

105-023-7863

MOTC-IOT-104-H3DB003a

臺灣海域未來平均海平面升降 變動率之推估



交通部運輸研究所

中華民國 105 年 03 月

105-023-7863

MOTC-IOT-104-H3DB003a

臺灣海域未來平均海平面升降 變動率之推估

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 105 年 03 月

GPN：1010500322

定價 200 元

國家圖書館出版品預行編目(CIP)資料

臺灣海域未來平均海平面升降變動率之推估 / 郭重言
等著.-- 初版.-- 臺北市：交通部運輸研究所，民 105.03
面；公分
ISBN 978-986-04-8218-8(平裝)

1.海洋水文學 2.臺灣

351.93

105004035

臺灣海域未來平均海平面升降變動率之推估

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 (中文版/中心出版品)
電話：(04) 26587176
出版年月：中華民國 105 年 3 月
印刷者：禾泰印刷設計有限公司
版(刷)次冊數：初版一刷 70 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：200 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：1010500322

ISBN：978-986-04-8218-8 (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：臺灣海域未來平均海平面升降變動率之推估			
國際標準書號 ISBN：978-986-04-8218-8 (平裝)	政府出版品統一編號 1010500322	運輸研究所出版品編號 105-023-7863	計畫編號 104-H3DB003a
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：台南市大學路 1 號 聯絡電話：06-2757575 轉 63826		研究期間 自 104 年 2 月 至 104 年 12 月
關鍵詞：海平面變化、衛星測高、潮位站、太平洋年代際振盪、聖嬰-南方振盪			
摘要： 近年來全球海平面上升為全球氣候暖化衍伸出的重要問題之一。全球各區域海平面上升速率並非一致，而臺灣四周海域之海水面呈現上升現象，且上升速率較全球平均大，因此，充分應用國際與本土監測資訊，據以詳實預估臺灣周遭海域海平面之升降變化，明確為系屬海島國家因應氣候變遷衝擊之重要議題。 一般而言，潮位站與衛星測高為研究海平面變化的兩種主要觀測量，但資料觀測時間較短(~20 年)，所估算之海平面變化速率會受到海洋低頻震盪影響。本研究分別利用經驗模態分解法與多變量擬合法分析臺灣周遭海平面資料與氣候因子之相關性，並且整合重力衛星資料和海洋溫、鹽度資料來了解臺灣周遭海域海水質量和溫鹽資料計算之比容海水面對於絕對海平面變化之貢獻量，並預估海平面未來變動趨勢。 研究結果顯示，利用總體經驗模態分解法減少低頻訊號對衛星測高資料計算海平面上升速率之影響，結果無法有效降低低頻訊號之影響(改正前、後分別為 1~8 mm/yr、1~7 mm/yr)。利用多變量線性方程式擬合衛星測高資料，可估算出氣候因子(如：聖嬰-南方振盪與太平洋年代際振盪現象)對海平面變化之貢獻量，並減低氣候因子造成之海平面變化速率影響。僅利用六參數估算出之絕對海平面上升速率將受到氣候因子影響，臺灣周圍海平面上升速率由北(約 2~3 mm/yr)往南(8~12 mm/yr)逐漸增快；而在考慮氣候因子影響下，以多變量擬合 1993-2012 衛星測高資料，估算之絕對海平面上升速率在各海域則較為一致，速率約在-2~4 mm/yr，其中聖嬰-南方振盪現象主要影響海平面範圍為緯度±20° 以內，而太平洋年代際振盪現象則影響整個臺灣周圍海域。另外，分析臺灣周圍 2003-2012 衛星測高資料、重力衛星資料和海洋溫、鹽度資料得知，臺灣東北海域比容海水面與海洋質量變化對於海平面升降速率貢獻量相似，而東南海域之比容海水面與海洋質量變化分別約占海平面上升的 70%~90%與 20%；而臺灣西部溫、鹽觀測量較為稀少，導致計算之比容海水面誤差較大。最後利用衛星測高資料，推算 2050 年臺灣四周未來海平面相對於 2012 年之估計值，其在修正氣候因子前、後之上升量，分別約為 200 mm 及 90 mm。 研究成果之效益：			
(1) 學術成就(科技基礎研究)方面：發表國內研討會論文 1 篇；出版研究報告 1 冊。			
(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，整合衛星遙測、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，並分區提供詳實地殼板塊擠壓之造山陸昇與地層下陷的地殼垂直變動率資訊。特別是利用多變量線性方程式擬合衛星測高資料，考量聖嬰-南方振盪與太平洋年代際振盪現象等氣候因子對海平面變化之貢獻量，進而推估臺灣海域未來 50 年平均海平面之升降變動量。

- (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長年期(近二十年)詳實的平均海平面升降變動率特性，並預為推估臺灣海域未來 50 年平均海平面之升降變動量。研究成果可促進都市防洪、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，並考量聖嬰-南方振盪與太平洋年代際振盪現象等氣候因子對海平面升降變化之影響量，預為推估臺灣海域未來 50 年平均海平面之升降變動量。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
105 年 3 月	186	200	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

TITLE: Projection of future sea level changes around Taiwan			
ISBN 978-986-04-8218-8 (pbk)	GOVERNMENT PUBLICATIONS NUMBER 1010500322	IOT SERIAL NUMBER 105-023-7863	PROJECT NUMBER 104-H3DB003a
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			PROJECT PERIOD FROM February 2015 TO December 2015
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 701, Taiwan PHONE: 06-2757575 ext 63826			
KEY WORDS: Sea level change, Satellite altimetry, Tide gauge, PDO, ENSO			
ABSTRACT: In recent years, global sea level rise resulting from global warming has been one of the highly respected and important issues. Since the rates of sea level changes are not uniform in worldwide oceans and sea level trend around Taiwan is rising and faster than global averaged trend, accurate estimation and projection of sea level changes around Taiwan are both extremely important. Traditionally, tide gauges and satellite altimetry are the common instruments used to determine sea level changes; however, the time span of data (< 20 years) is too short to avoid the influence of low-frequency signals on determining sea level trend. In this study, we attempt to analyze the relationship between climate factors and sea level around Taiwan by two techniques, including Ensemble Empirical Mode Decomposition (EEMD) method and multivariate fitting method. We will also focus on understanding the contributions of sea level rise around Taiwan using the combination of satellite altimetry data, space gravimetry data and <i>in-situ</i> ocean temperature and salinity data. Finally, the future sea level change projection around Taiwan is calculated using the trends derived from satellite altimetry data. The results show that the sea level trend from altimetry data, corrected by low-frequency signals from tide gauges decomposed by EEMD, is not significantly improved (the trends without and with low-frequency correction: 1~8 <i>mm/yr</i> and 1~7 <i>mm/yr</i>). On the other hand, we used multivariable linear function to fit altimeter measurements during the period of 1993-2012 which allows us to reduce impacts of interannual (El Niño Southern Oscillation, ENSO) and decadal (Pacific Decadal Oscillation, PDO) climate factors on the determination of sea level trend around Taiwan. Without considering the impacts of climate factors, the absolute sea level trends around Taiwan derived by six-parameter fitting method gradually increase from the north of Taiwan at a rate of 2~3 <i>mm/yr</i> to the south of Taiwan at 8~12 <i>mm/yr</i>; however, the rates of sea level trends are roughly uniform (-2~4 <i>mm/yr</i>) using the multivariate fitting method. The ENSO phenomenon strongly influences the regional sea level within the latitude			

of 20°N~20°S, and sea level all around Taiwan could be possibly affected by PDO phenomenon. Moreover, the results of sea level budget show that steric sea level and ocean mass changes contribute to total absolute sea level at the northeast of Taiwan at a similar rate, but contribute about 70%~90% and 20% at the southeast of Taiwan, respectively. In the western ocean of Taiwan, the temperature and salinity data are lack, so the steric sea level is not accurate. Finally, the projected sea level around Taiwan by 2050 with and without considering climate factors would reach 200 *m* and 90 *m* relative to the estimated sea level in 2012, respectively.

DATE OF PUBLICATION March 2016	NUMBER OF PAGES 186	PRICE 200	CLASSIFICATION ☐RESTRICTED ☐CONFIDENTIAL ☐SECRET ☐TOP SECRET ☒UNCLASSIFIED
-----------------------------------	------------------------	--------------	---

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

臺灣海域未來平均海平面升降變動率之推估

目 錄

中文摘要	I
ABSTRACT	III
表目錄	VIII
圖目錄	X
第一章 緒論	1-1
1.1 研究動機與目的	1-1
1.2 研究流程	1-10
1.3 工作項目與執行進度	1-11
1.4 本文架構	1-12
1.5 第一章完成之工作項目	1-13
第二章 研究資料	2-1
2.1 測高衛星	2-1
2.2 潮位站	2-8
2.3 重力反演和氣候實驗重力衛星	2-14
2.3.1 重力反演和氣候實驗衛星介紹	2-14
2.3.2 重力反演和氣候實驗重力衛星觀測原理	2-18
2.3.3 去相關演算法	2-19
2.3.4 高斯濾波	2-21
2.3.5 洩漏效應	2-21
2.3.6 海水質量變化計算	2-22

2.4 溫度與鹽度資料.....	2-24
2.5 氣候指標.....	2-25
2.6 第二章完成之工作項目.....	2-27
第三章 潮位站資料改正.....	3-1
3.1 海潮改正.....	3-1
3.2 逆氣壓改正.....	3-4
3.3 偏移量改正.....	3-7
3.4 潮位站地表垂直變動改正.....	3-14
3.4.1 潮位站地表垂直變動速率.....	3-14
3.4.2 近二十年潮位站地表垂直變動速率.....	3-15
3.4.3 估算之地表垂直變動速率與全球衛星定位系統和水準 資料成果比較.....	3-17
3.5 海洋年際低頻變動.....	3-21
3.5.1 潮位站資料內插.....	3-21
3.5.2 總體經驗模態分解法.....	3-22
3.5.3 氣候因子與海水面變化之關係.....	3-25
3.6 第三章完成之工作項目.....	3-33
第四章 臺灣四周海域之絕對海平面升降速率與未來趨勢預估.....	4-1
4.1 改正前後海水面上升速率之差異.....	4-2
4.2 移除低頻訊號前後海水面上升速率之差異.....	4-5
4.3 多變量線性擬合.....	4-10
4.3.1 多變量線性擬合法.....	4-10
4.3.2 成果分析.....	4-13

4.4 合成平均差異推算法.....	4-20
4.5 分區比較臺灣四周海水面變化.....	4-27
4.5.1 臺灣周遭海域海水面上升速率之原因	4-28
4.5.2 臺灣周遭海域海水面上升速率	4-34
4.6 未來海水面預估.....	4-35
4.7 第四章完成之工作項目	4-39
第五章 結論與建議.....	5-1
5.1 結論.....	5-1
5.2 建議.....	5-3
參考文獻.....	參-1
附錄一 潮汐分潮週期.....	附錄 1-1
附錄二 中央氣象局潮位站資料之改正流程.....	附錄 2-1
附錄三 期中報告審查意見處理情形表.....	附錄 3-1
附錄四 期末報告審查意見處理情形表.....	附錄 4-1
附錄五 期末簡報.....	附錄 5-1

表 目 錄

表 2.1 衛星測高基本資料表.....	2-3
表 2.2 臺灣附近海域平均海平面永久服務中心資料庫之潮位站資訊	2-11
表 2.3 臺灣附近海域中央氣象局資料庫之潮位站資訊.....	2-11
表 3.1 平均海平面永久服務中心潮位站垂直變動速率.....	3-16
表 3.2 中央氣象局潮位站垂直變動速率.....	3-16
表 3.3 估算之潮位站地表垂直變動速率與全球衛星定位系統成果比較	3-20
表 3.4 估算之潮位站地表垂直變動速率與水準成果比較.....	3-21
表 3.5 潮位站資料與多重 ENSO 指數以及太平洋年代際振盪指數間之 相關係數.....	3-31
表 4.1 平均海平面永久服務中心潮位站資料經各項改正後所估算之海 水面上升速率.....	4-2
表 4.2 平均海平面永久服務中心潮位站資料經各項改正後所估算之海 水面上升速率.....	4-3
表 4.3 中央氣象局潮位站資料經各項改正後所估算之海水面上升速率	4-3
表 4.4 中央氣象局潮位站資料經各項改正後所估算之海水面上升速率	4-4
表 4.5 1993-2012 臺灣周圍絕對海水面上升速率	4-8
表 4.6 1993-2012 臺灣周圍絕對海水面上升速率	4-17
表 4.7 多變量線性擬合中 β_2 與 β_3 係數	4-17

表 4.8 2003-2012 臺灣附近海域比容海水面變化、海水質量變化與絕對 海水面上升速率.....	4-33
表 4.9 臺灣周遭海域 1993-2012 海水面上升速率與海水面加速度..	4-34
表 4.10 臺灣周遭海域 2003-2012 海水面上升速率與海水面加速度	4-34

圖 目 錄

圖 1.1 計畫流程圖	1-10
圖 2.1 Skylab 衛星照片	2-2
圖 2.2 測高衛星之軌道誤差比較	2-2
圖 2.3 測高衛星基本觀測原理	2-6
圖 2.4 潮位站觀測海水面示意圖	2-9
圖 2.5 臺灣附近海域之潮位站資料涵蓋時間圖	2-13
圖 2.6 臺灣附近海域潮位站位置分佈圖	2-13
圖 2.7 基隆潮位站資料比較圖	2-14
圖 2.8 重力反演和氣候實驗重力衛星示意圖	2-17
圖 2.9 重力反演和氣候實驗球諧係數之誤差	2-20
圖 2.10 重力反演和氣候實驗重力場解計算之海洋質量	2-22
圖 2.11 重力反演和氣候實驗重力場解計算質量變化流程圖	2-23
圖 2.12 太平洋年代際振盪和聖嬰-南方振盪現象對於海水表面溫度與 海表面風場影響	2-26
圖 2.13 多重聖嬰-南方振盪指數及太平洋年代際振盪指數	2-27
圖 3.1 基隆潮位站之海潮效應改正	3-3
圖 3.2 高雄潮位站之海潮效應改正	3-3
圖 3.3 海潮改正前後之基隆與高雄潮位站資料差異圖	3-4
圖 3.4 美國國家氣象局國家環境預測中心月平均全球平均海水面壓力	3-6
圖 3.5 基隆潮位站之逆氣壓效應改正	3-6

圖 3.6 高雄潮位站之逆氣壓效應改正.....	3-7
圖 3.7 基隆潮位站之季節性訊號移除.....	3-10
圖 3.8 高雄潮位站之季節性訊號移除.....	3-10
圖 3.9 基隆潮位站之偏移量偵測.....	3-11
圖 3.10 高雄潮位站之偏移量偵測.....	3-12
圖 3.11 基隆潮位站資料偏移量改正.....	3-13
圖 3.12 高雄潮位站資料偏移量改正.....	3-14
圖 3.13 竹圍潮位站之地表垂直變動訊號.....	3-15
圖 3.14 淡水潮位站資料偏移量改正.....	3-16
圖 3.15 潮位站近二十年之地表垂直變動速率圖.....	3-17
圖 3.16 估算潮位站地表垂直變動速率、全球衛星定位系統成果與水準 點成果比較.....	3-19
圖 3.17 估算潮位站地表垂直變動速率、全球衛星定位系統成果與水準 點成果比較.....	3-20
圖 3.18 三次樣條曲線內插前後之基隆潮位站資料圖.....	3-22
圖 3.19 六參數擬合內插前後之基隆潮位站資料圖.....	3-22
圖 3.20 多重 ENSO 指數利用總體經驗模態分解分析之結果.....	3-27
圖 3.21 多重 ENSO 指數利用總體經驗模態分解分析後之統計測試結果	3-27
圖 3.22 太平洋年代際振盪指數利用總體經驗模態分解分析之結果.....	3-28
圖 3.23 太平洋年代際振盪指數利用總體經驗模態分解分析後之統計 測試結果.....	3-28
圖 3.24 多重聖嬰-南方振盪指數與太平洋年際振盪指數圖.....	3-29

圖 3.25 潮位站資料與多重聖嬰-南方振盪指數之 2-8 年週期訊號的相關係數.....	3-32
圖 3.26 潮位站資料與太平洋年際振盪指數之 10-30 年週期訊號的相關係數.....	3-32
圖 4.1 各項改正對於平均海平面永久服務中心潮位站資料進行海水面上升速率計算之影響量.....	4-4
圖 4.2 各項改正對於中央氣象局潮位站資料進行海水面上升速率計算之影響量.....	4-5
圖 4.3 宿霧潮位站月平均海水面資料與其海洋低頻訊號.....	4-7
圖 4.4 宿霧周圍衛星測高資料中之海洋低頻訊號移除.....	4-7
圖 4.5 原始與改正低頻後衛星測高資料所估算之 1993-2012 絕對海水面變化速率與標準偏差.....	4-9
圖 4.6 原始與改正低頻後衛星海洋數據存檔、驗正與解釋衛星測高資料所估算之 2003-2012 絕對海水面變化速率與標準偏差	4-9
圖 4.7 多重 ENSO 指數與太平洋年代際振盪指數分別經濾波處理後並經正規化處理(正規化=原始資料/原始資料之標準偏差)之成果	4-12
圖 4.8 宿霧潮位站周圍衛星測高資料之多變量擬合.....	4-13
圖 4.9 未考慮海水面資料中氣候因子影響下之臺灣周圍絕海水面上升速率.....	4-15
圖 4.10 考慮海水面資料中氣候因子影響下之臺灣周圍絕海水面上升速率	4-15
圖 4.11 多變量線性擬合中多重 ENSO 指數之 β_2 係數.....	4-16
圖 4.12 多變量線性擬合中太平洋年代際振盪之 β_3 係數	4-16
圖 4.13 潮位站資料估算之絕對海水面變化速率與標準偏差	4-18
圖 4.14 多變量擬合黎牙實比潮位站資料.....	4-18

圖 4.15	多變量擬合 1993-2011 年黎牙實比潮位站資料	4-19
圖 4.16	太平洋海域之平均海水面變化	4-19
圖 4.17	受聖嬰-南方振盪、太平洋年代際振盪及石化燃料排放影響之海水面的空間特性	4-24
圖 4.18	受太平洋年代際振盪、太平洋年代際振盪及石化燃料排放影響之海水面的貢獻量	4-25
圖 4.19	太平洋海域 1993-2012 年之海水面上升率及人為影響之海水面上升率	4-26
圖 4.20	本研究海域 1993-2012 年之海水面上升率及人為影響之海水面上升率	4-26
圖 4.21	太平洋海域之平均海水面變化及人為影響之平均海水面變化	4-27
圖 4.22	臺灣海域分區圖	4-28
圖 4.23	臺灣周圍比容海水面變化、海水質量變化與絕對海水面變化	4-31
圖 4.24	臺灣周圍絕對海水面變化	4-31
圖 4.25	臺灣周圍比容海水面上升速率	4-32
圖 4.26	臺灣周圍絕對海水面上升速率	4-32
圖 4.27	臺灣周圍海水質量變化速率	4-33
圖 4.28	統計經 1993-2012 海洋數據存檔、驗正與解釋衛星測高 $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ 網格資料所估算臺灣周圍海水面之加/減速變化	4-37
圖 4.29	以線性方程式預估臺灣周圍未來海水面變化	4-38
圖 4.30	以線性方程式預估臺灣周圍各區域未來海水面變化	4-39

第一章 緒論

1.1 研究動機與目的

過去的數十年間，由於全球暖化衍生出許多氣候變遷問題，其中海水面上升(sea level rise)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，而全球海水面上升可能造成之嚴重災害已經引起產、關、學各界關注。全球海水面變化已有許多學者進行研究[Cazenave and Nerem, 2004；Church *et al.*, 2004; Merrifield *et al.*, 2009; Cazenave *et al.*, 2014; Feng and Zhong, 2015]，二十世紀全球海水面上升速率每年約為 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]，而近二十年(自 1993 年以來)之全球海水面上升速率為 3.2 ± 0.4 mm/yr [Ablain *et al.*, 2009; Nerem *et al.*, 2010; Willis *et al.*, 2010; Shum and Kuo, 2011; Church and White, 2011; Cazenave *et al.*, 2014]，不同觀測成果皆顯示全球海水面呈現明顯上升趨勢。

海水面上升將對全球人類和環境造成巨大衝擊。Ericson 等人[2006]研究成果顯示若全球海水面以 2 mm/yr 速率上升，在 2050 年時，全球 40 個三角洲上的 8,710,000 人會因海水面上升遭受到嚴重災害。Leatherman 等人[2000]指出，當全球海水面上升時，侵蝕海岸速率為海水面上升速率的幾十至幾百倍，導致可居住區域受到嚴重威脅，而暴風浪也會因海水面上升而增強，造成沿岸生態、建築物及人類生命財產遭受巨大損失。Webster 等人[2005]亦指出海水面上升將導致熱帶氣旋發生頻率與強度增加。對於臺灣而言，近年來颱風造成之災害亦有加劇的趨勢，極端強降雨颱風發生頻率由原本 3-4 年發生一次，到 2000 年以後變成每年幾乎都會發生 [陳亮全等人，2011]。海水面上升除了造成上述海岸淹沒、居住地減少、土地流失、海岸侵蝕海岸速率加快等影響外，亦造成地下水與土壤鹽化、生態環境變遷等影響，將對全人類生活與其他生物生態環境造成重大之衝擊。

2013 年政府間氣候變遷委員會(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)第五次報告中利用輻射驅動力(radiative forcing)設定模擬情境(又稱代表濃度過程(Representative Concentration Pathways, RCP))，設定之 2100 年輻射驅動力情境，提出 4 種濃度過程(RCP)情境模式，分別為 2.6 W/m^2 、 4.5 W/m^2 、 6.0 W/m^2 與 8.5 W/m^2 ，再以耦合氣候模式數值實驗計畫(Coupled Model Intercomparison Project 5, CMIP5)模式進行模擬。代表濃度過程(RCP) 8.5 為第五次報告中最嚴重之推算情境，在此情境下本世紀末(2100 年)海水面上升將上升 0.53-0.97 公尺 [IPCC, 2013]，此推算值遠大於第四次報告之結果[2100 年將上升約 0.26-0.59 公尺; IPCC, 2007]。第五次報告中亦指出區域海水面上升速率將受到氣候變動之影響，有可能大於全球平均值的一倍，且本世紀末約有 95%區域的海水面變化速率為正值。然而不同時期海水面上升速率並不完全相同，例如利用潮位站估算之二十世紀海水面上升速率與衛星測高估算之近二十年速率明顯不同，因此近年來許多學者致力於海水面上升加速之研究，例如: Church and White [2006] 結合衛星測高與潮位站資料進行 1870-2001 年全球海水面上升重建(sea level reconstruction)，並以二階多項式(second order polynomial)估算全球海水面上升之加速度為 $0.013 \pm 0.006 \text{ mm/yr}^2$ (95%信賴區間)。Jevrejeva 等人[2008]結合衛星測高與潮位站資料進行 1700-2003 年(約 300 年)全球海水面上升重建，並估算海水面上升加速度，成果顯示全球海水面上升速率約從 18 世紀末開始加速，由二階多項式擬合 1700-2003 海水面上升之加速度約為 0.01 mm/yr^2 。Merrifield 等人[2009]利用潮位站資料估算 1962-1990 全球海水面上升速率為 $1.5 \pm 0.5 \text{ mm/yr}$ ，而 1990-2007 全球海水面上升速率為 $3.2 \pm 0.4 \text{ mm/yr}$ ，此數據與衛星測高成果($3.2 \pm 0.4 \text{ mm/yr}$; [Church and White, 2011])一致，由於海水面上升速率隨著時間增加，作者推測全球海水面上升正在加速，且主要發生在赤道附近海域與南半球海域。Calafat and Chambers [2013]利用九個分佈全球的潮位站資料估算 1952-2011 海水面上升之加速度為 $0.022 \pm 0.015 \text{ mm/yr}^2$ (90%信賴區間)，此外結果亦顯示海水面上升之加速度隨著時間的增加而逐漸加大，並且與溫室氣體(Greenhouse gas)濃度增加有關。

海水面變化與全球氣候變動間有聯動性[Zhang and Church, 2012; White *et al.*, 2014]，且海水面變化包含十分廣泛的訊息，因此現今海水面上升已成為氣候變遷的重要指標之一。許多學者分析氣候之年際(interannual;如聖嬰-南方振盪(El Niño Southern Oscillation, ENSO)現象)或數十年(年代際(multidecadal);如太平洋年代際振盪(Pacific Decadal Oscillation, PDO))變化與海水面變化間相關性。西太平洋赤道附近發生的準週期性聖嬰-南方振盪(ENSO)現象與海水面變高度變化呈現高度相關[Merrifield *et al.*, 2011; 2012]，甚至被認為是影響海水面變化的主要因素之一[Nerem *et al.*, 1999; Landerer *et al.*, 2008]。Newman等人[2003]認為數十年的氣候變動(如太平洋年代際震盪(PDO))受到聖嬰-南方震盪(ENSO)的影響，影響北太平洋的大氣環流，進而影響大氣-海洋的交互作用。太平洋年代際震盪(PDO)-聖嬰-南方震盪(ENSO)兩者之高相關性同時發生在夏季與冬季，其中當聖嬰-南方震盪(ENSO)持續增強時，會影響夏季的太平洋年代際震盪(PDO)；在聖嬰-南方震盪(ENSO)增強後，其變異較小的時期將影響當年冬季或隔年春季之太平洋年代際震盪(PDO)。太平洋年代際震盪(PDO)與聖嬰-南方震盪(ENSO)為影響太平洋區域海溫、鹽度及氣候之重要因子，進而影響區域或全球的海水面變動[Hamlington *et al.*, 2013]。分析不同時間尺度下近百年的水位觀測資料，海水面上升加減速特性主要來自於氣候因子的年際及年代際變動影響[Haigh *et al.*, 2014]。過去十年間，全球海水面上升趨勢已經減緩30%左右，此特性恰巧與暖化減緩(global warming pause)的情況相符合，然而在移除氣候年際間主要影響(如聖嬰-南方震盪(ENSO))後，暖化減緩情形不存在，近十年海水面上升速率恢復為 $3.3 \pm 0.4 \text{ mm/yr}$ [Cazenave *et al.*, 2014]。分析過去近20年的衛星資料，聖嬰-南方震盪(ENSO)是影響全球海水循環的重要因素，因此氣候變遷在大氣與海洋溫度變化及其交互作用，成為主要影響海水面上升加減速的關鍵[Boening *et al.*, 2012; Cazenave *et al.*, 2012; Fasullo *et al.*, 2012; Cazenave *et al.*, 2014]。

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)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上變化稱之為熱比容海水面上變化(thermosteric sea level)和鹽比容海水面上變化(halosteric sea level)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。

臺灣位西太平洋亞熱帶地區且四面環海，中央為高山區，平原大多位於海岸附近，大部分的城市距離海岸線約為10-30 公里。由Nicholls和Cazenave [2010]與Llovel等人[2010]計算衛星測高資料的成果可知，全球各區域的海水上升速率並不一致，且臺灣附近海域之海水面上升速率相較於全球海水面上升速率來的大，因此精確估計臺灣附近海域海水面上升速率並了解臺灣周圍海水面上升速率的主要原因就顯得非常重要。

本研究已於102年度(第一期)[郭重言等人，2014]以及103年度(第二期)[郭重言等人，2015]計劃中完成四年總計畫之部分項目。第一期(102年度)計劃將臺灣四周近十年(2002-2011)衛星測高與潮位站資料進行各項改正，並利用改正後資料進行分區估算近十年(2002-2011)絕對海水面上變化速率，區域分為臺灣北部、臺灣南部、菲律賓、香港與日本五區。臺灣北部海域絕對海水面上變化速率為-1~2 mm/yr，南部海域變化速率為4~8 mm/yr，菲律賓地區的變化速率為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，且變化速率由北向南增加，而臺灣西方海域(香港地區)海水面上升速率(3~8 mm/yr)較臺灣東方海域(日本地區)變化速率(0~1 mm/yr)快。另外由衛星測高資料估算2002-2011年整個研究區域的絕對海水面上變化速率為6~8 mm/yr。然而本計畫第一期(102年度)僅利用臺灣周圍十年衛星測高與潮位站資料進行潮位站地表垂直變動與海水面上變化速率計算，導致估算潮位站地表垂直變動速率之標準偏差偏大，以中央氣象局潮位站資料為例，各潮位站地表垂直變動速率的標準偏差平均值為 ± 2.41 mm/yr，此誤差進而影響海水面上升速率之計算精度。衛星測高時間涵蓋達二十年(1993-至今)，且相關研究亦說明採用較長時間(如20年)衛星測高與潮位站資

料可大幅減低潮位站地表垂直變動速率之標準偏差[Kuo *et al.*,2004; Kuo *et al.*, 2008; Ray *et al.*, 2010]，因此本計畫第二期(103年度)應用臺灣四周海域近二十年衛星測高資料與潮位站資料估算潮位站地表變動速率與海水面上升速率之分析。第二期(103年)結果顯示利用二十年衛星測高與潮位站資料估算地表垂直變動速率之精度大幅提升，各潮位站地表垂直變動速率的標準偏差平均值為 ± 0.66 mm/yr。而由衛星測高與潮位站資料估算近二十年(1993-2012)臺灣附近絕對海水面變化速率之結果顯示，臺灣北部絕對海水面上升速率為2~3mm/yr，臺灣南部為2~3 mm/yr，菲律賓地區為6~8 mm/yr，表示臺灣南方海域的海水面上升速率較臺灣北部快，且海水面上升速率越往南越快，而臺灣西方海域(香港地區)絕對海水面上升速率(1~5 mm/yr)較臺灣東方海域(日本地區)(2~3 mm/yr)快。比較十年與二十年各區域的絕對海水面變化呈現相同趨勢，然而各區域十年與二十年海水面上升速率之數據上仍有些許差異，其原因可能為資料涵蓋時間長度不同以及受到海洋低頻震盪(如聖嬰-南方振盪 (ENSO) 現象或太平洋年代際振盪(PDO))的影響所造成。因此本年(104)度計劃將據此評估臺灣海域之長期海水面變化與不同尺度之大氣及海洋變動之關係，並結合重力衛星資料和海洋溫、鹽度資料計算了解臺灣附近海水面與海水質量、溫鹽比容海水面變化之貢獻量，進而預估未來海水面之變動趨勢，期許本研究能夠提供臺灣政府進行海岸建設、管理及防災等的科學根據。

現今監測海面水位變化主要有兩種方式—長時間觀測紀錄之潮位站資料和短期但涵蓋近全球衛星測高資料。然而潮位站資料包含基準點的地表垂直變動資訊、位置分佈不平均、觀測時間長短不一致等問題，且臺灣管理的早期潮位站資料還包含資料嚴重缺漏以及資料基準偏移等情形;衛星測高技術觀測海水面變化資料之特性為觀測範圍近乎全球，但觀測時間僅約二十年，且近岸資料較少和精度較低，因此結合衛星測高資料和潮位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比容海水面與海水質量變化造成，其中比容海水面變化可結合海洋各層溫度與鹽度資料計算得到[Gill, 1982]。早期海洋溫度與鹽度資料常以浮標(Buoys)和

船載儀器收集，資料收集時間涵蓋數十年之久，然而浮標與船測所能收集之溫、鹽資料數量與範圍有限，因此取樣點的空間分佈稀疏且不均勻。近年來，由世界海洋環流實驗室 (World Ocean Circulation Experiment, WOCE) 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 $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ 溫度與鹽度觀測資料，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。

臺灣周圍海域海水面變化研究相對較少 [Tseng *et al.*, 2010]，且尚無完整分析海洋低頻訊號與臺灣周圍海水面變化間關係之研究。Rong 等人[2007]利用1993-2004衛星測高資料、1945-2004年溫度資料以及潮位站資料分析南中國海之海水面變化與聖嬰-南方振盪 (ENSO) 現象之間的關係，結果顯示南中國海水面之海水面變化與聖嬰-南方振盪 (ENSO) 現象之南方震盪指數(SOI)間相關係數高達0.78，而熱比容海水面變化與SOI指數相關係數為0.37，表示南中國海水面變化與聖嬰-南方振盪 (ENSO) 現象有高相關性。Zhan 等人 [2009] 利用14年衛星測高資料估計黃海、東海、南海之海水面上升速率分別為3.91 mm/yr、4.28 mm/yr、3.49 mm/yr，此外亦利用經驗正交函數(Empirical Orthogonal Function, EOF)和小波分解衛星測高資料得到此區域海水面時間變化和空間分佈資訊，其計算之空間分佈與海洋環流相符合，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。Zhang and Church [2012]結合衛星測高資料與聖嬰-南方振盪 (ENSO)指數和太平洋年代際振盪(PDO)指數，利用線性迴歸方式評估聖嬰-南方振盪 (ENSO)與太平洋年代際振盪(PDO)對於太平洋各區域海水面變化影響程度。由結果可知，聖嬰-南方振盪 (ENSO)主要影響緯度 $\pm 20^{\circ}$ 以內海水面變化，太平洋年代際振盪(PDO)則影響整個太平洋海域。Lee 等人[2015]利用1982-2012高解析輻射儀(Advanced Very-High-Resolution Radiometer,

AVHRR)觀測之長期海表面溫度資料，並以經驗正交函數(EOF)分析探討臺灣海峽夏季海溫長期變化以及與聖嬰-南方振盪 (ENSO)之關係。成果顯示，1982-2012臺灣海峽海溫平均每年升高 0.067°C ，不過近十年臺灣海峽海溫升溫速率有稍微降低，每年升溫 0.03°C ，而且臺灣海峽夏季海溫可能受到聖嬰-南方振盪 (ENSO)與太平洋年代際振盪(PDO)影響。Peng等人[2013]結合衛星測高資料與潮位站資料進行1950-2009南海海水面上升速率為 $3.9\pm 0.6\text{ mm/yr}$ ，而1950-2009南海海水面上升速率為 $1.7\pm 0.1\text{ mm/yr}$ ，此外該研究亦表示南海地區地表垂直變動訊號較小，重建時無需考慮地表垂直變動改正。Cheng等人[2014]利用1993-2012衛星測高資料估計南海海水面上升速率為 $5.1\pm 0.8\text{ mm/yr}$ ，其中比容海水面上升速率約占南海海水面上升速率的45%，而在整個南海中，以越南東海岸與南海的東部海域之海水面上升率最快，最大可達 8.4 mm/yr 。Tseng et al. [2010]利用8個潮位站資料和衛星測高資料估計臺灣附近海水變化，並以局部回歸(LOcal rEgreSSion, LOESS) [Hastie and Tibshirani, 1990]分析處理非線性海水面上升趨勢，研究結果顯示1955-2003年潮位站計算之海水面上升趨勢為 $0\sim 11\text{ mm/yr}$ (11 mm/yr 是由澎湖潮位站資料所估算而得)，此結果各站估算速率差異過大。Tseng et al. [2010]亦利用1993-2003年潮位站和測高資料求得海水面上升趨勢分別為 5.7 mm/yr 和 5.3 mm/yr ，上升趨勢皆大於全球海水面上升速率平均值 $3.2\pm 0.4\text{ mm/yr}$ [Church and White, 2011]，此外該研究總結臺灣四周海水面上升變化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上升速率相關係數，並無法量化海水溫度變化對海水面上升速率之貢獻。黃清哲等人[2009]利用線性迴歸與傅立葉分析(Fourier analysis)估算臺灣周圍海水面上升速率，其研究成果顯示臺灣海域之海水面上升皆呈現上升之趨勢，然而臺灣東部之結果卻不甚合理，因為利用潮位站與測高資料計算之臺灣東部之海水面上升速率相差約 50 mm/yr ，作者認為可能臺灣東部之測站地表垂直變動較劇烈所導致。Tseng et al. [2010]與黃清哲等人[2009]之研究在利用潮位站進行海水面上升速率計算時皆未考慮潮位站地表垂直變動之影響，而Ching等人

[2011]利用全球定位系統 (Global Positioning System, GPS) 連續觀測站與精密水準資料估算臺灣本島地表垂直變動速率，結果顯示臺灣東南部與西南部等區域的地表垂直變動量比臺灣附近海水面上變動量來的大，表示臺灣潮位站資料中包含的地表垂直變動訊號將顯著影響潮位站資料所估算之海水面上升速率。綜合上述文獻，直接利用未改正地表垂直變動的臺灣周圍潮位站資料並估算絕對海水面上升速率，將會顯著偏差海水面上升速率之估算成果。

臺灣潮位站資料除了受到上述地表垂直變動影響外，亦受到人為因素造成資料基準偏移，因此臺灣氣候變遷推估與資訊平台計畫 (Taiwan Climate Change projection and Information Platform, TCCIP) 中海水面均一化之校正工作針對臺灣 17 個長期潮位站資料進行均一處理 [陳進益等人，2014]，然而該研究在處理資料偏移時，可能造成海水變化和地表垂直變動量訊號改變。

衛星資料之地球物理校正亦是影響海水位計算的重要因素。Cheng 等人 [2013] 分析初始地球物理校正 (Default-corrections) 後臺灣海域之海水面上升速率差異分別為 -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。另外應用初始地球物理校正於海水面上升速率的計算會造成臺灣東南及西北海域出現海水面上升速率估算過高及過低，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，其所推估之海水面上升速率具有較大之不確定性。

本計畫為配合工作項目中評估海洋低頻震盪 (如聖嬰-南方振盪 (ENSO) 與太平洋年代際震盪 (PDO) 等現象) 對臺灣海域海水面上變化速率之影響，因此收集潮位站資料的時間設定在大於 30 年以上 (1983 - 2012)，而研究區域範圍為臺灣附近海域 (緯度：10°N~30°N、經度：110°E~130°E)。本計畫將利用衛星測高與潮位站資料估算臺灣周圍海水面上絕對變化速率。另外，在氣候變遷效應的影響下，不同海域的海水面上升速率可能受到不同時間尺度之海洋低頻震盪影響。本研究將據

此評估臺灣附近海域之海水面變化與海洋低頻震盪之相關性，並整合重力衛星資料和海洋溫、鹽度資料，以了解臺灣附近海水面與海水質量、溫度與鹽度估算之比容海水面變化之貢獻量，進而預估未來之變動趨勢。本計畫之工作項目如下所示：

- (1) 針對臺灣四周近海及國內各商港海域，匯整更新區域性驗潮站和衛星測高儀海水面變化速率和影響因子等相關觀測與研究文獻。
- (2) 臺灣環島驗潮站潮位基準偏移之自動化偵測與校正。
- (3) 應用驗潮站和衛星測高資料，探討影響臺灣海域長、短期平均海水面上升之顯著海氣候因子。
- (4) 應用驗潮站和衛星測高資料，分區進行臺灣海岸地殼變動速率之趨勢分析。
- (5) 評估聖嬰(El Niño)及反聖嬰(La Niña)氣候現象對臺灣海域平均海水面上升速率變動趨勢之影響。
- (6) 評估太平洋年代際低頻震盪(PDO)對臺灣海域平均海水面上升速率變動趨勢之影響。
- (7) 依據臺灣海域長、短期之平均海水面上升變動率，進行相關地殼變動及海洋年際低頻變動之關聯。
- (8) 從全球暖化所造成海洋質、能平衡(budget)之觀點，評估氣候變遷在臺灣海域造成 MSLR 之本質變動率，進而預估未來之變動趨勢。

1.2 研究流程

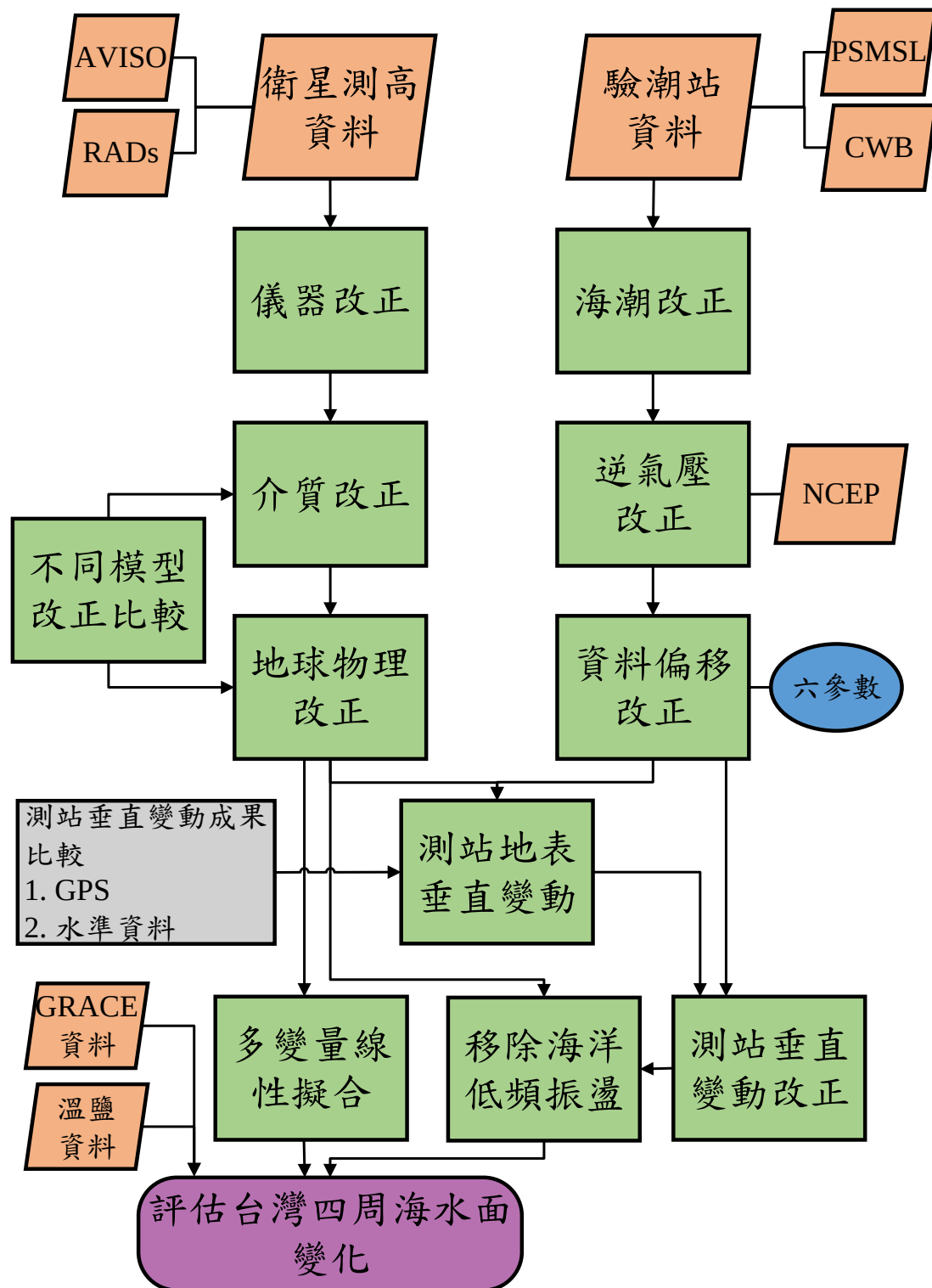


圖 1.1 計畫流程圖

1.3 工作項目與執行進度

工作項目	第1月	第2月	第3月	第4月	第5月	第6月	第7月	第8月	第9月	第10月	備 註
匯整更新潮位、衛星測高、重力衛星、海洋溫度及鹽度等相關文獻與研究資料	----	----	----								目前進度已完成 100%
	----	----	----								
潮位及衛星測高之率定與改正(包含海氣候因子之改正)以及測站地表垂直變動之趨勢分析	----	----	----								目前進度已完成 100%
	----	----	----								
臺灣環島驗潮站潮位基準偏移之自動化偵測與校正			----	----	----	----					目前進度已完成 100%
			----	----	----	----					
評估聖嬰(El Niño)及反聖嬰(La Niña)氣候現象對臺灣海域平均海水面上升速率變動趨勢之影響				----	----	----	----				目前進度已完成 100%
				----	----	----	----				
評估太平洋年際低頻振盪(PDO)對臺灣海域平均海水面上升速率變動趨勢之影響					----	----	----	----			目前進度已完成 100%
					----	----	----	----			
依據臺灣海域長、短期之平均海水面上升變動率，進行相關地殼變動及海洋年際低頻變動之關聯							----	----	----	----	目前進度已完成 100%
							----	----	----	----	
從全球暖化所造成海洋質、能平衡(budget)之觀點，評估氣候變遷在							----	----	----	----	目前進度已完成 100%

臺灣海域所造成MSLR之本質變動率，進而預估未來之變動趨勢								----	----	----	----	
文章和期末報告撰寫								----	----	----	----	目前進度已完成 100%
期末報告修改											----	目前進度已完成 100%
工作進度估計百分比(累積數)	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100		

----: 預計進度 - - - -: 實際進度

1.4 本文架構

本文共分為五個章節，以下依序為：

第一章: 介紹本計畫之研究動機與目的，其中說明海水位升降變化的影響、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。關於衛星測高資料與重力反演和氣候實驗(GRACE)重力衛星資料則分別闡述其觀測及率定改正原理。

第三章: 潮位站資料各項改正方法與結果，並詳細說明臺灣周圍潮位站地表垂直變動成果以及分析潮位站資料中低頻訊號與氣候因子間相關性。

第四章: 比較水位觀測資料在移除低頻訊號前、後對估算海水面上升速率之影響程度，並分析臺灣周圍絕對海水位升降變化之情形以及臺灣周圍水面上升之主要原因。最後預估臺灣四周未來海水面變化。

第五章: 結論與未來工作。

1.5 第一章完成之工作項目

第一章已完成工作項目”針對臺灣四周近海及國內各商港海域，匯整更新區域性驗潮站和衛星測高儀海水面變化速率和影響因子等相關觀測與研究文獻”中的研究文獻彙整。由文獻可知，全球海水面正呈現每年 $\sim 3.1\text{ mm}$ 上升狀態，而臺灣周圍海水面上升速率較全球海水面速率快。而由 Zhang and Church [2012]成果可知，聖嬰-南方振盪 (ENSO) 主要影響的海水面範圍為 $\pm 20^\circ$ 以內，太平洋年代際振盪(PDO)影響範圍為太平洋各處。因此評估海洋低頻震盪(如聖嬰-南方振盪(ENSO)與太平洋年代際震盪(PDO)等現象)對臺灣海域海水面變化速率之影響是相當重要的。

第二章 研究資料

2.1 測高衛星

測高衛星可用於觀測全球海水面高度，其優點為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。

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、HY-2、Saral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。



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

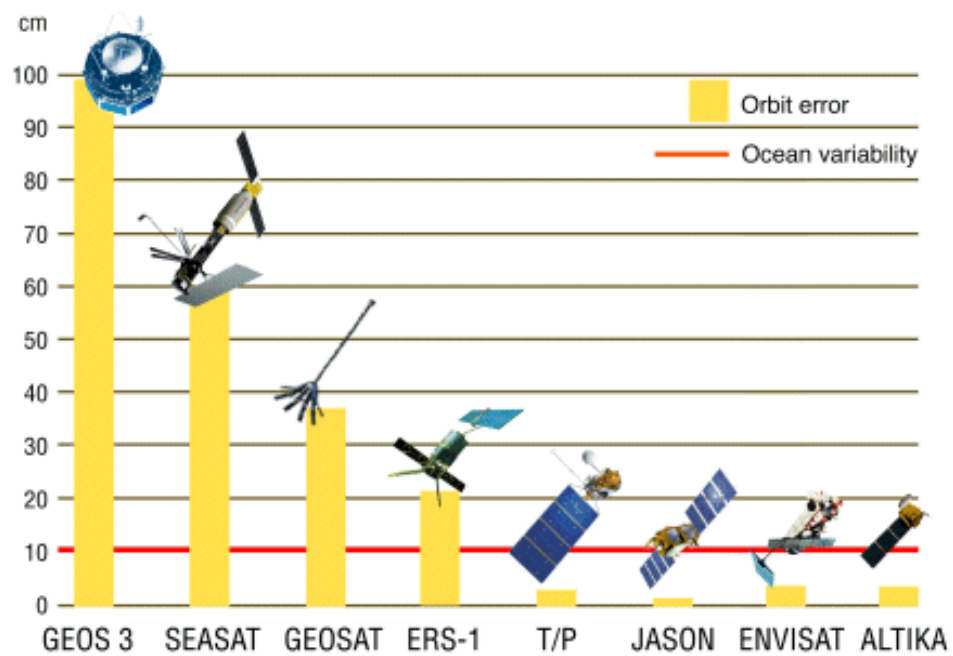


圖 2.2 測高衛星之軌道誤差比較。[圖片來源：
<http://www.aviso.oceanobs.com/>]

**表 2-1 衛星測高基本資料表[資料來源：
http://www.aviso.altimetry.fr/en/home.html]**

衛星名稱	研製單位	發射時間 – 結束時間	軌道高度	軌道傾角	週 期(天)
Skylab	NASA	1973/05 – 1979/07	435	50	–
GEOS-3	NASA	1975/04 – 1979/07	845	115	–
Seasat	NASA	1978/07 – 1978/10	800	108	3; 17
Geosat	U.S. Navy	1985/03 – 1990/01	800	108	17.05
ERS-1	ESA	1991/07 – 2000/03	785	98.52	3; 35; 168
T/P	NASA, CNES	1992/08 – 2006/01	1336	66	9.9156
ERS-2	ESA	1995/04 – 2011/07	785	98.52	35
GFO	U.S. Navy	1998/10 – 2008/11	880	108	17
Jason-1	NASA/CNES	2001/12 – 2013/07	1336	66	9.9156
EnviSat	ESA	2002/03 – 2012/04	782.4 – 799.8	98.55	30; 35
ICESat	NASA	2003/01 – 2010/02	600	94	8; 91
Jason-2	CNES, NASA, Eumetsat and NOAA	2008/06 – Present	1336	66	9.9156
Cryosat-2	ESA	2010/04 – Present	717	92	369 days with 30 day sub-cycle
HY-2	CAST	2011/08 – Present	971	99.3	14; 168
Saral	ISRO, CNES	2013/02 – Present	800	98.55	35

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(Δh)可表示為：

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

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， ΔR_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)、逆氣壓效應改正、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]：

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

其中 ΔR_{dry} 為乾對流層延遲改正量(單位: 公分)， p_{ocean} 為海水面之大氣壓力(單位: 毫巴)， λ 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) 逆氣壓效應改正: 逆氣壓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，一般逆氣壓效應影響量約 ± 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，近來海潮精度提升至 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。

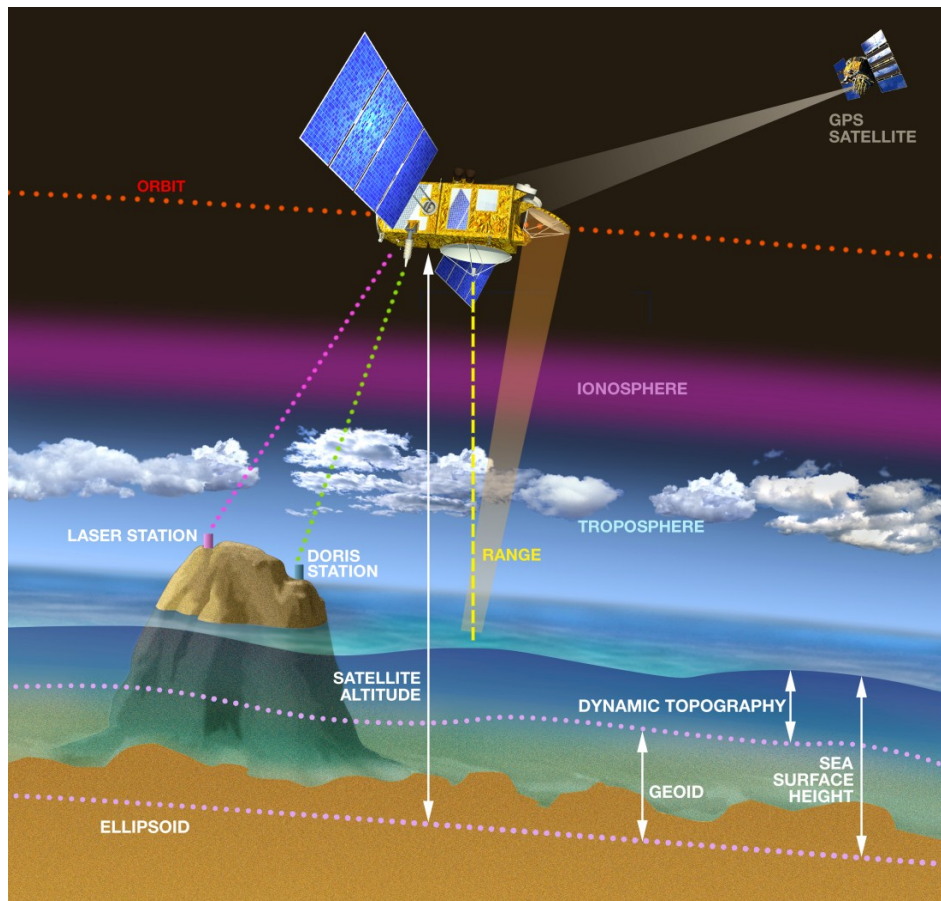


圖 2.3 測高衛星基本觀測原理。[圖片來源：
<http://www.aviso.oceanobs.com/>]

衛星測高資料監測海水面變化主要分成沿軌跡點(along-track)與網格化等資料，為延續102期[郭重言等人，2014]與103期[郭重言等人，2015]計畫成果，本研究主要使用沿軌跡點衛星測高資料於測站資料之地表垂直變動訊號改正以及分析測高觀測資料之水位特性。而網格資料僅用於分析每個網格上水位特性。沿軌跡點衛星測高資料將包含T/P、J-1、J-2衛星測高資料，測高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;衛星測高網格資料主要結合HY-2A, Saral/AltiKa, Cryosat-2, J-1/2, J-2, T/P, Envisat, GFO, ERS1/2等衛星測高資料，網格資料可由衛星海洋數據存檔、驗正與解釋 (AVISO) [<http://www.aviso.oceanobs.com/en/>]資料中心取得。沿軌跡點衛星測高資料為本研究主要使用之衛星測高資料，因此後續將主要介紹T/P、J-1、J-2衛星測高資訊。

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 ± 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、逆氣壓效應改正）。本計畫中衛星測高資料皆以衛星海洋數據存檔、驗正與解釋(AVISO)和衛星海洋數據存檔、驗正與解釋(RADs)資料中心預設之改正來進行。

潮位站大多設置於岸邊，而衛星測高技術在近岸海域之應用上，會因測高儀回波受到陸地地形、海潮、海底地形、河口等影響，造成衛星接收到複雜的波形訊號，導致近岸之衛星測高資料較少。本計畫已於第二期(103年度)分別比較等權平均與距離加權平均潮位站周圍半徑經緯度 2° 、 3° 、 5° 範圍內的測高資料與潮位站資料間之相關性，由成果可知，臺灣本島之潮位站資料較適用等權平均 5° 範圍內之衛星測高資料，其他區域潮位站資料則適用平均 2° 範圍或加權平均各範圍(2° 、 3° 、 5°)內衛星之測高資料，因此本年度計畫將沿用第二期(103年度)成果，臺灣本島之潮位站資料較適用等權平均 5° 範圍內之衛星測高資料，其他區域潮位站資料適用平均 2° 範圍內之衛星測高資料。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海水面上升速率的研究成果顯示，東部與西部的水面上升速率差異量約 4 mm/yr ，表示海水面上升速率於太平洋與臺灣海峽的變化並不一致，且Cheng and 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 ，為避免區域海水面上升速率不一致而影響潮位站地表垂直變動速率的估算成果，因此臺灣區域之潮位站與衛星測高資料以東經 121° (約臺灣本島之中間線)為基準，分為東西部分，分別包含臺灣海峽及太平洋區域，位於東邊的潮位站僅使用基準線以東的測高資料，而位於西邊的潮位站則使用基準線以西之測高資料。

2.2 潮位站

潮位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表變動而產生位移，而使潮位站觀測資料包含海水面變化與基準點周圍的地表垂直變動訊號，因此潮位站資料為一相對於地表之觀測量，如圖2.4所示。若以潮位站資料估算絕對海水面上升速率時，需進行潮位站地表垂直變動改正，此外，還需改正海潮和逆氣壓效應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。一般而言，全球衛星定位系統 (Global Positioning System, GPS)觀測量為常見用於監測地表變動之觀測技術，但由於臺灣附近潮位站大

多未設置全球衛星定位系統(GPS)連續觀測站，因此無法利用GPS觀測量估算潮位站的潮位站地表垂直變動量。然而測高衛星資料為觀測海水面高度的絕對量，潮位站資料則為相對量，因此可結合測高衛星資料與潮位站資料估算出潮位站垂直變動訊號並自潮位站資料中改正之 [Kuo *et al.*, 2004, 2008; Braitenberg *et al.*, 2011; Chang *et al.*, 2012; Wöppelmann and Marcos, 2012; Santamaria-Gomez *et al.*, 2014]。

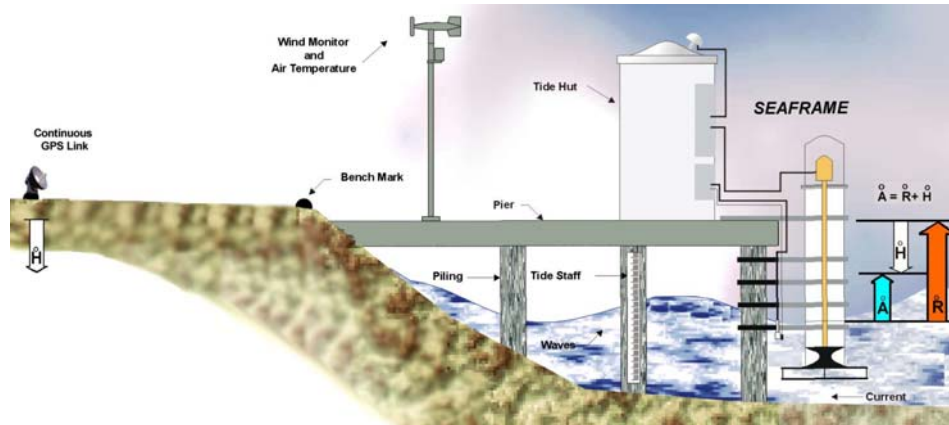


圖 2.4 潮位站觀測海水面示意圖

本研究中，臺灣附近海域之潮位站資料由下述兩處資料中心取得：

1. 平均海平面永久服務中心(Permanent Service for Mean Sea Level, PSMSL) [Holgate *et al.*, 2013; PSMSL, 2014]，資料可由 [<http://www.psmsl.org/>]下載。
2. 中央氣象局(Central Weather Bureau, CWB)。

平均海平面永久服務中心(PSMSL)為一個負責收集、分析和提供全球潮位站資料的機構，其潮位站資料基準分為修正地方基準 (Revised Local Reference, RLR)與Metric，修正地方基準(RLR)與Metric的資料格式皆為每個月平均的觀測數據。修正地方基準(RLR)與Metric資料的不同之處在於修正地方基準(RLR)資料已經由各潮位站管理單位提供的基準資料，將同一潮位站資料化算至相同基準點上，表示修正地方基準(RLR)資料應無基準不一致之問題，而Metric資料則表示未校正基準問題。本研究平均海平面永久服務中心(PSMSL)資料庫中符合本計畫設定的研究範圍與時間區段(> 30 年; 與衛星測高資料重疊時間> 10年)的潮位站數量為13個，其中兩個測站分別為基隆與高雄潮位站，但由

於中央氣象局亦有提供此兩站資料，且為較原始之資料，使用與處理上較有一致性，因此使用中央氣象局基隆與高雄潮位站資料，故本計畫共使用11個(移除基隆與高雄潮位站資料)平均海平面永久服務中心(PSMSL)的潮位站資料，潮位站時間分佈如圖2.5所示，而位置分佈如圖2.6所示，平均海平面永久服務中心(PSMSL)的潮位站詳細資訊如表2.2所示。

目前臺灣沿岸約有40個潮位站，各潮位站分別由不同單位設立維護，目前主要由中央氣象局與經濟部水利署管理資料。依據本計畫研究的空間與時間範圍，向中央氣象局與水利署申請並取得12個潮位站資料，各測站時間涵蓋如圖2.5所示，位置分佈如圖2.6所示。中央氣象局與經濟部水利署提供的潮位站之詳細資訊如表2.3所示(後續在敘述中央氣象局與經濟部水利署資料時，皆以中央氣象局資料簡稱)，由表可知，各潮位站管理單位並不完全相同，因此在計畫初期申請潮位站資料時，常因為資料權屬不透明以及申請資料限制等問題，增加收集潮位站資料的難度。表2.3中亦顯示，各站可能有多個不同的測站編號，更改測站編號的原因通常為測站觀測儀器更換或位置移動，造成記錄中斷之後，測站再重新記錄資料時便會更換測站編號[陳進益等人，2014]，更換測站編號後潮位站未重新進行基準量測，將可能與之前潮位資料之基準不同，以基隆潮位站為例，基隆潮位站有1212、1511、151、1514、1513、1516共六個站號，測站1513與前、後測站可明顯看出基準不一致，表示更換測站編號前後可能因為人為疏失且未重新進行基準量測，造成更換站號前後潮位資料基準不一致(如圖2.7所示)，因此在本研究中，對於測站編號更換前後未涵蓋相同時間潮位站資料或雖涵蓋相同時間但資料卻不一致等情形皆需評估是否有基準偏移。潮位站資料之各項改正將於第三章中詳細說明。

平均海平面永久服務中心(PSMSL)的潮位站各測站資料保存較完整，本研究中使用平均海平面永久服務中心(PSMSL)潮位站資料完整度[資料完整度=1-缺漏資料月份數/總資料月份數]平均值約95.9%，單一測站最長缺漏時間為23月。而臺灣管理的潮位站保存較不完善，全臺

灣各潮位站資料完整度平均值約77.5%，單一測站缺漏時間最長為 84 月，該測站為花蓮潮位站(如圖2.5所示)。平均海平面永久服務中心(PSMSL)的潮位站資料分佈最廣，資料中包含中國大陸、日本與菲律賓等地潮位站資料，而中央氣象局的潮位站資料主要分佈於臺灣沿岸，最遠為澎湖潮位站，如圖2.6所示。

表 2.2 臺灣附近海域平均海平面永久服務中心(PSMSL)資料庫之潮位站資訊。平均海平面永久服務中心(PSMSL)的潮位站依地區分類，依序為中國大陸、日本以及菲律賓

Country	Station ID.	Station name			Lon(°)	Lat(°)	Data period	
		Ch.	Eng.	Abbr.			RLR	Metric
China	610002	開坡	Zhapo	ZP	111.8	21.6	1959-2013	1959-2013
	610005	廈門	Xiamen	XM	118.1	24.5	1954-2004	1954-2004
	610016	坎門	Kanmen	KM	121.3	28.1	1959-2013	1959-2013
	611014	大浦滬	Tai Po Kau	TPK	114.2	22.4	1963-2013	1963-2013
	611017	尖鼻咀	Tsim Bei Tsui	TBT	114.0	22.5	1974-2013	1974-2013
Japan	646003	內斯	Nase	NS	129.5	28.5	1981-2013	1981-2013
	646011	中之島	Nakano Sima	NKNS	129.9	29.8	1984-2013	1965-2013
	646021	沖繩	Okinawa	OKNW	127.8	26.2	1975-2013	1975-2013
	646024	那霸	Naha	NH	127.7	26.2	1966-2013	1966-2013
Philippines	660021	黎牙實比	Legaspi	LGSP	123.8	13.2	1947-2011	1947-2013
	660101	宿霧	Cebu	CB	123.9	10.3	1935-2011	1935-2013

表 2.3 臺灣附近海域中央氣象局資料庫之潮位站資訊。表中前五個潮位站分別位於臺灣五大商港

Station name			Station ID.	Lon(°)	Lat(°)	Records (minutes)	Data period	Originator
Ch.	Eng.	Abbr.						
基隆	Keelung	KL	1212	121.7	25.1	60	1946-1990	中央氣象局
			1511	121.7	25.2	60	1991-1995	基隆港務局
			151	121.7	25.2	6	1995-2000	基隆港務局
			1514	X	X	6	2003-2004	港灣技術研究中心
			1513	X	X	6	2005-2006	基隆港務局
			1516	121.8	25.2	6	2006-2013	中央氣象局
蘇澳	Su-ao	SA	1241	X	X	60	1981-1991	中央氣象局
			124	121.9	24.6	6	1991-2005	中央氣象局
			1246	121.9	24.6	6	2005-2014	中央氣象局
花蓮	Hualien	HL	1251	X	X	60	1950-1990	中央氣象局
			125	121.6	24.0	6	1991-2003	中央氣象局
			1256	121.6	24.0	6	2003-2013	中央氣象局

高雄	Kaohsiung	KS	1482	X	X	60	1947-1986	中央氣象局
			148	120.3	22.6	60	1987-2004	高雄港務局
			1486	120.3	22.6	6	2004-2013	內政部
台中	Taichung Port	TCP	1431	120.5	24.3	60	1971-1990	港灣技術研究中心
			1432	120.5	24.3	60	1990-1993	港灣技術研究中心
			1433	120.5	24.3	10	1993-1997	港灣技術研究中心
			143	120.5	24.3	6	1997-1999	港灣技術研究中心
			1434	120.5	24.3	6	2001-2004	港灣技術研究中心
			1436	120.5	24.3	6	2004-2013	內政部
淡水	Tamsui	TS	1101	121.4	25.2	60	1949-1991	中央氣象局
			110	121.4	25.2	6	1991-1995	中央氣象局
			1102	121.4	25.2	6	1999-2013	中央氣象局
將軍	Jiangjun	JG	146	120.1	23.2	60	1979-2001	經濟部水利署
			1176	120.1	23.2	6	2002-2013	中央氣象局
塭港	Wengang	WG	1361	X	X	60	1963-2002	經濟部水利署
			1366	120.1	23.5	6	2003-2013	中央氣象局
澎湖	Penghu	PH	1351	119.6	23.6	60	1955-1991	中央氣象局
			135	119.6	23.6	60	1991-2007	中央氣象局
			1356	119.6	23.6	6	2007-2013	中央氣象局
埤廣嘴	Syunguangzui	SGZ	149	120.7	22.0	60	1976-2002	經濟部水利署
			1496	120.7	22.0	6	2001-2013	經濟部水利署
富岡	Fugang	FG	158	121.2	22.8	60	1976-2002	經濟部水利署
			1586	121.2	22.8	6	2001-2013	經濟部水利署
竹圍	Jhuwei	JW	1111	121.2	25.1	60	1976-1992	經濟部水利署
			111	121.2	25.1	6	1992-2007	中央氣象局
			1116	121.2	25.1	6	2007-2013	中央氣象局

X: 表示原始資料中未提供該項資訊

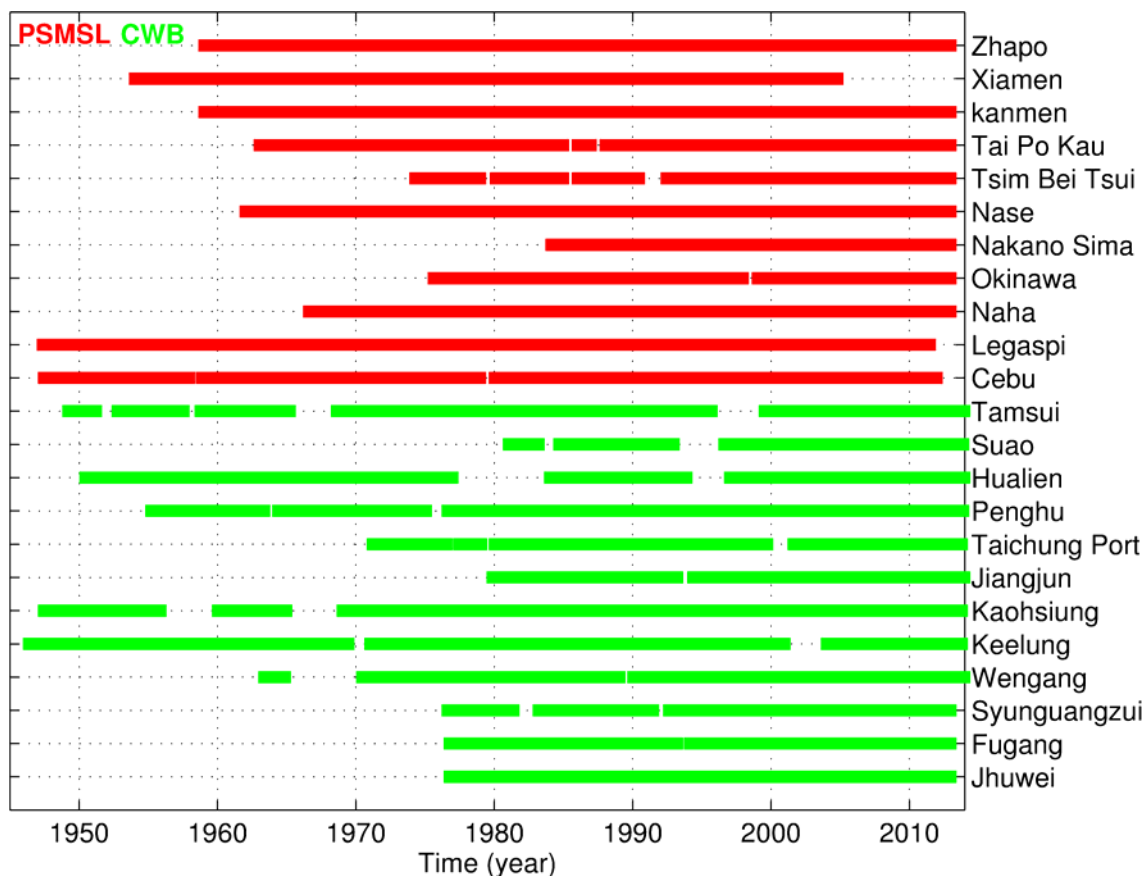


圖 2.5 臺灣附近海域之潮位站資料涵蓋時間圖

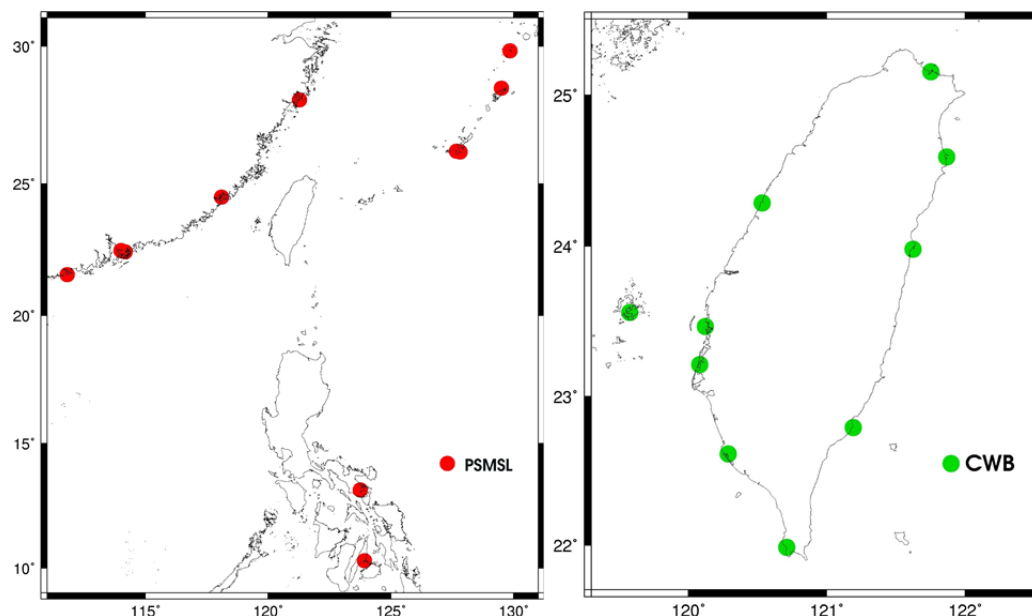


圖 2.6 臺灣附近海域潮位站位置分佈圖。左圖：平均海平面永久服務中心(PSMSL)潮位站；右圖：中央氣象局潮位站

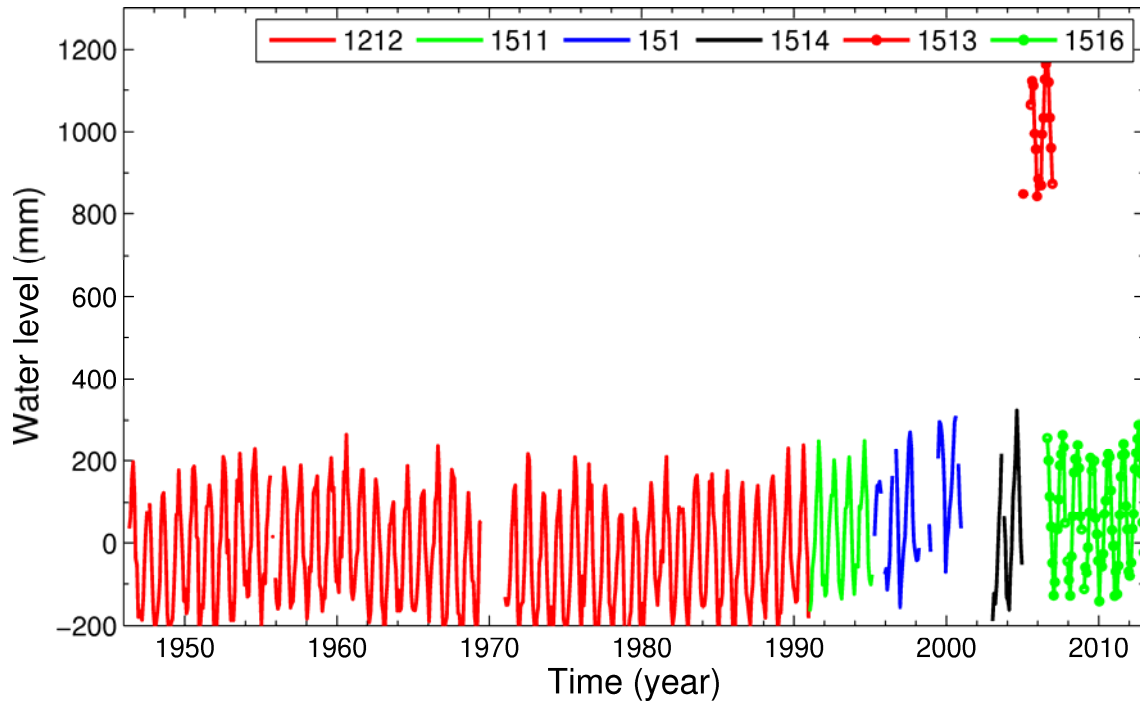


圖 2.7 基隆潮位站資料比較圖。測站資料均為月平均資料

潮位站為觀測海水面變化的主要方式之一，由於潮位站資料包含潮位站地表垂直變動訊號，若以潮位記錄資料估算絕對海面上升速率時，則需考慮潮位站地表垂直變動速率，此外，還需進行海潮、逆氣壓效應以及基準偏移等改正。逆氣壓效應改正所需之海水表面大氣壓力資料可由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] [資料下載網址: <http://www.cdc.noaa.gov>]資料中心取得，美國國家氣象局國家環境預測中心(NCEP)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。資料涵蓋時間為1871/01-2012/12。

2.3 重力反演和氣候實驗(GRACE)重力衛星

2.3.1 重力反演和氣候實驗(GRACE)衛星介紹

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 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佈以外，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。大地水準面為自平均海水面向陸地延伸之一等位面，與無風、無洋流、無潮汐之海水面一致，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大地水準面間之差異，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 *mgal*，大地水準面之相對精度為 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 年重

力反演和氣候實驗(GRACE)發射後則成功解決此問題。

重力反演和氣候實驗(GRACE)衛星由美國航空暨太空總署(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重力反演和氣候實驗(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，可由重力反演和氣候實驗(GRACE)之觀測量反推水文變化。

重力反演和氣候實驗(GRACE)的軌道高度為 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。重力反演和氣候實驗(GRACE)由兩顆子衛星所組成(如圖 2.8 所示)，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 $1\mu\text{m}$ 。
- (2) 超穩定之微型震盪器 (Ultra-Stable Oscillator, USO)：提供 K 波段測距穩定的頻率。
- (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，計算相對於全球衛星定位系統(GPS)衛星距離的改變。

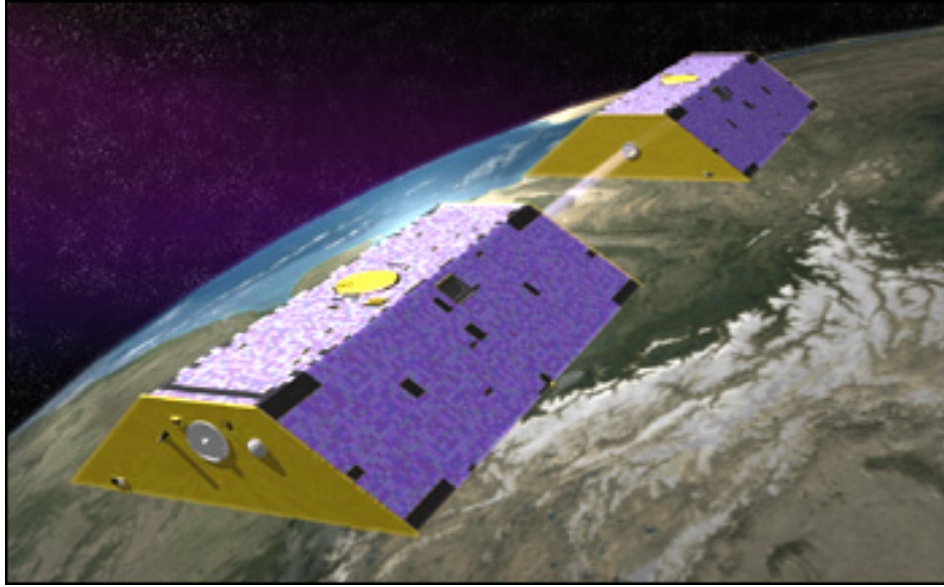


圖 2.8 重力反演和氣候實驗(GRACE)重力衛星示意圖 [圖片來源：
<http://earthobservatory.nasa.gov/Features/GRACE/>]。

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重力反演和氣候實驗(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。萬有引力位與球諧係數之間的關係可由下式表示 [Heiskanen and Moritz, 1967]：

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

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)， θ 為餘緯度(Co-latitudes)， φ 為經度。重力反演和氣候實驗(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]，在重力反演和氣候實驗(GRACE)的任務中，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。

重力反演和氣候實驗(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海水面變化速率 [Chen *et al.*, 2005]，若以衛星雷射測距 (Satellite laser ranging) 觀測之 $\bar{C}_{20}$ 取代重力反演和氣候實驗(GRACE)的重力場解之 $\bar{C}_{20}$ ，其估計之海水質量與比容海水面後之衛星測高資料較吻合 [Chen *et al.*, 1999]。

2.3.2 重力反演和氣候實驗(GRACE)重力衛星觀測原理

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，而重力反演和氣候實驗(GRACE)與以往地球觀測任務衛星不同。重力反演和氣候實驗(GRACE)計畫由兩顆子衛星組成，包括位於前端的子衛星 (重力反演和氣候實驗(GRACE)-A)，以及位於後端的子衛星 (重力反演和氣候實驗(GRACE)-B)，兩子衛星相距平均 220 公里。重力反演和氣候實驗(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，首先重力反演和氣候實驗(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；而當重力反演和氣候實驗(GRACE)-A 通過而重力反演和氣候實驗(GRACE)-B 接近該地區時，重力反演和氣候實驗(GRACE)-A 受重力影響而飛行速度減慢，同時重力反演和氣候實驗(GRACE)-B 速度增加，兩子衛星間距離則縮短；最後當重力反演和氣

候實驗(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。重力反演和氣候實驗(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。重力反演和氣候實驗(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，重力反演和氣候實驗(GRACE)重力衛星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] 發現重力反演和氣候實驗(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 2.9 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]。

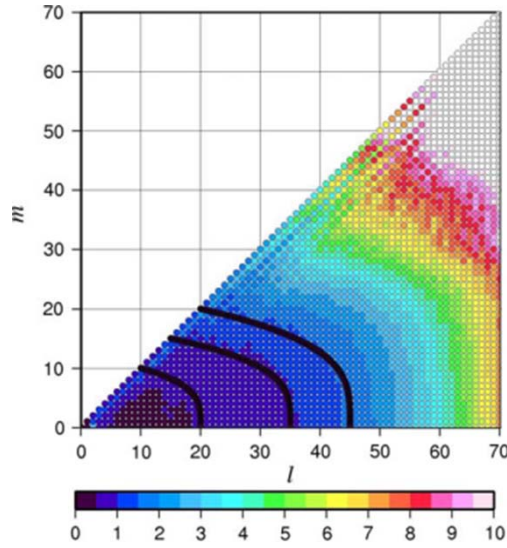


圖 2.9 重力反演和氣候實驗(GRACE)球諧係數之誤差 (Scaled by $\times 10^{12}$)，三條黑色曲線用來表示沒有變化之區域[Duan *et al.*, 2009]

依據圖 2.9，不變區域黑色曲線可以下式來表示

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

其中 n 和 m 分別為階數和次數，依據重力反演和氣候實驗(GRACE)公佈 04 版本計算之 $r=3.5$ ， n_0 和 β 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：

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

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 $UP = (35, 0) (10, 10)$ 可取得最小均方根(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)

重力反演和氣候實驗(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，因此實際使用重力反演和氣候實驗(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：

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

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

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)

重力反演和氣候實驗(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. 平滑重力反演和氣候實驗(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，然後從重力反演和氣候實驗(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 2.10 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。

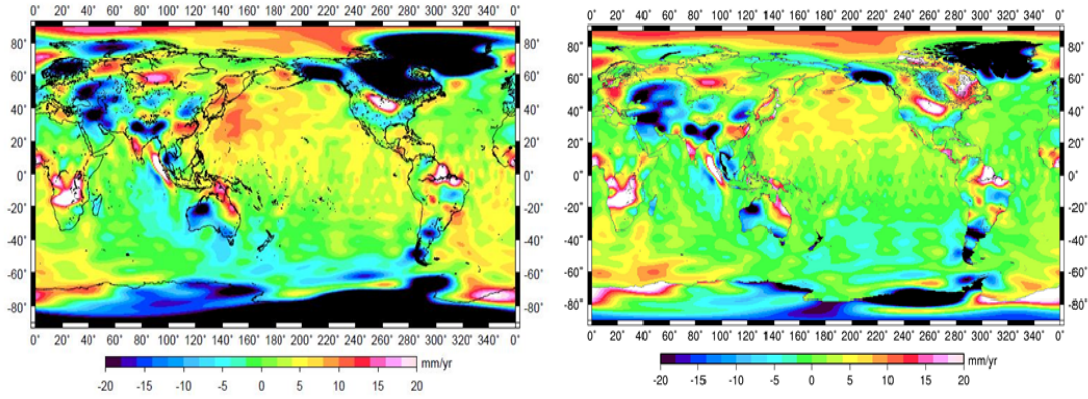


圖 2.10 重力反演和氣候實驗(GRACE)重力場解計算之海洋質量。左：未進行洩漏效應改正，右：進行洩漏效應改正

2.3.6 海水質量變化計算

本研究採用空間研究中心(CSR)發佈之月平均重力反演和氣候實驗(GRACE)的重力場解 (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)，稱之為重力反演和氣候實驗(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 2.11 所示。當利用重力反演和氣候實驗(GRACE)的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，故需將大氣-海洋去混疊(AOD)模型加回重力反演和氣候實驗(GRACE)重力場解中，因此步驟 8 中將大氣-海洋去混疊(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：

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

其中 σ_w 為純水密度(1000 kg m^{-3})， σ_E 為地球平均密度(5517 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，即為隨時間變化之斯托克斯(Stokes)球諧係數， k_n 為洛夫數 (Love number)。

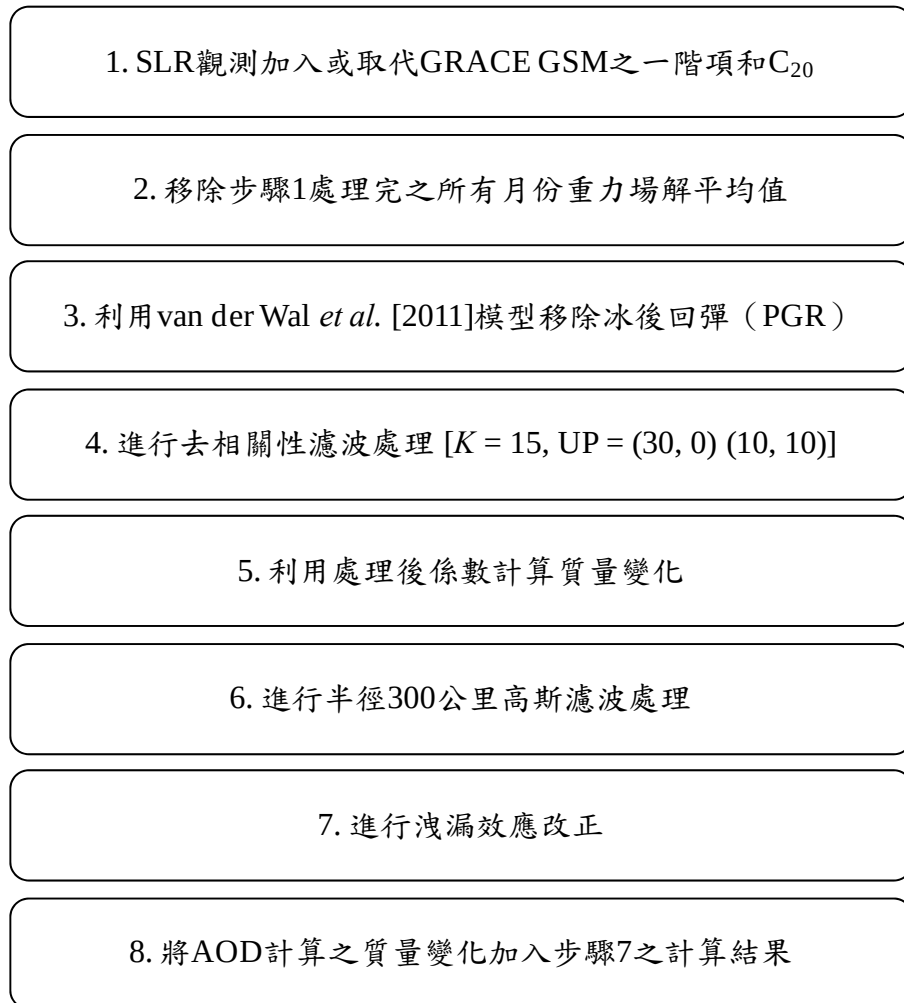


圖 2.11 重力反演和氣候實驗(GRACE)重力場解計算質量變化流程圖

2.4 溫度與鹽度資料

本計畫利用海洋各深度之溫度與鹽度資料估算比容海水面變化 [Gill, 1982]。計畫中採用的溫度與鹽度資料為Ishii和Kimoto [2009]更新後之資料(後續簡稱Ishii資料)與地轉海洋學即時觀測陣列(ARGO)計畫下的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1945/01-2012/12，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。日本海洋研究開發機構 (JAMSTEC)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2001/01-2012/12，同樣地涵蓋範圍亦近乎全球，資料由海水表面至水深2000 m共分為25層。

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

比容海水面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：

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

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， ρ 和 ρ_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)。

2.5 氣候指標 (Climate index)

聖嬰-南方振盪(ENSO)現象與太平洋年代際振盪(PDO)是太平洋呈現明顯年際與數十年變化之氣候現象。兩者現象非常相似，對於海水表面溫度(sea surface temperatures)、海水面氣壓(sea level pressure)以及海表面風場(surface winds)等氣象因子之影響皆非常相似。太平洋年代際振盪 (PDO) 主要影響的區域為北太平洋，但它的影響仍會擴及到赤道地區 (如圖 2.12(a)所示)。聖嬰-南方振盪(ENSO)與太平洋年代際振盪 (PDO) 現象相反，聖嬰-南方振盪(ENSO)主要影響赤道附近地區的氣候，但其仍會影響在北太平洋之氣候 (如圖 2.12(b)所示)。由圖可知，太平洋年代際振盪 (PDO) 正相位(或稱暖相位)，其影響非常相似於聖嬰(El Niño)現象。同樣地，太平洋年代際振盪 (PDO) 負相位(或稱冷相位)表示，其影響亦相似於反聖嬰(La Niña)現象(Gershunov and Barnett, 1998)。而所謂太平洋年代際振盪 (PDO) 正相位(或稱暖相位)即為當北太平洋海水溫度異常下降以及熱帶太平洋附近海水溫度異常上升時稱之，反之亦然。由上述可知，兩現象間影響非常相似，而兩者之間最大不同之處在於訊號時間尺度之差異。聖嬰-南方振盪(ENSO)現象之週期約為 2 至 8 年，而太平洋年代際振盪 (PDO) 之週期則約為 15 至 25 年 (Mantua, 2002)。

本計畫在評估聖嬰-南方振盪(ENSO)與太平洋年代際振盪(PDO)現象對於臺灣海水面變化影響時，將使用兩個氣候指標:多重聖嬰-南方振盪(ENSO)指數(Multivariate ENSO Index, MEI)與太平洋年代際振盪(PDO)指數。多重聖嬰-南方振盪指數(MEI)是由六個變量所組成，包括海水面氣壓(sea-level pressure)、東西方向與南北方向之表面風速(surface wind)、海水面溫度(sea surface temperature)、地表溫度(surface air temperature)以及雲總遮蔽量(total cloudiness fraction of the sky)，並經相鄰兩個月的數值經由標準化處理後所得之月平均指數[多重聖嬰-南方振盪指數指數 (MEI)，<http://www.esrl.noaa.gov/psd/data/climateindices/list/>]。多重聖嬰-南方振盪指數(MEI)時間涵蓋 1950-至今，當聖嬰-南方振盪(ENSO)現象越顯著時，多重聖嬰-南方振盪指數

(MEI)指數則越高，反之亦然（如圖 2.13 所示）。由圖可知，歷史上聖嬰現象規模最為顯著時間為 1982-1983 與 1997-1998 年間，而且每一個聖嬰現象必定伴隨另一個反聖嬰現象發生。

太平洋年代際振盪(PDO)指數是由北太平洋(緯度 $> 20^{\circ}\text{N}$)月平均海面溫度以特徵向量函數(EOF)法推算出的月平均模式。太平洋年代際振盪(PDO)指數時間涵蓋 1948-至今，並可至 <http://www.esrl.noaa.gov/psd/data/climateindices/list/> 下載。目前太平洋年代際振盪(PDO)已經歷約 2.5 次週期(如圖 2.13 所示)。Newman 等人 [2003]認為太平洋年代際振盪(PDO)的年際變化受到聖嬰-南方振盪(ENSO)的影響，因此北太平洋大氣環流受到影響後，進而影響海氣的交互作用。太平洋年代際振盪(PDO)-聖嬰-南方振盪(ENSO)兩者間的高相關性同時發生在夏季與冬季，其中當聖嬰-南方振盪(ENSO)持續增強時，將影響夏季的太平洋年代際振盪(PDO)，在聖嬰-南方振盪(ENSO)增強後，其變異較小的時期將影響當年冬季或隔年的春季之太平洋年代際振盪(PDO)。

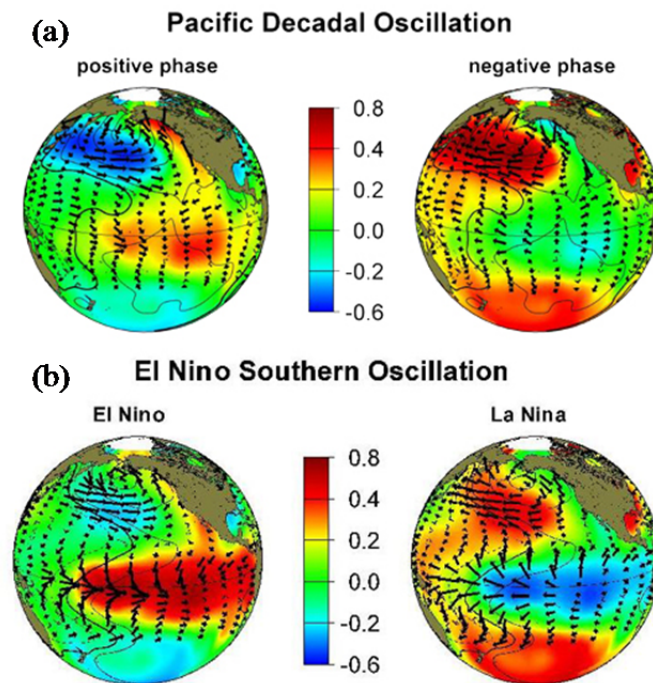


圖 2.12 太平洋年代際振盪 (PDO) 和聖嬰-南方振盪(ENSO)現象對於海水表面溫度與風場(surface winds)影響。(a) 太平洋年代際振盪 (PDO)、(b) 聖嬰-南方振盪(ENSO)現象。顏色: 溫度異常 (temperature anomalies)、箭頭: 風場方向和大小。【圖摘自:

http://ffden-2.phys.uaf.edu/645fall2003_web.dir/Jason_Amundson/pdo_main.htm

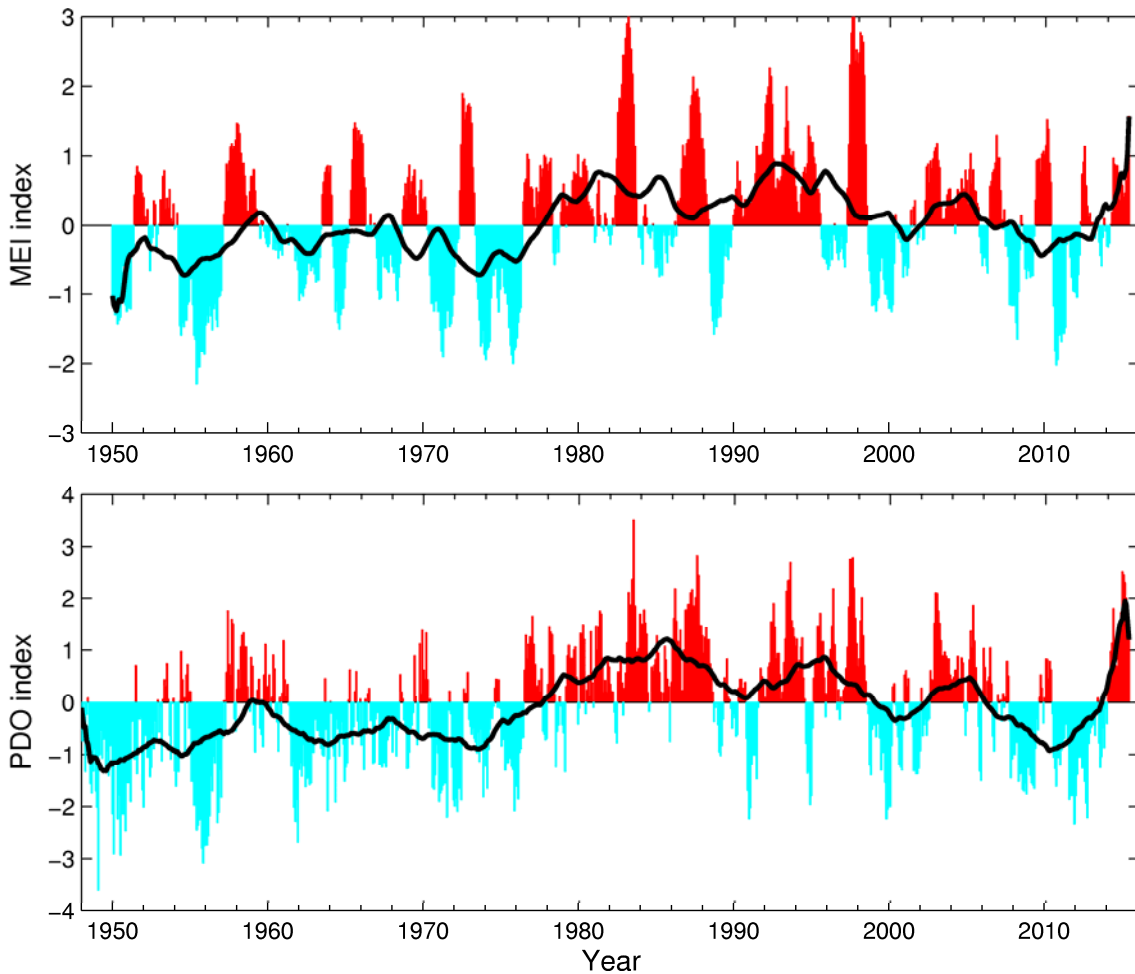


圖 2.13 多重聖嬰-南方振盪指數(MEI)及太平洋年代際振盪 (PDO) 指數，黑線為 5 年移動平均線

2.6 第二章完成之工作項目

第二章已完成工作項目”針對臺灣四周近海及國內各商港海域，匯整更新區域性驗潮站和衛星測高儀海水面變化速率和影響因子等相關觀測與研究文獻”中的研究資料更新。本研究主要使用研究資料包含水位觀測資料(衛星測高與潮位站資料)、重力反演和氣候實驗(GRACE)重力衛星觀測所觀測之全球重力場變化、溫度與鹽度資料(Ishii 與日本海洋研究開發機構 (JAMSTEC))以及氣候指標(多重聖嬰-南方振盪指數(MEI)與太平洋年代際振盪(PDO)指數)。

第三章 潮位站資料改正

潮位站觀測量為相對於岸邊固定基準點之水位變動觀測值，基準點可能受地表面垂直變動影響，使得潮位站觀測資料含有自然海水面變化與長期或短期之地表垂直變動資訊。若以未經修正之潮位站資料來估算海水面上升速率，將求得相對於潮位站地表面之海水面上升速率。本研究之目標為估計臺灣四周海域絕對海水面上升速率，絕對海水面為相對於一個固定參考點或參考面，因此潮位站資料需進行地表垂直變動改正。此外還需改正天體引力造成之海潮、氣壓變化造成之逆氣壓效應以及人為造成之偏移量來移除非海洋變化之訊號。本章將分別說明海潮效應、逆氣壓效應、資料偏移量與潮位站地表垂直變動速率改正之相關方法與理論，並說明分析長期潮位站資料中低頻海洋震盪訊號之時頻工具與結果。於下一章（第四章）比較改正前(未改正)與改正後之海水面上升速率成果，並估計臺灣周遭海域絕對海水面上升速率以及預估臺灣未來海水面變化。

3.1 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。一般而言，海潮效應常以平均潮位資料來降低或調和分析法(Harmonic analysis)來移除，然而潮位資料中若包含基準偏移時(如圖 3.1 所示)，若以平均潮位資料來移除海潮效應時，於基準偏移發生時間附近之潮位資料將受到偏移量之影響，而產生誤差。本計畫利用目前最常使用的調和分析法(Schwartz, 2005)估算各分潮之震幅，並且於調和分析法中加上 m 個步階函數 b_j 來擬合偏移量，以避免偏移量影響海潮效應之改正，其公式如下：

$$TG(t) = a_0 + a_1 t + \sum_{i=1}^n [A_i \sin(\omega_i t) + B_i \cos(\omega_i t)] + \sum_{j=1}^m b_j \dots\dots\dots(3.1)$$

其中

TG : 潮位站觀測水位高度資料

t : 時間

a_0 、 a_1 、 A_i 、 B_i 、 b_j : 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， b_j 為步階函數(m : 基準偏移之個數)， C_i 為各分潮之振幅 ($C_i = \sqrt{A_i^2 + B_i^2}$)

n : 分潮個數，本研究 $n=37$ ，37 個分潮的週期請參閱附錄一

ω_i : 各分潮之頻率

本計畫以間接平差計算方式，依最小二乘法原理求解式(3.1)中未知參數，再將擬合的高頻訊號(週期 < 28 天) 自潮位站資料中移除，以提高日後推算海水面上升速率之精度。以中央氣象局提供的基隆與高雄潮位站資料為例 (如圖 3.1 與圖 3.2 所示)，未改正海潮效應的基隆與高雄潮位站資料中皆包含高頻海潮訊號以及基準偏移情形，依最小二乘法原理求得式(3.1)中的未知參數，再將擬合高頻海潮訊號自潮位站資料中移除後顯示出低頻訊號(週期 > 182 天)。比較海潮改正前後之基隆與高雄潮位站資料可以清楚看出，移除高頻海潮訊號後之剩餘低頻訊號中含有明顯之年週期與半年週期海水面變化，如圖 3.3 所示。

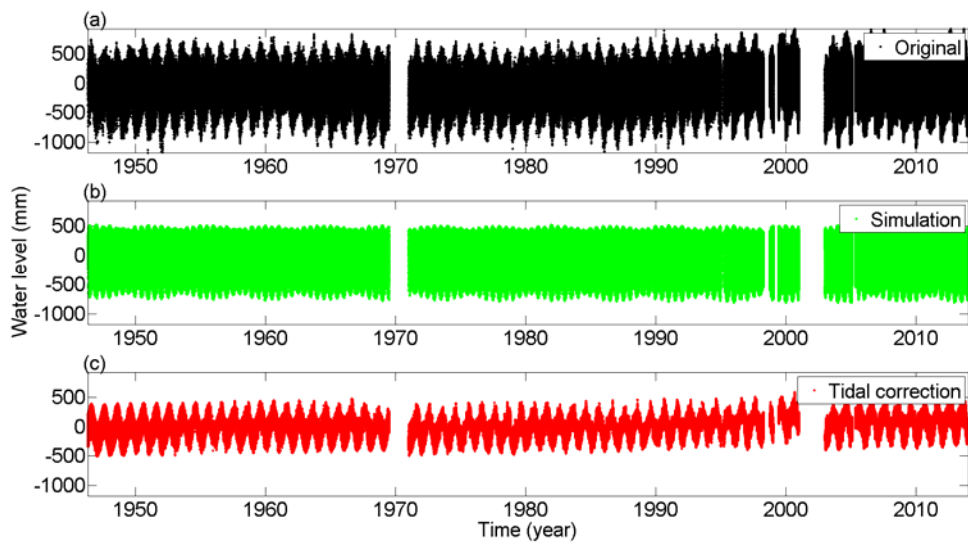


圖 3.1 基隆潮位站之海潮效應改正。(a) 未改正海潮效應之潮位資料，
(b) 擬合高頻海潮訊號，(c) 移除高頻海潮訊號分量後之潮位資料

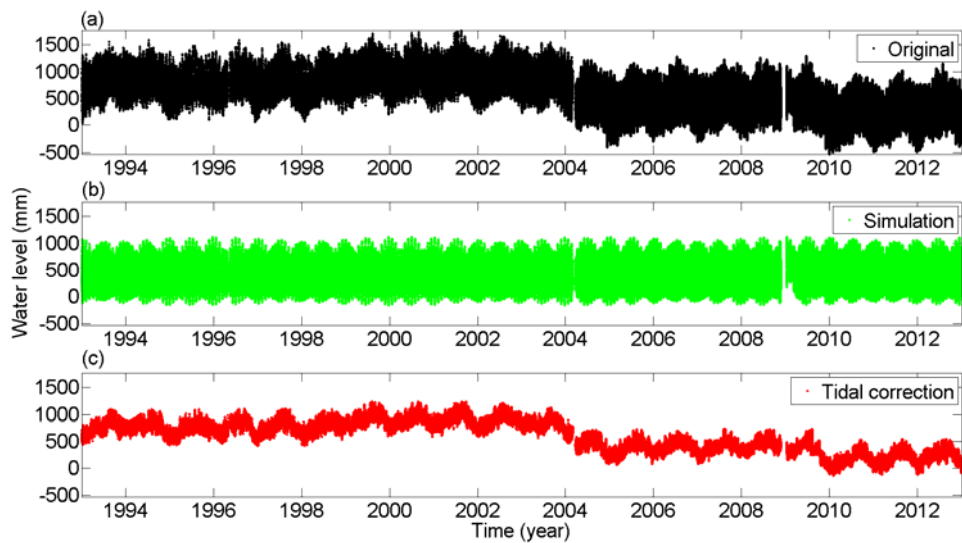


圖 3.2 高雄潮位站之海潮效應改正。(a) 未改正海潮效應之潮位資料，
(b) 擬合高頻海潮訊號，(c) 移除高頻海潮訊號分量後之潮位資料

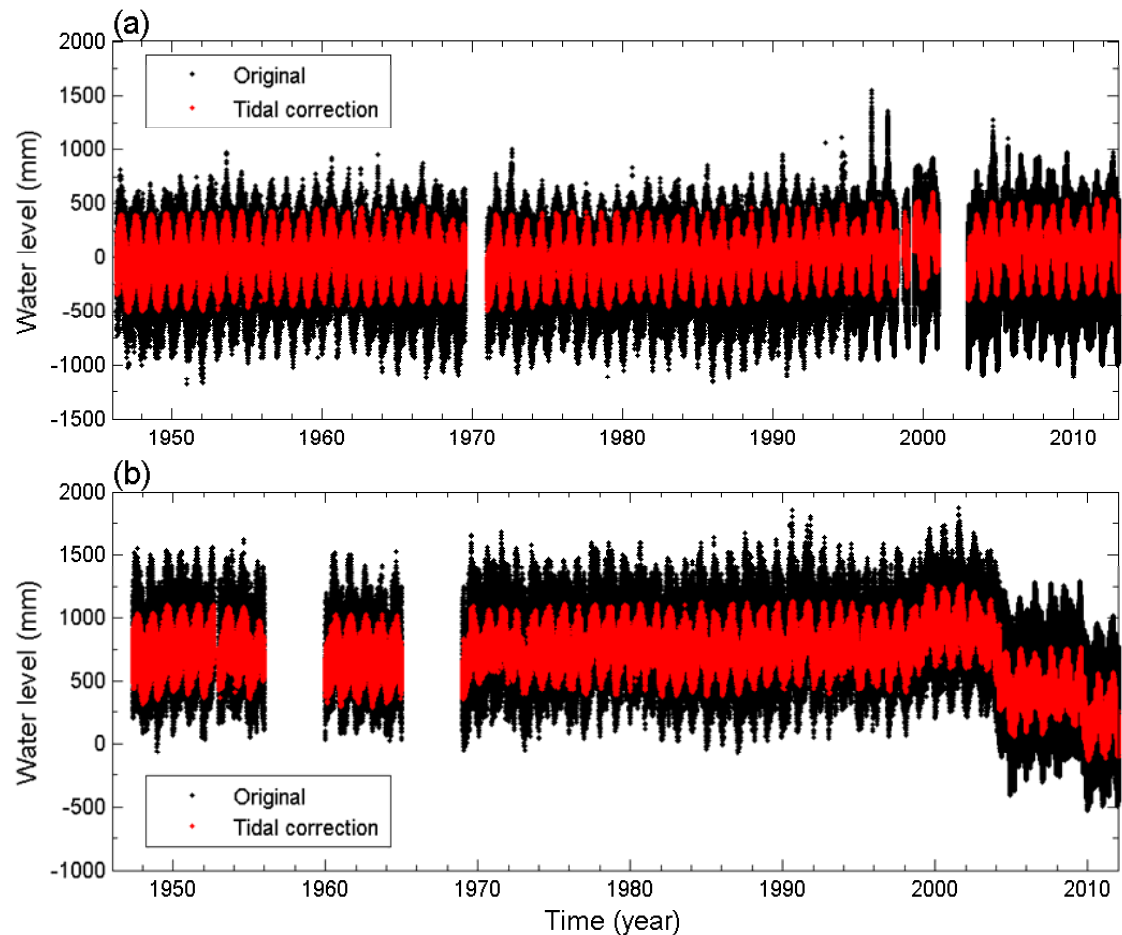


圖 3.3 海潮改正前後之基隆與高雄潮位站資料差異圖。(a) 基隆潮位站、(b) 高雄潮位站。黑色時間序列(Original)為未改正海潮效應之潮位資料，紅色時間序列(Tidal correction)為移除高頻海潮訊號分量後之潮位資料

3.2 逆氣壓改正

先前利用臺灣潮位站估計海水面變化之研究中，較少考慮逆氣壓效應對海水面上升速率計算之影響。然而研究發現，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變化的影響[Wunsch and Stammer, 1997]，故本計畫各潮位站資料皆進行逆氣壓改正。一般而言，當氣壓升高 1 *mbar*，海水面高度約降低 1.01 *cm* [Chelton and Enfield, 1986]。逆氣壓效應改正(*IB*; 單位: 公釐)公式如下所示：

$$IB = -9.948 \times (P_{atm} - P) \dots\dots\dots (3.2)$$

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平均海水表面壓力，尺度因子 9.948 為中緯度之經驗值 [Wunsch, 1972]

公式(3.2)中 P 為隨時間變化之全球平均海水表面壓力(如圖 3.4 所示)，全球海水表面壓力平均應為常數不變，故公式中 P 之目的為移除全球平均氣壓變化之斜率影響。本計畫使用的潮位站資料分別為平均海平面永久服務中心(PSMSL)月平均資料與中央氣象局之資料(包含每 6 分鐘、10 分鐘與 60 分鐘之潮位記錄資料)，根據第一期(102 年度)計畫成果，利用不同時間段平均之 P 值(6 小時、日及月平均全球平均海水表面壓力)對臺灣四周潮位站的逆氣壓效應改正之影響甚小，因此本研究皆使用月平均全球平均海水表面壓力變化來進行逆氣壓效應改正。而海水表面壓力 P_{atm} 亦沿用第一期(102 年度)[郭重言等人，2014]之改正方式，平均海平面永久服務中心(PSMSL)潮位站資料為月平均資料，故逆氣壓改正之 P_{atm} 則為月平均資料；而中央氣象局潮位站資料的逆氣壓改正之 P_{atm} 則使用日平均資料。

以中央氣象局提供的基隆與高雄潮位站資料為例（如圖 3.5 與圖 3.6 所示），逆氣壓效應改正前後的基隆與高雄潮位站資料差異不大，兩潮位站資料經逆氣壓改正後的標準偏差皆降低，分別由 145 mm 降至 97 mm 以及 206 mm 降至 187 mm，而基隆與高雄潮位站上的逆氣壓效應主要為季節性變化(年週期與半年週期)。

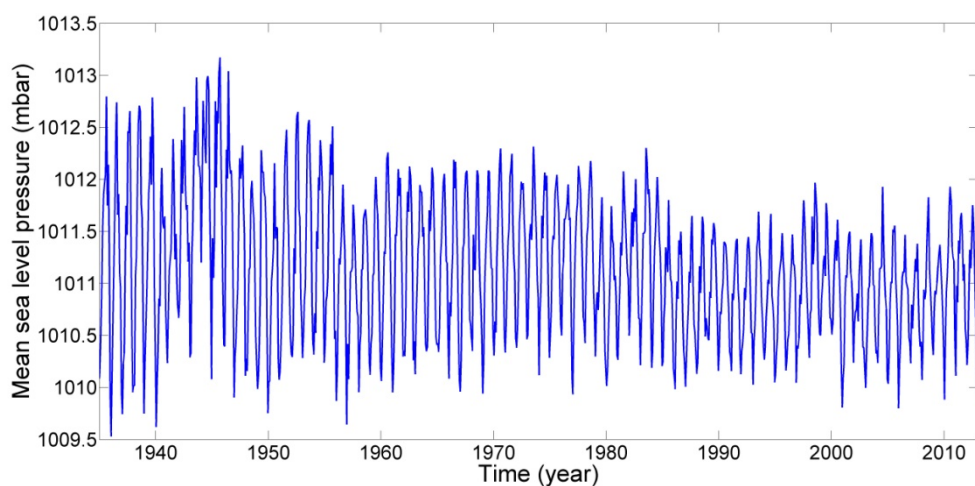


圖 3.4 美國國家氣象局國家環境預測中心(NCEP) 月平均全球平均海面壓力

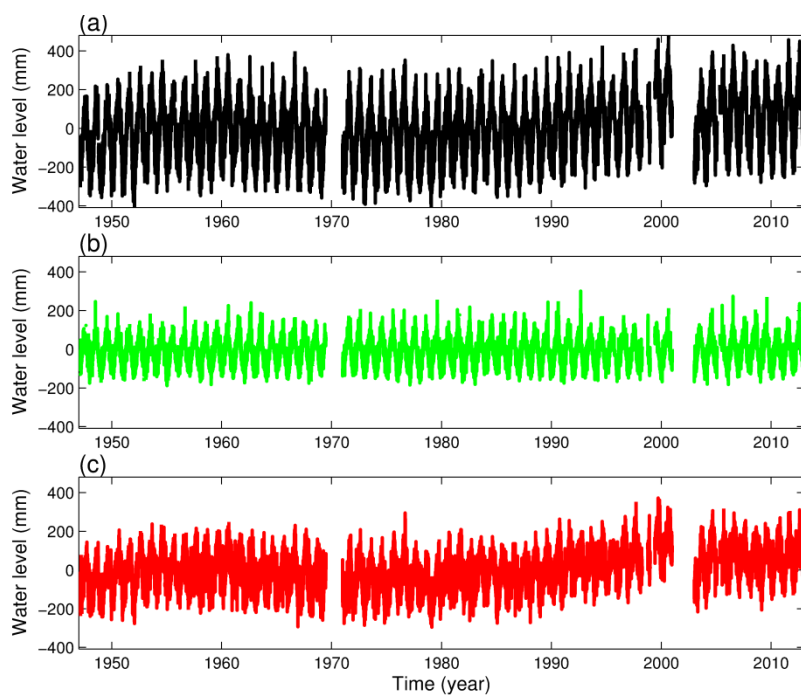


圖 3.5 基隆潮位站之逆氣壓效應改正。(a) 未改正逆氣壓效應之潮位資料，(b) 逆氣壓效應，(c) 改正逆氣壓效應後之潮位資料

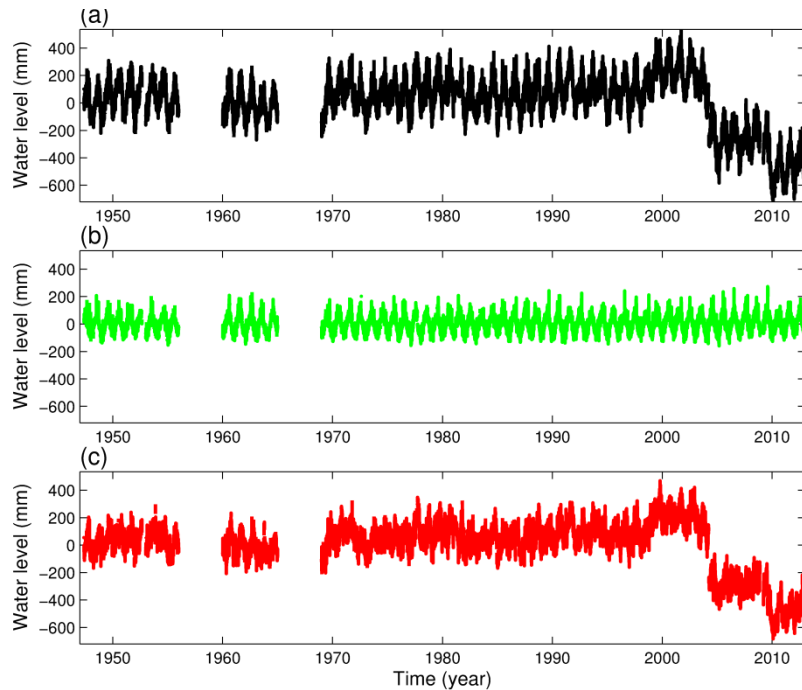


圖 3.6 高雄潮位站之逆氣壓效應改正。(a) 未改正逆氣壓效應之潮位資料，(b) 逆氣壓效應，(c) 改正逆氣壓效應後之潮位資料

3.3 偏移量改正

潮位站使用一段時間後，因儀器調整、設備維修、儀器更換或變更設置地點(遷站)等情形，造成觀測記錄中斷。理論上儀器更換或遷站皆須按規定重新量測參考基準，而實際上常常不按照規定進行基準重新量測，造成新舊觀測資料之參考基準不一致，因此使用潮位站資料前需先檢查資料是否有基準偏移之情形。本研究偏移量偵測主要分為三個部份，第一部份為潮位站換站檢測，潮位站可能有多個不同的測站編號(如表 2.4 所示)，而更改測站編號通常是因為儀器更換或遷移，若儀器更換或位置遷移後，無重新進行基準量測，則後續觀測資料將與先前資料可能存在一偏移量，因此若測站編號更換前後未涵蓋相同時間潮位資料，在後續分析潮位資料中是否有基準偏移之情形時，將特別注意該時間點。第二部分為資料中斷檢測，潮位站觀測儀器因為故障、機器維修或設備更換等因素造成觀測記錄中斷，當潮位站資料不連續時，代表潮位資料中可能有基準偏移情形。然而若以記錄中斷為檢核條件，將會檢測出許多中斷情形，然而記錄中斷事件與基準偏

移量情形並非完全相關，因此本研究以記錄中斷半年之上事件為門檻值，若超過半年以上中斷記錄，將視該時間點有資料偏移情形。第三部份為進一步分析潮位資料中是否有基準偏移之情形，以中央氣象局基隆與高雄潮位站資料為例之步驟說明如下，

- (1) 進行偏移量偵測之前，為了減少其他已知訊號影響偏移量偵測，先將上述海潮與逆氣壓效應自潮位站資料中移除（如圖 3.7(a)與圖 3.8(a)所示），圖中潮位資料皆已移除海潮與逆氣壓效應。
- (2) 為了降低季節性(年周期與半年週期)訊號對偏移量偵測之影響，利用六參數擬合步驟(1)處理後之潮位資料，擬合公式如下，

$$TG(t) = a + \beta_1 t + c \sin(2\pi t) + d \cos(2\pi t) + e \sin(4\pi t) + f \cos(4\pi t) \dots\dots\dots (3.3)$$

其中， TG 為步驟(1)處理後之潮位站資料， a 為偏差， β_1 為斜率， 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之餘弦振幅， t 為時間。式(3.3)以間接平差計算方式，依最小二乘法原理，求解式中未知參數。擬合之基隆與高雄潮位站資料的季節性(年周期與半年週期)訊號如圖 3.7(b)與圖 3.8(b)所示。

- (3) 將步驟(1)處理後之潮位站資料與步驟(2)擬合之季節性(年周期與半年週期)訊號進行相減，將季節性訊號自潮位資料中移除，結果如圖 3.7(c)與圖 3.8(c) 所示。由圖 3.7(c)與圖 3.8(c)可明顯看出季節性(年周期與半年週期)訊號已被移除或降低。
- (4) 將步驟(3)處理後之潮位站資料以哈爾(Haar)小波分解(wavelet decomposition)進行分解，然後移除資料中的高頻訊號，保留低頻訊號(如圖 3.9 與圖 3.10 所示)。由圖可知，移除高頻訊號後，低頻訊號變得相對平滑，僅在基準偏移點位附近有較大變化。
- (5) 對步驟(4)處理後之低頻訊號的相鄰時間海水面變化值進行相減(差值)，分析訊號中在短時間內是否有劇烈變化，若差值大於設定門檻值(50 mm)的門檻值，該時間點可能因人為或自然(如地震)造成偏移情形。圖 3.9 與圖 3.10 中紅色點位為差值大於設定門檻值(50 mm)之時間，因此該時間附近被認為可能存在基

準偏移。此門檻值為利用臺灣附近無基準問題的水位變化資料(如衛星測高與平均海平面永久服務中心(PSMSL)之修正地方基準(RLR)資料)，而估算出的門檻值，此門檻值已於第二期計劃(103 年)[郭重言等人，2015]中詳細說明如何取得，因此本計畫將沿用第二期計劃(103 年)所設定之門檻值 50 *mm*。

- (6) 利用步驟(5)判斷之可能發生偏移點位前後特定時間段(約 2 年)之資料偏差值，評估獲取的偏移點位是否真正存在偏移量。若資料偏差值遠大於設定之門檻值(100 *mm*)，則認定該時間點潮位資料存在基準偏移，若資料偏差值接近門檻值則輔以衛星測高資料或其他相鄰潮位站資料來進行評估。利用步驟(1)~步驟(6)分別偵測出基隆與高雄潮位站資料有 0 個與 4 個偏移量，結果如圖 3.9 與圖 3.10 所示。此門檻值為利用臺灣附近無基準問題的水位變化資料(如衛星測高與平均海平面永久服務中心(PSMSL)之修正地方基準(RLR)資料)，而估算出的門檻值，此門檻值已於第二期計劃(103 年)[郭重言等人，2015]中詳細說明如何取得，因此本計畫將沿用第二期計劃(103 年)所設定之門檻值 100 *mm*。

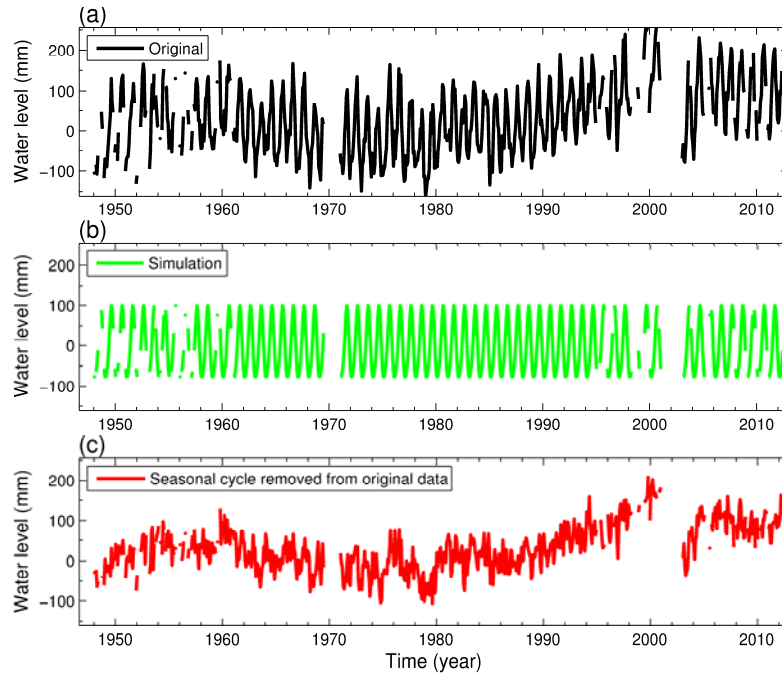


圖 3.7 基隆潮位站之季節性訊號移除(海水面的年週期與半年週期變化)。
 (a) 未移除季節性之潮位資料(已移除海潮與逆氣壓效應)，(b) 擬合潮
 位資料的季節性訊號，(c) 移除季節性訊號後之潮位資料

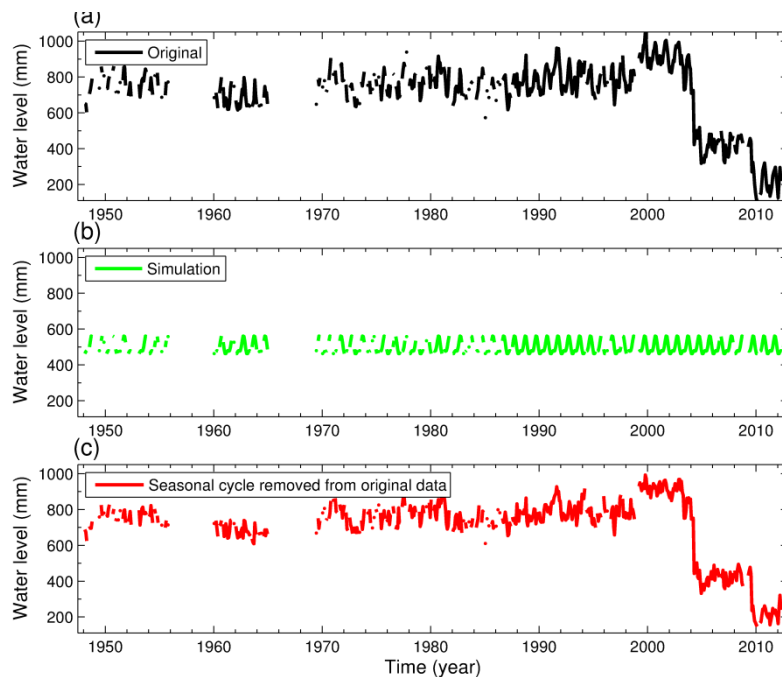


圖 3.8 高雄潮位站之季節性訊號移除(海水面的年週期與半年週期變化)。
 (a) 未移除季節性之潮位資料(已移除海潮與逆氣壓效應)，(b) 擬合潮
 位資料的季節性訊號，(c) 移除季節性訊號後之潮位資料

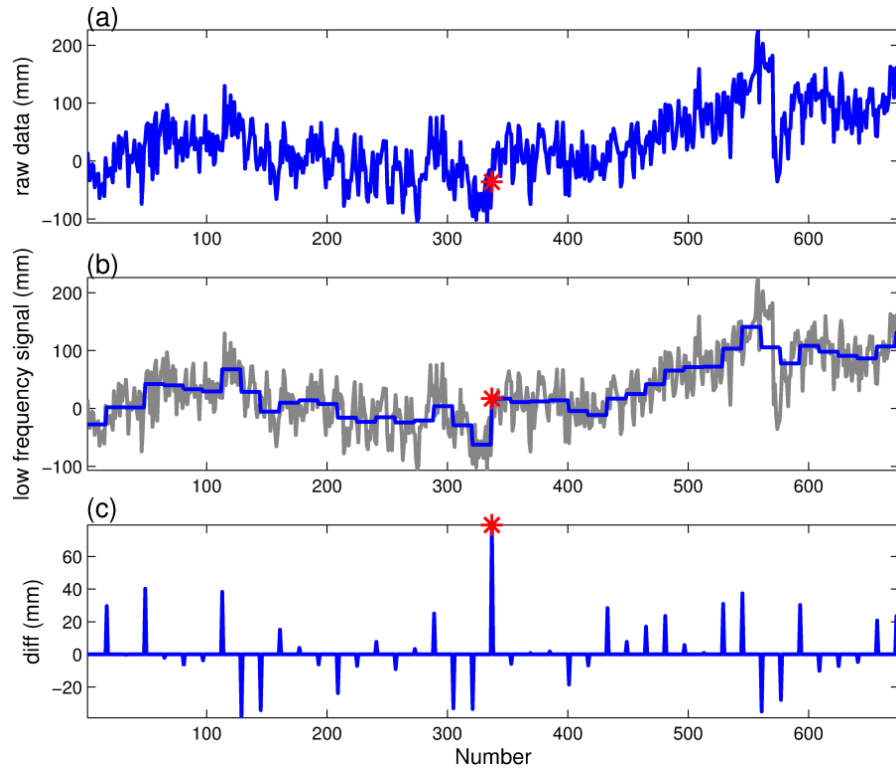


圖 3.9 基隆潮位站之偏移量偵測。(a) 移除海潮、逆氣壓與季節性訊號之潮位站資料，(b) 利用小波分解移除(a)的資料之高频訊號，(c) 剩餘訊號(low frequency signal)之相鄰時間海水面變化值相減。紅色點表示可能之偏移點位。使用的資料需為連續訊號，將按照時間先後順序一個個排序，若遇到缺漏資料則跳過，因此 X 軸以 Number 為名

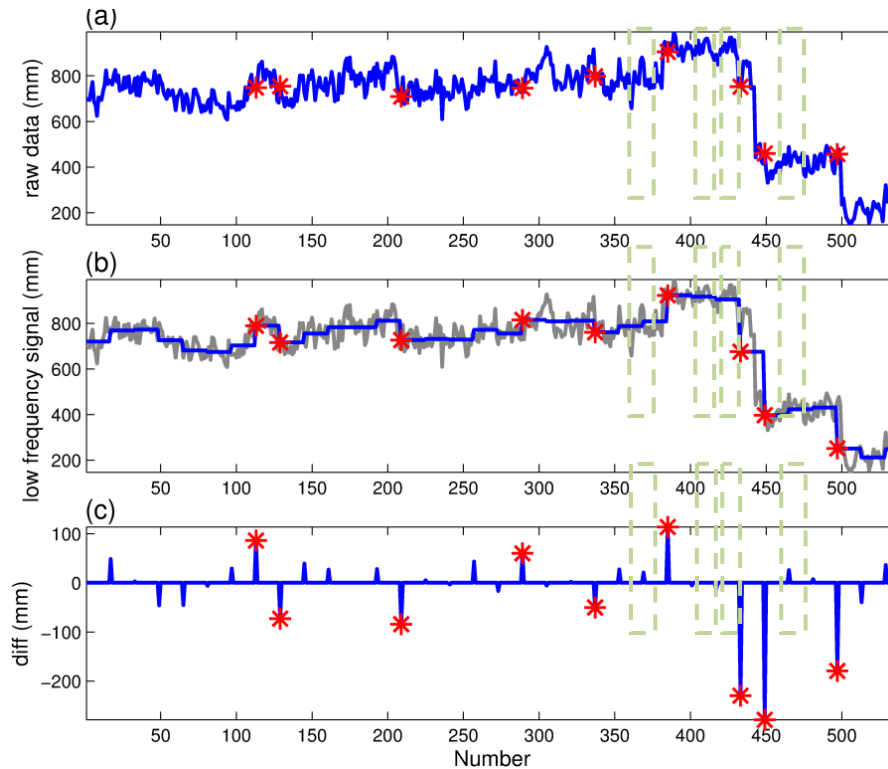


圖 3.10 高雄潮位站之偏移量偵測。綠色虛線框表示偵測出的偏移點位。(a) 移除海潮、逆氣壓與季節性訊號之潮位資料，(b) 利用小波分解移除(a)的資料之高频訊號，(c) 剩餘訊號(low frequency signal)之相鄰時間海水面變化值相減。紅色點表示可能之偏移點位。使用的資料需為連續訊號，將按照時間先後順序一個個排序，若遇到缺漏資料則跳過，因此 X 軸以 Number 為名

本計畫在第一期(102 年)計劃與第二期(103 年)計劃已分別針對十年與二十年潮位站資料進行基準偏移校正，校正方式分為兩種，第一種為將包含海水面變化與潮位站地表垂直變動的訊號以六參數加上步階函數(step function)進行潮位站資料擬合並改正之；第二種利用衛星測高資料消除潮位站資料中海水面變化訊號，並以二參數加上步階函數擬合並改正之。然而本期(104 年)計劃為改正長期潮位站資料(>30 年)，潮位站資料涵蓋時間範圍已大於衛星測高觀測時間段，因此今年期計畫中基準偏移校正並不適用於第二種方式，故本期僅使用六參數加上步階函數進行潮位站資料擬合並改正之，其公式如下所示：

$$TG(t) = a_0 + b't + c \sin(2\pi t) + d \cos(2\pi t) + e \sin(4\pi t) + f \cos(4\pi t) + \sum_{i=1}^n a_i \dots \dots \dots (3.4)$$

其中 a 為偏差， n 為基準偏移個數， TG 為潮位站資料， b' 為包含海水上升速率與潮位站地表垂直變動速率。當高雄潮位站時間序列未改正基準偏移前，潮位站資料在 1995-2012 年有明顯基準不一致，而偏移量改正後，高雄潮位站時間序列較有一致性。比較基隆與高雄潮位站資料基準偏移改正前、後成果如圖 3.11 與圖 3.12 所示。基隆潮位站資料改正偏移量前、後的海水面上升速率分別為 $1.63 \pm 0.10 \text{ mm/yr}$ 和 $3.00 \pm 0.08 \text{ mm/yr}$ 。高雄潮位站資料改正偏移量前、後的海水面上升速率分別為 $-3.80 \pm 0.41 \text{ mm/yr}$ 和 $1.13 \pm 0.11 \text{ mm/yr}$ ，由圖 3.12 可知 2000 年以後分別有兩次基準偏移事件，改正前、後海水面速率差異則來自基準偏移時間段後期，因此未改正偏移量將造成估算海水面速率誤差，因此偏移量亦是修正潮位資料必須考量因素。

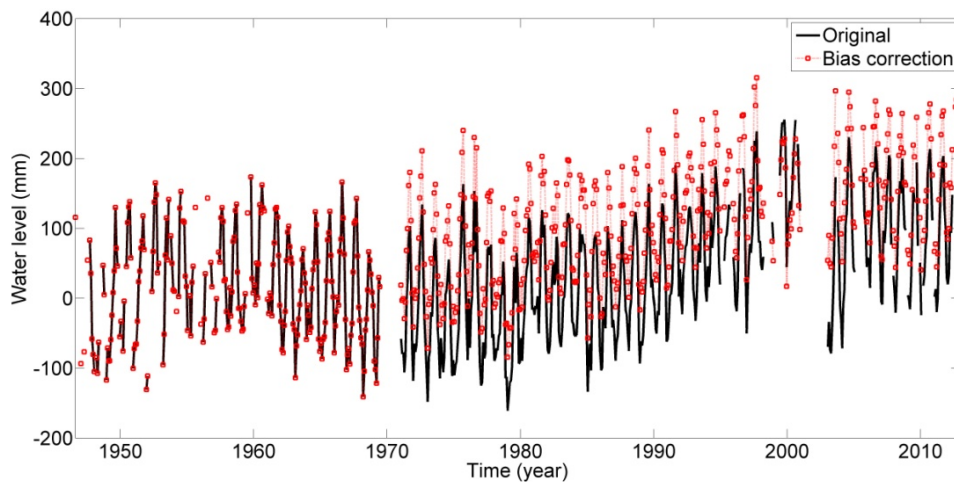


圖 3.11 基隆潮位站資料偏移量改正

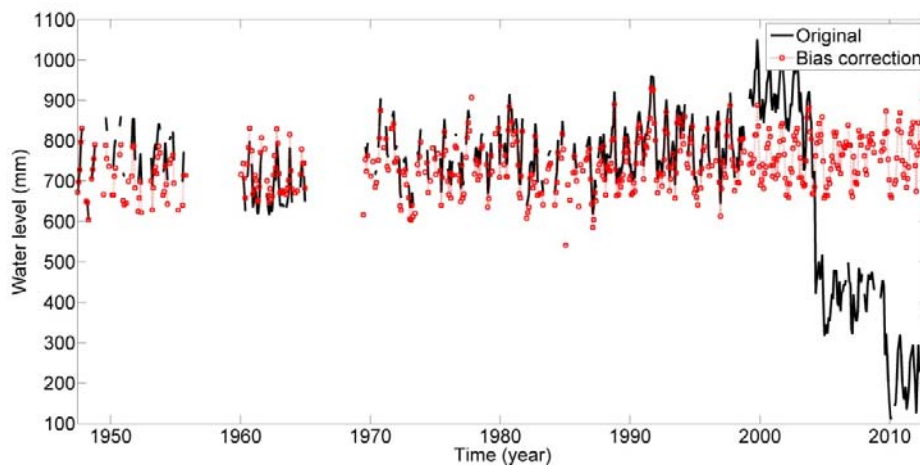


圖 3.12 高雄潮位站資料偏移量改正

3.4 潮位站地表垂直變動改正

3.4.1 潮位站地表垂直變動速率

衛星測高觀測之海水面高度為相對於參考橢球之絕對觀測量，因此該觀測量不受固體地球形變之影響，然而潮位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，其觀測量中包含潮位站地表垂直變動訊號，因此結合潮位站水位變化資料與衛星測高資料即可求得該潮位站之地表垂直變動量 u 與其斜率訊號 b'' ，公式如下所示，

$$u(\lambda, \varphi, t) = alt(\lambda, \varphi, t) - TG(\lambda, \varphi, t) \dots\dots\dots(3.5)$$

$$u(t) = a + b''t \dots\dots\dots(3.6)$$

其中 φ 為緯度， λ 為經度， TG 為潮位站資料， alt 為測高資料， t 為時間， a 為偏差量。因此潮位站垂直變動速率之推算為應用線性方程式(二參數)擬合，依最小二乘法原理求解式中未知參數。本研究使用之潮位站中，以竹圍潮位測站之垂直變動訊號最為明顯（如圖 3.13 所示），比較 1994-2012 年衛星海洋數據存檔、驗正與解釋(AVISO)衛星測高資料和竹圍潮位站資料，由其差值之時變特性可知，由 1994 年起竹圍潮位站周圍地表有明顯下沉情形，直至 2007 年，竹圍測站更換監測地點(遷站)，地表下沉情形才有明顯改變(如表 2.4 所示)，而 1994-2012 年地表下沉量約 50 公分。

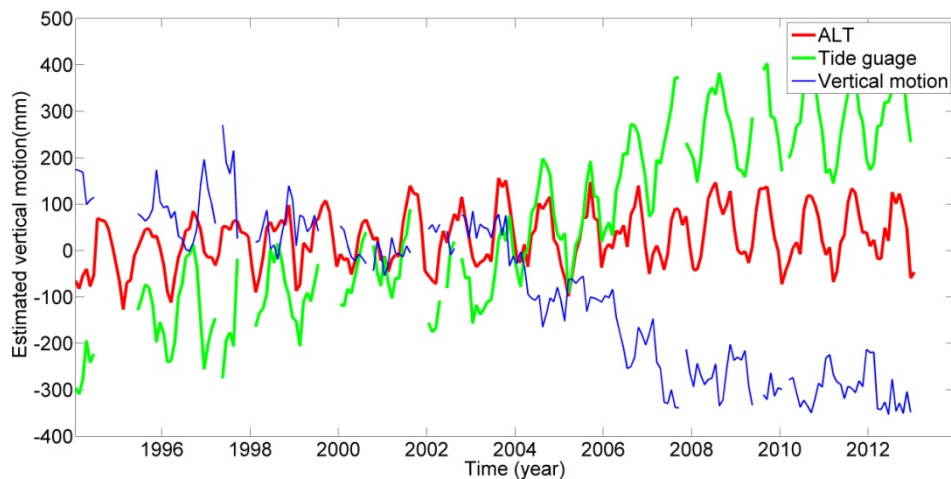


圖 3.13 竹圍潮位站之地表垂直變動訊號。ALT 為衛星海洋數據存檔、
驗正與解釋(AVISO)衛星測高之海水面高

3.4.2 近二十年(1993-2012)潮位站地表垂直變動速率

本小節結合衛星測高與潮位站資料估算近二十年(1993-2012)潮位站地表垂直變動速率(如表 3.1-3.2)，其中潮位站資料皆已改正海潮效應、逆氣壓效應與基準偏移。臺灣本島西半部潮位站周圍地表垂直變動速率差異較大，西南部塭港(Wengang)潮位站呈現顯著下沉情形，而西北部淡水(Tamsui)與竹圍(Jhuwei)兩潮位站相距 20~30 公里，但兩站地表變動情形完全相反，造成不一致的原因為淡水潮位站資料缺漏與基準偏移情形較嚴重(如圖 3.14 所示)以及竹圍測站更換監測地點(如圖 3.13 所示)所致。因淡水潮位站觀測的潮位資料每隔一段時間便會發生顯著的基準偏移以及連續數年資料缺漏，表示此測站觀測資料品質較不佳。另外，竹圍潮位站在 2007 年更換監測地點(遷站)，由地表下沉速率較大地點換至較穩定之地點(如圖 3.13 所示)，表示竹圍測站周圍地表變化較劇烈，因此要使用竹圍測站觀測資料還需再進行評估。

由上述原因可知淡水與竹圍潮位站資料並不適用於長期(> 30 年)海水面變化研究，因此之後研究不使用此兩站資料，並將表 3.1 中其他的潮位站垂直變動速率以圖示方式展示(如圖 3.15)。由圖可知，雖然兩衛星測高資料估算各潮位站垂直變動速率有些微差異，但整體而言，兩測高資料估算之趨勢相當一致。近二十年(1993-2012)臺灣本島沿岸

地表主要呈現下降情形，如西部沿岸地區之地表呈現明顯下降情形，其中塭港潮位站垂直變動速率最大，每年約下沉 14 mm。菲律賓潮位站、香港潮位站與日本潮位站周圍地表皆無明顯垂直變動情形。

表 3.1 平均海平面永久服務中心(PSMSL)潮位站垂直變動速率

Station Name	Vertical motion trend (mm/yr)	
	AVISO-TG	RADs-TG
Zhapo	0.03±0.63	-0.17±0.70
Xiamen	-2.85±1.85	-2.97±1.79
Kanmen	-1.19±1.01	-1.39±1.03
Tai Po Kau	-0.03±0.75	-0.81±0.78
Tsim Bei Tsui	-1.15±0.71	-1.48±0.74
Nase	0.28±0.49	0.55±0.41
Nakano Sima	-1.32±0.47	-1.22±0.61
Okinawa	-0.23±0.46	-0.34±0.49
Naha	-0.88±0.36	-1.05±0.40
Legaspi	-0.02±0.56	-0.38±0.60
Cebu	1.32±0.55	1.05±0.65

表 3.2 中央氣象局潮位站垂直變動速率

Station Name	Vertical Motion Trend (mm/yr)	
	AVISO-TG	RADs-TG
Tamsui	21.01±0.85	20.17±0.86
Su-ao	-4.30±0.63	-5.54±0.64
Hualien	-0.46±1.10	-1.62±1.12
Penghu	1.14±0.45	-0.73±0.49
Taichung Port	-7.87±0.79	-8.95±0.79
Jiangjun	-0.71±0.67	-1.33±0.68
Kaohsiung	3.90±0.52	3.29±0.53
Syunguangzui	-9.27±0.60	-9.99±0.61
Fugang	2.07±0.61	0.69±0.62
Keelung	2.65±0.52	1.73±0.53
Wengang	-13.72±1.06	-14.32±1.05
Jhuwei	-28.04±0.88	-28.99±0.90

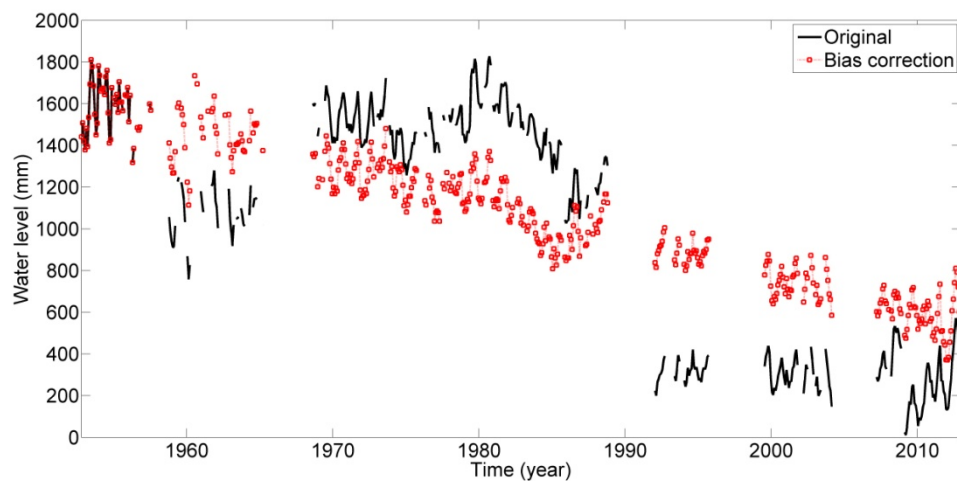


圖 3.14 淡水潮位站資料偏移量改正

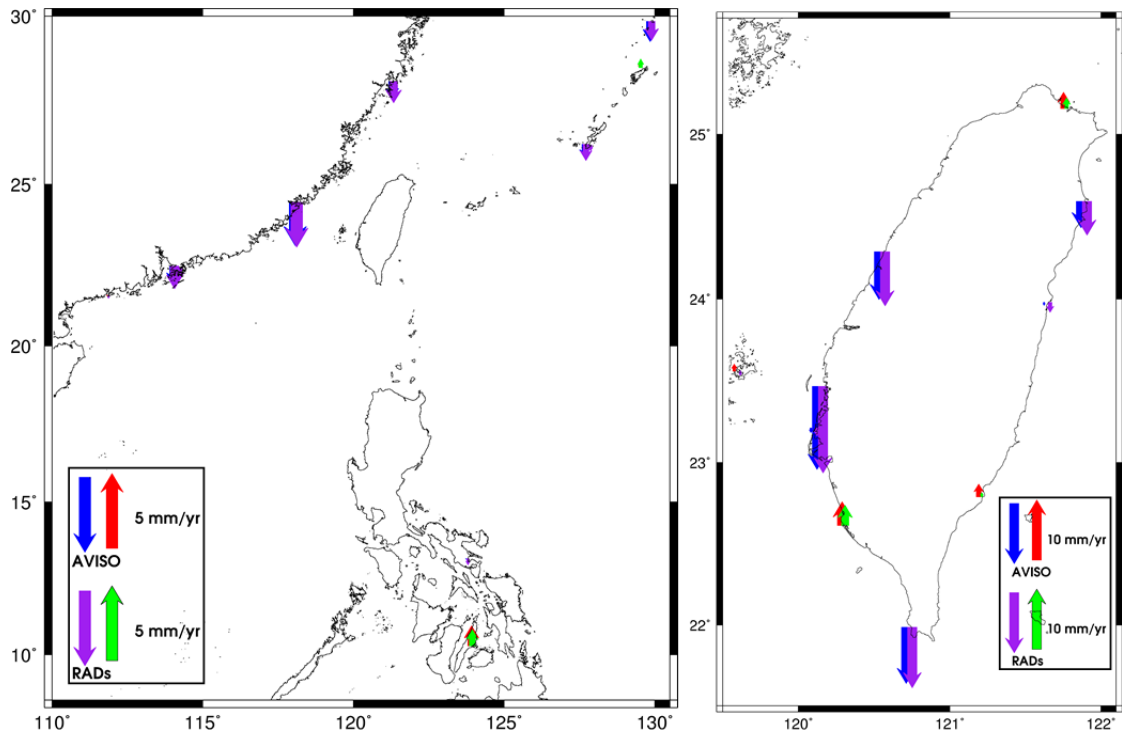


圖 3.15 潮位站近二十年(1993-2012)之地表垂直變動速率圖

3.4.3 估算之地表垂直變動速率與全球衛星定位系統(GPS)和水準資料成果比較

將本研究估算之潮位站地表垂直變動速率與臺灣地區全球衛星定位系統(GPS)連續觀測資料和內政部水準成果[內政部國土測繪中心，2014]相比較。臺灣地區全球衛星定位系統(GPS)成果為 Ching 等人[2011]所提供，共有 199 個觀測站資料。因澎湖全球衛星定位系統(GPS)觀測站位於板塊相對穩定的區域[Ching *et al.*, 2011]，199 個全球衛星定位系統(GPS)觀測站為相對於澎湖全球衛星定位系統(GPS)觀測站(S01R)。內政部水準成果為潮位站岸邊基準點相對於最近一等水準點高程變化量，因一等水準點高程可能有變化，故由內政部水準資料所估算出來的潮位站變動速率為相對速率。

本計畫中使用的潮位站資料分佈於臺灣、中國大陸、日本與菲律賓等地，而 Ching 等人[2011]的全球衛星定位系統(GPS)觀測站資料與內政部的水準資料幾乎僅位於臺灣本島上，因此僅選擇臺灣本島附近的潮位站成果，與最接近各潮位站的全球衛星定位系統(GPS)觀測站與

水準點之成果進行比較，成果如表 3.3 與表 3.4 所示。將本計畫成果與全球衛星定位系統(GPS)成果相比較可知，本計畫估算之地表垂直變動速率與全球衛星定位系統(GPS)成果有差異，在塭港潮位站差異量最為顯著(如圖 3.16 與圖 3.17 所示)，除了可能由資料涵蓋時間長度不同與參考原點不同導致外，亦可能是 2000 年以前潮位站觀測資料品質無法確定所導致。本計畫估算之地表垂直變動速率與 GPS 成果之差值平均值和標準偏差為 $-3.71 \pm 6.82 \text{ mm/yr}$ (AVISO) 與 $-2.69 \pm 6.95 \text{ mm/yr}$ (RADs)。

本計畫成果與內政部水準成果[內政部國土測繪中心，2014]相比較發現並不一致(如表 3.4 所示)，而全球衛星定位系統(GPS)成果與水準成果亦不一致(如圖 3.16 與圖 3.17 所示)。本計畫成果與水準成果之差值平均值和標準偏差為 $2.59 \pm 5.47 \text{ mm/yr}$ (AVISO) 與 $3.51 \pm 5.42 \text{ mm/yr}$ (RADs)，而全球衛星定位系統(GPS)成果與水準成果之差值平均值和標準偏差為 $-6.55 \pm 8.55 \text{ mm/yr}$ 。

相較於 103 年度計畫成果[郭重言等人，2015]，今年度地表垂直變動計算成果較差，其原因如上述所言，2000 年以前潮位站觀測資料品質管理較差，因此在進行偏移量改正時，品質較差部分將會影響偏移量計算成果。

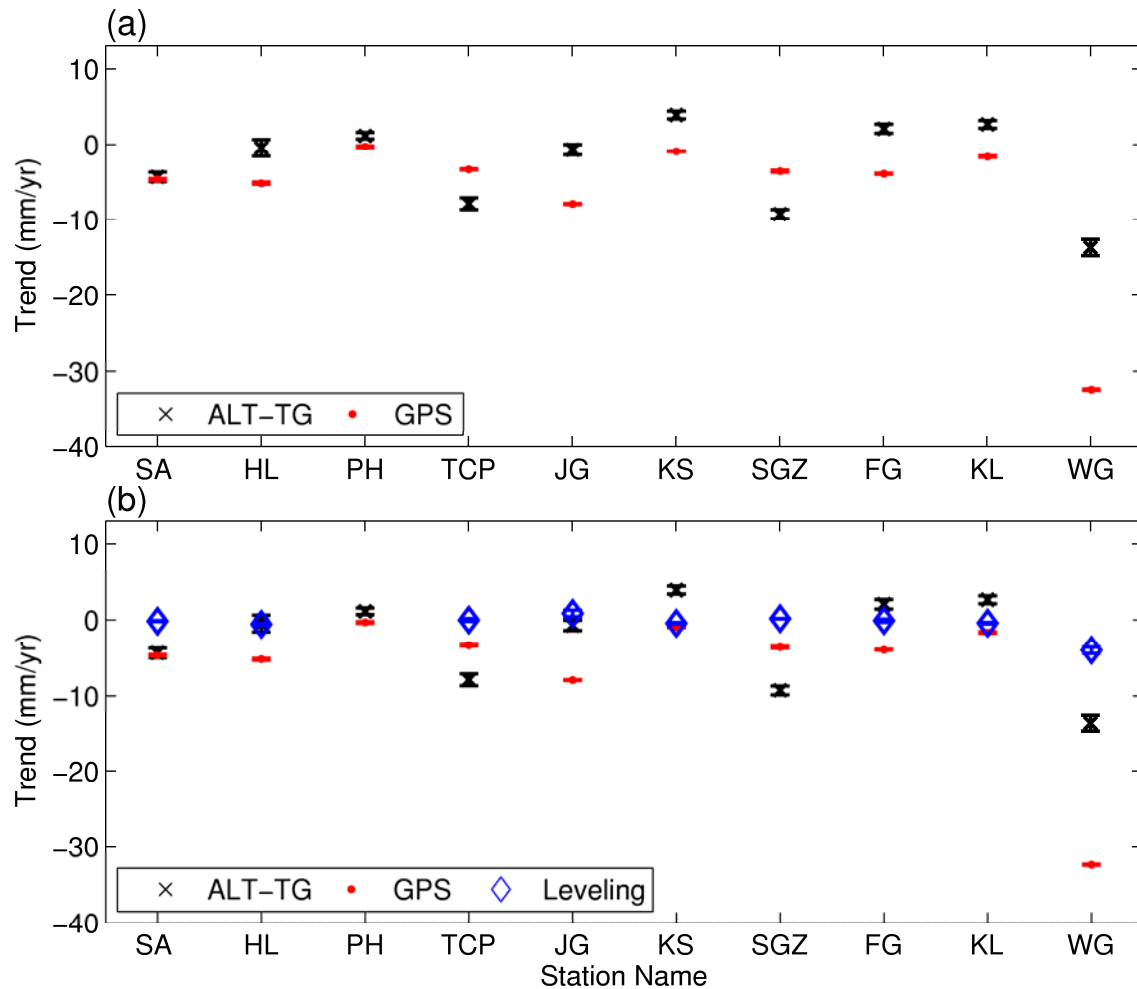


圖 3.16 估算潮位站地表垂直變動速率、全球衛星定位系統(GPS)成果與水準點成果比較。(a) 估算之潮位站垂直變動速率與全球衛星定位系統(GPS)成果比較，(b) 估算潮位站垂直變動速率、全球衛星定位系統(GPS)成果與水準點成果相比較。ALT: 衛星海洋數據存檔、驗正與解釋(AVISO)衛星測高，TG: 潮位站，Leveling: 水準成果

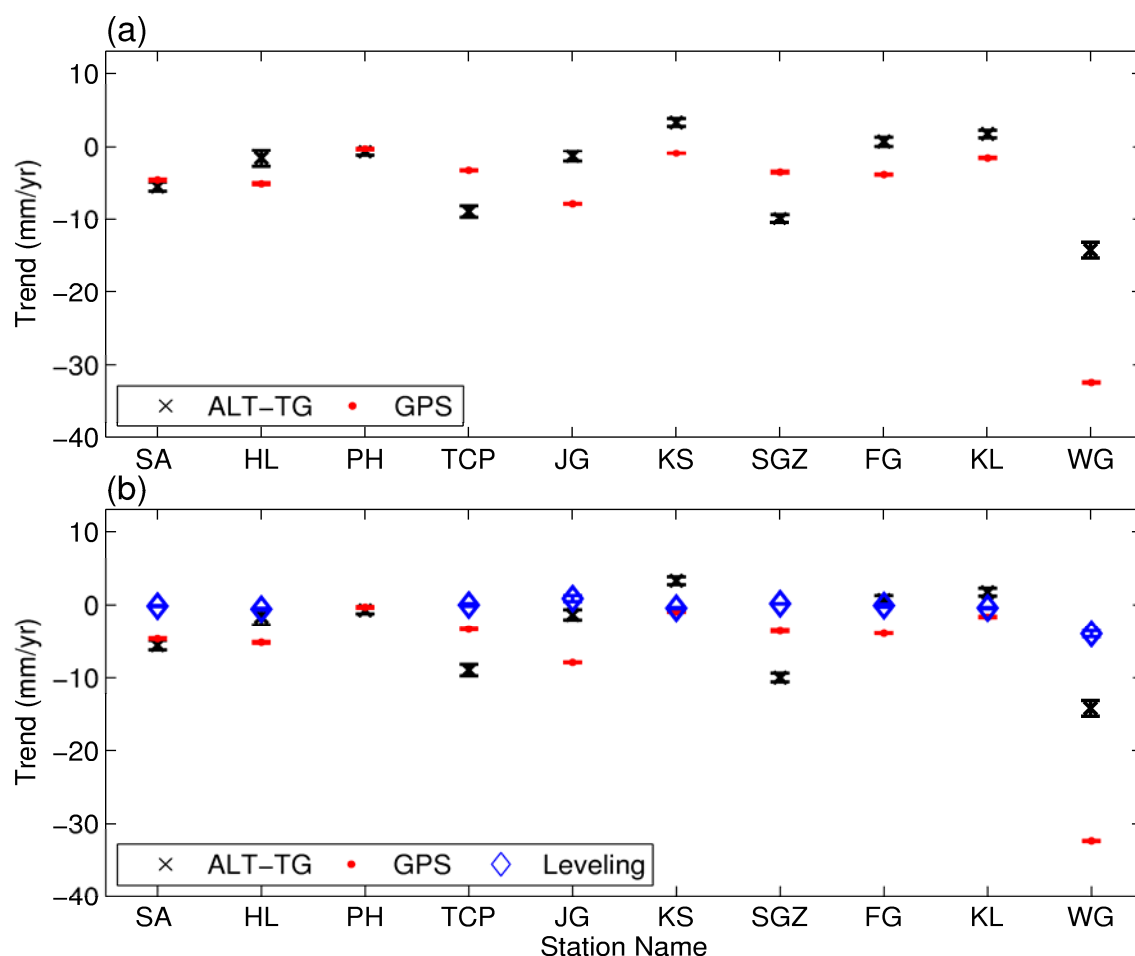


圖 3.17 估算潮位站地表垂直變動速率、全球衛星定位系統(GPS)成果與水準點成果比較。(a) 估算之潮位站垂直變動速率與全球衛星定位系統(GPS)成果比較，(b) 估算潮位站垂直變動速率、全球衛星定位系統(GPS)成果與水準點成果比較。ALT: 雷達測高資料收集 (RADs)衛星測高，TG: 潮位站，Leveling: 水準成果

表 3.3 估算之潮位站地表垂直變動速率與全球衛星定位系統(GPS)成果比較

Station Name	Trend (mm/yr)			GPS period	Distance (km)
	AVISO-TG (1993-2012)	RADs-TG (1993-2012)	GPS [Ching <i>et al.</i> , 2011]		
Su-ao	-4.30±0.63	-5.54±0.64	-4.63±0.12	2002/01-2012/08	0.02
Hualien	-0.46±1.10	-1.62±1.12	-5.15±0.13	2002/01-2012/12	1.18
Penghu	1.14±0.45	-0.73±0.49	-0.30±0.11	2002/01-2012/08	1.45
Taichung Port	-7.87±0.79	-8.95±0.79	-3.31±0.07	2004/02-2012/08	0.39
Jiangjun	-0.71±0.67	-1.33±0.68	-7.91±0.05	2001/12-2012/09	5.94
Kaohsiung	3.90±0.52	3.29±0.53	-0.91±0.07	2004/01-2012/08	0.01
Syunguangzui	-9.27±0.60	-9.99±0.61	-3.55±0.12	2001/12-2012/09	4.11
Fugang	2.07±0.61	0.69±0.62	-3.89±0.07	2003/12-2012/12	0.00
Keelung	2.65±0.52	1.73±0.53	-1.63±0.09	2002/01-2012/12	9.77
Wengang	-13.72±1.06	-14.32±1.05	-32.42±0.07	2004/01-2012/08	2.52

表 3.4 估算之潮位站地表垂直變動速率與水準成果比較

Station Name	Trend (mm/yr)			Leveling period
	AVISO-TG (1993-2012)	RADS-TG (1993-2012)	Leveling [內政部國土測繪中心，2014]	
Su-ao	-4.30±0.63	-5.54±0.64	-0.14±0.08	2003-2012
Hualien	-0.46±1.10	-1.62±1.12	-0.55±0.12	2003-2012
Penghu	1.14±0.45	-0.73±0.49	X	X
Taichung Port	-7.87±0.79	-8.95±0.79	0.02±0.19	2003-2012
Jiangjun	-0.71±0.67	-1.33±0.68	0.88±0.41	2005-2012
Kaohsiung	3.90±0.52	3.29±0.53	-0.41±0.10	2003-2012
Syunguangzui	-9.27±0.60	-9.99±0.61	0.18±0.03	2009-2013
Fugang	2.07±0.61	0.69±0.62	-0.07±0.20	2004-2012
Keelung	2.65±0.52	1.73±0.53	-0.40±0.09	2002-2012
Wengang	-13.72±1.06	-14.32±1.05	-3.94±0.43	2003-2013

X 表示無此資料

3.5 海洋年際低頻變動

3.5.1 潮位站資料內插

各潮位站資料缺漏程度不一，為避免資料缺漏在後續使用時頻方法分析潮位資料時產生吉布斯(Gibbs)效應，本計畫在進行時頻分析前對潮位資料內插來補滿資料缺漏。本計畫測試兩種內插方式，分別為三次多項式(Cubic spline)內插法[Church *et al.*, 2004; White *et al.*, 2014]與六參數擬合(如式(3.3)所示)。

三次多項式內插法對於資料僅含短時間段缺漏之表現較好，當缺漏時間大於 1 年以上時，其內插成果將不符合實際情形。以基隆潮位站資料為例，基隆潮位站資料在 1970 年之前有數個短時間段缺漏，三次多項式內插法之內插值均呈現季節性變化，然而缺漏時間段超過 1 年以上，如 1970 年與 2002 年，內插值呈現平滑曲線，無法呈現實際季節性訊號(如圖 3.18 所示)。與三次多項式內插法相比，當資料缺漏較長時，六參數擬合成果較好(如圖 3.19 所示)。因此後續潮位站內插方式皆使用六參數擬合法。

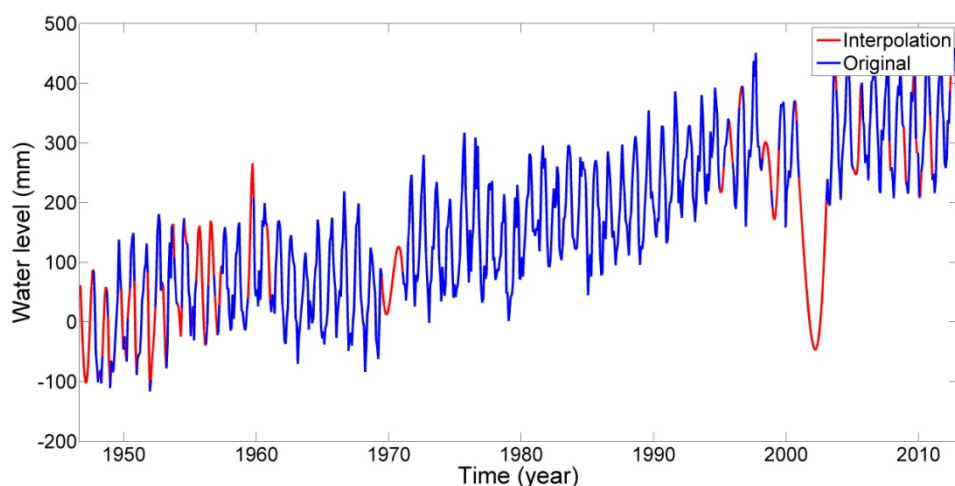


圖 3.18 三次樣條曲線內插前後之基隆潮位站資料圖

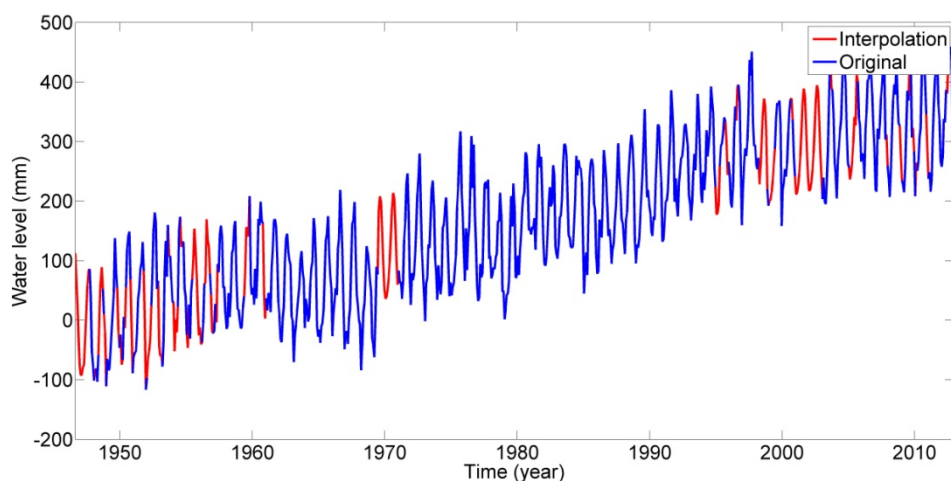


圖 3.19 六參數擬合內插前後之基隆潮位站資料圖

3.5.2 總體經驗模態分解法

衛星測高資料因涵蓋時間較短，故受全球氣候變化之年際或數十年變動等因素影響海水面變動特性，線性趨勢為平均且為所有時間中的變化量，不能直接代表隨時間變化趨勢 [Wu *et al.*, 2007]。海水面變動率也是隨時間在改變，因此本研究據此分析不同週期之海水面變化特性。海洋之年際變動為低頻訊號(週期大於 1 年)，若在未考慮低頻年際變動之情況下，海水面資料經由最小二乘法擬合之海水面上升速率將可能因低頻訊號造成估計誤差，若由時間頻率分析工具對海水面資料進行分解後，將可減低低頻訊號之影響。時間頻率處理主要是將時

間序列資料依照不同頻率(週期)來進行分類、分解的過程，並且顯示出各分解頻率在頻率域中的能量強度，此分解對於海水面變化分析十分重要，我們可利用這個方法來分解出海水面各個週期的變化量。然而分解方法對於資料本身的型態影響十分鉅大，以往常使用傅立葉分析(Fourier transformation analysis)和小波分析(Wavelet analysis)來進行，但此兩種方法對資料有兩點要求：1. 資料必須為連續， 2. 週期現象明顯且穩定。然而，海水面資料同時滿足這兩個相當困難，因此在分解資料之前，須先對資料進行線性化以及平滑處理，而然這些處理方法如使用不當，則會有結果誤判或分解不理想的情形發生[Coughlin *et al.*, 2003]。

據上述時頻分析方法的本異同，本計劃將探討此低頻震盪與臺灣周遭海水面變化的相關性及不同時間尺度下氣候自然因子對海水面上升趨勢影響及其是否具有加速之特性，並將應用經驗模態分解法(Empirical Mode Decomposition method, EMD)分析非線性(nonlinear)及非常態(non-stationary)的數據，分解出具有自然震盪的尺度及潛在人為影響之暖化特性。經驗模態分解法(EMD)是由 Huang 等人[1998]所提出，為希爾伯特-黃轉換 (Hilbert Huang Transform, HHT) 過程中的一個部份，在進行希爾伯特-黃轉換(HHT)過程中，先以經驗模態分解法(EMD)法對非線性及非常態的數據進行處理，而求得各模態函數(Intrinsic Mode Function, IMF)，各模態函數 (IMF) 分量代表各個不同頻率及能量，而各分量的總和則等於原始數據。各模態函數(IMF)模態訊號須滿足兩個條件：1. 模態函數(IMF)訊號的極值數目與跨越零點(zero-crossing)的數目相等或最多差一。2. 訊號中極大與極小值包絡線的平均包絡線須為零。此分解過程可將載波消除及使波形具有對稱性。海水面資料經由經驗模態分解法(EMD)分解後可分析其與低頻年際變化影響之關係，降低最小二乘法擬合海水面上升速率之標準偏差。

以下詳述經驗模態分解法(EMD)分解的步驟：

首先，求得訊號 $X(t)$ 各局部極大及極小值，以三次樣條曲線內插法求出上、下包絡線(envelope)，而上下包絡線的平均值為平均包絡線 m_1 ，兩者差值為第一個分量 h_1 ，可表示為

$$X(t) - m_1 = h_1 \dots\dots\dots(3.7)$$

而此時 h_1 含有不同能量的擾動及數據能全部跨越零點，且平均包絡線之值亦非為零，因此從 h_1 再重複進行上述的平均包絡線的計算

$$h_1 - m_{11} = h_{11} \dots\dots\dots(3.8)$$

並重複計算直到第 k 次式(3.9)滿足模態函數(IMF)的條件式(3.10)

$$h_{1(k-1)} - m_{1k} = h_{1k} \dots\dots\dots(3.9)$$

$$SD = \sum_0^T \frac{|h_{1(k-1)} - h_{1k}|^2}{h_{1(k-1)}^2} \dots\dots\dots(3.10)$$

建議 SD 值的範圍約在 0.2-0.3 間，模態函數(IMF)的第一個分量 C_1 即等於 h_{1k} ，此為篩選(sifting)程序。因此，訊號可被分解成數個模態函數(IMF)模態，其表示式為

$$X(t) = \sum_{i=1}^n C_i + r_n \dots\dots\dots(3.11)$$

其中 r_n 為各個模態函數(IMF)之殘差值，其值為單調趨勢或接近零。

但是經驗模態分解法(EMD)所解出的各模態可能會產生模態混合(Mode mixing)情況，即模態函數(IMF)訊號可能具有 2 個或 2 個以上之頻率，因此 Wu and Huang [2009]提出總體經驗模態分解法(Ensemble Empirical Mode Decomposition method, EEMD)方法，即將欲分解的訊號加入多組白噪音(white noise)時序，該時序與訊號的關係式如

$$\varepsilon_n = \frac{\varepsilon}{\sqrt{N}} \dots\dots\dots(3.12)$$

$N(N=100)$ 為總體個數 (Ensemble number)， ε 為加入原始訊號的白

噪音振幅大小， ε_n 為則為原始訊號的標準差。藉由上述的關係將訊號加入

$$X_E(t) = X(t) + \varepsilon * \text{noise}(t) \dots\dots\dots(3.13)$$

再將式(3.13)的訊號進行 N 次之總體經驗模態分解法(EEMD)分解後，並平均其分解出的各分量後可求得不同頻率的模態函數(IMF)，並消除白噪音的影響。總體經驗模態分解法(EEMD)分解訊號無需主觀上尺度的選擇，即可將訊號分解具有自然震盪的尺度。

3.5.3 氣候因子與海水面變化之關係

本小節將使用兩氣候指標:多重 ENSO 指數(MEI)與太平洋年代際振盪(PDO)指數來評估聖嬰-南方振盪(ENSO)與太平洋年代際振盪(PDO)現象對於臺灣附近海域海水面變化影響。為了評估海水面與氣候變動間長期相關性，海水面變化需使用長期(> 30 年)潮位站資料，在經時頻分析法分解前，潮位站資料皆已進行海潮、逆氣壓、基準偏移以及地表垂直變動等改正。另外，各資料在進行總體經驗模態分解(EEMD)分解前，為了避免強烈季節性訊號影響分析成果，季節性訊號皆由資料中移除，擬合公式如式(3.3)所示。

利用總體經驗模態分解(EEMD)分析兩氣候指標，多重 ENSO 指數(MEI)分析成果如圖 3.20 與 3.21 所示，太平洋年代際振盪(PDO)指數分析成果如圖 3.22 與 3.23 所示。由圖 3.20 可知，模態函數(IMF)各分量是由原始資料分解而得，各模態函數(IMF)按照頻率由高至低排列，但總體經驗模態分解法(EEMD)分解後的模態函數(IMF)分量仍可能具有模態混合情形，對於模態混合情形需儘量避免。多重 ENSO 指數(MEI)分解後無明顯模態混合情形（如圖 3.20 所示），同樣地，太平洋年代際振盪(PDO)指數分解後亦無明顯模態混合情形（如圖 3.22 所示）。除了需注意各模態函數(IMF)間模態混合情形外，本研究還檢測各模態函數(IMF)的統計特性，以判定各模態函數(IMF)是否具有統計與物理意義。多重 ENSO 指數(MEI)與太平洋年代際振盪(PDO)指數的檢測成果如圖 3.21 與圖 3.23 所示。圖 3.21 與圖 3.23 中紅色線條與藍色線條分別為

99%與 95%信賴曲線，點位為模態函數(IMF)的平均週期與對應之平均能量，若點位位於信賴曲線下方則表示該模態函數(IMF)分量可能不具統計意義或能量偏小，則該模態函數(IMF)分量不予使用。多重 ENSO 指數(MEI)與太平洋年代際振盪(PDO)指數之模態函數(IMF)皆已通過顯著性測試。

後續欲比較聖嬰-南方振盪(ENSO)和太平洋年代際振盪(PDO)現象與臺灣周圍海水面變化間之相關性，聖嬰-南方振盪(ENSO)現象週期一般為 2~8 年[Ropelewski and Halpert, 1987; McGregor *et al.*, 2013]，而太平洋年代際振盪(PDO)現象約為 10~30 年(如圖 2.13 所示)，因此將多重 ENSO 指數(MEI)與太平洋年代際振盪(PDO)指數經總體經驗模態分解(EEMD)法分解後，分別萃取出週期介於 2~8 年與 10~30 年訊號(如圖 3.24 所示)，作為後續評估聖嬰-南方振盪(ENSO)和太平洋年代際振盪(PDO)現象與海水面變化間相關性之指標。

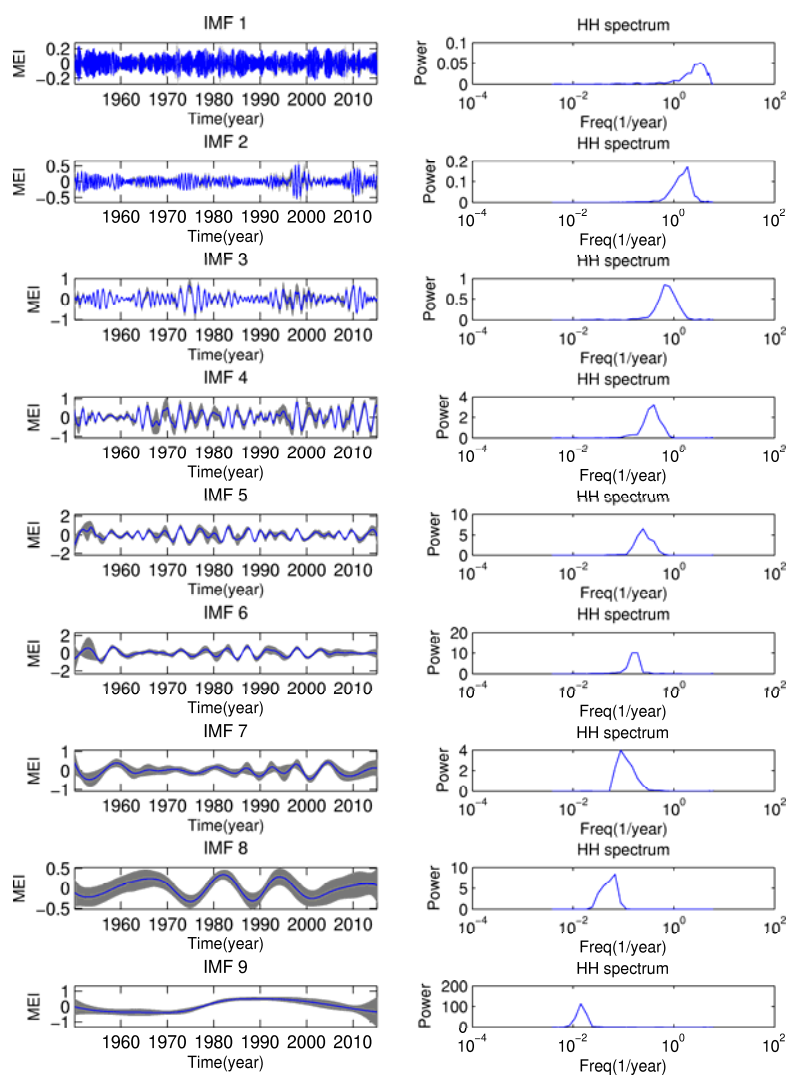


圖 3.20 多重 ENSO 指數(MEI)利用總體經驗模態分解(EEMD)分析之結果

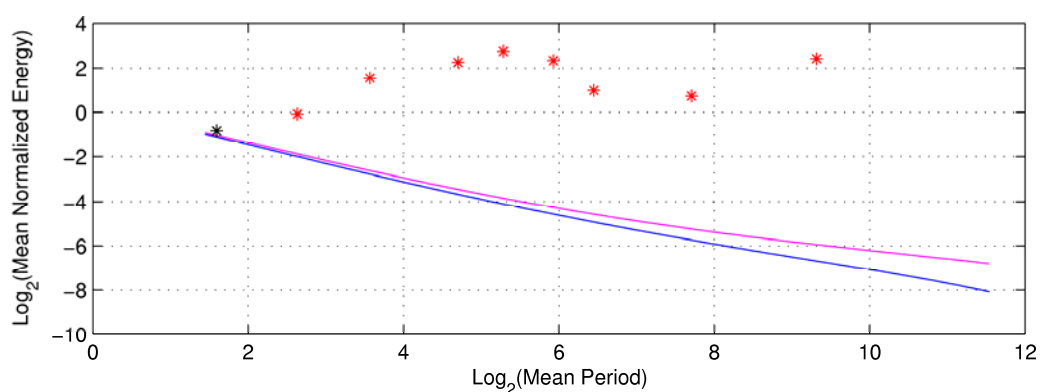


圖 3.21 多重 ENSO 指數(MEI)利用總體經驗模態分解(EEMD)分析後之統計測試結果

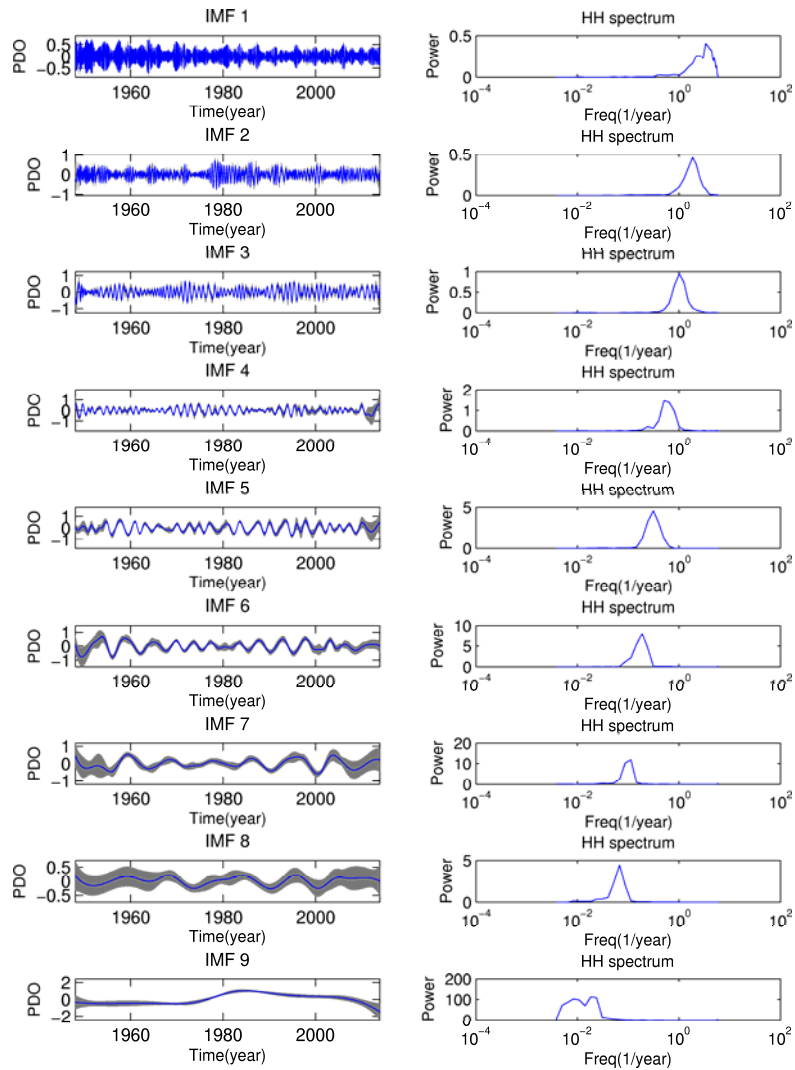


圖 3.22 太平洋年代際振盪(PDO)指數利用總體經驗模態分解(EEMD)分析之結果

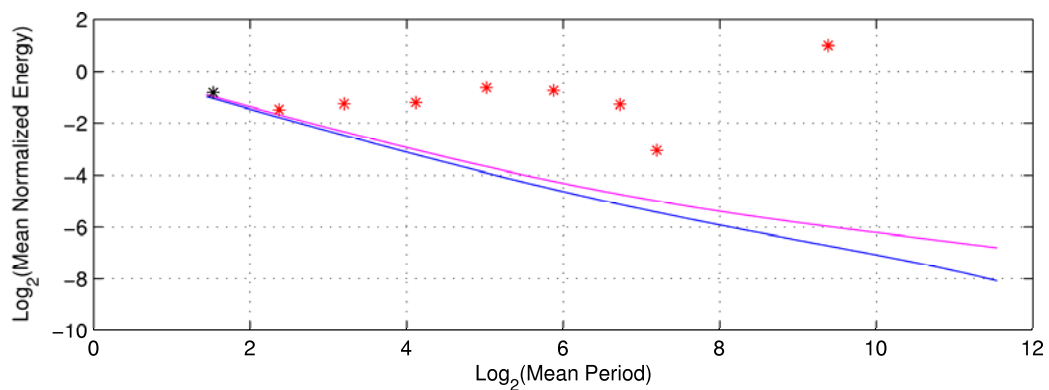


圖 3.23 太平洋年代際振盪(PDO)指數利用總體經驗模態分解(EEMD)分析後之統計測試結果

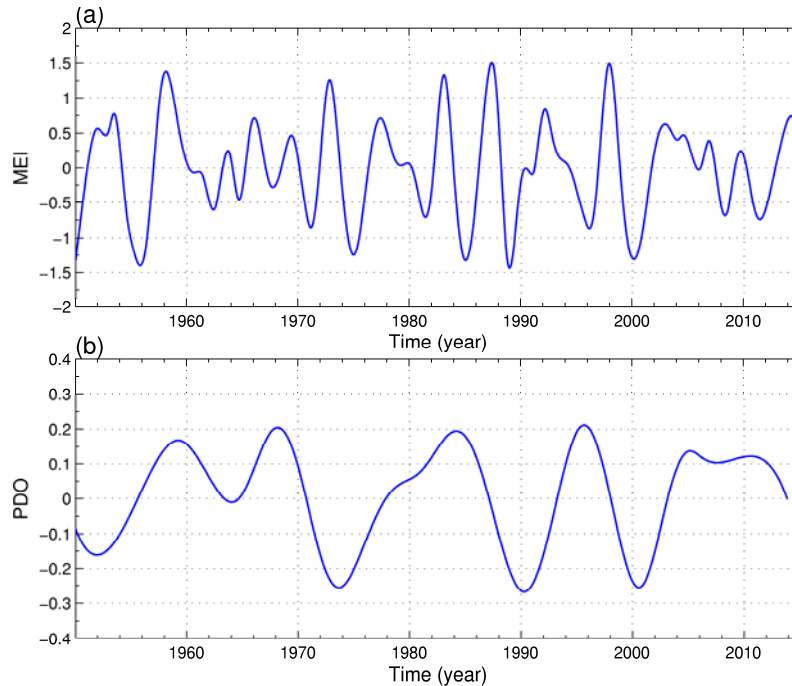


圖 3.24 多重聖嬰-南方振盪指數(MEI)與太平洋年代際振盪(PDO)指數圖。(a)多重 ENSO 指數(MEI)經總體經驗模態分解(EEMD)法分解後，萃取出週期 2~8 年之圖示，(b) 太平洋年代際振盪(PDO)指數經總體經驗模態分解(EEMD)法分解後，萃取出週期 10~30 年之圖示

同樣地，利用總體經驗模態分解(EEMD)法分解長期潮位站觀測資料，並由潮位站觀測資料萃取出週期介於 2~8 年與 10~30 年訊號，再分別與多重 ENSO 指數(MEI)之 2~8 年準週期訊號以及太平洋年代際振盪(PDO)指數之 10-30 年準週期訊號比較計算其相關係數，正負相關係數表示海水面變化與對應氣候指標間為正相位與負相位，成果如表 3.5 所示。由表可知，兩種改正成果後之潮位站資料與多重 ENSO 指數(MEI)中 2~8 年準週期訊號之相關係數相當一致，同樣與太平洋年代際振盪(PDO)指數中 10~30 年準週期訊號之相關係數亦相當一致，因此將表中衛星海洋數據存檔、驗正與解釋(AVISO)衛星測高成果展示於圖 3.25 與圖 3.26。比較總體經驗模態分解(EEMD)法萃取潮位站資料與多重 ENSO 指數(MEI)之 2-8 年週期訊號，臺灣地區、大陸沿岸與菲律賓等地海水面變化與多重 ENSO 指數(MEI)主要呈現負相關，其中位於最南方菲律賓潮位站相關性最為顯著，相關係數為-0.4~-0.7，而日本地區海

水面變化與與多重 ENSO 指數(MEI)主要呈現正相關(0.3~0.4)，如圖 3.25 所示。

比較總體經驗模態分解(EEMD)法萃取潮位站資料與太平洋年代際振盪(PDO)指數之 10-30 年準週期訊號，日本、大陸沿岸與菲律賓等地海水面變化與太平洋年代際振盪(PDO)指數現象亦主要呈現負相關(-0.3~-0.7)，而臺灣地區海水面變化與太平洋年代際振盪(PDO)指數呈現正、負參雜現象(-0.7~0.6)，如圖 3.26 所示。臺灣地區海水面變化與太平洋年代際振盪(PDO)指數雖然呈現正、負參雜現象，但相關係數並不高，表示臺灣海域受海洋年代際低頻振盪影響較小。比較圖 3.25 與圖 3.26 可知，位於較南方的菲律賓水位對於多重 ENSO 指數(MEI)與太平洋年代際振盪(PDO)指數相關性較一致(-0.4~-0.7)，其他區域多數測站海水面變化與太平洋年代際振盪(PDO)指數之相關性較多重 ENSO 指數(MEI)大，表示太平洋年代際振盪(PDO)現象對於臺灣周圍海水面變化影響較大。此成果與 Zhang and Church [2012]推估聖嬰-南方振盪(ENSO)現象主要影響的海水面範圍為緯度 $\pm 20^{\circ}$ 以內，而太平洋年代際振盪(PDO)現象影響整個太平洋相符合。

表 3.5 潮位站資料與多重 ENSO 指數(MEI)以及太平洋年代際振盪(PDO)指數間之相關係數(Correlation Coefficient, C.C.)。MEI 表示潮位站資料與多重 ENSO 指數(MEI)中 2~8 年準週期訊號之相關係數、PDO 表示潮位站資料與太平洋年代際振盪(PDO)指數中 10~30 年準週期訊號之相關係數。A 與 R 表示改正潮位站地表垂直變動中採用的衛星測高資料來源，A 為採用衛星海洋數據存檔、驗正與解釋(AVISO)衛星測高資料，R 為採用雷達測高資料收集(RADs)衛星測高資料

Country	Station	C.C. (A)		C.C.(R)	
		MEI	PDO	MEI	PDO
Japan	NS	0.32	-0.28	0.32	-0.28
	NKNS	x	-0.46	x	-0.58
	OKNW	0.27	-0.67	0.25	-0.68
	NH	0.38	-0.53	0.38	-0.54
Taiwan	SA	-0.23	x	x	x
	HL	-0.16	-0.28	-0.23	-0.29
	PH	-0.20	-0.05	-0.19	x
	TCP	0.22	x	0.18	x
	JG	-0.20	0.20	-0.22	0.21
	KS	-0.23	0.35	-0.19	0.31
	SGZ	-0.44	-0.32	-0.47	-0.33
	FG	-0.24	-0.70	-0.22	-0.71
	KL	0.15	0.23	0.15	0.26
	WG	-0.13	0.60	-0.13	0.52
China	ZP	-0.29	-0.65	-0.26	-0.68
	XM	-0.09	-0.35	-0.09	-0.35
	KM	x	-0.61	x	-0.55
	TPK	-0.24	-0.69	-0.23	-0.72
	TBT	0.18	x	0.20	x
Philippines	LGSP	-0.38	-0.40	-0.39	-0.41
	CB	-0.68	-0.50	-0.69	-0.52

x 表示在該頻率下，潮位站資料分解出不具統計意義或能量偏小之訊號

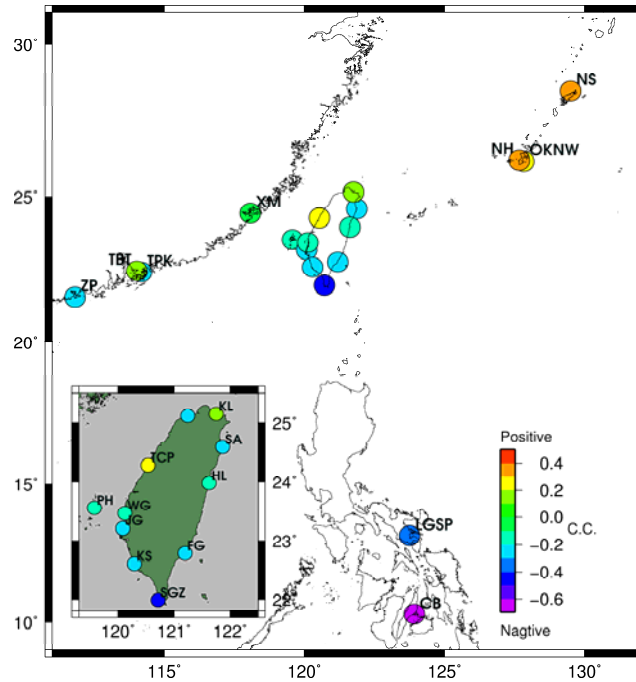


圖 3.25 潮位站資料與多重聖嬰-南方振盪指數(MEI)之 2-8 年週期訊號的相關係數(Correlation Coefficient, C.C.)。各站相關係數皆以經過顯著性測試

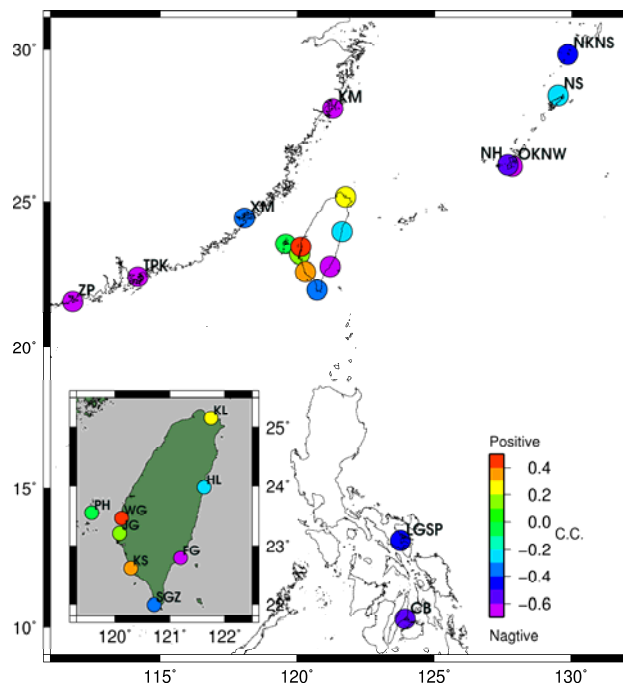


圖 3.26 潮位站資料與太平洋年代際振盪(PDO)指數之 10-30 年週期訊號的相關係數(Correlation Coefficient, C.C.)。各站相關係數皆以經過顯著性測試

3.6 第三章完成之工作項目

第三章目前已完成工作項目”臺灣環島驗潮站潮位基準偏移之自動化偵測與校正”、”應用驗潮站和衛星測高資料，分區進行臺灣海岸地殼變動速率之趨勢分析”以及”依據臺灣海域長、短期之平均海水面上升變動率，進行相關地殼變動及海洋年際低頻變動之關聯”。

本研究偏移量偵測方法，可分析出潮位站資料中是否包含較大基準偏移情形。本年度計畫對於含有偏移量的資料利用六參數加上步階函數擬合後並改正，各潮位站資料基準偏移改正成果將展示於第四章。由測站地表垂直變動成果可知，近二十年臺灣本島潮位站地表主要呈現下沉情形，而其他區域皆無明顯垂直變動情形。本計畫利用總體經驗模態分解法(EEMD)萃取臺灣周圍長期水位資料與多重聖嬰-南方振盪指數(MEI)之 2-8 年週期訊號，臺灣地區、大陸地區與菲律賓等地海水面變化與多重 ENSO 指數(MEI)主要呈現負相關，其中位於最南方菲律賓潮位站相關性最為顯著(-0.4~-0.7)，而日本地區海水面變化與多重 ENSO 指數(MEI)主要呈現正相關(0.3~0.4)。比較總體經驗模態分解(EEMD)法萃取潮位站資料與太平洋年代際振盪(PDO)指數之 10-30 年準週期訊號，較南方的菲律賓水位對於多重 ENSO 指數(MEI)與太平洋年代際振盪(PDO)指數相關性較一致，其他區域多數測站海水面變化與太平洋年代際振盪(PDO)指數之相關性較與多重 ENSO 指數(MEI)大，表示太平洋年代際振盪(PDO)現象對於臺灣周圍海水面變化影響較大。另外，本研究將於四年期計畫完成後提供港研中心基準偏移與校正程式，基準偏移校正之相關理論如 3.3 節所示。

第四章 臺灣四周海域之絕對海平面升降速率與未來趨勢預估

本計畫目的為利用衛星測高儀及潮位站資料計算臺灣附近海域絕對海水面上升速率以及預估臺灣未來海水面變化。衛星測高資料需經儀器改正、介質改正與地球物理因子改正，因資料涵蓋時間較短(僅約20年)，在估算絕對海水面上升速率時，需考慮海洋低頻效應影響，因此需自資料中降低或移除海洋低頻效應影響；應用長期潮位站資料(>30年)估算絕對海水面上升速率時，則需改正海潮、逆氣壓、基準偏移與測站地表垂直變動。往昔利用臺灣周圍潮位站資料分析海水面上升速率的研究中[黃清哲等人, 2009; Tseng *et al.*, 2010; Chang *et al.*, 2012]，並未考慮海潮、逆氣壓、基準偏移以及測站地表垂直變動等影響，因此本章將分析上述四項改正對於利用潮位站資料計算海水面上升速率之影響，並利用改正後潮位站和衛星測高資料分析臺灣四周海域絕對海水面變動情形。本計畫於4.1節評估改正前、後潮位站資料估算海水面上升速率之差異，並分析各項改正因子對於潮位站資料估計海水面上升速率之影響程度，4.2節分析自測高資料中移除低頻訊號後對估算海水面上升速率之影響程度，4.3節利用多變量線性擬合方法[Zhang and Church, 2012]估算臺灣四周海水面上升速率，4.4節利用合成平均差異推算(Composite Mean Difference Projection, CMD)法推算氣候因子及人類活動(排放溫室氣體)對海水面變動之貢獻程度，4.5節為分析臺灣周圍海水面上升的主要原因，4.6節為臺灣四周未來海水面變化之預估，最後4.7節說明第四章完成之工作項目。

本章中使用之潮位站資料皆已經過海潮效應、逆氣壓效應、偏移量與地表垂直變動改正。偏移量改正使用六參數加上步階函數擬合後再改正。地表垂直變動改正為結合潮位站資料與衛星測高資料估算並改正之，然而測高儀回波訊號在靠近海岸易受到陸地地形、海底地形、海潮與河口等影響，造成測高資料在近海岸處資料較為稀少且精度差，為配合潮位站資料使用，本計畫沿用第二期(103年度)成果[郭重言等人，

2015]，臺灣本島潮位站資料使用等權平均半徑 5°範圍內衛星測高資料，離島的澎湖與其他區域潮位站(如中國大陸、日本、菲律賓等)資料則使用等權平均半徑 2°範圍內衛星測高資料。

4.1 改正前後海水面上升速率之差異

潮位站資料經四項改正後所估算之海水面上升速率如表 4.1~表 4.4 所示。由各項改正前、後潮位資料所估算海水面上升速率之差值可知，自然及人為因子對於各區域潮位站資料之影響量(影響量為各項改正前、後潮位站資料估算之海水面速率差值(或稱變化量))不一致(圖 4.1 與圖 4.2)。由圖可知，海潮與逆氣壓因子對於估算海水面上升速率之影響較小，僅 0~1 mm/yr，顯示移除高頻海潮週期訊號與大氣壓力變化對於海水面上升速率計算影響較小，但對於海水面上升速率精準推估仍須納入考慮。基準偏移與測站地表垂直變動因子影響海水面上升速率最為顯著，偏移量改正對於潮位站資料的影響量為 0~28 mm/yr，平均值約 6 mm/yr，而臺灣周圍潮位站之地表垂直變動改正對於海水面上升速率影響量平均值約 5 mm/yr，皆大於 1993-2009 年全球平均海水面上升速率的 3.2 ± 0.4 mm/yr [Church and White, 2011]。因此在臺灣附近海域，若以未經過基準偏移和測站地表垂直變動改正之潮位站資料估算絕對海水面上升速率，將造成顯著誤差。另外，在表 4.1 與表 4.2 中經各項改正後廈門(Xiamen)潮位站資料估算海水面上升速率為負值，其原因為廈門(Xiamen)潮位站觀測時間涵蓋 1954-2004(表 2.2)，結合潮位站與衛星測高估算的測站地表垂直變動訊號僅涵蓋約十年(1993-2004)，因此測站垂直變動速率之估算精度較差導致此站改正後成果較不理想。

表 4.1 平均海平面永久服務中心(PSMSL)潮位站資料經各項改正後所估算之海水面上升速率(全部時間段資料)。改正測站地表垂直變動中採用衛星海洋數據存檔、驗正與解釋(AVISO)衛星測高資料

Station Name	Trend (mm/yr)			
	With Ocean tide corrections	With Ocean tide and IB corrections	With Ocean tide, IB, and bias corrections	With Ocean tide, IB, bias, and vertical motion corrections
Zhapo	2.21±0.17	2.11±0.17	x	2.14±0.17
Xiamen	1.05±0.20	1.04±0.20	x	-1.81±0.20
Kanmen	2.01±0.15	1.98±0.15	x	0.79±0.15

Tai Po Kau	3.14±0.22	3.12±0.21	x	3.09±0.21
Tsim Bei Tsui	0.71±0.35	0.57±0.36	x	-0.58±0.36
Nase	1.12±0.17	1.10±0.17	3.29±0.16	3.57±0.16
Nakano Sima	4.54±0.32	4.35±0.31	x	3.03±0.31
Okinawa	1.14±0.26	0.99±0.25	x	0.76±0.25
Naha	2.26±0.19	2.26±0.19	x	1.38±0.19
Legaspi	5.46±0.12	5.51±0.11	x	5.49±0.11
Cebu	0.70±0.12	0.74±0.11	x	2.06±0.11

x 為潮位資料中無偏移量情形

表 4.2 平均海平面永久服務中心(PSMSL)潮位站資料經各項改正後所估算之海面上升速率(全部時間段資料)。改正測站地表垂直變動中採用雷達測高資料收集(RADs)衛星測高資料

Station Name	Trend (mm/yr)			
	With Ocean tide corrections	With Ocean tide and IB corrections	With Ocean tide, IB, and bias corrections	With Ocean tide, IB, bias, and vertical motion corrections
Zhapo	2.21±0.17	2.11±0.17	x	1.94±0.17
Xiamen	1.05±0.20	1.04±0.20	x	-1.93±0.20
Kanmen	2.01±0.15	1.98±0.15	x	0.59±0.15
Tai Po Kau	3.14±0.22	3.12±0.21	x	2.31±0.21
Tsim Bei Tsui	0.71±0.35	0.57±0.36	x	-0.91±0.36
Nase	1.12±0.17	1.10±0.17	3.29±0.16	3.84±0.16
Nakano Sima	4.54±0.32	4.35±0.31	x	3.13±0.31
Okinawa	1.14±0.26	0.99±0.25	x	0.65±0.25
Naha	2.26±0.19	2.26±0.19	x	1.21±0.19
Legaspi	5.46±0.12	5.51±0.11	x	5.13±0.11
Cebu	0.70±0.12	0.74±0.11	x	1.79±0.11

x 為潮位資料中無偏移量情形

表 4.3 中央氣象局潮位站資料經各項改正後所估算之海面上升速率(全部時間段資料)。改正測站地表垂直變動中採用衛星海洋數據存檔、驗正與解釋(AVISO)衛星測高資料

Station Name	Trend (mm/yr)				
	Original	With Ocean tide corrections	With Ocean tide and IB corrections	With Ocean tide, IB, and bias corrections	With Ocean tide, IB, bias, and vertical motion corrections
Su-ao	-7.05±0.88	-7.17±0.88	-7.17±0.86	5.66±0.27	1.36±0.27
Hualien	2.24±0.18	2.28±0.17	2.17±0.16	-1.61±0.13	-2.07±0.13
Penghu	3.67±0.27	3.75±0.26	3.62±0.25	2.50±0.15	3.64±0.15
Taichung Port	4.62±0.34	4.63±0.32	4.76±0.31	11.27±0.22	3.40±0.22
Jiangjun	6.11±0.31	6.11±0.30	6.03±0.29	6.15±0.29	5.44±0.29
Kaohsiung	-3.65±0.42	-3.71±0.41	-3.80±0.41	1.13±0.11	5.03±0.11
Syunguang zui	9.68±0.40	9.70±0.39	10.93±0.37	13.71±0.31	4.44±0.31
Fugang	1.84±0.34	1.84±0.33	1.66±0.32	1.40±0.20	3.47±0.20
Keelung	1.66±0.11	1.69±0.11	1.63±0.10	3.00±0.08	5.65±0.08
Wengang	-9.22±0.95	-8.89±0.93	-9.01±0.93	18.65±0.25	4.93±0.25

表 4.4 中央氣象局潮位站資料經各項改正後所估算之海水面上升速率(全部時間段資料)。改正測站地表垂直變動中採用雷達測高資料收集(RADs)衛星測高資料

Station Name	Trend (mm/yr)				
	Original	With Ocean tide corrections	With Ocean tide and IB corrections	With Ocean tide, IB, and bias corrections	With Ocean tide, IB, bias, and vertical motion corrections
Su-ao	-7.05±0.88	-7.17±0.88	-7.17±0.86	5.66±0.27	0.12±0.27
Hualien	2.24±0.18	2.28±0.17	2.17±0.16	-1.61±0.13	-3.23±0.13
Penghu	3.67±0.27	3.75±0.26	3.62±0.25	2.50±0.15	1.77±0.15
Taichung Port	4.62±0.34	4.63±0.32	4.76±0.31	11.27±0.22	2.32±0.22
Jiangjun	6.11±0.31	6.11±0.30	6.03±0.29	6.15±0.29	4.82±0.29
Kaohsiung	-3.65±0.42	-3.71±0.41	-3.80±0.41	1.13±0.11	4.42±0.11
Syunguang zui	9.68±0.40	9.70±0.39	10.93±0.37	13.71±0.31	3.72±0.31
Fugang	1.84±0.34	1.84±0.33	1.66±0.32	1.40±0.20	2.09±0.20
Keelung	1.66±0.11	1.69±0.11	1.63±0.10	3.00±0.08	4.73±0.08
Wengang	-9.22±0.95	-8.89±0.93	-9.01±0.93	18.65±0.25	4.33±0.25

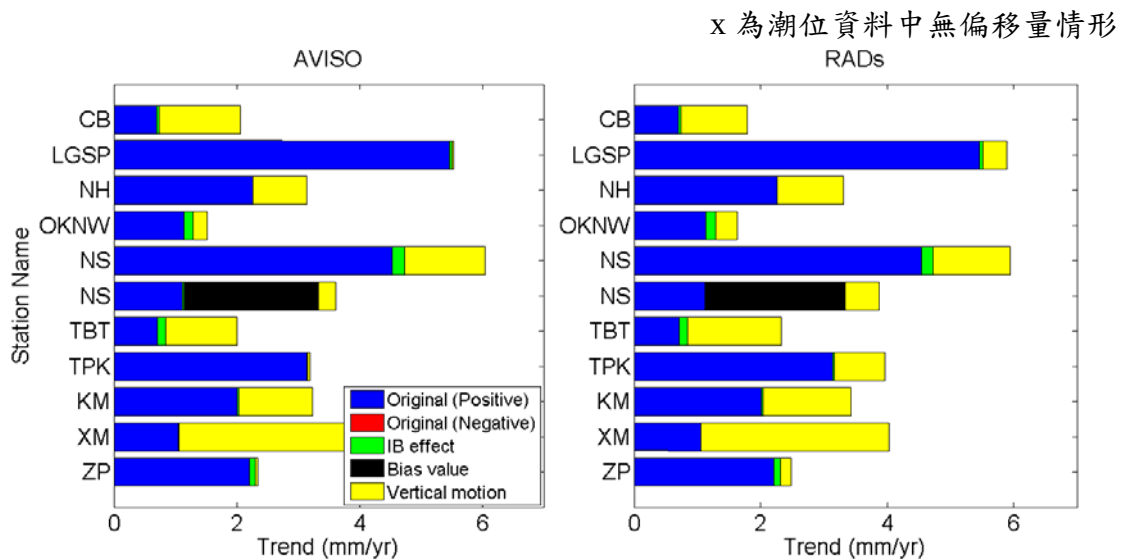


圖 4.1 各項改正對於平均海平面永久服務中心(PSMSL)潮位站資料(全部時間段)進行海水面上升速率計算之影響量(變化量)。Original 為原始資料之海水面上升速率，其中 Positive 與 Negative 分別表示海水面上升速率為正與負。IB effect、Bias value 與 Vertical motion 分別為逆氣壓效應、基準偏移與測站地表垂直變動改正。AVISO 與 RADs 分別表示改正測站地表垂直變動中採用衛星海洋數據存檔、驗正與解釋(AVISO)衛星測高資料與雷達測高資料收集(RADs)衛星測高資料

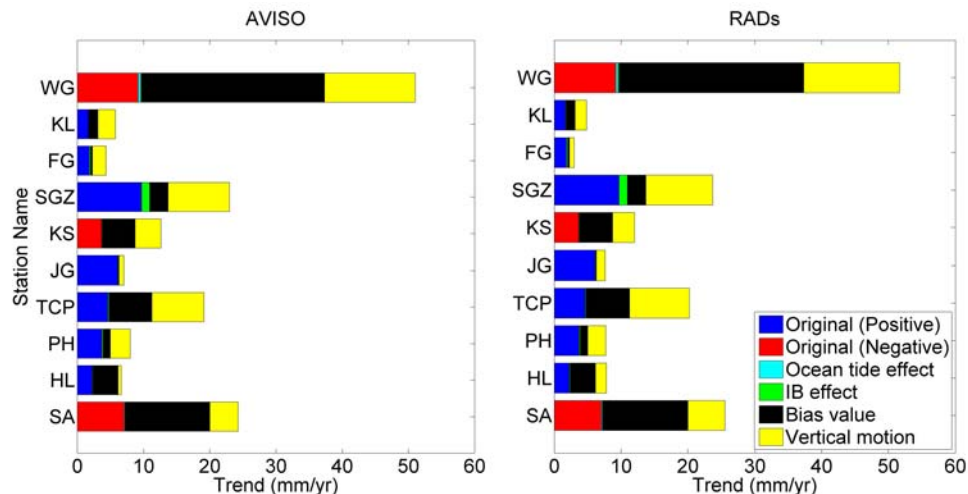


圖 4.2 各項改正對於中央氣象局潮位站資料(全部時間段)進行海水面上升速率計算之影響量(變化量)。Original 為原始資料之海水面上升速率，其中 Positive 與 Negative 分別表示海水面變化速率為上升與下降。Ocean tide effect、IB effect、Bias value 與 Vertical motion 分別為海潮、逆氣壓效應、基準偏移與潮位站地表垂直變動改正。AVISO 與 RADs 分別表示改正測站地表垂直變動中採用衛星海洋數據存檔、驗正與解釋(AVISO)衛星測高資料與雷達測高資料收集(RADs)衛星測高資料

潮位站資料品質對於估算測站地表垂直變動速率與海水面上升速率相當重要，然而本計畫使用的長期中央氣象局潮位站資料皆有基準偏移情形(如圖 4.2 所示)，基準偏移將造成估算海水面上升速率顯著之誤差量，影響量平均值約 6 mm/yr。另外，部分中央氣象局潮位站可能因人為或儀器問題導致潮位資料有嚴重缺漏情形，以花蓮港(臺灣五大商港之一)潮位站為例，該潮位站於 1977-1983 間並無潮位記錄資料(如圖 2.5 所示)。因此相關管理單位應對潮位站資料品質有相當重視，高品質資料有助於分析了解臺灣周圍海域海水面上升等相關議題。

4.2 移除低頻訊號前後海水面上升速率之差異

衛星測高資料涵蓋時間較短，僅約二十年，在計算海水面上升速率時會受到海洋低頻訊號影響而產生誤差，因此本研究利用總體經驗模態分解(EEMD)從潮位站資料中萃取出低頻震盪訊號(10-30 年準週期訊號)後，將之自測高資料中移除，以減少低頻訊號對衛星測高資料計

算海水面上升速率之影響。以宿霧(Cebu)海水面資料為例，利用總體經驗模態分解(EEMD)法從宿霧(Cebu)潮位站資料中萃取出週期 10~30 年之海洋低頻訊號後(如圖 4.3 所示)，再將此低頻訊號自衛星測高資料中移除(如圖 4.4 所示)。改正低頻訊號前、後衛星測高資料估算海水面上升速率如表 4.5 與圖 4.5 所示。由圖可知，改正後測高資料所估算各區域之絕對海水面上升速率較一致，其中菲律賓區域海水面上升速率由原本 7~8 mm/yr 降為 5~7 mm/yr。另外，改正低頻訊號後海水面變化速率並非一定下降，如大浦滯(Tai Po Kau)改正前、後絕對海水面速率約上升 1 mm/yr。整體而言，改正前各區域海水面上升速率約為 1~8 mm/yr，而改正後各區域海水面僅降至 1~7 mm/yr，結果顯示用總體經驗模態分解(EEMD)法萃取出低頻海水面訊號後，並自衛星測高資料中移除之方法並不能有效降低低頻海水訊號影響，推測除了潮位資料本身品質問題外，還可能是衛星測高資料選取範圍和資料平均方法與潮位站資料不合適所造成，此部分仍須日後更進一步研究。

另外，本研究亦重新估算改正低頻訊號前、後 2003-2012 衛星測高資料之絕對海水面上升速率，結果如圖 4.6 所示。由圖可知，大部分區域改正前、後海水面速率差異皆在標準偏差內，表示改正海洋低頻訊號對於衛星測高資料估算 2003-2012 海水面上升速率影響不大，其原因除了上述所說原因外，利用短期資料(2003-2012)亦將造成估算速率之精度較差[郭重言等人，2013]。

由上述可知，結合總體經驗模態分解(EEMD)法移除衛星測高資料中低頻訊號僅能些許降低其影響，表示此方法還需要日後更進一步研究。因此在 4.3 節將以多變量線性方程式[Zhang and Church, 2012]擬合衛星測高資料，評估氣候因子(如：多重 ENSO 指數(MEI)與太平洋年代際振盪(PDO)指數)對於海水面影響量。

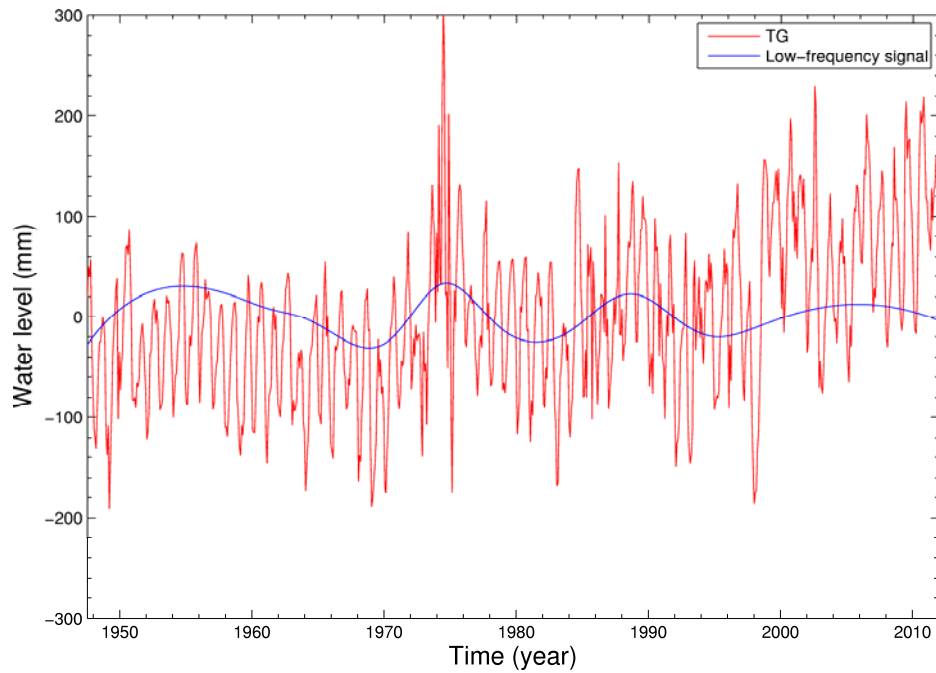


圖 4.3 宿霧(Cebu)潮位站月平均海水面資料與其海洋低頻訊號。TG 為潮位站月平均海水面資料，Low-frequency signal 為利用總體經驗模態分解萃取出宿霧(Cebu)潮位站資料中週期 10~30 年的低頻訊號

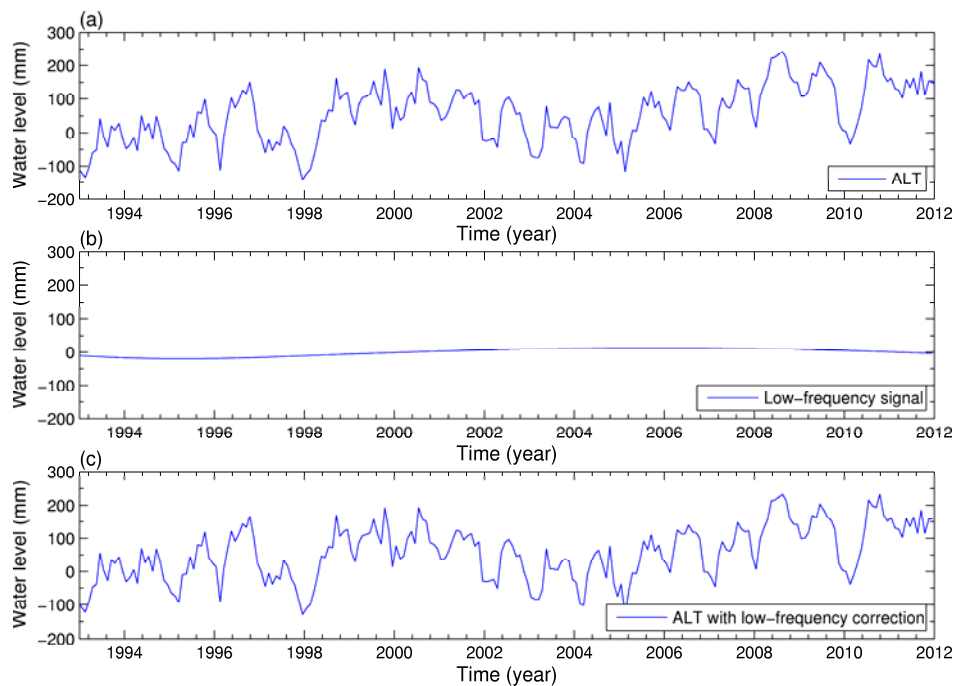


圖 4.4 宿霧(Cebu)周圍衛星測高資料中之海洋低頻訊號移除。(a) 衛星測高資料，(b)利用總體經驗模態分解萃取出宿霧(Cebu)潮位站資料中週期 10~30 年的低頻訊號，(c) 移除海洋低頻訊號後之衛星測高資料

表 4.5 1993-2012 臺灣周圍絕對海面上升速率。AVISO 與 RADs 分別表示改正測站地表垂直變動中衛星測高的資料來源

Country	Station	Sea level trends (mm/yr)					
		AVISO			RADs		
		ALT	ALT with low-frequency correction	Difference	ALT	ALT with low-frequency correction	Difference
Japan	NS	3.03±0.55	2.97±0.55	-0.06	3.06±0.54	3.02±0.53	-0.04
	NKNS	2.86±0.52	2.48±0.51	-0.38	2.79±0.57	2.44±0.55	-0.35
	OKNW	2.63±0.70	2.09±0.68	-0.54	2.53±0.72	2.02±0.70	-0.51
	NH	2.44±0.68	2.40±0.67	-0.04	2.28±0.69	2.34±0.69	0.06
Taiwan	SA*	3.20±0.37	3.20±0.37	0.00	2.22±0.38	2.22±0.38	0.00
	HL	3.20±0.39	3.08±0.41	-0.12	2.10±0.40	2.12±0.42	0.02
	PH*	2.45±0.52	3.45±0.53	1.00	0.67±0.53	0.67±0.53	0.00
	TCP*	3.45±0.43	3.45±0.43	0.00	2.68±0.44	2.68±0.44	0.00
	JG	4.22±0.37	4.51±0.39	0.29	3.65±0.37	3.87±0.40	0.22
	KS	4.49±0.36	4.25±0.36	-0.24	3.82±0.36	3.70±0.36	-0.12
	SGZ	4.59±0.35	3.98±0.33	-0.61	3.87±0.35	3.34±0.34	-0.53
	FG	3.27±0.44	3.57±0.43	0.30	2.04±0.45	2.32±0.45	0.28
	KL	3.16±0.36	3.61±0.37	0.45	2.38±0.37	2.83±0.38	0.45
	WG	4.04±0.37	4.58±0.40	0.54	3.46±0.37	4.05±0.40	0.59
China	ZP	2.63±0.54	3.06±0.52	0.43	2.63±0.56	3.04±0.55	0.41
	XM	3.62±1.57	3.09±1.56	-0.53	3.67±1.54	3.42±1.54	-0.25
	KM	2.94±0.43	3.20±0.42	0.26	2.73±0.43	2.97±0.42	0.24
	TPK	2.34±0.53	3.71±0.51	1.37	1.80±0.53	3.27±0.53	1.47
	TBT	2.40±0.54	2.40±0.54	0.00	1.80±0.54	1.80±0.54	0.00
Philippines	LGSP	7.71±0.70	5.95±0.70	-1.76	7.36±0.68	4.78±0.71	-2.58
	CB	8.14±0.71	6.54±0.73	-1.60	8.20±0.86	6.19±0.86	-2.01
All regions		3.66±0.13	3.60±0.13	-0.06	3.13±0.13	3.00±0.13	-0.13

*表示潮位站資料無法分解出具有統計意義的週期 10~30 年訊號

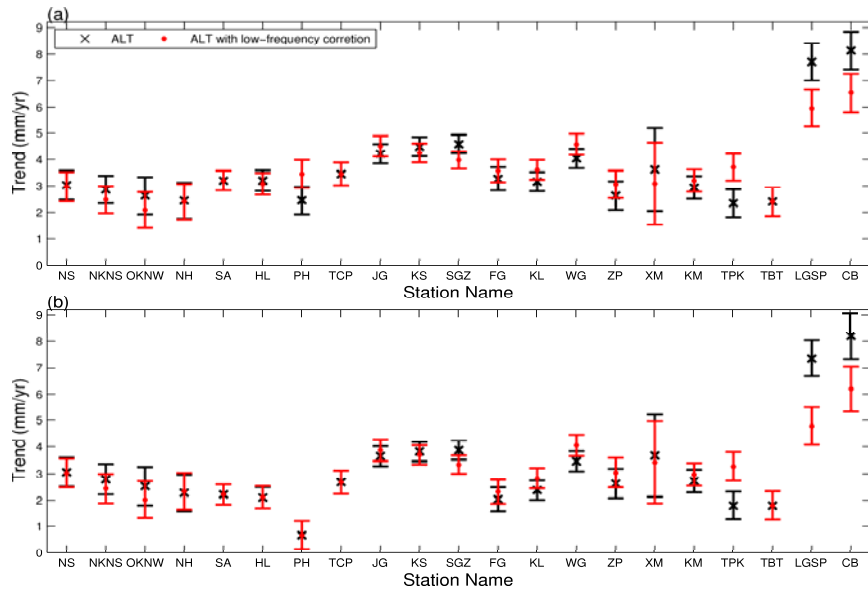


圖 4.5 原始與改正低頻後衛星測高資料所估算之 1993-2012 絕對海水
面變化速率與標準偏差。(a)為採用衛星海洋數據存檔、驗正與解釋
(AVISO)衛星測高資料,(b)為採用雷達測高資料收集(RADs) 衛星測高
資料。潮位站依地區由北向南分類,依序為日本、臺灣、中國大陸以
及菲律賓

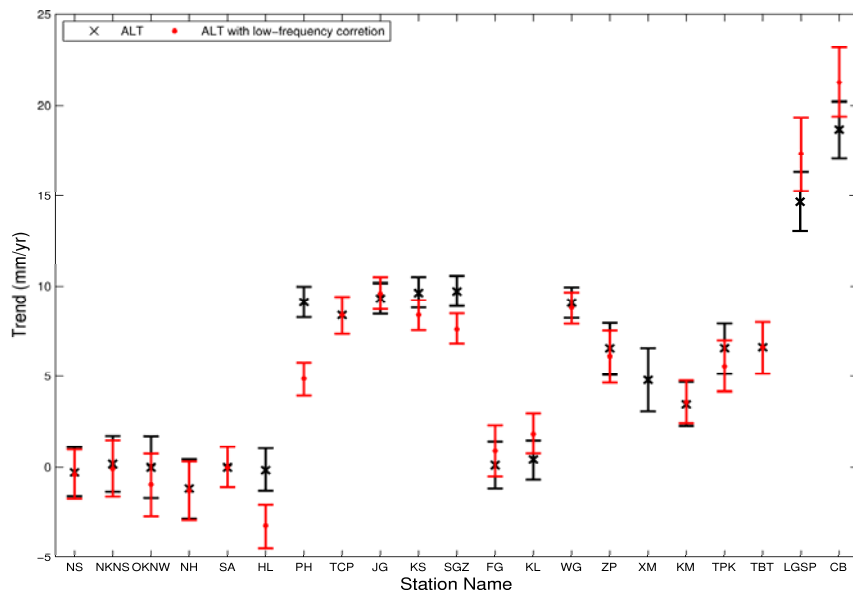


圖 4.6 原始與改正低頻後衛星海洋數據存檔、驗正與解釋(AVISO)衛星
測高資料所估算之 2003-2012 絕對海水面變化速率與標準偏差。潮位站
依地區由北向南分類,依序為日本、臺灣、中國大陸以及菲律賓。其
中廈門(Xiamen)潮位站資料僅至 2004 年,僅能改正衛星測高資料至
2004 年,若計算 2003-2004 廈門(Xiamen)海水面速率,其精度會非常
差,因此在此不顯示改正後廈門(Xiamen)速率

4.3 多變量線性擬合

4.3.1 多變量線性擬合法

由本研究成果(3.5.3 小節)可知，聖嬰-南方振盪(ENSO)和太平洋年代際振盪(PDO)現象與臺灣周圍海水面變化有一定程度相關性(如表 3.5 所示)，因此將利用 Zhang and Church [2012]提出的多變量線性擬合法還降低海洋低頻訊號對速率估算之影響。此方法結合二參數線性方程式(如式(3.6)所示)與氣候指標(例如:多重 ENSO 指數(MEI)與太平洋年代際振盪(PDO)指數)擬合衛星測高觀測海水面變化資料，以估算出氣候指標對於海水面影響以及未受氣候因子(如:多重 ENSO 指數(MEI)與太平洋年代際振盪(PDO)指數)影響之海水面上升速率。在擬合海水面資料前需進行資料前處理，處理步驟首先將海水面變化資料、多重 ENSO 指數(MEI)以及太平洋年代際振盪(PDO)指數中季節性訊號移除。再將移除季節性訊號後海水面資料進行 5 個月移動平均之平滑化處理，以降低週期 1 年以下訊號和雜訊之影響量。而多重 ENSO 指數(MEI)與太平洋年代際振盪(PDO)指數均為月平均指標，兩者變化非常相似(如圖 2.13 所示)。太平洋年代際振盪(PDO)指數代表年代際變化(Decadal variability)，因此將移除季節性訊號的太平洋年代際振盪(PDO)指數經 65 個月移動平均處理，降低訊號 10 年以下週期之影響量(Decadal climate index, DCI) (圖 4.7)。多重 ENSO 指數(MEI)代表年際間變化(Interannual variability)，因此將多重 ENSO 指數(MEI)分別進行 65 個月移動平均以及 5 個月移動平均處理，自 5 個月移動平均成果扣除 65 個月移動平均成果，即可得到年際間變化(Interannual climate index, ICI)(圖 4.7)[Zhang and Church, 2012]。上述使用的 5 個月移動平均與 65 個月移動平均參數是參照 Zhang and Church [2012]。

本計畫利用多變量線性擬合法[Zhang and Church, 2012]擬合海水面變化，估算出氣候指標對於海水面影響程度以及未受氣候因子影響之海水面上升速率，其公式如下：

$$SL = a + \beta_1 t + \beta_2 ICI + \beta_3 DCI \dots\dots\dots(4.1)$$

其中 SL 為海水面升降變動， a 為偏差， β_1 為海水面上升速率、 t 為時間， ICI 與 DCI 為濾波和正規化(正規化=原始資料/原始資料之標準偏差)處理後多重 ENSO 指數(MEI)與太平洋年代際振盪(PDO)指數成果(圖 4.7)， β_2 與 β_3 分別為 ICI 與 DCI 係數，正負號表示海水面變化與對應氣候指標(ICI 與 DCI)間為正相位或負相位，而大小表示該氣候指標對於海水面變化影響量。另外，後續將預估臺灣四周未來海水面變化，若需要估算海面上升加速度，可在式(4.1)中加入海水面加速度之參數 β_4 [Jevrejeva *et al.*, 2008]，其公式如下，

$$SL = a + \beta_1 t + \beta_4 t^2 + \beta_2 ICI + \beta_3 DCI \dots\dots\dots (4.2)$$

以宿霧(Cebu)潮位站衛星測高資料為例，衛星測高資料已移除季節性訊號並經平滑化處理(移動平均法)，將資料代入式(4.1)中並依最小二乘法求解未知參數，再將求出未知參數帶回式(4.1)中求得擬合海水面變化。比較衛星測高資料與擬合海水面可以清楚看出(如圖 4.8 所示)，兩時間序列非常吻合，尤其是聖嬰-南方振盪(ENSO)現象特別顯著的 1997-1998 年。

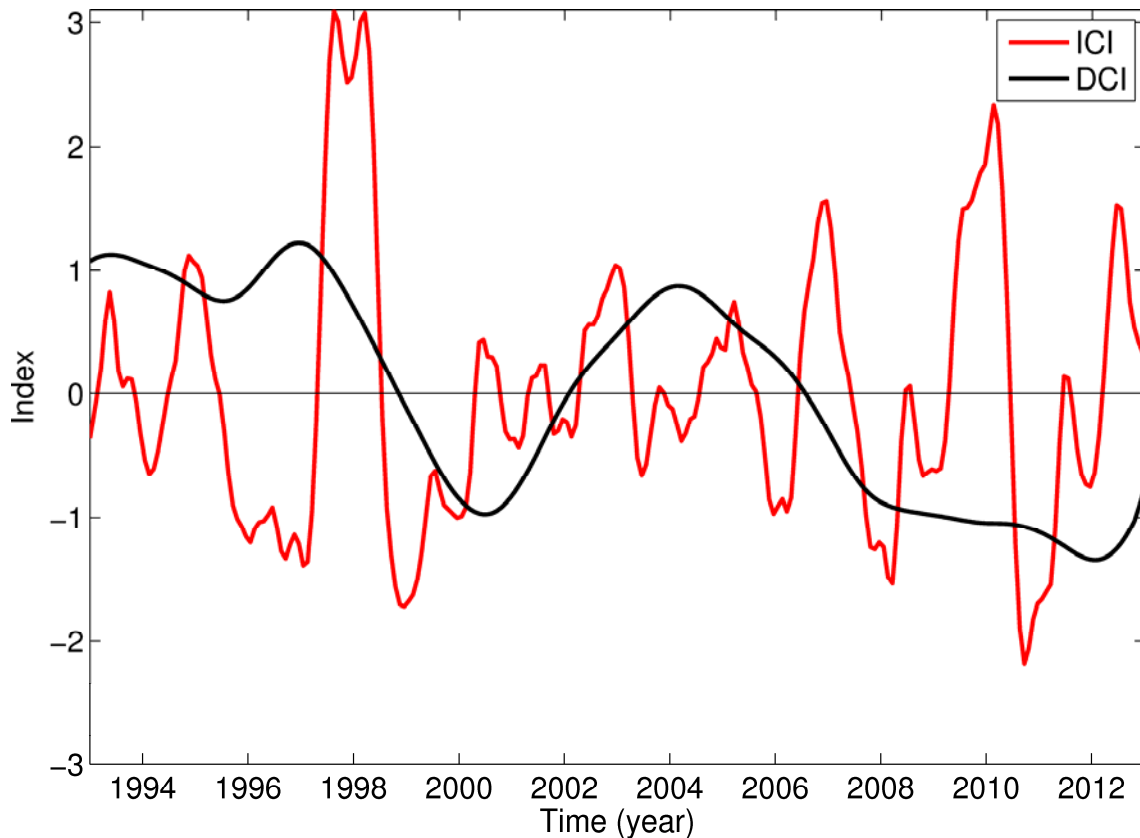


圖 4.7 濾波和正規化(正規化=原始資料/原始資料之標準偏差)處理後多重 ENSO 指數(MEI)與太平洋年代際振盪(PDO)指數成果。ICI (Interannual Climate Index)為多重 ENSO 指數(MEI)經分別經 65 個月移動平均以及 5 個月移動平均，自 5 個月移動平均成果扣除 65 個月移動平均之成果。DCI (Decadal Climate Index)為太平洋年代際振盪 (PDO)指數經 65 個月移動平均後之成果

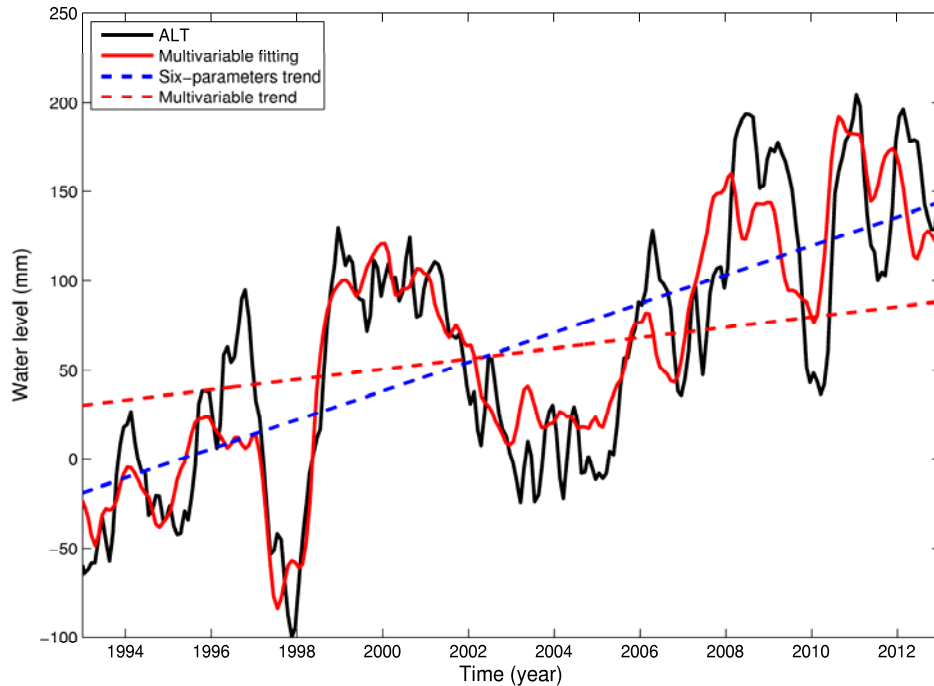


圖 4.8 宿霧(Cebu)潮位站衛星測高資料之多變量擬合。ALT 為衛星測高資料(已移除季節性訊號並經 5 個月移動平均處理)、Multivariable fitting 為多變量擬合成果、Six-parameters trend 為六參數擬合之斜率、Multivariable trend 為多變量擬合之斜率。

4.3.2 成果分析

在未考慮氣候因子影響下，以六參數擬合(式(3.3))衛星測高海水面資料所估算出的絕對海水面上升速率將受到氣候因子影響，臺灣周圍海水面上升速率由北(約 2~3 mm/yr)往南(8~12 mm/yr)逐漸增快 (如圖 4.9 所示)。然而在考慮氣候因子(式(4.1))影響下所估算絕海水面上升速率則較一致，如圖 4.10 所示。比較改正前後速率可知，越靠近赤道改正前後速率差異越大，表示越靠近赤道海水面升降變動受氣候因子影響越顯著(如圖 4.9、圖 4.10 與表 4.6 所示)。由多變量擬合衛星測高資料時的多重 ENSO 指數(MEI)之係數 β_2 與太平洋年代際振盪(PDO)之係數 β_3 亦可評估氣候因子對於各區域海水面的影響量，如圖 4.11、圖 4.12 與表 4.7 所示。由圖 4.11 可知，聖嬰-南方振盪(ENSO)現象僅對於菲律賓地區海水面有較大影響，影響量約-20~-30 mm，且聖嬰-南方振盪(ENSO)現象與菲律賓海水面變化呈現相反相位情形。而太平洋年代際

振盪(PDO)現象對於臺灣周圍各區域海水面皆有顯著影響(圖 4.12 與表 4.7)。由上述可知，此成果與本研究利用經驗模態分解(EEMD)法分析潮位站資料與氣候因子間相關性之成果大致相符合(圖 3.25 與圖 3.26 所示)。另外此成果亦與 Zhang and Church [2012]推估聖嬰-南方振盪(ENSO)現象主要影響的海水面範圍為緯度 $\pm 20^\circ$ 以內，而太平洋年代際振盪(PDO)現象影響整個太平洋亦相符合。

本研究亦比較在未考慮與考慮氣候因子影響下所估算長期絕對海水面上升速率，成果如圖 4.13 所示。由圖可知，兩成果非常接近，未考慮氣候因子影響下各區域海水面上升速率為 $-2\sim 6\text{ mm/yr}$ ，考慮氣候因子影響各區域海水面上升速率為 $-1\sim 6\text{ mm/yr}$ ，由成果得知，若海水面資料觀測時間較長(潮位站資料)，則較不受氣候因子週期性的影響。與衛星測高成果相比(如表 4.6 所示)，潮位站資料估算之海水面速率略大於衛星測高成果，其中差異較大的為黎牙實比(Legaspi)潮位站(潮位站: $\sim 6\text{ mm/yr}$ ，衛星測高: $\sim 3\text{ mm/yr}$)，原因為應用多變數擬合黎牙實比(Legaspi)潮位站資料之成果並不佳，造成在估算海水面上升速率時，未能有效降低氣候因子對於速率計算之影響，如圖 4.14 所示。然而利用多變數擬合 1993-2011 黎牙實比(Legaspi)潮位站海水面資料時，海水面資料與擬合成果則非常一致(如圖 4.15 所示)，1993-2011 黎牙實比(Legaspi)海水面上升速率降至 $4.73\pm 0.56\text{ mm/yr}$ 。由上述可推論，1993 年以前的黎牙實比(Legaspi)潮位站資料品質較差，造成利用多變數擬合 1950~2011 黎牙實比(Legaspi)潮位站成果較差。

圖 4.16 為太平洋區域(緯度: $60^\circ\text{S}\sim 60^\circ\text{N}$ 、經度: $100^\circ\text{E}\sim 60^\circ\text{W}$)平均海水面變化與移除氣候因子影響(聖嬰-南方振盪(ENSO)現象與太平洋年代際振盪(PDO))之海水面變化。由圖可知，氣候因子對於太平洋區域平均之海水面變化速率影響不大，太平洋區域平均海水面上升速率為 $2.94 \pm 0.04\text{ mm/yr}$ ，而移除氣候因子影響後海水面速率為 $2.83 \pm 0.06\text{ mm/yr}$ ，表示氣候因子對於太平洋區域之平均海水面僅影響 $\sim 0.1\text{ mm/yr}$ 。

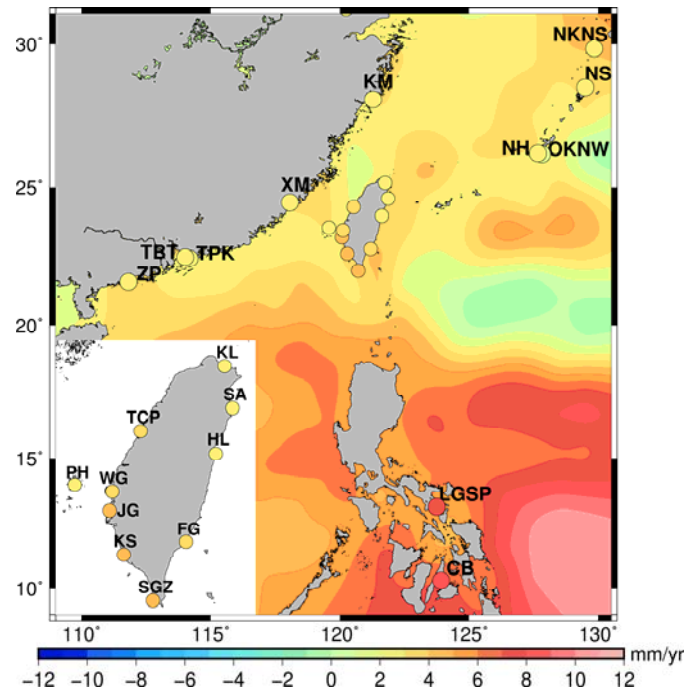


圖 4.9 未考慮海水面資料中氣候因子影響下之臺灣周圍絕海水面上升速率。點位與背景圖分別為利用 1993-2012 海洋數據存檔、驗正與解釋 (AVISO) 衛星測高平均沿軌跡點(along-track)與 $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ 網格資料所估算

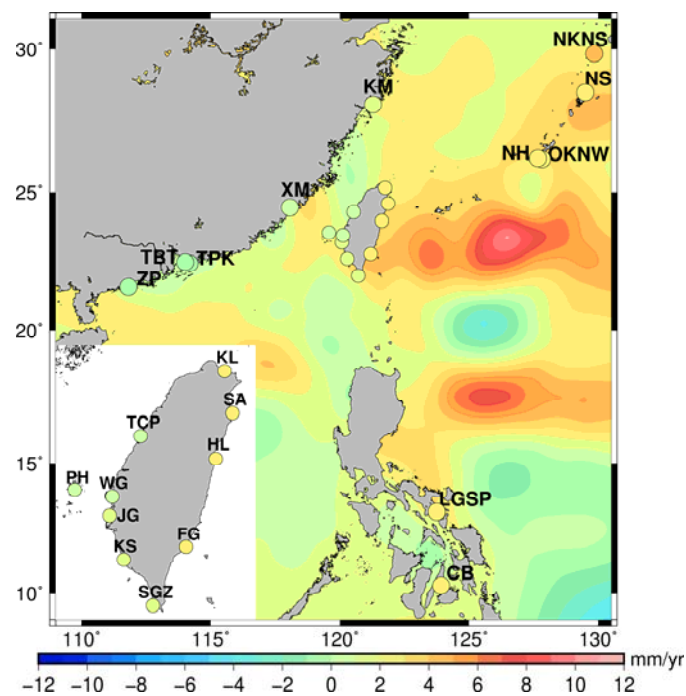


圖 4.10 考慮海水面資料中氣候因子影響下之臺灣周圍絕海水面上升速率。點位與背景圖分別為利用 1993-2012 海洋數據存檔、驗正與解釋 (AVISO) 衛星測高平均沿軌跡點(along-track)與 $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ 網格資料所估算

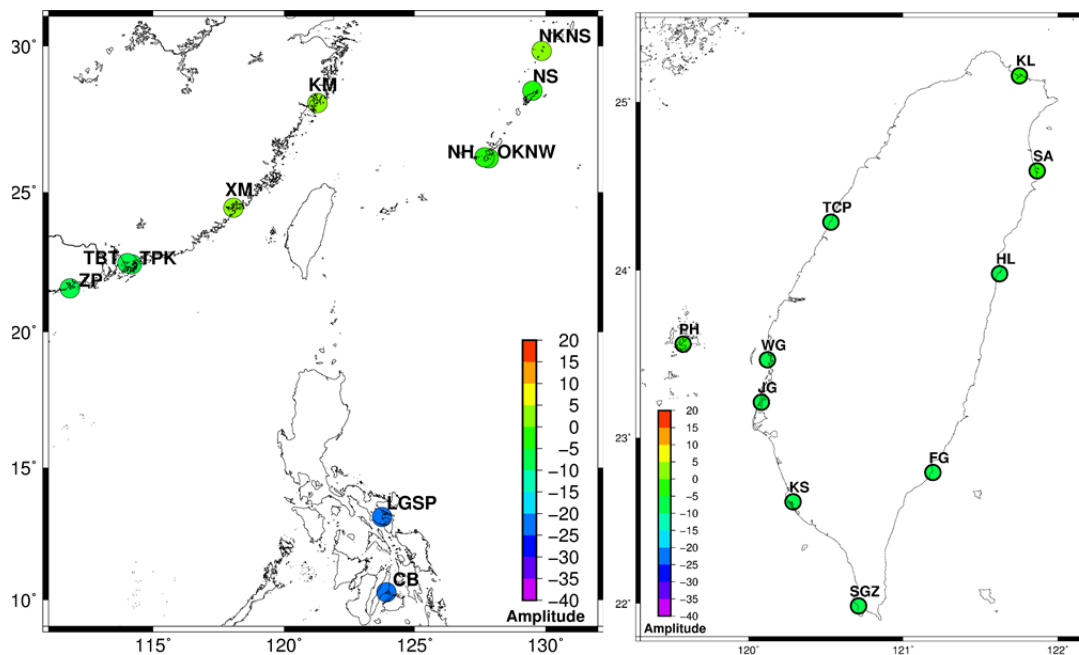


圖 4.11 多變量線性擬合中多重 ENSO 指數(MEI)之 β_2 係數

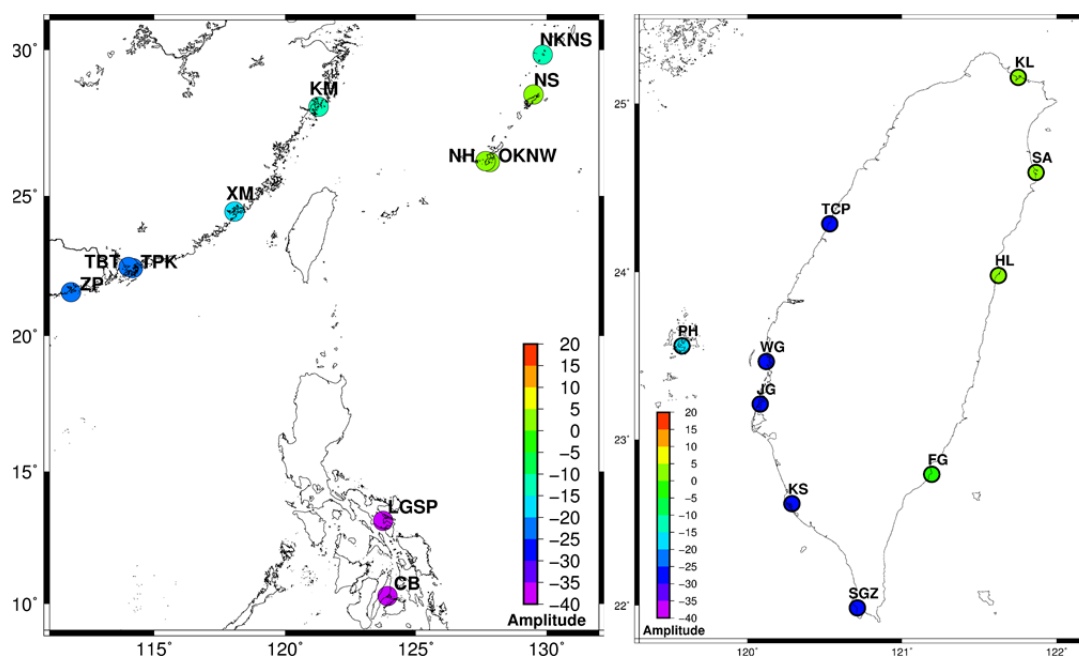


圖 4.12 多變量線性擬合中太平洋年代際振盪(PDO)之 β_3 係數

表 4.6 1993-2012 臺灣周圍絕對海面上升速率。Fitting6 與 Multivariable 分別為在擬合時未考慮與考慮海面資料中氣候因子影響。AVISO 與 RADs 分別表示衛星測高之資料來源

Country	Station	Sea level trends (mm/yr)					
		AVISO			RADs		
		Fitting6	Multivariable	Difference	Fitting6	Multivariable	Difference
Japan	NS	3.03±0.55	3.14±0.61	0.11	3.06±0.54	3.07±0.54	0.01
	NKNS	2.86±0.52	1.42±0.64	-1.44	2.79±0.57	2.35±0.56	-0.44
	OKNW	2.63±0.70	2.19±0.84	-0.44	2.53±0.72	2.85±0.86	0.32
	NH	2.44±0.68	2.32±0.86	-0.12	2.28±0.69	2.48±0.86	0.20
Taiwan	SA	3.20±0.37	3.29±0.41	0.09	2.22±0.38	2.50±0.41	0.28
	HL	3.20±0.39	1.10±0.36	-2.10	2.10±0.40	0.95±0.36	-1.15
	PH	2.45±0.52	3.08±0.45	0.63	0.67±0.53	2.11±0.45	1.44
	TCP	3.45±0.43	2.97±0.47	-0.48	2.68±0.44	1.82±0.49	-0.86
	JG	4.22±0.37	0.39±0.50	-3.83	3.65±0.37	-1.59±0.57	-5.24
	KS	4.49±0.36	0.95±0.36	-3.54	3.82±0.36	0.79±0.36	-3.03
	SGZ	4.59±0.35	0.32±0.41	-4.27	3.87±0.35	-0.01±0.42	-3.88
	FG	3.27±0.44	1.38±0.35	-1.89	2.04±0.45	1.06±0.34	-0.98
	KL	3.16±0.36	1.49±0.34	-1.67	2.38±0.37	1.10±0.34	-1.28
China	WG	4.04±0.37	3.24±0.41	-0.80	3.46±0.37	2.40±0.41	-1.06
	ZP	2.63±0.54	0.15±0.52	-2.48	2.63±0.56	1.09±0.56	-1.54
	XM	3.62±1.57	0.70±0.57	-2.92	3.67±1.54	-0.64±0.62	-4.31
	KM	2.94±0.43	1.63±0.40	-1.31	2.73±0.43	2.09±0.42	-0.64
	TPK	2.34±0.53	-0.03±0.52	-2.37	1.80±0.53	0.00±0.53	-1.80
Philippines	TBT	2.40±0.54	0.00±0.53	-2.40	1.80±0.54	0.00±0.54	-1.80
	LGSP	7.71±0.70	2.97±0.62	-4.74	7.36±0.68	3.36±0.65	-4.00
All regions	CB	8.14±0.71	2.90±0.54	-5.24	8.20±0.86	3.55±0.69	-4.65
		3.66±0.13	1.75±0.14	-1.91	3.13±0.13	1.49±0.14	-1.64

表 4.7 多變量線性擬合中 β_2 與 β_3 係數。AVISO 與 RADs 分別表示衛星測高之資料來源

Country	Station	AVISO (mm)		RADs (mm)	
		β_2	β_3	β_2	β_3
Japan	NS	-0.34	3.74	-2.08	1.41
	NKNS	0.64	-13.06	-1.22	-3.86
	OKNW	-0.06	4.17	0.12	8.16
	NH	-1.32	1.26	-0.16	4.03
Taiwan	SA	-2.28	2.62	-2.45	2.90
	HL	-5.88	-27.44	-6.35	-23.90
	PH	-3.61	1.75	-3.91	1.98
	TCP	-5.05	0.89	-5.44	0.25
	JG	-2.37	-16.89	-3.87	-16.63
	KS	-5.88	-27.27	-6.45	-23.75
	SGZ	-5.75	-27.54	-6.98	-24.10
	FG	-5.89	-27.40	-6.09	-24.23
	KL	-5.63	-27.22	-5.78	-24.23
China	WG	-2.21	2.83	-2.34	3.41
	ZP	-7.81	-21.23	-7.90	-12.49
	XM	3.55	-16.11	4.14	-12.66
	KM	3.92	-11.12	4.46	-5.50
	TPK	-8.85	-20.76	-8.37	-14.59
Philippines	TBT	-8.92	-20.95	-8.44	-14.63
	LGSP	-21.79	-42.50	-23.73	-35.42
	CB	-24.89	-52.27	-30.87	-44.37

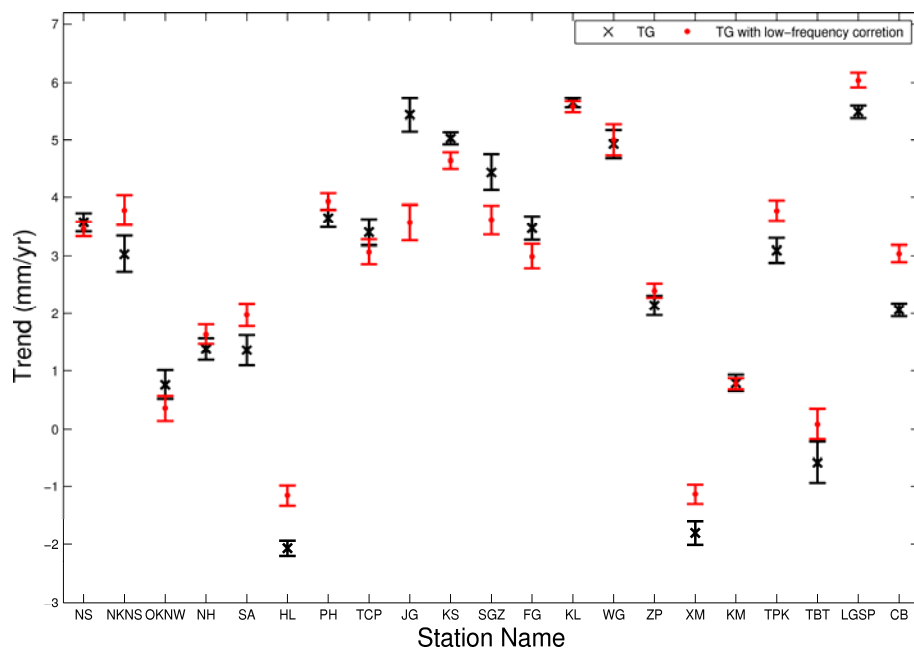


圖 4.13 潮位站資料(> 30 年)估算之絕對海水面上升速率與標準偏差。黑標表示未考慮海水面上升速率中氣候因子影響下之臺灣周圍絕對海水面上升速率，紅標表示臺灣周圍絕對海水面上升速率已考慮氣候因子之影響

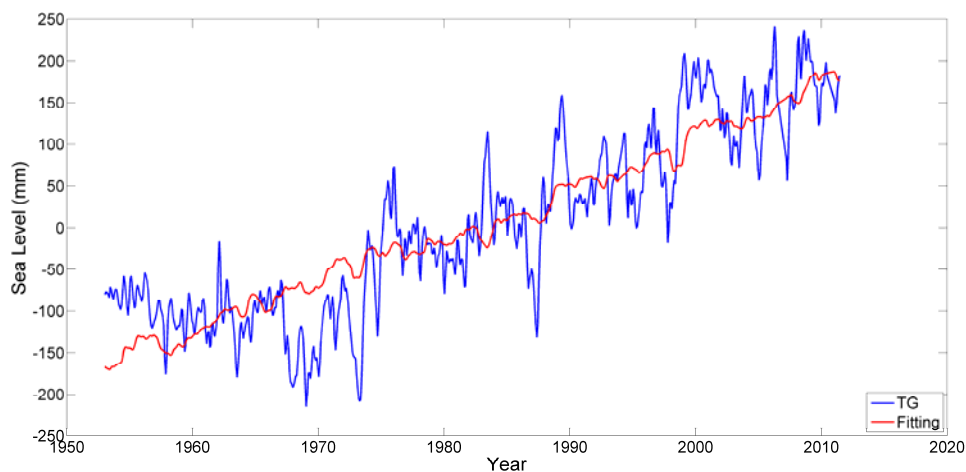


圖 4.14 多變量擬合黎牙實比(Legaspi)潮位站資料。藍線為潮位站資料，紅線為多變量擬合成果

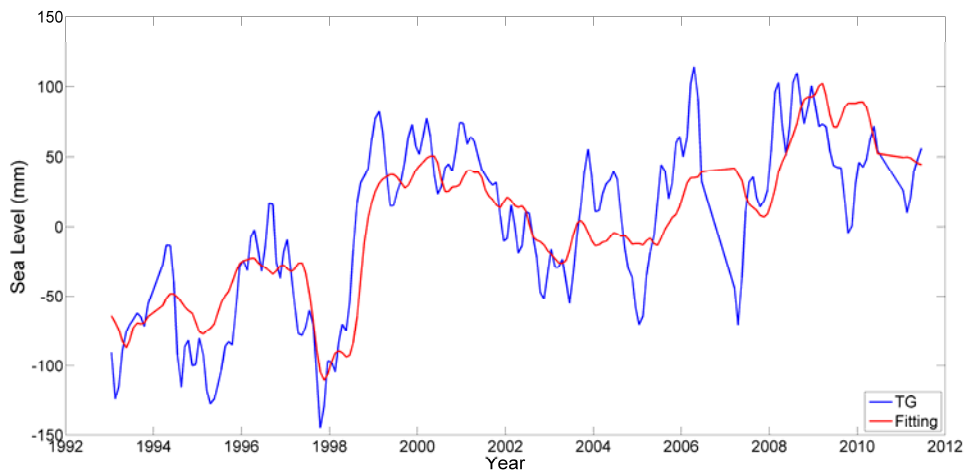


圖 4.15 多變量擬合 1993-2011 年黎牙實比(Legaspi)潮位站資料。藍色線為潮位站資料，紅色線為多變量擬合成果

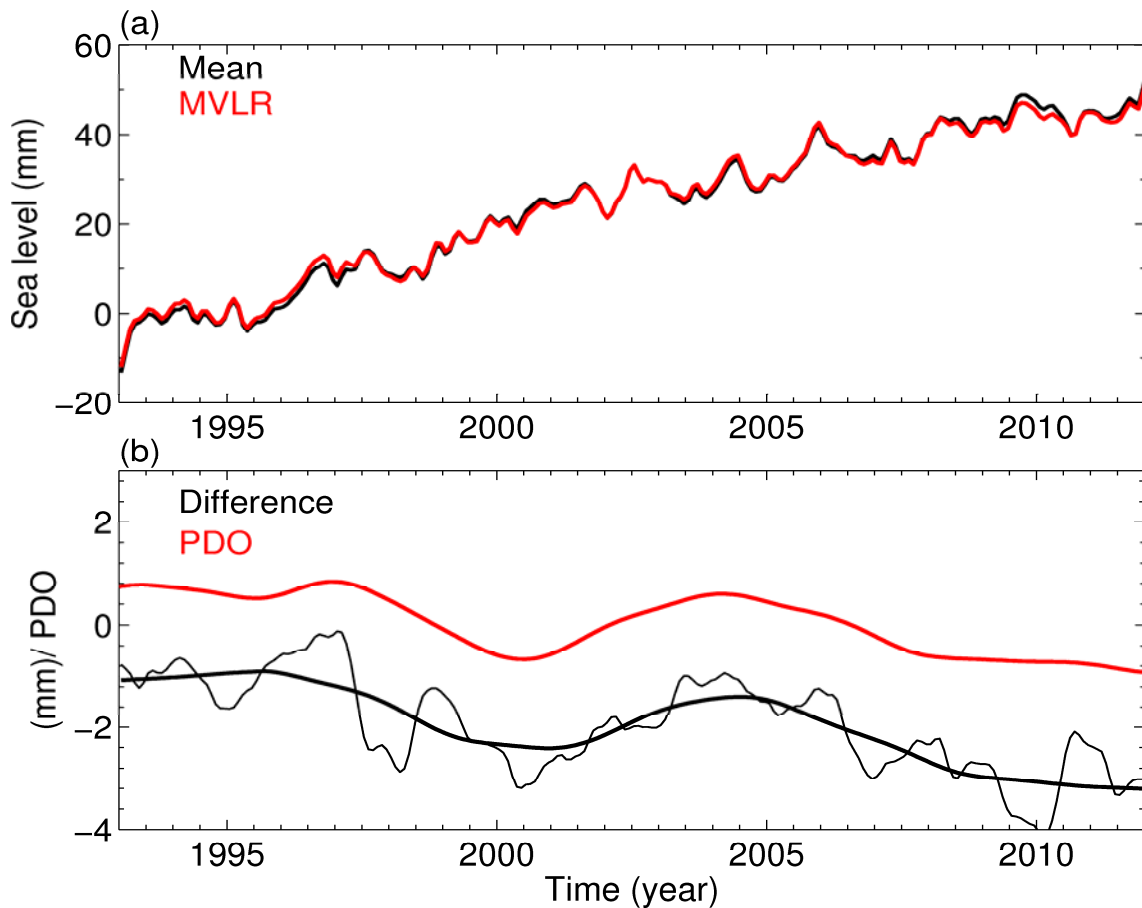


圖 4.16 太平洋海域之平均海水面變化，(a)太平洋海域之平均海水面變化(黑線)及變化移除氣候因子之平均海水面 (紅線)。 (b)上圖之差異與太平洋年代際振盪(PDO)指數關係。圖(b)中黑線為圖(a)中差值以及將差值經 65 月移動平均後結果

4.4 合成平均差異推算法

為分析不同時間尺度之氣候因子對海洋物理特性之影響，本研究以 Camp and Tung [2007] 及 Zhou and Tung [2010] 發展之合成平均差異推算(Composite Mean Difference Projection, CMD)法，推算氣候因子及人類活動(排放溫室氣體)對海水面之貢獻程度。該方法應用時變之空間海水面資料 $T(x,t)$ ，分析受到如聖嬰-南方振盪(ENSO)影響之相應海水面空間變化，而該海水面空間變化可由聖嬰-南方振盪(ENSO)時間序列中設定一門檻值，本研究定義為正負 0.5。表示受到海水面可能受到聖嬰-南方振盪(ENSO)影響的海水面空間資料之平均正(>0.5)負(<-0.5)群組間的差值並定義為 $P(x)$ 及表示為下式

$$P(x) = \overline{T(x, G_1)} - \overline{T(x, G_2)} \dots\dots\dots (4.3)$$

其中 G_1 及 G_2 為大於及小於聖嬰-南方振盪(ENSO)時間序列中之門檻值 (0.5)的群組，在平均差異推算(CMD)方法中，海水面之時空資料將被表示為經驗正交函數(Experimental Orthogonal Function，EOF)方式

$$T(x,t) = \sum C_n(t)P_n(x) \dots\dots\dots (4.4)$$

其中 n 為影響海水面的氣候因子，包含聖嬰-南方振盪(ENSO)及太平洋年代際振盪(PDO)，與人類影響因子共三項。而各空間分布模態(mode)正交性將被定義為推算係數(projection coefficients)

$$C_j(t) = \frac{\int T(x,t)P_j(x)dx}{\int P_j^2(x)dx} \dots\dots\dots (4.5)$$

並假定 $P_1(x)$ 表示為受聖嬰-南方振盪(ENSO)影響的海水面空間模態並正交於其他非聖嬰-南方振盪(ENSO)模態之總和，而 $C_1(t)$ 則表示空間平均之 $P_1(x)$ 正規化時間序列，即應用 $P_1(x)$ 之空間分佈為一種濾波器(filter)。因此 $C_1(t)$ 的變化特性將可表示為受聖嬰-南方振盪(ENSO)影響之平均海水面變動，並可計算聖嬰-南方振盪(ENSO)時間序列之群組與推算係數 $C_1(t)$ 之線性迴歸係數(mm/index)，作為分析海水面與海洋溫鹽受聖嬰-南方振盪(ENSO)影響之貢獻量。

以上述聖嬰-南方振盪(ENSO)影響因子為例，本研究將三項因子帶入平均差異推算(CMD)方法中，並以聖嬰-南方振盪(ENSO)門檻值(0.5)、太平洋年代際振盪(PDO)門檻值(0.1)與人類影響因子(溫室氣體的排放量)，其中溫室氣體排放量資料由二氧化碳資訊分析中心(Carbon Dioxide Information Analysis Center, <http://cdiac.ornl.gov/GCP/>)取得 1959 至 2012 年間的石化燃料排放量，其門檻值為 1993-2012 年之平均值。其中海水面資料以 1993-2012 年之衛星海洋數據存檔、驗正與解釋(AVISO)網格資料分析太平洋海域(南北緯 60°以內，東經 100°~西經 60°)上述三項因子之影響。其中 $C_1(t)$ 並以 Bootstrap Monte Carlo (蒙地卡羅)方法檢測與各影響因子之相關性。

本研究以平均差異推算(CMD)方法經由氣候或人為因子作為影響海水面變動之空間模態以求得各影響因子之海水面貢獻時間序列，此方法相異於 Zhang 等人[2012]以多變量線性擬合聖嬰-南方振盪(ENSO)與聖嬰-南方振盪(ENSO)計算海水面之影響量與未受上述兩因子之海水面上升率。然而排除氣候因子之海水面上升率並非完全等同人為之影響量，因此以平均差異推算(CMD)方法予以同時推算氣候與人為因子對海水面影響趨勢。

圖 4.17 為各影響因子之海水面空間資料的正負群組差值。受聖嬰-南方振盪(ENSO)影響之海水面空間變化趨向於聖嬰(El Niño)事件，即東太平洋赤道區域海面溫度變暖，聖嬰-南方振盪(ENSO)共向海水面之影響量於 1993-2012 年間約 120 mm，其中西太平洋赤道區域海面溫度變冷，海水面的變化約為 -120 mm。大於南北緯 25°之區域影響量則約為正負 40 mm。另外受太平洋年代際振盪(PDO)影響之海水面模態則趨向暖相位太平洋年代際振盪(PDO) (Warm PDO Phase)，其中影響顯著的區域為北太平洋北緯 25°~50°與西太平洋赤道南北緯 20°之範圍，海水面的變化約為 -120 mm。另外，由美洲阿拉斯加沿岸與美洲西岸延伸至赤道之區域之海水面的顯著變化則約為 100 mm ~ 120 mm。且聖嬰-南方振盪(ENSO)與太平洋年代際振盪(PDO)對海水面的影響僅在赤道附近之有限區域較類似，但大部分的區域相似性並不顯著。上述海水

面之各模態顯著的區域與氣候因子的空間分布類似，顯示比容海水面的動力作用可能是影響赤道海水面變化的主要因素。

石化燃料之排放所影響之海水面變化則以排除聖嬰-南方振盪(ENSO)與太平洋年代際振盪(PDO)的影響，並以赤道南北緯 25° 間的範圍為顯著區域，變化量約為 60 mm ~ 80 mm。除了少數小區域如黑潮和親潮延伸流域(Kuroshio-Oyashio Extension)及其他孤立區域，大部分區域則趨向於正相關的影響。

由上述三組影響因子之空間平均海水面模態求得各海水面的貢獻量時間序列及其影響(線性回歸)係數(mm/index)，如圖 4.18 所示。圖中顯示受聖嬰-南方振盪(ENSO)影響的海水面與聖嬰-南方振盪(ENSO)指數的相關性約為 0.73，且通過 Bootstrap Monte Carlo (蒙地卡羅)檢測，其影響係數為 0.02(mm/index)。於太平洋年代際振盪(PDO)因子則相關性為 0.96，影響係數為 14.23(mm/index)。人為排放的影響相關性為 0.91，影響係數為 0.01(mm/MtC/yr)，其中 1993 至 2004 年之海水面上升率為 2.39 mm/yr，2004 至 2012 年之海水面上升率則為 0.91 mm/yr。由上述結果所推算之海水面貢獻量與氣候和人為的相關性非常顯著，且 20-30 年週期之太平洋年代際振盪(PDO)對海水面的影響較聖嬰-南方振盪(ENSO)甚巨，顯示長週期的氣候因子將可解釋並修正區域海水面上升率之差異，並利用石化燃料排放量來解釋人為影響太平洋海域之海水面上升率將下修至 ~2 mm/yr。

另外本研究以平均差異推算(CMD)法求得之人為影響之海水面 1993-2012 年的空間變化量，並計算平均之上升率如圖 4.19 及圖 4.20。圖中 AVISO 網格資料之線性擬合與平均差異推算(CMD)法所求得其海水面上升率之比較，顯示未受氣候與人為因子影響之區域上升率於西太平洋赤道區最大為 12 mm/yr，而以平均差異推算(CMD)法求得之人為影響海水面上升率約為 4-6 mm/yr，其顯著位置已位移至赤道東經 150° 至西經 160° 之區域，此結果顯示聖嬰-南方振盪(ENSO)與太平洋年代際振盪(PDO)因子確會對溫鹽比容之動力特性造成顯著的貢獻進而影響海水面變動。

圖 4.20 顯示北緯 20° 以南之海水面上升率約為 4.5 mm/yr，經過氣候因子之修正後人為影響之上升率較顯著的區域位於北緯 20-25° 與東經 122°~130° 範圍，其值約為 4 mm/yr。臺灣北部約為 1 mm/yr，臺灣海峽至臺灣南部海域則為 0-2 mm/yr，由此臺灣東部海域受太平洋年代際振盪(PDO)的影響較為顯著。

圖 4.21 為太平洋區域平均之海水面變化與人為影響之海水面變化，上述兩者並扣除 1993-1996 年間的平均值，對已排除氣候因子之海水面於 1999-2004 及 2008-2012 年間下修約 10 mm。而下修量則來自太平洋年代際振盪(PDO)的貢獻量，顯示長週期的因子特別需要修正海水面的變動以改善區域海水面上升率差異。而短週期的氣候因子如聖嬰-南方振盪(ENSO)則影響的程度遠較太平洋年代際振盪(PDO)小。因此利用潮位站之資料亦須考慮長週期氣候因子的影響。相較於利用 Zhang and Church [2012]方法評估氣候因子(聖嬰-南方振盪(ENSO)與太平洋年代際振盪(PDO))對於太平洋海水面影響(如圖 4.16 所示)，平均差異推算(CMD)法分析低頻訊號對於太平洋海水面速率影響量較大(如圖 4.21 所示)。兩方法並不相同，若要完整分析低頻訊號對於太平洋海水面速率影響仍須往後更進一步研究。

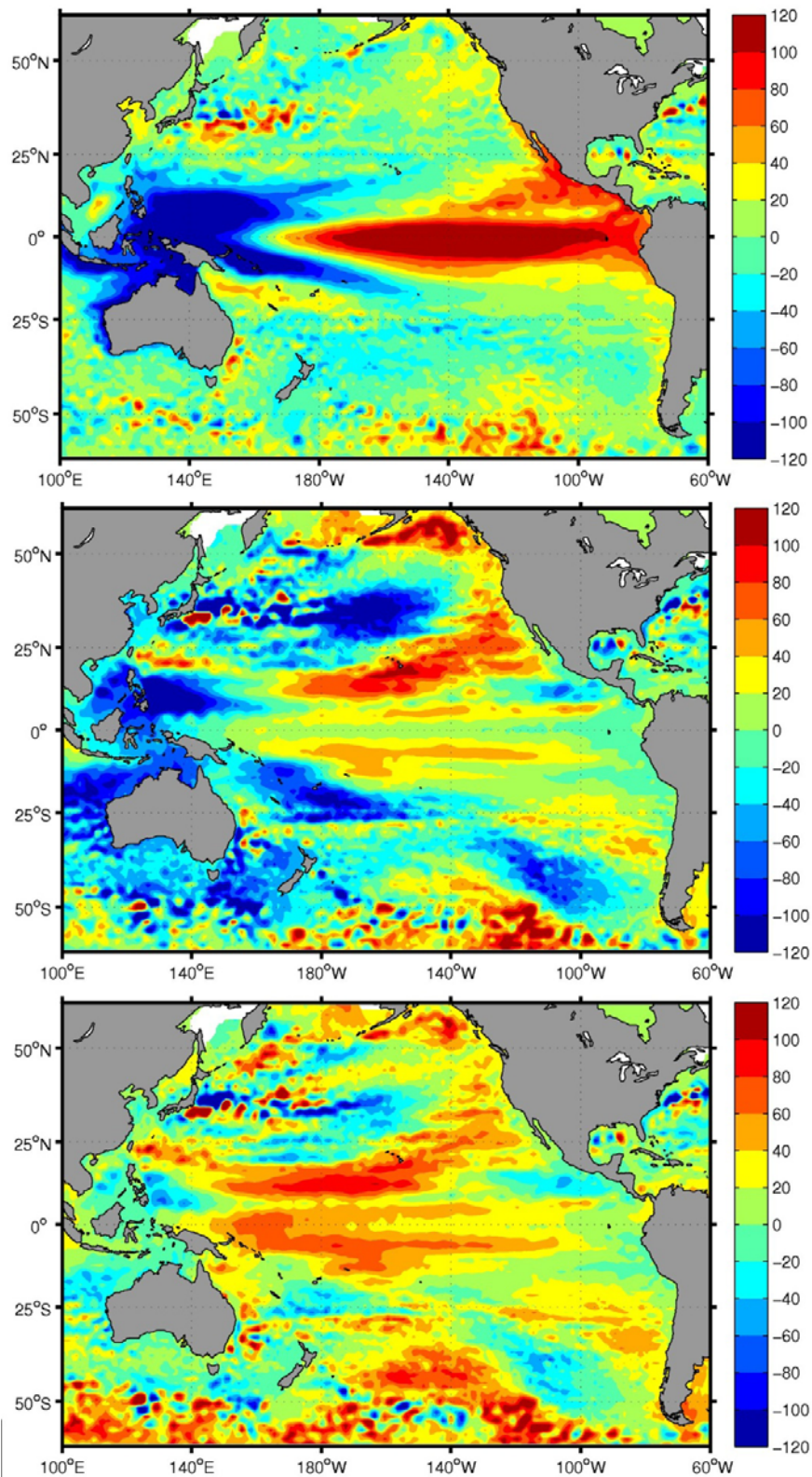


圖 4.17 受聖嬰-南方振盪(ENSO) (上)、太平洋年代際振盪(PDO) (中) 及石化燃料排放(下)影響之海水面的空間特性(單位: mm)

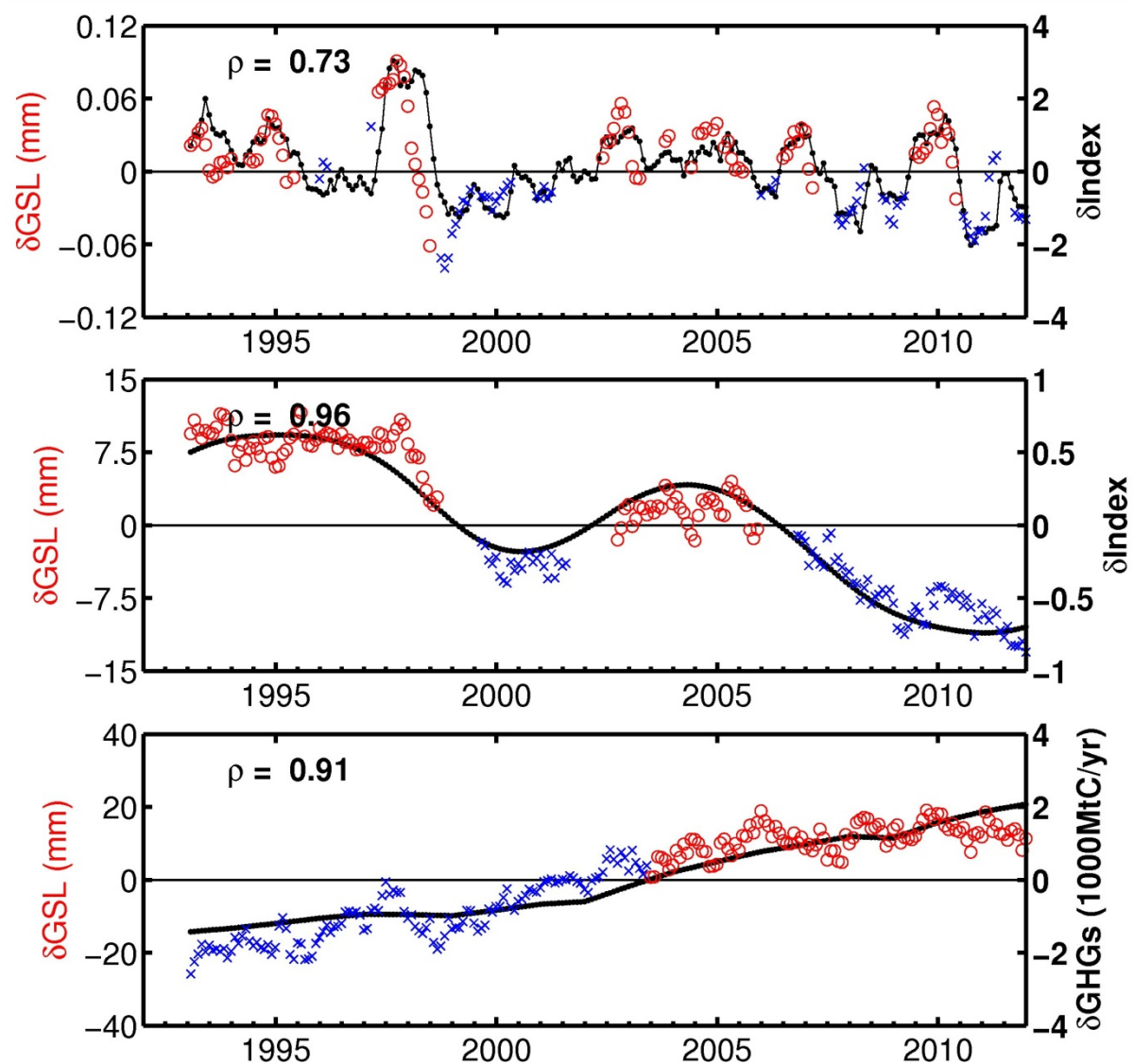


圖 4.18 受太平洋年代際振盪(PDO) (上)、太平洋年代際振盪(PDO) (中) 及石化燃料排放(下)影響之海水面的貢獻量(海水面單位: mm ; 石化燃料排放量單位為: MtC/yr); 正群組表示為 O, 負群組表示為 X。

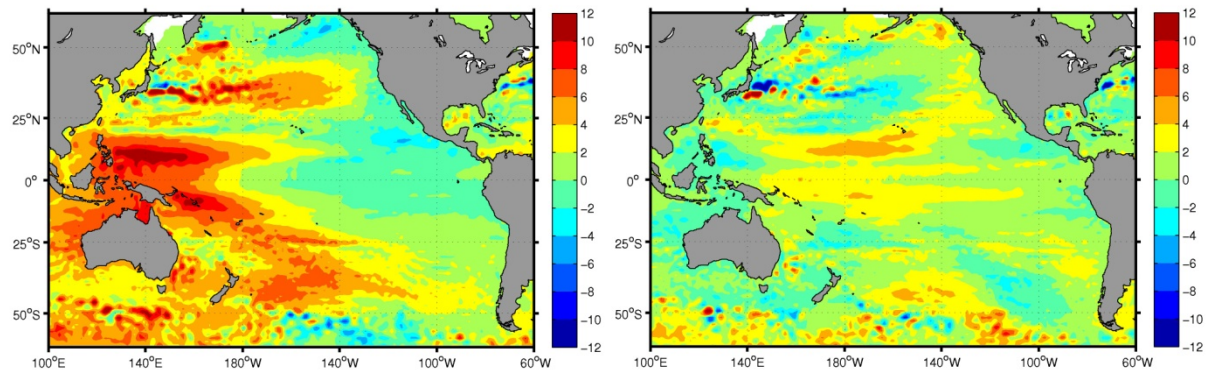


圖 4.19 太平洋海域 1993-2012 年之海水面上升率(左圖)及人為影響之海水面上升率(右圖)(單位: mm/yr)。

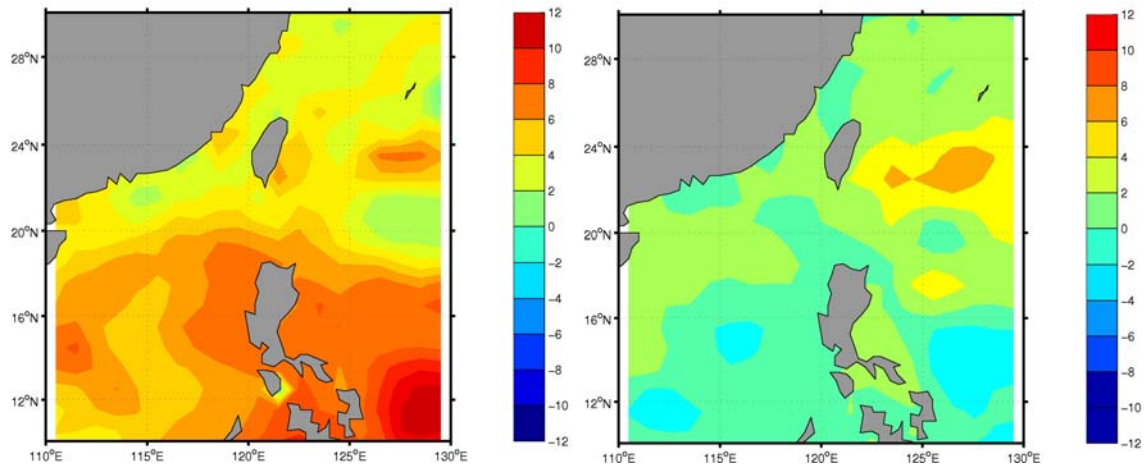


圖 4.20 本研究海域 1993-2012 年之海水面上升率(左圖)及人為影響之海水面上升率(右圖) (單位: mm/yr)。

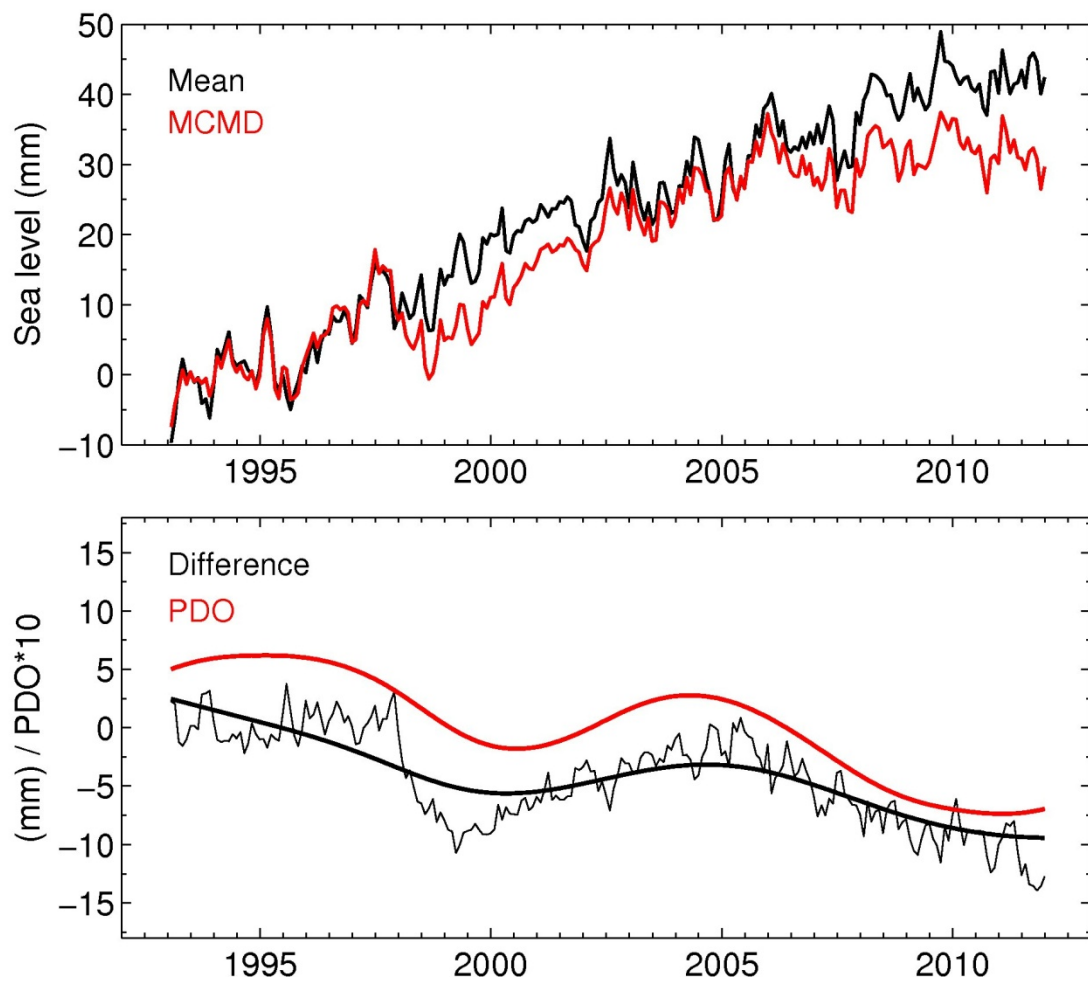


圖 4.21 上圖為太平洋海域之平均海水面變化(黑線)及人為影響之平均海水面變化(紅線)。下圖為上圖之差異與太平洋年代際振盪(PDO)指數關係。

4.5 分區比較臺灣四周海水面變化

由 103 期計畫成果得知，臺灣周圍海域近十年比容海水面變化與海洋質量變化僅分別占衛星海洋數據存檔、驗正與解釋(AVISO)衛星測高資料估算之絕對海水面變化的 30% 與 25%，另外分別占雷達測高資料收集 (RADs)衛星測高資料估算之絕對海水面變化的 37%與 24% [郭重言等人, 2015]。成果顯示三者資料間存在約 2~4 mm/yr 的不確定量，約為絕對海水面上升速率的 40%~50%。為了分析造成此不確定量之原因，將臺灣附近海域分成四區域進行分析，如圖 4.22 所示。由圖可知，南北界線為北緯 20°，其原因為 20°N 至赤道為聖嬰-南方振盪(ENSO)

影響顯著區域[Zhang and Church, 2012]，可分析臺灣本島周圍海域受聖嬰-南方振盪(ENSO)等氣候因素之影響量；而東西方向之界線分為兩部分，南部區域為 121.5°E ，因黑潮於東南區域非常盛行，因此以東西兩區域的中間線(121.5°E)為分界線。而北部區域分界線為 121°E ，其原因為臺灣東部與西部海水面上升速率與年週期相位不一致，因此以 121°E (約臺灣本島之中間線)為基準，分為東西部分。

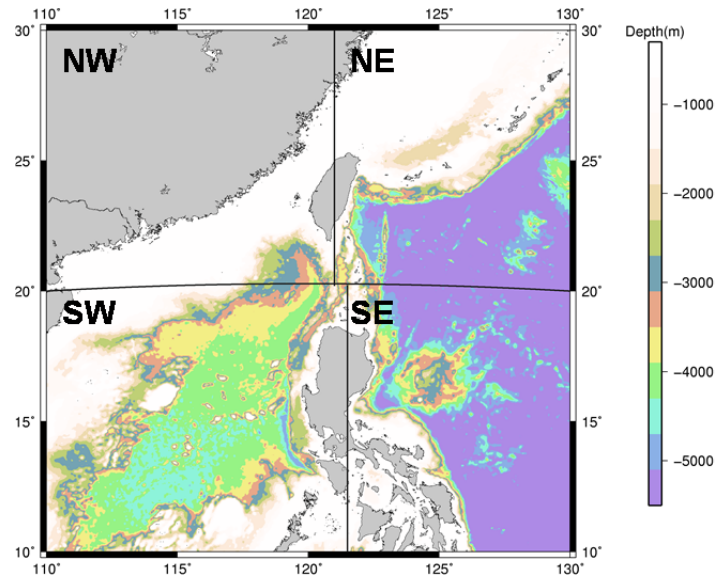


圖 4.22 臺灣海域分區圖。背景顏色表示海底地形高低起伏，資料來源為 EOTOP1 [Amante and Eakins, 2009]。NE、NW、SE 與 SW 分別為臺灣東北區域、西北區域、東南區域與西南區域

4.5.1 臺灣周遭海域海水面上升速率之原因

本計畫利用溫度和鹽度資料(Ishii[Ishii 和 Kimoto, 2009]與日本海洋研究開發機構(JAMSTEC)[Hosoda *et al.*, 2008])、重力反演和氣候實驗(GRACE)重力衛星資料與衛星測高資料(海洋數據存檔、驗正與解釋(AVISO)與雷達測高資料收集 (RADs))估算臺灣周圍海域之比容海水面變化、海水質量變化與絕對海水面變化，並將上述資料依圖 4.22 分成四區域。溫度和鹽度資料所估算比容海水面變化之時間序列與兩衛星測高資料估算絕對海水面變化的時間序列之相關性在各分區不完全相同，東部區域相關係數為 0.90~0.92，而在西部區域相關係數僅約為 0.60~0.66，而各區域海水質量變化時間序列與絕對海水面變化時間序

列則無明顯相關，但西部海水質量年週期變化較東部大(圖 4.23 與表 4.18)。將比容海水面變化與海水質量變化相加估算絕對海水面變化，並與衛星測高絕對海水面變化相比較，成果如圖 4.24 所示。由圖可知，在東部區域以及西北部相關性皆在 0.90 以上，而西南部之相關係數僅約 0.72。另外，比較圖 4.24 中兩絕對海水面時間序列變化趨勢可知，東北部 2003-2012 海水面呈現先升後降的變化，東南部 2003-2012 海水面呈現穩定上升，而西北部與西南部 2003-2012 衛星測高觀測海水面皆呈現穩定上升情形，但結合海水質量變化與比容海水面變化推估的絕對海水面卻僅呈現些微上升情形，詳細數據如表 4.18 所示。此結果顯示估算臺灣西部海域比容海水面或海水質量變化的觀測資料中可能含有較大誤差。比較由日本海洋研究開發機構(JAMSTEC)與 Ishii 溫、鹽資料所估算比容海水面上升速率成果可知，日本海洋研究開發機構(JAMSTEC)在臺灣西岸溫鹽資料相當稀少(圖 4.25)，而 Ishii 在臺灣西岸溫、鹽資料則較完整(圖 4.25)。雖然 Ishii 資料在臺灣西部較日本海洋研究開發機構(JAMSTEC)完整，但比較衛星測高資料所估算 2003-2012 絕對海水面上升速率成果(圖 4.26)與 Ishii 成果，在臺灣東部成果一致，但臺灣西部則差異較大，尤其是西南部海域，不甚合理。日本海洋研究開發機構(JAMSTEC)為地轉海洋學即時觀測陣列(ARGO)的資料處理中心之一，而地轉海洋學即時觀測陣列(ARGO)資料在臺灣西部非常稀少。同樣的，地轉海洋學即時觀測陣列(ARGO)資料也是 Ishii 資料相當重要的資料來源之一[Ishii 和 Kimoto, 2009]，因此 Ishii 在臺灣西部溫鹽資料可能是由內、外插求得，導致結合海水質量變化與比容海水面變化推估的臺灣西部絕對海水面與衛星測高成果有較大差異。另外，由重力反演和氣候實驗(GRACE)重力衛星資料所估算 2003-2012 海水質量變化速率成果可知 (圖 4.27)，臺灣四周海水質量變化速率一致。

在未考慮氣候因子影響下，衛星測高資料估算 2003-2012 四區域海水面上升速率與潮位站成果一致，海水面上升速率由北向南增加，近十年南部區域海水面上升速率可達到 10 mm/yr 以上(如表 4.8 所示)。由上述可知，臺灣西部溫、鹽觀測量較為稀少，導致比容海水面誤差較

大，因此在此不討論臺灣西部海域海水面上升主要原因。臺灣東北部海域中，2003-2012 比容海水面變化與海洋質量變化所估算速率分別 $-2\sim-5\text{ mm/yr}$ 與 2 mm/yr ；而臺灣東南部海域中，2003-2012 比容海水面變化與海洋質量變化所估算速率分別 $8\sim10\text{ mm/yr}$ 與 2 mm/yr ，表示東南海域的比容海水面影響量遠大於海洋質量變化，而在東北海域則影響量相似。結合海水質量變化與比容海水面變化推估的臺灣東北與東南海域絕對海水面上升速率為 $0\sim-3\text{ mm/yr}$ 與 $11\sim12\text{ mm/yr}$ ，比較衛星測高估算絕對速率為 $0\sim-2\text{ mm/yr}$ 與 $12\sim14\text{ mm/yr}$ 。由上述成果可知，三者資料(衛星測高、溫鹽資料與重力反演和氣候實驗(GRACE)重力衛星)間於臺灣東部區域仍約有 $1\sim2\text{ mm/yr}$ 的不確定量。除了計算資料僅涵蓋約 10 年造成估算成果精度較差外，可能是冰後回彈模型誤差與深海比容海水面未考慮所造成[Boe' *et al.*, 2009]。因重力反演和氣候實驗(GRACE)重力衛星測得的重力場變化訊號中包含冰後回彈(post-glacial rebound)訊號，在重力反演和氣候實驗(GRACE)的重力場資料裡，冰後回彈訊號相對於海水質量變化訊號影響更大，若要利用重力反演和氣候實驗(GRACE)解計算海水質量變化，須將冰後回彈訊號自重力反演和氣候實驗(GRACE)重力場解中移除，若以水厚度表示不同冰後回彈模型之差異，其差值可達 1 mm/yr [Chambers *et al.*, 2010]，表示現今冰後回彈改正模型存有很大的不確定性。另外，本研究使用的溫度與鹽度資料僅包含水深最深至 1500 m 或 2000 m ，因此部分不確定量可能由未考慮深海(水深 $> 1500\text{ m}$ 或 $> 2000\text{ m}$) 比容海水面變化所引起[Boe' *et al.*, 2009]。

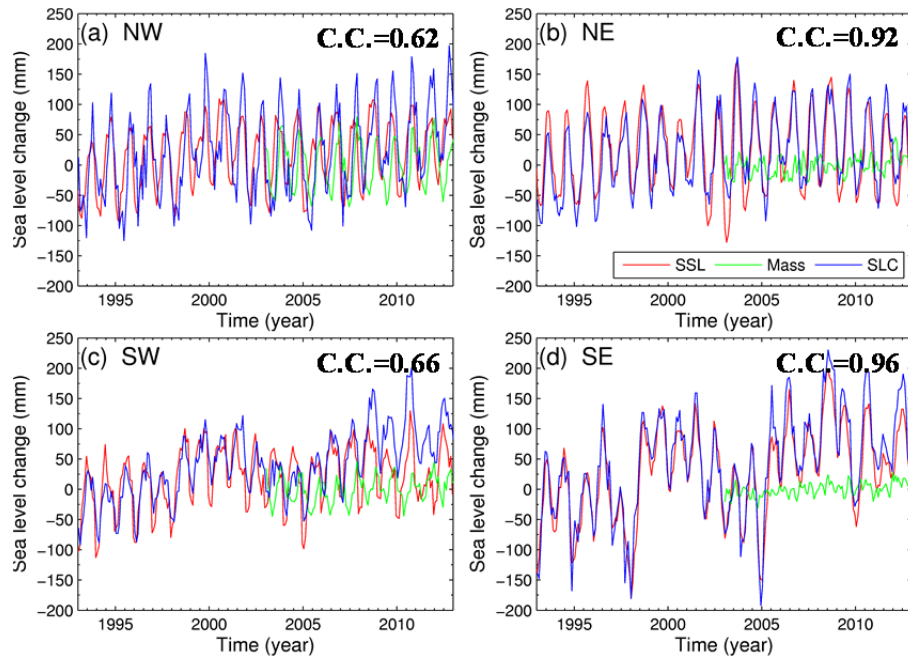


圖 4.23 臺灣周圍比容海水面變化、海水質量變化與絕對海水面變化。SLC 為衛星海洋數據存檔、驗正與解釋(AVISO)衛星測高資料所估算，SSL 為利用 Ishii 溫、鹽資料估算比容海水面變化，Mass 為 GRACE 資料估算海水質量變化。C.C.表示 SLC 與 SSL 兩時間序列之相關係數

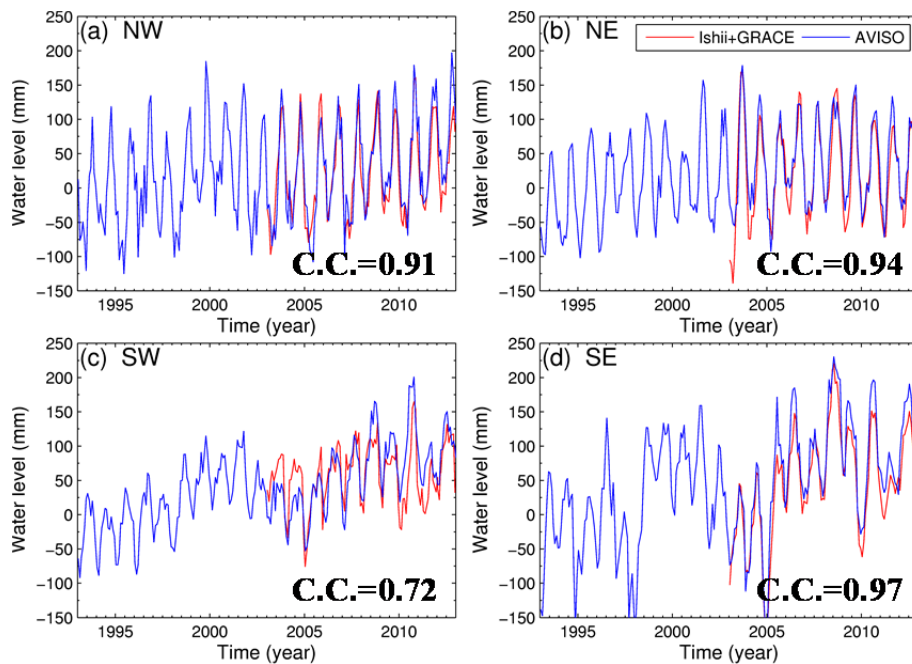


圖 4.24 臺灣周圍絕對海水面變化。SLC 為衛星海洋數據存檔、驗正與解釋(AVISO)衛星測高資料所估算，SSL+Mass 為結合比容海水面變化(Ishii)與海水質量變化(GRACE)所推估之絕對海水面變化。C.C.表示兩時間序列之相關係數

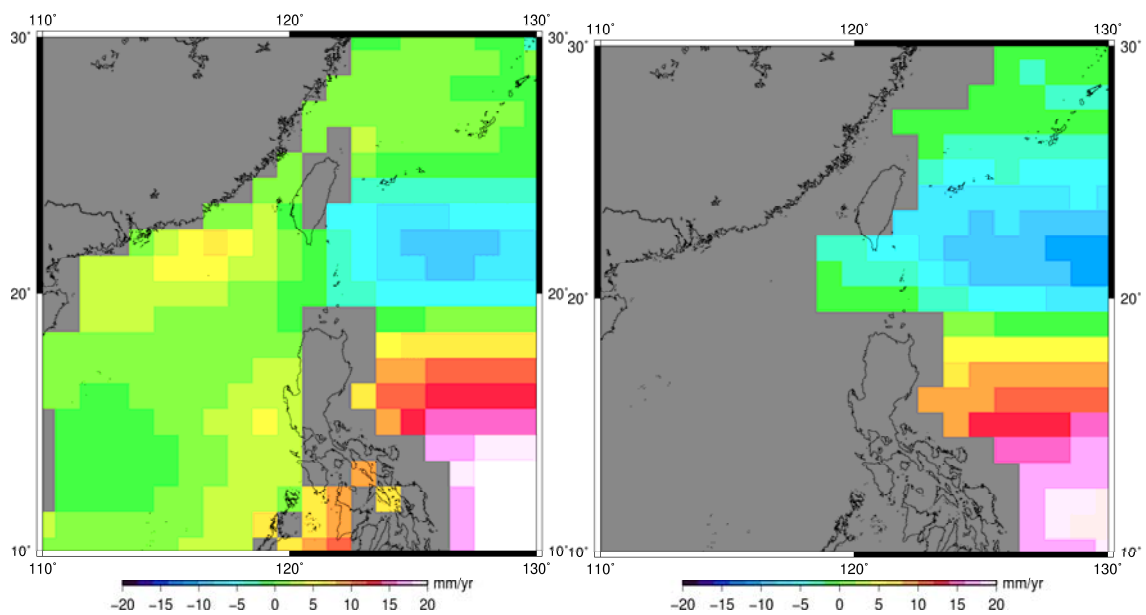


圖 4.25 臺灣周圍比容海水面上升速率(2003-2012)，右圖的溫度與鹽度資料來源為 Ishii，左圖的溫度與鹽度資料來源為日本海洋研究開發機構 (JAMSTEC)

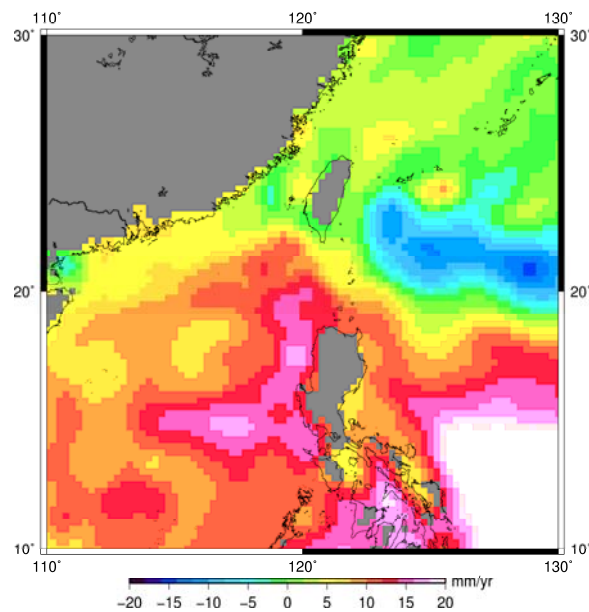


圖 4.26 臺灣周圍絕對海水面上升速率(2003-2012)，資料來源為利用衛星海洋數據存檔、驗正與解釋(AVISO)衛星測高網格資料所估算

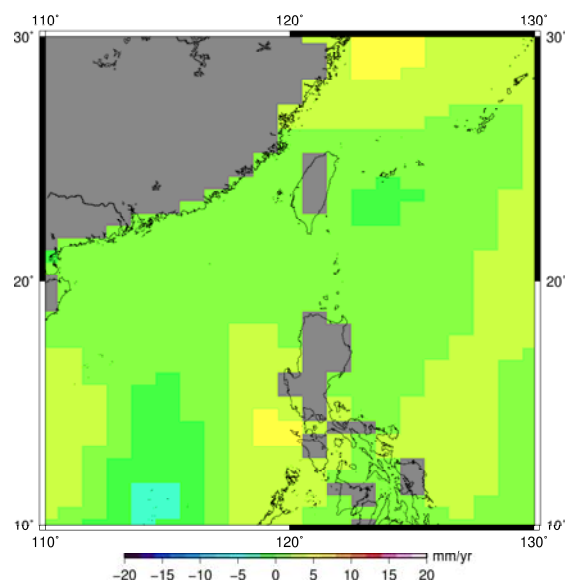


圖 4.27 臺灣周圍海水質量變化速率(2003-2012)

表 4.8 2003-2012 臺灣附近海域比容海水面變化、海水質量變化與絕對海面上升速率。Ishii (JAMSTEC)+GRACE 為結合 Ishii (JAMSTEC) 比容海水面變化(Ishii 資料)與海水質量變化(GRACE)所推估之絕對海水面變化

Data		NE	NW	SE	SW
AVISO	Trend (mm/yr)	-0.49±0.90	7.83±0.95	14.32±1.90	11.24±0.90
	Amplitude (mm)	78	75	64	41
	Phase (°)	242	295	180	226
RADs	Trend (mm/yr)	-1.80±0.92	5.12±0.98	11.95±1.91	10.52±0.90
	Amplitude (mm)	78	81	65	42
	Phase (°)	241	299	180	224
Ishii	Trend (mm/yr)	-2.24±0.83	2.31±0.66	9.94±1.66	1.32±0.92
	Amplitude (mm)	90	65	59	47
	Phase (°)	237	249	188	201
JAMSTEC	Trend (mm/yr)	-4.92±1.07	-3.10±1.81	8.33±1.68	-1.08±1.68
	Amplitude (mm)	76	32	57	69
	Phase (°)	239	250	183	229
GRACE	Trend (mm/yr)	1.85±0.40	0.75±0.45	1.80±0.29	1.47±0.42
	Amplitude (mm)	12	57	2	25
	Phase (°)	352	343	128	329
Ishii+GRACE	Trend (mm/yr)	0.00±0.95	3.36±0.80	12.46±1.78	3.04±1.03
	Amplitude (mm)	86	80	61	36
	Phase (°)	245	291	185	232
JAMSTEC+GRACE	Trend (mm/yr)	-2.88±1.19	-0.17±1.86	10.87±1.80	1.58±1.79
	Amplitude (mm)	72	61	60	67
	Phase (°)	248	314	180	248

4.5.2 臺灣周遭海域海水面上升速率

在 102 年期[郭重言等人，2014]與 103 期[郭重言等人，2015]研究中皆已利用六參數擬合(未考慮氣候因子影響)並估算 1993-2012 整個臺灣周遭海域海水面上升速率。而今年期研究將臺灣海域分成四大區域，並估算此四個區域海水面上升速率，分區方式如圖 4.22 所示。以六參數擬合(式(3.3))此四區域衛星海洋數據存檔、驗正與解釋(AVISO)測高資料，估算出的絕對海水面上升速率會受到氣候因子影響，其結果與圖 4.9 一致，1993-2012 臺灣周圍海水面上升速率由北(約 3~4 mm/yr)往南(6~7 mm/yr)加速 (如表 4.9 所示)。然而在考慮氣候因子(式(4.1))影響下，以降低估算的海水面速率中氣候因子影響，成果如表 4.9 所示。由表可知，此四個區域在降低氣候影響後所估算的 1993-2012 海水面速率非常一致，整體變化速率約為 1~3 mm/yr。另外，我們亦利用多變量線性方程式擬合 2003-2013 海水面變化速率，其成果與六參數擬合(未考慮氣候因子影響)成果差異不大。後續為了完成工作項目中臺灣周圍未來海水面預估，擬合海水面變化支線性方程式中亦加入加速度參數，其成果如表 4.9 與表 4.10 所示，後續將應用表中部分參數於未來海水面變化預估中。

表 4.9 臺灣周遭海域 1993-2012 海水面上升速率與海水面加速度。海水面資料為衛星海洋數據存檔、驗正與解釋(AVISO)測高資料

Region	Fitting6 Trend (mm/yr)	Fitting6+Acceleration Trend (mm/yr)	Accel. (mm/yr ²)	Multivariable Trend (mm/yr)	Multivariable+Acceleration Trend (mm/yr)	Accel. (mm/yr ²)
NE	3.10±0.31	9.79±1.17	-0.34±0.06	3.37±0.41	9.86±0.93	-0.34±0.04
NW	3.37±0.40	1.42±1.58	0.10±0.08	0.77±0.41	-0.51±1.05	0.07±0.05
SE	7.02±0.65	7.51±2.61	-0.02±0.13	1.90±0.70	3.13±1.80	-0.06±0.09
SW	6.12±0.34	6.05±1.34	0.00±0.07	2.50±0.31	2.90±0.80	-0.02±0.04
All region	5.23±0.31	7.02±1.25	-0.09±0.06	2.43±0.32	4.96±0.80	-0.13±0.04

表 4.10 臺灣周遭海域 2003-2012 海水面上升速率與海水面加速度。海水面資料為衛星海洋數據存檔、驗正與解釋(AVISO)測高資料

Region	Fitting6 Trend (mm/yr)	Fitting6+Acceleration Trend (mm/yr)	Accel. (mm/yr ²)	Multivariable Trend (mm/yr)	Multivariable+Acceleration Trend (mm/yr)	Accel. (mm/yr ²)
NE	-0.49±0.90	7.76±3.53	-0.83±0.34	-1.16±0.59	19.46±4.74	-2.12±0.51
NW	7.83±0.95	2.87±3.76	0.50±0.36	7.24±0.53	-3.21±2.86	1.09±0.28
SE	14.32±1.90	50.00±6.76	-3.57±0.65	15.23±1.26	-10.68±11.13	2.71±1.14
SW	11.24±0.90	20.77±3.48	-0.95±0.34	10.48±0.59	-6.40±3.56	1.68±0.35

4.6 未來海水面預估

本研究將利用海水面資料進行海水面預估，首先進行海水面資料擬合，以求得所需之參數(如偏差 a 、海水面上升速率 β_1 、海水面加速度 β_4)，再利用線性方程式(二參數)並給定預計推估之年份，可得到未來海水面預估值 y ，預估公式如下所示，

$$y = a + \beta_1 t \dots\dots\dots(4.6)$$

其中偏差 a 可由擬合海水面資料求得。若考慮預估未來海水面時加入加速度因子，則應在式(4.6)中加入海水面加速度 β_4 參數 [Jevrejeva *et al.*, 2008]，預估公式如下所示，

$$y = a + \beta_1 t + \beta_4 t^2 \dots\dots\dots(4.7)$$

本研究將利用四種估算出的參數來進行未來海水面預估。第一種為未考慮海水面資料中氣候因子影響，利用六參數(式(3.3))所示擬合估算海面上升速率 β_1 並將之帶回式(4.6)進行預估。第二種為未考慮海水面資料中氣候因子影響，但在預估未來海水面時考慮海水面加速度因子，因此在式(3.3)中加入海水面加速度上升 β_4 之參數，擬合公式如下所示，

$$TG(t) = a + \beta_1 t + \beta_4 t^2 + c \sin(2\pi t) + d \cos(2\pi t) + e \sin(4\pi t) + f \cos(4\pi t) \dots\dots(4.8)$$

求解未知參數後，將求得參數代回式(4.7)，並給定預推估之年份，求得海面上升之預估值。第三種為利用未受氣候因子影響之海面上升速率 β_1 預估未來海水面變化，利用式(4.1)進行海水面資料擬合，再以估算出參數(海面上升速率 β_1)帶回式(4.6)進行海水面預估。第四種為利用未受氣候因子影響之海面上升速率 β_1 以及海水面加速度 β_4 預估未來海水面變化，在式(4.1)中加入海水面加速度 β_4 之參數(如式(4.2)所示)，將求解後的參數代回式(4.7)中進行未來海水面預估。

以下將利用表 4.9 中衛星海洋數據存檔、驗正與解釋(AVISO)衛星測高資料估算出的參數(海面上升速率 β_1 與海水面加速度 β_4)去預估臺灣四周各區域未來海水面變化。然而表 4.9 各區域中加速度正負參雜，

而對應之海水面速率多數為正，另外本研究亦利用衛星海洋數據存檔、驗正與解釋(AVISO)衛星測高 $1^\circ \times 1^\circ$ 網格資料估算出臺灣周圍海面上升速度 β_1 與加速度 β_4 ，其中各個網格海水面速率大多顯示為上升情形，而加速度則表現出正負參雜情形，加速度結果之統計如圖 4.28 所示。由圖可知，未考慮或是考慮海水面資料中氣候因子的影響，臺灣周圍海水面變化加速度同樣是正負參雜，表示臺灣四周海水面未來短期將呈現持續上升情形，而 10 年或甚至 20 年後的海水面變化情形則較不明確，可能上升、下降或持平，因此需要往後更長時間資料或加入更多模型與資料去評估未來海水面情形。為了避免成果混淆，以下僅利用表 4.9 中海水面上升速率之參數，以線性方式(式(4.6))預估臺灣四周各區域未來海水面變化。預估時間由 2012 年起至 2050 年止，起算點高程值設定為 2012 年於該海域內的測高海水面估計值(測高海水面估計值為利用六參數擬合法(未考慮氣候因子)擬合該海域 1993-2012 測高資料求得偏差 a 與海水面上升速率 β_1 ，並帶入式(4.7)估算出 2012 年海水面變化值)，預估未來海水面成果如圖 4.29 與圖 4.30 所示。圖 4.29 為利用整個臺灣周圍衛星測高資料($10^\circ \text{N} \sim 30^\circ \text{N}$ 與 $110^\circ \text{E} \sim 130^\circ \text{E}$)所估算之參數來預估臺灣周圍未來海水面變化(預估時間至 2050 年)。由圖可知，在未考慮氣候因子情形下，2050 年臺灣周圍海水面將上升約 200 mm (相對於 2012 年海水面估計值)，在考慮氣候因子情形下，臺灣周圍海水面同樣呈現上升情形，在 2050 年海水面僅上升約 90 mm (相對於 2012 年海水面估計值)，顯示長週期之氣候因子對區域之海水面變化速率計算之影響不可忽視。

圖 4.30 為預估臺灣周圍各區域之未來海水面變化。由圖可知，在不考慮海水面資料中氣候因子影響下，各區域未來海水面皆呈現上升情形，其中北部區域在 2050 年海水面將上升約 130 mm(相對於 2012 年海水面估計值)，而南部區域在 2050 年海水面將上升約 250 mm(相對於 2012 年海水面估計值)。而考慮海水面資料中氣候因子影響下，東北區域在 2050 年海水面將上升約 130 mm(相對於 2012 年海水面估計值)，而其他區域在 2050 年海水面上升皆在 100 mm 以下(相對於 2012 年海水面估計值)。由上述成果可知，除了東北部區域外，其他三區域海水

面受到氣候因子影響較大，此結果與利用多變量線性擬合法和合成平均差異推算法一致，臺灣海峽、南海及菲律賓之東太平洋區皆受氣候因子(多重聖嬰-南方振盪指數(MEI)與太平洋年代際振盪(PDO))之影響。

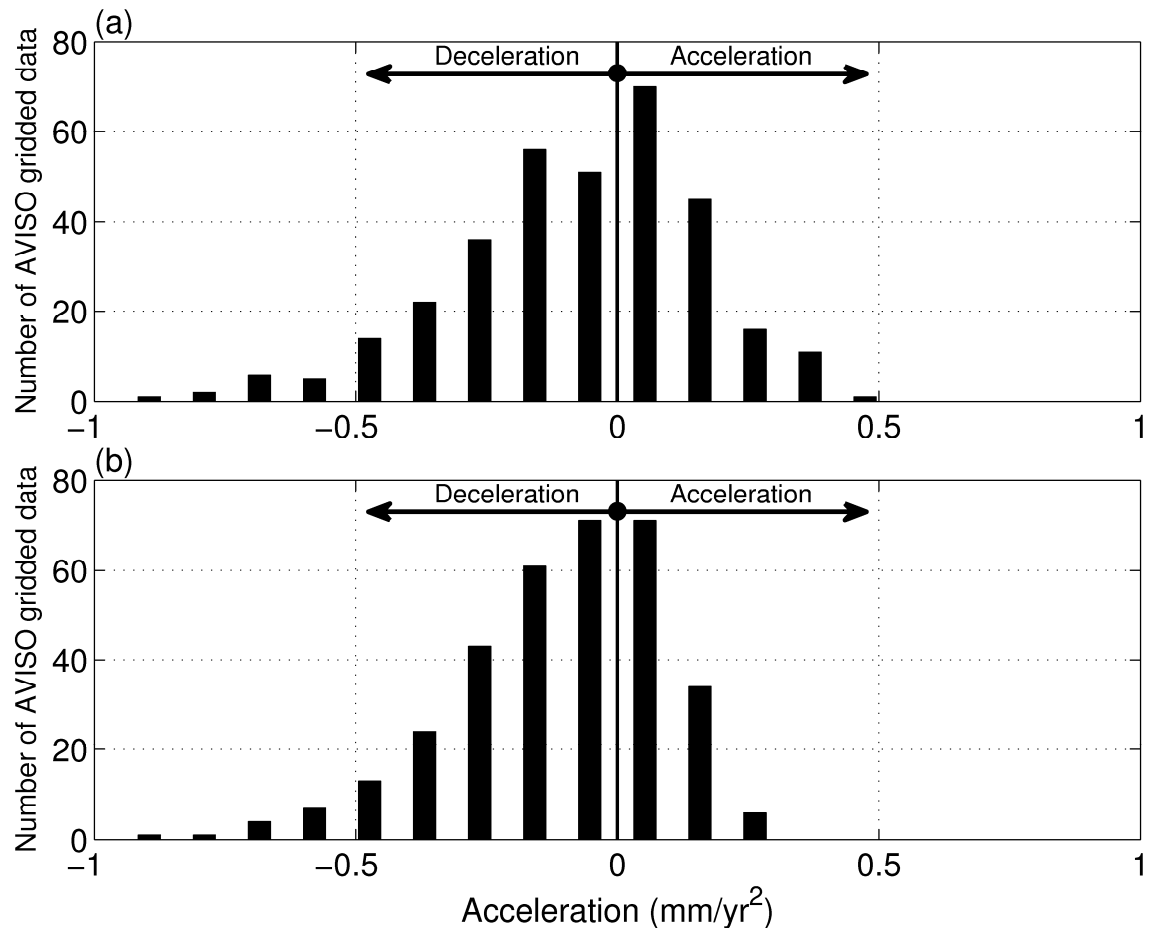


圖 4.28 統計經 1993-2012 海洋數據存檔、驗正與解釋(AVISO)衛星測高 $1' \times 1'$ 網格資料所估算臺灣周圍海水面之加/減速變化(β_4)。(a) 未考慮海水面資料中氣候因子影響，(b) 考慮海水面資料中氣候因子影響

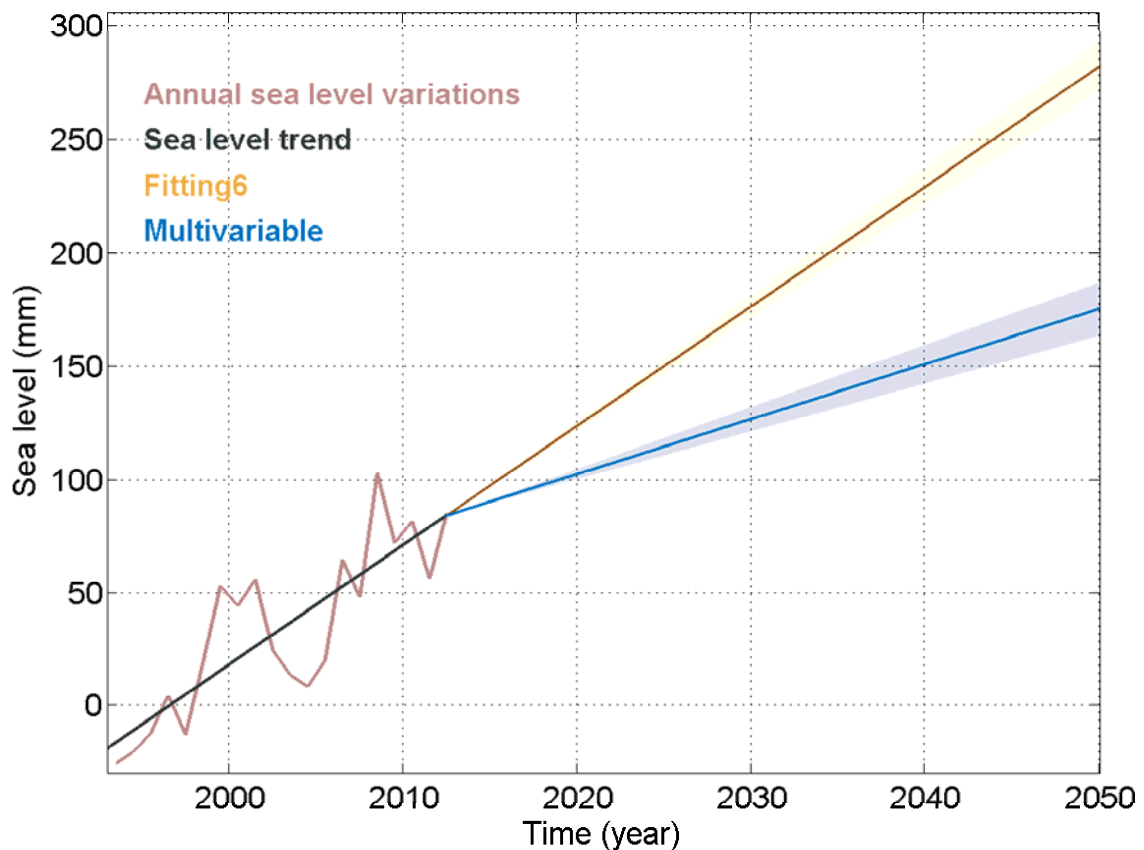


圖 4.29 以線性方程式預估臺灣周圍未來海水面變化(10°N~30°N 與 110°E~130°E)。Annual sea level variations 為整個臺灣周圍測高資料逐年平均之海水面變化，Sea level trend 為利用整個臺灣周圍 1993-2012 測高資料估算出偏差 a 與海面上升速率 β_1 (未考慮氣候因子)，並將 a 與 β_1 代入線性方程式中，估計出 1993-2012 海水面變化值。Fitting6 與 Multivariable 為修正海水面資料中氣候因子影響前、後預估之臺灣周圍未來海水面變化。線條顏色帶為 68% 信心區間

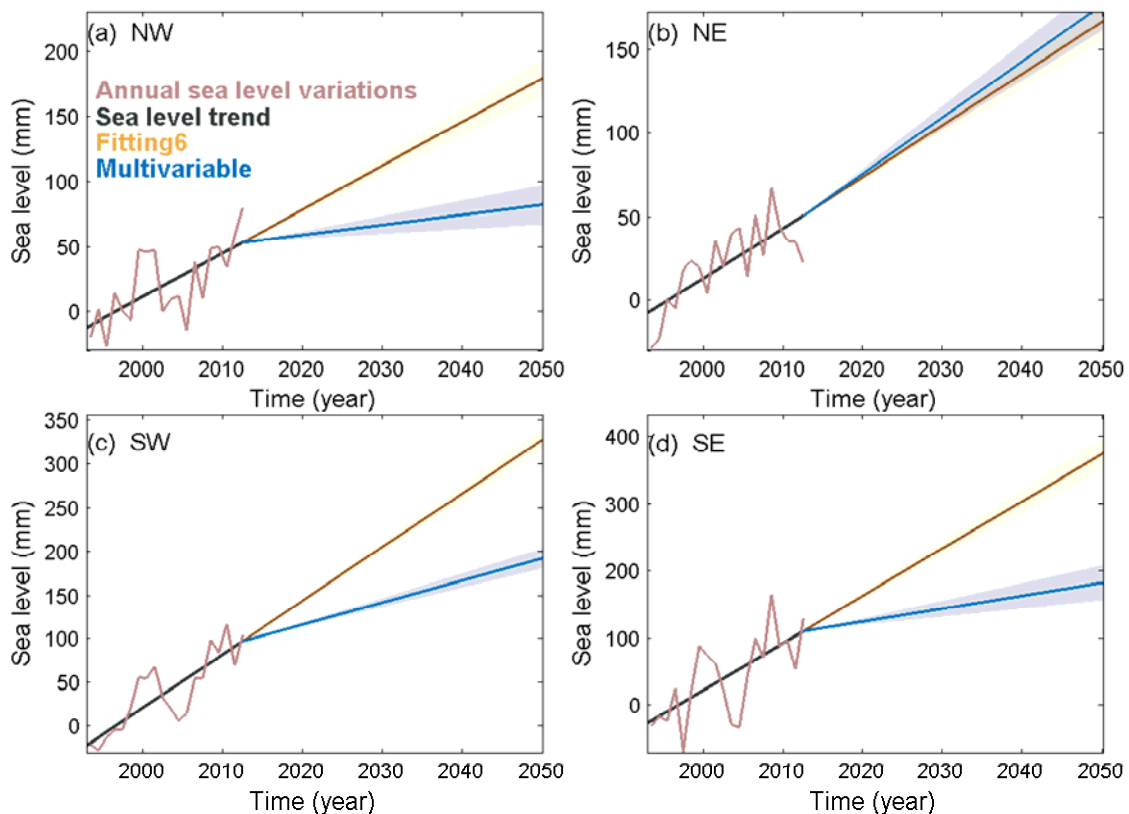


圖 4.30 以線性方程式預估臺灣周圍各區域未來海水面變化。Annual sea level variations 為各海域周圍測高資料逐年平均之海水面變化，Sea level trend 為利用各區域臺灣周圍 1993-2012 測高資料估算出偏差 a 與海面上升速率 β_1 (未考慮氣候因子)，並將 a 與 β_1 代入線性方程式中，估計出 1993-2012 海水面變化值。Fitting6 與 Multivariable 為修正海水面資料中氣候因子影響前、後預估之臺灣周圍未來海水面變化。線條顏色帶為 68% 信心區間

4.7 第四章完成之工作項目

第四章完成衛星測高近 10 年與近 20 年海水面變化速率之計算以及臺灣未來海水面預估，並且結合溫、鹽資料、重力反演和氣候實驗 (GRACE) 重力衛星資料以及衛星測高資料評估臺灣周圍海水面主要上升原因。本章節已完成”應用驗潮站和衛星測高資料，探討影響臺灣海域長、短期平均海面上升之顯著海氣候因子”、”評估聖嬰 (El Niño) 及反聖嬰 (La Niña) 氣候現象對臺灣海域平均海面上升速率變動趨勢

之影響”、“評估太平洋年代際低頻震盪(PDO)對臺灣海域平均海水面上升速率變動趨勢之影響”以及“從全球暖化所造成海洋質、能平衡(budget)之觀點，評估氣候變遷在臺灣海域造成 MSLR 之本質變動率，進而預估未來之變動趨勢”等四項工作項目。由上述成果可知，本研究目前成果認為聖嬰-南方振盪(ENSO)現象主要影響的海水面範圍為緯度 $\pm 20^\circ$ 以內，而太平洋年代際振盪(PDO)現象影響整個太平洋。在未考慮氣候因子情形下，臺灣周圍絕對海水面上升速率由北(約 2~3 mm/yr)往南(8~12 mm/yr)逐漸變大，而考慮氣候因子影響下所估算絕對海水面上升速率則較一致。本研究亦利用衛星測高、溫鹽資料與重力衛星資料評估臺灣四周海水面上升原因。對於西部海域而言，由於溫鹽觀測資料較為稀少，導致計算之比容海水面誤差較大，而東南海域的比容海水面影響量遠大於海洋質量變化，而在東北海域影響量相似。在近十年的東北海域與東南海域海水面中，結合比容海水面變化與海洋質量變化所估算絕對海水面上升速率為 0~3 mm/yr 與 11~12 mm/yr，而衛星測高估算之絕對速率為 0~2 mm/yr 與 12~14 mm/yr，顯示三者資料(衛星測高、溫鹽資料與重力反演和氣候實驗(GRACE)重力衛星)間在臺灣東部區域仍有約 1~2 mm/yr 的不確定量，對於此部分還需日後更進一步研究。利用衛星海洋數據存檔、驗正與解釋(AVISO)衛星測高資料所估算出參數(海水面上升速率)來預估整個臺灣四周未來海水面變化，在不考慮海水面資料中氣候因子影響下，2050 年臺灣周圍海水面將上升約 200 mm (相對於 2012 年海水面估計值)，而在考慮氣候因子情形下，臺灣周圍海水面同樣呈現上升情形，但 2050 年海水面僅上升約 90 mm (相對於 2012 年海水面估計值)。本研究亦預估臺灣周圍各區域之未來海水面變化，在不考慮海水面資料中氣候因子影響下，各區域未來海水面皆呈現上升情形，其中北部與南部區域在 2050 年海水面將上升約 130 mm 與 250 mm(相對於 2012 年海水面估計值)。而考慮海水面資料中氣候因子影響下，東北區域在 2050 年海水面將上升約 130 mm(相對於 2012 年海水面估計值)，而其他區域在 2050 年海水面上升值皆在 100 mm 左右(相對於 2012 年海水面估計值)。

第五章 結論與建議

近年來全球海平面上升為全球氣候暖化衍伸出的重要問題之一。全球各區域海平面上升速率並非一致，而臺灣四周海域之海水面呈現上升現象，且上升速率較全球平均大，因此，充分應用國際與本土監測資訊，據以詳實預估臺灣周遭海域海平面之升降變化，明確為系屬海島國家因應氣候變遷衝擊之重要議題。

一般而言，潮位站與衛星測高為研究海平面變化的兩種主要觀測量，但資料觀測時間較短(~20 年)，所估算之海平面變化速率會受到海洋低頻震盪影響。為此，本研究分別利用經驗模態分解法與多變量擬合法，首先進行臺灣周遭海平面資料與氣候因子之相關性分析；接著，整合重力衛星資料和海洋溫、鹽度資料，探討臺灣周遭海域海水質量和溫鹽資料計算之比容海水面對於絕對海平面變化之貢獻量；最後，預估海平面未來(2050 年)之升降變動趨勢。相關研究成果，綜合可歸納結論與建議如后。

5.1 結論

1. 利用改正前、後潮位站資料估算之海水面上升速率有顯著差異，其中海潮與逆氣壓改正影響量約為 $0\sim 1\text{ mm/yr}$ ，偏移量改正影響量之平均值為 6 mm/yr ，潮位站地表垂直變動改正影響量之平均值約 5 mm/yr ，顯示海潮效應與大氣壓力變化對海水面上升速率估計之影響較小，而基準偏移與地表垂直變動因子之影響較為顯著，遠大於全球平均海水面之上升速率 $3.2\pm 0.4\text{ mm/yr}$ (涵蓋時間為 1993-2009 年) [Church and White, 2011]。本研究推論若使用未經改正之原始潮位站資料來計算臺灣周圍海域海水面上升速率，其精度將受到上述因子影響而產生不同程度的誤差，其中基準偏移與測站地表垂直變動影響為必須改正之項目。
2. 本計畫結合近二十年衛星測高與潮位站資料估算測站地表面垂直變動速率。成果顯示臺灣本島地表大多呈現下降情形，其中臺灣西

部的塭港潮位站下沉量最大，每年約下陷 14 mm; 菲律賓、香港與日本等潮位站周圍地表皆無明顯垂直變動情形。

3. 本研究分別利用經驗模態分解(EEMD)法與多變量擬合法[Zhang and Church, 2012]分析海水位資料與氣候因子之相關性。兩方法之成果大致吻合，亦與 Zhang and Church [2012]成果一致。由成果可知，聖嬰-南方振盪(ENSO)現象主要影響的海水面範圍為緯度 $\pm 20^\circ$ 以內，而太平洋年代際振盪(PDO)現象則影響整個臺灣周圍海域。
4. 利用總體經驗模態分解(EEMD)法萃取出潮位站資料中海洋低頻訊號，並由衛星測高資料中移除萃取之低頻訊號來估算未海水面上升速率。移除低頻訊號前、後衛星測高資料所估算之各區域絕對海水面上升速率分別為 1~8 mm/yr 和 1~7 mm/yr，顯示此方法並不能有效降低低頻訊號之影響，需日後更進一步研究其影響。
5. 利用多變量擬合衛星測高資料可估算出氣候因子對海水面變化之貢獻量和減低氣候因子造成之海水面上升速率影響。在未考慮氣候因子時，利用六參數擬合 1993-2012 衛星測高資料所估算出的絕對海水面上升速率由北(約 2~3 mm/yr)往南(8~12 mm/yr)逐漸增快；而考慮氣候因子影響，以多變量擬合 1993-2012 衛星測高資料所估算之絕對海水面上升速率在各海域則較為一致(-2~4 mm/yr)。比較上述兩結果，位於最南部的菲律賓(靠近赤道)海水面上升速率減少最多，由 7~8 mm/yr 降至 3~4 mm/yr。對於整個臺灣周圍海域海水面而言，修正氣候因子前、後(前:未考慮(六參數擬合)、後:考慮氣候因子(多變量擬合))之衛星海洋數據存檔、驗正與解釋(AVISO)測高資料估算 1993-2012 絕對海水面上升速率分別為 5.23 ± 0.31 mm/yr 及 2.43 ± 0.32 mm/yr，顯示氣候因子造成臺灣附近海水面上升速率約 2.0 mm/yr。
6. 本研究利用合成平均差異推算(CMD)法推算氣候因子及人類活動(排放溫室氣體)對海水位之貢獻程度。由成果得知，推算之海水位變化與氣候和人為影響顯著相關，且太平洋年代際振盪(PDO)對海水位變化的影響較聖嬰-南方振盪(ENSO)影響大，顯示長週期的氣

候因子將可解釋並修正區域海水面上升速率之差異。若利用石化燃料排放量來評估人為影響太平洋海域之海水面上升率，海水面上升速率將下修至 $\sim 2 \text{ mm/yr}$ 。

7. 利用溫度與鹽度資料、重力反演和氣候實驗(GRACE)重力衛星資料與衛星測高資料估算 2003-2012 臺灣周圍海域比容海水面變化、海水質量變化與絕對海水面變化。由於臺灣西部溫、鹽觀測量較為稀少，導致計算之比容海水面誤差較大，故本研究不討論西部海水質量與比容海水面變化。2003-2012 臺灣東北部海域之比容海水面變化與海洋質量變化速率分別為 $-2\sim-5 \text{ mm/yr}$ 與 2 mm/yr ；而臺灣東南部海域之比容海水面變化與海洋質量變化速率分別為 $8\sim 10 \text{ mm/yr}$ 與 2 mm/yr ，表示東南海域之比容海水面影響量遠大於海洋質量變化，而在東北海域兩影響量則相近。結合海水質量變化與比容海水面變化推估臺灣東北與東南海域絕對海水面上升速率分別為 $0\sim-3 \text{ mm/yr}$ 與 $11\sim 12 \text{ mm/yr}$ ，而衛星測高估算之東北與東南海域絕對速率為 $0\sim-2 \text{ mm/yr}$ 與 $12\sim 14 \text{ mm/yr}$ ，兩絕對海水面速率間仍約有 $1\sim 2 \text{ mm/yr}$ 的不確定量，對此還需更進一步的研究。
8. 利用衛星海洋數據存檔、驗正與解釋(AVISO)衛星測高資料估算出整個臺灣周圍海水面上升速率參數，並預估整個臺灣四周未來海水面變化。利用修正氣候因子前、後估算速率所推算之 2050 年臺灣周圍未來海水面分別上升約 200 mm 及約 90 mm (相對於 2012 年海水面估計值)。

5.2 建議

1. 本計畫利用衛星測高與潮位站資料評估海洋低頻震盪對臺灣海域海水面變化速率之影響，並且預估臺灣周圍未來海水面之變動趨勢。由成果可知，臺灣周圍海水面變化速率大多為正趨勢，而加速度則正負相雜，表示未來短期海水面呈現持續上升情形，但因僅利用 20 年衛星數據來推算加速度，使得利用估計加速度來預估之 2050 年海水面變化的精度較不明確。因此展望未來工作將繼續探

討臺灣周遭之海水面上升加速度現象，對於未來海水面上升速率之分析將更為精確，進而評估未來海水面變動對臺灣海岸區域之可能衝擊與影響。

2. 全球衛星定位系統(GPS)常用於長時間持續監測地表變動之觀測技術，但目前臺灣周圍潮位站大多未架設全球衛星定位系統(GPS)連續觀測站，為了能長期監測潮位站周圍地表垂直變動情形以及進行潮位站資料地表垂直變動改正，建議潮位站應同時增設全球衛星定位系統(GPS)接收儀。

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. 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.
4. Boening, C., J. K. Willis, F. W. Landerer, R. S. Nerem, and J. Fasullo (2012), The 2011 La Niña: So strong, the oceans fell. *Geophysical Research Letters*, 39, doi: 10.1029/2012gl053055.
5. Braitenberg, C., P. Mariani, L. Tunini, B. Grillo, and I. Nagy (2011), Vertical crustal motions from differential tide gauge observations and satellite altimetry in southern Italy, *Journal of Geodynamics*, 51(4), 233-244, doi: 10.1016/j.jog.2010.09.003.
6. Calafat, F. M., and D. P. Chambers (2013), Quantifying recent acceleration in sea level unrelated to internal climate variability, *Geophysical Research Letters*, 40(14), 3661-3666, doi: 10.1002/grl.50731.
7. Camp, C. D., and K.-K. Tung (2007), Surface warming by the solar cycle as revealed by the composite mean difference projection, *Geophysical Research Letters*, 34(14), doi: 10.1029/2007gl030207.
8. Cazenave, A., and R. S. Nerem (2004), Present-day sea level change: Observations and causes, *Reviews of Geophysics*, 42(3).
9. 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.

10. Cazenave, A., O. Henry, S. Munier, T. Delcroix, A. L. Gordon, B. Meyssignac, W. Llovel, H. Palanisamy, and M. Becker (2012), Estimating ENSO Influence on the Global Mean Sea Level, 1993-2010, *Marine Geodesy*, 35, 82-97, doi: 10.1080/01490419.2012.718209.
11. Cazenave, A., H.-B. Dieng, B. Meyssignac, K. von Schuckmann, B. Decharme, and E. Berthier (2014), The rate of sea-level rise, *Nature Clim. Change*, 4(5), 358-361, doi: 10.1038/nclimate2159.
12. Chambers, D.P., J. Wahr, M.E. Tamisiea, and R.S. Nerem (2010), Ocean mass from GRACE and Glacial Isostatic Adjustment, *Journal of Geophysical Research*, 115, doi: 10.1029/2010jb007530.
13. 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.
14. Chelton, D.B., and D.B. Enfield (1986), Ocean signals in tide gauge records, *Journal of Geophysical Research*, 91, 9081-9086.
15. Chelton, D.B., J.C. Ries, B.J. Haines, L.-L. Fu, and P.S. Callahan (2001), Satellite altimetry. In: L.-L. Fu and A. Cazenave (editors), *Satellite Altimetry and Earth Sciences: A Handbook of Techniques and Applications*, Elsevier, New York, 1-132.
16. Chen, J. L., C. R. Wilson, R. J. Eanes, and R. S. Nerem (1999), Geophysical interpretation of observed geocenter variations, *Journal of Geophysical Research*, 104, 2683- 2690.
17. 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, *Geophysical Research Letters*, 32, L14405, doi: 10.1029/2005GL022964.
18. 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.
19. 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.
20. Cheng, Y., Q. Xu, and O. B. Andersen (2014), Sea-level trend in the

- South China Sea observed from 20 years of along-track satellite altimetric data, *International Journal of Remote Sensing*, 35, 4329-4339.
21. 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.
 22. Chovitz, B.H. (1983), Geodetic results from Seasat, *Marine Geodesy* 7, 315-330.
 23. 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.
 24. Church, J., and N.J. White (2006), A 20th century acceleration in global sea-level rise, *Geophysical Research Letters*, 33(1), doi: 10.1029/2005gl024826
 25. Church, J., and N.J. White (2011), Sea-level rise from the late 19th to the Early 21st Century, *Surveys in Geophysics*, doi: 10.1007/s10712-011-9119-1.
 26. Coughlin, K.T., and K.K. Tung (2004), 11-Year Solar Cycle in the Stratosphere Extracted by The Empirical Mode Decomposition Method, *Advances in Space Research*, 34, 323–329.
 27. 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, *Journal of Geophysical Research*, 107, 2374, doi: 10.1029/2002JB001820.
 28. 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.
 29. 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, *Journal of Geodesy*, 83, 1095-1106, doi:10.1007/s00190-009-0327-0.

30. 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.
31. Fasullo, J. T., C. Boening, F. W. Landerer, and R. S. Nerem (2013), Australia's unique influence on global sea level in 2010-2011, *Geophysical Research Letters*, 40(16), 4368-4373, doi: 10.1002/grl.50834.
32. Feng, W. and M. Zhong (2015), Global sea level variations from altimetry, GRACE and Argo data over 2005–2014, *Geodesy and Geodynamics*, doi: 10.1016/j.geog.2015.07.001.
33. Gill, A. E. (1982), *Atmosphere-Ocean Dynamics*, Academic Press, New York.
34. 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, *Geophysical Journal International*, 181, 290-302, doi: 10.1111/j.1365-246X.2010.04534.x.
35. Haigh, I. D., T. Wahl, E. J. Rohling, R. M. Price, C. B. Pattiaratchi, F. M. Calafat, and S. Dangendorf (2014), Timescales for detecting a significant acceleration in sea level rise, *Nature Communications*, 5, doi: 10.1038/ncomms4635.
36. Hamlington, B.D., R.R. Leben, M.W. Strassburg, R.S. Nerem, and K.Y. Kim (2013), Contribution of the Pacific Decadal Oscillation to global mean sea level trends, *Geophysical Research Letters*, 40, 5171-5175, doi: 10.1002/grl.50950.
37. Hastie, T., and R. Tibshirani (1990), Exploring the nature of covariate effects in the proportional hazards model, *Biometrics*, 46, 1005–1016.
38. Heiskanen, W. A., and H. Moritz (1967), *Physical Geodesy*, W. H. Freeman, New York.
39. Hofmann-Wellenhof B., and H. Moritz (2006), *Physical geodesy*, Springer Wien New York, 3-14.
40. Holgate, S. J., A. Matthews, P. L. Woodworth, L. J. Rickards, M. E. Tamisiea, E. Bradshaw, P. R. Foden, K. M. Gordon, S. Jevrejeva, and J. Pugh (2013), New Data Systems and Products at the Permanent Service for Mean Sea Level. *Journal of Coastal Research*, 29(3),

493-504, doi: 10.2112/JCOASTRES-D-12-00175.1.

41. 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.
42. Huang, N. E., Z. Shen, S. R. Long, M. C. Wu, H. H. Shih, Q. Zheng, N. C. Yen, C. C. Tung, and H. H. Liu (1998), The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis, *Proceedings of the Royal Society of London*, 454, 903-995.
43. 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.
44. 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.
45. 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.
46. Jevrejeva, S., J. Moore, A. Grinsted, and P. Woodworth (2008), Recent global sea level acceleration started over 200 years ago?, *Geophysical Research Letters*, 35, doi:10.1029/2008GL033611.
47. 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.
48. 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, *Geophysical Research Letters*, 31(1), 4-7, doi: 10.1029/2003GL0191064.
49. Kuo C. Y., C.K. Shum, A. Braun, K.C. Cheng, and Y. Yi (2008),

- Vertical Motion determined using Satellite Altimetry and tide Gauges, *Terrestrial Atmospheric and Oceanic Sciences*, 19(1-2), 21-35, doi: 10.3319/TAO.2008.19.1-2.21(SA)1.21.
50. Kusche, J. (2007), Approximate decorrelation and non-isotropic smoothing of time-variable GRACE-type gravity field models, *Journal of Geodesy*, 81, 733-749. doi: 10. 1007/s00190- 007- 0143- 3.
 51. Landerer, F.W., J.H. Jungclaus, and J. Marotzke (2008), El Niño–Southern Oscillation signals in sea level, surface mass redistribution, and degree-two geoid coefficients, *Journal of Geophysical Research*, 113, C08014, doi: 10.1029/2008JC004767.
 52. Leatherman, P. S., K. Zhanng, and B.C. Douglas (2000), Sea level rise drives coastal erosion, *EOS Transactions, Agu*, 81, 55-57.
 53. Lee M.-A., Y.-C. Kuo, J.-W. Chan, Y.-K. Chen, and S.-T. Teng (2012), Long-Term (1982 - 2012) Summertime Sea Surface Temperature Variability in the Taiwan Strait, *Terrestrial, Atmospheric and Oceanic Sciences*, 26(2), 183-192, doi: 10.3319/TAO.2014.12.02.03(EOSI).
 54. 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.
 55. Mantua, N. J. and S. R. Hare (2002), The Pacific Decadal Oscillation, *Journal of Oceanography*, 58, 35–44.
 56. McGregor, H. V., M. J. Fischer, M. K. Gagan, D. Fink, S. J. Phipps, H. Wong, and C. D. Woodroffe (2013), A weak El Niño/Southern Oscillation with delayed seasonal growth around 4,300 years ago, *Nature Geoscience*, 6, 949–953, doi: 10.1038/ngeo1936.
 57. Merrifield, M. A., S. T. Merrifield, and G. T. Mitchum (2009), An Anomalous Recent Acceleration of Global Sea Level Rise, *Journal of Climate*, 22(21), 5772-5781, doi: 10.1175/2009jcli2985.1.
 58. Merrifield, M. A. (2011), A Shift in Western Tropical Pacific Sea Level Trends during the 1990s, *Journal of Climate*, 24(15), 4126-4138, doi: 10.1175/2011jcli3932.1.
 59. Merrifield, M. A., P. R. Thompson, and M. Lander (2012), Multidecadal sea level anomalies and trends in the western tropical Pacific, *Geophysical Research Letters*, 39, doi: 10.1029/2012gl052032.

60. 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.
61. Nerem, R.S., D.P. Chambers, E.W. Leuliette, G.T. Mitchum, and B.S. Giese (1999), Variations in global mean sea level associated with the 1997–1998 ENSO event: Implications for measuring long term sea level change, *Geophysical Research Letters*, 26(19), 3005-3008, doi: 10.1029/1999GL002311.
62. 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.
63. Newman, M., G.P. Compo, and M.A. Alexander (2003), ENSO-forced variability of the Pacific decadal oscillation, *Journal of Climate*, 16, 3853–3857.
64. Nicholls, R.J., and A. Cazenave (2010), Sea-Level Rise and Its Impact on Coastal Zones, *Science*, 328, 1517-1520.
65. Pattullo, J., W. Munk, R. Revelle, and E. Strong (1955), The seasonal oscillation in sea level, *Journal of Marine Research*, 88-156.
66. Peng, D., H. Palanisamy, A. Cazenave, B. Meyssignac (2013), Interannual Sea Level Variations in the South China Sea Over 1950–2009, *Marine Geodesy*, 36, 164-182, doi: 10.1080/01490419.2013.771595.
67. Permanent Service for Mean Sea Level (PSMSL) (2014), Tide Gauge Data, Retrieved 03 Nov 2014 from <http://www.psmsl.org/data/obtaining/>.
68. Ray RD, BD Beckley, and FG Lemoine (2010), Vertical crustal motion derived from satellite altimetry and tide gauges, and comparisons with DORIS measurements, *Advances in Space Research*, 45(12), 1510-1522, doi:10.1016/j.asr.2010.02.0201510.
69. Rong, Z., Y. Liu, H. Zong, and Y. Cheng (2007), Interannual sea level variability in the South China Sea and its response to ENSO, *Global and Planetary Change*, 55(4), 257-272, doi: 10.1016/j.gloplacha.2006.08.001.
70. Ropelewski, C.F., and M.S. Halpert (1987), Global and regional scale precipitation patterns associated with the El Niño/Southern Oscillation,

Monthly Weather Review, 115, 1606-1626.

71. Rosmorduc, V., J. Benveniste, E. Bronner, S. Dinardo, O. Lauret, C. Maheu, M. Milagro, and N. Picot (2011), Radar Altimetry Tutorial, *CSL*.
72. Santamaria-Gomez, A., M. Gravelle, and G. Wöppelmann (2014), Long-term vertical land motion from double-differenced tide gauge and satellite altimetry data, *Journal of Geodesy*, 88(3), 207-222, doi: 10.1007/s00190-013-0677-5.
73. Schwartz, M. L. 2005, *Encyclopedia of Coastal Science*, Dordrecht, The Netherlands: Springer, 1-1086.
74. 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
75. Shum, C. K., J. C. Ries, and B. D. Tapley (1995), The accuracy and applications of satellite altimetry, *Geophysical Journal International*, 121, 321-336.
76. 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.
77. Swenson, S., and J. Wahr (2006), Post-processing removal of correlated errors in GRACE data, *Geophysical Research Letters*, 33, L08402, doi: 10.1029/2006JB004882.
78. 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.
79. Tapley, B. D., S. Bettadpur, M. Watkins, and C. Reigber (2004b), The Gravity Recovery and Climate Experiment: Mission overview and early results, *Geophysical Research Letters*, 31, L09607, 10.1029/2004 GL019920.
80. Torge, W. (1989), *Gravimetry*. de-Gruyter, Berlin-New York.
81. Torge, W. (1991), *Geodesy*, W. de Gruyter, Berlin.

82. 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.
83. Wagner, C.A. (1991), How well do we know the deep ocean tides An intercomparison of altimeter, hydrodynamic and gauge data, *Marine Geodesy*, 16, 118-140.
84. 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, *Journal of Geophysical Research*, 103, 30,205-30,229.
85. 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.
86. White, N.J., I.D. Haigh, J.A. Church, T. Koen, C.S. Watson, T.R. Pritchard, P.J. Watson, R.J. Burgette, K.L. McInnes, Z.J. You, X.B. Zhang, Xuebin, and P. Tregoning (2014), Australian sea levels-Trends, regional variability and influencing factors, *Earth-Science Reviews*, 136, 155-174, doi: 10.1016/j.earscirev.2014.05.011.
87. 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.
88. Wöppelmann, G., and M. Marcos (2012), Coastal sea level rise in southern Europe and the nonclimate contribution of vertical land motion, *Journal of Geophysical Research-Oceans*, 117, doi: 10.1029/2011jc007469.
89. 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.
90. Wu, Z., and N. E. Huang (2004), A study of the characteristics of white noise using the empirical mode decomposition method, *Proceedings of Royal Society London*, 460, 1597-1611, doi: 10.1098/rspa.2003.1221.
91. Wu, Z., and N. E. Huang (2009), Ensemble empirical mode decomposition: A noise-assisted data analysis method, *Advances in Adaptive Data Analysis*, 1, 1-41.

92. Wunsch, C. (1972), Bermuda sea level in relation to tides, weather and baroclinic fluctuations, *Reviews of Geophysics and Space Physics*, 10, 1-49.
93. Wunsch, C., and D. Stammer (1997), Atmospheric loading and the oceanic “inverted barometer” effect, *Reviews of Geophysics*, 35, 79-107.
94. Zhan, 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)
95. Zhang, X., and J. A. Church (2012), Sea level trends, interannual and decadal variability in the Pacific Ocean, *Geophysical Research Letters*, 39, doi: 10.1029/2012gl053240.
96. Zhou J, and K.-K. Tung (2013), Observed Tropospheric Temperature Response to 11-yr Solar Cycle and What It Reveals about Mechanisms, *Journal of the Atmospheric Sciences*, 70, 9–14.
97. 內政部國土測繪中心，2014，102年度「高程基準檢測工作」報告書。
98. 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。
99. 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)，台灣氣候變遷科學報告，311-358，台北：行政院國家科學委員會。
100. 陳盈樺，2009，利用測高衛星、重力衛星、NCEP氣候模型估計地心與C20變動。國立成功大學測量及空間資訊學系碩士論文，台南。
101. 陳進益、高嘉婉、曾于恆、楊智傑、余文彥，2014，海平面均一化校正工作，臺灣氣候變遷推估與資訊平台計畫之期末報告。
102. 郭重言、林立青、藍文浩、莊文傑、李俊穎，2014，臺灣四周海域近十年之海水面變化速率研究，交通部運輸研究所出版，台北市。
103. 郭重言、林立青、藍文浩、莊文傑、李俊穎，2015，臺灣四周海

域長期性之海水面變化趨勢評估，交通部運輸研究所出版，台北市。

104. 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。
105. 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 潮汐分潮週期

附表 1-1 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

附錄二 中央氣象局潮位站資料之改正流程

本計畫欲將潮位站相對於沿岸地表高程的海水面變化改正為絕對海水面變化，並且評估台灣周圍海水面變化與海洋低頻訊號關係，處理步驟依序為海潮改正、逆氣壓效應改正、基準偏移量、地表垂直變動改正以及萃取海洋低頻訊號，但若資料中包含基準偏移情形，在移除海潮效應時，需在調和分析法中加上步階函數(如式(3.1)所示)，以免偏移量影響海潮效應之改正，然後再重複上述步驟。本研究使用的潮位資料分別由平均海平面永久服務中心(PSMSL)與中央氣象局等資料中心取得，然而中央氣象局為較為原始之資料，因此以中央氣象局的潮位站資料為範例，以下為處理中央氣象局的潮位站資料之詳細步驟:

➤ 中央氣象局的潮位站資料

- (1) 中央氣象局潮位站資料為 6 分鐘、10 分鐘或 60 分鐘一筆之記錄，因此需進行海潮改正，海潮改正如式(3.1)所示，改正成果如圖 3.3 所示。
- (2) 將步驟(1)處理後之資料平均為 1 天一筆，然而因其時間系統為格林威治時間(Greenwich mean time)+8 小時，因此計算時需將潮位站資料的時間各修正 8 小時，轉換時間系統至格林威治時間，並且檢查中央氣象局的潮位資料是否占當天全部時段 75%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) 將步驟(2)處理後之潮位站資料進行逆氣壓效應改正。本計畫自美國國家氣象局國家環境預測中心 (NCEP)的平均海水面氣壓資料中估算出潮位站的逆氣壓效應如式(3.2)所示，並將該效應自潮位站資料中移除。
- (4) 將步驟(3)處理後之日平均資料平均為月平均資料。
- (5) 檢查步驟(4)處理後之資料中是否包含基準偏移。

- (6) 若步驟(4)處理後之資料中包含基準偏移情形，則將該潮位站的原始資料重新進行海潮改正，並重複步驟(2)-步驟(4)。將步驟(4)處理後之資料進行偏移量改正，改正方法如式(3.4)所示。
- (7) 結合衛星測高資料與潮位站資料估算地表垂直變動速率，方法如式(3.5)與式(3.6)所示。
- (8) 移除潮位站資料中的地表垂直變動訊號。
- (9) 利用六參數擬合(如式(3.3))內插具有資料缺漏之潮位站。
- (10) 利用經驗模態分解法(EEMD)分解出步驟(9)處理後之資料中低頻訊號。

附錄三 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：臺灣海域未來平均海平面升降變動率之推估

計畫編號：MOTC-IOT-104-H3DB003a

執行單位：財團法人成大研究發展基金會

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
林銘崇 委員 - 執行內容之科學性論述相當詳盡。 - 低頻海洋訊號之具體(物理)內容為何？是否等同於 ENSO 與 PDO？ - 海洋質量、能量平衡轉換之課題頗為複雜，是否有適當資料資訊足以評估造成海水面上升之本質變動率？	意見答覆 - 感謝委員肯定。 - 海水面變化包含十分廣闊的訊息，其訊號的週期變化範圍可由數秒至數十年，而本研究主要目的為分析臺灣四周海水面變化速率，然而衛星測高資料涵蓋時間僅約有 20 年，因此在計算速率時會受到長週期(低頻率)訊號影響，而 ENSO 與 PDO 為太平洋氣候變化中具代表性之現象(或稱氣候模式)，因此本研究評估海水面升降變化中的低頻海洋訊號與 ENSO 和 PDO 之關係。 - 導致海水面變動主要原因大致可分為由海水溫度與鹽度變化造成的海水體積變化(又稱比容海水面)與海水質量變化。本研究利用 Ishii 和 Kimoto [2009]更新後之海水溫度與鹽度月平均網格資料估算比容海水面變化；利用 GRACE 重力場解估算海水質	審查同意處理說明。 審查同意處理說明。 審查同意處理說明。

	量變化。比較海水面變化(可由衛星測高或潮位站資料估算而得)、比容海水面變化、海洋質量變化三者變化速率，將可以評估造成海面上升之主要因素。	
張憲國 委員 1. 本報告延續前兩年研究探討臺灣海域平均海水位上升之問題，除增加原本資料分析外，又加入其他新的工作項目，探討影響平均海水位上升的原因。報告內容參考許多國內外文獻，也提出合適分法分析平均海水位上升、聖嬰指標與 PDO，內文敘述詳盡，深具學術價值，結果值得肯定。 2. 本年度計畫的工作項目中「臺灣環島驗潮站潮位基準偏移之自動化偵測與校正」，除在附錄簡述外，並無在報告內文提及此工作項目是需要提供港研中心程式或可操作軟體。 3. 利用 NCEP 資料來探討逆氣壓影響平均海水位上升，其結果是否會因為 NCEP 空間的解析度(約 100km)而造成分析的精度不準。 4. 利用 EEMD 方法會產生約 10% 長度的邊界效應(end effect)，建議使用考慮修正的 EMD 方法及邊界處理技巧。	意見答覆 1. 感謝委員肯定。 2. 感謝委員建議，對於此工作項目(臺灣環島驗潮站潮位基準偏移之自動化偵測與校正)是將提供港研中心基準偏移與校正程式，此工作項目之相關敘述將於期末報告中第三章加強說明。 3. 第一期(102 年)計畫中已比較 NCEP 資料與中央氣象局氣壓實測資料間的相關性，兩者資料相關係數皆在 0.95 以上，表示 NCEP 資料與海水面實測氣壓資料於臺灣附近有非常高的一致性 4. 感謝委員建議。Wu 和 Huang [2009, 2010] 以及 Chu 等人 [2012] 已提出改善邊界效應(end effects)相關方法，本研究將嘗試利用 Wu 等人 [2010] 與 Chu 等人 [2012] 提出的方法，加入於 EEMD 方法中，以降低邊界效	審查同意處理說明。 審查同意並確認處理說明。 審查同意並確認處理說明。 審查同意並確認處理說明。

5. 利用 EEMD 方法分解潮汐及 MEI 及 PDO 資料所得的長期趨勢，雖然斜率相近但其量卻大於前幾個 IMF。因此，EEMD 方法的分析此問題的可信度就會受到質疑。建議可以考慮其他分析長期趨勢的方法來比較。	應。 5. 宿霧潮位站資料經由 EEMD 分解後所得到的長期趨勢(IMF9)之 Y 軸尺度與其他 IMF 並不相同，其原因為宿霧潮位站資料來源為 PSMSL 的 RLR，RLR 基準約比當地平均海水面低 7000 mm，因此為了統一數值尺度問題，期末報告將 PSMSL 之 RLR 的水位扣除平均值，再進行後續相關計算。	審查同意並確認處理說明。
溫志中 委員 1. 研究內容，成果豐富。 2. P.3-29，圖 3.21 分析圖形。 3. 偏移量改正及垂直變動改正，為預估及分析臺灣海域未來平均海平面升降變動率之重要參數，全臺之區域特性是否一致？	意見答覆 1. 感謝委員肯定。 2. 圖 3.21 中紅色與藍色線條分別表示 99%與 95%信賴區間，點位表示各 IMF 之平均週期與對應之平均能量，其中黑色點位為 IMF1，IMF1 的平均能量做為尺度因子(scale factor)，其他各 IMF(紅色點位)皆相對於 IMF1。期末報告將強化說明圖 3.21。 3. 基準偏移改正與潮位站垂直變動改正對於潮位資料後續應用於預估及分析臺灣海域未來平均海平面升降變動率是相當重要之步驟。基準偏移主要因人為所造成，或同震未改正，造成誤差每次皆不會完全一樣，因此沒有區域之特性。而由本研究之地表垂直變動成果以及 Ching 等人 [2011]利用 GPS 資料估算臺灣地表垂直變動成果可知，臺灣各區域地表垂直變動之特性不一定相同，因為臺灣地表垂直變動包含多項因素，包括板塊擠壓、地層結構、冰後回彈以及人為方面	審查同意處理說明。 審查同意並確認處理說明。 審查同意並確認處理說明。

4. P.5-2, 結論中所述花蓮、廈門變化速率為 -2~-3 mm/yr 及 -2 mm/yr, 推估原因為資料品質不佳及估算地表垂直變動精度較差所致, 是否有證據說明?	(如超抽地下水)等因素, 因此若某個區域的某項因素影響特別顯著時, 則該區域地表垂直變動之特性可能較為一致, 例如臺灣西南部(如雲林、嘉義等地)地表多呈現下沉情形, 其原因為當地居民超量抽取地下水, 造成該區域之地表多呈現下沉之情形。 4. 花蓮潮位站從 1950-2012 年資料完整度[資料完整度=1-缺漏資料月份數/總資料月份數]僅 68%, 並且 1977-1983 間無潮位記錄資料(如圖 2.5 所示), 表示該資料品質較不佳, 因此可能影響後續計算成果; 而廈門潮位站與衛星測高資料重疊時間僅約 10 年(如表 2.3 所示), 因此估算地表垂直變動速率之精度可能較差, 進而影響後續成果。	審查同意處理說明。
滕春慈 委員 1. 潮位資料先進行逆氣壓修正, 有無可能影響本研究試著尋找 ENSO 與潮位資料的關係? 2. 逆氣壓修正會造成海面高度的年變化率, 是表示氣壓值有氣候變遷值嗎? 是否有文獻佐證?	意見答覆 1. 感謝委員建議。由研究成果可知, 改正逆氣壓會影響 ENSO 與潮位資料間關係, 但 ENSO 主要影響為$\pm 20^{\circ}$以內, 且越靠近赤道的逆氣壓效應影響越小[郭重言等人, 2014]。因此潮位資料先進行逆氣壓修正對於 ENSO 與潮位資料間關係影響不大。 2. 由 Gillett 等人[2013]與 2007 年 IPCC 第四次會議(AR4)[IPCC, 2007]報告指出, 全球海水面氣壓有氣候變遷情形。2007 年 IPCC 的 AR4 報告中由 1955-2005 海水面氣壓估算成果可知, 在中、低緯度海水面氣壓值呈現下降情形, 高緯度區域呈現上升情形。	審查同意處理說明。 審查同意處理說明。

3. Grace 資料解析度約 300~600 km,分析這個資料和本研究的目的。	另外，由本研究成果可知，熱帶區域氣壓變化值會反應明顯 ENSO 效應。 3. 本研究將利用 GRACE 資料評估整個臺灣附近海域(緯度: 10°N~30°N、經度: 110°E~130°E)的海水質量變化，因此解析度是足夠的。	審查同意處理說明。
張國棟 委員 1. 執行成果豐富，分析亦相當深入，予以肯定。 2. 報告中探討臺灣周邊海域潮位實測資料之平均海平面升降變動，但報告未引出所有潮位資料原始數據圖，不易評斷推估之效果。 3. 圖 3.9 及圖 3.10 的橫座標以 Number 為名，但其他相關圖均以 Time 為名，請補充說明此二圖橫座標之物理意義。 4. 潮位改正對平均海水變化的推估有重要的影響，尤其基準偏移校正影響最大，但報告中對此部份的處理過程並未說明清楚，請予以補充。 5. 早期的潮位計大多是壓力式，經過一段期間後就有偏移(drift)的問題，而此會造成長期水位推估的偏差，但此因素並未納入修正討論，未來宜予以考慮。 6. 報告中若有提出每年海水位變動量，宜列出資料期間，較能顯	意見答覆 1. 感謝委員肯定。 2. 感謝委員建議，但原始數據圖為每小時或每六分鐘一筆水位資料，而潮位站資料時間長度為 >30 年，若將原始資料展示則亦無法清楚看出數據之問題。 3. 在使用小波分析工具時，使用的資料需為連續訊號，本計畫按照時間先後順序一個個排序，若遇到缺漏資料則跳過，因此圖 3.9 及圖 3.10 的橫座標不能以 Time 表示，而以 Number 為名。期末報告已強化說明圖 3.9 及圖 3.10。 4. 感謝委員建議，期中報告已利用 3.3 節說明基準偏移之相關處理步驟，期末報告中已於 3.3 節強化說明。 5. 感謝委員建議，一段時後續的偏移(drift)是屬於系統性誤差，並無法由資料中看出，為避免誤判而造成更大誤差，目前不考慮 drift 造成之誤差。 6. 感謝委員建議，期末報告中強化說明估算海水面變化速率之資	審查同意處理說明。 審查同意處理說明。 審查同意並確認處理說明。 審查同意並確認處理說明。 審查同意處理說明。 審查同意處理說明。

示出水位變化的實際狀況(不同期間水位平均變動量均不相同)。	料涵蓋範圍。	
莊文傑 委員 1. 感謝合作研究單位及研究同仁之共同配合與努力，如期提交期中研究報告。 2. 依據衛星測高資料與潮位站資料分析，可得臺灣周圍海域海水面由高緯度往赤道方向逐漸遞增之上升趨勢不同；速率 4~5 mm/yr 及 2~3 mm/yr 又各異，請具體闡釋造成差異之主要原因。另外，關於 2~8 年之週期性訊號中，衛星測高資料是否與潮位站資料分析結果相同，皆顯示僅位於北緯 20° 以南之水位變化(率或趨勢?)與聖嬰-南方振盪現象呈現高度負相關，其他區域潮位站無顯著相關? 3. P.1-1 第一章內文曾提及二十世紀全球海水面上升速率每年約為 1.5 到 2.4 公釐；近二十年(自 1993 年以來)之全球海水面上升速率為 3.2±0.4 mm/yr，請加入介紹本研究近期應用衛星測高及驗潮站資料對臺灣四周海域近十年及近二十年所計算之區域海水面上升速率成果及列入參考文獻。 4. P.1-1 第一章內文：“太平洋島國(Tuvalu Island)為世界上首個因為海水面上升而舉國移民之國家”請將 (...)刪除或作翻譯；另外，“2005 年颶風卡崔娜”、“中國大陸由沿海直接登入的強颶	意見答覆 1. 感謝委員肯定。 2. 可能原因推測為海水面升降變動中包含海洋低頻震盪訊號，若觀測資料涵蓋時間不長，在計算變化速率時，將會受到海洋低頻震盪影響，因此可能造成不同時期估算出的速率不同。4~5 mm/yr 為利用 1993-2012 衛星測高資料所估算出之海水面上升速率，而 2~3 mm/yr 為利用全部時間段(> 30 年)驗潮站資料所估算出之海水面速率。另外，感謝委員建議，期末報告第四章中已分析衛星測高資料與聖嬰-南方振盪現象之關係。 3. 感謝委員建議，期末報告將加入本研究近期應用衛星測高及驗潮站資料對臺灣四周海域近十年及近二十年所計算之區域海水面上升速率成果及並列入參考文獻。 4. 感謝委員建議，期末報告中將刪除“太平洋島國(Tuvalu Island)為世界上首個因為海水面上升而舉國移民之國家”、“2005 年颶風卡崔娜”、“中國大陸由沿海直接登入的強颶達 8 次”。	審查同意處理說明。 審查同意並確認處理說明。 審查同意並確認處理說明。 審查同意並確認處理說明。

達 8 次”等關聯氣候變遷課題之論述，應與本研究主題無直接相關，建議修訂或刪除。 5. P.1-2，請對 2013 年 IPCC 第五次報告中所指出之”最嚴重之推算情境 (Representative Concentration Pathways 8.5, RCP 8.5)”作較具體之介紹與說明。 6. Merrifield 等人[2009]利用潮位站資料估算 1990-2007 全球海水面上升速率為 3.2 ± 0.4 mm/yr，此數據與衛星測高成果 (3.2 ± 0.4 mm/yr [Church and White, 2011]) 相當一致，請補充其研究分析方法或利用潮位站資料估算 SLR 之特點，俾供本研究參考。Calafat and Chambers [2013] 利用分佈於全球的九個潮位站資料估算 1952-2011 海水面上升之加速度為 0.022 ± 0.015 mm/yr² (90%信賴區間)，為何此結果可據以顯示海水面上升之加速度隨著時間的增加而逐漸加大，且與溫室氣體 (Greenhouse gas) 濃度增加有關?? 7. 請提供 Merrifield et al.,(2011、2012)、Nerem et al.,(1999)、Landerer et al.,(2008)等關於在西太平洋赤道附近發生的準週期性 ENSO 現象與海水面上升高度變化有高度相關，甚至被認為是影響海水面上升的主要因素之一；以及 Hamlington et al.,(2013) 關於太平洋年代際震盪(PDO)與 ENSO 影響太平洋區域海溫、鹽度及氣候重要因子，進而影響區	5. 感謝委員建議，期末報告第一章中強化說明[IPCC, 2013]參考文獻。 6. 感謝委員建議，在期末報告中將強化說明[Merrifield et al., 2009]參考文獻。另外，Calafat and Chambers [2013] 中結果提出”海水面上升之加速度隨著時間的增加而逐漸加大，且與溫室氣體 (Greenhouse gas) 濃度增加有關”，是因為作者利用其研究結果以及結合其他文獻推論出海水面上升之加速度隨著時間的增加而逐漸加大以及海水面上升與溫室氣體濃度增加有關。 7. 將提供給委員[Nerem et al.,1999; Landerer et al., 2008; Merrifield et al., 2011; Fasullo et al., 2012; Boening et al., 2012; Hamlington et al., 2013; Haigh et al., 2014; Cazenave et al.,2012, 2014;]等參考文獻之電子檔。	審查同意並確認處理說明。 審查同意並確認處理說明。 審查同意並確認處理說明。
--	--	---

域或全球的海水面變動；Haigh et al., (2014)、Cazenave et al.,(2012、2014)、Boening et al.,(2012)、Fasullo et al.,(2012)關於海面上升加減速特性主要來自於氣候因子的年際及年代際變動影響等研究論文之電子檔供存參。 8. P.1-4~1-5 介紹本研究近期應用衛星測高及驗潮站資料對臺灣四周海域近十年及近二十年所計算之區域海面上升速率成果，請列入參考文獻。另外，建請從前期研究臺灣各區域近十年與二十年海面上升速率之差異談起，再由其造成原因，可能應包括資料涵蓋時間長度不同以及受到 ENSO 現象或 PDO 影響之推測，引入本研究之研究動機、目的、研究方法與工作項目。 9. P.2-15~2-23，#2.3 重力反演和氣候實驗(GRACE)重力衛星之相關介紹，以及#2.3.6 海水質量變化計算，其與本研究之相關性，請作說明與補充，特別是與式(2.1)及對本研究課題、研究目的、工作項目之關聯性及影響性。#2.4 溫度與鹽度資料，亦請說明與補充其對研究目的及工作項目之實質關聯性及影響性。 10. ENSO 及 PDO 為本年度對於 SLR 研究課題之重要考量因子，請於#2.5 氣候指標中，對兩者之現象作更詳細之介紹與相關討論，藉以論證本研究動機與	8. 感謝委員建議，期末報告將列入第一期(102 年)與第二期(103 年)計畫之參考文獻。另外，期末報告將於各章節中強化研究動機、目的、研究方法與工作項目之說明。 9. 感謝委員建議，期末報告中於第二章與第四章中強化說明 GRACE 重力衛星與溫鹽資料之相關介紹以及研究目的及工作項目之實質關聯性及影響性。 10. 期末報告於第二章、第三章與第四章中強化說明 ENSO 與 PDO 等兩指標之現象，藉以論證本研究動機與目的之實質性與重要性。	審查同意並確認處理說明。 審查同意並確認處理說明。 審查同意並確認處理說明。
---	--	---

目的之實質性與重要性。 11. P.3-22，本研究#3.5.2 將應用 EMD 經驗模態分解法及#3.5.3 將應用 TDIC 時變關聯法，分析非線性及非常態的海平面變動資訊，但請補充論述應用 EMD 及 TDIC 之必要性及主要考量因素與應用目的。另外，如何判斷所分解出之模態，具有自然震盪的尺度及潛在人為影響之暖化特性?或請說明何謂自然震盪的尺度及潛在人為影響之暖化特性? 12. P.3-26，圖 3.22 與圖 3.23 中，經檢測顯示，基隆與宿霧潮位站之模態函數(IMF)皆已通過顯著性測試，因此，請就基隆與宿霧潮位站之各模態函數(IMF)，試行闡釋其意義，並補充兩站位間之對應相關性。 13. P.3-33，圖 3.27 及圖 3.30 中，請於內文補充說明時變相關性(色調棒為相關係數)之意義。另外，依圖 3.27 及圖 3.29 分析結果顯示，基隆及宿霧水位與 MEI 之第四模態函數(IMF4)，兩者時間序列之 3 年週期相關性較低，且不同時間段之相關性散亂，聖嬰之 2-8 年週期對基隆水位年際變化影響並不明顯，且時間相關也較分散。但圖 3-28 分析結果顯示，聖嬰現象於 6 年週期對基隆第五模態函數(IMF5)之影響，於 1965-1975 間兩者時間序列呈現	11. 期末報告將強化說明應用 EMD 之考量因素。另外，期末報告將刪除”潛在人為影響之暖化特性”。 12. 感謝委員建議。基隆與宿霧潮位站之模態函數(IMF)皆已通過顯著性測試，但各 IMF 之物理意義須與所受之外力一併討論其因果關係。但本計畫中主要工作項目為探討海洋低頻震盪訊號，因此期末報告將依照工作項目強化探討潮位站資料中海洋低頻震盪訊號。 13. 期末報告將補充時變相關性中的相關性計算為一般之相關係數計算。另外，圖 3-28 分析結果顯示，聖嬰現象於 6 年週期與基隆第五模態函數(IMF5)間相關性，在不同時期表現有正有負，表示基隆潮位站水位變化可能受到多個因素影響，而 ENSO 影響量並不非常顯著。期末報告中已強化說明如何考量與移除低頻海洋訊號，綜合評論其可能對本年研究主題(~臺灣海域未來平均海平面升降變動率之推估)及目標達成之預期衝擊與影響。	審查同意並確認處理說明。 審查同意並確認處理說明。 審查同意並確認處理說明。
---	---	---

正相關，1976-1990 間呈現負相關，而 1991-2000 間呈現正相關。請分析其原因，並就如何考量與移除低頻海洋訊號，綜合評論其可能對本年研究主題(~臺灣海域未來平均海平面升降變動率之推估)及目標達成之預期衝擊與影響。 14. 期中報告簡報資料之第 11 頁中，關於高雄潮位站之原始潮位紀錄，其經海潮改正後之 STD 為 250 mm；而後接續進行逆氣壓改正前之 STD 卻為 206 mm，請說明原因並作報告內文之補充與修訂。 15. 請依據本研究契約之規劃期程，積極推展各工作項目，並具體作出對應之研究討論及提列成果。	14. 海潮改正時資料為原始資料（六分鐘），逆氣壓效應改正時潮位資料為日平均資料，因此兩者 STD 有差異。 15. 感謝委員建議。期末報告將依據本研究契約之規劃期程，積極推展各工作項目，並具體作出對應之研究討論及提列成果。	審查同意處理說明。 審查同意處理說明。
--	--	-----------------------------------

附錄四 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：臺灣海域未來平均海平面升降變動率之推估

計畫編號：MOTC-IOT-104-H3DB003a

執行單位：財團法人成大研究發展基金會

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
林銘崇 委員 - 研究用溫鹽資料均採自日本，國內是否有足夠相關資料？ - 聖嬰與反聖嬰是否成對存在？除緯度$\pm 20^\circ$以內之範圍，經度可能範圍是否存在？ - 研究方法使用多種數理統計分析方法，分析方法之選用可能影響分析結果，方法選用之考量為何？	意見答覆 - 本研究需利用長時間網格溫鹽資料來估算 10 年以上比容海水面變化，而國內研究中心提供的溫、鹽資料主要以船側或浮標等收集的資料，觀測時間與空間範圍皆不固定，對於本研究目的並不適用。 - 根據圖 2.13 可知，1950-1980 間主要是成對出現，而從 1980 年後較少成對出現。另外，聖嬰現象影響範圍是全球性地，例如 ENSO 與北大西洋震盪(NAO)發現有互相作用之影響[Polonsky et al., 2004]以及與印度洋氣候變化也有相關[Han et al., 2014]。 - 研究分析方法非常多，本研究主要由收集之海水面研究相關文獻中選用適合本計畫工作項目和目的且可信之新方法作為本研究研究方法。	審查同意處理說明。 審查同意處理說明。 審查同意處理說明。
張憲國 委員 本研究針對研究的課題提出適當方法來解析台灣海域的平均	意見答覆 感謝委員肯定。	審查同意處理說明。

海水面上升的問題，報告內容相當豐富詳盡，頗具學術及應用價值。 2. 使用各種方法逐步刪除數據的變動量(如潮汐，不連續偏移量…等)，是否有可能用此理論同時處理這些變動量(這只是建議的想法，不一定可行或者會有相同的結果)。 3. 逆氣壓的修正採用壓力扣除月平均，是否有考慮扣除平滑化的平均值。另外，逆氣壓修正，呈現規則的變動，其量值雖低於潮汐，但其量值約與潮汐同階量(如圖 3.7)，逆氣壓的修正結果在學理上其階量為何？若實際上缺少壓力訊號如何進行逆氣壓的修正？ 4. 如圖 3.11 及 3.12 的偏移量修正，是否有辦法確定偏移量的修正是可靠的。	2. 感謝委員建議。目前本研究中潮汐改正使用的資料為原始潮汐觀測資料(如 6 分鐘 1 筆、10 分鐘 1 筆與 60 分鐘 1 筆等)，而基準偏移改正使用資料為經月平均後的潮位站資料。理論上，同時改正潮位資料中潮汐效應與基準偏移是可行的，而本研究中有進行疊代計算，所以最後結果應會有相同結果。 3. 月平均為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，應與平滑化的平均值無關。根據郭重言等人[2014]成果可知，海洋各處逆氣壓效應皆不同，越靠近赤道的逆氣壓效應影響越小，而改正逆氣壓效應對於海水面上升速率影響量約為 10%~15% [National Research Council, 2012]。另外，若實際上缺少氣壓訊號則無法進行逆氣壓的修正，但本研究利用全球氣壓模型，應該不會有氣壓資料缺少的問題。 4. 本研究在 103 年計畫中利用無基準偏移潮位資料進行模擬測試，將數個 10 幾年潮位資料中加入一個 100 mm 基準偏移，測試不同潮位站資料之基準改正。將改正後成果與實際潮位站資料相比較，改正後約可以將基準偏移資料改正回 70%~90%。	審查同意處理說明。 審查同意處理說明。 審查同意處理說明。
---	---	--

5. 本計畫收集相當多的資料及分析整理有用的資料，相當難能可貴，在資料共享的理想及原則下，未來計畫結束可否提供甲方所有資料，以方便其他人使用，也創立台灣數據分享的制度。	5. 成果與報告書將依據港灣技術研究中心之規定提供給甲方，而原始資料還須詢問提供資料之所屬單位。	審查同意處理說明。
董東璟 委員 1. 研究團隊完成既定工作項目，成果豐碩，論述完整，學術與實務參考價值極高，甚表肯定。 2. 台灣環島潮位站過去(約民國 90 年之前)的資料品質常有所疑慮，本研究進行了多項改正，期能得到較準確的潮位資料。但部分測站資料從 1949 年開始，部分漁港當時甚至尚未興建等問題，PSMSL 的資料亦同，50 年代甚至 30 年代開始的資料在戰亂年代或科技水平不高的菲律賓，資料品質令人感到憂慮，是否有任何方式可提高對這些潮位資料使用之信心？ 3. 相對短期的衛星資料和現場潮位資料，與長週期氣候因子 ENSO 和 PDO 從事相關性分析之不確定性是否有辦法評估？ 4. p.1-13 頁第四行有漏文，建請補上。 5. 圖 3.20、圖 3.21 分析結果為何站？建請於圖說明中補充。其它若有類似情形者，建請一併補充。	意見答覆 1. 感謝委員肯定。 2. 早期潮位站資料精度無法評估，而本研究所使用方法僅能針對特定顯著訊號(如:海潮、逆氣壓、基準偏移與地表垂直變動訊號等)進行改正，若發現某潮位資料有明顯粗差，將捨棄該站資料。本研究成果有助於提醒政府對制定潮位站建立和管理制度。 3. 本研究中對於相關性計算成果皆已進行統計測試評估。 4. 已補上”全球海水面正呈現每年~3.1 mm 上升狀態，而台灣周圍海水面上升速率較全球海水面速率快”於 p.1-13。 5. 圖 3.20 與圖 3.21 為利用 EEMD 分解 MEI 之結果與分解後之統計測試結果。在圖 3.22 與圖 3.23 為展示利用 EEMD 分解 PDO 之結果與分解後之統計測試結	審查同意處理說明。 審查同意處理說明。 審查同意處理說明。 審查同意並確認處理說明。 審查同意並確認處理說明。

	果。其他類似情形皆已補充。	
滕春慈 委員 1. 計畫各種調整修正資料的方法嚴謹，逐步調整修正，計畫內容實在，成果即刻可供參考使用。 2. 報告中第 4 部分是利用 MEI、PDO 處理氣候對水位變化的影響，有幾點請加強說明。 (1) MEI 與 PDO 已經是強 2~8；10~30 年週期的指數，有必要還先做濾波的動作，會不會過度資料的處理？ (2) 氣候變化應該不只有 MEI、PDO 這二個週期，只利用這二個氣候因子為進行擬合，會不會有主導入的情形。 (3) 由圖 4.14、圖 4.15 中的 1998 年	意見答覆 1. 感謝委員肯定。 2. (1) 由圖 2.13 可知，MEI 與 PDO 指數非常相似，而許多研究[如 Newman <i>et al.</i>, 2003]發現 PDO 與 ENSO 現象會相互影響，為了清楚探討不同尺度之氣候震盪與臺灣四周海水面變化之相關性，因此將 MEI 與 PDO 指數分別做濾波處理，以獲取 MEI 中 2-8 年的訊號及 PDO 中的 10-30 年訊號。 (2) 除了季節性、半年和年週期外，ENSO 與 PDO 訊號是北太平洋主要呈現明顯年際與數十年變化之氣候現象[許晃雄等人，2011; Zhang and Church, 2012; White <i>et al.</i>, 2014]，因此本研究主要工作目的之一為分析 ENSO 與 PDO 對於臺灣四周海水面變化之影響。近期有學者發現更長期的氣候震盪，但還需更多研究才能確定。另外，為了不要有先入為主觀念，在加入 MEI 與 PDO 指數擬合之前，本研究利用 EEMD 分析氣候因子與台灣周圍海水面變化之相關性。結果顯示，兩氣候指標對於台灣周圍海水面有相關性。 (3) 擬合的成果會依據欲擬合資	審查同意處理說明。 審查同意處理說明。 審查同意處理說明。 審查同意處理說明。

資料看來，二者的多變量擬合結果(紅線)就呈現不同數值，這個擬合方法的結果會不會並不唯一。	料品質不同而異。圖 4.14 與圖 4.15 擬合成果之差異的可能原因推測為黎牙實比潮位站的早期觀測資料(1993 年以前)品質較差所以造成之差異。	
溫志中 委員 1. 研究成果豐碩，值得肯定。 2. 比較未考慮氣候因子與考慮氣候因子條件下，為何變動速率於臺灣至菲律賓海域有如此大的差異？真實結果為何？ 3. 文中國外中文測站說明時，請加註英文名稱。 4. 表 3.12 相關係數，除 FG 站外，其餘各站均偏低，相關係數意義為何？ 5. 圖 4.8 宿霧潮位站多變量擬合結果，建議以量化方式呈現。 6. 資料截取分析長度對相關性之影響，建議考量說明。	意見答覆 1. 感謝委員肯定。 2. 兩者結果不同是因為考慮因素不同。而台灣至菲律賓海域差異較大，表示台灣南部海域海水面受氣候低頻震盪因子影響較為顯著。 3. 感謝委員建議，期末報告中使用國外測站說明時，將加註英文名稱。 4. 相關係數意義代表海水面變化與氣候指標間相關性，可以藉由相關係數了解各區域海水面與氣候指標間相關性。相關係數低表示該站資料不受到氣候因子影響。另外，表 3.12 中相關係數皆通過顯著性測試。 5. 感謝委員建議，圖 4.8 宿霧潮位站多變量擬合結果已展示於表 4.6 與表 4.7。 6. 感謝委員建議，資料長度會影響相關係數之計算成果(因不同時間資料品質不一或低頻訊號未考慮完全等)。本研究在計算相關性時皆使用完整資料。	審查同意處理說明。 審查同意處理說明。 審查同意並確認處理說明。 審查同意處理說明。 審查同意並確認處理說明。 審查同意處理說明。
簡仲璟 委員 1. 相關論述詳細，分析結果也相當完整豐富，對於地球暖化下，臺灣海域海平面未來的變化趨勢，提供珍貴的參考資料。 2. 在未考慮氣候因子(如聖嬰-南方振盪與太平洋年代際振盪)下之	意見答覆 1. 感謝委員肯定。 2. 兩者結果不同是因為考量因素不同。若修正氣候因子前後之海	審查同意處理說明。 審查同意處理說明。

海平面上升幅度為何較考慮氣候因子為大？是否氣候因子會減低海平面上升幅度？請再補充說明。 3. 請表列出對臺灣海域而言，影響海平面上升的自然因素(不包括儀器校驗、資料修正、其他人為因素等)有那些？ 4. 結論中有關潮位站地表下降能否推論臺灣本島地表下降？請再斟酌。本研究對於地表升降的分析方法，建議可應用至高鐵軌道之高程變化(高鐵地層下陷課題)。	平面上升速率差異較大，表示該海域海水面受氣候低頻震盪因子影響較為顯著。而氣候因子影響海平面變化不一定會是上升或下降，需要視時間點、區域等因素而定。 3. 影響台灣四周海水面變化的自然因素主要有風、海潮、氣壓、海水體積以及海水質量等因子。 4. 感謝委員建議。潮位站周圍地表下降並不能推論為臺灣本島地表下降，此部分已修改於內文中第 3.4.2 小節。	審查同意處理說明。 審查同意並確認處理說明。
莊文傑 委員 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。 2. p.1-4~p.1-5，請擇要將 102、103 年度本研究第一、二期應用衛星測高及驗潮站資料所完成台灣四周長、短期及分區絕對海水面變化速率之相關圖、表列入，俾輔助說明及提供本年度分析成果之對照及比較。 3. 請補充提列 Tseng et al. (2009)之文獻，或將內文多處相關部分，如 p.1-6、p.1-7、…，作修訂。 4. p.1-10，圖 1.1 所示之本研究計畫流程圖，請配合工作項目及移除 ENSO 與 PDO 海洋低頻振盪及應用多變量線性擬合之內文論述程序，再檢視修訂。其中，若 ENSO 與 PDO 海洋低頻振盪量確認會影響海平面變動速率或趨勢，則在應用衛星測高及驗潮	意見答覆 1. 感謝委員肯定。 2. 感謝委員建議，已在第一章中說明本研究第一、二期之成果，並且為了比較第二期成果與本年度成果，將圖展示於圖 4.9 與圖 4.10。 3. Tseng et al. (2009)為(2010)之誤植，已於相關內文作修訂。 4. 已修正圖 1.1 計畫流程圖於 p.1-10。而在估算測站地表垂直變動訊號時會將潮位站與衛星測高資料相減，相減時會消除海水面訊號，因此低頻訊號不會影響地表垂直變動之估算成果，故無須重新調整處理程序。	審查同意處理說明。 審查同意並確認處理說明。 審查同意並確認處理說明。 審查同意並確認處理說明。

站資料進行地表垂直變動之估算程序，是否應重置調整至移除低頻振盪與多變量線性擬合程序之後？ 5. p.2-8，為避免區域海水面上升速率不一致而影響潮位站地表垂直變動速率的估算成果，因此台灣區域之潮位站與衛星測高資料，除了適用等權平均 5° 範圍內之衛星測高資料外，是否尚須考量以東經 121° (約臺灣本島之中間線) 為基準，分為東、西兩部分？對前期之研究成果影響如何？ 6. p.2-10，基隆驗潮站，其 1514 與 1513 站號在表 2.3 內之資料期間，在圖 2.7 中是否正確陳示。另外，表 2.3 內，站號 610005 係為西沙或 Xiamen？經、緯度是否正確，請檢視及修訂相關內文及圖表；在圖 2.6 中，PSMSL 資料有石垣島驗潮站，但表 2.3 內並未選用列出，請修訂。 7. p.2-22~p.2-24，請補充經由海水質量變化及溫鹽度變化所導致之海平面高度空間變異圖。 8. p.3-12，式 3.4 中之最後一項，請補充說明其意義；p.3-14，在第 3.4.1 節中，式 3.5~式 3.6 間之敘述，請調整其在內文之位置。 9. p.3-16~p.3-20，表 3.2 後之表 3.10 與表 3.11 編號誤植，請修訂表號及相關內文指示；圖 3.14 及圖 3.15 之圖說，請對應修訂圖目錄	5. 為避免區域海水面上升速率不一致而影響潮位站地表垂直變動速率的估算成果，因此台灣周圍潮位站與衛星測高資料以東經 121° 為基準，分為東西部分。另外，此部分為延續第二期 (103 年度) 之處理方式。第二期成果中有完整比較等權平均與距離加權平均潮位站周圍半徑經緯度 2°、3°、5° 範圍內的測高資料與潮位站資料間之相關性。 6. 圖 2.7 已更正。表 2.3 中廈門已更正。圖 2.6 已更正。 7. 已補充於圖 4.25 與圖 4.27。 8. 已補充“a 為偏差，n 為基準偏移個數”於 p.3-13 中。另外，已修改 p.3-14 內文。 9. 已修正誤植之編號。目錄已修正。圖 4.6 中竹圍站係開坡站之誤植，已作圖標修正。另外，表 3.2 中使用 12 站潮位站資料，但	審查同意處理說明。 審查同意並確認處理說明。 審查同意並確認處理說明。 審查同意並確認處理說明。 審查同意並確認處理說明。
---	---	--

編序。另外，表 3.2 以後之臺灣沿岸驗潮站數，在表 3.10、表 3.11、表 3.12...，皆自原來 12 站減為 10 站，缺淡水及竹圍(但在圖 4.6 中，有竹圍驗潮站)，其原因請於相關內文作補充說明。	因為淡水潮位站觀測資料品質較不佳(如圖 3.14)以及竹圍潮位站因為換站前後地點不同，導致地表垂直變動速率在 2007 年前後有明顯差異(如圖 3.13)等原因，表示此兩站資料並不適用於長期(> 30 年)海水面變化研究，因此後續研究不使用此兩站資料。上述已補充於 p.3-15。	
10. p.3-21，當驗潮站具缺漏紀錄時，應用六參數擬合(式 3.3)進行內插，是否可有效地進行後續海洋年際低頻振盪訊號之補遺或其萃取與移除？特別是接續應用 EEMD 之分解萃取？	10. 是的，此方法可以用於資料補遺之應用。本研究即是以此方法進行潮位站資料補遺，方法說明如 3.5.1 小節所示。另外，本研究先對於潮位站資料進行補遺後，再應用 EEMD 之萃取。	審查同意處理說明。
11. p.3-27~3-29，圖 3.20 之原始 ENSO MEI 指數，是否對應於圖 2.13 上圖？而圖 3.22 之原始 PDO 指數，是否對應於圖 2.13 下圖？在圖 3.22 中，為何其時間期距與圖 2.13 下圖不一致？圖 3.24 中，由 ENSO MEI 與 PDO 指數，經 EEMD 分解後，請補充說明其週期介於 2~8 年與 10~30 年訊號之構成 IMFs。另外，若僅依據 PDO 指數進行 EEMD 分析(圖 3.22)，則其週期介於 2~8 年之時序變化型態，與 MEI 指數週期介於 2~8 年之差異性或相關性為何？若差異性小或相關性甚高，則於後續進行海洋年際低頻振盪訊號移除時，是否可單純考量僅應用 PDO 指數？預期之差異為何？請討論及補充。	11. 已將圖 3.22 與圖 2.13 改正一致。利用 EEMD 分解 MEI 與 PDO 後可產生不同頻率之 IMF 分量，ENSO 現象週期一般為 2~8 年[Ropelewski and Halpert, 1987; McGregor <i>et al.</i>, 2013]，而 PDO 現象週期為 10-30 年，因此本研究將結合 MEI 的週期 2~8 年之 IMF 代表 MEI 指數，結合 PDO 的週期 10~30 年之 IMF 代表 PDO 指數。若將 PDO 指數進行 EEMD 分析(圖 3.22)，則其週期介於 2~8 年之時序變化型態，與 MEI 指數週期介於 2~8 年之相關係數約 0.61。若因為兩指標有一定之相關性則僅擇一使用，其邏輯上不甚合理。	審查同意並確認處理說明。
12. p.3-29~p.3-30 內文所述，及由表	12. 已修正推測原因之論述” 台灣	審查同意並確認處

3.12(表號誤植)可見，自潮位站觀測資料萃取出週期介於2~8年與10~30年訊號，並分別與多重ENSO指數(MEI)之2~8年準週期訊號以及太平洋年代際振盪(PDO)指數之10-30年週期訊號比較相關性，僅管兩者在臺灣、中國大陸、日本、菲律賓驗潮站之相關係數相當一致，但相關係數皆偏低，因此，這結果似乎不應據以直接單獨判定台灣地區潮位站資料品質較差，而應推論為臺灣鄰近海域，其受海洋年際低頻振盪影響較小，請再詳細補充討論。此外，就相關係數之正、負，亦請補充說明其意涵。		理說明。
13. p.3-33，第3.6節內文中，“垂直變動速率趨勢主要呈現下降情形”是否意謂“垂直變動主要呈現下沉趨勢”？另外，依據“多數驗潮站海水面變化與PDO指數之相關性較與ENSO MEI大”，是否可直接推論“PDO現象對於台灣周圍海水面變化影響較大”？請再作強化之補充說明。	13. “垂直變動速率趨勢主要呈現下降情形”表示多數測站所在位置呈現下沉趨勢。“多數驗潮站海水面變化與PDO指數之相關性較與ENSO MEI大則表示PDO現象對於台灣周圍海水面變化影響較大”，上述已加入p.3-33補充說明。	審查同意並確認處理說明。
14. p.4-1，第四章之標題，建請修正為“台灣四周海域之絕對海平面升降速率與未來趨勢預估”。內文中，更請補充“絕對海平面”之意涵。	14. 已修正為“台灣四周海域之絕對海平面升降速率與未來趨勢預估”。絕對海平面之意涵“絕對海水面為相對於一個固定參考點或參考面”已補充於p.3-1。	審查同意並確認處理說明。
15. p.4-2中，表4.1~表4.4及圖4.1與圖4.2，是本研究前期之研究成果嗎？，請在表說及內文中，補充其分析之資料期間(是2003~2012、1993~2012或	15. 已於文中表4.1~表4.4及圖4.1~圖4.2之表名與圖名中說明是使用潮位站資料的全部時間段。	審查同意處理說明。

1983~2012 ?)。 16. p.4-5, 第 4.2 節中內文第一段, 述及“本研究利用 EEMD 從潮位站資料中萃取出低頻震盪訊號(10-30 準週期訊號)後,將之自測高資料中移除,以減少低頻訊號對衛星測高資料計算海水面上升速率之影響。”但因表 3.12(表號誤植)分析結果已陳示驗潮站長期資料與 ENSO MEI 及 PDO 指數之相關性均甚低,為何仍依據驗潮站長期資料,萃取低頻震盪訊號,再據以自具有較高準確度之衛星測高資料中移除?而不直接依據雖僅約具 20 年期間之衛星測高資料,作低頻震盪訊號萃取,進而用以校正驗潮站資料?此外,宿霧驗潮站之 10~30 年低頻震盪訊號萃取經驗、方法或程序(參見圖 4.4~圖 4.6 與表 4.5 及 p.4-6 內文第一段末),對於常具缺漏及基準偏移問題之臺灣驗潮站資料,如何作應用?請作補充說明。 17. 表 3.12(表號誤植)分析結果顯示,在菲律賓東岸,驗潮站長期資料與 ENSO MEI 及 PDO 指數之相關性相對較高,但萃取低頻震盪訊號,據以自具有較高準確度之衛星測高資料中移除後,圖 4.6 (2003~2012) 相 對 於 圖 4.5(1993~2012),似乎具有較小之影響量或校正量,但增減趨勢卻相反,主要原因,請作補充說明。 18. P.4-10, 關於多重變量擬合法之	16. 因衛星測高僅約 20 年,而 PDO 週期約 10~30 年,因此利用 EEMD 可能無法自衛星測高資料中萃取出完整長週期訊號。若能由長期潮位站中萃取出低頻訊號,再將萃取低頻訊號由測高資料中移除,即可避免測高資料受到低頻訊號影響。另外,潮位站資料長度遠長於衛星測高,因此自衛星測高資料萃取低頻震盪訊號,進而用以校正驗潮站資料之作法並不合理。若潮位站資料常具缺漏及嚴重基準偏移,則可能會捨棄使用該站資料,如文中淡水潮位站。 17. 文中 p.4-6 已補充”大部分區域改正前、後海水面上升速率差異皆在標準偏差內,表示改正海洋低頻訊號對於衛星測高資料估算 2003-2012 海水面上升速率影響不大,其原因除了上述所說原因外,利用短期資料(2003-2012)亦將造成估算速率之精度較差。” 18. 本研究所說的季節性訊號主要	審查同意處理說明。 審查同意並確認處理說明。 審查同意並確認處
--	--	--

資料前處理，處理步驟已先依據式(3.3)，將季節性訊號，各自從驗潮站潮位資料、多重 ENSO MEI 以及 PDO 指數中移除，為何對移除季節性訊號的潮位資料，仍需經 5 個月移動平均之平滑化處理以降低訊號週期在 1 年以下之影響量？5 個月移動平均之取決考量因素為何？另外，對於 PDO 指數係以 65 個月移動平均之平滑化處理，以降低訊號週期在 10 年以下之影響量(如圖 4.7 所示)； ENSO MEI 指數係以 65 個月移動平均以及 5 個月移動平均之平滑化處理，其各自移動平均取決之主要考量因素為何？在式 4.1 中，述明圖 4.7 中之 ICI 及 DCI 係已經正規化處理後之成果，請補充說明如何作“正規化處理”，並將其補註於圖 4.7 之圖說中。	為年週期與半年週期訊號，在移除季節性訊號後，測高資料中還有其他短週期訊號或雜訊，因此經 5 個月移動平均之平滑化處理來減低短周期和雜訊之影響量。另外，文章使用的 5 個月移動平均與 65 個月移動平均等參數是根據 [Zhang and Church, 2012]文中所給定之參數。上述已補充於 p4.10。另外，“正規化=原始資料/原始之料之標準偏差”已補充於圖 4.7 之圖名。	理說明。
19. P.4-11，前列關於多重變量擬合法，係針對驗潮站資料，為何以宿霧驗潮站為例時，不採用驗潮站資料，而替代以該驗潮站周圍已移除季節性訊號並經平滑化處理(移動平均法)後之衛星測高資料為例？另外，圖 4.7 中，已經正規化處理後之 ICI 及 DCI 時序期間，係為 1993~2013，因此，從圖 4.8 之擬合驗證或表 4.6 之成果分析可見，僅應用近 20 年之氣候指標資料，是否應即可分別進行驗潮站及衛星測高資料之低頻震盪訊號校正或移除？先期研究所分析估計之地表垂	19. 多變量擬合法可用於衛星測高資料與潮位站資料，本研究以衛星測高資料為例(圖 4.8 所示)，P.4-9 已說明多變量線性擬合法主要為結合多重 ENSO 指數 (MEI) 與太平洋年代際振盪 (PDO)指數)擬合海水面變化資料，以估算出氣候指標對於海水面影響量以及未受氣候因子影響之海水面上升速率。圖 4.13 為應用多變量擬合於潮位站資料，而第四章中所使用的潮位站資料皆已進行地表垂直變動速率之改正。	審查同意處理說明。

直變動速率是否也應再修正？請作補充說明。 20. P.4-12, 請以圖 4.8 之擬合驗證資料為例, 進一步說明本研究如何進行低頻震盪訊號校正、移除或進行影響評估？並請於圖 4.8 中, 分別對應繪出擬合前後之 SLR 趨勢線, 俾供對照比較。 21. P.4-12, 在第 4.3.2 節中, 關於圖 4.9、圖 4.10 及表 4.6, 請補充說明其分析處理程序。圖 4.11 及圖 4.12, 請將對應之 β_1、β_2、β_3 列表, 並補充提供。 22. p.4-12, 第一段末內文“(圖 3.24 與圖 3.25 所示)”中, 圖號誤植。 23. p.4-16, 圖 4-13 為驗潮站資料低頻震盪訊號移除前、後之影響評估結果, 請仿表 4.6, 提供考量氣候因子影響前、後之相關分析結果, 藉以充分說明 ENSO 及 PDO 有無納入分析時, 分別對於海平面升降變動推估影響。另外, 圖 4-13 之資料分析期間大於 30 年(1983~2012), 但圖 4.7 中已經正規化處理後之 ICI 及 DCI 時序期間, 僅有約 20 年(1993~2013), 請補充說明依據式 4.1 中, 如何仿照圖 4.14 所示, 進行相互不等期間之驗潮站資料與低頻震盪訊號移除前後之影響評估？為何不如圖 4.15 所示, 擇相同期間？ 24. p.4-18, 圖 4.16 陳示太平洋海域	20. 已補充”衛星測高資料已移除季節性訊號並經平滑化處理(移動平均法), 將資料代入式(4.1)中並依最小二乘法求解未知參數, 再將求出的未知參數帶回式(4.1)中求得擬合海水面變化”於 P.4-11。另外, 已繪出擬合前後之 SLR 趨勢線於圖 4.8 中。 21. 已補充說明於 4.3.2 小節, 而處理程序補充說明於 4.3.1 小節。另外, β_1 已補充於表 4.6, 而 β_2 與 β_3 已補充於表 4.7。 22. 已修正為圖 3.25 與圖 3.26。 23. 圖 4.13 已能充分說明修正氣候因子前後對於長期潮位站資料估算絕對海水面上升速率影響不大, 故不須再加表補充。第二章資料使用時已說明, 本研究使用 MEI 與 PDO 皆約為 50 年, 因此若欲擬合潮位站時, 將使用長於 20 年數據。另外, 多變量擬合法主要為了修正時間段較短之衛星測高資料中長週期訊號, 為了方便說明, 圖 4.7 僅展示 1993-2012 資料。 24. 已強化說明於 p.4-13。	審查同意並確認處理說明。 審查同意並確認處理說明。 審查同意並確認處理說明。 審查同意處理說明。 審查同意處理說明。
---	---	---

移除氣候因子前後之平均海水位變化與 PDO 指數之時序變化關係，請於內文強化說明引介製作本圖之目的，並加強圖說之註解與說明。 25. p.4-18，在第 4.4 節中，關於圖 4.17~圖 4.21 之圖示成果，請強化補充說明其資料來源、期間、分析處理依據及建置目的，並加強內文對圖示成果之應用闡釋，以及加強相關圖說之註解與說明。p.4-21，關於圖 4.18~圖 4.21 相關內文之分項結論，請檢視其與本期研究成果之呼應性或一致性。 26. p.5-3，本研究利用修正氣候因子前、後估算速率所推算之 2050 年台灣周圍未來海平面上升量分別約 200mm 及約 90mm(相對於 2012 年海水面高度)。請評述其與 2013 IPCC AR5 對海平面上升預估量之對應性或差異性。此外，請強化說明 ENSO 及 PDO 有無納入分析時，對於海平面升降變動之推估影響。	25. 已強化說明於 4.4 節。另外，CMD 分析成果中說明太平洋年代際振盪(PDO)對海水面的影響較聖嬰-南方振盪(ENSO)大，此成果與本研究中 EEMD 與多變量擬合法等成果一致。 26. 本研究是以簡單線性擬合方式進行預估。此成果與 IPCC AR5 中預估成果不相同，其原因為研究範圍不同(本研究:台灣周圍海域,IPCC: 全球)以及使用方法不同(本研究: 線性擬合海水面，IPCC:利用氣候模型設定情境進行推估)。另外，圖 4-29 已說明 ENSO 及 PDO 有無納入分析時，對於海平面升降變動之推估影響。由圖 4.29 可知，在未考慮氣候因子情形下，2050 年台灣周圍海水面將上升約 200 mm (相對於 2012 年海水面高度)，而在考慮氣候因子情形下，台灣周圍海水面同樣呈現上升情形，在 2050 年海水面可能僅上升約 90 mm (相對於 2012 年海水面高度)。	審查同意並確認處理說明。 審查同意處理說明。
---	--	--------------------------------------

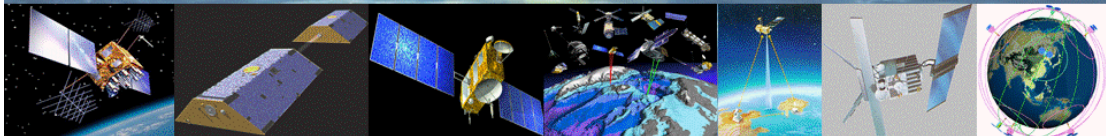
附錄五 期末簡報

臺灣海域未來平均海平面 升降變動率之推估 【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

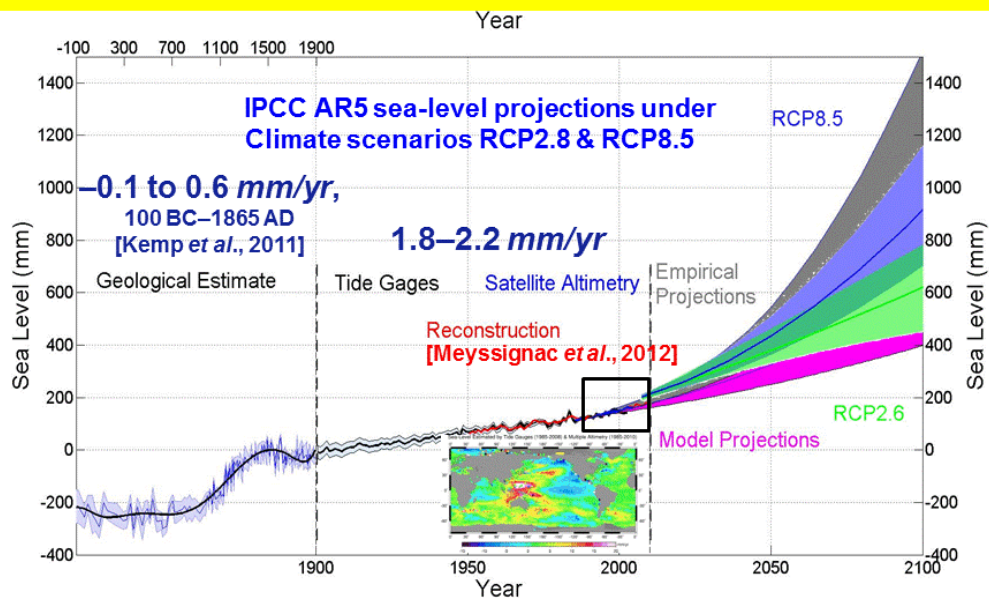


港灣技術研究中心
民國104年11月25日



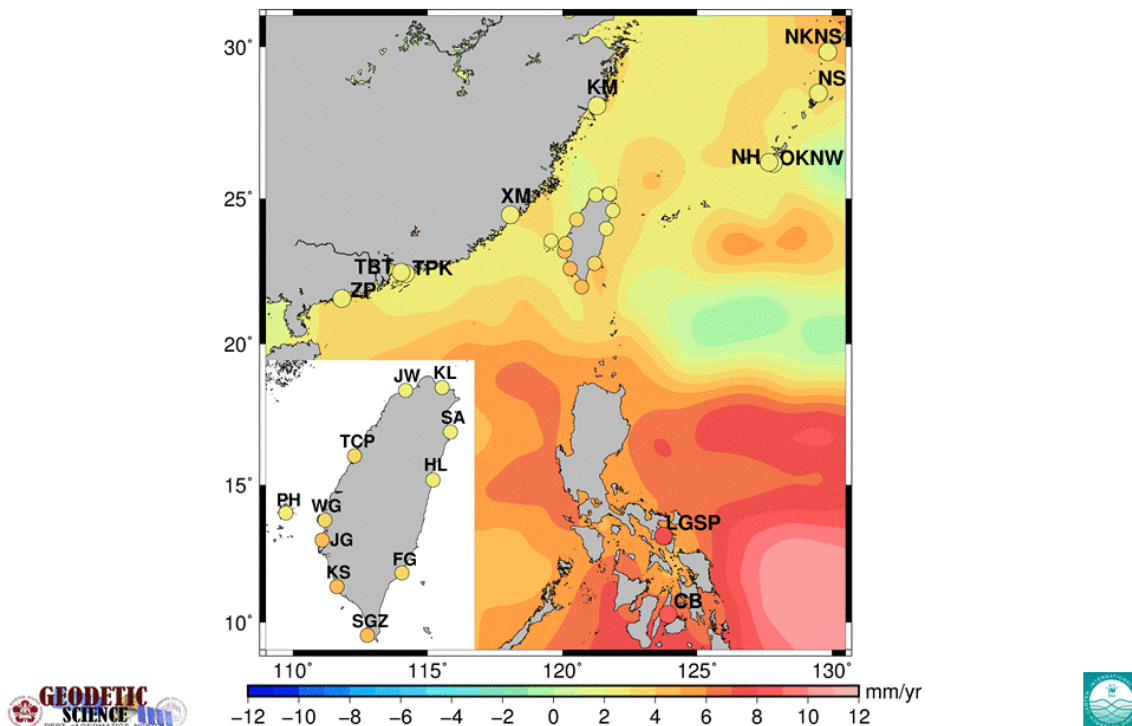
研究動機與目的

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

- 103年度計畫成果(1993-2012 AVISO衛星測高資料)



台灣周圍海水面變化相關研究

- Zhan等人[2009]利用14年衛星測高(Satellite altimetry)資料估計黃海、東海、南海之海面上升(Sea level rise)速率分別為 3.91 mm/yr 、 4.28 mm/yr 、 3.49 mm/yr ，表示台灣附近海域之絕對海水面變化主要呈現上升趨勢。
- 第二期(103年)計劃中二十年各區域的絕對海水面變化呈現由北往南逐漸加快上升速率，尤其以菲律賓海域上升速率最大[郭重言等人，2015]。
- 聖嬰-南方振盪 (El Niño Southern Oscillation, ENSO)現象與太平洋年代際振盪(Pacific Decadal Oscillation, PDO)指數皆對於西太平洋海水面高度變化有高相關 [Merrifield *et al.*, 2012]。
- Zhang and Church [2012]結合衛星測高資料、ENSO指數與PDO指數，並以線性迴歸方式評估ENSO與PDO現象對於太平洋各區域海水面變化影響程度，由結果可知，ENSO主要影響的海水面範圍為 $\pm 20^\circ$ 以內，PDO影響範圍為太平洋各處。

工作項目

5

- 針對臺灣四周近海及國內各商港海域，匯整更新驗潮站和衛星測高儀海水面上升變化和影響因子等相關觀測與研究文獻。
- 臺灣環島驗潮站潮位基準偏移之自動化偵測與校正。
- 應用驗潮站和衛星測高資料，探討影響臺灣海域長、短期平均海水面上升之顯著海氣候因子。
- 應用驗潮站和衛星測高資料，分區進行臺灣海岸地殼變動速率之趨勢分析。
- 評估聖嬰(El Niño)及反聖嬰(La Niña)氣候現象對臺灣海域平均海水面上升速率變動趨勢之影響。
- 評估太平洋年代際低頻震盪(PDO)對臺灣海域平均海水面上升速率變動趨勢之影響。
- 依據臺灣海域長、短期之平均海水面上升變動率，進行相關地殼變動及海洋年際低頻變動之關聯。
- 從全球暖化所造成海洋質、能平衡(budget)之觀點，評估氣候變遷在臺灣海域造成MSLR之本質變動率，進而預估未來之變動趨勢。



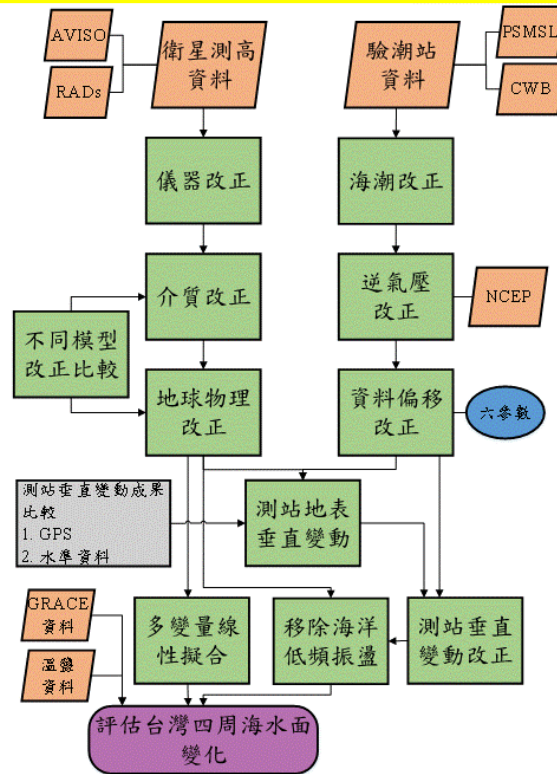
工作進度

6

工作項目	第1月	第2月	第3月	第4月	第5月	第6月	第7月	第8月	第9月	第10月	備註
匯整更新潮位、衛星測高、重力衛星、海洋溫度及鹽度等相關文獻與研究資料	----	----	----								目前進度已完成100%
潮位及衛星測高之率定與改正(包含海氣候因子之改正)以及測站地表垂直變動之趨勢分析	----	----	----								
臺灣環島驗潮站潮位基準偏移之自動化偵測與校正			----	----	----	----					目前進度已完成100%
評估聖嬰(El Niño)及反聖嬰(La Niña)氣候現象對臺灣海域平均海水面上升速率變動趨勢之影響				----	----	----	----				
評估太平洋年代際低頻振盪(PDO)對臺灣海域平均海水面上升速率變動趨勢之影響					----	----	----	----			目前進度已完成100%
依據臺灣海域長、短期之平均海水面上升變動率，進行相關地殼變動及海洋年際低頻變動之關聯							----	----	----	----	
從全球暖化所造成海洋質、能平衡(budget)之觀點，評估氣候變遷在臺灣海域造成MSLR之本質變動率，進而預估未來之變動趨勢							----	----	----	----	目前進度已完成100%
文章和期末報告撰寫							----	----	----	----	
期末報告修改										----	目前進度已完成100%
工作進度估計百分比(累積數)	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	

研究流程圖

7



研究資料

8

■ 潮位站(Tide gauge)

1. 中央氣象局(Central Weather Bureau, CWB)
2. 平均海平面永久服務中心(Permanent Service for Mean Sea Level, PSMSL) [Holgate *et al.*, 2013; PSMSL, 2014]

■ 衛星測高 (資料來源: AVISO與RADs)

1. TOPEX/Poseidon, 1993/01~2002/08
2. Jason-1, 2002/01~2009/01
3. Jason-2, 2008/07~2012/12

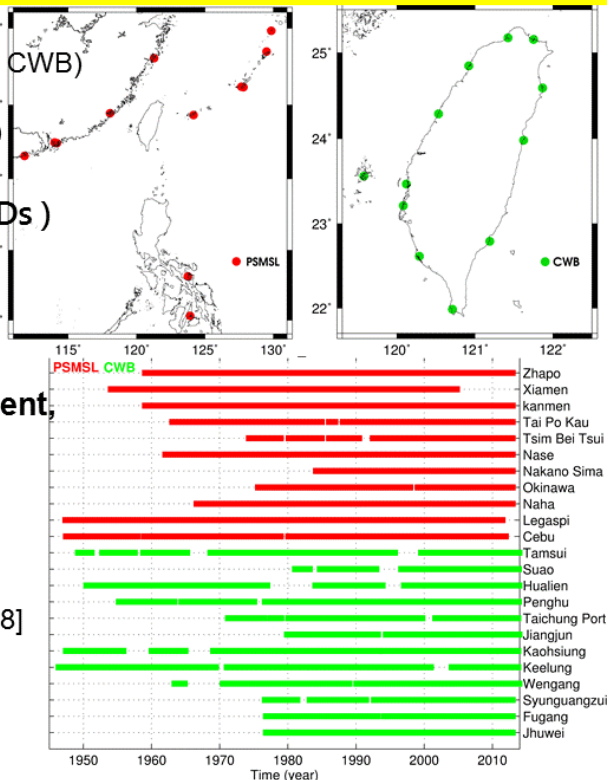
■ 重力反演和氣候實驗(Gravity Recovery and Climate Experiment, GRACE)重力衛星

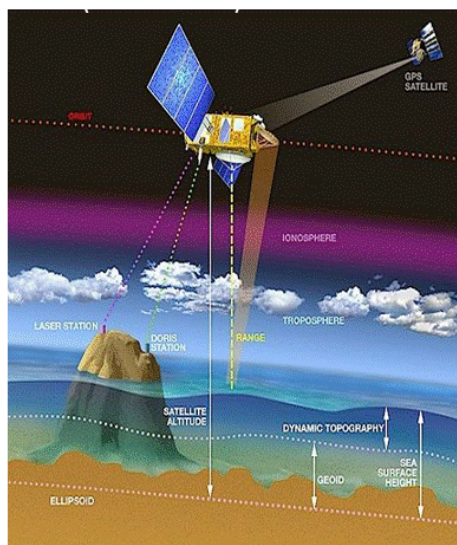
■ 溫鹽資料

1. Ishii, 1945/01~2012/12 [Ishii and Kimoto, 2009]
2. 日本海洋研究開發機構 (JAMSTEC), 2001/01~2012/12 [Hosoda *et al.*, 2008]

■ 氣候指標 (Climate index)

1. 多重型嬰-南方振盪(ENSO)指數 (Multivariate ENSO Index, MEI)
2. PDO指數

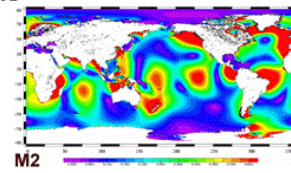




Courtesy CNES/D. Ducros

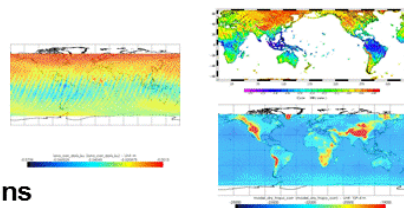
Geophysical corrections

Ocean tides
Solid earth tides
Pole tides
Tidal loading



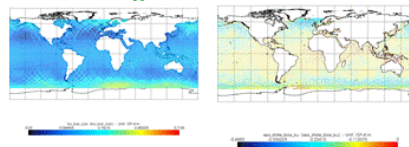
Propagation corrections

Ionosphere
Wet troposphere
Dry troposphere

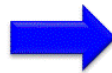


Surface corrections

Inverse barometer
Electromagnetic bias



Data Corrections



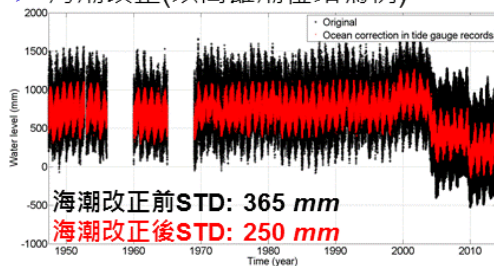
Sea Level Rise, SLR



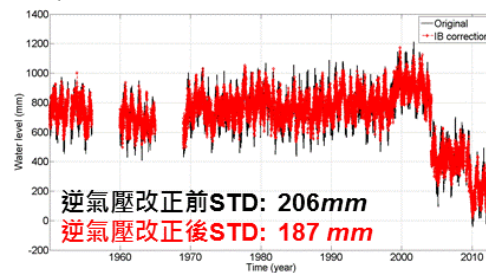
潮位站資料校正



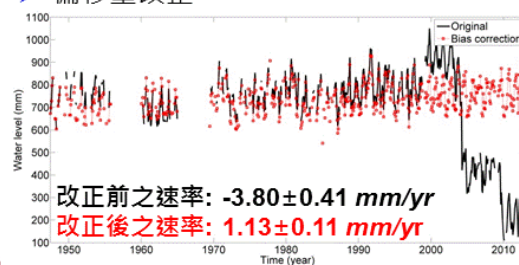
海潮改正(以高雄潮位站為例)



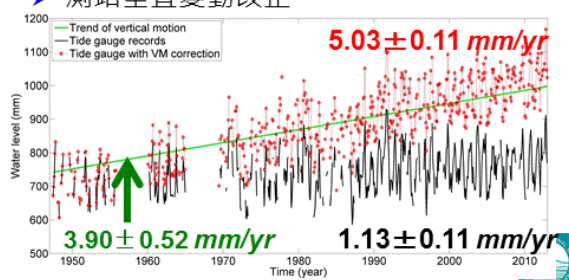
逆氣壓改正



偏移量改正



測站垂直變動改正



總體經驗模態分解法(Ensemble Empirical Mode Decomposition method, EEMD) [Wu and Huang, 2009]

$$X(t) = \sum_{i=1}^n C_i + r_n$$

$$X_E(t) = X(t) + \varepsilon * \text{noise}(t)$$

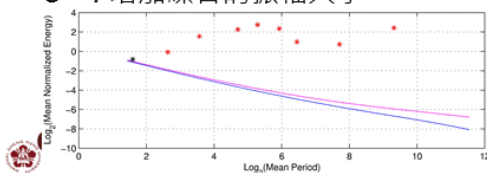
$X(t)$: 海水面高度變化, t 為時間

C_i : 模態函數(Intrinsic Mode Function, IMF)

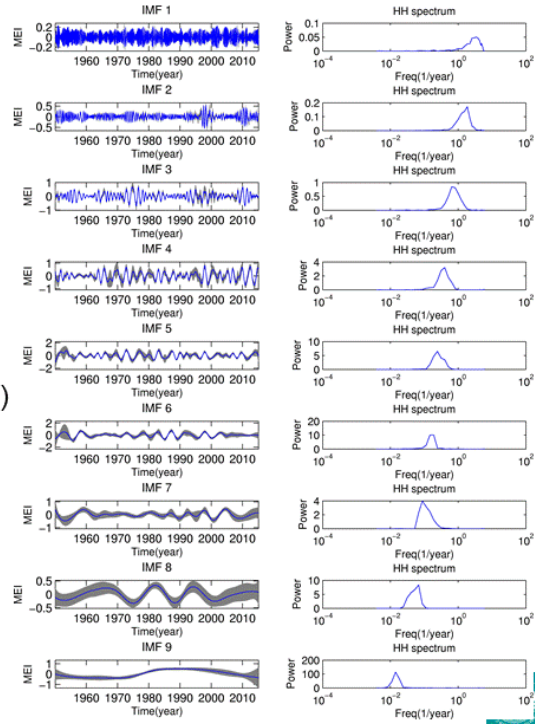
r_n : 各個IMF之殘差值

N : 整體總合成數之數目

ε : 增加噪音的振幅大小

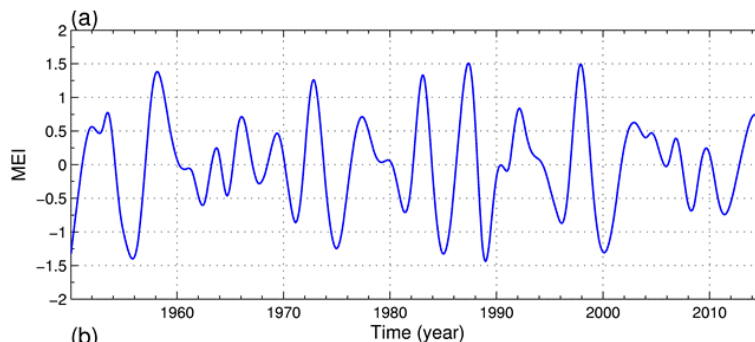


➤ MEI指數

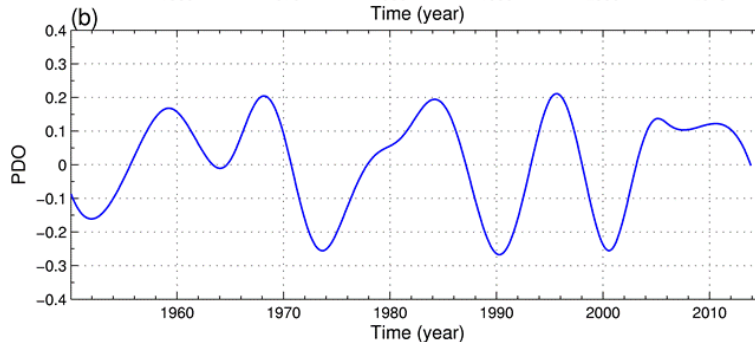


利用EEMD分別自MEI、PDO以及驗潮站資料中萃取相對應頻率之訊號, 以下為自MEI中萃取2~8年準週期訊號以及自PDO中萃取10~30年準週期訊號

MEI
IMF4+IMF5
(週期2~8年)



PDO
IMF6+IMF7
(週期10~30年)



多變量線性擬合 [Zhang and Church, 2012]

$$SL = a + \beta_1 t + \beta_2 ICI + \beta_3 DCI$$

SL : 經高通濾波後之測高資料 a : 偏差

β_1 : 海水面上升速率

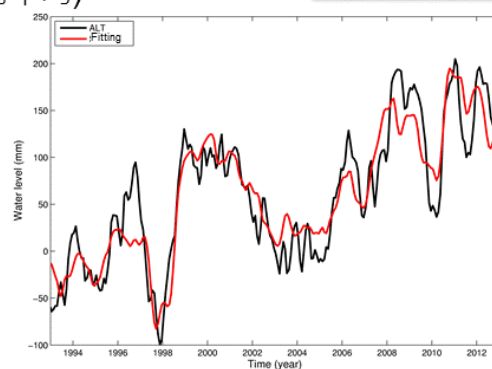
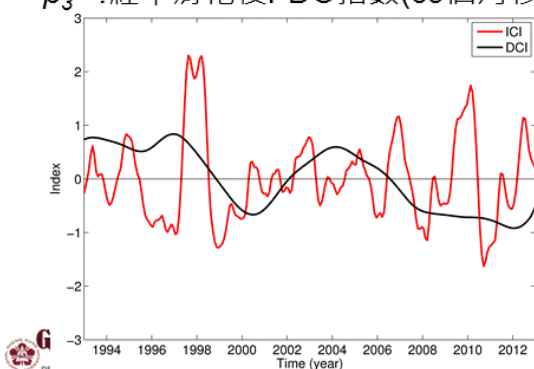
β_2 : 經帶通濾波後MEI指數

β_3 : 經平滑化後PDO指數(65個月移動平均)

衛星測高資料

移除季節性訊號

平滑化處理
(5個月移動平均)



研究方法-合成平均差異推算法

合成平均差異推算法 (Composite Mean Difference Projection, CMD) [Camp and Tung, 2007]

$$P(x) = \overline{T(x, G_1)} - \overline{T(x, G_2)}$$

G : 由影響因子時間序列中設定一門檻值

$T(x, t)$: 時變之空間海水位資料(x :座標、 t :時間)

$$T(x, t) = \sum C_n(t) P_n(x)$$

n : 影響海水位的氣候因子，包含ENSO、PDO

與人類影響因子共三項

$$C_j(t) = \frac{\int T(x, t) P_j(x) dx}{\int P_j^2(x) dx}$$

P : 受氣候因子影響的海水位空間模態

C : 線性迴歸係數

未來海水面預估

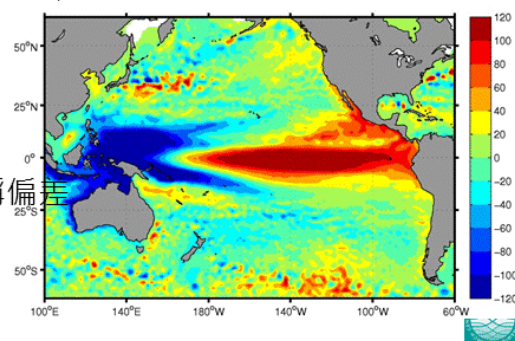
$$y = a + \beta_1 t$$

y : 未來海水面預估值

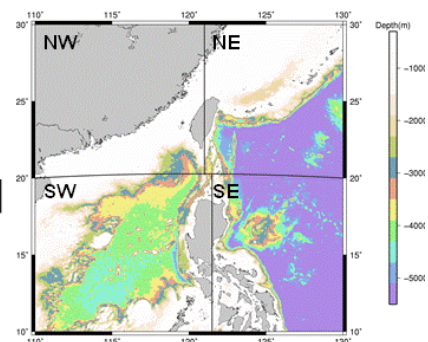
a : 海水面起算基準或稱偏差

β_1 : 海水面上升速率

t : 預估時間點



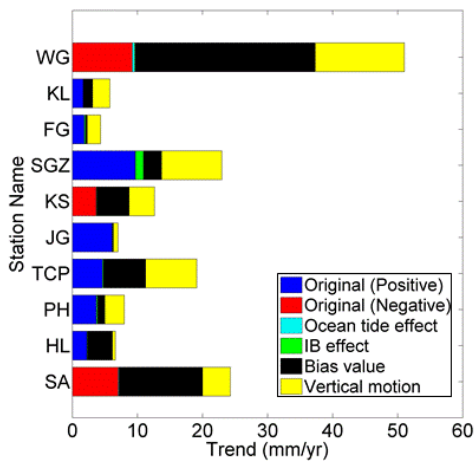
- 改正前後海水面變化速率之差異
- 潮位站之地表垂直變動速率
- 氣候因子與海水面變化之關係
- 移除低頻訊號前、後海面上升速率之差異
- 多變量線性擬合法之成果
- 合成平均差異推算法之成果
- 台灣周遭海域海面上升之原因



台灣周圍未來海水面預估

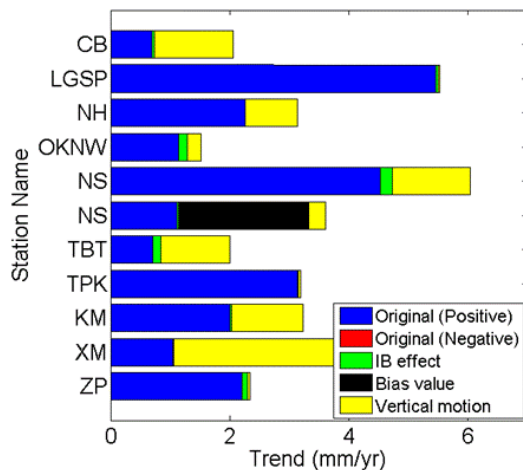
潮位站資料校正之影響量

➤ CWB



➤ PSMSL

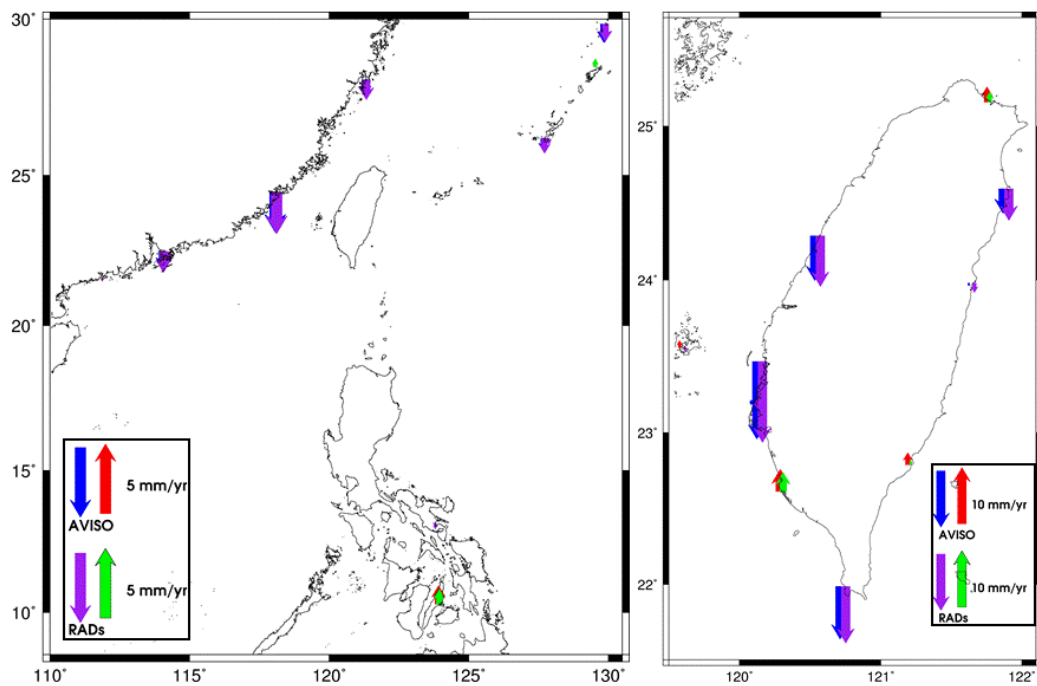
✓使用AVISO衛星測高資料



■ 各項改正之影響量 (mm/yr):

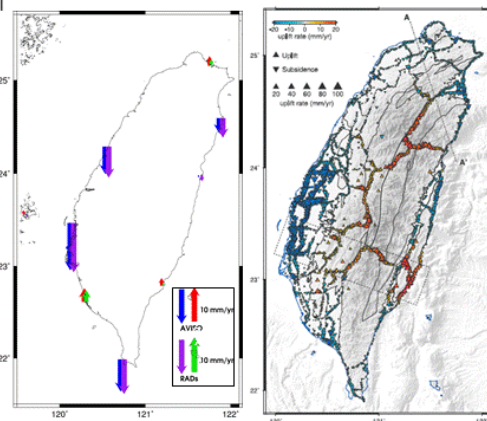
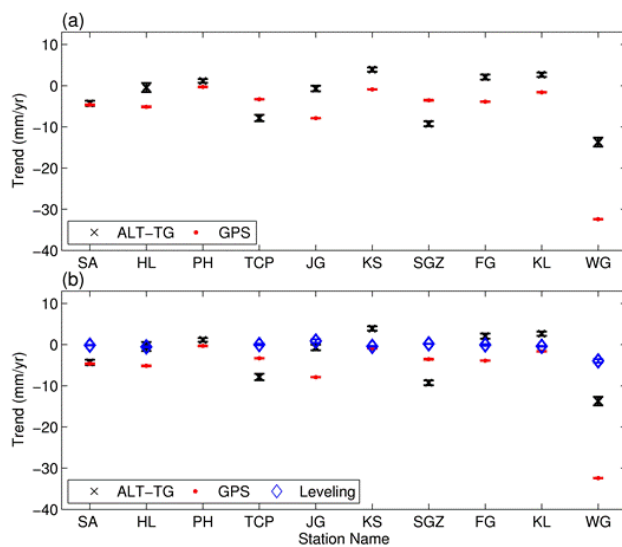
- 海潮改正: 0-1 ➤ 偏移量改正: 0-28
影響量平均值: 0.1 影響量平均值: 6
- 逆氣壓改正: 0-1 ➤ 垂直變動改正: 0-14
影響量平均值: 0 影響量平均值: 5





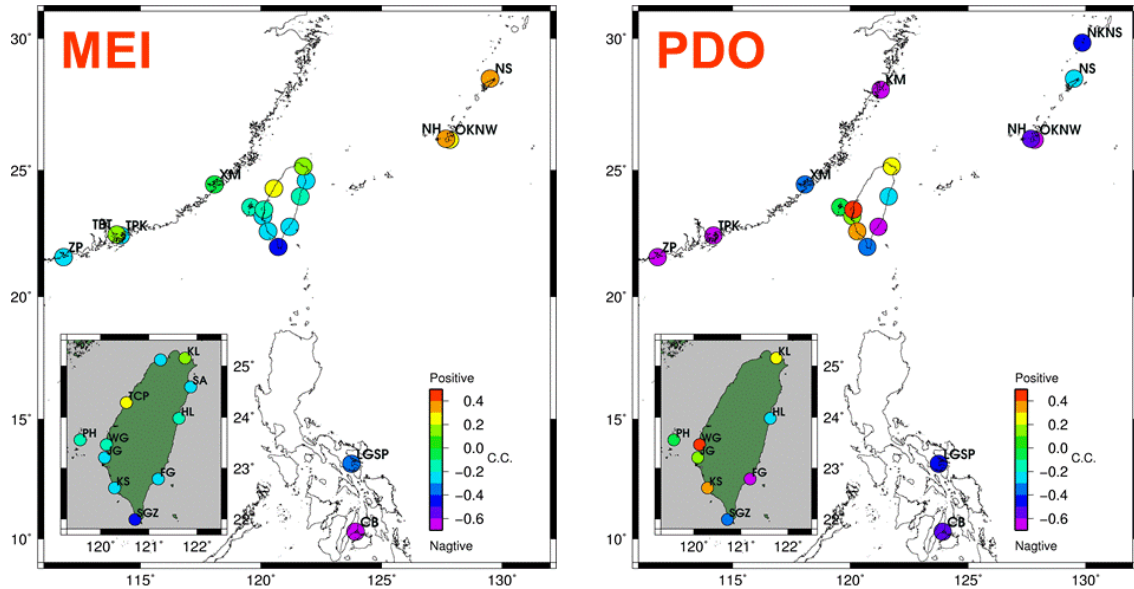
- 估算之地表垂直變動速率與現有成果(水準 (Levelling)與全球衛星定位系統(Global Positioning System, GPS))[內政部國土測繪中心，2014; Ching *et al.*, 2011] 比較

✓ 使用AVISO衛星測高資料



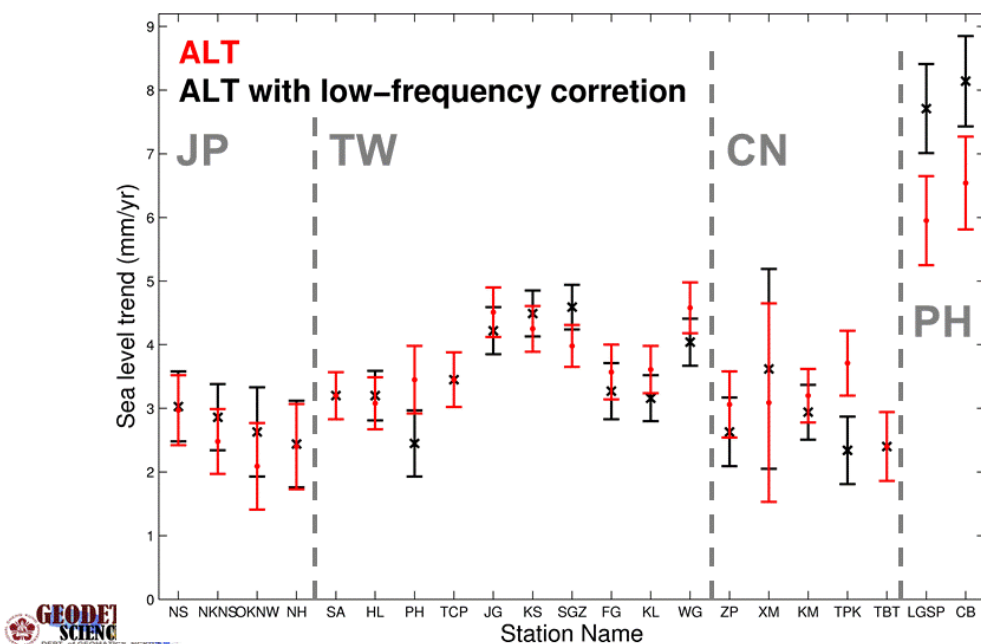
差值平均值與標準偏差 (mm/yr):
 ALT-TG V.S. GPS : -3.71 ± 6.82
 ALT-TG V.S. Leveling : 2.59 ± 5.47
 GPS V.S. Leveling : -6.55 ± 8.55

潮位站資料與氣候因子之相關係數(EEMD)



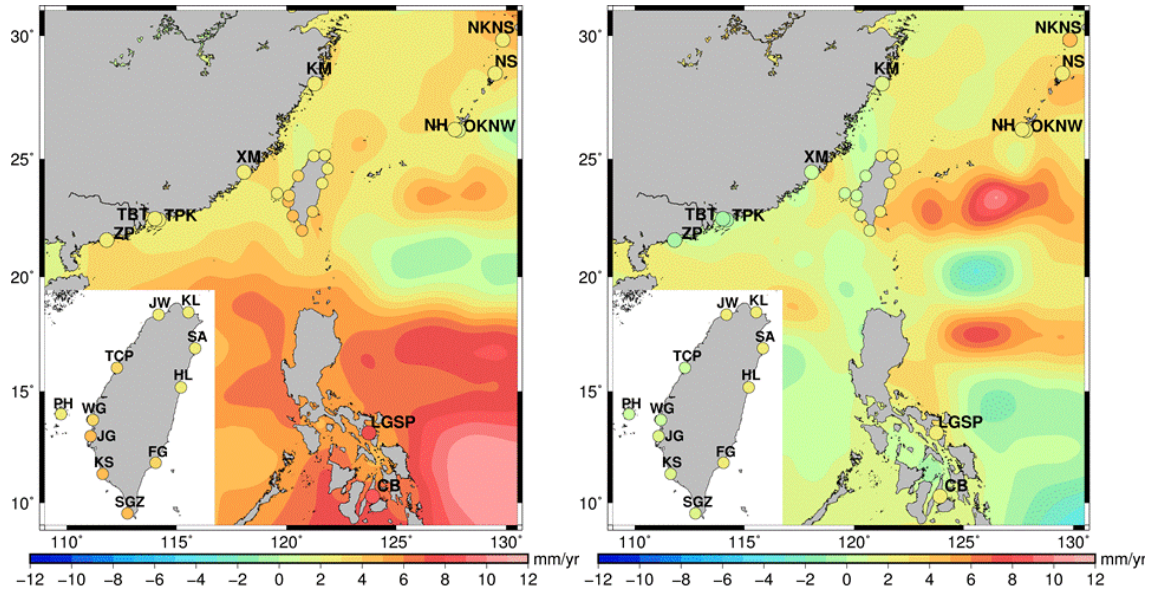
1993-2012絕對海面水位昇降變動速率

自衛星測高資料中移除EEMD萃取之低頻訊號前、後所估算之絕對海水面變化速率與標準偏差

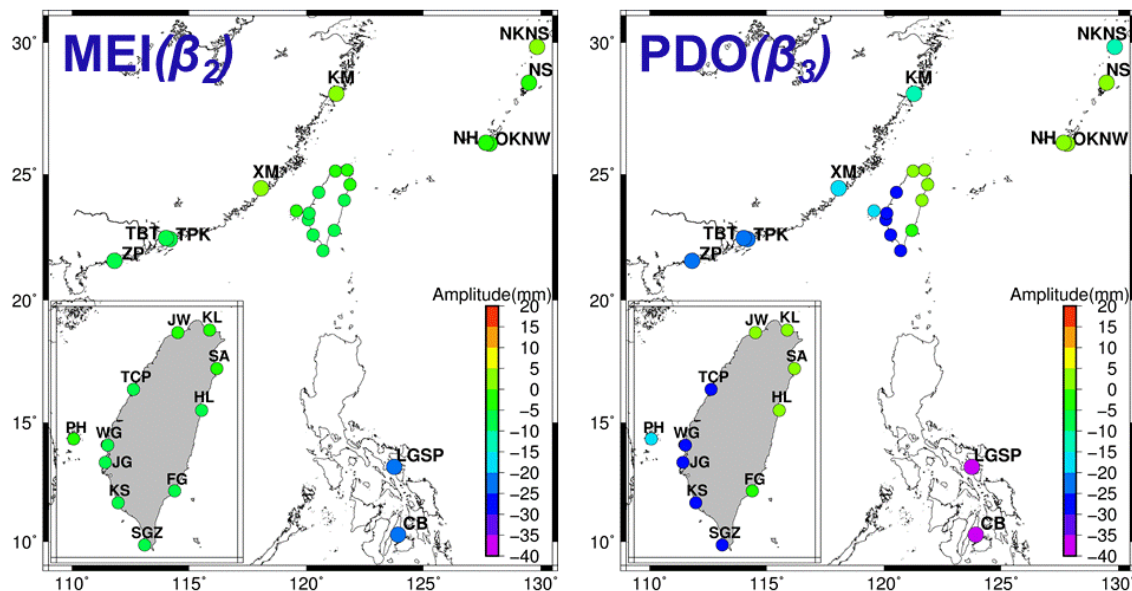


六參數擬合(未考慮氣候因子)

多變量線性擬合(考慮氣候因子)

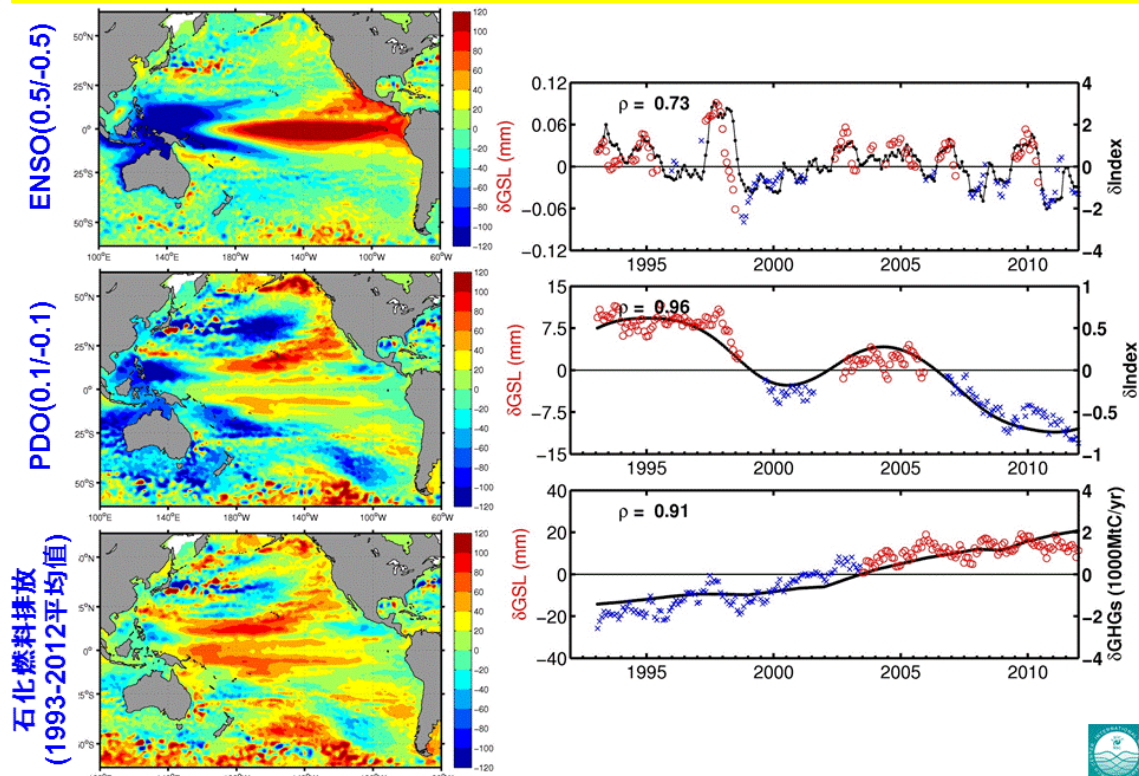


多變量線性擬合之參數



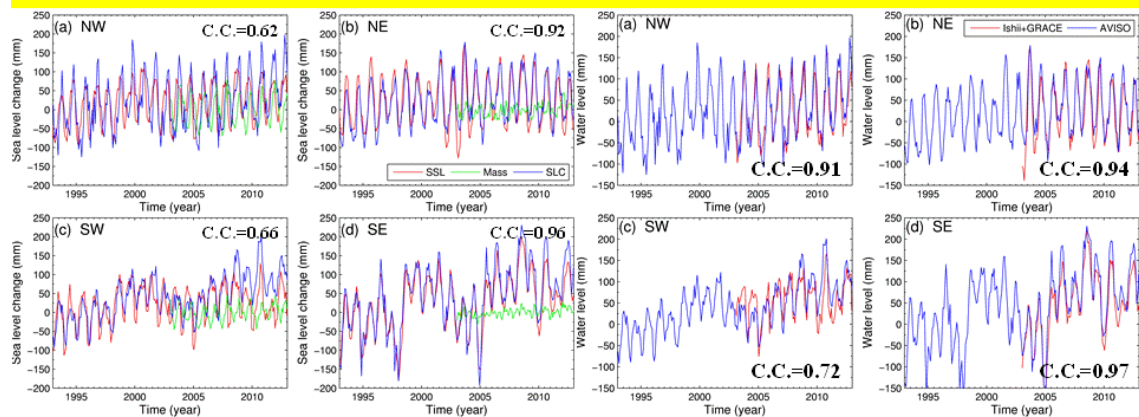
合成平均差異推算法之成果

23

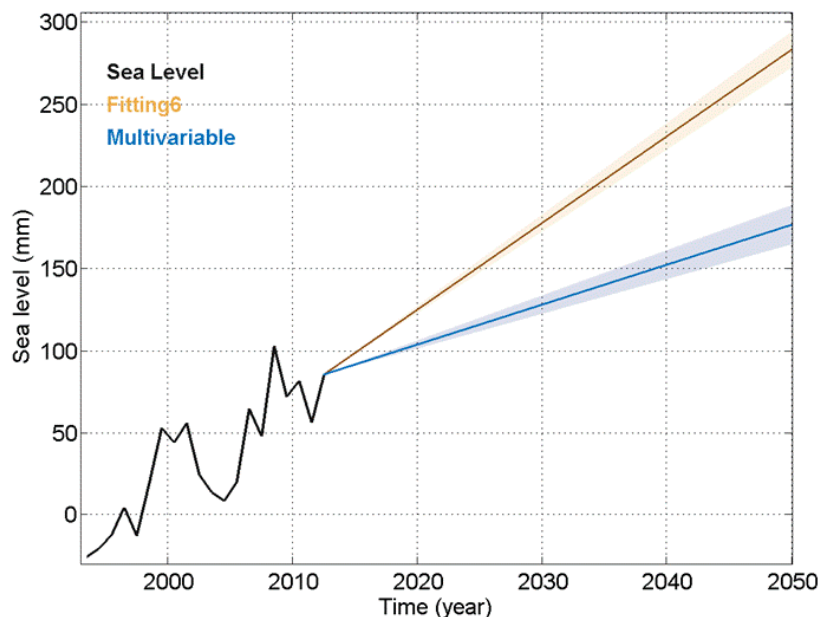


台灣周圍海域海面上升之原因

24



Data	Sea level trend (mm/yr)			
	NE	NW	SE	SW
AVISO	-0.49±0.90	7.83±0.95	14.32±1.90	11.24±0.90
RADs	-1.80±0.92	5.12±0.98	11.95±1.91	10.52±0.90
Ishii	-2.24±0.83	2.31±0.66	9.94±1.66	1.32±0.92
JAMSTEC	-4.92±1.07	-3.10±1.81	8.33±1.68	-1.08±1.68
GRACE	1.85±0.40	0.75±0.45	1.80±0.29	1.47±0.42
Ishii+GRACE	0.00±0.95	3.36±0.80	12.46±1.78	3.04±1.03
JAMSTEC+GRACE	-2.88±1.19	-0.17±1.86	10.87±1.80	1.58±1.79



結論與建議

- 利用原始與改正後的潮位站資料估算之海水面變化速率有顯著差異，其中海潮與逆氣壓改正影響潮位站資料計算海水面變化速率皆為 $0 \sim 1 \text{ mm/yr}$ ，而偏移量改正與測站地表垂直變動改正之影響量平均值為 6 mm/yr 與 5 mm/yr 。因此在臺灣附近海域，若以未經改正的原始潮位站資料計算海水面變化速率，將造成嚴重之估算誤差，其中偏移量和測站地表垂直變動為必要之改正。
- 近二十年潮位站地表垂直變動速率之成果顯示整個研究區域中台灣本島大多呈現地表下沉情形，其中位於台灣西部的塹港潮位站下沉量最大，每年約下陷 14 mm ；菲律賓、香港與日本等潮位站周圍地表皆無明顯垂直變動情形。
- 本研究分別利用EEMD法與多變量擬合法[Zhang and Church, 2012]分析海水位資料與氣候因子之相關性。兩方法之成果大致符合。由成果可知，ENSO現象主要影響的海水面範圍為緯度 $\pm 20^\circ$ 以內，而PDO現象則影響整個台灣周圍海域。

- 自衛星測高資料中移除以EEMD法萃取之海洋低頻訊號。移除低頻訊號前、後衛星測高所估算之各區域絕對海水面上升速率分別為1~8 mm/yr和1~7 mm/yr。
- 在未考慮氣候因子時，利用六參數擬合1993-2012衛星測高資料所估算出的絕對海水面上升速率包含氣候因子之影響，上升速率由北(約2~3 mm/yr)往南(8~12 mm/yr)逐漸增快；而在考慮氣候因子影響下，以多變量擬合1993-2012衛星測高資料所估算之絕對海水面上升速率在各海域則較為一致。
- 本研究利用CMD法，推算氣候因子及人類活動(排放溫室氣體)對海水位之貢獻程度。由成果得知，推算之海水位貢獻量與氣候和人為影響顯著相關，且PDO對海水位變化的影響較ENSO影響大，並利用石化燃料排放量來評估人為影響太平洋海域之海水面上升率，海水面上升速率將下修至~2 mm/yr。



- 分析台灣周圍2003-2012衛星測高、GRACE和海洋溫、鹽度資料得知，台灣東北海域比容海水面與海洋質量變化對於海水面上升速率貢獻量相似，而東南海域之比容海水面與海洋質量變化分別約占海水面上升的70%~90%與20%；而台灣西部溫、鹽觀測量較為稀少，導致計算之比容海水面誤差較大。
- 利用修正氣候因子前、後估算速率所推算之2050年台灣周圍未來海水面上升約200 mm及約90 mm(相對於2012年海水面高度)。

建議：

因僅利用20年衛星數據，使得推算數十年後海水面變化的精度較不明確。後續將繼續探討台灣海水面上升加速度現象對於未來海水面上升之分析將更為精確，進而評估未來海水面對臺灣海岸之衝擊與影響。

