

利用植被反射光譜特徵估測稻株氮素含量¹

張芳銘² 楊純明^{3,5} 張愛華⁴

摘 要

張芳銘、楊純明、張愛華。2004。利用植被反射光譜特徵估測稻株氮素含量。中華農業研究 53:63-74。

本研究旨在量測近地面水稻植被高解析反射光譜，篩檢與稻株氮素濃度(重量百分比)有關的光譜特徵，並建立估測氮素濃度的光譜遙測模式。試驗結果發現水稻植被反射光譜類似於一般綠色植物的典型光譜，而施用不等量氮肥將改變水稻光譜曲線。無論一、二期稻作，大致上稻株葉片及全株的含氮百分比均隨著生育的進展而出現下降的趨勢。經反射光譜之各窄波段反射比與含氮百分比進行簡單直線相關分析，顯示各窄波段反射比對於葉片與全株的氮素濃度具有相似的敏感反應，惟各窄波段之反應強度不一，且一、二期稻作之間存在差異。整體來說，植被反射光譜各窄波段反射比與氮素濃度的相關性在一期稻作低於二期稻作，然兩期作皆以近紅外光波段(740-1300 nm)至短波紅外光波段(1300-1800 nm)的相關性高於其他波段；其中一期稻作以 1240 nm 窄波段位置之相關係數絕對值最高，然決定係數(R^2)低於 0.18，顯示存在相當變異，二期稻作以 1208 nm 窄波段位置之相關係數絕對值最高， R^2 可達 0.70 以上。續以多元線性複迴歸分析篩檢出與葉片及全株含氮百分比有關的多個特徵窄波段，發現兩期稻作均可利用 403 nm、558 nm 及 1607 nm 之反射比組成最佳的三元直線複迴歸模式，進行對葉片及全株氮素濃度的估測。模式估測值對一期稻作之稻株葉片及全株含氮百分比的估測準確度分別提升至 $R^2=0.763$ ($P<0.0001$) 及 $R^2=0.738$ ($P<0.0001$)，對二期稻作則分別提升至 $R^2=0.790$ ($P<0.0001$) 及 $R^2=0.803$ ($P<0.0001$)。經比較這些三元直線複迴歸模式的估測值與實測值後，發現機差均方根(RMSE)均小於 0.548，斜率則均大於 0.94，顯示無論葉片或全株的氮素濃度，模式估測可達近於 1:1 的比較結果。

關鍵詞：植被反射比光譜、光譜特徵、氮素含量、相關係數、多元線性複迴歸模式。

前 言

精準農業(precision agriculture or precision farming)的精髓係所謂特定地點的考量(site-specific aspects)，也就是針對某特定地區各定點的差異予以差異性處理以求達到既定標準，這是一種符合立

1. 行政院農業委員會農業試驗所研究報告第 2183 號。接受日期：93 年 4 月 21 日。
2. 本所農藝組助理研究員。臺灣省 臺中縣 霧峰鄉。
3. 本所農藝組研究員。臺灣省 臺中縣 霧峰鄉。
4. 本所農化組助理研究員。臺灣省 臺中縣 霧峰鄉。
5. 通訊作者，電子郵件: cmyang@wufeng.tari.gov.tw；傳真機：(04)23396057。

足點平等為基準的農耕做法。以氮肥管理為例，即依照農田各定點農作物植體含氮狀態的變異，來施予差異量的氮肥，使達到既定的作物氮素需求標準。如此精準施用氮肥的方式，將可使得農田作物族群含氮狀態的空間變異趨向一致，進而獲得生產的充分表現、收穫物產量的穩定及品質的提升，並可因此減少或避免過量氮肥的使用，達到保育生態與保護生態的間接功效。

氮素的缺乏或過量是作物生產過程常發生的現象，作物植被因缺氮或高氮而出現的徵狀亦相當明顯與固定，因此吾人可藉由植被反射光譜的特徵來評估作物的含氮狀態(李等 2002；陳等 2001；蔡&陳 1966；Baret & Guyot 1991；Blackmer 1988；Gausman *et al.* 1969；Hergert & Ferguson 1997；Milton *et al.* 1991；Xue *et al.* 2004)。在這些徵狀當中，最重要者乃氮素供給與葉面積大小的密切關聯，以及氮素含量與葉綠素濃度間的顯著關係(李&楊 2002；吳&林 1968；楊 2003；楊等 2003a；蔡&陳 1966；Baret & Guyot 1991)。藉由植被反射光譜中與上述徵狀相關的波段分析結果，可以篩檢出特定的光譜特徵，並進一步建立反饋估測作物含氮狀態的光譜遙測模式(楊 2003b；Xue *et al.* 2004)。以水稻而言，在營養生長期間氮素供應不足將妨礙生長潛力的發揮，有效分蘗期間將因減少分蘗數而使穗數下降，在幼穗形成至孕穗期間則降低穗軸分枝及每穗穎花數，嚴重影響生產容量(朱 1988；吳&林 1968；Yoshida 1981)。所以，植體氮素的調節及人為氮肥的供應，對於包括水稻在內的許多農作物的生產管理是非常重要的。

傳統上作物植體中的含氮狀態係以化學分析予以估算，然而此種傳統方法需要重複的取樣，耗費相當的人力及時間進行分析工作。倘若需要進行全生育期間或廣大地區的取樣時，金錢、勞力與人力的支出將相當可觀，亦有緩不濟急之虞。因此，前述物理性量測植被反射光譜的遙測方法提供另一種選擇，能夠在短暫的時間內獲得非破壞性的快速偵測結果，尤其能夠擷取大面積的農田資訊及評估作物族群外觀形態與內在生理生化性質的特點(朱 1988；湯&侯 1969；楊&蘇 1997；Blackmer 1988；Gausman *et al.* 1969)，更是遙測技術獨具的功能和優勢。經由遙測農田在時間與空間上的變異分佈，吾人即可迅速的展開相對應的農場作業，也能夠因此實施合理而有效的精準管理。就氮肥的管理而言，在栽培作物之前可先予遙測評估土壤中可供吸收利用的礦物性氮素含量，再追蹤作物生長過程的含氮狀態，便能估算出農田各定點應當追施的氮肥用量，而實施氮肥的精準管理。本研究著重於作物生長過程含氮狀態的估測，試以建立適用的光譜遙測模式。

由於水稻是臺灣地區栽培面積最廣而產值最大的農作物，米食亦為民眾的傳統主食，如何實施精準的肥料管理，以適地適時適量的施用氮肥，仍為現行栽培水稻的重點課題。氮肥的精準管理不但可以提高稻作生產及施肥的經濟效益，更可以減少過量肥料造成的非點源污染(non-point source pollution)，具有維護生態與環境的積極意義(李等 2002)。惟在水稻生育前期不易以目視方法判別稻株的氮營養狀況，即便以肉眼主觀的判斷決定施肥量，也難以依照稻株需求均勻合宜的施用於稻田中。本研究採用光譜遙測技術偵測近地面水稻族群植被高解析(high resolution)反射光譜，篩檢與稻株氮素含量相關的光譜特徵，以建立評估含氮狀態的光譜特徵模式，期以助益於未來實施氮肥精準管理用途。

材料與方法

水稻栽培及氮素化學分析

本研究之田間試驗係於 2000 年至 2002 年在位於臺中縣霧峰鄉之行政院農業委員會農業試驗所農場(24°45'N, 120°54'E, 海拔高度 85 m)進行，參試水稻品種為臺農 67 號(*Oryza sativa* L. cv. TNG 67)，

分別在一、二期稻作期間量測水稻族群植被之反射光譜(350-2400 nm)，同時於每次量測光譜後實施取樣調查，化學分析葉片及全株(不含穗)的氮素濃度(含氮百分比)。

將 3-4 葉齡之水稻秧苗以機插方式移植於本田，每叢 3-5 株，南北向，行距約 0.3 m、株距約 0.18 m，栽植密度 185,000 hills ha⁻¹。一期作分別於 02/26/2001 及 02/27/2002 插秧，再於 06/27/2001 及 06/18/2002 收穫，二期作則分別於 08/07/2000 及 08/06/2001 插秧，而於 11/23/2000 及 11/28/2001 收穫。以施用不等量氮肥來產生不同的稻株生長速率、含氮百分比及收穫產量，計有 0、30、60、90、120 及 150 kg N ha⁻¹ 等六種氮肥處理，每處理小區面積約 400 m² (50 m × 8 m)。試區為一壤質土壤，屬於 Fluvuquentic Dystrochrept，試驗前測定之酸鹼值約 5.60，有機質 1.2%，而土壤之 Kjeldahl-N 為 755 ppm、有效性磷為 9.5 ppm、可交換鉀為 44.3 ppm、可交換鈣為 623 ppm、可交換鎂為 107 ppm。將各變級之氮肥量分成三等份，基肥(臺肥 39 號，N:P₂O₅:K₂O= 12%:18%:12%，臺灣肥料公司，高雄市)於插秧後一週內施用，第一次追肥(硫銨，21% N，臺灣肥料公司，高雄市)於抽秧後 2 週(二期作)或 3 週(一期作)施用，第二次追肥(穗肥，硫銨)於抽穗前 2 週(二期作)或 3 週(一期作)施用。

試驗期間發生嚴重病、蟲、草害時，依植物保護手冊(2002)噴施農藥，另注意灌溉控制，避免發生土壤缺水狀況。其中，丁基拉草(butachlor, 5%粒劑, 1.5 kg a.i. ha⁻¹)施用插秧後一週內，本達隆(bentazon, 44.1%溶液, 200X, 1.3 L a.i. ha⁻¹)施用於插秧後三週；施用有機氮劑培丹(cartap, 6%粒劑, 1.8 kg a.i. ha⁻¹)防治螟蟲(stem borer, *Rupella* spp.)，噴施加保扶(carbofuran, 40%水溶性粉劑, 800X, 0.48 L a.i. ha⁻¹)防治褐飛蟲[planthopper, *Nilaparvata lugens* (Stal)]及瘤野螟[leaf folder, *Cnaphalocrocis medinalis* (Guenee)]，以維粒黴素(Validamycin A, 50%溶液, 1000X, 0.5 L a.i. ha⁻¹)防治紋枯病(sheath blight, *Rhizoctonia solani* Kühn)。

每次水稻植被反射光譜量測後，即自量測標的樣區割取 6 叢稻株，區分為葉片(身)及莖稈(葉鞘加上莖)等二部分，秤取鮮重後，經 70°C 烘乾 72 h 後秤取乾重。將其磨粉過篩(0.1 mm)後的樣本，以修正的 Kjeldahl 方法(李等 2002)分析葉片及莖稈之含氮百分比(%)。即取前述各處理小區葉片或莖稈之磨粉樣本約 0.2 g，倒入 50 ml 分解瓶，加入 4 ml 之 36 N 濃硫酸及 0.2 g 催化劑(K₂SO₄:CuSO₄·5H₂O:Se= 50:10:1, w/w/w)，置於 800°C 電爐上加熱約 2 hr，至分解液呈淡青綠色時取出冷卻至室溫，加入去離子水(NANOpure, Ultrapure Water System, Barnstead/Thermolyne Inc., Iowa, USA)至 50 ml，均勻混合之。從中取 5 ml 稀釋液，加入 5 ml 之 10 N NaOH 溶液，以蒸餾方式收取冷凝之蒸氣於加溴酚藍之 4 ml 4%硼酸溶液。當顏色由紅轉成紫藍後，再以 0.01 N HCl 溶液滴定至中和，使顏色由紫藍轉成紅。如此，樣本之氮素含量(%)由下列公式計算： $N(\%)=0.01 \times W_N \times V \times (50 \text{ ml} / 5 \text{ ml}) \times (1/W) \times 100\%$ ，其中 V 為 HCl 之滴定量(ml)，W 為樣本重量(mg)，W_N 則為氮素原子量(14)。

水稻植被光譜量測

無論一、二期稻作，均自水稻插秧後約一個月起至收穫止，選擇晴朗時段(10:00 至 12:00 之間)，定期量測水稻族群植被之反射光譜。依照預備試驗結果，插秧後一月側視之植被覆蓋率近於 70%，此時之反射光譜曲線之大部分波段不受水田背景光譜之干擾，亦不影響植體含氮狀態之光譜特徵篩檢。光譜量測系統包括田間攜帶式高解析輻射光譜儀(spectroradiometer, model GER-2600, Geophysical & Environmental Research Corp., Millbrook, NY, USA)、10 度視角(FOV, field-of-view)掃描鏡頭、內建操作軟體之手提電腦、電池及電纜線等，掃描光譜區間 330-2600 nm。光譜儀本身具有二組分光儀組(spectrometers)，其一為 512 個矩陣排列之矽質感測器(silicon detectors)，量測波段介於 330-1050 nm，

光譜解析力達 1.5 nm；其二為 128 個硫化鉛質感測器(PbS detectors)，量測波段介於 1050-2600 nm，光譜解析力約 11.5 nm (GER-2600 User Manual 1996)。在實用上將窄波段之中心波長取至個位數，並選用 350-2400 nm 光譜範圍進行分析，以避開掃描光譜區間兩端之嚴重元件電磁干擾，使得窄波段數減至 537 個。

將光譜儀及各組件架設於可上下左右移動的高空作業車上，並將掃描鏡頭與水稻植被表層距離固定於約 5.8 m 位置，以垂直方式量測直徑約 1 m 的圓形面積(目標區)反射光譜。由內建於手提電腦之操作軟體控制量測流程，每次掃描均自動量測所有窄波段之輻射測值(radiance)，經內建校正值轉換成正確輻射值。每次掃描設定為 4 次連續測定之平均值，先後量測水稻植被及參考白板(reference panel, 'Spectralon', Labsphere, Inc., North Sutton, NH, USA)之反射輻射光譜後，由軟體計算反射比光譜曲線。每次每一處理小區皆逢機量測 15 個不同定點，取其等之平均值光譜曲線為當次量測代表，參與資料統計分析。

統計分析

試驗資料之統計分析由 Statistical Analysis System 8.1 版 (SAS 1998)及 Sigmaplot 2000 (SPSS ASC BV, The Netherlands)進行處理，先以虛擬變數檢(測)定(dummy-variable test)比較同期作之不同年份及不同期作之同一年份光譜資料間的差異，當檢定結果無顯著差異時，即將資料合併分析。在簡單直線相關分析上，求取稻株葉片(leaves)及全株(shoot)之氮素百分比與各窄波段反射比之相關係數(correlation coefficients)，並獲得相關強度曲線。續由此曲線篩檢最大相關係數絕對值所在窄波段，比較此特徵窄波段反射比與葉片及全株含氮百分比之互動關係。

在多元(變數)線性複迴歸分析(multiple linear regression analysis, MLR)上，以 SAS 中的共線性診斷(collinearity diagnostics)及不同變數組合決定係數(R-square selection)等程序篩選出若干合適的窄波段，再以逐步迴歸分析(step-wise selection)程序配合 Mallows' Cp criterion，將這些特定的光譜特徵組成最佳的多元線性複迴歸模式。本研究之最佳三元直線複迴歸模式如下列： $Y_3 = a + bR_{\lambda_1} + cR_{\lambda_2} + dR_{\lambda_3}$ ，其中依變數(dependent variable, Y_3)為葉片或全株之含氮百分比，獨立變數(independent variables, R_{λ_1} , R_{λ_2} , R_{λ_3})為水稻植被反射光譜中篩選出之特徵窄波段(λ_1 , λ_2 , λ_3)反射比。機差均方根(root mean square error, RMSE)係由以下公式計算：

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{k} \sum_{i=1}^k (X_i - \hat{X}_i)^2}$$

用以比較實測值(X_i)與估測值(\hat{X}_i)之間評估精度。

結 果

本研究量測的水稻植被反射光譜，類似於典型綠色植物光譜的變化趨勢，惟受到施用不等量氮肥的改變(資料未列出)。尤其在氮肥多寡直接影響光合作用高低的可見光區及間接影響植被覆蓋大小的近紅外光區，呈現較明顯的反射比差異。經分析稻株葉片及全株的含氮百分比，顯示兩期稻作生育期間的氮素濃度隨著生育進展而下降(圖 1)，換言之，單位重量的稻株含氮百分比隨株齡的增加而減少。

將營養生長期至生殖生長期分別量測的水稻植被光譜範圍(350-2400 nm)各窄波段的反射比與圖 1 所列稻株葉片及全株含氮百分比進行簡單直線相關分析，發現各窄波段反射比與稻株含氮百分比的相關性並不一致，惟對葉片及全株含氮百分比的相對敏感程度雷同(圖 2)，且皆以近紅外光波段(740-1300 nm)及短波紅外光波段(1300-1800 nm)的相關性較高。但是，一期稻作與二期稻作的相關強度不一，大體上一期稻作之反射光譜各窄波段反射比與含氮百分比的相關性低於二期稻作者；其中，相關係數在一期稻作介於-0.5 至 0.5 之間，在二期稻作則介於-0.75 至 0.5 之間。

在近紅外光波段至短波紅外光波段之中，與葉片及全株含氮百分比之相關係數絕對值最大的窄波段位置，在一期稻作落於 1240 nm，適用一次直線關係，決定係數(R^2)分別為 0.176 ($P<0.005$)及 0.146 ($P<0.01$)；在二期稻作則落於 1208 nm，適用於二次曲線關係， R^2 分別為 0.698 ($P<0.0001$)及 0.730 ($P<0.0001$)(圖 3)。

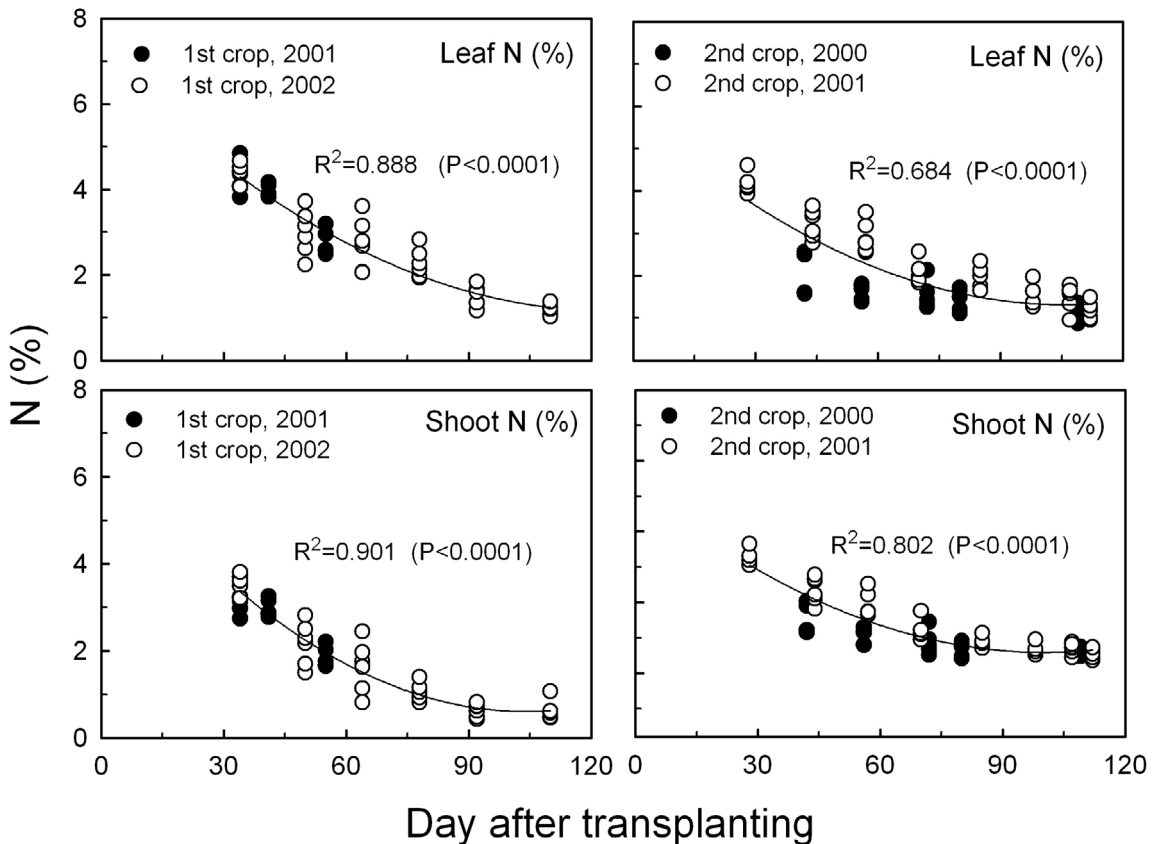


圖 1. 生長於 2000-2002 年兩期稻作期間施用不等量氮肥處理(0, 30, 60, 90, 120, and 150 kg ha⁻¹)之稻株葉片及全株含氮百分比隨著生育進展的變化趨勢。

Fig. 1. Temporal changes of nitrogen concentrations in leaves and shoot for rice plants grown under different nitrogen fertilizer application rates (0, 30, 60, 90, 120, and 150 kg ha⁻¹) in the cropping seasons of 2000-2002.

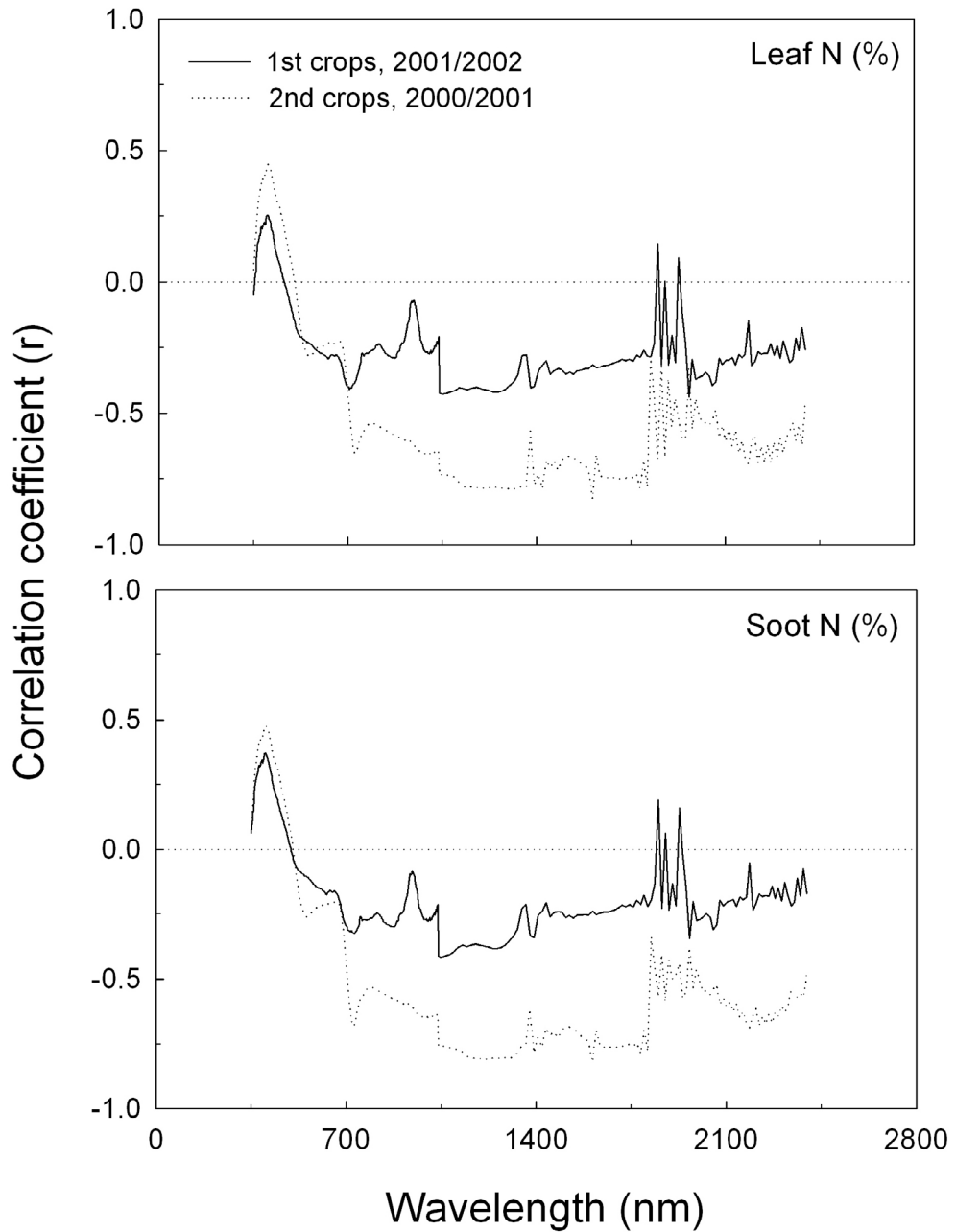


圖 2. 生長於 2000-2002 年兩期稻作期間施用不等量氮肥處理(0, 30, 60, 90, 120, and 150 kg ha⁻¹)之稻株葉片及全株含氮百分比與植被反射光譜各窄波段反射比之簡單直線相關強度曲線。

Fig. 2. Correlation intensity curves between nitrogen concentrations in leaves and shoot and spectral reflectance of canopy for rice plants grown under different nitrogen fertilizer application rates (0, 30, 60, 90, 120, and 150 kg ha⁻¹) in the cropping seasons of 2000-2002.

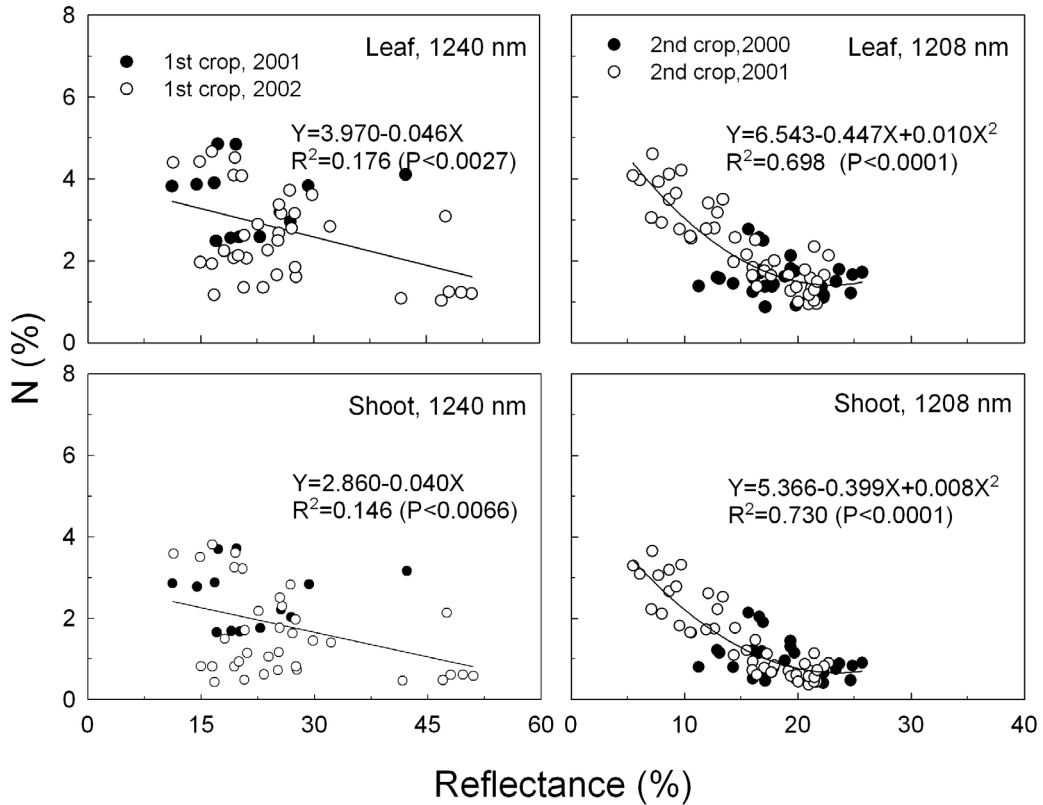


圖 3. 生長於 2001-2002 年一期稻作和 2000-2001 年二期稻作之稻株葉片及全株含氮百分分別與 1240 nm(一期作)及 1208 nm(二期作)窄波段反射比之關係。

Fig. 3. Changes of nitrogen concentration in leaves and shoot to spectral reflectance at 1240 nm and 1208 nm for rice plants grown in the first cropping seasons of 2001-2002 and the second cropping seasons of 2000-2001, respectively.

又由多元線性複迴歸分析結果，篩檢出最佳三元直線複迴歸模式的植被光譜特徵窄波段，如表 1 所示。這些三元直線複迴歸模式提高了對稻株氮素濃度估測的準確度，即增進了對稻株葉片及全株含

表 1. 生長於 2000-2002 年兩期稻作期間量測之水稻植被反射光譜特徵窄波段與稻株葉片及全株含氮百分比之多元線性複迴歸分析結果

Table1. Summary of multiple linear regression analysis for relationships between nitrogen concentration in leaves and shoot and spectral characteristics of canopy reflectance spectra for rice plants grown in the cropping seasons of 2000-2002

Item	$Y=a+bR_{\lambda_1}+cR_{\lambda_2}+dR_{\lambda_3}^z$				R^2	P
	a	b	c	d		
First crops, 2001 and 2002						
Leaf N (%)	1.783	1.828	-0.804	0.091	0.763	<0.0001
Shoot N (%)	0.560	1.745	-0.703	0.077	0.738	<0.0001
Second crops, 2000 and 2001						
Leaf N (%)	2.632	0.874	-0.308	-0.097	0.790	<0.0001
Shoot N (%)	1.673	0.863	-0.293	-0.082	0.803	<0.0001

^z Y represents leaf nitrogen or culm nitrogen; $\lambda_1=403$ nm, $\lambda_2=558$ nm, $\lambda_3=1607$ nm.

氮百分比變異的估測。無論一、二期稻作，403 nm、558 nm 及 1607 nm 等三窄波段的反射比組合皆可適用，一期稻作的 R^2 分別為 0.763 及 0.738，二期稻作的 R^2 則分別為 0.790 及 0.807。而這些複迴歸模式的估測值與實測值的關係十分密切，斜率大於 0.94，機差均方根(RMSE)值小於 0.548(圖 4)。

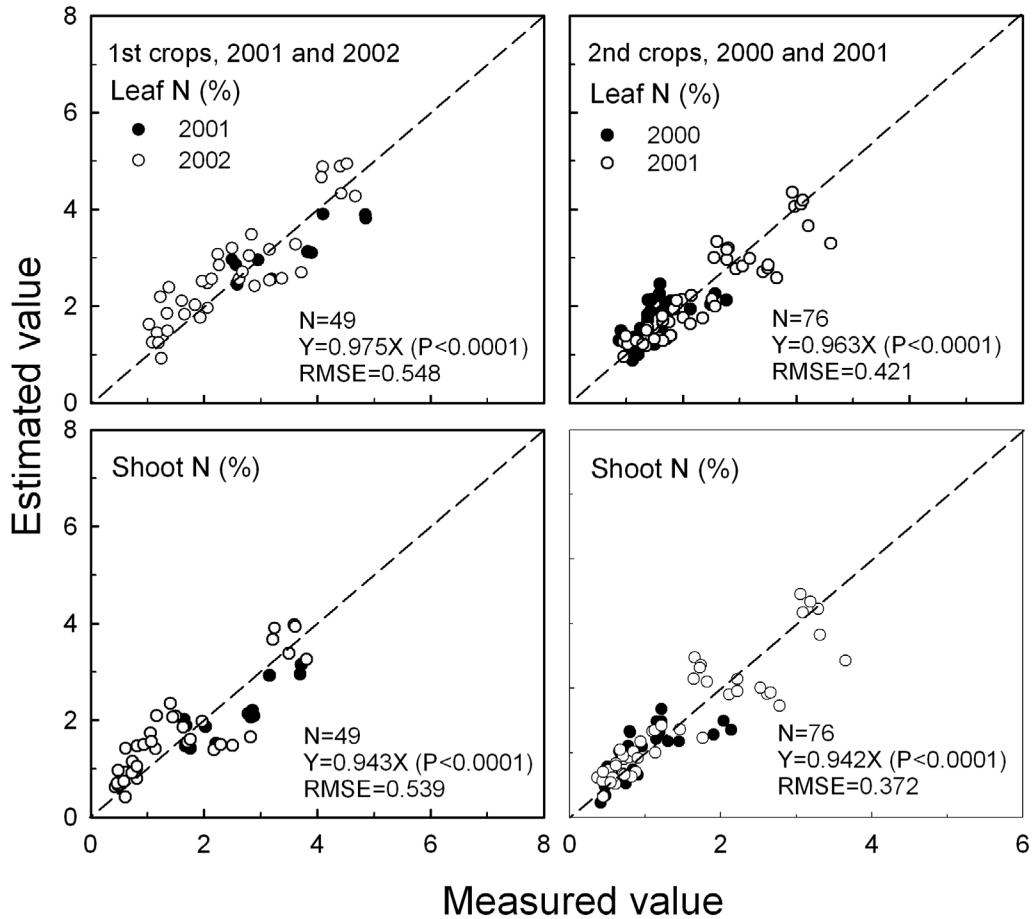


圖 4. 生長於 2000 年至 2002 年兩期稻作期間之稻株葉片及全株含氮百分比實測值與最佳三元線性複迴歸模式估測值之間的比較。

Fig. 4. Comparisons between the estimated values, from the best three variables linear regression models, and the measured values of nitrogen concentrations in leaves and shoot for rice plants grown in the cropping seasons of 2000-2002.

討 論

作(植)物植被的顏色、光澤、組織結構、組成成分及生理代謝的實際表現，將影響其反射光譜特性，而族群幾何構造及周遭環境隨著時空的變異，亦將綜合反應在反射光譜質與量上的變化。一般綠色植物的健康植株，因為含有豐富的葉綠體(素)及其他色素(包括胡蘿蔔素、花青素及葉黃素等)，因此在可見光區(400-700 nm 或 400-740 nm)有超過 80% 的吸收率，惟因色素與細胞壁在近紅外光區

(740-1300nm)幾乎不吸收，植被反射光譜在近紅外光區會出現一個反射高峰區(陳等 2001；Blackmer *et al.* 1996；Gausman 1982；Gausman *et al.* 1969；Sinclair 1971)。又由於葉綠素 a 及葉綠素 b 的主要吸收峰位於可見光區的藍光波段及紅光波段，分別以 450 nm 及 670 nm 為中心，所以植被約在 550 nm 附近會有較強的反射值(陳等 2001；楊&蘇 1997；Arnon 1949)。

本研究量測的水稻植被反射光譜，具有類似於上述綠色植物光譜的變化趨勢及陳等(2001)在水稻植被光譜量測之試驗結果，但是也發現施用不等量氮肥將改變光譜曲線(資料未列出)，如李等(2002)試驗之不同氮肥用量對稻株植被反射光譜的影響。許多文獻報告均顯示，施用高量氮肥將促進植被覆蓋，使其在可見光區因旺盛的光合作用而具有較低的反射比，在近紅外光區則因複雜植叢的多重反射與折射作用而具有較高的反射比；反之，缺氮的作物植被在可見光區的反射會因為葉綠素濃度的降低而增加，在近紅外光區的反射卻因為葉片細胞層數的減少而降低(Baret & Guyot 1991；Guyot 1990；Hergert & Ferguson 1997；Milton *et al.* 1991；Sinclair 1971)。因此，可見光及近紅外光波段的起伏變化，可作為作物植株氮素狀態的初步判斷。

從稻株葉片及全株的含氮百分比在生育期間的改變，發現無論一、二期稻作，氮素濃度均隨著生育的進展出現下降的趨勢(圖 1)。顯然地，稻株植體的氮素總量雖因體積的加大而增加，就單位重量而言，稻株的含氮百分比將隨株齡的升高而減少。推測在生育前期可視為發展營養器官(如葉、莖)的容積導致單位重量濃度隨著生長進展而逐漸下降，生育後期則更分別因為轉移至生殖器官(如穗)及老化組織枯萎掉落損失等，導致營養器官單位重量濃度的降低。

在量測的水稻植被光譜範圍內(350-2400 nm)，各窄波段之反射比與稻株葉片及全株的含氮百分比關係，可利用簡單直線相關強度分析，得到水稻全生育期間各窄波段與氮素含量的相關強度(圖 2)。大致上，葉片及全株含氮百分比與反射比光譜之相關強度曲線變化雷同，顯示各窄波段反射比對於葉片及全株的氮素濃度具有相似的敏感反應，皆以近光外光波段(740-1300 nm)及中紅外光波段(1300-1800 nm)的相關性較高，但是一期稻作與二期稻作的相關強度不一。整體來說，一期稻作的反射光譜各窄波段反射比與含氮百分比的相關性(相關係數介於-0.5 至 0.5 之間)低於二期稻作者(相關係數介於-0.75 至 0.5 之間)。在相關性較高的近紅外光波段至短波紅外光波段，一期稻作以 1240 nm 窄波段位置的反射比與葉片及全株的含氮百分比之相關係數絕對值最大，適用於一次直線關係(R^2 分別為 0.176 及 0.146)(圖 3)。惟因決定係數(R^2)不高，顯示具有相當大的變異，不適合僅以一次迴歸模式即可應用。二期稻作則以 1208 nm 窄波段位置的反射比與稻株葉片及全株的含氮百分比之相關係數絕對值最大，適用於二次曲線關係(R^2 分別達到 0.698 及 0.730)。因此，欲以單一窄波段反射比來估測與追蹤一期稻作的植株氮素濃度，將因變異範圍太大而不宜；二期稻作期間，若選取 1208 nm 窄波段，則可以獲得對葉片及全株的氮素濃度近 70%之估測準確度。由於兩期作之間的不同，反應各期作對氮素吸收與利用的效率並非一致，而在生長上的明顯差異亦造成含氮百分比的不同，總此使得一、二期稻作之最大相關窄波段位置並不相同。

本研究續利用多元線性複迴歸分析方法，期以篩檢出更多相關的光譜特徵窄波段，組合成複迴歸模式來提高對氮素濃度估測的準確度。由表 1 可知，無論一期稻作或二期稻作，均可建構出最佳的三元直線複迴歸模式，增進對稻株葉片及全株含氮百分比變異的估測。當選用 403 nm、558 nm 及 1607 nm 等三窄波段的反射比組合，對一期稻作植株葉片及全株的含氮百分比變異估測的準確度(R^2 表示)，將分別由 0.176 及 0.146 上升至 0.763 及 0.738，二期稻作植株的葉片及全株則分別由 0.698 及 0.730 升高至 0.790 及 0.807。經比較這些三元直線複迴歸模式的估測值與實測值後，發現二者關係十分密切，斜率大於 0.94，而機差均方根 (RMSE) 值均小於 0.548(圖 4)。根據此一結果，在本項研究之試

驗資料範圍內(低於 5%含氮百分比)，無論葉片或全株的含氮百分比，模式估測準確度近於 1:1 之比較。

綜合各項試驗結果，顯示可藉由簡單直線相關強度分析，篩檢出反射光譜中與稻株氮素濃度相關性最高的單一特徵窄波段。並可再藉由多元線性複迴歸分析，篩檢出與氮素濃度相關的多個特徵窄波段，組合成最佳的多元直線複迴歸模式，提高對稻株含氮狀態估測的準確度。本研究結果證明了利用光譜遙測於估測及追蹤稻株含氮狀態的可行性，也彰顯了光譜遙測於水稻氮肥精準管理的應用潛力。然而，為了增進光譜遙測模式對不同環境的適用性，未來應當增加更多栽植環境條件的量測資料，找出更適當的光譜特徵波段及數目，使建立的光譜遙測模式更能掌握氮素濃度的變異。其次，由於抽穗前後出現的明顯形態上差異，若能以抽穗期為界將水稻生育期切割成營養生長相(vegetative growth phase)及生殖生長相(reproductive growth phase)，將可能篩檢出不同生長相更直接相關的光譜特徵波段，進而提高光譜遙測模式的估測準確性與精確性。

誌 謝

本研究承蒙行政院農業委員會和農業試驗所經費(89 遙測-4.1-糧-41(Z)，90 農科-4.1.1-農-C2(Z)，91 農科-5.1.3-農-C2(Z)，92 農科-1.1.6-農 C1(Z))支持，謹以表示由衷感謝。

引用文獻

- 朱德民。1988。作物生產過程。國立中興大學出版，台中市。639 pp.
- 李裕娟、楊純明。2002。水稻單葉光譜特徵與葉綠素濃度之關係。航測及遙測學刊 7(4):41-52。
- 李裕娟、楊純明、張愛華。2002。施用氮肥對水稻植株氮素、葉綠素及植冠反射光譜之影響。中華農業研究 51:1-14。
- 吳育郎、林富雄。1968。水稻品種特性與肥料反應。科學農業 16(9-10):251-254。
- 陳榮坤、楊純明、張芳銘、蘇慕容。2001。水稻不同期作植被反射光譜之動態分析。中華農業氣象 8:77-92。
- 湯文通、侯倫。1969。水稻之生長原理(4)。科學農業 17(7,8):235-240。
- 楊純明、蘇慕容。1997。水稻族群植被反射光譜之分析。中華農業氣象 4(2):87-95。
- 楊純明。2003。利用葉綠素計估測水稻植株葉綠素及氮素。中華農業研究 52:73-83。
- 楊純明、沈百奎、余志儒、羅朝村、吳正宗。2003a。利用葉綠素測計估測莧菜植株葉綠素及氮素狀態。中華農業研究 52:105-116。
- 楊純明、吳正宗、沈百奎、余志儒、羅朝村、申雍。2003b。利用植被光譜特徵估測莧菜植株生長及氮素狀態。中華農業研究 52:267-289。
- 費雯綺、王玉美。2002。植物保護手冊。行政院農委會農業藥物毒物試驗所出版。台中。791 pp.
- 蔡文福、陳炯崧。1966。水稻幼穗形成期及齊穗期施用氮肥對收量及其構成因素之影響。科學農業 14(1-2):53-54。
- Arnon, D. I. 1949. Copper enzymes in isolated chloroplasts: Polyphenoloxidases in *Beta vulgaris*. Plant Physiol. 24:1-15.
- Baret, F. and G. Guyot. 1991. Potentials and limits of vegetation indices for LAI and APAR assessment. Remote Sens. Environ. 35:161-173.

- Blackmer, A. M. 1988. Using precision farming technologies to improve management of soil and fertilizer nitrogen. *Aust. J. Agric. Sci.* 49:555-564.
- Blackmer, T. M., J. S. Schepers, G. E. Varvel, and E. A. Water-Shea. 1996. Nitrogen deficiency detection using reflected shortwave radiation from irrigated corn canopy. *Agron. J.* 88:1-5.
- Gausman, H. W. 1982. Visible light reflectance and absorptance of differently pigmented cotton leaves. *Remote Sens. Environ.* 13:233-238.
- Gausman, H. W., W. A. Allen, V. I. Myers, and R. Cardenas. 1969. Reflectance and internal structure of cotton leaves, *Gossypium hirsutum* L. *Agron. J.* 61:374-376.
- Guyot, G. 1990. Optical properties of vegetation canopies. p.19-43. *in: Applications of Remote Sensing in Agriculture.* (Steven, M. D. and J. A. Clark, eds.) Butterworth publishers Ltd., London.
- Hergert, G. W. and R. B. Ferguson. 1997. The impact of variable rate N application on N use efficiency of furrow irrigated maize. p.297-305. *in: Precision Agriculture.* (Stafford, J.V. ed.) BIOS Scientific Publishers Ltd., Oxford, U. K.
- Milton, N. M., B.A. Eiswerth, and C. M. Ager. 1991. Effect of phosphorus deficiency on spectral reflectance and morphology of soybean plants. *Remote Sens. Environ.* 61:319-345.
- Sinclair, T. R., R. M. Hoffer, and M. M. Schreiber. 1971. Reflectance and internal structure of leaves from several crops during a growing season. *Agron. J.* 63:864-868.
- Xue, L., W. Cao, W. Luo, T. Dai, and Y. Zhu. 2004. Monitoring leaf nitrogen status in rice with canopy spectral reflectance. *Agron. J.* 96:135-142.
- Yoshida, S. 1981. *Fundamentals of Rice Crop Science.* IRRI, Los Banos, Philippines. 269 pp.

Estimation of Nitrogen Content in Rice Plants from Spectral Characteristics of Canopy Reflectance Spectrum¹

Fan-Ming Chang², Chwen-Ming Yang^{3,5} and Ay-Hwa Chang⁴

Summary

Chang, F. M., C. M. Yang, and A. H. Chang. 2004. Estimation of nitrogen content in rice plants from spectral characteristics of canopy reflectance Spectrum. *J. Agric. Res. China* 53:63-74.

This study was to measure near-ground remotely sensed canopy hyper-spectral reflectance data during the growing periods under varied treatments of nitrogen (N) fertilizer and to identify spectral characteristics in related to N concentration so as to establish spectral models for estimating N status in rice plants. Results indicated that reflectance spectra of rice canopy were similar to other green plants. Applications of different amounts of N fertilizer changed the spectral patterns, but did not change the decreasing trend of N concentrations in leaves and shoot following plant development in both cropping seasons. Correlation intensity curve between spectral reflectance in range of 340-2400 nm and N concentration was similar in leaves and shoot, suggesting that responses of reflectance along the spectral domain to N concentrations in leaves and shoot were quite alike. However, the correlation intensity curve of the first crops was not conformed to that of the second crops, and varied correlation coefficients existed in different narrow bands. In general, correlation coefficients from near-infrared (740-1300 nm) to short-wave infrared region (1300-1800 nm) had larger values than the other bands. Change of correlation coefficient was in between -0.5 and 0.5 in the first crops, with the maximum absolute value of correlation coefficient located at 1240 nm ($R^2 < 0.18$). The values of correlation coefficient in the second crops had greater variability, with the maximum absolute value found at 1208 nm ($R^2 > 0.70$). Results also indicated that estimation of N concentrations in leaves and shoot of rice plant may be improved by using multiple linear regression (MLR) models. The spectral wavebands suitable for the best three variables MLR models were 403 nm, 558 nm and 1607 nm for both cropping seasons. The slopes for the relationship between the estimated and the measured values of N concentrations were greater than 0.940, with the root mean square error (RMSE) less than 0.548.

Key words: Canopy reflectance spectrum, Spectral characteristics, Nitrogen content in rice, Correlation coefficient, Multiple linear regression model.

-
1. Contribution No.2183 from Agricultural Research Institute, Council of Agriculture. Accepted: April 21, 2004.
 2. Assistant Research Fellow, Agronomy Division, ARI, Wufeng, Taichung, Taiwan, ROC.
 3. Senior Agronomist/Research Fellow, Agronomy Division, ARI, Wufeng, Taichung, Taiwan, ROC.
 4. Assistant Research Fellow, Agricultural Chemistry Division, ARI, Wufeng, Taichung, Taiwan, ROC.
 5. Corresponding author, e-mail: cmyang@wufeng.tari.gov.tw ; Fax: (04) 23396057.