2 衛星及地面遙測資料應用於水稻生長及產量監測初步研究

吳啓南 蕭國鑫 徐偉城 廖子毅 陳大科 劉治中
工業技術研究院能源與資源研究所遙測研究室
E-mail:690398@itri.org.tw

摘 要 －－－－－－－－－－－－－－－－－－－－－－－－ 20
壹、前 言 －－－－－－－－－－－－－－－－－－－－－－ 21
貳、水稻全生育期SPOT影像光譜資料分析 －－－－－－－－ 21
參、全生育期水稻地面多光譜近紅外影像光譜資料分析 －－ 26
肆、SPOT影像應用於水稻產量推估 －－－－－－－－－－－ 31
伍、討論與建議 －－－－－－－－－－－－－－－－－－－－ 35
陸、引用文獻 －－－－－－－－－－－－－－－－－－－－－ 36
柒、誌謝 －－－－－－－－－－－－－－－－－－－－－－－ 36

2 衛星及地面遙測資料應用於水稻生長及產量監測初步研究

吳啓南 蕭國鑫 徐偉城 廖子毅 陳大科 劉治中
工業技術研究院能源與資源研究所遙測研究室
E-mail:690398@itri.org.tw

摘 要

本研究利用衛星影像及地面遙測資料監測水稻生長及預估產量。其中水稻生長監測以影像攝像日對照生長天數後，繪出全生育期水稻對應SPOT影像的NDVI指數分佈；另亦利用NDVI植被指數分析與比對正常與罹患稻熱病水稻的差異。水稻產量預估則利用四個時段SPOT影像的NDVI、RVI及TVI指數，配合農試所89年精準農業試驗田的坪割產量資料，以向後消去法逐步回歸(stepwise regression by backward elimination)估算水稻產量，並建立預估水稻產量的回歸方程式。地面遙測以具有綠、紅及近紅外光等三個波段的Duncan MS3100/CIR近地面紅外成像儀資料監測水稻生長，並建立水稻正常生長及不同氮肥力區的NDVI指數對應生長天數分佈曲線。衛星影像監測正常水稻生育，在綠色植生反應最敏感的近紅外光段光譜反射以幼穗形成期～孕穗期值最高，NDVI指數分佈亦相同；而逆境生長的稻熱病水稻區，在近紅外光段光譜反射及NDVI指數均減少。另以SPOT影像估測水稻產量；單一時期或多時段SPOT影像與一期稻產量資料回歸分析後，相關係數最高爲0.66；相同的方法應用於二期稻的產量預估，相關係數有明顯提昇，最高分蘗期SPOT影像預估產量的相關係數爲0.71，加上幼穗形成期或乳熟期影像的相關係數爲0.84，再結合黃熟期前的影像，回歸相關係數可達0.90，其預估產量的標準差爲0.39公噸/公頃。另近地面紅外成像儀監測以農試所試驗田90年兩期稻作爲攝取對象，攝像資料經增益調整後，正常生長水稻的NDVI指數極值在幼穗形成期~孕穗期間；另不同氮肥力區與正常生育水稻NDVI指數的比較發現，氮變異區水稻在孕穗期以前的NDVI指數均較低，抽穗期以後的NDVI指數反而較高，且反應在黃熟期的水稻生育有較晚成熟的現象。

關鍵詞：水稻產量、回歸分析、生長監測。

壹、前　言

遙測技術具有無遠弗屆的高處俯視及多時段獲取資料特性，可密集監測農作物全生育期的生育狀況；並藉由光譜資料的分析，辨別水稻與他種作物種類的區別，進而預估水稻種植面積及偵測稻作因病蟲害或肥力不足引起的異常狀態，以快速取得農災範圍後做有效的防制與追蹤，提供作爲逆境預警、災害防治或農作施肥的基本資料，利於水稻的精準栽培。此外遙測資料大面積涵蓋及可藉助電腦的快速處理分析，有助於作物種類辨識、種植面積及產量的估算。

目前國內可取得的遙測數值資料中，SPOT衛星的遙測感測器可左、右傾斜攝像，增加了好品質影像的獲取機率；因此，利用SPOT衛星資料監測水稻生育狀況，此種相對較穩定獲取遙測資料來源的優勢是當前其它衛星資料尚無法達到的。而依能資所吳啓南等(2000a)之研究，SPOT影像的NDVI指數與其它遙測資料的相關係數達0.92以上；因此，可以結合多種遙測資料分析，以找出最佳的遙測水稻監測模式。

Duncan MS3100/CIR 地面多光譜近紅外成像儀具有可同時拍攝綠光、紅光及對植生反應最敏感、訊號最強的近紅外光波段影像。除可輔助地眞調查外，在天候不佳、空中或太空遙測資料無法獲得情況下，此系統亦可結合其它資訊或現場調查資料進行研判分析，以發揮地面監測作用，儘早發現水稻是否受逆境環境的影響；並將此資料納入精準農業監測分析與應用中，以提供水稻栽培與環境精準農業管理專家決策系統使用。

第五屆“遙測在精準農業的應用”會程中，Scott & Taylor(2000)利用遙測影像各種植生指數，如NDVI、DVI及GNDVI，分析與玉米產量間的關係，其中GNDVI指標預測的相關性最高可達0.93（R^2）；Yang and James(2000)以五個時間的綠/紅/紅外多譜影像及NDVI指數，利用多元回歸分析法分析與高粱（Sorghum）產量的關係，發現最大分蘗期後的影像資料與產量相關性最爲顯著，並以NG指標（NIR/Green）最適合產量預測。另外如Prince(1990)也指出，作物的初級生產率(Primary productivity)間接與NDVI指數相關，因爲藉由凱氏線性(Quasi-linear)關係得知NDVI指數與被吸收光合作用的能量(Absorbed photosynthetically energy)相關，而光合作用是影響作物產量重要因素之一。Maselli與Rembold(2001)則成功的利用13年AVHRR衛星資料的NDVI指數，推估摩洛哥(Morocco)、阿爾及利亞(Algeria)、突尼西亞(Tunisia)與埃及(Egypt)等四個國家大面積的穀物產量，其中NDVI指數與產量的相關性（R^2）均在0.65以上，摩洛哥國家更高達0.93。鑒於遙測資料可預估作物產量，故擬就此產量推估技術，結合遙測水稻光譜與少數點的田間產量資料，推估水稻光譜與產量間相對較合理的對應關係。

貳、水稻全生育期SPOT影像光譜資料分析

利用15幅兩期水稻全生育期的SPOT衛星影像(如圖1所示)，萃取水稻純像元的光譜反射資訊；經影像正規化(normalization)並計算NDVI指數後，對照水稻生長天數繪出三個波段波譜反射及

NDVI指數分佈；另外亦比對罹患稻熱病區的光譜反射與正常生育水稻光譜差異。

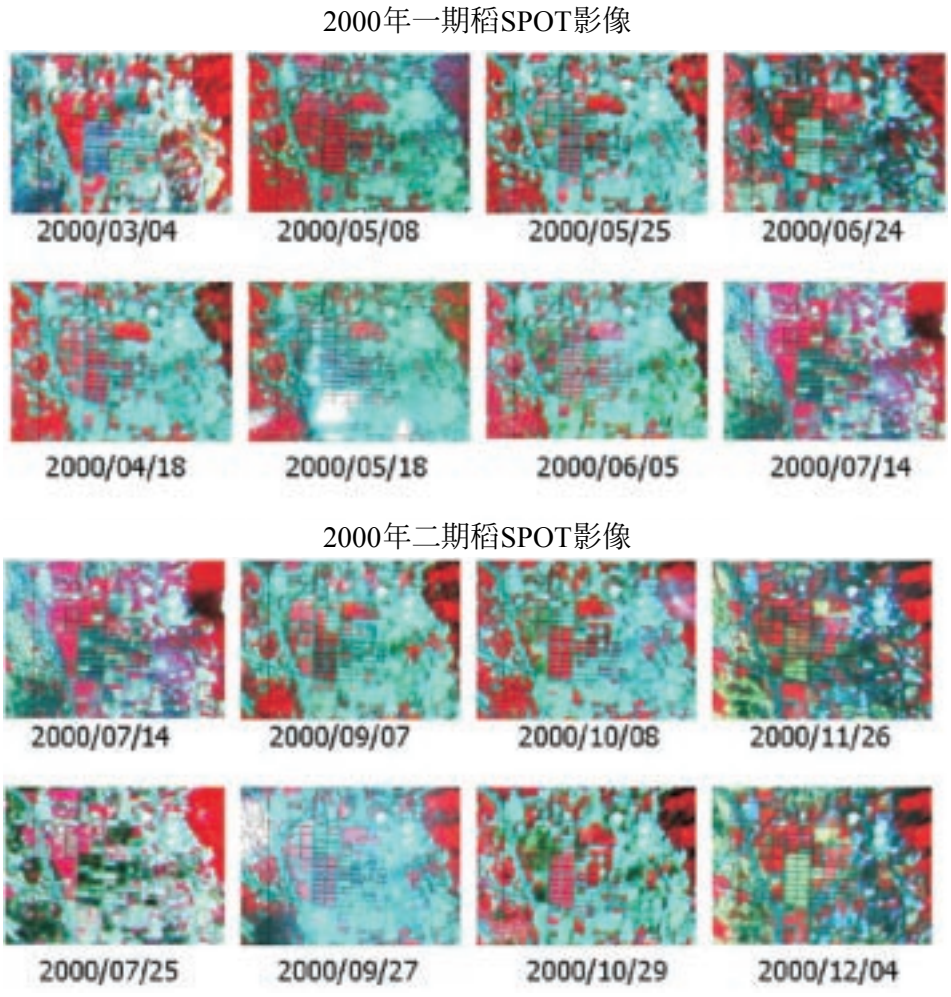


圖1. 農試所精準農業試驗田2000年SPOT影像。

一、不同生育期水稻SPOT影像光譜資料分析

要有純像元(pure pixel)的資料提供影像判釋或分析，則坵塊範圍需不小於影像2*2個像元大小方具有可信賴的取樣空間。目前臺灣地區平均農地坵塊面積爲0.17公頃(約100 *17平方公尺)，尚未達SPOT影像純像元的基準(SPOT影像空間解像力爲20*20平方公尺)；而農試所規劃設計的實驗田達0.5公頃(長*寬爲100公尺*50公尺)，高於最基本的2*2純像元萃取基準，所以每個坵塊中均有數個純像元資料可供分析。

1. SPOT影像光譜資料萃取

純水稻像元資料萃取依農試所精準農業試驗田，選取各坵塊對應影像中心的三個像元爲分析單元；而光譜數值計算利用翰林濾波(Hanning filter)方法，中心像元佔一半比重，左右像元各佔1/4權重；經統

計各坵塊對應SPOT三個波段的光譜反射值後，再以目視最清晰的影像爲對照基礎(攝像日:2000/06/24)，其他時期影像找出對應位置的光譜數值後，進行影像正規化，並計算標準差植被指數(Normalized Difference Vegetation Index；NDVI)、比例植被指數(Ratio Vegetation Index；RVI)及轉換植被指數（Transformed Vegetation Index；TVI）等三種植被指數。

2. **不同生育期水稻SPOT影像光譜資料分佈**

圖2爲SPOT影像正規化後三個波段對應生長天數的反射曲線分佈圖；顯示兩期水稻在綠光段光譜反射由成活生長期到幼穗形成期間爲緩慢減少，抽穗期以後再提昇；紅光段光譜反射由插秧到幼穗形成期以前緩慢減少，幼穗形成期以後增加；近紅外光段的光譜反射在成活期以後逐漸上昇，幼穗形成期~孕穗期達最高峰；抽穗開花期以後到乳熟期間緩慢下降。

二、全生育期水稻SPOT影像NDVI指數分佈

圖3爲SPOT影像換算的NDVI指數對照水稻生長天數後建立的反射曲線圖；NDVI的極值在0.53左右(影像的NDVI極值較地面量測資料提早10~15天)，遠比地面的光譜儀量測資料低，大氣條件影響即爲重要因素之一。另一期晚熟稻(四月初插秧)的NDVI指數對應生長天數的反應曲線與正常插秧水稻接近，只是生長天數較少，所以曲線稍向左偏移；二期水稻因生長天數更少(約爲98~110天)，故水稻各生長期均提前發生，所以NDVI指數對應生長天數的反應曲線再向左偏移，且曲線的開口縮小。

三、正常與稻熱病水稻光譜資料比對分析

水稻發生稻熱病時，顯現在莖、葉上的病症可直接反應在遙測資料的反射光譜上；因此，乃以稻熱病爲例，利用SPOT影像分析進行正常及逆境環境之水稻植冠光譜資料比對分析。

1. **試區選定**

90年一期稻作期間，苗栗地區有近千

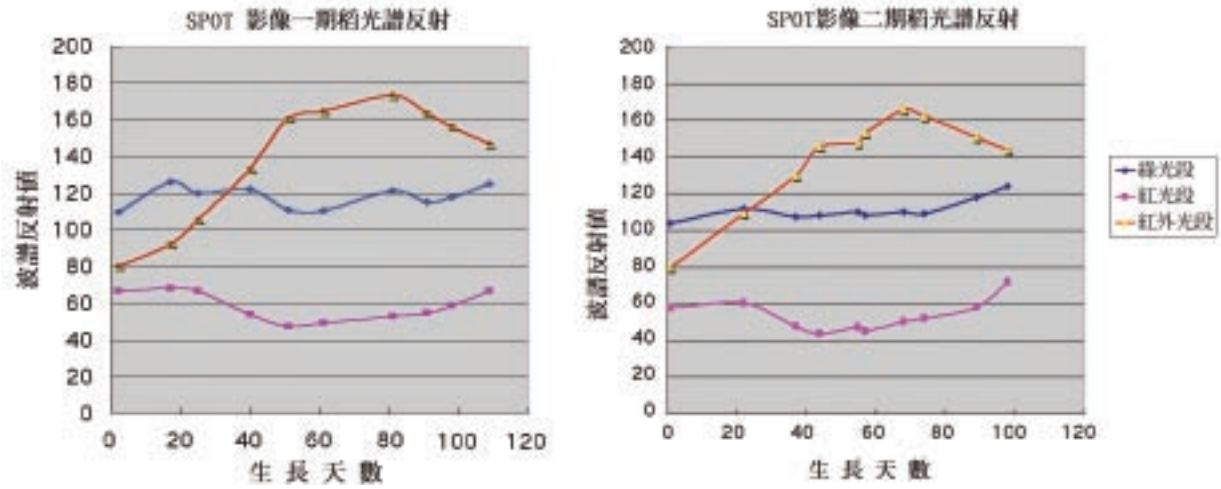


圖2　兩期水稻SPOT影像對應生長天數的三個波段波譜反射分佈。

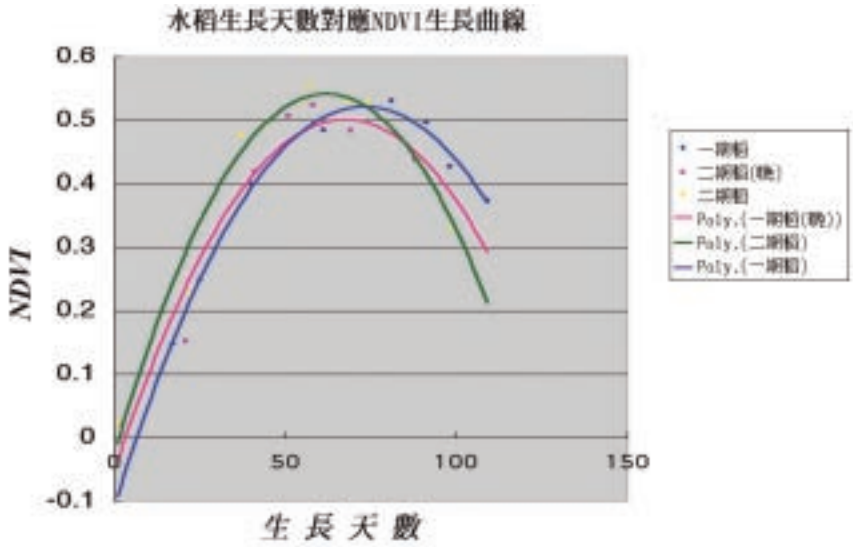


圖3. SPOT影像NDVI指數對照水稻生長天數反射曲線分佈。

公頃的稻作被感染葉稻熱病，且部份地區的水稻葉片有枯萎現象；受病感染地區包括三義、西湖、三灣、南庄、銅鑼等鄉鎮，並以銅鑼地區受病蔓延約一百多公頃最爲嚴重。因此，乃參考吳啓南等(2000b)利用地面光譜儀對彰化田中地區葉稻熱病水稻所量測的光譜資料，並蒐集苗栗地區2001/05/07日SPOT衛星影像，以進行正常及稻熱病水稻的光譜反射特性分析。

2. **正常與逆境水稻地面光譜與遙測資料分析**

(a) 葉稻熱病水稻地面光譜資料

圖4爲利用GER-3700地面光譜儀實測彰化田中地區健康水稻與稻熱病水稻的光譜反射資料(圖左爲對應之水稻生長狀況)。顯示罹患葉稻熱病植冠的光譜反射低於健康水稻的光譜反射值，尤以近紅外光部分(約750nm~1350nm)最爲明顯。

(b) 葉稻熱病水稻SPOT影像分析

由於SPOT1~3號衛星影像只有三個波段資料，且前兩個波段(綠光段與紅光段)爲高正相關；所以正常與逆境的光譜資料

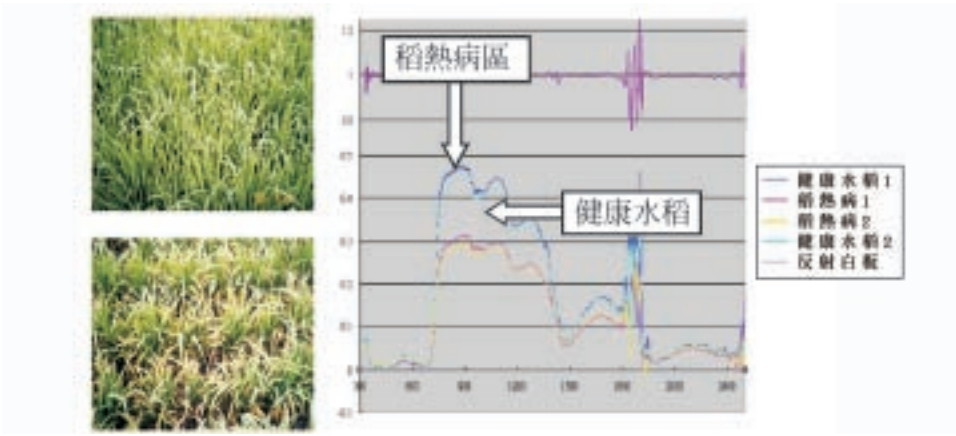
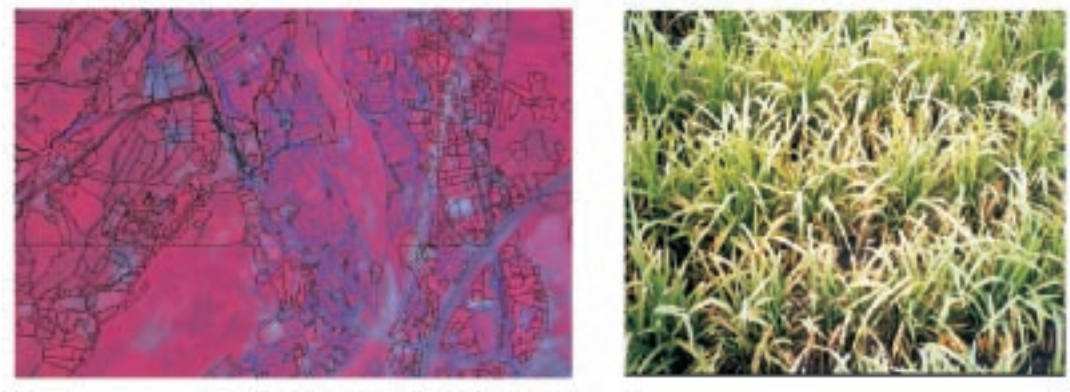


圖4 健康水稻與稻熱病水稻之地面光譜反射資料(資料來源:吳啓南等，2000b)。

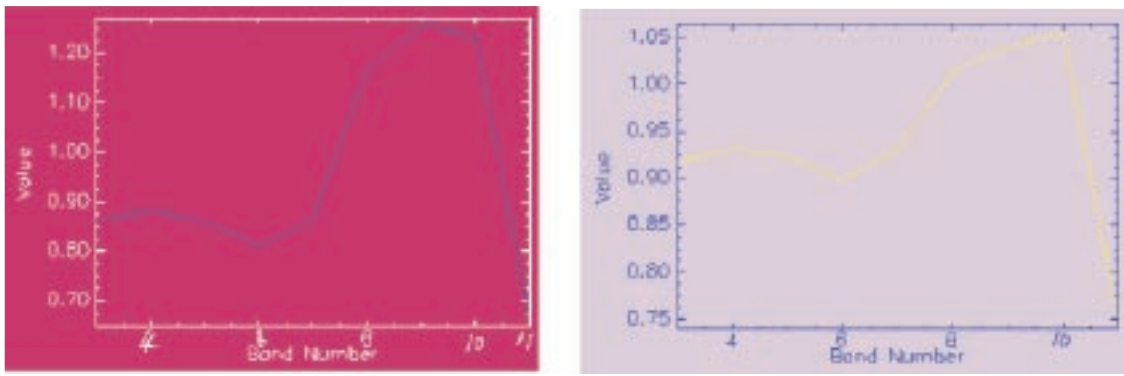
分析乃以NDVI植被指數進行之。其中逆境水稻判別爲利用地眞調查資料劃定範圍，再對應影像後萃取健康水稻與稻熱病水稻區域。圖5爲稻熱病盛行時，銅鑼地區沿128線道兩側的SPOT衛星影像及稻熱病區照片。

依吳啓南等(2000b)以空載多譜資料分析正常與稻熱病水稻的內部平均相對反射率(Internal Average Relative Reflectance，IARR；像元波譜反射值/該波段平均波譜反射值)分佈，顯示健康水稻IARR值較稻熱病水稻高(如圖6所示)；換算爲NDVI指數後，健康水稻NDVI指數亦較稻熱病水稻高。另將地面光譜資料對應SPOT三個波段的波長範圍，換算爲平均反射率後計算NDVI指數，同樣顯示逆境地區的NDVI指數較正常水稻低。研究中統計銅鑼地區128線道兩側健康與稻熱病水稻SPOT影像NDVI指數頻率分佈如圖7所示，顯示健康水稻NDVI指數亦較稻熱病水稻高。



(a)銅鑼稻熱病區SPOT影像　　(b)葉稻熱病區照片

圖5.　銅鑼地區128線道兩側稻熱病盛行區SPOT衛星影像及稻熱病區照片。



(a)健康水稻IARR分佈　　(b)稻熱病水稻IARR分佈

圖6.　空載多譜資料分析健康水稻與稻熱病水稻IARR分佈(資料來源:吳啓南等，2000b)。

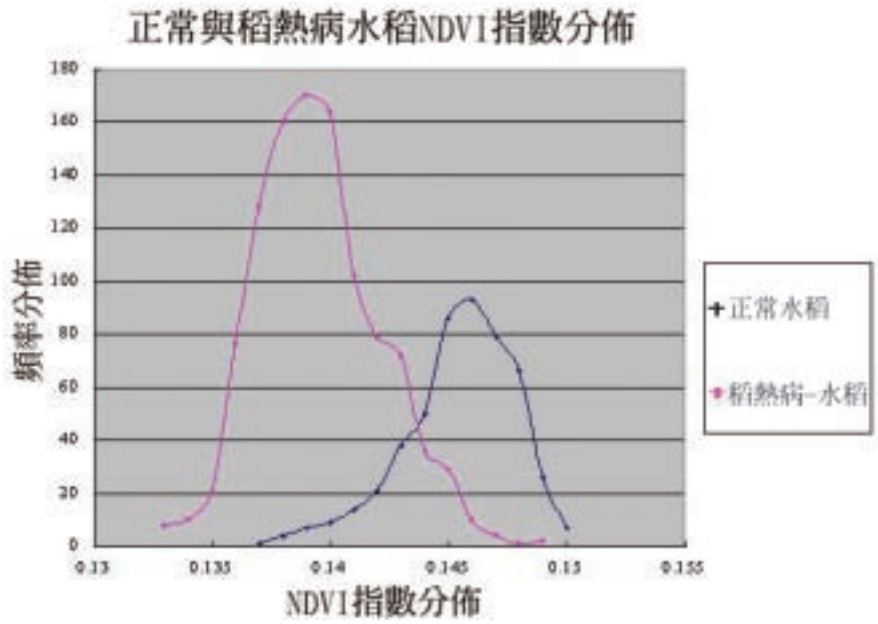


圖7. 銅鑼地區SPOT影像分析健康與稻熱病水稻NDVI指數分佈。

參、全生育期水稻地面多光譜近紅外影像光譜資料分析

地面多光譜近紅外攝像系統由於可機動獲取影像資料，受到天候影響因素較小；因此，研究中亦建立水稻全生育期的光譜資料，並進行正常與逆境環境的光譜資料分析。

一、地面多光譜近紅外影像

Duncan MS3100/CIR地面多光譜近紅外成像儀具有三個獨立CCD(如表1所示)，攝像時同時獲取相同範圍的三個波段影像；拍攝鏡頭角度(FOV)約爲20度，每幅影像大小1392(pixels) *1039(lines)；所以拍攝高度低於380公尺時的影像的空間解像力均屬公分級，如高度在15公尺地方拍攝的影像空間解像力爲0.39公分。

1.近紅外影像資料獲取

地面多光譜近紅外成像影像獲取爲利用農試所的高空作業車，在離地面約13~15公尺高度區近於垂直向下攝取正常生長、不防病、不防蟲及不同氮肥力田區的影像；而在攝取影像時亦進行感測器輻射率定，如調整增益值(gain)、平移值(offset)或影響能量來源的曝光時間，使得各波段影像反射值沒有超飽合現象，並分佈在系統容許的設定值內(0~255之間)；另外近於同一時間拍攝標準白板的光譜反射資料則提供比對及進行反射率計算。

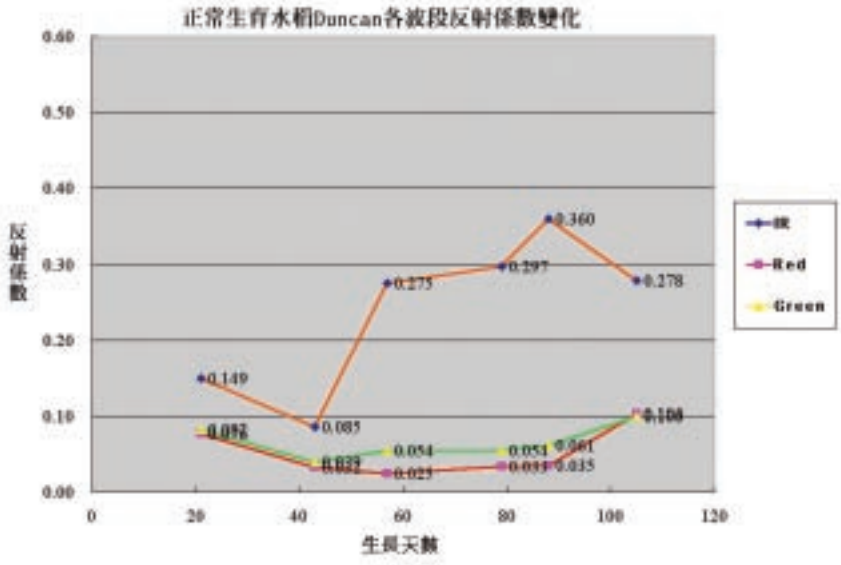
2.不同生育期水稻近紅外影像光譜資料分佈

獲取不同生長期水稻的近紅外影像後，決定水稻在影像中光譜反射值的大小，爲將全幅影像視爲同一單元，並取全幅影像的光譜反射平均值代表此區的水稻光譜反射資訊；再對照水稻生長天數，以比對不同時期水稻反應在地面近紅外影像三個波段的波譜反射情形。

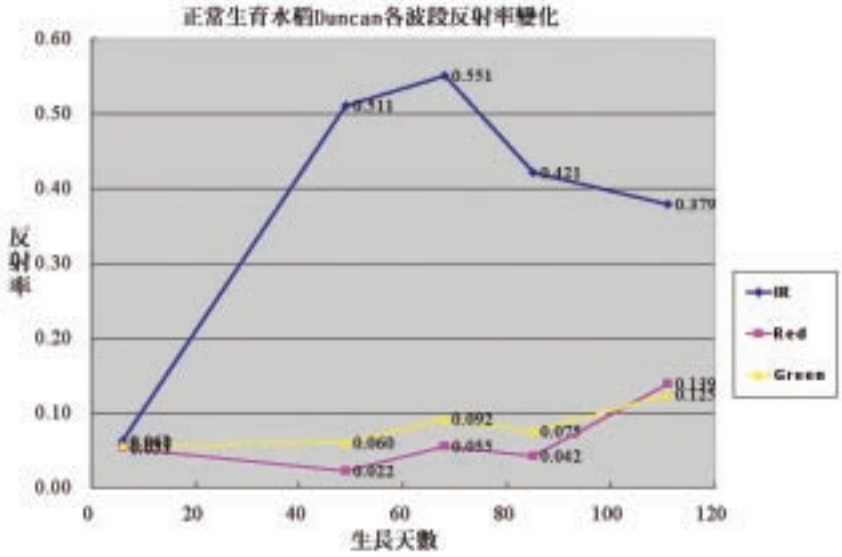
圖8所示爲兩期正常生育水稻在地面

表1. Duncan MS3100/CIR三個波段中心波長及頻寬表。

波 段	中心波長	頻 寬
綠光段	550 nm	40 nm
紅光段	660 nm	40 nm
近紅外光段	800 nm	65 nm



一期稻近紅外影像波譜反射分佈



二期稻近紅外影像波譜反射分佈

圖8. 兩期水稻地面近紅外影像對應生長天數的三個波段波譜反射分佈。

近紅外影像三個波段波譜反射率分佈。顯示一期稻在近紅外光段光譜反射隨水稻的生長逐漸上昇，抽穗期達最高峰，抽穗開花期以後緩慢下降；綠光段及紅光段的光譜反射在插秧期到有效分蘗期間慢慢下降，抽穗期以後再緩緩增高。二期稻光譜反射在近紅外光段以孕穗期最高，抽穗~乳熟期以後緩慢下降；綠光段與紅光段光譜反射與一期作近似，但二期作在孕穗期光譜反射有相對較高現象。

二、全生育期水稻近紅外影像NDVI指數分佈

利用圖8 的近紅外光譜資料計算影像的NDVI指數，並繪出水稻在正常生長、不防蟲(病)及不同氮肥力區對應水稻生長天數的反應曲線。如圖9爲地面近紅外影像換算之NDVI指數對照水稻生長天數後建立的反射曲線圖；其中一期稻NDVI極值約在幼穗形成期的0.83，二期稻NDVI極值約在孕穗期的0.91左右(與地面光譜儀量測換算NDVI極值對應生長天數接近)；顯示一期稻在孕穗~抽穗期影像的近紅外光段波譜反射率有減少現象，導致NDVI指數減少，相對NDVI極值亦往前提早到幼穗形成期。

三、正常生長與不同氮肥力水稻區光譜資料比對分析

不同氮肥力區拍攝的近紅外影像換算爲NDVI指數，再對應水稻生長天數後，繪出圖10的兩期水稻不同氮肥力區地面近紅外影像的NDVI指數分佈。其中一期稻作因氮肥控制並不好，故只利用二期稻的氮變異討論。

表2爲二期稻不同氮肥區在近紅外影像的NDVI指數；經與正常施肥區水稻的NDVI指數相減，並比較其NDVI指數變化率後(如圖11所示)；顯示不同氮肥區水稻在孕穗期以前的NDVI指數均較低，抽穗期以後的NDVI指數反而較高，且反應在黃熟期的水稻生育有較晚成熟的現象。

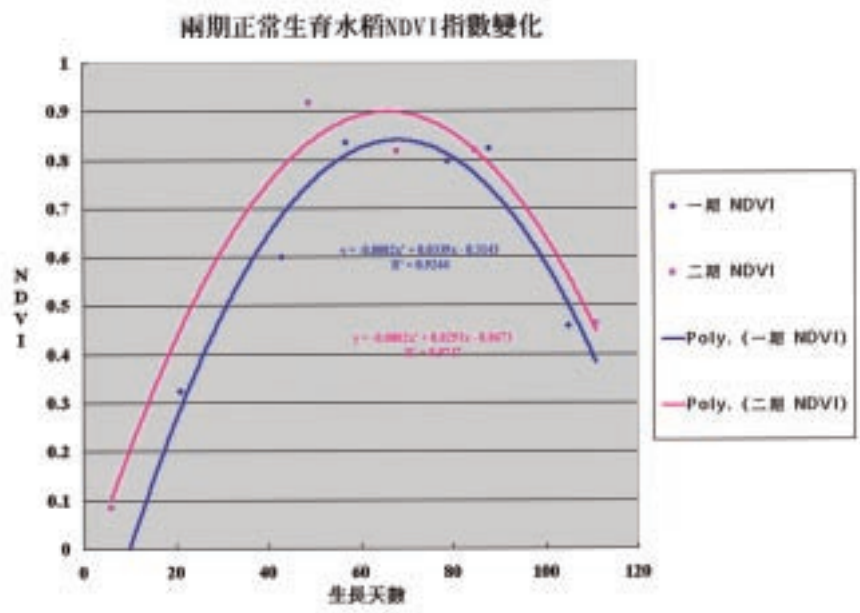
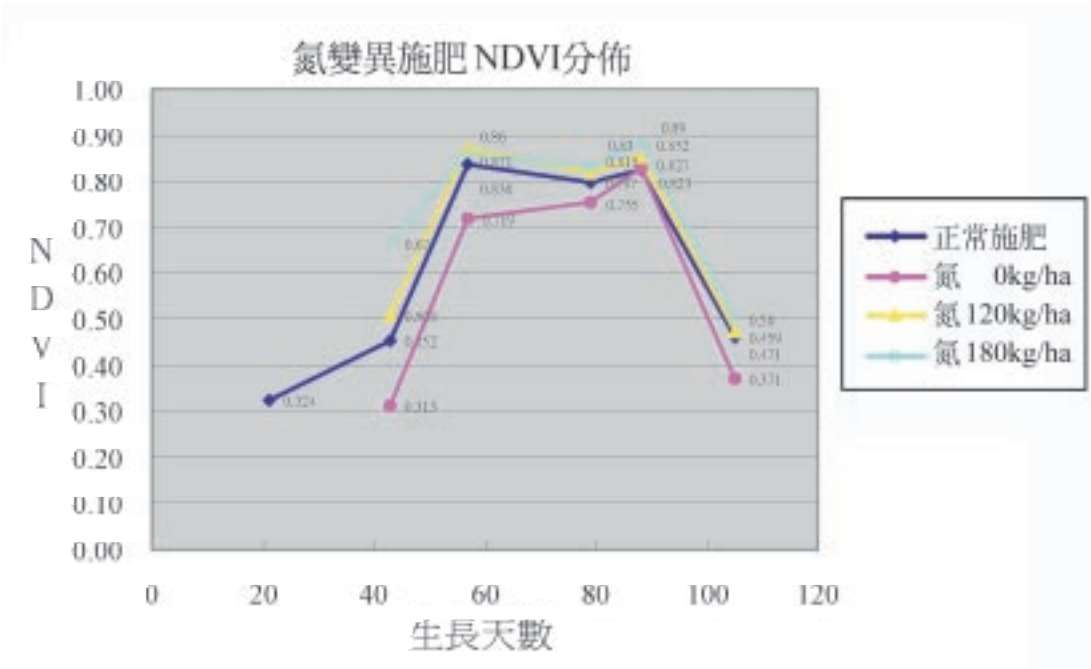
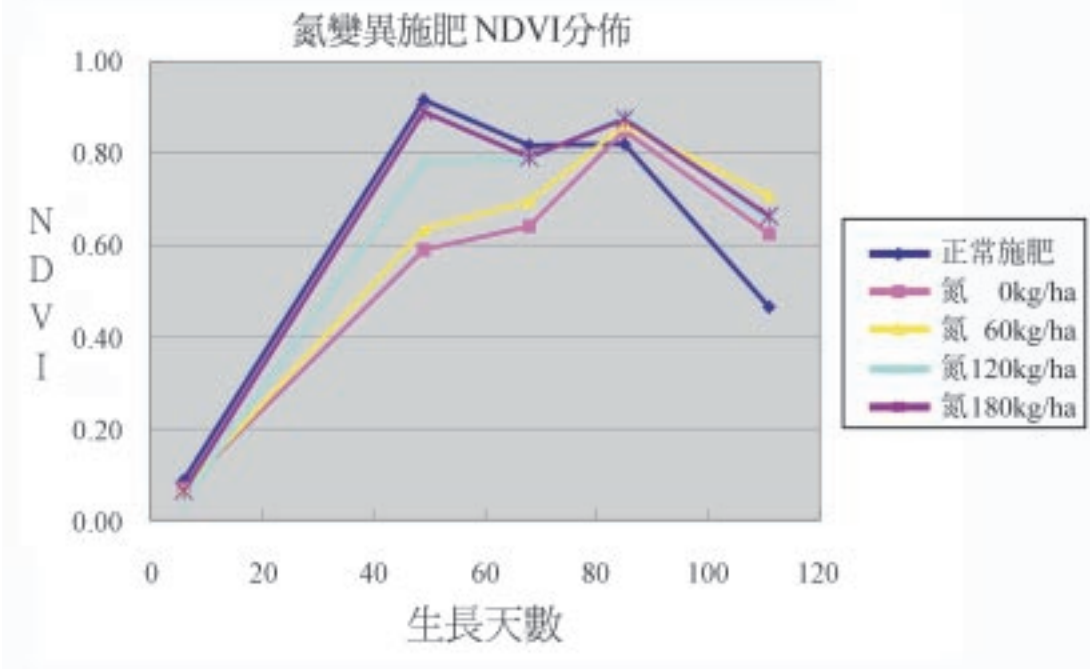


圖9.　地面近紅外影像NDVI指數對照水稻生長天數反射曲線分佈。



一期稻不同氮肥NDVI指數分佈



二期稻不同氮肥NDVI指數分佈

圖10. 正常生長與不同氮肥力區地面近紅外影像NDVI指數對照水稻生長天數反射曲線分佈。

表2. 二期稻期間不同氮肥區在近紅外影像的NDVI指數值。

生長天數	site 79	site 83-1/81-3	site 81-1	site 81-4	site 83 4/81-2	生長天數	當期水稻 NDVI 指數變化量			
	正常施肥	氮 0kg/ha	氮 60kg/ha	氮 120kg/ha	氮 180kg/ha		氮 0kg/ha	氮 60kg/ha	氮120kg/ha	氮180kg/ha
6	0.0860	0.0708	0.0688	0.0442	0.0640	6	-17.72%	-20.05%	-48.62%	-25.57%
49	0.9164	0.5900	0.6341	0.7819	0.8896	49	-35.62%	-30.80%	-14.68%	-2.93%
68	0.8179	0.6399	0.6960	0.7854	0.7903	68	-21.76%	-14.90%	-3.98%	-3.37%
85	0.8194	0.8487	0.8607	0.8844	0.8740	85	3.58%	5.04%	7.93%	6.67%
111	0.4634	0.6247	0.7072	0.6519	0.6650	111	34.82%	52.62%	40.67%	43.50%
變動範圍	0.8304	0.7779	0.7919	0.8402	0.8256	RMS	4.69%	6.24%	6.16%	3.73%

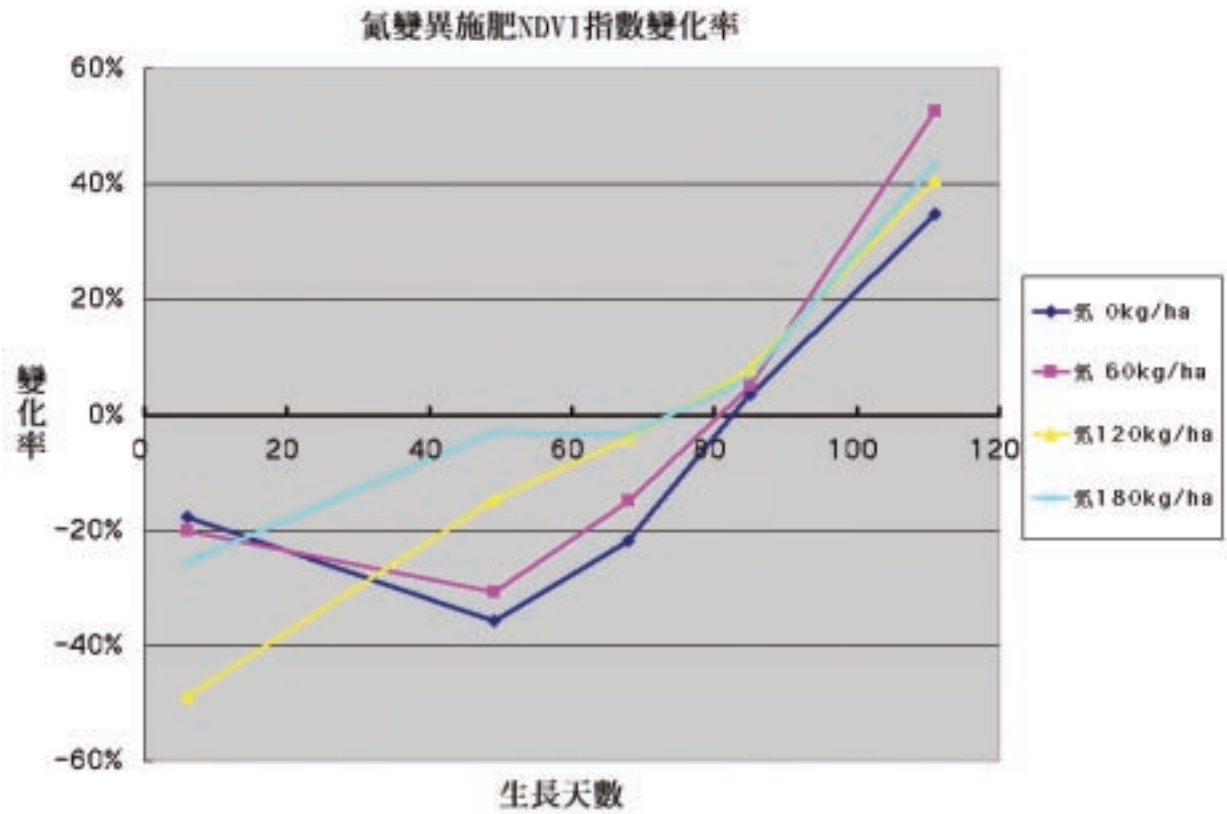


圖11. 正常生育與氮變異區水稻NDVI指數變化率。

肆、SPOT影像應用於水稻產量推估

由於獲取的SPOT影像均未經過大氣絕對輻射校正，所以難以利用單一波段資料進行水稻產量推估；但是紅光段與近紅外光段影像的波譜反射可以得知農作物大致生長狀況；因此，考慮不同大氣因素影響後，採用波段比例法可減少部份大氣效應，並達到影像分析目的；如NDVI、RVI、TVI等三種植被指數均具有紅外光段與紅光段比值的指數方法；因此，乃利用上述指數，配合田間產量建立遙測水稻產量推估模式。

一、遙測水稻產量推估模式

遙測水稻產量推估模式爲利用田間產量資料與對應相同座標的影像波譜反射值進行統計分析，並利用線性多元回歸（linear multiple regression）模式推導出回歸方程式。

1.統計回歸分析

水稻產量和遙測影像的線性多元回歸模式推求模式如下：

$$即 Y = X\beta + \Sigma \qquad (4\text{-}1)$$

Y：水稻產量估測值；

X：多光譜影像各種指數值。

Σ：隨機誤差；

β：欲解之回歸係數。

其中的最小平方(least square)解爲

$$\beta = (X'X)^{-1}X'Y$$

選擇適於預測水稻產量推估的最佳資料，採用向後消去法逐步回歸分析(stepwise regression by backward elimination)，以決定最佳水稻產量預測模式。即進行統計分析時，有N個植被指數資料進入回歸分析中，當解求出後，回歸係數的顯著性由統計量t予以評估，其中$t_i = \beta_i / S_{\beta i}$，$S_{\beta i}$表回歸係數標準差(standard deviation)；當t=2.0時當作界限(threshold)，若統計量<2.0即剔除回歸分析中最不顯著的指數(Devoer，1982)，再重新回歸求解，並逐步剔除不顯著指數，直到剩餘資料的貢獻度均爲顯著。接著進行變異數分析，以判斷此回歸結果是否具有可行性；即依據F-Test在α=5%的水平顯著性、均方差評估推定值與實測值誤差量是否合理；最後考慮回歸方程式偏差量（bias）大小及回歸相關係數是否趨近於1。因此，理想化具預測能力的統計回歸模式應滿足(吳啓南等，1989)：(1)回歸相關係數趨近於1，(2)均方差接近於0，(3)F-test與F值在α=5%時之比值≧4.0，(4)統計量ti≧2.0，(5)標準化期望總推定差與推定係數個數比$C_k/(k+1)$≦1.0。

2. 遙測水稻產量推定

遙測水稻產量迴歸分析完畢後，即可依迴歸方程式輸入常數及顯著指數資料，並進行全面性水稻空間產量估算。估算方式如下：

$$Y = K_0 + K_1(B_1) + K_2(B_2) + \cdots \qquad (4\text{-}2)$$

Y：水稻產量估計值；

K_i：回歸係數

B_i：各顯著波段波譜亮度值或植被指數值

(4-2)式的Bi爲各顯著波段波譜亮度值或植被指數值，並不是各波段的輻射量；由於波譜亮度值與輻射量的換算爲一線性關係，所以利用波段波譜亮度值或植被指數並不會影響水稻產量推估結果。圖12即

爲遙測水稻空間產量推估處理流程圖。

二、水稻產量與多時SPOT影像線性回歸關係

遙測水稻產量推估是逐步加入最高分蘗期~乳熟期的四幅影像，以修正產量推估結果。其中不同時期影像波譜反射值爲取對應坵塊中心的三個像元，依加強配置濾波決定光譜反射值後推算的NDVI、RVI及TVI指數，再計算每個坵塊區分8小區坪割資料中的中間4小區平均值，代表水稻田間產量；再與上述植被指數進行多元回歸分析，並推導出最佳的方程式。

1. 多時段影像與水稻產量多元回歸分析結果

表3爲二期稻作內13幅影像中，組合不同時期多時段影像與水稻產量多元回歸分析結果；初步設定相關係數均在0.7以上，且符合肆.一.1所述之具有理想化的統計預測能力者。

如表3所示，四幅影像中各取兩個時段影像與水稻產量多元回歸分析結果，以結合①最高分蘗期、幼穗形成期~孕穗期的三種植被指數②幼穗形成期~孕穗期、乳熟期的TVI指數回歸分析結果較佳；其中前者回歸相關係數0.84，統計標準差0.47公噸/公頃，後者回歸相關係數0.79，統計標準差0.50公噸/公頃。採用三個時期組合影像與水稻產量回歸分析結果；評估較佳者爲①最高分蘗期、幼穗形成期~孕

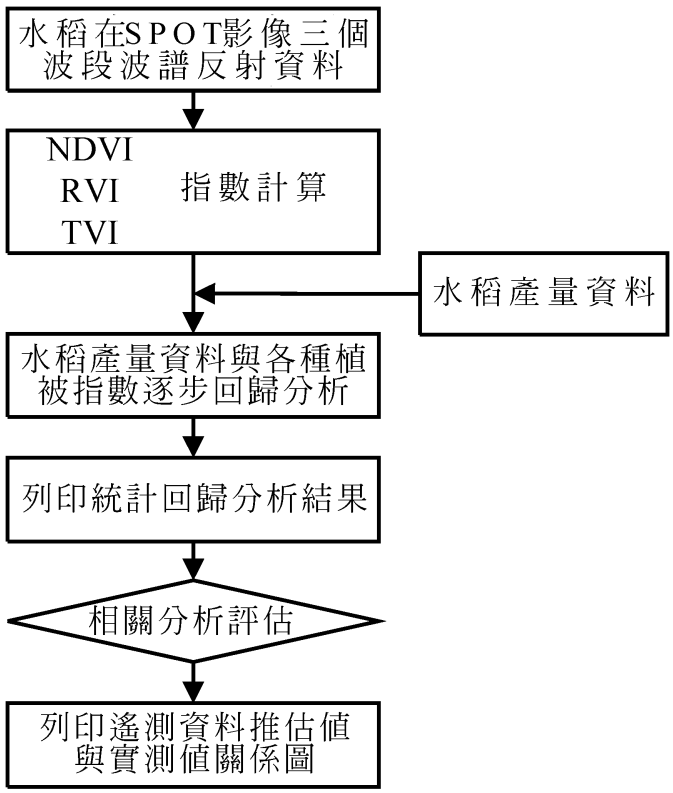


圖12. 遙測水稻空間產量推估處理流程圖。

穗期及乳熟期組合影像的RVI指數或TVI指數或綜合NDVI、TVI指數，回歸相關係數爲0.87、0.85及0.84，統計標準差爲0.42、0.46及0.47公噸/公頃。②最高分蘖期、幼穗形成期~孕穗期及抽穗期組合影像的NDVI與TVI指數，回歸相關係數0.84，統計標準差0.47公噸/公頃。③幼穗形成期~孕穗期、抽穗期及乳熟期組合影像的TVI指數，其回歸相關係數0.79，統計標準差0.50公噸/公頃。

另四個時段影像與水稻產量多元回歸分析結果，不論是各別植被指數、或同時結合NDVI、RVI與TVI三種指數，其回歸相關係數均大於0.89，統計標準差在0.39~0.41公噸/公頃之間；顯示以四個時期的影像推估水稻產量已趨於穩定，且具有較佳化的推估結果；圖13即爲四個時期影像與水稻產量回歸分析之實測值與推估值關係圖。

3. SPOT影像推估水稻空間產量

由於SPOT影像對應農試所精準農業實驗田後，每個坵塊水稻的純像元數不多；所以遙測影像推估的水稻產量，將坵塊範圍視爲基本計算單元。經以回歸方程式漸次推估二期稻作水稻產量，得到如圖14的SPOT影像推估農試所精準農業實驗田89年二期水稻產量空間分佈圖。

三、預估水稻產量最佳光學影像攝像時機

理論上以遙測光學影像預估水稻產量時，若有足夠的好品質影像，且足以反應水稻的反射光譜變化；則應加入預估水稻產量最佳光學影像攝像時機中。事實上，衛星並非每天均通過目標物上空進行攝像，且無雲或低霾的天氣無法確定；所以只就蒐集到的影像攝像日期對應水稻生育期別，以預估水稻產量最佳的影像攝像時

表3. 二期稻具理想化預估水稻產量的組合影像期別及迴歸分析結果。

對照水稻生育期別（2000年）	水稻期別	回歸參數	標準誤差	回歸相關係數
最高分蘖期、幼穗形成期-孕穗期	二	TVI	0.57	0.7058
最高分蘖期、幼穗形成期-孕穗期	二	NDVI、RVI TVI	0.47	0.8433
幼穗形成期~孕穗期、抽穗期	二	TVI	0.57	0.7058
幼穗形成期~孕穗期、乳熟期	二	TVI	0.50	0.7930
最高分蘖期、幼穗形成期-孕穗期、抽穗期	二	NDVI、TVI	0.47	0.8423
最高分蘖期、幼穗形成期-孕穗期、乳熟期	二	RVI	0.42	0.8687
最高分蘖期、幼穗形成期-孕穗期、乳熟期	二	TVI	0.46	0.8457
最高分蘖期、幼穗形成期-孕穗期、乳熟期	二	NDVI、TVI	0.47	0.8423
幼穗形成期~孕穗期、抽穗期、乳熟期	二	TVI	0.50	0.7930
最高分蘖期、幼穗形成期-孕穗期、抽穗期、乳熟期	二	NDVI	0.41	0.8871
最高分蘖期、幼穗形成期-孕穗期、抽穗期、乳熟期	二	RVI	0.39	0.9010
最高分蘖期、幼穗形成期-孕穗期、抽穗期、乳熟期	二	TVI	0.40	0.8938
最高分蘖期、幼穗形成期-孕穗期、抽穗期、乳熟期	二	NDVI、RVI TVI	0.40	0.8991

附註:NDVI:正規化差異植被指數值；RVI:比例植被指數；TVI:轉換植被指數

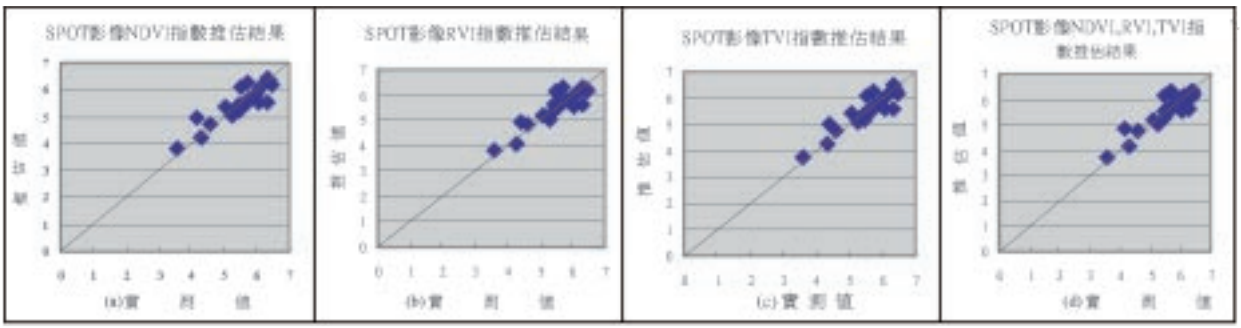


圖13. 四個時期影像與水稻產量迴歸分析之實測值與推估值關係圖。
(SPOT影像攝像日:2000/09/07、09/27、10/05、10/29)

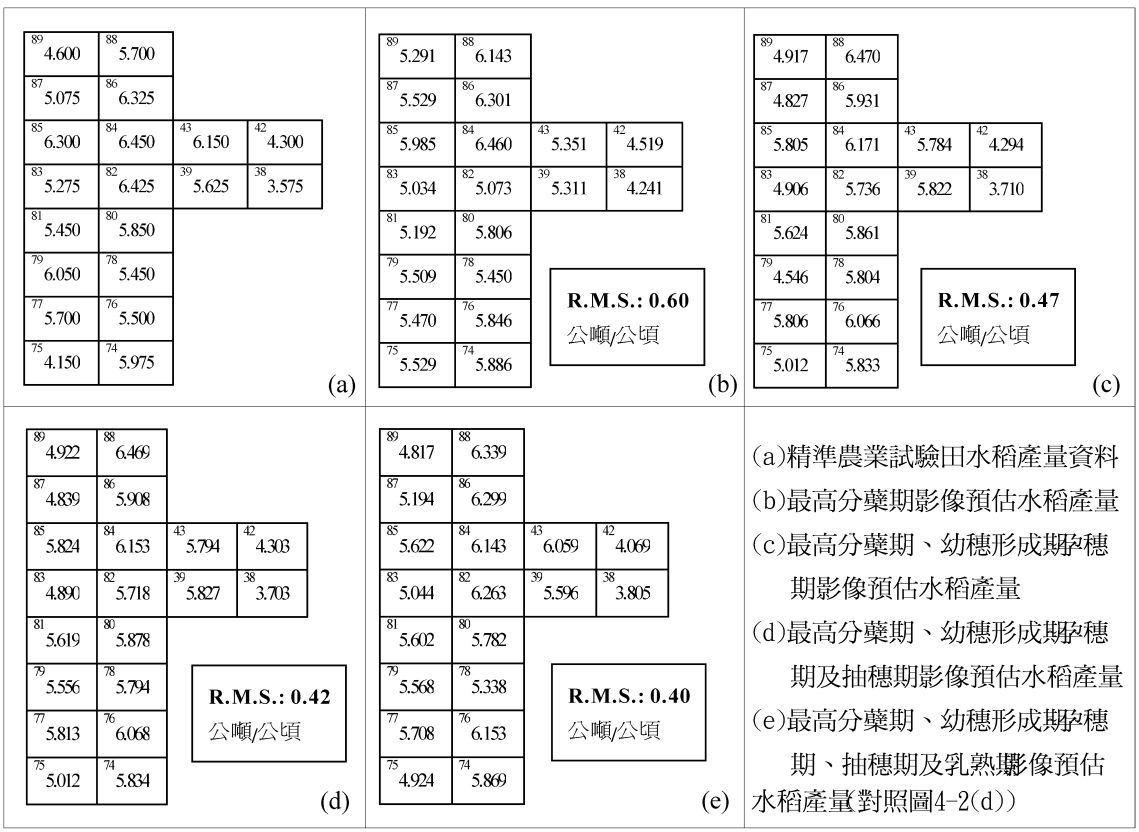


圖14. SPOT影像推估精準農業實驗田89年二期稻產量空間分佈。

機。

如肆.二.1節所述，單一時期SPOT影像以水稻最高分蘖後期預測產量能力較佳(回歸相關係數相對較高)。結合兩個時期影像以最高分蘖期、幼穗形成期~孕穗期的NDVI、RVI及TVI指數可得到較佳的預測結果(回歸相關係數0.84，統計標準誤差0.47公噸/公頃)；其次爲幼穗形成期~孕穗期、乳熟期的TVI指數(回歸相關係數0.79，統計標準誤差0.50公噸/公頃)。綜合三個時期影像以最高分蘖期、幼穗形成期~孕穗期、乳熟期的RVI指數預測結果較佳(回歸相關係數0.87，統計標準誤差0.42公噸/公頃)；另外在最高分蘖期、幼穗形成期~孕穗期、抽穗期的NDVI及TVI指數、及以乳熟期取代抽穗期的TV指數或NDVI、TVI指數，其回歸相關係數亦可達0.84，統計標準誤差則在0.46~0.47公噸/公頃之間。

結合四個時期影像預測水稻產量幾乎爲穩定狀態，無論以一種指數、或結合NDVI、RVI及TVI指數，其迴歸相關係數在0.89~0.90之間，而預估水稻的統計標準差則降至0.39~0.41公噸/公頃之間。

伍、討論與建議

本研究利用SPOT衛星影像及地面近紅外影像資料，分析水稻在正常環境之全生育期及逆境環境的光譜反射特性；比對其光譜反射的差異性後，建立遙測影像之正常與逆境之NDVI指數分佈。另結合農試所試驗田區產量資料，初步建立以多時段SPOT影像預估水稻產量之線性回歸關係式，並推估產量空間分佈。討論與建議如下:

(一) SPOT影像反應水稻植冠的光譜反射，綠光段在成活期到幼穗形成期間的反射值緩慢減少，抽穗期以後慢慢提昇；紅光段在插秧到幼穗形成期以前緩慢減少，幼穗形成期以後增加；近紅外光段在幼穗形成期以前快速增加，幼穗形成期~孕穗期達最高峰，抽穗開花期到乳熟期間光譜反射值緩慢下降；地面近紅外影像的光譜反射亦有類似的結果。

(二)兩期水稻在SPOT影像與地面近紅外影像的NDVI指數對應生長天數分佈曲線圖型相似；其中兩期水稻在SPOT影像的NDVI指數對照水稻生育期，極大值約在幼穗形成期~孕穗期生育期間的0.53。地面近紅外影像反應在一期稻的NDVI極值約在幼穗形成期的0.83，比SPOT影像約早15天；二期稻的NDVI極值與SPOT影像分析結果接近，對照水稻生育均在孕穗期，但極值爲0.91，遠比SPOT的NDVI指數極值大。

(三)比較二期作不同氮肥力區NDVI指數與正常生育水稻差異後，顯示氮變異區水稻在孕穗期以前的NDVI指數均較低，抽穗期以後的NDVI指數反而較高，反應在黃熟期的水稻生育有較晚成熟的現象。

(四)水稻產量推估採用逐步回歸分析向後消去法，並以具備(1)回歸相關係數趨近於1，(2)均方差接近於0，(3)F-test與F值在=5%時比值≧4.0，(4)統計量ti≧2.0，(5)標準化期望總推定差與推定係數個數比$C_k/(k+1)\leqq 1.0$等五種理想化預測能力的統計迴歸模式爲評估基準。評估結果顯示二期稻作期間，綜合最高分蘖期與幼穗形成期~孕穗期兩個時段影像，與水稻產量多元回歸分析的相關係數最高爲0.84，標準誤差爲0.47公噸/公頃；最高分

蘗期、幼穗形成期~孕穗期及抽穗期的組合影像，統計回歸相關係數爲0.84，標準誤差0.47公噸/公頃；以乳熟期影像取代抽穗期影像的回歸分析相關係數0.87，統計標準差爲0.42公噸/公頃；四個時期影像與水稻產量回歸分析的相關係數均大於0.89，統計標準差在0.39~0.41公噸/公頃之間。

(五)由於Duncan MS3100/CIR 多光譜近紅外成像儀三個獨立CCD的拍攝鏡頭角度(FOV)約爲20度，每幅影像的大小1392(pixels)*1039(lines)；因此，若拍攝高度低於380公尺時的影像的空間解像力均屬公分級。因此，若有穩定的高空平臺提供影像獲取，則可配合地面控制點的佈設，獲取較大範圍的影像，並配合影像的幾何校正，將資料轉換到實際的面狀資訊，以利進一步的分析與應用。

陸、引用文獻

1. 吳啓南、蕭國鑫、廖子毅、徐偉城、劉治中。2000a。運用空載多譜掃描及地面成像光譜儀監測水稻生育及自動辨識研究。工研院能資所063-89-W043研究報告，共70頁。
2. 吳啓南、陳大科等七人。2000b。遙測與資訊技術應用於精準農業先趨計畫-農作生長及農災監測。工研院能資所063-89-W022研究報告，共69頁。
3. 吳啓南、蕭國鑫等七人。1989。遙測資料應用於二仁溪及北港溪水污染調查報告。工研院能資所78污染與公害防治專案計畫報告，共141頁。
4. Devoer, J.L. 1982. Probability and Statistics for Engineering and the Sciences, CH 13, Wadsworth Inc., California, USA.
5. Maselli, F. and F. Rembold. 2001. Analysis of GAC NDVI Data for Cropland Identification and Yield Forecasting in Mediterranean African Countries. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 67 (5):593-602.
6. Prince, S.D. 1990. High temporal frequency remote sensing of primary production using NOAA AVHRR. Applications of Remote Sensing in Agriculture. M.D. Steven and J.A. Clark, editors. Butterworths London, U.K., 4:169~183.
7. Staggenborg S. and R. Taylor. 2000. Predicting Grain Yield Variability Using Infrared Image. 5th International Conference on Precision Agriculture.
8. Yang, C. and J. Everitt. 2000. Relationships Between Yield Monitor Data and Airborne Multispectral Digital Imagery. 5th International Conference on Precision Agriculture.

柒、誌 謝

本研究承農委會90農科-4.1.1-農-C2(01)之水稻生育狀況與環境監測系統~水稻生長、逆境及產量之監測與估測技術研究~SPOT衛星與地面近紅外成像儀之監測應用計畫、90農科4.1.2-林-R1(13)之農作生產及農災監測(稻熱病資料)計畫支援，農試所農場組提供89年水稻產量資料；另地面近紅外影像拍攝時，農試所農藝組作物逆境研究室高空作業車全力配合，本研究得以完成，深致謝忱。

2 Preliminary Study on Using Spaceborne and Ground-based Remotely Sensed Data for Rice Growth and Yield Monitoring

Chi-Nan Wu, Kuo-Hsin Hsiao, Wei-Chen Hsu, Tzu-Yi Liao, Ta-Ko Chen and Chi-Chnung Lau

Remote Sensing Lab., Energy & Resources Laboratories,
Industrial Technology Research Institute, Chutung, Hsinchu 310, Taiwan ROC
E-mail:690398@itri.org.tw

ABSTRACT

SPOT and Duncan MS3100/CIR imagery were adopted for the study of rice growth status and yield monitoring. The full-growth-period spectral responses of rice were characterized by NDVI distribution derived by using SPOT bands, and the NDVI responses of normal and leaf blast infected rice plants were compared. The NDVI, RVI and TVI indices derived from SPOT imagery during two cropping seasons in 2000 were used to correlate with the yields of the parcels by means of stepwise regression technique. Meanwhile, data from ground-based Duncan MS3100 imagery (G, R, NIR) were taken from the normal and varied nitrogen fertilized parcels to study their spectral response in the two cropping seasons of 2001. The results show that both NIR and NDVI indices rearched the maximum in panicle formation to grain filling stage, while their values were lower in the leat blast infected rice compared to the normal plants. When single or multiple SPOT images were employed to correlate with the yield of the first crop, the maximum regression coefficient (MRC) was 0.66. The MRC was increased to 0.71, 0.84 and 0.90 when the images from the maximum tillering stage, panicle formation stages, and grain-filling stage were incorporated into the analysis of the second crop, respectively. For the latter case, the standard deviation of the yield was 0.39 ton/ha. On the other hand, the images acquired by Duncan were gain adjusted and the NDVIs caculated from the data of the two cropping seasons in 2001 were analyzed. It was found that the maximum of NDVI was also located at the panicle formation to grain filling stage, and the NDVIs of varied nitrogen fertilized paddies were lower before grain filling stage, but higher than the normal paddy after heading stage. The preliminary results

suggest that the ground-based imagery can be used to distinguish the growth variation by the different rates of nitrogen fertilization.

Key words: Rice yield, Regression analysis, Growth monitoring.