

氮肥等級與刈割頻度對 Tifway 419 百慕達草反射光譜之影響

陳宏銘¹、許明晃²、楊志維¹、黃文達¹、楊棋明^{2*}、張新軒^{1*}

¹國立台灣大學農藝學系 ²中央研究院生物多樣性中心

摘要

本研究利用百慕達草 Tifway-419 草坪為材料,探討不同氮肥用量及刈割頻度對其色素含量及遙測光譜的影響。百慕達草 Tif-way 419 之葉綠素合成相關色素,包括 Chl *a+b*、total porphyrin、Chlide *a+b*、Phe *a+b*、含植醇及脫植醇色素含量,以及類胡蘿蔔素含量皆隨著氮肥用量增加而增多;在個別吡啉莫耳百分比的變化趨勢方面,受到氮肥用量的影響不明顯。百慕達草 Tifway 419 之植被反射光譜,在 400-700 nm 間之反射比都很低,最大反射比發生在近紅外光約 750 nm 以上之波段。近紅外光反射比隨著氮肥用量的增加而升高,而可見光區域之反射比則呈相反趨勢,隨著氮肥用量增加而下降。NDVI₆₈₀、NDVI₇₀₅ 及模擬衛星寬波段之 NDVI_{broad} 與三種色素 Chl *a*、Chl *b* 及 Car 含量間具有高相關性,其 R^2 皆為 0.7 左右($p < 0.01$)。除 Chl *b* 外,含有植醇鏈(phytol chain)的色素比無植醇者對 NDVI 之貢獻較大,即 LP Car 較 MP Car 對 NDVI 之貢獻較大。資料分析進一步顯示,葉綠素與類胡蘿蔔素之生合成與崩解代謝物中,位於葉綠體類囊膜(thylakoid membrane)上極性較小的色素對植被反射光譜 NDVI 之貢獻性較大;而分佈於基質(stroma)之水溶性較大之色素,其對 NDVI 之貢獻較小。

關鍵詞：百慕達草、葉綠素、類胡蘿蔔素、反射光譜、植生指數。

中英文縮寫對照：

葉綠素, chlorophyll (Chl); 脫植醇葉綠素, chlorophyllide (Chlide); 脫鎂葉綠素 pheophytin (Phe); 脫鎂脫植醇葉綠素, pheophorbide (Pho); 吡啉, Porphyrin; 原吡啉原 IX, protoporphyrin IX (PPIX); 鎂吡啉原 IX, magnesium protoporphyrin IX (MGPP); 葉綠素原, protochlorophyllide (Pchlide); 類胡蘿蔔素, carotenoid (Car); 相對極性較小之類胡蘿蔔素, less polar carotenoid (LP Car); 相對極性較大之類胡蘿蔔素, more polar carotenoid (MP Car); 脫植醇或未酯化色素, dephytylated or nonesterified pigment; 含植醇或酯化色素, phytylated or esterified pigment.

Nitrogen Rate and Mowing Frequency Effects on Spectral Reflectance of Bermudagrass “Tifway 419” (*Cynodon transvaalensis* x *C. dactylon*)

Hung-Ming Chen¹, Ming-Huang Hsu², Zhi-Wei Yang¹, Wen-Dar Huang¹, Chi-Ming Yang^{2*}, and Shin-Shinge Chang^{1*}

¹ Department of Agronomy, National Taiwan University, Taipei, Taiwan, R.O.C.

² Research Center for Biodiversity, Academia Sinica, Nankang, Taipei, Taiwan, R.O.C.

*Corresponding author: cmyang@gate.sinica.edu.tw, changss@ntu.edu.tw

ABSTRACT: The objectives of this study were conducted to examine the contents of pigments in the leaves and vegetation reflectance spectrum of bermudagrass “Tifway 419” (*Cynodon transvaalensis* x *C. dactylon*) with different nitrogen application rates and mowing frequencies. The contents of chlorophyll (Chl), its biosynthetic and degradative intermediates (total porphyrin; chlorophyllide, Chlide; pheophytin, Phe; phytolated and dephytylated pigments), and carotenoids in the leaves of bermudagrass Tifway 419 elevated with increasing nitrogen rates. The mole percents of three porphyrins (protoporphyrin, PPIX; magnesium protoporphyrin IX, MGPP; protochlorophyllide, Pchlde) were not influenced by nitrogen application rate significantly. The canopy reflectance spectra of bermudagrass Tifway 419 were measured. The reflectance in the range of 400 to 700 nm was very low, while near-infrared (NIR) band above 750 nm was very high. The reflectance in the near-infrared wavebands was increased with increasing nitrogen application rate, but the reflectance in the visible region was decreased as nitrogen application rate increased. Spectral indices NDVI₆₈₀, NDVI₇₀₅, and NDVI_{broad} calculated using broad-band reflectance were correlated well with the contents of Chl *a*, Chl *b*, and Car (R^2 about 0.7, $p < 0.01$). The chlorophyll-related compounds containing phytol chain greatly contributed to changes in NDVI than those compounds without phytol chain, except for Chl *b*. The LP Car also played a more important role in NDVI change than the MP Car. Results suggest that NDVI calculated from vegetation reflectance spectra was more affected by the chlorophyll- and carotenoid-related compounds located onto the thylakoid membranes than those located in the stroma of chloroplast.

Key words: Bermudagrass, Chlorophyll, Carotenoid, Reflectance spectra, Vegetation index.

前言

臺灣地處亞熱帶，高爾夫球場草種以熱帶型草種(warm season grass)為主，其中以生長溫度在 21 32 之間的草種最為合適。目前球場運用在果嶺(Green)上的草種以熱帶型草種百慕達 328 (Bermudagrass Tifgreen 328)及多福百慕達(Tifdwarf)為主。而在發球台(Tee)及球道(Fairway)方面，則以百慕達 328 (Bermudagrass Tifgreen 328)和百慕達 419(Bermudagrass Tifway 419)為主。另有在球道及粗草區內種植高麗芝(*Zoysia spp.*)或假儉草(*Eremochloa ophiuroides*)者。

草坪品質管理的好壞，受到氣候、土壤、草種栽培管理及病蟲害防治的影響。不當的管理對草皮有不良的影響，可能也引起更多的病蟲害及環境問題。草坪日常管理以割刈、灌溉、施肥、雜草、病蟲害及輔助操作等為主要工作。其中，氮素既是草坪草最重要的結構物質，又是生理代謝中最活躍物質的主要成分，所以氮素在草坪生理代謝和生長上占有關鍵地位(謝，2006)。草坪的割刈或修剪可以刺激其匍匐莖節上的芽點產生新植株，促進草坪草的生育，並以提高草坪的密度(王，2000)。

臺灣高爾夫球場管理者缺乏精準之維護管理方法，傳統的管理模式只是對其色澤做判斷，因此建立一套正確而快速的管理模式有其必要性。因為傳統的管理模式係將土壤、植株樣品送至實驗室做樣品分析檢測，耗費較多人力、物力，並且需要經過一段時間才能得到分析結果。如果能夠透過遙感探測所建立關聯模式，就可以快速了解草坪維護管理上的需求。而且透過遙感探測科學所發展出的分析技術及所提供的空間與光譜資訊，構成一套完整的空間分析系統，可進而改善草坪的維護管理系統及品質。遙測技術目前已廣泛地應用於植被覆蓋率(Huete, 1987; Maas, 1998)、葉面積指數(leaf area index, LAI) (Pollock and Kanemasu, 1979; Gardner and Blad, 1986; Peterson *et al.*, 1987)、葉綠素含量(Thomas and Gausman, 1977; Ercoli *et al.*, 1993)、植株營養狀況(Al-Abbas *et al.*, 1974; Milton *et al.*, 1989; Milton *et al.*, 1991; Adams *et al.*, 1993; Blackmer *et al.*, 1996)、乾旱逆境(申和李，1998)方面的研究。

目前臺灣高爾夫球場草坪管理之相關研究文獻極為有限，而將遙感探測技術應用於草坪管理上之研究更是乏善可陳。遙測技術在高爾夫球場草坪管理的應用在美國已行之有年，多為氮素及水分逆境之研究(Kruse, 2004)。但是關於葉綠素生成及崩解產物之研究，對於植被反射光譜與氮素施用量及割刈頻率的關係亦無實際之探討。本研究以遙感探測技術探討氮肥施用量及刈割頻度對百慕達草坪色素含量及植被反射光譜之影響，期望未來能建立一套可行之管理系統，助益於臺灣草坪的管理與維護。

材料與方法

一、樣區與處理

本研究之氮肥處理試驗於全國高爾夫花園球場第 14 洞及第 17 洞發球台進行,以發球台已成株之百慕達草 Tifway 419(*Cynodon transvaalensis* x *C. dactylon*) 草坪進行不同氮肥用量及刈割頻度處理。

氮肥處理分為 0、2.5 及 5 g m⁻² 三個等級,施用肥料之 N-P-K 比率為 20-6-18 之緩效性肥料(slow release fertilizer)。而刈割頻度分為每兩天刈割及每七天刈割兩種處理,刈割高度為 12 mm。合計共六個處理組合,每一小區面積為 2 m × 2 m,重複三次。肥料施用七天後,進行葉片色素及植被反射光譜測定。

二、色素含量測定

百慕達草 Tifway 419 葉片之 PPIX、MGPP、Pchl_{ide}、Chl a、Chl b、Chlide a、Chlide b、Phe a、Phe b、含植醇色素(phytylated pigments)及脫植醇色素(dephytylated pigments)、Car、LP Car、MP Car 色素是根據 Yang et al. (1998)所建立之方法進行測定,其步驟簡述如下:

1. 葉綠素及類胡蘿蔔素的測定

植物樣品稱取 0.01 克,以液態氮急速冷凍,並以研鉢磨成細粉,再以 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 A_{663.6}、A_{646.6}、A_{440.5} 的吸收值。三者分別為葉綠素 a (Chlorophyll a, Chl a)、葉綠素 b (Chlorophyll b, Chl b)及類胡蘿蔔素(Carotenoid, Car)的強吸收處。以 Porra et al. (1989)的公式計算葉綠素 a、b 的含量;以 Holm (1954)的方法計算類胡蘿蔔素的含量。

2. 不同極性崩解物的分離

以同體積正己烷與前述丙酮萃取液混合,以震盪器激烈混合後靜置,直到明顯分層,此時上層為極性較弱的正己烷層,下層為極性較強的丙酮層,分別含不同極性的各類色素。

3. Chlorophyllide 及 Pheophorbide 的測定

取上層液測 A₆₆₁ 的吸收值,此為脫植醇(Phytol)的色素(Nonesterified 或 Dephytylated pigments)的綜合吸收值,包括 Chlorophyllide (Chlide)或 Pheophorbide (Pho),以吸收值直接比較。

4. Esterified (Phytylated)色素的測定

其中 A_{666} 即為未脫植醇的色素(Esterified 或 Phytylated pigments)之吸收值，包括葉綠素(Chlorophyll, Chl)及 Pheophytin (Phe)，以吸收值直接作比較。

5. PPIX、MGPP 及 Pchlde 的測定

丙酮層的 A_{575} 、 A_{590} 、 A_{628} 之吸收值分別是 Protoporphyrin IX (PPIX)、Mg-protoporphyrin IX (MGPP)及 Protochlorophyllide (Pchlde)的吸收值，以 Kahn et al. (1976)之公式計算。

6. Chlorophyllide *a* 及 *b* (Chlide *a* 及 *b*)的測定

丙酮層的 A_{667} 及 A_{650} 分別是已脫植醇的 Chlide *a* 及 Chlide *b* 之吸收值，其計算公式是根據測定 Chlorophyllase 活性的方法(McFeeters et al., 1971)。該方法以測定生成物 Chlide *a* 及 Chlide *b* 的吸收值後利用 Beer-Lambert 公式換算出兩生成物的莫耳濃度。

7. 丙酮層的 $A_{440.5}$ 是相對極性較大的類胡蘿蔔素(More polar carotenoid, MP Car)之吸收值，再利用 Holm 及 Porra 等的方法計算 MP Car 的含量。

8. 將正己烷層液以氮氣吹乾後，以 80% 丙酮充分溶解並加 50 L 的 12.5% HCl 破壞葉綠素後，測定 $A_{665.4}$ 、 $A_{653.4}$ 及 A_{470} 。 $A_{665.4}$ 及 $A_{653.4}$ 分別是未脫植醇的 Pheophytin a (Phe a)及 Pheophytin b (Phe b)的吸收值，亦利用公式換算出兩物的莫耳濃度。 A_{470} 是相對極性較小的類胡蘿蔔素(Less polar carotenoid, LP Car)之吸收值(Lichtenthaler, 1987)。

三、植被反射光譜測定

植被反射光譜以輻射光譜儀(model LI-1800, LI-COR Inc., USA)進行測定，光譜的波段範圍為 300 至 1100 nm，光譜解析力為 1 nm。測定時高度 1.8 m，涵蓋面積約 0.8 m²。

植生指數 ND_{680} 係利用 R_{680} 及 R_{750} 計算，計算方式為 $ND_{680} = (R_{750} - R_{680}) / (R_{750} + R_{680})$ ； ND_{705} 乃利用 R_{705} 及 R_{750} 計算，計算方式為 $ND_{705} = (R_{750} - R_{705}) / (R_{750} + R_{705})$ ； ND_{broad} 則為模擬 SPOT 衛星寬頻波段所計算之 NDVI，其中 Red 為 610-680 nm，NIR 為 790-890 nm (Hsu et al., 2003b)。

四、灰關聯分析

以百慕達草 Tifway-419 葉片內各種色素含量為試驗序列，以植被反射光譜

之 $NDVI_{680}$ 、 $NDVI_{705}$ 及 $NDVI_{broad}$ 植生指數為參考序列進行灰關聯分析，探討各色素含量對 $NDVI$ 植生指數之貢獻程度，其下列之原理與步驟依據 Deng (1982, 1989)的方法進行：

1、原始數據列的均質化(mean value normalization):

$$\text{當原始數據之平均值 } \bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n x(k),$$

$$\text{則其均質化序列為 } x_0^* = \left(\frac{x(1)}{\bar{X}}, \frac{x(2)}{\bar{X}}, \frac{x(3)}{\bar{X}}, \dots, \frac{x(k)}{\bar{X}} \right)$$

2、求兩極最大差和最小差，進而計算灰關聯係數(grey relational coefficient) γ ，其定義如下：

$$\gamma(x_0(k), x_j(k)) = \frac{\min_j \min_k \|x_0(k) - x_j(k)\| + \zeta \max_j \max_k \|x_0(k) - x_j(k)\|}{\|x_0(k) - x_j(k)\| + \zeta \max_j \max_k \|x_0(k) - x_j(k)\|}$$

$$j = 1, \dots, m; \quad k = 1, \dots, n$$

j 是共同係數(identification coefficient), 其值介於 [0,1]之間

x_0 是參考序列(reference data series)

x_j 是試驗序列(test data series)

$\|x_0(k) - x_j(k)\|$ 是 $x_0(k)$ 和 $x_j(k)$ 之差的絕對值

$\min_j \min_k \|x_0(k) - x_j(k)\|$ 是選自所有 j 之第二最小差(the secondary minimum difference)

$\min_k \|x_0(k) - x_j(k)\|$ 是選自所有 k 之第一最小差(the first minimum difference)

所有 $\max \max$ 亦如上之取法。

3、計算灰關聯度 $\gamma^*(x_0(k), x_j(k))$ ，其運算如下：

$$\gamma^*(x_0(k), x_j(k)) = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \gamma(x_0(k), x_j(k))$$

4、排出灰關聯序或灰序(grey relational order or grey order)。

結果與討論

一、葉綠素合成之影響

不論氮肥處理，百慕達草 Tifway 419 之 Chl 含量都以七日刈割頻度者最高，二日刈割頻度者次之；隨著氮肥用量增加，七日刈割頻度者之 Chl 含量自 4,558 漸增至 11,221 $\mu\text{g g}^{-1}$ 時，二日刈割頻度者之 Chl 含量則自 4,097 漸增至 8,531 $\mu\text{g g}^{-1}$ ，亦即 Chl 含量皆隨著氮肥用量增加而增多(圖 1A)。

七日刈割頻度者葉片 Chl *a/b* 比值隨著氮肥用量增加依序為 3.4、2.9、2.2，而二日刈割頻度者為 3.5、3.2、3.0，二者均隨著氮肥用量增加而降低(圖 1B)。

類似於 Chl 隨著氮肥用量增加而增多的趨勢，吡啉總含量亦隨著氮肥用量增加而明顯增多(圖 2A)，七日刈割頻度者吡啉總含量自 693 nmole g^{-1} 增至 1,664 nmole g^{-1} ，二日刈割頻度者自 639 nmole g^{-1} 增至 1,278 nmole g^{-1} 。個別吡啉莫耳百分比(mole percent of porphyrins)的變化趨勢方面，不論七日刈割頻度或二日者，三種吡啉莫耳百分比受到氮肥的影響皆不明顯，即 PPIX、MGPP 和 Pchlide 莫耳百分比分別都保持在 78%、22%和 0%的水平上(圖 2B、2C、2D)。

隨著氮肥用量增加，兩種刈割頻度處理者 Chlide *a+b* 總含量與 Chlide *a/b* 比值皆同步增加。在 0 及 5 g m^{-2} 氮肥處理下，七日刈割頻度者其 Chlide *a+b* 總含量高於二日刈割頻度者；而在任何氮肥處理下，Chlide *a/b* 比值則是七日刈割頻度者低於二日刈割頻度者(圖 3)。

七日刈割頻度者之 Phe *a+b* 含量高於二日刈割頻度者，且皆隨著氮肥用量增加而增多，前者自 1,236 增至 3,194 $\mu\text{g g}^{-1}$ ，後者自 1,057 增至 2,192 $\mu\text{g g}^{-1}$ (圖 4A)。兩種刈割處理者不同氮肥處理間之 Phe *a/b* 比值變化不大，皆維持在 2.3 左右(圖 4B)。

含植醇色素即為酯化之色素，包括 Chl 及 Phe；而脫植醇色素則為未酯化的色素，包括 Chlide 及 Pho (Shioi and Sasa, 1986)。兩種刈割頻度處理者之含植醇與脫植醇色素含量變化趨勢與 Chl 之含量變化趨勢很相似，即隨著氮肥用量增加而增多(圖 5)。

兩種刈割處理者之 Car 總含量隨著氮肥用量增加而有明顯改變(圖 6A)。七日刈割頻度者 Car 總含量較高，從 2,227 增至 4,307 $\mu\text{g g}^{-1}$ ；二日刈割頻度者之 Car 含量較低，從 2,012 增至 3,698 $\mu\text{g g}^{-1}$ 。兩種刈割處理者之 Car/Chl 比值都依氮肥用量增加而有些微下降，七日刈割頻度者 Car/Chl 比值從 0.49 下降至 0.38，二日

刈割頻度者從 0.49 下降至 0.44 (圖 6B)。LP Car 與 MP Car 含量方面，兩種刈割處理者皆隨著氮肥用量的增加而呈現增多的變化(圖 7)。

百慕達草 Tifway 419 之葉綠素生合成相關色素，包括 Chl *a+b*、total porphyrin、Chlide *a+b*、Phe *a+b*、含植醇及脫植醇色素含量，以及類胡蘿蔔素含量皆隨著氮肥用量增加而增多，顯示氮肥的施用可促進百慕達草植株的生長及色素之生合成。而七日刈割頻度處理者色素含量高於二日刈割處理者，顯示刈割後較長的生長日數亦可促進植株的生長及色素之生合成。百慕達草 Tifway 419 之 Chl *a/b* 比值接近 3，與一般正常狀況下高等植物的葉片之 Chl *a/b* 比值相似，顯示其可適應於一般光照環境下生長。Chl *a/b* 比值隨氮肥用量增加而逐漸減少，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(供給面)隨著氮肥用量增加而比 Chl *b* 慢，或可能是導因於 Chl *a* 的崩解速率(消耗面)隨著氮肥用量增加而比 Chl *b* 快些，或導因於前二因素之綜合效應，仍需進一步釐清。

而在 Chl 崩解時，自 Chl 轉化為 Pho 有兩種可能途徑，每一途徑都需二個步驟。其一為先經由 chlorophyllase 催化，脫去植醇鏈(phytol chain)而生成 Chlide，再脫去鎂離子而生成 Pho；或者先經由 Mg-dechelatease 催化，脫去鎂離子而生成 Phe，繼而脫去植醇鏈而生成 Pho (Hendry *et al.*, 1987; Matile *et al.*, 1996)。本研究中 Chlide *a/b* 比值隨著氮肥用量增加而逐漸增高，另 Phe *a/b* 比值則維持不變，此顯示 Chl *a* 經由 Chl *a* → Chlide *a* → Pho *a* 之崩解速率可能快於 Chl *b* 經由 Chl *b* → Chlide *b* → Pho *b* 的速率，導致 Chl *a/b* 比值隨著氮肥用量增加而下降(圖 1B)。

在個別吡啉莫耳百分比方面，PPIX 累積較多，顯示其轉化成 MGPP 之速率較慢，MGPP 轉化成 Pchlide 較快，因此 MGPP 的累積次之。而 MGPP 一旦轉化成 Pchlide 後即刻繼續轉化成下一個代謝物，因此 Pchlide 之莫耳百分比幾乎為零。這種 PPIX → MGPP → Pchlide 轉化速率的差異，在不同物種間有不同之型態，例如在甘藷葉上面這種轉化速率的快慢即呈相反的趨勢(Hsu *et al.*, 2003a)。在個別吡啉莫耳百分比的變化趨勢方面，受到氮肥用量的影響不明顯，此與大部分正常植物綠葉類似，亦即正常高等植物此三種吡啉的生合成速率都保持著動態平衡(Hsu *et al.*, 1995; Chen *et al.*, 1996)。

二、植被反射光譜之影響

百慕達草 Tifway 419 之植被反射光譜與一般綠色植物類似，在 500-700 nm 間之反射比都很低，其中 550 nm 左右稍高些，但在 700 nm 以後之近紅外光波段反射比則急速增加，最大反射比發生在近紅外光約 750 nm 以上之波段(圖 8)。由於葉綠素與類胡蘿蔔素在藍光及紅光波段都有強吸收，因此植被反射光譜在此二

波段之反射比最低。不論二日刈割頻度或七日者，近紅外光反射率隨著氮肥用量的增加而增高，而可見光區域之反射比則呈相反趨勢，隨著氮肥用量增加而下降。

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，因此百慕達草 Tifway 419 植被反射光譜在這兩個波段的反射比最低，其反射光譜之基本特徵與其他綠色高等植物幾乎相同。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 510-600 nm 及 690 nm 以上波段之反射比明顯增加(Gitelson and Merzlyak, 1994a, 1996)。而本研究中，氮肥處理將造成的葉綠素及類胡蘿蔔素含量差異，低氮肥處理者在可見光區域之反射比大於高氮處理者，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，更能擴大曲線之間的差異性。百慕達草植被反射光譜(圖 8)經一次微分後之光譜曲線，可更明顯地顯示出氮肥處理間的差異(圖 9)。不論二日刈割頻度或七日者，0 g m⁻² 處理者，在大於 700 nm 左右之紅光臨界(red edge)，其一次微分曲線之峰值低於 2.5 及 5 g m⁻² 處理者，並且產生紅光臨界的位移現象，位移了 7 nm (圖 9)。

一次微分曲線在 500 nm 及 680 nm 附近斜率明顯地增加，波長 500 nm 附近一次微分反射比的增加與葉綠素、類胡蘿蔔素及花青素的吸收有關，而波長 680 nm 一次微分反射比的增加僅與葉綠素之吸收相關(Gitelson and Merzlyak, 1994a)。此類反射光譜特徵，主要導因於前述葉綠素及類胡蘿蔔素對宇宙輻射之吸收特性。另一次微分曲線在大於 700 nm 波段，產生紅光臨界的藍位移(blue-shift of red edge)現象，此可能與葉綠素含量的減少有關。

NDVI 與 Chl *a*、Chl *b* 及 Car 含量之關係，分別如圖 10 所示。其中 R_{NIR} 以 R₇₅₀ 計算，而 R_{Red} 則分別以 R₆₈₀ 計算得 NDVI₆₈₀ (圖 10A)，以 R₇₀₅ 計算得 NDVI₇₀₅ (圖 10B)。另以模擬 SPOT 衛星之紅光及近紅外光波段，計算寬波段(broad-band)之 NDVI_{broad}，與 Chl *a*、Chl *b* 及 Car 含量之關係，如圖 10C 所示。NDVI₆₈₀、NDVI₇₀₅ 及 NDVI_{broad} 與三種色素具有高相關性，其與 Chl *a*、Chl *b* 及 Car 含量之 R² 皆為 0.7 左右，且 $p < 0.01$ 。

680 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)，另波長 705 nm 之反射比對葉片色素含量變化具有最大之敏感度(sensitivity)，以此反射比與近紅外光 750 nm 反射比計算 NDVI 植生指數以估算葉綠素含量，預期具有高度準確率(Gitelson and Merzlyak, 1994a, 1994b, 1996, 1997; Hsu *et al.*, 2003b)。模擬 SPOT 衛星波段計算之 NDVI 植生指數估算葉綠素含量亦具有高準確率(Hsu *et al.*, 2003b; Huang *et al.*, 2005)。本研究的結果顯示，NDVI₆₈₀、NDVI₇₀₅ 及 NDVI_{broad}

對 Chl *a*、Chl *b* 及 Car 三種色素含量變化之相關性，其 R^2 皆達 0.7 左右。而利用單葉反射光譜所作的研究，NDVI 與 Chl *a*、Chl *b* 及 Car 色素含量變化之相關性，其 R^2 可達 0.85 以上(Hsu *et al.*, 2003b; Huang *et al.*, 2005)。其中的差異，可能為在植被層次上影響反射光譜之主要原因並非為色素含量之變化，而是以葉面積指數或者是植生量(biomass)為主要影響因子，亦或由葉面積、色素含量、水分含量或其他因子之相互作用而影響。

Car 的累積受到 Chl 累積的影響(Oelmullar and Mohr, 1985)，而 Car 的崩解亦會導致 Chl 的崩解(Mayfield and Taylor, 1984)。百慕達草 Tifway 419 的 Car 含量變化主要受到 Chl 含量的影響，Chl 含量隨著氮肥處理的增加而增高，而 Car 含量隨著 Chl 含量變化而同步增高，兩者間有密切相關。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。

三、色素含量對 NDVI 之灰關聯分析

把百慕達草 Tifway 419 葉片內十四種色素化合物之含量變化視為十四個試驗序列，而分別把 $NDVI_{680}$ 、 $NDVI_{705}$ 、 $NDVI_{broad}$ 各視為一個參考序列，應用灰系統理論之關聯分析，比較十四個試驗序列對三種 NDVI 之貢獻程度。根據灰關聯理論，灰關聯度愈大，表示灰序愈前面，即試驗序列對參考序列之影響或貢獻排在愈前面。灰關聯度值及灰關聯序結果顯示，十四種色素化合物含量對 $NDVI_{680}$ 、 $NDVI_{705}$ 、 $NDVI_{broad}$ 灰關聯分析之結果都極為類似(表 1)。依灰關聯度值大小順序排列其色素化合物對 $NDVI_{680}$ 之貢獻程度分別為：Car、Chl *a*、phytylated 色素、LP Car、Phe *b*、Phe *a*、PPIX、Dephytylated 色素、MP Car、Chl *b*、MGPP、Chlide *b*、Chlide *a*、Pchlide；對 $NDVI_{705}$ 之貢獻程度分別為：Car、LP Car、Phytylated 色素、Chl *a*、Phe *b*、Phe *a*、PPIX、Dephytylated 色素、MP Car、Chl *b*、MGPP、Chlide *b*、Chlide *a*、Pchlide；對 $NDVI_{broad}$ 之貢獻程度分別為：Car、Chl *a*、Phytylated 色素、LP Car、Phe *a*、Phe *b*、PPIX、Dephytylated 色素、MP Car、MGPP、Chl *b*、Chlide *b*、Chlide *a*、Pchlide。

十四個色素化合物(試驗序列)，包含 PPIX、MGPP、Pchlide、Chl *a*、Chl *b*、Chlide *a*、Chlide *b*、Phe *a*、Phe *b*、phytylated 色素及 dephytylated 色素、Car、LP Car 及 MP Car 等含量變化對 $NDVI_{680}$ 、 $NDVI_{705}$ 、 $NDVI_{broad}$ (參考序列)的灰關聯分析結果透露著一些訊息，即大部份極性小的色素化合物對於 NDVI 之貢獻度較極性大的色素化合物為高，極性較小的色素化合物主要位於葉綠體的類囊膜，而極性較大的色素化合物則主要分佈於基質。

PPIX、MGPP、Pchlide、Chlide *a* 及 Chlide *b* 等葉綠素的代謝物質都無植醇鏈(phytol chain)，使其成為極性較大而較易溶於水；而 Chl *a*、Chl *b*、Phe *a* 及 Phe

b 則都含有植醇鏈，使其成為極性較小而成為脂溶性。此化學結構的差異造成極性的差異，也因而造成這些物質在葉綠體內基質或類囊膜上分佈的差異。顯然葉綠素合成過程中的代謝物或崩解產物，只要缺植醇鏈，基本上可能都分佈在水溶性較大的基質中；而若含有植醇鏈，即存在於脂溶性較大的類囊膜上。由灰關聯分析的結果顯示，似乎含有植醇鏈的色素化合物對 NDVI 有較大的影響和貢獻。

楊(2001)運用灰色理論分析水稻營養生長期間，葉綠素與類胡蘿蔔素相關化合物對衛星遙測水稻之 NDVI 之關聯性。其灰關聯分析結果顯示，葉綠素與類胡蘿蔔素相關化合物對衛星遙測水稻 NDVI 之灰關聯序與化合物之極性有顯著相關。三種甘藷葉色素含量與葉片反射光譜 NDVI 植生指數之灰關聯分析結果與水稻之研究結果類似，顯示葉綠體內在類囊膜上極性較弱的脂溶性葉綠素相關化合物對 NDVI 之貢獻度較在基質裡極性較強的水溶性色素化合物為大(Hsu *et al.*, 2003c)。本研究中，除了 Chl *b* 外，含有植醇鏈的色素化合物對 NDVI 有較大的影響和貢獻，與水稻及甘藷葉片之研究大致吻合。值得注意的差異是，本研究中之 Chl *b* 的灰排序在較後面，可能原因為葉的解剖和型態不同，對光源的吸收、穿透或反射角度不同，或是試驗中的誤差所造成。

臺灣高爾夫球場之維護管理資料及研究均乏善可陳，大部分都流於經驗傳承口耳相傳，缺乏基本觀念。本研究將遙測技術運用於高爾夫球場草坪管理係超越以往記憶經驗及量化數據與資料的欠缺，且一般人對於高爾夫球場草坪的觀念均停留在一般農作物的維護保養。希望此一研究結果能吸引更多相關研究投入，使得高爾夫球場的草坪管理更趨科技化，對於逆境管理亦能快速因應，獲得正確解決方法。遙測技術乃精準農業體系監測之眼，可應用於協助建立草坪維護管理系統，透過非破壞性檢測快速瞭解問題所在，即可在遠端進行維護諮詢建議並提前做好適當的維護管理因應對策。

引用文獻

1. 王裕文。2000。草坪與高爾夫球場果嶺管理。高爾夫球場農藥肥料使用及雨水管理研習會報告書 pp.49-78。
2. 申雍、李佩玲。1998。應用 SPOT 衛星影像區分水稻旱害等級與受災範圍之初步研究。中華農業氣象 5:203-208。
3. 楊志維。2001。衛星遙測與灰系統理論應用於水稻(*Oryza sativa* L.)營養生長期之監測。國立臺灣大學農藝學研究所碩士論文。
4. 謝清祥。2006。高爾夫球場年度施肥計畫之擬定與管理。95 年度高爾夫球場產業發展策略及場務管理研習會論文輯。6 月 21 日，新竹關西。中華民國高爾夫球場協進會。
5. Adams, M.L., W.A. Norvell, J.H. Peverly, and W.D. Philpot. 1993. Fluorescence and reflectance characteristics of manganese deficient soybean leaves: Effect of leaf age and choice of leaflet. *Plant Soil* 155-156:235-238.
6. Al-Abbas, A.H., R. Barr, J.D. Hall, F.L. Crane, and M.F. Baumgardner. 1974. Spectra of normal and nutrient-deficient maize leaves. *Agron. J.* 66:16-20.
7. Blackmer, T.M., J.S. Schepers, G.E. Varvel, and E.A. Walter-Shea. 1996. Nitrogen deficiency detection using reflected shortwave radiation from irrigated corn canopies. *Agron. J.* 88:1-5.
8. Chappelle, E.W., M.S. Kim, and J.E. McMurtrey, III. 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.
9. Chen, H.Y., Y.K. Lu, C.H. Chou, and C.M. Yang. 1996. Analysis of pigment degradation in exocarp of papaya during late ripening. *J. Chinese Agric. Chem. Soc.* 34:460-468.
10. Deng, J.L. 1982. Control problems of grey systems. *Systems Control Lett.* 5:288-294.
11. Deng, J.L. 1989. Introduction to grey system theory. *J. Grey System* 1:1-24.
12. Ercoli, L., M. Mariotti, A. Masoni, and F. Massantini. 1993. Relationship between nitrogen and chlorophyll content and spectral properties in corn leaves. *Eur. J. Agron.* 2:113-117.
13. Gardner, B.R., and B.L. Blad. 1986. Evaluation of spectral reflectance models to estimate corn leaf area while minimizing the influence of soil background effect. *Remote Sens. Environ.* 20:183-193.
14. Gitelson, A.A., and M.N. Merzlyak. 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.
15. Gitelson, A.A., and M.N. Merzlyak. 1994b. Quantitative estimation of Chlorophyll *a* using reflectance spectra: Experiments with autumn chestnut and maple leaves. *J. Photochem. Photobiol. (B)* 22:247-252.
 16. Gitelson, A.A., and M.N. Merzlyak. 1996. Signature analysis of leaf reflectance spectra: algorithm development for remote sensing of chlorophyll. *J. Plant Physiol.* 148:494-500.
 17. Gitelson, A.A., and M.N. Merzlyak. 1997. Remote estimation of chlorophyll content in higher plant leaves. *Intl. J. Remote Sens.* 18:2691-2697.
 18. Hendry, G.A.F., J.D. Houghton, and S.B. Brown. 1987. The degradation of chlorophyll – a biological enigma. *New Phytol.* 107:255-302.
 19. Holm, G. 1954. Chlorophyll mutations in barley. *Acta Agric. Scand.* 4:457-461.
 20. Hsu, J.C., Y.K. Lu, and C.M. Yang. 1995. Analysis on pigments in the exocarp of orange fruit. *Taiwania* 40:83-90.
 21. Hsu, M.H., W.D. Huang, Z.W. Yang, Y.Z. Tsai, C.M. Yang, and S.S. Chang. 2003a. Study on the chlorophyll biosynthetic and degradative pathway in the leaves of three sweet potatoes. *Chinese Agron. J.* 13:87-98.
 22. Hsu, M.H., W.D. Huang, Z.W. Yang, Y.Z. Ysai, S.S. Chang, and C.M. Yang. 2003b. Remote estimation of pigment content in sweet potato leaves by reflectance spectra. *Chinese Agron. J.* 13:99-110.
 23. Hsu, M.H., W.D. Huang, Z.W. Yang, Y.Z. Tsai, S.S. Chang, J.S. Yang, and C.M. Yang. 2003c. Grey relational analysis on the pigment contents and normalized difference vegetation index (NDVI) of sweet potato leaves. *Chinese Agron. J.* 13:273-282.
 24. Huang, W.D., M.H. Hsu, Z.W. Yang, J.C. Chen, Y.Z. Tsai, S.S. Chang, and C.M. Yang. 2005 Mimicking satellite remote sensing of chlorophyll content in sugarcane (*Saccharum officinarum*) leaves. *Crop Environ. Bioinformatics* 2:137-147.
 25. Huete, A.R. 1987. Soil dependent spectral response in a developing plant canopy. *Agron. J.* 79:61-68.
 26. Kahn, V.M., N. Avivi-Bieise and Wettstein, D. von. 1976. Genetic regulation of chlorophyll synthesis analyzed with double mutants in barley. In: *Genetics and Biogenesis of Chloroplasts and Mitochondria.* (ed. by Bhuchler, T.). pp.119-131. Elsevier/North-Holland Biomedical Press, Amsterdam.
 27. Kruse, J., N. Christians, and M. Chaplin. 2004. Remote Sensing – Making your job a little easier with new technology. *Grounds Maint.* G33-40.
 28. Lichtenthaler, H.K. 1987. Chlorophylls and carotenoids: pigments of photosynthetic biomembrane. *Methods Enzymol.* 148: 350-382.

29. Maas, S.J. 1998. Estimating cotton canopy ground cover from remotely sensed scene reflectance. *Agron. J.* 90:384-388.
30. Matile, P., S. Hortensteiner, H. Thomas, and B. Krautler. 1996. Chlorophyll breakdown in senescent leaves. *Plant Physiol.* 112:1403-1409.
31. Mayfield, S.P., and W.C. Taylor. 1984. Carotenoid-deficient maize seedling fail to accumulate light-harvesting chlorophyll a/b binding protein (LHCP) mRNA. *Eur. J. Biochem.* 144:79-84.
32. McFeeters, R.F., Chichester, C.O. and Whitaker, J.R. 1971. Purification and properties of chlorophyllase from *Ailanthus altissima* (Tree-of-Heaven). *Plant Physiol.* 47:609-618.
33. 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.* 36:121-127.
34. Milton, N.M., C.M. Ager, B.A. Eiswerth, and M.S. Power. 1989. Arsenic- and selenium-induced changes in spectral reflectance and morphology of soybean plants. *Remote Sens. Environ.* 30:263-269.
35. Oelmullar, R., and H. Mohr. 1985. Carotenoid composition in milo (*Sorghum vulgare*) shoots as affected by phytochrome and chlorophyll. *Planta* 164:390-395.
36. Peterson, D.L., M.A. Spanner, S.W. Running, and K.B. Teuber. 1987. Relationships of thematic mapper simulation data to leaf area index of temperate coniferous forests. *Remote Sens. Environ.* 22:323-341.
37. Pollock, R.B., and E.T. Kanemasu. 1979. Estimating leaf area index of wheat with Landsat data. *Remote Sens. Environ.* 8:307-312.
38. 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.
39. Shioi, Y., and T. Sasa. 1986. Purification of solubilized chlorophyllase from *Chlorella protothecoides*. *Methods Enzymol.* 123:421-427.
40. Thomas, J.R., and H.W. Gausman. 1977. Leaf reflectance vs. leaf chlorophyll and carotenoid concentrations for eight crops. *Agron. J.* 69:799-802.
41. Yang, C.M., K.W. Chang, M.H. Yin, and H.M. Huang. 1998. Methods for the determination of the chlorophylls and their derivatives. *Taiwania* 43:116-122.

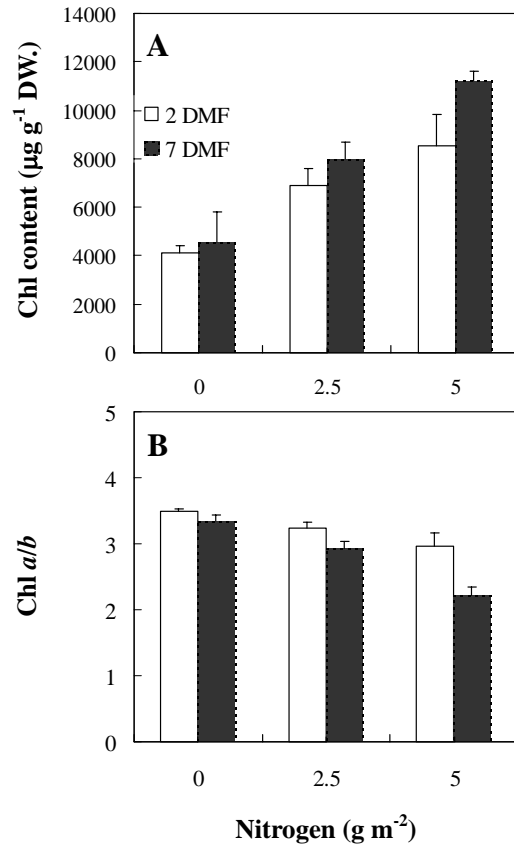


圖 1、不同氮肥處理及刈割頻度對百慕達草 Tifway 419 葉片 (A)葉綠素含量及(B)葉綠素 *a/b* 比值變化之影響。DMF , days mowing frequency。 二日刈割頻度； 七日刈割頻度。
 Fig. 1. Effects of nitrogen application rate and mowing frequency on (A) Chl content and (B) Chl *a/b* ratio in the leaves of bermudagrass Tifway 419. DMF, days mowing frequency. two days mowing frequency; seven days mowing frequency.

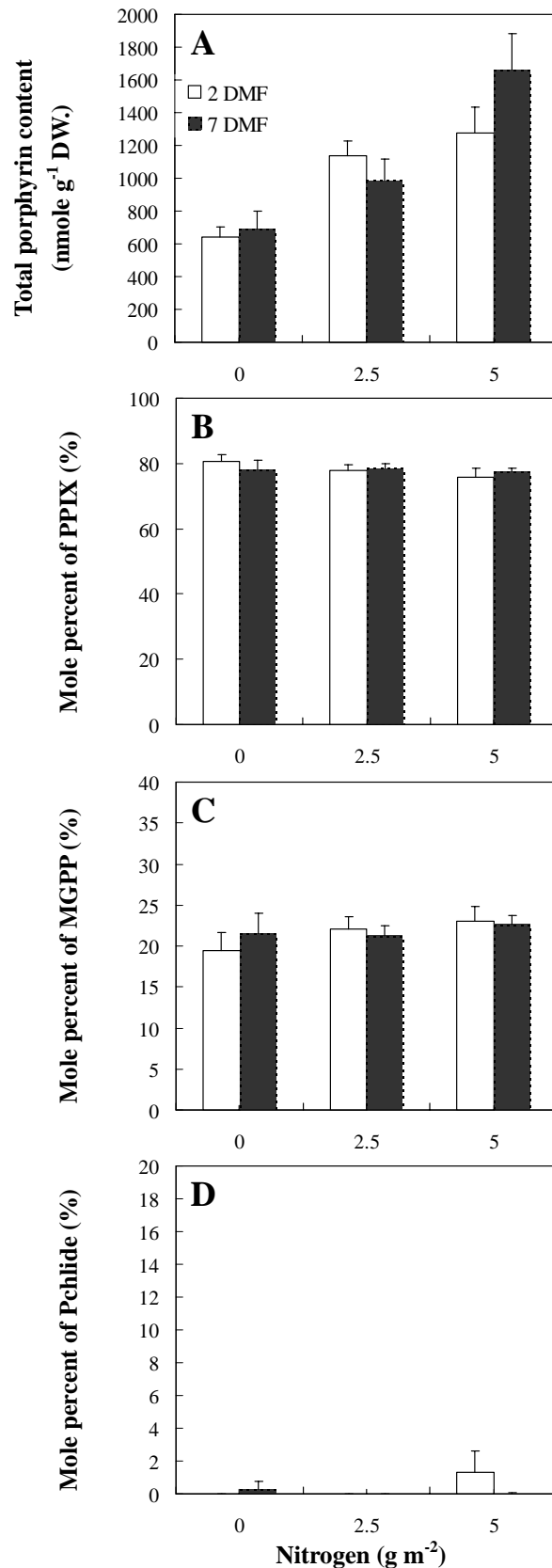


圖 2、不同氮肥處理及刈割頻度對百慕達草 Tifway 419 (A)總吡啉含量、(B) PPIX、(C) MGPP 及(D) Pchlide 三種吡啉莫耳百分比變化之影響。DMF, days mowing frequency。 二日刈割頻度； 七日刈割頻度。

Fig. 2. Effects of nitrogen application rate and mowing frequency on (A) total porphyrin content, and mole percent of (B) PPIX, (C) MGPP and (D) Pchlide in the leaves of bermudagrass Tifway 419. DMF, days mowing frequency. two days mowing frequency; seven days mowing frequency.

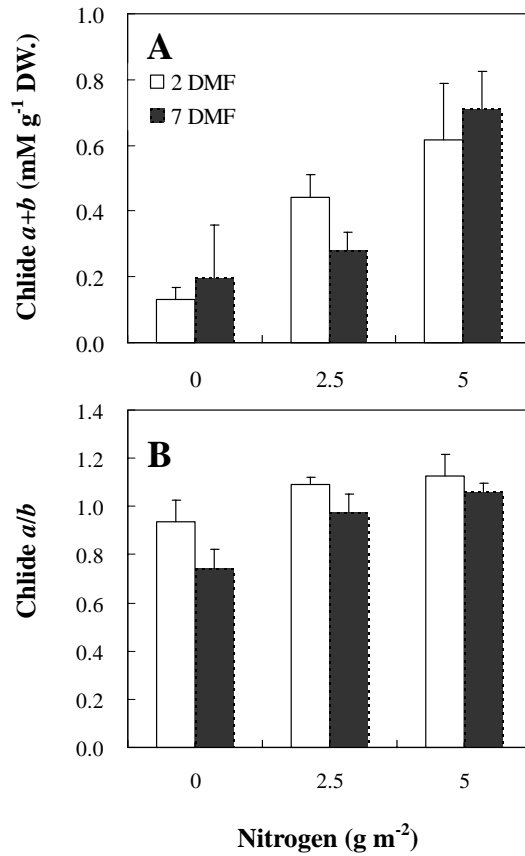


圖 3、不同氮肥處理及刈割頻度對百慕達草 Tifway 419 葉片 (A) Chlide $a+b$ 含量及(B) Chlide a/b 比值變化之影響。DMF , days mowing frequency. 二日刈割頻度; 七日刈割頻度。
 Fig. 3. Effects of nitrogen application rate and mowing frequency on (A) Chlide $a+b$ content and (B) Chlide a/b ratio in the leaves of bermudagrass Tifway 419. DMF, days mowing frequency. two days mowing frequency; seven days mowing frequency.

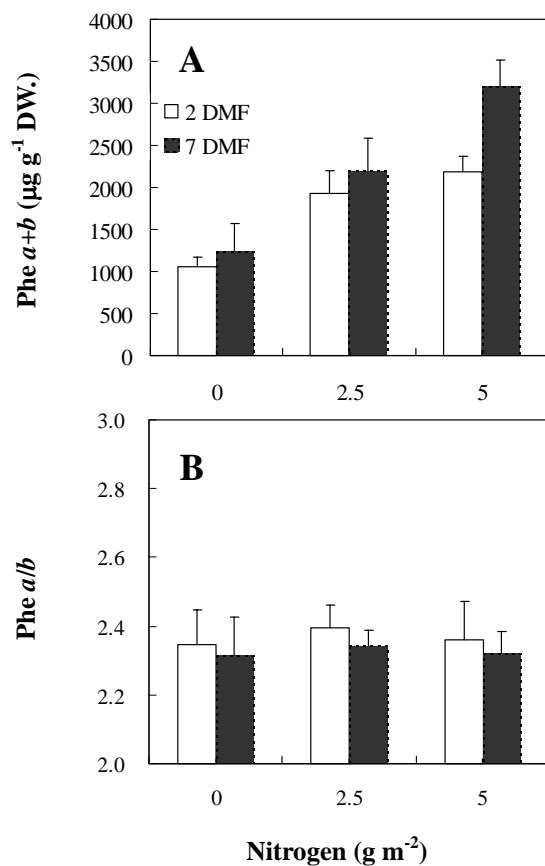


圖 4、不同氮肥處理及刈割頻度對百慕達草 Tifway 419 葉片 (A) Phe *a+b* 含量及(B) Phe *a/b* 比值變化之影響。DMF, days mowing frequency。 二日刈割頻度； 七日刈割頻度。

Fig. 4. Effects of nitrogen application rate and mowing frequency on (A) Phe *a+b* content and (B) Phe *a/b* ratio in the leaves of bermudagrass Tifway 419. DMF, days mowing frequency. two days mowing frequency; seven days mowing frequency.

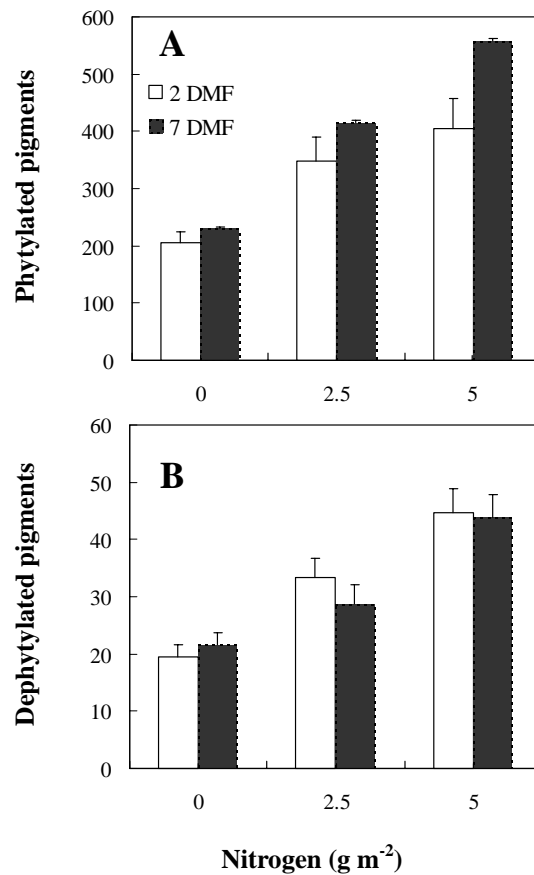


圖 5、不同氮肥處理及刈割頻度對百慕達草 Tifway 419 葉片 (A)含植醇色素及(B)脫植醇色素含量變化之影響。DMF , days mowing frequency。 二日刈割頻度； 七日刈割頻度。
 Fig. 5. Effects of nitrogen application rate and mowing frequency on (A) Phytylated + Dephytylated pigments content and (B) Phytylated/Dephytylated pigments ratio in the leaves of bermudagrass Tifway 419. DMF, days mowing frequency. two days mowing frequency; seven days mowing frequency.

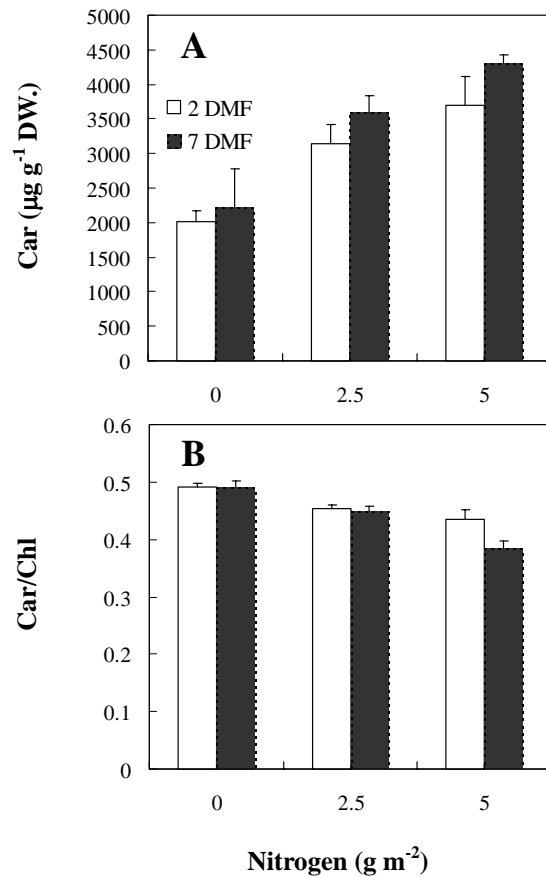


圖 6、不同氮肥處理及刈割頻度對百慕達草 Tifway 419 葉片 (A)類胡蘿蔔素含量及(B)類胡蘿蔔素/葉綠素比值變化之影響。DMF , days mowing frequency。 二日刈割頻度； 七日刈割頻度。

Fig. 6. Effects of nitrogen application rate and mowing frequency on (A) Car content and (B) Car/Chl ratio in the leaves of bermudagrass Tifway 419. DMF, days mowing frequency. two days mowing frequency; seven days mowing frequency.

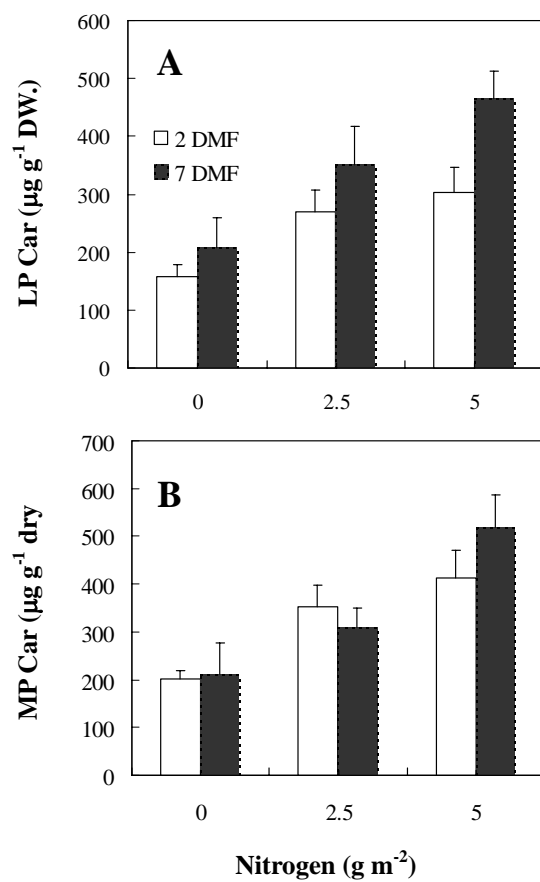


圖 7 不同氮肥處理及刈割頻度對百慕達草 Tif-way 419 葉片 (A) LP Car 及(B) MP Car 含量之變化。DMF, days mowing frequency。 二日刈割頻度； 七日刈割頻度。

Fig. 7. Effects of nitrogen application rate and mowing frequency on (A) LP Car and (B) MP Car content in the leaves of bermudagrass Tifway 419. DMF, days mowing frequency. two days mowing frequency; seven days mowing frequency.

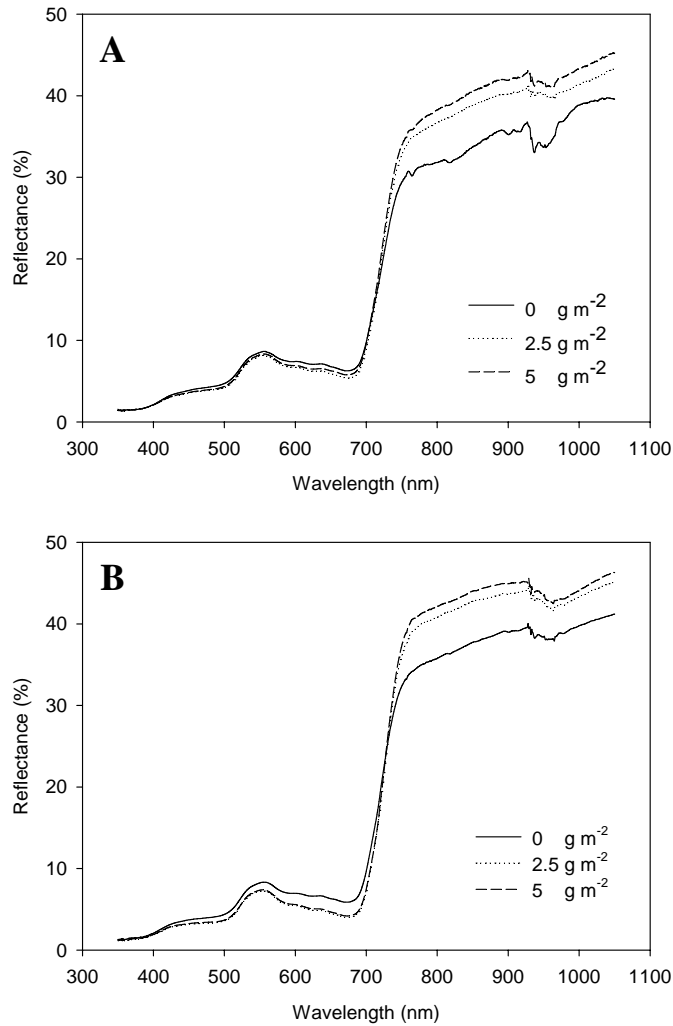


圖 8 不同氮肥處理及刈割頻度對百慕達草 Tifway 419 植被反射光譜變化之影響。(A)二日刈割頻度；(B)七日刈割頻度。

Fig. 8. Effects of nitrogen application rate and mowing frequency on canopy reflectance spectra of bermudagrass Tifway 419. (A) two days mowing frequency; (B) seven days mowing frequency.

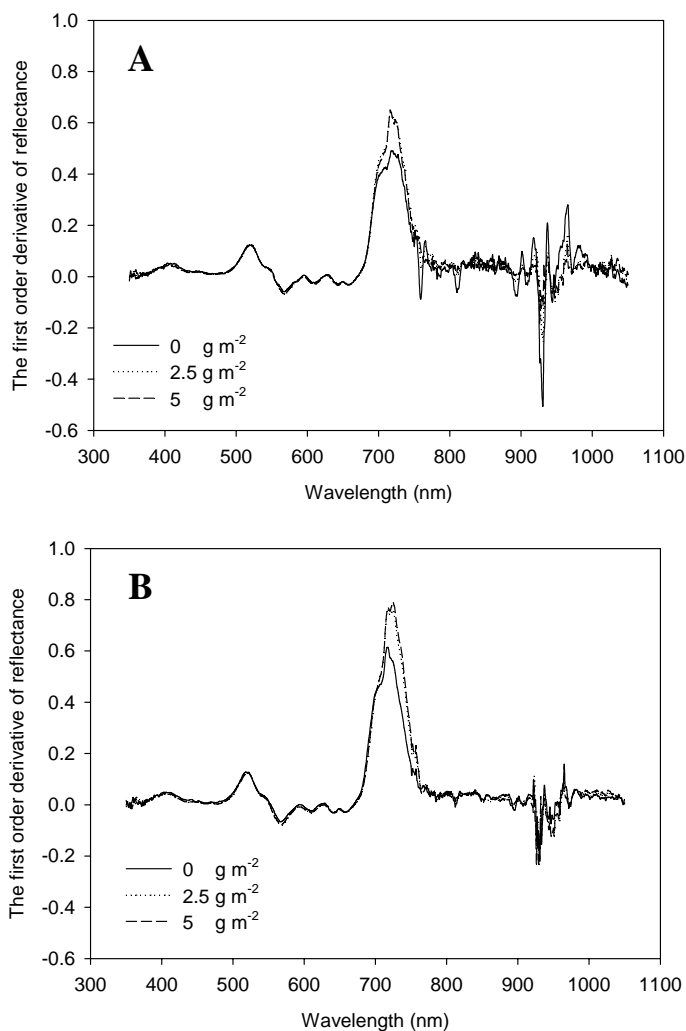


圖 9 不同氮肥處理及刈割頻度對百慕達草 Tifway 419 植被反射光譜一次微分曲線變化之影響。(A)二日刈割頻度；(B)七日刈割頻度。

Fig. 9. Effects of nitrogen application rate and mowing frequency on the first order derivative of canopy reflectance spectra of bermudagrass Tifway 419. (A) two days mowing frequency; (B) seven days mowing frequency.

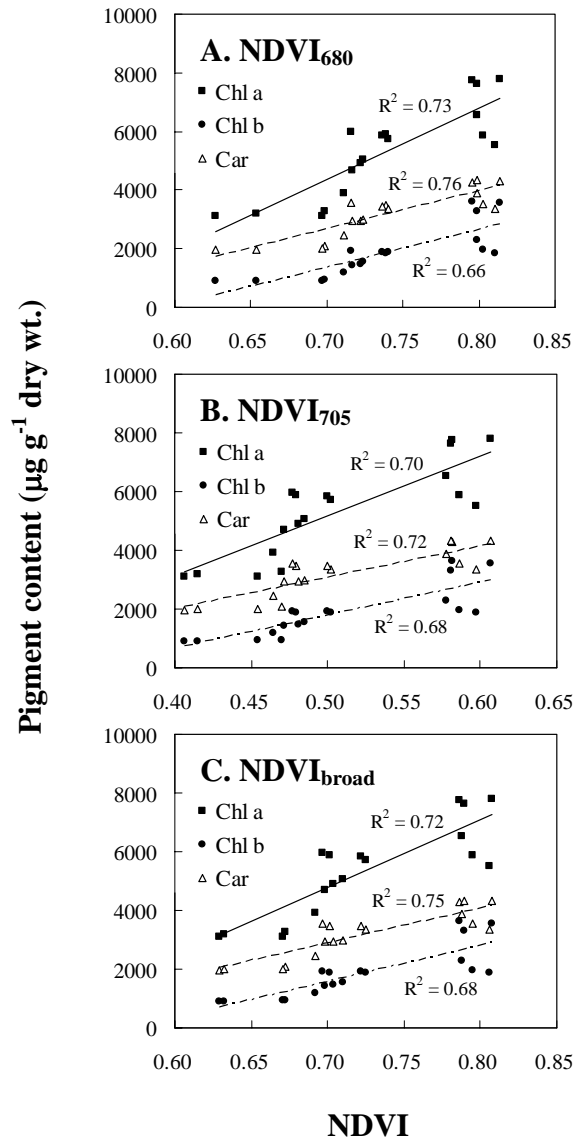


圖 10、百慕達草 Tifway 419 植被反射光譜(A) NDVI₆₈₀、(B) NDVI₇₀₅ 及(A) NDVI_{broad} 植生指數與葉片 Chl a (■), Chl b (●), and Car (△) 含量之關係。

Fig. 10. The (A) NDVI₆₈₀, (B) NDVI₇₀₅, and (C) NDVI_{broad} versus Chl a (■), Chl b (●), and Car (△) contents in bermudagrass Tifway 419.

表 1. 百慕達草 Tifway 419 植被反射光譜 NDVI₆₈₀、NDVI₇₀₅、NDVI_{broad} 植生指數與葉片內各種色素含量之灰關聯值及灰序。

Table 1. The grey relational value and order of NDVI₆₈₀, NDVI₇₀₅, NDVI_{broad}, and pigment contents in the leaves of bermudagrass Tifway 419.

Pigment	NDVI ₆₈₀	NDVI ₇₀₅	NDVI _{broad}
PPIX	0.9032 (7)*	0.9042 (7)	0.9017 (7)
MGPP	0.8853 (11)	0.8862 (11)	0.8838 (10)
Pchlide	0.6592 (14)	0.6597 (14)	0.6575 (14)
Chl <i>a</i>	0.9222 (2)	0.9255 (4)	0.9189 (2)
Chl <i>b</i>	0.8860 (10)	0.8890 (10)	0.8832 (11)
Chlide <i>a</i>	0.8205 (13)	0.8215 (13)	0.8191 (13)
Chlide <i>b</i>	0.8341 (12)	0.8349 (12)	0.8328 (12)
Phe <i>a</i>	0.9130 (6)	0.9157 (6)	0.9098 (5)
Phe <i>b</i>	0.9133 (5)	0.9170 (5)	0.9083 (6)
Phytylated pigments	0.9165 (3)	0.9261 (3)	0.9115 (3)
Dephytylated pigments	0.8993 (8)	0.9012 (8)	0.8977 (8)
Car	0.9326 (1)	0.9389 (1)	0.9292 (1)
LP Car	0.9159 (4)	0.9280 (2)	0.9111 (4)
MP Car	0.8964 (9)	0.8975 (9)	0.8949 (9)