

研究報告 (Original Paper)

稻株氮營養狀況遙測技術之建立

申雍¹ 羅正宗² 鄭世朋¹

¹中興大學土壤環境科學系 ²農業試驗所嘉義分所

摘要

水稻是台灣地區栽培面積最廣的作物，而氮肥是提高和穩定水稻生產最重要的肥料，但是在水稻生育初期很難以目視方法判別稻株的氮營養狀況，若能利用遙感探測技術，定期、迅速的提供田間稻株氮營養狀況空間分佈的資訊，是實施水稻精準管理的基礎。本研究以台農67號水稻為試驗材料，分別給予0、90、180 kgN ha⁻¹三種等級氮肥處理，以可攜式光譜儀 (LI-1800) 定期測定水稻植被的反射光譜，利用波段比值、植被指數、和光譜微分等方法，分析檢測稻株體內氮營養狀況的特徵指標，以開發利用遙測技術判斷稻株氮營養狀況之技術。研究結果指出，如果稻株體內之氮營養狀況可利用SRVI、NDVI、和dR/dλ₇₃₅等特徵值進行鑑別，但是SRVI和NDVI只能區別稻株體內氮素是否嚴重缺乏，不適合用於區別田間稻株氮營養狀況的空間分佈；dR/dλ₇₃₅可以分辨稻株體內氮素的濃度，具有可區別田間稻株氮營養狀況空間分佈的能力，因此較適合水稻實行氮肥精準管理之遙測模式應用。未來仍需累積在不同生育期稻體內氮濃度和光譜微分值的相關的資料，才能建立判斷稻株體內氮營養狀況之完整模式，最後還需在背景反射不同之其他土壤進行驗證與模式修正的工作。

關鍵詞：水稻、遙感探測、氮營養。

Development of Remote Sensing Techniques to Identify Nitrogen Status of Paddy Rice

Yuan Shen¹, Jeng-Chung Lo² and Shi-Pong Cheng¹ (¹ Department of Soil and Environment Sciences, National Chung-Hsing University, Taichung, Taiwan, ROC., ² Chia-Yi Agricultural Research Station, TARI, Chiayi, Taiwan, ROC.)

ABSTRACT : Paddy rice is the major crop in Taiwan. Nitrogen is the most important fertilizer to increase and stabilize yield of paddy rice. However, it is very difficult to identify nitrogen status of rice plants by visual inspection. If it can be identified by remote sensing techniques, the information regarding the spatial distribution of the nitrogen status of rice plants within the field can then be provided rapidly and at regular time interval. This constitutes the basis of precision management of nitrogen fertilizer. In this study, three rates of nitrogen fertilizer, 0、90、180 kgN ha⁻¹, was applied to paddy rice (TN 67). Reflectance spectrum of the rice canopies were measured by a portable spectroradiometer (LI-1800) at regular basis. Remote sensing techniques, such as band ratio, vegetation index, and spectrum differentiation, were used to identify the characteristic indices for nitrogen status of rice plants. Results indicated that SRVI, NDVI and dR/dλ₇₃₅ can all be used as the nitrogen status indicator. Though SRVI and NDVI can identify only severely nitrogen deficient rice plants, dR/dλ₇₃₅ index can

distinguish the concentration of nitrogen status within rice plants. Therefore, $dR/d\lambda_{735}$ is a much better indicator for delineating the spatial distribution of nitrogen status of rice plants within the field for precision nitrogen management. More experimental data related between nitrogen status of rice plants and $dR/d\lambda_{735}$ index at different growth stages still need to be accumulated before a useful model can be developed. Background correction also needs to be tested on soils of different color.

Keywords : Rice, Remote sensing, Nitrogen.

前 言

氮肥是提高和穩定水稻生產最重要的肥料，但也是最不容易正確施用的肥料，因為即使水稻在生育期中吸收有等量的氮素，但由於吸收的時期不同，稻株的型態和產量構成要素常常不同，產量也隨之變動(林等，1981；林與鍾，1982)。水稻從插秧後至開花期間均需要氮素持續的供應，而其中之營養生長期和幼穗形成期是兩個關鍵時段，若能提供充分之氮素供應即可得到好的生產株型與高的產量(張，1988)。營養生長期是分蘗數和葉數增加的時期，稻株體中氮濃度越高，分蘗數和葉面積就越多，光合成的能力也相對提高，但若氮肥供給過多，又容易造成氮的毒害，或是在成熟期間因營養器官過度繁茂導致光照不足，致使營養器官提早衰老死亡，致使穀粒填充不飽滿。在幼穗形成期間，充足的氮肥供應則能有增加一穗粒數和上位葉之葉面積與光合成能力的功效。為能控制水稻氮肥之供給，目前的肥培管理已將水稻氮肥分成基肥、2-3次的追肥和穗肥施用，但仍多憑農民個人之經驗決定施肥的時間與用量，尚不能達到依稻株體內氮營養狀況而施用的精準管理。

氮素是胺基酸、蛋白質、葉綠素、酵素、核酸、荷爾蒙及植物鹼等細胞質的組成份，氮素也具有促進水稻莖葉等營養器官生長的功能，因此稻株體內的氮營養狀況會表現於水稻的生理反應和外在型態上。例如，水稻葉片中葉綠素的濃度和葉

片的光合作用能力與葉片中的氮濃度成正相關，當氮素不足時，葉綠素的合成受限，葉色變淡甚至產生黃化現象，老葉提早枯萎，並出現分蘗數減少，葉片狹長，植株矮化等現象；氮肥過多則葉片呈現濃綠色，分蘗數和葉面積增加，且因氮素之同化作用需消耗糖及能量，降低構成細胞壁之碳水化合物及澱粉之聚集使得細胞組織軟弱，呈現莖部節間伸長、葉片軟弱等徵狀(張，1988)。

植被對太陽輻射之反射光譜已被廣泛用於進行有關作物逆境種類與程度等空間分佈之遙測調查中(c.g.申與李，1998；Steven and Clark, 1990)。在可見光區(400-700 nm)，葉片的反射光譜主要受葉綠素吸收之影響，呈現在藍光與紅光段較弱而在綠光段較強的分佈，且各光段的反射值隨葉綠素濃度的增加而下降。在近紅外光區(700-1300 nm)，雖然葉片色素與細胞壁對日射能量的吸收很少，但由於細胞和細胞間隙中空氣的折射指數不同，產生散射的效應，因此造成葉片的反射光譜在此波段呈現一個高台(plateau)，且反射率的高低與葉片的解剖構造，諸如葉肉細胞的層次、大小、排列方式，以及細胞的內容物有密切的關係。在中紅外光區(1300-2500 nm)，葉片的反射光譜主要受葉片中水分含量的影響，尤其在1450、1950、和2500 nm處，葉片中的水分會產生很強的吸收，因而導致反射光譜出現兩個高峰(Guyot，1990)。

氮肥對玉米 (Walburg et al., 1982) 和小麥 (Stanhill et al., 1972) 植被反射光譜的變化的影響曾被提出，由於氮肥會改變作物的葉面積、乾物重、株高、葉綠素濃度、地面覆蓋率等因素而改變植被的反射光譜，所以認為可以利用植被反射光譜的空間變異評估作物氮營養的空間分佈。Thomas 和 Oerther (1972)，Blackmer 等 (1994) 都指出可利用葉片在 550 nm 的反射值估計植體內的氮濃度。Blackmer 等 (1996) 則利用充分供應氮肥之玉米植被反射光譜在 550 nm 和 710 nm 的反射值為基準，以比值的方式區別氮肥對玉米產量的效應。Masoni 等 (1996) 利用微量元素缺乏造成大麥、小麥、玉米、向日葵等作物葉綠素之缺乏，除了可見光段的反射率因葉綠素缺乏而提高外，由紅光段到近紅外光段間反折點的波長也會減少，產生紅位移的現象。葉片中的氮濃度也可以利用 Minolta SPAD 502 葉綠素儀在田中快速測定 (Schepers et al., 1992)，該儀器係依據作物葉片在 650 nm 的穿透率和葉綠素濃度間有良好對應關係而設計。

水稻是台灣地區栽培面積最廣的作物，採用精準的肥培管理，適時適量的施用氮肥，除了具有提高稻作產量和施肥的經濟效益外，更可以減少非點源的污染，也具有維護生態環境的積極意義。但是，在水稻生育初期很難以目視方法判別稻株的氮營養狀況，因此無法達到適時適量施用氮肥的理想。利用遙感探測技術，定期、迅速的提供田間稻株氮營養狀況空間分佈的資訊，是實施水稻精準管理的基礎。唯由於遙測影像僅能提供地物在不同波段的反射強度，而地物的反射強度隨入射光之強度、角度、光譜特性、...而異，前述利用單一波段反射率的方法並不適合於用遙測影像鑑別植株體內的氮營養狀況。因此本研究之目的即在於利用對水稻

植被反射光譜的測定，開發檢測稻株體內氮營養狀況的相關技術。

材料與方法

本研究以台灣地區水稻栽植面積較廣之台農 67 號為試驗品種，於農業試驗所嘉義分所溪口農場進行氮肥試驗並量測各處理水稻植被之反射光譜。氮肥處理以硫銨分為 0、90、180 kgN ha⁻¹ 三種以造成生育性狀上的差別，分成基肥、追肥、和穗肥三次施用，每次各施入氮肥用量之 1/3，每試區面積至少 50 m²，各處理三重覆。

全生育期水稻植冠反射光譜之調查，於每 1-2 週以可攜式光譜儀 (LI-1800, LICOR) 測定植冠反射光譜，波長測定範圍為 350 nm-1100 nm，光譜解析度為 10 nm。測定時，測定人員位於測點的北側，將遠端接收器 (LI-1800-02 remote cosine receptor, LI-COR) 伸出約 1.5 m 置於水稻植冠上方約 1 m 處，並側向站立以儘量減少測定人員本身產生的干擾，儘快反覆測量入射及反射光譜各三次。由於進行測量時，入射之日射量仍可能有微小之變動，因此每次量測所得之入射或反射光譜強度，均除以同時由可見光感測器 (LI-190 quantum sensor, LI-COR) 量得之總入射可見光量，再由三次入射與反射測定之平均值計算植被的反射光譜。所有植被反射光譜的測量工作皆於上午十時至下午二時以前完成，以減少反射光譜受太陽入射角變動之影響。

水稻植被反射光譜測定完畢後，即以葉面積儀 (LI-2000, LICOR) 調查各試區水稻植被的葉面積與葉面傾角。並於每試區採集稻株樣品，攜回實驗室以 60 °C 烘乾後磨碎，以蒸餾法分析植體內的全氮濃度。由植體分析的氮濃度和田間量測所得之水稻植被反射光譜，再分別利用波段比值、植被指數和一次微分等方法，尋找可供檢測稻株體內氮營養狀況的特徵值。

結果與討論

不同氮肥處理水稻植被反射光譜典型的變化示於圖1。在可見光段，不同氮肥處理的反射光譜非常接近，因此在田間通常不易以目視方法區別稻株的氮營養狀況，除非進行植體分析否則很難適量的施用氮肥，此亦指出利用遙測技術鑑別稻株體內氮營養狀況的難度與重要性。水稻植被在近紅外光段的反射值則隨氮肥用量之增加而升高，此與氮肥供應充足之水稻試區，其分蘗數和葉面積都顯著增加有關，不僅因此提高植被對近紅外光段的反射，而且較繁茂的植被也會減低田水和土壤的背景貢獻。

若以 90 kg N ha^{-1} 處理之水稻植被反射光譜為基準，除以 0 和 180 kg N ha^{-1} 兩種氮肥用量水稻植被反射光譜，可得不同波長下的光譜比值圖(圖2)。圖中顯示 0 kg N ha^{-1} 處理因氮肥缺乏造成葉綠素濃度的減少，因此在藍光段和紅光段的反射值因色素之吸收減少而明顯增加；而近紅外光段的反射值因分蘗數和葉面積之減少而降低。 180 kg N ha^{-1} 處理與 90 kg N ha^{-1} 處理間的呈現平

行變化的趨勢，此可能由於 90 kg N ha^{-1} 之氮肥用量已接近充分供給，因此對葉綠素之濃度和水稻之生育性狀的影響不大，但是 180 kg N ha^{-1} 處理由於葉面積較多，背景田水和土壤之低反射值對植被反射光譜之貢獻則相對減少，所以光譜比值會高於1。雖然稻株體內氮缺乏的情形會反應於藍光段、紅光段、與近紅外光段反射值的高低，但是在利用遙測影像分析時，通常缺乏入射日射強度的資料，因此不能直接以單波段反射值的高低進行鑑別，在遙測分析技術上常利用波段比值法予以克服(Lillesand and Kiefer, 1994)，因此研究中首先探討利用兩個不同波段反射值的比值進行鑑別的可行性。依SPOT之波段範圍計算水稻植被反射光譜在綠光段、紅光段、和紅外光段的反射值，進行不同波段比值之比較分析，表1指出利用近紅光段/紅光段的比值(即植被指數SRVI)，最能反映稻株體內之氮營養狀況。

水稻全生育期植被指數(SRVI和NDVI)的變化示於圖3和圖4。此兩種指數自插秧後即快速上升，約6週後轉為平

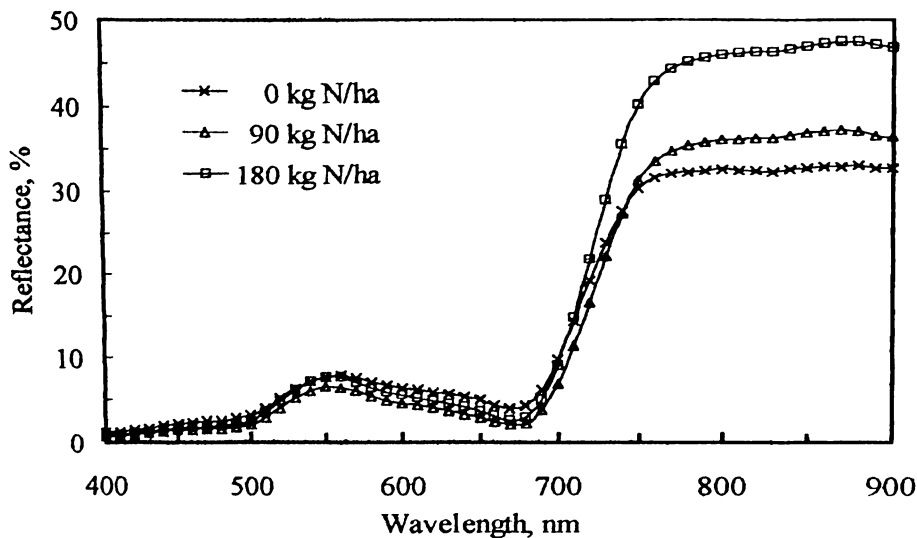


Fig. 1. Typical reflectance spectrum of rice canopies at different nitrogen fertilizer application rate.

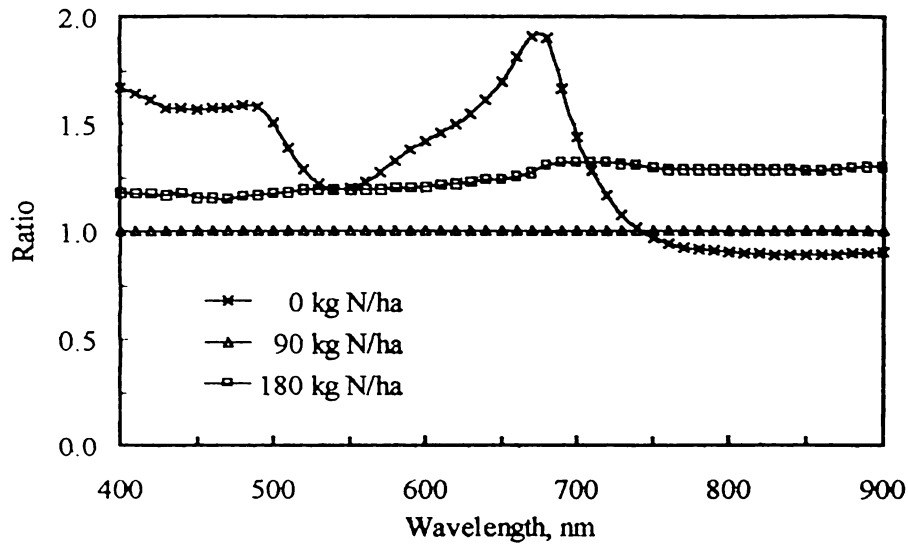


Fig. 2. Ratio of reflectance spectrum of rice canopies at different nitrogen fertilizer application rate to that of 90 kg N ha⁻¹.

Table 1. Effect of nitrogen application rates (kg N ha⁻¹) to band ratio computed from reflectance spectrum of rice canopies

	3 week			6 week			9 week		
	0	90	180	0	90	180	0	90	180
Band Ratio ^a									
G/R	1.0	1.4	1.3	1.2	1.5	1.5	1.2	1.6	1.5
NIR/R	2.6	8.0	8.2	5.8	10.3	10.2	6.6	12.0	12.5
NIR/G	2.6	5.8	6.1	4.7	7.1	7.0	5.3	7.6	8.2
Distribution ^b									
G/R	74	101	100	83	99	100	81	104	100
NIR/R	31	97	100	57	100	100	53	96	100
NIR/G	42	96	100	68	102	100	65	93	100

a : G(500-590nm), R(610-680nm), NIR(780-890nm)

b : using 180 kg N ha⁻¹ as the basis of computation.

緩，在12週後又快速下降，此變化與水稻植被的葉面積和葉片活性有密切之關係。在生育初期，由於分蘗數和葉面積快速增加，近紅外光段的反射值由田水之接近0而快速升高，但是可見光段的反射值卻因葉綠素之吸收而降低，因此SRVI和NDVI的數值會快速升高。在生育後期，水稻葉片逐漸黃化、枯萎，可見光段的反射值因葉綠素濃度減少而升高，但近紅外光段的

反射值卻因葉片枯萎和背景土壤之暴露而降低，因此SRVI和NDVI的數值會快速下降。其中0 kgN ha⁻¹處理之上升速度較90、180 kgN ha⁻¹處理為緩，但下降速度卻較快，此則與稻株因氮營養缺乏，導致生育初期葉面積增加慢，而在生育後期葉片又提早黃化、枯萎所致。

若對水稻植被之反射光譜進行微分處理(圖5)，不同氮肥處理在715-745 nm間

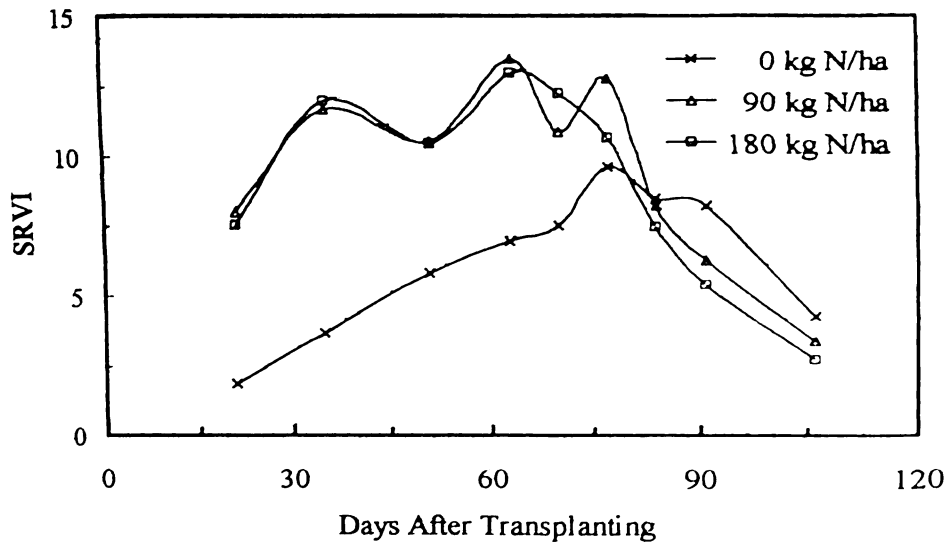


Fig. 3. Changes of simple ratio vegetation indices (SRVI) of rice canopies as affected by rate of nitrogen fertilizer application.

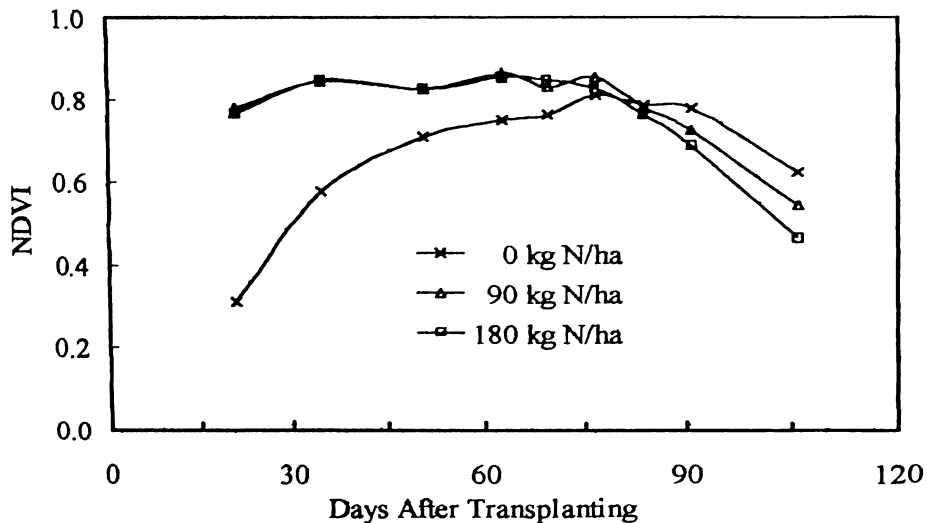


Fig. 4. Changes of normalized difference vegetation indices (NDVI) of rice canopies as affected by rate of nitrogen fertilizer application.

的一次微分值有明顯的差異出現。其原因係由於氮肥處理導致紅光段和近紅外光段反射值差距之增大，因此使得處於紅光段與近紅外光段間過渡地帶之斜率變化加劇。雖然目前國內常用之多光譜的衛星或航測影像資料的光譜解析度不足以供光譜微分之用，但是光譜解析度達 10 nm 以下

之高光譜影像在國外已被用於精準農業的工作中，而且也可設計適當的感測器加掛在可變率的施肥農機上，對稻株氮營養狀況進行即時感測與施用。Masoni 等 (1996) 利用微量元素缺乏造成作物葉綠素缺乏，使葉片反射光譜產生紅位移的現象，在本研究水稻植被的反射光譜中紅位移的現象

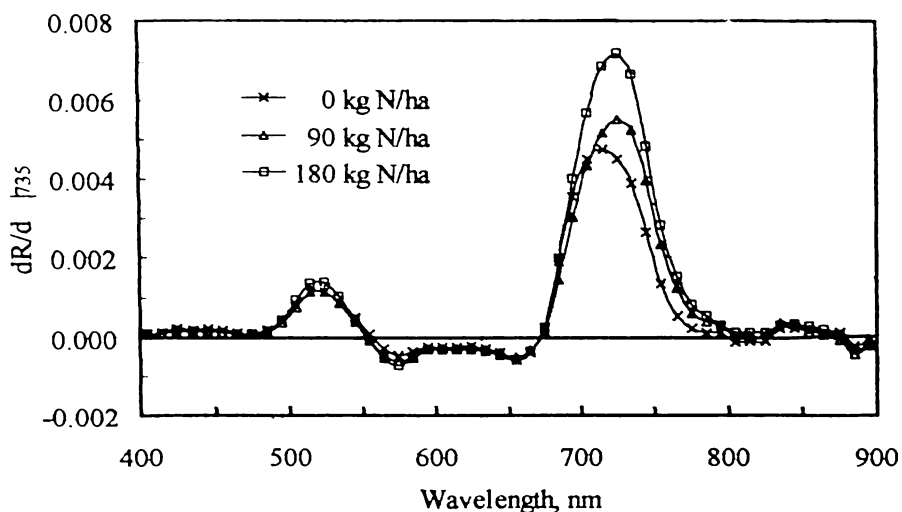


Fig. 5. Changes of reflectance spectrum first derivatives of rice canopies as affected by rate of nitrogen fertilizer application.

並不明顯，可能係由於氮肥的效應不僅影響葉片中葉綠素的濃度，還影響葉面積的多寡、葉片的厚度和葉肉細胞層數、植冠的株型…等其他因素所致。

由以上之討論，可知波譜比值、植被指數、和一次微分等方式都可用於鑑別稻株體內的氮營養狀況。但是利用波段比值 (G/R) 和 NDVI 和 SRVI 等植被指數的方法，只適合用於鑑別稻株體內氮營養狀態是否極度缺乏，並不易區分 90 和 180 kgN ha⁻¹ 處理間的差異 (表 2)。由於水稻栽培都

會施用肥料，因此精準農耕中所需的稻株氮營養鑑別技術必須能區別 90 和 180 kgN ha⁻¹ 處理間的差異。在研討過的鑑別方法中，僅有一次微分的方式可以突顯出 0、90、180 kgN ha⁻¹ 等處理間的差異。此外，一次微分也具有去除土壤背景反射干擾之功能 (Steven et al., 1990)，因此適合作為鑑別稻株體內氮營養狀況的特徵值。圖 6 是稻株體內氮濃度與植被反射光譜在 735 nm 處一次微分值間的關係，良好的線性相關顯示植被反射光譜在 735 nm 處的一次微

Table 2. Comparisons of characteristic indices to identify nitrogen status of rice plants applied at different rates (kg N ha⁻¹) of nitrogen fertilizer

	3 week			6 week			9 week		
	0	90	180	0	90	180	0	90	180
Indices									
SRVI	2.6	8.0	8.2	5.8	10.3	10.2	6.6	12.0	12.5
NDVI	0.44	0.78	0.78	0.71	0.82	0.82	0.74	0.85	0.85
dR/d λ ₇₃₅ ^a	1.43	3.78	4.16	3.53	5.96	6.01	3.90	5.26	6.69
Distribution									
SRVI	31	97	100	57	100	100	53	96	100
NDVI	56	99	100	86	100	100	86	100	100
dR/d λ ₇₃₅	34	91	100	59	99	100	58	79	100

a : dR/d λ |₇₃₅ × 1E3

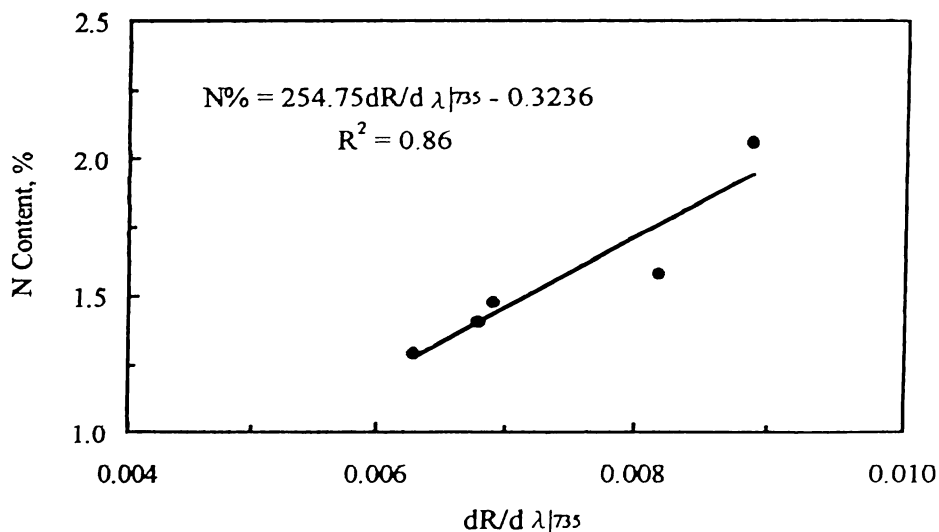


Fig. 6. Relations between nitrogen content and reflectance spectrum first derivatives of rice canopies.

分值確可作為鑑別稻株體內氮營養狀況的指標。由於正常生長之稻株體內的氮濃度自插秧後會逐漸下降，因此目前的研究成果只是一個起始，未來仍需累積在不同生育期稻體內氮濃度和光譜微分值的相關的資料，才能建立判斷稻株體內氮營養狀況之完整模式，最後還需在背景反射不同之其他土壤進行驗證與模式修正的工作。

參考文獻

- 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支出步研究。中華農業氣象 5:203-208。
- 林鴻淇、鍾仁賜、涂秀麗 1981 溫度與光氣候及營養間之交感對水稻之發育與分化及營養生理的效應 II 對氮素吸收、分配及利用之影響。中國農業化學會誌 19:115-124。
- 林鴻淇、鍾仁賜 1982 光氣候、溫度和氮肥之交感對水稻不稔之影響。中國農業化學會誌單 20:21-31。
- 張正賢 1988 稻作學精要。國立編譯館。
- Blackmer, T.M., J.S. Schepers and G.E. Varvel. 1994. Light reflectance compared with other nitrogen stress measurements in corn leaves. *Agron. J.* 86:934-938.
- 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.
- Guyot, G. 1990. Optical properties of vegetation canopies. In: "Applications of Remote Sensing in Agriculture". Steven, M.D. and J.A. Clark. (eds.) p. 19-43. Butterworths.
- Lillesand, T.M. and R.W. Kiefer. 1994. "Remote Sensing and Image Interpretation". 3rd ed. John Wiley & Sons.
- Masoni, A., L. Ercoli and M. Mariotti. 1996. Spectral properties of leaves deficient in iron, sulfur, magnesium, and manganese. *Agron. J.* 88:937-943.
- Schepers, J.S., D.D. Francis, M.F. Vigil and E.E. Below. 1992. Comparisons of corn leaf nitrogen concentration and chlorophyll meter readings. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 23:2173-2187.
- Stanhill, G., V. Kalkofi, M. Fuchs and Y. Kagan. 1972. The effects of fertilizer applications on

- solar reflectance from a wheat crop. Isael J. Agric. Res. 22:109-118.
- Steven, M.D. and J.A. Clark. (eds.) 1990. "Applications of Remote Sensing in Agriculture". Butterworths.
- Steven, M.D., T.J. Malthus, T.H. Demetriades-Shah, F.M. Danson and J.A. Clark. 1990. High-spectral resolution indices for crop stress. In: "Applications of Remote Sensing in Agriculture". Steven, M.D. and J.A. Clark. (eds.) p. 209-227. Butterworths.
- Thomas, J.R. and G.F. Oerther. 1972. Estimating nitrogen content of sweet pepper leaves by reflectance measurements. Agron. J. 64 : 845-847.
- Walburg, G., M.E. Bauer, C.S.T. Daughtry and T.L. Housley. 1982. Effects of nitrogen nutrition on the growth, yield, and reflectance characteristics of corn canopies. Agron. J. 74:677-683.