

國立臺灣大學生物資源暨農學院農藝學系

博士論文

Department of Agronomy
College of Bioresources and Agriculture
National Taiwan University
Doctoral Dissertation

應用遙測技術推估水稻產量與品質之研究
Studies on Rice Yield and Quality Estimated by
Remote Sensing Techniques



楊志維

Zhi-Wei Yang

指導教授：張新軒 博士

蔡養正 博士

楊棋明 博士

Advisor: Shin-Shinge Chang, Ph.D.

Yang-Zenq Tsai, Ph.D.

Chi-Ming Yang, Ph.D.

中華民國 101 年 1 月

Jan 2012

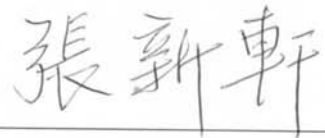
國立臺灣大學博士學位論文 口試委員會審定書

應用遙測技術推估水稻產量與品質之研究 Study on Rice Yield and Quality Estimated by Remote Sensing Techniques

本論文係 楊志維 君 (D93621104) 在國立臺灣大學農藝學系研究所完成之
博士學位論文，於民國 101 年 1 月 13 日承下列考試委員審查通過及口試及格，
特此證明

口試委員：

張新軒 博士 (Shin-Shinge Chang, Ph.D.)
國立台灣大學農藝學系教授(指導教授)



蔡養正 博士 (Yang-Zenq Tsai, Ph.D.)
國立台灣大學農藝學系教授(指導教授)



楊棋明 博士 (Chi-Ming Yang, Ph.D.)
中央研究院生物多樣性研究中心副研究員(指導教授)



蔡文福 博士 (Wen-Fu Tsai, Ph.D.)
國立台灣大學農藝學系教授



林孟輝 博士 (Meng-Huei Lin, Ph.D.)
桃園區農業改良場副研究員



陳建璋 博士 (Jan-Chang Chen, Ph.D.)
實踐大學休閒產業管理學系助理教授



黃文達 博士 (Wen-Dar Huang, Ph.D.)
國立台灣大學農藝學系助理教授



誌 謝

博士學位的取得與論文的完成，首先感謝恩師張新軒博士、蔡養正博士及楊棋明博士之悉心指導，撥冗討論與細心校閱，修業期間多蒙老師之諄諄教誨，以及待人處事受教良多，師恩深厚，謹記於心。

文稿初成之際，承蒙 蔡文福博士、林孟輝博士、陳建璋博士與黃文達博士詳加斧正且惠予卓見，使論文更臻於完善，實感受益良多，在此致以萬分謝意。

修業期間，承蒙系上諸位師長的教導與鼓勵，以及研究室許明晃學長及盟元、昶璋學弟等人的協助，尤以黃文達、黃秀鳳賢伉儷適時予以指導與關心，使論文得以順利完成，特此致謝。

感謝廖振鐸老師於統計上之指導。另感謝夫人杏珮於精神上的支持與關懷，於此一併致上最深的謝意。

願與所有關心我的人分享喜悅與榮耀，並獻上誠摯的謝意與祝福。

謹以此論文獻給我摯愛的家人，感謝家人對我的肯定與包容。

中文摘要

本文主要探討五種不同程度缺或無葉綠素 b 突變種水稻於生育期間其葉片之葉綠素(chlorophyll, Chl)、生合成中間物包括 protoporphyrin IX (PPIX)、magnesium protoporphyrin IX (MGPP)、protochlorophyllide (Pchl) 與崩解代謝物包括 chlorophyllide (Chlide)、pheophytin (Phe)、pheophorbide (Pho) 等含量變化與崩解途徑及類胡蘿蔔素(carotenoid, Car) 含量變化。結果顯示，農林 8 號 Chl 及其代謝物、Car 之含量皆明顯高於突變種水稻。Chl、Phe 及 LP Car 等極性較小之代謝物，其含量隨著生育日數增加而下降，而吡啉(PPIX、MGPP、Pchl)、Chlide 及 MP Car 等極性較大之代謝物，其含量亦隨著生育日數增加而下降。五種水稻在生育階段前期，也就是營養生長期至生殖生長期間，葉綠素之崩解途徑傾向以 Chl→Phe→Pho 為主要崩解途徑(major route)，而以 Chl→Chlide→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，亦即在生育階段後期，也就是生殖生長期至成熟期間，葉綠素之崩解途徑傾向以 Chl→Chlide→Pho 為主要崩解途徑，而以 Chl→Phe→Pho 為次要途徑。

五種不同葉色水稻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，五種不同葉色水稻葉片在 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($R^2 > 0.78$)。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($R^2 > 0.70$)。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。

另於 2006 年在花蓮縣玉里鎮(台稔 2 號)、高雄縣美濃鎮(高雄 145 號)、彰化縣竹塘鄉(台稔 11 號)以及桃園縣新屋鄉(台稔 14 號)，設置水稻產量地真樣區，以不同氮肥等級施用建立產量以及稻米品質差異。利用福衛二號以及 SPOT 衛星影像資料，建立衛星遙測 NDVI 植生指數對水稻產量與米質之推估模式。水稻生殖生長期間孕穗期之衛星影像 NDVI 指數與稻穀產量具有最高相關性，建立衛星遙測 NDVI 指數推估稻穀產量之最佳預測模式，玉里試區為移植後第 56 天之 Yield (kg/ha) = $7889.7 \times \text{NDVI} + 710.94$ ；美濃試區為移植後第 65 天之 Yield (kg/ha) = $14654 \times \text{NDVI} - 364.14$ ；竹塘試區為移植後第 59 天之 Yield (kg/ha) = $14063 \times \text{NDVI} + 1669.4$ ；新屋試區為移植後第 65 天之 Yield (kg/ha) = $13233 \times \text{NDVI} + 1768.6$ 。西半部美濃、竹塘及新屋試區合併資料建立之產量最佳預測模式為 Yield (kg/ha) = $8602.2 \times \text{NDVI} + 2845.3$ ，以此時期建立之產量預測模式，經驗證後顯示具有高準確度。西半部美濃、竹塘及新屋試區合併資料建立之產量估算模式，亦具有高準確度，顯示預測模式應用於不同品種及不同地區之可行性。

稻米品質食味值與產量具有負相關，與衛星遙測 NDVI 指數亦呈現負相關，玉里試區台稔 2 號，在進入生殖生長期後，其衛星遙測 NDVI 植生指數與稻米品質食味值之關係，相當密切，水稻生殖生長期間孕穗期之衛星影像 NDVI 指數建立稻米食味值之推估模式為 $y = -30.84x + 79.313$ ， $r^2 = 0.83$ 。在生育期最後階段，成熟期後期，衛星遙測 NDVI 與稻米食味值之關係亦非常高，其 r^2 達 0.9。竹塘試區台稔 11 號水稻生殖生長期間孕穗期之衛星影像 NDVI 指數建立稻米食味值之推估模式為 $y = -88.737x + 79.23$ ， $r^2 = 0.89$ ，以竹塘試區台稔 11 號水稻生殖生長期間孕穗期之衛星影像 NDVI 指數建立稻米食味值之推估模式，經驗證後其平均誤差為 11.52，顯示具有高準確度。

關鍵詞：水稻、葉綠素、類胡蘿蔔素、生成、崩解、代謝物、反射光譜、遙測、

植生指數、色素、氮肥、稻米產量、品質、推估模式、驗證。



Abstract

We examined the contents of chlorophyll (Chl), biosynthetic intermediates (protoporphyrin IX, PPIX; magnesium protoporphyrin IX, MGPP; protochlorophyllide, Pchl_{id}), degradative intermediates (chlorophyllide, Chl_{id}; pheophytin, Phe; pheophorbide, Pho), and carotenoid in the leaves of rice with five different types of chlorophyll b-deficient or -lacking mutant during their growth and development. The levels of less polar (LP) intermediates such as Chl, Phe and LP Car decreased with increasing growth stage, while the levels of more polar (MP) intermediates such as porphyrins (PPIX, MGPP, Pchl_{id}), Chl_{id} and MP Car were also decreased. The biosynthetic and degradative rate of Chl in rice variety Norin No. 8 was higher than rice mutant type due to smaller amounts of Chl, intermediates and Car. Chl→Phe→Pho was the major route of Chl degradation at vegetative stage in five rice, while Chl→Chl_{id}→Pho was the minor route. When leaves were aging and senescent, Chl→Chl_{id}→Pho was the major route and Chl→Phe→Pho became the minor route of Chl degradation.

The reflectance spectra of five rice 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 five rice the maximum sensitivity to pigment concentration was found to be at 705 nm. The minimal sensitivity to pigment concentration coincided with the red absorption maximum of chlorophyll at 675 nm. Therefore, it seemed 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 reference in the calculation of vegetation indices. Vegetation indices calculated using reflectance at 705 nm and 750 nm correlated very well with pigment concentration (correlation $R^2 > 0.78$). Vegetation indices calculated using broad-band reflectance also correlated well with pigment concentration (correlation $R^2 > 0.70$). Thus, it appears possible to create indices using reflectance spectra for non-destructive estimation pigment content and monitoring crop growth.

The satellite remote sensing normalization difference vegetation index (NDVI) of rice field at booting stage correlated very well with rice yield and rice quality in first period rice. The developed prediction models for rice yield and taste meter value were: yield (kg/ha) = $8602.2 \times \text{NDVI} + 2845.3$; taste meter value = $-30.84 \times \text{NDVI} + 79.313$, $r^2 = 0.83$; taste meter value = $-88.737 \times \text{NDVI} + 79.23$, $r^2 = 0.89$. The developed algorithms predicting rice yield and rice quality from satellite remote sensing data were validated in Chutang, Shinwu, Meinong and Yuli in 2007. Results indicated that estimation models were high accuracy.

Keywords: Paddy Rice, Chlorophyll, Carotenoid, Biosynthesis, Degradation Intermediates, Reflectance spectra, Remote sensing, Vegetation indices, Pigments, Nitrogenous fertilizer, Rice yield, Rice quality, Prediction models, Estimation.

目 錄

圖目錄.....	i
表目錄.....	vii
第一章 水稻葉片光合色素生合成與崩解途徑之研究.....	1
1.1 前言.....	1
1.2 材料方法.....	5
1.3 結果討論.....	8
第二章 水稻葉片及植冠反射光譜分析與色素含量之遙測估算.....	39
2.1 前言.....	39
2.2 材料方法.....	42
2.3 結果討論.....	44
第三章 地真樣區農藝性狀調查.....	70
3.1 前言.....	70
3.2 材料方法.....	73
3.3 結果討論.....	75
第四章 地真樣區米質分析.....	116
4.1 前言.....	116
4.2 材料方法.....	119
4.3 結果討論.....	121
第五章 建立植被指數推估產量模式及驗證.....	140
5.1 前言.....	140
5.2 材料方法.....	144
5.3 結果討論.....	145
第六章 建立植被指數推估米質模式及驗證.....	172
6.1 前言.....	172

6.2 材料方法.....	176
6.3 結果討論.....	178
參考文獻.....	209



圖 目 錄

圖 1-1、本研究在關渡試區種植五種水稻之田間生長情形，拍攝日期 2007 年 4 月 19 日。.....	27
圖 1-2、紫稻、農林 8 號及其突變種生育期間株高之變化。.....	28
圖 1-3、農林 8 號及其突變種生育期間以破壞性方法測定之 Chl a+b 變化。.....	29
圖 1-4、農林 8 號及其突變種生育期間以破壞性方法測定之 Chl a、Chl b 及 Chl a/b 比值之變化。.....	30
圖 1-5、農林 8 號及其突變種生育期間葉片吡啉化合物總量及莫耳百分比之變化。.....	31
圖 1-6、農林 8 號及其突變種生育期間葉片 Chlide a+b 及 Chlide a/b 比值之變化。.....	32
圖 1-7、農林 8 號及其突變種生育期間葉片 Phe a+b 及 Phe a/b 比值之變化。.....	33
圖 1-8、農林 8 號及其突變種生育期間葉片 Chlide a/Phe a 及 Chlide b/Phe b 比值之變化。.....	34
圖 1-9、農林 8 號及其突變種生育期間葉片含植醇+脫植醇色素含量及其比值之變化。.....	35
圖 1-10、農林 8 號及其突變種生育期間葉片類胡蘿蔔素總量之變化。.....	36
圖 1-11、農林 8 號及其突變種生育期間葉片低極性及高極性類胡蘿蔔素含量及其比值之變化。.....	37
圖 1-12、農林 8 號及其突變種生育期間葉片類胡蘿蔔素與葉綠素 a+b 比值之變化。.....	38
圖 2-1、農林 8 號及其突變種生育期間葉片光譜之變化。.....	55
圖 2-2、農林 8 號及其突變種生育期間植冠光譜之變化。.....	56
圖 2-3、農林 8 號及其突變種生育期間葉片微分光譜之變化。.....	57
圖 2-4、農林 8 號及其突變種生育期間葉片光譜反射率之標準差變化。.....	58

圖 2-5、農林 8 號及其突變種生育期間色素含量與葉片單波段反射率之相關性分析。	59
圖 2-6、農林 8 號及其突變種生育期間色素含量與植冠單波段反射率之相關性分析。	60
圖 2-7、農林 8 號及其突變種生育期間色素含量與葉片 SRVI 之相關性分析。	61
圖 2-8、農林 8 號及其突變種生育期間色素含量與植冠 SRVI 之相關性分析。	62
圖 2-9、農林 8 號及其突變種生育期間色素含量與葉片 NDVI 之相關性分析。	63
圖 2-10、農林 8 號及其突變種生育期間色素含量與植冠 NDVI 之相關性分析。	64
圖 2-11、農林 8 號及其突變種生育期間色素含量與葉片 $SRVI_{broad}$ 及 $NDVI_{broad}$ 之相關性分析。	65
圖 2-12、農林 8 號及其突變種生育期間色素含量與植冠 $SRVI_{broad}$ 及 $NDVI_{broad}$ 之相關性分析。	66
圖 2-13、農林 8 號及其突變種生育期間葉片反射光譜之植被指數變化。	67
圖 2-14、農林 8 號及其突變種生育期間植冠反射光譜之植被指數變化。	68
圖 2-15、農林 8 號及其突變種移植後第 60 天葉片反射光譜 $NDVI_{705}$ 植被指數與稻穀產量及稻米品質之相關係數。	69
圖 3-1、不同氮肥等級處理下竹塘試區二期稻作台稉 11 號水稻生育期間水稻株高變化。	83
圖 3-2、不同氮肥等級處理下竹塘試區二期稻作台稉 11 號水稻生育期間分蘗數變化。	84
圖 3-3、不同氮肥等級處理下竹塘試區二期稻作台稉 11 號水稻生育期間葉綠素計	

讀值變化。.....	85
圖 3-4、不同氮肥等級處理下竹塘試區二期稻作台稉 11 號水稻生育期間葉片葉綠素含量變化。.....	86
圖 3-5、不同氮肥等級處理下竹塘試區二期稻作台稉 11 號水稻生育期間葉片葉綠素 a/b 比值變化。.....	87
圖 3-6、不同氮肥等級處理下竹塘試區二期稻作台稉 11 號水稻生育期間葉片類胡蘿蔔素含量變化。.....	88
圖 3-7、不同氮肥等級處理下竹塘試區二期稻作台稉 11 號水稻生育期間葉片類胡蘿蔔素/葉綠素比值變化。.....	89
圖 3-8、不同氮肥等級處理下竹塘試區一期稻作台稉 9 號水稻生育期間水稻株高變化。.....	90
圖 3-9、不同氮肥等級處理下竹塘試區一期稻作台稉 9 號水稻生育期間分蘗數變化。.....	91
圖 3-10、不同氮肥等級處理下竹塘試區一期稻作台稉 9 號水稻生育期間葉綠素計讀值變化。.....	92
圖 3-11、不同氮肥等級處理下竹塘試區年一期稻作台稉 9 號水稻生育期間葉片葉綠素含量變化。.....	93
圖 3-12、不同氮肥等級處理下竹塘試區一期稻作台稉 9 號水稻生育期間葉片葉綠素 a/b 比值變化。.....	94
圖 3-13、不同氮肥等級處理下竹塘試區一期稻作台稉 9 號水稻生育期間葉片類胡蘿蔔素含量變化。.....	95
圖 3-14、不同氮肥等級處理下竹塘試區一期稻作台稉 9 號水稻生育期間葉片類胡蘿蔔素/葉綠素比值變化。.....	96
圖 3-15、不同氮肥等級處理下新屋試區二期稻作台稉 14 號水稻生育期間水稻株高變化。.....	97

圖 3-16、不同氮肥等級處理下新屋試區二期稻作台稈 14 號水稻生育期間分蘗數變化。	98
圖 3-17、不同氮肥等級處理下新屋試區年二期稻作台稈 14 號水稻生育期間葉綠素計讀值變化。	99
圖 3-18、不同氮肥等級處理下新屋試區二期稻作台稈 14 號水稻生育期間葉片葉綠素含量變化。	100
圖 3-19、不同氮肥等級處理下新屋試區二期稻作台稈 14 號水稻生育期間葉片葉綠素 a/b 比值變化。	101
圖 3-20、不同氮肥等級處理下新屋試區二期稻作台稈 14 號水稻生育期間葉片類胡蘿蔔素含量變化。	102
圖 3-21、不同氮肥等級處理下新屋試區二期稻作台稈 14 號水稻生育期間葉片類胡蘿蔔素/葉綠素比值變化。	103
圖 3-22、不同氮肥等級處理下新屋試區二期稻作台稈 14 號水稻移植後第 58 天生長狀況。	104
圖 3-23、不同氮肥等級處理下新屋試區二期稻作台稈 14 號水稻移植後第 58 天植冠反射光譜。	105
圖 3-24、不同氮肥處理下新屋試區二期稻作台稈 14 號水稻生育期間植冠反射光譜 NDVI705 植被指數之變化。	106
圖 3-25、不同氮肥處理下新屋試區二期稻作台稈 14 號水稻生育期間植冠反射光譜 NDVIbroad 植被指數之變化。	107
圖 3-26、不同氮肥等級處理下新屋試區一期稻作台稈 14 號水稻生育期間葉片葉綠素含量變化。	108
圖 3-27、不同氮肥等級處理下新屋試區一期稻作台稈 14 號水稻生育期間葉片葉綠素 a/b 比值變化。	109
圖 3-28、不同氮肥等級處理下新屋試區一期稻作台稈 14 號水稻生育期間葉片類胡	

蘿蔔素含量變化。.....	110
圖 3-29、不同氮肥等級處理下新屋試區一期稻作台稔 14 號水稻生育期間葉片類胡蘿蔔素/葉綠素比值變化。.....	111
圖 3-30、不同氮肥等級處理下新屋試區一期稻作台稔 14 號水稻移植後第 88 天生長狀況。.....	112
圖 3-31、不同氮肥等級處理下新屋試區一期稻作台稔 14 號水稻移植後第 60 天植冠反射光譜。.....	113
圖 3-32、不同氮肥處理下新屋試區一期稻作台稔 14 號水稻生育期間植冠反射光譜 NDVI705 植被指數之變化。.....	114
圖 3-33、不同氮肥處理下新屋試區一期稻作台稔 14 號水稻生育期間植冠反射光譜 NDVIbroad 植被指數之變化。.....	115
圖 5-1、玉里試區稻作衛星遙測植生指數 NDVI 變化模式。.....	155
圖 5-2、美濃試區稻作衛星遙測植生指數 NDVI 變化模式。.....	156
圖 5-3、竹塘試區稻作衛星遙測植生指數 NDVI 變化模式。.....	157
圖 5-4、新屋試區稻作衛星遙測植生指數 NDVI 變化模式。.....	158
圖 5-5、玉里試區稻作衛星遙測植生指數 NDVI 與穀粒產量之關係。.....	159
圖 5-6、美濃試區稻作衛星遙測植生指數 NDVI 與穀粒產量之關係。.....	160
圖 5-7、竹塘試區稻作衛星遙測植生指數 NDVI 與穀粒產量之關係。.....	161
圖 5-8、新屋試區稻作衛星遙測植生指數 NDVI 與穀粒產量之關係。.....	162
圖 5-9、玉里、美濃、竹塘及新屋四個試區稻作衛星遙測植生指數 NDVI 與穀粒產量之關係。.....	163
圖 5-10、竹塘試區產量預測模式之驗證。實線所示為預測值=實測值，虛線為產量估算之誤差值。.....	165
圖 5-11、新屋試區產量預測模式之驗證。實線所示為預測值=實測值，虛線為產量估算之誤差值。.....	167

圖 5-12、玉里、美濃、竹塘及新屋四個試區一期稻作衛星遙測植生指數 NDVI 與 穀粒產量之關係。——，四個試區合併資料之迴歸線；-----，竹塘、新屋 試區及美濃 60、120、180 kg-N/ha 試區合併資料之迴歸線。.....	169
圖 5-13、西半部試區產量預測模式之驗證。實線所示為預測值=實測值，虛線為產 量估算之誤差值。.....	170
圖 6-1、玉里試區稻作衛星遙測植生指數 NDVI 變化模式。.....	202
圖 6-2、美濃試區稻作衛星遙測植生指數 NDVI 變化模式。.....	203
圖 6-3、竹塘試區稻作衛星遙測植生指數 NDVI 變化模式。.....	204
圖 6-4、新屋試區稻作衛星遙測植生指數 NDVI 變化模式。.....	205
圖 6-5、玉里試區稻作衛星遙測植生指數 NDVI 與稻米食味值之關係。.....	206
圖 6-6、竹塘試區稻作衛星遙測植生指數 NDVI 與稻米食味值之關係。.....	207
圖 6-7、竹塘試區稻米食味值預測模式之驗證。實線所示為預測值=實測值，虛線 為產量估算之誤差值。.....	208

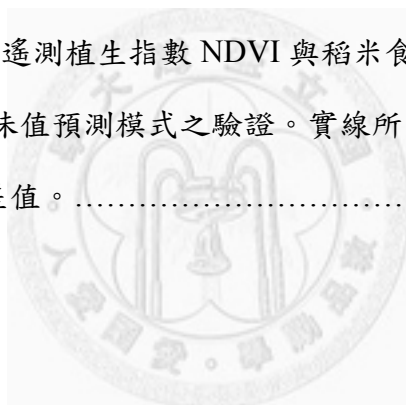


表 目 錄

表 1-1、本研究在關渡試區種植五種水稻之葉片葉綠素 a/b 比值及其色素特性。....	26
表 2-1、農林 8 號及其突變種生育期間葉片色素含量之變化。.....	53
表 2-2、農林 8 號及其突變種稻穀產量及稻米品質。.....	54
表 3-1、水稻試驗地區、品種及插秧、收穫日期。.....	81
表 3-2、水稻施肥用量與時程。.....	82
表 4-1、水稻試驗地區、品種及插秧、收穫日期。.....	125
表 4-2、水稻施肥用量與時程。.....	126
表 4-3、白米外貌之分類及其等級表。.....	127
表 4-4、玉里試區稻作碾米品質與米粒外觀。.....	128
表 4-5、玉里試區稻作白米理化性質與食味值。.....	129
表 4-6、美濃試區稻作碾米品質與米粒外觀。.....	130
表 4-7、美濃試區稻作白米理化性質與食味值。.....	131
表 4-8、竹塘試區稻作碾米品質與米粒外觀。.....	132
表 4-9、竹塘試區稻作白米理化性質與食味值。.....	133
表 4-10、新屋試區稻作碾米品質與米粒外觀。.....	134
表 4-11、新屋試區稻作白米理化性質與食味值。.....	135
表 4-12、玉里試區稻作台梗 2 號稻米品質與產量因子間之相關係數。.....	136
表 4-13、美濃試區稻作高雄 145 號稻米品質與產量因子間之相關係數。.....	137
表 4-14、竹塘試區稻作台梗 11 號稻米品質與產量因子間之相關係數。.....	138
表 4-15、新屋試區稻作台梗 14 號稻米品質與產量因子間之相關係數。.....	139
表 5-1、水稻試驗地區、品種及插秧、收穫日期。.....	151
表 5-2、水稻施肥用量與時程。.....	152
表 5-3、本研究使用之福衛二號及法國 SPOT 衛星影像其被拍攝之日期。.....	153
表 5-4、各試驗區稻作稻穀產量。.....	154

表 5-5、玉里試區水稻產量預測模式殘差分析。	164
表 5-6、竹塘試區水稻產量預測模式殘差分析。	166
表 5-7、新屋試區水稻產量預測模式殘差分析。	168
表 5-8、西半部試區水稻產量預測模式殘差分析。	171
表 6-1、水稻試驗地區、品種及插秧、收穫日期。	185
表 6-2、水稻施肥用量與時程。	186
表 6-3、白米外貌之分類及其等級表。	187
表 6-4、本研究使用之福衛二號及法國 SPOT 衛星影像其被拍攝之日期。	188
表 6-5、玉里試區稻作碾米品質與米粒外觀。	189
表 6-6、玉里試區稻作白米理化性質與食味值。	190
表 6-7、美濃試區稻作碾米品質與米粒外觀。	191
表 6-8、美濃試區稻作白米理化性質與食味值。	192
表 6-9、竹塘試區稻作碾米品質與米粒外觀。	193
表 6-10、竹塘試區稻作白米理化性質與食味值。	194
表 6-11、新屋試區稻作碾米品質與米粒外觀。	195
表 6-12、新屋試區稻作白米理化性質與食味值。	196
表 6-13、玉里試區稻作台梗 2 號稻米品質與產量因子間之相關係數。	197
表 6-14、美濃試區稻作高雄 145 號稻米品質與產量因子間之相關係數。	198
表 6-15、竹塘試區稻作台梗 11 號稻米品質與產量因子間之相關係數。	199
表 6-16、新屋試區稻作台梗 14 號稻米品質與產量因子間之相關係數。	200
表 6-17、竹塘試區稻米食味值預測模式殘差分析。	201

第一章 水稻葉片光合色素生合成與崩解途徑之研究

一、前言

高等植物葉片中含有多種色素，參與各項生理活動，含量最多的為光合色素 (photosynthetic pigments)，包括類胡蘿蔔素(carotenoid, Car)和葉綠素(chlorophyll, Chl)，與其生合成及崩解代謝物。這些光合色素，均以非共價鍵結合(non-covalent binding)方式與特定蛋白質結合成所謂的色素蛋白複合體(pigment-protein complexes)，而位於葉綠體之類囊膜上(Markwell *et al.*, 1979)。高等植物 Chl 包括 Chl a 及 Chl b，植物的葉片均可合成，而 Chl a/b 比值在正常狀況下約為 3 (Chang and Troughton, 1972)。在多種植物上已發現有 Chl 缺乏突變種(Chl-deficient mutant)，例如大麥(*Hordeum vulgare*)、豌豆(*Pisum sativum*)、玉米(*Zea mays*)、小麥(*Triticum aestivum*)、甜苜蓿 (*Melilotus alba*)、單胞藻(*Chlamydomonas reinhardtii*)等及其它植物(Markwell *et al.*, 1986 及其文獻)。Chl 缺乏突變種可分為兩類，一為幾乎測不到 Chl b，稱為無 Chl b 突變種(Chl b-lacking mutant)，其 Chl a/b 比值接近無限大；另一種則為 Chl b 產生量較少，稱之為 Chl b 缺乏突變種(Chl b-deficient mutant)，通常此種植物 Chl a/b 比值大於 4，葉色為淡黃綠色(King, 1991; Yang *et al.*, 1993)。通常，Chl 缺乏突變種都有較高的 Chl a/b 比值，較低的 Chl 總量，無正常堆疊的葉綠餅(stacked grana)，且幾無例外，Chl 缺乏突變種均對溫度及光線極為敏感(Yang *et al.* 1990, Yang *et al.* 1995, Chen and Yang 1995)。但迄今也有三個例子顯示，即使缺乏或無 Chl b，仍有正常堆疊的葉綠餅；亦即缺乏或無色素蛋白複合體 LHCII，仍有正常的葉綠體形態(Nakatani and Baliga 1985, Quijja *et al.* 1988, Yang and Chen 1996)。另外，在紅楠(*Machilus thunbergii*)葉片下表皮癭蚧虫癭之光合色素含量遠低於被感染葉片，而電子顯微鏡顯示，成熟虫癭仍擁有正常摺疊的葉綠餅(grana)

及類囊膜形態(Yang and Yang, 2004)。事實上，高等植物光合作用可以不需要 Chl *b*(King, 1991)，因為如上所述，目前有數種高等植物水稻及甜苜蓿(sweet clover)之無葉綠素 *b* 突變種(chlorophyll *b*-lacking mutant)，其葉綠素 *a/b* 比值幾乎是無限大，而仍可以正常開花結果與繁殖(Hsu and Lee, 1995；Terao *et al.*, 1985a；1985b；Yang and Chen, 1993a)，亦即，這些高等植物雖幾乎缺少葉綠素 *b*，卻仍能行光合作用以轉換太陽能。大部份的葉綠素 *b* 位於演化過程較晚出現的 PSII 上，而絕大部份的 PSII 則位於葉綠體的葉綠餅(grana)上(Yang and Chen, 1993a and b)，此亦顯示不具 PSII 或 PSII 不健全的高等植物可能仍可在地球上生存。因此，有研究證明 PSI 較 PSII 提供光合作用或葉綠素 *a/b* 比值更大的貢獻度，應是合理的現象(Huang *et al.*, 2005)。

Chl *a* 及 *b* 之含量會隨光環境而調控，其 Chl *a/b* 比值亦隨環境而改變。正常植物在強光下，其 Chl *a/b* 比值會稍高於 3，在弱光下此比值則小於 3。陰性植物(shade plant)因長期處於弱光環境，其 Chl *a/b* 比值會低於 3，而陽性植物(sun plant)因處於較強光環境，其 Chl *a/b* 比值通常高於 3(Boardman, 1980; Yang *et al.*, 1994)。因此，Chl *a/b* 比值也可作為植物適應光環境的指標(Dale and Causton, 1992)。葉片顏色主要由其所含之色素種類及含量而定。在完全黑暗環境中生長之黃化幼苗經照光後，開始合成 Chl 而綠化(Barry *et al.*, 1991)。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(Hendry *et al.*, 1987; Matile *et al.*, 1989)，葉片顏色也因而轉變(Matile *et al.*, 1992b)。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)。水稻葉片葉綠素累積的供給面與消耗面都受到三種酚酸的影響，供給面受到抑制，可能消耗面則受到促進，而導致葉綠素的短缺(Yang *et al.*, 2002；Yang *et al.*, 2003)。果實的發生或後熟過程中，各種色素質量產生變化，伴隨著果皮顏色的轉變，通常由綠色變為黃色、紅色、橙色、褐色、藍色或雜色等(Hsu *et al.*, 1995; Chen

et al., 1996)。捕光色素葉綠素 b 普遍存在於高等植物中，葉綠素與所結合的蛋白質之間，似形成共存亡或相輔相成之密切關係，即當造成色素蛋白複合體葉綠素缺失時，其蛋白質會快速崩解而消失；而無健全蛋白質的色素蛋白複合體，其葉綠素即使合成，亦無法持續存在(Yang and Chen, 1993a)。因此，高等植物的葉綠素 a/b 比值，可能由一個內在機制負責調控，以應付外在環境的變化。而此機制迄今仍未解明(Yang and Chen, 1993b)。

在水稻方面，葉綠素突變種通常可分類為 *albino*、*chlorina* (Zhang *et al.*, 2006)、*stripe*、*virescent* (Sugimoto *et al.*, 2004)、*yellow-green* 及 *zebra* (Kusumi *et al.*, 2000)，雖然從這些突變種中有許多基因功能已被確認，但其遺傳機制大部分都還是未知數(Chen *et al.*, 2008)。葉綠素是植物用來捕捉光能的主要色素，葉綠素缺陷突變種導致具 *chlorina* 外表性狀存在於各種植物中包含阿拉伯芥(Meinke and Koornneef, 1997)。利用 T-DNA 插入突變體已成功從阿拉伯芥中分離出一些基因，最近研究中，使用 T-DNA 基因捕捉系統(*gene-trap system*)已成功確認 *OsCHLH* 基因調控水稻 Mg-chelatase 最大的 subunit (Jung *et al.*, 2003)。阿拉伯芥突變種 *ch42* 是無法將鎂離子螯合在 PPIX 而形成 MGPP，進而經過一連串的酵素作用而轉化成葉綠素分子(Koncz *et al.*, 1990；Walker and Willows 1997；Rissler *et al.*, 2002)。螯合鎂離子在葉綠素生成過程中扮演重要的角色，抑制 tetrapyrrole 路徑的葉綠素支鏈第一步驟會降低葉綠素含量(Papenbrock *et al.*, 2000)，導致形成黃到淡綠色葉片的外表性狀(Jensen *et al.*, 1996；Mochizuki *et al.*, 2001)。本研究所使用的水稻材料除了農林 8 號及 LT8 外，其餘三種水稻 *ch11*、*ch16* 及 *ch1* 即為不同程度的缺葉綠素 b 突變種，選自日本的 16 種水稻突變種，這 16 種突變種水稻根據葉綠素 a/b 比值可區分為三群(Terao *et al.*, 1985a；1985b)，本研究之三種突變種水稻是個別選自三群中的每一群。突變種水稻 *ch1* 是不含葉綠素 b，顯示其不含補光複合蛋白體 II(LHCII)，而 *ch11* 及 *ch16* 之 LHCII 相較於栽培種水稻農林 8 號含量少很多(Terao *et al.*, 1985b)。

水稻栽植地區遍佈世界多國，栽培面積及分佈緯度均甚廣，為人類主要糧食之一，也是臺灣地區栽培面積最大產值最高的糧食作物。臺灣之稻作產業兼具生態性、生活性及生產性等三生功能，稻作生產同時影響農田生態環境、農村景觀和農民收益。水稻具有多種葉色，包括綠色、紫色、黃(綠)色等，在葉片生長、發育與老化過程，光合色素質量的變化伴隨著顏色的轉變，而在正常生長狀況下，不同顏色之葉片其光合色素質量是否有差異是值得探討之課題。另葉片色素含量的改變除了造成視覺上的差異外，在反射光譜上亦產生變化(Gitelson and Merzlyak, 1994, 1996; Matile *et al.*, 1992a)，此即為利用光譜進行遙測監控之重要基礎。本研究以黃色及綠色葉之水稻品種為材料，探討不同品種間，其葉片 Car 和 Chl 與其合成與崩解代謝物之含量變化，並以此為基礎，進一步探討色素含量與反射光譜之關聯，並擴展至太空遙測之研究。



二、材料與方法

植物材料

本研究以水稻五種不同程度缺或無葉綠素 b 突變種(chlorophyll b-deficient or -lacking mutant)為試驗材料，包括日本栽培種農林 8 號(Norin 8)為正常綠色(Chl a/b=2.5~3) 以及其突變種 *chl1*(Chl a/b= ∞)、*chl11*(Chl a/b=10~15)、*chl16*(Chl a/b=15~25)、*LT8*(Chl a/b=4~6)。五種不同葉色水稻之葉片色素特性如表 1-1 所示，農林 8 號為日本栽培種，與一般栽培種葉片色素特性一樣，呈現綠色；其它的突變種都有不同程度的黃色。葉綠素 a/b 比值自 3 到 ∞ 的各種水稻葉綠素突變種，可區分為黃、綠兩種水稻，適合做為建立水稻農藝性狀、葉片特性及色素質量，與(單)葉片、植冠、衛星遙測反射光譜相關性研究的材料。水稻的相關葉綠素突變種為自日本引進後大量繁殖(Terao *et al.*, 1985a; 1985b)。

試驗地點

關渡試區 2007 年一期稻作種植五種不同葉色水稻如圖 1-1 所示，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 × 0.15 m，每一品種栽植面積約 0.25 ha。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%丁基拉草粒劑 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，另於插秧後 4 週內進行人工除草一次，降低雜草族群的干擾。

農藝性狀調查

水稻田間調查方式為每 1~2 週取樣調查一次，調查項目如下：

株高：從土壤表面測量起至稻株最高點間之距離。

葉綠素生成及崩解產物的測定

根據 Yang 等(1998)所建立之方法進行測定，其步驟簡述如下：

1. 葉綠素(Chl)及類胡蘿蔔素(Car)的測定

植物樣品以液態氮急速冷凍，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 A_{663.6}、A_{646.6}、A_{440.5} 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。

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. 脫植醇或未酯化色素(dephytylated or nonesterified pigments)的測定

取上層液測 A₆₆₁ 的吸收值，此為脫植醇色素的綜合吸收值。以吸收值直接比較。

4. 含植醇或酯化色素(phytylated or esterified pigments)的測定

其中 A₆₆₆ 即為未脫植醇色素之吸收值。以吸收值直接比較。

5. PPIX、MGPP 及 Pchl_{ide} 的測定

丙酮層的 A₅₇₅、A₅₉₀、A₆₂₈ 之吸收值分別是 PPIX、MGPP 及 Pchl_{ide} 的吸收值，

以 Kahn 等(1976)之公式計算其濃度。

6. Chlide *a* 及 Chlide *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(MP Car)之吸收值，再利用 Holm (1954)及 Porra (1989)等的方法計算 MP Car 的含量。

8. 將正己烷層液體以氮氣吹乾後，以 80%丙酮充分溶解並加 50 mL 的 12.5% HCl 破壞 Chl 後，測定 $A_{665.4}$ 、 $A_{653.4}$ 及 A_{470} 的吸收值。 $A_{665.4}$ 、 $A_{653.4}$ 分別是未脫植醇的 Phe *a* 及 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(LP Car)之吸收值(Lichtenthaler, 1987)。

資料統計分析

利用 SAS (1985) 系統進行所有測量結果的統計分析，並以最小顯著差異測驗法 (Least Significant Difference Test, LSD) 比較平均值之差異顯著性。

三、結果與討論

一、水稻生育情形

隨著緯度、生長環境與季節不同，水稻從生長至成熟期的長短亦有差異。依農委會農糧署台灣地區每年兩期水稻種植統計資料；第一期稻約在冬末春初插秧（台灣南部較早），夏季收穫；二期稻約在一期稻作收割後半個月至 20 天開始插秧，秋末冬初收穫。一期稻作的插秧期溫度較低，水稻發芽生長較緩，到收割所需的天數約為 110~140 天；二期稻作因日照充足，插秧至收割僅需 100~110 天左右。在這生育期間，水稻完成了兩個截然不同但卻連續的生育期：營養生長期(vegetative stage)和生殖生長期(reproductive stage)。生殖生長期又可劃分為抽穗前(preheading)和抽穗後(postheading)兩個時期；後者又常被稱為成熟期(ripening stage)，農藝學上所謂成熟期是指抽穗至達最大穀粒重的時間。就一個種植在熱帶地區，其生育全期為 120 天的水稻品種而言，其營養生長期約為 60 天，生殖生長期約為 30 天，而成熟期亦約為 30 天。本研究於 2007 年 3 月 1 日關渡試區進行一期稻作種植試驗，水稻於插秧後歷經營養生長期、生殖生長期及成熟期等三個階段，並於當年 7 月 12 日進行收穫，全生育期共計 133 天，在正常範圍內。

二、農藝性狀

品種間株高亦有差異，可區分為三群：農林 8 號及 LT8 最高，可達 95 公分左右，*ch11* 約 92 公分及 *ch1* 約 86 公分次之，而 *ch16* 最矮，約 84 公分。五種不同葉色水稻在一期稻作生育期間，株高變化整體趨勢大致相同，農林 8 號及其突變種由營養生長期進入生殖生長期時，株高持續上升，進入生殖生長期後，株高快速上升，而在進入成熟期時，株高變化不大(圖 1-2)。

水稻株高在插秧後持續上升，由營養生長期進入生殖生長期後，株高快速上升，而生殖生長期的特徵是稈的伸長，導致植株的增高、分蘗數減少、劍葉抽出、孕穗、抽穗及開花，此時期的株高達全生育期之最大值。生育期間長短的差異基本上歸諸於營養生長期的差異；生殖生長期加成熟期的長短在同一環境下不同品種間大致相同。由圖 1-2 可看出農林 8 號及 *chl6* 在插秧後約 90 天左右，株高已達最大值，可知其將進入成熟期階段；而 *LT8*、*chl1* 及 *chl* 在插秧後約 120 天左右，株高才達最大值，由此可推斷其為較晚熟品種。

三、葉綠素相關化合物

此次所測之植物色素分別為 Chl a、Chl b；葉綠素合成前驅色素，包含 PPIX、MGPP 及 Pchlide；葉綠素崩解色素，包含 Chlide a、Chlide b、Phe a 及 Phe b，而 Chl a、Chl b、Phe a 及 Phe b 統稱為含植醇色素，PPIX、MGPP、Pchlide、Chlide a 及 Chlide b 統稱為脫植醇色素。

1. 葉綠素(Chlorophyll, Chl)

品種間葉綠素含量亦有差異，可區分為三群：農林 8 號整體葉綠素含量最高，介於 $2398-9520\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}\text{DW}$ ；其次為 *chl1*、*chl6* 及 *chl*，介於 $527-6154\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}\text{DW}$ ，最低為 *LT8*，介於 $1360-3197\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}\text{DW}$ 。農林 8 號葉綠素總量與一般栽培種水稻相類似，而突變種 *chl1*、*chl6* 及 *chl* 葉綠素總量稍微低一些，而 *LT8* 葉綠素總量則相當低。五種不同葉色水稻在一期稻作生育期間，葉片葉綠素含量之變化，各有不同，農林 8 號由營養生長期進入生殖生長期時，葉綠素含量下降，進入生殖生長期後，葉綠素含量緩慢下降，而在進入成熟期時，葉綠素含量迅速下降；*LT8* 由營養生長期進入生殖生長期時，葉綠素含量稍降，進入生殖生長期後，葉綠素含量持續上升，而在進入成熟期時，葉綠素含量迅速下降；*chl1*

由營養生長期進入生殖生長期時，葉綠素含量下降，進入生殖生長期後，葉綠素含量變化不大，而在進入成熟期時，葉綠素含量迅速下降；*chl6* 由營養生長期進入生殖生長期時，葉綠素含量下降，進入生殖生長期後，葉綠素含量緩慢下降，而在進入成熟期時，葉綠素含量迅速下降；*chl* 由營養生長期進入生殖生長期時，葉綠素含量下降，進入生殖生長期後，葉綠素含量緩慢下降，而在進入成熟期時，葉綠素含量迅速下降(圖 1-3)。農林 8 號、*chl1*、*chl6* 及 *chl* 之葉綠素含量變化整體趨勢隨著生育日數增加而下降；*LT8* 則呈現先升後降現象。

葉綠素是一般植物中最常見的色素，其主要結構為一卟啉環(porphyrin ring)，中心鍵結一個鎂離子，側鏈為一長鏈的植物醇(phytol chain)，其依據 porphyrin ring 上鍵結基團之不同又可分葉綠素 a 及葉綠素 b。以台農 67 號(TN67)水稻在台北縣新店台大安坑農場之生長為例，自播種到抽穗期之後期約 95 天，其葉綠素含量達最高峰而開始進入崩解大於合成之時期(楊，2001)。以葉綠素合成與崩解角度看，水稻於秧苗期及營養生長期時，其葉綠素不斷的累積，此導因於此二時期之葉綠素合成速率遠大於崩解速率。當開始進入生殖生長期之幼穗形成期，此時仍需活躍的光合作用以提供醣類積儲之來源，故葉綠素含量仍處於高峰階段。爾後進入後半段的孕穗期與抽穗期，其葉綠素累積進入崩解大於合成之時期，越往後之生長期，葉綠素崩解與合成速率之差距越大。

2. 葉綠素 a

品種間葉綠素含量亦有差異，可區分為三群：農林 8 號整體葉綠素 a 含量最高，介於 $1801-7122\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}\text{DW}$ ；其次為 *chl1*、*chl6* 及 *chl*，介於 $489-5600\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}\text{DW}$ ，最低為 *LT8*，介於 $1072-2697\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}\text{DW}$ 。五種不同葉色水稻在一期稻作生育期間，葉片葉綠素 a 含量之變化，各有不同，農林 8 號由營養生長期進入生殖生長期時，葉綠素 a 含量下降，進入生殖生長期後，葉綠素 a

含量緩慢下降，而在進入成熟期時，葉綠素 a 含量迅速下降；LT8 由營養生長期進入生殖生長期時，葉綠素 a 含量稍降，進入生殖生長期後，葉綠素 a 含量持續上升，而在進入成熟期時，葉綠素 a 含量迅速下降；ch11 由營養生長期進入生殖生長期時，葉綠素 a 含量下降，進入生殖生長期後，葉綠素 a 含量變化不大，而在進入成熟期時，葉綠素 a 含量迅速下降；ch16 由營養生長期進入生殖生長期時，葉綠素 a 含量下降，進入生殖生長期後，葉綠素 a 含量緩慢下降，而在進入成熟期時，葉綠素 a 含量迅速下降；chl 由營養生長期進入生殖生長期時，葉綠素 a 含量下降，進入生殖生長期後，葉綠素 a 含量緩慢下降，而在進入成熟期時，葉綠素 a 含量迅速下降(圖 1-4)。五種不同葉色水稻之葉綠素 a 含量變化整體趨勢與葉綠素含量變化一致。

3. 葉綠素 b

品種間 Chl b 含量亦有差異，可區分為三群：農林 8 號整體 Chl b 含量最高，介於 597-2399 $\mu\text{gg-1DW}$ ；其次為 LT8、ch11 及 ch16，介於 91-554 $\mu\text{gg-1DW}$ ；最低為 chl，介於 17-102 $\mu\text{gg-1DW}$ 。五種不同葉色水稻在一期稻作生育期間，葉片 Chl b 含量之變化，各有不同，農林 8 號由營養生長期進入生殖生長期時，Chl b 含量持續下降，進入生殖生長期後，Chl b 含量持平，而在進入成熟期時，Chl b 含量迅速下降；LT8 由營養生長期進入生殖生長期時，Chl b 含量持續下降，進入生殖生長期後，Chl b 含量持續上升，而在進入成熟期時，Chl b 含量迅速下降；ch11 由營養生長期進入生殖生長期時，Chl b 含量下降，進入生殖生長期後，Chl b 持續下降，而在進入成熟期時，Chl b 含量迅速下降；ch16 由營養生長期進入生殖生長期時，Chl b 含量下降，進入生殖生長期後，Chl b 含量持續下降，而在進入成熟期時，Chl b 含量迅速下降；chl 由營養生長期進入生殖生長期時，Chl b 含量下降，進入生殖生長期後，Chl b 含量持續下降，進入成熟期後，Chl b 含量稍升(圖 1-4)。

4. 葉綠素 a/b 比值

五種不同葉色水稻在一期稻作生育期間，葉片葉綠素 a/b 比值之變化與其葉片色素特性相吻合(表 1-1)。農林 8 號在各生育期間，葉綠素 a/b 比值變化不大，介於 2-3；*LT8* 由營養生長期進入生殖生長期時，葉綠素 a/b 比值上升，進入生殖生長期後，葉綠素 a/b 比值下降，而在進入成熟期時，葉綠素 a/b 比值持續下降；*chl1* 由營養生長期進入生殖生長期時，葉綠素 a/b 比值上升，進入生殖生長期後，葉綠素 a/b 比值持續上升，而在進入成熟期時，葉綠素 a/b 比值迅速下降；*chl6* 由營養生長期進入生殖生長期時，葉綠素 a/b 比值上升，進入生殖生長期後，葉綠素 a/b 比值持續上升，而在進入成熟期時，葉綠素 a/b 比值迅速下降；*chl* 由營養生長期進入生殖生長期時，葉綠素 a/b 比值上升，進入生殖生長期後，葉綠素 a/b 比值持續上升，進入成熟期後，葉綠素 a/b 比值迅速下降(圖 1-4)。

農林 8 號葉片 Chl *a/b* 比值在全生育期間都接近 3，與一般正常狀況下高等植物的葉片之 Chl *a/b* 比值相似，顯示其可適應於一般光照環境下生長，葉綠素 a 及葉綠素 b 在生育期間合成及崩解速率同步進行；而 *LT8*、*chl1*、*chl6* 及 *chl* 葉片 Chl *a/b* 比值在全生育期間明顯高於 3 甚多，且其 Chl 含量遠低於正常植物葉片，黃色葉甘藷亦有此現象(Hsu *et al.*, 2003)，因此，突變種 *LT8*、*chl1*、*chl6* 及 *chl*，可能對光線和溫度都甚為敏感(Yang *et al.*, 1990；Yang *et al.*, 1993)。突變種 *LT8*、*chl1*、*chl6* 及 *chl*，其葉綠素 a/b 比值在生育期間整體趨勢為先升後降，相對而言，突變種由營養生長期進入生殖生長期間，Chl *a* 之累積速率遠大於 Chl *b*，進入生殖生長期後，Chl *a* 及 *b* 間的累積速率差距逐漸縮小，而進入成熟期後，Chl *a/b* 都呈快速下降趨勢，顯現 Chl *a* 的崩解速率比 Chl *b* 快。高等植物中，除了綠葉之外，尚有許多其它綠色組織存在，例如花萼、花瓣、豆科植物之莢、種皮、子葉等，稱之為非葉綠色組織(NLGT, Non-leaf

green tissues)，一般來說，非葉綠色組織之葉綠素含量及 Chl a/b 比值和葉片間之歧異度很大，學者們亦於近年來分析兩者間的 Chl 含量和 Chl a/b 比值變化，有系統的檢測 22 種野生高等植物葉片及 68 個非葉綠色組織之的 Chl 含量和 Chl a/b，結果發現，葉片的 Chl 含量之平均值是非葉綠色組織的 8.5 倍，而葉片在正常生長狀態下的 Chl a/b 為 3.09 ± 0.45 ，但非葉綠色組織的 Chl a/b 為 2.80 ± 0.56 (楊，2004)。

5. 吡啉化合物(Porphyrin)

品種間吡啉化合物含量差異不大，農林 8 號、LT8、*chl1*、*chl6* 及 *chl*，介於 $444-1706 \text{ nmoleg}^{-1} \text{ DW}$ 。五種不同葉色水稻在一期稻作生育期間，葉片 Porphyrin 含量之變化，農林 8 號及其突變種(*chl1*、*chl6* 及 *chl*)由營養生長期進入生殖生長期時，Porphyrin 含量下降，進入生殖生長期後，Porphyrin 含量迅速下降，而在進入成熟期時，Porphyrin 含量持續下降；LT8 由營養生長期進入生殖生長期時，Porphyrin 含量下降，進入生殖生長期後，Porphyrin 含量持續下降，而在進入成熟期時，Porphyrin 含量上升(圖 1-5)。農林 8 號、*chl1*、*chl6* 及 *chl* 之 Porphyrin 含量變化整體趨勢隨著生育日數增加而下降；LT8 則呈現先降後升現象。農林 8 號、*chl1*、*chl6* 及 *chl* 之 Porphyrin 含量變化整體趨勢與葉綠素含量變化一致；而 LT8 則呈現相反現象，此結果顯示 LT8 之葉綠素合成前驅色素 porphyrin 在營養生長期至生殖生長期間，porphyrin 快速轉化形成葉綠素，而葉綠素崩解速度較慢，導致葉綠素含量在此期間呈上升趨勢；而在生殖生長期至成熟期間，porphyrin 轉化成葉綠素速率趨緩，但葉綠素崩解速率維持不變，因而導致葉綠素含量在此期間呈下降趨勢。

6. 原吡啉原(PPIX)莫耳百分比

品種間 PPIX 莫耳百分比亦有差異，可區分為兩群：農林 8 號及 *chl1*，介

於 70-92%；最低為 *LT8*、*chl6* 及 *chl*，介於 56-95%。五種不同葉色水稻在一期稻作生育期間，葉片 PPIX 莫耳百分比之變化，農林 8 號及其突變種(*chl1*、*chl6* 及 *chl*)由營養生長期進入生殖生長期時，PPIX 莫耳百分比下降，進入生殖生長期後，PPIX 莫耳百分比持續下降，而在進入成熟期時，PPIX 莫耳百分比上升；*LT8* 由營養生長期進入生殖生長期時，PPIX 莫耳百分比下降，進入生殖生長期後，PPIX 莫耳百分比上升，而在進入成熟期時，PPIX 莫耳百分比持續上升(圖 1-5)。農林 8 號、*LT8*、*chl1*、*chl6* 及 *chl* 之 PPIX 莫耳百分比變化整體趨勢隨著生育日數增加呈現先降後升現象。

7. 鎂吡啉原(MGPP)莫耳百分比

品種間 MGPP 莫耳百分比無顯著性差異。五種不同葉色水稻在一期稻作生育期間，葉片 MGPP 莫耳百分比之變化，各有不同，農林 8 號由營養生長期進入生殖生長期時，MGPP 莫耳百分比變化不大，進入生殖生長期後，MGPP 莫耳百分比稍降，而在進入成熟期時，MGPP 莫耳百分比下降；*LT8* 由營養生長期進入生殖生長期時，MGPP 莫耳百分比上升，進入生殖生長期後，MGPP 莫耳百分比下降，而在進入成熟期時，MGPP 莫耳百分比持續下降；*chl1* 由營養生長期進入生殖生長期時，MGPP 莫耳百分比變化不大，進入生殖生長期後，MGPP 莫耳百分比下降，而在進入成熟期時，MGPP 莫耳百分比持續下降；*chl6* 由營養生長期進入生殖生長期時，MGPP 莫耳百分比緩慢上升，進入生殖生長期後，MGPP 莫耳百分比變化不大，而在進入成熟期時，MGPP 莫耳百分比迅速下降；*chl* 由營養生長期進入生殖生長期時，MGPP 莫耳百分比變化不大，進入生殖生長期後，MGPP 莫耳百分比稍降，進入成熟期後，MGPP 莫耳百分比持續下降(圖 1-5)。五種葉色水稻之 MGPP 莫耳百分比變化與 PPIX 莫耳百分比變化相反。

8. 葉綠素原(Pchlide)莫耳百分比

品種間 Pchlide 莫耳百分比亦有差異，可區分為三群：*chl* 整體 Pchlide 莫耳百分比最高，介於 0-22%；其次為及 *chl1*、*chl6* 及 *LT8*，介於 0-18%；第三為農林 8 號，介於 0-8%。五種不同葉色水稻在二期稻作生育期間，葉片 Pchlide 莫耳百分比之變化，農林 8 號及其突變種(*chl1*、*chl6* 及 *chl*)，由營養生長期進入生殖生長期時，Pchlide 莫耳百分比上升，進入生殖生長期後，Pchlide 莫耳百分比持續上升，而在進入成熟期時，Pchlide 莫耳百分比迅速下降；*LT8* 由營養生長期進入生殖生長期時，Pchlide 莫耳百分比上升，進入生殖生長期後，Pchlide 莫耳百分比持平，而在進入成熟期時，Pchlide 莫耳百分比迅速下降 (圖 1-5)。農林 8 號、*LT8*、*chl1*、*chl6* 及 *chl* 之 Pchlide 莫耳百分比變化整體趨勢隨著生育日數增加呈現先升後降現象。

由圖 1-5 可知，農林 8 號、*chl1*、*chl6* 及 *chl*，其 porphyrin 含量在生育期間整體趨勢為持續下降；而 *LT8* 則呈現先降後升現象。在個別吡啉莫耳百分比 (mole percent of porphyrins) 方面，農林 8 號及其突變種之三種吡啉莫耳百分比在全生育期間，PPIX 累積較多，顯示其轉化成 MGPP 之速率較慢，MGPP 轉化成 Pchlide 較快一些，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 之莫耳百分比為三者最低。此種 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.*, 2003)。而大部分正常植物綠葉，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)。

9. 脫植醇葉綠素(Chlorophyllide, Chlide)

品種間 Chlide 含量亦有差異，可區分為二群：農林 8 號、*chl1*、*chl6* 及 *chl*

整體 Chlide 含量最高，介於 $0.19-0.64\text{mMg}^{-1}\text{DW}$ ；最低為 *LT8*，介於 $0.28-0.36\text{mMg}^{-1}\text{DW}$ 。五種不同葉色水稻在一期稻作生育期間，葉片 Chlide 含量之變化，各有不同，農林 8 號由營養生長期進入生殖生長期時，Chlide 含量稍降，進入生殖生長期後，Chlide 含量迅速下降，而在進入成熟期時，Chlide 含量變化不大；*LT8* 由營養生長期進入生殖生長期時，Chlide 含量變化不大，進入生殖生長期後，Chlide 含量持平，而在進入成熟期時，Chlide 含量稍降；*chl1*、*chl6* 與 *chl* 趨勢大致相同，由營養生長期進入生殖生長期時，Chlide 含量下降，進入生殖生長期後，Chlide 含量持平，進入成熟期後，Chlide 含量迅速下降(圖 1-6)。五種不同葉色水稻 Chlide 含量變化整體趨勢隨著生育日數增加而下降。

10. 脫植醇葉綠素 a/b 比值

品種間脫植醇葉綠素 a/b 比值亦有差異，可區分為兩群：*chl1*、*chl6* 及 *chl* 整體脫植醇葉綠素 a/b 比值最高，介於 0.8-1.4；其次為農林 8 號及 *LT8*，介於 0.9-1.0。五種不同葉色水稻在一期稻作生育期間，葉片脫植醇葉綠素 a/b 比值之變化，各有不同，農林 8 號及 *LT8* 於整個生育期間脫植醇葉綠素 a/b 比值變化不大；*chl1* 及 *chl6* 由營養生長期進入生殖生長期時，脫植醇葉綠素 a/b 比值下降，進入生殖生長期後，脫植醇葉綠素 a/b 比值上升，進入成熟期後，脫植醇葉綠素 a/b 比值下降；*chl* 由營養生長期進入生殖生長期時，脫植醇葉綠素 a/b 比值變化不大，進入生殖生長期後，脫植醇葉綠素 a/b 比值上升，進入成熟期後，脫植醇葉綠素 a/b 比值迅速下降(圖 1-6)。水稻生育期間脫植醇葉綠素 a/b 比值變化整體趨勢變化不大，唯獨 *chl* 在成熟期間，脫植醇葉綠素 a/b 比值快速下降，此結果顯示 Chlide a 崩解速率大於 Chlide b。

11. 脫鎂葉綠素(Pheophytin, Phe)

品種間 Phe 含量亦有差異，可區分為四群：農林 8 號整體 Phe 含量最高，介於 641-3256 $\mu\text{g g}^{-1}\text{DW}$ ；其次為 *chl1*、*chl6* 及 *chl*，介於 177-1851 $\mu\text{g g}^{-1}\text{DW}$ ；最低為 *LT8*，介於 359-964 $\mu\text{g g}^{-1}\text{DW}$ 。五種不同葉色水稻在一期稻作生育期間，葉片 Phe 含量之變化，各有不同，農林 8 號及其突變種(*chl6* 及 *chl*)由營養生長期進入生殖生長期時，Phe 含量下降，進入生殖生長期後，Phe 含量持續下降，而在進入成熟期後，Phe 含量迅速下降；*LT8* 由營養生長期進入生殖生長期時，Phe 含量稍降，進入生殖生長期後，Phe 含量上升，進入成熟期後，Phe 含量迅速下降；*chl1* 由營養生長期進入生殖生長期時，Phe 含量下降，進入生殖生長期後，Phe 含量變化不大，而在進入成熟期後，Phe 含量迅速下降(圖 1-7)。五種不同葉色水稻之 Phe 含量變化整體趨勢與葉綠素含量變化一致。

12. 脫鎂葉綠素 a/b 比值

品種間脫鎂葉綠素 a/b 比值亦有差異，可區分為四群：*chl* 整體脫鎂葉綠素 a/b 比值最高，介於 3-39；其次為 *chl6*，介於 4-21；第三為 *LT8* 及 *chl1*，介於 2-10；最低為農林 8 號，介於 2-3。五種不同葉色水稻在一期稻作生育期間，葉片脫鎂葉綠素 a/b 比值的變化，各有不同，農林 8 號於整個生育期間，脫鎂葉綠素 a/b 比值變化不大；*LT8*、*chl1* 及 *chl* 由營養生長期進入生殖生長期時，脫鎂葉綠素 a/b 比值下降，進入生殖生長期後，脫鎂葉綠素 a/b 比值上升，進入成熟期後，脫鎂葉綠素 a/b 比值迅速下降；*chl6* 由營養生長期進入生殖生長期時，脫鎂葉綠素 a/b 比值變化不大，進入生殖生長期後，脫鎂葉綠素 a/b 比值上升，進入成熟期後，脫鎂葉綠素 a/b 比值迅速下降(圖 1-7)。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-dechelataase 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)。農林 8 號生育期間脫

鎂葉綠素 a/b 比值變化整體趨勢變化不大；突變種 *LT8*、*chl1*、*chl6* 及 *chl* 生育期間脫鎂葉綠素 a/b 比值變化整體趨勢為先升後降，此結果顯示突變種由營養生長期進入生殖生長期間，Phe *a* 之累積速率遠大於 Phe *b*，進入生殖生長期後，Phe *a* 及 *b* 間的累積速率差距逐漸縮小，而進入成熟期後，Phe *a/b* 都呈快速下降趨勢，顯現 Phe *a* 的崩解速率比 Phe *b* 快。

13. 脫植醇葉綠素 a/脫鎂葉綠素 a(Chlide a/Phe a)比值

品種間 Chlide a/Phe a 比值亦有差異，可區分為兩群：*LT8*、*chl1*、*chl6* 及 *chl* 整體 Chlide a/Phe a 比值最高，介於 0.0002-0.0007；其次為農林 8 號，介於 0.0001-0.0004。五種不同葉色水稻在一期稻作生育期間，葉片 Chlide a/Phe a 比值之變化，各有不同，農林 8 號及 *LT8* 由營養生長期進入生殖生長期時，Chlide a/Phe a 比值上升，進入生殖生長期後，Chlide a/Phe a 比值下降，而在進入成熟期後，Chlide a/Phe a 比值迅速上升；*chl1*、*chl6* 及 *chl* 由營養生長期進入生殖生長期時，Chlide a/Phe a 比值變化不大，進入生殖生長期後，Chlide a/Phe a 比值上升，進入成熟期後，Chlide a/Phe a 比值迅速上升(圖 1-8)。五種不同葉色水稻生育期間 Chlide a/Phe a 比值變化整體趨勢為先降後升，此顯示水稻在生育階段前期，也就是營養生長期至生殖生長期間，葉綠素 a 之崩解途徑傾向以 Chl→Phe→Pho 為主要崩解途徑(major route)，而以 Chl→Chlide→Pho 為次要途徑(minor route)；但在生育階段後期，也就是生殖生長期至成熟期間，葉綠素之崩解途徑傾向以 Chl→Chlide→Pho 為主要崩解途徑(major route)，而以 Chl→Phe→Pho 為次要途徑(minor route)。

14. 脫植醇葉綠素 b/脫鎂葉綠素 b(Chlide b/Phe b)比值

品種間 Chlide b/Phe b 比值亦有差異，可區分為四群：*chl* 整體 Chlide b/Phe b 比值最高，介於 0.0023-0.0076；其次為 *chl6*，介於 0.0014-0.0049；第三為 *LT8*

及 *chl1*，介於 0.0010-0.0018；最低為農林 8 號，介於 0.0004-0.0008。五種不同葉色水稻在二期稻作生育期間，葉片 Chlide b/Phe b 比值之變化，各有不同，農林 8 號由營養生長期進入生殖生長期時，Chlide b/Phe b 比值變化不大，進入生殖生長期後，Chlide b/Phe b 比值持平，而在進入成熟期後，Chlide b/Phe b 比值上升；*LT8* 由營養生長期進入生殖生長期時，Chlide b/Phe b 比值下降，進入生殖生長期後，Chlide b/Phe b 比值變化不大，進入成熟期後，Chlide b/Phe b 比值持平；*chl1* 由營養生長期進入生殖生長期時，Chlide b/Phe b 比值變化不大，進入生殖生長期後，Chlide b/Phe b 比值上升，進入成熟期後，Chlide b/Phe b 比值下降；*chl6* 由營養生長期進入生殖生長期時，Chlide b/Phe b 比值變化不大，進入生殖生長期後，Chlide b/Phe b 比值上升，進入成熟期後，Chlide b/Phe b 比值迅速下降；*chl* 由營養生長期進入生殖生長期時，Chlide b/Phe b 比值稍降，進入生殖生長期後，Chlide b/Phe b 比值上升，進入成熟期後，Chlide b/Phe b 比值迅速下降(圖 1-8)。農林 8 號、*LT8* 及 *chl1* 生育期間 Chlide b/Phe b 比值變化不大；而 *chl6* 及 *chl* 生育期間 Chlide b/Phe b 比值變化整體趨勢為先升後降，此結果顯示水稻在生育階段前期，也就是營養生長期至生殖生長期間，葉綠素 b 之崩解途徑傾向以 Chl→Chlide→Pho 為主要崩解途徑(major route)，而以 Chl→Phe→Pho 為次要途徑(minor route)；但在生育階段後期，也就是生殖生長期至成熟期間，葉綠素 b 之崩解途徑傾向以 Chl→Phe→Pho 為主要崩解途徑(major route)，而以 Chl→Chlide→Pho 為次要途徑(minor route)。

植物色素的崩解是按遺傳設定好的順序進行複雜的生化生理過程，但其崩解途徑可能受到外在因子影響而轉變。在鴛鴦湖自然保護區植物葉綠素崩解模式之研究中，以自然及人為兩種方式進行實驗，結果顯示不同的環境因子會影響葉綠素崩解途徑的選擇，其一的主要途徑為 Chl→Chlide→Pho，而以 Chl→Phe→Pho 為副，另一的主要途徑為 Chl→Phe→Pho，而以

Chl→Chlide→Pho 為副(Yang *et al.*, 1997a, b)。正常種虎尾蘭的葉綠素崩解途徑，是以 Chl→Phe→Pho 為主要途徑，而以 Chl→Chlide→Pho 為次要途徑，而虎尾蘭缺葉綠素突變種則反之 (Chen *et al.*, 2003)。在甘藷葉的研究中，幼葉階段都傾向以 Chl→Chlide→Pho 為主要崩解途徑(major route)，而以 Chl→Phe→Pho 為次要途徑(minor route)；但是隨著葉片的生長發育，甘藷葉可能改變為以 Chl→Phe→Pho 為主要崩解途徑，而以 Chl→Chlide→Pho 為次要途徑(Hsu *et al.*, 2003)。本研究中，五種不同葉色水稻在一期稻作生育期間，Chlide a/Phe a 比值整體趨勢為先降後升，此顯示水稻在生育階段前期，也就是營養生長期至生殖生長期間，葉綠素 a 之崩解途徑傾向以 Chl→Phe→Pho 為主要崩解途徑(major route)，而以 Chl→Chlide→Pho 為次要途徑(minor route)；但在生育階段後期，也就是生殖生長期至成熟期間，葉綠素之崩解途徑傾向以 Chl→Chlide→Pho 為主要崩解途徑(major route)，而以 Chl→Phe→Pho 為次要途徑(minor route)，這種隨著生長階段的變化，Chl 崩解途徑也跟著轉換的現象，是否發生在其他植物？而且，為什麼會有這些途徑的轉換？都值得進一步研究。

15. 含植醇與脫植醇色素(Phytylated and dephytylated pigments)

品種間含植醇與脫植醇色素總含量亦有差異，整體趨勢與葉綠素含量變化一致(圖 1-9)。

16. 含植醇/脫植醇色素比值

品種間含植醇/脫植醇色素比值亦有差異，可區分為兩群：農林 8 號整體含植醇/脫植醇色素比值最高，介於 9-26；其次為 *LT8*、*chl1*、*chl6* 及 *chl*，介於 4-17。五種不同葉色水稻在一期稻作生育期間，葉片含植醇/脫植醇色素比值的變化，各有不同，農林 8 號、*chl1* 及 *LT8* 由營養生長期進入生殖生長期時，含

植醇/脫植醇色素比值下降，進入生殖生長期後，含植醇/脫植醇色素比值上升，而在進入成熟期後，含植醇/脫植醇色素比值迅速下降；*chl6* 及 *chl* 由營養生長期進入生殖生長期時，含植醇/脫植醇色素比值稍升，進入生殖生長期後，含植醇/脫植醇色素比值變化不大，進入成熟期後，含植醇/脫植醇色素比值迅速下降(圖 1-9)。

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)。五種不同葉色水稻在一期稻作生育期間，葉片含植醇與脫植醇色素總含量變化趨勢與 Chl 之含量變化趨勢很相似，此與甘藷葉之研究相符合(Hsu *et al.*, 2003)。含植醇/脫植醇色素比值整體趨勢為先升後降，此顯示水稻在生育階段前期，也就是營養生長期至生殖生長期間，葉片之 Chl 與 Phe 含量增加時，Chlide 與 Pho 之含量則減少，此一結果與前述資料一致，即 Chl 崩解時，主要為先經由 Mg-dechelatease 催化脫去鎂離子後生成 Phe，再脫去植醇鏈後生成 Pho；但在生育階段後期，也就是生殖生長期至成熟期間，葉片之 Chl 與 Phe 含量減少時，Chlide 與 Pho 之含量則增加，此一結果亦與前述資料一致，即 Chl 崩解時，主要為先經由 chlorophyllase 催化，脫去植醇鏈(phytol chain)而生成 Chlide，再脫去鎂離子而生成 Pho。

吡啉(包括 PPIX、MGPP 及 Pchlide)、Chlide 及 Pho 等 Chl 的代謝物都無植醇鏈，故其極性較大而較易溶於水；而 Chl 及 Phe 則都含有植醇鏈，其極性較小而為脂溶性。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(stroma)或類囊膜(thylakoid)上分布的差異。明顯地，Chl 生合成過程中的代謝物或崩解物，只要缺植醇鏈，基本上可能都分布在水溶性較大的基質中；而若有植醇鏈，即存在於脂溶性較大的類囊膜上。在五種不同葉色水稻上，隨著生育日數增加，極性較小的代謝物，包括 Chl 及 Phe，都有減少的趨

勢，而極性較大的代謝物，包括吡啉及 Chlide 則亦為減少的趨勢，此與甘藷葉研究不同(Hsu *et al.*, 2003)。雖然兩者減少趨勢相同，但極性較小的代謝物，包括 Chl 及 Phe，在水稻生育階段前期，也就是營養生長期至生殖生長期間，下降的速率較慢，而極性較大的代謝物，包括 Chlide 及 Pho，下降的速率則較快，結果導致含植醇/脫植醇色素比值上升；但在生育階段後期，也就是生殖生長期至成熟期間，葉片之 Chl 與 Phe 下降的速率較快，而 Chlide 與 Pho 下降速率趨緩，此一結果導致水稻生育後期含植醇/脫植醇色素比值下降。

四、類胡蘿蔔素

1. 類胡蘿蔔素(Carotenoids, Car)

品種間類胡蘿蔔素含量亦有差異，可區分為三群：農林 8 號整體類胡蘿蔔素含量最高，介於 $1339-4192\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}\text{DW}$ ；其次為 *chl1*、*chl6* 及 *chl*，介於 $544-3124\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}\text{DW}$ ；最低為 *LT8*，介於 $932-1841\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}\text{DW}$ 。五種不同葉色水稻在一期稻作生育期間，葉片類胡蘿蔔素含量之變化，各有不同，農林 8 號、*chl1* 及 *chl6* 由營養生長期進入生殖生長期時，類胡蘿蔔素含量下降，進入生殖生長期後，類胡蘿蔔素含量持續下降，而在進入成熟期時，類胡蘿蔔素含量迅速下降；*LT8* 由營養生長期進入生殖生長期時，類胡蘿蔔素含量變化不大，進入生殖生長期後，類胡蘿蔔素含量緩慢上升，而在進入成熟期時，類胡蘿蔔素含量迅速下降；*chl* 由營養生長期進入生殖生長期後，類胡蘿蔔素含量變化不大，進入生殖生長期後，類胡蘿蔔素含量緩慢下降，進入成熟期後，類胡蘿蔔素含量迅速下降(圖 1-10)。五種不同葉色水稻之類胡蘿蔔素含量變化整體趨勢與葉綠素含量變化一致。

2. 相對極性較小之類胡蘿蔔素(Less polar carotenoid, LP Car)

品種間 LP Car 含量亦有差異，可區分為三群：農林 8 號整體 LP Car 含量最高，介於 $87\text{-}338\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}\text{DW}$ ；其次為 *ch11*、*ch16* 及 *ch1*，介於 $29\text{-}220\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}\text{DW}$ ；最低為 *LT8*，介於 $52\text{-}113\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}\text{DW}$ 。五種不同葉色水稻在一期稻作生育期間，葉片 LP Car 含量之變化，農林 8 號及其突變種(*ch11*、*ch16* 及 *ch1*)由營養生長期進入生殖生長期時，LP Car 含量下降，進入生殖生長期後，LP Car 含量持續下降，而在進入成熟期時，LP Car 含量迅速下降；*LT8* 由營養生長期至生殖生長期後，LP Car 含量變化不大，而在進入成熟期時，LP Car 含量迅速下降(圖 1-11)。五種不同葉色水稻之 LP Car 含量變化整體趨勢與類胡蘿蔔素含量變化一致。

3. 相對極性較大之類胡蘿蔔素(More polar carotenoid, MP Car)

品種間 MP Car 含量亦有差異，可區分為兩群：農林 8 號整體 MP Car 含量最高，介於 $257\text{-}546\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}\text{DW}$ ；其次為 *LT8*、*ch11*、*ch16* 及 *ch1*，介於 $185\text{-}469\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}\text{DW}$ 。五種不同葉色水稻在一期稻作生育期間，葉片 MP Car 含量之變化，農林 8 號及其突變種(*ch11*、*ch1* 及 *LT8*)由營養生長期進入生殖生長期時，MP Car 含量變化不大，進入生殖生長期後，MP Car 含量下降，而在進入成熟期時，MP Car 含量持續下降；*ch16* 由營養生長期進入生殖生長期時，MP Car 含量下降，進入生殖生長期至成熟期後，MP Car 含量持續下降(圖 1-11)。

4. 相對極性較小之類胡蘿蔔素/相對極性較大之類胡蘿蔔素(LP/MP Car)比值

品種間 LP/MP Car 比值亦有差異，可區分為三群：農林 8 號整體 LP/MP Car 比值最高，介於 $0.34\text{-}0.62$ ；其次為 *ch11*、*ch16* 及 *ch1*，介於 $0.15\text{-}0.51$ ；最低為 *LT8*，介於 $0.21\text{-}0.36$ 。五種不同葉色水稻在一期稻作生育期間，葉片 LP/MP Car 比值的變化，各有不同，農林 8 號由營養生長期進入生殖生長期時，LP/MP Car 比值下降，進入生殖生長期後，LP/MP Car 比值上升，而在進入成熟期時，LP/MP

Car 比值迅速下降；*LT8* 由營養生長期進入生殖生長期時，LP/MP Car 比值變化不大，進入生殖生長期後，LP/MP Car 比值持平，而在進入成熟期時，LP/MP Car 比值迅速下降；*chl1* 由營養生長期進入生殖生長期時，LP/MP Car 比值下降，進入生殖生長期至成熟期後，LP/MP Car 比值持續下降；*chl6* 由營養生長期進入生殖生長期時，LP/MP Car 比值緩升，進入生殖生長期後，LP/MP Car 比值下降，而在進入成熟期時，LP/MP Car 比值持續下降；*chl* 由營養生長期進入生殖生長期時，LP/MP Car 比值變化不大，進入生殖生長期後，LP/MP Car 比值下降，而在進入成熟期時，LP/MP Car 比值迅速下降(圖 1-11)。五種不同葉色水稻在一期稻作生育期間，葉片 LP/MP Car 比值變化整體趨勢隨著生育日數增加而下降，此顯示 LP Car 崩解速率較 MP Car 為快，此與甘藷葉的研究不同(Hsu *et al.*, 2003)。

5. 類胡蘿蔔素/葉綠素(Car/Chl)比值

品種間 Car/Chl 比值亦有差異，可區分為三群：*chl* 及 *LT8* 整體 Car/Chl 比值最高，介於 0.5-1.0；其次為 *chl1* 及 *chl6*，介於 0.5-0.8；最低為農林 8 號，介於 0.4-0.6。五種不同葉色水稻在一期稻作生育期間，葉片 Car/Chl 比值之變化，農林 8 號由營養生長期進入生殖生長期時，Car/Chl 比值上升，進入生殖生長期後，Car/Chl 比值變化不大，而在進入成熟期時，Car/Chl 比值上升；*LT8*、*chl1*、*chl6* 及 *chl* 由營養生長期進入生殖生長期時，Car/Chl 比值上升，進入生殖生長期後，Car/Chl 比值下降，而在進入成熟期時，Car/Chl 比值迅速上升(圖 1-12)。五種不同葉色水稻在營養生長期至生殖生長期間 Car/Chl 比值變化不大，但在生育後期，也就是成熟期間，五種不同葉色水稻 Car/Chl 比值呈上升趨勢，此結果顯示水稻在成熟期間，葉綠素崩解速率大於類胡蘿蔔素，此與甘藷葉研究不同(Hsu *et al.*, 2003)，且此上升趨勢隨著品種色素特性而異，品種間葉綠素 a/b 比值愈大，Car/Chl 比值上升速率愈快，推測其結果可能是因為葉綠

素 b 缺乏程度愈大，其類胡蘿蔔素崩解速率會趨緩慢，可能是植物為了調整本身適應光環境下所做的改變。類胡蘿蔔素屬黃色色素，供給光合作用系統所需能量。然而，當入射光能超過光合作用所需時，類胡蘿蔔素形成葉黃素循環 (xanthophyll cycle) 以消除多餘能量，防止光合作用系統受損 (Demmig-Adams and Adams, 1996)。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)。以上的結果顯示，水稻葉 Car 與 Chl 的累積有密切相關。

五種不同葉色水稻之葉綠素崩解過程，在生育階段前期，也就是營養生長期至生殖生長期間，葉綠素之崩解途徑傾向以 Chl→Phe→Pho 為主要崩解途徑 (major route)，而以 Chl→Chlide→Pho 為次要途徑 (minor route)；但在生育階段後期，也就是生殖生長期至成熟期間，葉綠素之崩解途徑傾向以 Chl→Chlide→Pho 為主要崩解途徑 (major route)，而以 Chl→Phe→Pho 為次要途徑 (minor route)。突變種水稻之 Chl *a/b* 比值高達 4~419，葉色呈現黃色至黃綠色，且農林 8 號各種色素含量皆高於突變種水稻 1-1.5 倍，顯示在 Chl 生成與崩解作用方面，突變種水稻之生理活性明顯地較低，此可能影響其對周遭環境的適應力。農林 8 號除 porphyrin 含量有明顯差異外，其餘各種色素含量皆相近。葉片顏色的不同，反映出葉片所含色素質量上的差異，顯示由反射光譜偵測色素含量之可行性，可進一步應用於光譜遙測之研究上。

表 1-1、本研究在關渡試區種植六種水稻之葉片葉綠素 a/b 比值及其色素特性。
(Terao *et al.*, 1985a ; 1985b)

品種(系)	Chl a/b	葉色	品種(系)特性
Norin 8	2.5~3	綠色	為 <i>LT8</i> 、 <i>chl1</i> 、 <i>chl6</i> 、 <i>chl</i> 之親本
LT8	4~6	黃色	葉綠素 b 缺失 (Chl b-deficient)
<i>Chlorina-11</i>	10~15	黃綠色	葉綠素 b 缺失 (Chl b-deficient)
<i>Chlorina-16</i>	15~25	黃綠色	葉綠素 b 缺失 (Chl b-deficient)
<i>Chlorina-1</i>	∞	黃綠色	無葉綠素 b (Chl b-lacking)

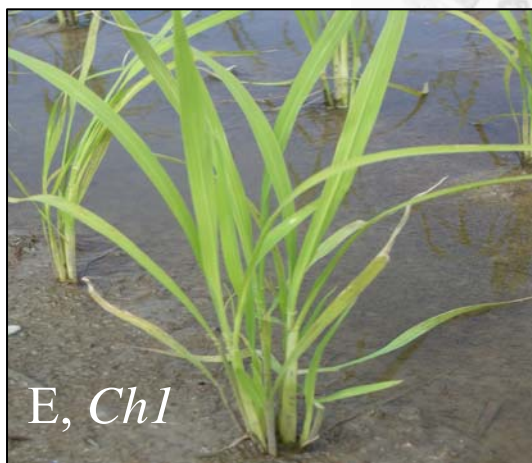
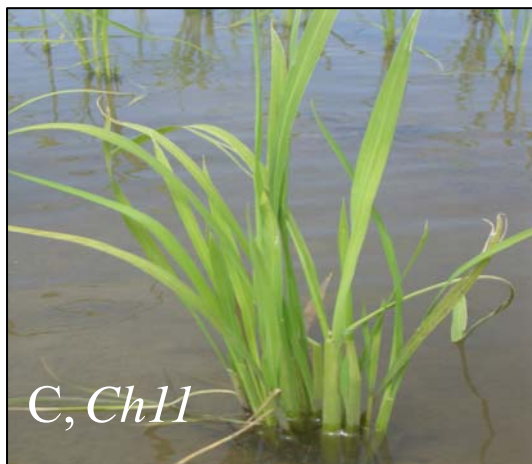
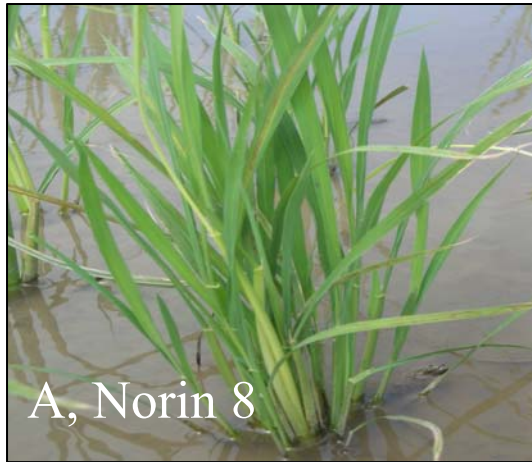


圖 1-1、本研究在關渡試區種植五種水稻之田間生長情形，拍攝日期 2007 年 4 月 19 日。

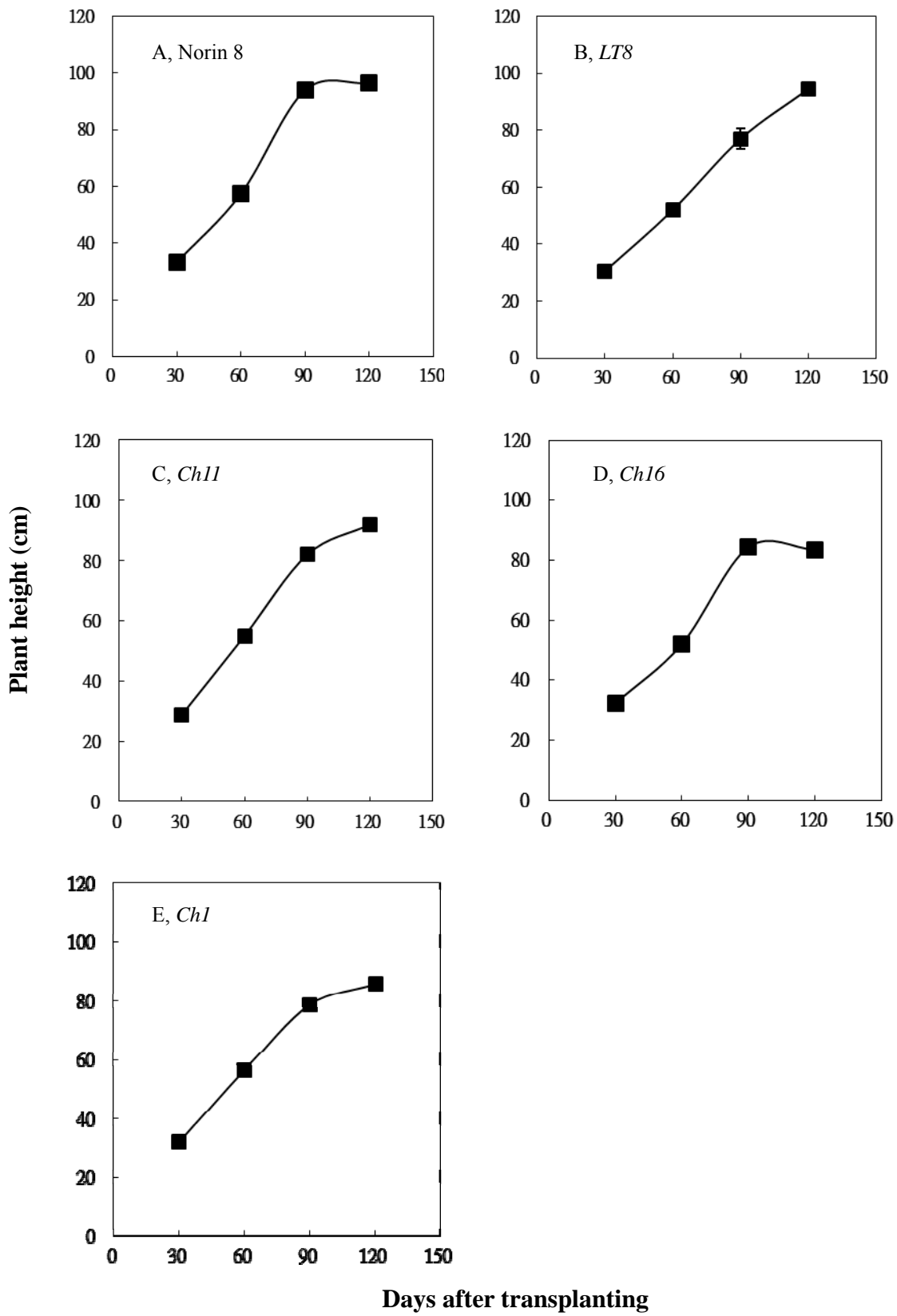


圖 1-2、紫稻、農林 8 號及其突變種生育期間株高之變化。

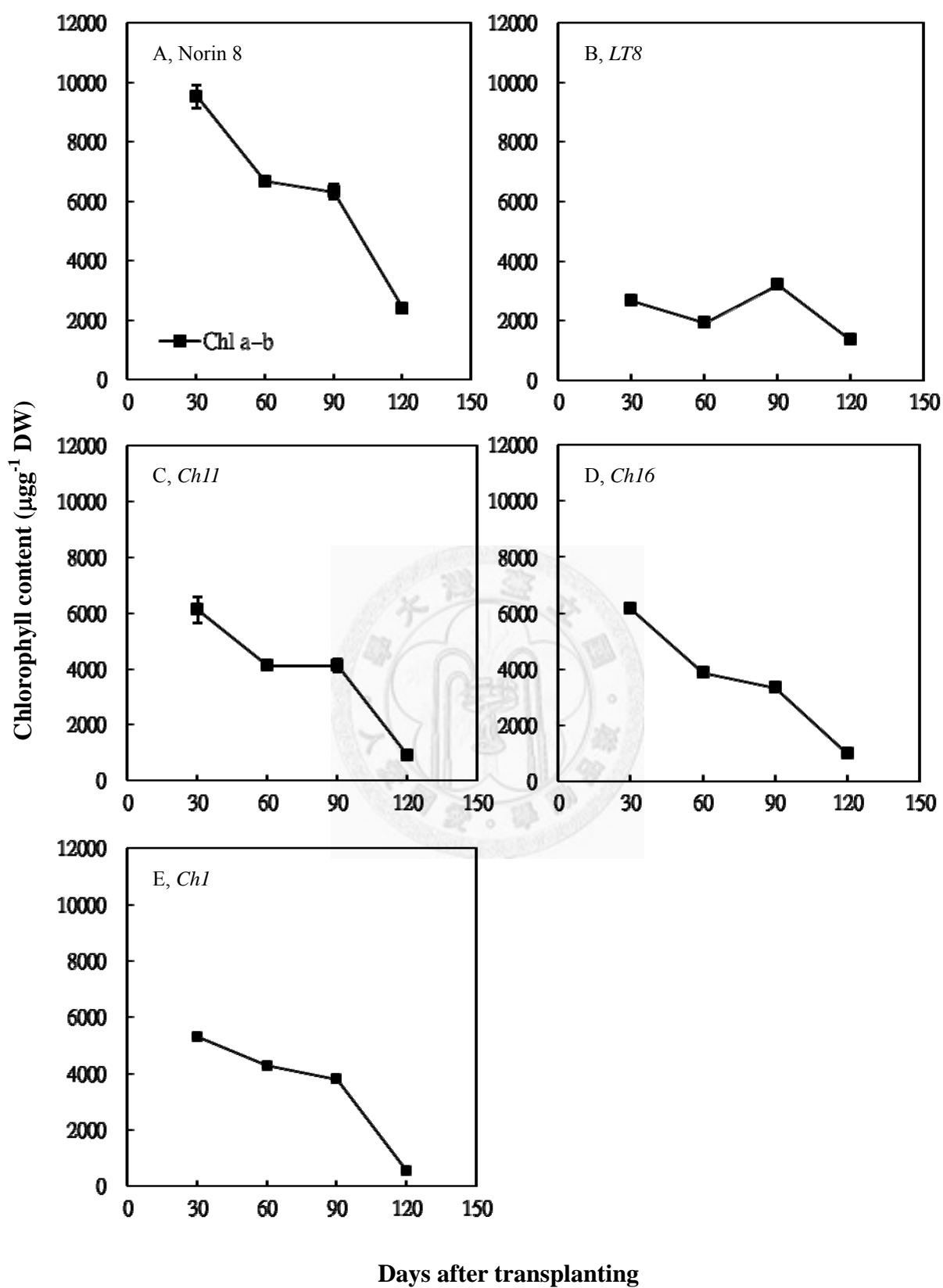


圖 1-3、農林 8 號及其突變種生育期間以破壞性方法測定之 Chl a+b 變化。

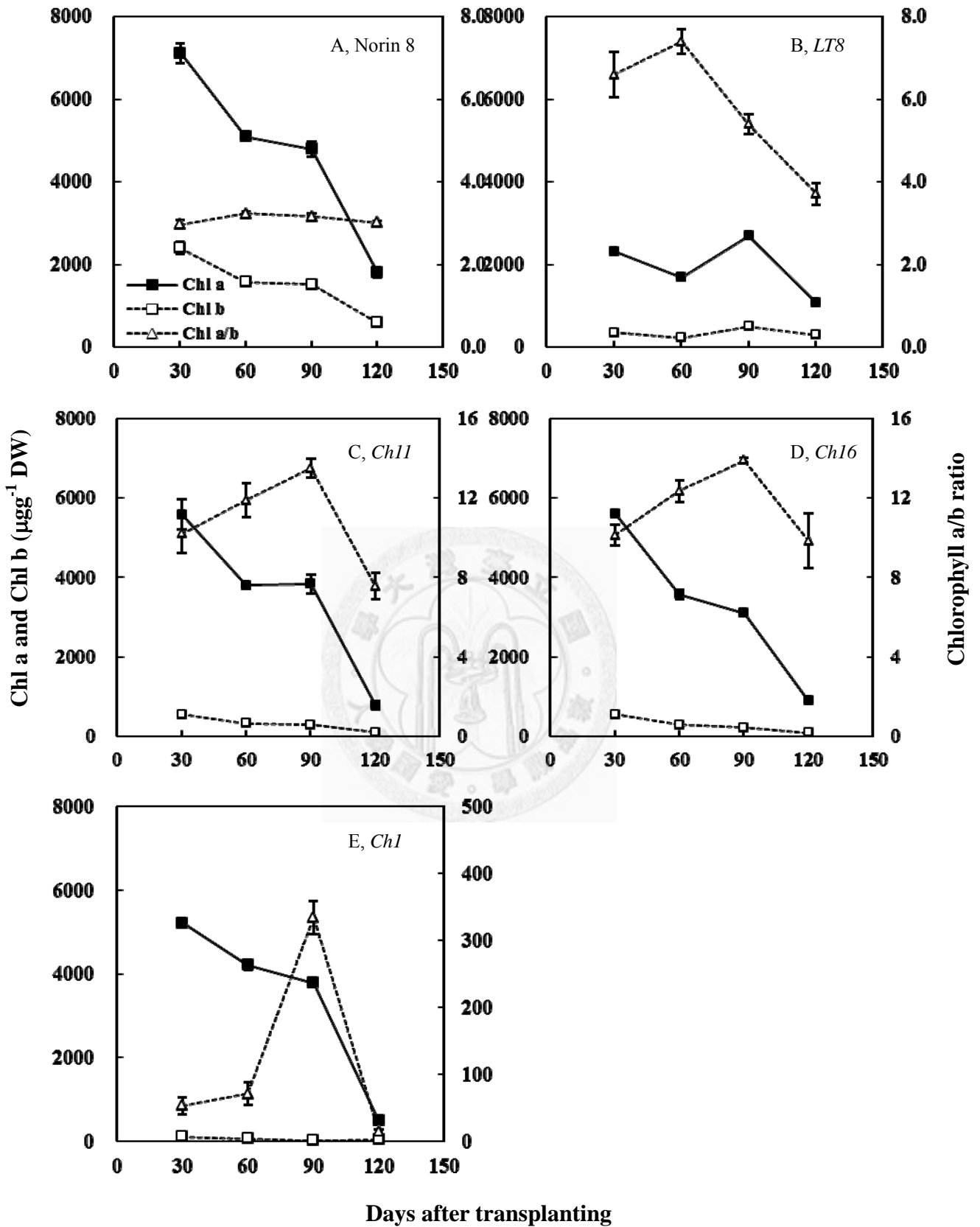


圖 1-4、農林 8 號及其突變種生育期間以破壞性方法測定之 Chl a、Chl b 及 Chl a/b 比值之變化。

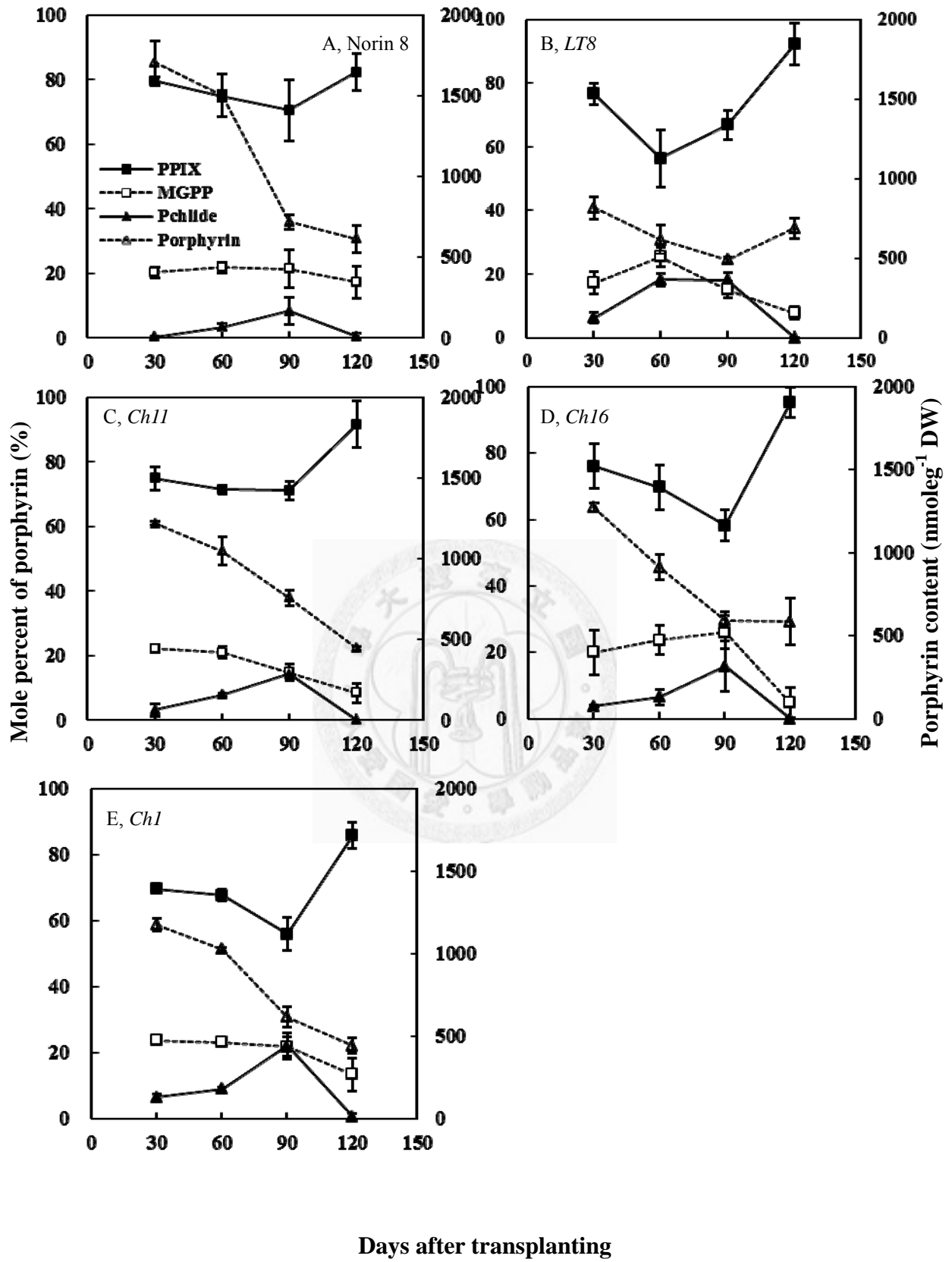


圖 1-5、農林 8 號及其突變種生育期間葉片吡啉化合物總量及莫耳百分比之變化。

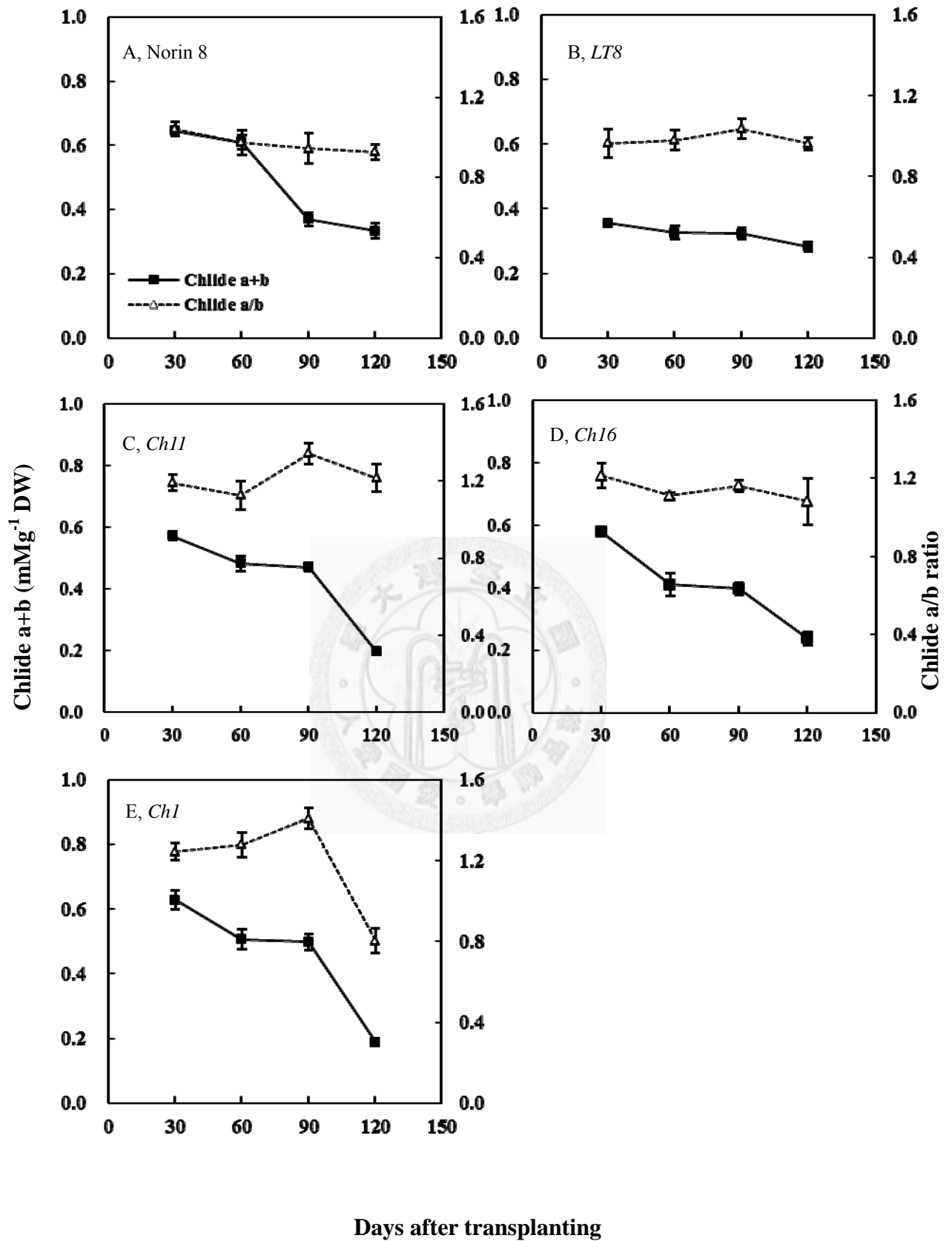


圖 1-6、農林 8 號及其突變種生育期間葉片 Chlide a+b 及 Chlide a/b 比值之變化。

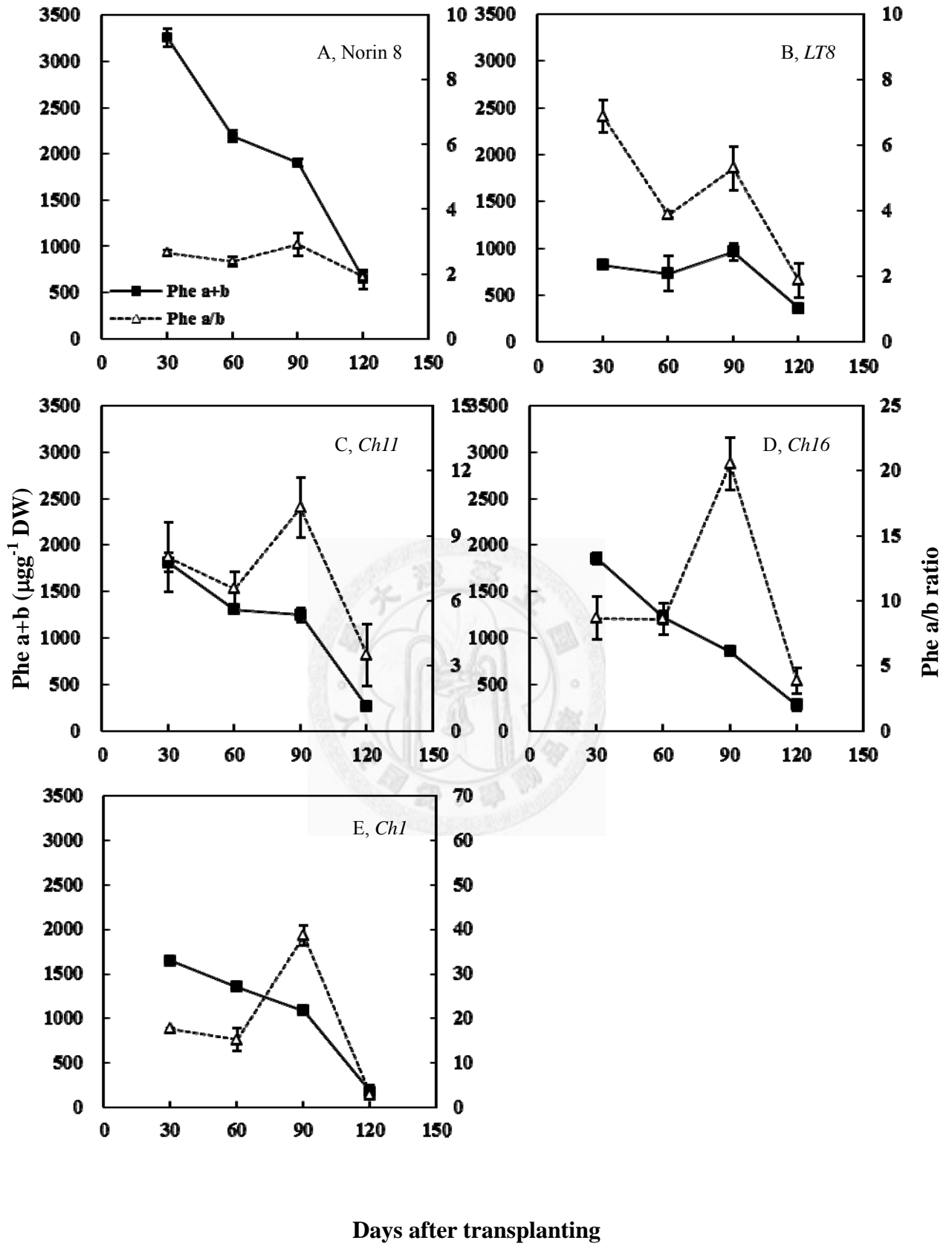


圖 1-7、農林 8 號及其突變種生育期間葉片 Phe a+b 及 Phe a/b 比值之變化。

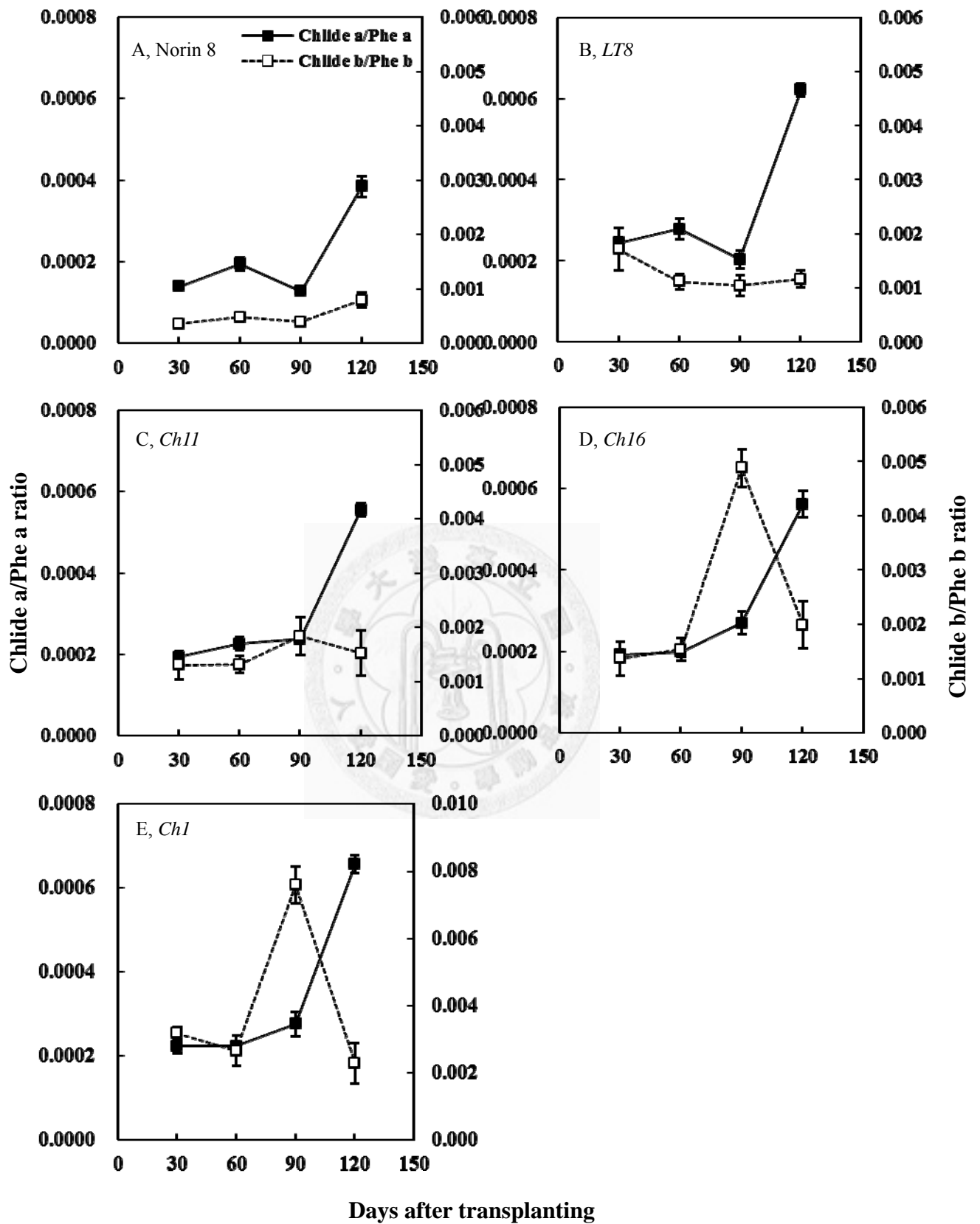


圖 1-8、農林 8 號及其突變種生育期間葉片 Chlide a/Phe a 及 Chlide b/Phe b 比
值之變化。

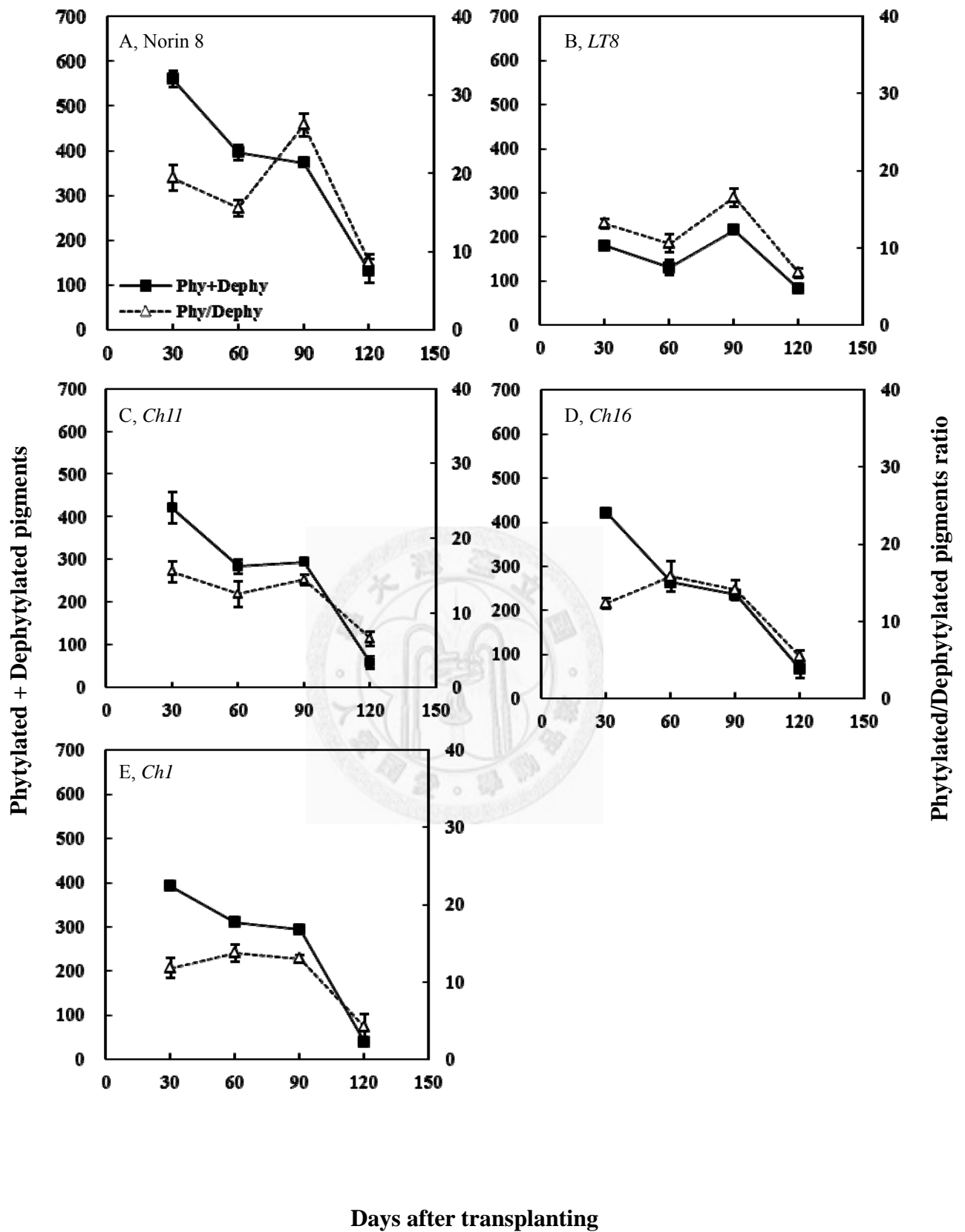


圖 1-9、農林 8 號及其突變種生育期間葉片含植醇+脫植醇色素含量及其比值之變化。

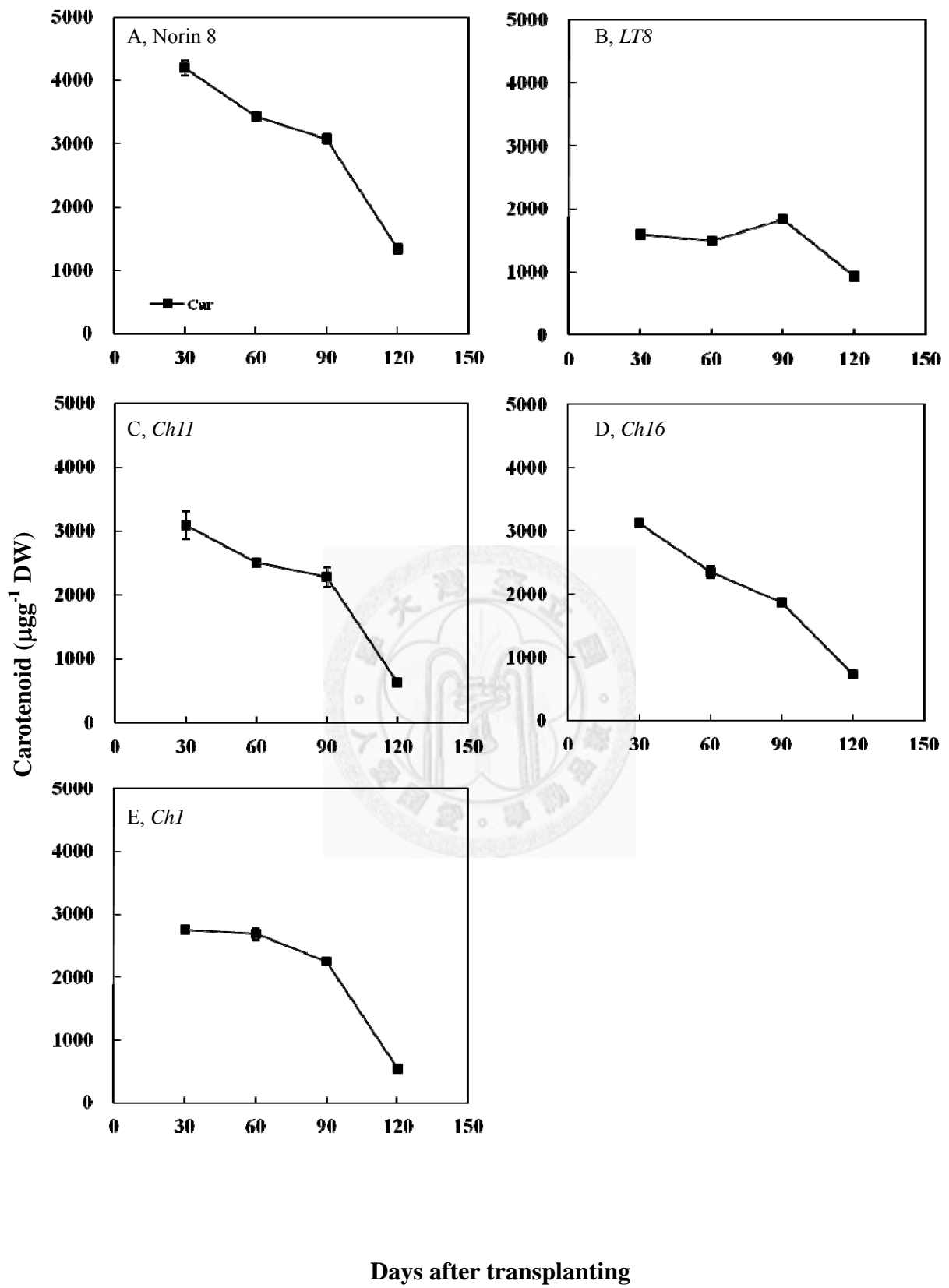


圖 1-10、農林 8 號及其突變種生育期間葉片類胡蘿蔔素總量之變化。

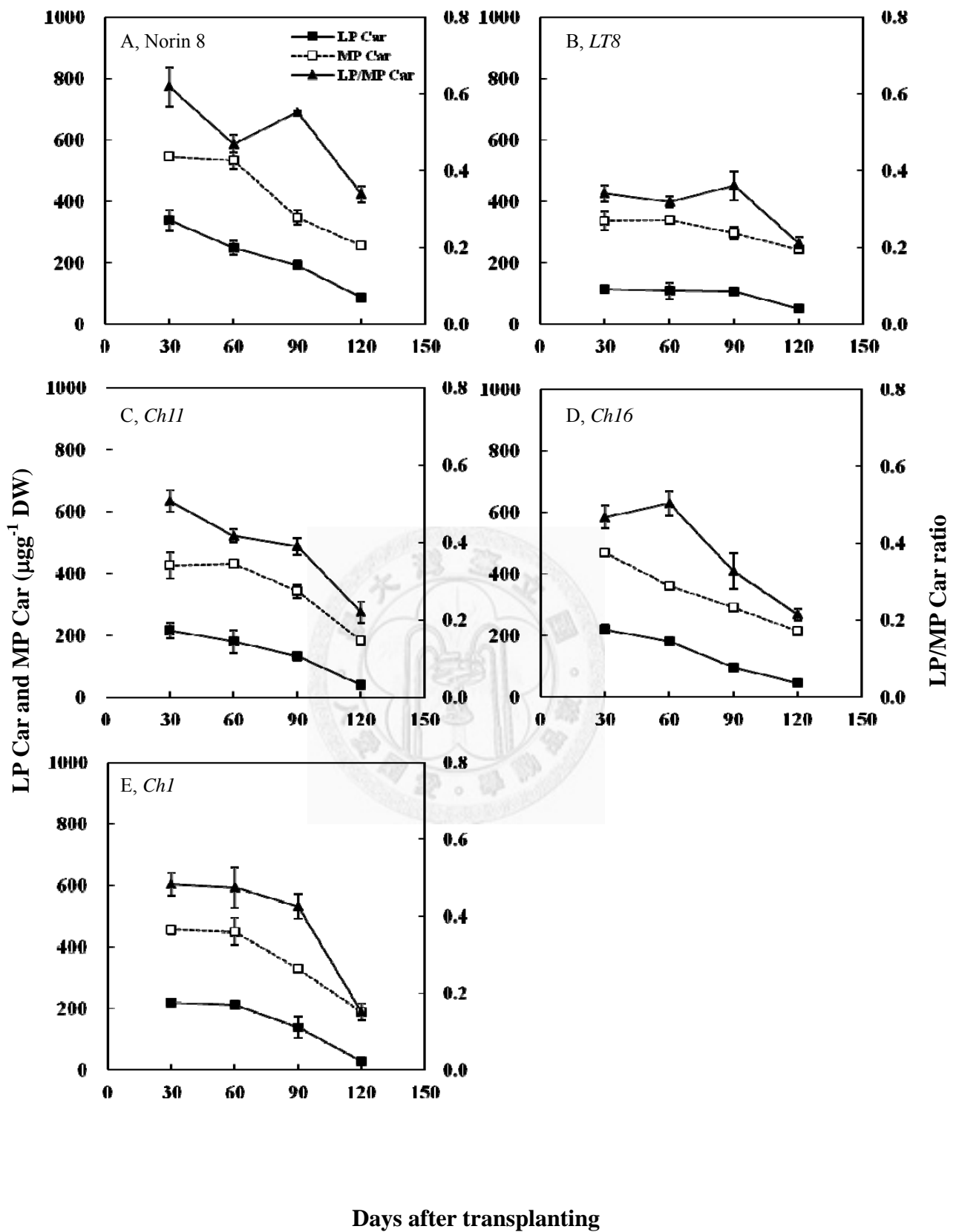


圖 1-11、農林 8 號及其突變種生育期間葉片低極性及高極性類胡蘿蔔素含量及其比值之變化。

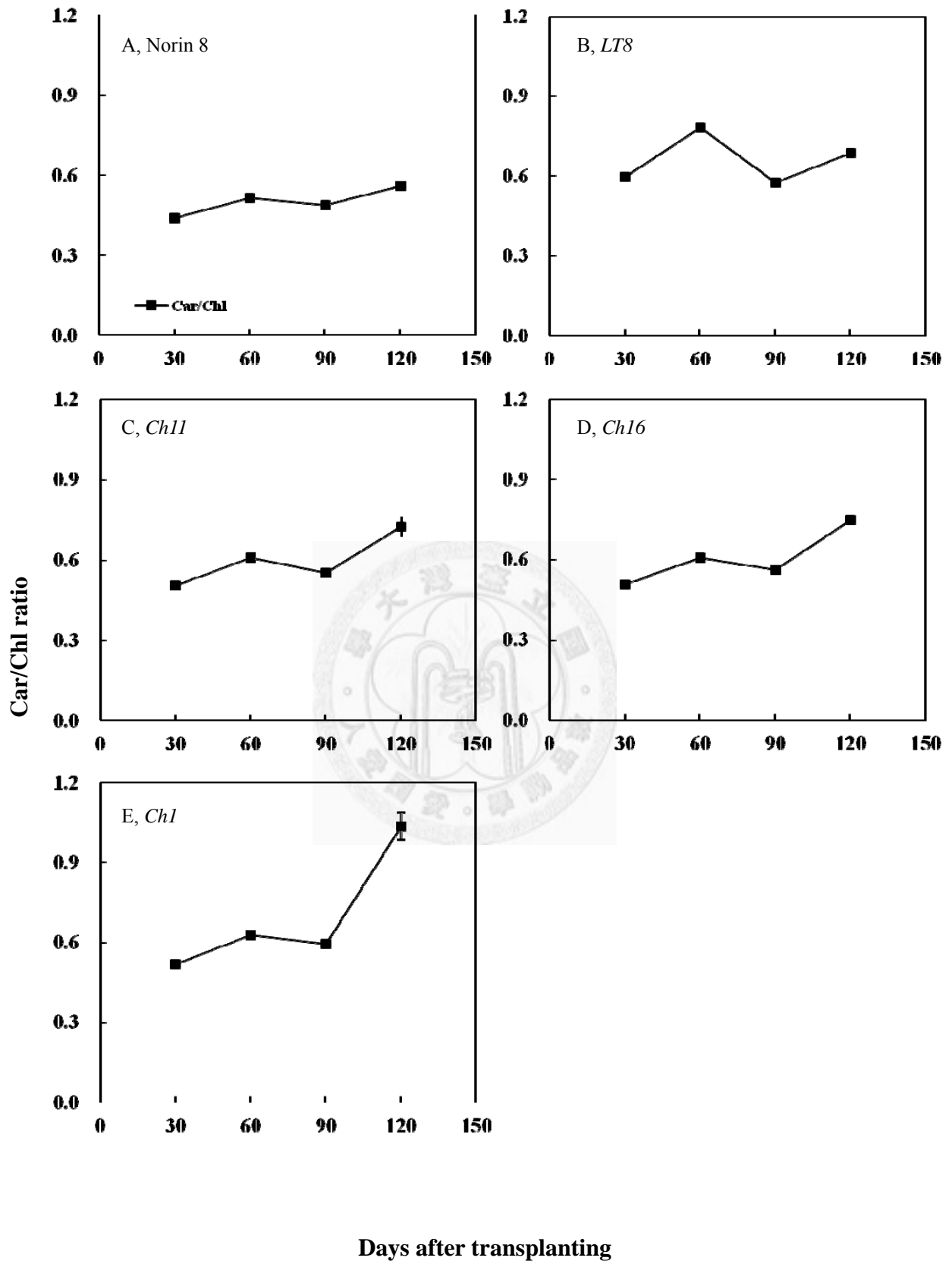


圖 1-12、農林 8 號及其突變種生育期間葉片類胡蘿蔔素與葉綠素 a+b 比值之變化。

第二章 水稻葉片及植冠反射光譜分析與色素含量之遙測估算

一、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)。

水稻具有多種葉色，包括綠色、紫色、黃(綠)色等。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。本篇論文先前的研究結果顯示，農林8號Chl及其代謝物、Car之含量皆明顯高於突變種水稻。Chl、Phe及LP Car等極性較小之代謝物，其含量隨著生育日數增加而下降，而吡啉(PPIX、MGPP、Pchlide)、Chlide及MP Car等極性較大之代謝物，其含量亦隨著生育日數增加而下降。五種水稻在生育階段前期，也就是營養生長期至生殖生長期間，葉綠素之崩解途徑傾向以Chl→Phe→Pho為主要崩解途徑(major route)，而以Chl→Chlide→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，亦即在生育階段後期，也就是生殖生長期至成熟期間，葉綠素之崩解途徑傾向以Chl→Chlide→Pho為主要崩解途徑(major route)，而以Chl→Phe→Pho為次要途徑(minor route)。五種不同葉色水稻在生育後期Car/Chl比值呈上升趨勢，且此上升趨勢隨著品種葉綠素a/b比值愈大，Car/Chl比值上升速率愈快。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，本研究以五種不同葉色水稻為材料，進行葉片及植冠反射光譜測定，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及初步探討光譜與水稻產量米質之相關性。



二、材料與方法

植物材料

本研究以水稻五種不同程度缺或無葉綠素 b 突變種(chlorophyll b-deficient or -lacking mutant)為試驗材料，包括日本栽培種農林 8 號(Norin 8)為正常綠色(Chl a/b=2.5~3) 以及其突變種 *chl1*(Chl a/b= ∞)、*chl11*(Chl a/b=10~15)、*chl16*(Chl a/b=15~25)、*LT8*(Chl a/b=4~6)。五種不同葉色水稻之葉片色素特性如表 1-1 所示，農林 8 號為日本栽培種，與一般栽培種葉片色素特性一樣，呈現綠色；其它的突變種都有不同程度的黃色。葉綠素 a/b 比值自 3 到 ∞ 的各種水稻葉綠素突變種，可區分為黃、綠兩種水稻，適合做為建立水稻農藝性狀、葉片特性及色素質量，與(單)葉片、植冠、衛星遙測反射光譜相關性研究的材料。水稻的相關葉綠素突變種為自日本引進後大量繁殖(Terao *et al.*, 1985a; 1985b)。

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 $SRVI = R_{NIR}/R_{RED}$ ， $NDVI = (R_{NIR} - R_{RED})/(R_{NIR} + R_{RED})$ 。

可攜式光譜儀(LI-1800，LICOR)測定植冠反射光譜，波長測定範圍為 300-900nm，光譜解析度為 5nm。將遠端接收器(LI-1800-02 remote cosine receptor，

LI-COR)橫向伸出約 1.5m 置於水稻植冠上方約 1m 處，以減少儀器遮陰的影響。選擇入射日射量受雲干擾較少時，盡快反覆測量入射及反射光譜各三次，再由三次入射與反射測定之平均值，計算水稻植冠的反射光譜。所有植被反射光譜的量測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。

色素含量測定

水稻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 $A_{663.6}$ 、 $A_{646.6}$ 、 $A_{440.5}$ 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。

三、結果與討論

葉片色素含量

農林 8 號、*chl1*、*chl6* 及 *chl* 之 Chl *a*、*b* 與 Car 含量變化整體趨勢隨著生育日數增加而下降；*LT8* 則呈現先升後降現象(表 2-1)。不論任何生育期間，Chl 含量都以綠色葉最高，而突變種黃色葉最低。而綠色葉 Chl 含量為黃色葉之 1.5~3 倍。農林 8 號葉片 Chl *a/b* 比值在全生育期間都接近 3，與一般正常狀況下高等植物的葉片之 Chl *a/b* 比值相似，顯示其可適應於一般光照環境下生長，葉綠素 *a* 及葉綠素 *b* 在生育期間合成及崩解速率同步進行；而 *LT8*、*chl1*、*chl6* 及 *chl* 葉片 Chl *a/b* 比值在全生育期間明顯高於 3 甚多，且其 Chl 含量遠低於正常植物葉片，黃色葉甘藷亦有此現象(Hsu *et al.*, 2003)，因此，突變種 *LT8*、*chl1*、*chl6* 及 *chl*，可能對光線和溫度都甚為敏感(Yang *et al.*, 1990；Yang *et al.*, 1993)。突變種 *LT8*、*chl1*、*chl6* 及 *chl*，其葉綠素 *a/b* 比值在生育期間整體趨勢為先升後降，相對而言，突變種由營養生長期進入生殖生長期間，Chl *a* 之累積速率遠大於 Chl *b*，進入生殖生長期後，Chl *a* 及 *b* 間的累積速率差距逐漸縮小，而進入成熟期後，Chl *a/b* 都呈快速下降趨勢，顯現 Chl *a* 的崩解速率比 Chl *b* 快。

五種不同葉色水稻在營養生長期至生殖生長期間 Car/Chl 比值變化不大，但在生育後期，也就是成熟期間，五種不同葉色水稻 Car/Chl 比值呈上升趨勢，此結果顯示水稻在成熟期間，葉綠素崩解速率大於類胡蘿蔔素，此與甘藷葉研究不同(Hsu *et al.*, 2003)，且此上升趨勢隨著品種色素特性而異，品種間葉綠素 *a/b* 比值愈大，Car/Chl 比值上升速率愈快，推測其結果可能是因為葉綠素 *b* 缺乏程度愈大，其類胡蘿蔔素崩解速率會趨緩慢，可能是植物為了調整本身適應光環境下所做的改變。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)。以上的結果顯示，水稻葉 Car 與 Chl 的累積有密切相關。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。

反射光譜分析

五種不同葉色水稻於不同生育期之葉片及植冠反射光譜皆類似，其最大反射率發生在近紅外光約 750 nm 以上之波段，近紅外光反射率隨生育日數增加而有所變動，於生殖生長期間之近紅外光反射率達最大值(圖 2-1，圖 2-2)。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，因此五種水稻葉在這兩個波段的反射率最低。農林 8 號的葉綠素及類胡蘿蔔素含量較高，而突變種水稻之二大類光合色素則含量明顯較低(表 2-1)，故其在藍光與紅光波段之反射率則比農林 8 號水稻葉稍高。整體而言，農林 8 號水稻葉片反射光譜之基本特徵與其它綠色高等植物幾乎相同，但突變種水稻葉片在 500-600 nm 綠光波段之反射率則有顯著差異；突變種之反射率遠大於農林 8 號(圖 2-1)。

紫色葉在 500-600 nm 綠光波段之反射率並不像一般綠色植物在有增加之趨勢，顯示紫色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 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，突變種水稻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農林 8 號，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。五種水稻生育期間之葉片反射光譜(圖 2-1)經一次微分後之光譜曲線，可更明顯地顯示出五種水稻葉之間的差異(圖 2-3)。突變種水稻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 附近之反射率一次微分值與農林 8 號差異大。一次微分曲線在 500 至 520 nm 波段間的斜率隨著生育日數增加而有所變動，而在甘藷葉的研究中，此波段間的斜率會隨著葉綠素含量的減少而明顯的增加(Hsu *et al.*, 2003)。在波長 550 nm 及 675 nm 時，不同生育階段水稻葉之一次微分曲線交會並且改變其正負號。Gitelson 與 Merzlyak (1994a)指出，波長 500 nm 附近反射率一次微分值的增加與葉綠素及類胡蘿蔔素的吸收有關，而波長 675 nm 反射率一次微分值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，反射率一次微分峰值，隨著生育日數增加變化不大，而在甘藷葉的研究中，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)(Hsu *et al.*, 2003)。波長在大於此一反射率一次微分峰值後，反射率一次微分值快速降低，至約 550 nm 時，不同生育階段水稻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五種水稻葉片的反射率皆低。在大於 675 nm 的波段，突變種水稻葉反射率一次微分值增加之趨勢大於農林 8 號，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)，此與甘藷葉的研究相同(Hsu *et al.*, 2003)。不同生育階段水稻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。以上紅光波段之藍位移現象都發生在不同葉色水稻之葉片，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。五種水稻葉光譜反射率之標準差(standard deviation, STD)如圖 2-4 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 附近對五種水稻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。農林 8 號葉片反射率標準差之最大值出現在 550-560 nm 及 700-710 nm 之間，突變種水稻葉除了波長 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(圖 2-4)。大致而言，這些標準差都隨著生育日數增加而變動，無一定規律可循，此與甘藷葉研究不同(Hsu *et al.*, 2003)。

色素與單波段反射率之相關性分析

五種不同葉色水稻在一期稻作生育期間，葉片 Chl a 含量分別與波長 550nm、675nm 及 705nm 葉片及植冠光譜反射率做相關性分析，結果顯示此葉片光譜之三波段與 Chl a 含量呈直線相關， R^2 分別為 0.2729、0.6101 及 0.7181(圖 2-5)；而植冠光譜之三波段與 Chl a 含量呈直線相關， R^2 分別為 0.0061、0.5139 及 0.6201(圖 2-6)，此亦顯示此二波段(675nm 及 705nm)反射率對色素含量變化之敏感度高，而 550 nm 反射率與 Chl a 含量之相關性則較低，此說明了在本研究中 Chl a 色素濃度範圍內， R_{550} 對 Chl a 含量變化之敏感度低，而 R_{675} 及 R_{705} 對 Chl a 含量變化具有

高敏感度，此與甘藷葉之研究略有不同(Hsu *et al.*, 2003)。

五種不同葉色水稻在一期稻作生育期間，葉片 Chl b 含量分別與波長 550nm、675nm 及 705nm 葉片及植冠光譜反射率做相關性分析，結果顯示此葉片光譜之三波段與 Chl b 含量呈直線相關， R^2 分別為 0.4858、0.172 及 0.3929(圖 2-5)；而植冠光譜之三波段與 Chl b 含量呈直線相關， R^2 分別為 0.4287、0.2038 及 0.4901(圖 2-6)，此亦顯示此二波段(550nm 及 705nm)反射率對色素含量變化之敏感度高，而 675 nm 反射率與 Chl b 含量之相關性則較低，此說明了在本研究中 Chl b 色素濃度範圍內， R_{675} 對 Chl b 含量變化之敏感度低，而 R_{550} 及 R_{705} 對 Chl b 含量變化具有高敏感度，此與甘藷葉之研究相同(Hsu *et al.*, 2003)。

五種不同葉色水稻在一期稻作生育期間，葉片 Car 含量分別與波長 550nm、675nm 及 705nm 葉片及植冠光譜反射率做相關性分析，結果顯示此葉片光譜之三波段與 Car 含量呈直線相關， R^2 分別為 0.3073、0.6393 及 0.7232(圖 2-5)；而植冠光譜之三波段與 Car 含量呈直線相關， R^2 分別為 0.0067、0.447 及 0.5821(圖 2-6)，此亦顯示此二波段(675nm 及 705nm)反射率對色素含量變化之敏感度高，而 550 nm 反射率與 Car 含量之相關性則較低，此說明了在本研究中 Car 色素濃度範圍內， R_{550} 對 Car 含量變化之敏感度低，而 R_{675} 及 R_{705} 對 Car 含量變化具有高敏感度，此與甘藷葉之研究略有不同(Hsu *et al.*, 2003)。

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，常用之指數包括有簡易比植生指數(simple ratio vegetation index, SRVI)及常態化差異植生指數(normalization difference vegetation index, NDVI)，其計算公式分別為 $SRVI = R_{NIR}/R_{RED}$ ， $NDVI = (R_{NIR} - R_{RED})/(R_{NIR} + R_{RED})$ 。

SRVI 與 Chl *a*、Chl *b* 及 Car 含量之關係，分別如圖 2-7 及圖 2-8 所示。其中 R_{NIR} 以 R_{750} 計算，而 R_{RED} 則分別以 R_{675} 及 R_{705} 計算。以葉片光譜 R_{705} 計算之 SRVI 與 Chl *a*、Chl *b* 及 Car 含量呈直線相關， R^2 分別為 0.7881、0.542 及 0.8322(圖 2-7)；以植冠光譜 R_{705} 計算之 SRVI 與 Chl *a*、Chl *b* 及 Car 含量呈直線相關， R^2 分別為 0.4228、0.3863 及 0.3676(圖 2-8)。如同前述之結果， R_{705} 對光合色素含量之變化具高敏感度，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。

NDVI 與 Chl *a*、Chl *b* 及 Car 含量之關係，分別如圖 2-9 及圖 2-10 所示。其中 R_{NIR} 以 R_{750} 計算，而 R_{RED} 則分別以 R_{675} 及 R_{705} 計算。以葉片光譜 R_{705} 計算之 NDVI 與 Chl *a*、Chl *b* 及 Car 含量呈直線相關， R^2 分別為 0.7885、0.4077 及 0.8187(圖 2-9)；以植冠光譜 R_{705} 計算之 NDVI 與 Chl *a*、Chl *b* 及 Car 含量呈直線相關， R^2 分別為 0.5062、0.3352 及 0.4345(圖 2-10)。如同前述之結果， R_{705} 對光合色素含量之變化具高敏感度，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。

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)。而在甘藷葉之研究顯示， 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，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，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(Hsu *et al.*, 2003)。

以上之光譜訊息建基在單一波長之反射率，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 $SRVI_{broad}$ 及 $NDVI_{broad}$ ，與 Chl *a*、Chl *b* 及 Car 含量之關係，如圖 2-11 及圖 2-12 所示。以葉片光譜計算之 $NDVI_{broad}$ 與 Chl *a*、Chl *b* 及 Car 含量具有直線相關，其 R^2 分別為 0.691、0.3324 及 0.7363；而以葉片光譜計算之 $SRVI_{broad}$ 與 Chl *a*、Chl *b* 及 Car 含量具有直線相關，其 R^2 分別為 0.7127、0.6191 及 0.7852(圖 2-11)。另以植冠光譜計算之 $NDVI_{broad}$ 與 Chl *a*、Chl *b* 及 Car 含量具有直線相關，其 R^2 分別為 0.3806、0.2582 及 0.3149；而以植冠光譜計算之 $SRVI_{broad}$ 與 Chl *a*、Chl *b* 及 Car 含量具有直線相關，其 R^2 分別為 0.3212、0.3162 及 0.2698(圖 2-12)。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_{705} 對於葉綠素含量具有高敏感度, 相對來說, 此波段反射率主要受到葉綠素含量變化之影響, 以 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, 亦即水稻葉片在正常生長狀況下, 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五種不同葉色之水稻, 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。

植生指數與水稻產量及品質

以水稻生育期間葉片及植冠反射光譜計算植被指數 $NDVI_{705}$ 及 $NDVI_{broad}$, 其

結果如圖 2-13 及圖 2-14 所示。農林 8 號及其突變種 $NDVI_{705}$ 及 $NDVI_{broad}$ 在營養生長期間持續增加，在進入生殖生長期中末期時(約 80-90 天左右)達到最大值，而後在生殖生長末期及進入成熟期後，持續的降低。不同的葉片色素特性對植被指數 $NDVI_{705}$ 及 $NDVI_{broad}$ 有顯著性的效應存在，葉綠素含量較高，則 $NDVI_{705}$ 及 $NDVI_{broad}$ 亦較高(圖 2-13、圖 2-14)。

各品種稻穀產量及稻米品質如表 2-2 所示，農林 8 號稻穀產量與一般栽培種相當，在關渡地區可達 4991 kg/ha，其次依序為 *LT8*、*ch11* 及 *ch16*，其產量分別 3819、3295 及 2995 kg/ha。*chl* 的稻穀產量相當低，皆未達 2000 kg/ha。*ch11*、*ch16* 及 *chl* 三個突變種稻米蛋白質含量超過儀器測定範圍，無法測出，其稻米可能含有大量的特殊蛋白質。將各品種一期稻作第 60 天葉片反射光譜計算之植被指數 $NDVI_{705}$ 對稻穀產量及米質進行相關分析，對稻穀產量相關係數達 0.6 以上(圖 2-15)，顯示葉色深淺與稻穀產量間具有一定的關聯性。但是品種間的葉色差異與施肥造成的葉色差異對稻穀產量，甚至是稻米品質的影響是否一致，則須更進一步的研究探討。

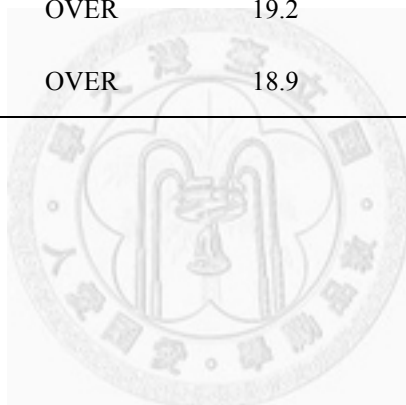
表 2-1、農林 8 號及其突變種生育期間葉片色素含量之變化。

Days after transplanting	Pigment contents					
	Chl <i>a</i>	Chl <i>b</i>	Chl <i>a+b</i>	Chl <i>a/b</i>	Car	Car/Chl
	— µg/g DW —					
<i>Norin 8</i>						
30	7122 ± 238	2399 ± 153	9520 ± 383	2.97 ± 0.11	4192 ± 115	0.44 ± 0.006
60	5094 ± 101	1573 ± 39	6667 ± 132	3.24 ± 0.06	3429 ± 27	0.51 ± 0.007
90	4801 ± 181	1519 ± 78	6320 ± 254	3.16 ± 0.07	3077 ± 77	0.49 ± 0.008
120	1801 ± 122	597 ± 32	2398 ± 154	3.01 ± 0.05	1339 ± 78	0.56 ± 0.005
<i>LT8</i>						
30	2319 ± 74	353 ± 27	2671 ± 77	6.60 ± 0.54	1593 ± 58	0.60 ± 0.006
60	1693 ± 83	229 ± 20	1922 ± 103	7.40 ± 0.30	1502 ± 61	0.78 ± 0.013
90	2697 ± 60	500 ± 21	3197 ± 67	5.40 ± 0.23	1841 ± 40	0.58 ± 0.007
120	1072 ± 40	289 ± 14	1360 ± 38	3.72 ± 0.26	932 ± 23	0.69 ± 0.008
<i>Ch11</i>						
30	5579 ± 380	552 ± 85	6131 ± 465	10.19 ± 0.94	3092 ± 212	0.50 ± 0.004
60	3797 ± 90	321 ± 27	4117 ± 111	11.88 ± 0.85	2511 ± 36	0.61 ± 0.008
90	3840 ± 237	284 ± 8	4124 ± 245	13.50 ± 0.46	2279 ± 148	0.55 ± 0.003
120	783 ± 113	104 ± 19	887 ± 131	7.56 ± 0.66	641 ± 64	0.73 ± 0.036
<i>Ch16</i>						
30	5600 ± 62	554 ± 24	6154 ± 46	10.13 ± 0.52	3124 ± 41	0.51 ± 0.004
60	3574 ± 122	289 ± 8	3863 ± 122	12.35 ± 0.54	2349 ± 90	0.61 ± 0.005
90	3107 ± 34	223 ± 3	3331 ± 37	13.90 ± 0.12	1877 ± 26	0.56 ± 0.004
120	889 ± 52	91 ± 7	980 ± 46	9.84 ± 1.37	734 ± 25	0.75 ± 0.014
<i>Ch1</i>						
30	5213 ± 92	102 ± 21	5315 ± 84	53 ± 13	2759 ± 51	0.52 ± 0.010
60	4217 ± 113	62 ± 16	4279 ± 103	71 ± 17	2686 ± 93	0.63 ± 0.008
90	3781 ± 102	17 ± 11	3799 ± 112	335 ± 25	2254 ± 62	0.59 ± 0.006
120	489 ± 64	38 ± 7	527 ± 60	13 ± 4	544 ± 36	1.04 ± 0.052

† Data presented as mean ± standard error (SE). (n=3)

表 2-2、農林 8 號及其突變種稻穀產量及稻米品質。

品種(系)	稻穀產量 (kg/ha)	稻米品質			
		蛋白質含量 (%)	直鏈澱粉含量 (%)	脂肪酸含量 (mg)	味度值
農林 8 號	4991	9.0	19.2	16.3	47
<i>LT8</i>	3819	9.7	19.0	16.1	45
<i>ch11</i>	3295	OVER	19.1	15.6	44
<i>ch16</i>	2995	OVER	19.2	15.1	49
<i>ch1</i>	1557	OVER	18.9	14.7	33



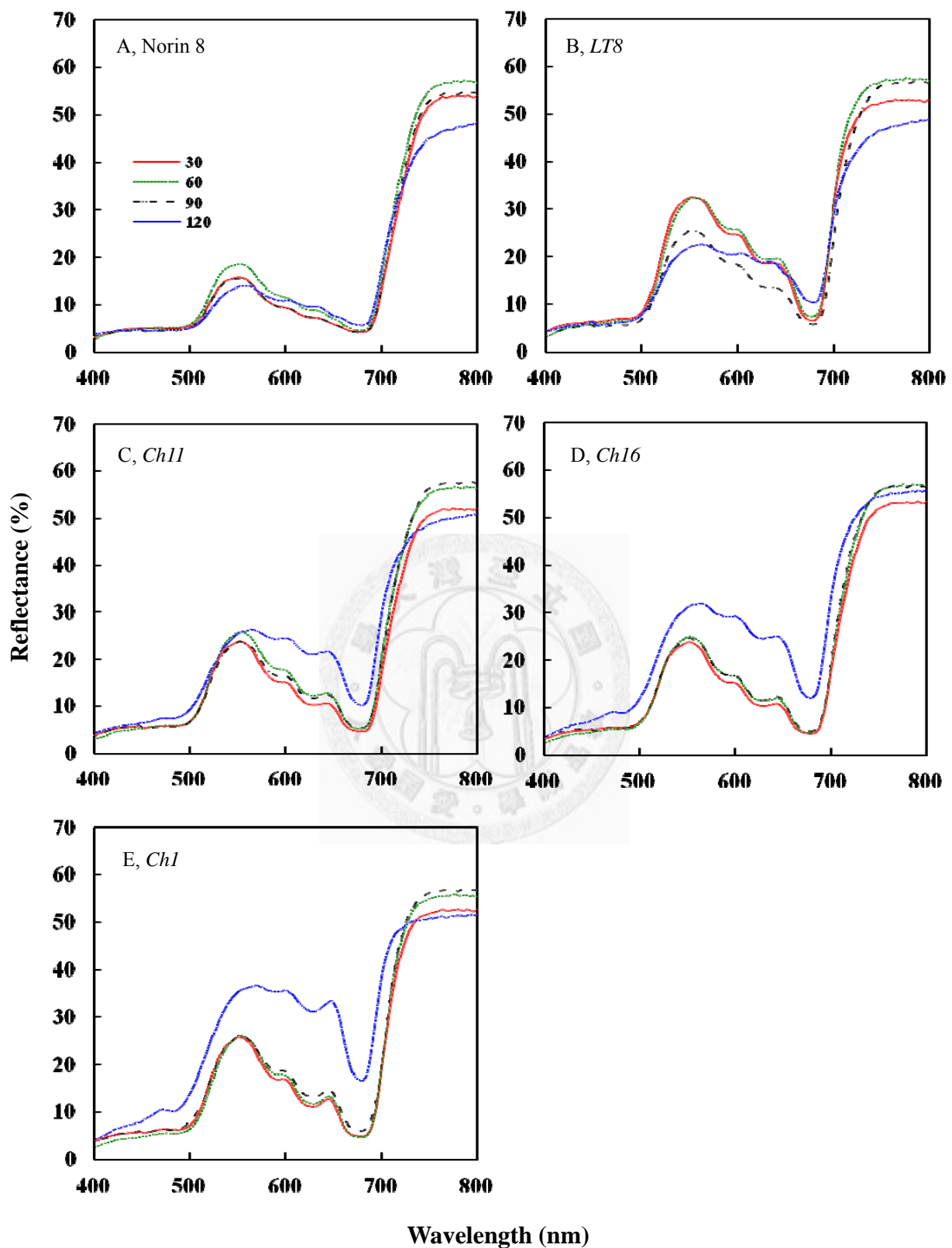


圖 2-1、農林 8 號及其突變種生育期間葉片光譜之變化。

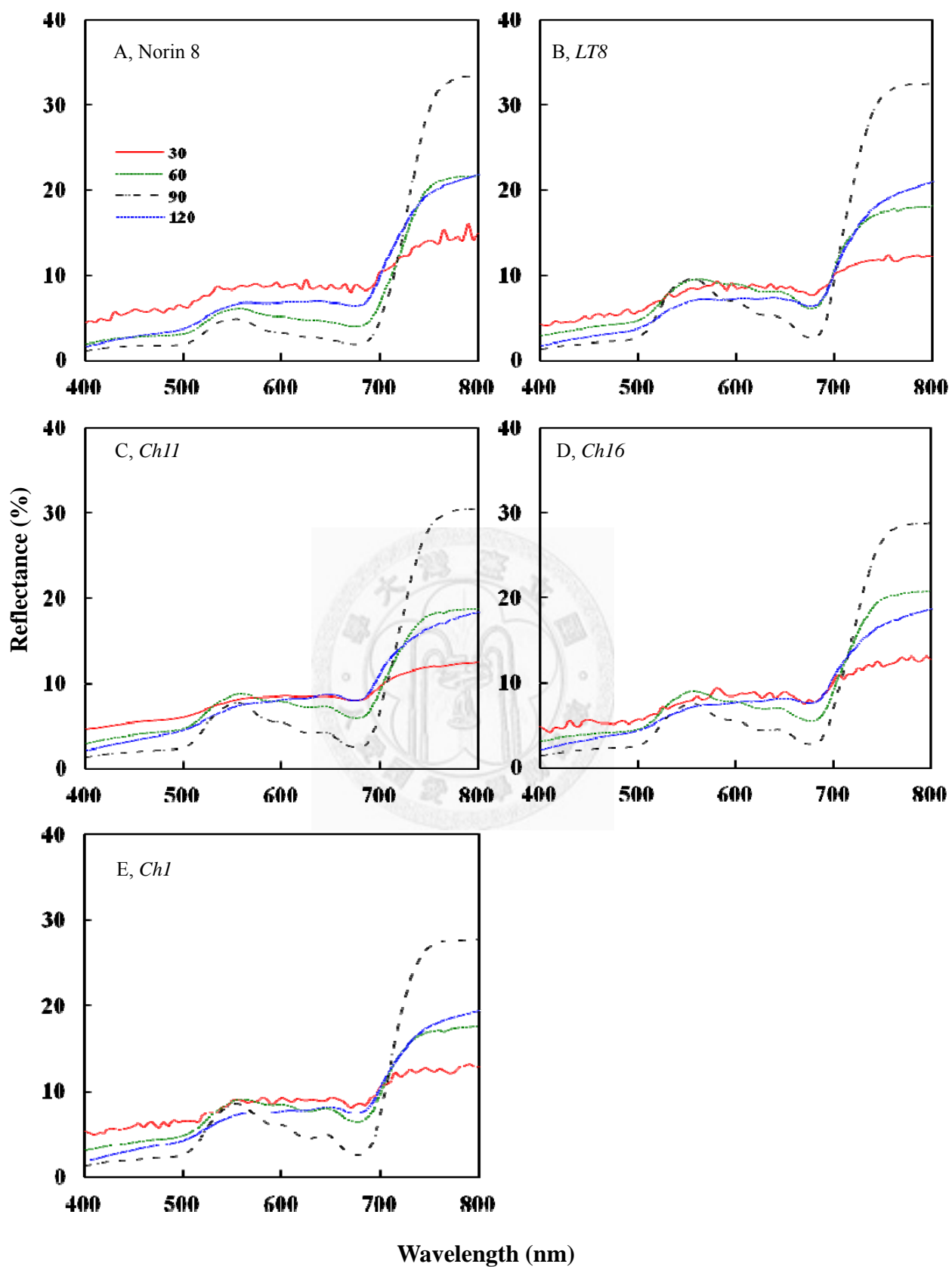


圖 2-2、農林 8 號及其突變種生育期間植冠光譜之變化。

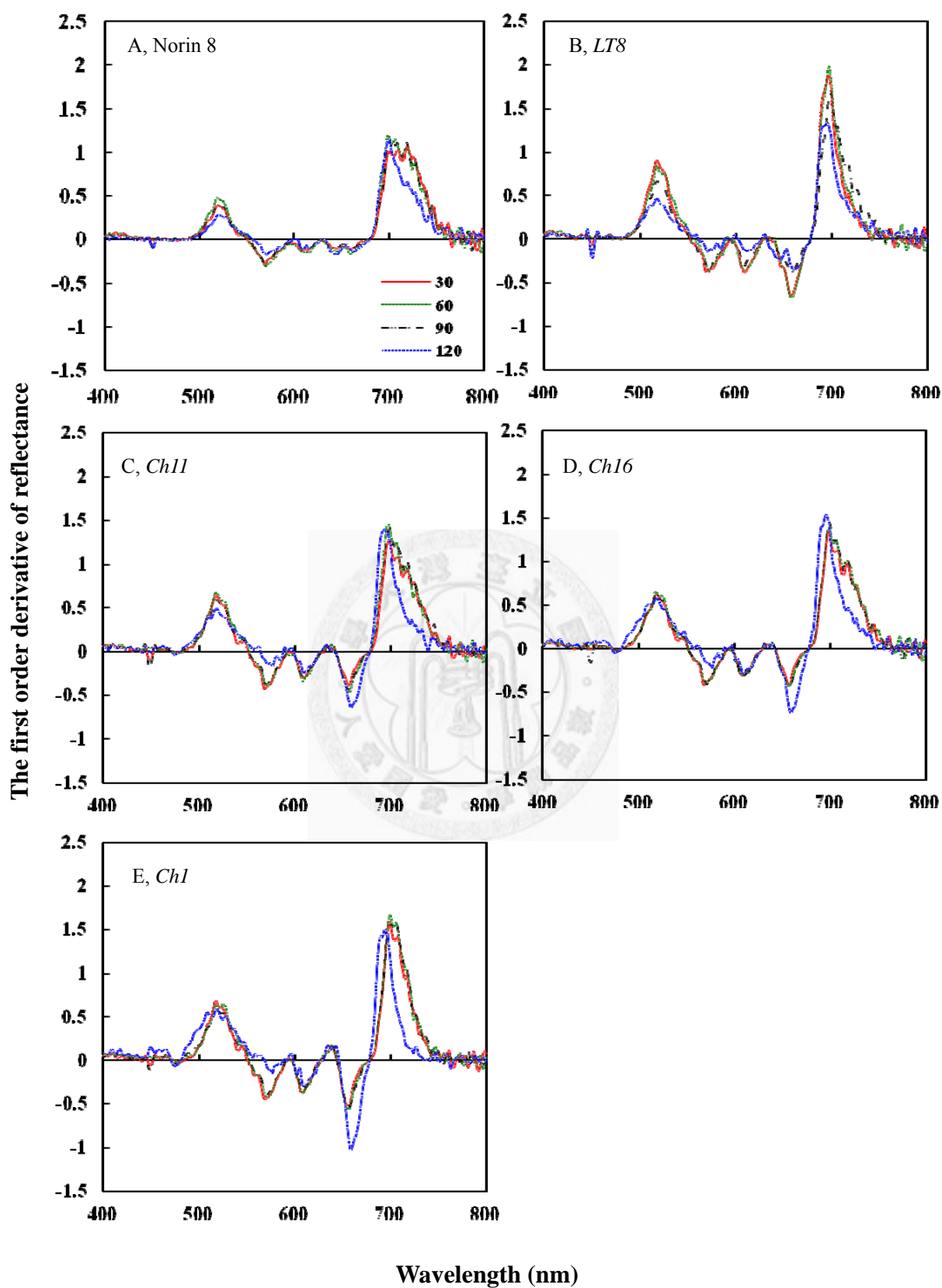


圖 2-3、農林 8 號及其突變種生育期間葉片微分光譜之變化。

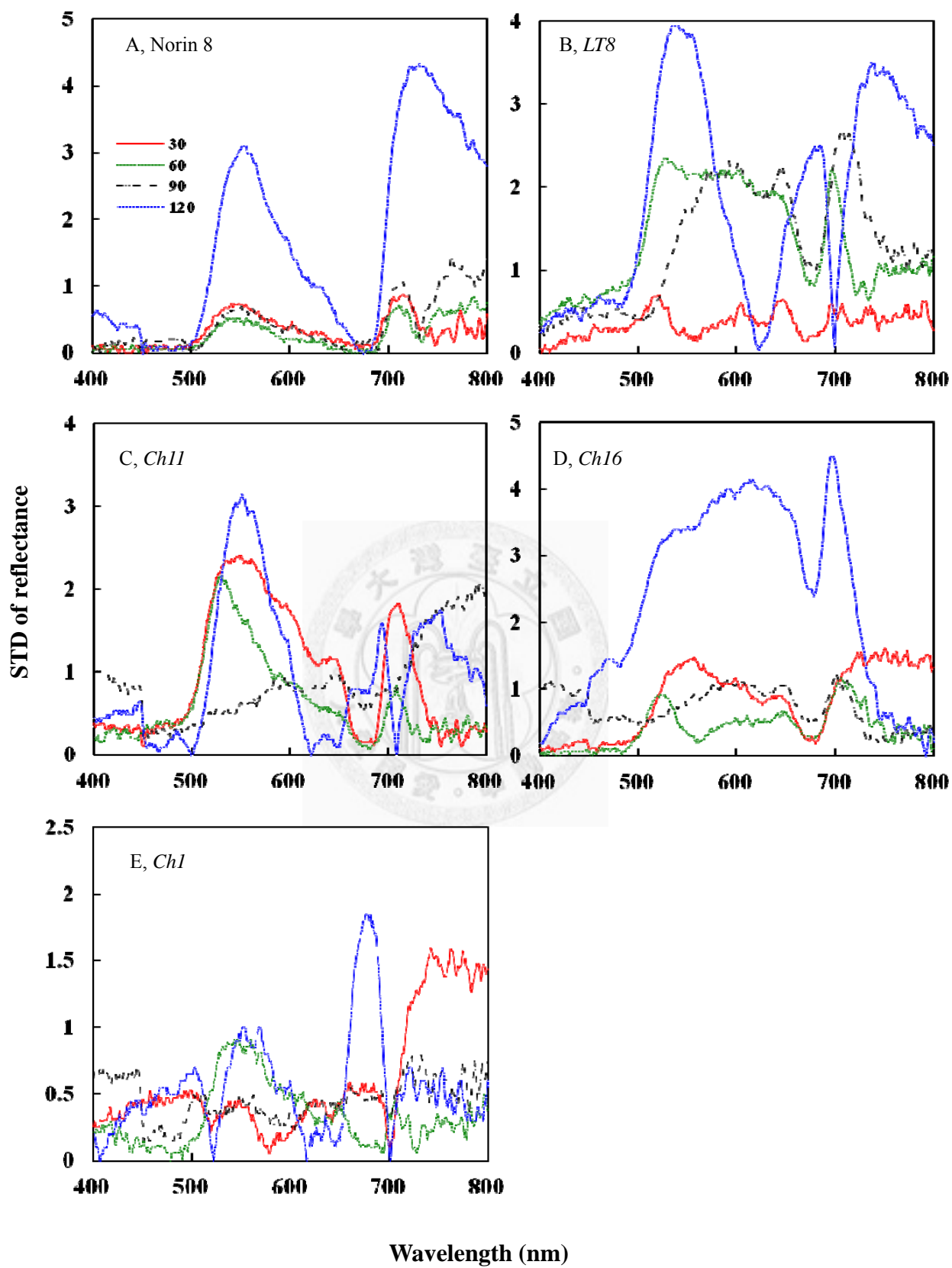


圖 2-4、農林 8 號及其突變種生育期間葉片光譜反射率之標準差變化。

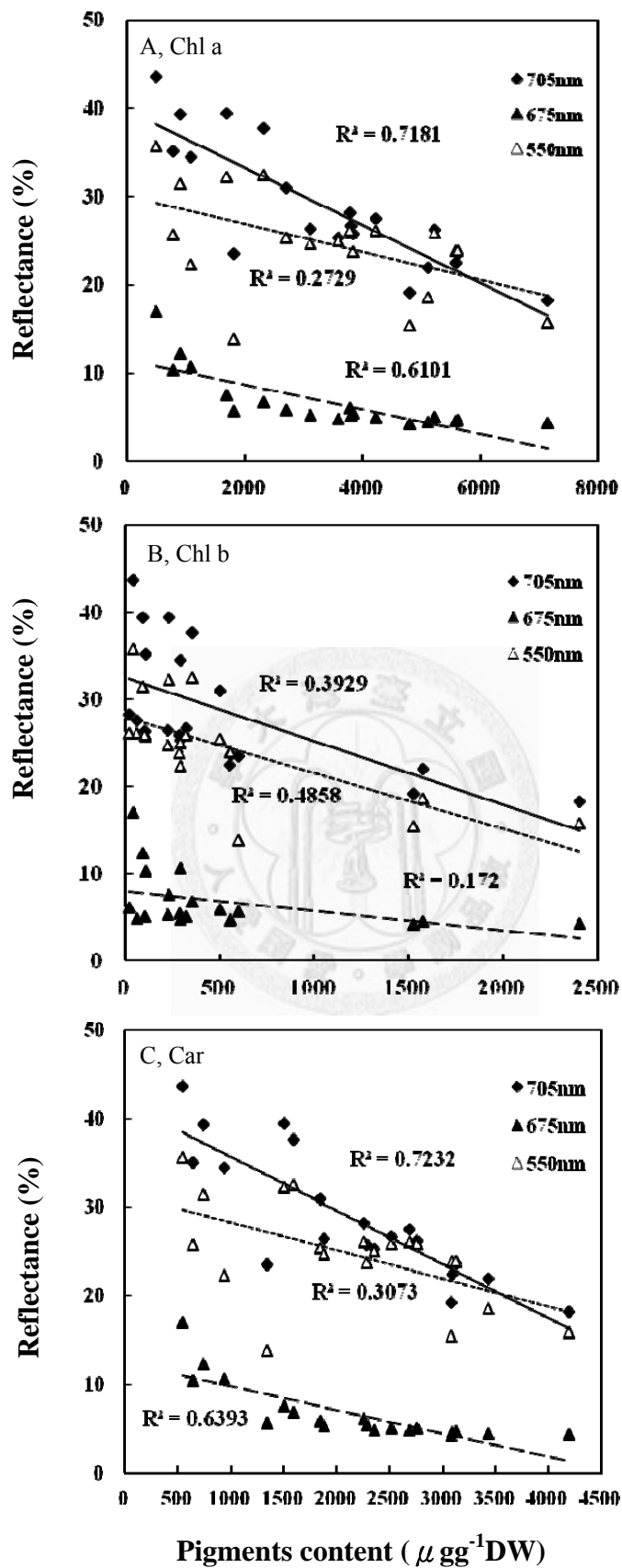


圖 2-5、農林 8 號及其突變種生育期間色素含量與葉片單波段反射率之相關性分析。

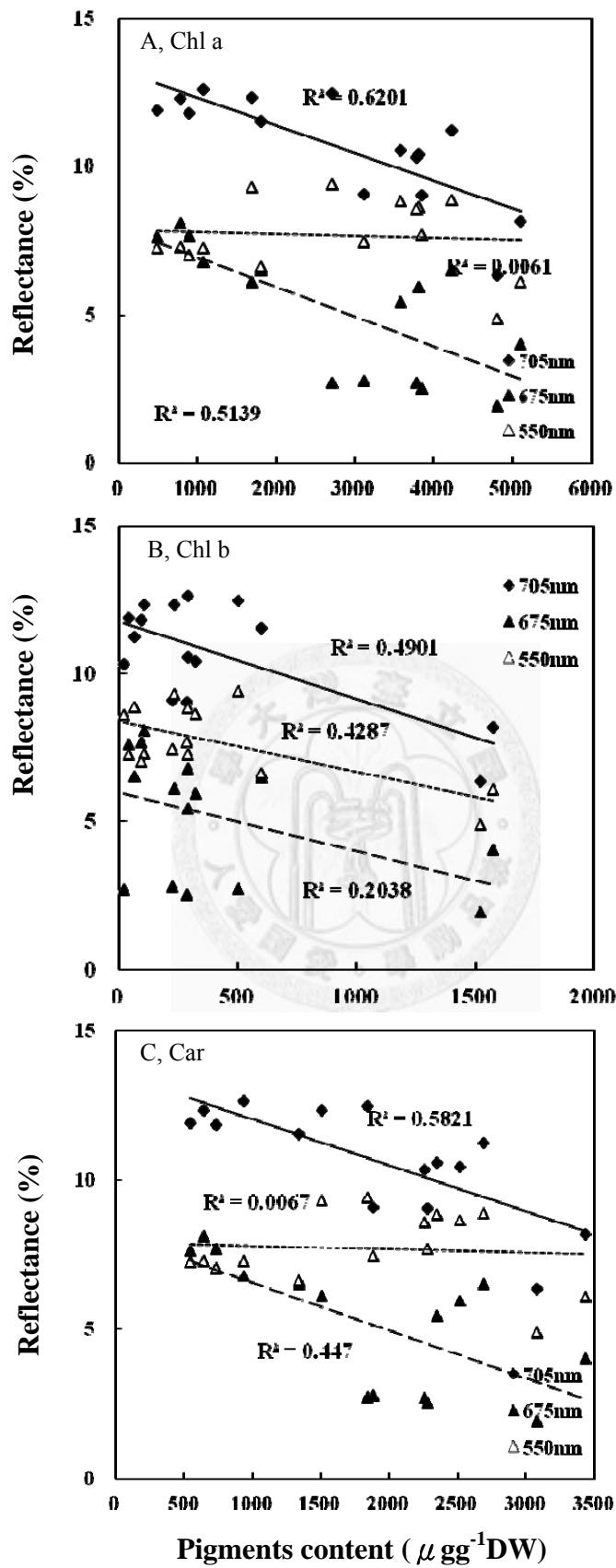


圖 2-6、農林 8 號及其突變種生育期間色素含量與植冠單波段反射率之相關性分析。

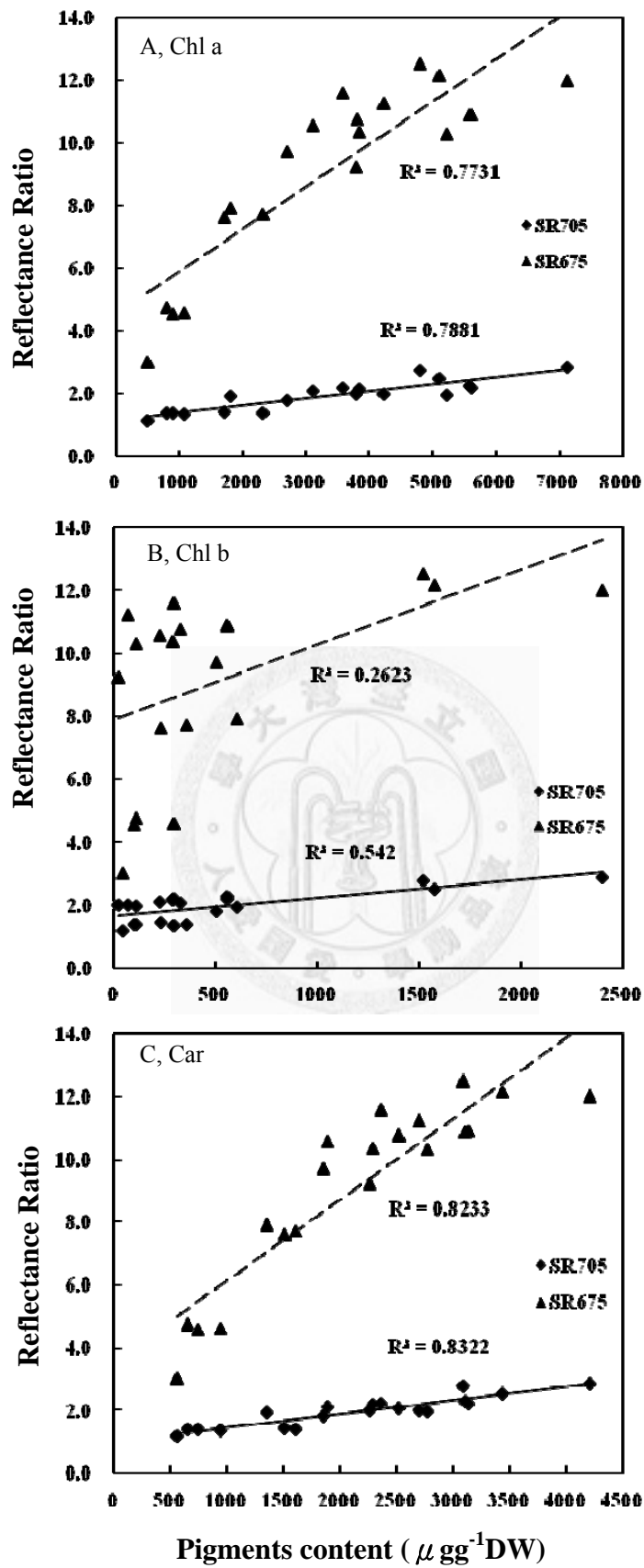


圖 2-7、農林 8 號及其突變種生育期間色素含量與葉片 SRVI 之相關性分析。

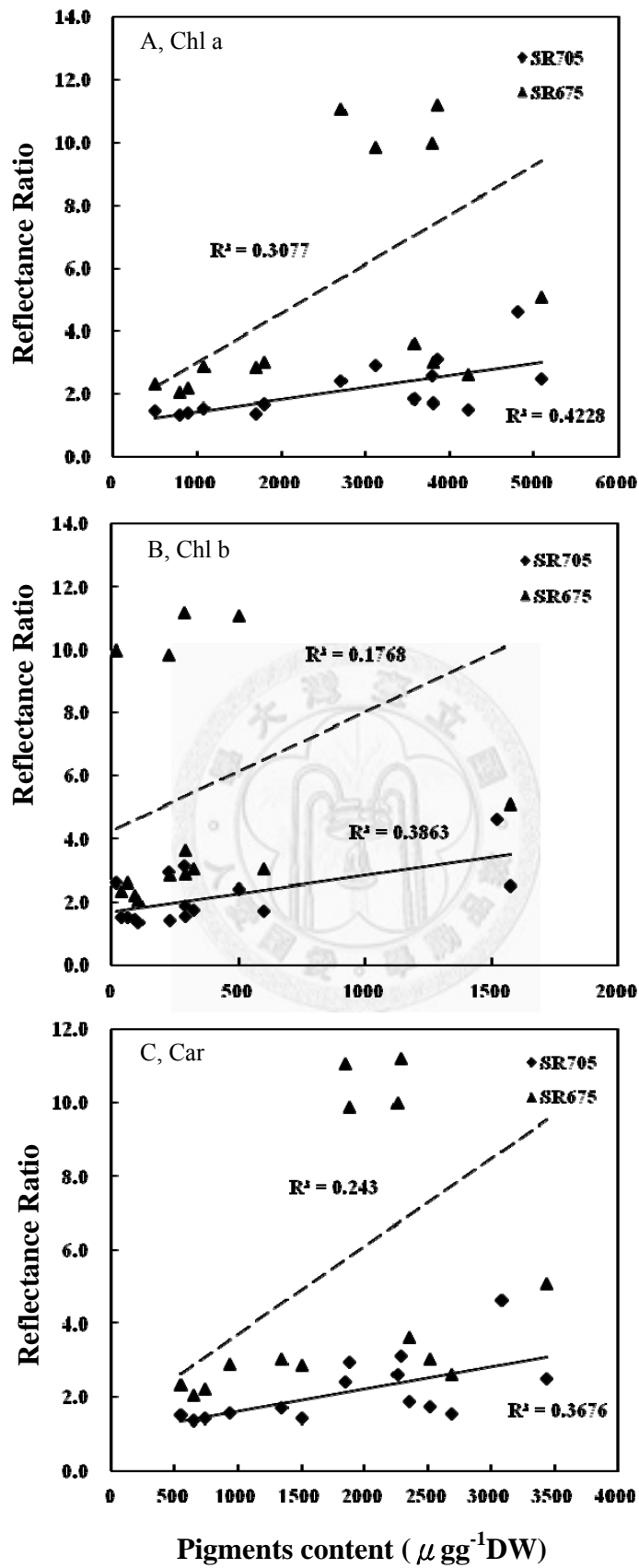


圖 2-8、農林 8 號及其突變種生育期間色素含量與植冠 SRVI 之相關性分析。

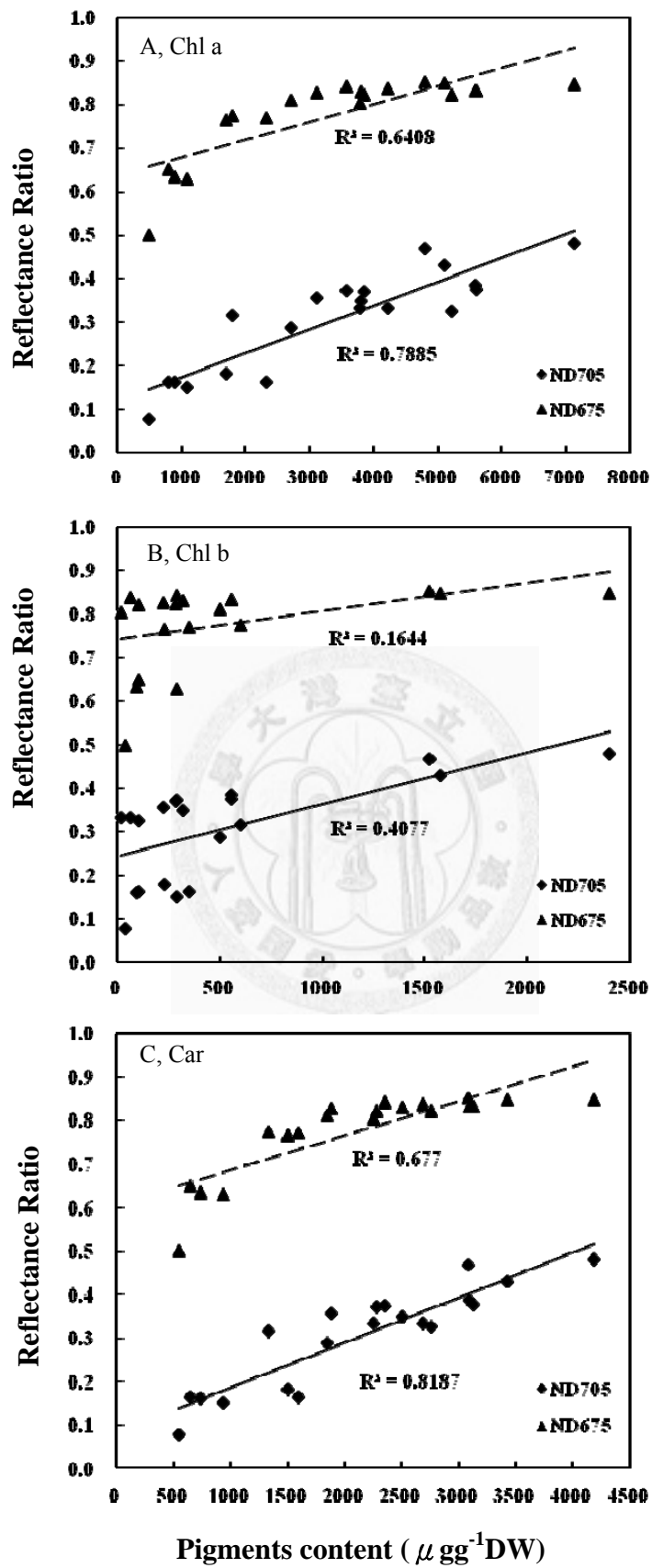


圖 2-9、農林 8 號及其突變種生育期間色素含量與葉片 NDVI 之相關性分析。

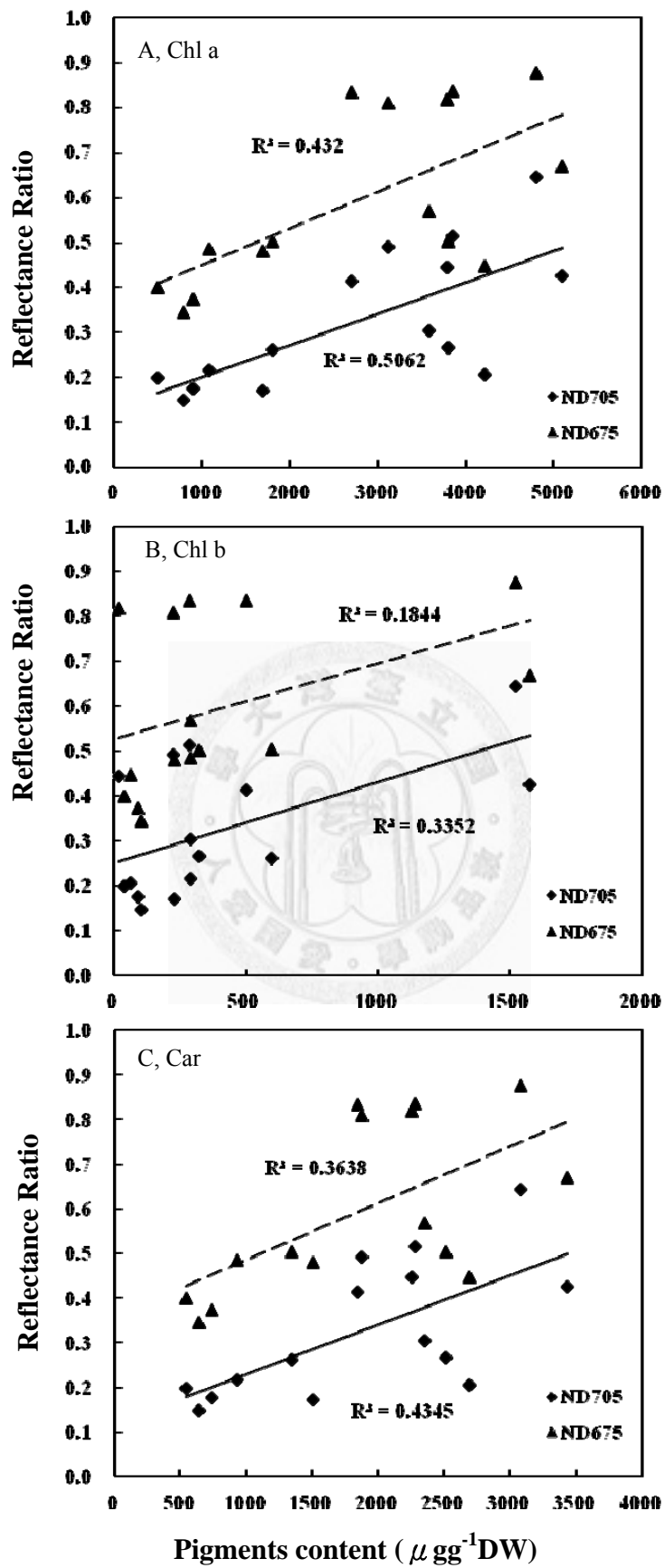


圖 2-10、農林 8 號及其突變種生育期間色素含量與植冠 NDVI 之相關性分析。

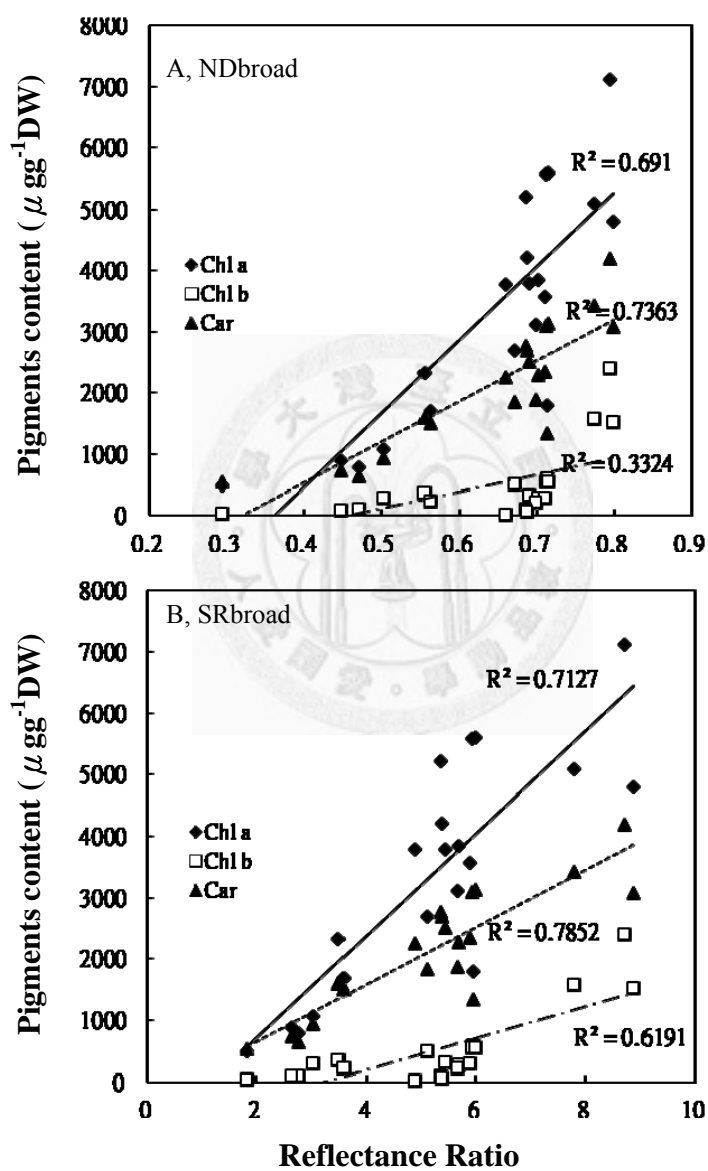


圖 2-11、農林 8 號及其突變種生育期間色素含量與葉片 $\text{SRVI}_{\text{broad}}$ 及 $\text{NDVI}_{\text{broad}}$ 之相關性分析。

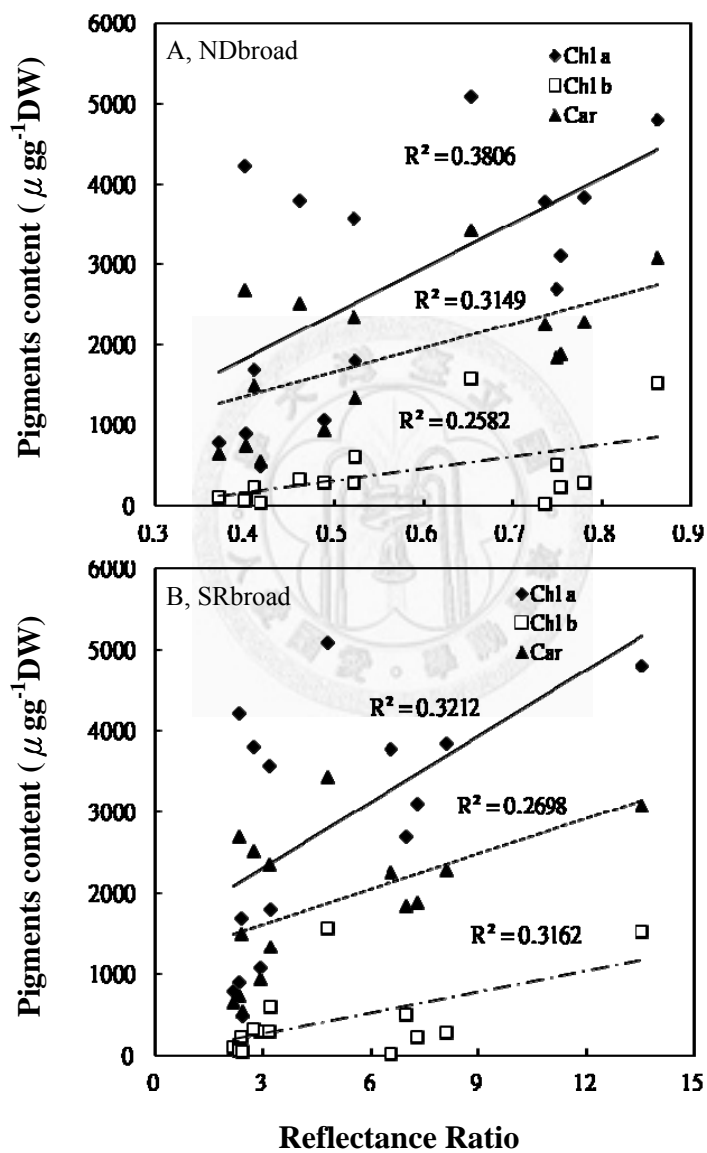


圖 2-12、農林 8 號及其突變種生育期間色素含量與植冠 $\text{SRVI}_{\text{broad}}$ 及 $\text{NDVI}_{\text{broad}}$ 之相關性分析。

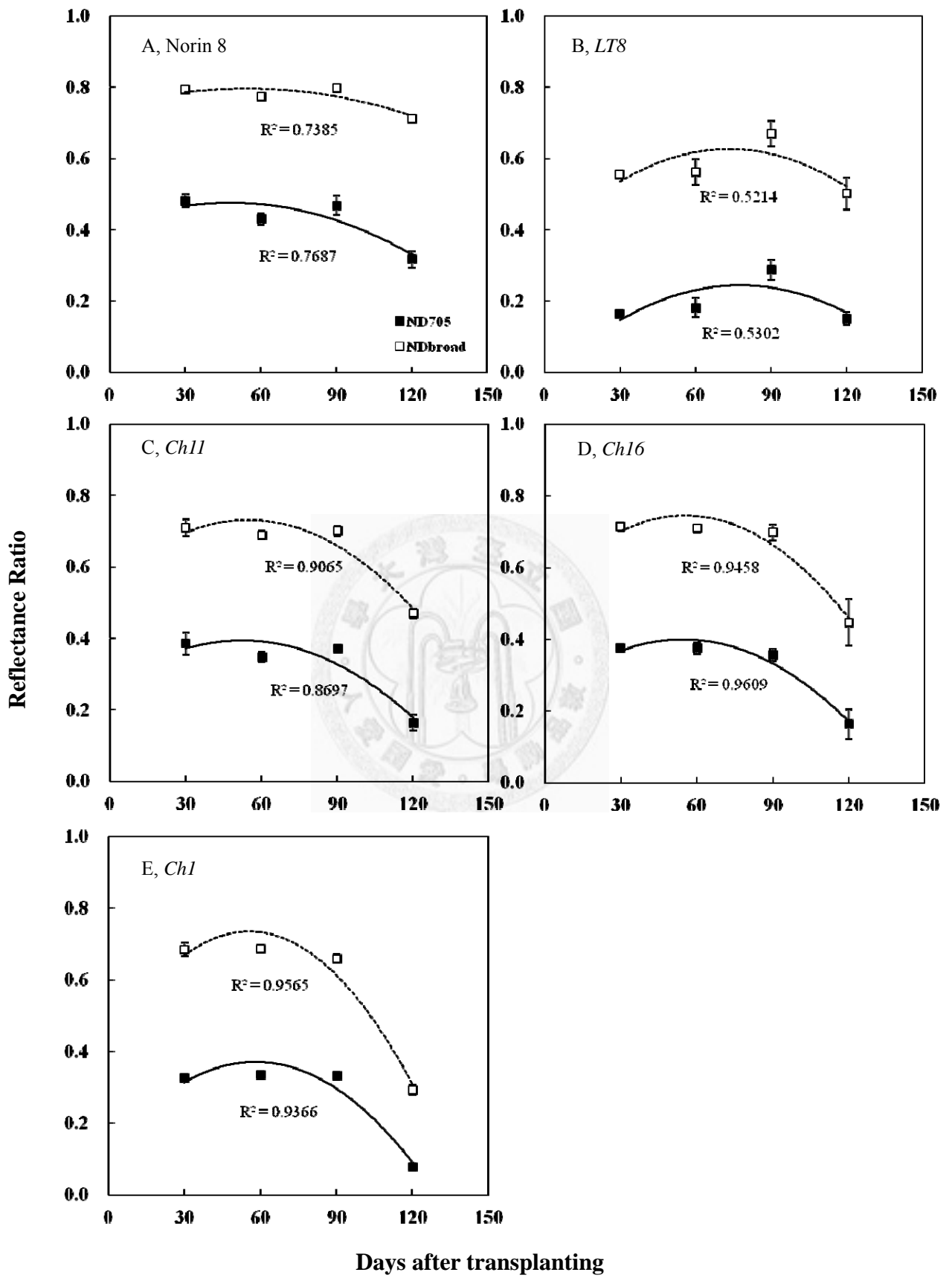


圖 2-13、農林 8 號及其突變種生育期間葉片反射光譜之植被指數變化。

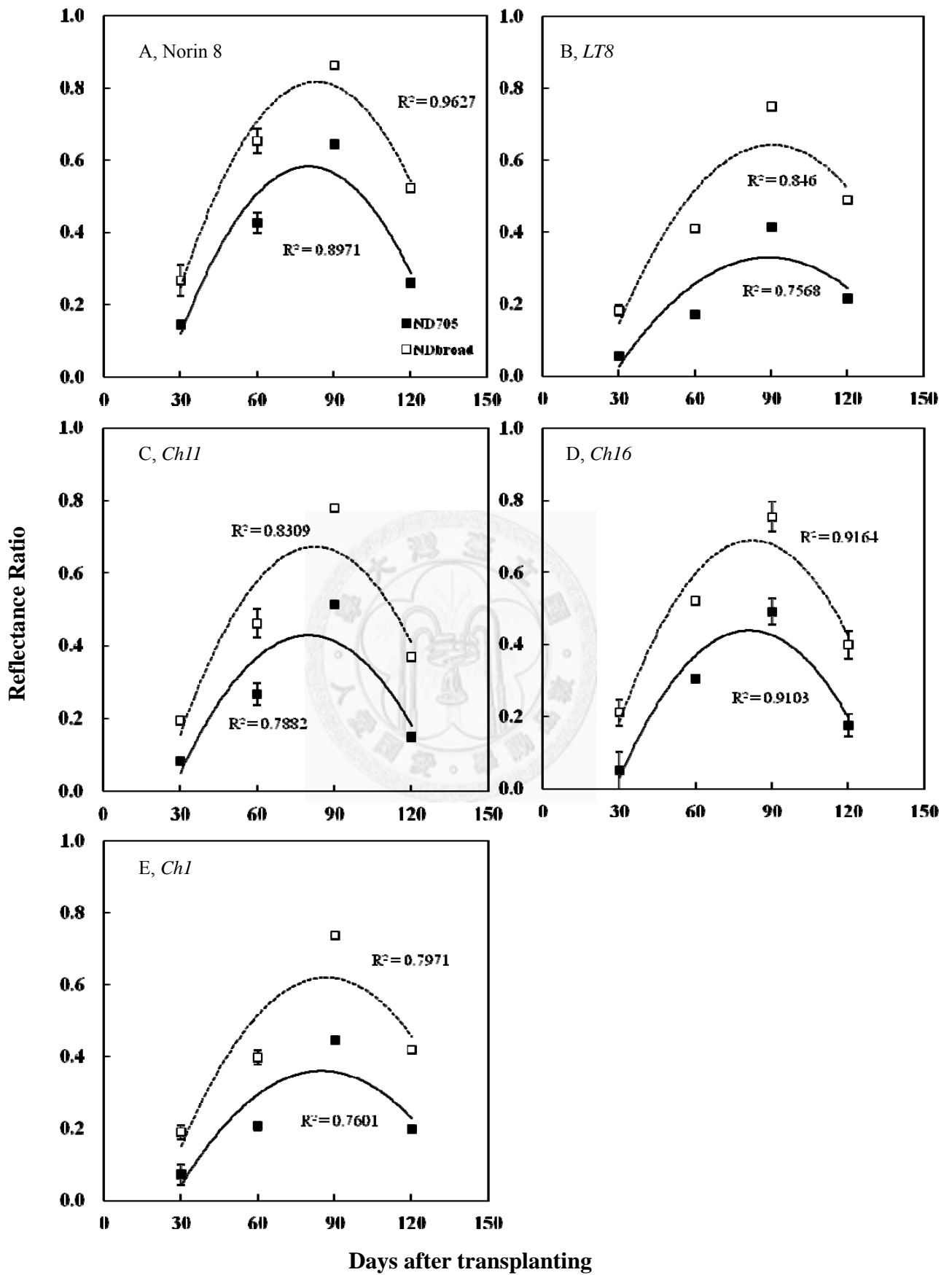


圖 2-14、農林 8 號及其突變種生育期間植冠反射光譜之植被指數變化。

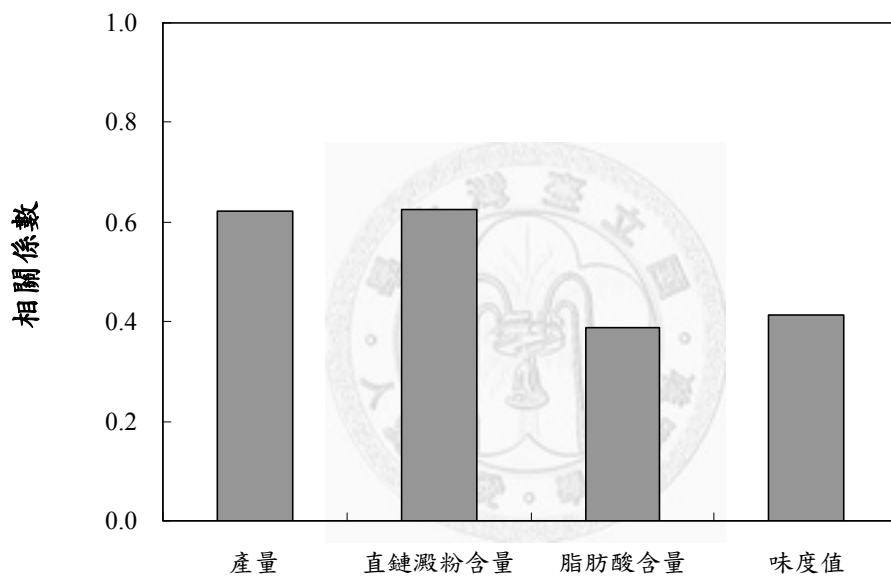


圖 2-15、農林 8 號及其突變種移植後第 60 天葉片反射光譜 NDVI₇₀₅ 植被指數與稻穀產量及稻米品質之相關係數。

第三章 地真樣區農藝性狀調查

一、前言

水稻是臺灣地區主要的糧食作物，正確掌握水稻種植面積和產量是糧政單位重要的工作之一。目前主要利用航照調查全台灣地區各年期稻作種植面積，此種作業方式雖然準確，但工作流程不連貫，耗費人力且時效性差，因此已有許多相關研究，探討如何由遙測影像判釋稻作面積(陳與曾，1999；邵與史，2000；蕭等，2000；蕭等，2004)。農委會科技計畫則自90年度起即由成大、台大、逢甲、和工研院等四個工作團隊探討如何由衛星遙測影像自動判釋水稻種植面積。

除水稻種植面積外，糧政單位為掌握糧源還需調查水稻的產量，目前主要係利用分散於全省約1500個調查點的單位面積產量調查資料，再配合上述水稻種植面積資料估算全省的水稻產量。此種作業方式必須於水稻收穫後才能獲得所需資料，不僅需耗費大量調查人力且時效性差，也不利於公糧收購量與拋售時機、糧商進出口量估算、糧商與農政單位對各期米質的先期掌握、稻作災害保險等決策的訂定與推行，因此如何利用收穫前的遙測影像推估當期作稻作產量的研究乃具有實務工作上的重要意義，將是另一高難度挑戰。

劉等(2002)曾利用直昇機搭載DMSV多頻譜觀測儀獲取影像，並依據國外研發之模式估算田間水稻產量。吳等(2002)則利用SPOT多時段影像與地真產量資料推導估算水稻產量的迴歸模式。申等(2002)利用多年期地真水稻植被反射光譜測定資料，指出在抽穗期間水稻植被反射光譜中綠光段(GRN)、紅光段(RED)、和近紅外光段(NIR)的動態變動最小，因此適合作為建立推估當期作水稻產量之遙測模式的

自變數，並利用波段比值(NIR/RED、NIR/GRN)已分別建立可估測一、二期作水稻產量所需之複迴歸模式，且經驗證可用於推估新年期和遭受乾旱逆境之水稻產量(申等，2003；Chang *et al.*, 2005)。

應用遙測技術進行稻米品質判釋，將涉及對於植被反射光譜細微差異變動之辨認。例如，Shibayama *et al.* (1993)利用水稻植被在620和760nm的反射值(兩變數直線迴歸式)，或400、620和880nm的反射值(三變數直線迴歸式)與葉片氮素含量有最好之相關。Inoue *et al.* (1998)指出 $[(R_{1100}-R_{660})/(R_{1100} + R_{660})]$ 或內含R550,R830, R1650, 與R2200之四變數迴歸式與水稻葉片氮含量有線性相關。申等(2000)指出 $dR/d\lambda |_{735}$ 除可以分辨稻株體內氮素的濃度外，也具有可區別田間稻株氮營養狀況空間分佈的能力。進而利用 $dR/d\lambda |_{735}$ 建立稻株氮營養遙測模式，並於台北、台中、嘉義、屏東等地進行不同地區多年期之田間驗證，測試結果均指出所建立的稻株氮營養遙測模式可以快速鑑別田間穗肥施用期間稻株的氮營養狀態，足以提供做為田間穗肥精準施用的依據(申等，2001；Lee *et al.*, 2005)。除了稻株營養狀態及葉片氮素含量外，水稻米粒品質之遙測判釋亦有學者進行中，Sun *et al.* (2005)應用高光譜反射率建立參數預測水稻葉片葉綠素，以及水稻米粒蛋白質含量，結果顯示利用遙測技術推估水稻米粒蛋白質含量進而估測稻米品質是可行的。

精準的預估農作物產量是農業產官學界長期以來追求的目標，此需包括作物面積的判識與作物單位產量的推估，二者相乘才能得到總產量。作物產量的預估通常透過不同生長階段的農藝性狀與其產量之相關性分析。以水稻產量預估為例，葉面積與葉綠素二種農藝性狀與產量有高度相關(Raj and Tripathi, 1999)。然而，葉綠素含量則隨植物年齡、品系種類、生長季節而異(Ramesh *et al.*, 2002)。因此，如何在水稻生長發育過程，運用其最適當植齡以達到最精準的產量預估，極

為重要。

由於水稻氮肥隨施量之增加其產量與葉綠素含量亦隨之增加，罹患病蟲害的機率也隨之增高，又其稻米品質則隨之降低。施肥過量之稻株生長過度繁茂而易倒伏，其稻米品質往往欠佳(Chamura et al., 1972)。米粒粗蛋白含量隨著氮肥施用量增加而增加，品質因而降低(賴等，1997)。

如何精準判識全國水稻一年二期水稻栽種面積與如何利用收穫前的遙測影像推估當期作稻作產量的研究，將是二大挑戰。同時解決一期與二期水稻栽種面積與單位產量與米質之快速與精準的先期推估，才能真正建構現代化水稻精準管理之模式。



二、材料與方法

水稻產量地真樣區設置

本研究之水稻樣區設置在彰化縣竹塘鄉及桃園縣新屋鄉。2006 年二期稻作及 2007 年一期稻作種植品種、插秧及收穫日期如表 3-1 所示。氮肥施用量依研究所需設定為四個等級(0、60、120、180 kg/ha)，另外磷、鉀肥則分別為 60、60 kg/ha，肥料施用量及施用時程如表 3-2 所示。水稻生育期間各地真樣區定期進行水稻生育性狀調查，包括株高、分蘗數、SPAD 及生化測定葉綠素含量，並進行植被地真光譜測定。

農藝性狀調查

水稻田間調查方式為每 1~2 周取樣調查一次，調查項目如下：

1. 株高：從土壤表面測量起至稻株最高點之距離。
2. 分蘗數：計算土壤表面以上 20 公分處，至少具有二葉之稻稈數目。
3. SPAD 葉綠素計測定：以 Minolta SPAD 502 葉綠素計測定水稻葉片，直接紀錄其讀值。
4. 葉綠素及類胡蘿蔔素含量生化測定：根據 Yang *et al.* (1998)所建立之方法進行測定。水稻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 光譜儀(spectrophotometer)測定 $A_{663.6}$ 、 $A_{646.6}$ 及 $A_{440.5}$ 的吸收值。三者分別為 Chl *a*、Chl *b* 及 Car 的強吸收處。以 Porra *et al.* (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。

植被地真光譜測定

於水稻生育期間，定期以可攜式光譜儀 LI-1800 (LI-COR, inc)測定植冠反射光譜。所有植被反射光譜的測量工作皆於上午十時至下午二時之間完成，以減少植被反射光譜受太陽入射角變動之影響。



三、結果與討論

台灣地區稻作插秧日期由南部地區最早開始，愈往北部則插秧日期愈延後。中部地區竹塘試區 2006 年二期稻作種植台梗 11 號(TK 11)水稻品種，插秧日期及收穫日期分別為 7 月 24 日及 11 月 15 日，移植後生育日數約 115 日；2007 年一期稻作種植台梗 9 號(TK 9)水稻品種，插秧日期及收穫日期分別為 2 月 11 日及 6 月 19 日，移植後生育日數約為 128 日。北部地區新屋試區 2006 年二期稻作種植台梗 14 號(TK 14)水稻品種，插秧日期及收穫日期分別為 8 月 1 日及 11 月 26 日，移植後生育日數約 118 日；2007 年一期稻作種植台梗 14 號(TK 14)水稻品種，插秧日期及收穫日期分別為 2 月 28 日及 7 月 15 日，移植後生育日數約為 137 日(表 3-1)。

一、竹塘試區 2006 年二期稻作

就株高而言，不論氮肥等級處理，其株高隨著水稻生育日數漸增，由營養生長期進入生殖生長期，水稻株高快速增加，至充實期達到最高，而不再增高(圖 3-1)。增施氮肥可以明顯地增加水稻株高，在生育末期 N180 處理與 N0 處理水稻株高差距達 15 公分以上，N180 處理水稻株高最高，達 108 公分，N0 處理水稻株高最低，僅 93 公分，而 N60 及 N120 處理水稻株高差距不明顯(圖 3-1)。分蘗數隨著水稻生育日數漸增，至最大分蘗期(約 50 天左右)達最多，而後即不再增加(圖 3-2)。氮肥處理對於分蘗數有顯著性效應存在，N180 處理其分蘗數與 N0 處理比較相差 6 以上，在成熟末期，N180 處理分蘗數達 22.2 支/叢，而 N0 處理僅 15.9 支/叢(圖 3-2)。在水稻生育期間，不論氮肥等級處理，從營養生長期進入生殖生長期，葉綠素計讀值的變化不大，在進入成熟期後，葉綠素計讀值即明顯下降(圖 3-3)。氮肥處理對於葉綠素計讀值有顯著性效應存在，增施氮肥可以明顯地增加葉綠素計讀值(圖 3-3)。

水稻葉片葉綠素含量在進入生殖生長期後降低，但在穗肥施用(60 天)後，N60、N120 及 N180 處理之葉片葉綠素含量有些微增加或減緩下降趨勢，在進入成熟期後葉綠素含量即大幅下降。增施氮肥處理明顯的增加葉片葉綠素含量(圖 3-4)。增加氮肥的施用，葉綠素 a/b 比值會稍微降低；在水稻生育末期，N0、N60、及 N120 處理葉綠素 a/b 比值會稍微增加，但不論氮肥等級處理及生育時期，所有葉片之葉綠素 a/b 比值都沒有太大的變化，維持在 3~3.5 左右(圖 3-5)。葉片類胡蘿蔔素含量之變化趨勢與葉綠素含量相類似，在進入生殖生長期後降低，在穗肥施用後，N60、N120 及 N180 處理之葉片類胡蘿蔔素含量有些微增加或減緩下降趨勢，在進入成熟期後類胡蘿蔔素含量持續下降。氮肥施用量的增加明顯的增加葉片類胡蘿蔔素含量(圖 3-6)。類胡蘿蔔素/葉綠素比值在營養生長期及生殖生長期，不同氮肥等級處理間的差異並不大，但是進入成熟期後，類胡蘿蔔素/葉綠素比值隨即明顯增高，且氮肥施用愈多，類胡蘿蔔素/葉綠素比值愈低(圖 3-7)。

二、竹塘試區 2007 年一期稻作

竹塘試區 2007 年一期稻作種植台稉 9 號水稻品種。不論氮肥等級處理，其株高隨著水稻生育日數漸增，由營養生長期進入生殖生長期，水稻株高快速增加，至充實期達到最高，而不再增高(圖 3-8)。增施氮肥可以明顯地增加水稻株高，在生育末期 N180 處理與 N0 處理水稻株高差距達 13 公分以上，N180 處理水稻株高最高，達 109 公分，N0 處理水稻株高最低，僅 86 公分(圖 3-8)。分蘗數隨著水稻生育日數漸增，至最大分蘗期(約 60 天左右)達最多，而後略為減少，故成熟末期分蘗數略少於最大分蘗期(圖 3-9)。氮肥處理對於分蘗數有顯著性效應存在，N180 處理其分蘗數與 N0 處理比較相差 7 以上，在成熟末期，N180 處理分蘗數達 26 支/叢，而 N0 處理僅 18.6 支/叢(圖 3-9)。在水稻生育期間，葉綠素計讀值在營養生長末期降低。進入生殖生長期後，N180 處理葉綠素計讀值呈現增加趨勢，N0 處理

則呈現降低趨勢，而 N60 及 N120 處理葉綠素計讀值則變化不大。但在進入成熟期，不論氮肥等級處理，葉綠素計讀值在成熟期初期皆為增加，而在末期迅速降低(圖 3-10)氮肥處理對於葉綠素計讀值有顯著性效應存在，增施氮肥可以明顯地增加葉綠素計讀值(圖 3-11)。

不論氮肥等級處理，水稻葉片葉綠素含量在營養生長期末期降低，在生殖生長期間葉片葉綠素含量變化不大，在進入成熟期後，除 N180 處理外，葉綠素含量先增加，然後降低。而增施氮肥處理明顯的增加葉片葉綠素含量(圖 3-11)。增加氮肥的施用，葉綠素 a/b 比值會稍微降低，但不論氮肥等級處理或任何生育時期，所有葉片之葉綠素 a/b 比值都沒有太大的變化，維持在 3~3.5 左右(圖 3-12)。葉片類胡蘿蔔素含量之變化趨勢與葉綠素含量相類似，在營養生長期末期降低，在生殖生長期間葉片類胡蘿蔔素含量變化不大，在進入成熟期後，除 N180 處理外，葉綠素含量先增加，然後降低。而增施氮肥處理明顯的增加葉片葉綠素含量(圖 3-13)。增加氮肥的施用，類胡蘿蔔素/葉綠素比值會稍微降低，生殖生長期間，類胡蘿蔔素/葉綠素比值會稍微增高，進入成熟期，類胡蘿蔔素/葉綠素比值會先降低再增高(圖 3-14)。

三、新屋試區 2006 年二期稻作

新屋試區 2006 年二期稻作種植台稉 14 號水稻品種。不論氮肥等級處理，其株高隨著水稻生育日數漸增，由營養生長期進入生殖生長期，水稻株高快速增加，至成熟期達到最高，而不再增高(圖 3-15)。增施氮肥可以增加水稻株高，但差距並不大，在生育末期 N180 處理與 N0 處理水稻株高差距僅 4 公分左右，N180 處理水稻株高最高，達 104 公分，N0 處理水稻株高最低，達 100 公分(圖 3-15)。分蘗數隨著水稻生育日數漸增，至最大分蘗期(約 40-50 天左右)達最多，而後即不再增加

(圖 3-16)。氮肥處理對於分蘗數有顯著性效應存在，N180 處理其分蘗數與 N0 處理比較相差 4 以上，在成熟末期，N180 處理分蘗數達 19.57 支/叢，而 N0 處理僅 14.23 支/叢(圖 3-16)。在水稻生育期間，葉綠素計讀值在營養生長末期降低。進入生殖生長期後，不論氮肥等級處理，葉綠素計讀值變化皆不大。但在進入成熟期，葉綠素計讀值皆迅速降低(圖 3-17)。氮肥處理對於葉綠素計讀值有顯著性效應存在，增施氮肥可以明顯地增加葉綠素計讀值(圖 3-17)。

不論氮肥等級處理，水稻葉片葉綠素含量在營養生長期末期降低，在生殖生長期間葉片葉綠素含量變化不大，在進入成熟期後，除 N180 處理外，葉綠素含量皆降低。而增施氮肥處理明顯的增加葉片葉綠素含量(圖 3-18)。增加氮肥的施用，葉綠素 a/b 比值會稍微降低，在營養生長期葉綠素 a/b 比值較低，生殖生長期及成熟期葉綠素 a/b 比值稍微增加。所有葉片之葉綠素 a/b 比值維持在 3~4 之間(圖 3-19)。葉片類胡蘿蔔素含量之變化趨勢與葉綠素含量相類似，在營養生長期末期降低，在生殖生長期間葉片類胡蘿蔔素含量變化不大，在進入成熟期後，除 N180 處理外，葉綠素含量皆降低。而增施氮肥處理明顯的增加葉片葉綠素含量(圖 3-20)。增加氮肥的施用，類胡蘿蔔素/葉綠素比值會稍微降低，生殖生長期間，類胡蘿蔔素/葉綠素比值會稍微增高，進入成熟期，類胡蘿蔔素/葉綠素比值會先降低再增高(圖 3-21)。

圖 3-22 為新屋試區二期稻作台稉 14 號移植後第 58 天之生長狀況，隨著氮肥的增施，水稻植株葉色較為濃綠，生長較為茂盛。圖 3-23 為台稉 14 號移植後第 58 天之植冠反射光譜。反射光譜在可見光區域，氮肥等級處理的影響並不顯著。較大的差異發生在紅光臨界以及近紅外光區域，隨著氮肥的增施，紅光臨界區域及近紅外光區域之反射率明顯的增加(圖 3-23)。以水稻生育期間植冠反射光譜計算植被指數 $NDVI_{705}$ 及 $NDVI_{broad}$ ，其結果如圖二十四及圖二十五所示。不論氮肥等

級處理， $NDVI_{705}$ 及 $NDVI_{broad}$ 在營養生長期間持續增加，在進入生殖生長期時(約 50 天左右)達到最大值，而後在生殖生長期及進入成熟期後，持續的降低。氮肥處理對植被指數 $NDVI_{705}$ 及 $NDVI_{broad}$ 有顯著性的效應存在，氮肥增加施用，植被指數 $NDVI_{705}$ 及 $NDVI_{broad}$ 增高(圖 3-24、圖 3-25)。

四、新屋試區 2007 年一期稻作

新屋試區 2007 年一期稻作種植台稔 14 號水稻品種。不論氮肥等級處理，水稻葉片葉綠素含量在營養生長期末期降低，進入生殖生長期後持續下降，但是在穗肥施用後減緩下降趨勢或些微增加，在進入成熟期後，葉綠素含量皆降低。而增施氮肥處理明顯的增加葉片葉綠素含量(圖 3-26)。增加氮肥的施用，葉綠素 a/b 比值會稍微降低，在水稻生育期間，不論氮肥等級處理，葉綠素 a/b 比值持續增加(圖 3-27)。葉片類胡蘿蔔素含量之變化趨勢與葉綠素含量相類似，不論氮肥等級處理，水稻葉片類胡蘿蔔素含量在營養生長期末期降低，進入生殖生長期後持續下降，但是在穗肥施用後減緩下降趨勢或些微增加，在進入成熟期後，類胡蘿蔔素含量皆降低。而增施氮肥處理會增加葉片類胡蘿蔔素含量(圖 3-28)。增加氮肥的施用，類胡蘿蔔素/葉綠素比值會稍微降低，生殖生長期間，類胡蘿蔔素/葉綠素比值變化不大，進入成熟期，類胡蘿蔔素/葉綠素比值會明顯增高(圖 3-29)。

圖 3-30 為新屋試區一期稻作台稔 14 號移植後第 88 天之生長狀況，隨著氮肥的增施，水稻植株葉色較為濃綠，生長較為茂盛。圖 3-31 為台稔 14 號移植後第 60 天之植冠反射光譜。反射光譜在藍光及紅光區域，N0 處理反射率較高。另外較大的差異發生在紅光臨界以及近紅外光區域，隨著氮肥的增施，紅光臨界區域及近紅外光區域之反射率明顯的增加(圖 3-31)。以水稻生育期間植冠反射光譜計算植被指數 $NDVI_{705}$ 及 $NDVI_{broad}$ ，其結果如圖三十二及圖三十三所示。不論氮肥等級

處理， $NDVI_{705}$ 及 $NDVI_{broad}$ 在營養生長期間持續增加，在進入生殖生長期中末期時(約 90 天左右)達到最大值，而後在生殖生長末期及進入成熟期後，持續的降低。氮肥處理對植被指數 $NDVI_{705}$ 及 $NDVI_{broad}$ 有顯著性的效應存在，氮肥增加施用，植被指數 $NDVI_{705}$ 及 $NDVI_{broad}$ 增高(圖 3-32、圖 3-33)。



表 3-1、水稻試驗地區、品種及插秧、收穫日期。

試 區	品 種	插秧日期	收穫日期
彰化竹塘			
2006 二期作	TK11	7/24	11/15
2007 一期作	TK9	2/11	6/15
桃園新屋			
2006 二期作	TK14	8/01	11/26
2007 一期作	TK14	2/28	7/15

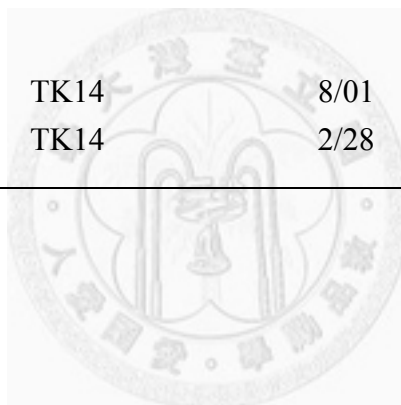


表 3-2、水稻施肥用量與時程*。

項 目	總量 (kg/ha)	基肥	一追	二追	穗肥
施用時期		不施肥	插秧後 8-10 天	一期作插 秧後 22-24 天，二期作 插秧後 18-20 天	幼穗分化至 0.2 公 分，一期稻作約插秧 後 75-85 天，二期稻 作約插秧後 50-60 天
N 分配比例	100%	0%	40%	35%	25%
用量分配	0	0	0	0	0
	60	0	24	21	15
	120	0	48	42	30
	180	0	72	63	45
P 分配比例	100%	0	100%		
用量分配	60	0%	60		
K 分配比例	100%	0%	40%	35%	25%
用量分配	60	0	24	21	15

*以每公頃用量及三要素量表示。

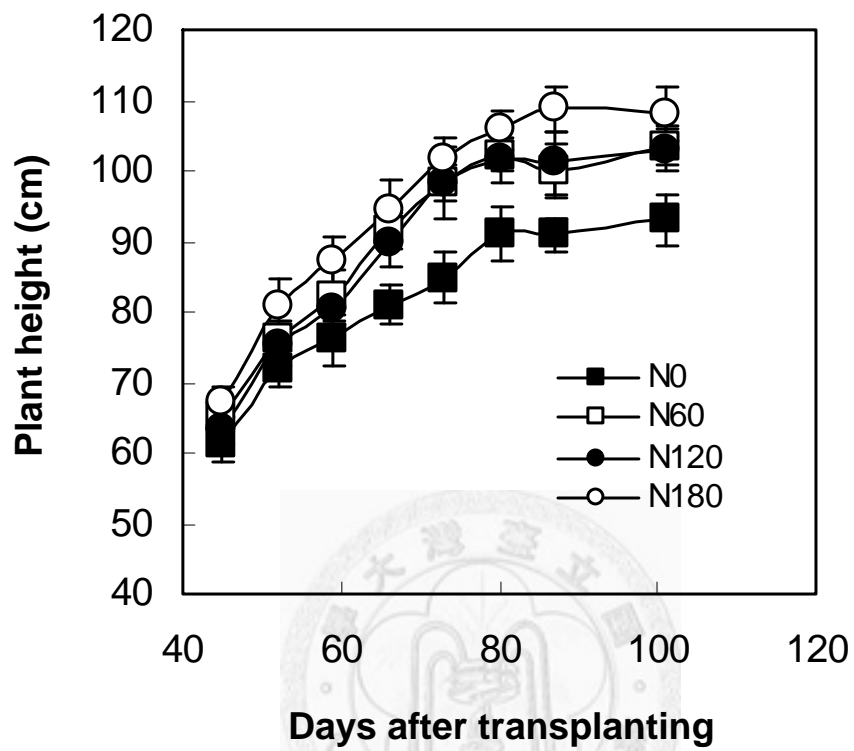


圖3-1、不同氮肥等級處理下竹塘試區2006年二期稻作台種11號水稻生育期間水稻株高變化。

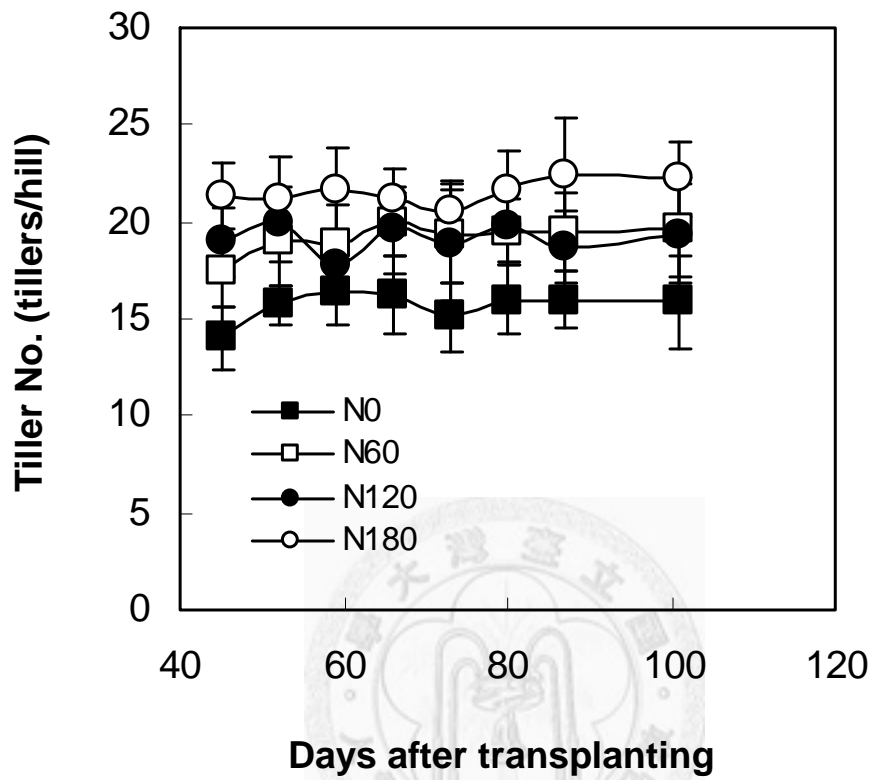


圖3-2、不同氮肥等級處理下竹塘試區2006年二期稻作台稉11號水稻生育期間分蘗數變化。

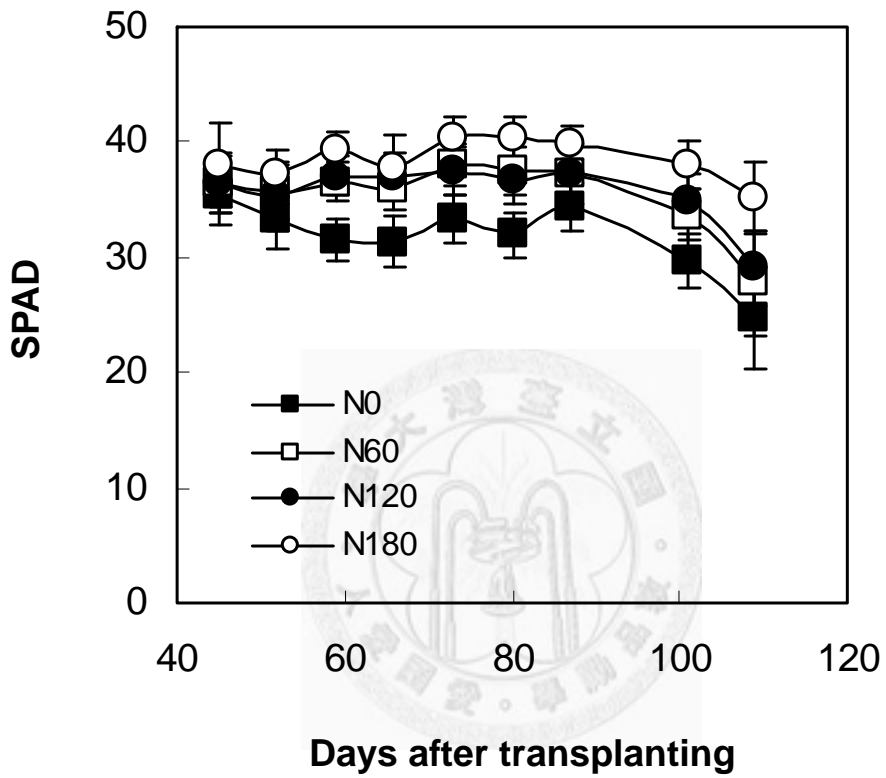


圖3-3、不同氮肥等級處理下竹塘試區2006年二期稻作台稉11號水稻生育期間葉綠素計讀值變化。

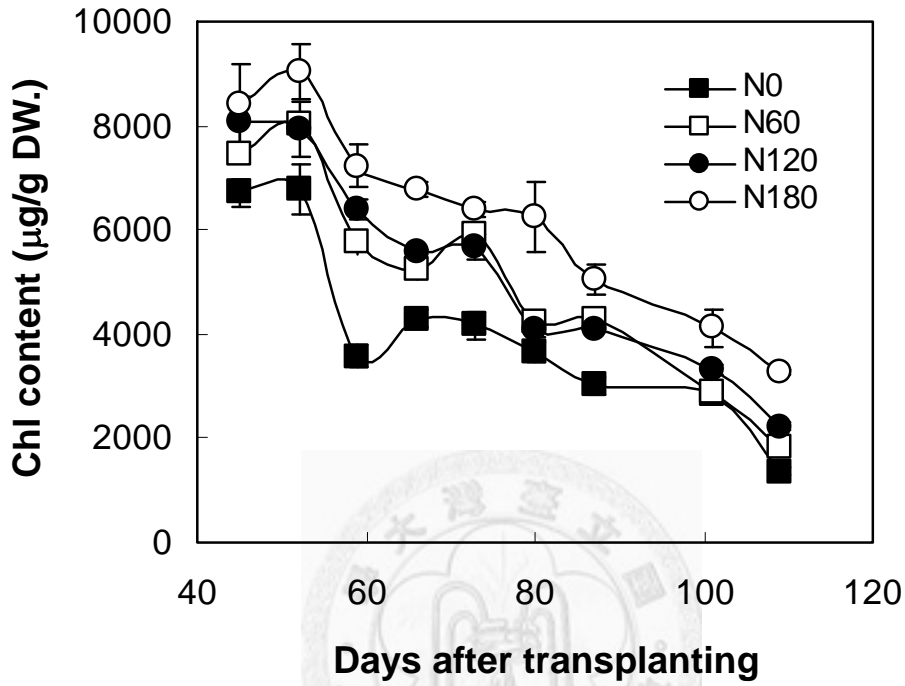


圖3-4、不同氮肥等級處理下竹塘試區2006年二期稻作台稉11號水稻生育期間葉片葉綠素含量變化。

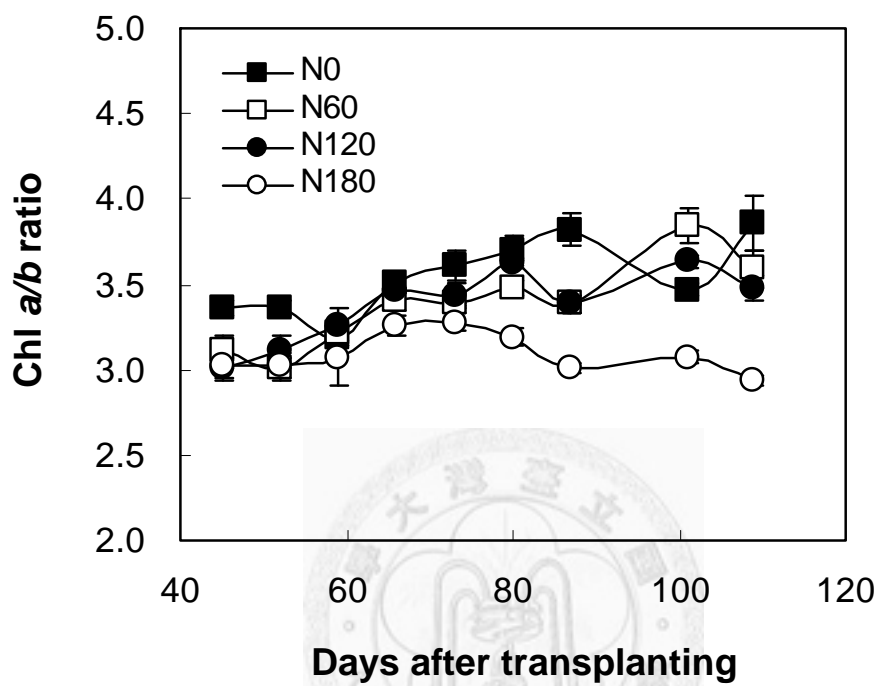


圖3-5、不同氮肥等級處理下竹塘試區2006年二期稻作台稉11號水稻生育期間葉片葉綠素a/b比值變化。

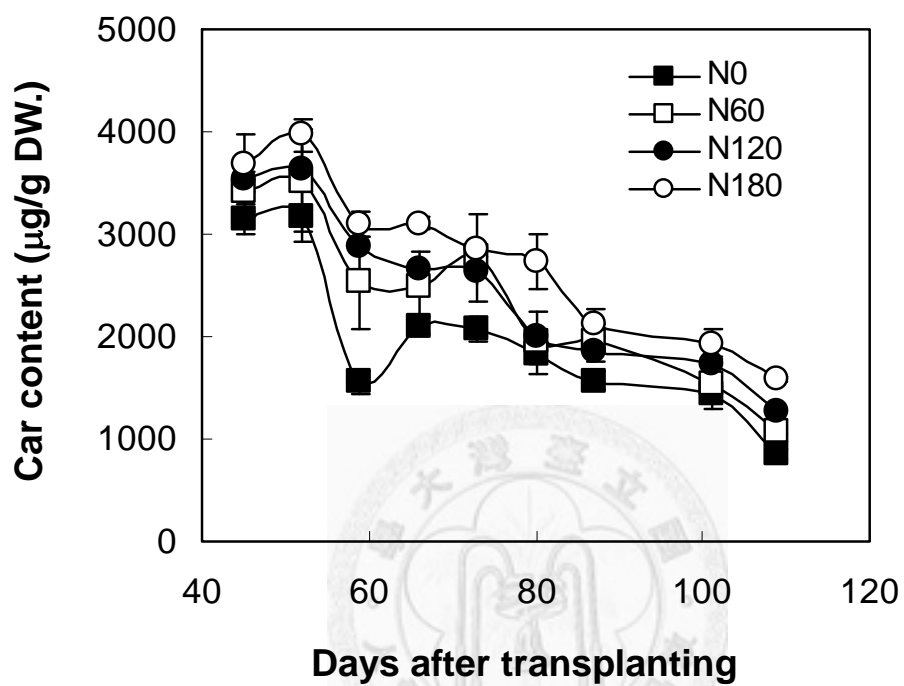


圖3-6、不同氮肥等級處理下竹塘試區2006年二期稻作台種11號水稻生育期間葉片類胡蘿蔔素含量變化。

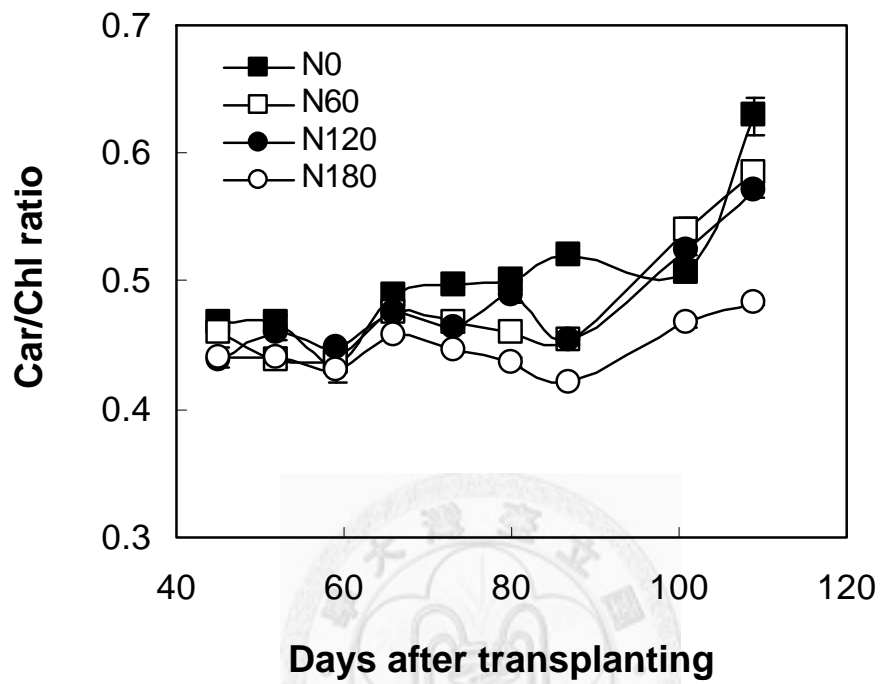


圖3-7、不同氮肥等級處理下竹塘試區2006年二期稻作台稉11號水稻生育期間葉片類胡蘿蔔素/葉綠素比值變化。

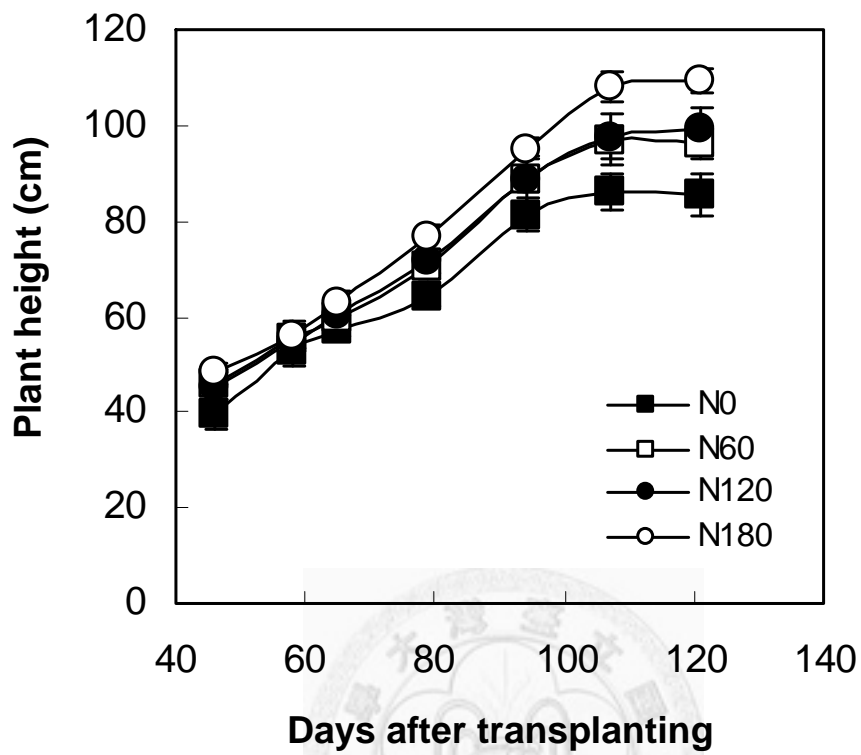


圖3-8、不同氮肥等級處理下竹塘試區2007年一期稻作台稉9號水稻生育期間水稻株高變化。

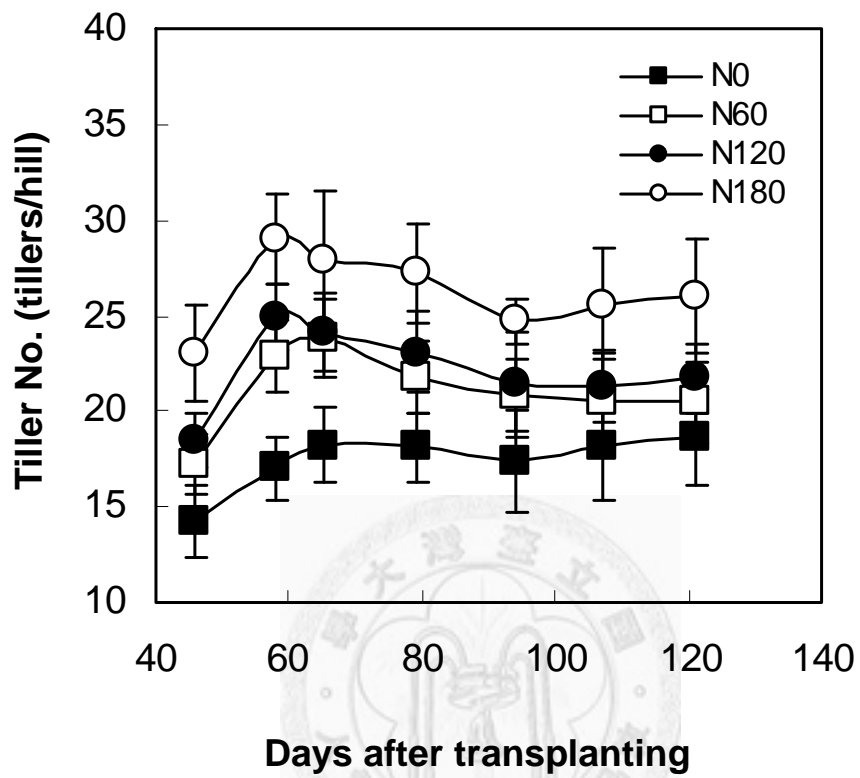


圖3-9、不同氮肥等級處理下竹塘試區2007年一期稻作台稉9號水稻生育期間分蘗數變化。

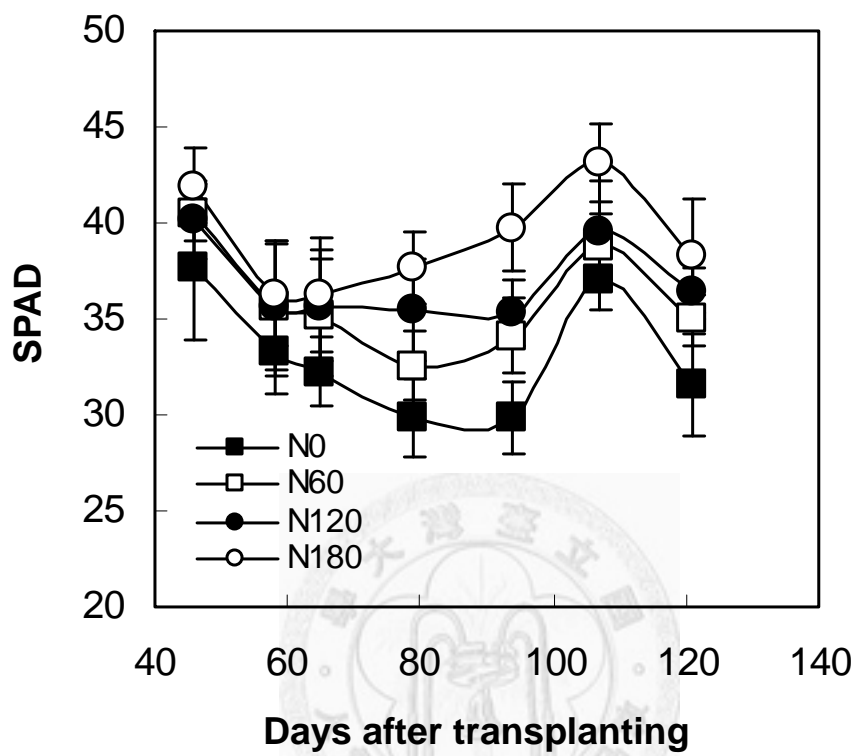


圖3-10、不同氮肥等級處理下竹塘試區2007年一期稻作台稉9號水稻生育期間葉綠素計讀值變化。

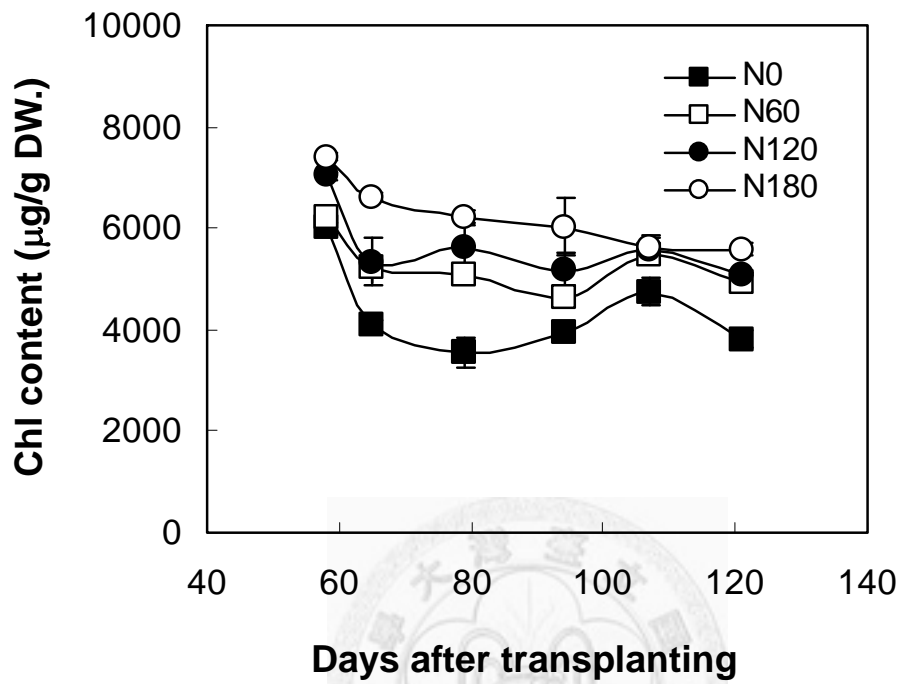


圖3-11、不同氮肥等級處理下竹塘試區2007年一期稻作台稉9號水稻生育期間葉片葉綠素含量變化。

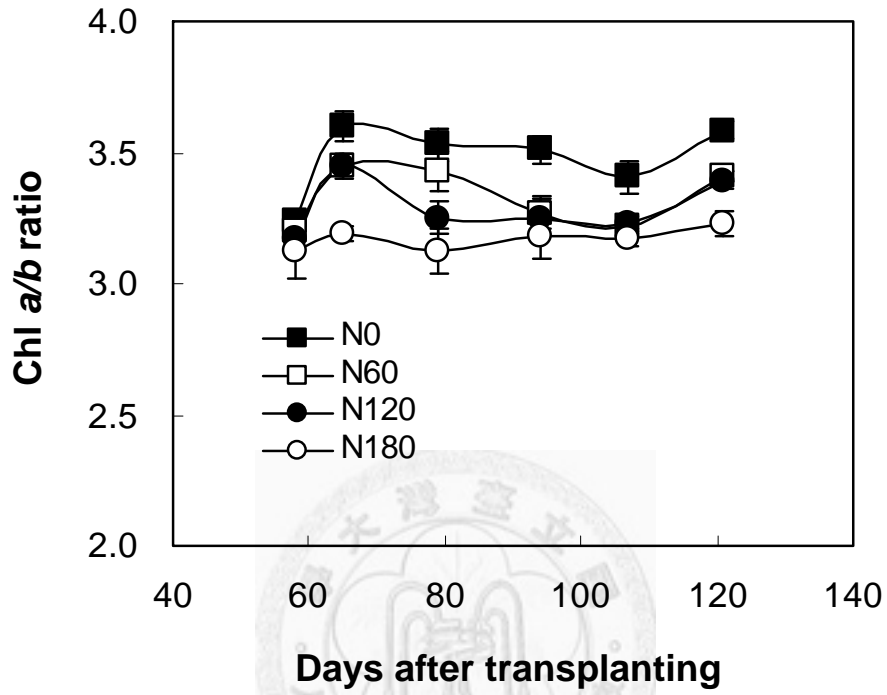


圖3-12、不同氮肥等級處理下竹塘試區2007年一期稻作台稉9號水稻生育期間葉片葉綠素a/b比值變化。

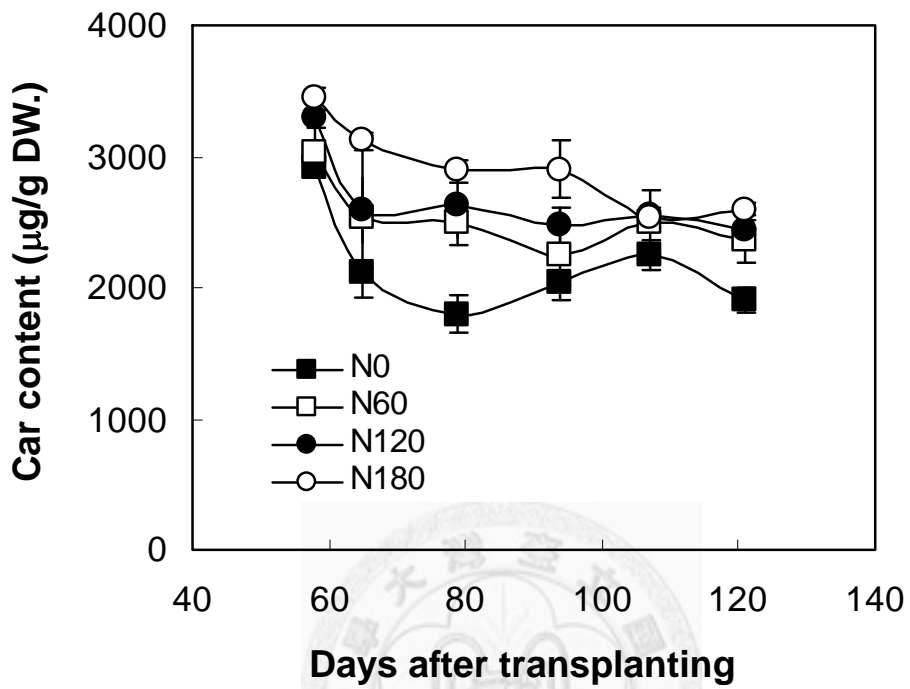


圖3-13、不同氮肥等級處理下竹塘試區2007年一期稻作台稉9號水稻生育期間葉片類胡蘿蔔素含量變化。

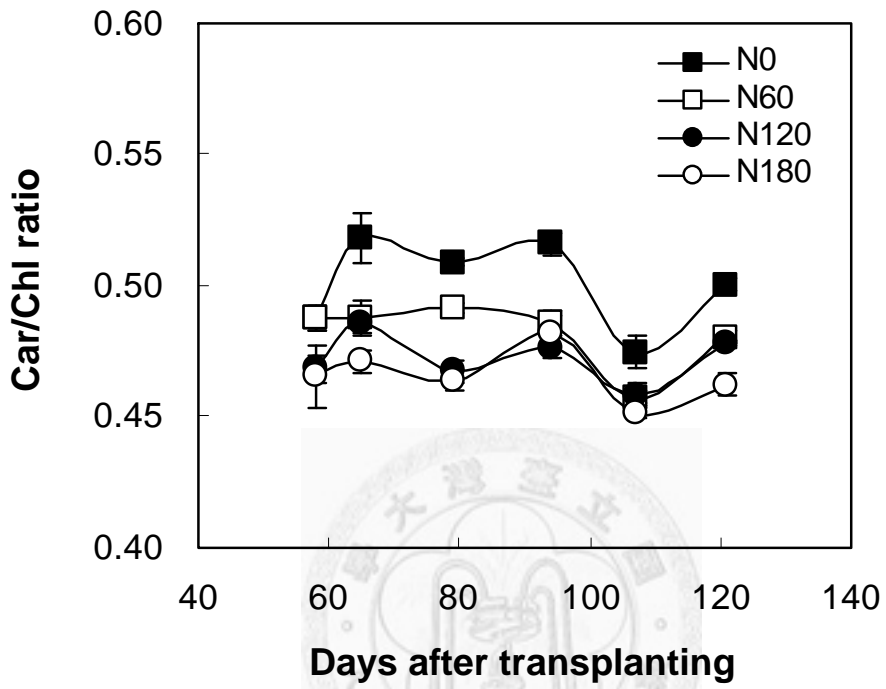


圖3-14、不同氮肥等級處理下竹塘試區2007年一期稻作台稉9號水稻生育期間葉片類胡蘿蔔素/葉綠素比值變化。

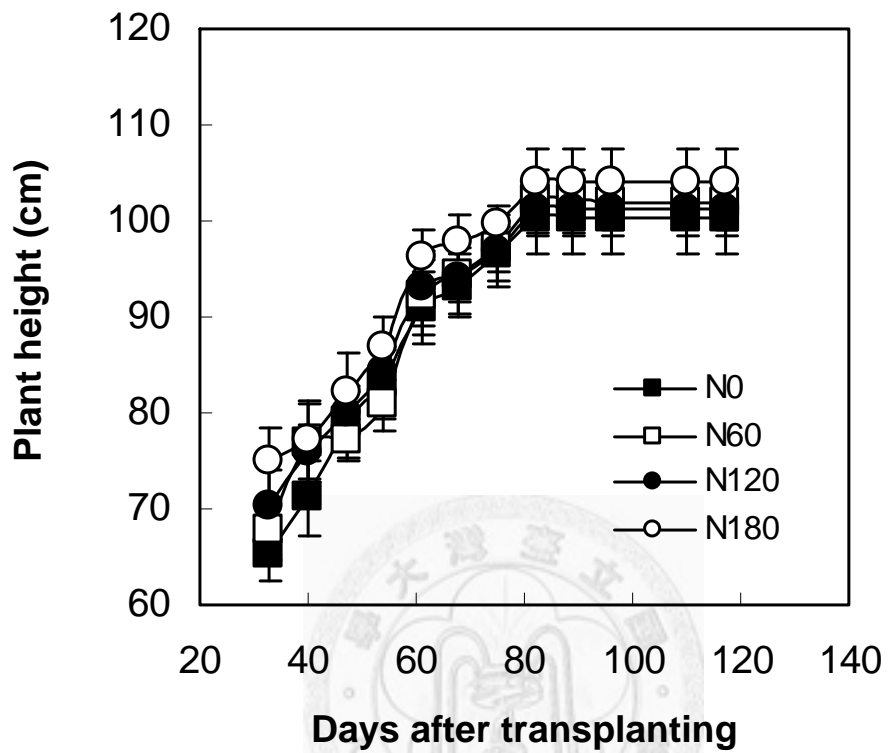


圖3-15、不同氮肥等級處理下新屋試區2006年二期稻作台稉14號水稻生育期間水稻株高變化。

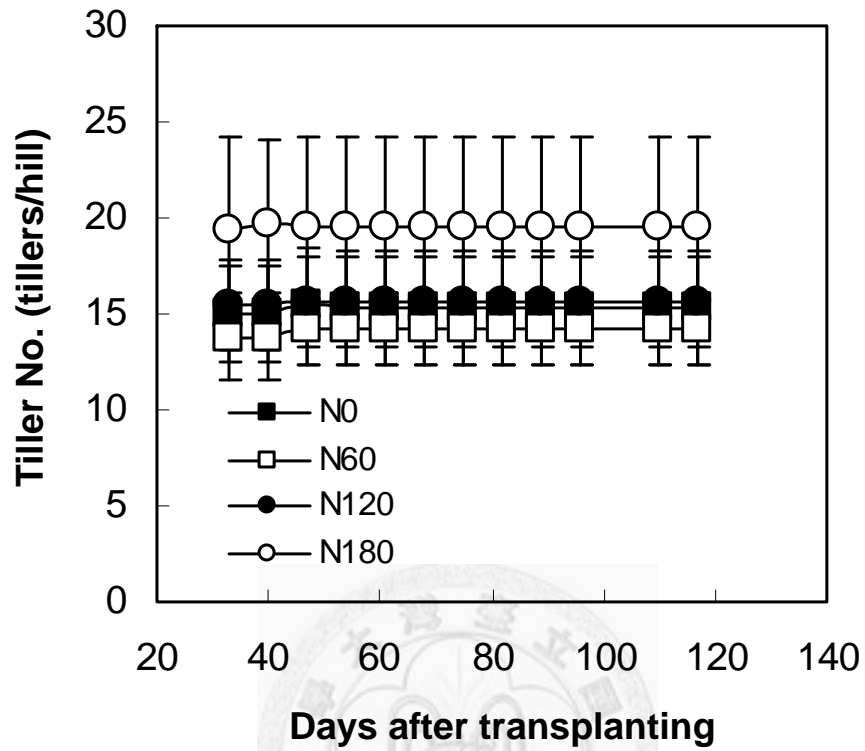


圖3-16、不同氮肥等級處理下新屋試區2006年二期稻作台稉14號水稻生育期間分蘖數變化。

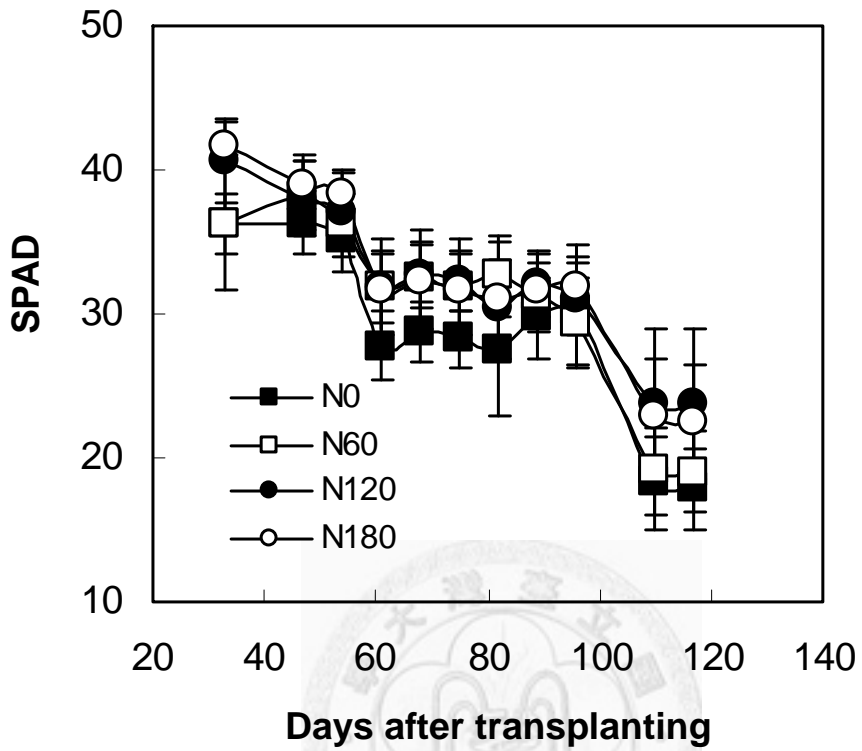


圖3-17、不同氮肥等級處理下新屋試區2006年二期稻作台梗14號水稻生育期間葉綠素計讀值變化。

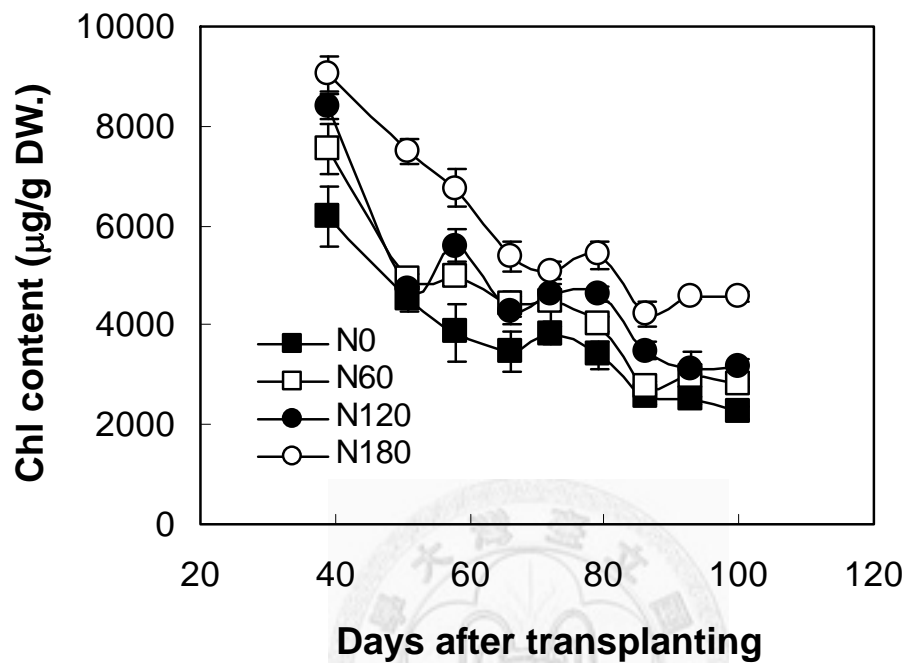


圖3-18、不同氮肥等級處理下新屋試區2006年二期稻作台稉14號水稻生育期間葉片葉綠素含量變化。

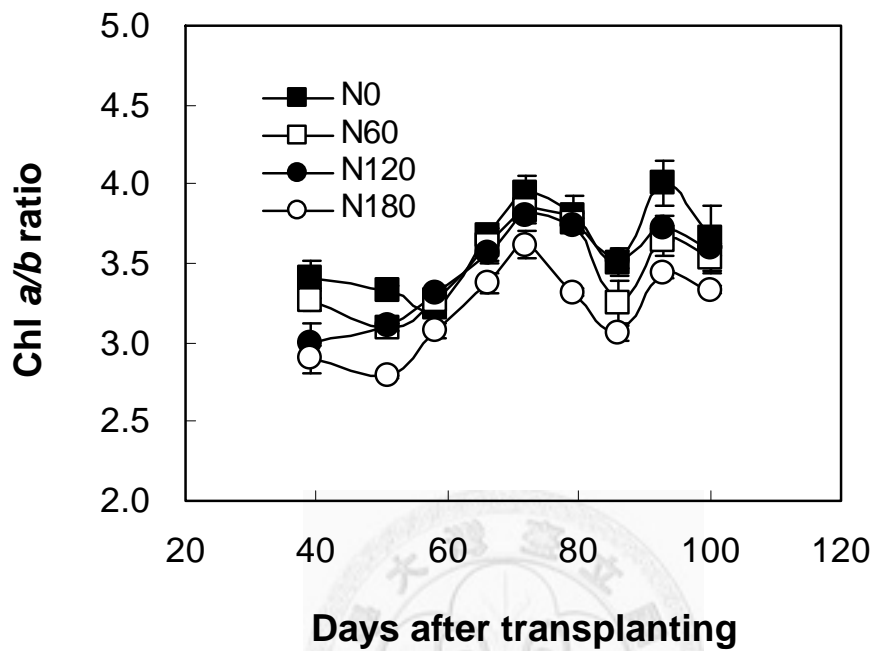


圖3-19、不同氮肥等級處理下新屋試區2006年二期稻作台種14號水稻生育期間葉片葉綠素a/b比值變化。

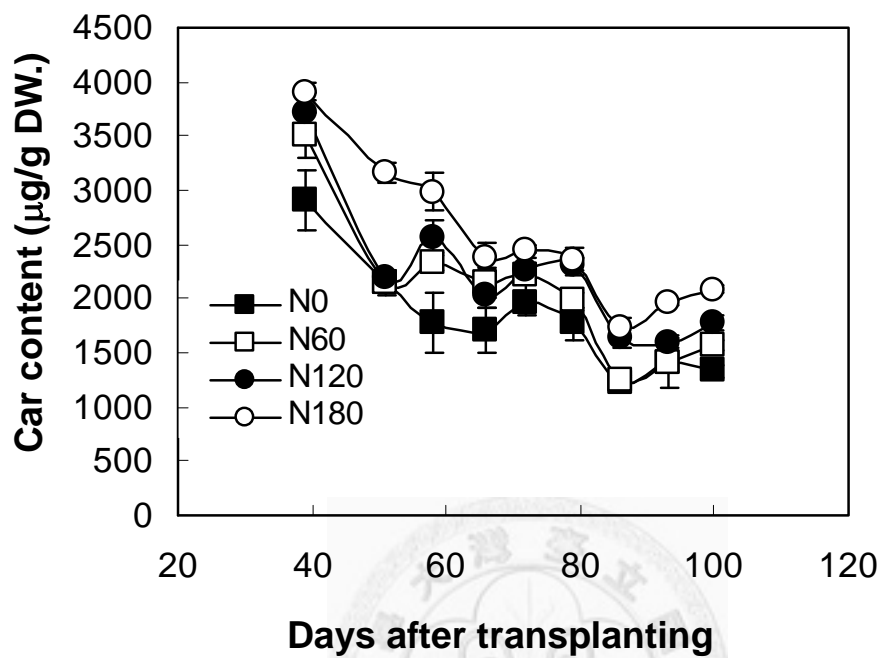


圖3-20、不同氮肥等級處理下新屋試區2006年二期稻作台稉14號水稻生育期間葉片類胡蘿蔔素含量變化。

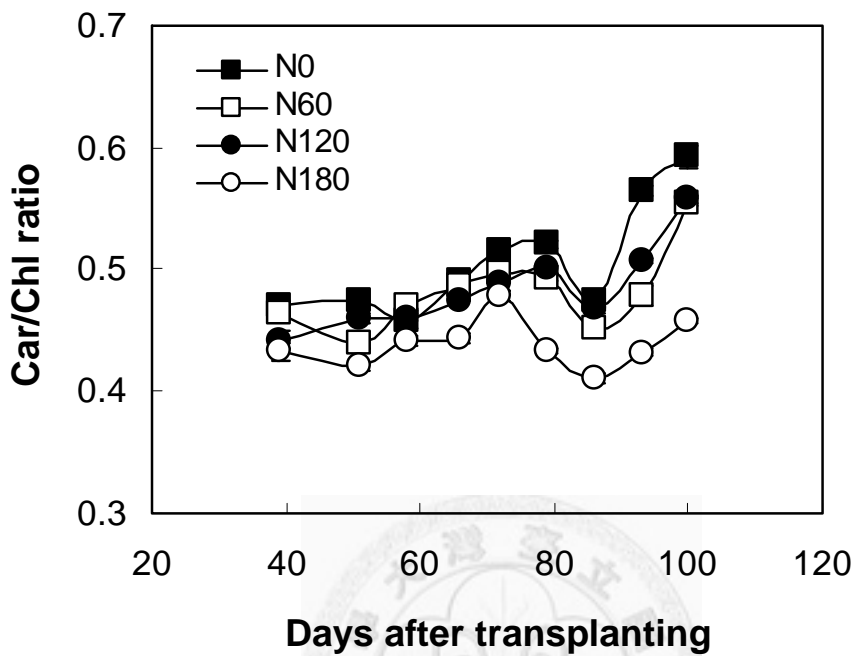


圖3-21、不同氮肥等級處理下新屋試區2006年二期稻作台稉14號水稻生育期間葉片類胡蘿蔔素/葉綠素比值變化。

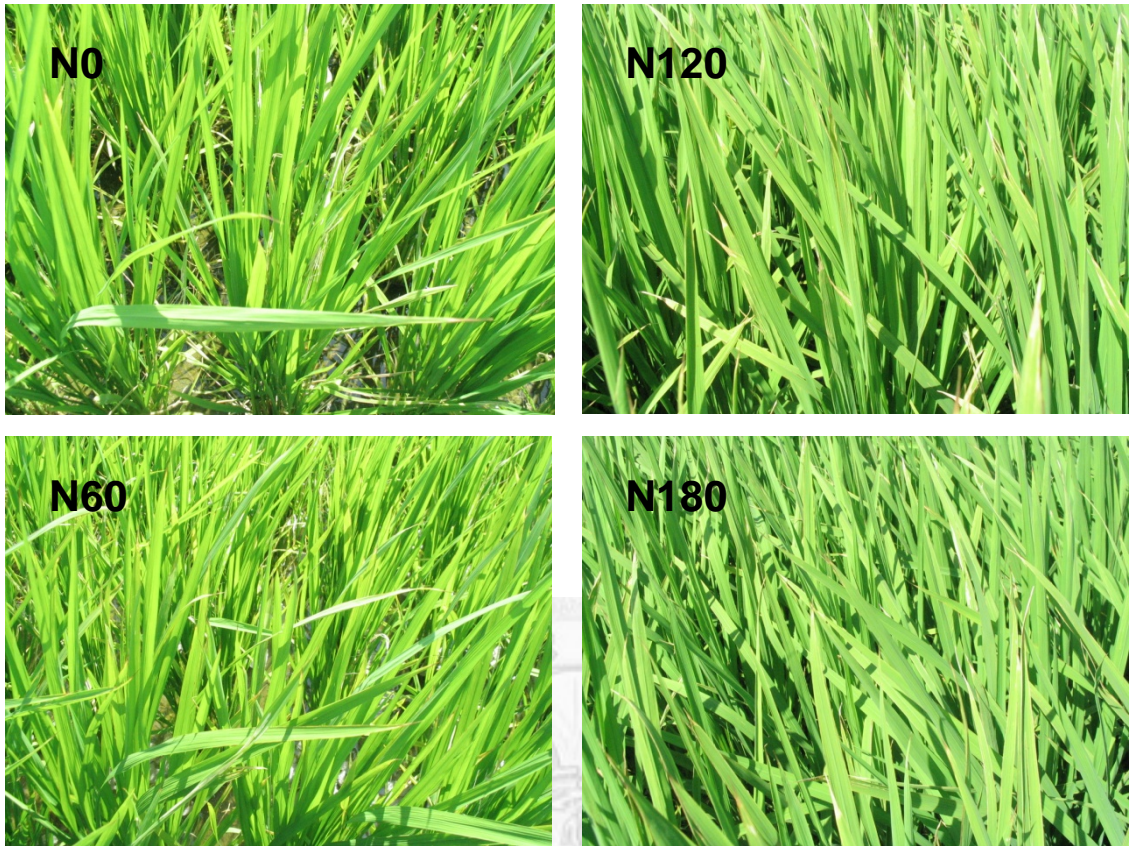


圖3-22、不同氮肥等級處理下新屋試區2006年二期稻作台粳14號水稻移植後第58天生長狀況。

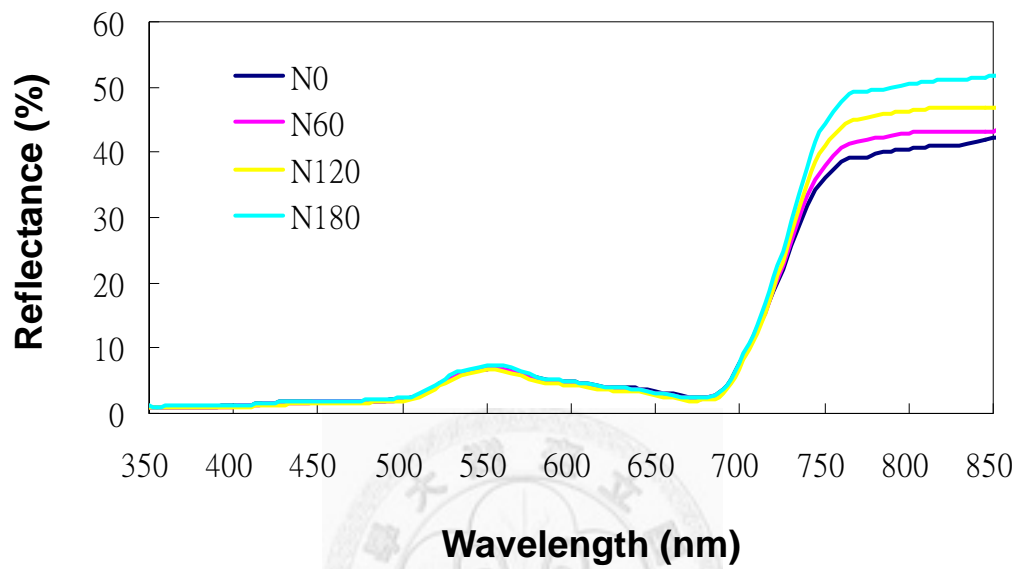


圖3-23、不同氮肥等級處理下新屋試區2006年二期稻作台梗14號水稻移植後第58天植冠反射光譜。

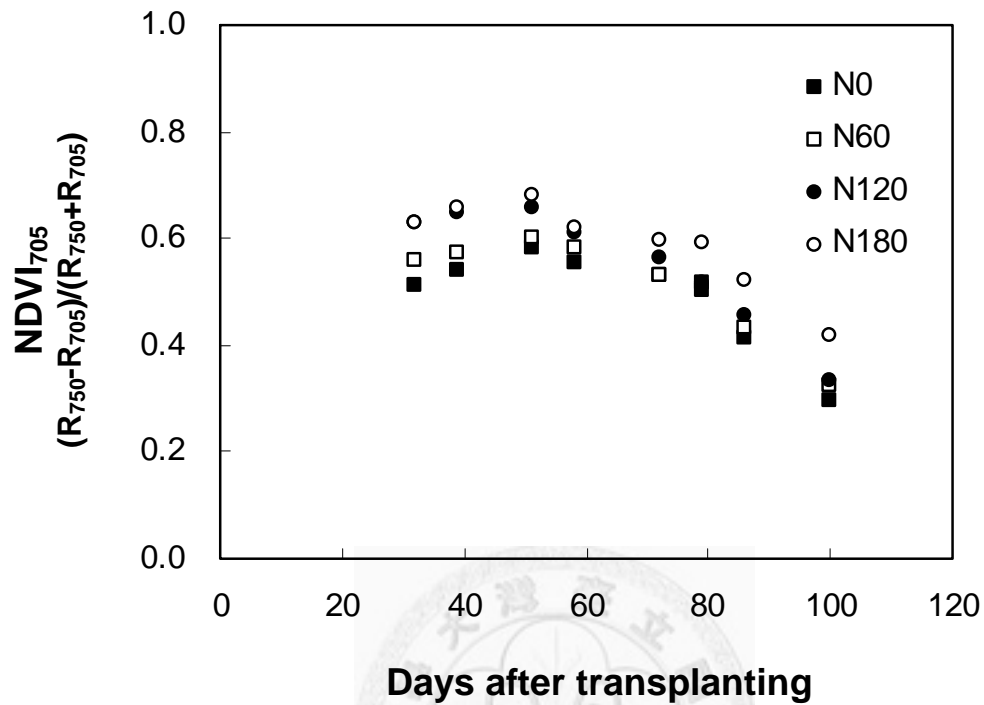


圖3-24、不同氮肥處理下新屋試區2006年二期稻作台稔14號水稻生育期間植冠反射光譜NDVI₇₀₅植被指數之變化。

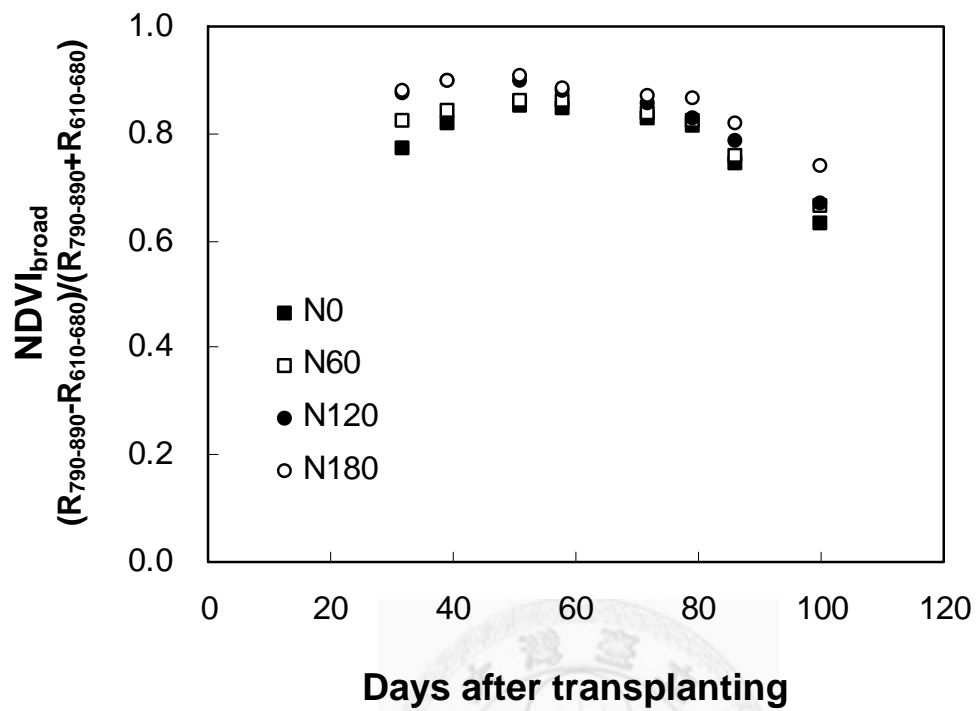


圖3-25、不同氮肥處理下新屋試區2006年二期稻作台稉14號水稻生育期間植冠反射光譜 $NDVI_{broad}$ 植被指數之變化。

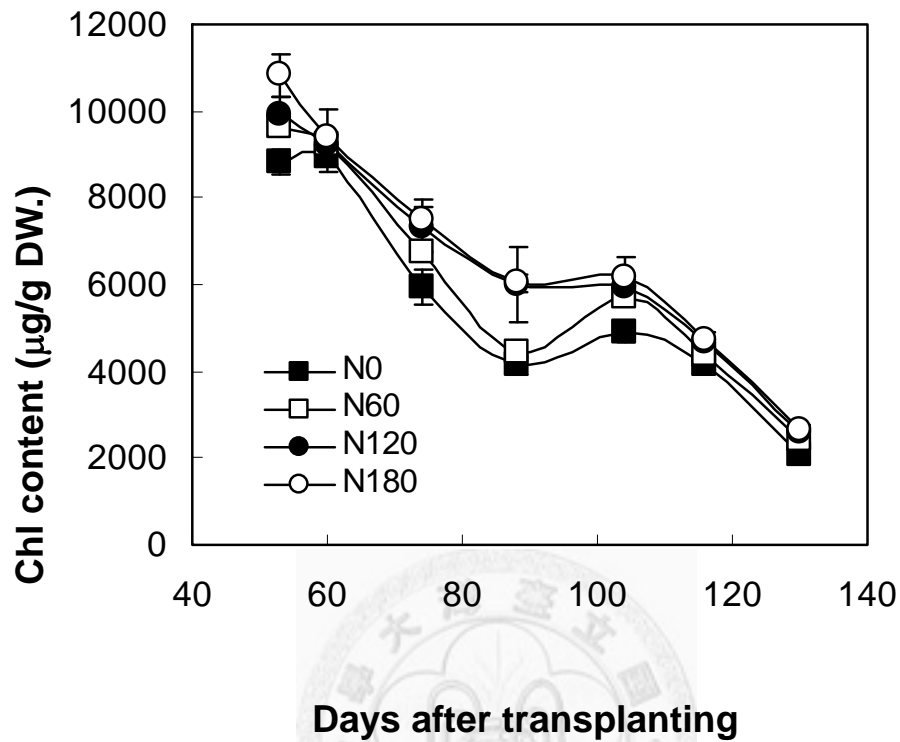


圖3-26、不同氮肥等級處理下新屋試區2007年一期稻作台稉14號水稻生育期間葉片葉綠素含量變化。

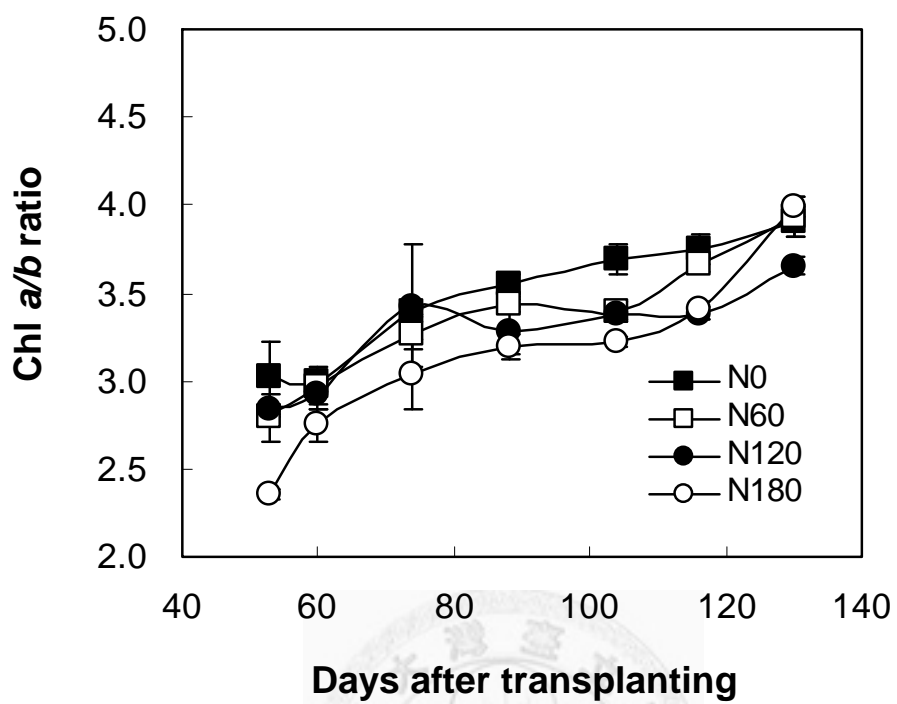


圖3-27、不同氮肥等級處理下新屋試區2007年一期稻作台種14號水稻生育期間葉片葉綠素a/b比值變化。

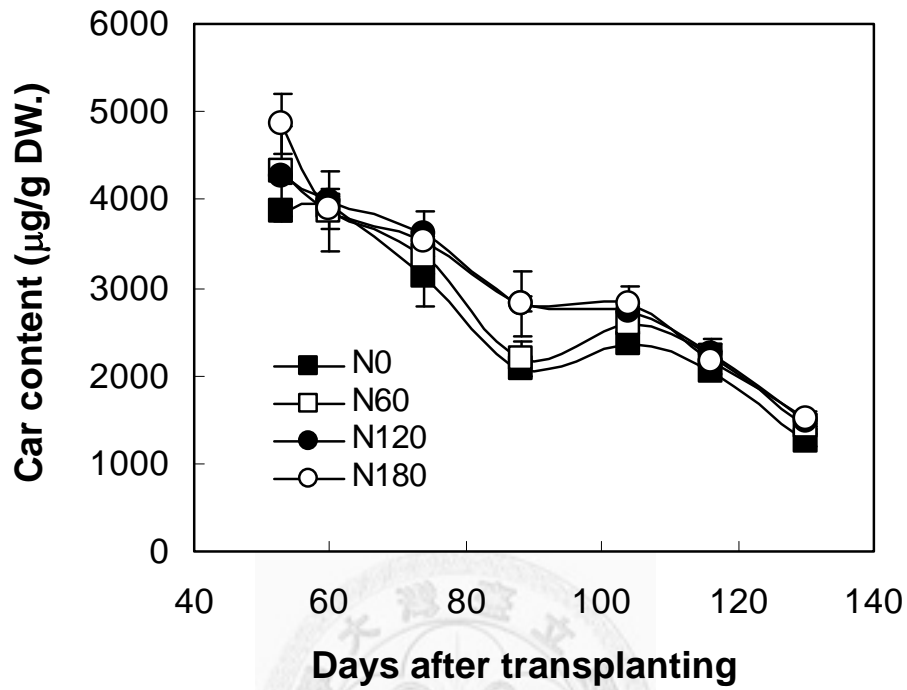


圖3-28、不同氮肥等級處理下新屋試區2007年一期稻作台稉14號水稻生育期間葉片類胡蘿蔔素含量變化。

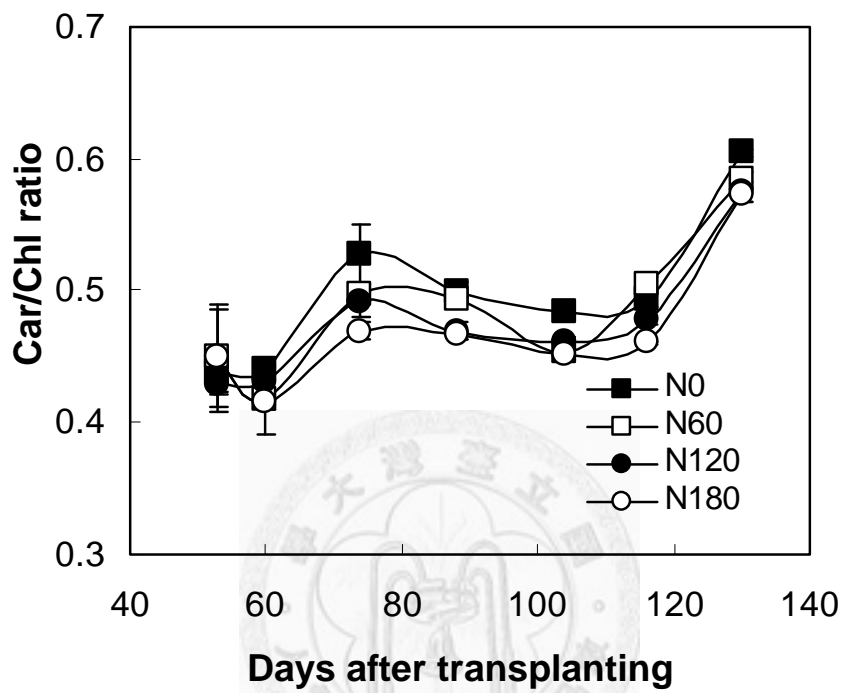


圖3-29、不同氮肥等級處理下新屋試區2007年一期稻作台梗14號水稻生育期間葉片類胡蘿蔔素/葉綠素比值變化。

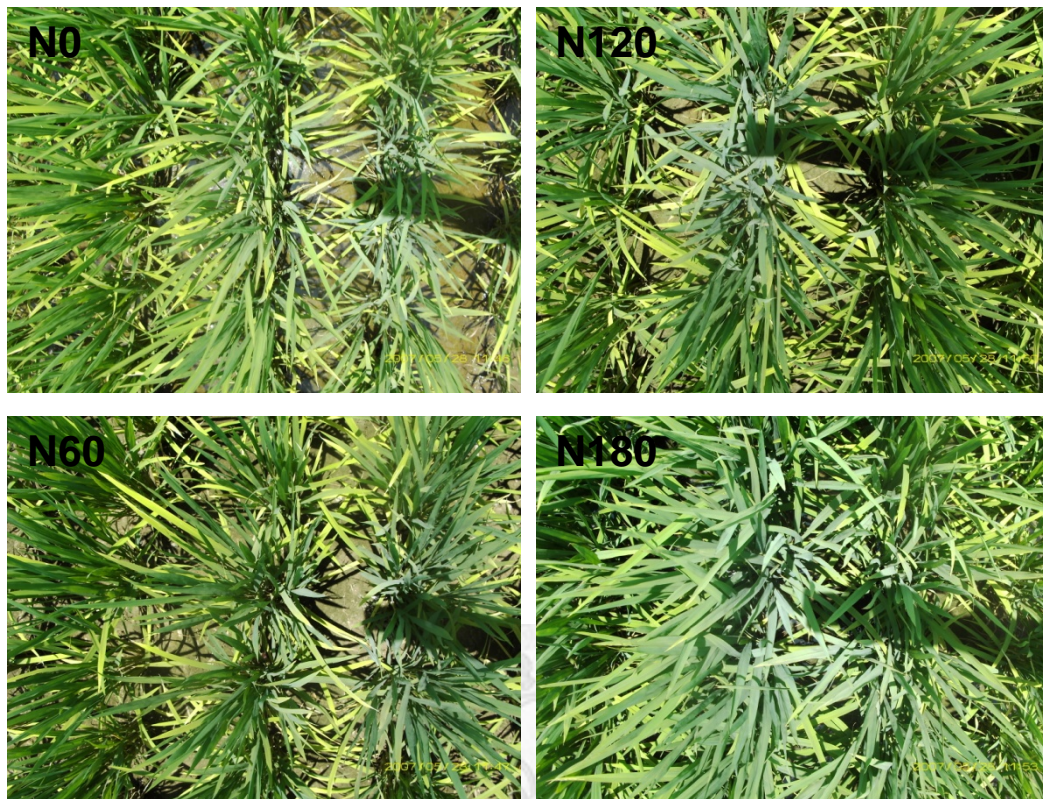


圖3-30、不同氮肥等級處理下新屋試區2007年一期稻作台梗14號水稻移植後第88天生長狀況。

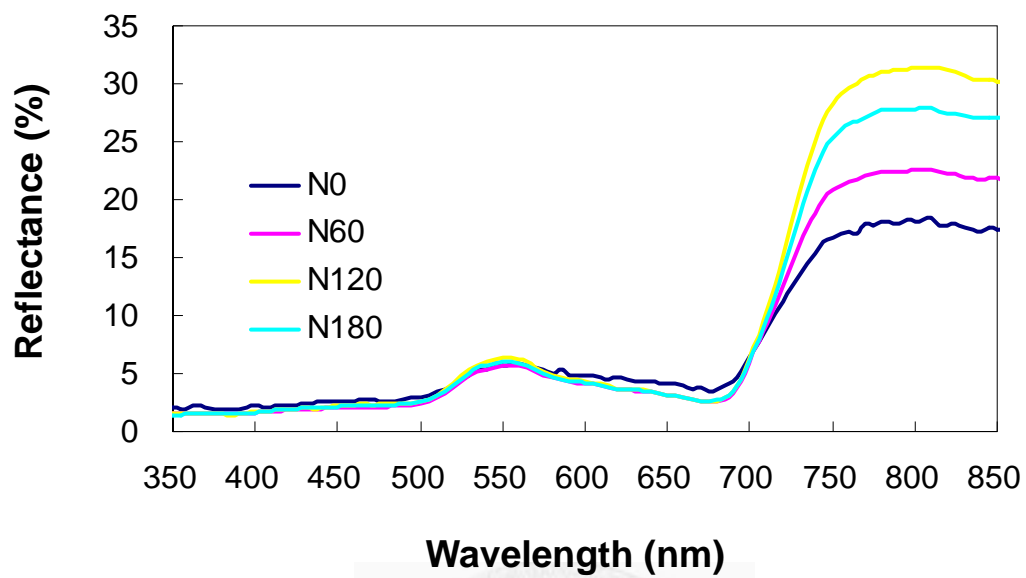


圖3-31、不同氮肥等級處理下新屋試區2007年一期稻作台梗14號水稻移植後第60天植冠反射光譜。



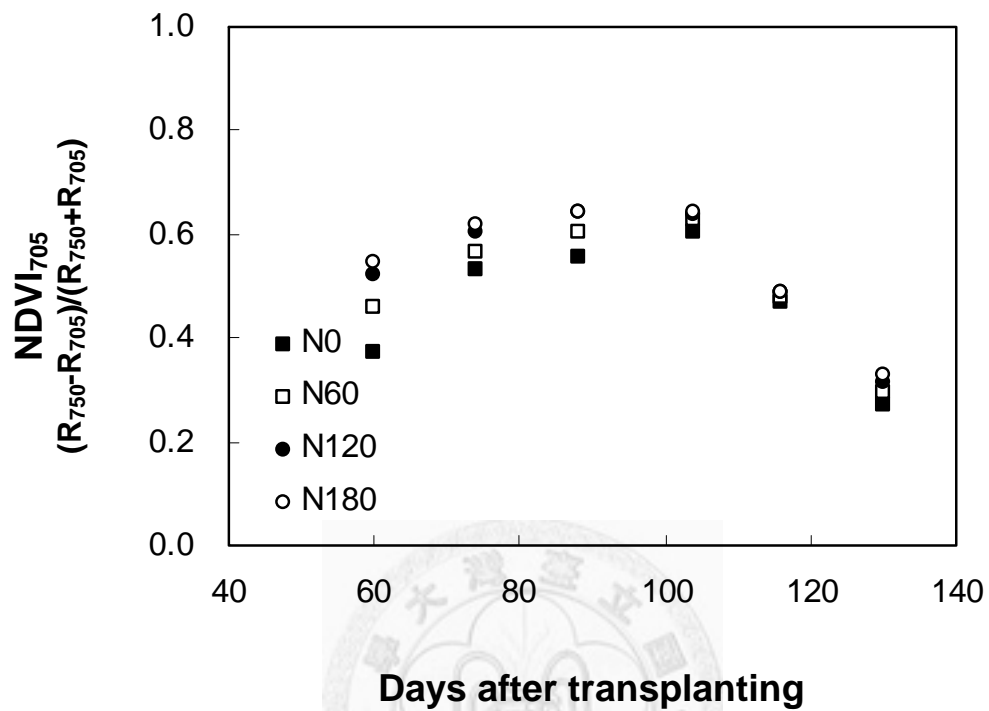


圖3-32、不同氮肥處理下新屋試區2007年一期稻作台稔14號水稻生育期間植冠反射光譜NDVI₇₀₅植被指數之變化。

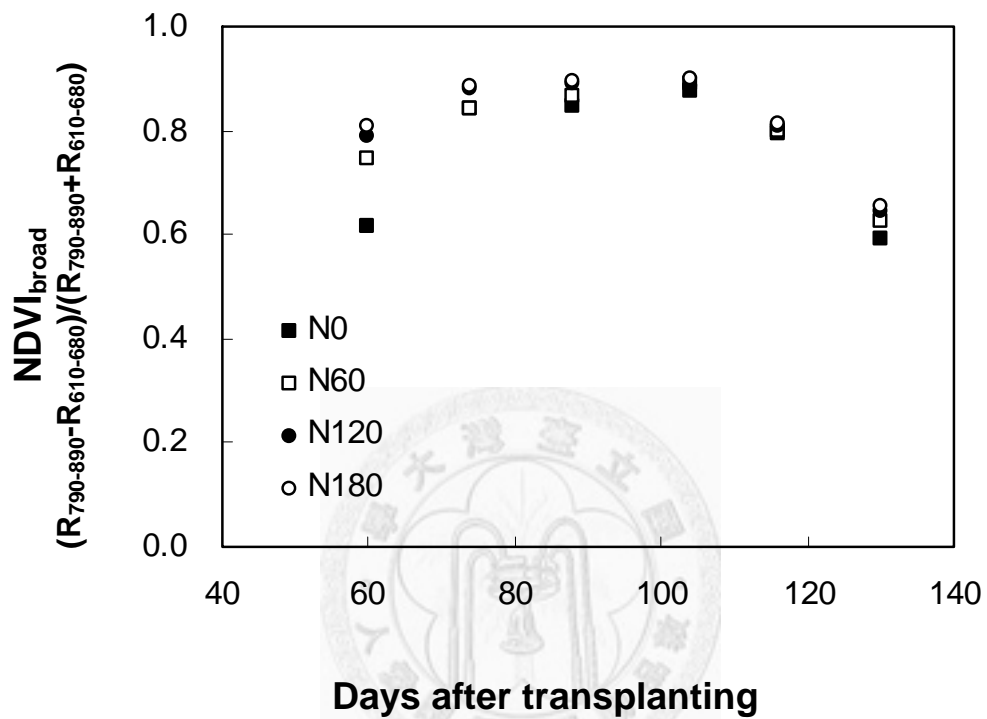


圖3-33、不同氮肥處理下新屋試區2007年一期稻作台稉14號水稻生育期間植被冠反射光譜 $NDVI_{broad}$ 植被指數之變化。

第四章 地真樣區米質分析

一、前言

水稻是臺灣地區主要的糧食作物，正確掌握水稻種植面積和產量是糧政單位重要的工作之一。目前主要利用航照調查全台灣地區各年期稻作種植面積，此種作業方式雖然準確，但工作流程不連貫，耗費人力且時效性差，因此已有許多相關研究，探討如何由遙測影像判釋稻作面積(陳與曾，1999；邵與史，2000；蕭等，2000；蕭等，2004)。農委會科技計畫則自90年度起即由成大、台大、逢甲、和工研院等四個工作團隊探討如何由衛星遙測影像自動判釋水稻種植面積。

除水稻種植面積外，糧政單位為掌握糧源還需調查水稻的產量，目前主要係利用分散於全省約1500個調查點的單位面積產量調查資料，再配合上述水稻種植面積資料估算全省的水稻產量。此種作業方式必須於水稻收穫後才能獲得所需資料，不僅需耗費大量調查人力且時效性差，也不利於公糧收購量與拋售時機、糧商進出口量估算、糧商與農政單位對各期米質的先期掌握、稻作災害保險等決策的訂定與推行，因此如何利用收穫前的遙測影像推估當期作稻作產量的研究乃具有實務工作上的重要意義，將是另一高難度挑戰。

劉等(2002)曾利用直昇機搭載DMSV多頻譜觀測儀獲取影像，並依據國外研發之模式估算田間水稻產量。吳等(2002)則利用SPOT多時段影像與地真產量資料推導估算水稻產量的迴歸模式。申等(2002)利用多年期地真水稻植被反射光譜測定資料，指出在抽穗期間水稻植被反射光譜中綠光段(GRN)、紅光段(RED)、和近紅外光段(NIR)的動態變動最小，因此適合作為建立推估當期作水稻產量之遙測模式的

自變數，並利用波段比值(NIR/RED、NIR/GRN)已分別建立可估測一、二期作水稻產量所需之複迴歸模式，且經驗證可用於推估新年期和遭受乾旱逆境之水稻產量(申等，2003；Chang et al., 2005)。

應用遙測技術進行稻米品質判釋，將涉及對於植被反射光譜細微差異變動之辨認。例如，Shibayama et al. (1993)利用水稻植被在620和760nm的反射值(兩變數直線迴歸式)，或400、620和880nm的反射值(三變數直線迴歸式)與葉片氮素含量有最好之相關。Inoue et al. (1998)指出 $[(R_{1100}-R_{660})/(R_{1100} + R_{660})]$ 或內含R550, R830, R1650, 與R2200之四變數迴歸式與水稻葉片氮含量有線性相關。申等(2000)指出 $dR/d\lambda |_{735}$ 除可以分辨稻株體內氮素的濃度外，也具有可區別田間稻株氮營養狀況空間分佈的能力。進而利用 $dR/d\lambda |_{735}$ 建立稻株氮營養遙測模式，並於台北、台中、嘉義、屏東等地進行不同地區多年期之田間驗證，測試結果均指出所建立的稻株氮營養遙測模式可以快速鑑別田間穗肥施用期間稻株的氮營養狀態，足以提供做為田間穗肥精準施用的依據(申等，2001；Lee et al., 2005)。除了稻株營養狀態及葉片氮素含量外，水稻米粒品質之遙測判釋亦有學者進行中，Sun et al. (2005)應用高光譜反射率建立參數預測水稻葉片葉綠素，以及水稻米粒蛋白質含量，結果顯示利用遙測技術推估水稻米粒蛋白質含量進而估測稻米品質是可行的。

精準的預估農作物產量是農業產官學界長期以來追求的目標，此需包括作物面積的判識與作物單位產量的推估，二者相乘才能得到總產量。作物產量的預估通常透過不同生長階段的農藝性狀與其產量之相關性分析。以水稻產量預估為例，葉面積與葉綠素二種農藝性狀與產量有高度相關(Raj and Tripathi, 1999)。然而，葉綠素含量則隨植物年齡、品系種類、生長季節而異(Ramesh et al., 2002)。因此，如何在水稻生長發育過程，運用其最適當植齡以達到最精準的產量預估，極為重要。

由於水稻氮肥隨施量之增加其產量與葉綠素含量亦隨之增加，罹患病蟲害的機率也隨之增高，又其稻米品質則隨之降低。施肥過量之稻株生長過度繁茂而易倒伏，其稻米品質往往欠佳(Chamura et al., 1972)。米粒粗蛋白含量隨著氮肥施用量增加而增加，品質因而降低(賴等，1997)。

如何精準判識全國水稻一年二期水稻栽種面積與如何利用收穫前的遙測影像推估當期作稻作產量的研究，將是二大挑戰。同時解決一期與二期水稻栽種面積與單位產量與米質之快速與精準的先期推估，才能真正建構現代化水稻精準管理之模式。



二、材料與方法

水稻產量地真樣區設置

本研究之水稻樣區設置在南部高雄縣美濃鎮、中部彰化縣竹塘鄉、北部桃園縣新屋鄉及東部花蓮縣玉里鎮四個地區。每一地區一期稻作種植品種、插秧及收穫日期如表 4-1 所示。氮肥施用量依研究所需設定為四個等級(0、60、120、180 kg/ha)，另外磷、鉀肥則分別為 60、60 kg/ha，肥料施用量及施用時程如表 4-2 所示。水稻收穫時，除各試驗田區外，在試驗田區附近之一般稻田亦進行坪割取樣，作為產量及米質預測模式之驗證資料。各試驗田區水稻收穫後，稻株脫粒進行烘乾，使水分含量達約 13.5%左右，使用風穀機、風選調製去除雜草、石塊及穀屑，再秤量乾穀重，進行產量調查。樣本穀接下來進行碾糙處理以及稻米品質分析。

稻米品質分析

米質分析程序如下(宋和劉，1996)：

一、碾米品質(Milling quality)

- (一) 糙米率
- (二) 白米率
- (三) 完整米率

二、米粒外觀

米粒外貌係指白米的外觀，調查項目包括大小、形狀、透明度、腹白、心白、背白、胚芽缺刻度大小等七項(表 4-3)。

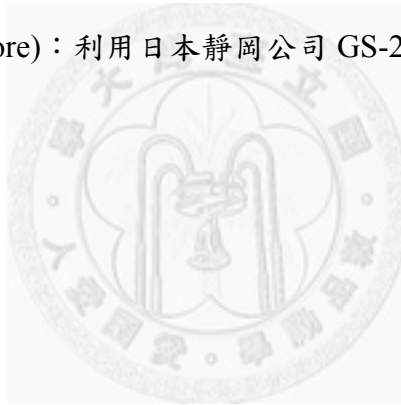
三、白米物理化學性質(Physicochemical properties of milled rice)

(一)直鏈澱粉含量(amylose content)：採用 method of simplification of amylose assay 測定(Juliano, 1971)。

(二)凝膠展延性(gel consistency)：採 Cagampang et al. (1973)方法分析，將米粉末加入瑞香酚藍(thymol blue)指示劑及 0.2N 之氫氧化鉀(KOH)溶液，加熱沸騰 10 分鐘，再冷卻 30 分鐘，紀錄其長度。長度 35 mm 以下為硬膠(H)，35~50 mm 為中間(M)，50 mm 以上為軟膠(S)。

(三)鹼性擴散度(alkali spreading value)：將 6 顆完整之白米加入 1.6 % KOH 溶液 10 ml，在 30°C 培養箱浸泡 23 小時，觀察其膨脹溶化情形並加以紀錄。

四、食味值(palatability score)：利用日本靜岡公司 GS-2000 型食味計測定。



三、結果與討論

台灣地區一期稻作插秧日期由南部地區最早開始，愈往北部則插秧日期愈延後。由表 4-1 可明顯看出，南部高雄縣美濃試區在一月下旬即插秧，花蓮縣玉里及彰化縣竹塘試區則在二月上旬插秧，而桃園縣新屋鄉則在三月初才插秧。各地區慣用水稻品種也不相同，南部美濃試區種植高雄 145 號(KS 145)，東部玉里試區種植台稉 2 號(TK 2)，中部竹塘試區種植台稉 11 號(TK 11)，北部新屋試區種植台稉 14 號(TK 14)。一期稻作試驗進行相當倉促，美濃試區之試驗田區選擇是在農民插秧完成後才選定，因此田區分散四地，土壤肥力亦不一致。由於一期稻作試驗匆忙進行，部分地真調查項目未及進行，將在二期稻作及來年期作一併進行調查分析。

本研究將氮肥用量設定為四個等級(表 4-2)，藉由不等量氮肥施用，造成各處理樣區間水稻生長勢、葉色和產量之差。在此，本研究不考慮原本土壤肥力造成之影響，只要施用之氮肥等級能將水稻生育期間葉色及稻米品質之差異顯現出來即可。

有關稻米品質之經常性分析項目，一般首重碾米品質，此項亦受到碾米商的重視。其次為白米大小與形狀、透明度、心白、腹白、背白等米粒外貌性狀，是屬於市場品質之部分，亦為消費者直接的首次印象。再者為直鏈澱粉含量、粗蛋白質含量、鹼性擴散值、凝膠展延性等，以上重要的米質理化特性，皆屬於實驗室內稻米品質間接測定法之部分。至於利用米飯質地分析儀所測定之米飯質地特性，以及利用人為進行米飯食味官能評估，兩者則同屬食用品質的部分，米飯食味口感佳才是消費者續購之原動力(許，2005)。對於米質理化特性分析，相當費時費力，而米飯食味官能評估，需有足夠熟練的品評員，及無法一次評鑑大量樣品

之缺點，因此具快速分析速度之近紅外線分析法應運而生，近年來日本許多公司利用近紅外線分析法設計成所謂的食味計，以糙米或白米為測定對象的機型，其利用光學反射原理測定米飯保水膜的厚度，用以推估米飯食味的良劣。本研究有關稻米品質之測定由農委會臺中區農業改良場稻米品質實驗室採用國際稻米研究所使用之 USDA 方法，測定碾米品質、米粒外觀、米值理化性質以及食味計分析等。由於測定米質之粗蛋白質含量之 NIR 儀器進行維修保養，因此本研究報告中之米質部分不包括粗蛋白質含量。

在稻米品質方面，玉里試區一期稻作台稉 2 號之米粒屬於短粒粗圓形，透明度為 3，心白以 120 kg-N/ha 處理者最多，0 kg-N/ha 處理者最低，背白及腹白皆為 0，胚眼缺刻度皆為 1。碾米品質之糙米率、白米率及完整米率皆隨著氮肥增施而增加，糙米率分別為 79.0、80.9、81.3 及 81.7%，白米率分別為 70.3、73.1、73.8 及 74.1%，完整米率分別為 60.5、66.5、66.9 及 69.2% (表 4-4)。鹼性擴散度皆為 6，膠化溫度屬於低溫度，直鏈澱粉含量及凝膠展延性皆隨著氮肥增施而降低，食味值亦隨著氮肥增施而降低(表 4-5)。

美濃試區一期稻作高雄 145 號之米粒屬於短粒粗圓形，透明度為 4，心白、背白及腹白皆為 0，胚眼缺刻度為 1。隨著氮肥增施，碾米品質之糙米率分別為 80.2、83.3、83.8 及 83.6%，白米率分別為 70.1、75.6、76.4 及 74.0%，完整米率分別為 41.6、70.0、70.4 及 61.3% (表 4-6)。鹼性擴散度皆為 6，膠化溫度屬於低溫度。隨著氮肥增施，直鏈澱粉含量分別為 17.9、17.6、17.6 及 18.1%，凝膠展延性分別為 81S、82S、76S 及 87S，食味值分別為 69.5、60.5、60.0 及 69.5(表 4-7)。

竹塘試區一期稻作台稉 11 號之米粒屬於短粒粗圓形，透明度以 120 kg-N/ha 處理者 3.13 最佳，180 kg-N/ha 處理者之 3.25 次之，再者為 60 kg-N/ha 處理者之

3.38，0 kg-N/ha 處理者之 3.50 最末。隨著氮肥增施，心白分別為 0.15、0.10、0.11 及 0.09，腹白分別為 0、0.15、0.14 及 0.26，背白皆為 0，白堊質總合分別為 0.15、0.25、0.25 及 0.35，胚眼缺刻度為 1。隨著氮肥增施，碾米品質之糙米率分別為 82.6、83.5、83.5 及 83.6%，白米率分別為 75.2、75.7、75.5 及 74.9%，完整米率分別為 72.0、72.9、72.1 及 71.6% (表 4-8)。鹼性擴散度皆為 6，膠化溫度屬於低溫度。隨著氮肥增施，直鏈澱粉含量分別為 18.9、18.8、18.9 及 19.1%，凝膠展延性分別為 89S、90S、86S 及 87S，食味值分別為 60.8、53.0、53.3 及 45.8(表 4-9)。

新屋試區一期稻作台梗 14 號之米粒屬於短粒粗圓形，透明度以 120 kg-N/ha 處理者 3.5 最佳，其餘處理者皆為 4。心白 120 kg-N/ha 處理者為 0.23，其餘處理者皆為 0。背白隨氮肥增施分別為 0.52、0.50、0.33 及 0.42，腹白皆為 0，白堊質總合分別為 0.52、0.50、0.56 及 0.42，胚眼缺刻度為 1。隨著氮肥增施，碾米品質之糙米率分別為 82.6、83.0、84.0 及 82.6%，白米率分別為 70.6、72.2、72.1 及 70.9%，完整米率分別為 63.0、67.8、67.1 及 65.5% (表 4-10)。鹼性擴散度皆為 6，膠化溫度屬於低溫度。隨著氮肥增施，直鏈澱粉含量分別為 17.3、17.2、17.6 及 17.6%，凝膠展延性分別為 90S、89S、96S 及 87S，食味值分別為 57、57、56 及 61(表 4-11)。

將各試區之稻穀產量與碾米品質、白米理化性質等因子進行相關性分析。可發現每個試區的結果不盡相同。玉里試區一期稻作台梗 2 號稻穀產量與碾米品質中之糙米率、白米率及完整米率具有極顯著之正相關，與白米理化性質之直鏈澱粉含量、凝膠展延性及食味值具有極顯著之負相關(表 4-12)。美濃試區一期稻作高雄 145 號稻穀與糙米率、白米率及完整米率具有極顯著之正相關，與食味值具有顯著之負相關(表 4-13)。竹塘試區一期稻作台梗 11 號稻穀產量與糙米率有極顯著之正相關，與食味值有極顯著之負相關(表 4-14)。由以上三個試驗區可看出稻穀產量與稻米品質之食味值有負相關的關係存在，也就是說增施氮肥促進稻穀產量增

進的同時，可能會讓稻米品質降低。而在新屋試區一期稻作台種 14 號，稻穀產量卻與食味值為正相關(表 4-15)，可能為品種因素、土壤質地或氣候環境因素所致。

影響稻米品質的因素很多，品種的選擇、栽培的環境、收穫、儲存而至煮飯的過程等均可影響到米飯的品質，其中影響稻米品質最大的因素為品種。影響稻米品質的因素若發生於生產階段時的各項措施，可以增進或降低其品質，因此生產階段為良質米生產之重要時期(楊等，2004)。在本研究中，單一試區生產階段氮肥管理之不同會造成之稻米食味質差異。

基本上，稻穀產量與稻米品質是屬於性質相反的兩個指標。不施用過量氮肥為高品質稻米栽培之基本原則。氮肥施用較多可增加有效分蘗數、每穗粒數與提高稔實率及千粒重，增進稻穀產量。但是過多的氮肥亦會導致食米粗蛋白質含量增高，影響稻米品質。因此合理的施肥，以達到稻穀產量及稻米品質雙益之目標至為重要。

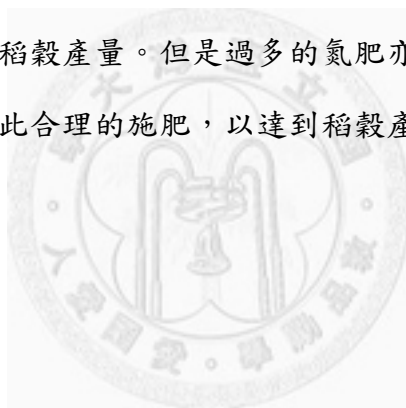


表 4-1、水稻試驗地區、品種及插秧、收穫日期。

地 區	品 種	插秧日期	收穫日期
高雄美濃	KS145	1/24~1/26	5/22
花蓮玉里	TK2	2/5	6/15
彰化竹塘	TK11	2/7	6/20
桃園新屋	TK14	3/4	7/13

表 4-2、水稻施肥用量與時程*。

項 目	總量 (kg/ha)	基肥	一追	二追	穗肥
施用時期		不施肥	插秧後 8-10 天	插秧後 22-24 天	幼穗分化至 0.2 公分， 約插秧後 75-85 天
N 分配比例	100%	0%	40%	35%	25%
用量分配	0	0	0	0	0
	60	0	24	21	15
	120	0	48	42	30
	180	0	72	63	45
P 分配比例	100%	0	100%		
用量分配	60	0%	60		
K 分配比例	100%	0%	40%	35%	25%
用量分配	60	0	24	21	15

*以每公頃用量及三要素量表示。

表 4-3、白米外貌之分類及其等級表

大小		形狀		透明度	腹白	心白	背白	胚眼缺刻度大小
代號	長度(mm)	代號	長/寬	Trans.	W.B.	W.C.	W.B.	Cond. of the eye
很長(EL)	>7.5	細長形(S)	>3	0*	0	0	0	1
長(L)	6.61~7.5	中間形(I)	2.1~3	1	1	1	1	2
中間(M)	5.51~6.609	粗短形(B)	<2	2	2	2	2	3
短(S)	<5.51			3	3	3	3	4
				4	4	4	4	5
				5	5	5	5	

* 透明度、腹白、心白、背白及胚眼缺刻度大小數值愈小愈好。

表 4-4、玉里試區一期稻作碾米品質與米粒外觀。

	碾米品質			米粒外觀							
	糙米率	白米率	完整米率	白米長度	白米形狀	透明度	心白	背白	腹白	白堊質總合	胚眼缺刻度
N0	79.0	70.3	60.5	S	B	3	0.30	0	0	0.30	1
N60	80.9	73.1	66.5	S	B	3	0.45	0	0	0.45	1
N120	81.3	73.8	66.9	S	B	3	0.52	0	0	0.52	1
N180	81.7	74.1	69.2	S	B	3	0.39	0	0	0.39	1

表 4-5、玉里試區一期稻作白米理化性質與食味值。

	白米理化性質				食味值
	鹼性擴散度	膠化溫度	直鏈澱粉含量(%)	凝膠展延性	
N0	6	L	19.3	87S	73
N60	6	L	19.1	85S	64
N120	6	L	19.1	85S	65
N180	6	L	19	80S	61

表 4-6、美濃試區一期稻作碾米品質與米粒外觀。

	碾米品質			米粒外觀							
	糙米率	白米率	完整米率	白米長度	白米形狀	透明度	心白	背白	腹白	白堊質總合	胚眼缺刻度
N0	80.2	70.1	41.6	S	B	4	0	0	0	0	1
N60	83.3	75.6	70.0	S	B	4	0	0	0	0	1
N120	83.8	76.4	70.4	S	B	4	0	0	0	0	1
N180	83.6	74.0	61.3	S	B	4	0	0	0	0	1

表 4-7、美濃試區一期稻作白米理化性質與食味值。

	白米理化性質				食味值
	鹼性擴散度	膠化溫度	直鏈澱粉含量(%)	凝膠展延性	
N0	6	L	17.9	81S	69.5
N60	6	L	17.6	82S	60.5
N120	6	L	17.6	76S	60.0
N180	6	L	18.1	87S	69.5

表 4-8、竹塘試區一期稻作碾米品質與米粒外觀。

	碾米品質			米粒外觀							
	糙米率	白米率	完整米率	白米長度	白米形狀	透明度	心白	背白	腹白	白堊質總合	胚眼缺刻度
N0	82.6	75.2	72.0	S	B	3.50	0.15	0	0	0.15	1
N60	83.5	75.7	72.9	S	B	3.38	0.10	0	0.15	0.25	1
N120	83.5	75.5	72.1	S	B	3.13	0.11	0	0.14	0.25	1
N180	83.6	74.9	71.6	S	B	3.25	0.09	0	0.26	0.35	1

表 4-9、竹塘試區一期稻作白米理化性質與食味值。

	白米理化性質				食味值
	鹼性擴散度	膠化溫度	直鏈澱粉含量(%)	凝膠展延性	
N0	6	L	18.9	89S	60.8
N60	6	L	18.8	90S	53.0
N120	6	L	18.9	86S	53.3
N180	6	L	19.1	87S	45.8

表 4-10、新屋試區一期稻作碾米品質與米粒外觀。

	碾米品質			米粒外觀							
	糙米率	白米率	完整米率	白米長度	白米形狀	透明度	心白	背白	腹白	白堊質總合	胚眼缺刻度
N0	82.6	70.6	63.0	S	B	4	0	0.52	0	0.52	1
N60	83.0	72.2	67.8	S	B	4	0	0.50	0	0.50	1
N120	84.0	72.1	67.1	S	B	3.5	0.23	0.33	0	0.56	1
N180	82.6	70.9	65.5	S	B	4	0	0.42	0	0.42	1

表 4-11、新屋試區一期稻作白米理化性質與食味值。

	白米理化性質				食味值
	鹼性擴散度	膠化溫度	直鏈澱粉含量(%)	凝膠展延性	
N0	6	L	17.3	90S	57
N60	6	L	17.2	89S	57
N120	6	L	17.6	96S	56
N180	6	L	17.6	87S	61

表 4-12、玉里試區一期稻作台種 2 號稻米品質與產量因子間之相關係數。

	糙米率	白米率	完整米率	透明度	心白	背白	腹白	直鏈澱粉含量	凝膠展延性	食味值
白米率	0.984**									
完整米率	0.932**	0.967**								
透明度	-	-	-							
心白	0.555	0.664*	0.601*							
背白	-	-	-	-	-					
腹白	-	-	-	-	-	-				
直鏈澱粉含量	-0.620*	-0.711**	-0.828**	-	-0.556	-	-			
凝膠展延性	-0.686*	-0.695*	-0.824**	-	-0.124	-	-	0.764**		
食味值	-0.922**	-0.947**	-0.984**	-	-0.536	-	-	0.783**	0.812**	
產量	0.941**	0.982**	0.979**	-	0.702*	-	-	-0.803**	-0.730**	-0.949**

*,** 分別為 0.05 及 0.01 顯著水準。

表 4-13、美濃試區一期稻作高雄 145 號稻米品質與產量因子間之相關係數。

	糙米率	白米率	完整米率	透明度	心白	背白	腹白	直鏈澱粉含量	凝膠展延性	食味值
白米率	0.933**									
完整米率	0.937**	0.989**								
透明度	-	-	-							
心白	-	-	-	-						
背白	-	-	-	-	-					
腹白	-	-	-	-	-	-				
直鏈澱粉含量	-0.179	-0.464	-0.471	-	-	-	-			
凝膠展延性	0.064	-0.236	-0.144	-	-	-	-	0.604*		
食味值	-0.506	-0.748**	-0.750**	-	-	-	-	0.842**	0.630*	
產量	0.969**	0.944**	0.966**	-	-	-	-	-0.274	0.040	-0.599*

*,** 分別為 0.05 及 0.01 顯著水準。

表 4-14、竹塘試區一期稻作台種 11 號稻米品質與產量因子間之相關係數。

	糙米率	白米率	完整米率	透明度	心白	背白	腹白	直鏈澱粉含量	凝膠展延性	食味值
白米率	0.530*									
完整米率	0.508*	0.878**								
透明度	-0.390	0.076	0.000							
心白	-0.086	0.354	0.335	0.021						
背白	-.	-.	-.	-.	-.					
腹白	0.586*	0.023	0.119	-0.574*	-0.341	-.				
直鏈澱粉含量	0.309	0.446	0.287	-0.236	0.245	-.	0.222			
凝膠展延性	-0.240	-0.325	-0.365	-0.038	-0.329	-.	-0.161	-0.132		
食味值	-0.817**	-0.267	-0.292	0.383	0.311	-.	-0.846**	-0.426	0.260	
產量	0.761**	0.062	0.033	-0.547*	-0.125	-.	0.627**	0.284	-0.349	-0.730**

*,** 分別為 0.05 及 0.01 顯著水準。

表 4-15、新屋試區一期稻作台種 14 號稻米品質與產量因子間之相關係數。

	糙米率	白米率	完整米率	透明度	心白	背白	腹白	直鏈澱粉含量	凝膠展延性	食味值
白米率	0.603*									
完整米率	0.492	0.916**								
透明度	-0.681*	-0.462	-0.383							
心白	0.721**	0.480	0.390	-0.995**						
背白	-0.599*	-0.385	-0.439	0.856**	-0.865**					
腹白	-	-	-	-	-	-				
直鏈澱粉含量	0.339	0.311	0.178	-0.271	0.315	-0.510	-			
凝膠展延性	0.681*	0.477	0.277	-0.942**	0.942**	-0.665*	-	0.235		
食味值	-0.412	-0.393	-0.155	0.519	-0.507	0.027	-	0.328	-0.726**	
產量	0.121	0.065	0.323	-0.268	0.272	-0.688*	-	0.478	-0.043	0.653*

*,** 分別為 0.05 及 0.01 顯著水準。

第五章 建立植被指數推估產量模式及驗證

一、前言

水稻是臺灣地區主要的糧食作物，正確掌握水稻種植面積和產量是糧政單位重要的工作之一。目前主要利用航照調查全台灣地區各年期稻作種植面積，此種作業方式雖然準確，但工作流程不連貫，耗費人力且時效性差，因此已有許多相關研究，探討如何由遙測影像判釋稻作面積(陳與曾，1999；邵與史，2000；蕭等，2000；蕭等，2004)。農委會科技計畫則自90年度起即由成大、台大、逢甲、和工研院等四個工作團隊探討如何由衛星遙測影像自動判釋水稻種植面積。

除水稻種植面積外，糧政單位為掌握糧源還需調查水稻的產量，目前主要係利用分散於全省約1500個調查點的單位面積產量調查資料，再配合上述水稻種植面積資料估算全省的水稻產量。此種作業方式必須於水稻收穫後才能獲得所需資料，不僅需耗費大量調查人力且時效性差，也不利於公糧收購量與拋售時機、糧商進出口量估算、糧商與農政單位對各期米質的先期掌握、稻作災害保險等決策的訂定與推行，因此如何利用收穫前的遙測影像推估當期作稻作產量的研究乃具有實務工作上的重要意義，將是另一高難度挑戰。

劉等(2002)曾利用直昇機搭載DMSV多頻譜觀測儀獲取影像，並依據國外研發之模式估算田間水稻產量。吳等(2002)則利用SPOT多時段影像與地真產量資料推導估算水稻產量的迴歸模式。申等(2002)利用多年期地真水稻植被反射光譜測定資料，指出在抽穗期間水稻植被反射光譜中綠光段(GRN)、紅光段(RED)、和近紅外光段(NIR)的動態變動最小，因此適合作為建立推估當期作水稻產量之遙測模式的

自變數，並利用波段比值(NIR/RED、NIR/GRN)已分別建立可估測一、二期作水稻產量所需之複迴歸模式，且經驗證可用於推估新年期和遭受乾旱逆境之水稻產量(申等，2003；Chang *et al.*, 2005)。

應用遙測技術進行稻米品質判釋，將涉及對於植被反射光譜細微差異變動之辨認。影響米質的諸多因素(如品種、肥料用量、土壤管理、病蟲害管理)，也同時影響植被的反射光譜。因此，應用遙測技術進行稻米品質判釋，將涉及對於植被反射光譜細微差異變動之辨認。例如，薛等(2004)指出水稻成熟期植被反射光譜中1650nm 和660nm的比值和標準差植被指數與穀粒加工品質呈顯著負相關，米粒蛋白質含量與生育期植被反射光譜和SRVI、NDVI等許多植被指數呈現極顯著相關，澱粉含量與乳熟期710 nm和660 nm的比值和標準差植被指數相關最好。Hansen *et al.* (2002)曾利用NDVI推估燕麥與大麥和水稻穀粒的蛋白質含量。Sakaiya and Inoue (2007)也利用NDVI推估水稻穀粒的蛋白質含量。氮營養狀態是影響水稻產量和品質最大的管理因素。Shibayama *et al.* (1993)利用水稻植被在620和760nm的反射值(兩變數直線迴歸式)，或400、620和880nm的反射值(三變數直線迴歸式)與葉片氮含量有最好之相關。Inoue *et al.* (1998)指出 $[(R1100-R660)/(R1100 + R660)]$ 或內含R550,R830, R1650, 與R2200之四變數迴歸式與水稻葉片氮含量有線性相關。申等(2000)指出 $dR/d\lambda |_{735}$ 除可以分辨稻株體內氮素的濃度外，也具有可區別田間稻株氮營養狀況空間分佈的能力。進而利用 $dR/d\lambda |_{735}$ 建立稻株氮營養遙測模式，並於台北、台中、嘉義、屏東等地進行不同地區多年期之田間驗證，測試結果均指出所建立的稻株氮營養遙測模式可以快速鑑別田間穗肥施用期間稻株的氮營養狀態，足以提供做為田間穗肥精準施用的依據(申等，2001；Lee *et al.*, 2005)。除了稻株營養狀態及葉片氮素含量外，水稻米粒品質之遙測判釋亦有學者進行中，Sun *et al.* (2005)應用高光譜反射率建立參數預測水稻葉片葉綠素，以及水稻米粒蛋白質含量，結果顯示利用遙測技術推估水稻米粒蛋白質含量進而估測稻米品質是可行

的。

精準的預估農作物產量是農業產官學界長期以來追求的目標，此需包括作物面積的判識與作物單位產量的推估，二者相乘才能得到總產量。作物產量的預估通常透過不同生長階段的農藝性狀與其產量之相關性分析。以水稻產量預估為例，葉面積與葉綠素二種農藝性狀與產量有高度相關(Raj and Tripathi, 1999)。然而，葉綠素含量則隨植物年齡、品系種類、生長季節而異(Ramesh *et al.*, 2002)。因此，如何在水稻生長發育過程，運用其最適當植齡以達到最精準的產量預估，極為重要。

由於水稻氮肥隨施量之增加其產量與葉綠素含量亦隨之增加，罹患病蟲害的機率也隨之增高，又其稻米品質則隨之降低。施肥過量之稻株生長過度繁茂而易倒伏，其稻米品質往往欠佳(Chamura *et al.*, 1972)。米粒粗蛋白含量隨著氮肥施用量增加而增加，品質因而降低(賴等，1997)。又衛星遙測水稻的NDVI與其葉綠素含量成正相關，故可明確推論NDVI應與與水稻產量成正相關而與米的品質成負相關，兩者都需透過統計分析。透過衛星遙測水稻NDVI以監測水稻產量與品質，需進行實際驗證與追求高的精準度。

福衛二號是台灣自製陸地資源衛星，已於2004/5/21發射，自2004/7/1正式拍攝台灣陸域影像。福衛二號之功能特性有助於衛星遙測對作物生長與生物多樣性研究，台灣科技界必須把握良機善用福衛二號。未來5-10年將是台灣植物界研究生態與生理、農業界發展精準農業及其他領域針對本土地面物大顯身手之良機。良機稍縱即逝，台灣農業界需好好運用福衛二號之強大功能。

如何精準判識全國水稻一年二期水稻栽種面積與如何利用收穫前的遙測影像

推估當期作稻作產量的研究，將是二大挑戰。同時解決一期與二期水稻栽種面積與單位產量與米質之快速與精準的先期推估，才能真正建構現代化水稻精準管理之模式。



二、材料與方法

水稻產量地真樣區設置

本研究之水稻樣區設置在南部高雄縣美濃鎮、中部彰化縣竹塘鄉、北部桃園縣新屋鄉及東部花蓮縣玉里鎮四個地區。每一地區一期稻作種植品種、插秧及收穫日期如表 5-1 所示。氮肥施用量依研究所需設定為四個等級(0、60、120、180 kg/ha)，另外磷、鉀肥則分別為 60、60 kg/ha，肥料施用量及施用時程如表 5-2 所示。水稻收穫時，除各試驗田區外，在試驗田區附近之一般稻田亦進行坪割取樣，作為產量預測模式之驗證資料。各試驗田區水稻收穫後，稻株脫粒進行烘乾，使水分含量達約 13.5%左右，使用風穀機、風選調製去除雜草、石塊及穀屑，再秤量乾穀重，進行產量調查。

衛星影像

福衛二號衛星影像及法國 SPOT 衛星之遙測反射光譜資料向國立中央大學太空及遙測研究中心(CSRSR)申購，福衛二號衛星影像都屬第三等級(level 3)，SPOT 衛星影像都屬第十等級(level 10)數位影像。影像正上空無任何雲層遮避。本研究使用之花蓮縣玉里鎮、高雄縣美濃鎮、彰化縣竹塘鄉及桃園縣新屋鄉四個地區之福衛二號及法國 SPOT 衛星影像拍攝之日期，如表 5-3 所示。本研究採用之植生指數為常態化差異植生指數(normalized difference vegetation index, NDVI)，其計算公式為 $NDVI = (NIR - R) / (NIR + R)$ 。其中 NIR 為近紅外光反射率，R 為紅光反射率。

三、結果與討論

台灣地區一期稻作插秧日期由南部地區最早開始，愈往北部則插秧日期愈延後。由表 5-1 可明顯看出，南部高雄縣美濃試區在一月下旬即插秧，花蓮縣玉里及彰化縣竹塘試區則在二月上旬插秧，而桃園縣新屋鄉則在三月初才插秧。各地區慣用水稻品種也不相同，南部美濃試區種植高雄 145 號(KS 145)，東部玉里試區種植台稉 2 號(TK 2)，中部竹塘試區種植台稉 11 號(TK 11)，北部新屋試區種植台稉 14 號(TK 14)。一期稻作試驗進行相當倉促，美濃試區之試驗田區選擇是在農民插秧完成後才選定，因此田區分散四地，土壤肥力亦不一致。由於一期稻作試驗匆忙進行，部分地真調查項目未及進行，將在二期稻作及來年期作一併進行調查分析。

各試區一期稻作收穫後稻穀產量如表 5-4 所示。隨著氮肥施用量的增加，稻穀產量亦明顯的增多。在美濃試區，可發現 0 kg-N/ha 處理者稻穀產量非常低，僅有 1403.5 kg/ha，而 60、120 及 180 kg-N/ha 處理者其稻穀產量並未有顯著差異，且最高產量落在 60 kg-N/ha 處理者。此乃因為美濃試區試驗田地分散四處，並非為同一塊田地。0 kg-N/ha 處理田區長年作為秧苗苗圃，土壤肥力相當低，又在不施氮肥的情況下，因此其稻穀產量非常低。而 60 及 120 kg-N/ha 處理田區，其前作為種植豆科作物紅豆，因此其土壤肥力相當高，雖然氮肥施用量為 60 及 120 kg/ha，但其稻穀產量卻超過 180 kg-N/ha 處理者。而在玉里、竹塘及新屋試區，試驗田區為同一田地劃分而成，因此土壤肥力不影響外施氮肥之效果。在玉里試區，隨著氮肥施用量增加，稻穀產量分別為 2384.5、4357.9、4862.1 及 5117.8 kg/ha；在竹塘試區，隨著氮肥施用量增加，稻穀產量分別為 4437.9、5343.6、6605.2 及 6803.2 kg/ha；在新屋試區，隨著氮肥施用量增加，稻穀產量分別為 3697.2、3984.7、4506.9 及 4941.2 kg/ha。

本研究將氮肥用量設定為四個等級(表 5-2)，藉由不等量氮肥施用，造成各處理樣區間水稻生長勢、葉色和產量之差。在此，本研究不考慮原本土壤肥力造成之影響，只要施用之氮肥等級能將水稻生育期間衛星影像之 NDVI 指數及稻穀產量與稻米品質之差異顯現出來即可。

衛星遙測的植生指數 NDVI 可以顯示地面植被的綠度或生理狀況，常被用以監測地面植物的生長狀況、其所處的生態環境或逆境與變遷。正常生長的水稻，葉色鮮綠，植株直立，其衛星遙測影像之常態化差異植生指數 NDVI 隨著水稻生育日數而逐步增加。插秧初期，水稻幼苗剛發育，此時稻田裡裸露之土壤及其淹覆之水分影響甚大，其 NDVI 都很低，與水體或裸露地之反射特性相似。隨著生育日數增加，稻株已逐漸覆蓋原裸露之土壤與水，水稻葉冠(canopy)已成為影響衛星遙測植生指數最重要的地面物。此後，由於稻株已全面覆蓋地面，將只有水稻的葉色及葉面積等農藝性狀影響衛星遙測之植生指數。

玉里試區使用 0131sp2、0222sp5、0312fs2、0318fs2、0402fs2、0418sp2、0605sp2、0623sp5 等八幅衛星影像(表 5-3)。由圖一的趨勢線可明顯的看出玉里試區一期稻作期間水稻衛星遙測植生指數 NDVI 的變化模式。插秧後初期，NDVI 仍相當低，隨著生育日數增加，由營養生長期進入生殖生長期，NDVI 快速累積增加，約在抽穗時(90 天左右)達到最高峰，而後進入成熟期，此時 NDVI 逐漸降低。在不同氮肥等級處理下，玉里試區一期稻作台梗 2 號，在各時期衛星遙測 NDVI 指數皆隨著氮肥施用量的增加而增高，顯示增施氮肥影響水稻葉色、分蘗數、葉面積等進而影響衛星遙測 NDVI 植生指數(圖 5-1)。

美濃試區使用 0124sp4、0130sp2、0207fs2、0220sp2、0315sp5、0331fs2、0510fs2 等七幅衛星影像(表 5-3)。將收穫後之 NDVI 植生指數當作 0，與各時期衛星影像

資料作圖，可得到美濃地區一期稻作期間水稻衛星遙測植生指數 NDVI 之變化模式(圖 5-2)。美濃地區一期稻作高雄 145 號 NDVI 之變化模式與玉里試區相似，營養生長期及生殖生長期 NDVI 快速累積增加，進入成熟期後，NDVI 逐漸降低。在不同氮肥等級處理下，由於土壤肥力效應的影響，各時期 NDVI 指數最高者為 60 kg-N/ha 處理者，其次為 120 kg-N/ha 處理者，再者為 180 kg-N/ha 處理者，最末為 0 kg-N/ha 處理者。

竹塘試區使用 0205sp2、0310fs2、0317sp4、0330sp5、0407fs2 等五幅衛星影像(表 5-3)。將收穫後之 NDVI 植生指數當作 0，與此五幅衛星影像資料作圖，可得到竹塘地區一期稻作期間台稔 11 號水稻衛星遙測植生指數 NDVI 之變化模式(圖 5-3)，亦與玉里試區相類似。隨著氮肥施用量的增加，各時期衛星遙測 NDVI 指數皆增加。

新屋試區使用 20311fs2、0317sp4、0508sp4、0617fs2、0710sp4、0720fs2 等六幅衛星影像(表 5-3)。將插秧前之 NDVI 植生指數當作 0，與此六幅衛星影像資料作圖，可得到新屋地區一期稻作期間台稔 14 號水稻衛星遙測植生指數 NDVI 之變化模式(圖 5-4)，亦與其他試區相類似。而隨著氮肥施用量的增加，各時期衛星遙測 NDVI 指數皆增加。

本研究嘗試建立以衛星遙測 NDVI 植生指數推估水稻產量之預測模式，藉由不等量氮肥的施用，造成各處理樣區間水稻生長勢、葉色和產量之差，進而反應於衛星遙測 NDVI 植生指數。玉里試區一期稻作移植後 56 天衛星影像 NDVI 指數與稻穀產量線性迴歸之決定係數(r^2)最高，達 0.94；41 天者次之， r^2 為 0.91；35 天者再其次， r^2 為 0.86；72 天者再其次， r^2 為 0.83；120 天者最末， r^2 為 0.64 (圖 5-5)。美濃試區一期稻作移植後 49 天衛星影像 NDVI 指數與稻穀產量線性迴歸之決定係

數最高，達 0.98；65 天者次之， r^2 為 0.97；105 天者再次之， r^2 為 0.66；26 天者最末， r^2 為 0.50 (圖 5-6)。竹塘試區一期稻作移植後 59 天，衛星影像 NDVI 指數與稻穀產量線性迴歸之 r^2 為 0.80，51 天者為 0.79(圖 5-7)。新屋試區一期稻作移植後 65 天衛星影像 NDVI 指數與稻穀產量線性迴歸之 r^2 為 0.86，其餘影像之 r^2 皆很低(圖 5-8)。綜合四個試驗區的結果，在水稻由營養生長期進入生殖生長期時，約在移植後 60 天時，其衛星遙測 NDVI 植生指數與稻穀產量之相關性最高。

台灣水稻自播種到可採收之生命史約 125 天，可分為秧苗期(約第 0~15 天)、營養生長期(約第 15~60 天)、生殖生長期(約第 60~95 天)、成熟期(約第 95~125 天)、及收穫期(約第 125 天以後)。Ramesh *et al.* (2002) 以迴歸理論分析印度水稻葉綠素含量與其產量之關聯性，發現第 79 天之葉綠素含量與產量之相關性最佳。而以灰關聯分析探討印度水稻抽穗前後不同生長階段之葉綠素含量與產量之關聯性，以水稻葉片葉綠素含量作為預估產量最好的時期為第 72-93 天之孕穗期及抽穗期最佳(Huang *et al.*, 2005)。Lo and Chen (2003)的研究中指出，水稻台稉 9 號與台農 67 號生育期葉色值與單位面積稻穀產量之關係，以抽穗前後兩週最密切。本研究中四個試區，水稻在移植後 60 天時，約為播種後第 75~80 天間之孕穗期，其衛星遙測 NDVI 指數與稻穀產量之相關性最佳，與前人研究之結果相符合。因此，建立衛星遙測 NDVI 指數推估稻穀產量之最佳預測模式，玉里試區為移植後第 56 天之 $\text{Yield (kg/ha)} = 7889.7 \times \text{NDVI} + 710.94$ ；美濃試區為移植後第 65 天之 $\text{Yield (kg/ha)} = 14654 \times \text{NDVI} - 364.14$ ；竹塘試區為移植後第 59 天之 $\text{Yield (kg/ha)} = 14063 \times \text{NDVI} + 1669.4$ ；新屋試區為移植後第 65 天之 $\text{Yield (kg/ha)} = 13233 \times \text{NDVI} + 1768.6$ 。

為驗證各試區產量推估預測模式之準確性，在玉里、竹塘及新屋試區試驗田區附近之一般稻田進行坪割取樣，並在衛星影像上萃取 NDVI 植生指數資料。玉

里試區驗證田區實測產量與預測產量之關係如圖 5-9。大部分的田區推估產量皆在估算誤差之內，但有些田區之預測產量有低估之情形，與實際產量之差距大於估算誤差。由表 5-5 中可較明顯的看出有些田區之預測產量與實測產量差異超過 30%，但是整體平均殘差僅為 10.73%，預測模式之準確率約達 90%。竹塘試區驗證田區預測產量大都在估算誤差之內(圖 5-10)，最大誤差超過 20%，整體平均殘差為 12.26%，預測模式之準確率約達 87%(表 5-6)。新屋試區驗證田區預測產量亦大都在估算誤差之內(圖 5-11)，最大誤差約為 20%，整體平均殘差為 10.82%，預測模式之準確率達 89%(表 5-7)。

將玉里試區第 56 天、美濃試區第 65 天、竹塘試區第 59 天及新屋試區第 65 天之衛星遙測 NDVI 植生指數與稻穀產量之相關性合併一起，其線性迴歸之 r^2 值僅有 0.34，而西半部試區除美濃 0 kg-N/ha 試驗田區之外，其餘試驗田區包括竹塘、新屋試區及美濃 60、120、180 kg-N/ha 試區之衛星遙測 NDVI 植生指數與稻穀產量線性迴歸之 r^2 高達 0.72，而東部之玉里試區則無法併入計算(圖 5-12)。造成此現象之原因可能為東部地區之地理氣候環境與西半部地區的差異所致。西半部試區稻穀產量推估之最佳預測模式為 $\text{Yield (kg/ha)} = 8602.2 \times \text{NDVI} + 2845.3$ ，驗證田區之預測產量大都位在估算誤差之內(圖 5-13)，誤差最大者達 24.07%，但是整體平均殘差僅為 8.6%，預測模式準確率超過 90%以上(表 5-8)。

作物產量的預測方法大都根據對產量組成因子的知識，田間實地經驗，以及根據大量觀測數據，加以歸納或統計分析所導出。所根據的預測因子，包括肥料用量、氣象因素、病蟲害因素等，或三者兼而有之。各種環境因子，包括氣象因素及生物因素，相互之間有密切相關關係。多種因子的組合就屬於多元線性迴歸之預測模式。本研究中，稻穀產量與衛星遙測 NDVI 指數間明顯的呈現線性關係，故嘗試建立單一因子 NDVI 指數推估稻穀產量之線性預測模式。而灰色系統理論

中之灰色預測，是屬於指數迴歸之預測模式，因此在本研究中無法適用。因為僅有一期稻作之資料，所以在不同試區各有其迴歸預測模式，經實地驗證，其準確率相當高。整合西半部資料，得到的迴歸預測模式，經驗證亦具有高準確率。因此，讓我們深具信心，待整合氣象因子或病蟲害因子以及多期稻作之累積資料後，可以建立一個普遍的預測模式，用於推估各地區之稻穀產量。

本研究初步建立直接的衛星影像遙測資料對水稻產量的推估預測模式，後續仍需進行修正與改進。本年度全台地區除了嘉義太保地區一期稻作期間有稻熱病疫情發生外，並沒有重大農業災害，諸如氣象災害或大規模病蟲害發生。因此本年度一期稻作建立之預測模式不包括氣象因子以及病蟲害因子。後續之研究將納入氣象以及病蟲害等環境、生物因子，作為預測模式之修正改進，進一步提高預測準確性。



表 5-1、水稻試驗地區、品種及插秧、收穫日期。

地 區	品 種	插秧日期	收穫日期
高雄美濃	KS145	1/24~1/26	5/22
花蓮玉里	TK2	2/5	6/15
彰化竹塘	TK11	2/7	6/20
桃園新屋	TK14	3/4	7/13



表 5-2、水稻施肥用量與時程*。

項 目	總量 (kg/ha)	基肥	一追	二追	穗肥
施用時期		不施肥	插秧後 8-10 天	插秧後 22-24 天	幼穗分化至 0.2 公分， 約插秧後 75-85 天
N 分配比例	100%	0%	40%	35%	25%
用量分配	0	0	0	0	0
	60	0	24	21	15
	120	0	48	42	30
	180	0	72	63	45
P 分配比例	100%	0	100%		
用量分配	60	0%	60		
K 分配比例	100%	0%	40%	35%	25%
用量分配	60	0	24	21	15

*以每公頃用量及三要素量表示。

表 5-3、本研究使用之福衛二號及法國 SPOT 衛星影像其被拍攝之日期。

地 區	衛星影像				
花蓮玉里	0131sp2*	0222sp5	0312fs2	0318fs2	0402fs2
		0418sp2	0605sp2	0623sp5	
高雄美濃	0124sp4	0130sp2	0207fs2	0220sp2	0315sp5
		0331fs2	0510fs2		
彰化竹塘	0205sp2	0310fs2	0317sp4	0330sp5	0407fs2
桃園新屋	0311fs2	0317sp4	0508sp4	0617fs2	0710sp4
		0720fs2			

* fs2，福衛二號衛星影像；sp2，SPOT 2 衛星影像；sp4，SPOT 4 衛星影像；sp5，SPOT 5 衛星影像。



表 5-4、各試驗區一期稻作稻穀產量。

	玉里	美濃	竹塘	新屋
	kg/ha			
N0	2384.5c*	1403.5b	4437.9c	3697.2d
N60	4357.9b	6325.5a	5343.6b	3984.7c
N120	4862.1ab	6263.6a	6605.2a	4506.9b
N180	5117.8a	5983.6a	6803.2a	4941.2a

* 同一地區內相同字母者為未達 $LSD_{0.05}$ 顯著差異。



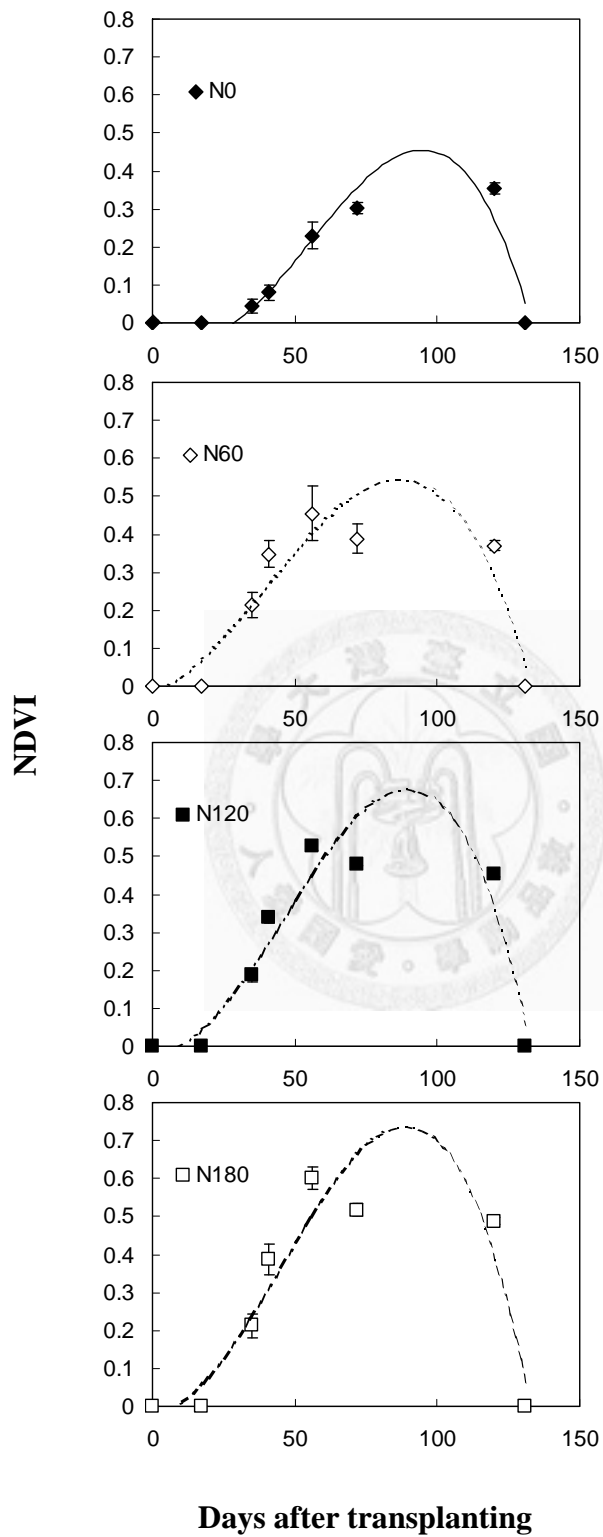


圖 5-1、玉里試區一期稻作衛星遙測植生指數 NDVI 變化模式。

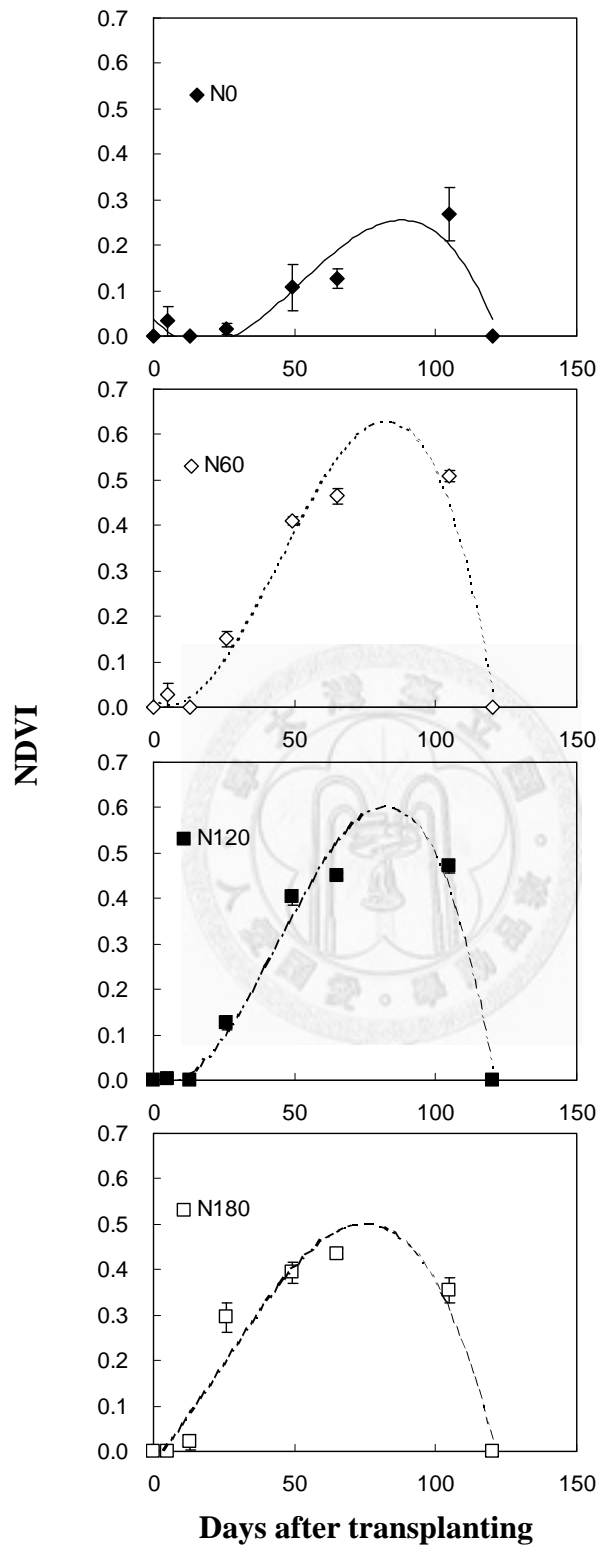


圖 5-2、美濃試區一期稻作衛星遙測植生指數 NDVI 變化模式。

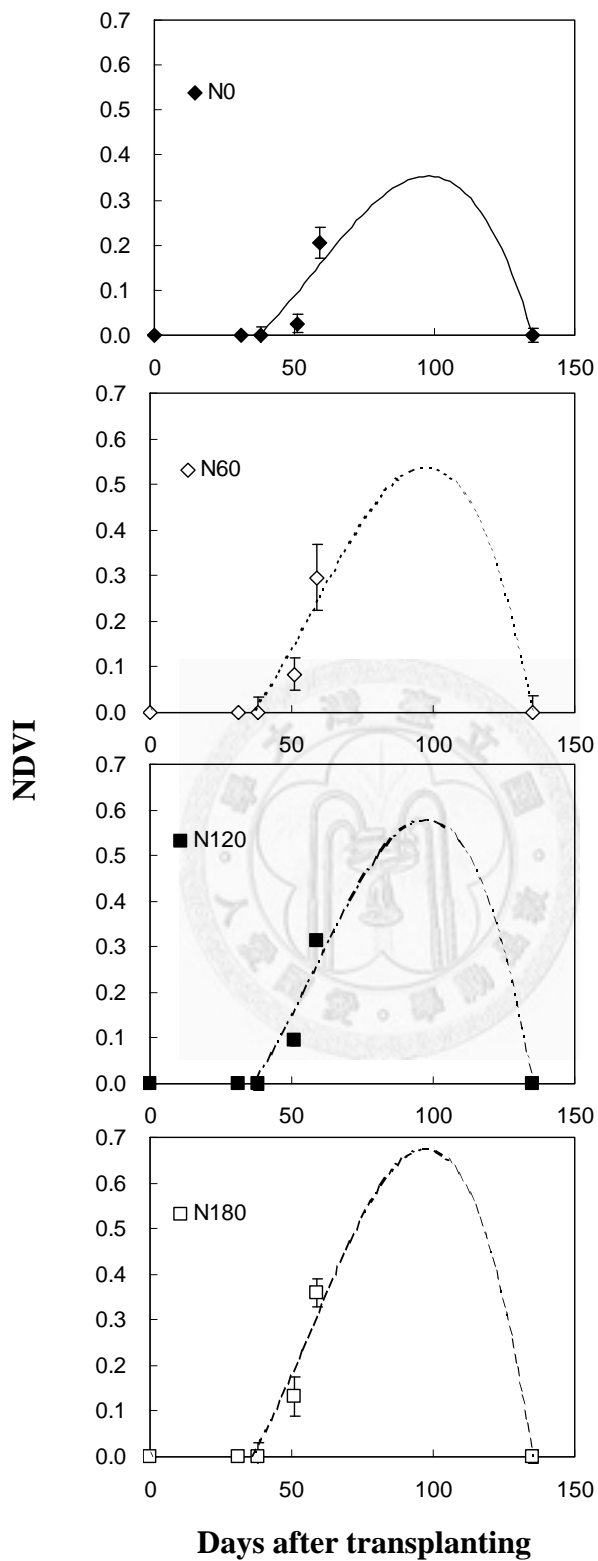


圖 5-3、竹塘試區一期稻作衛星遙測植生指數 NDVI 變化模式。

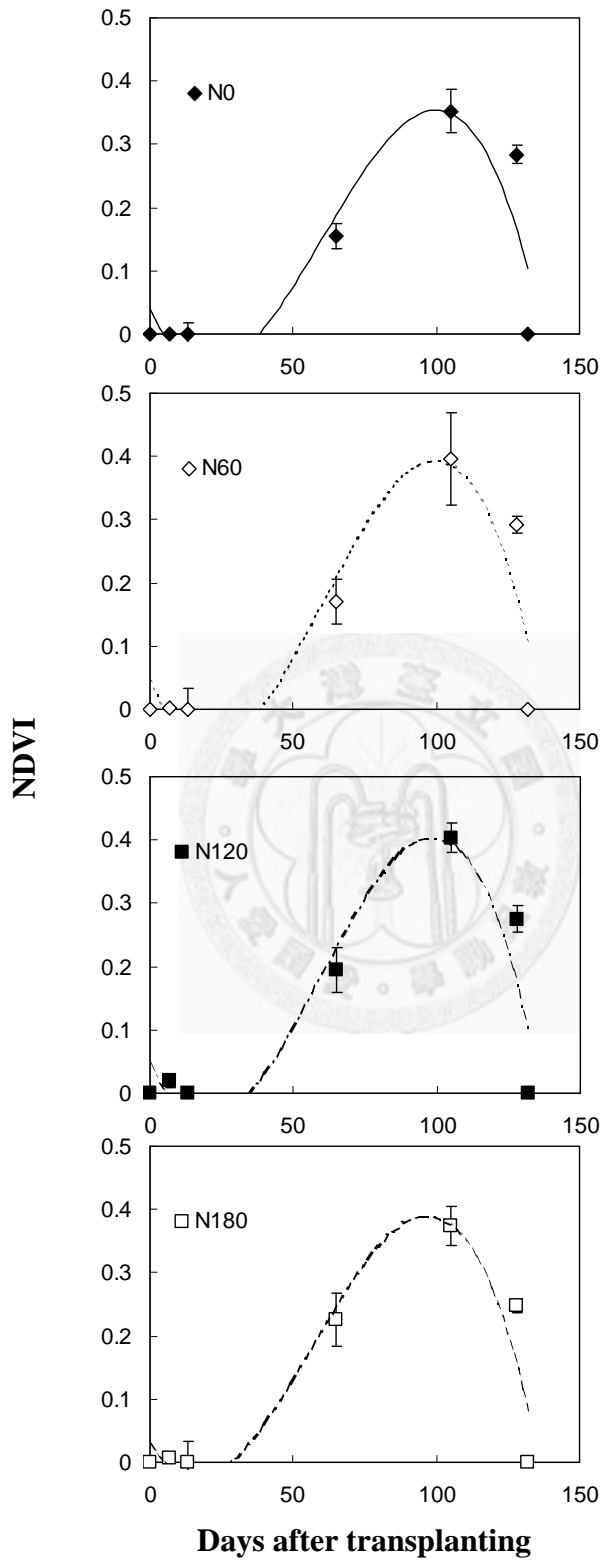


圖 5-4、新屋試區一期稻作衛星遙測植生指數 NDVI 變化模式。

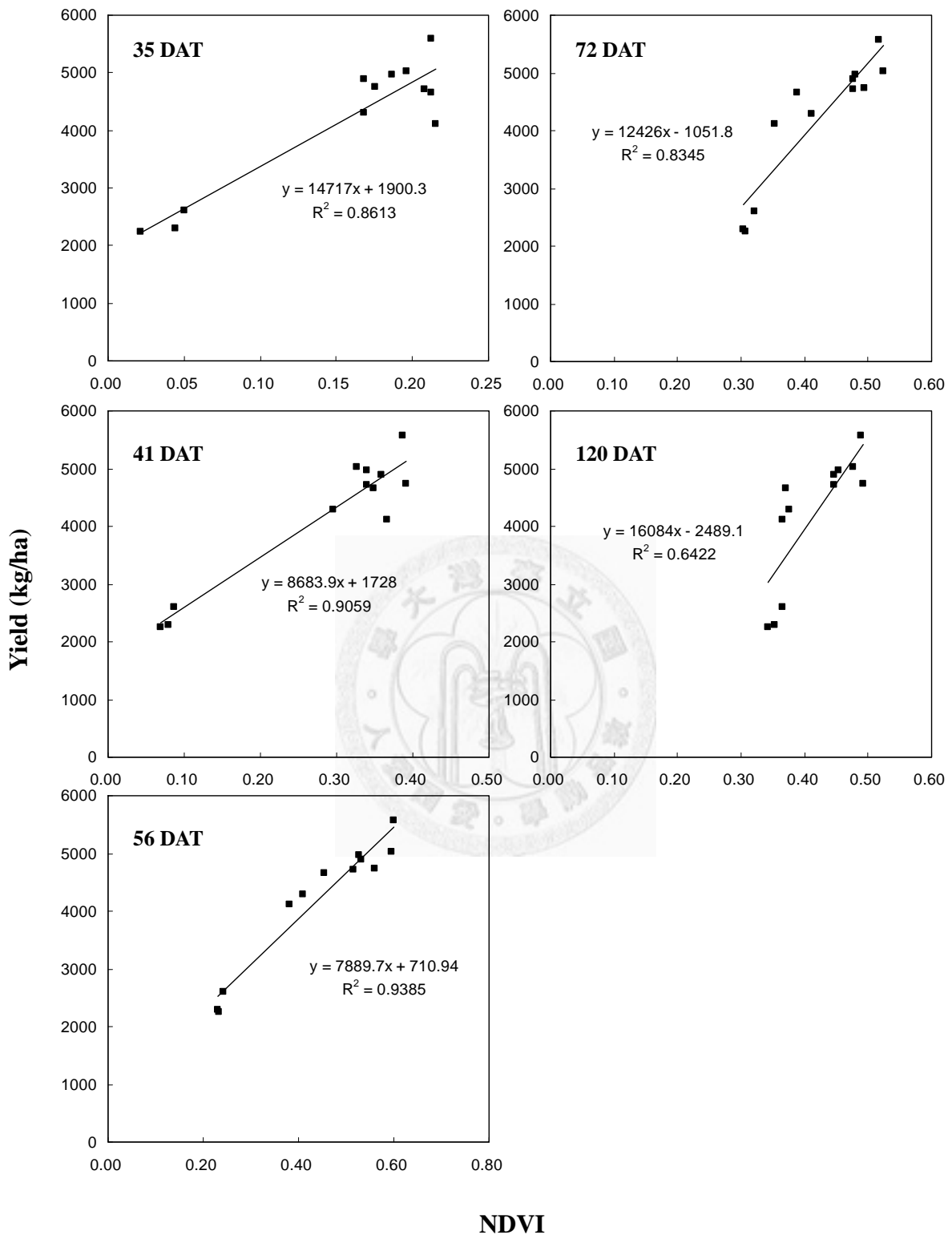


圖 5-5、玉里試區一期稻作衛星遙測植生指數 NDVI 與穀粒產量之關係。DAT，days after transplanting。

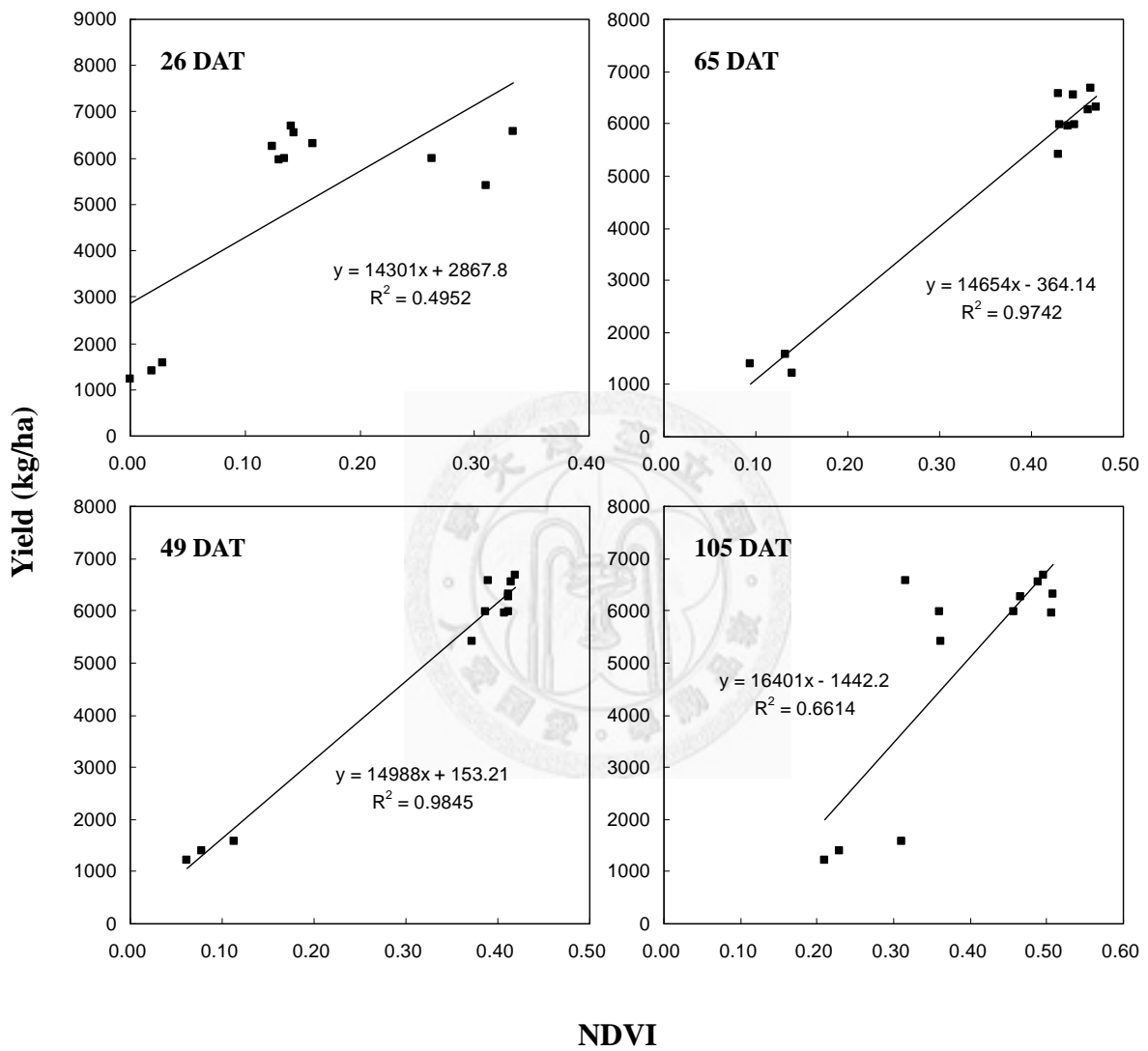


圖 5-6、美濃試區一期稻作衛星遙測植生指數 NDVI 與穀粒產量之關係。DAT，days after transplanting。

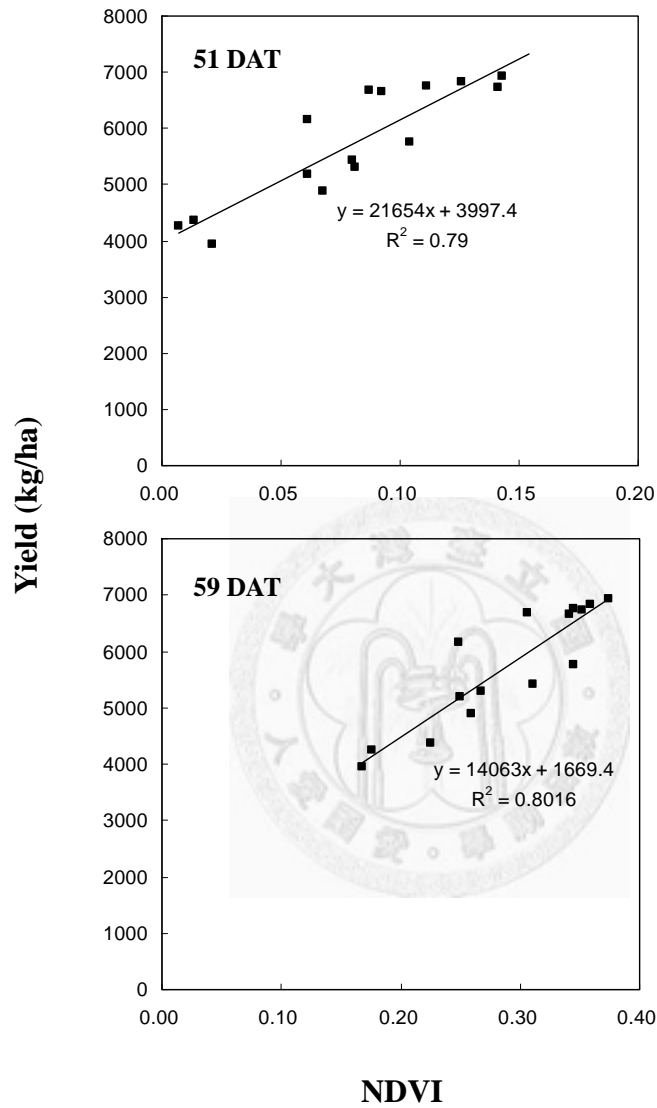


圖 5-7、竹塘試區一期稻作衛星遙測植生指數 NDVI 與穀粒產量之關係。DAT，days after transplanting。

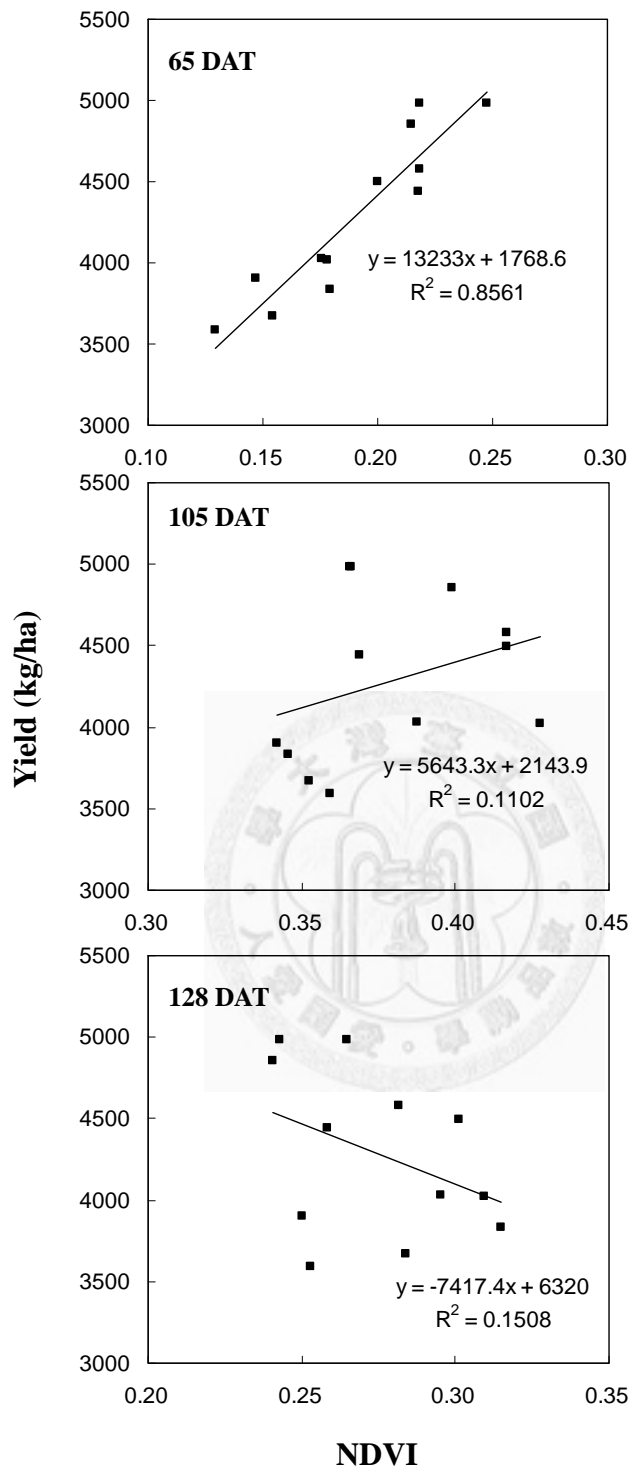


圖 5-8、新屋試區一期稻作衛星遙測植生指數 NDVI 與穀粒產量之關係。DAT，days after transplanting。

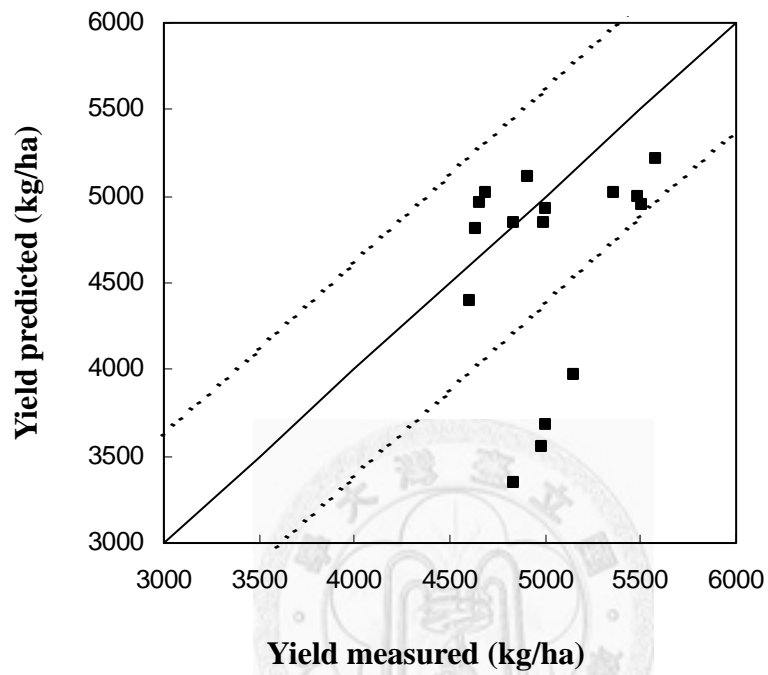


圖 5-9、玉里試區產量預測模式之驗證。實線所示為預測值=實測值，虛線為產量估算之誤差值。

表 5-5、玉里試區水稻產量預測模式殘差分析。

產量預測模式	預測值	實測值	殘差 (%)
$Y = 7889.7x + 710.94$			
	4967.2	4656.3	6.68
	5115.6	4914.3	4.10
	5018.8	4686.0	7.10
	5212.4	5580.3	6.59
	4392.8	4599.7	4.50
	4922.0	5005.7	1.67
	4813.6	4639.4	3.75
	4843.6	4831.3	0.26
	4848.2	4992.6	2.89
	5014.4	5361.2	6.47
	5000.0	5490.0	8.93
	4954.2	5509.3	10.08
	3556.4	4982.3	31.00
	3340.8	4833.1	30.88
	3967.0	5154.0	20.38
	3677.5	5001.8	26.48
Max. accuracy			99.74
Min. accuracy			69.00
Average			10.73

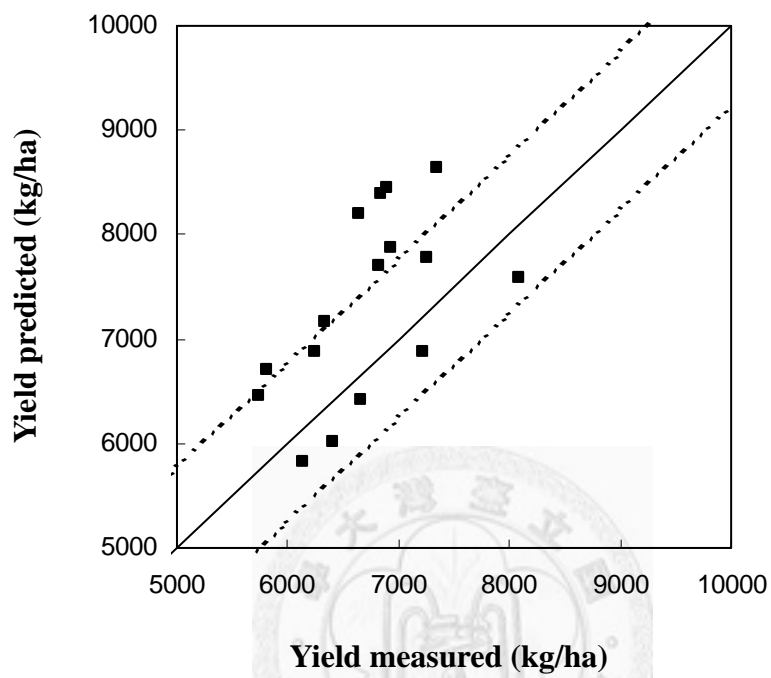


圖 5-10、竹塘試區產量預測模式之驗證。實線所示為預測值=實測值，虛線為產量估算之誤差值。

表 5-6、竹塘試區水稻產量預測模式殘差分析。

產量預測模式	預測值	實測值	殘差 (%)
$y = 14063x + 1669.4$			
	6458.4	5733.3	12.65
	6875.0	6248.3	10.03
	6697.1	5820.2	15.07
	7166.1	6341.8	13.00
	7579.9	8091.3	6.32
	7772.7	7250.5	7.20
	6426.4	6653.3	3.41
	6875.5	7216.6	4.73
	8449.8	6901.3	22.44
	8638.7	7340.3	17.69
	8389.8	6837.7	22.70
	8205.7	6649.5	23.40
	7696.4	6814.4	12.94
	7873.7	6935.9	13.52
	6023.9	6412.3	6.06
	5822.7	6128.9	5.00
Max. accuracy			96.59
Min. accuracy			76.60
Average			12.26

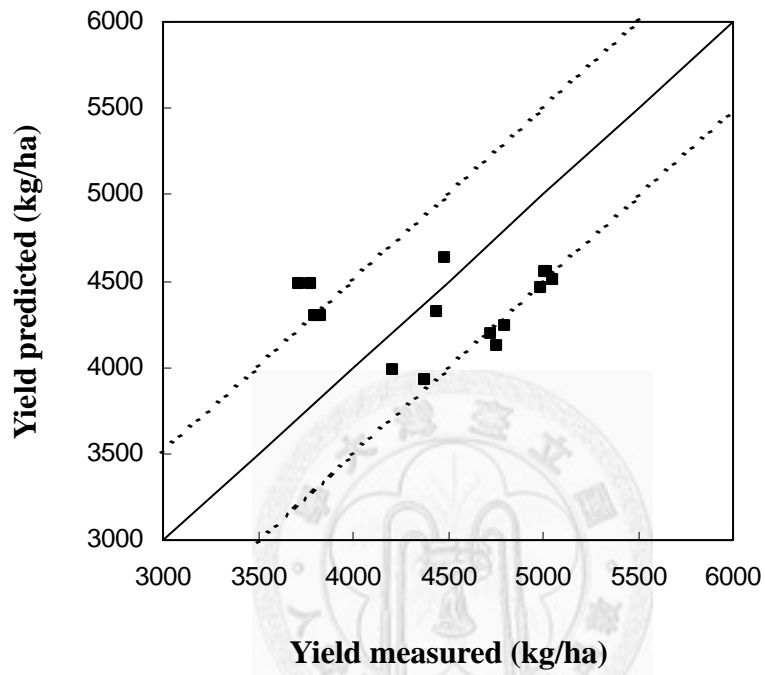


圖 5-11、新屋試區產量預測模式之驗證。實線所示為預測值=實測值，虛線為產量估算之誤差值。

表 5-7、新屋試區水稻產量預測模式殘差分析。

產量預測模式	預測值	實測值	殘差 (%)
$y = 13233x + 1768.6$			
	4191.5	4730.6	11.39
	4242.1	4804.2	11.70
	4118.4	4756.0	13.41
	4315.8	4440.3	2.80
	3931.7	4378.2	10.20
	4634.7	4481.9	3.41
	3984.7	4212.5	5.41
	4510.6	5050.0	10.68
	4554.5	5018.1	9.24
	4554.5	5011.1	9.11
	4464.2	4993.1	10.59
	4292.1	3831.9	12.01
	4292.1	3797.2	13.03
	4487.7	3718.1	20.70
	4487.7	3782.4	18.65
Max. accuracy			97.20
Min. accuracy			79.30
Average			10.82

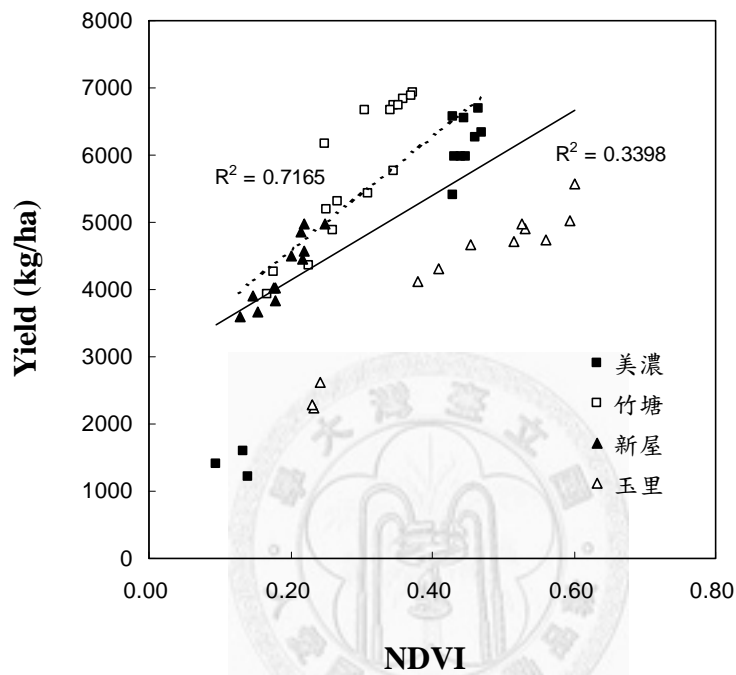


圖 5-12、玉里、美濃、竹塘及新屋四個試區一期稻作衛星遙測植生指數 NDVI 與穀粒產量之關係。——，四個試區合併資料之迴歸線；-----，竹塘、新屋試區及美濃 60、120、180 kg-N/ha 試區合併資料之迴歸線。

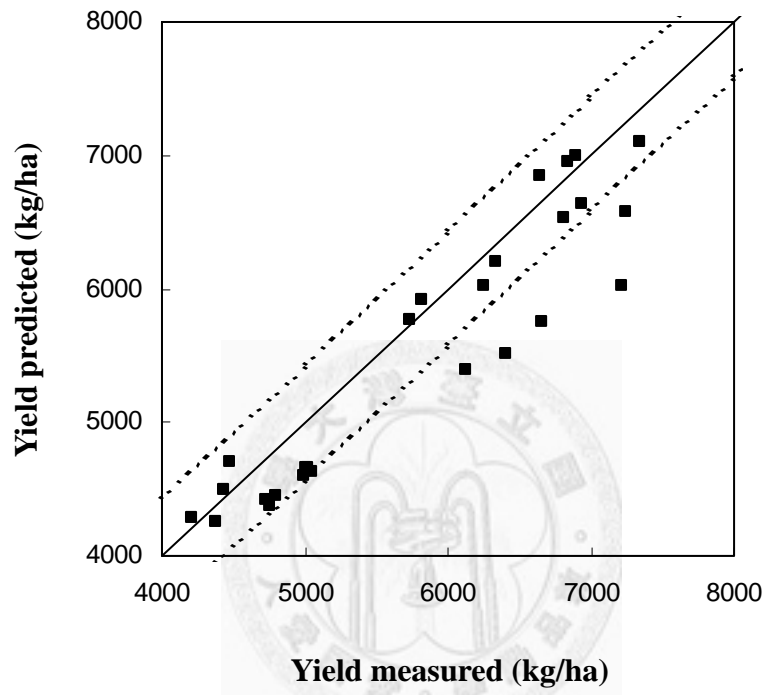


圖 5-13、西半部試區產量預測模式之驗證。實線所示為預測值=實測值，虛線為產量估算之誤差值。

表 5-8、西半部試區水稻產量預測模式殘差分析。

產量預測模式	預測值	實測值	殘差 (%)
$y = 8602.2x + 2845.3$			
	5774.7	5733.3	0.72
	6029.5	6248.3	3.50
	5920.7	5820.2	1.73
	6207.6	6341.8	2.12
	6460.7	8091.3	20.15
	6578.6	7250.5	9.27
	5755.1	6653.3	13.50
	6029.8	7216.6	16.44
	6992.8	6901.3	1.33
	7108.3	7340.3	3.16
	6956.1	6837.7	1.73
	6843.5	6649.5	2.92
	6532.0	6814.4	4.14
	6640.4	6935.9	4.26
	5508.9	6412.3	14.09
	5385.8	6128.9	12.12
	4420.4	4730.6	6.56
	4453.2	4804.2	7.31
	4372.8	4756.0	8.06
	4501.1	4440.3	1.37
	4251.4	4378.2	2.90
	4708.4	4481.9	5.05
	4285.9	4212.5	1.74
	4627.7	5050.0	8.36
	4656.3	5018.1	7.21
	4656.3	5011.1	7.08
	4597.6	4993.1	7.92
	4485.7	3831.9	17.06
	4485.7	3797.2	18.13
	4612.9	3718.1	24.07
	4612.9	3782.4	21.96
Max. accuracy			99.28
Min. accuracy			75.93
Average			8.60

第六章 建立植被指數推估米質模式及驗證

一、前言

水稻是臺灣地區主要的糧食作物，正確掌握水稻種植面積和產量是糧政單位重要的工作之一。目前主要利用航照調查全台灣地區各年期稻作種植面積，此種作業方式雖然準確，但工作流程不連貫，耗費人力且時效性差，因此已有許多相關研究，探討如何由遙測影像判釋稻作面積(陳與曾，1999；邵與史，2000；蕭等，2000；蕭等，2004)。農委會科技計畫則自90年度起即由成大、台大、逢甲、和工研院等四個工作團隊探討如何由衛星遙測影像自動判釋水稻種植面積。

除水稻種植面積外，糧政單位為掌握糧源還需調查水稻的產量，目前主要係利用分散於全省約1500個調查點的單位面積產量調查資料，再配合上述水稻種植面積資料估算全省的水稻產量。此種作業方式必須於水稻收穫後才能獲得所需資料，不僅需耗費大量調查人力且時效性差，也不利於公糧收購量與拋售時機、糧商進出口量估算、糧商與農政單位對各期米質的先期掌握、稻作災害保險等決策的訂定與推行，因此如何利用收穫前的遙測影像推估當期作稻作產量的研究乃具有實務工作上的重要意義，將是另一高難度挑戰。

劉等(2002)曾利用直昇機搭載DMSV多頻譜觀測儀獲取影像，並依據國外研發之模式估算田間水稻產量。吳等(2002)則利用SPOT多時段影像與地真產量資料推導估算水稻產量的迴歸模式。申等(2002)利用多年期地真水稻植被反射光譜測定資料，指出在抽穗期間水稻植被反射光譜中綠光段(GRN)、紅光段(RED)、和近紅外光段(NIR)的動態變動最小，因此適合作為建立推估當期作水稻產量之遙測模式的

自變數，並利用波段比值(NIR/RED、NIR/GRN)已分別建立可估測一、二期作水稻產量所需之複迴歸模式，且經驗證可用於推估新年期和遭受乾旱逆境之水稻產量(申等，2003；Chang *et al.*, 2005)。

應用遙測技術進行稻米品質判釋，將涉及對於植被反射光譜細微差異變動之辨認。影響米質的諸多因素(如品種、肥料用量、土壤管理、病蟲害管理)，也同時影響植被的反射光譜。因此，應用遙測技術進行稻米品質判釋，將涉及對於植被反射光譜細微差異變動之辨認。例如，薛等(2004)指出水稻成熟期植被反射光譜中1650nm 和660nm的比值和標準差植被指數與穀粒加工品質呈顯著負相關，米粒蛋白質含量與生育期植被反射光譜和SRVI、NDVI等許多植被指數呈現極顯著相關，澱粉含量與乳熟期710 nm和660 nm的比值和標準差植被指數相關最好。Hansen *et al.* (2002)曾利用NDVI推估燕麥與大麥穀粒的蛋白質含量。Sakaiya and Inoue (2007)也利用NDVI推估水稻穀粒的蛋白質含量。氮營養狀態是影響水稻產量和品質最大的管理因素。Shibayama *et al.* (1993)利用水稻植被在620和760nm的反射值(兩變數直線迴歸式)，或400、620和880nm的反射值(三變數直線迴歸式)與葉片氮素含量有最好之相關。Inoue *et al.* (1998)指出 $[(R1100-R660)/(R1100 + R660)]$ 或內含R550,R830, R1650, 與R2200之四變數迴歸式與水稻葉片氮含量有線性相關。申等(2000)指出 $dR/d\lambda |_{735}$ 除可以分辨稻株體內氮素的濃度外，也具有可區別田間稻株氮營養狀況空間分佈的能力。進而利用 $dR/d\lambda |_{735}$ 建立稻株氮營養遙測模式，並於台北、台中、嘉義、屏東等地進行不同地區多年期之田間驗證，測試結果均指出所建立的稻株氮營養遙測模式可以快速鑑別田間穗肥施用期間稻株的氮營養狀態，足以提供做為田間穗肥精準施用的依據(申等，2001；Lee *et al.*, 2005)。除了稻株營養狀態及葉片氮素含量外，水稻米粒品質之遙測判釋亦有學者進行中，Sun *et al.* (2005)應用高光譜反射率建立參數預測水稻葉片葉綠素，以及水稻米粒蛋白質含量，結果顯示利用遙測技術推估水稻米粒蛋白質含量進而估測稻米品質是可行

的。

精準的預估農作物產量是農業產官學界長期以來追求的目標，此需包括作物面積的判識與作物單位產量的推估，二者相乘才能得到總產量。作物產量的預估通常透過不同生長階段的農藝性狀與其產量之相關性分析。以水稻產量預估為例，葉面積與葉綠素二種農藝性狀與產量有高度相關(Raj and Tripathi, 1999)。然而，葉綠素含量則隨植物年齡、品系種類、生長季節而異(Ramesh *et al.*, 2002)。因此，如何在水稻生長發育過程，運用其最適當植齡以達到最精準的產量預估，極為重要。

由於水稻氮肥隨施量之增加其產量與葉綠素含量亦隨之增加，罹患病蟲害的機率也隨之增高，又其稻米品質則隨之降低。施肥過量之稻株生長過度繁茂而易倒伏，其稻米品質往往欠佳(Chamura *et al.*, 1972)。米粒粗蛋白含量隨著氮肥施用量增加而增加，品質因而降低(賴等，1997)。又衛星遙測水稻的NDVI與其葉綠素含量成正相關，故可明確推論NDVI應與與水稻產量成正相關而與米的品質成負相關，兩者都需透過統計分析。透過衛星遙測水稻NDVI以監測水稻產量與品質，需進行實際驗證與追求高的精準度。

福衛二號是台灣自製陸地資源衛星，已於2004/5/21發射，自2004/7/1正式拍攝台灣陸域影像。福衛二號之功能特性有助於衛星遙測對作物生長與生物多樣性研究，台灣科技界必須把握良機善用福衛二號。未來5-10年將是台灣植物界研究生態與生理、農業界發展精準農業及其他領域針對本土地面物大顯身手之良機。良機稍縱即逝，台灣農業界需好好運用福衛二號之強大功能。

如何精準判識全國水稻一年二期水稻栽種面積與如何利用收穫前的遙測影像

推估當期作稻作產量的研究，將是二大挑戰。同時解決一期與二期水稻栽種面積與單位產量與米質之快速與精準的先期推估，才能真正建構現代化水稻精準管理之模式。



二、材料與方法

水稻產量地真樣區設置

本研究之水稻樣區設置在南部高雄縣美濃鎮、中部彰化縣竹塘鄉、北部桃園縣新屋鄉及東部花蓮縣玉里鎮四個地區。每一地區一期稻作種植品種、插秧及收穫日期如表 6-1 所示。氮肥施用量依研究所需設定為四個等級(0、60、120、180 kg/ha)，另外磷、鉀肥則分別為 60、60 kg/ha，肥料施用量及施用時程如表 6-2 所示。水稻收穫時，除各試驗田區外，在試驗田區附近之一般稻田亦進行坪割取樣，作為產量及米質預測模式之驗證資料。各試驗田區水稻收穫後，稻株脫粒進行烘乾，使水分含量達約 13.5%左右，使用風穀機、風選調製去除雜草、石塊及穀屑，再秤量乾穀重，進行產量調查。樣本穀接下來進行碾糙處理以及稻米品質分析。

稻米品質分析

米質分析程序如下(宋和劉，1996)：

一、碾米品質(Milling quality)

- (一) 糙米率
- (二) 白米率
- (三) 完整米率

二、米粒外觀

米粒外貌係指白米的外觀，調查項目包括大小、形狀、透明度、腹白、心白、背白、胚芽缺刻度大小等七項(表 6-3)。

三、白米物理化學性質(Physicochemical properties of milled rice)

- (一) 直鏈澱粉含量(amylose content)：採用 method of simplification of amylose assay 測定(Juliano, 1971)。
- (二) 凝膠展延性(gel consistency)：採 Cagampang *et al.* (1973)方法分析，將米粉末加入瑞香酚藍(thymol blue)指示劑及 0.2N 之氫氧化鉀(KOH)溶液，加熱沸騰 10 分鐘，再冷卻 30 分鐘，紀錄其長度。長度 35 mm 以下為硬膠(H)，35~50 mm 為中間(M)，50 mm 以上為軟膠(S)。
- (三) 鹼性擴散度(alkali spreading value)：採改良之 Litter *et al.* (1958)之方法，將 6 顆完整之白米加入 1.6 % KOH 溶液 10 ml，在 30°C 培養箱浸泡 23 小時，觀察其膨脹溶化情形並加以紀錄。

四、食味值(palatability score)：利用日本靜岡公司 GS-2000 型食味計測定。

衛星影像

福衛二號衛星影像及法國 SPOT 衛星之遙測反射光譜資料向國立中央大學太空及遙測研究中心(CSRSR)申購，福衛二號衛星影像都屬第三等級(level 3)，SPOT 衛星影像都屬第十等級(level 10)數位影像。影像正上空無任何雲層遮避。本研究使用之花蓮縣玉里鎮、高雄縣美濃鎮、彰化縣竹塘鄉及桃園縣新屋鄉四個地區之福衛二號及法國 SPOT 衛星影像拍攝之日期，如表 6-4 所示。本研究採用之植生指數為常態化差異植生指數(normalized difference vegetation index, NDVI)，其計算公式為 $NDVI = (NIR - R) / (NIR + R)$ 。其中 NIR 為近紅外光反射率，R 為紅光反射率。

三、結果與討論

台灣地區一期稻作插秧日期由南部地區最早開始，愈往北部則插秧日期愈延後。由表 6-1 可明顯看出，南部高雄縣美濃試區在一月下旬即插秧，花蓮縣玉里及彰化縣竹塘試區則在二月上旬插秧，而桃園縣新屋鄉則在三月初才插秧。各地區慣用水稻品種也不相同，南部美濃試區種植高雄 145 號(KS 145)，東部玉里試區種植台稉 2 號(TK 2)，中部竹塘試區種植台稉 11 號(TK 11)，北部新屋試區種植台稉 14 號(TK 14)。一期稻作試驗進行相當倉促，美濃試區之試驗田區選擇是在農民插秧完成後才選定，因此田區分散四地，土壤肥力亦不一致。

本研究將氮肥用量設定為四個等級(表 6-2)，藉由不等量氮肥施用，造成各處理樣區間水稻生長勢、葉色和產量之差。在此，本研究不考慮原本土壤肥力造成之影響，只要施用之氮肥等級能將水稻生育期間衛星影像之 NDVI 指數及稻米品質之差異顯現出來即可。

有關稻米品質之經常性分析項目，一般首重碾米品質，此項亦受到碾米商的重視。其次為白米大小與形狀、透明度、心白、腹白、背白等米粒外貌性狀，是屬於市場品質之部分，亦為消費者直接的首次印象。再者為直鏈澱粉含量、粗蛋白質含量、鹼性擴散值、凝膠展延性等，以上重要的米質理化特性，皆屬於實驗室內稻米品質間接測定法之部分。至於利用米飯質地分析儀所測定之米飯質地特性，以及利用人為進行米飯食味官能評估，兩者則同屬食用品質的部分，米飯食味口感佳才是消費者續購之原動力(許，2005)。對於米質理化特性分析，相當費時費力，而米飯食味官能評估，需有足夠熟練的品評員，及無法一次評鑑大量樣品之缺點，因此具快速分析速度之近紅外線分析法應運而生，近年來日本許多公司利用近紅外線分析法設計成所謂的食味計，以糙米或白米為測定對象的機型，其

利用光學反射原理測定米飯保水膜的厚度，用以推估米飯食味的良劣。本研究有關稻米品質之測定由農委會臺中區農業改良場稻米品質實驗室採用國際稻米研究所使用之 USDA 方法，測定碾米品質、米粒外觀、米值理化性質以及食味計分析等。由於測定米質之粗蛋白質含量之 NIR 儀器進行維修保養，因此本研究報告中之米質部分不包括粗蛋白質含量。

在稻米品質方面，玉里試區一期稻作台稉 2 號之米粒屬於短粒粗圓形，透明度為 3，心白以 120 kg-N/ha 處理者最多，0 kg-N/ha 處理者最低，背白及腹白皆為 0，胚眼缺刻度皆為 1。碾米品質之糙米率、白米率及完整米率皆隨著氮肥增施而增加，糙米率分別為 79.0、80.9、81.3 及 81.7%，白米率分別為 70.3、73.1、73.8 及 74.1%，完整米率分別為 60.5、66.5、66.9 及 69.2% (表 6-5)。鹼性擴散度皆為 6，膠化溫度屬於低溫度，直鏈澱粉含量及凝膠展延性皆隨著氮肥增施而降低，食味值亦隨著氮肥增施而降低(表 6-6)。

美濃試區一期稻作高雄 145 號之米粒屬於短粒粗圓形，透明度為 4，心白、背白及腹白皆為 0，胚眼缺刻度為 1。隨著氮肥增施，碾米品質之糙米率分別為 80.2、83.3、83.8 及 83.6%，白米率分別為 70.1、75.6、76.4 及 74.0%，完整米率分別為 41.6、70.0、70.4 及 61.3% (表 6-7)。鹼性擴散度皆為 6，膠化溫度屬於低溫度。隨著氮肥增施，直鏈澱粉含量分別為 17.9、17.6、17.6 及 18.1%，凝膠展延性分別為 81S、82S、76S 及 87S，食味值分別為 69.5、60.5、60.0 及 69.5(表 6-8)。

竹塘試區一期稻作台稉 11 號之米粒屬於短粒粗圓形，透明度以 120 kg-N/ha 處理者 3.13 最佳，180 kg-N/ha 處理者之 3.25 次之，再者為 60 kg-N/ha 處理者之 3.38，0 kg-N/ha 處理者之 3.50 最末。隨著氮肥增施，心白分別為 0.15、0.10、0.11 及 0.09，腹白分別為 0、0.15、0.14 及 0.26，背白皆為 0，白堊質總合分別為 0.15、

0.25、0.25 及 0.35，胚眼缺刻度為 1。隨著氮肥增施，碾米品質之糙米率分別為 82.6、83.5、83.5 及 83.6%，白米率分別為 75.2、75.7、75.5 及 74.9%，完整米率分別為 72.0、72.9、72.1 及 71.6% (表 6-9)。鹼性擴散度皆為 6，膠化溫度屬於低溫度。隨著氮肥增施，直鏈澱粉含量分別為 18.9、18.8、18.9 及 19.1%，凝膠展延性分別為 89S、90S、86S 及 87S，食味值分別為 60.8、53.0、53.3 及 45.8(表 6-10)。

新屋試區一期稻作台梗 14 號之米粒屬於短粒粗圓形，透明度以 120 kg-N/ha 處理者 3.5 最佳，其餘處理者皆為 4。心白 120 kg-N/ha 處理者為 0.23，其餘處理者皆為 0。背白隨氮肥增施分別為 0.52、0.50、0.33 及 0.42，腹白皆為 0，白垩質總合分別為 0.52、0.50、0.56 及 0.42，胚眼缺刻度為 1。隨著氮肥增施，碾米品質之糙米率分別為 82.6、83.0、84.0 及 82.6%，白米率分別為 70.6、72.2、72.1 及 70.9%，完整米率分別為 63.0、67.8、67.1 及 65.5% (表 6-11)。鹼性擴散度皆為 6，膠化溫度屬於低溫度。隨著氮肥增施，直鏈澱粉含量分別為 17.3、17.2、17.6 及 17.6%，凝膠展延性分別為 90S、89S、96S 及 87S，食味值分別為 57、57、56 及 61(表 6-12)。

將各試區之稻穀產量與碾米品質、白米理化性質等因子進行相關性分析。可發現每個試區的結果不盡相同。玉里試區一期稻作台梗 2 號稻穀產量與碾米品質中之糙米率、白米率及完整米率具有極顯著之正相關，與白米理化性質之直鏈澱粉含量、凝膠展延性及食味值具有極顯著之負相關(表 6-13)。美濃試區一期稻作高雄 145 號稻穀與糙米率、白米率及完整米率具有極顯著之正相關，與食味值具有顯著之負相關(表 6-14)。竹塘試區一期稻作台梗 11 號稻穀產量與糙米率有極顯著之正相關，與食味值有極顯著之負相關(表 6-15)。由以上三個試驗區可看出稻穀產量與稻米品質之食味值有負相關的關係存在，也就是說增施氮肥促進稻穀產量增進的同時，可能會讓稻米品質降低。而在新屋試區一期稻作台梗 14 號，稻穀產量卻與食味值為正相關(表 6-16)，可能為品種因素、土壤質地或氣候環境因素所致。

衛星遙測的植生指數 NDVI 可以顯示地面植被的綠度或生理狀況，常被用以監測地面植物的生長狀況、其所處的生態環境或逆境與變遷。正常生長的水稻，葉色鮮綠，植株直立，其衛星遙測影像之常態化差異植生指數 NDVI 隨著水稻生育日數而逐步增加。插秧初期，水稻幼苗剛發育，此時稻田裡裸露之土壤及其淹覆之水分影響甚大，其 NDVI 都很低，與水體或裸露地之反射特性相似。隨著生育日數增加，稻株已逐漸覆蓋原裸露之土壤與水，水稻葉冠(canopy)已成為影響衛星遙測植生指數最重要的地面物。此後，由於稻株已全面覆蓋地面，將只有水稻的葉色及葉面積等農藝性狀影響衛星遙測之植生指數。

玉里試區使用 0131sp2、0222sp5、0312fs2、0318fs2、0402fs2、0418sp2、0605sp2、0623sp5 等八幅衛星影像(表 6-4)。由圖一的趨勢線可明顯的看出玉里試區一期稻作期間水稻衛星遙測植生指數 NDVI 的變化模式。插秧後初期，NDVI 仍相當低，隨著生育日數增加，由營養生長期進入生殖生長期，NDVI 快速累積增加，約在抽穗時(90 天左右)達到最高峰，而後進入成熟期，此時 NDVI 逐漸降低。在不同氮肥等級處理下，玉里試區一期稻作台梗 2 號，在各時期衛星遙測 NDVI 指數皆隨著氮肥施用量的增加而增高，顯示增施氮肥影響水稻葉色、分蘗數、葉面積等進而影響衛星遙測 NDVI 植生指數(圖 6-1)。

美濃試區使用 0124sp4、0130sp2、0207fs2、0220sp2、0315sp5、0331fs2、0510fs2 等七幅衛星影像(表 6-4)。將收穫後之 NDVI 植生指數當作 0，與各時期衛星影像資料作圖，可得到美濃地區一期稻作期間水稻衛星遙測植生指數 NDVI 之變化模式(圖 6-2)。美濃地區一期稻作高雄 145 號 NDVI 之變化模式與玉里試區相似，營養生長期及生殖生長期 NDVI 快速累積增加，進入成熟期後，NDVI 逐漸降低。在不同氮肥等級處理下，由於土壤肥力效應的影響，各時期 NDVI 指數最高者為 60 kg-N/ha 處理者，其次為 120 kg-N/ha 處理者，再者為 180 kg-N/ha 處理者，最末為

0 kg-N/ha 處理者。

竹塘試區使用 0205sp2、0310fs2、0317sp4、0330sp5、0407fs2 等五幅衛星影像(表 6-4)。將收穫後之 NDVI 植生指數當作 0，與此五幅衛星影像資料作圖，可得到竹塘地區一期稻作期間台稉 11 號水稻衛星遙測植生指數 NDVI 之變化模式(圖 6-3)，亦與玉里試區相類似。隨著氮肥施用量的增加，各時期衛星遙測 NDVI 指數皆增加。

新屋試區使用 20311fs2、0317sp4、0508sp4、0617fs2、0710sp4、0720fs2 等六幅衛星影像(表 6-4)。將插秧前之 NDVI 植生指數當作 0，與此六幅衛星影像資料作圖，可得到新屋地區一期稻作期間台稉 14 號水稻衛星遙測植生指數 NDVI 之變化模式(圖 6-4)，亦與其他試區相類似。而隨著氮肥施用量的增加，各時期衛星遙測 NDVI 指數皆增加。

台灣水稻自播種到可採收之生命史約 125 天，可分為秧苗期(約第 0~15 天)、營養生長期(約第 15~60 天)、生殖生長期(約第 60~95 天)、成熟期(約第 95~125 天)、及收穫期(約第 125 天以後)。Ramesh *et al.* (2002) 以迴歸理論分析印度水稻葉綠素含量與其產量之關聯性，發現第 79 天之葉綠素含量與產量之相關性最佳。而以灰關聯分析探討印度水稻抽穗前後不同生長階段之葉綠素含量與產量之關聯性，以水稻葉片葉綠素含量作為預估產量最好的時期為第 72-93 天之孕穗期及抽穗期最佳(Huang *et al.*, 2005)。Lo and Chen (2003)的研究中指出，水稻台稉 9 號與台農 67 號生育期葉色值與單位面積稻穀產量之關係，以抽穗前後兩週最密切。

探討衛星遙測 NDVI 植生指數與稻米品質之相關性，本研究報告著重在稻米食用品質方面，我們僅針對 NDVI 指數與稻米食味值進行分析。關於衛星遙測 NDVI

植生指數與稻米食味質之關係，我們以玉里試區以及竹塘試區作為例子。玉里試區一期稻作台梗 2 號，在進入生殖生長期後，其衛星遙測 NDVI 植生指數與稻米品質食味值之關係，相當密切。但值得注意的是，在生育期最後階段，成熟期後期，衛星遙測 NDVI 與稻米食味值之關係亦非常高，其 r^2 最高，達 0.9(圖 6-5)。在竹塘試區，可用的衛星影像僅有插秧後第 51 天及 59 天，以第 59 天之 $r^2 = 0.89$ 為最高，生育後期成熟期之影像則闕如，所以無法得知竹塘試區一期稻作台梗 11 號衛星遙測 NDVI 植生指數與稻米食味值之關係是否以成熟期較為密切(圖 6-6)。

以竹塘地區驗證田區衛星遙測 NDVI 指數代入第 59 天影像所建立之稻米食味值推估模式 $y = -88.737x + 79.23$ 計算所得之預測值，與實測稻米食味值作比較，大部分的預測值都在估算誤差之內(圖 6-7)。殘差分析顯示，最大誤差超過 20%，整體平均殘差為 11.52%，預測模式之準確率約達 88%(表 6-17)。

影響稻米品質的因素很多，品種的選擇、栽培的環境、收穫、儲存而至煮飯的過程等均可影響到米飯的品質，其中影響稻米品質最大的因素為品種。影響稻米品質的因素若發生於生產階段時的各項措施，可以增進或降低其品質，因此生產階段為良質米生產之重要時期(楊等，2004)。在本研究中，單一試區生產階段氮肥管理造成之稻米食味質差異，以衛星遙測 NDVI 指數進行推估可獲得不錯的成果。但在產地、氣象與期作等地理因素及品種因素之差異下，四個試驗區域，要建立衛星遙測 NDVI 植生指數推估稻米品質之普遍性預測模式，其困難性相當高。倘若能累積多期稻作資料，加上各項影響因子修正預測模式，或許可以建立一個普遍的預測模式。若然無法建立一個普遍的稻米品質預測模式，則可針對不同區域不同品種建立稻米品質之預測模式。

本研究初步建立直接的衛星影像遙測資料對水稻米質的推估預測模式，後續

仍需進行修正與改進。本年度全台地區除了嘉義太保地區一期稻作期間有稻熱病疫情發生外，並沒有重大農業災害，諸如氣象災害或大規模病蟲害發生。因此本年度一期稻作建立之預測模式不包括氣象因子以及病蟲害因子。後續之研究將納入氣象以及病蟲害等環境、生物因子，作為預測模式之修正改進，進一步提高預測準確性。



表 6-1、水稻試驗地區、品種及插秧、收穫日期。

地 區	品 種	插秧日期	收穫日期
高雄美濃	KS145	1/24~1/26	5/22
花蓮玉里	TK2	2/5	6/15
彰化竹塘	TK11	2/7	6/20
桃園新屋	TK14	3/4	7/13



表 6-2、水稻施肥用量與時程*。

項 目	總量 (kg/ha)	基肥	一追	二追	穗肥
施用時期		不施肥	插秧後 8-10 天	插秧後 22-24 天	幼穗分化至 0.2 公分， 約插秧後 75-85 天
N 分配比例	100%	0%	40%	35%	25%
用量分配	0	0	0	0	0
	60	0	24	21	15
	120	0	48	42	30
	180	0	72	63	45
P 分配比例	100%	0	100%		
用量分配	60	0%	60		
K 分配比例	100%	0%	40%	35%	25%
用量分配	60	0	24	21	15

*以每公頃用量及三要素量表示。

表 6-3、白米外貌之分類及其等級表。

大小		形狀		透明度	腹白	心白	背白	胚眼缺刻度大小
代號	長度(mm)	代號	長/寬	Trans.	W.B.	W.C.	W.B.	Cond. of the eye
很長(EL)	>7.5	細長形(S)	>3	0*	0	0	0	1
長(L)	6.61~7.5	中間形(I)	2.1~3	1	1	1	1	2
中間(M)	5.51~6.609	粗短形(B)	<2	2	2	2	2	3
短(S)	<5.51			3	3	3	3	4
				4	4	4	4	5
				5	5	5	5	

* 透明度、腹白、心白、背白及胚眼缺刻度大小數值愈小愈好。

表 6-4、本研究使用之福衛二號及法國 SPOT 衛星影像其被拍攝之日期。

地 區	衛星影像				
花蓮玉里	0131sp2 [*]	0222sp5	0312fs2	0318fs2	0402fs2
		0418sp2	0605sp2	0623sp5	
高雄美濃	0124sp4	0130sp2	0207fs2	0220sp2	0315sp5
		0331fs2	0510fs2		
彰化竹塘	0205sp2	0310fs2	0317sp4	0330sp5	0407fs2
桃園新屋	0311fs2	0317sp4	0508sp4	0617fs2	0710sp4
		0720fs2			

* fs2，福衛二號衛星影像；sp2，SPOT 2 衛星影像；sp4，SPOT 4 衛星影像；sp5，SPOT 5 衛星影像。

表 6-5、玉里試區一期稻作碾米品質與米粒外觀。

	碾米品質			米粒外觀							
	糙米率	白米率	完整米率	白米長度	白米形狀	透明度	心白	背白	腹白	白堊質總合	胚眼缺刻度
N0	79.0	70.3	60.5	S	B	3	0.30	0	0	0.30	1
N60	80.9	73.1	66.5	S	B	3	0.45	0	0	0.45	1
N120	81.3	73.8	66.9	S	B	3	0.52	0	0	0.52	1
N180	81.7	74.1	69.2	S	B	3	0.39	0	0	0.39	1



表 6-6、玉里試區一期稻作白米理化性質與食味值。

	白米理化性質				食味值
	鹼性擴散度	膠化溫度	直鏈澱粉含量(%)	凝膠展延性	
N0	6	L	19.3	87S	73
N60	6	L	19.1	85S	64
N120	6	L	19.1	85S	65
N180	6	L	19	80S	61

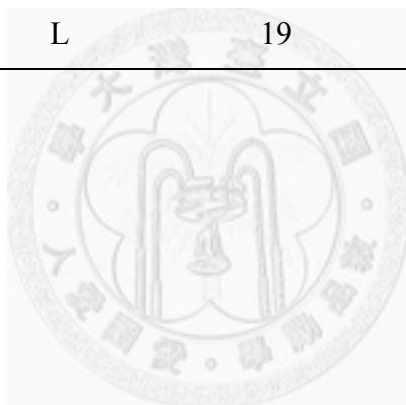


表 6-7、美濃試區一期稻作碾米品質與米粒外觀。

	碾米品質			米粒外觀							
	糙米率	白米率	完整米率	白米長度	白米形狀	透明度	心白	背白	腹白	白堊質總合	胚眼缺刻度
N0	80.2	70.1	41.6	S	B	4	0	0	0	0	1
N60	83.3	75.6	70.0	S	B	4	0	0	0	0	1
N120	83.8	76.4	70.4	S	B	4	0	0	0	0	1
N180	83.6	74.0	61.3	S	B	4	0	0	0	0	1

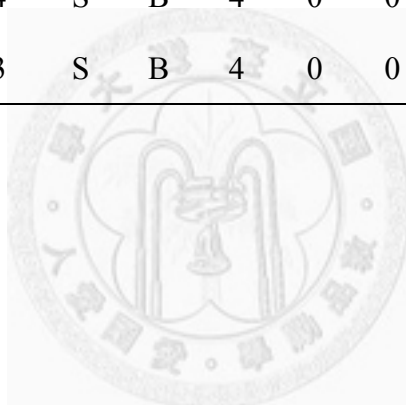


表 6-8、美濃試區一期稻作白米理化性質與食味值。

	白米理化性質				食味值
	鹼性擴散度	膠化溫度	直鏈澱粉含量(%)	凝膠展延性	
N0	6	L	17.9	81S	69.5
N60	6	L	17.6	82S	60.5
N120	6	L	17.6	76S	60.0
N180	6	L	18.1	87S	69.5

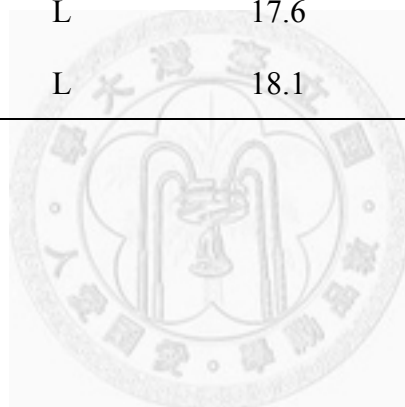


表 6-9、竹塘試區一期稻作碾米品質與米粒外觀。

	碾米品質			米粒外觀							
	糙米率	白米率	完整米率	白米長度	白米形狀	透明度	心白	背白	腹白	白堊質總合	胚眼缺刻度
N0	82.6	75.2	72.0	S	B	3.50	0.15	0	0	0.15	1
N60	83.5	75.7	72.9	S	B	3.38	0.10	0	0.15	0.25	1
N120	83.5	75.5	72.1	S	B	3.13	0.11	0	0.14	0.25	1
N180	83.6	74.9	71.6	S	B	3.25	0.09	0	0.26	0.35	1

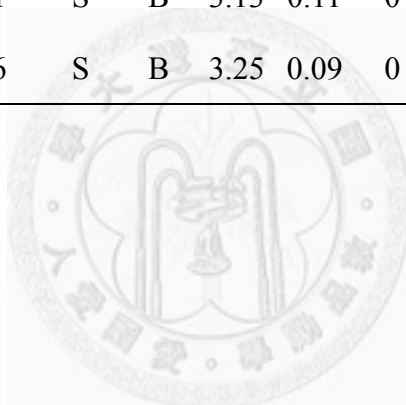


表 6-10、竹塘試區一期稻作白米理化性質與食味值。

	白米理化性質				食味值
	鹼性擴散度	膠化溫度	直鏈澱粉含量(%)	凝膠展延性	
N0	6	L	18.9	89S	60.8
N60	6	L	18.8	90S	53.0
N120	6	L	18.9	86S	53.3
N180	6	L	19.1	87S	45.8



表 6-11、新屋試區一期稻作碾米品質與米粒外觀。

	碾米品質			米粒外觀							
	糙米率	白米率	完整米率	白米長度	白米形狀	透明度	心白	背白	腹白	白堊質總合	胚眼缺刻度
N0	82.6	70.6	63.0	S	B	4	0	0.52	0	0.52	1
N60	83.0	72.2	67.8	S	B	4	0	0.50	0	0.50	1
N120	84.0	72.1	67.1	S	B	3.5	0.23	0.33	0	0.56	1
N180	82.6	70.9	65.5	S	B	4	0	0.42	0	0.42	1

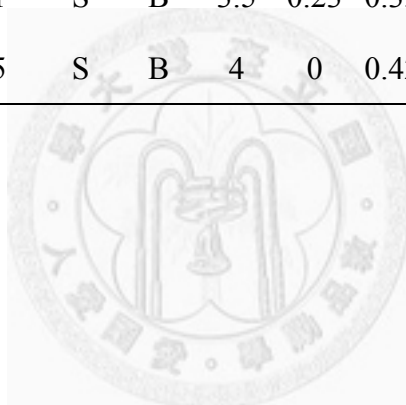


表 6-12、新屋試區一期稻作白米理化性質與食味值。

	白米理化性質				食味值
	鹼性擴散度	膠化溫度	直鏈澱粉含量(%)	凝膠展延性	
N0	6	L	17.3	90S	57
N60	6	L	17.2	89S	57
N120	6	L	17.6	96S	56
N180	6	L	17.6	87S	61

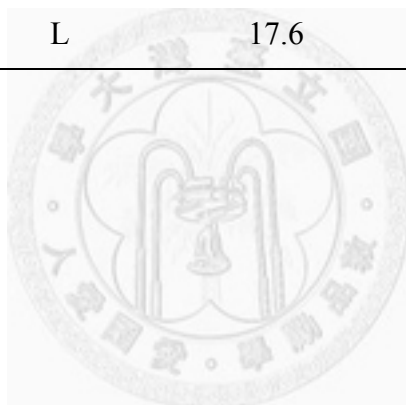


表 6-13、玉里試區一期稻作台種 2 號稻米品質與產量因子間之相關係數。

	糙米率	白米率	完整米率	透明度	心白	背白	腹白	直鏈澱粉含量	凝膠展延性	食味值
白米率	0.984**									
完整米率	0.932**	0.967**								
透明度	-	-	-							
心白	0.555	0.664*	0.601*							
背白	-	-	-	-	-					
腹白	-	-	-	-	-	-				
直鏈澱粉含量	-0.620*	-0.711**	-0.828**	-	-0.556	-	-			
凝膠展延性	-0.686*	-0.695*	-0.824**	-	-0.124	-	-	0.764**		
食味值	-0.922**	-0.947**	-0.984**	-	-0.536	-	-	0.783**	0.812**	
產量	0.941**	0.982**	0.979**	-	0.702*	-	-	-0.803**	-0.730**	-0.949**

*,** 分別為 0.05 及 0.01 顯著水準。

表 6-14、美濃試區一期稻作高雄 145 號稻米品質與產量因子間之相關係數。

	糙米率	白米率	完整米率	透明度	心白	背白	腹白	直鏈澱粉含量	凝膠展延性	食味值
白米率	0.933**									
完整米率	0.937**	0.989**								
透明度	-	-	-							
心白	-	-	-	-						
背白	-	-	-	-	-					
腹白	-	-	-	-	-	-				
直鏈澱粉含量	-0.179	-0.464	-0.471	-	-	-	-			
凝膠展延性	0.064	-0.236	-0.144	-	-	-	-	0.604*		
食味值	-0.506	-0.748**	-0.750**	-	-	-	-	0.842**	0.630*	
產量	0.969**	0.944**	0.966**	-	-	-	-	-0.274	0.040	-0.599*

**, * 分別為 0.05 及 0.01 顯著水準。

表 6-15、竹塘試區一期稻作台種 11 號稻米品質與產量因子間之相關係數。

	糙米率	白米率	完整米率	透明度	心白	背白	腹白	直鏈澱粉含量	凝膠展延性	食味值
白米率	0.530*									
完整米率	0.508*	0.878**								
透明度	-0.390	0.076	0.000							
心白	-0.086	0.354	0.335	0.021						
背白	-.	-.	-.	-.	-.					
腹白	0.586*	0.023	0.119	-0.574*	-0.341	-.				
直鏈澱粉含量	0.309	0.446	0.287	-0.236	0.245	-.	0.222			
凝膠展延性	-0.240	-0.325	-0.365	-0.038	-0.329	-.	-0.161	-0.132		
食味值	-0.817**	-0.267	-0.292	0.383	0.311	-.	-0.846**	-0.426	0.260	
產量	0.761**	0.062	0.033	-0.547*	-0.125	-.	0.627**	0.284	-0.349	-0.730**

*、** 分別為 0.05 及 0.01 顯著水準。

表 6-16、新屋試區一期稻作台種 14 號稻米品質與產量因子間之相關係數。

	糙米率	白米率	完整米率	透明度	心白	背白	腹白	直鏈澱粉含量	凝膠展延性	食味值
白米率	0.603*									
完整米率	0.492	0.916**								
透明度	-0.681*	-0.462	-0.383							
心白	0.721**	0.480	0.390	-0.995**						
背白	-0.599*	-0.385	-0.439	0.856**	-0.865**					
腹白	-	-	-	-	-	-				
直鏈澱粉含量	0.339	0.311	0.178	-0.271	0.315	-0.510	-			
凝膠展延性	0.681*	0.477	0.277	-0.942**	0.942**	-0.665*	-	0.235		
食味值	-0.412	-0.393	-0.155	0.519	-0.507	0.027	-	0.328	-0.726**	
產量	0.121	0.065	0.323	-0.268	0.272	-0.688*	-	0.478	-0.043	0.653*

*,** 分別為 0.05 及 0.01 顯著水準。

表 6-17、竹塘試區稻米食味值預測模式殘差分析。

食味值預測模式	預測值	實測值	殘差 (%)
$y = -88.737x + 79.23$			
	49.0	45	8.91
	46.4	44	5.42
	47.5	45	5.57
	44.5	42	6.06
	41.9	46	8.84
	40.7	46	11.48
	49.2	53	7.14
	46.4	47	1.32
	36.4	47	22.46
	35.3	45	21.66
	36.8	47	21.65
	38.0	48	20.86
	41.2	43	4.19
	40.1	45	10.93
	51.8	46	12.51
	53.0	46	15.27
Max. accuracy			98.68
Min. accuracy			78.34
Average			11.52

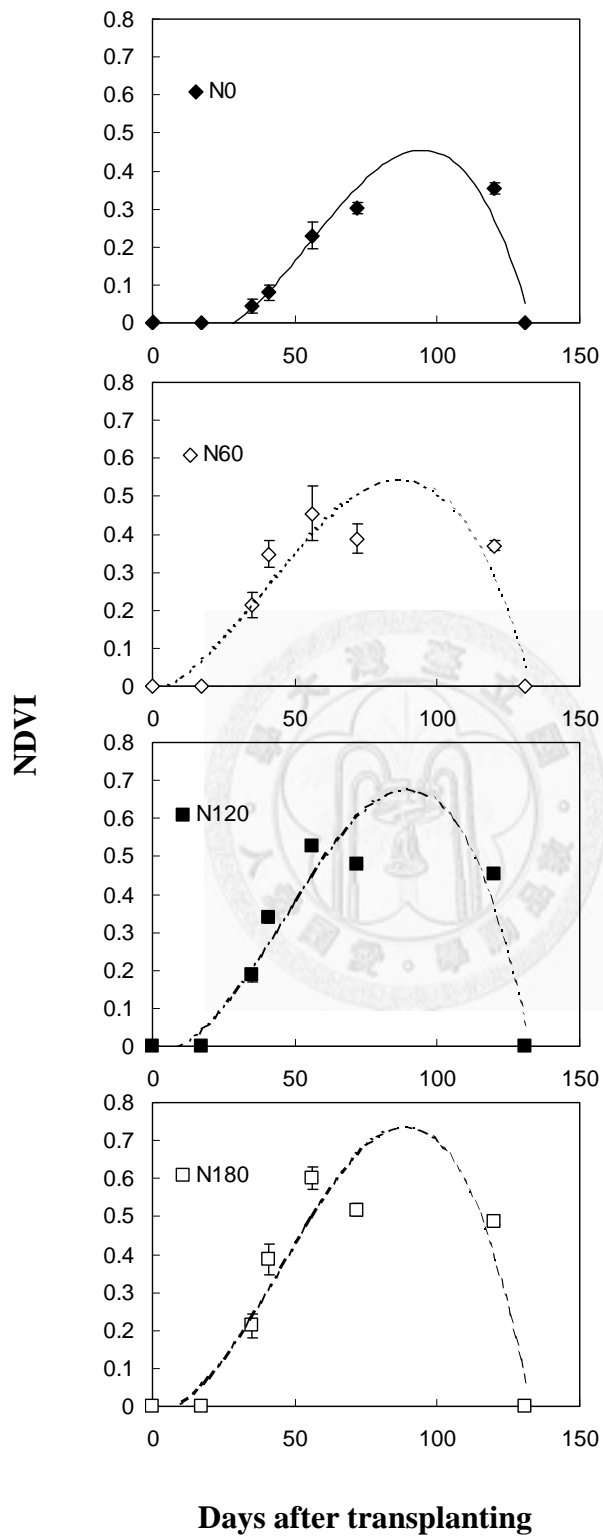


圖 6-1、玉里試區一期稻作衛星遙測植生指數 NDVI 變化模式。

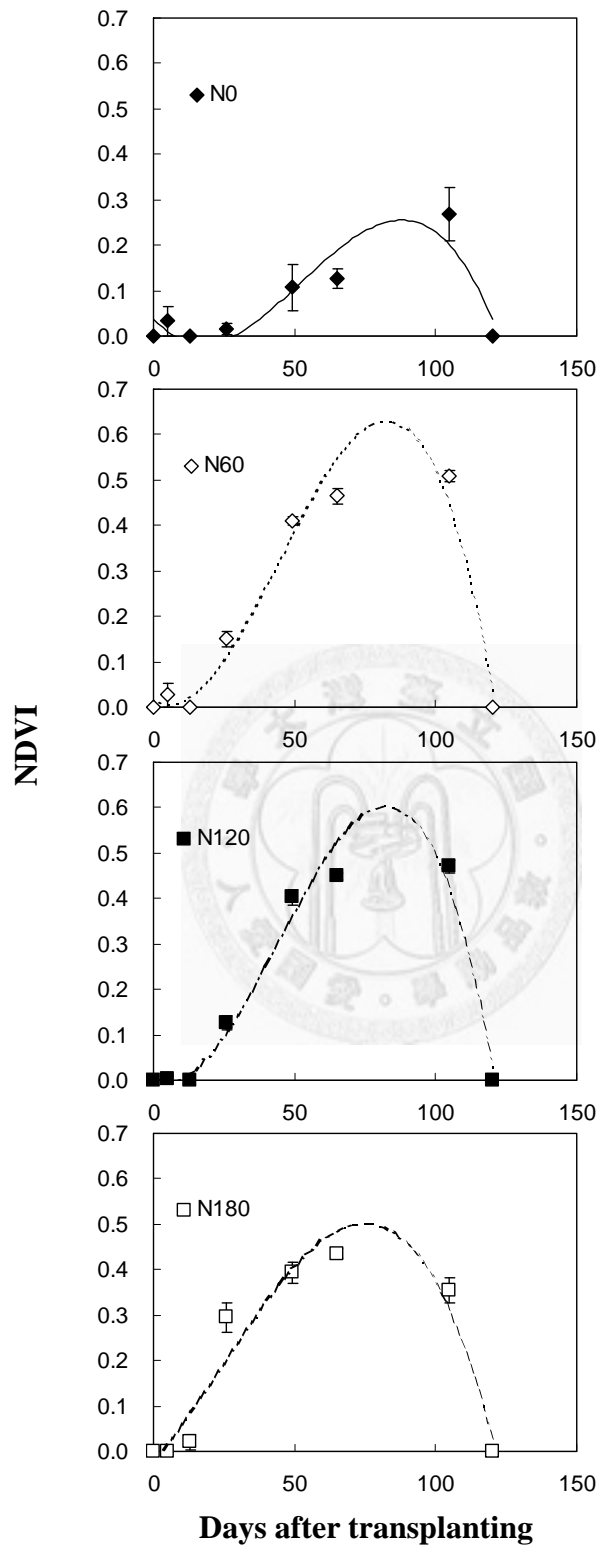


圖 6-2、美濃試區一期稻作衛星遙測植生指數 NDVI 變化模式。

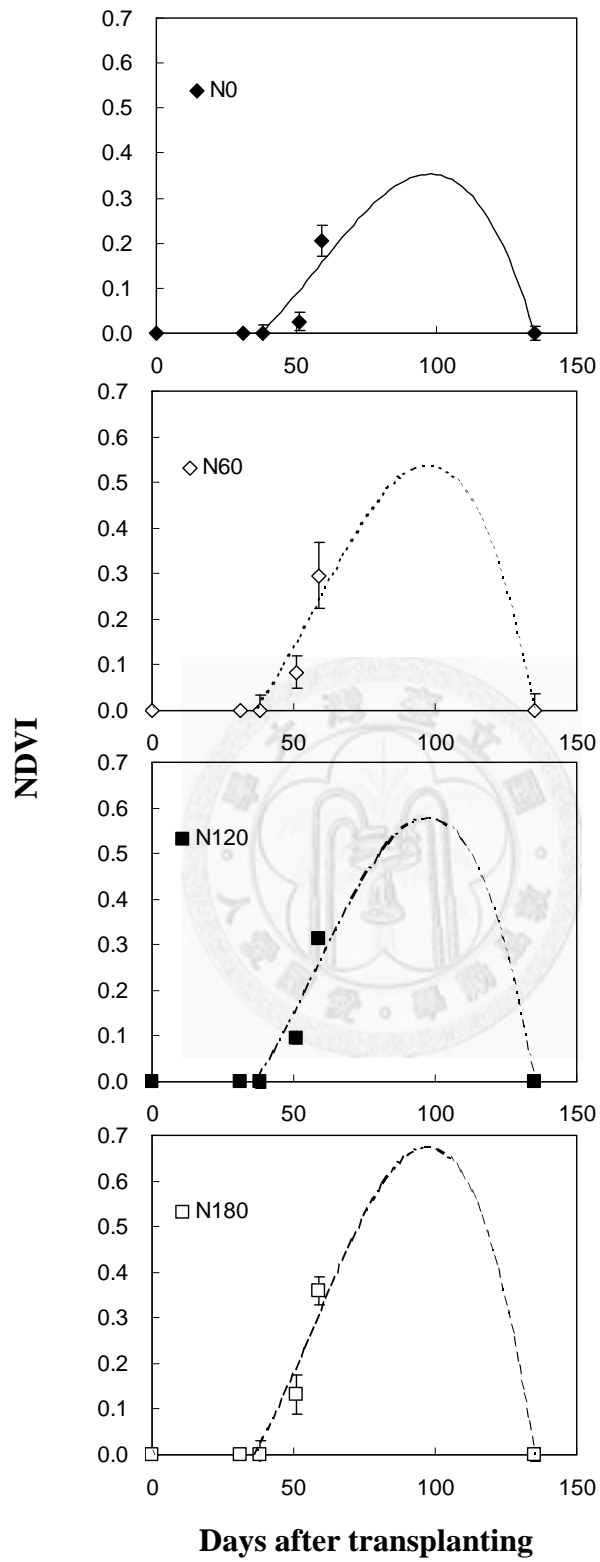


圖 6-3、竹塘試區一期稻作衛星遙測植生指數 NDVI 變化模式。

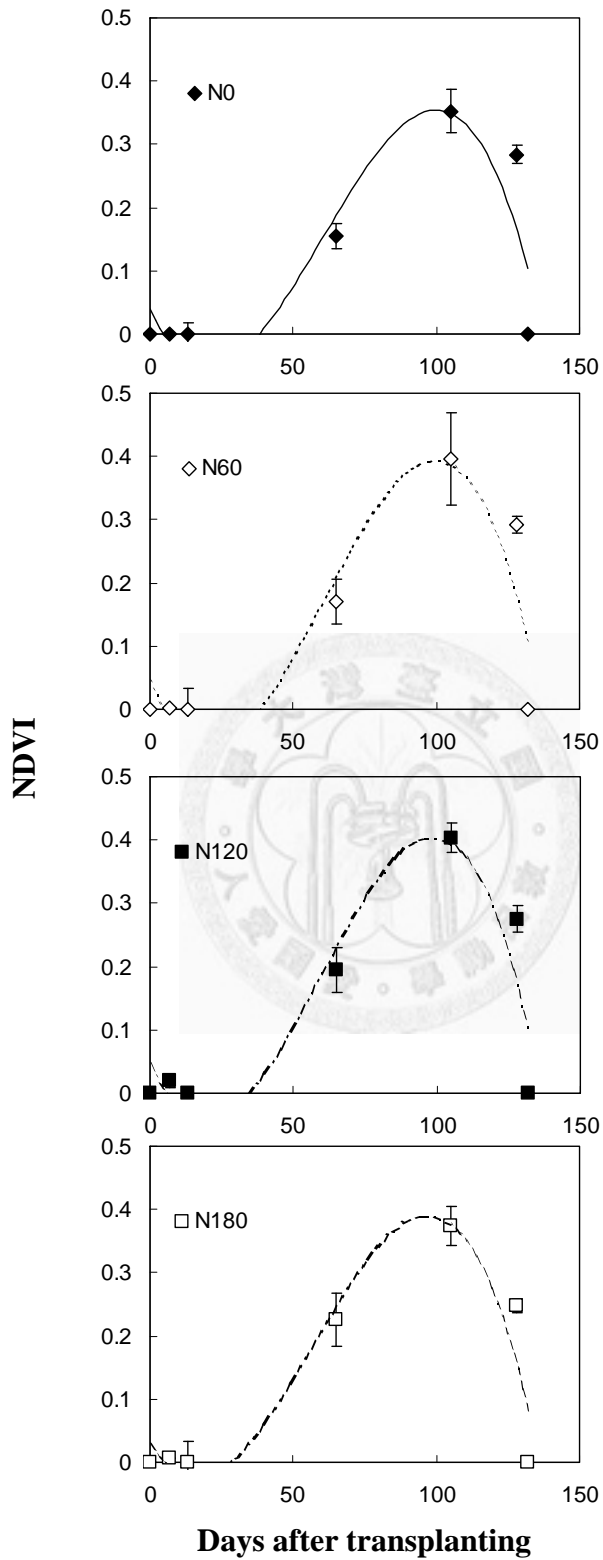


圖 6-4、新屋試區一期稻作衛星遙測植生指數 NDVI 變化模式。

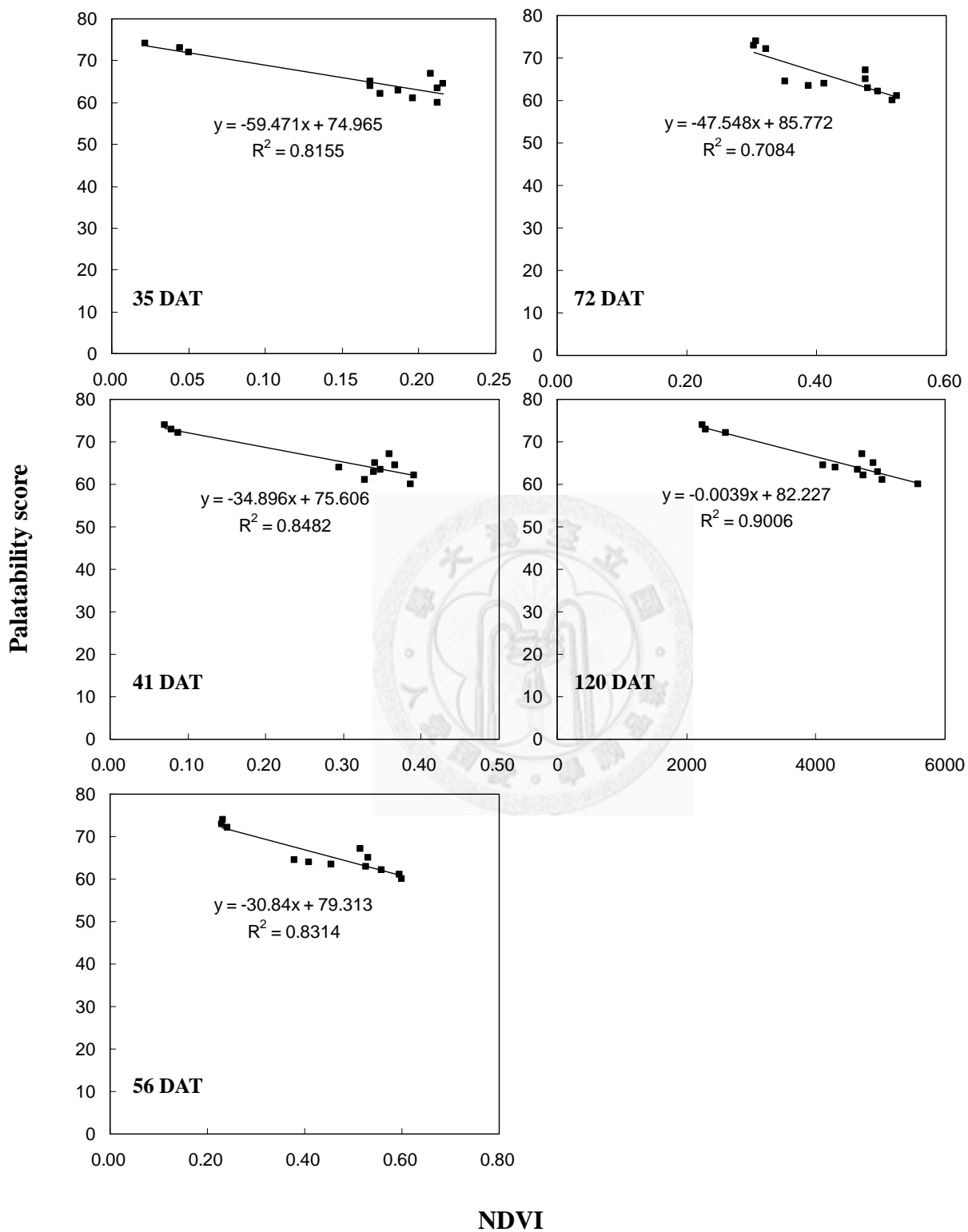


圖 6-5、玉里試區一期稻作衛星遙測植生指數 NDVI 與稻米食味值之關係。DAT，days after transplanting。

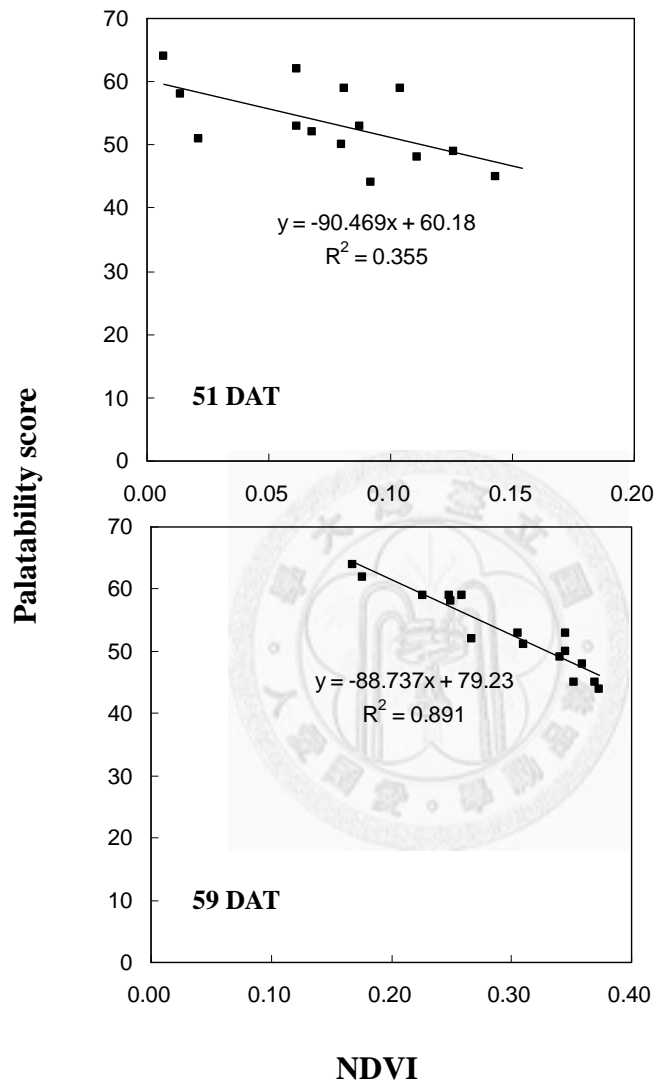


圖 6-6、竹塘試區一期稻作衛星遙測植生指數 NDVI 與稻米食味
值之關係。DAT，days after transplanting。

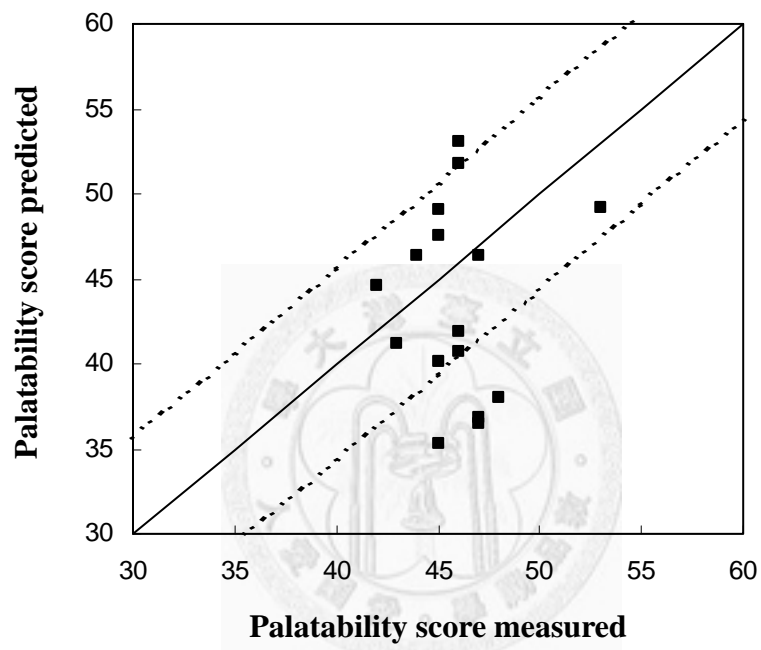


圖 6-7、竹塘試區稻米食味值預測模式之驗證。實線所示為預測值=實測值，虛線為產量估算之誤差值。

參考文獻

- 申雍、羅正宗、鄭世朋。2000。稻株氮營養狀況遙測技術之建立。中華農業氣象 7:23-32。
- 申雍、李裕娟、章國威、羅正宗。2001。水稻氮營養之遙感探測技術。p.235-238 有機肥料與合理化施肥研討會。中華土壤肥料學會，台中市。
- 申雍、章國威、李裕娟、楊純明、羅正宗，2002。應用遙測技術推估水稻產量之初探，應用於水稻精準農業體系之知識與技術(楊純明、林俊義主編)，農業試驗所，pp.39-50。
- 申雍、李裕娟、章國威、姚銘輝。2003。機載簡易多光譜影像拍攝系統之建構與應用。p.97-104。水稻精準農業(耕)體系。楊純明、林俊義，主編。農業試驗所，台中縣。
- 吳啟南、蕭國鑫、徐偉城、廖子毅、陳大科、劉治中，2002。衛星及地面遙測資料應用於水稻生長及產量監測出步研究，應用於水稻精準農業體系之知識與技術(楊純明、林俊義主編)，農業試驗所，pp.19-38。
- 宋勳、劉瑋婷。1996。稻米品質的影響因素與分級。p.133-154。稻作生產改進策略研討會專刊。台灣省農業試驗所編印。
- 邵泰璋、史天元，2000。類神經網路於多光譜影像分類之應用。航測及遙測學刊，5(1):1-14。
- 陳益鳳、曾義星。1999。應用多時段衛星影像辨識水稻田之研究。航測及遙測學刊，4(3):1-15。
- 許愛娜。2005。稻米品質要項與其影響因素。台中區農業專訊，50:8-13。
- 楊棋明、吳雅婷、劉翠雅、黃文達、黃秀鳳、趙璧玉。2004。高等植物非葉綠色組織葉綠素含量及其 a/b 比值之初探。華岡農科學報。13:27-34。
- 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。國立台灣大學農藝學研究所碩士論文。

楊嘉凌、許愛娜、許志聖。2004。良質米推薦品種的特性。台中區農業專訊，46:11-18。

劉振榮、林唐煌、郭宗華、梁志綱、梁隆鑫。2002。機載多頻譜遙測系統之建構與應用，應用於水稻精準農業體系之知識與技術(楊純明、林俊義主編)，農業試驗所，pp.51-64。

賴明信、陳正昌、郭益全、陳治官、李長沛、曾東海、林英俊。1997。現行水稻推品種生產力與氮肥用量之關係 II. 氮肥用量對水稻品質性狀之影響。中華農業研究，46(1):1-14。

薛利紅、曹衛星、李映雪、周冬琴、李衛國。2004。水稻冠層反射光譜特徵與籽粒品質指標的相關性研究。中國水稻科學，18：431-436。

蕭國鑫、劉治中、史天元，2000。遙測與GIS結合應用於水稻田辨識。航測及遙測學刊，5(4):1-22。

蕭國鑫、劉治中、徐偉城，2004。不同影像分類方法應用於水稻辨識之探討。航測及遙測學刊，9(1):13-26。

Asaka, D. and H. Shiga. 1999. Distribution mapping of rice grain protein contents using satellite remote sensing, new results in 1999. In: Collections of Paper Presented at the Meeting of Hokkaido Agricultural Experimental Stations in 1999(平成11年度北海道農業試驗場會議資料).Yubari:HCAES,2000.97-101.

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.

Barry, P., Young, A. J. and Britton, G. 1991. Accumulation of pigments during the

- greening of etiolated seedlings of *Hordeum vulgare* L. *J. Exp. Bot.* 42:229-234.
- Bauer, M. E. 1975. The role of remote sensing in determining the distribution and yield of crops. *Adv. Agron.* 27:271-304.
- Boardman, N. K. 1980. Comparative photosynthesis of sun and shade plants. *Annu. Rev. plant Physiol.* 28:355-377.
- 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.
- Cagampang, G. B., C. M. Perez and B. O. Juliano. 1973. A gel consistency for eating quality of rice. *J. Sci. Fd. Agri.* 24:1589-1594.
- 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.
- Chamura, S., K. Kawase, E. Yokoyama and Y. Honda. 1972. Studies on the relation between the types of soil and palatability of paddy rice. I. The influence of chemical properties of various soil on the growth and palatability of paddy rice. *Pro. Crop Sci. Soc. Japan* 41:27-31.
- Chang, F. H. and Troughton, J. H. 1972. Chlorophyll a/b ratios in C₃-C₄-plants. *Photosynthetica* 6:57-65.
- Chang, K. W., Y. Shen and J. C. Lo. 2005. Predicting rice yield using canopy reflectance measured at booting stage. *Agronomy Journal* 97: 872-878.
- 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.

- Chen H. Y, C. M., Yang 1995. Temperaturesensitivity of chlorophyll expression in the leaves of *Ficus microcarpa* cv. Golden-leaves. *Proc. Natl. Sci. Counc. ROC. Pt.B.* 19: 196-200.
- Chen, H. Y., Li, C. C. and Yang, C. M. 2003. Analysis of the chlorophyll biosynthetic and degradative pathways in a chlorophyll-deficient mutant of *Sansevieria trifasciata*. *J. Agric. Assoc. China* 4: in press.
- Chen, H. Y., Lu, Y. K., Chou, C. H. and Yang, C. M. 1996. Analysis of pigment degradation in exocarp of papaya during late ripening. *J. Chinese Agric. Chem. Soc.* 34:460-468.
- Chen Q. Wang L.F., Su N., Qin H.D., Niu H.B., Wang J.L., Zhai H.Q., Wan J.M. 2008. Photosystem 2 photochemistry and pigment composition of a yellow mutant of rice (*Oryza sativa* L.) under different irradiances. *Photosynthetica* 46(1):35-39.
- 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.
- Dale, M. P. and Causton, D. R. 1992. Use of the chlorophyll a/b ratio as a bioassay for the light environment of a plant. *Functional Ecol.* 6:190-196.
- Demming-Adams, B., and W. W. Adams III. 1996. The role of xanthophylls cycle carotenoids in the protection of photosynthesis. *Trends Plant Sci.* 1 : 21-26.
- 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 Sen. 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. *Aquatic Botany* 58:11-19.
- Hansen, P. M., J. R. Jorgensen and A. Thomsen. 2002. Predicting grain yield and protein content in winter wheat and spring barley using repeated canopy reflectance measurements and partial least squares regression. *J Agric Sci.* 139: 307-318.
- 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, B. D., and Lee J. Y. 1995. The photosystem II heterogeneity of chlorophyll

b-deficient mutants of rice: a fluorescence induction study. *Aust. J. Plant Physiol.* 22:195-200.

Hsu, J. C., Lu, Y. K. and Yang, C. M. 1995. Analysis on pigments in the exocarp of orange fruit. *Taiwania* 40:83-90.

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.* 13:87-98.

Huang, W. D., Yang, J. S., Hsu, M. H., Yang, Z. W., Tsai, Y. Z., Chang, S. S., and Yang, C. M. 2005. Application of grey system theory in biology: (2) Photosystem I attributes more than photosystem II to photosynthesis rate in higher plants: application of grey relational analysis. *J. Grey Sys.* 17(1):67-72.

Huang, W. D., J. S. Yang, M. H. Hsu, S. F. Huang, S. S. Chang, Y. Z. Tsai, Z. W. Yang and C. M. Yang. 2005. Application of grey system theory on biology: (IV) Grey relational analysis on the chlorophyll contents and yield of rice. *J. Agric. Assoc. China.* 6:347-354.

Inada, K. 1985. Spectral ratio of reflectance for estimating chlorophyll content of leaf. *Jpn. J. Crop Sci.* 54:261-265.

Inoue, Y., M. S. Moran, and T. Horie. 1998. Analysis of spectral measurements in paddy field for predicting rice growth and yield based on a simple crop simulation model. *Plant Prod. Sci.* 1:269-279.

Jensen, P.E., Willows, R.D., Petersen, B.L., Vothknecht, U.C., Stummann, B.M., Kannangara, C.G, von Wettstein, D. and Henningsen, K.W. 1996. Structural genes for Mg-chelatase subunits in barley: XANTHA-F, -G and -H. *Mol. Gen. Genet.* 250: 383–394.

Juliano, B. O. 1971. A simplified assay for milled rice amylose. *Cereal Sci. Today*

16:334-340.

- Jung, K.H., Hur, J.H., Ryu, C.H., Choi, Y.J., Chung, Y.Y., Miyao, A., Hirochika, H., An, G.H. 2003. Characterization of a rice chlorophyll-deficient mutant using the T-DNA gene-trap system. *Plant Cell Physiol.* 44: 463-472.
- Kahn, V. M., Avivi-Bieise, N. and Von Wettstein, D. 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.
- Kariya, K., A. Matsuzaki, and H. Machida. 1982. Distribution of chlorophyll content in leaf blade of rice plant. *Jpn. J. Crop Sci.* 51:134-135.
- King, J. 1991. The chlorophyll-deficient mutants. In: *The Genetics Basic of Plant Physiological Processes* (ed. by King, J.) pp. 153-166. Oxford University Press, Inc.
- Koncz, C., Mayerhofer, R., Koncz-Kalman, Z., Nawrath, C., Reiss, B., Redei, G.P. and Schell, J. 1990. Isolation of a gene encoding a novel chloroplast protein by T-DNA tagging in *Arabidopsis thaliana*. *EMBO J.* 9: 1337–1346.
- Kusumi, K., Komori, H., Satoh, H., Iba, K. 2000. Characterization of a zebra mutant of rice with increased susceptibility to light stress. *Plant Cell Physiol.* 41: 158-64.
- Lee, Y.J., K.W. Chang, J.C. Lo and Y. Shen. 2005. Remote sensing techniques to map nitrogen status of rice plants within fields at panicle initiation stage. *Agron. J.* (submitted)
- Lichtenthaler, H. K. 1987. Chlorophylls and carotenoids: pigments of photosynthetic biomembrane. *Methods Enzymol.* 148: 350-382.
- Li, H. H. and Liu, K. C. 1973. A survey of the medicinal plants in Taiwan. National Research Institute in Chinese Medicine. Taiwan.

- Lo, C. C. and Y. S. Chen. 2003. Yield and grain nitrogen content in relation to leaf color in rice cultivars TK 9 and TNG 67. *J. Agri. Res. China.* 52:166-177.
- 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.
- Markwell J. P., J. P., Thornber, R. T., Boggs 1979. Higher plant chloroplasts: evidence that all the chlorophyll exists as chlorophyll-protein complexes. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA.* 76:1233-1235.
- Markwell, J. P., Danko, S. J., Bauwe, H., Osterman, J., Gorz, H. J. and Haskins, F. A. 1986. A temperature-sensitive chlorophyll *b*-deficient mutant of sweetclover (*Melilotus alba*). *Plant Physiol.* 81:329-334.
- 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., 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.
- Matile, P., Flach, B. M. -P. and Eller, B. M. 1992a. Autumn leaves of *Ginkgo biloba* L.: Optical properties, pigments and optical brighteners. *Bot. Acta* 105:13-17.
- Matile, P., Schellenberg, M. and Peisker, C. 1992b. Production and release of a chlorophyll catabolite in isolated senescent chloroplasts. *Planta* 187:230-235.
- Matile, P., Hortensteiner, S., Thomas, H. and Krautler, B. 1996. Chlorophyll breakdown in senescent leaves. *Plant Physiol.* 112:1403-1409.
- 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.
- 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.
- Meinke, D. and Koornneef, M. 1997. Community standards for Arabidopsis genetics. *Plant J.* 12: 247–253.
- Minolta Camera Co. Ltd., 1989. Chlorophyll meter SPAD-502. Instruction Manual. Radiometric Instruments Divisions, Osaka, Minolta, p. 22.
- Mochizuki, N., Brusslan, J.A., Larkin, R., Nagatani, A. and Chory, J. 2001. Arabidopsis genome's uncoupled 5 (GUN5) mutant reveals the involvement of Mg-chelatase H subunit in plastid-to-nucleus signal transduction. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* 98: 2053–2058.
- Nakatani HY, V Baliga 1985. A clover mutant lacking chlorophyll a and b-containing protein antenna complexes. *Biochim. Biophys. Res. Commun.* 131: 182-189.
- Netto AT, Campostrini E, Oliveira JGD, Bressan-Smith RE 2005. Photosynthetic pigments, nitrogen, chlorophyll a fluorescence and SPAD-502 readings in coffee leaves. *Scientia Horticulturae* 104: 199-209.
- Oelmullar, R. and Mohr, H. 1985. Carotenoid composition in milo (*Sorghum vulgare*) shoots as affected by phytochrome and chlorophyll. *Planta* 164:390-395.
- Papenbrock, J., Mock, H.P., Tanaka, R., Kruse, E. and Grimm, B. 2000. Role of magnesium chelatase activity in the early steps of the tetrapyrrole biosynthetic pathway. *Plant Physiol.* 122: 1161–1169.
- Peterson, T. A., T. M. Blackmer, D. D. Francis, and J. S. Scheppers. 1993. Using a chlorophyll meter to improve N management. A Web Guide in Soil Resource Management: D-13, Fertility. Cooperative Extension, Institute of Agriculture and Natural Resources, University of Nebraska, Lincoln, Nebraska, USA.
- 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.

Quijja A, N Farineaum, C Cantrel, T Guillot-Salomon 1988. Biochemical analysis and photosynthetic activity of chloroplasts and photosystem II particles from a barley mutant lacking chlorophyll. *Biochim. Biophys. Acta* 932:97-106.

Raj, A and M. P. Tripathi, M. 1999. Relationship of leaf area and chlorophyll content with yield in deep water rice. *Indian J. Plant Physiol.* 4: 219-220.

Ramesh, K., B. Chandrasekaran, T. N. Balasubramanian, U. Bangarusamy, R. Sivasamy and N. Sankaran. 2002. Chlorophyll dynamics in rice (*Oryza sativa*) before and after flowering based on SPAD (chlorophyll) meter monitoring and its relation with grain yield. *J. Agro. Crop Sci.* 188:102-105.

Rissler, H.M., Collakova, E., DellaPenna, D., Whelan, J. and Pogson, B.J. 2002. Chlorophyll biosynthesis. Expression of a second CHLI gene of magnesium chelatase in *Arabidopsis* supports only limited chlorophyll synthesis. *Plant Physiol.* 128: 770–779.

Sakaiya, E. and Y. Inoue. 2007. Estimating Protein Content of Brown Rice in Central Tsugaru using Airborne Remote Sensing. *Crop Science Society of Japan 2007 Annual Meeting.*

SAS Institute, Inc. 1985. SAS User's Guide. Statistics. SAS Inst., Cary, NC, USA.

Shibayama, M., M. Steven, S. Morinaga and T. Akiyama. 1993. Canopy water deficit detection in paddy rice using a high resolution field spectroradiometer. *Remote Sens. Of Environ.* 45:117-126.

- Shioi, Y. and Sasa, T. 1986. Purification of solubilized chlorophyllase from *Chlorella protothecoides*. *Methods Enzymol.* 123:421-427.
- Sugimoto, H., Kusumi, K., Tozawa, Y., Yazaki, J., Kishimoto, N., Kikuchi, S., Iba, K. 2004. The virescent-2 mutation inhibits translation of plastid transcripts for the plastid genetic system at an early stage of chloroplast differentiation. *Plant Cell Physiol.* 45: 985-996.
- Sun, X. M., Q. F. Zhou and Q. X. He. 2005. Hyperspectral variables in predicting leaf chlorophyll content and grain protein content in rice. *Acta Agronomica Sinica.* 31:844-850.
- Terao, T., Yamashita, A., and Katoh, S. 1985a. Chlorophyll b-deficient mutants of rice. I. Absorption and fluorescence spectra and chlorophyll alb ratios. *Plant and Cell Physiology* 26, 1361-1367.
- Terao, T., Yamashita, A., and Katoh, S. 1985b. Chlorophyll b-deficient mutants of rice. 11. Antenna chlorophyll ah-proteins of photosystem I and 11. *Plant and Cell Physiology* 26, 1369-1377.
- Thomas, J. R. and Gausman, H. W. 1977. Leaf reflectance vs. leaf chlorophyll and carotenoid concentrations for eight crops. *Agron. J.* 69:799-802.
- Tung, T. C., Huang, P. C. and Li, H. C. 1961. Composition of food used in Taiwan. *J Formosan Med. Assoc.* 60:973-1005.
- Turner, F. T. and M. F. Jund. 1994. Assessing the nitrogen requirements of rice crops with a chlorophyll meter method. *Aust. J. Exp. Agric.* 34:1001-1005.
- Villareal, R. L., Lin, S. K., Chang, L. S. and Lai, S. H. 1979. Use of sweet potato (*Ipomoea batatas*) leaf trips as vegetables. *Expl. Agric.* 15:113-116.
- 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.

- Walker, C.J. and Willows, R.D. 1997. Mechanism and regulation of Mg-chelatase. *Biochem. J.* 327: 321–333.
- 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., J. C., Hsu, Y. K., Lu 1995. Light-sensitivity of chlorophyll expression in the leaves of *Ficus microcarpa* cv. Golden-leaves. *Bot. Bull. Acad. Sin.* 36:215-221.
- 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.
- Yang, C. M. and Y. R. Chen. 1993a. Protein phosphorylation in control of grana stacking of thylakoid membranes in higher plants. *J. Agri. Asso. China.* 161: 33-46.
- Yang, C. M. and Y. R. Chen. 1993b. Grana stacking of thylakoid membranes in higher plants. In *Recent Advances in Botany.* (Chou, C.H. and Hsing, I.Y. eds), Institute of Botany, Academia Sinica, Taipei, Taiwan, ROC, Monograph Series 13: 219-243.
- Yang, C. M., Hsu, J. C. and Shih, C. F. 1994. Response of Chlorophyll a/b ratio in Yuan-Yang Lake bryophytes to the alteration of light intensity. *Proc. Nat. Sci. Counc. ROC, Part B, Life Sci.* 18:134-137.
- Yang C. M., H. Y., Chen 1996. Grana stacking is normal in a chlorophyll-deficient LT8 mutant of rice. *Bot. Bull. Acad. Sin.* 37:26-29.
- Yang, C. M., Chang, K. W. and Yin, M. H. 1997a. Influence of the soil characteristics on pigment degradation in Yuanyang Lake Nature Preserve. 1997 International Long-term Ecological Research and Biodiversity Studies Conference. 12-13

November, National Taiwan University, Taipei, Taiwan.

Yang, C. M., Yin, M. H. and Chang, K. W. 1997b. Pigment degradation of the higher plants in Yuanyang Lake Nature Preserve. 1997 International Long-term Ecological Research and Biodiversity Studies Conference. 12-13 November, National Taiwan University, Taipei, Taiwan.

Yang, C. M. and Ko, C. C. 1997. Seasonal changes in canopy spectra of sweet potato. *J. Photogram Remote Sens.* 3(1): 13-28.

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., Chang, K. W., Yin, M. H. and Huang, H. M. 1998. Methods for the determination of the chlorophylls and their derivatives. *Taiwania* 43:116-122.

Yang, C. M., Lee, C. N. and Chou, C. H. 2002. Effects of three allelopathic phenolics on chlorophyll accumulation of rice (*Oryza sativa*) seedlings: I. Inhibition of supply-orientation. *Bot. Bull. Acad. Sin.* 43:299-304.

Yang, C. M., Chou, C. H., Chang, I. F. and Lin, S. J. 2003. Effects of three allelopathic phenolics on chlorophyll accumulation of rice (*Oryza sativa*) seedlings: II. Stimulation of consumption-orientation. *Bot. Bull. Acad. Sin.* 44: (in press).

Yang C. M., M. M., Yang 2004. Grana stacking is normal in two insect-induced cecidomyiid galls deficient in light-harvesting complex II (LHCII). *Plant Physiol. Biochem.* (accepted)

Zhang, H.T., Li, J.J., Yoo, J.H., Yoo, S.C., Cho, S.H., Koh, H.J., Seo, H.S., Paek, N.C. 2006. Rice Chlorina-1 and Chlorina-9 encode ChlD and ChlI subunits of Mg-chelatase, a key enzyme for chlorophyll synthesis and chloroplast

development. *Plant mol. Biol.* 62: 325-337.

