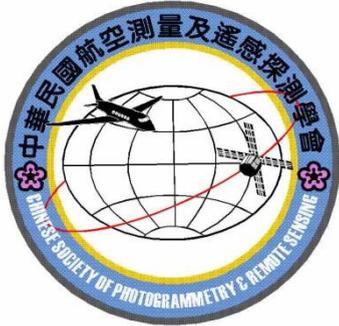


第二十卷第一期
中華民國一〇五年一月

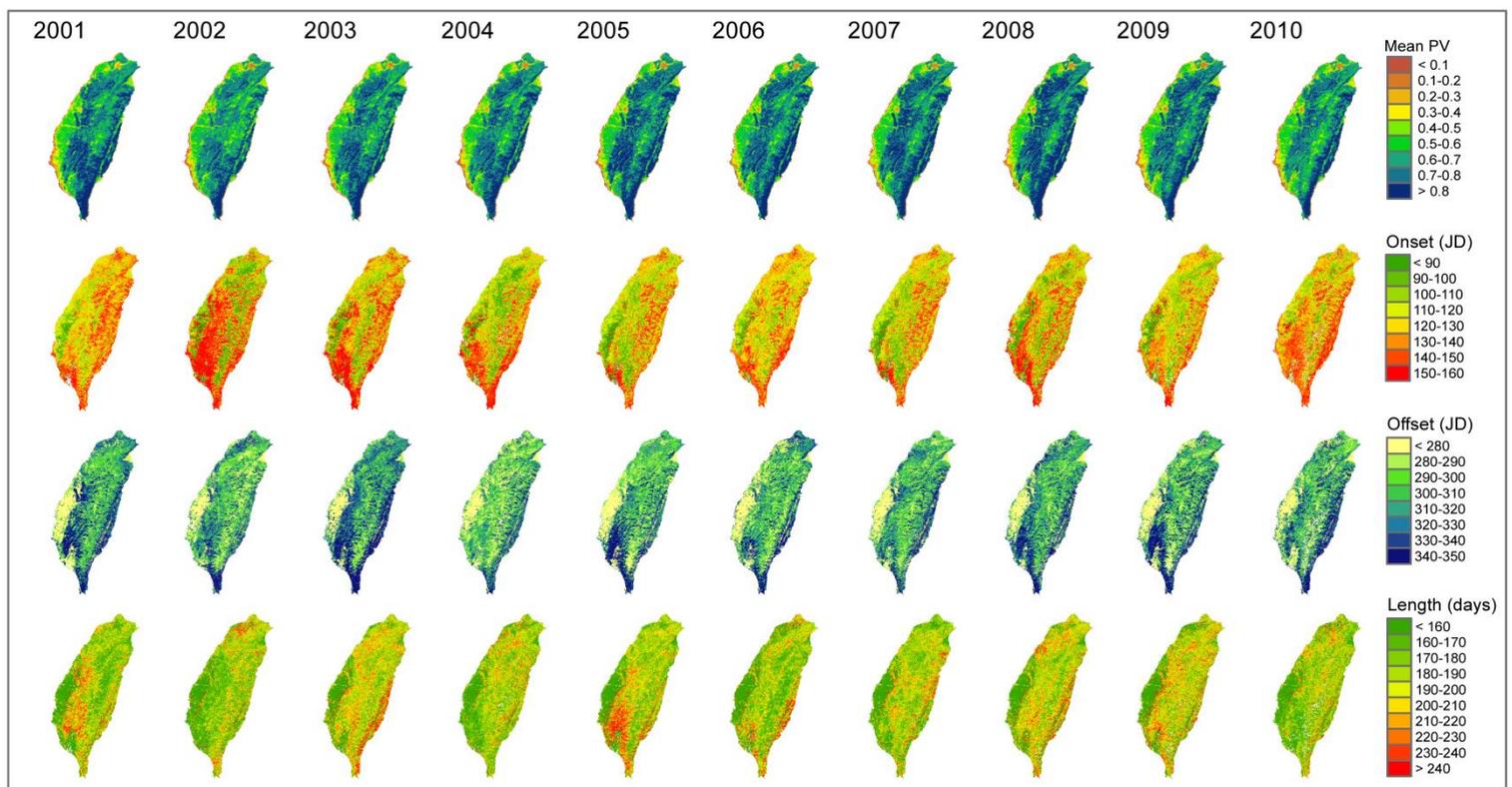
ISSN 1021-8661
DOI: 10.6574/JPRS



航測及遙測學刊

中華民國航空測量及遙感探測學會出版

大尺度遙感探測專刊



Journal of Photogrammetry and Remote Sensing

Volume 20 No.1

January

2016

Published by Chinese Society of Photogrammetry and Remote Sensing

航測及遙測學刊

Journal of Photogrammetry and Remote Sensing

發行人：史天元

出版者：中華民國航空測量及遙感探測學會

地址：台北市文山區羅斯福路五段 113 號三樓

信箱：台北市郵政 93-158 號信箱

電話：886-2-8663-3468 886-2-8663-3469

傳真：886-2-2931-7225

電子信件：csprsmail@csprs.org.tw

網址：http://www.csprs.org.tw

PUBLISHER: Peter Tian-Yuan Shih

PUBLISHED BY: Chinese Society of Photogrammetry and Remote Sensing

Address: 3F, No.113, Sec.5, Roosevelt Road, Taipei, Taiwan

Mail Address: P. O. Box. 93-158, Taipei, Taiwan

Tel: 886-2-8663-3468 886-2-8663-3469

Fax: 886-2-2931-7225

E-mail: csprsmail@csprs.org.tw

Web Site: http://www.csprs.org.tw

總編輯

趙鍵哲

國立臺灣大學土木工程學系

電話：886-2-2367-8645

傳真：886-2-2363-1558

電子信件：jprssubmit@gmail.com

EDITOR-IN-CHIEF

Jen-Jer Jaw

Department of Civil Engineering, National Taiwan University

Tel: 886-2-2367-8645

Fax: 886-2-2363-1558

E-Mail: jprssubmit@gmail.com

編輯委員(依中文姓氏筆劃排列)

王素芬 (彰化師大)

王聖鐸 (師範大學)

江凱偉 (成功大學)

何宗儒 (海洋大學)

林昭宏 (成功大學)

邱式鴻 (政治大學)

林老生 (政治大學)

林唐煌 (中央大學)

周天穎 (逢甲大學)

洪榮宏 (成功大學)

徐百輝 (臺灣大學)

陳朝圳 (屏東科大)

張中白 (中央大學)

黃金聰 (臺北大學)

曾義星 (成功大學)

詹進發 (政治大學)

楊明德 (中興大學)

趙鍵哲 (臺灣大學)

蔡富安 (中央大學)

蔡榮得 (中興大學)

EDITORIAL BOARD

S. F. Wang (National Changhua University of Education)

S. Wang (National Taiwan Normal University)

K. W. Chiang (National Cheng Kung University)

C. R. Ho (National Taiwan Ocean University)

C. H. Lin (National Cheng Kung University)

S. H. Chio (National Chengchi University)

L. S. Lin (National Chengchi University)

T. H. Lin (National Central University)

T. Y. Chou (Feng Chia University)

J. H. Hong (National Cheng Kung University)

P. H. Hsu (National Taiwan University)

C. T. Chen (National Pingtung University of Science and Technology)

C. P. Chang (National Central University)

J. T. Hwang (National Taipei University)

Y. H. Tseng (National Cheng Kung University)

J. F. Jan (National Chengchi University)

M. D. Yang (National Chung Hsing University)

J. J. Jaw (National Taiwan University)

F. Tsai (National Central University)

J. D. Tsai (National Chung Hsing University)

封面照片說明 About the Cover

利用植被指數進行地表綠度變化的監測是常見的分析，利用高時間解析度的遙測資料解析地表植被與不同時間尺度的氣候變異在國際間越來越受重視。本圖是以光合作用植物(PV, photosynthetic active vegetation)為基礎，利用 TIMESAT 物候分析軟體得到 2001-2010 年間生長季開始時間(onset)、生長季結束時間(offset)及生長季長度(length of the growing season)。以 2002 年為例，因為春季乾旱(2-3 月雨量 < 40 公厘)的影響，明顯造成生長季延後及生長季長度縮短的結果。此分析方法有利於未來氣候變動或干擾的研究。

大尺度遙感探測

陳良健

國立中央大學太空及遙測研究中心

高速人為活動造成的環境變化讓人們對未來的生活福祉憂慮日深。故，監測環境現象與變遷從而瞭解地球的運作機能以因應未來成為迫切的任務。衛星以其特殊的空間位置，達成在地表難以完成的任務。衛星遙測則以綜觀攬要的特性，重複且大範圍快速取樣的功能，提供大尺度環境監測的最佳解決方案。逾半個世紀的遙測科技發展，研究重心已從影像處理延伸至更深化的科學分析，進而貢獻永續發展。多元的資料來源，強大的系統分析能力及知識與經驗的累積所建構的發展支柱使人們對衛星遙測已由好奇演化為不可或缺的工具。

本特刊五篇論文涵蓋生態，農業，都市環境，製圖及衛星測高與重力測量，其中四篇使用影像資料。研究內容除空間分析外，亦包括以多時序資料探索環境之變遷。光學影像除用於南海稀疏島嶼之測繪，亦經由廣域衛星 MODIS 影像分析植物之分布及稻米之生產。在都市環境監測方面量化熱島效應並據以分析產業發展。衛星測高技术與重力測量雖與前述之光學影像分析有所不同，但其非接觸式之觀測方式亦屬遙測之範疇。本刊論文使用的光學衛星影像解析度從 0.5 公尺到 1000 公尺，掃描寬從十餘公里到超過二千公里，且皆使用多光譜及多時序的影像。就遙測領域的三個重要解析度：空間，時間，及光譜而言，本刊論文有全面的涵蓋。就處理技術而言，則兼容幾何與輻射資料之處理分析。

生態是永續發展的重要議題，植生分布則是生態系統建構的基礎，本刊第一篇論文「以 MODIS 時序資料分析台灣植被物候空間分布」分析植物各生長季節之特性，有助釐清氣候變化及環境擾動因素對植物生長之影響。第二篇論文「利用 MODIS 時序影像進行下湄公河盆地稻作區域監測初探」則對全球稻米重要生產區以多時序衛星影像進行監測，其成果可望推廣。第三篇論文「都市熱島效應於產業發展及其影響因子分析之研究」利用 Landsat 5 影像量化台中市之熱島效應並分析其與工業區間之關係。第四篇論文「應用衛星影像測繪南海島礁」使用 0.5 公尺解析度之衛星影像測繪南海島礁並偵測變遷，對我國疆域圖資貢獻具體。第五篇論文「利用 GRACE、衛星測高、海洋模型估計地心變動」，則以非接觸式之衛星遙測概念進行衛星大地測量，再配合海洋模型估計地心變動。本刊五篇論文兼顧廣度與深度，涵蓋科學與應用，貢獻由國內到國際，內容充實，值得細讀。

以 MODIS 時序資料分析台灣植被物候空間分布

張仲德¹、黃倬英^{2*}

摘要

地表植被物候反應生態系對於氣候變化的作用，本研究利用 2001 至 2010 年間由 MODIS (the Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) 波段反射率資料演算得到的月份光合作用植物(PV, photosynthetically active vegetation)資料，透過 TIMESAT 軟體分析台灣地區地表物候空間分布的特性，包括生長季開始時間(onset)、生長季結束時間(offset)及生長季長度(length of the growing season)。結果顯示台灣地區不同年間生長季開始時間與生長季結束時間($r = 0.67$, $p = 0.035$)及生長季長度($r = -0.77$, $p = 0.009$)具有顯著關係；其中生長季開始時間的延遲受到聖嬰現象(ENSO, El Niño-Southern Oscillation)影響的春季乾旱所控制，並對生態系造成負面衝擊。TIMESAT 是相當穩定的物候分析工具，有助於釐清氣候變化及環境擾動因素對植物生長反應的影響。

關鍵詞：中解析度成像光譜儀、物候分析、氣候變異、聖嬰現象

1.前言

氣候變遷對於自然生態系的影響已相當顯著，包括地表植物生長季的提前、生長季時間的延長及物種分布的變化等物候(phenology)的改變，並進而影響動植物生長、發展及移動等，已成為全球氣候變遷相關議題中重要的一環(Parnesan & Yohe, 2003; Jeong et al., 2011)。由於陸地上的植被對氣候改變的反應相當敏感，又與大氣及陸地之間物質、能量交換息息相關，因此探討物候與氣候之間的關聯性是了解及預測未來氣候變遷對全球生態系影響的重要課題(Crabtree et al., 2009)，分析物候的季節循環與溫度和水分獲得等氣候參數之間的連結，以及應用不同方法決定物候的各個階段，例如生長季開始、結束時間及生長季長度等，都受到極大的關注。傳統物候研究在特定地點記錄特定

物種各個生長階段出現的時空特性，雖然可以提供可靠而直接的資訊，但需要花費相當多的人力及時間，尤其對偏遠或不易到達地區的長期監測仍存在相當大的限制。

近二十多年來隨著衛星及遙測資訊在時間、空間及光譜解析度的精進，有利研究者對較大尺度的區域分析地面植物隨著不同季節生長活動所反映出來的光譜訊號強弱或植生指標變化，評估地面植被相對生長物候變動的情形，稱之為地表物候(land surface phenology; White & Nemani, 2006; Fisher & Mustard, 2007)。張仲德等(2011)回顧國內外近三十年來對植被物候現地觀測及遙測分析的發展及趨勢，整理的結果中大致顯示寒帶及溫帶地區植被物候主要受溫度主導，例如由中國大陸近四十年的物候觀測來看，隨著經緯度的推移，緯度每增加一度，開花物候延後 2.7 天；經度往東每增加一度，則延後

¹ 國立臺灣大學地理環境資源學系 博士後研究員

² 國立臺灣大學地理環境資源學系 副教授

收到日期：民國 103 年 03 月 07 日

修改日期：民國 103 年 11 月 03 日

接受日期：民國 103 年 11 月 07 日

*通訊作者，電話：02-33663733, E-mail: choying@ntu.edu.tw

0.65 天；海拔高度每增加 100 公尺，延後 1.2 天(Zheng et al., 2002)，溫度是影響物候變化最重要的因子。而乾燥及半乾燥地區植被物候則受雨量空間分布的變動所影響(Nicholson et al., 1990; Nicholson & Farrar, 1994)。相對於現地觀測記錄的困難及空間代表性，衛星資料的分析將可提供不同時空尺度下探討植被物候變化的可能性。

經由遙測資訊計算的長時間植生指標 (vegetation index) 如 NDVI (the Normalized Difference Vegetation Index, 常態化差異植生指標) 及 EVI (the Enhanced Vegetation Index, 增揚植生指標)，已廣泛應用於全球與區域生態環境變化的監測、植被覆蓋變化、物候特徵萃取及作物生長量評估等(Eklundh et al., 2009; Kariyeva and van Leeuwen, 2011)。植生指標所反映的植被生長時間序列曲線應該是連續而相對平滑的，但可能受到感測器本身問題、太陽照射角度、地表雙向反射影響、大氣雲霧及地表冰雪等干擾因素而產生雜訊，因此研究也經常使用最大值合成法(MVC, maximum value composite)來降低干擾的程度(Huete et al., 2002)，但合成時間內仍會存在干擾使植生指標的時間序列呈現不規則的變動，降低季節變化的趨勢或者無法明確監測到植被受氣候變異所造成的影響 (Atkinson et al., 2011)。因此目前已有相當多方法發展出來用以重建植生指標的時間序列曲線，例如最佳斜率萃取法(BISE, best index slope extraction, Viovy et al., 1992)、門檻值法(threshold, Dall'Olmo & Kamieli, 2002)、移動平均法(moving average curve, Reed et al., 1994)及季節中點法(seasonal mid-point, White et al., 1997)等，其目的主要是在於能有效消除干擾的影響，反映植被真實的物候生長規律。從過去的研究來看，不同方法的適用性與研究區域內所要分析的植被覆蓋類型有著緊密的關聯，也都各具有其應用上的優點(Beck et al., 2006; Hird & McDerimid, 2009; Hufkens et al., 2012)。近年來，TIMESAT 軟體被發展用來評估

遙測時間序列資料，能夠計算研究區域中各個像元的物候指數 (phenological metrics)，如生長季開始及結束時間、生長季長度、變化幅度和積分等代表植被生長的規律及變異 (Jönsson & Eklundh, 2004)。也被應用到其他的研究領域中，如環境及物候變遷空間分布的變化 (Heumann et al., 2007)、增進生態系劃分的準確性(Tottrup et al., 2007)或提供乾燥生態系火災潛勢的遙測及氣候指標 (Verbesselt et al., 2006)等。在許多碳循環模式及生產力評估的研究中，也將 TIMESAT 視為長時期遙測資料平滑及填充的重要分析工具(Olofsson et al., 2008; Schubert et al., 2012)，其中北美碳計劃 (North American Carbon Program)中也利用 TIMESAT 分析 MODIS (the Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer)影像所得到物候指數做為標準的物候產品如 MOD09PHN 及 MOD15PHN (Jones et al., 2012)，因此對於研究應用的進展而言提供相當多的協助。

台灣屬於熱帶及亞熱帶高山島嶼，劇烈的海拔梯度變化造就氣候及生態多樣性的特色(Ding et al., 2008)，但不同的生態系分布範圍可能相當侷限，面對全球氣候變遷所造成溫度及雨量的影響，即使是微小改變對生態系的衝擊也相當大。因此地表植被對於氣候條件變化的反應相當敏感，同時也可能間接影響其他的生物活動和生存。台灣早期為了精進農業栽培技術並掌握農作物生長狀態，曾對稻米及果樹生長物候進行調查，其中果樹生長之同時線(isochrone)隨緯度每增加一度或高度增加 100 公尺，延遲四日；但稻米受人為灌溉影響很大，因此生長同時線沒有差異(張月娥, 1958)。對於森林地區的物候觀察，通常是在單一試驗地從事一至三年的調查，包括植物發芽、開花及結實等(林國銓等, 1997; 楊金昌等, 1999; 曾喜育等, 2005)，但大部分記錄的時間長度不足以分析或探討氣候變化所造成的影響。而衛星資料的相關研究，例如應用遙測影像分析植被光譜季節變化，主要目的是為了區分

不同森林類型(呂明倫等, 2008), 但影像來源如 SPOT (Satellite Pour l'Observation de la Terre)或 Landsat (Land satellite)的再訪週期(revisit period)較長, 若受到天氣因素的干擾並不容易得到高品質影像, 對應用衛星資訊分析植被物候產生相當大的限制。近年來由於高時間解析度的衛星影像如 MODIS 資料取得更加便利, 包含了不同的空間解析度(250-1000 m)及光譜解析度(36 個波段)有助於不同研究項目的進行, 藉由每天取得且含蓋台灣全島的資訊能更即時有效地分析地表植被生長活動的變化。Chang et al. (2014a, b)利用近十年 MODIS 資料探討台灣地區不同植被類型與氣溫和雨量之間的關聯, 並對區域及大尺度氣候因素與植被生長反應有進一步的釐清。不過相對於許多全球及大陸尺度的物候分析, 目前對熱帶及亞熱帶島嶼生態系的了解仍相當缺乏。因此本研究將以 2001-2010 年間 MODIS 資料為基礎, 應用 TIMESAT 分析得到台灣地區地表植被生長季開始時間、結束時間及生長季長度的變化, 以及探討影響物候參數變動的因素, 此地表物候的型態間接提供了植被覆蓋空間分布的特徵, 同時也對於植被生長的反應與年間氣候變異和關聯提供相當有價值的資訊。

2. 研究方法與材料

2.1 研究地區

台灣島位處歐亞大陸與太平洋交界, 面積約 3 萬 6 千平方公里, 在東西寬不到 150 公里的距離內, 高度的梯度變化將近 4000 公尺; 北回歸線穿越台灣中部, 將台灣南北劃分成熱帶季風氣候及亞熱帶季風氣候。年平均溫度約 22 度(攝氏溫度), 年平均雨量約 2500 公厘, 北部的月均溫變化(1 月份為 15.0 度, 7 月份為 28.7 度)較南部(1 月份為 18.2 度, 7 月份為 28.4 度)更為劇烈。雨量空間分布由平地往山地增加, 東部大於西部, 東北部年雨量最高可達到 6500 公厘, 而西南部最低可能低

於 1500 公厘(Chang et al., 2014a)。如此劇烈的環境梯度變化造就台灣島嶼在氣候及生態多樣性的特性, 土地覆蓋的分布也由平原地區的稻作及早作, 到丘陵山地的常綠闊葉林、針闊葉混交林、針葉林及高山草原等, 森林及農業耕作的面積分別占全島的 58%及 27%, 其餘 15%為都市建成地、河流、沙灘等(圖 1, Chang et al., 2014a), 此複雜的植被覆蓋變化不只造就植物多樣性的特性, 同時也對動物的多樣性具有相當大的貢獻(Ding et al., 2008)。

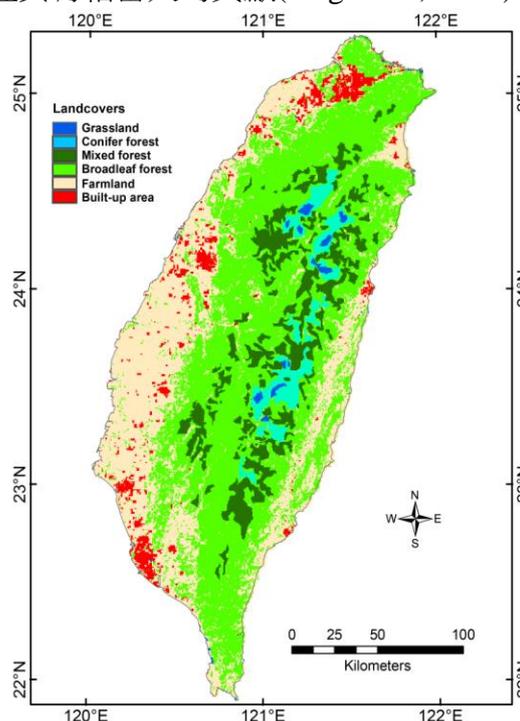


圖 1 台灣地區主要植被類型空間分布

2.2 研究材料

本研究自美國國家航空暨太空總署(NASA, National Aeronautics and Space Administration) Land Processes Distributed Active Archive Center (LP DACC, https://lpdaac.usgs.gov/get_data/data_pool) 下載取得 2001-2010 年間 8 天及 500 公尺空間解析度的地表反射率波段資料(MOD09A1; surface reflectance bands 1-7)。影像經過大氣校正與雜訊去除處理後進行光譜混合分析(spectral mixture analysis), 此方法經常應用於模擬出影像中每一個像素(pixel)可行光合作用植物

(PV, photosynthetically active vegetation)、不可行光合作用植物 (NPV, non-photosynthetically active vegetation) 與土壤裸露地 (SRO, soils and rock outcrop) 三種端元 (endmember) 所占的比率 (Asner & Heidebrecht, 2002)。此方法假設每一個像素 ($\rho(\lambda)_{pixel}$) 是由 PV、NPV 及 SRO 三個端元的線性組合：

$$\rho(\lambda)_{pixel} = \sum [C_e \rho(\lambda)_e] + \varepsilon \quad (1)$$

$$= [C_{PV} \rho(\lambda)_{PV} + C_{NPV} \rho(\lambda)_{NPV} + C_{SRO} \rho(\lambda)_{SRO}] + \varepsilon$$

$$\sum (C_e) = 1.0 \quad (2)$$

式(1)中 C_e 代表像素中每一個端元所佔有的比例，而 $\rho(\lambda)_e$ 則表示在波段 λ 時各端元的反射值， ε 代表殘差；式(2)表示三個端元的總合等於 1 (Huang et al., 2013)。完成光譜混合分析後，即可抽取出每一像素中可行光合植物 (PV) 覆蓋比率。由於 MODIS 的 8 天資料在台灣多雲霧覆蓋的環境仍受到相當大的影響，因此研究中再進一步將十年間共 460 幅影像以最大值合成法 (MVC, Huete et al., 2002) 得到各月份的影像 ($n = 120$)，研究也認為以月份最大值植生指標與氣候因素之間進行相關性分析時，相對於其他更短時間尺度的資料能獲得更好的結果 (Suzuki et al., 2006; Prasad et al., 2007)。

另外在 TIMESAT 分析工具中提供研究者以土地利用資料為基礎，對分析區域定義不同植被類型空間分布，由分析人員對各主要植被類型分布區域的時序影像資料重複測試，最後再給予不同植被類型適當的參數設定。本研究所使用的土地利用分類資料是由國土測繪中心取得 (<http://lui.nlsc.gov.tw/LUWeb/>)，此資料係 2006-2008 年間利用航空照片、衛星參考資料及現地調查所建立 (Chen & Chang, 2013)。主要土地覆蓋類型中森林及農業耕作的面積分別占全島的 58% 及 27%，其餘 15% 為都市建成地、河流、沙灘等。森林地區有 53% 屬於闊葉林、21% 為針葉林、19% 為針闊葉混淆林，其餘 7% 為高山箭竹草原。農業耕作的面積當中有 38% 為水稻田、47% 為非灌溉旱作，其他 15% 為草地、

散布的竹林及溼地等 (圖 1, Chang et al., 2014a)。

2.3 應用 TIMESAT 進行長期資料重建及擬合

每一時期遙測影像的植生指數代表該時間植被生長狀況，經由影像中各個像元時間序列植被指數的數據分析，即可了解像元內植被季節變化的訊息 (如圖 2(a) 中的像元 [x, y])。為了去除時間序列上影響植生指標的干擾，本研究採用 Jönsson & Eklundh (2002) 所發展之 TIMESAT 軟體 (TIMESAT v. 3.0, <http://www.nateko.lu.se/TIMESAT/timesat.asp>) 先對時間序列資料進行重建及擬合，再利用擬合後的長期資料萃取不同年度的物候參數，其概念是利用動態門檻值方法來進行，也就是當植生指標的增加達到當年幅度一定百分比的時間點定義為生長季開始，當植生指標降低到當年幅度的一定百分比的時間點定義為生長季結束時間，此幅度通常設定為 10%，此動態門檻值的方法在於進行多年份資料的物候分析時，不同年間的植被生長變異不會相互影響，能得到較適合的結果 (圖 2(b), Jönsson & Eklundh, 2004)。

分析中採用 Savitzky-Golay (SG) 濾波函數對資料進行平滑擬合，此方法的優點在於能保持植被生長的動態，並降低大氣效應的影響 (Chen et al., 2004)。SG 對時間序列植生指標的重建及濾波過程，可以下列方程式表示：

$$\bar{Y} = \frac{\sum_{i=-m}^{i=m} C_i \times Y_{j+1}}{N} \quad (3)$$

其中 \bar{Y} 為濾波處理後新產生之植生指標數值， Y_{j+1} 代表原始植生指標數值， C_i 為濾波係數， N 則代表移動窗口中所包括的數據點 $2m+1$ 。應用 SG 濾波函數來減少資料中的噪音再進行後續的分析，已是相當常見及可靠的方法 (Brady et al., 2007; Kariyeva & van Leeuwen, 2011; Chang et al., 2013; Chen et al., 2014)。

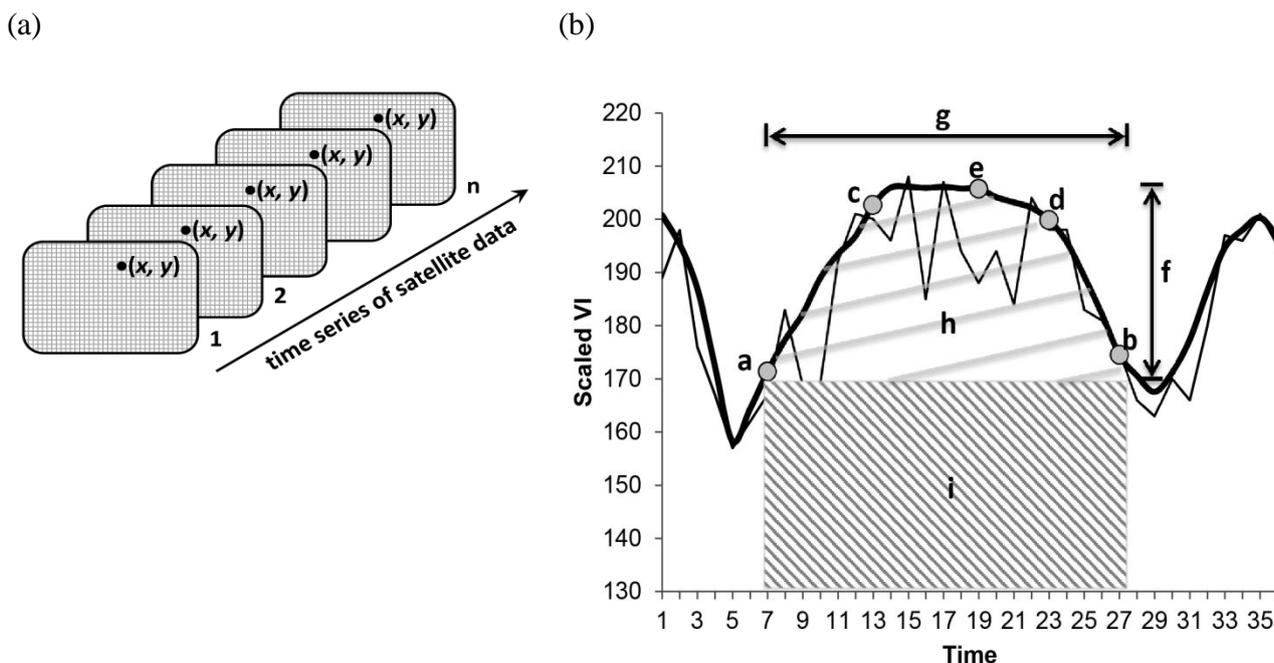


圖 2 (a) 觀測資料時間序列分布及(b) 植生指數原始數值分布(細黑線)與函數擬合(function fitting, 粗黑線)後結果及其所得到之物候參數示意圖, 其中 a 及 b 分別為生長季開始和結束時間, g 表示生長季長度。c 和 d 是由曲線左右兩測上升至最高值 80% 的位置, 生長季中點 e 則由 c 及 d 的中間位置來決定; 代表植被年生長季變化的幅度 f 是由 a-e 以 b-e 垂直變化的平均值來表示。積分 h 為函數擬合後與左右最低值之間的面積, 表示植被季節性的活動; 而積分 i 為函數擬合至植生指標為零之間的面積, 表示總植被的生產力

2.4 物候分析及季節參數的萃取

在 TIMESAT 中選定 SG 濾波函數對原始植生指標 PV 時間序列進行擬合得到物候參數及空間分布的基礎後, 研究者還需要了解土地覆蓋或植被類型的分布資訊, 再進一步從分析區域中選擇代表不同植被類型的像元, 本研究中主要的植被類型包括針葉林、針闊葉混交林、闊葉林、農地及建成地(圖 1), 再依照要求分別設置相關的參數。(1) 植生指標的範圍(data range), 一般的植生指標範圍介於 0 和 1 之間。(2) 噪音去除門檻方法(spike method)主要在去除噪音所造成的離群值(spike 或 outlier), 工具中提供兩種方式, 第一種為 median filter, 當時間序列中某一個時間點的數值大於前後數值的移動中位數時則被移除; 第二種為 STL replace, 主考慮季節(Season)及趨勢(Trend)的組成, 若某一時間點的數值不適合擬合的型態, 則給予較低(Low)的權重, 兩種方式的選擇由研究者

視實際資料情況來決定(Eklundh & Jönsson, 2009)。(3) 季節性參數(seasonal parameter)的考慮通常當時間序列資料具有一年單一生長季時設定為 1, 若一年具有兩次生長季, 如台灣地區的稻作生長, 設定為 0。(4) 迭代次數(Number of envelope iterations)設定數值介於 1 至 3, 次數越大時表示降低原始曲線中較低數值如雜訊的影響, 使得擬合曲線能逼近原始曲線的峰值。(5) 適合強度(Adaptation strength)設定數值介於 0 至 10 之間, 其目的同樣使得擬合曲線逼近原始曲線峰值, 一般的設定在 2 或 3 (Eklundh & Jönsson, 2009)。(6) 移動平均窗口大小(SG window size)數值越高表示資料的時序變動被平滑的程度也越高。(7) 生長季開始結束參數(season start/stop)是用來判斷資料曲線由最低至最高生長季開始及結束的門檻值比率, 一般設定在 0.5。經由視窗化的操作對採樣像元進行測試及擬合, 判斷決定適合該植被類型的各項參數, 最後做為研究區

域影像中各個像元物候分析的基礎。利用完成物候分析產生之結果及資料檔，研究者能從中定義所要萃取的物候參數、萃取時間段及輸出影像格式，以利進行後續分析。應用遙測資料分析擷取物候參數與傳統植物觀察的物候期雖然仍會有些許落差，但能夠反應較大區域尺度植被生長物候的關鍵訊息和相對狀況。目前 TIMESAT 中能提供研究者擷取 11 項相關的物候參數，圖 2(b)中的 a 點表示生長開始時間，b 點表示生長季結束時間，而生長季長度 g 就由 a 和 b 之間的長度來決定。其中 c 和 d 是由曲線左右兩測上升至最高值 80% 的位置，生長季中點 e 則由 c 及 d 的中間位置來決定；代表植被年生長季變化的幅度 f 是由 a-e 以 b-e 垂直變化的平均值來表示。積分 h 為函數擬合後與左右最低值之間的面積，表示植被季節性的活動；而積分 i 為函數擬合至植生指標為零之間的面積，表示總植被生產力，各項物候參數所代表之意義和研究上應用的關聯可參閱相關說明(Eklundh & Jönsson, 2009)。在本研究中物候分析所擷取的資訊是一般最為常用的生長季開始時間(圖 2 中 a 點)、生長季結束時間(圖 2 中 b 點)以及 a 與 b 之間的距離所決定的生長季長度(圖 2 中 g)，分析台灣地區地表植被生長的空間分布、不同年間的變化和三項參數之間的關係，並探討影響物候參數變異的原因。

3. 結果與討論

3.1 PV 時間序列平滑化結果與分析

以不同植被類型生長季節變化來看，森林(針葉林、針闊葉混生林及闊葉林)相

當一致，主要是森林地區生長的季節變化有相似的趨勢，如 PV 月份最大及最小值通常出現在 7 月(針葉林為 0.79、針闊葉混生林為 0.89 及闊葉林為 0.94)及 1 月(針葉林為 0.58、針闊葉混生林為 0.59 及闊葉林為 0.65) (圖 3(a)-(c))。台灣地區受人為耕作影響的農田具有一年兩穫的特性，因此 PV 在季節的變動具有兩次高峰(分別為 4 月及 9 月)，其 PV 季節變化在所有地表植被類型當中最大(可達到 0.40)(圖 3(d))。建成地的月份平均 PV 及季節差異是所有植被類型中最低的(0.20-0.35) (圖 3(e))。

由擬合所需的參數來看，森林地區(針葉林、針闊葉混生林及闊葉林)由於植被生長的變動及季節之間的差異較一致，因此物候分析中所需要的參數設定也相同(表 1)。但在非森林地區，相關的參數設定如適合強度(adaptive strength)及 SG 平均窗口(SG window size)皆低於森林地區(表 1)，主要是因為非森林地區 PV 的季節性差異較森林地區要低或者因為農地一年有兩次生長季變化所造成(seasonal parameter 為 0；表 1 及圖 3(d))，由於 SG 是利用濾波窗口大小及迭代次數或適合強度等過濾干擾，較低的次數能獲得稍微平滑的結果，也能保留異常數值；較高的次數雖可以去除異常值，但也可能因為過度擬合而喪失植被原有的生長變化(Chen et al., 2004)。以台灣不同植被類型分析而言，森林及非森林地區的季節變化都相當明顯，唯有農田地帶因為人為耕作具有一年兩穫(兩次生長季)的特性需要留意其分析時參數設定的差異，其他相關的數值設置在不同的植被類型之間經由研究者進行必要的調整應能得到相當良好的結果。

表 1 不同植被類型於 TIMESAT 中應用 Savitzky-Golay (SG)濾波函數進行資料擬合及物候分析時主要參數之設定

地表種類	Spike method	Seasonal parameter	Envelope iteration	Adaptive strength	SG window	Season Start/stop
針葉林	2	1	2	3	5	0.5, 0.5
針闊葉混生林	2	1	2	3	5	0.5, 0.5
闊葉林	2	1	2	3	5	0.5, 0.5
農地	2	0	2	2	2	0.5, 0.5
建成地	2	1	2	2	3	0.5, 0.5

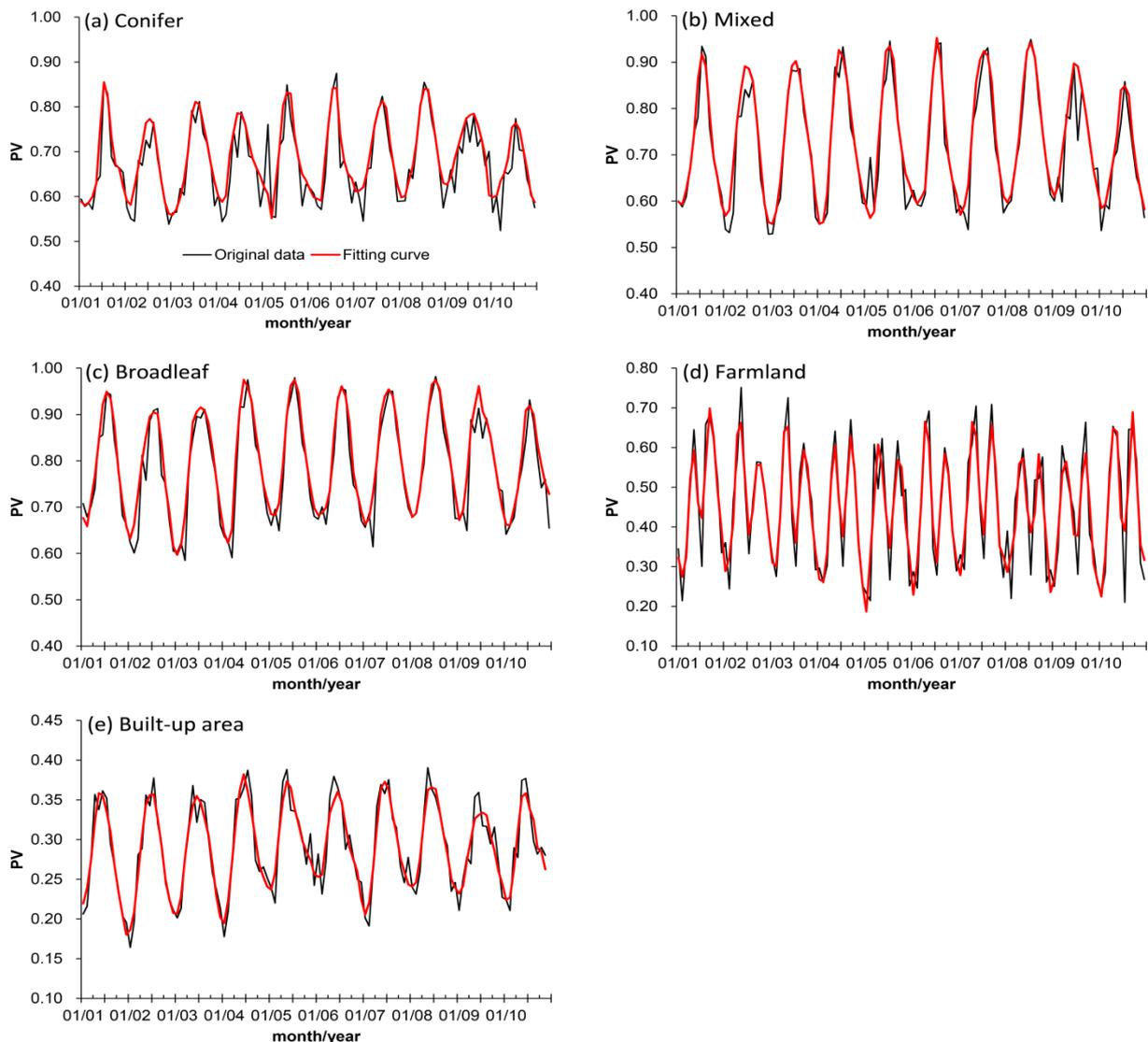


圖 3 不同地表植被類型原始 PV 時間序列分布(黑線)及 SG 函數擬合重建結果(紅線): (a) 針葉林(Conifer forest); (b) 針闊葉混濶林(Mixed forest); (c) 闊葉林(Broadleaf forest); (d) 農地(Farmland); (e) 建成地(Built-up area)

3.2 台灣地區地表植被覆蓋的空間分布特性

台灣地區地表植被 PV 的空間變化由西南部的沿海平原(0.05)往丘陵山地逐漸增加(> 0.80)，至高海拔再略微降低(< 0.40；圖 4)；此空間上的分布特性主要反映人為活動及氣候的影響，低海拔平原地區氣溫及雨量皆適合植被生長，但因為都市化及農業活動使其年平均 PV 的數值偏低，當雨量隨著海拔的上升而增加，植被的生長及覆蓋也跟著提高。更高海拔的地

區(> 2700 公尺)由於較低的溫度及植被類型由森林轉變為高山草原，植被覆蓋或 PV 也跟著下降(圖 4)。雖然森林及非森林地區受人為活動影響程度不同，但同一種植被類型的 PV 季節變化在不同年間型態仍相當一致，其季節生長規律通常在夏季達到最高而冬季降到最低(圖 3)，此現象主要還是反應氣候(氣溫和雨量)季節性循環的特性，如 Chang et al. (2014b)的分析指出不同植被類型的 PV 與月平均溫度($r^2 = 0.58-0.83$)及月雨量($r^2 = 0.50-0.78$)具有相當良好的關係。而台灣全島的年平均 PV 的變化由 2002 年的 0.63 增加至 2008 年的

0.68 (圖 4)，年間的變化也受到雨量所影響，其中 2002 年持續的乾旱使其年雨量(1520 公厘)遠低於台灣長期平均(2500 公厘)，相對地 2008 年的則屬於溼潤的年份

(3000 公厘) (Chen et al., 2009)，這也顯示台灣熱帶及亞熱帶的生態系對於不同年間氣候變異或者雨量累積變化的反應相當敏感。

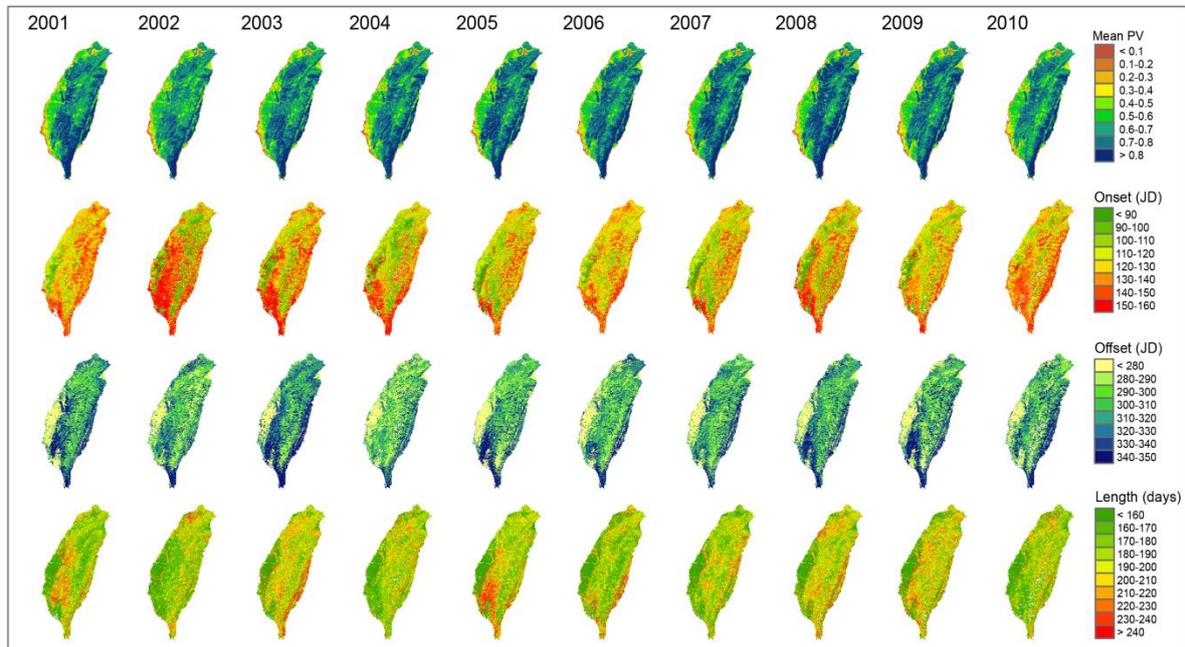


圖 4 由上至下分別代表 2001 年至 2010 年間年平均 PV、生長季開始時間(onset, JD, Julian date)、生長季結束時間(offset, JD)及生長季長度(length, days)

Chang et al. (2014b)應用主成份分析探討台灣地區影響地表植被生長變異的主要來源，其結果指出植被類型的空間分布特性及生長規律是地表植被年間變異的重要組成，可以解釋 96%的生長變異；同時植被類型各月份主成份負荷量也與月平均溫度($r = 0.85$, $p < 0.01$)和雨量($r = 0.56$, $p < 0.01$)具有相當一致的規律變化。就氣候的空間分布特徵來看，台灣地區即使在高海拔地區不同月份的溫度分布也甚少低於植物生長所需，但低海拔地區較高的溫度及較低的雨量則可能造成乾旱並對植物生長形成極大的限制(Chang et al., 2014a)。近年的研究已顯示區域尺度的氣候有朝向乾季越加乾旱的趨勢(Chou et al., 2013)，同時台灣地區在小雨及降雨日數上逐漸減少，大雨頻率則明顯的增加(Chou et al., 2009)，如此可能對植物生長及發展產生負面效應，未來對於環境生態上的衝擊仍需

更多的評估才能加以釐清。

3.3 台灣地區物候分析之空間特性

台灣地區平均之生長季開始時間(onset, Julian day, JD)分布，約由平原地區的 80 日(3 月底)逐漸增加至中海拔地區的 160 日(6 月初) (圖 4)；生長季結束時間的空間分布則由西南部平原的平原地區的 240 日(8 月底)逐漸增加至台灣西南及東南部中海拔森林地區至 340 日(12 月初) (圖 4)，平均生長季的長度由中高海拔森林地區的 210 日減少至西部平原農田及高海拔的 150 日(圖 4)。三個物候參數空間分布的特徵主要也是反應植被類型的差異，農地的生長季開始及結束時間通常較早，因此生長季長度也較短；而森林地區生長季開始時間稍慢，但生長季也較晚結束，因此有較長的生長季長度(表 2)。

表 2 2001-2010 年間不同地表植被類型物候分析結果比較

	生長季開始時間 (JD, Julian date)	生長季結束時間 (JD, Julian date)	生長季長度 (Days)
	Average (\pm SD)		
針葉林	130.6 (\pm 37.5)	302.3 (\pm 60.8)	169.8 (\pm 39.4)
針闊葉混淆林	122.3 (\pm 27.1)	305.4 (\pm 35.1)	183.4 (\pm 28.1)
闊葉林	123.9 (\pm 31.1)	309.9 (\pm 44.9)	184.7 (\pm 36.1)
農地	119.8 (\pm 40.0)	287.1 (\pm 78.1)	148.5 (\pm 60.9)
建成地	123.0 (\pm 39.6)	285.9 (\pm 77.4)	165.1 (\pm 54.4)

若以台灣地區整體平均而言，較晚的生長季開始時間通常也會導致生長季結束時間延後($r = 0.67$, $p = 0.035$, 圖 5(a))，但會使得生長季時間長度縮減($r = -0.77$, $p = 0.009$, 圖 5(b))，不過生長季結束時間與生長季長度之間則沒有顯著的關係存在($r = -0.10$, $p = 0.784$, 圖 5(c))，此意謂台灣地區生長季開始時間對於地表植被的生長季長度或生長活動具有關鍵的影響。林國銓等(1997)過去在台灣東北部福山天然闊葉林的現地物候調查指出，通常 3-4 月為闊葉林抽芽展葉期，10 月至隔年 2 月為落葉期；曾喜育等(2005)在台灣中部關刀溪森林對台灣榕進行的展葉及落葉調查，指出台灣榕植株在 2-3 月開始展新葉，每年 10-11 月開始落葉，12 月至隔年 2 月是葉片量最少的時期，同時展葉及落葉大致與氣溫及雨量的變化具有關聯。雖然沒有確切日期可供對比，但以本研究呈現的空間分布來看，森林地區生長季開始(3-4 月)及結束(10-11 月)的時間大致能符合過去東北部及中部現地調查的結果。未來若能應用品質良好的影像進行局部區域分析，將有更好的機會連結現地調查及遙測分析。

由 2001-2010 年間物候參數的空間分布來看，其中生長季開始時間延後(\geq JD 140)所佔的比例在不同年間具有相當大的差異，由 2001 年的 33% 增加至 2002 年的 38%，再逐漸降低至 2005 年的 13%，2006 年至 2010 年之間約佔有 25-30% 的區域(圖 4)。先前的研究已指出台灣地區生長季的延後及生產力的減少和春季(2-3 月)雨量偏少(< 40 公厘)所造成的乾旱具有顯著的

關聯，此春季雨量的多寡與大尺度大氣循環(ENSO, El Niño-Southern Oscillation)具有相當緊密的連結(Chang et al., 2013)。氣候分析也顯示就大尺度氣候循環的條件而言，前一年冬季(11 至 2 月)若聖嬰現象(El Niño)盛行，則隔年台灣地區的春季(2-3 月)變得相對溼潤，同時梅雨季(5-6 月)雨量也會增多；相反地，若前一年冬季反聖嬰盛行(La Niña)，次年春季及梅雨季雨量將相對減少(Jiang et al., 2003)。許多大陸及全球尺度的研究指出，聖嬰及反聖嬰所造成年間氣候變異及其對植被生長物候及生產力具有重要的擾動作用，如東北亞地區因為聖嬰(El Niño)造成相對溫暖的春季(3-5 月)，使植被生長季開始時間提早(Park et al., 2012)。南美洲的亞馬遜盆地在聖嬰(El Niño)盛行期間通常會發生嚴重的乾旱，並使森林的死亡率提高及生長受到抑制(Nepstad et al., 2004)。對熱帶及亞熱帶地區森林生態系而言，聖嬰/反聖嬰盛行期間所造成的乾旱也可能導致森林結構永久性改變及生產力的劇烈變化(Brando et al., 2008; Bastos et al., 2013)。目前氣候變遷不僅改變全球降雨強度、降雨季節分布並增加不同年間的變異(Dai, 2013; Feng et al., 2013)，同時也將增加聖嬰及反聖嬰現象發生的頻率及強度，因此更加頻繁持續的乾旱勢必阻礙溼潤熱帶及亞熱帶森林生長、回復及碳收支平衡(Marlier et al., 2013; Cai et al., 2014)，社會經濟發展也不可避免將遭受嚴厲的衝擊。

許多研究利用植生指標衡量植被在遭受氣候上乾旱的影響程度，主要是以乾旱事件前後的差異或標準化方式來評估植被綠度的損失(Saleska et al., 2007; Xu et al.,

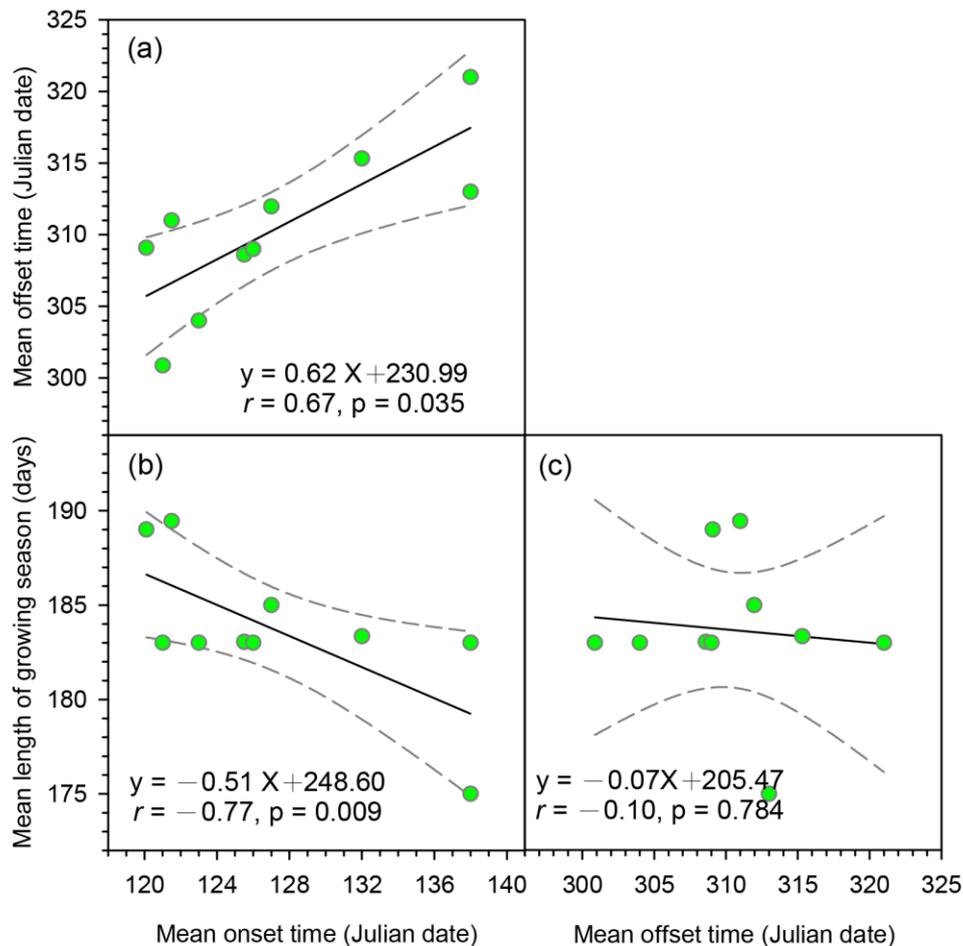


圖 5 2001 年至 2010 年間(a) 年平均生長季開始時間(onset)與生長季結束時間(offset)關係、(b) 生長季開始時間與生長季長度(length of the growing season)關係及(c) 生長季結束時間與生長季長度之關係

2011)。但植生指標因為飽和問題、大氣或感測器的噪音，使得綠度減損並不完全是受到乾旱所造成；或者即使生產力已下降，但綠度仍然沒有顯著變化而引起爭論(Asner et al., 2004; Samanta et al., 2010; Atkinson et al., 2011)。應用其他的技術的協助如多變量分析或物候分析等，可以相當有效地將影響資料的雜訊去除，擷取關鍵的訊息並與氣候變異或自然擾動等因素得到良好的連結(Cong et al., 2013; Griffiths et al., 2013; Ma et al., 2013; Chang et al., 2014b)。本研究利用 TIMESAT 分析台灣地區地表植被物候空間分布的特性及年間變異，其中生長季開始時間的早晚顯著影響生長季結束及生長季長度，由於西太平洋及台灣地區春季降雨量(2-3 月)的多寡與大尺度聖嬰現象的氣候循環具有關

聯，是影響台灣地區的地表植被物候及生產力的關鍵因素(Chang et al., 2013)。

4. 結論

本研究取得 2001-2010 年間 MODIS 地表反射率波段資料並合成月份最大值 PV 進行物候分析，利用 TIMESAT 軟體分析得到台灣地區地表物候參數，包括生長季開始時間、生長季結束時間及生長季長度。結果顯示台灣地區生長季開始時間顯著影響生長季結束時間及生長季長度，生長季開始時間受到大尺度 ENSO 導致的春季雨量所控制，對台灣生態系具有關鍵性的影響。在氣候變遷的情勢下，極端氣候及大尺度氣候循環事件的頻率及強度將更加提高，因此利用物候分析工具有助於釐

清地表植被生長反應與氣候變化之間的關聯。

致謝

本論文的完成主要感謝科技部(NSC 98-2221-E-002-198,98-2313-B-002-062-M Y2, 100-2621-B-002-001-MY3)及臺灣大學相關研究計畫 (EcoNTU:NTU-CESRP-102R7604-2)的經費補助及支持。

參考文獻

- 呂明倫、葉慶龍、鍾玉龍、謝依達，2008：墾丁國家公園四種優勢植群之地面光譜分析。航測及遙測學刊，第十三期，第一號，19-28 頁。
- 林國銓、黃吳清標、劉哲政，1997：福山試驗林天然闊葉林之物候現象。台灣林業科學，第十二期，第三號，347-353 頁。
- 張月娥，1958：臺灣物候報告。氣象學報，第四期，第四號，6-9 頁。
- 張仲德、王素芬、林登秋，2011：氣候變遷與不同尺度植被物候研究之回顧。地理學報，第六十三期，1-33 頁。
- 曾喜育、曾麗蓉、歐辰雄、呂福源，2005：關刀溪森林生態系之臺灣榕物候。中華林學季刊，第三十八期，第四號，377-395 頁。
- 楊金昌、王亞男、姜家華、賴玉芳，1999：塔塔加地區臺灣雲杉、臺灣鐵杉及玉山箭竹物候學之初步研究。第三十一期，第三號，251-263 頁。
- Asner, G., and Heidebrecht, K.B., 2002: Spectral unmixing of vegetation, soil, and dry carbon cover in arid regions: comparing multispectral and hyperspectral observations. *Int J Remote Sens*, 23, 3939-3958.
- Asner, G., Nepstad, D., Cardinot, G., and Ray, D., 2004: Drought stress and carbon uptake in an Amazon forest measured with spaceborne imaging spectroscopy. *Proc Natl Acad U S A*, 101, 6039-6044.
- Atkinson, P.M., Dash, J., and Jeganathan C., 2011: Amazon vegetation greenness as measured by satellite sensors over the last decade. *Geophys Res Lett*, 38, L19105.
- Bastos, A., Running, S.W., Gouveia, C., and Trigo, R.M., 2013: The global NPP dependence on ENSO: La Niña and the extraordinary year of 2011. *J Geophys Res: Biogeosci*, 118, 1247-1255.
- Beck, P.S.A., Atzberger, C., Høgda, K.A., Johansen, B., and Skinmore, A.K., 2006: Improved monitoring of vegetation dynamics at very high latitudes: a new method using MODIS NDVI. *Remote Sens Environ*, 100, 321-334.
- Brady, B.A., Joshi, R.W., Hermance, J.F., and Mustard, J.F., 2007: A curve fitting procedure to derive inter-annual phenologies from time series of noisy satellite NDVI data. *Remote Sens Environ*, 106, 137-145.
- Brando, P.M., Nepstad, D.C., Davidson, E.A., Trumbore, S.E., Ray, D., and Camargo, P., 2008: Drought effects on litterfall, wood production and belowground carbon cycling in an Amazon forest: results of a throughfall reduction experiment. *Phil Trans R Soc B*, 363, 1839-1848.
- Cai, W., Borlace, S., Lengaigne, M., van Rensch, P., Collins, M., Vecchi, G., Timmermann, A., Santoso, A., McPhaden, M.J., Wu, L., England, M.H., Wang, G., Guilyardi, E., and Jin, F.F., 2014: Increasing frequency of extreme El Niño events due to greenhouse warming. *Nature Clim Change*, 4, 111-116.
- Chang, C.T., Wang, H.C., and Huang, C.Y., 2013: Impacts of vegetation onset time on the net primary productivity in a mountainous island in Pacific Asia. *Environ Res Lett*, 8, 045030.
- Chang, C.T., Wang, S.F., Vadeboncoeur, M.A., and Lin, T.C., 2014a: Relating vegetation dynamics to temperature and precipitation at monthly and annual timescales in Taiwan using MODIS vegetation indices. *Int J Remote Sens*, 35, 598-620.

- Chang, C.T., Wang, H.C., and Huang, C.Y., 2014b: Retrieving multi-scale climatic variations from high dimensional time-series MODIS green vegetation cover in a tropical/subtropical mountainous island. *J Mt Sci*, 11, 407-420.
- Chen, B., Zhang, X., Tao, J., Wu, J., Wang, J., Shi, P., Zhang, Y., and Yu, C., 2014: The impact of climate change and anthropogenic activities on alpine grassland over the Qinghai-Tibet Plateau. *Agr For Meteorol*, 189-190, 11-18.
- Chen, J., Jönsson, P., Tamura, M., Gu, Z., Matsuhita, B., and Eklundh, L., 2004: A simple method for reconstructing a high-quality NDVI time-series data set based on the Savitzky-Goley filter. *Remote Sens Environ*, 91, 332-344.
- Chen, S.T., Kuo, C.C., and Yu, P.S., 2009: Historical trends and variability of meteorological droughts in Taiwan. *Hydrol Sci J*, 54, 430-441.
- Chen, X.R., and Chang, H.S., 2013. Discussion on the impact factor of agricultural land in Taiwan: case study of Yunlin, Chiayi and Tainan. *Procedia Environ Sci*, 17, 28-36.
- Chou, C., Huang, F., Tseng, L., Tu, J., and Tan, P.H., 2009: Annual cycle of rainfall in the Western North Pacific and East Asia Sector. *J Clim*, 22, 2073-2094.
- Chou, C., Chiang, J.C.H., Chung, C.H., Liao, Y.C., and Lee, C.J., 2013: Increase in the range between wet and dry season precipitation. *Nature Geosci*, 6, 263-267.
- Cong, N., Wang, T., Nan, H., Ma, Y.C., Wang, X., Myneni, R.B., and Piao, S., 2013: Changes in satellite-derived spring vegetation green-up date and its linkage to climate in China from 1982-2010: a multimethod analysis. *Glob Change Biol*, 19, 881-891.
- Crabtree, R., Potter, C., Mullen, R., Sheldon, J., Huang, S., Harmsen, J., Rodman, A., and Jean, C., 2009: A modelling and spatio-temporal analysis framework for monitoring environmental change using NPP as an ecosystem indicator. *Remote Sens Environ*, 113, 1486-1496.
- Dai, A., 2013: Increasing drought under global warming in observations and models. *Nature Clim Change*, 3, 52-58.
- Dall'Olmo, G., and Kamieli, A., 2002: Monitoring phenological cycles of desert ecosystems using NDVI and LST data derived from NOAA-AVHRR imagery. *Int J Remote Sens*, 23, 4055-4071.
- Ding, T.S., Su, G., and Yuan, H.W., 2008: Breeding bird community composition in different successional vegetation in the montane coniferous forests zone of Taiwan. *For Ecol Manage*, 255, 2038-2048.
- Eklundh, L., and Jönsson, P., 2009: Timesat 3.0 software manual. Lund Univeristy, Sweden.
- Eklundh, L., Johansson, T., and Solberg, S., 2009: Mapping insect defoliation in Scots pine with MODIS time-series data. *Remote Sens Environ*, 113, 1566-1573.
- Feng, X., Porporato, A., and Rodriguez-Iturbe, I., 2013: Changes in rainfall seasonality in the tropics. *Nature Clim Change*, 3, 811-815.
- Fisher, J.I., and Mustard, J.F., 2007: Cross-scalar satellite phenology from ground, Landsat, and MODIS data. *Remote Sens Environ*, 109, 261-273.
- Griffiths, P., Kuemmerle, T., Baumann, M., Radeloff, V.C., Abrudan, I.V., Lieskovsky, J., Munteanu, C., Ostapowicz, K., and Hostert, P., 2013: Forest disturbances, forest recovery, and changes in forest types across the Carpathian ecoregion from 1985 to 2010 based on Landsat image composites. *Remote Sens Environ*, 151, 72-88.
- Heumann, B.W., Seaquist, J.W., Eklundh, L., and Jönsson, P., 2007: AVHRR derived phenological change in the Sahel and Soudan, Africa, 1982-2005. *Remote Sens Environ*, 108, 385-392.
- Hird, J.N., and McDermid, G.J., 2009: Noise reduction of NDVI time series: an empirical comparison of selected

- techniques. *Remote Sens Environ*, 113, 248-258.
- Huang, C., Chai, C., Chang, C., Huang, J., Hu, K., Lu, M., and Chung, Y., 2013: An integrated optical remote sensing system for environmental perturbation research. *IEEE J Sel Top Appl Earth Obs Remote Sens*, 6, 2434-2444.
- Huete, A.R., Didan, K., Miura, K., Rodriguez, E.P., Gao, X., and Ferreira, L.G., 2002: Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices. *Remote Sens Environ*, 83, 195-213.
- Hufkens, K., Friedl, M., Snonning, O., Braswell, B.H., Milliman, T., and Richardson, A.D., 2012: Linking near-surface and satellite remote sensing measurements of deciduous broadleaf forest phenology. *Remote Sens Environ*, 117, 307-321.
- Jeong, S.J., Ho, C.H., Gim, H.J., and Brown, M.E., 2011: Phenology shifts at start versus end of growing season in temperate vegetation over the Northern Hemisphere for the period 1982-2008. *Glob Change Biol*, 17, 2385-2399.
- Jiang, Z.H., Chen, G.T.J., and Wu, M.C., 2003: Large-scale circulation patterns associated with heavy spring rain events over Taiwan in strong ENSO and non-ENSO years. *Mon Weather Rev*, 131, 1769-1782.
- Jones, M.O., Kimball, J.S., Jones, L.A., and McDonald, K.C., 2012: Satellite passive microwave detection of North America start of season. *Remote Sens Environ*, 123, 324-333.
- Jönsson, P., and Eklundh, L., 2002: Seasonality extraction by function fitting to time-series of satellite sensor data. *IEEE Trans Geosci Remote Sens*, 40, 1824-1832.
- Jönsson, P., and Eklundh, L., 2004: TIMESAT- a program for analyzing time-series of satellite sensor data. *Comput Geosci*, 30, 833-845.
- Kariyeva, J., and van Leeuwen, W.J., 2011: Environment drivers of NDVI-based vegetation phenology in central Asia. *Remote Sens*, 3, 203-246.
- Ma, X., Huete, A., Yu, Q., Coupe, N.R., Davies, K., Broich, M., Ratana, P., Beringer, J., Hutley, L.B., Cleverly, J., Boulain, N., and Eamus, D., 2013: Spatial patterns and temporal dynamics in savanna vegetation phenology across the North Australian tropical transect. *Remote Sens Environ*, 139, 97-115.
- Marlier, M.E., DeFries, R.S., Voulgarakis, A., Kinney, P.L., Randerson, J.T., Shindell, D.T., Chen, Y., and Faluvegi, G., 2013: El Niño and health risks from landscape fire emissions in southeast Asia. *Nature Clim Change*, 3, 131-136.
- Nepstad, D., Lefebvre, P., Lopes, U., Tomasella, J., Schlesinger, P., Solórzano, L., Moutinho, P., Ray, D., and Benito, J.G., 2004: Amazon drought and its implications for forest flammability and tree-growth: a basin-wide analysis. *Glob Change Biol*, 10, 704-717.
- Nicholson, S.E., Davenport, M.L., and Malo, A.R., 1990: A comparison of the vegetation response to rainfall in the Sahel and East Africa, using normalized difference vegetation index from NOAA AVHRR. *Clim Change*, 17, 209-241.
- Nicholson, S.E., and Farrar, T.J., 1994: The influence of soil type on the relationships between NDVI, rainfall and soil moisture in semiarid Botswana, I. NDVI response to rainfall. *Remote Sens Environ*, 50, 107-120.
- Olofsson, P., Lagergren, F., Lindroth, A., Lindström, J., Klemedtsson, L., Kutsch, W., and Eklundh, L., 2008: Towards operational remote sensing of forest carbon balance across Northern Europe. *Biogeosci*, 5, 817-832.
- Park, K.A., Bayarsaikhan, U., and Kim, K.R., 2012: Effects of El Niño on spring phenology of the highest mountain in north-east Asia. *Int J Remote Sens*, 33, 5268-5288.
- Parmesan, C., and Yohe, G., 2003: A globally coherent fingerprint of climate change impacts across natural systems. *Nature*, 421, 37-42.
- Prasad, V.K., Badarinath, V.K.S., and Eaturu,

- A., 2007: Spatial patterns of vegetation phenology metrics and related climatic controls of eight contrasting forest types in India: analysis from remote sensing datasets. *Theor Appl Climatol*, 89, 95-107.
- Reed, G.I., Brown, J.F., VanderZee, D., Loveland, T.R., Merchant, J.W., and Ohlen, D.O., 1994: Measuring phenological variability from satellite imagery. *J Veg Sci*, 5, 703-714.
- Saleska, S.R., Didan, K., Huete, A.R., and da Rocha, H.R., 2007: Amazon forests green-up during 2005 drought. *Science*, 318, 612.
- Samanta, A., Ganguly, S., Hashimoto, H., Devadiga, S., Vermote, Y., Knyazikhin, Y., Nemani, R.R., and Myneni, R.B., 2010: Amazon forests did not green-up during the 2005 drought. *Geophys Res Lett*, 37, L05401.
- Schubert, P., Lagergren, F., Aurela, M., Christensen, T., Grelle, A., Heliasz, M., Klemetsson, L., Lindroth, A., Pilegaard, K., Vesala, T., and Eklundh, L., 2012: Modeling GPP in the Nordic forest landscape with MODIS time series data- comparison with the MODIS GPP product. *Remote Sens Environ*, 126, 136-147.
- Suzuki, R., Xu, J.Q., and Motoya, K., 2006: Global analyses of satellite-derived vegetation index related to climatological wetness and warmth. *Int J Climatol*, 26, 425-438.
- Tottrup, C., Rasmussen, M.S., Eklundh, L., and Jönsson, P., 2007: Mapping fractional forest cover across the highlands of mainland Southeast Asia using MODIS data and regression tree modelling. *Int J Remote Sens*, 28, 23-46.
- Verbesselt, J., Jönsson, P., Lhermitte, S., van Aardt, J., and Coppin, P., 2006: Evaluating satellite and climate data-derived indices as fire risk indicators in Savanna ecosystems. *IEEE Trans Geosci Remote Sens*, 44, 1622-1632.
- Viovy, N., Arino, O., and Belward, A.S., 1992: The best index slope extraction (BISE): a method for reducing noise in NDVI time-series. *Int J Remote Sens*, 13, 1585-1590.
- White, M.A., Thornton, P.E., and Running, S.W., 1997: A continental phenology model for monitoring vegetation responses to interannual climatic variability. *Glob Biogeochem Cycle*, 11, 217-234.
- White, M.A., and Nemani, R.R., 2006: Real-time monitoring and short-term forecasting of land surface phenology. *Remote Sens Environ*, 104, 43-49.
- Xu, L., Samanta, A., Costa, M.H., Ganguly, S., Nemani, R.R., and Myneni, R.B., 2011: Widespread decline in greenness of Amazonian vegetation due to the 2010 drought. *Geophys Res Lett*, 38, L07402.
- Zheng, J., Ge, Q., and Hao, Z., 2002: Impacts of climate warming on plants phenophases in China for the last 40 years. *Chin Sci Bull*, 47, 1826-1831.

Spatial patterns of vegetation phenology based on MODIS time-series data in Taiwan applying TIMESAT

Chung-Te Chang¹ Cho-ying Huang^{2*}

ABSTRACT

Land surface phenology reflects the responses of a terrestrial ecosystem to climate change. In this study, we used monthly PV (photosynthetically active vegetation) derived from MODIS (the Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) reflectance data between 2001 and 2010 to delineate the land surface phenology. The phenological metrics including onset, offset, and the length of the growing season were obtained from the phenological analysis toolbox TIMESAT. Results indicated that the interannual variability of onset time was significantly correlated to offset time ($r = 0.67$, $p = 0.035$) and length of the growing season ($r = -0.77$, $p = 0.009$). In addition, the shortage of spring rainfall was influenced by ENSO events and resulted in significant delayed on vegetation onset time and cause dramatic impacts on the ecosystem. TIMESAT is a robust phenological analysis tool, which can facilitate our understanding of the vegetation responses and development associated with climate change and environmental disturbances.

Keywords: MODIS (the Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer), Phenology analysis, Climatic anomaly, ENSO

¹ Postdoctoral Research Fellow, Department of Geography, National Taiwan University.

² Associate Professor, Department of Geography, National Taiwan University.

*Correspondent author: E-mail:choying@ntu.edu.tw

Received Date: Mar. 07, 2014

Revised Date: Nov. 03, 2014

Accepted Date: Nov. 07, 2014

利用 MODIS 時序影像進行下湄公河盆地 稻作區域監測初探

陳正儒^{1*} 陳繼藩² 阮天祥³ 張立雨⁴ 林雅文⁵

摘要

了解大尺度範圍的稻作耕作型態對於區域糧食作物管理與產量估測是十分重要的一環。本研究使用 2010 年的 MODIS 8 日時序衛星影像產品進行下湄公河盆地稻作區域的監測。影像反射光譜推導的指數先經過小波轉換濾除時間雜訊，並依地物物候關係與地形資訊設定閾值遮罩濾除以降低資料量與複雜度，之後以類神經網路進行稻作耕種類型分類。分類結果以混淆矩陣顯示其總體精度為 84.4%，Kappa 係數為 0.8；利用線性迴歸分析，比較 MODIS 推導的稻米種植面積與政府/研究計畫的稻作生產面積統計資料(省級空間尺度)，結果顯示各國的 R^2 皆大於 0.9 以上，顯示分類方法有相當高的生產面積預測性。因此，本研究除了可以提供下湄公河盆地稻作生產面積、分布區域與稻作耕種系統等量化數據參考外，研究驗證的分析方法未來亦可推廣至世界其他區域進行稻作監測的應用。

關鍵詞：MODIS、稻米、遙測影像、下湄公河盆地

1.前言

對超過世界 50% 以稻作為主食的人口而言，糧食安全與稻米穩定地供給與分配息息相關。然自 2000 年開始，世界稻米的生產量已經開始落後於米食的消耗量(OECD-FAO, 2006)。由於世界人口每年約 1% 的成長率，世界稻米的交易量，從 1995 年到 2005 年已經增加了 30%。稻米的經濟效益對東南亞發展中的國家而言，是十分重要的經濟引擎(MRC, 2010)。在柬埔寨、寮國、緬甸與越南有超過 60% 以上的勞力依賴著稻米的種植農事與生產收益，

稻作為該區域國家的主要農地利用型態，約佔其農耕面積的 50-80%(FAOSTAT, 2011)。東南亞陸地國家每年可生產將近一億五千萬公噸的稻穀，等同於世界上四分之一的稻作生產量。以東南亞兩大稻米輸出國為例，越南每年可生產近四千二百萬多公噸的稻米，泰國則有三千五百萬多公噸(FAO, 2011)。根據湄公河委員會(Mekong River Commission, MRC) 2010 年統計資料顯示，該區總人口約六千兩百萬人，全區總面積約為八十萬平方公里，超過一千萬公頃為稻米生產區，大部分集中於越南與泰國(MRC, 2005, 2010)。然而伴

¹ 國立中央大學太空及遙測中心 博士後研究員

收到日期：民國 103 年 05 月 25 日

² 國立中央大學土木工程研究所 教授

修改日期：民國 103 年 12 月 08 日

³ 國立中央大學太空及遙測中心 博士後研究員

接受日期：民國 103 年 12 月 10 日

⁴ 國立中央大學太空及遙測中心 助理工程師

⁵ 國立中央大學資訊管理研究所 博士生

*通訊作者，電話：03-4227151 ext.57659, E-mail:ccrunco@gmail.com

隨著都市化造成耕地面積縮減與全球暖化導致水旱災頻率增加、氣溫升高、海平面上升與降雨模式和雨區分佈的改變，這些實際發生的環境變化直接衝擊當地農業環境與生產系統，並降低了該區域現有稻米的生產量與破壞供應平衡 (Furuya and Kobayashi, 2009; Matthews and Wassmann, 2003; Matthews et al., 1995)。聯合國糧食及農業組織的報告中指出，由於 2010 年初的旱災，湄公河的水位降低，衝擊了該稻米生產區的產量，但是由於新的灌溉系統發展、集約化，以及新區域的開墾，彌補了環境災害性的減產，稻米生產量有小幅的增加(FAOSTAT, 2011)；就歷年的數據來看，可以確信的是，產米國稻米種植面積縮減與稻穀生產量減少，將造成持續飆漲的米價，進而觸發世界性糧食安全危機。因此，攸關糧食安全的稻米生產資訊也因全球氣候變遷而顯得更為重要。

遙測科技現已被視為是在農業監測應用上跨學門研究的一項利器；除了監測稻作種植面積與稻米生長狀況外，亦能應用於稻米產量的估計(Hamar et al., 1996; Prasad et al., 2006; Ranjith et al., 2009)。目前遙測技術已發展出可直接偵測與評估環境狀態，提供快速且即時的作物監測資訊，提供在作物收成前的高準確性的作物生長與產量訊息(Reynolds et al., 2000)。諸如日本、美國、歐盟等先進國家皆大量應用遙測技術，對其主要糧食輸入區域的生產環境以及農業環境災害，投入大量研究，作為農業監測與預警的參考，並將評估成果應用於擬訂糧食安全政策。農委會 2011 全國糧食安全會議的核心議題之一，即為建立風險管理機制，確保糧食供應無缺 (行政院農業委員會, 2011)，而糧食風險的評估有賴於掌握充足性與可靠的產區作物種植資訊。因此對於糧食自給率

不足的台灣，相關研究的投入更有其急迫需要。

早期遙測傳統地物偵測常以單一時間衛星影像中的地物光譜特徵做為辨識地物的依據，然而僅憑單一時間的影像，實難區分光譜特徵相似的地物；如使用水稻收割後的單時段影像，單憑光譜特徵僅能得知土地覆蓋類型為土壤，卻無法判斷先前土地利用類型為水稻田。選擇多時間點的影像，必須準確選擇作物生長特徵的時期影像，若是部分區域有雲霧覆蓋，則被遮蔽的區域無法進行判釋，遑論部分水稻田仍然容易與其他地物混淆的情況。

隨著遙測發展累積大量資料，許多研究開始利用時序植生指標資訊進行農業環境與作物生長的監測(Atzberger et al., 2014; Chen et al., 2006; Quarmby et al., 1993; Sehgal et al., 2011; Wardlow and Egbert, 2008)。近年研究指出，作物的生長變化高度關聯於時序植生指數，如標準化差異植生指數(Normalized Difference Vegetation Index; NDVI)的反應變化。由於水稻在不同生長期具有不同的光譜反應，利用水稻在不同生長期影像各波段光譜灰度值與光譜指數的變化，可避免與其他地物混淆的問題；同時由於種植環境(灌水、收割)改變亦在 NDVI 時序剖線產生的較大波動，適當地利用這些資訊，將有助於分類精度的提升。Xiao 等人(Xiao et al., 2005)，以 MODIS 時序影像進行稻作分類，以稻米種植期灌水特徵，利用衛星影像光譜推導出地表面水指數(land surface water index; LSWI)指標來輔助稻區判釋與播種型態判別；抑或結合相關光譜波段指標以及其他的衛星資訊，做為輔助的分類指標(Prasad et al., 2009)。本研究將使用多時期衛星影像所產生的時間序列資料進行稻作偵測分類研究，以提供在大尺度稻作

區更準確的偵測與監測成果。

2. 研究區

研究區所在的下湄公河盆地(Lower Mekong Basin; LMB)位處於湄公河中下游部分，其經緯度座標範圍為 8.51-22.35° N 與 98.9-108.98° E (圖 1)，包含了泰國、寮國、柬埔寨與越南四個國家的各一部分。當地的氣候類型主要為熱帶季風氣候，一年有乾、濕兩季，乾季由前年的十一月至四月，五月至十月為雨季，90%的降雨集中於雨季。稻米為研究區內主要的糧食作物，種植區域與農民生活皆與稻米生產息息相關，因此稻米的監測十分重要。當地的稻作系統依一年耕種周期，可分為單期稻、雙期稻與三期稻。單期稻屬

於雨季稻，耕作期為七月至來年一月，生長期約 160 天，主要稻作區分布位於泰國、寮國與柬埔寨。雙期稻與三期稻的稻米生長期較短，約略 90 日左右，主要集中於越南湄公河三角洲區域。雙期稻則依水源與種植曆差異又可細分為：雙期雨季稻種植時間為夏秋季稻(四月到八月)與秋冬季稻(七月到十二月)，雙期灌溉稻作系統則是冬春季稻(十一月至三月)與夏秋季稻。其中，分布在三角洲的單期稻與雙期雨季稻，因為灌排系統的限制，而多散落於海岸區域。三期稻作可以進行多一期的稻作種植，依種植區域差異與灌溉水源的供應程度，時間為秋冬季稻或是春夏季稻(三月到六月)。研究區域的稻作類型與種植季節將整理顯示於表 1。

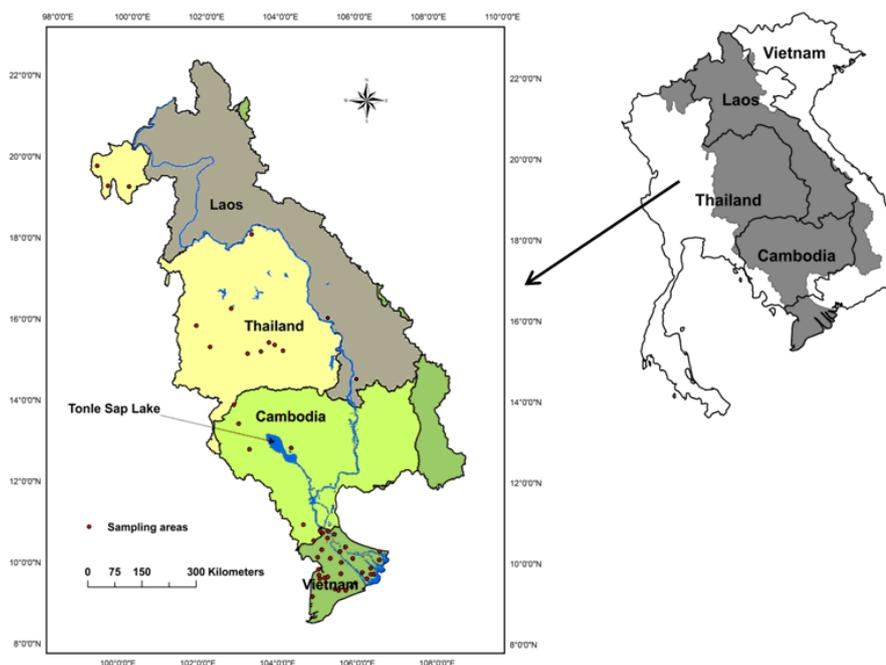


圖 1 下湄公河盆地區域研究區域，圖中紅點為地面調查及地面參考資料區域。

表 1 下湄公河區域的稻米的耕作系統

稻作系統	類型說明	耕作季節
單期稻	雨季稻	雨季
雙期稻	灌溉稻	冬春季、夏秋季
	雨季稻	夏秋季、秋冬季
三期稻	灌溉稻 I 型	冬春季、春夏季、夏秋季
	灌溉稻 II 型	夏秋季、秋冬季、冬春季

3. 資料

美國太空總署 (NASA) 的 Terra 衛星，是新一代地球觀測系統遙感探測系列衛星，衛星上搭載中尺度影像光譜儀 (MODIS)。隨著地球觀測系統任務 (Earth Observing System, EOS) 持續地觀測並累積了大量的資料，世界各地的研究者得以使用長期且大量的 MODIS 資料來進行大時空尺度的環境變遷研究，並成為監測乾旱、暖化、人地關係、災害與環境等其他大尺度地球現象的最有利工具。本研究使用 MODIS/Terra Surface Reflectance 8-Day L3 Global 500m SIN GRID V005 的衛星產品 (MOD09A1)。MODIS 影像可由美國航太總署 (National Aeronautics and Space Administration, NASA) 取得。MOD09A1 的產品是以 MOD09GQ 7 個光譜影像為基礎重新組製的 level-3 產品，提供地面解析度 500 公尺、8 日合成的七個波段地面反射率資訊。影像產品中的每個像素皆以 8 天觀測值中最好的 L2G (Level2Grid) 觀測值來記錄儲存，其中包含了最大觀測幅合區、較佳視角區與最小雲量與雲影及穩定大氣膠區等。MOD09A1 的產品在品質控制資訊圖層中提供了雲量資訊，產品經過 Stage2 驗證並可以提供科學性的研究發表之用 (Vermote et al., 2008)。本研究中 MODIS 時序影像，以 2010 年的完整稻作耕作期 (2009 年十一月至 2010 年十二月) 取得共 54 張 8 日影像。研究區涵蓋了 h28v07, h28v08, h27v06 與 h28v07 四個衛星影像分幅，一併下載拼合。本研究使用數值高程與其地形分析資料，包括高度、坡度等進行資料遮罩的使用，數值資料來源為 ASTER GDEM V2 (Advanced Space borne Thermal Emission and Reflection Radiometer Global Digital

Elevation Model Version 2; <http://gdem.ersdac.jspacesystems.or.jp>)。為了稻作生產區域分類與精度評估，下湄公河盆地涵蓋區域，包含越南、寮國、柬埔寨與泰國的土地利用資料、高解析衛星影像、地面調查資料與政府/國際研究計畫之稻米統計資料，亦在本研究中予以收集使用。

4. 研究方法與流程

本研究的分析處理流程架構，包含了三個主要的分析步驟，如圖 2 所示：(1) 資料前處理，包含影像資料接合裁切，萃取光譜影像計算研究所須要之相關光譜指標、濾除時序雜訊以重建去噪的時序剖線、資料區域遮罩過濾移除混淆資料，(2) 利用地物候資訊選取訓練樣本，進行類神經網路 (Artificial Neural Network; ANN) 建模進行分類；最後 (3) 以混淆矩陣進行分類精度評估，並利用線性回歸分析稻作面積統計資料與分類所推估稻作面積進行比較。

4.1 資料前處理

由 NASA 網站下載取得的 MODIS HDF 資料投影格式為正弦投影 (Sinusoidal projection)。在前處理階段，影像資料先經拼合剪裁，隨後投影成 WGS84 的座標系統。每 8 天周期的 MODIS 光譜影像隨後計算出研究所須要之相關光譜指標，包括 NDVI (式 1)、LSWI (式 2)、與標準化差異建成區指數 (normalized difference built-up index; NDBI) (式 3)，之後各自堆疊成 54 幅時序資料的組合影像。各時序指數的組合影像隨後用於稻作/非稻作區的分類資料遮罩，以及後續進行稻作耕種型態分類之用。

$$NDVI = (\rho_{nir} - \rho_{red}) / (\rho_{nir} + \rho_{red}) \quad (1)$$

$$LSWI = (\rho_{nir} - \rho_{swir}) / (\rho_{swir} + \rho_{nir}) \quad (2)$$

$$NDBI = (\rho_{swir} - \rho_{nir}) / (\rho_{swir} + \rho_{nir}) \quad (3)$$

其中 ρ_{red} (620–670 nm)、 ρ_{nir} (841–876 nm) 與 ρ_{swir} (1,230–1,250 nm) 分別為 MODIS 產品的第 1、第 2 與第 6 波段。

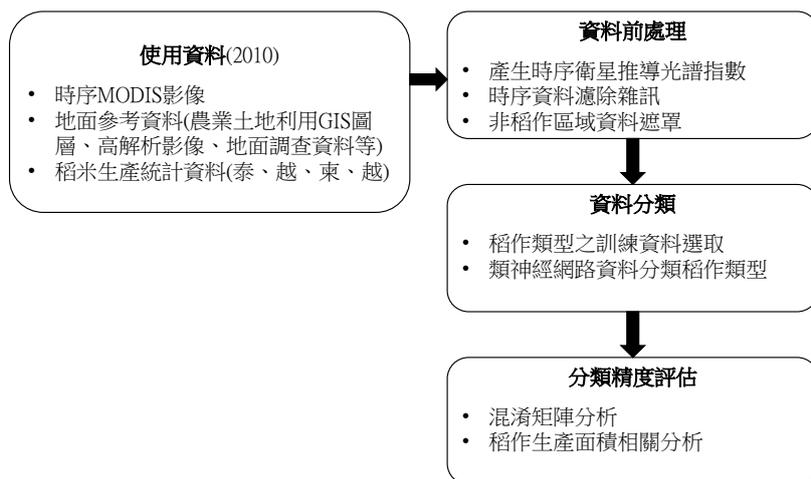


圖2 研究架構圖

4.2 時序資料濾噪

MODIS 衛星產品雖然提供了衛星影像的品質指標(Vermote et al., 2008)，但從衛星影像光譜資料仍有可能因複雜的大氣校正過程、雲層覆蓋、拍攝角度與軌道差異等影響而具有時間域的雜訊，而影響所推導出的時序光譜指數。在熱帶地區中，進行作物分類的諸多研究中，都必須使用濾除噪訊的技術以減少影像分類的誤差與影響(Canisius et al., 2007; Sakamoto et al., 2005)。對時間序列的資料處理分析而言，雜訊的移除對於分類的結果影響很大。在本研究中，濾除雜訊的方法分為兩個步驟：首先，先針對被厚雲所覆蓋區域，以 MODIS 影像產品中的藍光波段反射值高於 0.2 的資料點，視為厚雲區並將之移除(Biggs et al., 2006)，移除後的缺失值以線性內插方式重建；接著，再以時頻轉換的

方法過濾高頻雜訊，常見的傅立葉分析可分解訊號成一組 cos 與 sin 弦波所組合的週期波，但對非線性與非穩態的訊號資訊，則會產生多組無意義的諧波(Huang et al., 1999)；應用小波分析則可以解決非穩態訊訊號的問題。Galford 等人(Galford et al., 2008)於南美洲雨林地區進行稻作偵測，因當地的特殊氣候條件，稻米生長週期時常發生改變，故須挑選適合的小波參數以濾除 MODIS 影像的時間序列資料雜訊，可幫助增益稻米的分類精度。小波分析的輸入訊號 $x(t)$ 的小波轉換形式 $W(s, \tau)$ 可以下式 4 表示：

$$W(s, \tau) = \frac{1}{\sqrt{s}} \int x(t) \psi\left(\frac{t-\tau}{s}\right) dt, \quad (4)$$

其中 $s > 0$ 並且 $\tau \in \mathbf{R}$ ， $x(t)$ 為輸入解析訊號； $\psi(t)$ 為母波函數； s 與 τ 分別代表縮放尺

度與平移參數。參考前人研究，本研究使用 Coiflet (order 4) 做為母波函數進行小波分析濾噪，可以產生較佳的稻作物候濾噪

的結果(Chen et al., 2011; Sakamoto et al., 2005)，如圖 3 示例。

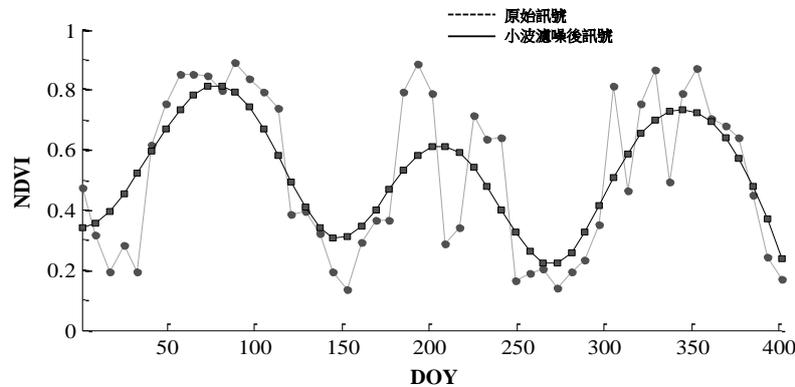


圖 3 以研究區內三期稻作為例，濾除厚雲的原始 NDVI 時序訊號與小波濾噪後的訊號比較。

4.3 閾值遮罩

為了避免龐大的資料處理量，同時減少分類時複雜資料的混淆，可在進行分類前，先以地物時序特徵與數值高程資料及其產製的地形分析資訊，進行初步資料濾除。首先，透過觀察的物時序資料的物候型態，使用時序閾值法移除水體(多於 30 張的像元 $NDVI < 0.1$ 同時 $LSWI > 0.2$)、大部分的森林區(連續 20 張影像像元的 $NDVI > 0.7$)、建成區(連續 30 張影像像元的 $NDVI < 0.4$ 與 $NDBI > -0.1$)。由於研究區域大部分的森林位於高程 250 公尺以上 (Stibig et al., 2004; Tingting and Chuang, 2010)，以及坡度高於 30% 的區域，因此使用高程資訊與地形分析資訊予以一併遮罩移除。然而，僅使用閾值過濾的方法是無法完全地移除非農業區域，並且由於本區域的稻作系統因氣候條件、灌排系統的區域差異，變異性很大，因此必須再藉由分類方法進行細部分類。研究檢視閾值濾除影像區域與地真資料訓練區，並進行比對以選擇分類樣本。挑選後的分類樣本區

分為六個大類別，包括了依稻作的耕種集約度區分為單期稻、雙期稻、三期稻以及其他類型(旱作、疏林、建成區)，隨後作為類神經輸入的訓練參數。

4.4 類神經網路分類

類神經網路是一個基於統計學習理論的無參數分類器(Foody and Mathur, 2004; Haykin, 1994)。類神經網路模擬生物神經的運作方式，利用資料不斷的學習及錯誤修正以達到正確的輸出。類神經網路的主要特點是大量的平行處理、非線性輸出及利用多層結構的預測能力。實際應用上並不需要先瞭解系統的數學模型，就可直接以神經網路取代系統的模型，一樣可以得到輸入與輸出之間的關係。其概念架構如圖 4 所示：

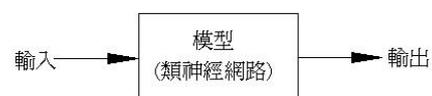


圖 4 類神經網路系統架構關係

處理單元中的神經元是類神經網路最基本的組成單位，神經元有輸入輸出與激發態的設計並連結成網路，在網路內每一個神經元的輸出相互連結到次層，將上述的神經元組合起來就成為一個類神經網路。類神經網路可透過訓練的方式，讓類神經網路反覆的學習，直到對於每個輸入都能幾近正確地對應到所需要的輸出。在類神經網路學習前，必須先建立訓練樣本（training pattern），使類神經網路在學習的過程中作為參考進行訓練，最終建構出輸入樣區與輸出推論結果間的關聯網路。目前為止，類神經網路已經被廣泛應用於土地利用與覆蓋的分類研究中(Aitkenhead and Aalders, 2008; Dixon and Candade, 2007; Huang et al., 2002; Kavzoglu and Colkesen, 2009; Kavzoglu and Mather, 2003; Maeda et al., 2009; Murthy et al., 2003; Otukey and Blaschke, 2010; Pal and Mather, 2004)。針對解決問題的不同，研究學者們提出許多不同的類神經網路模型，每一種類神經網路的演算方法並不相同，亦適用不同的問題，常見的網路有倒傳遞網路（Back-propagation Network）、霍普菲爾網路（Hopfield Network）、徑路式函數網路（Radial Basis Function Network）。由於這些類神經網路並非適用所有的問題，因此必須針對問題選擇適當的類神經網路。本研究採用倒傳遞網路，以描述一年完整稻作耕種期的物候資訊 54 個 NDVI 資料值作為輸入，選擇共 8134 個訓練樣本（訓練樣本的提取，詳見下節），連接一層隱藏層，隱藏層含有 28 個神經元，連接連接至輸出層，輸出類別最後整併為選定的六個分類類別。

4.5 訓練樣本的提取

本研究參考地面調查資料與地面參考資料區域，直接提取濾噪的 NDVI 時序數據用於神經網路分類模式訓練。地面參考資料被分為兩部分：用以進行神經網路的訓練(類型 1)與利用於混淆矩陣評估分類精度(類型 2)。由地面參考資料選擇用於各類別的训练像元(類型 1)，不可避免地會有資料異常、陰影覆蓋與混合像元等問題，為了找出具稻作特徵的純質像元，此必須以地面資料為參考，從濾噪後的 NDVI 數據隨機抽取，使用模糊組合(Fuzzy composition)算法(Witold, 1989):利用大量選取的資料像元計算其模糊集合的相關係數與隸屬函數，設定閾值條件(95%以上)移除異常，僅留下供作訓練樣本的純質像元。此外，訓練樣本也必須同時符合種植日曆的物候特性。以雙期稻作為例，雙期灌溉水稻必須一年只有兩個峰值；且第一峰值發生時間必須在一月至二月之間，第二個峰值發生期必須是五月至八月之間(因地而異)；且兩峰值時間間距必須多於 80 日以上。因研究區域涵蓋廣大，不同的環境差異造成種植時間可能因地而異的，因此我們利用可得之地面資料提取訓練類別數據，並儘量涵蓋研究區域內稻作系統的可能變異。本研究提取各類別的训练樣本數詳見表 2。

表 2 進行類神經網路訓練的各類別樣本數

輸入類別	訓練樣本數
單期稻作	2,241
雙期稻作	3,210
三期稻作	1,011
旱作	829
疏林	589
建成區	254
總計	8,134

4.6 分類精度與成果驗證

由地面參考資料與地面調查資料，隨機抽取一部分作為訓練樣本進行類神經網路的模式建立，另一部分則進行混淆矩陣分析。為了解決分類後資料常產生的胡椒鹽效應，研究使用了多數決空間濾波 (majority filter) 消滅之。濾噪後的分類影像，各類別隨機選取 2,000 個像元與地面資料進行精度評估。另外，本研究使用線性迴歸分析驗證政府稻作統計調查(省級空間尺度)的稻作種植區域資料與研究分類的稻作區進行產製成果的評估。

5. 成果與討論

5.1 稻作物候資訊

選取稻米訓練樣本，計算其 NDVI 時間序列的剖線均值特徵，顯示 2010 年各稻作系統的耕作物候資訊，如圖 5。就單一耕種期而言，稻作的 NDVI 時序剖線，從播種期因灌水而產生 NDVI 值的相對低點開始；其後，隨著進入稻作成長期，稻米生物質的發展而逐漸達到高峰；之後，結穗到收穫期前 NDVI 值快速下降，迄至收割後達到另一低點，相對於其他類別，稻作時序剖線形成較大的時間波動；可由剖線可以看出不同稻作系統的差異：如單期稻作在整年度內只有一個 NDVI 的高峰，且高峯值出現在雨季後，生長期相對較長；雙期稻有兩個高峰，依灌溉系統與水源差異而分為雙期灌溉稻作與雙期雨季稻作，雙峰的分布反映耕種季節的區域差異；三期稻作有三個峰值，部份區域其兩個峰值會與雙期稻作系統相近，但因灌溉水源足夠，可再多一季的耕種，因此會多一個峰值出現；同時，因種植週期的密集，

時序剖線會有前後期波形相似、稻作期短且緊密排列的特性。各作物系統的 NDVI 時序特徵描述說明於表 3。

5.2 分類成果分析

類神經網路分類結果與地面參考/調查資料進行混淆矩陣分析，如表 4 所示，其中總體精度為 84.4%，Kappa 係數為 0.81，而各類稻作系統的生產者分類精度皆高於 85% 以上，使用者精度除了雙期稻作之外，皆達 85% 以上，顯示利用類神經網路進行大區域分類有很好的分類成果；而雙期稻誤授較高的原因，主要是因雙期稻的類型較多且易與其他類型混淆，特別是與三期稻作和森林類別。而由類神經網路分類產製的稻作系統空間分布圖(圖 6)觀察可以知道，在湄公河流域中游區域的泰國、寮國與柬埔寨，多為單期稻作生產區，該區僅少數有雙期稻作系統臨湖或河流區域分布，而寮國因地形因素，稻作面積較小；越南三角洲位處湄公河下游，因為該地區發達的灌排系統、低平的地形與濕熱氣候因子，稻作型態較為多元。其中，雙期稻作區分布廣大且密布，而靠河岸與下游的部分地區，因為豐富的灌溉水源提供而發展出集中分布的三期稻區；三角洲的西南部則為單期稻分布。

為比較類神經網路分類推導出的稻米種植面積與政府/研究計畫的作物生產面積統計(省級空間尺度)，研究彙整了政府官方稻米生產統計資料與當地研究調查建立的現調資料，進行線性迴歸分析。由圖 7 可以看出各國的 R^2 皆大於 0.9 以上；比較圖 7 係數與表 5 各國統計資料與分類推估的生產總面積，稻米耕作期密集度高或種植區域大的國家，回歸的係數推定有過度估計傾向，但是稻米生產區域的空間同質性卻更高。就分類面積來看，分類資料

與實地統計資料相對面積誤差，泰國為 -10.05%、越南為 -14.32%、柬埔寨為 -7.97%、寮國為 -4.70%、全部區域為 -10.57%，分類推估資料也有高估的現象發生，主要原因為 MODIS 的空間解析度為 500 公尺，容易發生面積超估的結果；而另一個原因，可從表現於越南的較大誤差看出，在本研究中所稱總稻米種植面積為分類稻作區域乘以分類像元的耕作期數目。越南區域的稻作多為二、三期，耕作

期高，也因此產生較大的稻米種植面積誤差。分析各國的均方根誤差，泰國為 56.7 千公頃、越南為 48.63 千公頃、柬埔寨為 31.77 千公頃、寮國為 15.2 千公頃、全部區域為 45.27 千公頃。其誤差比較實際種植面積、分類精度，尚在可接受之範圍內。顯見利用本方法應用於進行稻作區域與稻作型態的分類與監測，具有極佳的分類成果與應用價值。

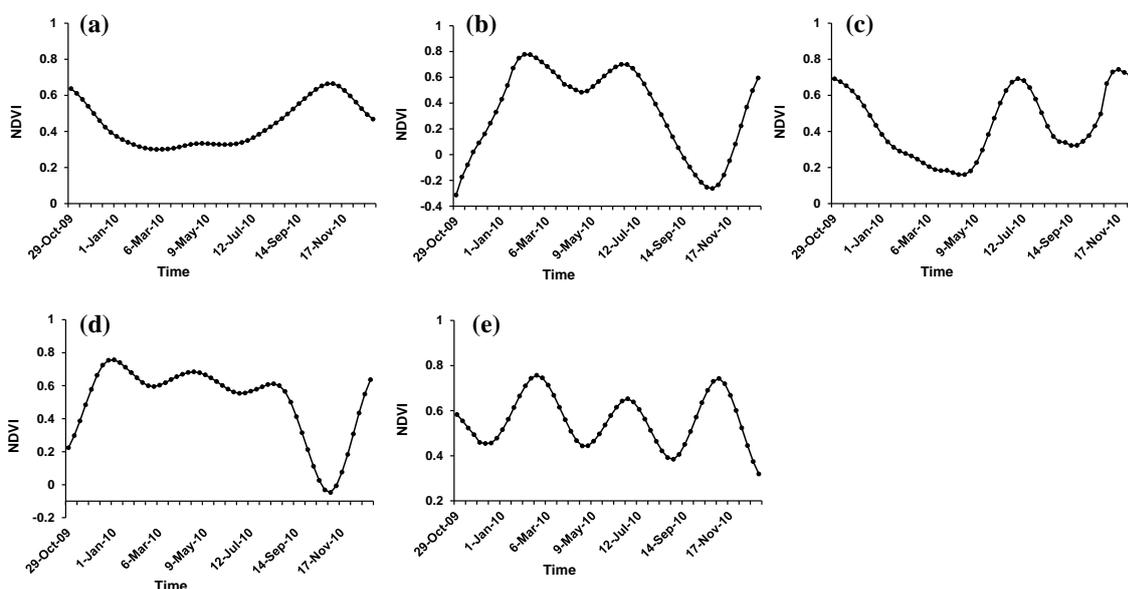


圖 5 圖中顯示 2010 年以小波分析進行濾除雜訊後不同稻作系統的 NDVI 時序剖線類型 (a)單期雨季稻作;(b)雙期灌溉稻作;(c)雙期雨季稻作;(d)三期灌溉稻作 I 型;(e)三期灌溉稻作 II 型。

表3 不同稻作系統濾噪後之NDVI時序特性說明

稻米耕作系統	NDVI時序剖線特徵描述
單期稻作系統	單期稻作系統主要為雨季稻，耕作類型是一年一作的種植型態。反映在NDVI時序剖線的特徵，就是抽穗期時的NDVI極值一年出現一次，而且耕種期較長。由於仰賴降雨灌溉，因此雨季來臨前開始播種，NDVI的低值出現，播種之後的NDVI值會隨著生物質的累積逐漸增加，終至高點後轉為快速地降低，迄至十二月底前。
雙期稻作系統	由NDVI時序剖線特徵，可以觀察到兩個峰值的分布。雙期水稻耕作系統代表著一年有兩期的水稻種植。而水稻的種植日曆多可歸因於當地的氣候條件，因此區域差異，水稻種植日曆不同，就會產生不同的峰值出現時間。例如，在越南湄

	<p>公河三角洲地區，雙期水稻分布非常普遍，這裡雙期灌溉稻NDVI剖線的第一個高峰大多出現在二月中旬(約DOY49)，而第二個高峰則是在六月中旬(約 DOY161)。然而，在雙季雨季稻米耕作系統中，由於仰賴雨季降水的供應與充分利用，NDVI極值通常出現在六月底(約DOY177)和十一月中旬(約DOY321)，例如湄公河下游海岸區。</p>
三期稻作系統	<p>由於有較為完善的灌排系統支持，可以提供較高時間集約的耕作密度，此類稻作系統的NDVI時序剖線可以發現三個峰值；並且依種植區域的不同差異，播種季節會向前推移(推遲)1~2個月。如果灌溉水分足夠，某些區域的三期稻作，前兩個峰值會正好與雙期灌溉稻作系統一致，分別對應於冬春季、夏秋季耕作時間，並能於秋冬季或春夏季間，再多進行一個額外稻作耕種。另外就是透過灌溉供應整年的稻米耕種季節，因此三期灌溉稻類型II型的NDVI時序剖線的變動起伏很大、前後期波形相似且種植期短緊密排列。</p>
其他作物類型	<p>種植諸如甘蔗、木薯、玉米等類的旱作農地，並與草原、灌木叢等地面覆蓋歸類於此類。這類型通常在NDVI時序剖線上面會形成單峰值的波形。並且由於當地傳統的農業仰賴著雨季水分的供應，因此NDVI峰值多會出現於雨季之後。少數會有雙峰出現，但與雙期稻作的物候峰值有所差異。不同於發生在水稻耕作初期的灌水現象，旱作農業地區的NDVI值會一直維持平穩高值的狀態。草原與灌木叢有一樣時序特徵。由於使用濾噪的程序、資料時間解析度與混合像元的問題，因此產生出來的時序波形有時會與單期雨季稻相似，增加分類的混淆。</p>

表4 研究區類神經網路分類之混淆矩陣分析

地面參考資料	2010 年分類結果						(像元)
	單期稻	雙期稻	三期稻	旱作	森林	建成區	總計
單期稻	1,789	16	8	74	34	28	1,949
雙期稻	22	1,818	113	86	126	117	2,282
三期稻	13	89	1,728	76	19	98	2,023
旱作	13	34	15	1,592	80	112	1,846
森林	151	36	122	151	1,735	183	2,378
建成區	12	7	14	21	6	1,462	1,522
總計	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	12,000
生產者精度 (%)	89.5	90.9	86.4	79.6	86.8	73.1	
使用者精度 (%)	91.8	79.7	85.4	86.2	72.9	96.1	
總體精度 (%)	84.4						
Kappa 係數	0.81						

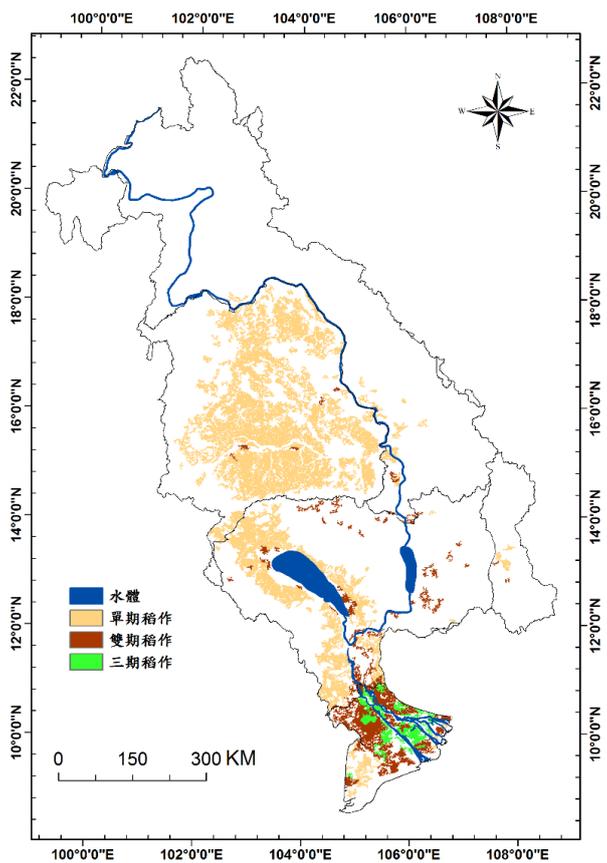


圖 6 下湄公河盆地 2010 年稻作系統的空間分布。

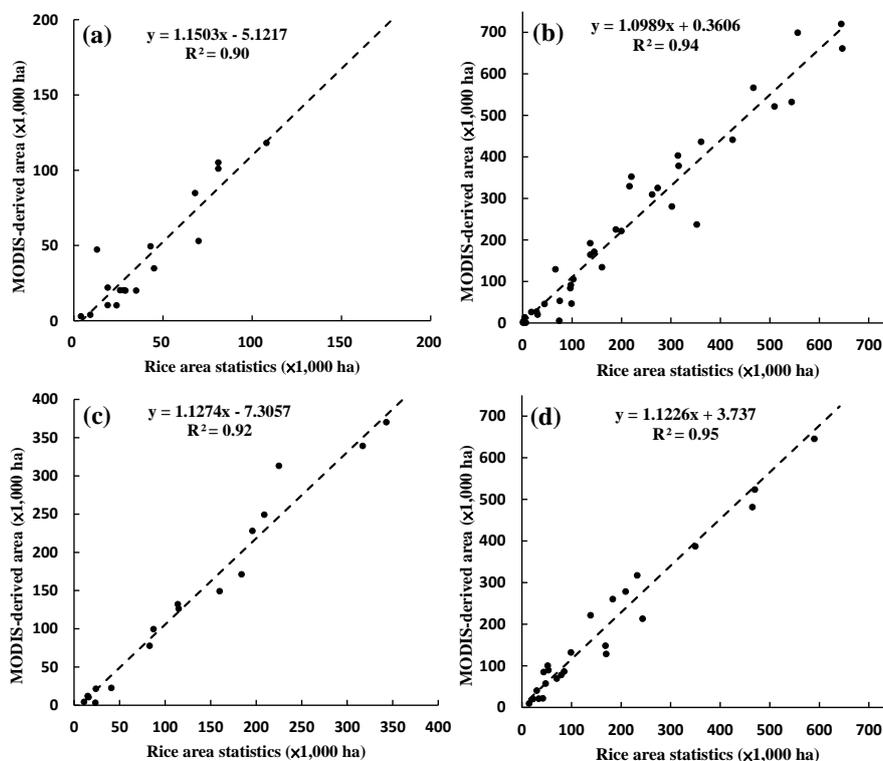


圖7 2010年MODIS影像分類之稻米生產面積與政府稻米調查統計資料(省級空間單元)進行線性迴歸分析 (a)寮國(b)泰國(c)柬埔寨(d)越南。

表 5 2010 年 MODIS 影像分類之稻米生產面積與稻米調查統計資料之面積比較

	泰國	越南	柬埔寨	寮國	總計
RAS (×1,000 ha)	8,128.15	4,538.20	2,911.00	892.30	1,6469.65
MOD (×1,000 ha)	8,945.39	5,187.95	3,143.14	934.23	1,8210.71
REA (%)	-10.05	-14.32	-7.97	-4.70	-10.57
RMSE (×1,000 ha)	56.70	48.63	31.77	15.20	45.27

註 1：S:稻米生產面積統計資料

註 2：MOD:MODIS 分類稻米生產區域面積

註 3：REA:面積相對誤差百分率 $REA = ((RAS - MOD) / RAS) \times 100\%$

註 4：RMSE:均方根誤差: $RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (X_{obs,i} - X_{map,i})^2}$ ，其中 $X_{obs,i}$ ，為第 i 省的觀測值; $X_{map,i}$ ，為第 i 省的估計值。

6. 結論與建議

針對地球環境的變化，農業的變動是最直接反應，目前遙測技術已發展出可直接偵測與評估環境狀態，提供快速且即時的作物監測資訊，提供在作物收成前的準確作物生長產量訊息。先進國家諸如日本、美國、歐盟等，皆依賴應用遙測技術，對其主要的糧食輸入區域進行農業監測，監測其作物生長與環境災害等狀況，作為糧食安全的政策評估。隨著地球監測系統的建構，目前運行的 MODIS 提供了一個大範圍並滿足區域農業監測需求的最佳來源。本研究發展以多時序 MODIS 衛星影像進行下湄公河區域稻作區域的偵測分類方法，研究所需的相關參數如 NDVI、LSWI、NDBI 皆可由 MODIS 影像直接推導。影像資料經過輔助衛星資料濾除後以類神經網路分類，分類的結果以混淆矩陣顯示總體精度為 85%，Kappa 係數為 0.8，比較 MODIS 推導的稻米種植面積與政府/計畫的作物統計資料(省級的空間尺度)，進行線性迴歸分析，結果顯示各國的 R^2 皆大於 0.9 以上。除了驗證此偵測方法的可應用性之外，本研究結果可以提供下湄

公河盆地稻作生產面積、分布區域與稻作耕種系統等量化數據參考外，分析方法未來亦可以推廣至世界其他區域進行稻作監測的應用。我們希望研究所得之相關成果有利於政府糧食政策制定者的訊息參考，修正其進出口的目標與稻米購買的策略以維持國家的糧食安全；並能進一步擴大到其他重要稻米產區的監測，除可協助其區域的環境變遷評估、農業資源管理應用；未來產製多年期稻作系統分布圖，可作為分析稻米生產型態區域的時空變化資訊，提供區域蒸發散、水資訊管理，以及環境災害分析，對於區域整合與全球環境問題的解決上，應有極大的助益。

誌謝

本研究特此感謝國科會案號 NSC98-2221 -E-008-095-MY2 的經費支持，與越南安江大學農業與自然資源團隊協助本研究所需的現地調查與相關統計資料的收集。寮國農業部、泰國農業部、越南統計部提供相關網路下載資源，與匿名審查委員惠賜專業建議與修改意見，特此一併致謝。

參考文獻

- 行政院農業委員會, 2011. 全國糧食安全會議. *Agriculture Policy and Review* 第 228 期.
- Aitkenhead, M.J., Aalders, I.H., 2008. Classification of Landsat Thematic Mapper imagery for land cover using neural networks. *International Journal of Remote Sensing* 29, 2075-2084.
- Atzberger, C., Formaggio, A.R., Shimabukuro, Y.E., Udelhoven, T., Mattiuzzi, M., Sanchez, G.A., Arai, E., 2014. Obtaining crop-specific time profiles of NDVI: the use of unmixing approaches for serving the continuity between SPOT-VGT and PROBA-V time series. *International Journal of Remote Sensing* 35, 2615-2638.
- Biggs, T.W., Thenkabail, P.S., Gumma, M.K., Scott, C.A., Parthasaradhi, G.R., Turrall, H.N., 2006. Irrigated area mapping in heterogeneous landscapes with MODIS time series, ground truth and census data, Krishna Basin, India. *International Journal of Remote Sensing* 27, 4245-4266.
- Canisius, F., Turrall, H., Molden, D., 2007. Fourier analysis of historical NOAA time series data to estimate bimodal agriculture. *International Journal of Remote Sensing* 28, 5503 - 5522.
- Chen, C.F., Huang, S.W., Son, N.T., Chang, L.Y., 2011. Mapping double-cropped irrigated rice fields in Taiwan using time-series Satellite Pour l'Observation de la Terre data. *Journal of Applied Remote Sensing* 5, 053528-053528.
- Chen, P.Y., Fedosejevs, G., Tiscareño-López, M., Arnold, J., 2006. Assessment of MODIS-EVI, MODIS-NDVI and VEGETATION-NDVI composite data using agricultural measurements: An example at corn fields in Western Mexico. *Environmental Monitoring and Assessment* 119, 69-82.
- Dixon, B., Candade, N., 2007. Multispectral landuse classification using neural networks and support vector machines: one or the other, or both? *International Journal of Remote Sensing* 29, 1185-1206.
- FAO, 2011. Global food price monitor, December 2011. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome - Italy.
- FAOSTAT, 2011. FAO Statistics Online. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, Italy.
- Foody, G.M., Mathur, A., 2004. Toward intelligent training of supervised image classifications: directing training data acquisition for SVM classification. *Remote Sensing of Environment* 93, 107-117.
- Furuya, J., Kobayashi, S., 2009. Impact of global warming on agricultural product markets: stochastic world food model analysis. *Sustainability Science* 4, 71-79.
- Galford, G.L., Mustard, J.F., Melillo, J., Gendrin, A., Cerri, C.C., Cerri, C.E.P., 2008. Wavelet analysis of MODIS time series to detect expansion and intensification of row-crop agriculture in Brazil. *Remote Sensing of Environment* 112, 576-587.
- Hamar, D., Ferencz, C., Lichtenberger, J., Tarcsai, G., Ferencz-Árkos, I., 1996. Yield estimation for corn and wheat in the Hungarian Great Plain using Landsat MSS data. *International Journal of Remote Sensing* 17, 1689-1699.
- Haykin, S., 1994. *Neural networks: A comprehensive foundation*. Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ.
- Huang, C., Davis, L.S., Townshend, J.R.G., 2002. An assessment of support vector machines for land cover classification. *International Journal of Remote Sensing* 23, 725-749.
- Huang, N.E., Shen, Z., Long, S.R., 1999. A new view of nonlinear water waves: the Hilbert Spectrum. *Annual Review of Fluid Mechanics* 31, 417-457.

- Kavzoglu, T., Colkesen, I., 2009. A kernel functions analysis for support vector machines for land cover classification. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 11, 352-359.
- Kavzoglu, T., Mather, P.M., 2003. The use of backpropagating artificial neural networks in land cover classification. *International Journal of Remote Sensing* 24, 4907-4938.
- Maeda, E.E., Formaggio, A.R., Shimabukuro, Y.E., Arcoverde, G.F.B., Hansen, M.C., 2009. Predicting forest fire in the Brazilian Amazon using MODIS imagery and artificial neural networks. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 11, 265-272.
- Matthews, R., Wassmann, R., 2003. Modelling the impacts of climate change and methane emission reductions on rice production: a review. *European Journal of Agronomy* 19, 573-598.
- Matthews, R.B., International, C.A.B., International Rice Research, I., 1995. Modeling the impact of climate change on rice production in Asia. CAB International in association with the International Rice Research Institute, Wallingford.
- MRC, 2005. Lower Mekong Basin drought study: analysis, forecasting, planning and management, Mekong River Commission, Vientiane, Laos.
- MRC, 2010. Multi-functionality of paddy fields over the Lower Mekong Basin, Mekong River Commission, Vientiane, Laos.
- Murthy, C.S., Raju, P.V., Badrinath, K.V.S., 2003. Classification of wheat crop with multi-temporal images: performance of maximum likelihood and artificial neural networks. *International Journal of Remote Sensing* 24, 4871-4890.
- OECD-FAO, 2006. Agricultural outlook 2006-2015. Organisation for economic co-operation and development.
- Otukei, J.R., Blaschke, T., 2010. Land cover change assessment using decision trees, support vector machines and maximum likelihood classification algorithms. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 12, 27-31.
- Pal, M., Mather, P.M., 2004. Assessment of the effectiveness of support vector machines for hyperspectral data. *Future Generation Computer Systems* 20, 1215-1225.
- Prasad, A.K., Chai, L., Singh, R.P., Kafatos, M., 2006. Crop yield estimation model for Iowa using remote sensing and surface parameters. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 8, 26-33.
- Prasad, T., Li, Y., Chandrashekhar, B., MuraliKrishna, G., Praveen, N., Venkateswarlu, D., Manohar, V., Obi Reddy, P.G., 2009. Global Irrigated Area Maps (GIAM) and Statistics Using Remote Sensing, Remote Sensing of Global Croplands for Food Security. CRC Press, pp. 41-117.
- Quarmby, N.A., Milnes, M., Hindle, T.L., Silleos, N., 1993. The use of multi-temporal NDVI measurements from AVHRR data for crop yield estimation and prediction. *International Journal of Remote Sensing* 14, 199-210.
- Ranjith, A., Prasad, T., Sarath, G., Xueliang, C., Li, Y., Chandrashekhar, B., Mitchell, A.S., MuraliKrishna, G., Venkateswarlu, D., PraveenNoojipady, Hugh, T., and Xiangming, X., Manohar, V., Obi Reddy, P.G., 2009. Global Map of Rainfed Cropland Areas (GMRCA) and Statistics Using Remote Sensing, Remote Sensing of Global Croplands for Food Security. CRC Press, pp. 357-389.
- Reynolds, C.A., Yitayew, M., Slack, D.C., Hutchinson, C.F., Huete, A., Petersen, M.S., 2000. Estimating crop yields and production by integrating the FAO Crop Specific Water Balance model with real-time satellite data and

- ground-based ancillary data. *International Journal of Remote Sensing* 21, 3487-3508.
- Sakamoto, T., Yokozawa, M., Toritani, H., Shibayama, M., Ishitsuka, N., Ohno, H., 2005. A crop phenology detection method using time-series MODIS data. *Remote Sensing of Environment* 96, 366-374.
- Sehgal, V., Jain, S., Aggarwal, P., Jha, S., 2011. Deriving Crop Phenology Metrics and Their Trends Using Times Series NOAA-AVHRR NDVI Data. *J Indian Soc Remote Sens* 39, 373-381.
- Stibig, H.J., Achard, F., Fritz, S., 2004. A new forest cover map of continental southeast Asia derived from SPOT-VEGETATION satellite imagery. *Applied Vegetation Science* 7, 153-162.
- Tingting, L., Chuang, L., 2010. Study on extraction of crop information using time-series MODIS data in the Chao Phraya Basin of Thailand. *Advances in Space Research* 45, 775-784.
- Vermote, E.F., Kotchenova, S.Y., Ray, J.P., 2008. MODIS surface reflectance user's guide, College Park, USA <http://modis-sr.ltdri.org/products.html>.
- Wardlow, B.D., Egbert, S.L., 2008. Large-area crop mapping using time-series MODIS 250 m NDVI data: An assessment for the U.S. Central Great Plains. *Remote Sensing of Environment* 112, 1096-1116.
- Witold, P., 1989. Fuzzy control and fuzzy system. John Wiley & Sons, New York, USA.
- Xiao, X., Boles, S., Liu, J., Zhuang, D., Froking, S., Li, C., Salas, W., Moore Iii, B., 2005. Mapping paddy rice agriculture in southern China using multi-temporal MODIS images. *Remote Sensing of Environment* 95, 480-492.

Delineating Rice Cropping Activities from MODIS Time-series Data in the Lower Mekong Basin

Cheng-Ru Chen^{1*} Chi-Farn Chen² Nguyen-Thanh Son³ Li-Yu. Chang⁴ Ya-Wen Lin⁵

ABSTRACT

Delineating rice cropping activities is important for crop management and crop production estimation. This study used 8-day the time-series MODIS NDVI data in 2010 to delineate rice-cropping activities in the Lower Mekong Basin (LMB). The data were processed using the wavelet transform and artificial neural networks (ANN). The classification results assessed using the ground reference data indicated the overall accuracy and Kappa coefficient of 84.9% and 0.81, respectively. Comparisons between MODIS-derived rice area and rice area statistics at the provincial level for each country reaffirmed a close agreement between the two datasets ($R^2 > 0.9$). The results achieved from the methods used in this study confirmed the validity of mapping approach for delineating rice agriculture activities in the study region. The results could provide quantitative information on rice cropping areas and farming activities. This classification approach is thus proposed for monitoring rice cropping activities in the study region and other regions in the world.

Keywords: MODIS, rice crop, remote sensing image, Lower Mekong Basin

1 Postdoctoral Research Fellow, Center for Space and Remote Sensing Research, National Central University

2 Professor, Center for Space and Remote Sensing Research, National Central University

3 Postdoctoral Research Fellow, Center for Space and Remote Sensing Research, National Central University

4 Assistant Research Engineer, Center for Space and Remote Sensing Research, National Central University

5 PhD Student, Department of Information Management, National Central University

* Corresponding Author: Phone: 03-4227151 ext.57659, E-mail:ccrunclu@gmail.com

Received Date: May 25, 2014

Revised Date: Dec. 08, 2014

Accepted Date: Dec. 10, 2014

都市熱島效應於產業發展及其影響因子分析之研究

楊龍士¹、楊倍航²、何佳薇^{3*}、葉美伶⁴、周天穎⁵

摘要

最近全球暖化議題越來越受重視，而都市熱島效應也是構成全球暖化的原因之一。由於近年來遙測影像處理的科技越來越進步，其適合與地理資訊系統進行大尺度環境之綜合分析。因此本研究應用衛星遙測技術配合地理資訊系統，進行都市整體面向溫度的監測分析。本研究應用衛星遙測技術，進行都市整體面向溫度的監測分析，取 Landsat 5 衛星 1995、2009 及 2011 年於臺中上空所拍攝之衛星影像，將熱紅外波段做溫度反演計算獲取地表亮度溫度，進而計算熱島強度，並配合風向、風速及洋流自然因素探討熱島效應之分布情形，以了解臺中地區都市熱島效應現況。此外，根據工業區內分析結果，各工業區內最高熱島強度約在 0.6~0.7 之間，調查其高溫區域之產業類別結果，包括有：金屬製造業、機械設備製造業、電子、化學、光電產業，玻璃製品業、造紙業、紡織業等，尤以機械設備及金屬相關產業所產生熱島強度最高。

關鍵字：熱島效應、單窗算法、溫度反演

1. 前言

1.1 前言

本研究探討熱島效應的對象為臺中市，臺中市位居於臺灣南北交通路網的中心，並擁有全臺灣第三高的人口密度。如果以產業的特性來看，臺中地區的產業空間分佈大致上主要集中於人口密集、都市化程度較高的區域，例如舊市區主要集中在西屯區、西區及北屯區，而縣市合併後之新市區則包括有太平、豐原、大里分居前三位。然而人為的活動、加上密集的產業與大量的土地開發結果，致使都市交通

壅擠且耗能大增。在都市中的綠地快速且大量的消逝，伴隨產生的是空氣品質惡化與擁擠的居住環境，對都市居民的健康、整體經濟的發展與都市的生態環境產生影響，顯示出都市微氣候環境有逐年惡化的趨勢。根據調查，過去到現在一百年來臺灣都會區的平均增溫大約是 1.5°C，比起北半球各國家都市的平均增溫 0.7°C 高出了約 2 倍(劉紹臣等人，2003)，至 2010 年臺中市百年來整體溫度平均上升 1.4°C。現今的臺中市已經成為臺灣中部地區最大工商業都市。

位於盆地內的臺中都市熱島效應現象則會比較偏向於集中內陸，由於熱島效應而形成之氣流循環的塵罩現象更加為強烈

¹逢甲大學土地管理學系教授兼資深副校長

²逢甲大學土地管理學系研究生

³逢甲大學地理資訊系統研究中心資深規劃師

⁴逢甲大學地理資訊系統研究中心空間資訊與環境規劃處處長

⁵逢甲大學土地管理學系教授兼地理資訊系統研究中心主任

*通訊作者 Email: nicole@gis.tw

收到日期：民國 102 年 12 月 12 日

修改日期：民國 103 年 06 月 19 日

接受日期：民國 103 年 07 月 04 日

與穩定，使得感受更加明顯（林憲德，2001）。由於近年來遙測影像處理科技進步很快速，其適合與地理資訊系統進行整體環境的綜合分析，透過遙測影像，可以快速地監測地物反射光譜的變化，且透過植被指數，我們能更清楚地把地物的反射光譜轉換成更容易去分析的資訊，尤其植被指數是目前國際上最常用來進行地景監測的指標(林孟龍，2009)。本研究嘗試應用並配合衛星遙測技術，進行都市整體面向及重點高溫地區的監測分析，即利用三個時期衛星影像反演地表溫度，配合地形風向等自然因素探討熱島效應之關係，以了解臺中地區都市熱島效應現況趨勢。

1.2 研究目的

遙感探測 (remote sensing) 是一門藉由分析所獲取的資料，主要以探知物體、地區或是現象的科學。而其獲取資料的方式非常特別，能夠在不接觸到該物體、地區或是現象的情況下進行分析取得資訊 (Lillesand and Kiefer, 2000)，本研究為了探討熱島效應其高溫在臺中的分佈情形，為考量具備熱紅外波段之衛星影像，加上需配合衛星通過臺灣上空之雲體遮蔽率及影像拍攝品質，故以 Landsat-5 衛星所拍攝的衛星影像作為研究。

另為探討臺中地區長期之土地利用與產業發展對熱島效應之變化，本研究取得間隔 15 年如 1995 年及 2009 年之衛星影像，以及年份較新之 2011 年以探討土地利用與產業發展之變化，以此三個時期影像進行分析比較，其研究目的為：

1. 本研究以 1995、2009 及 2011 年三個時期 Landsat-5 衛星所拍攝的臺中地區之衛星影像，取其中的熱紅外波段影像，利用溫度反演方程式進行地表溫度的資訊及

亮度溫度之轉換，進而計算熱島強度。由於 Landsat-5 為僅有單一波段為熱紅外波段之衛星影像，如果單從反演的技術及精度來講，以單窗算法進行分析具有較大的優勢。以反演後之衛星影像探討熱島強度於臺中市之分佈情形並加以分析探討。

2. 配合地形及臺中市氣象觀測站的輔助。配合衛星影像時間點 1995 年 07 月 20 日 09:25、2009 年 07 月 17 日 10:25、2011 年 04 月 02 日 10:16，取得氣象站所觀測之溫度資料進行熱島效應三個時期之熱島強度檢核，並利用測站之風向、風速的變化情形評估對熱島效應分佈之情形並分析評論，供作為都市降溫及環境改善之必要參考。

3. 以三個時期衛星影像可見光波段來進行地覆植生指標分析，並計算土地植生覆蓋的面積，藉由觀察其變遷資訊來探討綠覆率於臺中地區之變化情形。都市地表植被覆蓋度低是都市熱島出現的主要因素之一(裴歡等人，2008)，透過都市熱島效應強度的計算與臺中市綠覆率的計算將兩者做迴歸分析及相關性探討。

2. 研究範圍概述

都市熱島效應的成因影響因子眾多，每個鄉鎮市均具有其獨特的自然環境條件、發展定位與產業結構等，必定衍生出不同的都市熱島型態，綜合上述介紹可得知，臺中直轄市主要發展集中於全區西部，為文獻整理中主要加速影響熱島效應之集中區域，此處由於和平區為人口密度極低之丘陵山區，故本研究之研究範圍選定為臺中直轄市（和平區除外之中西部地區），進行土地利用現況與熱島效應之分析研究，以期找出臺中地區土地現況與熱島效應之關係。

島強度越大，表示都市內部較郊區集中更多熱能，都市熱島效應現象越明顯。城市熱島強度通常是以熱島中心氣溫減去同時同高度近郊的氣溫差值，這裡以 ω 來表示， ω 值愈大，表示熱島效應愈強。嚴格地講，熱島強度的計算應以逐次都市溫度場中的最高值與當時郊區氣溫值之差為準。本研究以研究區都市內影像像元對應地面單元的地表亮度溫度與研究區影像像元對應地面單元最低地表亮度溫度進行相減，以得出熱島強度值，其中各年度之最低地表亮度溫度皆位於研究區東南方之行政區，如太平區、霧峰區內。都市熱島效應強度與熱島強度平均值計算公式如下：

$$\omega = T_u - T_s \quad (3)$$

其中： ω = 熱島強度； T_u = 研究區都市內影像像元對應地面單元地表亮度溫度； T_s = 研究區影像像元對應地面單元最低地表亮度溫度

$$\bar{\omega} = \frac{\sum \omega}{n} \quad (4)$$

其中： $\bar{\omega}$ = 熱島測試窗口強度平均值； n = 熱島強度計算個數。在遙感探測影像處理軟體中熱島測試窗口通常取 3×3 ，此時 $n=9$ 或 5×5 ，此時 $n=25$ 個像元矩陣，用移動窗口計算地區單元熱島強度平均值。

3.2.1 熱島強度標準差分析

標準差 (Standard Deviation) σ ，在機率統計中最常拿來作為統計分佈程度上的測量。標準差其定義為方差的算術平方根，反應組內個體之間的離散程度。

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \mu)^2} \quad (5)$$

簡單來說，標準差是一組數值自平均值分散開來的程度的一種測量觀念。一個較大的標準差，代表大部分的數值和其平均值之間差異較大；一個較小的標準差，代表這些數值較接近平均值。因此本研究以標準差之概念來探討熱島效應的標準差，以表示熱島效應城鄉氣溫之差距波動大小，以下列公式來表示：

$$\delta = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^n (DN_i - \overline{DN})^2} \quad DN_i (i = 1, 2, 3, \dots, n) \quad (6)$$

3.3 常態化差異植生指標分析

許多研究運用綠色植物生長愈旺盛，其吸收之紅光愈多；反射之紅外光愈強，其間差異愈大之原理，以可見光與近紅外光之比值或差異值，即常態化差異植生指標 (Normalized Difference Vegetation Index)，應用於監測植生與地表覆蓋之變化。NDVI 之計算式如下：

$$NDVI = (NIR - R) / (NIR + R) \quad (7)$$

NIR 為近紅外光輻射值；R 為紅外光輻射值。NDVI 為綠色植物探測最常用之指標，由二者波段相差與和之比例組成。其值介於 $-1 \sim 1$ 之間，小於零的像元值，通常屬於非植生之雲層、水域、道路和建築物等像元，故指數愈大時，代表綠色生物量越多。

3.4 簡單線性迴歸與相關程度分析

3.4.1 迴歸模型

迴歸分析 (Regression Analysis) 目的在於了解兩個或多個變數間是否相關、相關方向與強度，並建立數學模型以便觀察

特定變數來預測研究者感興趣的變數。簡單線性迴歸模型如下：

$$Y = \beta_0 + \beta_1 x + \varepsilon \quad (8)$$

3.4.2 相關性分析

相關性分析的目的在於探討兩變數間的相關程度，就綠覆率、產業與都市氣溫之相關性分析而言，藉由相關性之分析可以得知各行政區及工業區綠覆率與都市氣溫之間是否具有相關性，此外亦可得知探討的範圍尺度及綠覆率的強度，對於都市氣溫降溫是否有明顯的效果（呈現負相關）。

$$\rho_{X,Y} = \frac{\text{cov}(X,Y)}{\sigma_X \sigma_Y} = \frac{E((X-\mu_X)(Y-\mu_Y))}{\sigma_X \sigma_Y} \quad (9)$$

$$\rho_{X,Y} = \frac{E(XY) - E(X)E(Y)}{\sqrt{E(X^2) - E^2(X)} \sqrt{E(Y^2) - E^2(Y)}} \quad (10)$$

透過綠覆蓋面積的計算，配合地表溫度反演成果與都市熱島強度指標，分析臺中市各行政區及各工業區範圍內，綠覆率對熱島效應的貢獻度及熱島強度之關聯性由皮爾森(Pearson)相關係數分析，可獲得各種土地覆蓋對地表溫度的影響。其係數之絕對值若為「1.00」，表示自變數與應變數間，呈現完全相關；係數之絕對值若為「0.10以下」，表示自變數與應變數間關聯程度為微弱相關。

4. 實證分析

4.1 臺中市熱島效應空間分布解析

本研究利用1995年、2009年及2011年衛星影像，經由溫度反演程式將其解算出地表亮度溫度值之最高溫與最低溫度值，進行臺中地區都市熱島強度值之計算，並將計算結果之熱島強度值分為四個等級。分別為低溫分布區、中溫過渡區、高溫聚集區以及最高溫核心區。依據空間分析方法中的Nature Break趨勢分級法將其熱島強度值進行分類，共歸類為四大類，並以四種顏色表示，顏色愈深者為熱島強度值愈高(白色則為雲體覆蓋切除部分)：以熱島強度值為0至0.52定義為低溫分布區，以淺黃表示；熱島強度值為0.52至0.58定義為中溫過渡區，以深黃色表示；熱島強度值為0.58至0.64定義為高溫聚集區，以橘色表示；最高溫核心區則為熱島強度值為0.64至1之間，以紅色表示(如圖2至圖4)。

由三個時期臺中市都市熱島效應強度計算結果，顯示出研究區內不同年度間熱島強度值最高溫分布情形有些共同的趨勢，也就是臺中市熱島強度之最高溫核心區主要集中於舊臺中市建成區(如圖2至圖4)，包括西區、西屯區、南區、南屯區、北區、北屯區及中區等等，其次為靠海的梧棲區。從1995年(圖2)與2009年(圖3)之成果圖進行比較，可以明顯看出熱島效應現象有顯著之增長及擴張，而2009年(圖2)至2011年(圖4)間因僅隔2年其熱島效應強度程度大致略同。但因2011年影像日期為春季季節，其他兩個時期影像日期則為夏季，因此熱島強度分佈範圍略有不同，尤其是沿海地區，以下詳加分析。

除了氣溫、降雨時數、降雨量、風速及風向這些因素會影響外，從反演成果圖看出除了舊臺中市區為顯著之高溫聚集區外，可發現沿海之梧棲區亦為較高溫之核心與聚集地區，經調查得知靠海的梧棲區於1973年開始動工進行臺中港的興建，包

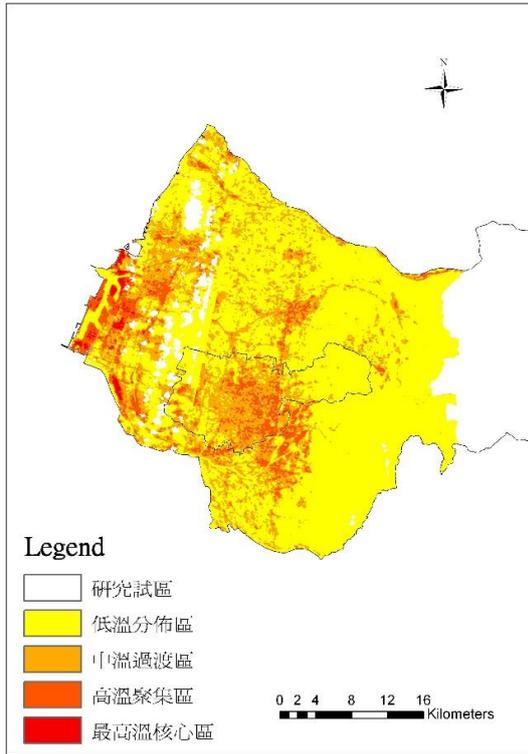


圖2 1995年6月25日影像之熱島強度反演成果圖

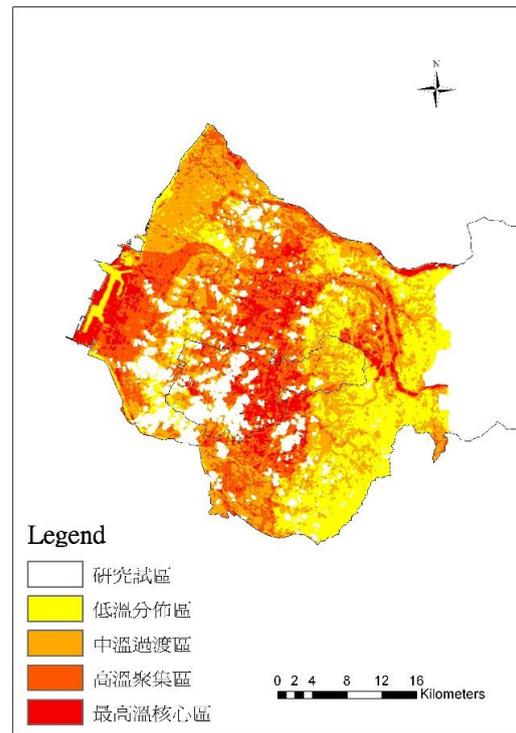


圖3 2009年7月17日影像之熱島強度反演成果圖

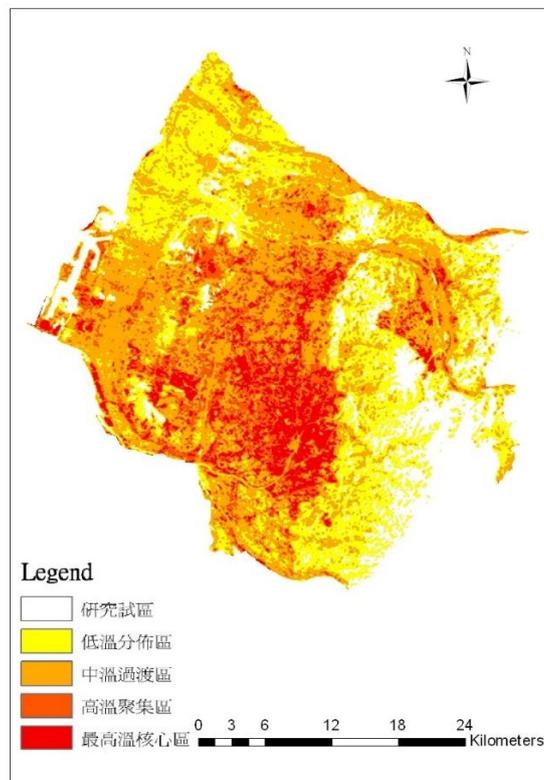


圖4 2011年4月02日影像之熱島強度反演成果圖

含商港、工業港及漁港三部分，另為配合臺中港與臨海工業區興建開發，於港區西南角設置火力發電廠，以供應中部區域都市及工業所需電力，加上氣象資料顯示其影像拍攝日期之風向為南風，故判斷火力發電廠之建置除了帶動海岸線的城鎮發展外，也造成溫度較其他地區高之原因之一。

另除了火力發電廠之興建外，夏季流經臺灣海峽之黑潮為北太平洋中的一股巨大的暖流，在流經臺灣海峽時，夏季表層水溫常達30°C左右，比同緯度相鄰的海域高出2至6°C，比東部同緯度的陸地亦偏高2°C左右，造成臺灣沿海潮濕而炎熱的氣候。黑潮不但為臺灣沿海地區帶來溫暖，還為夏季季風增添大量的水氣，為沿海地區溫度較高之另一原因。本研究所選定之影像日期多為夏季，沿海一帶溫度較高，臺灣海峽之黑潮洋流及受西南風向影響是造成其高溫現象的主要原因，而也因為沿岸受洋流與西南風之影響將梧棲區產業及火力發電廠所生產之熱能帶上，因此使南邊梧棲區至北邊大甲區都受到熱島效應的影響，熱能擴及臺中市沿海地區。

4.2 臺中市熱島效應強度與影響因子解析

4.2.1 氣象站氣溫觀測值與熱島強度值分析

本研究利用臺中市各氣象觀測站，包括環保署的5個測站及中央氣象局的兩個測站，以個別氣象站於影像日期時間所測得之氣溫與氣象站所在地所計算之熱島強度值做檢核分析。從1995年各測站所測得之氣溫來看(圖6)，最高溫出現在梧棲氣象站為28.01°C，熱島強度為0.664；最低溫出現在沙鹿測站，氣溫為23.34°C，熱島強度為0.483。平均氣溫為24.92°C，平均熱島強度為0.56。測站氣溫與熱島強度之相關性

為0.992，顯示其為高度相關，也就是氣溫的高低與熱島強度的高低呈一線性關係。

從2009年各測站所測得之氣溫來看(圖7)，最高溫出現在豐原測站為28.09°C，熱島強度為0.668；最低溫出現在忠明測站，氣溫為25.56°C，熱島強度為0.581。平均氣溫為26.91°C，平均熱島強度為0.62。測站氣溫與熱島強度之相關性為0.984，顯示其為高度相關。氣溫的高低與熱島強度的高低亦呈一線性關係。另臺中氣象站因為其位址剛好在雲體覆蓋之下，所以該測站不列入計算之中，但不影響整體計算之結果。

從2011年各測站所測得之氣溫來看(圖8)，最高溫出現在大里測站為27.28°C，熱島強度為0.567；最低溫出現在沙鹿測站，氣溫為24.86°C，熱島強度為0.492。平均氣溫為25.86°C，平均熱島強度為0.52。測站氣溫與熱島強度之相關性為0.975，顯示其為高度相關。氣溫的高低與熱島強度的高低亦呈一線性關係。由以上三個時期的分析，除了可說明氣溫之高低明顯影響了熱島強度，也證實由熱島反演模型所計算出的熱島效應強度資料是可靠的。

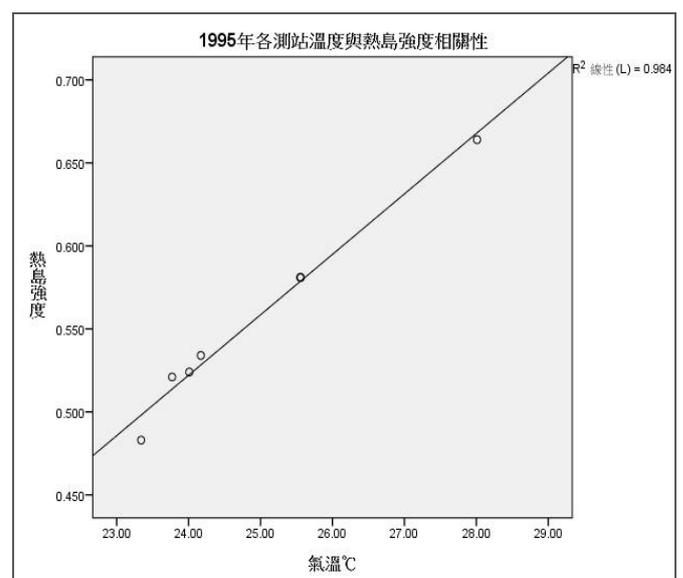


圖6 1995年各測站溫度與熱島強度相關性

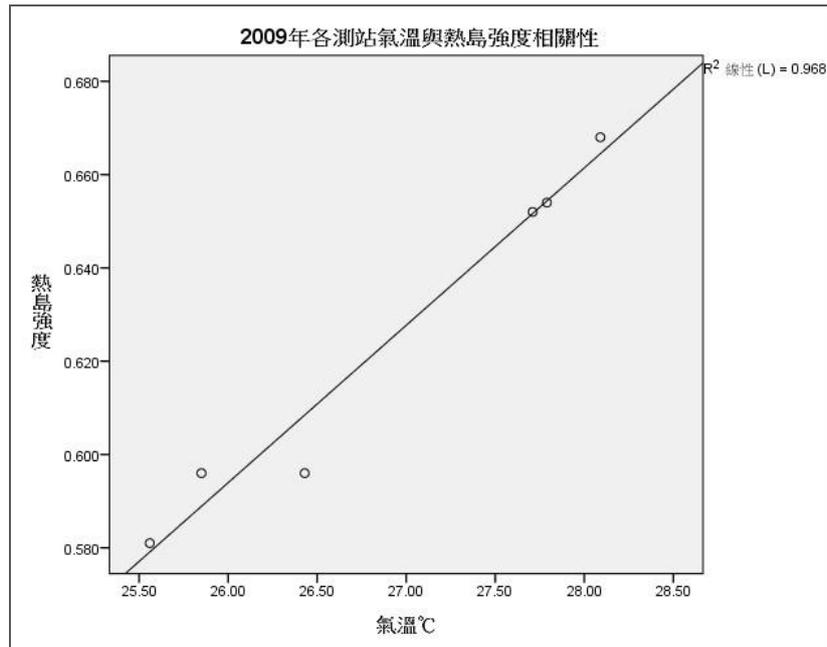


圖7 2009年各測站溫度與熱島強度相關性

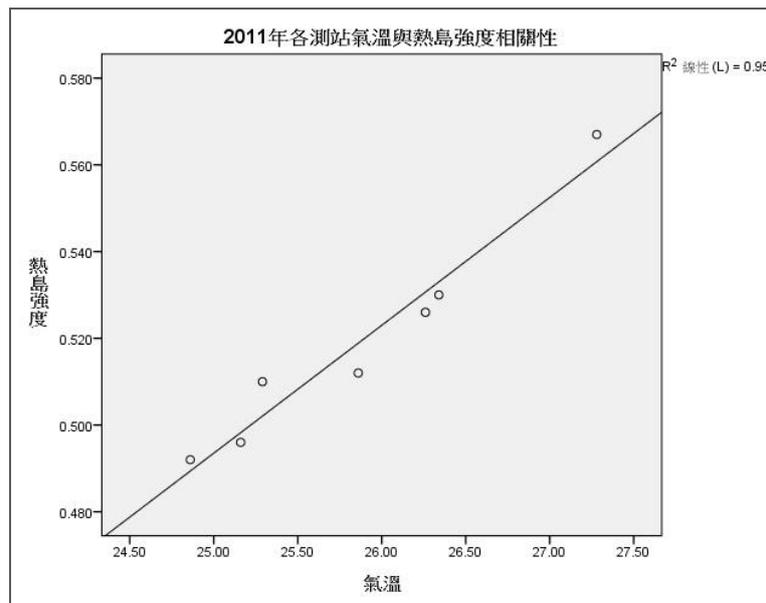


圖8 2011年各測站溫度與熱島強度相關性

4.2.2 氣象站風速及風向角觀測值

對熱島強度分布影響分析

為了詳細探究熱島與風向、風速之關係，本研究利用7個氣象觀測站，包含環保署的大里測站、忠明測站、西屯測站、沙

鹿測站、豐原測站，以及中央氣象局的臺中氣象站、梧棲氣象站，評估臺中市三個時期風向、風速對熱島效應的影響，以解釋其熱島強度高溫之分佈狀態。透過蒐集三個時期影像當日氣象站所測得之風向，以箭頭所指示之方向代表風向，顏色之深淺代表風速之快慢，由淺綠色代表風速較

慢，顏色越接近深綠代表風速較快，而黑色為無風速資料。

1995年因缺少臺中氣象站風向資料，僅以6個測站分析，6月25日約10:00am當時所測得之風向主要以南風為主，風向角為130~195，南進北出的風向使得當時熱島效應較無集中在都市內部。而越外圍風速則越大，風速約為3.03~4.83(m/s)，從當時之風速來看，約為2到3級風。梧棲區附近因有中港加工出口區、中港關聯工業區及火力發電廠，加上風向影響，使得梧棲區沿海一帶熱島效應強度較高。

2009年7月17日約10:00AM當時所測得之風向較無一定的規律，風向角為16.8~327。風速約為1.52~2.19(m/s)，當期之熱島強度核心區主要分佈為市中心區以及沿海地區。從當時市中心之風速來看，約為2級風，因此熱島效應受到風的影響較小，整體氣溫高。以2009年之影像日期來看，因當時為夏季，沿海主要還是盛行西南風，雖然梧棲區之風速無法得知，但從熱島強度之分佈來看，研判因沿海梧棲區在西南風的作用之下，再加上黑潮洋流的影響將梧棲區之熱能帶上臺中市整個沿海地區，一值延伸到大甲區之沿海使其高溫居高不下；2011年6月25日約10:00AM當時所測得之風向亦無一定的規律，風向角為30~360。風速約為1.2~2.2(m/s)，當期之熱島強度核心區主要集中於市中心區。從當時市中心之風速來看，也約為2級風，。因2011年影像日期為春季，沿海地區無受到西南風向之影響，因此只有梧棲區之熱島強度較高。另由沙鹿測站觀測之風向得知，風由外圍帶向內陸地區，熱島強度核心主要集中於盆地內舊都市地區，都市內部氣溫較高。

4.2.3 臺中市各區綠覆率變化與熱島強度分析

本研究運用 Landsat-5 衛星影像之可見光波段，分析臺中市植生地變遷情形，包括計算臺中市各行政區之綠覆率面積與常態化差異植生指標(以下簡稱為NDVI)。NDVI 為綠色植物探測最常用之指標，由二者波段相差與和之比例組成。其值介於-1 至 1 之間，小於零的像元值，通常屬於非植生之雲層、水域、道路和建築物等像元，故指數愈大時，代表綠色生物量越多。排除雲體遮蔽影響後，本研究將 NDVI 值為-1 至 0 之間設定為非植生地，0 至 1 之間為植生地，來進行都市熱島效應與都市綠地覆蓋面積之關聯性探討。

由圖 13 至圖 15 可看出三個時期之植生地多集中於臺中地區東邊之和平區範圍以及西邊的大肚山，非植生地則主要分布在臺中盆地，尤以舊臺中市區範圍幾乎無植生之分布。受到近年來臺中地區人為開發擴展等因素影響，於 2009 年及 2011 年西北部區域，如大甲區、大安區、清水區、及梧棲區，包括大肚山植生地大量減少，僅剩東部地區如東勢區、新社區、太平區，及霧峰區，仍保留大量自然植生地表，可見近幾年人為開發行為對植被破壞情況甚重。

由於植物生長與覆蓋情形受到天氣與季節影響甚大，不同農作物之生長季與收割期皆有所不同，故本研究以影像拍攝時間同為夏季(6月與7月份)之1995年與2009年各行政區綠覆率面積進行比較分析。參考圖16臺中市1995年及2009年各行政區平均綠覆率面積計算後發現，此14年間綠覆率面積差距甚大，尤其以大甲區、大安區、

清水區、梧棲區、以及龍井區最為明顯。
以大甲區為例，綠覆率面積由1995年的

56%，至2009年下降至27%，減少了29%。

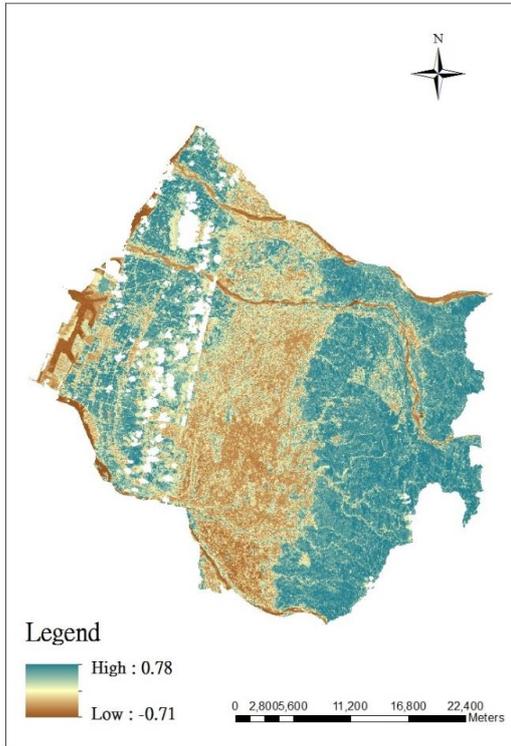


圖13 1995年6月25日臺中市NDVI成果圖

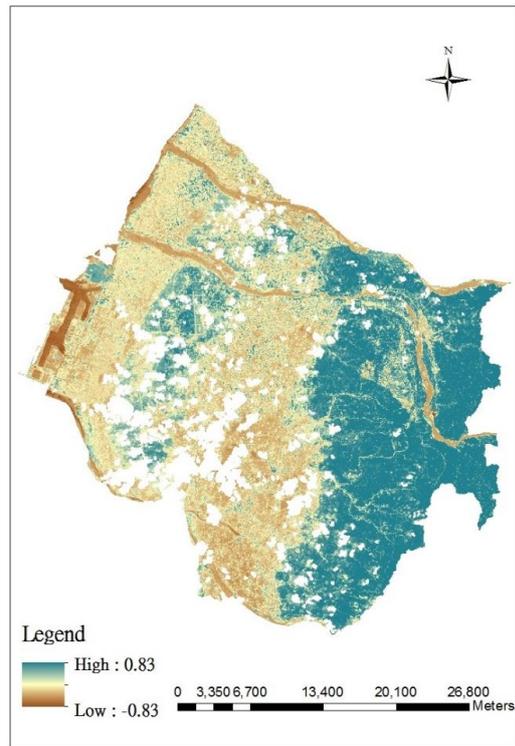


圖14 2009年7月17日臺中市NDVI成果圖

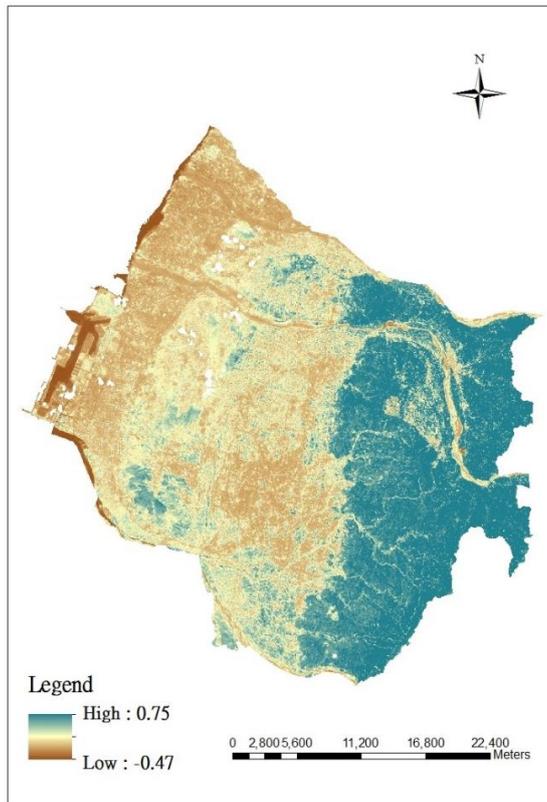


圖15 2011年4月02日臺中市NDVI成果圖

資料來源：本研究彙整

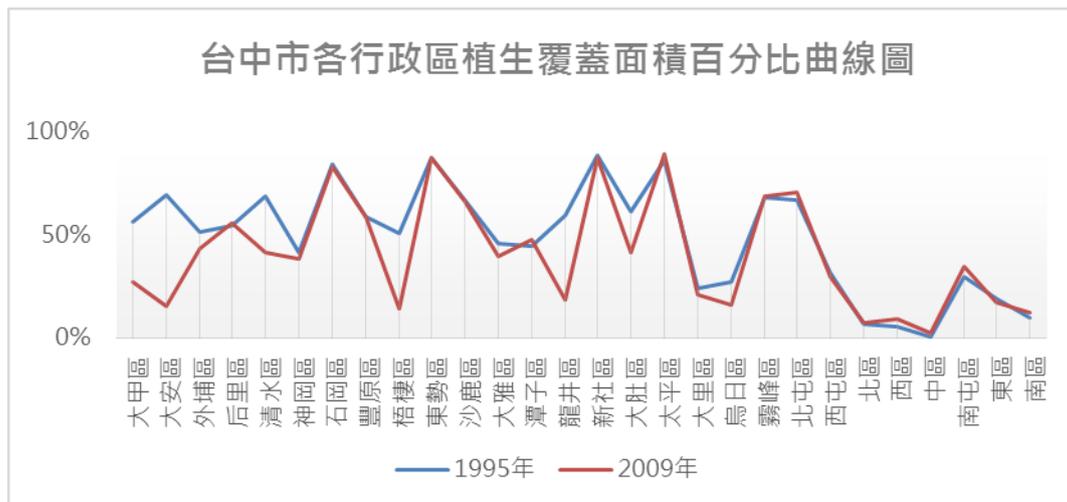


圖16 臺中市1995年及2009年各行政區平均綠覆率面積百分比曲線圖

1995年至2009年綠覆率減少的行政區共有9個，包含大甲、大安、外埔、清水、梧棲、大雅、龍井、大肚、烏日區，其中多屬於大肚山區塊，經研究成果顯示大肚山區塊整體平均自1995年至2009年綠覆率減少約30%。由兩個時期影像之NDVI計算結果，可得知大肚山一帶NDVI在近年來有大量減少的趨勢，根據文獻分析主要有幾個影響原因：

1. 近年來在大肚山臺地上的地景有了極大的變化，臺中都會公園的成立、中部科學園區的進駐、清泉崗機場轉為中部國際機場，以及南端的高鐵臺中站在烏日開始營運。中部科學園區帶動產業發展，加上精密機械科技園區開發，形成大肚山科技走廊。因此使得大肚山受人為開發影響甚大。
2. 大肚山降雨量稀少以至於非常乾燥，雨量少原因主要受十月開始的東北季風影響，濕冷的空氣被雪山山脈擋在東北部地區，而剩餘的冷空氣轉向進入中部濱海區後變得十分乾燥，因此位於背風面的大肚山臺地雨量銳減也改變了植被景觀，原屬於相思樹林相，原生種有大肚山薔薇與光葉薔薇，但由於天竺草入侵加上貧瘠的土

地使得農民只能以大黍為旱作，且大肚山上設立了非常多的公墓，每到清明掃墓焚燒紙錢就容易引發火災。根據調查大肚山東側協和消防隊轄區之山坡地佈滿了天竺草，每年平均草坪火燒面積從幾平方米到數十公頃皆有。雖大部份屬於地表火，但在都市開發，人與自然爭地的同時，這樣的火燒生態，已對附近臺中市的居民造成某種程度的影響。此外，因國道通過此地，駕駛扔棄煙蒂造成森林火災也是主要原因之一(張集豪、章錦瑜，2004)。

4.3 臺中市各工業區產業與熱島強度探討

根據文獻及調查顯示，過去一個世紀以來，臺灣暖化的速度，是全球平均的 2 倍，在 IPCC 的報告中，把臺灣列為氣候變遷的「高危險群」，二氧化碳不斷增量的結果，不僅使臺灣成為國際污染大國、更是助長暖化的凶手。臺灣地區耗用能源，排放二氧化碳的程度，越來越嚴重，其中耗能產業(鋼鐵、石化、電子、人纖、造紙、水泥等等)就佔了工業部門總排放量的 75 %。

由於工業部門所消耗之電力及排放之二氧化碳量大，因此本研究進一步探討熱島強度與產業之關聯，本節重點主要探討臺中市各工業區內的產業類別型態與熱島強度。然而各工業區因開發先後不同，故本研究考慮後選擇以產業大致已進駐於工業區後的 2011 年來探討。利用本研究衛星影像所反演的熱島強度成果，切出各個工業區範圍的熱島強度，藉以檢視熱島強度較高的地區所聚集的產業類別為何，是否屬於耗能產業其中之一，以判定這些產業可能是造成熱島效應的主要原因。

本研究依據臺中地區各工業區開發時間、規模及產業資料取得之限制，選取臺中工業區、幼獅工業區、大里工業區、臺中加工出口區、中港關連工業區，及中部科學園區共六個工業區為研究對象，進行與熱島效應關係之評估。表 1 為本研究欲比較之各工業區基本資料、產業類別比較。

上述六個工業區個別分布在臺中直轄市境內，其中園區所佔用地較廣，面積大於 200 公頃為臺中工業區及中部科學園區。不同工業區有其不同之特性，如面積大小、產業類別及土地利用比例不同等，對於其熱島強度亦有不同之影響，又因製造業所消耗之電力及排放之二氧化碳量較大，因此本研究以各工業區範圍之平均熱島強度值來比較不同工業區特性對於熱島

強度之影響。由分析結果顯示，大里工業區熱島強度最高為 0.69，總面積為 218 公頃，高溫地區之產業包括有 4 間金屬產業、4 間機械設備產業及一間紙製品產業，主要產業以機械設備及金屬製造相關產業為主；大甲幼獅工業區熱島強度最高為 0.628，總面積為 218 公頃，高溫地區內之產業包括有 2 間機械製造業、2 間電子產業、1 間人造纖維製造業；臺中工業區熱島強度最高為 0.69，總面積為 580 公頃，高溫地區內最多之產業包括有 8 間機械設備製造業、4 間金屬製品製造業、3 間塑膠製品製造業；臺中加工出口區熱島強度最高為 0.628，總面積為 26 公頃，高溫地區內最多之產業包括有 2 間半導體、電子元件製造業、1 間電腦製造業；臺中港關聯工業區熱島強度最高為 0.667，總面積為 26 公頃，高溫地區內之主要產業為玻璃製品製造業；中部科學園區熱島強度最高為 0.59，總面積為 413 公頃，高溫地區內最多之產業包括有 3 間光電產業、1 間電池製造業。從平均產業類別用電量來看，熱島強度值較高之大里工業區與臺中工業區主要為機械設備與金屬製品製造業，從 1995 年至 2011 年全臺製造業平均產業類別用電量長條圖(圖 25)可看出此兩項產業之平均用電量最多，與其他產業有顯著之差距。

表 1 臺中地區工業區簡介

工業區名稱	開發年度	總面積	主要產業別
臺中工業區	1973 年	580 公頃	機械設備製造修配業
大甲幼獅工業區	1978 年	218.47 公頃	金屬基本工業及金屬製品製造業
大里工業區	1991 年	218.47 公頃	機械設備製造修配業及金屬製品製造業
臺中加工出口區	1971 年	26.12 公頃	機械設備製造修配業及金屬製品製造業
中港關聯工業區	1975 年	143.12 公頃	塑膠製品製造業
中部科學工業園區 (臺中園區)	2003 年	413 公頃	精密機械

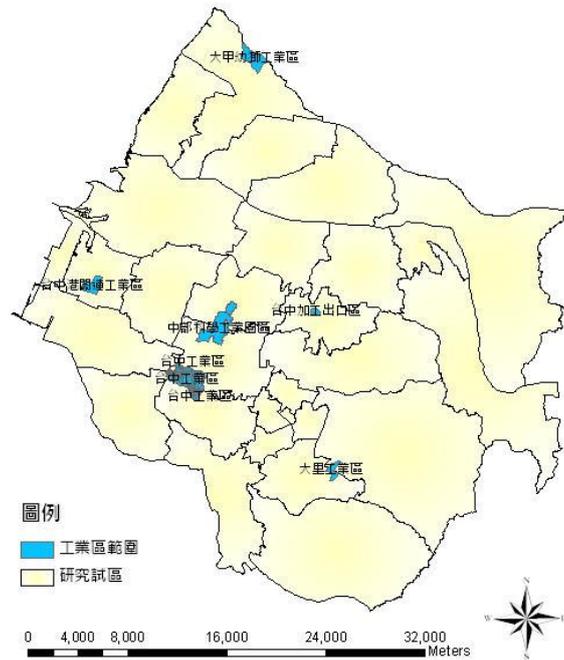


圖 18 臺中市工業區範圍圖

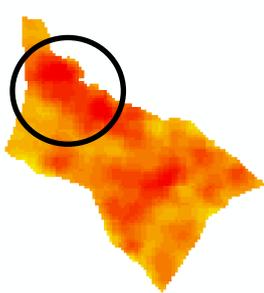


圖19 2011年大甲幼獅工業區熱島強度成果圖



圖20 2011年臺中工業區熱島強度成果圖

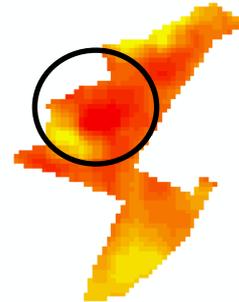


圖21 2011年大里工業區熱島強度成果圖

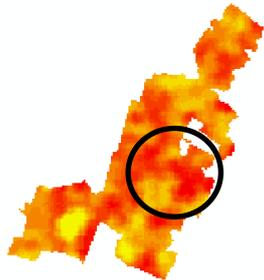


圖22 2011年中部科學園區熱島強度成果圖

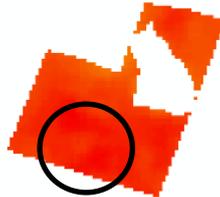


圖23 2011年中港關聯工業區熱島強度成果圖

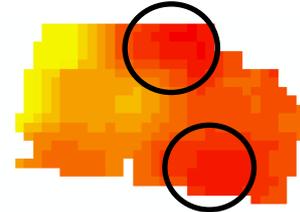


圖24 2011年臺中加工出口區熱島強度成果圖

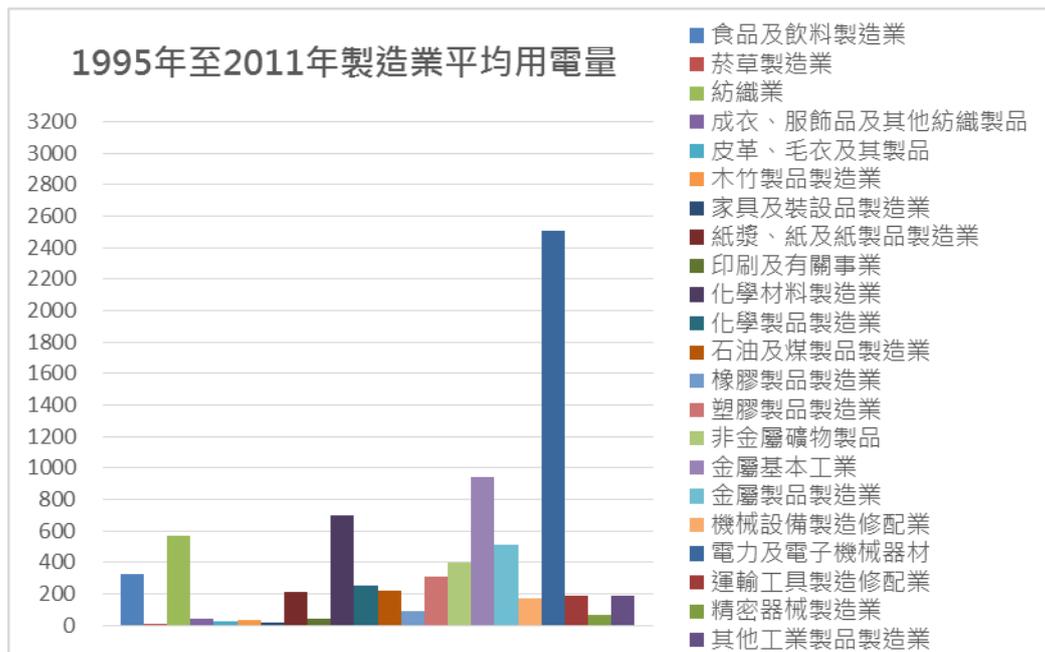


圖25 1995年至2011年全臺製造業平均產業類別用電量長條圖(單位：度/千萬)

資料來源：經濟部能源局網站

根據分析結果，各工業區內最高熱島強度約在0.6~0.7之間，調查其高溫區域之產業類別結果，包括有：金屬製造業、機械設備製造業、電子、化學、光電產業，玻璃製品業、造紙業、紡織業等，尤以機械設備及金屬相關產業所產生熱島強度最高。其中熱島強度與廠房園區面積無正面相關，尤其中部科學園區面積最大達413公頃，熱島強度卻為最低，主要因為園區中所佔綠地面積比例較其他園區大，故使得熱島效應較為趨緩。另以2011年各行業別之平均用電量來看，各工業區主要產業皆以金屬、塑膠製品、以及機械設備製造業為主，為用電量較高之產業類別，除了園區所佔之面積外，不同類別之產業其耗能量不同，對於熱島效應亦有正相關之影響。

5. 結論與建議

5.1 結論

本研究以 1995 年、2009 年及 2011 年之 Landsat 衛星影像，進行溫度反演與熱島強度的探討，透過本研究針對臺中市熱島效應三個時期衛星影像之溫度反演，發現熱島效應現象於三個時期內有加重的趨勢，也證實了一些專家學者對於臺灣以及臺中市熱島效應是否有快速增長的猜疑。確實臺中市熱島效應增長的速度由本研究分析之結果，從 1995 年到 2011 年已經大幅增加了許多，透過空間分布解析可以發現，夏季臺中市高溫核心區主要分布區域除了臺中市盆地內較早開發的市區。再配合地形洋流及各氣象測站風向、風速資訊進行全面性探討，分析結果顯示受到風向、夏季黑潮洋流影響，將西岸梧棲區火力發電廠及工業區高溫擴散於沿海地帶，因此也是高溫核心區之一。都市熱島效應除了受人為開發因素影響外也受自然因素之影響，隨著季節不同，其高溫核心分布也有所變化。臺中市獨特的盆地地形致使冬季時期熱島強度高溫核心集中於盆地都

市內部，而夏季因風向洋流變化又使熱島效應擴散於沿海多個區域。

臺中市各工業區產業與熱島強度探討，本節的目的主要是為了透過分析工業區的熱島強度，找出工業區內高溫的地區，再探討其高溫之區塊內的產業類別分別有哪些，藉此說明產生高溫之產業有哪些。透過分析結果顯示，大部分在工業區內，分布在高溫區的主要產業類別分別有：金屬製造業、機械設備製造業、電子、光電產業，玻璃製品業、造紙業、紡織業等。以前人之研究文獻來看，大部分份這些產業都包含在耗能產業之中，因此推斷研究區內有著高溫現象，就是因為這些產業的耗能及排放廢氣所造成。

5.2 建議

因衛星影像品質較容易受雲體遮蔽等的影響，挑選不容易且無法進行長時間之連續性的探討。因此本研究僅只單就三個時期衛星影像探討都市熱島效應之變化，所以無法看出長期的變動趨勢，只能透過挑選時期的影像分析成果以警惕高溫區地方必須加強熱島強度降溫措施，因此針對高溫區之降溫策略，建議對於市區內除了節約能源外，進行植栽復育相關計畫或屋頂綠化等。透過本研究分析發現綠覆盖率減少之區域如清水區、沙鹿區、大雅區等，顯示這些區域植生生態有逐年減少及遭受破壞之情形，為減少熱島效應之災害，建議應加強生態保護並劃設為相關保育之地區。對於未來之都市使用規劃，或工業區

之設立則建議應加入綠地規劃，考量人工鋪面與都市生態平衡，避免人工鋪面破壞都市生態，利用植栽增加都市的熱容量，以免造成都市溫度升高；在工業區內也能配合政府措施，盡量節約能源，二氧化碳的排放也必須做到符合政府所規定之排放量，以緩和都市熱島現象之發生。

6. 參考文獻

- 林孟龍(2009)，地景動態變遷與衛星監測，科學發展學報，第 439 期，第 33 卷。
- 林憲德、郭曉青、李魁鵬、陳子謙、陳冠廷(2001)，臺灣海岸型城市之都市熱島現象與改善對策解析。都市與計畫，第 28 期，第 3 卷，第 323-341 頁。
- 裴歡、房世峰(2008)，南京市夏季熱島特徵及其與土地利用覆蓋關係研究，第 1 期，第 26 卷。
- 張集豪、章錦瑜(2004)，大肚山地區火燒與植被關係之研究，林業研究季刊，第 26-4 卷，第 1-10 頁。
- 劉紹臣、劉振榮、林傳堯、許乾忠、林文澤(2003)，臺灣西部平原熱島效應，Taiwan Watch，第 5 期，第 4 卷。
- Lillesand, Thomas M. and Ralph W. Kiefer (2000), Remote Sensing and Image Interpretation. New York: John Wiley & Sons, Inc.

The Study of Urban Heat Island Effect Change and Contribution Factors in Taichung City

Abstract

Lung-Shih Yang¹ Pei-Hang Yang² Chia-Wei Ho^{3*} Mei-Ling Yeh⁴ Tine-Yin Chou⁵

In this study, Landsat-5 satellite images in 1995, 2009 and 2011 were used to calculate the land surface temperature and explore the intensity of the heat island effect. In the results, the intensity is higher in the center of Taichung city and the northwest area. By overlaying with the population map and the industrial map, we found that these areas are the heavy concentration of people and factories. The overdevelopment enhances the urban heat island effect. Considering the different seasons, currents and the wind direction, in the summer, the change of currents and the wind direction make the heat island effect spread to multiple areas. In addition, we explored the heat island intensity in industrial areas. We found that there is no significant correlation between the type of industry and the heat island intensity. The heat island intensity is affected by the wind direction mainly and the higher temperature zone concentrates in the area and leeward.

Keyword: Heat Island Effect、Remote Sensing、Surface Temperature Retrieval

¹Professor & Senior Vice President, Department of Land Management, Feng Chia University

²Master student, Department of Land Management, Feng Chia University

³Senior Planner, Geographic Information Systems Research Center, Feng Chia University

⁴Director, Geospatial Information and Environmental Planning Department, Geographic Information Systems Research Center, Feng Chia University.

⁵Director, Geographic Information Systems Research Center, Feng Chia University

*Corresponding Author: E-mail: nicole@gis.tw

Received Date: Dec. 12, 2013

Revised Date: Jun. 19, 2014

Accepted Date: Jul. 04, 2014

應用衛星影像測繪南海島礁

劉建良^{1*} 陳良健² 王成機³ 徐偉城⁴

摘要

為掌握完整且正確之島礁資訊，本研究針對南海周邊海域島礁測繪其基礎圖資，並就重要島礁持續監測其自然環境及人為開發情形。考量高解析遙測衛星影像 0.5 公尺級之解析能力，且在無地表控制點可供校正情況下，絕對定位精度優於 5 公尺，合於島礁地圖測繪使用。加以其具彈性與機動之優勢，可不受干擾自由拍攝全球各地現況影像，可替代登島實際勘測或使用航空攝影測量技術等方式，對於距臺灣遙遠之島礁地圖測繪需求，高解析遙測衛星影像成為本文選定之方案。

本文針對島礁之測繪成果包括(1)衛星影像校正、(2)向量化、(3)基本圖製作、(4)立體地形建構及(5)變遷監測。影像校正採用有理函數模型產生衛星正射影像，向量化係於正射影像描繪重要地物邊界，基本圖製作針對類比輸出規定之格式產生，立體地形建構則組合影像匹配及人工編修產生數值地形模型，變遷監測則依多時序衛星影像比對島礁之自然與人為變化。本文成果對於南海島礁現況可提供豐富之空間資訊。

關鍵詞：南海、衛星影像、島礁、基本圖、變遷監測、數值地形模型

1.前言

為掌握南海島礁之精確資訊，蒐集重要島礁之空間資訊並測繪其基礎圖資，以及研析重要島礁自然與人為變遷情形乃必要工作。本研究逐年進行南海島礁資料蒐集及建置工作，本文將介紹工作方法並展示部分成果。

地圖測繪常用之航空攝影測量技術，受到幅員廣大及主客觀條件之限制，不易完成上述島礁之測繪任務。近年來，衛星遙測科技快速發展，使用衛星影像測繪島礁地圖成為可行，其優點包括：(1)資料取

得之普遍性、(2)解析度可達 0.5 公尺、(3)同幅影像內相對精度可優於 1 公尺及(4)在無地面參考點以供校正之情況下，絕對定位精度可優於 5 公尺（國立中央大學，2013）。此高精度之定位能力主要源自衛星之(1)優異之全球衛星定位系統、(2)高精度之慣性量測系統及(3)恆星追蹤儀 (Smiley, 2009)。另配合全球少數之定位檢校站，使得影像精度適於地圖測繪。此外，高解析度衛星影像尚有多光譜之資訊，可製作彩色影像地圖。

¹ 國立中央大學太空及遙測研究中心 助理研究工程師

² 國立中央大學太空及遙測研究中心 教授

³ 內政部 簡任技正

⁴ 達雲科技 總經理

*通訊作者 Email: ericleo@csrsr.ncu.edu.tw

收到日期：民國 104 年 08 月 27 日

修改日期：民國 105 年 01 月 06 日

接受日期：民國 105 年 01 月 13 日

本文所稱之「島礁」屬通稱，涵蓋自深水、淺水、至水上區域，它包括了(1)灘、(2)暗沙、(3)礁、(4)沙洲及(5)島嶼（吳啟南與李元炎，1993）。各類之意義分別如下：

(1)灘：在水底下較深處隆起，體積廣大且頂部平坦之岩礁。

(2)暗沙：大灘繼續向上生長，直至水面下較近處者，謂之暗沙。

(3)礁：隱伏於水面下近處，低潮時全部或部份露出水面之岩礁。

(4)沙洲：些微露出水面之岩礁，上面覆蓋沙礫者。

(5)島嶼：海水無法淹沒，且長有草木、棲有鳥獸者。

本文涵蓋範圍包括南海之島礁，主要目標島礁共 251 個。製圖基準為 WGS84 (World Geodetic System 1984)，其長軸半徑 6378137 公尺，扁率為 1/298.257223563。考量海域圖之全球性，所選擇之投影坐標系統為世界橫麥卡托投影 (Universal Transverse Mercator, UTM)，所使用到之 UTM 投影帶含 UTM49 及 UTM50。高程系統因無法得到全區長時間之實測潮位資料，故以影像中海陸交界線起算將其高程設為零。南海地區潮汐變化約 0.5 公尺，對於淺水平緩區之海陸界線圈繪仍有影響。

本文介紹利用衛星影像針對南海島礁，進行島礁衛星影像校正、向量化、基本圖製作、立體地形建構及變遷監測。影像來源包括 WorldView-3、WorldView-2、WorldView-1、GeoEye-1、QuickBird-2 及 IKONOS-2 等六顆美國之商用衛星。島礁基本圖製作方式依循「東海及南海島礁基本圖測製規範(草案)」(內政部，2012)之規定。另外，針對部分島礁蒐集多時期衛星影像，以人工進行前後期影像比對，

判釋各項地物變遷情況。部分取得立體對影像之島礁，以立體測繪方式數化地物，並產製網格之數值地形模型包括數值地表模型及數值高程模型。

2.方法

測繪南海島礁之工作包括衛星影像校正、向量化、基本圖製作、立體地形建構及變遷監測。以下說明各項工作處理程序。

2.1 衛星影像校正

使用之影像以 WorldView-2 及 GeoEye-1 衛星影像為主，其垂直攝影時影像解析度為 0.41 公尺。基於解析度考量，原則上選用傾角為 30° 內之影像以確保解析度優於 0.55 公尺。衛星影像需經校正方可與地面坐標系統結合，此處採有理函數模型 (Rational Function Model, RFM) (Chen et. al., 2006 ; Toutin, 2004)，並使用衛星公司提供之有理多項式係數 (Rational Polynomial Coefficients, PCs) (DigitalGlobe, 2015)。一般而言，在未使用地面控制資料時，其定位誤差優於 5 公尺 (國立中央大學，2013)。其餘 WorldView-3、WorldView-1、QuickBird-2 及 IKONOS-2 之影像亦選擇解析度優於 1 公尺者，其定位精度與 WorldView-2 及 GeoEye-1 相近。

本文使用之有理函數模式，以兩個多項式的比值進行物像空間轉換。衛星公司所提供的 80 個有理多項式係數係由載體外方位參數轉換而來。利用此 80 個有理多項式係數可建立物空間與像空間之關係，如式(1)所示。

$$x = \frac{\begin{bmatrix} 1 & Z & Y & X & \dots & Y^3 & Z^3 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} a_1 & a_2 & \dots & a_{20} \end{bmatrix}^T}{\begin{bmatrix} 1 & Z & Y & X & \dots & Y^3 & Z^3 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} b_1 & b_2 & \dots & b_{20} \end{bmatrix}^T} \quad (1)$$

$$y = \frac{\begin{bmatrix} 1 & Z & Y & X & \dots & Y^3 & Z^3 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} c_1 & c_2 & \dots & c_{20} \end{bmatrix}^T}{\begin{bmatrix} 1 & Z & Y & X & \dots & Y^3 & Z^3 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} d_1 & d_2 & \dots & d_{20} \end{bmatrix}^T}$$

其中， $a_1 \sim a_{20}, b_1 \sim b_{20}, c_1 \sim c_{20}, d_1 \sim d_{20}$ 為衛星公司提供之有理多項式係數， X, Y, Z 為地面坐標， x, y 為影像坐標。

因並非所有島礁均具備立體對影像可製作數值高程模型，因此衛星影像幾何校正程序分為具備立體對及無立體對兩種校正方式。有立體對之島礁衛星影像，利用所產製之數值高程模型及立體測繪之三維坐標作為控制資料，配合有理多項式係數進行幾何校正。無立體對之島礁衛星影像，僅能假設島礁為具單一高程之平面，配合有理多項式係數進行幾何校正。綜觀南海地區島礁地形起伏最大之島礁其高度差約 8.5 公尺，因此當衛星拍攝角度大至 30° 時，若視高程為定值，造成影像校正之差異小於 5 公尺。

2.2 向量化

依照「東海及南海島礁基本圖測製規範(草案)」之規定，為求島礁地物向量資料成果精確，以人工判釋為主，自動化分析為輔。有立體對可供三維量測時，採用數位影像工作站進行測繪。若僅有單幅影像，則進行單像判釋。

本文使用之衛星影像內容包含以下三類，(1)全色態影像(WorldView-1)、(2)全色態加強(Pan-Sharpning)影像(R,G,B 波段)及(3)全色態及多光譜影像(R,G,B,IR 波段或 WorldView-2 八波段)。全色態影像並無進行影像前處理，而全色態加強影像則進行影像前處理以輔助數化判釋。具備全色態及多光譜影像則先進行全色態加強處理，使用高通濾波器(High-Pass Filter,

HPF)處理程序，將全色態影像過濾後，與多光譜影像進行融合(Schowengerdt, 2007)產生全色態加強影像，再進行影像前處理。

本文數化之島礁海岸線，因為影像拍攝時間未必是最低潮位，故本文數化之海岸線為影像中所判斷之陸地與海面交界線，並記載影像拍攝時間，以作為未來進一步修訂之依據。由於本文島礁中的暗沙、灘及礁主要在海水面以下，所以並無海岸線的存在。因此，依據影像中暗礁與深水的對比，圈繪暗礁邊界。

因受到拍攝時間、潮汐及海浪影響，在原始多光譜影像中海岸線及暗礁邊界並不易確定其位置，因此，利用常態化差異植生指標(Rouse et al., 1973)及主成分分析(Hardy and Walton, 1978)兩種影像處理方式，如圖 1(b)及圖 1(c)所示，輔助判釋海岸線及暗礁邊界。另外由於部分取得之影像無紅外光波段，故納入綠度指標(Niederöst, 2001)，如圖 1(d)所示。判釋海岸線及暗礁邊界時並不固定使用單一影像處理方式，而是依照個別影像之狀況選擇適當之影像處理方式。

數化流程如圖 2 所示，完成影像前處理後進行海岸線及暗礁邊界描繪，之後針對衛星影像中之建物、植被、水系及道路等各式地物加以數化並建立向量圖資之屬性資料，內容包含島礁名稱、測製日期、影像來源、影像名稱、影像日期及圖層編碼等。

進行上述島礁海岸線、暗礁邊界及地物數化時，由於海岸線及地物特徵細節及暗礁邊界不易辨識，為求可靠，以兩組人員針對相同影像資料獨立進行數化，完成後套疊兩組數化之向量資料，找出差異之處並討論出最終結果，並由獨立檢核之第三方予以確認。

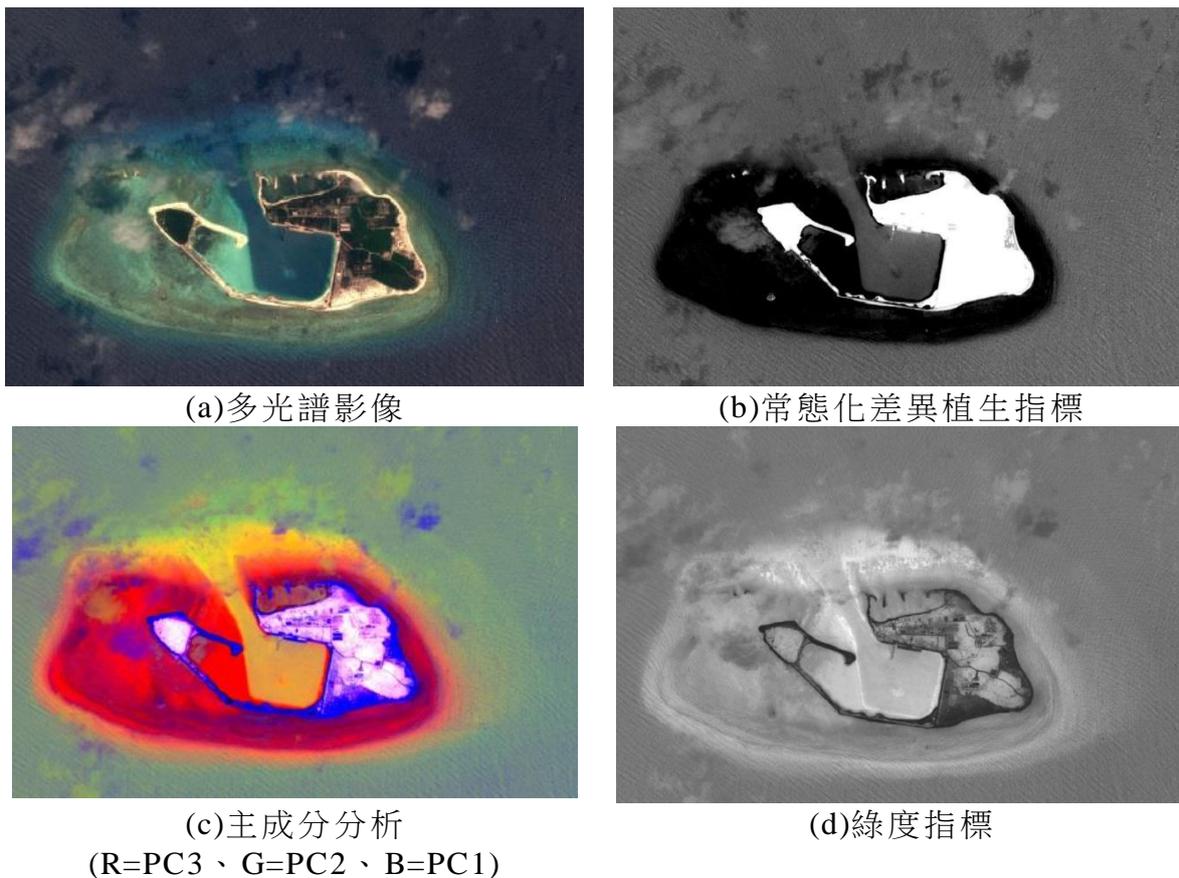


圖 1 琛航島、廣金島影像處理例

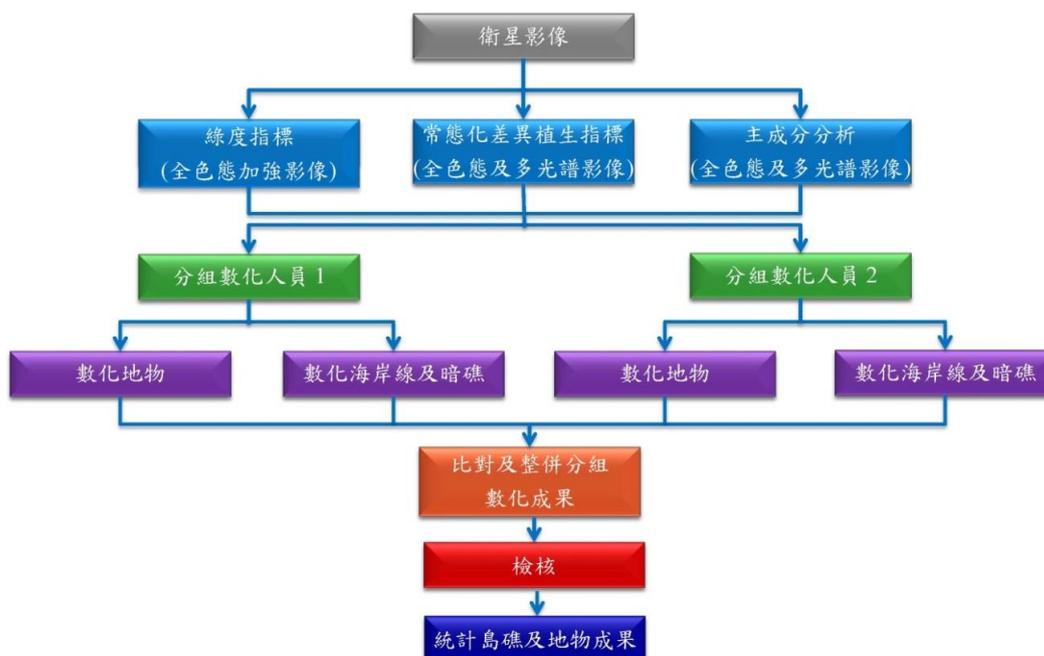


圖 2 數化流程圖

2.3 基本圖製作

南海地區為廣大海域，區域內之島礁零星分佈，地理條件特殊，基本圖製作不宜直接採用「基本圖測製規範草案」（內政部，2009）之規定。因此，訂定「東海及南海島礁基本圖測製規範（草案）」，研訂此規範主要的參考文件為「基本圖測製規範草案」，考量其中適用及不適用的內容，進行修改並增訂，以符合南海地區之地圖測製條件。

待地物圖資測繪完成後，依「東海及南海島礁基本圖測製規範（草案）」規定分幅編纂及圖幅整飾(含圖元類別與註記、圖式線號、圖例、圖廓、方格線、方格線坐標、圖號、比例尺及圖幅接合表等)整理成基本圖向量資料檔。基本圖編纂完成並經檢查後，將數值正射影像資料檔、基本圖向量資料檔(包括數值等高線)予以套疊成基本圖，並製作出圖檔。

2.4 島礁變遷

針對部分島礁蒐集多時期衛星影像，以人工進行前後期影像比對，判釋各項地物變遷情況，主要可分為：(1)人為變遷(2)自然變遷(3)無明顯變遷。

(1)人為造成的變遷有：

- (a)建物新建或拆除。
- (b)道路新建或整修。
- (c)堤防修建。
- (d)碉堡新建或拆除。
- (e)碼頭新建或拆除等。

(2)自然變遷則有：

- (a)海岸線侵蝕或堆積。
- (b)植被變動（裸露地變草地）。
- (c)沙洲侵蝕堆積或飄移。

2.5 立體地形

所產製之立體地形包括數值地表模型、數值高程模型及暗礁數值高程模型，以下分別說明產製方法。

2.5.1 數值地表模型及數值高程模型產製

本項工作使用 ERDAS LPS(Leica Photogrammetry Suite)中之 eATE(enhanced Automatic Terrain Extraction)(Previtali et al, 2011)進行影像匹配，再以人工進行編修。數值高程模型及數值地表模型產製工作內容包括影像匹配、人工編修及品質檢驗等，工作流程如圖 3 所示。

首先於立體對影像中量測共軛點，並於有理函數模式坐標系統下，透過共軛點，藉由線性轉換之方式，計算影像坐標之修正量。有理函數模式坐標系統為利用有理多項式係數所計算得到像坐標之坐標系統，因多項式係數有誤差，故與真實影像坐標系統有偏差，故需使用線性轉換修正。eATE 影像匹配使用影像金字塔概念，從低解析度影像開始處理至高解析度影像，由粗至細的匹配流程，可提升匹配成果的效率和品質。將匹配完成後取得之地面點雲進行內插，建立較細解析度之數值地表模型，並將新建立之數值地表模型使用在下次迭代中，配合影像金字塔處理中解析度較高之影像，重複影像匹配處理，直至最高解析度影像處理完畢。

影像匹配成果中有部分是錯誤匹配點，以人工立體觀測進行編修，刪除錯誤點位。另外由於海岸線為重要之地形特徵位置，但自動匹配程序中無法產生海岸線之點位，因此以人工方式加入海岸線點位。人工編修工作執行至此完成之三維點為初步地表點位，為確保數值地表模型成果品質，另外以人工立體觀測依三維點位分布狀況增加地表點。為產製數值高程模型，以人工

立體觀測方式，刪除地物點並增加地形點。人工編修三維點完成後，重新內插計算，輸出為網格之數值地表模型及數值高程模型資料。最後獨立檢驗人員以立體觀測方

式量測檢核點三維坐標，與所產製之數值地表模型及數值高程模型比較，評估其品質。

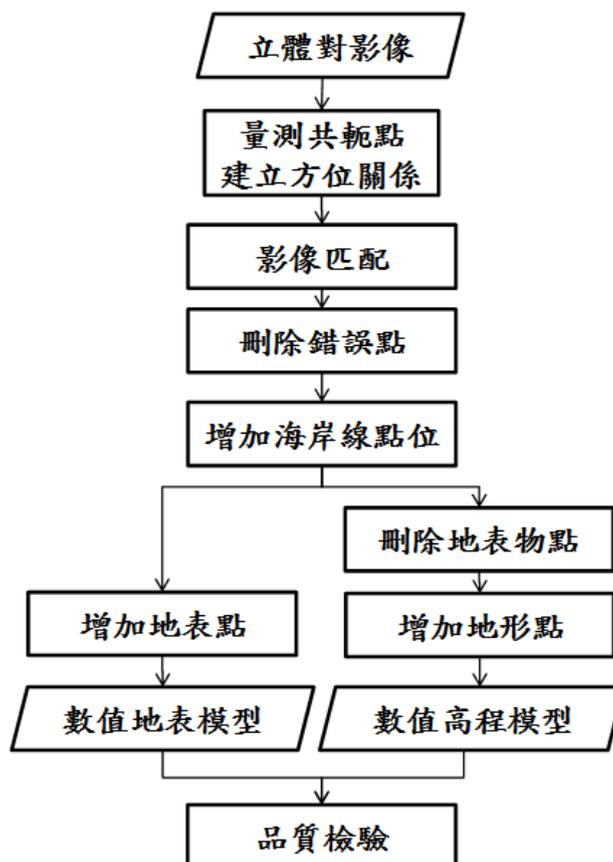


圖 3 產製數值地表模型及數值高程模型工作流程圖

2.5.2 暗礁數值高程模型產製

因本文使用之光學衛星影像能穿透潔淨海水超過 20 公尺深，當進行影像幾何校正時，如不考慮水下地形變化，在較深暗礁部分易產生明顯位置誤差。利用取得之景宏島、華礁、吉陽礁立體對影像進行影像偏差評估，倘將暗礁視為原假設具同一高程之平面，並以人工量測立體對正射影像間相同點位之相對偏差量，統計相對偏差量之均方根值為 6.5 公尺，顯示立體對正射影像間有明顯偏差。為進一步提升島礁正射影像在暗礁區域之一致性，利用立體對影像以人工立體測繪方式進行暗礁地

形產製工作。

利用立體對影像以人工方式數化暗礁地形，因暗礁受海水及海浪影響，並不易觀測到明確暗礁位置，且常遭遇左右像之海浪反射狀況不一致，亦使立體觀測不易，造成可數化之點位稀疏且分布不均，而越深之暗礁越不易數化其三維坐標。因此暗礁地形之立體測繪目標除三維點位資料外，另外利用暗礁顏色相同時其深度近似之原則，數化少數等高線。整合三維點位及等高線產生網格化暗礁數值高程模型，並與島礁數值高程模型合併，利用合併後之地形模型進行影像正射化。

光線通過不同介質時會有折射效應之

影響，造成上述方式所產製暗礁數值高程模型之高度有誤，如圖 4 所示，圖 4 中 h 為立體觀測所得之水深，但實際水深為 h' 。因此，需依照海水折射率進行暗礁地形之

高度修正，本文使用之海水折射率為 1.34。

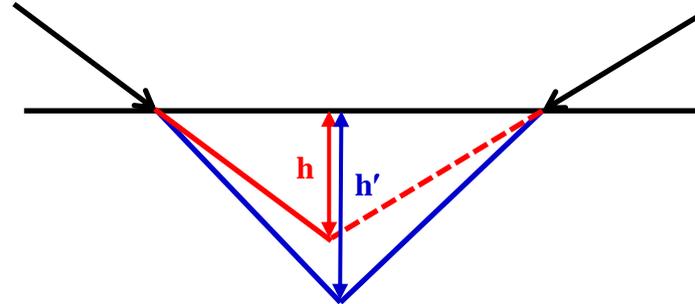


圖 4 水下地形立體觀測示意圖

3.成果

本章節內容為南海島礁測繪成果介紹，包括目標區簡介及測繪成果。目標區為南海之島礁，圖 5 為南海諸島分布圖。南海為西太平洋陸緣海之一，被臺灣、菲律賓、馬來西亞、汶萊、印尼、新加坡、越南及中國大陸所包圍，海域面積逾 350 萬平方公里。海域內散佈約 300 個大小不等的島嶼、沙洲、礁、暗沙及淺灘，依島礁之分布狀況，由北至南，分為東沙、西沙、中沙及南沙等四大群島。東沙群島由東沙島（含環礁）、北衛灘及南衛灘所組成；西沙群島位於東沙群島西南方約 600 公里處，由永樂群島、宣德群島及鄰近島礁組成，西起中建島，東至西渡灘，北起北礁，南至嵩燾灘；中沙群島位於西沙群島東方約

100 公里，最南端之中南暗沙與南沙群島北端約距 200 公里。除最東側之黃岩島（民主礁）外，其餘均為水下暗礁；南沙群島為南海諸島中最南方之群島，為四大群島分布面積最廣，島礁最多之群島，其西起萬安灘，東至海馬灘，北起禮樂灘，南至曾母暗沙及八仙暗沙。

3.1 影像幾何校正

影像幾何校正目前完成 676 幅南海地區高解析度光學衛星影像之幾何校正，包括 QuickBird-2 109 幅、WorldView-1 200 幅、WorldView-2 295 幅及 WorldView-3 1 幅、GeoEye-1 47 幅、IKONOS-2 24 幅，圖 6 為 2010 年產製之中業島幾何校正影像，表 1 為圖 6 影像之拍攝資訊。

表 1 中業島影像拍攝資訊

編號	衛星	拍攝日期	拍攝角度 ($^{\circ}$)	地面取樣距離(m)		雲覆率 (%)
				跨徑	沿徑	
(a)	QuickBird-2	2005/04/22	2.6	0.63	0.64	1
(b)	QuickBird-2	2009/09/16	15.8	0.65	0.66	0
(c)	WorldView-2	2009/12/17	4.7	0.49	0.50	1
(d)	WorldView-2	2010/02/07	20.2	0.50	0.54	6



圖 5 南海諸島分布圖



(a)



(b)



(c)



(d)

圖 6 中業島幾何校正影像

3.2 向量化

利用所產製之島礁幾何校正影像進行島礁向量化，現已完成 191 個島礁之向量圖資，圖 7 為南子礁向量資料之一例。

3.3 基本圖製作

島礁向量資料完成後依照「東海及南海島礁基本圖測製規範（草案）」，進行島礁基本圖分幅編纂及圖幅整飾，圖 8 為基本圖圖幅整飾示意圖。之後將數值正射影像資料檔、基本圖向量資料檔予以套疊成基本圖，現共完成 4433 幅南海島礁五千分

之一比例尺之基本圖，圖 9 為完成之永興島-石島基本圖。

3.4 立體地形

本工作共取得 23 對立體對影像，完成 31 個島礁之數值地表模型、34 個島礁之數值高程模型及 36 個島礁之暗礁數值高程模型。數值地表模型及數值高程模型成果以琛航島為例，分別顯示於圖 10 及圖 11。精度檢核部分，利用立體影像獨立檢核，以隨機抽樣方式由人工量測檢核點，比對人工量測檢核點之高程與該點於數值高程模型及數值地表模型中之高程，檢核



圖 7 南子礁幾何校正影像之向量資料

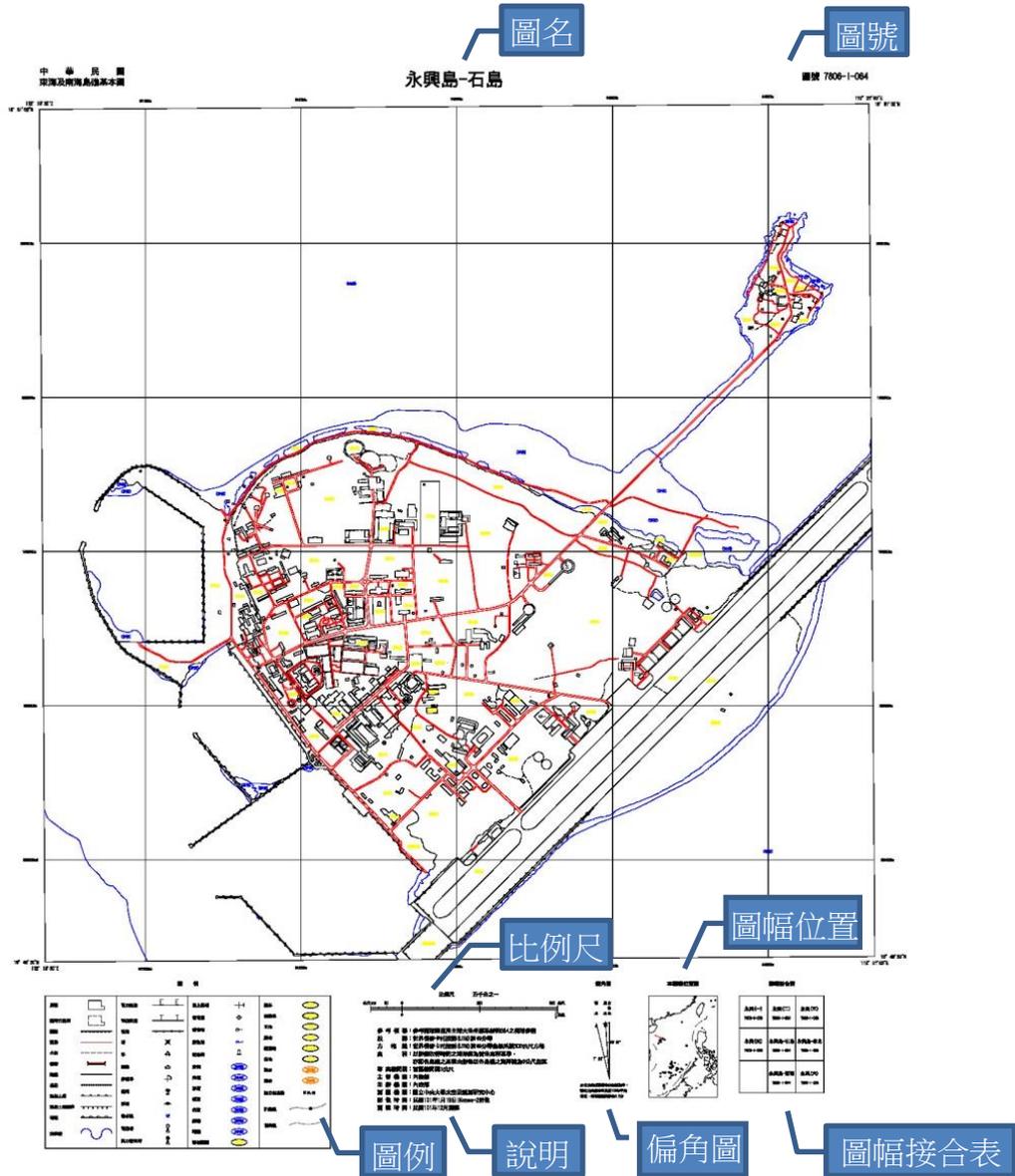
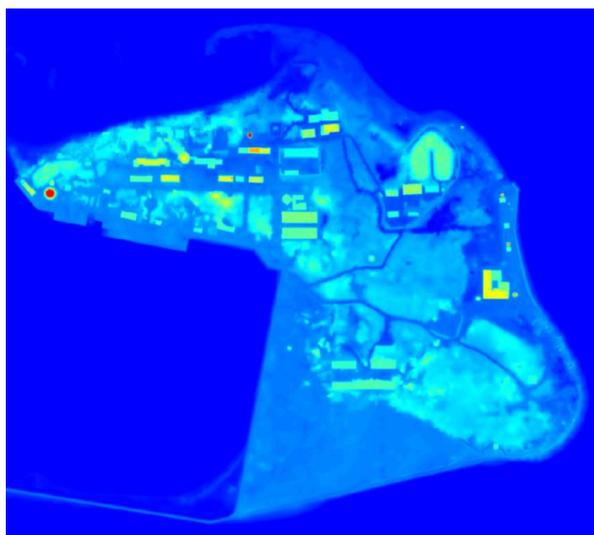


圖 8 基本圖圖幅整飾示意圖

成果如表 2 所示，檢核點之均方根差大多小於 1 公尺。

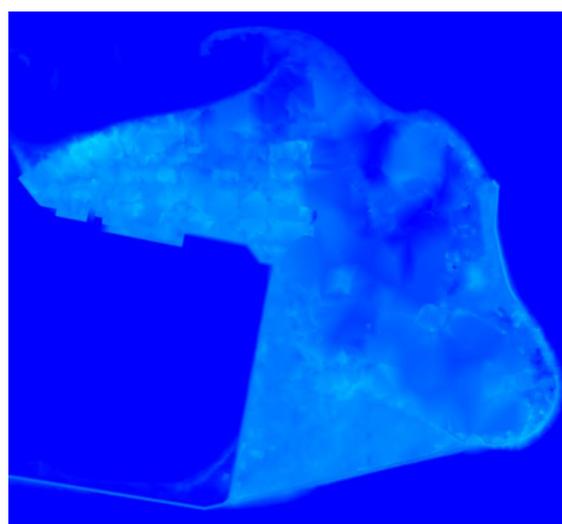
暗礁數值高程模型成果則以景宏島、華礁、吉陽礁為例，顯示於圖 12 中，三個島礁之水下礁盤實際上是連成一體。在平面定位精度檢核部分，利用所產製之暗礁數值高程模型進行影像正射化，以隨機抽樣方式由人工量測於立體對影像所產製之

兩正射影像共軛點，比對共軛點間之相對偏差，檢核成果如表 3 所示，相對偏差均方根值大多小於 2 公尺。暗礁數值高程模型精度之評估對象為水下地形，而數值地表模型及數值高程模型精度之評估對象為水上地形。因水下目標物之觀測較不明確，因此暗礁數值高程模型精度評估略遜於數值地表模型及數值高程模型精度評估。



0m  20m

圖 10 琛航島數值地表模型



0m  20m

圖 11 琛航島數值高程模型

表 2 數值高程模型及數值地表模型精度檢核

	數值高程模型			數值地表模型		
	檢核點 數量	平均差 (m)	均方根差 (m)	檢核點 數量	平均差 (m)	均方根差 (m)
北子礁	20	0.48	0.62	20	0.46	0.61
南子礁	20	-0.28	0.55	20	0.40	1.67
貢士礁	10	0.37	0.59			
奈羅礁	6	0.94	1.07	11	0.27	0.86
中業島	30	0.07	0.28	30	0.13	0.48
鐵線礁	8	-0.24	0.37			
渚碧礁				20	-0.28	1.01
太平島	30	0.06	0.41	30	0.39	0.78
敦謙沙洲	20	-0.18	0.62	20	-0.13	0.65
中洲礁	10	0.08	0.3			
舶蘭礁				10	-0.04	0.57
鴻庥島	46	0.13	0.42	69	0.34	0.85
南薰礁	13	0.57	1.06	10	0.35	0.50
永暑礁	35	-0.01	0.76	35	0.31	1.21
南威島	31	-0.24	0.39	31	0.34	0.94
中礁	20	-0.02	0.42	20	0.00	0.52
安波沙洲	20	-0.29	0.55	20	-0.16	0.55
彈丸礁	32	-0.04	0.28	33	0.16	0.75
景宏島	19	0.17	0.60	72	0.19	0.74
華礁	6	0.65	0.84			

染青沙洲	21	0.11	0.33	22	0.08	1.03
甘泉島	32	-0.23	0.57	38	0.24	0.79
金銀島	24	0.07	0.57	55	0.20	0.81
珊瑚島	36	0.22	0.46	64	0.21	0.64
琛航島-廣金島	69	0.19	0.40	59	0.57	1.08
晉卿島	36	0.36	0.64	26	0.28	0.68
羚羊礁	19	0.46	0.76	15	0.20	0.55
森屏灘	30	0.33	0.43	13	0.08	0.32
石嶼	7	0.58	0.64			
鴨公島	15	0.28	0.53	17	0.25	0.53
全富島	15	0.40	0.56	15	0.21	0.46
永興島-石島	26	0.04	0.76	30	0.41	0.87
中建島	21	-0.22	0.39	21	-0.10	0.42
和五島	40	0.06	0.78	40	0.24	0.98

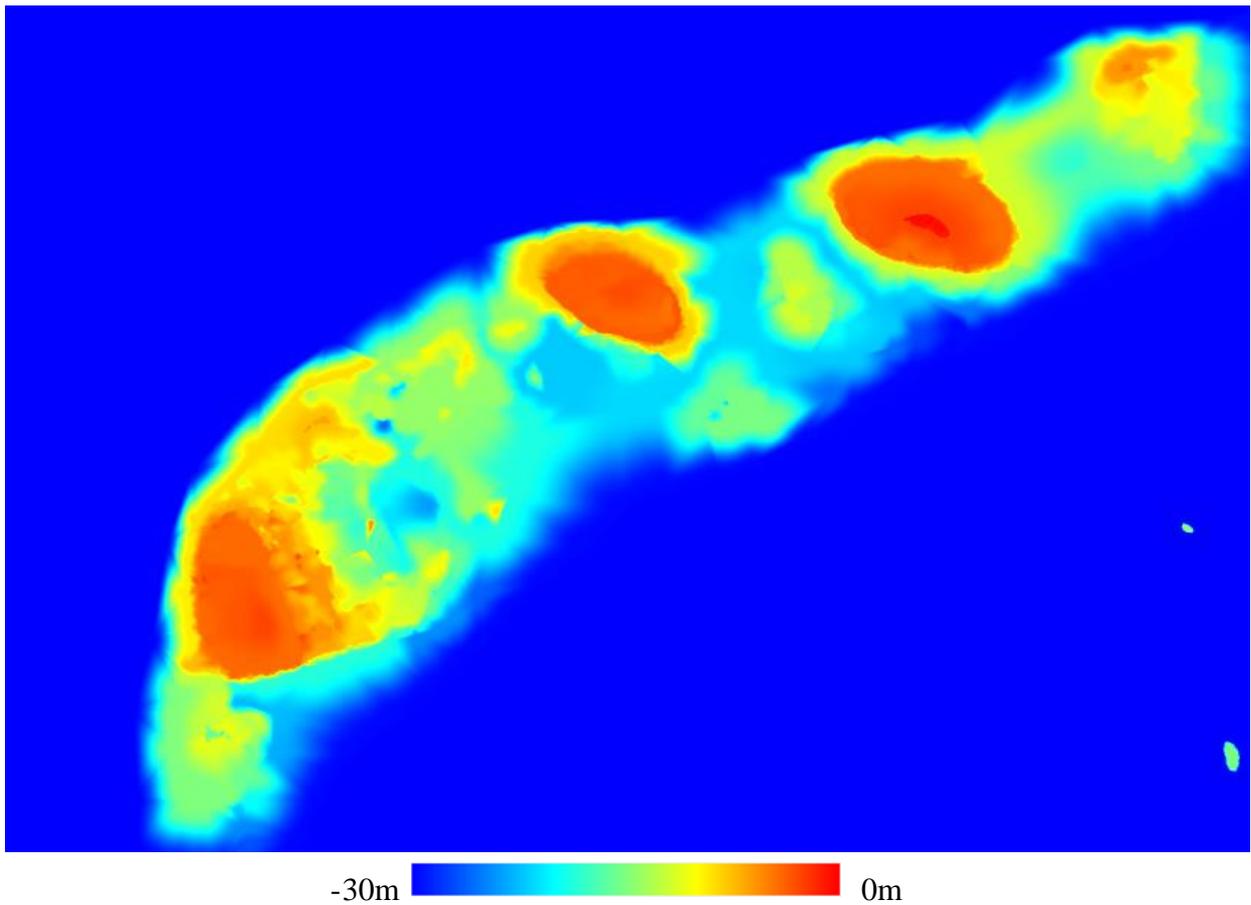


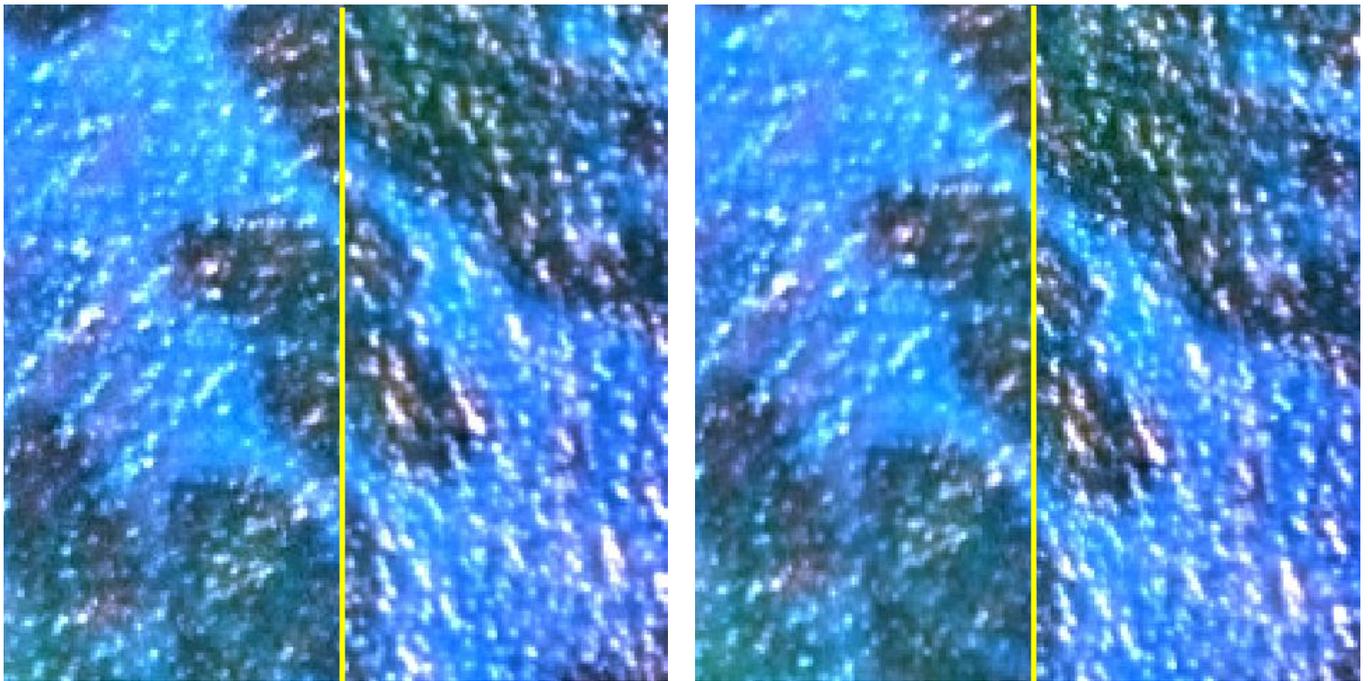
圖 12 景宏島、華礁、吉陽礁暗礁模型

表 3 立體對正射影像相對偏差評估

涵蓋島礁	相對偏差平均值		相對偏差均方根值		檢核點數量
	(m)		(m)		
	E	N	E	N	
北子島、南子島、貢士礁、奈羅礁	0.28	-0.18	0.74	0.90	53
渚碧礁	-0.26	0.31	1.07	1.53	18
太平島、敦謙沙洲、中洲礁	0.15	0.19	0.93	1.47	33
舶蘭礁	-0.72	-0.58	1.38	1.53	27
鴻庥島	-0.11	0.36	0.73	1.17	19
南薰礁	0.75	0.10	1.81	2.12	26
南威島	0.04	0.57	0.64	1.31	25
永暑礁	-0.19	0.16	0.98	1.41	58
彈丸礁	-0.19	-0.17	0.65	0.72	45
景宏島、華礁、吉陽礁	0.04	-0.02	1.50	1.50	43
染青沙洲、染青東礁、長線礁	0.02	0.07	0.31	0.60	63
永樂群島(甘泉島、金銀島、珊瑚島、琛航島、廣金島、晉卿島、羚羊礁、筐仔沙洲、森屏灘、咸舍嶼、石嶼、鴨公島及全富島)	-0.21	0.22	0.81	1.11	121
永興島、石島	-0.19	0.24	1.50	1.35	33
中建島	-0.07	0.00	0.31	0.64	25

以景宏島、華礁、吉陽礁為例，其立體對正射影像加入暗礁地形後，相對偏差量之均方根值為 1.5 公尺，與未加入暗礁地形時之均方根值為 6.5 公尺相比，相對偏差量大幅減少。圖 13 為局部放大之立體對正射影像，圖中黃線左右分別為立體對之兩幅正射影像，在未加入暗礁地形之正射影像中，可明顯發現暗礁有錯開之情況，而在加入暗礁地形之正射影像中則明顯改

善。圖 14 中縱軸為人工量測點位之相對偏差，橫軸為該點位之水深，圖中顯示未加入暗礁地形時有明顯相對偏差，且水深越深偏差量越大。而加入暗礁地形後無明顯相對偏差，且水深與偏差量間無明顯關係，剩餘之偏差主要受到暗礁量測不易之影響。



(a)未加入暗礁地形

(b) 加入暗礁地形

圖 13 立體對正射影像比對

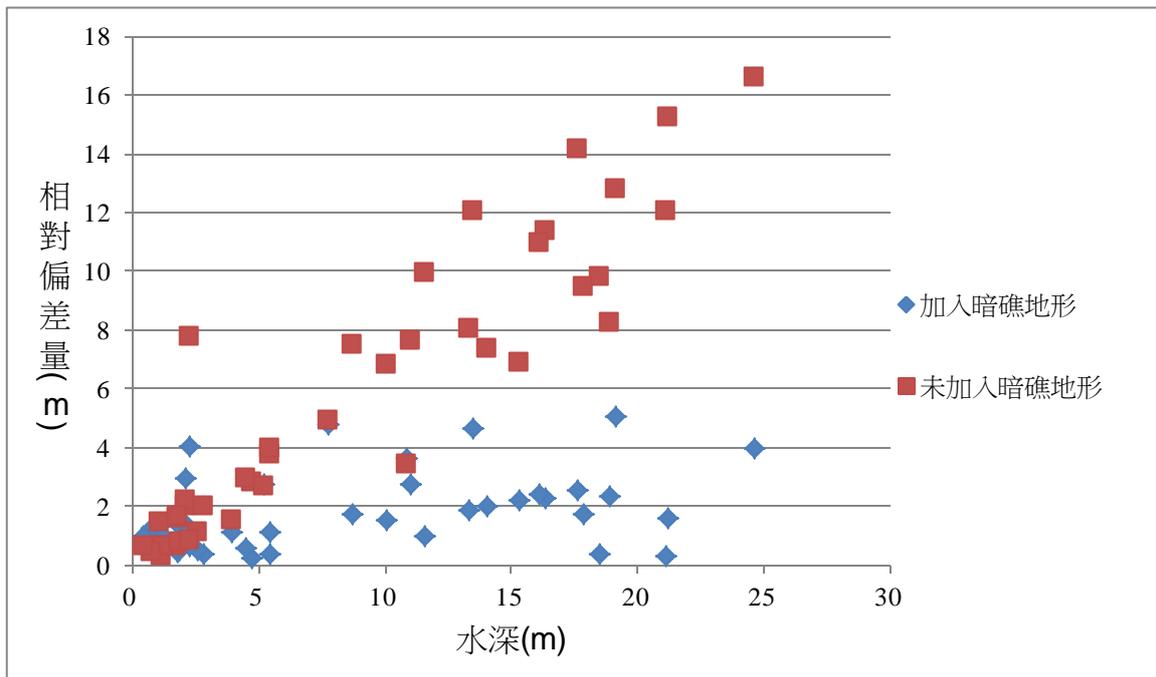


圖 14 人工量測點位相對偏差量與水深關係圖

3.5 島礁變遷

島礁變遷之研析情況主要可分為：(1)

人為變遷(2)自然變遷(3)無明顯變遷。數化人員比較前後期所產製之島礁向量圖資，判釋變遷情形為自然或人為變遷。以 2012

至 2014 年島礁變遷為例，表 4 為統計各年島礁變遷概況，表 4 內之數據為當年度影像與前一年度影像比較結果，其單位為島礁。以東門礁為例，圖 15(a)為東門礁完整影像，圖 15(b)至圖 15(e)為圖 15(a)中紅色方框位置 4 個不同時期之局部放大影像，東門礁大部分屬水下暗礁，在 2014 年 2 月 12 日之影像中僅在島中南處有一小棟建物，到 5 月發現有填海而成之大片裸露

地，而後在上方增建許多建設物，此 7 個月的時間內變化顯著。南海島礁多由珊瑚礁形成，島上沙灘易受海浪的搬運、堆積等作用，以南威島為例，圖 16(a)至圖 16(c)為 3 個不同時期之影像，2007 年 6 月沙灘位於島之西南端，2011 年 10 月沙灘移至島之東北端，2013 年 4 月沙灘又移回島之西南端。

表 4 島礁變遷概況

	2012	2013	2014
有變遷	55	60	65
無明顯變遷	26	21	24



(a) 東門礁完整影像



(b)WorldView-2 2014/02/12



(c)WorldView-2 2014/03/28



(d)WorldView-1 2014/05/02



(e)WorldView-2 2014/09/17

圖 15 東門礁變遷



(a) QuickBird-2 2007/06/13



(b) IKONOS-2 2011/10/23



(c) WorldView-2 2013/04/25

圖 16 南威島沙灘自然變遷

4. 結論

本研究目前已蒐集南海地區共 216 個島礁之衛星影像資料，進行衛星影像校正、向量化、基本圖製作、立體地形建構及變遷監測等工作，並獲寶貴的空間資料。研究成果總結如下：

- (1) 衛星影像幾何校正使用衛星公司提供之有理多項式係數，一般而言在未使用地面控制資料時，其定位誤差優於 5 公尺。本研究共完成 676 幅光學衛星影像之幾何校正，並利用衛星影像完成 191 個島礁之向量圖資製作。
- (2) 考量南海島礁零星分佈地理條件特殊，修正陸域使用之基本圖測製規範，訂定「東海及南海島礁基本圖測製規範（草案）」，共完成 4433 幅南海島礁基本圖。
- (3) 共完成 31 個島礁之數值地表模型、34 個島礁之數值高程模型及 36 個島礁之暗礁數值高程模型。數值地表模型及島礁之數值高程模型以重複觀

測檢核其精度，檢核點均方根差約在 1 公尺左右。暗礁數值高程模型則比對正射影像間相對偏差以檢核其精度，相對偏差均方根值大多小於 2 公尺。

- (4) 南海島礁變遷包括自然及人為變遷，由各年島礁變遷概況中可發現，每年均有 7 成左右之島礁有明顯變遷情況。

致謝

本文承蒙內政部協助得以順利完成，達雲科技有限公司協助島礁地物數化及日陞空間資訊股份有限公司協助基本圖編圖，謹此致謝。

參考文獻

- 內政部，2009。基本地形圖資料庫分類編碼表及專有名詞定義，共 259 頁。
- 內政部，2012。101 年度東海與南海島礁資料蒐集及建置工作期末報告，共 823 頁。
- 吳啟南與李元炎，1993，南沙群島太平島海域遙測衛星影像分析(一)，工研院能資所第 06-3-83-0032 報告。
- 國立中央大學，2013。超高解析度衛星影像定位誤差分析研究計畫期末報告書，共 55 頁。
- Chen, L.C., Teo, T.A., and Liu, C.L., 2006. The geometrical comparisons of RSM and RFM for FORMOSAT-2 satellite images. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, Vol.72, No.5, pp.573-579.
- Digital Globe, A satellite company website. URL:

- <http://www.digitalglobe.com/index.php>
(last date accessed: 30 July 2015)
- Hardy, D.M., and J.J., Walton, 1978, Principal Components Analysis of Vector Wind Measurements, *J. Appl. Meteor.*, Vol. 17, pp. 1153-1162.
- Niederöst, M., 2001. Automated update of Building Information in Maps Using Medium-scale Imagery (1:15,000), Automatic Extraction of Man-Made Objects from Aerial and Space Images, Vol.3, pp.161-170.
- Previtali, M., Barazzetti, L., Scaioni, M., 2011. Multi-Step And Multi-Photo Matching For Accurate 3D Reconstruction. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Volume XXXVIII-3/W22.
- Rouse, J.W., Haas, R.H., Schell, J.A., and Deering, D.W., 1973, Monitoring vegetation systems in the great plains with ERTS, *Third ERTS Symposium*, NASA SP-351 I: 309-317.
- Schowengerdt, R. A., 2007, *Remote Sensing: Models and Methods for Image Processing*, 3rd ed., Burlington, MA, Academic Press.
- Smiley, B., 2009, The absolute and relative geolocation accuracies of QB02 and WV01, *American Society for Photogrammetry and Remote Sensing 2009 Annual Conference*, March 9-13, Baltimore, Maryland.
- Toutin, T., 2004. Review article: Geometric processing of remote sensing images: models, algorithms and methods. *International Journal of Remote Sensing*, Vol.25, No.10, pp.1893-1924.

Island Mapping for South China Sea Using Satellite Images

Chien-Liang Liu^{1*} Liang-Chien Chen² Cheng-Gi Wang³ Wei-Chen Hsu⁴

ABSTRACT

To collect complete and correct island information, this study mapped South China Sea islands and monitored the natural environment and human developments of important islands. Due to their half-meter resolution capability and 5m accuracy without ground control, high resolution satellite images are suitable for sparse island mapping. The suitability and flexibility of satellite bring certain advantages. Satellites can freely observe the world and surpass ground surveying or aerial photogrammetry for sparse islands in South China Sea. It could be the best option in this study to map islands that are far away from Taiwan.

This paper reports a mapping project for islands in South China Sea. Major works include: (1) rectification of satellite images, (2) vectorization, (3) base map generation, (4) 3D surface construction, and (5) change monitoring. First of all, rational function model is selected in the generation of orthoimages. Then the vector maps are digitized in the orthoimages. Base maps are generated for analogue output according to the standard format. The next step is to generate digital elevation models by means of image matching and manual editing. Finally, change monitoring is done by the comparisons of historical images. The results provide valuable geoinformation for South China Sea.

Keywords : South China Sea, satellite images, islands, base map, change monitoring, digital terrain model

¹ Associate Research Engineer, Center for Space and Remote Sensing Research, National Central University

² Professor, Center for Space and Remote Sensing Research, National Central University

³ Senior Technical Specialist, Ministry of the Interior

⁴ General Manager, LIDAR Technology Co., Ltd.

* Corresponding Author: E-mail: ericleo@csrr.ncu.edu.tw

Received Date: Aug. 27, 2015

Revised Date: Jan. 06, 2016

Accepted Date: Jan. 13, 2016

利用 GRACE、衛星測高、海洋模型估計地心變動

鐘子淵¹、郭重言^{2*}、藍文浩³、沈嗣鈞⁴

摘要

地心變動定義為地球質量中心 (center of mass, CM) 相對於幾何中心 (center of figure, CF) 之位置變化, 可反映出地球系統中質量之重新分佈, 因此高精度地心變動資料有助於了解地球系統之質量變化。本研究結合 GRACE 重力衛星與衛星測高資料或海洋模型精確來估計地心變動, 結合 GRACE 與海洋模型資料計算之成果與先前研究成果相符, 然而衛星測高觀測量是參考於國際地面參考框架 (International Terrestrial Reference Frame, ITRF), 其原點與 CF 有所差異, 另外測高資料和海洋模型包含誤差, 因此利用測高資料計算之地心變動在趨勢及相位有明顯差異。本研究亦探討洩漏效應 (leakage effect) 和冰後回彈 (Post-Glacial Rebound, PGR) 一階項對於地心變動估計之影響, 結果發現洩漏效應之影響不可忽略, 而 PGR 一階項僅反映於計算之地心變動趨勢速率上, 造成之地心變動速率變化量約為 PGR 一階項改變量之 80%。

關鍵字：地心變動、衛星測高、GRACE、海洋模型

1. 緒論

地球質量中心 (Center of Mass, CM) 一般稱之為地心 (geocenter), 常用來描述慣性空間中地球運動情形以及作為地球衛星軌道中心。地心變動定義為地球 CM 相對於地球幾何中心 (Center of Figure, CF) 之位置變化, 習慣上以卡氏坐標系統分量 (X、Y、Z) 或重力場球諧係數一階項來表示。地心變動主要由地表和地球內部之質量重新分佈造成, 其中地表質量重新分佈主要為水循環所造成, 包含海洋、大氣、陸地水體、冰川、冰山及冰原間質量的交

換, 大部分可經由大地測量技術求得, 而地球內部質量重新分佈包含冰後回彈 (Post-Glacial Rebound, PGR) 及地震等影響 (Dong et al., 1997)。

國際地面參考框架 (International Terrestrial Reference Frame, ITRF) 是結合多種空間大地測量觀測量所建立, 除了少數不連續情況外, 現今地表觀測點位皆假設為線性移動, 理論上 ITRF 坐標原點定義為長時間平均之地球 CM, 而非近瞬時之 CM。實際上受到地表觀測點位非全球性均勻分佈之影響下, 短時間內地球 CF 與 ITRF 框架原點間存在一偏差量 (Wu et al., 2012), 若利用 ITRF 為參考框架之衛

¹ 國立成功大學測量及空間資訊學系 碩士生

² 國立成功大學測量及空間資訊學系 教授

³ 國立成功大學測量及空間資訊學系 博士生

⁴ 俄亥俄州立大學地球科學院 教授

* 通訊作者 Email: kuo70@mail.ncku.edu.tw

收到日期: 民國 103 年 02 月 20 日

修改日期: 民國 103 年 03 月 27 日

接受日期: 民國 103 年 04 月 15 日

星資料來計算地心變動，其結果與定義之地心變動並不符合 (Bouillé et al., 2000；尤瑞哲，2009)。地心位置每年變動約數個釐米，造成 ITRF 坐標框架原點與原先定義之原點產生偏離，若忽略此偏離量，量測之坐標將因為地心變動而產生誤差。早期衛星軌道誤差較大且航遙測和大地測量觀測精度較低時，地心變動量可忽略不計，然而現今各類航遙測和空間大地觀測技術以及軌道定軌技術皆已大幅進步，故地心變動量已不可忽略，因此若能精確估計地心變動量，則可進一步提升航遙測和大地測量精度，例如 GPS 定位精度、航遙測和大地測量之控制點精度、遙測和大地衛星軌道精度等。

地球重力場模型大多以球諧展開式來表示，一般假設坐標框架原點與地球 CM 重合，故一階項球諧係數為零。然而地球系統中質量重新分佈造成地球 CM 變動，即一階項係數不再為零，進而造成後續應用計算的問題，例如造成利用重力場球諧係數變動計算地球質量變動之誤差，因此若能精確估計地心位置變化，則可提高重力場計算之精度，對於後續應用（例如估算質量變化）的計算精度將有相當大的幫助。地球重力場一階項係數對於利用 Gravity Recovery and Climate Experiment (GRACE) 重力場解計算高緯度地區質量變化和大尺度海水質量變化有顯著的影響，例如 Chambers et al. (2004) 從 GRACE 及衛星測高資料中分析得知，當 GRACE 重力場解加入季節性變化之地心變動模型時，兩資料求得之海洋質量年週期振幅差異量由 15 % 降至 1 %；Chambers et al. (2007) 利用 GRACE 資料模擬南極洲冰原、格陵蘭冰原與冰山冰川融化對於全球海水面上升之影響，結果顯示若未考慮地心變動，所估計之海水面上升速率僅占模

擬真值之 40%-70%。Davis et al. (2004) 比較由 GPS 與 GRACE 計算之地表沉降量，其結果也指出當 GRACE 加入一階項時，兩者結果呈現高相關。此外，若地球 CM 與 CF 間存有相對速度 2 mm/yr 誤差時，將造成衛星測高所量測之全球平均海水面上升速率約有 0.4 mm/yr 誤差 (Blewitt et al., 2009)。

先前已有許多估算地心變動的相關研究，例如 Eanes et al. (1997)、Bouillé et al. (2000) 以及 Cretaux et al. (2002) 利用衛星雷射測距 (Satellite Laser Range, SLR) 量測地面站位移量來估計地心變動量，然而 SLR 地面站點位稀少且分佈不均 (無涵蓋海洋區域)，造成計算成果誤差較大；Blewitt and Clarke (2003) 利用 GPS 垂直向位移量來估算地心變動，雖然 GPS 測站資料稍多於 SLR 地面站，但與 SLR 仍有相同的缺點；Kuzin et al. (2010) 利用 16 年多普勒軌道學與無線電定位集成衛星 (Doppler Orbitography and Radiopositioning Integrated by Satellite, DORIS) 資料進行地心變動估計，但 DORIS 測站大多分佈於北半球，導致估算之地心變動 Z 軸分量遠大於 X 與 Y 軸分量，且其精度僅達公分等級，遠大於實際地心變動量。除了利用衛星觀測量外，地心變動亦可由氣候模型求得，Chen et al. (1999) 利用 National Centers and Environmental Prediction - The National Center for Atmospheric Research (NCEP-NCAR) 模型中的地表面大氣壓力、土壤濕度、陸地水文與 TOPEX/Poseidon 測高等資料進行地心變化估計，其計算結果與 Dong et al. (1997) 僅使用氣候模型計算之結果相符，然而陸地水文與海洋模型精度無法評估，因此所估算之地心變動量精度亦難以評估。

GRACE 重力衛星自 2002 年發射升空後，成功提供了高精度之月平均重力場解 (Tapley et al., 2004a)，此重力場解與氣象模型結合，可用於計算地球系統中的質量重新分佈 (Wahr et al., 2004)。已有多人利用 GRACE 重力衛星資料於地心變動量之估計，例如 Kang et al. (2009) 利用 GRACE 雙星高-低追蹤資料 (GPS to Low-Earth Orbiting, or LEO satellites) 計算年週期與半年週期之地心變動訊號；Kusche and Schrama (2005) 和 Munk and Munk (2007) 除了使用 GPS 垂直向位移量外，並加入 GRACE 重力場解，用來減低高階項係數對一階項係數估計時的混疊效應 (aliasing effect)，以提高地心變動估計之精度；Wu et al. (2006) 結合 GRACE、Estimating the Circulation and Climate of the Ocean (ECCO) 海洋模型、GPS 垂直位移量估計地心變動，其精確度高於 0.5 mm；Swenson et al. (2008) 結合 GRACE 資料與海洋模型計算地心變動，其結果與 Chen et al. (1999) 和 Wu et al. (2006) 之成果相符合，但是 Swenson et al. (2008) 認為 PGR 一階項係數對地心變動計算之影響小於 0.1 mm/yr，因此在其研究中將 PGR 一階項假設為 0，然而 Wu et al. (2010) 結合 GRACE、ECCO 海洋模型、GPS 垂直向位移量計算地心變動之研究中指出，PGR 將造成地心變動 Z 軸分量有 -0.72 ± 0.06 mm/yr 變動，另外 Klemann and Martinec (2009) 也指出 PGR 一階項影響不可忽略。同樣地，上述研究皆有氣候模型精度無法評估或觀測量分佈不均勻之限制。此外，因 GRACE 重力衛星重力場解之空間解析度僅為數百公里，因此資料位於陸地海洋交界處會因洩漏效應 (leakage effects) 產生地心變動估計誤差。

本研究將結合 GRACE 重力衛星資料和衛星測高資料或海洋模型進行地心變動計算，並進行比較分析。其中，為探討洩漏效應對地心變動估計之影響，本研究分別將海岸線周圍之海洋資料移除或移除後內插進行測試分析。此外，為研究 PGR 一階項係數對地心變動估計之影響，本研究模擬六組 PGR 一階項係數加入 ICE-5G deglaciation model and viscosity profile VM2 計算之 PGR 模型 (Paulson et al., 2007) 中進行測試分析。

2. 資料

2.1 GRACE 重力衛星

本研究使用 Center for Space Research (CSR) 所計算之 GRACE 月平均重力場解，稱之為 GRACE Satellite-only Model (GSM)，重力場解以 2-60 階球諧係數形式提供，資料涵蓋時間範圍為 2002 年 9 月至 2009 年 12 月，共計 87 個月份。由於 GRACE 重力場解中的二階項係數 (\bar{c}_{20}) 因軌道誤差造成其誤差較大 (Tapley et al., 2004b)，而此誤差會造成計算的海水質量變化速率偏大，參考 Chambers (2006) 處理方法，本研究以 SLR 求得之 \bar{c}_{20} 項來取代 GSM 之 \bar{c}_{20} 項 (Cheng et al., 2004)。此外，當 CSR 利用 GRACE Level 1B 觀測資料進行地球重力場解算時，大氣-海洋去混疊模型 (Atmosphere-Ocean De-aliasing model, AOD) 被當作背景力 (background force)，因此若要利用 GSM 重力場解計算海洋海水質量變化時，則需將 AOD 加回 GSM 中，本研究採用 GRACE Average of non-tidal Atmosphere and Ocean Combination (GAC) 模型。最後平均所有月份之 GSM+GAC 球諧係數，並將平均值自各月份重力場解資

料中移除，求得各月份球諧係數之變動量 $\Delta\bar{C}_{nm}$ 與 $\Delta\bar{S}_{nm}$ 。

2.2 冰後回彈 (Post-Glacial Rebound, PGR)

GRACE 的 GSM 重力場解中包含固體地球變形效應，而本研究採用之方法 (3.1 節) 假設球諧係數並不包含固體地球變形，因此需將其模式化並自 GRACE 重力場解中移除，待計算完地心變動後，再將固體地球變形所造成之地心變動加回。至今能被 GRACE 重力衛星偵測到之固體地球變形包含 PGR (Paulson et al., 2007)、2004 南亞大地震 (Han et al., 2006)、2011 Tohoku-Oki 地震 (Wang et al., 2012b)、2010 智利地震 (Wang et al., 2012a)，因此本研究中僅考慮 PGR 影響。PGR 為用來描述 8000 年前冰河時期結束後的地球內部之質量分

佈變化，對地心變動之影響反應於趨勢上 (Klemann and Martinec, 2009)，而本研究採用 ICE-5G deglaciation model and viscosity profile VM2 所計算之 PGR 模型 (Paulson et al., 2007)。

Swenson et al. (2008) 認為 PGR 一階項對地心變動計算之影響小於 0.1 mm/yr，故在其研究中將 PGR 一階項對地心變動之影響設為 0 mm/yr，然而 Wu et al. (2010) 研究中指出，PGR 會造成地心變動 Z 軸分量 -0.72 ± 0.06 mm/yr 之變化，因此進行地心變動估計時不可忽略。Klemann and Martinec (2009) 指出 PGR 一階項在 X、Y、Z 三分量約為 ± 1 mm/yr 以下，其中 Z 分量遠大於 X 和 Y 分量，而本研究採用之 PGR 模型僅提供 2-60 球諧係數，故於此模型中分別加入六組假設之不同 PGR 一階項進行測試 (如表 1 所示)，用來測試不同 PGR 一階項對地心變動計算之影響。

表 1 六組假設之 PGR 一階項 (以 X、Y、Z 三軸分量來表示)

PGR	PGR0	PGR1	PGR2	PGR3	PGR4	PGR5
X(mm/yr)	0	0	-0.1	-0.2	-0.3	-0.4
Y(mm/yr)	0	0	-0.1	-0.2	-0.3	-0.4
Z(mm/yr)	0	-0.1	-0.3	-0.5	-0.7	-0.9

2.3 衛星測高

本研究使用 Envisat 以及 Jason-1/2 測高衛星資料，資料涵蓋時間範圍為 2002 年 9 月至 2009 年 12 月，其中 Jason-1 資料時間區段為 2002 年 9 月至 2008 年 12 月，之後以 Jason-2 資料接續。測高資料由 Radar Altimeter Database System (RADS) 資料庫取得，皆已經過儀器改正、介質改正和地球物理改正，其中介質改正包括乾濕對流層和電離層改正，地球物理改正包括固體潮改正、極潮改正、海潮改正以及大氣負載 (Inverted Barometer,

IB) 改正。此外，PGR 造成之大地水準面變化也需自測高資料中移除。為結合使用衛星測高資料與月平均之 GRACE 重力場解資料，1Hz Envisat 與 Jason-1/2 測高資料將利用下式計算權，並化算成 $1^\circ \times 1^\circ$ 月平均網格資料 (Chambers, 2006)：

$$W_s = \exp\left[-1\left(\frac{r}{R_s}\right)^2\right] \quad (1)$$

其中 r 為網格中心點至海水面高度觀測點之距離 (赤道處 1° 為 110 km)， $R_s=500$ km。

衛星測高觀測資料可經由下式求得淨海水質量變化：

$$\Delta h_{net}(\theta, \varphi) = \Delta h(\theta, \varphi) - \Delta h_{SSL}(\theta, \varphi) - \Delta u_r(\theta, \varphi) \quad (2)$$

其中 Δh 為衛星測高觀測海水表面變化， Δh_{SSL} 為比容海水面(steric sea level)變化， Δu_r 為海水承載造成之地殼垂直位移 (vertical displacement due to elastic loading)， θ 為餘緯度， φ 為經度 (Kuo et al., 2008)。

Δh_{SSL} 可藉由海水溫度和鹽度資料求得，如下式：

$$h_{steric} = \int_{z_1}^{z_2} \frac{\rho_0(S_0, T_0, z) - \rho(S, T, z)}{\rho_0(S_0, T_0, z)} dz \quad (3)$$

其中 S_0 與 T_0 為長時間平均之海水鹽度及溫度資料， s 與 t 為月平均之海水鹽度及溫度資料， z 為海水深度，由海水深度 z_1 (本研究 $z_1=1500$ m) 積分至海水表面 $z_2=0$ m， ρ_0 為參考海水密度， ρ 為海水密度，可利用溫度及鹽度混合效應之狀態方程 (equation of the state) 計算求得 (Gill, 1982)。本研究使用 Ishii and Kimoto (2009) 海水溫度和密度資料，該資料為一組 $1^\circ \times 1^\circ$ 月平均網格資料，涵蓋範圍近乎全球，涵蓋深度由海水表面 (0 m) 至水深 1500 m 共分為 24 層。

$\Delta u_r(\theta, \varphi)$ 之計算公式如下所示 (Kuo et al., 2008；Guo et al., 2004)：

$$\Delta u_r(\theta, \varphi) = a \sum_{n=0}^{\infty} \frac{h_n}{(k_n + 1)} \sum_{m=0}^n \bar{P}_{nm}(\cos \theta) \left[(\Delta \bar{C}_{nm} - \Delta \bar{C}_{nm}^{PGR}) \cos m\varphi + (\Delta \bar{S}_{nm} - \Delta \bar{S}_{nm}^{PGR}) \sin m\varphi \right] \quad (4)$$

其中 a 為地球半徑 (=6378137 m)， n 與 m 分別為階數 (degree) 及次數 (order)， \bar{P}_{nm} 為完全正規化之雷建德函數 (associated Legendre function)， $\Delta \bar{C}_{nm}$ 與 $\Delta \bar{S}_{nm}$ 為球諧係數之變化量，可代入上節處理過之 GRACE 資料， $\Delta \bar{C}_{nm}^{PGR}$ 和 $\Delta \bar{S}_{nm}^{PGR}$ 為 PGR 模型之球諧係數變化量， k_n 與 h_n 為洛夫數 (Love numbers)，用以描述地球彈性變型，本研究採用 Guo et al. (2004) 之洛夫數數

據。

2.4 海洋模型

本研究採用兩種海洋模型求得海洋質量變化，分別為 Estimating the Circulation and Climate of the Ocean (ECCO) 和 global Ocean Model for Circulation and Tides (OMCT)。ECCO 模型涵蓋範圍為緯度 $\pm 78^\circ$ 間之海洋區域，經度方向空間解析力固定為 1° 、緯度方向空間解析力為 0.3° (赤道) $\sim 1^\circ$ (極區)。OMCT 涵蓋範圍為全球海洋，網格大小則為 $1.875^\circ \times 1.875^\circ$ 。由於海洋模型輸出為體積守恆，因此需先進行改正，成為質量守恆 (Thomas, 2002)，然而質量守恆模型並不包含海洋與陸地間之質量交換，因此在利用此模型來計算地心變動前，須將大氣、海洋及陸地間質量交換所造成之海水質量變化改正至海洋模型中，其方法參照 Swenson et al. (2008)。最後利用 Generic Mapping Tools (GMT) 軟體 (張力係數為 0.25) 進行內插，將兩海洋模型網格大小內插成 $1^\circ \times 1^\circ$ 網格以配合其他資料。

3. 研究方法

3.1 背景公式

移除 PGR 影響之大地起伏變化可表示成：

$$\Delta N(\theta, \varphi) = a \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{m=0}^n \bar{P}_{nm}(\cos \theta) \cdot \left[(\Delta \bar{C}_{nm} - \Delta \bar{C}_{nm}^{PGR}) \cos m\varphi + (\Delta \bar{S}_{nm} - \Delta \bar{S}_{nm}^{PGR}) \sin m\varphi \right] \quad (5)$$

表面質量異常 (surface mass anomaly) 可表示成 (Wahr et al., 1998)：

$$\Delta \sigma(\theta, \varphi) = \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{m=0}^n \bar{P}_{nm}(\cos \theta) (\Delta \bar{C}_{nm}' \cos m\varphi + \Delta \bar{S}_{nm}' \sin m\varphi) \quad (6)$$

故表面質量異常係數與球諧係數間的關係可表示成 (Wahr et al., 1998) :

$$\begin{cases} \Delta\bar{C}'_{nm} \\ \Delta\bar{S}'_{nm} \end{cases} = \frac{\rho_E}{3} \frac{(2n+1)}{1+k_n} \begin{cases} \Delta\bar{C}_{nm} - \Delta\bar{C}_{nm}^{PGR} \\ \Delta\bar{S}_{nm} - \Delta\bar{S}_{nm}^{PGR} \end{cases} \quad (7)$$

其中 ρ_E 為地球平均密度 (=5517 kg/m³)。

以地球 CM 為原點的參考框架下，因 $k_l = -1$ ，故無法在 $n=1$ 情形下，利用式 (7)

求得 $\Delta\bar{C}'_{nm}$ 與 $\Delta\bar{S}'_{nm}$ 。然而若建立一參考框架，其 $k_l \neq -1$ ，並求得此框架下之一階項

球諧係數，再透過兩框架間之關係，則可計算地球 CM 框架下一階項之表面質量變化係數。

由於水文或海洋模型和觀測量均以 CF 框架為參考框架，而 CF 框架中 $k_l = 0.021$ (Blewitt, 2003)，因此在此框架下可利用質量變化觀測或模型求得一階項

係數變化 (Swenson et al., 2008)，並以下式求得地心變動於 X、Y、Z 軸之分量 GM_X 、 GM_Y 、 GM_Z ：

$$\begin{aligned} GM_X &= \sqrt{3} \times a \times \Delta\bar{C}_{11} \\ GM_Y &= \sqrt{3} \times a \times \Delta\bar{S}_{11} \\ GM_Z &= \sqrt{3} \times a \times \Delta\bar{C}_{10} \end{aligned} \quad (8)$$

3.2 演算法

若將表面質量異常係數分成陸地與海洋兩部分，則式(6)可改寫成 (Swenson et al., 2008)：

$$\Delta\sigma(\theta, \varphi) = \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{m=0}^n \bar{P}_{nm}(\cos\theta) \cdot [(\Delta\bar{C}'_{nm} + \Delta\bar{C}'_{nm}^{land}) \cos m\varphi + (\Delta\bar{S}'_{nm} + \Delta\bar{S}'_{nm}^{land}) \sin m\varphi] \quad (9)$$

依 \bar{P}_{nm} 球面上之正交性質 (Orthogonality) 可求得下式：

$$\Delta\bar{C}'_{nm} = \frac{1}{4\pi} \int \bar{P}_{nm}(\cos\theta) \cos m\varphi \cdot \Delta\sigma(\theta, \varphi) d\Omega \quad (10)$$

$$\Delta\bar{S}'_{nm} = \frac{1}{4\pi} \int \bar{P}_{nm}(\cos\theta) \sin m\varphi \cdot \Delta\sigma(\theta, \varphi) d\Omega \quad (11)$$

$$\text{其中 } \int = \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi} \quad , \quad d\Omega = \sin\theta d\theta d\varphi \quad ,$$

$$\mathcal{G}(\theta, \varphi) = \begin{cases} 1, & \text{if ocean} \\ 0, & \text{if land} \end{cases} \quad (12)$$

將式(6)代入式(10)和(11)中，並將球諧係數一階項自求和式中提出，且將零階項視為零，即可求得：

$$\begin{aligned} \Delta\bar{C}'_{10}{}^{ocean} &= \frac{1}{4\pi} \int \bar{P}_{10}(\cos\theta) \mathcal{G}(\theta, \varphi) \cdot \\ & [\bar{P}_{10}(\cos\theta) \Delta\bar{C}'_{10} + \bar{P}_{11}(\cos\theta) \Delta\bar{C}'_{11} \cos\varphi + \bar{P}_{11}(\cos\theta) \Delta\bar{S}'_{11} \sin\varphi + \\ & \sum_{n=2}^{60} \sum_{m=0}^n \bar{P}_{nm}(\cos\theta) (\Delta\bar{C}'_{nm} \cos m\varphi + \Delta\bar{S}'_{nm} \sin m\varphi)] d\Omega \end{aligned} \quad (13)$$

$$\begin{aligned} \Delta\bar{C}'_{11}{}^{ocean} &= \frac{1}{4\pi} \int \bar{P}_{10}(\cos\theta) \cos\varphi \cdot \mathcal{G}(\theta, \varphi) \cdot \\ & [\bar{P}_{10}(\cos\theta) \Delta\bar{C}'_{10} + \bar{P}_{11}(\cos\theta) \Delta\bar{C}'_{11} \cos\varphi + \bar{P}_{11}(\cos\theta) \Delta\bar{S}'_{11} \sin\varphi + \\ & \sum_{n=2}^{60} \sum_{m=0}^n \bar{P}_{nm}(\cos\theta) (\Delta\bar{C}'_{nm} \cos m\varphi + \Delta\bar{S}'_{nm} \sin m\varphi)] d\Omega \end{aligned} \quad (14)$$

$$\begin{aligned} \Delta\bar{S}'_{11}{}^{ocean} &= \frac{1}{4\pi} \int \bar{P}_{10}(\cos\theta) \sin\varphi \cdot \mathcal{G}(\theta, \varphi) \cdot \\ & [\bar{P}_{10}(\cos\theta) \Delta\bar{C}'_{10} + \bar{P}_{11}(\cos\theta) \Delta\bar{C}'_{11} \cos\varphi + \bar{P}_{11}(\cos\theta) \Delta\bar{S}'_{11} \sin\varphi + \\ & \sum_{n=2}^{60} \sum_{m=0}^n \bar{P}_{nm}(\cos\theta) (\Delta\bar{C}'_{nm} \cos m\varphi + \Delta\bar{S}'_{nm} \sin m\varphi)] d\Omega \end{aligned} \quad (15)$$

將式(13)~(15)以矩陣型式來表示(鐘子淵, 2012)：

$$\begin{bmatrix} \Delta\bar{C}'_{10}{}^{ocean} \\ \Delta\bar{C}'_{11}{}^{ocean} \\ \Delta\bar{S}'_{11}{}^{ocean} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_{C10}^{C10} & I_{C10}^{C11} & I_{C10}^{S11} \\ I_{C11}^{C10} & I_{C11}^{C11} & I_{C11}^{S11} \\ I_{S11}^{C10} & I_{S11}^{C11} & I_{S11}^{S11} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\bar{C}'_{10} \\ \Delta\bar{C}'_{11} \\ \Delta\bar{S}'_{11} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} G_{C10} \\ G_{C11} \\ G_{S11} \end{bmatrix} \quad (16)$$

以 $\Delta\bar{C}'_{10}{}^{ocean}$ 為例，矩陣中各項如下所示：

$$\begin{aligned} I_{C10}^{C10} &= \frac{1}{4\pi} \int \bar{P}_{10}(\cos\theta) \mathcal{G}(\theta, \varphi) \cdot \bar{P}_{10}(\cos\theta) d\Omega \\ I_{C10}^{C11} &= \frac{1}{4\pi} \int \bar{P}_{10}(\cos\theta) \mathcal{G}(\theta, \varphi) \cdot \bar{P}_{11}(\cos\theta) \cos\varphi d\Omega \\ I_{C10}^{S11} &= \frac{1}{4\pi} \int \bar{P}_{10}(\cos\theta) \mathcal{G}(\theta, \varphi) \cdot \bar{P}_{11}(\cos\theta) \sin\varphi d\Omega \end{aligned} \quad (17)$$

$$G_{C10} = \frac{1}{4\pi} \int \bar{P}_{10}(\cos\theta) \mathcal{G}(\theta, \varphi) \cdot \left\{ \sum_{n=2}^{60} \sum_{m=0}^n \bar{P}_{nm}(\cos\theta) (\Delta\bar{C}'_{nm} \cos m\varphi + \Delta\bar{S}'_{nm} \sin m\varphi) d\Omega \right\} \quad (18)$$

式中 $\Delta\bar{C}'_{nm}$ 與 $\Delta\bar{S}'_{nm}$ 可由處理後之 GRACE 資料 (2.1 節) 代入式(7)中計算求得。

$\Delta\bar{C}'_{10}{}^{ocean}$ 、 $\Delta\bar{C}'_{11}{}^{ocean}$ 與 $\Delta\bar{S}'_{11}{}^{ocean}$ 可由處理後

之衛星測高資料 (2.3 節) 或海洋模型 (2.4 節) 加上於陸地和海洋無資料處補零代入

式(10)和(11)計算求得。最後透過最小二乘法求得式(16)中之未知數 $\Delta\bar{C}'_{10}$ 、 $\Delta\bar{C}'_{11}$ 與

$\Delta\bar{S}'_{11}$ ，再經由式 (7)和(8)求得地心變動之

X、Y、Z 三軸分量。

4. 成果和討論

本研究分別結合 GRACE 重力衛星與衛星測高或海洋模型計算求得地心變動時間序列(結果如圖 1 所示),由圖 1 可看出四種資料計算之地心變動結果相當吻合。擬合本研究計算成果之年週期振幅與相位,並與 Swenson et al. (2008) 成果比較(如表 2 所示之 6 個研究成果,分別以成果(A)~(F)表示)可得知,本研究利用 GRACE 與海洋模型估計地心變動之成果(成果(C)與(D))與前人研究成果(成果(A)與(B))大致相符。比較結合 GRACE 重力衛星和

衛星測高資料估算地心變動成果(成果(E)與(F))與結合 GRACE 重力衛星和海洋模型所計算之成果(成果(C)與(D))可知,地心變動 X 軸分量之年週期相位差異較大,而 Y 和 Z 分量之年週期振幅與相位則相當一致。在趨勢速率部分,成果(C)~(F)的 Z 分量皆為負值,而 X 和 Y 分量呈現正負號不一之情況,造成差異之原因為用於計算之資料涵蓋時間較短,於擬合趨勢速率時誤差較大。另外,造成海洋模型和測高資料之計算成果差異,除了觀測資料或模型含有誤差外,也可能是兩資料參考框架不同所致(衛星測高相對於 ITRF; 海洋模型相對於 CF)。

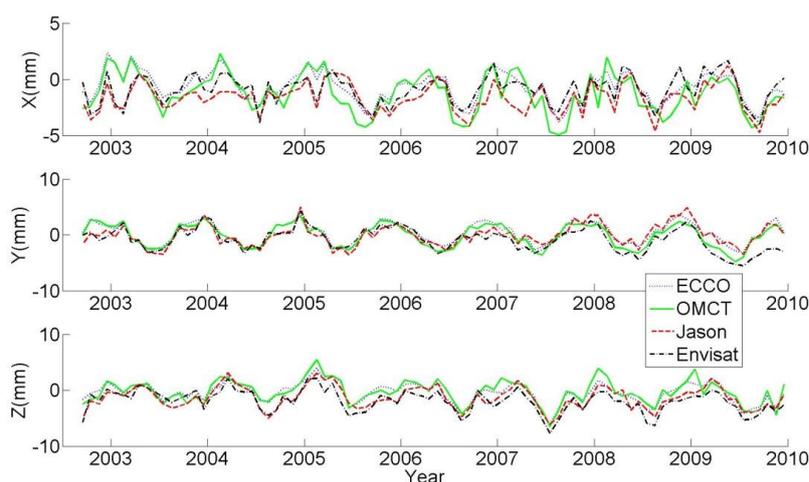


圖 1 本研究計算之地心變動 X (上圖)、Y (中圖)、Z (下圖)三軸分量。

為量化評估本研究與前人研究成果,本研究分別利用結合估計地心變動與 GRACE 2-60 階重力場解資料以及 Envisat 測高資料估算離海岸線 300 公里外海洋區域之海水質量變化,並且計算兩者差值之均方根(Root Mean Square)值,其結果如圖 2 所示。圖 2 顯示加入本研究估計的地心變動所估算之海水質量變化與測高資料之成果最為接近,而加入 Swenson et al. (2008) 之地心變動結果差異較大,其中

以太平洋區域最為明顯。由圖 2 也發現在例如巴西海流(Brazil Current)和阿古拉斯海流(Agulhas Current)等處均方根值明顯偏大,主要是因衛星測高資料空間解析度高於 GRACE 所造成。本研究分別計算圖 2 中各均方根值之平均值後發現,加入一階項後使均方根值之平均值由 5.73 cm 降低至 5.71 cm (Swenson et al., 2008) 及 5.29 cm (本研究)。

表 2 結合 GRACE 重力衛星與衛星測高資料或海洋模型計算之地心變動 X、Y、Z 軸分量

			Annual Amplitude (mm)	Annual Phase (°)	Trend (mm/yr)
(A) ECCO Time span: 2003/01~2006/12 (Swenson et al., 2008)	X		1.13±0.07	51.29±3.95	-0.12±0.04
	Y		2.67±0.09	325.48±1.97	0.07±0.03
	Z		1.23±0.10	54.25±4.93	-0.14±0.05
(B) OMCT Time span: 2003/01~2006/12 (Swenson et al., 2008)	X		1.88±0.07	45.37±3.95	-0.20±0.04
	Y		2.59±0.09	326.47±1.97	-0.02±0.03
	Z		1.78±0.10	59.18±4.93	0.06±0.05
本研究 Time span: 2002/09 ~2009/12	(C) ECCO	X	1.41±0.13	52.83±5.16	-0.14±0.04
		Y	2.46±0.10	329.10±2.42	0.01±0.03
		Z	1.82±0.18	40.95±5.46	-0.19±0.06
	(D) OMCT	X	1.96±0.16	50.91±4.69	-0.18±0.05
		Y	2.61±0.10	325.71±2.29	-0.16±0.04
		Z	2.16±0.23	45.23±6.03	-0.11±0.08
	(E) Envisat	X	0.93±0.16	67.28±9.92	0.04±0.05
		Y	2.09±0.19	332.08±5.11	-0.34±0.06
		Z	1.86±0.20	45.92±5.97	-0.27±0.07
	(F) Jason-1/2	X	0.95±0.15	90.92±9.59	-0.03±0.05
		Y	2.14±0.17	334.04±4.63	0.19±0.06
		Z	2.31±0.16	60.69±4.03	-0.08±0.05

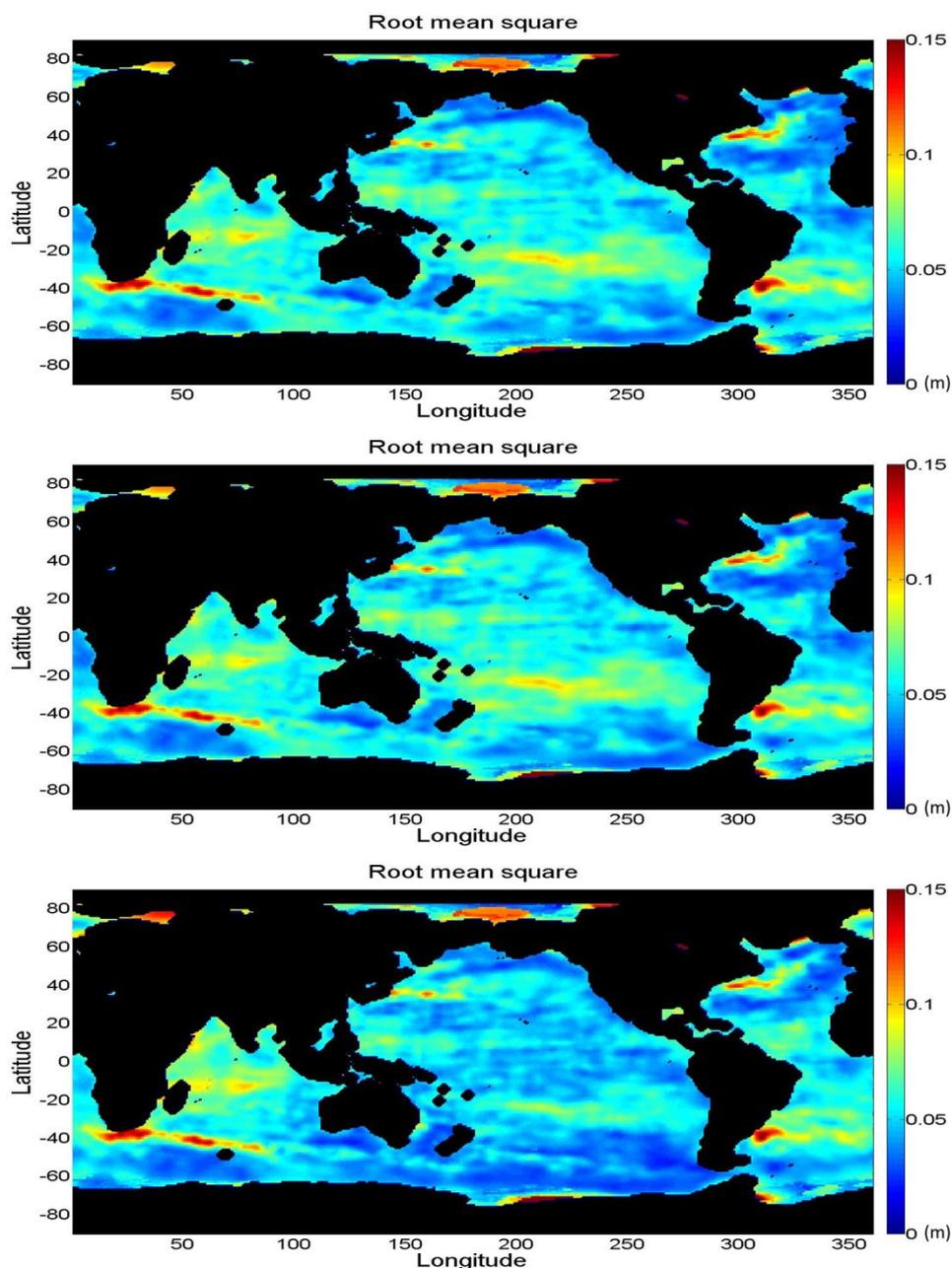


圖 2 GRACE 重力場解結合不同一階項與 Envisat 測高所計算海水質量變化差值之均方根值(海岸 300 公里內之資料已移除)。上圖：GRACE 2-60 階重力場解，中圖：GRACE 2-60 階重力場解結合 Swenson et al. (2008) 計算之一階項，下圖：GRACE 2-60 階重力場解結合本研究計算之一階項 (成果 (E))。

GRACE 重力場解的空間解析度為數百公里，當計算區域靠近海洋和陸地交界處時，由於陸地質量變化訊號較海洋質量變化訊號劇烈，所計算之海洋質量變化在靠近海岸處會產生洩漏效應。洩漏效應是指因計算範圍內之訊號大小分佈不均勻，例如陸地訊號遠大於海洋訊號，而導致沿

海地區之海洋訊號受到陸地訊號影響被放大而與真實情況不符。洩漏效應依訊號流動方向可分為 leakage-in effects (訊號自區域外流入) 以及 leakage-out effects (訊號自範圍內流出)。為探討洩漏效應對於地心變動估計之影響，本研究分別將距海岸線 300 公里或 600 公里內之海洋資料移除，

並與未移除資料之估計成果相比較。此外，本研究亦利用 GMT 軟體(張力係數為 0.25) 進行內插，分別內插補回距海岸線 300 公里或 600 公里內資料後進行計算。測試結果發現(如表 3 所示)，移除距海岸 300 與 600 公里內資料與未移除資料之結果在 Z 軸分量上之年週期振幅、相位、趨勢速率變化差異較大，可能由於移除了南極洲和格陵蘭等附近海域較大海水質量變化資料所致。由表 3 中亦可得知，當加回內插資料與原始成果相比較時，年週期相位在三軸分量上並無明顯變化，但在 Z 軸分量之年週期振幅則由 1.86 mm 增加至 2.99 mm (300 公里(補回))及 2.69 mm (600

公里(補回))，趨勢速率也增加約一倍，但與未補回資料相同，推論應為內插之後北極海周圍變化較大區域之訊號消失所導致。另外，衛星測高在北極海域因為受到海冰覆蓋影響造成觀測量精度較低，故亦會影響 Z 分量之計算結果。

本研究亦測試表 1 中不同 PGR 一階項對於地心變動估算之影響，由成果可知，PGR 一階項對地心變動計算之影響僅反應於地心變動之趨勢速率上(如表 4 所示)，而年週期振幅和相位則完全不變。表 4 中無論是以海洋模型或測高資料進行地心變動估計，計算之地心變動趨勢改變量約為 PGR 一階項之 80%。

表 3 結合 GRACE 與 Envisat 測高估算之地心變動 X、Y、Z 三軸分量(未移除資料、移除海岸線 300 公里內海洋資料及內插補回、移除海岸線 600 公里內海洋資料及內插補回)

移除距離 (km)		0	300	300 (補回)	600	600 (補回)
Annual Amplitude (mm)	X	0.93±0.16	1.05±0.16	1.17±0.18	1.11±0.18	1.15±0.32
	Y	2.09±0.19	2.25±0.19	2.36±0.21	2.29±0.19	2.58±0.38
	Z	1.86±0.20	2.54±0.23	2.99±0.23	2.30±0.25	2.69±0.33
Annual Phase (°)	X	67.28±9.92	71.27±8.64	69.95±8.83	74.76±9.22	62.06±15.94
	Y	332.08±5.11	334.47±4.72	336.83±5.11	326.97±4.82	342.49±8.34
	Z	45.92±5.97	59.45±5.21	55.02±4.41	72.72±6.42	58.76±7.03
Trend (mm/yr)	X	0.04±0.05	0.09±0.05	0.02±0.06	0.10±0.06	0.02±0.11
	Y	-0.34±0.06	-0.44±0.06	-0.35±0.07	-0.42±0.06	-0.41±0.13
	Z	-0.27±0.07	-0.53±0.08	-0.50±0.08	-0.46±0.09	-0.64±0.11

表 4 估計地心變動 X、Y、Z 三軸之變化趨勢(mm/yr) (分別加入表 1 中 PGR0 至 PGR5 改正)

		PGR0	PGR1	PGR2	PGR3	PGR4	PGR5
ECCO	X	-0.14±0.04	-0.14±0.04	-0.23±0.04	-0.32±0.04	-0.40±0.04	-0.49±0.04
	Y	0.01±0.03	0.01±0.03	-0.08±0.03	-0.17±0.03	-0.27±0.03	-0.36±0.03
	Z	-0.19±0.06	0.06±0.06	-0.46±0.06	-0.65±0.06	-0.83±0.06	-1.01±0.06

Envisat	X	0.04±0.05	0.04±0.05	-0.04±0.05	-0.12±0.05	-0.20±0.05	-0.28±0.05
	Y	-0.34±0.06	-0.34±0.06	-0.42±0.06	-0.50±0.06	-0.59±0.06	-0.67±0.06
	Z	-0.27±0.07	-0.35±0.07	-0.52±0.07	-0.68±0.07	-0.85±0.07	-1.02±0.07

PGR 一階項之影響不可忽略。

5. 結論與建議

本研究成功地結合 GRACE 重力場解和衛星測高或海洋模型資料估計地球地心變動，結合 GRACE 與海洋模型所計算之成果與 Swenson et al.(2008) 結果相符合，但與結合 GRACE 與衛星測高資料之結果有所差異，可能造成原因為衛星測高資料與海洋模型涵蓋海洋範圍不同且兩者皆包含觀測誤差所致。此外，兩資料之參考框架分別為 CF 與 ITRF 框架，而兩框架原點間存在一偏差量，也可能造成此差異，但因為海洋模型精度無法評估，故無法對 ITRF 和 CF 間的偏差量進行估計。目前估計之地心變動趨勢速率因資料涵蓋時間較短，誤差較大，若為來能精確評估地心變動速率，其結果可用來計算冰原或冰山融化之效應。

本研究亦分析洩漏效應對於地心變動估計之影響，結果發現洩漏效應對地心變動計算之三軸分量均有影響，其中以 Z 分量之影響最大，推論因為格陵蘭和南極洲附近海域因陸地冰原大量融化造成不可忽略之洩漏效應，此外此差異量也可能因北極海域因海冰覆蓋導致測高資料精度較差所致，因此如何解決有效解決洩漏效應為下一階段的研究工作，可參考 Guo et al. (2010) 方法進行。PGR 一階項對地心變動計算之影響僅反應於地心變動趨勢上，速率影響量約為 PGR 一階項改正量之 80%。Klemann and Martinec (2009) 指出 PGR 一階項對地心變動 X、Y、Z 分量之影響分別為 -0.13 mm/yr、0.33 mm/yr、-0.81 mm/yr，因此結合 GRACE 重力場解和海洋質量變化資料計算地心變動時，

6. 參考文獻

- 尤瑞哲，測量座標系統第二版，國立成功大學測量與空間資訊學系，2009。
- 鐘子淵，利用 GRACE、測高資料、海洋模型估計地心變動，國立成功大學測量與空間資訊學系，碩士論文，2012。
- Blewitt, G., and Clarke, P., Inversion of Earth's changing shape to weigh sea level in static equilibrium with surface mass redistribution, *J. Geophys. Res.*, 108(B6), 2311, doi: 10.1029/2002JB002290, 2003.
- Blewitt, G., Altamimi Z., Davis J., Gross R., Kuo C., Lemoine F., Moore A., Neilan R., Plag H.P., Rothacher M., Shum C., Sideris M.G., Schöne T., Tregoning P., and Zerbini S., *Geodetic Observations and Global Reference Frame Contributions to Understanding Sea-Level Rise and Variability*, Proc. the WCRP Workshop 'Understanding sea level rise and variability', eds. J. Church, P. Woodworth, T. Aarup and S. Wilson et al., Blackwell Publishing, Inc., 2009.
- Bouillé, F., Cazenave, A., Lemoine, J. M., and Cretaux, J. F., Geocentre motion from the DORIS space system and laser data to the Lageos satellites: Comparison with surface loading data, *Geophys. J. Int.*, 143, 71–82, 2000.
- Chambers, D. P., Tamisiea, M. E., Nerem, R. S., and Ries, J. C., Effects of ice

- melting on GRACE observations of ocean mass trends, *Geophys. Res. Letts.*, 34, L05610, doi: 10.1029/2006GL029171, 2007.
- Chambers, D. P., Observing seasonal steric sea level variations with GRACE and satellite altimetry, *J. Geophys. Res.*, 111, C03010, doi:10.1029/2005JC002914, 2006.
- Chambers, D., Wahr, J., and Nerem, R.S., Preliminary observations of global ocean mass variations with GRACE, *Geophys. Res. Letts.*, 31, L13310, doi:10.1029/2004GL020461, 2004.
- Chen, J. L., Wilson, C. R., Tapley, B. D., and Ries, J. C., Low degree gravitational changes from GRACE: Validation and interpretation, *Geophys. Res. Letts.*, 31, L22607, doi: 10.1029/2004GL021670, 2004.
- Chen, J. L., Wilson, C. R., Eanes, R. J., and Nerem, R. S., Geophysical interpretation of observed geocenter variations, *J. Geophys. Res.*, 104 (B2), 2683–2690, 1999.
- Cheng, M., and Tapley, B. D., Variations in the Earth's oblateness during the past 28 years, *J. Geophys. Res.*, 109, B09402, doi:10.1029/2004JB003028, 2004.
- Cretaux, J.-F., Soudarin, L., Davidson, F. J. M., Gennaro, M.-C., Berge-Nguyen, M., and Cazenave, A., Seasonal and interannual geocenter motion from SLR and DORIS measurements: Comparison with surface loading data, *J. Geophys. Res.*, 107(B12), 2374, doi: 10.1029/2002JB001820, 2002.
- Davis, J. L., Elósegui, P., Mitrovica, J. X., and Tamisiea, M. E., Climate-driven deformation of the solid Earth from GRACE and GPS, *Geophys. Res. Letts.*, 31, L24605, doi: 10.1029/2004GL021435, 2004.
- Dong, D., Dickey, J. O., Chao, Y., and Cheng, M. K., Geocenter variations caused by atmosphere, ocean and surface ground water, *Geophys. Res. Letts.*, 24(15), 1867–1870, 1997.
- Eanes, R. J., Kar, S., Bettadpur, S. V., and Watkins, M. M., Low frequency geocenter motion determined from SLR tracking (abstract), *Eos Trans. AGU*, 78(46), Fall Meet. Suppl., F146, 1997.
- Gill, A. E., *Atmosphere-Ocean Dynamics*, Academic Press, New York, 1982.
- Guo, J. Y., Li, Y. B., Huang, Y., Deng, H. T., Xu, S. Q., and Ning, J. S., Green's function of the deformation of the Earth as a result of atmospheric loading, *Geophys. J. Int.*, 159, 53–68, doi:10.1111/j.1365-246X.2004.02410.x, 2004.
- Guo, J. Y., Duan, X.J., and Shum, C.K., Non-isotropic Gaussian Smoothing and Leakage Reduction for Determining Mass Changes over Land and Ocean using GRACE data, *Geophys. J. Int.*, 181, 290–302. doi: 10.1111/j.1365-246X.2010.04534.x, 2010.
- Ishii, M., and Kimoto, M., Reevaluation of historical ocean heat content variations with time-varying XBT and MBT depth bias corrections, *J. Oceanogr.*, 65, 287–299, doi: 10.1007/s10872-009-0027-7, 2009.
- Kang, Z., Tapley B., Chen J., Ries J., and

- Bettadpur, S., Geocenter variations derived from GPS tracking of the GRACE satellites, *J. Geod.*, 83, 895–901, doi: 10.1007/s00190-009-0307-4, 2009.
- Klemann, V., and Martinec, Z., Contribution of glacial-isostatic adjustment to the geocenter motion, *Tectonophysics*, doi: 10.1016/j.tecto.2009.08.031, 2009.
- Kuo, C. Y., Shum, C. K., Guo, J. Y., Yi, Y., Braun, A., Fukumori, I., Matsumoto, K., Sato, T., and Shibuya, K., Southern Ocean Mass Variation Studies Using GRACE and Satellite Altimetry, *Earth Planets and Space*, 60, 477–485, 2008.
- Kusche, J., and Schrama, E. J. O., Surface mass redistribution inversion from global GPS deformation and Gravity Recovery and Climate Experiment (GRACE) gravity data, *J. Geophys. Res.* 110, B09409, doi: 10.1029/2004JB003556, 2005.
- Kuzin S. P., Tatevian, S. K., Valeev, S. G., and Fashutdinova, V. A., Studies of the geocenter motion using 16-years DORIS data, *Advances in Space Research*, 46(10), 1292-1298, doi: 10.1016/j.asr.2010.06.038, 2010.
- Munekane H., Ocean mass variations from GRACE and tsunami gauges, *J. Geophys. Res.*, 112, B07403, doi:10.1029/2006JB004618, 2007.
- Paulson A., Zhong, S. and Wahr, J., Inference of mantle viscosity from GRACE and relative sea level data, *Geophys. J. Int.*, 171, 497–508, doi: 10.1111/j.1365-246X.2007.03556.x, 2007.
- Swenson S., Chambers, D. P. and Wahr, J., Estimating geocenter variations from a combination of GRACE and ocean model output, *J. Geophys. Res.*, 113, B08410, doi: 10.1029/2007JB005338, 2008.
- Tapley, B. D., Bettadpur, S., Ries, J. C., Thompson, P. F., and Watkins, M. M., GRACE measurements of mass variability in the Earth system, *Science*, 305, 503–505, 2004a.
- Tapley, B. D., Bettadpur, S., Watkins, M., and Reigber, C., The Gravity Recovery and Climate Experiment: Mission overview and early results, *Geophys. Res. Letts.*, 31, L09607, 10.1029/2004GL019920, 2004b.
- Thomas, M., Ocean induced variations of Earth's rotation - Results from a simultaneous model of global circulation and tides, PhD dissertation, University of Hamburg, Germany, 129, 2002.
- Wahr, J., Molenaar, M., and Bryan, F., Time variability of the Earth's gravity field: Hydrological and oceanic effects and their possible detection using GRACE, *J. Geophys. Res.*, 103(B12), 30205–30229, 1998.
- Wahr, J., Swenson S., Zlotnicki V., and Velicogna I., Time-variable gravity from GRACE: First results, *Geophys. Res. Letts.*, 31, L11501, doi: 10.1029/2004GL019779, 2004.
- Wang, L., Shum, C.K., Simons, F. J., Tassara, A., Erkan, K., Jekeli, C., Braun, A., Kuo, C. Y., Lee, H., and Yuan, D. N., Coseismic slip of the 2010 Mw 8.8 Great Maule, Chile, earthquake quantified by the inversion of GRACE

- observations, *Earth & Planet. Sci. Letts.*, 335-336, 167-179, 2012a.
- Wang, L., Shum, C. K., Simons, F. J., Tapley, B., and Dai, C., Coseismic and postseismic deformation of the 2011 Tohoku-Oki earthquake constrained by GRACE gravimetry, *Geophys. Res. Letts.*, 39, L07301, doi:10.1029/2012GL051104, 2012b.
- Wu, X. P., Heflin, M. B., Ivins, E. R., and Fukumori, I., Seasonal and interannual global surface mass variations from multisatellite geodetic data, *J. Geophys. Res.*, 111, B09401, doi: 10.1029/2005JB004100, 2006.
- Wu, X. P., Heflin, M. B., Schotman, H., Vermeersen, B. L. A., Dong, D., Gross, R. S., Ivins, E. R., Moore, A. W., and Owen, S. E., Simultaneous estimation of global present-day water transport and glacial isostatic adjustment, *Nature Geoscience*, 3, 642–646, doi: 10.1038/NGEO938, 2010.
- Wu, X. P., Ray, J. and Dam, T., van, Geocenter motion and its geodetic and geophysical implications, *J. Geodyn.*, 58, 44–61, doi:10.1016/j.jog.2012.01.007, 2012.

Estimation of Geocenter Motions Using GRACE Satellite Altimetry and Ocean Models

Tzu-Yuan Chung¹ Chung-Yen Kuo^{2*} Wen-How Lan³ C K Shum⁴

Geocenter motion, defined as the motion of center of mass (CM) of the Earth relative to the center of figure (CF), reflects the mass redistribution in Earth system, so accurately estimated geocenter motion has a significant contribution for understanding the mass variation of the Earth. In the study, geocenter motions are determined accurately using the combination of GRACE gravity solutions with altimeter observations or ocean models. The estimates derived from the combination of GRACE and ocean models agree well with previous researches. However, since the altimeter measurements refer to International Terrestrial Reference Frame (ITRF), which is different from CF, and data and models also contain errors, estimated geocenter motions from the combination of GRACE and altimeter data show the discrepancies compared to previous studies, especially in phases and trends. The study also analyzes the impacts of leakage effects and the degree one coefficients of Post-Glacial Rebound (PGR) on determining geocenter motions. The result shows that leakage effects have to be considered in computation. When non-zero degree one coefficient of PGR is applied, only about 80% of the change of assumed degree one PGR reflects on the trend of the estimated geocenter motion.

Keywords: geocenter motion, satellite altimetry, GRACE, ocean model

¹Department of Geomatics, National Cheng Kung University,
Master student

²Department of Geomatics, National Cheng Kung University,
Professor

³Department of Geomatics, National Cheng Kung University,
PhD student

⁴Division of Geodetic Science, School of Earth Sciences, Ohio
State University, Professor

*Corresponding author: Email: kuo70@mail.ncku.edu.tw

Received Date: Feb. 20, 2014

Revised Date: Mar. 27, 2014

Accepted Date: Apr. 15, 2014

中文稿件投稿注意事項（英文稿件請參閱下頁 Author Guidelines）

本學刊定期出版攝影測量及遙感探測領域之學術論著、技術短文及應用性報導。所收錄之稿件皆須通過本編輯委員會安排之專家學者審查程序，並由通訊作者簽署著作權讓渡書。作者可自行聲明文稿屬學術論著、技術短文或應用性報導之類別，但本編輯委員會將依據審查委員意見決定收錄文稿之類別。本學刊不接受已經刊載過之文稿，於研討會發表過之論文，經適當增補其內容者為例外。

投稿之電子郵件信箱地址為 jprsubmit@gmail.com，請以電子郵件附件方式寄送稿件之 WORD 檔及 PDF 檔各一份。為便利編審作業，請於稿件 PDF 檔中移除作者之相關資料（如姓名、服務機關、電話、及電子郵件信箱等）。稿件撰寫要點如下：

1. 頁面：採用 A4 規格頁面。
2. 字體：(1) 中文均以新細明體橫式打字；(2) 英文均以 Times New Roman 字體橫式打字。
3. 單位：內文、圖表及符號中之度量單位皆採用 SI 公制單位。
4. 首頁：首頁應含內容依次為「題目、作者姓名、摘要、關鍵詞、及作者服務機關及職稱（置於頁尾）」，接續文稿內文。
5. 末頁：末頁應含內容與首頁相同，但皆以英文書寫。
6. 題目：論文題目宜簡明，字體大小為 20，英文題目每字第一位字母以大寫字體打印。
7. 作者：作者姓名列於題目之下方，字體大小為 14，其服務機關及職稱以^{1,2,...}上標編號註記於頁尾，字體大小為 12。
8. 摘要：摘要字數以 250 字為限，字體大小為 12。
9. 關鍵詞：列出三至五個關鍵詞，字體大小為 12。
10. 章節及標題：(1) 章節標題置中，編號一律為阿拉伯數字，如 1, 2, ...，標題字體大小為 18；(2) 小節標題靠左，編號一律為 1.1, 1.2, 1.1.1, 1.1.2.....，字體大小為 14。
11. 內文：內文之長度(含圖表)以不超過 25 頁為原則，各段落第一行應縮排，字體大小為 12。
12. 數學式：所有數學式均須標式號於圓括弧內，數學式內所有符號須於符號第一次出現時，應於數學式下方逐一加以定義。
13. 圖及影像：(1) 圖及影像均須數位化置於文稿中適當位置；(2) 所有圖及影像下方須附圖流水編號及說明；(3) 本刊接受彩色圖及影像，但紙版印刷一律採灰階印刷。
14. 表格：(1) 表格均須數位化置於文稿中適當位置；(2) 所有表格上方須附表流水編號及說明；(3) 本刊接受彩色表格，但紙版印刷一律採灰階印刷。
15. 參考文獻：(1) 參考文獻應列於文末，文稿中未直接引用者不得列入；(2) 先排列中文參考文獻，再排列英文參考文獻，其他文字參考文獻列於英文參考文獻之後；(3) 中文參考文獻以第一作者姓名筆劃順序排列，英文參考文獻以第一作者之姓依英文字母順序排列。當作者相同時，依發表年代排列，作者及發表年代完全相同時，依日期在年代後加以 a, b, c 順序。第一作者姓名相同時，先排列單一作者之參考文獻，其次為多作者文獻；(4) 參考文獻之格式如下列：
 - 期刊論文：作者姓名，年代。文章標題，期刊名稱，卷數(期數)：起始頁數—結束頁數。
 - 書籍：作者姓名，年代。書名，出版者，出版地。
 - 論文集：作者姓名，年代。篇名，論文集名稱，發表地點，卷(期)：起始頁數—結束頁數。
16. 參考文獻引用：(1) 作者為一人時，以作者全名(中文文獻)或姓(英文文獻)及發表年代，如李良輝(1991)或(李良輝，1991)、Jones (1979)或(Jones, 1979)；(2) 作者為二人時，以二作者全名(中文文獻)或姓(英文文獻)及發表年代，如施學延及陳良健(2011) 或(施學延及陳良健，2011)、Jones & Smith (1979)或(Jones & Smith, 1979)；(3) 作者為多人時，以第一作者全名(中文文獻)或姓(英文文獻)，之後加「等」(中文文獻)或「et al.」(英文文獻)及發表年代，如(郭寶章等，1976)或郭寶章等(1976)、Jones et al. (1979)或(Jones et al., 1979)；(4) 作者及發表年代完全相同時，依日期在年代後加以 a, b, c 引用，如 Jones & Smith (1979a)、Jones & Smith (1979b)。

Author Guidelines

The Journal of Photogrammetry and Remote Sensing periodically publishes academic articles, technical short papers and application reports addressing topics in photogrammetry and remote sensing. Acceptance of submitted manuscripts for publication is based on a peer-reviewing process arranged by the editorial board. A manuscript will not be formally accepted until a copyright agreement is received. Although authors can indicate their submitted manuscripts belonging to one of the categories of academic articles, technical short papers or application reports, the editorial board will make the final decision based on the suggestions of reviewers. This journal does not accept any paper has ever been published, but a paper only published in conference proceedings and revised appropriately is an exception.

The E-mail address for manuscript submission is jprsubmit@gmail.com. Please send your manuscript in both WORD and PDF formats via e-mail attachments. In the WORD file, please provide author information. However, for blind reviewing, please eliminate author information in the PDF file. Instructions for authors to prepare a manuscript are as follows:

1. Typing format: Manuscripts should be typed single-column and double-space on A4 page size using font-type of 12pt **Times New Roman**. The pages should be numbered.
2. Units: Manuscripts must use SI (Metric) units in text, figures, or tables.
3. Cover page: The cover page should contain manuscript title, author names, abstract, key words, and author affiliations.
4. End page: The end page contains the same information as the cover page, but in Chinese.
5. Title: The title of the manuscripts should be concise and informative. Please use font size of 20pt and capitalize the initial letter of each word in the title.
6. Authors: Authors names (using font size of 14pt) are listed below the title, affiliations (using font size of 12pt) are listed at the end of the first page marked with ^{1,2,...}.
7. Abstract: The abstract should be shorter than 250 words and typed using font size of 12pt..
8. Keywords: Keywords (no more than 5 words) should be given and placed below the abstract.
9. Sections and Sub-sections: Section heading (using font size of 18pt) should be centered and numbered in 1, 2... etc. Sub-sections (using font size of 14pt) are justified to the left in 1.1, 1.2, 1.1.1, 1.1.2...etc.
10. Paper length: Published papers are limited to 25 pages.
11. Equations: Type formulae and equations clearly in black and numbered in curved brackets. All symbols in equations should be clearly defined when they firstly appear in the manuscripts.
12. Figures and Tables: Figures and tables are numbered and described in short. When papers are accepted, original figures, tables, and photographs are expected for reproduction. Color figures and tables are acceptable in digital version, but they will be printed in gray levels in hard copies.
13. References: Only works cited in the text will be included. References should be cited in the text by giving the last name of the author(s) and the year of publication of the reference, such as Lee and Huang (1979) or (Lee and Huang, 1979). With three or more names use the form "Huang *et al.* (1995) or (Huang *et al.*, 1995)" in the text. When two or more references have the same text identification, please distinguish them by appending "a", "b", etc., to the year of publication. References should include the complete title(s), the number of the volume and the page(s) of the information cited. References should be listed in alphabetical order, according to the last name of the first author, at the end of the paper.

第 二 十 卷 第 一 期
中 華 民 國 一 零 五 年 一 月

航測及遙測學刊

(大尺度遙感探測專刊)

目錄

專刊引言

大尺度遙感探測

(陳良健)

學術論著

- 以 MODIS 時序資料分析台灣植被物候空間分布
(張仲德、黃倬英).....1
- 利用 MODIS 時序影像進行下湄公河盆地稻作區域監測初探
(陳正儒、陳繼藩、阮天祥、張立雨、林雅文)17
- 都市熱島效應於產業發展及其影響因子分析之研究
(楊龍士、楊倍航、何佳薇、葉美伶、周天穎)33
- 應用衛星影像測繪南海島礁
(劉建良、陳良健、王成機、徐偉城).....49
- 利用 GRACE、衛星測高、海洋模型估計地心變動
(鍾子淵、郭重言、藍文浩、沈嗣鈞)69

Volume 20 No. 1
January 2016

Journal of Photogrammetry and Remote Sensing

(Special Issue on Large Scale Remote Sensing)

CONTENTS

Introduction to the Special Issue

Large Scale Remote Sensing
(Liang-Chien Chen)

Special Issue Papers

- Spatial patterns of vegetation phenology based on MODIS time-series data in Taiwan applying
(Chung-Te Chang and Cho-Ying Huang)**1**
- Delineating Rice Cropping Activities from MODIS Time-series Data in the Lower Mekong Basin
(Cheng-Ru Chen, Chi-Farn Chen, Nguyen-Thanh Son, Li-Yu Chang and Ya-Wen Lin).....**17**
- The Study of Urban Heat Island Effect Change and Contribution Factors in Taichung City
(Lung-Shih Yang, Pei-Hang Yang, Chia-Wei Ho, Mei-Ling Yeh and Tine-Yin Chou) ...**33**
- Island Mapping for South China Sea Using Satellite Images
(Chien-Liang Liu, Liang-Chien Chen, Cheng-Gi Wang and Wei-Chen Hsu)**49**
- Estimation of Geocenter Motions Using GRACE Satellite Altimetry and Ocean Models
(Tzu-Yuan Chung, Chung-Yen Kuo, Wen-How Lan, C. K. Shum) **69**