

# 甘藷葉片反射光譜分析與色素含量 之遙測估算

許明晃<sup>1</sup> 黃文達<sup>1</sup> 楊志維<sup>2</sup> 蔡養正<sup>1</sup> 張新軒<sup>1</sup> 楊棋明<sup>2</sup>

<sup>1</sup>國立台灣大學農藝學系

<sup>2</sup>中央研究院植物研究所

**摘要：**本研究以紫、綠與黃三種顏色甘藷葉為材料，進行葉片反射光譜測定，並以反射率計算植生指數(vegetation index)後，估算其葉片之色素含量。由反射光譜分析顯示，三種顏色甘藷葉片在555 nm與705nm之反射率對色素含量變化具有最大敏感度。而葉綠素紅光吸收波段675nm之反射率對於色素含量變化之敏感度小，故此一波段不適用於估算葉片色素含量。波長750 nm以上之近紅外光波段對於葉片色素含量敏感度亦小，雖不適用於直接估算色素含量，卻可用於計算植生指數來估算色素含量。以波段705nm及750 nm反射率計算植生指數SRVI與NDVI後，與葉片色素含量進行迴歸分析，可得到最佳的估算模式( $R^2 > 0.9$ )。另以多波段平均反射率計算植生指數後，與色素含量進行迴歸分析亦可得到較佳的估算模式( $R^2 > 0.82$ )。由本研究結果顯示利用反射光譜計算植生指數，非破壞性地估算葉片色素含量之變化進而監測作物生長狀況，可能為有效可行的方法。

**關鍵詞：**甘藷葉片、反射光譜、遙測、植生指數、色素

## Remote estimation of pigment content in sweet potato leaves by reflectance spectra

Ming-Huang Hsu<sup>1</sup>, Wen-Dar Huang<sup>1</sup>, Zhi-Wei Yang<sup>2</sup>, Yang-Zeng Tsai<sup>1</sup>, Shin-Shinge Chang<sup>1</sup>, and Chi-Ming Yang<sup>2</sup>,

<sup>1</sup> Department of Agronomy, National Taiwan University, Taipei, Taiwan 106, Republic of China

<sup>2</sup> Institute of Botany, Academia Sinica, Nankang, Taipei, Taiwan 115, Republic of China

**Abstract.** The reflectance spectra of Yellow, Purple and Taoyuan 2 (Green) sweet potato leaves were recorded. By using of reflectance spectra, vegetation indices were calculated to remotely estimate the pigment content. The signature analysis of reflectance spectra indicated that in the leaves of three sweet potatoes the maximum sensitivity to pigment concentration was found to be at 555 nm and 705 nm. The minimal sensitivity to pigment

concentration coincided with the red absorption maximum of chlorophyll at 675 nm. Therefore, it seems inappropriate to use this spectral band for pigment estimation. The near-infrared band ranging above 750 nm was not sensitive to pigment concentration, as found for 675 nm. The reflectance at near-infrared band could be used as a reference in the calculation of vegetation indices. Calculated vegetation indices using reflectance at 705 nm and 750 nm correlated very well with pigment concentration (correlation  $R^2 > 0.9$ ). Calculated vegetation indices using broad-band reflectance also correlated well with pigment concentration (correlation  $R^2 > 0.82$ ). Thus, it appears possible to create indices using reflectance spectra for non-destructive estimation pigment content and monitoring crop growth.

*Keywords:* Reflectance spectra, remote sensing, vegetation indices.

## 前 言

綠色植物的葉片含有大量的光合色素 (photosynthetic pigments)，包括葉綠素 (chlorophyll, Chl) 和類胡蘿蔔素 (carotenoid, Car)，能有效地吸收可見光的部份波段進行光合作用，將光能轉變為化學能以供利用。植物葉片的光合色素含量不僅在不同的發育階段有所變化，在老化的過程中亦逐漸地減少光合色素含量而改變顏色。落葉植物在秋天葉片老化過程中，其葉片色素質量產生變化，葉片顏色也因而轉變 (Hendry *et al.*, 1987; Matile *et al.*, 1989; Matile *et al.*, 1992)。植物遭受逆境時，譬如淹水、乾旱、高低溫、除草劑或病蟲害時，葉片色素含量與顏色變化與自然老化時之情形相似 (Hendry *et al.*, 1987)。光合色素含量之減少可作為葉片老化之指標，發展非破壞性方法測定葉片色素含量可監控作物生長狀況，在遭受逆境危害時可提供即時預警。

時至今日，非破壞性測定葉片色素含量之技術中，較常用之方法為以葉片或植冠反射光譜來估算色素含量 (Baret *et al.*, 1987; Baret *et al.*, 1992; Buschmann and Nagel, 1993; Chappelle *et al.*,

1992; Curran *et al.*, 1991; Gitelson and Merzlyak, 1994a, b; Thomas and Gausman, 1977)。反射光譜是電磁能 (electromagnetic energy) 在遙測的一種應用，其主要光譜波段涵蓋紫外光 (<400 nm)、可見光 (400~700 nm)、近紅外光 (700~1300 nm) 及中紅外光 (1300~2500 nm) 等，在此等波段範圍下植物葉片或植冠皆可描繪出的反射光譜特徵曲線 (Fuchs, 1990)。由反射光譜的分析，發現不同波段反射比值的變化與作物的生理反應及生長狀況有密切關係 (Bauer, 1975; Ma *et al.*, 1996; Masoni *et al.*, 1977; Walburg *et al.*, 1982)，而以不同波段反射比值所計算之各種植生指數則受到葉片的發育及水分含量、色素含量、細胞壁組成及葉片內部結構等不同因子之影響 (Elvidge and Chen, 1995)。健康之綠色植物有吸收藍光、紅光及強烈反射紅外光之特性，植物生長越旺盛，其吸收之紅光越多及反射之紅光越少，而反射之近紅外光越強，紅光與近紅外光之反射差異即越大 (Green *et al.*, 1997; Price and Bausch, 1995)。因此常用於植物資源探測的植生指數，多使用紅光與近紅外光之反射比值或差值 (Elvidge and Chen, 1995)。

葉綠素位於紅光之吸收峰波段約在 675 nm，

此一波段之反射率亦常用於估算葉綠素含量 (Chappelle *et al.*, 1992; Thomas and Gausman, 1977)。以秋天落葉植物葉片為材料進行的研究中顯示，波長555 nm與705 nm之反射率對葉片色素含量變化具有最大之敏感度，故以此二波段反射率與近紅外光750 nm反射率，計算各植生指數以估算葉綠素含量具有高度準確率 (Gitelson and Merzlyak, 1994a, b, 1996, 1997)。

甘藷具有多種葉色，包括綠色、紅色、紫色、黃（綠）色等，及不同葉形。Yang與Ko (1997)及Yang (1998)運用遙測技術於分析數種甘藷植冠(canopy)反射光譜之特徵與不同生長季節之植被指數變化。無論栽培季節之間或基因型之間，甘藷植冠全生育期之輻射量與反射比波譜變化曲線均類似，而輻射量波譜遠較反射比波譜複雜。此研究所使用之甘藷葉全為綠色系列，其基本光譜特徵較類似。我們先前的研究結果顯示，紫色及綠色甘藷葉Chl及其代謝物、Car之含量皆明顯高於黃色葉。Chl、pheophytin (Phe) 及 less polar carotenoid (LP Car)等極性較小之代謝物，其含量隨著葉位的增加而增多，而吡啉 (protoporphyrin, PPIX、magnesium protoporphyrin, MGPP、protochlorophyllide, Pchl)ide、chlorophyllide (Chlide)、pheophorbide (Pho)及 more polar carotenoid (MP Car)等極性較大之代謝物，其含量則隨著葉位的增加而降低。三種甘藷葉在幼葉階段，葉綠素崩解以Chl→Chlide→Pho為主要途徑 (major route)，而以Chl→Phe→Pho為次要途徑 (minor route)。而隨著葉片逐漸成熟與老化，其葉綠素崩解之途徑卻有明顯的不同，即主要途徑為Chl→Phe→Pho，而次要途徑則為Chl→Chlide→Pho (Hsu *et al.*, 2003)。這些與葉綠素生合成與崩解有關之代謝物，都在紅光波段有不同程度之吸收

而影響葉片之反射。

因此，本研究以紫、綠與黃三種顏色甘藷葉為材料，進行葉片反射光譜測定，並以反射率計算植生指數後估算葉片色素含量，建立遙測估算葉片色素含量之模式。

## 材料與方法

### 一、試驗材料

本研究以三種不同葉色的甘藷 (*Ipomoea batatas*)變種，即淺綠葉（黃葉）、紫葉及桃園2號（綠葉）為材料，單本插植於10×10×30 cm<sup>3</sup>之盆鉢後置於溫室。插植時取約10節之甘藷蔓先端苗，將7節埋入土中，並施用肥料N:P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>:K<sub>2</sub>O = 0.1:0.2:0.3 g/盆。生長三週後，取同一條蔓自頂端往基部算起葉身完全展開之第1、3、5、7葉位(leaf position)之葉片，進行葉片反射光譜及葉綠素與類胡蘿蔔素之測定 (Hsu *et al.*, 2003)。

### 二、反射光譜測定

葉片反射光譜以配備積分球套件之Hitachi U-3010光譜儀進行測定。光譜掃描速率為600 nm/min，波段範圍自200至900 nm，光譜解析力為1 nm。測定時以硫酸鋁白板為參考對比。葉片測定反射光譜時以葉脈間之區域為主，反射率為葉片反射輻射值對參考白板反射輻射值之比值。簡易比植生指數 (simple ratio vegetation index, SRVI)及常態化差異植生指數 (normalized difference vegetation index, NDVI)之計算方式分別為SRVI = RNIR/RRED，NDVI = (RNIR - RRED)/(RNIR + RRED)。NDVI<sub>Green</sub>計算公式為NDVI<sub>Green</sub> = (R750-R555)/(R750+R555)。

### 三、色素含量測定

甘藷葉片以液態氮急速冷凍，並以研鉢磨成

細粉後進行冷凍乾燥。然後秤取0.01 g樣品細粉，以80%丙酮萃取色素，在4,500 rpm離心5分鐘，取上清液，以Hitachi U-2000分光光度計測定A663.6、A646.6、A440.5的吸收值。三者分別為Chl *a*、Chl *b*及Car的強吸收處。以Porra等(1989)的公式計算Chl *a*與Chl *b*的含量；以Holm(1954)的方法計算Car的含量。

## 結果與討論

### 一、葉片色素含量

三種甘藷葉片Chl *a*、*b*與Car含量，都隨著葉位之增加而變化（表1）。不論任何葉位，Chl含量都以紫色葉最高，綠色葉次之，黃色葉最低。前二者間含量相近，但後者的差異甚大，而紫色及綠色葉Chl含量為黃色葉之3~4倍。紫色及綠色甘藷葉之Chl含量隨著葉位增加而明顯增多，而黃色葉不同葉位間Chl含量之變化則較小。綠色葉與紫色葉Chl *a/b*比值都接近3，與一

般正常狀況下高等植物的葉片之Chl *a/b*比值相似，黃色葉Chl *a/b*比值明顯高於3甚多，且其Chl含量遠低於正常植物之葉片。因此，黃色葉甘藷應屬葉綠素缺乏突變種(chlorophyll-deficient mutant)，對溫度與光線都很敏感，對生存環境之適應力較其它二種甘藷葉薄弱(Yang *et al.*, 1990; Yang *et al.*, 1993)。

隨著葉位增加，三種甘藷葉之Chl *a/b*都呈逐漸下降趨勢，顯現Chl *a*的累積速率比Chl *b*慢，此可能是導因於Chl *a*的生合成速率隨著葉位增加而比Chl *b*慢，或可能是導因於Chl *a*的崩解速率隨著葉位增加而比Chl *b*快些，或導因於前二因素之綜合效應。三種葉色甘藷葉之Chl總含量隨葉位而明顯增多時，其Car總含量並未同步地隨著葉位之變化而有明顯改變，顯示Car之生成與分解較Chl更容易達到平衡狀態。

三種甘藷葉之Car/Chl比值都依葉位增加而有些微下降，但差距不大。以黃色葉較高，自0.35緩降為0.31；綠色葉次，自0.23緩降為0.19；而

**Table 1.** Pigment contents ( $\mu\text{g/g}$  dry wt.) in sweet potato leaves.

Leaf position	Pigment contents					
	Chl <i>a</i>	Chl <i>b</i>	Chl <i>a+b</i>	Chl <i>a/b</i>	Car	Car/Chl
Yellow						
1st	2291	569	2859	4.21	991	0.35
3rd	2319	489	2808	5.01	924	0.33
5th	2758	604	3361	4.76	1039	0.31
7th	2783	635	3419	4.45	1062	0.31
Purple						
1st	6900	2334	9234	2.99	1860	0.21
3rd	7907	2999	10906	2.73	1899	0.19
5th	8590	3285	11875	2.66	2002	0.18
7th	9138	3832	12970	2.45	1970	0.16
Green (Taoyuan 2)						
1st	6483	1903	8386	3.42	1920	0.23
3rd	7258	2233	9491	3.29	1963	0.21
5th	7523	2442	9965	3.12	1875	0.19
7th	7804	2734	10538	2.90	1923	0.19

以紫色葉最低，自0.21變化為0.19。此顯示，Car與Chl之相對累積量雖有品係間較明顯之差異，但同一品係在甘藷葉之生育過程中則無明顯變化。黃色葉Car之相對累積速度比綠色葉快，而紫色葉則最慢。從另一角度看，黃色葉Chl之相對累積速度比綠色葉慢，而紫色葉則最快。此二光合色素含量之變化，勢必反映在其葉片之吸收與反射光譜特徵。

## 二、葉片反射光譜分析

紫、綠與黃三種顏色甘藷葉不同葉位間之葉片反射光譜皆類似（圖1）。三種甘藷葉最大反射率發生在近紅外光約750 nm以上之波段。紫色與綠色葉之近紅外光反射率幾乎相同，而黃色葉近紅外光反射率則較低，但差距隨著葉位增加而縮小（反射率大於800 nm為顯示）。由於葉綠素在紅光及藍光波段及類胡蘿蔔素在藍光波段都具有強吸收的特性，因此三種甘藷葉在這兩個波段的反射率最低。紫色與綠色葉的葉綠素及類胡蘿蔔素含量接近（表1），因此在藍光、紅光及近紅外光波段反射率亦相近。而黃色葉之二大類光合色素則含量明顯較低，故其在藍光與紅光波段之反射率則比另外二種甘藷葉稍高。整體而言，綠甘藷葉反射光譜之基本特徵與其它綠色高等植物幾乎相同，但黃色與紫色甘藷葉在500-600 nm綠光波段之反射率則有顯著差異；前者之反射率遠大於綠色葉，而後者之反射率則遠低於綠色葉（圖1）。

紫色葉在500-600 nm綠光波段之反射率並不一般綠色植物在有增加之趨勢，顯示紫色甘藷葉片應含有對此波段具有強吸收之色素，致使反射率降低。這些色素可能是花青素、類黃酮或多酚類等二次代謝物，因它們在500-550 nm之間有強吸收。在以秋天落葉植物為材料的研究中顯示，葉片在老化過程中，葉綠素含量減少，在

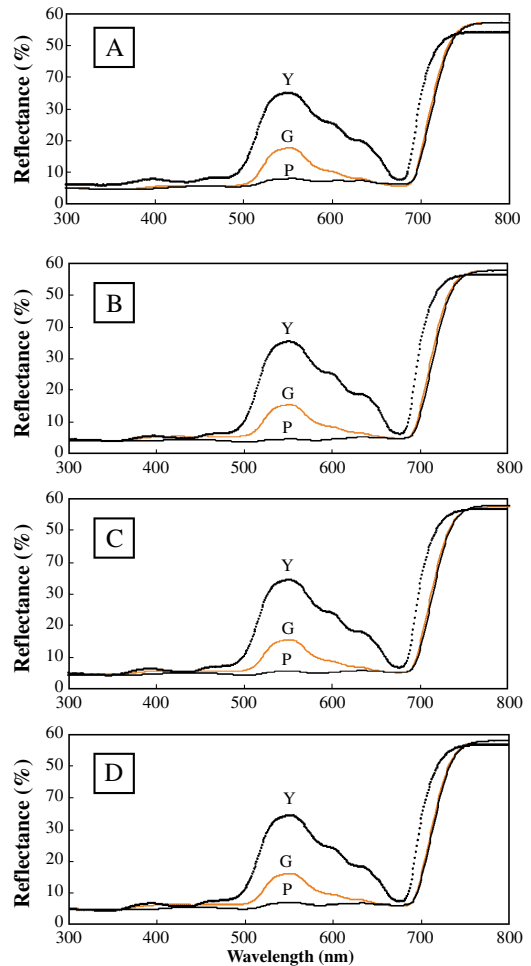


Fig. 1. Reflectance spectra of sweet potato leaves are detected at 1<sup>st</sup> (A), 3<sup>rd</sup> (B), 5<sup>th</sup> (C) and 7<sup>th</sup> (D) leaf position. Y, P and G indicate Yellow, Purple and Green (Taoyuan 2) leaf of three sweet potatoes, respectively.

510-600 nm及690 nm以上波段之反射率明顯增加 (Gitelson and Merzlyak, 1994a, 1996)。而本研究中，黃色甘藷葉的葉綠素及類胡蘿蔔素含量皆較低，除藍光波段外，在綠光，紅光波段之反射率皆高於紫色與綠色甘藷葉，葉綠素含量與反射光譜之變化趨勢與老化過程中之葉片相似。

曲線經過微分後，更能展示曲線之間的差異性。三種甘藷不同葉位之葉片反射光譜（圖1）經一次微分後之光譜曲線，可更明顯地顯示出三

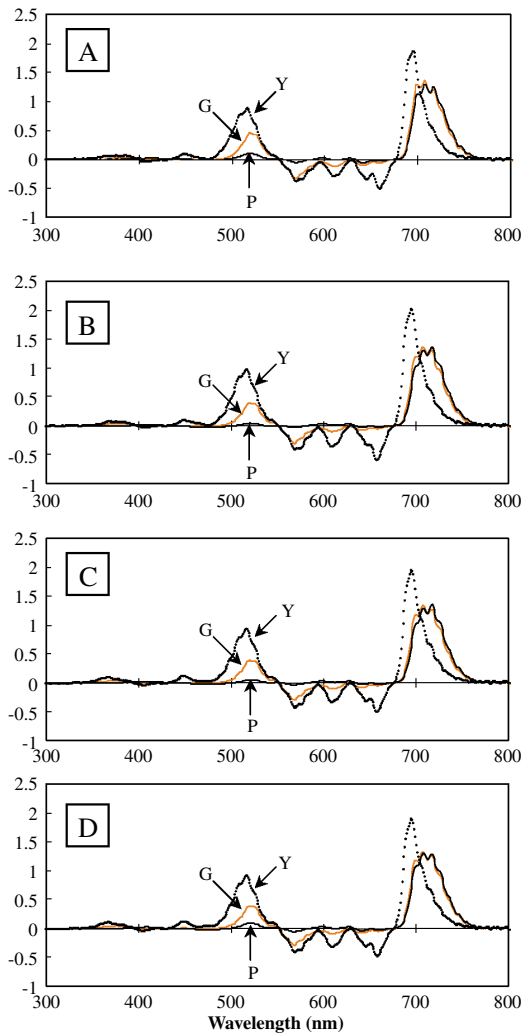


Fig. 2. The first order derivative of reflectance spectra of sweet potato leaves is presented at 1<sup>st</sup> (A), 3<sup>rd</sup> (B), 5<sup>th</sup> (C) and 7<sup>th</sup> (D) leaf position. Y, P and G indicate Yellow, Purple and Green (Taoyuan 2) leaf of three sweet potatoes, respectively.

種甘藷葉之間的差異（圖2）。黃色甘藷葉的類胡蘿蔔素含量較低，因此在類胡蘿蔔素吸收峰波段450 nm附近之一次微分反射率與紫色與綠色甘藷葉差異大。隨著葉綠素含量的減少，一次微分曲線在500至520 nm波段間的斜率明顯地增加。在波長555 nm及675 nm時，三種甘藷葉之一微分曲線交會並且改變其正負號。Gitelson

與Merzlyak (1994a)指出，波長500 nm附近一次微分反射率的增加與葉綠素及類胡蘿蔔素的吸收有關，而波長675 nm一次微分反射率的增加僅與葉綠素之吸收相關。此類反射光譜特徵實導因於前述的葉綠素及類胡蘿蔔素對宇宙輻射之吸收特性。

在波段500至520 nm之間，一次微分反射率的峰值，隨著葉綠素含量的減少，而往短波長的方向移動，亦即產生藍位移現象(blue-shift)。波長在大於此一反射率峰值後，一次微分反射率快速降低，至約555 nm時，三種甘藷葉一次微分反射曲線交會，且其值為0。在波長約675 nm時，因為葉綠素的強吸收致使三種甘藷葉片的反射率皆低。在大於675 nm的波段，黃色葉一次微分反射率增加之趨勢大於紫色及綠色葉，顯示在此一波段的峰值隨著葉綠素含量的減少而往短波長的方向移動，此一現象為紅光臨界的藍位移(blue-shift of red edge)。三種甘藷葉一次微分曲線在約705 nm時再次交會，自此以後其反射率值相等。以上綠光與紅光波段之藍位移現象都發生在不同葉位之葉片，且都受花青素、類黃酮、多酚類、類胡蘿蔔素及葉綠素等之影響。

藉由分析反射光譜中反射率的變異量可瞭解光譜變化趨勢，及對色素含量的敏感度。三種甘藷葉光譜反射率之標準差(standard deviation, STD)如圖3所示。波長500 nm以下及波長約750 nm以上之近紅外光波段對色素變異之敏感度低，葉綠素紅光吸收波段約675 nm附近對三種甘藷葉色素含量變化之敏感度亦低。675 nm附近之波段為葉綠素強吸收之波段，因此前人研究中有以此波段進行葉綠素含量之估算(Chappelle *et al.*, 1992; Thomas and Gausman, 1977)，此一波段對低濃度之葉綠素含量變化具有較高之敏感度，但是對於較高濃度葉綠素含量變化之敏感度則較

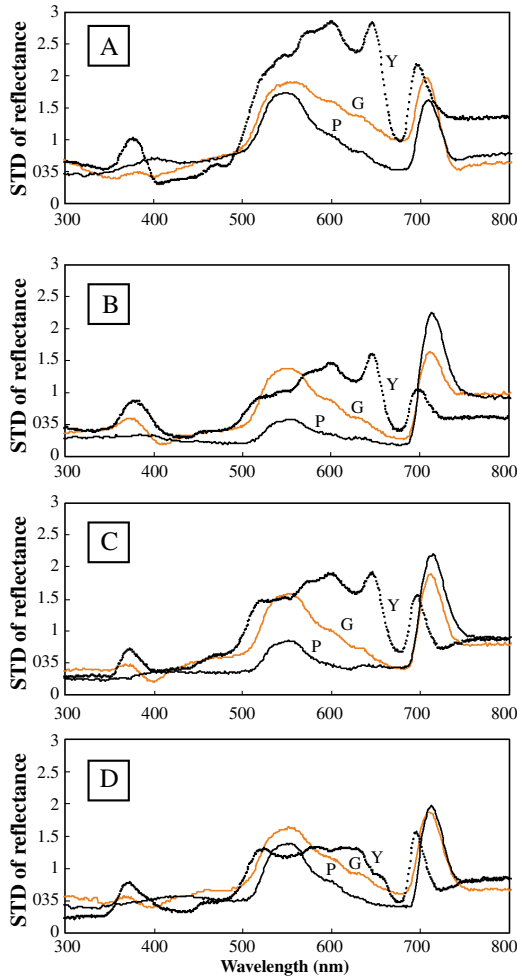


Fig. 3. Standard deviation (STD) of reflectance for sweet potato leaves is presented at 1<sup>st</sup> (A), 3<sup>rd</sup> (B), 5<sup>th</sup> (C) and 7<sup>th</sup> (D) leaf position. Y, P and G indicate Yellow, Purple and Green (Taoyuan 2) leaf of three sweet potatoes, respectively.

低 (Gitelson and Merzlyak, 1994a, 1996, 1997)。

反射率對色素含量變異具有高敏感度之波段，包括從530至640 nm的長波段及約700至710 nm附近之波段。紫色及綠色葉反射率標準差之最大值出現在550-560 nm及700-710 nm之間，黃色葉除了波長700 nm附近有標準差最大值外，從530-640 nm的長波段範圍其標準差皆維持較高，並且在波長640 nm有一個明顯突出的最大

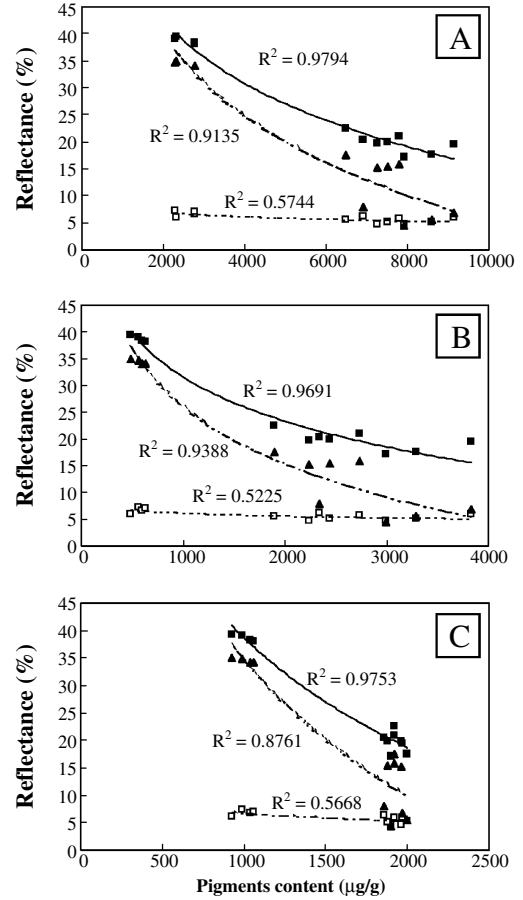


Fig. 4. The reflectance at the wavelength 705 (■), 675 (□), and 555 nm (▲) versus Chl *a* (A), Chl *b* (B), and Car (C) content in sweet potato leaves.

值 (圖3)。大致而言，這些標準差都隨著葉位增加而減少，但此標準差之最大值則減少更多。

波長555 nm ( $R_{555}$ )及705 nm ( $R_{705}$ )反射率與三種甘藷葉之Chl *a*、Chl *b*及Car含量呈現高度之曲線相關 (圖4)。此亦顯示此二波段反射率對色素含量變化之敏感度高，其對Chl *a*、Chl *b*及Car含量相關性之 $R^2$ 值分別為0.9794及0.9135、0.9691及0.9388、0.9753及0.8761。而675 nm反射率( $R_{675}$ )與Chl *a*、Chl *b*及Car含量之相關性則低，其對Chl *a*、Chl *b*及Car含量相關性之 $R^2$ 值分別為0.5744、0.5225及0.5668，此說明了在本

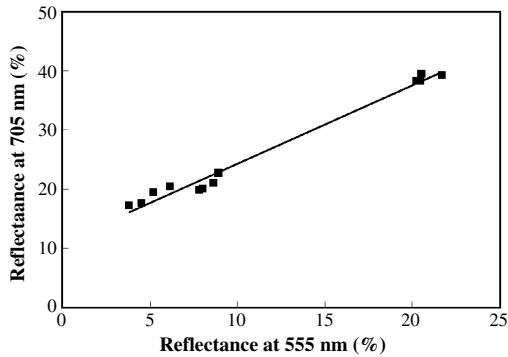


Fig. 5. The reflectance at the wavelength 705 nm versus that at 555 nm.

研究中三種色素濃度範圍內， $R_{675}$ 對三種色素含量變化之敏感度低。 $R_{555}$ 及 $R_{705}$ 除了對色素含量變化具有高敏感度外，此二波段間之反射率亦具有高度之相關，其 $R^2$ 為0.9845（圖5）。

### 三、植生指數與色素含量

用來計算植生指數以進行色素含量估算之波段，必須對色素含量具有高敏感度，且不易受其他因子影響。相對而言，影響這些波段反射率之主要因子即為各種色素。530至640 nm的長波段及約700 nm附近之波段對色素含量具有高敏感度，750至900 nm之近紅外光波段反射率( $R_{NIR}$ )對色素含量變化敏感度低，但可用於植生指數之計算。植生指數之計算多使用紅光與近紅外光之比值或差值，常用之指數包括有SRVI及NDVI。

SRVI及NDVI與Chl *a*、Chl *b*及Car含量之關係，分別如圖6及圖7所示。其中 $R_{NIR}$ 以 $R_{750}$ 計算，而RRED則分別以 $R_{675}$ 及 $R_{705}$ 計算。以 $R_{705}$ 計算之SRVI及NDVI與三種色素具有高相關性，其與Chl *a*及Car含量之 $R^2$ 分別為0.948及0.9287，而其與Chl *b*含量之 $R^2$ 值亦接近0.9。而以 $R_{675}$ 計算之SRVI及NDVI與三種色素之相關性則明顯較低，其 $R^2$ 值約0.40~0.55（圖6、7）。如同前述之結果， $R_{705}$ 對光合色素含量之變化具高

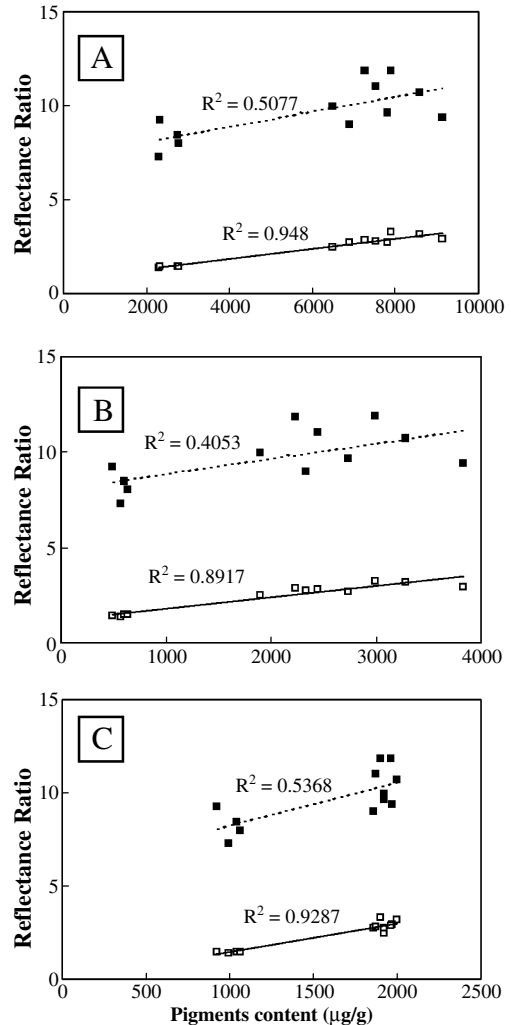


Fig. 6. SRVI calculated using reflectance at 675 nm and 750 nm (■), and reflectances at 705 and 750 nm (□), plotted versus Chl *a* (A), Chl *b* (B), and Car (C) content in sweet potato leaves.

敏感度，故以 $R_{705}$ 計算之植生指數對色素含量變化之相關性高；而 $R_{675}$ 對色素含量敏感度低，以其計算之指數對色素含量變化之相關性亦低。

以近紅外光波段 $R_{750}$ 及綠光波段 $R_{555}$ 計算 $R_{750}/R_{555}$ 及 $NDVI_{Green}$ 指數， $R_{750}/R_{555}$ 比值與三種甘藷葉之Chl *a*、Chl *b*及Car含量相關性低，其 $R^2$ 值約0.43-0.64，但 $NDVI_{Green}$ 與三種色素含量則具有高



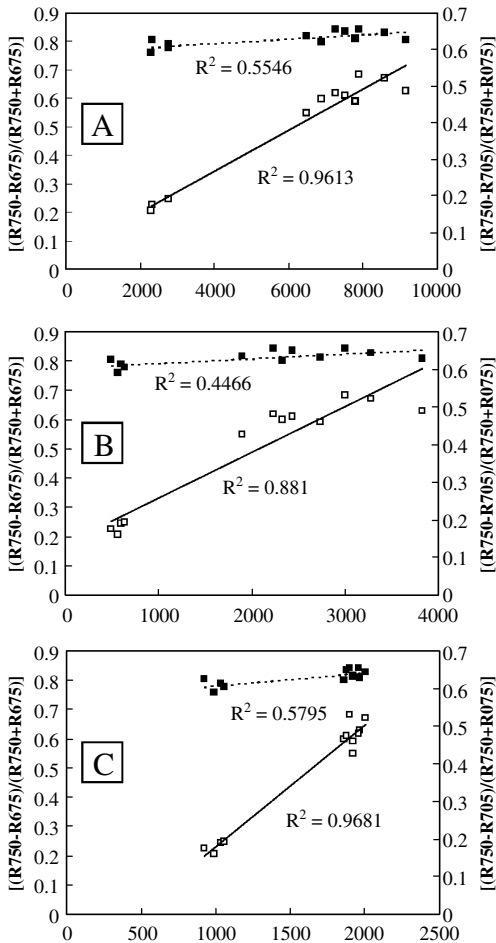


Fig. 7. NDVI calculated using reflectance at 675 nm and 750 nm (■, left scale) and reflectances at 705 and 750 nm (□, right scale) plotted versus Chl *a* (A), Chl *b* (B), and Car (C) content in sweet potato leaves.

度曲線相關，其 $R^2$ 值都大於 0.9 (圖8)。在許多研究中顯示，以綠光波段計算之植生指數可做為葉綠素含量的指標 (Buschmann and Nagel, 1993; Carter, 1993, 1994; Gitelson and Merzlyak, 1994a, 1996, 1997; Gitelson *et al.*, 1996)。以  $\log(R_{800}/R_{550})$  計算之指數可做為菜豆葉片單位葉面積葉綠素含量之指標，另  $R_{800}/R_{550}$  比值對 Chl *a* 含量亦具有高相關性 ( $R^2 > 0.88$ ) (Buschmann and Nagel, 1993)。以多種無關聯之植物為材料的研

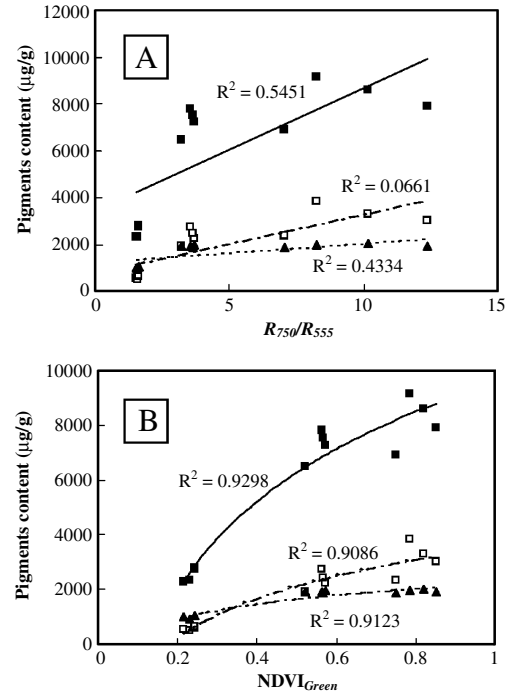


Fig. 8.  $R_{750}/R_{555}$  ratio (A) and  $NDVI_{Green}$  (B) versus Chl *a* (■), Chl *b* (□), and Car (▲) content in sweet potato leaves. Green NDVI calculated as  $NDVI_{Green} = (R_{750} - R_{555}) / (R_{750} + R_{555})$ .

究顯示， $R_{750}/R_{550}$  與葉綠素含量具有高度的直線相關，而  $NDVI_{green}$  則與葉綠素含量具有高度的指數曲線相關 (Gitelson and Merzlyak, 1997)。本研究顯示， $NDVI_{green}$  與 Chl *a*、Chl *b* 及 Car 含量間呈現高度曲線相關，但是  $R_{750}/R_{555}$  比值與三種色素間之相關性則不高，造成此結果之原因可能為紫色甘藷葉含有花青素、類黃酮或多酚類等(資料未列出)，而這些非光合色素(non-photosynthetic pigments)在綠光波段具有強吸收，致使紫色甘藷葉在綠光波段之反射率大幅降低(圖1)，進而影響對葉綠素含量之估算。因此，若葉片含有對綠光波段有強吸收之色素時，以綠光波段計算植生指數作為葉綠素含量指標之準確性可能會降低。

以上之光譜訊息建基在單一波長之反射率，

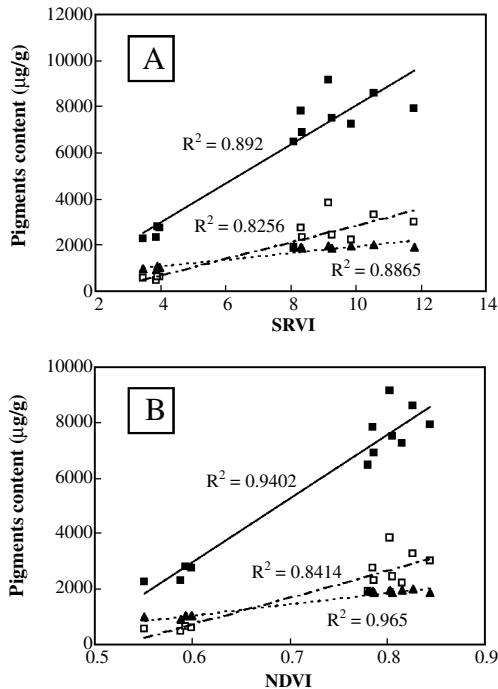


Fig. 9. SRVI (A) and NDVI (B) calculated using broad-band reflectance plotted versus Chl *a* (■), Chl *b* (□), and Car (▲) Content in sweet potato leaves. R: 610-680 nm; IR: 790-890 nm.

然而迄今，任何人造之光譜感應器尚無法在遙測距離獲取這麼高的光譜解析力。高空及衛星遙測並非以單一波長反射率做為地面植冠反射光譜之探測。以法國SPOT衛星為例，其多譜態掃描器具有三個波段，分別為綠光波段XS1 (500~590 nm)、紅光波段XS2 (610~680 nm)及近紅外光波段XS3 (790~890 nm)。

因而，本研究模擬SPOT衛星之紅光及近紅外光波段，計算多波段(broad-band)之SRVI及NDVI，與Chl *a*、Chl *b*及Car含量之關係，如圖9所示。NDVI與Chl *a*及Car含量具有高度相關，其 $R^2$ 都大於0.94，而其與Chl *b*之 $R^2$ 值亦達0.84以上。SRVI與三種色素含量之相關性亦高，其 $R^2$ 值介於0.82及0.89之間。Elvidge和Chen (1995)的研究顯示，以單一波長反射率計算之植生指數

估算葉面積指數(leaf area index, LAI)之準確度，僅比以多波段反射率計算之植生指數高一點而已。本研究中，以多波段反射率計算之植生指數與 $R_{705}$ 及 $R_{750}$ 計算之植生指數對色素含量之 $R^2$ 值也相差極微，顯示以多波段計算之SRVI及NDVI亦可用於估算葉片色素含量。

$R_{555}$ 及 $R_{705}$ 對於葉綠素含量具有高敏感度，相對來說，此二波段反射率主要受到葉綠素含量變化之影響，以 $R_{555}$ 及 $R_{705}$ 計算之植生指數對Chl *a*及Chl *b*含量具有高度相關性是可以理解的。而Car的累積受到Chl累積的影響(Oelmullar and Mohr, 1985)，且Car的崩解亦會導致Chl的崩解(Mayfield and Taylor, 1984)，因此Car含量會隨著Chl的含量變化。所以只要所計算出之植生指數對Chl *a*及Chl *b*含量具有高相關性，對Car含量亦同樣會具有高相關性。亦即三種甘藷葉在正常生長狀況下，可用於估算Chl *a*及Chl *b*含量之植生指數，亦可用於對Car之估算。

對於正常環境下生長之三種甘藷，其葉片色素含量與 $R_{750}$ 、 $R_{705}$ 及多波段反射率計算之SRVI及NDVI具有高度相關。因此，可以這些植生指數來進行葉片色素含量之遙測估算。另外葉片含有花青素、類黃酮、多酚類、或對綠光波段具有強吸收之其他色素，必然影響其在綠光波段之吸收與反射光譜特徵，故以綠光波段反射率計算之植生指數估算葉片色素含量則較不適當。但是，以綠光波段反射率計算之植生指數可能可以估算葉片花青素、類黃酮、多酚類之含量，此有待進一步探討。以葉片反射光譜計算植生指數，可以進行非破壞性地估算葉片色素含量之變化，擴及至植冠反射光譜測定及衛星遙測，可即時估算葉片色素含量與監測作物生長狀況，有助於精準農耕之發展。

## 引用文獻

- Baret, F., Champion, I., Guyot, G. and Podaire, A. (1987) Monitoring wheat canopies with high spectral resolution radiometer. *Remote Sens. Environ.* 22:367-378.
- Baret, F., Jacquemoud, S. and Guyot, G. (1992) Modeled analysis of the biophysical nature of spectral shift and comparison with information content of broad bands. *Remote Sens. Environ.* 41:133-142.
- Bauer, M. E. (1975) The role of remote sensing in determining the distribution and yield of crops. *Adv. Agron.* 27:271-304.
- Buschmann, C. and Nagel, E. (1993) *In vivo* spectroscopy and internal optics of leaves as basis for remote sensing of vegetation. *Int. J. Remote Sens.* 14:711-722.
- Carter, G. A. (1993) Responses of leaf spectral reflectance to plant stress. *Am. J. Bot.* 80:239-243.
- Carter, G. A. (1994) Ratios of leaf reflectances in narrow wavebands as indicator of plant stress. *Int. J. Remote Sens.* 15:697-703.
- Chappelle, E. W., Kim, M. S. and McMurtrey III, J. E. (1992) Ratio analysis of reflectance spectra (RARS): An algorithm for the remote estimation of the concentrations of chlorophyll a chlorophyll b, and carotenoids in soybean leaves. *Remote Sens. Environ.* 39: 239-247.
- Curran, P. J., Dungan, J. L., Macler, B. A. and Plummer, S. E. (1991) The Effect of a red leaf pigment on the relationship between red edge and chlorophyll concentration. *Remote Sens. Environ.* 35:69-76.
- Elvidge, C. D. and Chen, Z. (1995) Comparison of broad-band and narrow-band red and near-infrared vegetation indices. *Remote Sens. Environ.* 54:38-48.
- Fuchs, M. (1990) Canopy thermal infrared observations In: Instrumentation for studying vegetation canopies for remote sensing in optical and thermal infrared regions (ed. by Goel, N. S. and Norman, J. M.). pp.323-333. Harwood Acad. Publ. Gmb H, U. K.
- Gitelson, A. A. and Merzlyak, M. N. (1994a) Spectral reflectance changes associated with autumn senescence of *Aesculus hippocastanum* L. and *Acer platanoides* L. leaves. Spectral features and relation to chlorophyll estimation. *J. Plant Physiol.* 143: 286-292.
- Gitelson, A. A. and Merzlyak, M. N. (1994b) Quantitative estimation of Chlorophyll *a* using reflectance spectra: Experiments with autumn chestnut and maple leaves. *J. Photochem. Photobiol. (B)* 22:247-252.
- Gitelson, A. A. and Merzlyak, M. N. (1996) Signature analysis of leaf reflectance spectra: algorithm development for remote sensing of chlorophyll. *J. Plant Physiol.* 148:494-500.
- Gitelson, A. A. and Merzlyak, M. N. (1997) Remote estimation of chlorophyll content in higher plant leaves. *Int. J. Remote Sens.* 18:2691-2697.
- Gitelson, A. A., Kaufman, Y. J. and Merzlyak, M. N. (1996) Use of a green channel in remote sensing of global vegetation from EOS-MODIS. *Remote Sens. Environ.* 58:289-298.
- Green, E. P., Mymby, P. J., Edwards, A. J., Clark, C. D. and Ellis A. C. (1997) Estimating leaf area index of mangroves from satellite data. *Aquat. Bot.* 58:11-19.
- Hendry, G. A. F., Houghton, J. D. and Brown, S. B. (1987) The degradation of chlorophyll - a biological enigma. *New Phytol.* 107:255-302.
- Holm, G. (1954) Chlorophyll mutations in barley. *Acta Agric. Scand.* 4:457-461.
- Hsu, M. H., Huang, W. D., Yang, Z. W., Tsai, Y. Z., Yang, C. M. and Chang, S. S. (2003) Study on the chlorophyll biosynthetic and degradative pathway in the leaves of three sweet potatoes. *Chinese Agron. J.* (in press)
- Ma, B. L., Morrison, M. J. and Dwyer, L. M. (1996) Canopy light reflectance and field greenness to assess nitrogen fertilization and yield of maize. *Agron. J.* 88:915-920.
- Mayfield, S. P. and Taylor, W. C. (1984) Carotenoid-deficient maize seedling fail to accumulate light-harvesting chlorophyll *a/b* binding protein (LHCP) mRNA. *Eur. J. Biochem.* 144:79-84.
- Masoni, A., Ercoli, L. and Mariotti, M. (1997)

- Spectral properties of leaves deficient in iron. Sulfur, Magnesium, and Manganese. *Agron. J.* 88:937-943.
- Matile, P., Schellenberg, M. and Peisker, C. (1992) Production and release of a chlorophyll catabolite in isolated senescent chloroplasts. *Planta* 187:230-235.
- Matile, P., Duggelin, T., Schellenberg, M., Rentsch, D., Bortlik, K., Peisker, C. and Thomas, H. (1989) How and why is chlorophyll broken down in senescent leaves? *Plant Physiol. Biochem.* 27:595-604.
- Oelmullar, R. and Mohr, H. (1985) Carotenoid composition in milo (*Sorghum vulgare*) shoots as affected by phytochrome and chlorophyll. *Planta* 164:390-395.
- Porra, R. J., Thompson, W. A. and Kriedelman, P. E. (1989) Determination of accurate extraction and simultaneously equation for assaying chlorophyll a and b extracted with different solvents: verification of the concentration of chlorophyll standards by atomic absorption spectroscopy. *Biochem. Biophys. Acta* 975: 384-394.
- Price, J. C. and Bausch, W. C. (1995) Leaf area index estimation from visible and near-infrared reflectance data. *Remote Sens. Environ.* 52:55-65.
- Thomas, J. R. and Gausman, H. W. (1977) Leaf reflectance vs. leaf chlorophyll and carotenoid concentrations for eight crops. *Agron. J.* 69: 799-802.
- Walburg, G., Bauer, M. E., Daughtry, C. S. and Housley, T. L. (1982) Effects of nitrogen on the growth, yield, and reflectance characteristics of corn. *Agron. J.* 74:677-683.
- Yang, C. M. (1998) Variations of reflectance spectrum and vegetation index in sweet potato canopy. p.58-78. In: Proceedings of Symposium on Applications of Remote Sensing Data. April 23-24, 1998. Energy and Resources Research Institute, Research Academy of Industrial Technology, Hsinchu.
- Yang, C. M. and Ko, C. C. (1997) Seasonal changes in canopy spectra of sweet potato. *J. Photogram Remote Sens.* 3:13-28.
- Yang, C. M., Osterman, J. C. and Markwell, J. P. (1990) Temperature-sensitivity as a general phenomenon is a collection of chlorophyll-deficient mutants of sweetcolver (*Melilotus alba*). *Biochem. Genet.* 28:31-40.
- Yang, C. M., Hsu, J. C. and Chen, Y. R. (1993) Light- and Temperature- sensitivity of chlorophyll-deficient and virescent mutants. *Taiwania* 38:49-56.

---

收稿日期：92年5月1日

接收刊登日期：92年8月1日

編輯：謝兆樞

通訊作者：楊棋明（電話：02-27821258轉612；

傳真：02-7827954；Email: cmyang@gate.

sinica.edu.tw）