中華農業氣象 (Chinese J. Agromet.) 10 : 29 - 38, 2003

研究報告(Original Paper)

# 水稻植被反射光譜之特徵及變異

陳榮坤　楊純明*

行政院農業委員會農業試驗所農藝組

## 摘要

本研究於 2000-2002 年 (計有四期稻作) 在行政院農業委員會農業試驗所農場進行田間試驗，量測近地面水稻全生育期之植被高解析反射光譜 (350-2400 nm)，以探討不同期作及年度間反射光譜之特徵及變異，提供光譜地眞資料作爲精準管理等用途。爲顯示水稻全生育期之反射光譜變化輪廓，乃將高解析植被光譜以三維動態曲線展現，發現其與一般綠色植被光譜曲線具有相似性。將光譜區分爲紫外光 (UV, 350-400 nm)、可見光 (Vis, 400-740 nm)、近紅外光 (Nir, 740-1300 nm)、短波紅外光 (Swir, 1300-1800 nm) 及中紅外光 (Mir, 1800-2400 nm) 等五寬頻波段比較，結果以近紅外光波段在全生育期的變異最大，紫外光波段最小。續將可見光進一步細分爲紅光 (640-740 nm)、橘光 (585-640 nm)、黃光 (560-585 nm)、綠光 (490-560 nm)、藍光 (425-490 nm) 及紫光 (400-425 nm) 等波帶，發現以紅光帶變異較高，紫光帶變異較低。從光譜曲線篩檢動態變異的綠光波帶峰點 ($R_{GREEN}$)、紅光波帶谷點 ($R_{RED}$) 及近紅外光波段頂點 ($R_{NIR}$) 等三項光譜特徵反射比，由其等在生育期間的變化可以反應出在不同期作及年度的差異。此三項光譜特徵之間的比值、$R_{NIR}$-$R_{RED}$、標準差植被指數 (NDVI) 及紅光臨界區間與斜率等，在生育期間均呈現二次曲線分佈，顯示其等與生長之間具有互動關係，具有作爲監測水稻生長狀態的應用潛力。

關鍵字： 水稻、植被反射光譜、光譜特徵、光譜指數、期作。

# Characteristics and Variations in Canopy Reflectance Spectra of Rice

Rong-Kuen Chen and Chwen-Ming Yang* (Division of Agronomy, Taiwan Agricultural Research Institute,Wufeng, Taichung Hsien, Taiwan, ROC )

**ABSTRACT :** Field experiments were conducted in the experimental field of Taiwan Agricultural Research Institute to obtain ground-based remotely sensed rice canopy reflectance spectra (350-2400 nm) of high resolution in the cropping seasons in 2000-2002. Characteristics of spectra were investigated and variations in different cropping seasons and years were studied to provide the ground truth for further precision management applications. The three dimensional graphs were plotted to show changes of spectral curves during the growing periods

本文研究承蒙行政院農委會農委會 (89 遙測 -4.1- 糧 -41(4)) 及農委會農業試驗所 (90 農科 -4.1.1- 農 -C2 (1) 及 91 農科 -5.1.3- 農 -C2(1)) 之計畫經費支持，特以致謝；農試所農場組對試驗田區之管理，謹一併致上由衷謝忱。

* 通信作者，E-mail: cmyang@wufeng.tari.gov.tw，電話: 04-2330-2301分機135。

and between seasons. As indicated, the reflectance spectra of rice canopy were similar to those from other green plants. By dividing the spectrum into 5 broad bands, the greatest variation was observed in the near-infrared (Nir, 740-1300 nm) and the smallest variation was in the ultraviolet (UV, 350-400 nm). By dividing the visible light into red band (Red, 640-740 nm), orange band (Orange, 585-640 nm), yellow band (Yellow, 560-585 nm), green band (Green, 490-560 nm), blue band (Blue, 425-490 nm) and violet band (Violet, 400-425 nm), it showed that red band had the highest variation and violet band had the lowest variation. Reflectance of the spectral characteristics at green band maximum ($R_{GREEN}$), red band minimum ($R_{RED}$), and infrared peak ($R_{NIR}$) showed a curvilinear variation during the growth and a difference between seasons. Ratios from these three characteristics, NDVI, $R_{NIR}$-$R_{RED}$, red edge slope and red edge span were also changed curvilinearly during rice growth. Variations of these parameters have their physico-physiological meanings and are related to plant growth and environmental influences. The connections to the morphological progresses of rice plants make these parameters potential in applications for growth status monitoring.

Key words： Rice, Canopy reflectance spectrum, Spectral characteristics, Spectral index, Cropping season.

## 前　言

遙測技術是監測農作物生長狀態的良好工具，具有快速、大面積、非破壞及即時偵測等特點，可以適當反映出作物的植被種類、位置、分佈與生長狀態，同時也可顯示出當時的環境條件及其影響。在農業領域中，許多研究均指出植被反射光譜與作物生長狀態之間的密切關係 (Bouman, 1995; Christensen, 1991; Jacobsen *et al.*, 1995; Wiegand *et al.*, 1992)，因此亦被廣泛的利用於生產管理體系。尤其近年來高解析光譜遙測技術的精進發展，更增強了光譜與幾何解析力，大幅提升了對輻射和影像的質量分析及判讀能力，使得農作物的精準管理成爲可行 (楊及林，2002、2003)。

在田間正常栽培狀況下，太陽輻射是綠色作物最主要的能量來源，當太陽輻射照射至作物植被 (或葉片) 表面時，將會有反射、吸收及穿透等三種運動方式，復顯現植被反射、吸收及穿透等三項光學性質。影響入射光輻射運動的因子，除了光輻射的波長之外，構成植被的葉片角度、葉面粗糙程度及葉片化學成分等的差異也是重要成因。在常用的作物植被反射光譜中，高能的紫外光 (300-400 nm, ultraviolet) 極易穿透葉片而僅有少量的反射及吸收，可見光波段 (400-740 nm, visible) 能階適於光合作用，由綠色植被中的色素強烈吸收而表現出極低的反射及穿透，近紅外光波段 (740-1300 nm, near-infrared) 則因受到植體及植被結構的散射而出現高量的反射比 (Gausman, 1982; Hoffer, 1978)。色素中的葉綠素 a 及葉綠素 b 通常是最主要的光輻射吸收物質，尤以介於 400-500 nm 的藍光帶及 600-700 nm 的紅光帶吸收最爲強烈 (Belward, 1991)，490-560 nm 的綠光帶相對吸收較少而造成植被呈現綠色。短波紅外光 (1300-1800 nm, short-wave infrared) 以上的紅外光波段受到植體水分的吸收，因此葉片水分量的多寡是影響其光譜反射的主因 (Belward, 1991; Puritch, 1981)，而葉片表面的角質 (lignin) 厚度亦會干擾其變化

(Gao and Goetz, 1995)

水稻 (*Oryza sativa*) 是臺灣地區最重要也是栽培面積最大的糧食作物，一般以每年兩期稻作栽培。自秧苗移植至田間後，水稻於營養生長期逐漸發育茁壯而於幼穗形成期起進入生殖生長期，再於抽穗開花結實後生長勢日漸衰退直至收穫。水稻全生育期間的伸長、分蘗、抽穗、穀實充實及顏色轉化等的形態改變，不但影響族群植被的光學性質，更反應在植被反射光譜的對應變化 (楊及蘇，1997；陳及楊，2001)。楊及蘇 (1997) 曾指出水稻在不同期作間、植被反射光譜隨著全生育期間植株的生長狀態而變化。陳及楊 (2001) 之報告進一步顯示水稻植被光譜曲線之特徵及特性，並提出紅光臨界轉折點之位移隨著生育進展而上升的趨勢。本文研究量測二年四期作之不同年度及期作的全生育期水稻族群植被反射光譜，試以解析正常生育過程下的植被反射光譜動態變化，展示光譜特徵及光譜指數在年度間與期作間的差異，並討論其在生理與生長上的意義，評估應用於水稻栽培管理的可行性。

## 材料與方法

本研究之田間試驗在 2000-2002 年於臺中縣霧峰鄉行政院農業委員會農業試驗所農場 (24°45'N, 120°54'E, elevation of 85 m) 實施，包括 2000 年之一、二期作、2001 年二期作及 2002 年一期作等四期。參試水稻 (*Oryza sativa*) 品種爲臺農 67 號，每叢 3-5 株，行株距 0.3 m × 0.18 m，密度 $1.85 \times 10^5$ hills $ha^{-1}$。試驗田區計有二十塊，每一塊田區面積約 0.5 ha，供作量測近地面水稻族群植被全生育期之反射光譜。試驗期間之栽培方法採用慣行法，秧苗以南北向機械插植，一期稻作分別於 2000 年 2 月 14-18 日及 2002 年 2 月 25-27 日移植，並分別於 6 月 14-16 日及 6 月 18-20 日收穫。二期稻作則分別於 2000 年 8 月 1-5 日及 2001 年 7 月 31 日至 8 月 3 日移植，12 月 4-6 日 (收穫約遲 7-14 天) 及 11 月 19-21 日收穫。肥料之施用係於插秧前 5 天施用臺肥 39 號 (臺灣肥料公司，高雄市) 300 kg $ha^{-1}$ 爲基肥，第一次追肥分別約於插秧後 2 週 (一期作) 及 1 週 (二期作) 後施用臺肥 1 號 100 kg $ha^{-1}$，第二次追肥分別約於插秧後 4 週 (一期作) 及 3 週 (二期作) 後施用臺肥 1 號 200 kg $ha^{-1}$，穗肥則約於插秧後 9 週 (一期作) 及 6 週 (二期作) 後施用硫酸鉀 160 kg $ha^{-1}$。農藥施用視病蟲草害發生狀況而異，依照前臺灣省政府農林廳植物保護手冊 (1996) 規定。二化螟蟲及瘤野螟之防治以 6% 培丹粒劑 (30 kg $ha^{-1}$) 撒施田間，紋枯病防治以 40% 加保扶水懸劑 (1.2 L $ha^{-1}$) 及 50% 維利黴素溶液 (1 L $ha^{-1}$) 等之千倍稀釋液噴施。禾本科雜草係於插秧後一週內以 5% 丁基拉草粒劑 (30 ka $ha^{-1}$) 防除，另於分蘗前期以 44.1% 本達隆溶液 (3 L $ha^{-1}$) 之 200 倍稀釋液防除鴨舌草及螢藺等雜草。

水稻族群植被反射光譜乃以田間攜帶式輻射光譜儀 (spectroradiometer，model GER-2600，Geophysical & Environmental Research Corp., Millbrook, NY, USA) 進行光輻射 (radiance) 的量測，將目標植被區之反射光輻射除以同波長之已知反射光譜特性的標準白板 ('Spectralon', Labsphere, Inc., North Sutton, NH, U.S.A.) 反射光輻射 (即參考值) 來計算反射比，得到反射比光譜曲線，光譜範圍 330-3600 nm。量測系統包括具有 10 度視角 (field-of-view，FOV) 掃描鏡頭的光譜儀、手提筆記型電腦、電池及電纜線等，由電腦中內建的GER程式 (GER-2600 User Manual, 1996) 進行量測操作，每次掃描均爲連續 4 次之平均測值。爲避免光譜兩端的硬體電磁干擾，僅選取 350-2400 nm 區間的反射比光譜進行資料分

析。系統係固定於距離植被約 5.8 m 垂直上方的機動式高空作業車上，以垂直方式量測植被之反射光譜，每一塊試驗田區逢機量測 15 定點，取 15 定點之平均值反射比曲線爲該區代表。由於稻株生育初期的植被尚未完全覆蓋地表，植被反射光譜將受到土壤及灌溉水影響，因此本研究之水稻植被反射光譜約自插秧後 4 週起進行，排除背景之干擾。通常每間隔 1-2 週測量一次，量測時間於上午十時至下午一時之間，選擇晴朗無雲時段爲之，以減少太陽入射角及遮雲的干擾。

將水稻植被反射光譜劃分爲紫外光 (UV, 350-400 nm)、可見光 (Vis, 400-740 nm)、近紅外光 (Nir, 740-1300 nm)、短波紅外光 (Swir, 1300-1800 nm) 及中紅外光 (Mir, 1800-2400 nm) 等五寬頻波段，以比較各波段之變化及差異。又將可見光細分爲紫光 (Violet, 400-425 nm)、藍光 (Blue, 425-490 nm)、綠光 (Green, 490-560 nm)、黃光 (Yellow, 560-585 nm)、橘光 (Orange, 585-640 nm)、紅光 (Red, 640-740 nm) 等六波帶，以瞭解各波帶在全生育期間及不同期作間之趨勢。續由光譜曲線之波形動態篩檢綠光帶峰點 (GREEN)、紅光帶谷點 (RED) 及近紅外光波段頂點 (NIR) 爲光譜特徵，顯示其等在生育期間的反射比改變，並計算 $R_{RED}/R_{NIR}$、$R_{RED}/R_{GREEN}$、$R_{GREEN}/R_{NIR}$ 及標準差植被指數 (normalized difference vegetation index, NDVI) 隨生育進展之演變。另計算紅光臨界斜率 (red edge slope, RES)、紅光臨界區間 (red edge span, RESP) 及 $R_{NIR}$-$R_{RED}$，比較在期作及年度間之變異。其中，NDVI 之計算公式爲 $(R_{NIR}-R_{RED})/(R_{NIR}+R_{RED})$，RES 爲 $(R_{NIR}-R_{RED})/(\lambda_{NIR}-\lambda_{RED})$，RESP 爲 $\lambda_{NIR}-\lambda_{RED}$，而 $R_{GREEN}$、$R_{RED}$ 及 $R_{NIR}$ 爲 GREEN、RED 及NIR 之反射比，$\lambda_{NIR}$ 及 $\lambda_{RED}$ 則 NIR 及RED 之波長位置。

## 結果與討論

在作物生育的過程中，顏色、組織構

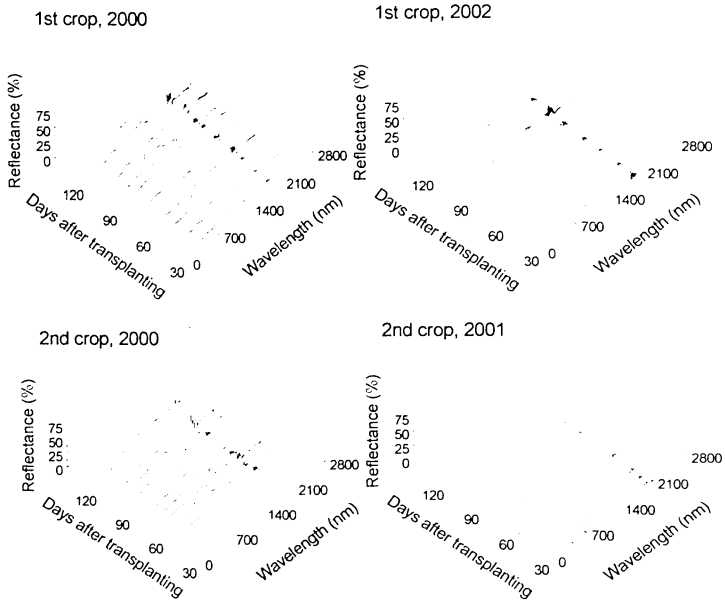



Fig. 1. Three-dimensional dynamic variations of canopy reflectance spectra from rice plants grown in the first and the second cropping seasons of 2000-2002.

造、植株外觀及族群幾何結構等的形態變化是非常普遍而自然的現象。最顯而易見的是生長和老化的階段，前者顯徵於細胞擴增與伸長、葉片繁茂、枝條橫生等，後者則突顯於植體的枯萎與凋落、葉色的黃褐化、莖桿的乾縮等。在田間生長的作物族群，綠色植被係由許多層次的葉片、枝條及莖桿所組成，每一種組成分均爲植被結構的變數，都綜合反應在植被的反射光譜上。因此，當作物植被任一組成分隨著生育發展或環境影響改變時，即顯現於植被反射光譜的質量變化。在水稻的生育過程中，光譜曲線隨著生育的進展而異 (圖 1)，充分反映了複雜的生長行爲和可能潛在的環境效應。由 2000-2002 年一、二期稻作植被光譜曲線的三維動態變化 (圖 1)，顯示水稻族群植被光譜無論期作別或年度別，均類似於一般綠色植物的光譜曲線模型，大致以紫外光波段及可見光波段的反射比較低，近紅外光波段的反射比較高，而短波紅外光波段及中紅外光波段的變動與落差較爲劇烈。這些光譜的變化輪廓，潛藏生育期、栽培條件及環境因素等的多重影響，需要予以解析並歸納出脈絡條理，才能與特定的外觀物理徵狀或內在的化學組成分相互連結，建立彼此推估與解釋的光譜遙測模式，從事生產管理上的可能應用。

經將植被反射光譜劃分爲紫外光 (UV)、可見光 (Vis)、近紅外光 (Nir)、短波紅外光 (Swir) 及中波紅外光 (Mir) 等五個寬波段 (圖 2) 分別觀察，可以瞭解光譜曲線內在的差異及全生育期間的反射比變化。由圖 2 明顯可見 UV 及 Vis 波段的反射比較低，分別低於 8% 及 15%，而 Nir、Swir 及 Mir 等三個波段的反射比較高，分別介於 16-54%、8-31% 及 4-24% 之間。雖然同一光譜曲線的 Nir 反射比值高於 Swir 及 Mir 者，然而 Mir 波段平均反射比在全生育

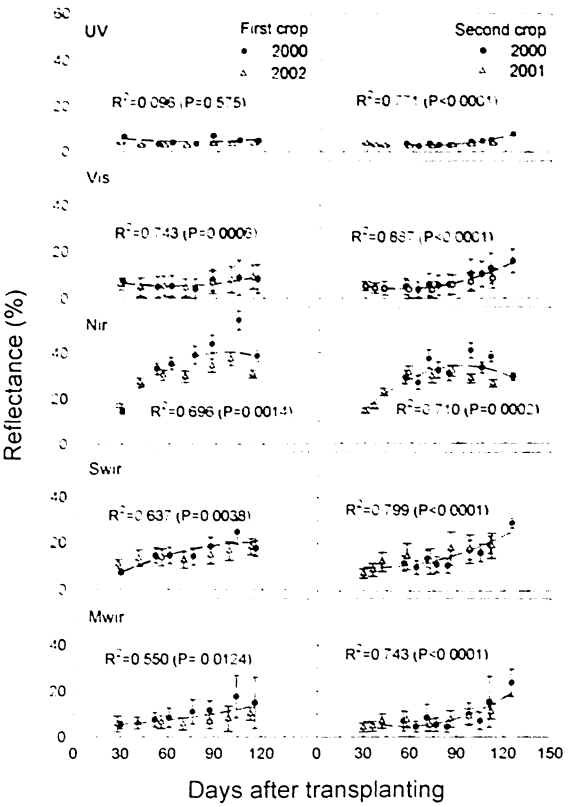



Fig.2. Variations of reflectance in different wavebands of canopy reflectance spectra from rice plants grown in the first and the second cropping seasons of 2000-2002. UV: 350-400 nm, Vis: 400-740 nm, Nir: 740-1300 nm, Swir: 1300-1800 nm, and Mir: 1800-2400 nm.

期間的高低落差可達 5 倍之多，顯示影響 Mir 吸收程度的水稻植體水分含量在生育期間有甚大差距，造成中紅外光波段反射比的劇烈變異。無論係緣自生育進展或環境影響，可見 Mir 容易受到內在及外在因子控制，此一干擾現象使其較不適用於稻株生長監測。

續將可見光波段範圍細分成紫光 (Violet)、藍光 (Blue)、綠光 (Green)、黃光 (Yellow)、橘光 (Orange) 及紅光 (Red) 等六波帶 (圖 3)，以探討可見光波段組成的差異及全生育期間的變化。由於紅光帶 (640-740 nm) 包含部分重疊的近紅外光波段，使

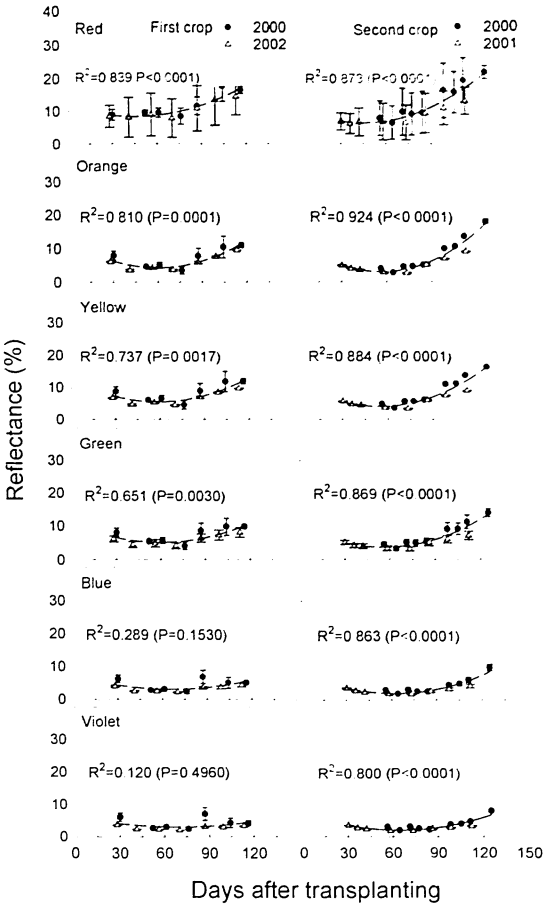



Fig.3. Variations of reflectance in different wavebands of visible light from canopy reflectance spectra of rice plants grown in the first and the second cropping seasons of 2000-2002. Violet: 400-425 nm, Blue: 425-490 nm, Green: 490-560 nm, Yellow: 560-585 nm, Orange: 585-640 nm, and Red: 640-740 nm.

其反射比最高，依次爲綠光、黃光、橘光、藍光及紫光。在不同期作之間，紅光帶的變異範圍 0.8-8.3% 爲最大，其次爲黃光 (0-3.2%)、橘光 (0.1-3.2%)、綠光 (0.3-2.5%)、藍光 (0.1-2.0%) 及紫光 (0-2.0%)，而且一期作的可見光波段變異範圍略高於二期作者。

由圖 1 至圖 3 的分析結果，顯示水稻植被反射光譜曲線確實反應了稻株生育過程的變化，而一、二期作之間的曲線趨勢雖然類似，但因期作間的氣象環境條件顯著有別，仍可由曲線在質與量上的差異反映不同處。水稻植被反射光譜中的紫外光波段在生育期間的反射比值皆最低，因多數被葉片吸收或穿透葉片；可見光波段反射比則隨著稻株生長需要增加吸收而逐日降低，直至抽穗後因稻株生長勢衰退及老化而升高 (Avers, 1985)。此一過程充分表現了水稻生育期間植被覆蓋率與色素含量的演變趨勢，也反應出生長、生殖與老化的生理情境 (楊及蘇，1997; Blackburn, 1998; Yang and Lee, 2001)。本研究顯示水稻植被反射光譜在可見光波段中的紫光帶 (400-413 nm) 及紅光帶 (670 nm) 部位呈現最低的反射比，因此葉綠素 a 當爲水稻植體最主要的色素，此結果與 Lee and Yang (1999) 及 Yang and Lee (2001) 的研究結果類似。當水稻植株在抽穗後隨即進入生殖生長期，生長勢逐日衰退老化，植體中的葉綠素衰解含量緩慢降低，類胡蘿蔔素 (吸收波段爲 420-500 nm) 及葉黃素 (吸收波段爲 400-500 nm) 成爲葉片中的主要色素，在較高的綠光及紅光反射比之下使得葉片呈現黃化徵狀 (Boyer *et al.*, 1988)。

在遙測技術發展初期，多以衛星影像或衛星輻射光譜進行對地表形物的監測，由於衛星上係掛載多光 (頻) 譜的寬頻 (broad band) 感測器，因此而有了所謂光譜指數 (spectral index)(或稱植被指數，vegetation index) 的研發與應用。許多研究以不同的光譜指數描繪其與作物生長的關係，其主要的構成分概爲綠光帶、紅光帶及近紅外光波段之光譜特徵 (陳及楊，2001，2002)。本研究以綠光帶峰點 (GREEN)、紅光帶谷點 (RED) 及近紅外光波段頂點 (NIR) 的反射比 ($R_{GREEN}$、$R_{RED}$及 $R_{NIR}$) 來表現光譜特徵在生育期間及期作間的改變 (圖4)，其中 $R_{GREEN}$ 及 $R_{RED}$ 呈現凹形二次曲線，$R_{NIR}$ 則近似於凸形二次曲

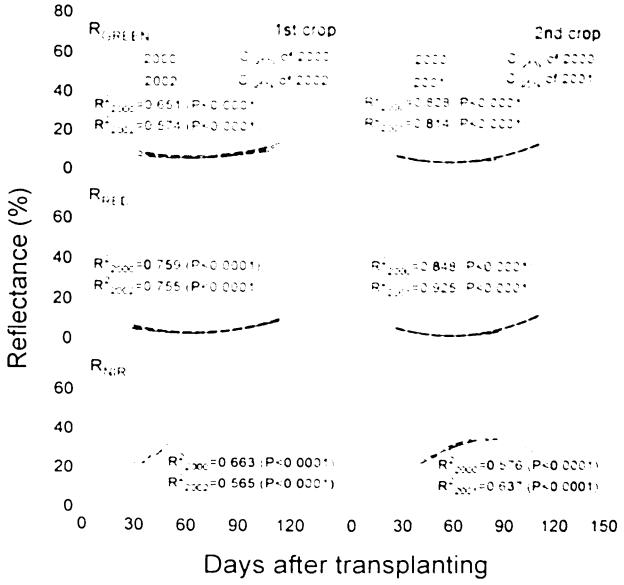



Fig. 4. Variations of reflectance at green light maximum ($R_{GREEN}$), red light minimum ($R_{RED}$), and near infrared peak ($R_{NIR}$) from canopy reflectance spectra of rice plants grown in the first and the second cropping seasons of 2000-2002. $CI_{95\%}$: 95% confidence interval.

線，而 $R_{GREEN}$ 及 $R_{RED}$ 在年度間的差異似乎在二期作後期較明顯，$R_{NIR}$ 則無論在年度間或期作間的曲線變化均較大。由此可知窄波段光譜特徵在生育期間之變化和寬波段之變化雷同，而不同年度之間則有差別，尤其以 $R_{NIR}$ 爲甚，顯見影響近紅外光的植被覆蓋率及結構等因子對環境的變動具有較敏感的反應，使得各年度出現不等的變異程度。這些不同的環境因素可能改變葉內細胞間隙、細胞排列方式、細胞大小及形狀，當造成葉片組織含有較多的細胞間隙及水分與空氣的界面 (air-water boundaries) 時，就會促使入射的光輻射產生較多的反射與較低的穿透率 (Sinclair *et al.*, 1971; Gausman, 1982)。在水稻抽穗後，由於生理機能衰退和老化作用，綠色植被覆蓋率及植體水分逐漸降低，導致細胞間隙萎縮而降低紅外光的反射，一如圖 2 及圖 4 所示結果。

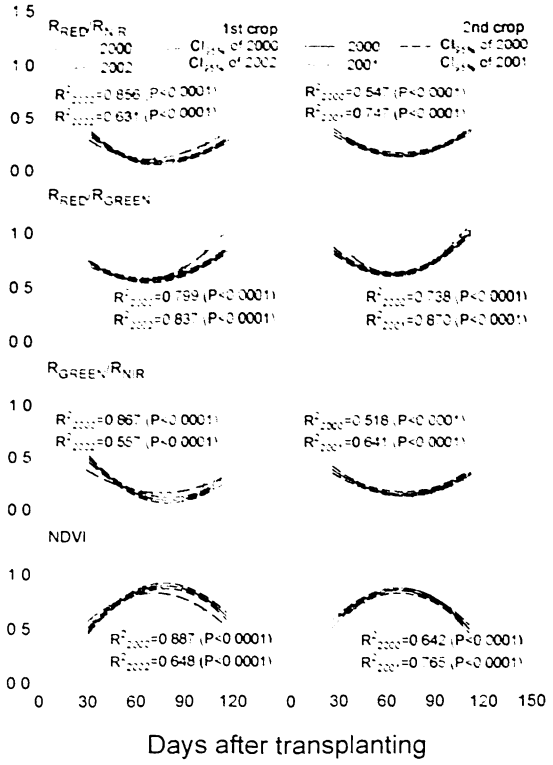



Fig. 5. Variations of different spectral indices calculated from canopy reflectance spectra of rice plants grown in the first and the second cropping seasons of 2000. NDVI is the normalized difference vegetation index. $CI_{95\%}$: 95% confidence interval.

將 GREEN、RED 及 NIR 等三項光譜特徵的反射比組成四種不同的光譜指數 (如 $R_{RED}/R_{NIR}$、$R_{RED}/R_{GREEN}$、$R_{GREEN}/R_{NIR}$ 及 NDVI)，在時間序列上前三種指數呈現凹形曲線，NDVI 則爲凸形曲線 (圖5)。這些光譜指數的變化反映了 GREEN、RED 及 NIR 等三項光譜特徵反射比的改變與相對關係，係稻株生長、分蘗、葉面積增加、葉綠素含量提高及植體水分含量等複雜交感的綜合表現。在稻株蓬勃生長的時期，$R_{GREEN}$ 及 $R_{RED}$ 下降而 $R_{NIR}$ 上升，$R_{RED}/R_{NIR}$、$R_{RED}/R_{GREEN}$ 及 $R_{GREEN}/R_{NIR}$ 均隨之減少；在稻株由生殖生長期邁向成熟與老化階段，$R_{GREEN}$ 及 $R_{RED}$ 上升而 $R_{NIR}$ 下降，$R_{RED}/R_{GREEN}$ 及 $R_{GREEN}/R_{NIR}$ 則隨之回

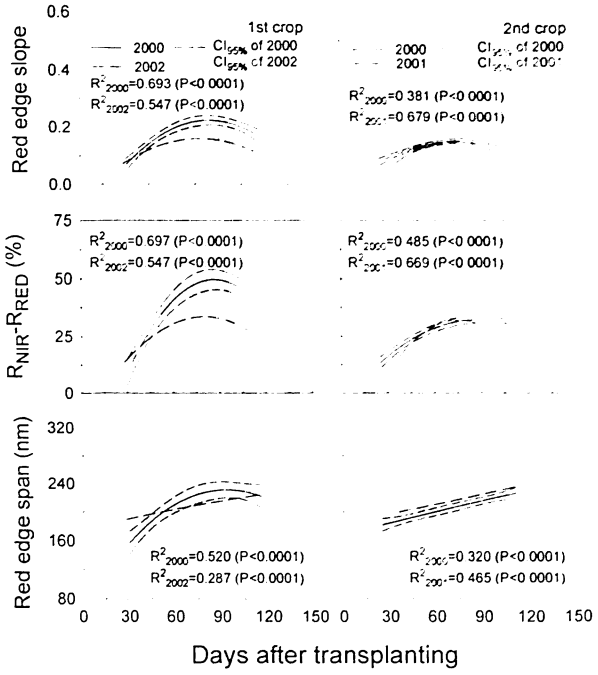



Fig. 6. Variations of red edge slop, $R_{NIR}$-$R_{RED}$ and red edge span calculated from canopy reflectance spectra of rice plants grown in the first and the second cropping seasons of 2000-2002. $Cl_{95\%}$: 95% confidence interval.

增。NDVI 表現恰相反，然皆伴隨 $R_{RED}$ 及 $R_{NIR}$ 之互動關係。未來可進一步利用這些光譜指數連結作物植被的生理狀態 (Pinty *et al.*, 1993)、生質量 (Tucker, 1979)、葉面積指數 (Baret and Guyot, 1991) 等性狀，建立估測模式。又 NDVI 的數值介於 0.0-1.0 之間，當 NDVI 愈大，則表示植被生長愈繁茂，植被結構愈複雜且覆蓋率愈高。由圖 5 中 NDVI 的改變，可以解釋水稻植被隨生育進展的眞實變化。

有報告 (Collins, 1978; Horler *et al.*, 1983) 指出，由可見光進入近紅外光波段的光譜轉折處反射比的改變，可以提供作物生長狀態許多重要資訊，此一綠色植被反射光譜的轉折區間被稱爲紅光臨界 (red edge)。研究曾發現植被反射光譜曲線在紅光臨界的位移或反射比變異，與植體生理性狀具有高度相關，且受土壤背景及大氣干擾的影響甚小 (Demetriades-Shah *et al.*, 1990; Baret *et al.*, 1992)。本研究於是篩檢水稻植被光譜的紅光臨界區間及斜率，並計算 $R_{NIR}$-$R_{RED}$ 差距，將與紅光臨界相關的資訊 (紅光臨界區間、紅光臨界斜率及 $R_{NIR}$-$R_{RED}$) 提供未來進一步探究。試驗顯示三者均呈現類似的凹形二次曲線，但在不同期作及不同年度間的表現差異較大 (圖 6)。如前述，RED 光譜特徵因水稻植被對紅光帶的大幅吸收而具低反射比，且未明顯位移，NIR 位置則隨生育及環境而異，且具較高反射比。因此，這二項參數同時受到生育及環境的明顯，與生長之間亦具有互動關係。Knipling (1969) 曾指出，紅光臨界位置及斜率會因爲作物的老化所導致葉綠素含量降低及丹寧酸增加而產生位移、改變現象。Filella *et al.* (1994) 的研究也顯示，紅光臨界位置與葉綠素含量具有高度相關，因此受到生育及環境影響。

綜合本研究結果，可知水稻植被反射光譜的變化確實反應出生育進展及環境效應，而光譜特徵及光譜指數的變化趨勢亦和稻株生長及生育期間的環境具有因果關係，同時受到植體的生理代謝、組織構造及外觀形態演變的影響。因此，利用適當的統計方法連結光譜特徵或光譜指數與水稻植被的物理徵狀及化學組成是可行的，重點在於邏輯合理性及潛在意義。而光譜遙測模式之應用價值，則必須經過詳細驗證其對環境變異的適用行後才具可行性。

## 引用文獻

植物保護手冊。1996。行政院農委會農藥技術咨議委員會審定。臺灣省政府農林廳編印，南投縣中興新村。

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。

陳榮坤、楊純明 2002 以近地面高解析植被光譜及模擬 SPOT 衛星遙測光譜估測水稻生長性狀的變化 中華農業研究 51(4):1-18.

楊純明、蘇慕容 1997 水稻族群植冠反射光譜之分析 中華農業氣象 4(2):87-95.

楊純明、林俊義 2002 應用於水稻精準農業體系之知識與技術 行政院農業委員會農業試驗所出版，臺中縣 221pp.

楊純明、林俊義 2003 水稻精準農業體系 行政院農業委員會農業試驗所出版，臺中縣 252pp.

Avers, C.G. 1985. Molecular Cell Biology. Addison-Wesley, Reading, MA, USA.

Baret, F. and G. Guyot. 1991. Potentials and limits of vegetation indices for LAI and APAR assessment. Remote Sensing of Environment. 35:161-173.

Baret F., S. Jacquemoud, G. Guyot and C. Leprieur. 1992. Modelled analysis of the biophysical nature of spectral shifts and comparison with information content of broad bands. Remote Sensing of the Environment. 41:133-142.

Belward, A.S. 1991. Spectral characteristics of vegetation, soil and water in the visible, near-infrared and middle-infrared wavelengths. In: Belward, A.S., Valenzuela, C.R., (Eds.) Remote Sensing and Geographical Information Systems for Resource Management in developing countries. Kluwer, Netherlands.

Blackburn, G.A. 1998. Spectral indices for estimating photosynthetic pigment concentrations: a test using senescent tree leaves. Intl. J. Remote Sens. 19(4):657-675.

Bouman, B.A.M. 1995. Crop modeling and remote sensing for yield prediction. Netherlands J. of A. Sci. 43:413-161.

Boyer, M. M., M. H. E. Belanger and J. Wu. 1988. Senescence and spectral reflectance in leaves in Northern Pin Oak (*Quercus palustris* Muench.). Remote Sensing of Environment. 25:71-87.

Christensen, S. 1991. Assessing leaf area index and light interception from spectral measurements. Proceedings from the workshop on remote sensing. Sostrup Castle, Grena, May 6-7.

Collins, W. 1978. Remote sensing of crop type and maturity. Photogram. Eng. Remote Sensing. 26:43-55.

Demetriades-Shah, T. H., M. D. Steven and J. A. Clark. 1990. High resolution derivative spectra in remote sensing. Remote Sensing of the Environ. 33:55-64.

Filella, I. and J. Penuelas. 1994. The red edge position and shape as indicators of plant chlorophyll content, biomass and hydric status. Intl. J. Remote Sens. 15(7): 1459-1470.

Gao, B. and A.F.H. Goetz. 1995. Retrieval of equivalent water thickness and information related to biochemical components of vegetation canopies from AVIRIS data. Remote Sens. Environ. 52:155-162.

Gausman, H. W. 1982. Visble light reflectance, transmittance, and absorptance of differently pigmented cotton leafs. Remote Sens. Environ. 13:233-238.

Hoffer, R.M. 1978. Biological and physical considerations in applying computer aided analysis techniques to remote sensor data. p.227-289. *In* : Remote Sensing: the Quantitative Approach. P.H. Swain and S.M. Davis, eds., McGraw Hill, New York.

Horler, D. N. H., M. Dockray and J. Barber. 1983. The red edge of plant leaf reflectance. Intl. J. Remote Sens. 4:273-288.

Jacobsen, A., N. H. Broge and B. U. Hansen. 1995. Monitoring wheatfields and grasslands using spectral reflectance data. ISSSR, Melbourne, Victoria, Australia, 26 Nov-1 Dec, 1995.

Knipling, E. B. 1969. Physical and physiological

basis for the reflectance of visible and near-infrared radiation from vegetation. Remote Sens. Environ. 1:155:159.

Lee, Y.-J. and C.-M. Yang. 1999. Relationship of plant growth and chlorophyll content in field-grown rice. Chinese J. Agromet. 6:191-2000.

Pinty, B., C. Leprieur and M. M. Verstraete. 1993. Towards quantitative interpretation of vegetation indices - Pat 1: Biophysical canopy properties and classical indices. Remote Sens. Rev. 7:127-150.

Puritch, G. S. 1981. Nonvisual remote sensing of trees affected by stress: A review. Can. For. Ser., For. Tech. Rep. 30. Victoria, BC, Canada.

Sinclair, T. R., R. M. Hoffer, M. M. Schreiber. 1971. Reflectance and internal structure of leaves from several crops during a growing season. Agron. J. 63:864-868.

Tucker, C. J. 1979. Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation. Remote Sensi. Environ. 8:127-150.

Wiegand, C.L., S.J .Mass, J.K. Aase, J.L. Hatfield, P.J. Pinter, R.D. Jackson, E.T. Kanemasu, and R.L. Lapitan. 1992. Multisite analysis of spectral-biophysical data for wheat. Remote Sens. Environ. 42:1-21.

Yang, C-M. and Y-J. Lee. 2001. Seasonal changes of chlorophyll content in field-grown rice crop and their relationships with growth. Proc. Natl. Sci. Counc. ROC(B) 25:233-238.