

106-011-7913

MOTC-IOT-105-H3DB003a

臺灣海域海平面上升之加速 特性研究



交通部運輸研究所

中華民國 106 年 3 月

106-011-7913
MOTC-IOT-105-H3DB003a

臺灣海域海平面上升之加速 特性研究

著 者：郭重言、林立青、藍文浩、莊文傑、李俊穎

交通部運輸研究所

中華民國 106 年 3 月

臺灣海域海平面上升之加速特性研究

交通部運輸研究所

GPN : 1010600308
定價 250 元

國家圖書館出版品預行編目(CIP)資料

臺灣海域海平面上升之加速特性研究 / 郭重言等
著. -- 初版. -- 臺北市 : 交通部運研所, 民
106.03
面 ; 公分
ISBN 978-986-05-1923-5(平裝)

1. 海洋水文學 2. 臺灣

351.93

106002152

臺灣海域海平面上升之加速特性研究

著 者：郭重言、林立青、藍文浩、莊文傑、李俊穎
出版機關：交通部運輸研究所
地 址：10548 臺北市敦化北路 240 號
網 址：www.ihmt.gov.tw (中文版/中心出版品)
電 話：(04) 26587132
出版年月：中華民國 106 年 3 月
印 刷 者：
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港灣技術研究中心網站
定 價：250 元
展 售 處：
交通部運輸研究所運輸資訊組•電話：(02)23496880
國家書店松江門市：10485 臺北市中山區松江路 209 號 F1•電話：(02)25180207
五南文化廣場：40042 臺中市中山路 6 號•電話：(04)22260330

GPN : 1010600308

ISBN : 978-986-05-1923-5 (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：臺灣海域海平面上升之加速特性研究			
國際標準書號（或叢刊號） ISBN 978-986-05-1923-5(平裝)	政府出版品統一編號 1010600308	運輸研究所出版品編號 106-011-7913	計畫編號 105-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：國立成功大學 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：臺南市大學路1號 聯絡電話：06-2757575 轉 63826	研究期間 自 105 年 2 月 至 105 年 12 月	
關鍵詞：海平面變化、衛星測高、潮位站、海平面加速度、淹水潛勢圖			
報告內容重點摘要：			
<p>本計畫為四年期計畫，目的在於計算與分析臺灣四周海域之絕對海平面變動速率、海平面上升加速之特性及海平面上升可能造成氾濫區域。本年度之研究重點，在統整前三年計畫成果，並且利用潮位站與衛星測高資料分析台灣附近海域海平面上升速率與加速度特性，最後，結合海平面上升、地表垂直變動量和最大天文潮等因素來評估台灣淹水潛勢區域。</p>			
<p>本研究應用衛星測高與驗潮站資料估算近 20 年(1993-2012)測站地表垂直變動速率之成果顯示：臺灣本島與香港橫瀾島驗潮站主要呈現地表下降之情形，而臺灣西南部驗潮站為顯著下沉區域，其中箔子寮、東石、後壁湖以及塭港驗潮站每年下沉量約 22~30 mm。</p>			
<p>若不考慮氣候因子(聖嬰-南方振盪與太平洋年代際振盪現象)影響，則臺灣海域自 1993~2012 絶對海平面之上升速率，係由北(約 2~3 mm/yr)往南(8~12 mm/yr)逐漸增快；而若考慮並修正氣候因子之影響，則所估算之上升速率則較為一致，速率約 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 $\pm 20^\circ$ 以內，而太平洋年代際振盪現象則影響整個台灣周圍海域。另外，利用近 20 年海平面資料估算台灣周圍海平面上升加速度，結果顯示不同時間段估算之成果並不一致，這表示只依據 20 年長度之資料，仍不足以求得精確之加速度。</p>			
<p>針對海岸溢淹之應用課題，由模擬臺灣沿岸溢淹成果可知，在百年後或到 2112 年，海平面上升影響所造成的淹沒面積約為 187.314 km^2(約佔台灣陸地面積 0.5%)；地表垂直變動影響為 964.064 km^2(約佔面積 2.7%)；最大天文潮影響為 771.811 km^2(約佔面積 2.1%)，而綜合考慮三個影響因子所計算出的總淹沒面積約為 1758.997 km^2(約佔面積 4.9%)。其中，臺灣環島海岸溢淹潛勢威脅最為嚴重區域為西南沿海的彰化、雲林、嘉義與臺南等地，主要影響因素係為西部海潮潮差較大，且西南沿海因超抽地下水而造成地表顯著下沉。</p>			
研究成果之效益：			
<p>(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。</p> <p>(2) 技術創新(科技整合創新)方面：引進及應用國際培訓資源，建置專業整合環境，強化國際互動機制，從海洋到海岸，整合衛星測高、地科及大氣之科研成果，統合 AVISO、RADs 衛星測高及 PSMSL、UHSLC 全球平均海平面資料庫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，</p>			

應用內政部地政司衛星測量中心提供之 1/20,000 航照正射影像所製作的臺灣地區 5mx5m 數值高程模型(DEM)，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，並就臺灣環島近岸海域之分區特性，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，進而詳實提供近 20 年期間(1993~2012)之平均海平面昇降變動速率、加速率與地殼變動速率，掌握未來海平面昇降變動之趨勢，評估未來可能造成之海岸溢淹區域與範圍，並探討對海岸環境之衝擊影響，推動並落實總體性之海岸保育、濕地保護與近岸溢淹防災策略。

- (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(1993~2012)之平均海平面昇降變動速率，週嚴地評估全球暖化、氣候變遷之衝擊與影響，提供政府及業界掌握臺灣海岸經營管理及海岸溢淹水情，藉以促進都市防洪排水規劃、設計及維護等工程之效能提昇，有效因應全球暖化所造成的氣候變遷課題，強化知災、防災與減災資訊，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响，呼籲減少人為溫室效應，達成海岸保育、濕地保護與永續利用之目標。
- (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，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，在國內自力完成近 20 年期間(1993~2012)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，並預為推估未來百年後臺灣環島海岸之溢淹潛勢威脅。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、濕地保護、港灣規劃、設計及維護的應用參考；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
106 年 3 月	208	250	凡屬機密性出版品均不對外公開。普通性出版品，公營、公益機關團體及學校可函洽本所免費贈閱；私人及私營機關團體可按定價價購。

機密等級：

密 機密 極機密 絶對機密
 (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: Analysis of regional sea level accelerations around Taiwan			
ISBN ISBN 978-986-05-1923-5 (pbk)	GOVERNMENT PUBLICATIONS NUMBER 1010600308	IOT SERIAL NUMBER 106-011-7913	PROJECT NUMBER 105-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 Feburary 2016 TO December 2016
RESEARCH AGENCY: National Cheng Kung University PRINCIPAL INVESTIGATOR: Kuo Chung-Yen CO-PRINCIPAL INVESTIGATOR: Lin Li-Ching RESEARCH ASSISTANT: Lan Wen-Hau ADDRESS: No.1, University Rd., Tainan City 701, Taiwan PHONE: 06-2757575 ext 63826			
KEY WORDS: Sea level change, Satellite altimetry, Tide gauge, Sea level accelerations, Flood risk map			
ABSTRACT:			
<p>This project is a four-year plan aimed at the assessment of the rates and accelerations of regional sea level rise around Taiwan, and the flooding areas in response to the future sea level rise along Taiwan coast. The major achievements of this year included the integration of the previous projects within the past three years, the sea level rates and accelerations determined using tide gauge and satellite altimeter data around Taiwan, and the analysis of the future flooding areas in Taiwan caused by sea level rise, vertical land movement, and highest astronomical tide.</p>			
<p>The results show that the estimated vertical motions at tide gauges around Taiwan and Waglan Island are negative during the past two decades. The southwestern area of Taiwan has larger rates of subsidence, especially at Boziliao, Dongshi, Houbihu and Wengang tide gauge stations with rates of 22-30 mm/yr. Without considering the impacts of climate factors (El Niño Southern Oscillation and Pacific Decadal Oscillation), the absolute sea level trends around Taiwan derived by the six-parameter fitting method gradually increase from the north of Taiwan at rates of 2~3 mm/yr to the south of Taiwan at 8~12 mm/yr; however, the rates of sea level trends are roughly uniform (-2~4 mm/yr) using the multivariate fitting method by considering climate factors.</p>			
<p>The El Niño Southern Oscillation 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 Pacific Decadal Oscillation phenomenon. Moreover, the sea level accelerations are not consistent in different time periods, indicating that the 20-year data is still not long enough to estimate accurate sea level acceleration. Finally, we conclude that sea level rise, vertical land motion, highest astronomical tide, and the combined effects will flood a total land area of 187.314 km² (about 0.5% of the total area of Taiwan), 964.064 km² (about 2.7%), 771.811 km² (about 2.1%), and 1758.997 km² (4.9%), respectively. From the perspective of combined scenario, the southwestern coastal area in Taiwan is the most vulnerable resulting from the inundation, especially Changhua, Yunlin, Chiayi, and Tainan. The main reasons are the higher tidal heights along the west coast of Taiwan and significant land subsidence in the southwestern plains due to groundwater pumping.</p>			
DATE OF PUBLICATION March 2017	NUMBER OF PAGES 208	PRICE 250	CLASSIFICATION <input type="checkbox"/> RESTRICTED <input type="checkbox"/> CONFIDENTIAL <input type="checkbox"/> SECRET <input type="checkbox"/> TOP SECRET <input checked="" type="checkbox"/> UNCLASSIFIED
The views expressed in this publication are not necessarily those of the Ministry of Transportation and Communications.			

臺灣海域海平面上升之加速特性研究

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 前言	1-1
1.2 文獻回顧	1-3
1.3 工作流程	1-13
1.4 工作項目與執行進度	1-14
1.5 本文架構	1-15
1.6 第一章完成之工作項目	1-16
第二章 研究資料	2-1
2.1 測高衛星	2-1
2.2 潮位站	2-5
2.3 氣候指標	2-12
2.4 數值高程模型	2-15
2.5 地表垂直變動量	2-16
2.6 最大天文潮	2-17
2.7 濕地	2-18
2.8 第二章完成之工作項目	2-19

第三章 衛星測高資料改正與海平面變化計算	3-1
3.1 測高資料改正	3-1
3.2 海平面上升速率與加速度之計算	3-4
3.2.1 六參數擬合	3-4
3.2.2 多變量擬合	3-6
3.3 臺灣周遭海平面上升速率與加速度	3-9
3.3.1 1993-2012 絶對海平面昇降變動速率	3-9
3.3.2 2003-2012 絶對海平面昇降變動速率	3-14
3.3.3 1993-2015 絶對海平面昇降變動速率	3-18
3.3.4 絶對海平面上升加速度	3-21
3.4 第三章完成之工作項目	3-28
第四章 潮位站資料改正與海平面變化計算	4-1
4.1 海潮改正	4-1
4.1.1 調和分析法	4-1
4.1.2 移動平均法	4-4
4.1.3 成果分析	4-6
4.2 逆氣壓改正	4-7
4.3 偏移量改正	4-10
4.4 潮位站地表垂直變動改正	4-20
4.4.1 潮位站地表垂直變動速率	4-20
4.4.2 近二十年潮位站地表垂直變動速率	4-21
4.4.3 近十年與近二十年潮位站之地表垂直變動速率	4-23

4.4.4 估算之二十年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	4-27
4.5 絶對海平面上升速率與加速度.....	4-32
4.5.1 1993-2012 絶對海平面昇降變動速率	4-32
4.5.2 2003-2012 絶對海平面昇降變動速率	4-35
4.5.3 絶對海平面上升加速度	4-40
4.6 第四章完成之工作項目	4-42
第五章 臺灣沿岸淹水潛勢.....	5-1
5.1 靜態淹水	5-1
5.1.1 溢淹情境說明	5-1
5.1.2 區域成長法	5-3
5.2 臺灣沿岸靜態淹水成果	5-4
5.2.1 臺灣沿岸淹水潛勢圖	5-4
5.2.2 濕地損失評估	5-10
5.3 第五章完成之工作項目	5-12
第六章 結論與建議.....	6-1
6.1 結論	6-1
6.2 建議	6-4
參考文獻	參-1
附錄一 1993-2012 中央氣象局逐時潮位站資料	附錄 1-1
附錄二 潮汐分潮週期	附錄 2-1
附錄三 基準偏移程式之操作手冊	附錄 3-1
附錄四 期中報告審查意見處理情形表	附錄 4-1

附錄五 期末報告審查意見處理情形表 附錄 5-1

附錄六 期末簡報 附錄 6-1

表 目 錄

表 1.1 臺灣周圍海域海平面上升速率	1-10
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	2-8
表 2.3 臺灣附近海域中央氣象局資料庫之潮位站資訊	2-8
表 2.4 臺灣沿海的重要濕地	2-18
表 3.1 1993-2012 臺灣周圍絕對海平面上升速率	3-13
表 3.2 多變量線性擬合 1993-2012 測高資料中係數 g 與 h	3-13
表 3.3 2003-2012 臺灣周圍絕對海平面上升速率	3-17
表 3.4 多變量線性擬合 2003-2012 測高資料中係數 g 與 h	3-18
表 3.5 1993-2012 臺灣周圍絕對海平面上升速率與加速度	3-25
表 4.1 平均海平面永久服務中心潮位站資料經海潮改正後所估算之海平面上升速率	4-6
表 4.2 中央氣象局潮位站資料經海潮改正後所估算之海平面上升速率	4-6
表 4.3 平均海平面永久服務中心潮位站資料經海潮與逆氣壓效應改正後所估算之海平面上升速率	4-10
表 4.4 中央氣象局潮位站資料經海潮與逆氣壓效應改正後所估算之海平面上升速率	4-10
表 4.5 平均海平面永久服務中心潮位站資料經海潮、逆氣壓效應與基準偏移改正後所估算之海平面上升速率	4-19
表 4.6 中央氣象局潮位站資料經海潮、逆氣壓效應與基準偏移改正後所估算之海平面上升速率	4-19
表 4.7 平均海平面永久服務中心潮位站垂直變動速率	4-22
表 4.8 中央氣象局潮位站垂直變動速率	4-22
表 4.9 平均海平面永久服務中心潮位站之近十年與近二十年地表垂直變動速率	4-25
表 4.10 中央氣象局潮位站之近十年與近二十年地表垂直變動速率	4-26

表 4.11 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	4-30
表 4.12 估算之潮位站地表垂直變動速率與水準成果比較	4-31
表 4.13 利用潮位站資料估算 1993-2012 臺灣周圍絕對海平面上升速率	4-34
表 4.14 多變量線性擬合 1993-2012 潮位站資料中係數 g 與 h	4-35
表 4.15 利用潮位站資料估算 2003-2012 臺灣周圍絕對海平面上升速率	4-38
表 4.16 多變量線性擬合 2003-2012 潮位站資料中係數 g 與 h	4-39
表 4.17 1993-2012 臺灣周圍絕對海平面上升速率與加速度.....	4-42
表 5.1 百年後(2112 年)淹水潛勢比較	5-5
表 5.2 在綜合情境下濕地損失比例統計表	5-11

圖 目 錄

圖 1.1 計畫流程圖	1-13
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 潮位站觀測海平面示意圖	2-6
圖 2.4 臺灣附近海域之潮位站資料涵蓋時間圖	2-10
圖 2.5 臺灣附近海域潮位站位置分佈圖	2-10
圖 2.6 高雄潮位站逐時資料	2-11
圖 2.7 基隆潮位站逐時資料	2-11
圖 2.8 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風場影響	2-14
圖 2.9 多重聖嬰-南方振盪指數及太平洋年代際振盪指數	2-15
圖 2.10 本研究使用的臺灣 5m x 5 m 數值高程模型圖幅之示意圖	2-16
圖 2.11 臺灣本島之地表垂直變動速率圖	2-17
圖 2.12 利用 TWN5T 模型模擬臺灣周遭海域在 18.6 年潮汐週期中之最大天文潮	2-18
圖 2.13 臺灣沿海重要濕地之分布圖	2-19
圖 3.1 測高衛星基本觀測原理	3-4
圖 3.2 宿霧潮位站周圍 2° 範圍內之測高資料平均	3-5
圖 3.3 濾波和正規化處理後多重 ENSO 指數與太平洋年代際振盪指數成果	3-8
圖 3.4 宿霧潮位站周圍 2° 範圍內之測高資料平均	3-8
圖 3.5 宿霧潮位站周圍 2° 範圍內之測高資料平均	3-9
圖 3.6 未考慮氣候因子影響下之 1993-2012 臺灣周圍絕海平面上升速率	3-11
圖 3.7 考慮氣候因子影響下之 1993-2012 臺灣周圍絕對海平面上升速率	3-11
圖 3.8 多變量線性擬合 1993-2012 測高資料中多重 ENSO 指數之係數 g	3-12

圖 3.9 多變量線性擬合 1993-2012 測高資料中太平洋年代際振盪之係數 h	3-12
圖 3.10 未考慮氣候因子影響下之 2003-2012 臺灣周圍絕對海平面上升速率	3-15
圖 3.11 考慮氣候因子影響下之 2003-2012 臺灣周圍絕對海平面上升速率	3-15
圖 3.12 2003-2012 臺灣周圍絕對海平面變化的多變量擬合	3-16
圖 3.13 多變量線性擬合 2003-2012 測高資料中多重 ENSO 指數之係數 g	3-16
圖 3.14 變量線性擬合 2003-2012 測高資料中太平洋年代際振盪之係數 h	3-17
圖 3.15 未考慮氣候因子影響下之 1993-2015 臺灣周圍絕對海平面上升速率	3-19
圖 3.16 臺灣周圍絕對海平面變化	3-20
圖 3.17 考慮氣候因子影響下之 1993-2015 臺灣周圍絕對海平面上升速率	3-20
圖 3.18 多變量線性擬合 1993-2015 測高資料中多重 ENSO 指數之係數 g	3-21
圖 3.19 多變量線性擬合 1993-2015 測高資料中太平洋年代際振盪之係數 h	3-21
圖 3.20 1993-2012 臺灣周圍絕對海平面上升速率	3-23
圖 3.21 1993-2012 臺灣周圍絕對海平面上升加速度	3-23
圖 3.22 1993-2015 臺灣周圍絕對海平面上升速率	3-24
圖 3.23 1993-2015 臺灣周圍絕對海平面上升加速度	3-24
圖 3.24 統計經海洋數據存檔、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平面之加/減速變化	3-26
圖 3.25 1993-2015 臺灣周圍絕對海平面變化	3-27
圖 3.26 考慮氣候因子下 1993-2012 臺灣周圍絕對海平面上升速率	3-27
圖 3.27 考慮氣候因子下 1993-2012 臺灣周圍絕對海平面上升加速度	3-28
圖 4.1 基隆潮位站之海潮效應改正	4-3
圖 4.2 高雄潮位站之海潮效應改正	4-3
圖 4.3 海潮改正前後之基隆與高雄潮位站資料差異圖	4-4

圖 4.4 基隆潮位站逐時平均與移動平均時間序列	4-5
圖 4.5 高雄潮位站逐時平均與移動平均時間序列	4-5
圖 4.6 歐洲中期天氣預報中心月平均全球平均海平面壓力	4-8
圖 4.7 基隆潮位站之逆氣壓效應改正	4-9
圖 4.8 高雄潮位站之逆氣壓效應改正	4-9
圖 4.9 基隆潮位站之季節性訊號移除	4-13
圖 4.10 高雄潮位站之季節性訊號移除	4-13
圖 4.11 基隆潮位站之偏移量偵測	4-14
圖 4.12 高雄潮位站之偏移量偵測	4-15
圖 4.13 基隆潮位站資料偏移量改正	4-17
圖 4.14 高雄潮位站資料偏移量改正	4-17
圖 4.15 模擬成功潮位資料之基準偏移	4-18
圖 4.16 成功潮位站資料偏移量改正	4-18
圖 4.17 竹圍潮位站之地表垂直變動訊號	4-21
圖 4.18 潮位站近二十年之地表垂直變動速率圖	4-23
圖 4.19 平均海平面永久服務中心潮位站之近十年與近二十年地表垂直變動成果	4-24
圖 4.20 中央氣象局潮位站之近十年與近二十年地表垂直變動速率	4-25
圖 4.21 後壁湖潮位站之地表垂直變動訊號	4-26
圖 4.22 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	4-28
圖 4.23 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	4-29
圖 4.24 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	4-29

圖 4.25 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	4-30
圖 4.26 台中港潮位站資料偏移量改正	4-31
圖 4.27 未考慮潮位站資料中氣候因子影響下之 1993-2012 臺灣周圍絕對海平面上升速率	4-32
圖 4.28 考慮潮位站資料中氣候因子影響下之 1993-2012 臺灣周圍絕對海平面上升速率	4-33
圖 4.29 多變量線性擬合 1993-2012 潮位站資料中多重 ENSO 指數之係數 g	4-33
圖 4.30 多變量線性擬合 1993-2012 潮位站資料中太平洋年代際振盪之係數 h	4-34
圖 4.31 未考慮潮位站資料中氣候因子影響下之 2003-2012 臺灣周圍絕對海平面上升速率	4-36
圖 4.32 考慮潮位站資料中氣候因子影響下之 2003-2012 臺灣周圍絕對海平面上升速率	4-37
圖 4.33 多變量線性擬合 2003-2012 潮位站資料中多重 ENSO 指數之係數 g	4-37
圖 4.34 多變量線性擬合 2003-2012 潮位站資料中太平洋年代際振盪之係數 h	4-38
圖 4.35 1993-2012 臺灣周圍絕對海平面上升速率	4-40
圖 4.36 1993-2012 臺灣周圍絕對海平面上升加速度	4-41
圖 4.37 經各項改正後之花蓮潮位站海平面變化	4-41
圖 5.1 靜態淹水示意圖	5-3
圖 5.2 臺灣本島海岸線網格點示意圖與區域成長法搜尋方式	5-4
圖 5.3 不同情境下的淹水潛勢圖	5-6
圖 5.4 台中與彰化淹水潛勢圖	5-7
圖 5.5 雲林與嘉義淹水潛勢圖	5-8
圖 5.6 台南淹水潛勢圖	5-9
圖 5.7 核能發電廠周圍之淹水潛勢圖	5-10

圖 5.8 四草濕地與曾文河口濕地淹水潛勢圖 5-12

第一章 緒論

1.1 前言

本計畫以推展「全球暖化引致臺灣海域海面水位昇降變動率之評估」為目標。規劃研究之總期程自民國 102 年起，共計 4 年，主要研究方式為結合衛星測高(Satellite altimetry)與潮位站(Tide gauge)海平面變動資料，計算與分析臺灣四周近海及各商港海域之絕對海平面變動速率、海平面上升加速之特性及海平面上升可能造成氾淹區域與面積，並於計算中減低潮位站紀錄受基準偏移與測站地表垂直變動之影響以及衛星測高資料受海洋低頻訊號干擾等影響。期望計算成果能掌握全球暖化對臺灣海域之衝擊與影響。

本研究已於 102 年度(第一期)[郭重言等人，2014]、103 年度 (第二期)[郭重言等人，2015]以及 104 年度 (第三期)[郭重言等人，2016]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)絕對海平面變化速率，分區為臺灣北部、臺灣南部、菲律賓、香港與日本等五區。臺灣北部海域絕對海平面變化速率為 $-1\sim2\text{ mm/yr}$ ，南部海域變化速率為 $4\sim8\text{ mm/yr}$ ，菲律賓地區的變化速率為 $8\sim14\text{ mm/yr}$ ，顯示臺灣南方海域海平面上升速率較臺灣北部快，且變化速率由北向南逐漸增加。而臺灣西方海域(香港地區) 海平面上升速率($3\sim8\text{ mm/yr}$)較臺灣東方海域(日本地區)變化速率($0\sim1\text{ mm/yr}$)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平面變化速率為 $6\sim8\text{ mm/yr}$ 。然而第一期(102 年度) 計畫僅利用十年資料進行潮位站地表垂直變動與海平面速率計算，導致估算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 $\pm2.41\text{ mm/yr}$ ，此誤差進而影響利用潮位站資料計算海平面上升速率之精度。衛星測高時間涵蓋達二十年(1993-至今)，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]。

第二期(103 年度)計畫應用臺灣四周海域近二十年(1993-2012)衛星測高與潮位站資料估算潮位站地表垂直變動速率與海平面上升速率。結果顯示相較於十年資料，利用二十年資料估算地表垂直變動速率之精度大幅提升，測站地表垂直變動速率的標準偏差平均值為 $\pm 0.66\text{ mm/yr}$ 。由衛星測高與潮位站資料估算近二十年臺灣附近絕對海平面變化速率之結果顯示，臺灣海域絕對海平面上升速率為 $2\sim 3\text{ mm/yr}$ ，菲律賓地區為 $6\sim 8\text{ mm/yr}$ ，表示臺灣南部海域的海平面上升速率較臺灣北部快，而臺灣西方海域(香港地區)絕對海平面上升速率($1\sim 5\text{ mm/yr}$)較臺灣東方海域(日本地區) ($2\sim 3\text{ mm/yr}$)快。衛星測高資料估算整個臺灣四周(緯度： $10^\circ\text{N}\sim 30^\circ\text{N}$ 、經度： $110^\circ\text{E}\sim 130^\circ\text{E}$)近二十年海平面變化呈現 $4.4\sim 5.2\text{ mm/yr}$ 的速率在上升。比較十年與二十年各區域的絕對海平面變化，兩者呈現相同趨勢，但各區域十年與二十年之成果數據上仍有些許差異，其原因推測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 (El Niño Southern Oscillation, ENSO) 現象或太平洋年代際振盪(Pacific Decadal Oscillation, PDO))的影響所造成。

第三期(104 年度)計畫評估臺灣附近海域海平面變化與海洋低頻震盪之相關性，最後並預估未來(2050 年)海平面變動。第三期(104 年度)研究中分別利用總體經驗模態分解法(Ensemble Empirical Mode Decomposition, 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。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影響(改正前、後分別為 $1\sim 8\text{ mm/yr}$ 、 $1\sim 7\text{ mm/yr}$)。而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(聖嬰-南方振盪 (ENSO) 與太平洋年代際振盪(PDO)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，臺灣周圍海平面計算上升速率由北(約 $2\sim 3\text{ mm/yr}$)往南($8\sim 12\text{ mm/yr}$)逐漸增快；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 $\pm 20^\circ$ 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。最後利用修正氣候因子前、後測高資料所推算之 2050 年臺灣四周未來海平面將分別上升約 200 mm 及約 90 mm (相對於 2012 年海平面估計值)。另外，第三期(104 年度)研究中亦利用溫度與鹽度資料、重力反演和氣候實驗(Gravity Recovery and Climate Experiment, 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平面變化、海水質量變化與絕對海平面變化。由於臺灣西部溫、鹽觀測量較為稀少，導致計算之比容海平面誤差較大。2003-2012 臺灣東部海域海洋質量變化速率為 2 mm/yr，而東北部與東南部海域之比容海平面速率分別為-2~-5 mm/yr 與 8~10 mm/yr，表示東南海域之比容海平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平面變化推估臺灣東北與東南海域絕對海平面與衛星測高估算之速率間仍約有 1~2 mm/yr 的不確定量。本年度(105)計劃將統整前三年計畫成果，據此評估臺灣附近海域海平面上升速率與加速度特性，並結合海平面上升、地表垂直變動量及海潮等因素評估海平面上升造成本島之淹水潛勢。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。

1.2 文獻回顧

過去數十年間，由於全球暖化衍生出許多氣候變遷問題，其中海平面上升(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，而全球海平面上升可能造成之嚴重災害已經引起產、關、學、研各界關注。全球海平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]，二十世紀全球海平面上升速率每年約為 1.0 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; Jevrejeva *et al.*, 2014]，而近二十年(自 1993 年以來)之全球海平面上升速率為 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]，利用不同觀測資料和計算方法成果皆顯示全球海平面呈現明顯上升趨勢。

2013 年政府間氣候變遷委員會(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)第五次報告中預估未來海平面上升趨勢，報告中以輻射驅動力(radiative forcing)設定模擬情境(又稱代表濃度過程(Representative Concentration Pathways, RCP))，利用 4 種濃度過程(RCP)情境模式(2.6 W/m^2 、 4.5 W/m^2 、 6.0 W/m^2 與 8.5 W/m^2)，並以耦合氣候模式數值實驗計畫(Coupled Model Intercomparison Project 5, CMIP5)模式模擬未來海平面變化趨勢。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)海平面預估將上升 $0.53\text{-}0.97$ 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 $0.26\text{-}0.59$ 公尺；IPCC, 2007]。第五次報告中亦指出區域海平面上升速率將受到氣候變動之影響，速率上升值有可能 2 倍大於全球平均值，且本世紀末約有 95% 區域的海平面變化速率為正值。近二十幾年(1993-2015)來北極海(緯度範圍： $66^\circ\text{N}\text{-}82^\circ\text{N}$)海平面亦呈現每年 $2.2\pm1.1\text{ mm}$ 上升，最大可達 15 mm/yr [Andersen and Piccioni, 2016]。Mengel 等人 [2016] 亦分別利用 3 種代表濃度過程(RCP) 模式(2.6 W/m^2 、 4.5 W/m^2 以及 8.5 W/m^2)預估未來全球海平面上升情形，結果指出在最嚴重之推算情境下(8.5 W/m^2)，2100 年將上升約 $0.57\text{-}1.31$ 公尺。Hansen 等人[2015]利用歷史的氣候資料建立氣候模式，由模式演算成果得知，當大氣溫度上升 2°C 的情境下，將造成更多冰原的融化，導致海平面上升速度加劇。然而由上述可知，不同時期海平面變化速率並不完全相同，例如利用潮位站估算之二十世紀絕對海平面上升速率($1.0\text{-}2.4\text{ mm/yr}$ [Douglas, 2001; Mitrovica *et al.*, 2001; Church *et al.*, 2004; Church and White, 2011; Shum and Kuo, 2011])與衛星測高估算之近二十年速率(3.2 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])明顯不同，因此近年來許多學者致力於海平面上升加速之研究，例如：Douglas[1992]利用潮位站資料估算全球海平面上升加速度，由 23 個分

佈全球的潮位站估算 1905-1985 海平面上升之加速度約為 $-0.011\pm0.012 mm/yr^2$ ，而由 37 個潮位站估算 1850-1991(平均時間為 92 年)海平面上升之加速度約為 $0.001\pm0.008 mm/yr^2$ 。由上述近百年成果可知，全球海平面加速度並不顯著。另外，Douglas[1992]利用不同時間涵蓋範圍(10 年、20 年、30 年....100 年以上)估算全球海平面加速度值，其結果顯示海平面會受到低頻氣候因子影響，資料涵蓋時間範圍超過 50 年所估算海平面加速度才趨近穩定。Church and White [2006] 結合衛星測高與潮位站資料進行 1870-2001 年全球海平面重建(sea level reconstruction)，並以二階多項式(second order polynomial)估算全球海平面上升之加速度為 $0.013\pm0.006 mm/yr^2$ (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)全球海平面重建，並估算海平面上升加速度，成果顯示全球海平面上升速率約從 18 世紀末開始加速，由二階多項式擬合 1700-2003 海平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 全球海平面上升速率為 $1.5\pm0.5 mm/yr$ ，而 1990-2007 全球海平面速率為 $3.2\pm0.4 mm/yr$ ，此數據與衛星測高成果($3.2\pm0.4 mm/yr$; [Church and White, 2011])一致，由於海平面上升速率隨著時間增加，作者推測全球海平面上升正在加速，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 海平面變化之加速度為 $0.022\pm0.015 mm/yr^2$ (90%信賴區間)，此外結果亦顯示海平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。然而也有其他學者利用美國國家海洋暨大氣總署(National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA)提供的全球 200 個以上潮位站資料(其中超過 100 個潮位站資料時間涵蓋 50 年以上)進行全球海平面加速度之分析，作者指出全球各區域潮位資料並無明顯顯示出海平面有加速度之情形(<https://wattsupwiththat.com/2016/05/28/2015-updated-noaa-tide-gauge-data-shows-no-coastal-sea-level-rise-acceleration/>)。Jevrejeva 等人[2014]結合衛星測高與潮位站資料進行 1807-2009 年全球海平面重建，並估算海平面上升加速度，成果顯示 1807-2009 海平面上升之加速度約為

$0.02 \pm 0.01 \text{ mm/yr}^2$ 。另外，Jevrejeva 等人[2014]亦利用超過兩百年以上比容海平面與冰川融化時間序列分別估算出各自造成的海平面上升之加速度約為 0.006 mm/yr^2 與 0.003 mm/yr^2 。同樣地，Parker 和 Ollier[2016]亦利用平均海平面永久服務中心(Permanent Service for Mean Sea Level, PSMSL)資料庫中超過 100 個潮位站資料(時間涵蓋 80 年以上)進行全球相對海平面速率與加速度之分析(未改正地表垂直變動)，其結果顯示相對海平面速率僅上升 0.25 mm/yr ，且無顯著加速度之情形。

海平面上升將對全球人類和環境造成巨大衝擊。Leatherman 等人[2000]指出，當全球海平面上升時，侵蝕海岸速率為海平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，而暴風浪也會因海平面上升而增強，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]亦指出海平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]。海平面上升除了造成上述海岸侵蝕海岸速率加快以及生態環境變遷等影響外，亦會造成海岸淹沒、居住地減少與土地流失，將對全人類生活與其他生物生態環境造成重大之衝擊。Ericson 等人[2006] 研究成果顯示若全球海平面以 2 mm/yr 速率上升，在 2050 年時，全球 40 個三角洲上的 8,710,000 人會因海平面上升遭受到嚴重災害。Alley 等人[2005]指出若南極與格陵蘭冰原全部融化，將令全球海平面上升 70 公尺。不過最近 Nghiem 等人[2016]利用衛星觀測資料發現南極海冰(sea ice)面積卻在增加，其原因可能為因地形作用、風場變化及海洋環流的影響。

海平面變化與全球氣候變動間有聯動性[Zhang and Church, 2012; White *et al.*, 2014]，且海平面變化包含十分廣泛的訊息，因此現今海平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(ENSO)現象)或數十年(年代際(multidecadal);如太平洋年代際振盪(PDO))變化與海平面變化間相關性。西太平洋赤道附近發生的準週期性聖嬰-南方振盪(ENSO)現象與海平

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平面變化的 main 因素之一[Nerem *et al.*, 1999; Landerer *et al.*, 2008; Yi *et al.*, 2015]。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素，進而影響區域或全球的海平面變動[Hamlington *et al.*, 2013]。分析不同時間尺度下近百年的水位觀測資料，海平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，全球海平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，近十年海平面上升速率恢復為 $3.3 \pm 0.4 \text{ mm/yr}$ [Cazenave *et al.*, 2014]。Yi 等人[2015]同樣發現因為 2010/2011 反聖嬰現象(La Niña)影響，全球海平面在 2011 年下降 5 mm，然而經反聖嬰現象減輕後，海平面高度逐漸恢復，利用衛星測高資料估算 2005/01-2014/07 全球海平面速率為 $3.1 \pm 0.4 \text{ mm/yr}$ ，表示聖嬰-南方震盪(ENSO)與海平面變動有高度相關。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，成為主要影響海平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]。

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平面上升速率相較於全球海平面上升速率來的大，因此精確估計臺灣附近海域

海平面上升速率與加速度就顯得非常重要。

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平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平面變化研究，可避免使用單一資料之缺點。

臺灣周圍海域海平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平面變化間關係之研究。臺灣周圍海域相關海平面研究文獻成果如表1.1所示。Zhan 等人 [2009] 利用14年衛星測高資料估計黃海、東海、南海之海平面上升速率分別為 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平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平面變化影響程度。由結果可知，聖嬰-南方振盪 (ENSO) 主要影響緯度 $\pm 20^\circ$ 以內海平面變化，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南海海平面重建，利用1993-2009衛星測高資料估計南海之海平面上升速率為 $3.9 \pm 0.6 \text{ mm/yr}$ ，而1950-2009南海海平面重建之速率為 $1.7 \pm 0.1 \text{ mm/yr}$ （表1.1），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之影響。Cheng等人[2014]利用1993-2012衛星測高資料估計南海海平面上升速率為 $5.1 \pm 0.8 \text{ mm/yr}$ （表1.1），其中比容海平面上升速率約占南海海平面速率的45%，而在整個南海中，以越南東海岸與南海的東部海域之海平面上升率最快，最大可達 8.4 mm/yr 。Tseng等人[2010]利用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 EgreSSION, LOESS) [Hastie and Tibshirani, 1990]分析處理非線性海平面趨勢，研究結果顯示由1955-2003年潮位站計算之海平面趨勢為 $0 \sim 11 \text{ mm/yr}$ （ 11 mm/yr 是由澎湖潮位站資料所估算而得），表示估算速率成果差異大。Tseng等人[2010]平均所有潮位站和測高資料求得1993-2003海平面變化趨勢分別為 5.7 mm/yr 和 5.3 mm/yr （表1.1），上升趨勢皆大於全球海平面上升速率平均值 $3.2 \pm 0.4 \text{ mm/yr}$ [Church and White, 2011]。黃清哲等人[2010]利用線性迴歸與傅立葉分析(Fourier analysis)估算臺灣周圍海平面上升速率，其研究成果顯示臺灣海域之海平面皆呈現上升之趨勢，然而臺灣東部之結果卻不甚合理，因為潮位站與測高資料計算之海平面上升速率相差約 50 mm/yr （表1.1），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等人[2010]與黃清哲等人[2010]之研究在利用潮位站進行海平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平面變動量來的大，表示潮位資料中包含的垂直變動訊號將顯著影響估算之海平面上升速率。綜合上述文獻，直接利用未改正地表垂直變動的臺灣潮位站資料估算絕對海平面上升速率，將會造成顯著偏差速率。

表 1.1 臺灣周圍海域海平面上升速率。Altimeter 與 TG 表示資料來源為衛星測高與潮位站資料

Area	Period	Sea level trends (mm/yr)	Data source	Ref.
渤海	1993-2007	3.91±0.47	Altimeter	[Zhan <i>et al.</i> , 2009]
東海	1993-2007	4.28±0.35	Altimeter	[Zhan <i>et al.</i> , 2009]
南海	1993-2007	3.49±0.40	Altimeter	[Zhan <i>et al.</i> , 2009]
	1993-2009	3.9±0.6	Altimeter	[Peng <i>et al.</i> , 2013]
	1950-2009	1.7±0.1	Altimeter&TG	[Peng <i>et al.</i> , 2013]
	1993-2012	5.1±0.8	Altimeter	[Cheng <i>et al.</i> , 2014]
臺灣	1992-2009	4-56	TG	[黃清哲等人, 2010]
	1992-2009	3-7	Altimeter	[黃清哲等人, 2010]
	1993-2003	5.7	TG	[Tseng <i>et al.</i> , 2010]
	1993-2003	5.3	Altimeter	[Tseng <i>et al.</i> , 2010]
	2003-2012	6-8	Altimeter	[郭重言等人, 2014]
	1993-2012	4-5	Altimeter	[郭重言等人, 2015]
全球	1993-2009	3.2±0.4	Altimeter	[Church and White, 2011]

為了評估海平面上升、地表變形等可能造成陸地泛淹的影響，廖貞如[2010]利用 1996 地球重力場模型 (Earth Gravitational Model, EGM)、太空梭雷達製圖任務(Shuttle Radar Topography Mission, SRTM)資料、農航所之數值地形模型和臺灣大地水準面(Hwang *et al.*, 2007)探討何種高程系統(橢球高、正高等高程系統)較能模擬出最接近現實狀況的淹溢範圍。結果顯示，正高系統可以模擬出最接近現實狀況。然而該研究在評估淹水面積時僅簡單假設某高度下皆為氾淹區域，此方法會造成內陸低窪地區也是淹水區域，高估氾淹區域面積。Wang 等人[2012]結合潮位站觀測之海平面變化、地表垂直變動量以及風暴潮等資料，整

合於水動力模型來模擬未來海平面對於上海沿海地區氾濫情形。模擬的結果顯示，在 2030 年、2050 年、2100 年上海分別將有 1.5%、37%、50% 的陸地面積淹溢。此外，模擬成果也顯示地表下沉為上海地區泛濫的最大因素。Passeri 等人[2015]利用水動力模型模擬未來海平面上升對於低窪地區海岸環境造成之衝擊，作者認為若要完整模擬沿海地區氾濫情形，需要將土地利用情形、周圍生態環境、海岸地形、地表垂直變動、潮汐與海平面資料整合於水動力模式，才能夠更完整地了解海岸於未來情境的變化特性，以期能夠為氾濫所造成衝擊提供因應之道。Wellington 和 Seibert[2016]結合數值地形模型與人口空間分布資料，評估不同淹水高度有多少紐約市(New York city)人口會直接受到衝擊。其研究成果顯示在海平面上升 2 英尺(約 60 公分)時，將會有 15 萬居民直接受到衝擊(<http://www.landscapemetrics.com/>)。然而該研究在評估淹水面積時僅簡單假設某高度下皆為氾濫區域，未考慮地表垂直變動、潮汐、風暴潮等因素。Refaat 和 Eldeberky [2016]利用數值地形模型資料評估尼羅河三角洲(Nile delta)的淹水潛勢，本世紀末(2100 年)尼羅河三角洲周圍相對海平面(包含地表垂直變動)上升 1 公尺[Dasgupta *et al.*, 2009]時，尼羅河三角洲將有 7 % 的陸地面積(尼羅河三角洲總面積約為 2 萬平方千米)淹溢。

綜合以上所述，潮位站與衛星測高資料為研究海平面變化之兩種主要觀測量。本計畫將利用改正後之衛星測高與驗潮站資料分析臺灣四周海域海平面上升速率與加速度，並分析海洋低頻震盪對於臺灣附近海域海平面變化之影響。並期建立驗潮站資料基準偏移自動化偵測與校正模式系統以利未來潮位資料處理與分析。另外，本研究將依據目前海平面上升速率，評估臺灣本島泛濫潛勢，探討對海岸環境之衝擊影響。本計畫之工作項目如下所示：

- (1) 針對西太平洋、臺灣海峽、東海、南海等臺灣鄰近海域，及含括國內七大商港之臺灣環島近岸海域，分別匯整並應用驗潮站紀錄和衛星測高資料，分區估算臺灣四周海域長(近 20 年)、短(近 10 年)期海平面昇降變動速率與加速率，並配合氣候變遷模式，進行加速特性探討，同時進行可靠度與準確度分析。

- (2) 針對臺灣鄰近及環島近岸海域，匯整相關觀測與研究文獻，分析並估算不同尺度海洋年際振盪變動對臺灣環島區域性長、短期之海平面升降變動速率與加速率之影響，並依據驗潮站和衛星測高儀資料，更新計算臺灣四周海域驗潮站位長、短期之地表(地殼)垂直變動速率。
- (3) 應用臺灣環島(含括國內七大商港)近岸海域長、短期之驗潮站紀錄，研提驗潮站潮位基準偏移變動之通用自動調校準則，並進行驗潮站潮位基準偏移校正，再應用移動平均法，先行估算並比較基準調校校前後之海平面升降變動速率，而後，綜合整理並應用衛星測高資料所分析之相關結果，透過對照比較，探討國內近岸驗潮站實測潮位紀錄應用於估算長、短期海平面升降變動速率之準確度、可靠度與可行性。
- (4) 依據臺灣四周海域長、短期海平面升降變動速率與加速率，掌握臺灣環島近岸海域未來海平面升降變動之趨勢，評估未來可能造成之海岸溢淹區域與範圍，並探討對海岸環境之衝擊影響。
- (5) 建置臺灣環島驗潮站潮位基準偏移自動化偵測與校正模式及其使用手冊，並作技術移轉。

1.3 工作流程

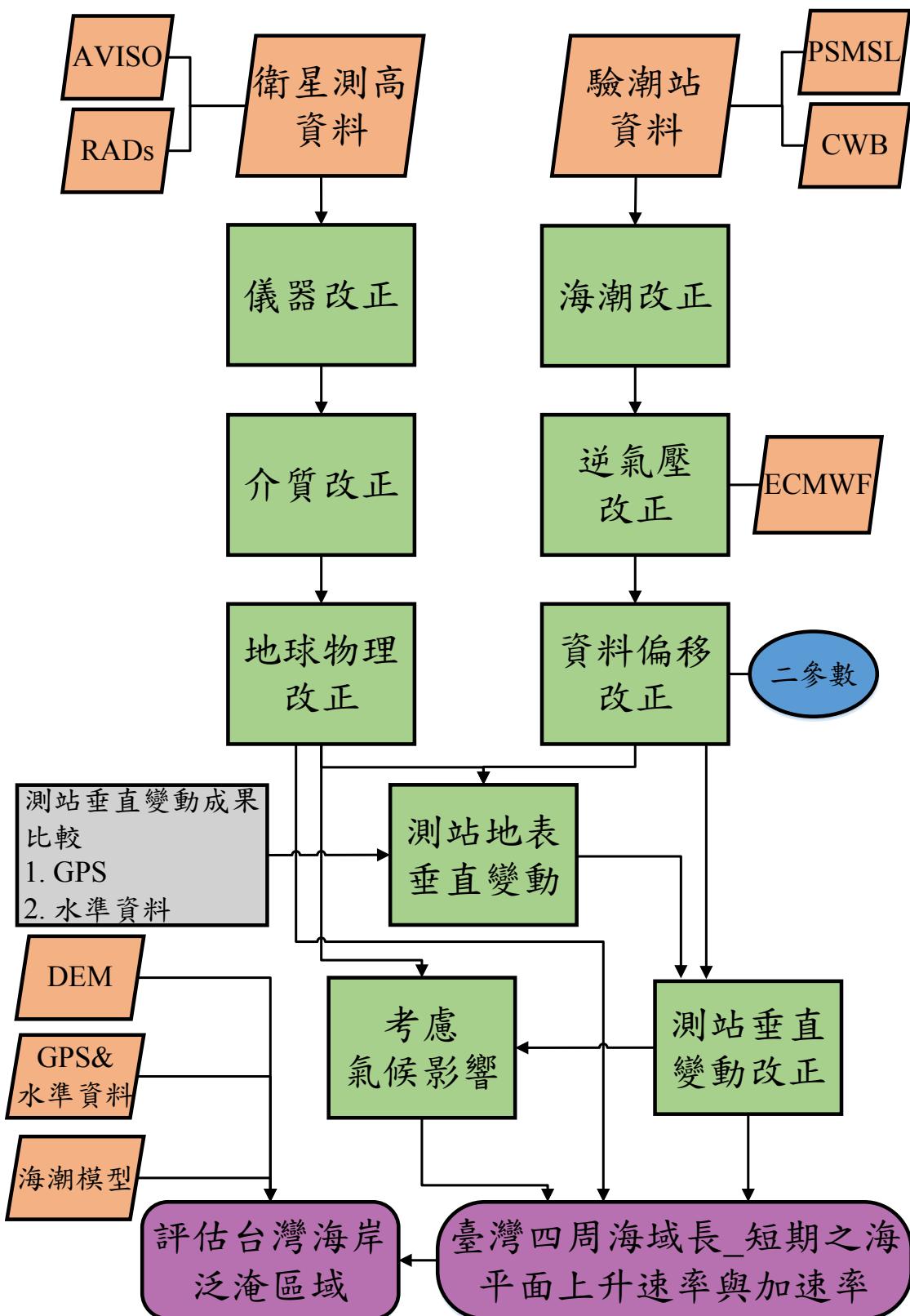


圖 1.1 計畫流程圖

1.4 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
針對臺灣鄰近及環島近岸海域，匯整相關觀測與研究文獻，分析並估算不同尺度海洋年際振盪變動對臺灣環島區域性長、短期之海平面昇降變動速率與加速率之影響，並依據驗潮站和衛星測高儀資料，更新計算臺灣四周海域驗潮站位長、短期之地表(地殼)垂直變動速率	---	---	---	---							目前進度已完成 100%
針對西太平洋、臺灣海峽、東海、南海等臺灣鄰近海域，及含括國內七大商港之臺灣環島近岸海域，分別匯整並應用驗潮站紀錄和衛星測高資料，分區估算臺灣四周海域長(近 20 年)、短(近 10 年)期海平面昇降變動速率與加速率，並配合氣候變遷模式，進行加速特性探討，同時進行可靠度與準確度分析	---	---	---	---							目前進度已完成 100%
應用臺灣環島(含括國內七大商港)近岸海域長、短期之驗潮站紀錄，研提驗潮站潮位基準偏移變動之通用自動調校準則，並進行驗潮站潮位基準偏移校正，再應用移動平均法，先行估算並比較基準調校			---	---	---	---					目前進度已完成 100%

校前後之海平面升降變動速率，而後，綜合整理並應用衛星測高資料所分析之相關結果，透過對照比較，探討國內近岸驗潮站實測潮位紀錄應用於估算長、短期海平面升降變動速率之準確度、可靠度與可行性													
依據臺灣四周海域長、短期海平面升降變動速率與加速度率，掌握臺灣環島近岸海域未來海平面升降變動之趨勢，評估未來可能造成之海岸溢淹區域與範圍，並探討對海岸環境之衝擊影響													目前進度已完成 100%
建置臺灣環島驗潮站潮位基準偏移自動化偵測與校正模式及其使用手冊，並作技術移轉													目前進度已完成 100%
文章和期末報告撰寫													目前進度已完成 100%
期末報告修改													
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

1.5 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。說明海平面上升可能導致的影響、全球海平面上升速率與加速度以及氣候因子對於海平面變化之影響等。

第二章：說明本計畫使用資料來源及特性。

第三章：說明衛星測高技術的觀測方式及率定改正原理，並利用衛

星測高資料估算臺灣周圍之海平面上升速率與加速度。

第四章：說明潮位站資料各項改正方法與結果，並利用改正後潮位資料估算海平面上升速率與加速度。

第五章：結合大地測量技術分析臺灣沿岸溢淹區域。

第六章：結論與未來工作。

1.6 第一章完成之工作項目

第一章已完成工作項目”針對臺灣鄰近及環島近岸海域，匯整相關觀測與研究文獻，分析並估算不同尺度海洋年際振盪變動對臺灣環島區域性長、短期之海平面升降變動速率與加速度之影響，並依據驗潮站和衛星測高儀資料，更新計算臺灣四周海域驗潮站位長、短期之地表(地殼)垂直變動速率”中的研究文獻彙整。由文獻可知，全球海平面正呈現每年~ 3.1 mm 上升狀態，而臺灣周圍海平面上升速率較全球海平面速率快。由 Zhang and Church [2012]成果可知，聖嬰-南方振盪(ENSO)主要影響的海平面範圍為緯度 $\pm 20^\circ$ 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)對臺灣海域海平面變化速率之影響是相當重要的。另外，Jevrejeva 等人[2008]結合衛星測高與潮位站資料進行 1700-2003 年(約 300 年)全球海平面重建，成果發現全球海平面上升速率約從 18 世紀末開始加速。然而 Parker 和 Ollier[2016]利用平均海平面永久服務中心(Permanent Service for Mean Sea Level, PSMSL)資料庫分析全球相對海平面速率與加速度(未改正地表垂直變動)，結果指出全球各海域海平面上升速率無明顯加速之情形。

第二章 研究資料

2.1 測高衛星

測高衛星設計來觀測全球海平面高度，其優點為涵蓋近乎全球的觀測量，且觀測的海平面高度不受陸地地表變形之影響，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應用於開闊海域海平面監測，而陸地表面因植被、建物等因素造成地形起伏較大，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平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平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（圖2.1），隨後Geos-3、Seasat、Geosat、GFO、ERS-1、ERS-2、Envisat、Altika/Saral、TOPEX/Poseidon(T/P)、Jason-1(J-1)、Jason-2(J-2)、J-3、Cryosat-2、HY-2等測高衛星陸續發射，表2.1為各測高衛星任務參數比較表。第一顆測高衛星Skylab觀測精度約為1公尺，其中以衛星軌道誤差最大，後續發射衛星之軌道已有顯著改進，現今之軌道誤差已小於海洋變化訊號，軌道精度由1公尺提升至2-3公分(圖2.2)，因此測高衛星觀測量可廣泛應用於海平面訊號監測。



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

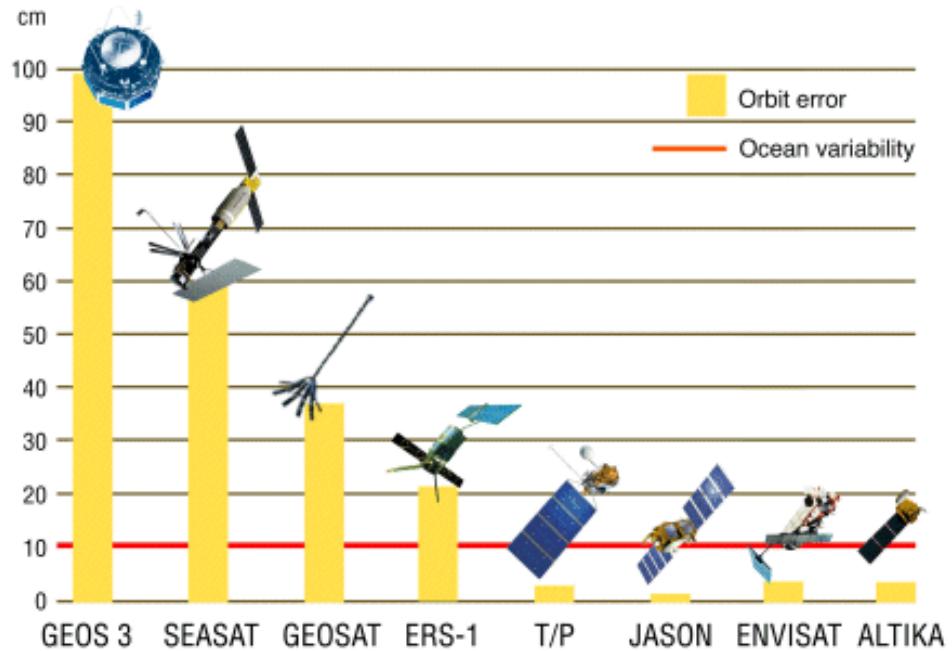


圖 2.2 測高衛星之軌道誤差比較。[圖片來源：
<http://www.aviso.oceanobs.com/>]

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
Altika/Saral	ISRO, CNES	2013/02 - Present	800	98.55	35
Jason-3	CNES, NASA, Eumetsat, and NOAA	2016/01- Present	1336	66	10

衛星測高海平面變化資料主要分成沿軌跡點(along-track)與網格化後之網格(grid)等資料，為延續第一期至第三期計畫成果，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昇降變化特性。而網格資料僅用於分析每個網格上水位變化特性。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，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，該資料主要結合ERS-1/-2、Envisat、Saral/AltiKa、Cryosat-2、T/P、J-1/2、J-2、GFO及HY-2A等衛星測高資料。沿軌跡點衛星測高資料為本研究主要使用之測高資料，後續將主要介紹T/P、J-1與J-2衛星測高資訊。

T/P是第一顆專為量測海流及海平面變化所設計之衛星，能提供連續時間及空間之海平面監測，其量測海平面高度之精度約為5公分 [Shum *et al.*, 1995]，而J-1衛星的目的為接替T/P衛星，J-2衛星為接替J-1衛星，三顆測高衛星的設計相同。此三個衛星資料可合併使用，因此本計畫使用T/P、J-1與J-2等測高衛星資料，其每秒平均之海平面高度觀測量精度可達 ± 4.2 公分 [AVISO and PODAAC User Handbook, 2001]，三顆衛星涵蓋之時間範圍為1992/09-至今。另外，本研究中使用的衛星測高資料為經由時間和空間上的平均，衛星測高觀測精度可再提升精度。測高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）。本計畫為延續第一期至第三期計畫成果，將沿用前期(102-104年度)計畫中選擇的模型改正衛星測高資料，因此後續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)資料中心預設模型來進行改正。

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加權平均(距離倒數平方)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，澎湖潮位站以及其他區域潮位站資料適用等權平均 2° 範圍內之衛星測高資料。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平面上升速率的研究成果顯示，東部與西部的海平面上升速率差異量約 4 mm/yr ，表示海平面上升速率於太平洋與臺灣海峽的變化並不一致，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

潮位站的海平面觀測量為相對於岸邊的基準點，基準點會隨著該區域的地表變動而產生相對位移，使潮位站水位觀測資料包含海平面升降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相鄰岸邊地表之觀測量，如圖2.3所示。若以潮位站資料估算絕對海平面上升速率，需進行潮位站地表垂直變動改正。除了上述地表垂直變動改正外，還需改正潮位站資料中之海潮和逆氣壓效應等非海平面變化之週期訊號和人為造成的資料基準不一致之情形。一般而言，全球衛星定位系統(GPS)觀測量為常見用於監測地表變動之觀測技術，但過去臺灣周圍潮位站鄰近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觀測量估算潮位站之地表垂直變動量。測高衛星資料為觀測海平面高度的絕對量，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之地表垂直變動訊號並自潮位站資料中改正 [Kuo *et al.*, 2004, 2008; Braitenberg *et al.*, 2011; Chang *et al.*, 2012; Wöppelmann and Marcos, 2012;

Santamaria-Gomez *et al.*, 2014]。

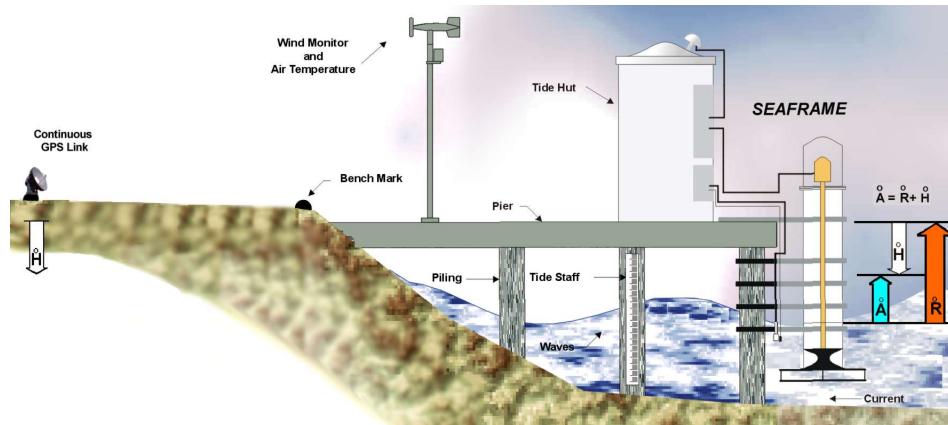


圖 2.3 潮位站觀測海平面示意圖[圖片來源: John Luick, NTF]

本研究中，臺灣附近海域之潮位站資料由下述四處資料中心提供：

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)。
3. 經濟部水利署(Water Resources Agency, Ministry of Economic Affairs)。
4. 交通部運輸研究所港灣技術研究中心(Harbor and Marine Technology Center, Institute of Transportation, Ministry of Transportation and Communications)。

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，提供修正地方基準 (Revised Local Reference, RLR)與Metric之月平均潮位數據。修正地方基準(RLR)資料已經利用原潮位站管理單位提供的基準資料將潮位站資料化算至相同基準上；而Metric資料未參考原管理單位之基準資料，資料存在基準不一致問題。因此本研究僅使用平均海平面永久服務中心(PSMSL)之修正地方基準(RLR)潮位站資料。依據本研究研究範圍(緯度: 10°N~30°N 和 經度: 110°E~130°E)以及去除觀測時間(研究時間設定1993-2012)少於15年的測站，平均海平面永久服務中心(PSMSL)資料庫中符合之驗潮站共計16

個。各潮位站時間分佈如圖2.4所示，而點位分佈如圖2.5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、經濟部水利署以及港灣技術研究中心管理資料。依據本計畫研究的空間與時間範圍，向中央氣象局、水利署與港灣技術研究中心申請並取得18個潮位站資料，各測站時間涵蓋如圖2.4所示，位置分佈如圖2.5所示。中央氣象局、經濟部水利署與港灣技術研究中心提供的潮位站之詳細資訊如表2.3所示(因中央氣象局為主要提供潮位站資料之單位，後續敘述臺灣沿岸潮位站資料時，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，各站可能包含多個測站編號，在測站觀測儀器更換或位置移動後，測站再重新記錄資料時便會更換測站編號[陳進益等人，2014]，然而因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。以高雄潮位站為例，可明顯看出基準不一致(圖2.6)，其偏移原因應為更換測站編號前後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，因此在本研究中，對於測站編號更換前後若有資料不一致之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四章中詳細說明。各潮位站原始逐時資料請參閱附錄一。另外，工作項目中所列之七大商港分別為基隆、高雄、蘇澳、花蓮、台中港、安平港與台北港，然而安平港與台北港資料時間涵蓋範圍不足，後續將選取附近的將軍與竹圍測站取代。

臺灣早期潮位站管理較不完善，本研究使用的1993-2012年潮位站資料完整度[資料完整度=1-缺漏資料月份數/總資料月份數]平均約87.3%，單一測站缺漏時間最長為台中潮位站的27個月(圖2.4)，而對臺灣極為重要的基隆潮位站亦有嚴重資料缺漏(圖2.7)。近年來潮位站管理較為完善，2003-2012年資料完整度平均提高到92.6%，單一測站缺漏時間最長降為7個月。而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1993-2012平均海平面永久服務中心(PSMSL)潮位站資料完整度平均值約95.5%，單一測站最長缺漏時間為15月。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2.5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($^{\circ}$)	Lat($^{\circ}$)	Data period	
		Ch.	Eng.	Abbr.			RLR	Metric
China	610002	閘坡	Zhapo	ZP	111.8	21.6	1959-2012	1959-2012
	610004	西沙	Xi Sha	XS	112.3	16.8	1990-2012	1989-2012
	610016	坎門	Kanmen	KM	121.3	28.1	1959-2012	1959-2012
	611007	橫瀾島	Waglan Island	WGI	114.3	22.2	1987-2012	1987-2012
	611010	鯤魚涌	Quarry Bay	QB	114.2	22.3	1986-2012	1986-2012
	611012	大廟灣	Tai Miu Wan	TMW	114.3	22.3	1997-2012	1997-2012
	611014	大浦滘	Tai Po Kau	TPK	114.2	22.4	1963-2012	1963-2012
	611017	尖鼻咀	Tsim Bei Tsui	TBT	114.0	22.5	1974-2012	1974-2012
	611023	石壁	Shek Pik	SP	113.9	22.2	1998-2012	1998-2012
	646003	內斯	Nase	NS	129.5	28.5	1981-2012	1981-2012
Japan	646011	中之島	Nakano Sima	NKNS	129.9	29.8	1984-2012	1965-2012
	646021	沖繩	Okinawa	OKNW	127.8	26.2	1975-2012	1975-2012
	646024	那霸	Naha	NH	127.7	26.2	1966-2012	1966-2012
	646042	石垣島	Ishigaki	IGK	124.2	24.3	1986-2012	1986-2012
Philippines	660021	黎牙實比	Legaspi	LGSP	123.8	13.2	1947-2012	1947-2012
	660101	宿霧	Cebu	CB	123.9	10.3	1935-2012	1935-2012

表 2.3 臺灣附近海域中央氣象局資料庫之潮位站資訊。排序方式以基隆潮位站為起始點，並以順時針方向排序

Station name			Station ID.	Lon($^{\circ}$)	Lat($^{\circ}$)	Records (minutes)	Data period	Originator
Ch.	Eng.	Abbr.						
基隆	Keelung	KL	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	2006-2012	中央氣象局
梗枋	Gengfang	GF	153	121.9	24.9	60	1992-1996	經濟部水利署
			123	121.9	24.9	6	1996-2008	中央氣象局
蘇澳	Su-ao	SA	124	121.9	24.6	6	1991-2005	中央氣象局
			1246	121.9	24.6	6	2005-2012	中央氣象局
花蓮	Hualien	HL	125	121.6	24.0	6	1991-2003	中央氣象局
			1256	121.6	24.0	6	2003-2012	中央氣象局
成功	Chenggong	CHG	127	121.4	23.1	6	1993-2005	中央氣象局
			1276	121.4	23.1	6	2002-2012	中央氣象局

富岡	Fugang	FG	158 1586	121.2 121.2	22.8 22.8	60 6	1976-2002 2001-2013	經濟部水利署 經濟部水利署
後壁湖	Houbihu	HBH		119 1196	120.7 120.7	21.9 21.9	6 6	1996-2007 2007-2012
麟洛	Syunguangzui	SGZ		149 1496	120.7 120.7	22.0 22.0	60 6	1976-2002 2001-2012
東港	Donggang	DG	118 1186	120.4 120.4	22.5 22.5	6 6	1998-2003 2003-2012	中央氣象局 中央氣象局
高雄	Kaohsiung	KS	148 1486	120.3 120.3	22.6 22.6	60 6	1987-2004 2004-2012	高雄港務局 內政部
將軍	Jiangjun	JG	146 1176	120.1 120.1	23.2 23.2	60 6	1979-2001 2002-2012	經濟部水利署 中央氣象局
東石	Dongshi	DS	116 1162 1166	120.1 120.1 120.1	23.4 23.4 23.5	6 6 6	1993-2004 1999-2012 2012-2012	中央氣象局 中央氣象局 中央氣象局
塭港	Wengang	WG	1361 1366	X 120.1	X 23.5	60 6	1963-2002 2003-2012	經濟部水利署 中央氣象局
澎湖	Penghu	PH	135 1356	119.6 119.6	23.6 23.6	60 6	1991-2007 2007-2012	中央氣象局 中央氣象局
箔子寮	Boziliao	BZL	115 1156	120.1 120.1	23.6 23.6	6 6	1995-2004 2004-2012	中央氣象局 中央氣象局
台中	Taichung Port	TCP	1433 143 1434 1436	120.5 120.5 120.5 120.5	24.3 24.3 24.3 24.3	10 6 6 6	1993-1997 1997-1999 2001-2004 2004-2012	港灣技術研究中心 港灣技術研究中心 港灣技術研究中心 內政部
新竹	Hsinchu	HSC	112	120.9	24.8	6	1992-2012	中央氣象局
竹圍	Jhuwei	JW	111 1116	121.2 121.2	25.1 25.1	6 6	1992-2007 2007-2012	中央氣象局 中央氣象局

X: 表示原始資料中未提供該項資訊

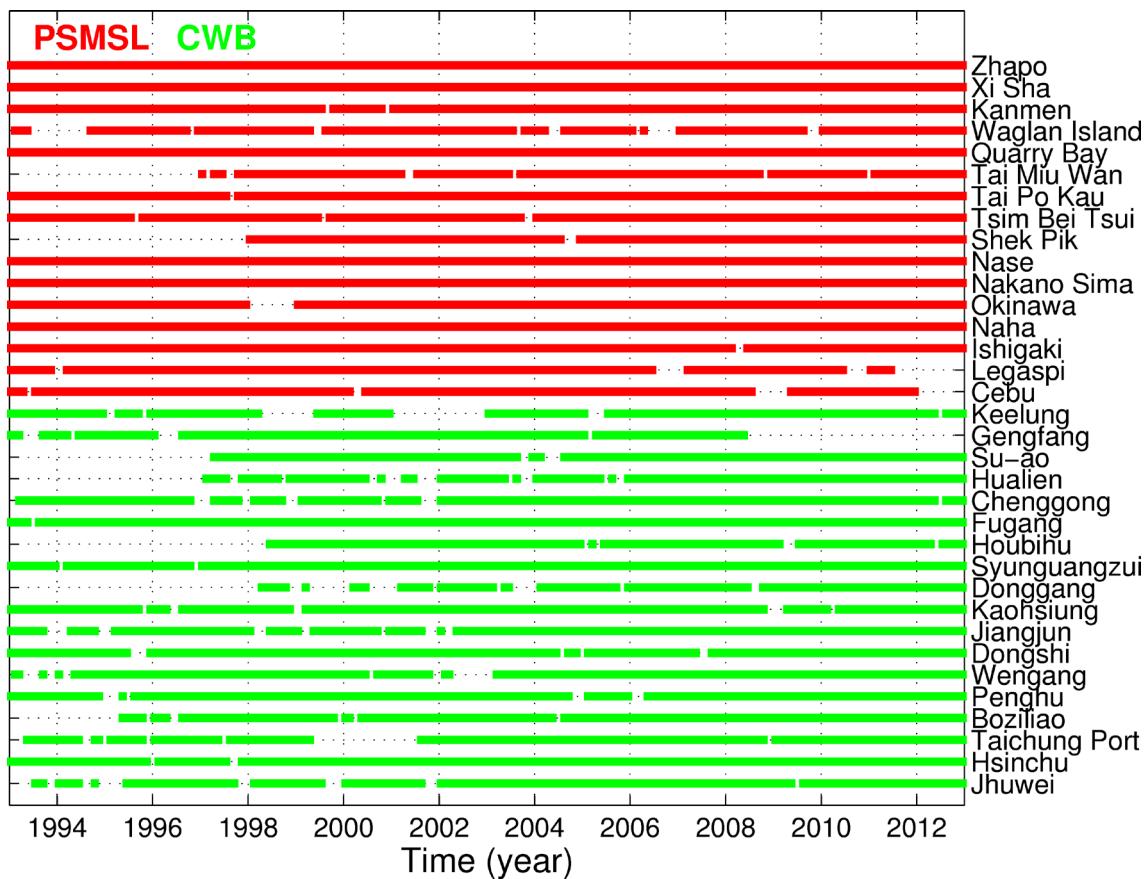


圖 2.4 臺灣附近海域之潮位站資料涵蓋時間圖

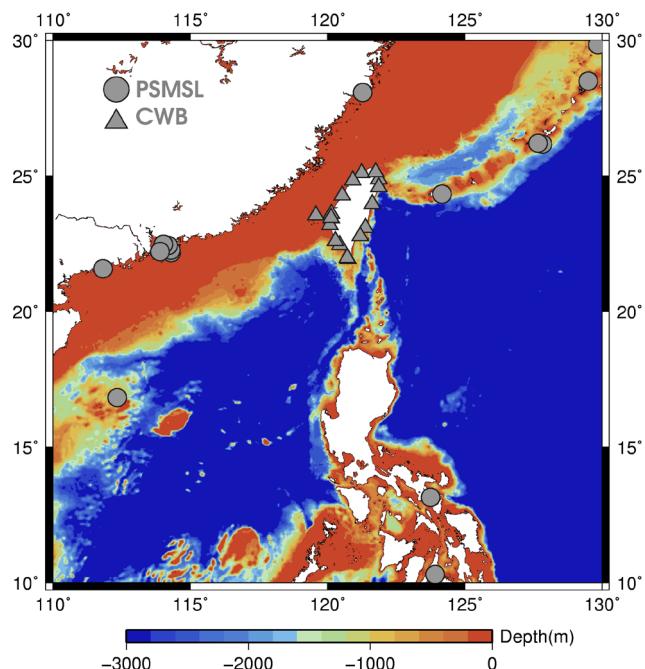


圖 2.5 臺灣附近海域潮位站位置分佈圖。背景為 ETOPO1 海底地形圖
[Amante and Eakins, 2009]

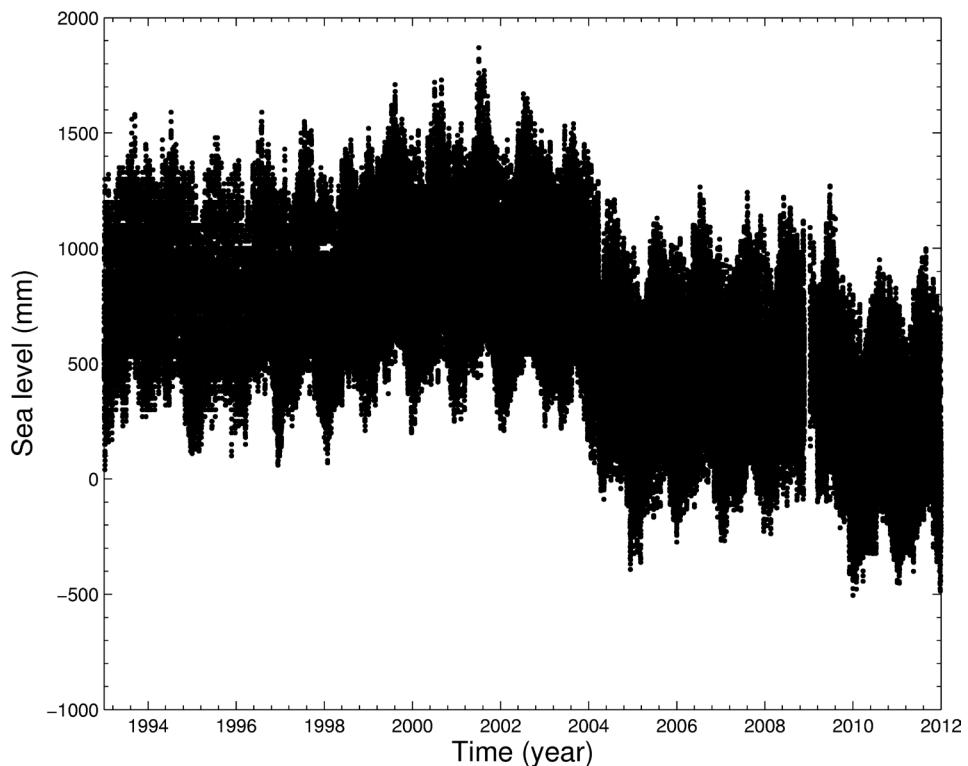


圖 2.6 高雄潮位站逐時資料

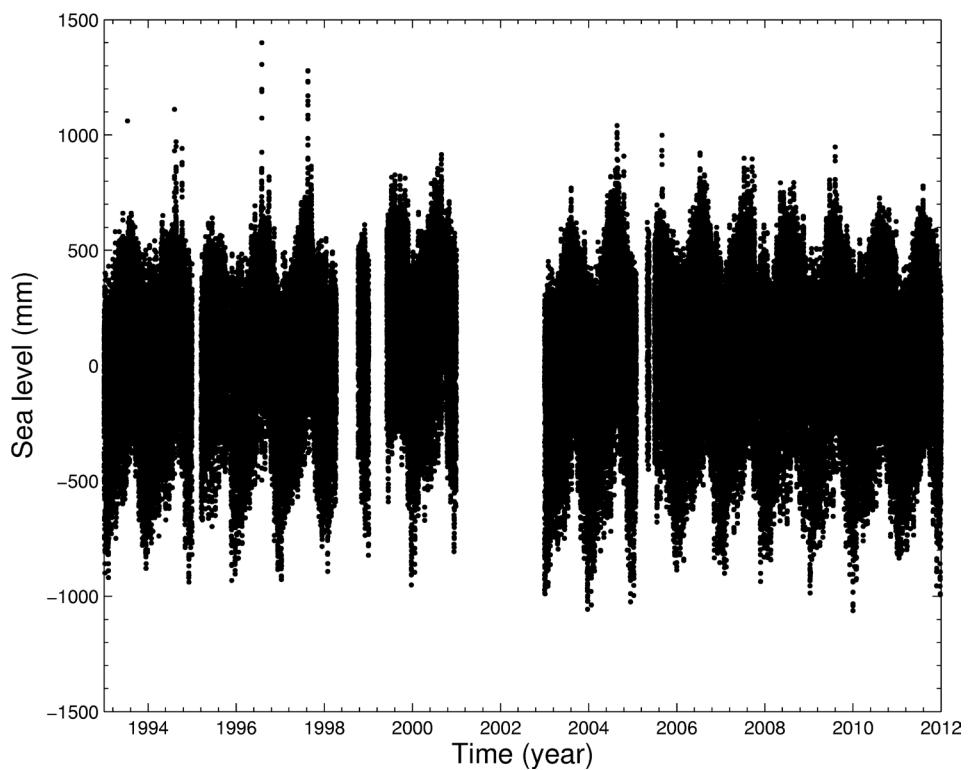


圖 2.7 基隆潮位站逐時資料

潮位站為觀測海平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平面上升速率時，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歐洲中期天氣預報中心 (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, ECMWF) [<http://www.ecmwf.int/>] 取得，歐洲中期天氣預報中心(ECMWF)提供 $0.75^\circ \times 0.75^\circ$ 全球海平面氣壓網格資料，時間間隔為6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1979/01-2015/12。

2.3 氣候指標 (Climate indices)

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。兩者對於海水表面溫度(sea surface temperatures)、海平面氣壓(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 2.8(a)所示)。聖嬰-南方振盪(ENSO)呈現相反現象，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 2.8(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)現象對於臺灣海平面變化影響時，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，包括海平面氣壓(sea-level pressure)、東西方向與南北方向之表面風速(surface wind)、海平面溫度(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 2.9 所示)。由圖可知，歷史上聖嬰現象規模最為顯著時間為 1982-1983、1997-1998 年與 2014-2015 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 $> 20^{\circ}\text{N}$)月平均海表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，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 2.9(b)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，在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)。

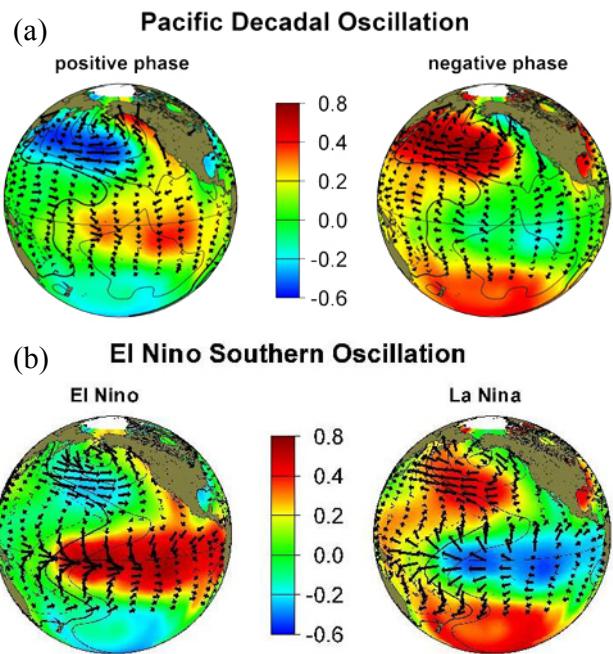


圖 2.8 太平洋年代際振盪(PDO)和聖嬰-南方振盪(ENSO)現象對於海水表面溫度與風場(surface winds)影響。(a) 太平洋年代際振盪(PDO)、(b) 聖嬰-南方振盪(ENSO)現象。顏色: 溫度異常(temperature anomalies)、箭頭: 風場方向和大小。[圖摘自:
http://ffden-2.phys.uaf.edu/645fall2003_web.dir/Jason_Amundson/pdo_main.htm]

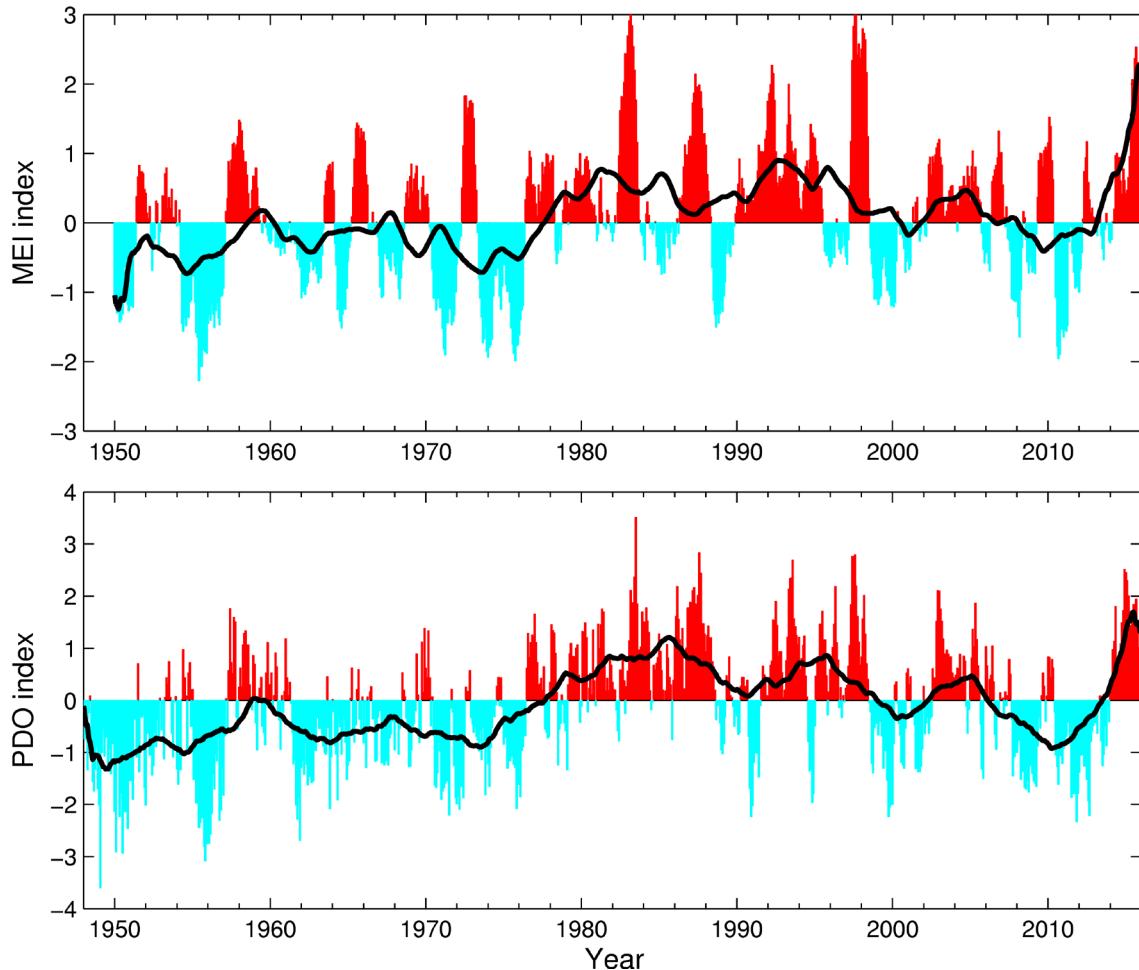


圖 2.9 多重聖嬰-南方振盪指數(MEI)及太平洋年代際振盪 (PDO) 指數，黑線為 5 年移動平均線

2.4 數值高程模型(Digital Elevation Model, DEM)

本研究使用內政部地政司衛星測量中心於 2004 年利用農林航空測量局提供之 1/20,000 航照正射影像所製作的臺灣地區 $5m \times 5m$ 數值高程模型(DEM)，其參考基準為 2001 臺灣高程基準 (Taiwan Vertical Datum 2001)，為目前唯一涵蓋臺灣全島的高解析度高程模型。數值高程模型(DEM)為一般是以規則網點的資料格式，儲存地形高程資料，而資料中不包含防坡堤等地上物。由於 $5m \times 5m$ 的數值高程模型(DEM)圖幅較多，僅依需求向內政部地政司申請高程低於 70m 的圖幅，共 179 幅(圖 2.10)。

2001 臺灣高程基準 (Taiwan Vertical Datum 2001, TWVD2001) 是採用正高系統。正高是一個以大地水準面為基準面的高程系統，地面上任一點之正高為該點起沿重立垂線至大地水準面之距離。2001 臺灣高程基準(TWVD2001)之大地水準面定義為在 1990 年 1 月 1 日標準大氣環境情況下，採用基隆驗潮站 1957 年至 1991 年之潮位資料化算而得(內政部地政司衛星測量中心)。

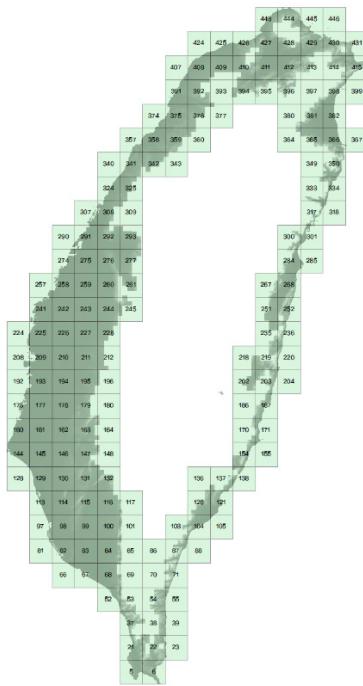


圖 2.10：本研究使用的臺灣 $5m \times 5m$ 數值高程模型圖幅之示意圖

2.5 地表垂直變動量

臺灣位處板塊交界地帶，地表垂直變動非常劇烈[Chen *et al.*, 2011; Ching *et al.*, 2011; Chang *et al.*, 2012]，在預測未來海平面氾濫情形是一項不可或缺的因素。本研究使用地表垂直變量是結合 Ching 等人[2011]計算之臺灣 199 個全球衛星定位系統(GPS)連續觀測站成果與 Chen 等人[2011]計算之 1843 個精密水準點成果，兩成果時間涵蓋為 2000-2008 年。水準資料與全球衛星定位系統(GPS)成果皆相對於澎湖全球衛星定位系統(GPS)觀測站(S01R)，因為 S01R 點位於板塊相對穩定的區域 [Ching *et al.*, 2011]，故選定此點作為相對的固定點。本研究後續將內插

全球衛星定位系統(GPS)和水準測量之垂直變動速率成網格資料，而空間解析度與數值高程模型(DEM)相同，以利後續結合使用。由內插成果可知，臺灣西南部雲嘉南沿海區域多呈現顯著下沉趨勢(圖 2.11)，且下陷趨勢遠大於海面上升值($\sim 5 \text{ mm/yr}$ [郭重言等人，2015])，最大下沉值為 $\sim 98 \text{ mm/yr}$ 。對於西南部沿海地區而言，地表垂直變動遠較海面上升影響來的大。

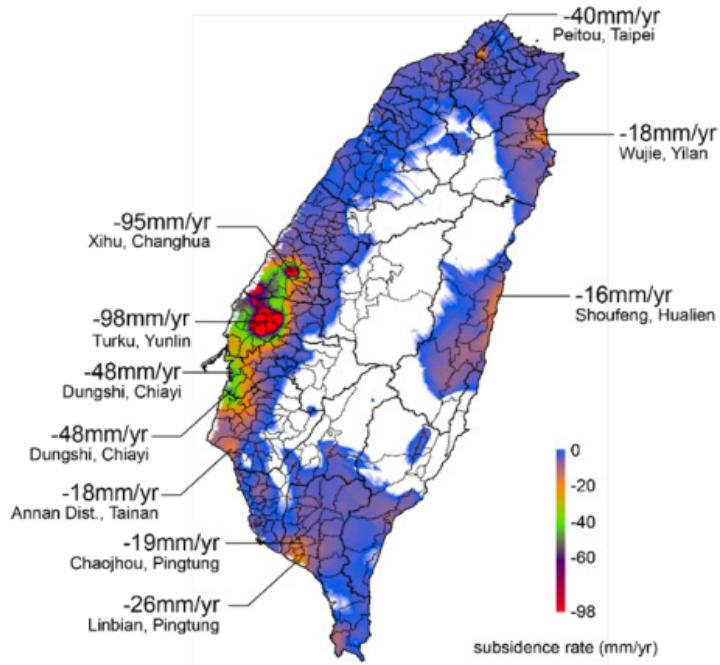


圖 2.11 臺灣本島之地表垂直變動速率圖（圖中只描繪地層下陷顯著($< -15 \text{ mm/yr}$)的區域）

2.6 最大天文潮

最大天文潮為在天體運行之週期(18.6 年)間所發生之最高天文潮位。本研究利用 TWN5T 模型[林勝豐等人, 2014]模擬臺灣周遭海域在 18.6 年潮汐週期中之最大天文潮。TWN5T 是以工業研究院利用普林斯頓海洋模式(Princeton Ocean Model, POM) 開發之第 5 代臺灣周圍海域潮汐模式。此模式範圍為 $117^\circ\text{E}-125^\circ\text{E}$, $18^\circ\text{N}-27^\circ\text{N}$ ，水平解析度為 $1/24^\circ$ 。模擬成果如圖 2.12 所示，後續將利用模擬成果內插成與數值高程(DEM)模型相同空間解析度網格，以利後續結合使用。

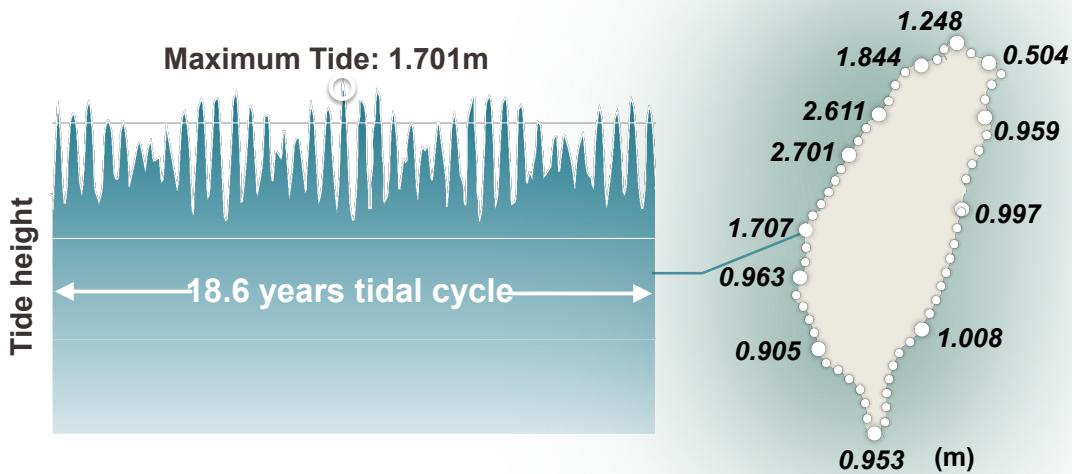


圖 2.12 利用 TWN5T 模型[林勝豐等人, 2014]模擬臺灣周遭海域在 18.6 年潮汐週期中之最大天文潮

2.7 濕地

本研究亦分析淹水潛勢對於臺灣重要沿岸濕地造成可能的衝擊，濕地資訊可至 <http://wetland-tw.tcd.gov.tw/WetLandWeb/index.php> 下載。表 2.4 展示臺灣重要沿岸濕地所在縣市、面積以及歸屬之類別(國際級或國家級)。將表 2.4 濕地展示於地圖上可知，臺灣重要沿岸濕地主要分布於西部，且多位於嘉義與台南兩縣市。其中臺南市內有兩個重要國際濕地，分別為四草濕地(Sihcao Wetland)與曾文河口濕地(Zengwun Estuary Wetland)。

表 2.4 臺灣沿海的重要濕地

Name	Location	Importance	Area (ha)
Wazihwei Wetland	New Taipei City	National importance	60
Lanyang Estuary Wetland	Yilan County	National importance	2799
52-jia Wetland	Yilan County	National importance	299
Wuwei Harbor Wetland	Yilan County	National importance	684
Hualien Estuary Wetland	Hualien County	National importance	259
Beinan Estuary Wetland	Taitung County	National importance	947
Yanshuei Estuary Wetland	Tainan City	National importance	635
Sihcao Wetland	Tainan City	International importance	547
Zengwun Estuary Wetland	Tainan City	International importance	3218
Cigu Salt Pan Wetland	Tainan City	National importance	2997
Beimen Wetland	Tainan City	National importance	2447

Bajhang Estuary Wetland	Chiayi County and Tainan City	National importance	635
Budai Salt Pan Wetland	Chiayi County	National importance	721
Haomeiliao Wetland	Chiayi County	National importance	1171
Puzih Estuary Wetland	Chiayi County	National importance	8522
Aogu Wetland	Chiayi County	National importance	512
Dadu Estuary Wetland	Taichung City and Changhua County	National importance	4136
Gaomei Wetland	Taichung City	National importance	701
Siangshan Wetland	Hsinchu City	National importance	1600
Sinfong Wetland	Hsinchu County	National importance	165
Danshuei River Mangrove Wetland	New Taipei City	National importance	190



圖 2.13 臺灣沿海重要濕地之分布圖

2.8 第二章完成之工作項目

第二章說明工作項目”針對西太平洋、臺灣海峽、東海、南海等臺灣鄰近海域，及含括國內七大商港之臺灣環島近岸海域，分別匯整並應用驗潮站紀錄和衛星測高資料，分區估算臺灣四周海域長(近 20

年)、短(近 10 年)期海平面昇降變動速率與加速度，並配合氣候變遷模式，進行加速特性探討，同時進行可靠度與準確度分析”、”針對臺灣鄰近及環島近岸海域，匯整相關觀測與研究文獻，分析並估算不同尺度海洋年際振盪變動對臺灣環島區域性長、短期之海平面昇降變動速率與加速度之影響，並依據驗潮站和衛星測高儀資料，更新計算臺灣四周海域驗潮站位長、短期之地表(地殼)垂直變動速率”以及”依據臺灣四周海域長、短期海平面昇降變動速率與加速度，掌握臺灣環島近岸海域未來海平面昇降變動之趨勢，評估未來可能造成之海岸溢淹區域與範圍，並探討對海岸環境之衝擊影響”中所使用的的研究資料。本章說明此研究中使用資料包括衛星測高、潮位站、多重聖嬰-南方振盪(ENSO)指數(MEI)與太平洋年代際振盪(PDO)指數等氣候指標、數值高程模型(DEM)、地表垂直變動量、最大天文潮以及臺灣重要沿岸濕地等相關研究資料。

第三章 衛星測高資料改正與海平面變化計算

衛星測高資料需進行儀器改正、介質改正(電離層改正、濕對流層改正、乾對流層改正)與地球物理改正(固體潮改正、海潮改正、海潮負載改正、極潮改正、海面狀態偏差改正、逆氣壓效應改正)。3.1 節將說明各項改正之定義，3.2 節說明海平面上升速率與加速度之計算方式，3.3 節利用衛星測高資料分析臺灣周圍之海平面上升速率與加速度，3.4 節說明本章完成之工作項目。

3.1 測高資料改正

衛星測高技術之基本觀測原理為測高儀由天底方向向海平面發射雷達微波脈衝訊號，訊號經由海平面反射後由衛星接收，經取得雷達波精密傳遞時間可計算得到衛星至海平面間之距離，而測高衛星至一參考橢球之距離可由精密衛星定軌計算求得，結合兩項距離即可得到相對於參考橢球之海平面高度，其原理如圖3.1所示。測高衛星觀測之海平面相對於平均海平面之高度變化(Δh)可表示為：

$$\Delta h = H - R + \sum_j \Delta R_j - h_M \quad \dots \dots \dots \quad (3.1)$$

其中 H 為利用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 為平均海平面(平均海平面是由衛星測高經長時間測量全球海平面後平均求得)至參考橢球之高度， 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，其中最主要的是影響為折射效應，對訊號產生延遲影響，造成訊號往返的時間誤差，進而形成測距誤差，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，造成訊號往返的時間誤差。對流層延遲量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，為測高資料改正中之最大改正量，但其變化量僅在數公分內，可由下式簡單計算 [Roshmorduc *et al.*, 2011]：

$$\Delta R_{dry} = -0.002277 P_{ocean} \times (1 + 0.0026 \cos 2\lambda) \quad \dots \dots \dots \quad (3.2)$$

其中 ΔR_{dry} 為乾對流層延遲改正量(單位: 公分)， p_{ocean} 為海平面之大氣壓力(單位: 毫巴)， 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訊號傳播路徑延遲，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：逆氣壓效應為海平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*)，海平面將降低 1 公分，一般逆氣壓效應影響量約 ±15 公分 [Roshmorduc *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 公尺，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，近年來海潮模型精度提昇至 3 公分 [Wagner, 1991]，但在淺海區域預估精度仍然較差，需以區域性海潮模型取代。現在利用 T/P 測高衛星資料計算之海潮模型，精度可達到 2~3 公分 [Chelton *et al.*, 2001]。
- (5) 地球固體潮改正(Solid Earth tide): 地球構造並非剛體，實為一半彈性體，因為日、月引力的影響，造成固體地球產生形變，稱之為固體潮，改正量可達 50 公分。目前採用模型進行改正，其精度可達 1 公分[Chovitz, 1983]。
- (6) 極潮改正(Pole tide): 極運動 (Polar motion)是因為地球本身內部質量與幾何形狀不均勻所引起的[Torge,1991]。極運動會產生極潮，造成海平面形狀改變，故需改正此項誤差，改正量約為 2 公分。

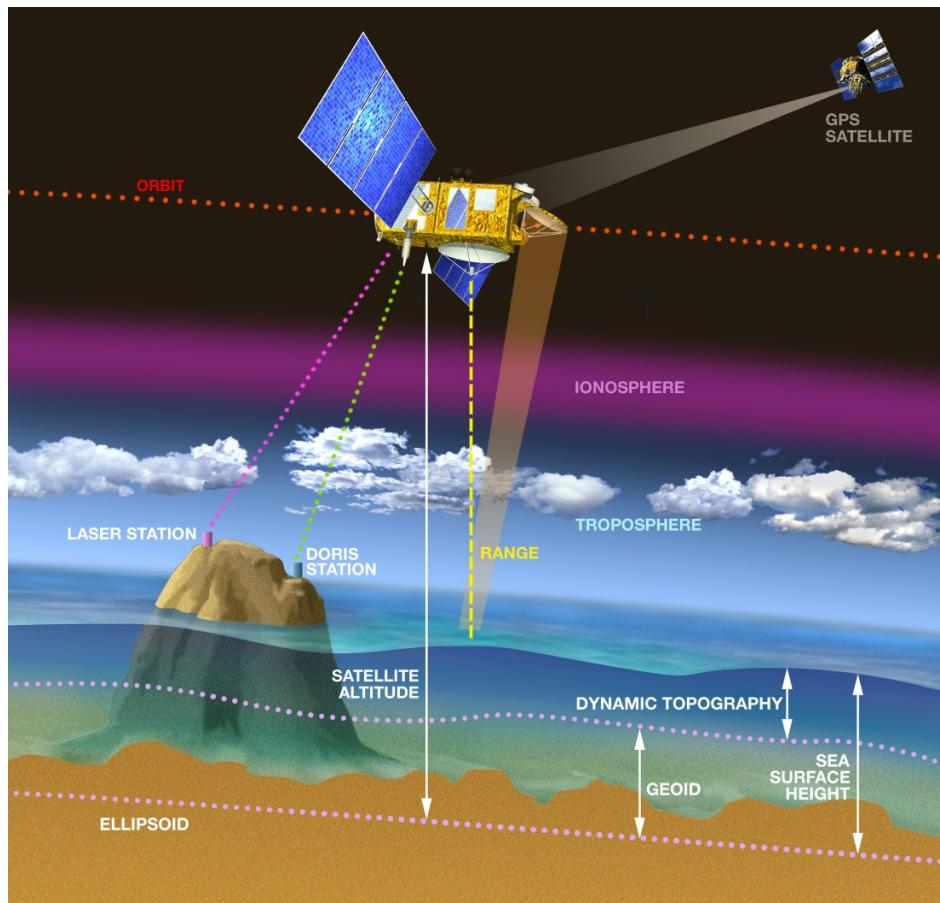


圖 3.1 測高衛星基本觀測原理。[圖片來源：

<http://www.aviso.oceanobs.com/>]

3.2 海平面上升速率與加速度之計算

本計畫將利用兩種方式估算臺灣周圍海平面變化速率與加速度，一為利用六參數分別擬合改正後之衛星測高與潮位站資料，並估算出臺灣周圍絕對海平面變化速率與加速度；另一方法為利用 Zhang and Church [2012]提出的多變量線性擬合法為基礎，結合六參數與氣候指標擬合海平面變化，估算出未受或降低氣候因子影響之海平面上升速率與加速度，期望能夠更精確了解臺灣周圍海平面上升情形。

3.2.1 六參數擬合

臺灣周圍海平面變化的季節性訊號非常明顯，在計算海平面上升速率 a_1 時須同時考慮季節性(年周期與半年週期)訊號，因此以六參數擬

合海平面變化，並以最小二乘法解算未知參數。為了避免如颱風或其他短時間的氣象因素影響海平面上升速率之估算，因此解算過程中利用3倍中誤差，移除誤差量過大的數據，六參數擬合公式如下：

$$SL(t) = a_0 + a_1 t + c \sin(2\pi t) + d \cos(2\pi t) + e \sin(4\pi t) + f \cos(4\pi t) \dots\dots\dots(3.3)$$

其中， SL 為海平面變化， a_0 為偏差， a_1 為海平面上升速率， c 和 e 分別為年訊號和半年訊號之正弦振幅， d 和 f 分別為年訊號和半年訊號之餘弦振幅， t 為時間。

本研究亦估計臺灣四周海平面加速度，另外在六參數(式(3.3))中加入海平面加速度之參數 a_2 ，其公式如下：

$$SL(t) = a_0 + a_1 t + a_2 t^2 + c \sin(2\pi t) + d \cos(2\pi t) + e \sin(4\pi t) + f \cos(4\pi t) \dots\dots(3.4)$$

以宿霧(Cebu)潮位站周圍 2° 範圍內之測高資料平均為例，將測高資料分別帶入式(3.3)與式(3.4)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中擬合海平面變化。比較六參數擬合速率與六參數加上加速度之擬合速率可以清楚看出(圖 3.2)，六參數加上加速度後對於速率計算之影響非常大。

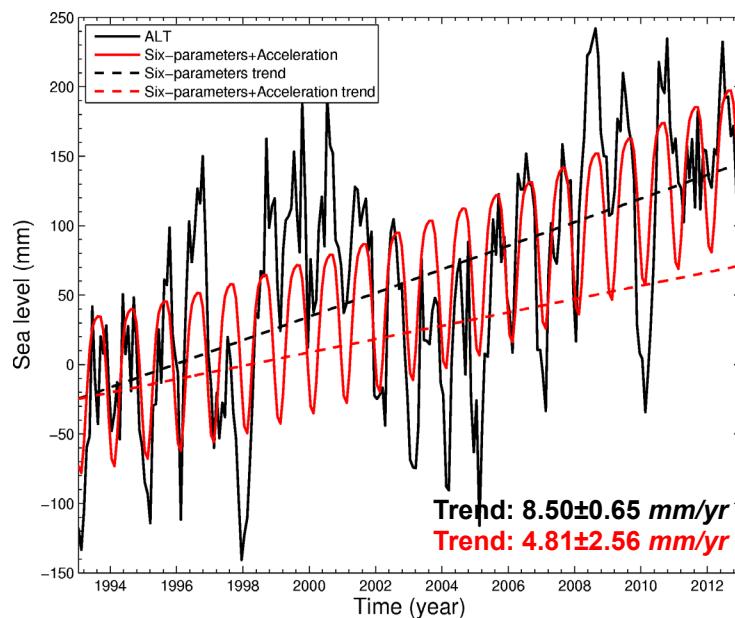


圖 3.2 宿霧(Cebu)潮位站周圍 2° 範圍內之測高資料平均。ALT 為衛星測高資料、Six-parameters+Acceleration 為六參數加上加速度擬合成果

(式(3.4))、Six-parameters trend 為六參數擬合之斜率(式(3.3))、
Six-parameters+Acceleration trend 為六參數加上加速度擬合之斜率

3.2.2 多變量擬合

由第三期(104 年度)計畫成果可知，聖嬰-南方振盪(ENSO)與太平洋年代際振盪(PDO)現象對臺灣周圍海平面變化有相當的貢獻量，因此今年度計畫結合六參數線性方程式(式(3.3))與氣候指標擬合臺灣周圍海平面變化(後續簡稱為多變量擬合)。多重 ENSO 指數(MEI)以及太平洋年代際振盪(PDO)指數分別表示年際間變化(Interannual variability)與年代際變化(Decadal variability)，然而兩指數皆為月平均資料。為降低氣候因子間相互之影響，需將多重 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，且多重 ENSO 指數(MEI)代表年際間變化(Interannual variability)，因此再將多重 ENSO 指數(MEI)分別進行 5 個月與 65 個月移動平均，自 5 個月移動平均成果扣除 65 個月移動平均成果，即可得到年際間變化(Interannual climate index, ICI)(圖 4.3)。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，降低週期 10 年以下之訊號(圖 3.3)。上述使用的參數(5 個月移動平均與 65 個月移動平均)均是參照於 Zhang and Church [2012]。

多變量線性公式如下：

$$SL(t) = a_0 + a_1 t + c \sin(2\pi t) + d \cos(2\pi t) + e \sin(4\pi t) + f \cos(4\pi t) + gICI + hDCI \quad (3.5)$$

其中 ICI (Interannual climate index)與 DCI (Decadal climate index)為經濾波和正規化(正規化=原始資料/原始資料之標準偏差)處理後之多重 ENSO 指數(MEI)與太平洋年代際振盪(PDO)指數成果(圖 3.3)， g 與 h 分別為 ICI 與 DCI 係數，係數正負號表示海平面變化與對應氣候指標(ICI 與 DCI)間為正相位或負相位，其大小表示該氣候指標對於海平面變化影響量。

以宿霧(Cebu)潮位站周圍 2° 範圍內之測高資料平均為例，將測高資料帶入式(3.5)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(3.5)中擬合海平面變化。比較衛星測高資料與擬合海平面可以清楚看出(如圖 3.4 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。另外，比較多變量擬合速率與六參數之速率可以清楚看出(圖 3.4)，低頻氣候因子對於宿霧周圍海平面速率影響非常大。

另外，本研究亦利用多變量擬合估計臺灣四周海平面加速度，因此在多變量擬合方程式(式(3.5))中加入海平面加速度之參數 a_2 ，其公式如下：

$$SL(t) = a_0 + a_1 t + a_2 t^2 + c \sin(2\pi t) + d \cos(2\pi t) + e \sin(4\pi t) + f \cos(4\pi t) + gICI + hDCI \quad (3.6)$$

同樣是以宿霧(Cebu)潮位站周圍 2° 範圍內之測高資料平均為例，將測高資料帶入式(3.6)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中擬合海平面變化。由多變量擬合加上加速度之擬合速率可以清楚看出，加入加速度因子對於速率計算之影響非常大(圖 3.5)。由圖亦可知，加速度因子後對於速率之標準偏差計算之影響亦非常大，加入加速度因子後速率之標準偏差上升至 $\pm 1.73 \text{ mm/yr}$ 。同樣地，圖 3.4 也有相同情形。初步推估，求算精確速率與加速度時需要更長時間段資料。

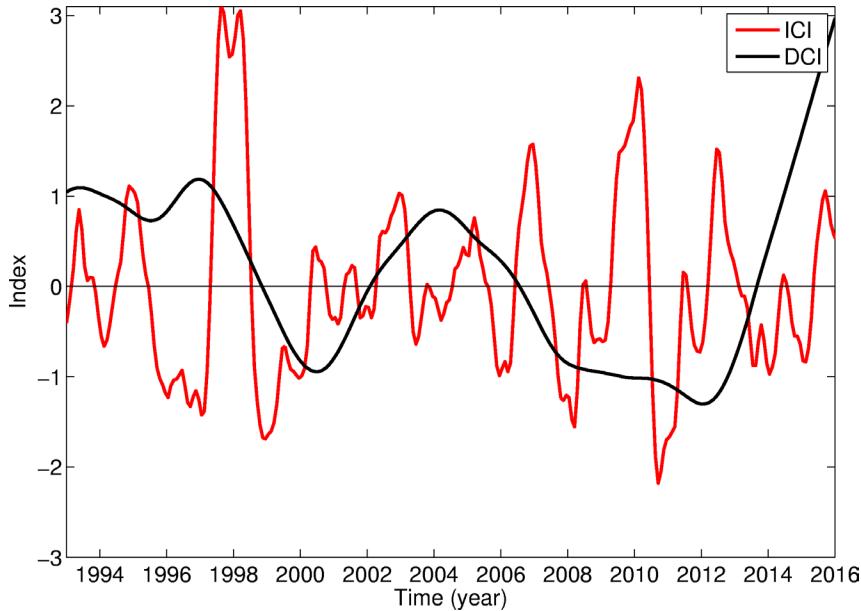


圖 3.3 濾波和正規化(正規化=原始資料/原始資料之標準偏差)處理後多重 ENSO 指數(MEI)與太平洋年代際振盪(PDO)指數成果。ICI (Interannual Climate Index)為多重 ENSO 指數(MEI)經分別經 65 個月移動平均以及 5 個月移動平均，自 5 個月移動平均成果扣除 65 個月移動平均之成果。DCI (Decadal Climate Index)為太平洋年代際振盪(PDO)指數經 65 個月移動平均後之成果

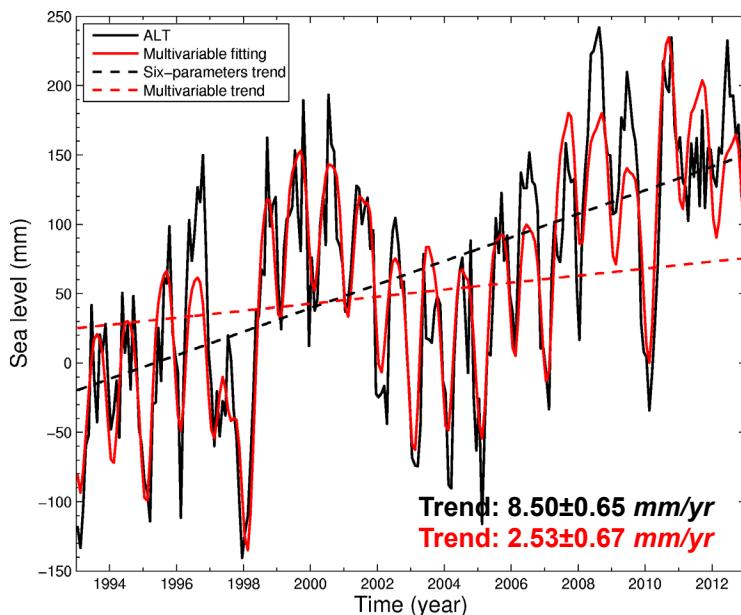


圖 3.4 宿霧(Cebu)潮位站周圍 2° 範圍內之測高資料平均。ALT 為衛星測高資料、Multivariable fitting 為多變量擬合成果、Six-parameters

trend 為六參數擬合之斜率(式(3.3))、Multivariable trend 為多變量擬合之斜率(式(3.5))

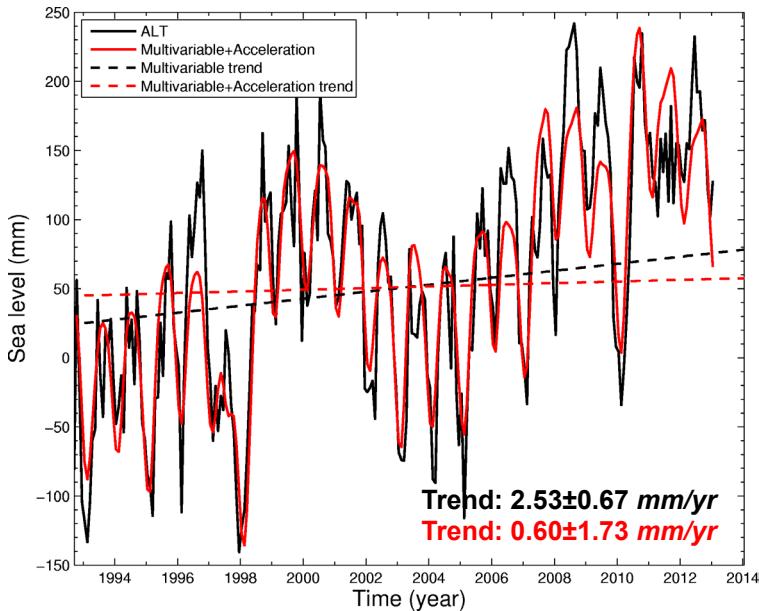


圖 3.5 宿霧(Cebu)潮位站周圍 2。範圍內之測高資料平均。ALT 為衛星測高資料、Multivariable+Acceleration 為多變量擬合+加速度成果(式(3.6))、Multivariable trend 為多變量擬合之斜率(式(3.5))、Multivariable+Acceleration trend 為含加速度項的多變量擬合之斜率。

3.3 臺灣周遭海平面上升速率與加速度

本計畫為了解海平面上升之時空特性，故利用 10 年(2003-2012)與 20 年(1993-2012)衛星測高儀資料計算臺灣附近海域絕對海平面上升速率與加速度。衛星測高資料如本章章節所述已經儀器改正、介質改正與地球物理因子改正。

3.3.1 1993-2012 絶對海平面昇降變動速率

在未考慮氣候因子影響下，以六參數擬合(式(3.3))衛星測高海平面資料所估算出的絕對海平面上升速率將受到氣候因子影響，臺灣周圍海平面速率由北(約 2~3 mm/yr)往南(8~12 mm/yr)逐漸增快(圖 3.6)。然而在考慮氣候因子(式(3.5))影響下所估算絕對海平面速率空間分佈則較一致，速率約在-2~4 mm/yr(圖 3.7)。比較改正前後速率(表 3.1)可知，

越靠近赤道差異越大，表示靠近赤道海平面昇降變動受氣候因子影響較為顯著。由多變量擬合衛星測高資料時的多重 ENSO 指數(MEI)之係數 g 與太平洋年代際振盪(PDO)之係數 h 亦可評估氣候因子對於各區域海平面的影響量，如圖 3.8、圖 3.9 與表 3.2 所示。由圖 3.8 可知，聖嬰-南方振盪(ENSO)現象僅對於菲律賓以東地區海平面有較大影響，影響量約-20~-40 mm，且聖嬰-南方振盪(ENSO)現象與菲律賓海平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平面皆有顯著影響，且與臺灣南方海域海平面變化皆呈現相反相位情形(圖 3.9 與表 3.2)。由上述可知，此成果與 Zhang and Church [2012] 推估聖嬰-南方振盪(ENSO)現象主要影響的海平面範圍為緯度 $\pm 20^\circ$ 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。

未考慮氣候因子時，利用衛星海洋數據存檔、驗正與解釋(AVISO)衛星測高資料估算臺灣四周海域(緯度: 10°N~30°N、經度: 110°E~130°E)近二十年(1993-2012)絕對海平面上升速率為 $5.23 \pm 0.31 \text{ mm/yr}$ 。當移除低頻氣候訊號(考慮氣候因子)後，臺灣周圍近二十年(1993-2012)絕對海平面上升速率降為 $2.43 \pm 0.32 \text{ mm/yr}$ ，其結果接近百年潮位站資料估算之結果($\sim 2 \text{ mm/yr}$ [Douglas, 2001])，表示移除低頻氣候影響後所估算之海平面變化速率將更接近長期資料所估算之成果。

另外，後續將利用 1993-2012 年測高網格資料估算之速率進行臺灣本島淹水潛勢之分析，其臺灣本島周圍海平面上升速率如圖 3.6 所示。利用測高海平面變化進行溢淹分析前須進行資料參考基準偏移轉換，第五章將說明參考基準轉換方式。

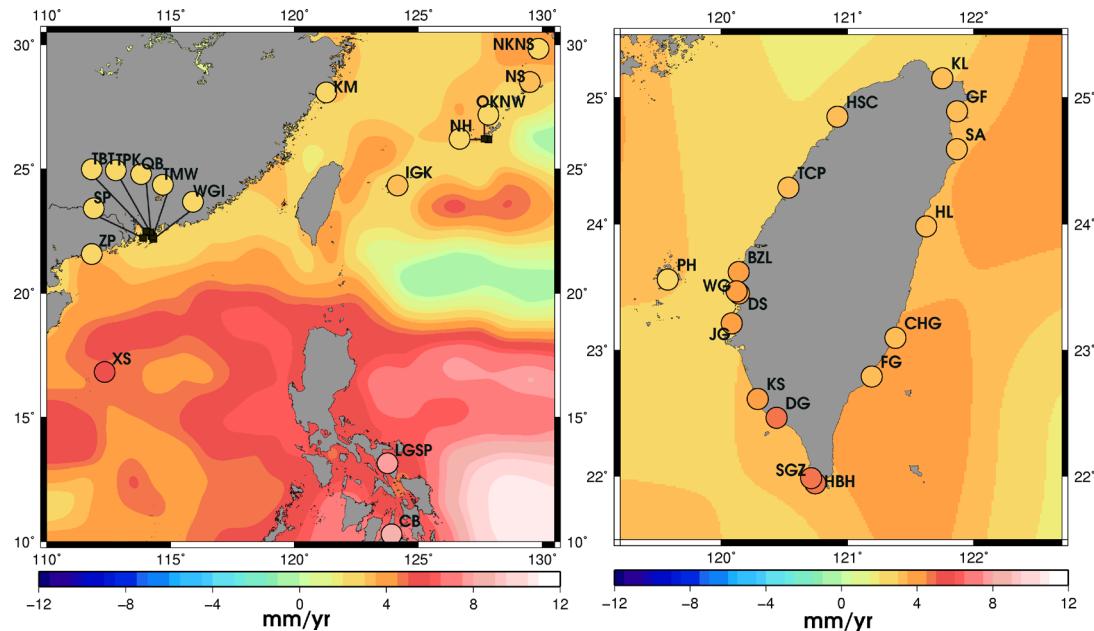


圖 3.6 未考慮氣候因子影響下之 1993-2012 臺灣周圍絕對海平面上升速率。圓點與趨勢分布圖分別為利用海洋數據存檔、驗正與解釋(AVISO)衛星測高平均沿軌跡點(along-track)與 $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ 網格(grid)資料所估算

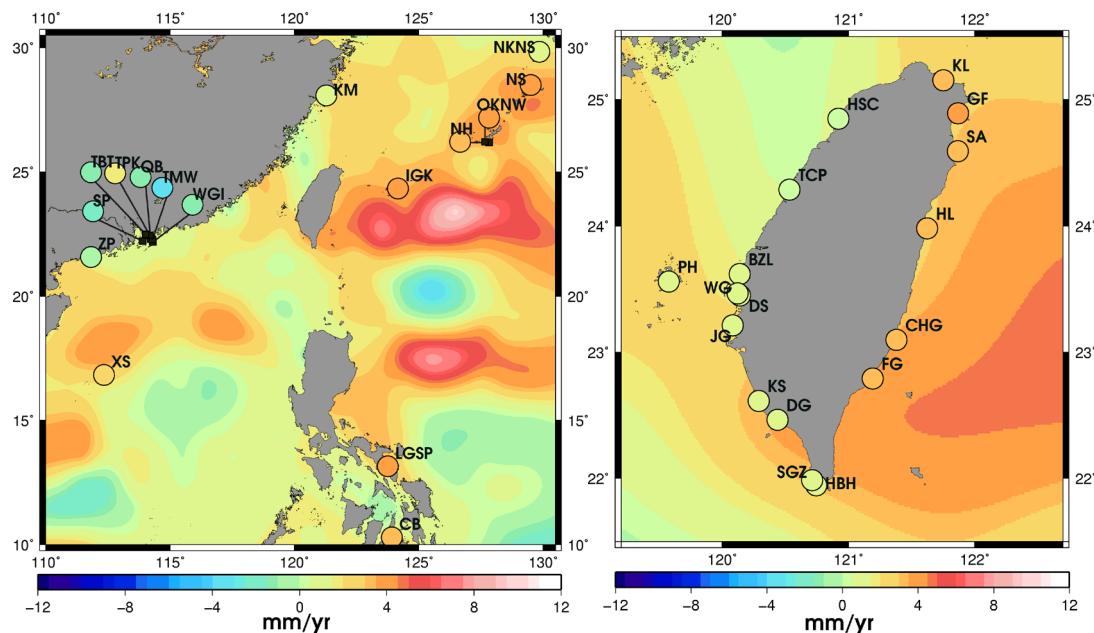


圖 3.7 考慮氣候因子影響下之 1993-2012 臺灣周圍絕對海平面上升速率。圓點與趨勢分布圖分別為利用海洋數據存檔、驗正與解釋(AVISO)衛星測高平均沿軌跡點(along-track)與 $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ 網格(grid)資料所估算

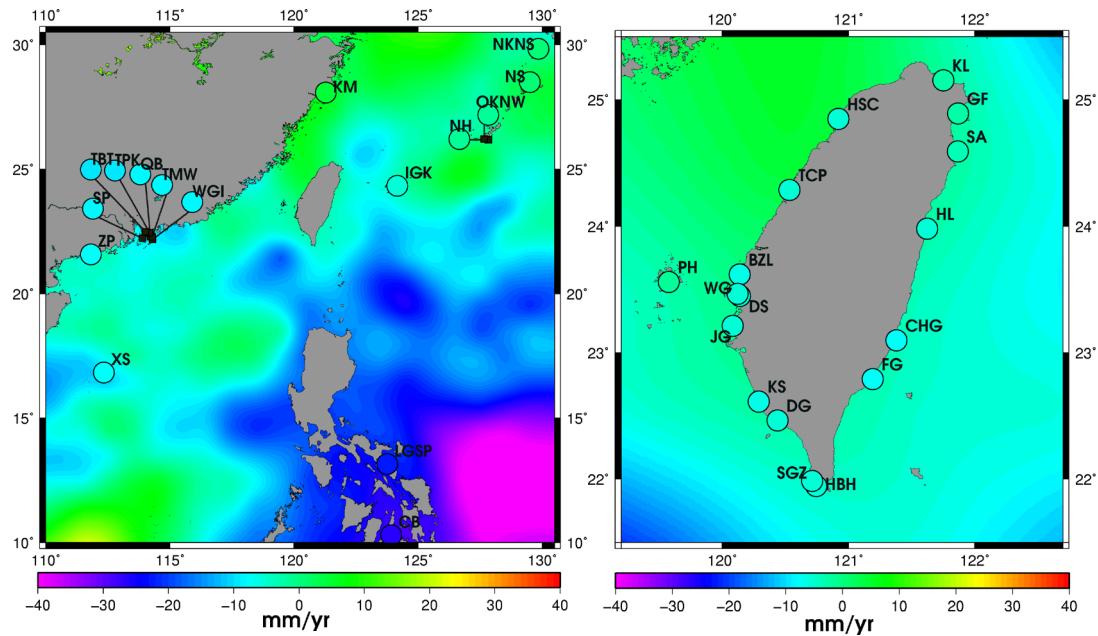


圖 3.8 多變量線性擬合 1993-2012 測高資料中多重 ENSO 指數(MEI)
之係數 g

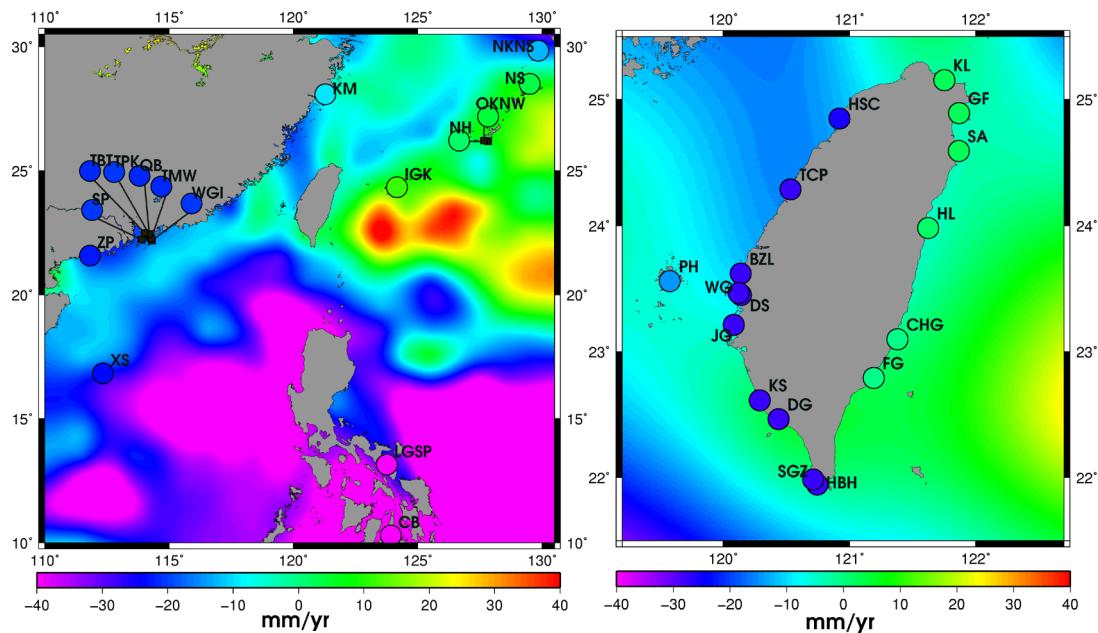


圖 3.9 多變量線性擬合 1993-2012 測高資料中太平洋年代際振盪(PDO)
之係數 h

表 3.1 1993-2012 臺灣周圍絕對海平面上升速率。Six-parameters 與 Multivariable 分別為在擬合時未考慮與考慮海平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		
		Six-parameters	Multivariable	Difference	Six-parameters	Multivariable	Difference
China	ZP	2.63±0.54	0.14±0.81	-2.49	2.63±0.56	1.31±0.86	-1.32
	XS	5.89±0.57	3.83±0.88	-2.06	4.44±0.57	1.99±0.90	-2.45
	KM	2.94±0.43	1.85±0.68	-1.09	2.73±0.43	2.34±0.69	-0.39
	WGI	2.32±0.51	0.01±0.75	-2.31	2.02±0.51	0.57±0.77	-1.45
	QB	2.30±0.52	-0.06±0.77	-2.36	1.90±0.52	0.41±0.79	-1.49
	TMW	2.29±0.52	-0.07±0.77	-2.36	1.99±0.52	0.55±0.79	-1.44
	TPK	2.34±0.53	0.00±0.79	-2.34	1.80±0.53	0.27±0.82	-1.53
	TBT	2.40±0.54	0.03±0.81	-2.37	1.80±0.54	0.27±0.83	-1.53
	SP	2.44±0.52	0.16±0.77	-2.28	1.82±0.52	0.31±0.80	-1.51
	KL	3.16±0.36	3.47±0.57	0.31	2.92±0.36	3.40±0.57	0.48
Taiwan	GF	3.24±0.37	3.57±0.57	0.33	2.88±0.37	3.32±0.58	0.44
	SA	3.20±0.37	3.47±0.58	0.27	2.78±0.38	3.15±0.59	0.37
	HL	3.20±0.39	3.38±0.61	0.18	2.68±0.40	2.92±0.63	0.24
	CHG	3.34±0.42	3.16±0.66	-0.18	2.65±0.44	2.67±0.67	0.02
	FG	3.27±0.44	3.18±0.68	-0.09	2.67±0.45	2.59±0.69	-0.08
	HBH	4.58±0.35	1.47±0.47	-3.11	4.44±0.35	1.77±0.49	-2.67
	SGZ	4.59±0.35	1.48±0.47	-3.11	4.45±0.35	1.79±0.49	-2.66
	DG	4.50±0.36	1.38±0.47	-3.12	4.40±0.36	1.73±0.50	-2.67
	KS	4.49±0.36	1.36±0.48	-3.13	4.40±0.36	1.72±0.50	-2.68
	JG	4.22±0.37	1.08±0.49	-3.14	4.22±0.37	1.57±0.51	-2.65
	DS	4.04±0.37	0.93±0.50	-3.11	4.03±0.37	1.38±0.52	-2.65
	WG	4.04±0.37	0.93±0.50	-3.11	4.03±0.37	1.38±0.52	-2.65
	PH	2.45±0.52	0.78±0.82	-1.67	1.23±0.53	-0.34±0.85	-1.57
	BZL	3.92±0.38	0.82±0.51	-3.1	3.87±0.38	1.24±0.53	-2.63
	TCP	3.45±0.43	0.33±0.61	-3.12	3.14±0.44	0.40±0.64	-2.74
	HSC	3.11±0.46	0.23±0.68	-2.88	2.44±0.49	-0.09±0.73	-2.53
	JW	3.23±0.36	3.51±0.57	0.28	2.91±0.37	3.33±0.58	0.42
Japan	NS	3.03±0.55	3.45±0.87	0.42	3.06±0.54	3.19±0.85	0.13
	NKNS	2.86±0.52	1.37±0.83	-1.49	2.79±0.57	2.48±0.89	-0.31
	OKNW	2.63±0.70	3.16±1.10	0.53	2.53±0.72	3.36±1.13	0.83
	NH	2.44±0.68	2.65±1.07	0.21	2.28±0.69	2.64±1.09	0.36
	IGK	3.50±0.59	4.82±0.93	1.32	2.07±0.60	3.25±0.95	1.18
Philippines	LGSP	7.61±0.61	2.91±0.75	-4.70	6.47±0.64	2.82±0.83	-3.65
	CB	8.50±0.65	2.53±0.67	-5.97	8.01±0.77	3.02±0.93	-4.99
All regions		3.60	1.75	-1.85	3.20	1.80	-1.40

表 3.2 多變量線性擬合 1993-2012 測高資料中係數 g 與 h 。AVISO 與 RADs 分別表示衛星測高之資料來源

Country	Station	AVISO (mm)		RADs (mm)	
		g	h	g	h
China	ZP	-7.28±2.83	-22.19±5.55	-7.96±3.02	-11.75±5.93
	XS	-7.80±3.10	-23.26±6.04	-6.67±3.16	-26.24±6.17
	KM	4.14±2.36	-9.67±4.67	4.01±2.40	-3.44±4.73
	WGI	-8.64±2.64	-20.67±5.18	-8.23±2.71	-12.96±5.32
	QB	-8.85±2.69	-21.00±5.29	-8.33±2.77	-13.27±5.44
	TMW	-8.79±2.68	-21.02±5.27	-8.31±2.75	-12.83±5.41
	TPK	-9.04±2.77	-20.86±5.43	-8.53±2.85	-13.67±5.61
	TBT	-9.11±2.82	-21.05±5.54	-8.60±2.91	-13.71±5.72
	SP	-8.81±2.69	-20.32±5.28	-8.28±2.79	-13.49±5.48

	KL	-2.32±2.01	2.71±3.94	-2.32±2.00	4.25±3.92
	GF	-2.82±2.00	2.98±3.94	-3.01±2.02	3.91±3.97
	SA	-3.60±2.03	2.38±3.99	-3.84±2.07	3.25±4.06
	HL	-5.07±2.13	1.56±4.19	-5.46±2.18	2.10±4.29
	CHG	-7.26±2.31	-0.30±4.53	-7.66±2.34	0.15±4.60
	FG	-7.92±2.38	-0.86±4.67	-8.42±2.42	-0.69±4.76
	HBH	-5.73±1.63	-27.72±3.20	-5.79±1.71	-23.82±3.35
	SGZ	-5.74±1.63	-27.69±3.20	-5.81±1.71	-23.74±3.36
Taiwan	DG	-5.98±1.66	-27.84±3.25	-6.08±1.74	-23.82±3.41
	KS	-6.01±1.66	-27.88±3.27	-6.13±1.74	-23.85±3.42
	JG	-6.00±1.73	-27.90±3.39	-6.39±1.79	-23.62±3.52
	DS	-6.00±1.77	-27.71±3.47	-6.49±1.83	-23.54±3.60
	WG	-6.00±1.77	-27.71±3.47	-6.49±1.83	-23.54±3.60
	PH	-1.85±2.85	-14.80±5.64	-2.99±2.94	-13.21±5.82
	BZL	-6.01±1.80	-27.60±3.54	-6.55±1.87	-23.50±3.67
	TCP	-5.83±2.12	-27.86±4.16	-6.94±2.25	-24.49±4.42
	HSC	-5.34±2.37	-25.69±4.65	-6.93±2.55	-22.54±5.01
	JW	-2.40±2.01	2.50±3.94	-2.42±2.04	3.72±4.00
Japan	NS	0.20±3.05	3.69±5.99	-1.81±2.97	1.15±5.83
	NKNS	0.42±2.89	-12.97±5.68	-1.86±3.12	-2.77±6.12
	OKNW	-1.31±3.85	4.73±7.56	-0.48±3.96	7.41±7.77
	NH	-1.31±3.74	1.79±7.35	-0.24±3.83	3.27±7.52
	IGK	-5.15±3.24	11.73±6.37	-5.25±3.31	10.47±6.51
Philippines	LGSP	-22.51±2.64	-43.09±5.18	-24.41±2.90	-36.62±5.69
	CB	-26.30±2.35	-53.22±4.61	-32.29±3.27	-46.02±6.42
	All region	-6.35	-16.45	-6.80	-12.76

3.3.2 2003-2012 純對海平面昇降變動速率

在未考慮氣候因子影響下，以六參數擬合(式(3.3))衛星測高海平面資料所估算出的 2003-2012 純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往南逐漸增快，而且在臺灣以南的海平面速率幾乎皆大於 10 mm/yr (圖 3.10)，遠大於 1993-2012 卫星測高資料估算之速率 (圖 3.6)。然而在考慮氣候因子(式(3.5))影響下所估算 2003-2012 純對海平面上升速率在空間上分布並不一致 (圖 3.11)，其結果與 1993-2012 測高資料估算之速率(圖 3.7)亦不相同。其原因推測除了因為使用時間段較短(僅十年)外，還因為近十年(2003-2012)聖嬰-南方振盪(ENSO)與太平洋年代際振盪(PDO) 現象並不明顯，導致擬合成果不佳，進行影響估算速率之精度(速率之標準偏差平均值為±3.53~±3.66 mm/yr) (表 3.3)。以整個臺灣四周海域(緯度: 10°N~30°N、經度: 110°E~130°E)衛星測高資料為例，近十年(2003-2012)海平面變化受氣候因子影響並不明顯，導致利用多變量擬合速率之精度達±1.98 mm/yr (圖 3.12)。近十年聖嬰-南方振盪(ENSO)現象較不明顯(圖 3.13)，而太平洋年代際振盪(PDO)影響卻非常顯著(圖 3.14)，但估算之太平洋年代際振盪(PDO)係數 h 的標準偏差(標準偏差平均值約±13~±14 mm)卻也增大許多。

多(表 3.4)。

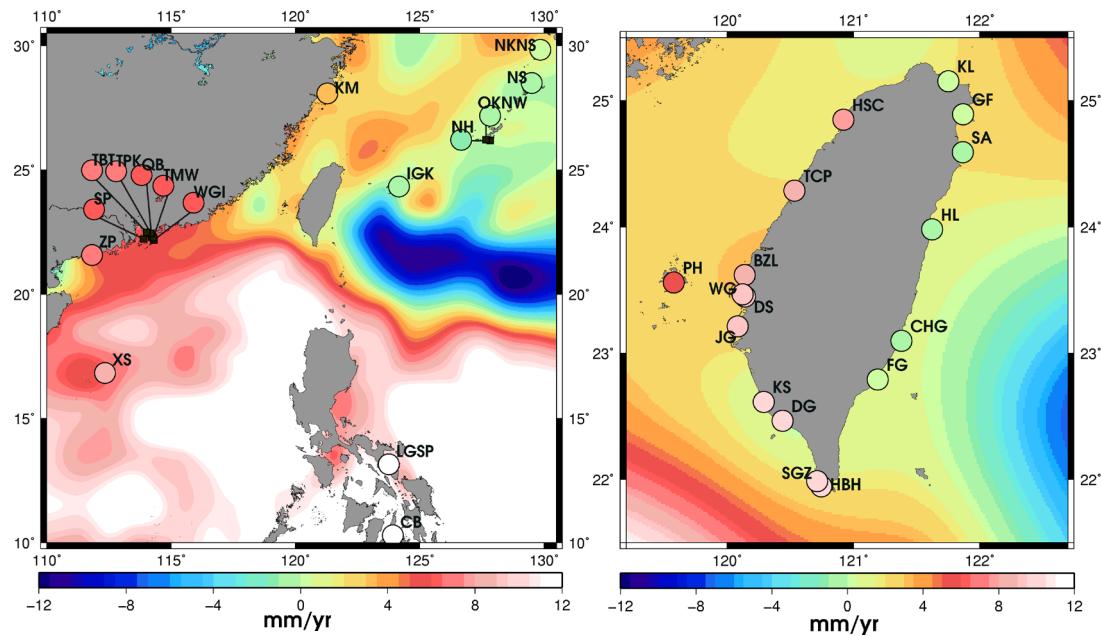


圖 3.10 未考慮氣候因子影響下之 2003-2012 臺灣周圍絕對海平面上升速率。點位與背景圖分別為利用海洋數據存檔、驗正與解釋(AVISO)衛星測高平均沿軌跡點(along-track)與 $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ 網格資料所估算

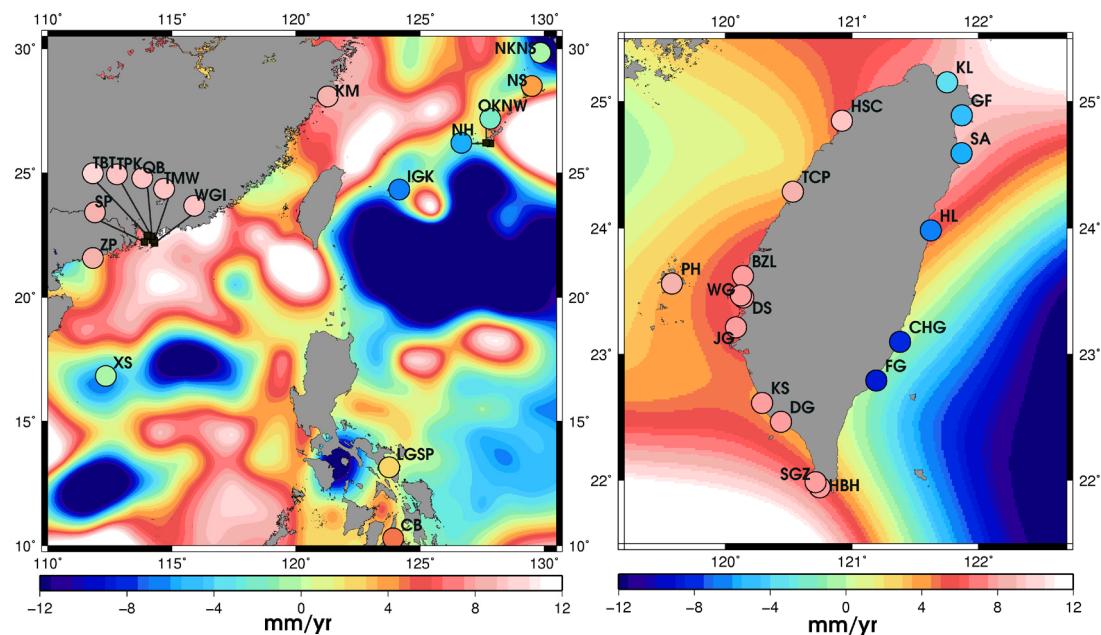


圖 3.11 考慮氣候因子影響下之 2003-2012 臺灣周圍絕對海平面上升速率。點位與背景圖分別為利用海洋數據存檔、驗正與解釋(AVISO)衛星測高平均沿軌跡點(along-track)與 $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ 網格資料所估算

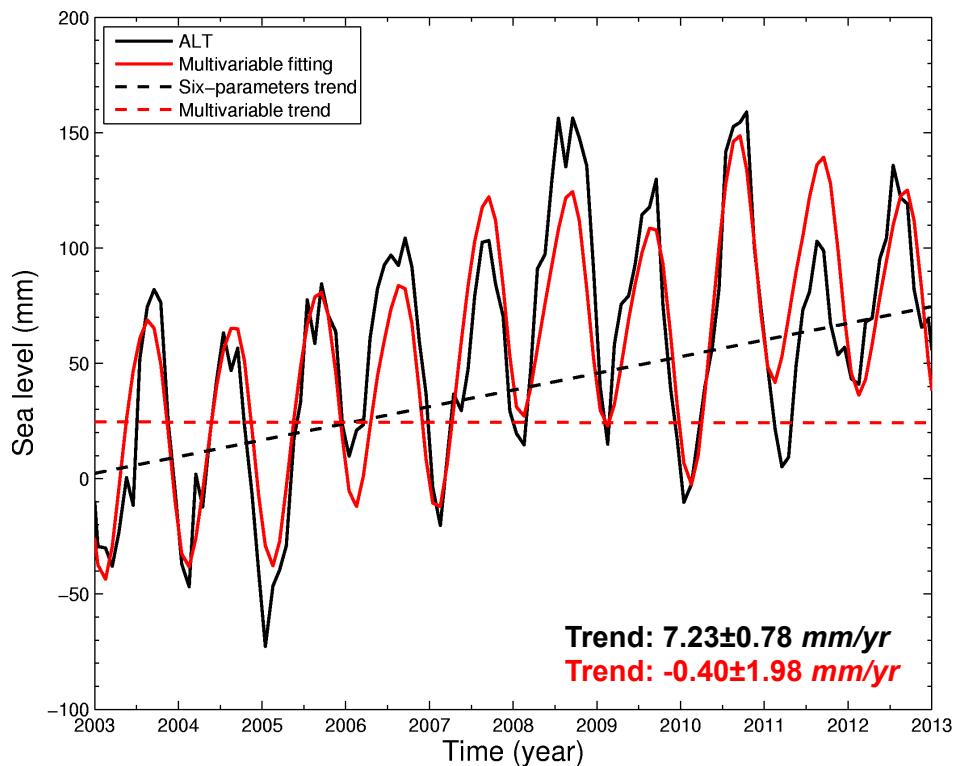


圖 3.12 2003-2012 臺灣周圍絕對海平面變化的多變量擬合。ALT 為衛星測高資料、Multivariable fitting 為多變量擬合成果、Six-parameters trend 為六參數擬合之斜率、Multivariable trend 為多變量擬合之斜率

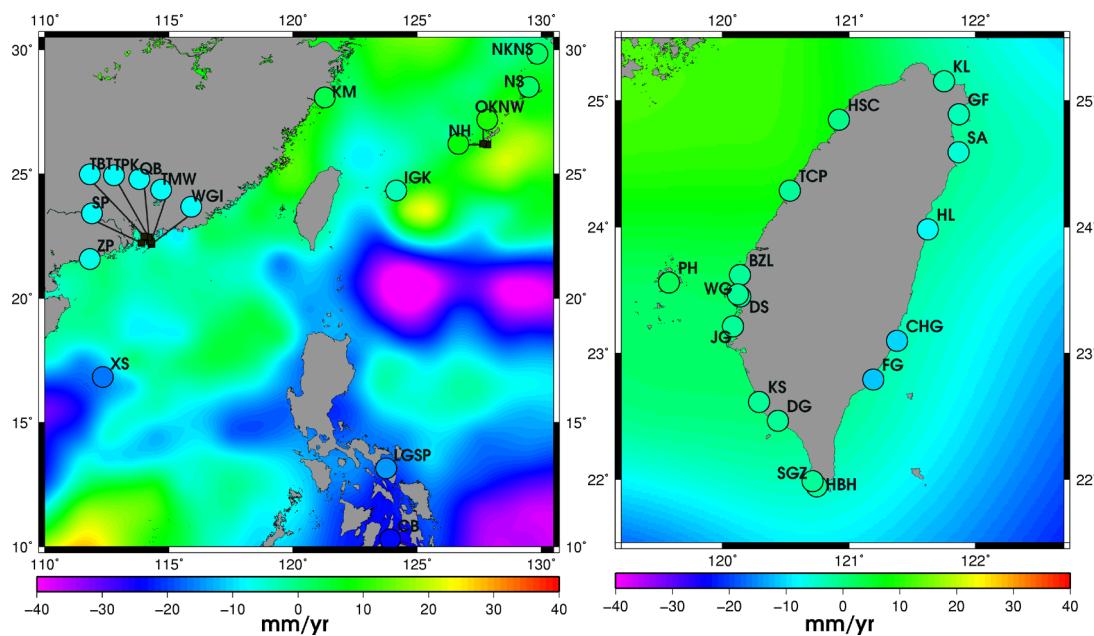


圖 3.13 多變量線性擬合 2003-2012 測高資料中多重 ENSO 指數(MEI)之係數 g

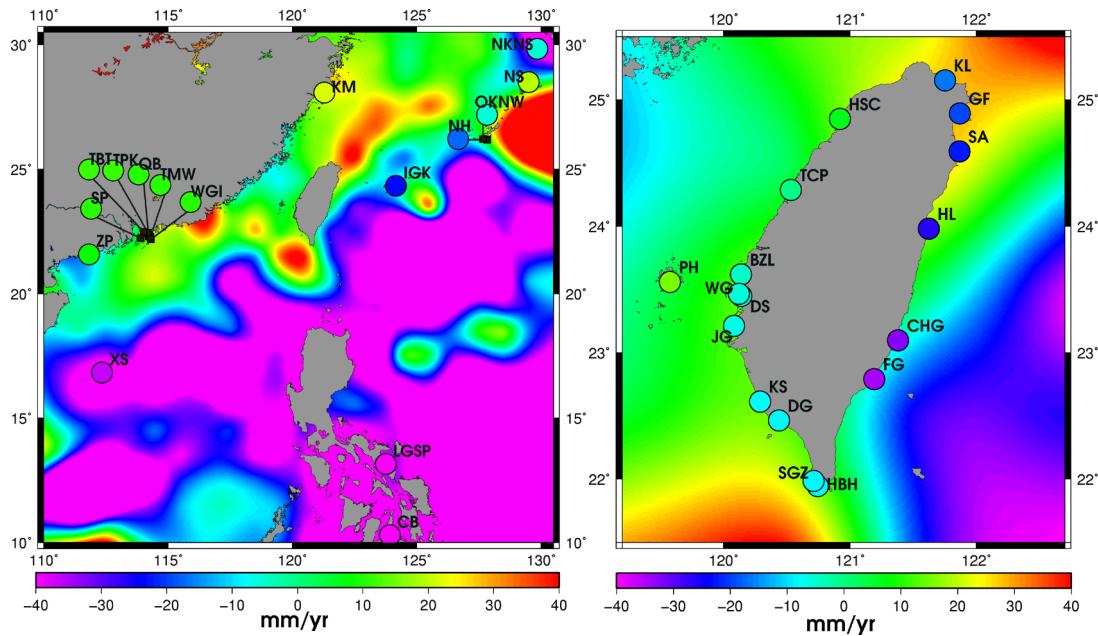


圖 3.14 多變量線性擬合 2003-2012 測高資料中太平洋年代際振盪 (PDO) 之係數 h

表 3.3 2003-2012 臺灣周圍絕對海平面上升速率。Six-parameters 與 Multivariable 分別為在擬合時未考慮與考慮海平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		
		Six-parameters	Multivariable	Difference	Six-parameters	Multivariable	Difference
China	ZP	6.53±1.46	8.67±4.18	2.14	3.16±1.52	4.61±4.35	1.45
	XS	8.49±1.84	-0.28±5.20	-8.77	6.81±1.84	-2.22±5.22	-9.03
	KM	3.45±1.22	8.77±3.45	5.32	1.10±1.20	5.57±3.55	4.47
	WGI	6.43±1.35	9.08±3.82	2.65	3.59±1.39	6.88±3.96	3.29
	QB	6.46±1.38	9.19±3.92	2.73	3.46±1.42	6.76±4.05	3.30
	TMW	6.48±1.37	9.22±3.90	2.74	3.52±1.41	6.87±4.03	3.35
	TPK	6.54±1.42	9.47±4.02	2.93	3.48±1.46	6.89±4.17	3.41
	TBT	6.59±1.45	9.50±4.11	2.91	3.42±1.49	6.82±4.24	3.4
	SP	6.36±1.38	8.97±3.92	2.61	3.26±1.42	6.37±4.06	3.11
Taiwan	KL	0.39±1.08	-3.81±3.07	-4.20	-0.36±1.08	-5.23±3.05	-4.87
	GF	0.10±1.10	-4.83±3.12	-4.93	-0.58±1.10	-6.22±3.10	-5.64
	SA	-0.03±1.13	-5.66±3.15	-5.63	-0.78±1.13	-7.28±3.15	-6.50
	HL	-0.17±1.19	-6.99±3.29	-6.82	-1.03±1.21	-8.97±3.29	-7.94
	CHG	-0.01±1.29	-8.29±3.45	-8.28	-0.99±1.31	-10.68±3.47	-9.69
	FG	0.09±1.33	-8.72±3.54	-8.81	-0.91±1.36	-11.24±3.56	-10.33
	HBH	9.72±0.81	7.56±2.32	-2.16	8.06±0.83	5.63±2.38	-2.43
	SGZ	9.72±0.81	7.57±2.32	-2.15	8.06±0.83	5.67±2.38	-2.39
	DG	9.65±0.82	7.61±2.35	-2.04	8.03±0.84	5.83±2.40	-2.20
	KS	9.64±0.82	7.64±2.35	-2.00	8.04±0.84	5.86±2.41	-2.18
	JG	9.32±0.84	7.71±2.41	-1.61	7.65±0.86	5.59±2.48	-2.06
	DS	9.09±0.85	7.75±2.45	-1.34	7.38±0.88	5.56±2.53	-1.82
	WG	9.09±0.85	7.75±2.45	-1.34	7.38±0.88	5.58±2.53	-1.80
	PH	5.01±1.40	8.91±4.02	3.90	1.04±1.39	3.00±4.00	1.96
	BZL	8.95±0.86	7.84±2.49	-1.11	7.20±0.89	5.59±2.57	-1.61

	TCP	8.40±1.01	8.28±2.91	-0.12	6.29±1.07	5.49±3.07	-0.80
	HSC	7.72±1.08	9.33±3.23	1.61	4.97±1.21	5.72±3.48	0.75
	JW	0.73±1.07	-2.91±3.06	-3.64	0.03±1.07	-4.16±3.06	-4.19
Japan	NS	-0.29±1.37	4.50±3.94	4.79	-0.33±1.45	-1.98±4.30	-1.65
	NKNS	0.15±1.56	-0.58±4.64	-0.73	-0.59±1.55	-4.17±4.42	-3.58
	OKNW	-0.03±1.73	-1.56±4.92	-1.53	-0.53±1.81	-1.86±5.13	-1.33
	NH	-1.23±1.64	-5.58±4.64	-4.35	-1.88±1.72	-6.30±4.84	-4.42
	IGK	-0.26±1.68	-6.25±4.79	-5.99	-1.70±1.69	-7.77±4.83	-6.07
Philippines	LGSP	14.65±1.64	2.10±4.30	-12.55	10.59±1.72	-2.66±4.60	-13.25
	CB	18.62±1.59	4.68±3.70	-13.94	12.66±2.07	-5.84±5.22	-18.5
All regions		5.62	3.62	-2.00	3.62	0.84	-2.78

表 3.4 多變量線性擬合 2003-2012 測高資料中係數 g 與 h 。AVISO 與 RADs 分別表示衛星測高之資料來源

Country	Station	AVISO (mm)		RADs (mm)	
		g	h	g	h
China	ZP	-6.30±4.35	8.43±15.49	-6.58±4.53	5.67±16.12
	XS	-16.79±5.41	-36.80±19.26	-16.31±5.43	-37.84±19.34
	KM	3.37±3.59	21.07±12.79	4.11±3.70	18.48±13.16
	WGI	-7.21±3.98	10.46±14.17	-6.37±4.12	13.00±14.66
	QB	-7.38±4.08	10.76±14.51	-6.48±4.21	13.01±14.99
	TMW	-7.34±4.06	10.79±14.44	-6.44±4.19	13.23±14.92
	TPK	-7.60±4.19	11.53±14.91	-6.73±4.34	13.46±15.45
	TBT	-7.80±4.28	11.47±15.23	-6.96±4.41	13.38±15.70
	SP	-7.49±4.08	10.27±14.52	-6.78±4.22	12.25±15.02
	KL	-2.71±3.19	-16.64±11.35	-2.78±3.18	-19.27±11.31
Taiwan	GF	-3.99±3.24	-19.50±11.55	-4.18±3.23	-22.32±11.48
	SA	-5.30±3.28	-22.32±11.68	-5.64±3.27	-25.71±11.65
	HL	-7.82±3.42	-26.99±12.17	-8.36±3.42	-31.47±12.17
	CHG	-10.87±3.59	-32.78±12.79	-11.73±3.62	-38.40±12.86
	FG	-11.90±3.68	-34.90±13.11	-12.95±3.71	-40.94±13.19
	HBH	-1.44±2.42	-8.56±8.60	-1.33±2.48	-9.63±8.82
	SGZ	-1.47±2.42	-8.52±8.60	-1.35±2.48	-9.47±8.83
	DG	-1.62±2.44	-8.05±8.69	-1.51±2.50	-8.71±8.91
	KS	-1.60±2.45	-7.93±8.71	-1.53±2.51	-8.63±8.92
	JG	-1.50±2.51	-6.36±8.93	-1.59±2.58	-8.13±9.18
	DS	-1.51±2.55	-5.33±9.08	-1.65±2.63	-7.19±9.36
	WG	-1.51±2.55	-5.33±9.08	-1.66±2.63	-7.14±9.36
	PH	2.81±4.18	15.43±14.88	0.79±4.16	7.77±14.82
	BZL	-1.52±2.59	-4.40±9.21	-1.68±2.67	-6.38±9.50
	TCP	-1.14±3.03	-0.46±10.77	-2.11±3.20	-3.16±11.39
	HSC	-0.84±3.36	6.13±11.96	-2.30±3.62	2.96±12.89
	JW	-2.59±3.18	-14.41±11.33	-2.55±3.19	-16.60±11.34
Japan	NS	1.50±4.06	19.01±14.63	2.46±4.48	-9.28±15.94
	NKNS	1.91±4.83	-5.12±17.20	-0.05±4.60	-14.12±16.33
	OKNW	9.92±5.12	-5.98±18.22	10.69±5.34	-5.20±18.99
	NH	7.27±4.84	-17.27±17.16	7.95±5.05	-17.52±17.91
	IGK	-3.34±4.99	-23.71±17.74	-3.73±5.03	-24.01±17.90
Philippines	LGSP	-14.58±4.48	-49.66±15.94	-12.94±4.79	-52.42±17.04
	CB	-23.89±3.85	-55.23±13.69	-22.19±5.43	-73.24±19.34
All region		-4.23	-8.08	-4.18	-11.12

3.3.3 1993-2015 絶對海平面昇降變動速率

本研究為了解 1993-2015 臺灣周圍絕對海平面上升速率，故自海洋數據存檔、驗正與解釋(AVISO)下載 1993/01-2015/08 臺灣周圍網格資料。在未考慮氣候因子影響下，以六參數擬合(式(3.3))衛星測高海平面

資料所估算出的 1993-2015 純對海平面上升速率將受到氣候因子影響(圖 3.15)，其速率之空間分佈與近二十年(1993-2012)之成果相似(圖 3.6)。整個區域(緯度: $10^{\circ}\text{N} \sim 30^{\circ}\text{N}$ 、經度: $110^{\circ}\text{E} \sim 130^{\circ}\text{E}$)純對海平面上升速率分別為 $3.52 \pm 0.25 \text{ mm/yr}$ 。然而 1993-2012 純對海平面上升速率卻為 $5.23 \pm 0.31 \text{ mm/yr}$ ，兩時間段海平面速率差異約 1.71 mm/yr ，其原因為自 2014 年起聖嬰現象(El Niño)開始增強(圖 2.9)，至 2015 達到最強，導致近兩年(2014-2015)臺灣周圍海平面顯著下降(圖 3.16)。

在考慮氣候因子(式(3.5))影響下所估算 1993-2015 純對海平面上升速率空間分佈則較一致(圖 3.17)，其空間中海平面上升速率分布與 1993-2012 結果一致(圖 3.7)。在考慮氣候因子下，利用衛星海洋數據存檔、驗正與解釋(AVISO)衛星測高資料估算臺灣四周海域(緯度: $10^{\circ}\text{N} \sim 30^{\circ}\text{N}$ 、經度: $110^{\circ}\text{E} \sim 130^{\circ}\text{E}$)1993-2015 純對海平面上升速率為 $2.55 \pm 0.18 \text{ mm/yr}$ ，與 1993-2012 成果($2.43 \pm 0.32 \text{ mm/yr}$)相一致。由多變量擬合 1993-2015 測高資料時的多重 ENSO 指數(MEI)之係數 g 與太平洋年代際振盪(PDO)之係數 h (圖 3.18 與圖 3.19)與 1993-2012 測高資料估算之成果相似(圖 3.8 與圖 3.9)

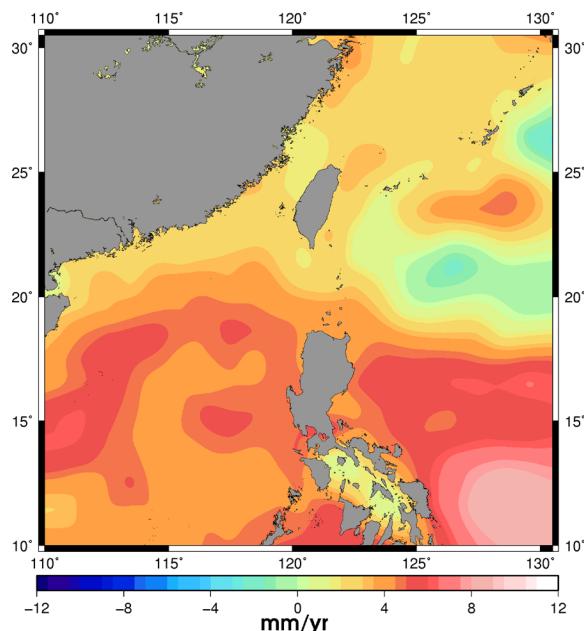


圖 3.15 未考慮氣候因子影響下之 1993-2015 臺灣周圍絕對海平面上升速率。由海洋數據存檔、驗正與解釋(AVISO)衛星測高 $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ 網格資料所估算

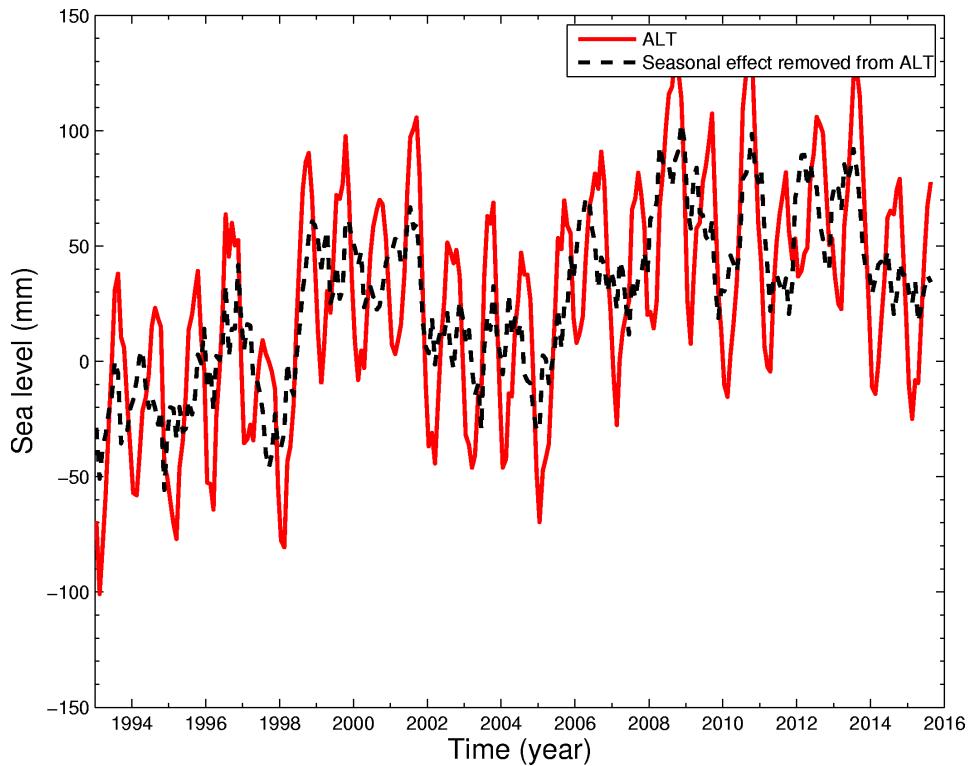


圖 3.16 臺灣周圍絕對海平面變化。由衛星海洋數據存檔、驗正與解釋(AVISO)衛星測高資料所估算

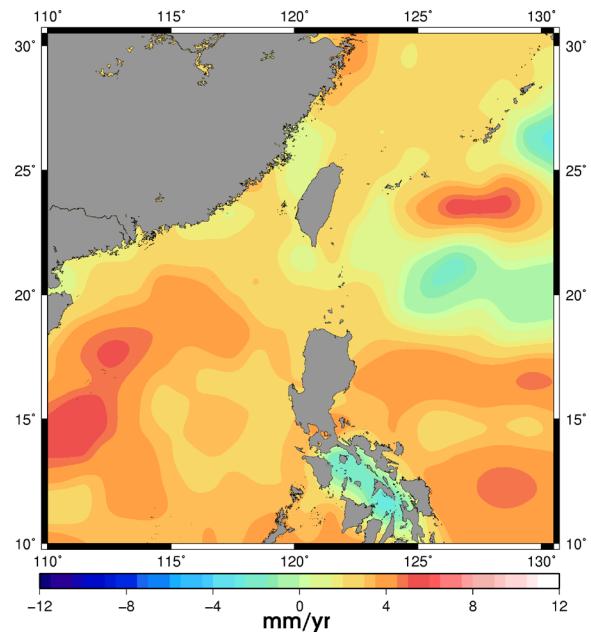


圖 3.17 考慮氣候因子影響下之 1993-2015 臺灣周圍絕對海平面上升速率。由海洋數據存檔、驗正與解釋(AVISO)衛星測高 $1^\circ \times 1^\circ$ 網格資料所估算

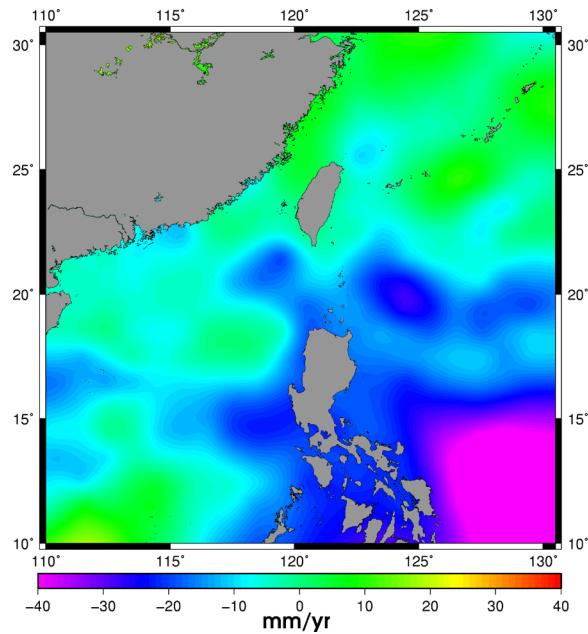


圖 3.18 多變量線性擬合 1993-2015 測高資料中多重 ENSO 指數(MEI)
之係數 g

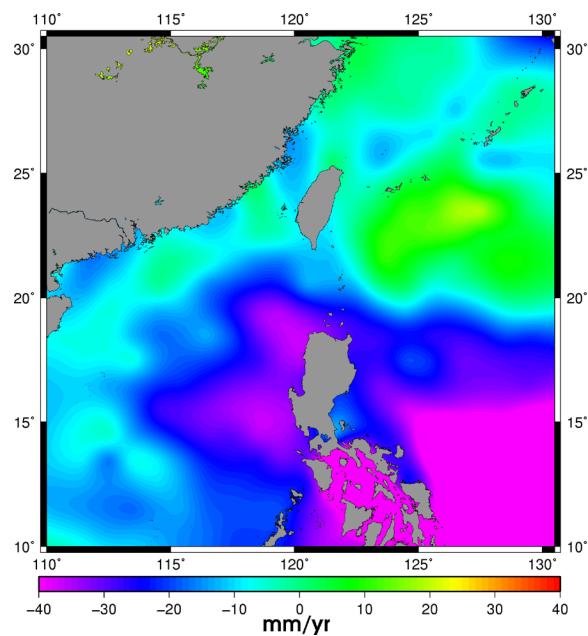


圖 3.19 多變量線性擬合 1993-2015 測高資料中太平洋年代際振盪
(PDO)之係數 h

3.3.4 絶對海平面上升加速度

本研究亦利用式(3.4)擬合衛星測高資料估算近二十年(1993-2012與 1993-2015)臺灣周圍海平面上升速率與加速度。由 1993-2012 衛星測

高資料估算臺灣周圍海平面呈現上升情況(圖 3.20 與表 3.5)，而加速度為正負參雜(表 3.5 與圖 3.21)。而由衛星測高網格資料估算 1993-2015 臺灣周圍海平面速率與加速度(圖 3.22 與圖 3.23)，1993-2015 估算成果與 1993-2012 成果並不一致。將 1993-2012 與 1993-2015 估算之加速度結果做成統計圖，由 1993-2012 測高資料顯示出正負參雜情形，而 1993-2015 資料則主要為負值(圖 3.24)。利用式(3.4)擬合整個臺灣海域(緯度: $10^{\circ}\text{N} \sim 30^{\circ}\text{N}$ 、經度: $110^{\circ}\text{E} \sim 130^{\circ}\text{E}$)的衛星海洋數據存檔、驗正與解釋(AVISO)衛星測高資料，結果顯示 1993-2012 臺灣海平面上升速率與加速度分別為 $5.48 \pm 1.15 \text{ mm/yr}$ 與 $-0.06 \pm 0.06 \text{ mm/yr}^2$ ；而 1993-2015 海平面之速率與加速度分別為 $7.53 \pm 0.95 \text{ mm/yr}$ 與 $-0.18 \pm 0.07 \text{ mm/yr}^2$ ，表示兩時間段成果並不一致，推測原因應為 2014-2015 年聖嬰現象(El Niño)表現強烈(圖 2.9)，造成近兩年(2014-2015)臺灣周圍海平面顯著下降所致(圖 3.25)。此外 20 年資料也不足以求得精確加速度。

在考慮氣候因子下(式(3.6))，臺灣周圍海平面同樣呈現上升情況(圖 3.26)，而加速度亦為正負參雜(圖 3.27)，與未修正氣候因子成果相似(圖 3.20 與圖 3.21)。計算 1993-2012 與 1993-2015 整個臺灣四周海平面之速率、加速度分別為 $3.66 \pm 0.85 \text{ mm/yr}$ 、 $-0.09 \pm 0.04 \text{ mm/yr}^2$ 與 $2.70 \pm 0.81 \text{ mm/yr}$ 、 $0.00 \pm 0.03 \text{ mm/yr}^2$ 。顯示出修正氣候因子後，兩者成果較一致，但是在加速度部分仍然有差異。由上述可知，估算海平面加速度會受到低頻氣候因子與資料長度影響，若要精確估算臺灣周圍海平面加速度值還需要加入往後更長時間段資料。由 Douglas[1992]研究成果可知，利用較短的時間段資料去估算海平面速率與加速度會受到低頻氣候因子影響，資料時間段超過 50 年以上所估算海平面加速度才會趨近穩定。

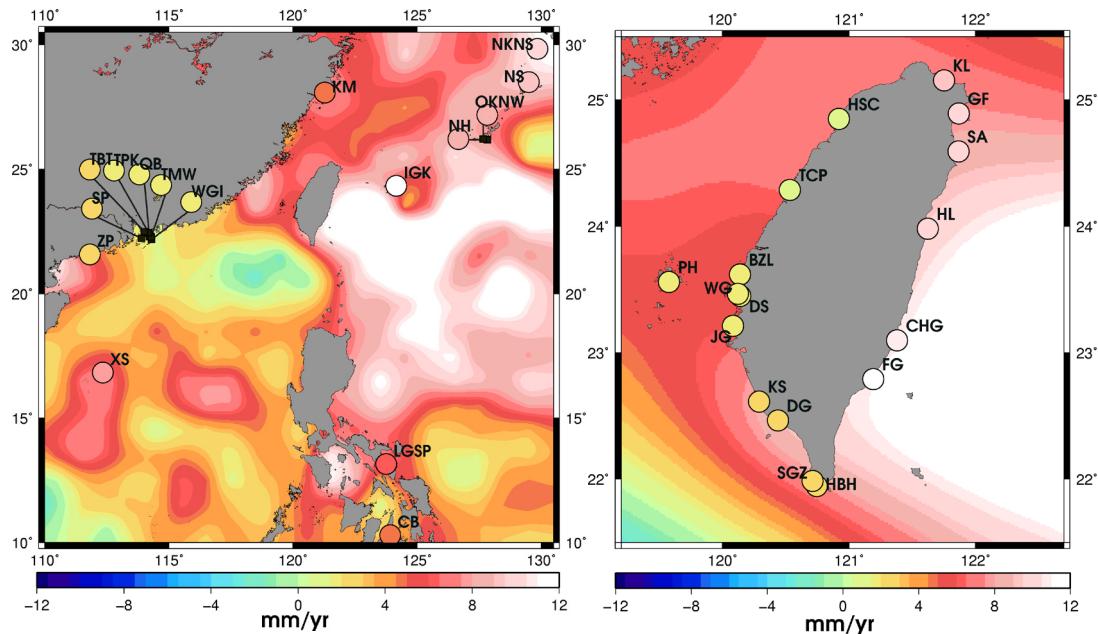


圖 3.20 1993-2012 臺灣周圍絕對海平面上升速率。點位與背景圖分別為利用 1993-2012 海洋數據存檔、驗正與解釋(AVISO)衛星測高平均沿軌跡點(along-track)與 $1^\circ \times 1^\circ$ 網格資料所估算

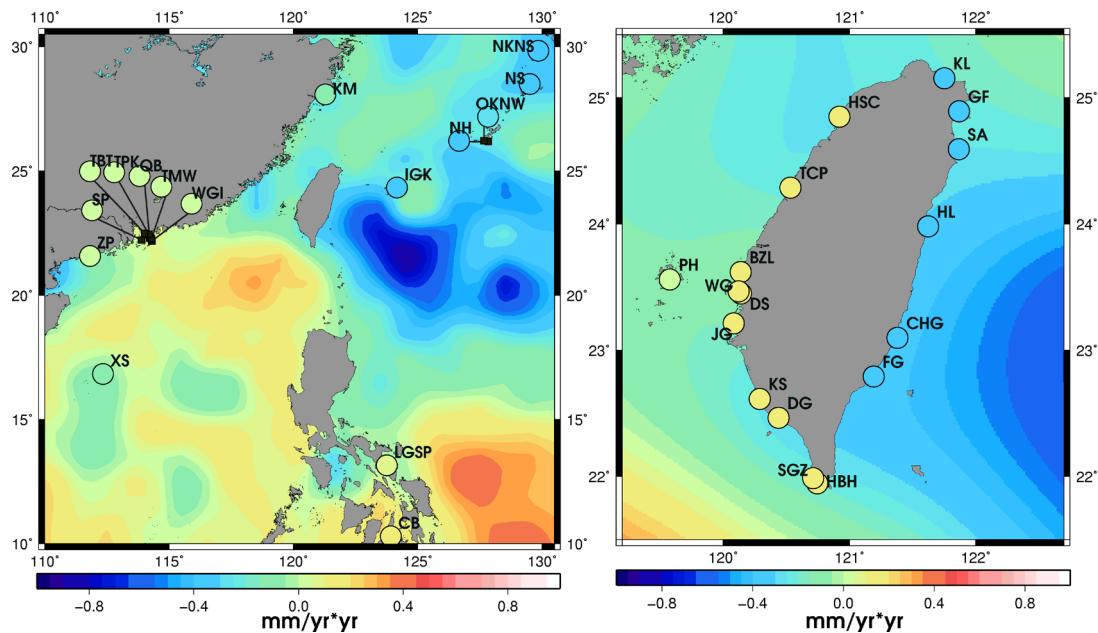


圖 3.21 1993-2012 臺灣周圍絕對海平面上升加速度。點位與背景圖分別為利用 1993-2012 海洋數據存檔、驗正與解釋(AVISO)衛星測高平均沿軌跡點(along-track)與 $1^\circ \times 1^\circ$ 網格資料所估算

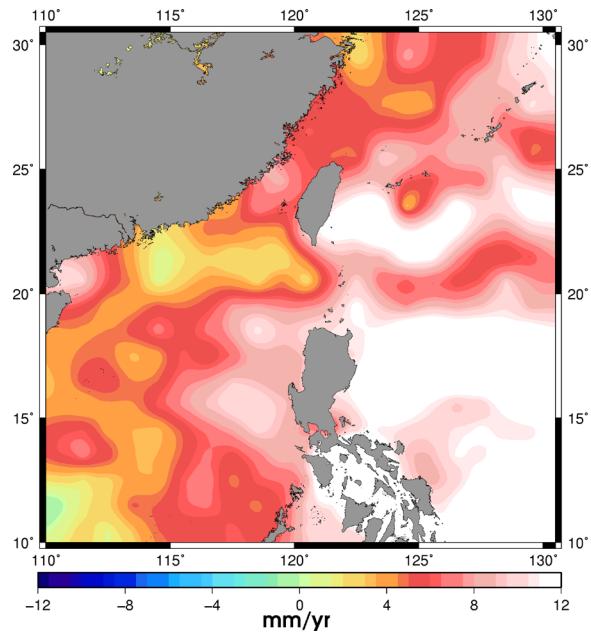


圖 3.22 1993-2015 臺灣周圍絕對海平面上升速率

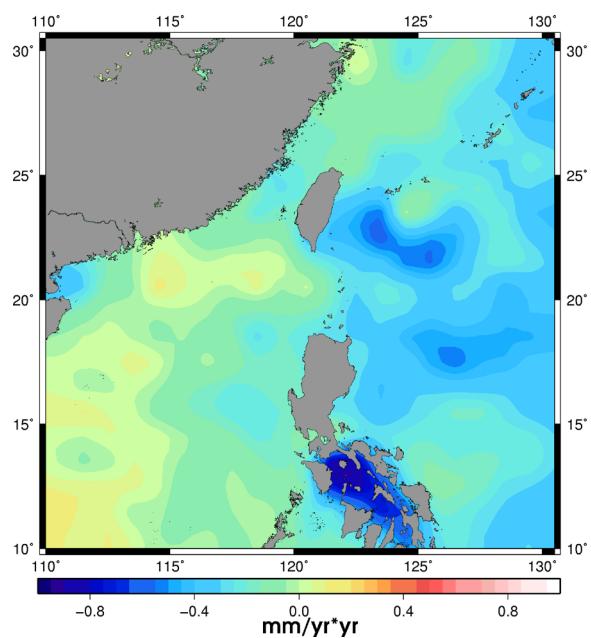


圖 3.23 1993-2015 臺灣周圍絕對海平面上升加速度

表 3.5 1993-2012 臺灣周圍絕對海平面上升速率(a_1)與加速度(a_2)。
Six-parameters+acceleration 與 Multivariable+acceleration 分別為含加速度項的六參數擬合與含加速度項的多變量擬合

Country	Station	Six-parameters+acceleration		Multivariable+acceleration	
		a_1 (mm/yr)	a_2 (mm/yr 2)	a_1 (mm/yr)	a_2 (mm/yr 2)
China	ZP	2.51±2.15	0.01±0.10	0.76±2.08	-0.03±0.10
	XS	7.51±2.26	-0.08±0.11	4.60±2.27	-0.04±0.11
	KM	4.85±1.72	-0.10±0.08	4.15±1.74	-0.12±0.08
	WGI	1.96±2.02	0.02±0.10	0.32±1.95	-0.02±0.09
	QB	1.94±2.07	0.02±0.10	0.27±1.99	-0.02±0.10
	TMW	1.90±2.06	0.02±0.10	0.23±1.98	-0.02±0.09
	TPK	1.94±2.12	0.02±0.10	0.28±2.04	-0.01±0.10
	TBT	2.04±2.16	0.02±0.10	0.36±2.08	-0.02±0.10
	SP	2.28±2.06	0.01±0.10	0.66±1.98	-0.03±0.10
Taiwan	KL	9.46±1.39	-0.32±0.07	9.48±1.42	-0.31±0.07
	GF	9.78±1.41	-0.33±0.07	9.78±1.44	-0.33±0.07
	SA	9.97±1.43	-0.35±0.07	9.92±1.45	-0.35±0.07
	HL	10.41±1.50	-0.37±0.07	10.26±1.52	-0.37±0.07
	CHG	10.93±1.62	-0.39±0.08	10.65±1.62	-0.39±0.08
	FG	11.19±1.67	-0.40±0.08	10.85±1.67	-0.40±0.08
	HBH	2.25±1.39	0.12±0.07	0.16±1.20	0.07±0.06
	SGZ	2.25±1.39	0.12±0.07	0.16±1.20	0.07±0.06
	DG	2.18±1.41	0.12±0.07	0.07±1.22	0.07±0.06
	KS	2.16±1.42	0.12±0.07	0.05±1.23	0.07±0.06
	JG	1.93±1.46	0.11±0.07	-0.18±1.27	0.07±0.06
	DS	1.81±1.48	0.11±0.07	-0.29±1.30	0.06±0.06
	WG	1.81±1.48	0.11±0.07	-0.29±1.30	0.06±0.06
	PH	1.65±2.09	0.04±0.10	-0.27±1.29	0.07±0.06
	BZL	1.72±1.50	0.11±0.07	-0.37±1.33	0.06±0.06
	TCP	1.32±1.71	0.11±0.08	-0.79±1.56	0.06±0.07
	HSC	0.76±1.81	0.12±0.09	-0.96±1.74	0.06±0.08
	JW	9.21±1.39	-0.30±0.07	9.23±1.42	-0.30±0.07
Japan	NS	9.22±2.16	-0.31±0.10	9.36±2.21	-0.31±0.11
	NKNS	10.14±2.01	-0.37±0.10	9.13±2.04	-0.39±0.10
	OKNW	8.15±2.75	-0.28±0.13	8.37±2.82	-0.27±0.14
	NH	8.97±2.66	-0.33±0.13	8.94±2.72	-0.33±0.13
	IGK	11.31±2.30	-0.39±0.11	11.94±2.34	-0.37±0.11
Philippines	LGSP	6.41±2.44	0.06±0.12	2.98±1.95	0.00±0.09
	CB	4.81±2.56	0.19±0.12	0.60±1.73	0.10±0.08
All regions		5.08	-0.08	3.84	-0.11

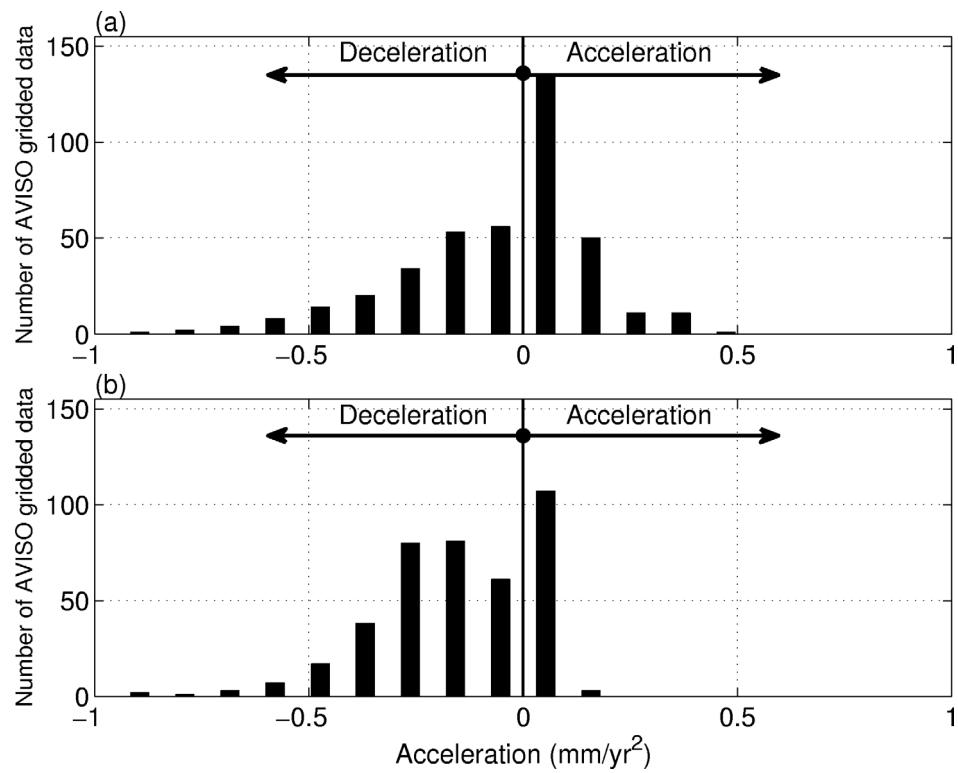


圖 3.24 統計經海洋數據存檔、驗正與解釋(AVISO)衛星測高 $1^\circ \times 1^\circ$ 網格資料所估算臺灣周圍海平面之加/減速變化(a_2)。(a) 1993-2012, (b) 1993-2015

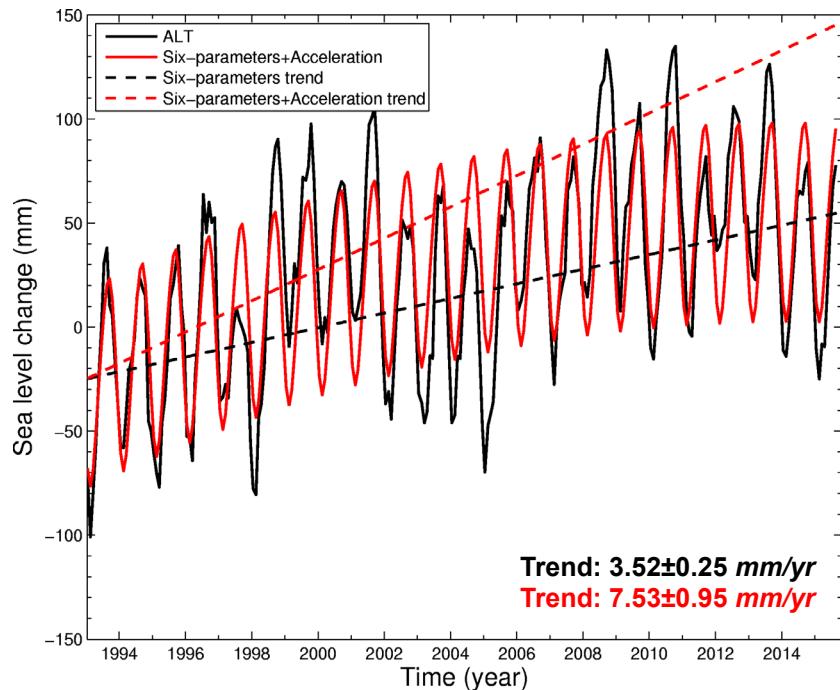


圖 3.25 1993-2015 臺灣周圍絕對海平面變化。ALT 為衛星測高資料、Six-parameters+Acceleration 為六參數加上加速度擬合成果、Six-parameters trend 為六參數擬合之斜率、Six-parameters+Acceleration trend 為含加速度項的六參數擬合之斜率

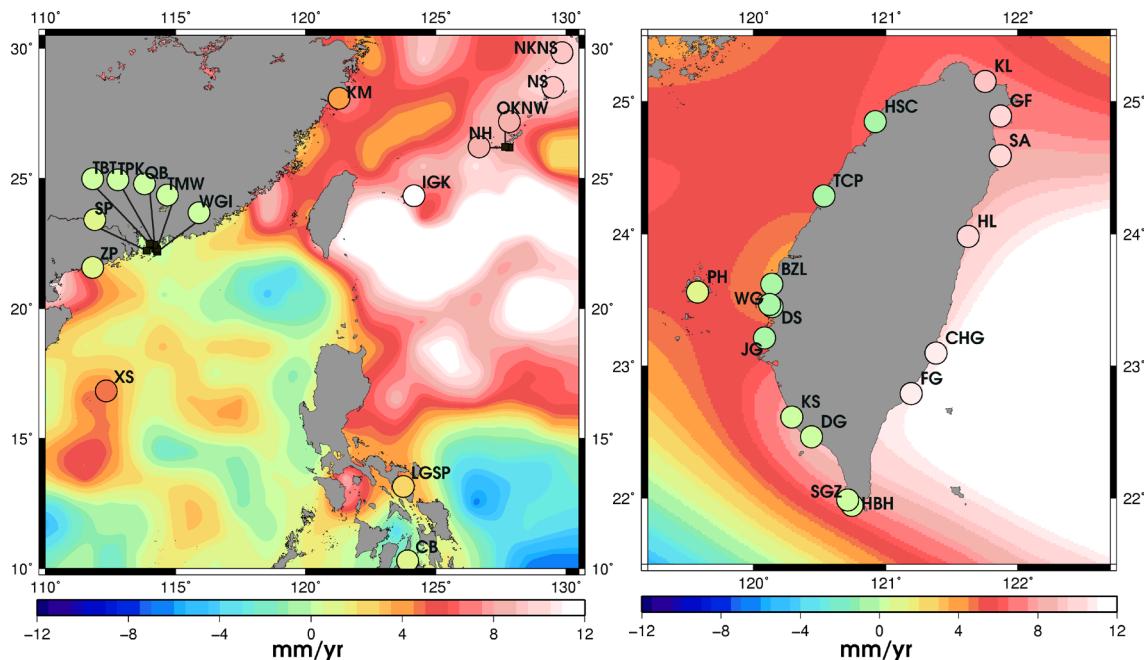


圖 3.26 考慮氣候因子下 1993-2012 臺灣周圍絕對海平面上升速率。點位與背景圖分別為利用 1993-2012 海洋數據存檔、驗正與解釋(AVISO)衛星測高平均沿軌跡點(along-track)與 $1^\circ \times 1^\circ$ 網格資料所估算

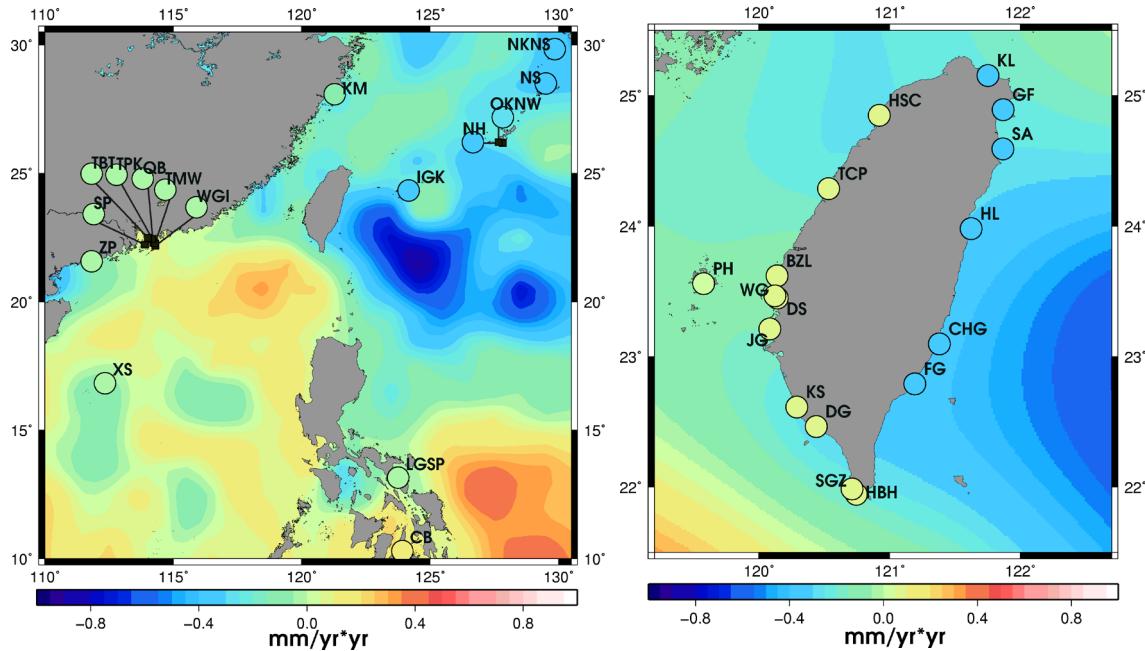


圖 3.27 考慮氣候因子下 1993-2012 臺灣周圍絕對海平面上升加速度。
點位與背景圖分別為利用 1993-2012 海洋數據存檔、驗正與解釋
(AVISO)衛星測高平均沿軌跡點(along-track)與 $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ 網格資料所估算

3.4 第三章完成之工作項目

第三章已完成工作項目”1. 針對西太平洋、臺灣海峽、東海、南海等臺灣鄰近海域，及含括國內七大商港之臺灣環島近岸海域，分別匯整並應用驗潮站紀錄和衛星測高資料，分區估算臺灣四周海域長(近 20 年)、短(近 10 年)期海平面昇降變動速率與加速度，並配合氣候變遷模式，進行加速特性探討，同時進行可靠度與準確度分析”、”針對臺灣鄰近及環島近岸海域，匯整相關觀測與研究文獻，分析並估算不同尺度海洋年際振盪變動對臺灣環島區域性長、短期之海平面昇降變動速率與加速度之影響，並依據驗潮站和衛星測高儀資料，更新計算臺灣四周海域驗潮站位長、短期之地表(地殼)垂直變動速率”與”依據臺灣四周海域長、短期海平面昇降變動速率與加速度，掌握臺灣環島近岸海域未來海平面昇降變動之趨勢，評估未來可能造成之海岸溢淹區域與範圍，並探討對海岸環境之衝擊影響”中利用衛星測高資料分析臺灣周圍近 10 年與近 20 年絕對海平面變化速率與加速度。

利用衛星海洋數據存檔、驗正與解釋(AVISO)衛星測高資料估算臺灣四周海域(緯度: 10°N ~ 30°N 、經度: 110°E ~ 130°E)近二十年(1993-2012)絕對海平面上升速率分別為 $5.23\pm0.31\text{ mm/yr}$ 與 $2.43\pm0.32\text{ mm/yr}$ 。而考慮氣候因子前後 1993-2015 臺灣周圍絕對海平面上升速率分別為 $3.52\pm0.25\text{ mm/yr}$ 與 $2.55\pm0.18\text{ mm/yr}$ 。在未考慮氣候因子影響下，速率差異約 1.71 mm/yr ，其原因為自 2014 年起聖嬰現象增強導致臺灣周圍海平面顯著下降所導致。另外，本研究亦評估 2003-2012 臺灣周圍絕對海平面上升速率，然而其結果因為使用時間段較短(僅十年)以及時間段內聖嬰-南方振盪(ENSO)與太平洋年代際振盪(PDO)現象並不顯著導致擬合成果不佳，導致精度較差。

另外，本研究亦利用衛星測高資料分析近二十年(1993-2012 與 1993-2015)臺灣周圍海平面上升速率與加速度情形。由衛星測高資料估算臺灣周圍海平面上升速率主要為上升，而加速度為正負參雜。本研究認為同時擬合較短時間段資料之速率與加速度，易受到低頻氣候因子與資料長度影響，若要精確估算臺灣周圍海平面加速度值還需要加入往後更長時間段資料。

第四章 潮位站資料改正與海平面變化計算

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平面海平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平面海平面上升速率，僅求得相對於潮位站地表面之海平面上升速率。本研究目標為估計臺灣四周海域絕對海平面上升速率與加速度，絕對海平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測站地表垂直變動改正。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並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、理論及成果。並於利用改正後之潮位資料估計臺灣海域絕對海平面上升速率以及加速度。

4.1 海潮改正

4.1.1 調和分析法

潮汐是由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 4.1 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：

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

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)， A_i 與 B_i 分別為各頻率的正弦與餘弦振幅，利用 A_i 與 B_i 可估算出各分潮之振幅 C_i ($C_i = \sqrt{A_i^2 + B_i^2}$)

n : 分潮個數，本研究 $n=37$ ，37 個分潮週期請參閱附錄二

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(4.1)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，以提高後續推算海平面上升速率之精度。以中央氣象局提供的基隆與高雄潮位站資料為例 (如圖 4.1 與圖 4.2 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(4.1)中的未知參數。在解算過程中利用 3 倍中誤差，移除誤差量過大的數據。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知，移除高頻海潮訊號後之剩餘訊號中含有明顯之年週期與半年週期海平面變化，如圖 4.3 所示。

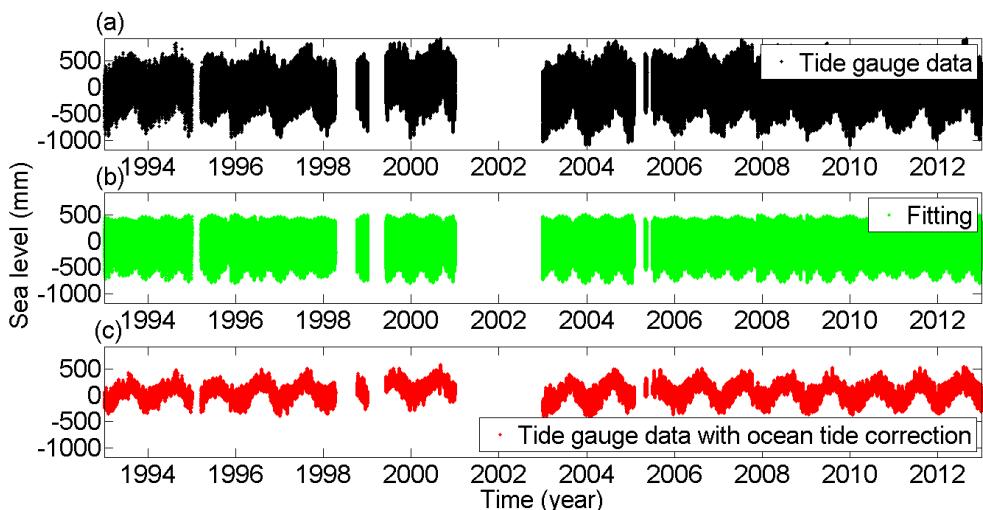


圖 4.1 基隆潮位站之海潮效應改正。(a) 未改正海潮效應之潮位資料，
(b) 擬合高頻海潮訊號，(c) 移除高頻海潮訊號分量後之潮位資料

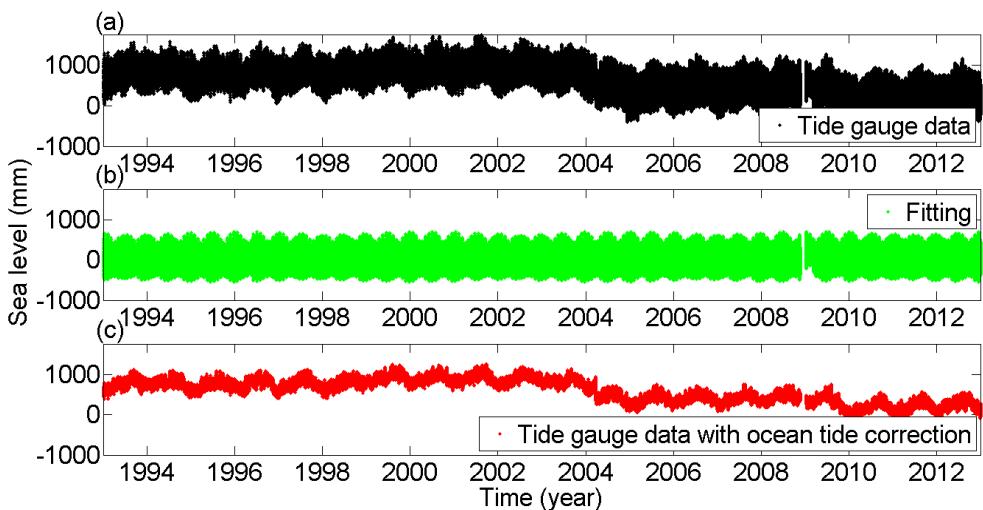


圖 4.2 高雄潮位站之海潮效應改正。(a) 未改正海潮效應之潮位資料，
(b) 擬合高頻海潮訊號，(c) 移除高頻海潮訊號分量後之潮位資料

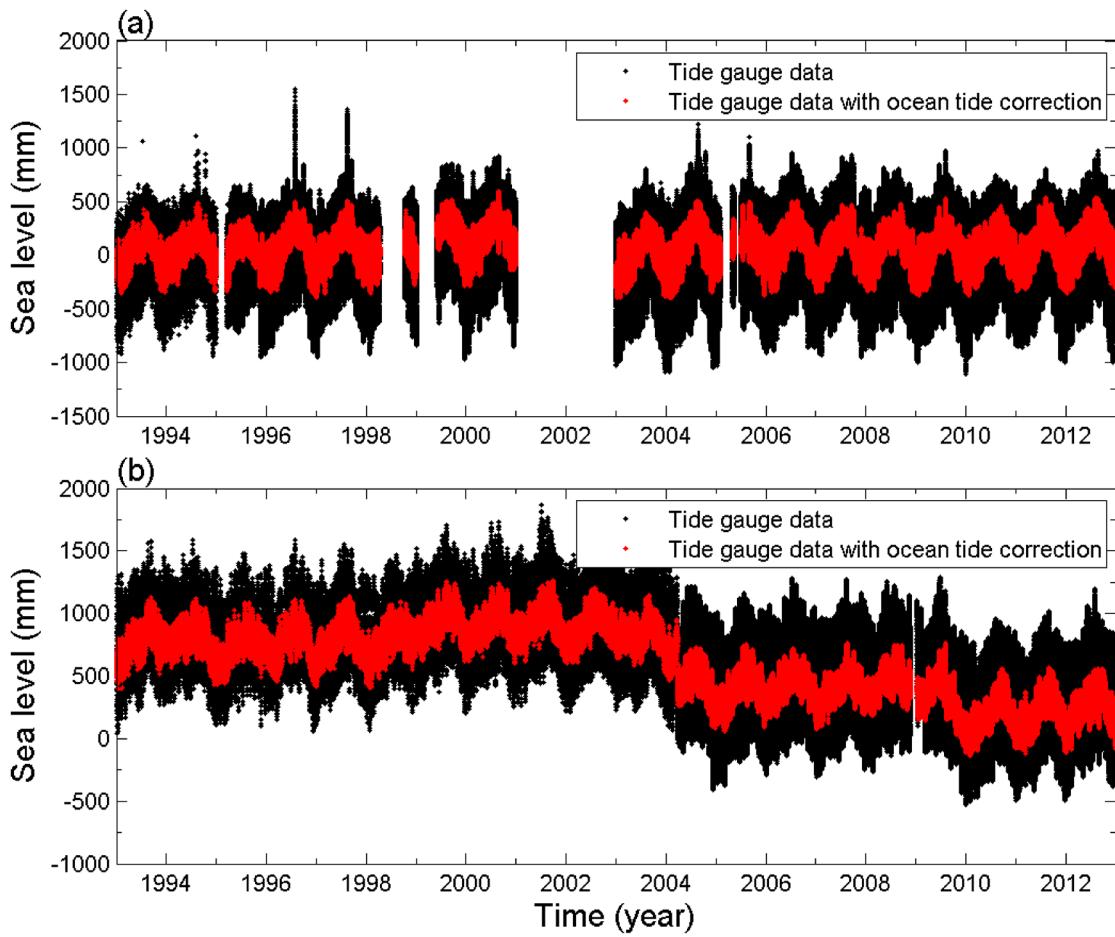


圖 4.3 海潮改正前後之基隆與高雄潮位站資料差異圖。(a) 基隆潮位站、
(b) 高雄潮位站

4.1.2 移動平均法

本研究亦將逐時潮位資料經過移動平均法去除高頻的訊號，並與調和分析成果相比較。在進行移動平均前，原始潮位資料(6 分鐘、10 分鐘)平均為逐時資料，然後利用移動平均法(時間是選取 720 個小時)自逐時資料移除高頻海潮效應。比較平滑前後之基隆與高雄潮位站資料可知，移除高頻海潮訊號後之剩餘訊號中含有明顯之年週期與半年週期海平面變化，如圖 4.4 與圖 4.5 所示。

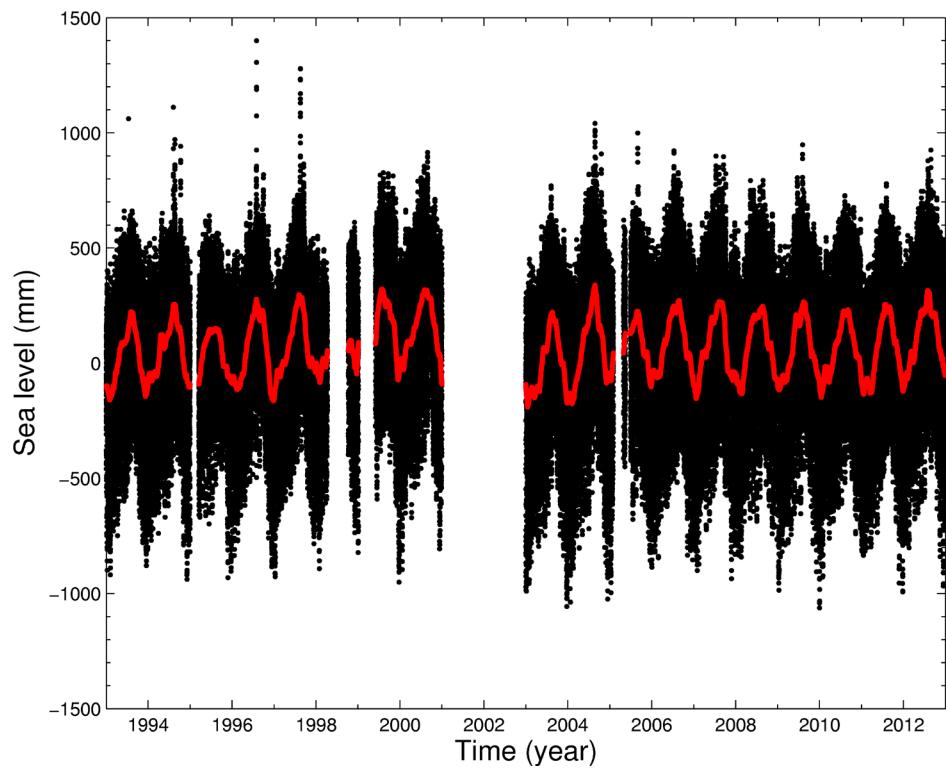


圖 4.4 基隆潮位站逐時平均(黑線)與移動平均(紅線)時間序列

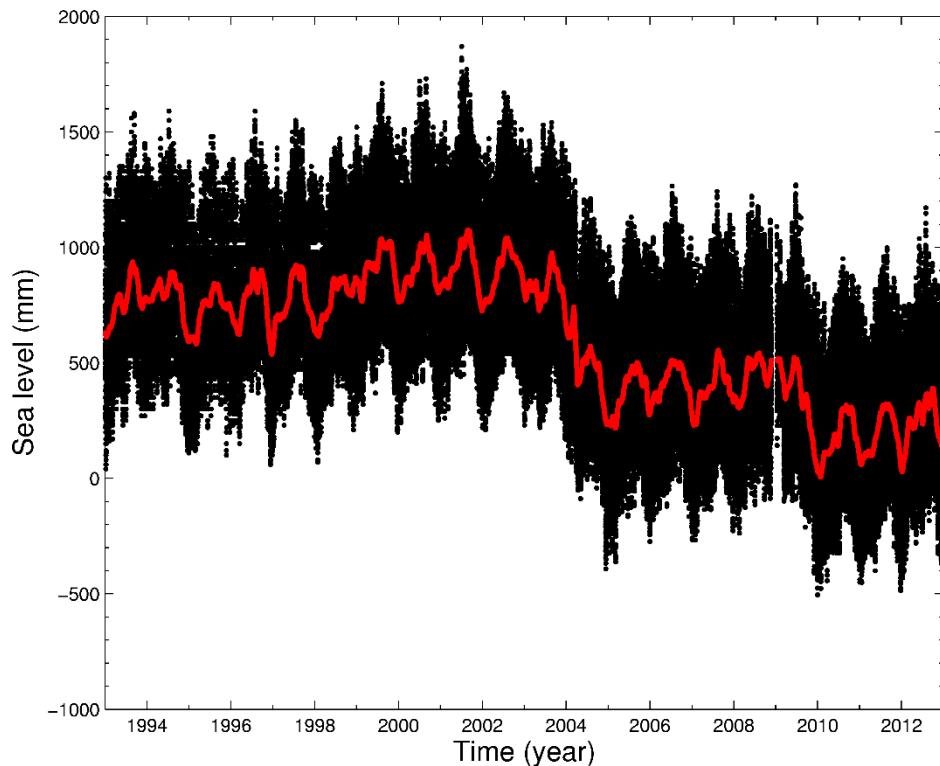


圖 4.5 高雄潮位站逐時平均(黑線)與移動平均(紅線)時間序列

4.1.3 成果分析

本研究利用潮位站資料計算海平面上升速率皆利用式(3.3)估計之。在計算前皆將資料平均成月平均資料。本研究使用之潮位站資料經海潮改正後所估算之海平面上升速率如表 4.1 與表 4.2 所示。比較海潮效應改正前後潮位資料估算之速率相當一致(表 4.2)，表示海潮因子對於估算海平面上升速率之影響較小。另外，本研究亦比較調和分析與移動平均法應用於海潮改正之差異量(表 4.2)，由表可知，兩方法改正後所計算之海平面速率幾乎一致，然而若潮位資料中有基準偏移，經移動平均平滑後基準變動地方將變成連續資料(圖 4.5)。為延續前期計畫成果之一致性，後續使用將沿用前期使用之調和分析進行海潮改正。

表 4.1 平均海平面永久服務中心(PSMSL)潮位站資料經海潮改正後所估算之海平面上升速率

Country	Station Name	Sea level trends with Ocean tide correction
China	Zhapo	2.53±0.72
	Xi Sha	4.49±0.78
	Kanmen	3.72±0.70
	Waglan Island	3.23±1.36
	Quarry Bay	1.92±0.79
	Tai Miu Wan	2.75±1.53
	Tai Po Kau	2.56±0.76
	Tsim Bei Tsui	3.48±0.85
	Shek Pik	-0.42±1.09
Japan	Nase	2.56±0.63
	Nakano Sima	4.23±0.55
	Okinawa	3.35±0.64
	Naha	3.55±0.67
	Ishigaki	3.68±0.70
Philippines	Legaspi	7.97±0.79
	Cebu	6.26±0.82
Mean		3.49

表 4.2 中央氣象局潮位站資料經海潮改正後所估算之海平面上升速率。
Raw、Harmonic analysis 與 Moving average 分別表示原始資料、調和分析與移動平均

Station Name	Sea level trends (mm/yr)		
	Raw	Harmonic analysis	Moving average
Keelung	0.72±0.62	0.78±0.59	0.77±0.59
Gengfang	-13.10±0.99	-11.39±0.92	-13.10±0.96
Su-ao	9.54±0.91	9.61±0.85	9.43±0.86
Hualien	1.53±0.84	1.59±0.84	1.33±0.83
Chenggong	4.75±0.56	4.69±0.55	4.76±0.53
Fugang	0.05±0.61	0.06±0.61	0.06±0.59
Houbihu	17.11±1.37	16.99±1.37	16.97±1.32
Syunguangzui	9.13±0.70	10.03±0.69	9.22±0.67

Donggang	14.25±1.10	13.97±1.07	14.29±1.04
Kaohsiung	-37.11±1.94	-37.23±1.92	-37.13±1.93
Jiangjun	5.50±0.62	5.62±0.59	5.24±0.60
Dongshi	22.89±0.99	23.04±0.95	22.96±0.96
Wengang	32.88±1.34	32.31±1.35	33.16±1.31
Penghu	9.72±0.78	9.56±0.73	9.74±0.74
Boziliao	26.66±1.31	27.03±1.23	26.79±1.26
Taichung Port	10.06±0.80	9.30±0.76	10.84±0.77
Hsinchu	5.63±0.76	3.90±0.71	5.12±0.71
Jhuwei	26.20±1.24	27.81±1.16	26.85±1.22
Mean	8.13	8.20	8.18

4.2 逆氣壓改正

以往利用臺灣潮位站資料計算海平面變化之研究中，較少考慮逆氣壓效應對海平面變化之影響。然而研究發現，除了熱帶和西邊界流(western boundary current)等區域外，海洋各處海平面變化皆受到大氣壓力變化的影響[Wunsch and Stammer, 1997]，故本計畫潮位站資料皆進行逆氣壓改正。一般而言，當氣壓升高 1 mbar，海平面高度約降低 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：

$$IB = -9.948 \times (P_{atm} - P) \dots \dots \dots \quad (4.2)$$

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(4.2)中 P 為隨時間變化之全球平均海水表面壓力(圖 4.6)，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平面壓力)對臺灣周圍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]之設定，平均海平面永久服務中心(PSMSL)潮位站資料為月平均資料，故計算逆氣壓效應之 P_{atm} 則為月平均資料；而改正中央氣象局潮位站資料的逆氣壓效應之 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(圖 4.7 與圖 4.8)，基隆與高雄潮位站資料經逆氣壓改正後的標準偏差皆降低，分別由 139 mm 和 275 mm 降至 89 mm 以及 270 mm，而基隆與高雄潮位站上的逆氣壓效主要為季節性變化(年週期與半年週期)。

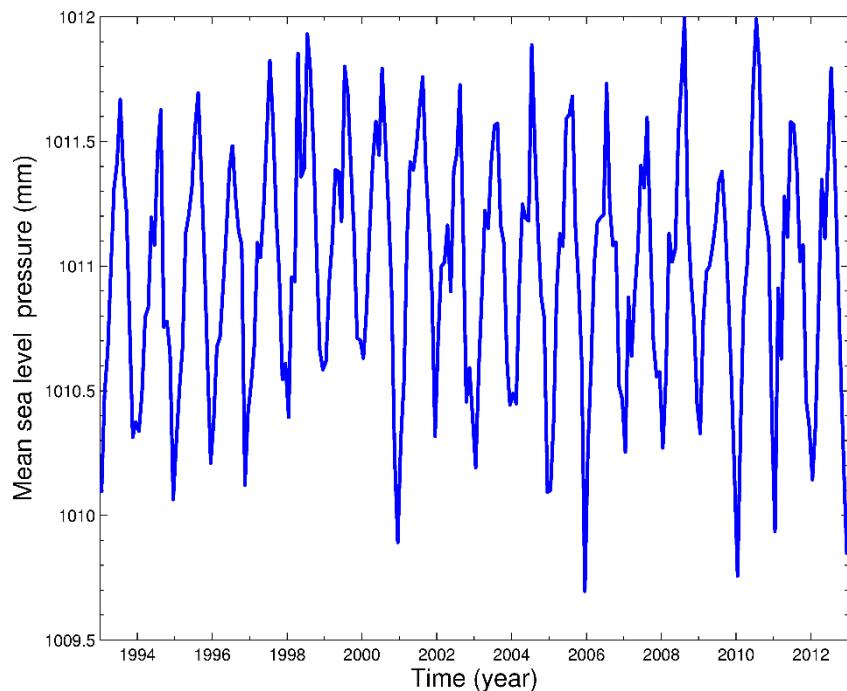


圖 4.6 歐洲中期天氣預報中心(ECMWF)月平均全球平均海平面壓力

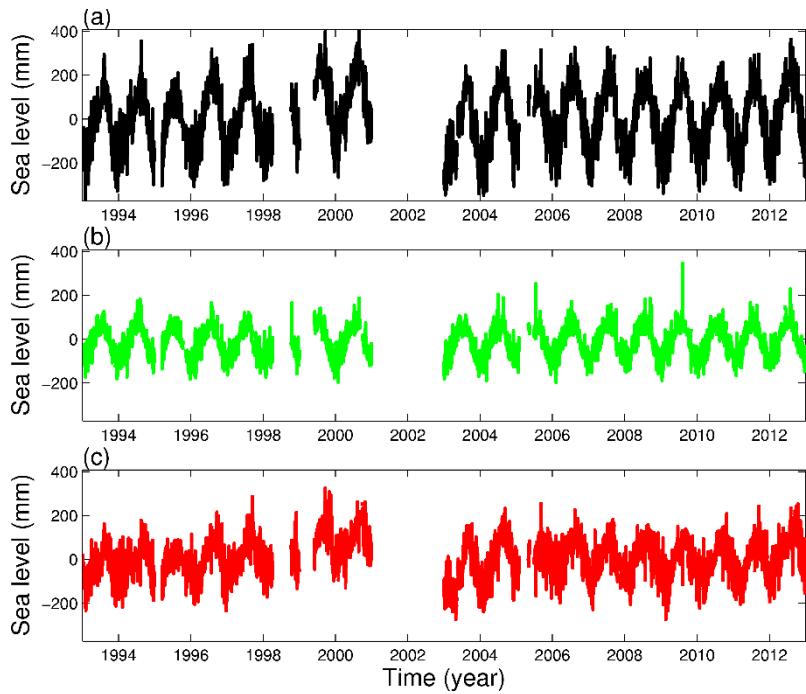


圖 4.7 基隆潮位站之逆氣壓效應改正。(a) 未改正逆氣壓效應之潮位資料，(b) 逆氣壓效應，(c) 改正逆氣壓效應後之潮位資料

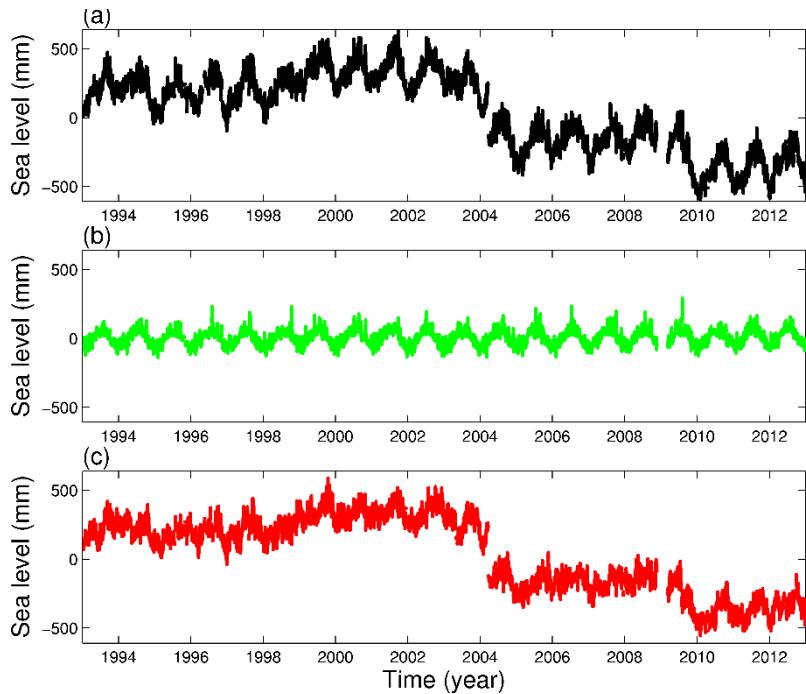


圖 4.8 高雄潮位站之逆氣壓效應改正。(a) 未改正逆氣壓效應之潮位資料，(b) 逆氣壓效應，(c) 改正逆氣壓效應後之潮位資料

比較移除逆氣壓效應前後潮位資料估算之海平面上升速率，其成果相當一致(表 4.1-表 4.4)，表示逆氣壓因子對於估算海平面上升速率

之影響較小，改正影響量 $0\sim1 \text{ mm/yr}$ 。

表 4.3 平均海平面永久服務中心(PSMSL)潮位站資料經海潮與逆氣壓效應改正後所估算之海平面上升速率

Country	Station Name	Sea level trends with Ocean tide and IB corrections
China	Zhapo	1.96 ± 0.72
	Xi Sha	3.97 ± 0.76
	Kanmen	3.27 ± 0.70
	Waglan Island	2.36 ± 1.36
	Quarry Bay	1.34 ± 0.78
	Tai Miu Wan	2.57 ± 1.51
	Tai Po Kau	1.97 ± 0.76
	Tsim Bei Tsui	2.88 ± 0.83
Japan	Shek Pik	-0.51 ± 1.09
	Nase	2.11 ± 0.60
	Nakano Sima	3.74 ± 0.54
	Okinawa	3.01 ± 0.62
	Naha	3.29 ± 0.63
Philippines	Ishigaki	3.18 ± 0.69
	Legaspi	7.96 ± 0.64
Cebu		6.18 ± 0.69
Mean		3.08

表 4.4 中央氣象局潮位站資料經海潮與逆氣壓效應改正後所估算之海平面上升速率

Station Name	Sea level trends with Ocean tide and IB corrections
Keelung	0.38 ± 0.54
Gengfang	-12.02 ± 0.94
Su-ao	8.53 ± 0.77
Hualien	1.37 ± 0.91
Chenggong	4.25 ± 0.52
Fugang	-0.41 ± 0.58
Houbihu	16.58 ± 1.49
Syunguangzui	9.37 ± 0.66
Donggang	13.76 ± 0.98
Kaohsiung	-37.62 ± 1.90
Jiangjun	5.21 ± 0.56
Dongshi	22.55 ± 0.98
Wengang	31.80 ± 1.36
Penghu	9.21 ± 0.69
Boziliao	27.02 ± 1.22
Taichung Port	9.10 ± 0.73
Hsinchu	3.46 ± 0.69
Jhuwei	25.95 ± 1.18
Mean	7.69

4.3 偏移量改正

潮位站因儀器調整、設備維修、儀器更換或變更設置地點(遷站)等情形，可能造成觀測記錄中斷。為了資料的連續性及連貫性，儀器更換或遷站皆須重新量測參考基準使其前後一致，若基準重新量測之

操作不確實或遺漏，常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檢查資料是否有基準不一致(偏移)之情形。本研究偏移量偵測主要分為三個部份，第一部份為檢測潮位站換站前後之基準一致性，潮位站可能有多個不同的測站編號(如表 2.3 所示)，而更改測站編號通常是由於儀器更換或遷移，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，將特別注意在後續分析潮位資料中是否有基準偏移之情形。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，將在後續分析潮位資料中是否有基準偏移之情形。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 4.9(a)與圖 4.10(a)所示）。此偏移偵測步驟所產生結果，潮位站資料皆已移除海潮與逆氣壓效應。
- (2) 臺灣周圍海平面變化的季節性訊號非常明顯，如基隆潮位站資料所示(圖 4.9(a))。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，故利用六參數擬合(式(3.3))步驟(1)處理後之潮位資料。擬合之基隆與高雄潮位站資料的季節性訊號(年周期與半年週期)如圖 4.9(b)與圖 4.10(b)所示。
- (3) 將步驟(1)處理後之潮位站資料與步驟(2)擬合之季節性訊號相減，將季節性訊號自潮位資料中移除，結果如圖 4.9(c)與圖 4.10(c) 所示。由圖 4.9(c)與圖 4.10(c)可明顯看出季節性(年周期與半年週期)訊號已自潮位資料中移除或降低。

- (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 4.11 與圖 4.12 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平面變化值進行相減(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 4.11 與圖 4.12 中紅色點位為差值大於設定門檻值(50 mm)之時間，因此認為該時間附近可能存在基準偏移。此門檻值是利用臺灣附近無基準問題的海水位變化資料(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)所估算出，此門檻值已於第二期計劃(103 年)[郭重言等人，2015]中詳細說明如何計算求得，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 2 個與 4 個偏移量，結果如圖 4.11 與圖 4.12 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 。

依據工作項目”建置臺灣環島驗潮站潮位基準偏移自動化偵測與校正模式及其使用手冊，並作技術移轉”。本小節撰寫之程式將做技術轉移，程式對應的使用手冊於附錄三中說明。

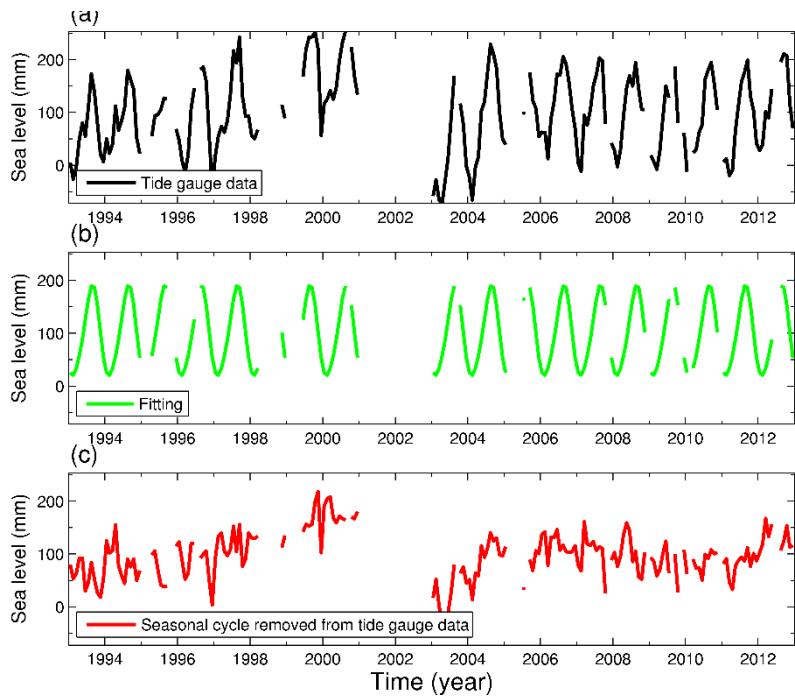


圖 4.9 基隆潮位站之季節性訊號移除(海平面的年週期與半年週期變化)。
 (a) 未移除季節性之潮位資料(已移除海潮與逆氣壓效應)，(b) 擬合潮位資料的季節性訊號，(c) 移除季節性訊號後之潮位資料

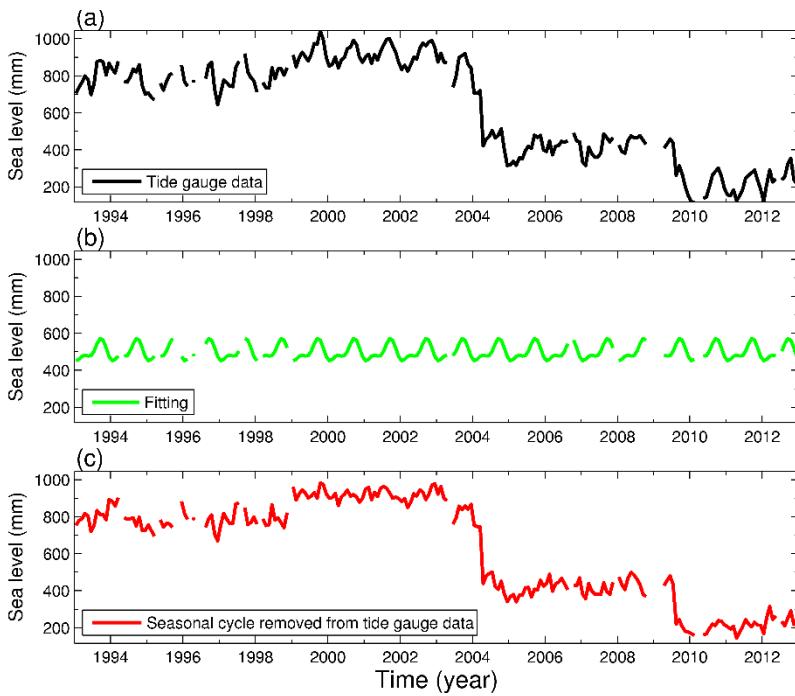


圖 4.10 高雄潮位站之季節性訊號移除(海平面的年週期與半年週期變化)。(a) 未移除季節性之潮位資料(已移除海潮與逆氣壓效應)，(b) 擬合潮位資料的季節性訊號，(c) 移除季節性訊號後之潮位資料

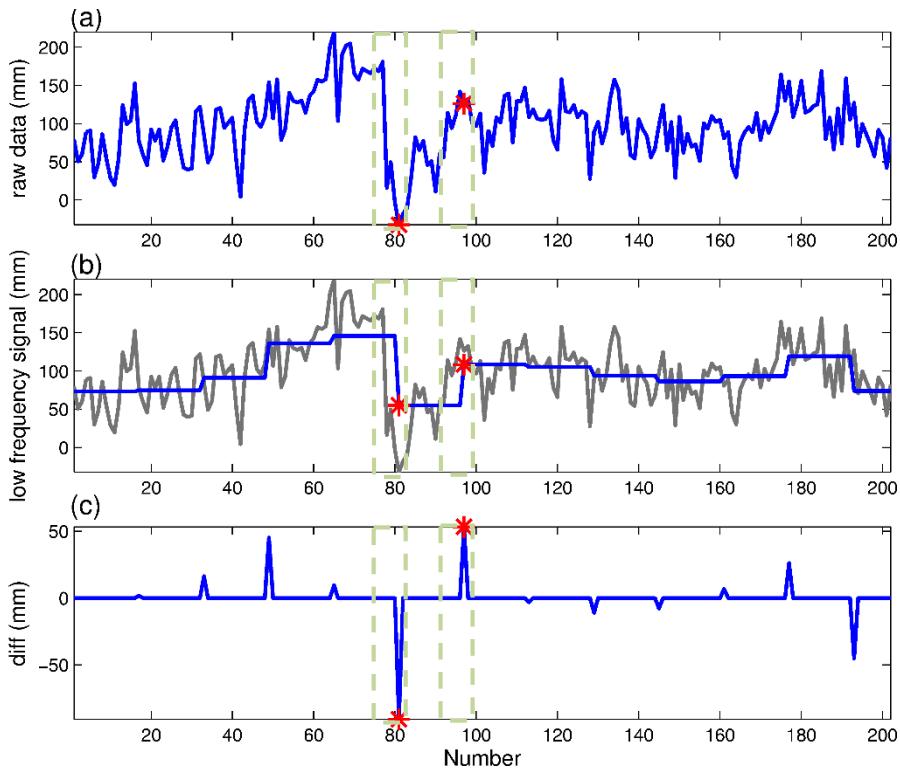


圖 4.11 基隆潮位站之偏移量偵測。綠色虛線框表示偵測出的偏移點位。
 (a) 移除海潮、逆氣壓與季節性訊號之潮位站資料，(b) 利用小波分解
 移除(a)的資料之高頻訊號(藍線:移除灰線之高頻訊號後、灰線: (a)的資
 料)，(c) 剩餘訊號(low frequency signal)之相鄰時間海平面變化值相減。
 紅色點表示可能之偏移點位。使用的資料需為連續訊號，將按照時間
 先後順序一個個排序，若遇到缺漏資料則跳過，因此 X 軸以 Number
 為名

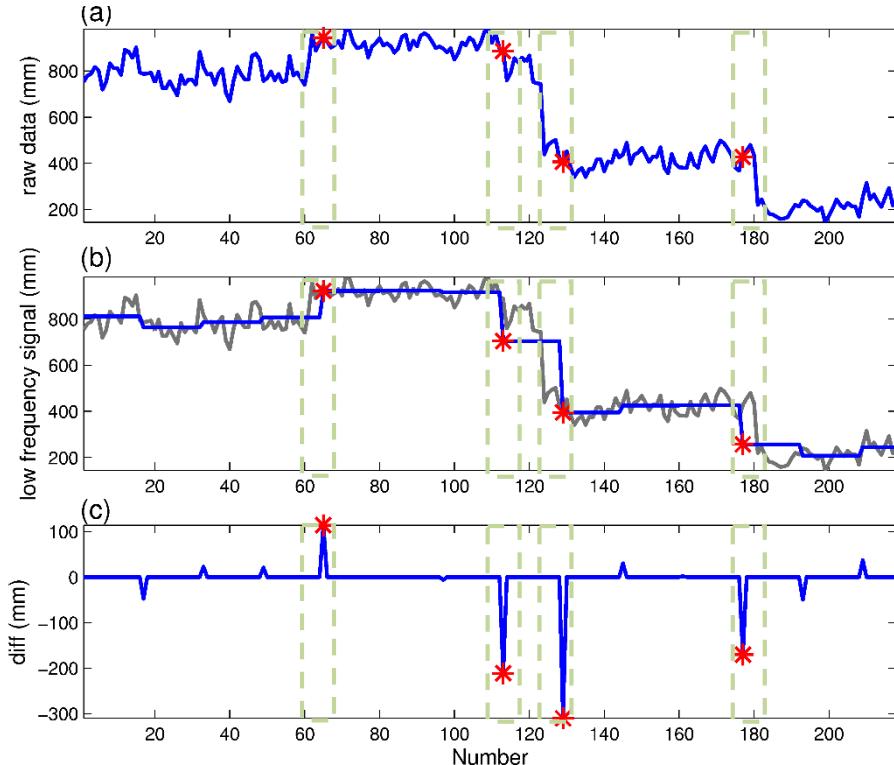


圖 4.12 高雄潮位站之偏移量偵測。綠色虛線框表示偵測出的偏移點位。
 (a) 移除海潮、逆氣壓與季節性訊號之潮位資料，(b) 利用小波分解移除(a)的資料之高頻訊號(藍線:移除灰線之高頻訊號後、灰線: (a)的資料)，(c) 剩餘訊號(low frequency signal)之相鄰時間海平面變化值相減。紅色點表示可能之偏移點位。使用的資料需為連續訊號，將按照時間先後順序一個個排序，若遇到缺漏資料則跳過，因此 X 軸以 Number 為名

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，方法 I 為將包含海平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；方法 II 為利用衛星測高資料消除潮位站資料中海平面變化訊號，並以二參數加上步階函數擬合並改正之。前期(103 年)計畫已評估兩改正方法，就方法合理性以及與衛星測高資料間相關性而言，方法 II 為較適合之方法，因此本年度計畫將沿用前期(103 年)設定，使用二參數加上步階函數(方法 II)進行潮位站資料擬合並改正之。

方法 II 為在偏移量改正前，先降低其他可能會影響偏移量改正之訊號，除了將上述已提到的海潮效應與逆氣壓效應自潮位站資料中移除外，並利用衛星測高資料消除海平面變化訊號，估算出主要包含潮位站地表垂直變動訊號與偏移量之時間序列 u ，公式如下式所示，

$$u(\lambda, \varphi, t) = alt(\lambda, \varphi, t) - TG(\lambda, \varphi, t) \quad \dots \dots \dots \quad (4.3)$$

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。潮位站垂直變動的時間序列 u 主要包含偏差量與潮位站垂直變動的斜率訊號（假設為線性變化），故使用二參數加上步階函數 b_i 擬合並改正之，公式如下所示，

其中 a_0 為偏差， a_1' 為潮位站地表垂直變動速率。當基隆與高雄潮位站時間序列未改正基準偏移前，潮位站資料有明顯不一致，而偏移量改正後，基隆與高雄潮位站時間序列較有一致性，改正成果如圖 4.13 與圖 4.14 所示。當高雄潮位站時間序列未改正基準偏移前，潮位站資料在 2004 年與 2009 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，基隆潮位站改正前、後的速率分別為 $0.38 \pm 0.54 \text{ mm/yr}$ 和 $2.73 \pm 0.40 \text{ mm/yr}$ 。高雄潮位站改正前、後的速率分別為 $-37.62 \pm 1.90 \text{ mm/yr}$ 和 $2.50 \pm 0.51 \text{ mm/yr}$ 。高雄潮位站資料改正偏移量前後差異差距 40.12 mm/yr ，其原因應為高雄潮位站資料自 2000 年以後分別有兩次非常顯著基準偏移事件所導致，因此未改正偏移量將造成估算海平面速率誤差，因此偏移量亦是修正潮位資料必須考量因素。

另外，本研究選擇資料品質較佳成功潮位站進行模擬偏移改正之測試。首先我們將成功潮位資料中加入一個 100 mm 偏移量，時間點在 2003 年 1 月(圖 4.15)。然後利用上述改正方式，將包含基準偏移之成功潮位資料進行改正，改正成果如圖 4.16 所示。由圖可知，改正基準偏移後與原始資料相較非常接近，利用上述方式可改正回 96 mm 。然而不同資料品質不相同，改正成果亦不一樣。依本研究前期計畫中研

究成果顯示，改正後至少可校正回 50%~70% 以上，端看資料品質而定。

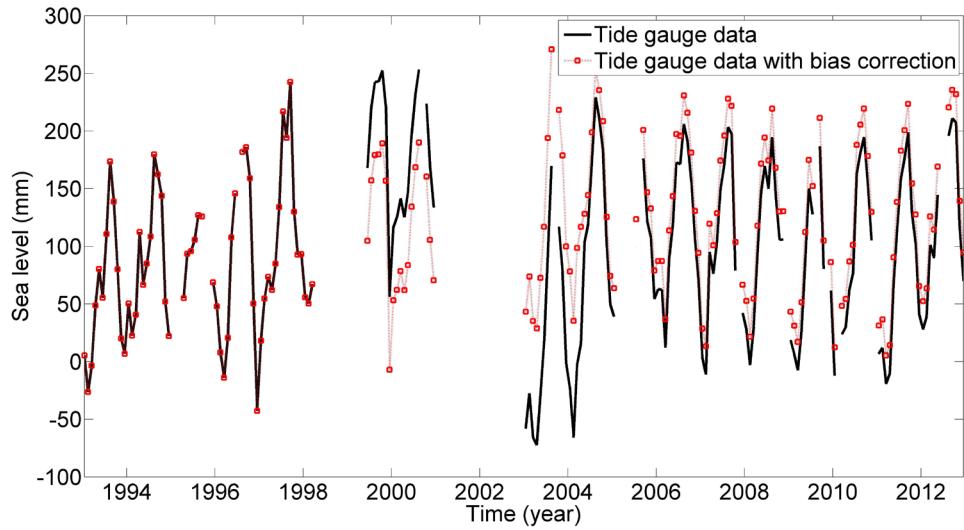


圖 4.13 基隆潮位站資料偏移量改正

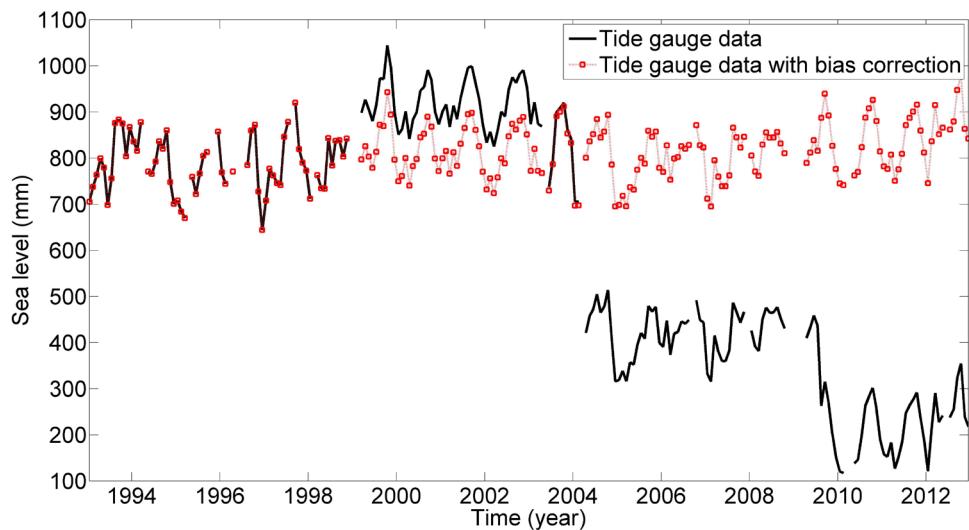


圖 4.14 高雄潮位站資料偏移量改正

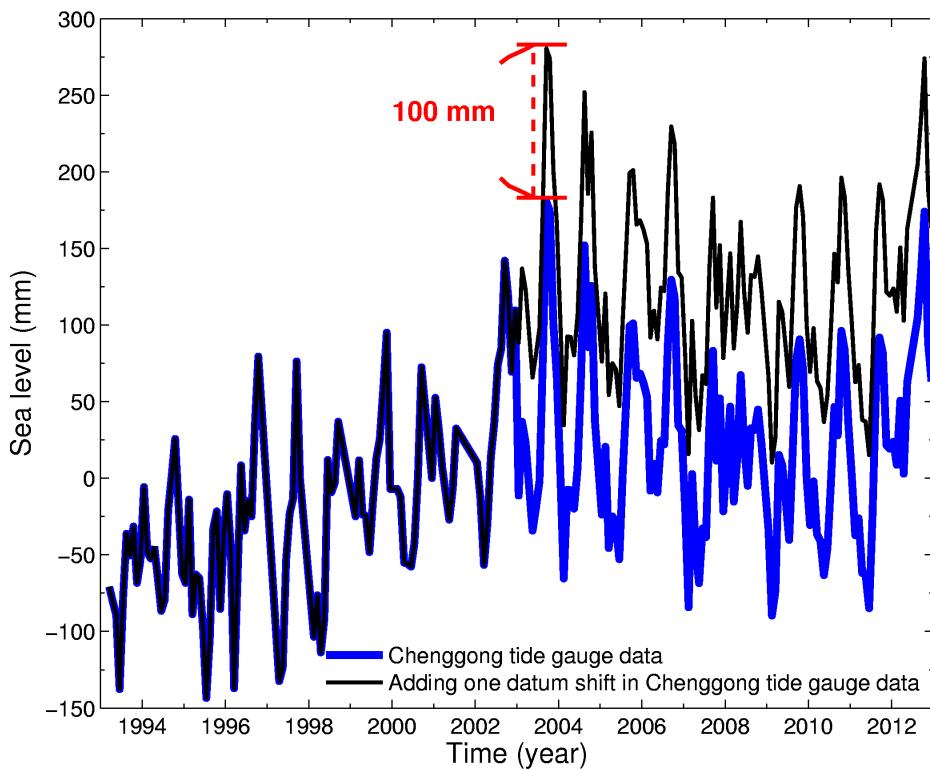


圖 4.15 模擬成功潮位資料之基準偏移

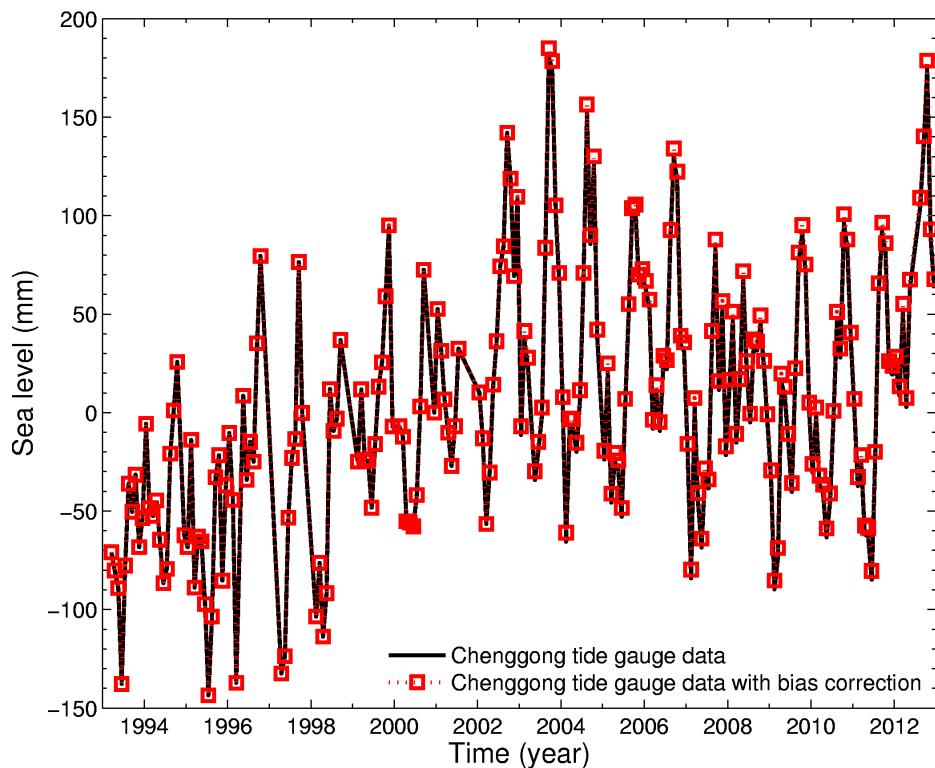


圖 4.16 成功潮位站資料偏移量改正

比較改正基準偏移前後潮位資料估算之海平面上升速率差異非常大(表4.3-表4.6)，偏移量改正對於潮位站資料的影響量為 $0.61\sim40.70\text{ mm/yr}$ ，影響量平均值約 7.95 mm/yr ，約為1993-2012年全球平均海平面上升速率的 $3.2\pm0.4\text{ mm/yr}$ [Cazenave and Cozannet, 2014]兩倍，此成果與第一期(102年)至第三期(104年)一致。

表 4.5 平均海平面永久服務中心(PSMSL)潮位站資料經海潮、逆氣壓效應與基準偏移改正後所估算之海平面上升速率

Country	Station Name	Sea level trends with Ocean tide, IB, and datum shifts corrections	
		AVISO	RADs
China	Zhapo	1.96 ± 0.72	1.96 ± 0.72
	Xi Sha	3.97 ± 0.76	3.97 ± 0.76
	Kanmen	3.27 ± 0.70	3.27 ± 0.70
	Waglan Island*	16.86 ± 1.12	17.74 ± 1.11
	Quarry Bay	1.34 ± 0.78	1.34 ± 0.78
	Tai Miu Wan	2.57 ± 1.51	2.57 ± 1.51
	Tai Po Kau	1.97 ± 0.76	1.97 ± 0.76
	Tsim Bei Tsui	2.88 ± 0.83	2.88 ± 0.83
	Shek Pik	-0.51 ± 1.09	-0.51 ± 1.09
Japan	Nase	2.11 ± 0.60	2.11 ± 0.60
	Nakano Sima	3.74 ± 0.54	3.74 ± 0.54
	Okinawa	3.01 ± 0.62	3.01 ± 0.62
	Naha	3.29 ± 0.63	3.29 ± 0.63
	Ishigaki	3.18 ± 0.69	3.18 ± 0.69
Philippines	Legaspi	7.96 ± 0.64	7.96 ± 0.64
	Cebu	6.18 ± 0.69	6.18 ± 0.69

*為潮位資料中有偏移量情形

表 4.6 中央氣象局潮位站資料經海潮、逆氣壓效應與基準偏移改正後所估算之海平面上升速率

Station Name	Sea level trends with Ocean tide, IB, and datum shifts corrections	
	AVISO	RADs
Keelung	2.73 ± 0.40	3.00 ± 0.40
Gengfang	-1.08 ± 0.61	-1.02 ± 0.61
Su-ao	5.20 ± 0.50	5.75 ± 0.50
Hualien	5.43 ± 0.71	6.12 ± 0.71
Chenggong*	4.25 ± 0.52	4.25 ± 0.52
Fugang	0.20 ± 0.43	0.21 ± 0.44
Houbihu	25.16 ± 0.98	25.11 ± 1.00
Syunguangzui	14.02 ± 0.52	13.11 ± 0.52
Donggang	6.41 ± 1.00	7.36 ± 0.98
Kaohsiung	2.50 ± 0.51	3.08 ± 0.50
Jiangjun*	5.21 ± 0.56	5.21 ± 0.56
Dongshi	28.95 ± 0.61	29.84 ± 0.61
Wengang	26.35 ± 0.73	26.44 ± 0.72
Penghu	1.66 ± 0.46	1.38 ± 0.46
Boziliao	29.04 ± 0.67	30.28 ± 0.66
Taichung Port	16.20 ± 0.52	15.84 ± 0.51

Hsinchu	4.37±0.47	4.89±0.46
Jhuwei	32.79±0.83	32.84±0.83
Mean	11.63	11.87

*為潮位資料中有偏移量情形

4.4 潮位站地表垂直變動改正

4.4.1 潮位站地表垂直變動速率

衛星測高觀測之海平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平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 (式 4.3)。潮位站垂直變動速率之推算為應用線性方程式(二參數)擬合與其偏差 a 與斜率訊號 a_1' ，公式如下所示，

$$u(t) = a_0 + a_1' t \quad \dots \dots \dots \quad (4.5)$$

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 4.17 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(換站時間如表 2.3 所示)，而 1994-2012 年地表下沉量約 50 公分。

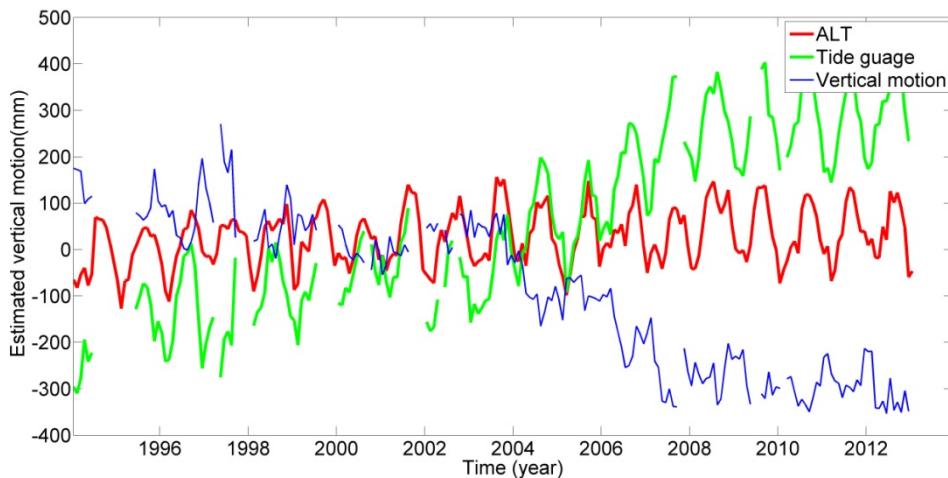


圖 4.17 竹圍潮位站之地表垂直變動訊號。ALT 為衛星海洋數據存檔、驗正與解釋(AVISO)衛星測高之海平面高

4.4.2 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，結果如表 4.7-4.8 所示，使用之潮位站資料皆已改正海潮效應、逆氣壓效應與基準偏移。表中顯示位於臺灣西半部潮位站周圍潮位站多呈現下降情形，然而位於西北部的新竹(Hsinchu)與竹圍(Jhuwei)兩潮位站相距 40 公里，但兩站地表變動量差異量非常顯著，約 28 mm/yr 。造成顯著不一致的原因為竹圍測站更換監測地點所致，竹圍測站在 1993-2007 年地表下沉速率較大，而在 2007 年更換監測地點(遷站)後，測站周圍地表呈現穩定之情形(如圖 4.17 所示)。

由上述原因可知，竹圍潮位站資料並不適用於海平面變化研究，因此本研究後續計算不使用此站資料。將表 4.7 與表 4.8 中其他的潮位站垂直變動速率以圖示方式展示(如圖 4.18)，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，其中西南部之箔子寮(Boziliao)、東石(Dongshi)、後壁湖(Houbihu)以及塭港(Wengang)潮位站垂直變動速率每年皆下沉 20 mm 。其他臺灣附近區域潮位站除了位於香港橫瀾島(Waglan Island)測站周圍地表呈現每年下

沉 14.5-15.6 mm，其他香港、菲律賓潮位站與日本潮位站周圍地表皆無明顯垂直變動情形。

表 4.7 平均海平面永久服務中心(PSMSL)潮位站垂直變動速率

Country	Station Name	Vertical motion trend (mm/yr)	
		AVISO	RADs
China	Zhapo	0.40±0.65	0.21±0.71
	Xi Sha	2.27±0.48	0.77±0.48
	Kanmen	-0.86±1.03	-1.06±1.05
	Waglan Island	-14.45±1.18	-15.59±1.21
	Quarry Bay	0.49±0.73	0.10±0.76
	Tai Miu Wan	-0.59±1.44	-1.61±1.46
	Tai Po Kau	0.34±0.76	-0.34±0.80
	Tsim Bei Tsui	-0.53±0.72	-1.09±0.73
	Shek Pik	1.79±0.97	0.34±0.99
Japan	Nase	0.37±0.49	0.78±0.42
	Nakano Sima	-0.91±0.46	-0.80±0.62
	Okinawa	-0.09±0.47	-0.34±0.51
	Naha	-0.77±0.37	-1.06±0.42
	Ishigaki	0.07±0.52	-1.36±0.55
Philippines	Legaspi	-0.35±0.50	-0.94±0.55
	Cebu	1.70±0.50	1.09±0.60
Mean		-0.70	-1.31

表 4.8 中央氣象局潮位站垂直變動速率

Station Name	Vertical motion trend (mm/yr)	
	AVISO	RADs
Keelung	0.74±0.44	0.09±0.45
Gengfang	4.85±0.79	4.48±0.79
Su-ao	-3.83±0.64	-4.89±0.65
Hualien	-4.38±1.04	-5.63±1.06
Chenggong	-1.46±0.78	-2.07±0.80
Fugang	3.46±0.60	2.67±0.61
Houbihu	-21.71±1.22	-22.00±1.23
Syunguangzui	-9.07±0.58	-8.07±0.58
Donggang	0.34±0.87	-1.20±0.87
Kaohsiung	2.49±0.51	1.86±0.52
Jiangjun	-0.43±0.68	-0.48±0.69
Dongshi	-24.25±0.84	-25.13±0.84
Wengang	-22.44±1.04	-22.44±1.06
Penghu	0.58±0.43	-0.46±0.45
Bozilia	-24.61±0.87	-26.02±0.86
Taichung Port	-11.72±0.81	-11.79±0.84
Hsinchu	-1.44±0.89	-2.45±0.92
Jhuwei	-29.99±0.86	-30.33±0.86
Mean	-7.94	-8.54

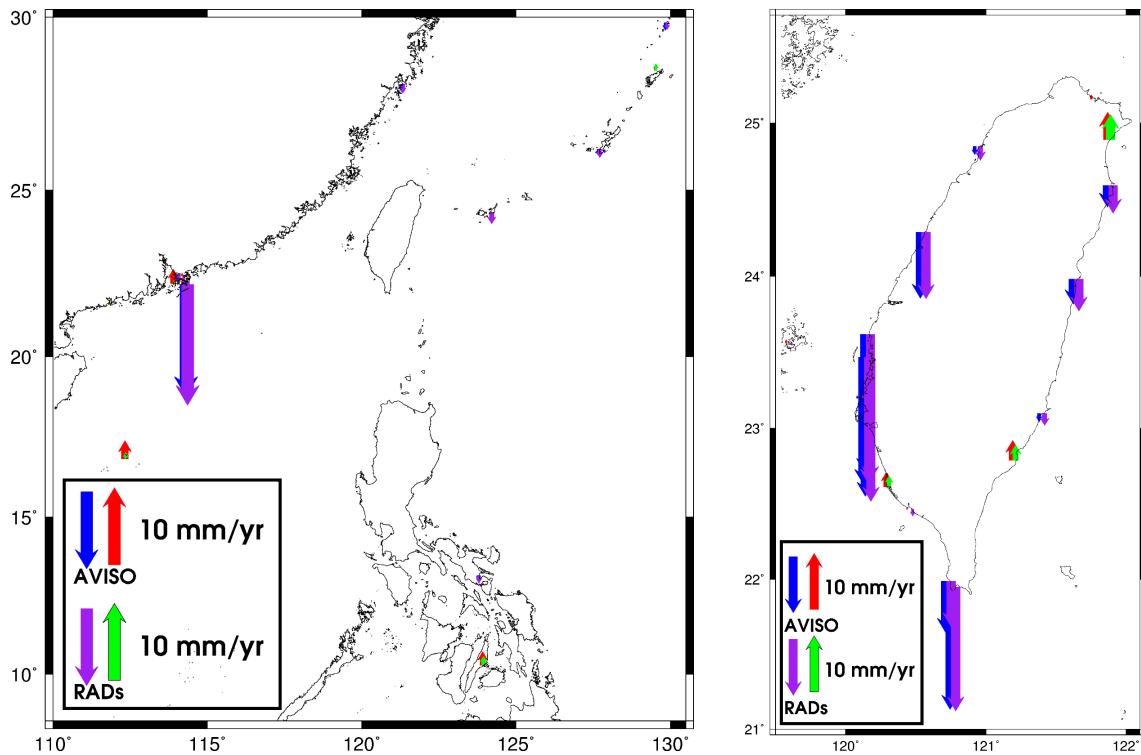


圖 4.18 潮位站近二十年(1993-2012)之地表垂直變動速率圖

4.4.3 近十年與近二十年潮位站之地表垂直變動速率

平均海平面永久服務中心(PSMSL)近十年(2003-2012)與近二十年(1993-2012)之潮位站垂直變動速率趨勢大致上是相似的(如圖 4.19 與表 4.9 所示)，但由十年資料所計算速率之標準偏差明顯變大。由圖 4.19 可知，十年與二十年的垂直變動速率差異較大為坎門(圖 4.19(b))與宿霧(圖 4.19(a))潮位站，此成果與第二年期(103 年)成果相同，其原因應為使用較短時間資料(十年)去推算速率，容易導致計算之精度較差，以及容易受到短期強烈訊號影響[郭重言等人，2015]。

中央氣象局近十年與近二十年潮位站的地表垂直變動速率趨勢大多是一致的(如圖 4.20、表 4.10 所示)，近十年臺灣西南部地表仍呈現穩定下沉，其中箔子寮、東石與塭港每年約呈現 1-2 公分的下沉量。後壁湖潮位站近十年與近二十年的地表變動速率差異較大，速率差值約 20 mm/yr ，原因除了十年的時間段較短造成計算之精度較差外，還可能是後壁湖測站資料 2003 年之前地表垂直變動速率非常顯著(如圖 4.21 所示)，造成在改正基準偏移時成果有所差異，導致後續所估算地

表變動速率不一致之情形。

亦如前期(102年)計劃成果所示，由十年資料估算垂直變動速率之標準偏差較大(標準偏差平均值為 $\pm 1.76 \text{ mm/yr}$)，而由二十年資料估算的地表垂直變動速率之精度較佳(平均標準偏差為 $\pm 0.72 \text{ mm/yr}$)。後續將以估算之近二十年(1993-2012)地表垂直變動速率成果與全球衛星定位系統(GPS)以及水準成果相比較。

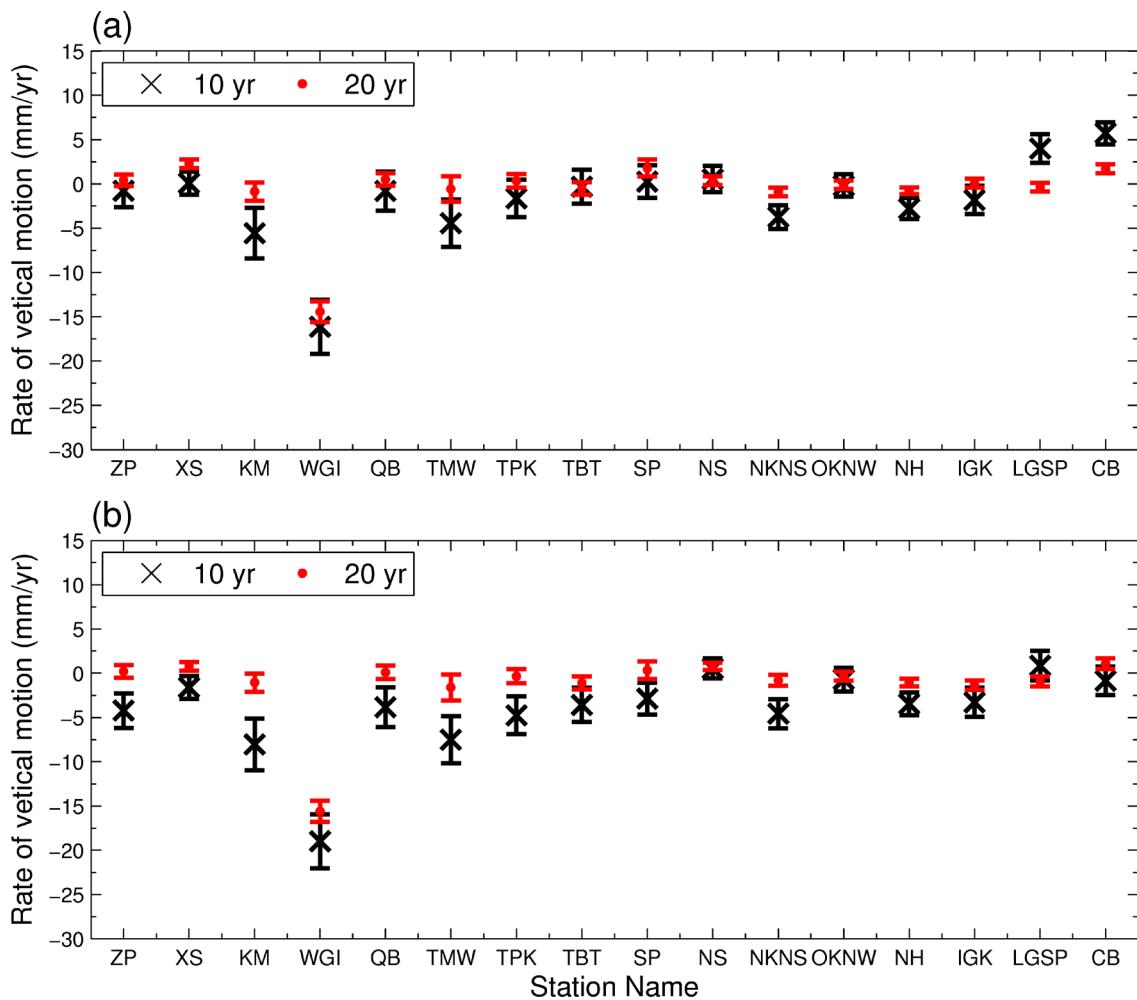


圖 4.19 平均海平面永久服務中心(PSMSL)潮位站之近十年(10 yr; 2003-2012)與近二十年(20 yr; 1993-2012)地表垂直變動成果。(a) 衛星海洋數據存檔、驗正與解釋(AVISO)衛星測高，(b) 雷達測高資料收集(RADs)衛星測高

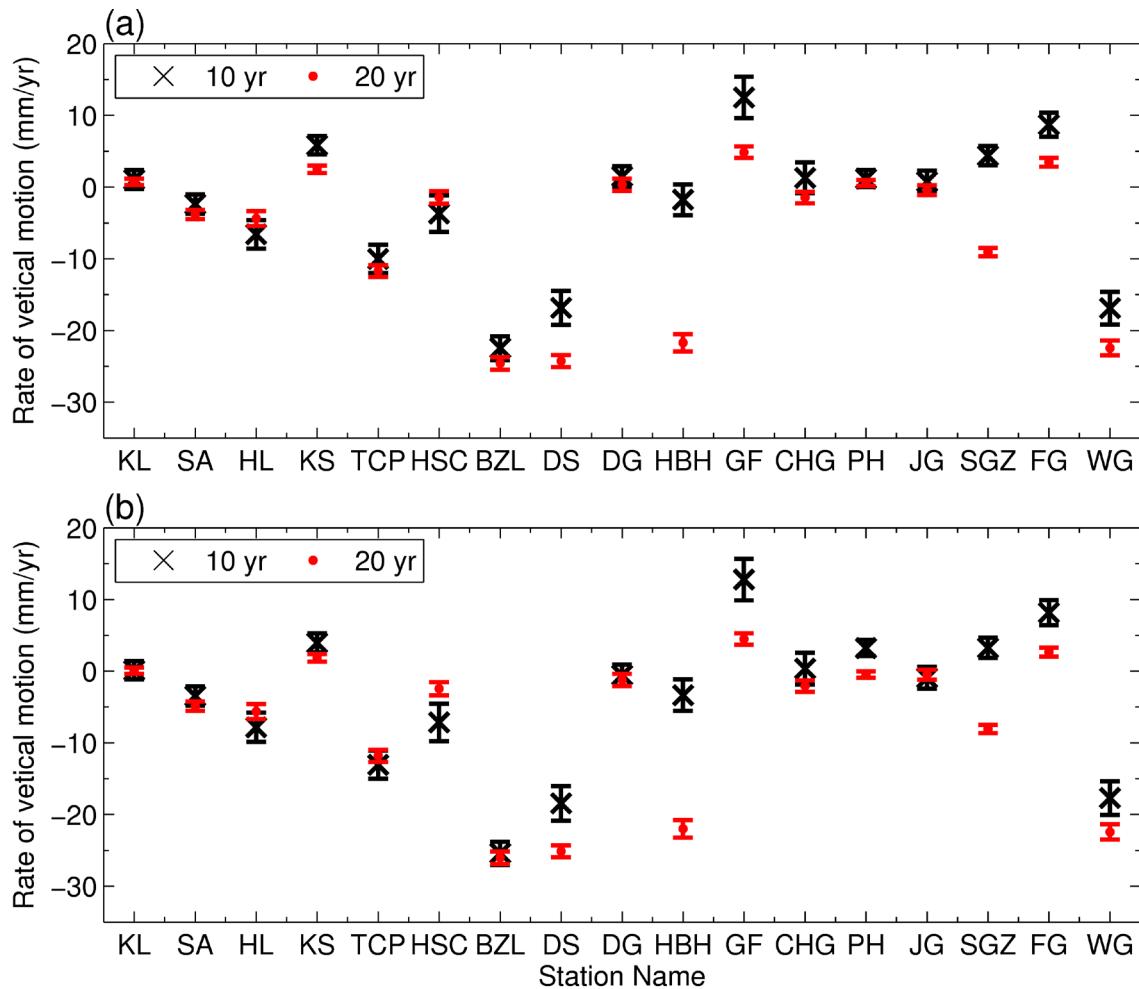


圖 4.20 中央氣象局潮位站之近十年(10 yr; 2003-2012)與近二十年(20 yr; 1993-2012)地表垂直變動速率(a) 衛星海洋數據存檔、驗正與解釋(AVISO)衛星測高，(b) 雷達測高資料收集 (RADs)衛星測高

表 4.9 平均海平面永久服務中心(PSMSL)潮位站之近十年(10 yrs; 2003-2012)與近二十年(20 yrs; 1993-2012)地表垂直變動速率

Country	Station Name	Vertical land motion trend (mm/yr)			
		AVISO-TG		RADs-TG	
		10 yrs	20 yrs	10 yrs	20 yrs
China	Zhapo	-0.79±1.84	0.40±0.65	-4.22±1.97	0.21±0.71
	Xi Sha	0.08±1.31	2.27±0.48	-1.60±1.29	0.77±0.48
	Kanmen	-5.56±2.85	-0.86±1.03	-8.04±2.92	-1.06±1.05
	Waglan Island	-16.14±3.06	-14.45±1.18	-18.99±3.05	-15.59±1.21
	Quarry Bay	-0.81±2.20	0.49±0.73	-3.85±2.23	0.10±0.76
	Tai Miu Wan	-4.45±2.68	-0.59±1.44	-7.51±2.67	-1.61±1.46
	Tai Po Kau	-1.64±2.11	0.34±0.76	-4.76±2.12	-0.34±0.80
	Tsim Bei Tsui	-0.32±1.91	-0.53±0.72	-3.58±1.94	-1.09±0.73
Japan	Shek Pik	0.25±1.84	1.79±0.97	-2.88±1.80	0.34±0.99
	Nase	0.54±1.49	0.37±0.49	0.54±1.16	0.78±0.42
	Nakano Sima	-3.74±1.34	-0.91±0.46	-4.57±1.64	-0.80±0.62
	Okinawa	-0.20±1.26	-0.09±0.47	-0.71±1.33	-0.34±0.51
	Naha	-2.79±1.19	-0.77±0.37	-3.47±1.27	-1.06±0.42

	Ishigaki	-1.83±1.59	0.07±0.52	-3.29±1.65	-1.36±0.55
Philippines	Legaspi	3.99±1.60	-0.35±0.50	0.86±1.67	-0.94±0.55
	Cebu	5.72±1.26	1.70±0.50	-0.85±1.60	1.09±0.60
	Mean	-1.73	-0.51	-4.18	-1.61

表 4.10 中央氣象局潮位站之近十年(10 yrs; 2003-2012)與近二十年(20 yrs; 1993-2012)地表垂直變動速率

Station Name	Vertical land Motion Trend (mm/yr)			
	AVISO-TG		RADs-TG	
	10 yrs	20 yrs	10 yrs	20 yrs
Keelung	1.07±1.30	0.74±0.44	0.12±1.27	0.09±0.45
Gengfang	12.51±2.91	4.85±0.79	12.79±2.90	4.48±0.79
Su-ao	-2.38±1.34	-3.83±0.64	-3.45±1.36	-4.89±0.65
Hualien	-6.59±2.00	-4.38±1.04	-7.83±2.06	-5.63±1.06
Chenggong	1.29±2.15	-1.46±0.78	0.35±2.23	-2.07±0.80
Fugang	8.71±1.70	3.46±0.60	8.17±1.77	2.67±0.61
Houbihu	-1.75±2.14	-21.71±1.22	-3.34±2.20	-22.00±1.23
Syunguangzui	4.38±1.37	-9.07±0.58	3.25±1.39	-8.07±0.58
Donggang	1.50±1.43	0.34±0.87	-0.55±1.46	-1.20±0.87
Kaohsiung	5.85±1.29	2.49±0.51	3.95±1.34	1.86±0.52
Jiangjun	0.77±1.52	-0.43±0.68	-0.93±1.54	-0.48±0.69
Dongshi	-16.83±2.39	-24.25±0.84	-18.45±2.42	-25.13±0.84
Wengang	-16.90±2.29	-22.44±1.04	-17.70±2.32	-22.44±1.06
Penghu	1.18±1.19	0.58±0.43	-3.22±1.13	-0.46±0.45
Boziliao	-22.46±1.65	-24.61±0.87	-25.41±1.62	-26.02±0.86
Taichung Port	-10.02±1.99	-11.72±0.81	-13.06±1.98	-11.79±0.84
Hsinchu	-3.70±2.53	-1.44±0.89	-7.13±2.61	-2.45±0.92
Mean	-2.55	-7.94	-4.26	-8.54

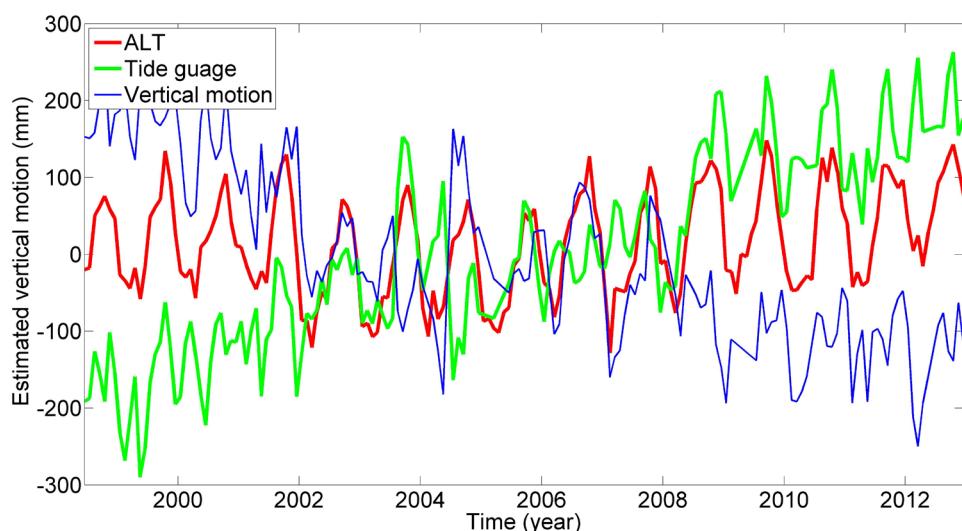


圖 4.21 後壁湖潮位站之地表垂直變動訊號。ALT 為衛星海洋數據存檔、驗正與解釋(AVISO)衛星測高之海平面高

4.4.4 估算之二十年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

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]所提供之，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鄰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於一等水準點高程之變化，而非相對於位於基隆的水準原點。

本計畫中使用的潮位站資料分佈於臺灣、中國、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潮位站成果與測站最鄰近的全球衛星定位系統(GPS)觀測站與水準之成果進行比較，成果如表 4.11 與表 4.12 所示。本計畫成果與全球衛星定位系統(GPS)成果相比較可知，兩者成果並不一致(圖 4.22 與圖 4.23)，兩者成果差值之平均值約為 4 mm/yr 。造成不一致的原因應為潮位站與全球衛星定位系統(GPS)站間水平距離長短不一(表 4.11)，距離過長則可能代表不同的地表變形特性。將兩測站(潮位站與全球衛星定位系統(GPS)站)相距 1 公里內成果展現於圖 4.24 與圖 4.25，由圖可知，兩者成果較為一致，在臺灣東石與後壁湖之地表皆估算出明顯下沉，兩者成果之差值平均值為 $-1.5 \pm 5.4 \text{ mm/yr}$ 與 $-1.1 \pm 5.4 \text{ mm/yr}$ (AVISO 與 RADs; \pm 值為利用本研究成果與 GPS 成果相減後差異值所估算之標準偏差)，差異量可能為資料涵蓋時間長度不同與參考原點不同所導致。其中台中港與東石為差異量較大之測站。除了上述原因(時間長度不同)造成外，還可能為東石位於臺灣西南部沿海地區，附近地表下沉量非常顯著[Ching *et al.*, 2011]，而兩測站相距約 0.27 公里，可能導致兩者資料所計算下沉

量不同。而台中港差異量除了因上述原因以及測高資料在此處精度較差原因除外，還有因為潮位站資料本身品質較差所導致。台中港潮位資料自 1999 年起，約有 2-3 年無觀測資料，且在 2006-2009 年間有明顯基準偏移情形(圖 4.26)。

本計畫成果與內政部水準成果[內政部國土測繪中心, 2014]相比較並不一致(表 4.12)，而全球衛星定位系統(GPS)成果與水準成果亦不相同(圖 4.22 與圖 4.23)。本計畫成果與水準成果之差值平均值為 6.80 mm/yr，其差異的原因為內政部水準資料為相對於附近一等水準點，而臺灣部分的一等水準點之高程已變動，因此，水準成果與本計畫成果並不一致。

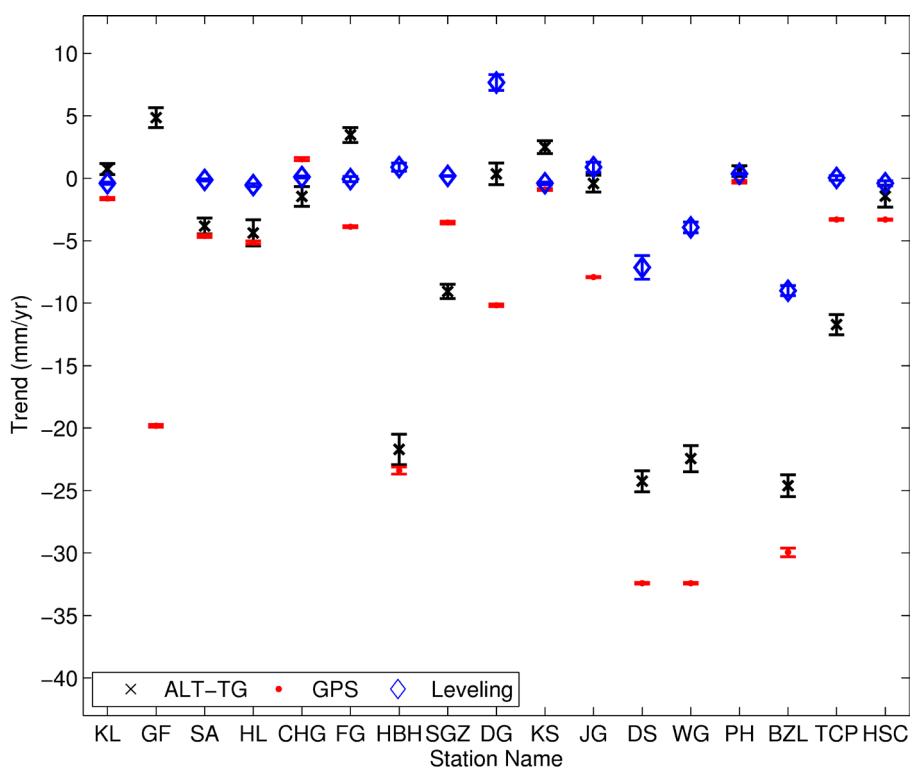


圖 4.22 估算潮位站地表垂直變動速率、全球衛星定位系統(GPS)成果與水準點成果比較。ALT: 衛星海洋數據存檔、驗正與解釋(AVISO)衛星測高，TG: 潮位站，Leveling: 水準成果

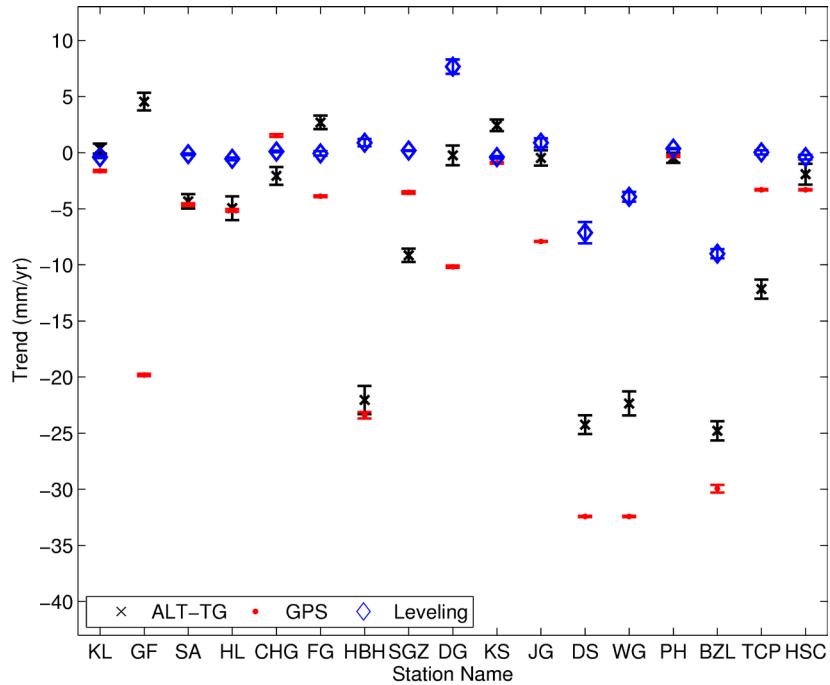


圖 4.23 估算潮位站地表垂直變動速率、全球衛星定位系統(GPS)成果與水準點成果比較。ALT: 雷達測高資料收集 (RADs)衛星測高，TG: 潮位站，Leveling: 水準成果

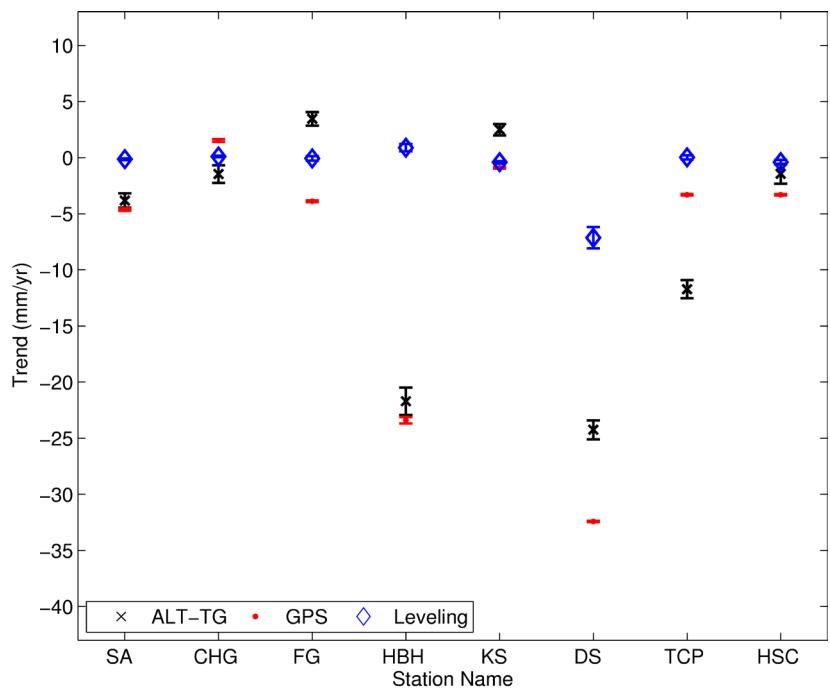


圖 4.24 估算潮位站地表垂直變動速率、全球衛星定位系統(GPS)成果與水準點成果比較。ALT: 衛星海洋數據存檔、驗正與解釋(AVISO)衛星測高，TG: 潮位站，Leveling: 水準成果

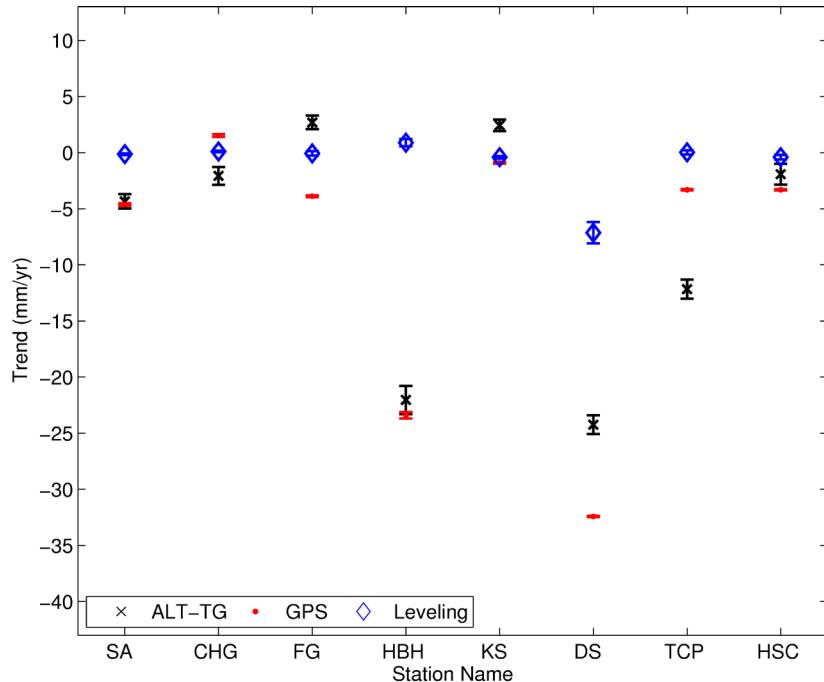


圖 4.25 估算潮位站地表垂直變動速率、全球衛星定位系統(GPS)成果與水準點成果比較。ALT: 雷達測高資料收集 (RADs)衛星測高，TG: 潮位站，Leveling: 水準成果

表 4.11 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	Vertical land Motion Trend (mm/yr)			GPS period	Distance (km)
	AVISO-TG (1993-2012)	RADs-TG (1993-2012)	GPS [Ching et al., 2011]		
Keelung	0.74±0.44	0.36±0.45	-1.63±0.09	2002/01-2012/12	9.77
Gengfang	4.85±0.79	4.54±0.79	-19.82±0.10	2006/07-2012/08	9.06
Su-ao	-3.83±0.64	-4.34±0.65	-4.63±0.12	2002/01-2012/08	0.02
Hualien	-4.38±1.04	-4.95±1.06	-5.15±0.13	2002/01-2012/12	1.18
Chenggong	-1.46±0.78	-2.07±0.80	1.52±0.12	2002/01-2012/12	0.60
Fugang	3.46±0.60	2.69±0.61	-3.89±0.07	2003/12-2012/12	0.00
Houbihu	-21.71±1.22	-22.04±1.26	-23.40±0.28	2009/01-2012/08	0.32
Syunguangzui	-9.07±0.58	-9.15±0.59	-3.55±0.12	2001/12-2012/09	4.11
Donggang	0.34±0.87	-0.25±0.87	-10.17±0.11	2004/01-2012/08	13.34
Kaohsiung	2.49±0.51	2.43±0.52	-0.91±0.07	2004/01-2012/08	0.01
Jiangjun	-0.43±0.68	-0.48±0.69	-7.91±0.05	2001/12-2012/09	5.94
Dongshi	-24.25±0.84	-24.24±0.84	-32.42±0.07	2004/01-2012/08	0.27
Wengang	-22.44±1.04	-22.35±1.06	-32.42±0.07	2004/01-2012/08	2.52
Penghu	0.58±0.43	-0.46±0.45	-0.30±0.11	2002/01-2012/08	1.45
Boziliao	-24.61±0.87	-24.79±0.86	-29.94±0.35	2007/01-2012/08	12.46
Taichung Port	-11.72±0.81	-12.16±0.84	-3.31±0.07	2004/02-2012/08	0.39
Hsinchu	-1.44±0.89	-1.93±0.92	-3.31±0.05	2004/02-2012/08	0.42
Mean	-6.64	-7.01	-10.66	—	3.64

表 4.12 估算之潮位站地表垂直變動速率與水準成果比較

Station Name	Vertical land Motion Trend (mm/yr)			Leveling period
	AVISO-TG (1993-2012)	RADs-TG (1993-2012)	Leveling [內政部國土測繪中 心，2014]	
Keelung	0.74±0.44	0.36±0.45	-0.40±0.09	2002-2012
Gengfang	4.85±0.79	4.54±0.79	—	—
Su-ao	-3.83±0.64	-4.34±0.65	-0.14±0.08	2003-2012
Hualien	-4.38±1.04	-4.95±1.06	-0.55±0.12	2003-2012
Chenggong	-1.46±0.78	-2.07±0.80	0.10±0.07	2004-2012
Fugang	3.46±0.60	2.69±0.61	-0.07±0.20	2004-2012
Houbihu	-21.71±1.22	-22.04±1.26	0.88±0.32	2005-2012
Syunguangzui	-9.07±0.58	-9.15±0.59	0.18±0.03	2009-2013
Donggang	0.34±0.87	-0.25±0.87	7.66±0.63	2008-2013
Kaohsiung	2.49±0.51	2.43±0.52	-0.41±0.10	2003-2012
Jiangjun	-0.43±0.68	-0.48±0.69	0.88±0.41	2005-2012
Dongshi	-24.25±0.84	-24.24±0.84	-7.14±0.94	2005-2011
Wengang	-22.44±1.04	-22.35±1.06	-3.94±0.43	2003-2013
Penghu	0.58±0.43	-0.46±0.45	0.36±0.05	2005-2012
Boziliao	-24.61±0.87	-24.79±0.86	-9.00±0.41	2003-2011
Taichung Port	-11.72±0.81	-12.16±0.84	0.02±0.19	2003-2012
Hsinchu	-1.44±0.89	-1.93±0.92	-0.40±0.20	2005-2012
Mean	-6.64	-7.01	-0.75	—

— 表示無此資料

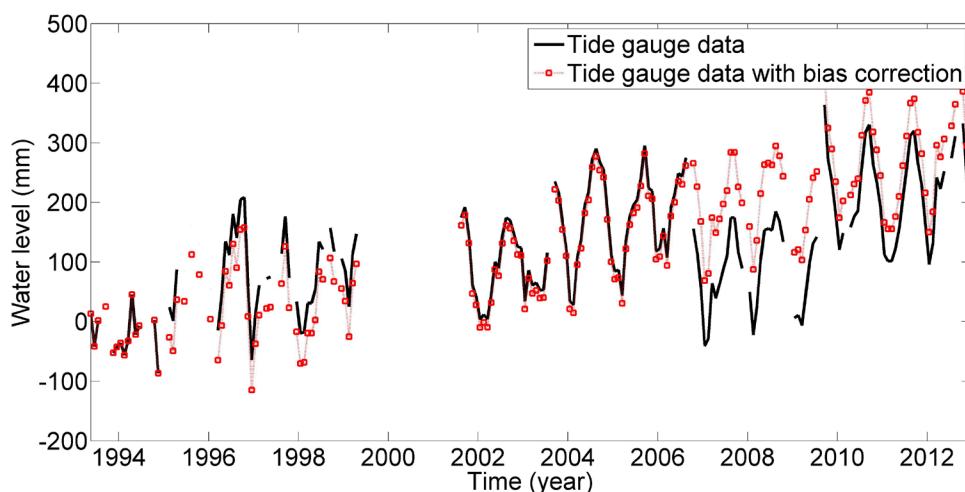


圖 4.26 台中港潮位站資料偏移量改正

4.5 絶對海平面上升速率與加速度

4.5.1 1993-2012 絶對海平面昇降變動速率

本研究比較在未考慮與考慮氣候因子影響下潮位站資料所估算 1993-2012 絶對海平面上升速率，成果如圖 4.27 與圖 4.28 所示。由圖 4.27 可知，由潮位站資料估算海平面上升速率與海洋數據存檔、驗正與解釋(AVISO)成果一致，利用六參數擬合(式(3.3))估算之海平面上升速率受到氣候因子影響，臺灣周圍海平面上升速率由北往南逐漸增快；而考慮氣候因子影響下，估算之絕對海平面上升速率則較一致，潮位站資料估算之速率平均值由 3.5 mm/yr 降至 2.3 mm/yr (圖 4.28 與表 4.13)。由多變量擬合潮位站資料時的多重 ENSO 指數(MEI)之係數 g 與太平洋年代際振盪(PDO)之係數 h (圖 4.29、圖 4.30 與表 4.14)與衛星測高成果相似(圖 3.8、圖 3.9 與表 3.1)，聖嬰-南方振盪(ENSO)現象僅對於菲律賓以東地區海平面有較大影響，而太平洋年代際振盪(PDO)現象對於臺灣周圍各區域海平面皆有顯著影響。

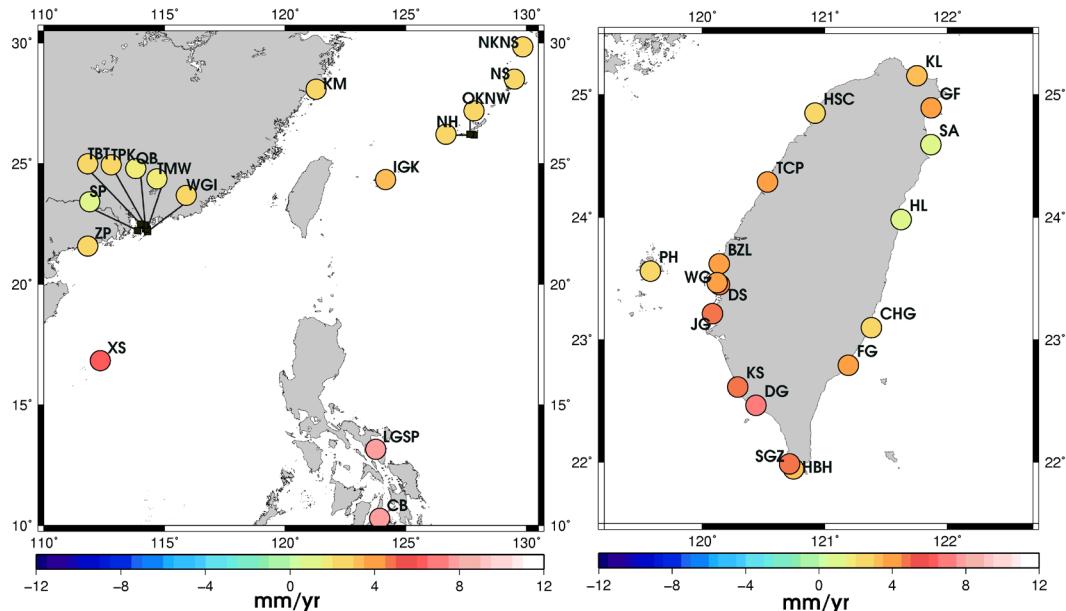


圖 4.27 未考慮潮位站資料中氣候因子影響下之 1993-2012 臺灣周圍絕對海平面上升速率。改正測站地表垂直變動是利用海洋數據存檔、驗正與解釋(AVISO)測高資料所估算

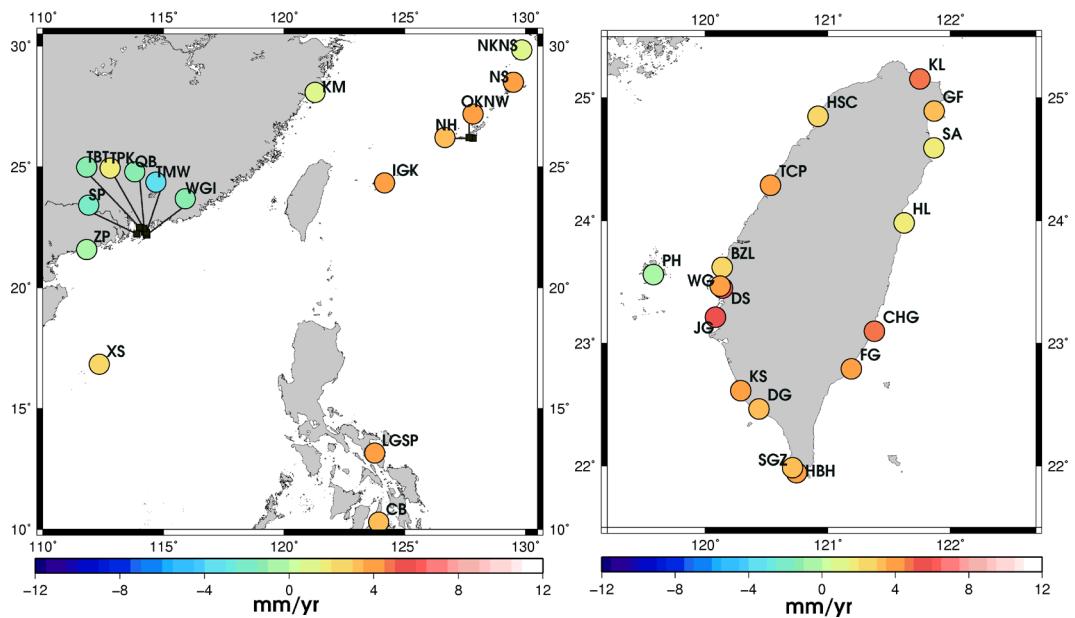


圖 4.28 考慮潮位站資料中氣候因子影響下之 1993-2012 臺灣周圍絕對海平面上升速率。改正測站地表垂直變動是利用海洋數據存檔、驗正與解釋(AVISO)測高資料所估算

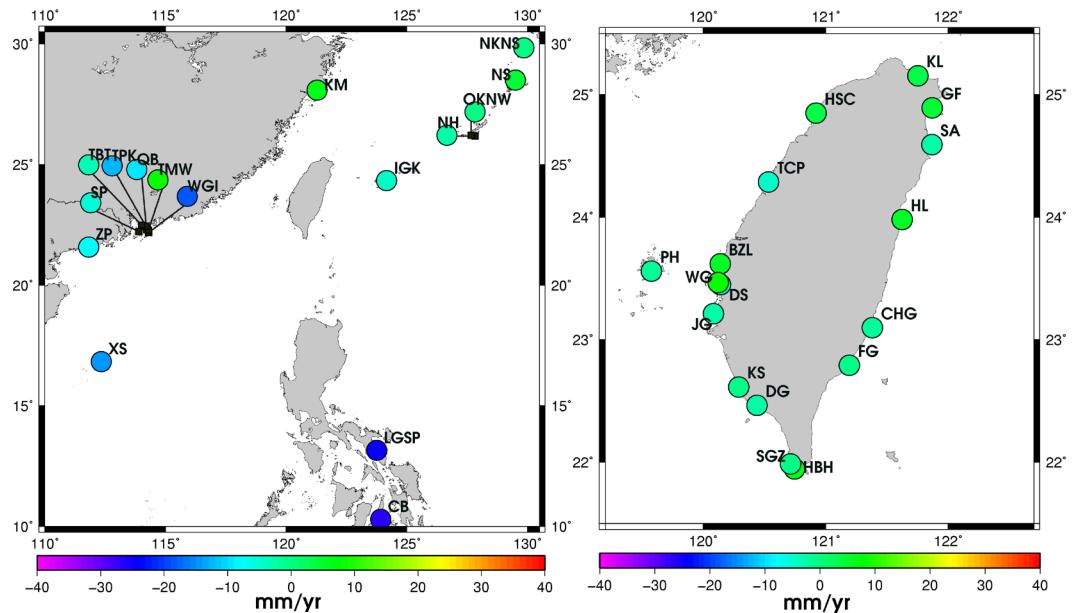


圖 4.29 多變量線性擬合 1993-2012 潮位站資料中多重 ENSO 指數(MEI)之係數 g

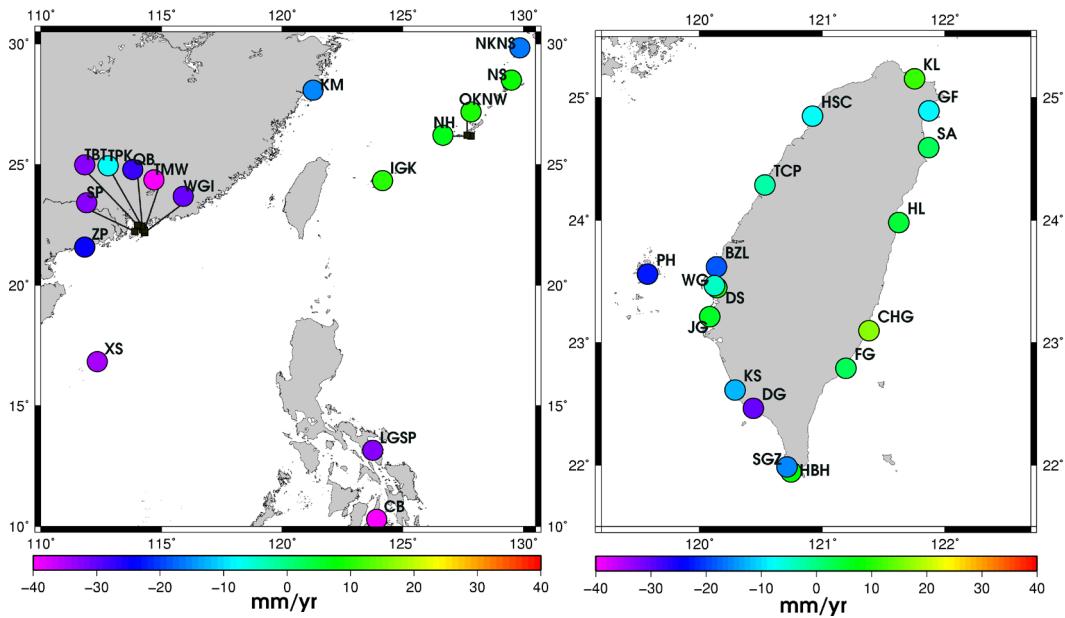


圖 4.30 多變量線性擬合 1993-2012 潮位站資料中太平洋年代際振盪(PDO)之係數 h

表 4.13 利用潮位站資料估算 1993-2012 臺灣周圍絕對海平面上升速率。Six-parameters 與 Multivariable 分別為在擬合時未考慮與考慮海平面資料中氣候因子影響。AVISO 與 RADs 分別表示改正測站地表垂直變動時所使用的測高資料來源

Country	Station	Sea level trends (mm/yr)					
		AVISO			RADs		
		Six-parameter s	Multivariable	Difference	Six-parameter s	Multivariable	Difference
China	ZP	2.36±0.73	-0.28±1.11	-2.64	2.17±0.73	-0.47±1.11	-2.64
	XS	6.24±0.76	2.36±1.11	-3.88	4.74±0.76	0.86±1.11	-3.88
	KM	2.40±0.69	0.65±1.14	-1.75	2.20±0.69	0.45±1.14	-1.75
	WGI	2.39±1.12	-1.34±1.63	-3.73	2.13±1.12	-1.25±1.62	-3.38
	QB	1.83±0.78	-1.25±1.19	-3.08	1.44±0.78	-1.64±1.19	-3.08
	TMW*	1.98±1.52	-3.43±1.77	-5.41	0.96±1.52	-4.45±1.77	-5.41
	TPK	2.31±0.76	1.56±1.18	-0.75	1.63±0.76	0.88±1.18	-0.75
	TBT	2.34±0.83	-1.10±1.33	-3.44	1.78±0.83	-1.66±1.33	-3.44
	SP*	1.28±1.10	-1.51±1.26	-2.79	-0.17±1.10	-2.96±1.26	-2.79
Taiwan	KL	3.47±0.40	4.91±0.65	1.44	3.09±0.40	4.59±0.65	1.50
	GF*	3.76±0.61	3.22±0.69	-0.54	3.45±0.61	2.90±0.69	-0.55
	SA*	1.37±0.49	1.59±0.64	0.22	0.86±0.49	1.21±0.64	0.35
	HL*	1.05±0.71	1.58±0.95	0.53	0.49±0.71	1.17±0.95	0.68
	CHG	2.79±0.52	4.60±0.81	1.81	2.18±0.52	3.99±0.81	1.81
	FG	3.66±0.43	3.97±0.68	0.31	2.89±0.44	3.28±0.69	0.39
	HBH*	3.46±0.98	3.82±1.15	0.36	3.11±1.00	3.66±1.14	0.55
	SGZ	4.95±0.52	3.23±0.81	-1.72	5.04±0.52	3.64±0.81	-1.40
	DG*	6.77±1.00	3.00±1.24	-3.77	6.17±0.98	2.80±1.24	-3.37
	KS	4.99±0.51	3.58±0.77	-1.41	4.94±0.50	3.74±0.76	-1.20
	JG	4.78±0.56	5.48±0.88	0.70	4.73±0.56	5.43±0.88	0.70
	DS	4.70±0.61	5.77±0.97	1.07	4.62±0.62	5.99±0.96	1.37
	WG	3.92±0.73	3.56±1.10	-0.36	4.00±0.72	4.14±1.09	0.14

	PH	2.23±0.46	-0.20±0.70	-2.43	0.91±0.46	-1.47±0.72	-2.38
	BZL*	4.44±0.67	2.44±0.99	-2.00	4.27±0.66	2.32±0.96	-1.95
	TCP	4.48±0.52	4.19±1.00	-0.29	4.05±0.51	4.44±0.98	0.39
	HSC	2.92±0.47	2.01±0.72	-0.91	2.43±0.46	1.96±0.72	-0.47
Japan	NS	2.41±0.59	3.52±0.97	1.11	2.82±0.59	3.93±0.97	1.11
	NKNS	2.84±0.54	0.92±0.86	-1.92	2.95±0.54	1.03±0.86	-1.92
	OKNW	2.92±0.62	4.06±0.99	1.14	2.67±0.62	3.81±0.99	1.14
	NH	2.52±0.63	3.27±1.00	0.75	2.23±0.63	2.98±1.00	0.75
	IGK	3.25±0.70	4.38±1.09	1.13	1.82±0.70	2.95±1.09	1.13
Philippines	LGSP	7.61±0.64	4.07±0.73	-3.54	7.02±0.64	3.48±0.73	-3.54
	CB	7.88±0.69	3.48±0.81	-4.40	7.27±0.69	2.87±0.81	-4.40
All regions		3.52	2.31	-1.22	3.06	1.96	-1.10

*表示資料無完整涵蓋 1993-2012 年

表 4.14 多變量線性擬合 1993-2012 潮位站資料中係數 g 與 h 。AVISO 與 RADs 分別表示改正測站地表垂直變動時所使用的測高資料來源

Country	Station	AVISO (mm)		RADs (mm)	
		g	h	g	h
China	ZP	-7.93±3.89	-24.88±7.64	-7.93±3.89	-24.88±7.64
	XS	-14.18±3.90	-34.78±7.62	-14.18±3.90	-34.78±7.62
	KM	6.96±3.85	-15.28±7.81	6.96±3.85	-15.28±7.81
	WGI	-18.29±5.62	-30.11±10.94	-18.78±5.61	-26.94±10.93
	QB	-9.55±4.17	-27.41±8.18	-9.55±4.17	-27.41±8.18
	TMW	8.01±6.22	-57.00±11.22	8.01±6.22	-57.00±11.22
	TPK	-12.23±4.27	-7.13±8.08	-12.23±4.27	-7.13±8.08
	TBT	-3.50±4.64	-32.36±9.25	-3.50±4.64	-32.36±9.25
	SP	-5.74±4.55	-32.74±8.19	-5.74±4.55	-32.74±8.19
Taiwan	KL	3.74±2.26	11.83±4.42	3.68±2.26	12.39±4.42
	GF	4.71±2.50	-8.03±4.35	4.74±2.51	-8.13±4.36
	SA	-2.16±2.12	2.94±4.32	-2.26±2.11	4.43±4.32
	HL	5.42±3.01	4.47±6.02	5.38±3.00	5.91±6.01
	CHG	-1.77±2.91	16.11±5.57	-1.77±2.91	16.11±5.57
	FG	-0.06±2.36	2.81±4.68	-0.14±2.38	3.54±4.71
	HBH	6.54±4.63	7.66±7.16	6.22±4.56	10.71±7.05
	SGZ	-0.66±2.89	-15.41±5.57	-0.85±2.89	-12.57±5.57
	DG	-2.93±3.69	-30.22±6.91	-3.24±3.69	-27.06±6.90
	KS	-0.99±2.88	-12.73±5.27	-1.47±2.86	-10.79±5.25
	JG	-2.42±3.22	5.97±5.91	-2.42±3.22	5.97±5.91
	DS	-4.65±3.36	9.46±6.65	-5.02±3.32	11.26±6.58
	WG	8.27±3.77	-4.32±7.49	7.87±3.72	0.10±7.40
	PH	-1.13±2.46	-22.27±4.78	0.91±2.50	-20.85±4.91
	BZL	5.04±3.12	-18.36±6.22	4.22±3.05	-15.81±6.07
	TCP	-4.43±2.67	-2.09±6.83	-4.60±2.61	3.31±6.68
	HSC	3.86±2.72	-7.89±4.94	3.74±2.70	-3.98±4.90
Japan	NS	4.11±3.38	8.75±6.69	4.11±3.38	8.75±6.69
	NKNS	-0.50±3.00	-16.37±5.88	-0.50±3.00	-16.37±5.88
	OKNW	-0.17±3.74	9.99±6.71	-0.17±3.74	9.99±6.71
	NH	-2.81±3.47	6.60±6.90	-2.80±3.47	6.60±6.90
	IGK	-4.18±3.83	10.02±7.53	-4.18±3.83	10.02±7.53
Philippines	LGSP	-24.77±2.63	-32.69±4.85	-24.77±2.63	-32.69±4.85
	CB	-26.30±2.76	-40.68±5.61	-26.30±2.76	-40.68±5.61
All region		-2.87	-11.40	-2.93	-10.25

4.5.2 2003-2012 絶對海平面昇降變動速率

在未考慮氣候因子影響下，以六參數擬合(式(3.3))潮位站海平面資

料所估算出的 2003-2012 純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往南逐漸增快，而且在臺灣以南的海平面速率幾乎皆大於 10mm/yr (圖 4.31)，遠大於 1993-2012 潮位資料估算之速率 (圖 4.27)。然而在考慮氣候因子(式(3.5))影響下所估算 2003-2012 純對海平面上升速率在空間上分布並不一致 (圖 4.32)，其結果與 1993-2012 潮位資料估算之速率(圖 4.28)亦不相同，其原因推測除了因為使用時間段較短(僅十年)外，還因為近十年(2003-2012)海平面變化受氣候因子影響並不明顯以及資料品質問題，導致擬合成果不佳，進而影響估算速率之精度 (表 4.15)。比較修正氣候因子前後全部潮位資料估算速率分別為 6 mm/yr 與 8.85 mm/yr ，與測高成果不一致(表 3.3)，推測原因如上所述，潮位資料品質問題與近十年氣候因子影響海平面並不明顯所致。近十年聖嬰-南方振盪(ENSO)現象較不明顯(圖 4.33)，而太平洋年代際振盪(PDO)影響較顯著(圖 4.34)，但太平洋年代際振盪(PDO)係數 h 的標準偏差(標準偏差平均值約 $\pm 10.4\sim \pm 24.4\text{ mm}$)卻也增大許多(表 4.16)。

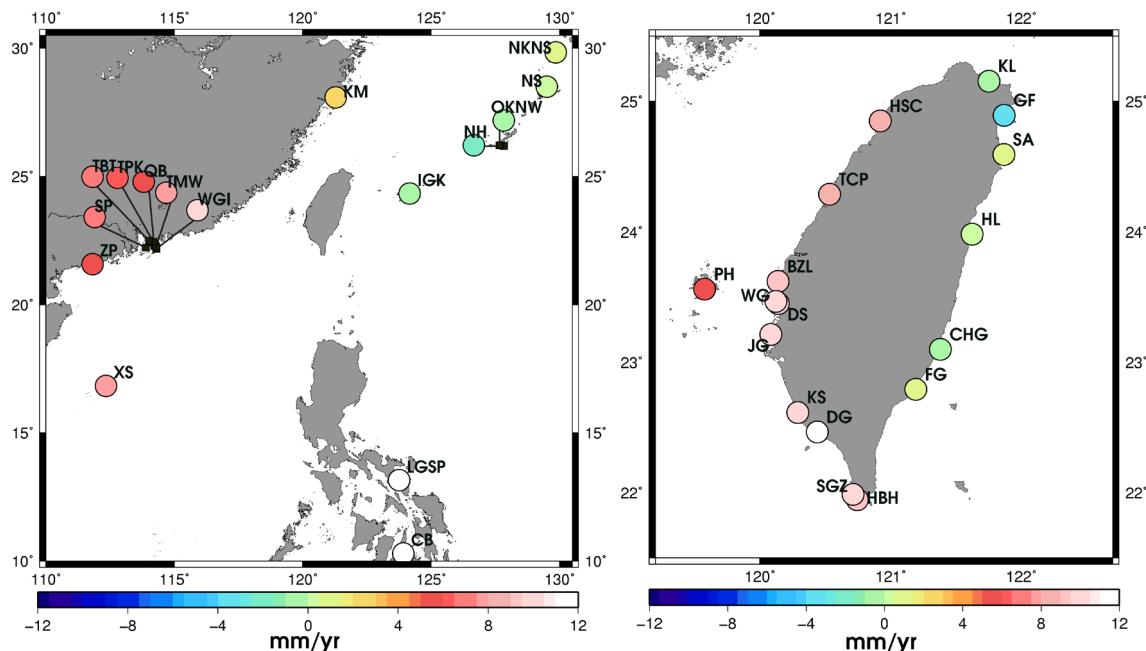


圖 4.31 未考慮潮位站資料中氣候因子影響下之 2003-2012 臺灣周圍絕對海平面上升速率。改正測站地表垂直變動是利用海洋數據存檔、驗正與解釋(AVISO)測高資料所估算

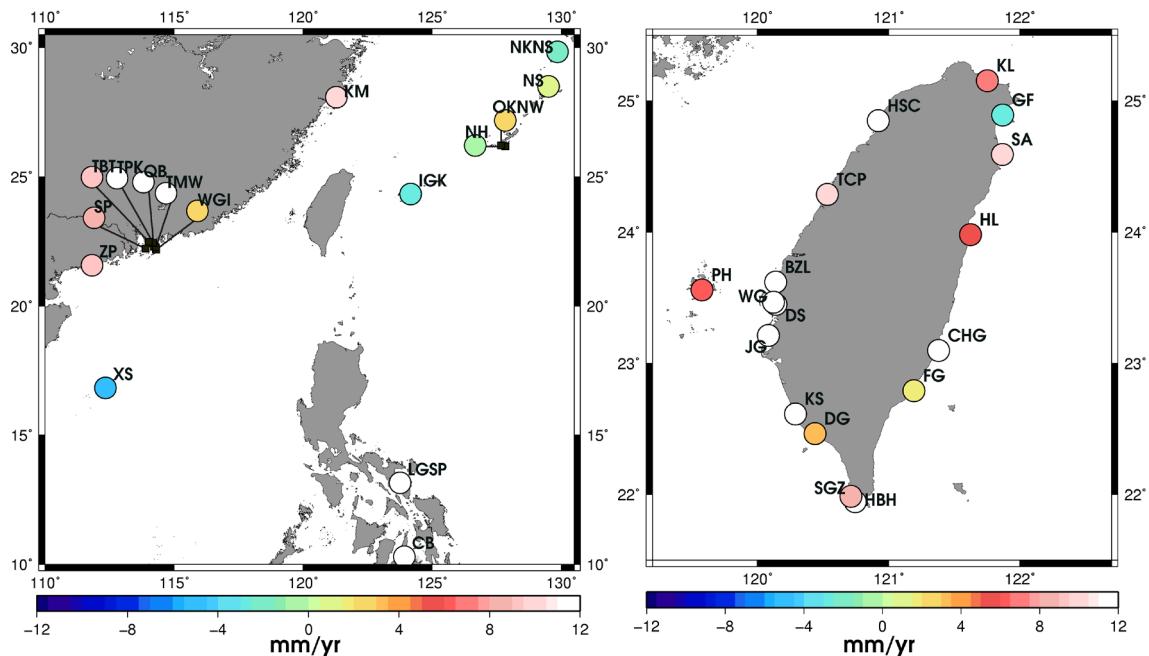


圖 4.32 考慮潮位站資料中氣候因子影響下之 2003-2012 臺灣周圍絕對海平面上升速率。改正測站地表垂直變動是利用海洋數據存檔、驗正與解釋(AVISO)測高資料所估算

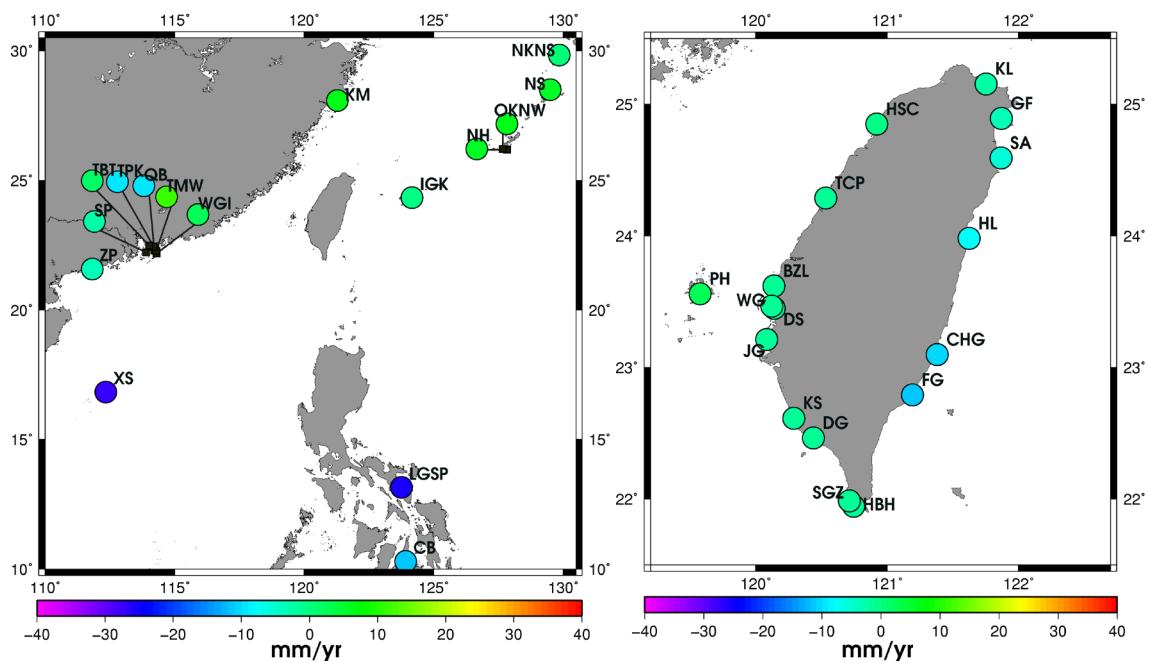


圖 4.33 多變量線性擬合 2003-2012 潮位站資料中多重 ENSO 指數(MEI)之係數 g

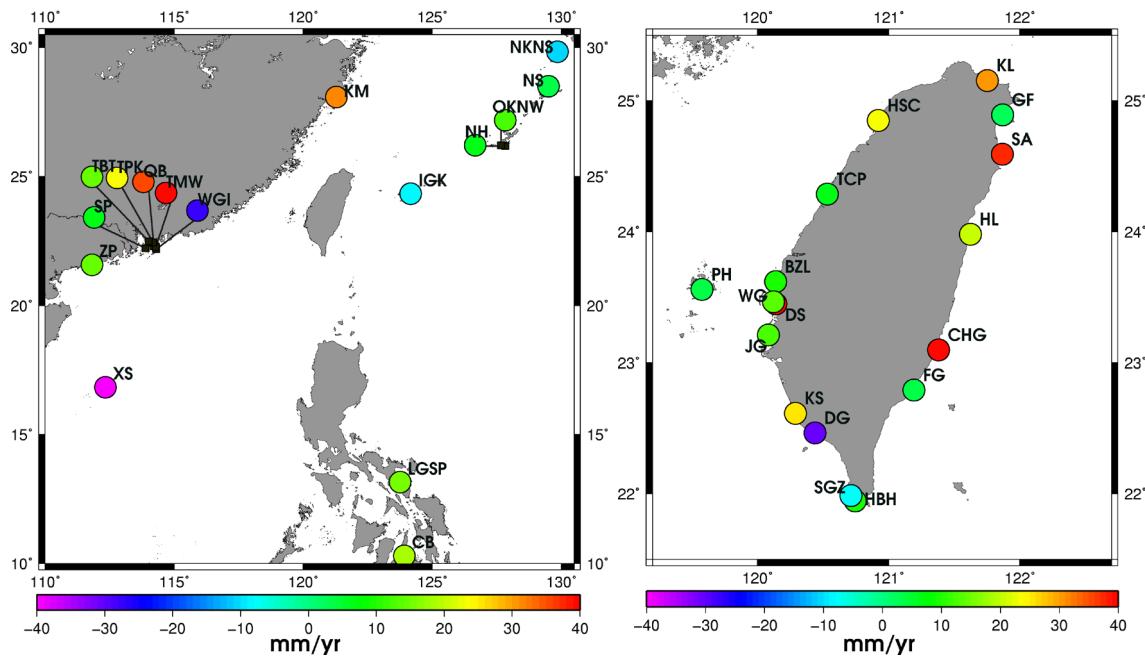


圖 4.34 多變量線性擬合 2003-2012 潮位站資料中太平洋年代際振盪(PDO)之係數 h

表 4.15 利用潮位站資料估算 2003-2012 臺灣周圍絕對海平面上升速率。Fitting6 與 Multivariable 分別為在擬合時未考慮與考慮海平面資料中氣候因子影響。AVISO 與 RADs 分別表示改正測站地表垂直變動時所使用的測高資料來源

Country	Station	Sea level trends (mm/yr)					
		AVISO			RADs		
		Six-paramet ers	Multivariabl e	Difference	Six-paramet ers	Multivariabl e	Difference
China	ZP	5.88±2.08	9.44±5.97	3.56	2.45±2.08	6.01±5.97	3.56
	XS	7.98±2.27	-4.74±6.67	-12.72	6.30±2.27	-6.42±6.67	-12.72
	KM	2.55±1.93	10.38±5.48	7.83	0.07±1.93	7.90±5.48	7.83
	WGI	9.78±2.53	2.92±7.29	-6.86	6.90±2.53	-0.03±7.29	-6.93
	QB	5.91±2.25	14.96±6.38	9.05	2.87±2.25	11.92±6.38	9.05
	TMW	7.55±2.52	17.56±6.95	10.01	4.49±2.52	14.50±6.95	10.01
	TPK	6.32±2.04	12.24±5.81	5.92	3.20±2.04	9.12±5.81	5.92
	TBT	6.79±2.31	9.13±6.58	2.34	3.53±2.31	5.87±6.57	2.34
	SP	6.52±1.98	8.22±5.56	1.7	3.39±1.98	5.09±5.56	1.7
	XS	7.98±2.27	-4.74±6.67	-12.72	6.30±2.27	-6.42±6.67	-12.72
Taiwan	KL	-0.31±1.06	7.33±2.94	7.64	-1.04±1.06	6.49±2.94	7.53
	GF*	-3.48±1.62	-2.52±4.59	0.96	-3.20±1.62	-2.24±4.59	0.96
	SA	1.00±1.08	10.09±2.73	9.09	0.11±1.08	9.15±2.73	9.04
	HL	0.40±1.30	5.56±3.38	5.16	-0.53±1.30	4.39±3.37	4.92
	CHG	-0.81±1.28	13.23±3.29	14.04	-1.75±1.28	12.29±3.29	14.04
	FG	0.76±1.26	1.78±3.62	1.02	-0.23±1.27	0.14±3.66	0.37
	HBH	9.46±1.68	11.69±4.76	2.23	7.88±1.69	10.23±4.78	2.35
	SGZ	10.32±1.24	8.35±3.58	-1.97	8.58±1.25	6.52±3.59	-2.06
	DG	11.11±1.59	3.30±4.16	-7.81	9.20±1.59	1.53±4.17	-7.67
	KS	10.28±1.32	16.61±3.77	6.33	8.70±1.31	15.09±3.76	6.39
	JG	9.98±1.21	13.14±3.45	3.16	8.28±1.21	11.44±3.45	3.16

	DS	9.56±1.71	26.78±4.84	17.22	7.86±1.71	24.87±4.85	17.01
	WG	9.70±1.26	13.12±3.66	3.42	8.08±1.26	11.56±3.67	3.48
	PH	8.54±1.06	6.32±3.00	-2.22	1.55±1.05	3.99±3.02	2.44
	BZL	9.23±1.14	11.58±3.25	2.35	6.86±1.13	8.87±3.24	2.01
	TCP	8.53±1.11	10.27±3.20	1.74	5.01±1.07	5.35±3.21	0.34
	HSC	8.15±1.46	13.98±4.22	5.83	5.35±1.46	10.64±4.23	5.29
Japan	NS	0.28±1.52	1.25±4.36	0.97	0.28±1.52	1.25±4.36	0.97
	NKNS	0.76±1.55	-2.00±4.48	-2.76	-0.07±1.55	-2.83±4.48	-2.76
	OKNW	-0.86±1.49	2.45±4.19	3.31	-1.37±1.49	1.94±4.19	3.31
	NH	-1.84±1.52	-0.30±4.30	1.54	-2.52±1.52	-0.98±4.30	1.54
	IGK	-0.68±2.18	-2.87±6.42	-2.19	-2.14±2.18	-4.33±6.42	-2.19
Philippines	LGSP	15.13±1.63	20.51±4.52	5.38	12.00±1.63	17.37±4.52	5.37
	CB	17.76±1.40	22.38±4.04	4.62	11.19±1.40	15.81±4.04	4.62
All regions		5.83	8.85	3.03	3.68	6.74	3.07

* 表示資料無完整涵蓋 2003-2012 年

表 4.16 多變量線性擬合 2003-2012 潮位站資料中係數 g 與 h 。AVISO 與 RADs 分別表示改正測站地表垂直變動時所使用的測高資料來源

Country	Station	AVISO (mm)		RADs (mm)	
		g	h	g	h
China	ZP	-3.95±6.23	14.13±22.21	-3.95±6.23	14.13±22.21
	XS	-27.09±7.08	-54.57±24.78	-27.09±7.08	-54.57±24.78
	KM	6.55±5.72	31.16±20.38	6.55±5.72	31.16±20.38
	WGI	2.17±8.53	-27.97±27.83	2.25±8.53	-28.22±27.83
	QB	-9.64±6.64	35.72±23.64	-9.64±6.64	35.72±23.64
	TMW	11.93±7.32	40.25±25.83	11.93±7.32	40.25±25.83
	TPK	-9.30±6.04	23.36±21.51	-9.30±6.04	23.36±21.51
	TBT	1.08±6.85	14.08±24.41	1.08±6.85	14.09±24.41
	SP	-2.27±5.75	6.85±21.02	-2.27±5.75	6.85±21.02
Taiwan	KL	1.41±3.19	30.44±10.99	1.44±3.19	30.00±10.99
	GF	0.72±3.68	2.48±11.99	0.72±3.68	2.48±11.99
	SA	-0.04±2.81	37.35±10.42	-0.02±2.81	37.14±10.42
	HL	2.06±3.53	20.86±12.69	2.15±3.52	19.85±12.65
	CHG	1.35±3.35	54.98±12.06	1.35±3.35	54.98±12.06
	FG	-4.15±3.72	3.93±13.34	-4.13±3.77	1.39±13.50
	HBH	0.03±4.86	9.01±17.98	-0.05±4.88	9.52±18.05
	SGZ	-1.70±3.73	-7.75±13.25	-1.74±3.75	-8.06±13.30
	DG	-5.54±4.27	-30.67±15.3	-5.57±4.27	-30.12±15.35
	KS	-4.29±3.99	25.39±14.07	-4.27±3.98	25.63±14.02
	JG	-1.40±3.66	12.47±12.78	-1.40±3.66	12.47±12.78
	DS	-5.09±4.88	68.88±18.27	-5.23±4.89	68.00±18.30
	WG	0.67±3.80	13.47±13.48	0.60±3.81	13.70±13.51
	PH	2.50±3.18	-9.12±11.46	2.64±3.20	-12.38±11.50
	BZL	1.91±3.40	9.49±12.22	2.02±3.39	8.12±12.16
	TCP	6.96±3.35	6.32±11.79	7.09±3.35	-1.18±11.79
	HSC	-1.28±4.37	23.09±15.67	-1.11±4.38	20.96±15.70
Japan	NS	5.38±4.54	3.87±16.14	5.38±4.54	3.87±16.14
	NKNS	0.29±4.68	-10.91±16.60	0.29±4.68	-10.91±16.60
	OKNW	6.85±4.36	12.98±15.48	6.85±4.36	12.98±15.48
	NH	5.08±4.47	6.02±15.96	5.08±4.47	6.02±15.96
	IGK	-0.22±6.63	-8.66±23.91	-0.22±6.63	-8.66±23.91
Philippines	LGSP	-25.43±4.82	15.69±15.84	-25.43±4.82	15.69±15.84
	CB	-11.42±4.04	18.24±15.20	-11.42±4.04	18.24±15.20
All region		-0.35	15.92	-1.68	11.29

4.5.3 絶對海平面上升加速度

利用式(3.4)擬合潮位站資料估算 1993-2012 臺灣周圍海平面上升速率與加速度(圖 4.35、圖 4.36 與表 4.17)，其結果與測高速率並不一致，其原因可能為潮位站時間長短不一以及資料可能包含非線性變化等因素，進而影響海平面速率與加速度之估算。例如圖 4.35 與圖 4.36 中花蓮潮位站資料估算之速率與加速度與衛星測高網格成果皆不一致(圖 3.20 與圖 3.21)，其原因為花蓮潮位資料僅涵蓋 1998-2012，並且在 2008 年之前潮位資料海平面變化無明顯速率變動，但在 2008 年以後海平面明顯上升趨勢(圖 4.37)，導致擬合之加速度值較測高成果顯著。

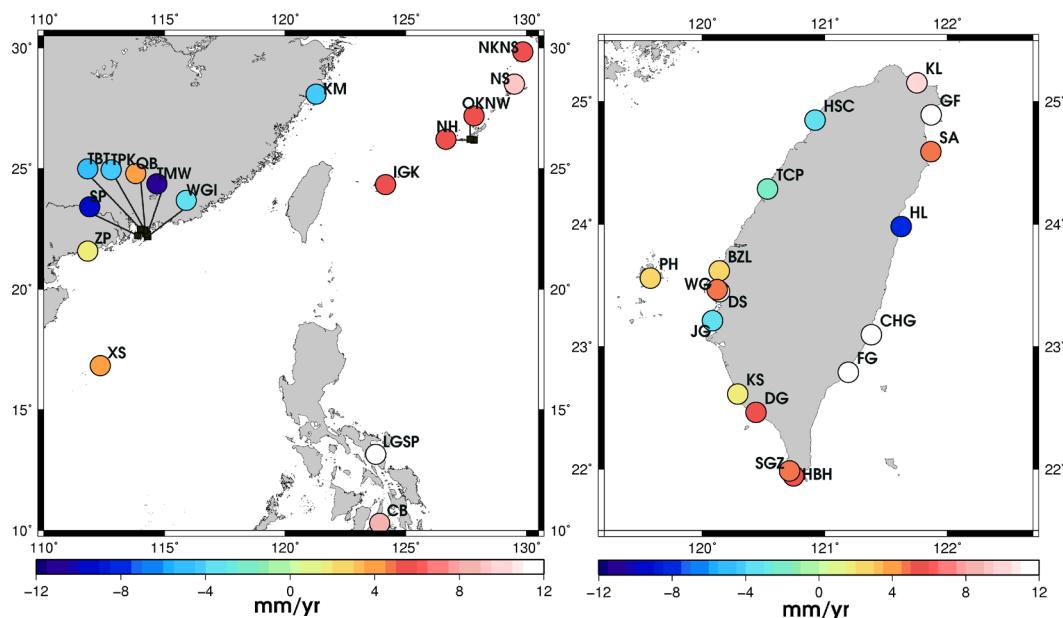


圖 4.35 1993-2012 臺灣周圍絕對海平面上升速率。點位為利用潮位站資料所估算

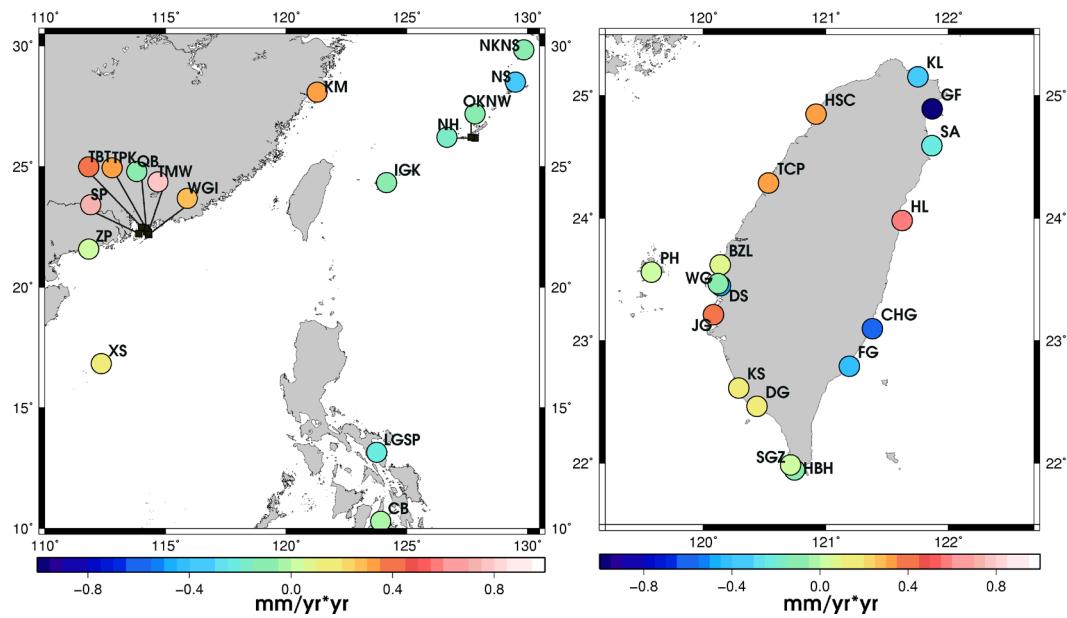


圖 4.36 1993-2012 臺灣周圍絕對海平面上升加速度。點位為利用潮位站資料所估算

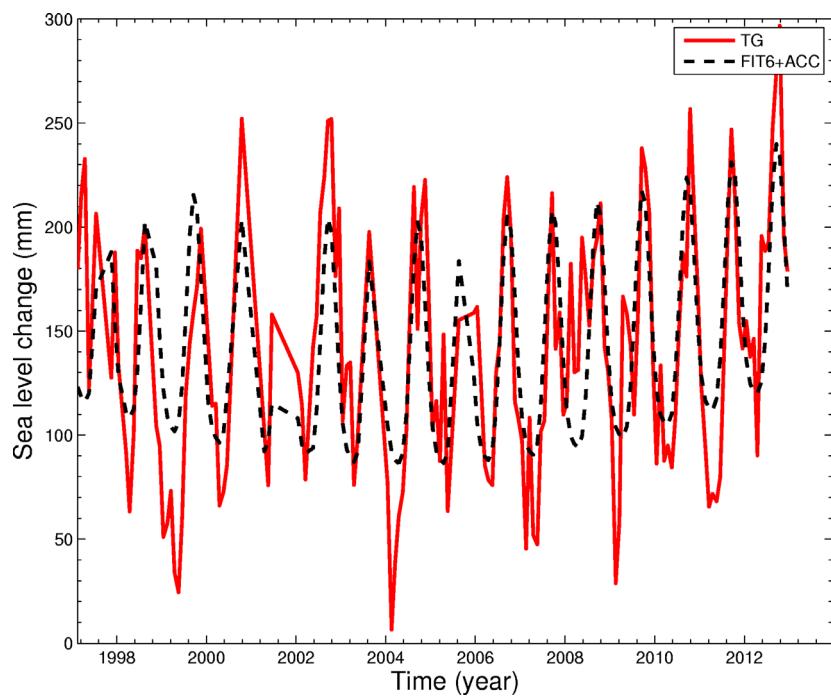


圖 4.37 經各項改正後之花蓮潮位站海平面變化。TG 為花蓮潮位站資料、FIT6+ACC 為式(3.4)擬合成果

表 4.17 1993-2012 臺灣周圍絕對海平面上升速率(a_1)與加速度(a_2)

Country	Station	a_1 (mm/yr)	a_2 (mm/yr 2)
China	ZP	1.87±2.92	0.02±0.14
	XS	3.63±3.00	0.13±0.15
	KM	-4.26±2.81	0.33±0.14
	WGI	-3.84±4.78	0.30±0.22
	QB	4.44±3.12	-0.13±0.15
	TMW	-10.86±6.16	0.79±0.37
	TPK	-4.21±2.99	0.33±0.15
	TBT	-5.18±3.25	0.38±0.16
	SP	-9.45±4.33	0.72±0.28
Taiwan	KL	10.20±1.57	-0.34±0.08
	GF	22.18±1.93	-1.16±0.12
	SA	4.70±2.01	-0.21±0.12
	HL	-8.36±2.84	0.56±0.17
	CHG	13.67±1.89	-0.56±0.09
	FG	12.37±1.66	-0.43±0.08
	HBH	5.31±3.91	-0.13±0.26
	SGZ	4.93±2.07	0.00±0.10
	DG	5.11±3.96	0.11±0.25
	KS	1.81±1.95	0.16±0.09
	JG	-3.06±2.21	0.39±0.11
	DS	13.73±2.32	-0.45±0.11
	WG	4.96±3.20	-0.05±0.15
	PH	2.68±1.86	0.07±0.09
	BZL	2.80±2.71	0.09±0.15
	TCP	-1.51±2.00	0.30±0.10
	HSC	-3.10±1.81	0.30±0.09
Japan	NS	9.08±2.37	-0.33±0.12
	NKNS	5.75±2.14	-0.15±0.10
	OKNW	5.44±2.43	-0.13±0.12
	NH	5.54±2.51	-0.15±0.12
	IGK	5.67±2.76	-0.12±0.13
Philippines	LGSP	11.58±2.48	-0.20±0.12
	CB	8.62±2.73	-0.04±0.13
All regions		3.40	0.01

4.6 第四章完成之工作項目

第四章目前已完成工作項目”針對臺灣鄰近及環島近岸海域，匯整相關觀測與研究文獻，分析並估算不同尺度海洋年際振盪變動對臺灣環島區域性長、短期之海平面昇降變動速率與加速度之影響，並依據驗潮站和衛星測高儀資料，更新計算臺灣四周海域驗潮站位長、短期之地表(地殼)垂直變動速率”以及”應用臺灣環島(含括國內七大商港)近岸海域長、短期之驗潮站紀錄，研提驗潮站潮位基準偏移變動之通用自動調校準則，並進行驗潮站潮位基準偏移校正，再應用移動平均法，先行估算並比較基準調校校前後之海平面昇降變動速率，而後，綜合整理並應用衛星測高資料所分析之相關結果，透過對照比較，探

討國內近岸驗潮站實測潮位紀錄應用於估算長、短期海平面升降變動速率之準確度、可靠度與可行性”中之潮位站資料處理、基準偏移改正以及地表垂直變動之估算，並評估潮位站各項改正對於海平面速率之影響、臺灣周圍近 10 年與近 20 年絕對海平面變化速率之計算以及臺灣周圍海平面加速度。由上述成果可知，海潮與逆氣壓因子對於估算海平面上升速率之影響較小，而基準偏移與測站地表垂直變動因子影響海平面上升速率最為顯著。

考慮氣候因子前後對於利用全部潮位站資料估算臺灣近二十年(1993-2012)絕對海平面上升速率分別為 3.5 mm/yr 與 2.3 mm/yr 。本研究亦評估 2003-2012 臺灣周圍絕對海平面上升速率，然而結果並不佳，其原因為使用時間段較短(僅十年)、時間段內海平面受氣候因子影響不顯著及資料品質問題等所導致。另外，本研究亦利用潮位站資料估算 1993-2012 臺灣周圍海平面上升速率與加速度，其成果與測高成果並不一致，其原因可能為潮位站時間長短不一以及資料品質問題等因素，進而影響成果。

第五章 臺灣沿岸淹水潛勢

本計畫為分析臺灣本島淹水潛勢，結合衛星測高技術監測之海平面網格資料、全球衛星定位系統(GPS)及精密水準測量得到的地表垂直變動量、海潮模型 TWN5T[林勝豐等人, 2014]計算之最大天文潮，以及數值高程模型(DEM)等，估算百年後(2112 年)臺灣沿岸靜態淹水情境。衛星測高資料如第三章節所述已經儀器改正、介質改正與地球物理因子改正。衛星測高網格解析度為 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ ，為方便後續結合使用，將網格內插成與數值高程模型(DEM)相同空間解析度($5m \times 5m$)。其他資料(地表垂直變動量與最大天文潮)亦同樣內插成與數值高程模型(DEM)相同空間解析度。本計畫於 5.1 節說明靜態淹水之情境與計算溢淹方法，5.2 節分析臺灣沿岸淹水潛勢圖，5.3 節說明本章完成之工作項目。

5.1 靜態淹水(Static Flooding)

5.1.1 溢淹情境說明

本研究利用三項可能造成臺灣沿岸溢淹的因子，分析在不同情境下的淹水潛勢，包含了海平面上升、地表垂直變動量以及最大天文潮(圖 5.1)，最後分析綜合所有因子下的淹水潛勢。溢淹評估基本的概念為將淹水深度與數值高程模型(DEM)之高度相減，若差值為負的區域便可視為未來的淹水範圍。然而此方法可能將內陸低窪地區視為淹水區域，造成淹水潛勢的高估。為了防止此情況，本研究利用區域成長法(region growing)來計算淹沒範圍與深度。區域成長法將於 5.1.2 小節詳細說明。

四項模擬情境分別為海平面上升、地表垂直變動、最大天文潮以及同時考慮上述三項因子，模擬溢淹時間為 2112 年。海平面上升情境的起算時間為 2012 年，推估未來海平面高度時是以 2012 年平均海平

面起算(平均測高 2012 年月平均資料)。為預估百年後(2112 年)海平面上升，故利用式(3.3)計算衛星測高網格資料之 1993-2012 海平面上升速率 a_1 乘上欲估算之時間長度，並自海水起算面 $SLR_{t(0)}$ 起算，如下式

$$SLR_{t(x)} = SLR_{t(0)} + a_1 \times (t(x) - t(0)) \dots \quad (5.1)$$

其中 $SLR_{t(x)}$ 為百年後(2112 年)海平面上升值， $t(x)$ 與 $t(0)$ 分別為 2112 年與 2012 年。然而，數值高程模型的基準(Geoid)與海平面資料的起算基準(Topex/Poseidon)並不相同(圖 5.1)，計算前須進行基準轉換的問題。須將海平面基準轉換至 Geoid。首先將海平面參考之 Topex/Poseidon 橢球面轉至 WGS84(World Geodetic System 1984)橢球面上，然後利用交大黃金維老師團隊製作的臺灣混合大地起伏模型(TWHYGEO2014)，此大地起伏模型之基準為 2001 臺灣高程基準(TWVD2001)，與本研究使用數值高程模型(DEM)基準一樣，故可將海平面參考基準轉換至 2001 臺灣高程基準(TWVD2001)，則海平面資料與數值高程模型(DEM)基準為一致(圖 5.1)。

地表垂直變動情境是在考慮地表垂直變動量影響下，而海平面高度維持於 2012 年平均海平面，預估百年後(2112 年)地表垂直變動因子對於溢淹影響量，如下式

其中 $DEM_{t(x)}$ 為百年後(2112 年)地表高程模型， $DEM_{t(0)}$ 為現今地表高程模型， $t(x)$ 與 $t(0)$ 分別為 2112 年與 2012 年。將 2012 年平均海平面與百年後預估地表高程模型比較時，同樣須將海平面基準轉換至 2001 臺灣高程基準(TWVD2001)。

最大天文潮是利用 TWN5T 模型[林勝豐等人, 2014]模擬臺灣周遭海域在 18.6 年潮汐週期中之最大潮差(圖 2.12)。最大天文潮情境是海平面維持於 2012 年平均情形下，結合最大天文潮與 2012 年平均海平面模擬淹水潛勢。在分析前，同樣需將海平面基準轉換至與數值地表高程模型相同(相對於 2001 臺灣高程基準(TWVD2001))。另外，本研究

亦考慮上述三個因子綜合影響，評估結合三項因子之情境對於臺灣本島淹水潛勢。

關於靜態淹水的淹沒建模框架不同於模擬短期淹水事件（例如河流淹水和颱風淹水）的現有模型，現有模型取主要決於若干參數，例如水面高、風速、地表高度、洪水發生持續時間和表面粗糙度等特徵。而靜態淹水僅取決於海平面高度和地表高程，也就是說，靜態淹水的溢淹區域認為它們的海拔低於海平面並且連接到被洪氾的相鄰小區。

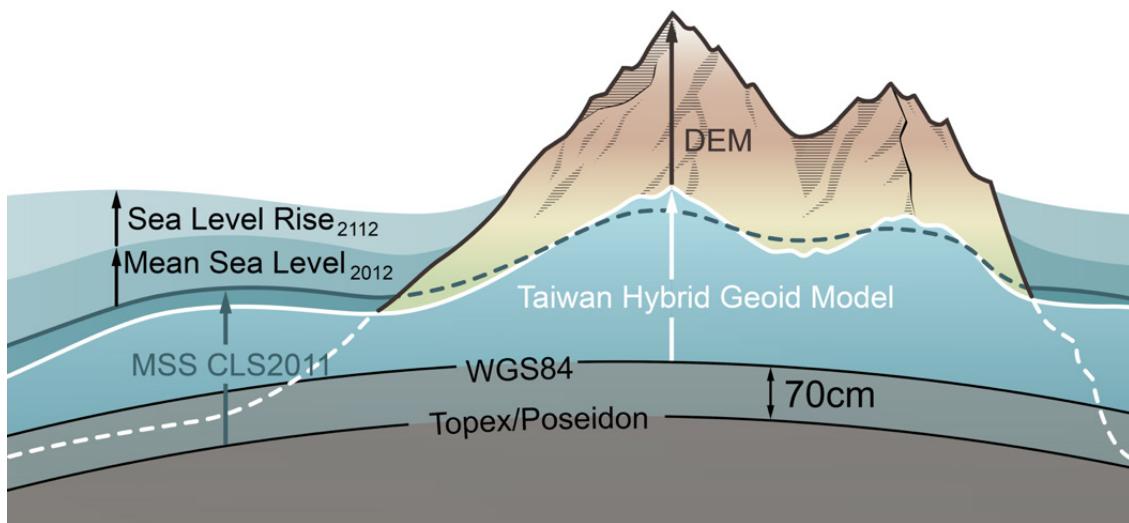


圖 5.1 靜態淹水示意圖

5.1.2 區域成長法(Region growing method)

區域成長法為一個簡單方法，從一個種子點區域逐漸搜尋擴大範圍，搜尋原則為相鄰區域若符合設定條件，則該區域被視為下一個種子點繼續搜尋，直至相鄰區域無符合設定之條件，才停止搜尋。

由於不同位置的海平面高度並不相同，因此先找出臺灣本島海岸線網格點(圖 5.2)，並將各個網格點皆視為欲搜尋之種子點。由沿岸的海平面高作為種子點，並由種子點判斷四周相鄰網格(圖 5.2)之地表高程是否低於海平面高，若是，則標示其淹水高度，並將其視為種子點，再往四周相鄰網格搜尋是否有低於海平面高。此步驟會持續循環，直到該海岸種子點完成其淹水區域的判斷。我們將一個海岸種子點的最

遠淹沒範圍設定在 50 km 的範圍，表示海平面溢淹平面距離不會超過 50 km。當一個海岸種子點完成他範圍內的淹水區域判斷，便會讀取下一個海岸種子點的海平面高度並重新執行一次區域成長法，若此次淹沒範圍的水深超過前次的淹沒水深，則該位置的淹沒水深便會被更新至較深的淹沒水深並視為種子點繼續往外擴張；反之則停止擴張。此區域成長法會不斷重複操作，直到所有海岸種子點都完成區域成長法的判斷過程。

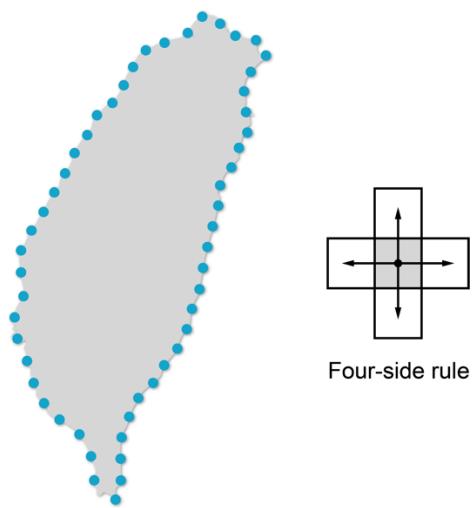


圖 5.2 臺灣本島海岸線網格點示意圖與區域成長法搜尋方式

5.2 臺灣沿岸靜態淹水成果

5.2.1 臺灣沿岸淹水潛勢圖

本研究欲分析百年後(2112 年)臺灣本島淹水潛勢。海平面上升因子造成的淹沒面積為 187.314 km^2 (約佔陸地面積 0.5%)，地表垂直變形為 964.064 km^2 (約陸地面積 2.7%)，最大天文潮為 771.811 km^2 (約陸地面積 2.1%)，而同時考慮三個影響因子所計算出的總淹沒面積則為 1758.997 km^2 ，約為本島陸地面積之 4.9%，如表 5.1 所示。由表可知，若依目前情形持續發生，百年後(2112 年)地表垂直變形因素將是三個情境中最嚴重的一個，其總淹沒面積、最大淹沒水深以及平均水深都為三者最嚴重的數值。最大天文潮的影響雖非最為嚴重，但仍然造成

2.1%陸地面積淹沒，同樣不可小覷。海平面上升造成的溢淹程度較輕微，僅造成 0.5%陸地面積淹沒，但是海平面上升因子是迫在眉睫且持續性的影響，因此在未來防範溢淹時三者因子皆為須考慮之因素。

本島淹水潛勢威脅最為嚴重區域為西部沿海，主要影響區域為彰化雲林、嘉義與台南(圖 5.3)。在同時考慮三個影響因子情況下，彰化地區海水入侵最遠可至離海岸線 4.4 km (圖 5.4)，而雲林與嘉義地區最遠可至距離海岸線 16.7 km (圖 5.5)，而臺南最遠可至距離海岸線 18.0 km (圖 5.6)。西南部沿海受到淹水潛勢威脅較嚴重的原因主要為西部海潮潮差較大(圖 2.12)且西南部沿海因超抽地下水造成地表顯著下沉(圖 2.11)。

本研究亦分析百年後(2112 年)淹水潛勢對於核能電廠周圍之影響情形。核電廠分別為位於新北市之核一($25^{\circ}17'11''N, 121^{\circ}35'5''E$)、核二($25^{\circ}12'10''N, 121^{\circ}39'46''E$)與核四($25^{\circ}02'19''N, 121^{\circ}55'27''E$)發電廠以及位於屏東縣之核三($21^{\circ}57'29''N, 120^{\circ}45'6''E$)發電廠。在同時考慮三個影響因子情形下，淹水潛勢對於四個核能電廠威脅並不大，受影響區域僅在當地沿岸(圖 5.7)。

表 5.1 不同情境下的淹水潛勢比較

<i>Items</i>	<i>Sea-level rise</i>	<i>Vertical land motion</i>	<i>Highest astronomical tide</i>	<i>Total inundation</i>
<i>Inundation area (km²)</i>	187.314	964.064	771.811	1758.997
<i>Maximum inundation depth (m)</i>	-3.98	-9.00	-5.99	-11.99
<i>Mean inundation depth (m)</i>	-0.82	-2.21	-1.41	2.95

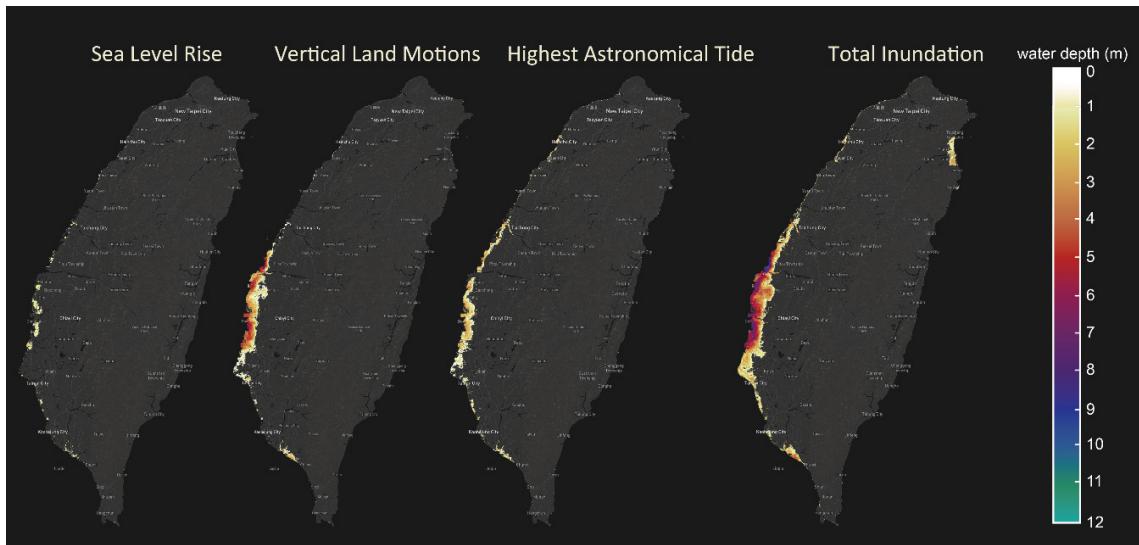


圖 5.3 不同情境下的淹水潛勢圖。Sea level rise、Vertical Land Motions、Highest Astronomical Tide 與 Total Inundation 分別為海平面上升情境、地表垂直變動量情境、最大天文潮情境與同時考慮三個影響因子之淹水潛勢

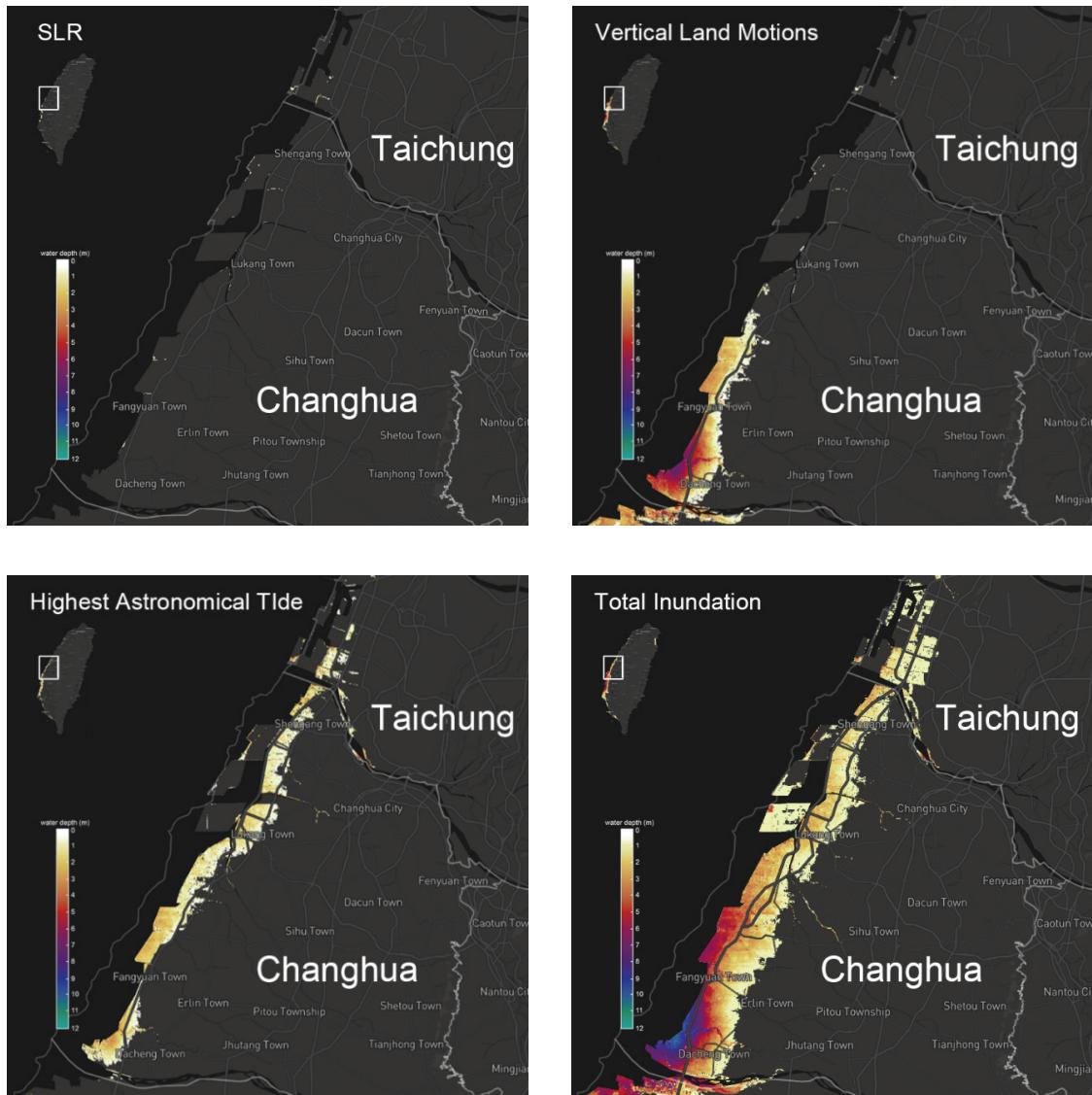


圖 5.4 台中與彰化淹水潛勢圖。SLR、Vertical Land Motions、Highest Astronomical Tide 與 Total Inundation 分別為海平面上升情境、地表垂直變動量情境、最大天文潮情境與同時考慮三個影響因子之淹水潛勢

勢

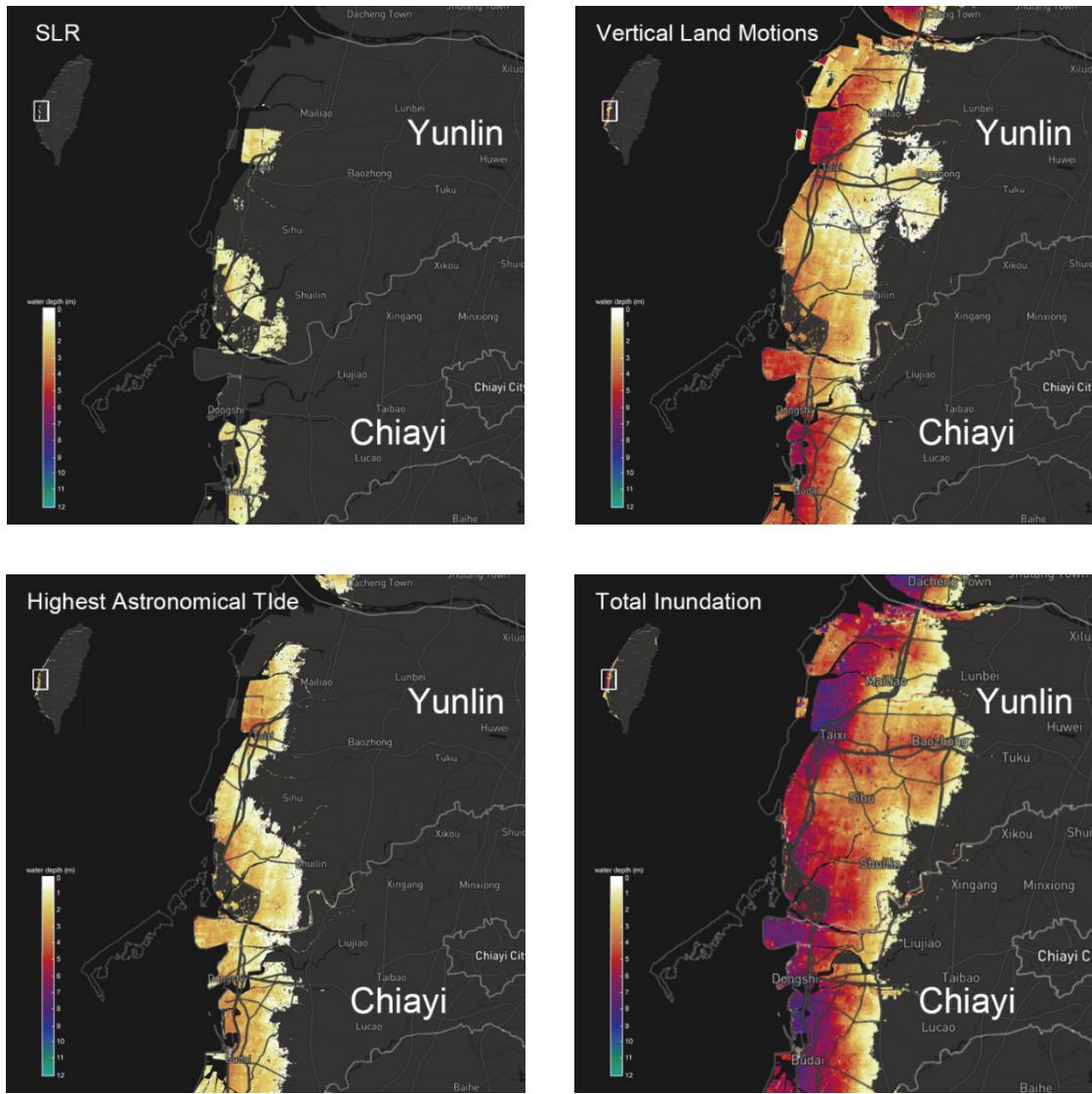


圖 5.5 雲林與嘉義淹水潛勢圖。SLR、Vertical Land Motions、Highest Astronomical Tide 與 Total Inundation 分別為海平面上升情境、地表垂直變動量情境、最大天文潮情境與同時考慮三個影響因子之淹水潛勢

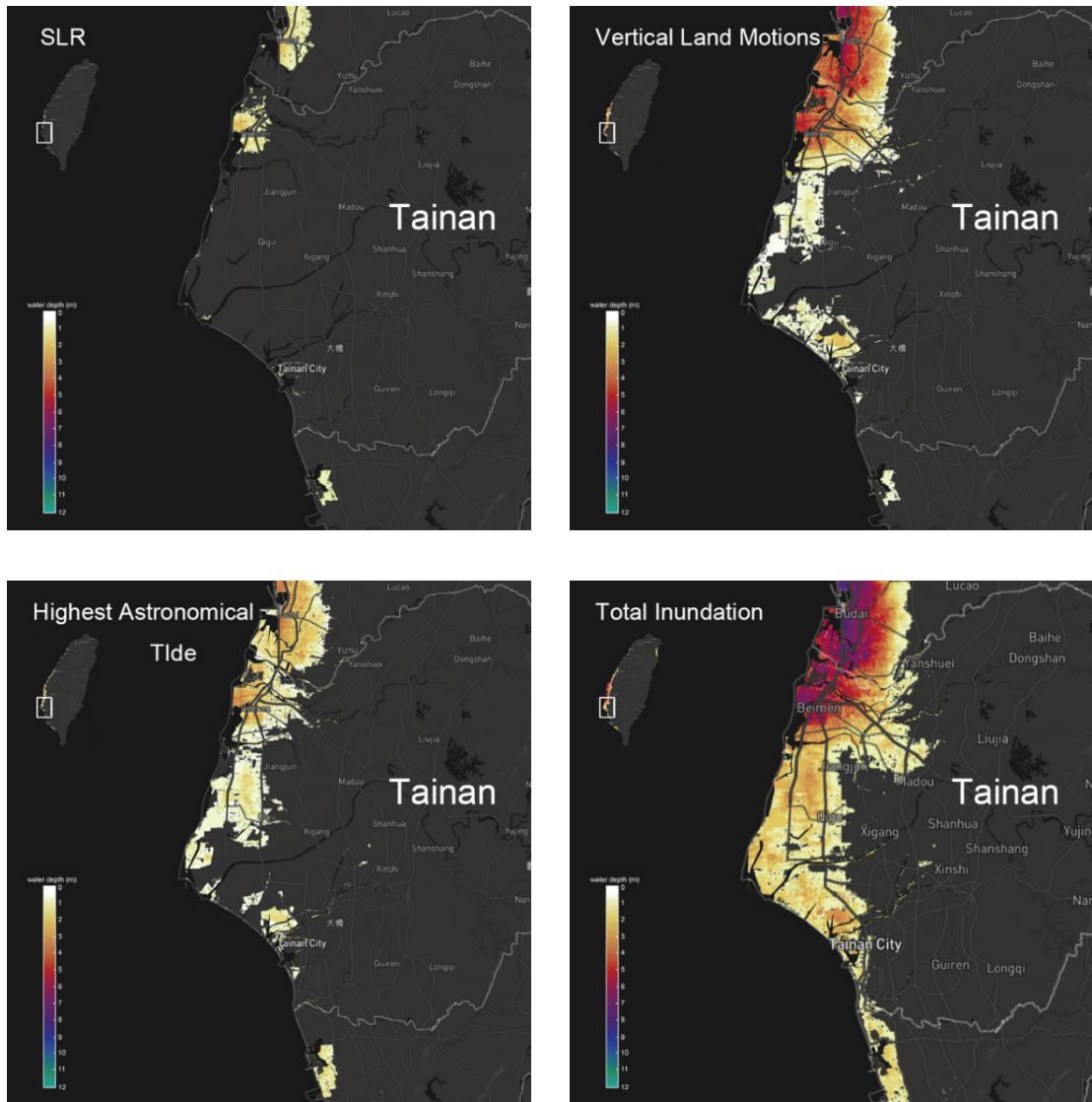


圖 5.6 台南淹水潛勢圖。SLR、Vertical Land Motions、Highest Astronomical Tide 與 Total Inundation 分別為海平面上升情境、地表垂直變動量情境、最大天文潮情境與同時考慮三個影響因子之淹水潛勢

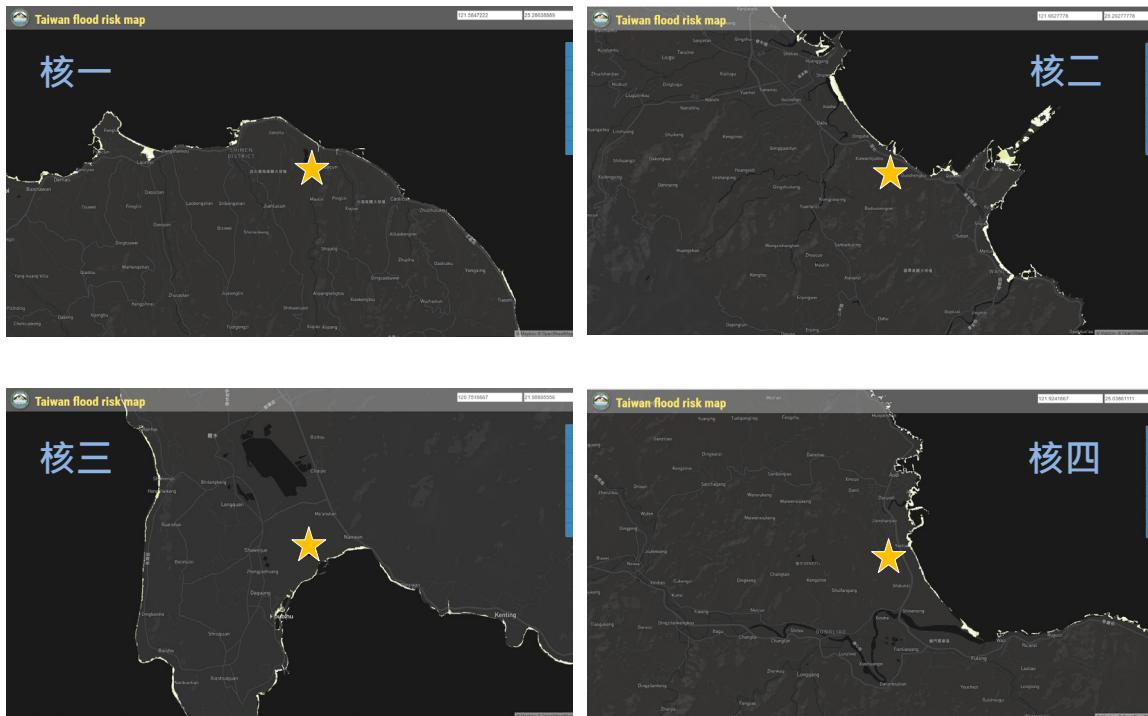


圖 5.7 核能發電廠周圍之淹水潛勢圖。星點表示核電廠位置

5.2.2 濕地損失評估

本研究亦針對溢淹造成國家重要濕地面積損失進行統計與分析。重要沿岸濕地多數集中於西部海岸之嘉義與台南等地(圖 2.13)，而兩縣市為本島淹水潛勢威脅較為嚴重區域(圖 5.5 與圖 5.6)。西部沿海濕地大多受到海平面上升威脅，主要影響範圍從大渡河口(Dadu Estuary)濕地到鹽水溪口(Yanshuei Estuary)濕地(表 5.2)。另一方面，東部濕地遭受到的淹沒風險相對較輕，但仍不可小覷，其中五十二甲(52-jia)濕地幾乎完全淹沒於海水下。臺灣沿岸重要濕地平均面積將損失 75% (表 5.2)，也就是說在此情境下，海平面上升將對臺灣重要的沿海濕地造成相當大威脅，這是一個非常重要的警訊。其中臺南市內有兩個重要國際(International importance)濕地-四草濕地(Sihcao Wetland)與曾文河口濕地(Zengwun Estuary Wetland)將完全淹沒於海水之下，損失面積分別高達 99%與 89% (圖 5.8)。這兩個濕地為保育類動物-黑面琵鷺度冬棲息地之一，在冬季，超過一半的黑面琵鷺將遷移到這兩個濕地，若此兩個濕地消失亦同時將對黑面琵鷺造成極大的衝擊。

表 5.2 在綜合情境下濕地損失比例統計表

Name	Location	Total inundation (%)
Wazihwei Wetland	New Taipei City	82.59
Lanyang Estuary Wetland	Yilan County	44.62
52-jia Wetland	Yilan County	99.51
Wuwei Harbor Wetland	Yilan County	27.15
Hualien Estuary Wetland	Hualien County	47.77
Beinan Estuary Wetland	Taitung County	3.56
Yanshuei Estuary Wetland	Tainan City	96.97
Sihcao Wetland	Tainan City	99.47
Zengwun Estuary Wetland	Tainan City	88.51
Cigu Salt Pan Wetland	Tainan City	98.98
Beimen Wetland	Tainan City	99.77
Bajhang Estuary Wetland	Chiayi County and Tainan City	100.00
Budai Salt Pan Wetland	Chiayi County	100.00
Haomeiliao Wetland	Chiayi County	100.00
Puzih Estuary Wetland	Chiayi County	96.80
Aogu Wetland	Chiayi County	100.00
Dadu Estuary Wetland	Taichung City and Changhua County	89.54
Gaomei Wetland	Taichung City	31.38
Siangshan Wetland	Hsinchu City	96.33
Sinfong Wetland	Hsinchu County	77.17
Danshuei River Mangrove Wetland	New Taipei City	0.00
Mean		75.24

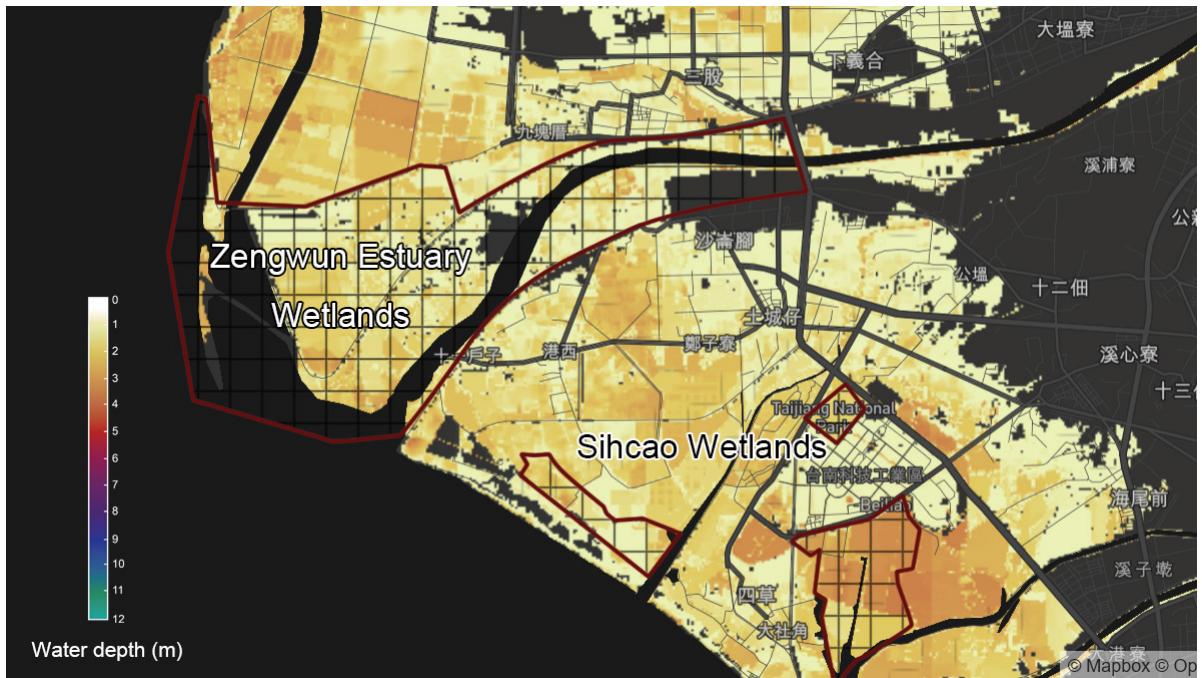


圖 5.8 四草濕地(Sihcao Wetland)與曾文河口濕地(Zengwun Estuary Wetland)淹水潛勢圖

5.3 第五章完成之工作項目

第五章已完成工作項目”依據臺灣四周海域長、短期海平面升降變動速率與加速率，掌握臺灣環島近岸海域未來海平面升降變動之趨勢，評估未來可能造成之海岸溢淹區域與範圍，並探討對海岸環境之衝擊影響”中評估未來可能造成之海岸溢淹區域與範圍，並探討對海岸環境之衝擊影響。由上述成果可知，結合三個影響因子所計算出的總淹沒面積則為 1758.997 km^2 ，約為本島陸地面積之 4.9%。而地表垂直變形與最大天文潮因子較為三個情境中較為嚴重的兩個因子，將分別造成 964.064 km^2 (約陸地面積 2.7%) 與 771.811 km^2 (約陸地面積 2.1%) 的淹沒面積，而海平面上升造成 0.5% 陸地面積淹沒。此外，臺灣本島中受到淹潛勢威脅程度較嚴重的區域為彰化、雲林、嘉義以及台南，主要為原因為西部海潮潮差較大且西南部沿海因超抽地下水造成地表顯著下沉。

第六章 結論與建議

本研究目的，在引進及應用國際海氣象資源，建置專業整合環境，從海洋到海岸，整合衛星測高、地科及大氣之科研成果，統合 AVISO、RADs 衛星測高及 PSMSL、UHSLC 全球平均海平面資料庫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，應用內政部地政司衛星測量中心所提供之 1/20,000 航照正射影像所製作的臺灣地區 5mx5m 數值高程模型(DEM)，擴展海岸科技學能，強化跨領域之合作研究，並就臺灣環島近岸海域之分區特性，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，進而計算分析近 20 年期間(1993~2012)之平均海平面升降變動速率、加速度率與地殼變動速率，詳實掌握未來海平面升降變動之趨勢，探討未來百年(2112)可能必須面對之海岸溢淹區域與範圍，週嚴地評估全球暖化、氣候變遷對海岸環境所造成之衝擊影響，強化總體性之海岸保育、濕地保護與近岸溢淹防災資訊。相關研究結論與建議，綜合歸納如后。

6.1 結論

1. 利用改正前、後潮位站資料估算之海平面上升速率有顯著差異，其中海潮與逆氣壓改正影響較小，分別為 $0\sim2\text{ mm/yr}$ 與 $0\sim1\text{ mm/yr}$ ；而偏移量改正量之平均值為 7.95 mm/yr ，潮位站地表垂直變動速率平均值約 5.05 mm/yr ，顯示基準偏移與地表垂直變動因子之影響較為顯著，遠大於全球平均海平面之上升速率 $3.2\pm0.4\text{ mm/yr}$ (涵蓋時間為 1993-2012 年) [Cazenave and Cozannet, 2014]。因此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平面上升速率，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

部的箔子寮、東石、後壁湖以及塭港潮位站垂直變動速率每年下沉約 22-30 mm；而臺灣附近區域潮位站除了香港橫瀾島測站周圍地表呈現每年下沉 15 mm 外，其他香港、菲律賓潮位站與日本等潮位站周圍地表皆無明顯垂直變動情形。顯示地表垂直變動之改正為海平面上升計算所需之重要因子。

3. 利用多變量擬合衛星測高與潮位站資料可估算出氣候因子對海平面變化之影響和未受氣候因子影響之海平面上升速率。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平面上升速率由北(約 2~3 mm/yr)往南(8~12 mm/yr)逐漸增快；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平面上升速率在各海域則較為一致，速率約在 -2~4 mm/yr。比較上述兩結果，位於最南部的菲律賓(靠近赤道)海平面上升速率變化最多，由 6~9 mm/yr 降至 2~4 mm/yr。對於整個臺灣周圍海域海平面而言，考慮氣候因子下，衛星海洋數據存檔、驗正與解釋(AVISO)測高資料估算 1993-2012 絕對海平面上升速率為 2.43 ± 0.32 mm/yr，而氣候因子造成影響量約 2.80 mm/yr，其海平面速率也接近利用百年潮位站資料估算之結果(~2 mm/yr; [Douglas, 2001])，顯示移除低頻氣候之影響後所估算之海平面變化速率將更接近長期資料所估算之成果。
4. 修正氣候因子前、後之衛星海洋數據存檔、驗正與解釋(AVISO)測高資料估算 1993-2015 絶對海平面上升速率分別為 3.52 ± 0.25 mm/yr 及 2.55 ± 0.18 mm/yr。因為 2014-2015 年聖嬰現象非常強烈，導致近 2014-2015 臺灣周圍海平面顯著下降。相較於 1993-2012 臺灣周圍上升速率，1993-2015 將會降低 1.71 mm/yr。
5. 在未修正氣候因子影響下，2003-2012 絶對海平面上升速率會受到氣候因子影響，臺灣周圍海平面上升速率由北往南逐漸增快，而且在臺灣以南的海平面速率幾乎皆大於 12 mm/yr。然而修正氣候因子後所估算之 2003-2012 絶對海平面上升速率在空間上分布並不一致。其原因為使用時間段較短(僅十年)以及近十年(2003-2012)聖嬰-南

方振盪(ENSO)與太平洋年代際振盪(PDO) 現象並不明顯，導致擬合成果不佳。

6. 聖嬰-南方振盪(ENSO)現象主要影響的海平面範圍為緯度 $\pm 20^{\circ}$ 以內，且聖嬰-南方振盪(ENSO)現象與菲律賓周圍海平面變化呈現相反相位情形，而太平洋年代際振盪(PDO)現象則影響整個臺灣周圍海域。
7. 利用衛星測高資料估算近二十年(1993-2012 與 1993-2015)臺灣周圍海平面上升速率與加速度情形。在未考慮氣候因子情形下，1993-2012 估算成果與 1993-2015 成果並不一致，即使考慮氣候因子後加速度部分仍然有差異。表示 20 年資料仍不足以求得精確之加速度。由 Douglas[1992]研究成果可知，資料時間段超過 50 年以上所估算之加速度才會趨近穩定。
8. 由模擬溢淹成果可知，結合三個影響因子所計算出的 2112 總淹沒面積為 1758.997 km^2 ，約為臺灣本島陸地面積之 4.9%。而地表垂直變形與最大天文潮因子為三個情境中較為嚴重的兩個因子，各自造成 964.064 km^2 與 771.811 km^2 (約陸地面積 2.7% 與 2.1%) 的淹沒面積。雖然海平面上升造成的溢淹程度較輕微，僅造成 0.5% 陸地面積淹沒，為三者因子影響程度最小，但是海平面上升因子是迫在眉睫且持續性的影響，因此在未來防範溢淹時三者因子皆為須考慮之因素。此外，臺灣本島中受到淹潛勢威脅程度較嚴重的區域為彰化、雲林、嘉義與臺南，對於雲林與嘉義以及臺南地區，海水入侵最遠將淹至距離海岸線 16.7 km 及 18.0 km 。
9. 本研究亦針對百年後(2112 年)溢淹造成國家重要濕地面積損失進行統計與分析。臺灣本島重要沿岸濕地幾乎皆受到淹水潛勢威脅，沿岸重要濕地平均面積將損失 75%，表示海平面上升將對臺灣重要的沿海濕地造成嚴重衝擊與影響。

6.2 建議

1. 利用 20 年資料不足以精確求得海平面上升速率與加速度。潮位站資料雖然較長，但點位分布不均。故可結合衛星測高與潮位站資料進行臺灣周圍海平面重建(sea level reconstruction)，以估算海平面上升速率與加速度。
2. 利用全球定位系統(GPS)連續觀測站，計算臺灣地表垂直變動速率，並分析在不同時期變動之現象。
3. 本計畫規劃之總期程自民國 102 年起，共計 4 年。今年為統整前三年計畫成果，並分析臺灣附近海域之速率與加速度特性以及海平面上升造成本島之淹水潛勢。希冀四年來計畫之相關研究成果可供政府海岸以及土地管理部門制定因應全球氣候變遷相關災害的調適政策。

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. Alley, R. B., P. U. Clark, P. Huybrechts, and I. Joughin (2005), Ice-Sheet and Sea-Level Changes, *Science*, 310(5747), 456-460, doi: 10.1126/science.1114613.
3. Amante, C., and B. W. Eakins (2009), ETOPO1 1 Arc-Minute Global Relief Model: Procedures, data sources and analysis, *NOAA Tech. Memo. NESDIS NGDC-24, National Geophysical Data Center, NOAA*, doi:10.7289/V5C8276M.
4. Andersen, O. B., and G. Piccioni (2016), Recent Arctic sea level variations from satellites, *Frontiers in Marine Science*, 3, doi: 10.3389/fmars.2016.00076.
5. AVISO and PODAAC User Handbook (2001), IGDR and GDR Jason Products.
6. 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.
7. 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.
8. 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.

9. Cazenave, A., and R. S. Nerem (2004), Present-day sea level change: Observations and causes, *Reviews of Geophysics*, 42(3).
10. 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.
11. 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.
12. 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.
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, 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.

17. 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.
18. 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.
19. 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.
20. Chovitz, B.H. (1983), Geodetic results from Seasat, *Marine Geodesy* 7, 315-330.
21. 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.
22. 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.
23. 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.
24. Dasgupta, S., B. Laplante, S. Murray, and D. Wheeler (2009), Sea-level rise and storm surges: A comparative analysis of impacts in developing countries, Policy Research Working Paper 4901.
25. Douglas, B. C. (1992), Global sea level acceleration, *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 97, 12699-12706, doi: 10.1029/92JC01133.

26. 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.
27. 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.
28. 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.
29. 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.
30. Haigh, I. D., T. Wahl, E. J. Rohling, R. M. Price, C. B. Pattiariatchi, F. M. Calafat, and S. Dangendorf (2014), Timescales for detecting a significant acceleration in sea level rise, *Nature Communications*, 5, doi: 10.1038/ncomms4635.
31. 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.
32. Hansen, J., M. Sato, P. Hearty, R. Ruedy, M. Kelley, V. Masson-Delmotte, G. Russell, G., Tselioudis, J. Cao, E. Rignot, I. Velicogna, B. Tormey, B. Donovan, E. Kandiano, K. von Schuckmann, P. Kharecha, A. N. Legrande, M. Bauer, and K. W. Lo (2016), Ice melt, sea level rise and superstorms: evidence from paleoclimate data, climate modeling, and modern observations that 2 °C global warming could be dangerous, *Atmos. Chem. Phys.*, 16(6), 3761-3812, doi: 10.5194/acp-16-3761-2016.

33. Hastie, T., and R. Tibshirani (1990), Exploring the nature of covariate effects in the proportional hazards model, *Biometrics*, 46, 1005–1016.
34. 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.
35. Hwang, C., Y.S. Hsiao, H.C. Shih, M. Yang, K.H. Chen, R. Forsberg, and A. V. Olesen (2007), Geodetic and geophysical results from a Taiwan airborne gravity survey: Data reduction and accuracy assessment, *J. Geophys. Res.*, 112, B04407.
36. 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.
37. 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.
38. 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.
39. Jevrejeva, S., J. C. Moore, A. Grinsted, A. P. Matthews, and G. Spada (2014), Trends and acceleration in global and regional sea levels since 1807, *Global and Planetary Change*, 113, 11-22, doi: 10.1016/j.gloplacha.2013.12.004.
40. 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.

41. 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.
42. 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.
43. Leatherman, P. S., K. Zhanng, and B.C. Douglas (2000), Sea level rise drives coastal erosion, EOS Transactions, Agu, 81, 55-57.
44. 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).
45. 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.
46. Mantua, N. J. and S. R. Hare (2002), The Pacific Decadal Oscillation, *Journal of Oceanography*, 58, 35–44.
47. Mengel, M., A. Levermann, K. Frieler, A. Robinson, B. Marzeion, and R. Winkelmann (2016), Future sea level rise constrained by observations and long-term commitment, *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 113(10), 2597–2602, doi: 10.1073/pnas.1500515113.
48. 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.

49. 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.
50. 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.
51. 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.
52. 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.
53. 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.
54. Newman, M., G.P. Compo, and M.A. Alexander (2003), ENSO-forced variability of the Pacific decadal oscillation, *Journal of Climate*, 16, 3853–3857.
55. Nghiem, S. V., I. G. Rigor, P. Clemente-Colón, G. Neumann, and P. P. Li (2016), Geophysical constraints on the Antarctic sea ice cover, *Remote Sensing of Environment*, 181, 281-292, doi: 10.1016/j.rse.2016.04.005.
56. Nicholls, R.J., and A. Cazenave (2010), Sea-Level Rise and Its Impact on Coastal Zones, *Science*, 328, 1517-1520.
57. Parker, A., and C. D. Ollier (2016), Coastal planning should be based on proven sea level data, *Ocean & Coastal Management*, 124, 1-9, doi: 10.1016/j.ocecoaman.2016.02.005.
58. Passeri, D. L., S. C. Hagen, S. C. Medeiros, M. V. Bilskie, K. Alizad,

- and D. Wang (2015), The dynamic effects of sea level rise on low-gradient coastal landscapes: A review, *Earth's Future*, 3(6), 159-181, doi: 10.1002/2015EF000298.
59. 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.
 60. Permanent Service for Mean Sea Level (PSMSL) (2014), Tide Gauge Data, Retrieved 03 Nov 2014 from <http://www.psmsl.org/data/obtaining/>.
 61. 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.
 62. Rosmorduc, V., J. Benveniste, E. Bronner, S. Dinardo, O. Lauret, C. Maheu, M. Milagro, and N. Picot (2011), Radar Altimetry Tutorial, CSL.
 63. Santamaría-Gómez, 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.
 64. Schwartz, M. L. 2005, Encyclopedia of Coastal Science, Dordrecht, The Netherlands: Springer, 1-1086.
 65. 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
 66. Shum, C. K., J. C. Ries, and B. D. Tapley (1995), The accuracy and applications of satellite altimetry, *Geophysical Journal International*, 121, 321-336.

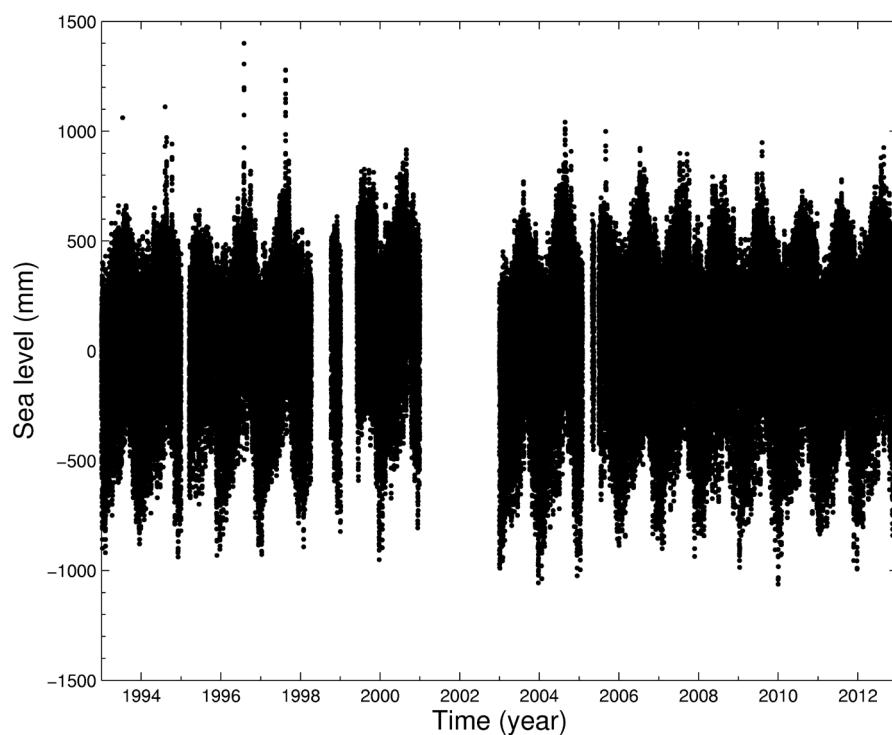
67. Shum, C. K., and C. Y. Kuo (2011), Observation and geophysical causes of present-day sea level rise, In: Climate Change and Food Security in South Asia, R. Lal, M. Sivakumar, S. Faiz, A. Rahman, and K. Islam (Eds.), Part 2, Chapter 7, 85-104, doi: 10.1007/978-90-481-9516-9_7.
68. Torge, W. (1991), *Geodesy*, W. de Gruyter, Berlin.
69. 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.
70. Wagner, C.A. (1991), How well do we know the deep ocean tides An intercomparision of altimeter, hydrodynamic and gauge data, *Marine Geodesy*, 16, 118-140.
71. Wang, J., W. Gao, S. Xu, and L. Yu (2012), Evaluation of the combined risk of sea level rise, land subsidence, and storm surges on the coastal areas of Shanghai, China, *Climatic Change*, 115(3-4), 537-558, doi: 10.1007/s10584-012-0468-7.
72. 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.
73. 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.
74. 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.
75. 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.

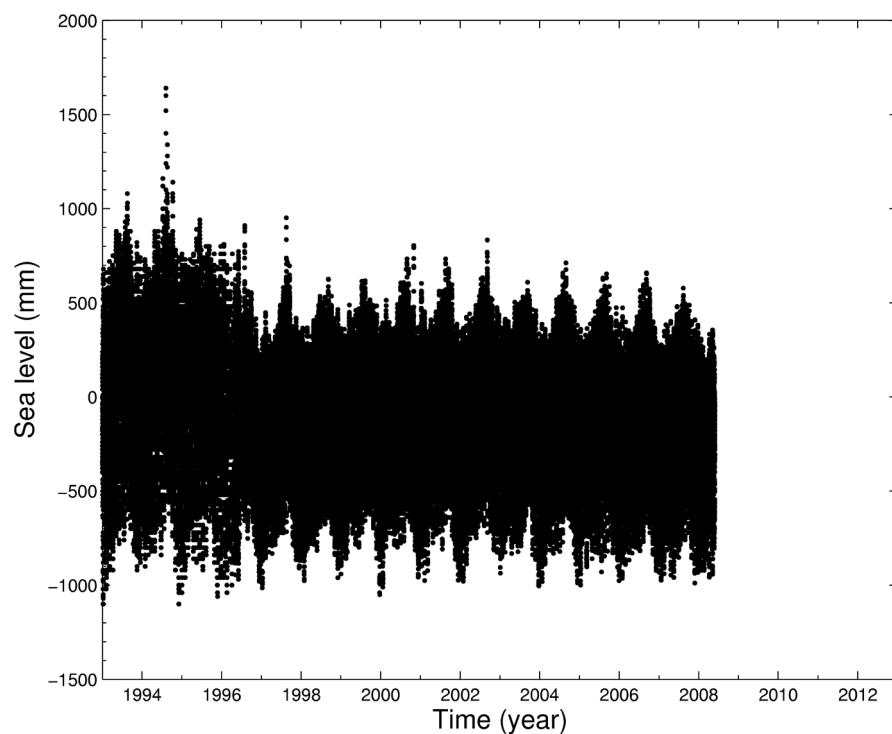
76. Wunsch, C. (1972), Bermuda sea level in relation to tides, weather and baroclinic fluctuations, *Reviews of Geophysics and Space Physics*, 10, 1-49.
77. Wunsch, C., and D. Stammer (1997), Atmospheric loading and the oceanic “inverted barometer” effect, *Reviews of Geophysics*, 35, 79-107.
78. Zhan, 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)
79. Yi, S., W. Sun, K. Heki, and A. Qian (2015), An increase in the rate of global mean sea level rise since 2010, *Geophysical Research Letters*, 42(10), 3998-4006, doi: 10.1002/2015GL063902.
80. 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.
81. 內政部國土測繪中心，2014。102 年度「高程基準檢測工作」報告書。
82. 林勝豐、馬名軍、陳進益、羅聖宗、滕春慈，2014，臺灣周圍海域潮位模擬結果比對分析，天氣分析與預報研討會。
83. 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。
84. 陳亮全、林李耀、陳永明、張志新、陳韻如、江申、于宜強、周仲島、游保彬，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。
85. 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。

86. 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。
87. 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。
88. 郭重言、林立青、藍文浩、莊文傑、李俊穎，2016，臺灣海域未來平均海平面升降變動率之推估，交通部運輸研究所出版，台北市。
89. 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。
90. 廖貞如，2010，從大地水準面及地形推估地面淹水狀況。國立中央大學地球物理研究所碩士論文，桃園市。

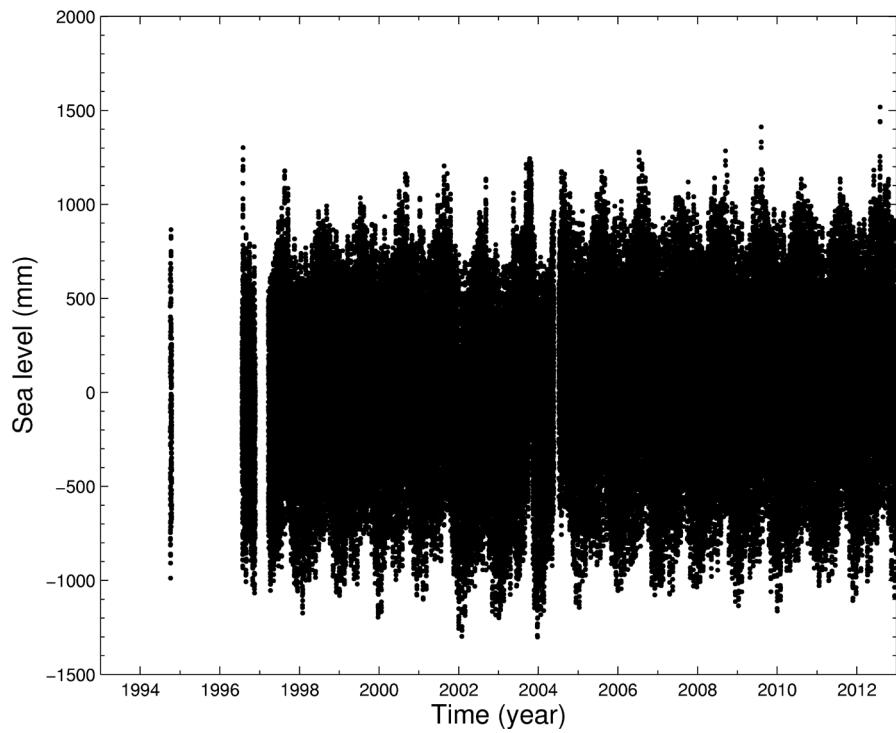
附錄一 1993-2012 中央氣象局逐時潮位站資料



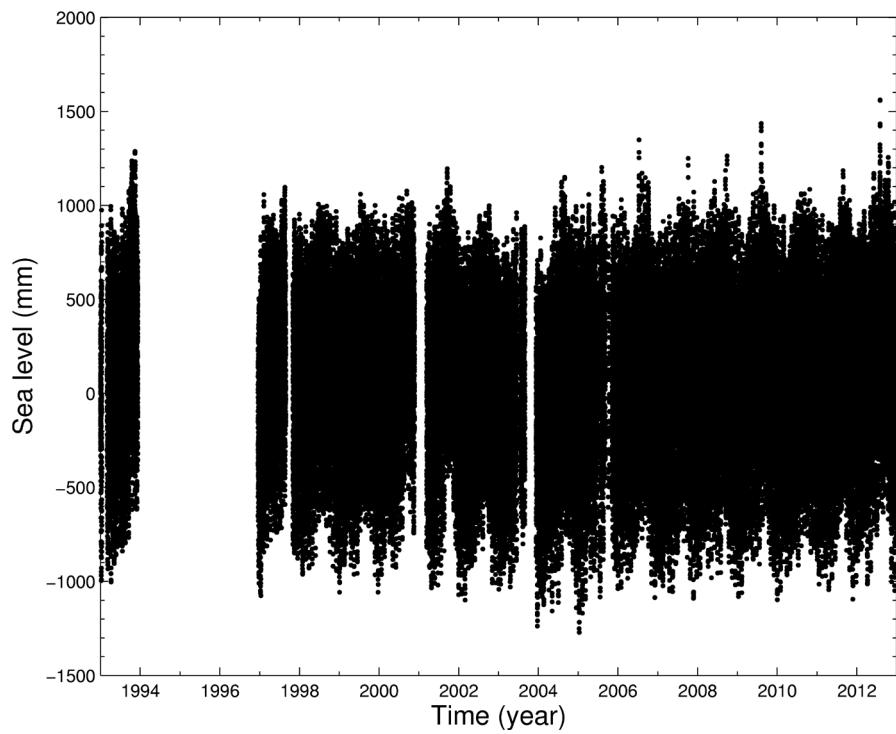
附圖 1.1 基隆潮位站逐時資料



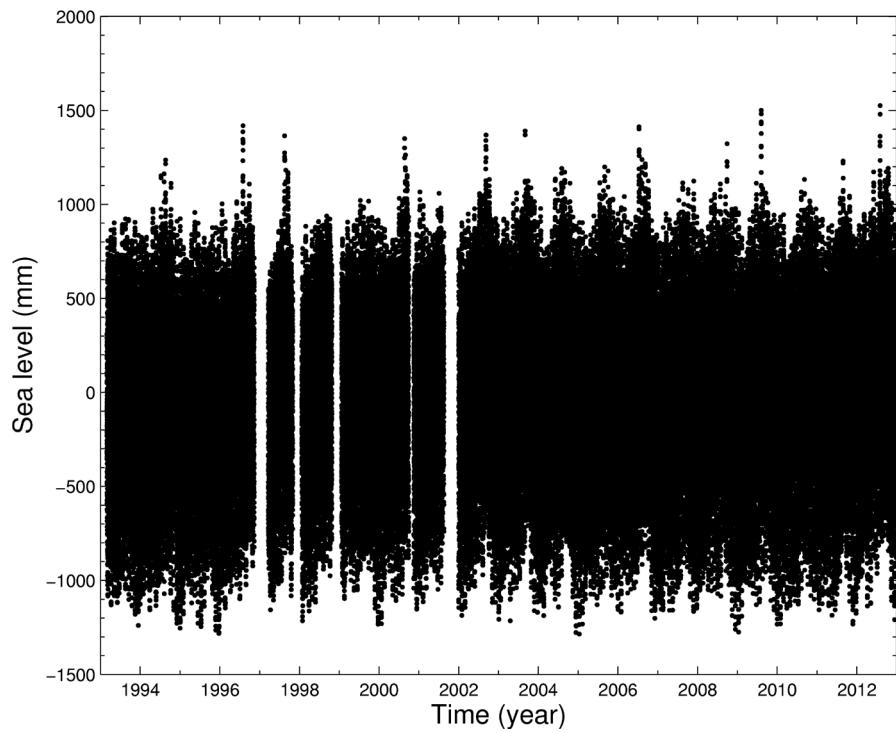
附圖 1.2 梓仔腳潮位站逐時資料



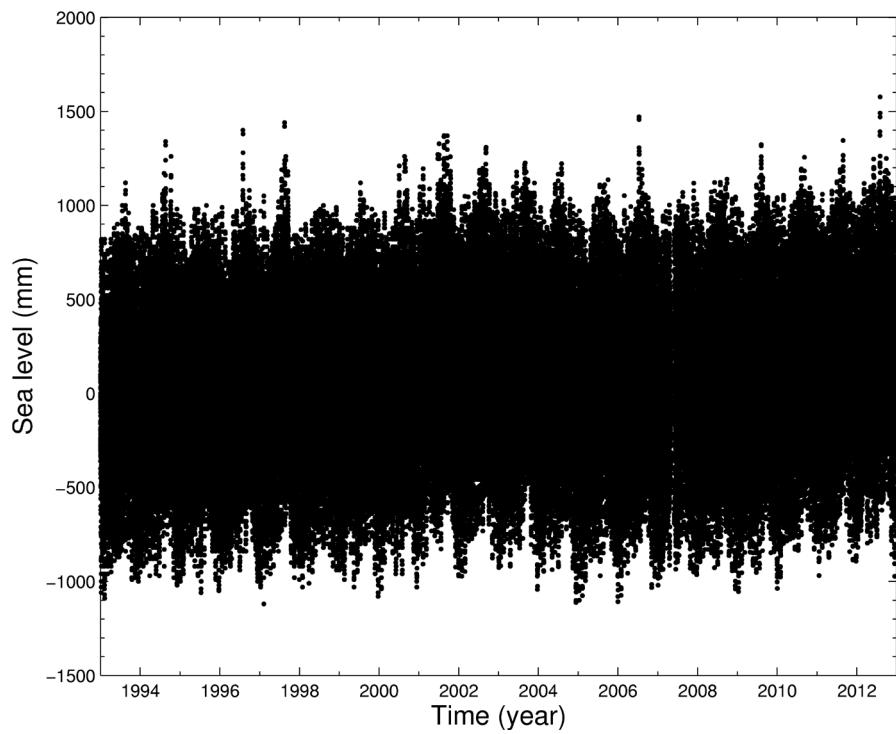
附圖 1.3 蘇澳潮位站逐時資料



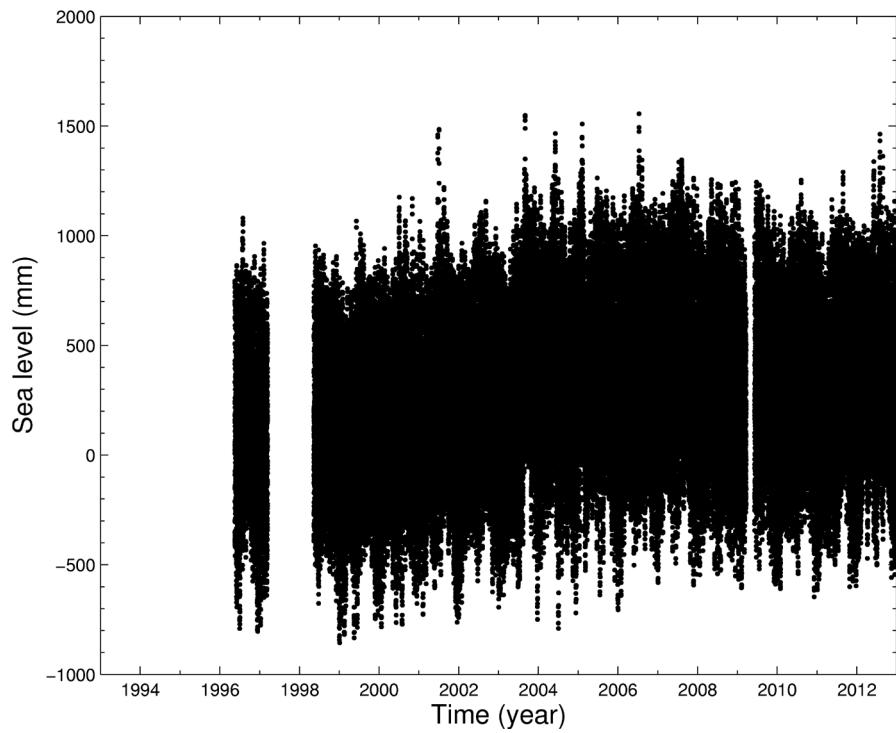
附圖 1.4 花蓮潮位站逐時資料



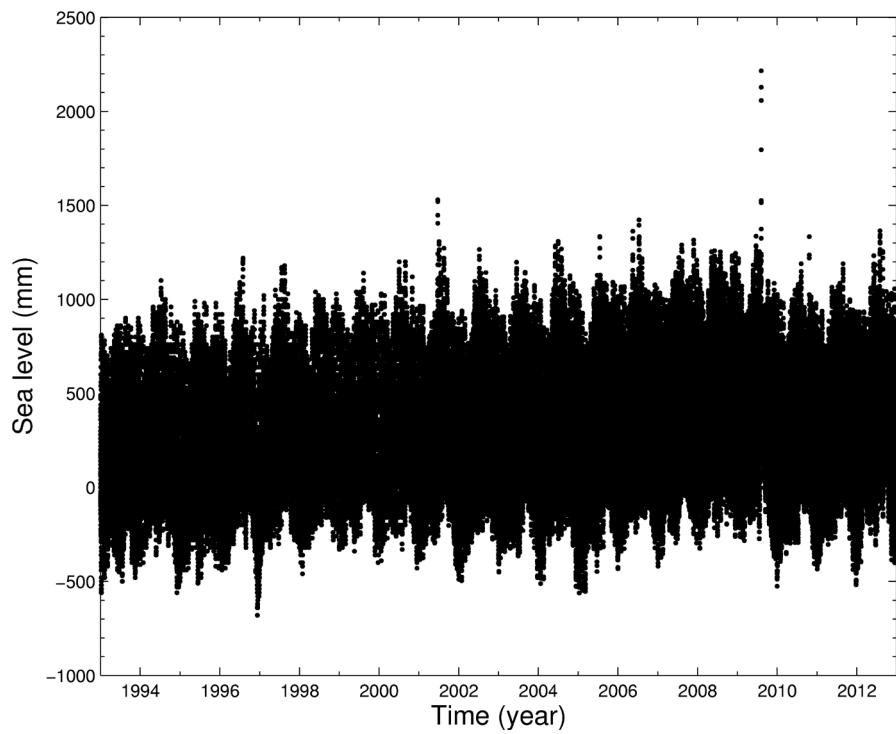
附圖 1.5 成功潮位站逐時資料



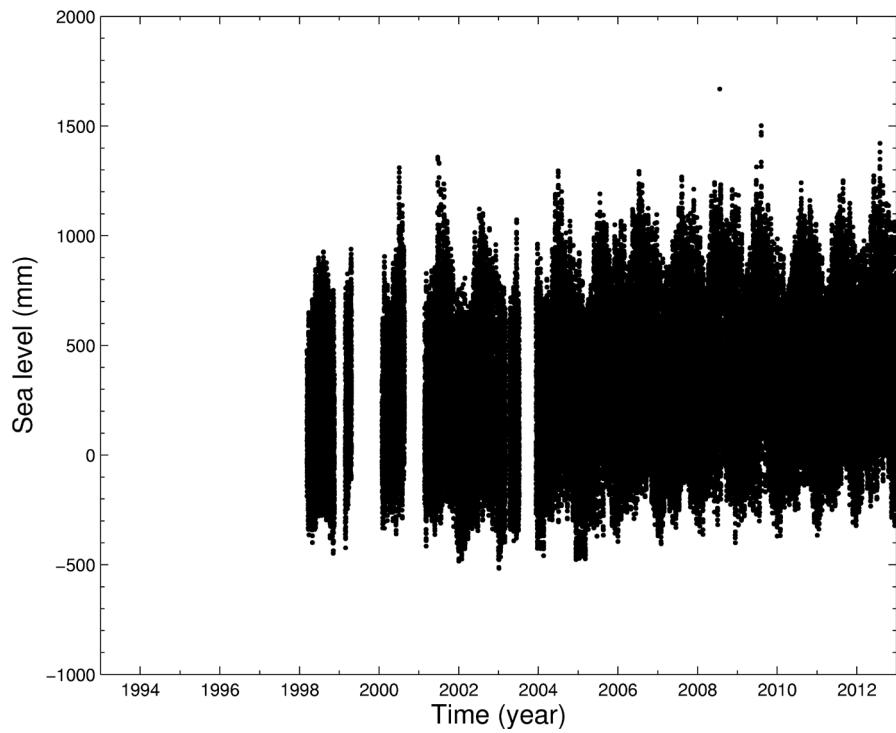
附圖 1.6 富岡潮位站逐時資料



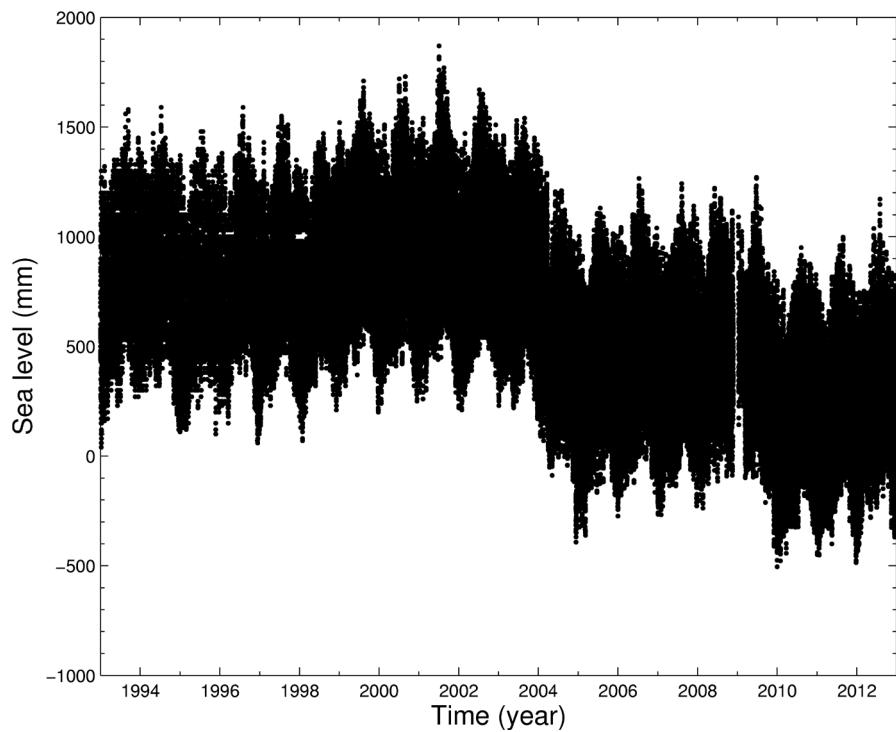
附圖 1.7 後壁湖潮位站逐時資料



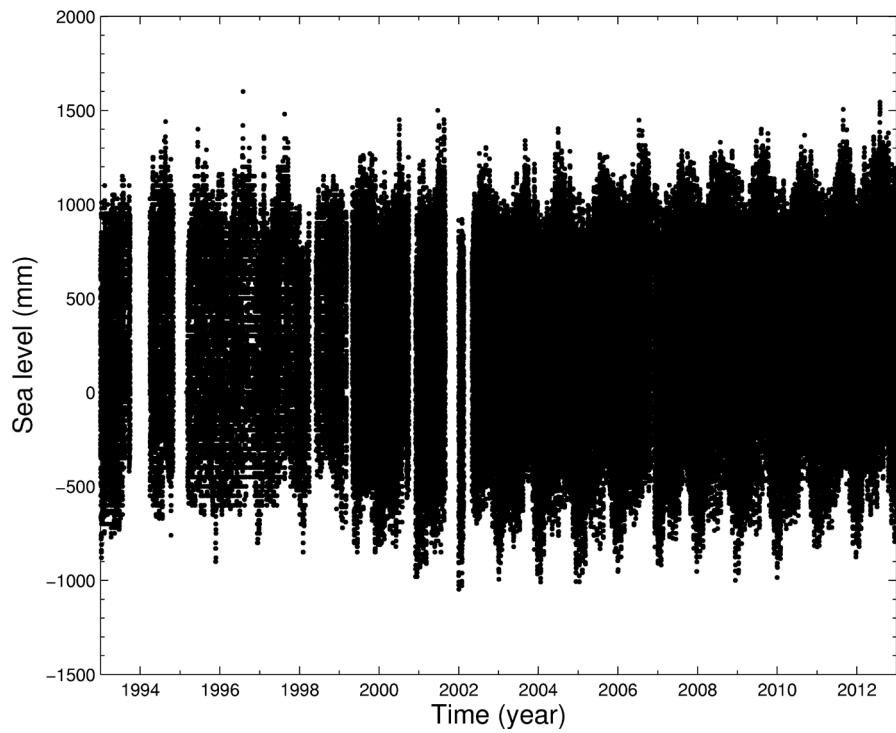
附圖 1.8 蠵廣嘴潮位站逐時資料



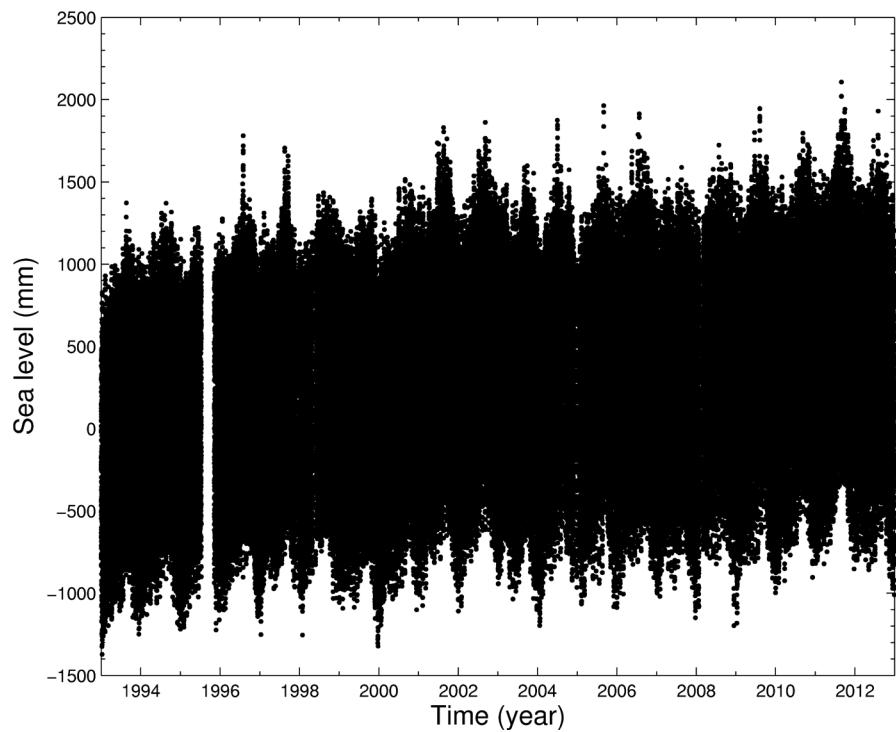
附圖 1.9 東港潮位站逐時資料



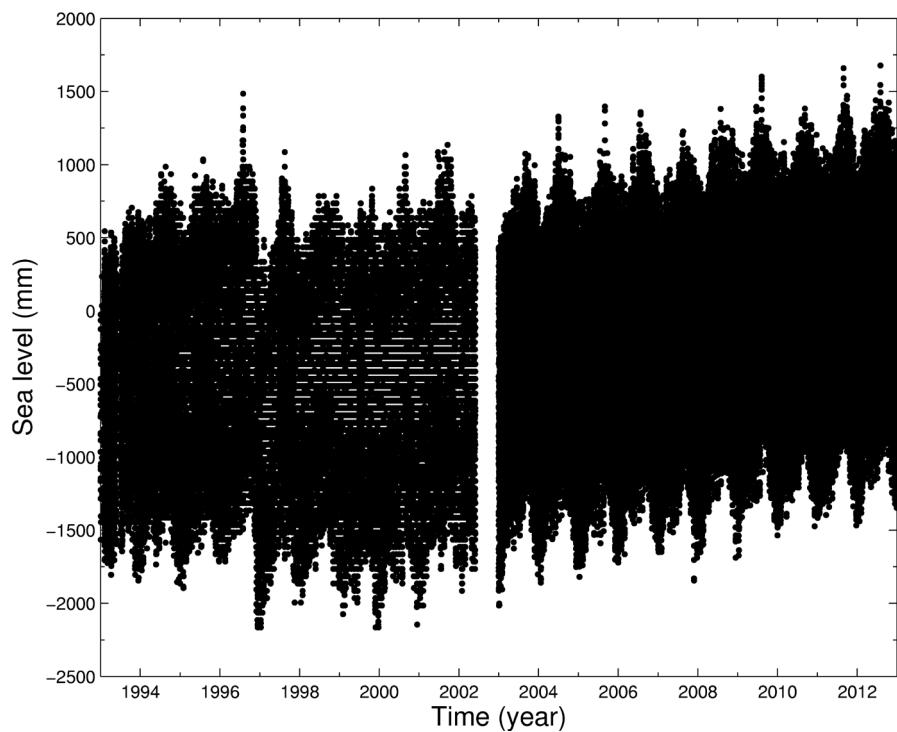
附圖 1.10 高雄潮位站逐時資料



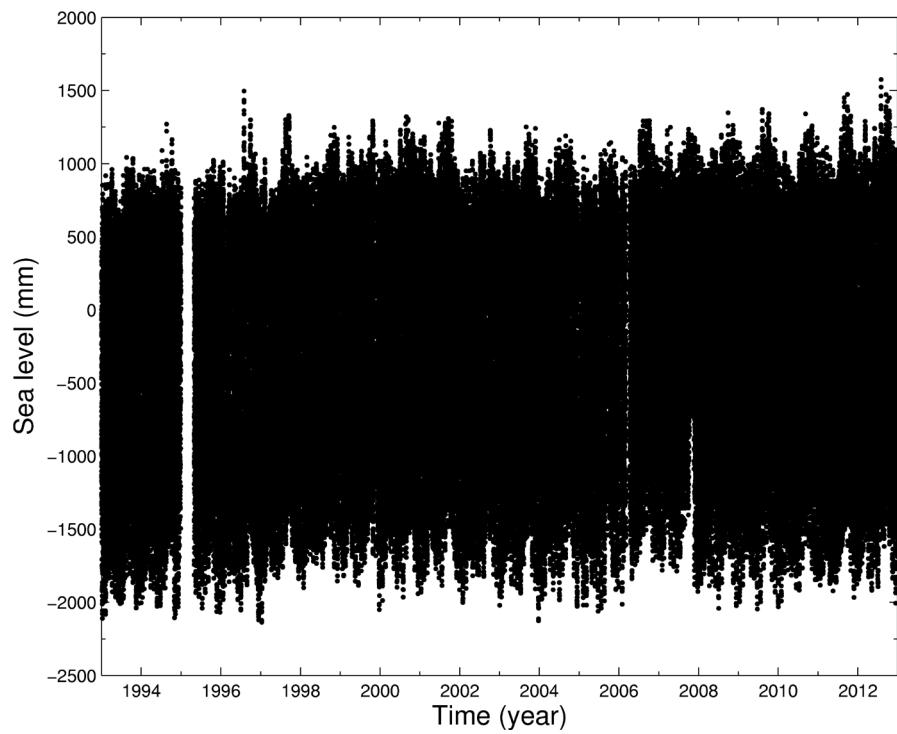
附圖 1.11 將軍潮位站逐時資料



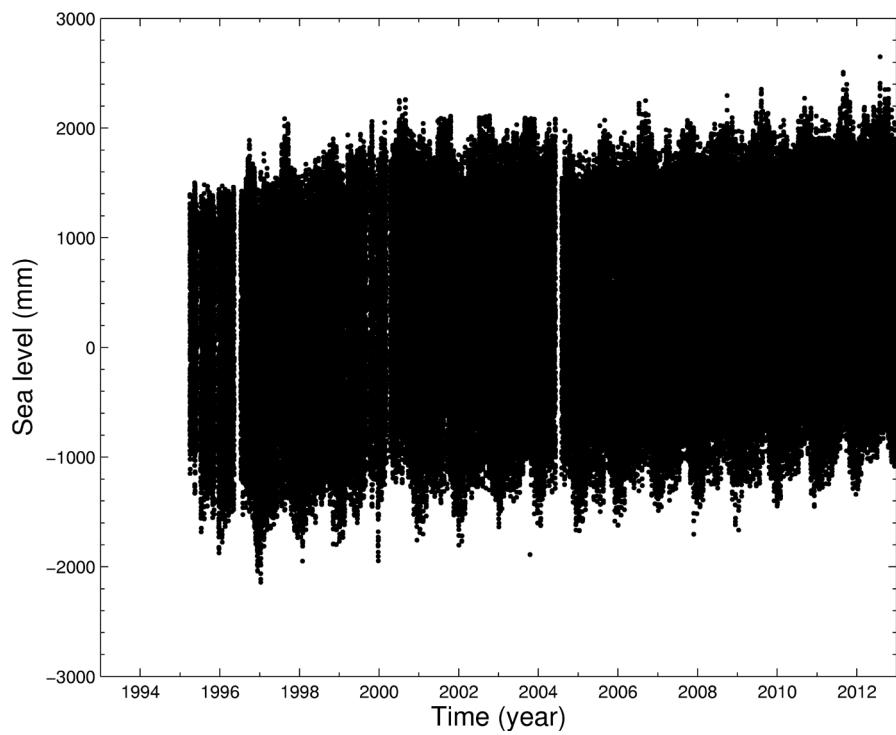
附圖 1.12 東石潮位站逐時資料



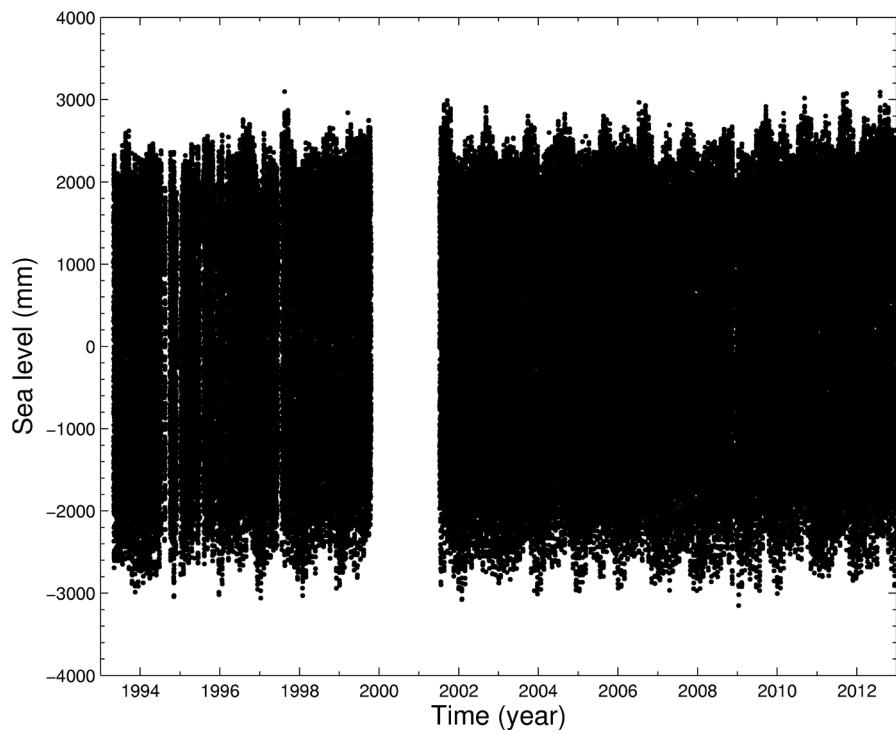
附圖 1.13 塘港潮位站逐時資料



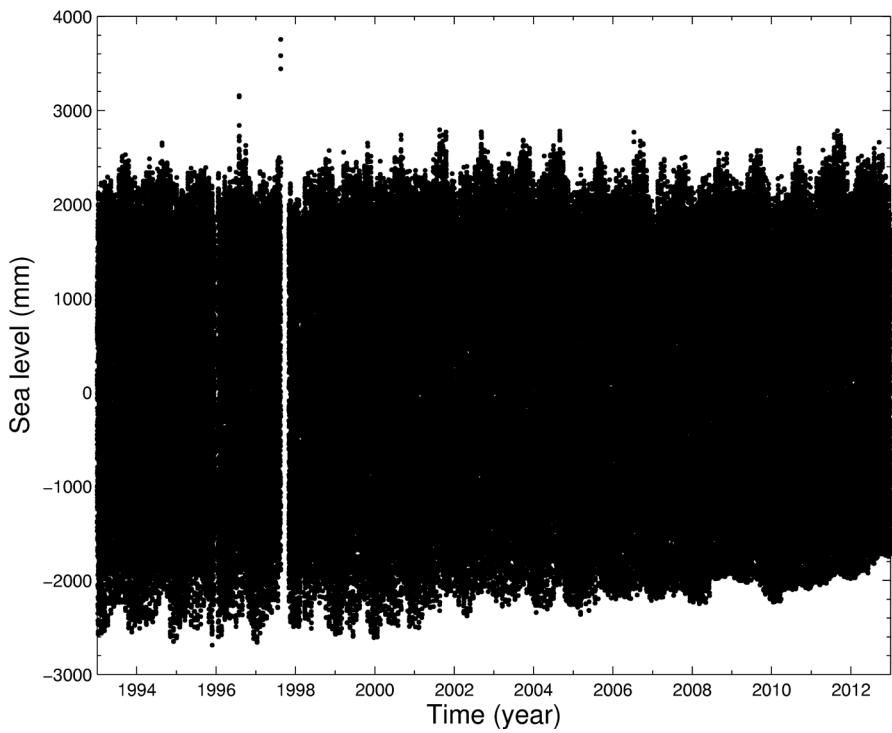
附圖 1.14 澎湖潮位站逐時資料



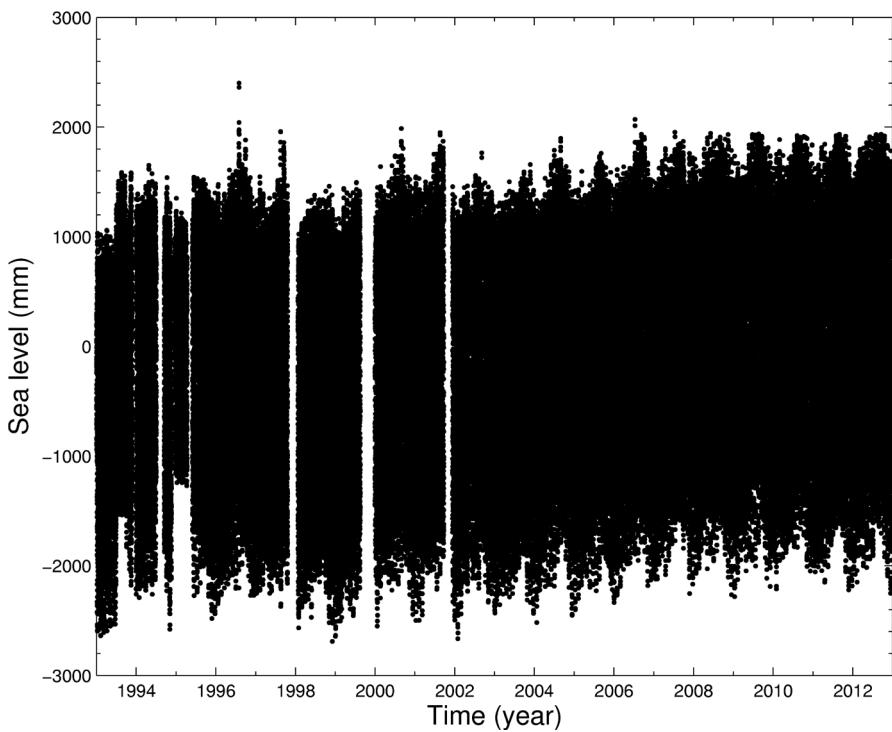
附圖 1.15 箔子寮潮位站逐時資料



附圖 1.16 台中港潮位站逐時資料



附圖 1.17 新竹潮位站逐時資料



附圖 1.18 竹圍潮位站逐時資料

附錄二 潮汐分潮週期

附表 2.1 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 evctional 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 evctional 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 evctional 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

附錄三 基準偏移程式之操作手冊

本附錄說明基準偏移程式之操作手冊，而相關理論請參閱 4.3 節。在計算之前將潮位站資料平均成月平均資料。以下所有程式放置於 Bias correction 資料夾內。

預備資料為潮位站站號(Bias correction\CWB2.txt)與潮位站資料(Bias correction\TG\ib_XXXXm.txt)。

1. 移除季節性訊號。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，故利用六參數擬合之潮位資料，將季節性訊號自潮位資料中移除，結果如附圖 3.1 與附圖 3.2 所示。

目的：移除季節性訊號

目錄：Bias correction\1rmvcy\

程式：fit6new_month.m

輸入檔：CWB2.txt 與潮位資料(TG.txt)

輸出檔：移除季節性訊號後之潮位資料(TG_rmvcy.txt)

2. 利用小波轉換萃取低頻訊號。將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。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。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。附圖 3.3 與附圖 3.4 中紅色點位為差值大於設定門檻值 (50 mm) 之時間，認為該時間附近可能存在基準偏移。

目的：萃取低頻訊號

目錄：Bias correction\2wavelet\

程式：wavelet.m

輸入檔：Bias correction\1rmvcy\XXXX_rmvcy.txt

輸出檔：wavelet.txt

程式參數設定：Line21：設定要重建第幾層之訊號(20 年資料為 3 or 4 層)

3. 利用步驟 2 偵測出成果計算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。

目的：計算偏移點位前後時間段之資料偏差值

目錄：Bias correction\ 3shift\

程式：shift.m

輸入檔：Bias correction\1rmvcy\XXXX_rmvcy.txt

輸出檔：顯示於 matlab 操作面上，輸出資料前段與後段偏差，以及前段與後段之差值

程式參數設定：Line10-Line13

sdt1=2002.208; % 資料前段起點

edt1=2004.208; % 資料前段終點

sdt2=2004.791; % 資料後段起點

edt2=2006.791; % 資料後段終點

4. 將潮位資料與附近潮位資料或衛星測高資料相比較

目的：資料比較

目錄：Bias correction\ 4compare\

程式：compare_mono.m

輸入檔：Bias correction\TG\ ib_XXXXm.txt

輸出檔：顯示出資料比較之影像

5. 將潮位資料進行基準偏移改正(六參數擬合)。當基隆與高雄潮位站時間序列未改正基準偏移前，潮位站資料有明顯不一致，而偏移量改正後，基隆與高雄潮位站時間序列較有一致性，改正成果如附圖3.5與附圖3.6所示。

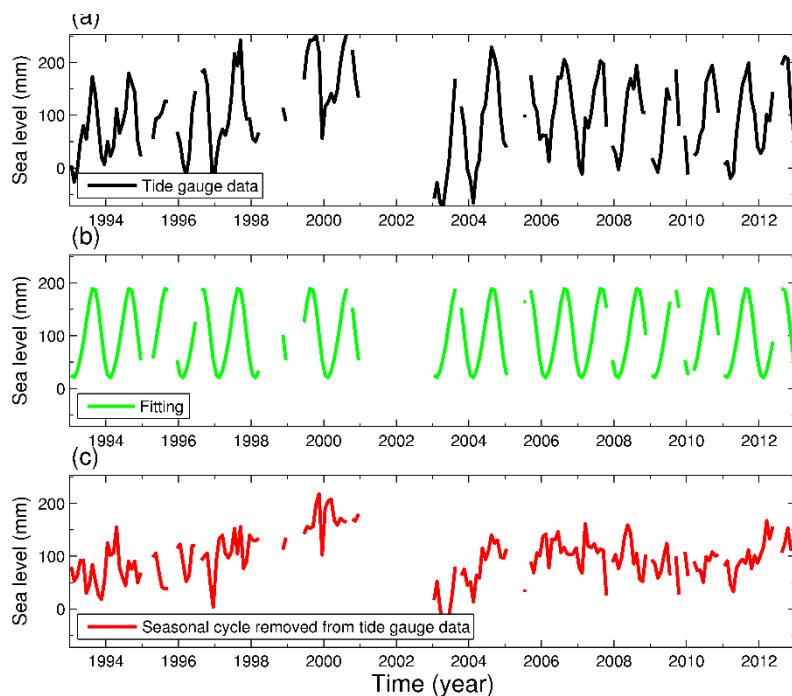
目的：基準偏移改正

目錄：Bias correction\5bias correction\

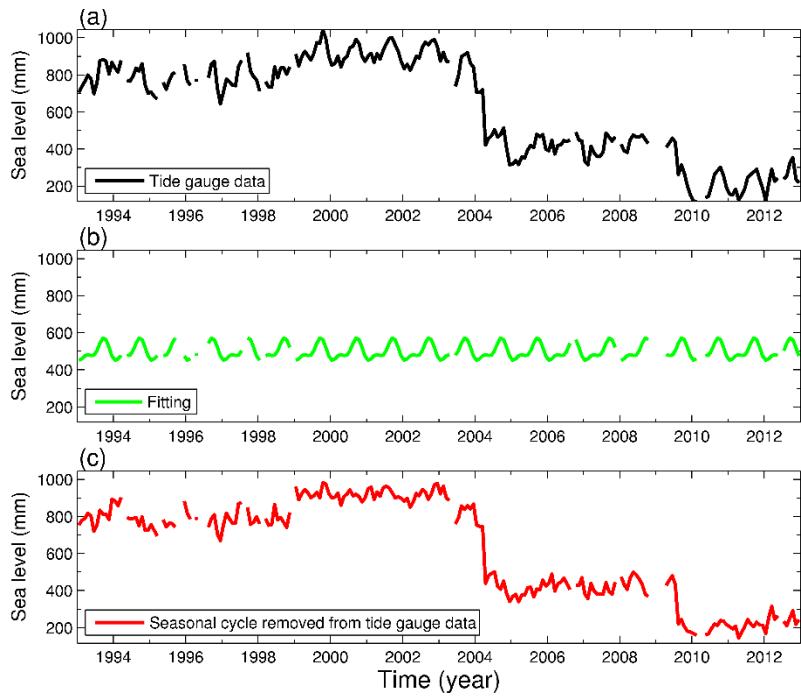
程式：fit6new_multi_ds.m

輸入檔：Bias correction\TG\ib_XXXXm.txt 以及 cwb_bp.txt(利用上述偵測基準偏移時間點，格式請看 readme.txt)

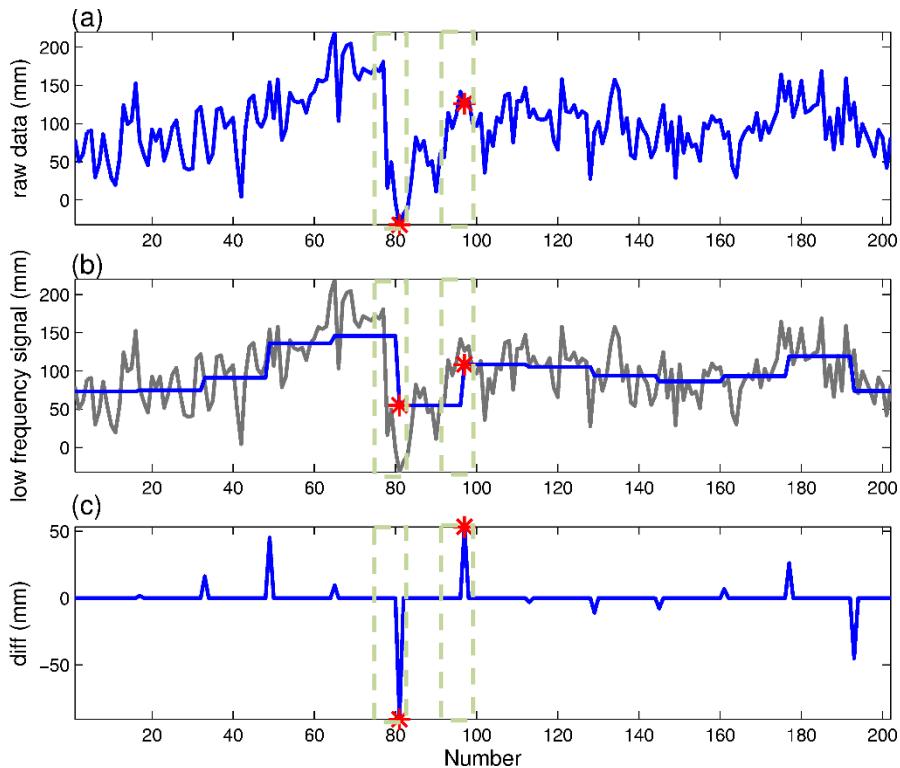
輸出檔：改正後潮位站資料，如 ib_XXXXm.txt



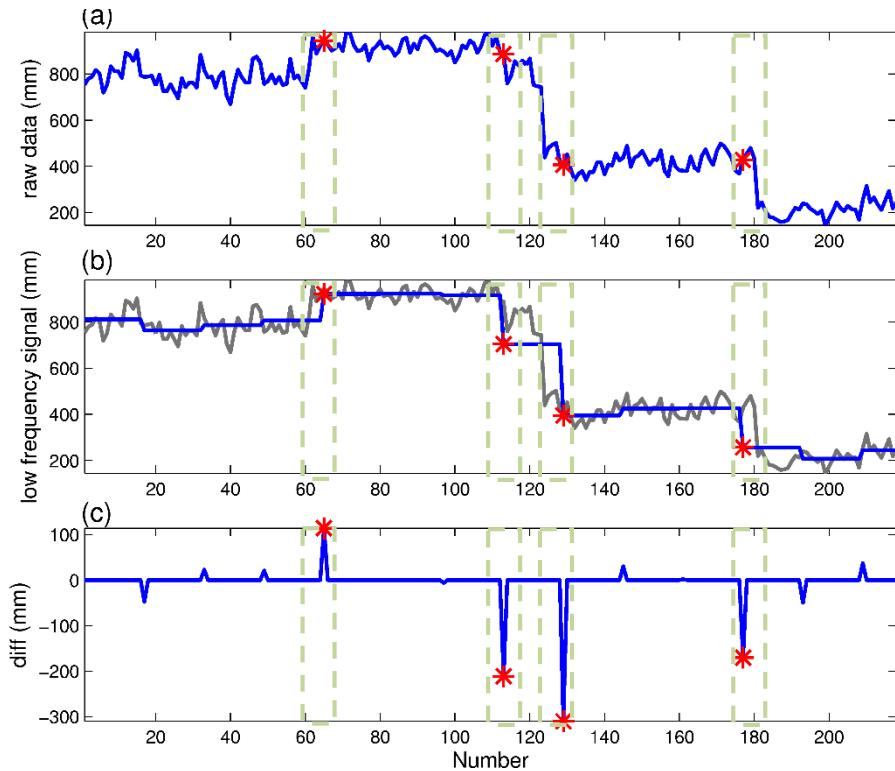
附圖 3.1 基隆潮位站之季節性訊號移除(海平面的年週期與半年週期變化)。(a) 未移除季節性之潮位資料(已移除海潮與逆氣壓效應)，(b) 擬合潮位資料的季節性訊號，(c) 移除季節性訊號後之潮位資料



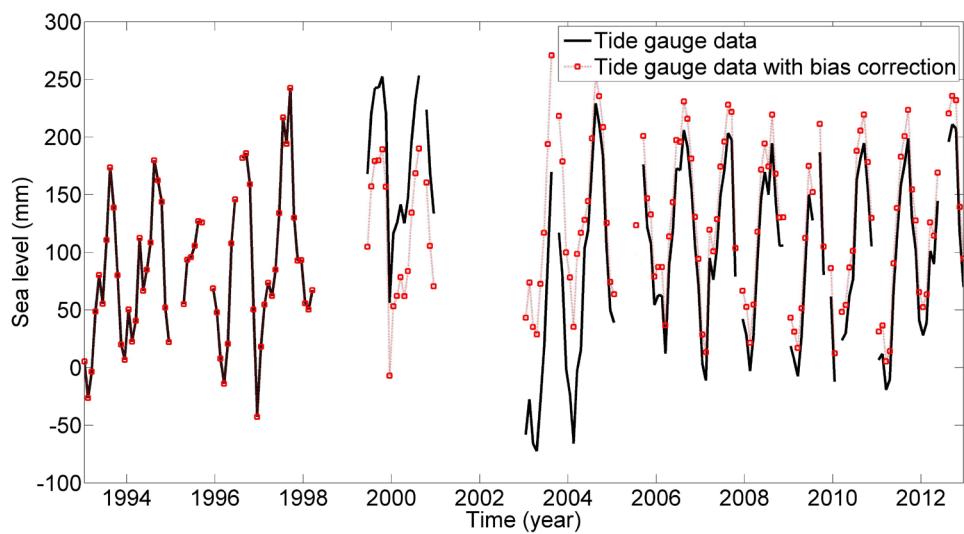
附圖 3.2 高雄潮位站之季節性訊號移除(海平面的年週期與半年週期變化)。(a) 未移除季節性之潮位資料(已移除海潮與逆氣壓效應)，(b) 擬合潮位資料的季節性訊號，(c) 移除季節性訊號後之潮位資料



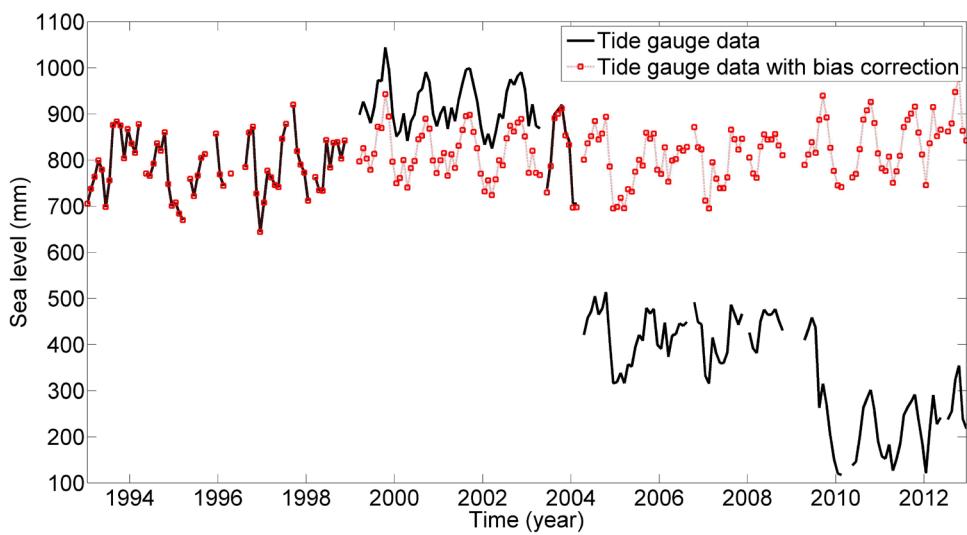
附圖 3.3 基隆潮位站之偏移量偵測。綠色虛線框表示偵測出的偏移點位。(a) 移除海潮、逆氣壓與季節性訊號之潮位站資料，(b) 利用小波分解移除(a)的資料之高頻訊號(藍線:移除灰線之高頻訊號後、灰線: (a) 的資料)，(c) 剩餘訊號(low frequency signal)之相鄰時間海平面變化值相減。紅色點表示可能之偏移點位。使用的資料需為連續訊號，將按照時間先後順序一個個排序，若遇到缺漏資料則跳過，因此 X 軸以 Number 為名



附圖 3.4 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)的資料之高頻訊號(藍線:移除灰線之高頻訊號後、灰線: (a) 的資料)，(c) 剩餘訊號(low frequency signal)之相鄰時間海平面變化值相減。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



附圖 3.5 基隆潮位站資料偏移量改正



附圖 3.6 高雄潮位站資料偏移量改正

附錄四 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：臺灣海域海平面上升之加速特性研究

計畫編號：MOTC-IOT-105-H3DB003a

執行單位：國立成功大學

參與審查人員及其所提意見	合作研究單位處理情形	本所計畫承辦單位 審查意見
<p>林銘崇 委員</p> <p>1. 研究過程及其成果可稱嚴謹合理。</p> <p>2. 海平面上升加速度係依迴歸公式算得，如何確認海平面上升確有加速特性。另外，依二個不同之加速公式算得之結果，顯示出明顯差異，應以何者較為適切？</p> <p>3. 潮汐水位資料經分潮分析後，針對各分潮，本研究成果特性是否仍可適用？</p>	<p>意見答覆</p> <p>1. 感謝委員肯定。</p> <p>2. 估算海平面上升加速度能夠了解此時間序列是否有加速現象，若要確認是否有顯著加速特性可利用顯著性測試，評估估算之加速度是否為顯著。而利用不同之加速公式求得之結果顯示出明顯差異，表示臺灣周圍海洋低頻震盪效應顯著影響臺灣海平面變化。而結合多變量與加速度擬合成果較佳，表示此公式較合適用於估算臺灣周圍海水面上升之加速度。</p> <p>3. 本研究經調和分析法分別自各潮位站資料中擬合各分潮之振幅，並將擬合的高頻訊號自潮位站資料中移除，分潮特性則不影響海平面上升之趨勢。</p>	<p>審查同意處理說明。</p> <p>審查同意處理說明。</p> <p>審查同意並確認處理說明。</p>
<p>張憲國 委員</p> <p>1. 本研究報告彙整前三年的研究結果，並與今年研究的結果比較，成果相當豐富，對臺灣海平面受全球溫室效應影響下的變動速度提出可靠的評估，深具學</p>	<p>意見答覆</p> <p>1. 感謝委員肯定。</p>	審查同意處理說明。

	術及工程價值。	
2.	(1) 圖 3-19 至圖 3-22 的各站排序結果可否以地點順序，易於閱讀及歸納。(2) 取消圖 3-19 至圖 3-22 的上圖或者取消圖 3-19 至圖 3-22 的下圖的全球衛星定位系統(GPS)結果。(3) 第 3-23 頁說明此研究結果與內政部國土測繪中心相比較發現並不一致。是否可以由此研究與全球衛星定位系統(GPS)的確定此研究的正確性。	(1) 感謝委員建議，期末報告已重新排序各站順序，排序方式以基隆潮位站為起始點，並以順時針方向排序。(2) 感謝委員建議，期末報告取消圖 3-19 至圖 3-22 的上圖。(3) 本研究結果與內政部國土測繪中心相比較並不一致是因為國土測繪中心水準成果為相對於潮位站附近的一等水準點，而臺灣部分地區地表垂直變動非常顯著，因此部分一等水準點之高程存在明顯變動。本研究估算的地表垂直變動量為絕對量(相對於坐標框架)，而國土測繪中心成果為相對於一等水準點之變動，所以才有不一致的現象。若全球衛星定位系統(GPS)站與潮位站共站時，才能夠由全球衛星定位系統(GPS)確定本研究之正確性。
3.	第四章的表格內數據以從北至南的測站排序。	感謝委員建議，期末報告已重新排序各站順序，排序方式以基隆潮位站為起始點，並以順時針方向排序。
4.	目前用 1993-2012 估算成果與 1993-2015 成果並不一致，來說明利用較短時間段資料去估計速率與加速度易受到低頻氣候因子影響，若要精確估算臺灣周圍海平面加速度值還需要加入更長時間段資料。Douglas[1992]建議用超過 50 年以上所估算海平面加速度才會趨近穩定。這種結論是否因為求平均趨勢的計算方式所造成，還是因為資料不	由於海平面會受到低頻氣候因子影響，其中 PDO 為 10 年以上準週期震盪，因此當資料時間長度超過 50 年以上所估算海平面加速度才可能趨近穩定。

足所造成。		
董東璟 委員	意見答覆	
1. 報告內容符合原計畫工作要求，予以肯定。	1. 感謝委員肯定。	審查同意處理說明。
2. 「海平面」上升(計畫名稱)或「海水面」上升(顯示於內文)？全文宜一致。	2. 感謝委員建議，期末報告已統一使用「海平面」一詞。	審查同意並確認處理說明。
3. 第一章彙整數十篇前人研究成果，能否再詳細歸納並列表顯示較有系統性的結果。	3. 感謝委員建議，期末報告將研究臺灣海域之前人成果列表顯示，如 p1-10 所示(表 1.1)。	審查同意並確認處理說明。
4. 分析資料中有使用到港灣技術研究中心所設之潮位站資料，但文中未見說明。	4. 感謝委員建議，已說明於 p2-6-p2-8。	審查同意並確認處理說明。
5. 表 2.3 中僅見五大商港蒐集資料，然工作項目列七大商港？	5. 七大商港為基隆、高雄、蘇澳、花蓮、台中港、安平港與台北港，然而安平港與台北港資料時間涵蓋範圍不足，將選取附近的測站取代。	審查同意並確認處理說明。
6. 表 3.6 中，AVISO、RAD 與內政部結果變異頗大，如何驗證其正確性與可信度？	6. 國土測繪中心地表垂直變動是相對於潮位站附近一等水準點之結果，而臺灣部分一等水準點之高程有明顯變動，因此與本研究結果(相對於坐標框架)比較才會有不一致的現象。	審查同意並確認處理說明。
7. 宜更明確說明本計畫與前期計畫之差異。	7. 感謝委員建議，已於期末報告 1.1 小節與 1.2 小節強化說明本計畫與前期計畫之差異。	審查同意並確認處理說明。
8. 後續淹水分析所需之未來海平面升降變動趨勢分析如何進行？請於期末報告中詳細說明。	8. 後續淹水分析將利用靜態淹水方式模擬未來海平面上升對於沿岸地區氾濫情形，計算靜態淹水時將同時考慮到海平面上升、地表垂直變動以及最大天文潮(又稱海潮)等影響。淹水分析計算方式已於期末報告第五章詳細說明。	審查同意並確認處理說明。
9. 報告中關於海平面圖的縱軸說	9. 感謝委員建議，期末報告關於海	審查同意並確認處理說明。

<p>明出現 sea level、sea level change 等宜一致。</p> <p>10. 圖 3-7(c)為(a)圖減(b)圖結果，但其縱軸量值似乎不正確，請檢查。另圖 3.9(b)藍線、灰線為何？應說明。</p>	<p>平面圖的縱軸說明皆改成 sea level。</p> <p>10. 為了方便比較因此將圖 3-7(c)之縱軸平移至與圖(a)和圖(b)相同縱軸範圍。而圖 3.9 中藍線為利用小波分解移除圖(a)的資料之高頻訊號後之剩餘訊號，灰線為圖(a)中移除海潮、逆氣壓與季節性訊號之潮位資料。期末報告已強化說明圖 4.11 與圖 4.12。</p>	<p>理說明。</p> <p>審查同意並確認處理說明。</p>
<p>滕春慈 委員</p> <p>計畫案成果豐碩，在資料檢定上對實際作業有實質幫助，海水位資料分析方面，對氣候變遷的影響有更深入的瞭解。</p> <p>研究案有繁複的資料檢定方法，僅就幾點不清楚的地方請教：</p> <ol style="list-style-type: none"> 未來工作項目之一為評估臺灣未來溢淹區域，由於臺灣地區，地層下陷問題比海平面上升嚴重，這個部分如何處理？是否影響溢淹推估的合理性。 3-2 頁提到，高頻訊號(<28 天)移除，....顯示出低頻訊號(週期 >182 天)，二者的週期並不相當的原因？ 研究報告中海潮改正已進行低頻資料處理，又進行每日逆氣壓改正，時間尺度上是否合宜，逆 	<p>意見答覆</p> <p>感謝委員肯定。</p> <ol style="list-style-type: none"> 計算靜態淹水時將同時考慮到海平面上升、地表垂直變動以及最大天文潮(又稱海潮)等影響因子，其中地表垂直變量是結合臺灣 199 個全球衛星定位系統(GPS)連續觀測站 [Ching et al., 2011] 與 1843 個精密水準點 Chen et al., 2011] 成果，兩成果時間涵蓋為 2000-2008 年。 海潮效應計算方式為利用調和分析法，並依最小二乘法原理求解各分潮振幅(分潮週期請參閱附錄一)。再將擬合的高頻訊號(週期 < 28 天)自潮位站資料中移除，則資料中主要將剩餘低頻訊號(週期 > 182 天)。 海潮改正為自潮位站資料中移除擬合之高頻訊號，保留低頻訊號(包含年週期與半年週期)。從 	<p>審查同意處理說明。</p> <p>審查同意並確認處理說明。</p> <p>審查同意並確認處理說明。</p> <p>審查同意並確認處理說明。</p>

<p>氣壓改正的結果似乎是就氣壓年變化進行改正，這種改正的目的性？尤其是後面海平面上升的資料分析，又強調半年、年週期？</p> <p>4. 以 20 年資料差異 2 年的長短就可以顯著影響結果，有無可能是顯示資料處理方法的不穩定？</p> <p>5. 3-9 頁提到基隆潮位站資料有 0 個偏移量，和圖 3.11 似乎有偏移調整，結果是否一致？</p> <p>6. 第三章已對潮位站進行基準面、垂直變動改正，第四章中對潮位站資料分析結果仍和以衛星資料分析結果差異大的原因？</p>	<p>圖 3.5 可知，逆氣壓效應有明顯年週期與半年週期變化，而逆氣壓效應對於海平面上升速率影響量約為 10%~15% [National Research Council, 2012]，因此若要提高海平面上升速率之推估精度仍須納入逆氣壓效應考慮。</p> <p>4. 因為 2015 聖嬰可能是史上最強烈的聖嬰，因此對於臺灣周圍海平面產生顯著影響(圖 3.16)。由圖 3.16 可知，在 2014-2015 臺灣周圍平均海平面明顯下降，造成差異 2-3 年的資料就可以影響結果。而利用多變量擬合法(考慮低頻氣候因子)，求得 1993-2012 與 1993-2015 海水面上升速率則較一致。</p> <p>5. 期末報告將修正"4-12 頁中"基隆潮位站資料有 2 個偏移量"。</p> <p>6. 差異大的原因主要因為潮位站時間長短不一，雖然計畫中設定時間範圍為 1993-2012，但是部分潮位站時間段並不完整，如蘇澳與花蓮潮位資料時間段約 1997-2012。期末報告將註記時間段不完整之潮位站。</p>	<p>審查同意並確認處理說明。</p> <p>審查同意並確認處理說明。</p> <p>審查同意並確認處理說明。</p>
<p>蘇青和 委員</p> <p>1. 本研究報告除今年研究的結果外，並彙整前三年的研究結果，成果相當豐碩，僅建議能簡略區分說明今年改進或增加之工作成果。</p> <p>2. 本研究探討之水位變化量相對較小，些微正值或負值偏差量影響甚大，例如簡報第 17 頁：物</p>	<p>意見答覆</p> <p>1. 感謝委員肯定。另外也感謝委員建議，期末報告已於 1.1 小節與 1.2 小節說明今年改進或增加之工作成果。</p> <p>2. 簡報第 17 頁的偏差量(7.36 mm/yr)為利用本研究成果與 GPS 成果相減後差異值所估算</p>	<p>審查同意並確認處理說明。</p> <p>審查同意並確認處理說明。</p>

<p>理量 -3.84 mm/yr 但偏差量 7.36，正負值計算結果完全不同之結論，應做較詳細說明。</p> <p>3. “觀測水位”偏差(如簡報第 17 頁)，除基準偏移，其他如儀器量測精準度誤差、地殼變動、地層下陷等，不同地點影響程度不同，建議做補充說明。另每一種”偏差”如何確保修正之可信度，或信賴區間大小，也建議做補充說明。</p> <p>4. 報告引用 1993-2012 估算成果，與 1993-2015 估算成果，資料僅相差 3 年但成果差異甚大，應做較詳細說明。</p> <p>5. 報告撰寫內容請依本所規定，期末報告增加納入英文摘要。</p>	<p>之標準偏差，此部分於期末報告 pp.4-27 中強化說明”土值為利用本研究成果與 GPS 成果相減後差異值所估算之標準偏差”。</p> <p>3. 感謝委員建議，已於期末報告第四章中各小節強化說明各項改正對於各潮位站之影響程度。另外，基準偏移修正值，僅能利用模擬方式進行分析，期末報告已於 4.3 節選擇成功潮位站資料進行偏移改正之模擬測試。</p> <p>4. 因為 2015 聖嬰現象可能是史上最強烈的聖嬰，因此對於臺灣周圍海平面產生顯著影響(圖 4.20)，導致僅相差 3 年但成果差異甚大。另外，感謝委員建議，期末報告中於 3.3 節中強化說明此部分。</p> <p>5. 感謝委員建議，期末報告依貴所規定增加納入英文摘要。</p>	<p>審查同意並確認處理說明。</p> <p>審查同意並確認處理說明。</p> <p>審查同意並確認處理說明。</p>
<p>李俊穎 委員</p> <p>1. P.3-14 潮位偏移量改政建議可與衛星資料比對，加強說明偏移量改正正確性與否。</p> <p>2. 建議加強說明 ENSO 及 PDO 對臺灣周圍海域影像大小及範圍。</p> <p>3. 靜態淹水範圍圖建議先放一張現況資料，因沿海部分區域已低於海平面。</p>	<p>意見答覆</p> <p>1. 感謝委員建議。潮位站資料皆有與衛星資料比較。期末報告已於 4.3 節選擇成功潮位站資料進行偏移改正之模擬測試。</p> <p>2. 圖 3.8 與圖 3.9 可說明 ENSO 及 PDO 對臺灣周圍海平面影響程度，期末報告於 p3-9 與 p3-10 加強說明圖 3.8 與圖 3.9。</p> <p>3. 感謝委員建議，期末報告將考慮以此方式展示現況資料。</p>	<p>審查同意並確認處理說明。</p> <p>審查同意並確認處理說明。</p> <p>審查同意並確認處理說明。</p>
<p>莊文傑 委員</p> <p>1. 感謝合作研究單位及研究同仁</p>	<p>意見答覆</p> <p>1. 感謝委員肯定。</p>	<p>審查同意處理說明。</p>

<p>之共同配合與努力，如期提交期中研究報告。</p>		
<p>2. 本年度研究重點之一，為綜整提示過去三年系列研究之成果。因此，全文架構及報告章節內容之安排，建請遵循圖 1.1 所示之流程圖及配合第 1-11 頁所列之工作項目，先就衛星測高資料，後就驗潮站資料，分區分別計算、比較及評估臺灣環島近岸海域(含括國內主要商港)之長(近 20 年)、短(近 10 年)期海平面昇降變動速率與加速度率。</p>	<p>2. 感謝委員建議，期末報告已根據第三次工作會議討論結果進行章節安排。</p>	<p>審查同意並確認處理說明。</p>
<p>3. 第 2-18 頁第 2.5 節關於地表垂直變動量，請結合介紹第 3-22 頁第 3.4.4 節有關 GPS 和水準資料，俾利參照。</p>	<p>3. 感謝委員建議，期末報告已強化說明 2.5 節。</p>	<p>審查同意並確認處理說明。</p>
<p>4. 為顯示基準偏移情形及便利後續基準偏移校正成效之比較，請就表 2.2 與表 2.3 中，PSMSL 與 CWB 之檢選驗潮站，以附錄，整理並繪製各站原始實測之逐月潮位時序。</p>	<p>4. 感謝委員建議，期末報告已在附錄一繪製各潮位站之原始逐時潮位時間序列。</p>	<p>審查同意並確認處理說明。</p>
<p>5. 表 2.3、圖 2.5、圖 2.6 中，臺灣環島近岸海域驗潮站，請增列淡水驗潮站。</p>	<p>5. 感謝委員建議，然而由前期(104 年)報告可知，淡水潮位站品質不佳，因此本期計畫建議不使用淡水潮位站資料。</p>	<p>審查同意並確認處理說明。</p>
<p>6. 本研究中之圖表說明，如圖 2.8、圖 4.2、圖 4.3、圖 4.5、...，請務求簡明，並請僅標列必要輔助閱讀表圖之關聯資訊，其他之詳細分析或處理說明或英文附註，請均改列並陳述於相關章節段落之內文中。</p>	<p>6. 感謝委員建議，期末報告將重新調整本研究中之圖表說明。</p>	<p>審查同意並確認處理說明。</p>
<p>7. 第 2-15 頁，本研究應用週期約 2~8 年之 MEI 與週期約 15~25 年</p>	<p>7. 感謝委員建議。第 3-6 頁已說明係數對海平面變化之意義。而</p>	<p>審查同意並確認處理說明。</p>

<p>之 PDO，據以評估其對 SLR 之長期性影響。因此，在進行相關評估前，應請具體陳示或提列 MEI 與 PDO 各別指數高低與 SLR 之直接關聯性。並請補充說明圖 2.9 中，對 MEI 與 PDO 均採用 5 年移動平均之意涵或其用途！</p>	<p>104 期計畫已說明 MEI 與 PDO 指數高低與 SLR 之關聯。另外，圖 2.9 中，對 MEI 與 PDO 均採用 5 年移動平均是為了比較兩指數的十年期震盪之相似性。</p>	
<p>8. 第 2-16 頁陳述 Newman(2003) 曾認為 PDO 係受 ENSO 所影響，因此，為何不單獨僅就週期約 2~8 年之 MEI 以評估其對 SLR 之長期性影響，同時，藉以縮減本研究僅採用 20 年資料期間之有效性。</p>	<p>8. 雖然 PDO 受 ENSO 所影響，但 ENSO 週期為 2~8 年，而 PDO 週期為 10~30 年，若僅以 MEI 評估其對 SLR 之長期性影響，其邏輯上不甚合理。</p>	<p>審查同意處理說明。</p>
<p>9. 第 2-17 頁，請具體說明第 2.4 節引入 DEM 之應用目的、資料來源及近岸海灘地形特徵。</p>	<p>9. 感謝委員建議，期末報告已將強化說明 2.4 節 DEM 資料之相關。</p>	<p>審查同意並確認處理說明。</p>
<p>10. 圖 3-19~圖 3-22，圖中之(a)與(b)具重複性，請併圖說仔細檢視及修訂。</p>	<p>10. 感謝委員建議，期末報告將重新修訂圖 4-22~圖 4-25。</p>	<p>審查同意並確認處理說明。</p>
<p>11. 第 3-24 頁有關驗潮站垂直變動量與 GPS 及水準成果之比較與討論，第 3.4.4 節末內文：“因此，水準成果與本計畫成果不一致是合理的。”請作較合適之論述或將該語句去除。另外，文中曾論及一等水準點之高程變動，請作舉證補充以強化論述。</p>	<p>11. 感謝委員建議，期末報告將修正該句為“因此，水準成果與本計畫成果並不一致”。另外，第一章中文獻回顧中已知臺灣部分區域地表垂直變動速率非常顯著[Ching et al., 2011]，可推估部分一等水準點之高程已變動。</p>	<p>審查同意並確認處理說明。</p>
<p>12. 第 4-14~4-15 頁說明：ENSO 僅對菲律賓以東海域之 SLR 有較大影響，而 PDO 則對臺灣周圍海域之 SLR 有顯著之影響。請強化上述之討論與說明，並確認未來評估臺灣周圍海域之 SLR 時，將 ENSO 與 PDO 納入計算</p>	<p>12. 感謝委員建議。以強化說明於 3.3 節。另外，不同時間段之水位資料受 ENSO 或 PDO 之影響現象並不完全相似，因此不同年期之衛星資料成果應無法確認短年期之成果。</p>	<p>審查同意處理說明。</p>

<p>考量之必要性。另外，第 4-19 頁說明：應用 10 年期之衛星資料，因 ENSO 與 PDO 現象並不明顯，導致成果不佳！因此，是否可利用近 20 年期之衛星資料，確認上述之成果？</p> <p>13. 圖 4-10 與圖 4-11 中，臺灣鄰近海岸及環島海岸之絕對 SLR，請將對應數據列表，俾利相關比較及參考。</p> <p>14. 請針對臺灣環島近岸海域(含國內主要商港)，先就衛星測高資料，後就驗潮站資料，於考量 ENSO 與 PDO 之具體影響下，綜合列表陳示及比較與評估其長(近 20 年)、短(近 10 年)期海平面昇降變動速率與加速度。</p> <p>15. 請針對臺灣環島沿岸(含國內主要商港)驗潮站資料，增列章節，強化說明如何綜合考量基準偏移校正、地表垂直變動速率、ENSO 與 PDO 等因素之具體影響，以計算評估長(近 20 年)、短(近 10 年)期海平面昇降變動速率與加速度。</p> <p>16. 臺灣環島海岸之絕對 SLR 及其加速度，明確具有區域性之差異，因此，如何辦理後續之溢淹評估？</p>	<p>13. 已列於表 4.13。</p> <p>14. 感謝委員建議。期末報告已強化海平面上升速率與加速度之說明於 3.3 節與 4.5 節。</p> <p>15. 感謝委員建議。依第三次工作會議之討論結果安排期末報告之章節。</p> <p>16. 感謝委員建議。各個海岸點對應未來海平面高度可利用衛星測高或潮位站資料進行推估。而泛淹評估將利用區域成長法模擬各海岸點是否會被淹沒，若該點會被淹沒則將此海岸點向周圍內陸點位繼續模擬淹沒情形，直至無法淹沒或超過設定淹沒範圍為止。</p>	<p>審查同意並確認處理說明。</p> <p>審查同意並確認處理說明。</p> <p>審查同意處理說明。</p> <p>審查同意並確認處理說明。</p>
--	--	--

附錄五 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：臺灣海域海平面上升之加速特性研究

計畫編號：MOTC-IOT-105-H3DB003a

執行單位：國立成功大學

參與審查人員及其所提意見	合作研究單位處理情形	本所計畫承辦單位審查意見
<p>林銘崇 委員</p> <p>1. 針對淹水潛勢，除設定模擬情境外，建議對相關之前提條件及處理過程加以適度說明。</p>	<p>意見答覆</p> <p>1. 感謝委員建議。已於第 5.1 節中說明溢淹情境之相關條件與處理過程。</p>	審查同意並確認處理說明。
<p>張憲國 委員</p> <p>1. P.2-17 請查明最大天文潮的學術名詞是否為天文潮最高高潮面(highest high water level, H.H.W.L.)，在內文上敘述其定義。</p> <p>2. 物理量除了定義外，應加入單位。</p> <p>3. 使用二次的加速度項還估算海平面上升率特性是否有學術基礎或通用性。若從圖 3.2 來看加速度項的影響是不可忽略，且因為含加速度項的上升率是時間的函數，本研究是如何定義含加速</p>	<p>意見答覆</p> <p>1. 根據 NOAA 官方網站 (https://tidesandcurrents.noaa.gov/datum_options.html)，最高天文潮 (Highest astronomical tide) 為在天體運行之週期(18.6 年)間所發生之最高天文潮位。已將上述“在天體運行之週期(18.6 年)間所發生之最高天文潮位”敘述於 P.2-17</p> <p>2. 感謝委員建議。文中圖表加入單位。</p> <p>3. Jevrejeva et al. [2008]、Church and White [2011] 等文章皆利用二階多項式 (second order polynomial) 估算海平面加速度特性，可知利用二階的加速度項估算海平面上升加速特性是有學術基礎或通用性。另外，將位移對於時間進行一次微分為速</p>	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。

<p>度項的上升率。</p> <p>4. 利用衛星測高資料來推算海平面上升率，其推算點的原始資料是否有空間上的差異(見圖 3.2 或圖 3.4)。若有，擬合的公式應有空間的修正量。</p> <p>5. 多變量擬合的 ICI 及 DCI 是否有空間差異，在臺灣所有海域只有一個時間變化的值。</p> <p>6. 圖表說明閱讀上容易混淆，如 Six-parameters 與 Multivariable 分別為在擬合時未考慮與考慮海平面資料中氣候因子影響，可能會誤解兩種方法考慮兩種情況，共有 4 種狀況。因為 Six-parameters 不考慮海平面資料中氣候因子影響而多變量擬合一定考慮海平面資料中氣候因子影響。因此說明不要中英文夾雜，建議 Six-parameters 改六參數、Multivariable 改多變量；Multivariable+Acceleration 改為含加速度項的多變量擬合等。</p>	<p>度，二次微分為加速度。</p> <p>4. 本研究平均潮位站周圍半徑經緯度固定範圍內的測高資料，一般而言，附近海平面差異並不 大。103 年計畫 [郭重言等人， 2015] 比較衛星測高與潮位站資 料間之相關性，兩資料於宿霧站 相關係數為 0.8，表示兩資料變 化是一致的。</p> <p>5. 本研究是於每一網格點進行多 變量擬合，故無空間差異的問 題。由圖 3.8 與圖 3.9 可知，ENSO 與 PDO 現象對於臺灣周遭海平 面影響程度各不相同。ENSO 主 要影響臺灣東南部海域之海平 面變化。而 PDO 現象對於臺灣 周圍各區域皆有顯著影響。</p> <p>6. 感謝委員建議。各圖表說明改為 Six-parameters 為六參數、 Multivariable 為多變量； Multivariable+Acceleration 為含 加速度項的多變量擬合等。</p>	<p>審查同意並確認處 理說明。</p> <p>審查同意處理說明。</p> <p>審查同意並確認處 理說明。</p>
---	---	--

		審查同意處理說明。
7. 海平面資料中氣候因子或分析方法中含有加速度項對海平面上升率的影響，哪個較大。	7. 以平均臺灣四周海域為例，以六參數、多變量與含加速度項之多變量估算之臺灣海平面上升速率分別為 $5.23 \pm 0.31 \text{ mm/yr}$ 、 $2.43 \pm 0.32 \text{ mm/yr}$ 與 $3.66 \pm 0.85 \text{ mm/yr}$ 。表示氣候因子的影響量約為 2.80 mm/yr ，而加速度項影響 1.23 mm/yr 。由上述例子可知氣候因子的影響量較大，但使用20年資料並不足以求得精確加速度。因此上述結論需要加入更長期資料才可印證。	審查同意處理說明。
8. 研究指出 2014 及 2015 年的聖嬰現象影響臺灣海平面上升率的結論，在臺灣海平面上升率的研究上是否有必要分離出聖嬰的影響，有何技巧分出其影響量。	8. 以本研究成果而言，在評估臺灣海平面上升速率的研究上須考慮低頻訊號的影響，並可對 ICI 和 DCI 擬和計算其影響量。	審查同意處理說明。
9. 以潮位站的潮汐資料分析海平面上升率的各步驟均採用最小二乘法，是否有可能把所有步驟整合一次處理。	9. 因步驟之一的逆氣壓改正需要使用海平面氣壓資料，而此步驟並非需要使用最小二乘法，因此無法把所有步驟整合一次處理。	審查同意處理說明。
10. 使用歐洲中期天氣預報中心(ECMWF)月平均全球平均海平面壓力，沒有空間差異，在臺灣潮位站都是一樣的時序。	10. 進行改正時是內插到當月驗潮站位置，因此有空間上的差異。月平均全球平均海平面壓力僅是逆氣壓改正公式中的 \bar{P} 項。	審查同意處理說明。
11. 在第 4-40 頁說明使用潮位站的潮汐資料及衛星測高資料用相同方法分析出的海平面上升率不同。研究單位推論可能為潮位站時間長短不一以及資料品質問題(可能包	11. 本研究已處理潮位站資料基準偏移問題，但資料長短不一與非線性等問題，目前並無法完整處理。	審查同意處理說明。

<p>含非線性變化)等因素。在研究上如何處理這種可能因素。</p> <p>12. 本年度已是計畫執行最後一年，報告可否將前三年計畫精簡整理出四年研究成果。</p>	<p>12. 已於第一章前言中精簡整理前三年計畫之成果。</p>	<p>審查同意並確認處理說明。</p>
<p>董東環 委員</p> <p>1. P2-4, 衛星高度計海平面高度觀測精度約 4~5 公分, 如何說服讀者可用於尺度在 mm 等級之區域海平面變動分析, 建請補充說明。</p> <p>2. P4-21, 分析結果顯示潮位站地表垂直變動速率在西南沿海如箔子寮等處每年下降約 20mm, 此結果與 P2-16 所提每年下降 98mm 有不少差異, 建請說明其原因。</p> <p>3. P5-2, 式(5.1)預估未來 2112 年海平面上升量, 惟該式係以現況外推, 尚未考慮氣候變遷(加劇或減緩)影響, 於最後模擬淹水的條件中宜有說明。</p> <p>4. 摘要中誤植因海平面上升造成之淹水面積佔陸地面積比率, 正確值是否應為 0.5% (P5-4)。</p> <p>5. P5-4 及摘要, 總淹水面積(1758.997)與個別淹水面積累加總和似乎不</p>	<p>意見答覆</p> <p>1. 本研究中使用的衛星測高資料為經由時間和空間上的平均, 衛星測高觀測精度可再提升精度。另外, 在擬合海平面上升速率時, 測高觀測量誤差將分散於各未知參數中, 因此估算之海平面上升速率精度可小於 1 mm/yr。</p> <p>2. 表 4.11 已選取最靠近箔子寮潮位站的 GPS 觀測站成果進行比較。GPS 成果每年約下降 30 mm, 而本研究估算之箔子寮測站每年約下降 25 mm。</p> <p>3. 5.1 節已說明未來 2112 年海平面上升量是利用線性方式外推, 並未考慮氣候變遷影響。</p> <p>4. 感謝委員提醒, 已修改摘要中海平面上升造成之淹水面積佔陸地面積比率 0.5%。</p> <p>5. 總淹水面積與個別情境淹水情境累加並不相同(非線性相加), 因溢淹面積還須視臺灣沿岸地</p>	<p>審查同意處理說明。</p> <p>審查同意並確認處理說明。</p> <p>審查同意並確認處理說明。</p> <p>審查同意並確認處理說明。</p> <p>審查同意並確認處理說明。</p>

<p>同，宜再檢查。</p> <p>6. 淹水面積之計算主要考慮各因素造成之海平面上升與 DEM 之關係，此與現實面上頗有差異，現實上，海面上升會影響排水，排水造成淹水，且海陸交界均有防波堤等因素，因此本報告淹水計算結果宜於摘要或適當地方說明所採用的條件與方法。</p>	<p>形起伏。</p> <p>6. 感謝委員建議。已在第二章節說明使用 DEM 模型相關資訊，DEM 模型是數值高程模型，用來展示地形起伏變化，並不包含防波堤等建築物。</p>	<p>審查同意並確認處理說明。</p>
<p>滕春慈 委員</p> <p>1. 有關增加氣候因子影響下海平面上升速率數值，建議書寫的方式是以多變量分析成果為主，並討論若不考慮氣候因子造成的速率差異。</p> <p>2. 第 5 章提到地表垂直運動是影響沿岸溢淹的重要因子，建議在第 4 章討論潮位站資料時，可以並列含地表垂直運動的海平面上升速率。</p> <p>3. 第 3 章討論 1993-2012 與 1993-2015，海平面上升速率的差異明顯，建議增加討論資料分析的限制與可適用範圍，同樣的情況在第 5 章討論溢淹問題時，強調僅適用於什麼範圍的議題為宜。</p> <p>4. 本研究案如何確保溼對流層延遲校正的品質？</p>	<p>意見答覆</p> <p>1. 感謝委員建議。3.3 節與 5.1 節結論將依據委員建議書寫。</p> <p>2. 感謝委員建議。表 4.5 與表 4.6 為包含地表垂直運動的海平面上升速率。</p> <p>3. 感謝委員建議。因使用方法與時間長度皆會影響計算成果，因此說明成果時皆會強調使用方法、資料與時間涵蓋範圍。另外，本研究使用的地表起伏模型為 DEM，DEM 模型是數值高程模型，並不包含防波堤等建築物，DEM 資料相關資訊皆說明於第二章中。</p> <p>4. 本計畫已於 102 年計畫比較各濕對流層模式對於利用改正後之</p>	<p>審查同意並確認處理說明。</p> <p>審查同意並確認處理說明。</p> <p>審查同意並確認處理說明。</p> <p>審查同意並確認處理說明。</p>

	<p>衛星測高時間序列估算海平面上升速率，並分析速率之差異。濕對流層延遲改正為雷達脈衝受到大氣中水氣影響導致訊號傳播路徑延遲，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計算求得。</p>	
蘇青和 委員	<p>意見答覆</p> <p>1. 感謝委員建議。報告結論將做更清楚之說明。</p> <p>2. 感謝委員肯定。P6-3 頁第 9 點該改為”本研究亦針對百年後(2112 年)溢淹造成國家重要濕地面積損失進行統計與分析。臺灣本島重要沿岸濕地幾乎皆受到淹水潛勢威脅，沿岸重要濕地平均面積將損失 75%，表示海平面上升將對臺灣重要的沿海濕地造成嚴重衝擊與影響”，並且在 P.6-1 加入”而溢淹研究時使用的高程模型為數值高程模型(DEM)，此模型並不包含防波堤</p>	<p>審查同意處理說明。</p> <p>審查同意並確認處理說明。</p>

	<p>等建築物，在引用本研究數據時，需注意使用之資料”以說明清楚重要條件，並避免錯誤引用。</p> <p>3. 觀測水位偏差改正，包括如儀器位置調整、地殼變動、地層下陷等因素甚為複雜，其中 p2-17 頁地層下陷在 20 年間每年僅取平均值作偏差改正，建議增加說明逐年之地層下陷量，是否在不同時期可能與平均值差異甚大之現象。</p>	<p>審查同意處理說明。</p>
<p>李俊穎 委員</p> <ol style="list-style-type: none"> 所提淹水潛勢海平面上升、地表垂直變形、最大天文潮影響因子至 2112 年高程差為何？ 濕地損失的定義為何？ 加速度在 1993~2012 年及 1993~2015 年值有明顯差異，是否表示多變量線性擬合在 20 幾年資料下並無法除去聖嬰現象？ 測站垂直變動改正所引入衛星資料，是否會導致潮位站長期斜率變化和衛星資料一致？ 	<p>意見答覆</p> <ol style="list-style-type: none"> 圖 2.11、圖 2.12 以及圖 3.6 皆已展示各影響因子之影響量。 若 DEM 高度減去海平面高度為負值，則該區域便可視為未來溢淹範圍。而濕地損失定義為特定時間點濕地區域的淹水面積稱之。 表示 20 年資料仍不足以求得精確之加速度。 是的。另外，研究中為確定改正地表垂直變動速率是否正確，將估算地表垂直變動速率與 GPS 成果相比較，如 4.4.4 小節。 	<p>審查同意並確認處理說明。</p> <p>審查同意處理說明。</p> <p>審查同意處理說明。</p> <p>審查同意並確認處理說明。</p>
<p>莊文傑 委員</p> <ol style="list-style-type: none"> 感謝合作研究單位的協力配合及努力，並如期提 	<p>意見答覆</p> <ol style="list-style-type: none"> 感謝委員肯定。 	<p>審查同意處理說明。</p>

<p>送繳交期末報告。</p> <p>2. P.I 中文摘要，”百年後(2112 年)海平面上升因子造成的淹沒面積為 187.314 km²(約佔臺灣陸地面積 4.9%)”，其中，4.9%誤植，請更正。</p> <p>3. 目錄與內文，”1.3 本計畫之流程”請修訂為”1.3 工作流程”；”1.4 目前計畫之執行進度”請修訂為”1.4 工作項目與執行進度”。</p> <p>4. 圖 1.1 計畫流程圖中，請在”評估臺灣未來海岸泛淹區域”工作項前，加入本計畫之重點工作項：”臺灣四周海域長短期之海平面上升速率與加速率”；”多變量線性擬合”請修訂為”氣候影響”工作項目之配合方法。</p> <p>5. P.2-7，單一驗潮站缺漏期間最長的為台中的 27 個月(圖 2.4)，但後壁湖、東港、蘇澳、花蓮、梗枋等似乎亦多缺漏，請列表補充說明圖 2.4 中，在 1993~2012 及 2003~2012 間，各驗潮站之缺漏率與完整度。</p> <p>6. P.2-15，請補充說明何謂正高系統？又內政部地政司衛星測量中心如何採用基隆驗潮站 1957 年至</p>	<p>2. 感謝委員建議，已修改摘要中約佔臺灣陸地面積 0.5%。</p> <p>3. 感謝委員建議，目錄與內文之”1.3 本計畫之流程”已修訂為”1.3 工作流程”；”1.4 目前計畫之執行進度”已修訂為”1.4 工作項目與執行進度”。</p> <p>4. 感謝委員建議，圖 1.1 已依照委員建議修改。</p> <p>5. 感謝委員建議，圖 2.4 已可清楚展示各潮位站觀測紀錄之完整性。</p> <p>6. 感謝委員建議，正高系統已補充於 P.2-15”正高是一個以大地水準面為基準面的高程系統，地面上任一點之正高為該點起沿重</p>	<p>審查同意並確認處理說明。</p> <p>審查同意並確認處理說明。</p> <p>審查同意並確認處理說明。</p> <p>審查同意處理說明。</p> <p>審查同意處理說明。</p> <p>審查同意並確認處理說明。</p>
--	--	---

<p>1991 年之潮位資料，化算 2001 臺灣高程基準 (TWVD2001) ?為何與 1990 年 1 月 1 日標準大氣環境有關聯？如何與第 5 章之 DEM 相搭配，以作淹水潛勢之應用？</p>	<p>立垂線至大地水準面之距離”。TWVD2001 以 1957 年至 1991 年基隆驗潮站資料所計算之平均海水面作為高程零點。而高程基準係定義在 1990 年 1 月 1 日標準大氣環境情況下，應為平均海平面相對於 1990 年 1 月 1 日標準大氣環境情況下之海平面高度。另外，溢淹計算方式已詳述於第五章。</p>	
<p>7. P.2-17，臺灣本島之地表垂直變動速率圖及其色棒比尺(圖 2.11)，請盡可能再放大！圖說請標註資料來源。此外，圖 2.11 顯示臺灣環島海岸，似乎皆陳現程度大小不一之下沉速率，因此，其對準確海平面上升率之推估計算，將具有極大影響，請就其可能對本研究之影響趨勢，再進一步補充說明。</p>	<p>感謝委員建議，已放大圖 2.11。圖 2.11 為自全球衛星定位系統(GPS)和水準測量之垂直變動速率內插成網格資料。已補充”由內插成果可知，臺灣西南部雲嘉南沿海區域多呈現顯著下沉趨勢(圖 2.11)，且下陷趨勢遠大於海平面上升值(~5 mm/yr [郭重言等人，2015])，最大下沉值為~98 mm/yr。對於西南部沿海地區而言，地表垂直變動遠較海平面上升影響來的大。”於 P.2-17。</p>	<p>審查同意並確認處理說明。</p>
<p>8. P.2-19，請將第二章實際完成之工作與結果，綜整列述說明於 2.8 節之內文。</p>	<p>感謝委員建議，已將第二章實際完成之工作說明於 2.8 節。</p>	<p>審查同意並確認處理說明。</p>
<p>9. P.3-4，針對衛星測高資料，為詳實陳現臺灣環島區域性長、短期之海平面升降變動速率與加速度，請於表 3.1~3.4 中，除了提列海平面上升速率(a_1)外，尚應增列加速度(a_2)；或另新增表單，比照表 3.1~3.4，陳明加</p>	<p>感謝委員建議，已增列加速度(a_2)於表 3.5。</p>	<p>審查同意並確認處理說明。</p>

<p>速度(a_2)，俾利於加速特性之討論、理解及與圖 3.21、圖 3.23 之對照。</p>		
<p>10. P.3-5，利用六參數分別擬合改正後之衛星測高與潮位站資料，並估算出比較六參數擬合速率與六參數加上加速度之擬合速率，係為本計畫採用以估算臺灣周圍海平面變化速率與加速度之重要方法，但由圖 3.2 之結果可清楚看出，六參數加上加速度後對於速率計算之影響非常大。請詳細說明原因，並補述本文後續分析之應對方法及對本研究成果之影響。</p>	<p>10. 因海平面時間序列有加速度之特性，因此六參數加上加速度後對於速率計算之影響非常大。然而自成果可知 20 年資料仍不足以求得精確之加速度，因此還需結合更長期資料進行分析。</p>	<p>審查同意處理說明。</p>
<p>11. P.3-7，第 3.2.2 節中，對照圖 3.4 及圖 3.5，由比較多變量擬合速率與六參數之速率可以清楚看出(圖 3.4)，低頻氣候因子對於宿霧周圍海平面速率影響非常大；又由多變量擬合加上加速度之擬合速率可以清楚看出，加入加速度因子，對於速率計算之影響亦非常大(圖 3.5)，特別是會使速率之標準偏差，由 $\pm 0.67 \text{ mm/yr}$ 上升至 $\pm 1.73 \text{ mm/yr}$。鑑此，在第 3.2 節末及進入 3.3 節前，建議總結提出或建議可較準確計算臺灣周遭海平</p>	<p>11. 感謝委員建議，在未進行計算分析前無法得知何種方法可準確計算臺灣周遭海平面上升速率與加速度，因此無法在 3.2 節末及進入 3.3 節前，總結提出或建議可較準確計算臺灣周遭海平面上升速率與加速度之方法。另外，由圖 3.18 與圖 3.19 可知，臺灣周圍海域之 g、h 無特定值。</p>	<p>審查同意並確認處理說明。</p>

	<p>面上升速率與加速度之方法。另外，式(3.5)與式(3.6)中，當欲進行具空間變化特性之臺灣周遭海平面上升速率與加速度計算時，如何應用僅具時間特性之 ICI 及 DCI？或對臺灣海域而言，其 g、h 應是特定代表值才較合理？</p>	
12.	<p>P.3-22，利用式(3.4)擬合整個臺灣海域(緯度：10°N~30°N、經度：110°E~130°E)的 AVISO 衛星測高資料，結果顯示 1993-2012 臺灣海平面上升速率與加速度分別為 $5.48 \pm 1.15 \text{ mm/yr}$ 與 $-0.06 \pm 0.06 \text{ mm/yr}^2$；而 1993-2015 海平面之速率與加速度分別為 $7.53 \pm 0.95 \text{ mm/yr}$ 與 $-0.18 \pm 0.07 \text{ mm/yr}^2$，這意謂臺灣四周海平面上升加速度均為負值，或意謂海平面上升速率應皆在趨緩中，惟此一結果似乎與一般地球暖化之海平面上昇速率加快(1993-2015 之 $7.53 \pm 0.95 \text{ mm/yr}$ 大於 1993-2012 之 $5.48 \pm 1.15 \text{ mm/yr}$)有所矛盾，請試就此一比較對照結果，作進一步闡釋及說明。</p>	審查同意處理說明。
13.	<p>P.3-22，同上，在考慮氣候因子下(式(3.6))下，臺</p>	審查同意處理說明。

<p>灣周圍海平面同樣呈現上升情況(圖 3.26)，但計算 1993-2012 與 1993-2015 整個臺灣四周海平面之速率、加速度分別為 $3.66 \pm 0.85 \text{ mm/yr}$、$-0.09 \pm 0.04 \text{ mm/yr}^2$ 與 $2.70 \pm 0.81 \text{ mm/yr}$、$0.00 \pm 0.03 \text{ mm/yr}^2$，可見海平面上升速率亦在趨緩中，請試行併上列問題作進一步闡釋及說明。</p>	<p>度，容易因短期因素而受影響。若要精確估計海平面加速度，還需要加入更長期資料。</p>	
<p>14. P.3-27，請將第三章實際完成之工作與結果，綜整列述說明於 3.4 節之內容。</p>	<p>14. 感謝委員建議，已將第三章實際完成之工作與成果說明於 3.4 節。</p>	<p>審查同意並確認處理說明。</p>
<p>15. P.4-9，請再詳細補充說明，比較移除逆氣壓效應前後潮位資料估算之海平面上升速率之一致性(表 4.1-表 4.4)，表示逆氣壓因子對於估算海平面上升速率之影響較小。另外，請減少”此成果與第一期(102 年)至第三期(104 年)一致”。之論述方式，並建請多作相關評估比較結果之引述及具體說明，第一期(102 年)至第三期(104 年)之結果，可用文獻，如(郭等，2013、2014、2015)之方式註明即可，以確保本報告之獨立完整性。</p>	<p>15. 感謝委員建議。已移除”此成果與第一期(102 年)至第三期(104 年)一致”。補充”表示逆氣壓因子對於估算海平面上升速率之影響較小，改正影響量 $0\sim 1 \text{ mm/yr}$”於 P.4-9。</p>	<p>審查同意並確認處理說明。</p>
<p>16. P.4-19，表 4.5 及表 4.6 中，PSMSL 及 CWB 潮</p>	<p>16. 感謝委員建議。已補上各測站之速率。為避免誤解已刪除表 4.5</p>	<p>審查同意並確認處理說明。</p>

<p>位站資料經海潮、逆氣壓效應與基準偏移改正後所估算之海平面上升速率，對於標註為”x”之測站，請明確陳示其海平面上升速率，再在其後補標註”x”。另外，表 4.5 中，由於區域含蓋中國、日本、及菲律賓，故平均值應分別陳示，而不應三區共同平均。</p>	<p>中平均值。</p>	
<p>17. P.4-32，第 4.5 節，針對驗潮站資料，為詳實陳現臺灣環島區域性長、短期之海平面昇降變動速率與加速度，請於表 4.13~4.16 中，除了提列海平面上升速率(a1)外，尚應增列加速度(a2)；或另新增表單，比照表 3.1~3.4，陳明加速度(a2)，俾利於加速特性之討論、理解及與圖 4.36 之對照。</p>	<p>17. 感謝委員建議，已增列加速度(a2)於表 4.17。</p>	<p>審查同意並確認處理說明。</p>
<p>18. P.5-6，第 5 章中，圖 5.3~圖 5.8 之淹水潛勢圖，繪圖時，建請調整配色，使海、陸區域易於區隔，俾利成果之清楚陳示。</p>	<p>18. 感謝委員建議，圖 5.3~圖 5.8 之淹水潛勢圖已可清楚陳示成果，故不更改其配色。</p>	<p>審查同意處理說明。</p>
<p>19. P.附錄 3-1，附錄三請增列基準偏移概述、檢測準則、校正理論、範例與相關校正前、後之圖資，俾使基準偏移程式之操作手冊，具有獨立完整性。</p>	<p>19. 感謝委員建議，已增列基準偏移概述、檢測準則、校正理論、範例與相關校正前、後之圖資於附錄三。</p>	<p>審查同意並確認處理說明。</p>

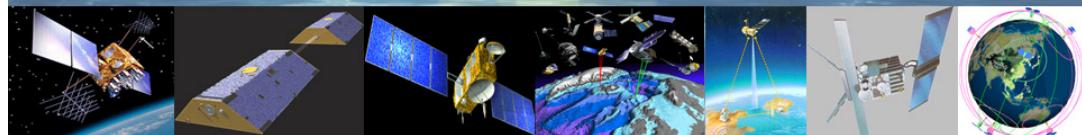
附錄六 期末簡報

臺灣海域海平面上升之加速特性研究
【期末報告】

主持人：郭重言 國立成功大學測量及空間資訊學系
協同主持人：林立青 中央研究院環境變遷研究中心

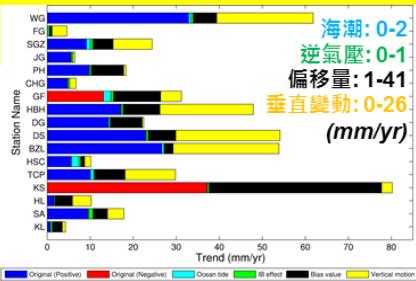
GEODETIC SCIENCE DEPT. OF CIVIL & ENVIRONMENTAL ENGINEERING

港灣技術研究中心 民國105年11月21日



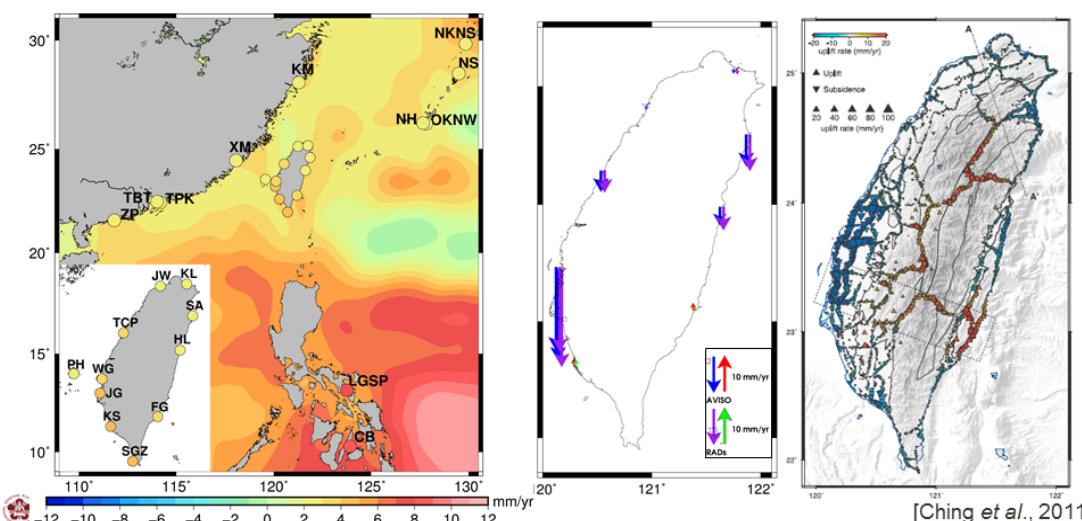
前言

- 臺灣海域近十年之海水面變化速率研究
- 臺灣海域二十年之海水面變化速率研究
- 臺灣海域未來平均海平面升降變動率之推估



WG FG SGZ JG PH CHG GF HB DS BZ HS TCP KS HI SA KL

海潮: 0.2
逆氣壓: 0.1
偏移量: 1.41
垂直變動: 0.26
(mm/yr)

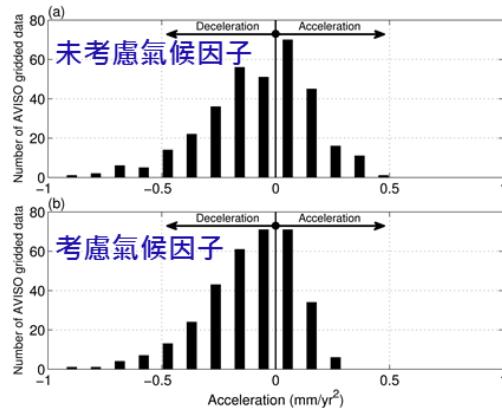


[Ching et al., 2011]

海平面變化相關研究

3

- Zhan等人[2009]利用14年衛星測高(Satellite altimetry)資料估計黃海、東海、南海之海平面上升(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海平面變化主要呈現上升情形
- Church and White [2006] 結合衛星測高與驗潮站資料進行1870-2001年全球海平面重建(sea level reconstruction)，並以二階多項式(second order polynomial)估算全球海平面上升之加速度為 $0.013 \pm 0.006\text{ mm/yr}^2$ (95%信賴區間)
- 由本計畫102-104年計畫成果可知，台灣周遭海平面變化呈現上升趨勢，。然而加速度部分並不明確。
- 廖貞如[2010]評估正高系統可以模擬出最接近現實狀況的淹溢範圍。另外，該研究在評估淹水面積時僅簡單假設某高度下皆為氾濫區域，此方法會造成內陸低窪地區也是淹水區域，造成統計氾濫區域面積誤差。



工作項目

4

- 針對西太平洋、臺灣海峽、東海、南海等臺灣鄰近海域，及含括國內七大商港之臺灣環島近岸海域，分別匯整並應用驗潮站紀錄和衛星測高資料，分區估算臺灣四周海域長(近20年; 1993-2012)、短(近10年; 2003-2012)期海平面昇降變動速率與加速度，並配合氣候變遷模式，進行加速特性探討，同時進行可靠度與準確度分析。
- 針對臺灣鄰近及環島近岸海域，匯整相關觀測與研究文獻，分析並估算不同尺度海洋年際振盪變動對臺灣環島區域性長、短期之海平面昇降變動速率與加速度之影響，並依據驗潮站和衛星測高儀資料，更新計算臺灣四周海域驗潮站位長、短期之地表(地殼)垂直變動速率。
- 應用臺灣環島(含括國內七大商港)近岸海域長、短期之驗潮站紀錄，研提驗潮站潮位基準偏移變動之通用自動調校準則，並進行驗潮站潮位基準偏移校正，再應用移動平均法，先行估算並比較基準調校校前後之海平面昇降變動速率，而後，綜合整理並應用衛星測高資料所分析之相關結果，透過對照比較，探討國內近岸驗潮站實測潮位紀錄應用於估算長、短期海平面昇降變動速率之準確度、可靠度與可行性。
- 依據臺灣四周海域長、短期海平面昇降變動速率與加速度，掌握臺灣環島近岸海域未來海平面昇降變動之趨勢，評估未來可能造成之海岸溢淹區域與範圍，並探討對海岸環境之衝擊影響。
- 建置臺灣環島驗潮站潮位基準偏移自動化偵測與校正模式及其使用手冊，並作技術移轉。



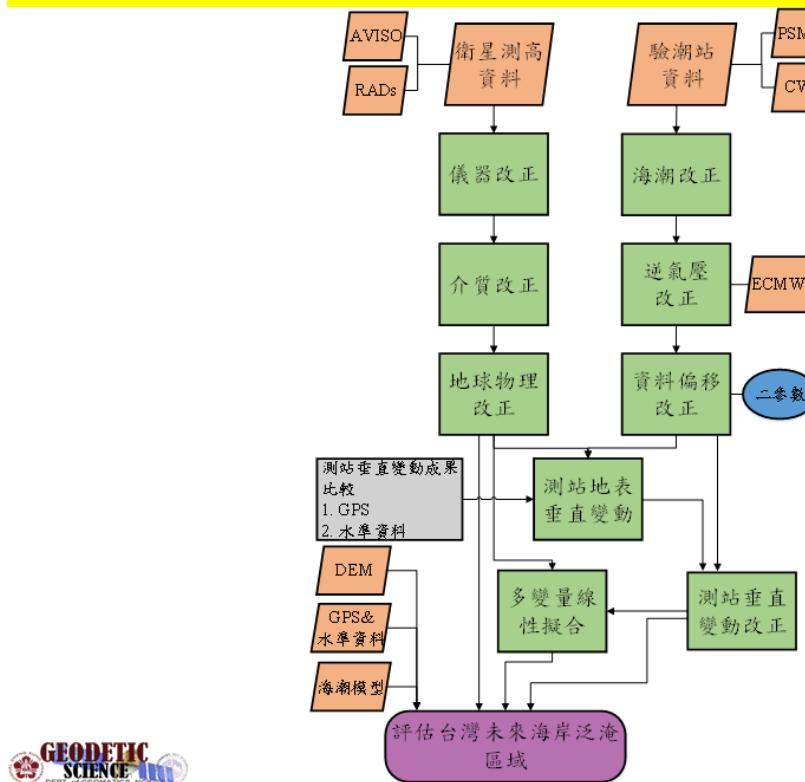
工作進度

5

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
匯整台灣附近相關觀測與研究文獻，分析並估算不同尺度海洋年際振盪變動對臺灣周圍長、短期之海平面上升速率與加速率之影響，並計算測站長、短期之地表(地殼)垂直變動速率	-----	-----	-----	-----							目前進度已完成100%
	-----	-----	-----	-----							
針對臺灣鄰近海域，分別匯整並應用驗潮站紀錄和衛星測高資料，分區估算臺灣海域長(近20年)、短(近10年)期海平面上升速率與加速率	-----	-----	-----	-----	-----						目前進度已完成100%
	-----	-----	-----	-----	-----						
應用臺灣環島近岸海域長、短期之驗潮站紀錄，研提驗潮站潮位基準偏移變動之通用自動調校準則，並與相關文獻成果相比較			-----	-----	-----	-----					目前進度已完成100%
			-----	-----	-----	-----					
依據臺灣四周海域長、短期海平面上升速率與加速度，掌握臺灣未來海平面上升之趨勢，評估可能造成之海岸溢淹區域					-----	-----	-----	-----	-----	-----	目前進度已完成100%
					-----	-----	-----	-----	-----	-----	
建置臺灣環島驗潮站潮位基準偏移自動化偵測與校正模式及其使用手冊，並作技術移轉						-----	-----	-----	-----	-----	目前進度已完成100%
						-----	-----	-----	-----	-----	
文章和期末報告撰寫						-----	-----	-----	-----	-----	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

6

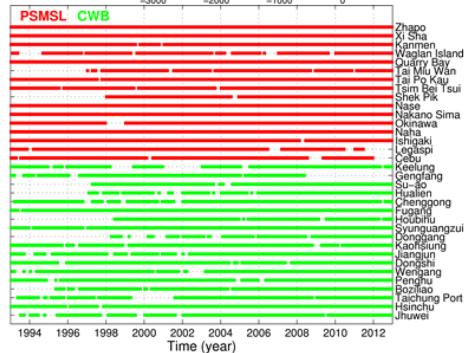
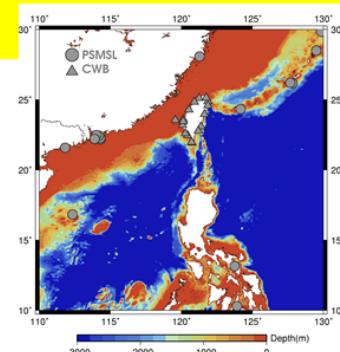


研究資料

7

- 潮位站(Tide gauge; 時間涵蓋1993-2012)
 1. 中央氣象局、內政部、水利署、港灣技術研究中心
 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, 1992/09~2002/08
 2. Jason-1, 2002/01~2009/01
 3. Jason-2, 2008/07~now
- 氣候指標 (Climate index)
 1. 多重聖嬰-南方振盪(ENSO)指數
(Multivariate ENSO Index, MEI)
 2. 太平洋年代際振盪(PDO)指數
- 數值高程模型(Digital Elevation Model, DEM)

內政部地政司(5公尺 x 5公尺)
- 地表垂直變動量(VLM)
 1. GPS資料來自於Ching et al. [2011]
 2. 精密水準資料來自於Chen et al. [2011]



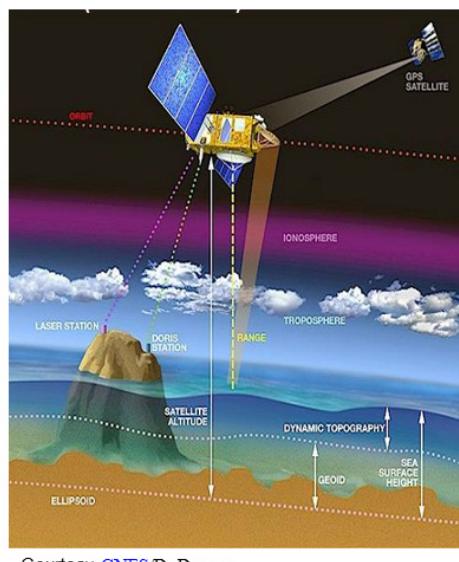
- 最大天文潮(HAT)

TWN5T模型來自於林勝豐等人 [2014]
- 濕地(Wetland)

DEPT. OF GEODETICS, NSYSU

衛星測高模型改正評估

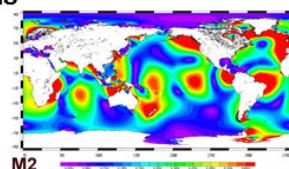
8



Courtesy CNES/D. Ducros

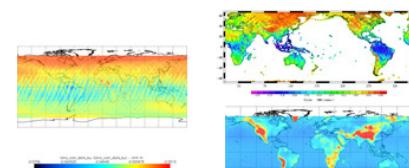
Geophysical corrections

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



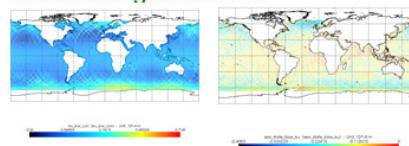
Propagation corrections

- Ionosphere
- Wet troposphere
- Dry troposphere



Surface corrections

- Inverse barometer
- Electromagnetic bias



Data Corrections



Sea Level Rise (SLR)



潮位站資料校正

9



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

TG: 潮位站觀測水位高度資料

t: 時間

a_0 、 a_1 、 A_i 、 B_i : 未知參數

ω_i : 各分潮之頻率

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

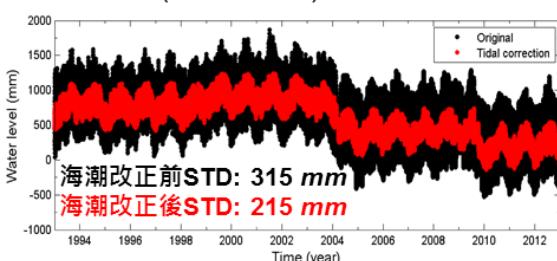
P_{atm} : 海水表面壓力 (毫巴)

P: 隨時間變化之全球海水表面
平均壓力

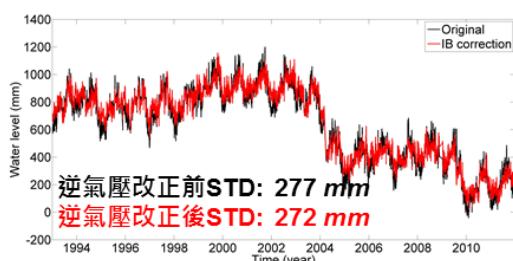
尺度因子 9.948: 中緯度之經
驗值 [Wunsch, 1972]

ECMWF

➤ 海潮改正(高雄潮位站)



➤ 逆氣壓改正(高雄潮位站)



潮位站資料校正

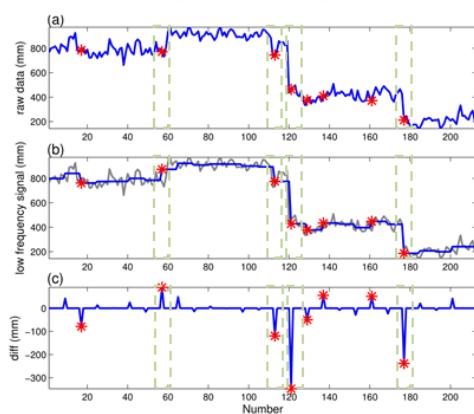
10



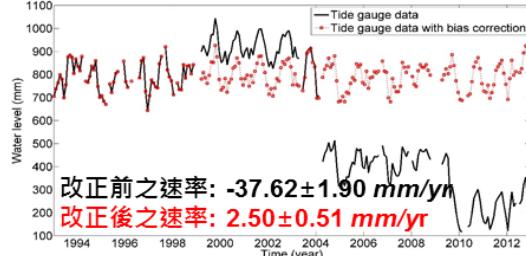
$$VM(t) = a + bt$$

VM: 地表垂直變動時間序列
 a 與 b : 偏差與垂直變動斜率

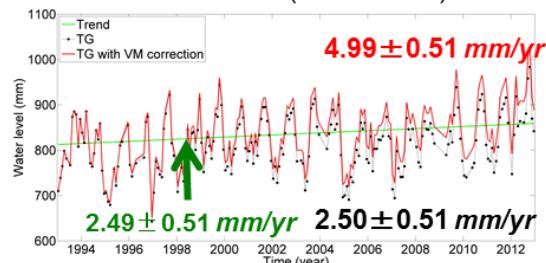
➤ 偏移量偵測(高雄潮位站)



➤ 偏移量改正(高雄潮位站)

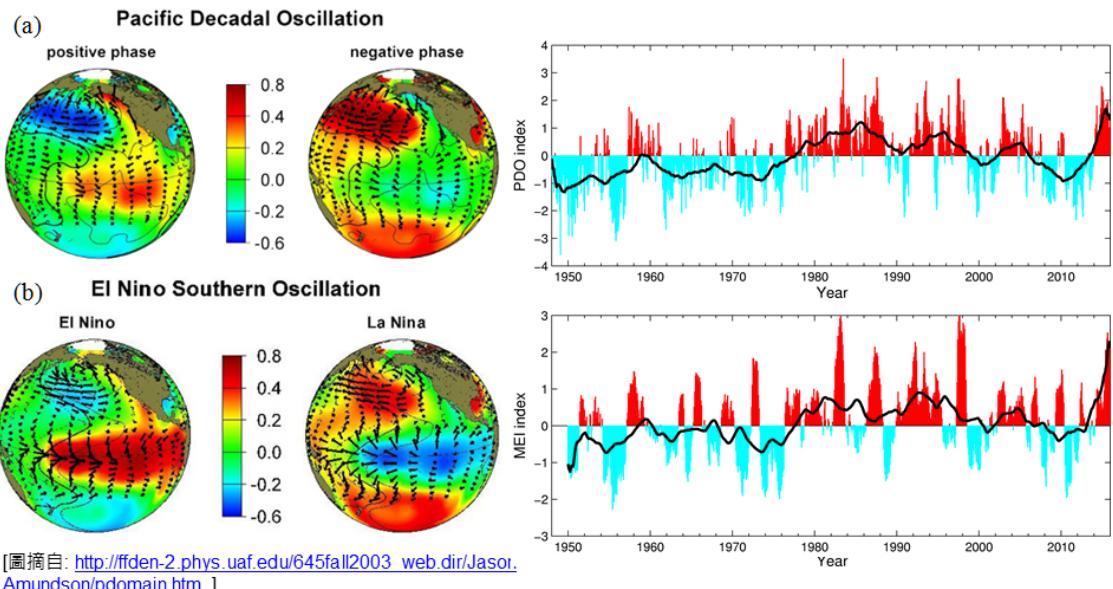


➤ 測站垂直變動改正(高雄潮位站)



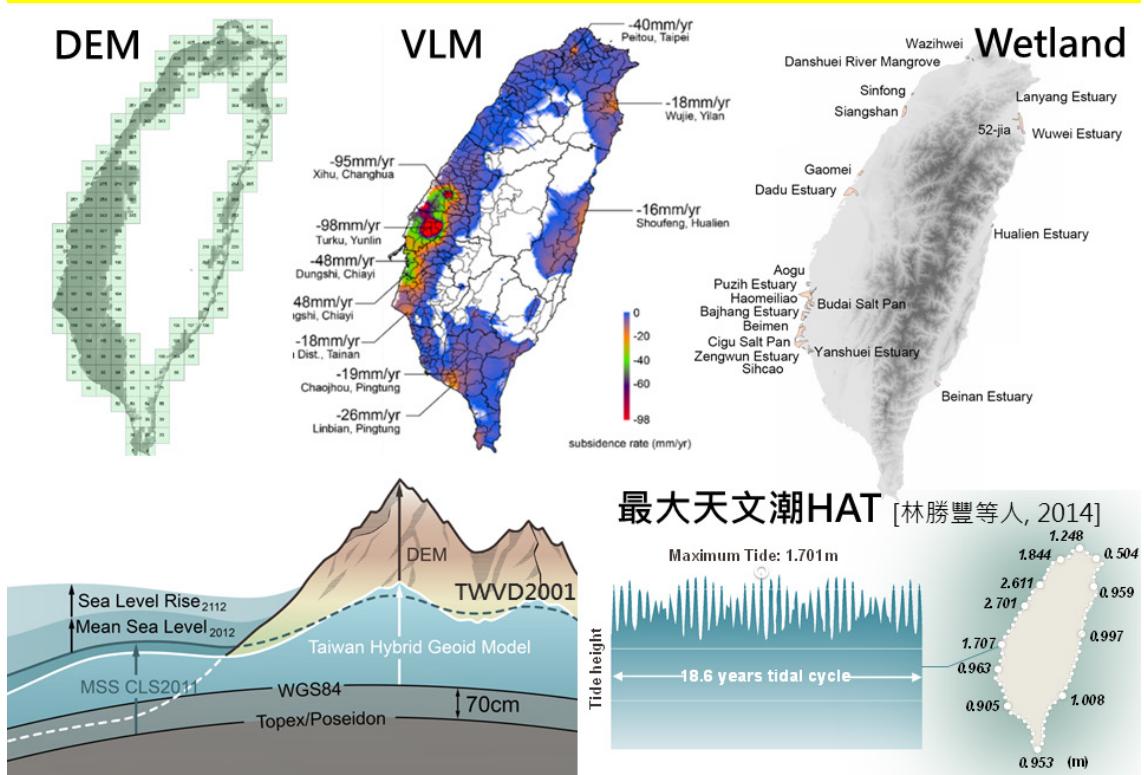
氣候指標

11



計算溢淹區域之相關資料

12



研究方法-多變量線性擬合法

13

多變量線性擬合 [Zhang and Church, 2012]

$$SL(t) = a + a'_1 t + c \sin(2\pi t) + d \cos(2\pi t) + e \sin(4\pi t) + f \cos(4\pi t) + g ICI + h DCI$$

SL : 測高資料

a : 偏差

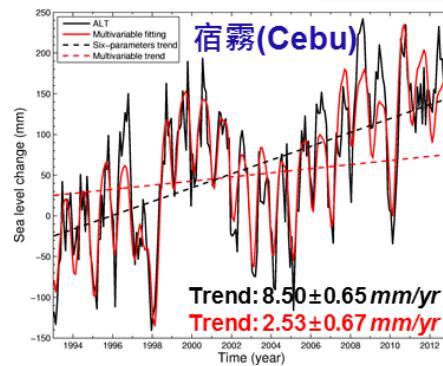
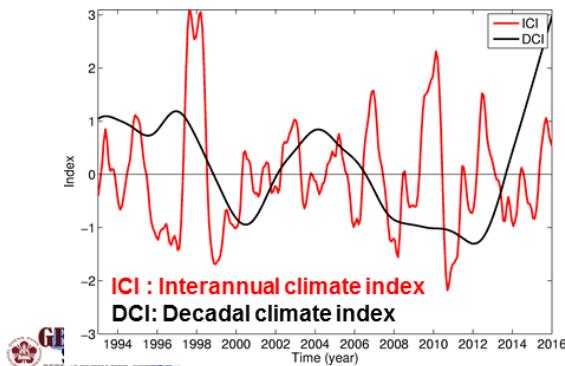
a'_1 : 海平面上升速率

ICI : 經帶通濾波後MEI指數

DCI : 經平滑化後PDO指數(65個月移動平均)

g 與 h : ICI 與 DCI 係數，正、負號表示海平面與對應氣候指標

為正、負相位，其大小表示氣候指標對於海平面之影響量



氣候指標

移除季節性
訊號

平滑化處理

研究方法-海平面上升加速度

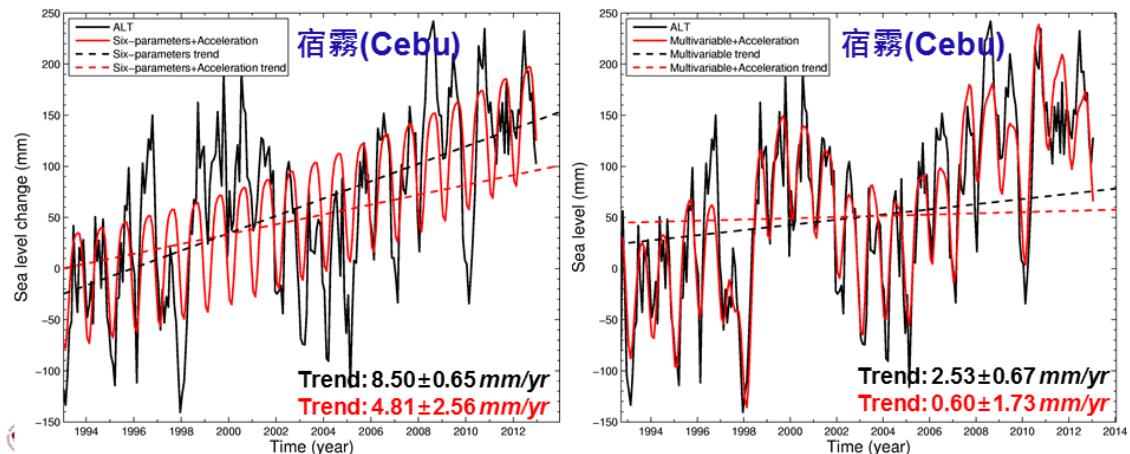
14

Fitting 6+Acceleration(a'_2)

$$SL(t) = a + a'_1 t + a'_2 t^2 + c \sin(2\pi t) + d \cos(2\pi t) + e \sin(4\pi t) + f \cos(4\pi t)$$

Multivariable+Acceleration(a'_2)

$$SL(t) = a + a'_1 t + a'_2 t^2 + c \sin(2\pi t) + d \cos(2\pi t) + e \sin(4\pi t) + f \cos(4\pi t) + g ICI + h DCI$$

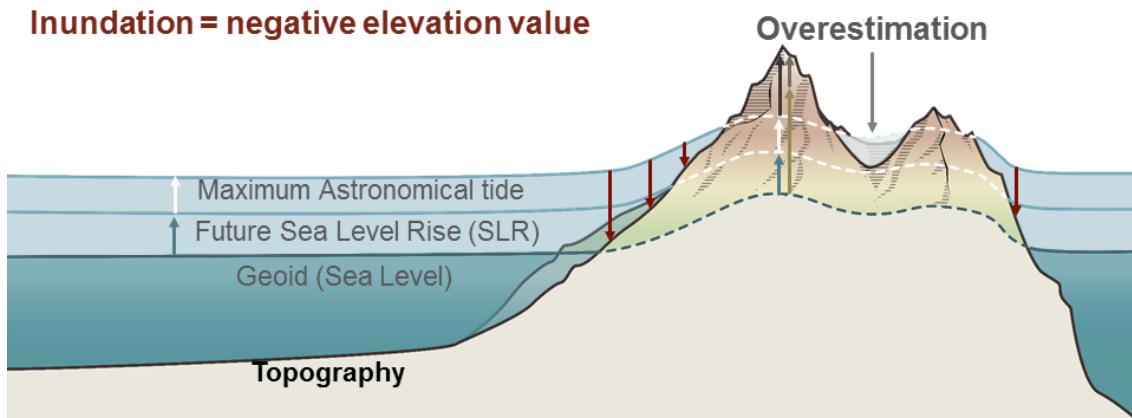


研究方法-靜態淹水

15

$$\text{Inundation map} = \text{DEM}_{t(0)} + \underset{s \times (t_x - t_0)}{\text{VLM}} - \underset{SLR_{trend} \times (t_x - t_0)}{\text{SLR}} - \underset{\text{HAT}_{18.6\text{yr}} \text{ from TWN5T}}{\text{HAT}}$$

Inundation = negative elevation value



研究方法-靜態淹水

16

Employ Region growing algorithm to judge the actual inundation area



```

Sea level rise at 2112 = 1m
Seed point 1

Sea level rise at 2112 = 1.2m
Seed point 2

► Find out grids at coastal line
  Foreach grids
  {
    ► Get DEMfuture
    Region growing : DEMfuture < 0
      if depth(i,j) > previous depth(i,j)
        ► DEM(i,j) is inundated
  }
}

```

■ 絶對海平面上升速率

■ 絶對海平面上升加速度

■ 臺灣海岸淹水潛勢



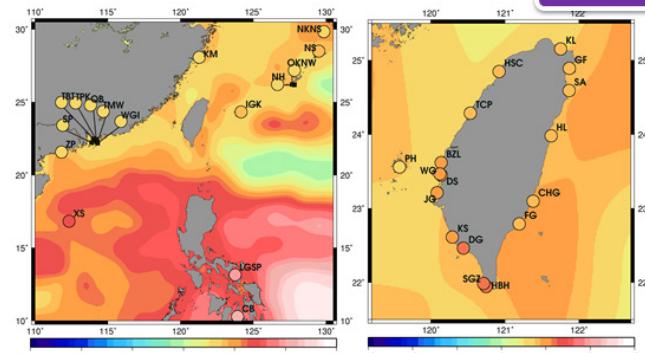
Sea Level Rise Vertical Motion Tide effects

■ 臺灣沿岸重要濕地之淹水潛勢

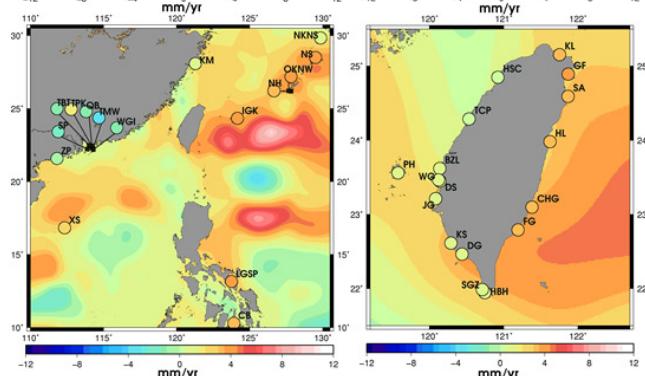
1993-2012 絶對海平面上升速率

✓ 使用AVISO衛星測高資料

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)

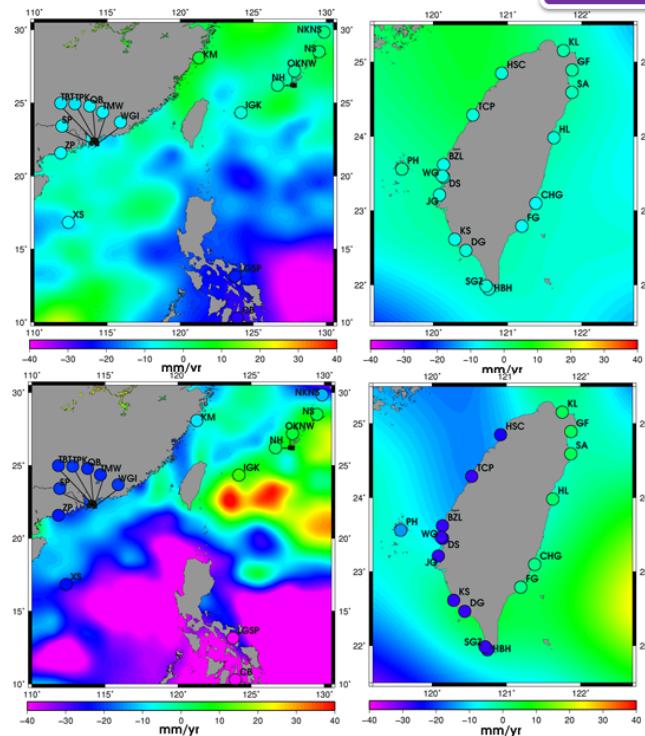


低頻海洋訊號與海平面變化之關係

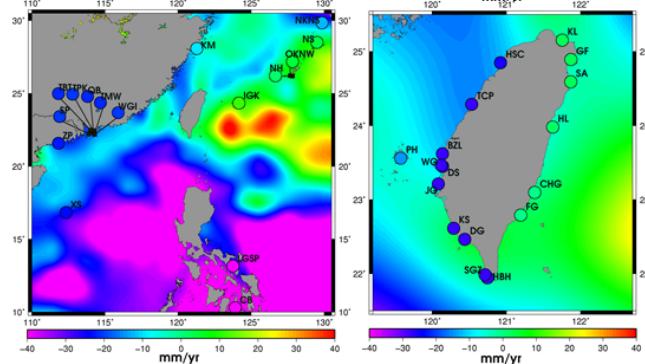
19

✓ 使用AVISO衛星測高資料

係數 g (MEI)



係數 h (PDO)

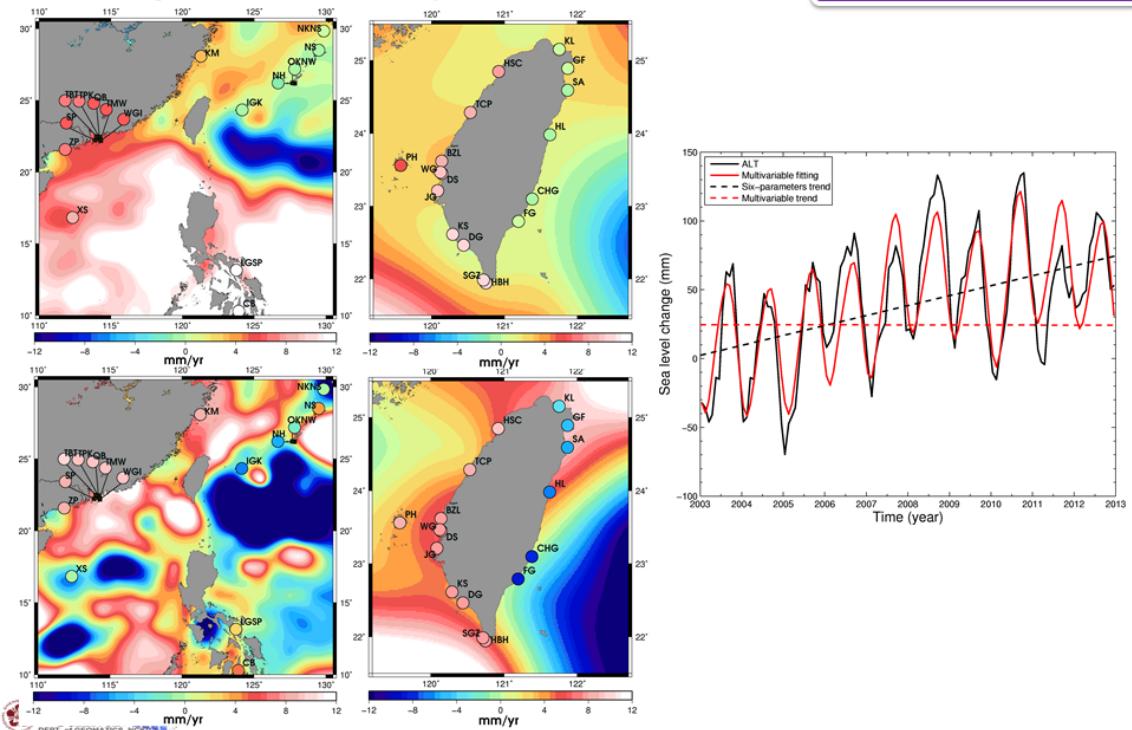


2003-2012 絶對海平面上升速率

20

✓ 使用AVISO衛星測高資料

六參數擬合&多變量線性擬合



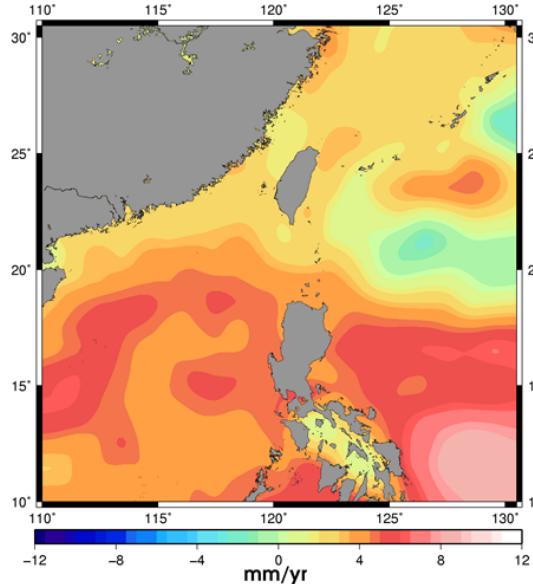
附錄 6-10

1993-2015 絶對海平面上升速率

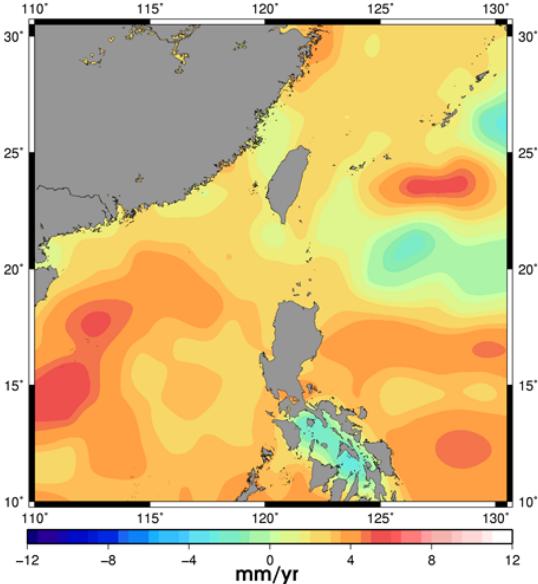
21

✓ 使用AVISO衛星測高資料

六參數擬合(未考慮氣候因子)



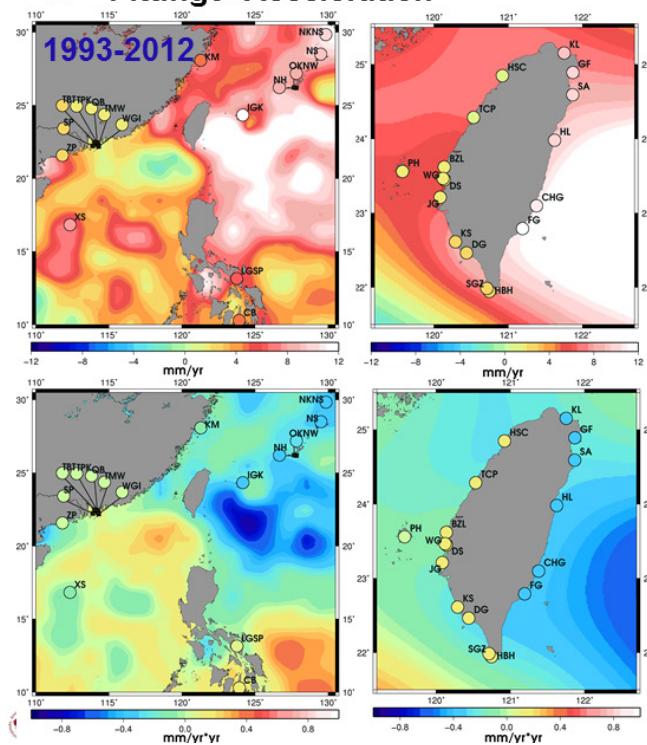
多變量線性擬合(考慮氣候因子)



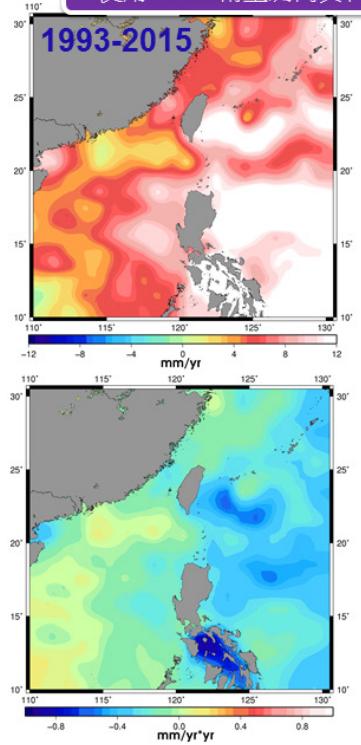
絕對海平面上升速率與加速度

22

■ Fitting6+Acceleration



✓ 使用AVISO衛星測高資料

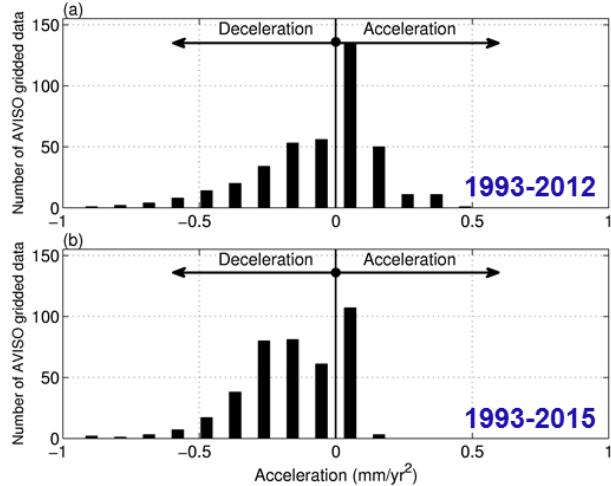


絕對海平面上升速率與加速度

23

Time period	Fitting6		Fitting6+ Acceleration		Multivariable		Multivariable+ Acceleration	
	Trend (mm/yr)		Trend (mm/yr)	Accel. (mm/yr ²)	Trend (mm/yr)	Trend (mm/yr)	Accel. (mm/yr ²)	
2003-2012	7.23±0.78		x	x	-0.40±1.98	x	x	
1993-2012	5.23±0.31		5.48±1.15	-0.06±0.06	2.43±0.32	3.66±0.85	-0.09±0.04	
1993-2015	3.52±0.25		7.53±0.95	-0.18±0.07	2.55±0.18	2.70±0.81	0.00±0.03	

Fitting6+ Acceleration



臺灣海岸淹水潛勢

24

Inundation map = DEM_{t(0)}



VLM

$$s \times (t_x - t_0)$$

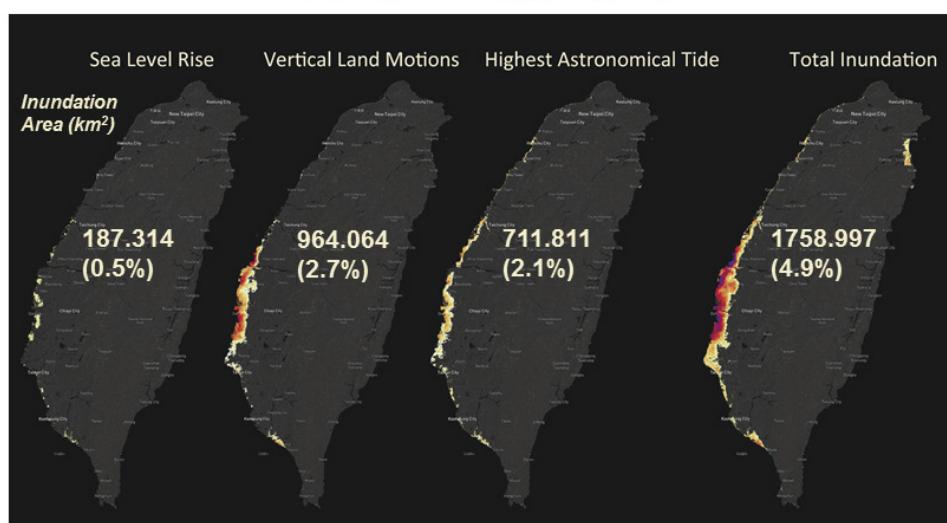
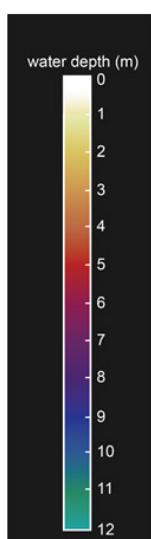


SLR

$$SLR_{trend} \times (t_x - t_0)$$

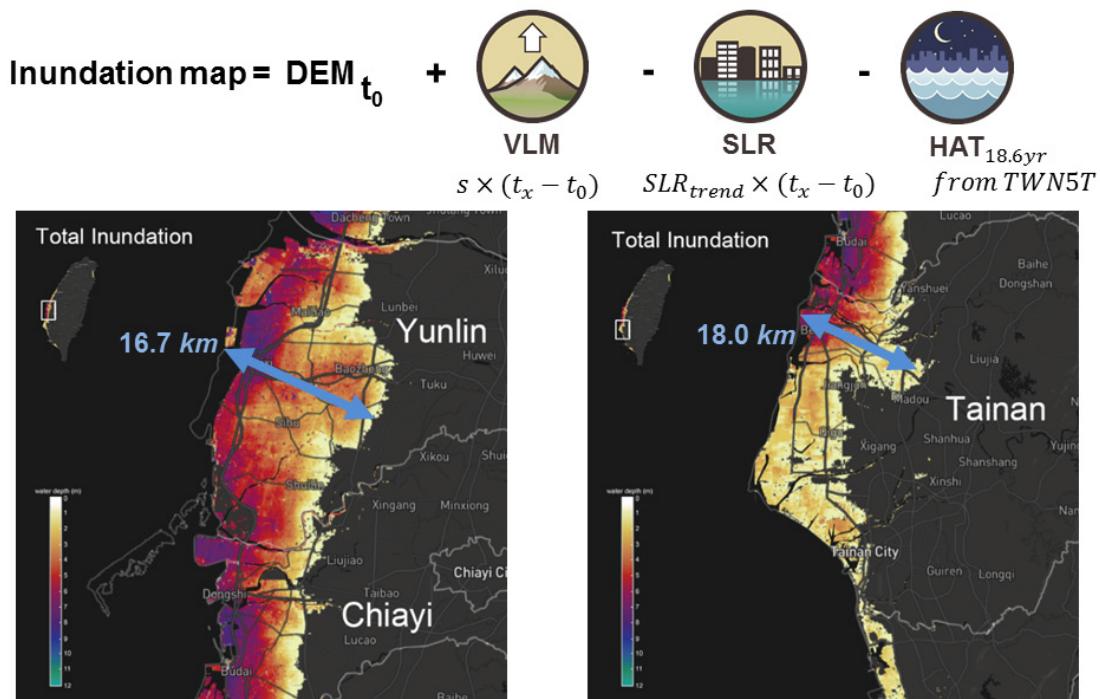


HAT_{18.6yr}
from TWN5T



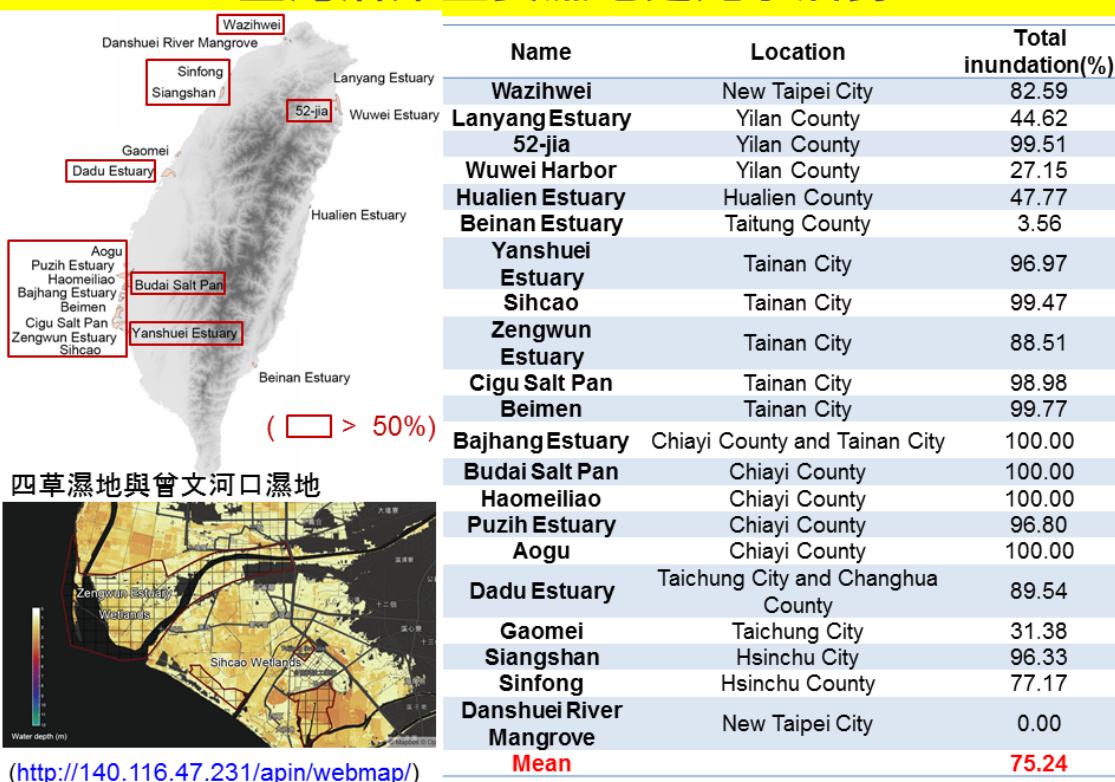
臺灣海岸淹水潛勢

25



臺灣沿岸重要濕地之淹水潛勢

26



結論與建議

27

- 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平面上升速率由北往南逐漸增快；在考慮氣候因子影響下，各海域之海平面速率則較為一致。對於整個台灣周圍海域而言，修正氣候因子前、後之測高資料估算1993-2012絕對海平面上升速率分別為 $5.23 \pm 0.31\text{ mm/yr}$ 及 $2.43 \pm 0.32\text{ mm/yr}$ ，顯示氣候因子造成台灣附近海平面影響量約 2.80 mm/yr ，其結果接近利用百年潮位站資料估算之結果($\sim 2\text{ mm/yr}$; [Douglas, 2001])。
- 由多變量擬合成果可知，聖嬰-南方振盪(ENSO)現象主要影響的海平面範圍為緯度 $\pm 20^\circ$ 以內，而太平洋年代際振盪(PDO)現象則影響整個台灣周圍海域，且其影響量大於ENSO現象。



結論與建議

28

- 利用衛星測高資料估算近二十年(1993-2012與1993-2015)台灣周圍海平面上升加速度。結果顯示1993-2012估算成果與1993-2015成果並不一致，表示20年資料仍不足以求得精確之加速度。
- 由模擬溢淹成果可知，結合三個影響因子所計算出的2112總淹沒面積為 1758.997 km^2 ，約為台灣本島陸地面積之4.9%。而地表垂直變形與最大天文潮因子為三個情境中較為嚴重的兩個因子，各自造成 964.064 km^2 與 771.811 km^2 (約陸地面積2.7%與2.1%)的淹沒面積。雖然海平面上升造成的溢淹程度較輕微，僅造成0.5%陸地面積淹沒，為三者因子影響程度最小，但是海平面上升因子是持續性的影響。此外，彰化、雲林、嘉義與台南為受到淹水威脅較嚴重的區域。



■ 台灣本島重要沿岸濕地幾乎皆受到淹水潛勢威脅，沿岸重要濕地平均面積將損失75%，表示海平面上升將對台灣重要的沿海濕地造成嚴重衝擊與影響。

■ 建議：

1. 利用20年資料不足以精確求得海平面上升加速度。未來可結合衛星測高與潮位站資料進行台灣周圍海平面重建(sea level reconstruction)，以估算海平面上升速率與加速度。
2. 本計畫規劃之總期程自民國102年起，共計4年。希冀四年計畫之相關研究成果可供政府海岸以及土地管理部門制定因應全球氣候變遷相關災害的調適政策。

