

103-15-7730

MOTC-IOT-102-H3DB004a

# 臺灣四周海域近十年之海水面 變化速率研究



交通部運輸研究所

中華民國 103 年 3 月

103-15-7730

MOTC-IOT-102-H3DB004a

# 臺灣四周海域近十年之海水面 變化速率研究

著者：郭重言、林立青、藍文浩、莊文傑、李俊穎

交通部運輸研究所

中華民國 103 年 3 月

103

臺灣四周海域近十年之海水  
面變化速率研究

交通部運輸研究所

GPN : 1010300188

定價 250 元

國家圖書館出版品預行編目(CIP)資料

臺灣四周海域近十年之海水面變化速率研究 /  
郭重言等著. -- 初版. -- 臺北市：交通部運研所，  
民 103.03  
面；公分  
ISBN 978-986-04-0448-7(平裝)

1.海洋水文學 2.臺灣

351.93

103002070

**臺灣四周海域近十年之海水面變化速率研究**

著者：郭重言、林立青、藍文浩、莊文傑、李俊穎  
出版機關：交通部運輸研究所  
地址：10548 臺北市敦化北路 240 號  
網址：[www.ihmt.gov.tw](http://www.ihmt.gov.tw) (中文版/中心出版品)  
電話：(04) 26587176  
出版年月：中華民國 103 年 3 月  
印刷者：  
版(刷)次冊數：初版一刷 75 冊  
本書同時登載於交通部運輸研究所臺灣技術研究中心網站  
定價：250 元  
展售處：  
交通部運輸研究所運輸資訊組•電話：(02)23496880  
國家書店松江門市：10485 臺北市中山區松江路 209 號 F1•電話：(02)25180207  
五南文化廣場：40042 臺中市中山路 6 號•電話：(04)22260330

GPN：1010300188

ISBN：978-986-04-0448-7 (平裝)

著作財產權人：中華民國(代表機關：交通部運輸研究所)

本著作保留所有權利，欲利用本著作全部或部份內容者，須徵求交通部運輸研究所書面授權。

## 交通部運輸研究所合作研究計畫出版品摘要表

出版品名稱：臺灣四周海域近十年之海水面變化速率研究			
國際標準書號 ISBN978-986-04-0448-7 (平裝)	政府出版品統一編號 1010300188	運輸研究所出版品編號 103-15-7730	計畫編號 102-H3DB004a
本所主辦單位：港研中心 主管：邱永芳 計畫主持人：莊文傑 研究人員：李俊穎 聯絡電話：04-26587185 傳真號碼：04-26564415	合作研究單位：財團法人成大研究發展基金會 計畫主持人：郭重言 計畫協同主持人：林立青 專任研究助理：藍文浩 地址：701 台南市大學路 1 號 聯絡電話：06-2757575 轉 63826	研究期間 自 102 年 2 月 至 102 年 12 月	
關鍵詞：海水面變化、地殼變動、衛星測高、驗潮站			
<p><b>報告內容重點摘要：</b></p> <p>近十年來全球海水面因全球暖化上升更為快速，所導致之災害對人類生命和財產造成極大的損失，因此引起全球產學各界之關注。全球各區海面上升速率並非一致，而台灣四周海域之海水面變化速率較全球速率來的大，因此將台灣附近海水面變化視為與全球平均海水面變化速率一樣並不合理。此外，台灣為海島型國家，主要人口與經濟發展皆集中於沿海地區，因此台灣受海面上升之影響相對於世界其他大陸區域顯得更為嚴重，故精確計算台灣周圍海域海水面變化速率並了解台灣附近海面上升的主要原因為一相當重要課題。一般而言，驗潮站與衛星測高資料為研究海水面變化之兩種主要觀測量，而前人利用驗潮站資料研究台灣海水變化的成果中皆未考慮地殼變動的影響。</p> <p>本研究結合近十年（2002-2011）衛星測高資料與驗潮站資料，首先，估算近十年驗潮站之地殼變動速率，其後，再將其自驗潮站之潮位紀錄中移除。經分區分析臺灣四周海域之海水面變化速率，結果顯示：台灣周圍驗潮站大多呈現地殼下沉情形，其中，台灣西南部驗潮站為顯著下沉之區域，而塹港驗潮站周圍地殼表面下沉量最大，每年可下沉 3~4 公分，地殼變動改正的影響量平均值約 7.5 mm/yr。此外，本研究亦評估海潮、逆氣壓效應、偏移量與地殼變動等改正對於利用台灣周圍驗潮站資料估算海水面變化速率之影響，其中偏移量改正之影響最為顯著，皆在 30 mm/yr 以上，因此若應用未經偏移量和地殼變動改正的驗潮站資料進行海水面變化速率估算，將造成嚴重誤差。</p> <p>本研究依據驗潮站位置，將驗潮站劃分為五個區域並估算各區域內海水面變化速率，由衛星測高與驗潮站資料估算結果顯示，台灣周圍海域的海水面變化主要呈現上升現象，上升速率由北向南增大，台灣北部海水面變化速率為-1~2 mm/yr，南部為 4~8 mm/yr，菲律賓地區的海水面變化速率約 8~14 mm/yr。而衛星測高資料估算整個台灣四周（緯度：10oN~30oN、經度：110°E~130°E）海水面變化速率為 6~8 mm/yr。</p> <p>經由比較整個台灣四周近十年（2003-2011）衛星測高海水面變化、GRACE 海水質量、溫鹽比容海平面變化後可知，海水面與比容海水面在年週期到多年週期訊號呈現高相關（相關係數<math>\geq 0.9</math>），且比容海平面與海洋質量速率亦持續上升，兩者分別約占海面上升的 30%~40%與 15%，但仍有 45%的海水面變化速率無法解釋，可能為深海比容海水面變化或資料本身和改正不正確所致。</p>			
<p><b>研究成果之效益：</b></p> <p>(1) 學術成就(科技基礎研究)方面：發表國內研討會論文 3 篇；出版研究報告 1 冊。</p>			

- (2) 技術創新(科技整合創新)方面：引進及應用國際培訓資源，建置專業整合環境，強化國際互動機制，從海洋到海岸，整合衛星測高、地科及大氣之科研成果，提昇海洋科技—藍色科技之科研能力，落實跨領域之合作研究，堅實科技人力資源，統合 PSMSL、UHSLC 與中央氣象局之臺灣環島近岸驗潮站資料庫及 ECMWF、NCEP 及中央氣象局之大氣壓力等海洋物理資料庫，並將相關資料成功應用於分析臺灣近岸海域的平均海平面升降變動率，並提供詳實的分區地殼垂直變動率(地殼板塊擠壓之造山陸昇與地層下陷)資訊。
- (3) 在經濟效益(經濟產業促進)方面：提供政府及業界掌握臺灣近岸海域近年(十年)詳實的平均海平面升降變動率特性，可促進都市防洪、排水之規劃、設計及維護工程提昇效能，有效因應全球暖化所造成的氣候變遷課題，強化防災、減災與救災資訊，敦節實施全面監測之人力及物力之投注成本。
- (4) 在社會影響(社會福祉提升、環保安全)方面：透過詳實的平均海平面升降變動率特性，反饋及確認全球暖化、氣候變遷所造成的影響，減少人為溫室效應，達成海岸保育與永續利用之目標。
- (5) 在其它效益(政策管理及其它)方面：具體配合政府推展「海洋國家」之策略目標，落實海洋經理政策，補充既有海象監測及防災資料庫之完整，強化因應全球暖化、氣候變遷課題之決策資訊，厚植近岸防災預警與風險管理機制之關鍵技術，提升近岸海域災害應變與預警能力，精進災害風險評估系統，強化救災及預警科技之評估效能及應用。

**可供本所或其他政府機關後續應用情形：**

本研究結合國際海洋科學資源，擴展海岸科技學能，強化跨領域之合作研究，堅實科技人力資源，在國內自力完成詳實的平均海平面升降變動率與地殼垂直變動率(地殼板塊擠壓之造山陸昇與地層下陷)分析。相關成果可提供交通部、環資部、內政部、本所、各港務分公司、經濟部水利署、各工程顧問公司等相關產、官、學、研單位從事海岸開發、港灣規劃、設計、擴建及維護的應用參考。推動並落實總體性之海岸保育與防災策略。

出版日期	頁數	定價	本 出 版 品 取 得 方 式
103 年 3 月	292	250	凡屬機密性出版品均不對外公開。普通性出版品，公營、公益機關團體及學校可函洽本所免費贈閱；私人及私營機關團體可按定價價購。

**機密等級：**

密 機密 極機密 絕對機密

(解密條件：年 月 日解密，公布後解密，附件抽存後解密，

工作完成或會議終了時解密，另行檢討後辦理解密)

普通

備註：本研究之結論與建議不代表交通部之意見。

**PUBLICATION ABSTRACTS OF RESEARCH PROJECTS  
INSTITUTE OF TRANSPORTATION  
MINISTRY OF TRANSPORTATION AND COMMUNICATIONS**

<b>TITLE:</b> Changes of sea level in Taiwan waters for recent decades			
ISBN 978-986-04-0448-7 (pbk)	GOVERNMENT PUBLICATIONS NUMBER 1010300188	IOT SERIAL NUMBER 103-15-7730	PROJECT NUMBER 102-H3DB004a
DIVISION: Harbor & Marine Technology Center DIVISION DIRECTOR: Chiu Yung-Fang PRINCIPAL INVESTIGATOR: Juang Wen-Jye PROJECT STAFF: Lee Chun-Ying PHONE: (04) 26587185 FAX: (04) 26564415			<b>PROJECT PERIOD</b>  FROM February 2013 TO December 2013
RESEARCH AGENCY: NCKU Research and Development Foundation PRINCIPAL INVESTIGATOR: Kuo Chung-Yen CO-PRINCIPAL INVESTIGATOR: Lin Li-Ching RESEARCH ASSISTANT: Lan Wen-Hau ADDRESS: No.1, University Rd., Tainan City 701, Taiwan PHONE: 06-2757575 ext 63826			
<b>KEY WORDS:</b> Sea level change, Vertical motion, Satellite altimetry, Tide gauge			
<b>ABSTRACT:</b> <p>In the past decades, sea level rise resulting from global warming is one of the important issues, causing hazards to human beings and their property worldwide. Since the rates of sea level changes are not uniform in the oceans, it is not reasonable to consider sea level trend around Taiwan is identical to the global averaged trend. Comparing to other countries in the world, the main population and developed cities in Taiwan are mostly located near the coasts, so the global sea level rise could produce significant impacts in Taiwan. Therefore, accurate estimation of the sea level rise around Taiwan is extremely important in the very first step of this project. Tide gauges and satellite altimetry are the common instruments used to determine the sea level change; however, the vertical motions were not taken into account to correct the tide gauge records in previous studies of sea level determination.</p> <p>In this study, vertical motions can be computed by combining 2002-2011 tide gauges and altimetry data and the estimated vertical motions are used to correct tide gauge records. The result shows that the land at tide gauge sites around Taiwan generally subside during the past decade and the southwestern area of Taiwan has larger rates of subsidence, especially Wengang gauge station with a rate of 3~4 cm/yr. The average of vertical motions at tide gauges are 7.5 mm/yr. Furthermore, we find out that relative bias has a significant impact on the determination of sea level trend after analyzing the effects of ocean tide, inverted barometer, and relative bias on the sea level trend determination using the decadal tide records and the bias correction can be higher than 30 mm/yr. Therefore, corrections of relative bias and vertical motions should be applied to the tide gauge records for estimating sea level trend around Taiwan.</p> <p>The rates of sea level trends in five regions around Taiwan are all positive and increase gradually from the ocean in the north of Taiwan with a rate of -1~2 mm/yr to the south of Taiwan at 4~8 mm/yr and become larger at 8~14 mm/yr in the ocean near the Philippines. The rates of sea level change in the region of latitude 10°N~30°N and longitude 110°E~130°E over 2002-2011 is 6~8 mm/yr derived from altimetry data.</p> <p>In order to understand the contribution of sea level rise, altimetry-derived sea level</p>			

change, GRACE-derived ocean mass change, and steric sea level change derived from ocean temperature and salinity data around Taiwan are also investigated in the study. Results show sea level and steric sea level are highly correlated with all correlation coefficients  $\geq 0.9$  and steric sea level and ocean mass have been increasing in the recent decade (2003-2011). Steric sea level and ocean mass change could contribute about 30%~40% and 15% to sea level, respectively. Fifty-five percent of the sea level budget still remains unexplained and may be caused by not taking deep-ocean steric sea level or the errors of measurements and corrections into consideration.

<p>DATE OF PUBLICATION March 2014</p>	<p>NUMBER OF PAGES 292</p>	<p>PRICE 250</p>	<p>CLASSIFICATION  <input type="checkbox"/> RESTRICTED    <input type="checkbox"/> CONFIDENTIAL  <input type="checkbox"/> SECRET            <input type="checkbox"/> TOP SECRET  <input checked="" type="checkbox"/> UNCLASSIFIED</p>
---	--------------------------------	----------------------	---

The views expressed in this publication are not necessarily those of the Ministry of Transportation and Communications.

## 縮寫表

1. Archiving, Validation and Interpretation of Satellite Oceanographic (AVISO): 衛星海洋數據存檔、驗正與解釋.....2-7
2. Array for Real-time Geostrophic Oceanography (ARGO): 地轉海洋學即時觀測陣列.....1-3
3. Atmosphere-Ocean De-aliasing (AOD): 大氣-海洋去混疊.....2-26
4. Center for Space Research (CSR): 空間研究中心.....2-22
5. Central Weather Bureau (CWB): 中央氣象局.....2-10
6. Data Bank for Atmospheric Research (DBAR): 大氣研究資料庫.2-16
7. Doppler Orbitography and Radiopositioning Integrated by Satellite (DORIS): 都卜勒追蹤系統接收儀.....2-4
8. Empirical Orthogonal Functions (EOF): 經驗正交函數.....1-4
9. European Centre for Medium-range Weather Forecasts (ECMWF): 歐洲中期天氣預報中心.....2-15
10. GeoForschungsZentrum (GFZ): 地球科學研究中心.....2-22
11. Global Positioning System (GPS):全球衛星定位系統.....2-10
12. Gravity Recovery and Climate Experiment (GRACE): 重力反演和氣候實驗.....1-3
13. GRACE Satellite-only Model (GSM): GRACE 衛星重力模型.....2-26
14. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC): 政府間氣候變遷委員會.....1-2

15. International Pacific Research Center (IPRC): 國際太平洋研究中心.....	2-28
16. Inverse Barometer (IB): 逆氣壓.....	1-5
17. Japan Agency for Marine-earth Science and TEChnology (JAMSTEC): 日本海洋研究開發機構.....	2-28
18. Jet Propulsion Laboratory (JPL): 噴氣推進實驗室.....	2-22
19. K Band Ranging (KBR): K 波段測距.....	2-21
20. Last Glacial Maximum (LGM): 末次冰盛期.....	1-1
21. National Aeronautics and Space Administration (NASA): 美國航空暨太空總署.....	1-3
22. National Centers for Environmental Prediction (NCEP): 美國國家氣象局國家環境預測中心.....	2-15
23. Permanent Service for Mean Sea Level (PSMSL): 平均海平面常設服務中心.....	2-10
24. Radar Altimeter Data Acquisition (RADs): 雷達測高資料收集.....	2-6
25. Representative Concentration Pathways (RCP): 代表濃度過程.....	1-2
26. Revised Local Reference (RLR): 地方基準修正.....	2-10
27. Root Mean Square (RMS): 均方根.....	2-25
28. SCRIPPS Institution of Oceanography (SIO): 斯克里普斯海洋研究所.....	2-28
29. Sea Level Rise (SLR): 海水面上升.....	1-1
30. Star Camera Assembly (SCA): 恆星敏感器.....	2-21
31. Steric Sea Level (SSL): 比容海水面.....	1-2

- 32. SuperSTAR Accelerometer (ACC): 超星加速度.....2-21
- 33. Ultra-Stable Oscillator (USO): 超穩定之微型震盪器.....2-21
- 34. University of Hawaii Sea Level Center (UHSLC): 美國夏威夷大學海  
水位中心.....2-10
- 35. World Ocean Circulation Experiment (WOCE): 世界海洋環流實  
驗.....1-3

# 臺灣四周海域近十年之海水面變化速率研究

## 目 錄

中文摘要.....	I
ABSTRACT.....	III
縮寫表.....	V
表目錄.....	XI
圖目錄.....	XIII
第一章 緒論.....	1-1
1.1 研究動機與目的.....	1-1
1.2 本計畫之流程.....	1-7
1.3 本文架構.....	1-8
第二章 研究資料.....	2-1
2.1 衛星測高.....	2-1
2.2 驗潮站.....	2-8
2.3 Gravity Recovery and Climate Experiment(GRACE)重力衛星.....	2-18
2.3.1 GRACE 介紹.....	2-18
2.3.2 GRACE 觀測原理.....	2-22
2.3.3 去相關(Decorrelation)演算法.....	2-22
2.3.4 高斯濾波(Gaussian Filter).....	2-24
2.3.5 洩漏效應(Leakage effect).....	2-24
2.3.6 海水質量變化計算.....	2-25



附錄一 潮位站資料.....	附錄 1-1
附錄二 衛星測高資料.....	附錄 2-1
附錄三 潮汐分潮週期.....	附錄 3-1
附錄四 海潮改正.....	附錄 4-1
附錄五 逆氣壓改正.....	附錄 5-1
附錄六 驗潮站資料偏移量偵錯與改正.....	附錄 6-1
附錄七 地殼變動速率.....	附錄 7-1
附錄八 海水面變化速率.....	附錄 8-1
附錄九 期中報告審查意見處理情形表.....	附錄 9-1
附錄十 期末報告審查意見處理情形表.....	附錄 10-1
附錄十一 期末簡報.....	附錄 11-1

## 表目錄

表 2.1 各測高衛星任務比較.....	2-2
表 2.2 測高衛星各項改正與改正模型.....	2-7
表 2.3 臺灣附近海域 PSMSL 與 UHSLC 資料庫驗潮站資料之相關係數 .....	2-11
表 2.4 臺灣附近海域 PSMSL 資料庫之驗潮站資料.....	2-11
表 2.5 臺灣附近海域 UHSLC 資料庫之驗潮站資料.....	2-11
表 2.6 臺灣附近海域 CWB 資料庫之驗潮站資料.....	2-12
表 2.7 CWB 提供之海水面氣壓觀測站資訊.....	2-16
表 3.1 T/P 衛星測高資料進行不同改正後之 SLR 速率.....	3-3
表 3.2 J-1 衛星測高資料進行不同改正後之 SLR 速率.....	3-4
表 3.3 J-2 衛星測高資料進行不同改正後之 SLR 速率.....	3-5
表 3.4 衛星測高資料進行不同模型改正後估算之 SLR 速率差異.....	3-5
表 3.5 本計畫採用之衛星測高資料改正模型.....	3-6
表 3.6 PSMSL 驗潮站固定範圍之 SLR 速率.....	3-12
表 3.7 UHSLC 基隆與高雄驗潮站固定範圍之 SLR 速率.....	3-12
表 3.8 CWB 驗潮站固定範圍之 SLR 速率.....	3-12
表 4.1 各海水面氣壓資料間之相關係數.....	4-6
表 4.2 各驗潮站之最大 IB 效應分析.....	4-7
表 4.3 統計各驗潮站資料應用不同氣壓資料進行 IB 改正後估算 SLR 速率之差異量.....	4-9
表 4.4 PSMSL 驗潮站之地殼變動速率.....	4-15
表 4.5 PSMSL 基隆與高雄驗潮站的地殼變動速率.....	4-15

表 4.6 UHSLC 基隆與高雄驗潮站的地殼變動速率 .....	4-15
表 4.7 CWB 驗潮站之地殼變動速率.....	4-16
表 4.8 CWB 高雄驗潮站的地殼變動速率.....	4-16
表 5.1 PSMSL 驗潮站資料經各項改正估算之 SLR 速率.....	5-3
表 5.2 PSMSL 驗潮站資料經各項改正估算之 SLR 速率.....	5-4
表 5.3 UHSLC 基隆與高雄驗潮站資料經各項改正估算之 SLR 速率 .	5-4
表 5.4 UHSLC 基隆與高雄驗潮站資料經各項改正估算之 SLR 速率 .	5-4
表 5.5 CWB 驗潮站資料經各項改正估算之 SLR 速率 .....	5-5
表 5.6 CWB 驗潮站資料經各項改正估算之 SLR 速率 .....	5-5
表 5.7 PSMSL 驗潮站固定範圍之 SLR 速率.....	5-13
表 5.8 UHSLC 驗潮站固定範圍之 SLR 速率 .....	5-13
表 5.9 CWB 驗潮站固定範圍之 SLR 速率 .....	5-14
表 5.10 臺灣附近各海域的 SLR 變化速率 .....	5-16
表 5.11 臺灣附近海域 SSL 變化、海水質量變化與 SLR 變化速率 .	5-18
表 5.12 臺灣附近海域 SSL 變化、海水質量變化與 SLR 變化速率 .	5-18

## 圖目錄

圖 1.1 計畫流程圖.....	1-7
圖 2.1 Skylab 衛星照片.....	2-2
圖 2.2 測高衛星之軌道誤差比較.....	2-3
圖 2.3 測高衛星基本觀測原理.....	2-6
圖 2.4 驗潮站觀測海水面示意圖.....	2-9
圖 2.5 臺灣附近海域之驗潮站分佈圖.....	2-12
圖 2.6 PSMSL 之 RLR 和 Metric 基隆和高雄驗潮站資料.....	2-13
圖 2.7 PSMSL 與 UHSLC 驗潮站資料比較圖.....	2-14
圖 2.8 CWB 提供之四站海平面氣壓觀測站資料.....	2-17
圖 2.9 CWB 海水面氣壓觀測站分佈圖.....	2-18
圖 2.10 GRACE 重力衛星示意圖.....	2-20
圖 2.11 GRACE 球諧係數之誤差.....	2-23
圖 2.12 GRACE 重力場解計算之海洋質量.....	2-25
圖 2.13 GRACE 重力場解計算質量變化流程圖.....	2-27
圖 3.1 高雄驗潮站周圍經緯度 $2^{\circ}$ 、 $3^{\circ}$ 、 $5^{\circ}$ 之範圍與 T/P 測高資料之地面軌跡.....	3-7
圖 3.2 馬祖、新竹、台中港與宿霧驗潮站位置與 T/P 測高資料之地面軌跡.....	3-9
圖 3.3 PSMSL 驗潮站周圍固定範圍之 SLR 速率.....	3-10
圖 3.4 USHLC 與 CWB 驗潮站周圍固定範圍之 SLR 速率.....	3-11
圖 4.1 海潮改正前後之高雄驗潮站資料差異圖.....	4-2

圖 4.2 IB 效應改正量 .....	4-4
圖 4.3 ECMWF 與 NCEP 全球月平均海水面平均壓力 .....	4-4
圖 4.4 高雄驗潮站之 IB 效應改正 .....	4-5
圖 4.5 驗潮站資料進行 IB 效應改正後的影響 .....	4-9
圖 4.6 改正後之 PSMSL 高雄驗潮站之小波分解訊號 .....	4-10
圖 4.7 PSMSL 高雄驗潮站資料之偏移量改正 .....	4-12
圖 4.8 馬尼拉驗潮站之地殼表面垂直變動訊號 .....	4-13
圖 4.9 大廟灣驗潮站地殼變動訊號 .....	4-17
圖 4.10 台中港驗潮站地殼變動訊號 .....	4-18
圖 4.11 驗潮站地殼變動速率圖 .....	4-21
圖 4.12 精密水準點與 GPS 連續觀測站之分佈 .....	4-22
圖 4.13 臺灣附近驗潮站、精密水準點與 GPS 連續觀測站之分佈 ..	4-23
圖 4.14 估算之地殼變動速率與 GPS 和精密水準點成果比較 .....	4-23
圖 4.15 麟山鼻驗潮站的地殼垂直變動訊號 .....	4-24
圖 4.16 高雄驗潮站之 IB 效應 .....	4-25
圖 4.17 高雄驗潮站資料之地殼變動速率改正 .....	4-26
圖 4.18 高雄驗潮站之 IB 效應 .....	4-27
圖 4.19 高雄驗潮站資料之地殼變動速率改正 .....	4-28
圖 4.20 高雄驗潮站之 IB 效應 .....	4-29
圖 4.21 高雄驗潮站資料之地殼變動速率改正 .....	4-30
圖 5.1 原始與改正後 PSMSL 驗潮站資料估算之 SLR 速率 .....	5-6

圖 5.2 原始與改正後 UHSLC 與 CWB 驗潮站資料估算之 SLR 速率	5-7
圖 5.3 各項改正對於驗潮站資料估算 SLR 速率之影響量 .....	5-9
圖 5.4 AVISO 測高資料(上圖)與所有驗潮站資料(下圖)估算臺灣周圍 SLR 速率 .....	5-11
圖 5.5 RADs 測高資料(上圖)與所有驗潮站資料(下圖)估算臺灣周圍 SLR 速率 .....	5-12
圖 5.6 臺灣附近海域驗潮站之分佈與分區圖 .....	5-15
圖 5.7 臺灣附近海域 SSL 變化、海水質量變化與 SLR 變化 .....	5-19
圖 5.8 臺灣周圍的 SSL 變化、海水質量變化與 SLR 變化 .....	5-20

# 第一章 緒論

## 1.1 研究動機與目的

過去的數十年間，由於全球暖化造成氣候變遷等問題，其中海面上升(Sea Level Rise, SLR)與其他環境變遷息息相關，例如南北極冰原融化和海水溫度上升，其可能造成之災害已引起產學各界之關注，而海水面變化所包含的訊息十分廣闊，它與社會、經濟、環境等方面息息相關，舉例來說，在中太平洋海域發生的聖嬰與反聖嬰現象就和此有高度相關。距今約21000年前為末次冰盛期(Last Glacial Maximum, LGM)，當時海水面比現今低了約125公尺，紐奧良和邁阿密等沿海都市不像今日緊鄰海邊，海岸線較現今往海洋多延伸了數百公里。全球SLR被廣泛認為是可量測的訊號 [Wilson *et al.*, 2011]，且主要由人為造成之全球暖化所致 [Cazenave and Remy, 2011; Shum and Kuo, 2011]。近年來研究指出二十世紀全球SLR速率每年約為1.5到2.4公釐 [e.g., Douglas, 2001; Mitrovica *et al.*, 2001; Church *et al.*, 2004; Church and White, 2011; Shum and Kuo, 2011]，因衛星測高技術發展，近二十年的全球SLR變化速率可精確估計求得 [Blewitt *et al.*, 2010; Cazenave *et al.*, 2010]，其中利用測高衛星Topex/Poseidon(T/P)和Jason-1/-2(J-1/-2)計算自1993年來之全球SLR速率為 $3.2 \pm 0.4$  mm/yr [Ablain *et al.*, 2009; Nerem *et al.*, 2010; Willis *et al.*, 2010; Shum and Kuo, 2011; Church and White, 2011]，因此人口密集的可居住地正逐漸被海水淹沒。Leatherman 等人[2000]指出，當全球SLR時，侵蝕海岸速率為SLR速率的幾十至幾百倍，導致人類居住區域越來越受到嚴重威脅，而暴風浪也因SLR而增強，造成沿岸建築物及人類生命財產巨大損失。Webster 等人[2005]亦提到SLR將導致熱帶氣旋的頻率與強度增加。Ericson等人[2006]研究成果顯示如果全球海水面變化以2 mm/yr速率上升，在2050時，全球40個三角洲上的8,710,000人會因SLR遭受到災害。在2001年時，太平洋島國(Tuvalu Island)成為世界上首個因為SLR而舉國移民之國家。2005年，

颶風卡崔娜 (Hurricane Katrina) 襲擊美國著名城市紐奧良，數百萬人被迫撤離，損失高達上千億美元，造成損失為大西洋颶風有史以來最嚴重。同年，中國大陸由沿海直接登入的強颱風達8次，損失達數百億人民幣。相較於暴風浪或強降雨所造成之災害（例如淹水），SLR將造成不可逆之災害。

由政府間氣候變遷委員會(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)於2001年提出的第三次報告中，SLR在1990-2100年間的估算值約為0.1-0.9 m，平均110年之上升率約為0.9-8 mm/yr [IPCC, 2001]。此數據約是二十世紀全球SLR速率的4倍。2007年IPCC第四次報告中更提出於1980-1999年及2090-2099年間之上升速率約為2.1及6 mm/yr [IPCC, 2007]，該次報告對未來SLR速率之推算仍保持悲觀的看法，仍遠大於目前二十世紀的SLR速率。自1980-1999年後海水面推算，則成為第5次報告的比較基準 [Stocker *et al.*, 2010]，於2013年九月提出的第五次報告中，已明確指出SLR之推算值將大於第四次報告之結果，在最嚴重之推算情境下(代表濃度過程 (Representative Concentration Pathways 8.5,RCP 8.5))，本世紀末SLR約0.53-0.97公尺 [IPCC, 2013]，其中並指出區域SLR速度受到氣候變動之影響，其各別的上升速率將可能大於全球平均值約100%，且本世紀末約有95%區域的SLR速率將會是正值，70%的沿岸地區將受到此上升率的影響。

海水面變動主要因大氣、海洋、冰界與水界各系統間交互作用而產生，而導致海水面變化主要原因可大致分為兩方面：1. 比容海水面(Steric Sea Level, SSL)變化，主要由海水溫度與鹽度變化造成的海水體積變化，其中海水溫度與鹽度分別造成的海水面變化稱之為熱比容(Thermosteric sea level)和鹽比容(Halosteric sea level)海水面變化；2. 海水質量變化，主要由於陸上、海洋、大氣各系統之間的質量交換(如冰川或冰山融化、蒸發、降雨、徑流等)所造成之變化。

臺灣四面環海，中央為高山區，平原大多位於海岸附近，因此大部分

的城市距離海岸線約為10-30 公里，且臺灣位於西太平洋颱風慣常行進之路線範圍內，近年來颱風造成之災害有加劇之趨勢。由內政部統計資料[內政部消防署，2012]顯示，以1950-2011年臺灣因颱風死亡人口統計，造成死亡人數排名前十的颱風，其中3個颱風為2001年以後發生，最慘重的颱風為2009年的莫拉克風災，造成673人死亡，農業損失超過新台幣195億元，此極端強降雨颱風發生頻率近十年有上升的趨勢，由原本3-4年發生一次，在2000年以後幾乎每年都會發生 [陳亮全等人，2011]，因此海洋災害越來越頻繁，造成的損失亦逐漸升高。由Llovel等人[2010]利用衛星測高資料計算成果可知，全球各區域的海水上升速率並不一致，且臺灣附近海域之SLR速率相較於全球SLR速率來的大，因此精確估計臺灣附近海域SLR速率並了解臺灣周圍SLR的主要原因就顯得非常重要。

現今監測海面水位變化的兩種主要方式為長時間紀錄之驗潮站資料和衛星測高資料，由於驗潮站資料包含地殼變動資訊、位置分佈不平均、觀測時間長短不一致，而衛星測高技术觀測海水面變化之資料範圍雖近乎全球，但觀測時間僅約20年，且近岸資料稀少，因此結合衛星測高資料和驗潮站資料進行臺灣附近海域之海水面變化研究，可避免使用單一資料之缺點。海水面高度變化主要由SSL變化與海水質量變化造成，其中SSL變化可結合海洋各水層之溫度與鹽度資料計算得到[Gill, 1982]，在早期，常以浮標(Buoys)和船載儀器收集海洋溫度與鹽度資料，資料收集時間涵蓋數十年之久，然而浮標與船測所能收集溫、鹽資料的數量與範圍有限，因此取樣點的分佈不均勻且較為稀疏。近年來，由世界海洋環流實驗 (World Ocean Circulation Experiment, WOCE) 室所進行之海洋計畫-地轉海洋學即時觀測陣列(Array for Real-time Geostrophic Oceanography, ARGO)已可提供全球 $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ 溫、鹽觀測資料，資料涵蓋由海水表面到深度2000公尺。海水質量變化可由美國航空暨太空總署(National Aeronautics and Space Administration, NASA)與德國太空中心(German Aerospace Center) 於2002年共同研發發射重力反演和氣候實驗(Gravity Recovery and Climate

Experiment, GRACE)重力衛星所觀測之全球重力場變化計算求得。因此本計畫將對於近10年臺灣附近海水面變化進行研究與分析，希望能夠為臺灣附近海水面變化與臺灣沿海城市的環境安全提供科學根據。

Zhan 等人 [2009] 利用14年衛星測高資料估計黃海、東海、南海之SLR速率分別為3.91 mm/yr、4.28 mm/yr、3.49 mm/yr，此外，他們利用經驗正交函數(Empirical Orthogonal Functions, EOF)和小波分解測高資料得到此區域海水面空間分佈，其分佈與海洋循環相符合，然而此研究僅使用衛星測高資料，並無其他配合或比較之資料。Tseng等人[2009]利用8個驗潮站資料和衛星測高資料估計臺灣附近海水變化，並以 LOESS[Hastie and Tibshirani, 1990]處理非線性海水面趨勢，研究結果顯示利用1955-2003和1961-2003年驗潮站資料計算之海水面趨勢分別為3.5 mm/yr 和2.4 mm/yr，此結果不甚合理，因為由1955-2003之澎湖驗潮站資料估算SLR速率竟然高達約11 mm/yr。Tseng等人[2009]亦而利用1993-2003年驗潮站和測高資料計算求得海水面變化趨勢分別為5.7 mm/yr 和5.3 mm/yr，速率皆比全球SLR速率之平均值來的大。此外其總結臺灣SLR是由海洋上層溫度上升所致，然而該研究中僅探討海水上層溫度與海水面時間序列相關係數，並無法真正顯示海水溫度變化對SLR速率之貢獻。黃清哲等人[2009]利用線性迴歸與傅立葉分析(Fourier analysis)分析衛星測高和驗潮站資料來估算臺灣周圍SLR變化速率，兩方法分析同一資料來估算SLR趨勢之差異量最大可達27 mm/yr。利用線性迴歸分析估算臺灣本島5個驗潮站資料與衛星測高資料的SLR變化速率，結果顯示利用1992-2009年驗潮站或測高資料計算之臺灣北部、西部、西南部、南部與東部之SLR速率分別為4.95和3.18 mm/yr、10.7和3.07 mm/yr、4.31和3.81 mm/yr、9.80和5.72 mm/yr與55.6和6.61 mm/y，其中臺灣東部驗潮站和測高資料計算之趨勢相差約50 mm/yr，作者認為可能臺灣東部的地殼變動較劇烈所導致。Tseng等人[2009]與黃清哲等人[2009]之研究在利用驗潮站進行SLR速率計算時皆未考慮地殼變動之影響，而臺灣地區處理地殼變動劇烈之地區，且驗潮站大

多架設於易下陷之海堤上，因此利用驗潮站估算之SLR速率誤差很大。Chang等人[2012]利用衛星測高與驗潮站資料估算驗潮站地殼變動，結果發現驗潮站地殼變動量可比海水面變動訊號來的大，例如1995-2008年箔子寮驗潮站地殼變動速率為 $-52.4 \pm 2.3$  mm/yr，1992-2005年蘇澳驗潮站地殼變動速率為 $-17.2 \pm 3.3$  mm/yr，相較於該研究中利用衛星測高觀測臺灣周圍SLR速率約1-5 mm/yr，臺灣本島的驗潮站資料中包含的地殼變動訊號將顯著影響驗潮站資料估算SLR速率。Tseng等人[2009]、黃清哲等人[2009]與Chang等人[2012]雖然皆利用衛星測高資料估算臺灣周圍SLR速率，但由於資料來源、時間涵蓋範圍以及資料處理方式不完全相同，因此造成估算SLR速率之結果不同。另外，衛星資料之地球物理校正亦是影響海水位變遷的重要因素，Cheng等人[2013]分析初始地球物理校正(Default-corrections)後臺灣海域之SLR速率差異分別為-0.1至1.6 mm/yr；若是經過區域特性之地球物理校正(Alternative corrections)，其校正前後差異為-0.4至0.4 mm/yr。然而應用初始地球物理校正於SLR速率的計算則會在臺灣東南及西北海域出現過高及過低的推估。因此，區域之海水位變遷則須合理考慮區域特性之地球物理校正。Wu等人[2012]雖然應用衛星資料分析海水位變遷的特性，其結論在未考慮地球物理校正的影響下，其所推估之SLR速率具有較大之不確定性。

本計畫的研究範圍為臺灣附近海域(緯度:  $10^{\circ}\text{N} \sim 30^{\circ}\text{N}$ 、經度:  $110^{\circ}\text{E} \sim 130^{\circ}\text{E}$ )，研究時間為2002-2011年。研究中將收集臺灣附近歷年驗潮站潮位資料與衛星測高資料，分析臺灣周圍SLR變化情形。然而驗潮站及衛星資料皆需進行率定及改正，因此本計畫將分析海潮改正、逆氣壓(Inverse Barometer, IB)效應改正、偏移量改正與地殼變動改正對於利用臺灣附近驗潮站資料估計2002-2011年SLR變化速率之影響量。衛星測高之改正模型精度將直接影響衛星測高海水面觀測量的精度，故本研究會同時比較不同模型改正之SLR速率結果，並測試不同單位提供之衛星測高資料。最後利用溫鹽資料和GRACE重力衛星資料分析近10年臺灣周圍SLR的主

要原因。本計畫之工作項目如下所示：

1. 海面水位變化相關研究、觀測和學術文獻之蒐集與匯整分析
2. 臺灣驗潮站實測潮位紀錄和衛星測高資料之蒐集、改正與率定
3. 應用驗潮站和衛星測高資料，分區進行臺灣四周海域長短期海面水位昇降變動速率分析
4. 分區比較與評估臺灣四周海域應用驗潮站和衛星測高資料進行長短期SLR變化速率分析結果之可靠度與準確度。
5. 利用國內驗潮站資料和衛星測高資料，分區計算評估臺灣四周海域近十年期之海面水位昇降變動率。

## 1.2 本計畫之流程

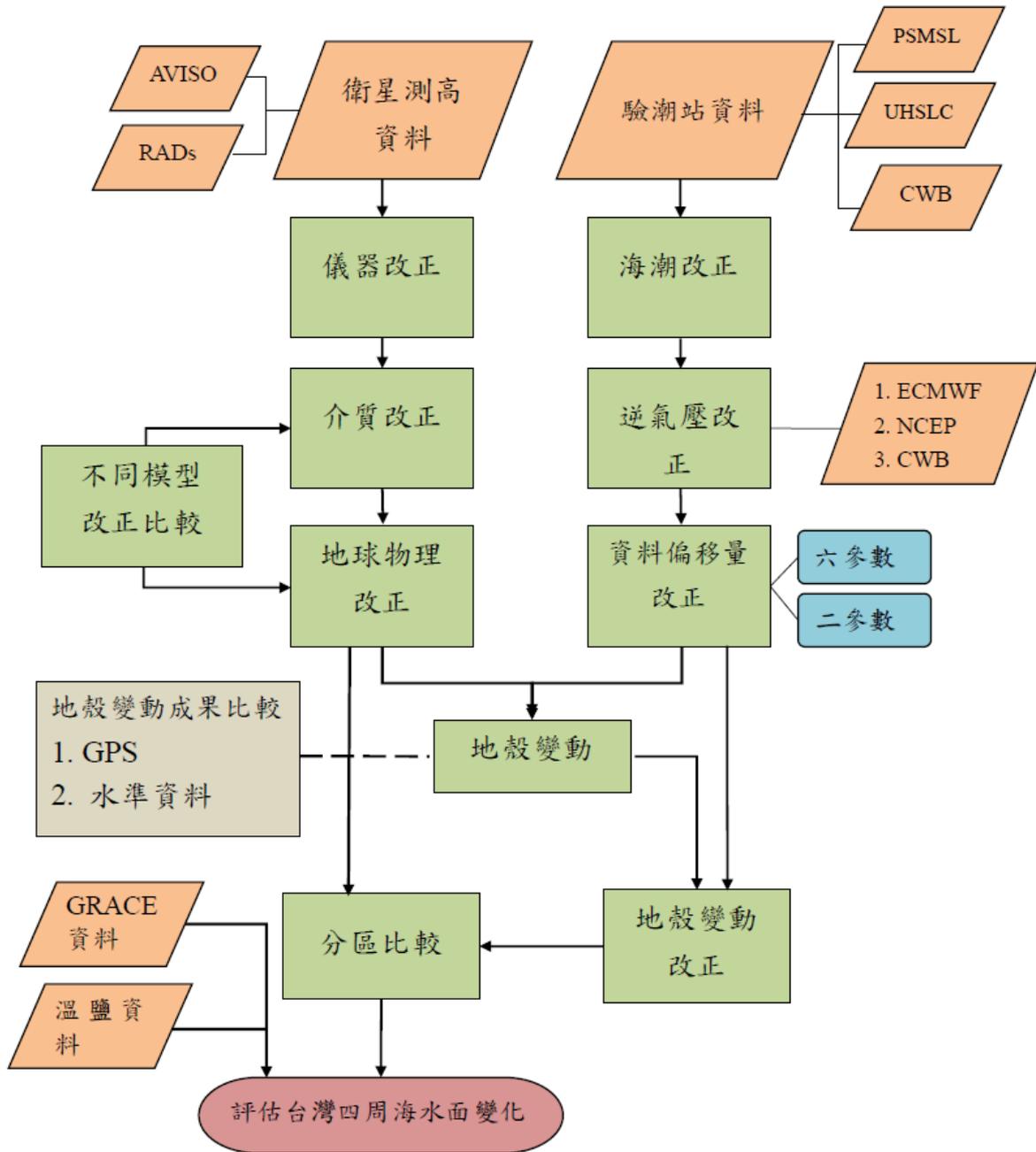


圖1.1 計畫流程圖

### 1.3 本文架構

本文共分為六個章節，以下依序為：

第一章：介紹本計畫之研究動機與目的，其中說明海水位昇降變化的影響、上升速率在不同時間尺度的變化與影響海水位上升速率的因素等。

第二章：詳細說明本計畫使用之相關資料來源及特性。關於衛星測高資料則闡述其觀測及率定改正原理。

第三章：衛星測高各項改正評估。

第四章：驗潮站資料各項改正方法與結果，並且詳細說明各驗潮站資料改正步驟。

第五章：評估各項改正對於臺灣周圍驗潮站資料的影響程度，估算臺灣附近海水位昇降變化之情形，並分析近10年臺灣周圍SLR的主要原因。

第六章：結論與未來工作

## 第二章 研究資料

### 2.1 測高衛星

測高衛星用於觀測全球海水面高度之優點為其觀測量涵蓋近乎全球，且所觀測海水面高度不受固體地球變形之影響，為相對於參考橢球之絕對量。因為海水表面較為平滑穩定，且對於雷達波訊號反射率較佳，故測高衛星一開始被設計於海水面監測，而陸地表面因植被、建物等造成地形起伏較大，且地表面對於雷達訊號反射率較差，因此測高觀測量於陸地上之精度欠佳，但近幾年來因為波形重定(Waveform retracking)演算法快速發展，衛星測高可用來監測陸地、陸地水體或冰原等變化，例如。

最早提出利用測高雷達技術觀測海水面變化的想法可追溯到1969年於美國威廉斯鎮(Williamstown)所召開會議中，此想法為測量衛星至海水面距離之雷達技術與精密軌道定位技術定出衛星位置進而設計出測高衛星。第一顆測高衛星Skylab於1973年5月由NASA研製發射（如圖2.1所示），隨後Geos-3、Seasat、Geosat、ERS-1、T/P、ERS-2、J-1、J-2、Cryosat-2等測高衛星陸續發射，表2.1為各測高衛星任務參數比較表。第一顆測高衛星Skylab觀測精度約為1公尺，其中以衛星軌道誤差最大，後續發射衛星之軌道已有顯著改進，現今之軌道誤差已小於海洋變化訊號，軌道精度由1公尺提升至2-3公分(如圖2.2所示)，因此測高衛星觀測量可廣泛應用於海水面訊號監測。

表2.1 各測高衛星任務比較。[資料來源：<http://www.avisio.oceanobs.com/>]

衛星	研制單位	發射日期	衛星傾角(°)	週期(days)
Skylab	NASA	1973.05.14	50	不重覆
Geos-3	NASA	1975.04.09	115	不重覆
Seasat	NASA	1978.06.28	108	3、17
Geosat	U.S.NAVY	1985.03.15	108	不重覆、17
ERS-1	ESA	1991.07.17	98.5	3、35、168
T/P	NASA/CNES	1992.08.10	66	10
ERS-2	ESA	1995.04.21	98.5	3、35、168
GFO	U.S.NAVY	1998.02.10	108	17
Jason-1	NASA/CNES	2001.12.07	66	10
Envisat	ESA	2002.03.01	98.5	35
Jason-2	NASA/CNES /EUMETSAT/NOAA	2008.06.20	66	10
Cryosat-2	ESA	2010.04.08	92	369



圖 2.1 Skylab 衛星照片。[圖片來源：<http://www.nasa.gov/>]

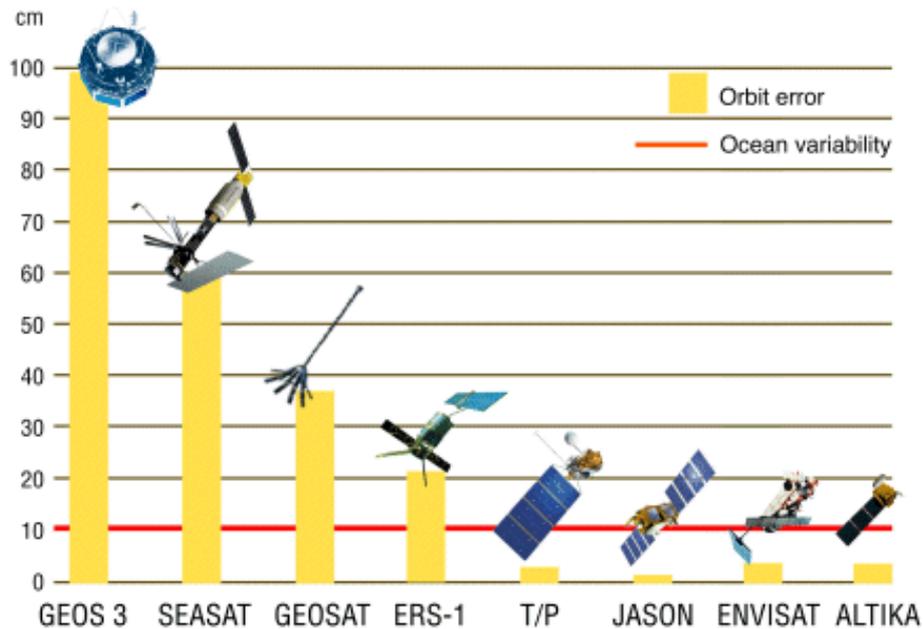


圖 2.2 測高衛星之軌道誤差比較。[圖片來源：  
<http://www.aviso.oceanobs.com/>]

測高衛星之基本觀測原理為測高儀由天底方向向海水面發射雷達微波脈衝訊號，訊號則經由海水面反射後由衛星接收，經取得雷達波精密傳遞時間而計算得衛星至海水面之距離，而測高衛星至一參考橢球之距離可由精密軌道定軌計算求得，結合兩項距離即可得到相對於參考橢球之海水面高度，其原理如圖2.3所示。測高衛星觀測之海水面相對於平均海水面之高度變化( $\Delta h$ )可表示為：

$$\Delta h = H - R + \sum_j \Delta R_j - h_M \quad (2.1)$$

其中 $H$ 為精密定軌求得之衛星至參考橢球距離， $R$ 為衛星至反射面之距離， $h_M$ 為平均海水面（平均海水面是由衛星測高經長時間測量全球海水面後平均求得）至橢球之高度， $\Delta R_j$ 為各項改正量，包含電離層與對流層改正、海面狀態偏差(Sea state bias)、IB效應改正、潮汐(海潮、海潮負載和固體潮)以及極潮改正，各改正詳細敘述如下：

1. 電離層與對流層改正：測高衛星觀測基本公式假設雷達脈衝行走環境為真空，而實際上大氣層對於雷達脈衝行進會產生延遲，因此須進行路徑延遲改正。大氣層對雷達脈衝路徑影響可分為電離層與對流層之影響。電離層主要由於太陽和其他天體的各種輻射線對空氣產生電離作用而形成帶電等離子體的大氣，分佈於地面上50~1000 公里的範圍，電離層的電子密度隨太陽與其他天體的輻射強度、季節、時間以及地理位置等因素而變化，其中以太陽黑子活動強度對其影響最大。當測高雷達脈衝訊號通過電離層時，將會產生各種物理效應，其中最主要的影響為折射效應，對訊號產生延遲影響，造成訊號往返時間的誤差，進而形成測距誤差，造成的誤差量約為0.2至20公分。電離層延遲與通過電磁波頻率平方成反比，故不同頻率訊號會產生不同之延遲量，其解決方法可藉由搭載雙頻雷達測高儀(例如T/P)或都卜勒追蹤系統接收儀(Doppler Orbitography and Radiopositioning Integrated by Satellite, DORIS)系統測得，如果是單頻測高儀如Geosat等，則需使用電離層模型來改正延遲量。

對流層分佈在地球表面向上延伸約40公里範圍內的大氣底層，當訊號通過對流層時，由於大氣折射率的變化，使訊號傳播路徑會產生彎曲，造成訊號往返時間量測誤差。對流層延遲可分為乾對流層分量與濕對流層分量，乾對流層延遲改正量約為2.3公尺，為測高資料中最大之改正量，但其變化量僅在數公分內，可由下式簡單計算 [Rosmorduc *et al.*, 2011]：

$$\Delta R_{dry} = -0.002277 P_{ocean} \times (1 + 0.0026 \cos 2\lambda) \quad (2.2)$$

其中  $\Delta R_{dry}$  為乾對流層延遲改正量(單位: 公分)， $p_{ocean}$  為海平面之大氣壓力(單位: 毫巴)， $\lambda$  為緯度。

濕對流層延遲改正為雷達脈衝受到大氣中水氣影響導致路徑延遲，造成影響約為0-50公分，因傳播路徑上之水氣含量較難估計，故精度較

低。目前可透過多波段微波輻射儀 (Microwave Radiometer) 計算求得，但在陸地以及海岸地區因多波段微波輻射儀無法觀測，故此區域則以氣象模型取代。

2. 海面狀態偏差(Sea state bias): 海面反射誤差為實際海面狀況對反射測高訊號之影響，由於海面並不是一直處於平穩的狀態，海面上會有波浪起伏的影響，然而波谷的反射能力優於波峰，造成回波功率的重心偏離於平均海面而趨向於波谷，此偏差稱為海面狀態偏差。
3. IB改正: IB效應為海水面隨大氣壓力變化而產生些微升降，一般而言大氣壓力每增加1毫巴 (*mbar*)，海水面將降低1公分，一般IB效應影響量約  $\pm 15$ 公分 [Rosmorduc *et al.*, 2011]。
4. 海潮改正 (Ocean tide) 與海潮負載(Ocean tide loading): 海水因日月引力的影響產生漲落的現象，稱為海潮。海水壓力會使地殼發生形變，稱為海潮負載。海面的變化會受到海潮的影響，在廣闊海域中變化幅度約1 m，而在近海岸線或淺海區域可達10公尺的影響。舊有之全球海潮模型 [Schwiderski, 1984]精度可達10公分，近來海潮精度提昇至3公分 [Wagner, 1991]，但在淺海區域預估精度仍然較差，需以區域性海潮模型取代。現在利用T/P測高衛星資料計算之海潮模型，精度可達到2~3公分 [Chelton *et al.*, 2001]。
5. 地球固體潮改正(Solid Earth tide): 地球構造並非剛體，實為一半彈性體，因為日、月引力的影響，造成固體地球產生形變，稱之為固體潮，改正量可達50公分。目前採用模型進行改正，其精度可達1公分 [Chovitz, 1983]。
6. 極潮改正(Pole tide): 極運動 (Polar motion)是因為地球本身內部質量與幾何形狀不均勻所引起的[Torge,1991]。極運動會產生極潮，造成海水面形狀改變，故需進行此項誤差改正，改正量約為2公分。

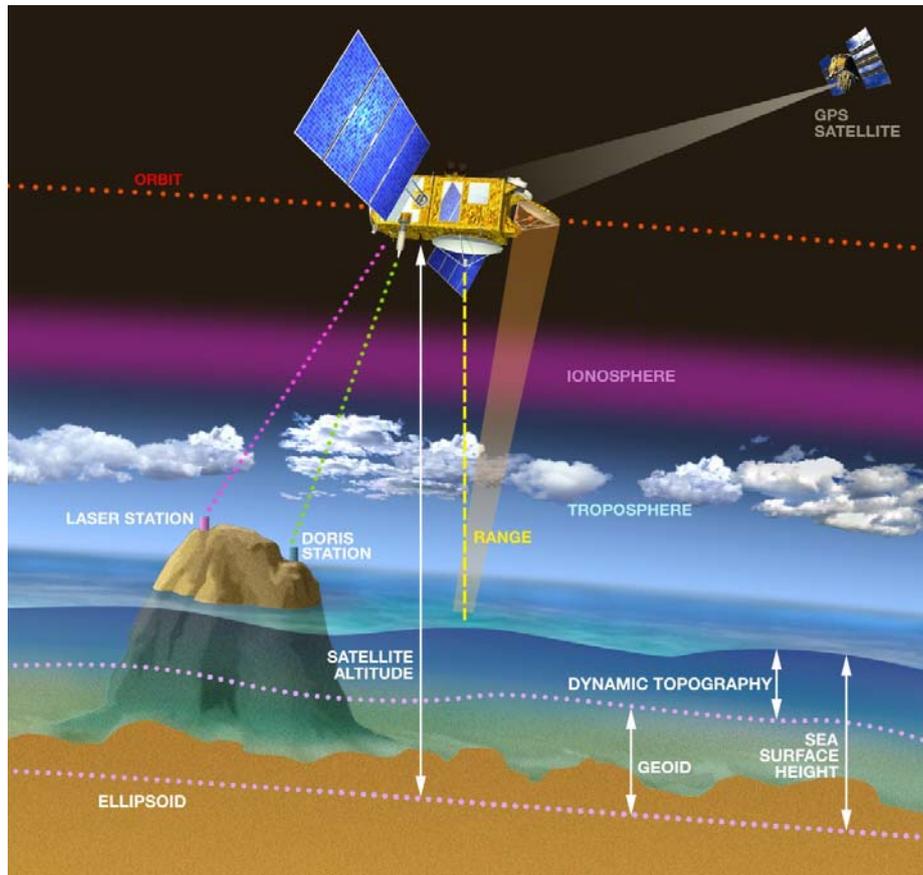


圖 2.3 測高衛星基本觀測原理。[圖片來源：  
<http://www.aviso.oceanobs.com/>]

T/P是第一顆專為量測海流及海水面變化所設計之衛星，能提供長時間且不間斷之海水面監測，其量測海水面高度之精度約為5公分[Shum *et al.*, 1995]，而J-1衛星的目的是為接替T/P衛星，J-2 衛星為接替J-1衛星，因此本計畫使用T/P、 J-1 與J-2等測高衛星資料，其每一秒平均之海水面高度觀測量精度可達 $\pm 4.2$ 公分[AVISO and PODAAC User Handbook, 2001]，因三顆測高衛星的設計相同，因此三個衛星資料可合併使用，三顆衛星涵蓋之時間範圍為1992/09-至今。另外，本研究中使用的衛星測高資料為經由時間和空間上的平均，衛星測高觀測精度可再提升精度。測高衛星資料可分別由雷達測高資料收集 (Radar Altimeter Data Acquisition, RADs) [<http://rads.tudelft.nl/rads/rads.shtml>]與法國衛星海洋數據存檔、驗正

與解釋 (Archiving, Validation and Interpretation of Satellite Oceanographic, AVISO) [<http://www.aviso.oceanobs.com/en/>]資料中心取得。測高資料均需進行儀器改正、介質改正(雙頻電離層改正、濕對流層改正、乾對流層改正)、地球物理改正(固體潮改正、海潮改正、海潮負載改正、極潮改正、海面狀態偏差改正、IB改正)，由於改正模型精度會直接影響測高衛星海面觀測量的精度，故本計畫將比較不同模型改正之結果，各衛星之改正模型如表2.2所示。

表2.2 測高衛星各項改正與改正模型

各項改正	改正模型		
	T/P	J-1	J-2
乾對流層改正	1. ECMWF model 2. NCEP model 3. ECMWF ERA-int model	1. ECMWF model 2. NCEP model 3. ECMWF ERA-int model	1. ECMWF model 2. NCEP model 3. ECMWF ERA-int model
濕對流層改正	1. TMR 2. ECMWF model 3. NCEP model 4. ECMWF ERA-int model	1. Enhanced JMR 2. ECMWF model 3. NCEP model 4. ECMWF ERA-int model 5. Original JMR	1. AMR 2. ECMWF model 3. NCEP model 4. ECMWF ERA-int model
電離層改正	1. dual-frequency ionospheric correction 2. smoothed dual-frequency ionosphere correction 3. DORIS ionospheric correction 4. IRI2007 ionospheric correction 5. NIC09 ionospheric correction	1. dual-frequency ionospheric correction 2. smoothed dual-frequency ionosphere correction 3. JPL GIM ionospheric correction 4. IRI2007 ionospheric correction 5. NIC09 ionospheric correction	1. dual-frequency ionospheric correction 2. smoothed dual-frequency ionosphere correction 3. JPL GIM ionospheric correction 4. IRI2007 ionospheric correction 5. NIC09 ionospheric correction 6. dual-frequency ionospheric correction (Ku MLE3) 7. MLE3 smoothed dual-frequency ionosphere correction
IB改正	1. local inverse barometer correction 2. local+global inverse barometer correction	1. local inverse barometer correction 2. local+global inverse barometer correction	1. local inverse barometer correction 2. local+global inverse barometer correction

	3. global inverse barometer correction 4. MOG2D total inverse barometer correction 5. MOG2D mean inverse barometer correction	3. global inverse barometer correction 4. MOG2D total inverse barometer correction 5. MOG2D mean inverse barometer correction	3. global inverse barometer correction 4. MOG2D total inverse barometer correction 5. MOG2D mean inverse barometer correction
海潮改正	1. FES2004 ocean tide 2. GOT4.7 ocean tide 3. GOT4.8 ocean tide 4. GOT4.9 ocean tide	1. FES2004 ocean tide 2. GOT4.8 ocean tide 3. GOT4.9 ocean tide	1. FES2004 ocean tide 2. GOT4.8 ocean tide 3. GOT4.9 ocean tide
海潮負載潮改正	1. FES2004 load tide 2. GOT4.7 load tide 3. GOT4.8 load tide 4. GOT4.9 load tide	1. FES2004 load tide 2. GOT4.8 load tide 3. GOT4.9 load tide	1. FES2004 load tide 2. GOT4.8 load tide 3. GOT4.9 load tide
海面狀態偏差改正	1. BM4 sea state bias 2. CLS sea state bias 3. Chambers BM4 sea state bias	1. CLS sea state bias	1. CLS sea state bias (Ku-band) 2. CLS sea state bias (C-band) 3. CLS sea state bias (Ku-band MLE3)

## 2.2 驗潮站

驗潮站的海水面觀測量為相對於岸邊的基準點，基準點會因為該區域的地殼變動產生位移，而使驗潮站觀測資料包含海水面變化與基準點周圍的地殼變動訊號，因此驗潮站資料為一相對於地殼之觀測量，如圖2.4所示。若以驗潮站資料估算SLR速率時，需進行地殼變動改正，此外，還需改正海潮和IB等非海水面變化之週期訊號和人為造成的潮位資料基準不一致之情形。由於臺灣附近驗潮站大多未設置全球衛星定位系統 (Global Positioning System, GPS)連續觀測站，因此無法利用GPS觀測量估算驗潮站的地殼變動量，然而測高衛星資料為觀測海水面高度的絕對量，驗潮站資料則為相對量，因此可結合測高衛星資料與驗潮站資料估算地殼變動訊號並自驗潮站資料中移除。

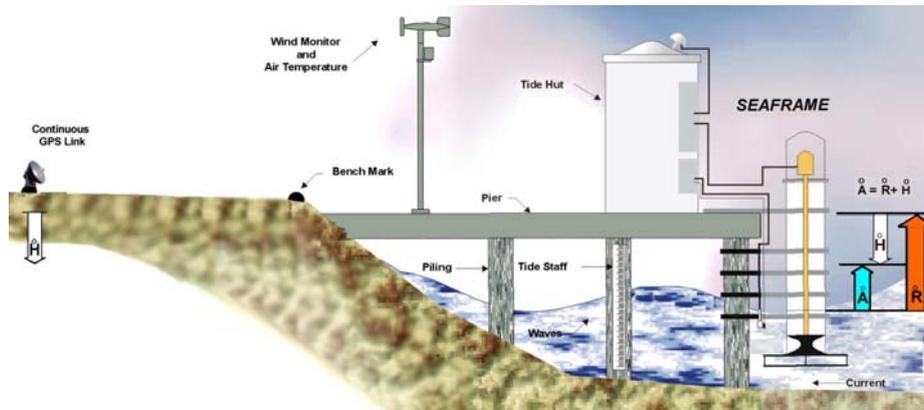


圖2.4 驗潮站觀測海水面示意圖

本研究中，臺灣附近海域之驗潮站資料由下述三處資料中心取得：

1. 平均海平面永久服務中心(Permanent Service for Mean Sea Level, PSMSL) [<http://www.psmsl.org/>]
2. 美國夏威夷大學海水位中心(University of Hawaii Sea Level Center, UHSLC) [<http://uhslc.soest.hawaii.edu/>]
3. 中央氣象局(Central Weather Bureau, CWB) [<http://www.cwb.gov.tw/V7/>]

PSMSL為一個負責收集、分析和提供全球驗潮站資料的機構，其驗潮站資料基準分為修正地方基準 (Revised Local Reference, RLR)與Metric，RLR與Metric的資料格式皆為每個月平均的觀測數據，潮汐影響皆已移除。RLR與Metric資料的不同在於RLR資料已改正驗潮站資料基準不一致問題，而Metric資料則未改正基準問題，因此RLR與Metric資料涵蓋的時間範圍可能不一致。PSMSL資料庫中符合本計畫設定的研究範圍與時間區段(2002-2011年)的驗潮站數量為26個，由於各驗潮站觀測資料涵蓋時間長短不一，為避免觀測時間較短影響後續成果，因此移除觀測資料涵蓋時間小於7年的驗潮站資料，故本計畫共使用19個PSMSL驗潮站資料，驗潮站詳細資訊如表2.4所示，驗潮站分佈如圖2.5所示。19個驗潮站之RLR與Metric資料涵蓋的時間範圍不完全相同 (表2.4)，其中RLR基隆與高雄驗潮站資料並無近10年潮位記錄，因此使用Metric基隆與高雄驗潮站

資料，其餘則使用RLR驗潮站資料。圖2.6為比較基隆與高雄驗潮站的RLR與Metric資料，由圖可知，基隆與高雄的RLR驗潮站資料於近10年並無資料，而兩Metric驗潮站資料皆有明顯資料基準不一致情形，因此在後續驗潮站資料校正將需改正含有偏移量的驗潮站資料。

UHSLC資料庫中符合本計畫設定的研究範圍與時間區段的驗潮站資料共有9個(已移除觀測資料涵蓋時間範圍低於7年的驗潮站資料)，資料格式為1天平均1筆數據，詮釋資料中說明潮汐影響已移除。PSMSL與UHSLC的驗潮站資料來源相同，比較PSMSL與UHSLC中驗潮站站名，重複測站為9個，此9個測站的PSMSL與UHSLC驗潮站資料之相關係數如表2.3所示，除了基隆與高雄驗潮站的相關係數分別為0.17與-0.07外，其餘7個驗潮站資料的相關係數皆在0.99以上。圖2.7為比較基隆與高雄驗潮站的PSMSL與UHSLC資料，顯示近10年PSMSL基隆與高雄驗潮站資料間皆有一明顯偏移量，因此本計畫使用UHSLC基隆與高雄驗潮站資料，點位分佈如圖2.5所示，詳細資訊如表2.5所示，其餘7個UHSLC的驗潮站資料與PSMSL資料之相關係數皆在0.99以上，且資料時間段僅至2008年，故不使用。

目前臺灣沿岸約有40個驗潮測站，各驗潮站分別由不同單位設立維護，目前由CWB統一管理資料。依據本計畫設定的空間與時間(2002-2011年)範圍，由CWB取得14個驗潮站資料(已移除觀測資料涵蓋時間低於7年的驗潮站資料，驗潮站之詳細資訊如表2.6所示)，點位分佈如圖2.5所示，格式皆為6分鐘平均一筆之潮位數據。圖2.5為本計畫使用臺灣附近海域之驗潮站分佈圖，PSMSL驗潮站資料分佈最廣，資料中包含香港、日本與菲律賓等地驗潮站資料，而CWB的驗潮站資料主要分佈於臺灣沿岸，最遠為馬祖驗潮站，UHSLC資料僅使用與PSMSL資料明顯不一致的基隆與高雄驗潮站資料。

表2.3 臺灣附近海域PSMSL與UHSLC驗潮站資料之相關係數

PSMSL Station ID.	UHSLC Station ID.	Station name	Correlation coefficient
611010	329	Quarry Bay	1.00
612012	340	Kaohsiung	0.17
612002	341	Keelung	-0.07
646011	345	Nakano Sima	1.00
646024	355	Naha	1.00
646003	359	Nase	1.00
646042	365	Ishigaki	1.00
660011	370	Manila	0.99
660101	379	Cebu	1.00

表 2.4 臺灣附近海域 PSMSL 資料庫之驗潮站資料

Station ID.	Station name			Lon(°)	Lat(°)	Data period	
	Ch.	Eng.	Abbr.			RLR	Metric
610002	開坡	Zhapo	ZP	111.8	21.6	1959-2012	1959-2012
610004	西沙	Xi Sha	XS	112.3	16.8	1990-2012	1989-2012
610016	坎門	Kanmen	KM	121.3	28.1	1959-2012	1959-2012
611007	橫瀾島	Waglan Island	WG	114.3	22.2	1987-2011	1987-2011
611010	鯪魚涌	Quarry Bay	QB	114.2	22.3	1986-2011	1986-2011
611012	大廟灣	Tai Miu Wan	TMW	114.3	22.3	1997-2011	1997-2011
611014	大浦滘	Tai Po Kau	TPK	114.2	22.4	1963-2011	1963-2011
611017	尖鼻咀	Tsim Bei Tsui	TBT	114.0	22.5	1974-2011	1974-2011
611023	石壁	Shek Pik	SP	113.9	22.2	1998-2011	1998-2011
612002	基隆	Keelung	KL	121.7	25.1	1956-1995	1948-2010
612012	高雄	Kaohsiung	KS	120.3	22.5	1973-1989	1973-2010
646003	內斯	Nase	NS	129.5	28.5	1981-2011	1981-2011
646011	中之島	Nakano Sima	NKNS	129.9	29.8	1984-2011	1965-2011
646021	沖繩	Okinawa	OKNW	127.8	26.2	1975-2011	1975-2011
646024	那霸	Naha	NH	127.7	26.2	1966-2011	1966-2011
646042	石垣島	Ishigaki	IGK	124.2	24.3	1986-2011	1986-2011
660011	馬尼拉	Manila	MNL	121.0	14.6	1901-2011	1901-2011
660021	黎牙實比	Legaspi	LGSP	123.8	13.2	1947-2011	1947-2011
660101	宿霧	Cebu	CB	123.9	10.3	1935-2011	1935-2011

表 2.5 臺灣附近海域 UHSLC 資料庫之驗潮站資料

Station ID.	Station name			Lon(°)	Lat(°)	Data period
	Ch.	Eng.	Abbr.			
341	基隆	Keelung	KL	121.8	25.2	1980-2010
340	高雄	Kaohsiung	KS	120.3	22.6	1980-2010

表 2.6 臺灣附近海域 CWB 資料庫之驗潮站資料

Station ID.	Station name			Lon(°)	Lat(°)	Data period
	Ch.	Eng.	Abbr.			
1156	箔子寮	Boziliao	BZL	120.1	23.6	2004-2012
1436	台中港	Taichung Port	TC	120.5	24.3	2004-2012
112	新竹	Hsinchu	HSC	120.9	24.9	1992-2012
1206	麟山鼻	Linshanbi	LSB	121.5	25.3	2003-2012
1226	龍洞	Longdong	LD	121.9	25.1	2001-2012
1256	花蓮	Hualien	HL	121.6	24.0	2003-2012
1276	成功	Chenggong	CHG	121.4	23.1	2002-2012
1386	小琉球	Liuchiu	LC	120.4	22.4	2002-2012
1186	東港	Donggang	DG	120.4	22.5	2003-2012
1486	高雄	Kaohsiung	KS	120.3	22.6	2004-2012
1176	將軍	Jiangjun	JG	120.1	23.2	2002-2012
1366	塭港	Wengang	WG	120.1	23.5	2003-2012
1162	東石	Dongshi	DS	120.1	23.5	1999-2012
1926	馬祖	Mazu	MZ	119.9	26.2	2004-2012

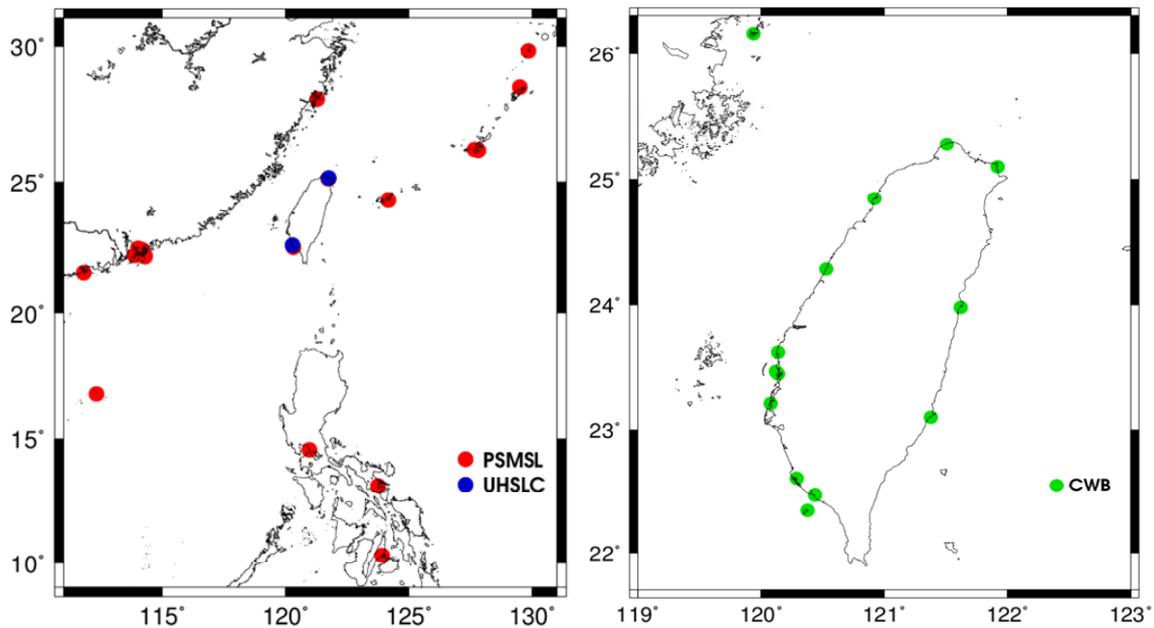


圖2.5 臺灣附近海域之驗潮站分佈圖。左圖: PSMSL與UHSLC驗潮站分佈；右圖: CWB驗潮站分佈

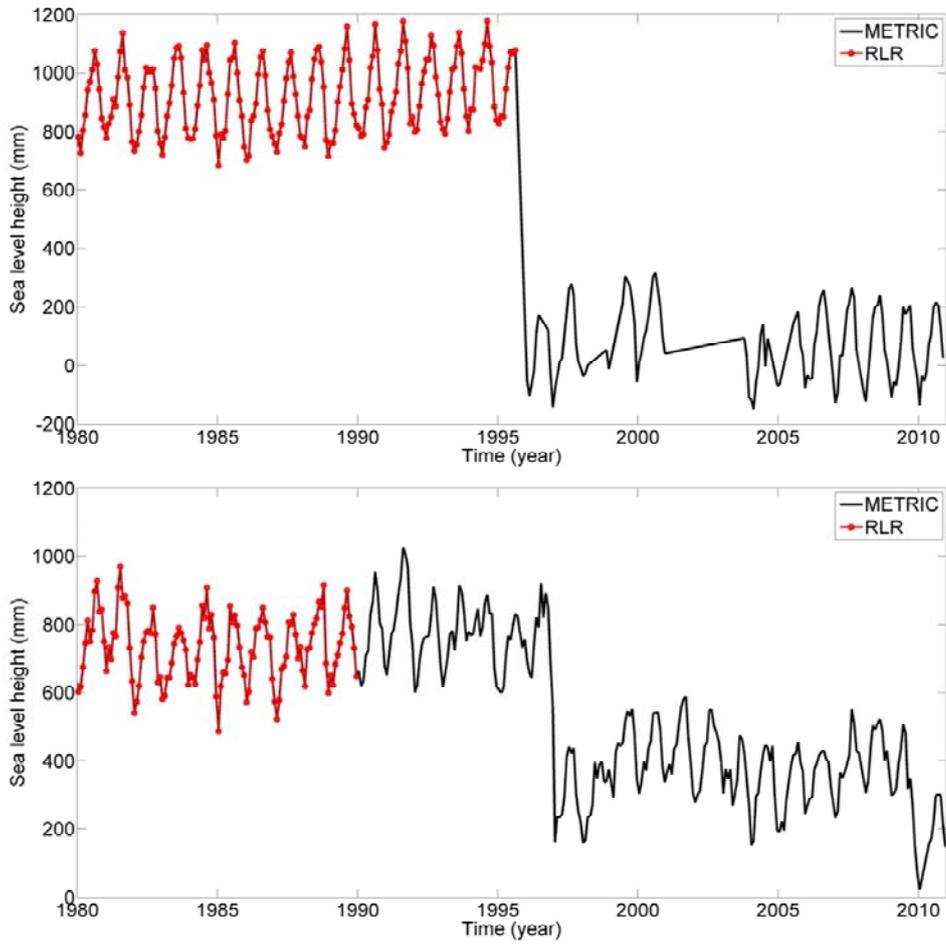


圖2.6 PSMSL之RLR和Metric基隆(上圖)和高雄驗潮站資料(下圖)

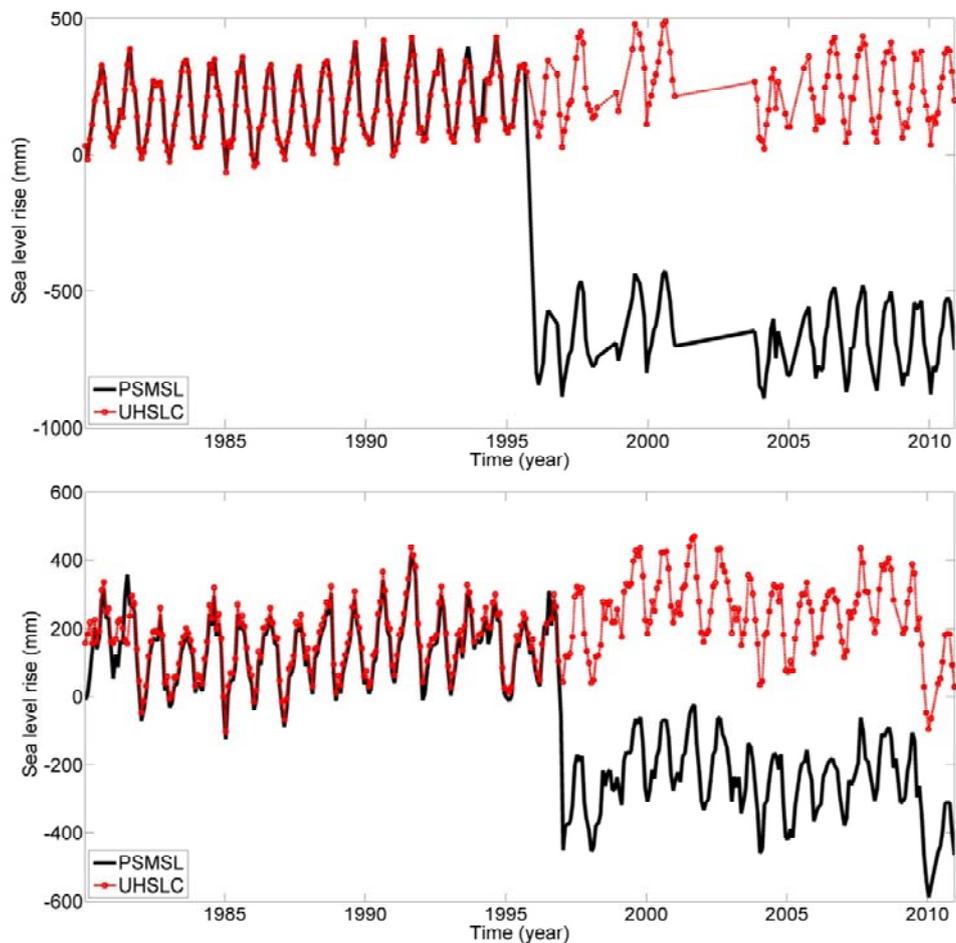


圖2.7 PSMSL與UHSLC驗潮站資料比較圖。上圖: 基隆驗潮站，下圖: 高雄驗潮站

驗潮站為觀測海水面變化的主要方式之一，由於驗潮站資料包含地殼變動訊號，若以潮位記錄資料估算SLR速率時，則需考慮地殼變動速率，此外，還需進行海潮及IB效應改正。IB改正所需之海水表面大氣壓力資料可由下列三個資料中心取得： 1. 歐洲中期天氣預報中心 (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, ECMWF) [<http://www.ecmwf.int/>]提供 $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$ 全球海水面氣壓網格資料，時間間隔為6小時，模型中亦包含高度、相對濕度、溫度等資料。 2. 美國國家氣象局國家環境預測中心 (National Centers for Environmental Prediction,

NCEP) [Kistler *et al.* 2001] [<http://www.cdc.noaa.gov>]提供 $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$ 全球海水面氣壓網格資料，時間間隔為六小時，模型中亦包含風速、高度、相對濕度、大氣溫度等資料。3. 大氣研究資料庫 (Data Bank for Atmospheric Research, DBAR) [<http://dbar.tfri.narl.org.tw/Default.aspx>] 提供CWB佈設於臺灣各地海水面氣壓觀測站之資料，共有33個測站 (如表2.7所示)。表2.7中平均海水面氣壓為平均各測站歷年來海水面氣壓觀測資料，其中鞍部、阿里山、玉山與日月潭的平均氣壓分別為1507、3139、3152 與1513 毫巴 (4測站之海水面氣壓資料如圖2.8所示)，因數據明顯有誤，故本計畫不採用此4個測站的海水面氣壓觀測資料。另外，本研究亦移除觀測時間段未在研究時間範圍內之測站資料，例如臺北(師院)、臺南(永康)與新竹，故最後使用之海水面氣壓觀測資料共有26個，其測站分佈如圖2.9所示，由圖可知，CWB的海水面氣壓觀測站分佈在臺灣各地，最遠觀測站為金門與馬祖。

ECMWF與NCEP為全球網格資料，CWB海水面氣壓資料為主要分佈於臺灣本島之觀測數據，因此PSMSL、UHSLC與CWB驗潮站資料將使用ECMWF與NCEP的海水面氣壓資料進行IB改正，而CWB海水面氣壓資料僅應用於臺灣周圍驗潮站資料進行IB改正，如PSMSL與UHSLC的基隆和高雄驗潮站資料，以及CWB驗潮站資料。

表2.7 CWB提供之海水面氣壓觀測站資訊

站號	站名	經度	緯度	平均海水面氣壓 (mbar)
466880	板橋	121.43	25.00	1013.35
466900	淡水	121.44	25.17	1013.55
466910	鞍部	121.52	25.19	1506.53
466920	臺北	121.51	25.04	1013.00
466930	竹子湖	121.54	25.17	1013.85
466940	基隆	121.73	25.13	1013.02
466950	彭佳嶼	122.07	25.63	1013.82
466990	花蓮	121.61	23.98	1012.88
467060	蘇澳	121.86	24.60	1013.20
467080	宜蘭	121.75	24.77	1013.03
467110	金門	118.29	24.41	1014.82
467300	東吉島	119.66	23.26	1012.20
467350	澎湖	119.56	23.57	1012.48
467410	臺南	120.20	22.99	1012.34
467420	永康	120.23	23.04	1011.05
467440	高雄	120.31	22.57	1011.68
467480	嘉義	120.42	23.50	1011.94
467490	臺中	120.68	24.15	1011.86
467530	阿里山	120.81	23.51	3139.43
467540	大武	120.90	22.36	1011.97
467550	玉山	120.95	23.49	3151.82
467571	新竹	121.01	24.83	1012.71
467590	恆春	120.74	22.01	1011.54
467610	成功	121.37	23.10	1012.14
467620	蘭嶼	121.55	22.04	1012.15
467650	日月潭	120.91	23.88	1512.94
467660	臺東	121.15	22.75	1012.19
467770	梧棲	120.52	24.26	1012.19
467780	七股	120.07	23.15	1010.72
467990	馬祖	119.92	26.17	1015.21
466921	臺北(師院)	121.51	25.04	1000.07
467411	臺南(永康)	120.23	23.04	1011.49
467570	新竹	120.97	24.80	1001.19

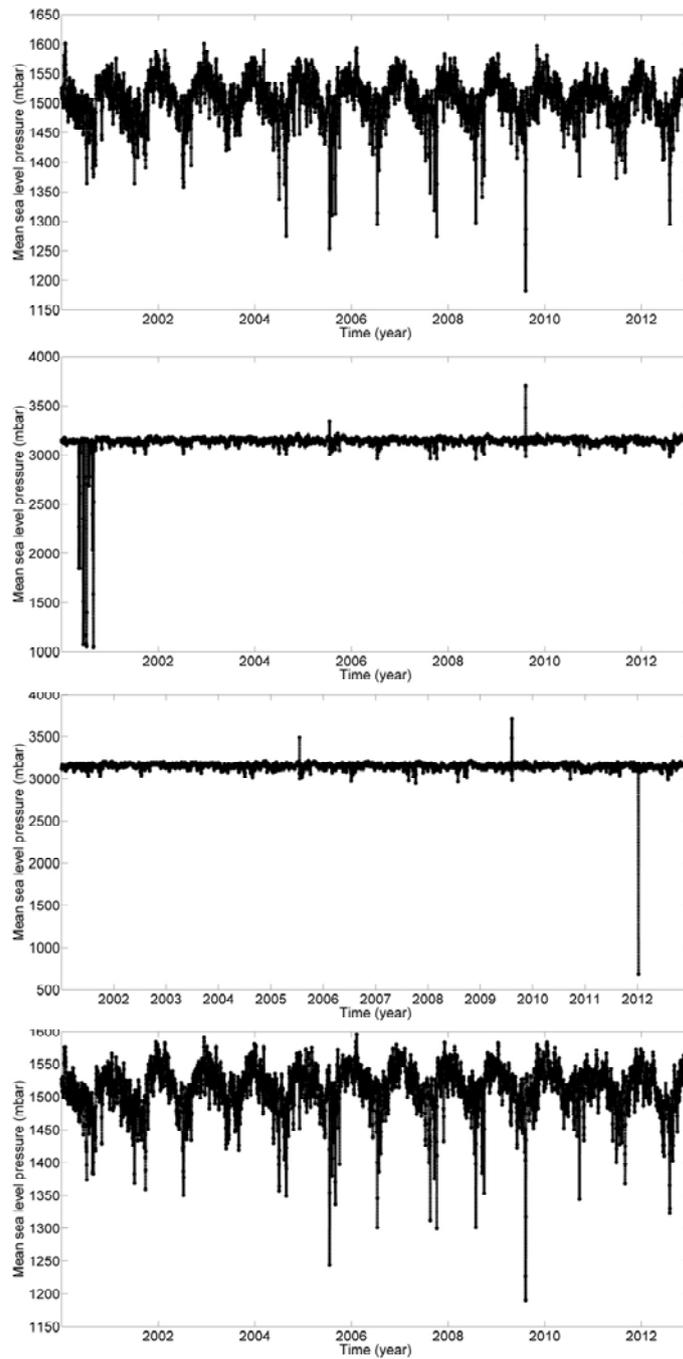


圖2.8 CWB提供之四站海平面氣壓觀測站資料。上: 鞍部站，中上: 阿里山站，中下: 玉山站，下: 日月潭站

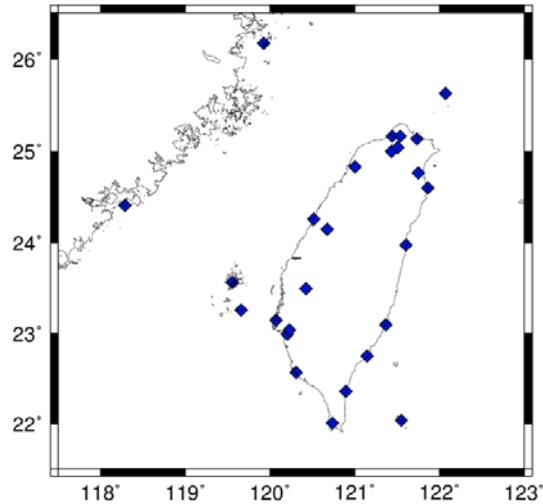


圖2.9 CWB海水面氣壓觀測站分佈圖

## 2.3 Gravity Recovery and Climate Experiment (GRACE) 重力衛星

### 2.3.1 GRACE 介紹

宇宙中的物質遵守萬有引力定律，質量與質量之間互相吸引，在地球上的物體會受到地球自轉造成之離心力以及地球引力影響 [Torge, 1989]，這些力的合力稱為重力  $g$ ，地球的平均重力為  $9.8 \text{ ms}^{-2}$ 。重力會受到質量分佈影響，由於地球非密度均勻之球體，當地球系統中質量重新分佈時，會造成重力的改變，因此地球各處之重力值並非一致。重力的改變可分為全球性的重力變化、區域性的重力變化以及局部性的重力變化 [Torge, 1989]。全球性重力變化為地球內部長時期逐漸形成之質量位移所造成；區域性重力變化週期長，一般發生在板塊構造邊緣如板塊運動造成之板塊擠壓，以及板塊內部如冰後回彈；局部性重力變化較劇烈且周期較短，一般為火山活動或地震所造成。除了地球內部質量重新分布以外，各種自然現象如地殼變動、風化、河流侵蝕等導致各種不同之地貌，亦會造成地球各處之重力差異。地貌變化為一緩慢之過程，於一般情況下，短時間內之

地貌變化並未造成重力變化，因此重力場視為恆定，稱之為平均重力場 (Mean gravity field) 或靜態重力場 (Static gravity field)；除此之外，地球受到大氣層、陸地水文、海洋、冰山及冰河間水循環產生質量變化，此變化較前者而言快速且劇烈。短時間內之質量重新分布導致重力場變化，稱之為時變重力場 (Time variable gravity field) [陳盈樺，2009]。近年來，全球環境變遷劇烈，例如因溫室效應造成南極和格陵蘭冰原融化，因此對時變重力場的研究越來越重視。

地球重力場主要由兩個方式描述：大地水準面 (Geoid) 與重力異常。Geoid 為自平均海水面像陸地延伸之一等位面，與無風、無洋流、無潮汐之海平面一致，為物理大地中重要之參考面。重力異常為地球實際重力場與 Geoid 間之差異，通常來自於區域內之質量異常。重力異常可表現出地球實際重力場與一個均勻分布、沒有地形特徵之參考橢球表面重力場兩者間之差異，可凸顯地表上的重力強度變化。大地、地球物理及海洋學中對於重力異常之精度要求約為  $1 \text{ mgal}$ ，Geoid 之相對精度為 1 至 2 公分。起初對於地球重力場之研究受限於儀器，僅能在陸地上利用重力儀觀測相對重力或絕對重力，雖然隨科技演進觀測精度提升，但是點位僅分布於陸地，無法建立完整包含全球且高精度之重力模型。人造衛星發明之後，藉由衛星之觀測量以及陸地、海洋之地面觀測至做重力場模型，然而模型僅於部分區域有高精度之成果，無精確之全球重力場模型，直到 2002 年 GRACE 發射後則成功解決此問題。

GRACE 衛星由 NASA 與德國太空中心共同研發發射，其科學目的為觀測靜態和動態重力場變化以及重力場與氣候變遷之關係 [Tapley *et al.*, 2004a]，計算全球高解析度重力場解以及瞬時之重力變化。透過重力變化觀測水文質量交換為 GRACE 任務主要目標之一，由於地表質量之變化較地球內部大且快速，在移除大氣質量之影響後，可由 GRACE 之觀測量反推水文變化。

GRACE 軌道高度為 485 公里，軌道傾角為 89 度，空間解析度可高

達 400 公里 [Tapley *et al.*, 2004b]，可解決極區未經過之區域，觀測資料範圍涵蓋整個地球，軌道週期為 90 分鐘。GRACE 由兩顆子衛星所組成(圖 2.10)，衛星上裝載以下裝置：

1. K 波段測距(K-band Ranging, KBR)系統：發射 24 和 32 GHz 雙頻的微波訊號，每秒量測兩顆子衛星之間的距離，精度約  $1\mu m$ 。
2. 超穩定之微型震盪器 (Ultra-Stable Oscillator, USO)：提供 KBR 穩定的頻率。
3. 超星加速度 (SuperSTAR Accelerometers, ACC)：精密計算衛星的非重力加速度。
4. 恆星敏感器 (Star Camera Assembly, SCA)：利用兩顆子衛星與星體的相對位置計算出子衛星的位置。
5. Black-Jack GPS Receiver and Instrument Processing Unit (GPS)：訊號處理，計算相對於 GPS 衛星距離的改變。

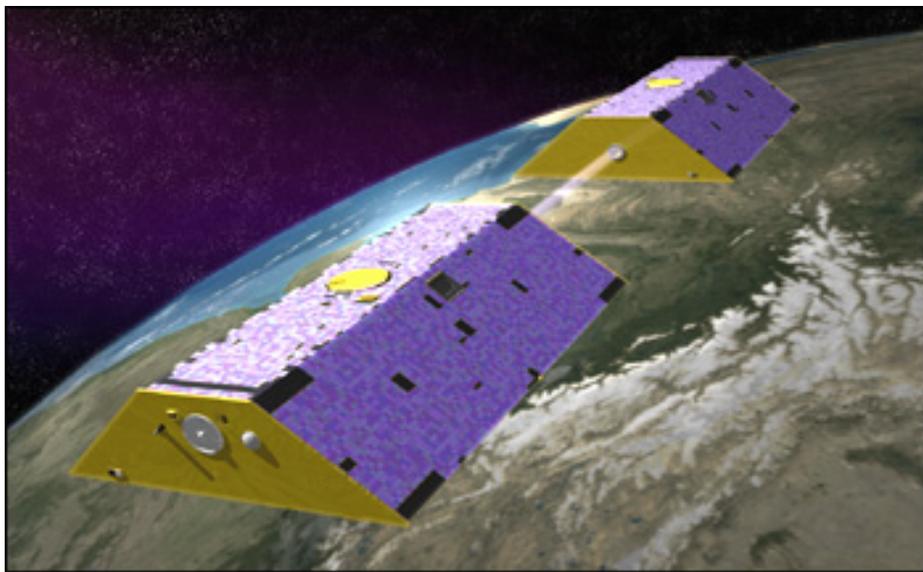


圖 2.10 GRACE 重力衛星示意圖 [圖片來源：  
<http://earthobservatory.nasa.gov/Features/GRACE/>]

自 2002 年發射後，空間研究中心(Center for Space Research, CSR)、噴氣推進實驗室(Jet Propulsion Laboratory, JPL)、德國地球科學研究中心(GeoForschungsZentrum, GFZ) 三個單位分別提供各自所計算之 GRACE 月平均之 2-60、2-180 階與 2-120 階球諧係數重力場解。球諧係數為拉普拉斯方程式 (Laplace's equation) 在球面坐標系之解，由於其正交性質，大地領域中常利用球諧係數展開來代表地球重力場、大地起伏、重力異常等相關研究 [Hofmann-Wellenhof and Moritz, 2006; 游輝欽, 2000]。各階的球諧係數互相不影響，而計算階數愈高之係數所產生之重力場解空間解析度則愈高。球諧係數與萬有引力位之間的關係可由下式表示 [Heiskanen and Moritz, 1967]：

$$V(r, \phi, \lambda) = \frac{GM}{r} \left\{ 1 + \sum_{n=2}^{\infty} \sum_{m=0}^n \left( \frac{R_E}{r} \right)^n \bar{P}_{nm}(\sin \phi) [\bar{C}_{nm} \cos m\lambda + \bar{S}_{nm} \sin m\lambda] \right\} \quad (2.3)$$

其中  $r$  為觀測點位置至坐標原點距離， $G = 6.6742 \cdot 10^{-11} \text{ m}^3/\text{kgs}^2$ ， $M$  為地球質量， $R_E$  為地球平均半徑(6378136.3 m)， $n$  為階數(Degree)， $m$  為次數(Order)， $\bar{C}_{nm}$  與  $\bar{S}_{nm}$  為正規化 Stokes 球諧係數， $\bar{P}_{nm}$  為正規化之雷建德函數 (Normalized associated Legendre function)， $\theta$  為餘緯度 (Co-latitudes)， $\phi$  為經度。GRACE 重力場球諧係數解中缺少零階與一階項。零階項表示地球的總質量，包含固體地球、海洋及大氣等，為一定量，理論上不會增減，故球諧係數解中零階項  $\bar{C}_{00}$  與  $\bar{S}_{00}$  之變化為零 [Wahr *et al.*, 1998]。一階球諧係數表示地球質心在地固坐標系統中的位置 [Cretaux *et al.*, 2002]，在 GRACE 任務中，重力場參考地球瞬時之質量中心，也就是說任何時刻的  $\bar{C}_{10}$ 、 $\bar{C}_{11}$ 、 $\bar{S}_{11}$  皆為零。

GRACE 球諧係數重力場解中， $\bar{C}_{20}$  受到軌道誤差以及其他因素影響導致誤差較大，而此項係數之誤差會影響海水質量變化之計算，使計算之海水質量有較大之 SLR 速率 [Chen *et al.*, 2005]，若以衛星雷射測距 (Satellite laser ranging) 觀測之  $\bar{C}_{20}$  取代 GRACE 重力場解之  $\bar{C}_{20}$ ，其估計之

海水質量與 SSL 後之衛星測高資料較吻合 [Chen *et al.*, 1999]。

### 2.3.2 GRACE 觀測原理

以往衛星觀測方式為主動式—對地表發射訊號並接收反射訊號以計算觀測量；以及被動式—接收地表發射之輻射訊號，而 GRACE 與以往地球觀測任務衛星不同。GRACE 計畫由兩顆子衛星組成，包括位於前端的子衛星 (GRACE-A)，以及位於後端的子衛星 (GRACE-B)，兩子衛星相距平均 220 公里。GRACE 在軌道上運行時，兩子衛星以微波脈衝訊號相連接，並持續紀錄兩子衛星間之距離變化。假設行經地面重力較大地區時，首先 GRACE-A 受到重力影響而飛行速度加快，使得兩子衛星距離增加；而當 GRACE-A 通過而 GRACE-B 接近該地區時，GRACE-A 受重力影響而飛行速度減慢，同時 GRACE-B 速度增加，兩子衛星間距離則縮短；最後當 GRACE-B 飛離時，受重力影響而飛行速度降低；反之當通過重力較小地區時情況則相反。GRACE 沿軌道路徑記錄兩衛星距離變化，此觀測量經計算轉換後即可以得到沿軌道地面路徑 (Ground track) 之重力場變化。GRACE 所測得之重力場變化來自於地表與內部地殼變動，陸上水文變化，以及冰山、冰棚與海水間的質量交換。除了觀測重力變化外，GRACE 同時可觀測地球大氣層，其結果對於全球氣候變遷之研究有莫大貢獻。

### 2.3.3 去相關(Decorrelation)演算法

Swenson 和 Wahr [2006] 發現 GRACE 重力場解係數間呈現相關造成計算之重力場呈現條紋 (Stripes)，此相關性需要去除。去相關的方法可以分成兩種，第一種是經驗法 (Empirical method)，此種方法無須任何相關資訊 [例如 Swenson and Wahr, 2006]。另一方法則需球諧係數訊號的誤差變方協變方 (An error variance-covariance matrix) [Kusche, 2007]。本研究採用 Duan 等人 [2009] 利用經驗法所推導之去相關濾波，其基本概念為讓低階之階數和次數係數不改變，而其他階數和次數利用移動視窗多項

式濾波 (Moving-window polynomial filter) 進行處理，視窗寬度用來決定濾波的強度。圖 2.11 為 GRACE 重力場解之球諧係數誤差，黑色曲線為不改變之低階係數，第一條黑色曲線其階數和次數( $l,m$ )由(20,0)到(10,10)，其他黑色曲線和第一條曲線相似[Duan *et al.*, 2009].

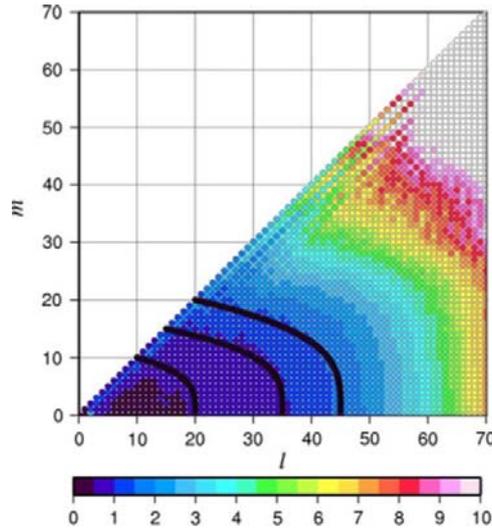


圖 2.11 GRACE 球諧係數之誤差 (Scaled by  $\times 10^{12}$ )，三條黑色曲線用來表示沒有變化之區域[Duan *et al.*, 2009]

依據圖 2.11，不變區域黑色曲線可以下式來表示

$$n = n_0 + \beta m^r \quad (2.4)$$

其中  $n$  和  $m$  分別為階數和次數，依據 GRACE RL04 計算之  $r=3.5$ ， $n_0$  和  $\beta$  則由黑色曲線兩端點之( $n,m$ )來定義，其中一端點的  $m=0$ ，另一端點  $n=m$ 。

Duan 等人[2009]採用 Swenson 和 Wahr [2006] 移動視窗的方法，但採用二次多項式，且視窗大小利用誤差模式來決定，其理論為誤差越大，越多係數被濾除，因此視窗口寬度越小。視窗口寬度可由下式來計算：

$$\omega = \max \left\{ A e^{\frac{[(1-\gamma)m^p + \gamma n^p]^{n/p}}{K}} + 1.5 \right\} \quad (2.5)$$

求得後無條件去除小數取得奇整數。

其中  $A = 30$  為常數， $\gamma = 0.1$  和  $p = 3$  為常數，可擬合圖 2.11 之誤差模式，函數  $\max()$  為兩者之最大值，最後  $K$  用來決定視窗大小。

相較於其他去相關濾波演算法，Duan 等人 [2009] 利用均方根 (Root mean square, RMS) 計算來評估去除條紋的成果，成果顯示視窗大小採用  $K = 15$  和  $UP = (35, 0) (10, 10)$  可取得最小 RMS。本研究後續利用 GRACE 計算海水質量變化皆採用此組數據進行計算。

### 2.3.4 高斯濾波(Gaussian Filter)

GRACE 重力場解中高階球諧係數(階數大於 15 階)之雜訊較訊號強，因此實際使用 GRACE 資料時需採用濾波消除計算質量之雜訊。本研究採用高斯濾波，高斯濾波為一低通濾波，可用來消除資料中的高頻訊號。高斯濾波公示可寫成：

$$G(x) = \exp\left(-\frac{x^2}{2\sigma_x^2}\right)$$

$$\sigma_x = -\frac{r_x}{\sqrt{2\ln(2)}} \quad (2.6)$$

其中  $r_x$  為濾波半徑 (本研究採用 300 公里)， $x$  為地心角度 (Geocentric angle)。

### 2.3.5 洩漏效應(Leakage effect)

GRACE 重力場解的空間解析度為 300-600 公里，因為訊號變化不均勻且不連續，故產生所謂洩漏效應，例如質量變化訊號在陸地上遠大於海

洋，故陸地上的訊號會洩漏到海洋上，使得海洋上計算之質量變化大於真實訊號。Wahr 等人 [1998] 提出一演算法用來減低洩漏效應，此演算法簡單地分別平滑陸地和海洋區域。Guo 等人 [2010] 改進 Wahr 等人 [2008]之演算法，其處理步驟為：1. 平滑 GRACE 計算之全球質量來移除大部分的誤差或條紋，然後令海洋質量為零，這裡我們稱之為平滑後之陸地質量。2. 利用步驟 1 之平滑後陸地質量來計算重力位球諧係數，然後從 GRACE 球諧係數中減去，取得海洋質量之重力球諧係數。3. 利用步驟 2 計算之球諧係數計算海洋質量，並進行平滑。[Guo *et al.*, 2010].

由圖 2.12 可見，為進行洩漏改正前，海岸旁的質量變化相對來說過大或過小，改正後與真實訊號較為相近。

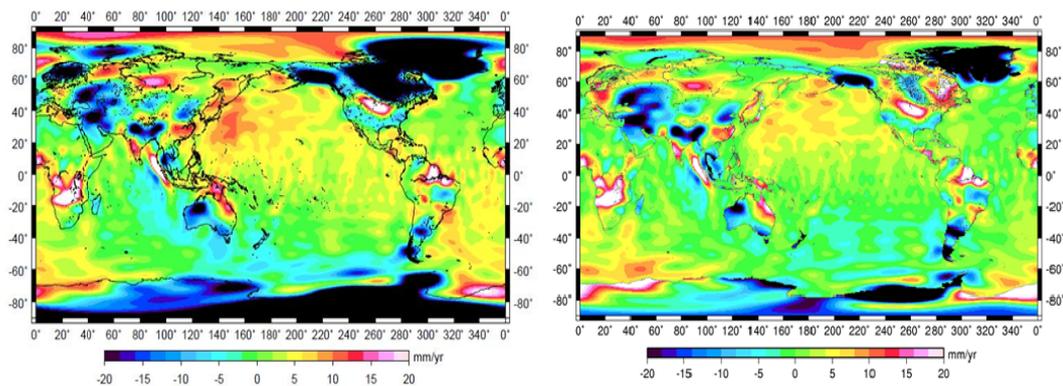


圖 2.12 GRACE 重力場解計算之海洋質量。左：未進行洩漏效應改正，右：進行洩漏效應改正

### 2.3.6 海水質量變化計算

本研究採用 CSR 發佈之月平均 GRACE 重力場解 (L2 Release 5 or RL05 產品，此版本之低階項球諧係數，例如  $J_2$  項，比以前版本精度已經大幅改進)，稱之為 GRACE 衛星重力模型 (GRACE satellite-only model, GSM)，重力場解以球諧係數形式提供 2-60 階。計算海水質量變化之處理流程如圖 2.13 所示。當利用 GRACE 觀測量計算重力場球諧係數解時，表示 non-IB barotropic 訊號之大氣-海洋去混疊模型 (Atmosphere-ocean

de-aliasing (AOD) model) 被當成背景力模式，用來減低海洋高頻之 barotropic 訊號，因本研究要計算海洋質量變化，故需將 AOD 模型加回 GRACE 重力場解中，因此步驟 8 中將 AOD 資料經過高斯濾波平滑加到步驟 7 計算之海洋質量變化中。

依據 Wahr 等人 [1998]，水高變動可由重力場球諧係數變化,  $\Delta\bar{C}_{nm}, \Delta\bar{S}_{nm}$ , 計算求得，其公式如下所示：

$$\Delta h(\theta, \lambda) = \frac{a\sigma_E}{3\sigma_w} \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{m=0}^n \bar{P}_{nm}(\cos\theta) \frac{(2n+1)}{(k_n+1)} \times (\Delta\bar{C}_{nm} \cos(m\lambda) + \Delta\bar{S}_{nm} \sin(m\lambda)) \quad (2.7)$$

其中  $\sigma_w$  為純水密度 ( $1000 \text{ kg m}^{-3}$ )， $\sigma_E$  為地球平均密度 ( $5517 \text{ kg m}^{-3}$ )， $\Delta\bar{C}_{nm}$  與  $\Delta\bar{S}_{nm}$  為  $\bar{C}_{nm}$ 、 $\bar{S}_{nm}$  減去所有月份球諧係數平均值，即為隨時間變化之 Stokes 球諧係數， $k_n$  為洛夫數 (Love number)。

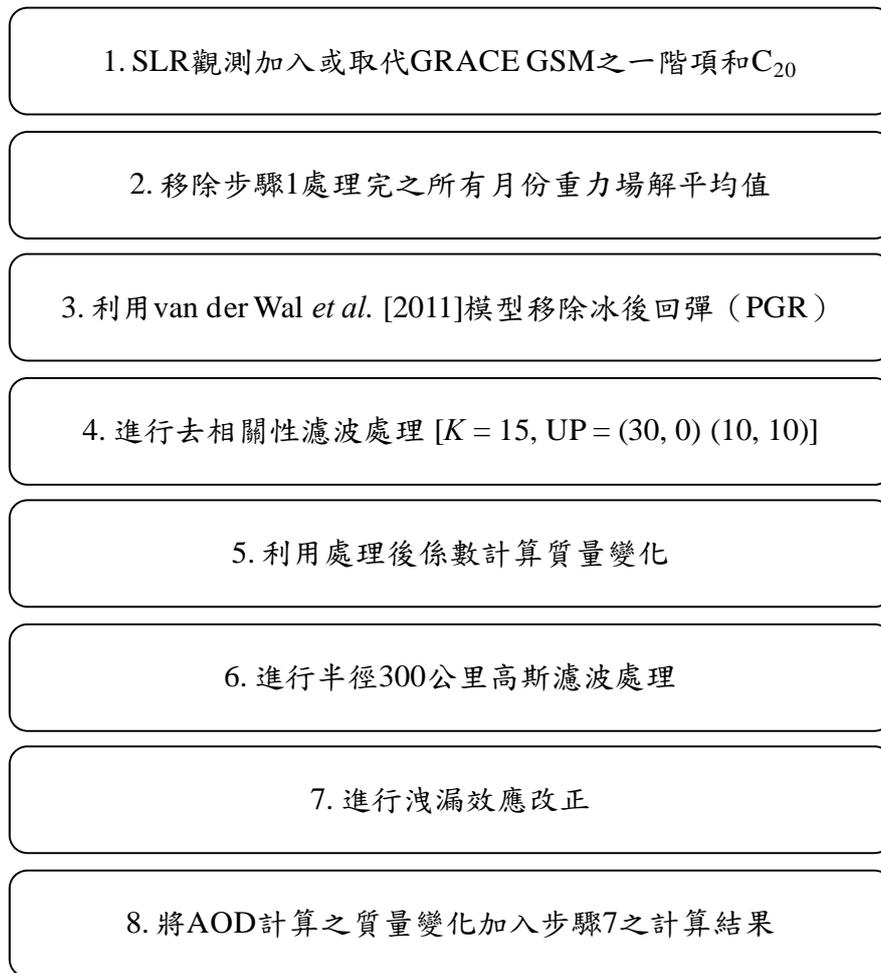


圖 2.13 GRACE 重力場解計算質量變化流程圖

## 2.4 溫鹽資料

本計畫利用海洋各深度之溫度與鹽度資料估算SSL變化[Gill, 1982]。計畫中採用四組海水溫度與鹽度資料，分別為更新Ishii和Kimoto [2009]之資料與ARGO計畫下的國際太平洋研究中心 (International Pacific Research Center, IPRC)、斯克里普斯海洋研究所 (SCRIPPS Institution of Oceanography, SIO)資料[Roemmich and Gilson, 2009]與日本海洋研究開發機構 (Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, JAMSTEC) 資料 [Hosoda *et al.*, 2008]。

Ishii 資料為 Ishii 和 Kimoto [2009] 更新後之資料，該資料為一組  $1^\circ \times 1^\circ$  之月平均海水溫度和鹽度網格資料，資料涵蓋時間為 1945/01-2011/12，涵蓋範圍近乎全球，資料由海水表面至水深 1500 m 共分為 24 層。

ARGO 計畫於 2000 年開始，至今全球已佈設超過 3000 顆的 ARGO 浮標，可大範圍且穩定的收集全球海洋之溫、鹽資料。ARGO 網格資料由不同研究中心提供，不同研究中心有各自處理資料的步驟與方法，故處理後之往格溫鹽資料有些許差異。本研究使用 IPRC、SIO 與 JAMSTEC 分別提供的  $1^\circ \times 1^\circ$  網格之月平均海水溫、鹽資料，資料涵蓋時間分別為 2005/01-2012/12、2004/01-2012/12 與 2001/01-2012/12，其範圍涵蓋皆近乎全球，資料皆包含海表面至水深 2000 m，共可分為 27 層、58 層與 25 層，資料可至 [http://www.argo.ucsd.edu/Gridded\\_fields.html](http://www.argo.ucsd.edu/Gridded_fields.html) 下載。

SSL 可分為由溫度所造成之海水面變化稱為熱比容海平面，以及由鹽度所造成之海水面變化稱為鹽比容海平面，兩者間之關係為非線性 [Pattullo *et al.*, 1955]。熱比容海平面佔 SSL 中之大部分，約為鹽比容海平面造成之十倍，

SSL 可由海水溫度及鹽度資料計算海水密度加上由深度轉換之壓力積分求得，其公式如下：

$$h_{steric} = \int_{z_1}^{z_2} \frac{\rho_0(S_0, T_0, z) - \rho(S, T, z)}{\rho_0(S_0, T_0, z)} dz \quad (2.8)$$

其中  $S_0$  與  $T_0$  為長時間平均之鹽度及溫度資料， $S$  與  $T$  為月平均之鹽度及溫度資料， $\rho$  和  $\rho_0$  分別為海水密度和參考海水密度， $z$  為海水深度，可由考慮溫度及鹽度混合效應之狀態方程 (equation of the state) 計算求得 (Gill, 1982)。

## 第三章 衛星測高改正模型評估

衛星測高資料需進行儀器改正、介質改正(電離層改正、濕對流層改正、乾對流層改正)與地球物理改正(固體潮改正、海潮改正、海潮負載改正、極潮改正、海面狀態偏差改正、IB 改正)，其中多項改正以模型進行改正，由於改正模型精度會影響衛星測高海水面觀測量之精度，故 3.1 節將比較不同模型改正之結果，並說明不同改正模型對於估算 SLR 速率之影響。3.2 節比較衛星測高 AVISO 與 RADs 資料估算各驗潮站周圍之 SLR 速率。

### 3.1 改正模型評估

本節利用第二章中表 2.2 所列之各改正模型分別對 T/P、J-1、J-2 衛星測高資料進行改正，並利用改正後之衛星測高時間序列估算 SLR 速率，再分析速率之差異。測試之 T/P、J-1、J-2 測高資料所涵蓋時間範圍分別為 1992/09-2002/08、2002/1-2009/1、2008/7-2013/6。各改正模型對 T/P、J-1 與 J-2 測高資料進行改正，並計算改正後的 SLR 速率，成果如表 3.1-3.3 所示，而表 3.4 為測高資料改正後差異量之統計表

1. T/P 衛星測高: 表 3.1 中利用不同改正模型進行乾對流層改正、海潮改正、海潮承載改正所造成的 SLR 變化速率差異甚小，最大改正差異約為 0.1 mm/yr。濕對流層改正後的 SLR 速率差異則較大，比較 ECMWF ERA-int model 和 TMR 改正，其差異為 0.9 mm/yr，然而測高觀測之反射面為海水面，相較氣候模型之數據，TMR 為直接觀測數據可提供較準確之改正。不同電離層之改正差異約為 0.8 mm/yr(排除較舊之 IRI2007 和 DORIS 改正)，但因為雙頻(dual-frequency)雷達波測高儀觀測量可以組成無電離層觀測量，使觀測量不受電離層影響，因此較使用電離層模型進行改正準確。不同 IB 之最大改正差異約為 1.3 mm/yr，而 MOG2D total inverse

barometer correction 目前最為被廣泛採用且較為精確。海面狀態偏差之最大改正差異為 0.7 mm/yr。

2. J-1 衛星測高：表 3.2 與 表 3.1 相比，其乾對流層改正、海潮改正、海潮承載和海面狀態偏差等之改正後的最大差異可達 0.2 mm/yr。利用 Enhanced JMR 或 original JMR 直接觀測數據進行濕對流層改正，其差異為 0.2 mm/yr，相較於 J-1 Geophysical Data Records (GDR) 提供之 original JMR，Enhanced JMR 對於靠陸地區域之測高濕對流層更加準確 (Brown, 2010)。表 3.2 中以雙頻消除電離層延遲應進行電離層改正，除了利用 IRI2007 模型改正差異較大外 (Vignudelli 等人 (2011)指出 IRI2007 模型相對於其他模型在 J1 的濕對流層精度較差)，其餘改正後之 SLR 速率差異則小於 0.9 mm/yr。與表 3.1 相同，不同 IB 改正最大差異則約為 1.3 mm/yr，目前 MOG2D total inverse barometer correction 最為被廣泛採用。
3. J-2 衛星測高：表 3.2 中顯示與 T/P 及 J-1 衛星測高相似的結果，其乾對流層改正、海潮改正、海潮承載改正和海面狀態偏差改正差異很小，最大差異量約 0.2 mm/yr。濕對流層改正後造成的 SLR 速率差異可達 1.2 mm/yr，而 ECMWF ERA-int model 和 AMR 改正差值為 0.6 mm/yr，但因測高觀測反射面為海水面，AMR 為直接觀測數據，直接觀測數據應較氣候模型準確。表中電離層改正部分，除了利用 IRI2007 模型改正之結果差異較大外，其餘模型改正造成之 SLR 速率差異小於 0.2 mm/yr。不同 IB 改正造成 0.8 mm/yr SLR 速率變化差異，目前 MOG2D total inverse barometer correction 最為被廣泛採用。

表 3.4 為綜合上述結果，由表可知，不同乾對流層改正、海潮改正、海潮承載改正所造成的 SLR 速率差異很小，然而對於濕對流層效應、電離層延遲效應與 IB 效應進行改正後造成 SLR 速率差異較大。目前為止，濕對流層改正中多波段微波輻射儀為直接觀測數據，應用於海洋區域較準確，因此可用多波段微波輻射儀進行濕對流層改正；以雙頻觀測量組成無電離層觀測量消除電離層延遲效應較為可信之方式；IB 改

正中 MOG2D total inverse barometer correction 最為被廣泛採用，故本研究後續計算地殼變動和 SLR 速率之改正模型皆以 AVISO 和 RADs 資料中心預設來進行，如表 3.5 所示。以 T/P 衛星為例，各改正採用兩種模型來進行改正的誤差評估，乾對流層改正（NCEP model 和 ECMWF ERA-int model）；濕對流層改正(TMR 和 ECMWF ERA-int model)；電離層改正(smoothed dual-frequency ionosphere correction 和 NIC09 ionospheric correction); IB 改正(local+global inverse barometer correction 和 MOG2D total inverse barometer correction); 海潮和海潮承載改正（GOT4.9 ocean tide 和 FES2004 ocean）；海面狀態偏差改正(CLS sea state bias 和 Chambers BM4 sea state bias))，其因改正所造成之 SLR 速率誤差為 1.2 mm/yr。

表 3.1 T/P 衛星測高資料進行不同改正後之 SLR 速率

乾對流層改正模型	ECMWF model	NCEP model	ECMWF ERA-int model		
Trend (mm/yr)	8.6±0.8	8.5±0.8	8.5±0.8		
濕對流層改正模型	TMR	ECMWF model	NCEP model	ECMWF ERA-int model	
Trend (mm/yr)	8.6±0.8	9.3±0.7	7.9±0.7	7.7±0.8	
電離層改正模型	dual-frequency ionospheric correction	smoothed dual-frequency ionosphere correction	DORIS ionospheric correction	IRI2007 ionospheric correction	NIC09 ionospheric correction
Trend (mm/yr)	8.6±0.8	8.6±0.8	6.6±0.7	6.4±0.7	7.8±0.7
IB 改正模型	local inverse barometer correction	local+global inverse barometer correction	global inverse barometer correction	MOG2D total inverse barometer correction	MOG2D mean inverse barometer correction
Trend (mm/yr)	8.8±0.8	8.6±0.8	9.7±1.0	8.6±0.8	9.9±1.0
海潮改正模型	FES2004 ocean tide	GOT4.7 ocean tide	GOT4.8 ocean tide	GOT4.9 ocean tide	
Trend (mm/yr)	8.6±0.8	8.6±0.8	8.6±0.8	8.6±0.8	
海潮承載改正模型	FES2004 ocean tide	GOT4.7 ocean tide	GOT4.8 ocean tide	GOT4.9 ocean tide	
Trend (mm/yr)	8.6±0.8	8.6±0.8	8.6±0.8	8.6±0.8	
海面狀態偏差改正模型	BM4 sea state bias	CLS sea state bias	Chambers BM4 sea state bias		
Trend (mm/yr)	8.0±0.8	8.7±0.8	8.6±0.8		

表 3.2 J-1 衛星測高資料進行不同改正後之 SLR 速率

乾對流層改正模型	ECMWF model	NCEP model	ECMWF ERA-int model		
Trend (mm/yr)	11.2±1.3	11.3±1.3	11.3±1.3		
濕對流層改正模型	Enhanced JMR	ECMWF model	NCEP model	ECMWF ERA-int model	original JMR
Trend (mm/yr)	11.2±1.3	11.0±1.4	11.1±1.3	11.7±1.3	11.4±1.3
電離層改正模型	dual-frequency ionospheric correction	smoothed dual-frequency ionospheric correction	JPL GIM ionospheric correction	IRI2007 ionospheric correction	NIC09 ionospheric correction
Trend (mm/yr)	11.3±1.3	11.2±1.3	11.7±1.3	14.1±1.2	12.1±1.2
IB 改正模型	local inverse barometer correction	local+global inverse barometer correction	global inverse barometer correction	MOG2D total inverse barometer correction	MOG2D mean inverse barometer correction
Trend (mm/yr)	11.0±1.3	10.9±1.3	12.2±1.4	11.2±1.3	12.2±1.4
海潮改正 模型	FES2004 ocean tide	GOT4.8 ocean tide	GOT4.9 ocean tide		
Trend (mm/yr)	11.1±1.3	11.2±1.3	11.3±1.3		
海潮承載改正模型	FES2004 ocean tide	GOT4.8 ocean tide	GOT4.9 ocean tide		
Trend (mm/yr)	11.2±1.3	11.2±1.3	11.2±1.3		
海面狀態偏差改正(Sea state Bias correction)	CLS sea state bias				
Trend(mm/yr)	11.2±1.3				

表 3.3 J-2 衛星測高資料進行不同改正後之 SLR 速率

乾對流層改正模型	ECMWF model	NCEP model	ECMWF ERA-int model				
Trend (mm/yr)	-2.7±2.4	-2.9±2.4	-2.7±2.4				
濕對流層改正模型	AMR	ECMWF model	NCEP model		ECMWF ERA-int model		
Trend (mm/yr)	-2.5±2.4	-3.1±2.4	-2.6±2.3		-1.9±2.4		
電離層改正模型	dual-frequency ionospheric correction	smoothed dual-frequency ionosphere correction	JPL GIM ionospheric correction	IRI2007 ionospheric correction	NIC09 ionospheric correction	dual-frequency ionospheric correction (Ku MLE3)	MLE3 smoothed dual-frequency ionosphere correction
Trend (mm/yr)	-2.5±2.4	-2.5±2.4	-2.4±2.5	-3.8±2.7	-2.6±2.4	-2.5±2.4	-2.5±2.4
IB 改正模型	local inverse barometer correction	local+global inverse barometer correction	global inverse barometer correction	MOG2D total inverse barometer correction	MOG2D mean inverse barometer correction		
Trend (mm/yr)	-2.5±2.5	-2.4±2.4	-1.7±2.6	-2.5±2.4	-1.8±2.7		
海潮改正模型	FES2004 ocean tide	GOT4.8 ocean tide	GOT4.9 ocean tide				
Trend (mm/yr)	-2.6±2.5	-2.5±2.4	-2.5±2.4				
海潮承載改正模型	FES2004 ocean tide	GOT4.8 ocean tide	GOT4.9 ocean tide				
Trend (mm/yr)	-2.5±2.4	-2.5±2.4	-2.5±2.4				
海面狀態偏差改正 (Sea state Bias correction)	CLS sea state bias (Ku)	CLS sea state bias (C)	CLS sea state bias (Ku MLE3)				
Trend (mm/yr)	-2.5±2.4	-2.5±2.4	-2.5±2.4				

表 3.4 衛星測高資料進行不同模型改正後估算之 SLR 速率差異

各項改正(mm/yr)	T/P (1992/09-2002/08)	J-1 (2002/01-2009/01)	J-2 (2008/07-2013/06)
乾對流層改正模型	0-0.1	0-0.1	0-0.2
海潮改正	0	0.1-0.2	0-0.1
海潮承載改正	0	0	0
濕對流層改正	0.2-1.6	0.1-0.7	0.1-1.2
電離層改正	0-2.2	0.1-0.9 (移除 IRI2007)	0-0.2 (移除 IRI2007)
IB 改正	0-1.3	0.1-1.3	0-0.8
海面狀態偏差改正	0.1-0.7	x	0

表 3.5 本計畫採用之衛星測高資料改正模型

各項改正	RADs	AVISO
乾對流層改正	1. T/P: ECMWF 2. J-1: ECMWF 3. J-2: ECMWF	1. T/P: Rectangular grid 2. J-1: Gaussian grid 3. J-2: Gaussian grid
濕對流層改正	1. T/P: TMR 2. J-1: enhanced JMR 3. J-2: AMR	1. T/P: from TMR and from ECMWF (if near coast) 2. J-1: from JMR and from ECMWF (if near coast) 3. J-2: from AMR and from ECMWF (if near coast)
電離層改正	1. T/P: smoothed dual-frequency 2. J-1: smoothed dual-frequency 3. J-2: smoothed dual-frequency	1. T/P: dual-frequency 2. J-1: dual-frequency 3. J-2: dual-frequency
IB 改正	1. T/P: MOG2D total IB correction 2. J-1: MOG2D total IB correction 3. J-2: MOG2D total IB correction	1. T/P: MOG2D+ Rectangular grid 2. J-1: MOG2D+ Rectangular grid 3. J-2: MOG2D+ Rectangular grid
海潮改正	1. T/P: GOT4.8 2. J-1: GOT4.8 3. J-2: GOT4.8	1. T/P: GOT4.7 2. J-1: GOT4.7 3. J-2: GOT4.7
海潮承載改正	1. T/P: GOT4.8 2. J-1: GOT4.8 3. J-2: GOT4.8	1. T/P: GOT4.7 2. J-1: GOT4.7 3. J-2: GOT4.7
海面狀態偏差改正	1. T/P: CLS 2. J-1: CLS 3. J-2: CLS	1. T/P: Non parametric SSB(from GDR) (Topex) BM4 formula (Poseidon) 2. J-1: Non parametric SSB (from GDR) 3. J-2: Non parametric SSB (from GDR)

### 3.2 衛星測高資料比較

衛星測高觀測之海水面高度的絕對量，相對於一參考橢球，因此可結合驗潮站資料來估算地殼變動訊號，然而衛星測高近岸資料較稀少且精度較差，而驗潮站大多設置於岸邊，為了配合驗潮站資料使用，本計畫分別平均驗潮站周圍經緯度  $2^{\circ}$ 、 $3^{\circ}$ 、 $5^{\circ}$  範圍內的測高資料，以高雄潮位站為例，如圖 3.1 所示。驗潮站近岸資料量較少，因此以該驗潮站位置中心分別平均驗潮站周圍經緯度  $2^{\circ}$ 、 $3^{\circ}$ 、 $5^{\circ}$  範圍內的測高資料。然而根據黃清哲等人[2009]利用衛星測高估算臺灣東部與西部 SLR 速率的研究成果顯示，東部與西部的 SLR 差異量約  $4 \text{ mm/yr}$ ，表示 SLR

速率於太平洋與臺灣海峽的變化並不一致，且 Cheng 和 Anderson (2013) 亦提出初始地球物理校正(Default-corrections)於大陸沿岸約為 1.4 mm/yr；於臺灣海峽則約為 2.1 mm/yr，為避免區域 SLR 變化速率不一致而影響地殼變動的估算成果，因此不同區域之 SLR 速率計算以東經 121° (約臺灣本島之中間線)為基準，將臺灣附近的驗潮站及衛星測高資料分為東西部分，分別包含臺灣海峽及太平洋區域，位於基準線東邊的驗潮站僅使用基準線以東的 2°、3°、5° 測高資料，而位於基準線西邊的驗潮站則使用基準線以西的 2°、3°、5° 測高資料。

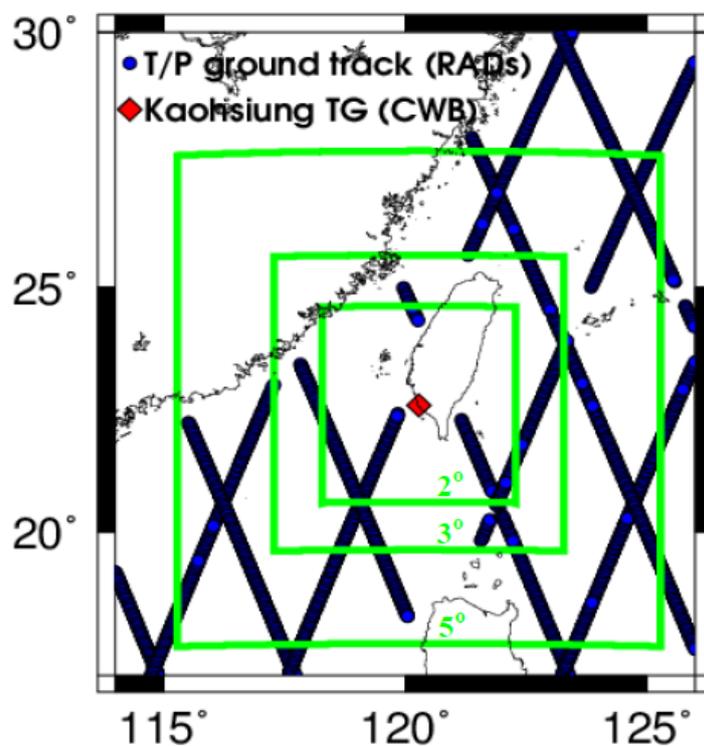


圖 3.1 高雄驗潮站周圍經緯度 2°、3°、5° 之範圍與 T/P 測高資料之地面軌跡

表 3.6-3.8 為利用衛星測高資料估算各驗潮站固定範圍內之 SLR 速率( $\pm$ 標準偏差(Standard deviation))，在相同範圍內，衛星測高以 AVISO 與 RADs 估算 PSMSL、UHSLC 與 CWB 驗潮站周圍 SLR 速率之差異量平均值分別皆在 2 mm/yr、3 mm/yr 與 4 mm/yr 以下，隨著涵蓋範圍擴大為 3° 或 5° 時，AVISO 與 RADs 估算 SLR 之差異量則相對降低。AVISO 與 RADs 之資料由不同的資料處理中心提供，處理測高資料的

方法與步驟並不完全相同，由圖 3.2 中 T/P 測高資料之地面軌跡可知，AVISO 較 RADs 在海岸附近(淺水區)有較多的資料，然而以兩種資料估算各驗潮站周圍海水面時間序列的相關係數皆約在 0.9 以上，表示兩資料間的趨勢非常一致，因此，造成差異量較大的另外一個原因可能為觀測時間涵蓋範圍較短，觀測時間僅 10 年(2002-2011 年)，標準偏差則較大，導致兩資料估算 SLR 速率的差異量較大，例如所有驗潮站中衛星測高 AVISO 與 RADs 估算馬祖驗潮站周圍的 SLR 速率差異量最大，主要因為馬祖驗潮站周圍所涵蓋的測高資料較少，如圖 3.2 所示。且淺水區的測高資料受到陸地反射波和改正模型較差外，導致兩測高資料估算馬祖驗潮站周圍  $2^{\circ}$  SLR 速率之差異量約 8 mm/yr，然而若將觀測時間延長至 19 年(1993-2011 年)，則兩測高資料估算馬祖驗潮站周圍  $2^{\circ}$  SLR 速率之差異量約 2 mm/yr，表示資料涵蓋時間長短亦對於估算 SLR 速率非常顯著影響。

圖 3.3-3.4 為比較不同範圍之衛星測高資料估算驗潮站周圍之 SLR 速率，其中 UHSLC 基隆(Keelung)與高雄(Kaohsiung)驗潮站分別以 KL2 與 KS2 表示。由圖可知，不同範圍之衛星測高資料估算臺灣周圍的 SLR 速率皆主要呈現上升趨勢，其中不同範圍之衛星測高資料估算 SLR 速率差異較大的測站分別為馬祖(MZ)、新竹(HSC)、台中港(TC)與宿霧(CB)驗潮站，宿霧驗潮站周圍有許多小島地形不利測高資料的擷取，因此 RADs 資料於宿霧驗潮站周圍  $2^{\circ}$  內範圍並無資料，而以 RADs 資料估算馬祖、新竹與台中港驗潮站的在範圍  $2^{\circ}$  與  $5^{\circ}$  SLR 速率之差異量約為 8~11 mm/yr，主要原因為三驗潮站皆位於臺灣海峽的淺水區，受到改正模型較差，且衛星測高觀測量較少導致 RADs 資料估算的 SLR 速率差異量較大。此外，由 AVISO 資料估算馬祖、新竹與台中港驗潮站的周圍  $2^{\circ}$  與  $5^{\circ}$  SLR 速率差異約為 6~7 mm/yr，與 RADs 差異量相比，不同範圍的 AVISO 估算 SLR 速率差異量較小，主要原因為臺灣海峽上 AVISO 資料較多。

本計畫使用不同範圍的衛星測高資料結合驗潮站資料進行地殼變動改正，並由估算的地殼變動速率之標準偏差評估何者範圍的衛星測

高資料較適用於估算驗潮站之地殼變動量。

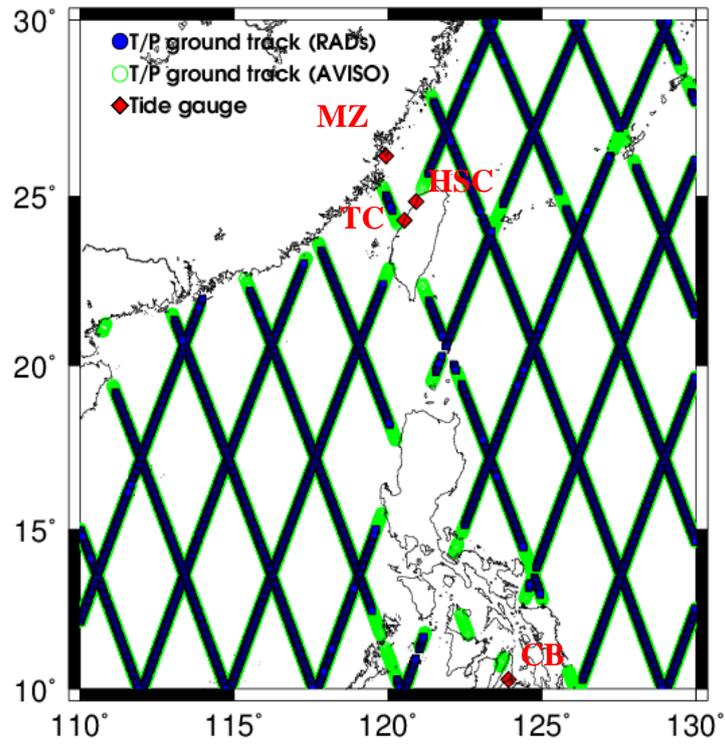


圖 3.2 馬祖(Mazu)、新竹(Hsinchu)、台中港(Taichung Port)與宿霧(Cebu)驗潮站位置與 T/P 測高資料之地面軌跡(RADs 及 AVISO 資料)

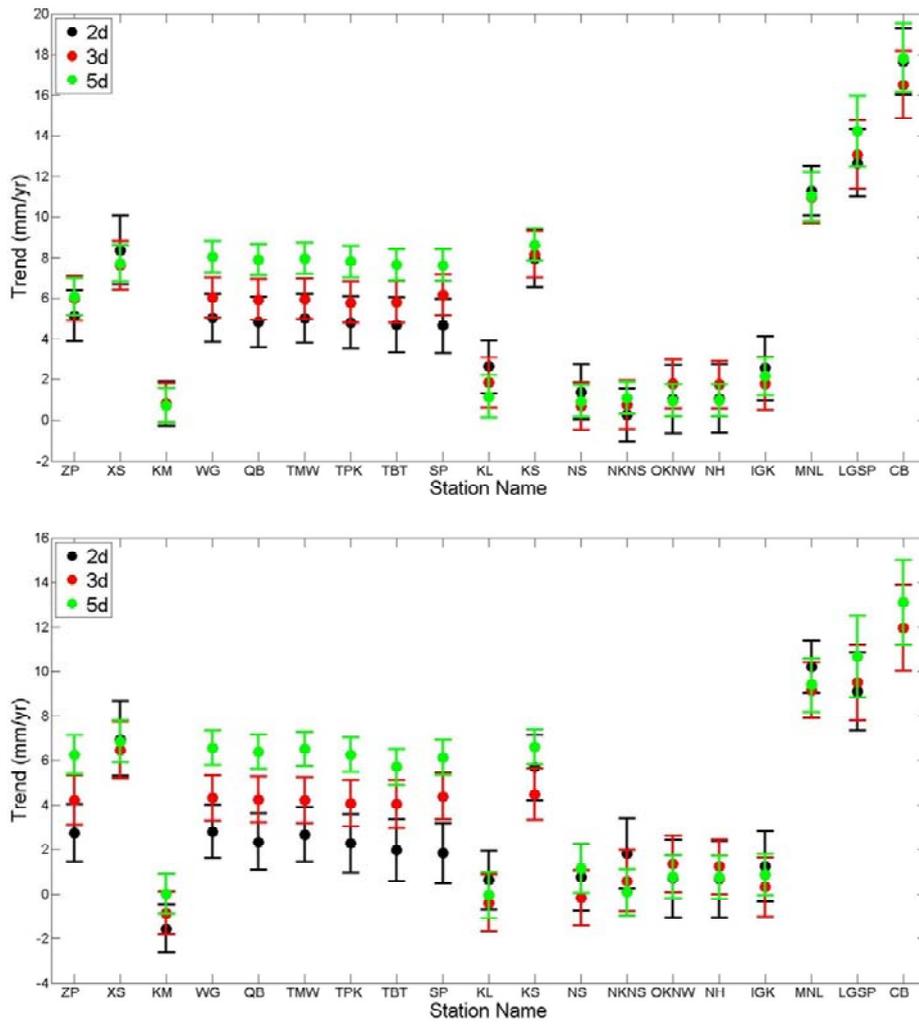


圖 3.3 PSMSL 驗潮站固定範圍之 SLR 速率(2d 為使用驗潮站周圍 2° 之衛星測高資料，3d 與 5d 以此類推)。上圖：AVISO 衛星測高，下圖：RADs 衛星測高

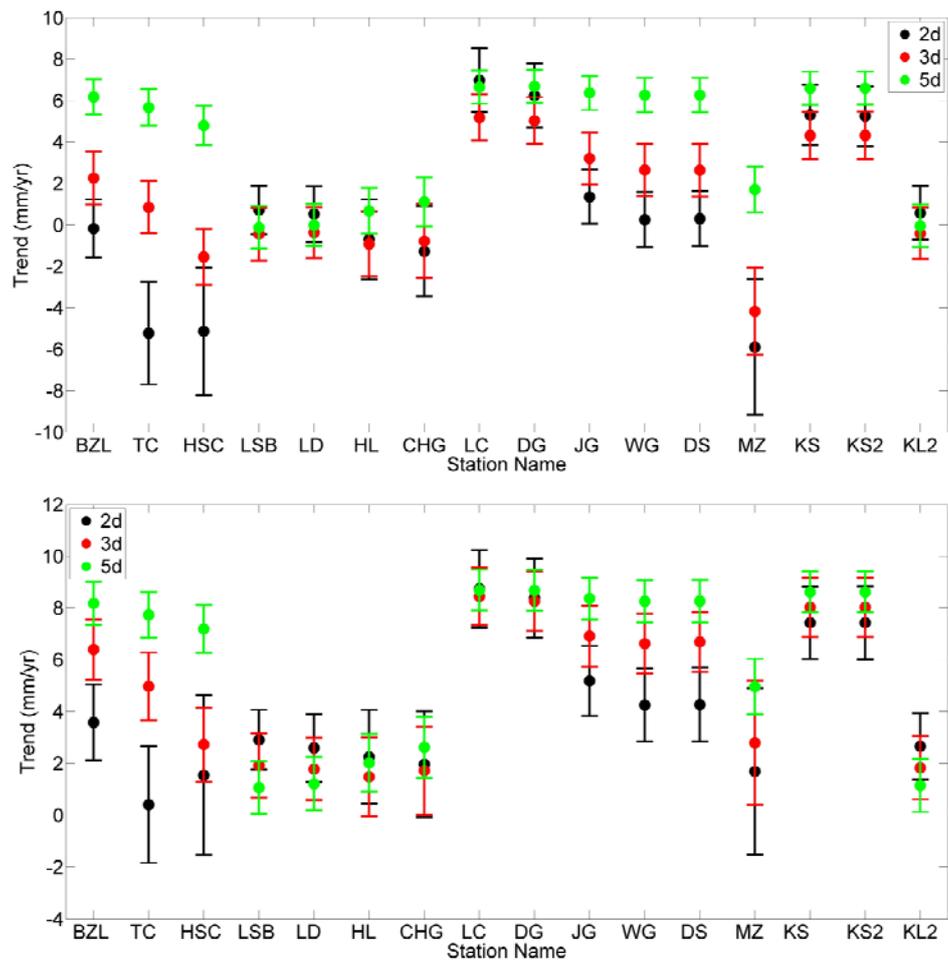


圖 3.4 USHLC 與 CWB 驗潮站固定範圍之 SLR 速率。上圖：AVISO 衛星測高，下圖：RADs 衛星測高

表 3.6 PSMSL 驗潮站固定範圍之 SLR 速率

Station Name	Trend(mm/yr)					
	AVISO			RADs		
	2°	3°	5°	2°	3°	5°
Zhapo	5.12±1.25	5.98±1.08	6.07±0.91	2.75±1.29	4.22±1.10	6.25±0.89
Xi Sha	8.36±1.70	7.62±1.22	7.72±0.90	6.98±1.69	6.47±1.27	6.87±0.94
Kanmen	0.80±1.09	0.84±0.96	0.71±0.86	-1.56±1.08	-0.84±0.96	0.02±0.89
Waglan Island	5.03±1.18	6.03±1.00	8.04±0.78	2.81±1.21	4.32±1.00	6.58±0.78
Quarry Bay	4.83±1.23	5.93±1.01	7.90±0.78	2.35±1.26	4.24±1.02	6.40±0.78
Tai Miu Wan	5.01±1.20	5.96±1.00	7.97±0.78	2.69±1.23	4.22±1.01	6.52±0.78
Tai Po Kau	4.81±1.28	5.79±1.02	7.81±0.78	2.28±1.32	4.07±1.03	6.26±0.78
Tsim Bei Tsui	4.69±1.35	5.81±1.04	7.65±0.78	1.98±1.38	4.05±1.05	5.70±0.81
Shek Pik	4.65±1.33	6.15±1.01	7.63±0.79	1.84±1.36	4.39±1.03	6.14±0.80
Keelung	2.64±1.31	1.84±1.23	1.15±1.03	0.64±1.32	-0.40±1.27	-0.05±1.03
Kaohsiung	7.96±1.44	8.16±1.14	8.64±0.79	5.68±1.48	4.48±1.15	6.62±0.80
Nase	1.38±1.36	0.69±1.15	0.92±0.79	0.76±1.50	-0.17±1.24	1.14±1.10
Nakano Sima	0.25±1.31	0.75±1.18	1.08±0.79	1.82±1.58	0.60±1.37	0.08±1.04
Okinawa	1.02±1.69	1.77±1.20	0.96±0.78	0.71±1.74	1.34±1.28	0.78±0.97
Naha	1.05±1.68	1.74±1.17	0.97±0.79	0.68±1.72	1.24±1.24	0.74±0.97
Ishigaki	2.56±1.58	1.79±1.31	2.16±0.92	1.24±1.59	0.32±1.32	0.87±0.93
Manila	11.28±1.22	10.96±1.26	11.00±1.21	10.22±1.19	9.17±1.25	9.39±1.21
Legaspi	12.65±1.68	13.09±1.69	14.22±1.75	9.10±1.75	9.50±1.70	10.68±1.84
Cebu	17.65±1.64	16.52±1.66	17.83±1.71	x	11.96±1.93	13.11±1.92

表 3.7 UHSLC 基隆與高雄驗潮站固定範圍之 SLR 速率

Station Name	Trend(mm/yr)					
	AVISO			RADs		
	2°	3°	5°	2°	3°	5°
Keelung	2.66±1.28	1.83±1.22	1.15±1.03	0.59±1.30	-0.40±1.26	-0.04±1.03
Kaohsiung	7.43±1.42	8.03±1.14	8.62±0.79	5.26±1.44	4.33±1.15	6.61±0.80

表 3.8 CWB 驗潮站固定範圍之 SLR 速率

Station Name	Trend(mm/yr)					
	AVISO			RADs		
	2°	3°	5°	2°	3°	5°
Boziliao	3.58±1.46	6.40±1.16	8.18±0.84	-0.17±1.41	2.27±1.28	6.18±0.85
Taichung Port	0.41±2.25	4.98±1.30	7.74±0.88	-5.22±2.48	0.86±1.26	5.67±0.88
Hsinchu	1.55±3.09	2.73±1.43	7.19±0.93	-5.13±3.08	-1.54±1.36	4.80±0.94
Linshanbi	2.91±1.16	1.92±1.25	1.07±1.01	0.72±1.17	-0.43±1.28	-0.12±1.03
Longdong	2.60±1.32	1.78±1.20	1.21±1.03	0.54±1.34	-0.36±1.23	-0.00±1.03
Hualien	2.25±1.81	1.48±1.51	2.02±1.11	-0.69±1.93	-0.91±1.57	0.68±1.11
Chenggong	1.97±2.05	1.72±1.71	2.62±1.17	-1.27±2.17	-0.78±1.79	1.12±1.18
Liuchiu	8.74±1.50	8.45±1.12	8.69±0.79	6.99±1.53	5.19±1.12	6.65±0.80
Donggang	8.38±1.51	8.27±1.14	8.68±0.79	6.24±1.55	5.04±1.13	6.70±0.80
Kaohsiung	7.43±1.41	8.03±1.14	8.62±0.79	5.31±1.45	4.32±1.15	6.60±0.80
Jiangjun	5.19±1.35	6.92±1.18	8.37±0.81	1.36±1.30	3.22±1.24	6.38±0.83
Wengang	4.26±1.41	6.63±1.15	8.26±0.83	0.26±1.33	2.66±1.27	6.27±0.84
Dongshi	4.27±1.42	6.69±1.16	8.27±0.83	0.30±1.34	2.65±1.27	6.27±0.84
Mazu	1.69±3.22	2.80±2.39	4.96±1.07	-5.89±3.28	-4.16±2.12	1.71±1.11

## 第四章 驗潮站資料改正

驗潮站所觀測之海水面變動量為水位相對於岸邊固定基準點之觀測值，基準點可能受地殼變動的影響而使驗潮站之觀測資料則含有自然之海水面變化與長期或短期之地殼變動資訊。若以未經修正過之驗潮資料估算 SLR 速率時，則需進行地殼變動之改正，此外，還需改正海潮和 IB 等天體引力及氣象因子以及人為造成之偏移量。因此本章分別說明海潮效應、IB 效應、資料偏移量與地殼變動速率之改正，以及各驗潮站資料的詳細改正步驟，並於第五章比較改正前後之 SLR 速率成果，以精確推算臺灣海域 SLR 速率之特性。

### 4.1 海潮改正

潮汐是由於天體相對運動引起的引潮力所造成，不同的引潮力可對應至特定的潮汐週期，不同的潮汐週期稱之為分潮，理論上潮汐包括無限多的分潮成份，但應用上只就主要分潮進行分析。本計畫採用 37 個目前普遍使用之分潮(請參閱附錄三)，其應能涵蓋大部分引潮力之影響，並利用目前最常使用的調和分析法(Harmonic analysis) (Franco, 1988)推算各分潮之特性，調和分析法為將潮汐視為各週期分潮的總和，公式如下：

$$TG(t) = a_0 + a_1 t + \sum_{i=1}^{37} [A_i \sin(\omega_i t) + B_i \cos(\omega_i t)] \quad (4.1)$$

其中

$TG$ : 每 6 分鐘記錄一筆潮位高度的時間序列

$t$ : 時間

$a_0$ 、 $a_1$ 、 $A_i$ 、 $B_i$ : 未知參數，其中為  $a_0$  與  $a_1$  分別為時間序列之偏移量與斜率

$\omega_i$ : 各分潮之頻率，37 個分潮的週期請參閱附錄三

本計畫以最小二乘法(Least-Square method)求解式(4.1)中未知參數，並將擬合的高頻訊號(週期 < 28 天)自驗潮站資料中移除，以降低日後推算 SLR 速率的標準偏差的變動。然而若驗潮站資料中有包含  $n$  個基準不一致之偏移量，則在調和分析法(如式(4.1))中加上  $n$  個步階函數  $a_i$ ，以避免偏移量影響海潮效應之改正，公式改寫如下，

$$TG(t) = a_0 + a_1 t + \sum_{i=1}^{37} [A_i \sin(\omega_i t) + B_i \cos(\omega_i t)] + \sum_{i=2}^{n+1} a_i \quad (4.2)$$

以 CWB 高雄驗潮站為例(如下圖所示)，由該驗潮站資料可明顯看出資料中包含 1 個偏移量，因此利用式(4.2)進行海潮改正。經移除擬合之高頻訊號海潮分量後，顯示低頻訊號(週期 > 182 天)。

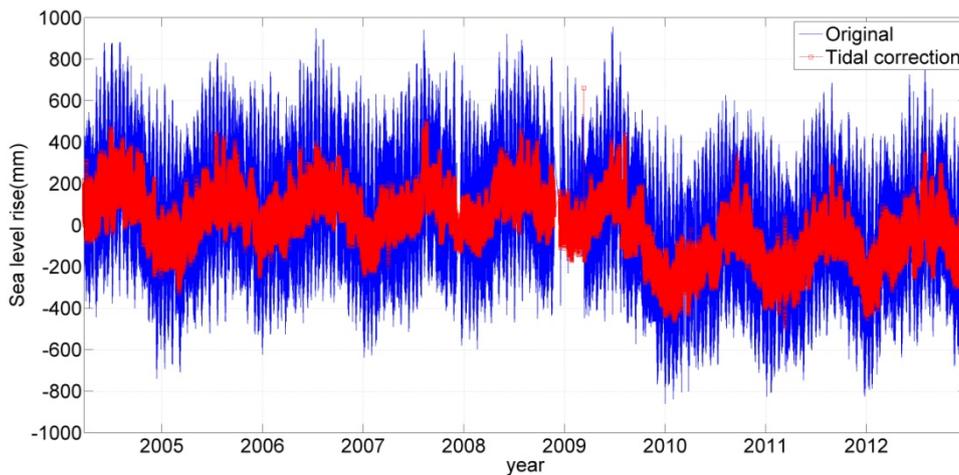


圖 4.1 海潮改正前後之高雄驗潮站資料差異圖

## 4.2 逆氣壓改正

### 4.2.1 逆氣壓效應之改正

以往海水面變化的研究中，並不對驗潮站資料進行 IB 效應改正，然而除了熱帶和西邊界流(western boundary current)等區域外，海洋各

處海水面變化皆受到大氣壓力的影響[Wunsch and Stammer, 1997]，故本計畫驗潮站資料皆進行 IB 改正。一般而言，當地氣壓升高 1 mbar，則海水面高度約降 1.01 cm [Chelton and Enfield, 1986]。IB 改正(單位:公釐)公式如下所示：

$$IB = -9.948 \times (P_{atm} - P) \quad (4.3)$$

其中  $P_{atm}$  為海水表面壓力 (單位為毫巴)， $P$  為隨時間變化之全球海水表面平均壓力，尺度因子 9.948 為中緯度之經驗值 [Wunsch, 1972]。

IB 改正公式中(式(4.3))的  $P$  為隨時間變化之全球海水表面平均壓力，其目的為使全球平均氣壓變化之斜率的影響降到最低。本計畫使用的驗潮站資料分別為 PSMSL 月平均資料、UHSLC 日平均資料與 CWB 的每 6 分鐘平均之資料，因此需分析 IB 效應與不同時間週期  $P$  之影響程度。

本計畫利用 ECMWF 資料估算臺灣附近驗潮站的 IB 效應，並分析採用不同時間週期  $P$  (6 小時、日及月平均全球海水面平均壓力)對 IB 效應改正之影響，ECMWF 資料涵蓋時間為 1980-2012 年。由結果可知，基隆與高雄驗潮站的三種利用不同平均時間  $P$  所計算之 IB 效應改正皆相當吻合，三種數據間之相關係數皆為 1，表示不同時間週期對於臺灣周圍的 IB 效應影響甚小，如圖 4.2 所示，因此本計畫於 PSMSL、UHSLC 與 CWB 驗潮站資料皆使用月平均全球海水表面平均壓力變化於 IB 改正的過程。然而 CWB 海水面壓力資料僅分佈於臺灣本島之觀測數據，無法計算全球海水面平均壓力資料，因 ECMWF 與 NCEP 全球海水面平均氣壓非常一致(如圖 4.3 所示)，相關係數約 0.96，因此採用 ECMWF 全球海水面平均壓力作為 CWB 海水面氣壓資料之  $P$ 。另外，PSMSL 驗潮站資料為月平均資料，故 IB 改正之  $P_{atm}$  則為月平均資料；而 UHSLC 與 CWB 驗潮站資料之 IB 改正則使用日平均資料。圖 4.4 為利用 ECMWF 海水面氣壓資料進行高雄驗潮站之 IB 改正成果。

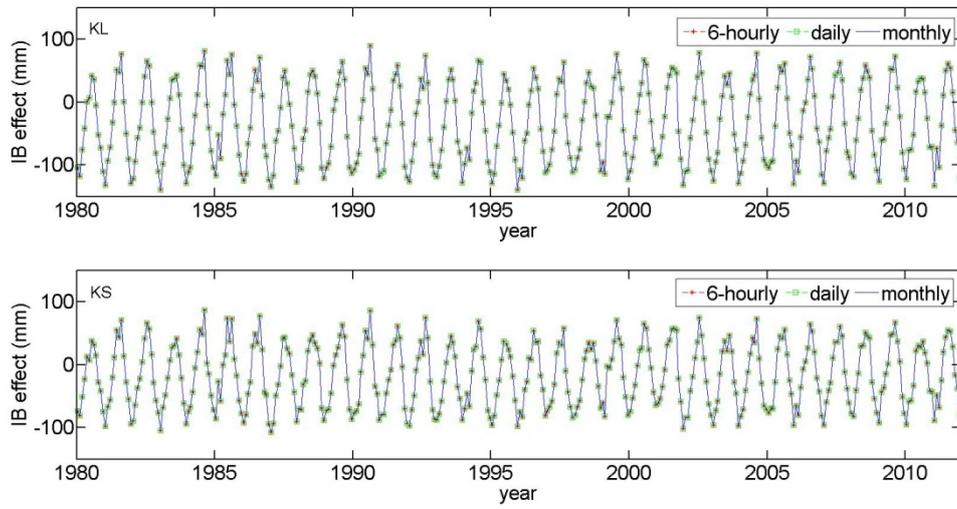


圖 4.2 IB 效應改正量。P 值分別採用 ECMWF 6 小時、日或月平均海水面壓力

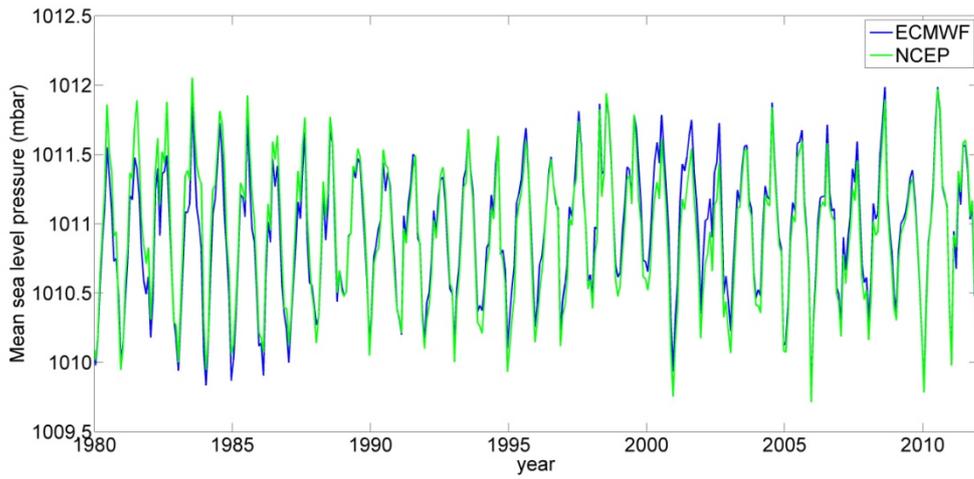


圖 4.3 ECMWF 與 NCEP 全球月平均海水面平均壓力

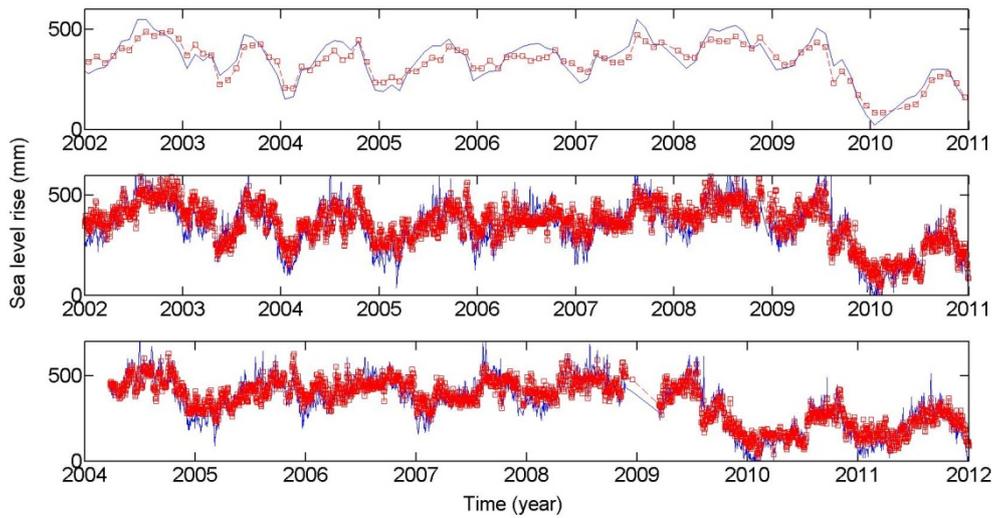


圖 4.4 高雄驗潮站之 IB 效應改正。上：PSMSL 高雄驗潮站，中：UHSLC 高雄驗潮站，下：CWB 高雄驗潮站

#### 4.2.2 臺灣周圍之逆氣壓效應

本計畫中海水面氣壓資料來源為 ECMWF、NCEP 與 CWB 資料中心，其中 ECMWF 與 NCEP 資料中心提供為模型網格資料，網格解析度分別為 0.5 度及 2.5 度，CWB 為各測站之實測資料，故需雙線性內插法將 ECMWF 與 NCEP 氣壓資料內插至 CWB 氣壓觀測站位置，再分別計算三種資料間(ECMWF 與 NCEP (I)、ECMWF 與 CWB (II)、NCEP 與 CWB (III))之相關係數，如表 4.1 所示，由表可知，各海水面氣壓資料之相關係數皆趨近於 1，結果顯示具有一致性。

表 4.1 各海水面氣壓資料間之相關係數

Station ID.	Station name	I	II	III
466880	Banqiao	1.00	1.00	0.99
466900	Tamsui	1.00	0.99	0.99
466920	Taipei	1.00	1.00	0.99
466930	Jhuzihhu	1.00	0.99	0.99
466940	Keelung	1.00	0.99	0.99
466950	Pengjia Island	1.00	0.99	0.99
466990	Hualien	1.00	0.99	0.99
467060	Su'ao	1.00	0.99	0.99
467080	Yilan	1.00	0.99	0.99
467110	Kinmen	1.00	1.00	0.99
467300	Dongjidao	1.00	0.99	0.99
467350	Penghu	1.00	0.99	0.99
467410	Tainan	1.00	0.99	0.99
467420	Yongkang	1.00	0.95	0.95
467440	Kaohsiung	1.00	0.99	0.99
467480	Chiayi	0.99	0.99	0.99
467490	Taichung	1.00	0.99	0.98
467540	Dawu	1.00	0.99	0.98
467571	Hsinchu	1.00	0.99	0.99
467590	Hengchun	1.00	0.99	0.99
467610	Chenggong	1.00	0.99	0.98
467620	Lanyu	1.00	0.99	0.98
467660	Taitung	1.00	0.99	0.98
467770	Wuqi	1.00	0.99	0.98
467780	Qigu	1.00	0.96	0.97
467990	Mazu	1.00	1.00	0.98

本計畫計算之近十年（2002-2011）海水面變化時間內，2009年8月8日之莫拉克(Morakot)颱風造成最大氣壓改變，也形成最大IB改正。表4.2顯示IB效應之最大影響量，PSMSL的 $P_{atm}$ 為月平均資料，因此IB效應的高頻訊號已降低，臺灣周圍各PSMSL驗潮站受到IB效應之最大影響量為5-18公分，但熱帶區域受IB效應則較不顯著，如菲律賓的馬尼拉(Manila)、黎牙實比(Legaspi)與宿霧(Cebu)受到IB效應之最大影響量約為5-7公分。UHSLC與CWB之 $P_{atm}$ 為日平均資料，其含有高頻的壓力變化，驗潮站的IB效應之最大影響量所發生時間皆為2009年8月8日，當時臺灣正受到莫拉克(Morakot)颱風侵襲，IB效應之最大影響量約為27-43公分。

表 4.2 各驗潮站之最大 IB 效應分析

(a) PSMSL

Station Name	Maximum IB effect (mm)		
	ECMWF	NCEP	CWB
Zhapo	122.1	115.5	x
Xi Sha	84.3	80.9	x
Kanmen	180.4	166.6	x
Waglan Island	117.5	111.6	x
Quarry Bay	118.4	113.1	x
Tai Miu Wan	117.4	112.1	x
Tai Po Kau	126.6	119.7	x
Tsim Bei Tsui	127.6	120.4	x
Shek Pik	118.1	112.5	x
Keelung	138.8	129.8	127.4
Kaohsiung	107.2	106.1	99.0
Nase	135.4	132.0	x
Nakano Sima	127.8	123.8	x
Okinawa	127.2	124.4	x
Naha	127.8	124.9	x
Ishigaki	120.0	114.2	x
Manila	64.5	67.8	x
Legaspi	63.3	62.1	x
Cebu	49.4	49.2	x

(b) UHSLC

Station Name	Maximum IB effect (mm)		
	ECMWF	NCEP	CWB
Keelung	343.8	306.6	373.1
Kaohsiung	278.7	281.2	309.6

(c) CWB

Station Name	Maximum IB effect (mm)		
	ECMWF	NCEP	CWB
Bozilio	303.3	295.0	348.9
Taichung Port	334.7	302.3	376.6
Hsinchu	355.1	310.0	368.1
Linshanbi	351.3	301.3	362.4
Longdong	338.7	308.6	373.1
Hualien	318.7	294.0	429.9
Chenggong	322.3	281.3	423.0
Liuchiu	276.5	272.9	309.6
Donggang	281.5	276.9	309.6
Kaohsiung	278.8	281.1	309.6
Jiangjun	283.3	290.3	324.0
Wengang	295.4	293.1	348.9
Dongshi	294.5	292.8	348.9
Mazu	299.9	268.4	313.7

由於海水面受到氣壓變化影響，造成海水面起伏不定，經 IB 改正後，海水面回復平穩，因此 IB 效應之改正會降低海水面變化時間序列的標準偏差，為評估 IB 效應於驗潮站資料之改正特性，本研究以 ECMWF 之資料進行改正之分析。圖 4.5 顯示，改正後除了中國大陸沿岸的驗潮站標準偏差變大外，其他驗潮站標準偏差皆變小，表示不同區域的 IB 改正成果不完全相同，ECMWF 氣壓資料在大陸地區表現較差。另外，本研究分別應用 ECMWF、NCEP 與 CWB 氣壓資料進行各驗潮站 IB 改正，改正後之 SLR 速率估算結果如表 4.3 所示，表中是以任兩種氣壓資料估算改正前後之 SLR 速率差異量(I: ECMWF 與 NCEP、II: ECMWF 與 CWB 和 III: NCEP 與 CWB)。表 4.3 中 PSMSL 與 UHSLC 各驗潮站資料之差異量平均值分別為 0.11-0.16 mm/yr 和 0.10-0.13 mm/yr，而 CWB 驗潮站資料應用 ECMWF 與 NCEP(例 I)氣壓資料改正前後之差異量平均值為 0.13 mm/yr，例 II 與 III 之差異量平均值約為 0.6 mm/yr，相較於例 I 之差異量則偏大，主要原因為 ECMWF 與 NCEP 氣壓資料並無缺漏資料之情形，而 CWB 氣壓資料涵蓋時間長短不一，且資料缺漏多寡不一，因此改正前後可能產生較大之差異。例 II 與例 III 中差異量最大值為將軍與馬祖驗潮站，差異量分別為 1.82 mm/yr 與 1.75 mm/yr，兩驗潮站資料涵蓋時間分別為 2002/01-2011/12 與 2004/01-2011/12，而相對應時間之 CWB 氣壓資料之起始時間則分別為 2002/08 與 2004/08，缺漏海水面氣壓資料皆約 8 個月。若移除上述之差異值，其差異量平均值可降至約 0.4 mm/yr，最大差異量約在 1 mm/yr 以下。

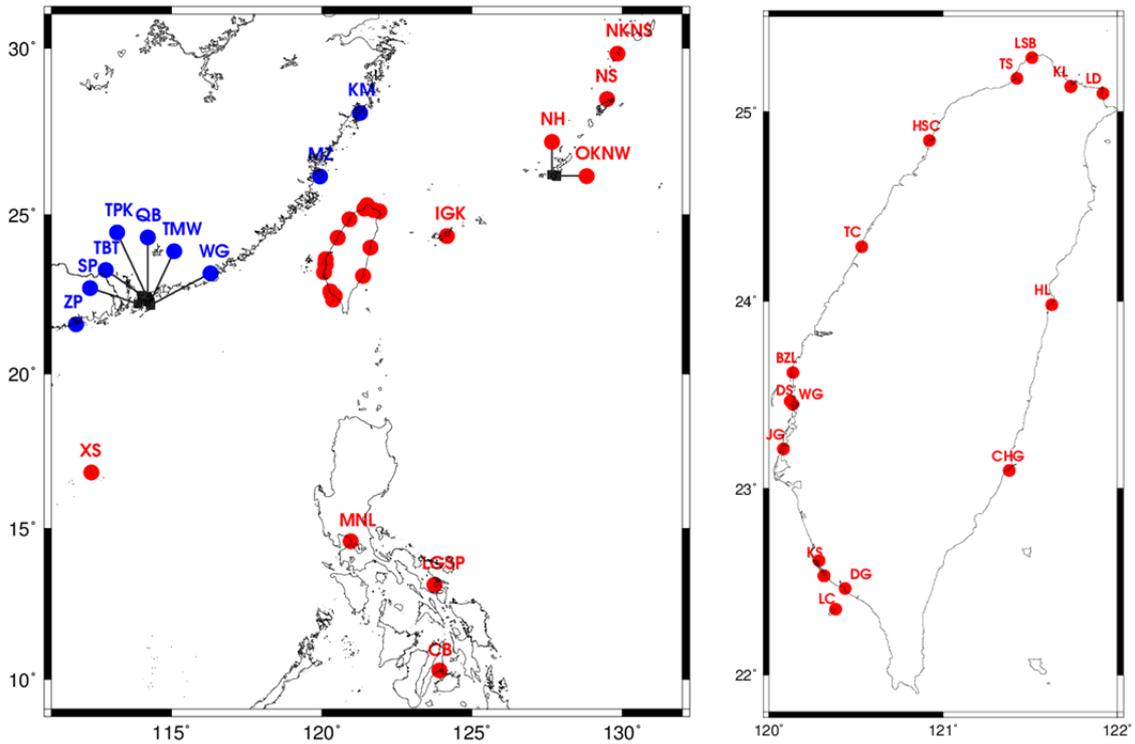


圖 4.5 驗潮站資料進行 IB 效應改正後的影響(藍色表示改正後標準偏差增大；紅色則為標準偏差降低)

表 4.3 統計各驗潮站資料應用不同氣壓資料進行 IB 改正後估算 SLR 速率之差異量

Data	Item	The difference between the two trends (mm/yr)		
		I	II	III
PSMSL	Max	0.34	0.25	0.13
	Min	0.02	0.02	0.08
	Mean	0.16	0.14	0.11
UHSLC	Max	0.13	0.24	0.11
	Min	0.06	0.02	0.08
	Mean	0.10	0.13	0.10
CWB	Max	0.61	2.09	1.82
	Min	0.00	0.03	0.03
	Mean	0.13	0.62	0.57

### 4.3 偏移量改正

驗潮站在使用一段時間後因需要進行調整儀器、設備維修或遷站等情形，因無按照規定進行基準重新測量，將造成資料基準不一致，因此需檢查驗潮站資料是否有基準偏移之情形。本研究為了降低其他

訊號影響偏移量之偵測，除了將上述已提到的海潮效應與 IB 效應自驗潮站資料中移除外，還結合衛星測高資料移除海水面變化訊號，估算出地殼變動與可能的人為偏移量之訊號，公式如下所示，

$$u(\lambda, \varphi, t) = g(\lambda, \varphi, t) - TG(\lambda, \varphi, t) \quad (4.4)$$

其中  $\varphi$  緯度， $\lambda$  為經度， $TG$  為驗潮站資料， $g$  為測高資料， $t$  為時間。將時間序列  $u$  進行 Haar 小波分解(Wavelet decomposition)萃取出高頻訊號，分析高頻訊號是否具有短時間內之突然變化(spike)，若有此情形，表示該資料中可能含有人為或地震造成之偏移情形。圖 4.6 為利用 Haar 小波分解經由公式 (4.4) 處理後之 PSMSL 高雄驗潮站資料，共分解出 4 個高頻訊號(d1-d4)，由圖可知，d1-d4 層皆偵測出訊號中有 3 個突然降低之現象(如圖 4.6 中紅框所示)表示該資料應含有 3 個偏移量。利用上述方式偵測出有偏移量情形的驗潮站分別為 PSMSL 與 UHSLC 的基隆驗站以及 PSMSL、UHSLC 與 CWB 的高雄驗潮站。

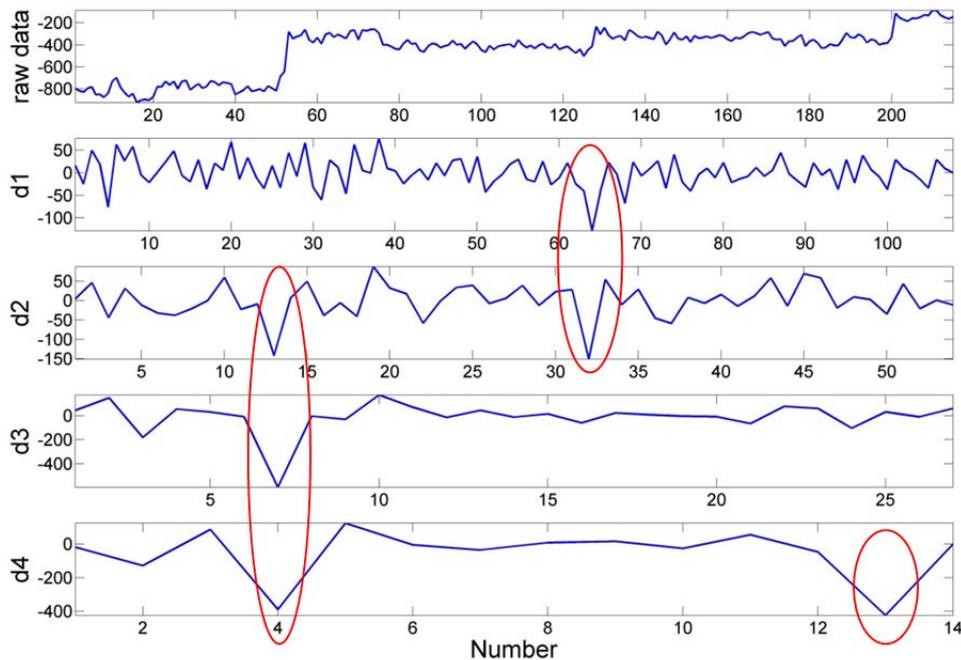


圖 4.6 改正後 PSMSL 高雄驗潮站資料之小波分解訊號

本研究偏移量校正方式可分為兩種方法，方法 I 為將包含海水面變

化與地殼變動的訊號以六參數加上步階函數(step function)進行驗潮站資料擬合並改正之，其公式如下所示：

$$TG(t) = a_0 + bt + c \sin(2\pi t) + d \cos(2\pi t) + e \sin(4\pi t) + f \cos(4\pi t) + \sum_{i=1}^n a_i \quad (4.5)$$

其中  $n$  為偏移量個數， $TG$  為驗潮站資料時間序列， $a_0$  為偏差， $b$  為 SLR 速率， $c$  和  $e$  分別為年訊號和半年訊號之正弦振幅， $d$  和  $f$  分別為年訊號和半年訊號餘弦之振幅， $t$  為時間。以 PSMSL 高雄驗潮站為例，全部時間段資料共有 3 個偏移量，而在 2002-2011 年間含有 2 個偏移量，因此僅改正 2002-2011 年間的偏移量，圖 4.7 為利用六參數(方法 I)加上步階函數將包含海水面變化與地殼變動的訊號進行偏移量改正。

方法 II 為在改正偏移量前，先降低其他可能會影響偏移量改正之訊號，除了將上述已提到的海潮效應與 IB 效應自驗潮站資料中移除外，並利用衛星測高資料消除海水面變化訊號，估算出主要包含地殼變動訊號與偏移量之時間序列  $u$  (如式(4.4)所示)。地殼變動的時間序列  $u$  主要包含偏差量與地殼變動的斜率訊號 (假設為線性變化)，故使用二參數加上步階函數  $a_i$  擬合並改正之，公式如下所示，

$$u(t) = a_0 + b't + \sum_{i=1}^n a_i \quad (4.6)$$

其中  $a_0$  為偏差， $b'$  為地殼變動速率。以 PSMSL 高雄驗潮站為例，圖 4.7 為利用二參數(方法 II)加上步階函數將包含地殼變動與偏移量的訊號進行偏移量改正，並且將擬合的偏移量改正回驗潮站資料中。

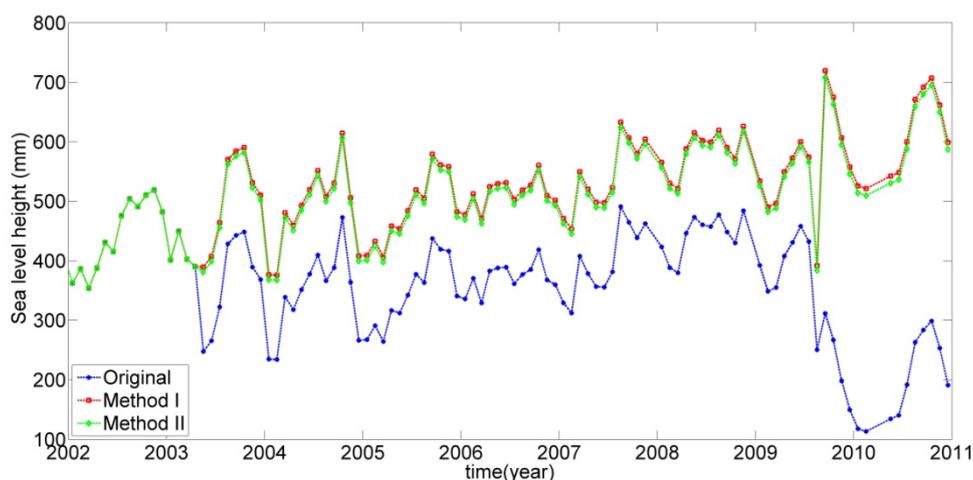


圖 4.7 PSMSL 高雄驗潮站資料之偏移量改正

## 4.4 地殼變動改正

本節為估算臺灣附近驗潮站周圍的地殼表面垂直變動速率並對驗潮站資料進行改正以精確推估海水面變化特性，各小節內容依序介紹如下：4.4.1 節將說明結合衛星測高與驗潮站資料估算地殼變動速率之方式；4.4.2 節為估算臺灣附近驗潮站的地殼變動速率之空間特性，4.4.3 小節為將估算地殼變動之結果與現有 GPS 和水準資料之估算值相比較。經由地殼變動改正後之驗潮站水位，即可估算臺灣海域之 SLR 變動趨勢。

### 4.4.1 地殼垂直變動速率

衛星測高觀測量為絕對值，其海水面高度為相對於參考橢球之觀測值，因此該觀測量不受固體地球形變之影響，但是驗潮站所量測之海水面高度則是相對於陸地上固定參考點之觀測值，其觀測量中包含地殼變動訊號，因此結合驗潮站記錄與衛星測高資料即可求得該驗潮站之地殼表面垂直變動量(如式(4.4)所示)。本研究使用之驗潮站中，以馬尼拉測站之地殼變動訊號最為明顯(如圖 4.8 所示)，比較 1993-2011 年 AVISO 衛星測高和 PSMSL 驗潮站資料，由其差值之時變特性可知，馬尼拉驗潮站周圍有明顯地殼下陷情形，其量值約為 10 mm/yr。因地

殼變動的時間序列資料 $u$ 主要包含偏差量 $a$ 與地殼變動的斜率訊號 $b'$ ，因此地殼變動速率之推算則應用二參數擬合估算之，公式如下所示

$$u(t) = a + b't \quad (4.7)$$

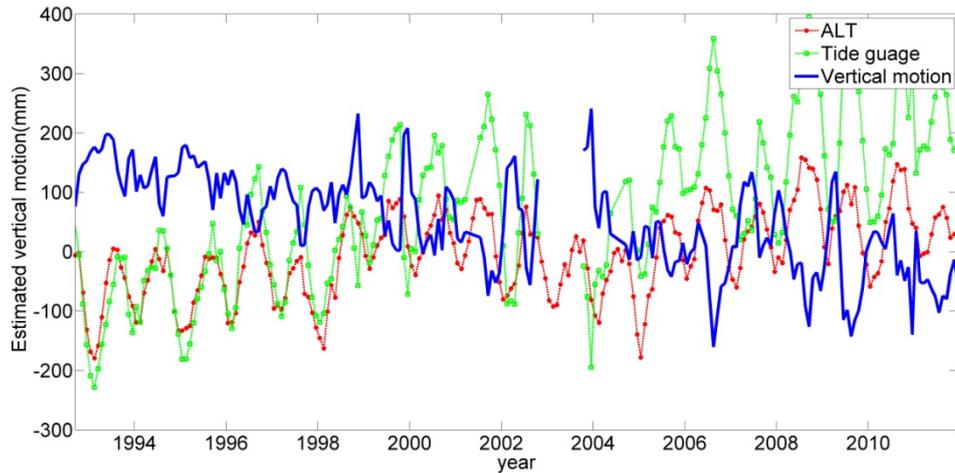


圖 4.8 馬尼拉驗潮站之地殼表面垂直變動訊號。ALT 表示 AVISO 衛星測高之海水面高

#### 4.4.2 2002-2011 地殼變動速率

本小節中將依照計劃選定的十年期(2002-2011)估算地殼變動速率，而在本小節之後的所有驗潮站資料皆已進行海潮改正、IB 改正與偏移量等改正。本研究使用的驗潮站資料包含 PSMSL 資料 19 個測站、UHSLC 資料 2 個測站與 CWB 資料 14 個測站，其中 PSMSL 與 UHSLC 基隆驗潮站資料，以及 PSMSL、UHSLC 與 CWB 高雄驗潮站資皆需進行資料基準偏移量改正，為了比較使用不同偏移量改正方法之結果，因此將僅進行海潮效應與 IB 效應改正的驗潮站資料所估算地殼變動成果列於表 4.4 與表 4.7 中，而將進行海潮改正、IB 改正以及偏移量改正的驗潮站資料估算之地殼變動成果分別列於表 4.5、表 4.6 與表 4.8 中。表 4.4 中結合驗潮站資料與不同範圍之 AVISO 資料所估算的地殼變動速率基本相似(大部分差異量小於標準偏差)，差異量平均值約為 1 mm/yr，其中大廟灣(Tai Miu Wan)驗潮站的差異量最大，2°與 5°估算的地殼變動速率差值約 4 mm/yr，然而比較不同範圍的地殼變動訊號之時

間序列可知(如圖 4.9 所示)，曲線間變化非常一致，但不同範圍間的時間序列之振幅有些差異，並且資料涵蓋時間段較短，標準偏差較大，造成估算此驗潮站地殼變動速率較不一致。表 4.4 中結合驗潮站資料與不同範圍之 RADs 資料所估算的地殼變動速率亦基本相似(大部分差異量小於標準偏差)，差異量平均值亦約為 1 mm/yr，其中大廟灣驗潮站的差異量亦為最大， $2^\circ$  與  $5^\circ$  估算的地殼變動速率差值約 4 mm/yr，然而比較地殼變動訊號的時間序列亦可知(如圖 4.9 所示)，曲線間變化非常一致，但不同範圍間的時間序列之振幅有些差異，且資料涵蓋時間段較短，造成估算此驗潮站地殼變動速率較不一致。

表 4.7 中結合 CWB 驗潮站資料與不同範圍的 AVISO 資料估算的地殼變動速率基本相似(大部分差異量小於標準偏差)，差異量平均值約 2 mm/yr，其中台中港(Taichung Port)驗潮站差異量最大， $2^\circ$  與  $5^\circ$  估算的地殼變動速率差值約 10 mm/yr，然而比較地殼變動訊號的時間序列可知(如圖 4.10 所示)，雖然曲線間趨勢變化非常一致，但  $2^\circ$  地殼變動訊號震盪很大，因為該驗潮站周圍  $2^\circ$  內測高資料較少(如圖 3.2 所示)，導致測高觀測海水面變化之時間序列震盪較大，並且資料涵蓋時間段較短，標準偏差較大，導致估算此驗潮站地殼變動速率差異量較大。而表 4.7 中結合驗潮站資料與不同範圍的 RADs 資料所估算的地殼變動速率亦基本相似，但相較於 AVISO 估算的地殼變動速率之差異量，RADs 資料差異量較大，差異量平均值約 3 mm/yr，主要原因為 RADs 資料在近岸處較少，導致不同範圍間測高衛星 RADs 資料估算的 SLR 差異量較大(詳細內容請參見第三章)，其中不同範圍估算地殼變動速率最大差異量的驗潮站與 AVISO 結果相同，皆為台中港驗潮站， $2^\circ$  與  $5^\circ$  估算的地殼變動速率差異量約為 13 mm/yr，然而比較地殼變動訊號的時間序列亦可發現(如圖 4.10 所示)，曲線間趨勢為一致的，但  $2^\circ$  地殼變動訊號震盪很大，並且資料涵蓋時間段較短，造成估算此驗潮站地殼變動速率差異量較大。

表 4.4 PSMSL 驗潮站之地殼變動速率

Station Name	Trend(mm/yr)					
	AVISO-TG			RADs-TG		
	2°	3°	5°	2°	3°	5°
Zhapo	2.03±2.20	2.75±2.54	2.64±3.10	-0.40±2.32	0.42±2.63	1.68±3.80
Xi Sha	0.04±1.25	0.59±1.60	-0.55±2.32	-1.34±1.24	-0.53±1.52	-0.23±1.98
Kanmen	-4.73±2.96	-4.73±3.06	-4.89±3.14	-7.11±3.02	-6.44±3.13	-5.74±3.29
Waglan Island	-2.22±3.85	-1.14±4.18	0.69±4.84	-4.42±3.85	-2.83±4.20	-1.09±4.93
Quarry Bay	-0.88±2.44	0.02±3.01	1.92±3.54	-3.39±2.44	-1.69±3.02	0.00±3.65
Tai Miu Wan	-3.84±3.01	-2.55±3.41	-0.06±4.03	-6.20±2.97	-4.33±3.40	-1.83±4.11
Tai Po Kau	0.34±2.31	1.03±3.03	3.06±3.52	-2.24±2.30	-0.72±3.04	1.13±3.61
Tsim Bei Tsui	-5.98±2.13	-4.51±2.72	-2.88±3.07	-8.72±2.11	-6.27±2.71	-4.84±3.12
Shek Pik	0.98±1.80	2.05±2.54	3.40±2.97	-1.84±1.75	0.28±2.55	1.55±3.10
Nase	1.37±1.39	0.83±1.49	0.93±1.52	0.77±1.10	0.35±1.18	0.86±1.50
Nakano Sima	-3.38±1.24	-2.79±1.36	-2.65±1.43	-2.26±1.67	-3.00±1.67	-3.57±1.58
Okinawa	-0.12±1.37	0.63±1.50	-0.21±1.56	-0.47±1.41	0.10±1.52	-0.55±1.67
Naha	-2.15±1.31	-1.42±1.47	-2.15±1.54	-2.55±1.35	-2.02±1.47	-2.57±1.64
Ishigaki	-0.73±1.55	-1.69±1.80	-0.82±1.98	-2.34±1.54	-3.18±1.81	-2.12±1.98
Manila	-11.89±2.47	-12.27±2.35	-13.48±2.34	-13.05±2.43	-14.20±2.38	-15.18±2.36
Legaspi	5.76±1.63	6.02±1.66	7.35±1.73	3.13±1.70	2.85±1.64	4.18±1.79
Cebu	7.59±1.48	5.66±1.27	7.09±1.42	x	0.61±1.52	2.08±1.61

表 4.5 PSMSL 基隆與高雄驗潮站之地殼變動速率

Station Name	Trend(mm/yr)					
	AVISO-TG			RADs-TG		
	2°	3°	5°	2°	3°	5°
Keelung (Method I)	-3.67±2.74	-4.41±2.54	-3.90±2.44	-5.45±2.72	-6.86±2.52	-5.15±2.41
Keelung (Method II)	-3.67±2.74	-4.41±2.54	-3.90±2.44	-5.45±2.72	-6.86±2.52	-5.15±2.41
Kaohsiung (Method I)	-11.97±2.03	-11.64±1.78	-9.79±1.47	-14.69±2.16	-14.76±1.88	-11.71±1.50
Kaohsiung (Method II)	-11.47±2.02	-11.86±1.78	-8.80±1.47	-13.71±2.15	-14.24±1.87	-11.03±1.50

表 4.6 UHSLC 基隆與高雄驗潮站之地殼變動速率

Station Name	Trend(mm/yr)					
	AVISO-TG			RADs-TG		
	2°	3°	5°	2°	3°	5°
Keelung (Method I)	-3.59±2.72	-4.43±2.54	-3.94±2.44	-5.47±2.71	-6.87±2.53	-5.19±2.42
Keelung (Method II)	-3.59±2.72	-4.43±2.54	-3.94±2.44	-5.47±2.71	-6.87±2.53	-5.19±2.42
Kaohsiung (Method I)	-12.26±1.99	-11.65±1.80	-9.78±1.47	-14.86±2.11	-14.79±1.91	-11.68±1.50
Kaohsiung (Method II)	-9.88±2.06	-11.30±1.91	-8.59±1.57	-13.76±2.10	-14.47±1.90	-11.41±1.50

表 4.7 CWB 驗潮站之地殼變動速率

Station Name	Trend(mm/yr)					
	AVISO-TG			RADs-TG		
	2°	3°	5°	2°	3°	5°
Boziliao	-27.59±3.27	-24.28±3.40	-20.99±2.44	-32.62±3.22	-29.98±3.55	-23.71±2.45
Taichung Port	-4.79±4.61	0.70±3.99	4.89±3.43	-11.09±5.20	-4.25±4.15	2.22±3.51
Hsinchu	9.26±4.53	10.33±3.25	14.86±2.79	1.97±4.77	6.06±3.31	12.46±2.85
Linshanbi	-19.00±1.94	-20.50±1.93	-20.74±1.58	-20.98±1.99	-22.85±1.99	-21.93±1.58
Longdong	0.72±1.49	-0.08±1.37	-0.55±1.15	-1.31±1.53	-2.21±1.39	-1.79±1.14
Hualien	-6.78±3.77	-7.51±3.36	-6.12±2.70	-9.90±3.96	-9.99±3.43	-7.39±2.72
Chenggong	8.04±2.82	7.87±2.34	8.69±1.79	4.84±2.94	5.37±2.44	7.24±1.82
Liuchiu	5.78±1.79	5.46±1.47	5.41±1.19	3.38±1.87	2.38±1.48	3.38±1.19
Donggang	-0.55±2.38	0.83±2.04	1.29±1.58	-3.94±2.58	-3.14±2.13	-1.36±1.61
Jiangjun	-2.08±1.85	-0.16±1.95	1.33±1.45	-5.75±1.86	-3.97±2.05	-0.77±1.48
Wengang	-38.87±3.39	-36.09±3.49	-33.92±2.85	-42.84±3.45	-40.28±3.63	-36.09±2.90
Dongshi	-9.10±3.05	-6.60±3.09	-5.27±2.79	-12.75±3.10	-10.55±3.22	-7.28±2.82
Mazu	44.62±7.89	47.80±6.50	48.71±6.12	36.89±7.67	38.42±5.79	44.56±5.96

表 4.8 CWB 高雄驗潮站的地殼變動速率

Station Name	Trend(mm/yr)					
	AVISO-TG			RADs-TG		
	2°	3°	5°	2°	3°	5°
Kaohsiung (Method I)	4.50±2.42	5.24±2.20	5.78±1.88	1.50±2.63	0.85±2.40	3.28±1.95
Kaohsiung (Method II)	9.15±2.39	6.56±2.20	8.47±1.87	7.34±2.59	4.40±2.38	6.18±1.94

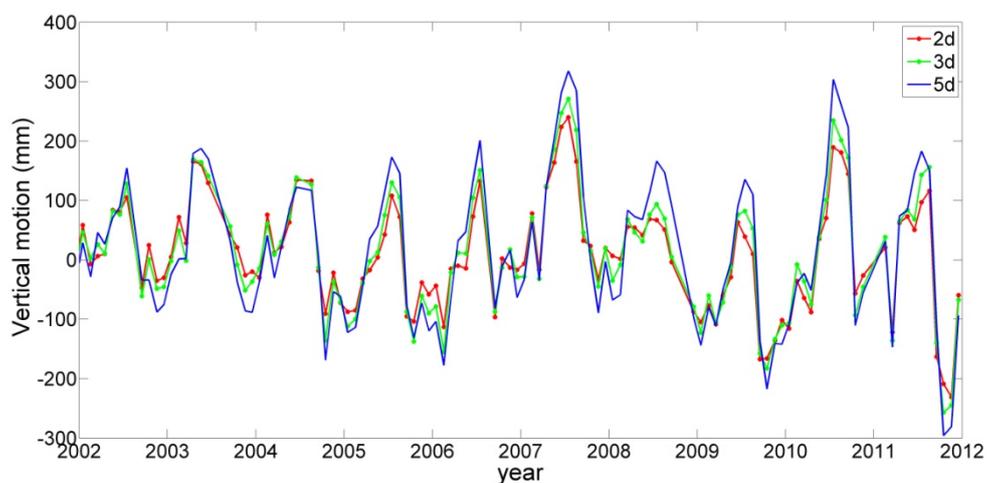
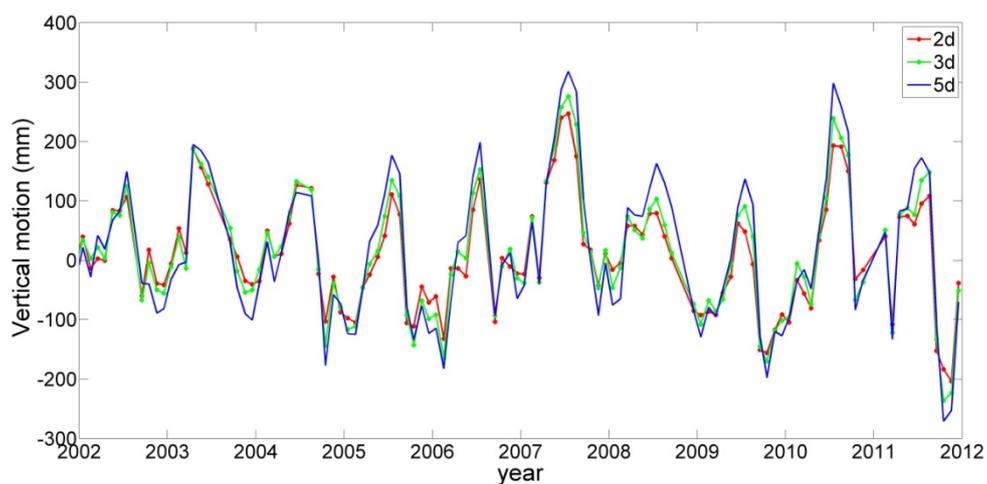


圖 4.9 大廟灣(Tai miu wan)驗潮站地殼變動訊號(2d 為使用驗潮站周圍 2° 之衛星測高資料，3d 與 5d 以此類推)。上：AVISO 衛星測高，下：RADs 衛星測高。

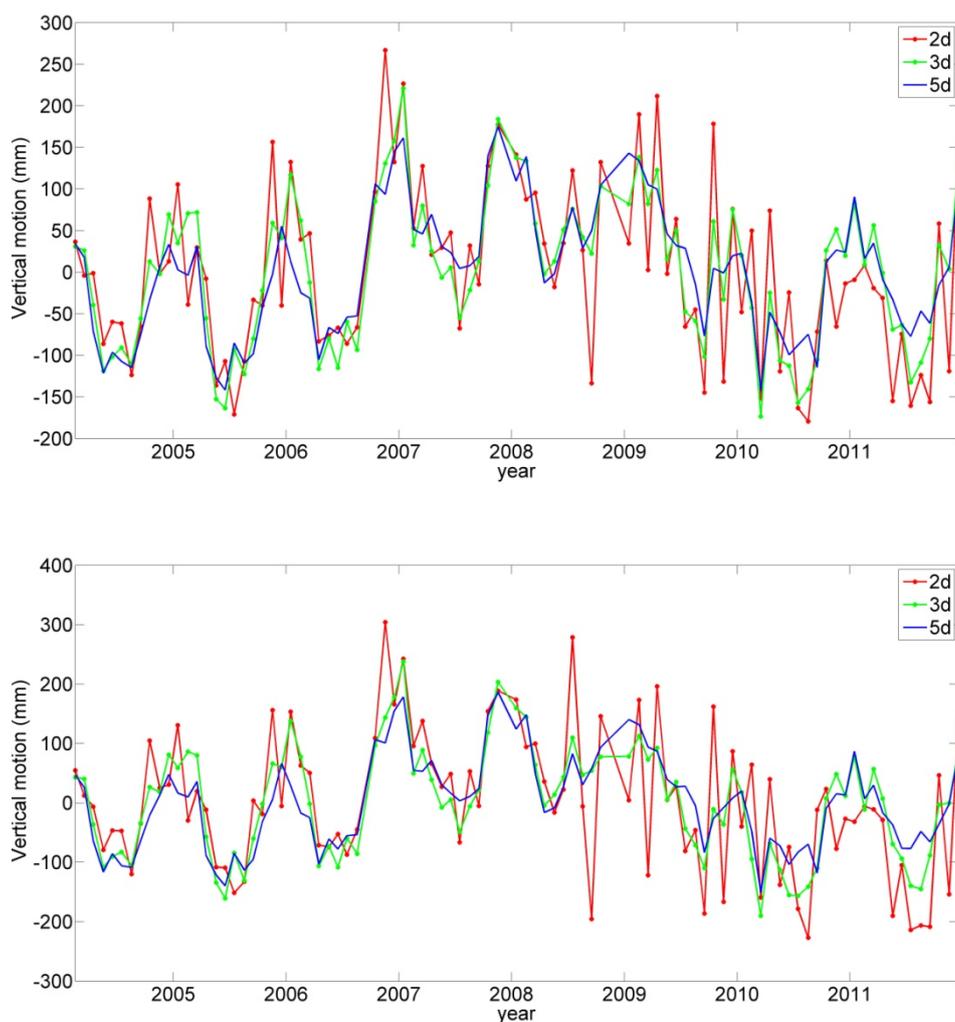


圖 4.10 台中港(Taichung Port) 驗潮站地殼變動訊號。上：AVISO 衛星測高，下：RADs 衛星測高。

表 4.5、表 4.6 與表 4.8 為估算基隆與高雄驗潮站地殼變動的成果，改正基準不一致的驗潮站資料之方法可分為 6 參數(方法 I)擬合與 2 參數(方法 II)擬合，表中方法 I 與方法 II 的 PSMSL 與 UHSLC 基隆驗潮站地殼變動速率完全相同，因為基隆驗潮站發生偏移量的時間點並未在研究時間(2002-2011 年)範圍內，因此方法 I 與 II 估算地殼變動速率完全相同，然而由方法 I 與方法 II 改正後的 PSMSL 與 USHLC 高雄驗潮站資料所估算地殼變動速率差值基本相似(大部分差異量小於標準偏差)，但與 CWB 高雄驗潮站成果差值較大，PSMSL 與 CWB 的方法 I 與方法 II 成果差異量皆分別相差 10 mm/yr 以上。主要原因為 CWB 高

高雄驗潮站資料約為 2004 年開始，PSMSL 與 UHSLC 高雄驗潮站資料在 2003 年有進行偏移量改正，並且 CWB 高雄驗潮站資料的時間涵蓋範圍較短，標準偏差則較大，因此改正後的成果才會有如此大的差異。

雖然目前並無法精確比較方法 I 與方法 II 何者改正偏移量成果較佳，但就方法的合理性而言，方法 II 可分離已知的變動參數再進行偏移量之改正，因此本計畫將以方法 II 作為偏移量改正之選擇，並於將與 GPS 和精密水準資料進行比較，以了解其差異特性。

由上述成果可知，主要影響估算地殼變動成果因素分別為驗潮站位置、資料涵蓋時間長度與驗潮站資料品質，以下分別說明各項原因，

1. 驗潮站位置: 衛星測高觀測海水面變化之資料範圍雖近乎全球，但近岸資料稀少，因此某些驗潮站周圍的衛星測高資料較少，例如宿霧(Cebu)驗潮站周圍經緯度  $2^{\circ}$  內並無衛星測高 RADs 資料，以及台中港(Taichung Port)驗潮站位於測高衛星資料較少的臺灣海峽海域，因此由衛星測高  $2^{\circ}$  估算該驗潮站周圍地殼變動之時間序列的震盪較為劇烈，而當平均範圍變大時，地殼變動時間序列變得較平滑(如圖 4.10 所示)，導致不同範圍估算地殼變動速率差異量較大。因此可知，當應用衛星測高估算驗潮站地殼變動時，應注意驗潮站位置與衛星測高之地面軌跡。
2. 資料時間長短: 資料涵蓋時間長短將對於估算 SLR 有顯著影響，例如馬祖驗潮站，其位於測高資料較少的位置(如圖 3.2 所示)，導致 AVISO 與 RADs 資料估算近 10 年 SLR 速率差異量可達 8 mm/yr，然而若將觀測時間延長至 1993-2011 年，則兩測高資料估算馬祖驗潮站周圍  $2^{\circ}$  SLR 速率之差異量約 2 mm/yr。本計畫僅利用近十年資料進行地殼變動和 SLR 速率計算，造成地殼變動速率標準偏差較大，而相關研究說明採用較長時間資料(20 年)衛星測高與驗潮站資料可大幅減低地殼變動速率標準偏差(kuo *et al.*, 2004; kuo *et al.*, 2008, Ray *et al.*, 2010)
3. 驗潮站資料品質: 若驗潮站資料中有嚴重缺漏資料或基準不一致

的情形，將嚴重影響估算地殼變動之成果。

目前本計畫以地殼變動速率之標準偏差評估何者範圍內衛星測高資料較適用於估算該驗潮站之地殼變動，由表 4.6-4.8 中 2°、3°與 5°間的地殼變動速率之標準偏差可知，整體而言，2°衛星測高資料估算 PSMSL 驗潮站地殼變動速率之標準偏差為最小，約為  $\pm 2$  mm/yr (AVISO 與 RADs)，利用 5°衛星測高資料所估算 UHSLC 與 CWB 驗潮站地殼變動速率之標準偏差為最小，約為  $\pm 3$  mm/yr (AVISO 與 RADs)，因此本計畫臺灣附近的驗潮站資料適用 5°衛星測高資料，其他區域驗潮站資料則適用 2°衛星測高資料，其中宿霧驗潮站周圍 2°並無衛星測高 RADs 資料，因此使用 3°衛星測高 RADs 資料進行地殼變動改正。

圖 4.11 為展示各驗潮站地殼變動速率，其中 PSMSL 與 UHSLC 的基隆與高雄驗潮站地殼變動速率差值很小，差異量小於 1 mm/yr，因此在此展示 PSMSL 基隆與高雄驗潮站地殼變動速率。由圖可知，雖然兩衛星測高資料估算各驗潮站的地殼變動速率些差異，但整體而言，兩資料估算各驗潮站地殼變動數率之趨勢相當一致，在 2002-2011 年間臺灣北部地區的地殼變動速率呈現下降情形，其中麟山鼻驗潮站 (Linshanbi) 的地殼變動速率最大，每年約 20-21 mm 下沉 (AVISO 與 RADs)；臺灣西北部地區的地殼變動速率呈現上升情形，其中馬祖 (Mazu) 驗潮站的地殼變動約每年 49 mm (AVISO) 與 45 mm (RADs) 上升；臺灣西南部地區主要呈現地殼下沉情形，其中以塭港 (Wengang) 與箔子寮 (Boziliao) 每年分別呈現約 30~40 mm 與 20 mm 的下沉量；菲律賓驗潮站中除馬尼拉驗潮站呈現下降情形 (~-12 mm/yr) 外，其餘驗潮站周圍地殼皆呈現上升 (1~8 mm/yr)，而香港附近驗潮站周圍的地殼平均每年呈現 1 mm (AVISO) 與 4 mm (RADs) 下降情形，日本驗潮站周圍地殼平均每年呈現 1 mm (AVISO 與 RADs) 下降情形。

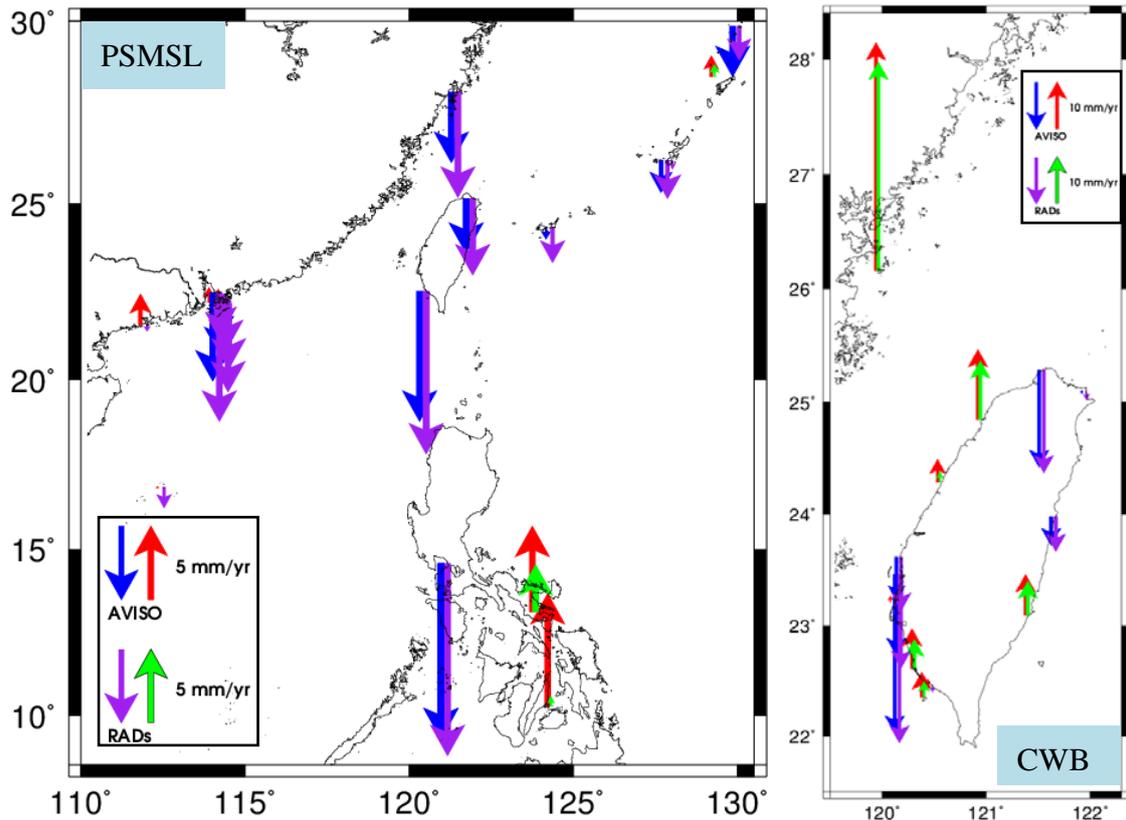


圖 4.11 驗潮站地殼變動速率圖

#### 4.4.3 估算之地殼變動速率與 GPS 和精密水準資料成果比較

本研究使用 Ching 等人[2011]利用 GPS 連續觀測資料與精密水準資料[Chen *et al.*, 2011]估算臺灣地區地殼高程變動資料，其成果利用時間涵蓋 2000-2008 年之分佈臺灣 199 個 GPS 連續觀測站與 1843 個精密水準點計算求得，其中 199 個 GPS 觀測站為相對於澎湖 GPS 觀測站 (S01R)，S01R 點位於板塊相對穩定的區域[Ching *et al.*, 2011]，故選定此點作為相對的固定點，而 1843 個精密水準點地殼變動速率為相對於基隆水準原點[Chen *et al.*, 2011]，GPS 觀測站與精密水準點分佈如圖 4.12 所示。

本計畫中使用的驗潮站資料分佈香港、日本與菲律賓等地，然而 GPS 觀測站與精密水準點幾乎僅在臺灣本島，因此選擇臺灣本島附近的驗潮站，與最接近各潮站的 GPS 觀測站與水準點之成果進行比較。由於 PSMSL 與 UHSLC 的基隆與高雄驗潮站之地殼變動速率非常接近，

因此選擇 PSMSL 基隆(KL)與高雄(KS\_2，CWB 高雄驗潮站為 KS\_1) 驗潮站為代表，另外，CWB 馬祖驗潮站旁並無 GPS 觀測站與水準點，因此 CWB 馬祖驗潮站並未加入比較，各驗潮站與對應的水準點和 GPS 連續觀測站之分佈如圖 4.13 所示。圖 4.14 為比較本計畫中估算驗潮站之地殼變動速率與 GPS 觀測成果和精密水準資料，由圖可知，本計畫估算之地殼變動速率、GPS 觀測量與精密水準資料成果皆不一致，本計畫估算之地殼變動速率與 GPS 觀測成果和精密水準成果之差異量平均值分別約 9 mm/yr 和 11-12 mm/yr，而 GPS 觀測成果與精密水準成果差異量平均值約 7 mm/yr，因本計畫選定的研究時間為 2002-2011 年，GPS 與精密水準成果估算時間範圍為 2000-2008 年，因此 GPS 與精密水準成果之差異量平均值較小為合理。圖 4.14 中麟山鼻驗潮站的地殼變動速率與 GPS 觀測量和水準資料差異量皆非常大，差異量分別約 20-21 mm/yr 和 21-22 mm/yr，而本計畫估算的麟山鼻驗潮站之地殼變動時間序列如圖 4.15 所示，麟山鼻驗潮站的地殼變動時間序列非常明顯，可知該驗潮站周圍地殼表面高度正在穩定下降，其原因可能為 GPS 觀測站與水準點位通常設於地殼較穩固處，而驗潮站的基準點通常建於堤防上，但堤防處可能屬於較不穩固且容易發生地層下陷情形之位置，因此造成麟山鼻驗潮站正在穩定下降。

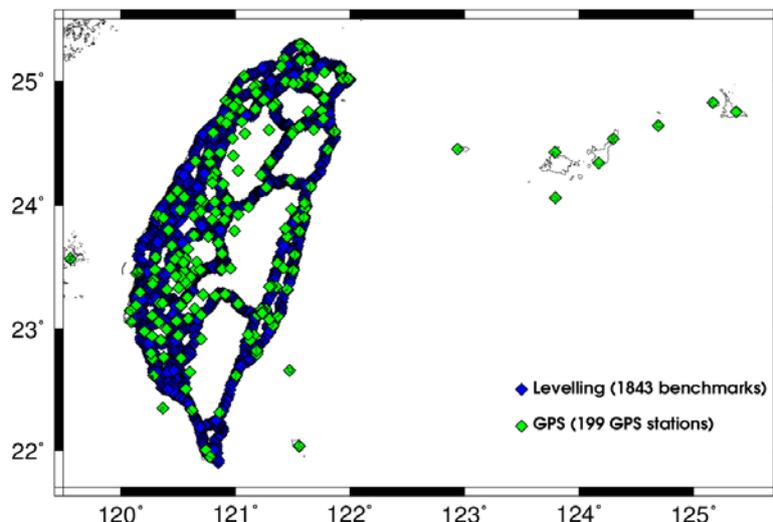


圖 4.12 精密水準點與 GPS 連續觀測站之分佈

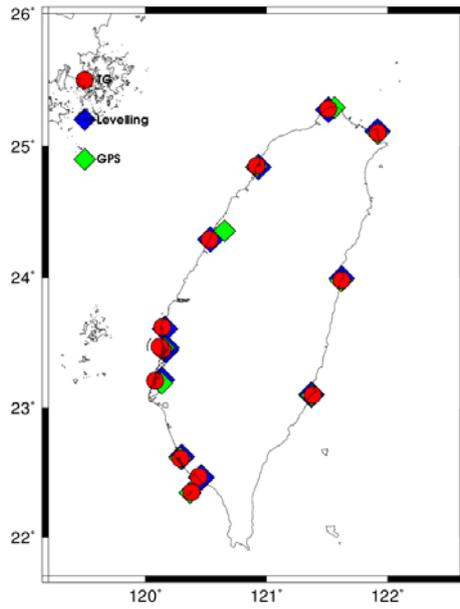


圖 4.13 臺灣附近驗潮站、精密水準點與 GPS 連續觀測站之分佈

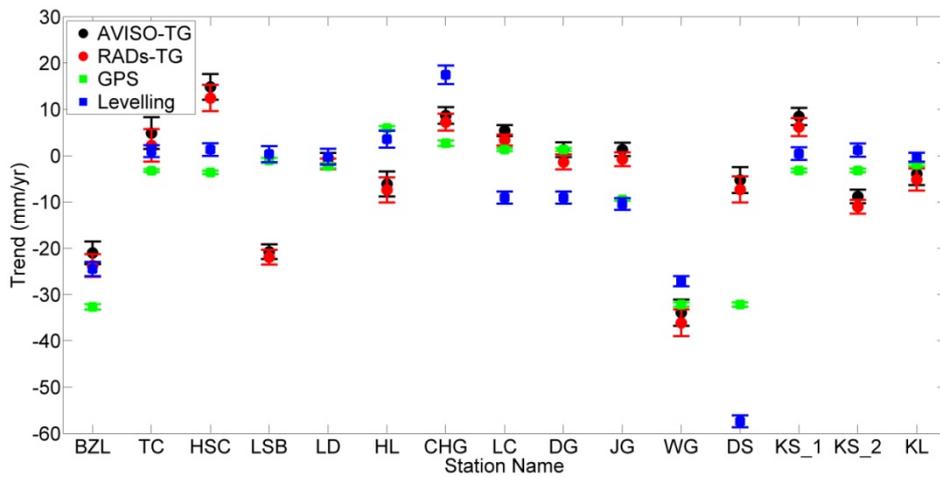


圖 4.14 估算之地殼變動速率與 GPS 和精密水準點成果比較

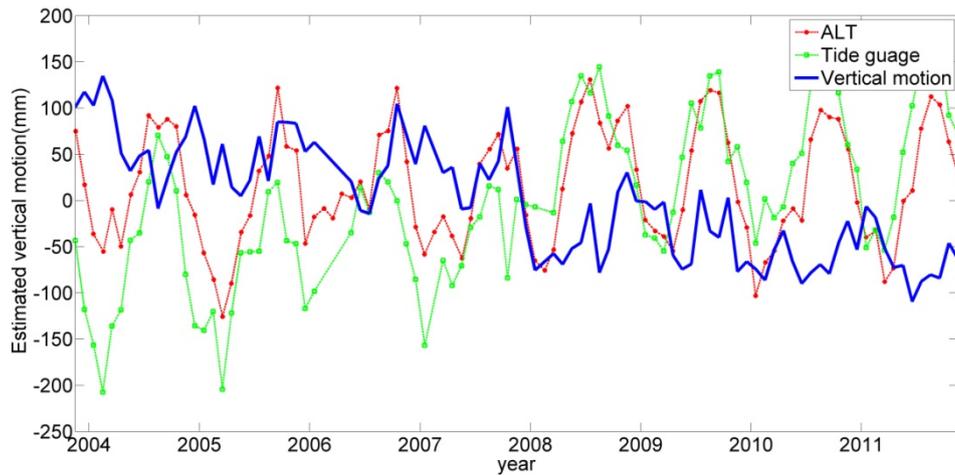


圖 4.15 麟山鼻驗潮站的地殼垂直變動訊號

#### 4.5 驗潮站資料之改正流程

本計畫處理驗潮站資料的改正流程依序為海潮改正、IB 效應改正、偏移量改正與地殼變動改正，但若資料中包含偏移量，該驗潮站資料在移除海潮效應時，則在調和分析法(如式(4.1)所示)中加上步階函數(如式(4.2)所示)，以免偏移量影響海潮效應之改正，然後再進行 IB 改正與地殼變動改正。UHSLC 的詮釋資料中說明全日潮與半日潮等高頻訊號已被移除，PSMSL 驗潮站資料為每月平均的觀測數據，表示 PSMSL 與 UHSLC 驗潮站資料皆已降低或移除海潮效應之影響，因此本計畫中不再對 PSMSL 與 UHSLC 驗潮站資料進行海潮改正，而 CWB 驗潮站資料為 6 分鐘平均 1 筆，需進行海潮效應之改正。以下為各驗潮站資料的詳細處理步驟：

➤ PSMSL 驗潮站資料（以高雄驗潮站為例）

1. PSMSL 驗潮站資料為每個月平均的觀測數據，故驗潮站資料中的海潮影響應已降低，因此不需進行海潮改正。
2. 將 PSMSL 驗潮站資料進行 IB 效應改正，IB 效應改正如式(4.3)所示，式中的平均海水面氣壓資料  $P_{atm}$  使用 1 個月平均一筆之氣壓資料， $P$  為月平均之全球海面平均壓力。以高雄驗潮站為例，本研究

從 ECMWF 平均海水面氣壓資料中計算高雄驗潮站的 IB 效應(如圖 4.16 所示)，並將該效應自高雄驗潮站資料中移除(結果如圖 4.4 所示)。

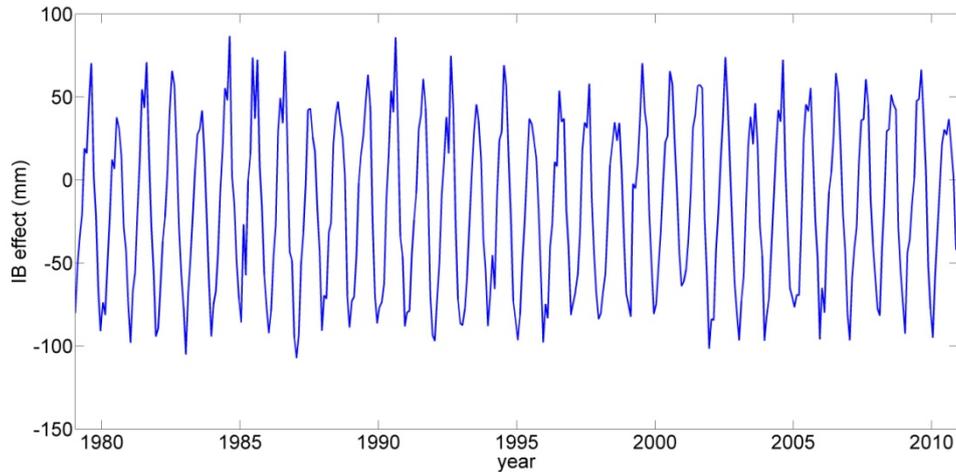


圖 4.16 高雄驗潮站之 IB 效應

3. 利用 Haar 小波檢查驗潮站資料中是否包含偏移量。
4. 若有資料中含有偏移量則需進行偏移量改正，改正方式可使用二參數(方法 II，如式(4.6)所示)進行改正。
5. 結合衛星測高資料與驗潮站資料估算地殼變動速率，方法如式(4.7)所示。
6. 移除驗潮站資料中的地殼變動速率，其結果如圖 4.17 所示。

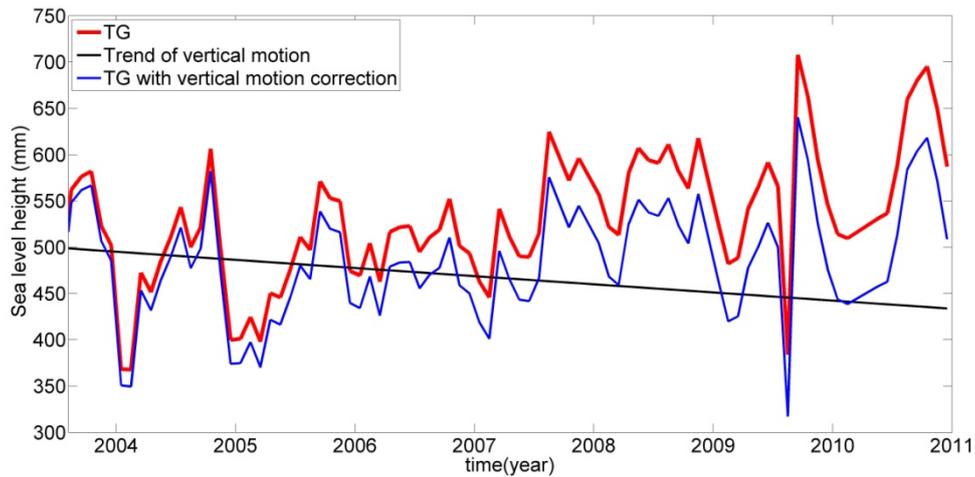


圖 4.17 高雄驗潮站資料之地殼變動速率改正

➤ UHSLC 驗潮站資料（以高雄驗潮站為例）

1. UHSLC 的說明資料中提到，UHSLC 的日平均資料已移除全日潮、半日潮以及高頻訊號，因此不需進行海潮改正。
2. 將 UHSLC 驗潮站資料進行 IB 效應改正，IB 效應改正如式(4.3)所示，式中的平均海水面氣壓資料  $P_{atm}$  使用 1 天平均一筆之氣壓資料， $P$  為月平均之全球海面平均壓力。以高雄驗潮站為例，本計畫從 ECMWF 平均海水面氣壓資料中估算高雄驗潮站的 IB 效應(如圖 4.18 所示)，並將該效應自高雄驗潮站資料中移除(如圖 4.4 所示)。

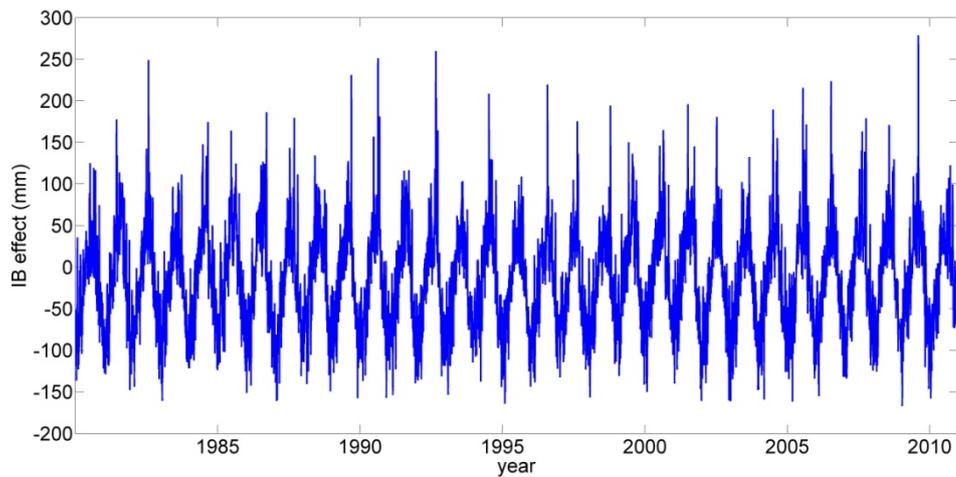


圖 4.18 高雄驗潮站之 IB 效應

3. 將 UHSLC 日平均的驗潮站資料平均為月平均資料。為避免該月資料量過少而導致成果有誤，因此 UHSLC 的每月資料需少於 7 天(包含 7 天)缺失，則將該月資料平均為月平均資料。
4. 利用 Haar 小波檢查驗潮站資料中是否包含偏移量。
5. 若資料中含有偏移量則需進行偏移量改正，改正方式可使用二參數(方法 II，如式(4.6)所示)進行改正。
6. 結合衛星測高資料與驗潮站資料估算地殼變動速率，方法如式(4.7)所示。
7. 移除驗潮站資料中的地殼變動速率，結果如圖 4.19 所示。

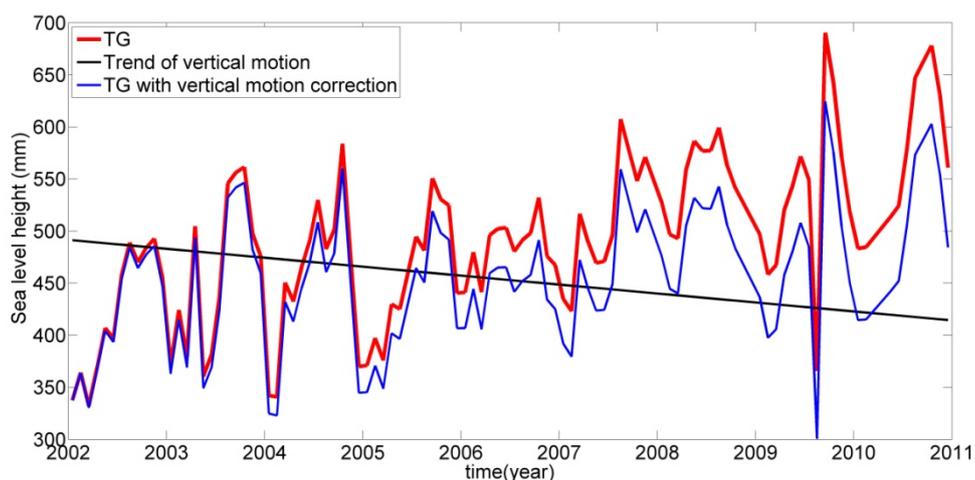


圖 4.19 高雄驗潮站資料之地殼變動速率改正

➤ CWB 驗潮站資料 (以高雄驗潮站為例)

1. CWB 資料為平均 6 分鐘一筆之資料，因此需進行海潮改正，海潮改正如式(4.1)所示，改正成果如圖 4.1 所示。
2. 將資料平均為 1 天一筆，然而因為 CWB 的時間系統為格林威治時間(Greenwich Mean Time, GMT)+8 小時，因此計算時需將驗潮站資料的時間各減去 8 小時，轉換時間系統至 GMT，並且檢查 CWB 的每天資料是否占當天全部時段 75% (比照 UHSLC 日平均資料→月平均資料之比例)以上，若大於 75%則將該日資料平均為 1 天，若小於 75%，則捨棄該日資料。
3. 將 CWB 驗潮站資料進行 IB 效應改正。以高雄驗潮站為例，本計畫從 ECMWF 平均海水面氣壓資料中估算高雄驗潮站的 IB 效應(如圖 4.20 所示)，並將該效應自高雄驗潮站資料中移除(如圖 4.4 所示)。

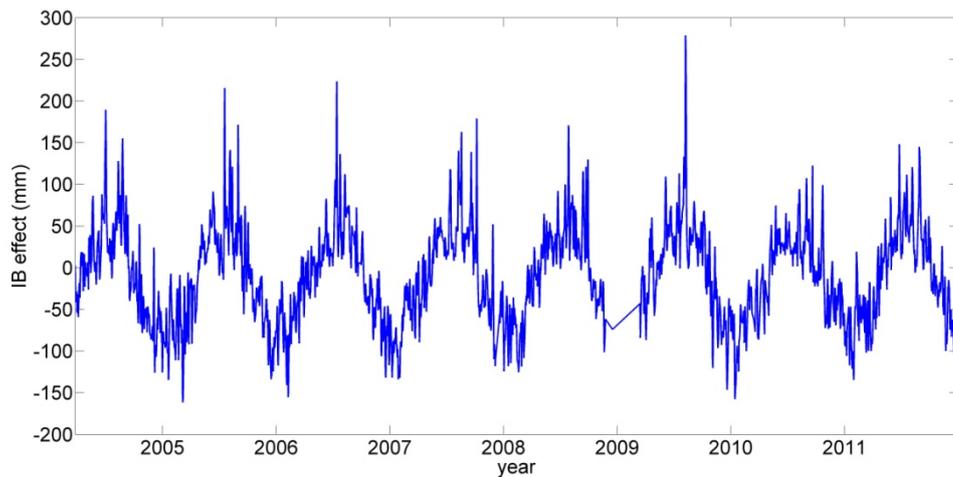


圖 4.20 高雄驗潮站之 IB 效應

4. 將 CWB 日平均的驗潮站資料平均為月平均資料。
5. 利用 Haar 小波檢查驗潮站資料中是否包含偏移量。
6. 若資料中包含偏移量，則將該驗潮站的原始資料進行海潮改正(步驟函數+調和函數)，公式如式(4.2)所示，並且重複步驟 2-步驟 3，成果如圖 4.1 所示。
7. 若有資料中含有偏移量則需進行偏移量改正。
8. 結合衛星測高資料與驗潮站資料估算地殼變動速率，方法如式(4.7)所示。
9. 移除驗潮站資料中的地殼變動速率，如圖 4.21 所示。

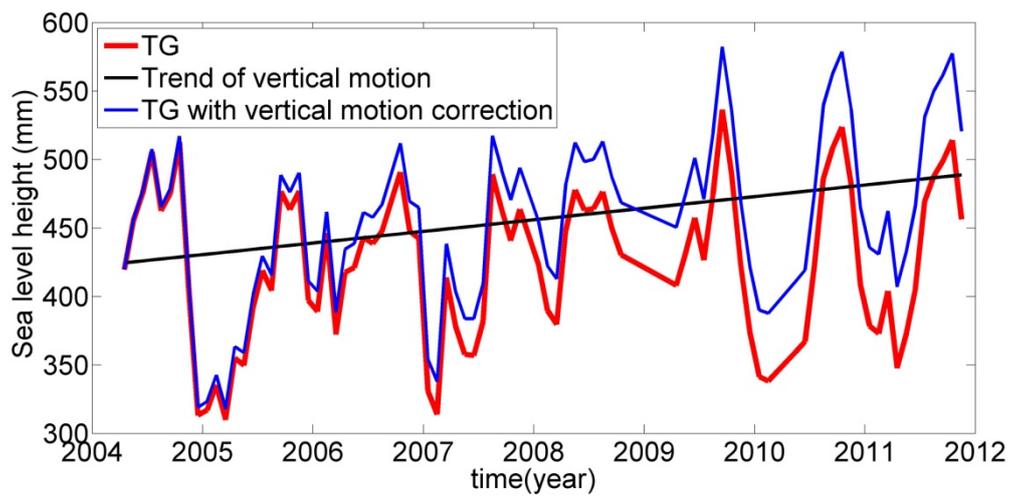


圖 4.21 高雄驗潮站資料之地殼變動速率改正

## 第五章 臺灣四周海域近十年之海水面變化速率

本計劃應用衛星測高儀及驗潮站資料進行臺灣附近海域 SLR 速率計算，衛星測高資料需經過儀器改正、介質改正與地球物理因子等改正，以求得不同海域之精確變化特性，而應用驗潮站資料估算 SLR 速率時，則需進行海潮、IB、偏移量與地殼變動等改正。往昔利用臺灣附近驗潮站資料分析 SLR 速率的研究中[黃清哲等人, 2009; Tseng *et al.*, 2009; Chang *et al.*, 2012]，並未完全考慮上述驗潮站資料之自然及人為效應，因此，本章將分析自然及人為等因子對 SLR 速率之影響，針對驗潮站資料進行上述各項因子之改正，並分析各項改正值對估算 SLR 速率之影響。本計畫於 5.1 節估算改正前後驗潮站資料的 SLR 速率之差異，並分析各改正因子對 SLR 速率計算之影響程度。最後於 5.2 節分析衛星資料及驗潮站資料之 SLR 速率空間分佈特性。

本章中的驗潮站資料皆已進行海潮效應、IB 效應、偏移量與地殼變動改正，其中因為 IB 效應使用的海水表面壓力資料來源為 ECMWF、NCEP 與 CWB 等三資料中心，此三種海水面氣壓資料非常相似，相關係數皆在 0.95 以上，因此本章中使用 ECMWF 海水面壓力資料改正驗潮站資料中 IB 效應，而 NCEP 與 CWB 相關 SLR 速率成果皆置於附錄中，詳細氣壓資料的比較請參閱第四章。本計畫中使用六參數(方法 I)與二參數(方法 II)進行資料偏移量的改正，就方法合理性而言，方法 II 應為較適合之方法，因此本章中皆使用二參數(方法 II)進行資料偏移量改正。本計畫結合驗潮站資料與衛星測高資料估算地殼變動速率，然而衛星測高資料在近海岸處資料較為稀少，但驗潮站大多設置於岸邊，為配合驗潮站資料使用，本計畫分別平均驗潮站周圍經緯度 2°、3°、5° 範圍內的測高資料來使用，由地殼變動速率之標準偏差可知，5° 衛星測高資料估算臺灣附近驗潮站地殼變動速率之標準偏差為最小，2° 衛星測高資料估算其他區域驗潮站地殼變動速率之標準偏差為最小(詳閱第四章)，因此本計畫臺灣附近的驗潮站(例如 UHSLC 驗潮站、CWB 驗潮站以及 PSMSL 基隆與高雄驗潮站)資料適用 5° 衛星

測高資料，其他區域驗潮站資料則適用 2° 衛星測高資料。

## 5.1 改正前後海水位變化速率之差異

驗潮站資料在經過海潮和 IB 之改正後，並利用不同衛星測高資料 (AVISO 和 RADs) 進行偏移量與地殼變動改正。各驗潮站資料經各項改正後估算的 SLR 速率如表 5.1~表 5.6，改正前(原始驗潮站資料)與改正後(經 4 項改正後的驗潮站資料)的結果如圖 5.1 及 5.2 所示。由於海潮和 IB 改正量相對於偏移量與地殼變動因子改正量來的小 (圖 5.3)，因此著重分析後項兩改正因子對估計 SLR 速率之探討。圖 5.1 中顯示改正前後驗潮站資料之 SLR 速率變化量(或稱差值)遠大於 SLR 速率之標準偏差約有數倍之多，顯示對於利用驗潮站資料估算 SLR 速率具有顯著的影響，PSMSL 驗潮站中，利用改正前後高雄驗潮站資料估算的 SLR 速率差值為最大(AVISO: 23 mm/yr，RADs: 21 mm/yr)，由於高雄驗潮站資料中含有偏移量，偏移量改正對於 SLR 速率的影響量約 32 mm/yr (圖 5.3)，因此造成高雄驗潮站的 SLR 速率之差異量較大。經過改正後之 SLR 速率空間變化，在大範圍(PSMSL)的區域可使其變化獲得較一致性的結果，但是仍可看出 SLR 速率的區域特性變化，此結果與 Cheng 和 Anderson [2013] 的結果一致。改正後 PSMSL 各測站的 SLR 變化速率約為-5~14 mm/yr。

相似的結果亦顯示在利用 UHSLC 及 CWB 驗潮站資料於臺灣海域之 SLR 速率估算，結果如圖 5.2 所示。UHSLC 基隆與高雄驗潮站分別以 KL2 與 KS2 表示，其中利用改正前後高雄驗潮站資料計算之 SLR 速率差值較大(AVISO: 24 mm/yr 與 RADs: 22 mm/yr)，而利用 CWB 改正前後的高雄、塭港與馬祖驗潮站資料估算 SLR 速率的差值較大，差值皆超過 30 mm/yr，由於 UHSLC 與 CWB 高雄驗潮站資料中亦含有偏移量，偏移量改正對於 SLR 速率的影響量皆在 32 mm/yr 以上，因此造成高雄驗潮站的 SLR 速率之差異量較大，而塭港與馬祖驗潮站的地殼變動量較大，造成地殼變動對於 SLR 速率之影響量約在 36 mm/yr 以上(如圖 5.3 所示)。整體而言，改正後 UHSLC 與 CWB 各測站的 SLR 變

化速率約為-5~10 mm/yr。

表 5.1 PSMSL 驗潮站資料經各項改正估算之 SLR 速率。偏移量與地殼變動影響為利用 AVISO 衛星測高資料進行改正

Station Name	Trend (mm/yr)			With Ocean tide, IB, bias, and vertical motion adjustment
	With Ocean tide adjustment	With Ocean tide and IB adjustment	With Ocean tide, IB, and bias adjustment	
Zhapo	2.88±1.85	2.39±1.92	X	4.41±1.93
Xi Sha	8.68±2.30	7.69±2.29	X	7.72±2.29
Kanmen	4.15±1.84	4.75±1.96	X	0.02±1.96
Waglan Island	9.24±3.20	8.68±3.22	X	6.42±3.23
Quarry Bay	5.34±2.08	4.80±2.12	X	3.92±2.13
Tai Miu Wan	10.93±2.52	10.52±2.53	X	6.66±2.54
Tai Po Kau	4.59±1.78	4.06±1.83	X	4.39±1.84
Tsim Bei Tsui	11.18±2.28	10.74±2.33	X	4.77±2.34
Shek Pik	4.36±1.86	3.92±1.92	X	4.89±1.92
Keelung	1.96±2.13	0.05±1.73	0.05±1.73	-3.83±1.73
Kaohsiung	-12.75±3.06	-13.93±3.04	19.00±1.39	10.21±1.40
Nase	-0.18±1.63	-0.11±1.52	X	1.27±1.52
Nakano Sima	3.97±1.60	4.04±1.54	X	0.66±1.54
Okinawa	0.93±1.61	0.04±1.51	X	-0.07±1.50
Naha	2.41±1.60	2.03±1.53	X	-0.11±1.53
Ishigaki	3.30±2.22	2.76±2.21	X	2.04±2.22
Manila	23.63±2.62	22.58±2.51	X	10.71±2.51
Legaspi	9.64±1.69	8.64±1.61	X	14.40±1.61
Cebu	9.79±1.57	8.74±1.48	X	16.33±1.48

表 5.2 PSMSL 驗潮站資料經各項改正估算之 SLR 速率。偏移量與地殼變動影響為利用 RADs 衛星測高資料進行改正

Station Name	Trend (mm/yr)			
	With Ocean tide adjustment	With Ocean tide and IB adjustment	With Ocean tide, IB, and bias adjustment	With Ocean tide, IB, bias, and vertical motion adjustment
Zhapo	2.88±1.85	2.39±1.92	X	1.98±1.93
Xi Sha	8.68±2.30	7.69±2.29	X	6.34±2.29
Kanmen	4.15±1.84	4.75±1.96	X	-2.36±1.96
Waglan Island	9.24±3.20	8.68±3.22	X	4.22±3.23
Quarry Bay	5.34±2.08	4.80±2.12	X	1.41±2.13
Tai Miu Wan	10.93±2.52	10.52±2.53	X	4.30±2.54
Tai Po Kau	4.59±1.78	4.06±1.83	X	1.81±1.84
Tsim Bei Tsui	11.18±2.28	10.74±2.33	X	2.03±2.34
Shek Pik	4.36±1.86	3.92±1.92	X	2.07±1.92
Keelung	1.96±2.13	0.05±1.73	0.05±1.73	-5.09±1.73
Kaohsiung	-12.75±3.06	-13.93±3.04	19.31±1.39	8.29±1.39
Nase	-0.18±1.63	-0.11±1.52	X	0.67±1.52
Nakano Sima	3.97±1.60	4.04±1.54	X	1.78±1.54
Okinawa	0.93±1.61	0.04±1.51	X	-0.42±1.50
Naha	2.41±1.60	2.03±1.53	X	-0.51±1.53
Ishigaki	3.30±2.22	2.76±2.21	X	0.43±2.22
Manila	23.63±2.62	22.58±2.51	X	9.55±2.51
Legaspi	9.64±1.69	8.64±1.61	X	11.77±1.61
Cebu	9.79±1.57	8.74±1.48	X	9.35±1.48

表 5.3 UHSLC 基隆與高雄驗潮站資料經各項改正估算之 SLR 速率。偏移量與地殼變動影響為利用 AVISO 衛星測高資料進行改正

Station Name	Trend (mm/yr)			
	With Ocean tide adjustment	With Ocean tide and IB adjustment	With Ocean tide, IB, and bias adjustment	With Ocean tide, IB, bias, and vertical motion adjustment
Keelung	2.01±2.13	0.04±1.74	0.04±1.74	-3.77±1.74
Kaohsiung	-13.71±3.04	-14.39±3.01	18.61±1.44	10.06±1.45

表 5.4 UHSLC 基隆與高雄驗潮站資料經各項改正估算之 SLR 速率。偏移量與地殼變動影響為利用 RADs 衛星測高資料進行改正

Station Name	Trend (mm/yr)			
	With Ocean tide adjustment	With Ocean tide and IB adjustment	With Ocean tide, IB, and bias adjustment	With Ocean tide, IB, bias, and vertical motion adjustment
Keelung	2.01±2.13	0.04±1.74	0.04±1.74	-5.02±1.74
Kaohsiung	-13.71±3.04	-14.39±3.01	19.48±1.40	8.10±1.41

表 5.5 CWB 驗潮站資料經各項改正估算之 SLR 速率。偏移量與地殼變動影響為利用 AVISO 衛星測高資料進行改正

Station Name	Trend (mm/yr)				
	Original	With Ocean tide adjustment	With Ocean tide and IB adjustment	With Ocean tide, IB, and bias adjustment	With Ocean tide, IB, bias, and vertical motion adjustment
Boziliao	30.67±2.01	31.27±1.84	31.03±1.64	X	10.04±1.65
Taichung Port	4.22±2.91	4.41±2.86	4.07±2.76	X	8.96±2.77
Hsinchu	-8.02±2.23	-6.95±2.31	-7.56±2.24	X	7.30±2.24
Linshanbi	21.01±2.04	22.33±2.00	21.85±1.76	X	1.12±1.76
Longdong	2.51±1.15	2.56±1.14	2.06±0.96	X	1.53±0.96
Hualien	9.03±1.92	8.93±1.93	8.67±1.83	X	2.57±1.83
Chenggong	-4.99±1.10	-5.07±1.10	-5.77±1.09	X	2.91±1.09
Liuchiu	4.82±1.39	4.83±1.40	4.07±1.26	X	9.48±1.26
Donggang	9.22±2.21	9.08±2.23	8.26±2.09	X	9.55±2.09
Kaohsiung	-34.39±3.64	-34.76±3.62	-35.41±3.54	1.73±1.82	10.18±1.83
Jiangjun	8.20±1.30	8.26±1.30	7.51±1.20	X	8.85±1.21
Wengang	43.59±1.92	43.56±1.93	42.81±1.80	X	8.90±1.80
Dongshi	14.80±2.51	14.81±2.52	13.96±2.50	X	8.71±2.50
Mazu	-47.86±5.71	-47.62±5.64	-47.12±5.73	X	1.57±5.74

表 5.6 CWB 驗潮站資料經各項改正估算之 SLR 速率。偏移量與地殼變動影響為利用 RADs 衛星測高資料進行改正

Station Name	Trend (mm/yr)				
	Original	With Ocean tide adjustment	With Ocean tide and IB adjustment	With Ocean tide, IB, and bias adjustment	With Ocean tide, IB, bias, and vertical motion adjustment
Boziliao	30.67±2.01	31.27±1.84	31.03±1.64	X	7.32±1.65
Taichung Port	4.22±2.91	4.41±2.86	4.07±2.76	X	6.29±2.77
Hsinchu	-8.02±2.23	-6.95±2.31	-7.56±2.24	X	4.90±2.24
Linshanbi	21.01±2.04	22.33±2.00	21.85±1.76	X	-0.07±1.76
Longdong	2.51±1.15	2.56±1.14	2.06±0.96	X	0.29±0.96
Hualien	9.03±1.92	8.93±1.93	8.67±1.83	X	1.30±1.83
Chenggong	-4.99±1.10	-5.07±1.10	-5.77±1.09	X	1.46±1.09
Liuchiu	4.82±1.39	4.83±1.40	4.07±1.26	X	7.45±1.26
Donggang	9.22±2.21	9.08±2.23	8.26±2.09	X	6.90±2.09
Kaohsiung	-34.39±3.64	-34.76±3.62	-35.41±3.54	1.52±1.83	7.70±1.83
Jiangjun	8.20±1.30	8.26±1.30	7.51±1.20	X	6.75±1.21
Wengang	43.59±1.92	43.56±1.93	42.81±1.80	X	6.73±1.80
Dongshi	14.80±2.51	14.81±2.52	13.96±2.50	X	6.70±2.50
Mazu	-47.86±5.71	-47.62±5.64	-47.12±5.73	X	-2.58±5.74

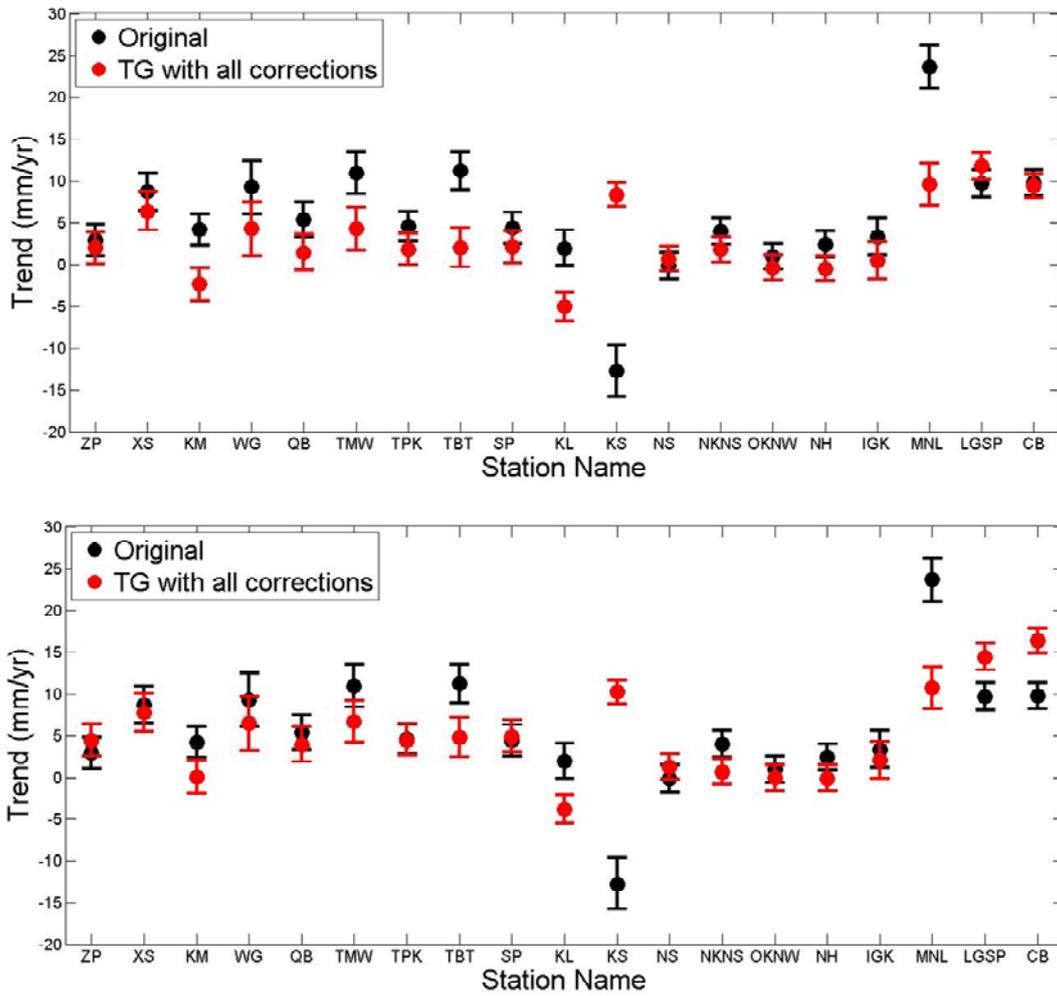


圖 5.1 原始與改正後 PSMSL 驗潮站資料估算之 SLR 速率。上：採用 AVISO 衛星測高，下：採用 RADs 衛星測高

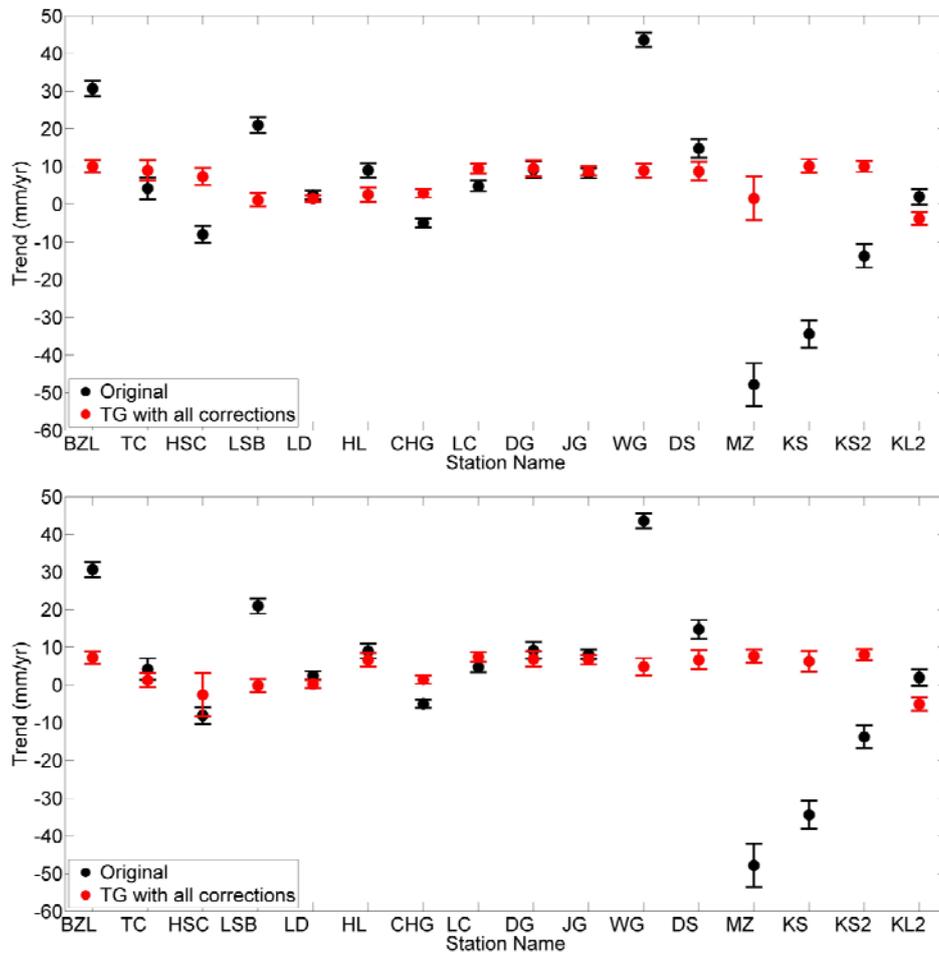


圖 5.2 原始與改正後 UHSLC 與 CWB 驗潮站資料估算之 SLR 速率。  
 上：採用 AVISO 衛星測高，下：採用 RADs 衛星測高

由上述結果可知，利用改正後驗潮站資料估算 SLR 速率有顯著的差異，雖然部份驗潮站之差值小於 3 mm/yr，但是大部分的測站仍須經過偏移量與地殼變動改正才能降低各測站估算 SLR 速率之差異。若利用改正前資料估計小區域 SLR 速率變化，會出現如圖 5.2 中 SLR 速率有顯著的空間變化差異特性，因此偏移量與地殼變動因子對驗潮資料的影響則需加以考慮。圖 5.3 則顯示自然及人為因子對驗潮資料之改正影響。海潮因子對 CWB 資料改正前後 SLR 速率之影響約為 0~1 mm/yr，主要原因為海潮改正時僅移除高頻的週期訊號，因此改正後對於 SLR 速率影響較小，而由 PSMSL 與 UHSLC 資料中心下載的驗潮站資料皆已降低或移除海潮效應之影響，因此本小節中不對 PSMSL 與

UHSLC 驗潮站資料進行海潮效應影響評估，詳細說明請參見第四章。IB 改正對驗潮站資料的影響約為 0~2 mm/yr，顯示大氣壓力的變化對 SLR 速率推估的影響較小，但在推估短時間 SLR 速率時，尤需加以考慮。由圖 5.3 可知，偏移量與地殼變動因子之影響最為顯著，各資料中心的高雄驗潮站資料皆含有偏移量，偏移量影響量皆在 30 mm/yr 以上，約佔改正差異量的 75~83 % [% = 偏移量/全部 SLR 速率改正量]。除高雄測站外，在大區域(PSMSL)SLR 速率的改正中，地殼變動因子佔有 3~98 % ；在臺灣海域 UHSLC 與 CWB 地殼變動改正分別約佔 19~72 % 與 14~99 %。綜合上述改正前後之差異表現及各因子之影響程度，對於臺灣周圍驗潮站而言，地殼變動改正的影響量最為顯著，其影響平均值約 7.4 mm/yr (AVISO)與 7.6 mm/yr (RADs)，約 2 倍大於全球 SLR 速率的  $3.2 \pm 0.4$  mm/yr (涵蓋時間為 1993-2009 年) [Church and White, 2011]。因此在臺灣附近區域，若以未經過偏移量和地殼變動改正之驗潮站資料來進行 SLR 速率變化估算，將造成巨大誤差。

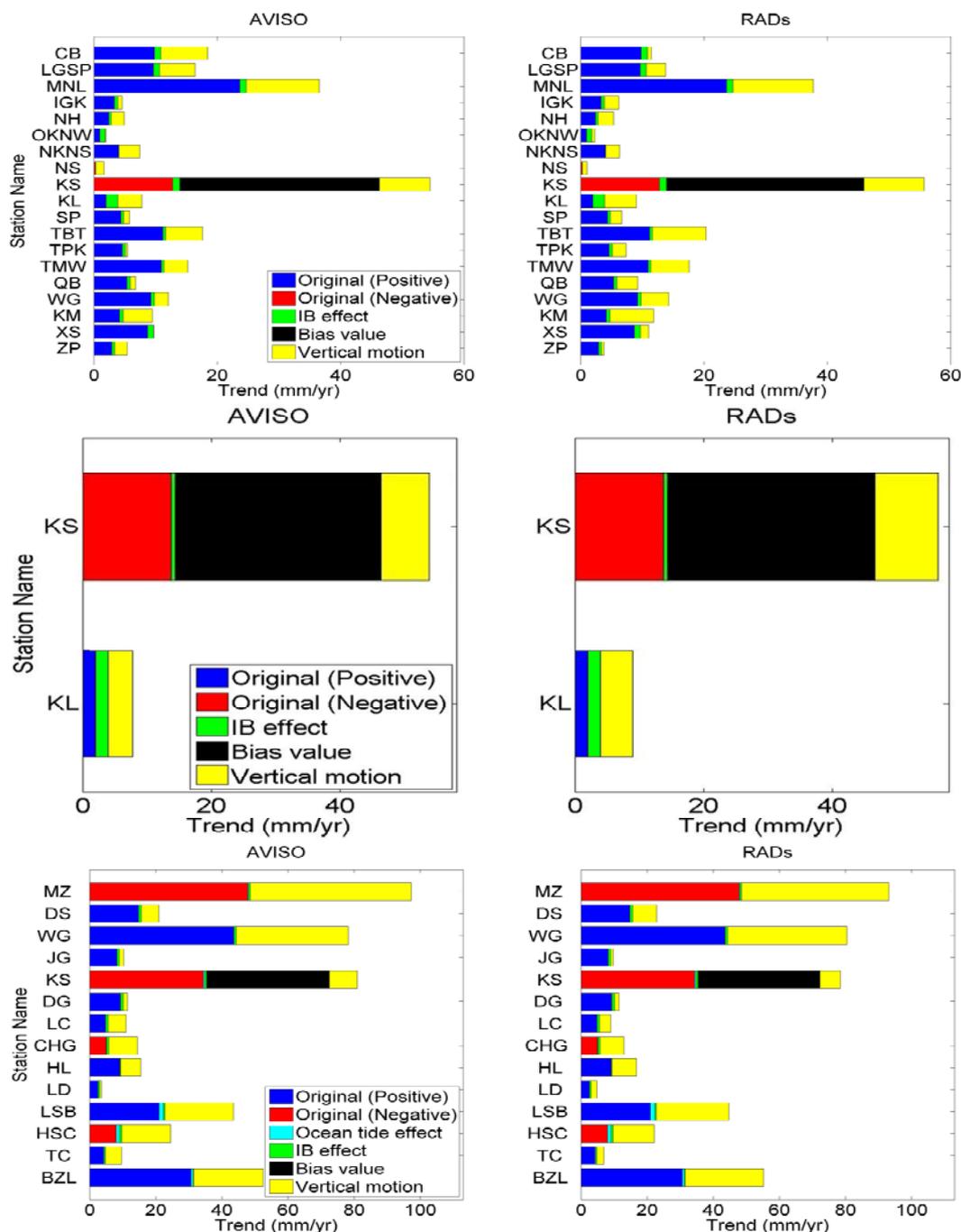


圖 5.3 各項改正對於驗潮站資料估算 SLR 速率之影響量。上：PSMSL 驗潮站，中：UHSLC 驗潮站，下：CWB 驗潮站。Original 為原始資料之 SLR 速率，其中 Positive 與 Negative 分別表示斜率為正與斜率為負。Ocean tide effect、IB effect、Bias value 與 Vertical motion 分別為海潮、IB 效應、偏移量、與地殼變動改正對於 SLR 速率影響量

## 5.2 海面水位昇降變動速率

本小節為估算臺灣周圍海域之 SLR 速率，各節內容依序介紹如下：5.2.1 節為利用衛星測高資料與驗潮站資料估算驗潮站周圍 SLR 速率，並將研究區域分為五區，以估算各區域的 SLR 速率；5.2.2 節為利用溫鹽資料和重力衛星 GRACE 資料，分析近 10 年臺灣周圍海水面上升的主要原因。

### 5.2.1 2002-2011 海水面變化速率

圖 5.4 與圖 5.5 為衛星資料及所有驗潮站資料於臺灣海域之 SLR 速率，其中 PSMSL 與 UHSLC 的基隆驗潮站，以及 PSMSL、UHSLC 與 CWB 的高雄驗潮站為重複之測站，由於各資料中心估算的基隆與高雄驗潮站估算的 SLR 速率之差值皆低於 0.6 mm/yr，因此重複的高雄驗潮站 SLR 速率以 CWB 成果表示，而重複的基隆驗潮站 SLR 速率，以 PSMSL 成果表示。由圖 5.4-5.5 可知，衛星測高資料與驗潮站資料估算的各驗潮站 SLR 速率大致相近，衛星測高計算之臺灣附近驗潮站海水面變化大部分呈現上升，尤其在北緯 25° 以南，各資料估算的 SLR 速率皆呈現正在上升，而越往南 SLR 速率上升越快，例如以坎門(KM)、麟山鼻(LSB)、小琉球(LC)與黎牙實比(LGSP)為例，估算各站海域之 SLR 速率分別為-2~1 mm/yr，0~1 mm/yr，小琉球驗潮站 SLR 速率可達到 7~10 mm/yr，黎牙實比驗潮站 SLR 速率為 9~14 mm/yr。詳細統計之 SLR 速率則如表 5.7 至表 5.9 所示，表中顯示利用衛星測高和驗潮站資料計算各驗潮站周圍之 SLR 速率及標準偏差，因驗潮站資料分別結合 AVISO 與 RADs 衛星測高資料改正偏移量與地殼變動影響，因此在將驗潮站資料各分為兩種成果顯示，由表可知，驗潮站與對應的衛星測高資料所估算 SLR 速率之差值皆非常小，因驗潮站經由地殼變動改正後，兩者之差異即可降低，但部分測站可能因驗潮站資料時間涵蓋範圍長短不一，使兩資料估算的 SLR 速率具有較大之差異，例如 CWB 馬祖資料涵蓋時間範圍約為 2004-2011 年，若以此時間段所估算之 SLR 速率與衛星 2002-2011 年之 SLR 速率數據相比，兩者可能有 3~4 mm/yr

之差異。若取自 2004-2011 資料相比，兩者之差異可降低至 1~3 mm/yr。

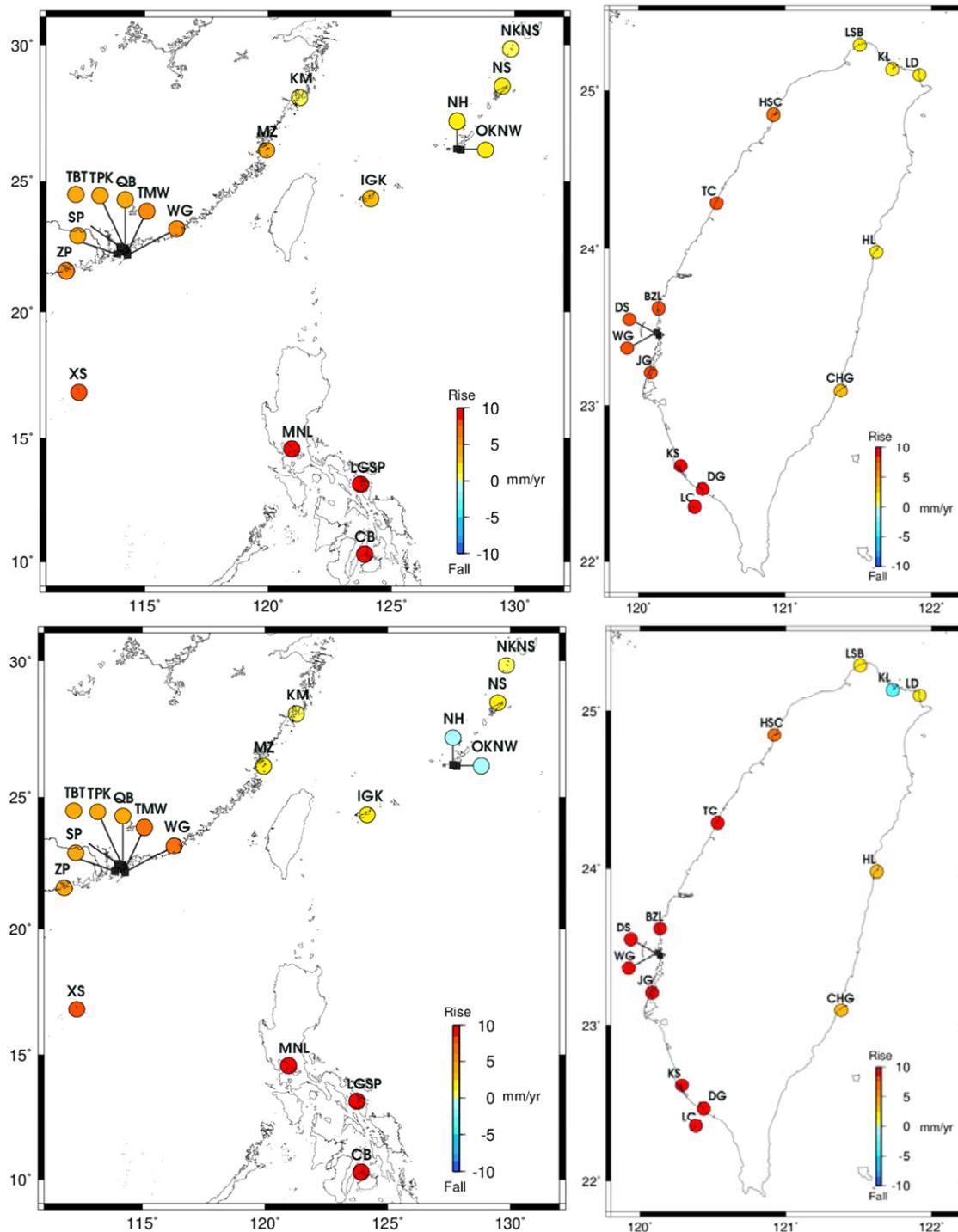


圖 5.4 AVISO 測高資料(上圖)與所有驗潮站資料(下圖)估算臺灣周圍 SLR 速率

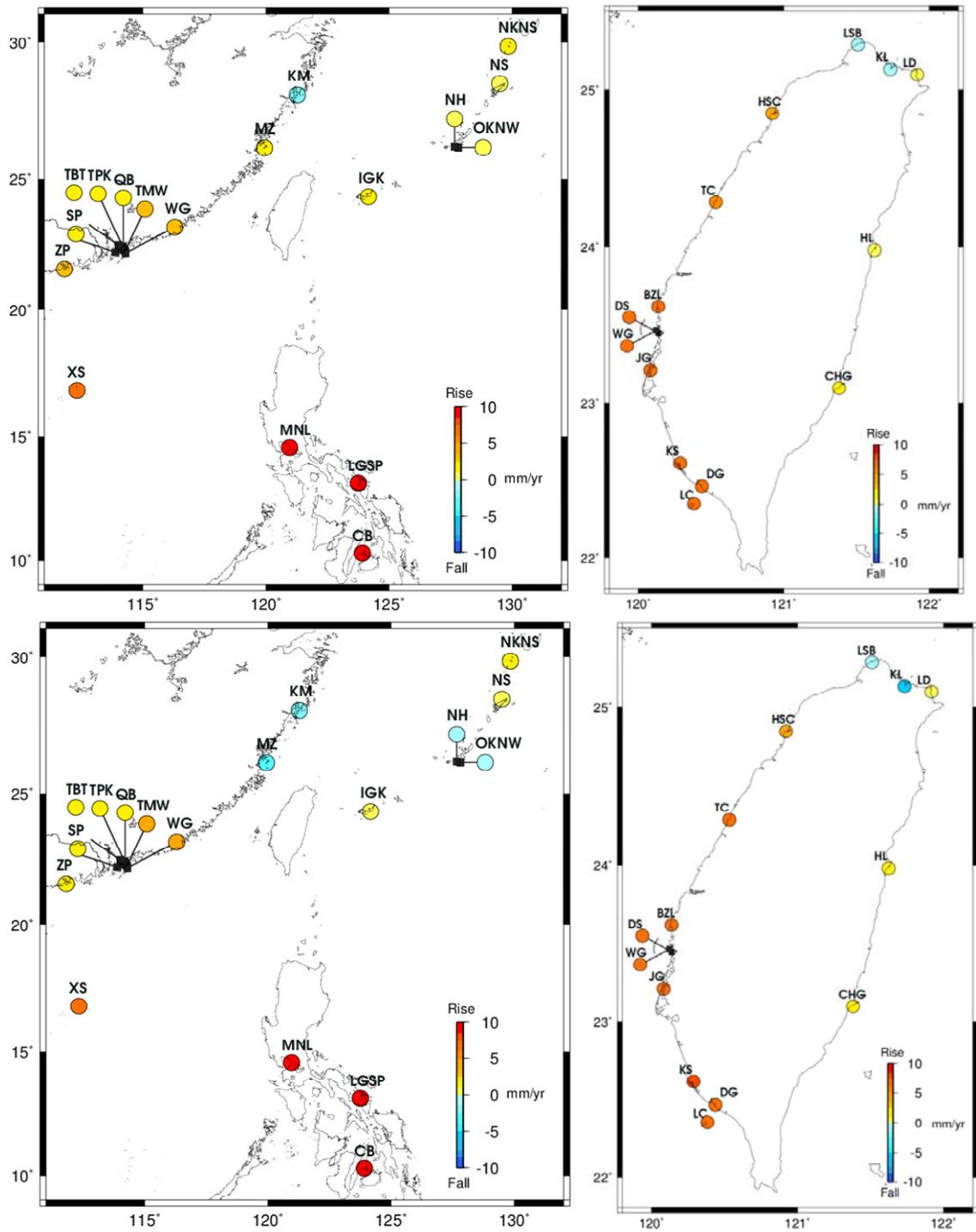


圖 5.5 RADs 測高資料(上圖)與所有驗潮站資料(下圖)估算臺灣周圍 SLR 速率

表 5.7 PSMSL 驗潮站固定範圍之 SLR 速率 (除了基隆與高雄驗潮站應用 5° 衛星測高資料, 其他區域驗潮站則使用 2° 衛星測高資料)。ALT 為衛星測高資料

Station Name	Trend(mm/yr)			
	AVISO		RADs	
	ALT	TG	ALT	TG
Zhapo	5.12±1.25	4.41±1.93	2.75±1.29	1.98±1.93
Xi Sha	8.36±1.70	7.72±2.29	6.98±1.69	6.34±2.29
Kanmen	0.80±1.09	0.02±1.96	-1.56±1.08	-2.36±1.96
Waglan Island	5.03±1.18	6.42±3.23	2.81±1.21	4.22±3.23
Quarry Bay	4.83±1.23	3.92±2.13	2.35±1.26	1.41±2.13
Tai Miu Wan	5.01±1.20	6.66±2.54	2.69±1.23	4.30±2.54
Tai Po Kau	4.81±1.28	4.39±1.84	2.28±1.32	1.81±1.84
Tsim Bei Tsui	4.69±1.35	4.77±2.34	1.98±1.38	2.03±2.34
Shek Pik	4.65±1.33	4.89±1.92	1.84±1.36	2.07±1.92
Keelung*	1.15±1.03	-3.83±1.73	-0.05±1.03	-5.09±1.73
Kaohsiung*	8.64±0.79	10.21±1.40	6.62±0.80	8.29±1.39
Nase	1.38±1.36	1.27±1.52	0.76±1.50	0.67±1.52
Nakano Sima	0.25±1.31	0.66±1.54	1.82±1.58	1.78±1.54
Okinawa	1.02±1.69	-0.07±1.50	0.71±1.74	-0.42±1.50
Naha	1.05±1.68	-0.11±1.53	0.68±1.72	-0.51±1.53
Ishigaki	2.56±1.58	2.04±2.22	1.24±1.59	0.43±2.22
Manila	11.28±1.22	10.71±2.51	10.22±1.19	9.55±2.51
Legaspi	12.65±1.68	14.40±1.61	9.10±1.75	11.77±1.61
Cebu	17.65±1.64	16.33±1.48	11.96±1.93	9.35±1.48

\*表示各驗潮站資料的時間涵蓋範圍無完整涵蓋 2002-2011 年

表 5.8 UHSLC 驗潮站固定範圍之 SLR 速率(應用 5° 衛星測高資料)。ALT 為衛星測高資料

Station Name	Trend(mm/yr)			
	AVISO		RADs	
	ALT	TG	ALT	TG
Keelung*	1.15±1.03	-3.77±1.74	-0.04±1.03	-5.02±1.74
Kaohsiung*	8.62±0.79	10.06±1.45	6.61±0.80	8.10±1.41

\*表示各驗潮站資料的時間涵蓋範圍無完整涵蓋 2002-2011 年

表 5.9 CWB 驗潮站固定範圍之 SLR 速率(應用 5° 衛星測高資料)。ALT 為衛星測高資料

Station Name	Trend(mm/yr)			
	AVISO		RADs	
	ALT	TG	ALT	TG
Boziliao*	8.18±0.84	10.04±1.65	6.18±0.85	7.32±1.65
Taichung Port*	7.74±0.88	8.96±2.77	5.67±0.88	6.29±2.77
Hsinchu	7.19±0.93	7.30±2.24	4.80±0.94	4.90±2.24
Linshanbi*	1.07±1.01	1.12±1.76	-0.12±1.03	-0.07±1.76
Longdong	1.21±1.03	1.53±0.96	0.00±1.03	0.29±0.96
Hualien*	2.02±1.11	2.57±1.83	0.68±1.11	1.30±1.83
Chenggong	2.62±1.17	2.91±1.09	1.12±1.18	1.46±1.09
Liuchiu	8.69±0.79	9.48±1.26	6.65±0.80	7.45±1.26
Donggang*	8.68±0.79	9.55±2.09	6.70±0.80	6.90±2.09
Kaohsiung*	8.62±0.79	10.18±1.83	6.60±0.80	7.70±1.83
Jiangjun	8.37±0.81	8.85±1.21	6.38±0.83	6.75±1.21
Wengang*	8.26±0.83	8.90±1.80	6.27±0.84	6.73±1.80
Dongshi	8.27±0.83	8.71±2.50	6.27±0.84	6.70±2.50
Mazu*	4.96±1.07	1.57±5.74	1.71±1.11	-2.58±5.74

\*表示各驗潮站資料的時間涵蓋範圍無完整涵蓋 2002-2011 年

另外，本研究利用衛星測高資料與驗潮站資料分析 2002-2011 年臺灣周圍各區域內的 SLR 速率 (依圖 5.6 中分區方式)，結果如表 5.10 所示。由表可知，不同資料估算的整體區域趨勢非常一致，臺灣北部(區域 I)的 SLR 速率約-1~2 mm/yr，臺灣南部(區域 II)的 SLR 速率約 4~8 mm/yr，菲律賓地區(區域 III) 的 SLR 速率為 8~14 mm/yr，表示臺灣南方海域的 SLR 速率較臺灣北部快，SLR 速率越往南上升越快，而且兩資料皆顯示臺灣西方海域(香港地區-區域 IV) 的 SLR 速率(3~8 mm/yr) 皆較臺灣東方海域(日本地區-區域 V)的 SLR 速率(0~1 mm/yr)快。然而因為驗潮站位置分佈不平均以及越低緯度 SLR 速率越快，導致臺灣南部、菲律賓與香港區域的驗潮站 SLR 速率和衛星測高成果有 2~3 mm/yr 差異，但整體而言，驗潮站與測高資料估算臺灣周圍 SLR 速率的趨勢相同，近 10 年臺灣附近 SLR 速率正由北向南逐漸增加且平均區域(I-V 區域)中各資料估算 SLR 速率約為 3~5 mm/yr，而由 AVISO 與 RADs 衛星測高資料估算整個研究區域(緯度: 10° N~30° N、經度: 110° E~130° E)的 SLR 速率分別為 8 mm/yr 與 6 mm/yr。

綜合上述 SLR 速率成果可知，臺灣周圍海水面變化主要呈現上升趨勢，此結果與前人研究利用衛星測高估算 SLR 速率成果一致[黃清哲

等人，2009; Tseng *et al.*, 2009; Chang *et al.*, 2012]。IPCC[2013]第五次報告指出，本世紀末平均海水面將上升約 0.53~0.97 公尺，表示海水面將持續上升，而目前臺灣周圍海域 SLR 速率約全球變化速率的  $3.2\pm 0.4$  mm/yr (涵蓋時間為 1993-2009 年) [Church and White, 2011]的兩倍，並且 SLR 速率正由北向南逐漸增加。相對於風浪等短週期災害，海面上升可能造成海岸淹沒、土地流失、海岸侵蝕海岸速率加快、地下水與土壤鹽化等影響，將會對於臺灣社會與經濟造成極大的衝擊，然而臺灣西南部地區驗潮站卻主要呈現地殼下降情形，其中塹港驗潮站每年可呈現約 30~40 mm 的下沉量。兩種影響因子結合下，塹港地區的海水面變化每年將上升約 4~5 cm，因此臺灣西南部地區為政府當局在未來制訂防災機制時，首先應考慮的地區之一。

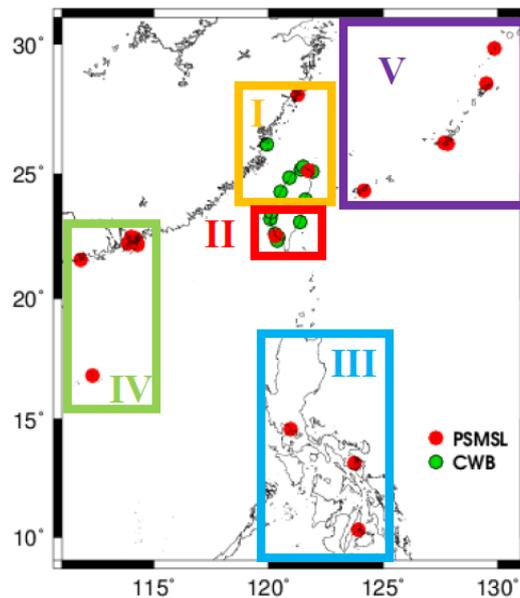


圖 5.6 臺灣附近海域驗潮站之分佈與分區圖

表 5.10 臺灣附近各海域的 SLR 變化速率。ALT 為衛星測高資料

Region	Trend (mm/yr)			
	AVISO		RADs	
	ALT	Tide gauge	ALT	Tide gauge
Northern Taiwan (I)	2.30±1.11	2.38±0.94	-0.62±1.10	0.62±0.94
Southern Taiwan (II)	5.50±1.31	7.91±0.58	3.96±1.37	5.81±0.58
Philippine (III)	11.27±1.60	13.81±1.11	7.60±1.64	10.22±1.11
Hong Kong (IV)	7.96±1.10	5.40±0.82	6.08±1.09	3.02±0.82
Japan (V)	1.04±0.95	0.76±0.75	0.49±0.95	0.39±0.75
Total regions (I-V)	5.07±0.79	5.51±0.37	3.77±0.80	3.45±0.37
All study areas	7.79±0.87	5.51±0.37	6.41±0.86	3.45±0.37

### 5.2.2 臺灣周圍海域海水面上升速率之原因

本計畫分別利用溫鹽資料(Ishii、IPRC、SIO 與 JAMSTEC)、GRACE 重力衛星資料與衛星測高資料(AVISO 與 RADs)估算臺灣周圍海域(緯度: 10°N~30°N、經度: 110°E~130°E) SSL 變化、海水質量變化與海水面變化。由於 IPRC 溫鹽資料時間涵蓋起始為 2005 年，為了比較的一致性，因此圖 5.7 為分別估算 2005-2011 年臺灣周圍的 SSL 變化、海水質量變化與海水面變化，由圖可知，各溫鹽資料估算的 SSL 變化的時間序列與兩衛星測高資料估算的海水面變化的時間序列非常一致，相關係數約 0.79~0.93，其中 Ishii 資料的相關係數最高，與 AVISO 和 RADs 資料的相關係數約 0.92~0.93，而海水質量變化的時間序列則與海水面變化時間序列呈現相反方向的震盪，相關係數為-0.23~-0.19，如表 5.11 所示。表 5.11 中 2005-2011 年臺灣周圍 SLR、SSL 變化速率與海洋質量變化速率分別為 4.4~5.9 mm/yr、-4.2~-1.5 mm/yr 與 2.12 mm/yr，可知近 7 年臺灣周圍海水面與海洋質量變化正在上升，而各溫鹽資料估算 SSL 變化正在降低，然而因為溫鹽資料來自不同資料中心，各資料中心有各自處理資料的步驟與方法，造成溫鹽資料間有些許差異，並且觀測資料時間段較短，標準偏差較大，導致各溫鹽資料估算的 SSL 變化速率之差異量較大，最大差異量可達 3 mm/yr。因此本計畫使用溫鹽資料時間範圍可涵蓋至 2003-2011 年的 Ishii 與 JAMSTEC 資料，並且與相同時間段的衛星測高資料和重力衛星 GRACE 資料相比較，成果如圖 5.8 與表 5.12 所示。由圖 5.8 可知，兩溫鹽資料估算的 SSL 變化之時間序列與兩測高資料估算海水面變化的時間序列皆非常一致，

相關係數約 0.86~0.93; 海水質量變化的時間序列則與兩測高估算海水表面變化的時間序列皆呈現相反方向的震盪，相關係數為-0.22~-0.19;而兩溫鹽資料估算的 SSL 變化和海水質量變化相加後的時間序列與海水表面變化則更加一致，相關係數約 0.88~0.95。2003-2011 年臺灣周圍 SLR 速率、SSL 變化速率與海洋質量變化速率分別為 7.24~8.68 mm/yr、2.48~2.66 mm/yr 與 1.10 mm/yr，表示近 10 年臺灣周圍海水面正呈現上升情形，其中影響海水面變動的 SSL 變化與海洋質量變化亦正在上升，兩者分別占 AVISO 估算海水面變化的 29%~31% 與 15%，而 SSL 變化與海洋質量變化分別占 RADs 估算海水面變化的 34%~37% 與 15%。

由上面結果可知，近 10 年 SSL 變化為目前 SLR 主要上升的因素，雖然三者資料(衛星測高、溫鹽資料與重力衛星 GRACE)間約有 3~5 mm/yr 的不確定量，約為 SLR 速率的 1/2，而 Leuliette 與 Miller [2009] 利用 ARGO 溫鹽資料、GRACE 重力衛星資料與衛星測高資料估算 2004-2007 年全球海水面變化，三者資料間的不確定量約 1 mm/yr，表示海水面變化結果仍然存在一定的不確定量，除了資料本身的誤差外，其中部份因素可能是由 PGR 模型與深海 SSL 變化所造成[Boe' *et al.*, 2009]，因 GRACE 重力衛星測得的重力場變化訊號中包含 PGR 訊號，在 GRACE 重力場資料裡，PGR 訊號相對於海水質量變化訊號來說影響很大，若要利用 GRACE 解計算海水質量變化，必須將 PGR 自 GRACE 重力場解中移除，然而若以水厚度表示不同 PGR 模型，其差值約可達 1 mm/yr [Chambers *et al.*, 2010]，表示現今 PGR 改正模型存有很大的差異量。另外，因本研究使用的溫鹽資料僅包含水深最深至 2000 公尺，因此部分不確定量可能由深海 SSL 變化所引起 [Boe' *et al.*, 2009]。

表 5.11 臺灣附近海域 SSL 變化、海水質量變化與 SLR 變化速率  
(2005-2011 年)

Data	Trend (mm/yr)	Corr. with AVISO	Corr. with RADs
AVISO	5.93±1.60	x	x
RADs	4.40±1.59	x	x
Ishii	-1.70±1.52	0.92	0.93
IPRC	-4.23±2.20	0.79	0.82
SIO	-1.52±1.93	0.85	0.88
JAMSTEC	-2.70±1.92	0.87	0.89
Mass	2.12±0.46	-0.19	-0.23

表 5.12 臺灣附近海域 SSL 變化、海水質量變化與 SLR 變化速率  
(2003-2011 年)

Data	Trend (mm/yr)	Corr. with AVISO	Corr. with RADs
AVISO	8.68±1.05	x	x
RADs	7.24±1.05	x	x
Ishii	2.48±1.04	0.92	0.93
JAMSTEC	2.66±1.33	0.86	0.89
Mass	1.10±0.32	-0.19	-0.22
Ishii+mass	3.80±1.13	0.94	0.95
JAMSTEC+mass	3.73±1.46	0.88	0.90

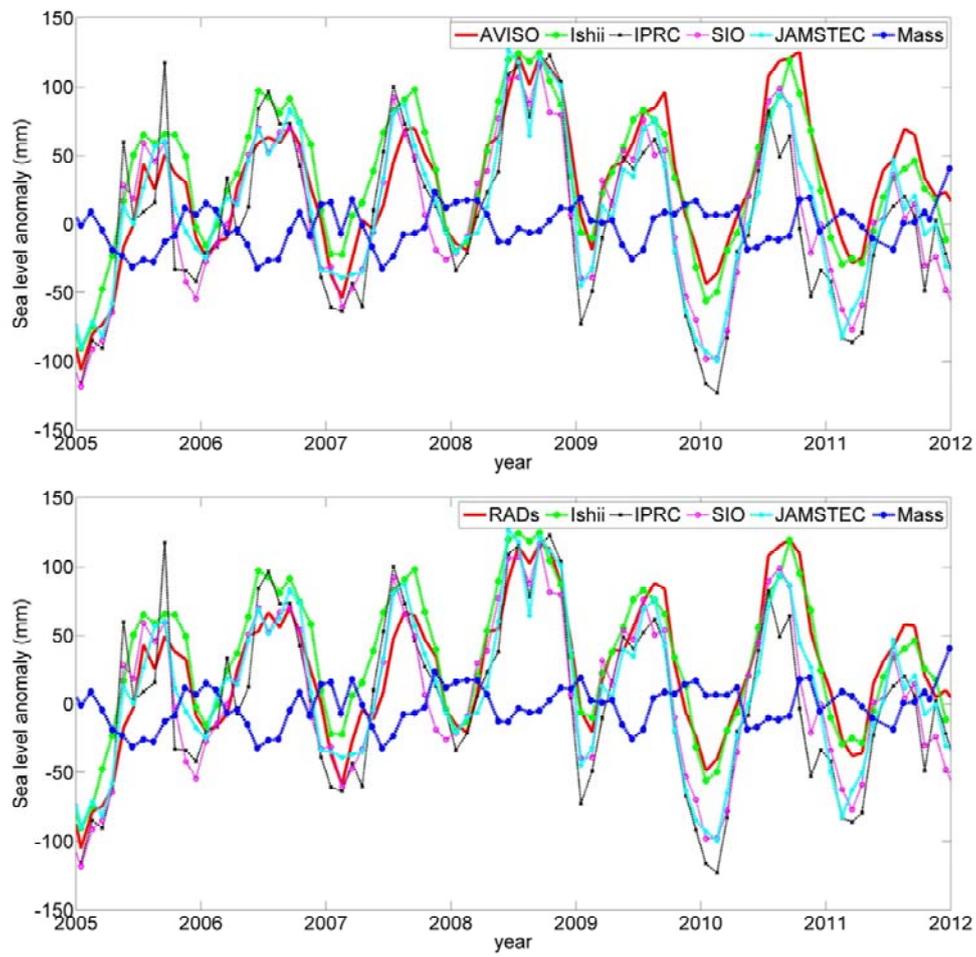


圖 5.7 臺灣附近海域 SSL 變化、海水質量變化與 SLR 變化 (2005-2011 年)。上: AVISO 衛星測高，下: RADs 衛星測高

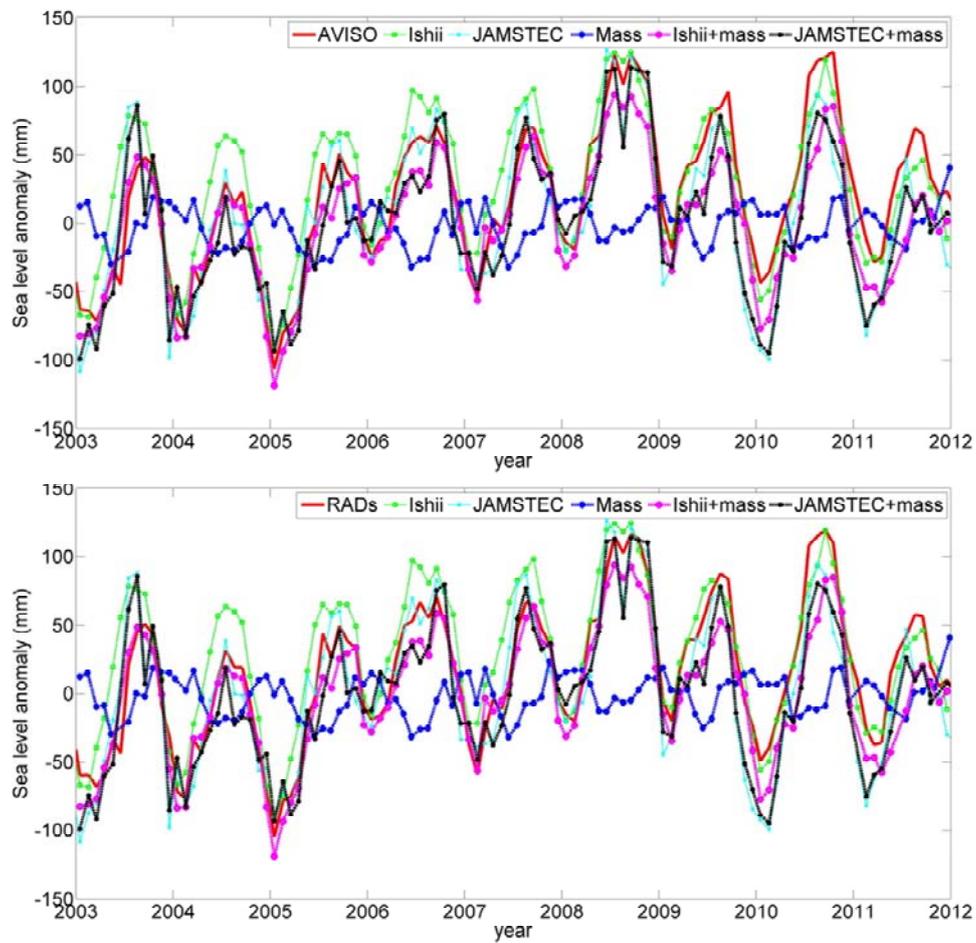


圖 5.8 臺灣周圍的 SSL 變化、海水質量變化與 SLR 變化 (2003-2011 年)。上: AVISO 衛星測高，下: RADs 衛星測高

## 第六章 結論與建議

近十年來，因氣候變遷、全球暖化所導致之全球海面上升，遠比過去更為快速，其所導致之災害及其對人類生命和財產所造成的損失，普遍引起全球產官學研各界之關注。惟因海洋地理位置與地殼升降變動之差異，臺灣四周海域之海水面變化速率，實際與全球平均海水面之上升速率並非一致，甚且較全球速率來的大，因此，將臺灣附近海水面變化視為與全球平均海水面變化速率一樣並不合理。所以針對臺灣之地理與地質特性，準確分析估算臺灣周圍海域海水面變化速率並瞭解造成海面上升的主要原因，實為一順應全球暖化效應之重要課題。

一般而言，驗潮站潮位紀錄與衛星測高資料為研究海水面變化之兩種主要觀測量，為此，本研究結合近十年（2002-2011）衛星測高資料與驗潮站資料，首先，估算近十年驗潮站之地殼變動速率，其後，再將其自驗潮站之潮位紀錄中移除。經分區分析臺灣四周海域之海水面變化速率，結果顯示：台灣周圍驗潮站大多呈現地殼下沉情形，其中，台灣西南部驗潮站為顯著下沉之區域，而塭港驗潮站周圍地殼表面下沉量最大，每年可下沉 3~4 公分，地殼變動改正的影響量平均值約 7.5 mm/yr。此外，本研究亦評估海潮、逆氣壓效應、偏移量與地殼變動等改正對於利用台灣周圍驗潮站資料估算海水面變化速率之影響，其中偏移量改正之影響最為顯著，皆在 30 mm/yr 以上，因此若應用未經偏移量和地殼變動改正的驗潮站資料進行海水面變化速率估算，將造成嚴重誤差。

本研究考量地殼升降變動率，經分區分析臺灣四周海域之海水面變化速率，所得主要之具體結論，歸納如后。

### 6.1 結論

1. 不同乾對流層改正、海潮改正、海潮承載改正模型對於利用衛星測高資料計算 SLR 速率所造成的差異很小，而濕對流層改正、電離層延遲改正與 IB 改正對 SLR 變化速率計算影響較大。現今衛星測高資料濕對流層改正在海洋區域多以多波段微波輻射儀直接觀測數據來進行，電離層改正則大多以測高儀雙頻雷達波組成無電離層觀測量來消除，IB 改正則以最新 MOG2D total inverse barometer correction 最為被廣泛採用。本研究利用不同改正模型評估改正所造成之 SLR 速率誤差約為 1.2 mm/yr。
2. 驗潮站資料 IB 改正之海水面氣壓資料來源為 ECMWF、NCEP 與 CWB 資料中心，三種資料間的相關係數皆在 0.95 以上，表示三者資料於臺灣附近有非常高的一致性。
3. 本計畫結合衛星測高資料與驗潮站資料估算驗潮站周圍地殼表面升降速率，主要影響估算地殼變動成果之因素分別為驗潮站位置與衛星測高之地面軌跡路徑、資料涵蓋時間長度與驗潮站資料品質。另外，本計畫以地殼變動速率之標準偏差評估何者範圍(2°、3°、5°)內衛星測高資料較適用於估算驗潮站之地殼變動，由結果可知，本計畫臺灣附近的驗潮站資料適用 5° 衛星測高資料，其他區域驗潮站資料則適用 2° 衛星測高資料。
4. 本計畫結合 2002-2011 年衛星測高與驗潮站資料估算地殼變動速率，成果顯示整個研究區域大多呈現地殼下降情形，例如臺灣北部地區的地殼變動速率呈現下降情形，其中麟山鼻驗潮站的地殼變動速率最大，每年約 20~21 mm 下沉量；臺灣西北部地區的地殼變動速率呈現上升情形，其中馬祖驗潮站的地殼變動約每年 50 mm 上升；臺灣西南部地區主要呈現地殼下沉情形，其中以塭港每年呈現約 30~40 mm 下沉量，為研究區域中下沉量最大的驗潮站；菲律賓驗潮站中除馬尼拉驗潮站呈現下降情形(~-12 mm/yr)外，其餘驗潮站周圍地殼呈現上升情形(1~8 mm/yr)，而香港附近驗潮站周圍的地殼呈現輕微下降情形，平均每年呈現 1~4 mm 下降情形，日本驗潮站周圍地殼平均每年呈現 1 mm 下降情形。

5. 利用改正後的驗潮站資料來估算 SLR 速率與利用原始驗潮站資料有顯著的不同，其中海潮因子與 IB 因子對於驗潮站資料改正前後 SLR 速率變化之影響分別為 0~1 mm/yr 與 0~2 mm/yr，顯示海潮效應與大氣壓力的變化對 SLR 速率推估的影響較小，而偏移量與地殼變動因子之影響最為顯著，偏移量影響量皆在 30 mm/yr 以上，地殼變動改正的影響量平均值約 7.5 mm/yr，約全球 SLR 速率  $3.2 \pm 0.4$  mm/yr (涵蓋時間為 1993-2009 年) [Church and White, 2011] 的兩倍。因此在臺灣附近區域，若以未經偏移量和地殼變動改正之驗潮站資料來進行 SLR 變化速率估算，將造成嚴重誤差，故本研究推斷若僅使用驗潮站資料來計算近 10 年之臺灣附近海域 SLR 速率，則其變化速率可能包含上述因子之影響而產生較大的誤差。因此偏移量與地殼變動因子之改正則是必需的。
6. 由衛星測高資料與驗潮站資料計算臺灣驗潮站之 SLR 速率大致相同，但部分驗潮站資料涵蓋時間較短將造成計算速率差異。
7. 本研究將驗潮站進行分區並估算 SLR 速率，區域共分為臺灣北部、臺灣南部、菲律賓、香港與日本五區。臺灣北部的 SLR 速率為 -1~2 mm/yr，臺灣南部的 SLR 速率為 4~8 mm/yr，菲律賓地區的 SLR 速率為 8~14 mm/yr，表示臺灣南方海域的海水面上升速率較臺灣北部快，SLR 變化速率越往南越快，而臺灣西方海域(香港地區) SLR 速率(3~8 mm/yr)較臺灣東方海域(日本地區)變化速率(0~1 mm/yr)快。由衛星測高資料估算 2002-2011 年整個研究區域的 SLR 速率分別為 6~8 mm/yr。
8. 臺灣西南部地區驗潮站呈現較明顯的地殼下降情形，其中塭港驗潮站每年可呈現約 30~40 mm 的下沉量，而臺灣周圍 SLR 速率呈現 6~8 mm/yr 上升，並且 SLR 速率正由北向南加快，臺灣南部 SLR 速率為 4~8 mm/yr。考慮地殼變動的影響下，塭港地區的海水面變化每年將上升約 4~5 cm。因此未來政府在制訂防災機制時，西南區域應為首要考慮的地區之一。

9. 本計畫利用溫鹽資料、GRACE 重力衛星資料與衛星測高資料估算近 10 年(2003-2011 年)臺灣周圍海域 SSL 變化、海水質量變化與海水面變化。SSL 變化與海水面變化的相關係數約為 0.90;海水質量變化與海水面變化的相關係數約為-0.20。SLR 變化速率、SSL 變化速率與海洋質量變化速率分別為 7.24~8.68 mm/yr、2.48~2.66 mm/yr 與 1.10 mm/yr, 表示影響海水面變動的 SSL 變化與海洋質量變化皆呈現上升, 兩者分別約占 SLR 速率的 30%~40%與 15%。然而三者資料間約有 45%的 SLR 變化速率的不確定量, 除了資料本身的誤差外, 其中部份因素可能是由改正 GRACE 之 PGR 模型誤差 [Chambers *et al.*, 2010]與深海 SSL 變化所造成 [Boe' *et al.*, 2009]。

## 6.2 建議

本計畫僅利用十年衛星測高與驗潮站資料進行地殼變動和 SLR 變化速率計算, 導致估算變動速率之標準偏差較大, 進而影響 SLR 速率之計算精度。而相關研究說明採用長時間資料 (20 年) 衛星測高與驗潮站資料可大幅減低地殼變動速率之標準偏差(kuo *et al.*, 2004; kuo *et al.*, 2008; Ray *et al.*, 2010), 故展望未來工作, 建議應用長期(二十年)資料進行地殼變動和 SLR 速率估算分析, 可規劃預期工作項目如下:

1. 匯整與更新臺灣四周海水面之相關研究文獻。
2. 進行長期性(20 年期距以上)驗潮站和衛星測高資料之蒐集、改正和率定。
3. 應用驗潮站和衛星測高資料, 進行長期性臺灣四周海域 SLR 之研究分析。
4. 綜合比較與評估長、短期之臺灣四周海水面升降變動率與趨勢。
5. 分別評估 SSL 變化與海水質量變化對海水面變化之貢獻程度。

## 參考文獻

1. Ablain, M., A. Cazenave, G. Valladeau, and S. Guinehut (2009), A new assessment of the error budget of global mean sea level rate estimated by satellite altimetry over 1993–2009, *Ocean Sciences*, 5, 193-201.
2. AVISO and PODAAC User Handbook (2001), IGDR and GDR Jason Products.
3. Blewitt, G., Z. Altamimi, J. Davis, R. Gross, C. Kuo, F. Lemoine, A. Moore, R. Neilan, H.P. Plag, M. Rothacher, C. Shum, M. Sideris, T. Schöne, P. Tregoning, and S. Zerbini (2010), Geodetic observations and global reference frame contributions to understanding sea-level rise and variability in *Understanding Sea-Level Rise and Variability*, 256–284, Eds. J. Church, P.L. Woodworth, T. Aarup, and S. Wilson. Wiley-Blackwell, ISBN: 978-1-443-3451-7.
4. Boe', J., A. Hall, and X. Qu (2009), Deep ocean heat uptake as a major source of spread in transient climate change simulations, *Geophysical Research Letters*, 36, doi: 10.1029/2009gl040845.
5. Brown, S. (2010), A Novel Near-Land Radiometer Wet Path-Delay Retrieval Algorithm: Application to the Jason-2/OSTM Advanced Microwave Radiometer, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 48, 4.
6. Cazenave, A., D. Chambers, P. Cipollini, L. Fu, J. Hurrell, M. Merrifield, R. Nerem, H. Plag, C. Shum, and J. Willis (2010), The challenge of measuring sea level rise and regional and global trends, Geodetic observations of ocean surface topography, ocean currents, ocean mass, and ocean volume changes, Proc. OceanObs09: Sustained

- Ocean Observations and Information for Society, 2, Venice, Italy, 21-25 Sept. 2009, Hall. J., Harrison D.E. and Stammer, D., Eds., ESA Publication WPP-306.
7. Chambers, D.P., J. Wahr, M.E. Tamisiea, and R.S. Nerem (2010), Ocean mass from GRACE and Glacial Isostatic Adjustment, *J. Geophys. Res.*, 115, doi: 10.1029/2010jb007530.
  8. Chang, T.Y., B.F. Chao, C.-C. Chiang, and C. Hwang (2012), Vertical crustal motion of active plate convergence in Taiwan derived from tide gauge, altimetry, and GPS data, *Tectonophysics*, 578, 98-106.
  9. Chelton, D.B., and D.B. Enfield (1986), Ocean signals in tide gauge records, *Journal of Geophysical Research*, 91, 9081-9086.
  10. Chen, J. L., C. R. Wilson, R. J. Eanes, and R. S. Nerem (1999), Geophysical interpretation of observed geocenter variations, *J. Geophys. Res.*, 104, 2683- 2690.
  11. Chen, J. L., M. Rodell, C. R. Wilson, and J. S. Famiglietti (2005), Low degree spherical harmonic influences on Gravity Recovery and Climate Experiment (GRACE) water storage estimates, *Geophys. Res. Lett.*, 32, L14405, doi: 10.1029/2005GL022964.
  12. Chen, K.H., M. Yang, Y.T. Huang, K.E. Ching, and R.J. Rau (2011), Vertical displacement rate field of Taiwan from geodetic levelling data 2000–2008, *Survey Review* 43, 296-302, doi: 10.1179/003962611X13055561708380.
  13. Cheng, Y., and O. B. Andersen (2013), Impacts of altimeter corrections on local linear sea level trends around Taiwan, *International Journal of Remote Sensing*, 34, 6738-6748, doi: 10.1080/01431161.2013.805283.
  14. Ching, K.E., M.L. Hsieh, K.M. Johnson, K.H. Chen, R.J. Rau, and M.

- Ying (2011), Modern vertical deformation rates and mountain building in Taiwan from precise leveling and continuous GPS observations, 2000–2008, *Journal of Geophysical Research*, 116, B08406, doi: 10.1029/2011JB008242.
15. Chovitz, B.H. (1983), Geodetic results from Seasat, *Marine Geodesy* 7, 315-330.
  16. Church, J.A., N.J. White, R. Coleman, K. Lambeck, and J.X. Mitrovica (2004), Estimates of regional distribution of sea level rise over the 1950-2000 period, *Journal of Climate*, 17, 2609-2625.
  17. Church, J., and N.J. White (2011), Sea-level rise from the late 19th to the Early 21<sup>st</sup> Century, *Surv. Geophys.*, doi: 10.1007/s10712-011-9119-1.
  18. Cretaux, J.-F., L. Soudarin, F. J. M. Davidson, M.-C. Gennero, M. Berge-Nguyen, and A. Cazenave (2002), Seasonal and interannual geocenter motion from SLR and DORIS measurements: Comparison with surface loading data, *J. Geophys. Res.*, 107, 2374, doi: 10.1029/2002JB001820.
  19. Douglas, B. C. (2001), Sea level change in the era of the recording tide gauge, In B. C. Douglas, M. S. Kearney, and S. P. Leatherman (Eds.), *Sea Level Rise; History and Consequences*, Chapter 3, Academic Press.
  20. Duan, X.J., J.Y. Guo, C.K. Shum, and W. van der Wal. (2009), On the postprocessing removal of correlated errors in GRACE temporal gravity field solutions, *J. Geod.*, 83, 1095-1106, doi:10.1007/s00190-009-0327-0.
  21. Ericson, J.P., C.J. Vorosmarty, S.L. Dingman, L.G. Ward, and M. Meybeck (2006), Effective sea level rise and deltas: causes of change and human dimension implications, *Global and Planetary Change*, 50,

- 63-82.
22. Franco, A.F. (1988), *Tides: Fundamentals, Analysis and Prediction*, Second edition. Fundação Centro Tecnológico de Hidráulica, São Paulo, Brazil, 249.
  23. Gill, A. E. (1982), *Atmosphere-Ocean Dynamics*, Academic Press, New York.
  24. Guo, J. Y., X.J. Duan, and C.K. Shum (2010), Non-isotropic Gaussian Smoothing and Leakage Reduction for Determining Mass Changes over Land and Ocean using GRACE data, *Geophys. J. Int.*, 181: 290-302. doi: 10.1111/j.1365-246X.2010.04534.x.
  25. Hastie, T., and R. Tibshirani (1990), Exploring the nature of covariate effects in the proportional hazards model, *Biometrics*, 46, 1005–1016.
  26. Heiskanen, W. A., and H. Moritz (1967), *Physical Geodesy*, W. H. Freeman, New York.
  27. Hofmann-Wellenhof B. and H. Moritz (2006), *Physical geodesy*, Springer Wien New York, 3-14.
  28. Hosoda, S., T. Ohira, and T. Nakamura (2008), A monthly mean dataset of global oceanic temperature and salinity derived from Argo float observations, *JAMSTEC Rep. Res. Dev.*, 8, 47-59.
  29. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (2001), *Climate Change 2001: The Scientific Basis*, edited by J. T. Houghton et al., Cambridge Univ. Press, Cambridge, U. K.
  30. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (2007), *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, edited by S. Solomon et al., Cambridge

Univ. Press, Cambridge, U. K.

31. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (2013), *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Summary for Policymakers*, edited by L. Alexander et al., available at [http://www.climatechange2013.org/images/uploads/WGIAR5-SPM\\_Approved27Sep2013.pdf](http://www.climatechange2013.org/images/uploads/WGIAR5-SPM_Approved27Sep2013.pdf).
32. Ishii, M., and M. Kimoto (2009), Reevaluation of historical ocean heat content variations with time-varying XBT and MBT depth bias corrections, *Journal of Oceanography*, 65, 287-299, doi: 10.1007/s10872-009-0027-7.
33. Kistler, R., and coauthors (2001), The NCEP–NCAR 50-year reanalysis: Monthly means CD-ROM and documentation, *Bulletin Of the American Meteorological Society*, 82, 247–268.
34. Kuo C. Y, C.K. Shum, A. Braun, and J.X. Mitrovica (2004), Vertical crustal motion determined by satellite altimetry and tide gauge data in Fennoscandia, *Geophys. Res. Lett.*, 31, 1, 4-7, doi:10.1029/2003GL0191064.
35. Kuo C. Y., C.K. Shum, A. Braun, K.C. Cheng, and Y. Yi (2008), Vertical Motion determined using Satellite Altimetry and tide Gauges, *Terr. Atmos. Ocean. Sci.*, 19, 1-2, 21-35, doi:10.3319/TAO.2008.19.1-2.21(SA)1.21.
36. Leatherman, P. S., K. Zhanng, and B.C. Douglas (2000), Sea level rise drives coastal erosion, *EOS Transactions, Agu*, 81, 55-57.
37. Llovel, W., S. Guinehut, and A. Cazenave (2010), Regional and interannual variability in sea level over 2002-2009 based on satellite altimetry, Argo float data and GRACE ocean mass, *Ocean Dynamics*,

- 60, 1193-1204, doi: 10.1007/s10236-010-0324-0.
38. Mitrovica, J. X., M.E. Tsimplis, J.L. Davis, and G.A. Milne (2001), Recent mass balance of polar ice sheets inferred from patterns of global sea-level change, *Nature*, 409, 1026-1029.
  39. Nerem, R.S., D.P. Chambers, C. Choe, and G.T. Mitchum (2010), Estimating mean sea level change from the TOPEX and Jason altimeter missions, *Marine Geodesy*, 33, 435-446.
  40. Pattullo, J., W. Munk, R. Revelle, and E. Strong (1955), The seasonal oscillation in sea level, *J. Mar. Res.*, 88-156.
  41. Ray RD, BD Beckley, and FG Lemoine (2010), Vertical crustal motion derived from satellite altimetry and tide gauges, and comparisons with DORIS measurements, *Adv. Space Res.*, 45, 12, 1522, doi:10.1016/j.asr.2010.02.0201510.
  42. Roemmich, D., and J. Gilson (2009), The 2004-2008 mean and annual cycle of temperature, salinity, and steric height in the global ocean from the Argo Program, *Progress in Oceanography*, 82, 81-100, doi: 10.1016/j.pocean.2009.03.004.
  43. Rosmorduc, V., J. Benveniste, E. Bronner, S. Dinardo, O. Lauret, C. Maheu, M. Milagro, and N. Picot (2011), Radar Altimetry Tutorial, *CSL*.
  44. Schwiderski, H. (1984), Combined hydrodynamical and empirical modeling of ocean tides, In: Seeber, Apel (eds.), *Geodetic Feature of the Ocean Surface and their Implications*, 215-229, D. Reidel, Dordrecht.
  45. Shum, C. K., J. C. Ries, and B. D. Tapley (1995), The accuracy and applications of satellite altimetry, *Geophys. J. Int.*, 121, 321-336.

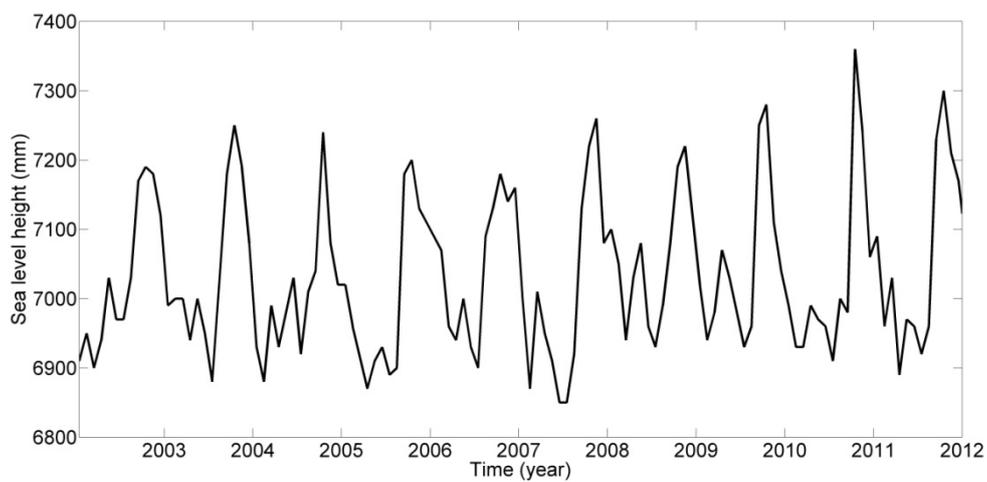
46. Shum, C. K., and C. Y. Kuo (2011), Observation and geophysical causes of present-day sea level rise, In: *Climate Change and Food Security in South Asia*, R. Lal, M. Sivakumar, S. Faiz, A. Rahman, and K. Islam (Eds.), Part 2, Chapter 7, 85-104, doi: 10.1007/978-90-481-9516-9\_7.
47. Stocker, T., Q. Dahe, G.K. Plattner, M. Tignor, S. Allen, and P. Midgley (2010), IPCC Workshop on Sea Level Rise and Ice Sheet Instabilities (Kuala Lumpur, Malaysia, IPCC).
48. Swenson, S. and J. Wahr (2006), Post-processing removal of correlated errors in GRACE data, *Geophys. Res. Lett.*, 33, L08402, doi: 10.1029/2006JB004882.
49. Tapley, B. D., S. Bettadpur, J. C. Ries, P. F. Thompson, and M. M. Watkins (2004a), GRACE measurements of mass variability in the Earth system, *Science*, 305, 503-505.
50. Tapley, B. D., S. Bettadpur, M. Watkins, and C. Reigber (2004b), The Gravity Recovery and Climate Experiment: Mission overview and early results, *Geophys. Res. Lett.*, 31, L09607, 10.1029/2004GL019920.
51. Torge, W. (1989), *Gravimetry*. de-Gruyter, Berlin-New York.
52. Torge, W. (1991), *Geodesy*, W. de Gruyter, Berlin.
53. Tseng, Y.H., C.L. Breaker, and T.Y. Chang (2010), Sea level variations in the regional seas around Taiwan, *Journal of Oceanography*, 66, 27-39.
54. Vignudelli, S., A.G. Kostianoy, P. Cipollini, and J. Benveniste (Eds.) (2011), Coastal altimetry, XII, 566p. 216 illus., 186 illus. in color.
55. Wagner, C.A. (1991), How well do we know the deep ocean tides An

- intercomparision of altimeter, hydrodynamic and gauge data, *Marine Geodesy*, 16, 118-140.
56. Wahr, J., M. Molenaar, and F. Bryan (1998), Time variability of the Earth's gravity field: Hydrological and oceanic effects and their possible detection using GRACE, *J. Geophys. Res.*, 103, 30,205-30,229.
  57. Webster, P.J., G.J. Holland, and J.A. Curry (2005), Changes in tropical cyclone number, duration, and intensity in a warming environment, *Science*, 16, 309, 844-846.
  58. Willis, J., D. P. Chambers, C.Y. Kuo, and C.K. Shum (2010), Global sea level rise: Recent progress and challenges for the decade to come, *Oceanography*, 23, 4, 14-25.
  59. Wilson, A.B., D.H. Bromwich, and K.M. Hines (2011), Evaluation of Polar WRF forecasts on the Arctic System Reanalysis domain: Surface and upper air analysis, *Journal of Geophysical Research*, 116, D11112, doi: 10.1029/2010JD015013.
  60. Wu, L., C. Kao, T. Hsu, Y. Wang and J. Wang (2012), Spatial and Temporal Features of Regional Variations in Mean Sea Level around Taiwan, *Open Journal of Marine Science*, 2, 2, 58-65. doi: 10.4236/ojms.2012.22008.
  61. Wunsch, C. (1972), Bermuda sea level in relation to tides, weather and baroclinic fluctuations, *Reviews of Geophysics and Space Physics*, 10, 1-49.
  62. Wunsch, C., and D. Stammer (1997), Atmospheric loading and the oceanic "inverted barometer" effect, *Reviews of Geophysics*, 35, 79-107.
  63. Zhang, J.G., Y. Wang, and Y.S. Cheng (2009), The analysis of China

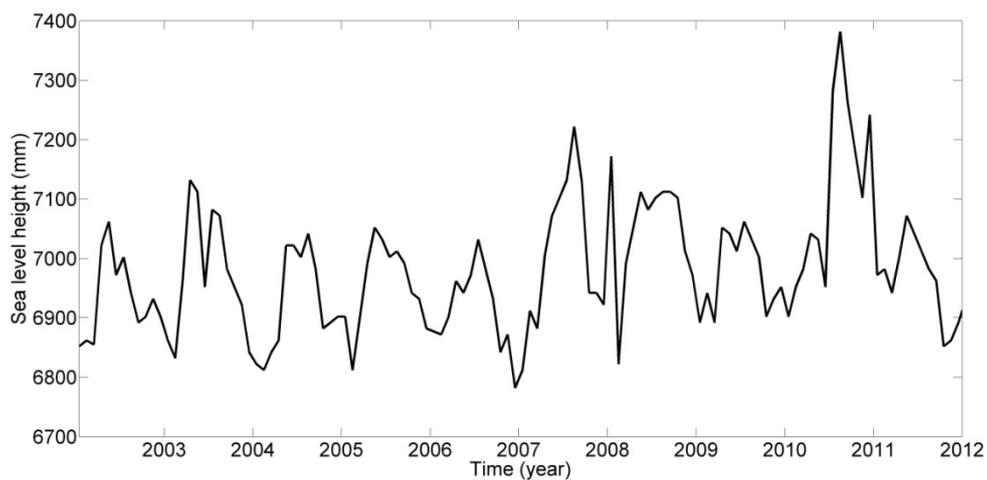
sea level change, *Chinese Journal of Geophysics*, 52, 7, 1725-1733. (in Chinese)

64. 內政部消防署，2012，內政部消防署天然災害統計資料。
65. 姜介中，2009，利用驗潮記錄估計臺灣沿岸地表垂直運動。國立臺灣大學理學院海洋研究所碩士論文，台北。
66. 游輝欽，2000，球諧分析衛星加速度求定地球重力場。國立交通大學土木工程學系碩士論文，新竹。
67. 陳盈樺，2009，利用測高衛星、重力衛星、NCEP氣候模型估計地心與 $C_{20}$ 變動。國立成功大學測量及空間資訊學系碩士論文，台南。
68. 陳亮全、林李耀、陳永明、張志新、陳韻如、江申、于宜強、周仲島、游保杉，2011，氣候變遷與災害衝擊，載於許晃雄、陳正達、盧孟明、陳永明、周佳、吳宜昭(主編)，*臺灣氣候變遷科學報告*，311-358，台北：行政院國家科學委員會。
69. 黃清哲、許泰文、吳立中，2010，運用潮位與衛星資料推估海平面變遷量技術之研發(2/2)，經濟部水利署出版，台北市。

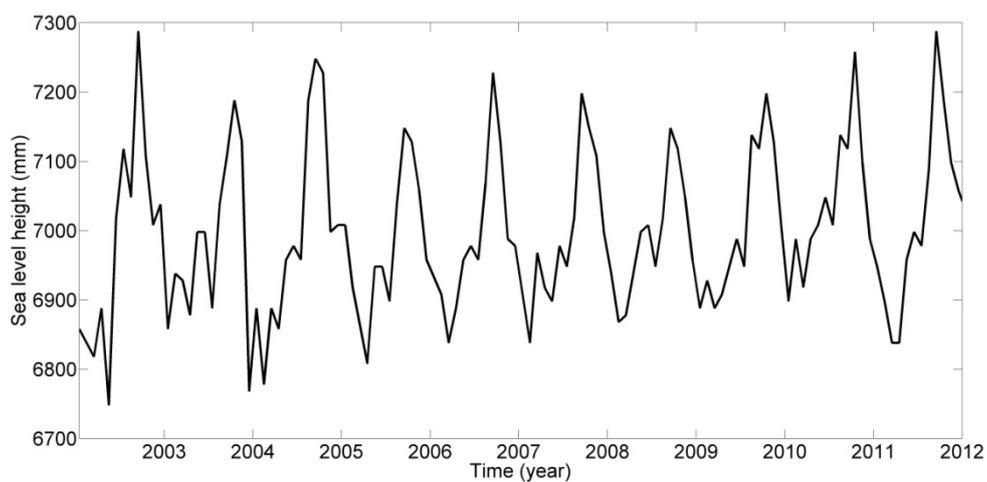
## 附錄一 潮位站資料



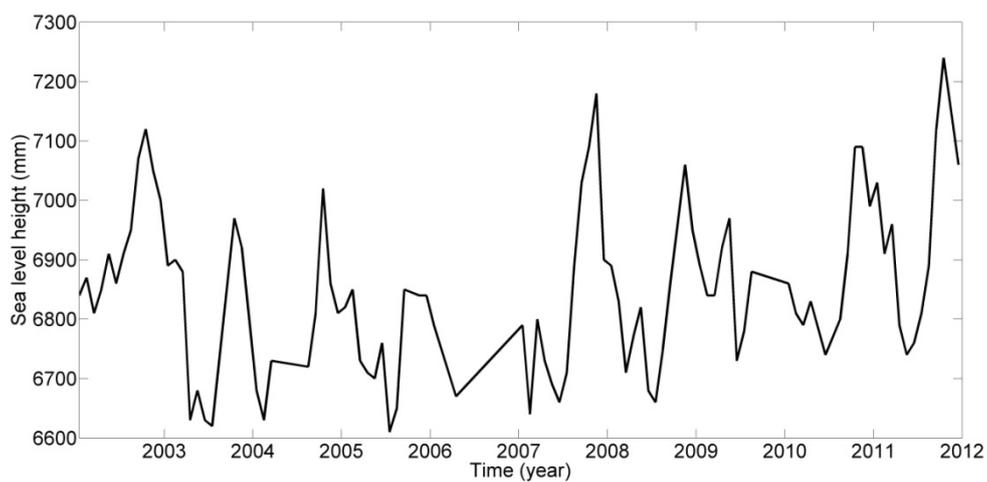
附圖 1-1 PSMSL 開坡驗潮站資料



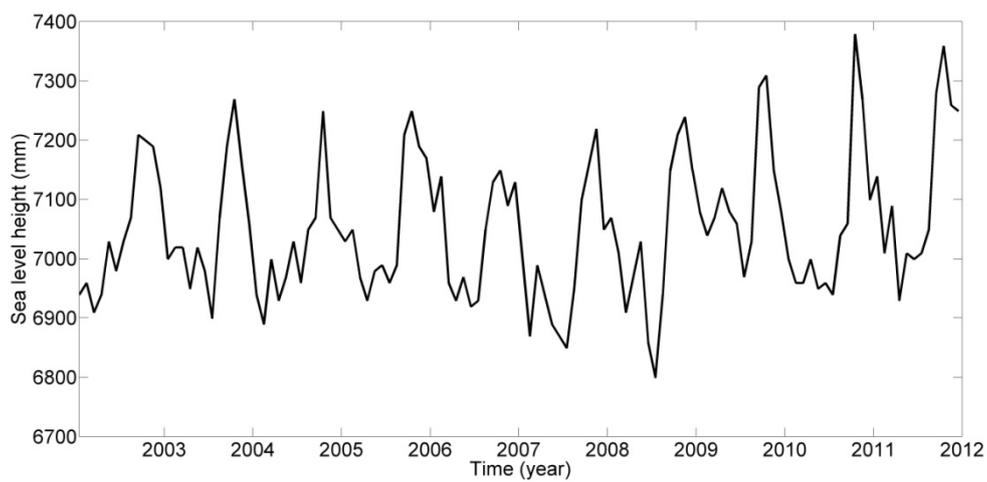
附圖 1-2 PSMSL 西沙驗潮站資料



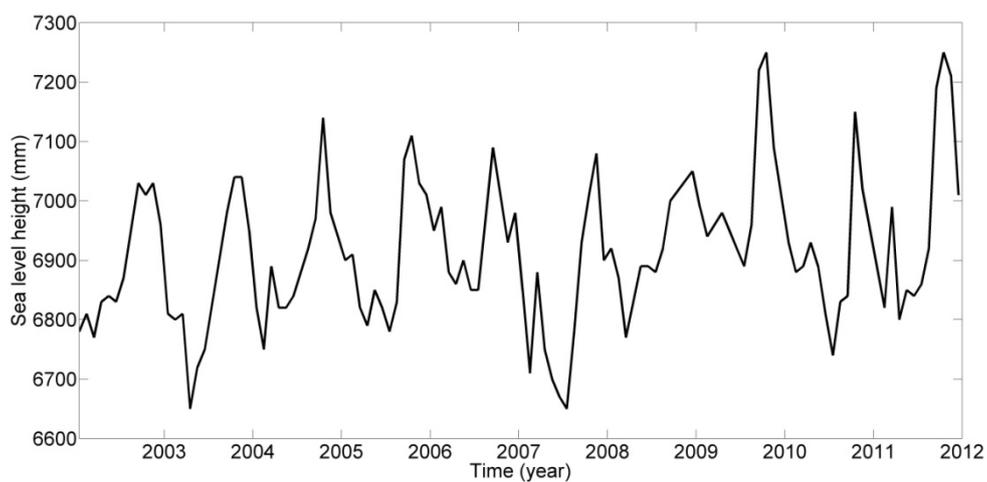
附圖 1-3 PSMSL 坎門驗潮站資料



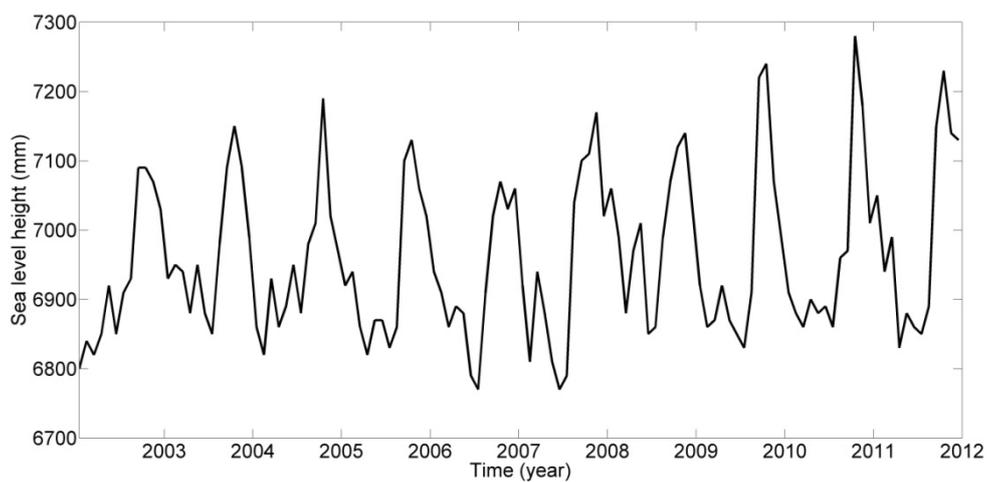
附圖 1-4 PSMSL 橫瀾島驗潮站資料



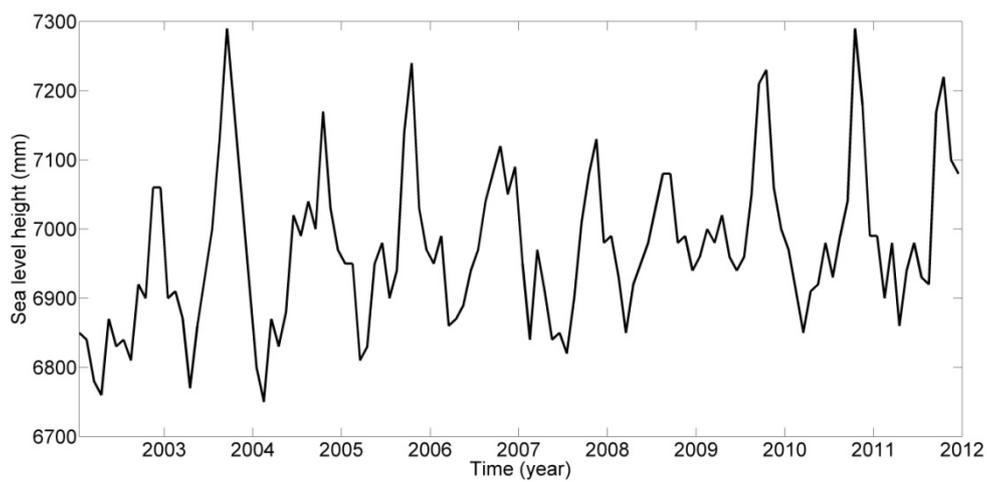
附圖 1-5 PSMSL 鯽魚涌驗潮站資料



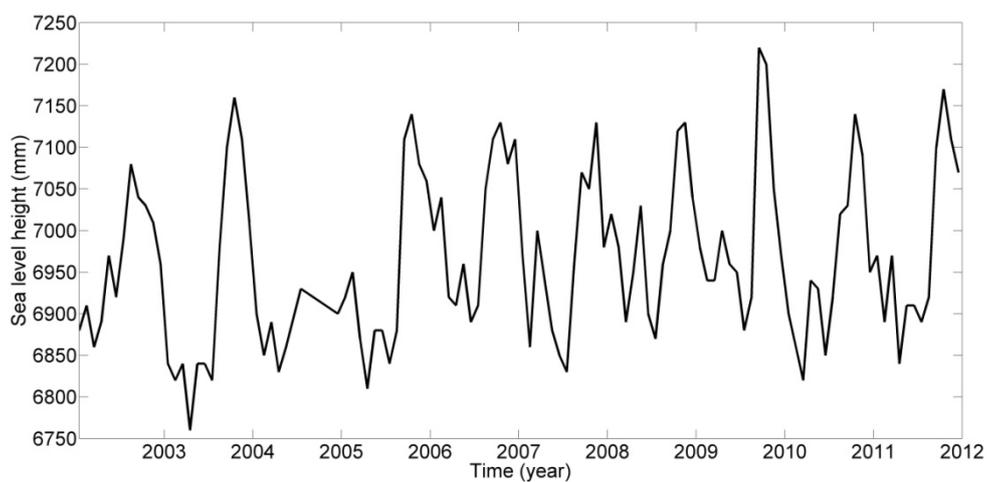
附圖 1-6 PSMSL 大廟灣驗潮站資料



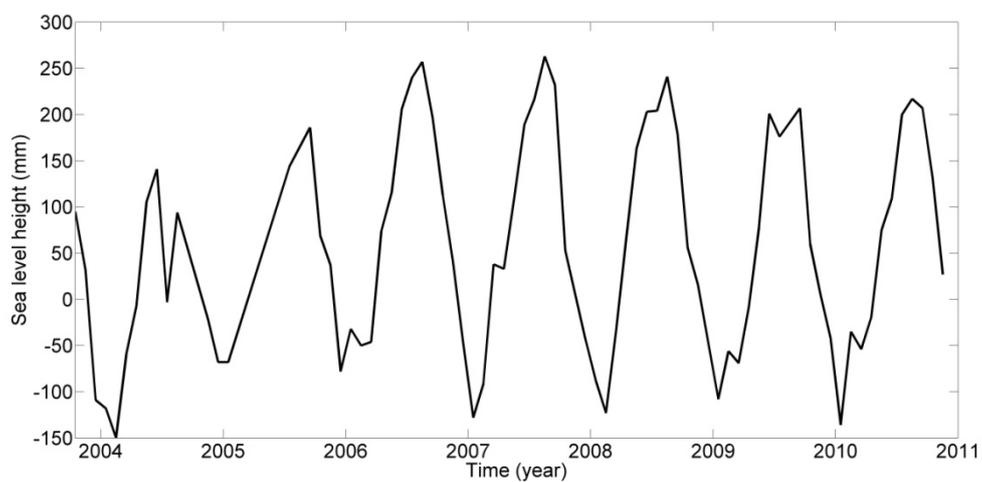
附圖 1-7 PSMSL 大浦滙驗潮站資料



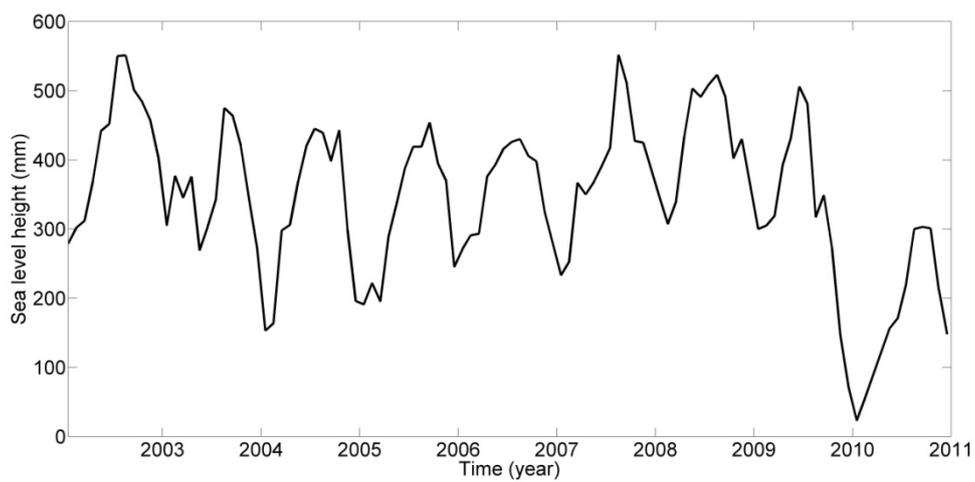
附圖 1-8 PSMSL 尖鼻咀驗潮站資料



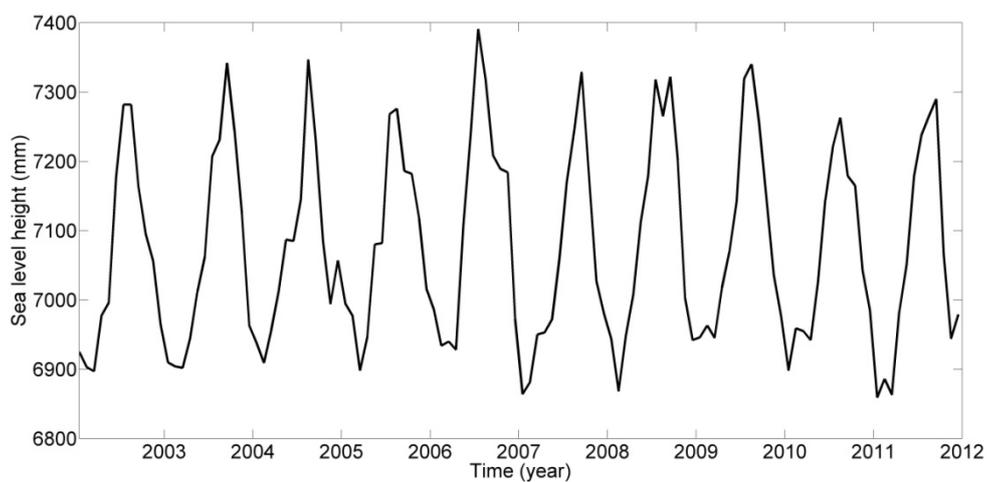
附圖 1-9 PSMSL 石壁驗潮站資料



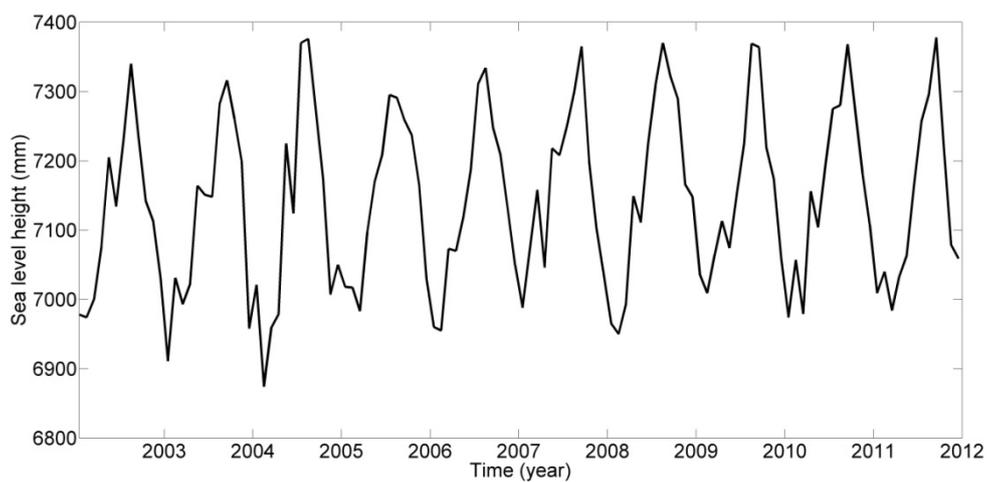
附圖 1-10 PSMSL 基隆驗潮站資料



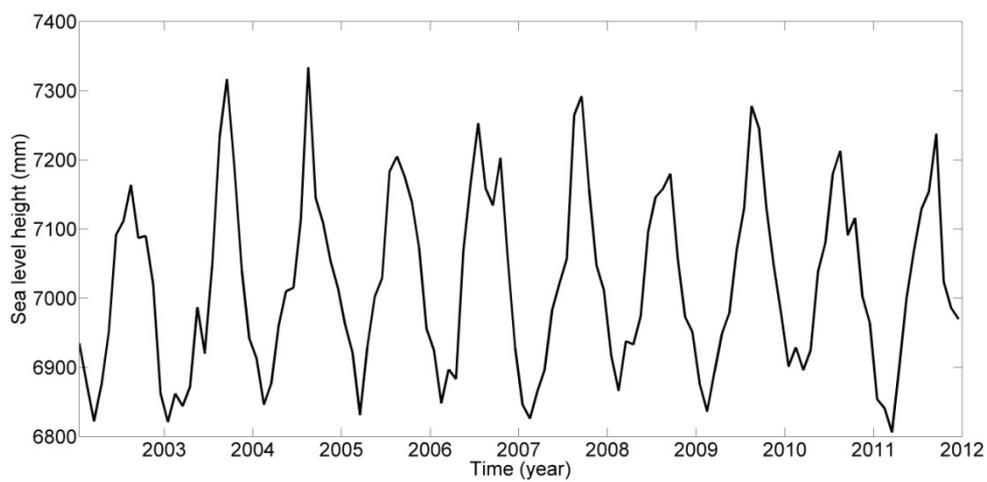
附圖 1-11 PSMSL 高雄驗潮站資料



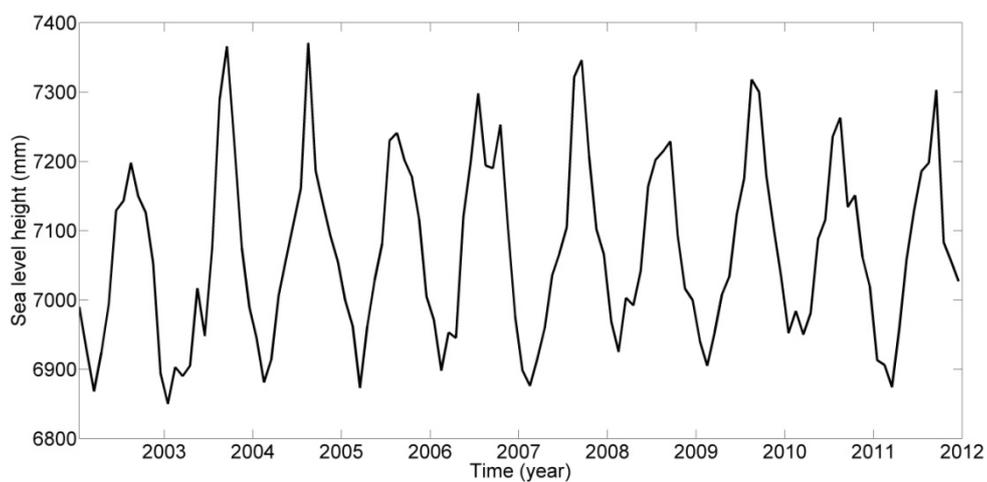
附圖 1-12 PSMSL 內斯驗潮站資料



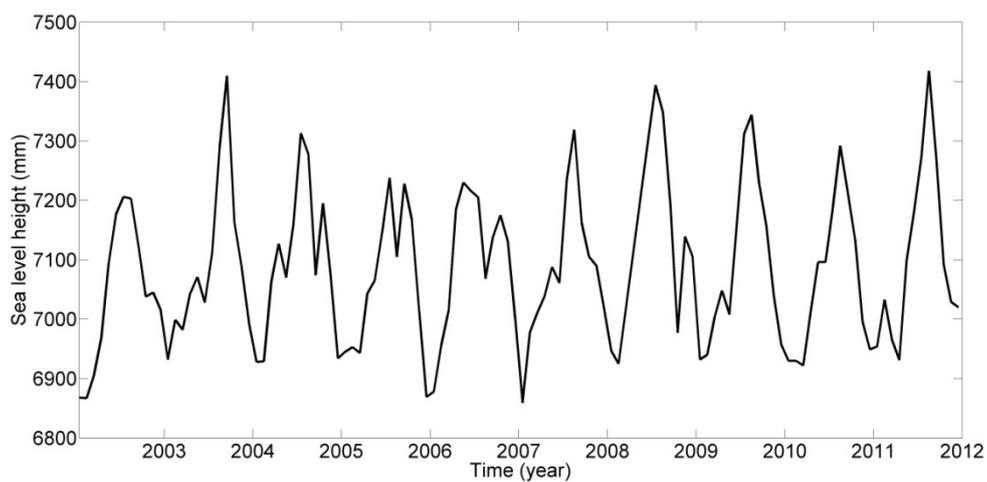
附圖 1-13 PSMSL 中之島驗潮站資料



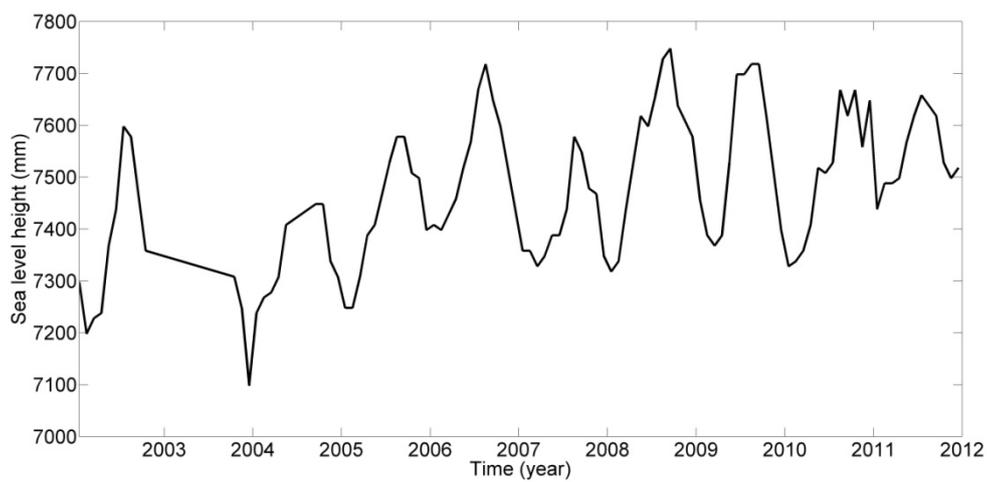
附圖 1-14 PSMSL 沖繩驗潮站資料



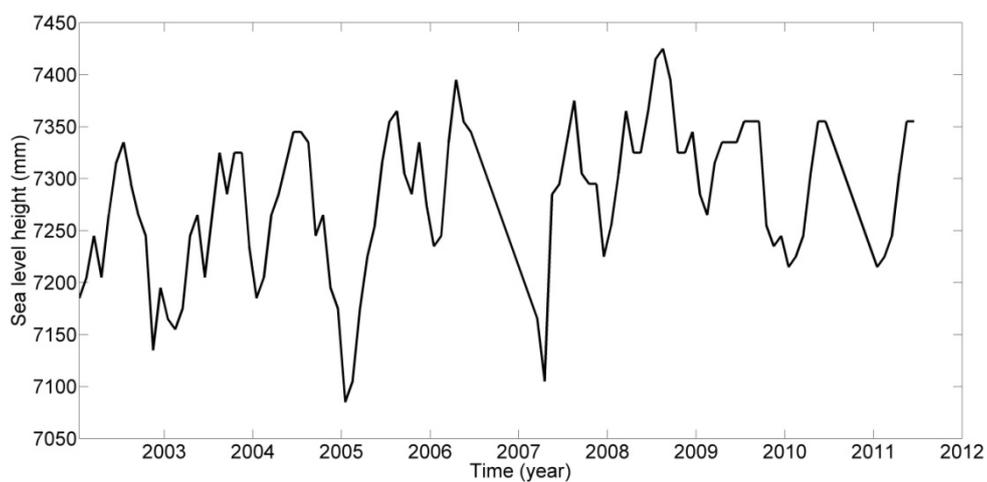
附圖 1-15 PSMSL 那霸驗潮站資料



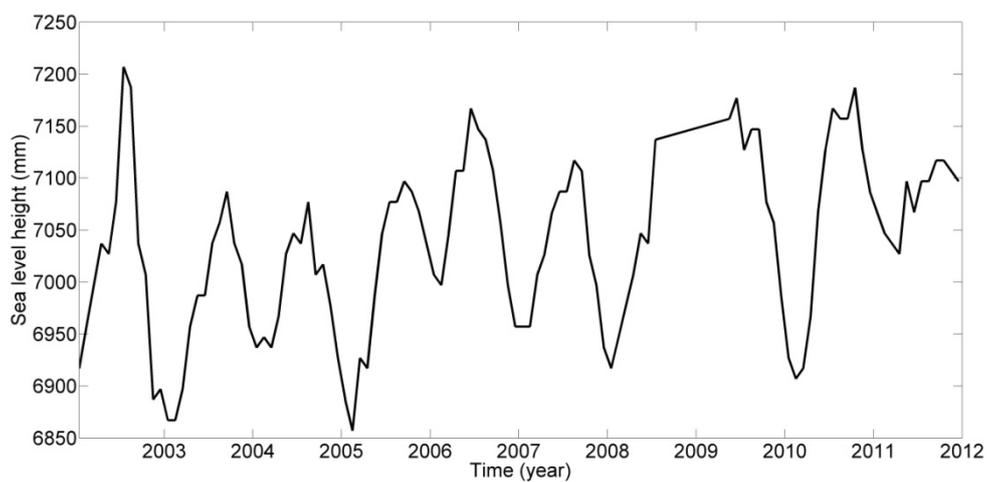
附圖 1-16 PSMSL 石垣島驗潮站資料



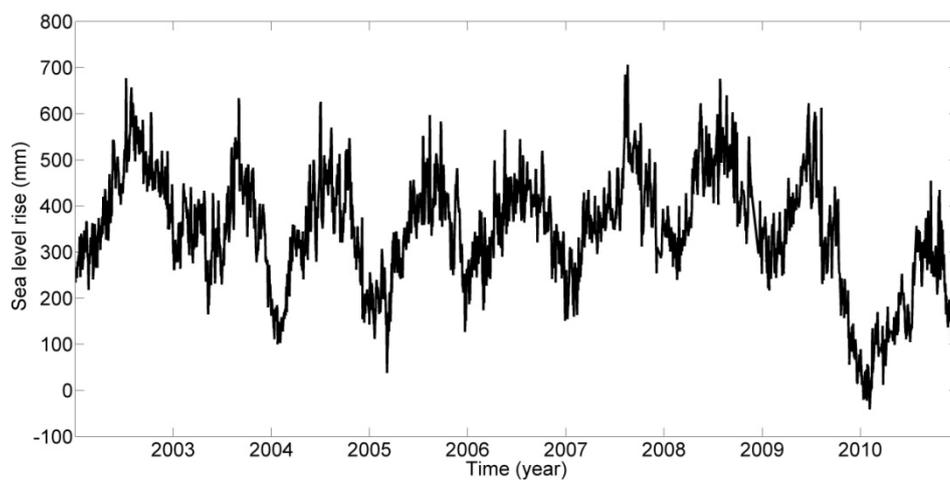
附圖 1-17 PSMSL 馬尼拉驗潮站資料



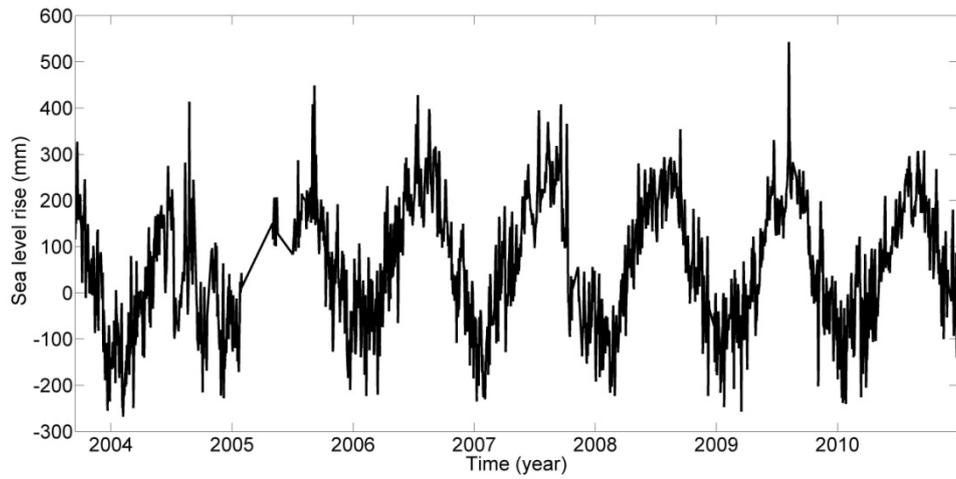
附圖 1-18 PSMSL 黎牙實比驗潮站資料



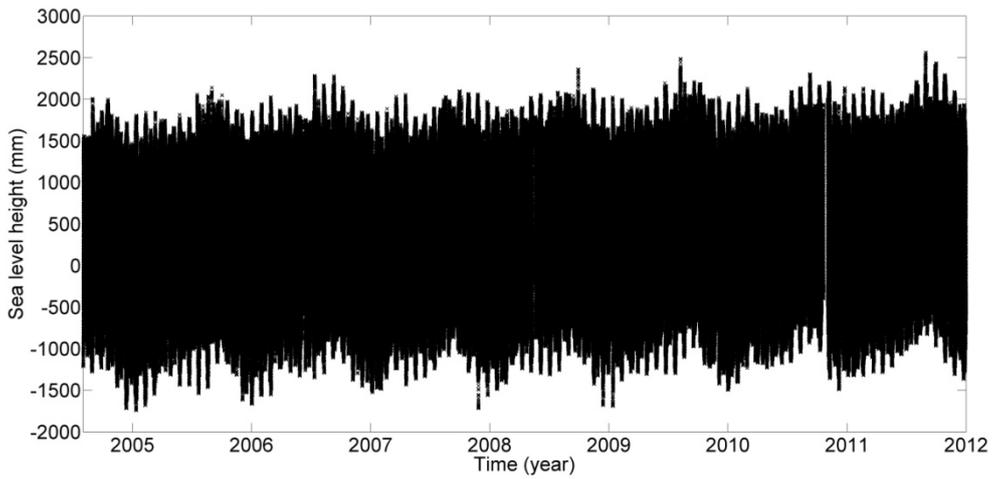
附圖 1-19 PSMSL 宿霧驗潮站資料



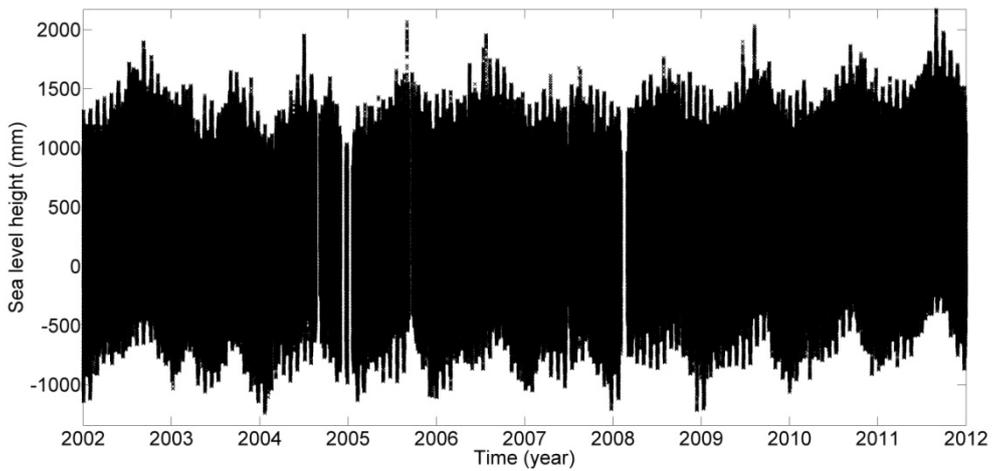
附圖 1-20 UHSLC 高雄驗潮站資料



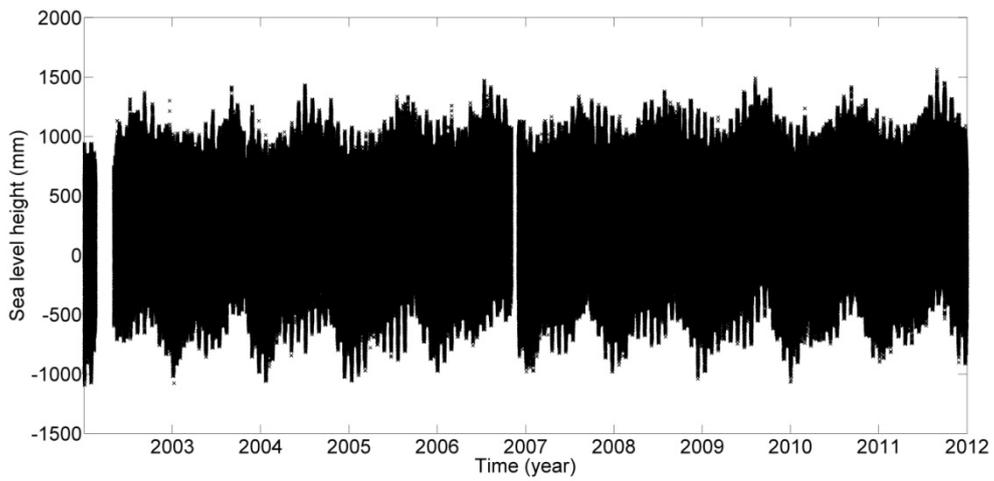
附圖 1-21 UHSLC 基隆驗潮站資料



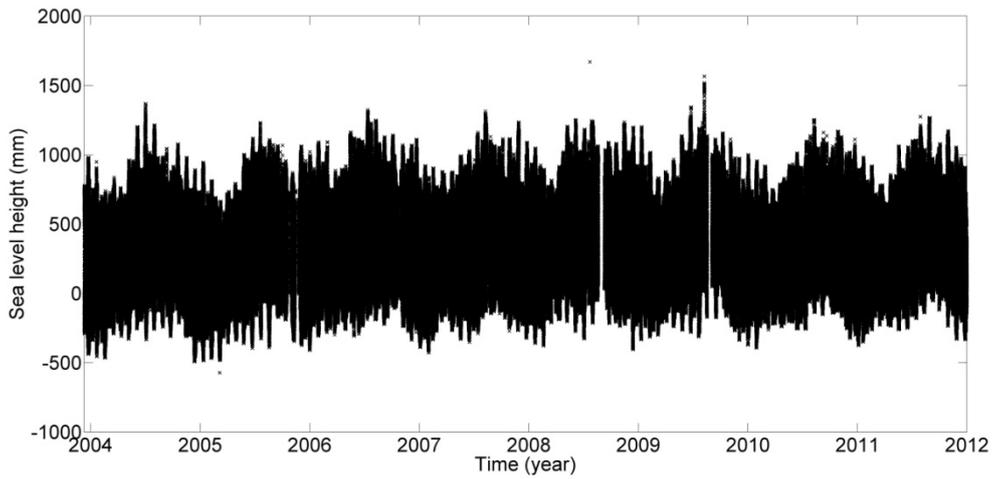
附圖 1-22 CWB 箔子寮驗潮站資料



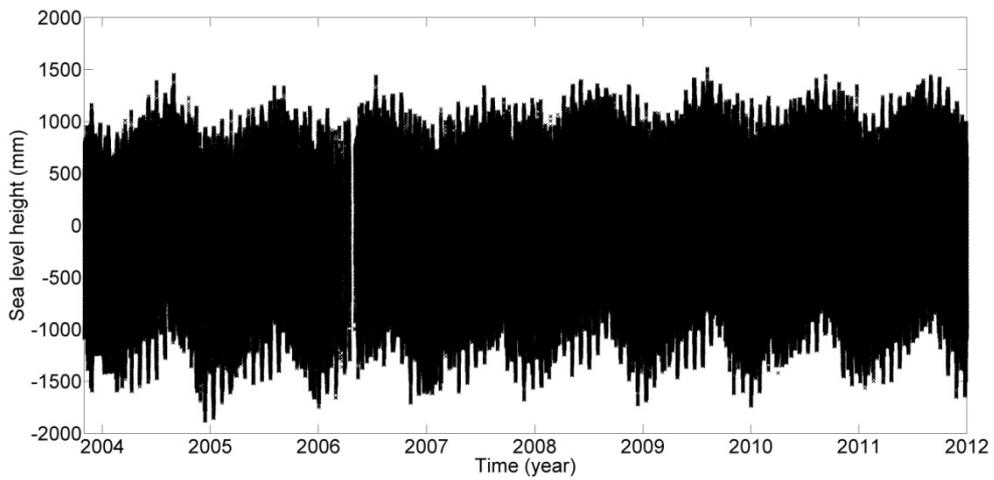
附圖 1-23 CWB 東石驗潮站資料



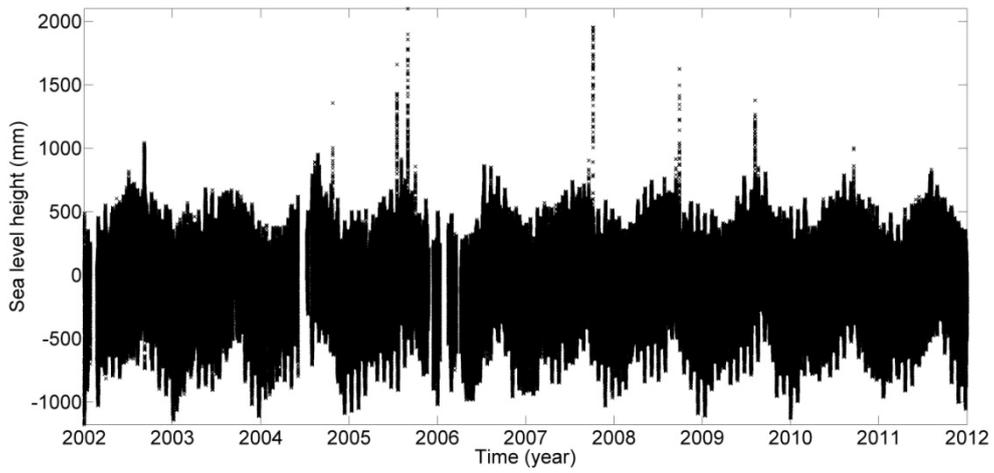
附圖 1-24 CWB 將軍驗潮站資料



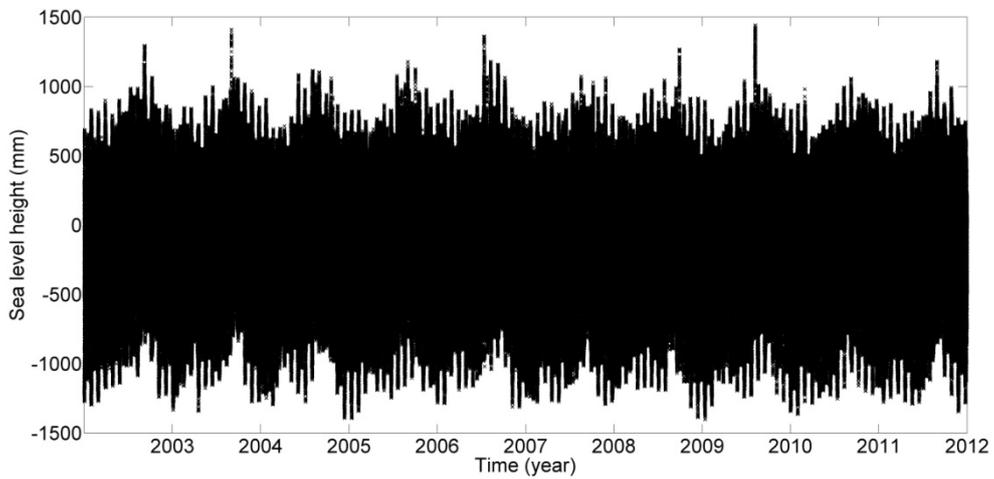
附圖 1-25 CWB 東港驗潮站資料



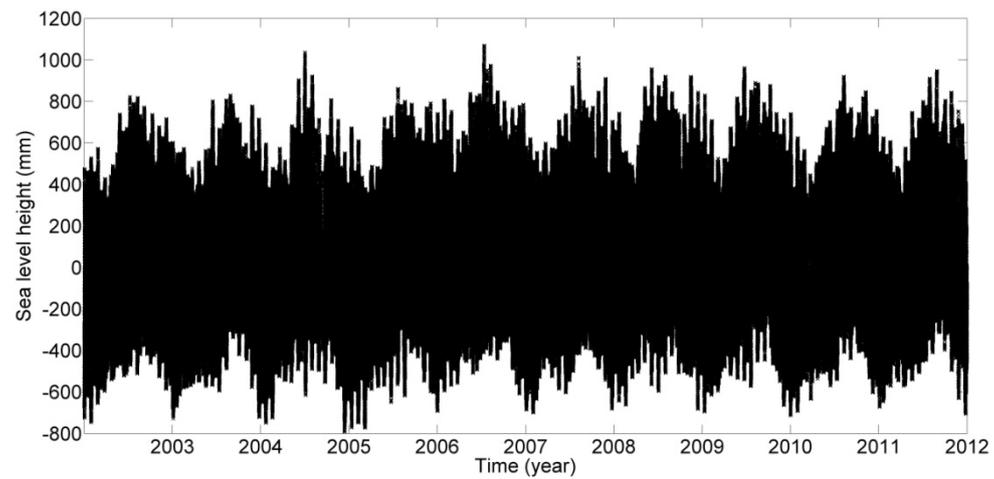
附圖 1-26 CWB 麟山鼻驗潮站資料



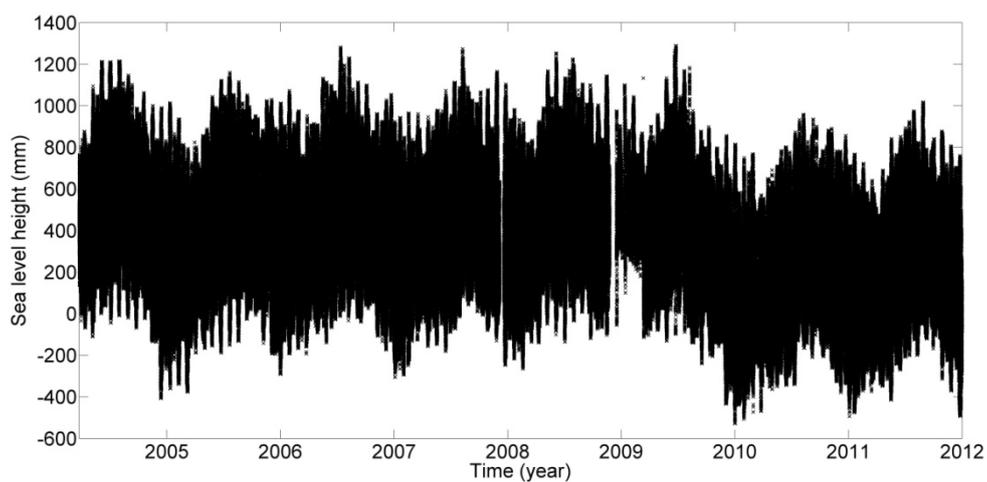
附圖 1-27 CWB 龍洞驗潮站資料



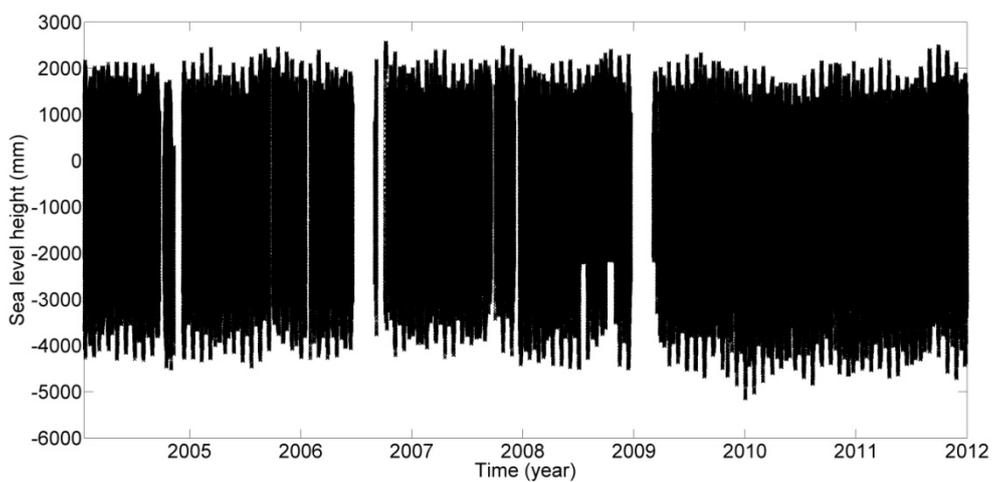
附圖 1-28 CWB 成功驗潮站資料



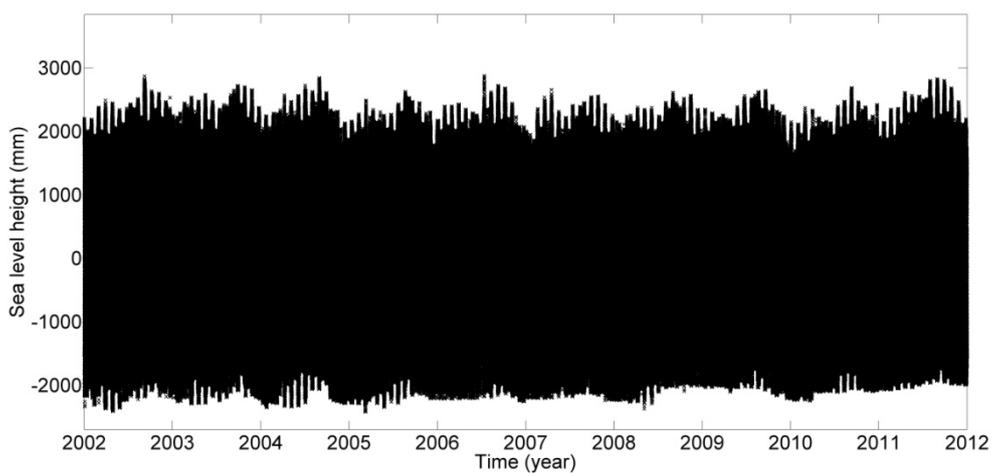
附圖 1-29 CWB 小琉球驗潮站資料



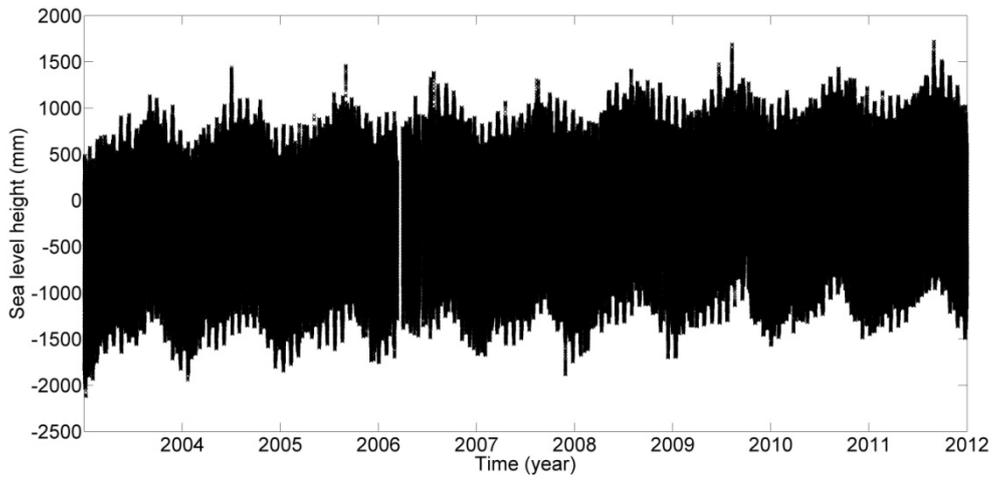
附圖 1-30 CWB 高雄驗潮站資料



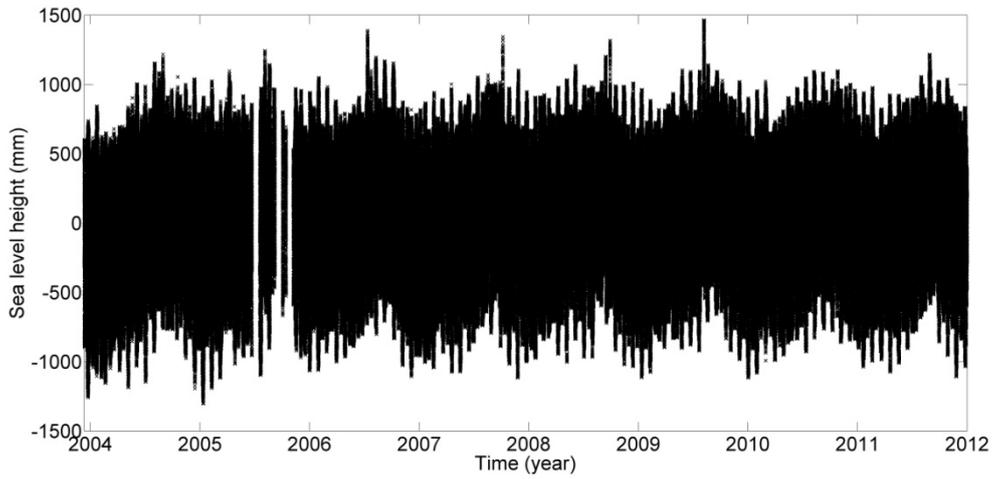
附圖 1-31 CWB 馬祖驗潮站資料



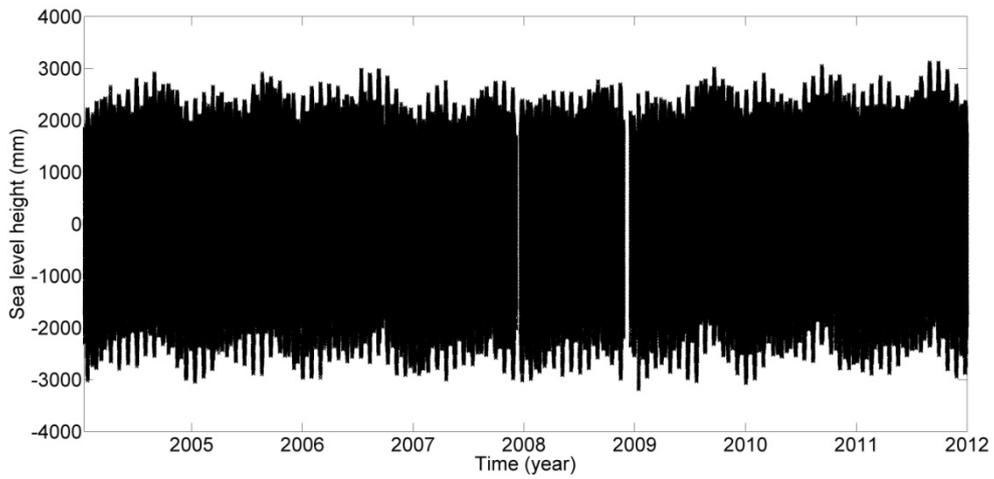
附圖 1-32 CWB 新竹驗潮站資料



附圖 1-33 CWB 塭港驗潮站資料

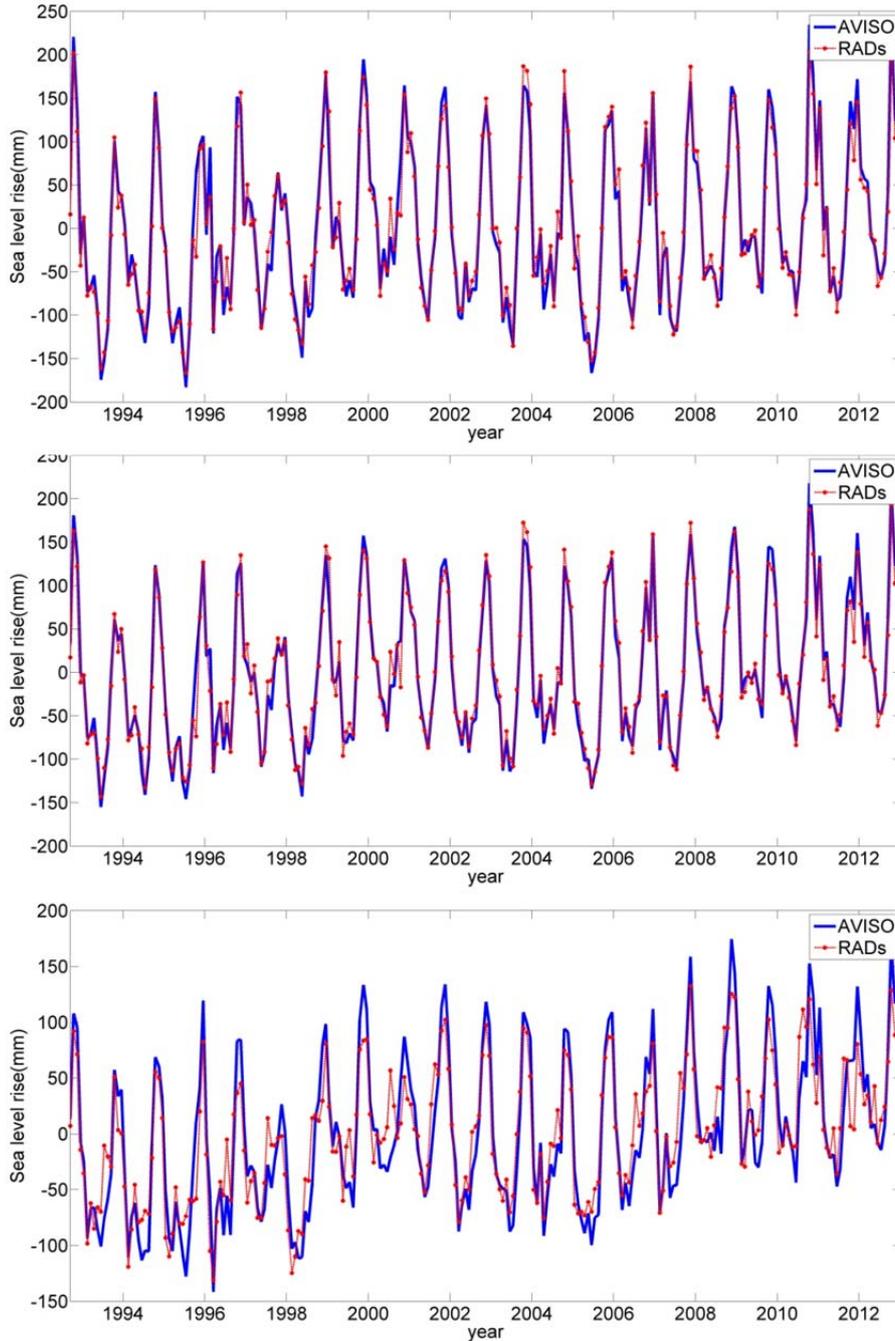


附圖 1-34 CWB 花蓮驗潮站資料

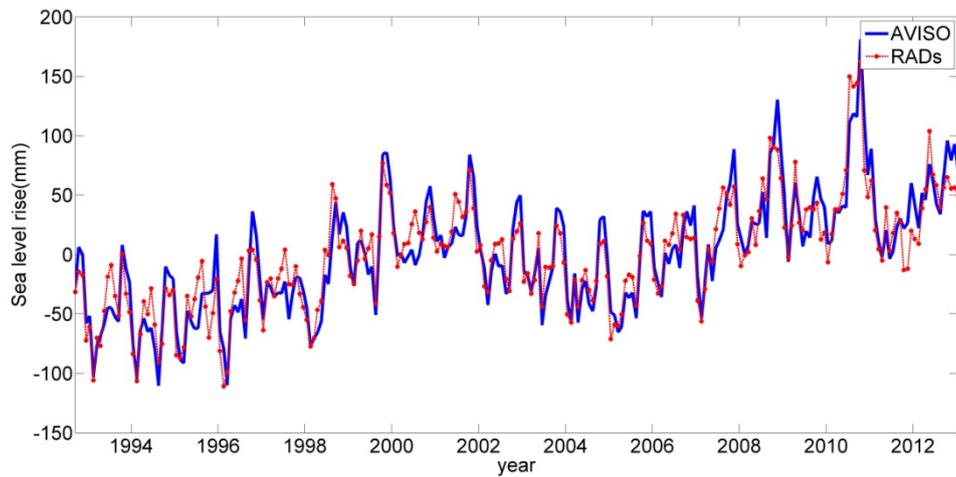
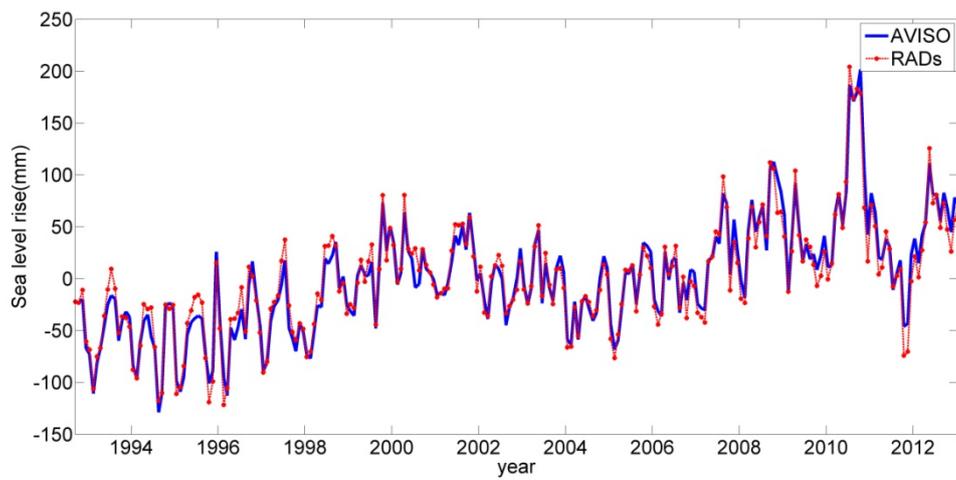
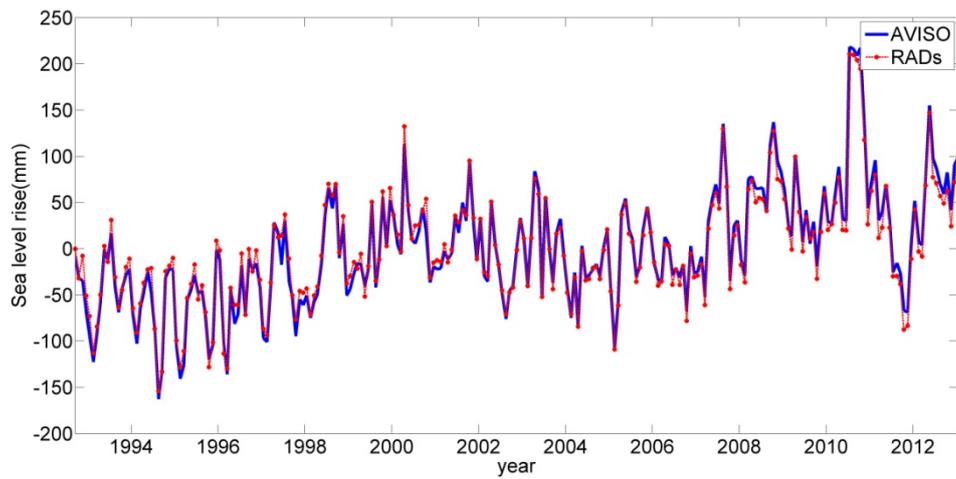


附圖 1-35 CWB 台中港驗潮站資料

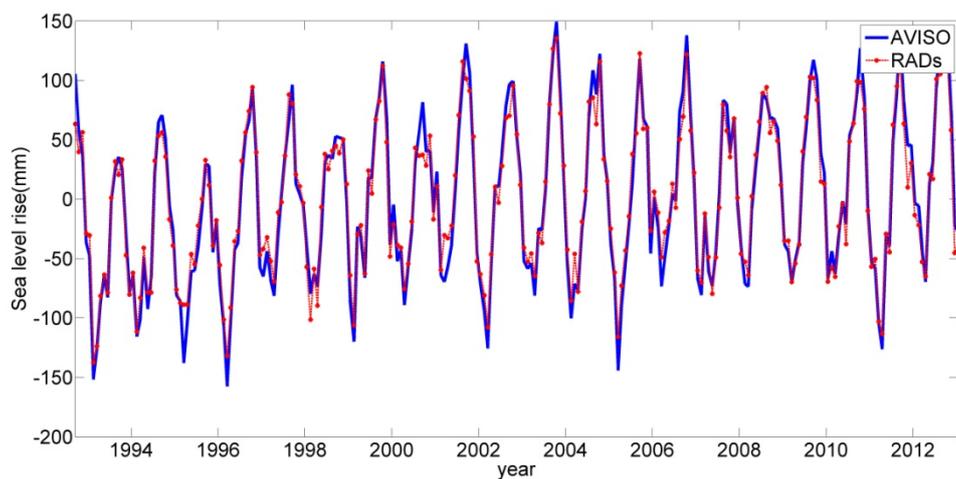
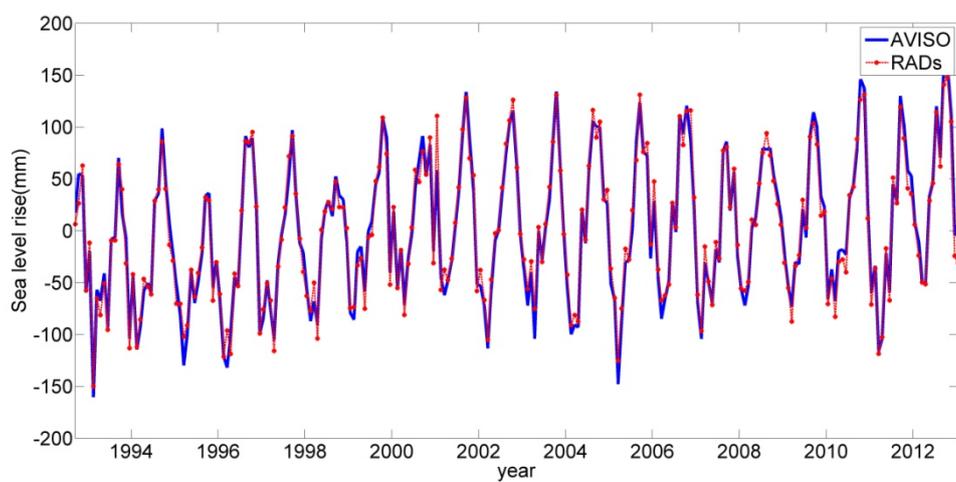
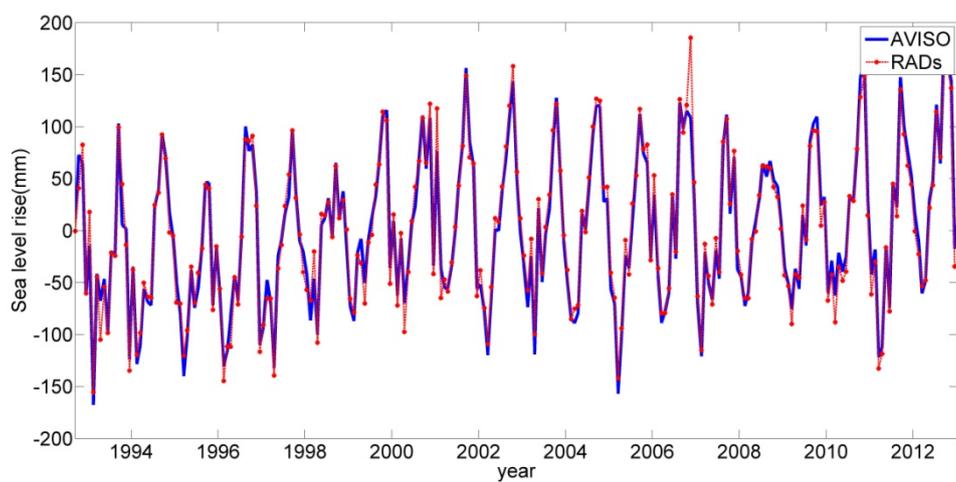
## 附錄二 衛星測高資料



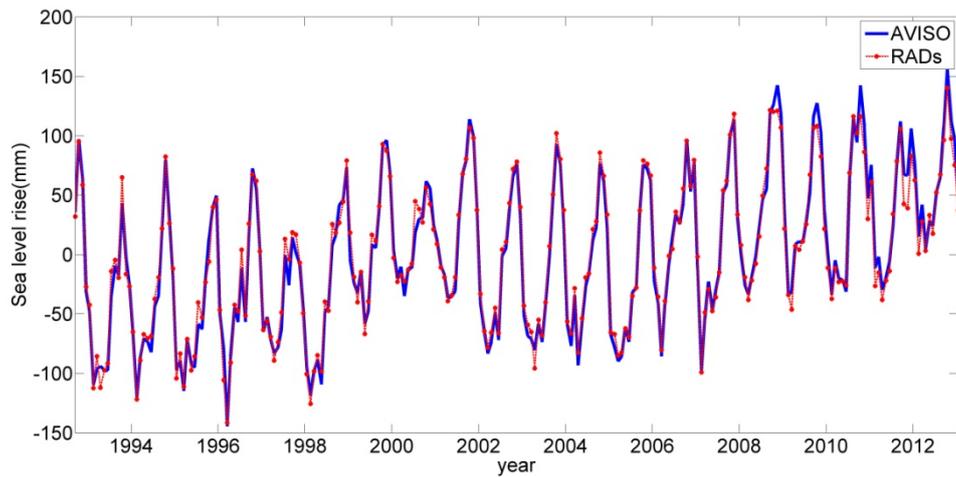
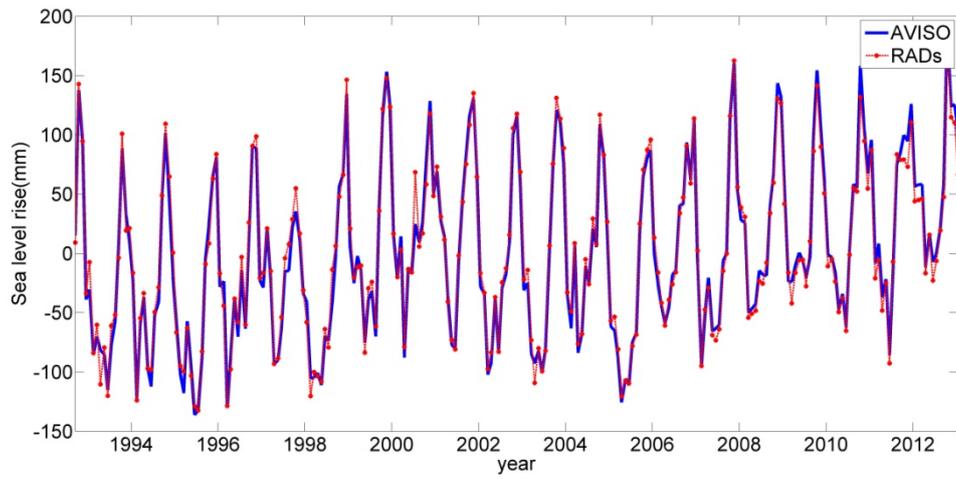
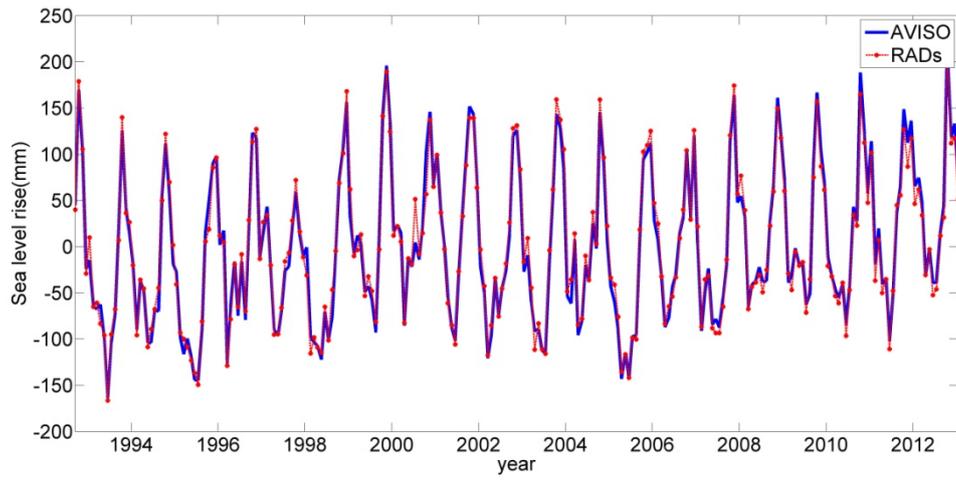
附圖 2-1 PSMSL 開坡驗潮站固定範圍內之衛星測高海水面變化。上: 經緯度 2°, 中: 經緯度 3°, 下: 經緯度 5°



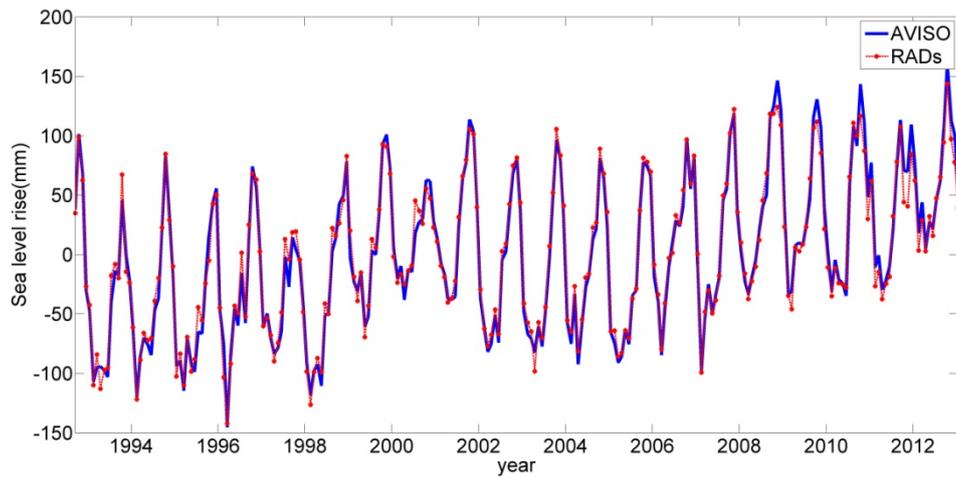
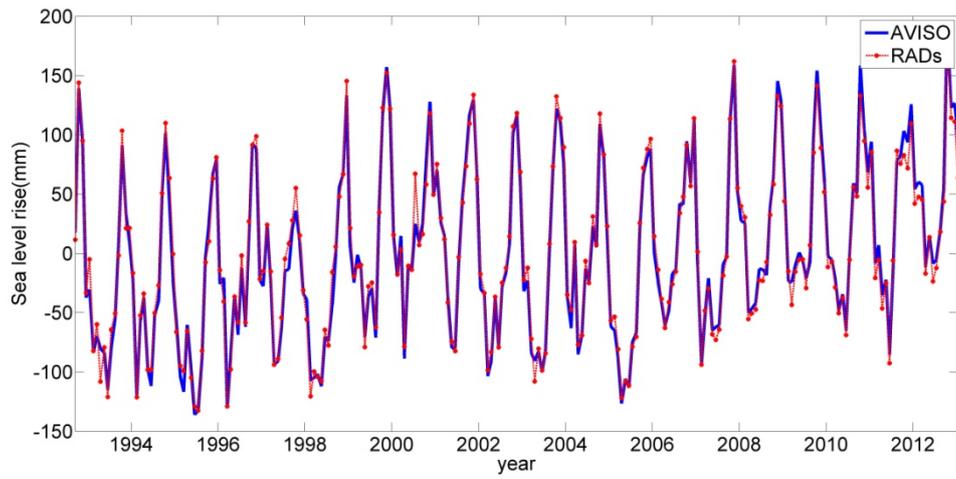
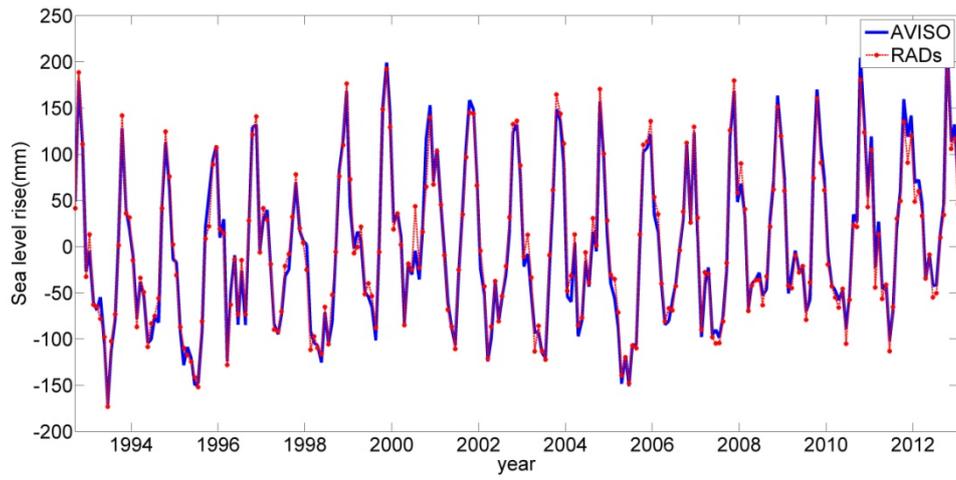
附圖 2-2 PSMSL 西沙驗潮站固定範圍內之衛星測高海水面變化。上: 經緯度  $2^{\circ}$ ，中: 經緯度  $3^{\circ}$ ，下: 經緯度  $5^{\circ}$



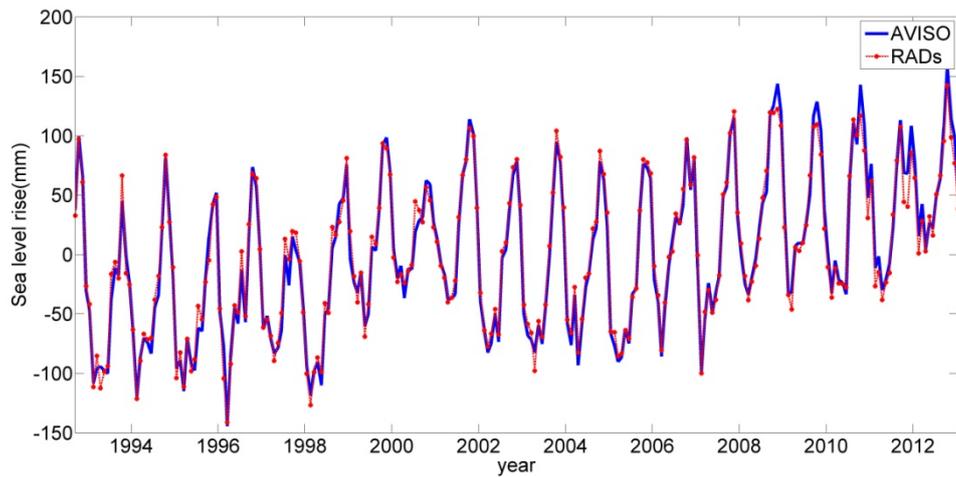
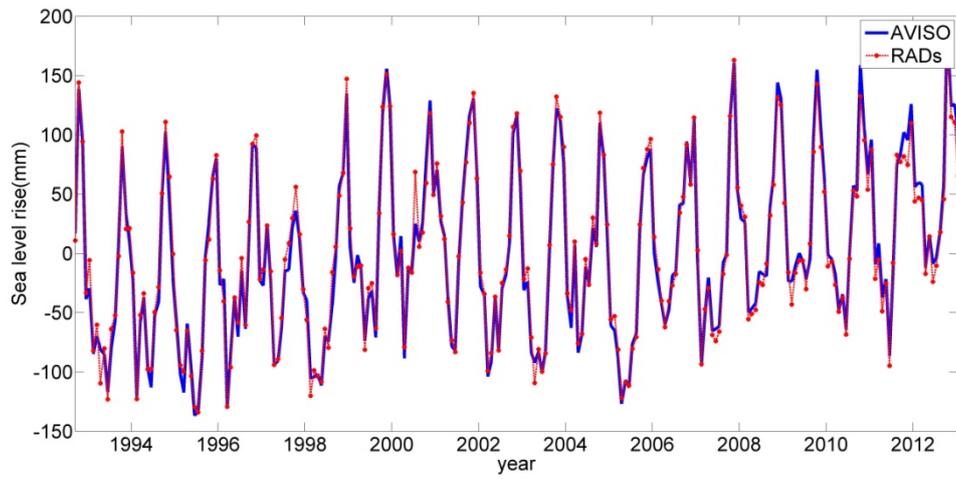
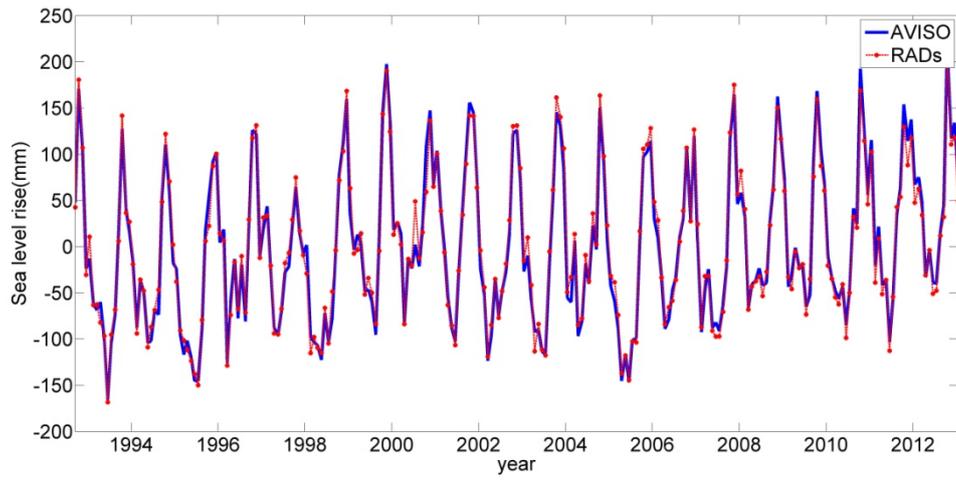
附圖 2-3 PSMSL 坎門驗潮站固定範圍內之衛星測高海水面變化。上: 經緯度  $2^{\circ}$ ，中: 經緯度  $3^{\circ}$ ，下: 經緯度  $5^{\circ}$



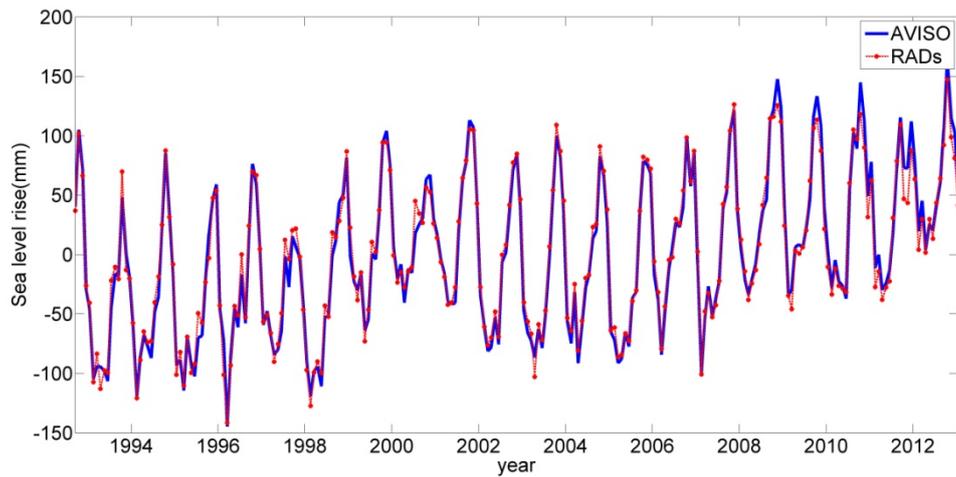
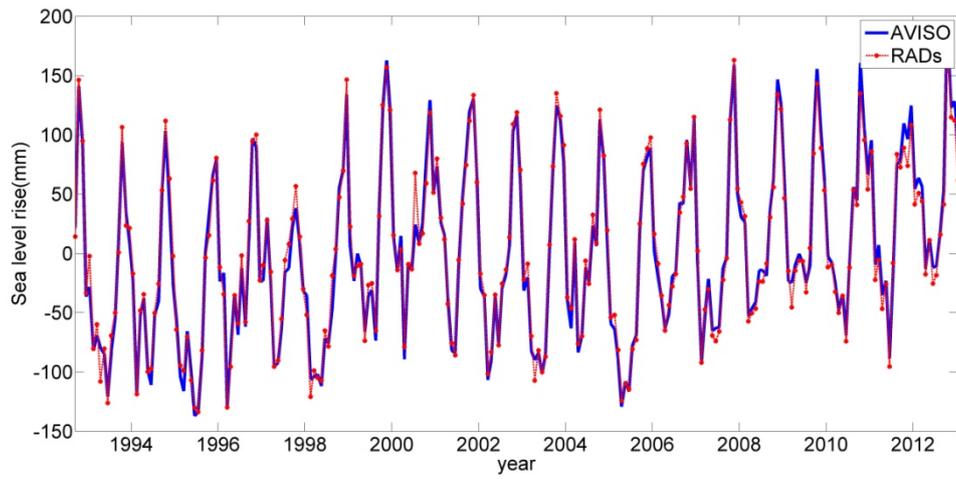
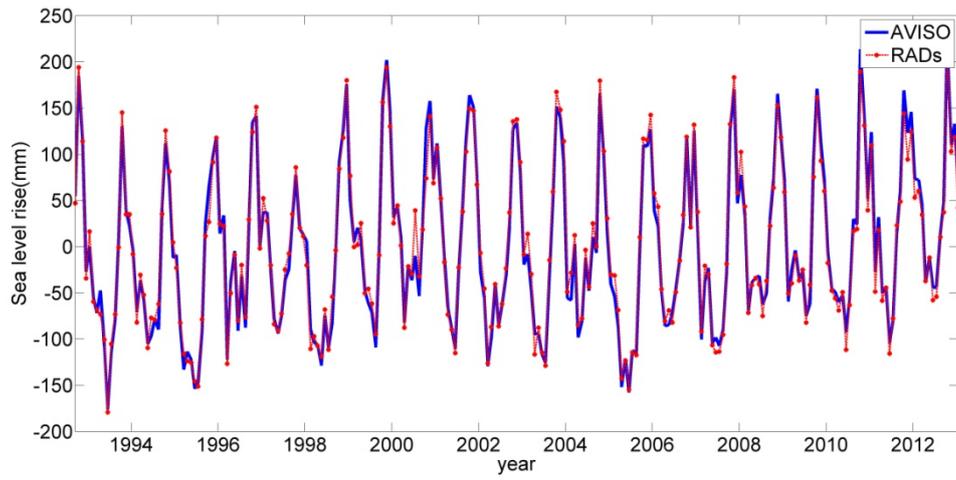
附圖 2-4 PSMSL 橫瀾島驗潮站固定範圍內之衛星測高海水面變化。上: 經緯度 2°, 中: 經緯度 3°, 下: 經緯度 5°



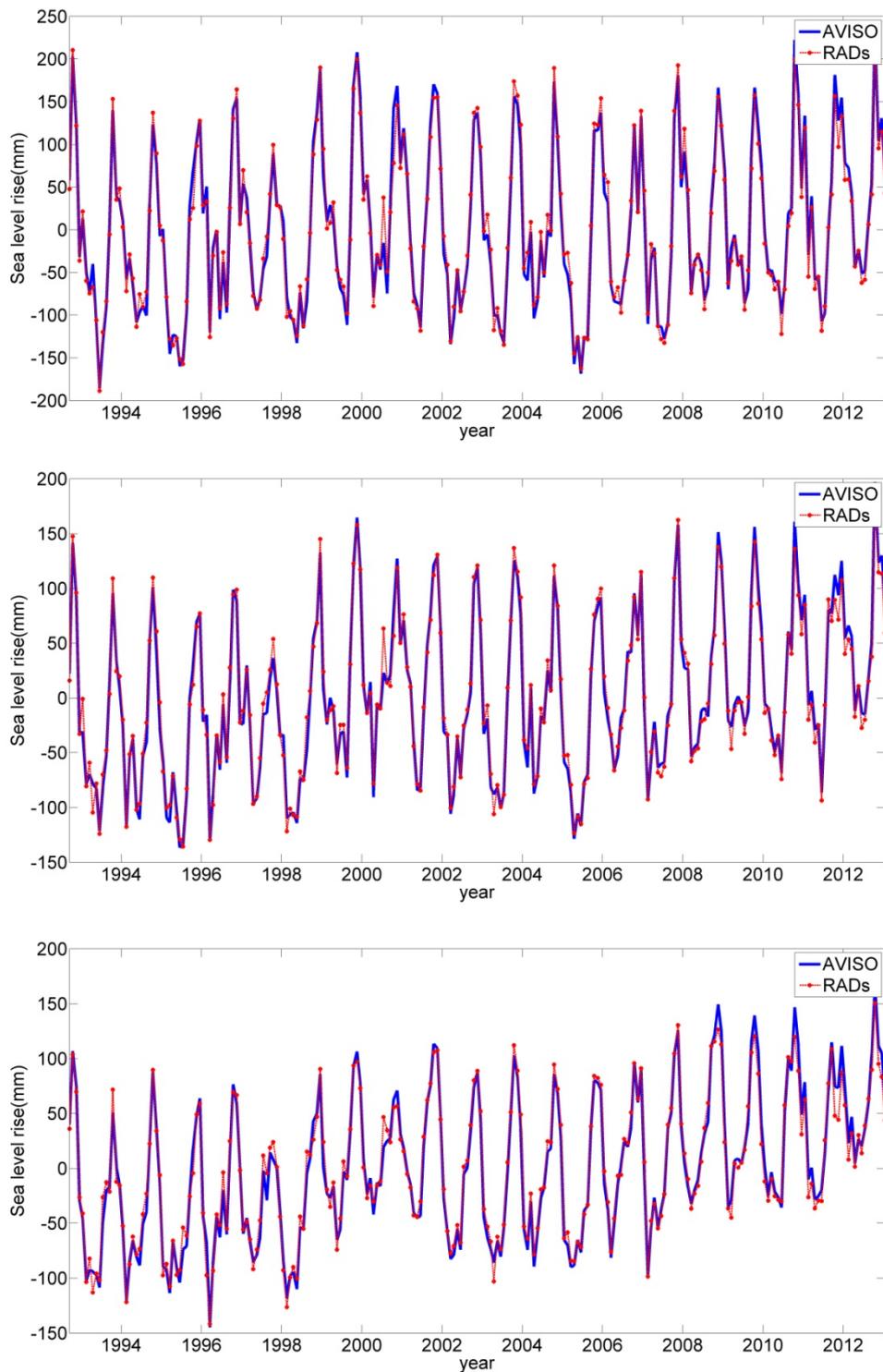
附圖 2-5 PSMSL 鰂魚涌驗潮站固定範圍內之衛星測高海水面變化。上: 經緯度 2°, 中: 經緯度 3°, 下: 經緯度 5°



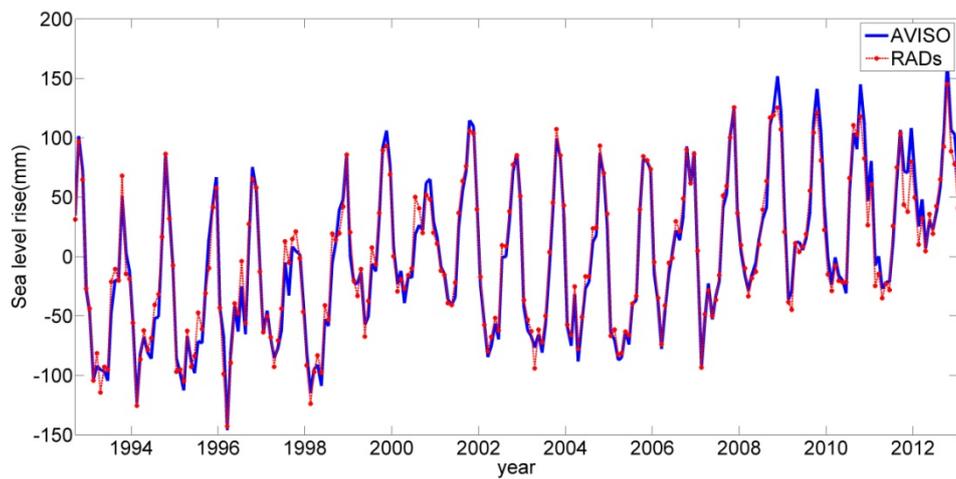
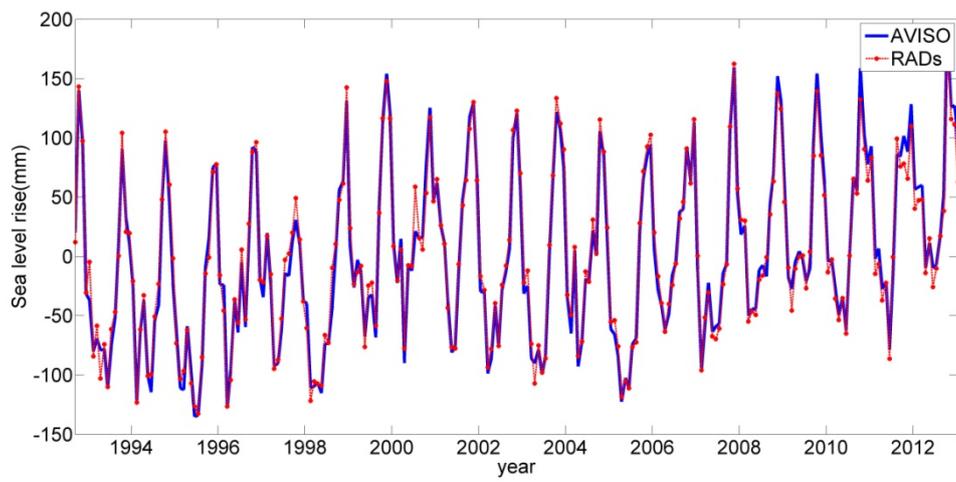
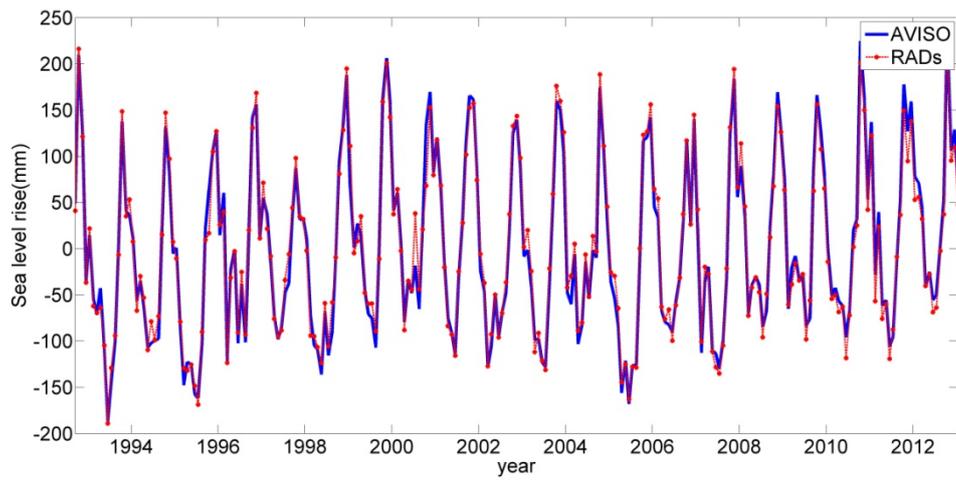
附圖 2-6 PSMSL 大廟灣驗潮站固定範圍內之衛星測高海水面變化。上: 經緯度 2°, 中: 經緯度 3°, 下: 經緯度 5°



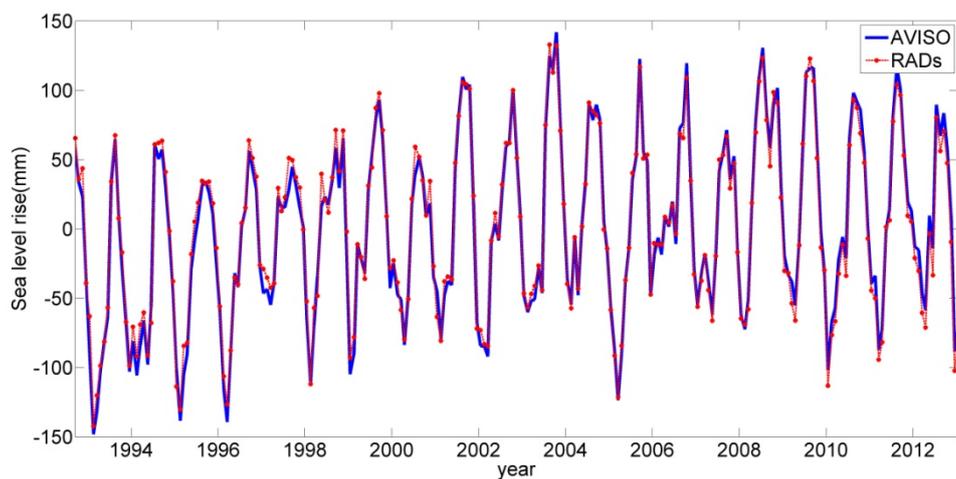
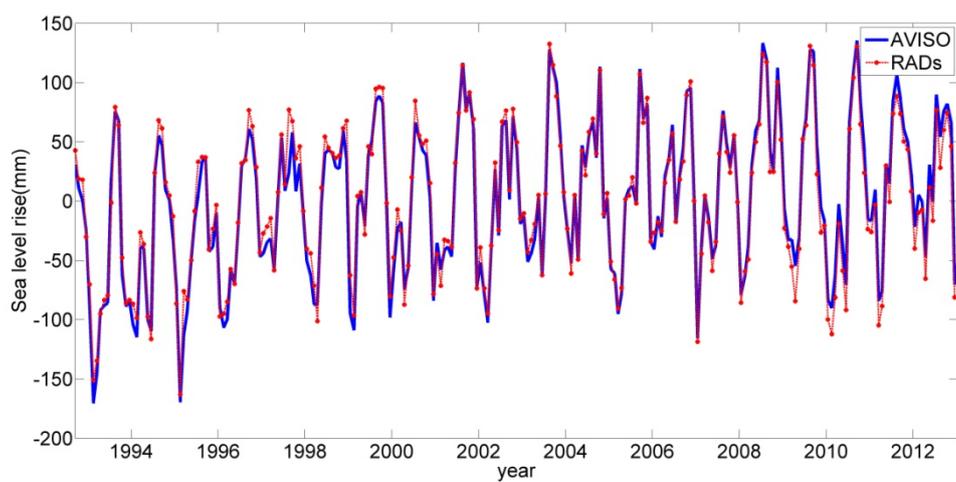
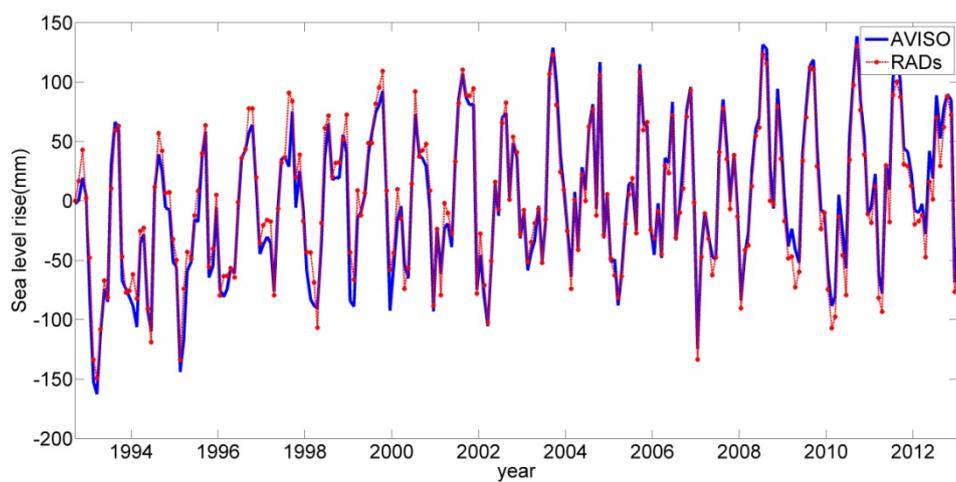
附圖 2-7 PSMSL 大浦滯驗潮站固定範圍內之衛星測高海水面變化。上: 經緯度  $2^{\circ}$ ，中: 經緯度  $3^{\circ}$ ，下: 經緯度  $5^{\circ}$



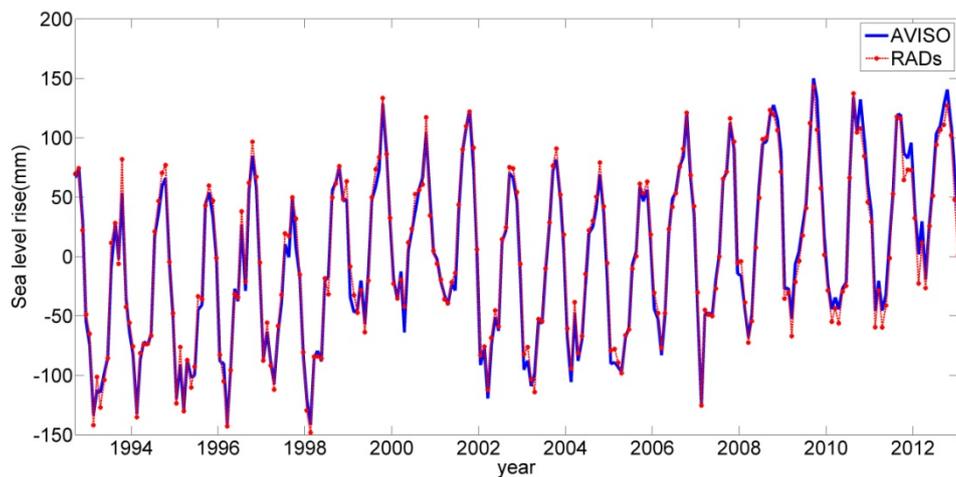
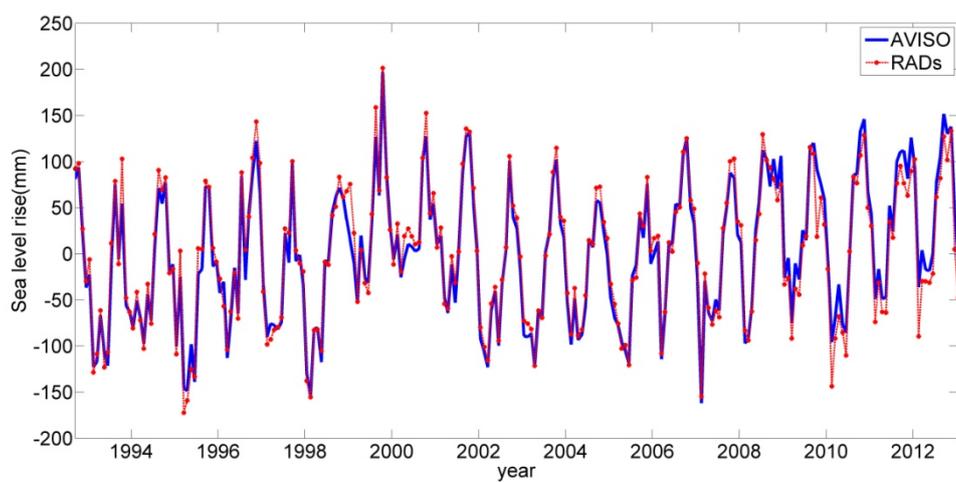
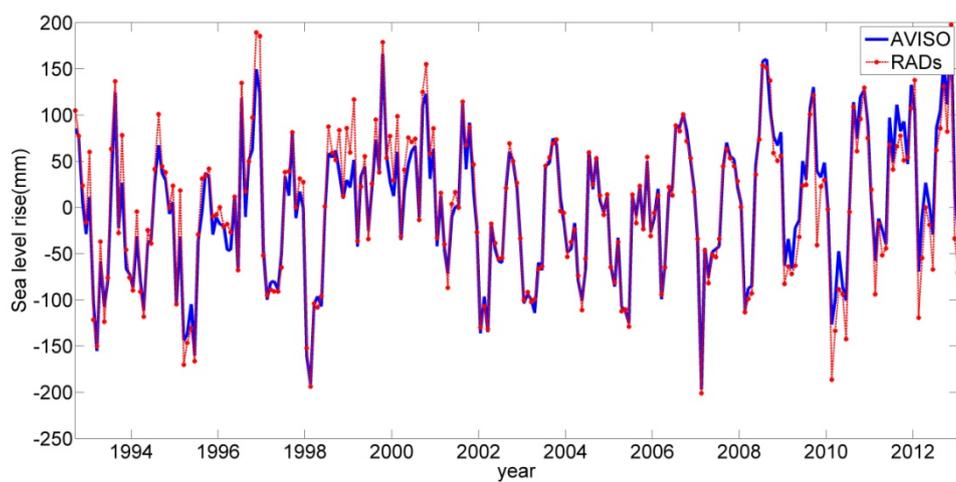
附圖 2-8 PSMSL 尖鼻咀驗潮站固定範圍內之衛星測高海水面變化。上: 經緯度 2°, 中: 經緯度 3°, 下: 經緯度 5°



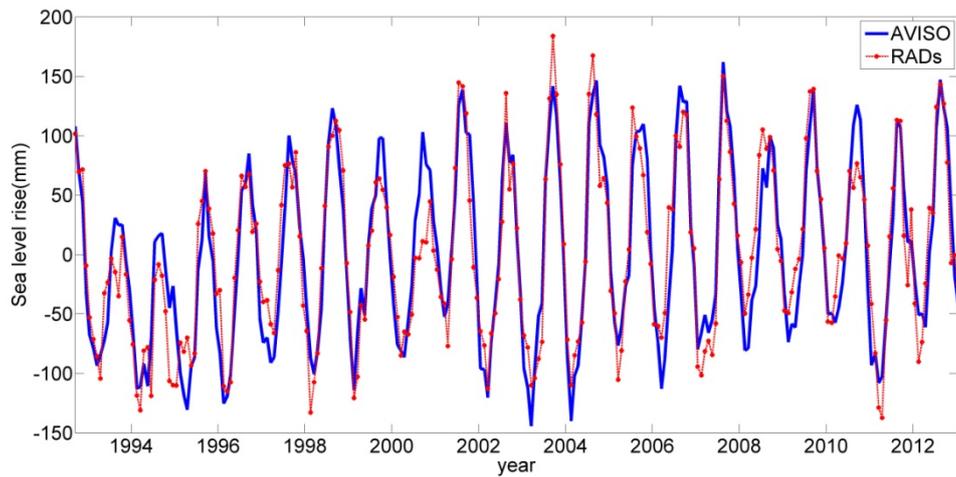
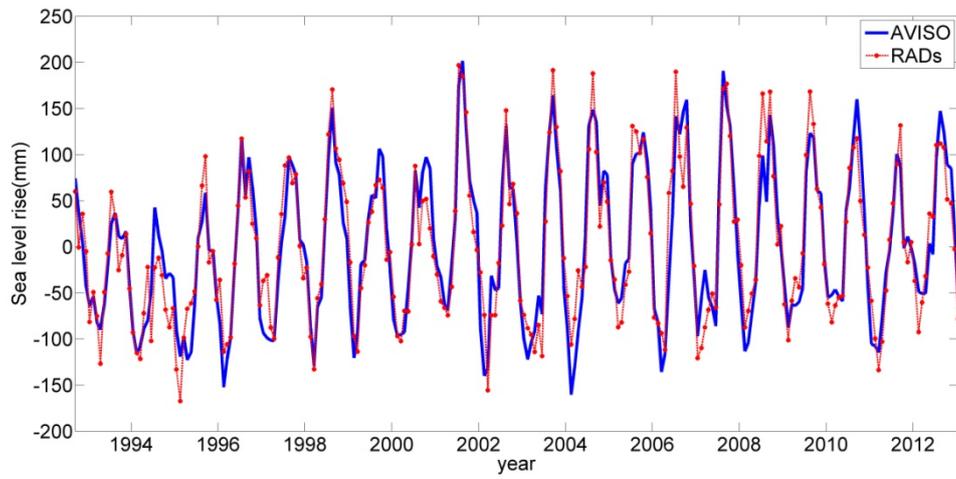
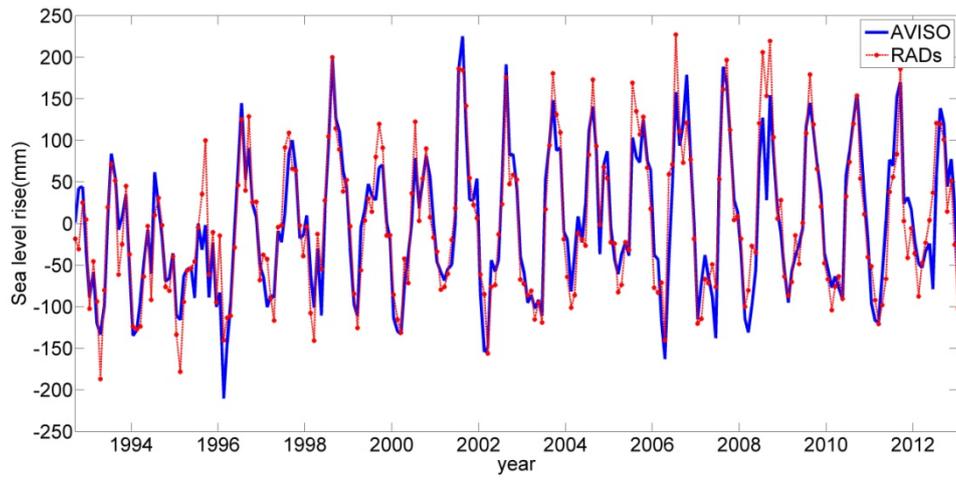
附圖 2-9 PSMSL 石壁驗潮站固定範圍內之衛星測高海水面變化。上: 經緯度  $2^{\circ}$ ，中: 經緯度  $3^{\circ}$ ，下: 經緯度  $5^{\circ}$



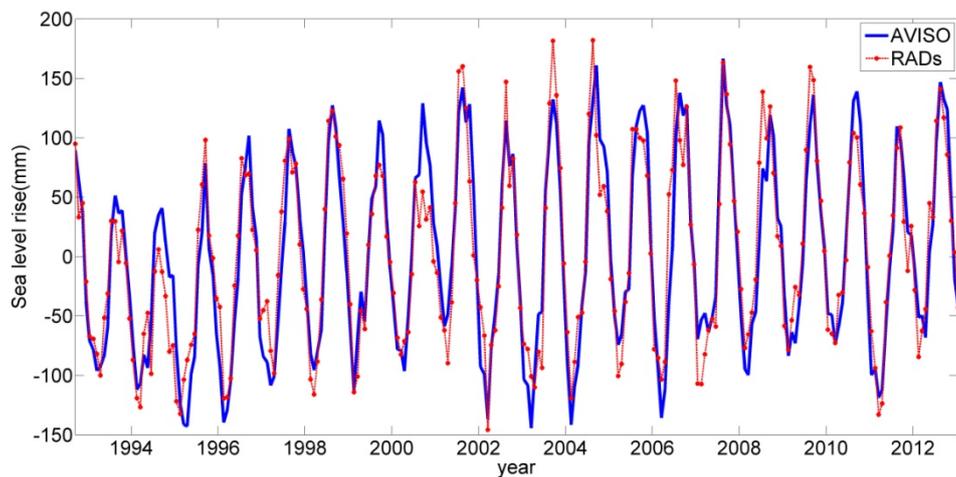
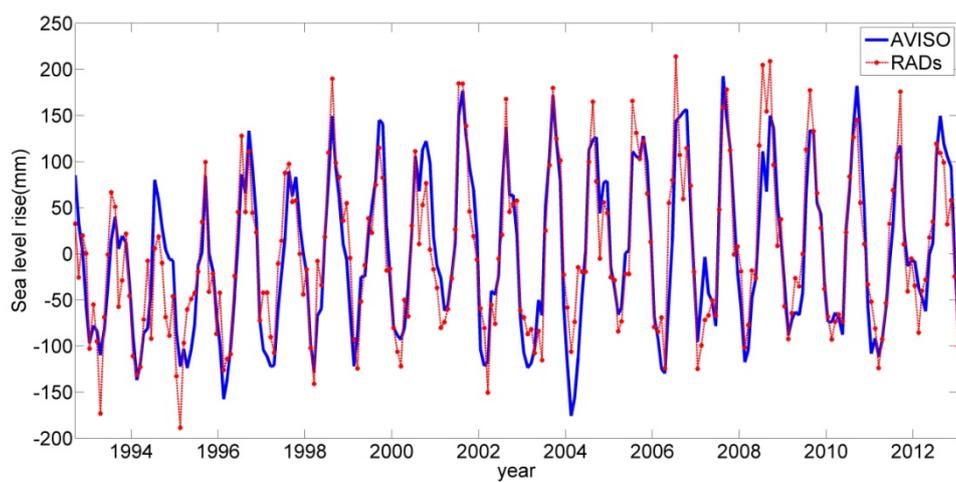
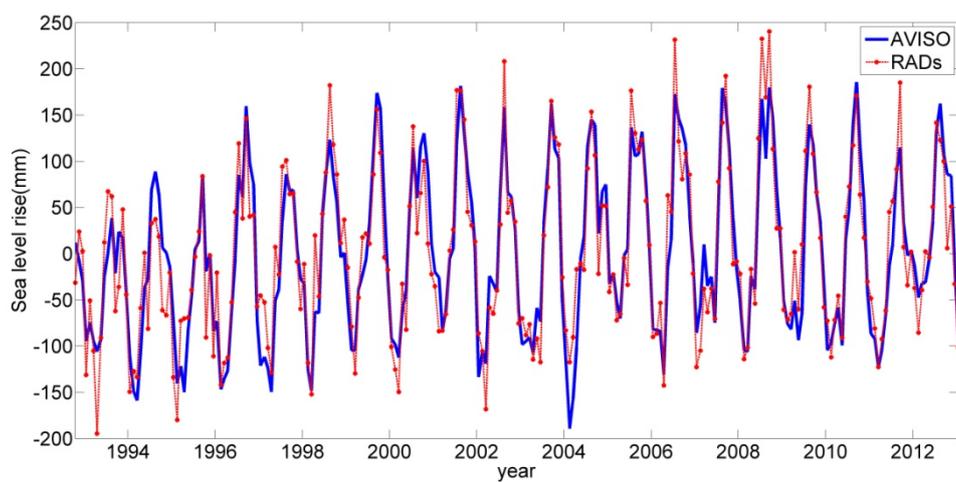
附圖 2-10 PSMSL 基隆驗潮站固定範圍內之衛星測高海水面變化。上：經緯度  $2^{\circ}$ ，中：經緯度  $3^{\circ}$ ，下：經緯度  $5^{\circ}$



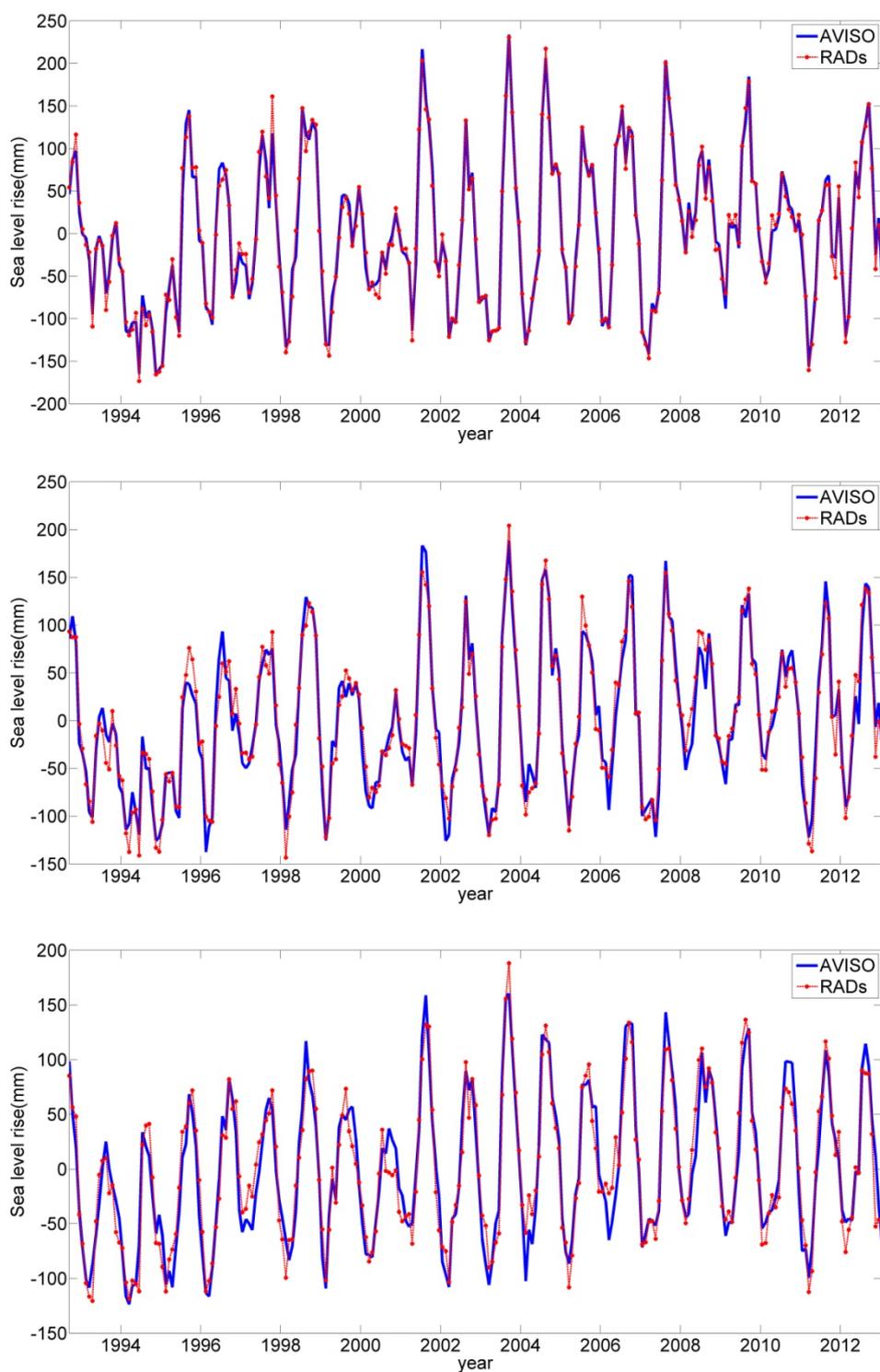
附圖 2-11 PSMSL 高雄驗潮站固定範圍內之衛星測高海面變化。上：經緯度 2°，中：經緯度 3°，下：經緯度 5°



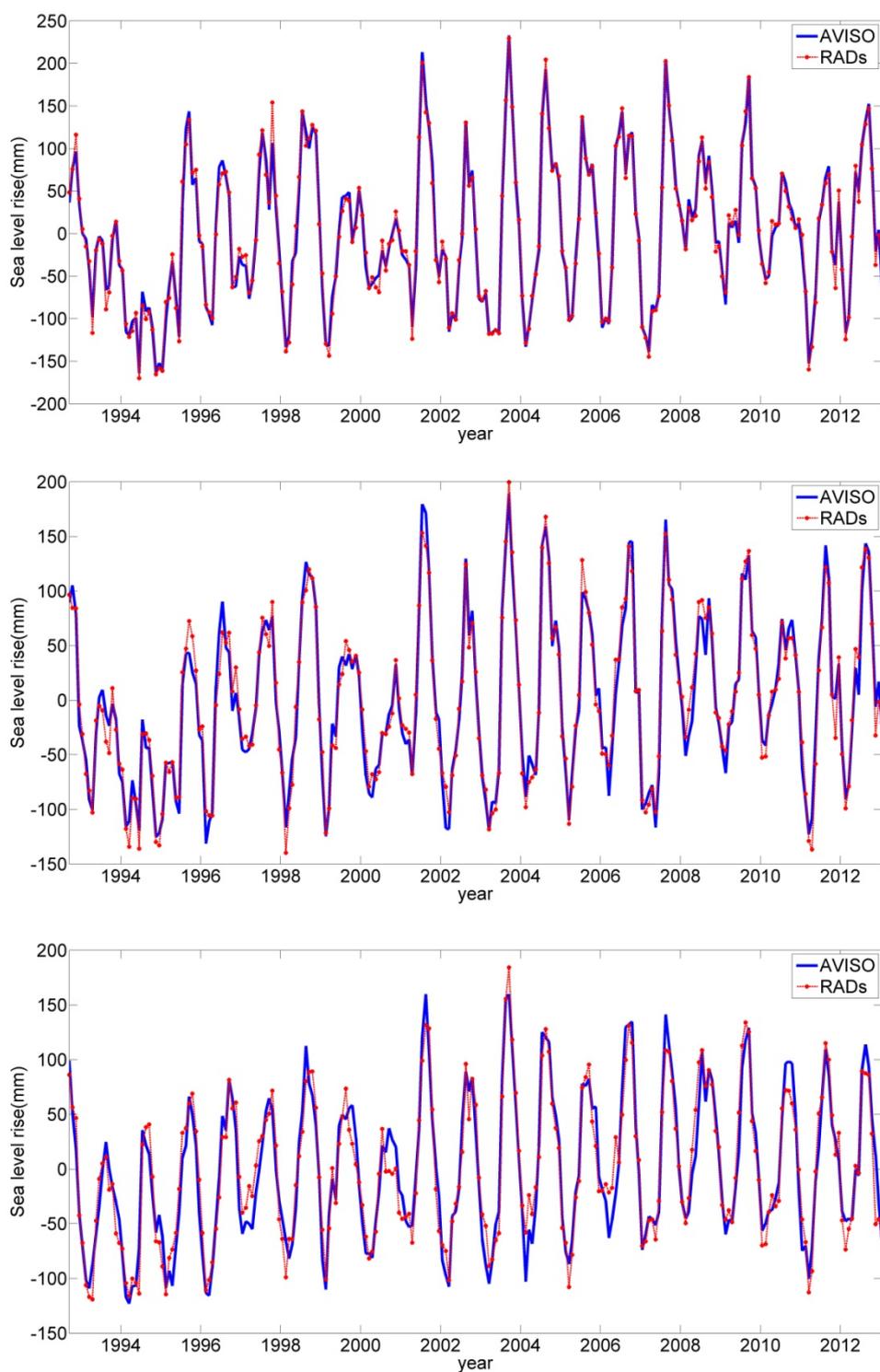
附圖 2-12 PSMSL 內斯驗潮站固定範圍內之衛星測高海水面變化。上：  
經緯度 2°，中：經緯度 3°，下：經緯度 5°



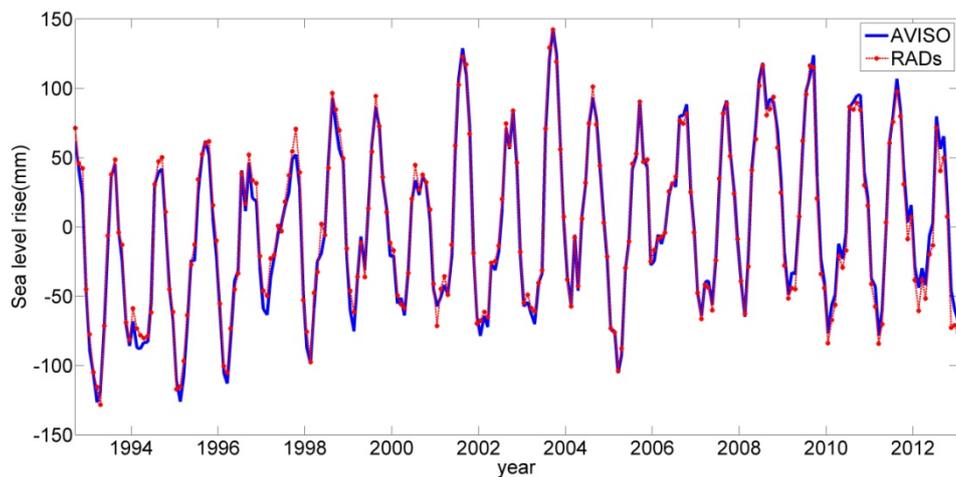
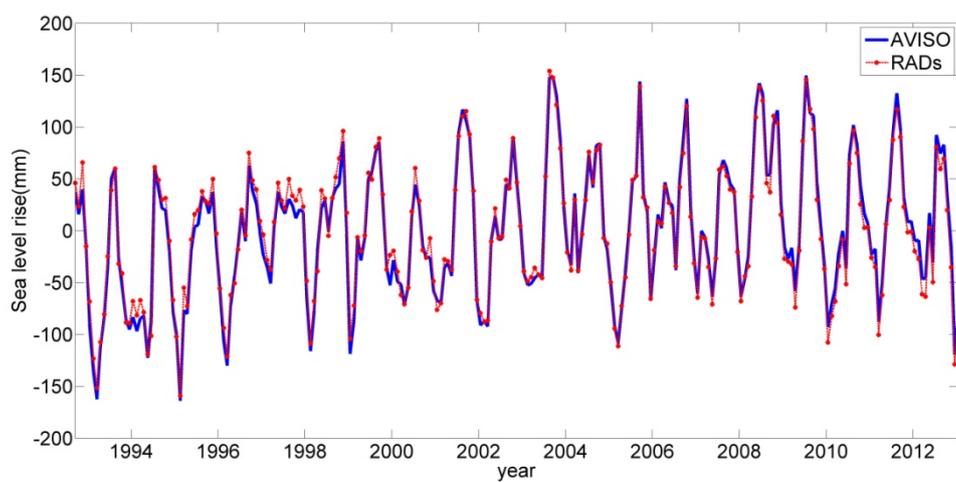
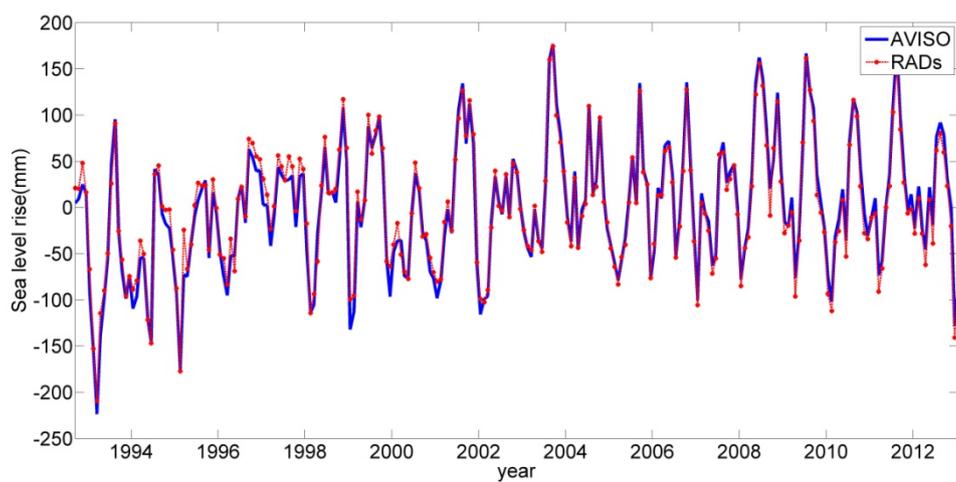
附圖 2-13 PSMSL 中之島驗潮站固定範圍內之衛星測高海水面變化。上：經緯度 2°，中：經緯度 3°，下：經緯度 5°



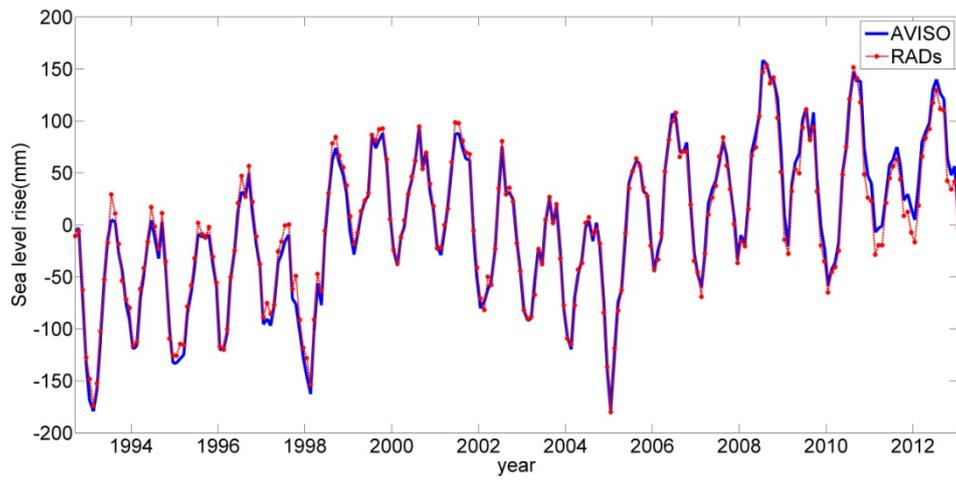
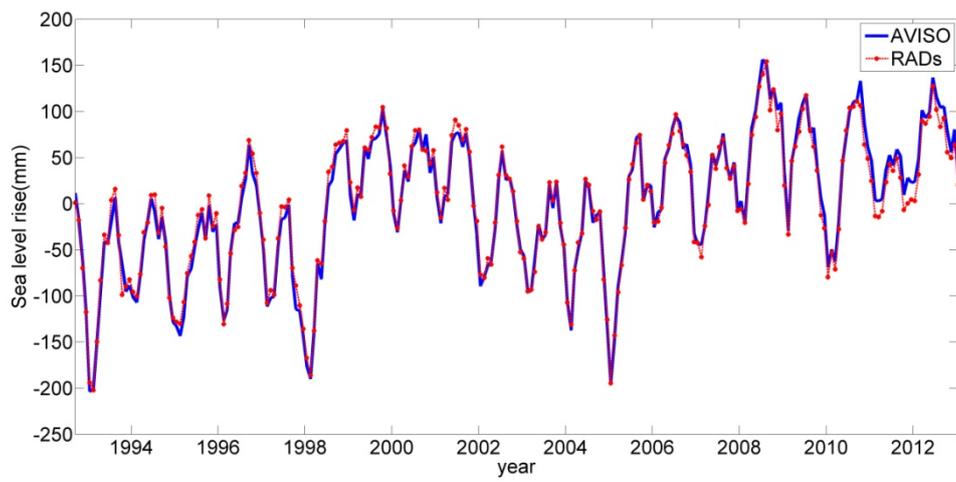
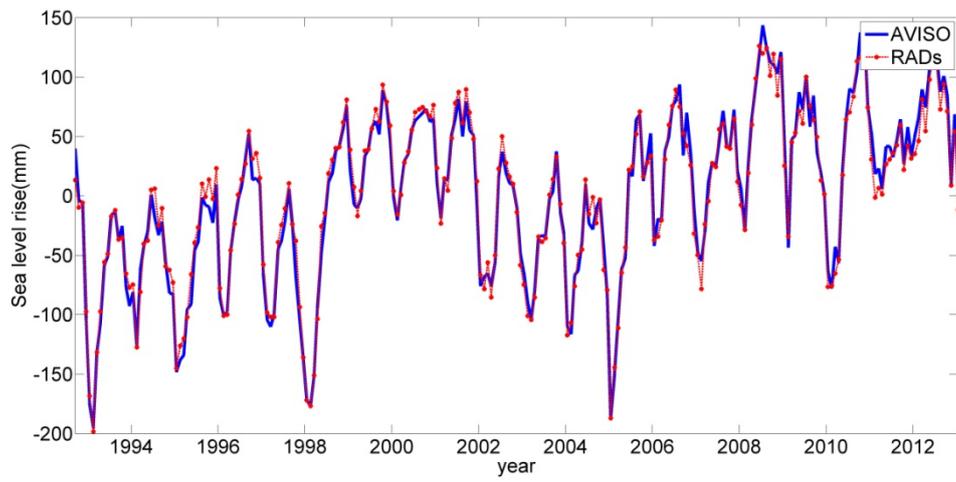
附圖 2-14 PSMSL 沖繩驗潮站固定範圍內之衛星測高海水面變化。上: 經緯度 2°, 中: 經緯度 3°, 下: 經緯度 5°



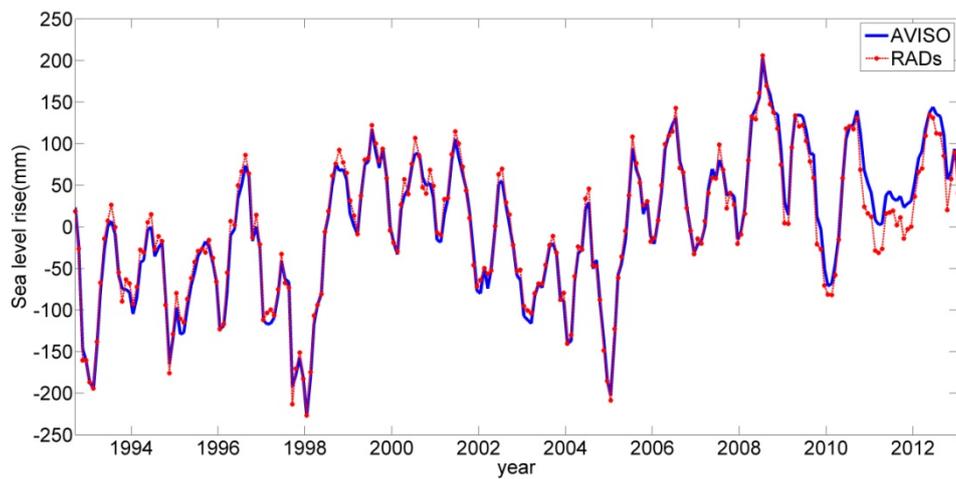
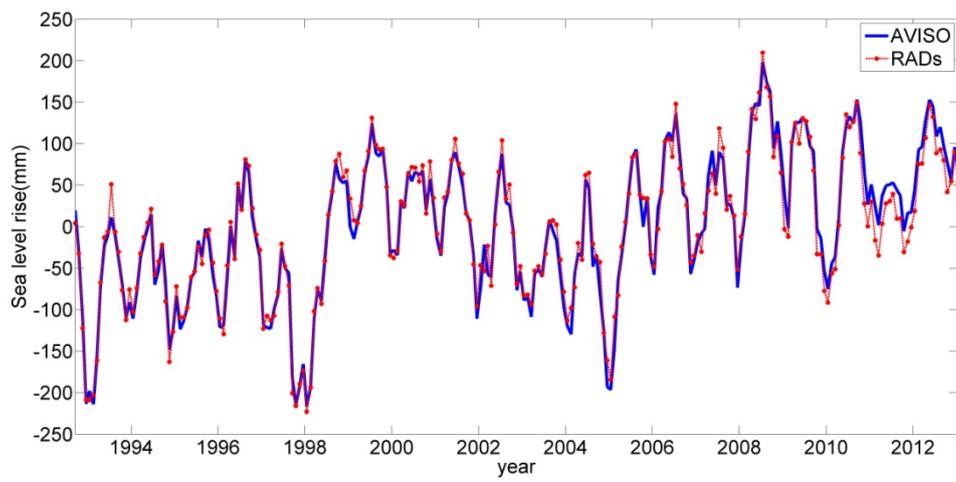
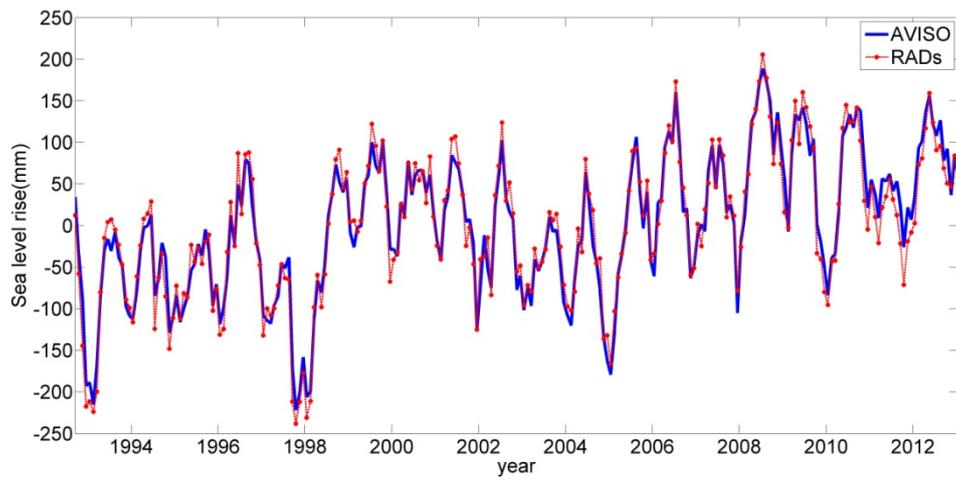
附圖 2-15 PSMSL 那霸驗潮站固定範圍內之衛星測高海水面變化。上: 經緯度 2°, 中: 經緯度 3°, 下: 經緯度 5°



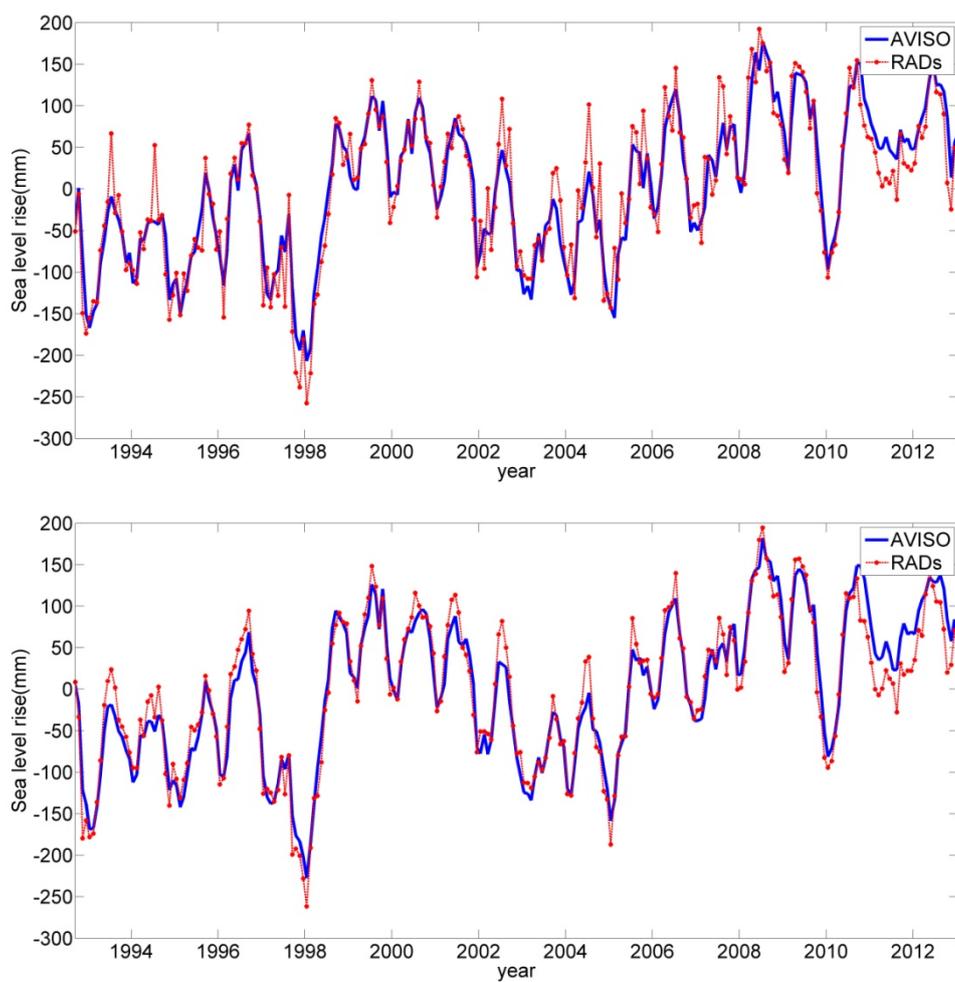
附圖 2-16 PSMSL 石垣島驗潮站固定範圍內之衛星測高海水面變化。上：經緯度  $2^{\circ}$ ，中：經緯度  $3^{\circ}$ ，下：經緯度  $5^{\circ}$



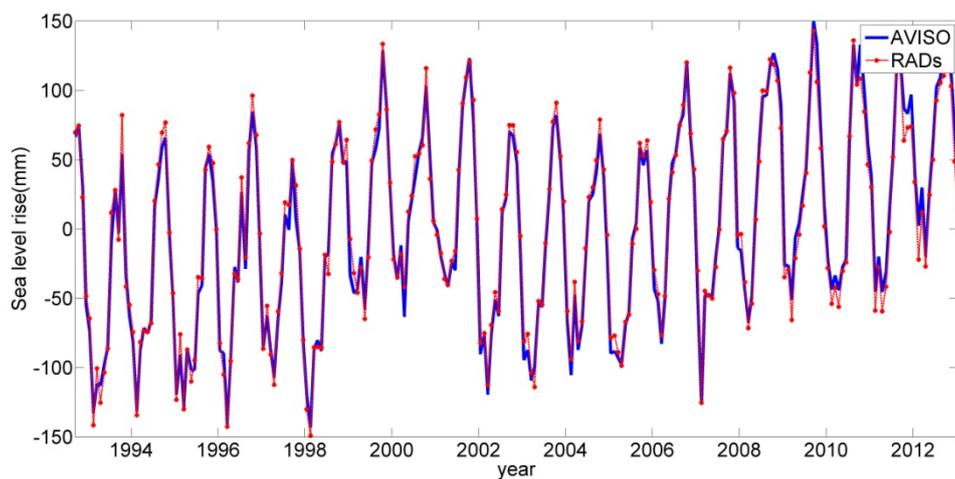
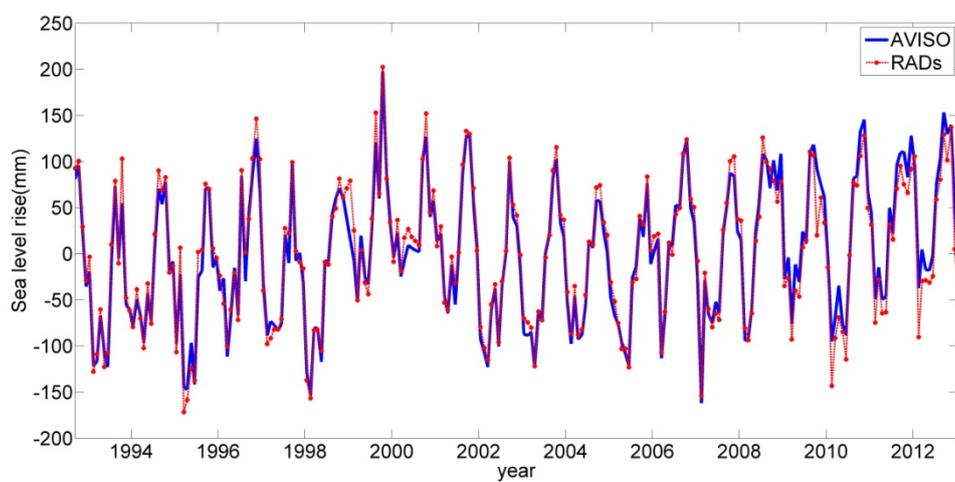
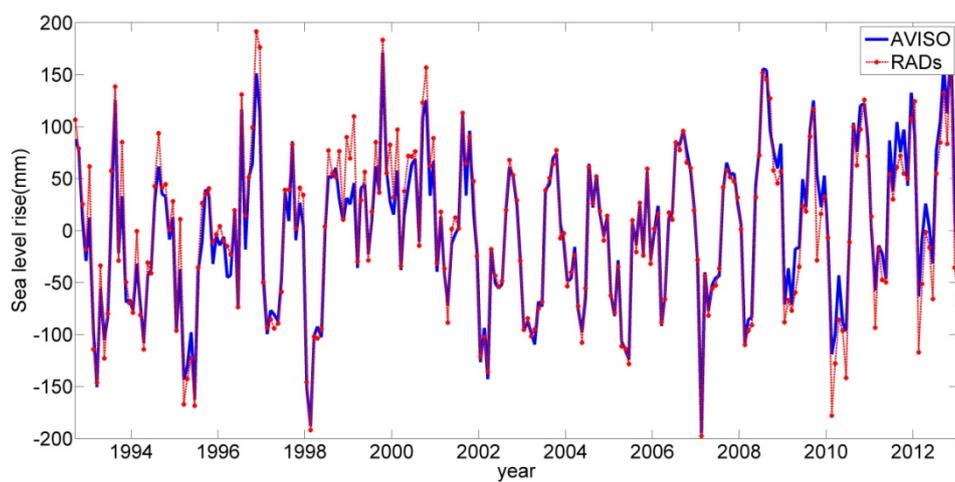
附圖 2-17 PSMSL 馬尼拉驗潮站固定範圍內之衛星測高海水面變化。上: 經緯度 2°, 中: 經緯度 3°, 下: 經緯度 5°



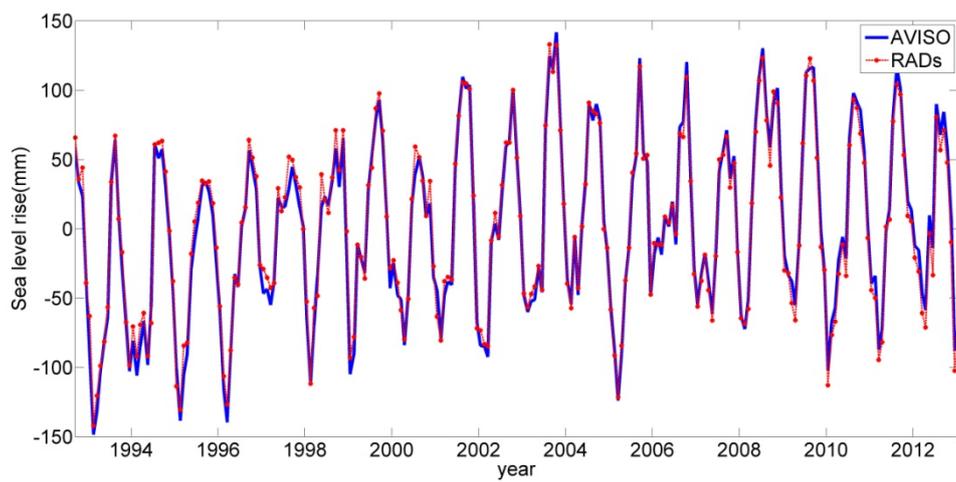
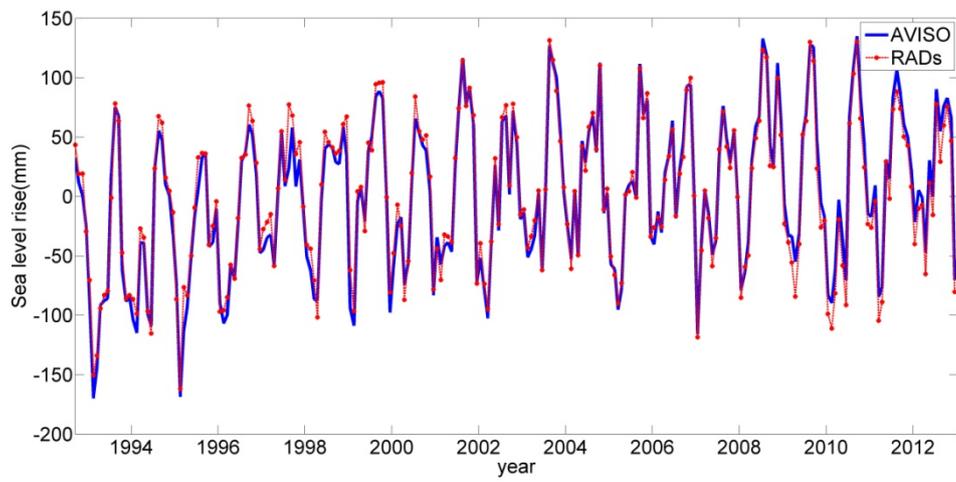
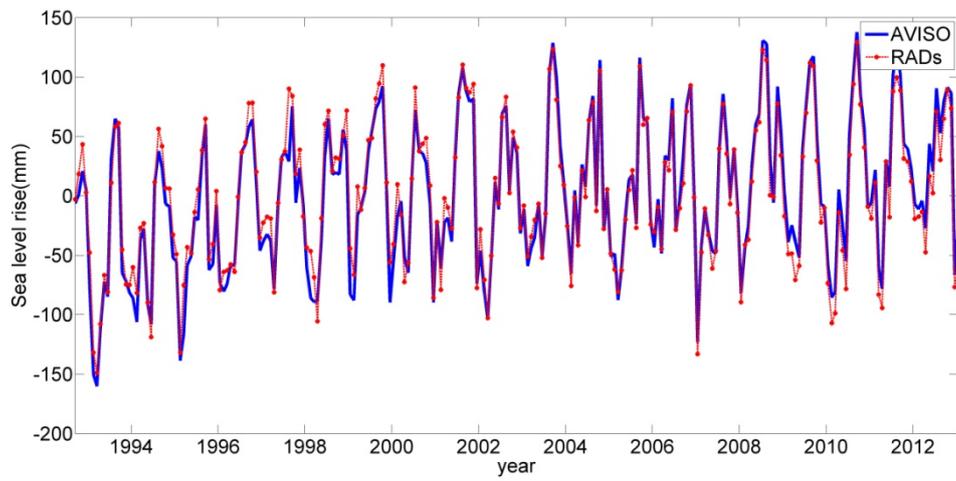
附圖 2-18 PSMSL 黎牙實比驗潮站固定範圍內之衛星測高海水面變化。  
 上: 經緯度 2°, 中: 經緯度 3°, 下: 經緯度 5°



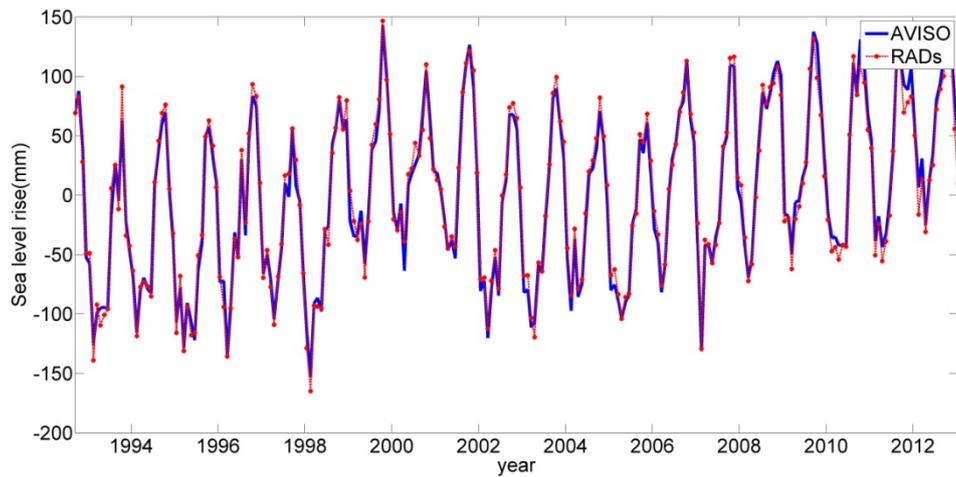
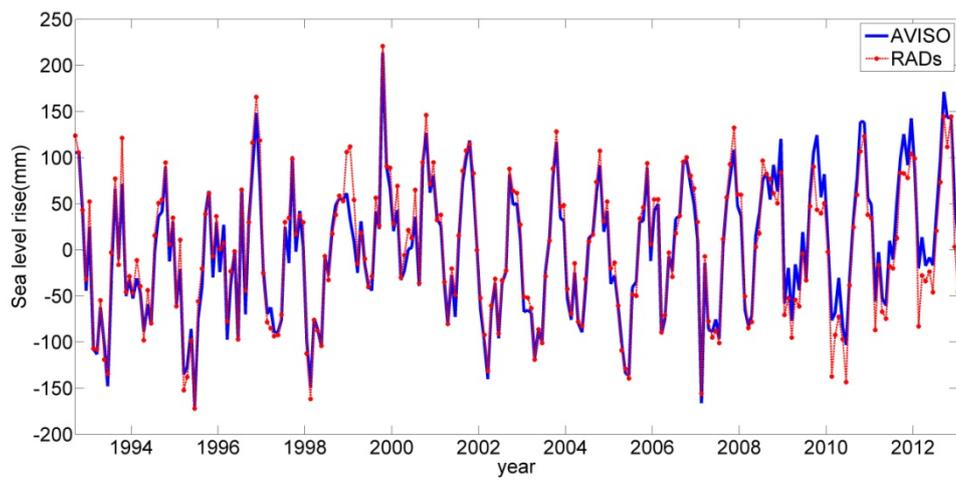
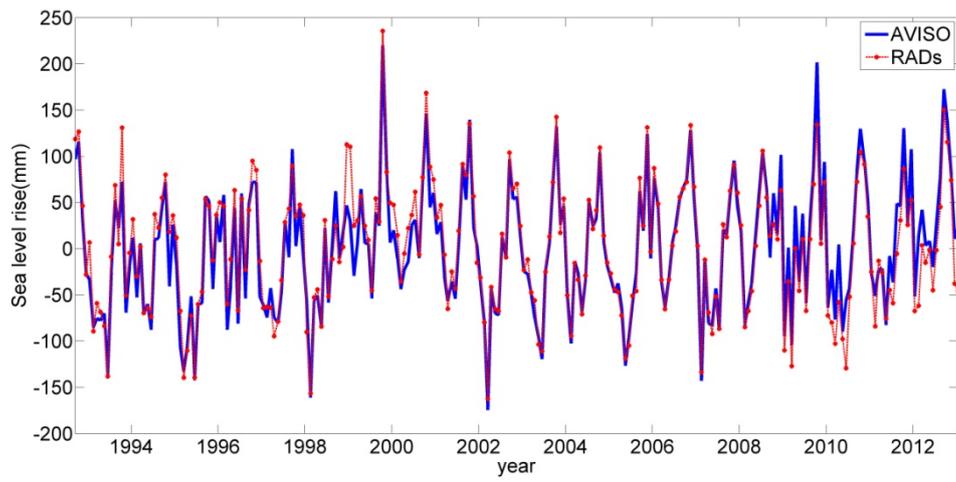
附圖 2-19 PSMSL 宿霧驗潮站固定範圍內之衛星測高海水面變化。上:3°，  
下: 經緯度 5°，2° 範圍內無衛星測高 RADs 資料



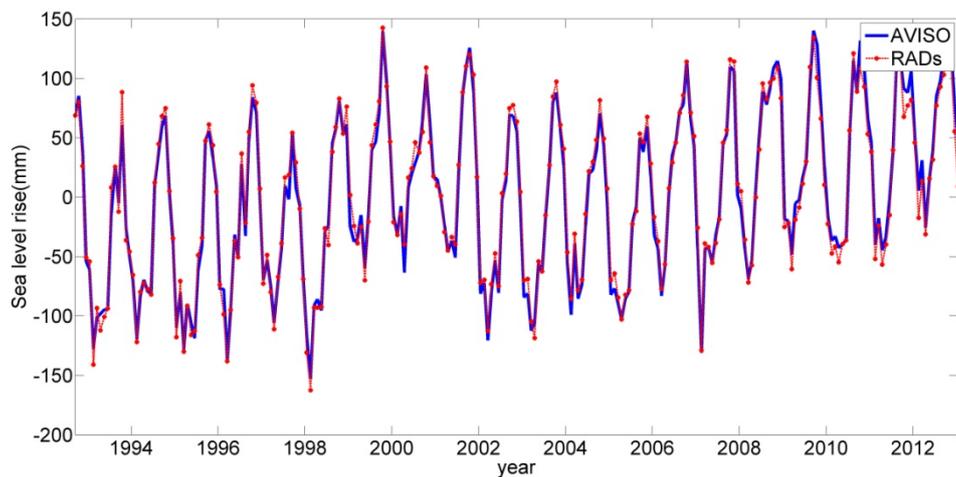
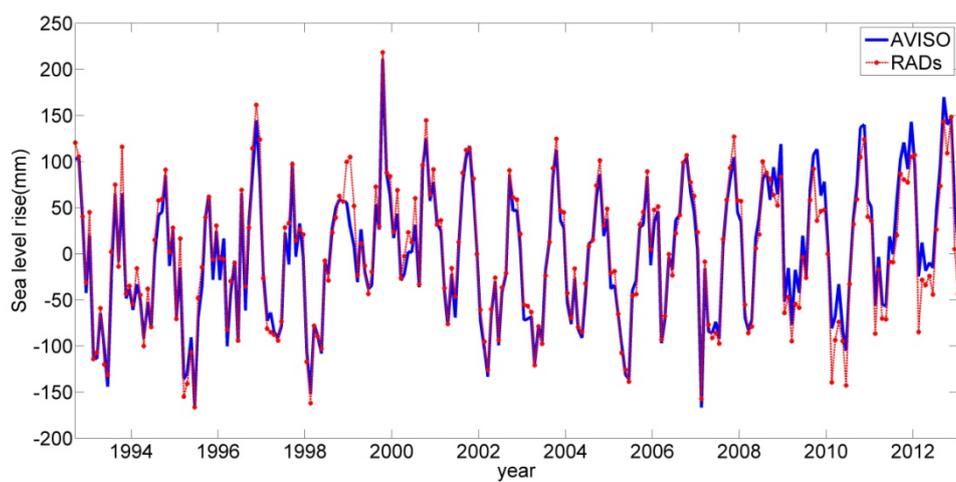
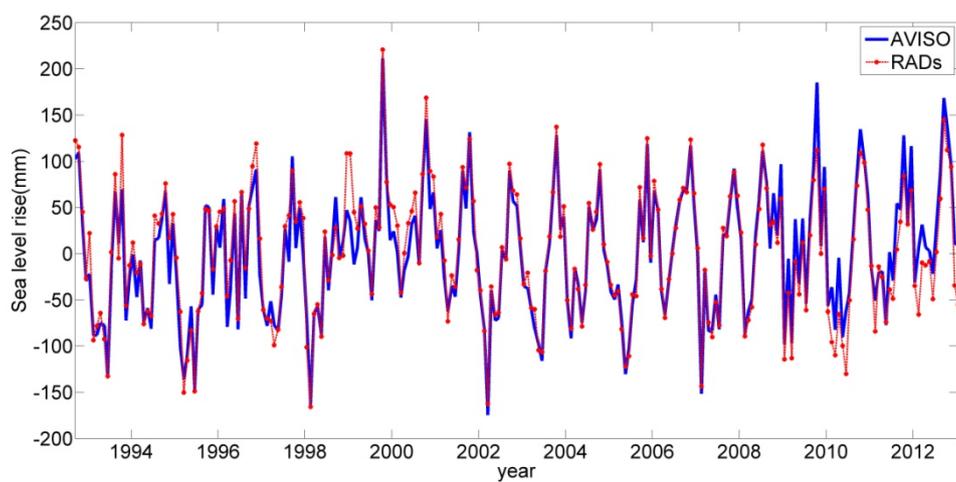
附圖 2-20 UHSLC 高雄驗潮站固定範圍內之衛星測高海水面變化。上：經緯度  $2^{\circ}$ ，中：經緯度  $3^{\circ}$ ，下：經緯度  $5^{\circ}$



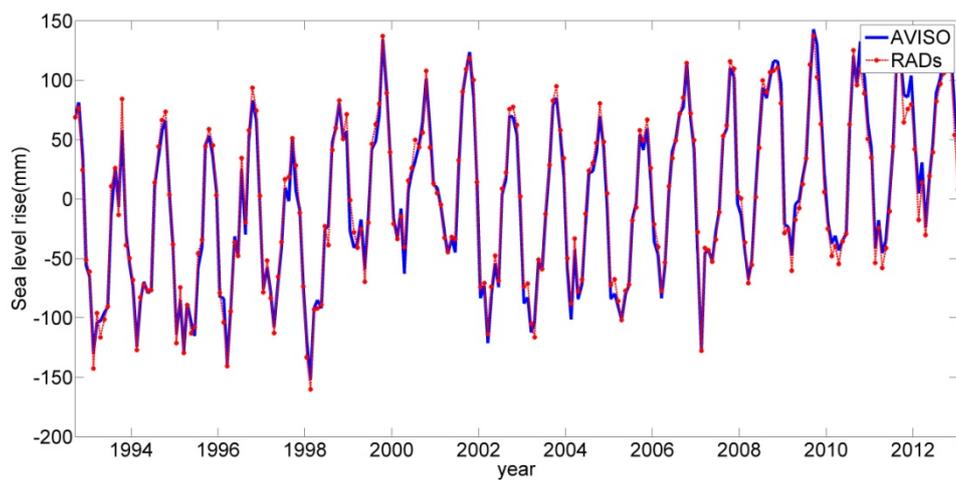
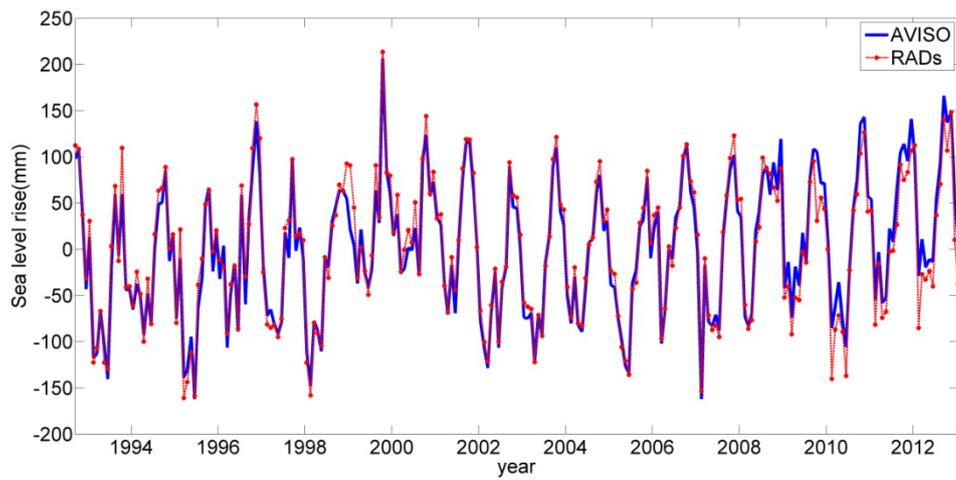
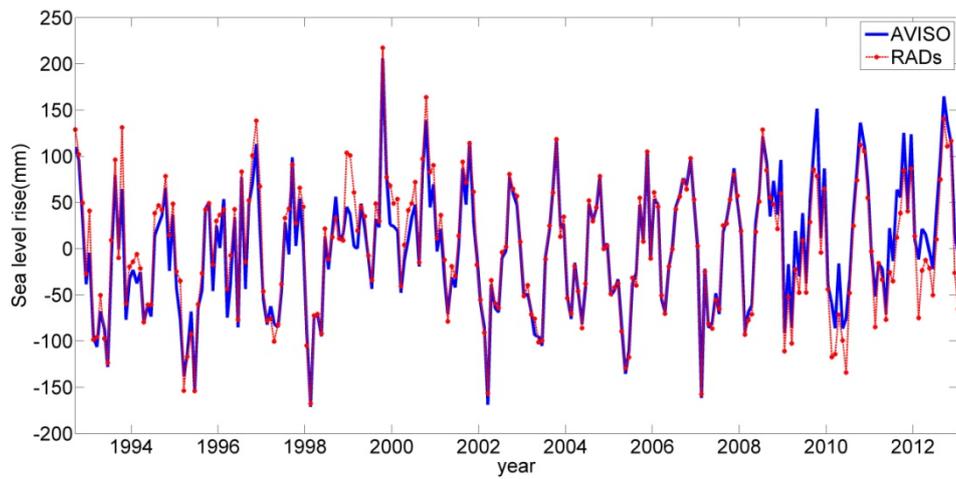
附圖 2-21 UHSLC 基隆驗潮站固定範圍內之衛星測高海水面變化。上: 經緯度  $2^{\circ}$ ，中: 經緯度  $3^{\circ}$ ，下: 經緯度  $5^{\circ}$



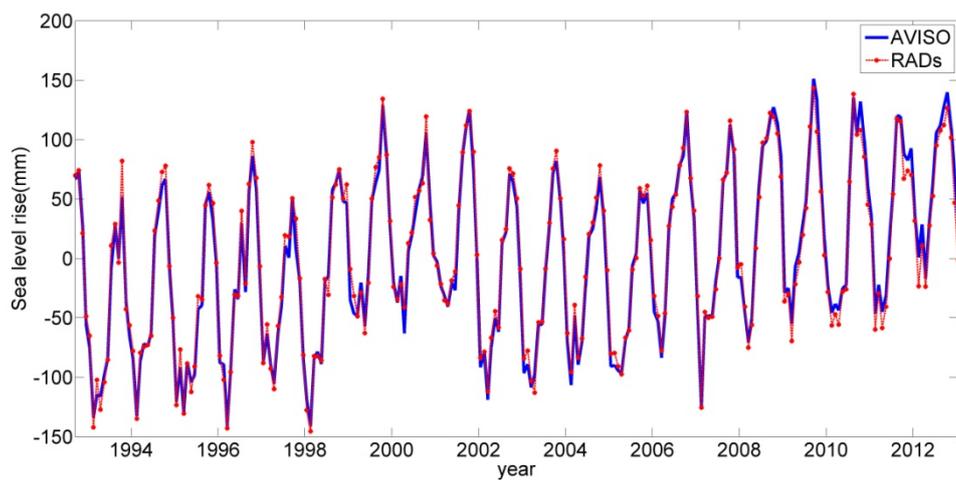
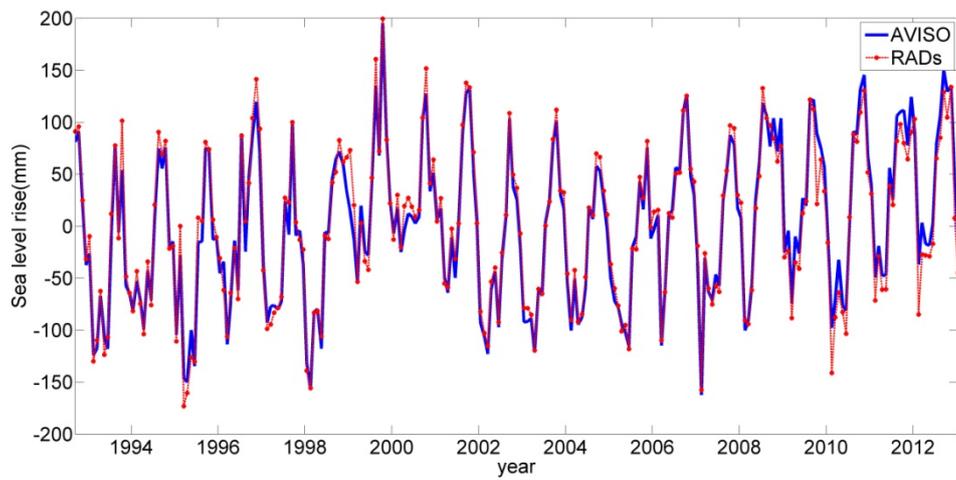
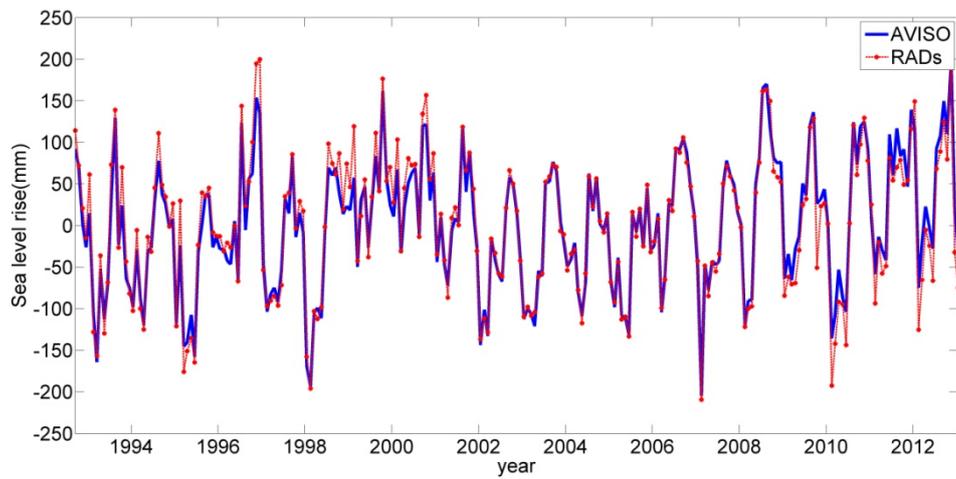
附圖 2-22 CWB 箔子寮驗潮站固定範圍內之衛星測高海水面變化。上：經緯度  $2^{\circ}$ ，中：經緯度  $3^{\circ}$ ，下：經緯度  $5^{\circ}$



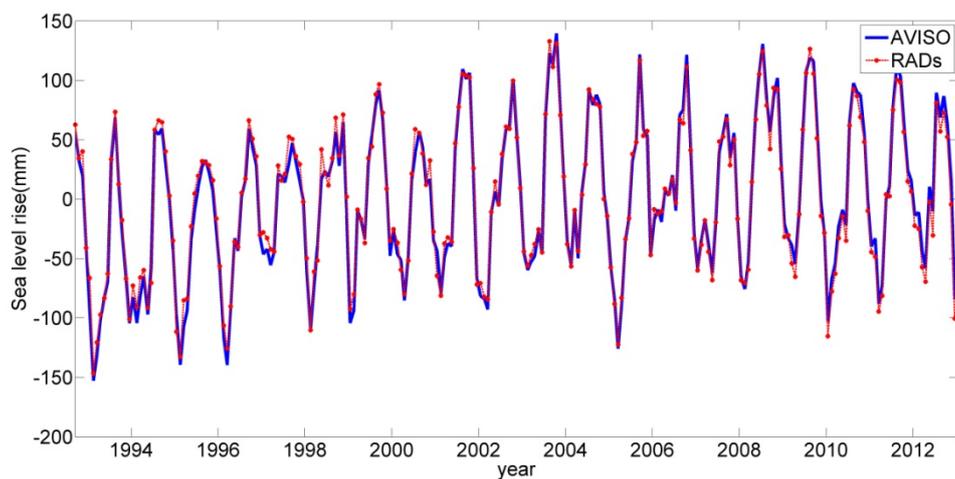
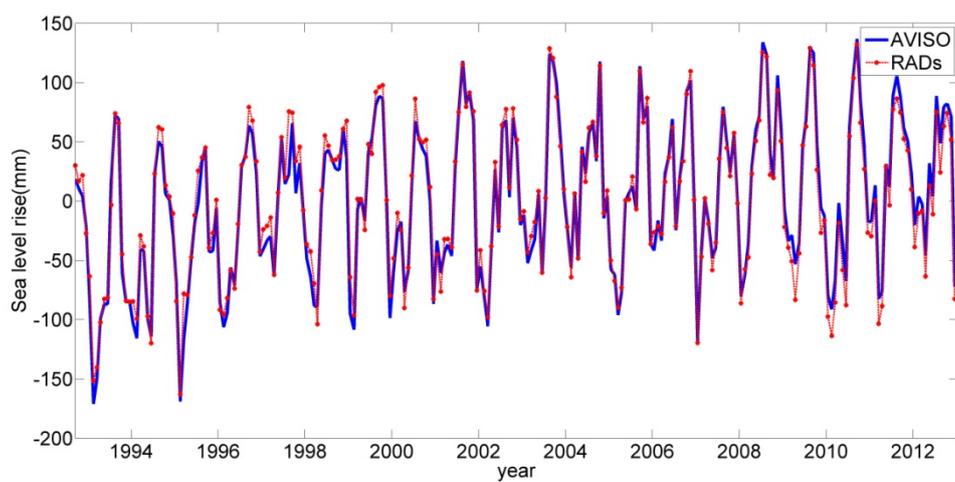
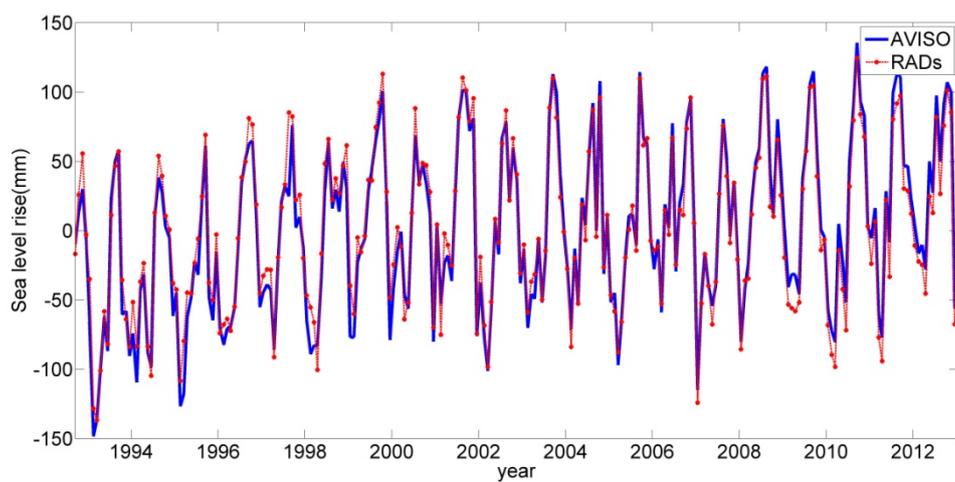
附圖 2-23 CWB 東石驗潮站固定範圍內之衛星測高海水面變化。上: 經緯度  $2^{\circ}$ ，中: 經緯度  $3^{\circ}$ ，下: 經緯度  $5^{\circ}$



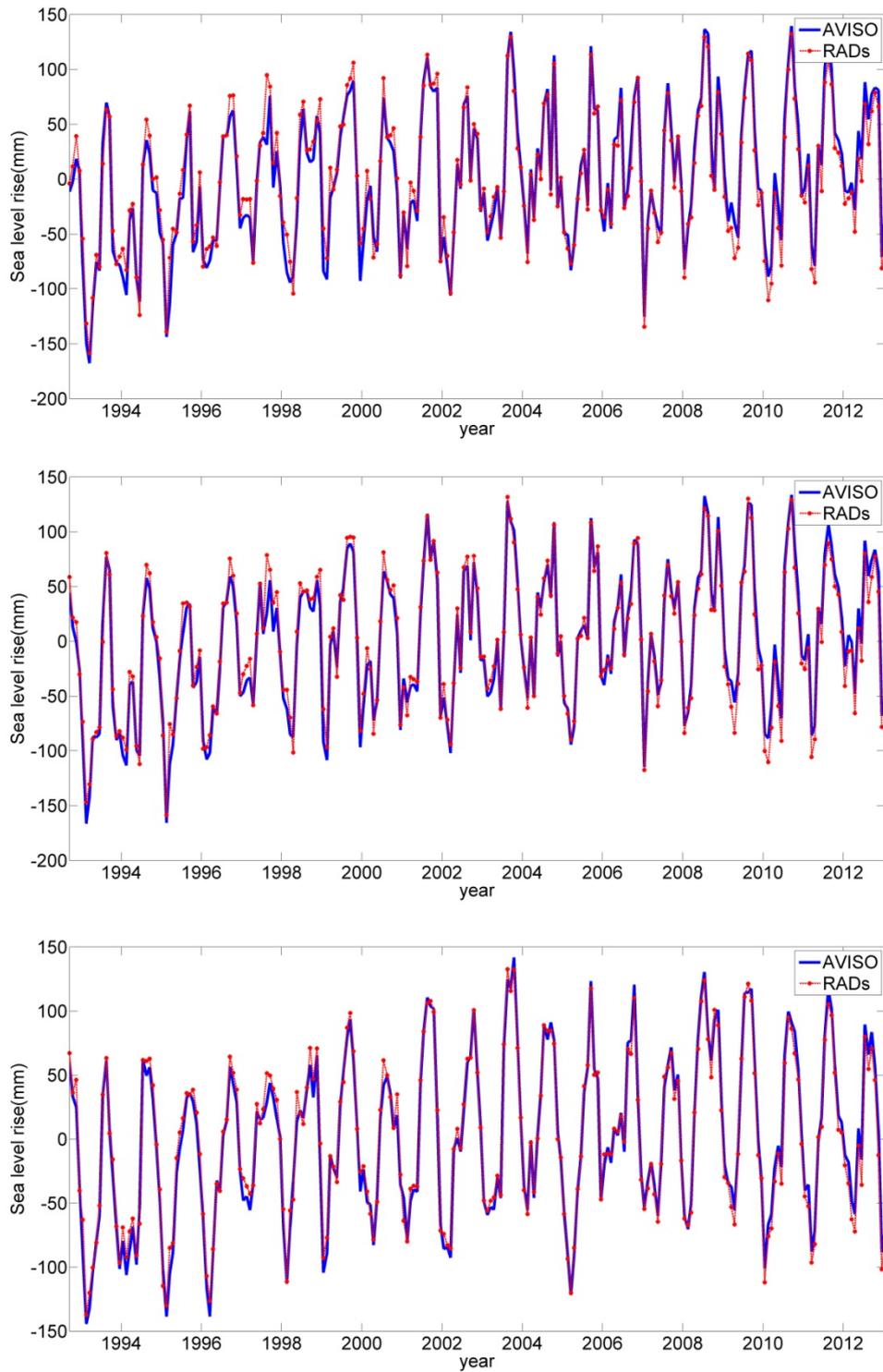
附圖 2-24 CWB 將軍驗潮站固定範圍內之衛星測高海水面變化。上: 經緯度  $2^{\circ}$ ，中: 經緯度  $3^{\circ}$ ，下: 經緯度  $5^{\circ}$



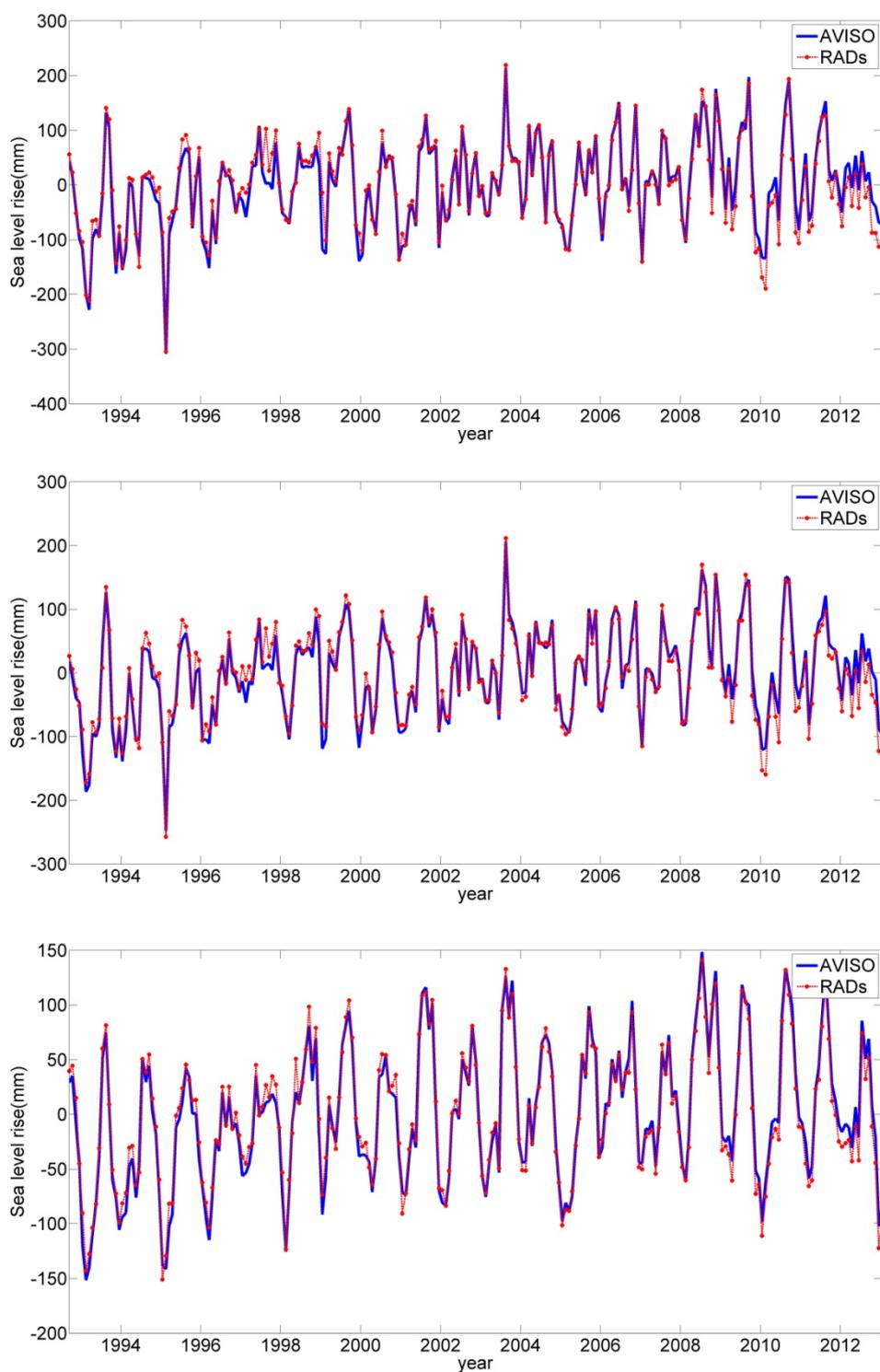
附圖 2-25 CWB 東港驗潮站固定範圍內之衛星測高海水面變化。上: 經緯度  $2^{\circ}$ ，中: 經緯度  $3^{\circ}$ ，下: 經緯度  $5^{\circ}$



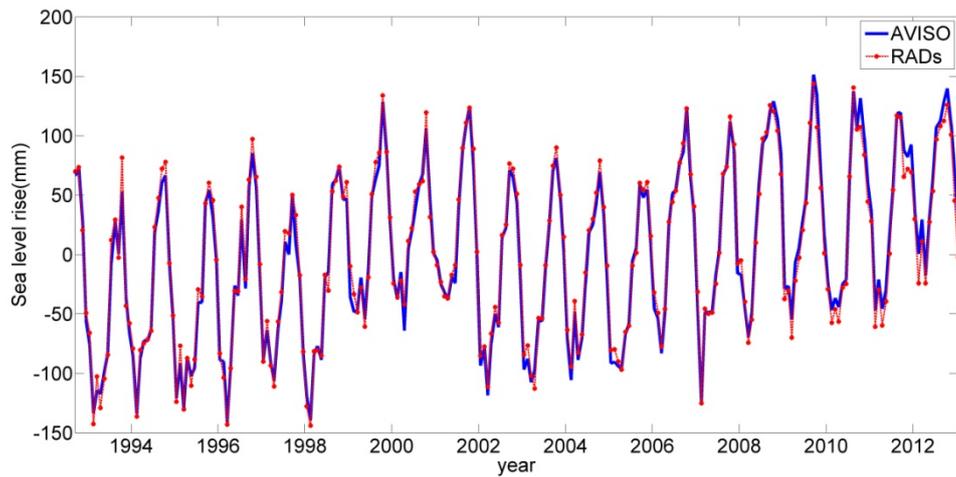
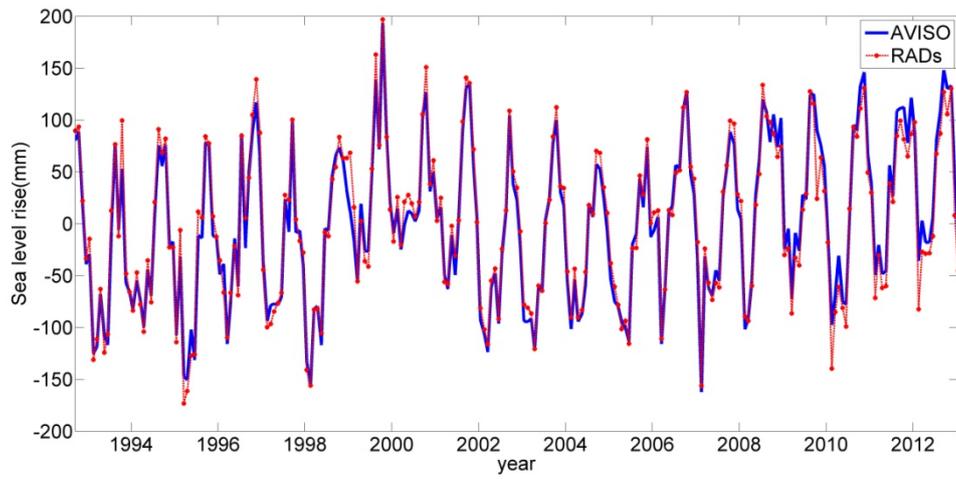
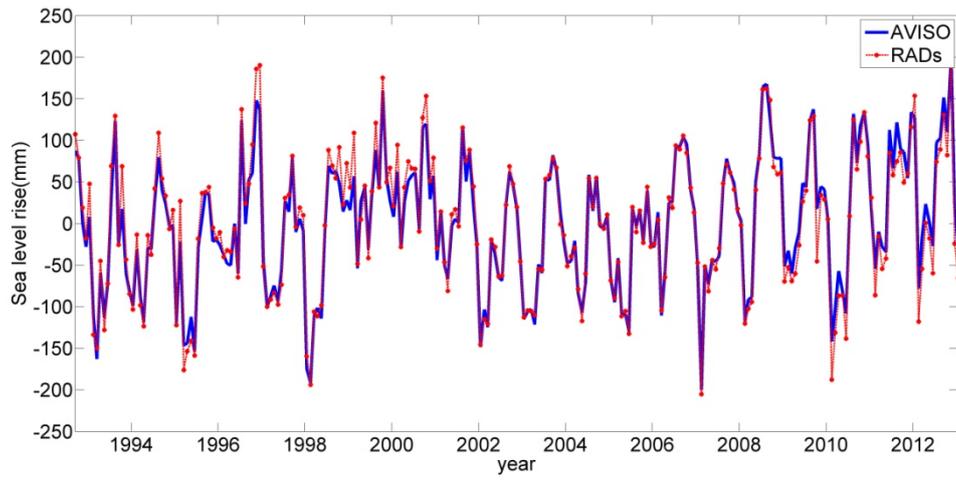
附圖 2-26 CWB 麟山鼻驗潮站固定範圍內之衛星測高海水面變化。上：經緯度  $2^{\circ}$ ，中：經緯度  $3^{\circ}$ ，下：經緯度  $5^{\circ}$



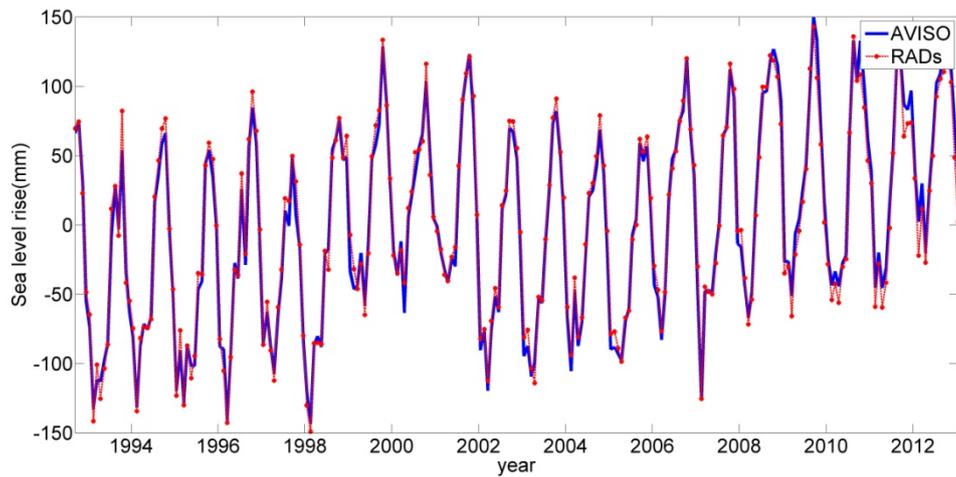
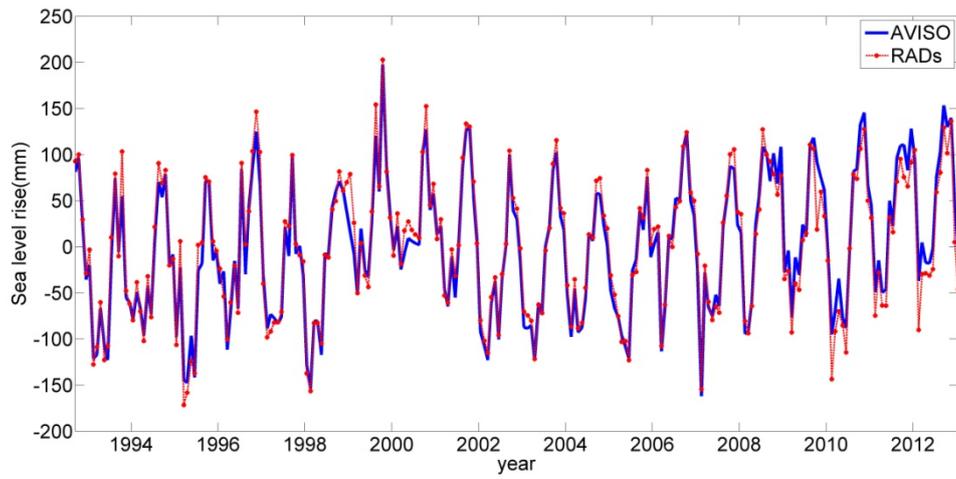
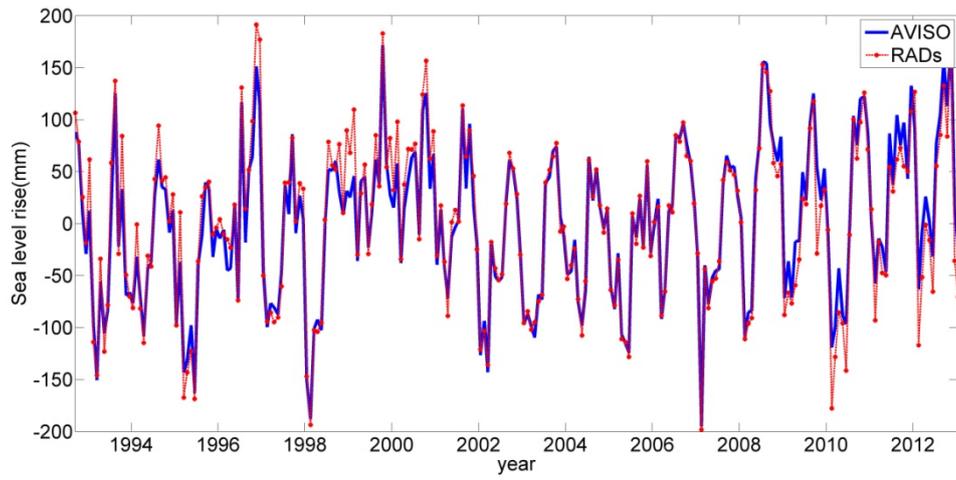
附圖 2-27 CWB 龍洞驗潮站固定範圍內之衛星測高海水面變化。上: 經緯度  $2^{\circ}$ ，中: 經緯度  $3^{\circ}$ ，下: 經緯度  $5^{\circ}$



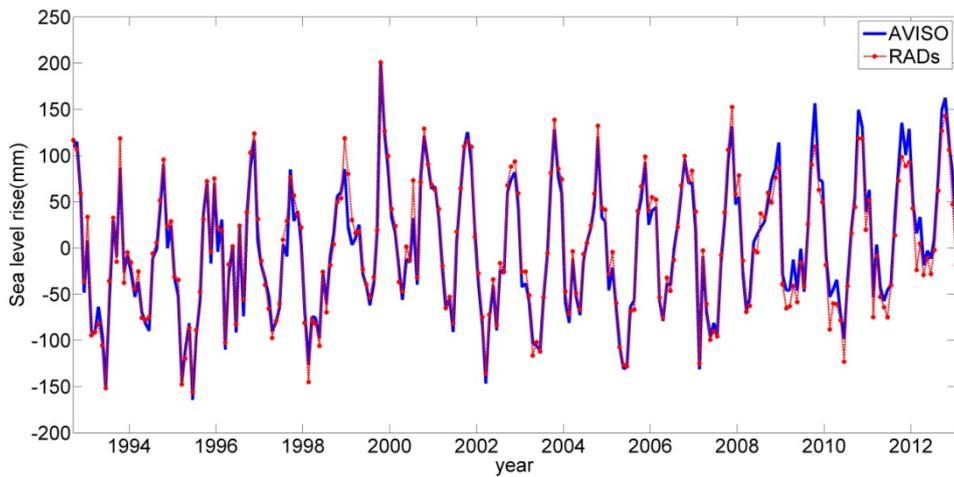
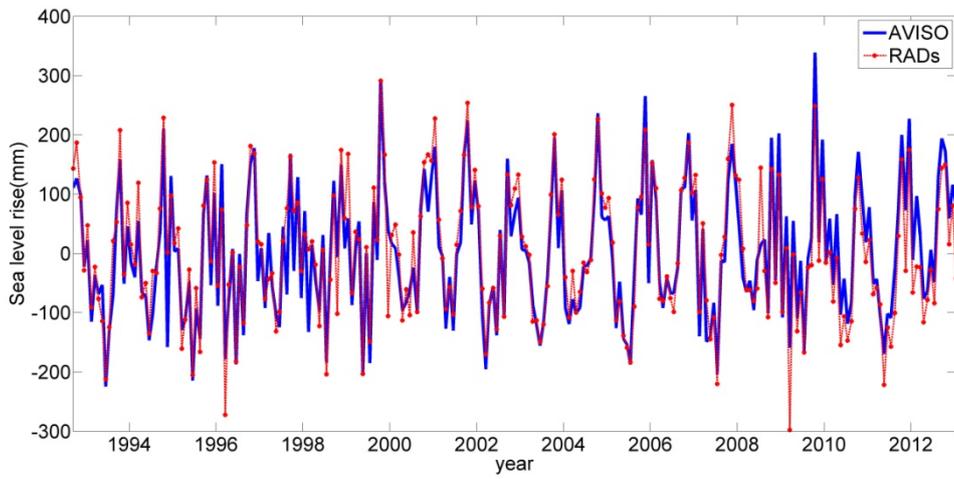
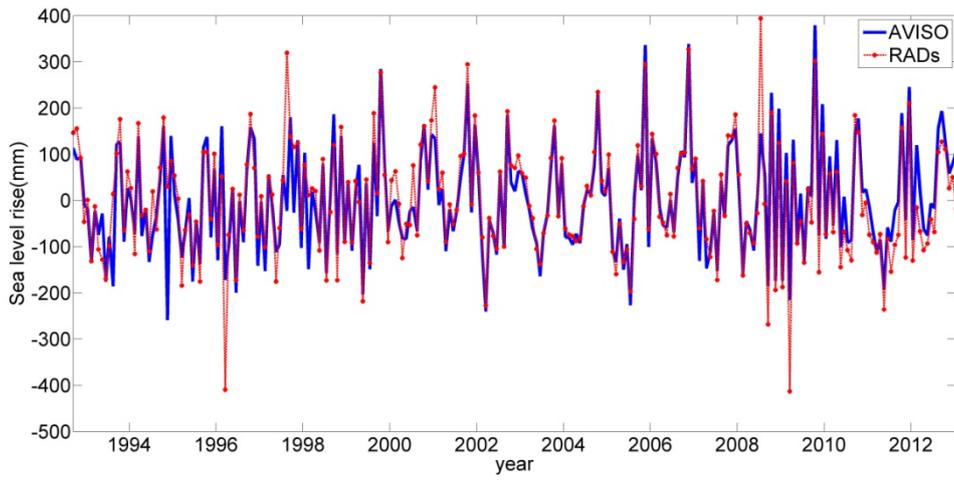
附圖 2-28 CWB 成功驗潮站固定範圍內之衛星測高海水面變化。上: 經緯度 2°, 中: 經緯度 3°, 下: 經緯度 5°



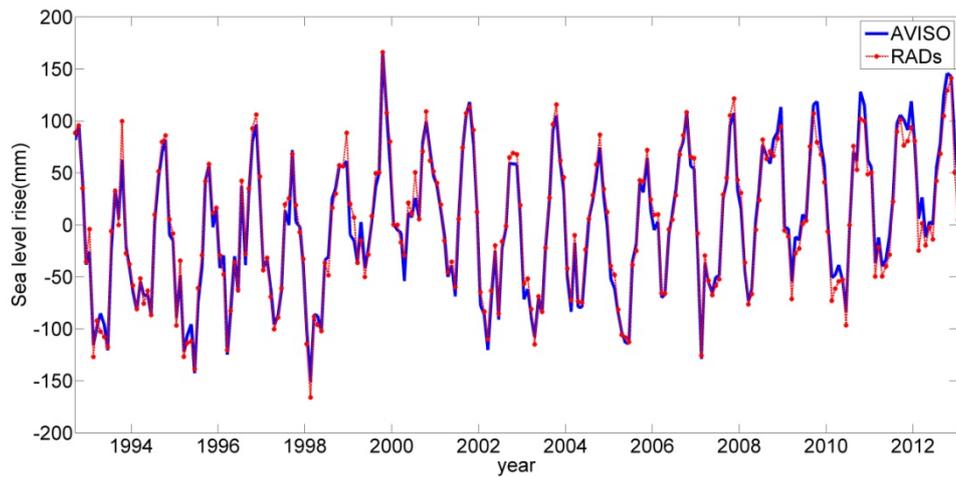
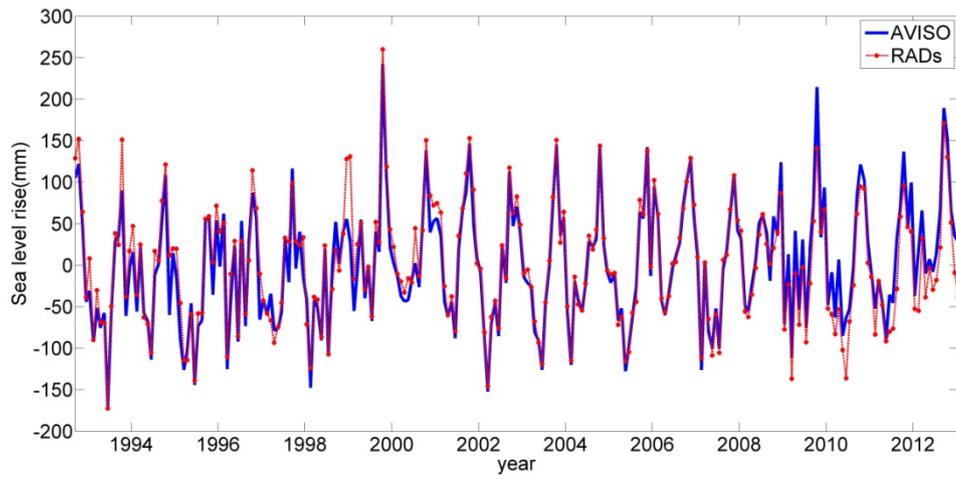
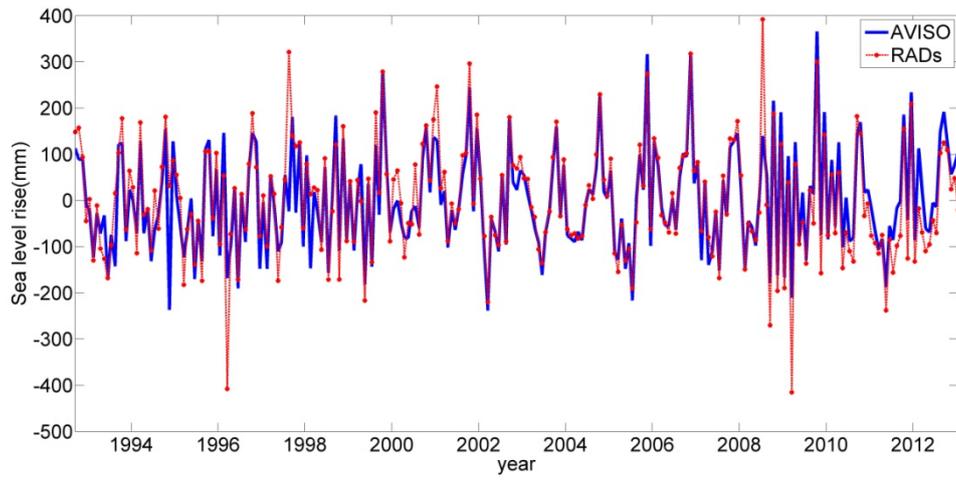
附圖 2-29 CWB 小琉球驗潮站固定範圍內之衛星測高海水面變化。上：經緯度 2°，中：經緯度 3°，下：經緯度 5°



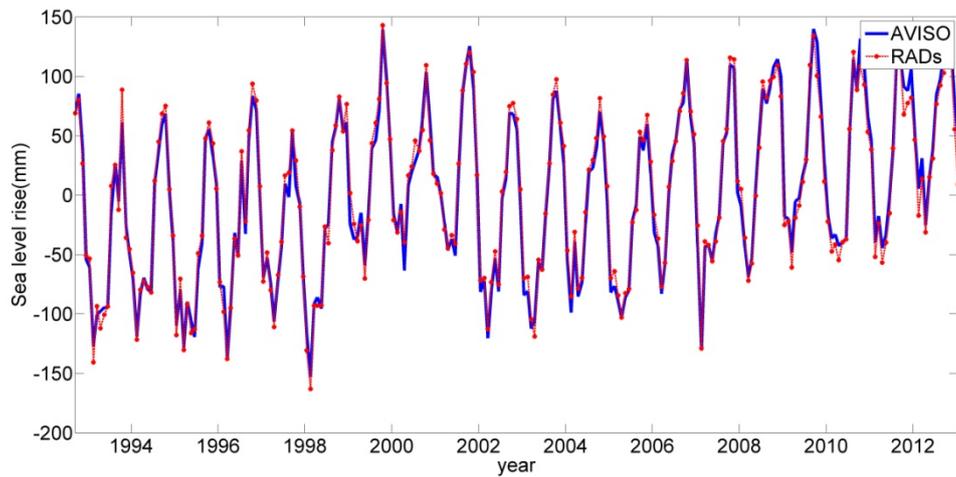
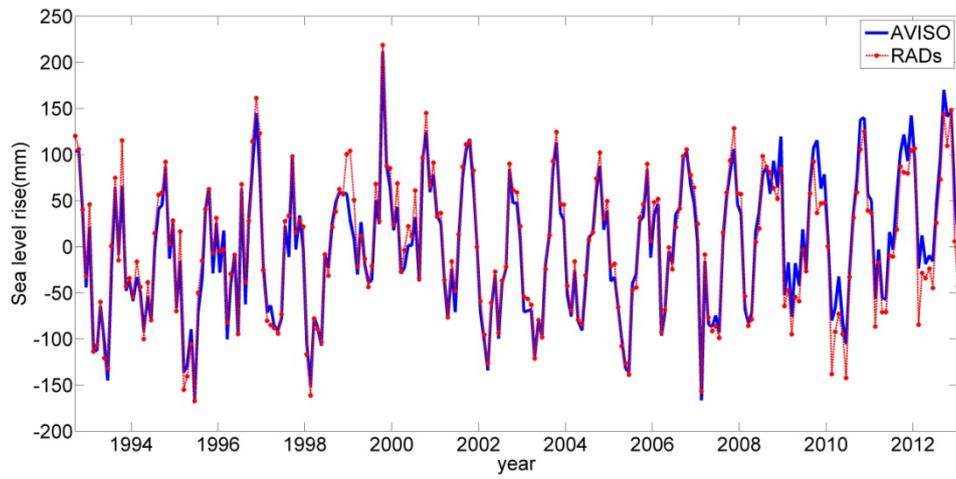
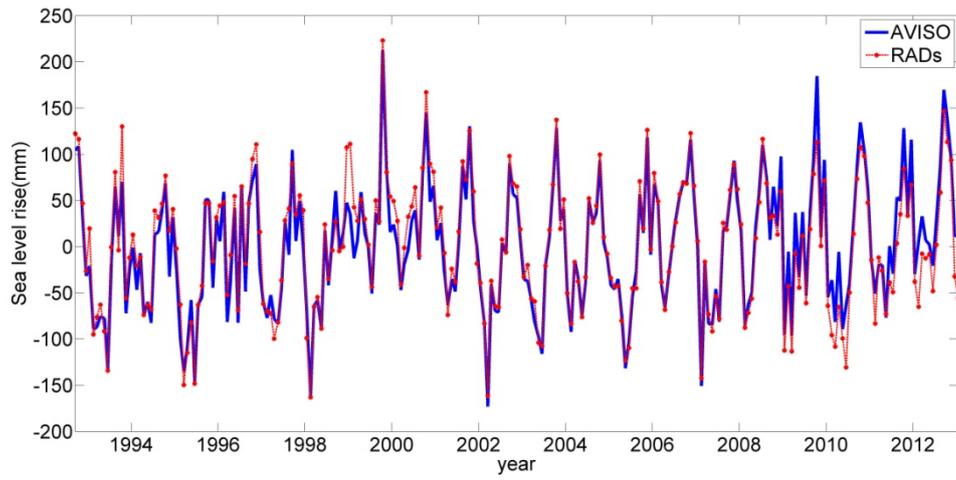
附圖 2-30 CWB 高雄驗潮站固定範圍內之衛星測高海水面變化。上: 經緯度  $2^{\circ}$ ，中: 經緯度  $3^{\circ}$ ，下: 經緯度  $5^{\circ}$



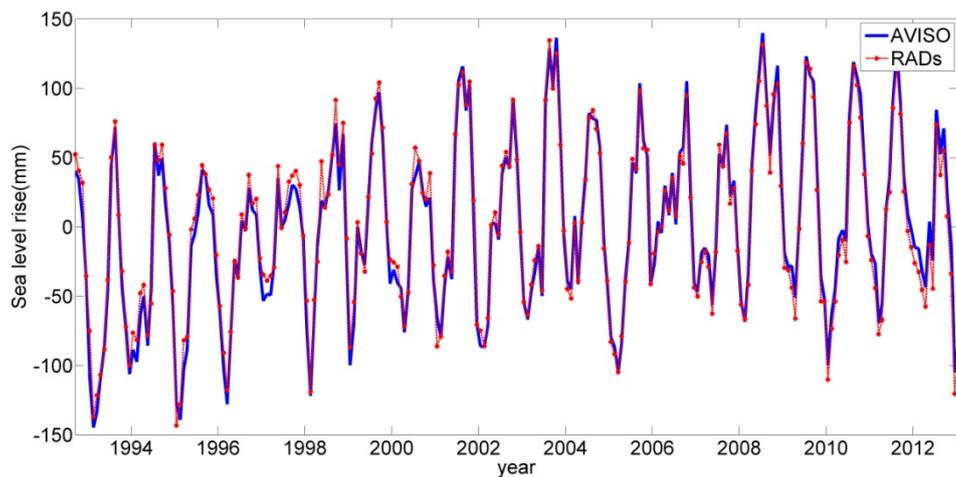
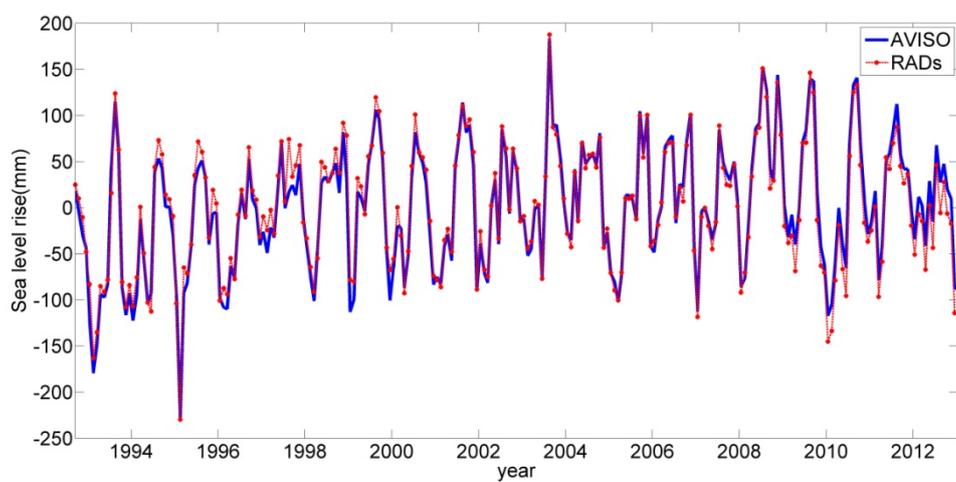
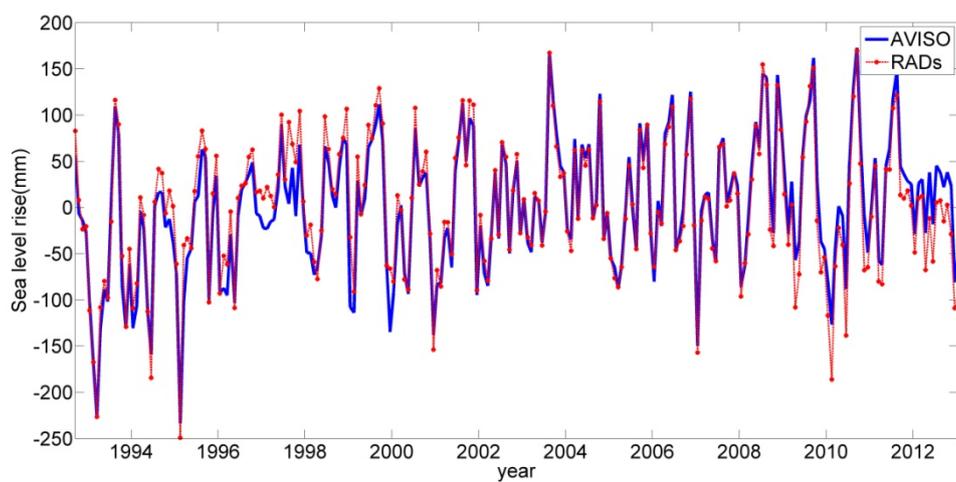
附圖 2-31 CWB 馬祖驗潮站固定範圍內之衛星測高海水面變化。上: 經緯度  $2^{\circ}$ ，中: 經緯度  $3^{\circ}$ ，下: 經緯度  $5^{\circ}$



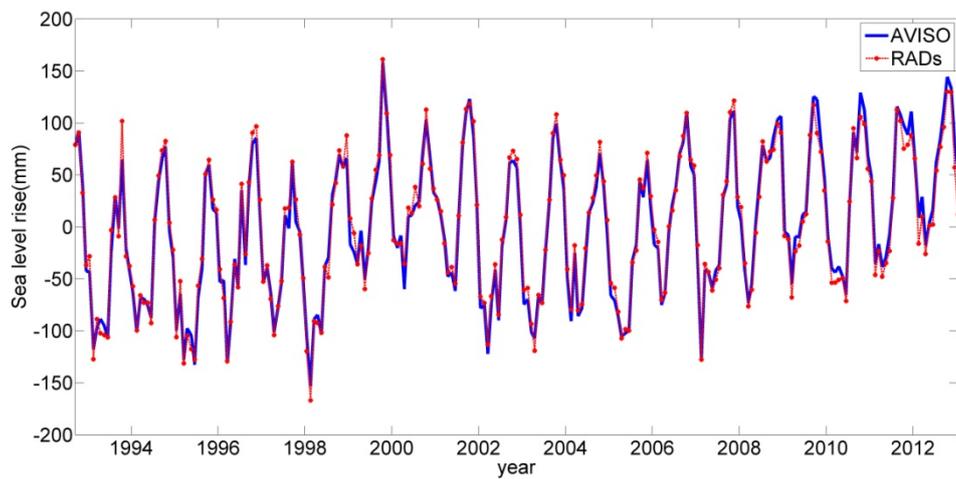
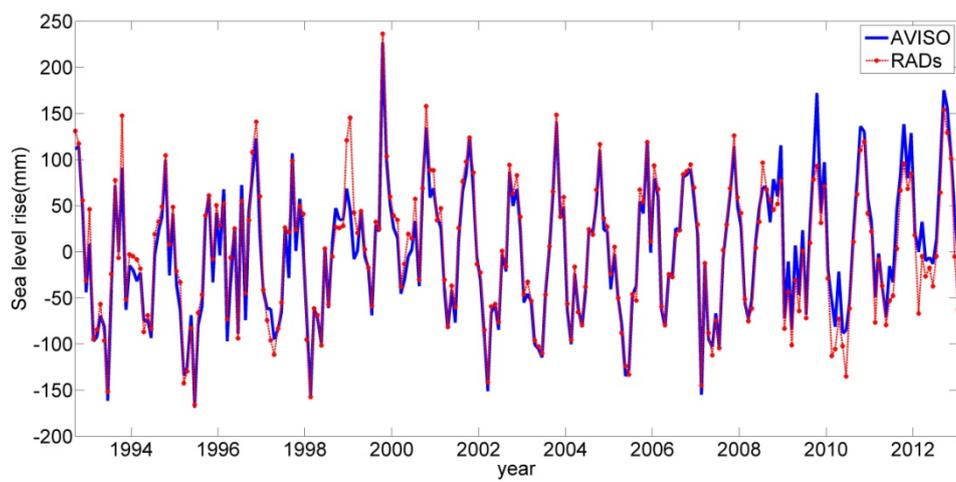
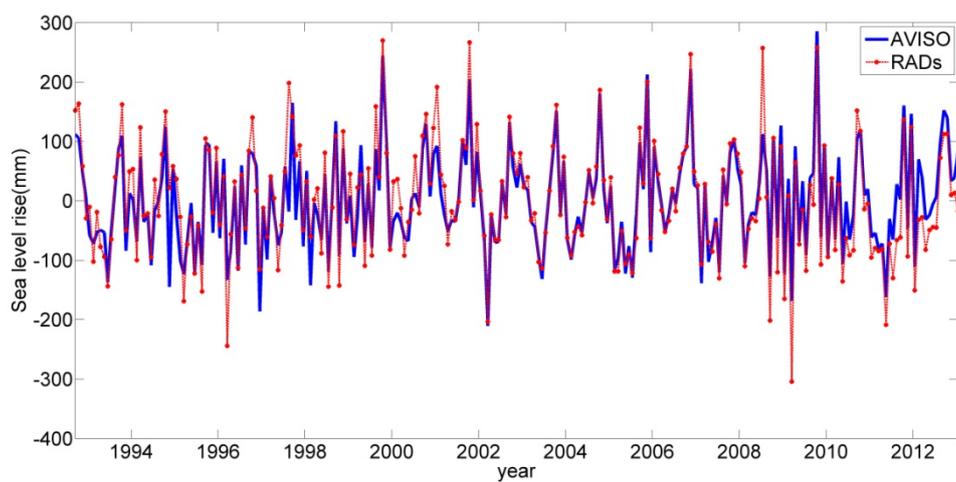
附圖 2-32 CWB 新竹驗潮站固定範圍內之衛星測高海水面變化。上: 經緯度  $2^{\circ}$ ，中: 經緯度  $3^{\circ}$ ，下: 經緯度  $5^{\circ}$



附圖 2-33 CWB 塭港驗潮站固定範圍內之衛星測高海水面變化。上: 經緯度  $2^{\circ}$ ，中: 經緯度  $3^{\circ}$ ，下: 經緯度  $5^{\circ}$



附圖 2-34 CWB 花蓮驗潮站固定範圍內之衛星測高海水面變化。上: 經緯度  $2^{\circ}$ ，中: 經緯度  $3^{\circ}$ ，下: 經緯度  $5^{\circ}$



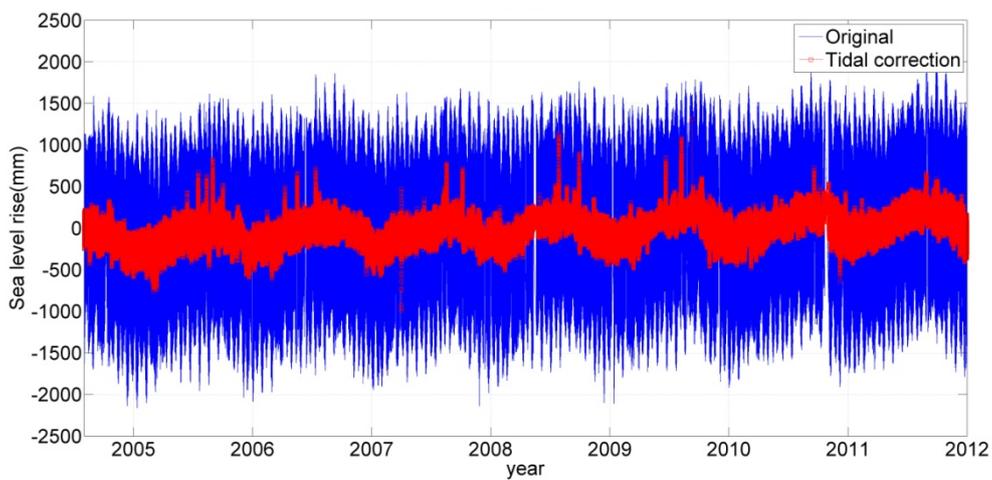
附圖 2-35 CWB 台中港驗潮站固定範圍內之衛星測高海水面變化。上：經緯度  $2^{\circ}$ ，中：經緯度  $3^{\circ}$ ，下：經緯度  $5^{\circ}$

### 附錄三 潮汐分潮週期

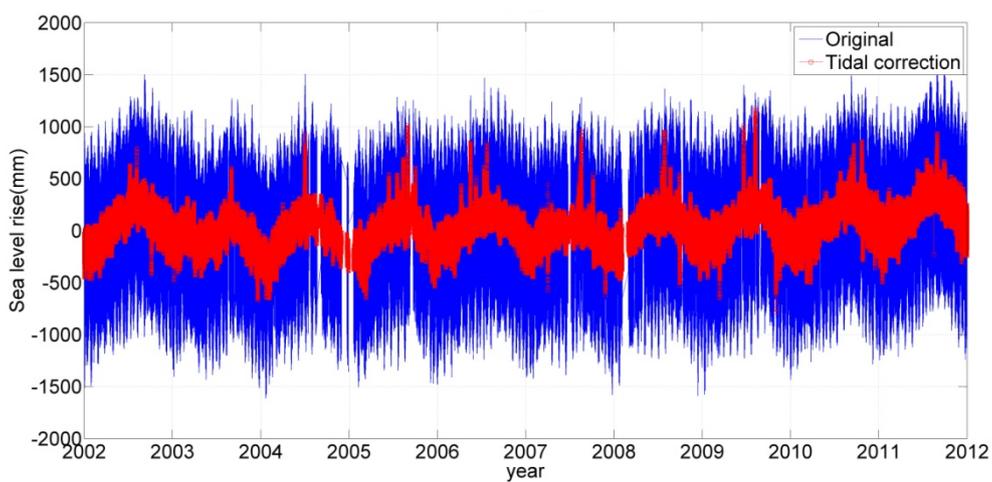
附表 3-1 37 個潮汐分潮週期[姜介中，2009]

	分潮名稱	周期 (hr)
M2	Principal lunar semidiurnal constituent	12.4206
S2	Principal solar semidiurnal constituent	12.0000
N2	Larger lunar elliptic semidiurnal constituent	12.6583
K1	Lunar diurnal constituent	23.9345
M4	Shallow water overtides of principal lunar constituent	6.2103
O1	Lunar diurnal constituent	25.8193
M6	Shallow water overtides of principal lunar constituent	4.1402
MK3	Shallow water terdiurnal	8.1771
S4	Shallow water overtides of principal solar constituent	6.0000
MN4	Shallow water quarter diurnal constituent	6.2692
NU2	Larger lunar evectional constituent	12.6260
S6	Shallow water overtides of principal solar constituent	4.0000
MU2	Variational constituent	12.8718
2N2	Lunar elliptical semidiurnal second-order constituent	12.9054
OO1	Lunar diurnal	22.3061
LAM2	Smaller lunar evectional constituent	12.2218
S1	Solar diurnal constituent	24.0000
M1	Smaller lunar elliptic diurnal constituent	24.8332
J1	Smaller lunar elliptic diurnal constituent	23.0985
MM	Lunar monthly constituent	661.3092
SSA	Solar semiannual constituent	4382.9052
SA	Solar annual constituent	8765.8210
MSF	Lunisolar synodic fortnightly constituent	354.3670
MF	Lunisolar fortnightly constituent	327.8589
RHO	Larger lunar evectional diurnal constituent	26.7231
Q1	Larger lunar elliptic diurnal constituent	26.8684
T2	Larger solar elliptic constituent	12.0164
R2	Smaller solar elliptic constituent	11.9836
2Q1	Larger elliptic diurnal	28.0062
P1	Solar diurnal constituent	24.0659
2SM2	Shallow water semidiurnal constituent	11.6070
M3	Lunar terdiurnal constituent	8.2804
L2	Smaller lunar elliptic semidiurnal constituent	12.1916
2MK3	Shallow water terdiurnal constituent	8.3863
K2	Lunisolar semidiurnal constituent	11.9672
M8	Shallow water eighth diurnal constituent	3.1052
MS4	Shallow water quarter diurnal constituent	6.1033

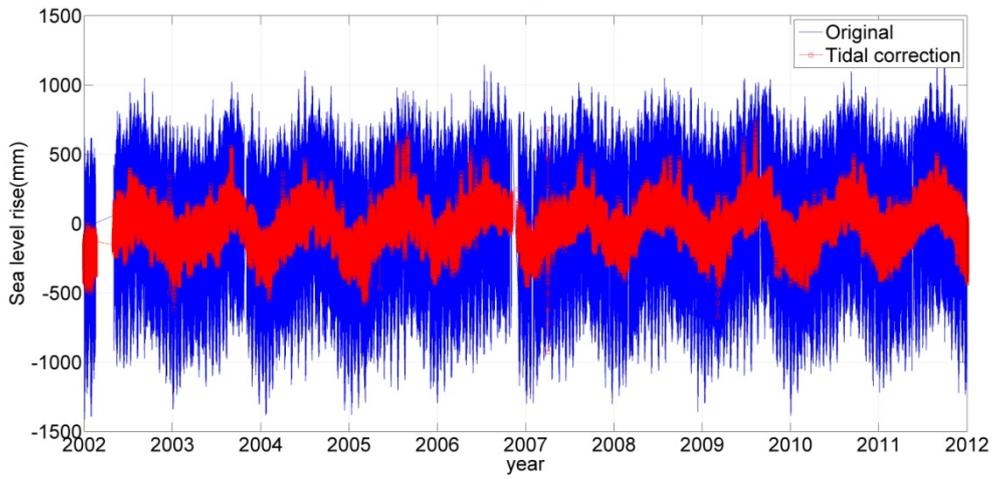
## 附錄四 海潮改正



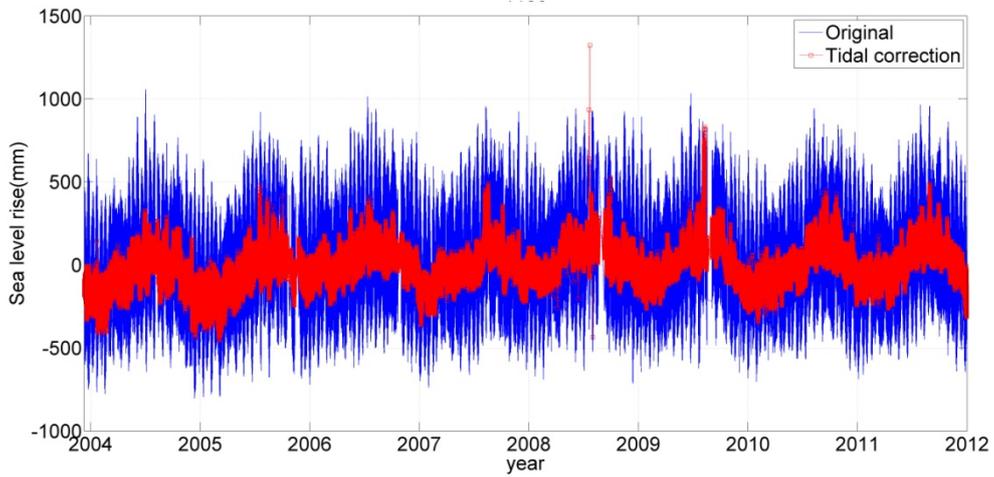
附圖 4-1 海潮改正前後之 CWB 箔子寮驗潮站資料差異圖



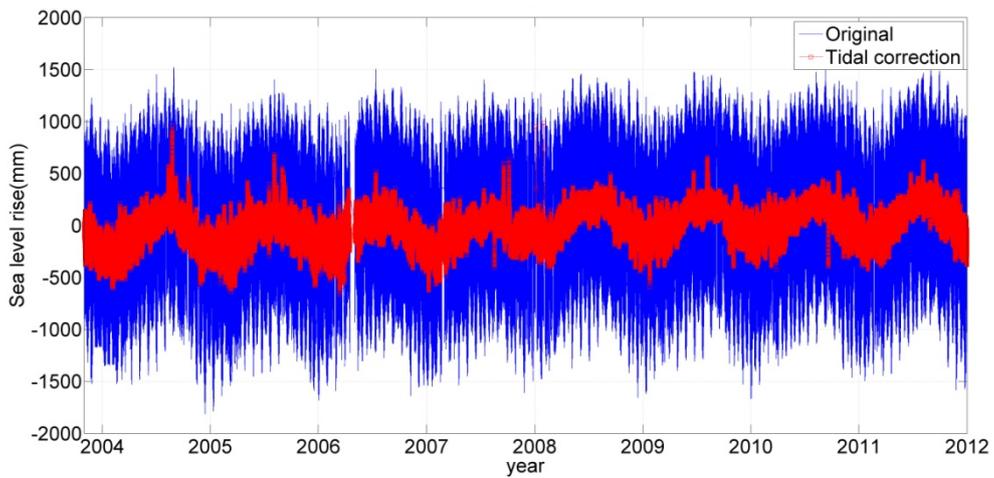
附圖 4-2 海潮改正前後之 CWB 東石驗潮站資料差異圖



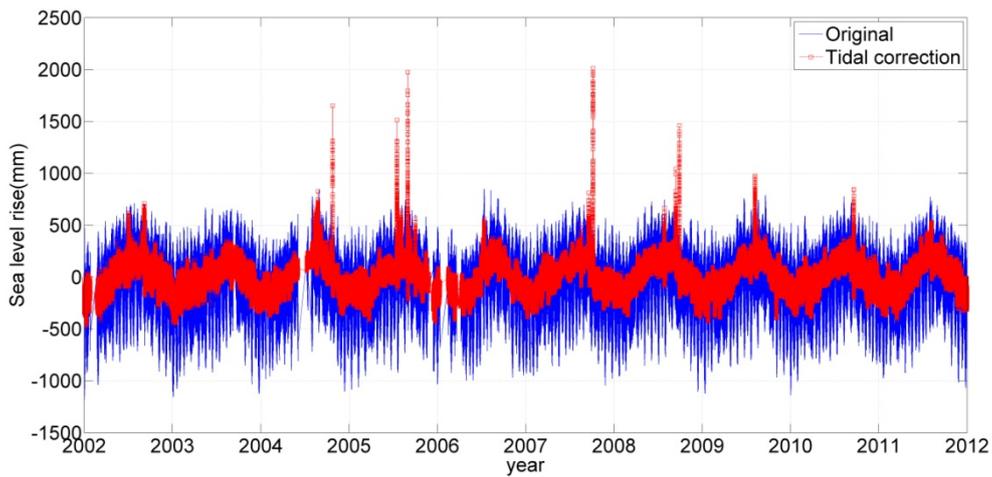
附圖 4-3 海潮改正前後之 CWB 將軍驗潮站資料差異圖



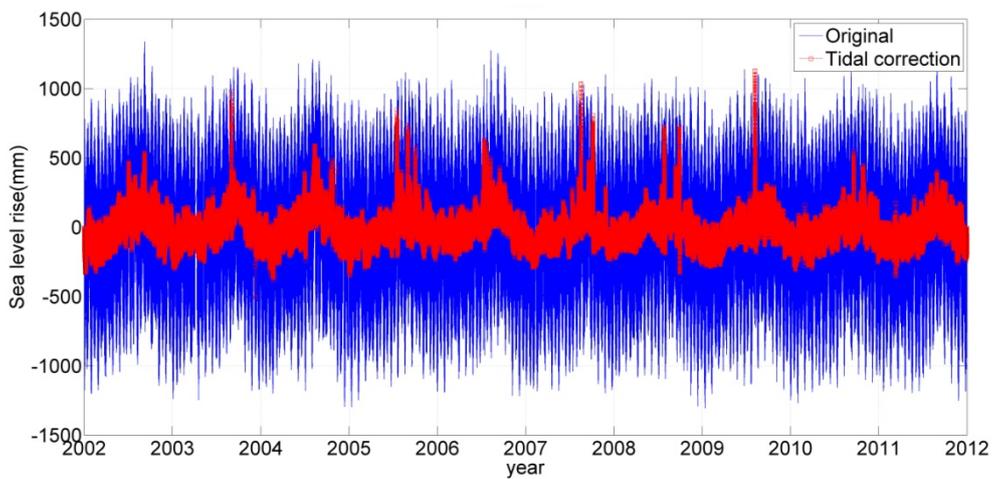
附圖 4-4 海潮改正前後之 CWB 東港驗潮站資料差異圖



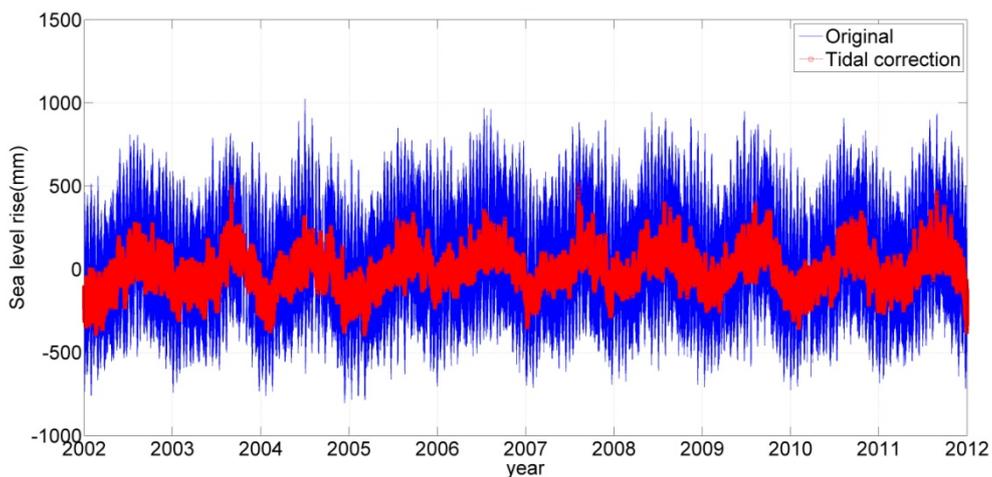
附圖 4-5 海潮改正前後之 CWB 麟山鼻驗潮站資料差異圖



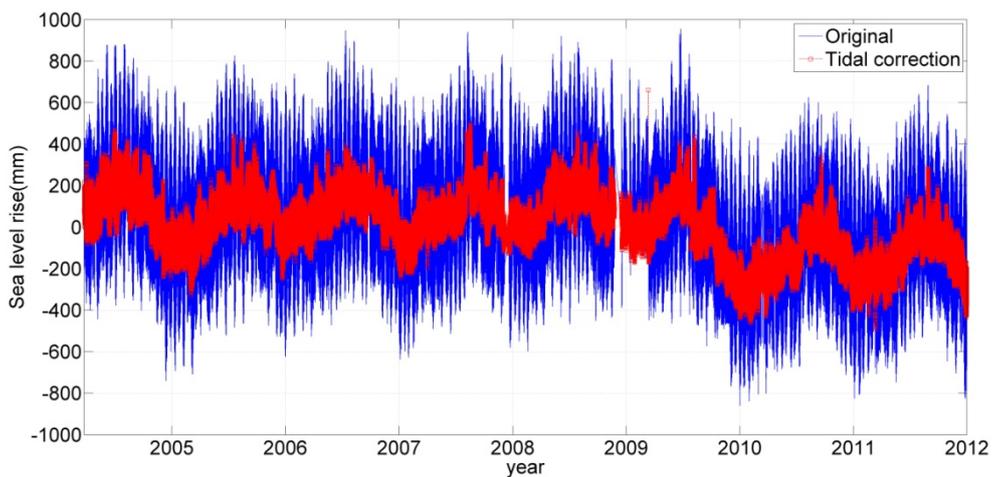
附圖 4-6 海潮改正前後之 CWB 龍洞驗潮站資料差異圖



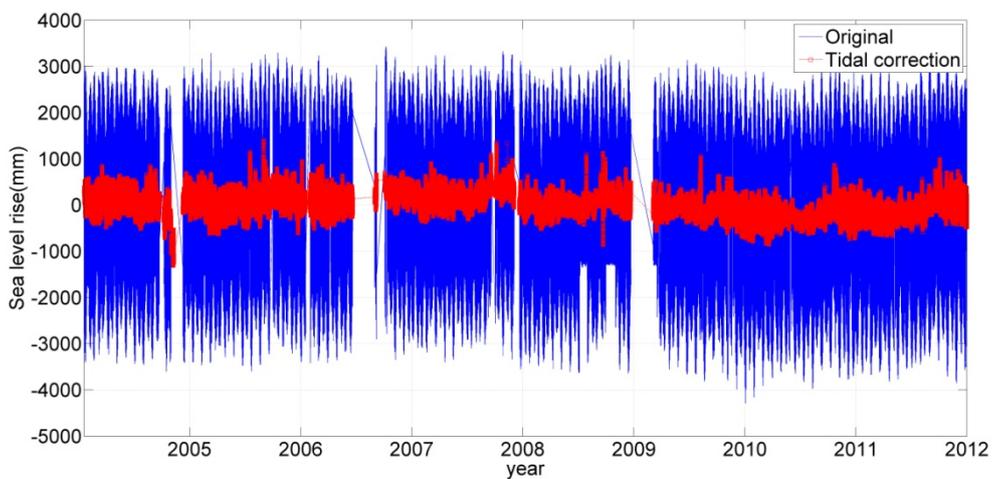
附圖 4-7 海潮改正前後之 CWB 成功驗潮站資料差異圖



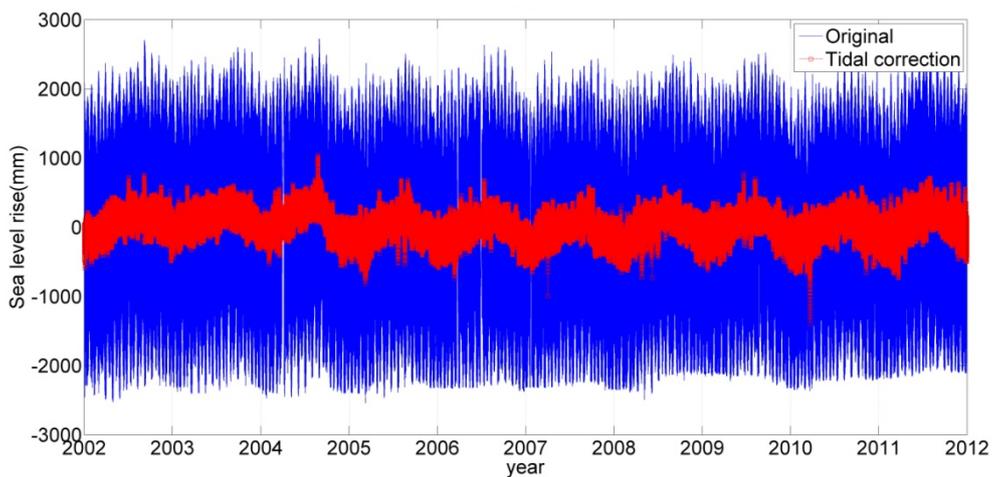
附圖 4-8 海潮改正前後之 CWB 小琉球驗潮站資料差異圖



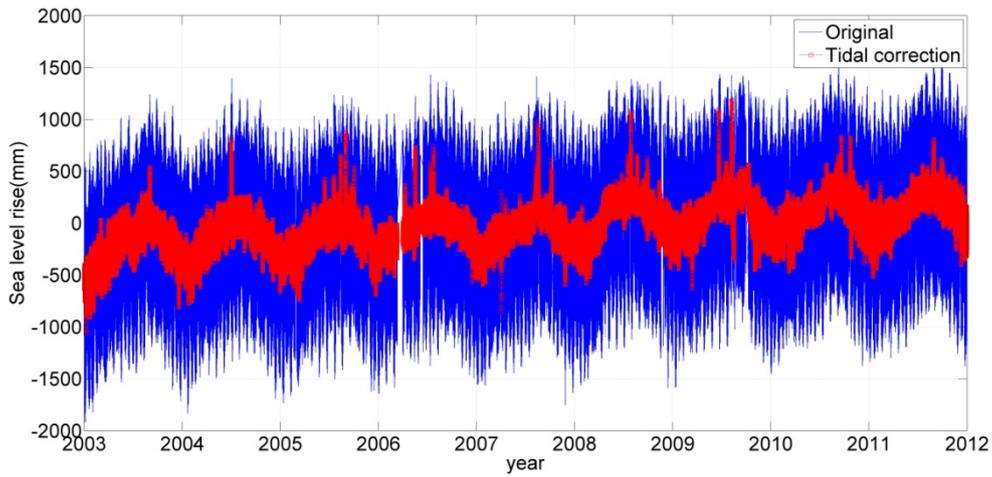
附圖 4-9 海潮改正前後之 CWB 高雄驗潮站資料差異圖



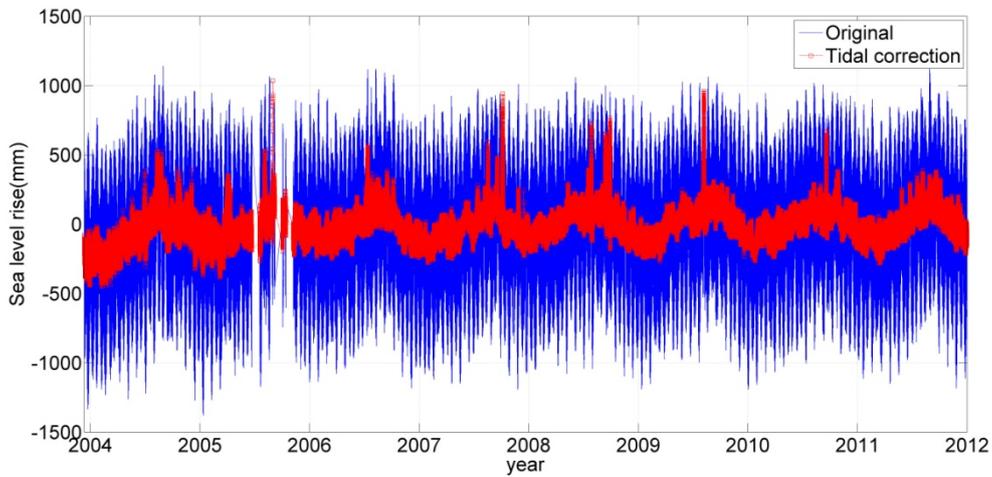
附圖 4-10 海潮改正前後之 CWB 馬祖驗潮站資料差異圖



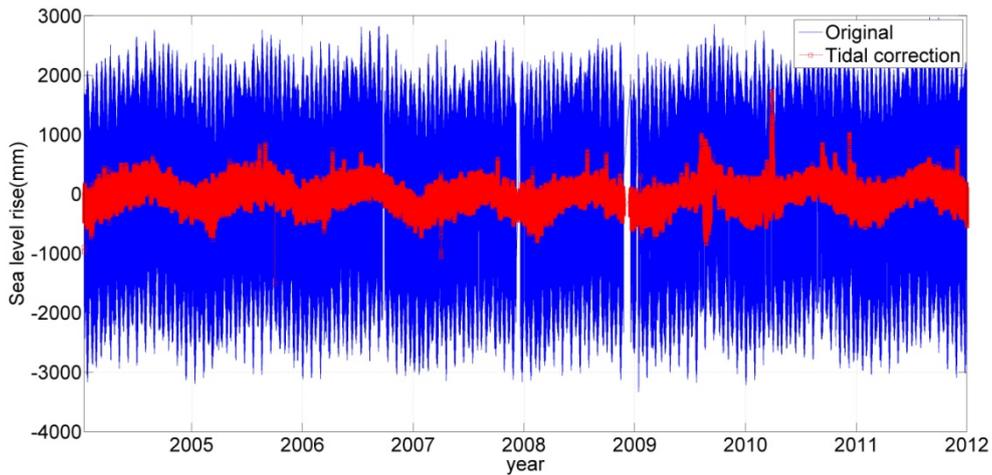
附圖 4-11 海潮改正前後之 CWB 新竹驗潮站資料差異圖



附圖 4-12 海潮改正前後之 CWB 塭港驗潮站資料差異圖



附圖 4-13 海潮改正前後之 CWB 花蓮驗潮站資料差異圖



附圖 4-14 海潮改正前後之 CWB 台中港驗潮站資料差異圖

## 附錄五 逆氣壓改正

附表 5-1 驗潮站資料進行 IB 效應改正後的 SLR

### (a) PSMSL

Station name	Trend (mm/yr)		
	ECMWF	NCEP	CWB
Zhapo	2.39±1.92	2.21±1.92	x
Xi Sha	7.69±2.29	7.67±2.30	x
Kanmen	4.75±1.96	4.54±1.94	x
Waglan Island	8.68±3.22	8.5±3.22	x
Quarry Bay	4.8±2.12	4.63±2.12	x
Tai Miu Wan	10.52±2.53	10.33±2.53	x
Tai Po Kau	4.06±1.83	3.9±1.82	x
Tsim Bei Tsui	10.74±2.33	10.55±2.33	x
Shek Pik	3.92±1.92	3.75±1.91	x
Keelung	0.05±1.73	-0.07±1.74	-0.2±1.73
Kaohsiung	-13.93±3.04	-13.99±3.02	-13.91±3.03
Nase	-0.11±1.52	-0.3±1.51	x
Nakano Sima	4.04±1.54	3.79±1.55	x
Okinawa	0.04±1.51	0.1±1.51	x
Naha	2.03±1.53	2.09±1.54	x
Ishigaki	2.76±2.21	2.64±2.21	x
Manila	22.58±2.51	22.24±2.52	x
Legaspi	8.64±1.61	8.35±1.61	x
Cebu	8.74±1.48	8.59±1.49	x

### (b) UHSLC

Station name	Trend (mm/yr)		
	ECMWF	NCEP	CWB
Keelung	0.04±1.74	-0.09±1.75	-0.20±1.74
Kaohsiung	-14.39±3.01	-14.45±3.00	-14.37±3.01

### (c) CWB

Station name	Trend (mm/yr)		
	ECMWF	NCEP	CWB
Boziliao	31.03±1.64	31.64±1.56	32.13±1.63
Taichung Port	4.07±2.76	3.95±2.76	4.52±2.78
Hsinchu	-7.56±2.24	-7.71±2.23	-7.67±2.29
Linshanbi	21.85±1.76	21.70±1.76	22.29±1.68
Longdong	2.06±0.96	1.92±0.96	2.09±0.96
Hualien	8.67±1.83	8.56±1.83	8.59±1.85
Chenggong	-5.77±1.09	-5.82±1.09	-5.38±1.15
Liuchiu	4.07±1.26	4.07±1.25	4.23±1.25
Donggang	8.26±2.09	8.31±2.08	8.66±2.08
Kaohsiung	-35.41±3.54	-35.30±3.52	-34.99±3.52
Jiangjun	7.51±1.20	7.51±1.21	9.33±1.31
Wengang	42.81±1.80	42.82±1.80	43.75±1.82
Dongshi	13.96±2.50	13.95±2.51	14.79±2.51
Mazu	-47.12±5.73	-47.46±5.72	-49.21±6.54

附表 5-2 驗潮站資料進行 IB 效應改正前後之標準偏差(mm) (2002-2011 年)。O: 未改正，C: 改正後

(a) PSMSL

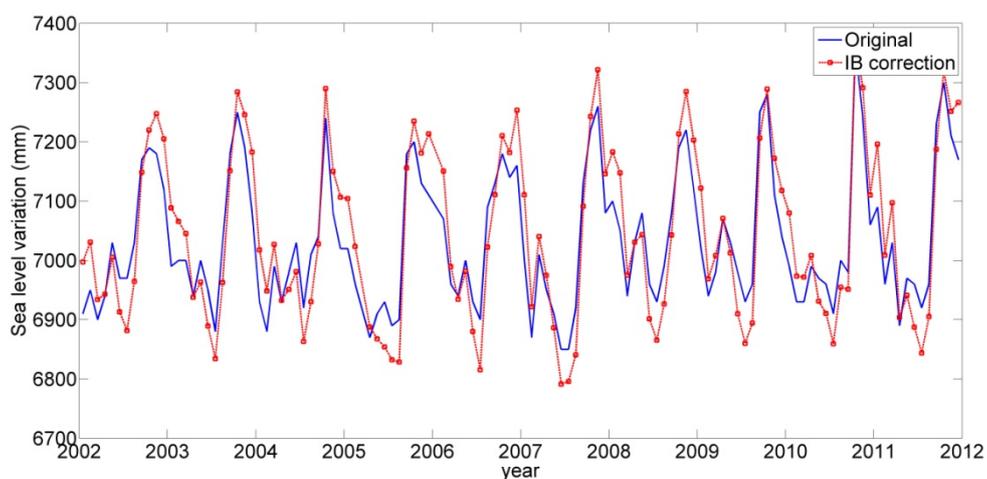
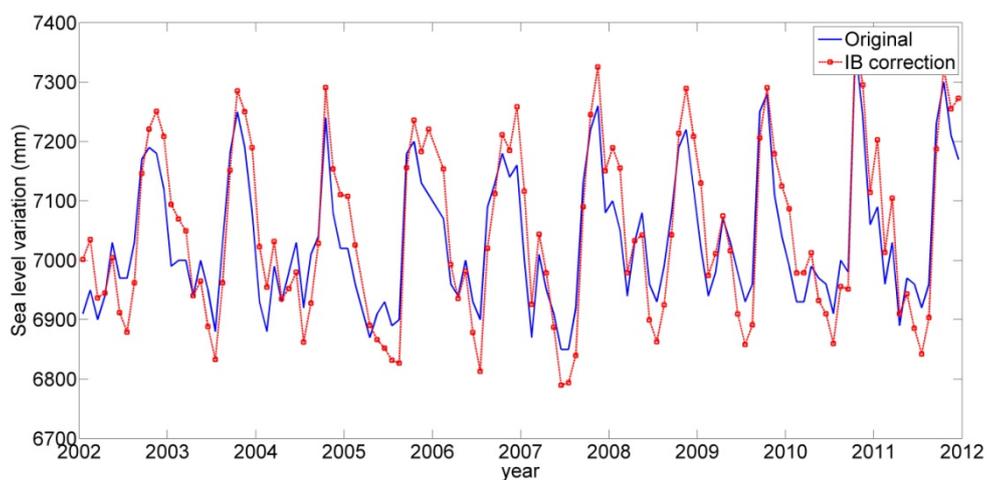
Station Name	ECMWF		NCEP		CWB	
	O	C	O	C	O	C
Zhapo	114.8	144.8	114.8	143.3	x	x
Xi Sha	108.4	90.2	108.4	90.7	x	x
Kanmen	117.0	122.5	117.0	121.0	x	x
Waglan Island	141.0	168.2	141.0	166.5	x	x
Quarry Bay	117.7	144.6	117.7	143.0	x	x
Tai Miu Wan	125.1	148.6	125.1	147.1	x	x
Tai Po Kau	115.5	142.9	115.5	141.4	x	x
Tsim Bei Tsui	113.0	126.9	113.0	125.8	x	x
Shek Pik	100.5	124.1	100.5	122.4	x	x
Keelung	116.4	66.5	116.4	68.8	116.4	67.5
Kaohsiung	111.2	90.7	111.2	90.3	111.2	90.5
Nase	140.7	103.4	140.7	105.3	x	x
Nakano Sima	126.0	91.6	126.0	93.1	x	x
Okinawa	129.5	96.5	129.5	98.3	x	x
Naha	128.9	95.7	128.9	97.6	x	x
Ishigaki	131.1	92.3	131.1	94.1	x	x
Manila	140.4	123.6	140.4	123.2	x	x
Legaspi	71.2	58.1	71.2	58.2	x	x
Cebu	82.5	71.2	82.5	71.3	x	x

(b) UHSLC

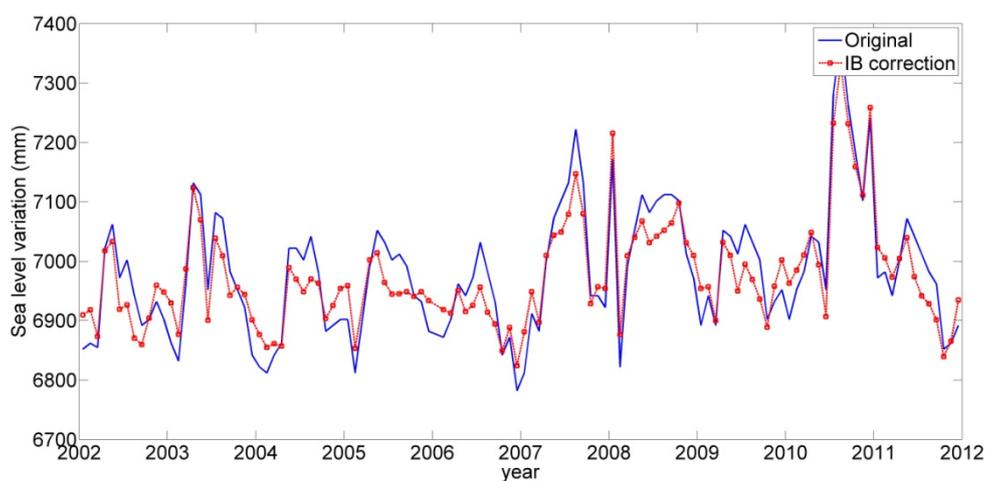
Station Name	ECMWF		NCEP		CWB	
	O	C	O	C	O	C
Keelung	134.1	83.4	134.1	85.0	134.1	85.2
Kaohsiung	122.9	102.3	122.9	102.1	122.9	101.8

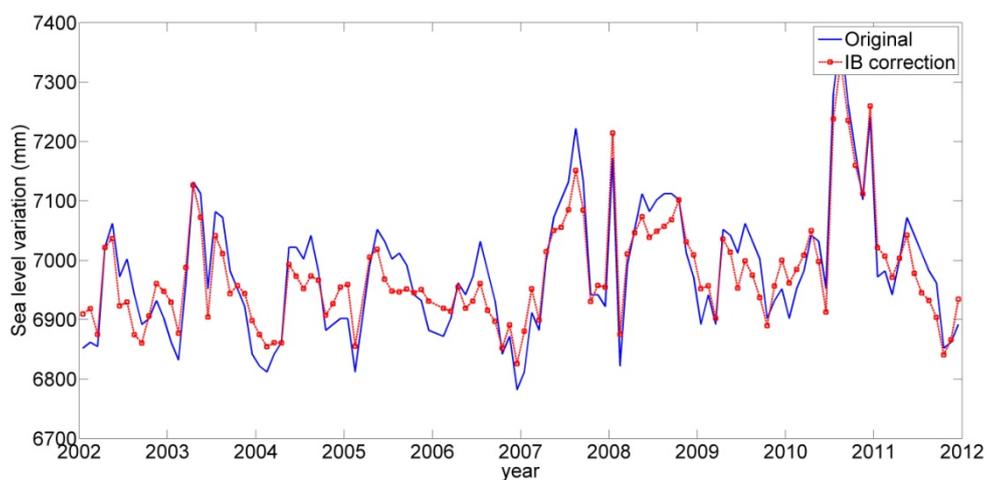
(c) CWB

Station Name	ECMWF		NCEP		CWB	
	O	C	O	C	O	C
Bozilliao	140.5	102.9	140.5	103.1	140.5	104.3
Taichung Port	145.6	102.4	145.6	102.7	145.6	103.6
Hsinchu	156.5	109.8	156.5	111.0	156.5	112.4
Linshanbi	152.9	103.1	152.9	104.6	152.9	106.9
Longdong	134.9	85.5	134.9	86.7	134.9	87.0
Hualien	111.4	81.8	111.4	80.5	111.4	80.8
Chenggong	103.8	78.2	103.8	77.9	103.8	78.2
Liuchiu	101.0	73.6	101.0	73.5	101.0	72.9
Donggang	104.0	75.5	104.0	75.3	104.0	74.9
Kaohsiung	142.9	121.8	142.9	121.3	142.9	120.8
Jiangjun	119.2	80.6	119.2	80.4	119.2	80.5
Wengang	195.6	160.4	195.6	159.6	195.6	162.0
Dongshi	152.0	118.5	152.0	117.8	152.0	119.2
Mazu	215.0	227.2	215.0	224.8	215.0	229.8

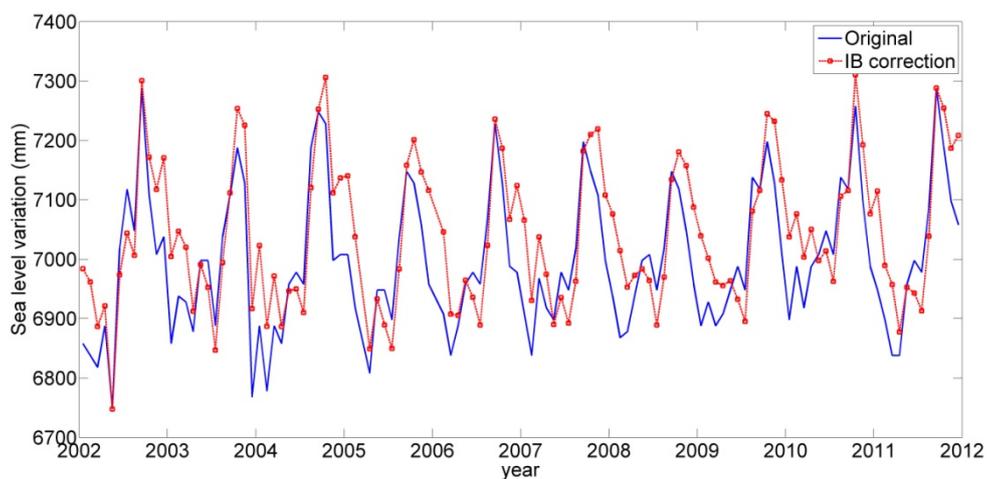
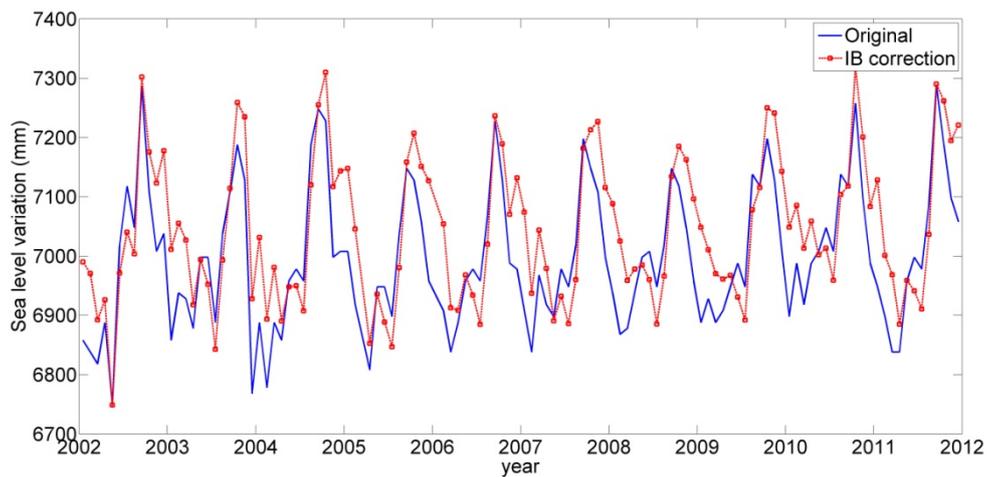


附圖 5-1 IB 改正前後之 PSMSL 開坡驗潮站資料。上圖：採用 ECMWF 資料，下圖：採用 NCEP 資料

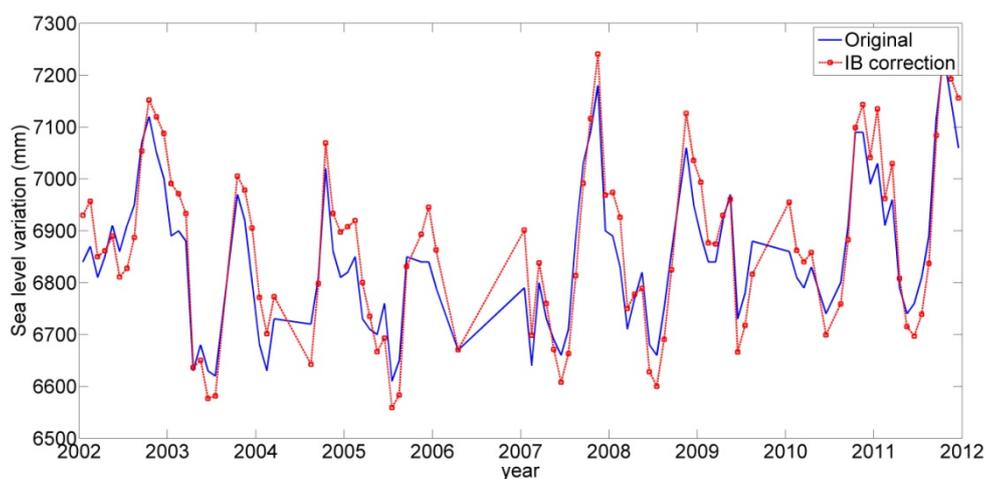
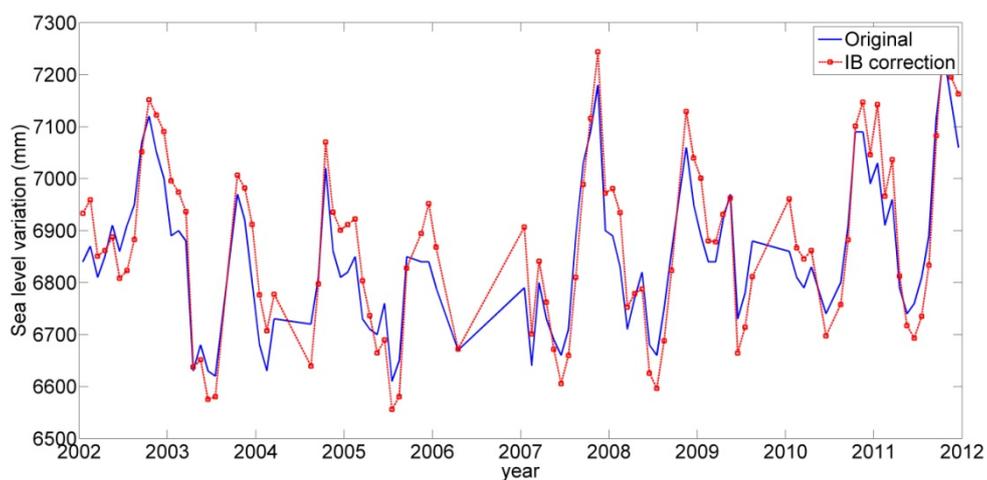




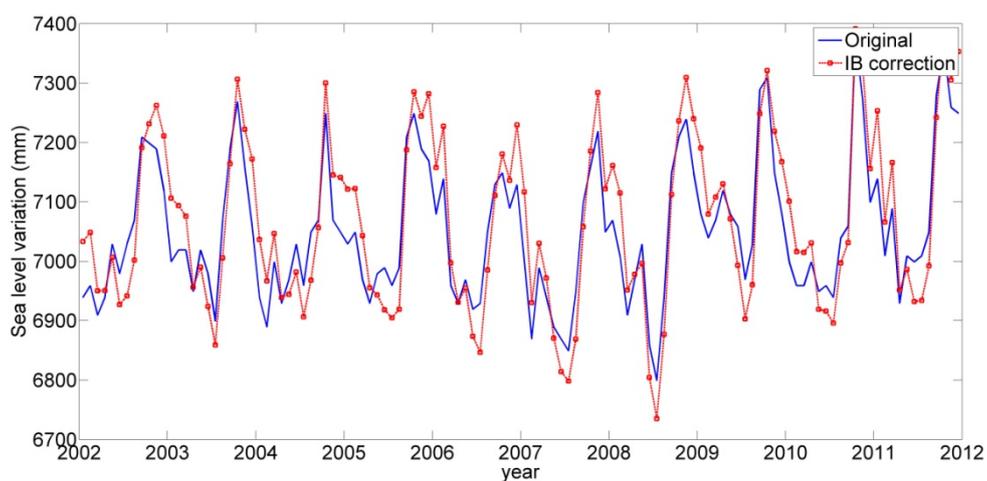
附圖 5-2 IB 改正前後之 PSMSL 西沙驗潮站資料。上圖：採用 ECMWF 資料，下圖：採用 NCEP 資料

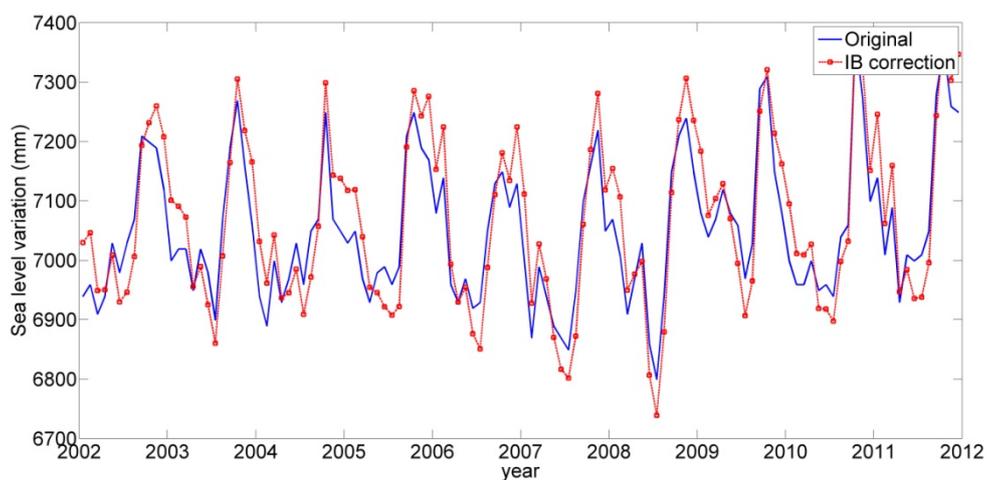


附圖 5-3 IB 改正前後之 PSMSL 坎門驗潮站資料。上圖：採用 ECMWF 資料，下圖：採用 NCEP 資料

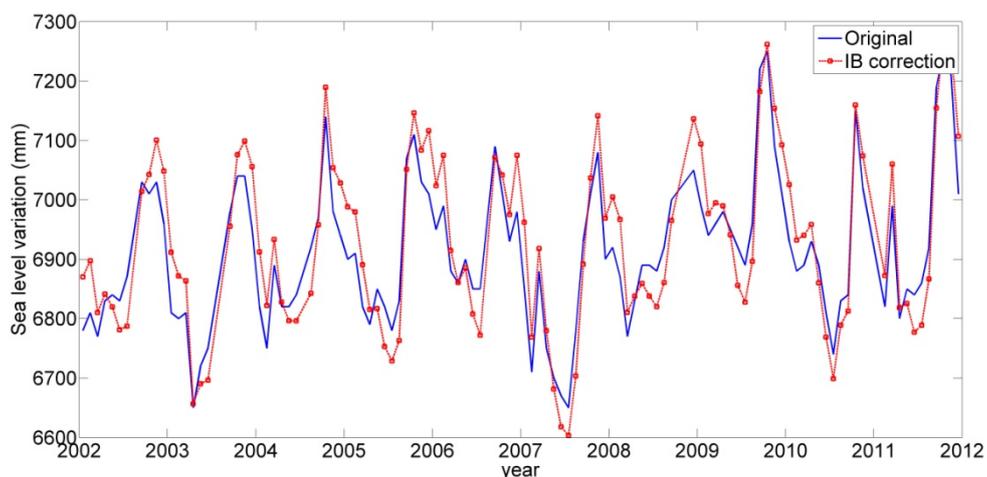
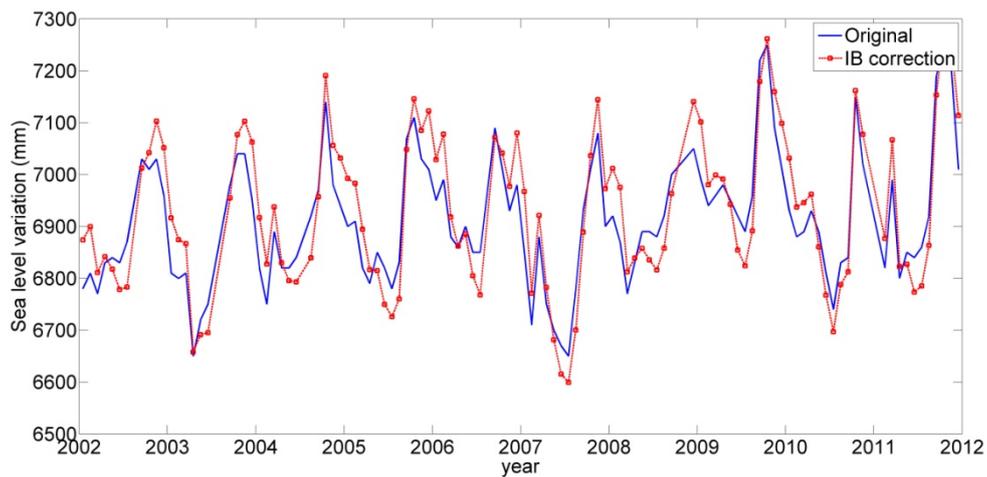


附圖 5-4 IB 改正前後之 PSMSL 橫瀾島驗潮站資料。上圖：採用 ECMWF 資料，下圖：採用 NCEP 資料

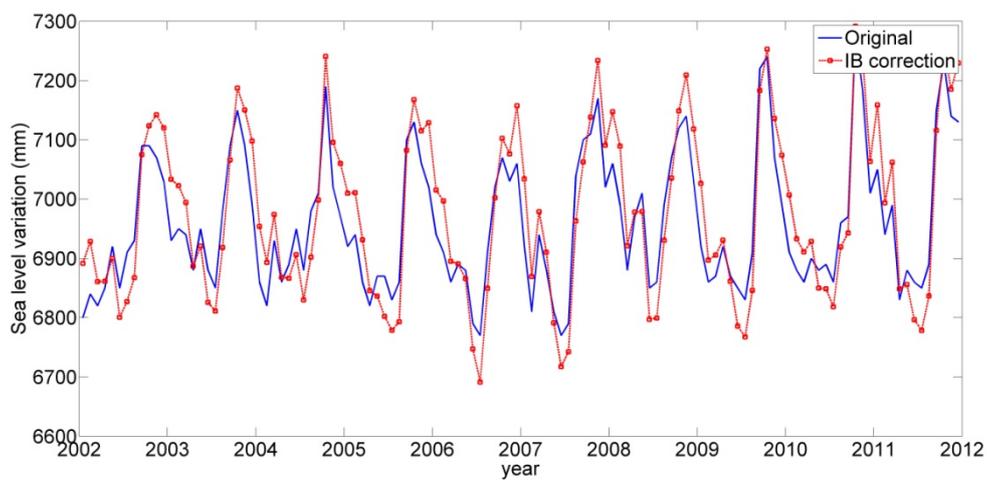
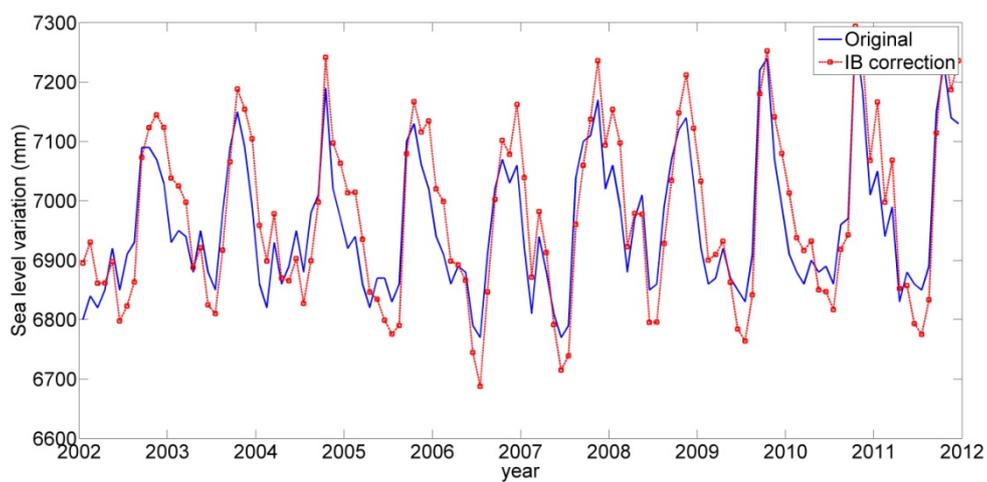




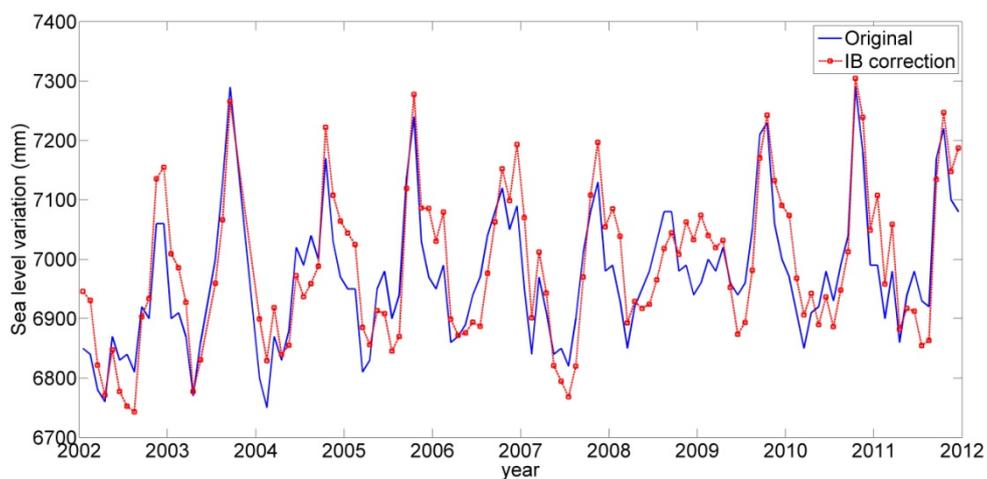
附圖 5-5 IB 改正前後之 PSMSL 鯽魚涌驗潮站資料。上圖：採用 ECMWF 資料，下圖：採用 NCEP 資料

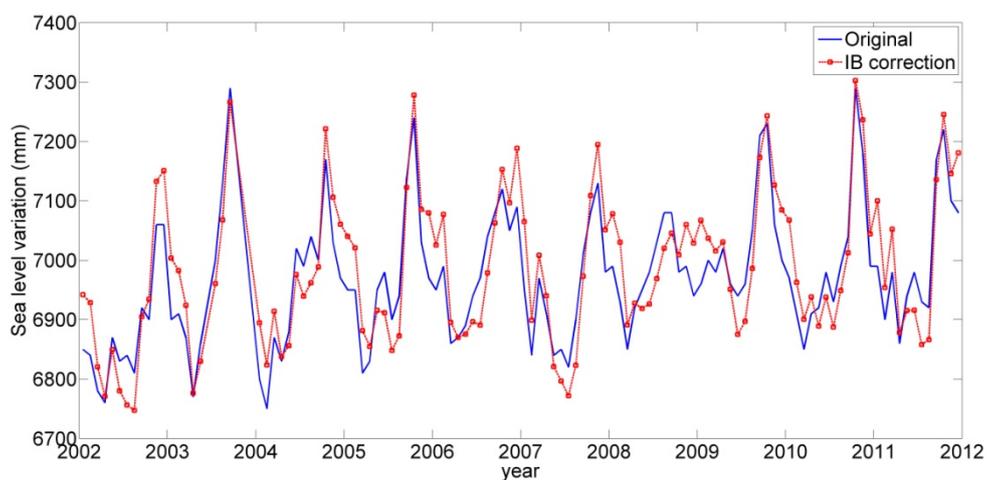


附圖 5-6 IB 改正前後之 PSMSL 大廟灣驗潮站資料。上圖：採用 ECMWF 資料，下圖：採用 NCEP 資料

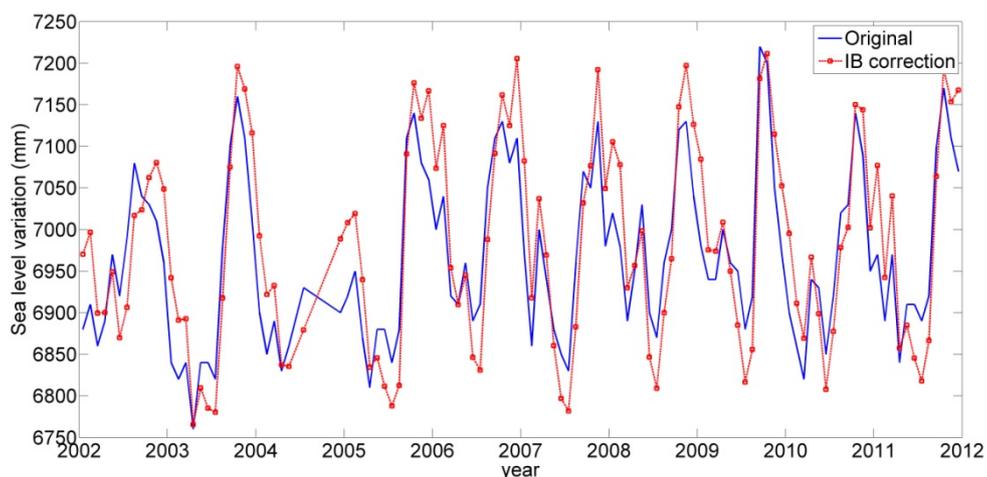
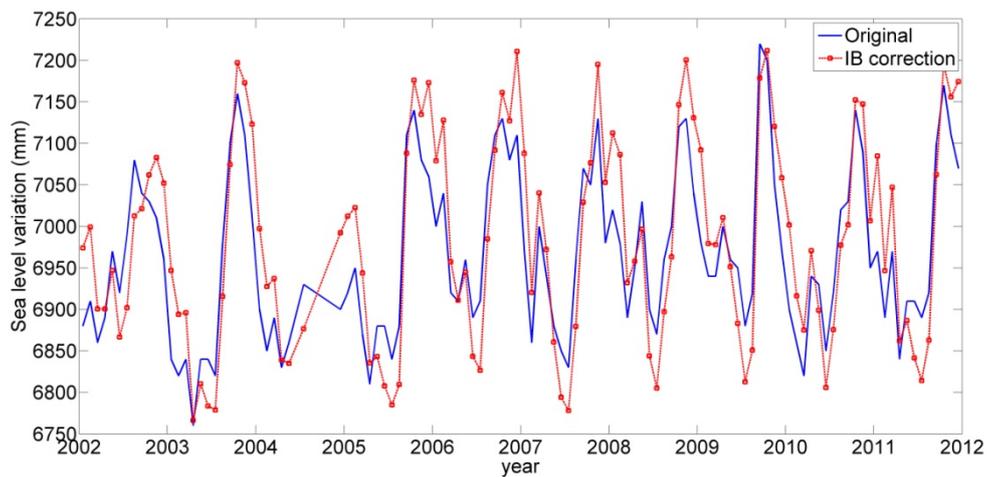


附圖 5-7 IB 改正前後之 PSMSL 大浦滯驗潮站資料。上圖：採用 ECMWF 資料，下圖：採用 NCEP 資料

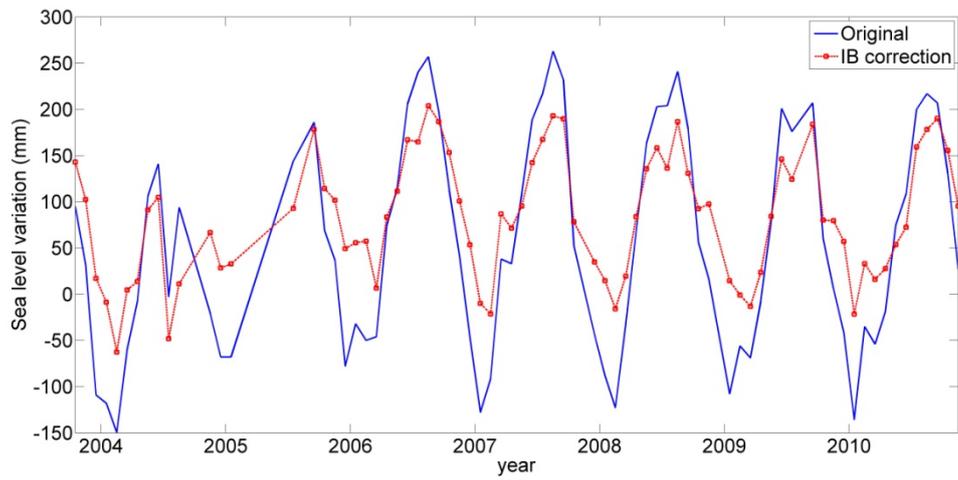
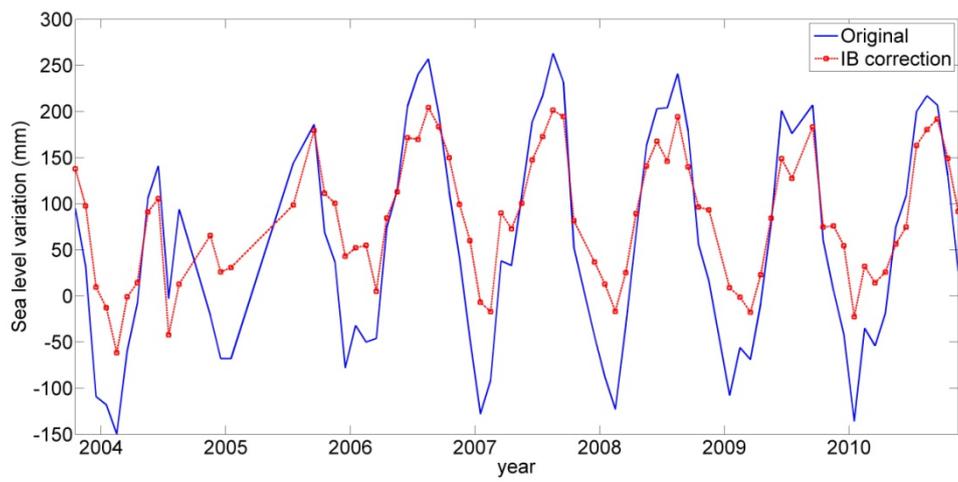
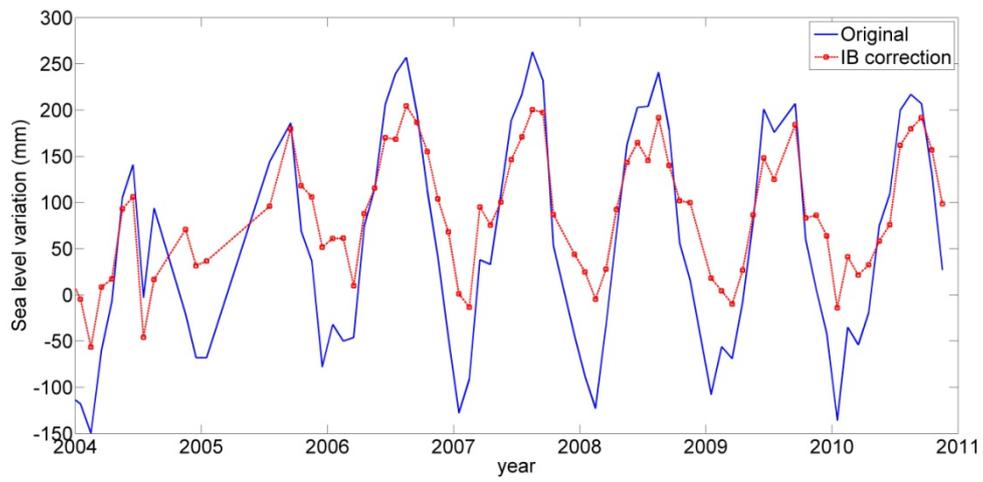




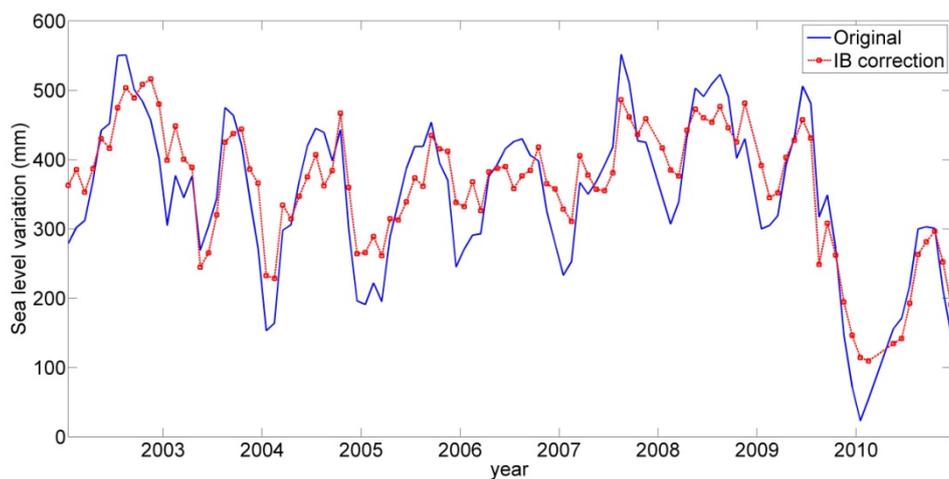
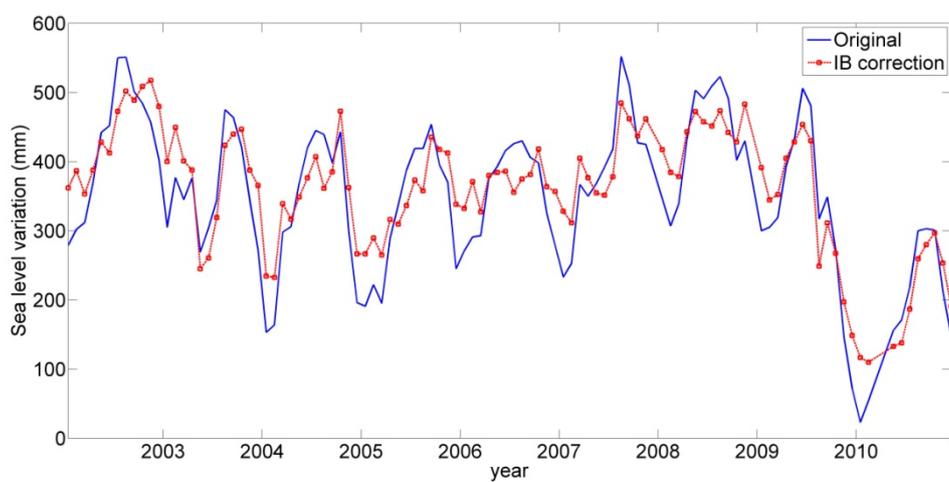
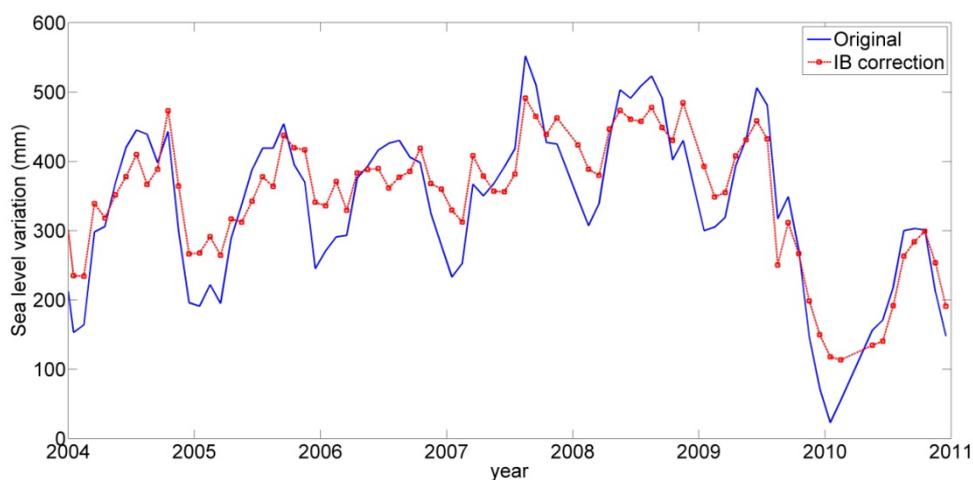
附圖 5-8 IB 改正前後之 PSMSL 尖鼻咀驗潮站資料。上圖：採用 ECMWF 資料，下圖：採用 NCEP 資料



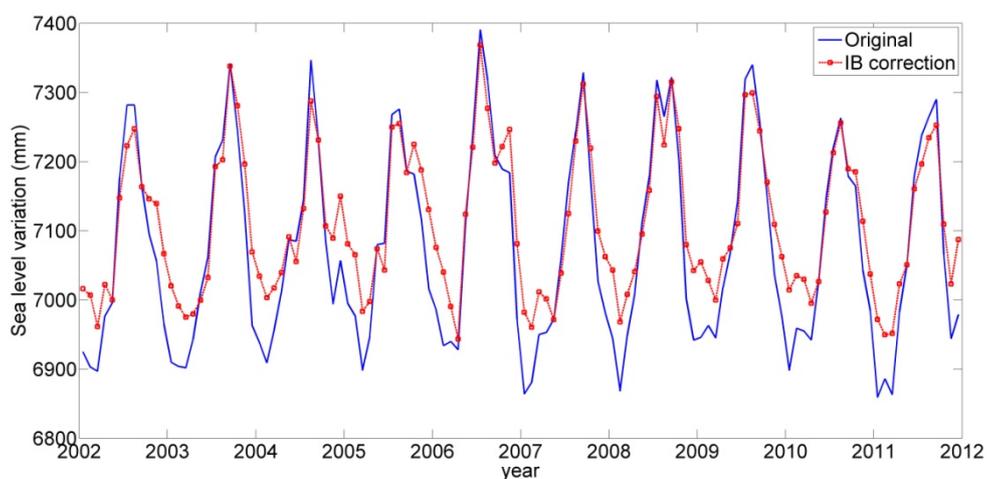
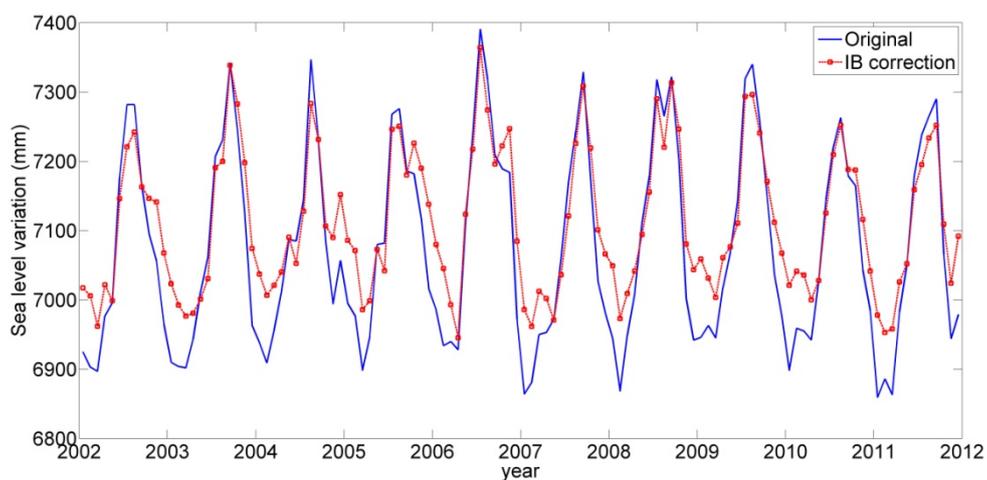
附圖 5-9 IB 改正前後之 PSMSL 石壁驗潮站資料。上圖：採用 ECMWF 資料，下圖：採用 NCEP 資料



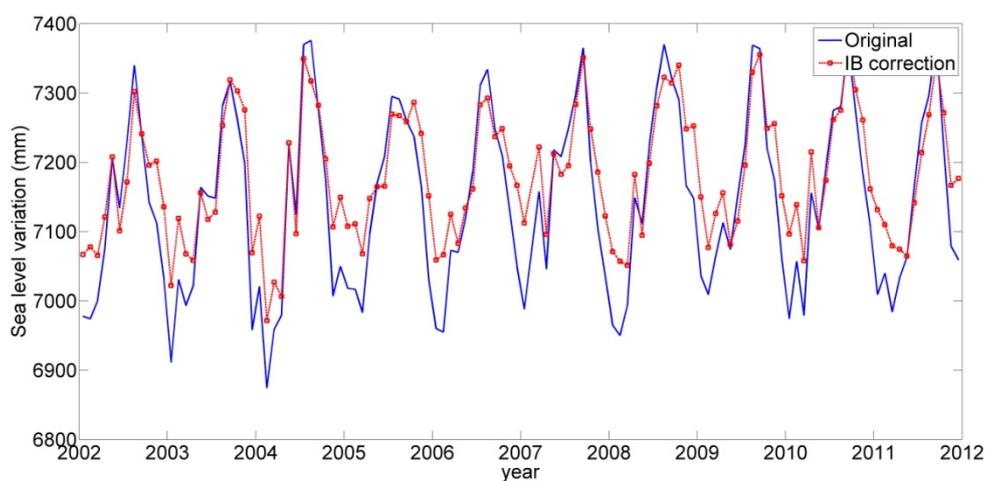
附圖 5-10 IB 改正前後之 PSMSL 基隆驗潮站資料。上圖：採用 ECMWF 資料，中圖：採用 NCEP 資料，下圖：採用 CWB 資料

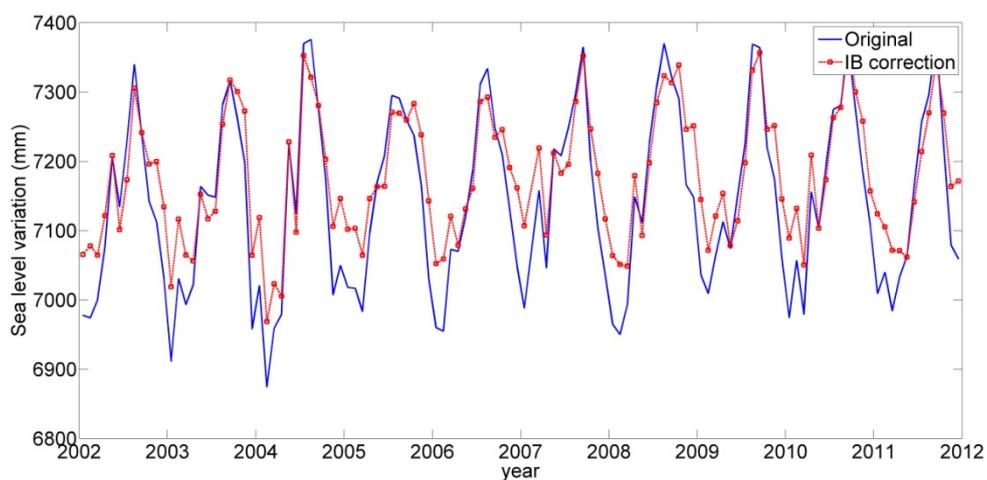


附圖 5-11 IB 改正前後之 PSMSL 高雄驗潮站資料。上圖：採用 ECMWF 資料，中圖：採用 NCEP 資料，下圖：採用 CWB 資料

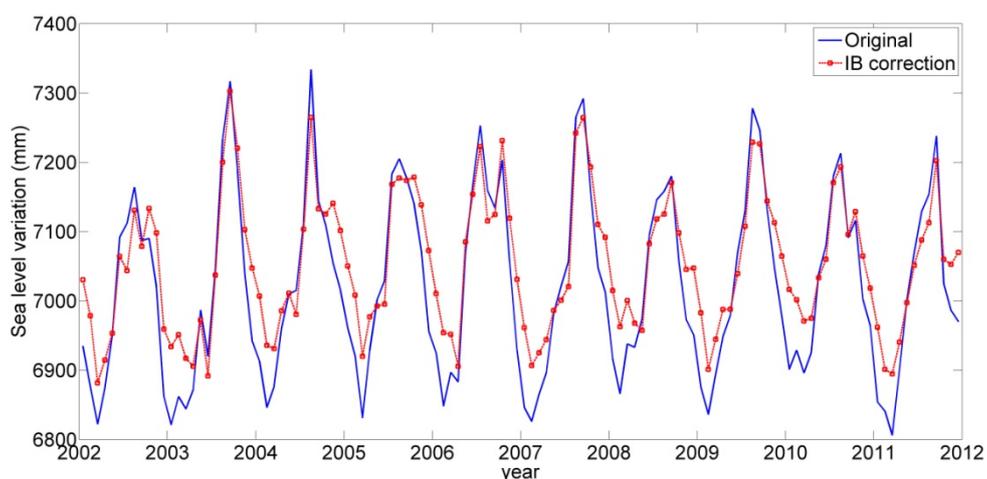
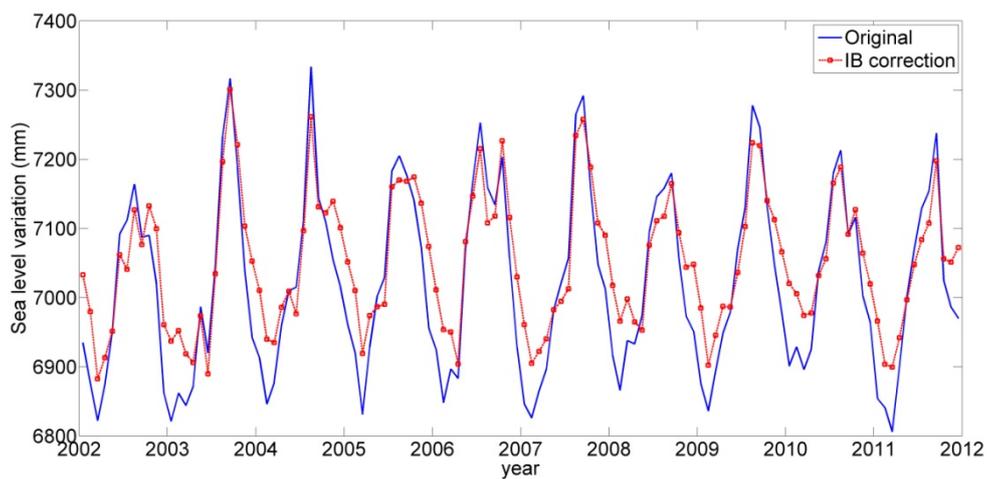


附圖 5-12 IB 改正前後之 PSMSL 內斯驗潮站資料。上圖：採用 ECMWF 資料，下圖：採用 NCEP 資料

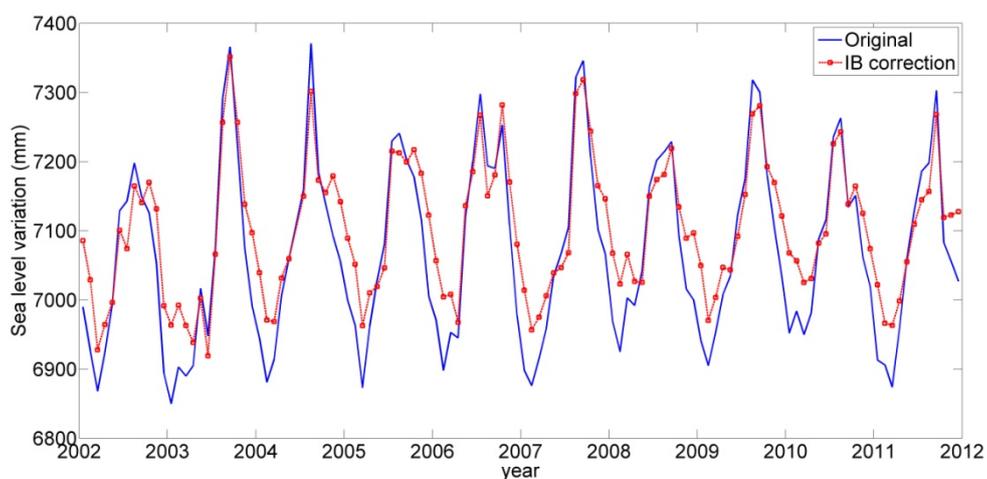
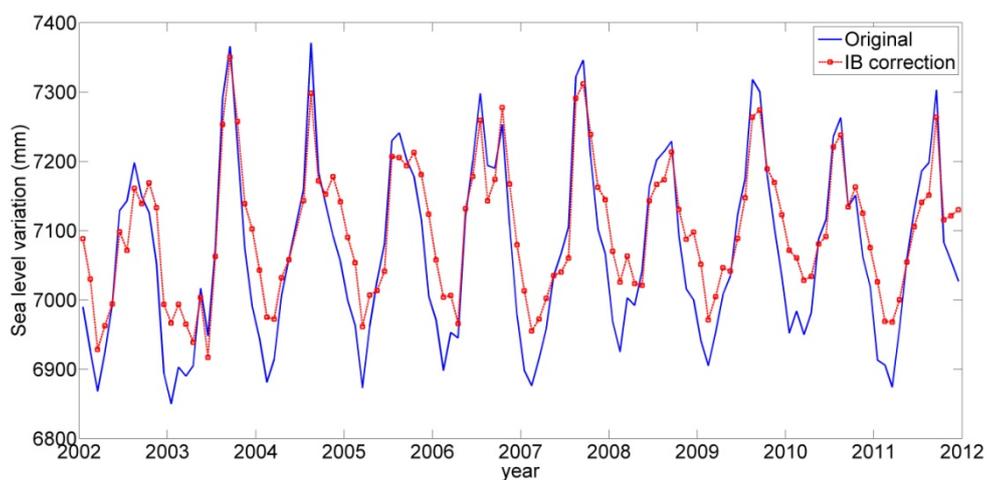




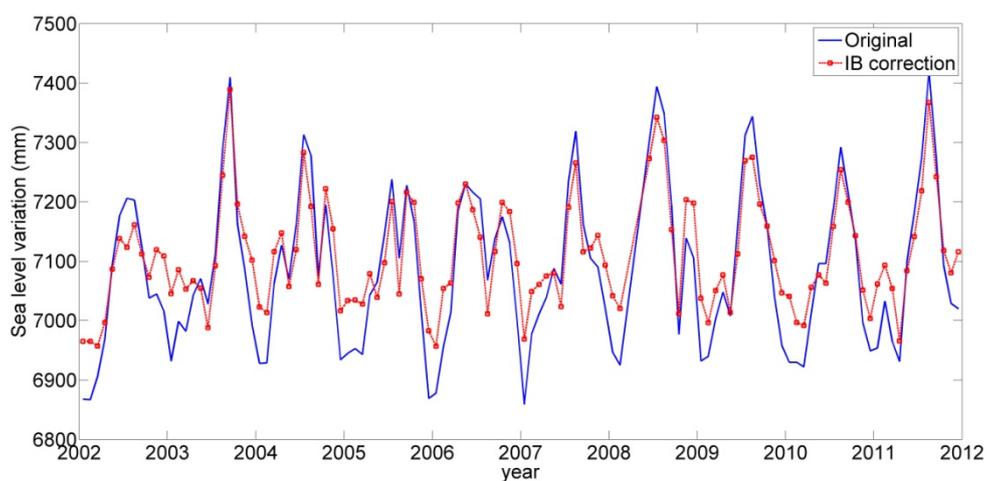
附圖 5-13 IB 改正前後之 PSMSL 中之島驗潮站資料。上圖：採用 ECMWF 資料，下圖：採用 NCEP 資料

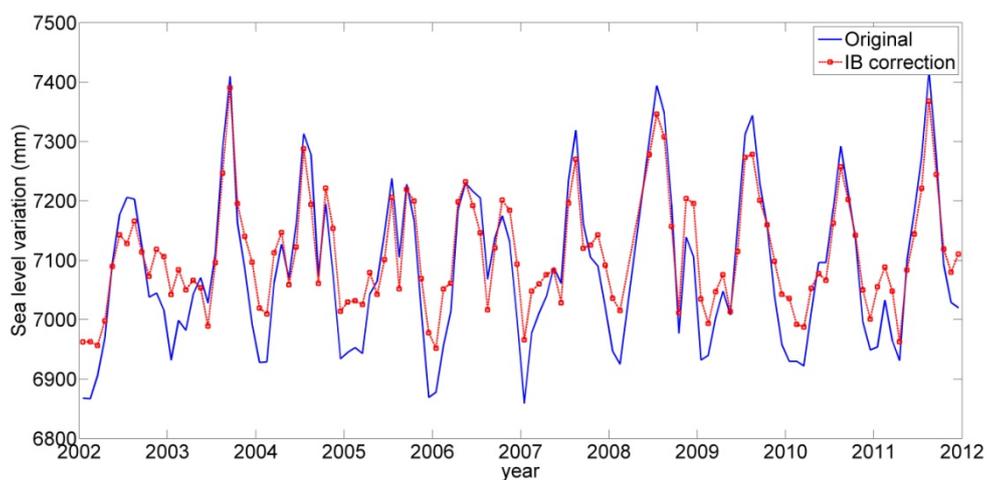


附圖 5-14 IB 改正前後之 PSMSL 沖繩驗潮站資料。上圖：採用 ECMWF 資料，下圖：採用 NCEP 資料

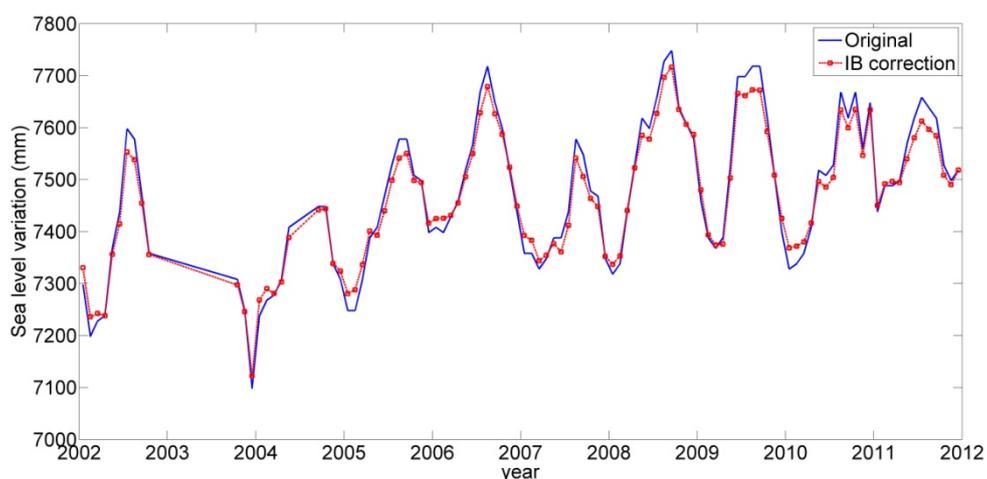
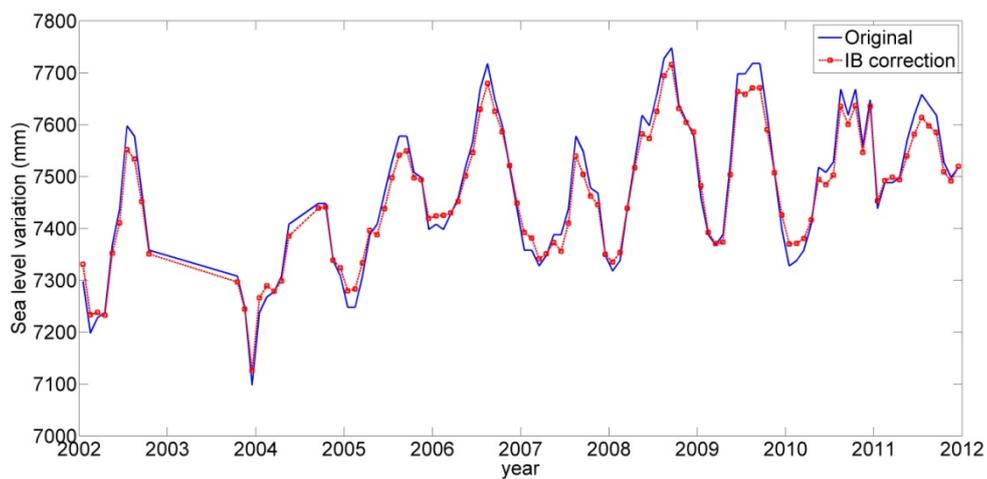


附圖 5-15 IB 改正前後之 PSMSL 那霸驗潮站資料。上圖：採用 ECMWF 資料，下圖：採用 NCEP 資料

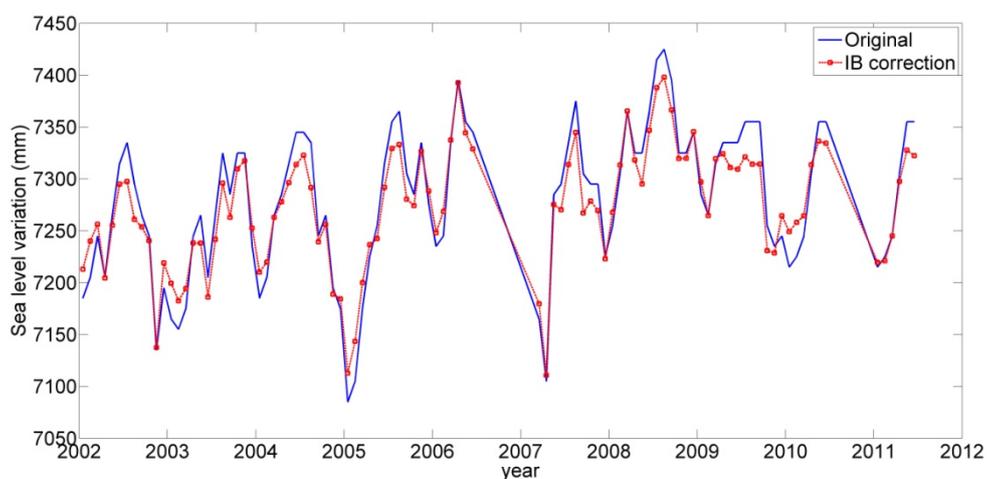
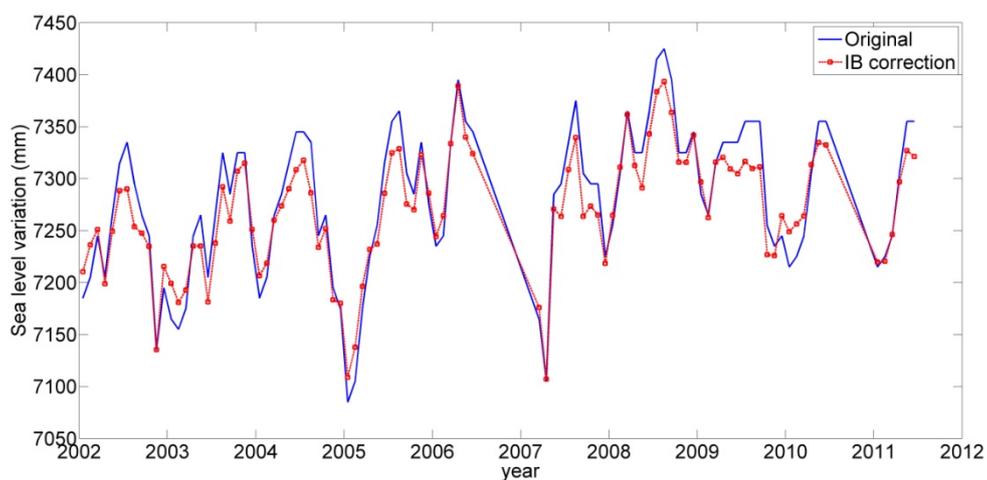




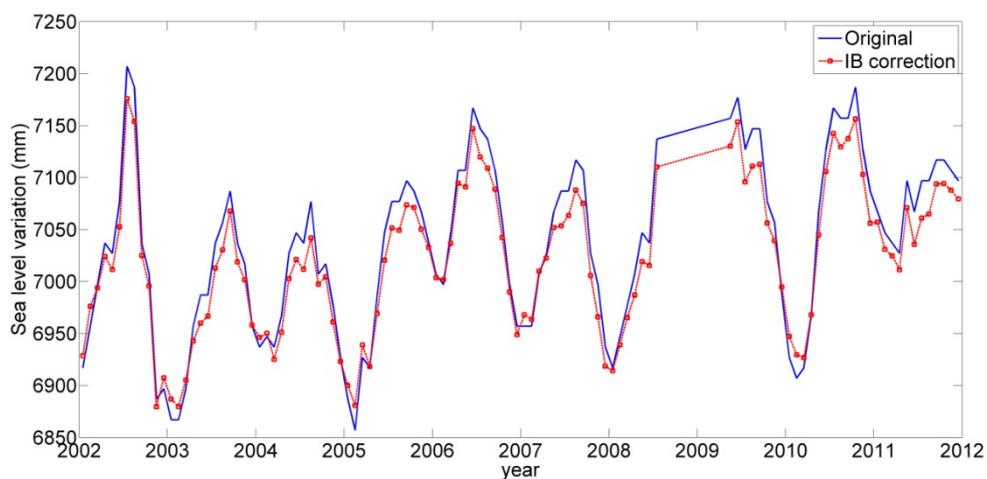
附圖 5-16 IB 改正前後之 PSMSL 石垣島驗潮站資料。上圖：採用 ECMWF 資料，下圖：採用 NCEP 資料

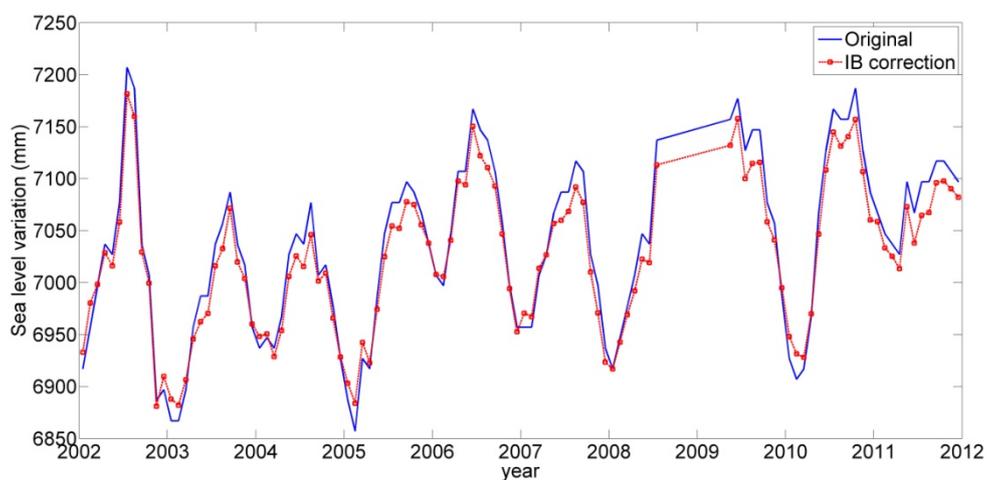


附圖 5-17 IB 改正前後之 PSMSL 馬尼拉驗潮站資料。上圖：採用 ECMWF 資料，下圖：採用 NCEP 資料

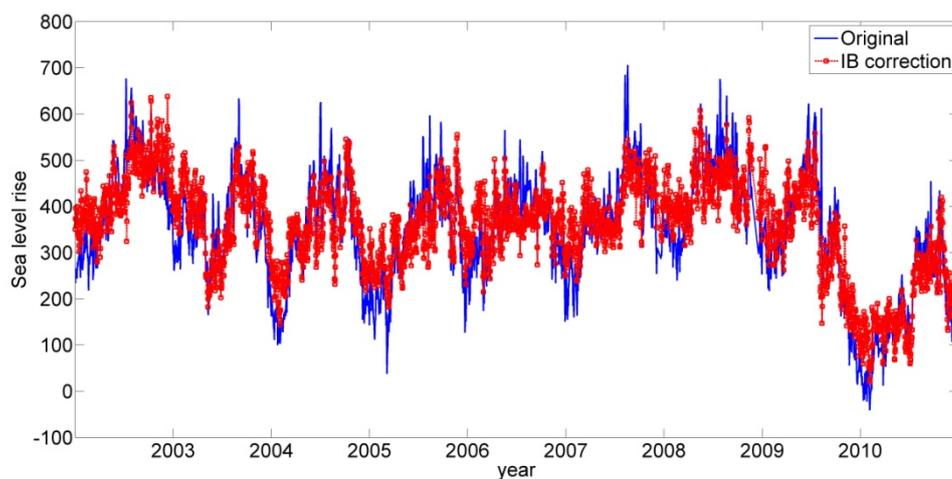
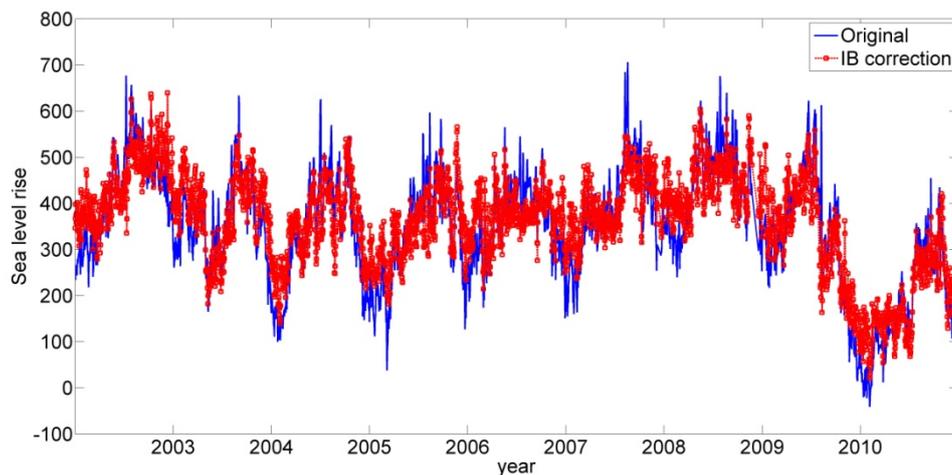


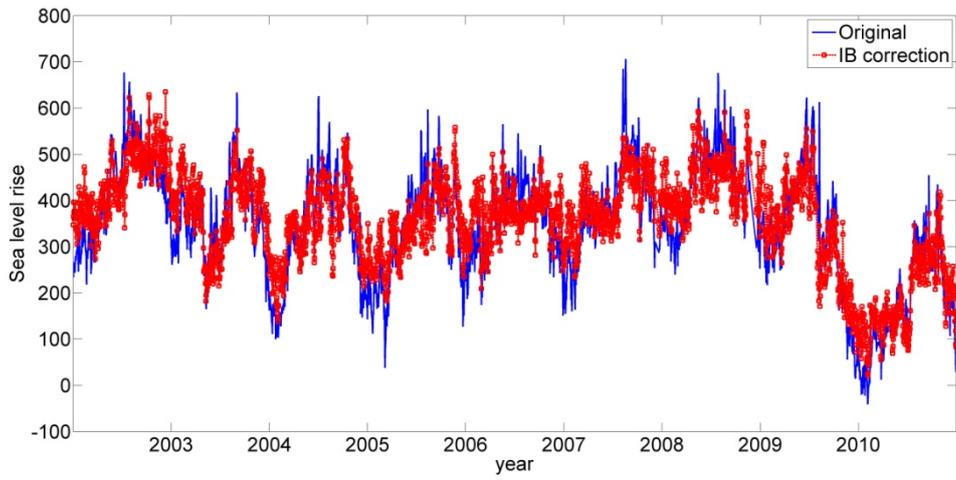
附圖 5-18 IB 改正前後之 PSMSL 黎牙實比驗潮站資料。上圖：採用 ECMWF 資料，下圖：採用 NCEP 資料



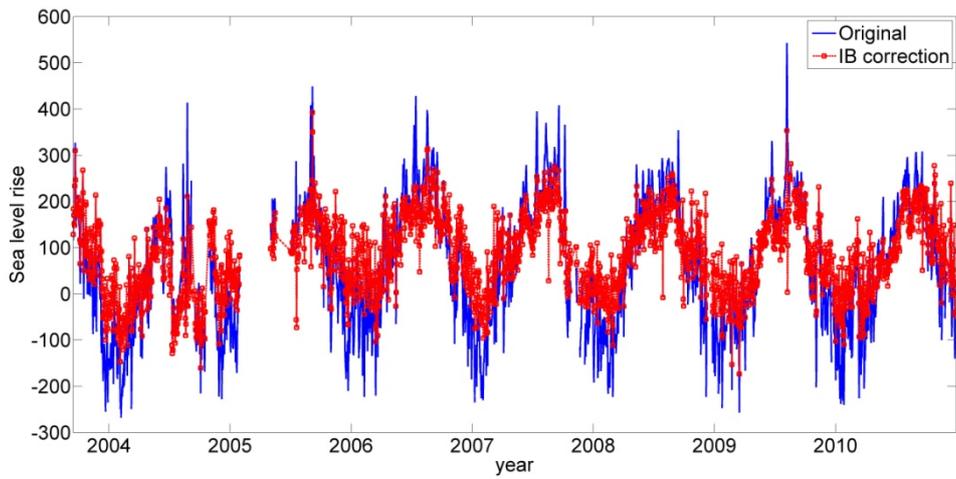
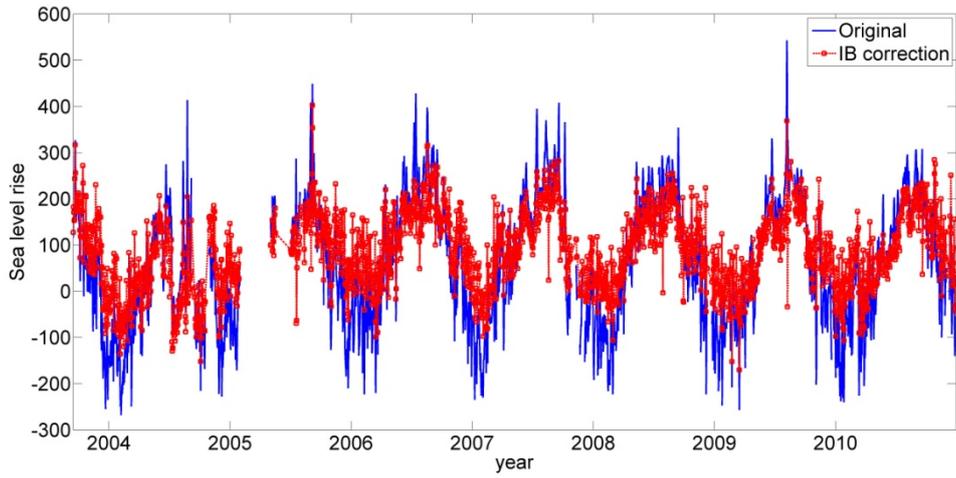


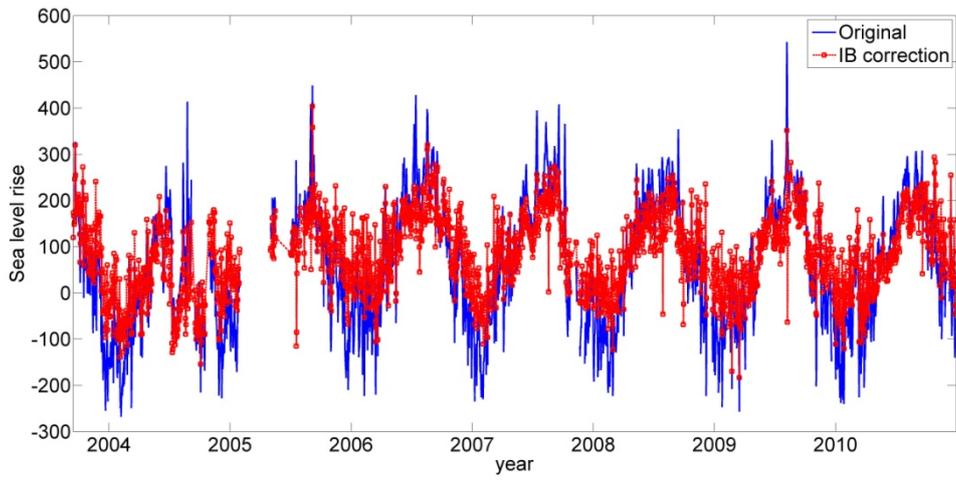
附圖 5-19 IB 改正前後之 PSMSL 宿霧驗潮站資料。上圖：採用 ECMWF 資料，下圖：採用 NCEP 資料



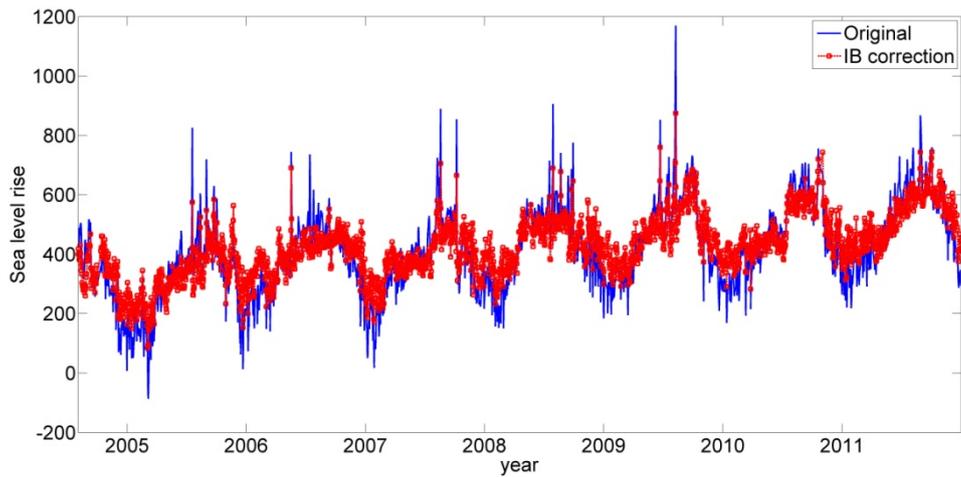
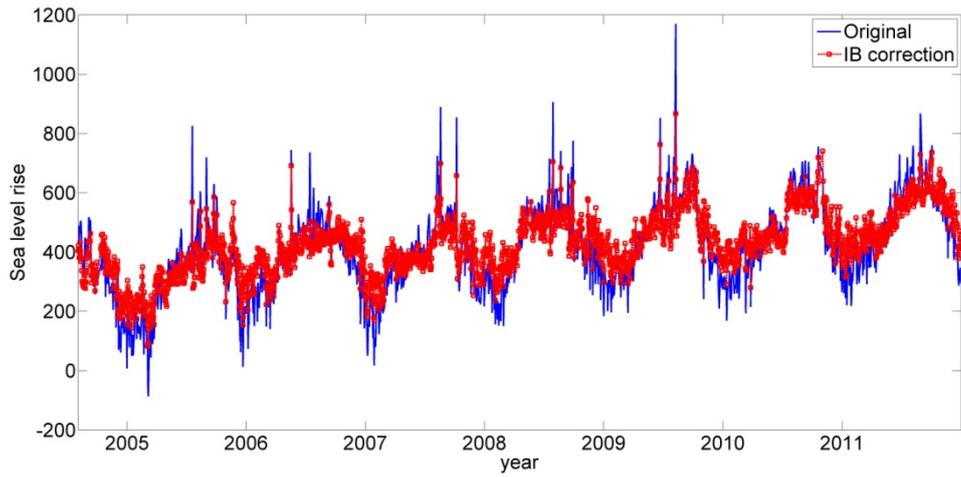


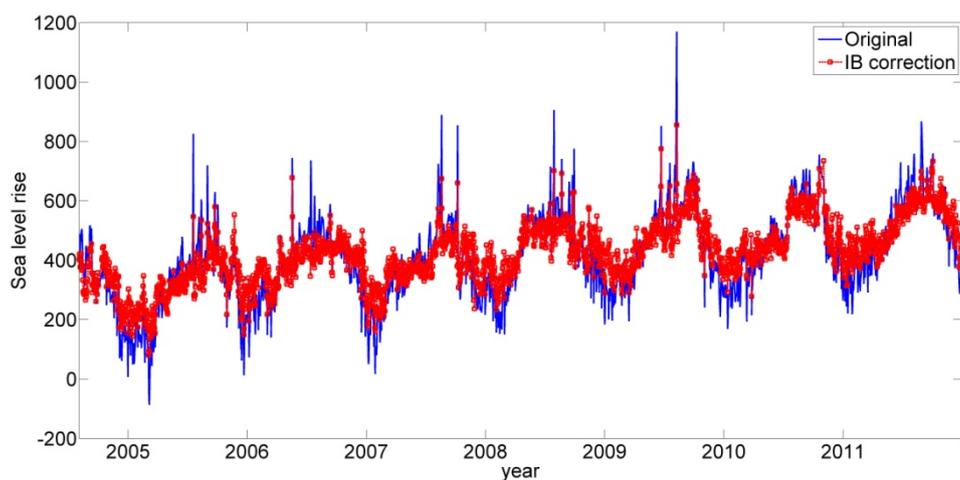
附圖 5-20 IB 改正前後之 UHSLC 高雄驗潮站資料。上圖：採用 ECMWF 資料，中圖：採用 NCEP 資料，下圖：採用 CWB 資料



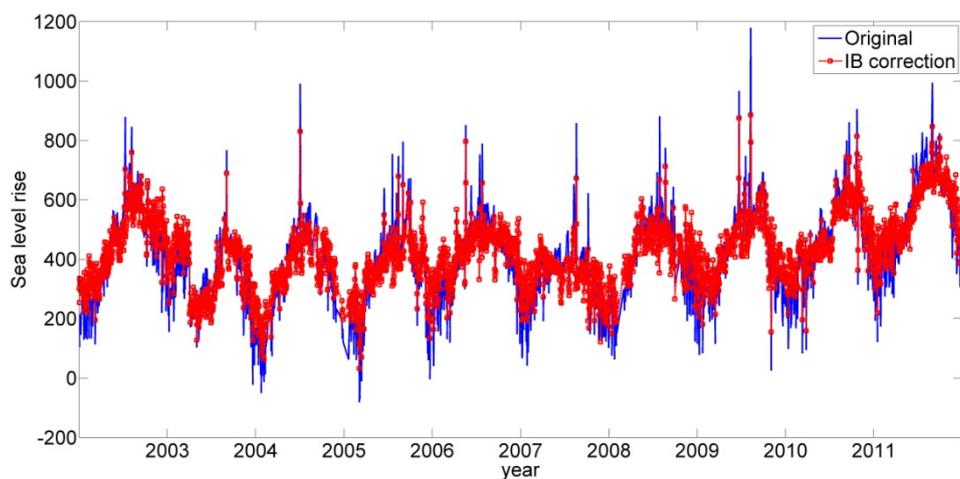
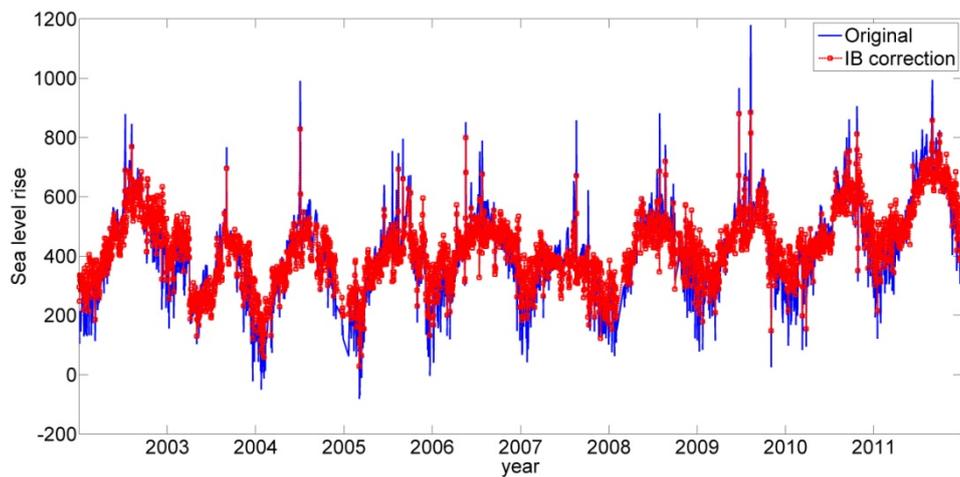


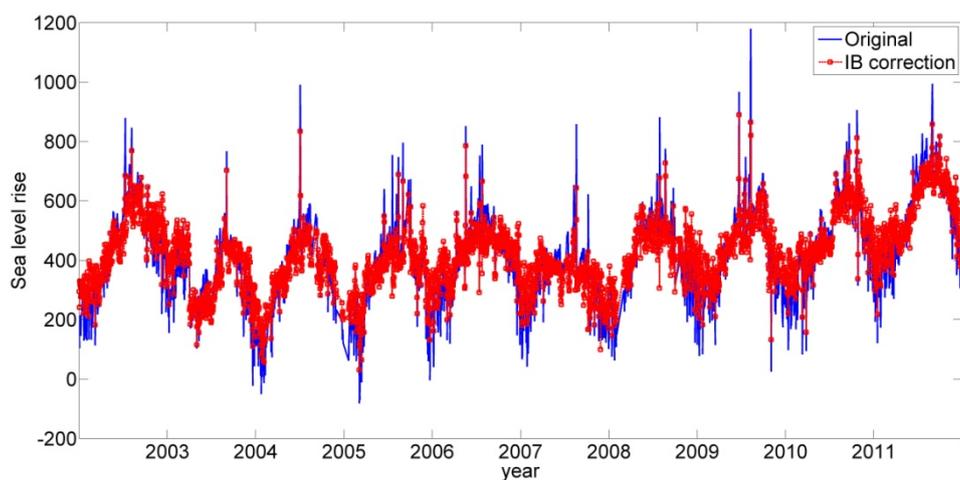
附圖 5-21 IB 改正前後之 UHSLC 基隆驗潮站資料。上圖：採用 ECMWF 資料，中圖：採用 NCEP 資料，下圖：採用 CWB 資料



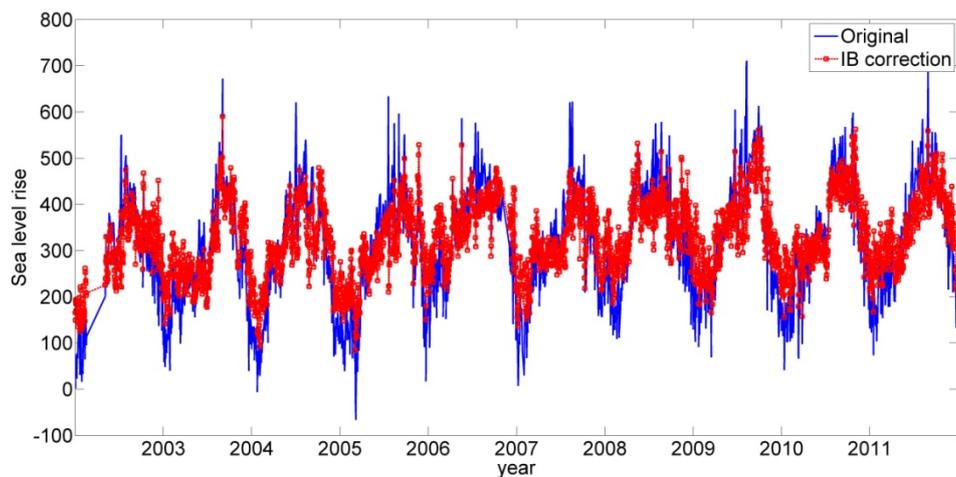
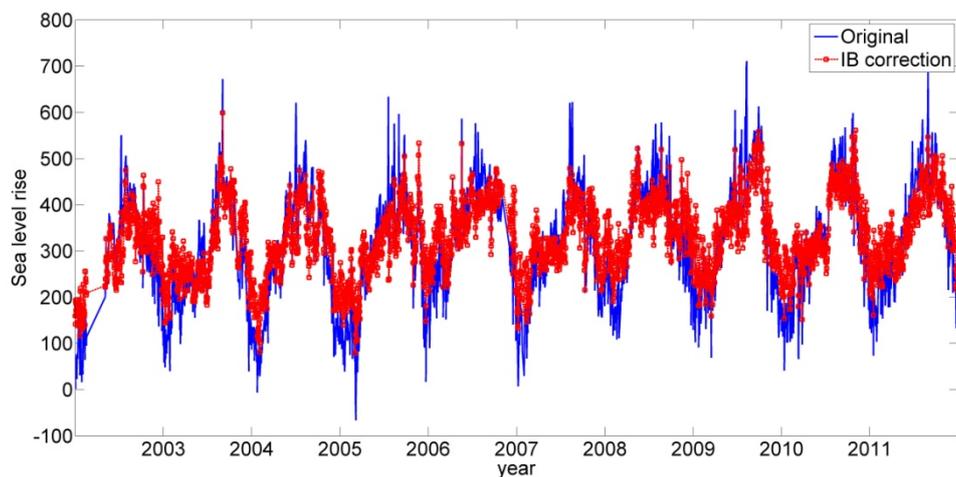


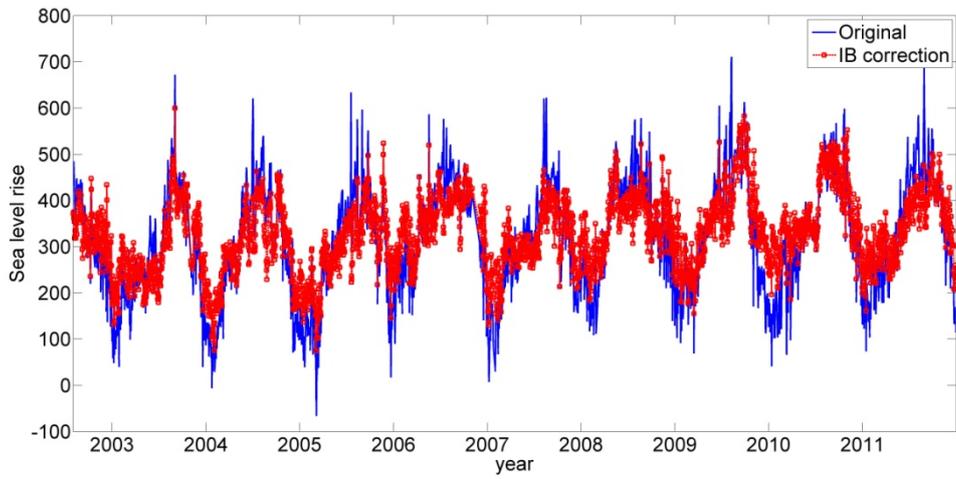
附圖 5-22 IB 改正前後之 CWB 箔子寮驗潮站資料。上圖：採用 ECMWF 資料，中圖：採用 NCEP 資料，下圖：採用 CWB 資料



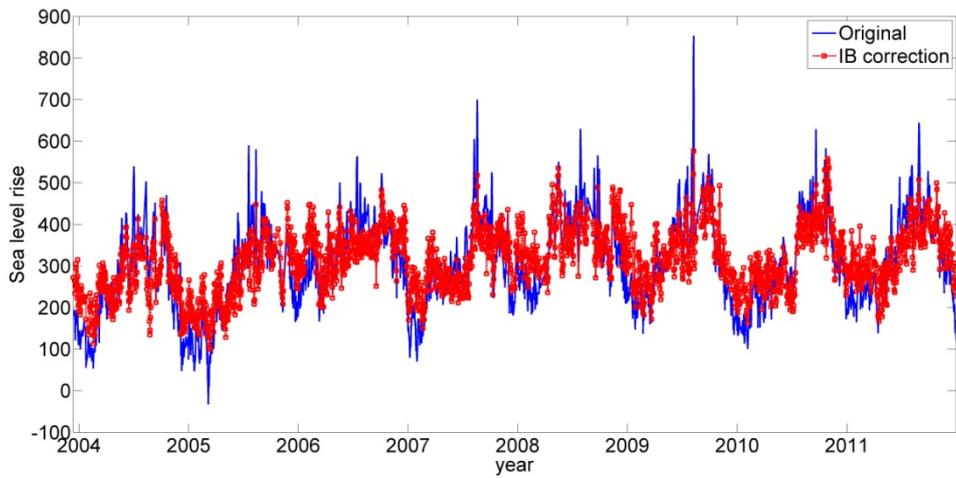
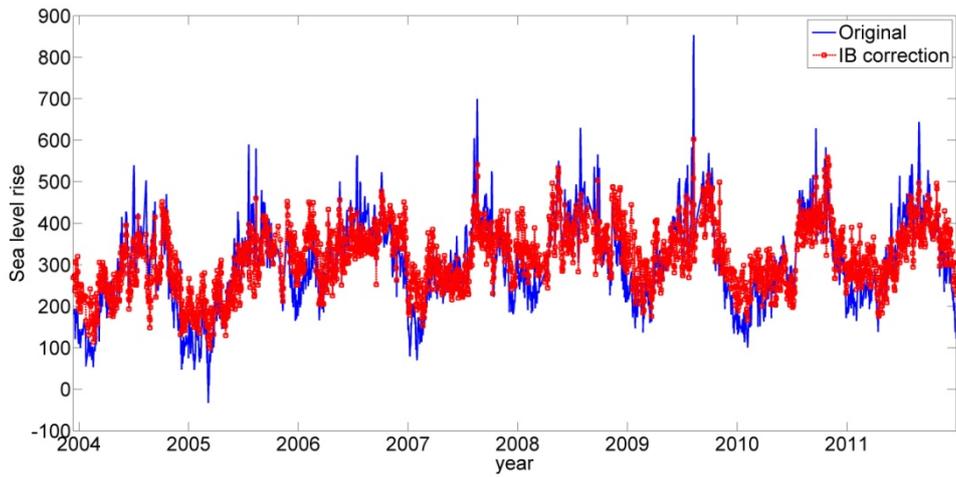


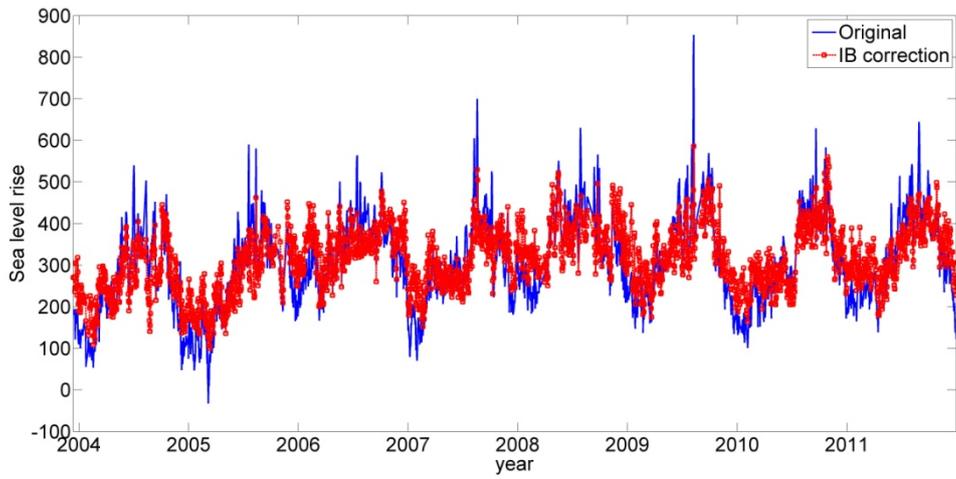
附圖 5-23 IB 改正前後之 CWB 東石驗潮站資料。上圖：採用 ECMWF 資料，中圖：採用 NCEP 資料，下圖：採用 CWB 資料



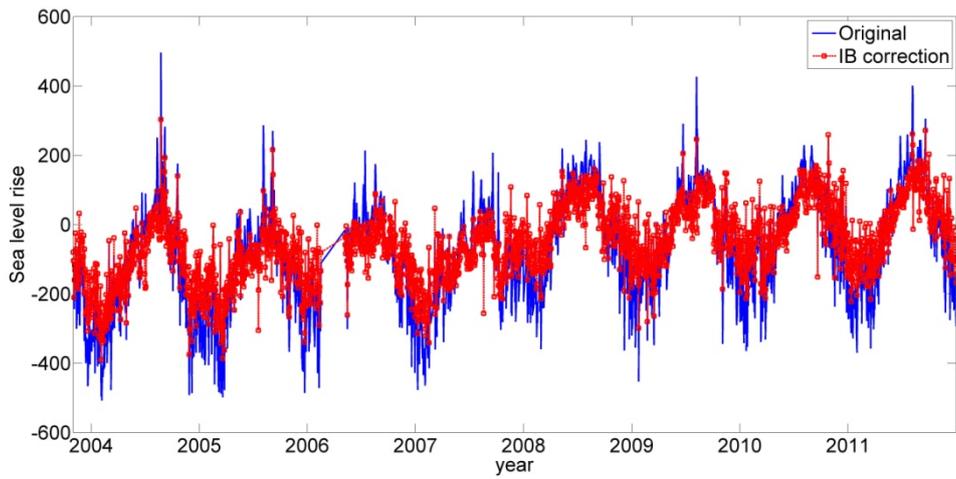
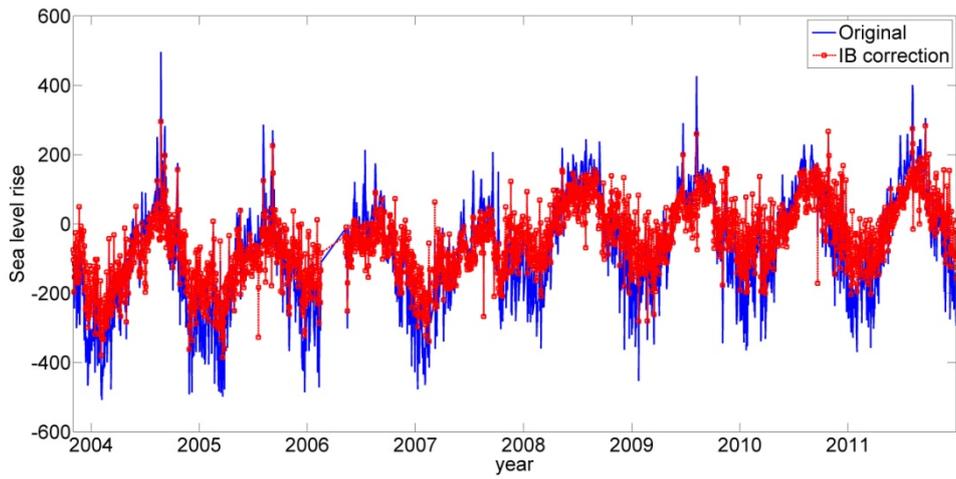


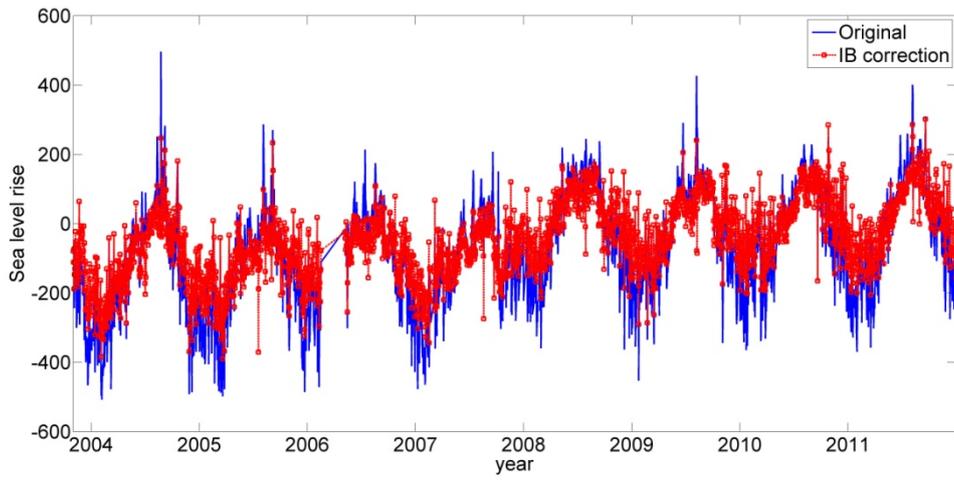
附圖 5-24 IB 改正前後之 CWB 將軍驗潮站資料。上圖：採用 ECMWF 資料，中圖：採用 NCEP 資料，下圖：採用 CWB 資料



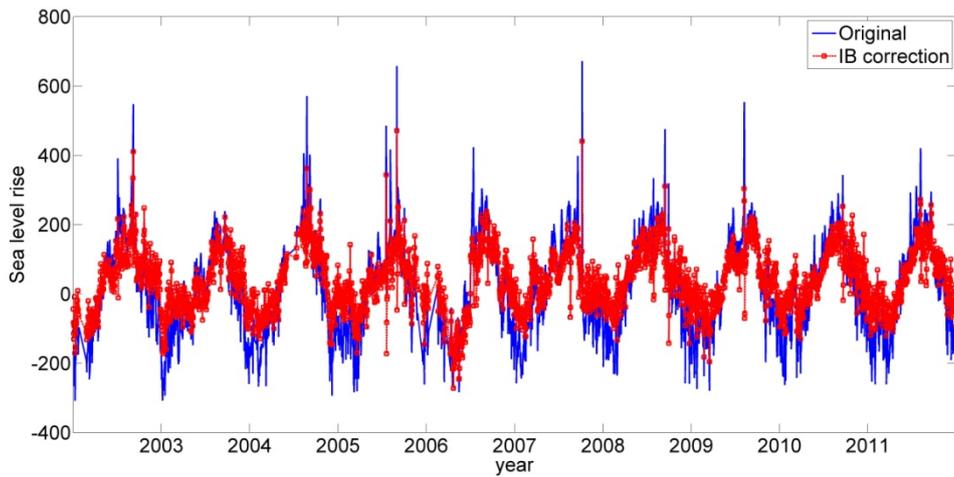
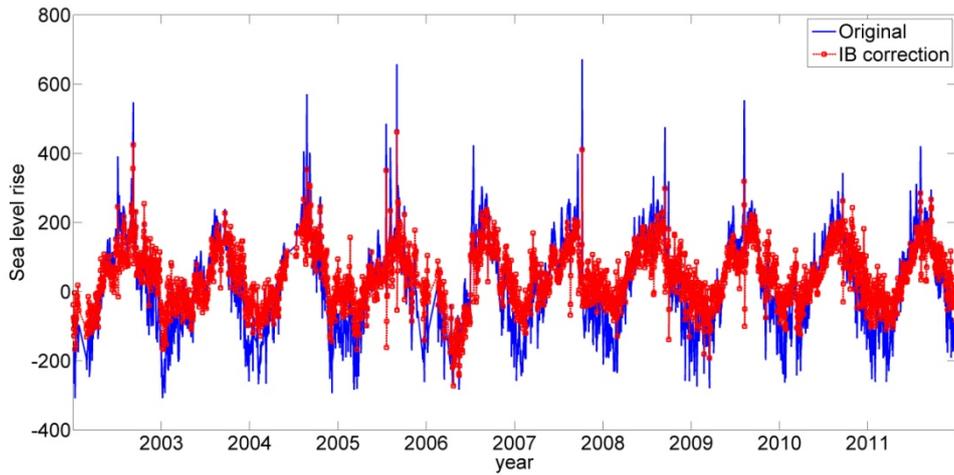


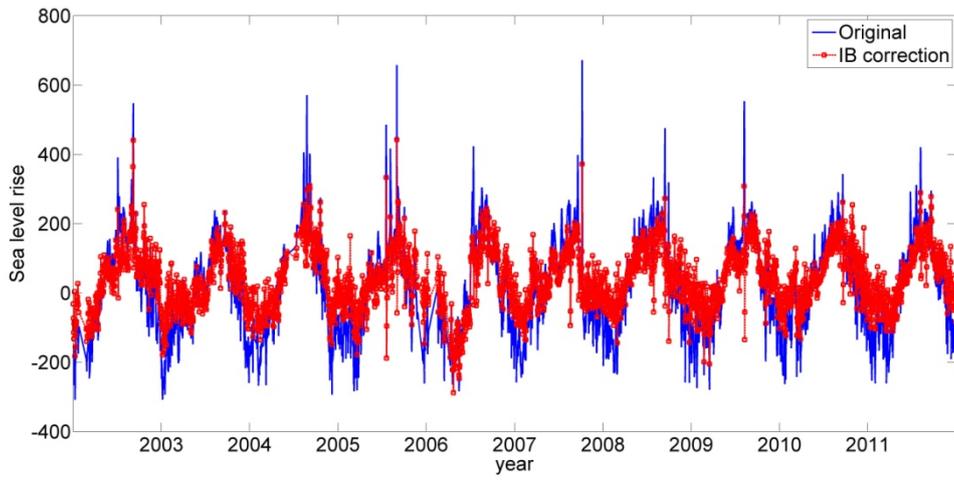
附圖 5-25 IB 改正前後之 CWB 東港驗潮站資料。上圖：採用 ECMWF 資料，中圖：採用 NCEP 資料，下圖：採用 CWB 資料



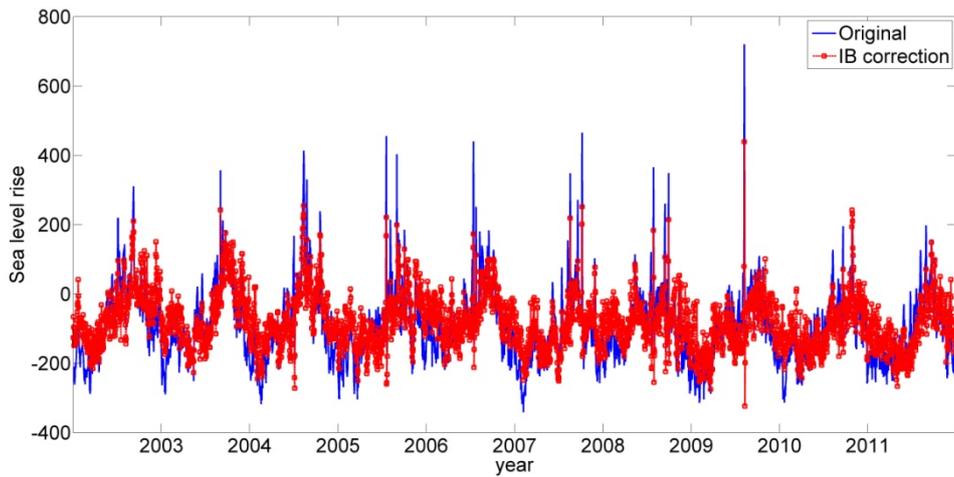
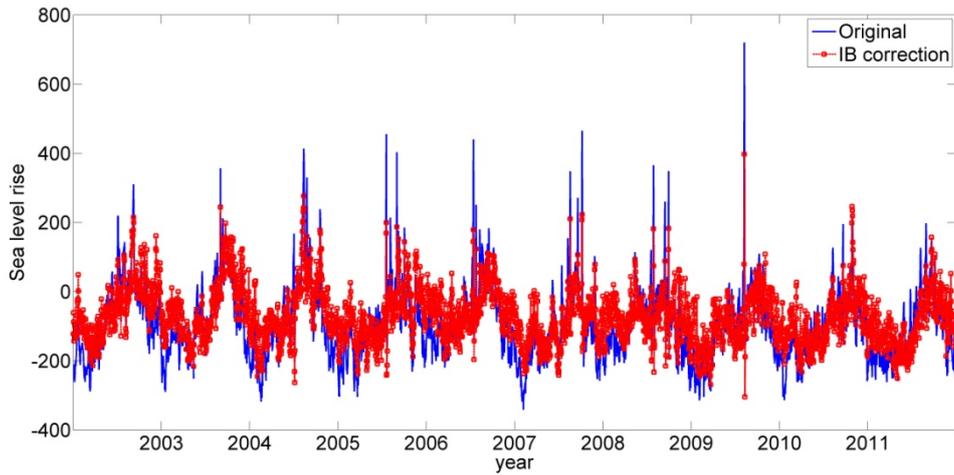


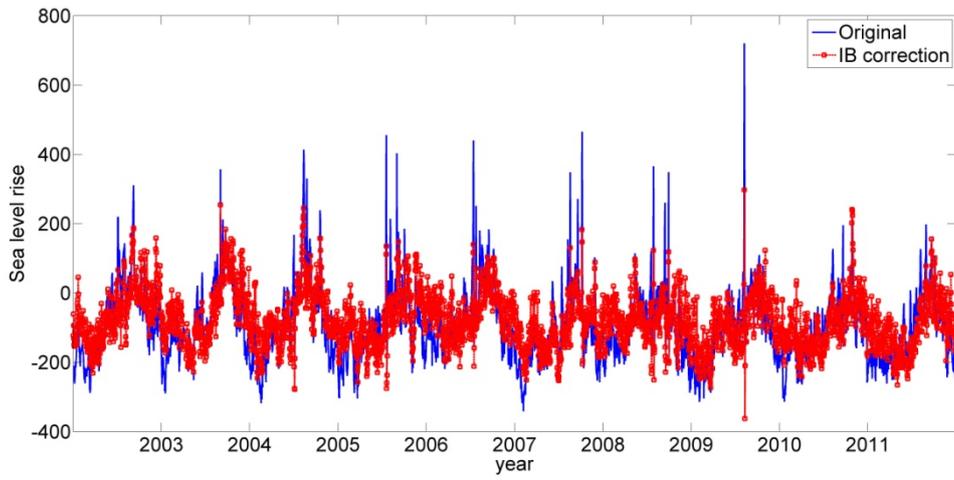
附圖 5-26 IB 改正前後之 CWB 麟山鼻驗潮站資料。上圖：採用 ECMWF 資料，中圖：採用 NCEP 資料，下圖：採用 CWB 資料



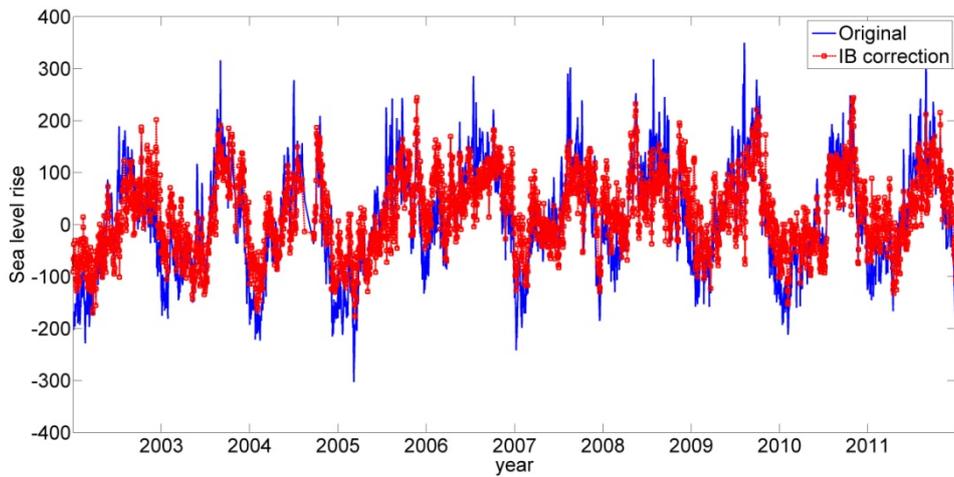
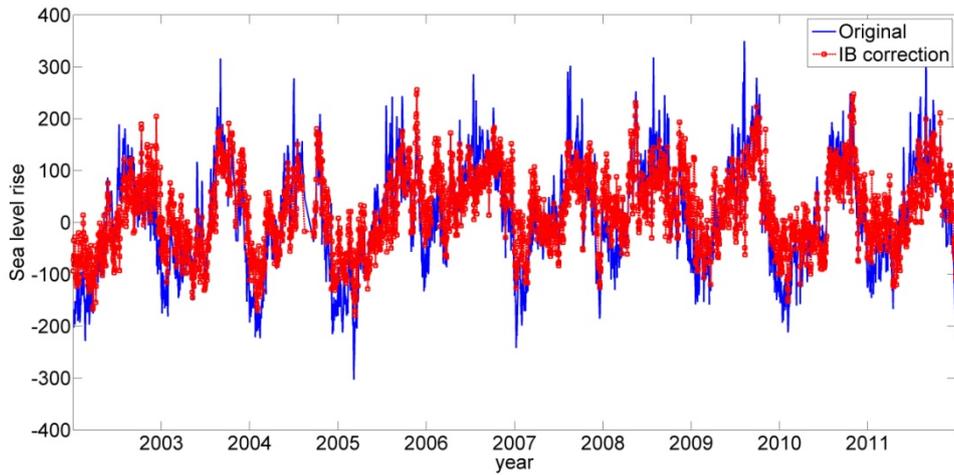


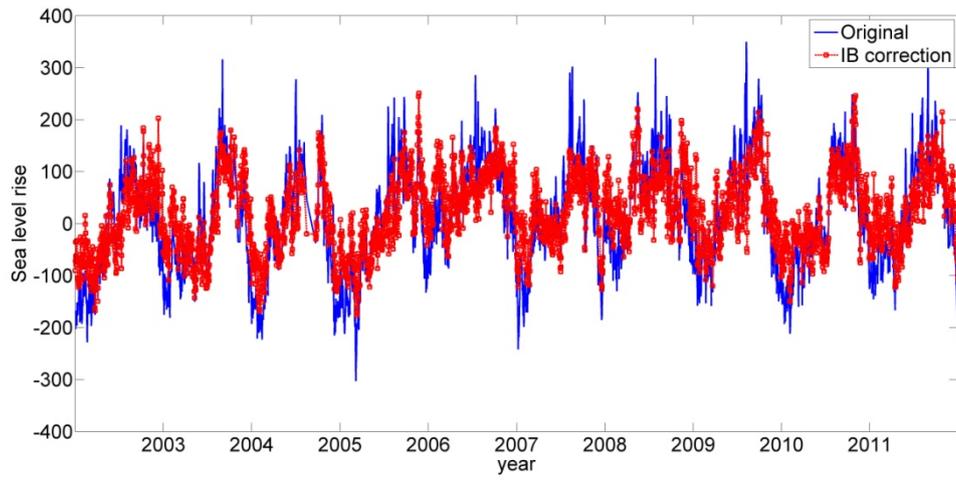
附圖 5-27 IB 改正前後之 CWB 龍洞驗潮站資料。上圖：採用 ECMWF 資料，中圖：採用 NCEP 資料，下圖：採用 CWB 資料



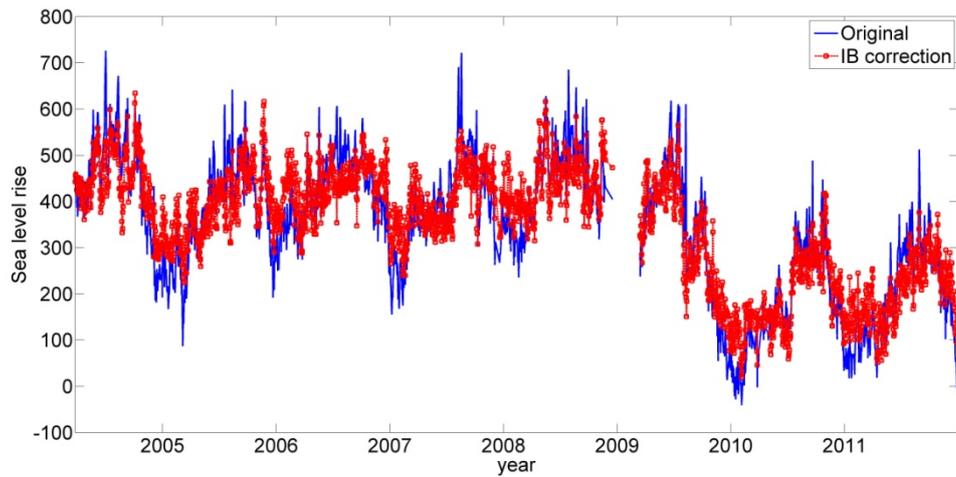
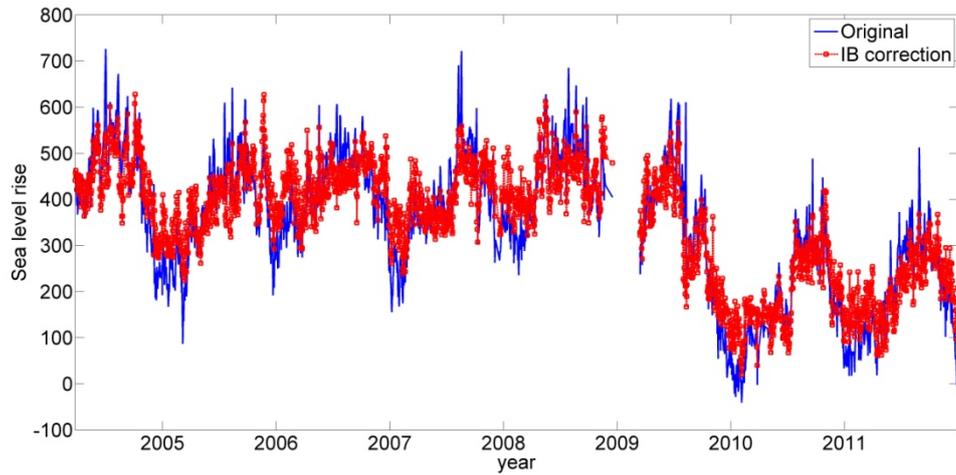


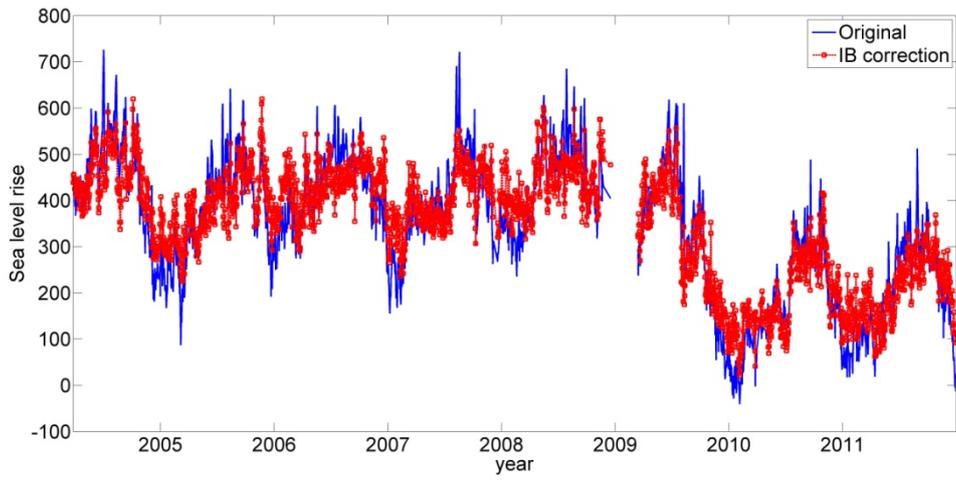
附圖 5-28 IB 改正前後之 CWB 成功驗潮站資料。上圖：採用 ECMWF 資料，中圖：採用 NCEP 資料，下圖：採用 CWB 資料



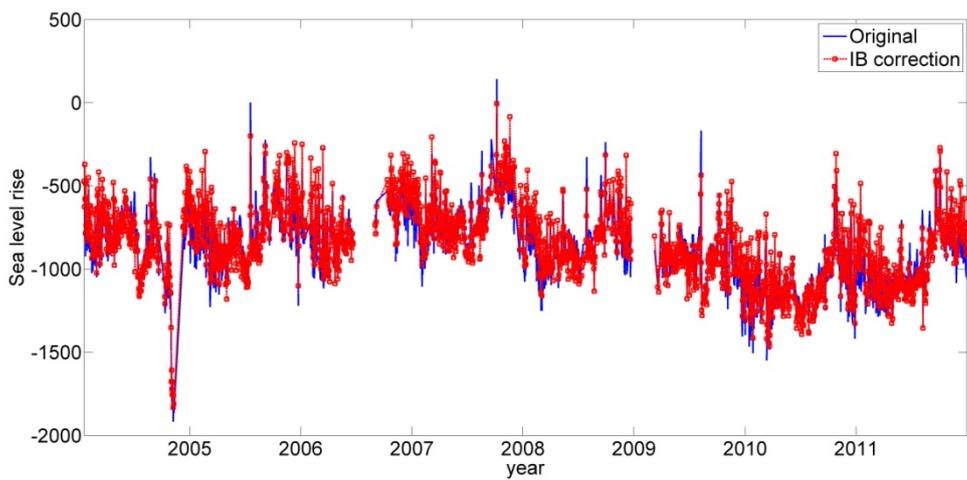
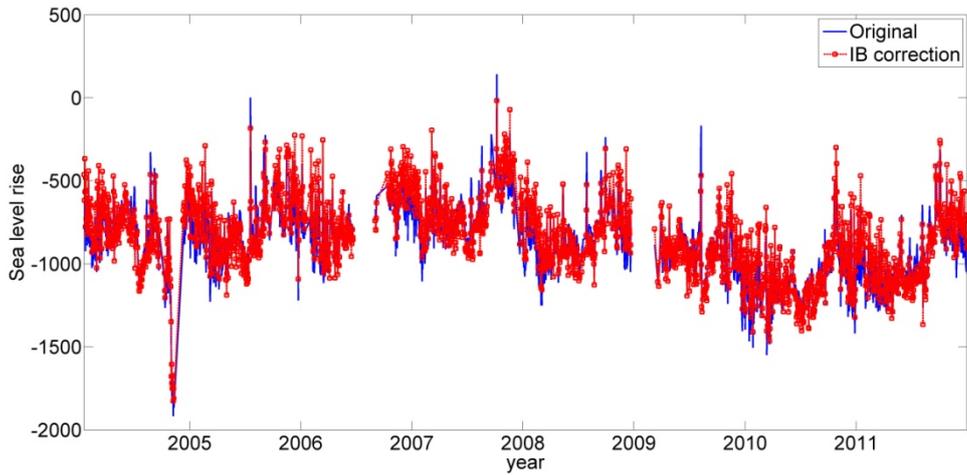


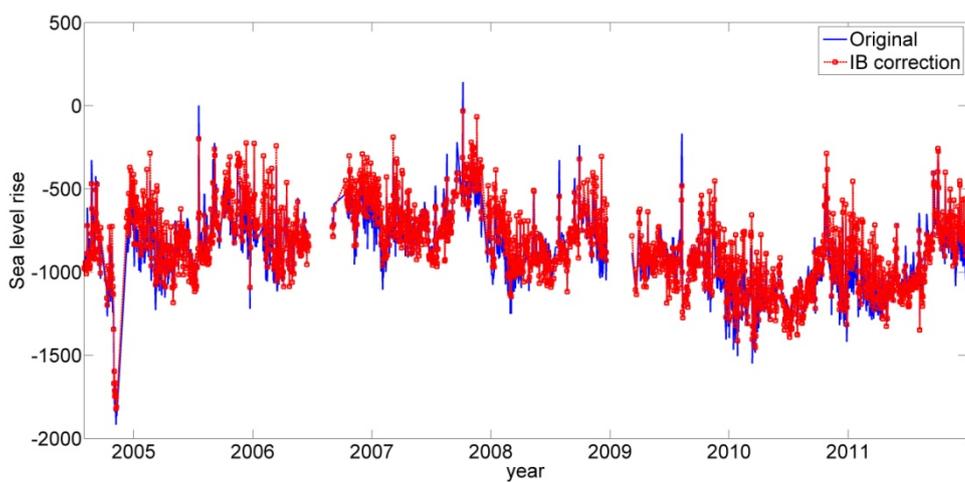
附圖 5-29 IB 改正前後之 CWB 小琉球驗潮站資料。上圖：採用 ECMWF 資料，中圖：採用 NCEP 資料，下圖：採用 CWB 資料



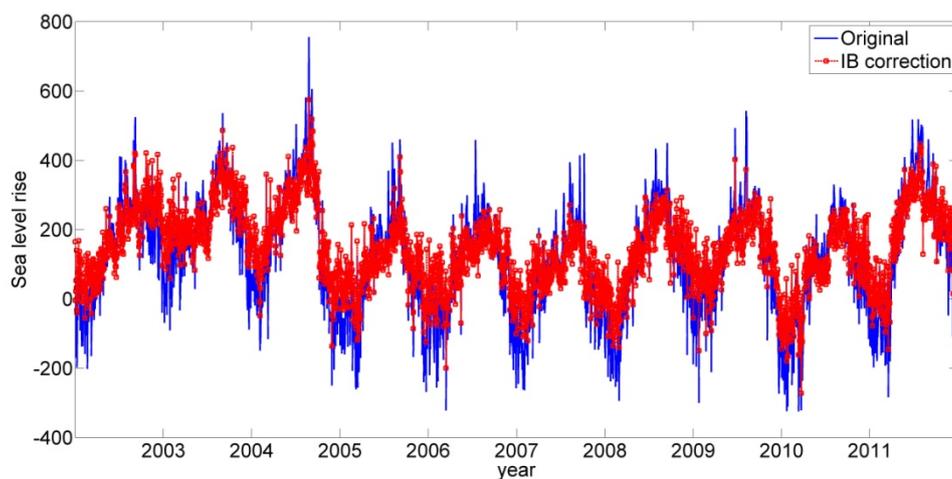
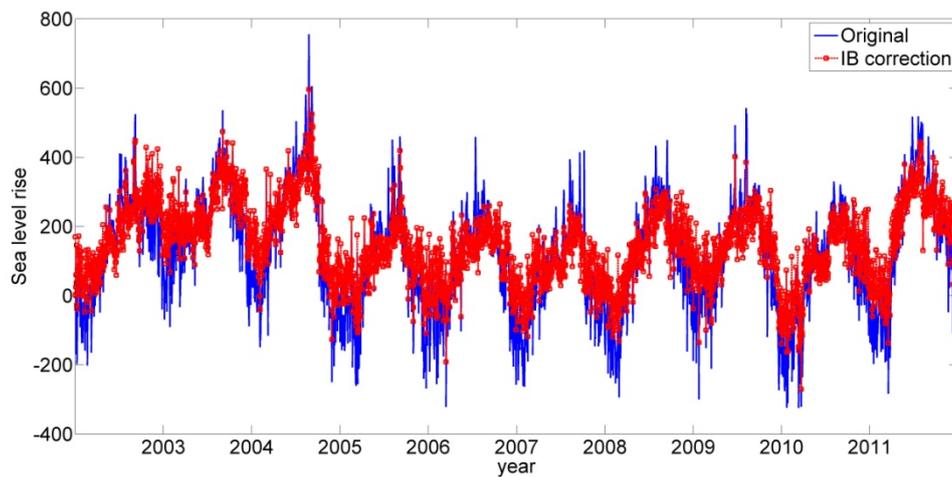


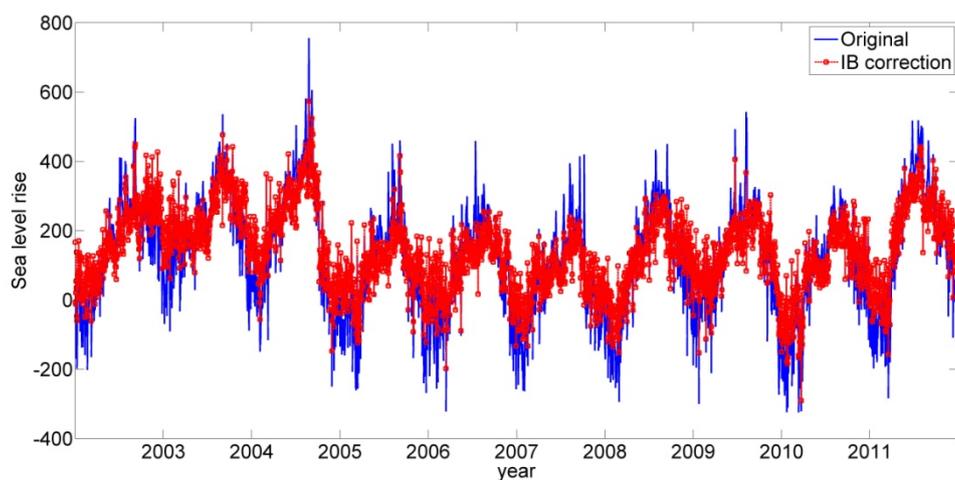
附圖 5-30 IB 改正前後之 CWB 高雄驗潮站資料。上圖：採用 ECMWF 資料，中圖：採用 NCEP 資料，下圖：採用 CWB 資料



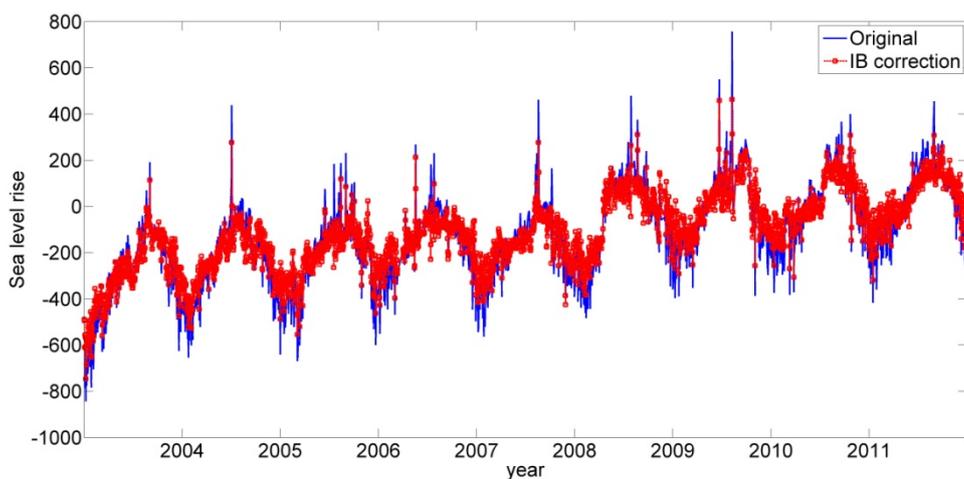
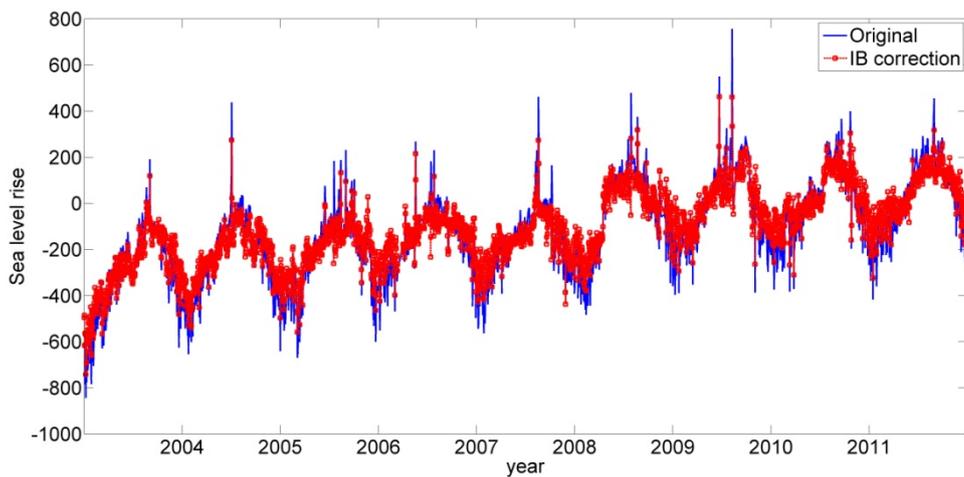


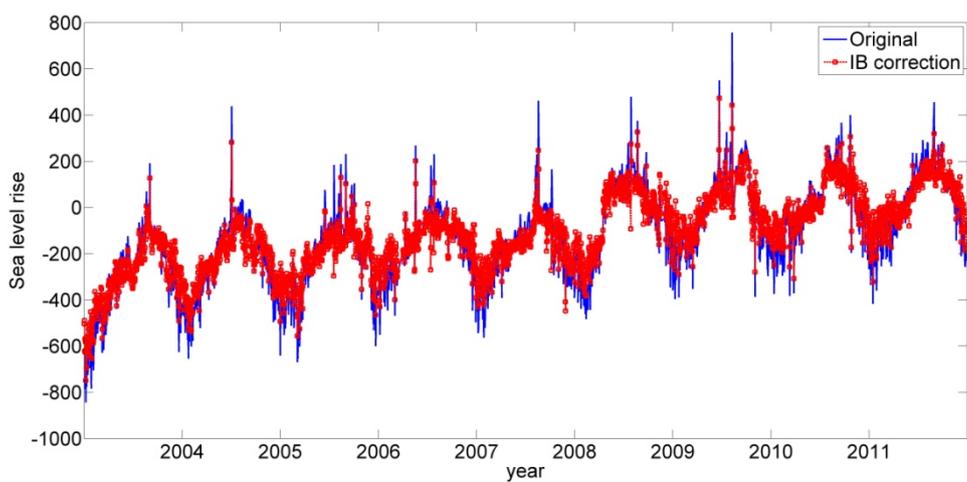
附圖 5-31 IB 改正前後之 CWB 馬祖驗潮站資料。上圖：採用 ECMWF 資料，中圖：採用 NCEP 資料，下圖：採用 CWB 資料



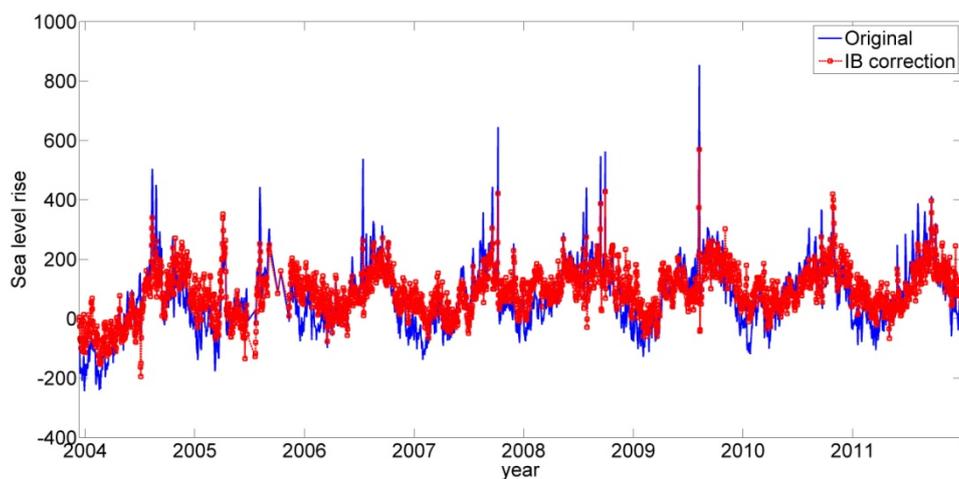
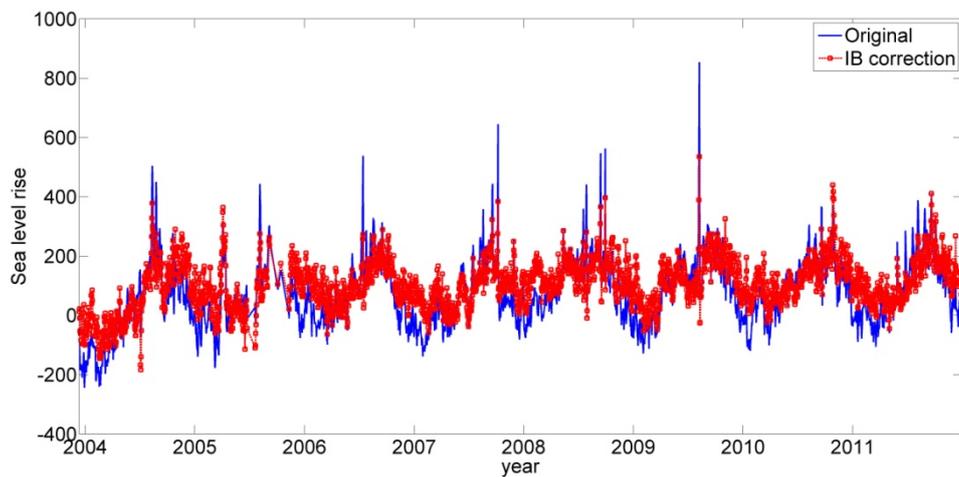


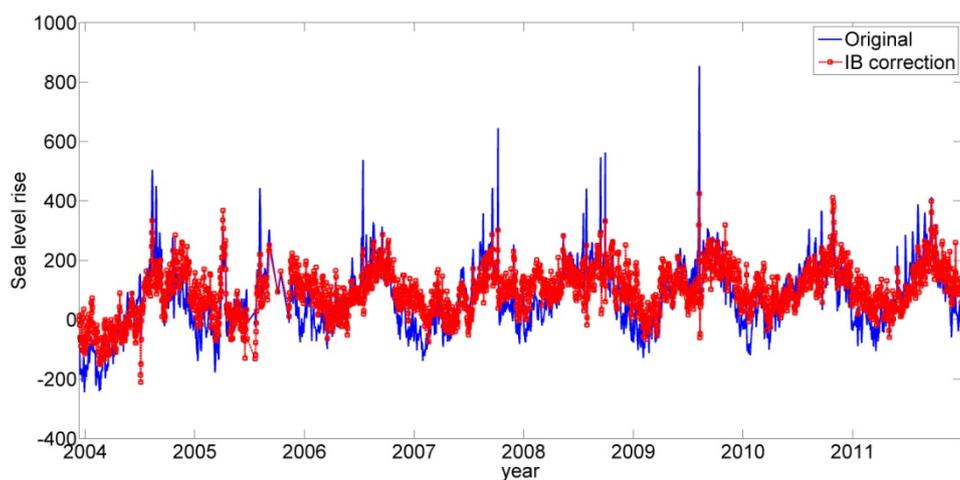
附圖 5-32 IB 改正前後之 CWB 新竹驗潮站資料。上圖：採用 ECMWF 資料，中圖：採用 NCEP 資料，下圖：採用 CWB 資料



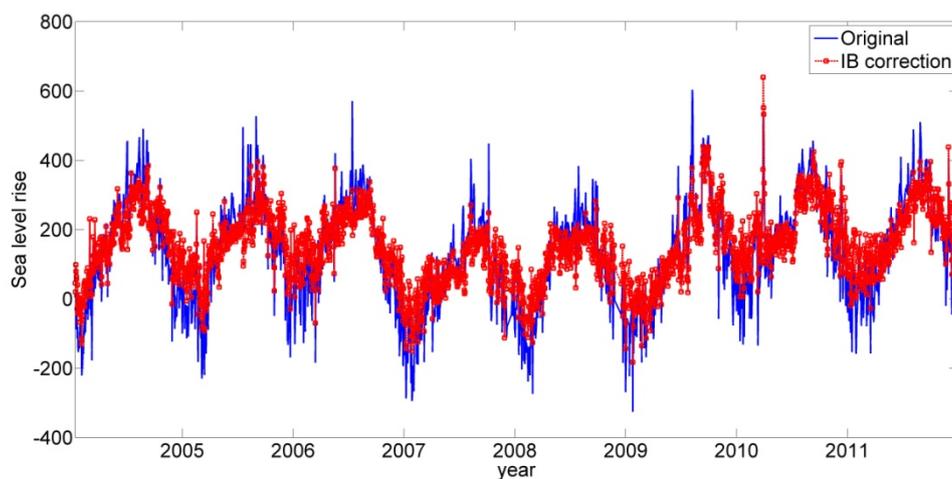
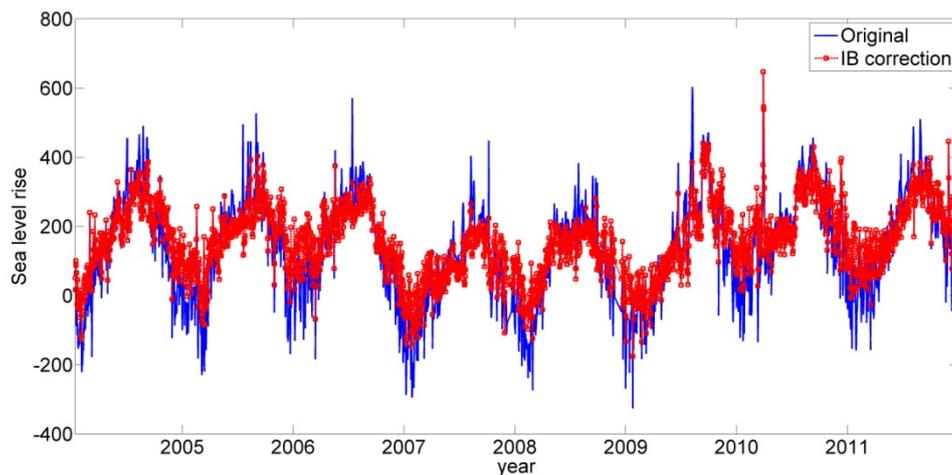


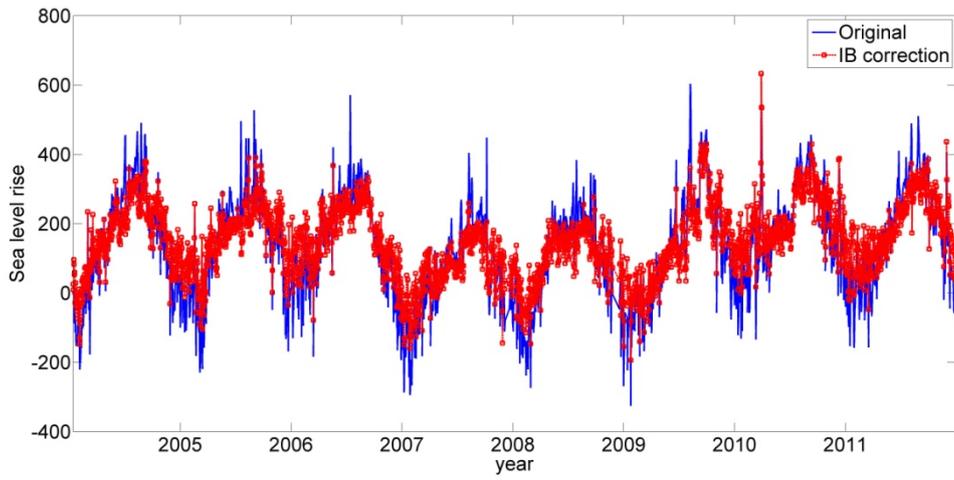
附圖 5-33 IB 改正前後之 CWB 塭港驗潮站資料。上圖：採用 ECMWF 資料，中圖：採用 NCEP 資料，下圖：採用 CWB 資料



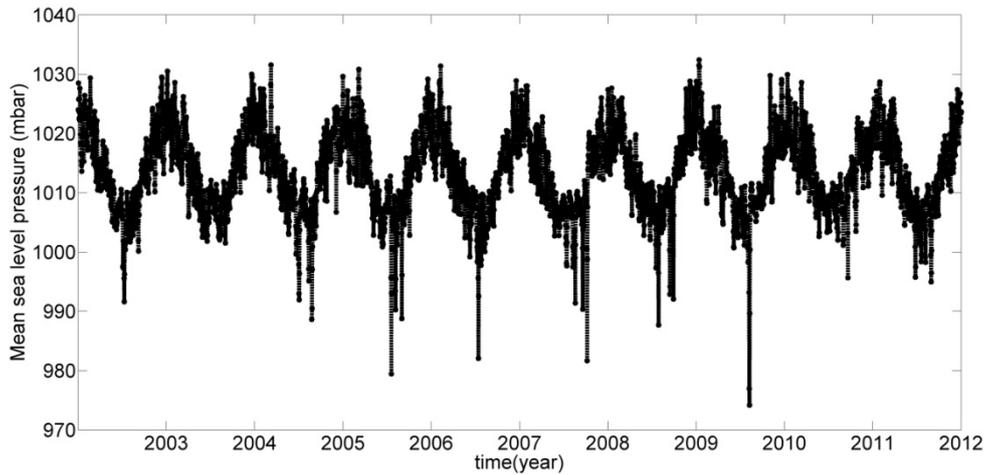


附圖 5-34 IB 改正前後之 CWB 花蓮驗潮站資料。上圖：採用 ECMWF 資料，中圖：採用 NCEP 資料，下圖：採用 CWB 資料

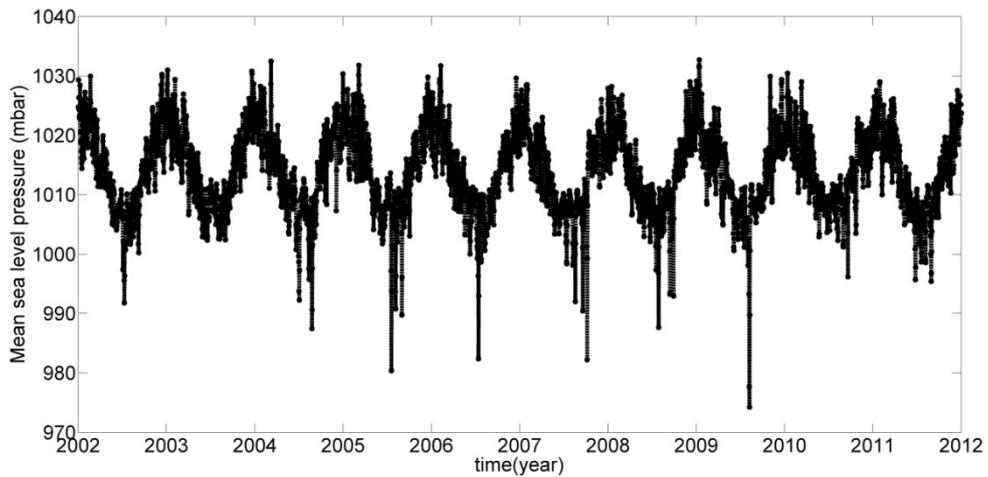




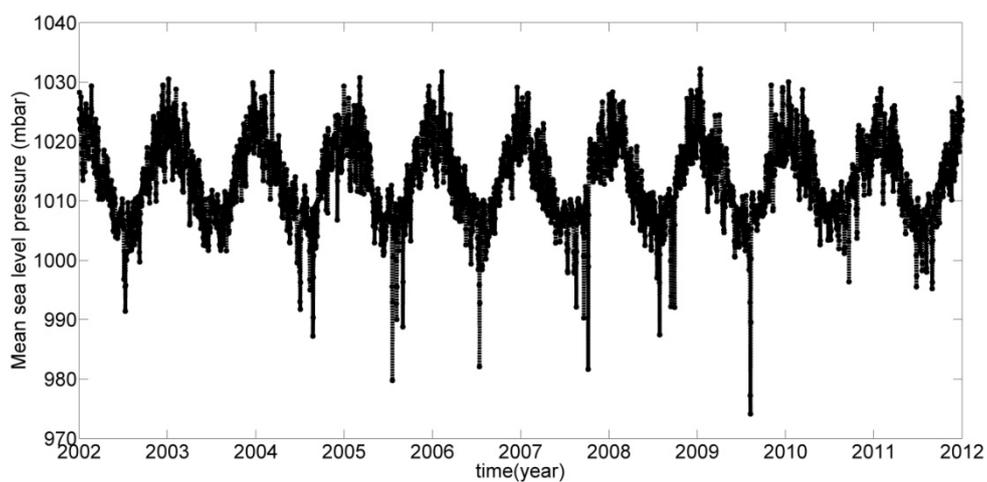
附圖 5-35 IB 改正前後之 CWB 台中港驗潮站資料。上圖：採用 ECMWF 資料，中圖：採用 NCEP 資料，下圖：採用 CWB 資料



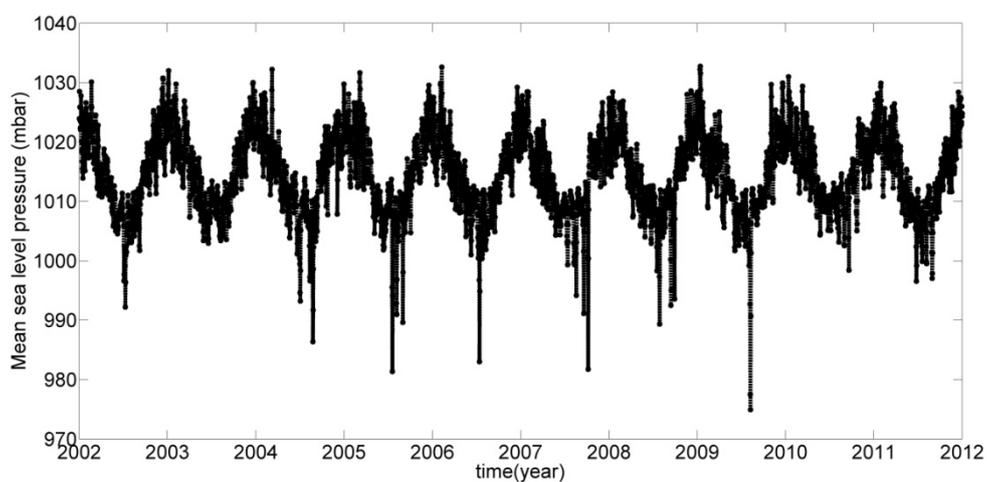
附圖 5-36 板橋海水面氣壓觀測站資料



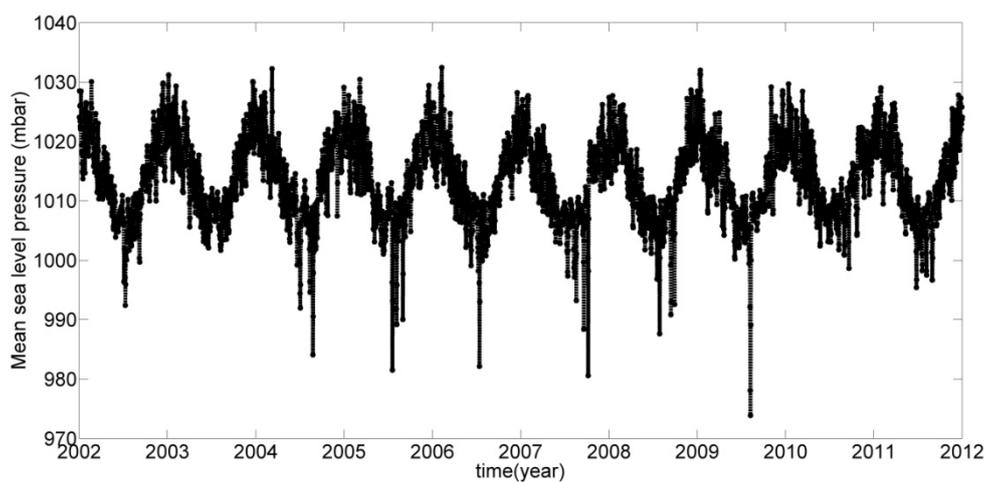
附圖 5-37 淡水海水面氣壓觀測站資料



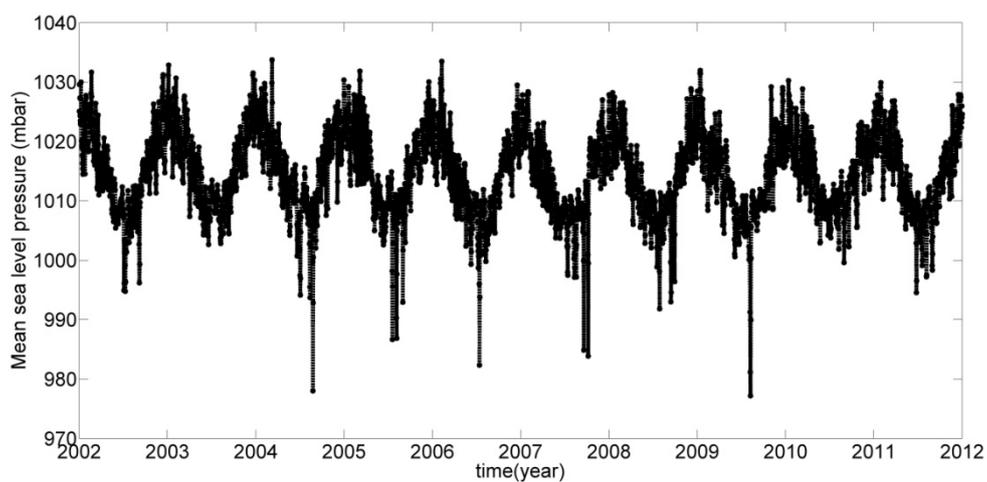
附圖 5-38 台北海水面氣壓觀測站資料



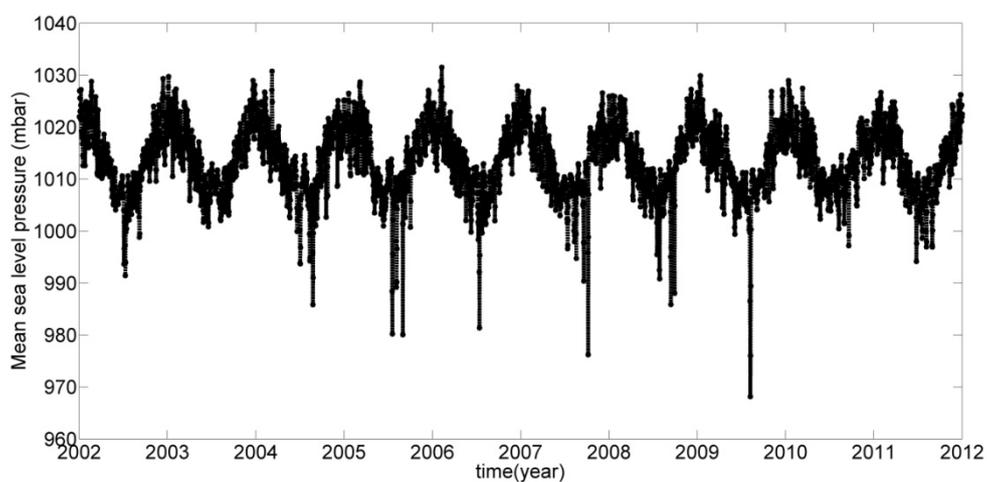
附圖 5-39 竹子湖海水面氣壓觀測站資料



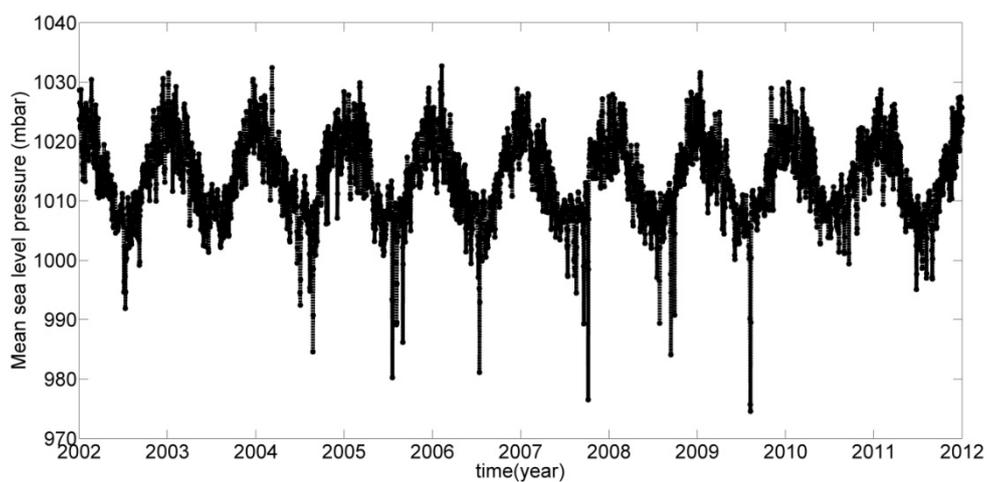
附圖 5-40 基隆海水面氣壓觀測站資料



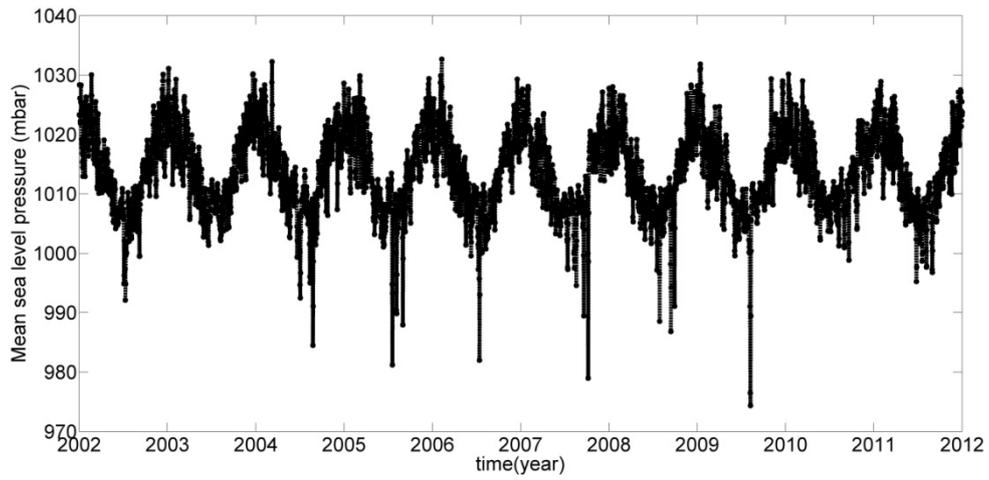
附圖 5-41 彭佳嶼海水面氣壓觀測站資料



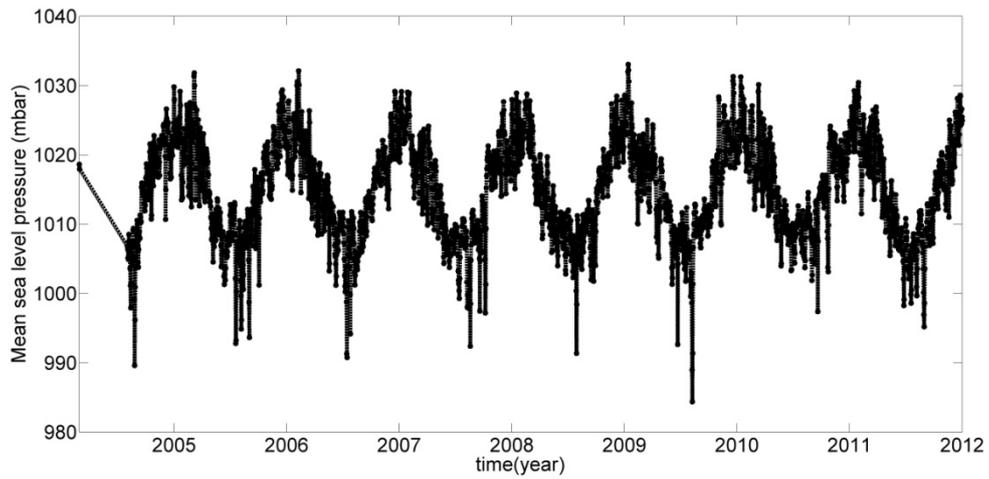
附圖 5-42 花蓮海水面氣壓觀測站資料



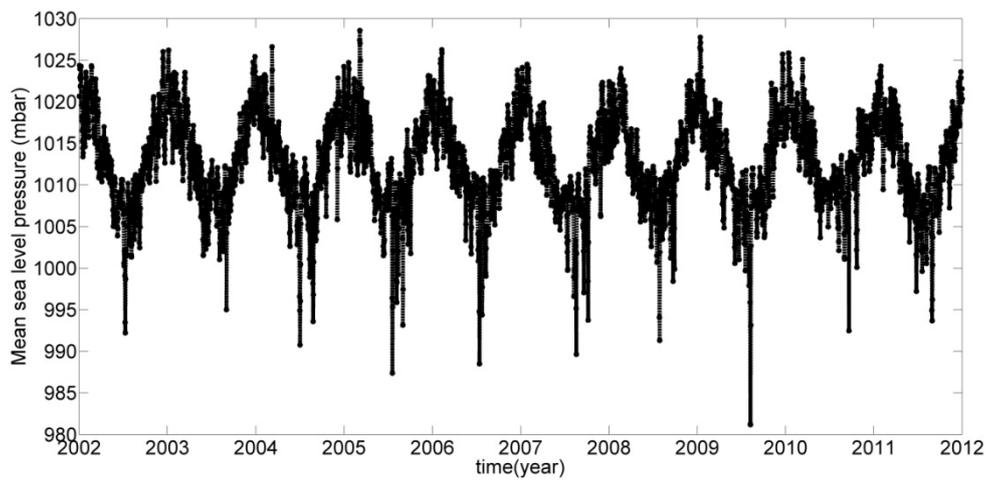
附圖 5-43 蘇澳海水面氣壓觀測站資料



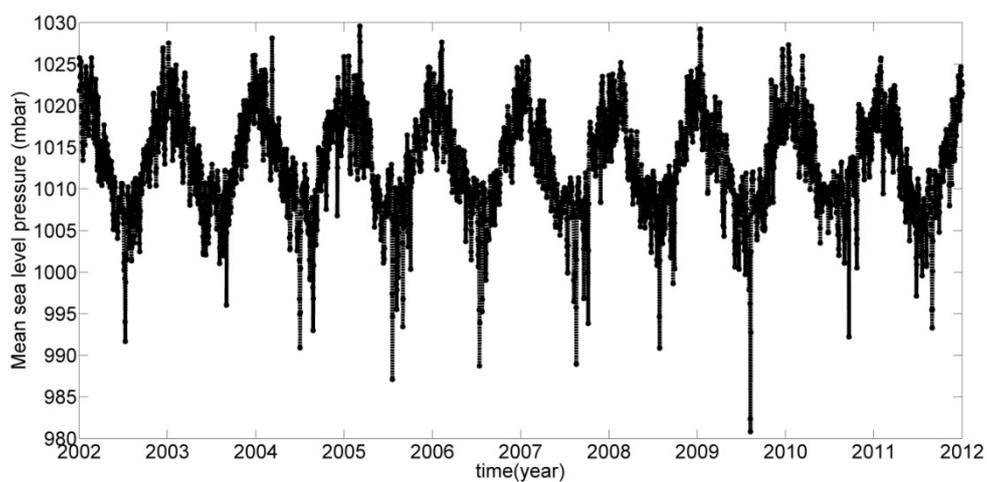
附圖 5-44 宜蘭海水面氣壓觀測站資料



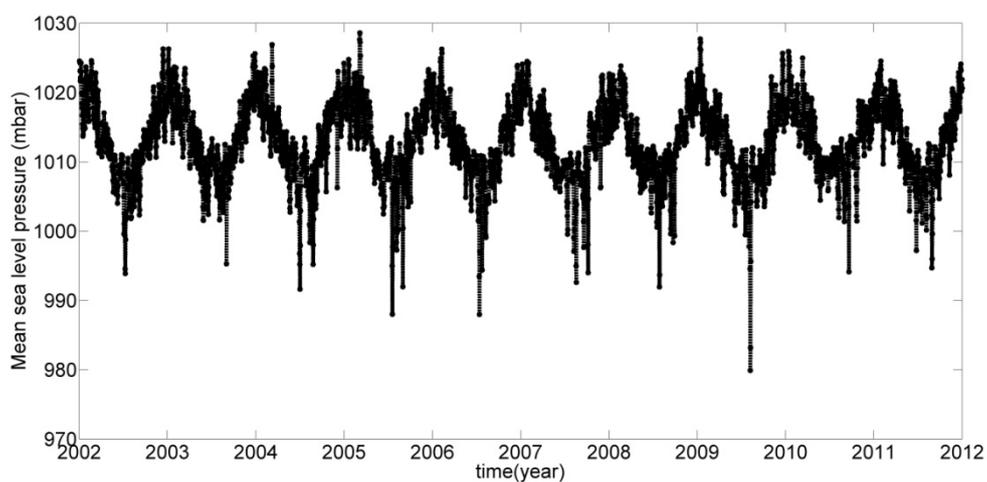
附圖 5-45 金門海水面氣壓觀測站資料



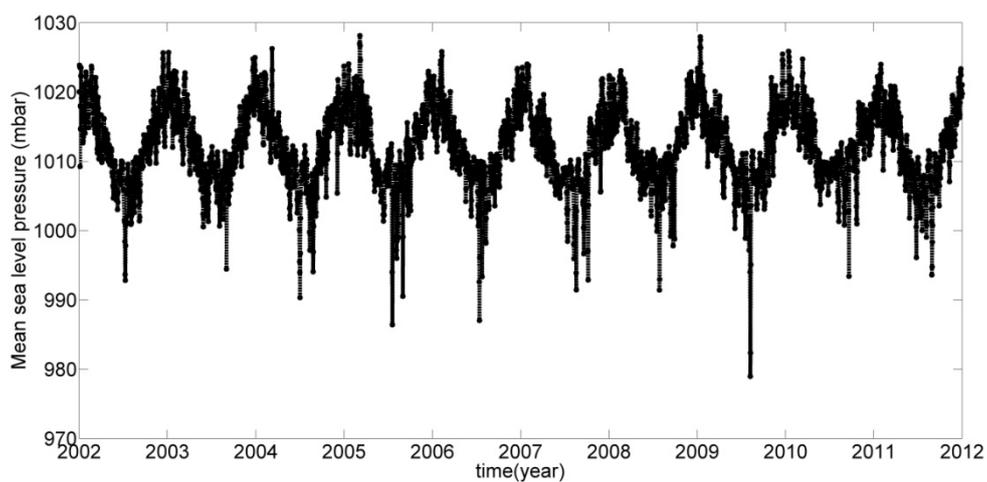
附圖 5-46 東吉島海水面氣壓觀測站資料



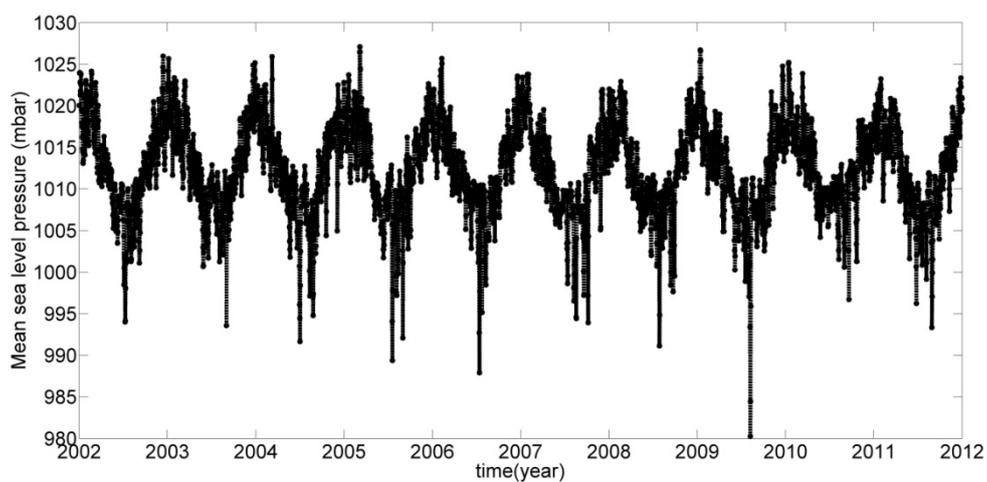
附圖 5-47 澎湖海水面氣壓觀測站資料



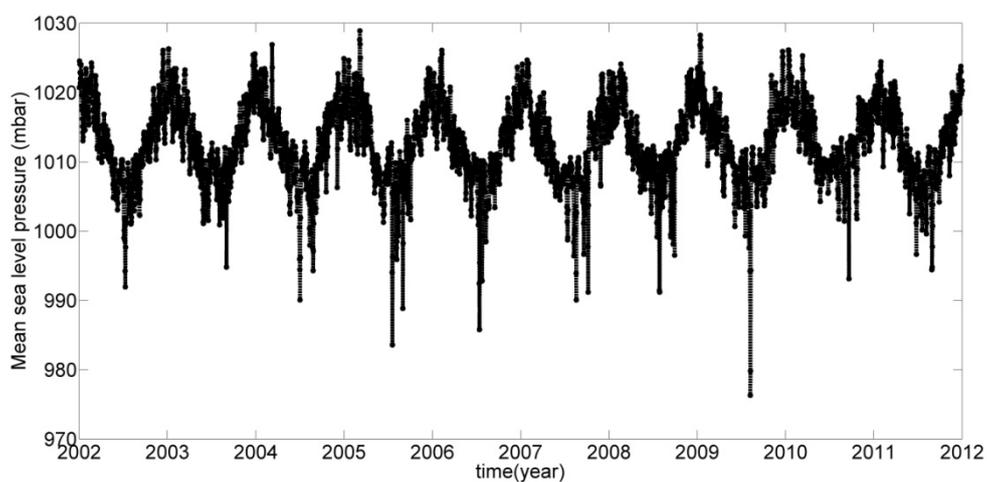
附圖 5-48 台南海水面氣壓觀測站資料



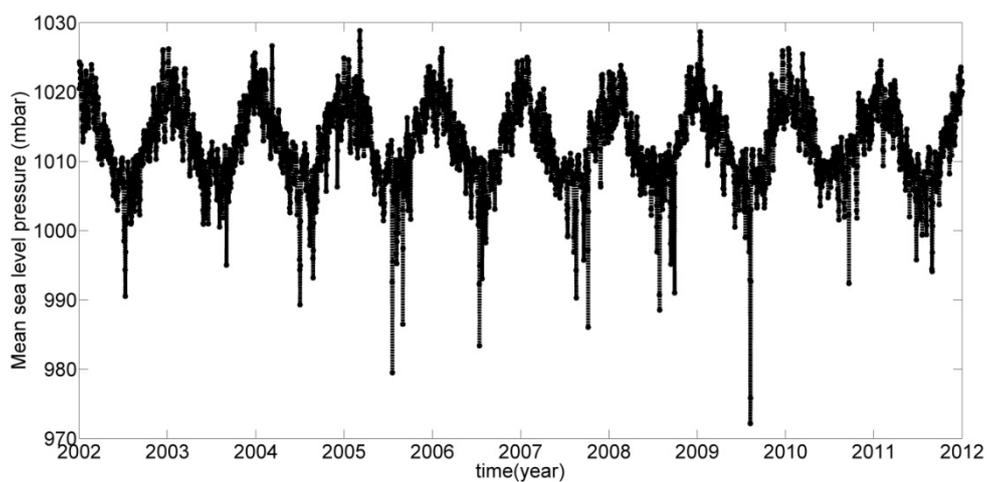
附圖 5-49 永康海水面氣壓觀測站資料



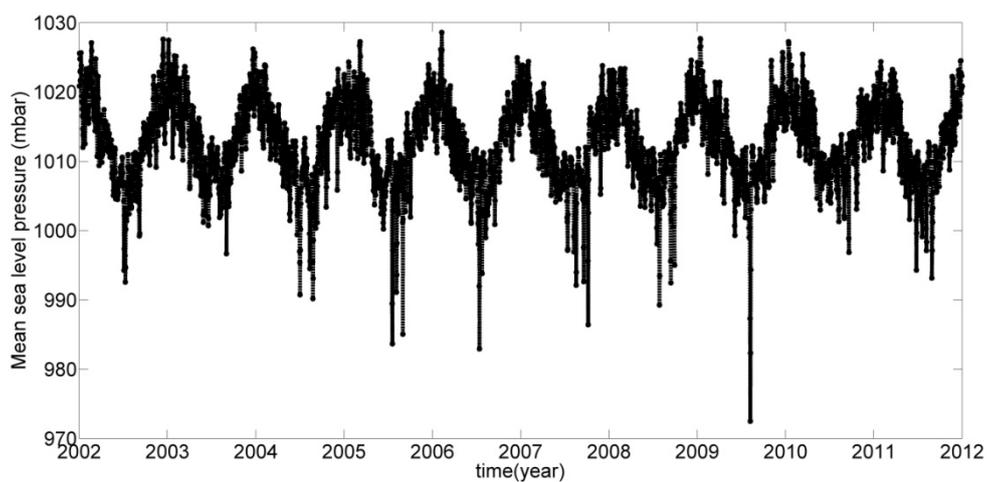
附圖 5-50 高雄海水面氣壓觀測站資料



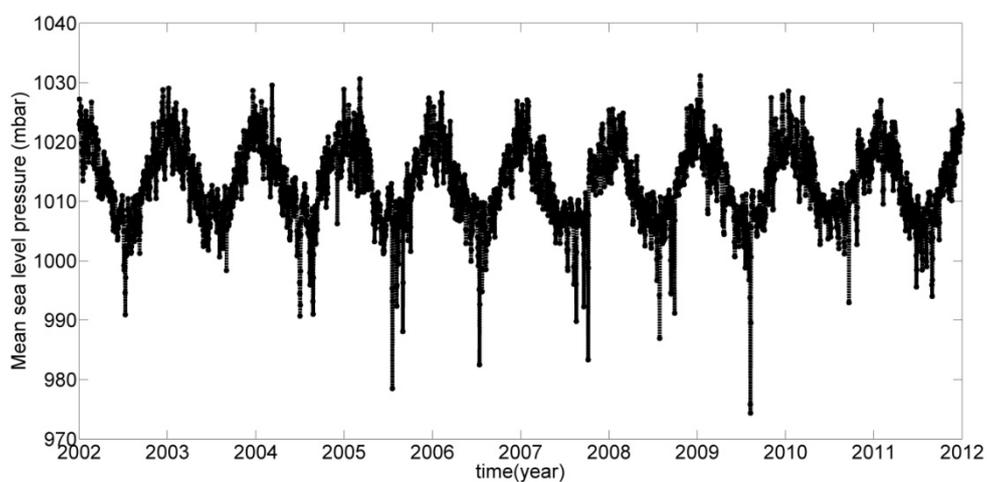
附圖 5-51 嘉義海水面氣壓觀測站資料



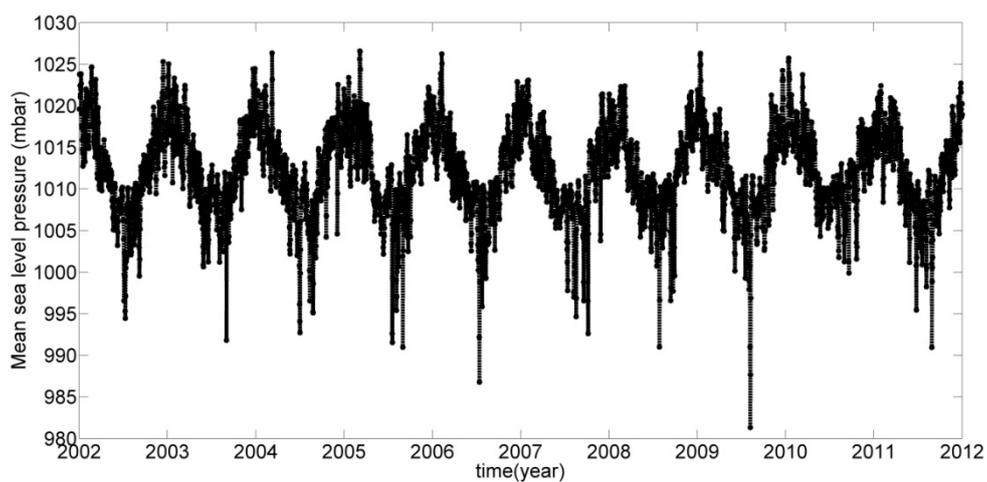
附圖 5-52 臺中海水面氣壓觀測站資料



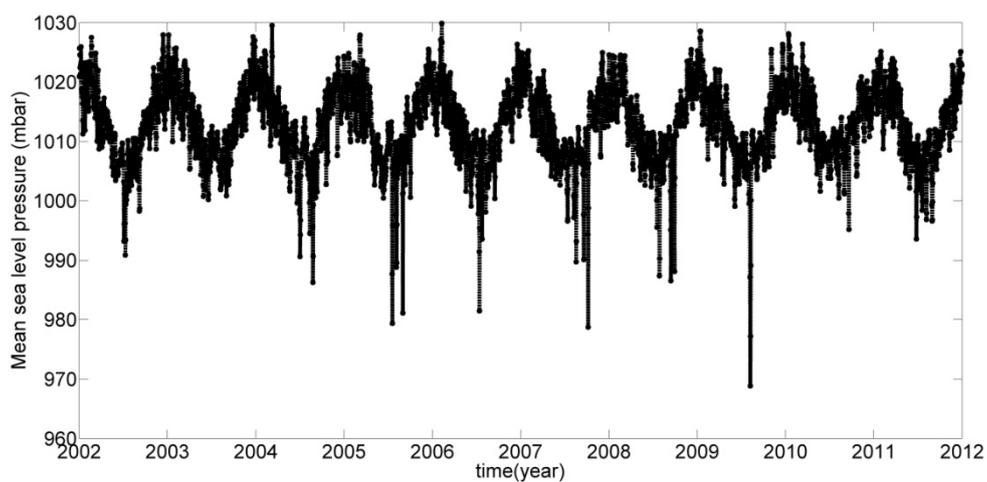
附圖 5-53 大武海水面氣壓觀測站資料



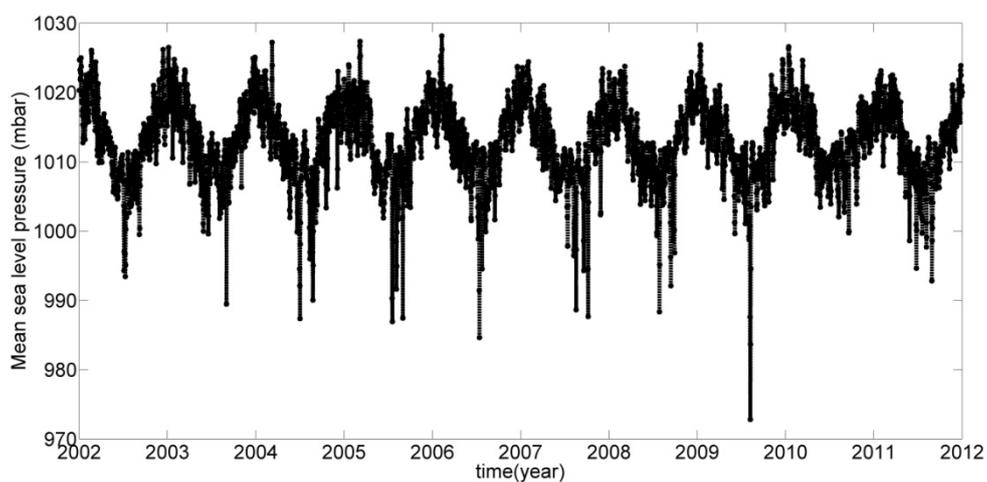
附圖 5-54 新竹海水面氣壓觀測站資料



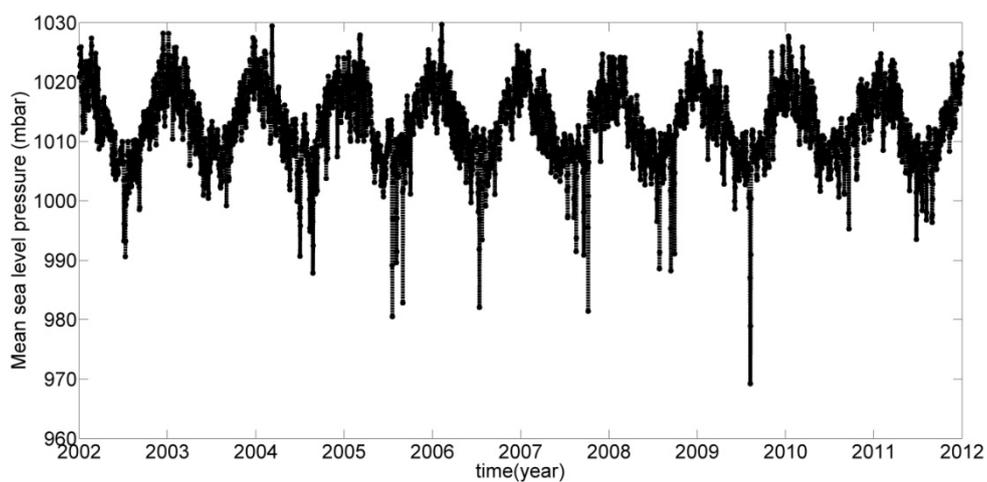
附圖 5-55 恆春海水面氣壓觀測站資料



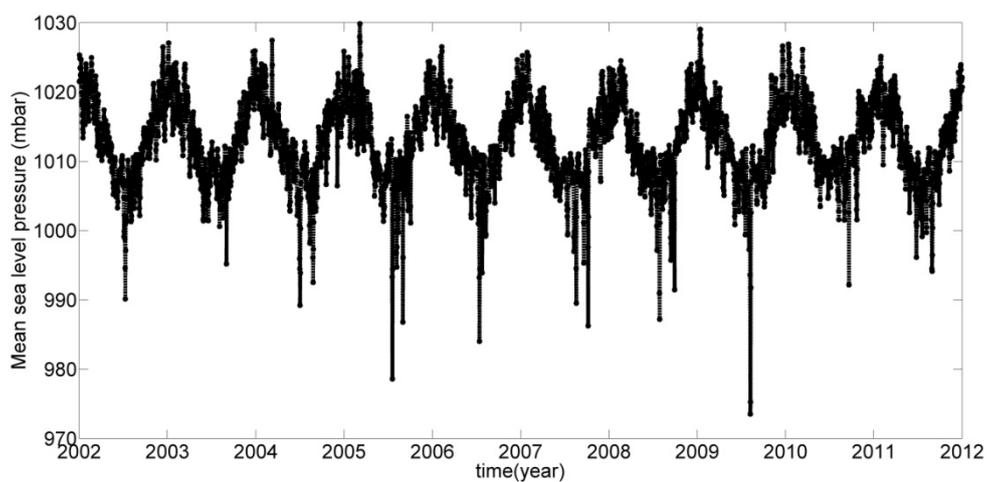
附圖 5-56 成功海水面氣壓觀測站資料



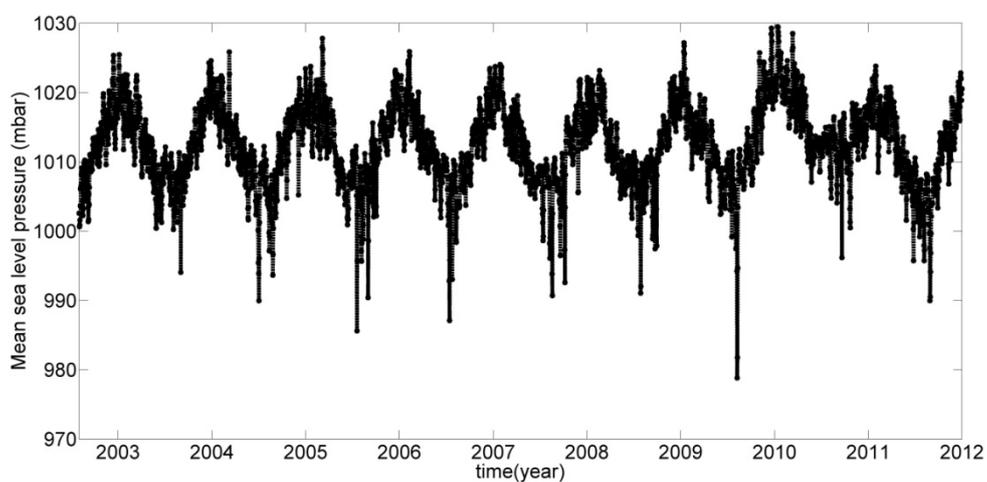
附圖 5-57 蘭嶼海水面氣壓觀測站資料



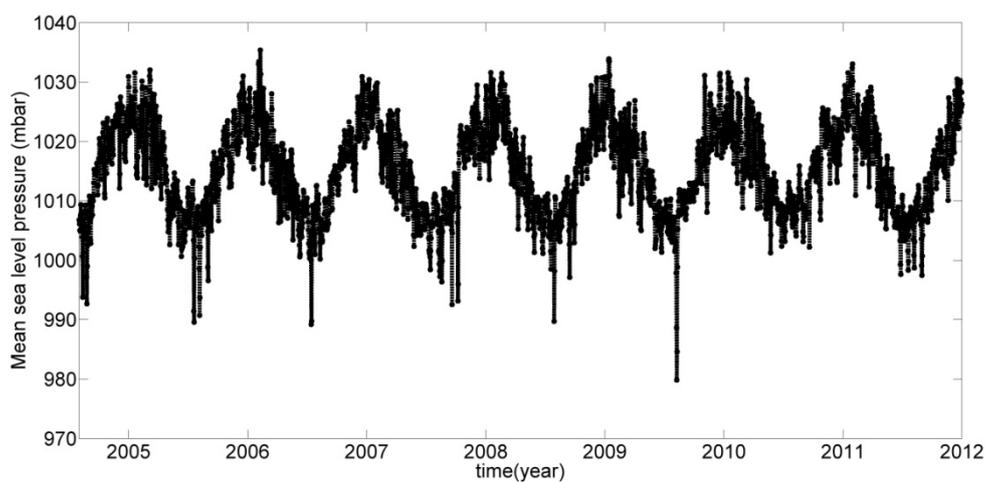
附圖 5-58 臺東海水面氣壓觀測站資料



附圖 5-59 梧棲海水面氣壓觀測站資料



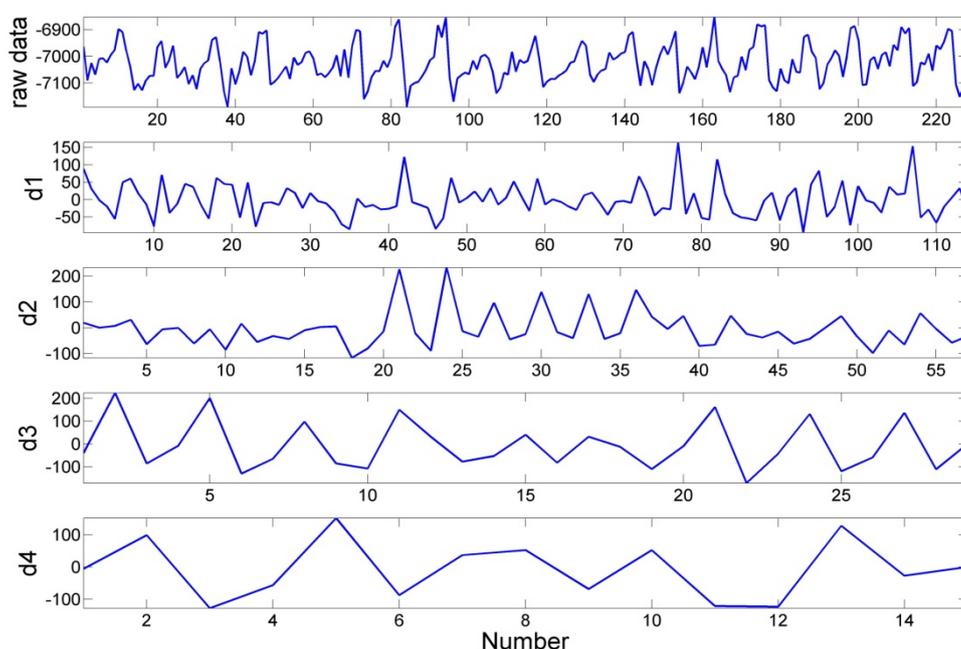
附圖 5-60 七股海水面氣壓觀測站資料



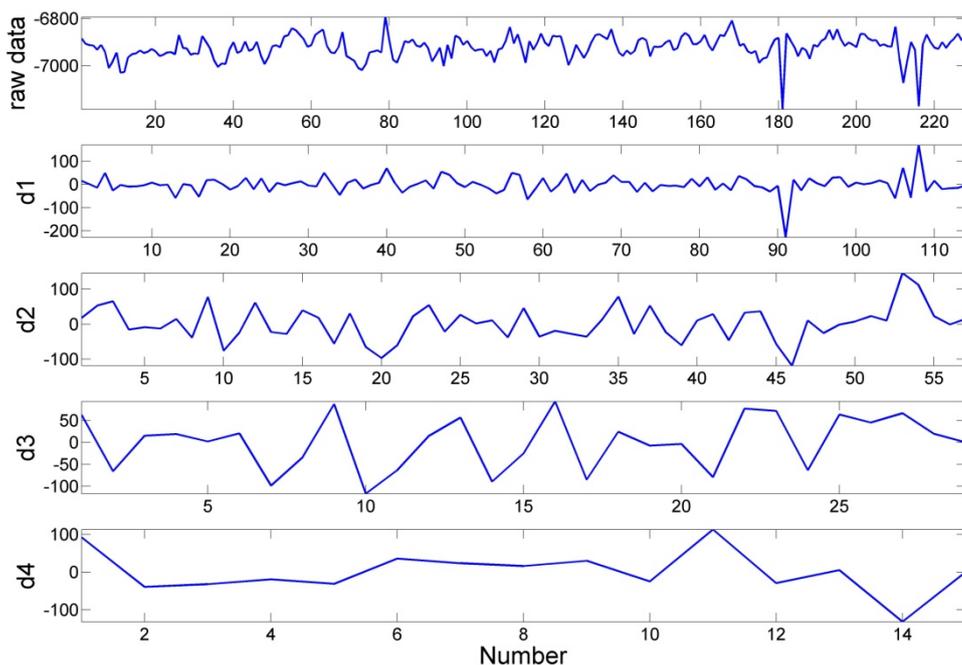
附圖 5-61 馬祖海水面氣壓觀測站資料

## 附錄六 驗潮站資料偏移量偵測與改正

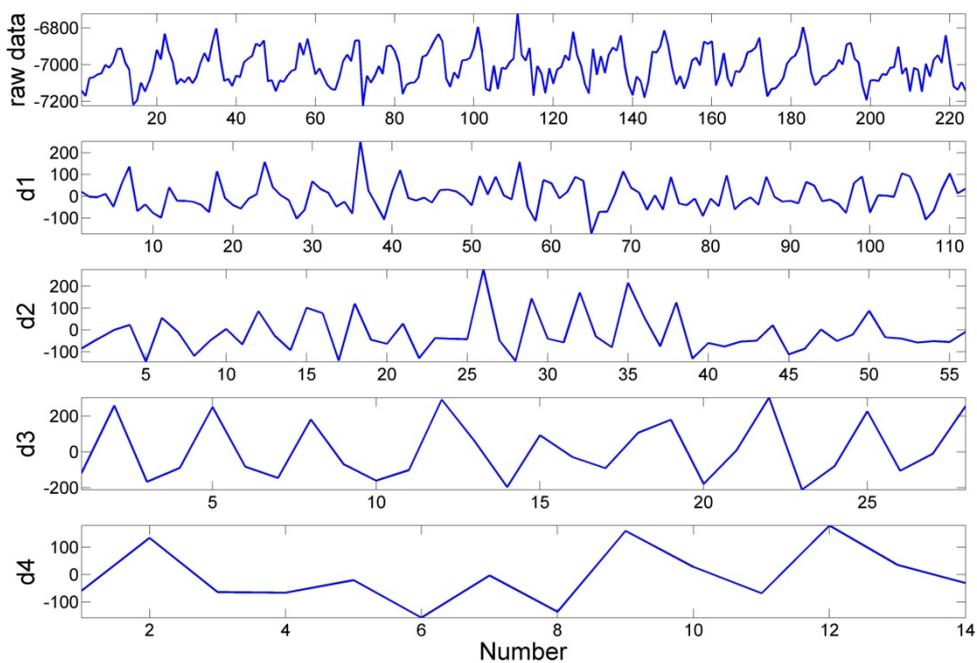
附錄六展示利用 Haar 小波分解已移除海水面變化等訊號的驗潮站資料，分解出 4 個高頻訊號(d1-d4)，由 d1-d4 層皆偵測出訊號中是否含有偏移量。以下分解的訊號皆已進行海潮改正、ECMWF 資料的 IB 效應改正以及結合衛星測高資料移除海水面變化訊號。因為 AVISO 與 RADs 衛星測高資料偵測結果大致相同，且使用不同範圍(2°、3°、5°)衛星測高資料偵測結果大致相同，以下僅展示臺灣附近的驗潮站資料應用 AVISO 衛星測高 5° 資料之偏移量偵錯成果，其他地區的驗潮站資料則應用 AVISO 衛星測高 2° 資料之偏移量偵錯成果。另外，目前偵測出有偏移量情形的驗潮站分別為 PSMSL 與 UHSLC 的基隆驗站以及 PSMSL、UHSLC 與 CWB 的高雄驗潮站，然而基隆驗潮站發生偏移量的時間點並未在研究時間(2002-2011 年)範圍內，對於本研究成果並無影響，因此本附錄中僅展示各資料中心之高雄驗潮站的偏移量改正成果。



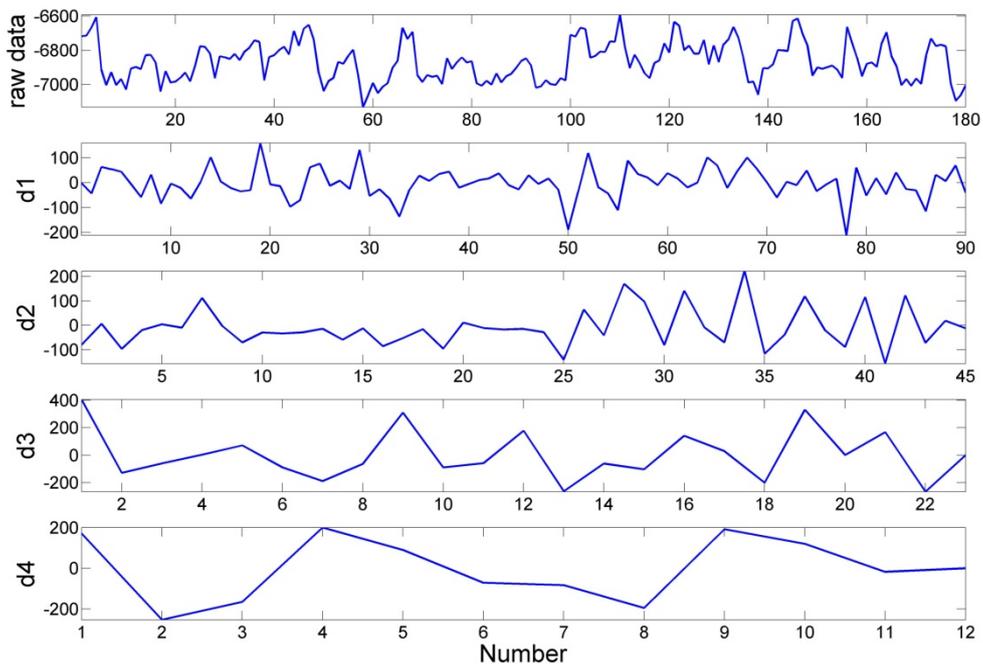
附圖 6-1 小波分解已移除海水面變化等訊號的 PSMSL 開坡驗潮站資料



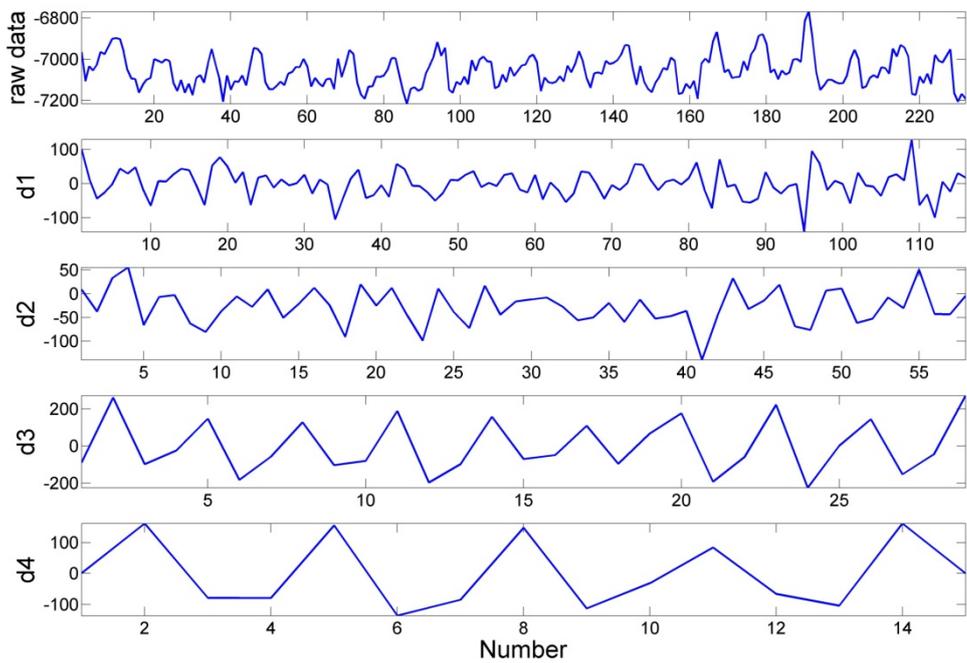
附圖 6-2 小波分解已移除海水面變化等訊號的 PSMSL 西沙驗潮站資料



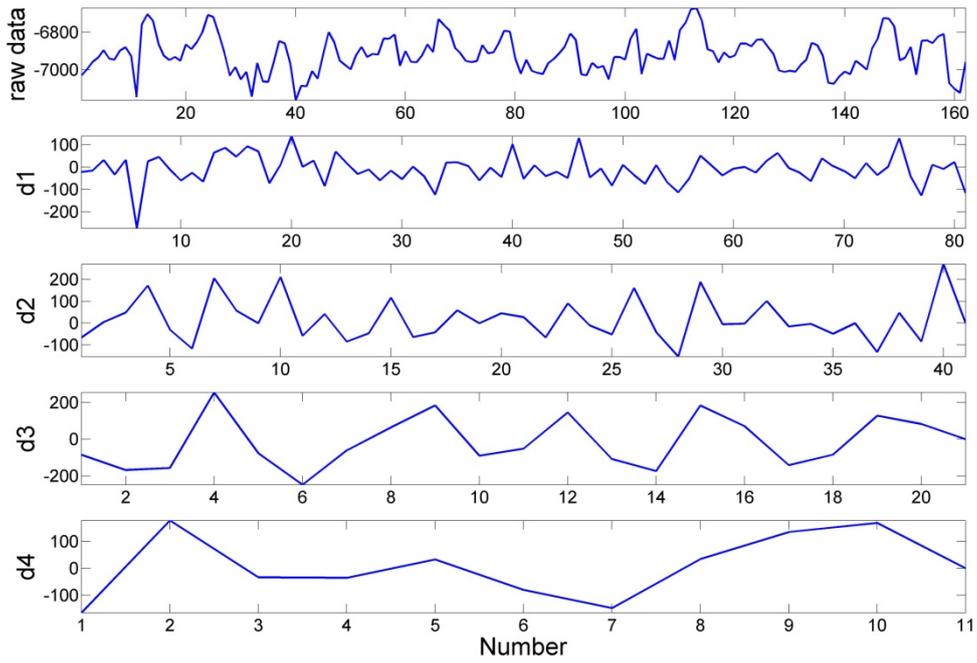
附圖 6-3 小波分解已移除海水面變化等訊號的 PSMSL 坎門驗潮站資料



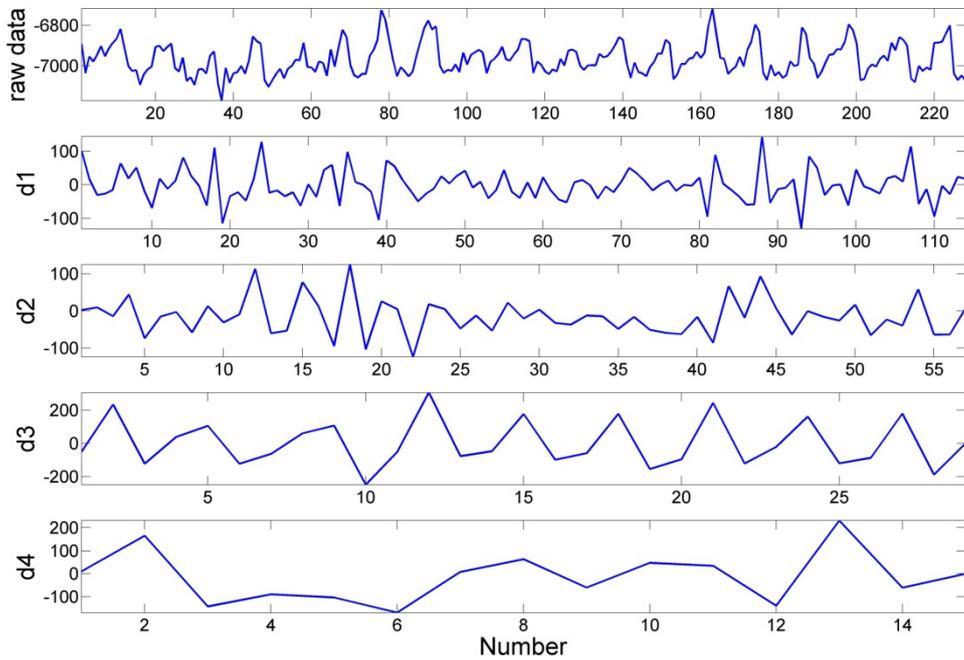
附圖 6-4 小波分解已移除海水面變化等訊號的 PSMSL 橫瀾島驗潮站資料



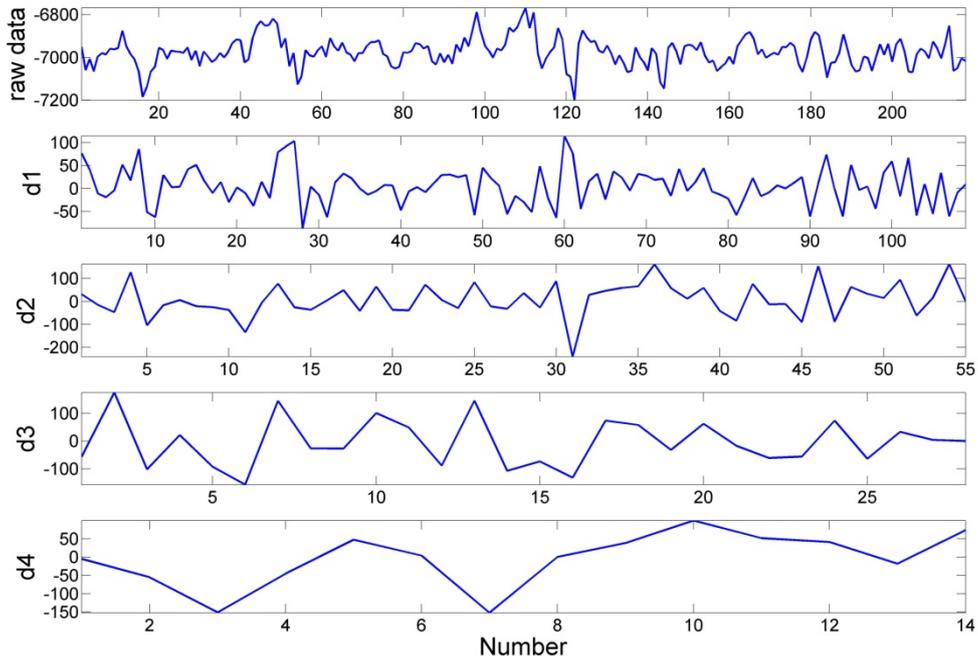
附圖 6-5 小波分解已移除海水面變化等訊號的 PSMSL 鯽魚涌驗潮站資料



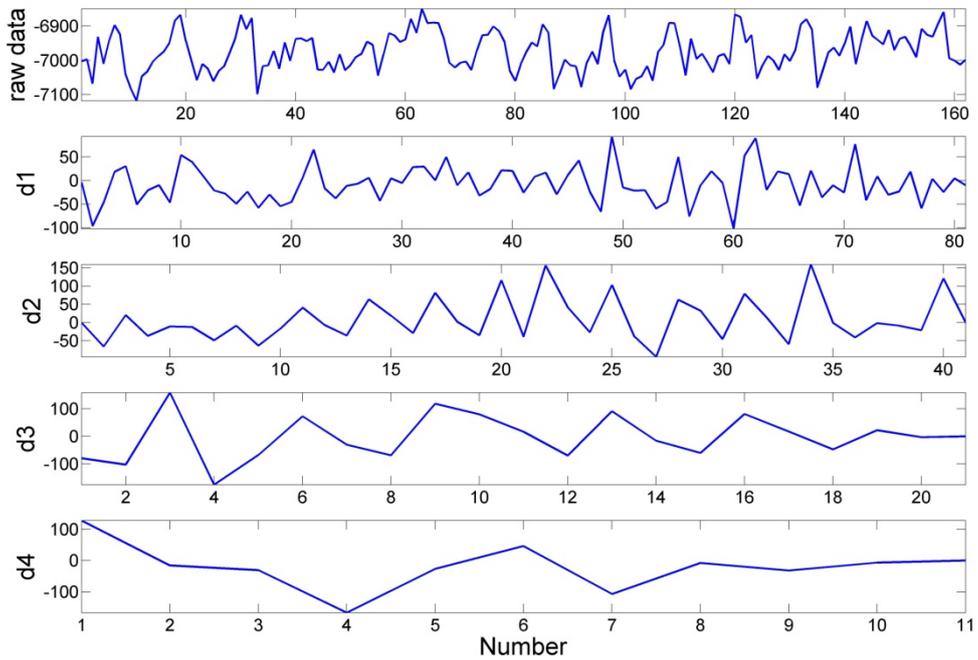
附圖 6-6 小波分解已移除海水面變化等訊號的 PSMSL 大廟灣驗潮站資料



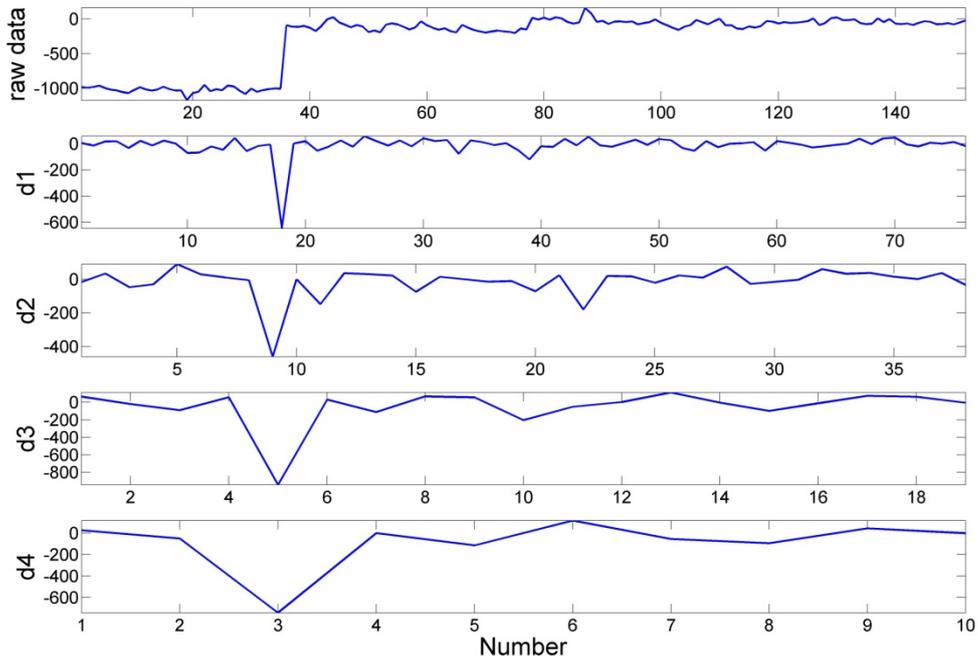
附圖 6-7 小波分解已移除海水面變化等訊號的 PSMSL 大浦滘驗潮站資料



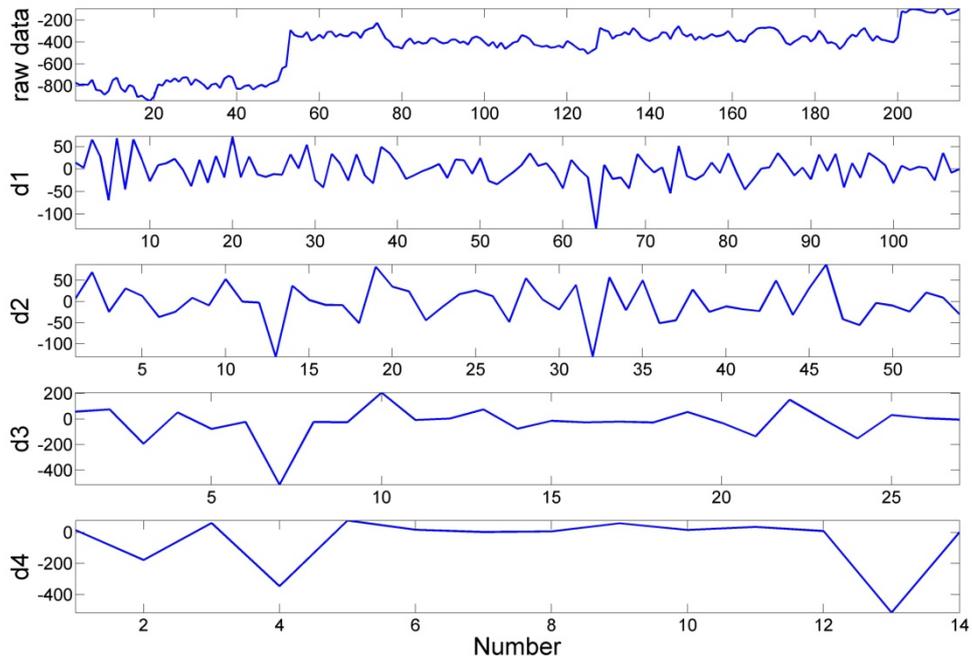
附圖 6-8 小波分解已移除海水面變化等訊號的 PSMSL 尖鼻咀驗潮站資料



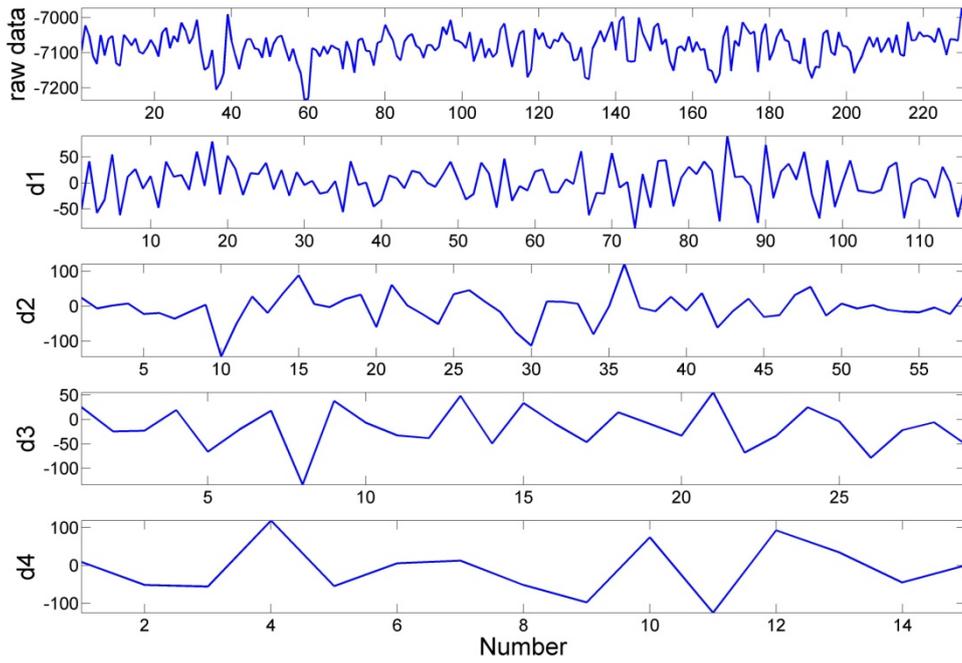
附圖 6-9 小波分解已移除海水面變化等訊號的 PSMSL 石壁驗潮站資料



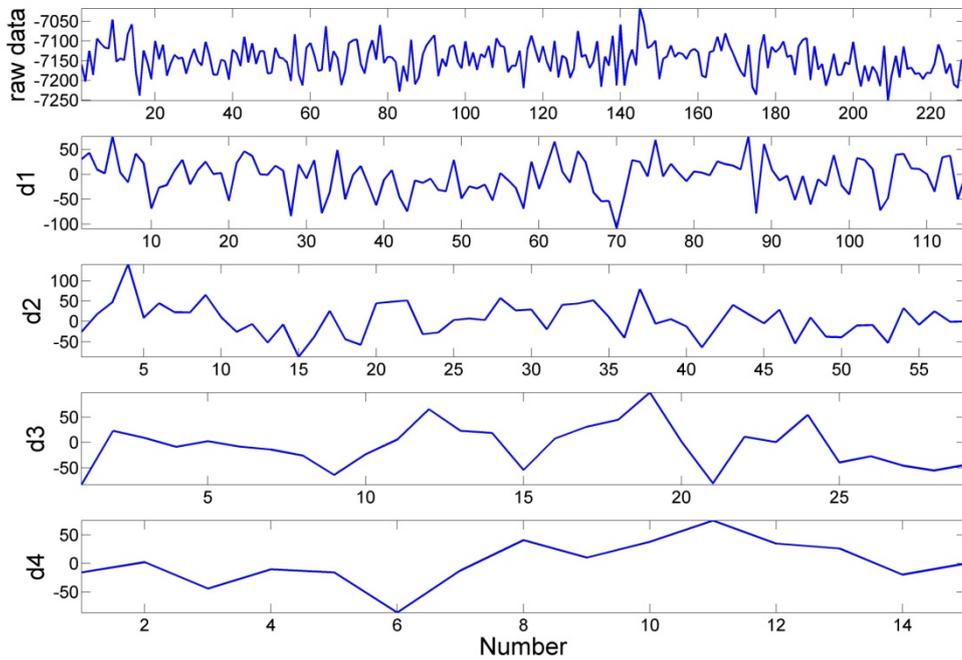
附圖 6-10 小波分解已移除海水面變化等訊號的 PSMSL 基隆驗潮站資料



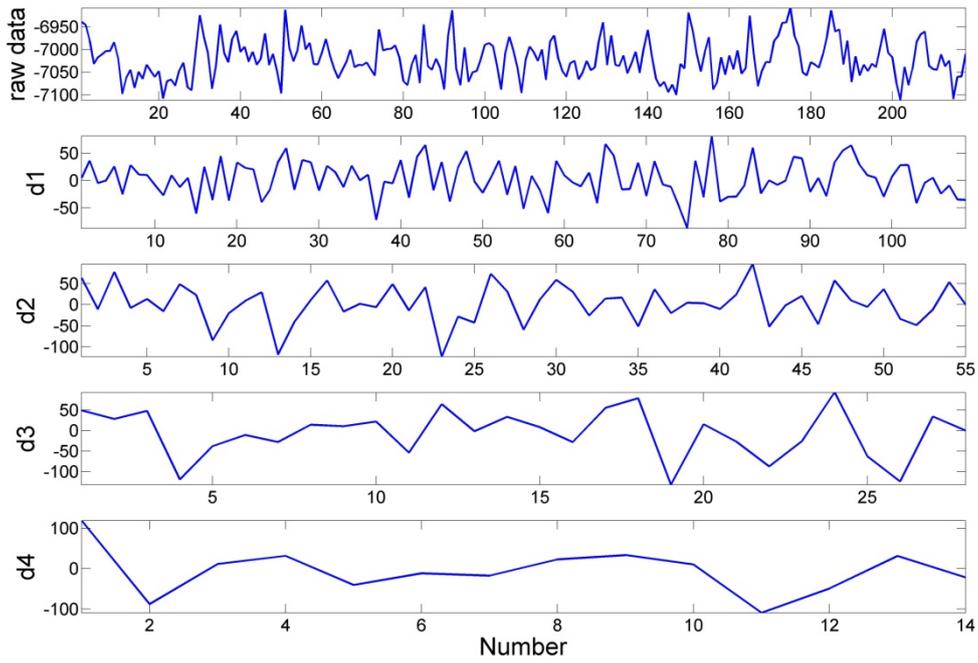
附圖 6-11 小波分解已移除海水面變化等訊號的 PSMSL 高雄驗潮站資料



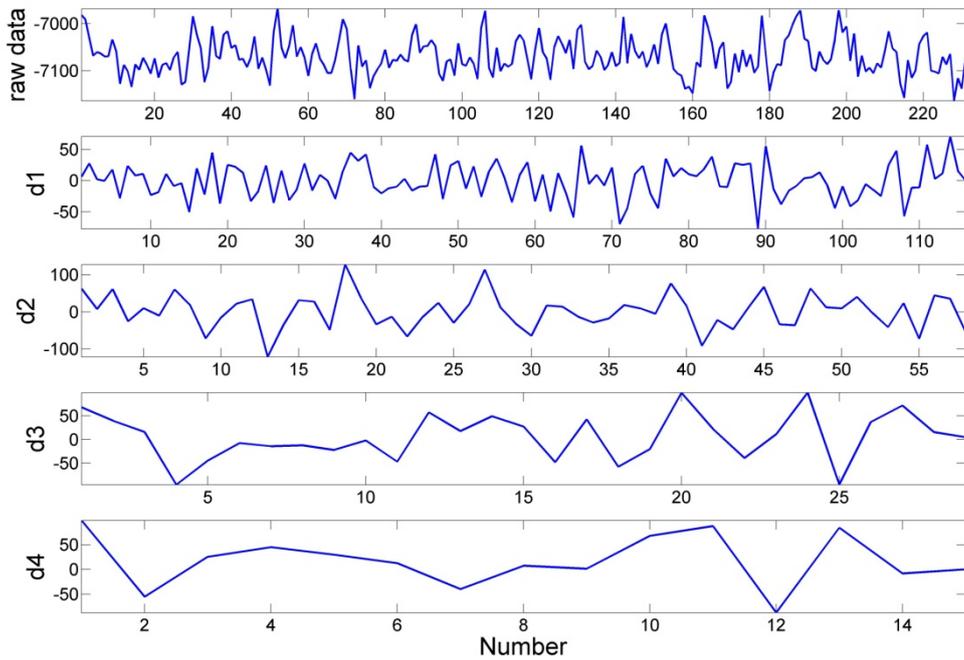
附圖 6-12 小波分解已移除海水面變化等訊號的 PSMSL 內斯驗潮站資料



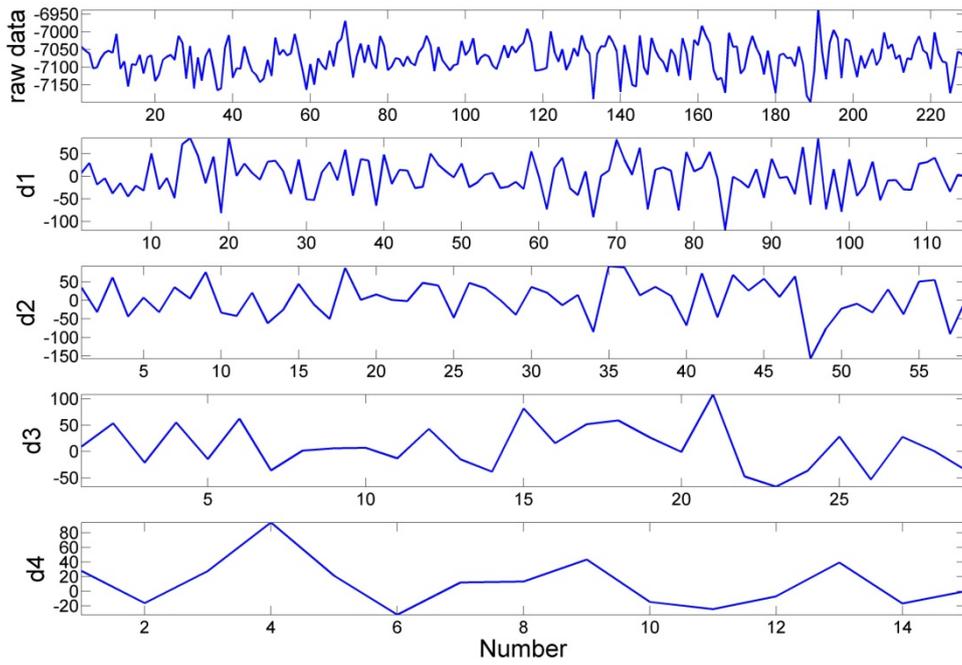
附圖 6-13 小波分解已移除海水面變化等訊號的 PSMSL 中之島驗潮站資料



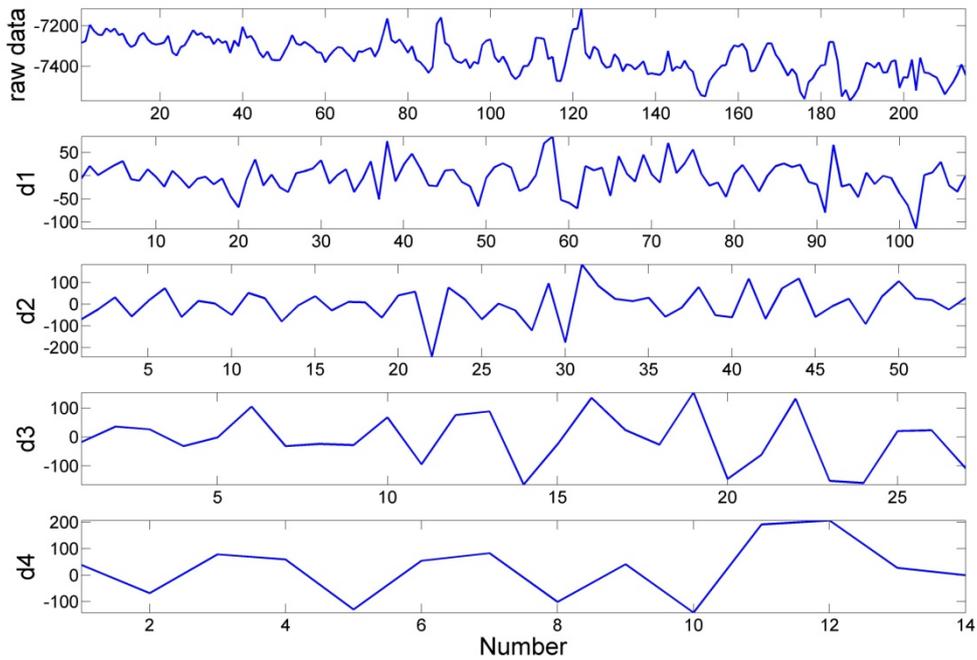
附圖 6-14 小波分解已移除海水面變化等訊號的 PSMSL 沖繩驗潮站資料



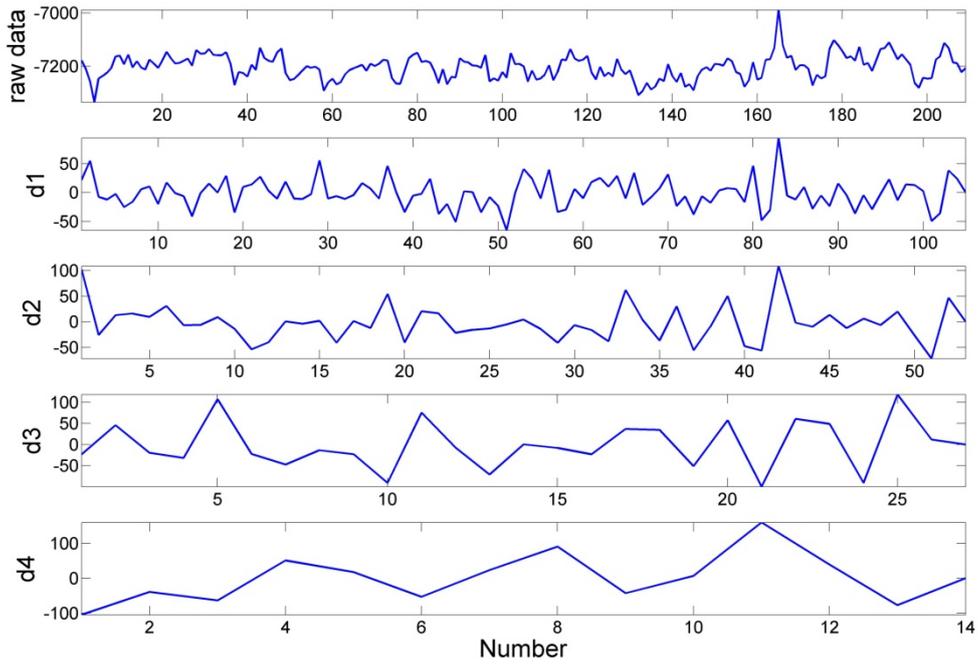
附圖 6-15 小波分解已移除海水面變化等訊號的 PSMSL 那霸驗潮站資料



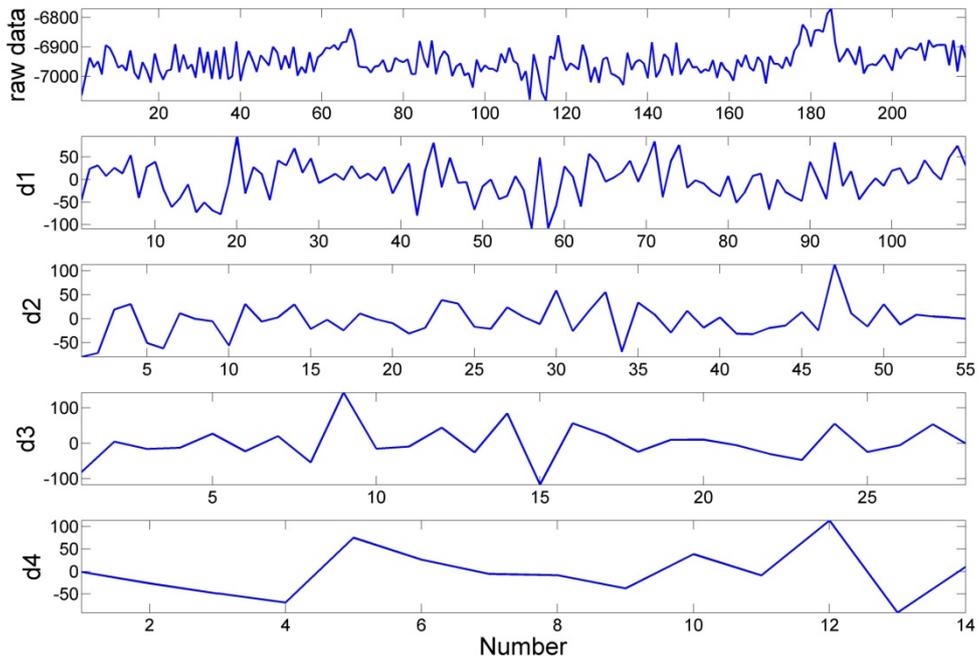
附圖 6-16 小波分解已移除海水面變化等訊號的 PSMSL 石垣島驗潮站資料



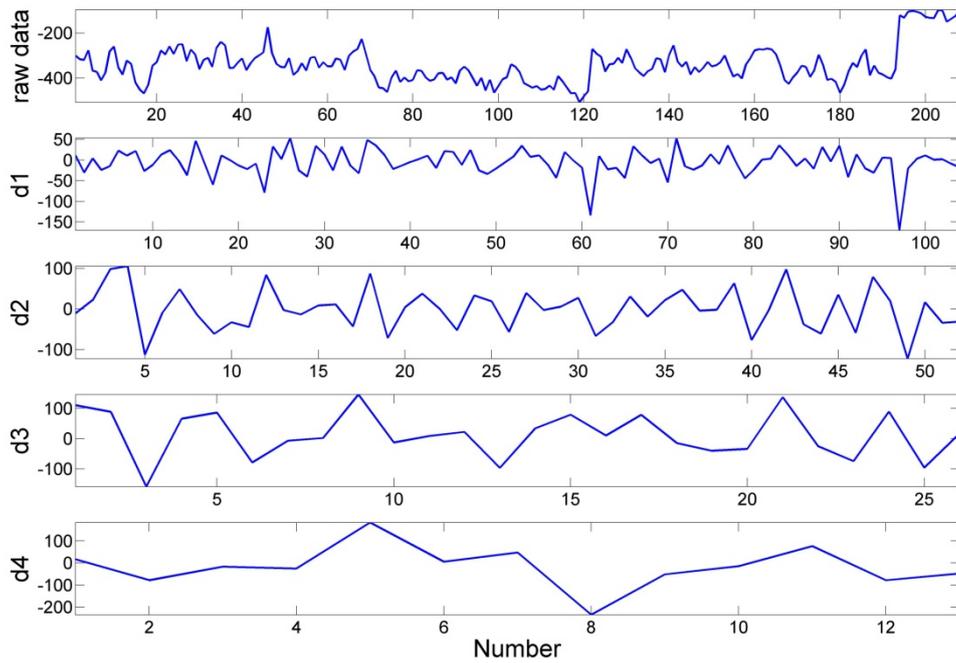
附圖 6-17 小波分解已移除海水面變化等訊號的 PSMSL 馬尼拉驗潮站資料



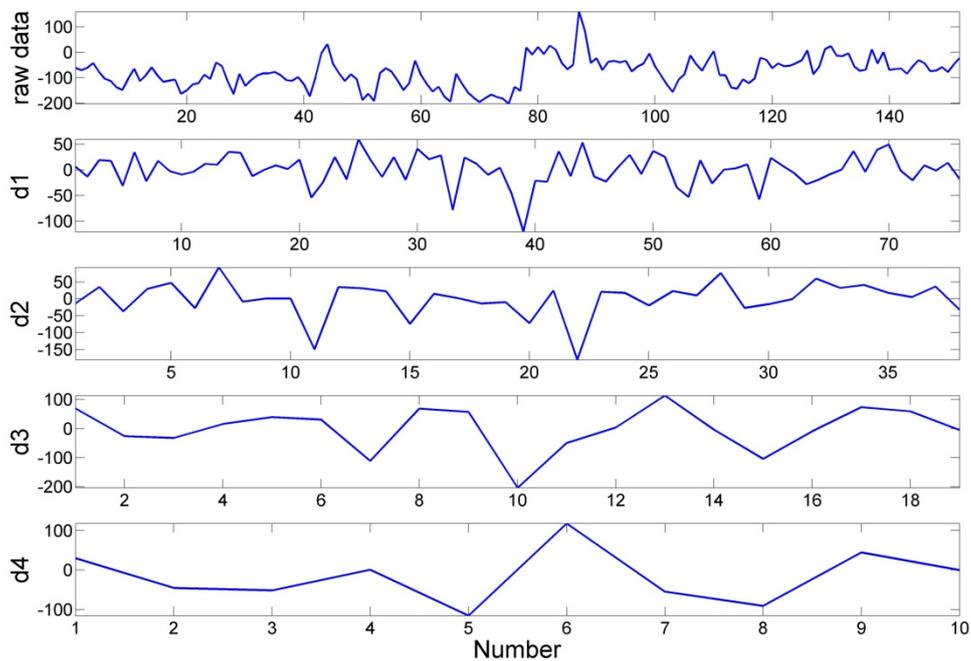
附圖 6-18 小波分解已移除海水面變化等訊號的 PSMSL 黎牙實比驗潮站資料



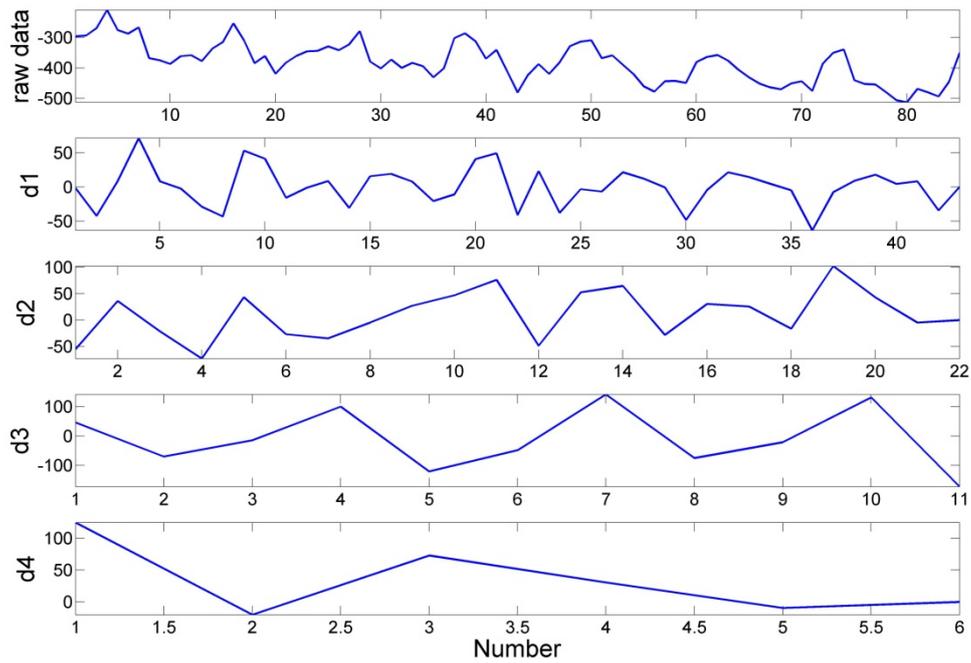
附圖 6-19 小波分解已移除海水面變化等訊號的 PSMSL 宿霧驗潮站資料



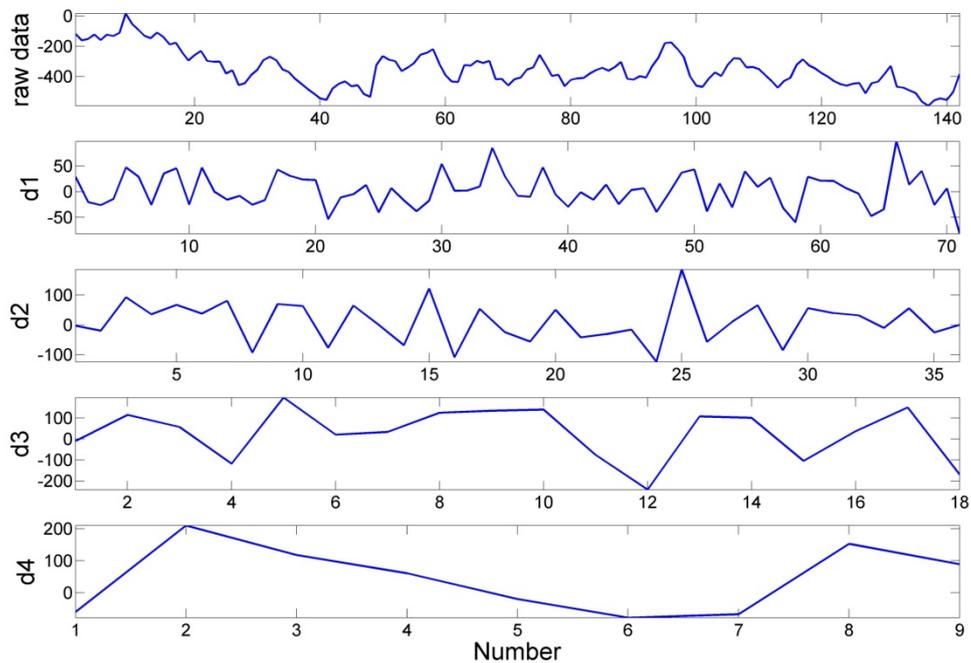
附圖 6-20 小波分解已移除海水面變化等訊號的 UHSLC 高雄驗潮站資料



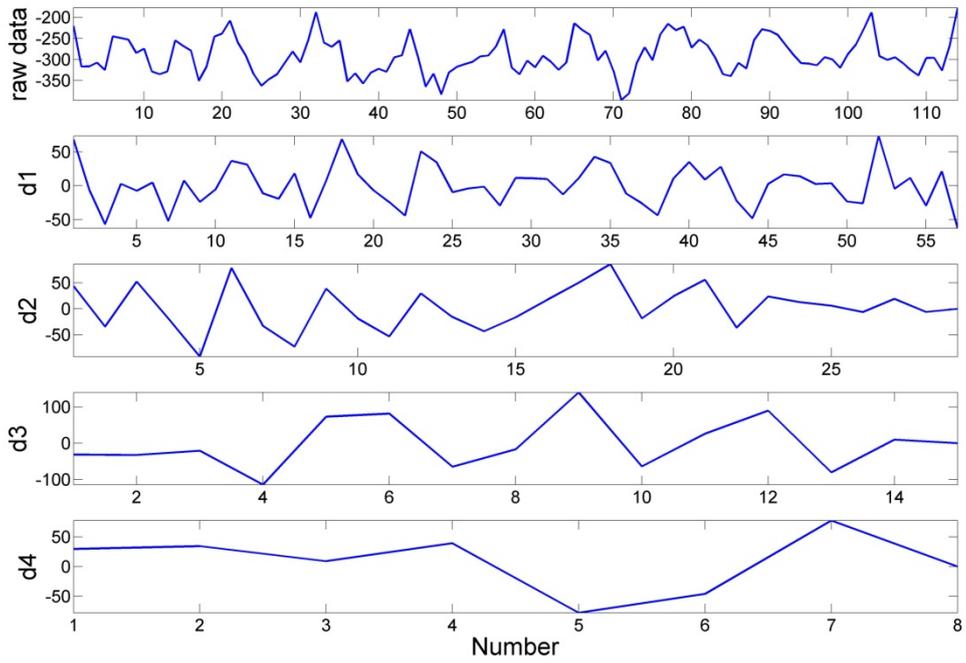
附圖 6-21 小波分解已移除海水面變化等訊號的 UHSLC 基隆驗潮站資料



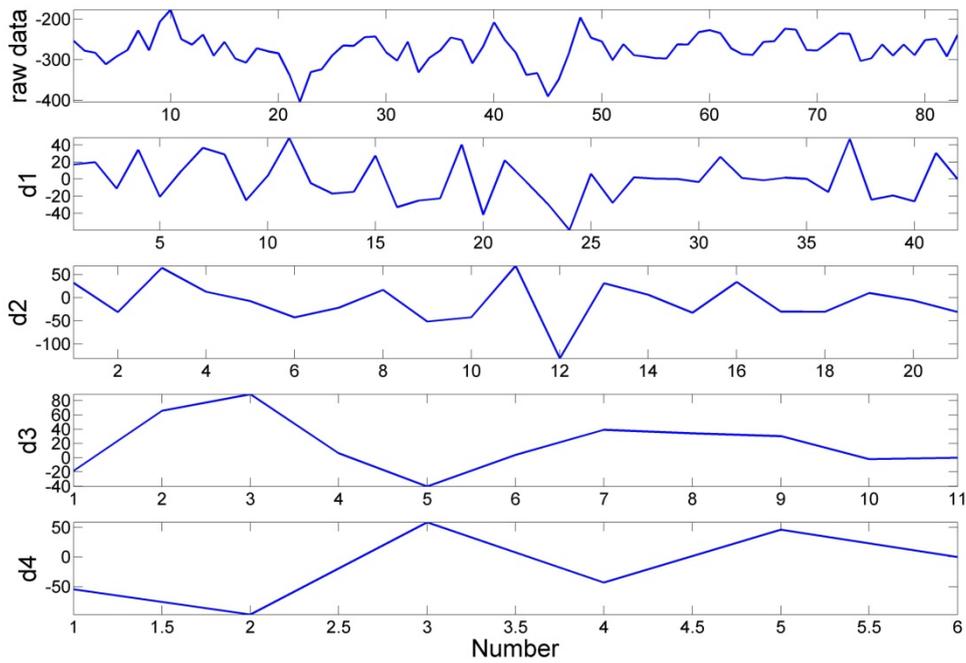
附圖 6-22 小波分解已移除海水面變化等訊號的 CWB 箔子寮驗潮站資料



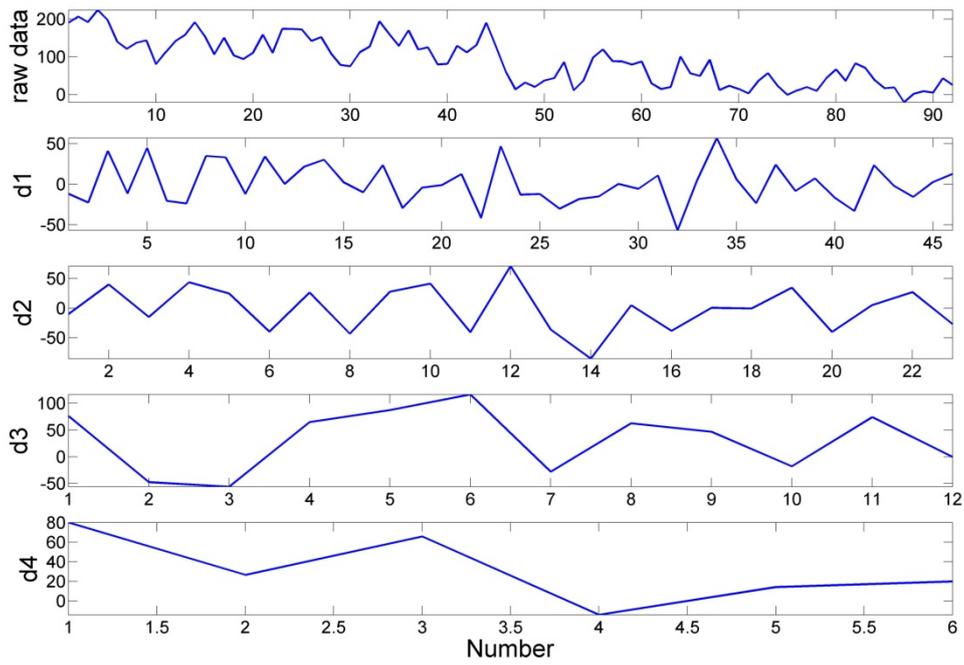
附圖 6-23 小波分解已移除海水面變化等訊號的 CWB 東石驗潮站資料



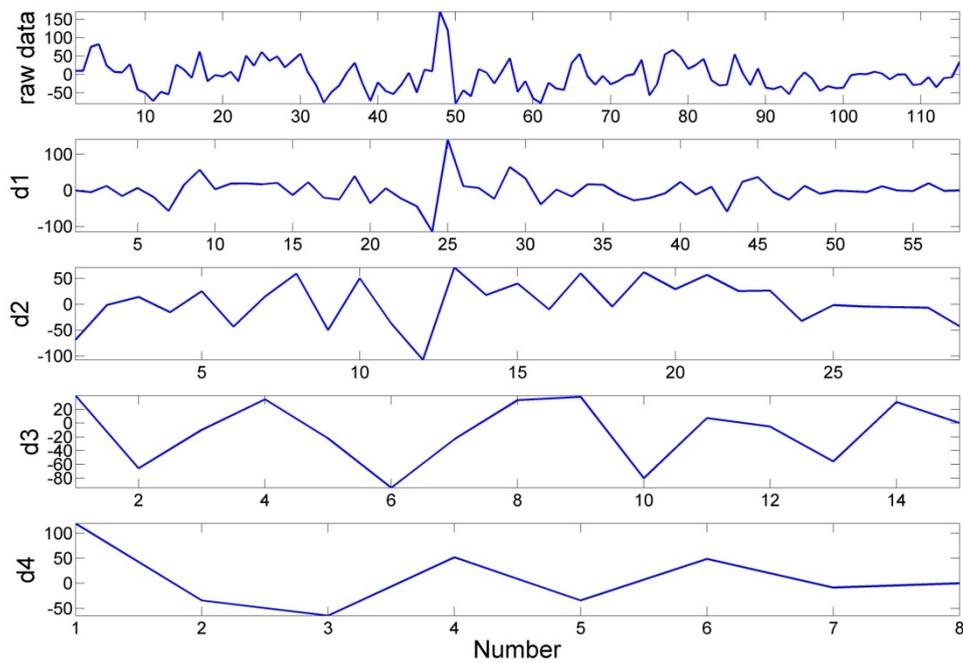
附圖 6-24 小波分解已移除海水面變化等訊號的 CWB 將軍驗潮站資料



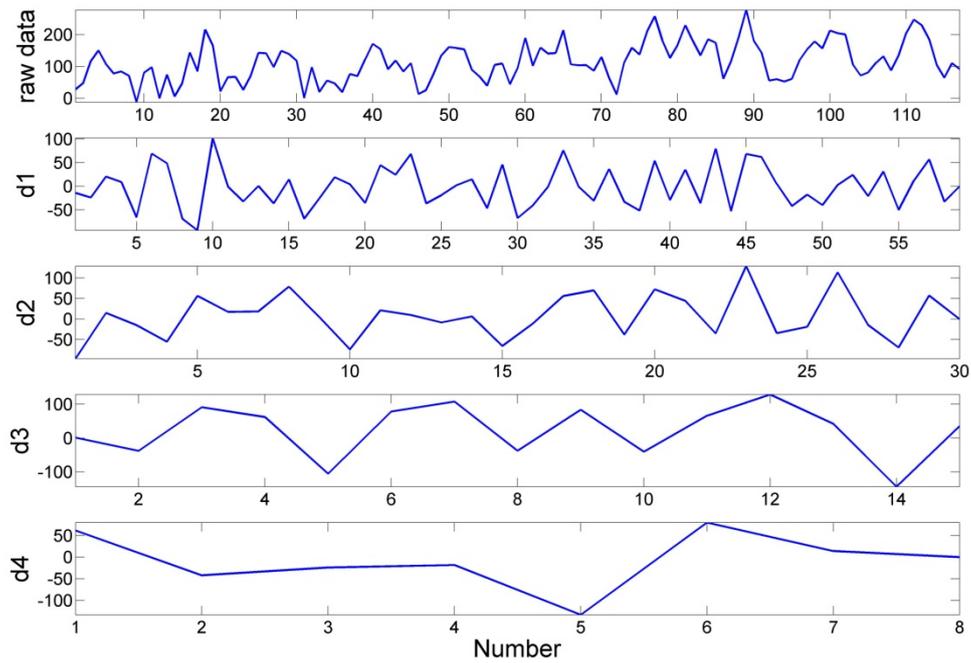
附圖 6-25 小波分解已移除海水面變化等訊號的 CWB 東港驗潮站資料



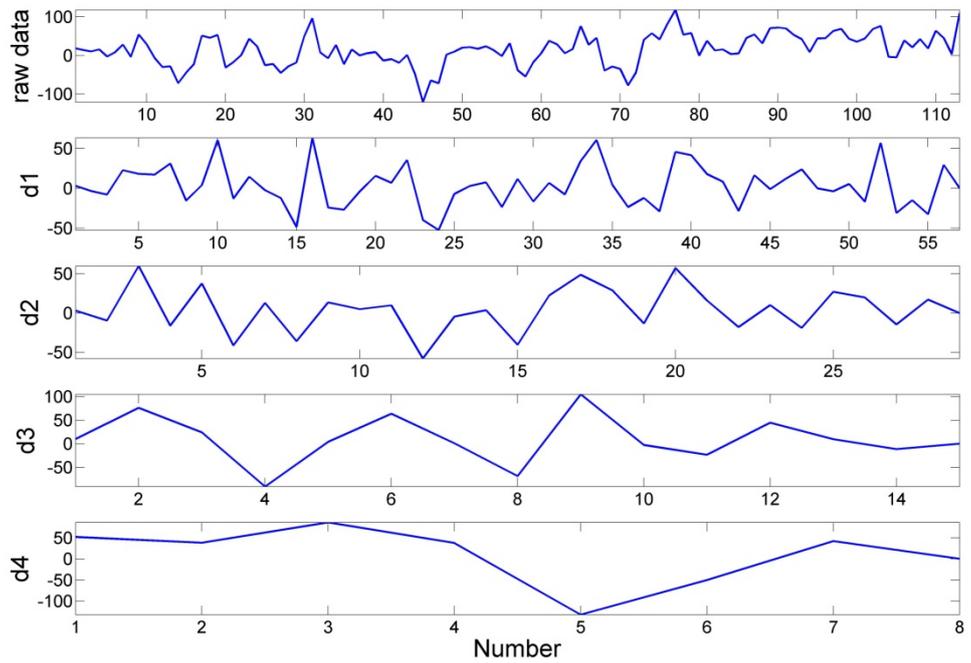
附圖 6-26 小波分解已移除海水面變化等訊號的 CWB 麟山鼻驗潮站資料



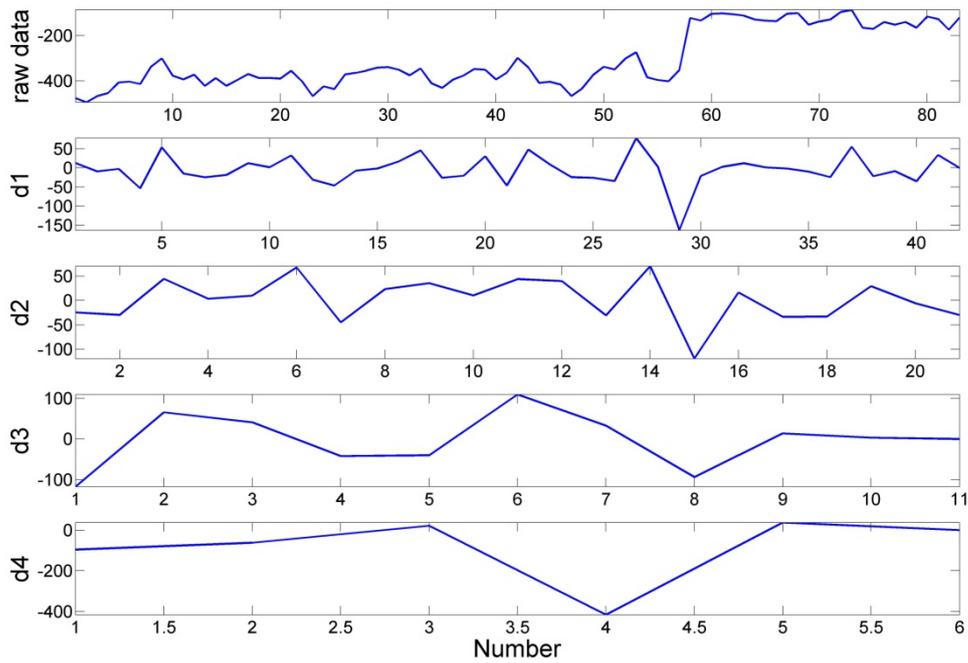
附圖 6-27 小波分解已移除海水面變化等訊號的 CWB 龍洞驗潮站資料



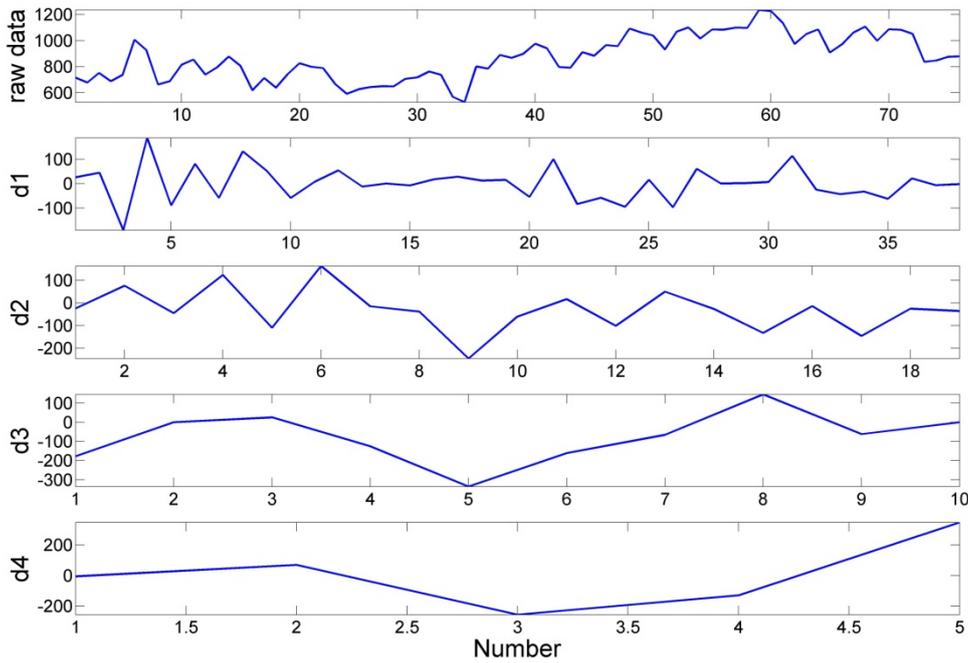
附圖 6-28 小波分解已移除海水面變化等訊號的 CWB 成功驗潮站資料



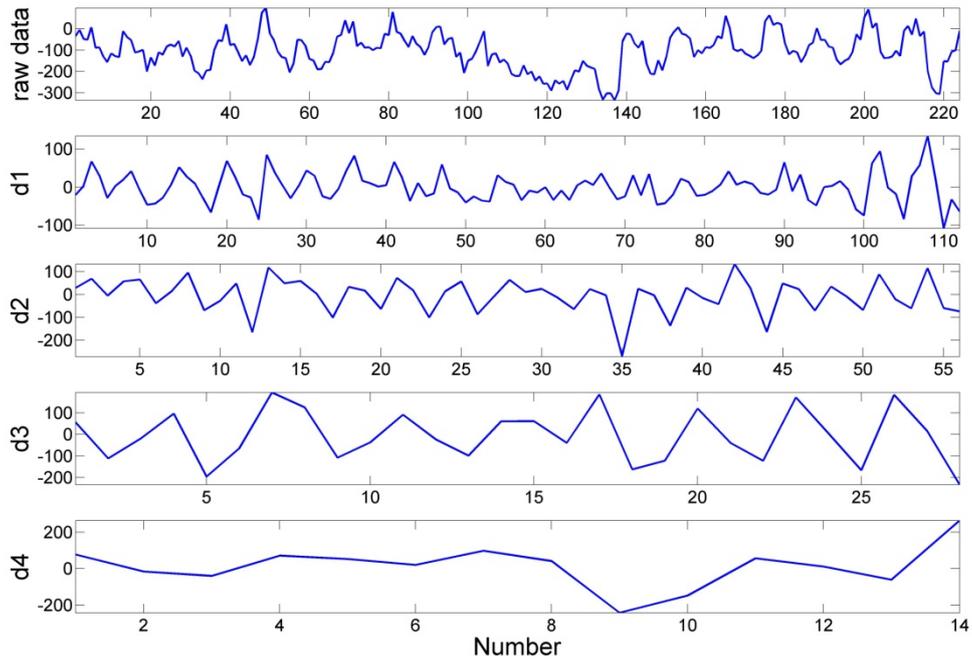
附圖 6-29 小波分解已移除海水面變化等訊號的 CWB 小琉球驗潮站資料



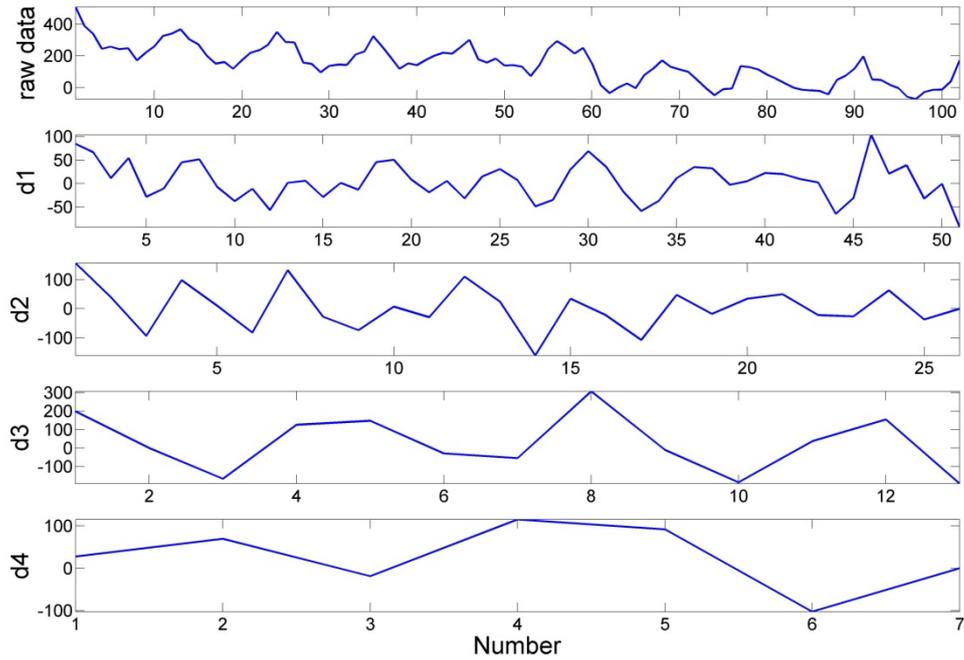
附圖 6-30 小波分解已移除海水面變化等訊號的 CWB 高雄驗潮站資料



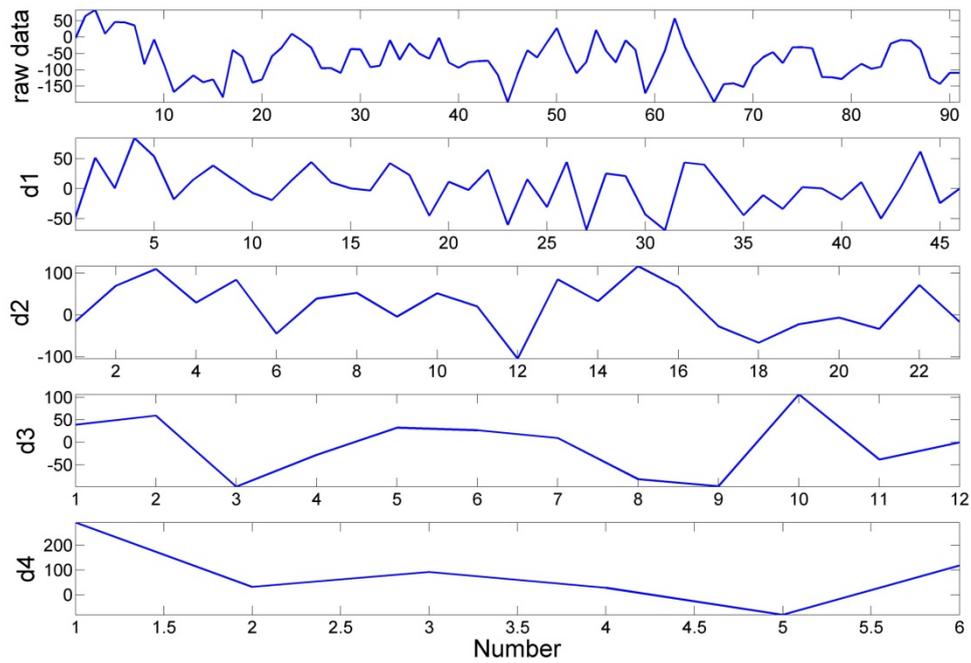
附圖 6-31 小波分解已移除海水面變化等訊號的 CWB 馬祖驗潮站資料



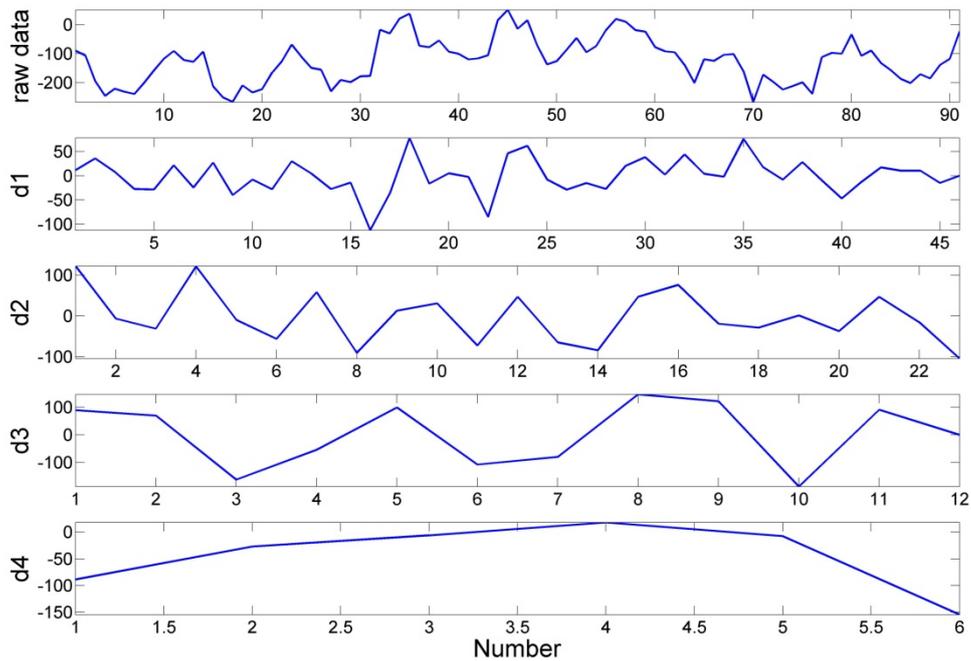
附圖 6-32 小波分解已移除海水面變化等訊號的 CWB 新竹驗潮站資料



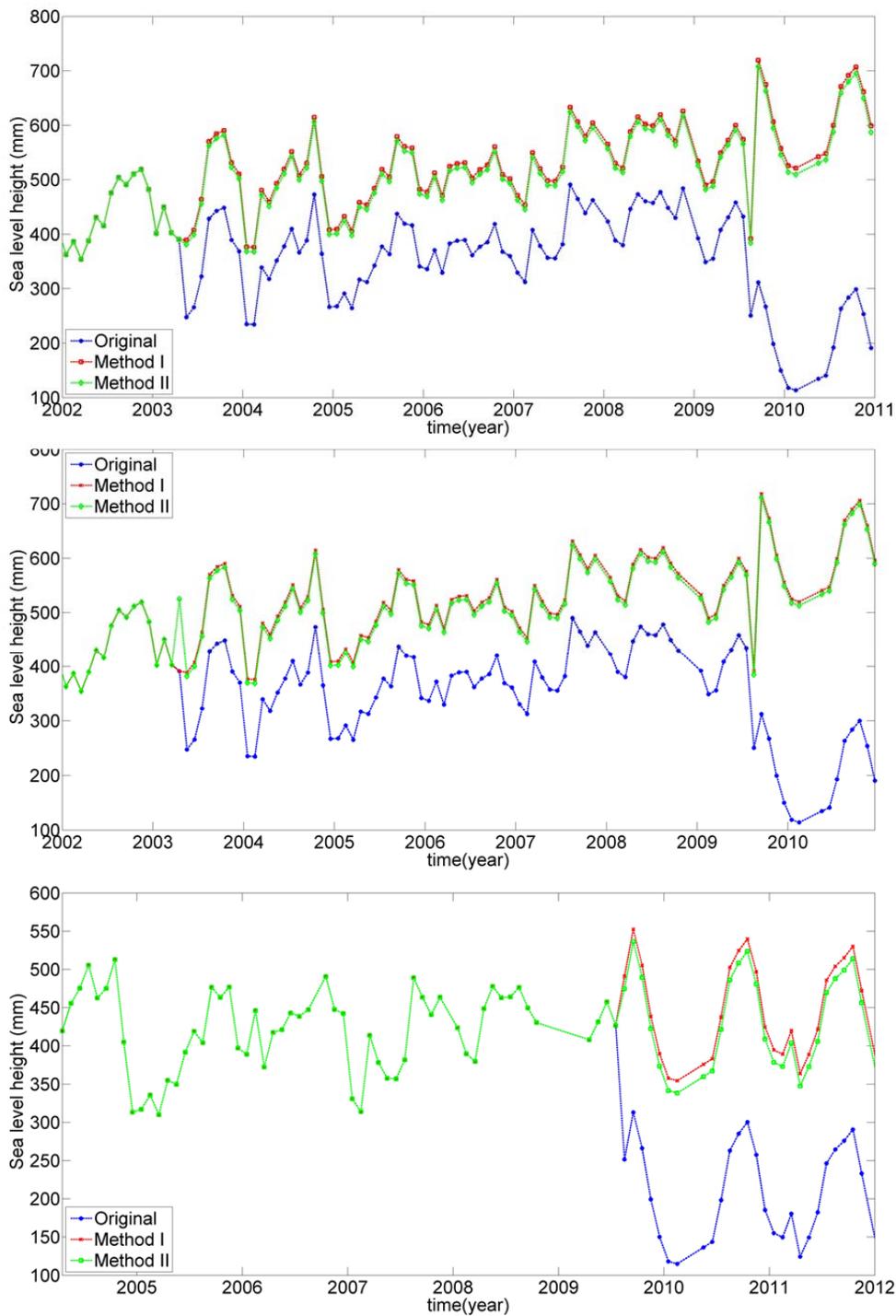
附圖 6-33 小波分解已移除海水面變化等訊號的 CWB 塭港驗潮站資料



附圖 6-34 小波分解已移除海水面變化等訊號的 CWB 花蓮驗潮站資料



附圖 6-35 小波分解已移除海水面變化等訊號的 CWB 台中港驗潮站資料



附圖 6-36 高雄驗潮站資料之偏移量改正。上圖: PSMSL 高雄驗潮站(原始資料中包含兩個偏移量), 中圖: UHSLC 高雄驗潮站(原始資料中包含兩個偏移量), 下圖: CWB 高雄驗潮站(原始資料中包含一個偏移量)

## 附錄七 地殼變動速率

附表 7-1 比較本研究估算的臺灣附近驗潮站地殼變動速率與 GPS 和水準測量成果。本表為對應本文中圖 4.14，表中各驗潮站採用 5<sup>o</sup> 衛星測高資料

Station Name	Trend (mm/yr)			
	AVISO-TG	RADs-TG	GPS (2000-2008) [Ching <i>et al.</i> , 2011]	Levelling (2000-2008) [Chen <i>et al.</i> , 2011]
Boziliao	-20.99±2.44	-23.71±2.45	-32.66±0.58	-24.48±1.55
Taichung Port	4.89±3.43	2.22±3.51	-3.23±0.32	0.99±1.28
Hsinchu	14.86±2.79	12.46±2.85	-3.62±0.37	1.31±1.36
Linshanbi	-20.74±1.58	-21.93±1.58	-1.01±0.52	0.33±1.72
Longdong	-0.55±1.15	-1.79±1.14	-2.24±0.48	-0.23±1.72
Hualien	-6.12±2.70	-7.39±2.72	5.95±0.43	3.56±1.82
Chenggong	8.69±1.79	7.24±1.82	2.69±0.60	17.47±2.01
Liuchiu	5.41±1.19	3.38±1.19	1.32±0.33	-9.04±1.31
Donggang	1.29±1.58	-1.36±1.61	1.32±0.33	-9.04±1.31
Jiangjun	1.33±1.45	-0.77±1.48	-9.46±0.27	-10.43±1.27
Wengang	-33.92±2.85	-36.09±2.90	-32.15±0.47	-27.12±1.11
Dongshi	-5.27±2.79	-7.28±2.82	-32.15±0.47	-57.39±1.28
Kaohsiung (CWB)	8.47±1.87	6.18±1.94	-3.19±0.39	0.44±1.37
Kaohsiung (PSMSL)	-8.80±1.47	-11.03±1.50	-3.19±0.39	1.20±1.44
Keelung (PSMSL)	-3.90±2.44	-5.15±2.41	-1.95±0.34	-0.34±0.96

附表 7-2 PSMSL 驗潮站之地殼變動速率。表中驗潮站採用 NCEP 氣壓資料進行 IB 改正

(a) 結合 AVISO 衛星測高與驗潮站資料估算之地殼變動速率

Station name	Vertical motion (mm/yr)		
	2°	3°	5°
Zhapo	2.18±2.16	2.91±2.50	2.80±3.05
Xi Sha	0.04±1.28	0.60±1.62	-0.80±2.44
Kanmen	-4.54±2.86	-4.54±2.96	-4.69±3.04
Waglan Island	-2.11±3.80	-1.03±4.12	0.80±4.77
Quarry Bay	-0.74±2.38	0.17±2.96	2.07±3.47
Tai Miu Wan	-3.79±2.96	-2.50±3.35	-0.01±3.96
Tai Po Kau	0.46±2.26	1.16±2.98	3.19±3.45
Tsim Bei Tsui	-5.83±2.12	-4.36±2.69	-2.73±3.02
Shek Pik	1.10±1.77	2.17±2.48	3.52±2.90
Nase	1.52±1.42	0.99±1.52	1.08±1.55
Nakano Sima	-3.17±1.24	-2.58±1.36	-2.44±1.45
Okinawa	-0.22±1.37	0.53±1.52	-0.32±1.57
Naha	-2.26±1.31	-1.54±1.48	-2.26±1.56
Ishigaki	-0.65±1.59	-1.60±1.83	-0.74±2.00
Manila	-11.51±2.47	-11.89±2.34	-13.13±2.34
Legaspi	6.07±1.61	6.32±1.63	7.65±1.70
Cebu	7.73±1.48	5.80±1.27	7.23±1.42

(b) 結合 RADs 衛星測高與驗潮站資料估算之地殼變動速率

Station name	Vertical motion (mm/yr)		
	2°	3°	5°
Zhapo	-0.24±2.27	0.58±2.58	1.84±3.74
Xi Sha	-1.34±1.27	-0.52±1.54	-0.22±2.00
Kanmen	-6.91±2.92	-6.24±3.03	-5.55±3.20
Waglan Island	-4.31±3.80	-2.72±4.14	-0.98±4.86
Quarry Bay	-3.25±2.39	-1.54±2.97	0.15±3.58
Tai Miu Wan	-6.15±2.92	-4.28±3.34	-1.78±4.04
Tai Po Kau	-2.11±2.25	-0.59±2.98	1.25±3.54
Tsim Bei Tsui	-8.57±2.10	-6.12±2.68	-4.69±3.07
Shek Pik	-1.72±1.72	0.40±2.49	1.66±3.03
Nase	0.93±1.11	0.50±1.20	1.01±1.53
Nakano Sima	-2.04±1.66	-2.78±1.66	-3.35±1.58
Okinawa	-0.58±1.42	-0.01±1.53	-0.65±1.69
Naha	-2.66±1.36	-2.14±1.48	-2.69±1.66
Ishigaki	-1.97±1.64	-3.10±1.84	-2.04±2.00
Manila	-12.67±2.42	-13.82±2.36	-14.83±2.35
Legaspi	3.43±1.68	3.15±1.61	4.48±1.76
Cebu	x	0.76±1.52	2.22±1.61

附表 7-3 PSMSL 基隆與高雄驗潮站之地殼變動速率。表中驗潮站分別應用 NCEP 與 CWB 氣壓資料進行 IB 校正

(a) 結合 AVISO 衛星測高與驗潮站資料估算之地殼變動速率

Station name	Vertical motion (mm/yr)					
	2°		3°		5°	
	NCEP	CWB	NCEP	CWB	NCEP	CWB
Keelung Method I	-5.38±2.95	-3.55±2.74	-6.02±2.75	-4.28±2.54	-4.11±2.53	-3.78±2.44
Keelung Method II	-5.38±2.95	-3.55±2.74	-6.02±2.75	-4.28±2.54	-4.11±2.53	-3.78±2.44
Kaohsiung Method I	-11.76±2.03	-12.13±2.02	-11.43±1.78	-11.80±1.78	-9.58±1.47	-9.96±1.46
Kaohsiung Method II	-11.29±2.02	-11.65±2.01	-11.67±1.78	-12.03±1.78	-8.61±1.47	-8.97±1.46

(b) 結合 RADs 衛星測高與驗潮站資料估算之地殼變動速率

Station name	Vertical motion (mm/yr)					
	2°		3°		5°	
	NCEP	CWB	NCEP	CWB	NCEP	CWB
Keelung Method I	-5.65±2.80	-5.32±2.73	-7.06±2.60	-6.74±2.53	-5.35±2.49	-5.03±2.42
Keelung Method II	-5.65±2.80	-5.32±2.73	-7.06±2.60	-6.74±2.53	-5.35±2.49	-5.03±2.42
Kaohsiung Method I	-14.47±2.17	-14.85±2.15	-14.55±1.88	-14.93±1.88	-11.50±1.50	-11.88±1.49
Kaohsiung Method II	-13.52±2.15	-13.88±2.14	-14.06±1.87	-14.42±1.87	-11.85±1.50	-11.21±1.49

附表 7-4 UHSLC 基隆與高雄驗潮站之地殼變動速率。表中驗潮站分別應用 NCEP 與 CWB 氣壓資料進行 IB 校正

(a) 結合 AVISO 衛星測高與驗潮站資料估算之地殼變動速率

Station name	Vertical motion (mm/yr)					
	2°		3°		5°	
	NCEP	CWB	NCEP	CWB	NCEP	CWB
Keelung Method I	-5.31±2.95	-3.47±2.74	-6.04±2.75	-4.31±2.55	-4.14±2.53	-3.81±2.45
Keelung Method II	-5.31±2.95	-3.47±2.74	-6.04±2.75	-4.31±2.55	-4.14±2.53	-3.81±2.45
Kaohsiung Method I	-12.01±1.99	-12.42±1.99	-11.41±1.80	-11.81±1.81	-9.54±1.48	-9.94±1.47
Kaohsiung Method II	-9.67±2.07	-11.98±1.98	-11.08±1.90	-12.28±1.81	-8.37±1.57	-9.42±1.47

(b) 結合 RADs 衛星測高與驗潮站資料估算之地殼變動速率

Station name	Vertical motion (mm/yr)					
	2°		3°		5°	
	NCEP	CWB	NCEP	CWB	NCEP	CWB
Keelung Method I	-5.67±2.80	-5.35±2.73	-7.07±2.61	-6.75±2.54	-5.39±2.50	-5.07±2.43
Keelung Method II	-5.67±2.80	-5.35±2.73	-7.07±2.61	-6.75±2.54	-5.39±2.50	-5.07±2.43
Kaohsiung Method I	-14.61±2.12	-15.01±2.11	-14.54±1.90	-14.95±1.91	-15.01±2.11	-11.83±1.50
Kaohsiung Method II	-13.53±2.11	-13.94±2.10	-14.25±1.89	-14.65±1.90	-11.18±1.51	-11.59±1.50

附表 7-5 CWB 驗潮站之地殼變動速率。表中驗潮站分別應用 NCEP 與 CWB 氣壓資料進行 IB 校正

(a) 結合 AVISO 衛星測高與驗潮站資料估算之地殼變動速率

Station name	Vertical motion (mm/yr)					
	2°		3°		5°	
	NCEP	CWB	NCEP	CWB	NCEP	CWB
Boziliao	-27.64±3.21	-28.71±3.34	-24.33±3.33	-25.39±3.47	-21.04±2.38	-22.10±2.50
Taichung Port	-4.68±4.61	-5.13±4.71	0.81±3.99	0.37±4.13	5.00±3.43	4.56±3.54
Hsinchu	9.40±4.58	9.41±4.61	10.47±3.31	10.48±3.36	15.01±2.84	15.02±2.90
Linshanbi	-18.95±2.03	-19.62±2.04	-20.45±2.01	-21.12±2.03	-20.69±1.66	-21.36±1.68
Longdong	0.87±1.54	0.68±1.49	0.07±1.43	-0.12±1.37	-0.50±1.26	-0.59±1.15
Hualien	-6.55±3.74	-6.60±3.80	-7.28±3.33	-7.33±3.41	-5.89±2.68	-5.94±2.76
Chenggong	8.12±2.81	7.38±2.87	7.95±2.33	7.21±2.40	8.77±1.79	8.03±1.87
Liuchiu	5.78±1.79	5.63±1.78	5.46±1.46	5.30±1.46	5.41±1.18	5.25±1.18
Donggang	-0.60±2.36	-0.93±2.36	0.78±2.01	0.45±2.03	1.23±1.56	0.90±1.57
Jiangjun	-2.12±1.81	-4.19±2.04	-0.20±1.91	-2.34±2.16	1.30±1.42	-0.64±1.61
Wengang	-38.88±3.33	-39.78±3.42	-36.10±3.42	-37.01±3.52	-33.93±2.78	-34.83±2.88
Dongshi	-9.09±3.02	-9.89±3.08	-6.60±3.06	-7.40±3.11	-5.26±2.77	-6.06±2.82
Mazu	44.83±7.81	48.49±9.07	48.01±6.46	51.32±7.43	48.92±6.01	54.61±6.84

(b) 結合 RADs 衛星測高與驗潮站資料估算之地殼變動速率

Station name	Vertical motion (mm/yr)					
	2°		3°		5°	
	NCEP	CWB	NCEP	CWB	NCEP	CWB
Boziliao	-32.67±3.16	-33.74±3.29	-30.03±3.48	-31.09±3.61	-23.76±2.39	-24.82±2.51
Taichung Port	-10.98±5.19	-11.43±5.30	-4.14±4.14	-4.58±4.28	2.33±3.50	1.89±3.62
Hsinchu	2.11±4.82	2.13±4.86	6.20±3.36	6.21±3.42	12.60±2.90	12.62±2.96
Linshanbi	-20.94±2.07	-21.60±2.09	-22.80±2.06	-23.47±2.08	-21.88±1.65	-22.55±1.67
Longdong	-1.17±1.58	-1.35±1.53	-2.06±1.44	-2.25±1.39	-1.74±1.24	-1.83±1.14
Hualien	-9.67±3.93	-9.72±3.99	-9.76±3.41	-9.81±3.48	-7.17±2.69	-7.21±2.78
Chenggong	4.91±2.93	4.18±2.99	5.45±2.44	4.71±2.50	7.32±1.81	6.58±1.90
Liuchiu	3.38±1.87	3.23±1.87	2.38±1.47	2.23±1.47	3.38±1.19	3.22±1.18
Donggang	-3.99±2.56	-4.32±2.56	-3.19±2.10	-3.53±2.11	-1.42±1.59	-1.74±1.60
Jiangjun	-5.79±1.82	-7.99±2.07	-4.01±2.00	-6.35±2.27	-0.81±1.45	-2.83±1.64
Wengang	-42.85±3.38	-43.76±3.48	-40.29±3.56	-41.19±3.66	-36.10±2.84	-37.00±2.94
Dongshi	-12.74±3.08	-13.54±3.13	-10.54±3.19	-11.34±3.25	-7.27±2.80	-8.07±2.85
Mazu	37.10±7.61	40.02±8.83	38.62±5.77	41.14±6.63	44.77±5.84	49.97±6.66

附表 7-6 CWB 高雄驗潮站之地殼變動速率。表中驗潮站分別應用 NCEP 與 CWB 氣壓資料進行 IB 校正

(a) 結合 AVISO 衛星測高與驗潮站資料估算之地殼變動速率

Station name	Vertical motion (mm/yr)					
	2°		3°		5°	
	NCEP	CWB	NCEP	CWB	NCEP	CWB
Kaohsiung Method I	4.80±2.42	4.26±2.42	5.54±2.19	5.00±2.22	6.08±1.89	5.54±1.89
Kaohsiung Method II	9.47±2.39	8.81±2.39	6.88±2.19	6.22±2.22	8.79±1.88	8.12±1.88

(b) 結合 RADs 衛星測高與驗潮站資料估算之地殼變動速率

Station name	Vertical motion (mm/yr)					
	2°		3°		5°	
	NCEP	CWB	NCEP	CWB	NCEP	CWB
Kaohsiung Method I	1.80±2.63	1.26±2.62	1.15±2.38	0.61±2.41	3.58±1.96	3.04±1.96
Kaohsiung Method II	7.66±2.59	7.00±2.58	4.72±2.37	4.06±2.39	6.50±1.94	5.84±1.95

## 附錄八 海水面變化速率

附錄八中的驗潮站資料皆已進行各項改正，資料涵蓋時間皆為 2002-2011 年。下列表格中計算結果分別利用 NCEP 與 CWB 海水面氣壓資料進行 IB 改正。

附表 8-1 PSMSL 驗潮站固定範圍之 SLR (除了基隆與高雄驗潮站採用 5° 衛星測高資料，其他區域驗潮站則使用 2° 衛星測高資料)

Station Name	Trend(mm/yr)			
	AVISO		RADs	
	NCEP	CWB	NCEP	CWB
Zhapo	4.39±1.93	x	1.97±1.93	x
Xi Sha	7.70±2.30	x	6.32±2.30	x
Kanmen	-0.63±1.87	x	-3.00±1.87	x
Waglan Island	6.35±3.23	x	4.15±3.23	x
Quarry Bay	3.89±2.13	x	1.38±2.13	x
Tai Miu Wan	6.52±2.54	x	4.16±2.54	x
Tai Po Kau	4.36±1.83	x	1.79±1.83	x
Tsim Bei Tsui	4.73±2.33	x	1.99±2.33	x
Shek Pik	4.84±1.92	x	2.02±1.92	x
Keelung*	-4.16±1.74	-3.96±1.73	-5.40±1.74	-5.21±1.73
Kaohsiung*	10.22±1.40	10.22±1.38	7.30±1.39	8.29±1.38
Nase	1.23±1.52	x	0.64±1.52	x
Nakano Sima	0.63±1.55	x	1.76±1.55	x
Okinawa	-0.11±1.51	x	-0.47±1.51	x
Naha	-0.16±1.54	x	-0.56±1.54	x
Ishigaki	2.00±2.22	x	0.68±2.22	x
Manila	10.75±2.52	x	9.59±2.52	x
Legaspi	14.42±1.61	x	11.78±1.61	x
Cebu	16.33±1.49	x	9.36±1.49	x

\*表示各驗潮站資料的時間涵蓋範圍無完整涵蓋 2002-2011 年

附表 8-2 UHSLC 驗潮站固定範圍之 SLR (採用 5° 衛星測高資料)

Station Name	Trend(mm/yr)			
	AVISO		RADs	
	NCEP	CWB	NCEP	CWB
Keelung*	-4.02±1.75	-3.88±1.74	-5.27±1.75	-5.14±1.74
Kaohsiung*	10.22±1.45	10.00±1.40	8.27±1.41	8.10±1.39

\*表示各驗潮站資料的時間涵蓋範圍無完整涵蓋 2002-2011 年

附表 8-3 CWB 驗潮站固定範圍之 SLR (採用 5° 衛星測高資料)

Station Name	Trend(mm/yr)			
	AVISO		RADs	
	NCEP	CWB	NCEP	CWB
Boziliao*	10.60±1.57	10.03±1.64	7.88±1.57	7.31±1.64
Taichung Port*	8.96±2.76	9.08±2.78	6.29±2.76	6.41±2.78
Hsinchu	7.31±2.24	7.36±2.29	4.90±2.24	4.96±2.29
Linshanbi*	1.02±1.76	0.93±1.68	-0.17±1.76	-0.26±1.68
Longdong	1.43±0.96	1.51±0.96	0.19±0.96	0.27±0.96
Hualien*	2.69±1.82	2.67±1.85	1.41±1.82	1.40±1.85
Chenggong	2.94±1.09	2.65±1.14	1.49±1.09	1.20±1.14
Liuchiu	9.48±1.25	9.48±1.25	7.45±1.25	7.45±1.25
Donggang*	9.53±2.08	9.56±2.08	6.88±2.08	6.92±2.08
Kaohsiung*	10.21±1.83	10.20±1.80	7.71±1.83	7.71±1.81
Jiangjun	8.82±1.21	8.70±1.31	6.71±1.21	6.51±1.31
Wengang*	8.90±1.80	8.94±1.83	6.73±1.80	6.77±1.83
Dongshi	8.71±2.51	8.75±2.51	6.70±2.51	6.74±2.51
Mazu*	1.44±5.73	5.44±6.55	-2.71±5.73	0.80±6.55

\*表示各驗潮站資料的時間涵蓋範圍無完整涵蓋 2002-2011 年

## 附錄九 期中報告審查意見處理情形表

### 期中報告審查意見處理情形表

交通部運輸研究所合作研究計畫

期中 期末 報告審查意見處理情形表

計畫名稱：臺灣四周海域近十年之海水面變化速率研究

計畫編號：MOTC-IOT-102-H3DB004a

執行單位：財團法人成大研究發展基金會/國立成功大學測量及空間資訊學系

參與審查人員及其所提意見	合作研究單位處理情形	本所計畫承辦單位審查意見
<p><b>林銘崇 委員</b></p> <p>1. 基本資料蒐集與評估校正已初步完成，過程詳實，並獲致初步合理成果。</p> <p>2. 驗潮站資料校正，除特別考慮地殼變動，地層下陷因素之可能影響如何？</p>	<p><b>意見答覆</b></p> <p>1. 感謝委員肯定。</p> <p>2. 地殼變動在本計畫中定義為該驗潮站之垂直變動量，由驗潮站和衛星測高資料求得，故文中所指之地殼變動已經包含地層下陷之變動。</p>	<p>審查同意處理說明。</p> <p>審查同意並確認處理說明。</p>
<p><b>張憲國 委員</b></p> <p>1. 圖 3.1 中顯示，半年及全年週期的訊號的振幅大約 20 cm，由天文潮造成的成份似乎無法到此大小，此原因為何？</p> <p>2. 潮汐資料因為人為因素造成不連續的跳動，是否有其他方法來處理訊號跳動的問題。</p> <p>3. 由水位資料探討地殼上升的構想，極具學術價值。不同分析方</p>	<p><b>意見答覆</b></p> <p>1. 圖 3.1 中顯示的半年及全年週期訊號主要由海水面之月平均變化所造成，天文潮之半年和全年週期訊號振幅相對很小。</p> <p>2. 目前嘗試使用其他方式處理訊號跳動的問題，並於期末報告 4.3 節中說明利用 Haar 小波分解進行偵測，並配合兩方法改正偏移量。</p> <p>3. 感謝委員肯定。若要證實此地殼變動結果的準確性，應在驗潮站</p>	<p>審查同意並確認處理說明。</p> <p>審查同意並確認處理說明。</p> <p>審查同意並確認處</p>

<p>法的結果顯示與由 GPS 推估結果有所差異。如何證實此方法所得結果的準確性？</p>	<p>旁架設 GPS 觀測站，並將估算的地殼變動成果與 GPS 結果相比較。</p>	<p>理說明。</p>
<p><b>陳冠宇 委員</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. 考慮之修正因素甚多，值得肯定。</li> <li>2. 建議加一縮寫表，說明各英文縮寫之意義。</li> <li>3. 各修正因素之精度，建議列表另行說明。</li> <li>4. 因地殼變動受地震事件的影響甚鉅，短期平均之量可能與較長期的平均地殼變動量不同。建議將長期平均列入比較，從而推導當地沉陷量之值。</li> <li>5. 本研究與其他人(如 Tseng 2010)的研究結果有何不同？考慮的內容有何差異？應在報告中敘明</li> </ol>	<p><b>意見答覆</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. 感謝委員肯定。</li> <li>2. 感謝委員建議，期末報告中將加一縮寫表於 P.II，說明各英文縮寫之意義。</li> <li>3. 感謝委員建議，於期末報告 3.1 節中增列表說明各修正因素之精度。</li> <li>4. 感謝委員建議，目前僅評估 10 年地殼變動量，長期地殼變動量之估算為未來工作。</li> <li>5. 本研究相較於 Tseng 等人 [2010]之研究差異很大，Tseng 等人 [2010]研究並無考慮驗潮站資料之各項改正（海潮改正、逆氣壓改正、地殼變動、偏移量改正等），測高資料也僅使用 RADs 資料庫，且改正項並無測試。於期末報告中 1.1 節說明與其他人研究（如 Tseng 2010）考慮的內容有何差異以及研究結果有何不同。</li> </ol>	<p>審查同意處理說明。</p> <p>審查同意並確認處理說明。</p> <p>審查同意並確認處理說明。</p> <p>審查同意並確認處理說明。</p> <p>審查同意並確認處理說明。</p>
<p><b>滕春慈 委員</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. 由於本研究涉及許多數值、修正等，能將修正前後值視覺化處理(如：繪圖)較易閱讀。</li> <li>2. AVISO 與 RAD 來源之衛星資</li> </ol>	<p><b>意見答覆</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. 感謝委員建議，期末報告將加入修正前後的圖表，以方便閱讀。</li> <li>2. AVISO 與 RADs 為處理衛星測高</li> </ol>	<p>審查同意並確認處理說明。</p> <p>審查同意</p>

<p>料，為什麼會造成計算結果的差異？代表意義應稍微說明，不然無法確認何者資料更具代表性。</p> <p>3. 研究已經使用大量水位站資料，並完成詳細的率定，成果豐盛。</p>	<p>數據的資料中心，因不同單位處理的方式和改正模型不完全相同，因此會產生結果上的差異。此兩資料庫為目前全球研究學者使用最多的測高資料，因此具有一定的代表性和可靠性。本研究採用兩種資料庫的原因在於探討測高資料之可信度。</p> <p>3. 感謝委員肯定。</p>	<p>並確認處理說明。</p> <p>審查同意處理說明。</p>
<p><b>溫志中 委員</b></p> <p>1. 圖 2.3，資料 PSMSL 與 UHSLC 明顯有差異，原因為何？</p> <p>2. 工作項目中，分區比較長、短期海水面變化，速率分析結果之可靠度與準確度，中、長、短期如何界定？</p> <p>3. 近 10 年之水位變動率是否能代表未來長期之變動率？未來變化趨勢是否有函數趨勢？</p>	<p><b>意見答覆</b></p> <p>1. 圖 2.3 中 PSMSL 與 UHSLC 資料有明顯差異，其原因應為 PSMSL 並未進行偏移量改正，而 UHSLC 的資料應已進行偏移量改正，但 UHSLC 的資料說明中並未說明已改正偏移量，因此本計畫中將此兩站(基隆與高雄)的 PSMSL 與 UHSLC 資料當成不同測站處理。</p> <p>2. 本研究目的在於計算分析近十年(2002-2011)臺灣附近海水面變化，因此短期時間定義為 2002-2011 年，長期定義為 1993-2011 年。</p> <p>3. 近年來海面上升速率加快，近 10 年之海水位變動率並不能表示未來長期之海水變動率，因此需持續觀測海水面變化。另外，文獻表示海面上升的加速度有增加之趨勢，因此未來研究海水面變化應增加分析海水面變化之加速度。</p>	<p>審查同意並確認處理說明。</p> <p>審查同意並確認處理說明。</p> <p>審查同意並確認處理說明。</p>

<p>4. 地殼變動率建議可用平均值與標準差之組合、變異係數來看其變異性是否明顯，並分區呈現。</p> <p>5. 如何判斷改正誤差為合理之變動量？</p>	<p>4. 感謝委員建議，期末報告將考慮以分區呈現。</p> <p>5. 理論上，改正後的擬合誤差將較改正前的擬合誤差量小，但不同區域的成果不完全相同。</p>	<p>審查同意並確認處理說明。</p> <p>審查同意並確認處理說明。</p>
<p><b>簡仲環 委員</b></p> <p>1. 期中報告書目前已針對潮位站及衛星測高與地殼變動等主要工作項目，依原定進度完成。</p> <p>2. 海水面變化速率在工程、防災、航運或其他領域之應用價值或預期效益，宜有進一步的強化說明，例如：假設 5mm/yr 之上升率究竟會造成那些明顯影響？</p> <p>3. 潮位資料雖有海潮成份之去除，但對於風暴潮如何處理？建議補充說明。</p> <p>4. 衛星測高其海水面高度觀測量精度可達±4.2 公分，(如報告第 2~3 頁)，此對相對微小之海水面變化是否合適？宜補充說明。</p>	<p><b>意見答覆</b></p> <p>1. 感謝委員肯定。</p> <p>2. 感謝委員建議，於期末報告第一章與第五章說明海水面變化速率將會造成那些影響。</p> <p>3. 風暴潮為大氣擾動影響海水面之升降，因此在進行逆氣壓改正時，已考慮氣壓影響海水面之效應。</p> <p>4. 報告中第 2~3 頁所描述之「衛星測高海水面高度觀測量精度達±4.2 公分」為一單點觀測量，經由時間和空間上的平均，衛星測高觀測精度可再提升，已經有很多發表的文章利用衛星測高資料進行區域和全球海水面之研究。感謝委員建議，於期末報告 2.1 節中加強此說明，並引用其他已經發表之文獻。</p>	<p>審查同意處理說明。</p> <p>審查同意並確認處理說明。</p> <p>審查同意並確認處理說明。</p> <p>審查同意並確認處理說明。</p>
<p><b>莊文傑 委員</b></p> <p>1. 感謝合作研究單位的協力配合及努力，並如期提送繳交期中報告。</p>	<p><b>意見答覆</b></p> <p>1. 感謝委員肯定。</p>	<p>審查同意處理說明。</p>

<p>2. P.1-1 研究動機與目的，請著重詳細介紹及評述臺灣陸海相關 SLR(Sea Level Rise)之研究成果，例如：Zhang(2009)、Tseng(2009)、Chang et al.(2012)...。另外，請強化本研究進行短期(近10年)SLR研究之優缺點與必要性及預期目的與成果。</p>	<p>2. 感謝委員建議，期末報告將詳細介紹及評述臺灣陸海相關 SLR 之研究成果，並且加強說明近 10 年 SLR 研究之優缺點與必要性及預期目的與成果。於期末報告 1.1 節中加強此說明。</p>	<p>審查同意並確認處理說明。</p>
<p>3. P.1-3 “另外，僅探討海水上層溫度與海水面時間序列相關係數，無法真正顯示海水溫度變化對海面上升速率之貢獻。”請補充文獻及詳細說明。並請補充說明並評述 IPCC 所提出 5 次 SLR 報告差異之主因。</p>	<p>3. 已於期末報告 1.1 節加強說明該段文獻之內容。IPCC 所提出的 SLR 報告是由約 20 多個獨立模式綜合結論，且不同版本之結論之差異性則來自於模式本本身的諸多物理模式的修正。IPCC 亦無法提出相異的原因。相關文獻可參考 Liang and Lin (2013a,b)。</p>	<p>審查同意並確認處理說明。</p>
<p>4. 建請以 P.1-4 所列本研究計畫之工作項目，作報告內容之主要架構或章節，俾利相關研究進度審查與研究成果核驗。</p>	<p>4. 感謝委員建議，期末報告將考慮委員的意見進行章節編排。</p>	<p>審查同意並確認處理說明。</p>
<p>5. P.1-5 計畫流程中，“驗潮站資料之應用”，其“海潮改正”、“逆氣壓改正”、及“資料偏移量改正”之流程係逐序進行或應平行進行？又“地殼變動”係延續“地球物理改正”與“資料偏移量改正”之成果，請補充說明其用意！</p>	<p>5. 海潮改正、逆氣壓改正以及資料偏移量改正為逐序進行。另外，地殼變動量為結合衛星測高資料與驗潮站資料估算之，衛星測高資料已進行儀器改正、介質改正、地球物理改正，而驗潮站資料已進行海潮改正、逆氣壓改正與資料偏移量改正。</p>	<p>審查同意並確認處理說明。</p>
<p>6. P.2-1 式(2.1)增加圖示說明。另外，P.2-1 式(2.1)說明衛星測高資料應含海潮改正與逆氣壓改正等，為何 P.1-5 計畫流程中未涵</p>	<p>6. 期末報告將增加圖示說明式(2.1)。P.1-5 計畫流程中介質改正包含電離層改正、濕對流層與乾對流層改正，地球物理改正包含</p>	<p>審查同意並確認處理說明。</p>

<p>括。</p>	<p>海潮改正、固體潮改正、海潮負載改正、極潮改正、海面狀態偏差改正與逆氣壓改正，因此海潮改正與逆氣壓改正皆已經包含在流程圖中。</p>	
<p>7. P.2-3 逆氣壓改正“最高可達公分”，在臺灣海域之適當性如何？</p>	<p>7. 以 PSMSL 基隆驗潮站為例，基隆驗潮站的逆氣壓改正最高可達到 14 公分。另外，經由逆氣壓改正後大多的驗潮站資料其變化量變小，由此可證明此改正之適用性。已於期末報告加強對此說明。</p>	<p>審查同意並確認處理說明。</p>
<p>8. P.2-3 迄今 T/P、J-1、J-2 之測高精度 公分，請強化說明其可用以估計 SLR 量級大小僅及 mm 之原因。</p>	<p>8. 期末報告將強化說明測高精度，於期末報告 2.1 節中加強此說明。</p>	<p>審查同意並確認處理說明。</p>
<p>9. P.2-6 “RLR 與 Metric 資料格式皆為 1 個月平均一筆，...”；P.2-7 “UHSLC 資料格式為 1 天平均一筆，...”，為何及如何認定潮汐影響皆已移除!?</p>	<p>9. 海潮效應除了可用本研究使用的調和分析法移除，亦可平均驗潮站資料以降低海潮效應影響，而 PSMSL 資料為 1 個月平均一筆之資料，表示 PSMSL 驗潮站資料已平均每個月的觀測數據，故認定潮位資料中的海潮影響應已降低，期末報告中 2.2 節對此將補充說明。而 UHSLC 的說明資料中已說明已移除日潮與半日潮等高頻訊號，故認定潮位資料中的海潮影響應已降低。</p>	<p>審查同意並確認處理說明。</p>
<p>10. P.2-11 請比較應用 ECMWF、NCEP、CWB 海面氣壓進行 PSMSL、UHSLC、CWB 驗潮站資料作逆氣壓改正結果或精度之差異性。</p>	<p>10. 期末報告將於 4.2 節補充應用不同海平面氣壓資料進行逆氣壓改正對於驗潮站資料之影響。</p>	<p>審查同意並確認處理說明。</p>

<p>11. P.3-4 逆氣壓改正之式(3-2)中,應用到時變全球海面平均壓力 P。為配合本研究目標,可否請針對臺灣海域,補充並比較依據 CWB(由表 3.1 中臺灣各氣壓站或圖 3.2)之分區氣壓紀錄所得出之時變海面平均壓力之差異性或相關性(例如:圖 3.2 中基隆與高雄之日平均 P),若具有顯著之差異,請討論式(3-2)中, P 之選取及應用影響。</p>	<p>11. 式(3-2)中的 P 為時變全球海面平均壓力,因此 P 需平均全球海面平均壓力,其目的為避免全球海面壓力之斜率造成逆氣壓改正錯誤,與研究區域無關。</p>	<p>審查同意並確認處理說明。</p>
<p>12. P. 3-6 請再補充說明式(3.3)所示六參數擬合之各分項意義或用途。尤其是為何僅考量年及半年週期?式中 t 之單位為何,與實測料如何搭配?“中誤差”是何意義,如何計算?若驗潮站存在時序偏移量時,為何不先做六參數擬合之偏移量改正,反而先做海潮及逆氣壓改正?其在資料處理程序上必須如此或有其他之特殊考量?亦即是若先做六參數擬合之偏移量改正,再進行海潮及逆氣壓改正,是否合宜?對 SLR 之成果是否具影響?圖 3.3 經以六參數擬合作偏移量改正後,似乎偏移量仍極明顯,請評估其效果!“附錄三”應為“附錄 C”之誤植,請修正。</p>	<p>12. 已於期末報告 4.3 節補充說明六參數擬合之各分項意義或用途。逆氣壓效應改正對於 PSMSL、UHSLC、CWB 資料應於改正偏移量前進行,海潮改正對於 CWB 資料應該與偏移量同時擬合。此部分已補充於期末報告 4.1 節。另外,期末報告中將改正部份誤植之錯誤。</p>	<p>審查同意並確認處理說明。</p>
<p>13. P.3-7 “六參數(式(3.2))”應為“六參數(式(3.3))”之誤植,請修正。式(3.4)與式(3.3)之主要差異為步階函數的引入,其主要之預期目的或效果是什麼?步階函數是特定時間之函數或與時間相關</p>	<p>13. 期末報告中將改正部份誤植之錯誤。另外,引入步階函數的目的為改正偏移量。期末報告將增加圖示說明此部份,請參閱期末報告 4.3 節。</p>	<p>審查同意並確認處理說明。</p>

<p>嗎?如何預為選定徧移量個數 <math>n</math>? 如何應用式(3.3)進行徧移量改正，請補充實際操作例圖作說明。</p> <p>14. P.3-7 式(3.5)所示為地殼變動訊號係以衛星測高(g)與驗潮站資料(TG)之差為計算依據，而 TG 因含有各項改正，故而會引入相關改正之誤差，所以，單純以式(3.5)計算地殼變動訊號之有效性與準確性為何?為何必須假設地殼變動訊號為線性?經應用式(3.5)後，所得地殼變動訊號確為線性嗎?又地殼變動量係為與驗潮站資料(TG)有關之導出量，如何再應用以作驗潮站資料(TG)之地殼變動量改正?亦即是若將式(3.6)代回式(3.4)，則意謂潮位之年際與半年際改正量不隨時間而變且皆為零，這一改正量之限制修正意義，請再做補充說明。</p> <p>15. P.3-9 表 3.2、3.3、3.4 所示 T/P、J-1、J-2 測高資料，經應用不同模型進行改正後所得之 SLR 值，似乎顯示諸多改正模型並不重要或不具有影響，例如表 3.2 第二欄所示：乾對流層改正採 ECMWF、濕對流層改正採 TMR、電離層改正採 dual-frequency、海潮改正採 FES2004、海潮承載採 FES2004 等模型，SLR 之結果均為 8.6 mm/yr，請補充說明原因。另外，表 3.2、3.3、3.4 所示依據 T/P、J-1、J-2 各衛星測高資料所得</p>	<p>14. 若在驗潮站旁架設 GPS 觀測站，GPS 故算的地殼變動成果將會更完整。但臺灣大部分驗潮站周圍並無架設 GPS 觀測站，因此僅能使用衛星測高資料與驗潮站資料進行估算之。理論上，地殼變動訊號應主要包含偏差量與地殼變動速率，目前大部分之研究皆以線性來表示地殼變動速率，因此使用二參數擬合之，不過不同區域的地殼變動訊號之情形不完全相同。公式(3.6)有誤，<math>TG(t)</math>應改為 <math>u(t)</math>，則無委員所提之問題。另外，地殼變動改正已於期末報告 4.4 節中詳細說明。</p> <p>15. 不同模型改正後的 SLR 結果相近，表示該項改正具有高精度。另外，T/P、J-1、J-2 各衛星測高資料所涵蓋時間範圍不相同，因此估算出來的 SLR 並不相同。</p>	<p>審查同意並確認處理說明。</p> <p>審查同意並確認處理說明。</p>
---	---	---

<p>1992/09~2002/08 、 2002/01~2009/01 、 2008/07~2013/06 不同期間之 SLR 明顯不同，請補充討論並說 明原因。</p>		
<p>16. P.4-1 第四章建請考量與第三章 之式(3.4)至式(3-6)做整合。並請 就與前列第 13 項審查意見相關 之課題，詳細說明及補充。另 外，表 4.2 中最後一欄所示地殼 變動速率，在基隆與高雄驗潮站 之結果間存在不一致性，究竟何 者較適宜或準確，請做評核!臺灣 地質調查結果中，有相關數據或 趨勢可資佐證嗎?</p>	<p>16. 感謝委員建議，期末報告將嘗試 將第四章與第三章之式(3.4)至 式(3-6)進行整合。另外，因各研 究的目地性不同，處理資料方式 亦不完全相同，若要有近 10 年 適宜的佐證地殼變動資料是非 常困難，因此若要證實此地殼變 動結果的準確性，應在驗潮站旁 架設 GPS 觀測站，並將本研究成 果與 GPS 結果相比較。</p>	<p>審查同意 並確認處 理說明。</p>
<p>17. P.4-14 GPS 及相關精密水準資料 成果，係用以對照驗證地殼變動 速率之推算成果，惟請補充說明 直接採用或依據 GPS 及相關精 密水準資料成果推算地殼變動 速率之可行性。</p>	<p>17. 許多文獻已說明使用 GPS 或精 密水準資料估算地殼變動速率 是可行的。</p>	<p>審查同意 並確認處 理說明。</p>
<p>18. 為能於驗潮站潮位紀錄之中準 確依據 GPS 計算地殼變動率，謹 請將“現有驗潮站位增加 GPS 配置”列入期末報告之建議事 項。</p>	<p>18. 感謝委員建議，期末報告將考慮 將“現有驗潮站位應增加 GPS 配置”列入期末報告之建議事 項中。</p>	<p>審查同意 並確認處 理說明。</p>
<p>19. 謹請就國內現有可蒐集到相關 SLR 之文獻或研究報告，例如: 參考文獻 29. Tseng et al.(2010)、 6_Chang et al.(2012)，作較詳細 之回顧，尤其請就其分析考量條 件之優缺點、充分性與完備性， 參酌列入推展本研究之緣起。</p>	<p>19. 感謝委員建議，期末報告將於第 一章對於相關 SLR 之文獻或研 究報告做詳細說明。</p>	<p>審查同意 並確認處 理說明。</p>

## 附錄十 期末報告審查意見處理情形表

### 期末報告審查意見處理情形表

交通部運輸研究所合作研究計畫

期中 期末 報告審查意見處理情形表

計畫名稱：臺灣四周海域近十年之海水面變化速率研究

計畫編號：MOTC-IOT-102-H3DB004a

執行單位：財團法人成大研究發基金會/國立成功大學測量及空間資訊學系

參與審查人員及其所提意見	合作研究單位處理情形	本所計畫承辦單位審查意見
<p><b>林銘崇 委員</b></p> <p>1. 影響資料改正之可能因子有那些？</p> <p>2. 根據研究所得資料成果是否可能進行預報？</p>	<p><b>意見答覆</b></p> <p>1. 以驗潮站資料而言，影響驗潮站資料因子有風、海潮、逆氣壓(IB)效應、偏移量以及地殼變動等，其中因為風對於海水面變化速率的影響較小[Proshutinsky <i>et al.</i>, 2004]，因此在本計劃中並無對於驗潮站資料進行風的改正。本計畫中驗潮站資料需進行海潮改正、IB 效應改正、資料偏移量改正以及地殼變動改正。以衛星測高資料而言，測高資料需進行儀器改正、介質改正(電離層改正、濕對流層改正、乾對流層改正)與地球物理改正(固體潮改正、海潮改正、海潮負載改正、極潮改正、海面狀態偏差改正、IB 改正)。</p> <p>2. 若要進行預報，應利用長期資料結合其他影響海水面因子估算海水面變化速率與海水面變化之加速度。本計畫為臺灣四周海域近十年之海水面變化速率研</p>	<p>審查同意並確認處理說明。</p> <p>審查同意並確認處理說明。</p>

<p>3. 文中所稱總海水面變化之含義如何？</p>	<p>究，為短期成果，若要進行預報，需利用長期資料進行海水面變化研究。</p> <p>3. 總海水面變化意同於海水面變化(可由改正後衛星測高與驗潮站觀測資料求得)，為使文章前後一致，已將全文中的總海水面變化改為海水面變化。</p>	<p>審查同意並確認處理說明。</p>
<p><b>張憲國 委員</b></p> <p>1. 此計畫完整地整理長期水位變動的往昔研究，並依考慮影響水位變動可能因素，逐一分析各種因素的影響程度，報告內容相當豐富，極具學術價值，值得肯定。</p> <p>2. 報告潮位站的名稱建議用一表格將中英文(縮寫)表列，有關各潮位站的分析結果可依順時或逆時排列，以利閱讀</p> <p>3. 潮位站的測量基準與衛星測高的基準不同，是否會影響長期水位變動的結果。</p> <p>4. 第 4.3 節中的偏移量修正，僅考慮修改瞬間的資料偏移量，本報</p>	<p><b>意見答覆</b></p> <p>1. 感謝委員肯定。</p> <p>2. 感謝委員的建議，已在本文表 2.4~表 2.6 中列出中英文(縮寫)表列。PSMSL 驗潮站資料是以區域進行排列(排列方式依序為中國大陸、臺灣、日本、菲律賓)，因此 PSMSL 成果表不需要重新排列；而 CWB 驗潮站的成果圖與表以箔子寮驗潮站為起點，依順時針排列。</p> <p>3. 不會，因為利用驗潮站估計海水面變化量時，將相對一參考時刻，則各驗潮站資料在該時刻皆為零，參考基準即可忽略(即僅看衛星測高資料與驗潮站資料之相對變動)。另外，驗潮站資料改正中已考慮地殼變動的影響。</p> <p>4. 不會，本研究中偏移量是指驗潮站中人為或環境造成之突然跳</p>	<p>審查同意處理說明。</p> <p>審查同意並確認處理說明。</p> <p>審查同意並確認處理說明。</p> <p>審查同意並確認處理說明。</p>

<p>告所使用的方法，是否會將地殼影響的因素同時修正?這兩種方法哪一種比較適合?</p> <p>5. 此研究以潮位資料分析長期水位變動率，此結果如何評估其準確性?</p>	<p>動 (jump)，而地殼變動為線性變動速率。方法 II 較佳，因為方法 I 為將驗潮站資料(僅移除海潮與逆氣壓效應)以六參數加上步階函數擬合之，因此需加入衛星測高資料才可以再進行修正地殼動之影響。方法 II 在改正偏移量前，先降低其他可能會影響偏移量改正之訊號，除了將上述已提到的海潮效應與逆氣壓效應自驗潮站資料中移除外，並利用衛星測高資料消除海水面變化訊號，再進行偏移量改正，因此方法 II 為較合理之方法。</p> <p>5. 經各項改正的測高資料，其每一秒平均之海水面高度觀測量精度可達±4.2 公分，經由時間和空間上的平均，精度可再提升。本研究將潮位資料估算的海水面變動速率與測高資料比較評估其準確性。</p>	<p>理說明。</p> <p>審查同意並確認處理說明。</p>
<p><b>陳冠宇 委員</b></p> <p>1. 已增列縮寫表，但未依字母順序，格式未統一，且部分縮寫無中文翻譯，與縮寫相對應之字首部分未大寫。</p> <p>2. 期中報告審查意見之答覆未列出修改何處，不利讀者參閱。</p> <p>3. 表 2.2 之各衛星的改正模型只有極少數不相同，建議合併並說明何以不同。</p> <p>4. 以圖 2.2 看來，測高衛星之軌道誤差有數 cm，如何得出 mm 級</p>	<p><b>意見答覆</b></p> <p>1. 感謝委員指正，已修改縮寫表。</p> <p>2. 感謝委員指正，定稿報告中已改正期中報告審查意見之答覆。</p> <p>3. 已合併為一張表，如表 2.2 所示。</p> <p>4. 現今軌道精度已提升至 2-3 公分，平均每一秒測高資料之海水</p>	<p>審查同意並確認處理說明。</p> <p>審查同意並確認處理說明。</p> <p>審查同意並確認處理說明。</p> <p>審查同意並確認處理說明。</p>

<p>的變化？</p>	<p>面高度觀測量精度可達±4.2 公分，經由時間和空間上的平均，可再提升精度。最後對時間序列進行擬合，求得時間序列之斜率和標準偏差 (mm/yr)，比較斜率和標準偏差即可知斜率不可信。如圖 2.2 所示。</p>	<p>理說明。</p>
<p><b>溫志中 委員</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. 研究成果內容豐富，值得肯定。</li> <li>2. 研究中分析資料之相關性為何種方法，請加註說明。</li> <li>3. P.4-3 相關係數為 1，代表資料為完全正相關，請修正“相當吻合”用詞。</li> <li>4. 第六章，結論與未來工作，請修正為“結論與建議”。</li> <li>5. 圖 1-22~圖 1-35，建議以其它方式表現。</li> </ol>	<p><b>意見答覆</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. 感謝委員的肯定。</li> <li>2. 本研究中計算資料相關性主要為利用相關係數進行分析，已補充於第四章中。</li> <li>3. 已修正”利用不同平均時間 P 所計算之 IB 效應改正皆相當吻合”於 P.4-3。</li> <li>4. 已修正，第六章，”結論與建議”。</li> <li>5. 因 CWB 驗潮站為每 6 分鐘平均一筆之潮位數據，因此原始 CWB 潮位站資料如附圖 1-22~附圖 1-35 所示。</li> </ol>	<p>審查同意處理說明。</p> <p>審查同意並確認處理說明。</p> <p>審查同意並確認處理說明。</p> <p>審查同意並確認處理說明。</p> <p>審查同意並確認處理說明。</p>
<p><b>簡仲璟 委員</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. 本計畫資料蒐集豐富，分析也相當完整，尤其在資料的改正工作值得肯定。</li> <li>2. 本計畫所估算之地殼變動速率，其範圍及解析度如何？若依報告中所述最小 2° 衛星資料如何看出驗潮站周圍地殼表面高度下降是局部小區域地層沉陷所造成，而非代表該區之地殼表面下降。簡言之，潮位站處之地殼變動速率如何準確得知？</li> </ol>	<p><b>意見答覆</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. 感謝委員的肯定。</li> <li>2. 2° 衛星測高資料是指平均 2° 衛星海水面資料，所計算之地殼變動皆為驗潮站位置之地殼變動。本計畫臺灣附近的驗潮站資料適用 5° 衛星測高資料，其他區域驗潮站資料則適用 2° 衛星測高資料。地殼變動在本計畫中定義為該驗潮站之垂直變動量，文中所</li> </ol>	<p>審查同意處理說明。</p> <p>審查同意並確認處理說明。</p>

<p>3. 目前測高衛星軌道精度已提昇至 2~3 公分，但此對海水面上升速率的探討是否仍不足？</p> <p>4. 近十年與近五年或近三年之海水面上升速率可能皆不同，建議可補充說明，以真實掌握變化趨勢。</p>	<p>指之地殼變動已經包含地層下陷之變動。另外，若要證實此地殼變動結果的準確性，應在驗潮站旁架設 GPS 觀測站，並將估算的地殼變動成果與 GPS 結果相比較。</p> <p>3. 經各項改正的測高資料，其每一秒平均之海水面高度觀測量精度可達±4.2 公分，經由時間和空間上的平均，可再提升精度。應足夠用以分析海水面上升速率。</p> <p>4. 本研究中僅利用近十年衛星測高與驗潮站資料進行海水面變化速率計算，導致估算海水面上升速率的標準偏差較大，可知資料涵蓋時間長度將影響估算之精度。若利用近五年或近三年的資料估算海水面上升速率，則海水面上升速率的標準偏差將更大，反而無法真實掌握現今海水面變化趨勢。</p>	<p>審查同意並確認處理說明。</p> <p>審查同意並確認處理說明。</p>
<p><b>莊文傑 委員</b></p> <p>1. 感謝合作研究單位的協力配合及努力，並如期提送繳交期末報告。</p> <p>2. 本報告之撰著，其內文章節、字型、公式-圖-表編號、參考文獻標註及引述等請參照本所提供之格式。PII 縮寫表請以英文縮寫及其首字母之先後作分序排列，中文譯置於英文全文前，並補列頁碼，俾利查閱對照。</p> <p>3. 請補充評論 Tseng et al.(2009)、Zhan et al.(2009)、黃 等(2009)、</p>	<p><b>意見答覆</b></p> <p>1. 感謝委員的肯定。</p> <p>2. 感謝委員指正，本文格式已調整且縮寫表已做調整。然而縮寫表中各名詞使用的頻率並不相同，為避免讀者混淆，僅列首次出現之頁碼。</p> <p>3. 因利用衛星測高對不同海域與不同期間進行 SLR 分析，因此造</p>	<p>審查同意處理說明。</p> <p>審查同意並確認處理說明。</p>

<p>Chang et al.(2012)利用衛星測高資料對不同海域及不同期間進行 SLR 分析所得差異結果之造成主因，同時，評述應用衛星測高資料進行分析之準確性。</p>	<p>成不一樣的結果。並已補充” Tseng 等人[2009]、黃清哲等人[2009]與 Chang 等人[2012]雖然皆利用衛星測高資料估算臺灣周圍 SLR 速率，但由於資料來源、時間涵蓋範圍以及資料處理方式不完全相同，因此造成估算 SLR 速率之結果不同”於 1.1 節中。另外，測高資料已進行各項改正，其每一秒平均之海水面高度觀測量精度可達±4.2 公分，經由時間和空間上的平均，可再提升精度。</p>	<p>審查同意並確認處理說明。</p>
<p>4. 請加強說明闡釋圖 2.2 中，海洋變化訊號(ocean variability)之意義。另外，基於”現今之軌道誤差已小於海洋變化訊號，軌道精度由 1 公尺提升至 2-3 公分，因此，...” ，請結合圖 2-3 及式(2-1)，再補充說明在既有特定之 2-3 公分軌道精度下，為何測高衛星觀測量可廣泛應用於 2~5mm/yr 之海水面訊號監測？</p>	<p>4. 感謝委員的建議，為避免語意混淆已將”現今之軌道誤差已小於海洋變化訊號”移除。另外，衛星測高的軌道精度可提升至 2-3 公分，其每一秒平均之海水面高度觀測量精度可達±4.2 公分，經由時間和空間上的平均，可再提升精度，因此可廣泛應用於海水面訊號監測。此外，在統計學上，對時間序列進行擬合，求得時間序列之斜率和標準偏差 (mm/yr)，比較斜率和標準偏差即可知斜率不可信。</p>	<p>審查同意並確認處理說明。</p>
<p>5. P.2-3 在式(2-1)中，“R 為衛星至反射面之距離，<math>h_M</math> 為平均海水面至橢球之高度，...” ，請補充說明“反射面”與“平均海水面”之異同。又在式(2-1)中，<math>h_M</math> (平均海水面至橢球之高度)係為已知量，請補充說明其如何測定，以及“平均海水面”如何計算 (“平均海水面”之計算及其變動率，不正是本研究待求解之最重</p>	<p>5. 已補充”反射面(如海水面)”於文中(P.2.3)。已補充”平均海水面是由衛星測高經長時間測量全球海水面後所決定”於文中(P.2-3)。另外，第一章中全球平均海水面為平均全球海水面的測高資料，為避免與第一章中全球平均海面上升名詞搞混，全文中的全球平均海面上升速率改為全球海面上升速率。</p>	<p>審查同意並確認處理說明。</p>

<p>要變動量嗎?)?</p> <p>6. P.2-4 之式(2.2)中，請補充 <math>P_{Ocean}</math> 及 <math>\Delta R_{dry}</math> 之單位。</p> <p>7. 在地球固體潮改正中，請再補充說明”固體潮”與圖 2.3 中之”Ellipsoid”與”Geoid”之相關性。</p> <p>8. P.2-7 之表 2.2 中，請補充說明”海潮負載潮改正”之意義與內容。又”海潮改正”及”海潮負載潮改正”如何與 P.2-3 中 <math>\Delta R_j</math> 之潮汐(海潮與固體潮)以及極潮改正作對應，或”海潮負載潮”係指”固體潮”與”極潮”之總和嗎？若是，為何在地球物理改正中，”海潮負載潮”、”固體潮”、”極潮”係分項明列呢？</p> <p>9. P.2-11 圖 2-5 含二圖，圖說請修訂。”(請參見附錄一)”請作明確表圖序之附註。又附錄中之表圖序，建請以類如附表 1-1 或附圖 1-1 作標示，俾與本文之表圖序作區隔。另外，附錄 1-1 中，表 1-2 內關於驗潮站之英文名稱及其簡寫均有誤植，請檢視修正，並請補充內文所提之其他 7 驗潮站之相關資訊，尤其是 data period。附圖 1-20 與 1-21 之圖說不一致，請檢視修正。圖 2-7 中，內文敘述”近 10 年 PSMSL 與 UHSLC...皆有一明顯偏移量”應有錯誤，請檢視修正。</p>	<p>6. 已補充 <math>P_{Ocean}</math> 及 <math>\Delta R_{dry}</math> 之單位於文中(P.2.4)。 <math>\Delta R_{dry}</math> 單位為公分， <math>P_{Ocean}</math> 單位為毫巴。</p> <p>7. 固體潮會使 Geoid 的形狀產生變化，而 Ellipsoid 與固體潮無相關性。</p> <p>8. 已補充海潮負載改正於本文中(P.2-5)。另外，本文(P.2-3)已改”潮汐(海潮、海潮負載和固體潮)”。</p> <p>9. 已於 P.2-14 加入”左圖: PSMSL 與 UHSLC 驗潮站分佈；右圖: CWB 驗潮站分佈”。已將附錄一之表置於本文中(P.2-12 與 2-13)。另外，附錄中之表圖序已改為附表或附圖。已改正附錄 1-1 中，附表 1-2 內關於驗潮站之英文名稱及其簡寫，請參閱表 2.5。表 2.5 為本研究使用的 UHSLC 驗潮站資料，為避免讀者混淆，因此不放入未使用之驗潮站資料。已改正附圖 1-21。已改正”顯示近 10 年 PSMSL 基隆與高雄驗潮站資料間皆有一明顯偏移量”於 P.2-11。</p>	<p>審查同意並確認處理說明。</p> <p>審查同意並確認處理說明。</p> <p>審查同意並確認處理說明。</p> <p>審查同意並確認處理說明。</p>
---	--	---

<p>10. P.2-25、P2-27 海水質量變化 (GRACE 重力衛星資料)及溫鹽變化(SSL 資料)已於P.1-2表明其為造成海水面變動之主要原因。惟未見其相關特性與量級之陳述及討論其對本研究應用驗潮站或測高衛星資料進行 SLR 分析之必要性或影響性，請再補充說明。</p>	<p>10. 溫鹽資料為估算比容海水面變化與 GRACE 重力衛星資料為估算海水質量變化。溫鹽資料精度與觀測資料覆蓋的範圍與分佈相當大的關係；GRACE 重力衛星資料量級與改正模型的精度有關。而質量變化和 SSL 為造成海水面變化的主要原因，但與本研究應用驗潮站或測高衛星資料進行 SLR 分析為獨立研究之資料，並不影響其結果。</p>	<p>審查同意並確認處理說明。</p>
<p>11. P.3-12 表 3.8 中，針對 AVISO 及 RADs 測高衛星資料在 CWB 驗潮站位之 SLR 分析結果，可見臺灣東-西分區之相鄰驗潮站位之 SLR，皆具有明顯之差異變化，請作進一步之差異比較，並補充評述造成差異之原因。另外，在 P.3-7 中，內文”在相同範圍內，...SLR 之差異量平均值分別皆在 2mm/yr、3mm/yr 與 4mm/yr 以下”之意旨，請進一步作說明。</p>	<p>11. 本文中已提到造成差異的原因觀測時間涵蓋範圍較短，標準偏差則較大以及驗潮站周圍若涵蓋淺水區，則測高資料受到陸地反射波和改正模型較差，可能造成差異量較大。P.3-7 中 2mm/yr、3mm/yr 與 4mm/yr 為統計 AVISO 與 RADs 估算各驗潮站周圍 SLR 變化速率之差異量。</p>	<p>審查同意並確認處理說明。</p>
<p>12. P.4-2 關於海潮效應之改正，高頻訊號以(週期&lt;23 天)為界定及移除是何意？為何其移除可降低推算 SLR 標準偏差之變動？又低頻訊號以(週期&gt;146 天)為界定是何意？附錄四各圖與附圖 4.1，除了驗潮站位不同外，彼此間有何特殊之差異，請多作補充說明。</p>	<p>12. P.4-2 中”週期&lt;23 天”與”週期&gt;146 天”為誤植，正確應為”週期&lt;28 天”與”週期&gt;182 天”。高頻與低頻訊號的界定為週期&lt;月為高頻、週期&gt;月為低頻，本研究中低頻訊號為年週期與半年週期，因此低頻訊號以&gt;182 天表示。移除高頻訊號為進行海潮改正。本研究中估算 SLR 速率是利用六參數(包含偏差、斜率、年週期與半年週期)，若先將高頻訊號移除，後續估 SLR 速率的標準偏差將會降低。附錄四為表示各驗</p>	<p>審查同意並確認處理說明。</p>

<p>13. P.4-5 根據表 4.1 之分析結果，是否意謂 ECWMF、NCEP 之海水面氣壓資料，即使在 CWB 之近岸驗潮站上亦相符合？並請補充分析比較 IB 效應校正前後之 SLR(或引入討論附表 5-1 及附表 5-2)。第 4.2.2 節，為本研究之甚重要工作項目，內文及相關圖表之說明與討論，請補充強化其完整性。</p> <p>14. P.4-11 請補充說明式(4.5)中，如何配合圖 4.6 計算徧移量？徧移量如何辨識？標準如何設定？又圖 4.6 之圖說應與內文及式(4.4)作適當聯結。式(4.5)與式(4.6)中之 b 值，是否即為 SLR？</p> <p>15. P.4-13 圖 4.8 中之藍色線與圖線註解不相符，請檢視修正。此外，若圖 4.8 中之藍色線表示地殼垂直變動量，則請補充說明為何其具有月昇降變動特性？其造成之可能原因為何？表 4.4~4.8 依序請置於圖 4.9 前(請配合內文，編排表圖在內文之位置!)。表 4.4~4.8 中不同測高範圍內之單一地殼變量如何計算，請補充說明。</p>	<p>潮站進行海潮改正前後的差異。</p> <p>13. 是，應相符合。IB 效應校正前後之 SLR 請參閱 5.1 節。已加強說明 4.2.2 節。</p> <p>14. 式(4.5)為利用六參數加上步階函數改正徧移量，而圖 4.6 成果需配合式(4.6)改正徧移量。由小波分解出來的訊號，若有突然躍起或降低之現象則表示該資料可能含有徧移量，但現階段仍需配合人為手動確定徧移量。式(4.4)計算出來的訊號為圖 4.6 的原始訊號。式(4.5)中的 b 為 SLR 速率，式(4.6)中的 b 已改正為 b'，因為 b' 為地殼變動速率 (P.4-11)。</p> <p>15. 已改正圖 4.8。測高與驗潮站資料為空間解析度不同的資料，因此由兩資料估算的地殼變動訊號可能含有季節性變動。已改正編排表圖之順序於 P.4-16。計算表 4.4~4.8 中地殼變量如式(4.7)所示。</p>	<p>審查同意並確認處理說明。</p> <p>審查同意並確認處理說明。</p> <p>審查同意並確認處理說明。</p>
---	--	---

<p>16. P.4-15 圖 4.9 及圖 4-10 中比較不同測高範圍內之地殼垂直變動量，其月昇降變動特性甚明顯，請補充說明該圖內昇降變動之意義與分析其造成之可能原因。</p>	<p>16. 測高與驗潮站資料為空間解析度不同的資料，因此由兩資料估算的地殼變動訊號可能含有季節性變動。</p>	<p>審查同意並確認處理說明。</p>
<p>17. 第 4 章末尾圖 4.17、圖 4.19、及圖 4.22 中之 Trend of vertical motion，請補充說明其值之計算由來或依據。鑑於第四章各分節之內文及相關圖表，甚至是地殼變動速率附錄內之圖表，諸多為本研究之重點項目與關鍵成果，因此，第 4 章請作總體編排調整。</p>	<p>17. 計算方式如式(4.7)所示。已將部分附錄中圖表置於本文中。已調整第四章。</p>	<p>審查同意並確認處理說明。</p>
<p>18. P.5-6 圖 5.3 內，圖說 Original(Positive)、Original(Negative)、Bias 之意義，請補充定義及說明。Original(Negative)與 Vertical motion 顏色重復或相近，請修改。</p>	<p>18. 已補充”Original 為原始資料之 SLR 速率，其中 Positive 與 Negative 分別表示斜率為正與斜率為負。Ocean tide effect、IB effect、Bias value 與 Vertical motion 分別為海潮、IB 效應、偏移量、與地殼變動改正對於 SLR 速率影響量”。另外，已將圖 5.3 中 Vertical motion 代表顏色設定為黃色。</p>	<p>審查同意並確認處理說明。</p>
<p>19. P.5-7 內文本研究驗潮站之偏移量改正目前曾結合 AVISO 及 RADs 作評估(表 5.1~表 5.3)，請於本章尾作優選比較或結論時特別作優選建議之提示。</p>	<p>19. 已將偏移量改正方法之評估建議寫於第五章的 P.5-1。</p>	<p>審查同意並確認處理說明。</p>
<p>20. 附錄中重要之圖與表，請儘量移置於內文相對應之關聯位置。而且內文圖表與附錄圖表之編序應作區隔。內文中請就相關表圖成果作較詳細之討論導讀，避</p>	<p>20. 已補充重要的圖表於本文中，並且移除本文中部份”請參見附錄 X”之用語。</p>	<p>審查同意並確認處理說明。</p>

<p>免” (請參見附錄五)” 之用語</p> <p>21. 請加列簡報資料之資料處理流程圖，並請配合流程圖，作全文架構之編輯與報告層次之組織，俾突顯研究之推展項目程序與成果。</p>	<p>21. 已補充流程圖於第一章中。</p>	<p>審查同意 並確認處理說明。</p>
--	-------------------------	--------------------------

# 附錄十一 期末簡報

## 臺灣四周海域近十年 之海水面變化速率研究 【期末報告】

主持人：郭重言 國立成功大學測量及空間資訊學系  
協同主持人：林立青 國立成功大學國際波動力學研究中心

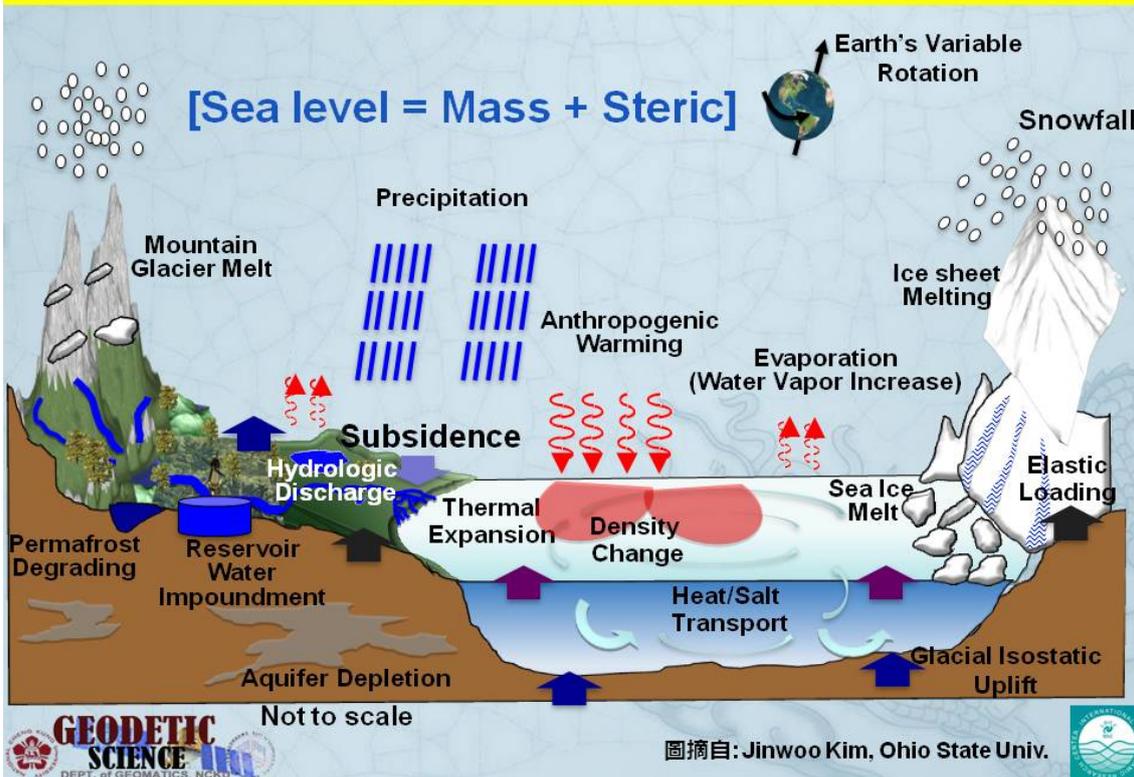


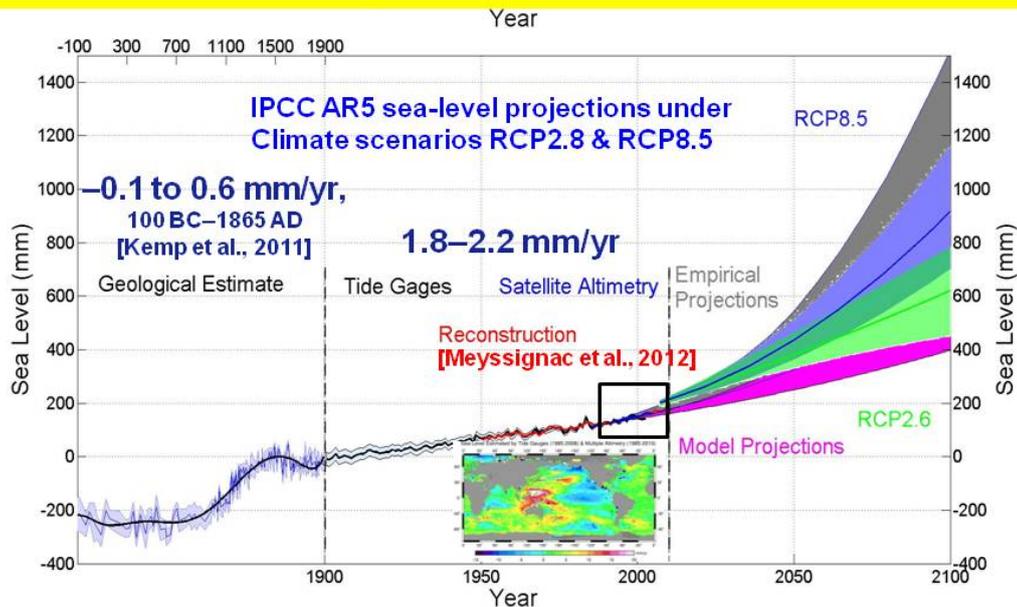
港灣技術研究中心  
November 15, 2013



### 研究動機與目的

2





2007 IPCC AR4 海平面上升預測 [Bindoff *et al.*, Solomon *et al.* 2007]: 2100可達0.58 m  
 2013 IPCC AR5 海平面上升預測 [Church *et al.*, 2013]: 2100 最高可達 0.98 m  
 2013 海平面上升預測中包含冰蓋(ice-sheets)融化後的影響  
 海平面上升預測為全球性海水面變化，非區域性海水面變化

## 台灣周圍海水面變化相關研究

- Tseng 等人[2009]利用1993-2003 台灣附近驗潮站(Tide gauge)和衛星測高(Satellite altimetry)資料計算求得海水面變化速率(Sea level rise, SLR)分別為5.7 mm/yr 和5.3 mm/yr，速率皆大於全球SLR之平均值。另外，該研究中僅探討海水上層溫度與海水面時間序列相關係數，並無法真正顯示海水溫度變化對SLR之貢獻。
- 黃清哲等人[2009] 利用台灣本島5個驗潮站資料與衛星測高資料估算SLR，結果顯示台灣周圍海水面皆呈上升現象，其中台灣東部驗潮站和測高資料計算之趨勢相差約50 mm/yr，作者認為可能台灣東部的地殼變動較劇烈所導致。
- Tseng 等人[2009]與黃清哲等人[2009]的研究在利用驗潮站進行台灣周圍SLR計算時皆未考慮地殼變動之影響，而台灣地區驗潮站地殼變動量可能較海水面變動訊號來的大[Chang *et al.*, 2012]。
- Cheng 等人[2013]應用初始地球物理校正(Default-corrections)於SLR的計算則會在台灣東南及西北海域出現過高及過低的推估，因此，區域之海水位變遷須合理考慮區域特性之地球物理校正(Alternative corrections)。

## 工作項目

5

- 海面水位變化相關研究、觀測和學術文獻之蒐集與匯整分析
- 台灣驗潮站實測潮位紀錄和衛星測高資料之蒐集、改正與率定
- 應用驗潮站和衛星測高資料，分區進行臺灣四周海域長短期海面水位昇降變動速率分析
- 分區比較與評估臺灣四周海域應用驗潮站和衛星測高資料進行長短期海水面變化速率分析結果之可靠度與準確度
- 利用國內驗潮站資料和國際衛星測高資料，分區計算評估臺灣四周海域近十年期之海面水位昇降變動率



## 研究資料

6

### ■ 驗潮站

1. Permanent Service for Mean Sea Level (PSMSL)
2. University of Hawaii Sea Level Center (UHSLC)
3. Central Weather Bureau (CWB)

### ■ 衛星測高 (資料來源: AVISO與RADs)

1. TOPEX/Poseidon(T/P), 1992/09~2002/08
2. Jason-1(J-1), 2002/01~2009/01
3. Jason-2(J-2), 2008/07~now

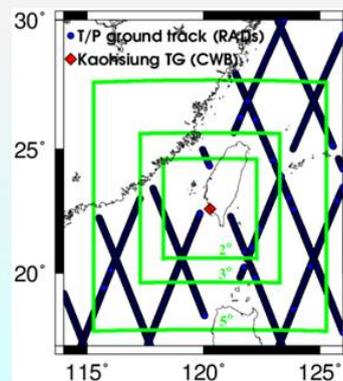
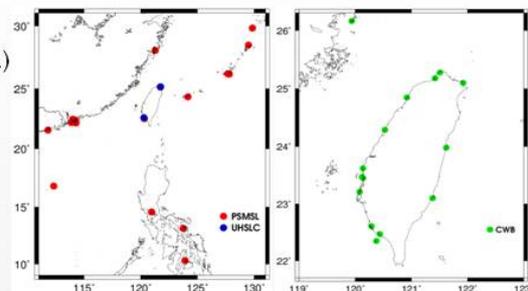
### ■ GRACE (Gravity Recovery and Climate Experiment)重力衛星

### ■ 溫鹽資料

1. Ishii [Ishii and Kimoto, 2009]
2. JAMSTEC [Hosoda *et al.*, 2008]

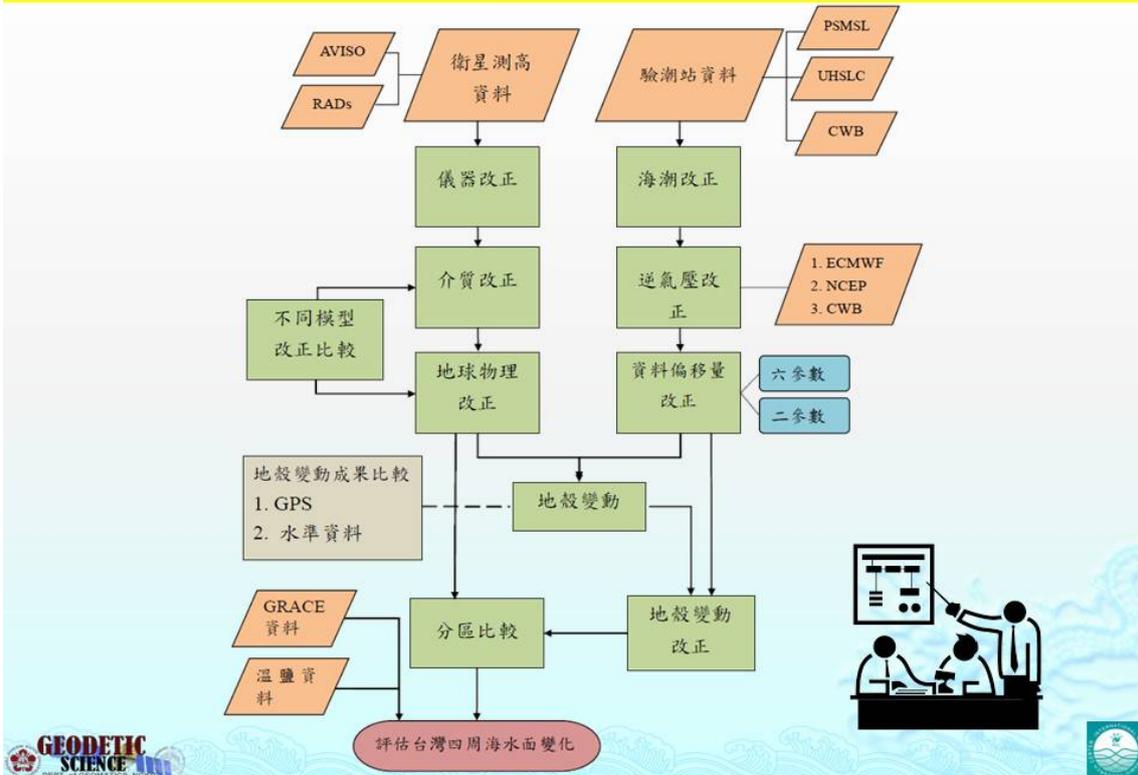
■ 研究時間: 2002-2011年

■ 研究範圍: 10° N~30° N 與 110° E~130° E



# 流程圖

7



# 衛星測高模型改正評估

8

Courtesy CNES/D. Ducros

### Geophysical corrections

- Ocean tides
- Solid earth tides
- Pole tides
- Tidal loading

### Propagation corrections

- Ionosphere
- Wet troposphere
- Dry troposphere

### Surface corrections

- Inverse barometer
- Electromagnetic bias

Data Corrections
Sea Level Rise, SLR

# 衛星測高模型改正評估

9

各項改正	改正模型		
	T/P 衛星	J-1 衛星	J-2 衛星
乾對流層改正	1. ECMWF model 2. NCEP model 3. ECMWF ERA-int model	1. ECMWF model 2. NCEP model 3. ECMWF ERA-int model	1. ECMWF model 2. NCEP model 3. ECMWF ERA-int model
濕對流層改正	1. TMR 2. ECMWF model 3. NCEP model 4. ECMWF ERA-int model	1. Enhanced JMR 2. ECMWF model 3. NCEP model 4. ECMWF ERA-int model 5. Original JMR	1. AMR 2. ECMWF model 3. NCEP model 4. ECMWF ERA-int model
電離層改正	1. dual-frequency ionospheric correction 2. smoothed dual-frequency ionosphere correction 3. ionospheric correction 4. IRI2007 ionospheric correction 5. NIC09 ionospheric correction	1. dual-frequency ionospheric correction 2. smoothed dual-frequency ionosphere correction 3. JPL GIM ionospheric correction 4. IRI2007 ionospheric correction 5. NIC09 ionospheric correction	1. dual-frequency ionospheric correction 2. smoothed dual-frequency ionosphere correction 3. JPL GIM ionospheric correction 4. IRI2007 ionospheric correction 5. NIC09 ionospheric correction 6. dual-frequency ionospheric correction (Ku MLE3) 7. MLE3 smoothed dual-frequency ionosphere correction
逆氣壓改正	1. local inverse barometer correction 2. local+global inverse barometer correction 3. global inverse barometer correction 4. MOG2D total inverse barometer correction 5. MOG2D mean inverse barometer correction	1. local inverse barometer correction 2. local+global inverse barometer correction 3. global inverse barometer correction 4. MOG2D total inverse barometer correction 5. MOG2D mean inverse barometer correction	1. local inverse barometer correction 2. local+global inverse barometer correction 3. global inverse barometer correction 4. MOG2D total inverse barometer correction 5. MOG2D mean inverse barometer correction
海潮改正	1. FES2004 ocean tide 2. GOT4.7 ocean tide 3. GOT4.8 ocean tide 4. GOT4.9 ocean tide	1. FES2004 ocean tide 2. GOT4.8 ocean tide 3. GOT4.9 ocean tide	1. FES2004 ocean tide 2. GOT4.8 ocean tide 3. GOT4.9 ocean tide
海潮負載改正	1. FES2004 load tide 2. GOT4.7 load tide 3. GOT4.8 load tide 4. GOT4.9 load tide	1. FES2004 load tide 2. GOT4.8 load tide 3. GOT4.9 load tide	1. FES2004 load tide 2. GOT4.8 load tide 3. GOT4.9 load tide
海面狀態偏差改正	1. BM4 sea state bias 2. CLS sea state bias 3. Chambers BM4 sea state bias	1. CLS sea state bias	1. CLS sea state bias (Ku-band) 2. CLS sea state bias (C-band) 3. CLS sea state bias (Ku-band MLE3)

# 衛星測高模型改正評估

10

## ■ 比較改正後之衛星測高資料估算SLR(mm/yr)之差異

各項改正	T/P (1992/09-2002/08)	J-1 (2002/01-2009/01)	J-2 (2008/07-2013/06)
乾對流層改正模型	0-0.1	0-0.1	0-0.2
海潮改正	0	0.1-0.2	0-0.1
海潮承載改正	0	0	0
濕對流層改正	0.2-1.6	0.1-0.7	0.1-1.2
電離層改正	0-2.2	0.1-0.9 (排除IRI2007)	0-0.2 (排除IRI2007)
逆氣壓改正	0-1.3	0.1-1.3	0-0.8
海面狀態偏差改正	0.1-0.7	x	0

- 乾對流層改正、海潮改正、海潮承載改正所造成SLR的差異約0-0.2 mm/yr
- 濕對流層多以多波段微波輻射儀進行改正，如TMR、JMR與AMR
- 電離層延遲多以雙頻觀測消除
- 逆氣壓改正中以最新MOG2D total inverse barometer correction最被廣泛採用

■ 本計畫使用衛星測高資料時所採用之各項改正模型

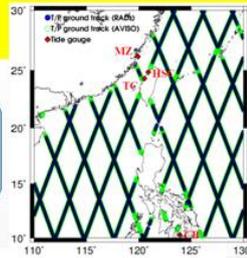
各項改正	RADs	AVISO
乾對流層改正	1. T/P: ECMWF 2. J-1: ECMWF 3. J-2: ECMWF	1. T/P: Rectangular grid 2. J-1: Gaussian grid 3. J-2: Gaussian grid
濕對流層改正	1. T/P: TMR 2. J-1: enhanced JMR 3. J-2: AMR	1. T/P: from TMR and from ECMWF (if near coast) 2. J-1: from JMR and from ECMWF (if near coast) 3. J-2: from AMR and from ECMWF (if near coast)
電離層改正	1. T/P: smoothed dual-frequency 2. J-1: smoothed dual-frequency 3. J-2: smoothed dual-frequency	1. T/P: dual-frequency 2. J-1: dual-frequency 3. J-2: dual-frequency
逆氣壓改正	1. T/P: MOG2D total IB correction 2. J-1: MOG2D total IB correction 3. J-2: MOG2D total IB correction	1. T/P: MOG2D+Rectangular grid 2. J-1: MOG2D+Rectangular grid 3. J-2: MOG2D+Rectangular grid
海潮改正	1. T/P: GOT4.8 2. J-1: GOT4.8 3. J-2: GOT4.8	1. T/P: GOT4.7 2. J-1: GOT4.7 3. J-2: GOT4.7
海潮承載改正	1. T/P: GOT4.8 2. J-1: GOT4.8 3. J-2: GOT4.8	1. T/P: GOT4.7 2. J-1: GOT4.7 3. J-2: GOT4.7
海面狀態偏差改正	1. T/P: CLS 2. J-1: CLS 3. J-2: CLS	1. T/P: Non parametric SSB(from GDR) (Topex) BM4 formula (Poseidon) 2. J-1: Non parametric SSB (from GDR) 3. J-2: Non parametric SSB (from GDR)

## 衛星測高資料比較

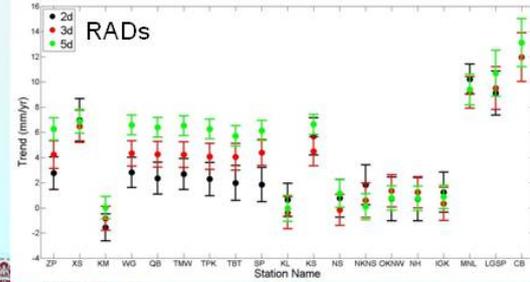
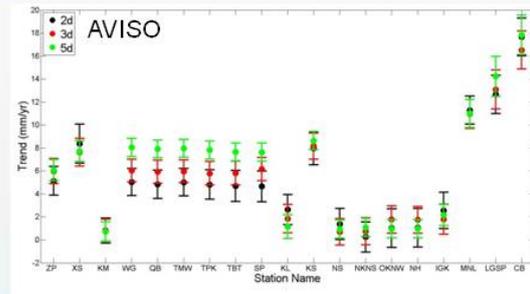
■ SLR之估算

$$SL(t) = a + bt + c \sin(2\pi t) + d \cos(2\pi t) + e \sin(4\pi t) + f \cos(4\pi t)$$

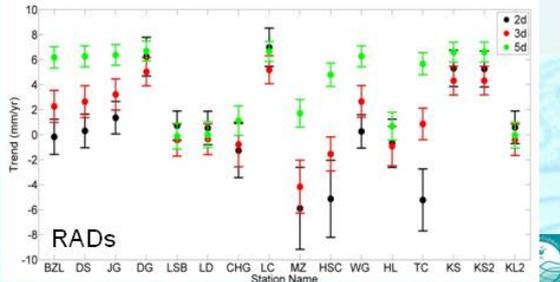
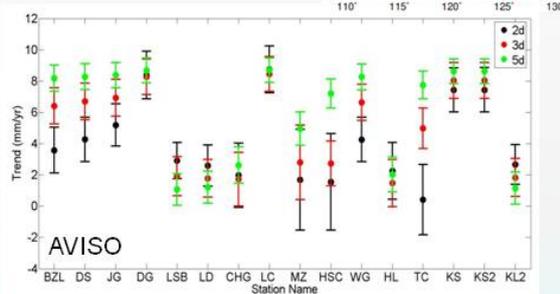
其中  $a$  為偏差,  $b$  為 SLR,  $c$  和  $d$  分別為年訊號和半年訊號之正弦振幅,  $e$  和  $f$  分別為年訊號和半年訊號之餘弦振幅,  $t$  為時間,  $SL$  為海水面高度變化之時間序列



➤ PSMSL



➤ UHSLC 與 CWB

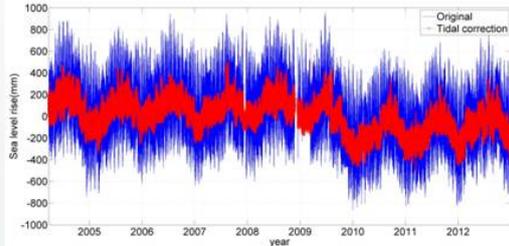


# 驗潮站資料校正

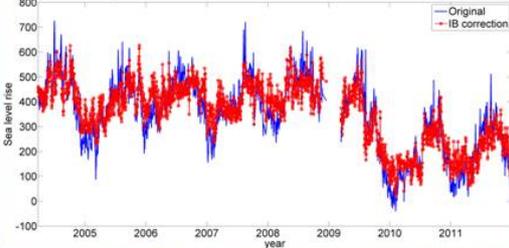
13



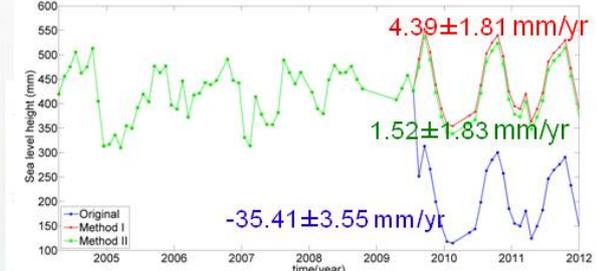
## 海潮改正(CWB高雄驗潮站)



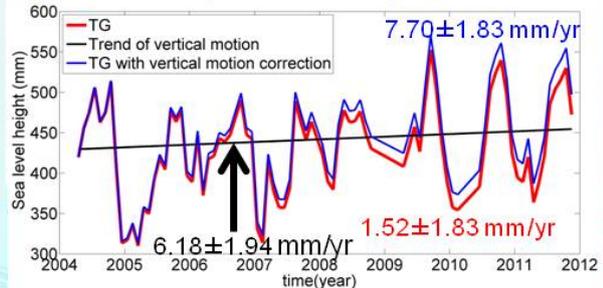
## 逆氣壓改正(CWB高雄驗潮站, 氣壓資料: ECMWF)



## 資料偏移量改正(CWB高雄驗潮站)

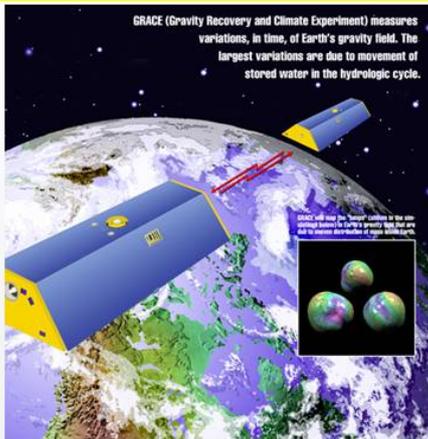


## 地殼變動改正(CWB高雄驗潮站)



# GRACE

14



圖摘自: <http://grace.jpl.nasa.gov/>

- 美國及德國太空中心研發並於2002年3月發射
- 軌道高度485公里, 傾角89度, 兩顆子衛星間相距220公里, 空間解析度可達400~40000公里 [Tapley et al., 2004]
- 提供高解析度重力場解及觀測靜態與動態重力場之變化用於觀測水文質量交換

## GRACE重力場解計算質量變化

1. 衛星雷射測距觀測加入或取代GRACE GSM之一階項和 $C_{20}$
2. 移除步驟1處理完之所有月份重力場解平均值
3. 利用van der Wal et al. [2011]模型移除冰後回彈效應
4. 進行去相關性濾波處理 [K = 15, UP = (30, 0) (10, 10)]
5. 利用處理後係數計算質量變化
6. 進行半徑300公里高斯濾波處理
7. 進行洩漏效應改正
8. 將AOD計算之質量變化加入步驟7之計算結果

- 比容海面(Steric sea level, SSL)變化可由海水溫度及鹽度資料計算海水密度加上由深度轉換之壓力積分求得，公式如下：

$$h_{steric} = \int_{z_1}^{z_2} \frac{\rho_0(S_0, T_0, z) - \rho(S, T, z)}{\rho_0(S_0, T_0, z)} dz$$

其中 $S_0$ 與 $T_0$ 為長時間平均之鹽度及溫度資料， $S$ 與 $T$  為月平均之鹽度及溫度資料， $\rho$ 和 $\rho_0$ 分別為海水密度和參考海水密度， $z$  為海水深度

Data	Spatial resolution	Depth(layers)	Data period	Data Sources
Ishii [Ishii and Kimoto, 2009]	1°x1°	1500m(24)	1945/01-2011/12	CTD/XBT/Argo
JAMSTEC[Hosoda et al., 2008]	1°x1°	2000m(25)	2001/01-2012/12	Argo plus others



- 改正前後SLR之差異

✓ 使用方法II改正驗潮站資料偏移量  
 ✓ 台灣附近驗潮站資料適用5°衛星測高資料，而其他區域驗潮站資料則適用2°衛星測高資料

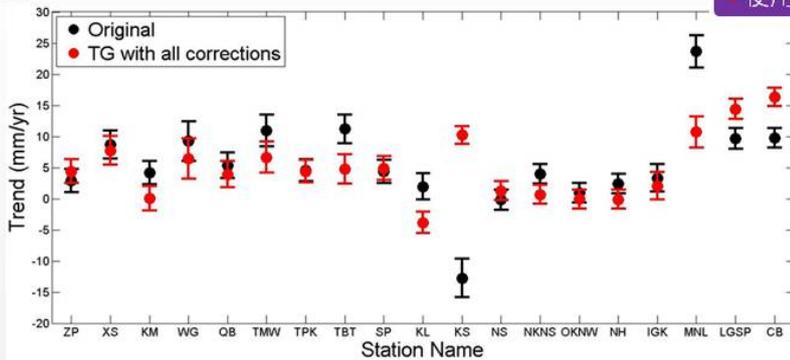
- 地殼變動速率
- 估算之地殼變動速率與現有成果比較
- 海面水位昇降變動速率
- 台灣周圍海域SLR之原因



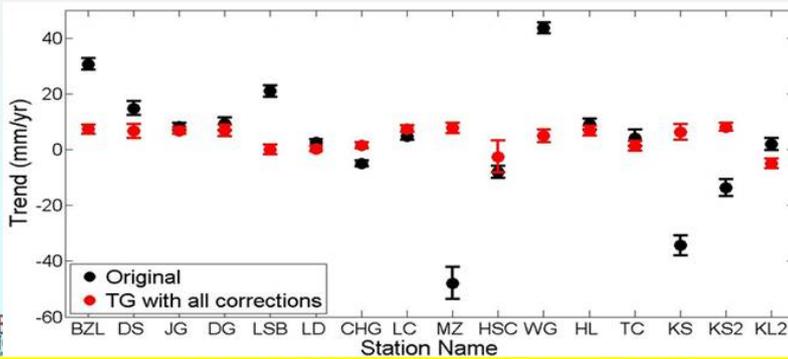
# 驗潮站資料校正之影響量

## PSMSL

使用RADs衛星測高資料



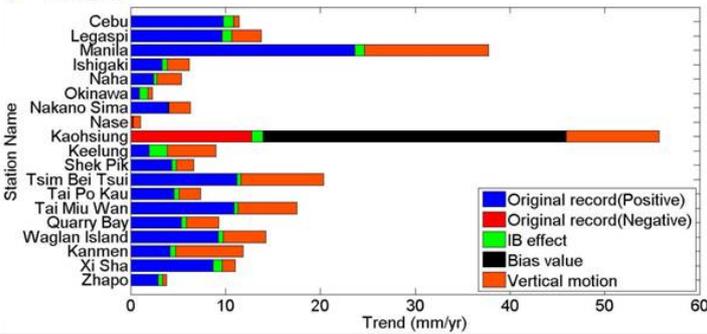
## UHSLC與CWB



# 驗潮站資料校正之影響量

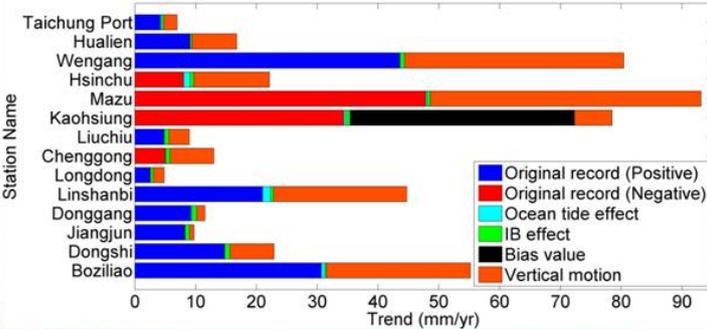
## PSMSL

使用RADs衛星測高資料

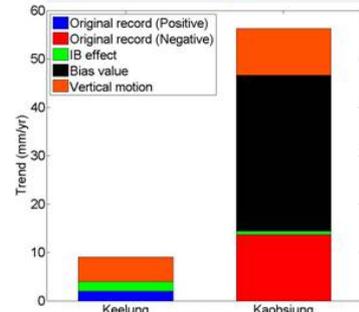


- 各項改正對於驗潮站資料估算SLR的影響量：
- 海潮改正: 0-1 mm/yr
- 逆氣壓改正: 0-2 mm/yr
- 偏移量改正: 32-37 mm/yr
- 地殼變動改正: 1-45 mm/yr
- 影響量平均值約 7.6 mm/yr

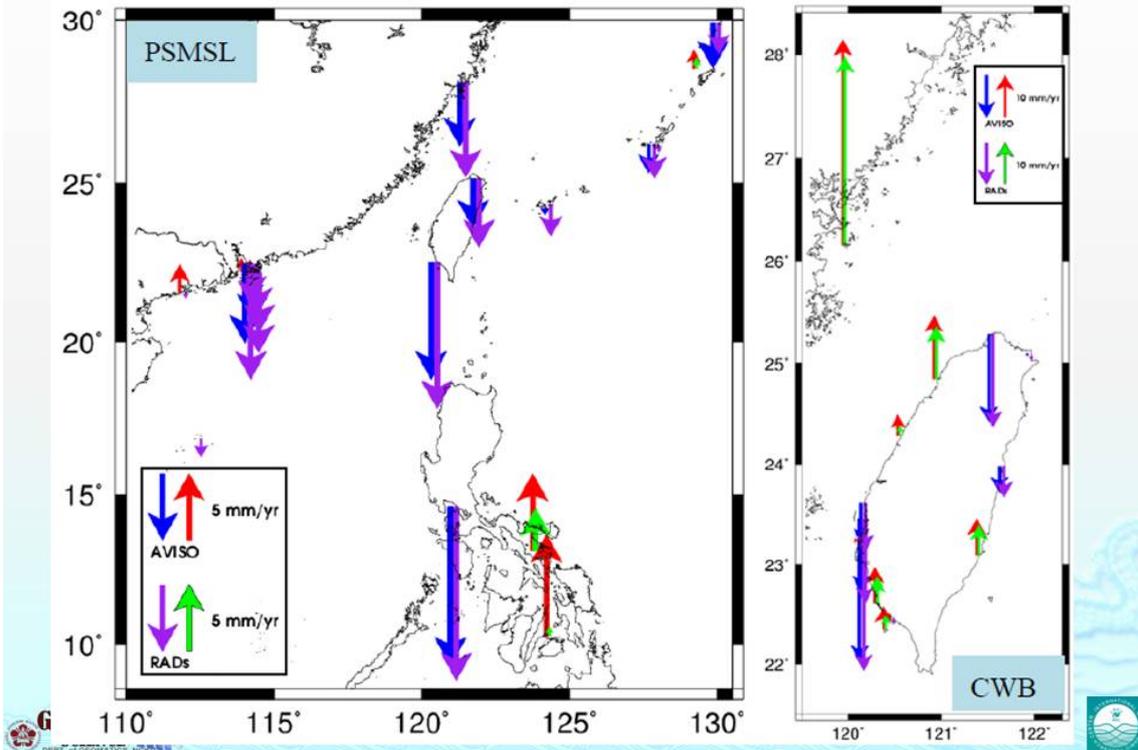
## CWB



## UHSLC

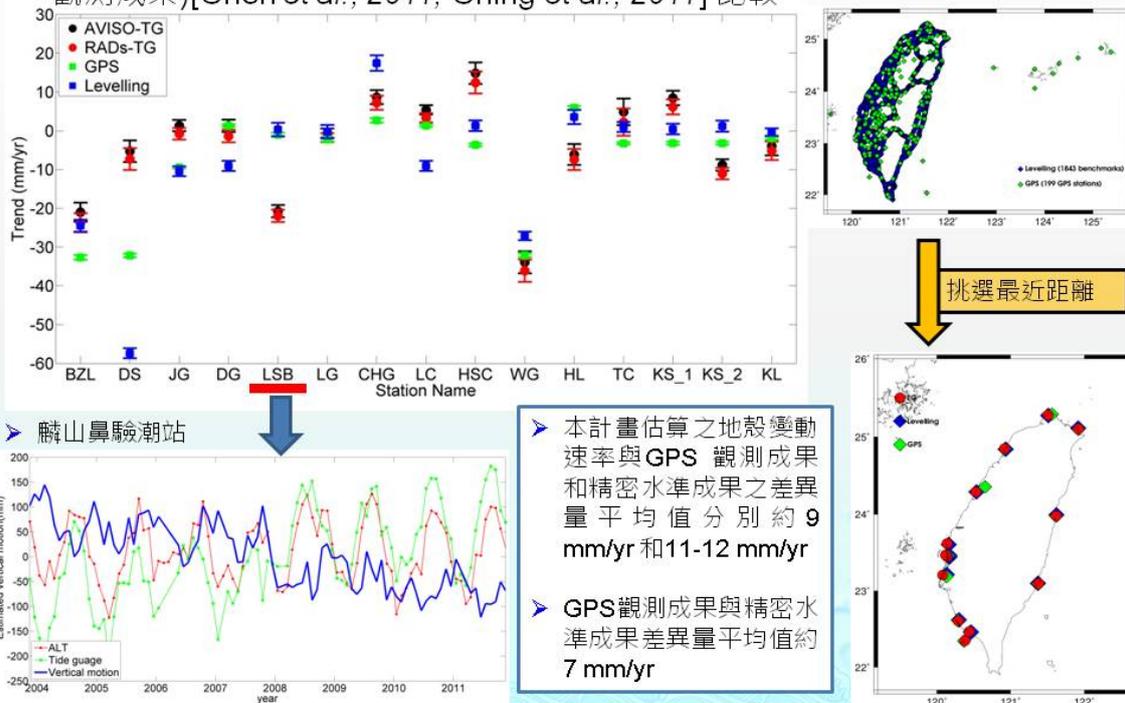


# 地殼變動



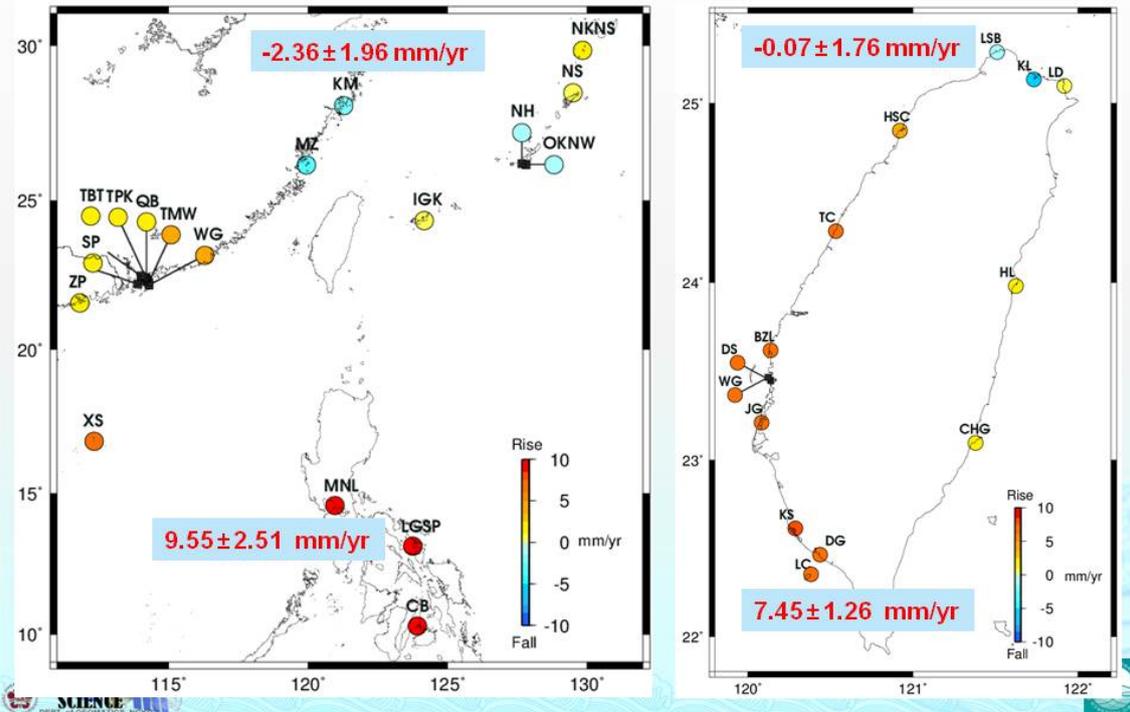
# 地殼變動

■ 估算之地殼變動速率與現有成果(精密水準與GPS連續觀測成果)[Chen et al., 2011; Ching et al., 2011] 比較



# 海面水位昇降變動速率

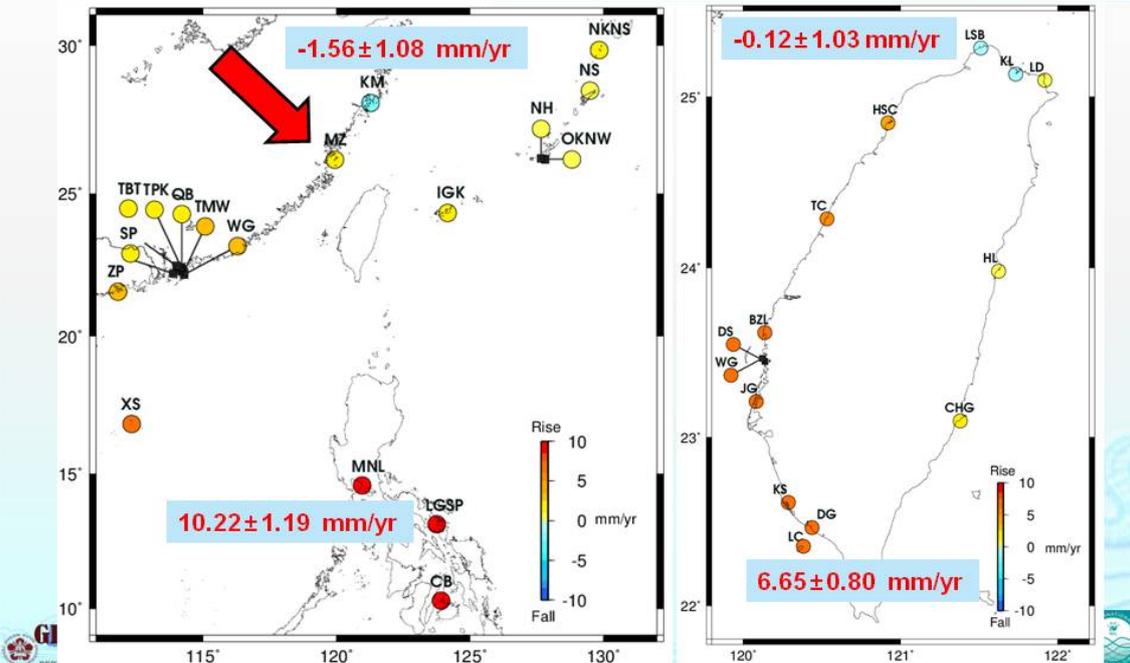
■ 驗潮站資料

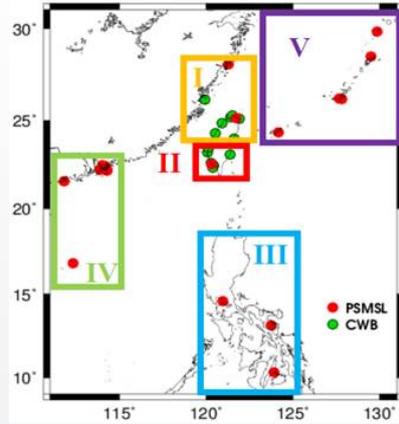


# 海面水位昇降變動速率

■ 衛星測高RADS資料

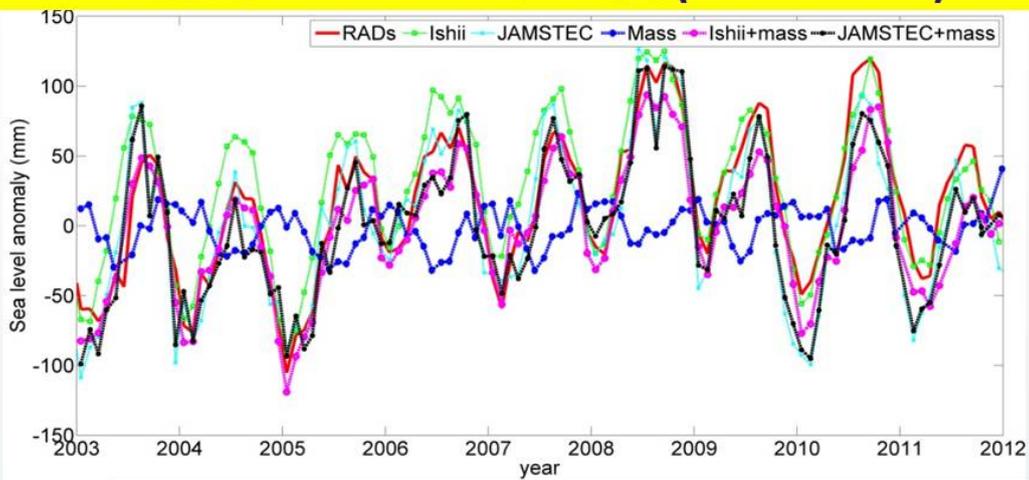
2004-2011馬祖驗潮站(驗潮站資料):  $-2.58 \pm 5.74$  mm/yr  
 2002-2011馬祖驗潮站(測高資料):  $1.71 \pm 1.11$  mm/yr  
 2004-2011馬祖驗潮站(測高資料):  $0.51 \pm 1.62$  mm/yr





Region	Trend (mm/yr)			
	AVISO		RADs	
	Altimetry	Tide gauge	Altimetry	Tide gauge
Northern Taiwan (I)	2.30±1.11	2.38±0.94	-0.62±1.10	0.62±0.94
Southern Taiwan (II)	5.50±1.31	7.91±0.58	3.96±1.37	5.81±0.58
Philippine (III)	11.27±1.60	13.81±1.11	7.60±1.64	10.22±1.11
Hong Kong (IV)	7.96±1.10	5.40±0.82	6.08±1.09	3.02±0.82
Japan (V)	1.04±0.95	0.76±0.75	0.49±0.95	0.39±0.75
Total regions (I-V)	5.07±0.79	5.51±0.37	3.77±0.80	3.45±0.37
All study areas	7.79±0.87	5.51±0.37	6.41±0.86	3.45±0.37

## 台灣周圍海域SLR之原因 (2003-2011)



Data	Trend (mm/yr)	Corr. with AVISO	Corr. with RADs
AVISO	8.68±1.05	x	x
RADs	7.24±1.05	x	x
Ishii	2.48±1.04	0.92	0.93
JAMSTEC	2.66±1.33	0.86	0.89
Mass	1.10±0.32	-0.19	-0.22
Ishii+mass	3.80±1.13	0.94	0.95
JAMSTEC+mass	3.73±1.46	0.88	0.90



- 不同乾對流層改正、海潮改正、海潮承載改正對於衛星測高資料計算SLR所造成的差異很小，而濕對流層改正、電離層延遲改正與逆氣壓改正對SLR變化計算影響較大。本研究中測高資料應用的改正模型皆以RADs和AVISO資料中心之預設改正模型來進行。
- 地殼變動速率成果顯示整個研究區域大多呈現地殼下降情形，其中塹港每年呈現約30~40 mm下沉量最為嚴重。
- 利用改正前後的驗潮站資料估算SLR有顯著的不同，其中海潮因子與逆氣壓因子對於SLR推估的影響較小，海潮與逆氣壓影響量分別為0~1 mm/yr與0~2 mm/yr。偏移量與地殼變動因子之影響較為顯著，偏移量影響量皆在30 mm/yr以上，地殼變動改正的影響量平均值約7.5 mm/yr，因此在台灣附近區域，若以未經偏移量和地殼變動改正之驗潮站資料來進行SLR估算，將造成嚴重誤差。
- 台灣南方海域的SLR較台灣北部快，SLR越往南越大，而台灣西方海域較台灣東方海域SLR快。由衛星測高資料估算2002-2011年整個研究區域的SLR為6~8 mm/yr。

- 比較近十年測高海水面變化、GRACE 海水質量、溫鹽比容海平面變化後可知，SSL變化與總海水面變化呈現高相關(相關係數約0.9)。SSL變化速率與海洋質量變化速率亦持續上升，兩者分別約占總海水面變化速率的30%~40%與15%。然而三者資料間約有45%的SLR之不確定量，其中部份因素可能是由改正GRACE之冰後回彈模型誤差[Chambers *et al.*, 2010]與深海SSL變化所造成 [Boe' *et al.*, 2009]。
- 未來工作：  
本計畫僅利用十年衛星測高與驗潮站資料進行地殼變動和SLR計算，導致估算變動速率之標準偏差較大，進而影響SLR速率之計算精度，因此展望未來工作將利用長期(二十年)資料進行地殼變動和SLR估算分析。