

研究報告

森林植生季節性光譜特性之研究*

林金樹¹⁾

摘要

本文利用大地衛星 TM 多譜資料探討季節性變化對森林植群光譜反射特性之影響，希望瞭解不同植群的光譜特徵異質性與季節變化之關係，決定利用多譜資料檢測森林植群的最適時期與資料處理之邏輯及方法。研究結果發現，季節性變化對植物的光譜反射量有很大的影響，而且不同植群對不同波段的光譜反射量，因季節推移所引起的變化量並不一致；但若以光譜反射特性曲線的型態看，植物與裸地反射可見光和近紅外光光譜的基本特性是沒有改變的，而且裸地的光譜反射特性曲線迥異於植物，證明在任一季節利用遙測多譜資料檢測林區非法的開墾行為，是絕對可行的。春季時期是植物生長季節的開始，植物的冠層結構與葉部總面積因生長所生之變化極微；春季時期的太陽位置比較接近天頂，衛星影像因地形效應所引起的陰影面積比較少，可檢測的影像面積比率比較高；不同季節影像之組類分離度與分類準確度顯示，春季影像中不同植物的光譜特徵異質性最大，組類可分辨率是四個季節影像中最高的。綜合這些條件可以證明，春季是利用遙測多譜資料檢測森林植群資訊的最佳時期。依地形與太陽高度可以模擬得到日照反射率影像，純化反射率的方法可以縮小地物每一細部組類光譜反射值的變異程度，並且降低地形效應造成同一地物之光譜反射值變異量擴大的影響。利用遙測技術監測森林植群時可以利用反射率純化法提升地物細部組類的光譜分離度。

關鍵詞：森林植群、遙測、光譜反射特性、季節性變異、日照反射率純化法。

林金樹。1999。森林植生季節性光譜特性之研究。台灣林業科學 14(3):289-305。

Research paper

Study of Seasonal Changes of Spectral Reflectance of Forest Vegetation*

Chinsu Lin¹⁾

【 Summary 】

This paper uses Landsat TM data to study differences of spectral reflectance and the spectral heterogeneity of different vegetation types caused by seasonal changes. It aims to find the best imaging season and sound data processing logic for monitoring forest vegetation. Results revealed that there is a significant influence of vegetative reflectance produced by seasonal change, yet the quantity changing in each TM band is not consistent. In spite of this fact, the basic reflection properties of visible and near infrared wavelength light are almost identical and distinguishable in a year's duration for both vegetation and bare land if viewed from the pattern of spectral reflectance curves. This implies that it is possible to detect illegal development in a forest with remotely sensed data. Photo-

¹⁾ 國立嘉義技術學院森林系，嘉義市 600 學府路 300 號 Dept. of Forestry, National Chiayi Institute of Technology, 300 University Rd., Chiayi 600, Taiwan, ROC.

1998 年 12 月送審 1999 年 3 月通過 Received December 1998, Accepted March 1999.

* 本研究承行政院國科會專題研究計畫(NSC 87-2313-B-021-021)經費補助，謹此致謝。

synthesis can directly and indirectly affect the visible and near infrared reflectance of trees, such as conifers, broadleaf trees, and bamboo; while background materials can also enhance the spectral reflectance of grass as a result of the photosynthesis process. In spring, the beginning of the plant growth season, physiological processes rarely change the total leaf area and canopy structure; furthermore the solar elevation is high enough to decrease the shadow area in the spring image. These conditions indicate that the spectral characteristics of plants are most stable in springtime. Further considering the best classes divergence and classification accuracy of the spring image revealed in this study, one can conclude that spring is the most suitable season for detecting forest vegetation with TM data. In the presence of the relief effect in an image, the spectral reflectance deviation of an object always expands. The light reflectance purification method separates the reflectance of an object into several classes, and hence can minimize the data deviation of each class. Results also revealed that the purification method is better than the relative proportion transformation method in reducing terrain effects in this study; and hence one can use this logic to process multispectral scanner data to upgrade the accuracy of classification in forest vegetation monitoring.

Key words: forest vegetation, remote sensing, spectral reflectance characteristics, seasonal change, and purified reflectance analysis.

Lin C. 1999. Study of seasonal changes of spectral reflectance of forest vegetation. *Taiwan J For Sci*: 14(3):289-305.

緒言

依森林生態系植生演替的觀念，植群的發展可以代表不同階段的演替過程，它可以反映林區環境甚至是微環境的狀態。森林植群的演替行為既是一種動態過程，則由遙測學的觀點，森林植群的光譜特徵即有可能因其內在條件與外在環境的改變而有變化；因此欲利用遙測技術檢測森林植群的組成與發展時，必須注意植群對入射光譜的動態反應，特別是企圖利用某一時空的植群光譜特性來模擬或調查不同時期森林生態系資訊時，若未考慮植生光譜特性動態變化的特質，則所得結果將很難符合實際狀況，可信度小，應用價值會降低。故利用遙測技術監測森林生態環境時，必須瞭解植生因時間推移所產生的季節性光譜特徵之變化，如此方得據以利用不同時節的光譜資料，發展遙測調查植生的模式化定量方法，提升遙測技術檢測森林資訊之效率。

森林植群的光譜特徵會因植生的生理活動與冠層結構之發展以及太陽位置與地形變化之影響而發生變化。台灣的森林環境由於地形與

林相非常崎嶇複雜，更使利用遙測多譜影像粹取林區植群或土地利用型時，常發生較嚴重的漏授與誤授情形，這種現象將致使利用遙測技術取得森林生態系植群資訊之時空優點無法全然發揮，也對研究森林生態系變遷之機制，以及提供輔助資訊規劃永續性森林經營目標與作業理想之達成，造成極大的限制。因此本文利用大地衛星 TM 多譜資料，探討森林植群隨季節推移所生的光譜特徵變異性，以期瞭解在時間推移中，太陽位置與局部地形之間相對位置的改變，對森林植群光譜特徵所可能產生的影響；並尋求一個較佳的資料處理邏輯與方法，供為利用遙測技術檢測森林資源之參考。

材料與方法

一、研究試區與材料

本研究以台灣中南部山區的特富野地區為研究試區 (Fig. 1)，該區位於嘉義縣阿里山鄉境內，林地轄屬林務局嘉義林區的大埔事業區和阿里山事業區，試區左上角與右下角地理座

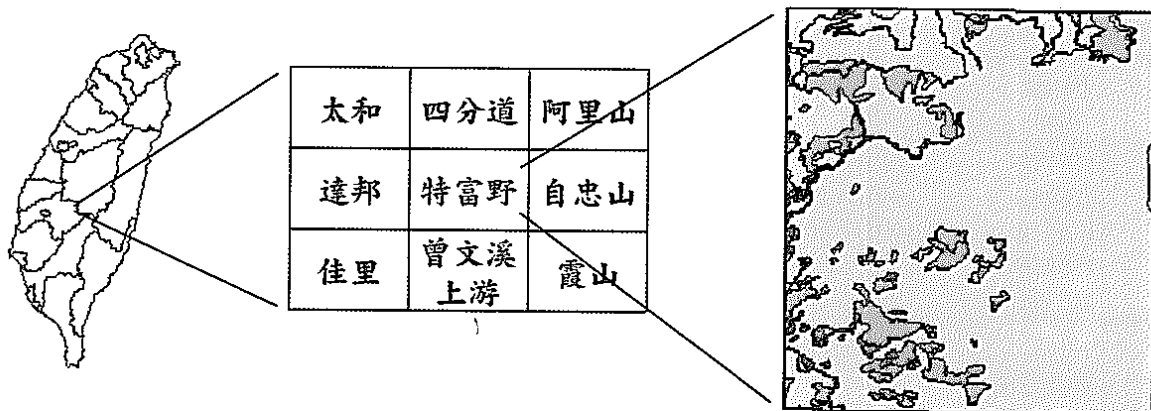


Fig. 1. Illustration of study site with a composite base map list (middle) and its land cover map (right).

標(TM二度分帶)各為(224420, 2599720)與(229595, 2594120),全區面積2925 ha。在台灣區像片基本圖9519-I-01一萬分一比例尺圖幅範圍內,該區位於阿里山森林遊樂區下方,試區上方有台18公路蜿蜒其間。航空照片判釋調查的結果顯示,特富野地區之土地利用型有關葉林、針葉林、竹林、建築區、草地、農地、茶園、果園、崩塌地、道路、河流、新造林地、人工寮舍以及開墾地等十四種,其中崩塌地、建地、道路、河流及人工寮舍等面積約為93 ha,佔全區面積的3.2%,其餘96.8%面積均為植生被覆。由於部分土地利用型之面積非常細碎,小於TM影像一個像元所涵蓋之面積900 m²,基於單純化原則,本研究將只選出闊葉林、針葉林、竹林、草地以及裸地等五種主要的土地利用型為分析對象。

本研究所用材料可分為航空照片與衛星多譜掃描影像二種。航空照片之拍攝時間為1995年8月至11月,照片比例尺一萬七千分一,係供為調查林區土地利用型以及測製數值地形模型之用。衛星多譜影像均為國立中央大學太空及遙測研究中心所提供的第十級Landsat TM影像,各影像之掃描時間為1995年一、四、七、十月以及1996年一月等共有五個時期影像,影像參數詳如Table 1,各時期影像可代表冬、春、夏、秋、翌冬等季節的地物輻射量。由於第十級Geo-coded TM影像之像元大

小均為25 × 25 m,因此本研究利用一萬七千分一比例尺的航空照片,以SOCET SET軟體(GDE Systems 1996)沿林木冠層頂部每隔25 m空格測製數值高程資料。分析特富野試區之數值地形模型(Fig. 2)可知全區高程分佈自901 m至2300 m,其平均高程為1619 m;而且本區地形為由東向西方向傾斜的山勢,東側有三個頂峰分佈,由北至南各為萬歲山山系、東水山山系以及霞山山系之一分支山峰,西側溪流為後大埔溪。



Fig. 2. Image of digital terrain model of study site. Cold and warm colors represent the lower and higher elevation.

Table 1. Imagery parameters and atmospheric conditions of TM data used in this study

Image list	Imaging date	Solar azimuth	Solar elevation	Atmospheric conditions	Representative season
I1871S	1995/1/9	139.874	32.347	Very clear	Winter
I1894S	1995/4/15	106.788	53.169	Very clear	Spring
I1651S	1995/7/20	86.456	54.774	Clear	Summer
I1881S	1995/10/24	132.616	42.125	Very clear	Fall
I1872S	1996/1/12	137.337	30.985	Very clear	Following winter

二、研究方法

植生對光譜的反射量會受到植物狀態及外在環境因子的影響，因此探討森林植生的季節性光譜特性時，必須將外在環境因子，例如衛星多譜感測器掃描時的大氣條件，對植生光譜的影響去除，方可瞭解植生的光譜特性隨季節或時間推移所產生的變化。本文之研究流程分為影像前期處理、影像分類及森林植生光譜特性分析等，其研究方法說明如后：

(一)多譜影像前期處理

1. 大氣輻射模式與路徑輻射修正之考量

遙測學藉感測地物對輻射能量之反射量以取得其有關資訊。入射的太陽輻射能必須經大氣向下穿透傳到地表，由地物反射的輻射能也必須經大氣向上穿透傳到衛星感測器，因此可以利用雙向反射的觀念，將感測器所量測得到的輻射亮度與有關因子間的關係表示如(1)式，在大氣物理學的研究上，最常應用此一公式計算地面目標物反射率 ρ (Deering 1989, Liu 1995, Peng 1996)。

在非均勻及蘭氏面的地表與水平層層均勻的大氣之假設條件下，(1)式之衛星感測器所量測得到的像元輻射亮度(L)為該像元內地面物體反射總入射輻照度經大氣穿透到達感測器之輻射亮度(L_r)、該像元周圍地面反射總入射輻照度再經大氣散射至感測器之輻射亮度(L_e)、

以及未到達地面的入射光線在空中經大氣散射至感測器之輻射亮度(L_p)等三項組成之總和，(1)式中之分數組成即為 L_r 與 L_e 之合成(Liu 1995, Peng 1996)。 L_e 與像元附近地物的反射特性和地形有關，而且目標像元周圍幾個像元對此項輻射量的貢獻量非常小(Peng 1996)，離目標像元越遠的周圍環境之貢獻量可因路徑之增加而減少，因此 L_e 是一項非常複雜而量微的輻射量；但是大氣路徑輻射 L_p 因係完全不經地表反射的輻射量，與地表物體及地形無關，完全由大氣條件所決定。由於大氣條件變化不一，因此探討地物季節性光譜特徵時，必須將大氣路徑輻射加以改正，而周圍效應的輻射應可忽略之。本文對大氣路徑輻射修正之基本考量有二：

(1)無法精確計算森林植生之反射率

一般衛星感測器所量測到的地物輻射亮度均以線性方程轉換為沒有單位的灰度值，因此灰度值本身雖可以代表地物對入射光能的反射值之高低外，並不代表任何物理意義。因此欲表達地物反射光能的真實物理量必須將灰度值還原為輻射亮度或反射率。根據(1)式，求算地物反射率 ρ 時，必須考慮地面物體屬性與地形變異以及大氣的向下與向上穿透率，而穿透率因子又與輻射路徑之光程、大氣之溫度、濕度、壓力、氣溶膠粒子密度與數量等非常複雜的條件因子有關，雖然目前大氣物理學界應用

$$L = L_p + \frac{\mu_s \cdot E_s \cdot T(\mu_s) [\rho \cdot e^{-\tau/\mu_v} + \langle \rho \rangle t_d(\mu_v)] \cdot T_g(\mu_s) \cdot T_g(\mu_v)}{\pi(1 - \langle \rho \rangle \gamma_s)} \quad (1)$$

美國空軍地球物理實驗室 (AFGL) 開發的 LOWTRAN 7 程式套來計算大氣穿透率、大氣散射值以及直接入射太陽能量值等；但在整個計算過程，推求地物反射率時，仍必須假設許多的條件方可完成。例如在求算路徑輻射時，常將高程、坡度、坡向、相同屬性地表物體、太陽入射角與衛星觀測角等在某一範圍內的數值當作是相同值，以其為同質性參數之代表 (Liu 1995, Peng 1996)。所以利用此法推求地物反射率之整個過程中，仍隱含有許多的不確定性，且對森林遙測也存有相當的不方便性。欲精確計算森林植群的反射率，必須於衛星掃描時，同時於地表進行植群反射率之對等試驗，例如利用直達日射儀直接量得太陽直射量，再據以求出大氣穿透率，這是山區地物遙測所無法做到的。

(2) 利用輻射亮度表現森林植生光譜特性之方便性

事實上，表面的反射特性取決於溫度、物性以及入射與反射方向等，而且相同屬性之地物對入射光能的反射、吸收以及穿透，均會隨光譜波長與溫度而異，如 $\rho = f[\lambda, B_{\lambda}(T)]$ ，在能量不滅定律之制約下，地物對入射能的反射率、吸收率以及穿透率之和等於 1 (Tseng 1988)，所以在不同的溫度下，物體的反射率不會相同。因此，雖然反射率是地物光譜特性比較直接的表現方式，但仍然無法完全去除不同時期之不同入射能量狀況時，地物反射率有差異的考量，而此一限制與輻射亮度的情形是一樣的。故在山區環境條件變異頗大的事實下，利用輻射亮度表示地物的光譜特徵應該是比較方便可行的方法。因此本研究即以輻射亮度這個物理量來表現地物的光譜特徵，並以其為改正大氣路徑輻射的對象。

2. 衛星遙測感測器之校正

衛星遙測感測器之校正 (sensor calibration) 即為影像輻射亮度之復原 (Price 1987, Chavez 1988)。Landsat TM 多譜影像所記錄的灰度值 (digital number)，可利用公式 (2) 復原成為掃描時衛星感測器所測得的輻射亮度 (radiance) (Murphy 1991)。公式中的 R' 即為輻射亮度，單位為 $W \cdot m^{-2} \cdot Sr^{-1}$ ， V' 即為灰度值， a_0 為絕對校正係數常數項 (absolute calibration offsets)， a_1 為絕對校正係數增益項 (absolute calibration gains)。Table 2 所列為登錄於影像資料錄之 Landsat TM 各波段絕對校正係數。

$$R' = a_0 + a_1 V' \tag{2}$$

3. 改進暗物消去法路徑輻射修正

路徑輻射之修正通常是利用位於陰影區或清澈無污染的大面積水體內的像元光譜值作為修正的參考，因為一般認為在完全陰影區之地物或均質乾淨水體的光譜輻射量是大氣輻射所貢獻的，特別是波長較短的可見光波段，而波長較長的紅外光區受大氣散射之影響極微，較簡單易行的方法有直方圖修正法以及迴歸修正法 (Jensen 1986)。由於本研究試區內並無大面積水體，所以必須以陰影區像元為修正之依據。

改進暗物消去法 (improved dark-object subtraction method, IDOS) 係 Chavez (1988) 所創的去除路徑輻射之方法，該法係根據衛星影像掃描時的大氣狀況以及波長與散射率之關係，計算各光譜波段的散射百分比，並以某一波段為標準，計算各波段之相對乘積因子，以及根據整體影像像元灰度值之累計頻度，通常是取其 1% 累計頻度之灰度值為路徑輻射臨界值，據以求算各波段每一像元之路徑輻射。由於本法並未考慮大氣漫射問題，而逕自選取影

Table 2. Gains and offsets for absolute calibration of Landsat TM data

	TM1	TM2	TM3	TM4	TM5	TM6	TM7
Offset	-1.52	-2.84	-1.17	-1.51	-0.37	0.00	-0.15
Gain	0.602431	1.175098	0.805674	0.814549	0.108078	0.000000	0.056980

像中某一暗值像元的光譜值作為路徑輻射的臨界值，計算路徑輻射，有可能造成陰影區或接近陰影區過度修正的現象 (Conese et al. 1993, Liu 1995)。

大氣路徑輻射會隨著高度呈指數型態的衰減，但以本研究試區高程分佈自 901 至 2300 m 之情形，高程最大值與最小值相差 1400 m，約為衛星地面距離 705 km (Jensen 1986) 的千分之二倍，最大高程與最小高程與全區平均高程 1619 m 之差僅約 700 m，約為衛星地面距離的千分之一倍。因此雖然大氣路徑輻射與高度呈指數型態衰減，甚至在 TM1、TM2 以及 TM3 可為線性方程衰減型態 (Peng 1996)，根據此一前提，以千分之一至千分之二的極小光程差異，對輻射量的影響可謂極小。所以本研究並未考慮將高程因子所產生的輻射亮度極微變異量納入路徑輻射修正，而仍以 IDOS 法修正大氣的路徑輻射。對 IDOS 法可能造成過度修正的問題，則以波段內輻射亮度修正值為負值的所有像元之平均值改正之。有關改進暗物消去法修正大氣路徑輻射之步驟示如 Fig. 3。

4. 太陽位置與地形效應之處理

山區地物的反射率是太陽入射方向、衛星觀測方向以及地面法線方向的函數，亦即一影像上的某一地物可因地形變化而有不同的輻射亮度，不同季節影像之太陽位置也會隨太陽天頂角與太陽高度角而變化。所以同一地點上之地物對光譜的反射特性，即可因太陽天頂角、太陽高度角以及坡度與坡向之相對關係發生改變。消除這種變異的最好方式是利用反射率的物理量來表現地物反射特徵，但如前節所述，現有反射率之求取方法中仍存有太多的不確定性因子，造成精確計算森林植群反射率有困難。

雖然有研究利用超圓方向餘弦轉換 (hyper-spherical direction cosine transformation, HSDC) (Schieh 1992, Liu 1995) 和相對百分比轉換 (relative proportion transformation, RPT) (Peng 1996) 以消除地形效應，但該二種方法均是以所有波段的光譜輻射量為基礎所求得的相對性輻射量值，均會改變地物對入射光譜所反射的原始輻射量值域，所以基本上已經改變

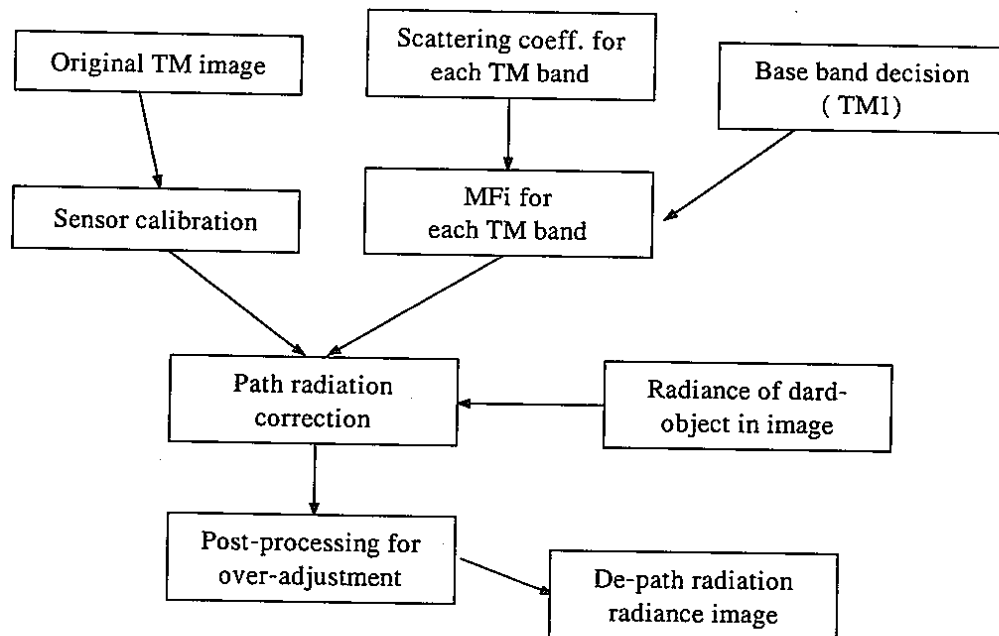


Fig. 3. Improved dark-object subtraction procedures for atmospheric correction (Schematic flowchart graphed by this paper).

了地物對某一波長光譜的反射特徵。由於斜坡面地物的輻射量與斜坡面的太陽入射幾何關係 (Fig. 4) 有關 (Schieh 1992)，因此利用衛星掃描時的太陽方位角 (solar azimuth)、太陽高度角 (solar elevation) 以及數值地形模型影像求算同一個位置像元的坡度與坡向，並考慮介於目標像元與太陽位置方向之間的相鄰像元高程對入射光線所可能產生的阻擋或陰影效應，即可模擬得到全區每一像元之日照反射率 (the amount of light reflectance) (ERDAS 1997)。模擬的日照反射率之資料值域為-1至1，其中負值代表陰影區，正值代表日照區，我們只要依地物組類所處位置之日照反射率，將其光譜特徵之變異降至最低，即可克服地形對地物光譜特徵之影響。因此本文提出利用日照反射率純化法 (purified reflectance analysis, PRA)，純化處理同一植群像元的地形與太陽位置之效應，將負的日照反射率調整為0，代表完全陰影區，並以每0.2為一級，將全區的日照反射率區分為五級，其中日照反射率0.8以上的像元可視為完全日照區。

(1)日照反射率模擬法

模擬日照反射率 (R) 係以待求像元為中心，依據待求像元與相鄰八個方向像元之高

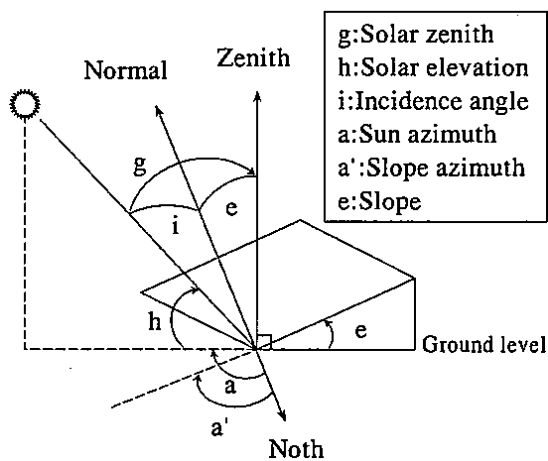


Fig. 4. Solar incidence geometric relationship on a slope surface (source: Schieh 1992).

度、太陽方位角 α 和太陽高度 θ 、以及周圍地物的亮度 Ω 等因子，利用(3)式推求得到的，式中S為比例因子(scale factor)，係指像元垂直放大的比例，S增大，日照反射率影像之反差也會增大。

$$R = \text{relief}[(\text{indem}(\text{DEM layer}) * S), \alpha, \theta, \Omega] \quad (3)$$

(2)相對百分比轉換法

相對百分比轉換法係以TM六個反射波段輻射亮度之合計 ($\sum R_{oi}$) 為約數，計算各像元之某波段輻射亮度 (R_{oi}) 所佔六個波段輻射亮度合計值之百分比 R_i^* (4式)，亦即利用相對輻射亮度表現像元之光譜反射值。相對百分比轉換法與超圓方向餘弦轉換法具有相似的意義，均有修正地形效應之效。

$$R_i^* = R_{oi} / \sum R_{oi}, \quad i = 1, 2, \dots, 5, 7. \quad (4)$$

(二)監督式影像分類

本文利用日照反射率純化法和相對百分比轉換法去除時間與地形的綜合效應，以各種植群在不同分級日照反射率之細部組類，進行最大概似法影像分類，再根據組類之光譜分離度與分類準確度，評估日照反射率純化法資料處理邏輯之適用性，同時瞭解季節變化對多譜資料影像粹取森林植群資訊之影響。

1. 疊合分析法與組類樣本選取

影像分類是根據地物組類之光譜分離性或相似性來粹取主題資訊的方法，為降低地形效應引起同一地物反射光譜輻射能之變異程度，本文利用地類圖與模擬的日照反射率分級圖進行疊合分析，再針對各級日照反射率與地類組合之區塊中選取樣本，作為分析的對象。由於分級的日照反射率與針葉樹、闊葉樹、竹類、草類裸地等五種地類疊合後，所產生的區塊非常細碎，故很難選得五種地類於各級日照反射率下的所有樣本。針葉樹和闊葉樹是本試區的主要地類，因此只有該二種植群可選得第一級

至第五級日照反射率的五個樣區，而竹類和草類只選得第三級至第五級日照反射率的三個樣區，裸地則只有第五級日照反射率一個樣區，共 17 個樣區。在冬、春、夏、秋、翌冬等五個時期影像中，所選得的樣本數各為 540、702、630、632、634 個像元。

2. 組類光譜特性差異性評估

不同組類的光譜特性之差異程度，可以利用分類準確度及組類分離度的觀念評估之。本文利用全區分類準確度 (OA) 及 Kappa 同意度係數 (\hat{K}) (Hudson and Ramm 1987) 等二個綜合性評估指標，比較各個組類之分類結果，並以轉換分離度 (TD) (Swain and Davis 1987) 表示組類間之光譜分離程度。OA 和 \hat{K} 值較高者，代表組類間的分類準確度較佳。TD 係以組類的均值向量 (μ) 和共變異矩陣 (C)，先依 (5) 式求取組類間的分離度 D 之後，再依 (6) 式計算而得到，其值介於 0 至 2000 之間；TD < 1700 者代表組類分離性不良 (poor)，1700 ≤ TD < 1900 者代表組類分離性中等 (semi)，1900 ≤ TD < 2000 者代表組類分離性優良 (good)，TD = 2000 者則為極佳 (excellent) 分離性之代表 (Jensen 1986)。

$$D_{ij} = 0.5 \text{tr}[(C_i - C_j)(C_i^{-1} - C_j^{-1})] + 0.5 \text{tr}[(C_i^{-1} - C_j^{-1})(\mu_i - \mu_j)(\mu_i - \mu_j)^T] \quad (5)$$

$$TD_{ij} = 2[1 - \exp(-D_{ij}/8)] \quad (6)$$

(三) 完全日照區森林植生之光譜可辨性分析

在完全日照區內，相鄰像元之地形效應極微，則地物依其屬性反射太陽輻射能時，感測器所測得的輻射亮度可認為是地面特性之完全表現。欲比較季節性因子對森林植群光譜特徵之影響，必需將外在環境之地形因子控制為常態狀態，因此本研究利用完全日照區針葉樹、闊葉樹、竹類、草類以及裸地等樣區像元的光譜輻射亮度資料，來分析該等地物光譜特徵之異質性及其季節性之變異。

完全日照區地物光譜特徵之異質性，係以

地物彼此間的轉換分離度為基礎，將分離度依不良、中等、優良與極佳等三種區界，各給予權值 0、0.5、1.0，再以其平均權值代表完全日照區地物光譜之可分辨性。(7) 式所示 N 種地物光譜可分辨性之平均權值 (\bar{w}) 為各組權值 (w_i) 和次數 (f_i) 之算術平均值， \bar{w} 之值域介於 0 至 1 之間。 $\bar{w} = 1$ ，代表 N 種地物彼此之光譜特徵是完全可分辨的； \bar{w} 愈接近 0，代表地物光譜之異質性愈低。

$$\bar{w} = \frac{\sum f_i w_i}{\sum f_i} \quad (7)$$

結果與討論

Fig. 5 所示為經大氣輻射修正後研究試區的 TM 輻射亮度影像 (Ai)，以及該輻射亮度影像的相對百分比轉換影像 (Bi) 與根據影像掃描時的太陽方位角、高度角以及地形高程所模擬得到的日照反射率影像 (Ci)。各影像序號代碼 i 值，1、2、3、4、5 各代表冬、春、夏、秋及翌冬等四個季節五個時期的影像。

一、大氣路徑輻射對植生光譜特徵之影響

路徑輻射是光譜波長的函數，而且波長愈短其散射力愈強，所以我們可以預期 TM 多譜資料的藍光、綠光、紅光、紅外光受散射的影響逐次遞減。因為大氣路徑輻射之影響，使得地物在可見光區的輻射亮度偏高，由光譜反射特性曲線 (Fig. 6) 可以看出，路徑輻射修正前後影像的藍、綠、紅光反射量之關係由原來的直線下降趨勢，被修正成為以綠光為首的單峰曲線，這種路徑輻射修正後的光譜特性曲線，確已表達出其為綠色健康植生的訊息。因為從植物生理學的觀點分析，植物的光合作用主要是靠吸收藍光和紅光波長範圍內的輻射能來進行的，該強烈的吸收作用勢必導致藍光和紅光反射量相對的減少，所以植物在該二個波段的光譜反射行為是相似的，而綠色樹葉對綠光有較高的反射量，所以在可見光區會形成單峰曲線。

比較五個時期影像於大氣路徑輻射修正前

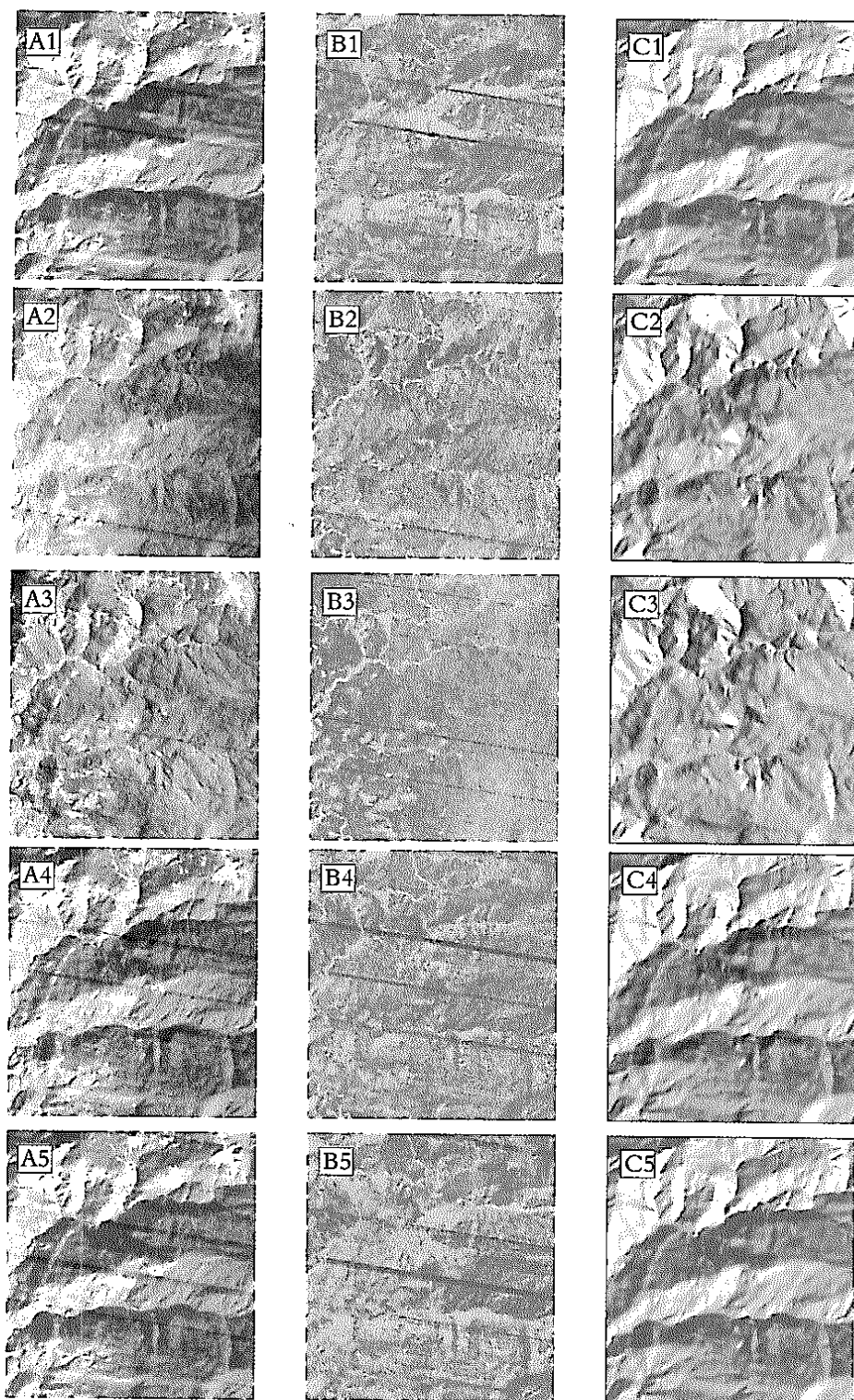


Fig. 5. Image list of the study site. Codes *A_i*, *B_i*, and *C_i* represent the atmospheric corrected radiance TM images, the relative radiance images, and the simulated reflectance amount images; in which the serial number *i* represents the seasonal sequence of winter (Jan.), spring (Apr.), summer (July), fall (Oct.), and the following winter (Jan.).

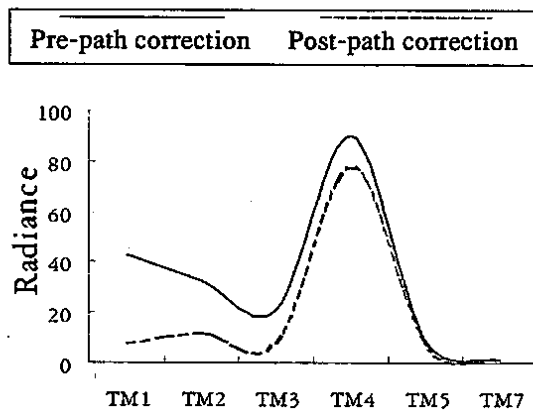


Fig. 6. Spectral radiance ($W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1}$) curve of pre-path radiation correction (an example of summer image).

後的影像輻射亮度均值 (Table 3)，以植生組類為主體的特富野地區，可發現藍光、綠光、紅光波段的平均輻射亮度與波長的關係，修正前均為傾斜下降的走勢，而修正後影像除了代表春季時期的 I1894S 影像之綠光反射量稍低於紅光之外，其餘四個影像均有單峰曲線現象，這種現象已大致表現出特富野地區的主要地物是植生之訊息。

二、森林植群光譜特徵之季節性變異

衛星影像掃描時受到當時太陽所在位置與地形起伏變化之影響，同一地物對入射的太陽輻射能會有不同的反射量。本節係利用針葉樹、闊葉樹、竹類、草類以及裸地等五種地物完全日照區的樣區像元，分析該五種組類之光譜輻射亮度資料，以定其季節性光譜特徵。

(一)地物光譜反射特性曲線型態之比較

針葉樹、闊葉樹、竹類、草類以及裸地等五種地物在春夏秋冬等四個季節之光譜反射特性曲線示如 Fig. 7。比較四個季節的地物光譜反射特性曲線之型態，針葉樹、闊葉樹以及竹類三種植物的綠光波段輻射亮度均高於藍光與紅光波段，在可見光區形成一個波峰分佈，加上近紅外光區的輻射亮度高峰，這種雙峰型態的光譜反射特性曲線與典型的植生光譜反射特

性曲線是完全相似的。草類為地被植物，受背景物質之影響較顯著，所以在綠光與紅光波段的輻射亮度在部分季節中會偏高，但其光譜反射特性曲線的分佈型態仍較相似於植物。裸地組類對可見光區各個波段的反射量均比植物組類在相對波段的反射量高，但對近紅外光波段的反射量則遠低於植物，這種光譜特徵表現在光譜反射特性曲線時，則有各波段的反射量隨波長增加之趨勢。而且裸地對各波段光譜的反射特徵雖會因季節變化而有高低不同的反射量值，但其春夏秋冬四個時期的光譜反射特性曲線之型態，基本上沒有明顯的變化。所以由 Fig. 7 四個季節五種地物的光譜反射特性曲線顯示，植物光譜反射特性曲線之型態受季節性變化之影響不大，而且地物的光譜反應行為具有某種程度的穩定性。而由植物與裸地之四季光譜特徵的差異性，可以證明利用遙測多譜資料檢測山區裸露地或崩塌地位置是絕對可行的，對監測非法開墾林地之行為是一種有效之利器；唯需注意者為濫墾初期之面積不會很大，裸地特徵易受周圍林區光譜之影響而混淆不明，此需有高空間解析力多譜資料才可確保早期發現的功效。

(二)地物光譜反射特徵之異質性比較

雖然植物與裸地反射光譜的基本特性並不隨季節而有明顯的變化，但是就各別波段的光譜反射量言，不同植物彼此仍有不同的相對變異量。針葉樹、闊葉樹、竹類以及草類等四種植物在冬季時期的光譜反射量差異很明顯，特別是在綠光與紅光二個可見光波段，四種植生之輻射亮度大小依序為草類 > 竹類 > 針葉樹 > 闊葉樹，但在近紅外光波段則以草類的輻射亮度最高，其次為竹類，而以針葉樹和闊葉樹最小也最接近 (Fig. 7A)。在春天時，植物開始其新的生長季節，生理活動轉趨旺盛，葉綠素濃度增加，光合作用能力增強，開始增生新葉部組織，因此植物對可見光區和紅外光區的反射量與冬季時期不同。所以我們可以瞭解四種植物之輻射亮度在春季時期之各個光譜波段的相對大小必定會有所變化。春季時期四種植

Table 3. Comparisons for the radiance mean of each TM band of the pre-and post-atmospheric correction images

Image list	TM1		TM2		TM3		TM4		TM5		TM7	
	$\mu_0^{1)}$	$\mu_a^{1)}$	μ_0	μ_a	μ_0	μ_a	μ_0	μ_a	μ_0	μ_a	μ_0	μ_a
I1871S	28.117	6.142	19.384	10.473	13.921	9.450	31.467	30.533	3.871	3.871	0.627	0.627
I1894S	51.360	6.160	36.287	10.049	25.032	11.434	53.466	48.029	5.734	5.386	0.903	0.882
I1651S	42.473	7.245	30.590	9.928	20.528	7.194	65.190	52.559	6.069	4.493	0.921	0.729
I1881S	30.827	6.443	19.966	11.055	12.243	7.773	47.538	46.624	4.692	4.692	0.748	0.748
I1872S	26.483	9.328	19.135	10.224	13.095	9.431	30.763	29.829	3.219	3.219	0.611	0.611

¹⁾ μ_0 and μ_a represent radiance mean of pre-path radiation correction image. Variances of both processed images are omitted due to their special property, that is if $y_i = x_i \pm c$, then $\sigma_y^2 = \sigma_x^2$.

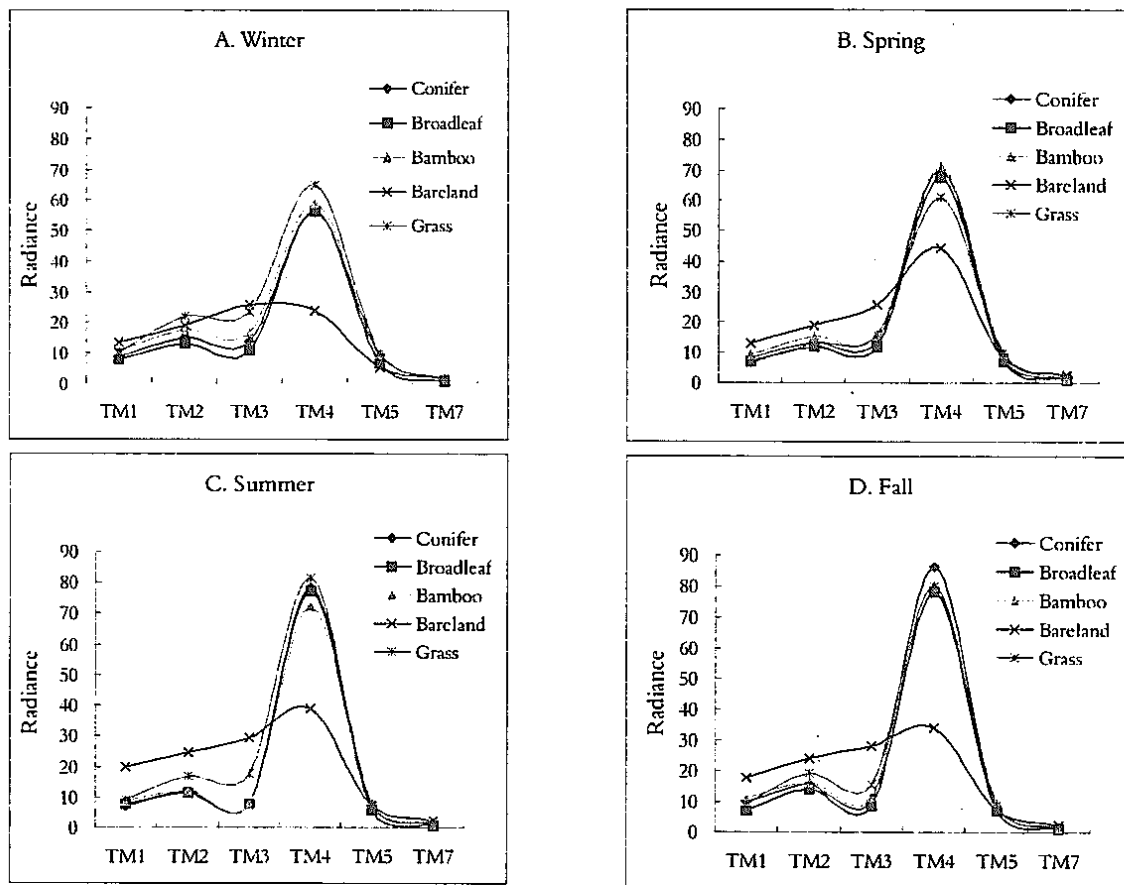


Fig. 7. Spectral reflectance curves of 5 cover types in each season. Plots A, B, C, and D show the spectral behavior in winter (Jan.) spring (Apr.), summer (July), and fall (Oct.), respectively.

物在綠光波段的輻射亮度，以竹類最高，其次為草類和針葉樹，最低者為闊葉樹，此種排序與冬季時期不同；在紅光波段則雖仍維持冬季時期之草類 > 竹類 > 針葉樹 > 闊葉樹的順序，但四者之差距變小，也仍可由光譜特徵曲線上

明顯的看出四個不同高低的輻射亮度(Fig. 7B)，四種植物在紅光的輻射亮度差距縮小應是植物對紅光的吸收率較冬季時期高，故使紅光的反射量降低之故。春季時期的植生光譜行為的另一個大改變是竹類、針葉樹以及闊葉樹三者對

近紅外光波段的反射量大幅增加，只有草類沒有增加，四種植物在近紅外光之輻射亮度大小依序為竹類>針葉樹>闊葉樹>草類，彼此在光譜特徵曲線上是可以分辨的。

夏季時期竹類、針葉樹及闊葉樹三者綠光和紅光波段之輻射亮度差異很小，三者光譜特徵曲線上之分佈比春季時期更形接近，而草類的輻射亮度反而增高，在近紅外光波段草類的輻射亮度也升到最高點，針葉樹和闊葉樹的輻射亮度也繼續升高，但是竹類的對近紅外光反射量之增量很小，故使其輻射亮度變成四種植物中最低的(Fig. 7C)。在秋季時期，四種植物對近紅外光的反射量以針葉樹最高，而以闊葉樹、竹類以及草類較低，三者彼此間之差異也較小，但是針葉樹、闊葉樹、竹類以及草類四者對可見光區光譜之反射量與春季時期影像相近，其光譜特徵之異質性又比夏季時期增大(Fig. 7D)。

綜合比較春夏秋冬四個季節的四種植物光譜反射特徵，可以發現在可見光區針葉樹、闊葉樹、竹類以及草類四者之異質性，以冬季最高，其次為秋季、春季、夏季；在紅外光區也是以冬季最高，其次為春季和夏季，最小為秋季；合併可見光和紅外光區等六個反射光譜波段資訊，也是以冬季時期的光譜異質性最高，其次為春季和夏季，最後才是秋季，其光譜可分辨性之平均權值各為0.83、0.75、0.75及0.67 (Table 4)。此一結果顯示，完全日照區的針葉樹、闊葉樹、竹類及草類等四種植物的光譜分辨性，在冬季時期是最佳的，其次是春季、夏季，再次是秋季；由於各時期四種植物光譜可辨性之平均權值均小於1，也顯示該四種植物的光譜特性仍有混淆的現象存在。

(三)不同植群光譜特徵之季節性變異

若以橫軸為季節，縱軸為輻射亮度($W \cdot m^{-2} \cdot Sr^{-1}$)，則可表示出針葉樹、闊葉樹、竹類以及草類等四種植物光譜反射量的季節性變異情形。Fig. 8橫軸所記1, 4, 7, 10, 1月等時序，各代表冬、春、夏、秋及次年冬季等五個時期。檢視該圖可以發現針葉樹、闊葉樹、竹類

以及草類在TM7第II中紅外光波段的輻射亮度差異極為微小，顯示植物對中紅外光的反射量受到季節因子之影響很小。雖然針葉樹、闊葉樹、竹類以及草類對TM5第I中紅外光反射量的季節性變異情形相似，但夏季時的輻射亮度仍稍低於其它季節，由於TM5對植物體的水分含量很敏感，所以各類植生在夏季時有較低的TM5中紅外光反射量，應是植物因呼吸作用旺盛以及蒸散作用較大，耗去植物體內較多水分量所造成的。

植物季節性光譜特徵之主要變異點在可見光與近紅外光波段。闊葉樹、針葉樹以及竹類對紅光波段反射量之季節性變異很相似，三者的紅光波段輻射亮度之季節變異趨勢圖均呈反拋物線型式，其反曲點大致均在夏季時期(Fig. 8A, B, C)，造成這種變異的主要原因應是植物光合作用的結果。在一般情況下，植物在冬季時期的生理活動能力比較低，但在春季以後開始轉為旺盛，光合作用率逐漸增高，而以夏秋時期達到最高點，隨後光合作用率逐漸降低，至冬季時最低，形成一個循環(Kramer and Kozlowski 1979)。由於春季與冬季影像之掃描時間相距只有三個月，該段期間又是植物生長較為緩慢的期間，所以在冬春時期影像的相同樣區內之植生量可視為沒有差異。故可推論造成四種植生組類光譜特徵變異的主要原因應是植物生理活動力之變化，亦即植物的光合作用是造成此一光譜特性變化的主要原因。

草類之季節性紅光光譜反射特徵(Fig. 8D)顯示，雖然在植物光合作用率高峰時期，但草類的夏季輻射亮度卻高於春秋二季，這種現象應與太陽高度以及葉面層與地面層之距離有關，由於太陽愈接近天頂位置時，冠層的陰影面積會愈少，草地由於葉面層與地面層非常接近，會增加背景物質對光譜反射量的影響程度。所以在夏季影像中，由於受到土壤對可見光之高反射率特性之增強效應影響，使得草地的光譜特徵在可見光波段也有比較高的光譜反射量；此與針葉樹、闊葉樹以及竹類等喬木型植物比較，草類的可見光光譜反射特性與裸地較為接近。

Table 4. Recognizable average weightings of spectral characteristics for 4 types of vegetation¹⁾ in sites with no relief shadow

Spectral division ²⁾	Winter	Spring	Summer	Fall	Following winter
Visible	0.50	0.42	0.33	0.50	0.67
Infrared	0.58	0.50	0.50	0.17	0.50
Visible and infrared	0.83	0.75	0.75	0.67	0.83

¹⁾The 4 types of vegetation are conifers, broadleaf trees, bamboo, and grass.

²⁾Visible spectral division stands for bands TM1, TM2, and TM3, and infrared stands for bands TM4, TM5, and TM7.

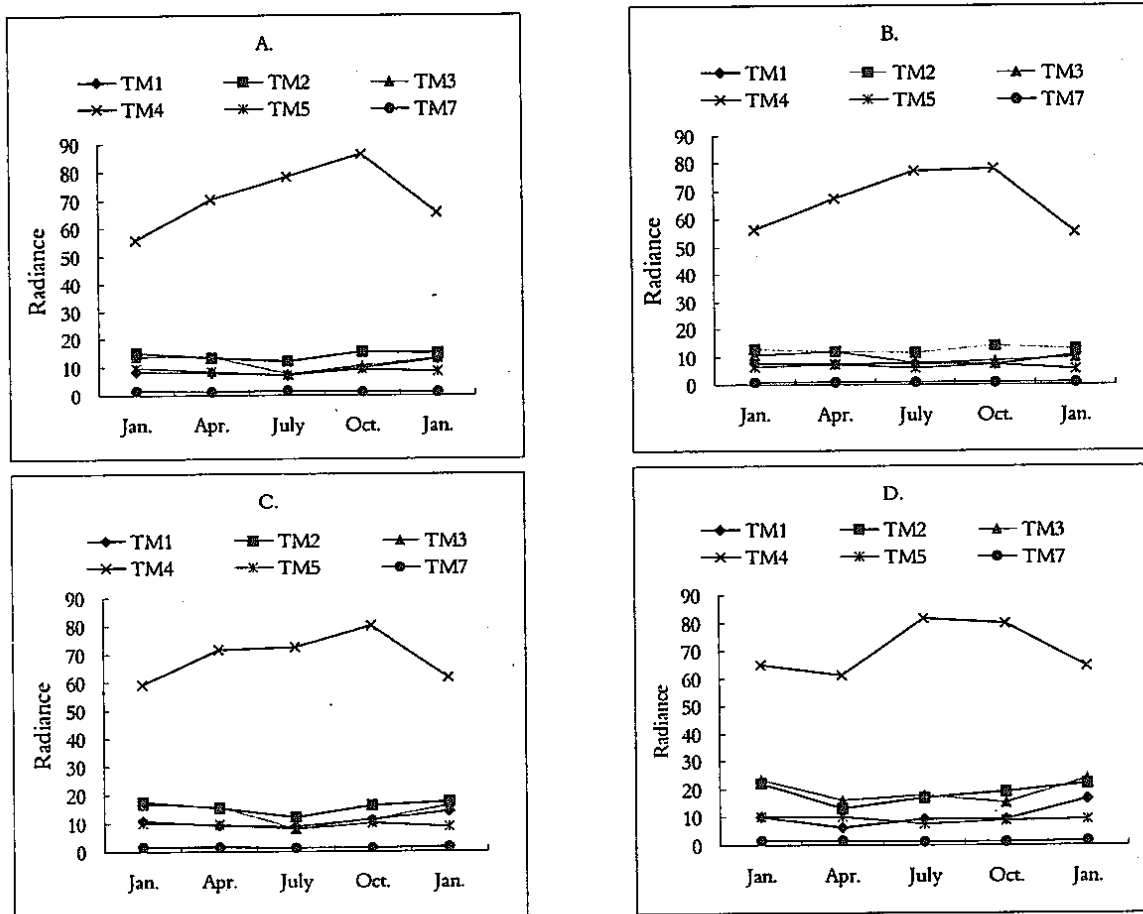


Fig. 8. Seasonal change of spectral characteristics of 4 vegetation types. Plots A, B, C, and D represent the spectral behavior of every TM band in a 1-yr duration for conifers, broadleaf trees, bamboo, and grass, respectively.

針葉樹與闊葉樹二種喬木型植生對綠光波段之季節性光譜行為非常相似，其冬季、春季以及夏季的綠光輻射亮度低於秋季與翌冬時期。雖然春季時植物之光合作用率開始增大，但在生長季節前半時期中，其冠層的葉表面積

總和可能沒有明顯的增加，所以其對綠光的反射量並沒有增加；至秋季時已大致經過整個的生長季節，植物冠層葉表面積明顯的增加了，所以其對綠光的反射量增大，故在秋季和翌冬季節有較高的綠光輻射亮度(Fig. 8A, B)。

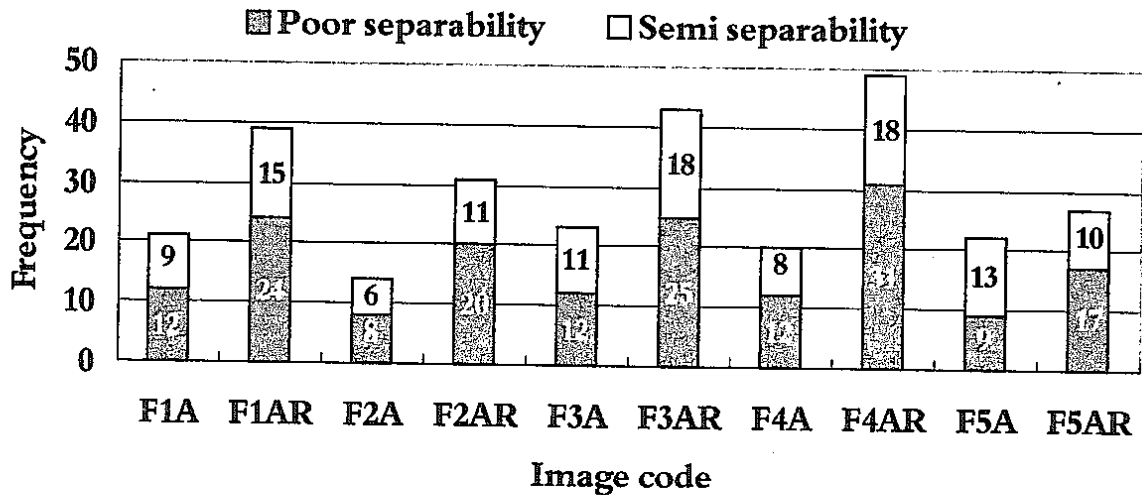


Fig. 9. Histogram of the semi and poor between-class TD for each seasonal image. The codes F_iA and F_iAR represent 2 image groups, processed with PRA and RPT methods. The serial number i in the image code represents the winter, spring, summer, fall, and the following winter season.

針葉樹、闊葉樹以及竹類三者對近紅外光波段之光譜反射量有隨季節增加的趨勢，並且均以秋季時期達到最高反射量，此一結果與農作物如甘薯之季節性光譜相似 (Yang and Ko 1998)。雖然植物光合作用率之高低與近紅外光沒有直接的關係，但是可以確定植物經過一個生長季節之後，其葉部表面積與總葉面積均會增加，由於植物本身即對近紅外光具有高反射的能力，因此在由冬季以至夏秋季節之反射量會增大，而且生長季節時的太陽高度較大，太陽接近天頂，冠層陰影面積減少，綜合這些條件之作用，才會造成喬木型植生的近紅外光輻射亮度隨季節之推移而有遞增的現象。草類的近紅外光反射量在冬春季節之差異較小，但在夏秋季節其輻射亮度增加了約 15 個單位量，推論應是受到葉面積增加與土壤之加乘效應所致。

三、不同季節影像檢測森林植群資訊能力之評估

本節係以日照反射率純化法為基礎，針對全部選得的針葉樹、闊葉樹、竹類、草類及裸地等五種地物在各種日照反射率下的 17 個細部組類之轉換分離度與分類準確度，評估不同

季節影像檢測森林植群之能力。

(一) 轉換分離度之比較

17 個細部組類彼此互相配對比較時，共有 136 個轉換分離度，扣除分離度優良與極佳的轉換分離度次數，所餘的不良與中等轉換分離度之次數，亦可表現所有細部組類光譜特徵的混淆情形。Fig. 9 所示為各期影像中，代表組類光譜分離性不良與中等的轉換分離度之次數分佈圖，其中 $F1A$ 與 $F1AR$ 為第一時期影像 (I1871S) 大氣路徑輻射修正後 PRA 與 RPT 影像代號，同理 $F2A$ 與 $F2AR$ 、 $F3A$ 與 $F3AR$ 、 $F4A$ 與 $F4AR$ 以及 $F5A$ 與 $F5AR$ 各別代表第二 (I1894S)、第三 (I1651S)、第四 (I1881S) 以及第五 (I1872S) 時期影像的 PRA 與 RPT 影像。五個時期影像之不良與中等的轉換分離度次數，以春天時期 PRA 法影像的 14 次為最小，秋季時期 RPT 法影像的 49 次為最多。

(二) 分類準確度之比較

影像分類準確度是評估遙測多譜資料檢測地物資訊效能最直接的指標。Table 5 所示為五個時期影像之最大概似法分類準確度的評估

Table 5. Classification accuracy of each season image processed with PRA and RPT methods (1)¹⁾

Processing method	I1871S		I1894S		I1651S		I1881S		I1872S		Average	
	OA	\hat{K}	OA	\hat{K}	OA	\hat{K}	OA	\hat{K}	OA	\hat{K}	OA	\hat{K}
PRA	81.3	79.8	85.8	84.5	81.6	80.0	77.5	75.7	81.4	80.0	81.5	80.0
RPT	65.7	63.3	72.2	69.9	67.8	65.1	64.6	61.7	72.2	70.2	68.5	66.0
Diff ²⁾	15.6	16.5	13.6	14.6	13.8	14.9	12.9	14.0	9.2	9.8	13.0	14.0

¹⁾ Assessed under 17 classes of 5 cover types: conifers, broadleaf trees, bamboo, grass, and bare land.

²⁾ Difference of accuracy index, OA or \hat{K} , which is the difference of the index of RPT and PRA; all accuracy indices are presented as percentages.

Table 6. Classification accuracy of each season image processed with PRA and RPT methods (2)¹⁾

Processing method	I1871S		I1894S		I1651S		I1881S		I1872S		Average	
	OA	\hat{K}	OA	\hat{K}	OA	\hat{K}	OA	\hat{K}	OA	\hat{K}	OA	\hat{K}
PRA	86.5	80.2	89.5	84.5	87.9	82.9	82.0	74.0	87.4	81.6	86.7	80.6
RPT	74.8	64.5	79.6	70.0	82.1	74.9	71.8	59.5	81.7	73.6	78.0	68.5
Diff ²⁾	11.7	15.7	9.9	14.5	5.8	8.0	10.3	14.5	5.7	8.0	8.7	12.1

¹⁾ Assessed under 5 cover types, in which each type contains all their sub-classes.

²⁾ Same as in table 5.

結果，其中日照反射率純化法(PRA)的全區分類準確度(OA)以第二時期春季影像85.8%最高，第四時期秋季影像77.5%最低，五個時期影像的全區分類準確度平均值為81.5%，比相對百分比轉換法(RPT)的五個時期影像之OA平均值68.5%高出13%，而且PRA法五個時期影像分類之Kappa同意度係數之平均值也可達80%的水準，同時也比RPT法高出14%。

假設影像經過相對百分比轉換後，地形效應對光譜資料之影響已被修正成功，如此即會對同一地物在不同地形區域的輻射能反射量產生同化作用，使得同一地物的不同細部組類之光譜特徵混淆情形更大，因為此等細部組類均代表同一個地物組類，或許只須用一個組類進行分類即可。這是一個非常合理的考量。但是我們將PRA法和RPT法17個組類歸類到原屬的五種地物，再評估其全區分類準確度及Kappa同意度係數，結果指出PRA法的OA和平均值仍比RPT法各高出8.7%和12.1%(Table 6)。所以根據轉換分離度以及分類準確

度指標之綜合評估結果，我們可以得到一個結論，就是日照反射率純化法可以降低因地形效應所造成的地物光譜混淆之程度或影響，其對檢測森林土地利用型資訊之能力較優於相對百分比轉換法；而且綜合各種日照反射率資料的評估結果，顯示春季時期影像檢測森林地類的能力較優於其他的季節影像。

四、森林植群最適辨識時期之探討

根據前節植生光譜特徵之季節性變異分析結果，我們瞭解到不同植物的光譜反射特性曲線之型態雖受季節變化的影響極小，但是不同植物彼此間對不同波長的光譜反射量，其變異量仍會隨季節的推移而有變化。造成這種變化的原因可歸為二類，其一為與植物的生理活動或光合作用能力有關的內在因子，其二為與太陽位置有關的外在因子。

就植物內在因子分析之，在春夏秋時期，植物的生理作用旺盛，其吸收紅光、反射近紅外光的特徵會更明顯，此時的遙測多譜資料應更有利於辨識植物屬性，但仍有潛在的不利因

子可能會影響植物屬性之可辨性，例如顯花植物於生長季節中，可能因葉部新生枝葉與花果，而影響可見光區的光譜特徵，而且隨著冠層花葉混合比率的改變，將使植物的輻射亮度產生更大且不可預知的不定性。這是利用生長季節影像檢測森林植群時必須注意的。此外也應注意太陽越接近天頂位置時，背景物質對光譜特徵之影響會增大。

若考慮地形高低與太陽位置(方位與高度)變化時會改變太陽與地形坡面的相對幾何關係，也會影響到地面陰影區面積的大小，也就是可檢視的日照區影像面積會因季節推移而改變。一般在植物生長季節期間的太陽高度會高於非植物生長季節的太陽高度，影像像元位於日照區的比率較大，影像之可檢視率比較高，檢測森林植群應該會比較有利。根據本研究五個時期影像的地物季節性光譜反射特徵異質性比較以及組類之轉換分離度分析與分類的結果，顯示春季時期的影像檢測森林植群資訊的結果最佳；這應該是春季正處林木生理活動較旺的初期，植物光譜特徵受內在因子影響發生不確定性變異的機會較少，而且因太陽高度角夠大，使地形效應與冠層結構所引起的陰影效應較少之故。

結論

綜合本研究所得結果，我們可以得到幾個結論：

一、利用遙測多譜資料研究地物之光譜特徵時，必須對大氣路徑輻射予以改正，否則地物在短波長光譜範圍內之反射量會因路徑輻射的影響而失真。吾人可以依據輻射修正後影像各波段光譜值之分布，判釋得到影像地物組成之大概。

二、利用日照反射率純化法，可以降低地形效應所引起的同一地物的光譜波段反射量的變異性，提升光譜組類分離度與影像分類的準確度。雖然相對百分比轉換法可以降低地形效應之影響，但日照反射率純化法檢測森林植群資

訊之能力較優於相對百分比轉換法。

三、裸地之可見光區和紅外光區的光譜反射特徵迥異於植生，其反射特性曲線型態受季節性變化之影響極為微小，證明利用遙測多譜資料檢測林區非法開墾行為是絕對可行的。而且當多譜資料的空間解析力夠大時，均可利用影像的視覺判釋方法辨識之。

四、植物的光譜反射特徵受季節性變化影響很大，而且不同種類植生受到季節性推移的影響程度並不一致。對於喬木型植物言，其於生長季節光合作用能力之高低，會直接影響植物在可見光區的反射量，也會間接影響植物在紅外光區的反射量。

五、雖然全日照區針葉樹、闊葉樹、竹類及草類四種植群的光譜異質性以冬季時期最高，但綜合該四種植群在各種日照反射率下的光譜特性，五個時期影像所有組類之轉換分離度與分類準確度可以證明，該四種植群的光譜可分辨性，在春季的衛星影像中是最佳的。春季是植物生長季節的開始，植物冠層結構與葉部總面積因其內在條件改變所生之變化極小，而因此所引起的光譜特徵變異之機會也比較小；就外在因子太陽高度言，春季時期的太陽高度角夠大，因地形效應所引起的陰影面積比較少；故可推論春季時期的多譜資料是比較適合於檢測森林植群之資訊。

引用文獻

- Chavez Jr PS. 1988. An improved dark-object subtraction technique for atmospheric scattering correction of multispectral data. *Remote Sensing Environ* 24: 459-79.
- Chavez Jr PS. 1989. Radiometric calibration of Landsat Thematic Mapper multispectral images. *Photogram Engineering Remote Sensing* 55(9): 1285-94.
- Conese C, Gilabert MJ, Maselli F, Bottai L. 1993. Topographic normalization of TM

- scenes through the use of an atmospheric correction method and digital terrain models. *Photogram Engineering Remote Sensing* 59 (12): 1745-53.
- Deering, DW.** 1989. Field measurements of bidirectional reflectance. In: Asrar G, editors. *Theory and application of optical remote sensing*. New York: J Wiley. p 14-65.
- ERDAS Inc.** 1997. *ERDAS field guide*, 4th edition. Atlanta, GA. p 343-53.
- GDE Systems Inc.** 1996. *SOCET SET user's manual*, 2nd edition. p 11-1~25-14.
- Hudson WD, Ramm CW.** 1987. Correct formulation of the kappa coefficient of agreement. *Photogram Engineering Remote Sensing* 53(4): 421-22.
- Jensen JR.** 1986. *Introductory digital image processing*. NJ: Prentice-Hall. 379 p.
- Kramer PJ, Kozlowski TT.** 1979. *Physiology of woody plants*. New York: Academic Press. 811 p.
- Liu CH.** 1995. Radiometric correction of SPOT satellite imagery [DPhil thesis]. Taoyuan, Taiwan: National Central University. 217 p. [in Chinese with English summary].
- Murphy JM.** 1991. Standard Landsat 4, 5, and 6 TM CCT format specification. Ottawa, Ontario: Canada Centre for Remote Sensing (CCRS), Document No. DMD-TM #82-249E. 115 p.
- Peng LH.** 1996. Estimation of canopy reflectance around mountainous area using satellite remotely sensed imagery [MSe thesis]. Taoyuan, Taiwan: National Central University. 75 p. [in Chinese with English summary].
- Price JC.** 1987. Radiometric calibration of satellite sensors in the visible and near infrared: history and outlook. *Remote Sensing Environ* 22: 3-9.
- Schieh HC.** 1992. Studies on the application of MSS data in the stand crown-closure and volume estimate of *Cryptomeria* [DPhil theses]. Taipei, Taiwan: National Taiwan University. 166 p. [in Chinese with English summary].
- Swain PH, Davis SM.** 1978. *Remote sensing: the quantitative approach*. New York: McGraw Hill. 180 p.
- Tseng CY.** 1988. *Atmospheric radiation*. Taipei, Taiwan: Linking. 360 p.
- Yang CM, Ko CC.** 1998. Seasonal changes in canopy spectra of sweet potato. *J Photogram Remote Sensing* 3(2): 13-28.