

以近地面高解析植被光譜及模擬 SPOT 衛星 寬頻光譜估測水稻生長性狀的變化¹

陳榮坤² 楊純明^{2,3}

摘要：利用 2000 年一、二期稻作近地面植被高解析光譜(350-2500nm)與生長性狀資料，篩檢與生長有關之植被光譜特徵，並建立光譜特徵模式以估測水稻生長，又比較窄波段與模擬 SPOT 衛星寬波段之植被指數估測生長之差異，以評估利用 SPOT 衛星光譜資料監測水稻生長可行性。由全生育期三維動態植被反射光譜，發現水稻與一般綠色植物的反射光譜曲線類似。由不同生長性狀之全生育期分佈圖，約於抽穗期前後達到最高峰而呈現曲線分佈。以量測光譜之反射比與各生長性狀進行相關強度分析，顯示抽穗前及抽穗後的相關趨勢雷同，但抽穗後相關性較低。由多元直線複迴歸分析的逐步迴歸選取程序，選出 2-3 個波長變數，建立多特徵窄波段組合的關係模式。在檢定的六種植被指數中，抽穗前以 GREEN/NIR 對各性狀的相關性最佳，抽穗後各指數與生長性狀的相關性均較低，以 RED/NIR 的相關性較佳。無論抽穗前或抽穗後，模擬 SPOT 衛星寬波段頻譜的植被指數與各性狀的相關性略低於窄波段光譜植被指數，但預測結果的相似度均高於 98%。

關鍵詞：近地面高解析植被光譜、光譜特徵模式、植被指數、生長、SPOT 衛星。

前 言

遙測技術係利用非接觸的方法感測物(形)體及其所處狀態，具有非破壞性而快速大面積(偵)測的優點，目前已被各產業廣泛採行於日常作業運轉。遙測技術在農業領域亦具有多元應用潛力，以地面植被的監測而言，可進行植被種類、作物相分佈、覆蓋比例、生長狀況及周遭環境等面向之探索與探討，據以進行各種評估和開發規畫。自 1972 年 Landsat 衛星順利發射升空以來，過去三十年遙測技術多以衛星影像或衛星光譜進行地表的監測，建立植被光學特性與植體性狀間的關係，其中尤以植被指數(VI, vegetation index)的應用最為普遍⁽¹⁵⁾。例如以 Landsat 衛星 TM 資料求得的標準差植被指數(NDVI, normalized difference vegetation index)，即被利用在生質量(biomass)、葉面積指數(LAI, leaf area index)、株高及產量等多樣性狀的估測上^(22, 23, 19)。

由於多數衛星遙測採用寬波段(broad band)的影像或光譜進行地面監(偵)測，因此這些植被指數使用的資訊均為寬波段涵蓋之窄波段的平均光譜資料，如 TM 波段 4 構成的影像即為近紅外光(760-900 nm)光譜之平均反射率(比)所構建的影像。寬頻譜資料的缺點之一，係無法提供一如窄波段光譜的細微頻譜變化，使吾人難以詳細瞭解作物在偵測光譜範圍內真實狀況，造成監測作物性狀時的許多限制

1. 行政院農業委員會農業試驗所研究報告第 2128 號。接受日期：91 年 11 月 22 日。

2. 本所農藝組助理研究員和研究員。臺灣省 臺中縣 霧峰鄉。

3. 通訊作者，電子郵件：cm yang@wufeng.tari.gov.tw；傳真機：(04)23302806。

(8,19)。此外，爲了取得正確的衛星影像及光譜資料，衛星遙測必須對於大氣吸收光譜的影響進行校正，因爲可見光及近紅外光波帶乃大氣吸收及干擾嚴重的光譜波段，而可見光及近紅外光卻是監測地表植被採行的關鍵波段，此亦爲使用衛星遙測資料所必須克服的問題之一。

近年來具備窄波段(narrow band)掃描能力之高頻譜感測器(hyperspectroradiometer)的問世及利用，逐漸受到遙測人士的重視。高頻譜感測器可約略分爲地面可攜式感測器及航空空載(spaceborne and airborne)感測器二類，頻寬約 2-10 nm 之間，可以提供詳細而連續的光譜資料。前者多在近地面使用，後者則分別裝置於各種航空器上。由這些豐富而龐大的高解析光譜資料，可嘗試定義出植被中各種性狀的光譜特徵(spectral signatures or spectral characteristics)，藉以區別不同植被種類或植體生育狀態等。例如水稻光譜特徵 2113.5 nm 窄波段反射比可以顯著識別稻株之不同缺水等級⁽²⁷⁾；547 nm 窄波段被發現與玉米葉片中的葉綠素總量有高度相關⁽¹⁶⁾；紅光臨界(red edge)之 704 nm and 718 nm 是許多作物植體遭受逆境時的良好指標，也可以作爲植體內氮素及葉綠素含量狀態的參考標的^(5, 7, 17)等。然而，雖然高頻譜感測器可以提供詳細豐富的光譜資料，如何從繁雜的光譜資訊中簡化、歸納終至篩檢出有用的光譜特徵波段，以精確估測植體生長狀態，則是光譜遙測技術(spectral remote sensing technique)的重要研究內容與方向。

利用高頻譜感測器所提供的光譜資料進行統計分析，文獻上有許多方法，其中以下三種甚爲常見。(1)利用窄波段與性狀間的專一性及敏感度，建立窄波段反射率(比)與性狀間的關係模式，獲得最佳窄波段光譜特徵模式。如前述水稻光譜特徵之 2113.5 nm 反射比，可用以辨識稻株不同缺水等級⁽²⁷⁾，兩者呈現曲線關係。(2)採用最佳多元直線迴歸模式(OMLRM, optimal multivariate linear regression model)，或稱最佳多窄波段反射比模式(OMNBR model, optimum multiple narrow band reflectance model)，係組合數個與特定性狀相關性高的窄波段光譜特徵，構建估測特定性狀的最佳線性迴歸關係以獲得較高的相關性。如 Thenkabail *et al.*⁽²⁰⁾利用逐步線性迴歸分析(stepwise linear regression analysis)，探討棉花、馬鈴薯、大豆及玉米等四種作物窄波段反射比與植體鮮重間的關係，並分別建議各作物以四個窄波段組合(棉花爲 368、668、925 及 968 nm；馬鈴薯爲 511、682、711、及 940 nm；大豆爲 353、754、811 及 825 nm；玉米爲 439、511、625 及 954 nm)對植體鮮重進行估測，其決定係數(R^2 , coefficient of determination)可分別達到 0.79、0.80、0.81 及 0.78。(3)利用植被指數，自光譜中篩選出 1 至 3 個不同特徵窄波段組合，以比較其等與作物種類、葉面積指數或植體鮮重等性狀的關係，建立最適植被指數與性狀間的關係模式，植被指數具有降低各種不確定因素(如不同土壤背景或環境因素等)干擾的功能⁽⁴⁾。如 Jordan⁽¹⁰⁾以 RVI(ratio vegetation index)作爲植體健康與否的指數，可說是採用植被指數的創始者；Rouse *et al.*⁽¹⁵⁾進一步提出 NDVI 指數以估測植體狀態，更受到廣大迴響，到目前爲止 NDVI 仍然受到廣泛的研究與使用。之後，許多針對不同植被或植體性狀表現的植被指數相繼發表^(5, 6, 13)，成爲性狀估測的有用工具。這三種統計方法的光譜波段使用範圍，大多以可見光(400-700 nm 或 400-740 nm)及近紅外光(700-1300 nm)爲基礎，利用二或數個單一波段組合以估測植被或植體狀態。

在光譜遙測對水稻生長估測的研究上，Yang *et al.*^(24, 25, 26)從水稻近地面光譜監測分析結果，顯示水稻植被光譜計算之 NDVI 與葉面積指數、葉片乾重及地上部乾重呈現曲線關係，可利用於估測水稻生長狀態，並提出以衛星寬頻波段連結近地面光譜資料庫的可能性。本文研究嘗試以不同統計方法分析近地面水稻高解析植被光譜，配合生長性狀調查，建立估測水稻生長的光譜特徵模式。再以近地面高解析光譜模擬 SPOT 衛星寬波段反射比計算植被指數，以比較近地面窄波段及衛星寬波段之植被指數估測水稻生長的差異。

材料與方法

試區、期作及栽培管理

田間試驗係於 2000 年在行政院農業委員會農業試驗所農場(臺中縣霧峰鄉)進行,提供近地面光譜遙測一、二期稻作植被反射光譜及性狀調查,計有二十塊田區,每一田區面積約 0.5 公頃。參試水稻品種為臺農 67 號(*Oryza sativa* L. cv. TNG 67),第一期稻作在 2 月 14~18 日機插,6 月 16 日收穫,生育日數約 122 天;第二期稻作於 8 月 1~5 日機插,12 月 6 日收穫,生育日數約 125 天(本期作收穫較遲,約在完熟後 7~14 天收割)。試驗期間之栽培管理採用慣行法,以南北向機械插秧,每叢 3-5 株,行株距約為 0.30 m×0.18 m。基肥於插秧前 5 天施用臺肥 39 號(臺灣肥料公司,高雄市)300 kg ha⁻¹,第一次追肥分別約於 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 4 週(一期作)及 3 週(二期作)後施用臺肥 1 號 200 kg ha⁻¹,穗肥約於 9 週(一期作)及 6 週(二期作)後施用硫酸銨 160 kg ha⁻¹。

農藥施用視病蟲草害發生狀況而定,以 6%培丹粒劑 30 kg ha⁻¹防治二化螟蟲及瘤野螟,以 40%加保扶水懸劑 1.2 L ha⁻¹及 50%維利黴素 1 L ha⁻¹等之千倍稀釋液防治紋枯病及其他蟲害。除草劑部分係以 5%丁基拉草劑 30 kg ha⁻¹於插秧一週內施用防除禾本科雜草,以 44.1%本達隆溶液 3 L ha⁻¹劑量 200 倍稀釋液於分蘖初期防除鴨舌草及螢蘭等雜草。

取樣及性狀調查

在兩期稻作全生育期間進行稻叢取樣,以估測稻株生長性狀。自秧苗移植後,約每隔一~二週取樣一次,每一塊田區逢機取 6 叢稻株,分別量測株高、葉鮮重、葉乾重、地上部鮮重、地上部乾重及葉面積指數(LAI)等性狀。株高係以直尺量測,將每叢稻株綠色葉片及莖稈分別剪下以分別稱取葉鮮重、稈鮮重及地上部鮮重(鮮葉與鮮稈的重量和),另以葉面積測定儀(portable area meter, model LI-3000A, LI-COR Inc., U.S.A.)測定各單叢葉片表面積,再利用行株距換算為葉面積指數(每平方公尺土地面積上的葉片表面積, m² m⁻²)。將鮮葉及鮮稈置於烘箱中以 80°C 烘乾 72 小時後,稱量葉乾重、稈乾重及地上部乾重(乾葉與乾稈的重量和)。

水稻植被反射光譜量測

水稻近地面植被反射光譜量測係以田間攜帶式高解析輻射光譜分(層)析儀(spectroradiometer, model GER-2600, Geophysical & Environmental Research Corp., Millbrook, NY, U.S.A.)為之,測定植被之光輻射(radiance),量測波長範圍介於 350-2500 nm;其中 350-1050 nm 波段範圍之波距(bandwidth)約 1.5 nm,1050-2500 nm 波段範圍之波距 11.5 nm。光譜分析儀之矩陣式光輻射感測器具有 10 度視角(FOV),固定於距離植被約 5.8 m 之高空作業車上,以垂直偵測(nadir viewing)水稻植被之反射光譜。

每一塊田區逢機量測 15 定點(目標區域),每一定點預設為 4 次掃描之平均值,取 15 定點均值為該區代表值。反射比(%)係由植被目標區域之各波長光輻射除以同波長之標準白板('Spectralon', Labsphere, Inc., North Sutton, NH, USA)反射光輻射(即參考值)來計算。水稻族群植被反射光譜量測日期配合田間取樣,係自插秧起每隔一~二週測量一次,約自上午十時至下午一時之間選擇晴朗無雲時段偵測,以減少太陽入射角及遮雲的干擾。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,因此本研究資料經比對植被光譜與地面光譜之差異後,僅使用未受水分及土表干擾的光譜曲線資料。

資料統計分析

水稻植被覆蓋率主要受 LAI 影響,一般言之,當 LAI 隨稻株生長而增加時,單位土地面積覆蓋率則愈高,約至抽穗期時達到最大值;抽穗後,因下位葉片逐漸枯萎死亡而導致 LAI 值漸減,覆蓋率亦隨之降低⁽²⁹⁾。因此,本研究之稻株生長性狀及光譜資料均以抽穗日(指田區抽穗率達 50%以上)為分隔點,分為抽穗前及抽穗後兩時期進行統計分析。

將水稻生長性狀與光譜(350-2500nm)各窄波段進行相關強度(簡單直線相關)分析,篩檢出最大相關係數(r , correlation coefficient)之波段位置,且從中篩選座落於不同波帶之 8-10 個較大相關係數之窄波段,作為後續統計軟體 SAS 8.0 進行直線複迴歸分析(MLR analysis, multiple linear regression analysis)之候選光譜特徵,由逐步回歸選取程序(stepwise regression selection procedure)建立具有適當相關強度之水稻生長性狀的 MLR 估測模式。又由光譜曲線之波形,篩檢綠光波段之反射比峰點(GREEN)、紅光波段之反射比谷點(RED)及近紅外光波段之反射比頂點(NIR)為光譜曲線特徵窄波段,由其反射比之個別及相互比值探討 GREEN、RED、NIR、RED/NIR、GREEN/NIR、RED/GREEN、NDVI 及紅光臨界斜率(RES, red edge slope)等指數在生育期間之變化,以及其等和生長性狀之關係。其中,NDVI 為 $(\text{NIR}-\text{RED})/(\text{NIR}+\text{RED})$ 之比值,RES 為 $(\text{NIR}-\text{RED})/2$ 反射比所在窄波段位置 $(\lambda_{(\text{NIR}-\text{RED})/2})$ 之斜率,而 NIR、RED、GREEN 為反射比, λ_{NIR} 及 λ_{RED} 則為窄波段中心位置。

另利用 SAS 8.0 進行二個期作間的虛擬變數(dummy variable)檢定,發現兩期作之植被指數未達顯著水準,故將兩期作資料合併進行迴歸分析,以提高植被指數關係模式的適用性。再另以近地面高解析光譜資料模擬 SPOT 衛星光譜之寬波段測值,即以綠光(500-590 nm)、紅光(610-680 nm)及近紅外光(790-890nm)波段範圍之近地面窄波段反射比平均值為衛星寬波段之代表值,藉由 RED/NIR、GREEN/NIR 及 NDVI 等三種植被指數,比較近地面窄波段估值與衛星寬波段估值在估測水稻生長性狀上的差異。

結果與討論

水稻植被光譜及生長性狀在全生育期的變化

植被反射光譜是植被光學特性的綜合表現,照射至植被的光輻射將出現吸收、反射及穿透等三種現象,並因作物植株的顏色光澤、形態及結構的空間變異分佈而有不等的變化,同時隨著生育進展、土壤條件、氣象環境及人為栽培管理的差異引起的不同植被狀態,進一步造成錯綜複雜的植被反射光譜。圖 1 係 2000 年一、二期稻作生育期間定期偵測的三維動態植被反射光譜(three-dimensional dynamic spectra),由平均值反射光譜曲線的時間序列動態顯示,水稻與一般綠色植物的植被光譜曲線類似,在不同波段各有獨特的變化趨勢。Avers⁽²⁾指出高等植物之葉綠素 a(主吸收波帶位於 380-450 nm 及 675 nm 附近)及葉綠素 b(主吸收波帶位於 410-470 nm 及 610 nm 附近)對光輻射的吸收率最大,共佔總吸收量的 65%,另 β 胡蘿蔔素吸收波帶為 420-500 nm,葉黃素吸收波帶為 400-500 nm。這些植物細胞色素對可見光波段的高吸收比例,概言之多集中在紅光及藍光波段,造成在 500-610 nm 範圍的綠黃色波段反射比相對較高,使得植物呈現綠色⁽²⁾。

在波長大於可見光的近紅外光波段(740-1300 nm),植被反射比將受到植被結構明顯影響,因此反射比在近紅外光波段上升迅速直至一高原波形出現後又大幅下降(圖 1);最大吸收窄波段近於 1193 nm,最大反射比則分別落於 806-890 nm(一期稻作)及 872-1161 nm(二期稻作)區間。隨著生育進展植被結構愈形複雜,近紅外光波段反射比有增高趨勢。短波紅外光波段(1300-1800 nm)及中紅外光波段(1800-2500 nm)波形複雜,且受到植物水分含量的影響最大反射比在短波紅外光落於 1316 nm,在中紅外光分別落於 1850 nm(一期稻作)及 1837 nm(二期稻作)附近。

由圖 1 之植被光譜變化,發現各波段在不同生育階段之變異不一,反應各種影響因子可能隨時空而異,組合出對各波段不等的影響作用。整體言之,概以中紅外光波段內之反射比有較大變異,顯然的中紅外光波段較易受到環境干擾,故較不適合利用於水稻生長與生育狀態之判識用途。又各波段之間可能有共線性(collinearity)問題,彼此或有交感及連動關係,未來均值得深入探討。

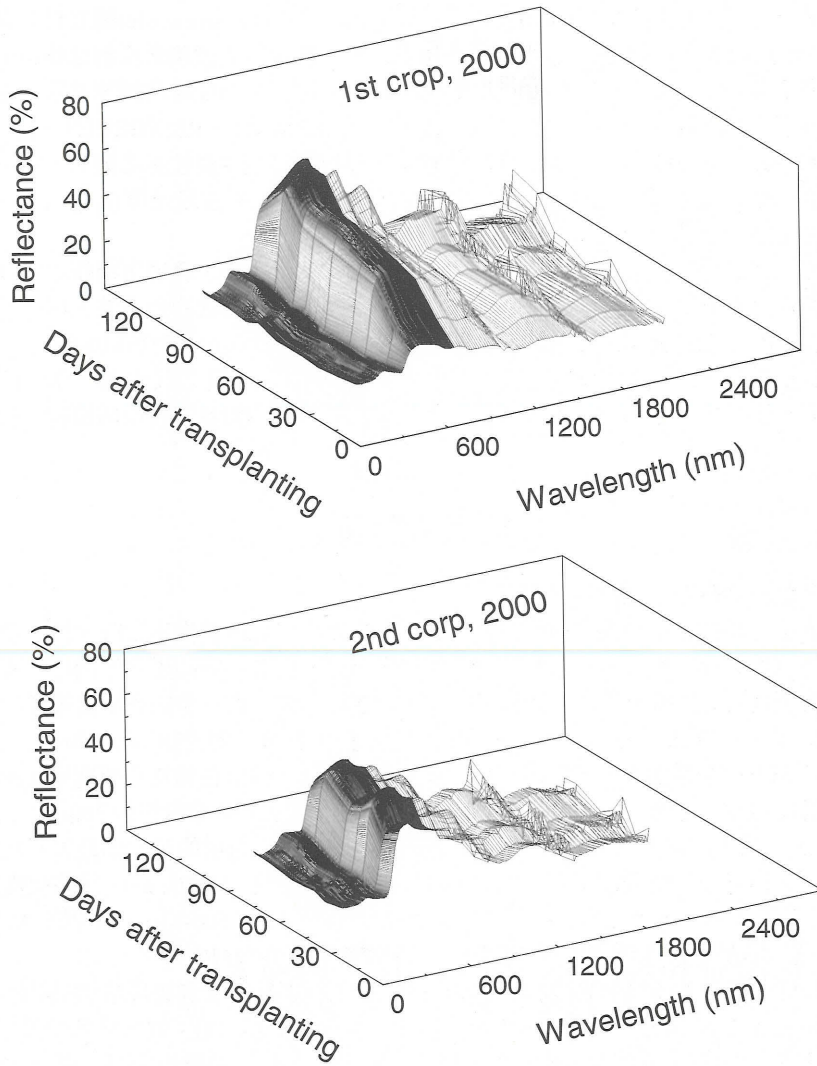


圖 1. 2000 年兩期稻作之水稻植被反射比光譜之 3D 動態變化。

Fig.1. The three-dimensional changes of rice canopy reflectance spectra during the first and the second cropping seasons of 2000.

全生育期的生長性狀分佈是瞭解作物族群生長狀況及植被狀態的最佳方式,圖 2 即是 2000 年兩期稻作不同生長性狀隨生育進展的定期偵(監)測圖示。水稻自秧苗移植後進入分蘗期,分蘗數及葉片數逐日增加,且葉片伸展擴大,使葉鮮重、葉乾重及 LAI 逐漸增大。大致言,各生長性狀約於抽穗期(一、二期稻作分別為移植後第 91 及 71 天)前後達到最高峰,且抽穗後逐漸降低,在全生育期間呈現曲線分佈。此一現象與 Yoshida and Ahn⁽²⁹⁾所述, LAI 值隨稻株生長而增大,至抽穗期因有最大的上位五枚葉片而達到最大值,抽穗後因下位葉片逐漸枯萎死亡而導致 LAI 值漸減的結果一致。而二期稻作由於生育初期的高溫抑制分蘗,使分蘗期提早停止,又在單位時間內快速生長使營養生長期縮短而較早達到抽穗期⁽¹¹⁾,因此區隔出一、二期稻作之生長曲線(圖 2)。又水稻株高則隨移植後天數的增加而伸長,生育後期逐漸趨緩,在二期稻作尤其明顯,其全生育期的分佈表現與其他性狀略異。

單一窄波段反射比與水稻生長性狀的關係

由於抽穗期約為曲線生長性狀之高原期,乃將水稻全生育期抽穗前及抽穗後的生長性狀資料切割成二部分,分別對量測光譜範圍(350-2500nm)之各窄波段反射比與各生長性狀進行相關強度(直線相關)分析,結果如圖 3。水稻一、二期稻作抽穗前的植被光譜反射比與各生長性狀間的直線相關,在可見光波段為負相關,以紅光部位的相關性(相關係數最大絕對值)最高,最大絕對值一期稻作落於 629 nm,各性狀的相關係數(r)依序為 LAI(-0.67)、葉鮮重(-0.67)、株高(-0.66)、葉乾重(-0.65)、地上部鮮重(-0.61)及地上部乾重(-0.61)。二期稻作在可見光波段的直線相關較一期稻作高,最大絕對值近 583 nm,依序為葉鮮重(-0.82)、地上部鮮重(-0.81)、株高(-0.80)、葉乾重(-0.79)、地上部乾重(-0.76)及 LAI(-0.59)。

隨著波長的增長,一、二期稻作分別在 705 nm 及 726 nm 附近由可見光波段的負相關急速轉變為近紅外光波段的正相關。在近紅外光波段中,740-1300 nm 間的相關係數均為非常相近的高度正值,一、二期稻作最大正相關分別落於 872 nm 及 896 nm 窄波段,一期稻作相關係數(r)依序為株高(0.85)、葉鮮重(0.82)、葉乾重(0.81)、地上部鮮重(0.80)、LAI(0.78)及地上部乾重(0.77),二期稻作相關係數(r)依序為株高(0.69)、地上部鮮重(0.67)、鮮葉重(0.65)、乾葉重(0.60)、地上部乾重(0.59)及 LAI(0.45)。其中,在 940-1040 nm 波帶雖然與作物生長有關,但對植體內水分也呈現敏感性⁽¹³⁾,因此其相關係數較 735-940 nm 波帶低。1040-2500 nm 波帶的反射光譜主要受植體內水分及結構的綜合影響,呈現出不同期作間光譜曲線的差異(圖 1),使得相關係數的表現各異(圖 3)。

抽穗後水稻植被反射光譜與生長性狀的關係與抽穗前的趨勢大致相同,一、二期稻作的最佳直線相關窄波段在可見光波段分別位於 652 nm 及 670 nm,近紅外光波段分別落於 834 nm 及 808 nm,但相關性均較抽穗前低。如前述水稻株高在抽穗後的生長逐漸趨緩,未如反射比之下降幅度,故相關性較差且不如其他生長性狀(圖 3)。因此,綜觀水稻生長性狀與波段光譜的直線相關,無論是抽穗前或抽穗後,雖然正、負不一,大致上均以可見光波段及近紅外光波段的相關性較佳。

利用多元直線複迴歸模式建立水稻兩期稻作生長性狀的估測模式

為了去除水稻植被光譜中的干擾因子,得到更好的生長性狀估(預)測結果,乃試以組合數個相互獨立且對生長性狀敏感性高的特徵窄波段^(11, 14, 18, 20),建立估測生長的光譜特徵模式。本研究利用多元直線複迴歸分析(MLR analysis)中的逐步迴歸選取程序,選出 2-3 個波長變數,以建立由多個單一特徵窄波段組合而成的關係模式,作為估(預)測水稻生長性狀用途。然為避免複迴歸分析中變數之間的共線性(collinearity)問題,先由前述單一窄波段反射比與水稻生長性狀的直線相關中(圖 3),選擇 8-10 個分屬不同波段(如藍光、綠光、紅光、短波近紅外光及中波近紅外光等)且對生長性狀相關性較佳的窄波段反射比進行迴歸分析,結果如表 1。

由表 1 得知,在一、二期稻作抽穗前的各個估測模式中,除二期稻作估測模式對地上部乾重($R^2=0.617$)及 LAI($R^2=0.385$)的相關性較低外,其他估測模式均能解釋各生長性狀 70% 以上的變異,且達到顯著相關($P<0.01$)。一期稻作估測模式的適用特徵窄波段為 541 nm、872 nm 及 1607 nm,二期稻作則為 583 nm、896 nm 及 1421 nm,但二期稻作中的三個特徵窄波段未必需要全部應用於估測模式,

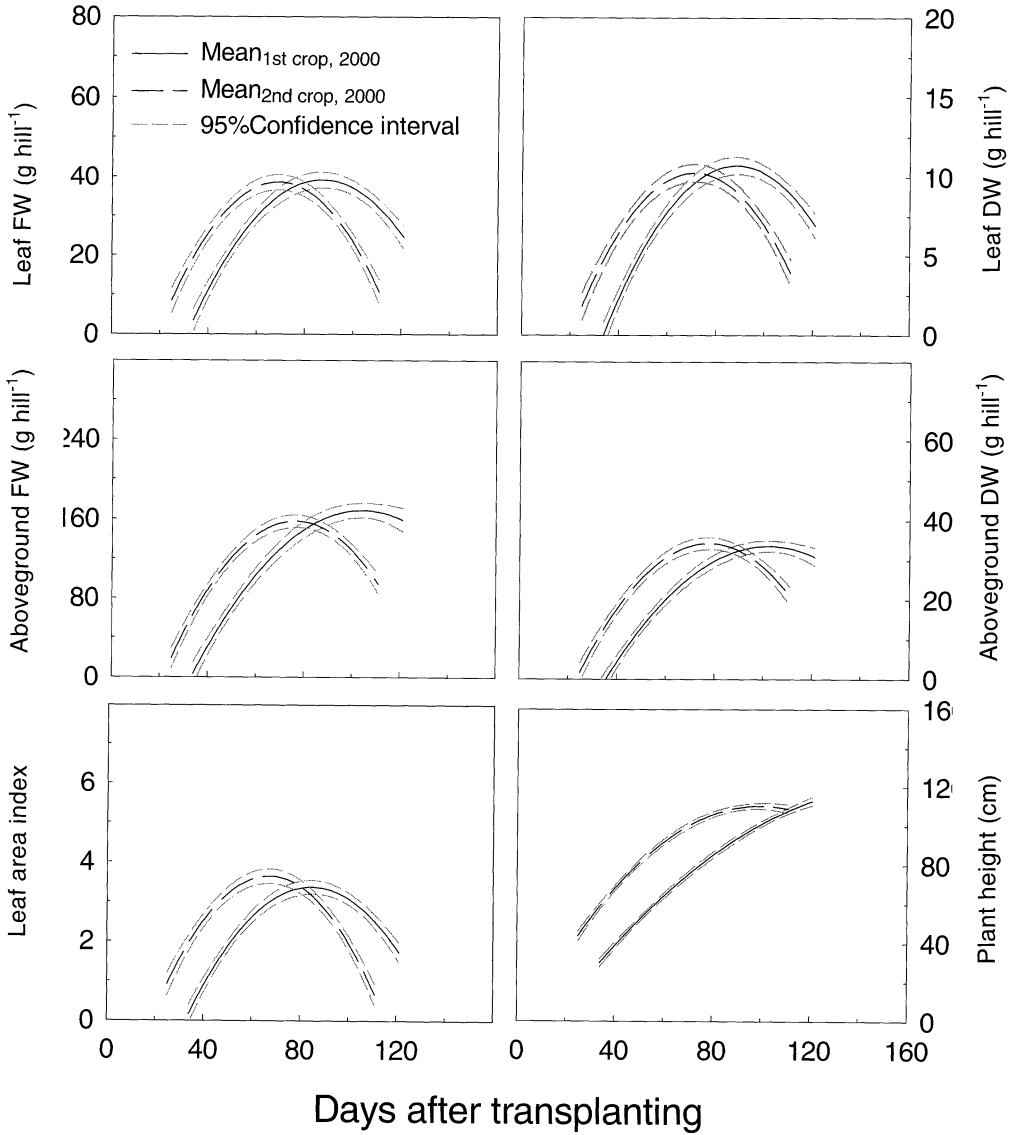


圖 2. 2000 年兩期稻作之水稻生長性狀全生育期二次迴歸曲線及其 95%信賴區間。

Fig.2. Changes of growth traits of rice plants grown in the first and the second cropping seasons of 2000. The 95% confidence interval of each growth trait is included.

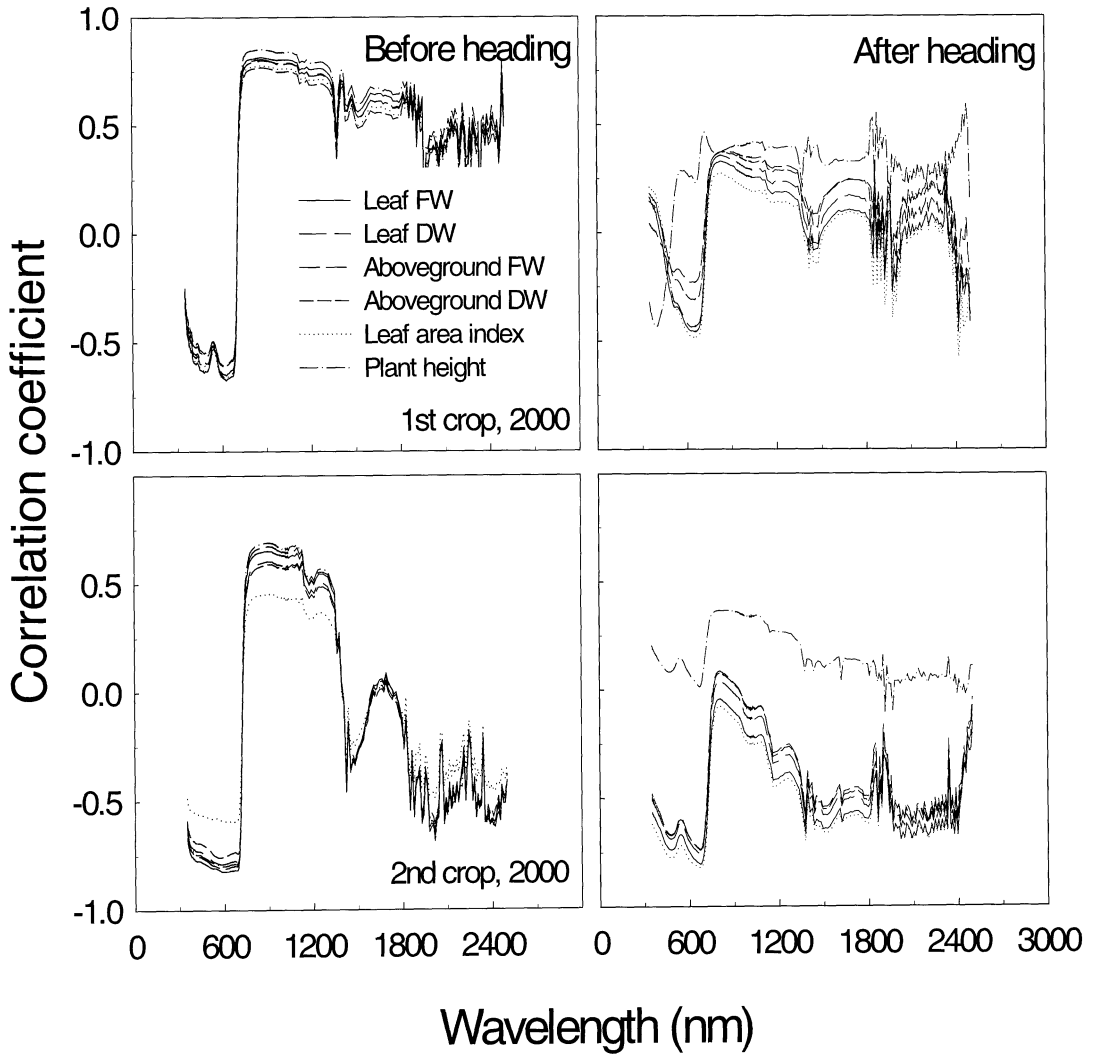


圖 3. 2000 年兩期稻作之水稻不同生長性狀與植被光譜反射比之相關強度(直線相關)曲線。

Fig.3. The correlation intensity (linear correlation) analysis curves of growth traits to reflectance spectra of rice plants grown in the first and the second cropping seasons of 2000.

表 1. 2000 年兩期稻作之水稻植株生長性狀直線複迴歸估測模式

Table 1. The best 1-, 2-, and 3-variable linear regression models for growth traits of rice plants (*Oryza sativa* L. cv TNG 67) grown in the first and the second crops of 2000

Growth stage	Y=aX ₁ +bX ₂ +cX ₃ +d				N	R ²	P
	a	b	c	d			
Before heading							
First crop, 2000 ^z							
Leaf fresh weight	-1.92	1.16	-1.21	16.16	20	0.779	<0.01
Leaf dry weight	-0.43	0.39	-0.52	3.48	20	0.786	<0.01
Aboveground fresh weight	-5.46	5.57	-7.34	40.22	20	0.761	<0.01
Aboveground dry weight	-1.03	1.21	-1.82	7.81	20	0.740	<0.01
Leaf area index	-0.15	0.10	-0.13	1.39	20	0.758	<0.01
Plant height	-2.15	1.79	-1.99	42.36	20	0.832	<0.01
Second crop, 2000 ^y							
Leaf fresh weight	-2.21	1.15	-2.28	31.08	20	0.793	<0.01
Leaf dry weight	-0.73	0.30	-0.60	8.93	20	0.708	<0.01
Aboveground fresh weight	-8.00	5.03	-9.34	99.27	20	0.790	<0.01
Aboveground dry weight	-4.72	0.56		28.23	20	0.617	<0.01
Leaf area index		0.15	-0.34	2.26	20	0.385	<0.01
Plant height	-6.03	1.05		73.15	20	0.730	<0.01
After heading							
First crop, 2000 ^x							
Leaf fresh weight	4.63	-6.93	0.55	21.94	20	0.642	<0.01
Leaf dry weight	1.12	-1.78	0.16	6.13	20	0.649	<0.01
Aboveground fresh weight		-6.95	1.83	142.65	20	0.363	<0.01
Aboveground dry weight		-1.69	0.40	29.59	20	0.457	<0.01
Leaf area index		-0.28	0.05	2.40	20	0.577	<0.01
Plant height ^w		-1.16	0.67	99.66	20	0.282	<0.01
Second crop, 2000 ^v							
Leaf fresh weight	11.56	-7.84		34.44	20	0.727	<0.01
Leaf dry weight		-0.73	0.16	7.18	20	0.690	<0.01
Aboveground fresh weight		-7.41	1.88	120.57	20	0.693	<0.01
Aboveground dry weight		-1.39		40.48	20	0.540	<0.01
Leaf area index		-0.27	0.04	2.65	20	0.731	<0.01
Plant height ^u		0.40	-0.35	97.64	20	0.177	<0.01

^z X₁: reflectance at 541 nm, X₂: reflectance at 872 nm, X₃: reflectance at 1607 nm.

^y X₁: reflectance at 583 nm, X₂: reflectance at 896 nm, X₃: reflectance at 1421 nm.

^x X₁: reflectance at 533 nm, X₂: reflectance at 629 nm, X₃: reflectance at 834 nm.

^w X₂: reflectance at 629 nm, X₃: reflectance at 1876 nm.

^v X₁: reflectance at 479 nm, X₂: reflectance at 670 nm, X₃: reflectance at 808 nm.

^u X₂: reflectance at 808 nm, X₃: reflectance at 1621 nm.

部分生長性狀在二期稻作以最佳二元直線複迴歸模式即已足夠，新增變數並未大幅提供對生長性狀變異之估測。由以上可知，無論一、二期稻作，其選出的三個窄波段組合分別落於可見光波段(400-740 nm)中的綠光部位(500-600 nm)，以及近紅外光(740-1300 nm)或短波紅外光(1300-1800 nm)等波段之中，並未有集中於某一特定波段之現象。

在抽穗後的估測模式中，由於株高在抽穗後的生長趨於平緩，與其他生長性狀在抽穗期前後達到最高值後逐漸降低的曲線分佈略異(圖 2)，造成其估測模式的 R^2 都在 0.282 以下(表 1)。因此，抽穗後除了株高及一期稻作的地上部鮮重($R^2=0.363$)、地上部乾重($R^2=0.457$)的 R^2 較低外，其他估測模式的 R^2 均可達到 0.54 以上，並具顯著水準($P<0.01$)。在摒除株高之後，各模式的特徵窄波段在一期稻作為 533 nm、629 nm 及 834 nm，二期稻作則為 479 nm、670 nm 及 808 nm，均落於可見光及近紅外光波段。其中葉鮮重、葉乾重對綠光(533 nm，一期稻作)或藍光(479 nm，二期稻作)部位及近紅外光波段較為敏感，其他性狀則受紅光(629 nm 或 670 nm)及近紅外光波段的影響較大(表 1)。

Thomas and Gausman⁽²¹⁾試驗結果發現，在植被 400-2500 nm 光譜範圍中，可見光波段主要受到葉綠素吸收光譜的影響，葉綠素吸收光譜最強烈的部位在藍光(400-500 nm)及紅光(600-700 nm)，最弱的部位在綠光(500-600 nm)；近紅外光部位(700-1300 nm)主要受植被結構及葉內構造的影響，植被結構及葉內構造愈複雜，近紅外光部位的反射比愈高；1300-2500 nm 波段則受植體內水分吸收的影響最大。因此，本研究表 1 各估測模式中特徵窄波段變數的參數值顯示，一、二期稻作抽穗前的水稻生長性狀分別與以 541 nm、583 nm 為中心的可見光綠光波段和以 1607 nm、1421 nm 為中心的短波紅外光波段呈負相關，與近紅外光波段(872 nm、896 nm)呈正相關。由此可見，水稻在抽穗前隨著生育日數的增加，植株日益成長的結果造成單位土地面積內葉綠素含量的提升及植被結構的漸趨複雜，於是使得植體水分含量愈高且植被覆蓋率增加^(3, 28)。抽穗後的估測模式中，除了株高以外，兩期稻作各生長性狀均與可見光中的紅光波段呈負相關，與近紅外光波段呈正相關，其中葉重部份受綠光的負影響較大。即當水稻在抽穗後的生殖生長相(reproductive growth phase)，通常植株生育已近停頓，隨著葉片老化作用的發生，器官的衰敗及色素的改變逐趨明顯，植被結構漸趨簡單，使得紅光部位的反射比增加而近紅外光部位的反射比降低，同時也降低生長性狀與光譜特徵的相關性。又植體的老化過程中，對水分的需求不若營養生長相(vegetative growth phase)的旺盛，可能使得其與水分關係密切的短波及中波紅外光的相關較鬆散，因此生長性狀的最佳估測模式並無短波及中波紅外光之窄波段列入。

利用植被指數建立水稻生長性狀的估測模式

多元直線複迴歸模式必須利用統計方法在許多窄波段中選擇獨立且敏感性高的窄波段加以組合，以估測生長性狀。這種方法較為複雜，需要考量變數之共線性及其對生長性狀之敏感性，當選出的特徵窄波段數目較多時，實用性將較差而不適合發展多波段(頻譜)之簡易測計。植被指數提供另一種選擇，係由不同窄波段或寬波段中精選出來的綜合指數，可由之建立植被反射光譜與作物外觀特性的關係，並將各種不確定因素(如土壤背景、大氣環境等)極小化⁽⁴⁾。植被指數通常選擇 1-3 個單一特徵波段，利用波段之間符合邏輯的數學運算(如和、差、比值等)與作物特性建立關係模式。因為此種統計方法較多元直線複迴歸分析簡單，選擇波段數較少，實用性相對較高。

為提高植被指數的實用性，經過虛擬變數檢定，本研究將一、二期稻作的資料進行合併，建立同時適用於兩期稻作的植被指數。表 2 陳列 RED、NIR、RED/NIR、GREEN/NIR、NDVI 及 RES 等六種植被指數對水稻一、二期稻作抽穗前和抽穗後生長性狀的參數。由表 2 結果，顯示抽穗前六種指數中以 GREEN/NIR 對各性狀的相關性最佳(圖 4a)，以 LAI 為例，各指數的決定係數 R^2 依次為 GREEN/NIR(0.775)、NDVI(0.740)、RED/NIR(0.730)、RED(0.459)、NIR(0.397)及 RES(0.375)。其中 GREEN/NIR、NDVI 及 RED/NIR 對各性狀的 R^2 除了地上部乾重及株高以外，均達到 0.72 以上，如 GREEN/NIR 與各性狀的相關性由大而小依序為葉鮮重(0.785)、地上部鮮重(0.780)、LAI(0.775)、葉乾重(0.763)、株高(0.728)及地上部乾重(0.719)。

表 2. 以植被指數估測 2000 年兩期稻作之水稻植株生長性狀

Table 2. Regression analyses of spectral indices to growth traits of rice plants (*Oryza sativa* L. cv TNG 67) grown in the first and the second crops of 2000

Spectral index		Growth trait ^z					
		LFW	LDW	AGFW	AGDW	LAI	PH
Before heading		$Y=ae^{bx}$					
RED(%)	a	74.61	22.42	308.18	81.85	7.42	122.06
	b	-0.29	-0.34	-0.34	-0.43	-0.33	-0.17
	R ²	0.599	0.589	0.569	0.599	0.459	0.654
	P	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01
NDVI	a	1.19	0.17	1.81	0.18	0.10	16.83
	b	4.01	4.74	5.03	5.86	3.98	1.80
	R ²	0.767	0.730	0.736	0.666	0.740	0.704
	P	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01
RED/NIR	a	58.63	17.33	249.69	57.39	4.74	92.79
	b	-6.11	-7.43	-7.98	-9.44	-6.04	-2.37
	R ²	0.758	0.763	0.780	0.719	0.730	0.728
	P	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01
GREEN/NIR	a	70.47	21.52	314.35	74.50	5.82	104.59
	b	-4.78	-5.76	-6.17	-7.23	-4.85	-2.10
	R ²	0.785	0.763	0.780	0.719	0.775	0.728
	P	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01
		$Y=aX+b$					
NIR(%)	a	1.01	0.27	3.83	0.75	0.07	1.25
	b	3.88	-1.37	-23.15	-4.47	-0.08	27.50
	R ²	0.504	0.430	0.449	0.318	0.397	0.372
	P	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01
RES	a	180.61	49.51	704.73	136.34	13.27	233.22
	b	1.86	0.05	-3.22	-0.43	0.33	33.43
	R ²	0.468	0.415	0.434	0.305	0.374	0.375
	P	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01
After heading		$Y=ae^{bx}$					
RED(%)	a	55.67	14.32	193.05	31.75	4.91	107.88
	b	-0.09	-0.07	-0.04	-0.02	-0.11	-9.41
	R ²	0.456	0.395	0.220	0.026	0.533	0.000
	P	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	1.000
NDVI	a	2.71	1.04	49.15	9.57	0.12	105.36
	b	3.33	2.92	1.56	1.68	4.04	0.03
	R ²	0.665	0.634	0.461	0.560	0.708	0.004
	P	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	0.487
RED/NIR	a	67.00	17.21	220.24	47.76	6.00	108.89
	b	-4.86	-4.24	-2.23	-2.38	-5.95	-0.05
	R ²	0.677	0.645	0.474	0.566	0.715	0.004
	P	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	0.466
GREEN/NIR	a	89.89	22.84	263.15	57.57	8.46	109.06
	b	-4.94	-4.44	-2.48	-2.63	-5.96	-0.05
	R ²	0.596	0.588	0.431	0.523	0.650	0.003
	P	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	0.585
		$Y=aX+b$					
NIR(%)	a	0.20	0.07	1.17	0.19	0.01	0.16
	b	20.08	5.28	95.54	22.79	1.79	100.92
	R ²	0.032	0.054	0.127	0.079	0.008	0.075
	P	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	0.321	0.218
RES	a	148.84	40.42	519.96	97.97	10.91	39.48
	b	4.34	1.55	61.64	14.98	0.38	101.42
	R ²	0.267	-0.301	0.370	0.319	0.192	0.069
	P	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01

^z LFW: leaf fresh weight, LDW: leaf dry weight, AGFW: aboveground fresh weight, AGDW: aboveground dry weight, LAI: leaf area index, PH: plant height.

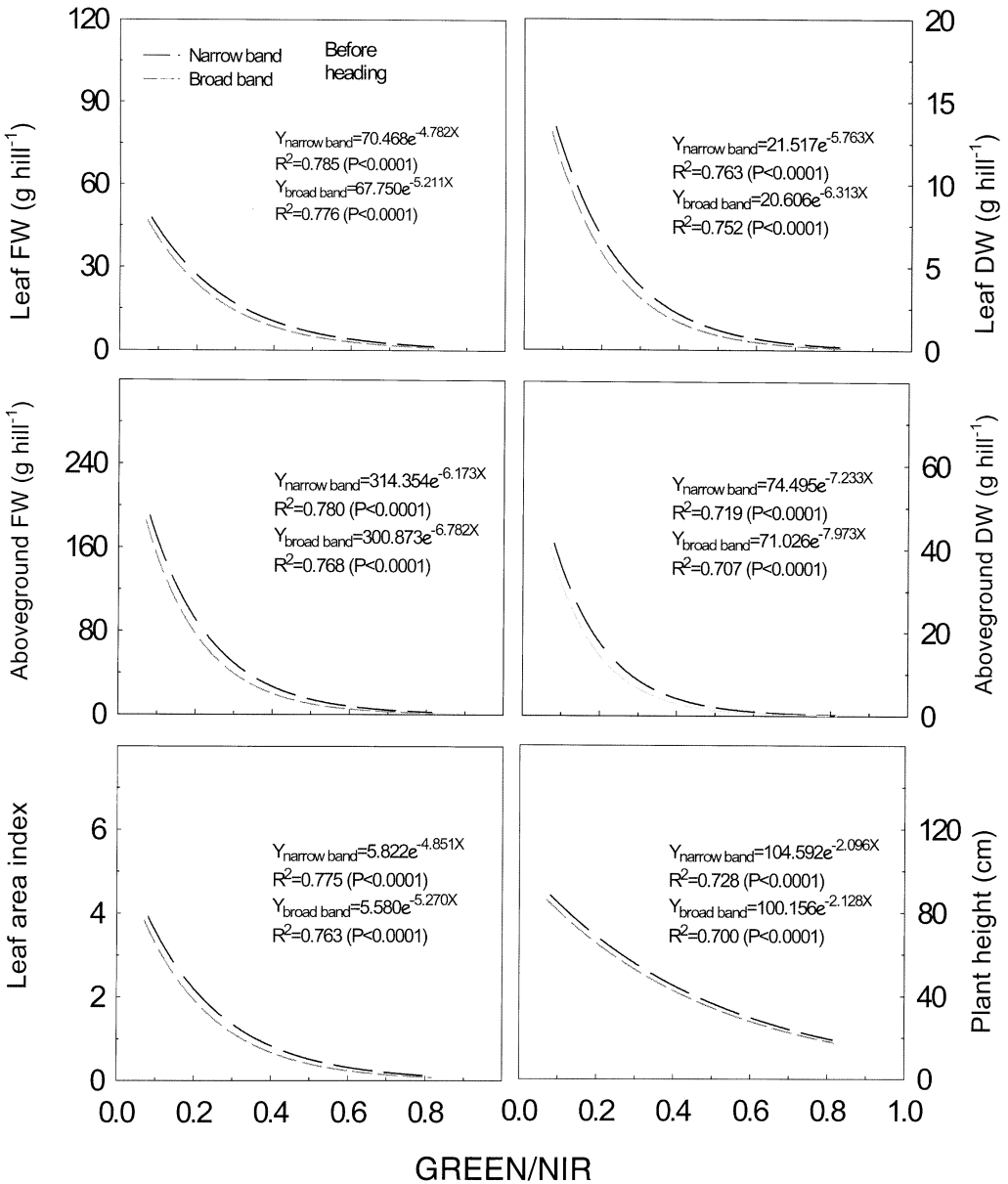


圖 4a. 2000 年兩期稻作之水稻抽穗前不同生長性狀與植被指數(GREEN/NIR 比值)之相關曲線。植被指數分別由水稻植被光譜之窄波段反射比及模擬 SPOT 衛星寬波段平均反射比計算。

Fig. 4a. Correlation between growth traits and GREEN/NIR ratio before heading for rice plants grown in the first and the second cropping seasons of 2000. GREEN: reflectance at green light peak, NIR: reflectance at near-infrared maximum.

又如表 2，抽穗後各指數與各性狀的相關性均較抽穗前為低，其中以 RED/NIR 與各性狀的相關性較佳(圖 4b)，如以 LAI 來說，其 R^2 依次為 RED/NIR(0.715)、NDVI(0.708)、GREEN/NIR(0.650)、RED(0.533)、RES(0.192)及 NIR(0.008)。此外，各指數對抽穗後株高的相關性普遍不佳，其 R^2 均在 0.008 以下。因此，抽穗前及抽穗後分別以 GREEN/NIR 及 RED/NIR 為最佳的結果(圖 4a、4b)，與多元直線複迴歸估測模式中單一窄波段所在的波段相符(表 1)。二種統計方法均顯示，水稻生長性狀的估(預)測，在抽穗前利用 GREEN 及 NIR 波段部位，抽穗後利用 RED 及 NIR 波段部位所建立的關係模式可達到最高的相關性。

此外，無論抽穗前或抽穗後，RES 及 NIR 與性狀間的關係為直線關係，NDVI、RED/NIR、GREEN/NIR 及 RED 與性狀間呈現指數關係(表 2)。Horler⁽¹⁰⁾指出，紅光臨界位置及斜率會因為作物的老化導致葉綠素含量降低及丹寧酸增加而產生位移，也會隨著生育進展而改變。惟本文研究之 RES 與水稻各性狀間的相關性並未較其他植被指數為佳，NDVI、RED/NIR 及 GREEN/NIR 都是以 GREEN、RED 及 NIR 為基礎的植被指數。可見光波段中的 RED 的反射比隨著植被覆蓋率的增加而降低，當覆蓋率接近 100% 以後，LAI 及生質量仍繼續生長，但 RED 的反射比卻增加很少，造成 RED 與各性狀的關係呈現指數關係，而非線性關係(表 2)。這似乎是可見光波段光譜中共有的特性，也是造成以可見光為基礎的植被指數在估(預)測植被各種性狀時，受到飽和度限制的原因。Aman *et al.*⁽¹⁾曾指出，NDVI 可對 LAI 進行良好的預測，在 LAI < 3 時，NDVI 與 LAI 幾乎呈直線關係，當 LAI 愈大，植冠構造漸趨複雜，NDVI 與 LAI 的相關性將逐漸降低，其限制因素即為 RED 與 LAI 的關係改變成非直線關係的結果。而 NIR 的反射比在覆蓋率達到 100% 以後，隨著 LAI 及生質量的繼續生長，其反射比不受覆蓋率的影響，植被覆蓋率愈高則近紅外光之反射值愈大⁽²²⁾，與各性狀的關係為直線相關(表 2)。因此，多元直線複迴歸模式為一線性關係，而當此模式選擇可見光波段及近紅外光波段中的二個波段長做為估測模式時，將因容易受到上述飽和度問題的限制，使其相關性較前述三個植被指數為低。

由上述可知，水稻生長性狀可以由近地面窄波段光譜中，以 GREEN、RED 及 NIR 為基礎的植被指數(NDVI、RED/NIR 及 GREEN/NIR)進行估測。但是，如果能夠利用衛星進行地面光譜遙測以評估作物生長狀態，將使植被光譜估(預)測作物生長性狀模式的實用性更廣、更多樣性。為瞭解近地面窄波段與衛星寬波段頻譜在進行水稻生長估(預)測時的差異性，本研究遂利用水稻近地面植被窄波段光譜模擬 SPOT 衛星寬頻之植被指數，以比較植被指數在近地面窄波段光譜與 SPOT 衛星寬波段頻譜在進行水稻生長預測時的差異性。本研究特選取抽穗前最佳之 GREEN/NIR 及抽穗後最佳之 RED/NIR 為例進行比較，結果顯示無論在抽穗前或抽穗後，模擬 SPOT 衛星寬波段頻譜的植被指數與各性狀的相關性雖略低於近地面窄波段光譜植被指數，但非常相近(圖 4a、4b)，且二者間對各種性狀預測結果的相似度均達到 98% 以上(圖 5)。

由試驗結果推論，SPOT 衛星寬波段頻譜在正確校正大氣干擾變數及地理幾何因素後，可藉由近地面高解析光譜遙測所建立之資料庫及各項衍生光譜特徵模式，應用於估測農作物(如水稻)的生長性狀及追蹤農作物的生長狀態。如此一來，將可進行大面積非破壞性的農作物生長監(偵)測，乃至於擴及環境對生長狀態的影響評估。惟本文研究直接以近地面窄波段高光譜資料模擬衛星寬波段多頻譜資料，避開了實際偵測時必然遭逢的光譜解析度、空間解析力、衛星感測器俯視角度及大氣與地理校正問題，真實狀況下立體光譜資訊之連結仍待探討與釐清。

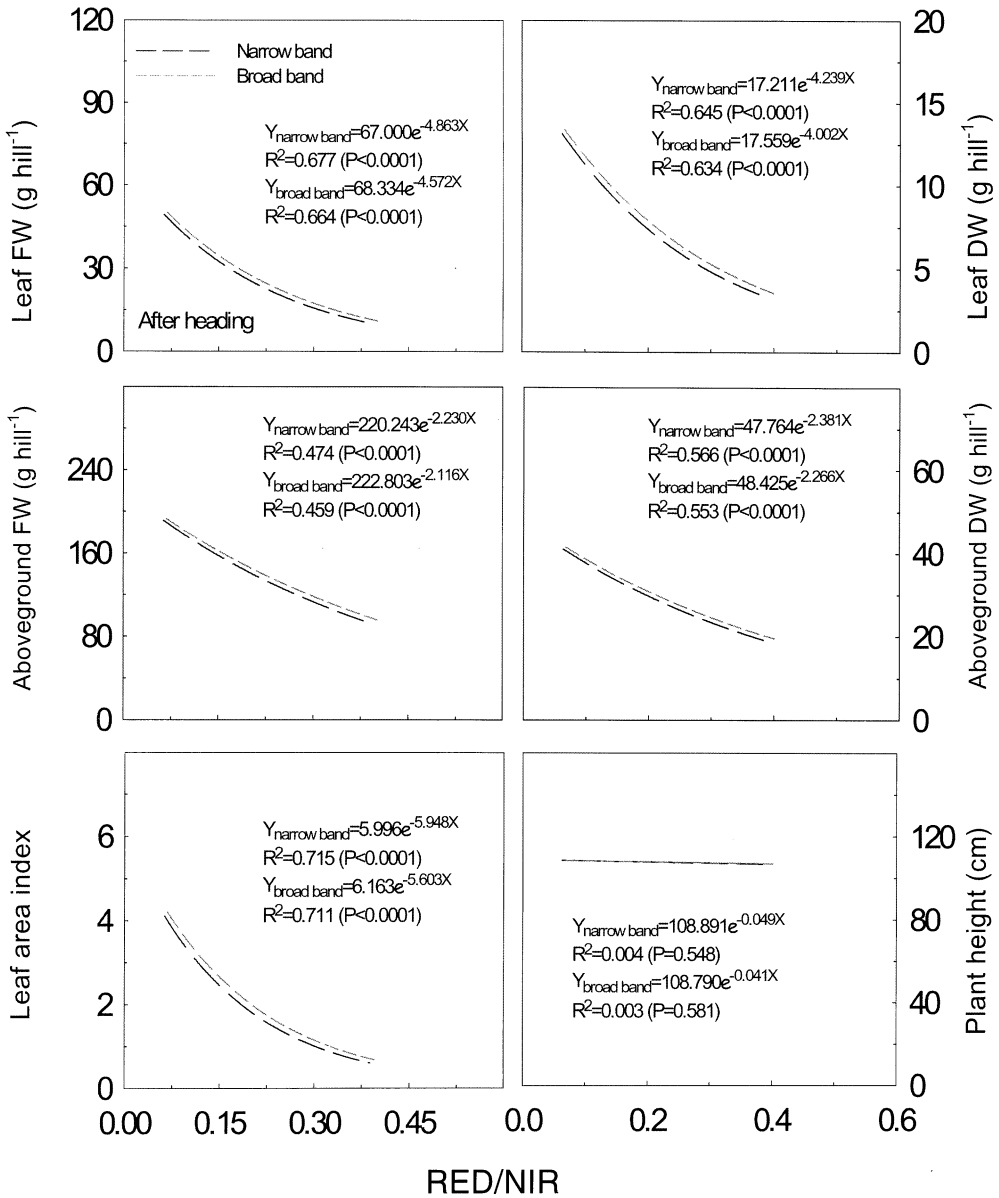


圖 4b. 2000 年兩期稻作之水稻抽穗後不同生長性狀與植被指數(RED/NIR 比值)之相關曲線。植被指數分別由水稻植被光譜之窄波段反射比及模擬 SPOT 衛星寬波段平均反射比計算。

Fig. 4b. Correlation between growth traits and RED/NIR ratio after heading for rice plants grown in the first and the second cropping seasons of 2000. RED: reflectance at red light minimum, NIR: reflectance at near-infrared maximum.

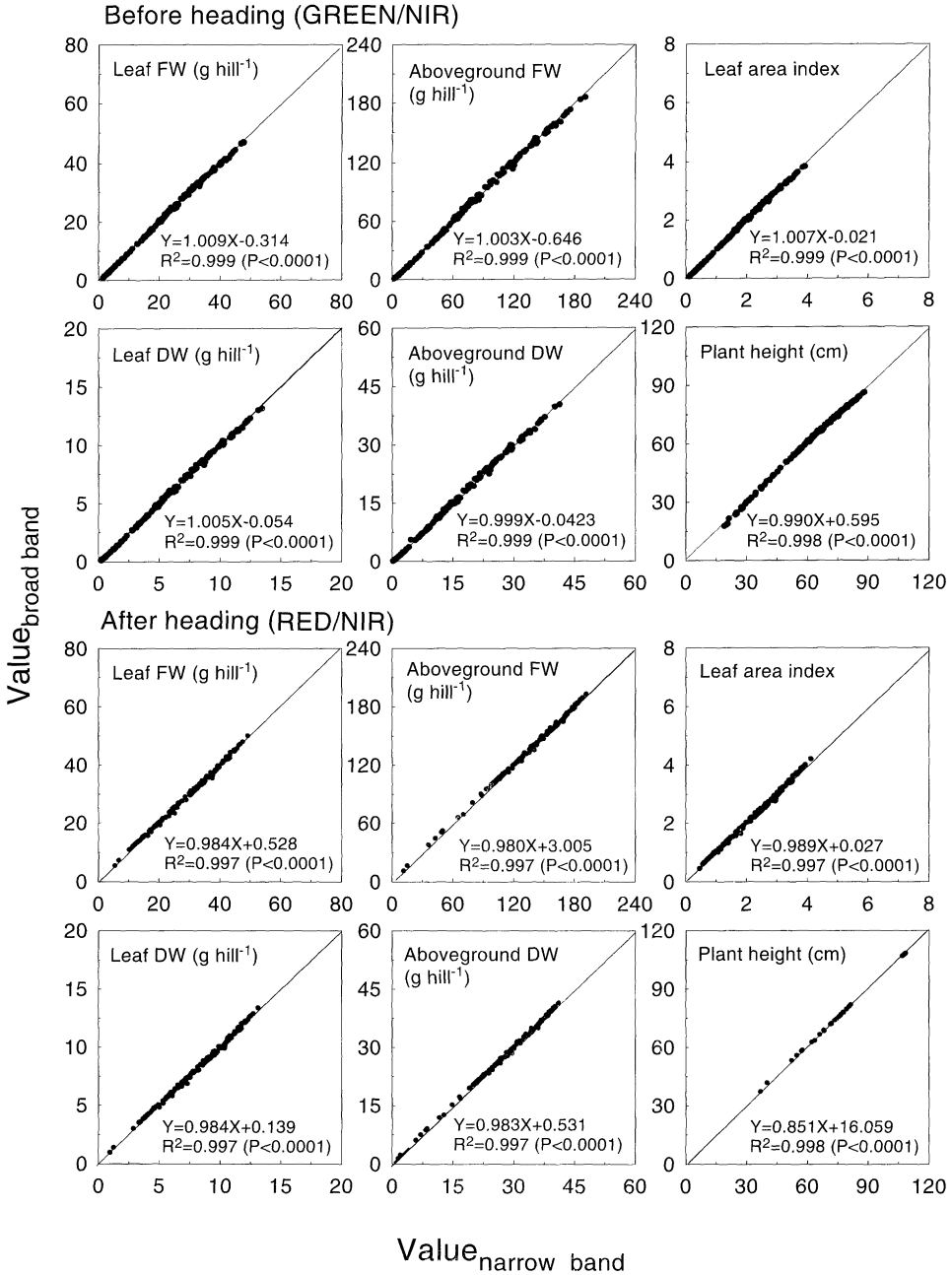


圖 5. 水稻不同生長性狀以窄波段植被指數及模擬 SPOT 衛星寬波段植被指數估測之相關性。抽穗前以 GREEN/NIR 比值估測，抽穗後以 RED/NIR 比值估測。

Fig.5. Correlation between growth traits of rice plants estimated from spectral indices, GREEN/NIR ratio before heading and RED/NIR ratio after heading, of ground-based hyperspectral data and simulated broad band data of SPOT satellite.

誌 謝

本文研究承蒙行政院農業委員會科技計畫(90 農科-4.1.1-農-C2 及 91 農科-5.1.3-農-C2)經費補助，並承農委會農業試驗所農場組協助田區管理，特以致謝。

引用文獻

1. Aman, A., H. P. Randriamanantena, A. Podaire and R. Forouin. 1992. Upscale integration of normalized difference vegetation index: The problem of spatial heterogeneity. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 30:326-338.
2. Avers, C. G. 1985. *Molecular Cell Biology*. Addison-Wesley, Reading, MA, USA.
3. 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.
4. Bouman, B. A. M. 1995. Crop modeling and remote sensing for yield prediction. *Netherlands J. Agric. Sci.* 43:413-161.
5. Carter, G. A. 1994. Ratios of leaf reflectance in narrow wavebands as indicators of plant stress. *Intl. J. Remote Sens.* 15:697-703.
6. Chen, J. M. 1996. Evaluation of vegetation indices and a modified simple ratio for boreal application. *Canadian J. Remote Sens.* 22:229-242.
7. Elvidge, C. D. and Z. Chen. 1995. Comparison of broad-band and narrow-band red and near-infrared vegetation indices. *Remote Sens. Environ.* 54:38-48.
8. Fassnacht, K. S., S. T. Gower, M. D. MacKenzie, E. V. Nordheim and T. M. Lillesand. 1997. Estimating the leaf area index of north central Wisconsin forests using the Landsat Thematic Mapper. *Remote Sens. Environ.* 61:229-245.
9. Horler, D. N. H. 1983. The red edge of plant leaf reflectance. *Intl. J. Remote Sens.* 4:273-288.
10. Jordan, C. F. 1969. Derivation of leaf area index from quality of light on the forest floor. *Ecology* 50:663-666.
11. Lawrence, R. L. and W. J. Ripple. 1998. Comparisons among vegetation indices and bandwise regression in a highly disturbed, heterogeneous landscape: Mount St. Helens, Washington. *Remote Sens. Environ.* 64:91-102.
12. Lin, A. C. 1979. Comparison on the photosynthesis under community conditions between the first and second crops of rice. p.85-90. In: *The Causes of Low Yield of the Second Crop Rice in Taiwan and the Measures for Improvement*. NSCT, Taiwan.
13. Penuelas, J., I. Filella, L. Serrano and R. Save. 1996. Cell wall elasticity and water index (R970 nm/R900 nm) in wheat under different nitrogen availabilities. *Intl. J. Remote Sens.* 17: 373-382.
14. Ripple, W. J. 1994. Determining coniferous forest cover and forest fragmentation with NOA-9 advanced very high resolution radiometer data. *Photogramm. Eng. Remote Sens.* 60:553-540.
15. Rouse, J. W., R. H. Haas, J. A. Schell, D. W. Deering and J. C. Harlan. 1974. *Monitoring the Vernal Advancement and Retrogradation (Greenwave Effect) of Natural Vegetation, NASA/GSFC Type III, Final Report, Greenbelt, MD, USA.* 371pp.

16. Schepers, J.S., T.M. Blackmer, W.W. Wilhelm and M. Resende. 1996. Transmittance and reflectance measurements of corn leaves from plants with different nitrogen and water supply. *J. Plant Physiol.* 148:523-529.
17. Shaw, D. T., T.J. Malthus and J.A. Kupiec. 1998. High-spectral resolution data for monitoring Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) regeneration. *Intl. J. Remote Sens.* 19:2601-2608.
18. Shibayama, M. and T. Akiyama. 1991. Estimating grain yield of maturing rice canopies using high spectral resolution reflectance measurements. *Remote Sens. Environ.* 36:45-53.
19. Thenkabail, P.S., A.D. Ward and J.G. Lyon. 1995. Landsat-5 Thematic Mapper models of soybean and corn crop characteristics. *Intl. J. Remote Sens.* 15:49-61.
20. Thenkabail P. S., R. B. Smith and E. De Pauw. 2000. Hyperspectral vegetation indices for determining agricultural crop characteristics. *Remote Sens. Environ.* 71:158-182.
21. Thomas, J.R. and H.W. Gausman. 1977. Leaf reflectance vs. leaf chlorophyll and carotenoid concentrations for eight crops. *Agron. J.* 69:799-802.
22. Tucker, C.J. 1979. Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation. *Remote Sens. Environ.* 8:127-150.
23. 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.
24. Yang, C.M. and M.R. Su. 1998a. Seasonal variations of reflectance spectrum and vegetation index in rice vegetation cover. p.574-593. In: *Proceeding of the 3rd Asian Crop Science Conference*. April 27-May 2, 1998. Chinese Society of Agronomy. Taichung, Taiwan.
25. Yang, C.M. and M.R. Su. 1998b. Correlation of spectral reflectance to growth of rice vegetation. p.A-1-1-A-1-6. In: *Proceedings of the 19th Asian Conference on Remote Sensing*. November 16-20, 1998. National Mapping and Resource Information Authority and Asian Association on Remote Sensing. Manila, Philippines.
26. Yang, C.M. and M.R. Su. 1999. Modeling rice growth from characteristics of reflectance spectra. P.735-740. In: *Proceedings of the 20th Asian Conference on Remote Sensing*. 22-25 November 1999, Hong Kong.
27. Yang, C.M. and M.R. Su. 2000. Analysis of spectral characteristics of rice canopy under water deficiency. p.13-18. In: *Proceedings of the 21th Asian Conference on Remote Sensing*. 4-8 December 2000, Taipei.
28. 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. Council. ROC(B)* 25:233-238.
29. Yoshida, S. and S.B. Ahn. 1968. The accumulation process of carbohydrate in rice varieties in relation to their response to nitrogen in the tropics. *Soil Sci. Plant Nutr.* 14:153-161.

Estimating Rice Growth Using Ground-Based Hyperspectral Reflectance Data and Simulated SPOT Broad Band Data¹

Rong-Kuen Chen² and Chwen-Ming Yang^{2,3}

Summary

Ground-based remotely sensed high-resolution reflectance spectra and growth traits of rice plants grown in the 1st and the 2nd cropping seasons of 2000 were used for establishing spectral characteristic models to estimate rice growth. Differences in plant growth from the estimates of spectral indices with narrow bands and simulated SPOT broad bands were compared. The 3-dimensional reflectance spectra of rice canopy were similar to those of other green plants. The patterns of growth traits were curvilinear, reached the climax near heading and differed between cropping seasons. By correlation intensity analysis between reflectance of narrow bands and growth traits, it showed that the correlation intensity curves were similar before and after heading, with lesser degree of correlation after heading. By the multiple linear regression (MLR) analysis, the best-2 and best-3 MLR models were established. Among the examined spectral indices, the GREEN/NIR ratio had the best correlation with growth traits before heading yet it was the RED/NIR ratio after heading. Differences in growth traits from spectral index estimations by narrow bands and the simulated SPOT broad bands were not significant.

Key words : Ground-based hyperspectral reflectance data, Spectral characteristic model, Vegetation index, Growth, SPOT satellite.

1. Contribution No.2128 from Taiwan Agricultural Research Institute, Council of Agriculture. Accepted : November 22, 2002.

2. Research Assistant and Senior Agronomist, Department of Agronomy, TARI, Wufeng, Taichung, Taiwan, ROC.

3. Corresponding author, E-mail: cmyang@wufeng.tari.gov.tw ; Fax: (04)23302806.