

# 水稻營養生長期農藝性狀與衛星遙測植生指數 NDVI 之灰關聯分析

楊志維<sup>1,3</sup> 許明晃<sup>1</sup> 黃文達<sup>1</sup> 楊智旭<sup>2</sup> 蔡養正<sup>1</sup> 楊棋明<sup>1,3</sup> 張新軒<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> 國立台灣大學農藝學系

<sup>2</sup> 淡江大學機械工程學系

<sup>3</sup> 中央研究院植物研究所暨生物多樣性研究中心

流動標題：水稻農藝性狀與衛星遙測植生指數

**Grey Relational Analysis between Agronomic Characters and Satellite Remote Sensing Normalized Difference Vegetation Index of Paddy Rice during Vegetation Stage**

Zhi-Wei Yang<sup>1</sup>, Ming-Huang Hsu<sup>1</sup>, Wen-Dar Huang<sup>1</sup>, Jr-Syu Yang<sup>2</sup>, Yang-Zenq Tsai<sup>1</sup>,  
Chi-Ming Yang<sup>3</sup>, and Shine-Shiang Chang<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Department of Agronomy, National Taiwan University, Daan, Taipei, Taiwan 101

<sup>2</sup>Department of Mechanical Engineering, Tamkang University, Tamshui, Taipei County, Taiwan 251

<sup>3</sup>Institute of Botany and Research Center for Biodiversity, Academia Sinica, Nankang, Taipei, Taiwan 115

Running title: Paddy rice agronomic characters and satellite remote sensing NDVI

通訊作者：

張新軒 Shine-Shiang Chang

國立台灣大學農藝學系教授

Professor, Department of Agronomy, National Taiwan University, Daan, Taipei, Taiwan

101

電話：02-23630231 轉 3049

傳真：02-23620879

## 摘要

本研究應用灰關聯理論,分析水稻營養生長期其農藝性狀與衛星遙測常態化差異植生指數(normalized difference vegetation index, NDVI)之關聯性。灰關聯分析顯示,株高、莖數、葉氮含量(%)、莖水份含量、葉鮮重與總水份含量之灰序分佔前 6 名;而葉氮含量(g)、總氮量(g)、莖氮量(g)、莖鮮重、總乾重與莖乾重之灰序則分別是後 6 名;其它農藝性狀則介於中間。因此,水稻營養生長期各農藝性狀對衛星遙測 NDVI 之貢獻度不同,以株高、分蘖數、水份含量等較高,組織乾重則較低。本文也將迴歸分析與灰關聯分析結果做比較。

**關鍵詞：**水稻、營養生長期、農藝性狀、衛星遙測、植生指數、灰關聯分析、NDVI

**Abstract:** This study applied grey system theory to analyze the relationship between agronomic characters and satellite remote sensing normalized difference vegetation index (NDVI) of paddy rice during vegetation stage. The results of grey relational analysis indicate that plant height, tiller number, leaf nitrogen content (%), tiller water content, leaf fresh weight and total water content (%) take the 1<sup>st</sup>, 2<sup>nd</sup>, 3<sup>rd</sup>, 4<sup>th</sup>, 5<sup>th</sup>, and 6<sup>th</sup> place, respectively; that leaf, total and tiller nitrogen contents (g), tiller fresh weight, total and tiller dry weights take occupy the 13<sup>th</sup>, 14<sup>th</sup>, 15<sup>th</sup>, 16<sup>th</sup>, 17<sup>th</sup> and 18<sup>th</sup>, respectively; and that other agronomic characters between them. Therefore, the agronomic characters of paddy rice make different contribution to satellite NDVI during vegetation stage. Among them, the plant height, tiller number and water content play more importance and dry weight of tissues play less. Regression and grey relational analysis were compared.

**Keywords:** agronomic characters, grey relational analysis, NDVI, paddy rice, satellite remote sensing, vegetation index, vegetation stage

## 前言

衛星遙測資料具有定期取得大面積空間分佈資料及可追溯過去時空資料的特殊優點，已廣泛運用於各領域之理論與實務之研究，也將是台灣未來發展精準農業監測與管理之重要工具(楊和林 2000, Steven and Clark 1990)。對於運用衛星遙測資料做定量測定，以建立地面植物生長狀況的植生指數(vegetation index)，如常態化差異植生指數(normalized difference vegetation index, NDVI)、簡易比植生指數(simple ratio vegetation index, SRVI)等，被學者們廣泛研究、討論與應用(Choudhury 1987, Sellers 1985, Sellers 1987, Tucker and Sellers 1986)。長期以來，有關衛星遙測植生指數之文獻很多，但有一問題似乎都未能解決。此即，衛星遙測所記錄的反射光譜特徵為所有地面物及其各種各類特性之綜合反射結果。因此，個別地面物及其附屬特性可能對衛星遙測之反射光譜提供不同程度之貢獻。對農作物而言，除葉綠素外，其它不同農藝特性狀對衛星遙測之反射光譜亦會產生不同之影響，亦即各農藝特性對衛星遙測植生指數 NDVI 有不同的貢獻度。對個別因子的貢獻度之排序問題，傳統數理統計無法解決，但灰系統理論(grey system theory)則可以(鄧和郭 1996)。

傳統的統計分析要求大量數據，而數據的分佈必須是典型的，且變化因素不能太多；迴歸分析可以解明個別子系統對其母系統間之相關性與可信度，但無法比較個別子系統間的相對關聯性、貢獻度、或重要性之程度或大小。灰系統理論則針對此問題發展出解決辦法而彌補這方面的缺點(Deng 1989)。灰系統理論自中國大陸華中理工大學鄧聚龍教授於 1982 年首次提出後(Deng 1982)，迄今超過二十年，已逐漸被廣泛地運用在許多的研究領域，諸如：農業、經濟、工程、水利、生態、醫學、環保、人口、氣象、地質、教育、體育、軍事(鄧和郭 1996)與生化反應等(Yang *et al.* 1999)。

其中的灰關聯分析(grey relational analysis)，曾被應用在營養學方面，比較個別抗

氧化物對總抗氧化力之影響(趙等 2001, 鍾等 2001, Chu *et al.* 2003)、拓樸效應對生態環境的影響(Che and He 1993)、血清中肝纖維細胞檢測標記之最佳選擇(Chen and Tan 1995)、小麥農藝性狀與產量之關聯性(Guo *et al.* 1991)、植物色素捕光蛋白含量對其葉綠素 *a/b* 比之貢獻度分析(黃等 2003a)及對其光合作用速率之影響方式(Huang *et al.* 2004a)。最近, 灰關聯分析也被運用於探討陽明山國家公園磺嘴山自然保護區五種氣候因子影響當地植被長期適應環境之問題(黃等 2003b, Huang *et al.* 2004b)。

吾人曾以水稻葉片葉綠素相關色素(chlorophyll-related compounds, CRCs)對衛星遙測 NDVI 進行灰關聯分析, 結果顯示位於葉綠體類囊膜(thylakoid)上極性較小的 CRCs 對衛星遙測 NDVI 之貢獻較大, 而分佈於基質(stroma)水溶性較大之 CRCs 則對衛星遙測 NDVI 之貢獻較小(楊 2001)。相似結果亦在三種不同顏色甘藷葉片發現(許 2003, 許等 2004)。

本研究應用灰關聯理論, 分析水稻營養生長期間其農藝特性對 SPOT 衛星遙測植生指數 NDVI 之關聯性。

## 材料與方法

### 水稻栽植與樣區

本研究之試樣區位於台北縣新店市國立台灣大學之安坑農業試驗場 總共四個樣區, 其長寬各為 100m×100m, 進行四種不同組合之處理。每個樣區再分為 4 個 50m×50m, 本文只運用作為對照組之資料。水稻插秧於 7/26/2000, 水稻種植行株距為 30cm×30cm。

## **農藝性狀調查**

水稻農藝特性與採樣，每二週進行一次，日期顯示於圖表中。調查項目共 18 種，包括：株高、分蘗數、葉面積、葉鮮重、莖鮮重、總鮮重、葉乾重、莖乾重、總乾重、葉氮含量(%)、莖氮含量(%)、總氮含量(%)、葉水份含量、莖水份含量、總水份含量、葉氮克數、莖氮克數、總氮克數 (楊 2001)。

## **衛星影像**

法國 SPOT 衛星影像直接購自國立中央大學太空及遙測研究中心，拍攝日期分別為 2000 年 8/7、8/20、9/28 及 10/11；相當於插秧後第 12、25、33 與 46 天。影像屬第十等級(level 10)，且均無雲層。常態化差異植生指數 NDVI 之定義為  $(IR-R)/(IR+R)$  (Rouse *et al.*, 1973)，R(red)為紅光反射率，IR(infrared)為紅外光反射率。農藝特性隨營養生長期而變化，但因其採樣與調查日與衛星遙測日不一致，故衛星遙測 NDVI 經迴歸分析後以內插法而得之植生指數，做為灰關聯分析之參考系統。

## **迴歸分析**

衛星遙測 NDVI 與營養生長期之迴歸分析根據 SAS(statistic analysis system)軟體完成(1985)。

## **灰關聯分析**

以各種農藝特性為實驗系列或子系統，而都以衛星遙測 NDVI 為參考系列或母系統，依下列之原理與步驟進行灰關聯分析。本研究採均質化後運算。

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

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

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

2、灰關聯係數(grey relational coefficient)  $\gamma$  之定義如下：

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

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

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

$x_0$  是參考序列(reference data series)

$x_j$  是實驗序列(test data series)

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

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

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

所有  $\max \max$  亦如上之取法。

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

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

## 結果與討論

### 農藝性狀

台灣水稻第二期生育期間，因生育初期之高溫及水份充足，各種農藝性狀都正常的變化著，諸如分蘗數旺盛，莖數、葉面積、葉莖鮮重或乾重等都快速增加(表一)。由於本文之主要目的在於農藝性狀與衛星遙測之灰關聯分析，故農藝性狀變化之意義不予討論。

### 衛星遙測 NDVI 之變化

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(圖一和圖二)。插秧後第 12 天(8/7/2000)之 NDVI 都低於 0.1，與水體或裸露地之反射特性相似，顯然地此期間水稻幼苗剛發育，稻田裡裸露之土壤及其淹覆之水份影響甚大。插秧後第 25 天(8/20/2000)，水稻之 NDVI 接近於 0.2，此期間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，將只有水稻的各種農藝性狀影響衛星遙測之植生指數。

### 迴歸分析

依圖二之迴歸曲線內插而得到相當於採樣日於水稻插秧後第 36、55 及 69 天之衛星遙測植生指數 NDVI，進一步與各種農藝特性進行直線迴歸分析(表二)。結果顯示，莖水份含量、總及葉氮含量(%)之  $R^2$  值都甚低，分別只有 0.004、0.295 及 0.338，相關性不顯著；然而葉面積指數、莖氮含量(%)及葉水份含量之  $R^2$  值則分別是 0.748、



0.745 及 0.887，有顯著相關；其它農藝特徵之  $R^2$  值除葉氮克數為 0.920 外，都超過 0.95，顯示極顯著之相關性。

### **灰關聯分析**

依灰關聯理論，若灰關聯度值(grey relational value)愈大，其灰序(grey order)排名就愈前面，即貢獻度愈大或愈重要。因此，株高、分蘗數、葉面積指數、葉鮮重、莖鮮重、總鮮重、葉乾重、莖乾重、總乾重、葉氮含量(%)、莖氮含量(%)、總氮含量(%)、葉水份含量、莖水份含量、總水份含量、葉氮克數(g)、莖氮克數(g)、總氮克數(g)對衛星遙測植生指數 NDVI 之灰序分別為 1、2、12、5、16、10、11、18、17、3、9、8、7、4、6、13、15 及 14(表二)。此顯示下列意義：(一)二期水稻之株高、分蘗數、葉氮含量(%)、莖水份含量、葉鮮重及總水份含量六種農藝特性之灰序都在前三分之一段，故影響衛星遙測植生指數 NDVI 之影響較大，而六者中以前二種即株高及分蘗數之貢獻最大；(二)二期水稻之葉氮克數(g)、總氮克數(g)、莖氮克數(g)、莖鮮重、總乾重及莖乾重六種農藝特性之灰序都在後三分之一段，故影響衛星遙測植生指數 NDVI 之影響較小，而六者中以後二者即總乾重及莖乾重之貢獻最小；(三)株高、葉鮮重、葉乾重、葉氮含量(%)、葉水份含量及葉氮克數(g)都是各相似農藝特性(諸如鮮重量、乾重量、氮含量(%)、水份含量、氮克數(g))中灰排序最前面的(水份含量除外)，此顯示，位於最上層之水稻葉片或葉冠之農藝特性，對衛星遙測植生指數 NDVI 之影響比其它較下層組織之農藝特性都重要，此很符合水稻田之生態變遷；(四)水稻各種組織之乾重及以克數(g)計量之氮含量對衛星遙測植生指數 NDVI 之貢獻度較小；及(五)水稻各種組織之水份含量都對衛星遙測植生指數 NDVI 有較高之貢獻。

### **迴歸分析與灰關聯分析之比較**

迴歸分析之相關性並不易與灰關聯分析結果相互比較，因二者所能解決問題之性

質不同(Deng, 1982 and 1989)。譬如：(一)葉面積指數、莖鮮重、莖乾重、總乾重、葉氮克數(g)、莖氮克數(g)、總含氮克數(g)都與衛星遙測植生指數 NDVI 有極顯著相關，但其灰關聯值都較小，故灰序排名卻都在後面三分之一段，亦及其對遙測植生指數 NDVI 之貢獻度較低；(二)葉氮含量(%)及莖水份含量與衛星遙測植生指數 NDVI 之相關性極不顯著， $R^2$  值分別是 0.338 及 0.004，但其灰關聯值都較大，故灰序排名卻都在前面三分之一段，且其灰序分別是 3 及 4，亦及其對遙測植生指數 NDVI 之影響遠比其它十四種農藝特性都較大；(三)即使總氮含量(%)之  $R^2$  值只有 0.295，其灰序仍比其它十種與衛星遙測植生指數 NDVI 有極顯著或顯著相關之農藝特性，扮演更重要的貢獻。

葉面積指數與衛星遙測 NDVI 間有極顯著相關性，其  $R^2$  值為 0.991，但其灰序卻是接近後三分之一段。顯示与其它農藝性狀比較，葉面積指數對衛星遙測 NDVI 之貢獻度似不明顯；反而是株高、分孽數等提供更重要之貢獻。

## 參考文獻

1. 楊純明、林俊義 (2000) 水稻精準農業(耕)體系之研究。行政院農業委員會農業試驗所。台灣台中。
2. 鄧聚龍、郭洪 (1996) 灰預測原理與應用。全華科技圖書股份有限公司。台灣、台北。
3. 趙璧玉、楊智旭、游添榮、楊棋明 (2001) 黑豆與黃豆個別類抗氧化物含量對其抗氧化力之灰關聯分析。2001年灰色系統理論與應用學術研討會論文集，pp.E28-35。10月25~26日。國立雲林科技大學水土資源及防災科技研究中心。
4. 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。
5. 鍾愛嵐、楊棋明、彭嵐霖、楊智旭、趙璧玉 (2001) 青草植物抗氧化評估之灰關聯分析與灰決策。2001年灰色系統理論與應用學術研討會論文集，pp.E117-123。10月25~26日。國立雲林科技大學水土資源及防災科技研究中心。
6. 黃文達、蔡養正、張新軒、楊智旭、楊棋明 (2003a) 灰系統理論在生物學之應用：(1)高等植物捕光蛋白對葉綠素a/b比值貢獻度之灰關聯分析。中華農學會報。4: 550-556。
7. 黃文達、陳建璋、許明晃、楊志維、張新軒、蔡養正、黃光瀛、呂理昌、陳朝圳、楊棋明 (2003b) 磺嘴山氣候因子對衛星遙測類地毯草亮度指數之灰關聯分析。中華農藝。13: 59-66。
8. 許明晃 (2003) 甘藷葉片色素含量與反射光譜關係之研究。國立台灣大學農藝研究所。博士論文。
9. 許明晃、黃文達、楊志維、蔡養正、張新軒、楊智旭、楊棋明 (2003) 甘藷葉片色素含量對植生指數NDVI之灰關聯分析。中華農藝。13: XX-XX。(印刷中)
10. Che KJ, HY He (1993) Grey relational analysis and topological prediction on ecological environment. J. Grey Sys. 5:147-162.
11. Chen YK, XR Tan (1995) Grey relational analysis on serum markers of liver fibrosis. J. Grey Sys. 7:63-74.
12. Choudhury BJ (1987) Relationships between vegetation indices, radiation absorption, and net photosynthesis evaluated by sensitivity analysis. Remote Sens. Environ. 22:209-233.
13. Chu YH, PY Chao, JS Yang, CM Yang (2003) Grey relational analyzing the flavonoid contents and antioxidative activities of eight vegetables. J. Grey Sys. 15:67-72.
14. Deng JL (1982) Control problems of grey systems. Systems Control Lett. 5:288-294.
15. Deng JL (1989) Introduction to grey system theory. J. Grey Sys. 1:1-24.
16. Guo RL, CJ Song, XL Yuan, QJ Wang (1991) Grey relational analysis on main quality and agronomic characters of wheat. J. Grey Sys. 3:227-236.
17. Huang WD, JS Yang, MH Hsu, ZW Yang, YZ Tsai, SS Chang, CM Yang (2004a)

- Application of grey system theory in biology: (2) Photosystem I attributes more than photosystem II to photosynthesis rate in higher plants. *J. Grey Sys.* 16:xxx-xxx. (in press)
18. Huang WD, JC Chen, MH Hsu, ZW Yang, JS Yang, SS Chang, YZ Tsai, KY Huang, L C Lu, CT Chen, CM Yang (2004b) Grey relational analysis of the effect of climate factors on the satellite remote sensing normalized difference vegetation index (NDVI) in the Mt. Huangzui area. (submitted).
  19. Rouse JW, RH Haas, JA Schell, DW Deering (1973) Monitoring vegetation systems in the great plains with ERTS. In Third ERTS Symposium, NASA SP-351, Washington, DC. Vol. 1, p.309-317.
  20. SAS Institute, Inc. 1985. SAS User's Guide. Statistics. SAS Inst. Cary, NC, USA.
  21. Sellers PJ (1985) Canopy reflectance, photosynthesis and transpiration. *Int. J. Remote Sens.* 6:1335-1372.
  22. Sellers PJ (1987) Canopy reflectance, photosynthesis and transpiration, II. The role of biophysics in the linearity of their interdependence. *Remote Sens. Environ.* 21:143-183.
  23. Steven MD, JA Clark (1990) Application of remote sensing in agriculture. University Press, Cambridge.
  24. Tucker CJ, PJ Sellers (1986) Satellite remote sensing of primary production, *Int. J. Remote Sens.* 7:1395-1416.
  25. Yang CM, JS Yang, CK Yang, CH Chou (1999) Long-term research on chlorophyll cycling in the Yuanyang Lake Nature Preserve I. The grey prediction models on chlorophyll degradation of *Chamaecypari. var. formosana* leaf. *Photosynthetica* 37: 499-508.

表一、水稻營養生長期其主要農藝性狀之變化。

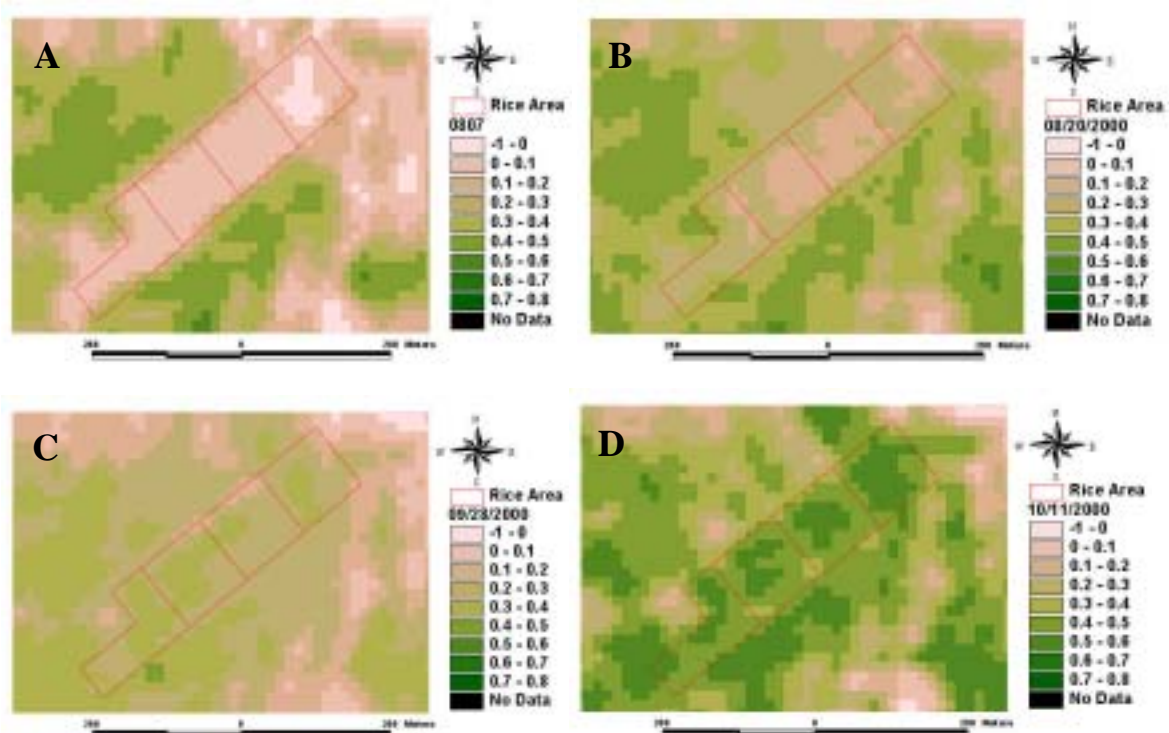
Table 1. Change of the major agronomic characters of paddy rice during vegetation stage.

農藝性狀	插秧後天數		
	36	55	69
株高(cm/叢)	35.83	58.10	81.65
分蘗數(支/叢)	7.41	10.25	10.88
葉面積指數	1.53	7.30	9.66
葉鮮重(g)	40.04	80.20	100.19
莖鮮重(g)	20.46	178.11	278.71
總鮮重(g/叢)	60.50	258.31	415.71
葉乾重(g)	4.96	23.62	30.29
莖乾重(g)	4.06	28.09	56.41
總乾重(g/叢)	9.03	51.71	100.10
葉氮含量(%)	1.88	2.53	2.18
莖氮含量(%)	1.46	1.37	0.86
總氮含量(%)	1.69	1.90	1.27
葉水份含量(%)	87.60	70.55	69.77
莖水份含量(%)	80.14	84.23	79.76
總水份含量(%)	85.08	79.98	75.92
葉氮克數(g)	0.09	0.60	0.66
莖氮克數(g)	0.06	0.39	0.49
總含氮克數(g)	0.15	0.98	1.27

表二、水稻營養生長期其農藝性狀與衛星遙測 NDVI 之迴歸分析與灰關聯分析。

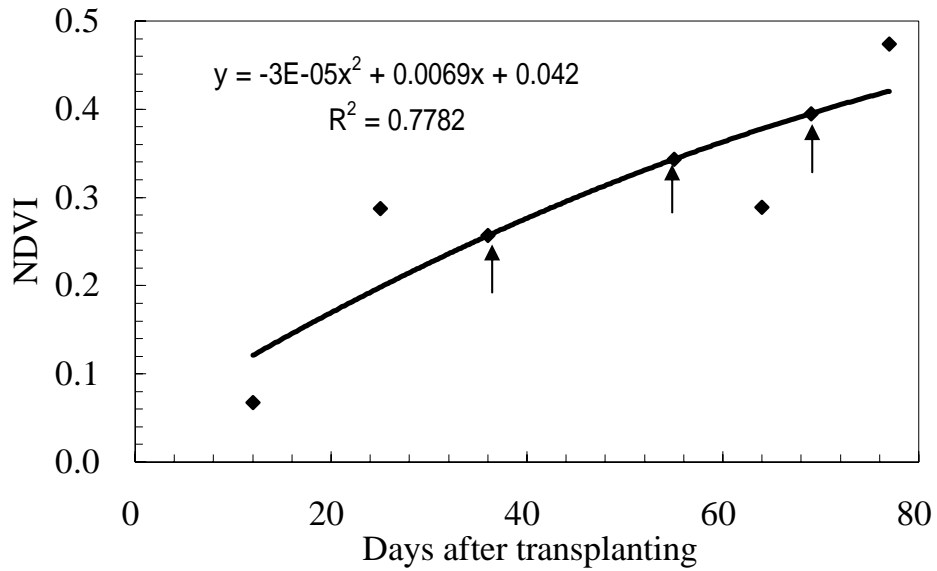
Table 2. Regression coefficient, value and order of grey relation analysis between agronomic characters and satellite remote sensing NDVI of paddy rice during vegetation stage.

農藝性狀	R <sup>2</sup>	灰關聯分析	
		灰關聯度	灰序
株高	0.997	0.963	1
分蘗數	0.747	0.923	2
葉面積指數	0.991	0.733	12
葉鮮重	0.998	0.860	5
莖鮮重	0.999	0.705	16
總鮮重	0.994	0.751	10
葉乾重	0.984	0.733	11
莖乾重	0.965	0.687	18
總乾重	0.969	0.701	17
葉氮含量(%)	0.338	0.875	3
莖氮含量(%)	0.745	0.752	9
總氮含量(%)	0.295	0.776	8
葉水分含量	0.887	0.791	7
莖水分含量	0.004	0.875	4
總水分含量	0.994	0.836	6
葉氮克數(g)	0.920	0.711	13
莖氮克數(g)	0.975	0.710	15
總含氮克數(g)	0.983	0.710	14



圖一、多期 SPOT 衛星影像監測水稻營養生長期之植生指數 NDVI 之變化。衛星影像日期標示於圖上，分別為(A)8/7/2000、(B)8/20/2000、(C)9/28/2000 及(D)10/11/2000。

Fig. 1. Change of NDVI of paddy rice monitored by multiple SPOT satellite imageries, taken on 8/7 (A), 8/20 (B), 9/28 (C), and 10/11 (D) in 2000.



圖二、水稻營養生長期其衛星遙測 NDVI 之變化。箭頭所示為在迴歸曲線內插後之數據，其日期與地面採樣日期一致，分別相當於第 36、55 及 69 天之採樣時間。

Fig. 2. Change of satellite remote sensing NDVI of paddy rice during vegetation stage. Arrows indicate the days, equivalent to 36, 55 and 69 days after rice transplanting, intrapolated after regression.