

應用遙測技術於水稻田判釋之研究

Interpretation of Rice Paddy Fields by Applying Remote Sensing Technology

李瑞陽^{*1} 姜如憶^{*2}
Re-Yang Lee Ru-I Chiang

Abstract

In the past years, remote sensing has been utilized to do the inventory of rice paddies by employ many technicians to manually interpret aerial photographs. This operation requires a large amount of photos and processing time. In this research, we propose an approach that integrates cultivating-field maps, multi-temporal SPOT images, and the spectral knowledge of rice growth to improve the efficiency of interpreting rice fields.

In the traditional supervised classification procedures, the selection of the training sites is done by human-computer interaction. In addition, the selected training sites cannot involve all the spectral variations of rice fields usually. The traditional method is time consuming and the classification accuracy is usually not very good. Therefore, it is necessary to develop a procedure to automatic select training sites to cover all the spectral variations of rice fields and further to improve the classification efficiency and accuracy.

The results showed that the supervised classification accuracies using the automatic selection of training sites (first cultivating period: overall accuracy 88% and kappa 0.75, second cultivating period: overall accuracy 92% and kappa 0.85) are better than using the traditional human-computer interaction procedures (first cultivating period: overall accuracy 83% and kappa 0.68, second cultivating period: overall accuracy 74% and kappa 0.68). The bias induced by human while selecting training sites can be reduced by adopting automatic procedures.

Keywords: remote sensing, training sites, cultivating-field maps, rice field interpretation

*1 逢甲大學土地管理學系助理教授。

*2 台灣師範大學福爾摩沙衛星二號影像加值處理分送中心研究助理。

中文摘要

由於傳統以人工判釋航照資料，萃取水稻田資訊的方式過於耗費人力及時間，所以許多學者嘗試以衛星影像為材料，利用遙測技術來進行自動化判釋水稻田之研究。執行自動化判釋水稻田面積時，大多是以遙測技術中的監督式分類方法來進行，但由於此法需以人工的方式來選取訓練樣區，多半無法完全達到客觀的要求，且因為人因經驗及專業知識不足、或因地面資訊較複雜、或是肉眼不易辨識而選出偏頗之訓練樣區，進而影響判釋結果。因此，本研究的目的是設計出一自動化流程來選取訓練樣區，利用遙測技術中的監督式分類方法進行分類，來提升判釋的準確度。

本研究是利用多時段SPOT衛星影像，來萃取雲林大埤鄉地區的水稻田耕作資訊。首先採用歷年農糧署所繪製水稻耕地坵塊圖，利用地理資訊系統中圖形套疊的技術，將在研究區內連續九年(民國83至民國91年)皆為水稻及非水稻的坵塊位置擷取出來。然後將此萃取出來的歷年水稻與非水稻坵塊位置圖套疊2003年SPOT衛星影像，擷取出水稻與非水稻像元，以非監督式分類方法得水稻與非水稻訓練樣區各20類。然後以此訓練樣區對一、二期水稻進行監督式分類，最後則以農糧署提供之2003年水稻耕地坵塊圖進行全面性的正確性檢核。

研究顯示經由自動化選取訓練樣區方法可獲致良好判釋精度(一期稻作中整體精度為88%，kappa指標為0.75，二期稻作整體精度為92%，kappa指標為0.85)，優於以人工選取樣區之傳統監督式分類方法(一期稻作中整體精度為83%，kappa指標為0.68，二期稻作整體精度為74%，kappa指標為0.63)。自動化選取訓練樣區方法，在有長時間且全面性的地真資料下，可改善人工選取訓練樣區之缺點，並提升判釋精度及效率，達到以遙測影像自動化判釋水稻田之目的。

關鍵字：遙測、訓練樣區、耕地坵塊圖、水稻田判釋

一、前言

農業土地利用資訊為農業管理的基本資料，不論直接使用供作物生育查報、產量推估，或間接估算農田用水量，都需要快速精確的農地利用資料。水稻為台灣地區重要作物之一，更是首要糧食作物，快速精準的統計稻作面積與估算產量為農政單位重要的業務，特別是進入國際貿易組織(WTO)後，將會逐年開放稻米進口，而乾旱年配合的水稻田休耕或是轉作措施亦會影響稻米產量，因此水稻田空間分佈調查一直被政府視為重要任務，不但可作為國家糧食政策、灌溉區渠道給水安排、田間管理之重要參考資料，並可作為災後對農民進行補助之依據。

目前國內的水稻田管理工作是由農委會農糧署依「糧食管理法施行細則第五條」，逐年分區施行航照稻作面積調查。其中稻作判釋與面積清點由農糧署依各地之稻作生長資料規劃出最適合判釋水稻田的拍攝時間，再委託林務局農林航空測量所進行航空攝影，並以人工作業方式將此航空照片，以區塊紋理搭配對應耕地坵塊圖判釋該區塊當期是否仍為水稻，並依判釋結果修改耕地地籍圖以作為農業政策擬定的根據。雖然人工航測辨識水稻可得較佳的判釋精度，但須經過照片攝取、判釋及修改耕地種植屬性等步驟，時間與人工成本較高。而國內大部分地區一年有兩期稻作，拍攝面積為180萬公頃，每個稻作期約需6500張航空照片(陳益鳳 1998)，龐大的工作量不僅費時費力且需要巨額的經費，而且拍攝航空像片的時間往往因氣候等自然因素，使得在實際拍攝時間與預先規劃會有所差異，增加人

工判釋的困難，因此有必要採用更有效率的調查方法來快速且準確的將水稻田判釋出來。而衛星影像以其具有資料獲取週期短、影像資料涵蓋範圍廣以及成本低等特性，非常適合用來作農業的應用及水稻田判釋。劉治中(2000)利用農委會農糧署提供之人工查報及航照判釋資訊與SPOT衛星影像分類進行評估，評估項目包括時效性、單位面積成本、判釋精度、及自動化比重等。結果指出衛星影像可隨著多時段影像的取得，漸次分析並更新資料，而單位成本與自動化比重亦佔優勢，但是判釋精度略遜於航空判釋結果，不過整體而言利用衛星影像判釋水稻田可節省大量的人力、時間及成本。

從60年代發射的第一顆氣象衛星TIROS起到80年代發射的各式衛星，主要如前蘇聯的METEOR、法國的SPOT、美國的LANDSAT系列，以及IKONOS和QuickBird衛星等，遙感探測技術現今已被各政府部門、學術機構以及民間團體應用在不同的研究與產業上，如利用影像的空間與光譜特性探討土地覆蓋或土地利用之分類(高玉惠2003；徐家盛 2002；郭秀玲 2002；Anderson et al. 1993；Bolstad & Lillesand 1992；Maas 1998)，或者利用衛星影像分析大型災害對環境之影響(簡世宏 2003；羅佳明 2002；Grilli & Gorla 1997；Lobitz et al. 2000)。在農業上的應用領域相當多樣化，包括土壤調查、耕地估計、作物生長狀態評估、病蟲害偵測、天然災害區域的定位與測量，以提供即時性的生產管理資料，作為農場經營管理決策之依據，並用來輔助數化和修正舊有的地籍圖等(陳惠燕 1999；Barrett & Curtis 1982；Blackmer et al. 1996；Casanova et al. 1998)。

衛星遙測影像在國內農業上的應用相當多，80年代黃則林(1982)開啓水稻光譜研究，接著劉建慧(1988)則建立水稻動態光譜，期能以之作為水稻分類的依據，後來陳哲俊(1989)研究以SPOT多光譜資料應用於台灣水稻種植面積估測之可行性，此類研究皆利用遙測衛星影像可以涵蓋大面積的地表資訊，獲得大範圍農作物種植面積的特性。但僅憑單一時期衛星影像則難以滿足高準確度的分類需求，於陳哲俊等(1989)的研究中發現若能利用多時期(multi-temporal)資料，及將一些不因時間而改變的土地利用類別(如道路、建築物等)事先去除，則可獲得較高的精度。藉由多時期影像的判釋分類，可彌補單一時期影像分類精度限制的缺點。蕭國鑫(2003)則以機率(probability)方式表現的軟件(soft)式分類方法來試圖求出導致水稻田分類誤差之原因，除了將影像分類成果轉換為硬式(hard)的明確二分類別外，亦利用坵塊被判釋為水稻的機率，針對判釋模糊地區(如判釋機率在0.4-0.6之間)進行查核，以減少大量的室內判釋作業，並提高影像分類辨識水稻的可行性。其判釋成果與當年度的航照判釋水稻田資料比對，全體精度介於87~98%，kappa指標在0.71~0.87之間。顯示以機率表現方式可找出判釋模糊地區，減少室內判釋作業之工作量。

傳統的影像分類方法，不管是監督式或非監督式都需要人工輔助判釋才能完成分類的程序。就監督式的方法而言，在分類之前要有與影像相對應的土地利用圖或對判釋區的土地利用現況有所了解，以便從中選取類別的訓練樣區製成類別的光譜統計資料，作為分類的依據。但是土地利用圖不易完整取得，且因影像拍攝時間與土地利用圖製作完成之時間不同，兩種資料的土地覆蓋物會有些許的差異，所得到的類別光譜統計值會有一些誤差。況且判釋者對判釋區的土地利用現況往往缺乏了解，所選的樣區無法代表該類別所有的光譜特性，例如水稻可能有不同的品種或土壤的溼度不同而有不同的光譜反射值，使得訓練樣區位置的選定更加困難，分類成果不會一次即達到理想，因此判釋者須不斷的修正類別的光譜訓練樣區資料。而非監督式分類亦存在類似的問題，電腦依判釋者輸入的參數，自動化地根據各個影像像元的灰值來分成數類群集(clusters)，但群集只是光譜的類別而已並不知其相對應的地物類別為何，所以還是需要由判釋者根據土地利用圖、分析已知地物類別光譜特性及對該

地區的了解，來給予未知群集所相對應的地物類別。由此可知，無論是監督式或非監督式分類方法，判釋者的經驗與知識都會顯著影響判釋的結果，這也是導致遙測技術無法廣泛被實務界使用的重要原因之一，因為自動化的度不夠且成果不易預期。所以如何減低人為的參與，提昇影像判釋的自動化程度，一直以來都為遙測研究的重要課題。

再者，臺灣地區土地利用的複雜度極高，且農業有小面積耕作的特性，對於應用衛星影像於土地資源的調查分析研究上，若僅靠傳統的衛星影像分類方式(監督式及非監督式分類)進行影像的處理、分析及判釋，除了前段文章所敘述的困難外，可能因地物光譜反射資訊的混淆(如水稻的反射值可能有不同的品種或土壤的溼度不同而有不同)，影像判釋的精確度不易提高，且對於特定用途的土地資源利用型態之分析，亦需耗費較多的時間進行影像的處理和影像分類訓練樣區的選取工作。為解決這樣的問題，已有相關學者利用SPOT衛星影像配合耕地坵塊圖等地理資訊系統(Geographical Information Systems, GIS)資料進行水稻田的萃取，研究結果顯示水稻田判釋正確率獲得提昇(周昶成 1997；鄧敏松 1997；陳益風 1998；吳啓南等 1999；劉治中等 2000)。因此利用多時段遙測影像並結合歷史水稻空間分布等GIS資訊來判釋水稻坵塊，為目前遙測衛星影像判釋的趨勢且為相對有效率的方法。

綜而言之，為避免監督式分類由人工選取訓練樣區，或非監督式分類需由人工根據參考資料給予群集類別所產生的誤差，有必要設計出一客觀選取類別訓練樣區的方法，再藉由整合GIS輔助資訊於判釋流程中，來提昇水稻田判釋的精度與效率。

二、研究目的與研究區域

(一) 研究目的

臺灣過去不少學者致力於水稻田判釋之研究(黃則林 1979；陳哲俊 1989；周昶成 1997；鄧敏松 1997；陳益風 1998；吳啓南 1999；黃信茗 2000；陳彥宏 2003)，但皆因採用監督式或非監督式分類，導致因人為因素而無法達到客觀地判釋結果，使得正確率無法顯著的提昇，且不同的人因經驗的不同會有不同的判釋結果。因此本研究的重點在如何改良監督式或非監督式分類因人為因素所產生的限制，以自動化的方式客觀選取訓練樣區，減少人為的參與，以求減低人為誤差提升精度，而達到提昇自動化程度的目的。而因監督式分類在訓練樣區選定後，人為的參與就會顯著的減少，因此本研究的分類方法將以監督式分類為主，配合GIS輔助資訊，來提昇水稻田判釋的精度與效率。本研究之研究目如下：

- 一、規劃客觀且自動化訓練樣區的選取流程
- 二、建置空間資訊判釋流程，加入GIS輔助資訊，完成自動化判釋目標。
- 三、減少判釋時人力的投入與時間的浪費，提昇水稻田判釋分類精度及效率。

(二) 研究區域

本研究選定雲林縣大埤鄉為研究範圍(圖1)，因為雲林縣位於台灣之中南部地區，處於嘉南平原之北端，東西寬約50公里，南北長約38公里，面積約1290.84平方公里，約佔台灣總面積3.59%，東鄰南投縣，西臨台灣海峽，南以港溪為界毗鄰嘉義縣，北隔濁水溪與彰化縣銜接，其境內大多為平

坦之平原地形，佔全縣面積87%以上，而在斗六圳以迄海拔30公尺間15公里之內高度降低70公尺，平均坡度為千分之4.6，利用扇面原始坡度極易引水灌溉，適合各種農業生產。而本縣年平均降雨量約在1,400公厘左右，降雨期以五至九月較豐沛，平原地區月平均日照時數為168小時，相對濕度約在80%左右，因此有利於作物生長。在“以農立國”的時代裡，“雲林”有米倉之稱，也是全省最富庶的地區之一，各鄉鎮擁有自己的特產。現今雲林嘉南地區是台灣最重要的農業生產區，其境內多以農業為主，其中農作物佔了68%，因此自民國九十一年加入WTO後，遭受之衝擊最大，影響的農民最多。

而大埤鄉位於雲林縣西南隅，東臨台一線省道縱貫公路，北接大湖溪口，西與北港溪為界，南臨石龜溪與三壘溪。國道中山高速公路貫穿期間。大埤鄉面積44.7387平方公里，共有十五村、三十二個部落，人口約二萬三千人(至九十年)。居民多數已務農為業，是嘉南平原北端的典型「農業鄉」。因此選定此區為研究範圍。

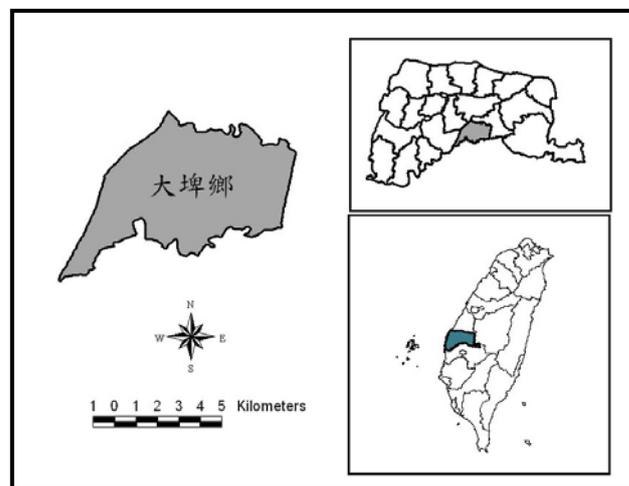


圖 1 研究範圍圖-雲林縣大埤鄉

三、研究方法

(一) 資料的取得

隨著地表地物的不同及生長季節差異，遙測感測器所接收的光譜反射率就會有所不同。對應水稻生長可知水稻田地表覆蓋會隨著生長期而改變，遙測影像的光譜資訊也會不同。水稻種植從插秧前的2~3週起，水稻田即需開始供水以整地育苗，自整地育苗到收割前這段期間，田地需不斷地供水灌溉，約到收割前10天才會停止灌溉。而這段期間內，水稻田大部分時間是一直保持含水狀態，地表所呈現的是覆蓋著水體或是富含豐富水分的土壤；水稻田插秧時，所呈現的則是變為植物與水體的組合；在最高分蘗期到收割前，水稻田的表面會因為水稻的成長使大部分的地表被植被所覆蓋；最後到

收割後，水稻田因少了植被的覆蓋而為裸露地。因此水稻田的土地覆蓋型式，可分別為水體+土壤、水體+植被、植被及乾燥裸露土壤四種，我們無法確切得知在水稻持續生長時，水體+植被此種混合地表覆蓋的光譜反射特性，但由Lillesand & Kiefer(1994)的研究中得知水體、植被及土壤三種地物的光譜反射特性如圖2。圖中顯示了健康的綠色植物、乾燥的土壤及透明的湖水這三種地物在不同波長下光譜反射情形，綠色植物在近紅外光段有較強的反射率，而清澈水體在此範圍內的反射率幾乎為零。因此瞭解水稻各生長期的光譜反射特性，將可提高水稻的判釋正確性。

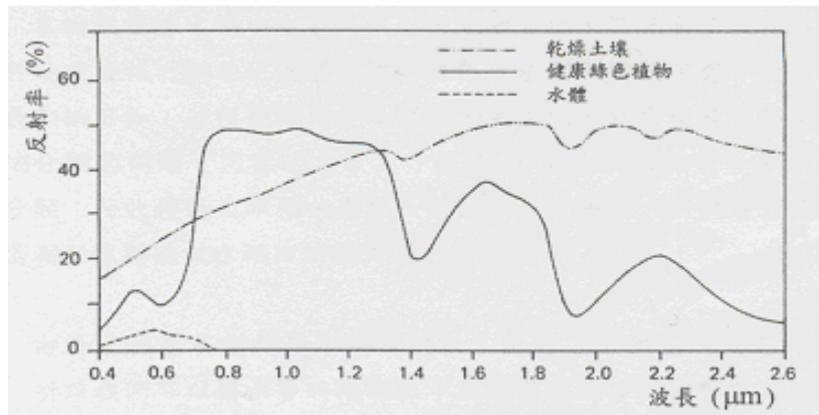


圖2 不同地物之標準光譜反射率曲線(Lillesand & Kiefer 1994)

水稻自插秧到成熟收割會隨著品種與種植環境的不同而影響水稻生長時間的長短。在台灣地區，水稻種植可區分為一期稻作與二期稻作兩種，其中一期稻作是於春季插秧(台灣南部較早)、夏季收穫，而二期稻作則是於一期稻作收割後約半月~20天開始差秧、秋末冬初的時候收穫。而一期稻作與二期稻作從插秧到成熟收割所需時間有些不同，一期稻作在插秧期的溫度較低，發芽分蘗與生長較緩，生長時間約為110~140天，而二期稻作因陽光日照充足，插秧至收割僅需為100~110天左右(農糧處，1999)。依照水稻生育期別，從插秧到成熟收割前，大致皆可概分為—(1)秧苗期、(2)營養生長期、(3)生殖生長期、(4)成熟期等4個大略時期。

就實際狀況而言，因本島全年的雲覆蓋量高，要取得4個生育期中皆無雲的影像並不容易，故本研究採用插秧期(水體+土壤)及生殖生長期(植被)之SPOT影像資料來判釋水稻田。因為僅憑單一時期衛星影像則難以滿足高準確度的分類需求，若能利用多時期(multi-temporal)資料，則可獲得較高的精度(陳哲俊等 1989)。藉由多時期影像的判釋分類，可彌補單一時期影像分類精度限制的缺點。水稻在插秧期時，水稻田的各波段反射值較低，而生殖生長期時因綠色植物在近紅外光段的反射值較強，可將水稻與非植生區分開。但因水稻與草地的反射值類似，僅憑此時期影像無法將兩者區分出來，若同時採用兩時段則可將裸露地、水稻與草地分別判釋出來。根據上述原則，本研究採用的四幅SPOT衛星影像分別為2003年2月27日(插秧期)與4月28日(生殖生長期)一期稻作；2003年7月25日(插秧期)與8月24日(生殖生長期)二期稻作(圖3以一期稻影像為例)。

而GIS相關資訊則是以農委會農糧署利用人工作業方式將航空照片，應用區塊紋理搭配對應耕地坵塊圖所判釋出的耕地地籍圖(坵塊圖)為主。研究區內的歷史耕地坵塊圖，由1994年至2002年一、

二期稻作共計36幅(圖4)，用於自動化選取訓練樣區分類法時作為水稻與非水稻坵塊的分類資訊。而2003年耕地坵塊圖則作為地真資料(ground truth)，於正確率檢核時作為誤差檢核之用。

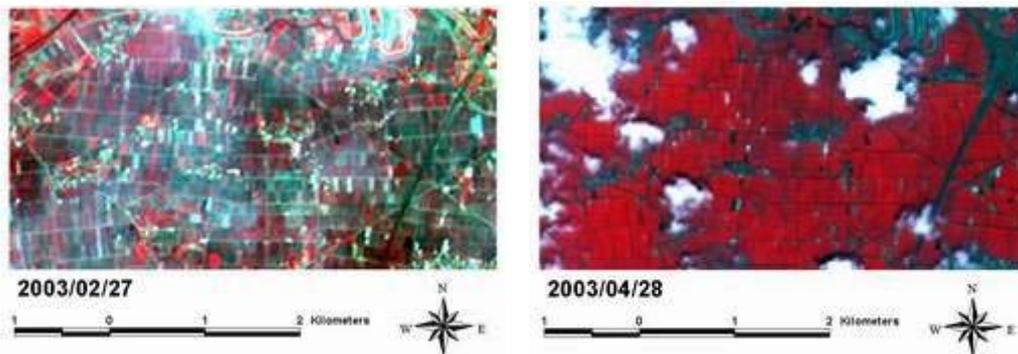


圖 3 2003 年一期稻作 SPOT 衛星影像圖

(二) 應用 GIS 輔助資訊

本研究所採用的農糧署水稻田耕地坵塊圖為向量式資料(圖4)，為了能與網格式SPOT衛星影像資料套合使用，必須先將向量式資料轉為網格式資料，轉換後網格式大小需與衛星影像地面解析度(像元大小)相配合，亦需考慮稻作坵塊面積及實際地物的分佈。較小的網格式可以避免資料被過度簡化，得到較精確的資料，但較浪費儲存的空間；反之，較大的網格式雖較節省儲存空間，但資料可能會有所遺漏(鄧敏松 1997)。

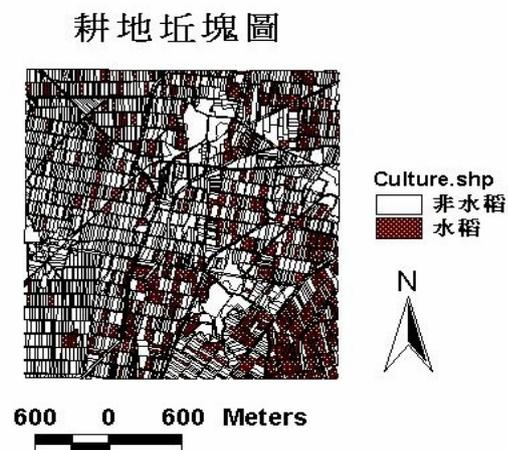


圖 4 耕地坵塊圖

SPOT衛星影像經幾何校正後再取樣為每個像元大小為 $12.5 \times 12.5 \text{ m}^2$ ，本研究進行時將農糧署

提供之耕地坵塊圖網格化為同樣大小的對應資料，依吳啓南等(1999)之研究統計，網格化後約有7.03%的面積不在對應的坵塊範圍內，且面積較小的坵塊會因網格化而消失。若將坵塊網格化面積縮小，除了不對應面積可以減少外，網格化後對應的坵塊消失數亦縮減(劉治中 2000)。因此本研究參考吳啓南(1999)之研究將原SPOT影像的 $12.5 \times 12.5 \text{ m}^2$ 網格轉成 $2.5 \times 2.5 \text{ m}^2$ 網格，而坵塊田亦網格化成同大小。

由於受到水稻的光譜反射值易與其他植生反射值特性相近而產生混淆的影響，分類時無法僅利用影像本身的光譜值將水稻與其他地物類型做區隔。同時若對全影像進行分類，則會將多餘的資訊(如住宅區、水體、道路、公園綠地等)包含進來，增加處理的成本與造成分類時的混淆。為解決以上的問題，則必須利用相關的輔助資訊，儘可能的將分析的區域集中在水稻的可能分佈範圍內，排除其他不相關的地區，直接限定判釋區域為農耕用地，可免除非農耕用地在判釋時所造成的影響。

本研究利用連續九年(1994年至2002年)的水稻耕地坵塊圖的聯集，來取得水稻田的潛在分佈地區。由於近年來由其他土地利用類別轉為水稻田的機率(面積)相當小，因此可大膽假設在坵塊圖外並無水稻田的存在或是面積過小可予以忽略。因此本研究利用這九年水稻坵塊圖的聯集地區，將在聯集地區內的衛星影像像元擷取出來，作為判釋目標區，進行進一步的水稻田判釋工作。如此一來，判釋的範圍將減少，且正確率可大幅提昇，圖5與圖6分別為利用歷年耕地坵塊圖與去雲處理後之2003年一期稻作與二期稻作判釋目標區的SPOT衛星影像。

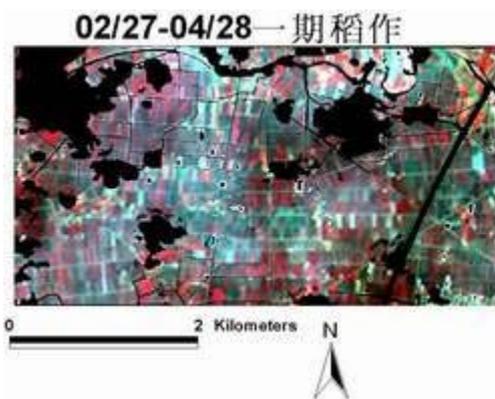


圖 5 一期稻判釋目標區

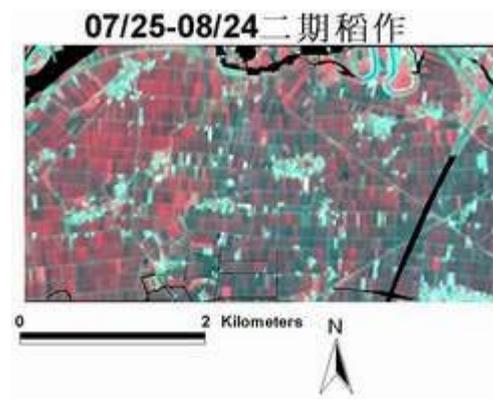


圖 6 二期稻判釋目標區

(三) 自動化擷取訓練樣區

為提升水稻田自動化判釋程度及減低人為因素所造成的誤差，需將進行監督式分類時所需的訓練樣區以客觀且自動化的方式擷取出來。訓練樣區之選取需格外謹慎，因為樣區選取的大小、多寡並無一定之準則，需視地表地物之實際覆蓋情形而定，且必須考慮到各類別樣區的多樣性與代表性及其空間分佈，盡量求其樣區之同質化(homogeneous)，以確保其具有代表性(楊龍士、周天穎 2000)。

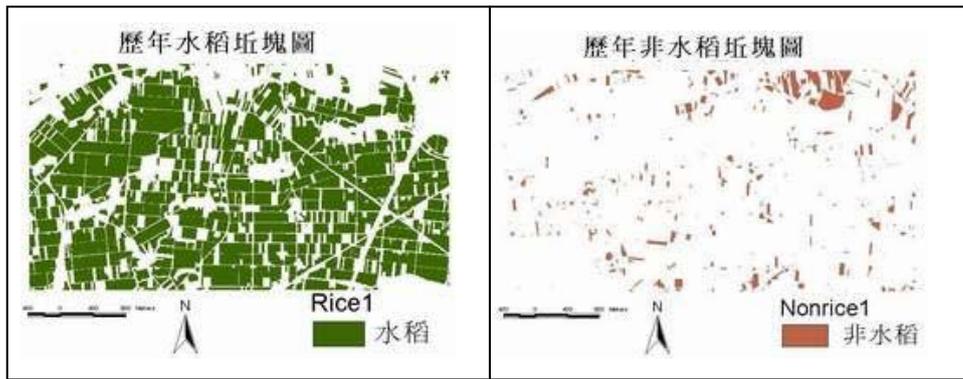


圖 7 歷年一期稻作皆為水稻與皆為非水稻坵塊圖

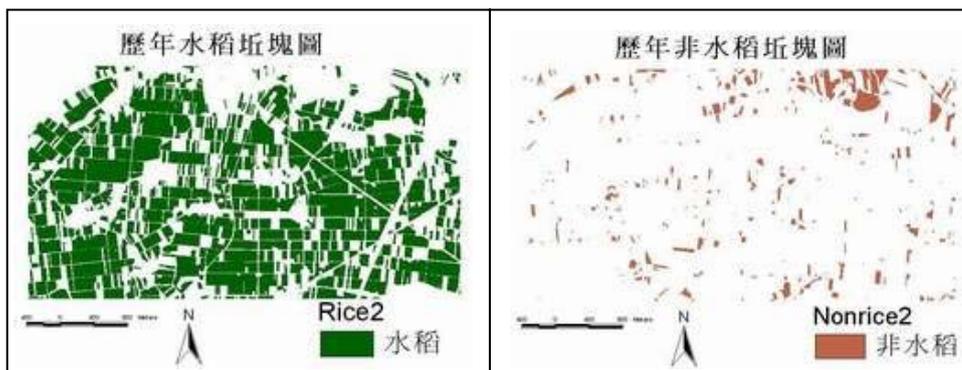


圖 8 歷年二期稻作皆為水稻與皆為非水稻坵塊圖

為符合上述訓練樣區的選取原則，本研究設計出一自動化流程來選取訓練樣區。流程如下：首先採用歷年農糧署所繪製水稻耕地坵塊圖，利用地理資訊系統中圖形套疊的技術，將在研究區內連續九年(民國83至民國91年)皆為水稻及非水稻的坵塊位置擷取出來(圖7和圖8)。本研究假設歷年從事水稻種植的坵塊，2003年應該還是栽種水稻作物的機率大於改種其他作物的機率；而歷年皆沒有耕種水稻的坵塊，可能早已改種其他經濟作物或是改為其他用途，由此可推測2003年還是不為水稻耕種。

然後將此萃取出來的歷年水稻與非水稻坵塊位置圖(圖7、圖8)套疊2003年SPOT衛星影像，擷取出水稻與非水稻像元，為了進一步確認在歷年水稻或非水稻位置圖內的區域在2003年仍無改變，本研究利用Normalized Difference Vegetation Index(NDVI)差值可相對容易區分水稻與非水稻的特性(劉治中等 1999)，來確認是否仍為水稻或非水稻。

NDVI指數，為植物生長狀態及植被空間分佈密度的最佳指標因子，植物在NDVI 影像上會更被凸顯出來，其為近紅外光波段與紅光波段二者差與和的比值，其公式為

$$NDVI = \frac{(\text{近紅外光波段} - \text{紅光波段})}{(\text{近紅外光波段} + \text{紅光波段})}$$

劉治中等(1999)對彰化地區光譜反射值加以分析與比較後，確定不同時期的水稻、非水稻與非

農業用地的NDVI指數分佈有明顯變化，利用NDVI差值可相對容易區分出水稻與非水稻，因此找出對應於攝像當時的水稻生長階段對照水稻NDVI光譜反射曲線找出兩者的差值。然後訂定NDVI差值落入某個門檻值範圍內者，就判定為水稻田，將不具有水稻光譜特徵的水稻像元刪除。所以本研究亦利用植被NDVI指數隨生長期變化的特性，計算兩個時期(一期稻2月和4月兩時期，二期稻7月和8月兩時期)NDVI差值後，訂定NDVI門檻值來辨識2003年兩期水稻的坵塊現況。

然後針對經NDVI檢核後的水稻與非水稻坵塊像元分別進行非監督式分類，產生水稻類別20類及非水稻類別20類，共計40個類別，以此作為監督式分類之訓練樣區統計值。本研究使用最常用的影像分群法ISODATA Clustering進行非監督式分類。ISODATA為Iterative Self-Organizing Data Analysis Technique，利用特徵(光譜)空間中的距離表示像元數據和分類類別特徵的相似程度，當距離最小時表示像元與分類類別相似度最大。他是以迭代的方式將每個候選像元指定給某一群集。

此種結合歷史資料(耕地坵塊圖)自動化擷取訓練樣區的程序，可避免人為主觀因素影響樣區的選擇；將研究地區歷年水稻坵塊位置擷取出來進行非監督自動化分類更可充分達到樣區多樣性之目的。

(四) 影像分類

本研究採用監督式分類方法來對2003年水稻一、二期影像進行判釋，監督式分類主要是以已知地面位置之真實資料所紀錄的光譜特性為判釋依據，進行影像其他未之未知空間資訊的光譜形式辨別，然後選定訓練樣區，再從訓練樣區中導出相關統計值做為分類依據。其中經過訓練資料取樣、分類、輸出三個處理階段(圖9)。研究進行時，首先將2003年2月28日與4月28日的兩張影像疊合成一張七個波段之影像(1-4波段為二月之影像，5~7波段為四月之影像)及同理亦將7月25日與8月24日(1-4波段為七月之影像，5~7波段為八月之影像)兩影像疊成一張影像，然後以自動化選取樣區方式所得的樣區進行監督式分類，分類器(classifier)是採用高斯最大概似分類法(Gaussian Maximum Likelihood Classification)。為了比較本研究所採用的自動化樣區選取與傳統以人工方式選取訓練樣區在分類上的差異，本研究也同時根據水稻生長情形推測其於影像上之光譜反應，進行人工圈選樣區之監督式分類。

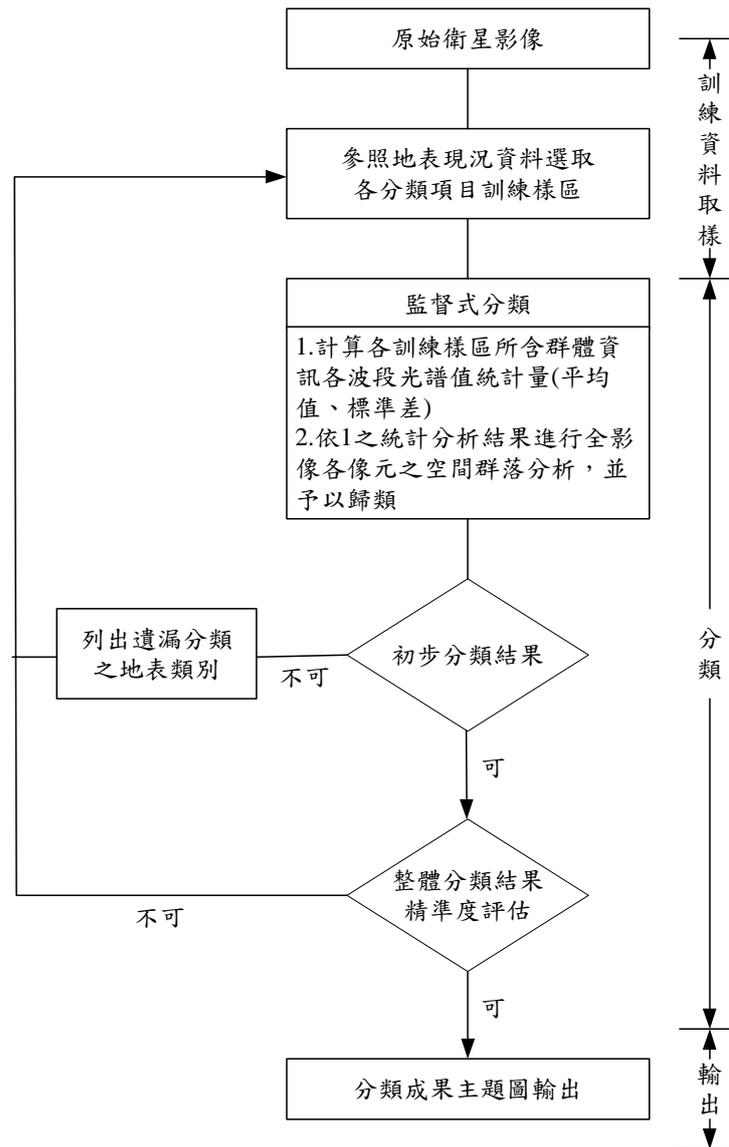


圖 9 監督式分類流程圖

(五) 正確率檢核

遙測影像分類中最常被用以評估分類成果的表達方式為誤差矩陣(error matrix)(表一)，可藉由誤差矩陣清楚看出分類後各類別誤授(commission error)及漏授(omission error)的情形，並可根據誤差矩陣之數據計算精度指標以供評估整體分類成果。誤差矩陣分析使用的指標有使用者精度(User' s Accuracy)、生產者精度(Producer' s Accuracy)、整體精度(Overall Accuracy)及Kappa指標，各指標分述如下：

1. 使用者精度(User's Accuracy)

使用者精度是指分類後的各土地覆蓋類別，對應到地面真實參考資料時，真正為該種類別的像元數之百分比；亦即依據每一種分類，將對角線的數值，除以行所有數值相加之和，所產生的百分位數。對應使用者精度者為誤授(commission)，即表示分類後之類別被分類錯誤的百分比，其式表示為：

$$\text{誤授(CE)} = 1 - \text{UA}$$

表 1 誤差矩陣表

真實地 表覆蓋 分類地 表覆蓋	類別A	類別B	類別C	類別D	總計	使用者精度
類別A	X_{11}	X_{12}	...	X_{1n}	$\sum_{i=1}^n X_{1i}$	$\frac{X_{11}}{\sum_{i=1}^n X_{1i}} \times 100\%$
類別B	X_{21}	X_{22}	...	X_{2n}	$\sum_{i=1}^n X_{2i}$	$\frac{X_{22}}{\sum_{i=1}^n X_{2i}} \times 100\%$
類別C	N	N	...	N	N	N
類別D	X_{n1}	X_{n2}	...	X_{nn}	$\sum_{i=1}^n X_{ni}$	$\frac{X_{nn}}{\sum_{i=1}^n X_{ni}} \times 100\%$
總計	$\sum_{i=1}^n X_{i1}$	$\sum_{i=1}^n X_{i2}$...	$\sum_{i=1}^n X_{in}$	$\sum_{i=1}^n \sum_{i=1}^n X_{ii}$	—
生產者精度	$\frac{X_{11}}{\sum_{i=1}^n X_{i1}} \times 100\%$	$\frac{X_{22}}{\sum_{i=1}^n X_{i2}} \times 100\%$...	$\frac{X_{nn}}{\sum_{i=1}^n X_{in}} \times 100\%$	—	—

X_{11} 代表該類別的像元數

(簡甫任 2001)

2. 生產者精度(Producer's Accuracy)

生產者精度是指屬於某一真實地面參考資料的土地覆蓋類別之檢核點，有部分的檢核點被錯誤分類，而被正確分類的像元數之百分比；亦即將誤差矩陣中對同一種分類，對角線的數值除以列中所有數值相加之和，所產生的百分比。與生產者相同意義者為漏授(omission)，漏授表示已知類別被遺漏而歸納到其他類別，和生產者精度之關係為

$$\text{漏授(OE)} = 1 - \text{PA}$$

3. 全體精度(Overall Accuracy)

整體精度代表分類後正確的土地覆蓋類別之檢核點數除以總抽取的檢核點數，所產生的百分比；亦即在誤差矩陣中對角線的所有數值加總除以全部樣本的總和，所產生的百分位數。由於已考慮到每個類別相對的全重關係，所以全體精度表示整體的分類結果較具客觀性

$$\text{整體精確度} = \frac{\sum_{i=1}^n X_{ii}}{\sum_{i=1}^n \sum_{i=1}^n X_{ii}} \times 100\%$$

4. kappa 指標(\hat{k})

Kappa指標為表示分類成果與檢核資料相似程度的指數， \hat{k} 值愈大代表分類精度愈高，同時考慮漏判與誤判因素，表示分類成果比隨機分類優良多少的指標。其表示式為

$$K = \frac{OA - AU}{1 - AU} = \left[\frac{N \sum_{i=1}^M N_{ii} - \sum_{i=1}^M (N_{i+} N_{+i})}{N^2 - \sum_{i=1}^M (N_{i+} N_{+i})} \right] \times 100\%$$

$$OA = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^M N_{ii} \quad N \text{代表地真資料總像元數}$$

$$AU = \frac{1}{N^2} \sum_{i=1}^M N_{i+} \cdot N_{+i} \quad N_{jj} \text{代表該類別像元數}$$

$$M \text{代表總類別數}$$

本研究於影像判釋完成後，根據農糧署提供 2003 年的兩期航測人工判釋耕地坵塊資料來檢核影像之分類成果，藉此探討此自動化選取訓練樣區之方法是否可提高水稻判釋精度並達到自動化分類之目的。

四、實證分析

本研究針對雲林地區大埤鄉2003年一期及二期稻作，利用傳統人工選取訓練樣區與自動化選取樣區進行衛星影像監督式分類來判釋水稻田。影像分類準確度分析不採用隨機抽樣檢核點的方式進行計算，而是利用農糧署的2003年數化資料進行全區的比對，並以誤差矩陣表表示。誤差矩陣除了有分類的類別外，並有生產者精度、使用者精度、全體精度、Kappa等分析指標，分類結果探討如下：

(一) 一、二期稻作分類成果

圖10為2003年一期稻傳統(左圖)與自動化樣區(右圖)監督式分類成果圖，其誤差矩陣表如表2和3所示，就整體而言自動化選取樣區的精度(整體精度為84.54%，Kappa指標為0.70)略大於傳統傳統人工方式(整體精度為82.87%，Kappa指標為0.68)。由於研究區內的非水稻面積約為水稻面積的三分之一，所以被判釋錯誤的像元總數水稻略大於非水稻，但非水稻的使用者精度(傳統與自動化分別為62% 與65%)與生產者精度(70% 與75%)遠小於水稻的使用者精度(90% 與92%)與生產者精度(87% 與88%)。而二期稻中，傳統的分類方式精度(整體精度為73.68%，Kappa指標為0.63)小於一期稻，但是自動化樣區的分類方式精度(整體精度為86.38%，Kappa指標為0.75)則優於一期稻，原因與耕作的作物有關。根據現地調查與訪問大埤鄉的農民得知，一期稻因為稻作產量高，所以大部分的農地主

要是種水稻，而二期稻則以其他經濟作物如花生、蒜頭及其他蔬果類為主。因為二期稻作耕地的種植作物種類較為複雜發生同質異譜的現象或是用肉眼不易辨識的地區，以人工方式選取水稻訓練樣區，因經驗或是專業不足發生誤差的機率相對的增高，容易造成漏判的現象。然而以自動化選取訓練樣區的方式，由於利用非監督式分類可將作物的多樣性以統計的方式全部涵蓋在內，減低人為的誤差，所以分類的精度自然提高。在二期稻時期因作物種類較為單純，以傳統人工方式與自動化選取訓練樣區兩種方法所產生的分類結果精度相差不大，所以自動化選取訓練樣區方式非常適宜應用在作物種類複雜的地區。

經由以上的分析可知，自動選取訓練樣區分類法於一期或是二期稻作中皆可以將地面資訊不完整或是較複雜的地區正確判釋出來，因其參考歷年耕地坵塊圖選取出歷年皆種植水稻的坵塊，並以NDVI指標進行初步過濾，將最適之坵塊留下作為訓練樣區。因此自動選取訓練樣區所產生的樣區可包含較完整的水稻光譜類型，達到樣區多樣性之目的，並彌補監督式分類人工選樣區類別不完整之缺憾。但是86% 整體精度仍然無法符合實際應用的需求，且判釋錯誤的地區到底分布在哪裡，有必要進一步的分析，以作為提昇更高精度的參考。

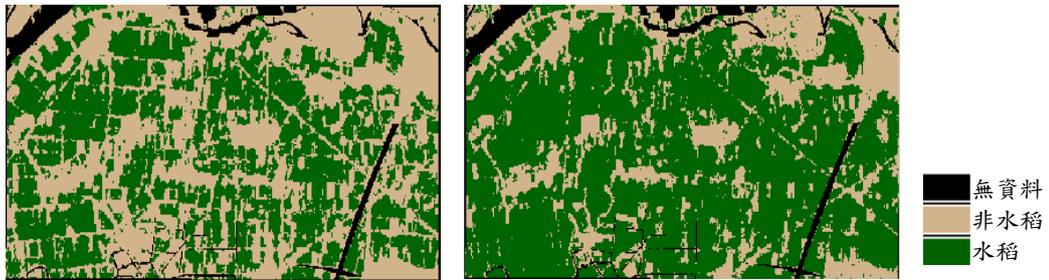


圖 10 2003 年一期稻傳統(左圖)與自動化樣區(右圖)監督式分類成果圖

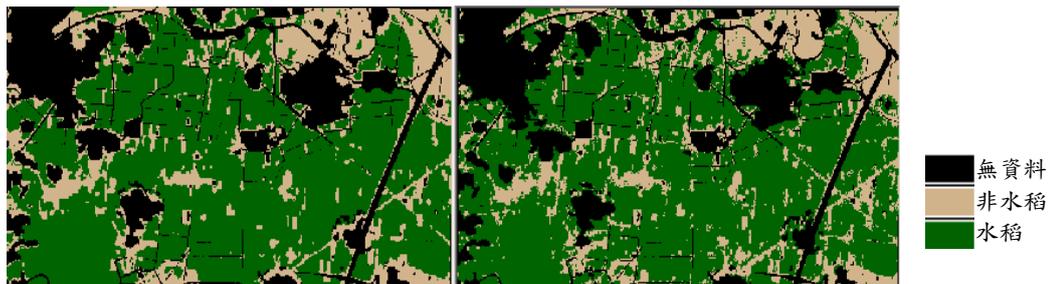


圖 11 2003 年一期稻傳統(左圖)與自動化樣區(右圖)監督式分類成果圖

表 2 2003 年一期稻傳統監督式分類成果

		地 真 資 料			
分 類 結 果		非水稻	水稻	總數	使用者精度
	非水稻	284127	175181	459308	61.86%
	水稻	124616	1165860	1290476	90.34%
	總數	408743	1341041	1749784	
	生產者精度	69.51%	86.94%		

整體精度：82.87% Kappa：0.68

表 3 2003 年一期稻自動選取樣區分類成果

		地 真 資 料			
分 類 結 果		非水稻	水稻	總數	使用者精度
	非水稻	306070	167776	473846	64.59%
	水稻	102673	1173265	1275938	91.95%
	總數	408743	1341041	1749784	
	生產者精度	74.88%	87.49%		

整體精度：84.54% Kappa：0.70

表 4 2003 年二期稻傳統監督式分類成果

		地 真 資 料			
分 類 結 果		非水稻	水稻	總數	使用者精度
	非水稻	608790	520803	1129593	53.89%
	水稻	50168	989862	1040030	95.18%
	總數	658958	1510665	2169623	
	生產者精度	92.39%	65.52%		

整體精度：73.68% Kappa：0.63

表 5 2003 年自動選取樣區分類成果

分類結果	地真資料				
		非水稻	水稻	總數	使用者精度
非水稻		504551	141151	645702	78.14%
水稻		154407	1369514	1523921	89.87%
總數		658958	1510665	2169623	
生產者精度		75.57%	90.66%		

整體精度：86.38% Kappa：0.75

(二) 誤差分佈圖分析

為了進一步分析誤判發生的原因，本研究將地真資料與一期稻作與二期稻作傳統監督式分類及自動化選取樣區分類法所得的結果的重疊(圖12以一期稻為例)，並比對航空照片及實地調查，發現判釋錯誤的情形主要為：

1. 水稻生育期較晚的坵塊，
2. 水稻分佈在狹長的耕地內，且相鄰地物為其他作物，
3. 與部分其它與水稻生育期類似作物混淆，
4. 同一坵塊內同時有水稻與其他作物分佈等，
5. 地真資料可能有誤，
6. 耕地坵塊圖與衛星影像對位有偏差。

其中第1與3項的誤判可增加其它時期之影像或航空照片與地面調查來提升分類的正確性，以一期稻為例可由目前的2和4月多增加一期3月影像，如此一來水稻耕種較晚和與其他作物混淆的情形應可改善。而第2項則需要有較高空間解析度的影像，如福衛二號、IKONOS或Quickbird影像，方可改善分類結果。第4項表示農民對於該年度該坵塊並非全部栽種水稻，而有部分栽種其他作物，但是農糧署的耕地坵塊圖則仍視全坵塊為水稻並無針對坵塊邊界作修正，所以導致正確率檢核的錯誤。

第五項則是農糧署的地真資料可能有誤，經由檢視誤差分佈圖誤判或漏判的區域(圖12)得知，有些地區在兩時期影像中呈現類似水稻的植生反應，但在坵塊圖中則呈現為非水稻，造成誤判(非水稻判釋為水稻)的現象。另一種判釋錯誤的現象則是某些在水稻坵塊圖上顯示為水稻田的坵塊，在兩時期影像上的光譜反射值則無植生特性反應或無水稻的特性，因此造成漏判(水稻判釋為非水稻)的現象。以上這兩種情形，皆可能為原始的坵塊圖本身就判釋錯誤。

第6項則是誤判與漏判的情形多發生在坵塊邊界上(圖12)，究其原因為影像與耕地坵塊圖的錯位問題(圖13)。另外因耕地坵塊圖為向量格式，當轉換為網格式資料時，會產生些許誤差，因而產生影像錯位問題，造成誤判情形產生。因此本研究將坵塊邊界產生左右各6.25m的環域(buffer)，再從影像上將此坵塊邊界去除，以改善邊界錯位的問題。

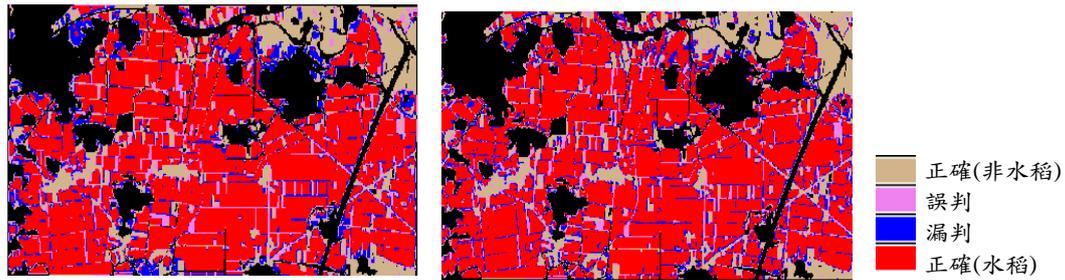


圖 12 2003 年一期稻傳統(左圖)與自動化樣區(右圖)監督式分類成果誤差分佈圖

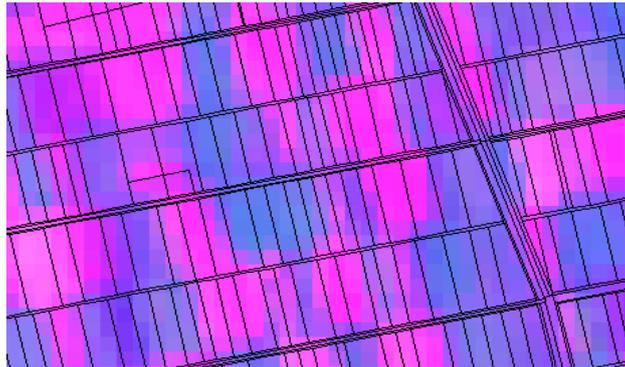


圖 13 坵塊圖套疊於衛星影像上產生邊界無法對齊的情形

表6為解決錯位問題後一期、二期監督式及自動選取樣區分類精度評估表，相較於未去除邊界的分類精度，整體約提昇5% 左右。其中一期稻作分類整體精度高達87%以上，Kappa指標也介於0.74~0.75左右，而二期稻作傳統監督式及自動選取樣區分類法其全體精度也提昇了，自動化選取樣區更達到92%以上的高精度。

表 6 2003 年解決錯位後影像分類精度評估一覽表

分類方法 \ 精度	一期稻作		二期稻作	
	整體精度	Kappa指標	整體精度	Kappa指標
傳統監督式	87.29%	0.74	78.49%	0.68
自動選取樣區	88.03%	0.75	92.41%	0.85

五、結論與建議

本研究以歷史耕地坵塊資料作為輔助資訊，利用多時段SPOT衛星影像來萃取雲林大埤鄉地區的

水稻田耕作資訊，期盼以客觀且自動化的方式選取訓練樣區，利用監督式分類達到自動化判釋之目的。經由相關分析獲致下列幾點結論：

- (一) 利用歷年耕地坵塊圖可客觀選取出訓練樣區，並可避免人為因經驗及專業知識不足或因地面資訊較複雜或是肉眼不易辨識而選出偏頗之訓練樣區，對於判釋結果影響可降至最低，達到樣區涵蓋多樣性的要求。
- (二) 研究顯示經由自動化選取訓練樣區方法可獲致良好判釋精度，於一期稻作中整體精度為88.03%，kappa指標為0.75，二期稻作整體精度為92.41%，kappa指標為0.85，優於以人工選取樣區之傳統監督性分類方法。
- (三) 解決影像錯位問題，可提升水稻田判釋精度。坵塊及影像不能完全套合是降低分類精度因素之一，由於影像錯位造成部份像元產生誤判，再將利用坵塊邊界產生的環域部分去除後，水稻田判釋整體精度提高約5%左右。
- (四) 利用衛星影像判釋可節省許多時間。人工查報為定期的查核工作，約在水稻插秧7天後可以第一次獲得水稻面積資訊，往後配合野外工作漸次更新資料，但此費時費力成本高無法獲得全面性的資訊。而航照判釋於取得航照後，經人工判釋、轉繪、水稻種植變異區數化與更改種植屬性等步驟，約在插秧後95~160天可得到臺灣地區精確的水稻分佈面積，但此費時費力成本高且判釋正確率無法保證。最後SPOT衛星影像則可漸次獲得水稻分佈資訊，如插秧~生長期提供第一次水稻種植面積估計，最高分蘗期~幼穗形成期組合影像的分類資訊可提供第二次面積資訊，約插秧後80~90天完成面積統計，若可以再獲取其他時期影像組合，則可以再次更新面積資訊，為一較有效率且成本低的做法。
- (五) 航空照片的解析力為公分級，可以精準地辨識地物的種類，因此可以達到高的分類準確度。衛星影像判釋是利用光譜反射的統計資訊分辨類別歸屬，由於影像空間解析力較粗，且又有混像元影響，如果相鄰坵塊的土地利用種類變化大或是耕作面積較小，亦或是狹長型坵塊，則分類精度往往會降低，此為以衛星影像的限制之一。

本研究以自動化選取訓練樣區進行自動化判釋水稻田之研究，已具有相當良好之成果，但礙於研究時間及資料之限制，仍有些許不完備之處可加以改進，建議後續研究可加以發展延伸。

- (一) 本研究一、二期稻作各以二張衛星影像為判釋基準，由於有其他作物與水稻產生混淆情形，後續若有更多影像資訊，可結合水稻不同生長期別之地面披覆情形，進行二期以上多時段影像之水稻田分析，可更清楚區別水稻與其他作物，更有效萃取的水稻資訊。
- (二) 本研究假設實驗區內所有水稻坵塊之插秧期皆非常相近，然而實驗區內若有較早或較晚插秧的區塊，極可能造成判釋上的誤判，若欲解決此問題可朝藉由分析水稻生長光譜曲線，而將二個曲線進行相似度的比較，相似程度較高的區塊即可歸類為水稻田。同理，若藉由多張衛星影像可分析出其它經濟作物之全生育期之生長曲線，則可利用各年度人工查報資料進行本研究之自動化選取訓練樣區之方法，選取出供判釋經濟作物之訓練樣區，進行後續衛星影像判釋工作；若歷史資料不甚齊全，所選取出的訓練樣區準確度可能未達水準，如此一來將造成分類精度降低。
- (三) 研究中結合歷史資料於衛星影像上判釋水稻田，礙於檔案格式不同，轉換時會有少許資料遺失及影像錯位問題，建議可改善坵塊田的邊界位置正確度，來解決錯位的問題。因SPOT衛星影像

的低空間解析度，易造成水稻與非水稻交接處有混像元的情形產生，因此建議後續研究可採用高解析度影像。

(四) 研究過程中發現有些地區在兩時期影像中呈現類似水稻的植生反應，但在耕地坵塊圖(地真資料)中則呈現為非水稻，造成誤判的現象。另一種判釋錯誤的現象則是某些在耕地坵塊圖上顯示為水稻田的坵塊，但在兩時期影像上的光譜反射值則無植生特性反應或無水稻的特性，因此造成漏判的現象。以上這兩種情形，皆可能為原始的坵塊圖本身就判釋錯誤。所以未來進行正確率檢核時，首先必須針對地真資料進行檢核。

(五) 未來若欲將本成果推廣至全國進行水稻自動判釋，則另外須注意需蒐集以下資訊：

稻作生長期，各地水稻耕種最適期不同，瞭解水稻生長期穩定度將有助於衛星影像時間點的選擇。可利用水稻不同生長期產生之不同土地覆蓋情形，選取水稻插秧期及分蘗盛期之衛星影像，以區別其他植生，抑或加入更多時期之影像。如果衛星影像充足，則可以利用其它作物的生長曲線與水稻生長曲線進行分析比較以區隔開來。

中間作物與其他與水稻生育期類似之作物可能會在衛星影像上與水稻造成混淆，因此瞭解各地中間作物與其他作物之栽種情形可避免混淆造成誤判。

地方耕種習慣將影響水稻插秧日期，如同一地區各坵塊田內水稻較晚耕種或是較早種植，是否有跡可尋或不規律分佈，若明白各地耕種習慣將可分區處理或是個案處理，以提升判釋精度。

各地地方政府因應當年度乾旱情形而制訂各區限水政策，將影響休耕或是繼續種植水稻，若能提早瞭解地方政策則可提供判釋時之參考資訊。

六、謝誌

本研究是由農委會農糧署91-93年'利用高解像遙測衛星影像輔助農作物耕作清查'計劃補助完成，感謝計劃主持人台灣大學地理環境資源學系朱子豪教授與共同主持人台灣師範大學地理系張國楨教授的協助。並感謝台大研究生張家豪與徐逸祥及逢甲大學土地管理學系研究生賴佩蓁與廖雅苓的協助。

七、參考文獻

《中文部分》

朱子豪、李瑞陽、陳致元、張智傑(2002)：稻田遙測調查暨監測先驅研究，2002 中華地理資訊學會年會暨學術研討會論文集。

吳啓南(1999)：精準農業之發展，1999 年北美華人學術研討會，農業建設分組論文集。

周昶成(1997)：利用多時 SPOT 衛星影像以研究水稻反射率動態光譜及其應用，國立中央大學太空科學研究所碩士論文。

高玉惠(2003)：小波轉換應用於影像自動判釋崩塌地分析，國立成功大學地球科學研究所碩士論文。

徐家盛(2002)：多種尺度遙測影像於農業土地利用分類精確度探討，中華大學土木工程研究所碩士論文。

- 陳惠燕、周天穎(1999)：自時性光譜影像資料萃取稻作區塊之研究，1999 中華地理資訊學會年會暨學術研討會論文集，台中，臺灣：逢甲大學。
- 陳益風(1998)：應用多時段衛星影像判釋水稻田之研究，國立成功大學測量工程研究所碩士論文。
- 陳哲俊(1989)：研究計畫綜合報告，國立中央大學太空及遙測研究中心研究計畫報告。
- 陳彥宏(2003)：運用紋理資訊輔助高解析度衛星影像於都會區水稻田萃取之研究，逢甲大學土地管理研究所碩士論文。
- 黃則林、廖閱郎、廖學禮(1979)：航照遙測應用於彰化縣稻穀生產調查，林務局農林航空測量所，叢刊第 27 號。
- 黃信茗(2000)：地理資訊系統及衛星影像應用於灌溉計劃之研究，屏東科技大學土木工程研究所碩士論文。
- 郭秀玲(2002)：紋理分析於農地利用判釋之研究-以苗栗縣大湖鄉為例，逢甲大學土地管理研究所碩士論文。
- 楊龍士、周天穎(2000)：遙感探測理論與分析實務，逢甲大學地理資訊系統研究中心
- 劉治中、蕭國鑫、徐偉城、李元炎(2000)：遙測與地理資訊系統技術應用於水稻丘塊辨識之研究，工研院能資所，共 66 頁。
- 劉建慧(1998)：利用 SPOT 衛星資料求取動態植被光譜之研究，國立中央大學物理研究所碩士論文。
- 鄧敏松(1997)：結合多時段遙測影像、耕地丘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，國立成功大學測量工程研究所碩士論文。
- 蕭國鑫(1998)：多時遙測光學與雷達資料於水稻田判釋之研究，國立交通大學土木工程學系碩士論文。
- 蕭國鑫(2003)：遙測與 GIS 結合應用於水稻辨釋，國土資訊系統通訊，45：51-57。
- 簡世宏(2003)：SPOT 衛星遙測影像與 DEM 應用於崩塌地潛勢分析之研究—以清水溪集水區為例，國立中興大學水土保持研究所碩士論文。
- 羅佳明(2002)：GPS/GIS/RS 應用於地震災區坡地災害防治工程調查及其風險評估模式，屏東科技大學土木工程研究所碩士論文。

《英文部分》

- Anderson, G. L, Everitt, J. H., Richardson, A. J. & Escobar, D. E. (1993): Using satellite data to map false broomweed(*Ericameria austrotexana*) infestations on south Texas rangelands. *Weed Tech*, 7:865-871.
- Barrett, E. C. & Curtis, L. F. (1982): Introduction to environmental remote sensing, 2nd ed, Chapman & Hall.
- Barrett, E. C. & Curtis, L.F. (1992): Introduction to environmental remote sensing, 2rded, Chapman & Hall.
- Blackmer, T. M., Schepers, J. S., Varvel, G. E. & Walter-Shea, E. A. (1996): Nitrogen deficiency detection using reflected shortwave from irrigated corn canopies, *Agron. J.*, 88:1-5.
- Bolstad, P. V. & Lillesand, T. M. (1992): Improved Classification of forest vegetation in northern Wisconsin through a rule-based combination of soils, terrain, and Landsat thematic mapper data, *Forest Sci.*, 38:5-20.
- Casanova, D., Epema, G. F. & Goudriaan, J. (1998): Monitoring rice reflectance at field level for

- estimating biomass and LAI, field Crops Res., 55:83-92.
- Grilli, M. P. & Gorla, D.E. (1997): The spatio-temporal pattern of *Delphacodes kuscheli*(Homoptera: Delphacidae)abundance in central argentina, Bull, Entom. Res., 87:45-53.
- Lobita, B., Beck, L., Huq, A., Fuchs, G., Faruque, A. S. G. & Colwell, R. (2000): Climate and infectious disease: use of remote sensing for detection of vibrio cholerae by indirect measurement. *Proc. Natl. Acad. Sci.*, 97(4):1438-1443.
- Lillesand, T. M. & Kiefer, R. W. (1994): Remote Sensing and Image Interpretation, John Wiley & Son, Inc., 3rd Edition.
- Maas, S. J. (1988): Use of remotely sensed information agricultural crop growth models, *Ecol. Model*, 41:247-268.

收稿日期：94年6月13日

修正日期：94年7月20日

接受日期：94年7月31日

