

第十七卷第一期
中華民國一〇二年三月

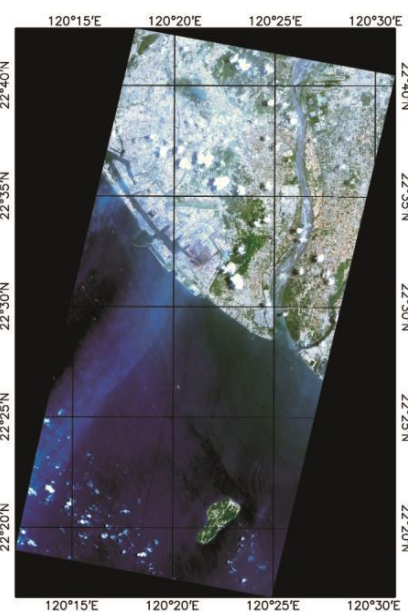
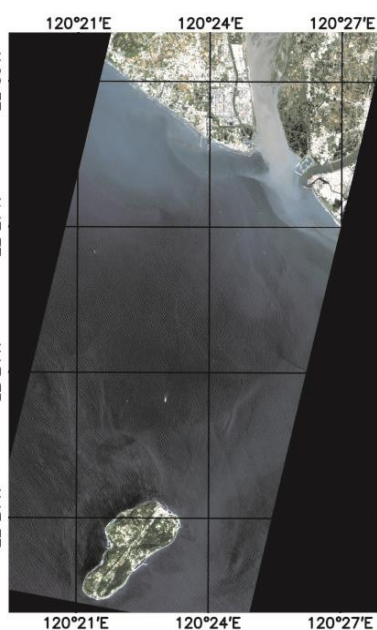
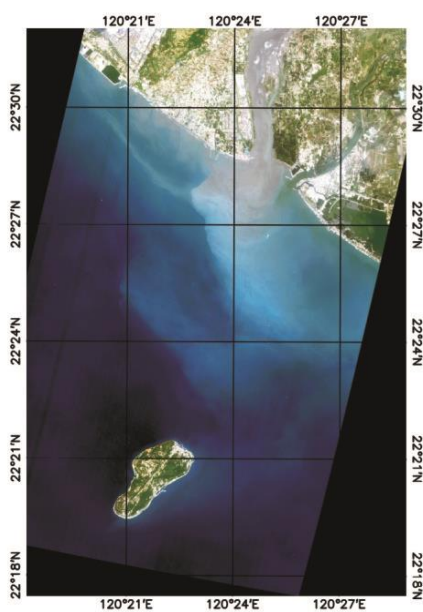
ISSN 1021-8661



航測及遙測學刊

中華民國航空測量及遙感探測學會出版

水資源遙測專刊



Journal of Photogrammetry and Remote Sensing

Volume 17 No.1

March

2013

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：陳良健

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

總編輯

曾義星

國立成功大學測量及空間資訊學系

電話：886-6-275-7575 分機 63835

傳真：886-6-237-5764

電子信件：jprssubmit@gmail.com

編輯委員

◆ 農林

鄭祈全 (文化大學)

申雍 (中興大學)

◆ 海洋與大氣

劉振榮 (中央大學)

何宗儒 (台灣海洋大學)

◆ 防災

劉進金 (達雲科技有限公司)

徐百輝 (台灣大學)

◆ 土地利用與覆蓋

陳永寬 (銘傳大學)

詹進發 (政治大學)

◆ 地理資訊系統

何維信 (中華科技大學)

蔡榮得 (中興大學)

◆ 遙感探測

陳良健 (中央大學)

陳錕山 (中央大學)

◆ 攝影測量與光達

廖揚清 (成功大學)

史天元 (交通大學)

趙鍵哲 (台灣大學)

PUBLISHER: L. C. Chen

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

EDITOR-IN-CHIEF

Yi-Hsing Tseng

Department of Geomatics, National Cheng Kung University

Tel: 886-6-275-7575 ext. 63835

Fax: 886-6-237-5764

E-Mail: jprssubmit@gmail.com

EDITORIAL BOARD

◆ Agriculture and Forestry

C. C. Cheng (Chinese Culture University)

Y. Shen (National Chung Hsing University)

◆ Oceanography and Atmospheric Science

G. R. Liu (National Central University)

C. R. Ho (National Taiwan Ocean University)

◆ Disaster Management

J. K. Liu (LIDAR Technology Co., Ltd)

P. H. Hsu (National Taiwan University)

◆ Land Cover and Land Use

Y. K. Chen (Ming Chuan University)

J. F. Jan (National ChengChi University)

◆ Geographical Information System

W. H. Ho (China University of Science and Technology)

J. D. Tsai (National Chung Hsing University)

◆ Remote Sensing

L. C. Chen (National Central University)

K. S. Chen (National Central University)

◆ Photogrammetry and LiDAR

Y. C. Liao (National Cheng Kung University)

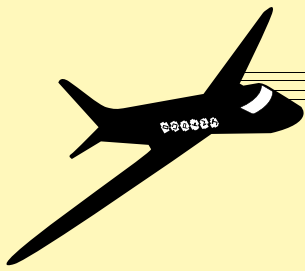
T. Y. Shih (National Chiao Tung University)

J. J. Jaw (National Taiwan University)

封面圖片說明 About the Cover

海洋沿岸水體是漁場、港灣、遊憩及珊瑚礁等重要海洋資源分佈所在，同時也是最容易受人為污染及陸源物質輸送影響的水質敏感區。從封面的福衛二號 8 公尺解析度多期影像可發現陸源輸送在高屏河口到小琉球間形成含有高濃度懸浮物質的沖淡水團，且水團型態受降雨、河川流量、潮汐及沿岸流場之作用影響，具有顯著的時空分佈特徵。(封面福衛二號影像為國家太空中心提供，並由國立成功大學全球觀測與資料分析中心加值處理完成)。

(封面圖片出處：結合 MODIS 與 Formosat-2 光學影像建立高屏河口及沿岸水體高時空分辨率總懸浮物質濃度估算公式，第十七卷 第一期 第 53-65 頁)



特刊引言 水資源遙感探測

游保杉
國立成功大學工學院

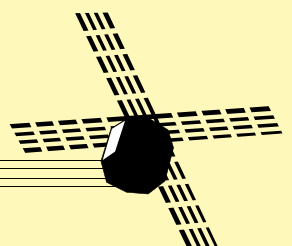
水是生命形成的重要因素，也是人類文明發軔的起源。從大禹治水、尼羅河洪泛，到「深淘灘、淺作堰」的都江堰、八田與一修建的嘉南大圳，水資源之成功應用可說是成就人類文明與文化發展之基石。由於台灣面臨多自然災害的環境，無論是大雨導致之淹水或山崩地滑，或是缺水導致的限水，均對人民福祉與國家經濟產生重大影響。水資源議題之重要性，不言可喻。本特刊旨在介紹衛星遙測與水資源的整合，期待未來有更深入跨領域研究成果，對水資源與防災更具體貢獻。

水資源議題之探討有多重面向，由氣象、氣候、以及全球變遷，到土地使用型態改變導致逕流特性轉換、地形變化導致沖刷淤積之行為變化，均屬於水資源議題。遙感探測具有掌握高時空分辨率之特性，提供水資源研究有效資訊，無論是光學型感測器或微波型感測器，均是現代所有與地理空間相關研究之重要一環。航測及遙測學刊乃中華民國航空測量及遙感探測學會所發行之專業期刊，基於推廣航測及遙測技術應用於水資源環境調查及分析之研究，乃規劃出版「水資源遙測」專刊。水資源之應用課題眾多，本特刊所刊載者為林林總總多樣研究中之部分議題。本刊所載者計五篇，其篇名依序為：

- 應用遙測偵測鹽水溪上游土地利用改變及其對逕流之影響；
- 整合遙測資訊於山區雨量推估；
- 運用福衛二號高時空分辨率多光譜影像於台灣全島崩塌地判釋與災害分析；
- 結合MODIS 與Formosat-2 光學影像建立高屏河口及沿岸水體高時空分辨率總懸浮物質濃度估算公式；
- 應用MODIS 影像反演土壤含水率-以泰國MaeSa集水區為例。

這五篇論文所探討之課題各異，反映出航測及遙測技術應用於水資源環境調查及分析之多樣性。而這五項研究，因應課題之差異，所探討之尺度亦有所不同。第一篇與第五篇，均以集水區為對象。相對應者，第四篇針對較小之特定區域，第三篇則涵蓋全台灣。以感測器性質而言，除第二篇使用微波外，其餘諸篇均以使用光波波段為主。而就使用光波波段感測器者，第四、五兩篇著重於構建模式反演，第一、三篇則應用到分類與辨識之技術。這五篇論文所探討之課題，最終均與水資源管理以及防災議題相關聯。

水資源之適當管理與妥善應用，是人類趨福避禍之重要環節。如何充分應用太空科技，了解環境、認識環境、因應環境，是一個嚴肅的課題，願本特刊之編印，能對航測及遙測技術應用於水資源環境調查及分析提供參考案例，並由而達成促進之功能。本特刊中諸項研究所使用之數據，AVHRR、LANDSAT、MODIS，均無資料獲取費用之需求。因此，瓶頸實為研究分析之人力與創意。



應用遙測偵測鹽水溪上游土地利用改變及其對逕流之影響

王毓麒^{1*} 郭俊超² 游保杉³

摘 要

臺灣由於經濟發展形成流域內土地都市化嚴重；而都市化對流域內洪水影響程度，是極需探討的主題。本文以鹽水溪流域豐化橋以上集水區為研究區域，探討土地利用改變，對都市化後水文歷線及蓄洪能力之影響。本文利用主題圖切除配合監督式分類之方法，針對 1972 年 Landsat MSS 影像及 2000 年 SPOT 影像，進行土地利用分類；並發現其中建築面積從 1972 到 2000 年增加約 1600 公頃。因研究區域包含平地及山區，故嘗試加入水筒模式，與過去可合理模擬山區；運動波理論建立之格網型降雨-逕流模式連結。經過 12 場歷史暴雨事件的率定，證實加入水筒模式可合理模擬降雨-逕流關係；進一步利用此分布型降雨-逕流模式，探討土地利用改變對蓄洪能力之影響程度；結果發現集水區 10 年重現期距之設計洪水增加約 10%，可能增加淹水機率，應提出適當減洪措施以減少損失。

關鍵詞：遙感探測、次像元分類、土地利用變遷、水筒模式、降雨-逕流模式

1. 前言

鹽水溪流域在民國 90 年代有許多重大開發案，其中以台南科學園區之開發最為重要，其他相關都市計畫有新市擴大計畫、善化都市計畫及安定都市計畫等。台南科學園區原為地勢較低之低窪地且南側又有鹽水溪阻隔，先天排水條件較差，而園區開發後其地盤勢必填高，造成原來承納洪水之區域大幅縮減，將對其鄰近區域造成衝擊；而都市計畫之開發亦使原為農業使用為主之土地使用型態有所改變，此種人文發展所引發之水文影響，可能使地表逕流量及淹水機率增加。因此本研究目的主要利用衛星遙測評估土地使用變遷狀況，測試不同分類方法的正確性，最後探討土地利用改變對逕流之影響。

鹽水溪豐化橋以上之流域，在上游區主要為丘陵地；下游區域則坡度平緩，為主要之農作區及市區。流域整體而言除山區地形外另包含平地區域；

然而以運動波為基礎之降雨-逕流模式一般只適用在上游山區，若單只用適合山區之模式，除理論基礎不合理，也可能達不到較佳的模擬結果。因此本研究亦提出一個結合平地區域與山區之模式，以適當模擬此一包含平地及山區集水區之降雨-逕流行為。

近年來地理資訊系統與衛星遙測之發展，已提供水文學家對集水區特性了解，尤其在土地變遷上，如 Lambin & Ehrlich(1997) 應用遙測技術對 1982-1991 非洲地區探討土地覆蓋改變，採用日時間尺度的 AVHRR (Advanced Very High Resolution Radiometer) 衛星影像資料去分析，結果顯示由於氣候的易變性及季節溫度的變化，使大部分的土地改變涉及不規則的變化。周天穎(1998)則結合遙測、地理資訊系統及全球定位系統等技術分析土地利用變遷對水庫集水區之影響，並建立土地利用分析系統。郭振民(1999)則結合遙測、地理資訊系統及全球定位系統等技術，分析土地利用變遷和整合分

¹ 國家實驗研究院台灣颱風洪水研究中心 副研究員

² 亞伯特大學土木環境工程系 博士後研究員

³ 國立成功大學水利及海洋工程學系 教授

*通訊作者，電話：04-24608822 ext. 903, E-mail: yuchi@narl.org.tw

收到日期：民國 101 年 04 月 11 日

修改日期：民國 101 年 08 月 15 日

接受日期：民國 101 年 11 月 18 日

析相關地文資料，以便分布型降雨-逕流模式模擬，並可監測集水區土地使用對水文歷線的影響。簡甫任(2001)應用人工智慧的技術在偵測都市土地變遷上，將專家知識與經驗利用知識庫邏輯推論的機制，快速偵測土地利用變遷，同時探討多時段之土地利用變遷型態，架構出一套完整遙測影像分類與土地利用變遷偵測模式。呂秀慧(2001)針對頭前河流域，以五個時期夏季之 SPOT 影像進行變遷分析，利用 NDVI 分類及利用 NDVI 輔助原始光譜分類，並比較利用影像相減法所得之變遷成果。以上相關文獻顯示利用遙測技術對影像進行變遷偵測，為有效且普遍應用之方法，因此本文亦使用衛星影像，配合不同分類方法，進行研究區域之土地利用變遷分析。

2. 研究區域

位於台灣西南部之鹽水溪，於 72 年由次要河川改為主要河川；為本省二十一條主要河川之一，主流於安平港附近流入台灣海峽。鹽水河流域，北和曾文溪；南與二仁溪為鄰，整體呈現出東南高而西北低的地勢，幹流長約 41.3 公里，面積大約為

343 平方公里，流域遍及台南縣市 14 個鄉鎮市區，其流域概況如圖 1 所示。鹽水河流域平坦廣闊，交通相當發達，高速公路、縱貫鐵路及第二高速公路等穿越全境，為陸上主要交通幹線。自政府調整鹽水溪為主要河川後，於民國 90 年代陸續有重大工程與土地開發案於流域內進行，其中較為重要的乃新市鄉的臺南科學工業園區之開發。科工區內主要為積體電路、電腦及週邊設備、通訊、光電、精密機械和生物技術等高科技產業，但該園區地勢低窪，加上排水系統整治管理未趨完善，因此暴雨或颱風來臨時，常在該區形成淹水。目前雖以填高地基方式處理，但若周邊相關排水措施不夠完善，如此反而減少原來可承納洪水之地區；增加園區外周邊之淹水潛勢，甚至影響到已開發高科技廠區之排洪效率。而鹽水河流域水位-流量站僅存新市站乙站，由於降雨-逕流模式需流量站進行率定之工作，故本研究土地利用變遷及降雨-逕流分析之主要研究區域為新市站上游集水區(如圖 2 所示)，本區域之特色為上游為丘陵地多湖泊，下游為平地除新化等都市建築區域外，餘多為農業用地。

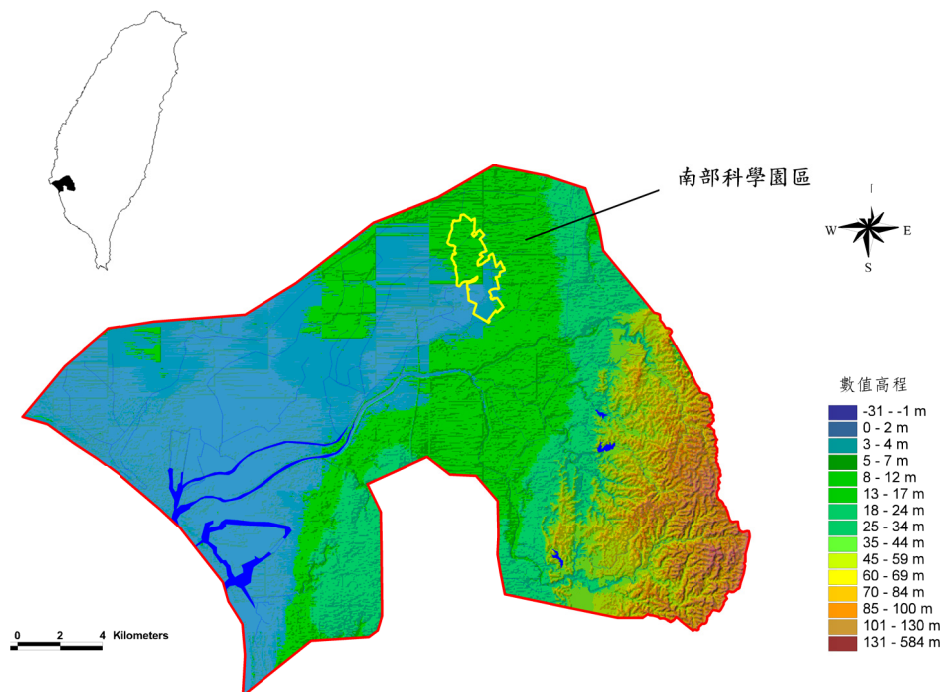


圖 1 鹽水河流域地形圖

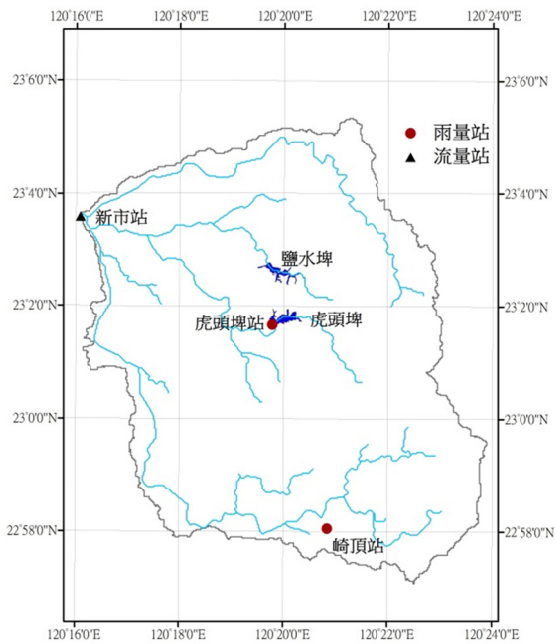


圖 2 新市站上游集水區概況圖

3. 土地利用變遷分析

欲比較不同時期的土地利用情形，必須選擇一個適當方法，對衛星影像做適當分析。傳統上應用遙測影像變遷方法，一般的方法有的有：影像差異法(image differencing method)、影像比例法(image rationing)、植生指數相減法(vegetation index method)、主成分分析法(principal component analysis)、分類後比較法(post-classification comparison)、向量變異分析法(change vector analysis)、K-S 檢定法(Kalmogorov-Smirnov Test)、多時段分類法(direct multideate classification)等(簡甫任，2001)。以上幾種方法，除分類後比較法及多時段分類法可判斷出分類後類別，其中多時段分類法需將兩張影像合併，不適合本研究中使用的不同解析度之影像圖。其餘之方法不進行土地利用分類大多僅利用影像差異大於某門檻值就判斷土地是否變遷。

分類後比較法是將兩時期的影像，根據地物不同的特性先各自進行適當分類，根據兩張影像圖各自分類後的結果，比較找出變遷的情況。由於此一方法分別針對兩個影像進行土地利用分類，可以減

少前後時期的大氣、太陽角度、植物生長狀況等之差異所造成的影響，鄧淑萍(2010)亦明確指出，分類後比較法可減少二期衛星影像不同的大氣狀況或不同感測器之誤差，因為各類別為獨立產生且製作成常見的分類主題圖，而其缺點是各影像分類誤差會累積而影響變遷分析結果，但對於本研究水文模擬影響並不大，因為水文模式是針對各時期分類的結果作為地文因子各自模擬，因此並不會有誤差累積之問題。

尤於本研究案例主要發生重大變遷時間約在民國 80~90 年代，缺乏較早的 SPOT 衛星影像資料情況下，不得已採用 Landsat MSS 及 SPOT 兩種不同衛星影像，其波段及解析度不同，不適合直接用兩張影像合併分析。在這種情況下，使用分類後比較法為兩張影像分別做分類辨識，具有減少兩時期不同大氣條件等影響，且可獲得個別的分類結果，以進一步比較土地利用變遷，因此本研究採用分類後比較法；另外兩不同時期的土地覆蓋，更可以提供降雨-逕流模式推算兩時期降雨-逕流行為所需之地文參數。

3.1 衛星影像與地真資料

為了解鹽水溪流域內較早年代之土地利用狀況，因此向中央大學太遙中心購買 1972 年 LANDSAT MSS 庫存衛星影像(圖 3(a))，雖然其解析度不如 Landsat TM 及 SPOT 影像，但其年代距今較久，實為土地利用變化前不可多得之珍貴參考資料。近年來國內已停止接收 LANDSAT TM 影像，而 SPOT 多光譜影像可提供較高空間解析力及較多取像區域，至目前為止可提供之影像數量達數十萬幅之多；且本研究區域主要變遷發生於民國 80~90 年代，因此採用 2000 年之 SPOT 衛星影像(圖 3(b))作為土地利用改變後之代表。另外為輔助 2000 年土地利用分類，另購買了一張 2001 年 SPOT 衛星影像(圖 4)，作為輔助分類水稻區域的影像資料。近年來，雖有更高解析度之 SPOT 5 及福衛二號影像可供選擇，但本研究主要目的乃探討 90 年代南科等重大土地開發案後對該區域逕流之影響，因此並未選用近期之影像。

在進行監督式分類之前，必須先瞭解實際的地真資料，才能根據已知的地真資料，進行訓練樣區的圈選；此外評估分類結果之精確度，亦需利用地真資料方可推求。1972 年 Landsat MSS 影像其年代久遠，實際的地表資料僅有航照圖，因此使用航照圖作為地真資料，而 2000 年 SPOT 影像則無適當航照圖做地真資料對應，因此進行現地調查，取得部分地真資料。在進行調查之前，先以既有的道路系統為基礎規劃適合的路線，以便對鹽水溪上游的土地覆蓋情形做深入的調查；本研究利用全球衛星定位系統(GPS：Global Positioning System)進行定位，拍下當地土地覆蓋情形並記錄座標。GPS 的定位方式是使用手持式 GPS 接收機，定位時須上空無遮蔽物，且接收到 4 顆衛星以上的訊號。接收器一般精度為 15 公尺，而本研究採用之 SPOT 衛星影像解析度為 12.5 公尺，因此在選擇樣區地點時，儘可能選擇較大面積且同一種類之區域，並在區域中心進行定位，如此則可減少 GPS 的誤差。現地調查對訓練樣區的圈選有相當大的幫助；大致上來說，平地區域建築物以外大多是農作，農作中又以水稻居多；丘陵山區大致上都是樹林、竹子，有農作的部分以鳳梨居多。經過此次現場調查，對流域內的地表覆蓋情形有深刻印象，對流域內的特徵也更能掌握。

3.2 傳統影像分類法

傳統影像分類法常用的有非監督式分類法(Unsupervised Classification)和監督式分類法(Supervised Classification)兩種，非監督式是依據使用者所定的分類數，利用群集分析方式計算各群集的平均值及標準差，逐一檢查影像各像元之光譜值，是否符合光譜最短距離之條件；經由反覆的群集切割或合併之分析計算，進行影像像元的群集歸類，以達到預定的分類數且達最高的光譜分離之目的。此方法其優點為單純利用統計方法進行分類，不需圈選訓練樣區，可減少監督式分類法中圈選訓練樣區之時間，同時對地表實際類別較不會遺漏；缺點是只能判釋分類數目，無法得知分類類別，在精確度方面亦因地貌複雜度不同而造成精確度品質不

穩定。

監督式分類法主要是根據地真(Ground Truth)，如航空照片、像片基本圖或其他主題圖等地面實際資料，將已知特定類組的像元做為特定訓練樣區用訓練分類演算，依調查目的先決定欲分出的類組，再圈選出各類組的訓練樣區以決定每一像元應歸入的類組，並計算各類組的均數與共變異矩陣等統計值，再依統計值產生之機率密度函數對整個影像各像元作分類。監督式分類法的優點為透過人工訓練判釋，所判釋之精確度較為穩定；缺點也因為利用人工判釋方法，需要訓練較具專業的判釋人員，同時分類所花費的時間隨地貌的複雜程度而有不同。

本研究原則上採用 ERADS Imagine 軟體進行監督式與非監督式分類，然而在分析的過程中發現，衛星影像在分類時，一般皆將影像像元視為單一土地覆蓋類別，但是實際上每一像元內，多混雜了各種類別之光譜值，此混合資訊會影響分類之精確度。而 LANDSAT MSS 之解析度只有 80 公尺，其像元必然混合了各種資訊，若直接將其視為均勻像元，則會造成分類面積嚴重誤差，並直接影響到土地利用變遷分析結果。因此本文除了以傳統方法進行土地利用分類外，嘗試以模糊聚類分析原理，將各像元視為不均勻以推求像元內各類別之模糊隸屬度，進一步將分類面積精確度提升。

3.3 次像元分類法

次像元(Sub-Pixel)分類法之理論，即是將影像現有像元再切割，影像分類單位由單一像元推進為次像元，以進一步萃取分離出像元內混合之光譜特徵值，改善衛星影像解析度不足之處，此時影像分類結果不再以單一像元為單位，而是到達次像元之精度，故在國外早期次像元分析技術多大量用於軍事及情報分析(李旻旻等，2002)。故次像元分類法不是某種特定的理論，而是一種分類概念，凡是能將現有像元單位進一步分割萃取的方法皆能稱為次像元分類法。目前國外文獻中常用的方法有模糊 C 均值分類法(Fuzzy C-Mean Classification)、最大概似後驗概率法(Posterior Probability from

Maximum Likelihood Classification)、線性混和模式 (Linear Mixture Model)(Bastin, 1997)及類神經網路模式(Artificial Neural Networks)(Kanellopoulos *et al.*, 1992)等。以上幾種方法又以模糊 C 均值法最常用，且應用廣泛。Foody 曾比較模糊方法與線性混和模式的分類結果，並證明兩種方法分類結果接較傳統方法準確且提高其精確度(Foody, 1994)，爾後並提出該方法的精確度評估法則(Foody, 1996；Foody, 1998)。因此本文採用模糊 C 均值分類法，進行影像次像元之分析。

傳統的 C 均值法的分類步驟為：(1)假定聚類個數 c ，並計算各群之聚類中心。(2)計算每一樣本到各中心之距離，並將各樣本分配到與其最近的聚類。(3)重新計算新聚類中心 v_i 。(4)重複步驟(2)和(3)，直到各群沒有重新分配樣本的情形為止。而模糊 c 均值法，除了須事先指定聚類數 c ，另外訂定一個實數 m 和一個代表停止準則的微小正數 ε 。與傳統分類法最大的不同在於隸屬度函數與特徵函數的差別。很明顯地，隸屬度函數的值域為介於 0 到 1 之間的所有實數。例如給一組資料的集合 $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ 。一般說來 x_k 是一個向量。模糊聚類分析的目標是找到一組有 c 個聚類中心 $v_1, v_2, \dots, v_c$ 的模糊分類 $P = \{P_1, P_2, \dots, P_c\}$ ，這些聚落中心要儘可能清楚表示樣本分布情況。我們需要一些規則來表達此一概念。也就是結果能使同一聚落中的元素有較強的關聯，且不同的聚落中的元素關聯性較弱的規則需考慮。因此定義一個模糊 c 分割矩陣 $M_{jc} = \{P | \mu_{ij}\}$ ， μ_{ij} 表示樣本 i 聚類的隸屬度，且滿足式(1)，(2)及(3)。

$$\mu_{ij} \in [0, 1] ; i=1, \dots, c ; j=1, \dots, n ; \quad (1)$$

$$\sum_{i=1}^c \mu_{ij} = 1 ; j=1, \dots, n ; \quad (2)$$

$$0 < \sum_{j=1}^n \mu_{ij} < n ; \quad (3)$$

則模糊聚類之目標函數為

$$J_{fc}(P, v) = \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^c (\mu_{ij})^m \|x_j - v_i\|^2 ; \quad (4)$$

其中 $1 \leq m \leq \infty$ 為模糊指數，此加權參數控制著分類過程的模糊性。

$\|\cdot\|$ 是在空間中的內積， $\|x_j - v_i\|^2$ 是 x_j 與 v_i 的歐基里德距離。

在(1)，(2)及(3)的條件下，對(4)式求取最小，可得 μ_{ij} 及 v_i 為：

$$v_i = \frac{\sum_{j=1}^n (\mu_{ij})^m x_j}{\sum_{j=1}^n (\mu_{ij})^m} , i=1, \dots, c \quad (5)$$

$$\mu_{ij} = \frac{\left(1 / \|x_j - v_i\|^2\right)^{1/(m-1)}}{\sum_{i=1}^c \left(1 / \|x_j - v_i\|^2\right)^{1/(m-1)}} , i=1, \dots, c ; j=1, \dots, n \quad (6)$$

觀察由(5)式計算出的 v_i ，它可被視為模糊分類 A_i 的聚落中心。因為它是 A_i 中資料加權平均，而權數是 x_j 在模糊集合 A_i 中隸屬度的 m 次方。目標函數則用來測度模糊聚落中，聚落中心與元素距離加權後的和。所以，較小的 $J_m(P)$ 值對應較佳的模糊分類。模糊 c 均值分類法的目標是找出一組模糊分類 P 擁有最小的 $J_m(P)$ ；聚落問題轉成了最佳化的問題。因此模糊 C 均值分類法之步驟可整理如下：

1. 選擇 c 個起始聚類中心，起始模糊分類 $P^{(0)}$ ， m 及誤差值 ε 。
2. 由式(5)計算 $P^{(t)}$ 的 c 個聚落中心 $v^{(t)} = \{v_1^{(t)}, v_2^{(t)}, \dots, v_c^{(t)}\}$ 。
3. 由 $v^{(t)} = \{v_1^{(t)}, v_2^{(t)}, \dots, v_c^{(t)}\}$ 與式(6)計算新的模糊分類 $P^{(t+1)} = \{P_1^{(t+1)}, P_2^{(t+1)}, \dots, P_c^{(t+1)}\}$ 。
4. 比較 $P^{(t)}$ 與 $P^{(t+1)}$ 。若 $\|P^{(t)} - P^{(t+1)}\| < \varepsilon$ ，演算就

停止。否則令 $t = t + 1$ ，回到步驟 2。

在步驟 4 中， $\|P^{(t)} - P^{(t+1)}\|$ 為 $P^{(t)}$ 與 $P^{(t+1)}$ 的距離。

例如可令 $\|P^{(t)} - P^{(t+1)}\| = \max_{i=1, \dots, c, j=1, \dots, n} |\mu_{ij}^{(t+1)} - \mu_{ij}^{(t)}|$ 。

此演算法中， m 的選取可根據問題的需要來考量。當 m 愈接近 1，則分類結果愈趨近於傳統分類法；當 m 趨近無限大，則 $J_{wfc}^{(t)}$ 函數值將趨近於零，分類結果愈模糊。也就是所有的聚落中心傾向於資料集 X 的中心。雖然文獻上較少討論應該如何選取 m 較為合適，但根據經驗上的最佳選擇是介於 1.25 到 5 之間最為適當。目前並無理論指出如何選取最佳的 m 值，但對所有的 m ，此演算法均會收斂(阮亨中，2000)。根據模糊 C 均值法分類後，即可獲得各像元對於各類別之隸屬度，因此可將原有像元予以切割，並依據各類別之隸屬度重新分配，以本文為例，將原始 LANDSAT MSS 像元切割並重新分配後，其分類之面積最小單位將由原來之 $80\text{m} \times 80\text{m}$ 提升至 $10\text{m} \times 10\text{m}$ ；不僅對於分類結果應有所改善，對於各類別面積，也會有較佳之精度。

3.4 分類結果與比較

3.4.1 精確度評估

分類後影像之可靠性可用精確度評估之方式進行，本研究利用應用軟體(ERDAS Imagine)進行精確度評估，利用隨機取點之方式，配合相片基本圖、地形圖或所蒐集的地面真實現況參考資料(Reference Data)輔助判釋；將此採樣點分類之結果與實際地貌之類別結果比較，評估分類後影像的精確度。本研究隨機取點，且在分類成果類別每類選擇的點數相同，是為了避免全體隨機選取集中在某類別上，且像元數較少之類別選到的點太少之缺點。

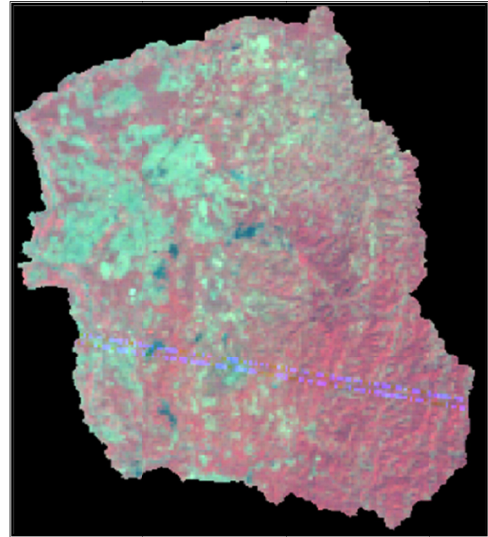


圖 3(a) 1972 年 Landsat MSS 衛星影像(11 月 1 日)

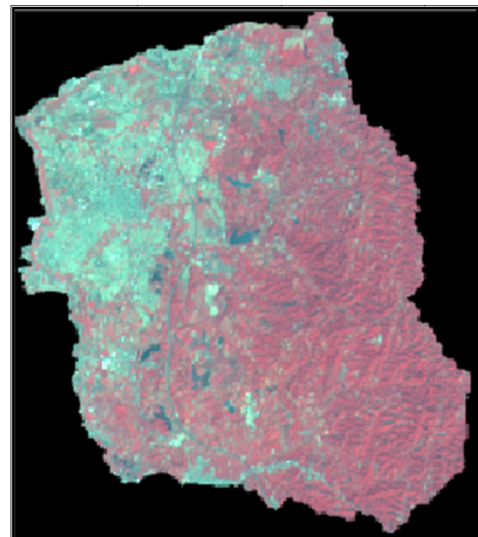


圖 3(b) 2000 年 SPOT 衛星影像(12 月 31 日)

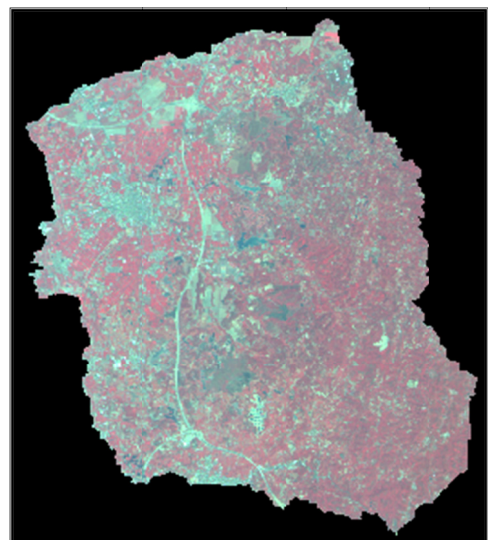


圖 4 2001 年 SPOT 衛星影像(4 月 25 日)

3.4.2 非監督式分類結果

非監督式分類法只需輸入影像，不需另外圈選訓練樣區，其步驟短、分類時間快，但是分類後只能得到分類數，無法得知類別，需另外給定分類結果。本文中使用非監督式分類法先分為 12 類，並根據航照圖及其他可參考資料，從 12 類中判斷類別，再將相同類別合併，影像類別之定義乃參考郭振民(1999)研究中對於逕流影響較大之類別，但考慮部分分類覆蓋面積較少，例如裸露地，其與旱田在光譜值之反應類似，對逕流之影響也類似，因此並未特別將其區分出來。最後本研究共合併為建築、水體、旱作、水稻及林木五類。豐化橋上游流域之 1972 年、2000 年非監督式分類結果如圖 5~6 所示；精確度評估如表 1~2。1972 年之分類精確度僅達 68.73%；2000 年為 73.5%，主要分類錯誤在建築、旱田、水稻，尤其建築區容易與其他類別混淆；而同樣的 2000 年分類影像也有相同之分類錯誤情形。

3.4.3 監督式分類結果

監督式分類首先需先圈選訓練樣區，作為訓練樣本。圈選訓練樣本則依據航照圖及現地調查。圈選的樣區依小區塊、多樣區的原則選取，選擇若干不同波譜反應的樣區，先將其分為不同類別，以確保取樣光譜之多樣性，並以最大概似法進行分類，分類完成後再依地真資料進行合併。在分類過程中發現 1972 年 Landsat MSS 影像，水稻與建築地區在四個波段之灰度值相當的接近，因此導致都市區與水稻田分類上之混淆，在如此接近的情況下，即使改變不同分類方式，可提升之精確度亦有限，因各分類方法中，皆是以波段灰度值進行分類，如果本質上其差異已經不大，分類勢必困難且容易誤判。因此本文擬切除較確定的一類後，再重覆進行監督式分類；希望藉由去除都市區與水稻田兩類別灰度值過相近的因素，提高辨識的精確度。

在考慮選擇切除水稻或是建築區的過程中，本文以面積大小為考量，因都市區域較小，將之切除花費的時間時間較短，所以決定以航照圖為參考資

料，先切除都市區域。另外河道部分由於分類時常受到周圍洪水平原的影響，分類上常會被誤判為植物類，因此也先將河道切除，最後對剩餘類別進行分類。經過此修正後，1972 年 Landsat MSS 影像判釋精確度評估結果如表 3；整體精確度可提升到達 80.43%，分類後影像如圖 7 所示。

至於 2000 年 SPOT 衛星影像分類，則欲利用上述相同的概念，先切除河道部分。除此之外，水稻田因季節不同而產生光譜不同的變化，可以利用為輔助分類的一個概念(鄧敏松，1997)。由標準的波譜反射率曲線，顯示三種基本的地物：健康的綠色植物、乾燥的土壤、及透明的湖水三類典型反射率曲線，而水稻之生長期與收穫期在地表的不同反應上；即為由植被轉為土壤，可從曲線中看出，在 SPOT 的第二、三波段植物與土壤之反射率有明顯之不同，因此利用 2001 年 4 月水稻生長時期與 2000 年 12 月水稻收割後兩張影像輔助辨識水稻。做法為分別將前者像元 3 個波段灰度值減掉後者像元之灰度值，觀察水稻區的變化情形。圈選出幾個代表的樣區，計算其平均值、標準差及各波段最大最小範圍等統計特性，並依此設定第二段灰度值差小於-6、第三波段灰度值差大於25的條件下，此區域為水稻田區，經過精確度分析(表4)的檢驗，水稻切除之精確度可達 96.74%，已達較高之精確度，因此先切除水稻田區，對其餘非水稻田區的部分再進行監督式分類，最後合併分類後影像。非水稻田區域土地分類之精確度評估可達 94.93%，而分類結果如圖 8 所示。

3.4.4 次像元分類結果

雖然經由切除主題圖輔助，1972 年影像以監督式分類已有不錯之精確度，但是其解析度只有 80m，與 SPOT 之 12.5m 相比相差甚多，即使分類結果不錯，但傳統方法將 80×80m 的範圍皆視為單一像元，忽略像元之不均勻性，勢必造成分類類別面積上極大的誤差，而以兩者解析度差異甚大之影像進行變遷分析，其精度必然受影響。因此本文除配合主題圖切割輔助分類外，另外以模糊 C 均值法，將影像初步細分 30 類，然後依據航照圖及其

他相關資料逐一判別各類別之土地利用狀況，並根據各類別之隸屬度重新合併及分配，單一格網。分類後之影像如圖 9 所示，而其精確度分析如表 5 所示。由表中可知次像元分類之全區精確度確實較監督式分類為佳。此外，為證實次像元分類法確能提升分類類別之面積精度，本計畫以虎頭埤枯水期最大蓄水面積為例，發現誤差率由原來 15.97%提高至 0.08%，為了進一步確認此結果，本研究隨機

選取數張航照圖並數化圖上所有水體面積，並與兩種分類結果比較，發現監督式分類法之水體面積誤差高達 141.8%而次像元分類法誤差則為 17.2%。由以上結果顯示經由次像元分類法確能提高分類之精確度，並獲得較正確之分類面積，以改進土地利用變遷分析結果。因此後續以 1972 年次像元分類以及 2000 年監督式分類結果，進行土地利用變遷分析。

表1 1972年非監督式分類精確度分析

影像分類成果	真實地表覆蓋							
		建築	水體	旱田	水稻	林地	總計	使用者精度
	建築	28	5	11	11	0	55	50.91
	水體	3	47	0	5	0	55	85.45
	旱田	8	0	28	8	11	55	50.91
	水稻	8	0	0	47	0	55	85.45
	林地	0	0	8	8	39	55	70.91
	總計	47	52	47	79	50	275	
	生產者精度	59.57	90.38	59.57	59.49	78.00		
	全區精確度=68.73% Kappa=0.6091							

表2 2000年非監督式分類精確度分析

影像分類成果	真實地表覆蓋							
		建築	水體	旱田	水稻	林地	總計	使用者精度
	建築	21	6	11	17	0	55	38.18
	水體	0	55	0	0	0	55	100.00
	旱田	6	0	38	3	8	55	69.09
	水稻	5	0	6	44	0	55	80.00
	林地	0	0	11	0	44	55	80.00
	總計	32	61	66	64	52	275	
	生產者精度	65.63	90.16	57.58	68.75	84.62		
	全區精確度=73.45% Kappa=0.6682							

表3 1972年監督式分類配合切除都市精確度分析

影像分類成果	真實地表覆蓋						
		水體	旱田	水稻	林地	總計	使用者精度
	水體	45	11	4	9	69	65.22
	旱田	0	56	9	4	69	81.16
	水稻	0	11	56	2	69	81.16
	林地	2	0	2	65	69	94.20
	總計	47	78	71	80	276	
	生產者精度	95.74	71.79	78.87	81.25		
	全區精確度=80.43% Kappa=0.7391						

表4 2000年水稻精確度分析

影像分類成果	真實地表覆蓋				
		水稻	非水稻	總計	使用者精度
	水稻	133	5	138	96.38
	非水稻	4	134	138	97.10
	總計	137	139	276	
	生產者精度	97.08	96.40		
	全區精確度=96.74% Kappa=0.9348				

表5 2000年監督式分類切除水稻精確度分析

影像分類成果	真實地表覆蓋						
		建築	水體	旱田	林地	總計	使用者精度
	建築	57	0	10	2	69	82.61
	水體	0	69	0	0	69	100.00
	旱田	2	0	67	0	69	97.10
	林地	0	0	0	69	69	100.00
	總計	59	69	77	71	276	
	生產者精度	96.61	100.00	87.02	97.18		
	全區精確度=94.93% Kappa=0.9324						

表 6 1972 年次像元分類配合切除都市精確度分析

影像分類成果	真實地表覆蓋						
		水體	旱田	水稻	林地	總計	使用者精度
	水體	40	1	7	2	50	80
	旱田	6	40	4	0	50	80
	水稻	2	0	45	3	50	90
	林地	2	0	5	43	50	86
	總計	50	41	61	48	200	
	生產者精度	80	97.56	73.77	89.58		
	全區精確度=84% Kappa=0.7867						

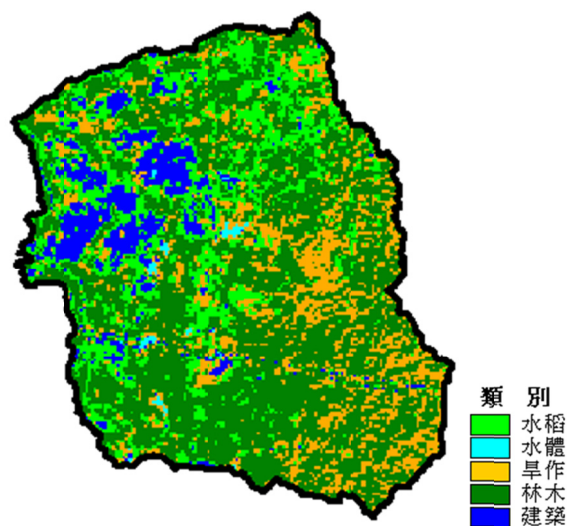


圖 5 1972 年豐化橋上游流域非監督式分類結果

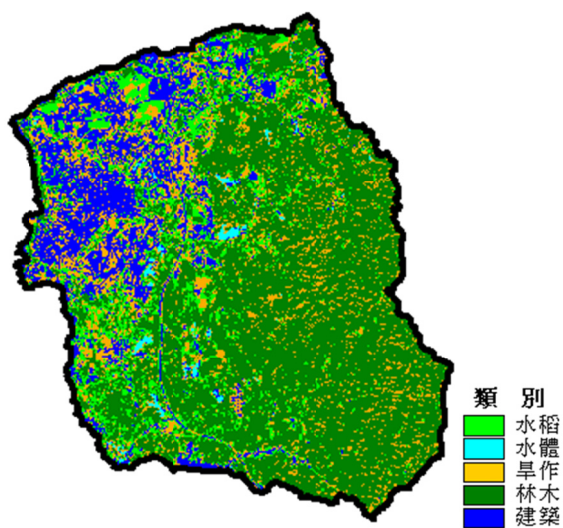


圖6 2000年豐化橋上游流域非監督式分類結果

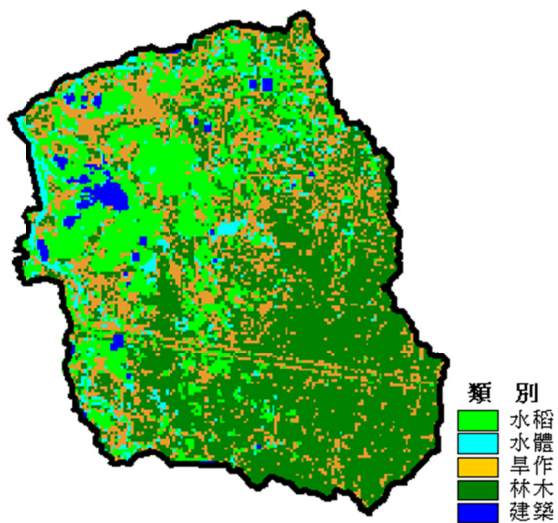


圖 7 1972 年豐化橋上游流域監督式配合輔助方法分類結果

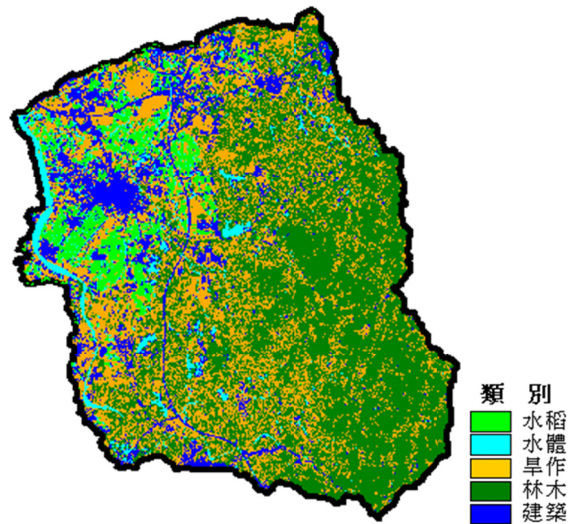


圖8 2000年豐化橋上游流域監督式配合輔助方法分類結果

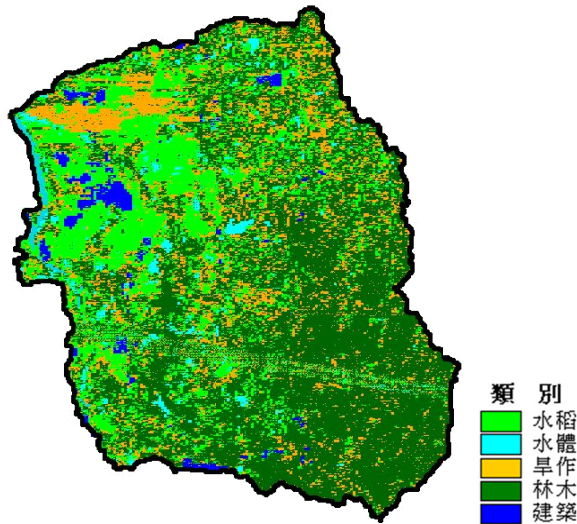


圖9 1972年豐化橋上游流域次像元分類結果

4. 平地-山地降雨逕流模式

4.1 模式基本架構

鹽水溪豐化橋以上集水區之地形多為丘陵且湖泊多，較著名有虎頭埤與鹽水埤，下游則為農業區與新化等新興都市發展地區，面對此一兼具山區集水區與平地集水區，過去以運動波發展之降雨-逕流模式，可能不適合於平地地區；因此本文修正過去分布型降雨-逕流模式(游保杉等，2002，以適合本流域之特性。

水筒模式法(Tank Model)乃由日本科學技術廳菅原正巳氏(Sugawara)，於 1971 年所倡議之通用水

文模式。其概念乃是將集水區逕流結構，置換為由數個貯留型之模型容器所組成。以各水筒側向孔口之水流流出模擬河川中之地表逕流、中間流、與地下水三部分，而以底面滲流孔口之流出模擬水份在土壤中之滲流。上述四段水筒模式較常應用在日降雨-逕流分析。對於事件型洪水分析可以適當簡化；因洪水時，第三及第四筒視為基流量的流出可予以忽略(Singh, 1995)。過去水筒模式應用在集水區較多，近年來陳榮松等(2001)成功應用在水田及旱田，而佐藤照子及植原茂次(1980)則應用在都市地區；本文根據上述文獻給定各水筒參數。

在模式應用上，由於原山區分布型模式以格網為架構，為了考慮模式的一致性，連接之水筒模式

亦採用格網架構。在一個單一平地格網中會有上述三種地表種類存在，要將這三種水筒整合到單一格網，必須將各水筒參數平均化，才可反應不同格網的不同地表種類組合。在參數的決定方面，雖然引用了賴任瑄及佐藤的參數，但考慮地區性差異，水田、旱田在田區情況可能不盡相同；都市地區的出流特性也可能不一樣，以及本文以格網架構將三種水筒模式整合產生之不確定性，因此本研究引進四個參數， Ctc_1 、 Ctc_2 、 Cth_1 、 Cth_2 ，分別率定孔口係數、孔口高度。

4.2 模式率定及驗證

為了瞭解本平地-山地降雨逕流模式在本集水

區之模擬狀況，故選用 16 場歷史颱風洪事件進行模式之率定與驗證，各事件參數之率定結果如表 7 所示，由表中檢視各事件之目標函數及相關指標值可知，峰時誤差(ETP)小於 1 小時，洪峰誤差(EQP)平均約 4.19%，總體積誤差(VER)則平均約為 11.9%，平均效率係數(CE)則為 0.93，率定結果尚稱理想。在事件驗證方面，以所有率定參數之平均值作為驗證參數，模式驗證結果如表 8，各評估指標的平均值分別為： $|ETP|=1.0$ hr、 $|EQP|=9.13\%$ 、 $|VER|=19.56\%$ 、 $CE=0.78$ ，上述結果皆在合理範圍之內，CE 值雖然未如率定結果高，但整體結果仍屬良好。顯示本山地-平地降雨逕流模式，對歷史暴雨事件能有適當的模擬。

表 7 平地-山地降雨逕流模式率定結果

洪水事件	颱風名稱	ETP(hr)	EQP(%)	VER(%)	CE	OBJ
事件 1	暴雨 717	1	0.89	-13.11	0.98	25.51
事件 3	暴雨 746	-1	-4.53	-17.71	0.95	25.88
事件 4	暴雨 756	0	6.69	-10.5	0.92	15.81
事件 5	暴雨 767	0	-2.65	-4.92	0.97	9.25
事件 6	歐馬(Omar)	0	6.43	-19.44	0.94	31.87
事件 7	暴雨 825	-1	-11.95	-15.58	0.89	22.19
事件 8	暴雨 828	0	-0.38	-0.78	0.98	7.25
事件 9	提姆(Tim)	0	0.59	-11.9	0.97	20.42
事件 10	暴雨 867	-1	2.22	-15.75	0.86	57.87
事件 11	暴雨 876	1	-5.71	-22.99	0.85	38.64
事件 12	暴雨 887	-1	2.06	0.77	0.99	7.07
事件 13	暴雨 888	-1	6.14	9.35	0.83	25.38
/平均/		0.6	4.19	11.90	0.93	23.93

表 8 平地-山地降雨逕流模式驗證結果

洪水事件	颱風名稱	ETP(hr)	EQP(%)	VER(%)	CE
事件 2	暴雨 728	1	2.65	-16.54	0.73
事件 14	碧利斯(Bilis)	1	-18.48	-28.89	0.81
事件 15	暴雨 905	0	-2.93	-14.85	0.89
事件 16	納莉(Nari)	2	-12.21	-18.4	0.67
/平均/		1	9.07	19.67	0.78

5. 土地利用變化之影響

鹽水溪豐化橋上游土地利用之情形，經變遷分析之後發現其土地利用改變互有消長，為了瞭解集水區地表覆蓋改變後，對集水區內水文現象有何影響，本研究利用前述平地-山地降雨逕流模式，探討土地利用變遷對逕流量之改變。

5.1 研究區域內土地利用變化情形

本研究利用 3.4 節分類結果進行土地利用之變遷分析，土地使用改變情形如表 9。結果顯示，過去近 30 年來，區域內由於人口增加使得促進市區的發展，建築面積顯著的增加；增加之幅度達 5 倍之多，其代表之意義則是不透水面積增加。在水體方面的面積則略微減少 40%，表示可蓄存洪水之埤塘減少，不利於調洪。水稻的面積則略微減少 71%，可能的原因是稻米之需求減少，使得水稻轉作為旱作或移作他用。旱作面積增加 46%，顯示經濟價值較高之旱田，有增加之情形。林木面積則變化不大，略微減少 7%，這也是由於林木多集中在山區丘陵地，而目前對此區域之開發並沒有很多，林木仍保存完整，因此變化並不大。

5.2 土地利用變遷對逕流歷線之影響

為了解研究區域土地利用改變對各種重現期距洪水之影響，故以虎頭埤及崎頂兩站之設計雨型分析結果作為輸入雨量(游保杉等，2002)，針對不同土地利用狀況，利用分布型降雨-逕流模式，模擬 1.1、2、5、10、25、50、100、200 年等八種不同重現期距之逕流歷線。至於其他影響逕流之變數如，地形、坡度及土壤等，由於短期內較不容易有重大改變，因此並無考慮此方面之變化。模擬結果發現 2000 年之土地利用條件下之逕流歷線；不論是洪峰或逕流體積，都比 1972 年土地利用條件下之逕流歷線增加許多。由表 10 的結果可見，增加幅度最大為 1.1 年重現期距條件下，洪峰流量增加

26.0%及逕流體積增加 14.6%。而隨著重現期距增加其變化幅度略有下降之趨勢，此結果顯示此區域由於不透水面積增加造成入滲量減少；且水稻田之減少，也顯著的影響洪水蓄存量，分析之結果顯示對區域排水(一般以重現期距 10 年以下為設計標準)有較大影響之低重現期距具有較顯著之影響，其比較之逕流歷線如圖 10。但在高重現期距時洪水事件之逕流體積很大，減少之蓄存洪水面積與入滲，相較之下並不明顯。此結果也反應了一個問題，在這個屬於區域排水之集水區，在低重現期距之洪峰流量與逕流體積增加後，對原本區域排水之設計將增加負擔。

6. 結論

豐化橋上游集水區為一特殊之區域，其於民國 80~90 年代有許多重大開發案，土地改變有顯著之變化，且集水區包含平地與丘陵地，因此本文利用遙測技術探討其土地變遷，建立適合平地與丘陵地之水文模式，反應此特殊之集水區。在衛星遙測分析上，利用分類後比較法，得出單獨兩張影像結果，並獲得各時期之地文因子作為後續水文模式之輸入資料。針對 1972 年影像，本研究採用次像元分類法以提高分類精確度及面積正確率，針對後期影像，則採用監督式法配合主題圖切除進行分類。變遷分析結果顯示，過去近 30 年來，區域內由於人口增加使得促進市區的發展，相關重大開發案使得建築面積顯著增加，亦代表不透水面積增加相當多。在水體方面的面積則減少 40%，表示可蓄存洪水之埤塘減少，不利於調洪。其他還有水稻的面積減少 71%，旱作面積則是增加 46%，皆顯示對本區域排水有不利之影響。而利用降雨-逕流模式，模擬土地利用變遷前後 1.1、2、5、10、25、50、100、200 年等八種重現期距之逕流歷線顯示：2000 年之土地利用條件下，不論是洪峰或逕流體積，都比 1972 年土地利用條件下增加許多；幅度最大為 1.1 重現期距雨量下，洪峰流量增加 23.1%及逕流體積增加 13.9%。顯示此區域土地利用變遷的確會對逕流產生影響，尤其該區地勢平坦，屬於區域排水之集水

區，在低重現期距之洪峰流量與逕流體積增加後，研究該地區淹水機率是否增加，並提出適當之減洪措施。對原本區域排水之設計將增加負擔，故後續可持續

表 9 豐化橋上游土地利用變化情形

	1972 年 (m ²)	所佔百分比	2000 年面積 (m ²)	所佔百分比	變化百分比
建築	2906744	2.11	18911810	13.71	550.62
水體	7441151	5.39	4464298	3.24	-40.01
旱田	29923066	21.68	43733259	31.70	46.15
水稻	31014420	22.47	8878423	6.44	-71.37
林木	66750235	48.36	61976584	44.92	-7.15

表 10 豐化橋上游土地利用改變對逕流量之影響

	1972 年		2000 年		變化量(%)	
重現期距	尖峰流量 (m ³ /s)	逕流體積 (m ³)	尖峰流量 (m ³ /s)	逕流體積 (m ³)	尖峰流量	逕流體積
1.1	127	6262012	160	7176486	26.00	14.60
2	295	15698680	341	17417730	15.59	10.95
5	437	24668770	489	26577940	11.90	7.74
10	521	29976440	574	31965650	10.17	6.64
25	629	36569950	672	38720940	6.84	5.88
50	722	41059820	740	43286230	2.49	5.42
100	794	45506280	804	47758570	1.26	4.95
200	858	49659850	873	51912490	1.75	4.54

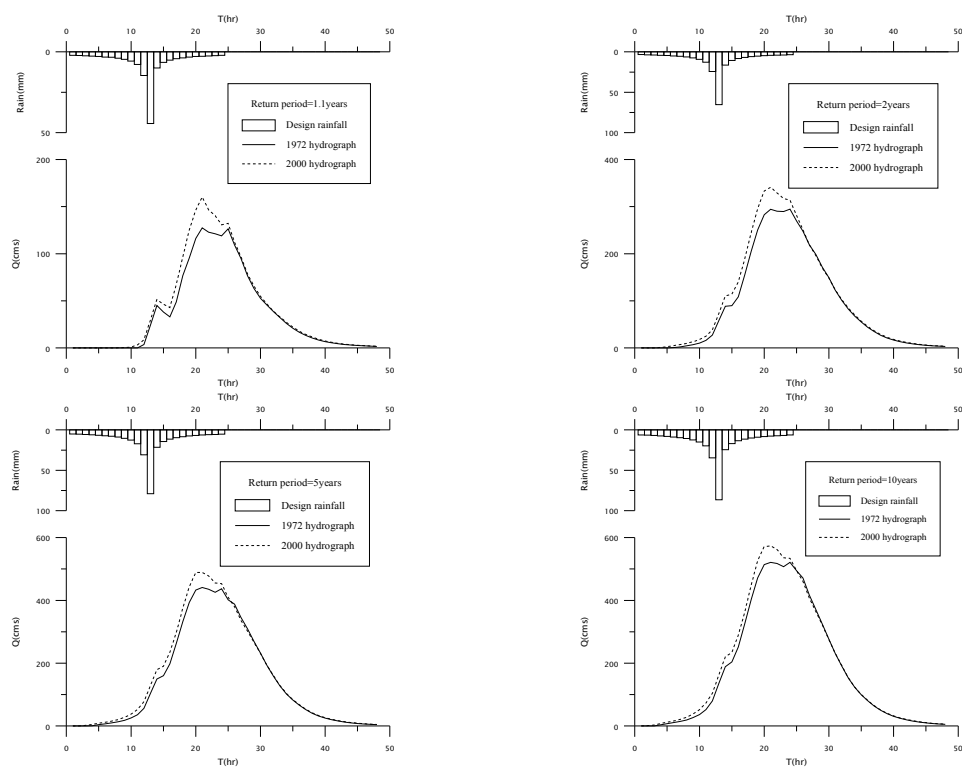


圖 10 低重現期距不同設計暴雨下兩時期之逕流歷線

參考文獻

- 李旻旻、黃凱易、常健行，2002，次像元分類法於台灣山區 TM 影像地覆分類效用之探討，中華水土保持學報，第 33 卷第 3 期，第 109-117 頁。
- 阮亨中、吳柏林，2000，模糊數學與統計應用，俊傑書局股份有限公司。
- 呂秀慧，2001，頭前溪流流域植生覆蓋變遷之研究，碩士論文，國立交通大學土木工程研究所。
- 周天穎，1998，土地利用變遷對水庫集水區水源涵養影響之評估計畫(一)，經濟部水資源局。
- 陳榮松、畢嵐杰、賴任瑄，2001，水筒模式應用於水旱田之降雨-逕流模擬，九十年農業工程研討會，第 341-348 頁。
- 郭振民，1999，應用遙測與地理資訊系統於分佈型降雨-逕流模式之研究，碩士論文，國立成功大學水利暨海洋工程研究所。
- 游保杉、王毓麒、郭俊超，防洪示範區淹水境況模擬與決策支援系統之研究(二)-鹽水溪流域上游丘陵集水區降雨逕流分析(二)，國科會計畫報告，2002。
- 游保杉、王毓麒、郭俊超、呂政璋，2002，視窗化分佈型降雨-逕流模式於鹽水溪之應用台灣水利季刊，第五十卷，第一期:pp. 51-59。
- 鄧淑萍，2010，假設檢定及衛星遙測影像應用於地表覆蓋變遷偵測之研究，博士論文，國立臺灣大學森林環境暨資源學研究所。
- 鄧敏松，1997，結合多時段遙測影像、耕地坵塊與領域知識之區域式影像辨識法於水稻田耕作調查之應用，碩士論文，國立成功大學測量工程研究所。
- 簡甫任，2001，運用知識庫輔助遙測影像分類與土地利用變遷偵測模式建立之研究－以都市區域環境為例，逢甲大學土地管理研究所碩士論文。
- 佐藤照子、植原茂次，1980，以水筒模式解析都市化後的洪水出流特性，國立防災科學技術中心研究報告，第 24 號，第 145-158 頁。(日文)
- Bastin, L., 1997. Comparison of Fuzzy C-Means Classification, Linear Mixture Modelling and MLC Probabilities as Tools for Unmixing Coarse Pixels. *International Journal of Remote Sensing*, 18, 3629-3648.
- Foody, G. M. and Cox, D. P., 1994. Sub-Pixel Land Cover Composition Estimation Using a Linear Mixture Model and Fuzzy Membership Functions. *International Journal of Remote Sensing*, 15(3), 619-631.
- Foody, G. M., 1996. Sharpening Fuzzy Classification Output to Refine the Representation of Sub-Pixel Land Cover Distribution. *International Journal of Remote Sensing*, 19(13), 2593-2599.
- Foody, G. M., 1998. Approaches for the Production and Evaluation of Fuzzy Land Cover Classifications from Remotely-Sensed Data. *International Journal of Remote Sensing*, 17(7), 1317-1340.
- Kanellopoulos, I., Varfis, A., Wilkinson, G. G., and Megier, J., 1992. Land Cover Discrimination in SPOT HRV Imagery Using an artificial Neural Network: a 20 class experiment. *International Journal of Remote Sensing*, 13(5), 917-924.
- Lambin, E.F., and Ehrlich D., 1997. Land-cover changes in sub-saharan Africa(1982-1991):application of change index based on remotely sensed surface temperature and vegetation indices at a continental scale. *Remote Singing Environment*, 61, 181-200.
- Singh, V. P., 1995. Computer models of watershed hydrology. Water Resource Publications, Highlands Ranch, Colorado, U.S.A.

Detecting Land Use Change by Remote Sensing and It's Impact on Runoff in the Upstream of Yan-Shoei Creek

Yu-Chi Wang^{1*} Chun-Chao Kuo² Pao-Shan Yu³

ABSTRACT

Urbanization is significantly increasing in Taiwan recently because of economic development. The basin Yan-Shoei creek is chosen as the study area to investigate the influence of urbanizing on runoff hydrograph and flood storage ability. 1972 LANDSAT MSS and 2000 SPOT satellite imageries are applied to identify the land use types by using the method that the image was classified by sub-pixel and supervised classification after the thematic maps were first cut off. The results showed building area increases about 1600 acres from 1972 to 2000. Due to the terrain of study area contains flat area and mountains; we tried to connect the tank model for flat area with the grid-based distributed rainfall-runoff model, which is based on kinematic wave approach for hilly area. Calibration from 12 storm events concluded that the model proposed in this work can well simulate the rainfall-runoff relationship. The model is further applied to investigate the impact of land use change on runoff. The return period 10-year flood was found to be increased around 10%, which reveals that changes the probability of flooding. The adaptation measures are necessarily proposed to reduce damage.

Keywords: Remote Sensing 、 Land use change 、 Tank model 、 Rainfall-runoff model

¹ Associate Research Fellow, Taiwan Typhoon and Flood Research Institute,
National Applied Research Laboratories

² Post Doctoral Fellow, Department of Civil and Environmental Engineering,
University of Alberta

³ Professor, Department of Hydraulic and Ocean Engineering, National Cheng-Kung University

* Corresponding Author, Phone: 886-4-24608822 ext. 903, E-mail: yuchi@narl.org.tw

Received Date: Apr. 11, 2012

Revised Date: Aug. 15, 2012

Accepted Date: Nov. 18, 2012

整合遙測資訊於山區雨量推估

張斐章^{1*} 蔡孟蓉² 江衍銘³ 謝明昌⁴

摘要

近年來遙測資訊相繼應用於降雨預報，其主要優點在於有效觀察大範圍降雨在時空之變化。本研究首先蒐集 QPESUMS 系統之雷達雨量產品、PERSIANN-CCS 衛星觀測系統之雨量產品以及地面雨量站觀測紀錄；接著以遺傳演算法融合地面雨量、雷達及衛星影像推估雨量三種資訊；為比較融合雨量之有效性，本研究再以 ANFIS 架構三種定量降雨預報模式分別為：(1)三種未融合資訊(2)二種融合資訊(3)三種融合資訊，預測未來一小時降雨，由研究結果可知三種融合資訊之定量降雨預報系統為最佳，模式測試部分相關係數、RMSE 及 MAE 分別為 0.88、3.88 及 2.39 且 RMSE 在 t+1 時刻有 28%之改善率。

關鍵詞：資料融合、類神經網路、定量降雨預報

1. 前言

目前許多國際性研究計劃皆將焦點著重於極端事件的雨量及洪水推估，其為一具有挑戰性且受重視的議題，而集水區雨量更受氣候變遷、地形、氣流、季節及降雨分布等因素影響，使其預報之精確性往往不高，導致接續之水文模擬或流域水源管理不盡理想。

臺灣位處亞熱帶四面環海地理位置特殊，平均每年遭受 3~4 個颱風侵襲，降雨量之分佈在時間或空間上呈不均勻之狀態，且臺灣為一狹長型島嶼，中央山脈橫亘其中，因此河川坡陡流急，加上山坡地開發，每逢颱風暴雨時期，上游的洪水往往在數小時內便抵達下游及注滿水庫(Chang *et al.*, 2002)。逕流滯留時間短暫，使得突發性洪水事件的發生更加難以預料，因此「時間」為相當關鍵之因素。在這種特殊的降雨-逕流特徵下(宋仁良，2004，王琮美，2005，Chang *et al.*, 2008)，為期能減輕災害，因此發展一精確雨量預報模式有其必要性。(Pan *et al.*, 2004, Chiang *et al.*, 2007, Chiang & Chang, 2009)

在台灣，以往主要的雨量觀測來自於地面測站，

然地面單點之觀測無法呈現雨量在空間中之變異；近幾年應用雷達觀測系統能提供較具體之雨量分布趨勢，然而卻會受山區地形遮蔽因素影響；而衛星影像應用於雨量推估之成果雖然空間解析度不若雷達觀測高，但卻不受地形變化影響。因此，本研究擬以石門水庫集水區為研究區域，整合地面雨量站、雷達觀測資訊(QPESUMS)(Quantitative Precipitation Estimation and Segregation Using Multiple Sensor)及衛星影像資訊(PERSIANN-CCS)(Precipitation Estimation from Remotely Sensed Information Using Artificial Neural Networks- Cloud Classification System)，建立集水區定量降雨預報模式。

2. 研究區域及資料概述

石門水庫為台灣地區第三大水庫，以淡水河上游之大漢溪為其主流，集水面積約 763.4 平方公里。水庫集水區年平均降雨量約在 2,200 mm~2,800 mm 之間，雨量多集中分佈於五至九月，其主要原因乃颱風所造成，另外尚有西南氣流所造成之雷陣

¹ 國立臺灣大學生物環境系統工程學系 教授

² 國立臺灣大學生物環境系統工程學系 博士候選人

³ 國立臺灣大學生物環境系統工程學系 博士後研究員

⁴ 經濟部水利署防災中心 主任

*通訊作者，電話：02-33663452，E-mail: changfj@ntu.edu.tw

收到日期：民國 101 年 06 月 14 日

修改日期：民國 102 年 01 月 03 日

接受日期：民國 102 年 01 月 18 日

雨、及熱帶性低氣壓所帶來之豪雨。石門水庫集水區氣象資料相當完備，資料來源主要為北區水資源局所設置之氣象觀測站及雨量站。其中雨量站又可分為無線電遙報雨量站及自計雨量站等二種。水庫集水區設有十六處雨量站，其中霞雲、高義、巴陵、玉峰、嘎拉賀、鎮西堡、池端、西丘斯山、白石等九站為無線電遙報雨量站，而自計雨量站則有石門、十一份、長興、復興、三光、鞍部、秀巒等七站。

本研究針對石門水庫集水區雨量站並配合雷達及衛星影像系統之觀測時間，蒐集西元 2006~2009 年期間之歷史颱風暴雨資料共 13 場，每場颱風所蒐集的資料長度皆為陸上颱風警報發布至陸上颱風警報解除。其中蒐集的資料可分為地面雨量站資料、QPESUMS 雷達推估降雨資料及 PERSIANN-CCS 衛星推估降雨資料三個部分，分述如下。

2.1 地面雨量資料

本研究蒐集石門水庫集水區包括：石門、復興、巴陵、霞雲、高義、玉峰、嘎拉賀、鎮西堡、白石、長興、三光、秀巒及西丘斯山等 13 個雨量站，集水區及各雨量站之位置如圖 1 所示。西元 2006~2009 年期間 13 場歷史颱風之基本資料如表 1 所示。

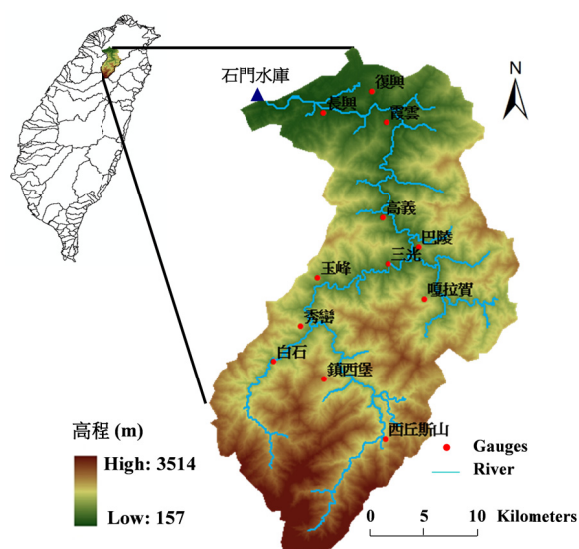


圖 1 石門水庫集水區雨量站位置圖

表 1 颱風事件基本資料表

事件名稱	英文名稱	觀測日期	強度
桑美	SAOMAI	2006/08/09~08/10	中度
寶發	BOPHA	2006/08/07~08/09	輕度
帕布	PABUK	2007/08/06~08/08	輕度
聖帕	SEPAT	2007/08/16~08/19	強烈
韋帕	WIPHA	2007/09/17~09/19	中度
柯羅莎	KROSA	2007/10/04~10/07	強烈
卡玫基	KALMAEGI	2008/07/16~07/18	中度
鳳凰	FUNG-WONG	2008/07/26~07/29	中度
辛樂克	SINLAKU	2008/09/11~09/16	強烈
哈格比	HAGUPIT	2008/09/21~09/23	中度
薔蜜	JANGMI	2008/09/26~09/29	強烈
蓮花	LINFA	2009/06/19~06/22	輕度
莫拉克	MORAKO	2009/08/05~08/10	中度

2.2 QPESUMS 雷達降雨推估產品

雖然地面雨量觀測記錄值為直接觀測最為接近真實降雨量，然而其空間代表性低，僅能代表單點之值；而遙測雨量產品便能有效解釋降雨系統在空間中的分布與移動情形。多重觀測工具之定量降雨估計與分類技術 QPESUMS (圖 2) 為經濟部水利署、氣象局、農委會水土保持局及美國劇烈風暴實驗室整合多重氣象觀測資料並結合地理資訊系統發展劇烈天氣監測系統，系統提供台灣地區整合後之定量降水估計與極短時之定量降水外延預報產品，而系統在產品顯示方面共包含五大類：(1) 雷達基本及整合產品；(2) 地面觀測資料；(3) 降水估計產品；(4) 降水預報產品；(5) 劇烈天氣資訊。(Chen *et al.*, 2007)

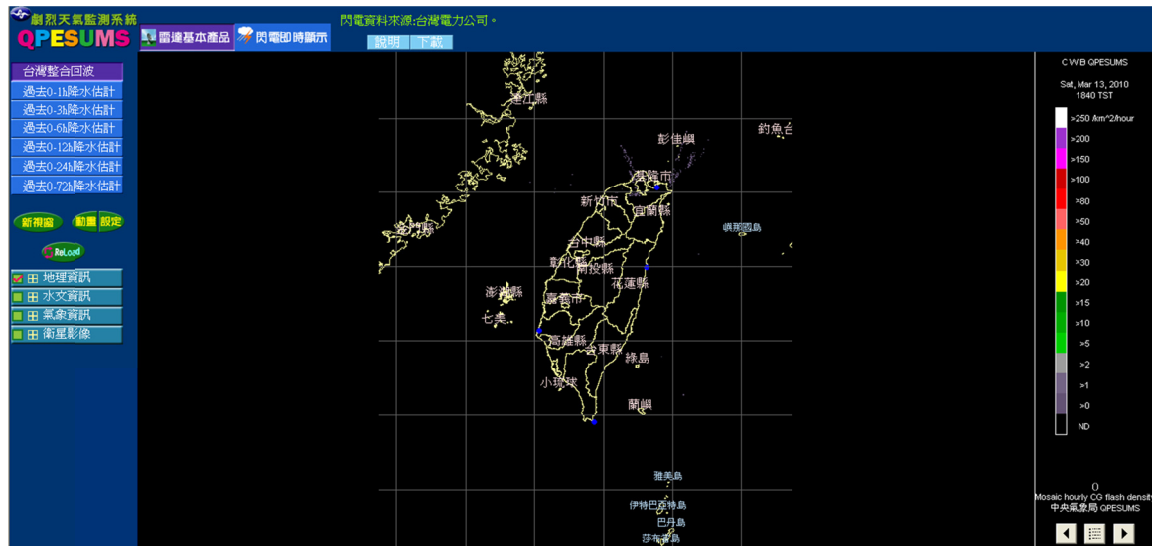


圖 2 QPESUMS 系統介面(<http://qpsums.cwb.gov.tw/>)

QPESUMS 系統網格資料起始點為 27°N , 118°E , 範圍介於 $20^{\circ}\sim 27^{\circ}\text{N}$, $118^{\circ}\sim 123.5^{\circ}\text{E}$, 其南北方向共有 561 個網格; 東西方向共有 441 個網格。產品空間解析度為 $0.0125^{\circ} \times 0.0125^{\circ}$ (約 $1.25\text{km} \times 1.25\text{km}$); 時間解析度為 10 分鐘。QPESUMS 系統針對最低可用仰角回波資料設定一 Z-R 關係式, 透過 Z-R 關係式推估降雨量, 目前系統使用 $Z=32.5R^{1.65}$ 為參考 Alberat, Canada 之夏季對流降雨與雷達觀測資料之關係(Xin *et al.* 1997)。

由於雷達觀測於山區將會受到地形遮蔽影響(如圖 3a 所示), 觀測資料無法直接拿來作為水文上之應用, 必需利用地面雨量站的降雨觀測資料來率定所需之參數, 目前模式之率定方法大致可區分為氣象方法與統計方法。氣象方法為直接量測雨滴粒徑與數量等相關資料, 而統計方法則利用雷達回波因子與地面雨量觀測值來作分析, 其中較常應用之分析方法有簡單之迴歸分析、多變量分析及分層分析法。無論氣象方法或統計方法皆希望獲得可靠之參數, 然如前述, 影響降雨強度之因子眾多, 較難以單一 Z-R 指數分佈關係式準確描述降雨強度與雷達回波因子間之複雜關係。因此, 本研究直接採用中央氣象局所提供校正後之雷達推估雨量產品(如圖 3b 所示), 作為後續定量降雨預報模式之輸入項。

2.3 PERSIANN-CCS 衛星降雨推估產品

西元 1957 年蘇聯發射人類史上第一顆人造衛星史波尼克號(SPUTNIK), 從此展開全球太空發展的序幕。往後數十年間衛星從只具備拍攝雲圖的簡單能力, 到分別具備不同功能及特性的衛星, 其中氣象衛星可以監測大尺度天氣系統的變化, 同時可以定量的觀測許多的氣象要素, 且能即時把所探測之資料傳送到地面上的衛星中心和各接收站使用, 因此以氣象衛星資料來推估地面降雨已成為近年來於雨量推估的主要方法之一。

在諸多以衛星影像資訊所建構之即時降雨推估模式中, 首推 PERSIANN (Precipitation Estimation from Remotely Sensed Information Using Artificial Neural Networks)系統, 此一系統由 Hsu *et al.*, (1997)所提出, 其收集 GMS 紅外光影像以及地面資料, 利用自組特徵映射網路, 將每個像元的亮溫、SURF(為一指標, 用於表示此像元為陸地、海岸、海洋等)、目標區域中心 3×3 像元的平均亮溫、目標區域中心 3×3 像元的亮溫之標準偏差、目標區域中心 5×5 像元的平均亮溫與目標區域中心 5×5 像元的亮溫之標準偏差等 6 個項目為網路輸入資料, 預報日本島及佛羅里達半島二個區域之降雨量。其後研究團隊(CHRS)再提出改良之

PERSIANN-CCS 系統(Hong *et al.*, 2004),目前兩者皆在 NASA 的贊助下發展出降雨產品,且已實際應用於即時線上操作,其中,PERSIANN 模式之空間解析度為 $25\text{km}\times 25\text{km}$,模式之輸出涵蓋全球;而 PERSIANN-CCS 模式之空間解析度更提高為 $4\text{km}\times 4\text{km}$,兩者皆可不斷地提供每小時之即時降雨推估。

PERSIANN-CCS 相較於 PERSIANN 而言,萃取出更多雲層的資訊,對於近紅外光影像中的雲層有更多的描述,例如雲高、雲最低溫度、雲面積與紋理等,並由這些特徵用於對衛星雲圖分類,分類採用 SOFM(Self Organization Feature Mapping Algorithm)類神經網路,其由 20×20 個拓撲層組成,並將 20×20 個拓撲層分類為 7 個類別,以此 7 個類別建立非線性模式建立雲頂溫度與降雨率(Tb-R)

的關係。PERSIANN-CCS 的主要核心為變動的門檻值演算法,該演算法能成功萃取出雲層的特徵;PERSIANN-CCS 系統之演算示意圖如圖 4 所示;

PERSIANN-CCS 系統不僅保留了 PERSIANN 的優點,更在架構上與影像前處理之步驟有所改良,首先,在架構上 PERSIANN-CCS 之輸出層由線性轉換改良成非線性轉換;其次,不同於 PERSIANN 將影像資料每一個 pixel 直接映射至降雨強度,PERSIANN-CCS 則是考慮了影像切割的方法,進而獲得不同大小的雲塊資訊,雖然模式之計算較為複雜但卻大幅增加模式推估的精確性(江衍銘及張斐章,2006)。其模式步驟大致可區分為四點(如圖 5 所示):(1)雲影像的切割 (2)雲塊特徵之萃取 (3)雲塊之分類 (4)降雨量之推估。

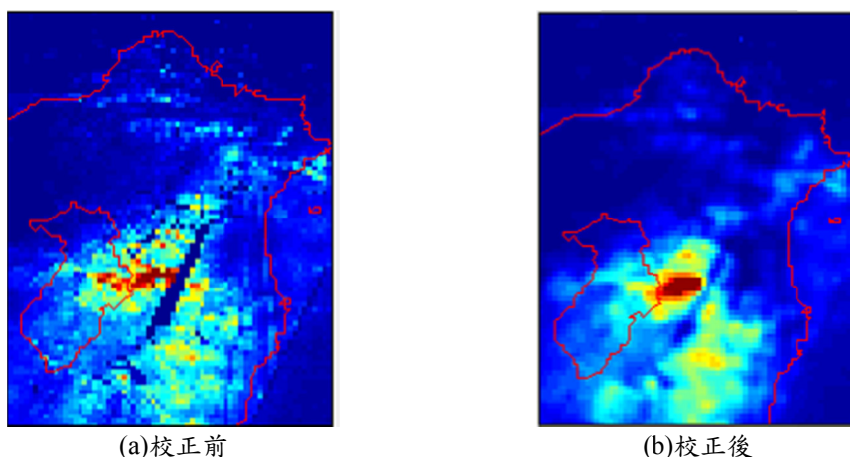


圖 3 雷達資料(QPESUMS)校正前後降雨分佈圖

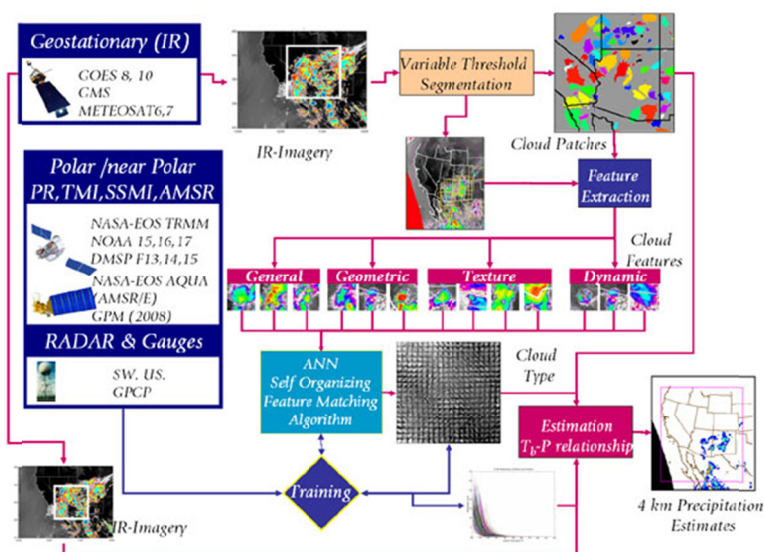
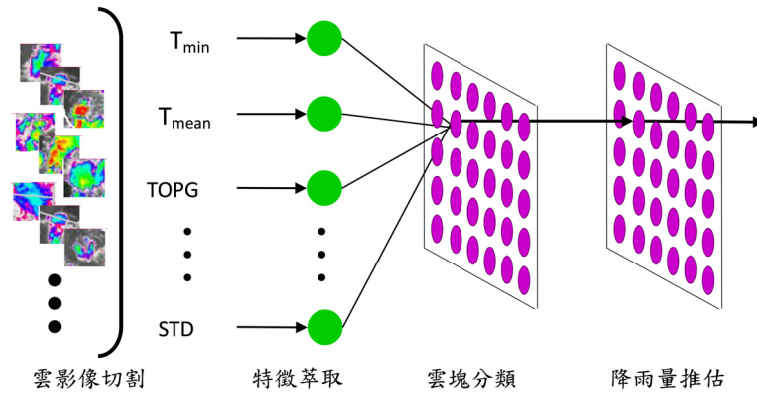


圖 4 PERSIANN-CCS 演算示意圖 (http://chrs.web.uci.edu/research/satellite_precipitation/activities01.html)



雲影像切割乃是以溫度的設定為切割準則，一般皆以固定門檻值(253K)為主，低於此門檻值的雲頂溫度，其雲系視為有降水，而高於此門檻值的雲頂溫度則視為無降水機率，然而若影像包含許多對流胞，單一門檻值將無法有效分割出雲塊，故 PERSIANN-CCS 系統則利用增溫門檻值(incremental temperature threshold: ITT)藉由逐漸增加溫度的方式對雲塊進行切割。

雲塊特徵萃取亦即是對模式輸入變數之挑選，包括：雲塊溫度之最低值及平均值(T_{min} & T_{mean})、雲塊面積(AREA)、雲塊形狀指標(SI)、雲頂溫度之標準偏差(STD)、局部(5×5 pixel)雲頂溫度標準偏差之平均值(MSTD5)、局部雲頂溫度標準偏差之標準偏差(STD5std)、雲頂溫度之梯度(TOPG)及灰階組織(ASMm)等，共 9 項雲塊特徵。

雲塊分類即為將萃取出來之 9 項雲塊特徵作為 SOM 模式之輸入變數，依其在幾何空間上之相關性進行分類，同時亦將多維度之輸入向量映射至二維之特徵圖上，以簡化後續之計算。

降雨量推估則是在輸出層上依不同之分類結果各自建立不同雲頂溫度與降雨量之非線性迴歸式，其可獲得較佳之推估雨量。

3. 以資料融合方法整合地面雨量、雷達及衛星影像觀測

3.1 遺傳演算法

遺傳演算法 (Genetic Algorithm, GA) 乃源自

達爾文進化論中「物競天擇、適者生存」的觀念，利用自然進化、擇優而生的理論來達到增進結果表現值的目的。John Holland 首先於其論著「Adaptation in Natural and Artificial Systems」(1975)中提出，染色體字串能夠用來模擬生物演化機制-適者生存，讓適應值較佳者進行繁衍下一代，其強大的演化能力即使在搜尋空間相當龐大的區域中仍能收斂於近似全域最佳解。

GA 應用於決策模式最佳解的搜尋機制時，首先將決策變數進行編碼轉換成 GA 中的基因，而問題中所有決策變數所轉換的基因集合成為染色體或稱為個體，透過初始化過程，產生第一個世代的群集由設定數目的染色體所集合而成，染色體的總數目稱為群集大小；在第一個世代產生後，須經由適合度評估每個個體(染色體)的優劣程度後，透過機率式的篩選法則選出所需親代的染色體個數，再由遺傳運算子進行複製 (reproduction)、交配 (crossover) 跟突變 (mutation) 產生下一代。遺傳演算法為具演化能力的最佳化搜尋方法，在許多研究與應用證實了 GA 在搜尋全域最佳解 (global optimum) 的問題上，表現出此法具有強健性與效能性，也可以解決傳統數學規劃中對於非連續性、不可微分、多峰及非凸函數的限制與瓶頸。

遺傳演算法主要的搜尋機制有三大運算子：複製、交配及突變，在解空間中進行反覆的進行搜尋，以下分別描述之：

- (1) 複製：每一個體之適合度的高低，影響了其本身是否被挑選或被淘汰，通常適合度越高的個體被選取複製到下一代的機率越高；反之，適

合度越低的個體也有可能被淘汰。常見的選取方法有輪盤式選取法 (roulette wheel selection) 與競爭式選取法 (tournament selection)、排序選取法 (ranking selection)。

- (2) 交配：交配運算就是在複製後從交配池中隨機選取兩個染色體，根據預先設定的交配率 (crossover rate) 決定是否基因交換以產生新子代，交配率愈高，有助於搜尋到表現較佳的解，交配率太低會使收斂速度緩慢，但若交配率太大可能造成較好的個體容易被替換，也會減緩收斂的速度；交配率一般設為 0.8~1。常見基因交換的位置與分割方法有單點 (single-point) 交配、多點 (multi-point) 交配、算術交配 (arithmetical crossover) 及模擬二位元交配 (simulated binary crossover, SBX)。
- (3) 突變：突變機制是為了避免提早收斂、落入局部解之困境。突變於實數編碼中最常見的方法是，突變基因在上下界範圍內隨機產生一個新值，稱為隨機突變。突變發生與否取決於突變率 (mutation rate) 的大小，若小於突變率，則該基因發生突變，反之則不發生突變；突變率門檻值的設定一般約在 0.01~0.1 左右，因過大的突變率則如同使用隨機的方式搜尋，如此便失去了使用遺傳演算法的意義。
- (4) 菁英策略：菁英策略則是將搜尋過程中最好的解保存下來，避免在演算過程中破壞前面搜尋的最佳解。一般在遺傳演算法中皆建議使用菁英策略來提高全域搜尋的效能。
- (5) 停止原則：遺傳演算法之搜尋停止原則，通常是設定一收斂範圍達到即停止；或是搜尋出最佳解的表現在一定程度內趨於收斂就停止搜尋；亦或是設定固定的演算代數，當演算到達設定代數即停止搜尋。

3.2 融合地面雨量、雷達及衛星估計之降雨量

本研究首先將地面雨量、雷達 (QPESUMS) 及衛星 (PERSIANN-CCS) 三種雨量資料來源，處理為

集水區平均面積雨量，計算方式如下所述：

- (1) 雨量站資料：使用徐昇式法計算平均面積雨量；
- (2) QPESUMS 資料：其涵蓋石門水庫集水區之網格共有 434 格，將 434 個網格之雨量值累加後除以網格總數，所求得平均面積雨量即為 QPESUMS 所推估之集水區每小時平均面積雨量；
- (3) PERSIANN-CCS 資料：處理步驟與 QPESUMS 相同，由於 PERSIANN-CCS 其空間解析度為 4km×4km，因此所涵蓋之石門水庫集水區為 45 格，將 45 個網格之雨量值累加後除以網格總數，即可求得 PERSIANN-CCS 所推估之集水區每小時平均面積雨量。

在雨量融合過程中最重要的即是融合權重之搜尋，融合權重搜尋方法有很多種，常見有平均法、最陡坡降法及梯度法等。而最佳化搜尋方法中，遺傳演算法為相當熱門方法之一，其優點可搜尋全域最佳解，因此本研究使用遺傳演算法搜尋最佳融合參數。本研究使用雷達、衛星雨量產品及觀測雨量做資料融合處理，利用遺傳演算法求得最佳融合係數，產生融合雨量 (P_m)。

本研究將分別融合出兩種不同融合雨量，第一種融合雨量為使用雨量站及雷達 (QPESUMS) 資訊分別計算出之集水區平均面積雨量，以上述二種雨量資訊透過遺傳演算法方式求得最佳融合係數 θ_1 及 θ_2 ，其 GA 目標函式及限制式如(1)式與(2)式所示，

$$\text{Min } f(X) = P_g(t) \times \theta_1 + P_r(t) \times \theta_2 - Y \quad (1)$$

$$\theta_1 + \theta_2 = 1 \quad (2)$$

其中 θ_1 及 θ_2 分別代表雨量站 (P_g) 及雷達 (P_r) 資訊在融合過程中所佔之權重，其值應介於 [0 1] 之間， Y 為石門水庫 $t+5$ 時刻之入庫流量。根據研究文獻 (何宜樺, 2009) 石門水庫集水區降雨與流量間之時間延遲為 5 個小時，即 t 時刻之降雨與 $t+5$ 時刻之石門水庫入庫流量有最大之相關性，故本研究假設 $t+5$ 時刻之入庫流量與 t 時刻之融合雨量有

最佳之相關性，因此透過 GA 搜尋之最佳融合權重所組成之融合雨量，即可視為石門水庫集水區 t 時刻之推估雨量。

第二種融合雨量為使用雨量站、雷達 (QPESUMS) 及衛星 (PERSIANN-CCS) 資訊分別計算出集水區平均面積雨量，以上述三種雨量資訊透過遺傳演算法方式求得最佳融合係數 θ_1 、 θ_2 與 θ_3 ，其 GA 目標函式及限制式如(3)式與(4)式所示，

$$\text{Min } f(X) = P_g(t) \times \theta_1 + P_r(t) \times \theta_2 + P_s(t) \times \theta_3 - Y \quad (3)$$

$$\theta_1 + \theta_2 + \theta_3 = 1 \quad (4)$$

其中 θ_1 、 θ_2 及 θ_3 分別代表雨量站(Pg)、雷達 (Pr) 及衛星 (Ps) 資訊在融合過程中所佔之權重，其值應介於 [0 1] 之間，Y 亦為石門水庫 $t+5$ 時刻之入庫流量。

上述二種資訊之融合雨量與三種資訊之融合雨量，經由 GA 進行最佳融合權重搜尋結果如表 2 所示。由圖 6 及圖 7 結果可知，無論是融合二種資訊或融合三種資訊，透過 $t+5$ 時刻流量所搜尋出之最佳融合參數，其融合雨量即 t 時刻之推估雨量與實際降雨量相當接近，其相關係數皆高達 0.99，因此可推論透過 $t+5$ 時刻流量所搜尋出之融合參數，即為推估 t 時刻降雨量之最佳參數。

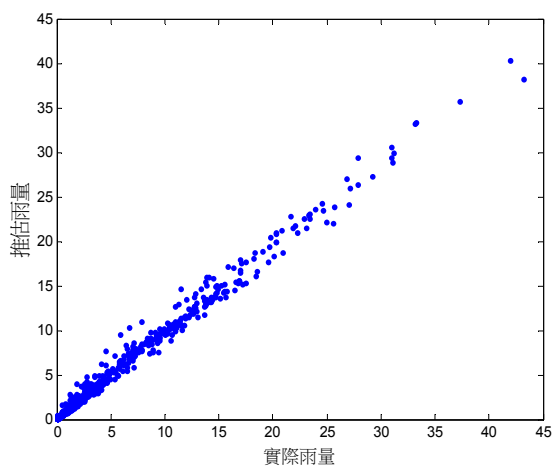


圖 6 二種資訊融合後 t 時刻雨量

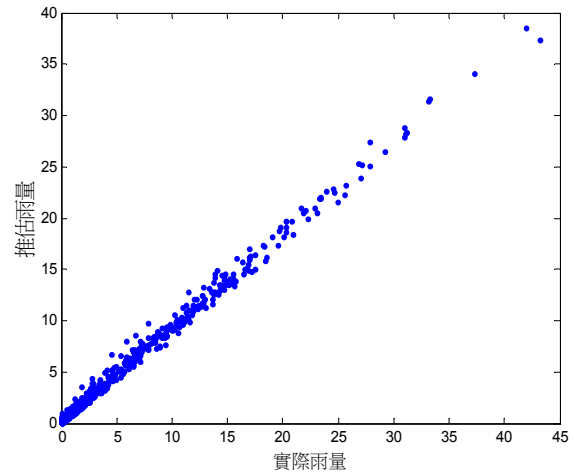


圖 7 三種資訊融合後 t 時刻雨量

表 2 最佳融合權重

	二種資訊 融合	三種資訊 融合
θ_1 (地面雨量站)	0.77	0.79
θ_2 (QPESUMS)	0.23	0.14
θ_3 (PERSIANN-CCS)		0.07

4. 建立石門集水區定量降雨預報模式

類神經網路經過了長時間的發展，已有許多不同的網路模型被提出，因此除了常被使用之倒傳遞類神經網路外，亦有學者選擇其他網路形式推估降雨量 (Luk *et al.*, 2001; Aksoy & Dahamsheh, 2009; Lin & Wu, 2009)，其中 Luk *et al.* (2001) 利用三種類神經網路，分別為多層前饋式類神經網路 (Multilayer Feedforward Networks, MLFN)、部分連結的類神經網路 (Partial Recurrent Neural Networks, PRNN) 及時間稽延的類神經網路 (Time-Delay Neural Networks, TDNN)，預報降雨量的空間分佈且應用於都市排水，結果顯示三種類神經網路在預報未來 1 小時之降雨量，只要網路架構良好且有足夠的訓練次數皆能得到不錯的結果。另亦有許多研

究指出調適性網路模糊推論系統具有處理高度非線性問題的能力，應用於雨量推估時優於傳統統計方法(陳正斌，2004; Talei *et al.* 2010)。

4.1 調適性網路模糊推論系統

近年來模糊推論系統與類神經網路常應用於實務界且有許多成功的案例。類神經網路可擷取不明確知識與處理不完全的輸入資訊來解決系統的問題，但是由於類神經網路所獲得的知識是以權重的方式來表示，因此無法解釋推論系統建構的過程。調適性網路模糊推論系統(Adaptive Network-based Fuzzy Inference System, ANFIS)(Zadeh, 1965, Jang, 1993)即利用以上二種技術加以整合並相互補償個別技術的缺點，使結合的系統將具有類神經網路的優點(如：學習能力、最佳化能力、連結式的結構)，與模糊推論系統的優點(如：接近人類的思考行為、容易結合專家知識)，類神經網路也可藉此改善自身透明度使其更接近模糊系統，而模糊推論系統則可加強自我調整的功能以更趨近於類神經網路，如此可有效地解決非線性系統的建構與控制問題。

(Chiang *et al.*, 2010)

類神經網路雖無法處理定性的知識與邏輯推論過程，卻具有極佳的自我學習與組織能力，其強大的調整能力正可用來作模糊系統的結構與參數之調整，使合乎模糊推論系統中輸入、輸出間的關係。也就是說調適性網路模糊推論系統是用類神經網路的技術，由所獲取的資料中萃取出模糊規則，並利用新獲取的資料逐漸的調整這些規則。因此，ANFIS 結合了二種演算法，可充分發揮模式對於系統不確定性(uncertainty)與不精確性(imprecisely)的處理能力，透過 ANFIS 學習與自我調適進而求得參數最佳解。

調適性網路模糊推論系統之架構，如圖 8 所示，分為五層，同一層節點的隸屬函數或轉換函數採用相似的函數；在學習與調整參數方面，則是結合前饋式類神經網路與監督式學習方法，使得模糊推論系統的所有參數可獲得適當的調整，讓模式具有自我學習與組織能力。本研究 ANFIS 模式建置係採用 MATLAB 之 ANN 模組進行計算。

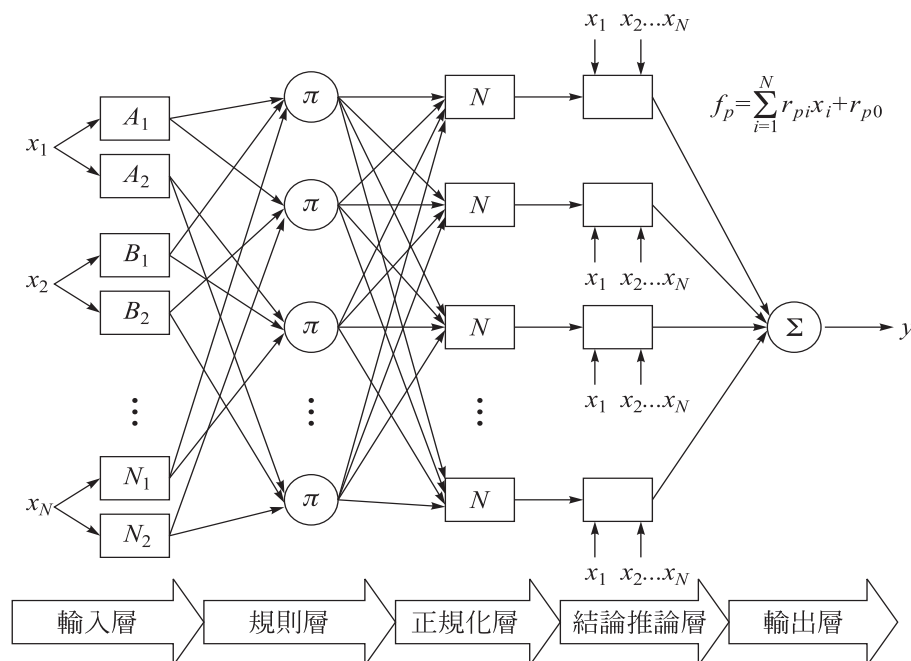


圖 8 ANFIS 架構圖(張斐章及張麗秋，2010)

第一層輸入層

將輸入變數映射至模糊集合，以設定之隸屬函數估算其隸屬度，在此隸屬函數以 S 型函數為例：

$$\begin{aligned} O_{1,i} &= \mu_{A_i}(x) \quad \text{for } i = 1, 2 \\ O_{1,i} &= \mu_{B_{i-2}}(y) \quad \text{for } i = 3, 4 \\ \mu_{A_i} &= \frac{1}{1 + e^{-a_i(x-c_i)}}, \quad \mu_{B_{i-2}} = \frac{1}{1 + e^{-a_i(y-c_i)}} \end{aligned} \quad (5)$$

其中 O_1 為輸入值相對於模糊集合之隸屬函數， $\{a_i, c_i\}$ 為模糊隸屬函數的參數，即前提項(premise)參數，當這些參數值改變，隸屬函數形式也會跟著改變。

第二層規則層

進行變數間模糊邏輯規則之先決條件配對，以得到各規則之 firing strength (即權重值)，再利用 T-norm 乘積運算，即輸出值為所有輸入訊息之乘積：

$$w_i = \mu_{A_i}(x) \times \mu_{B_i}(y), i=1,2 \quad (6)$$

第三層權重平均

此層各節點計算該規則相對於所有規則的 firing strength 之比例，也就是將第 i 條規則的輸出結果除以所有規則之輸出結果，使其輸出值介於 0 到 1 之間。

$$O_{3,i} = \bar{w}_i = \frac{w_i}{w_1 + w_2}, i = 1, 2 \quad (7)$$

第四層結論推論層

$$O_{4,i} = \bar{w}_i f_i = \bar{w}_i (p_i x + q_i y + r_i), i=1,2 \quad (8)$$

其中 $\{p_i, q_i, r_i\}$ 為模糊推論之結論參數，即推論項(consequent)參數。

第五層輸出層

將前層訊息加總以計算輸出變數值，一如解模糊化之功能：

$$\text{輸出值} = O_{5,1} = \sum_i \bar{w}_i f_i = \frac{\sum_i w_i f_i}{\sum_i w_i} \quad (9)$$

4.2 模式評估指標

不同的評估指標可針對不同的颱風降雨預報模式判斷其優劣，因此本研究選用四個評比指標來評估三種模式(三種資訊(未融合)、二種資訊(融合)及三種資訊(融合))不同之輸入模型於颱風降雨預報模式之準確度與適用性，分別為 CC、RMSE、MAE 及 SS 四種，各指標定義如下：

(1) CC (Correlation Coefficient)：

$$CC = \frac{\sum_{t=1}^N [P_{pre}(t) - \bar{P}_{pre}(t)][P_{obs}(t) - \bar{P}_{obs}(t)]}{\sqrt{\sum_{t=1}^N [P_{pre}(t) - \bar{P}_{pre}(t)]^2} \sqrt{\sum_{t=1}^N [P_{obs}(t) - \bar{P}_{obs}(t)]^2}} \quad (10)$$

(10)式中 N 為資料筆數， $P_{pre}(t)$ 為預報雨量， $P_{obs}(t)$ 為實際觀測雨量， $\bar{P}_{obs}(t)$ 為實際觀測雨量平均值， $\bar{P}_{pre}(t)$ 為預報雨量平均值。

(2) RMSE (Root Mean Square Error)：

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{t=1}^N [P_{pre}(t) - P_{obs}(t)]^2}{N}} \quad (11)$$

(3) MAE (Mean Absolute Error)：

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^N |(P_{pre}(i) - P_{obs}(i))|}{N} \quad (12)$$

(4) SS (Skill Score)：

SS 乃為計算不同預測成果間效能之優劣，通常選取一對照組與其他成果比較，因此 SS 又可以改善率代表。本研究以 SS 計算各模式於兩種不同條件下之評比，不同定量降雨預報模式間之改善率。

$$SS = \frac{E_m - E_n}{E_m} \times 100\% \quad (13)$$

(13)式中，下標 m 及 n 分別代表不同定量降雨預報模式，本研究共計算二種 SS，第一種組合為比較未融合的三種資訊(m)與融合的二種資訊(n)；第二種組合為比較融合的二種資訊(m)與融合的二種資訊(n)，當 SS 值大於 0 時，代表融合的二種資訊所建立之定量降雨預報模式優於其他模式，小於 0 時則反之。

4.3 定量降雨預報模式結果與討論

本研究於集水區定量降雨預報模式之建立上，將採用調適型類神經網路建構未來一小時之預報模型，為比較資料融合之有效性與否，本研究將架構三種不同定量降雨預報模式，第一種模式使用雷達(QPESUMS)、衛星(PERSIANN-CCS)及雨量站三種資訊未經融合作為 ANFIS 之網路輸入項，為一多輸入-單輸出之定量降雨預報模式；第二種模式僅使用雷達(QPESUMS)及雨量站資訊，將其二項資訊融合後作為 ANFIS 之網路輸入項，為一單輸入-單輸出模式；第三種模式為使用雷達(QPESUMS)、衛星(PERSIANN-CCS)及雨量站資訊，將其三項資訊融合後作為 ANFIS 之網路輸入項，亦為一單輸入-單輸出模式，其詳細網路架構圖如圖 9 所示。

ANFIS 定量降雨模式架構前需將資料區分為訓練、驗證及測試 3 個部份，故本研究將西元 2006~2009 年共 13 場颱風事件，區分為訓練部份

包含 7 場颱風事件，資料筆數為 350 筆；驗證部份包含 3 場颱風事件，資料筆數共 153 筆；測試部份包含 3 場颱風事件，資料筆數共 138 筆。

表 3 為三種定量降雨預報模式於 $t+1$ 時刻預報雨量之結果，由表 3 可知在 $t+1$ 時刻三種資訊未融合的預測雨量 CC、RMSE 及 MAE 之表現都不如三種資訊融合後的預測雨量，在模式中以融合了三種雨量資訊的定量降雨模式表現最佳，模式測試部分相關係數、RMSE 及 MAE 分別為 0.88、3.88 及 2.39；融合了二種雨量資訊的定量降雨模式表現次之；三種資訊未融合表現最差。而從表 4 亦可得知 QPESUMS、PERSIANN-CCS 及地面雨量站三種資訊融合後與三種資訊未融合之 RMSE 及 MAE 改善率分別為 28.23% 及 27.24%，由此可證明 QPESUMS、PERSIANN-CCS 及地面雨量站經融合成一融合雨量有其有效性。而在融合二種資訊與融合三種資訊於預測 $t+1$ 時刻雨量之比較，由表 4 可知增加 PERSIANN-CCS 雨量產品於定量降雨預報模式中，模式改善並不顯著，然而就其 RMSE 及 MAE 改善率於模式仍然分別有 5.80% 及 6.20%。

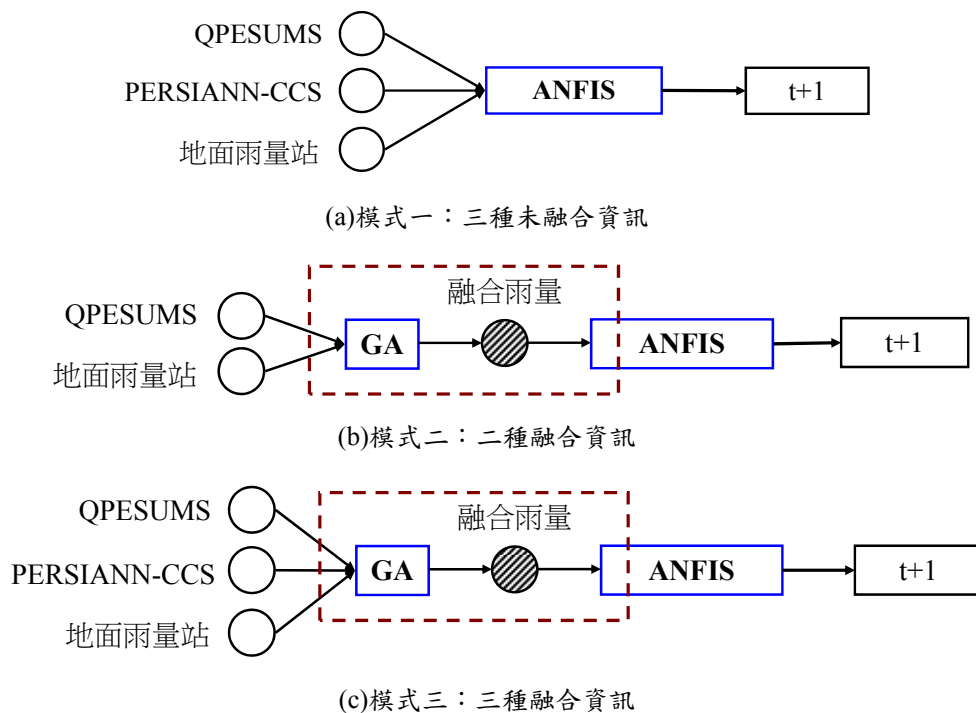


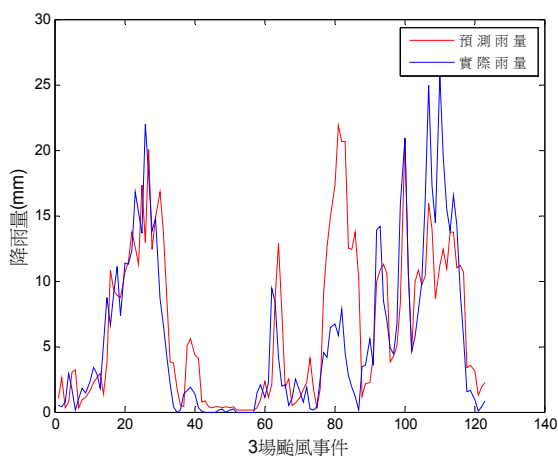
圖 9 (a)~(c)類神經網路定量降雨預報架構圖

表 3 模式結果比較表

	三種未融合資訊			二種融合資訊			三種融合資訊		
	訓練	驗證	測試	訓練	驗證	測試	訓練	驗證	測試
CC	0.85	0.80	0.71	0.88	0.86	0.83	0.88	0.85	0.85
RMSE	4.33	4.12	4.70	3.88	3.32	3.58	3.88	3.52	3.37
MAE	2.65	2.56	3.07	2.35	1.96	2.38	2.39	2.00	2.23

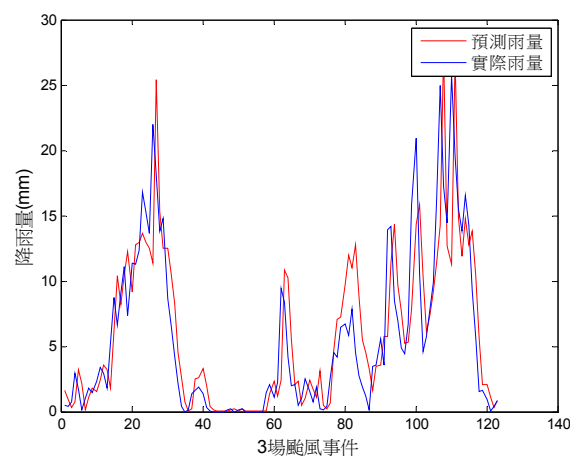
表 4 測試部分不同模式間之改善率

	t+1	
	SS(未融合-融合)	SS(二種-三種)
RMSE	28.23%	5.80%
MAE	27.24%	6.20%



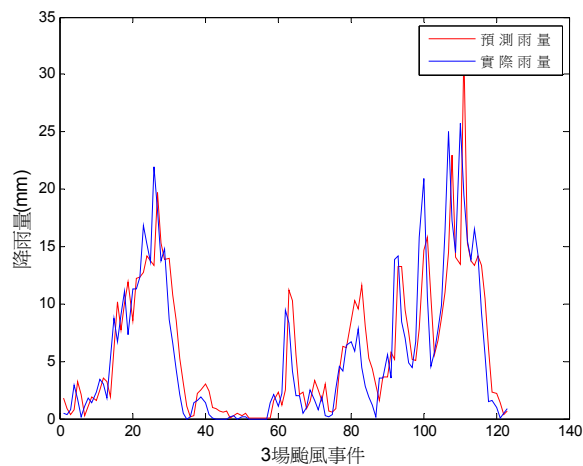
t+1 時刻

圖 10 三種未融合資訊時序圖



t+1 時刻

圖 11 二種融合資訊時序圖



t+1 時刻

圖 12 三種融合資訊時序圖

5. 結論

近年來遙測技術之發展提供集水區降雨於空間之分佈，其主要優點在於有效觀察大範圍降雨在時空之變化，對定量降雨估計而言，遙測影像資訊可提供比地面雨量站更寬廣的訊息。因此，本研究蒐集 QPESUMS 系統提供之雷達雨量產品、PERSIANN-CCS 衛星觀測系統提供之雨量產品以及集水區地面之雨量觀測紀錄，首先以遺傳演算法融合地面雨量、雷達及衛星影像推估雨量三種資訊，其中二種資訊之融合雨量與三種資訊之融合雨量，經由 GA 進行最佳融合權重搜尋，其融合雨量即 t 時刻之推估雨量與實際降雨量相當接近，相關係數高達 0.99。本研究再以 ANFIS 架構定量降雨預報模式，預測未來一小時，在三種定量降雨預報模式中，以融合了三種雨量資訊的定量降雨模式表現最佳；融合了二種雨量資訊的定量降雨模式表現次之；三種資訊未融合的定量降雨模式表現最差，故可證明融合雨量分別擷取 QPESUMS 之高解析度、易探測降雨分布狀況及 PERSIANN-CCS 不受地形影響之優點，應用於定量降雨預報有最佳之表現。

致謝

本文感謝經濟部水利署(MOEAWRA0990040)及國家科學委員 (Grand No. 100-2313-B-002-011-MY3)資料及經費提供，使本研究得以順利進行完成。

參考文獻

- 王琮美，2005，「降雨條件與集水區出流量關係之探討」，國立中央大學土木工程研究所碩士論文。
- 江衍銘及張斐章，2006，以遙測資訊建立類神經網路雲分類系統於雨量推估及洪水預測，中國農業工程學報 52(4): 39-47。
- 宋仁良，2004，「基隆河上游集水區地表特性與降雨逕流之關係研究」，中國文化大學地學研究所碩士論文。

何宜樺，2009，建構集水區多時刻降雨-逕流機制與類神經網路洪水預報模式，臺灣大學生物環境系統工程學研究所碩士論文。

陳正斌，2004，「應用模糊理論於颱風降雨量之推估」，成功大學水利及海洋工程研究所碩士論文。

張斐章及張麗秋，2010，類神經網路導論原理與應用，滄海書局。

Aksoy, H. & Dahamsheh, A., 2009. Artificial neural network models for forecasting monthly precipitation in Jordan, Stochastic Environmental Research and Risk Assessment, 23(7): 917-931.

Chang, F.J., Chang, L.C. and Huang, H.L., 2002. Real-time recurrent learning neural network for stream-flow forecasting. Hydrological Processes, 16(13): 2577-2588.

Chang, K.T., Chiang, S.H., and Lei, F., 2008. Analysing the relationship between typhoon-triggered landslides and critical rainfall conditions, Earth Surface Processes and Landforms, 33: 1261-1271.

Chen, C.Y., Lin, L.Y., Yu, F.C., Lee, C.S., Tseng, C.C., Wang, A.H., and Cheung, K.W., 2007. Improving debris flow monitoring in Taiwan by using high-resolution rainfall products from QPESUMS, Natural Hazards, 40: 447-461.

Chiang Y.M. & Chang F.J., 2009. Integrating hydrometeorological information for rainfall-runoff modeling by artificial neural networks. Hydrological Processes, 23(11):1650-1659.

Chiang YM, Hsu KL, Chang FJ, Hong Y, Sorooshian S. 2007. Merging multiple precipitation sources for flash flood forecasting. Journal of Hydrology 340: 183-196.

Chiang, Y.M, Chang, L.C, Tsai, M.J., Wang, Y.F, and Chang, F.J., 2010. Dynamic Neural Networks for Real-Time Water Level Predictions of Sewerage Systems-covering gauged and ungauged sites, Hydrology and Earth System Sciences, 14:1309-1319.

Hong, Y., Hsu, K.L., Sorooshian, S. and Gao, X.G., 2004. Precipitation estimation from remotely sensed imagery using an artificial neural network cloud classification system. Journal of Applied Meteorology, 43(12): 1834-185

Hsu, K.L., Gao, X., Sorooshian, S., and Gupta, H.V., 1997. Precipitation estimation from remotely sensed information using artificial neural networks. Journal of Applied Meteorology, 36:1176-1190.

- Jang J.S.R., 1993. ANFIS: Adaptive Network-based Fuzzy Unference System. IEEE Transactions on System, Man, and Cybernetics. 23(3):665-685.
- Lin, G. F. & Wu, M. C., 2009. A hybrid neural network model for typhoon-rainfall forecasting, 375(3-4): 450-468.
- Luk, Kin C., Ball, J.E., Sharma, A., 2001. An application of artificial neural networks for rainfall forecasting, neural networks, 33(6-7):683-693.
- Pan, T.Y. & Wang, R.Y., 2004. State space neural networks for short term rainfall-runoff forecasting. Journal of Hydrology, 297: 34-50.
- Talei, A., Chua, L. H. C., Wong, T. S. W., 2010. Evaluation of rainfall and discharge inputs used by Adaptive Network-based Fuzzy Inference Systems (ANFIS) in rainfall-runoff modeling, Journal of Hydrology, 391(3-4): 248-262.
- Xin L, Reuter G, Larochelle B. 1997. Reflectivity–rain rate relationships for convective rainshowers in Edmonton. *Atmosphere–Ocean* 35:513–521
- Zadeh L.A., 1965. Fuzzy Sets. Information and Control. 8:338-353.

Integrating Multiple Information for Precipitation Estimating in Mountainous Area

Fi-John Chang^{1*} Meng-Jung Tsai² Yen-Ming Chiang³ Ming-Chang Shieh⁴

ABSTRACT

Simulation of extreme rainfall-runoff events is the key issue for flood mitigation. The accuracy of flood forecasting driven by models is usually dependent on whether the upstream precipitation information is sufficient or not. In the past, such information was provided by ground measurements. The development of remotely sensed technology enables researchers to realize the spatial distribution of rainfall. Remote sensing data provide more useful information than ground measurements. The GA was applied to merging different precipitation products through various input combinations. Finally, the ANFIS was conducted to build three quantitative precipitation forecast models by feeding different input combinations, which are 1) three precipitation products, 2) merged precipitation generated by QPESUMS and ground measurements, and 3) merged precipitation generated by PERSIANN-CCS, QPESUMS and ground measurements, respectively. The improvement rate of model 3) over model 1) for quantitative precipitation forecast is 28% at t+1. The results show the model merging ground measurements, QPESUMS and PERSIANN-CCS produced the best precision for quantitative precipitation forecast.

Keywords: data integration, artificial neural network, quantitative precipitation forecasting

¹ Professor, Dept. Bioenvironmental Systems Engineering, National Taiwan University

² PhD Candidate, Dept. Bioenvironmental Systems Engineering, National Taiwan University

³ Post-doctoral Researcher, Dept. Bioenvironmental Systems Engineering, National Taiwan University

⁴ Head, Water Hazard Mitigation Center, Water Resources Agency, Ministry of Economic Affairs

*Corresponding Author, Phone: 886- 2-33663452, E-mail : changfj@ntu.edu.tw

Received Date: Jun. 14, 2012

Revised Date: Jan. 03, 2013

Accepted Date: Jan. 18, 2013

運用福衛二號高時空分辨率多光譜影像於台灣全島 崩塌地判釋與災害分析

林恩如¹ 劉正千^{2*} 張智華³ 鄭依凡⁴ 柯明勳⁴

摘要

台灣每年同時受到三項以上自然災害威脅的人口面積比例高居世界第一位，其中主要為山坡地災害，且台灣缺乏長時間的崩塌目錄。故本研究將 2005 至 2012 年間的福衛影像經錯位修正、正射糾正、色彩融合、邊緣銳化與可適化對比增強處理後，再以「遙測影像崩塌及陰影區專家輔助圈繪系統」進行陰影與崩塌區之判釋、以最小集水區的觀點群組崩塌地、結合陰影資訊的變異分析法找出年間變動量，最後建置崩塌目錄。在崩塌判釋結果方面，2m 解析度判釋結果與 25cm 航照判釋結果相比，崩塌判釋之平均整體準確度達 98%。

關鍵詞：衛星影像處理、崩塌地判釋、陰影判釋、年間變動量、崩塌地群組

1. 前言

自然界層出不窮的地震、海嘯、颱風、山崩等重大災害事件，是現今威脅人類生命安全，造成財產損失的主要因素，因此，預測災害潛勢、了解災損範圍、探討致災原因，達成知災、避災、救災、減災的目標，是國內外產官學研界共同關注的重要課題(楊樹榮等，2011)。世界銀行於 2005 發行的一份報告(Dilley, 2005)指出，台灣同時受到兩項或三項以上自然災害影響的人口土地面積分別達到 73.1%與 99.1%；台灣有 97%的面積都曾經歷過災後重建、而 96.6%的人口居住在曾發生過災害的地區，若以單位面積同時受到三項以上的天然災害損失上所花費的國民生產毛額(GDP)來計算，台灣更是高居全球第一位(Dilley, 2005)。聯合國減災策略組織在 2007 年出版的一份報告(UNISDR, 2007)中也指出：全球環境的變遷將導致發生災害的風險大幅增加。台灣不僅自然災害頻繁、災害高風險所佔的面積廣大，再加上未來極端氣候事件頻度增加的推波助瀾，蒐集調查台灣地區自然災害相關的各種

資訊並進行深入的研究分析，實為當務之急。

台灣主要的自然災害有地震、落石、地滑、土石流、颱風、豪雨與地層下陷等七大類型，根據中央氣象局的統計資料顯示，每年平均有 3~4 颱風侵襲台灣，規模大於 5 的地震平均約 24.4 次，再加上台灣山高多坡陡、地處岩體容易產生高密度破裂現象的活躍造山帶，具破碎岩層、膠結不良、壓縮及張裂性共存的地質結構特性(錢憲和，1999)，再加上氣候溫暖多雨，風化作用激烈。因此每當颱風、豪雨或地震發生，就容易誘發大規模崩塌的發生(Ho, 1988)。若能有系統地建置台灣地區長期的崩塌地資料庫，不僅可以掌握崩塌發生時間與空間位置，追蹤其長期發展變化，作為治理與管理之重要依據；透過與各種致災因子空間資訊的整合分析，更可以深入了解災害發生的機制，建立準確的災害預警模式。

一般調查崩塌地的方法是透過人員至現場進行田野調查，相當耗費人力、時間與經濟成本。近年來各種新科技也被應用於崩塌地的調查工作，例如以紅外線感測器監測邊坡穩定(Bison *et al.*,

¹ 國立成功大學地球科學系 碩士

² 國立成功大學地球科學系特聘教授兼全球觀測與資料分析中心 主任

³ 國立成功大學環境工程學系 助理教授

⁴ 國立成功大學全球觀測與資料分析中心 專案經理

*通訊作者，電話：06-2757575 ext. 65422, E-mail: ccliu88@mail.ncku.edu.tw

收到日期：民國 101 年 06 月 14 日

修改日期：民國 101 年 07 月 13 日

接受日期：民國 101 年 12 月 20 日

1990)、使用航空照片圈繪崩塌地以建置廣域而詳盡的崩塌目錄(Landslide inventory)、以 Radar 監測崩塌地的分布與運動方式(Singhroy & Molch, 2004)、以 LiDAR 製作 DEM 並結合光譜資訊來劃定崩塌地特徵、評估運動方式(McKean & Roering, 2004; Metternicht *et al.*, 2005)。在各種調查與分析崩塌地的方法之中,運用衛星遙測影像進行崩塌地調查具有大範圍、近即時、高頻度、完整保存長時間序列資料、且成本相對低廉的優點。快速獲取並處理遙測影像以進行崩塌災害緊急應變與災損評估、產製廣域與長期之崩塌目錄、進而深入了解災害發生機制、建立準確的災害預警模式,這些工作不僅是世界發展的趨勢,對於欠缺長時期的崩塌目錄的台灣更是相當重要與急迫。

土石流的分析方法主要可分為定值法與機率法兩種,而機率法又可分為定性與定量法兩類,前者是運用極限平衡來計算的無限邊坡分析方法;後者則建立在長時間的崩塌目錄的基礎之下,以統計多變量分析方法分析崩塌地。過去台灣因為無此類目錄資料,故無法進行準確的崩塌地分析(李錫堤, 2009)。目前國內關於將機率法應用在崩塌地潛感分析的研究,大多是運用各種多變量分析法找出因子之間的相對權重後,再以 1~2 個山崩事件來建立預測並驗證模型,但目前使用此方法所得到的結果,與已建置多年崩塌目錄、在全國性的等級亦具有同質性和可比較性的義大利相比,仍有相當大的改進空間(楊樹榮等, 2011)。這其中的關鍵,就在於建置台灣地區一致性、完整且長時間的崩塌目錄。此外,本研究所建置的崩塌目錄是經由判釋衛星影像所建立的崩塌目錄,並進一步探討山崩潛感值(landslide susceptibility index, LSI)、年間地表變化量等特質的目錄型態,屬地區型崩塌目錄的一種。

本研究使用具機動靈活取像能力與高時空分辨率特性的福衛二號影像作為崩塌判釋的主要資料來源。福衛二號自 2004 年升空以來,每天早晨 10 點左右均通過台灣,累積至 2012 年 5 月為止,已對台灣拍攝約 2 千萬 2 平方公里的影像(劉正千及張智華, 2009)。就台灣各種遙測平台而言,福衛二號不僅拍攝範圍不受限制,還可以在短時間

內完成全島所有地區的取像工作。以莫拉克風災的特殊事件為例,福衛二號於 8/10~17 期間每天通過台灣的同一軌道上,都藉著調整姿態進行多次取像,充分發揮了福衛二號靈活取像的特點(劉正千, 2009)。台灣自主控制的福衛二號不僅擁有高時空分辨率的資料優勢,在突發災害的應變上也深具機動性,實為建置台灣地區一致性、完整且長時間崩塌目錄的最佳資料來源。

本研究使用福衛二號兩公尺解析度之融合影像,結合數值高程模型(Digital Elevation Model, DEM)、衛星拍攝姿態參數、地面控制點(Ground Control Points, GCPs)等資料,進行嚴密的正射糾正處理。並運用「遙測影像崩塌及陰影區專家輔助圈繪系統」,由影像之多頻譜資訊計算正規化差異植生指標(Normalized Difference Vegetation Index, NDVI)與綠度指標(Greenness)以自動且快速地圈繪非植生區域;由影像之全色態強度資訊自動且快速地圈繪暗區。最後結合判釋區域之高程資訊及前期影像,由判釋人員選定陰影與崩塌區,輸出向量圖層。經與農航所 25cm 航照圖進行準確度檢核,崩塌判釋之平均整體準確度達 98%,最後以崩塌地面積的變化量,為年間變化主要探討之對象進行分析。從崩塌地間的變化量可得知, 93、94、97、98 年雖略有上升的趨勢,但整體而言變動幅度並不大。增幅最大的是從 98 年的 10157.8ha 增加到 99 年的 38147.9ha。本文架構第一章為緒論,簡述建置崩塌目錄之重要性與原因,選擇福衛影像之理由,以及所使用的研究方法,第二章為福衛二號的簡介與影像處理過程,第三章說明如何以光譜資訊(NDVI、Greenness、全色態)來進行崩塌判釋,以及崩塌判釋成果的準確度檢核,第四章則將崩塌地群組、修正陰影資訊後,逐年分析崩塌圖層,並探討誤差來源,第五章為結果與討論。研究流程如圖 1。

2. 影像處理

本研究以 2005 至 2012 年間,每年 1-7 月所拍攝台灣地區的福衛二號影像,使用「福爾摩沙二號衛星影像自動處理系統」(F-2 AIPS) (Liu, 2006)進

行基本的幾何與輻射校正、快速產製 Level-1A 影像，再進行嚴密的錯位修正、自動正射糾正、彩色融合、邊緣銳化與可適化對比增強等精細複雜的處理，產製兩公尺解析度之彩色融合影像。再使用「遙測影像崩塌及陰影區專家輔助圈繪系統」，由影像之多頻譜資訊計算 NDVI 與 Greenness，以自動且快速地圈繪非植生區域；由影像之全色態強度資訊自動且快速地圈繪暗區。最後結合判釋區域之高程及前期影像資訊，由判釋人員選定陰影與崩塌區，使其每次崩塌判釋成果準確度均能維持同一水平，並確保判釋結果具有同質性和可比較性。最後再將各年度陰影與崩塌圖層進行比對分析。

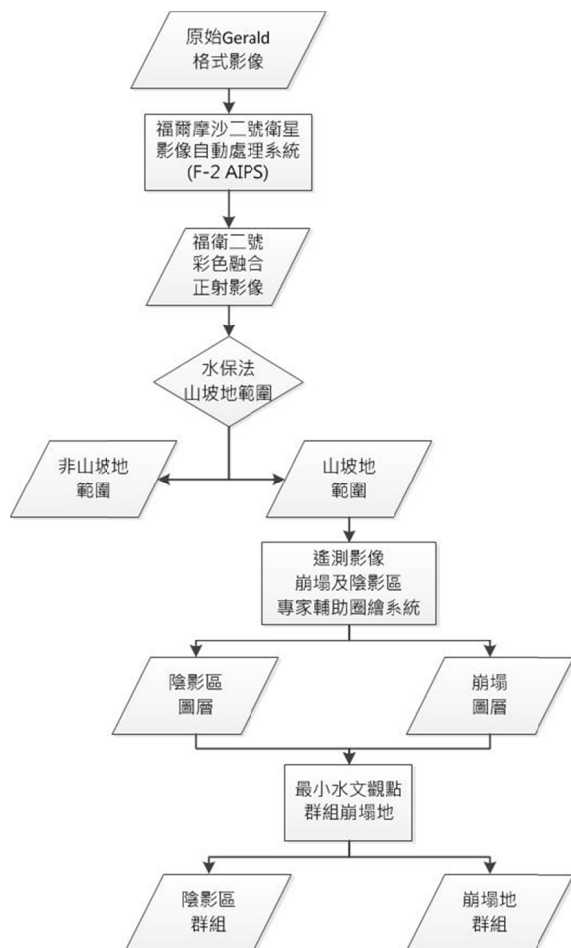


圖 1 研究流程圖

2.1 福衛二號影像處理

福衛二號是台灣第一顆自主控制的高時空分辨率遙測衛星，每日通過台灣上空兩次，可拍攝時間約為八分鐘，第一次為早上九點四十分至十點十

分之間，視軌道高度而定，可進行排程任務拍攝；第二次為晚間，此時可下傳其他地區的拍攝資料。目前的取像作業以條帶為基準，每個條帶刈幅 24 公里，相互重疊約 2 公里。而福衛二號通過台灣正上空的第一軌道可以近乎垂直的視角拍攝影像以避免因拍攝角度過大造成影像扭曲變形現象，此特色不僅提高空間上的細節，同時也減少正射糾正處理上的困難，而福衛二號的再訪性對災害監控與時間序列變化判別的應用上深具優勢，連續多日且定點監測的影像在前後期對比的應用上深具優勢且準確性，故本研究採用福衛二號作為崩場地判釋與定點監測的最佳遙測平台。

本研究所使用的 DEM 為內政部臺灣地區像片基本圖修測工作所製作的 20 公尺解析度 DEM。以數值化方式來展現三度空間地形起伏變化情形的數值高程模型為輔助，可以在進行判釋時避免資訊不足或誤判的情況發生。此外，用來進行正射糾正之準確度檢核的資料是由農林航空測量所製作的彩色正射航照圖，其比例尺為 1/5000，地面解析度為 25cm。為避免影像受衛星拍攝角度與天候的影響，進而導致正射作業困難以及背陽區崩場地受到地形遮蔽，本研究優先選擇拍攝角度較小、且盡量接近 7 月(汛期前)所接收的無雲影像為主，而優先選擇於汛期前影像之原因除了減少雲覆率以外，本研究合理假設汛期是造成該年大量新增崩場地之主因，故以此時期之影像代表該年度尚未有新增崩塌之影像，如此一來，若欲求前年新增崩塌時，比較該年度與前年度崩塌圖層即可。選取影像之詳細資訊如表 1，說明影像處理流程。

2.1.1 全色態與多頻譜影像之錯位修正

F-2 AIPS 是以 2m 的全色態為基底影像，運用快速正規化相關匹配 (Fast Normalize Cross Coefficient, FNCC) 的方法自動找到最大相關匹配的相對位置，並產製大量控制點(相關係數 0.5 以上)，再利用多項式映射關係濾除不良控制區後，以剩下品質良好的控制點為輔助，將多頻譜影像對全色態影像進行錯位修正(Liu, 2006)。

表 1 影像選取日期與角度

取像日期	影像角度	取像日期	影像角度
2005/01/03	-0.79 / 8.31	2008/12/03	11.4 / -1.04
2005/01/17	-4.98 / -0.30	2008/12/04	12.78 / -3.33
2005/01/20	-4.57 / -1.78	2008/12/10	6.53 / 4.35
2005/01/23	-6.04 / 5.93	2008/12/11	8.80 / 8.54
2005/01/24	1.97 / 0.00	2008/12/20	4.82 / 0.51
2005/03/06	-1.37 / 27.50	2008/12/21	8.47 / 4.85
2005/03/07	-1.36 / 27.11	2009/01/03	2.64 / 0.39
2005/03/16	-4.98 / -0.11	2009/01/14	6.23 / -1.64
2005/03/21	-3.29 / -6.61	2009/01/17	7.32 / 0.62
2005/04/04	-2.11 / -3.21	2009/01/28	7.16 / -5.09
2005/04/16	-4.09 / -0.43	2009/01/29	8.18 / 0.47
2005/04/23	-0.02 / 0.03	2009/06/29	7.26 / 0.42
2005/04/30	-1.50 / 0.02	2010/01/11	-0.31 / 4.47
2005/05/02	-1.52 / -0.14	2010/01/14	0.23 / -4.59
2005/05/22	0.25 / -9.15	2010/01/16	-5.55 / -0.10
2005/06/05	-0.07 / -5.48	2010/01/20	0.97 / 4.55
2005/06/06	-0.60 / -18.27	2010/02/10	1.07 / 0.17
2005/06/09	-9.18 / 10.80	2010/02/11	1.08 / -0.07
2005/07/01	3.58 / 0.91	2010/02/23	-1.74 / 0.06
2005/07/02	-5.40 / -11.82	2010/02/26	2.13 / 4.69
2005/07/09	-3.12 / -9.31	2010/03/06	-1.64 / -1.74
2005/07/10	-4.69 / -6.65	2010/03/11	-4.73 / 4.21
2005/07/14	-1.33 / 4.88	2010/04/01	-3.04 / -0.24
2005/07/25	-3.23 / -10.61	2010/04/10	-0.25 / -0.07
2008/01/03	13.20 / -10.58	2010/04/12	2.88 / -4.78
2008/01/07	15.97 / 1.10	2010/05/25	-0.87 / -4.16
2008/01/10	15.60 / 2.24	2010/11/18	6.15 / 5.06
2008/01/19	13.68 / -1.24	2010/12/20	9.76/5.17
2008/01/20	14.87 / -1.95	2011/02/05	3.37 / 4.43
2008/02/02	16.23 / -1.60	2011/02/06	2.41 / -3.04
2008/02/16	11.64 / -14.39	2011/02/08	6.32 / 3.87
2008/02/17	12.65 / -5.48	2011/02/10	4.85 / -1.47
2008/03/03	9.27 / -5.63	2011/02/22	-0.25 / 2.91
2008/03/27	12.82 / -36.79	2011/02/27	4.90 / 4.77
2008/04/06	11.20 / -10.23	2011/02/28	6.32 / 3.87
2008/04/09	12.33 / -8.46	2011/03/19	2.88 / 0.28
2008/04/26	11.15 / 4.23	2011/04/16	1.82 / 0.08
2008/05/10	2.71 / 0.72	2011/04/19	2.03 / -5.03
2008/05/12	10.90 / 0.54	2011/04/25	4.62 / -4.69
2008/05/13	12.20 / 0.99	2011/05/09	-0.53 / 3.05
2008/05/14	6.85 / 0.43	2011/06/06	3.18 / -0.70
2008/05/15	4.19 / 0.16	2011/06/09	-1.31 / 1.80
2008/06/10	9.08 / 0.76	2011/06/18	1.07 / 5.31
2008/06/22	8.00 / -5.51	2011/06/23	-0.39 / 4.44
2008/07/02	10.31 / 0.84	2011/07/08	1.01/-0.63

2.1.2 自動正射糾正處理

經錯位修正的影像，藉由點配足夠數量的地面控制點座標，輔以衛星拍攝姿態參數以及 DEM 等資料，進行嚴密的正射糾正以產製正射影像。F-2 AIPS 使用其他航空或衛星平台所產製之正射影像為基底影像，先在基底影像上利用空間特徵，自動圈繪出不隨時間改變之大量控制區，並利用 FNCC 的技術在 F-2 Level-1A 影像上，自動搜尋控制區內達到最大相關匹配的相對位置空間座標後。再將大量控制區座標輸入 ERDAS IMAGE© 8.7 的 Leica Photogrammetry Suite©系統，並輔以衛星拍攝姿態及數值高程模型等資料，即可建立一組空間映射轉換關係，藉以濾除所有匹配不佳的控制區，在擁有大量高品質控制點後，即可快速產製高品質正射影像(Liu & Chen, 2009)。運用此方法既不需實地測量控制點，其平地與山區的正射準確度(Root Mean Square Error, RMSE)各高達 3、5 個像元內圖 2。

2.1.3 彩色融合處理

一般商用影像處理軟體內建的一般影像融合模組，例如 HSI 轉換(Haydn *et al.*, 1982)或是 Brovey 轉換(Gillespie *et al.*, 1987)等方法，都無可避免地造成原始影像光譜特徵的失真。故本研究改以利用光譜總和強度調適法(Spectral Summation Intensity Modulation, SSIM)方法將低空間分辨率的多頻譜資訊與高空間分辨率資訊的全色態影像進行影像融合，不僅增進影像的空間細節，同時又保存原有頻譜的特性(Liu *et al.*, 2007)。

2.1.4 邊緣銳化與可適化對比增揚

光學衛星影像受到取像時天候的影響，許多細節部分常因對比不佳而不易辨識。此種問題無法藉由一般線性增揚或直方圖等化的方式予以消除。為使災害判釋與變異分析的應用上更為精準，本研究利用針對整幅影像細部加強的可適化對比增揚功能以及邊緣銳化濾波器，使影像中物體的邊緣更銳利、清晰，達到良好的視覺效果。

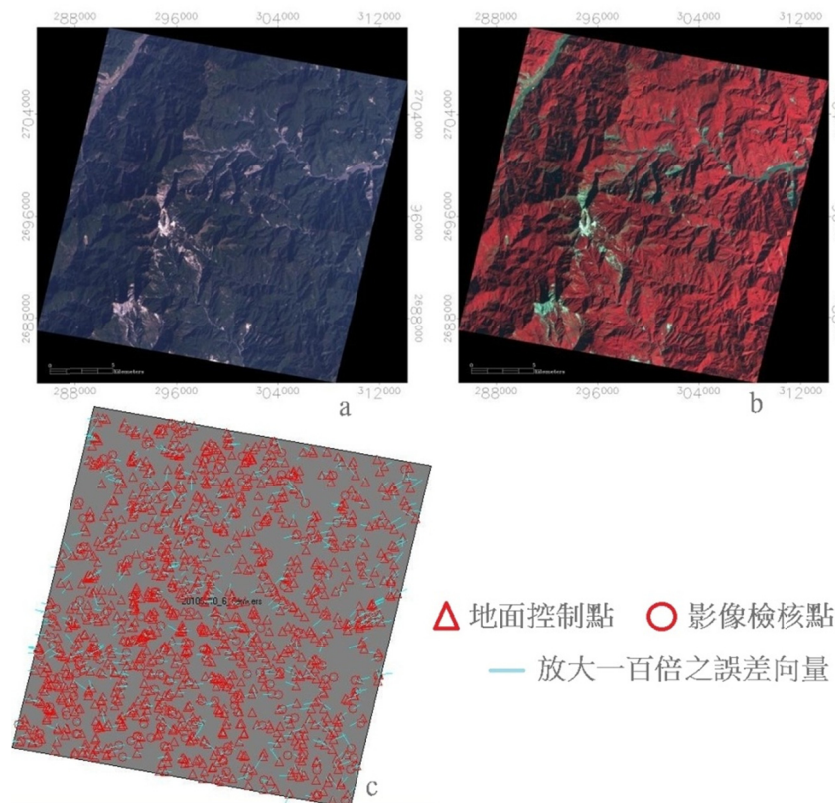


圖 2 自動正射糾正處理產製之正射影像實例(a)真實自然色 (b) 標準假彩色 (c) 誤差向量圖及檢核點 RMSE 資訊

3. 崩塌地判釋

將影像進行各種糾正使其影像正射準確度提升後，本研究利用衛星影像多頻譜資訊以及不同地表地物之反射光譜差異特性進行崩塌地判釋。

3.1 崩塌地判釋回顧

一般崩塌地調查方法可分為三種，包括現地人工調查、航照或衛星影像、及混合兩者(張崑宗等，2010)，其中崩塌地判釋最早主要是以人工方式，在航空照片上直接進行圈繪(Singhroy, 1995; Singhroy *et al.*, 1998; Kumar *et al.*, 2006)。例如早期在歐洲地區的崩塌地以及災害帶調查，大多是以機載的立體像對影像計算崩塌地的分布、崩塌頻率，並繪製、監測崩塌地(Mantovani *et al.*, 1996)。這種作法需花費大量時間及人力，長期大範圍實施成本高昂，在緊急應變上亦無法發揮即時功效(Joyce *et al.*, 2009)。近年來因高解析度的衛星影像的發展、高解析度衛星影像判釋崩塌的準確度與傳統機載立體像對影像判釋的準確度相仿(比例尺<25,000)、花費的判釋成本也相對低廉，且衛星影像光譜資訊豐富、容易取得(Nichol *et al.*, 2006)，故用衛星影像判釋崩塌已為世界的趨勢。

隨著高空間分辨率的衛星影像逐漸普及，監督式分類法(Nichol & Wong, 2005; 周毓嘉, 2005; 洪瑞鄉, 2006)、非監督式分類法(Dymond *et al.*, 2006)、及比值影像(Cheng *et al.*, 2004)等三種自動分類的方法便廣泛使用於崩塌地判釋工作。其中監督式分類法是人工選取訓練區後，在訓練區中人工決定分類類別並圈繪，再依每類別的光譜平均值來對整幅影像進行分類，但此法不僅手工圈繪訓練樣區耗時，且訓練樣區之選取亦影響分類準確度。非監督式分類為人為給定好欲分類級數、門檻值後，電腦自動計算光譜中心的初始值並不斷反覆迭代修正光譜中心值至收斂，以完成分類結果，此法雖能避免監督式分類因訓練樣區之偏差所產生的誤差，但若研究區土地覆蓋分布不如波譜分布均勻時，時常有準確度不足之現象。比值影像，例如

NDVI 影像，雖可以消除同一類物體受地形、季節等環境影響所產生的變異(潘國樑, 2006)，且亦可快速獲取任務所需之特徵，但針對不同區域之比值影像進行特徵萃取時很難決定達到準確度要求之門檻值(表 2)。

表 2 崩塌判釋自動分類方法比較

方法	監督式分類法	非監督式分類法	比值影像
優點	影像分類效能良好	避免判釋類別重疊快速的產生均勻的波譜分類結果	- 消除同類物體所產生的變異 - 快速獲取特徵
缺點	- 耗費大量的時間進行判釋訓練 - 訓練樣區之選取影響判釋結果	精準度不足	難決定達到準確度要求之門檻值

除了使用頻譜資訊進行全自動分類的方法之外，近年來亦有嘗試引進物件導向(Object-Oriented Classification)之觀念，將影像上相關性高的像元結合成有意義的區塊，再於區塊中附加屬性特徵作為辨識依據(洪凱政, 2009)。這種以經驗法所建立的知識庫進行崩塌地自動判釋的作法，其成果優劣取決於知識庫的完整性，因此不同的事件亦可能會有不同的判釋成果準確度。此外，近年來亦有將遙測影像與各種地理資訊系統(Geographic Information System, GIS)結合，將崩塌地圖層與不同屬性圖層結合進行空間分析的作法提出(Metternicht *et al.*, 2005)。

3.2 遙測影像崩塌及陰影區專家輔助圈繪系統

根據不同地物對入射光的反射能力互異，地物反射光的強弱與入射光的波長、入射角的大小，及地物表面的顏色、組成成份、微觀幾何形態、巨觀

幾何形狀等特徵有關。地物的反射光譜即是地物的反射率隨入射波長變化之規律，由於光譜特徵可隨時間及空間大小而變，藉由該特性，依地物反射率與波長間之關係所繪製而成的曲線圖（橫座標為波長，縱座標為反射率），可運用於輔助遙測影像中地物的辨識（林家慶，2007）。以前人研究之結果對本研究區域的影像進行非植生區判釋。F-2 具有紅光及近紅外光波段，可計算 NDVI 做為區別植生區域與裸露地的依據。但因裸露地與陰影區 NDVI 值過於相似，不易由門檻設定將兩者區分出來（王

慧雯，2007；楊孟學等，2009），故本研究利用植生在綠光波段的反射率大於紅光波段的特徵，合併使用了 Greenness，以區別植生區域與裸露地，獲得一不受陰影區影響之裸露地影像（表 3）。本研究運用兩種指標之優勢，以設定門檻的方式個別對兩種指標進行裸露地與植生區域分類，並將兩者分類結果進行交集運算，以獲得一不受陰影區影響之裸露地影像（圖 3）。其影像再經全島土地使用分類資料建立遮罩，除去已知建物、道路、河道等區域，即可產生初步的崩塌潛勢圖層。

表 3 NDVI 與 Greenness 之比較

	值域	數據意義	優點	缺點	判別結果
NDVI	-1~1	指標值大:綠色植物生物量增加	降低雜訊	其非線性延伸的結果，造成對於低值區的增強及高值區的抑制→裸露地與陰影區不易區分	區分植生與非植生區
Greenness	-1~1	指標值大:富含植被	降低雜訊	反映植生的靈敏度稍差	消除陰影區與裸露

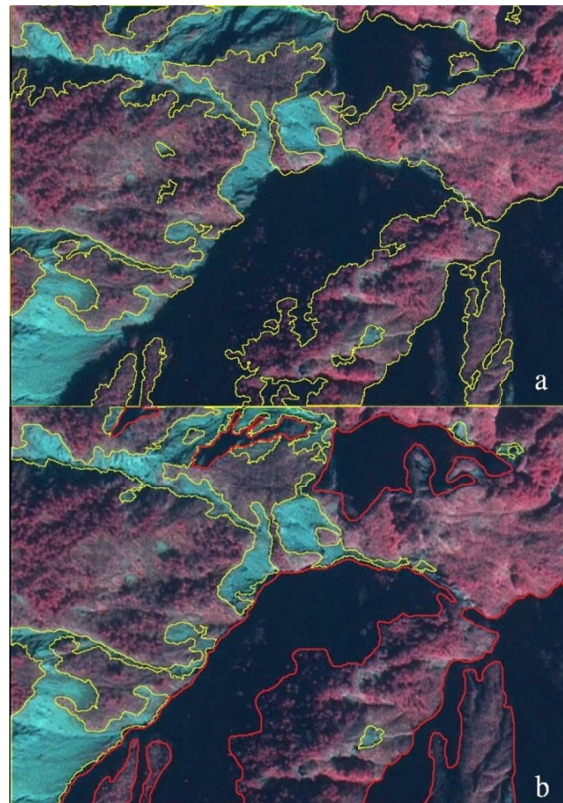


圖 3 (a)單獨使用 NDVI 指數並以 0.14 作為圈繪之門檻值，黃色曲線區域為崩場地潛勢區。陰影地區會誤判列入裸露地區。(b)同時使用 NDVI 與綠度指數分別設定 0.14 與-0.01 作為門檻值交集運算，可消除陰影影響，去除誤判區域（紅色圈繪處），圈繪出正確崩塌地區

接著運用區域增長 (Region Growing) 的概念，將崩塌潛勢圖層中不相連的資料分離成獨立的物件，具有獨立之空間屬性。使用者再依據判釋準則、專家判釋經驗及前期影像、全島假彩色立體圖、航遙測圖資供應平台等輔助資訊，對獨立的崩塌潛勢單元進行選取與切割，產製更為精確的崩場地資料庫。本研究所使用的判釋準則如下表 4 所示，並參考以往專家判釋崩場地經驗(劉治中等，2010)，而輔助資訊則利用影像套疊 DEM 而成之 3D 假彩色立體檢視圖可凸顯高程資訊的視覺效果，有助於判釋者瞭解判釋影像之區域地形坡度與植生情況；以及農林航空測量所所建置解析度更高的航照的遙測圖資供應平台做為輔助。

表 4 判釋準則

類別	判釋為崩場地與否
後期影像出現崩場地	Y
裸露地	Y
人為開發區	N
主河道	N
雲覆資訊不足區	N
低植生區	N

專家判釋經驗如下：

1. 植生因被剝除或被崩積物覆蓋，會呈現裸露的狀態，影像上色調明亮
2. 河系最上游一級河處常擴大成為湯匙狀。
3. 河道攻擊側經常造成崩塌，河流轉彎呈帶狀崩塌，顯示流動之土石具有相當大的側蝕 (lateral erosion) 力。
4. 大量鬆散的土壤或岩塊堆積於陡坡下。
5. 集中的豪雨常使許多細長條狀崩塌帶下來的物質匯集在陡坡下方或主河道上，個別之長條狀崩塌沿流路如同水系發育般的匯集在一起，呈現樹枝狀的分佈。(劉進金等，2001)
6. 河道突然變窄或彎曲：滑動中或不久前滑動之崩場地，其趾部會凸向河流，導致河流變窄或轉彎。

7. 崖坡具有斷裂及張力裂隙。
 8. 在照片上色調變化很大的區域。色調較暗表示有較多的水分。
 9. 潛移常造成樹木傾斜及籬笆移位。
- (劉守恆，2002)

3.3 陰影區判釋

福衛二號雖固定於早上十點鐘左右取像，但若考慮秋冬季節太陽入射角度較大、部分山區影像無可避免被陰影所覆蓋，且陰影區隨季節改變等現象，如果未能準確地加以標定並排除，對於崩塌區年間分析的結果會造成相當的誤差。由於陰影區內之訊號過低，無法用來判釋崩塌區，而主成分分析 (principal component analysis) 之第一分量(全色態的強度大小)即代表陰影資訊。準此原則，本研究採取逐塊掃描的方式以全色態波段強度為指標，並依局部區域的資訊來決定最佳的門檻值後(調整閾值濾除雲、水體)，再比照崩場地判釋流程(物件分離與單元化)來決定陰影區分布圖層(圖 4)。

3.4 準確度檢核

選取影像的條件為的方法一般分為系統性檢核與抽樣檢核。系統性檢核是對資料做全面性檢核，若資料間不存在邏輯關連性則必須逐筆檢核，但逐筆檢核相當於重新建立資料庫，其耗費的資源太大；而抽樣檢核則是隨機性的對資料進行抽樣檢核，其抽樣代表性則取決於樣區是否能充分代表母體資料在空間尺度和時間頻率上的全面性 (蔡博文，2000)。但且由於台灣地質脆弱、山高坡陡、氣候溫暖多雨、風化作用明顯，地表易隨著時間有所變動，故若欲進行崩塌圖層準確度檢核之影像須以兩者拍攝日期相近為主要選擇條件之一，因此本研究不採用一般常用的檢核方法(系統性檢核或抽樣性檢核)對崩塌判釋的準確度做檢核，取而代之的是選取衛星影像與航照影像拍攝日期相同的影像作為檢核樣本。而前人研究中提及可藉由解釋航照影像得到地真資料，並以之為現地人員調查的替代方案之情況下(Ridd & Liu, 1998)，本研究在影像的精

確度檢核上，使用農林航測所 25cm 的航照影像作為檢核基底，且為將崩塌判釋準確度檢核的誤差範圍降至最小，特意選取與航照影像同天拍攝的衛星影像作為檢核之對象，使之降低地表隨時間變化所造成的誤差，結果一共選了 7 幅五千分之一的衛星影像(圖號分別為 96211014、96211024、95191068、95191069、95191080、96201045、96204038)做崩塌準確度檢核之衛星影像。

在正射影像方面，均以隨機選取之檢核點進行檢核，本研究採用農林航空測量所的機載慣性定位定向系統(POS)所產製之航拍正射影像(25cm)做為基底，以 FNCC 演算法分別找出衛星影像與航照影像的特徵點，並依福衛影像製作一陰影遮罩，同時套用到航照崩塌地遮罩上，濾除因陰影造成無法判釋地區的誤差後進行正射準確度檢核，最後依獨立檢核點的方法比較 X 和 Y 方向的 RMSE 之差異。

在崩塌圖層的檢核方面，本研究則就農林航測所所判釋的崩塌圖層為基底，並以 7 幅與航照影像同天拍攝的衛星影像，以誤差矩陣 (misclassification matrix) 的概念，分別是使用者準確度 (producer's accuracy)、生產者準確度 (user's accuracy)、整體準確度 (overall accuracy) 以及 Kappa 指標 (K-hat index) (Cohen, 1960; Congalton, 1991)，四種常用的準確度評估方式表現判釋結果在樣區中的準確度(以圖號 95191068 拉庫音溪為例)。

崩塌準確度檢核的資料、方法與目的包含 1. 探討航照(25cm)與衛星影像(2m)解析度差異對崩塌判釋之準確度影響 2. 比較衛星影像 2m 與 8m 解析度之差異對崩塌判釋之準確度影響 3. 確保航照與衛星影像的判釋基準一致，並了解判釋成果之差異。

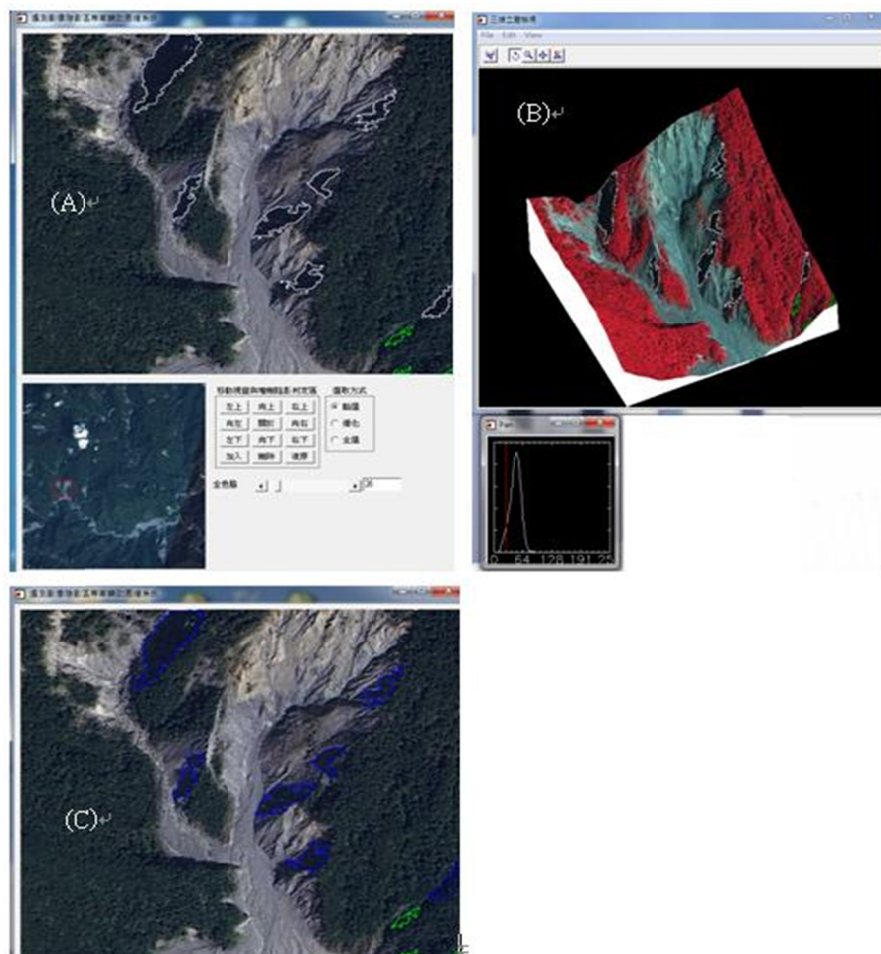


圖 4 (A)設定門檻值後的陰影區影像，(B)設定門檻值後的 3D 假彩色立體圖，(C)暗區自動圈繪結果

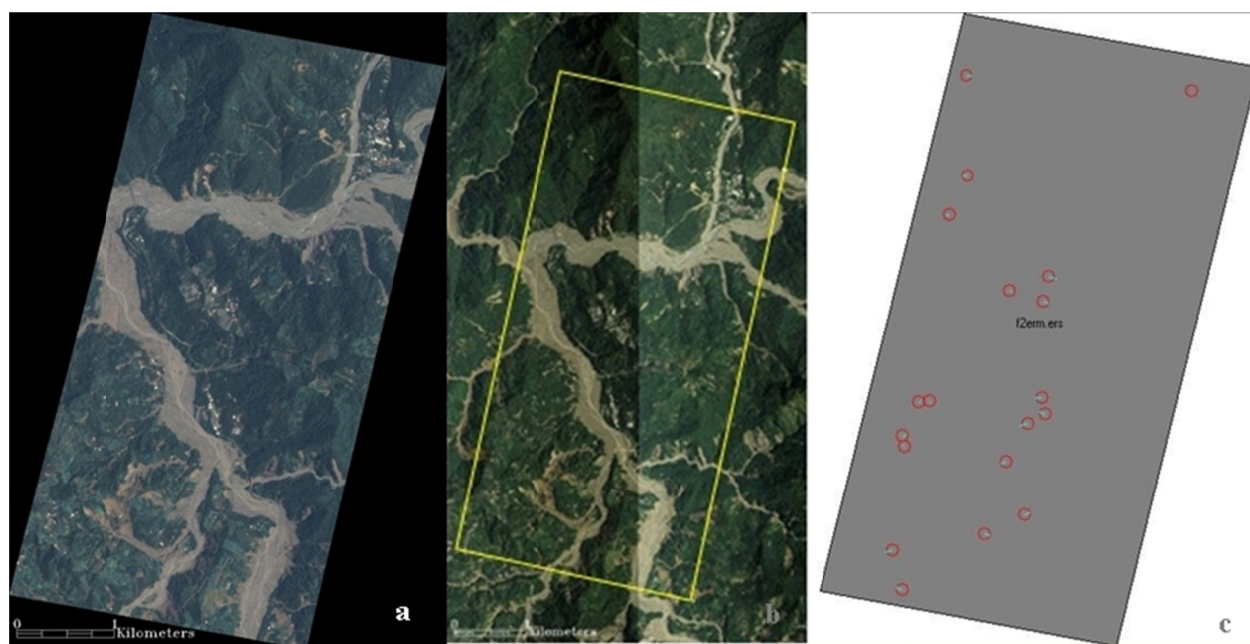


圖 5 (a)福衛二號，(b)25cm 航拍正射影像及對應福衛影像區，(c) 檢核點分佈圖與 200 倍誤差向量(以嘉義縣來吉地區為例)

結果顯示，在正射影像準確度方面(以嘉義縣來吉地區為例)，據隨機取樣 19 個獨立檢核點做為檢核用，所得之 RMSE 顯示 X 方向 1.53 個 pixel，Y 方向 0.58 個 pixel，總體為 1.64 個 pixel(圖 5)。在崩塌的判釋準確度檢核方面(以圖號 95191068 拉庫音溪為例)，2m 衛星影像於崩塌地的判釋與農林航照所的崩塌圖層比較，其崩塌判釋之平均整體準確度可達 98%，但因解析度不同而造成生產者準確度或使用者準確度仍有 10% 左右的過估(大型崩塌地內的小範圍植生區)或漏估(細長崩塌地受旁邊植生訊息影響)情形(表 5)。

表 5 崩塌地準確度檢核(圖號 95191068 拉庫音溪為例)

實際(pixel) \ 分類(pixel)	崩塌	非崩塌	總計
崩塌	2026040	20062	2046102
非崩塌	21591	163387	184978
總計	2047631	183449	2231080
整體準確度 99.12%		Kappa 指標 0.8852	
生產者準確度 89.09%		使用者準確度 88.86%	

2m 判釋結果與 8m 相比，其生產者準確度差異達 10%、Kappa 值更佳，且 8m 判釋之崩塌地圖層，套疊在高解析度之衛星影像上，不僅邊緣呈鋸齒狀致容易誤判崩塌地間的植生區域，對於計算崩塌地面積、範圍等應用上，所導致的誤差較大，相較之下，使用 2m 影像判釋的結果，更貼近於 25cm 地真資料的結果。

4. 年間分析

4.1 年間分析方法

美國地質調查所於 2000 年所出版的 National Landslide Hazards Mitigation Strategy(Spiker & Gori, 2000)提到山崩災害分析步驟的先後順序應為崩塌目錄圖、崩塌潛勢圖、崩塌危害度圖、崩塌風險圖，即災害之分析應從記錄事件、危險性分級、推測發生機率與規模到災害頻率與損失之關係與風險管理。故本研究將目前所建置的崩塌目錄進行分析以探討其年間變化。

一般探討具時間序列特性崩塌地研究，大多關注在崩塌地之數量、規模、頻率、型態與雨量、地震之間的關係，例如以一個事件/一天所發生的崩

塌數量為基礎，探討降雨事件與崩塌事件、累積雨量與崩塌規模之相關性，長/短前期降雨與崩塌數量、規模之關係(Rossi *et al.*, 2010)；探討降雨強度、前期降雨與崩塌之關係(Campbell, 1975)；探討降雨與地震觸發崩塌之區位比較(張子瑩及徐美玲，2004)；以降雨資料建立崩塌潛感模型(Chang *et al.*, 2008)。就僅以崩塌地面積探討大範圍崩塌地隨時間變化現象的相關文獻，本研究尚未找到確切的文獻回顧，推估可能之原因為建置大範圍的崩塌圖層通常是以衛星影像為主，但衛星影像解析度不如航照佳，易有誤判、漏判等現象，以及衛星影像無法完全避免雲與陰影遮蔽地表資訊之情況，再加上雲與陰影的分佈範圍也隨著拍攝日期有所差異，而導致純以面積探討崩塌地變化之不確定性。故本研究試圖以相對保守的想法加入陰影修正之概念，針對崩塌面積的年間變動進行分析，且由於雲與陰影區覆蓋之地區差異，以相對面積(面積比例)之概念取代絕對面積的計算方法(Liu *et al.*, 2011)，以期降低雲與陰影區所造成之分析誤差。

4.1.1 變異分析

變異分析是多期遙測影像最廣泛的應用，已有許多不同的變化偵測方法 (change detection algorithm) 發展出來 (Corresponding *et al.*, 2004)。基本上，變異分析包含變異區萃取 (變異偵測) 與變異區分離 (分類判釋) 兩個主要步驟，根據這兩個步驟前後順序之分，可將變異偵測分為直接比較之後再分類及先判釋分類再比較兩種分析方法。本研究先建立多年崩塌地判釋資訊，再針對崩塌地判釋的結果進行年間比較，屬先判釋分類後再比較的方法 (post-classification comparison)，此法進行準確變異偵測的基本條件為：1. 前後期影像須達成幾何及輻亮度精配準 2. 單幅影像之分類判釋須達一定崩塌準確度。本研究使用 F-2 AIPS 處理之後的影像不僅具正規化之輻亮度(可使崩塌地判釋更為客觀及一致)，且在幾何上的偏差可達到 1.5 個像元以內 (3 公尺)；而利用崩塌地專家判釋模組製作之崩塌地分佈圖又可具有相當於人工判釋崩塌之準確度。因此，產製之崩塌判釋圖層已可符合先判釋

分類之後再比較的基本條件。

為找出年間各地區崩塌地消長的情況和趨勢，以利進行山崩災害分析之作業，本研究將 93~100 年(95、96 年除外)的崩塌圖層逐年進行影像間的變異分析後，得到崩塌地的新增、擴大、復育以及不變 4 種分類(陳俞旭，2008)。以此分類法將每年的崩塌圖層進行年間分析與討論。

4.1.2 崩塌地群組方法

以衛星影像自動分類或自動圈繪所得之崩塌地資料，因少了人為主觀的判斷，及衛星影像陰影的干擾，容易呈現明顯不連續的破碎多邊形特徵(圖 6)，雖崩塌地以不連續的破碎多邊形呈現並不影響單年度的判釋成果，但對於重大崩塌地的認定不一致，於多年期的對比分析時就會出現問題。舉例來說，若一個崩塌地是由多塊不連續多邊形所構成並就其中任一多邊形進行認定，很可能都無法達到大於 10 公頃的重大崩塌地標準。再者，即使兩年間的影像可以在幾何上做很精準的配對，且兩年間沒有重大導致地表發生變化的自然事件，但受到陰影及植被的干擾，兩年間自動圈繪的破碎多邊形不能完全匹配，以此基礎上討論每一個不連續多邊形的變動較不具代表性。

為能以一致性標準判定重大崩塌區之分佈，並在同一基準範圍內進行年間分析，本研究以崩塌地群組的分法來解決年間分析誤判的機率，所選定之群組邊界於 9 年分析過程中都固定不變。本研究預計於 101 年底前建置 9 年全島崩塌圖層，而在撰寫本文時已完成 93、94、97~100 年等 6 年資料，剩下 3 年預計於 101 年底完成。資料的群組範圍方法具有一致性及再現性，且所需的資料容易取得、崩塌準確度及解析度高，又具有物理上的意義，故以水文觀點的最小集水區(minimum catchment)方法產生群組範圍(圖 6)，使用 ArcGIS 空間分析工具 (spatial analyst tool) 的 Hydrology 模組以群組崩塌地。並加入陰影資訊，即使崩塌及陰影在各年間同時都在變動，還是可以在同一標準下檢視年間的變動狀況。此方法不僅可以使用同一基準來量化群組內的年間面積變動量，還利於成果之展現。

在 100~3000 門檻範圍內門檻值設定為每隔 50 就產生該門檻值所對應之集水區多邊形，再計算其中有多少多邊形含 10ha 以上崩塌地。當門檻值達到一定程度時，因整體集水區數量降低，含 10ha 以上崩塌地的集水區數量會開始降低。為能確保每一個大於 10ha 以上的崩塌集水區都盡可能區分出來(集水區數量最大)，且此集水區具有足夠的面積(門檻值最大)，因此設定最佳水系門檻值為 1000(圖 7)。

4.1.3 結合陰影資訊的年間分析法

崩塌群組內包含了有崩塌、無崩塌及陰影三種多邊形，因在陰影區內的資訊無法得知，在 93~100 年間(95、96 年除外)，全台總陰影面積分別為 2490、539、2147、4084、4099、1424 平方公里，陰影區佔全島的面積比例分別為 6.8%、1.4%、5.9%、11.2%、11.3%、3.7%，故年間分析除了崩塌資訊外，亦應以陰影資料修正年間崩塌量，以避免陰影區的資訊對年間分析之結果造成誤差。分析兩年間變化時最不容易解決的問題是一年為崩塌但另一年為陰影，當群組內有此狀況時就無法得知該區域的變動情況，若以向量方式估計變動，將年間陰影的聯集區當成無資訊區，只針對有資訊的區域進行變動分析，可分為新增、消失或共同區來進行年間分析。舉例來說，本研究將 09 與 10 年崩塌圖層的陰影區聯集起來並視為無資訊區域，再針對剩下的崩塌面積進

行年間分析(圖 8)。

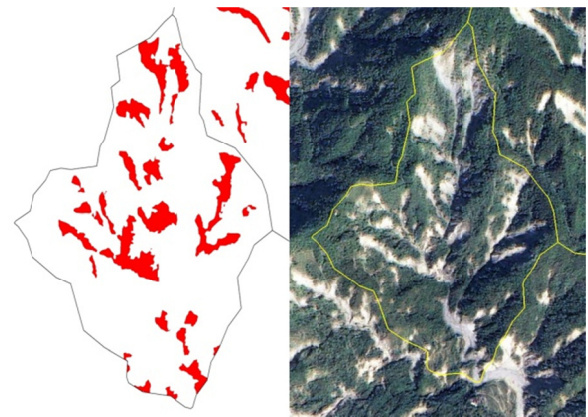


圖 6 崩塌地群組範例(紅色為崩塌面積，黃線為最小集水區方法產生之群組範圍)

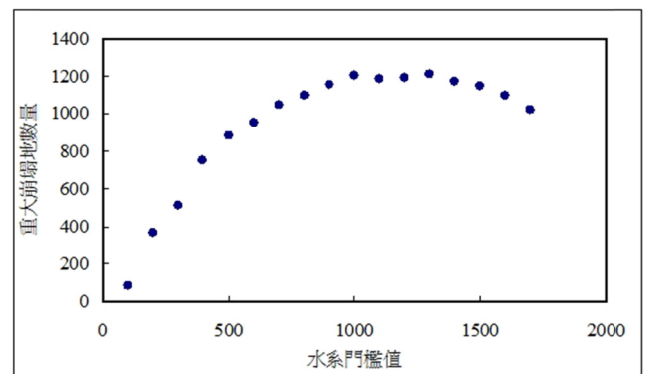


圖 7 水系門檻值與重大崩塌地數量之關係

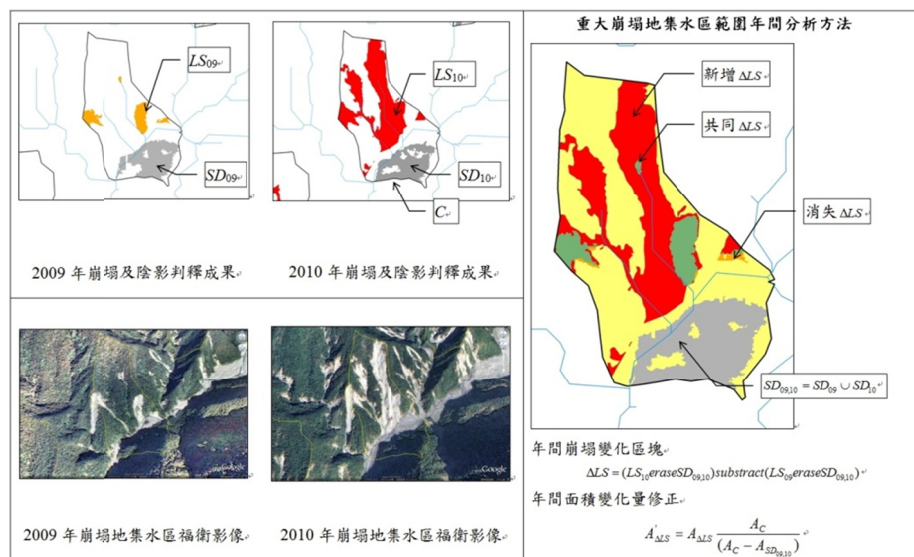


圖 8 考慮陰影資訊的年間分析方法

4.2 分析誤差來源

根據表 5 崩塌檢核的結果可知，以福衛二號 2m 解析度的影像進行崩塌判釋的結果，與 25cm 解析度的航照判釋結果相比較，仍有一些差異存在，以下就主要誤差來源分別加以討論。

4.2.1 資料來源不同

根據崩塌準確度檢核分析的結果可知，以遙測影像判釋之年間崩塌地變動除了期望探討的地表變化之外，若年間使用不同的判釋資料進行分析，則會有來自於資料源的固有差異，如影像拍攝時間及影像解析度，再者，不同目的的判釋成果亦會有崩塌判釋原則及崩塌地圈繪方法等人為差異，這些都會形成年間分析比對的誤差(圖 9)，應盡可能將

誤差消除及量化，最好的方法是採用一致性的判釋資料進行年間分析。

4.2.2 衛星陰影干擾

衛星影像拍攝時會受到太陽角度(拍攝時間及季節)、地形及植被的影響產生陰影。本研究雖儘量選取接近夏至及拍攝角度較小的影像進行鑲嵌再進行崩塌判釋，但仍很難避免陰影的影響(圖 10)。根據崩塌準確度檢核，陰影造成衛星影像之漏判約在 4%~19%之間。但本研究一致性採用福衛二號影像進行分析，可使兩期間陰影干擾應比航照要小。根據統計，衛星影像在山區因陰影所造成的影響面積可佔圖幅之 30%以上，且陰影分佈也隨拍攝日期而變化，所以有必要判釋每一年陰影的分佈範圍以進行年間崩塌地變化量之修正。

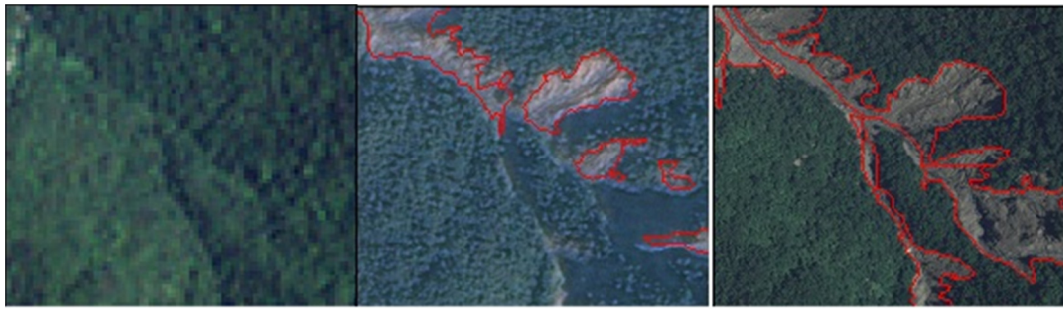


圖 9 25cm 航拍影像與 2m 福衛影像對上游野溪區崩塌判釋之成果比較。(a) 2009 年莫拉克災前福衛 2m 融合影像，(b) 2010 年莫拉克災後福衛 2m 融合影像及崩塌判釋區，(c) 2009 年航拍影像及崩塌判釋區

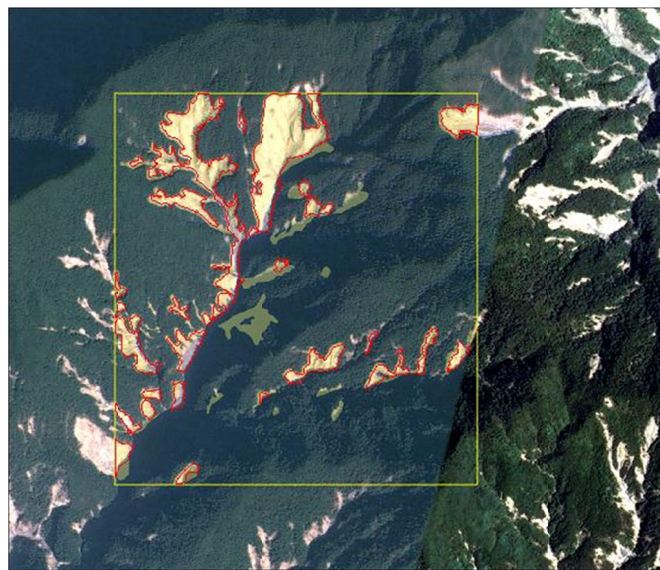


圖 10 2009 年航拍影像崩塌判釋成果與 2010 年衛星影像判釋成果之比對(高雄縣茂林鄉登知來地區)，圖中紅框圈繪區為衛星影像判釋成果，黃色填滿區為航拍影像判釋成果

5. 結果

5.1 結果

本研究選取具自主控制、光譜資訊豐富、多期全島影像資料等優點的福衛二號影像，以 F-2 AIPS 系統進行影像糾正後，再利用 NDVI、Greenness、全色態的光譜資訊，以「遙測影像崩塌及陰影區專家輔助圈繪系統」，建置全島 6 年一致性標準的崩塌地目錄，其崩塌判釋結果與 25cm 航照判釋結果顯示，崩塌判釋之平均整體準確度達 98%。

針對 93 年至 100 年(95、96 年除外)進行崩塌判釋與年間分析所得結果簡述如下:年間重大崩塌地面積變化趨勢如表 6 與圖 11 所示，94 年起全台

林區重大崩塌地面積開始超過 10,000 ha，到 97 年上升到 14,435.1 ha，98 年面積下降，98 年底發生八八水災使 99 年統計面積暴增到 38,147.9 ha，100 年則下降到 24,867.5 ha。由表 6 可看出，八八水災後，99 年達重大崩塌地認定標準(>10 ha)之群組數量大幅上升，達到 97 年的 2 倍以上，因此，雖然 99 年單位群組內之平均崩塌密度僅比 97 年增加 1.4%(1.1 倍)，但崩塌面積卻為 97 年的 2.6 倍，可見在目前崩塌群組所採用之最小集水區範圍內，既有重大崩塌集水區平均崩塌密度超過 15%就不易再上升，當致災強度更大時，會造成他處新增及小崩塌區擴大，因此崩塌治理除了將重大崩塌地列管外，也需從其中探討其致災因子及崩塌潛勢的關係，以防範從未發生崩塌區域會發生崩塌的可能。

表 6 93~94 及 97~100 年分年重大崩塌面積變化趨勢

	93	94	97	98	99	100
重大崩塌面積 (ha)	9496.4	11146.7	14435.1	10157.8	38147.9	24867.5
重大崩塌群組筆數	382	505	642	379	1561	957
平均單位群組崩塌面積 (ha)	13.5	17.3	19.2	11.7	20.7	13.9
平均單位群組崩塌比例 (%)	10.1	12.9	13.9	8.55	15.3	10.3

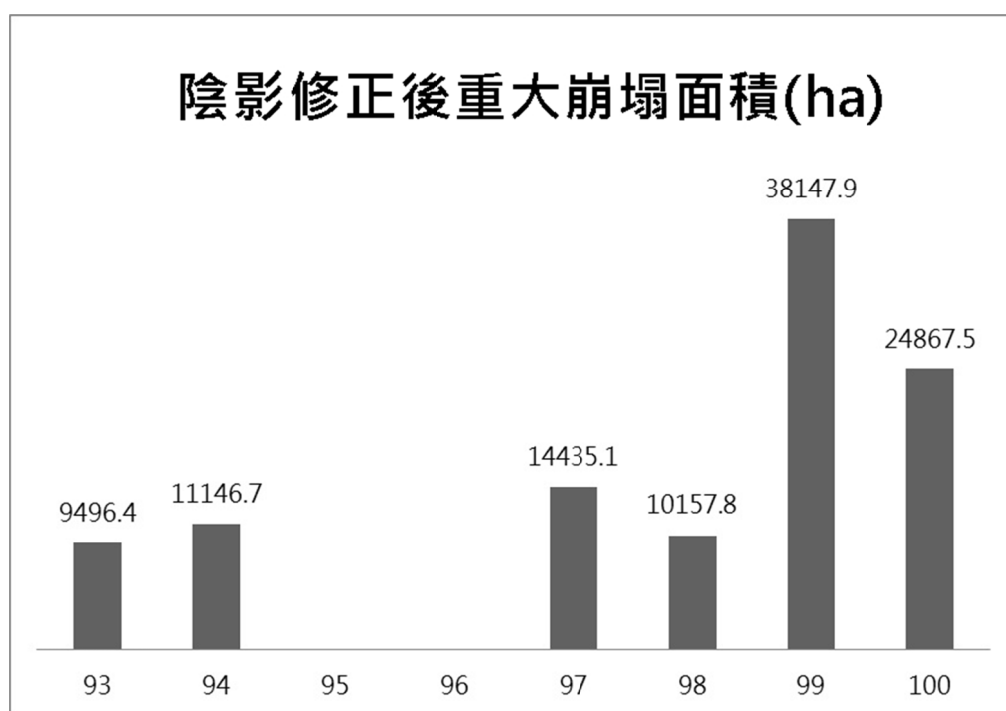


圖 11 93~94 及 97~100 年分年重大崩塌面積變化趨勢

此外，本研究特別針對使用國有林地所進行年間分析時的次年度崩塌面積(例如 93~94 年間分析之 94 年)，可見崩塌面積為 99 年>100 年>94 年>98 年(圖 11)，值得注意的是不變部分在這 6 年間呈現穩定及持續增長，新增量最多為 98~99 年間，其次為 93~94 年間；縮減量最多為 99~100 年間，其次則為 97~98 年間。不變部分在 99~100 年間增加近一倍，其貢獻應來自於 98~99 年的新增部分，而 99~100 年亦有大量消失(植被復育)應亦來自於 98~99 年的新增部分，可見復育速度在不同地區差異很大。

由於前人研究中大多直接探討崩塌地與其他相關資訊(如地震、雨量資料)，故本研究試圖僅先以扣除年間陰影區聯集面積的崩塌圖層、以相對面積(面積比例)取代絕對面積大小的概念，針對崩塌面積變化量進行年間分析。其年間分析成果主要如下：

1. 全台崩塌地面積整體呈現成長的趨勢，其中 98~99 年間新增量最多、99~100 年間縮減量最多，此現象推估主因是由於具短時間內強降雨特性的 98 年間莫拉克風災所致。
2. 以水小集水區觀點群組崩塌的方法，可見目前崩塌群組所採用之最小集水區範圍內，重大崩塌集水區平均崩塌密度超過 15%就不易再上升，故當致災強度更大時，僅會看出他處新增及小崩塌區擴大較為明顯。

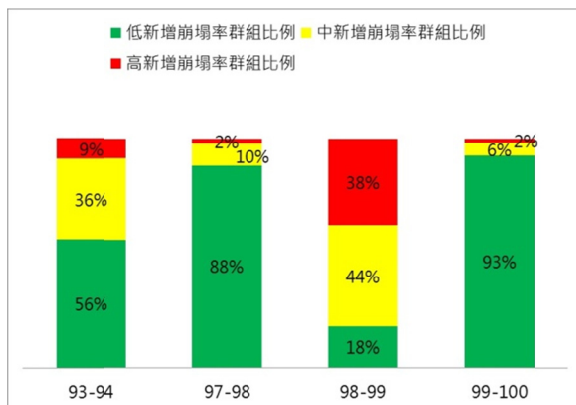


圖 12 93~94 及 97~100 年國有林事業區新增崩塌率比例變化(新增崩塌率大於 15%以上者、5~15%者及 5%以下者分別稱為高、中及低新增崩塌率區)

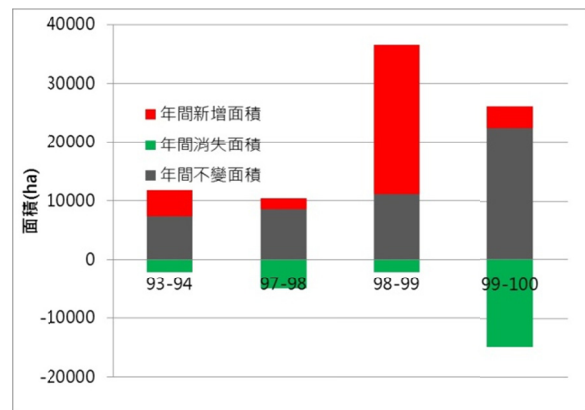


圖 13 93~94 及 97~100 年國有林事業區三種類型崩塌面積變化

以成功大學全球觀測與資料分析中心所研發的「福衛二號前後期影像搜尋比對系統」，就崩塌情況變動較嚴重的兩個事件：2004 年的敏督利颱風與 2009 年的莫拉克颱風為例，並分別列出各事件最嚴重的三處(圖 14 至圖 19)，93 年敏督利颱風前全台總崩塌地約 17,264 公頃，敏督利颱風後全台崩塌地上升為約 26,564 公頃。而 98 年莫拉克颱風前全台總崩塌地約 11,812 公頃，崩塌處約 8,705 個，崩塌率約 1.27%；莫拉克颱風總崩塌地、崩塌度、崩塌率均上升為 51,304 公頃、33,886 個、2.52%。其中，黃線範圍是以最小集水區觀點所劃定的崩塌群組界線，藍線範圍是事件前後崩塌地範圍的變比。

5.2 建議

關於本研究之建議，列舉於下：

- 本研究由於衛星影像解析度為 2m，且研究目的為建置大範圍崩塌目錄，故以 25cm 航照做為地真資料進行崩塌準確度檢核，建議可進一步選取小區域架設地面控制點再進行崩塌準確度檢核，比較兩兩之間差異多寡。
- 本研究主要目的為建置全島多期崩塌目錄，故針對相關的崩塌分析討論較少，建議可加入各種潛勢因子與誘發因子進行分析。

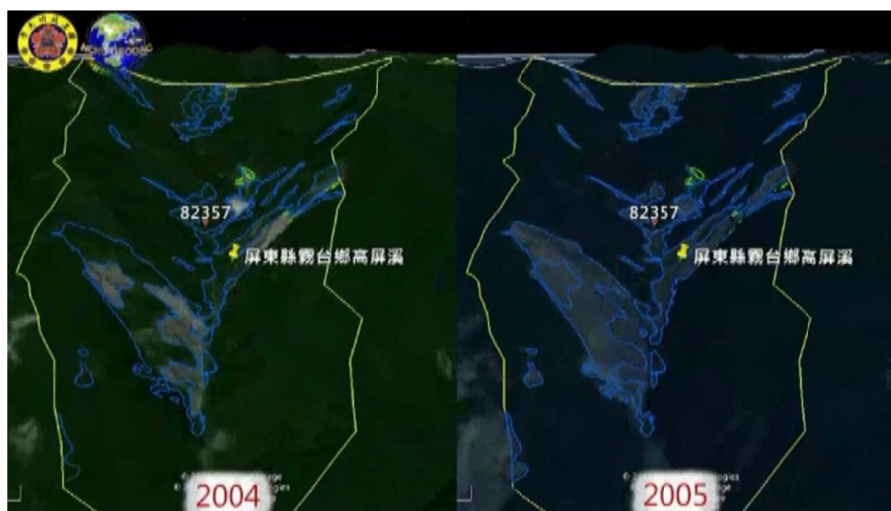


圖 14 敏督利颱風前後期崩塌影像對比—屏東縣霧台鄉高屏溪

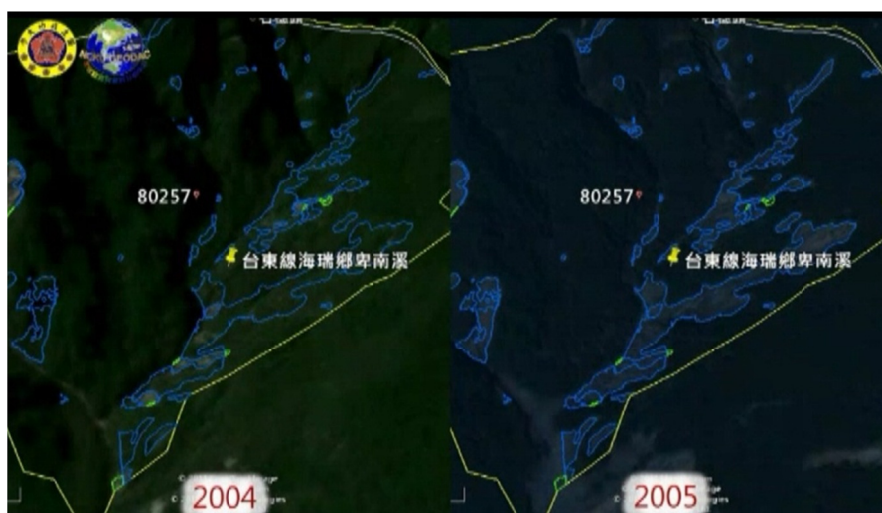


圖 15 敏督利颱風前後期崩塌影像對比—台東縣海瑞鄉卑南溪



圖 16 敏督利颱風前後期崩塌影像對比—高雄市茂林區高屏溪

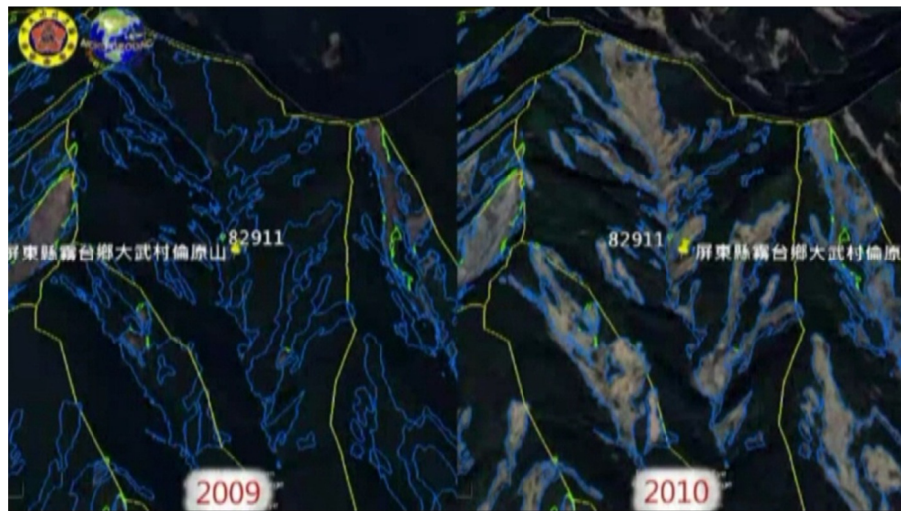


圖 17 莫拉克颱風前後期崩塌影像對比—屏東縣霧台鄉大武村倫原山

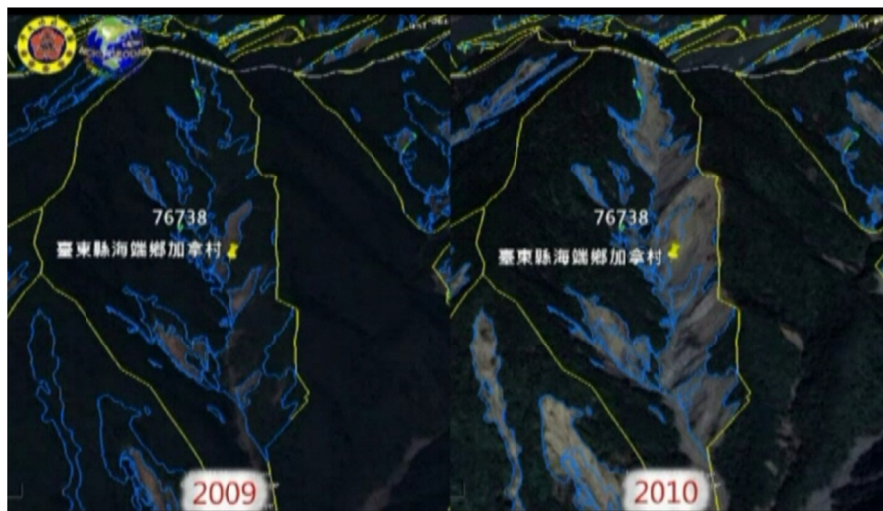


圖 18 莫拉克颱風前後期崩塌影像對比—台東縣海端鄉加拿村

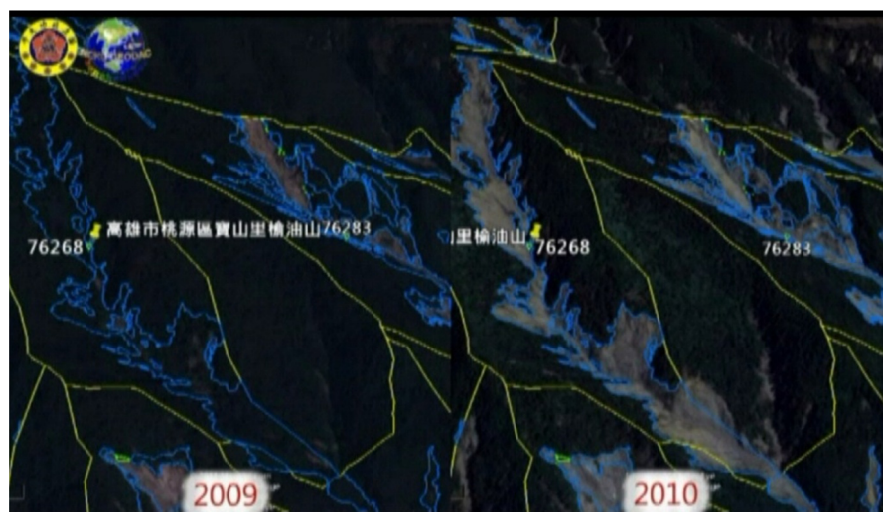


圖 19 莫拉克颱風前後期崩塌影像對比—高雄市桃源區寶山里榆油山

6. 討論

以下就本研究所使用的研究方法與結果進行討論：

1. 崩塌判釋方面:為達到快速自動圈繪崩塌地的目標,本研究所則使用光譜比值中的 NDVI 做為崩塌地判斷的基礎,但初步判釋結果顯示,NDVI 難以分辨出崩塌地與陰影區或裸露地之差異,導致誤判、漏判等情形,故加入 Greenness 指標與全色態資訊以有效的區別出崩塌地、陰影區與裸露地。並加入專家輔助功能,使之判釋結果與地真資料崩塌判釋之平均整體準確度達 98%。
2. 陰影區處理方面:雖受天候、太陽角度、軌道等因素影響,導致影像上部分地區被陰影區所覆蓋,但本研究特別選取角度較小、拍攝日期以夏季為主的影像來減少陰影區面積,建置陰影圖層、聯集年間陰影來修正年間分析受陰影的影響。此外,針對崩塌地的陰影修正方面,年間分析法雖有另一種純量的修正法(以純量方式估計變動:即假設其無陰影區之崩塌發生機率與陰影區內一致,故以無陰影的崩塌比例來推估屬該群組範圍內的陰影區崩塌之面積。),但在無法確保同一集水區的坡度、植被、地質、構造、風化程度、河流分級程度等致災因子條件均相同的情況下,假設同一群組中的崩塌比例固定的想法本身就具有很大的爭議性。
3. 崩塌的群集方面:由於圈繪出的崩塌地與陰影區的面積、形狀與位置皆隨著時間有所變動,此現象雖不影響各別年的崩塌比率,但在年間分析時,由於並無一致標準,易導致崩塌面積成長的漏判、過估等誤判情形,再加上崩塌面積過於零碎時亦難以看出整體性,故本研究將崩塌地以最小集水區的水文觀點來群組崩塌地,即使崩塌與陰影在 6 年間同時都在變動,還是可以在同一標準下檢視 6 年來的變動狀況,並避免崩塌地過於零碎導致年間分析的誤差。
4. 年間分析方面:本研究試圖降低因衛星影像解

析度、雲與陰影區分布隨拍攝日期有所差異之現象,導致之崩塌地面積年間變動的不確定性,故加入了扣除年間聯集陰影區面積(陰影區修正)、以相對面積(面積比例)取代絕對面積大小的概念,僅針對崩塌地面積變化量進行初步探討,雖 95、96 年崩塌圖層尚未建置完成,但初步結果顯示台灣地區整體崩塌面積有上升的趨勢,且崩塌地面積、數量與極端氣候事件(如莫拉克)有明顯相關。

以此為基礎,除了利用多期崩塌目錄來進行年間分析以外,預期未來能藉由一致性標準的崩塌資料,分析崩塌因子並取得相對權重後,就不同層面進行崩塌相關分析,如研究崩塌可能性程度高低之崩塌潛感分析(Landslide Susceptibility Analysis)、探討崩塌地點、頻率、規模相關的崩塌危害度分析(Landslide Hazard Analysis)以及針對災害損失方面的崩塌風險分析(Landslide Risk Analysis)。本研究針對山崩災害進行研究、了解、建置全島一致資料庫,以利未來進行精確的潛感分析並在災害發生前能預測崩塌高危險地區、在災害發生時能即時的透過衛星影像迅速掌握災情並擬定救災計畫,以期最終達到將災害程度降至最小。

參考文獻

- 王意雯, 2007。整合福衛二號高時間解析度和高空間解析度衛星影像與田間光譜資料監測水稻生長和預測產量,成功大學地球科學系碩博士班學位論文。
- 林家慶, 2007。應用福衛二號時間序列影像監測曾文水庫集水區崩塌地之時空變化,成功大學地球科學系碩博士班學位論文。
- 全球觀測與資料分析中心, 2011。運用衛星影像於全島崩塌地判勢與災害分析,行政院農委會林務局第 TFBR-990204 號成果報告。
- 李錫堤, 2009。山崩及土石流災害分析的方法學回顧與展望,台灣公共工程學刊 5。
- 周毓嘉, 2005。東沙島土地覆蓋變遷之研究,國立海洋大學海洋環境資訊學系碩博士班學位論

- 文。
- 洪凱政，2009。應用多光譜影像多種特徵偵測崩塌地之研究，成功大學測量及空間資訊學系碩博士班學位論文。
- 洪瑞鄉，2006。SPOT 衛星影像應用於桃園海岸林植生監測，臺灣大學森林環境暨資源學研究所學位論文。
- 陳俞旭，2008。地震對崩塌與土石流發生影響之研究，成功大學水利及海洋工程學系碩博士班學位論文。
- 張子瑩、徐美玲，2004。暴雨與地震觸發崩塌發生區位之比較以陳有蘭溪流域為例，地理學報 35:1-16。
- 張崑宗、高啟軒、王主依、劉進金，2010。暴雨型崩塌地自動判釋及特徵分析之研究，航測及遙測學刊 15(1): 79-95。
- 楊孟學、林明璋、劉進金，2009。結合衛星影像與地形指標於山崩自動分類之研究，航測及遙測學刊 14(1)。
- 楊樹榮、鄭錦桐、冀樹勇、紀宗吉，2011。各國國家型山崩潛災山計畫概況，中興工程 113: 56-66。
- 劉正千，2009。如何運用遙測資訊進行快速應變——莫拉克風災之經驗與建言，大自然 105。
- 劉正千、張智華，2009。從福爾摩沙二號衛星遙測資料庫中找尋極端氣候事件的因應之道——莫拉克風災之經驗與建言，地質 28(4)。
- 劉守恆，2002。衛星影像於崩塌地自動分類組合之研究，成功大學地球科系碩博士班學位論文。
- 劉治中、蕭國鑫、饒見有、劉進金、吳哲榮、黃群修，2010。結合空載 LiDAR 與彩色航照應用於崩塌地研判，航測及遙測學刊 15(1): 111-122。
- 劉進金、翁勳政、黃金鴻、楊明宗，2001。豪雨型崩塌地之遙測影像分析，21 世紀土木工程技術與管理研討會論文集: C-21~C-31。
- 蔡博文，2000。GIS 資料庫資料品質檢核，國土資訊系統通訊 35。
- 潘國樑，2006。遙測學大綱：遙測概念、原理與影像判釋技術，科技圖書。
- 錢憲和，1999。台灣常見的由滑坡運動造成之地質災難之初步研究，行政院國家科學委員會專題研究計畫第 NSC88-2116-M-002-005 號成果報告。
- Bison, P., E. Grinzato, A. Pasuto, and S. Slivano. 1990. Thermal IR remote sensing in landslides survey. International IAEG Congress: 837-878.
- Campbell, R. H. 1975. Soil slips, debris flows, and rainstorms in the Santa Monica Mountains and vicinity, southern California.
- Chang, K., S.H. Chiang, F. Lei. 2008. Analysing the Relationship Between Typhoon - Triggered Landslides and Critical Rainfall Conditions. Earth Surface Processes and Landforms 33(8): 1261-1271.
- Cheng, K., C. Wei, and S.C. Chang. 2004. Locating landslides using multi-temporal satellite images. Advances in Space Research 33(3): 296-301.
- Cohen, J. 1960. A coefficient of agreement for nominal scales. Educational and psychological measurement 20(1): 37-46.
- Congalton, R. G. 1991. A review of assessing the accuracy of classifications of remotely sensed data. Remote sensing of Environment 37(1): 35-46.
- Corresponding, P. C., I. Jonckheere, K. Nacjaerts, B. Muys, and E. Lambin. 2004. Review Article Digital change detection methods in ecosystem monitoring: a review. International Journal of Remote Sensing 25(9): 1565-1596.
- Dilley, M. 2005. Natural disaster hotspots: a global risk analysis, World Bank Publications.
- Dymond, J. R., A. G. Ausseil, J.D. Shepherd, and L. Buttener. (2006). "Validation of a region-wide model of landslide susceptibility in the Manawatu-Wanganui region of New Zealand." Geomorphology 74(1): 70-79.
- Gillespie, A. R., A. B. Kahle, and R.E. Walker. 1987. Color enhancement of highly correlated images. II. Channel ratio and "chromaticity" transformation techniques. Remote sensing of Environment 22(3): 343-365.
- Haydn, R., G. Dalke, J. Henkel, and J.E. Bare. 1982. Application of the IHS color transform to the processing of multisensor data and image enhancement.
- Ho, C. 1988. An introduction to the geology of Taiwan: explanatory text of the geologic map of Taiwan, Ministry of Economic Affairs.

- Joyce, K. E., S. E. Belliss, S.V. Samaonov, and S.J. McNeill. 2009. A review of the status of satellite remote sensing and image processing techniques for mapping natural hazards and disasters. *Progress in Physical Geography* 33(2): 183.
- Kumar, K.V., T. Martha, and P.S. Roy. 2006. Mapping damage in the Jammu and Kashmir caused by 8 October 2005 Mw 7.3 earthquake from the Cartosat-1 and Resourcesat-1 imagery. *International Journal of Remote Sensing* 27(20): 4449-4459.
- Liu, C-C. 2006. Processing of FORMOSAT-2 daily revisit imagery for site surveillance. *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on* 44(11): 3206-3214.
- Liu, C-C. and P-L. Chen. 2009. Automatic extraction of ground control regions and orthorectification of remote sensing imagery. *Optics Express* 17(10): 7970-7984.
- Liu, C-C., J-G. Liu, C-W. Lin, A-M. Wu, S-H. Liu, and C-L Shieh. 2007. Image processing of FORMOSAT-2 data for monitoring the South Asia tsunami. *International Journal of Remote Sensing* 28(13-14): 3093-3111.
- Liu, C-C., C-L. Shieh, J-C. Lin, and A-M. Wu .2011. Classification of non-vegetated areas using Formosat-2 high spatiotemporal imagery: the case of Tseng-Wen Reservoir catchment area (Taiwan). *International Journal of Remote Sensing* 32(23): 8519-8540.
- Mantovani, F., R. Soeters and Van Westen, C.J. 1996. Remote sensing techniques for landslide studies and hazard zonation in Europe. *Geomorphology* 15(3): 213-225.
- McKean, J and J. Roering. 2004. Objective landslide detection and surface morphology mapping using high-resolution airborne laser altimetry. *Geomorphology* 57(3): 331-351.
- Metternicht, G., L. Hurni and Gogu. Radu. 2005. Remote sensing of landslides: An analysis of the potential contribution to geo-spatial systems for hazard assessment in mountainous environments. *Remote sensing of Environment* 98(2-3): 284-303.
- Nichol, J. and M. Wong. 2005. Detection and interpretation of landslides using satellite images. *Land Degradation & Development* 16(3): 243-255.
- Nichol, J. E., A. Shaker and Wong. M.S. 2006. Application of high-resolution stereo satellite images to detailed landslide hazard assessment. *Geomorphology* 76(1): 68-75.
- Ridd, M. K. and J. Liu. 1998. A comparison of four algorithms for change detection in an urban environment. *Remote sensing of Environment* 63(2): 95-100.
- Rossi, M., A. Witt, F. Guzzetti, and S. Peruccacci. 2010. Analysis of historical landslide time series in the Emilia-Romagna region, northern Italy. *Earth Surface Processes and Landforms* 35(10): 1123-1137.
- Singhroy, V. 1995. SAR integrated techniques for geohazard assessment. *Advances in Space Research* 15(11): 67-78.
- Singhroy, V., K.E. Mattar and A.L. Gray. 1998. Landslide characterisation in Canada using interferometric SAR and combined SAR and TM images. *Advances in Space Research* 21(3): 465-476.
- Singhroy, V. and K. Molch. 2004. Characterizing and monitoring rockslides from SAR techniques. *Advances in Space Research* 33(3): 290-295.
- Spiker, E.C. and P.L. Gori. 2000. National Landslide Hazards Mitigation Strategy. USGS: 00-450.
- UNISDR. 2007. Disaster Risk Reduction: 2007 Global Review.

Using The FORMOSAT-2 High Spatial And Temporal Resolution Multispectral Image For Analysis And Interpretation Landslide Disasters in Taiwan

En-Ju Lin ¹ Cheng-Chien Liu ^{2*} Chih-Hua Chang ³ I-Fan Cheng ⁴
Ming-Hsun Ko ⁵

ABSTRACT

Taiwan ranks top one of the world in the ratios of population and area that are threatened by more than three natural disasters. Among various types of disasters, the landslide occurred in mountainous areas is the major one. To gain an insight of the mechanism and the long-term trend of landslide, we need a detailed landslide inventory of Taiwan generated from the same source of data, using the same interpreting method, with a comparable precision. Formosat-2 images of Taiwan area taken from 2005 to 2012 are processed by Formosat-2 automatic image processing system (F-2 AIPS). This system is able to digest the raw data of Gerald format, apply the basic radiometric and geometric correction, output the level-1A product, conduct the rigorous band-to-band coregistration, automatic orthorectification, multi-temporal image geometrical registration, multi-temporal image radiometric normalization, spectral summation intensity modulation pan-sharpening, edge enhancement and adaptive contrast enhancement, and the absolute radiometric calibration. The expert landslide and shaded area delineation system (ELSADS) is then used to produce the shadow and landslide inventory. Based on the concept of minimum catchment, all landslide polygons are grouped to investigate their annual variations. The accuracy of landslide inventory is carefully validated with the manual interpretations from aerial images (25cm), and the mean accuracy is 98%.

Keywords: Satellite image processing, interpretation of landslide, interpretation of shadow, variation, group of landslide

¹ Graduate Student, Department of Earth Science, National Cheng-Kung University

² Distinguished Professor, Department of Earth Science, National Cheng-Kung University ; Director, Global Earth Observation and Data Analysis Center, National Cheng-Kung University

³ Assistant Professor, Department of Environmental Engineering, National Cheng-Kung University

⁴ Project Manager, Global Earth Observation and Data Analysis Center, National Cheng-Kung University

* Corresponding Author, Phone: 886-6-2757575 ext. 65422, E-mail : ccliu88@mail.ncku.edu.tw

Received Date: Jun. 14, 2012

Revised Date: Jul. 13, 2012

Accepted Date: Dec. 20, 2012

結合 MODIS 與 Formosat-2 光學影像建立高屏河口及沿岸水體高時空分辨率總懸浮物質濃度估算公式

楊凱傑¹ 張智華^{2*} 劉正千³ 邱耀勝⁴ 劉祖乾⁵

摘要

沿岸水體常含有大量懸浮物質(Total Suspended Matter, TSM)，主要來自陸源沖淡水團的輸送及海底沉積物的再揚起。來自陸源輸送的 TSM 水團因河川流量、潮汐及沿岸流場之作用使其濃度之時空分佈特性明顯，高濃度區會有水質惡化的現象，並影響海洋生態、漁業及珊瑚礁的生長。鑑於傳統監測無法充分掌握 TSM 濃度時空分佈特性之缺點，本研究利用 Terra 及 Aqua 衛星搭載 Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS)感測器之多頻譜優勢，以及福衛二號(Formosat-2, FS-2)光學影像之高時空分辨率特性，以雙衛星資料建立高屏河口之 TSM 濃度估算公式。研究運用 8 幅 Aqua-MODIS 及 Terra-MODIS 影像(Band 1)及與其對應之高屏河口 TSM 船測數據建立 250 m 解析度 MODIS-TSM 估算公式($R^2=0.84$)。其次，利用 2 幅 MODIS-TSM 所得之高低濃度 TSM 影像做為地真資料，將與其對應之 FS-2 影像以 MODIS 大氣參數與 FLAASH 模式進行大氣校正獲致海面反射率後，建立 8 m 解析度 FS2-TSM 估算公式($R^2=0.86$)。最後，以 2011/6/7 海研三號 CR1542 航次採得之河口到小琉球 6 點 TSM 資料進行 FS2-TSM 驗證。受到大氣與驗證濃度偏低的影響，驗證結果雖不理想，但福衛二號呈現之 TSM 空間分佈趨勢仍與實測有高度相關($R=0.8$)。本研究建立之福衛二號高分辨率 TSM 濃度估算公式，具有多頻譜影像如 MODIS 推估水質濃度之可靠度，又具有高空間解析度，就遙測於民生及水資源用途而言，可提供比傳統監測更大範圍及近即時的 TSM 資訊，並補齊 MODIS 水色產品所欠缺之河口沖淡水團分佈細節。

關鍵詞：總懸浮物質、福衛二號、MODIS、水質、雙衛星遙測

1. 簡介

沿岸水體中含有比開放大洋高出許多倍的總懸浮物質(Total Suspended Matter, TSM)濃度，例如近岸之河口、漁場、海水浴場及珊瑚礁區，其主要形成原因來自陸源物質的輸送及海底沉積物的再揚起，高濃度 TSM 區造成之水質惡化將影響海洋中藻類的生產力(Cole and Cloern, 1987; Cloern, 1987; May *et al.*, 2003)、珊瑚礁的生長(Dodge *et al.*, 1974; Miller and Cruise, 1995; Torres and Morelock, 2002; McLaughlin *et al.*, 2003)或水生植物的成長

(Miller, 1980; Dennison *et al.*, 1993)。而沿岸 TSM 濃度主要受到河川流量、潮汐及沿岸流場之作用造成濃度時空分佈特性明顯，例如在降雨後突然升高且隨潮汐及流場之作用四處飄移，降雨數日後又快速沉積下來。利用船載具進行採樣，如國家海洋科學研究船海研一～五號之觀測任務，是目前監測沿岸 TSM 的常用方法(Liu *et al.*, 2009)，但此法難以大範圍進行研究，不僅耗時費力又無法全面分析及掌握 TSM 濃度之時空分佈特性。TSM 高濃度區會有明顯的水色變化，運用衛星遙測(remote sensing)可監測其分佈與動向，是近年來研究 TSM 時空分

¹ 國立成功大學環境工程學系 碩士

² 國立成功大學環境工程學系 助理教授

³ 國立成功大學地球科學系 特聘教授

⁴ 國立成功大學衛星資訊暨地球科學研究所 碩士

⁵ 國立中山大學海洋地質及化學研究所 教授

*通訊作者，電話：06-2757575 ext.65826, E-mail: chihhua@mail.ncku.edu.tw

收到日期：民國 101 年 06 月 14 日

修改日期：民國 101 年 09 月 13 日

接受日期：民國 101 年 10 月 18 日

佈特性的重要工具及唯一方法。

水中物質種類與含量的變化，會反應在水面上所觀察顏色的差異；而遙測技術具有長時間、大範圍、近即時監測等優點，因此，若能藉由遙測方式獲取水色資訊，當可輔助吾人達成監測水質之目標。美國於 1978 年發射全世界第一枚專為觀測海洋水色變化之衛星 CZCS (Coastal Zone Color Scanner, 1978-86) (Barale and Schlittenhardt, 1993) 任務，提供了寶貴的實驗數據與經驗，認為嚴謹大氣校正將是影響遙測水質準確度的重要因素。1997 年迄今，NASA 又陸續成功執行了 SeaWiFS (Sea-viewing Wide Field-of-view Sensor) 及 MODIS 海洋水色觀測任務，其中 MODIS 為 NASA 發展之最新水色感測器，搭載於 Aqua 與 Terra 兩顆衛星上，具有 36 個中高光學分辨力的光譜波段，所反演之產品不僅提供了海洋水色產品(如葉綠素、TSM)，還有做嚴謹大氣校正所需參數(如水蒸氣、CO₂、氣膠)，因此其科學產品廣為全球使用，惟因其遙測目標以開放大洋為主，最高解析度達 250 m 的兩波段(band 1, Red 及 band 2, NIR)僅適用於陸地，其餘用於海洋及大氣者為 500 m 到數公里不等，應用在近岸水體常受到解析度所限。有鑑於沿岸水體之水質變化與人類生活更為息息相關，因此，Miller & Mckee (2004) 提出以 MODIS Band 1 紅光波段，配合地真資料建立估算近岸水體 TSM 的模式，很快成為目前最被廣泛應用的非官方產品之一 (Miller *et al.*, 2011)。國人自主之福衛二號影像，具有 2 公尺全色態及 8 公尺彩色高解析度，且是全球第一顆位在日再訪軌道的高解析衛星。雖然能於福衛二號影像上觀察到近岸水體因高 TSM 所產生之顏色變化，如河口沖淡水團(plume)(康家珍等，2009)，但受限於無法進行嚴謹大氣校正，且只有 4 個低光學分辨力的光譜波段無法將水色量化。

本研究發展一個新的方法，採雙衛星平台聯合觀測的方式，對高屏河口之 TSM 濃度進行遙測分析。首先，運用 8 幅 MODIS 250 m 解析度 Band 1 (620-670 nm) 影像及與其對應之高屏河口 TSM 濃度船測數據建立 250 m 解析度的 MODIS TSM 估算公式，簡稱 MODIS-GP-TSM。其次，參考(Miller *et*

al., 2011)，運用 MODIS 大氣產品協助福衛二號進行嚴謹大氣校正(Fast Line-of-sight Atmospheric Analysis of Spectral Hypercubes, FLAASH)並與海面實測光譜資料進行核對，以配合 MODIS 所推演之 MODIS-GP-TSM 做為地真資料，用以建立福衛二號的 8 m 解析度 TSM 濃度分佈估計模式，簡稱 FS2-GP-TSM。最後，本研究於 2011/6/7 搭乘海研三號前往高屏河口採樣，同時請求國家太空中心拍攝當日高屏河口福衛二號影像並以 FS2-GP-TSM 產製 8 m 解析度 TSM 分佈圖，以 6 點河口到小琉球近同步船測 TSM 濃度進行驗證。利用本研究建立之 TSM 推估模式可在取像條件良好，且經大氣校正後的福衛二號影像上產製沿岸水體 8 m 解析度 TSM 分佈圖，將影像觀測到的沖淡水團(plume)轉為 TSM 濃度分佈，可提供近海養殖、沿岸流場及港灣建設更大範圍及近即時的環境資訊。

2. 材料與方法

2.1 研究區域

本研究選擇之區域為高屏溪河口、外海至小琉球附近，如圖 1(Liu *et al.*, 2009)影像區塊所示。高屏溪為台灣南部主要河川，流域面積及年逕流量大，輸砂量相當可觀，每年可高達每平方公尺 5.9 公斤(Hung & Hung, 2003)，大於世界平均之每平方公尺 3 公斤(Milliman & Syvitski, 1992)。台灣地形陡峭，發生颱風及豪大雨事件時，高屏溪會挾帶大量泥沙進入河口，河口外的高屏海底峽谷扮演了重要的傳輸通道並發展出獨特的海洋生地化系統(Liu *et al.*, 2002；Liu & Lin, 2004；Liu *et al.*, 2006)，瞭解高屏河口之 TSM 濃度分佈資訊，對河海動力、海洋生態及港灣設計相當有幫助，也能對集水區水文及物質輸送現象進行追溯分析。

2.2 MODIS 影像取得與處理

MODIS 為 NASA 發展之水色感測器，搭載於 Aqua 與 Terra 兩顆衛星上，具有 36 個中高光學分辨力的光譜波段，且具有不同的功能設定，分別為：

Band 1-2, 兩波段涵蓋 620-876 nm, 解析度 250 m, 提供土地、雲層及氣膠產品之邊界; Band 3-4 涵蓋 459-565 nm 及 Band 5-7 涵蓋 1230-2155 nm, 5 波段解析度均為 500 m, 提供土地、雲層及氣膠特性; Band 8-16, 9 波段涵蓋 405-877 nm, 解析度為 1000 m, 負責海洋水色、浮游生物及生地化特性之觀測; Band 20-36, 17 波段範圍 3.66-14.385 μm , 解析度亦為 1000 m, 主為提供大氣、雲層、地表及海面溫度。MODIS 與福衛二號遙測影像儀(Remote Sensing Instrument)相對應波段資料詳表 1。

研究顯示水面懸浮物質濃度會影響水面反射光譜(Gin *et al.*, 2003), 有機懸浮質反射率波峰通常出現在 450-580 nm 間, 最常於 550 nm 有最大波峰, 而在 600-645 nm 及 665-690 nm 有兩個次波峰; 無機性懸浮質則出現在 595-690 nm 之間。無論是有機或無機懸浮質, 在近紅外區段會出現反射光譜波峰反應(754 nm 開始, 最常在 814 nm 出現波峰)。Han *et al.* (1994)發現在含砂濃度不高時, 反射光譜之波峰反射率與懸浮物質濃度成很好的線性關係。雖官方未設定 MODIS Band 1 具有遙測懸浮物質濃

度之功能, 但其解析度與波段(620-670 nm)非常適合, Miller & Mckee(2004)亦提出以 Band 1 波段, 配合地真資料建立估算近岸水體 TSM 的模式。因此, 本研究也採用 Band 1 來建立 MODIS-GP-TSM 模式。

每日由 Aqua 及 Terra 衛星所取得之台灣沿岸 MODIS 影像平均有四到五幅。福衛二號有拍攝排程, 即便每日都會通過台灣上空, 但不一定會有研究區域影像, 因此, 本研究從福衛二號影像資料庫中現有資料, 選出雲覆低、拍攝角度小及有沖淡水團之影像後, 再挑選同時間的 MODIS 衛星影像。

本研究由 NASA 的 1 級大氣產品資料發佈系統(Level 1 and Atmosphere Archive and Distribution System, LAADS) (NASA, 2012)取得 MODIS L1B 之 Band 1 雲層上率定輻射資料(top of atmosphere calibrated radiance, TOA), 原始 TOA 可經 ENVI®內建之 MODIS Conversion 模組進行大氣校正、去掉帶及投影至所選之座標系統後, 得到研究所需之反射率資料 (reflectance), 以建立 FS2-GP-TSM 公式之 MODIS 影像為例, 如圖 2 所示。

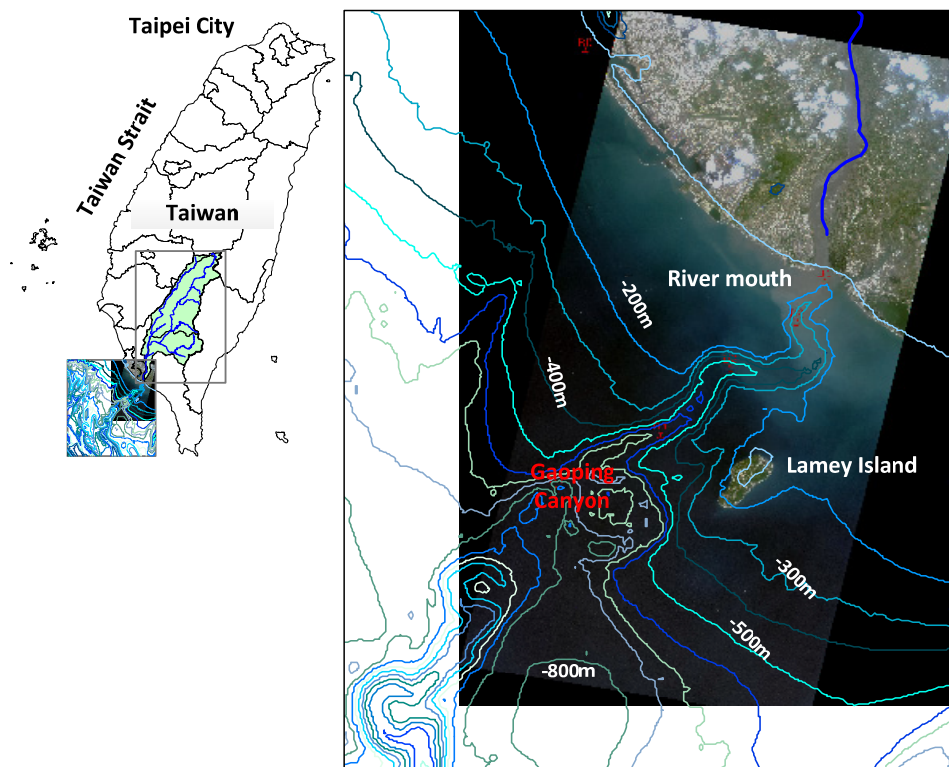


圖 1 研究區域：高屏河口，底圖為福衛二號遙測影像 (2005/8/10)

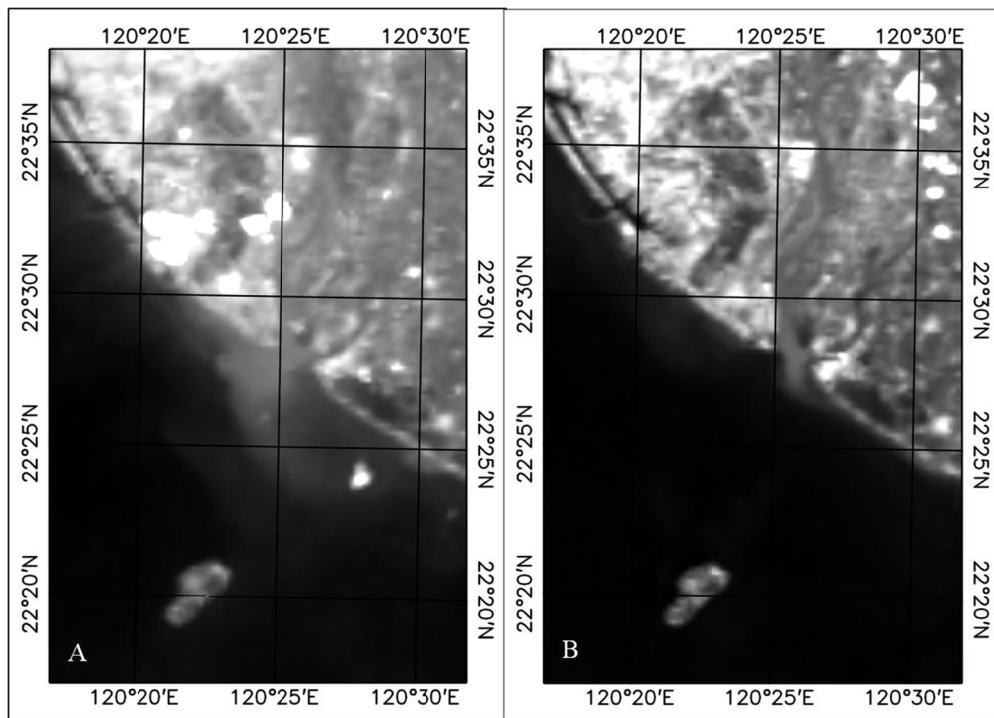


圖 2 MODIS Band 1 L1B 反射率影像，(A)2005/8/10，(B)2010/6/28，用以推演 TSM 地真資料，作為建立 FS2-GP-TSM 公式之用途

2.3 福衛二號影像取得與處理

福爾摩沙衛星二號(福衛二號，FORMOSAT-2)於 2004 年 5 月 21 日升空，進入離地表 891 km、傾角 99.1 度之太陽同步軌道上運行，每天約於上午 10 點左右通過臺灣。福衛二號為我國自主，為滿足救災、環保、教育、外交、國土規劃、農林漁牧等民生需求所發展的衛星(國家太空中心，2012)。福衛二號搭載遙測影像儀(RSI)共有 5 個波段，包含 4 個多頻譜波段(8 m 解析度)及 1 個全色態波段(2 m 解析度)，RSI 感測器各波段基本資料如表 1。

福衛二號覆蓋台灣本島及澎湖地區共劃分為 10 個條帶，本島由西向東分別為第 1 至第 7 條帶，澎湖地區則為第 8 至第 10 條帶，每個條帶跨幅約 24 km。研究區域高屏河口介於第三與第四條帶間，根據拍攝時間與季節的不同，河口可能會出現在第三條帶或第四條帶。本研究影像來源為國家太空中心授權國立成功大學全球觀測與資料分析中心複製，影像前處理採用成功大學針對福衛二號影像特性發展出的「福衛二號影像自動處理系統」(Formosat-2 automatic image processing system,

F2AIPS)，F2AIPS 詳細內容請參考(Liu, 2006)。簡言之，其處理包括錯位修正、正射糾正、彩色融合及輻射校正等四個主要流程，本研究所採用之影像前處理過程僅包含幾何部分之錯位修正與正射糾正，以避免影像處理破壞原始影像之頻譜訊號。錯位修正乃利用快速正規化相關匹配 (Fast Normalize Cross Coefficient, FNCC) 的方法解決因全色態與多頻譜 CCD(Charge-coupled Device)陣列拍攝時間延遲及聚焦面位移所造成影像之對位誤差及多頻譜影像各波段間之錯位問題。正射糾正是以其他航空或衛星平台產製之正射影像為基底，配合足夠數量之地面控制點座標、衛星拍攝姿態參數以及數值地形模型產製出正射影像。

根據表 1，MODIS Band 1 波段恰與福衛二號紅光重合，再參考 Miller *et al.*(2011)之建議，選擇以福衛二號紅光波段 (630-690 nm) 建立 FS2-GP-TSM 模式。本研究選擇兩幅高屏河口福衛二號影像與 MODIS 同步，如圖 3(A)、(B)所示，兩幅影像均無雲覆干擾，2005/8/10 之高屏外海污染團明顯，與海水之界線分明，具有明顯的 TSM 濃度梯度，2010/6/28 之高屏外海 TSM 濃度則較低，結合兩張影像可涵括較廣之反射率及 TSM 高低濃

度範圍，以達到公式適用之全面性。另外，本研究在 FS2-GP-TSM 公式建立後，將使用 2011/6/7 之船測資料進行驗證，該日影像如圖 3(C)，沖淡水團較不明顯、TSM 濃度較低且有薄雲干擾。

2. 4 福衛二號影像 FLAASH 校正

由於同一地點不同時間所拍攝之福衛二號影像，會受到當時之大氣狀況及條件而有所影響，因此同一地點所反映出的反射值，可能因時間不同而造成差異。嚴謹大氣校正對影像分類之定性分析影響不大，但對於水質的定量遙測卻會造成很大影響，

福衛二號並非以定量分析作為主要用途，所以缺乏嚴謹大氣校正所需之關鍵參數。「福衛二號影像自動處理系統」中的輻射校正，是採用主成分分析法 (Principle component analysis, PCA) 與品質控制 (Quality control)(Du *et al.*, 2002) 對經過幾何精配準處理後之兩期以上影像進行相對輻射校正。這種方法必須選出受大氣干擾較小之影像做為基底，並選擇基底影像上固有反射率不受環境改變之控制點為校正基準來進行相對輻射校正，並非完全去除大氣的影響。

表 1 RSI 各波段與 MODIS 對應波段之基本資料

Formosat-2 RSI		MODIS	
波段及光譜範圍	空間解析度 (m)	波段及光譜範圍	空間解析度 (m)
B (450-520 nm)	8	Band 3 (459-479 nm) Band 4 (545-565 nm) Band 10 (483-493 nm)	500 500 1000
G (520-600 nm)	8	Band 4 (545-565 nm) Band 11 (526-536 nm) Band 12 (546-556 nm)	500 1000 1000
R (630-690 nm)	8	Band 1 (620-670 nm) Band 13 (662-672 nm) Band 14 (673-683 nm)	250 1000 1000
NIR (760-900 nm)	8	Band 2 (841-876 nm) Band16 (862-877 nm) Band17 (890-920 nm)	250 1000 1000
PAN (450-900 nm)	2	-	-

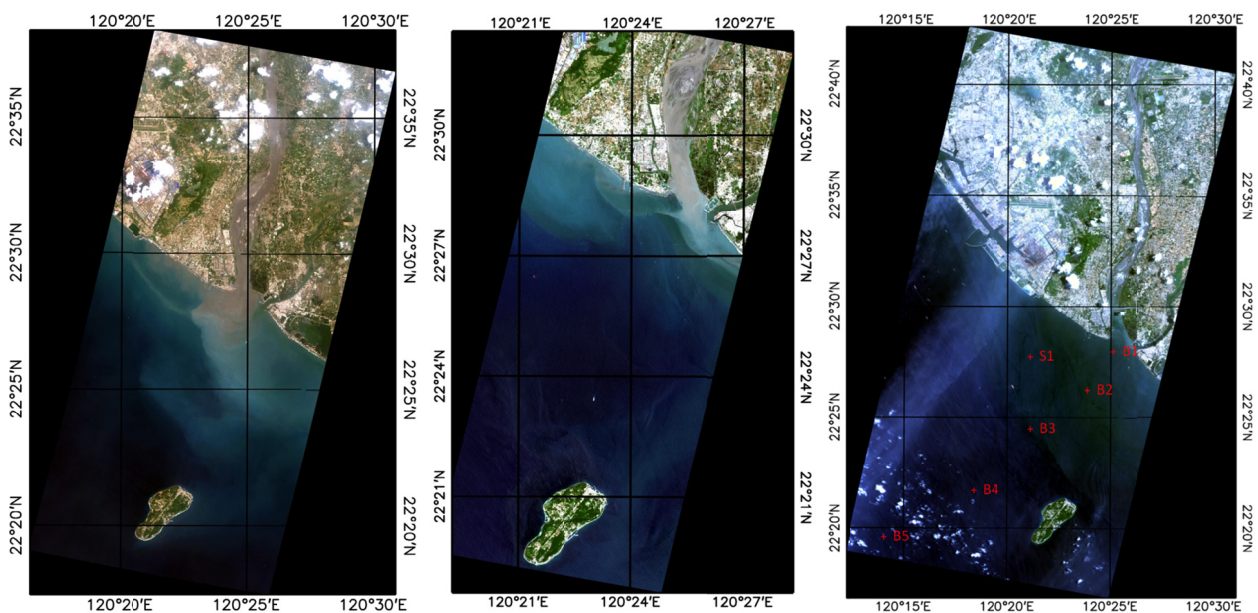


圖 3 高屏河口福衛二號影像 (A) 2005/8/10，(B) 2010/6/28，(C) 2011/6/7

本研究採用嚴謹大氣校正 FLAASH (Matthew *et al.*, 2000)對福衛二號影像進行大氣校正，使用軟體為 ENVI®。配合 MODIS 大氣條件。使用者需輸入福衛二號影像參數包括取像日期、時間、座標、衛星高度、地表海拔高度及空間解析度。根據給定之時空資訊，軟體可逕自下載研究區域之 MODIS 氣候參數、水蒸氣及 CO₂ 濃度等大氣產品，進而分析適合之大氣模式、氣膠模式及計算能見度。所以，可就當時當地之大氣條件針對同時間的福衛二號影像做嚴謹大氣修正，得到海面反射率。

Matthew *et al.*(2000)使用 FLAASH 功能進行嚴謹之大氣校正後，反射率不僅在趨勢上和數值都與實測值相近，同時亦去除了因大氣狀況干擾所造成之雜訊。由於是使用 MODIS 所提供的大氣條件對影像作校正，因此影像的拍攝時間極為重要，MODIS 取像時間使用的是格林威治標準時間，根據研究區域的時區位置，做出適當的修正，才能獲得正確的大氣條件以利精準校正。

2.5 TSM 地真資料

1. 2006-2009 河口觀測資料

本研究在建立 MODIS-GP-TSM 部分，是採用國立中山大學海岸地質實驗室所提供之 2006-2009 年實測 TSM 資料。TSM 分析方法參考張嘉文 (2009)，利用多層網目(>153 μm、63-153 μm、10-63 μm)過濾裝置(Catnet)，配合 2.7 μm 及 0.7 μm 孔徑濾紙將水樣過濾，之後再以 50 °C 烘 72 小時去除水分，最後秤重以求得 TSM。本批 TSM 資料為定點採樣，僅在不同年度有不同之採樣位置，主要在高屏河口(張嘉文，2009)，每個採樣點各有多個時間點之 TSM 資料。為與 MODIS 影像拍攝時間同步以建立迴歸式，僅採用與影像時間相近之 TSM 資料，如表 2。

2. 海研三號河口採樣

本研究在驗證 FS2-GP-TSM 部分，是採用 2011/6/7 海研三號在高屏河口到小琉球航次所取得之水樣，資料來源與分析方法與前述相同。本航次 TSM 採樣點分佈如圖 3(C)，採樣點選擇盡量涵蓋各種不同 TSM 濃度，分析結果如表 3。

表 2 高屏外海 2006~2009 實測 TSM 資料及近同步 MODIS 影像拍攝時間

日期	TSM 採樣時間	TSM(mg/L)	MODIS Terra (time)	MODIS Aqua (time)
2006/8/27	15:00	1.03	10:35	
2006/8/28	13:00	0.44		12:50
2007/6/27	12:10	96.15	10:35	
2008/5/23	15:00	0.99		13:25
2008/5/24	12:00	0.76	11:00	
2009/7/28	13:00	2.56	11:15	
2009/7/29	09:00	1.69	10:20	
2009/7/30	10:00	2.61	11:00	

表 3 2011/6/7 海研三號高屏河口實測 TSM 資料

Station	S1	B1	B2	B3	B4	B5
TSM(mg/L)	2.21	15.03	2.95	1.05	9.41	4.85

2.6 海面光譜地真資料

本研究首次以 FLAASH 進行福衛二號影像嚴謹大氣校正，為檢核其成果，特於 2011/6/7 航次於海研三號船首架設 HyperSAS 高頻譜儀(Hyperspectral Surface Acquire System, HSS)進行海面反射率之量測。HSS 儀器包含兩個輻亮度感測器和一個輻照度感測器。其一輻射感測器為水平向下 45 度面對水體去量測來自水面的輻亮度(L_t)，另一則是水平向上 45 度面對天空量測太陽入射之輻亮度(L_i)以方便校正水面耀光。輻照度感測器則 95 度朝上量測下行平面輻照度(E_d)。利用(Lee *et al.*, 1998)方法中的所提出方程式去計算不同波段的遙測反射率 R_{rs} ，公式如下：

$$R_{rs}(\lambda) = \frac{L_t(\lambda) - \rho L_i(\lambda)}{E_d(\lambda)} \quad (1)$$

現場以 HSS 所量測之 $R_{rs}(\lambda)$ 在 400-700 nm 的可見光波段共有 90 個波段，屬於解析度高的高頻譜(hyperspectral)資料。福衛二號在可見光波段範圍共有三個波段，屬於解析度低的多頻譜(multispectral)資料，三波段分別為藍光(431-536

nm)，綠光(497-619 nm)，以及紅光(610-716 nm)，理論上 HSS 與福衛二號對同一點所量測之反射率主要差別只有大氣干擾與解析度之差異。透過譚子健(2007)的研究中所導出福衛二號主要三個波段之穿透率函數，可將高頻譜 $R_{rs}(\lambda)$ 重新取樣(resample)為多頻譜的特性，將 HSS 的資料轉換為福衛紅光訊號，以能與福衛二號 FLAASH 後之反射值在同一基準下比較，公式如下：

$$R_{rs}(Band_i) = \sum_{\lambda=431}^{\lambda=716} R_{rs}(\lambda) T_i(\lambda) \quad (2)$$

式中 i 為福衛二號之三個波段，分別為藍波段($i=1$)、綠波段($i=2$)、以及紅波段($i=3$)三項，而 $T_i(\lambda)$ 為該波段對應之穿透函數，穿透率表示各波段之波長範圍內，感測器所能接收之實際幅射強度比率。搭載於福衛二號上 RSI 在波長 431 nm 至 716 nm 之穿透率函數，如圖 4 所示(譚子健，2007)。

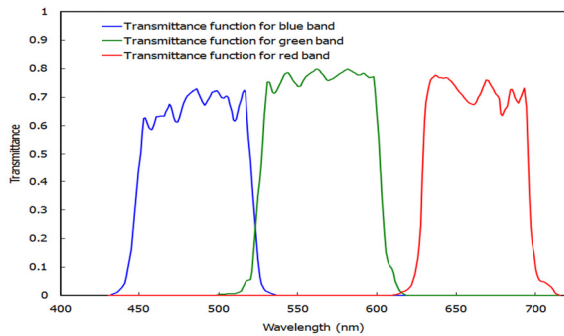


圖 4 福衛二號之穿透率函數

2.7 MODIS 與 Formosat-2 光學影像疊合

由於 MODIS 與福衛二號之空間解析度及座標投影之細微差異，為使兩衛星平台之影像資訊能夠完全重疊，利用 ENVI 系統之 Layer stacking 功能將兩平台之遙測影像作疊合。前置作業為使兩者之空間解析度一致，因此將 MODIS 影像原本之 250 m 解析度重新取樣同為福衛二號的 8 m 解析度。因原始解析度不同，影像疊合後會產生座標錯位之情形，因此還需利用選取相同控制點的方式(如圖 5)，使兩衛星遙測影像座標一致。

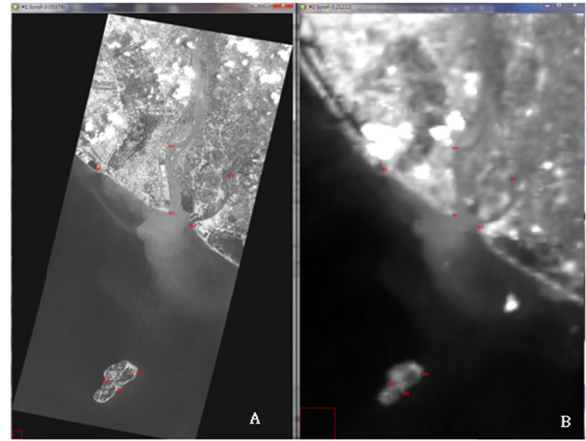


圖 5 影像上取相應控制點(圖中紅點)示意圖
2005/8/10 (A)FS-2，(B)MODIS

3. 結果與討論

3.1 MODIS 250m TSM 推估式建立

首先，配合 2006-2009 年所有之 8 筆 TSM 實測資料，再找出同期之 MODIS 影像，將原始資料轉換為反射值(reflectance)後再與 TSM 實測濃度建立 MODIS-GP-TSM 之公式。所用之影像日期及 TSM 濃度如表 2 所示，其中包含 2 幅 Aqua MODIS 及 6 幅 Terra MODIS 影像。建立之 MODIS-GP-TSM 公式迴歸關係如圖 6，其迴歸結果如式 3，TSM 單位為 mg/L。

$$\text{Log(TSM)} = -1.6493 + 33.12 \times (\text{MODIS Band 1 Reflectance}) \quad (3)$$

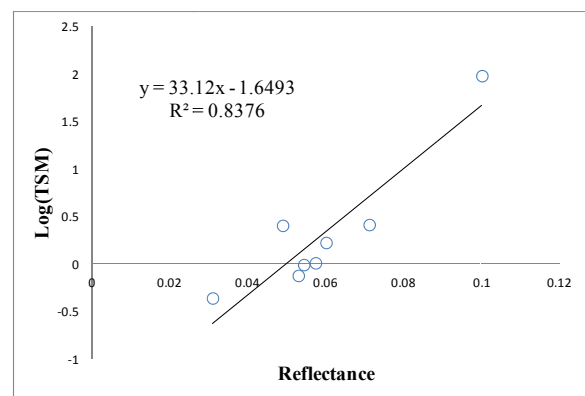


圖 6 高屏河口 MODIS-GP-TSM 迴歸公式

Miller & McKee (2004)運用美國密西西比河口實測資料所建立之 MODIS-TSM 估算方法如式 4，其 R^2 為 0.89，共 52 筆資料，

$$TSM = -1.91 + 1140.25 \times (\text{MODIS Band 1 Reflectance}) \quad (4)$$

與本研究所得之估算公式比較，MODIS-GP-TSM 為半對數迴歸模式，而 MODIS-TSM 公式(Miller & McKee, 2004)為線性迴歸。MODIS-GP-TSM 公式中，反射率介於 0.03-0.1，TSM 濃度範圍為 0-100 mg/L；MODIS-TSM 公式反射率介於 0-0.05，TSM 濃度範圍 0-60 mg/L。本研究採用之地真資料數量較少($n=8$)，但涵蓋之高屏河口 TSM 濃度範圍卻較大，因此以半對數迴歸較為合適。此比較也顯示以統計迴歸模式建立之遙測水質估算式具有區域特性，使用時要特別注意。

3.2 福衛二號影像大氣校正成果

為了解經 FLAASH 修正後的福衛二號水面反射率影像與地真光譜資料之差異，本研究利用重新取樣後的 HSS 頻譜資料與 FLAASH 後的福衛二號水面反射率進行比對。福衛二號是在短時間內取得整個研究區域之反射率，而 HSS 於同一時間僅能在同步點(S1，如圖 3C)取樣，因此比對差異僅能以 S1 為準，其餘點位均有時間上的差異。福衛二號經 FLAASH 後所得反射率，於藍光、綠光波段與 HSS 轉換後之數值有明顯差距，但紅光波段兩者之結果極為相似，如圖 7。有時間差異之 B1-B5 各點紅光波段反射率與 HSS 比較結果如圖 8，各點位之反射率尚有些許差異，也許不只是時間差所造成之影響，不過就整體數值高低變化(B1 點位較為靠近河口，B2-B5 漸往外海小琉球的方向延伸)來看，兩者間在空間分佈上接近。福衛二號 RSI 雖擁有 2 m-8 m 的高空間解析度，但其光譜解像力及輻射校準無法與其他水色衛星相比，經 FLAASH 後能有相近成果已屬難得，不過未來仍須進一步了解此差異對估算之 TSM 濃度所造成之影響。

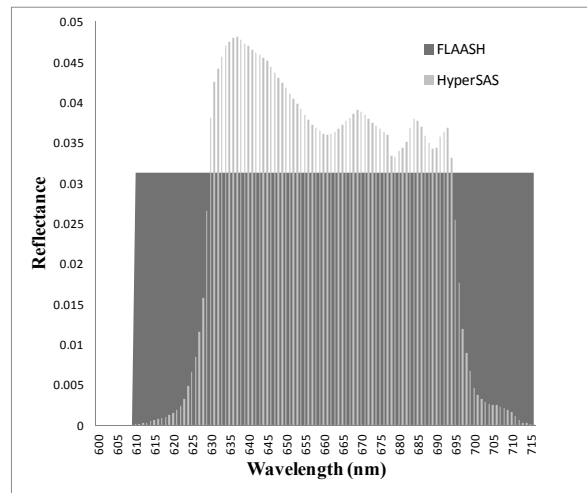


圖 7 紅光波段 FLAASH 與 HyperSAS 轉換反射率比較

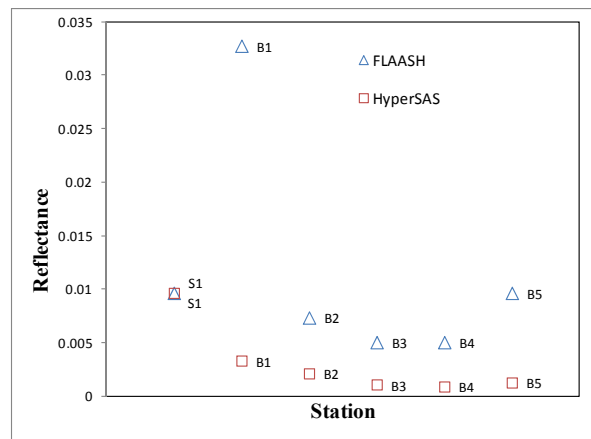


圖 8 紅光波段反射率驗證結果

3.3 建立福衛二號總懸浮物質濃度估算公式 (FS2-GP-TSM)

2005/8/10 及 2010/6/28 之福衛二號(如圖 3)及 Terra MODIS 影像(如圖 2)品質良好，從河口至外海地區均可看出高低濃度之沖淡水團。因此，本研究選用此兩日期之雙衛星聯合觀測資料建立 FS2-GP-TSM。如圖 9 所示，迴歸公式之 X 軸為福衛二號經 FLAASH 後的反射率值，Y 軸為 MODIS-GP-TSM 公式推導出的 TSM 資料，共 23958 筆，建立之 FS2-GP-TSM 如式 5， R^2 為 0.8567。當影像反射值偏低時，根據式 5 計算之 TSM 可能

為負值，在處理影像時若計算之 TSM 為負值就以 0 取代。此外，本研究亦嘗試採用半對數迴歸，雖有較高之 R^2 且可適用於較低的紅光反射值，但因驗證結果較差，且容易在高反射值狀況下得到不合理的高 TSM 濃度，處理影像時這些過曝點缺乏適合的門檻值來移除，且過曝點通常位於薄霧或吾人所關心之沖淡水團核心所在，移除後可能造成關心細節之喪失。因此比較後仍選擇使用線性迴歸，及以 0 為門檻值進行影像處理。

$$TSM = -20.11 + 850.84 \times$$

(FS-2 Red Band Reflectance) (5)

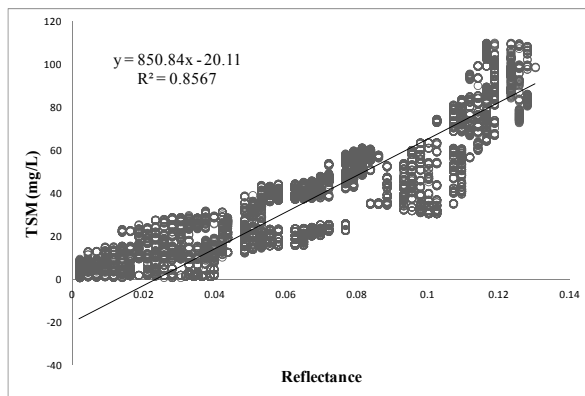


圖 9 FS2-GP-TSM 推估公式

3.4 FS2-GP-TSM 驗證

為證明本研究所推導之福衛二號 TSM 推估公式可用於研究區域內，將 2011/6/7 於高屏外海所測之 6 點 TSM 實測值與公式所推導出的 TSM 濃度作比較。比較結果如圖 10，實測與推估值之相關係數為 0.8，實測與推估值有高度相關且推估之 TSM 濃度與實測值大致在同一量化範圍內，因此，由影像上能大致掌握 TSM 的空間分佈特性(由河口到小琉球逐漸降低，B1 與 B5 濃度差距達 3 倍)。B4 及 B1 點是造成驗證結果不佳的主因，B4 點可能是受到海底沉積物再懸浮或採樣誤差之影響，實測 TSM 濃度高於離河口較近之 B3 及 B2 點，此再懸浮細節在影像上卻顯示不出來，造成推估值偏低；B1 點離河口最近，也是實測濃度較高處，由反射率比較(圖 8)可看出影像在該點受大氣校正不佳影響使反射值異常偏高，因此驗證誤差高估 70%。

整體而言，驗證所得之判定係數較模式建立階段之 R^2 值為低，研判大氣校正是造成誤差的原因之一，如前述，經 FLAASH 後的福衛二號影像本身即存在一定程度的大氣校正誤差(如圖 8)，而 2011/6/7 影像更有明顯的灰霾與薄霧(如圖 3C)干擾大氣校正使水面反射值偏高，造成推估值大多高於實測。其次，福衛二號影像雖與船次同日拍攝，但除同步點 S1 外，其他點的採樣時間與拍攝時間也有數小時的落差，推估結果與船測資料無法在同一時間進行比較也是造成誤差的原因之一。

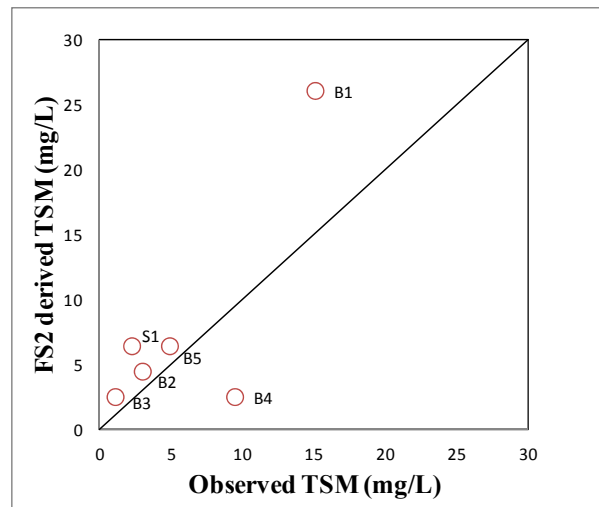


圖 10 TSM 濃度推估之驗證結果 (1 比 1 等直線圖)

3.5 高屏河口高空間分辨率總懸浮物質分佈圖

利用 FLAASH 及 FS2-GP-TSM 公式分析 2 幅於雨季取得之高屏河口福衛二號影像，結果如圖 11 及圖 12。取像日期為雨季，因此河口處有高濃度之 TSM 及沖淡水團現象。由於福衛二號高空間解析度之優勢，可明顯看出沖淡水團在沿岸附近之 TSM 濃度細節變化，且公式可估算濃度的範圍相當廣，涵蓋高屏溪口之 100 mg/L 以上到外海之低濃度。藉由此方式瞭解河口 TSM 濃度分佈資訊，對河海動力、海洋生態及港灣設計相當有幫助，此為福衛二號設計時未設想之延伸應用。

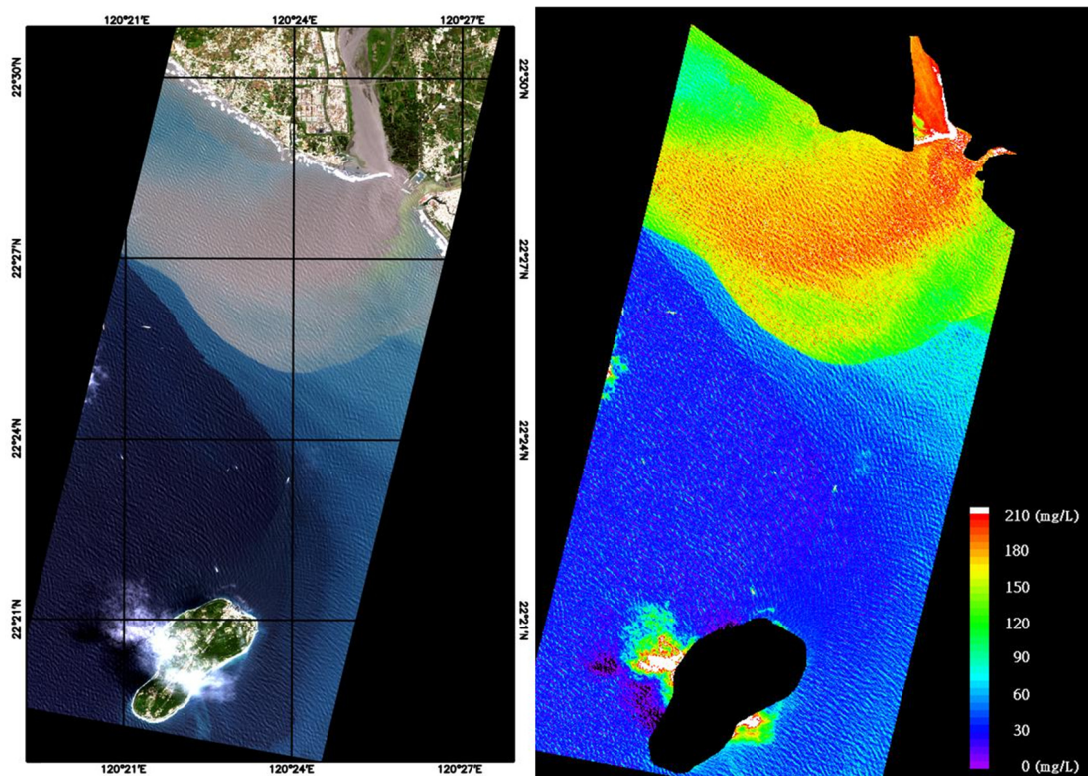


圖 11 高屏河口影像與 TSM 濃度分佈圖(2009/7/19)

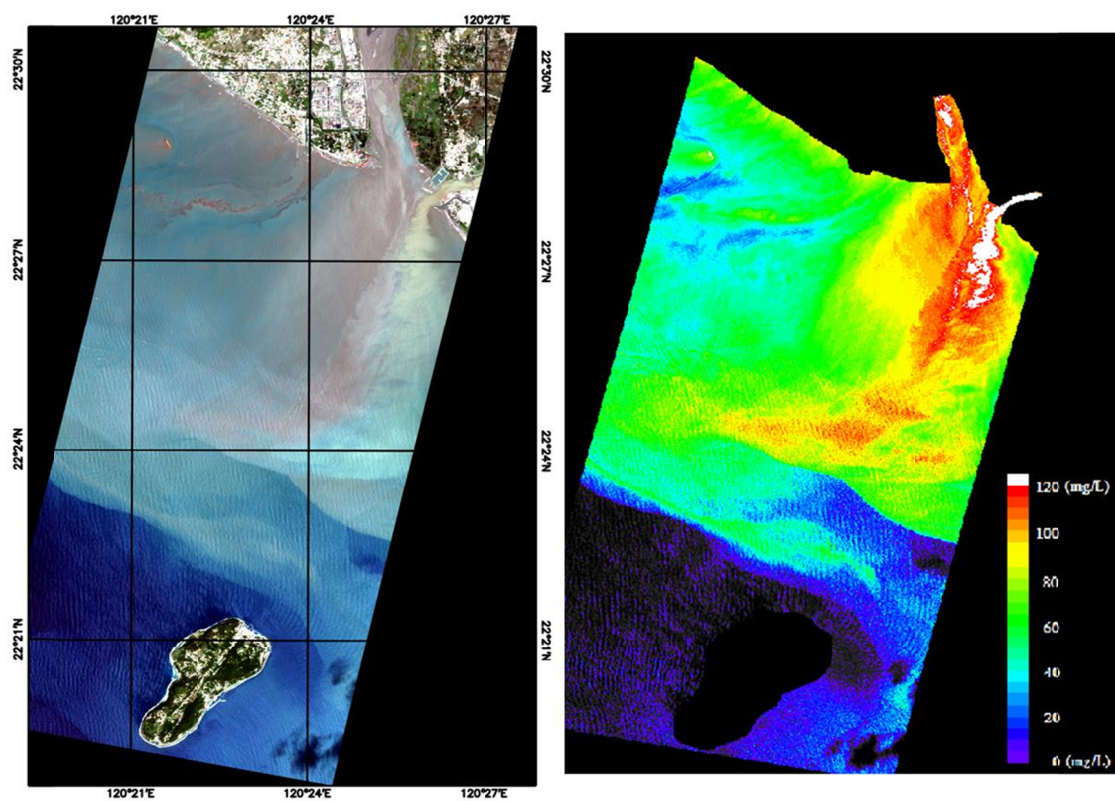


圖 12 高屏河口影像與 TSM 濃度分佈圖(2010/9/21)

4. 結論

沿岸水體水質之監測為攸關海洋生態、基礎生產力、及港灣工程之重要課題。藉由遙測獲取大範圍、近即時之水質資訊，是目前世界各國致力研究的趨勢。本研究運用雙衛星平台聯合觀測高屏河口系統 TSM 濃度，分別建立了 MODIS-GP-TSM 公式與 FS2-GP-TSM 公式，並以實測 TSM 與 HSS 光譜資料作結果之驗證，得到以下幾點主要結論：

1. 用以推估 TSM 濃度作為地真資料的 MODIS-TSM 公式，有其區域性的限制，Miller and Mckee(2004)所使用之公式套用在高屏河口地區並不適當，故本研究參考其公式建立過程及方法，發展適用於高屏河口 TSM 的 MODIS-GP-TSM 經驗式。本式為 8 幅 Aqua-MODIS 及 Terra-MODIS 250 m 解析度 Band 1 反射率影像及 8 筆地面資料所建立， $R^2=0.8376$ 。
2. 本研究首次利用 FLAASH 進行福衛二號影像嚴謹大氣校正，校正後之紅光波段反射值與同步點實測水面反射值十分接近，於其他點雖能掌握大致趨勢，但研判仍無法有效降低大氣干擾。
3. 本研究以 MODIS-GP-TSM 處理兩幅 MODIS 影像獲取海面 TSM 資料，並以 FLAASH 處理福衛二號影像得到相對應之反射率，以此 23,958 對資料建立 FS2-GP-TSM 迴歸公式，成功產製高屏河口 8 m 解析度 TSM 濃度分布圖。
4. 本研究以現地實測與同步 FS2 影像資料驗證 FS2-GP-TSM 迴歸公式，實測與影像推估值雖有高度相關，呈距河口越遠 TSM 濃度漸低的趨勢。但因受到同步當日河口 TSM 濃度偏低、影像受灰霾與薄霧干擾大氣修正效果、以及影像拍攝與採樣之時間差等主要因素影響，驗證結果並非良好。
5. 搭配福衛二號影像自動處理系統與 FLAASH 大氣校正，本研究提出之 FS2-GP-TSM 公式可運用在福衛二號紅光影像上，產製沿岸水體 8

m 解析度 TSM 濃度分佈圖。此濃度分布圖不僅看出沖淡水團在沿岸附近之濃度細節變化，也提供了大範圍及近即時的河口 TSM 資訊。

致謝

筆者感謝行政院國家科學委員會 (NSC-100-2625-M-006-005; NSC-99-2625-M-006-003) 提供經費補助，及國立中山大學海洋地質及化學研究所海岸地質實驗室協助採樣及分析水質數據。

參考文獻

- 國家太空中心, 2012, “福衛二號特性與應用”, 財團法人國家實驗研究院太空中心網頁, http://www.nspo.narl.org.tw/2011/tw/F2_image/property.html
- 康家珍, 劉正千, 張智華, 2009, “以福衛二號多頻譜高空間分辨率遙測影像分析高屏河口陸源物質輸送之季節性動態變化”, 2009 國科會海洋學門海洋科學成果發表會, 花蓮縣。
- 張嘉文, 2009, “島嶼型河川之海陸交互作用: 潮汐對河口區顆粒態有機碳及無機碳之影響”, 碩士論文, 中山大學海洋地質及化學研究所, 高雄市。
- 譚子健, 2007, “應用生光模式及福衛二號遙測影像研究曾文水庫水質之時空分佈”, 碩士論文, 成功大學環境工程學系, 台南市。
- Barale, V., and P. M. Schlittenhardt, 1993, “Ocean Colour: Theory and Applications in a Decade of CZCS Experience”, Kluwer Academic, Dordrecht., 367.
- Cloern, J. E., 1987, “Turbidity as a control on phytoplankton biomass and productivity in estuaries”, *Continental Shelf Research*, 7(11), 1367-1381.
- Cole, B. E., and J. E. Cloern, 1987, “An empirical model for estimating phytoplankton productivity in estuaries”, *Marine Ecology, Progress Series*, 36, 299-305.
- Dennison, W. C., R. J. Orth, K. A. Moore, J. C. Stevenson, V. Carter, and S. Kollar, 1993, “Assessing water quality with submersed aquatic

- vegetation", *Bioscience*, 43, 86-94.
- Dodge, R. E., R. Aller, and J. Thompson, 1974, "Coral growth related to resuspension of bottom sediments", *Nature*, 247, 574-577.
- Du, Y., P. M. Teillet, and J. Cihlar, 2002, "Radiometric normalization of multitemporal high-resolution satellite images with quality control for land cover change detection", *Remote Sensing of Environment*, 82, 123-134.
- Gin, K. Y. H., S. T. Koh, and I. I. Lin, 2003, "Spectral irradiance profiles of suspended marine clay for the estimation of suspended sediment concentration in tropical waters", *Int. J. Remote Sensing*, 24, 3235-3245.
- Han, L., D. C. Rundquist, L. L. Liu, R. N. Fraser, and J. F. Schalles, 1994, "The spectral responses of algal chlorophyll in water with varying levels of suspended sediment", *Int. J. Remote Sensing*, 15, 3707-3718.
- Hung, J. J., and P. Y. Hung, 2003, "Carbon and nutrient dynamics in a hypertrophic lagoon in southwestern Taiwan", *Journal of Marine Systems*, 42, 97-114.
- Lee, Z. P., K. L. Carder, R. G. Steward, T. G. Peacock, C. O. Davis, and J. S. Patch, 1998, "An empirical algorithm for light absorption by ocean water based on color", *Journal of Geophysical Research*, 103(C12), 27967-27978.
- Liu, C. C., 2006, "Process of FORMOSAT-2 daily revisit imagery for site surveillance", *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 44, 3206-3214.
- Liu, C. C., C. H. Chang, C. G. Wen, C. H. Huang, J. J. Hung, and J. T. Liu, 2009, "Using satellite observations of ocean color to categorize the dispersal patterns of river-borne substances in the Gaoping (Kaoping) River, Shelf and Canyon system", *Journal of Marine Systems*, 76, 496-510.
- Liu, J. T., and H. L. Lin, 2004, "Sediment dynamics in a submarine canyon : a case of river-sea interaction", *Marine Geology*, 207, 55-81.
- Liu, J. T., H. L. Lin, and J. J. Hung, 2006, "A submarine canyon conduit under typhoon conditions off Southern Taiwan", *Deep-sea Research I*, 53, 223-240.
- Liu, J. T., K. J. Liu, and J. C. Huang, 2002, "The influence of a submarine canyon on the river sediment dispersal and inner shelf sediment movement in southern Taiwan", *Marine Geology*, 181, 357-386.
- Matthew, M. W., S. M. Adler-Golden, A. Berk, S. C. Richtsmeier, R. Y. Levine, L. S. Bernstein, P. K. Acharya, G. P. Anderson, G. W. Felde, M. P. Hoke, A. Ratkowski, H. H. Burke, R. D. Kaiser, and D. P. Miller, 2000, "Status of Atmospheric Correction Using a MODTRAN4-based Algorithm", *SPIE Proceeding, Algorithms for Multispectral, Hyperspectral, and Ultraspectral Imagery VI*, 4049, 199-207.
- May, C. L., J. R. Koseff, L. V. Lucas, J. E. Cloern, and D. H. Schoellhamer, 2003, "Effects of spatial and temporal variability of turbidity on phytoplankton blooms", *Marine Ecology, Progress Series*, 254, 111-128.
- McLaughlin, C. J., C. A. Smith, R. W. Buddemeier, J. D. Bartley, and B. A. Maxwell, 2003, "Rivers, runoff and reefs", *Global and Planetary Change*, 39(1-2), 191- 199.
- Miller, R. L., 1980, "Phytoplankton production within the grass beds off Goose Point", *Lake Pontchartrain, LA. MS thesis, Louisiana State University*, 138.
- Miller, R. L., and J. F. Cruise, 1995, "Effects of suspended sediments on coral growth: Evidence from remote sensing and hydrologic modeling", *Remote Sensing Environment*, 53, 177-187.
- Miller, R. L., and B. A. McKee, 2004, "Using MODIS Terra 250 m imagery to map concentrations of total suspended matter in coastal waters", *Remote Sens. Environ.*, 93, 259-266.
- Miller, R. L., C. C. Liu, C. J. Buonassissi, and A. M. Wu, 2011, "A Multi-Sensor Approach to Examining the Distribution of Total Suspended Matter (TSM) in the Albemarle-Pamlico Estuarine System, NC, USA", *Remote Sens.*, 3, 962-974.
- Milliman, J. D., and J. P. M. Syvitski, 1992, "Geomorphic Tectonic Control of Sediment Discharge to the Ocean-the Importance of Small Mountainous Rivers", *Journal of Geology*, 100, 525-544.
- National Aeronautics and Space Administration (NASA), 2012, Level 1 and Atmosphere Archive and Distribution System, LAADS, <http://ladsweb.nascom.nasa.gov/>.
- Torres, J. L., and J. Morelock, 2002, "Effect of terrigenous sediment influx on coral cover and linear extension rates of three Caribbean massive coral species", *Caribbean Journal of Science*, 38(3-4), 222-229.

Integration of MODIS and Formosat-2 Imagery for the Development of a Reliable and High-Tempospatial-Resolution Total Suspended Matter Concentration Retrieval Model: Case Study in Goaping River Mouth

Kai-Jie Yang¹ Chih-Hua Chang^{2*} Cheng-Chien Liu³ Yao-Sheng Chiu⁴
James T. Liu⁵

ABSTRACT

Total Suspended Matter (TSM) concentration in nearshore waters plays a very important role to the coastal water quality management, oceanic primary production and coral reef conservation. However, traditional approach provides limited information in terms of spatial and temporal coverage for monitoring TSM concentration in nearshore waters. The MODerate resolution Imaging Spectroradiometers (MODIS) on board Terra and Aqua satellite can provide abundant spectral information for rigorous atmospheric correction and retrieving TSM concentrations from the observation of ocean color in a large scale (250 m resolution). With the advantage of daily-revisit characteristics of Formosat-2 satellite (FS-2), the Remote Sensing Instrument (RSI) onboard FS-2 provide high-tempospatial data (8 m resolution), however, insufficient spectral information to resolve the water color. With an intention to well understand the dynamic and spatial patterns of TSM concentration in the Goaping river, this study presents a multi-satellite sensor approach that integrate both the advantage of MODIS and RSI to generate high resolution map of TSM concentration on FS-2 imagery. Firstly, a 250m resolution TSM regression model named MODIS-GP-TSM was established using MODIS Band 1 reflectance and concurrent TSM concentration measured at Gaoping River mouth. Secondly, with the TSM data derived from two MODIS images and MODIS-GP-TSM, an 8m resolution TSM retrieval model named FS2-GP-TSM was developed on the corresponding FS-2 images. The FS2-GP-TSM was verified to another set of field data taken from the river mouth to Lamey Island, with a good agreement between derived and observed TSM concentrations. This study encourages the use of multi-satellite approaches to extend the application of the FS-2 imagery on monitoring costal and nearshore waters where high resolution information is required.

Keywords: Total Suspended Matter, MODIS, Formosat-2, Remote Sensing, Multi-satellite

¹ Master, Department of Environmental Engineering, National Cheng Kung University

² Assistant Professor, Department of Environmental Engineering,
National Cheng Kung University

³ Distinguished Professor, Department of Earth Sciences, National Cheng Kung University

⁴ Master, Institute of Satellite Informatics and Earth Environment, National Cheng Kung University

⁵ Institute of Marine Geology and Chemistry, National Sun Yat-sen University

* Corresponding Author, Phone: 886-6-2757575 ext.65826, E-mail : chihhua@mail.ncku.edu.tw

Received Date: Jun. 14, 2012

Revised Date: Sep. 13, 2012

Accepted Date: Oct. 18, 2012

應用 MODIS 影像反演土壤含水率-以泰國 MaeSa 集水區為例

張子瑩^{1*} 林李耀²

摘要

近年來熱帶地區國家，正逢快速的經濟發展，面臨大量的土地利用改變以增加農作面積或轉換成工業用地，為因應大量農業與工業的用水，水資源的分配與管理，逐漸成為重要的議題。在水的循環過程中，土壤含水率扮演著重要的角色之一，獲得土壤含水率的變化資訊，有助於強化水文模式，及了解不同土地利用覆蓋下的水資源的分布情形，對於分析未來的土地使用變更計劃所造成的水資源變遷，都可提供有用的資訊。本研究利用遙測技術結合熱慣量法，推估泰國北部 MaeSa 集水區內之土壤含水率。在遙測技術方面採用 2002 至 2009 年的美國中尺度影像光譜儀 (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer, MODIS)及可與影像實際結合的表觀熱慣量法(Apparent Thermal Inertia, ATI)分別推估土壤深度 10 公分、100 公分及 200 公分的土壤含水率。比對 MODIS 的推估值與地面觀測站的實測值的結果：10 公分、100 公分及 200 公分相關係數分別為 0.80，0.84，及 0.84。土深 10 公分、100 公分及 200 公分的納許-史托克利夫效率係數值(Nash-Sutcliffe efficiency coefficient, E)，分別為 0.57，0.537 及 0.492；而均方根誤差在各深度分別為 0.055，0.025 及 0.029。綜合統計結果，土壤深度為 100 公分的含水率推估結果最佳。本研究成功地使用 MODIS 影像推估 MaeSa 集水區的土壤含水率，未來將可有效使用此方法於其他測站缺乏的集水區，以提供更豐富的土壤含水率資訊於相關領域管理應用。

關鍵詞：MODIS、遙測、土壤含水率、熱慣量

1. 前言

全球產業的改變，對水的需求量迅速的提高，因此了解水的循環以及追蹤水的分布一直是天氣、水文學者所關注的焦點。以天氣領域而言，天氣邊界層是天氣環流中的重要一環，地表植物及土壤水份藉由擴散、蒸發、蒸散的方式，影響地表與天氣間能量與水份的交換。以水文領域而言，降雨與逕流的時空變化，則受到根區的土壤含水率、地表植被及地形的相互作用影響(Robinson *et al.*, 2008)。從過去的文獻分析裡發現，土壤含水率與降雨量的關係是相當緊密的 (Hong & Kalnay, 2000; Van der Schrier & Barkmeijer, 2007)，在多雨時期，土

壤中可維持較高的含水率。但在少雨時期，土壤含水主要貢獻給地表蒸發散量，當蒸發散減少時，則改變能量的分配，過多的地表淨輻射量則轉為加熱地表，影響水資源的分布及水資源的管理方式 (Song *et al.*, 2000; Starks & Jackson, 2001)。

傳統的氣象站及通量塔，除了降雨量外，也進行土壤含水率的量測，而在特定的水文研究集水區裡，則利用不同儀器追蹤水份的移動，其中包括雨量筒以監測降水量、水位計測量水流及土壤水分感測計量測土壤含水率等 (Van den Elsen *et al.*, 2004)。這些土壤含水率的量測，都能提供高精度土壤含水在時間尺度上的變化。近代遙測技術快速發展，不但能提供大區域、多時期的觀測特點，更可彌補傳

¹ 國家災害防救科技中心 助理研究員

² 國家災害防救科技中心 研究員

收到日期:民國 101 年 06 月 14 日

修改日期:民國 101 年 11 月 09 日

接受日期:民國 101 年 11 月 12 日

*通訊作者，電話: 02-81958668, E-mail: geoct@ncdr.nat.gov.tw

統測站點與點之間的資料空隙。有鑑於此，許多學者早已投入研究遙測推估土壤含水率的技術，並規劃實驗田的設置，其中包括：美洲 Radiobrightness Energy Balance Experiment (REBEX), Washita'92, Southern Great Plains 1997 (SGP97), SGP99, Soil Moisture Experiment 2002 (SMEX02), SMEX04, 亞洲季風區 Coordinated Enhanced Observing Period (CEOP), CEOP Enhanced Observing Periods 3 and 4 (EOP-3 and EOP-4), 及澳洲 National Airborne Field Experiment 2005 (NAFE'05), NAFE'06 等，這一系列研究在國際間都相當知名(Kim, 1996; Jackson *et al.*, 1993; Jackson *et al.*, 1999; Jackson *et al.*, 2001; Jackson *et al.*, 2003; Jackson *et al.*, 2008; Koike, 2004; Panciera *et al.*, 2008; Merlin *et al.*, 2008)。受限於電磁波的穿透特性及影像的空間解析度，這些實驗田的設置與遙測土壤水份的估算模式，焦點主要放在裸土、中低密度的植被覆蓋區及特定農業區(Schmugge, 1996; Ulaby *et al.*, 1996; Liou *et al.*, 1999; Kerr, 2001; Njoku *et al.*, 2003)。然而高植被覆蓋地區的土壤含水的變化，仍是不可獲缺的資訊之一，因此 Wagner *et al.* (1999) 學者也嘗試利用 ESR-1 及 ESR-2 雷達影像，推估歐洲森林區的土壤含水率。

Verstraeten *et al.* (2006) 利用可見光，紅外光及遠紅外光的 METEOSAT 影像，搭配表觀熱慣量法(apparent thermal inertia, ATI)，以推估歐洲森林覆蓋下的土壤含水率，比對地面測站的資料，其成果較 ERS 雷達影像所推估結果更佳，又利用此方式推估土壤含水率所需要的額外地面輔助資料較少，容易推廣到更多不易設站與到達的區域。因此本研究希望修改 Verstraeten *et al.* (2006) 提出的土壤含水率的推估方式，利用較易取得的光學影像應用於熱帶地區，經費較缺乏，不易建立氣象站的山地地區，進行全面土壤含水率的推估，不但有助於改進水文模式的分析成果，也可提供水資源管理多一項資料參考。

2. 研究方法

本研究用以推估土壤含水率的方法，主要是採

用表觀熱慣量法(本文簡稱 ATI 法)搭配美國太空總署的地球觀測系統(Earth Observing System, EOS) 中 Terra 衛星上搭載的 MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) 感測器，輔以山地區域建置的土壤含水觀測點資料，進行演算法的改進與土壤含水率的推估。

ATI 的理論基礎是來自於計算地表物質的熱慣量。熱慣量($P, J m^{-2} K^{-1} s^{-1/2}$)用以說明物質的熱特性，是量測其溫度改變的阻抗能力，定義為：

$$P = \sqrt{K \cdot \rho \cdot c_p} \quad (1)$$

其中 K 為熱傳導係數； ρ 是密度； c_p 是固定壓力下的比熱。

土壤的熱慣量可用以反應土壤的熱特性，一般而言，土壤含水越高，日夜的溫度變化較小，熱慣量越大。當土壤含水率較低時，熱慣量反之較小。但其中熱慣量的參數，不易利用遙測影像加以推估，因此後續發展的 ATI 法(Price, 1977)，則可有效的透過多光譜衛星影像資料，計算影像中每個像元的 ATI 值，以推算地表的熱慣量，ATI 法可寫成如下：

$$ATI = \frac{1-\alpha}{\Delta LST} \quad (2)$$

其中 α 是全波段的地表反照率； ΔLST 是每日的地表溫差，本研究採用 Terra MODIS 白天與晚間的地面溫度相差值。

根據 Liang (2000) 的研究，地表物質的可見光波段反照率可不受太陽角度與大氣能見度的影響，又 Terra MODIS 的可見光波段反照率，可利用 MODIS 第一、三及四波段，以線性組合方程推估，本研究則採 Liang(2000) 的可見光波段反照率(式 3)，視為全波段的地表反照率，簡化所需資料計算 ATI 值。

$$\alpha = 0.331\rho_1 + 0.424\rho_3 + 0.246\rho_4 \quad (3)$$

其中 ρ_1 、 ρ_3 及 ρ_4 分別為 MODIS 第一、三及四波段的反射率。

計算出每個像元的 ATI 值後，將 ATI 值標準化，可組合成一個地表濕度飽合指標(surface moisture saturation index, SMSI₀)，利用這指數可用

以評估一段時間內地表濕度的等級，其定義如下 (Verstraeten *et al.*, 2006)：

$$\text{SMSI}_0(t) = \frac{\text{ATI}(t) - \text{ATI}_{\min}}{\text{ATI}_{\max} - \text{ATI}_{\min}} \quad (4)$$

其中 $\text{ATI}(t)$ 是時間 t 時的 ATI 值； $\text{ATI}_{\max}$ 及 $\text{ATI}_{\min}$ 則代表在一段時間內分別為最大的 ATI 值與最小的 ATI 值。

在本研究裡，採用雙層的概念來推估土壤含水率。第一層為表層濕度值，即遙測地表時計算出來的 SMSI_0 值。不考慮水份的水平交換與移動，水份為垂直移動，以估算第二層一根區土壤層一的土壤含水率，主要的方程如下：

$$L \frac{d\theta(t)}{dt} = C \cdot (\theta_{\text{top}} - \theta) \quad (5)$$

其中 L 是根區層深度； C 是 pseudo-diffusivity coefficient，與土壤顆粒有關； θ 是根區層(第二層)濕度； θ_{top} 為遙測層(第一層)濕度。

再定義 T 為 L/C ， T 代表的含義為特徵時間長度，這時間長度內的第一層濕度變化，將貢獻於第二層的濕度量，式(5)可寫為式(6)：

$$\theta(t) = \frac{1}{T} \int_{-\infty}^t \theta_{\text{top}}(t') e^{-\frac{t-t'}{T}} dt' \quad (6)$$

Verstraeten *et al.* (2006) 假設 θ_{top} 第一層濕度層為 SMSI_0 的線性函數，則當根區深度為 1 公尺時，根區層的 $\text{SMSI}(t)$ 可寫成如下：

$$\text{SMSI}(t) = \frac{\sum_i \text{SMSI}_0(t_i) e^{-\frac{t-t_i}{T}}}{\sum_i e^{-\frac{t-t_i}{T}}} \quad (7)$$

根區層的土壤含水率則可再比照標準化的方式，利用 SMSI 並搭配最大最小的根區土壤含水率，則可推估時間 t 時之根區土壤含水率 $\theta(t)$ ，其方程可寫為如下：

$$\theta(t) = \frac{\text{SMSI}(t) - \text{SMSI}_{\min}}{\text{SMSI}_{\max} - \text{SMSI}_{\min}} \cdot (\theta_{\max} - \theta_{\min}) + \theta_{\min} \quad (8)$$

其中 $\theta_{\max}$ 及 $\theta_{\min}$ 為土壤層中的土壤含水率最大與最小值。

3. 研究區與研究材料

3.1 研究區簡介

本研究選取泰國北部清邁省的 MaeSa 集水區為研究區，選擇 MaeSa 集水區的主要原因是自 2004 年初以來，就有美國、德國等的水文學者在此地進行水文的觀測。本研究所蒐集的地面測站資料，主要是由夏威夷大學 Dr. Thomas Giambelluca 與新加坡大學 Dr. Alan Ziegler 所提供從 2004 年起在 MaeSa 地區設置數個雨量站/土壤含水率測站與 3 個大型氣象測站的長期觀測資料，尤其土壤含水率的測量深度，包括 10 公尺、100 公尺、200 公尺的觀測量，可供比對參考

MaeSa 集水區的全區面積約 138 平方公里，其地理位置於北緯 18.83 度至 18.94 度，東經 98.78 度至 98.97 度之間。年平均氣溫約攝氏 21.3 度，年雨量約 1300 公釐，雨季主要分布在五月至十一月，氣候分區隸屬於熱帶季風氣候。MaeSa 集水區的地勢分布是西高東低，西半部為山區丘陵地，東半部為平原，河流由西向東流，高程介於 314 至 1384 公尺之間，土地覆蓋及利用上，森林覆蓋為 71%，農業用地為 25%，為一典型的熱帶山地集水區。圖 1 為 MaeSa 的地理位置及測站分布圖；表 1 為測站編號與地理位置、地表覆蓋與儀器裝設。

3.2 遙測影像資料

由於水資源或氣象變化的監測，時間重現頻率要求較高，經過幾種遙測系統的評估之後，美國太空總署 EOS 的 Terra 衛星所搭載中尺度影像輻射儀 (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer, MODIS)，由於時間解析度高與影像取得的方便，成為本研究發展採用的遙測影像。

MODIS 影像擁有 36 個波段，波長範圍從 0.4 到 14.4 μm ，其中第 1-2 波段的空間解析度為 250 公尺，3-7 波段的空間解析度為 500 公尺，8-36 波段則是 1 公里的空間解析。本研究則下載 2002-2009 年之 Terra MODIS 的地面產品，其中主

要的三種參數，包括日間地面溫度、夜間地面溫度，以及可見光波段反照率是本研究必需的，因此產品名稱有：Terra MODIS Land Surface Temperature & Emissivity 8-Day L3 Global 1km (MOD11A2)及 Band 1-7 Surface Reflectance 8-Day L3 Global 500

m (MOD09A1)，雖然這些產品為 8 日的組合產品，但每一個像元的取像日期都於附加文件裡中說明，因此本研究可以確切的比對特定日期的地面觀測資料，而不同波段的解析度問題，也統一處理成 1km 的空間解析度。

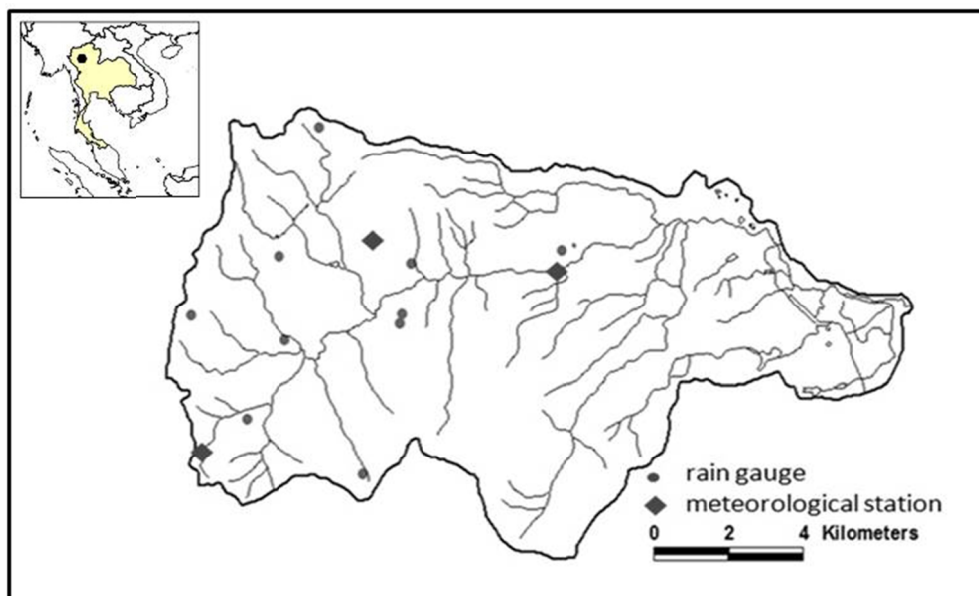


圖 1 MaeSa 集水區位置圖及研究區內的氣象站與雨量站位置圖

表 1 MaeSa 集水區內的測站編號與座標點位、地表覆蓋與儀器裝設情形

No	座標點位	地表覆蓋	儀器裝設
421	18°51'16.3"N, 98°47'18.1"E	農作用地	氣象站
423	18°53'11.7"N, 98°47'23.1"E	混合農作用地與休耕地	雨量站/土壤含水分站
425	18°50'56.8"N, 98°50'10.8"E	竹林	雨量站/土壤含水分站
426	18°53'05.3"N, 98° 50' 44.0"E	針葉林	土壤含水分站
427	18°53'13.8"N, 98°50'46.3"E	農作用地	雨量站
428	18°54'01.5"N, 98°48'54.1"E	混合林	雨量站/土壤含水分站
429	18°54'14.5"N, 98°50'20.3"E	混合林	氣象站
433	18°53'49.0"N, 98°53'04.3"E	果園	氣象站

4. 研究結果

4.1 加入地面雨量站資料

MODIS 影像即便已至少能提供 8 天一幅的組合影像，然而在雨季時，無法穿透雲層的限制，造成在乾季初始時，土壤含水率的推估會有低估的現象，因此本研究分析周圍的雨量站資料，清邁氣象站(Chiang Mai Weather Station)位於清邁市郊旁，屬於第一級的皇家氣象站，資料相當豐富並與美國 NOAA(National Oceanic and Atmospheric Administration)資料庫結合，是屬於最易取得的雨量站資訊。清邁氣象站的雨量觀測與 MaeSa 地區所設置的山區雨量站相互分析發現，當清邁氣象站的所量測的單日累積雨量值到達全年最高的 5%時，約為(40mm/24hour)，則 MaeSa 全區的雨量站都會量測到降雨，因此本研究建立一個假設，假設清邁雨量站的值達到全年最高雨量的前 5%時，MaeSa 集水區各地就會降雨，假設第一層的濕度就為飽和(即 $SMI_0=1$)，在雨季時增加表層濕度的資訊，可讓模式在估算土壤含水率的成果提升。圖 2 為測站 426 因增加雨季的資料後，在推估 100 公尺深的土壤含水，相關係數由 0.77 提升至 0.87。

4.2 評估 ATI-MODIS 推估土壤含水率之成果

本研究利用三種指標以評估 MODIS 推估土壤含水率的精度與準度，指標分別為：1.相關係數(Pearson correlation coefficient, R)，2.均方根誤差(Root mean square error, RMSE)及 3.納許-史托克利夫效率係數(Nash-Sutcliffe efficiency coefficient, E)。其中 E 主要是常應用在評估模式的預測能力，其定義如下：

$$E = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - Y_i)^2}{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2} \quad (9)$$

其中 X_i 代表第 i 點的觀測值； Y_i 代表第 i 點的推估值； $\bar{X}$ 及 $\bar{Y}$ 分別代表一段期間 n 個觀測值與 n 個推估值的平均量。E 值的範圍從 1.0 到 $-\infty$ ，

1.0 代表模式的推估值很完美，如果 E 值小於 0，即代表直接使用觀測值，模式的推估值不佳。

圖 3 為分析 2005-2008 四年之 10 公分、100 公分及 200 公分三種土壤深度的實測值與估算值之散布圖。不同深度的 R 與 E 值，都顯示出推估值與觀測值有良好的正相關，並可利用推估模式(本文簡稱為 ATI-MODIS)推估不同深度土壤含水率的未來變化。10 公分、100 公分及 200 公分的 R 值分別為 0.80, 0.84, 及 0.84。10 公分、100 公分及 200 公分的 E 值，分別為 0.57, 0.537 及 0.492。而 RMSE 在各深度分別為 0.055, 0.025 及 0.029。從散布圖裡發現，大部份的推估都接近 1:1，然測站 433 就有較大偏差，經實際調查發現，測站 433 的地表覆蓋主要為果園，地主於 2006 年後在果園旁邊加挖一大水池，造成各深度的土壤含水率觀測量高居不下，形成較大的推估誤差。整體而言，本研究地表覆蓋包含森林、果園、農作或休耕地等；土壤質地包含沙質壤土至黏土，經本研究評估後，ATI-MODIS 法能有效推估的這些情境下的土壤含水率，因此可推廣至其他區域應用。

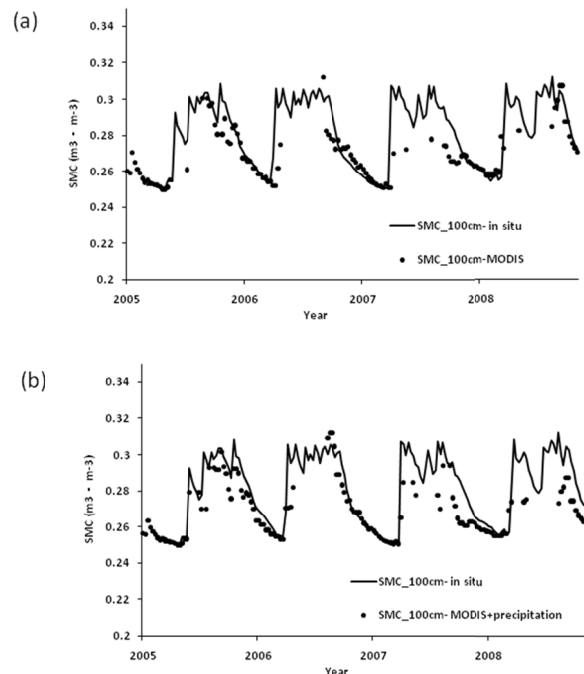


圖 2 2005-2008 年測站 426 的 100cm 深土壤含水率；連續黑線為測站的觀測值，黑點為影像估算出的土壤含水率。(a)為未加入雨量資料的成果；(b)為加入雨量資料的成果。

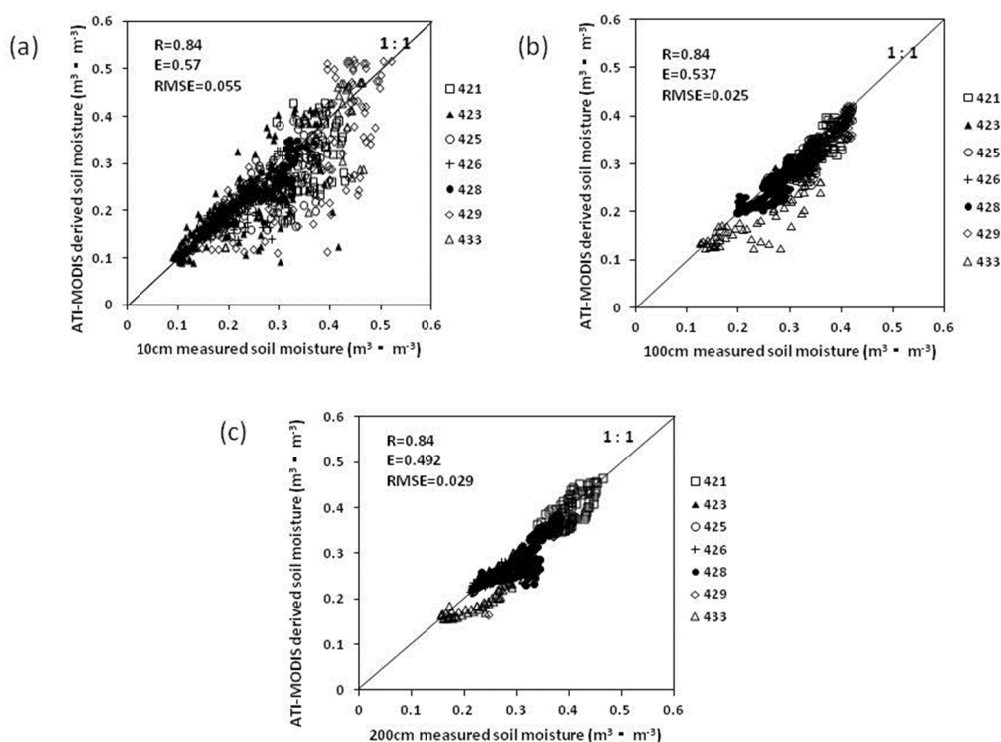


圖 3 (a)10 公分、(b)100 公分及(c)200 公分三種土壤深度的各測站觀測值與 ATI-MODIS 估算值之散布圖

4.3 應用 ATI-MODIS 推估長期之土壤含水率

Terra MODIS 的影像從 2001 年起就開始運行，遙測影像的優點，不但可提供一些歷史的資訊，此外如果地面測站損毀或不再蒐集資料時，可持續推估地面所要的資訊。因此本研究應用 2002 至 2009 年的影像推估 MaeSa 地區測站的 8 年連續性資料。圖 4 是以測站 425 與測站 421 為例進行展現與比對分析。由於這兩測站在地形位置相類似，都在邊坡坡頂的位置，然其地表覆蓋物不同，測站 421 周圍為農作用地，測站 425 周圍則為竹林覆蓋，因此可透過長時期土壤含水率的變化，以了解不同土地使用狀況下的土壤含水變化。

在地形的相似的情況下，從圖 4 可展現出(1)土壤含水率與雨量之間的關係，(2)不同深度土壤含水率的變化情形，(3)不同土地覆蓋的土壤含水率變化情形。雨季時，不論何種覆蓋下的淺層土壤含水率，都會急速增加；當日累積雨量的有較大的變化時，10 公分的土壤含水率變化則較 100 公分的大。在比較竹林與農作區的土壤含水變化上，由

於在非雨季時農作地仍有人為灌溉的情形，因此不論在 10 公分及 100 公分的土壤含水率都比竹林地較高；相對而言，灌溉活動對於淺層土壤含水影響較大，農作地與竹林的 100 公分土壤含水率差異甚小，變化也較為穩定

5. 結論

本研究主要結合 MODIS 影像及 ATI 法，推估 MaeSa 集水區中不同深度的土壤含水率。其中白天與夜間的地表溫度及可見光反照率，自 Terra MODIS 影像獲得，降雨資訊及當地的土壤中最大最小的含水率，則可經由鄰近的氣象站獲得。本研究提出的 ATI-MODIS 方法經過地面測站觀測值的比對驗證後，不論是相關係數、納許-史托克利夫效率係數值及均方根誤差等，都在 100 公分深度獲得最佳的成果。MODIS 影像與 NOAA 中的氣象資訊所涵蓋範圍幾近全球大部份陸地，希望透過本研究的推廣，提供較簡易的推估方式及免費資源，以利氣象、水文研究能有更豐富的資訊進行深入分析，及獲得更佳的管理規劃方案。

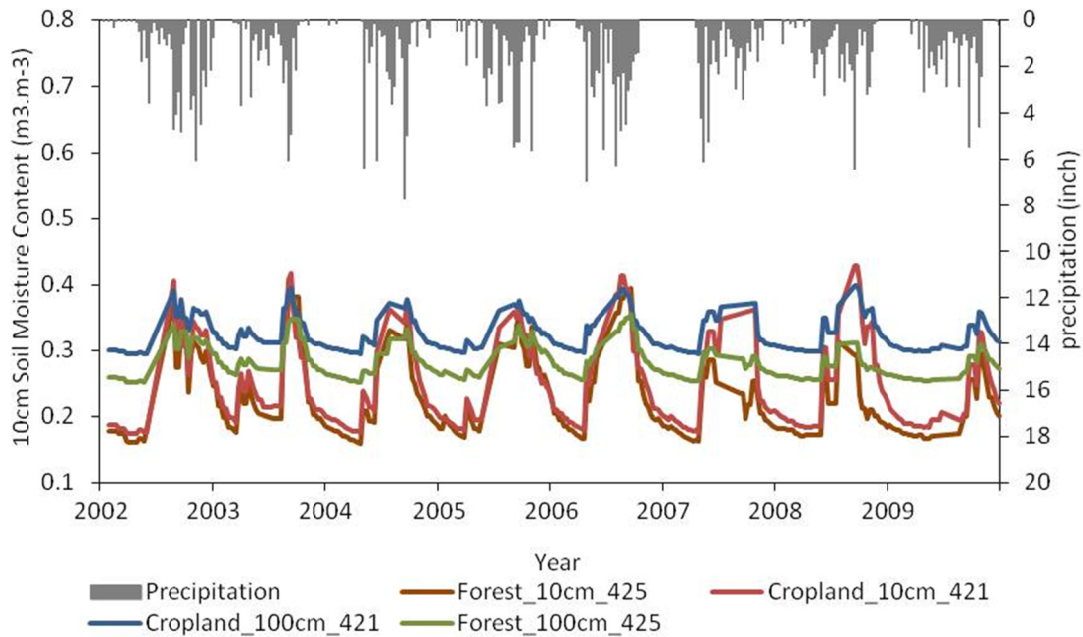


圖 4 ATI-MODIS 法推估 2002 至 2009 年測站 421 與測站 425 之 10 公分與 100 公分之土壤含水率

誌謝

感謝夏威夷大學 Dr. Thomas Giambelluca 與新加坡大學 Dr. Alan Ziegler 提供地面測站資料，新加坡大學 Dr. Yi-Chen Wang 及國立中央大學劉說安教授提供經費補助，使本研究得以順利完成

參考文獻

- Hong, S. Y. & E. Kalnay, "Role of sea surface temperature and soil-moisture feedback in the 1998 Oklahoma-Texas drought," *Nature*, vol. 408, pp. 842–844, 2000.
- Jackson, T. J., D. M. Le Vine, F. R. Schiebe, and T. J. Schmugge, "Large area mapping of soil moisture using passive microwave radiometry in the Washita'92 experiment," In: *Proc. IGARSS'93*, IEEE, Piscataway, NJ, 1993.
- Jackson, T. J., D. M. Le Vine, A. Y. Hsu, A. Oldak, P. J. Starks, C. T. Swift, J. D. Isham, and M. Haken, "Soil moisture mapping at regional scales using microwave radiometry: The Southern Great Plains Hydrology Experiment," *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, vol. 37, pp. 2136–2151, 1999.
- Jackson, T. J. & A. Y. Hsu, "Soil moisture and TRMM microwave imager relationships in the Southern Great Plains 1999 (SGP99) Experiment," *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, vol. 39, pp. 1632–1642, 2001.
- Jackson, T. J., R. Bindlish, M. Klein, A. J. Gasiewski, and E. G. Njoku, "Soil moisture retrieval and AMSR-E validation using an airborne microwave radiometer in SMEX02," In: *Proceedings of IGARSS '03*, vol.1, pp. 401–403, July 2003.
- Jackson, T. J., M. S. Moran, and P. E. O'Neill, "Introduction to Soil Moisture Experiments 2004 (SMEX04)," *Remote Sens. Environ.*, vol. 112 pp. 301–303, 2008.
- Kerr, Y. H., "The objectives and rationale of the soil moisture and ocean salinity (SMOS) mission," In: *Proc. IGARSS'01*, pp. 1004–1006, IEEE, Piscataway, NJ, 2001.
- Kim, E. J. "Field data report for the Third Radiobrightness Energy Balance Experiment (REBEX--3), September 1994 -- September 1995, wet acidic tundra on the Alaskan North Slope," *M Radiation Laboratory Technical Report RL-918*, July, 1996.
- Koike, T. "The Coordinated Enhanced Observing Period (CEOP): An initial step for integrated global water cycle observation," *WMO Bull.*, vol. 53, pp. 115–121, 2004.
- Liang, S. "Narrowband to broadband conversions of land surface albedo I Algorithms," *Remote Sens. Environ.*, vol. 76, pp. 213–238, 2000.
- Liou, Y.-A., J. Galantowicz, and A. W. England, "A land surface process/radiobrightness with coupled heat and moisture transport for prairie grassland," *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, vol. 37, no.4, pp. 1848–1859, 1999.
- Merlin, O., J. P. Walker, J. D. Kalma, E. J. Kim, J.

- Hacker, R. Panciera, R. Young, G. Summerell, J. Hornbuckle, M. Hafeez, and T. Jackson, "The NAFE'06 data set: Towards Soil Moisture Retrieval at Intermediate Resolution," *Advances in Water Resources*, vol. 31, pp. 1444-1455, 2008.
- Njoku, E., Jackson, E., Lakshmi, V., Chan, T., and Nghiem, S., "Soil moisture retrieval from AMSR-E," *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, vol. 41, pp. 215-229, 2003.
- Panciera, R., J. P. Walker, J. D. Kalma, E. J. Kim, J. M. Hacker, O. Merlin, M. Berger, and N. Skou, "The NAFE'05/CoSMOS data set: Toward SMOS soil moisture retrieval, downscaling, and assimilation," *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, vol. 46, no.3, pp. 736-745, 2008.
- Price, J. C. "Thermal inertia mapping: A new view of the Earth," *Journal of Geophysical Research*, vol. 82, no.18, pp. 2582-2590, 1977.
- Robinson, D. A., C. S. Campbell, J. W. Hopmans, B. K. Hornbuckle, S. B. Jones, R. Knight, F. Ogden, J. Selker, and O. Wendroth, "Soil moisture measurement for ecological and hydrological watershed-scale observatories: a review," *Vadose Zone Journal*, vol.7, pp. 358-389, 2008.
- Schmugge, T. J., "Applications of passive microwave observations of surface soil moisture," In: *Proc. IGRASS'96*, pp. 1051-1053, IEEE, Piscataway, NJ, 1996.
- Song, J., M. L. Wesely, R. L. Coulter, and E. A. Brandes, "Estimating watershed evapotranspiration with PASS. Part I: Inferring root-zone moisture conditions using satellite data," *Journal of Hydrometeorology*, vol.1, pp. 447-460, 2000.
- Starks, P. J. & T. J. Jackson, "Remote sensing and estimation of root zone water content," *Remote Sensing and Hydrology 2000 (Proceedings of a symposium held at Santa Fe, New Mexico, USA, April 2000)*. IAHS Publication, no. 267, pp. 409-411, 2001.
- Ulaby, F. T., Dubois, P. C., Van Zyl, J., "Radar mapping of surface soil moisture," *J. Hydrol.*, vol. 184, pp. 57-84, 1996.
- Van den Elsen, E., S. Eeman, J. Stolte, and C. Ritsema, "Measuring precipitation, infiltration and water discharge on a catchment scale for soil erosion modeling in the south pacific region," In: *ISCO 2004 - 13th International Soil Conservation Organisation Conference*, Brisbane, July 2004.
- Van der Schrier, G. and J. Barkmeijer, "North American 1818-1824 drought and 1825-1840 pluvial and their possible relation to the atmospheric circulation," *Journal of Geophysical Research*, vol. 112, D13102, 2007.
- Verstraeten, W. W., Veroustraete, F., Van der Sande, C. J., Grootaers, I., and Feyen, J., "Soil moisture retrieval using thermal inertia, determined with visible and thermal spaceborne data, validated for European forests," *Remote Sensing of Environment*, vol. 101, pp. 299-314, 2006.
- Wagner, W., G. Lemoine, and H. Rott, "A method for estimating soil moisture from ERS Scatterometer and soil data," *Remote Sens. Environ.*, vol. 70, pp. 191-207, 1999.

Soil Moisture Estimation by MODIS Imagery - The Case of the MaeSa Catchment in Thailand

Tzu-Yin Chang¹ Lee-Yaw Lin²

ABSTRACT

Tropical countries nowadays are at the economic developing stage. They are facing the rapid land use/ land cover change and increasing water demand for agriculture and industry. Therefore, hydrological issue becomes more and more important in these regions than ever before. In this study, we used thermal inertia approach with remote sensing technique to estimate the root zone soil moisture content, which plays a key role of hydrological cycle, in the tropical watershed of northern Thailand. The main purposes are focused on monitoring soil moisture content change which is part of an alert system for water supply and understanding the water distribution pattern corresponding to above land cover type and that is useful for land-use planning in the future. We analyzed different depths including 10cm, 100cm and 200cm root zone soil moisture contents (SMC) derived from the modified apparent thermal inertia approach (ATI) with Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) imagery from 2002 to 2009. The results showed that the Pearson correlation coefficient and Nash-Sutcliffe efficiency coefficient between ground truth and retrieved SMC under all different land cover sites for three depths were respective above 0.80, 0.84, 0.84 and 0.57, 0.537, 0.492. The retrieved precision referred to Root Mean Square Error (RMSE) value were 0.055, 0.025 and 0.029 ($\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$) for respective three depths. The 100cm depth root zone SMC showed the optimal estimation in response to the upper precipitation characteristics and various land cover types. The successful root zone SMC estimation by using optical remote sensing data will still have a strong contribution for the tropical or subtropical mountain studies in the future.

Keywords: MODIS, Remote Sensing, Soil Moisture content, thermal inertia

¹ Senior Assistant Research Fellow, National Science and Technology Center for Disaster Reduction

² Research Fellow, National Science and Technology Center for Disaster Reduction

*Corresponding Author, Phone: 886-2-81958668, E-mail : geoct@ncdr.nat.gov.tw

Received Date: Jun. 14, 2012

Revised Date: Nov. 09, 2012

Accepted Date: Nov. 12, 2012

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 jprssubmit@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.

Volume 17 No. 1
March 2013

Journal of Photogrammetry and Remote Sensing

(Special Issue on Remote Sensing for Water Resources)

CONTENTS

Introduction to the Special at Issue

Remote Sensing for Water Resources
(Pao-Shan Yu)

Regular Issue Papers

- Detecting Land Use Change by Remote Sensing and It's Impact on Runoff in the
Upstream of Yan-Shoei Creek
(Yu-Chi Wang, Chun-Chao Kuo, Pao-Shan Yu).....**1**
- Integrating Multiple Information for Precipitation Estimating in Mountainous Area
(Fi-John Chang, Meng-Jung Tsai, Yen-Ming Chiang, Ming-Chang Shieh)**17**
- Using The FORMOSAT-2 High Spatial And Temporal Resolution Multispectral
Image For Analysis And Interpretation Landslide Disasters in Taiwan
(En-Ju Lin, Cheng-Chien Liu, Chih-Hua Chang , I-Fan Cheng, Ming-Hsun Ko).....**31**
- Integration of MODIS and Formosat-2 Imagery for the Development of a Reliable
and High-Tempospatial-Resolution Total Suspended Matter Concentration Retrieval
Model: Case Study in Goaping River Mouth
(Kai-Jie Yang, Chih-Hua Chang, Cheng-Chien Liu, Yao-Sheng Chiu,
James T. Liu).....**53**
- Soil Moisture Estimation by MODIS Imagery - The Case of the MaeSa Catchment
in Thailand
(Tzu-Yin Chang, Lee-Yaw Lin).....**67**

第 十 七 卷 第 一 期
中 華 民 國 一 〇 二 年 三 月

航測及遙測學刊

(水資源遙感探測特刊)

目錄

特刊引言

水資源遙感探測
(游保杉)

學術論著

- 應用遙測偵測鹽水溪上游土地利用改變及其對逕流之影響
(王毓麒、郭俊超、游保杉).....1
- 整合遙測資訊於山區雨量推估
(張斐章、蔡孟蓉、江衍銘、謝明昌).....17
- 運用福衛二號高時空分辨率多光譜影像於台灣全島崩塌地判釋與災害分析
(林恩如、劉正千、張智華、鄭依凡、柯明勳).....31
- 結合 MODIS 與 Formosat-2 光學影像建立高屏河口及沿岸水體高時空分辨率
總懸浮物質濃度估算公式
(楊凱傑、張智華、劉正千、邱耀勝、劉祖乾).....53
- 應用 MODIS 影像反演土壤含水率-以泰國 MaeSa 集水區為例
(張子瑩、林李耀) 67