

SPOT 綠度與森林生育地因子於台灣杉材積 推估之探討*

謝漢欽^{1,2)}

摘要

本研究以東勢林區之大安溪事業區之 SPOT 影像常態化差異植生指數，及由數值地形資料推算之溫度指數、相對水分梯度、全天空光域、全年平均直射光空域，以及來自本區的台灣杉人工造林地之地理資訊的林齡和樹冠鬱閉度，當作自變數，材積當作應變數。以多變異統計逐步迴歸分析，配合地形組構因子的分層方法，進行台灣杉人工林材積推估模式的建立與分析。研究結果顯示，全區材積推估模式受到地形效應的影響。依地形組構因子之合理分層，減少地形變異，可提高材積推估的正確度達 80%。依自變數取得的難易程度，可選定最適台灣杉材積推估模式。

關鍵詞：常態化差異植生指數、遙感探測、森林生育地因子、地理資訊系統、台灣杉。

謝漢欽。1998。SPOT 綠度與森林生育地因子於台灣杉材積推估之探討。台灣林業科學 13(3): 175 - 188。

Evaluation on Integration of SPOT NDVI and Forest Habitat Factors for Estimating Timber Volume of Taiwania*

Han - Ching Hsieh^{1,2)}

[Summary]

This study focused on Taiwania plantations on forest land of the Danaen working circle in the Donshu National Forest. The normalized difference vegetation index as greenness of each stand was calculated from a SPOT image. Four forest habitat factors, temperature index, synthetic moisture gradient, whole sky space, and direct light incidence ratio, associated with topography and location were derived from digital elevation data. In addition, the Taiwania stand age, crown closure, and volume were selected from the forest land - use geographic information data base. Greenness, 4 forest habitat factors, stand age, and crown closure of the entire area of each stand were independent variables, and stand volume as was the dependent variable in the multivariable stepwise regression analysis which searched for the best volume estimate model. Through stratifying the terrain configuration factor derived by the digital terrain model, relieving the higher relief stratification from each stand stepwise, R^2 of the best model was able to reach 0.80. This shows that the Taiwania volume estimate models are affected by the variance of terrain. According to how easy it is to acquire the dependent variables, the optimal timber volume estimate models can be selected by the analysis procedure in this study.

1) 台灣省林業試驗所森林經營系，台北市南海路 53 號 Division of Forest Management, Taiwan Forestry Research Institute, 53 Nanhai Rd., Taipei, Taiwan, ROC.

2) 通訊作者 Corresponding author

1997 年 11 月送審 1998 年 5 月通過 Received November 1997, Accepted May 1998.

* 本研究承農委會遙測科技計畫(86-RS-02-002)經費補助，特予致謝。

Key words: NDVI, remote sensing, forest habitat factor, geographic information system, Taiwania. **Hsieh, H - C.** 1998. Evaluation on integration of SPOT NDVI and forest habitat factors for estimating timber volume of Taiwania. *Taiwan J. For. Sci.* 13(3): 175 - 188.

緒言

林業資源調查，艱辛非常，林木材積 (volume) 及生物量 (biomass) 調查之地面測定工作十分繁瑣，尤其在大面積森林資源調查時，更需投入大量之人力、時間與經費 (Chiao, 1997)。以往調查時常藉助航空照片資料，須由有經驗的人工判釋及轉繪，且必經事前的航線規劃工作，加以每張照片涵蓋林地面積不大，故所需航空照片數量亦多，頗費時費工。自 1970 年代，多光譜數位遙測技術傳入台灣之後，進展十分迅速，在政府及學術機構的努力下，於 1993 年底在中央大學遙測中心設置了資源衛星接收站，使得資源衛星影像的蒐集與獲取更為方便。以多光譜遙測資料而言，迄 1996 年止，所蒐集並建檔的組數以法國 SPOT 衛星影像最多，次為美國的 LANDSAT；依資料使用者分類，應用於森林領域佔了 10% 之多 (Cheng, 1997)。由於衛星遙測資訊覆蓋面積甚大，且自動化資料處理技術已臻完善，故如能利用遙測多譜資訊，取代部份的人工航測判釋，以估測林木地上部之材積，探究材積與多譜資訊之關係，建立模式，據以測定林分生物量及林地生產力，將可節省大量的人力與經費。以往在林業領域的研究與應用方面，多譜遙測技術對資源分佈及土地利用型變遷的探測，已有相當的進展 (Cheng and Jan, 1996; Chung, 1996; Hsieh, 1996)，但應用於森林生物量及材積測定方面之研究尚待起步 (Chiao, 1997)。

環顧過去，應用不同載台多光譜掃描資料進行人工林材積、樹冠鬱閉度 (crown closure) 及林齡之定量估測研究，在國內外已行之多年。雖得到初步的成果 (Butera, 1986; Ahern, 1991; Chiao and Cauo, 1992; Hsieh, 1992; Niemann, 1995)，但由於現階段之多譜遙測資料應用於台灣山巒起伏甚劇之陡峻林地，仍存有若干的限

制，除了資料的光譜及空間解析力不足外，不同時期感測時的感測器傾角、大氣狀況、太陽角度、地形效應及陰影交疊 (Proy and Deschamps, 1989; Hsieh, 1992)，以及人工林育林作業方法及生育地條件因子之差異 (Chen *et al.*, 1997; Howard, 1991) 等，皆應視為重要的影響因素。從過去的研究顯示，經過輻射值常態化處理和地形效應處理之不同載台的多譜資料，平均仍有 30% 屬於地形陰影區，無法經由常態化處理予以糾正 (Hsieh and Cheng, 1995)。

某些研究雖已得到較佳成果，但多屬於從地面選取向陽且林地環境均值的樣區與衛星影像對位後，求得之迴歸式 (Chiao and Cauo, 1992; Cheng *et al.*, 1997)。

然而，對於全區影像涵蓋之柳杉人工林，若只應用多譜資訊及植生指數 (vegetation index) 對全區域柳杉人工林分材積進行定量估測，並無法得到顯著的成效；但加入少數的林地地理資訊，如林齡或樹冠鬱閉度組成的多變異迴歸式，則能得到可用的推估模式 (Hsieh, 1992)。因此，整合多譜資訊與地理資訊於人工林材積之推估，應為繼續研發的方向。

由於人工林材積與林地生育地因子息息相關，而使用數值地形資料，可以快速自動化地推導大面積與地形及位置相關之林地生育地因子 (forest habitat factors)：如溫度指數 (temperature index)、水分梯度 (synthetic moisture gradient)、全天空光空域 (whole light sky space) 及直射光空域 (direct light space) (Hsieh, 1997)。此 4 個因子在林木生長之生育地環境之層級系統中，佔有顯著重要的地位 (Su, 1987; Liaw, 1997)。由多譜影像之紅外光和紅光段組成的常態化差異植生指數 (normalized difference vegetation index, NDVI)，可代表健康綠色植生的綠度值 (greenness)，過去曾應用不同時期的 SPOT 影像

之綠度值，監測林地的變化(Hsieh, 1996)，其與林木的材積及生物量的多寡均有關係。此外，人工林造林時，其造林年度均有記錄，目前建立的林地地理資訊系統多建在本項資料，故林齡資訊的取得也十分容易。

本研究鑑於上述原因，選擇林務局東勢林區之大安事業區為試區，以本區的台灣杉人工造林地為對象，由第三次台灣省森林資源調查建立的土地利用型地理資訊主題層上，取得不同造林地號的台灣杉材積、林齡及樹冠鬱閉度等資訊。以數值地形推導之溫度指數、相對水分指數、全天空光入射比率、全年平均直射光空域，以及地形組構因子。配合 1990 年 10 月 6 日攝取的 SPOT HRV 多譜影像，經輻射值常態化處理求得之 NDVI 綠度值。以材積為應變數，4 個林地生育地因子、NDVI 和林齡為自變數，以多變異逐步迴歸分析法，建立全影像涵蓋之台灣杉人工林最適材積推估模式。而最終的目的在於「如能尋得可茲派用的模式，將可提昇資源衛星資訊於林木材積定量測定之應用性，並能節省大面積森林資源調查所需投入之大量人力、時間與經費」。

材料與方法

一、研究材料

(一) 研究地區及台灣杉造林地的地理資訊

以林務局東勢林區之大安溪事業區的林地為試區，本區總面積達 32,935 ha，地處於台中縣和苗栗縣的交界處，涵蓋第 61 林班至第 131 林班範圍。林地土地利用型十分複雜，包括了天然林、人工林、竹林及混交林等，總計有 30 種林型。土地利用型已建成地理資訊檔，由林務局提供，本主題層乃由第三次台灣省森林及土地利用分類調查時，經航空照片判釋後，轉繪於航照基本圖上，經數化而成。其中，台灣杉純林之人工造林地計有 15 個(所在位置如

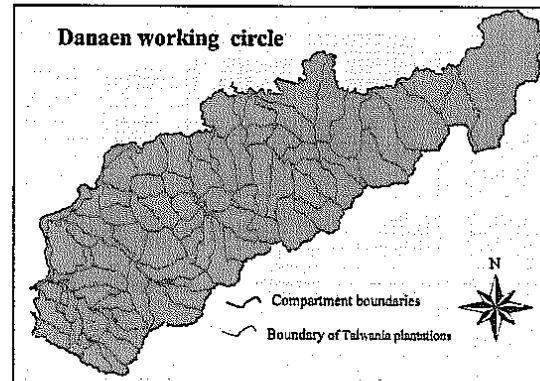


Fig. 1. Locations of Taiwania plantations in Danaen working circle of Donsu National Forest. Red lines are boundaries of Taiwania plantations. Black lines are compartment boundaries.

Fig. 1)，從其地理資訊屬性得知，總面積共有 320 ha。材積級分佈從第 1 到第 4 級，樹冠鬱閉度分佈從第 1 到第 4 級(Taiwan Forest Bureau, 1995)，林齡分佈依 1990 年為基準計算，從 12 年生到 32 年生。此外，因造林地以小班為代號，故可與檢定資料庫連結(joint)，相互對照(Hsieh, 1996)。將造林地地理資訊層與數值地形影像套疊，得知台灣杉人工造林地海拔分佈為 750 - 2,400 m。

(二) SPOT 衛星影像和數值地形資料之應用

為配合森林資源調查時間，採用 1990 年 10 月 6 日攝取之 SPOT HRV 多譜影像，求算研究區的 NDVI，其相關屬性如 Table 1 所示。本區的數值地形資料係採用農航所製作，由中央大學遙測中心提供之 40 m x 40 m 精度影像檔，用於推導與地形及位置相關之林地生育地因子。

(三) 使用之硬體與分析工具

1. 遙測數位影像處理系統：SUN 工作站之 ERDAS IMAGINE 8.3 版。
2. 地理資訊系統：SUN 工作站之 ARC/INFO

Table 1. Attributes of SPOT image

Date	Sensor	Receiving time	Sun azimuth	Sun elevation	Incidence
10/06/90	HRV	10: 45: 00	153.02°	58.12°	4.96°

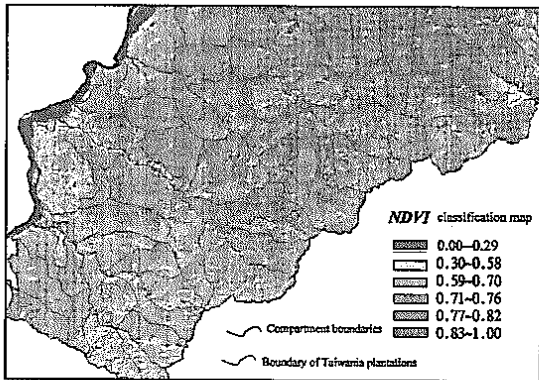


Fig. 2. Five-level classification map of NDVI in southern part of Danaen working circle. Red lines are boundaries of Taiwania plantations. Purple lines are compartment boundaries.

7.1 版。

3. 地理資訊查詢及展示系統：PC ArcView 3.0 版。
4. 統計分析系統：PC SAS 6.11 版。用於多變異統計分析。
5. 自行發展的程式：以 C 語言撰寫之程式，包括以數值地形推導 4 個林地生育地因子、地形組構因子，及多波段（層）影像取樣等程式。

二、研究方法

（一）相關地理資訊的萃取

由大安溪事業區土地利用型地理資訊檔，依其土地利用型代碼，將屬於純台灣杉造林區域以 ARC/INFO 空間分析功能萃取 (reselect) 出來。其屬性欄位錄有材積、樹冠鬱閉度及造林年度，將此等屬性在 ERDAS IMAGINE 上作向量轉網格 (vector to raster) 處理，使成 20 m x 20 m 像元 (pixel) 大小、具有 TM 二度分帶座標系統。再將造林年度屬性影像轉成以 1990 年為基準的林齡影像。

（二）以 SPOT 影像求取 NDVI

1. 影像再取樣

由中央大學遙測中心購得之 SPOT HRV 影像，其空間解析度已用 KT-16 演算法內插成

12.5 m x 12.5 m 像元大小。為考慮配合與 40 m x 40 m 精度的數值地形資料共同分析、並能節省電腦影像處理的時間和硬碟儲存空間。本影像經近鄰指派法再取樣 (nearest neighbor re-sampling) 成原來精度之 20 m x 20 m 大小。

2. 影像常態化處理

本研究採用 1996 謝漢欽發展之影像輻射值常態化處理程序，處理項目包括了 (1) 灰度值轉成輻射值 (2) 路徑輻射之去除 (3) 減除天空光效應 (Hsieh, 1996)。經此常態化處理後的 SPOT HRV 供為 NDVI 計算。

3. 綠度分析的方法與模式

本研究採用的植生綠度分析指數為 NDVI，經前人研究 (Hsieh, 1992) 可以判別植生反射量之多寡，適用於監測植生變化。蓋因 NDVI 指數的產生，係採用健康的綠色植生在近紅外有強烈的反射作用，在紅光則因光和作用需求，有強烈的吸收。依此兩波段之相差與和的比率，組合而成 (如 1 式)，NDVI 亦有進一步常態化之效，可減除部分的地形陰影 (Hsieh and Cheng, 1995)。

$$NDVI = \frac{NIR - R}{NIR + R} \quad (1)$$

其中，NDVI: 常態化差異植生指數

NIR: 近紅外光輻射值

R: 紅光輻射值

經由 1 式產生之 NDVI 其值落於 -1.0 至 1.0 範圍。小於 0 的像元，通常屬於非植生之雲層、水域、道路、建物及開闢地之土壤反應的像元，故有過濾之效。而其值愈高時，代表綠色植生量之聚積愈大 (Burgan and Hartford, 1993)。本研究取用 NDVI 值大於 0 的像元進行迴歸分，其結果與台灣杉造林地套疊後，如 Fig. 2。

Fig. 2 為試區的 NDVI 影像與台灣杉造林地位置套疊。

（三）應用數值地形資料推導林地生育地因子地形組構因子

1. 林地生育地因子求取

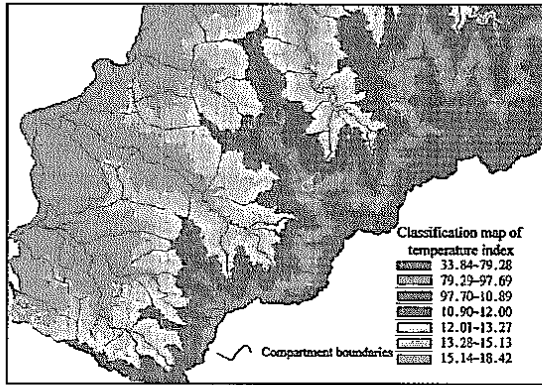


Fig. 3. Seven-level classification map of temperature index in southern part of Danaen working circle. White lines are boundaries of Taiwania plantations. Purple lines are compartment boundaries.

以數值地形資料推導與地形和位置相關之林地生育地因子，使用的方法，詳參(Hsieh, 1997)之報告，不在此贅述。其求算過程因考慮到能與遙測及地理資訊的整合，演算法已經過合理改良。推導的因子包括(1)溫度指數、(2)海拔與坡向合成之水分指數、(3)全天空光空域及(4)全年平均直射光入射比率，此4個林地生育地因子當作材積推估之獨立變數(independent variable)。Fig. 3為推算之溫度指數分級影像，Fig. 4為推算之全年平均直射光入射比率影像，影像中灰度值愈高著表示直射光入射率愈大。

2. 地形組構因子的求取

地形組構因子係假設輻射為均向性，並考察點與點之間的地形幾何關係，以及近鄰各點間之相互可視性，可依第(2)式之近似(2-1)式求

$$Ct = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} \int_{H\phi}^{\psi\phi} \sin\theta [\cos\theta \cos e + \sin\theta \sin e \cos(\phi - a)] d\theta d\phi \quad (2)$$

$$\cong \frac{1 + \cos e}{2} - vd \quad (2-1)$$

得(Dozier, 1990)。

其中，Ct：地形組構因子

vd：受地形影響之半球天空光可見率(天

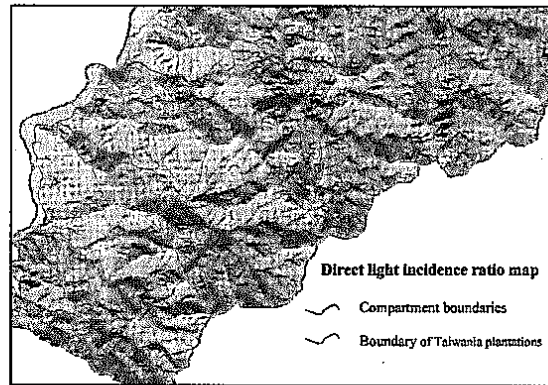


Fig. 4. Direct light incidence ratio map of southern part of Danaen working circle. Purple lines are compartment boundaries. Red lines are boundaries of Taiwania plantations.

空光比率因子)，vd之求算詳見(Hsieh, 1997)之報告。

Hø：坡度天頂角

Ψø：以南向逆時針方式計算之坡度天頂角

e：坡度

ø：太陽入射天頂角

a：坡向方位角

Fig. 5顯示所求得之試區地形組構因子之分級圖，其值愈高表示受近鄰地形影響愈大；愈低表示受地形影響愈小，屬於較為平坦且開闊區域，本影像用於第5節之地形變異大小之分

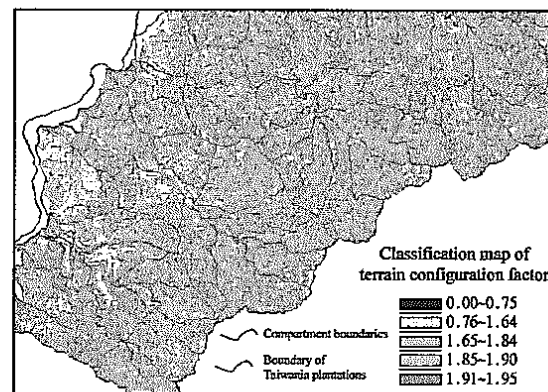


Fig. 5. Five-cluster classification map of terrain configuration factors in southern part of Danaen working circle. Purple lines are compartment boundaries. Red lines are boundaries of Taiwania plantations.

層。

(四) 材積的多變值逐步迴歸分析

將全部 15 個台灣杉造林地之 NDVI、4 個林地生育地因子、林齡及樹冠鬱閉度影像，以及材積影像組成 8 個波段的影像，由自行開發的取樣程式以 100% 取樣率，取出相對位的像元；並於取樣時由程式判斷每一變數值是否為 0，如為 0 則不予選取，作過濾之用，防止非植生覆蓋像元（如疏開地、岩地、小崩場地）的選入。先對所有變數進行兩兩之間的相關分析，以判定變數之間的獨立性。次以材積為應變數(dependent variable)，其餘 7 個變數當作自變數，進行多變值的逐步迴歸分析，依其選入變數之優先順序及顯著性，決定最佳材積迴歸推估模式。此外，亦以 NDVI 當應變數其餘 6 個變數當自變數，行多變異的逐步迴歸分析，探求之間是否有直線關係。

(五) 以地形組構因子分層，評析地形變異對材積推估式的影響

之所以加入本項分析，乃鑑於全區迴歸式之迴歸判定係數 R^2 值並不高，並假定是受到地形變異的影響。故將數值地形推導的地形組

構因子，依地形變異之高低分層，採用 ISO-CLAS (Interactive Self-Organizing Data Analysis Technique) 聚集分類法，設定其轉換分離度(transformed divergence)在 1900 以上，使分成適當的聚集組數。之後，按其地形變異之高低程度，逐一減除地形變異大的組類之像元，再針對每一分層，同樣以逐步迴歸分析法，逐一進行材積迴歸式的建立，以便能得到迴歸判定係數高的適用推估式。

(六) 差異性統計評估

1. 分層差異性比較：針對以地形組構因子分層而得之各層最佳材積推估結果，作差異性比較。因為各分層所選取的像元和像元數目並不完全相同，但如以造林地號為推估基準時，可進行兩兩之間的比較。故以造林地號之所選入像元的平均值，進行兩兩之間的關連樣本配對 t -test (paired-comparisons t -test) 檢定，評定各分層之最佳推估之間有無差異性。據以評析地形變異之影響，並選取最適推估式。

2. 評估 1. 節所得之最適推估式：按(1)選入變數取得之難易、(2)選入變數之迴歸係數變化程度，以及(3)合理的地形變異分層三原則，

Table 2. Correlation analysis of 8 variables

Pearson correlation coefficients / Prob > R under Ho: $\rho = 0$ / N = 7918								
	TEMP	WET	SKYF	DIR	NDVI	AGE	CRD	VOL
TEMP ²⁾	1.00000	0.32387	0.24065	-0.01436	-0.46786	-0.5196* ¹⁾	-0.27190	0.28155
WET ³⁾		1.00000	0.16985	-0.28686	-0.14685	-0.17372	-0.19821	0.05873
SKYF ⁴⁾			1.00000	0.52596*	0.02556	-0.05608	-0.16811	-0.10020
DIR ⁵⁾				1.00000	0.20753	0.16407	-0.03498	-0.16779
NDVI ⁶⁾					1.00000	0.33046	0.10521	-0.22373
AGE ⁷⁾						1.00000	0.66931*	0.35411
CRD ⁷⁾							1.00000	0.62770*
VOL ⁷⁾								1.00000

1) *: correlation coefficient > 0.5.

2) TEMP: temperature index.

3) WET: synthetic moisture gradient.

4) SKYF: whole light sky space.

5) DIR: direct light sky space.

6) NDVI: normalized difference vegetation index.

7) AGE, CRD, VOL: age, crown closure, volume of Taiwania.

Table 3. Summary of stepwise procedure for dependent variable, VOL

Step	Variable ¹⁾		Number in	Partial	Model	F	Prob > F
	entered	removed		R ²	R ²		
1	AGE		1	0.1254	0.1254	1134.9429	0.0001
2	TEMP		2	0.2969	0.4223	4068.7743	0.0001
3	DIR		3	0.0761	0.4984	1200.2801	0.0001
4	WET		4	0.0142	0.5127	231.1641	0.0001
5	NDVI		5	0.0118	0.5245	196.8653	0.0001
6	SKYF		6	0.0023	0.5268	38.4819	0.0001

¹⁾ Annotations same as in Table 2.

選取本研究之最適材積推估模式。將其推估結果與原地理資訊層之材積行配對 t-test 檢定，評估推估差異的百分比及迴歸式的適用性。

結果

一、台灣杉材積的多變值逐步迴歸分析結果

(一) 各變數間之相關性分析：取 8 個變數之台灣杉造林地之全區像元，共計 7,981 個，進行變數間的相關分析 (correlation analysis)，結果如 Table 2。其變數相關性較高的 (大於 0.5 者) 計有：材積及樹冠鬱閉度 (0.63)、林齡及樹冠鬱閉度 (0.67)、全天空光空域及直射光入射比率 (0.53)、溫度指數與林齡 (0.52)。餘者相關係數皆小，適合當作自變數。

(二) 以材積為應變數之逐步迴歸分析：以台

灣杉材積為應變數。其餘 7 個變數中，因樹冠鬱閉度取得較難 (一般需經航空照片判釋)，故先不將樹冠鬱閉度列為自變數，以其餘 6 個為自變數，進行逐步迴歸分析。變數選入的順序、偏迴歸係數、累積迴歸係數、F 值及顯著性，結果如 Table 3。其中以溫度指數 (TEMP) 及林齡 (AGE) 貢獻最大，直射光入射比、(DIR) 合成水分指數 (WET) 及綠度 (NDVI) 次之，全天空光空域 (SKYF) 最小。以 F 值顯著機率小於 0.05 為選入變數的基準，則 6 個變數所組成的材積迴歸式之迴歸係數為 0.5268。其能解釋材積變異的百分比仍感不滿意，故再加入樹冠鬱閉度 (CRD) 變數，期能提高迴歸判定係數，所得結果如 Table 4。此時，CRD 和 TEMP 貢獻最大，在變數交互作用影響下，WET 不被選入。由 6 個變數所組成的

Table 4. Summary of stepwise procedure for dependent variable, VOL

Step	Variable ¹⁾		Number in	Partial	Model	F	Prob > F
	entered	removed		R ²	R ²		
1	CRD		1	0.3940	0.3940	5146.8571	0.0001
2	TEMP		2	0.2208	0.6148	4537.9472	0.0001
3	AGE		3	0.0228	0.6376	497.9305	0.0001
4	DIR		4	0.0333	0.6709	800.9140	0.0001
5	NDVI		5	0.0064	0.6773	156.4189	0.0001
6	SKYF		6	0.0011	0.6785	28.1684	0.0001
7	WET		7	0.0001	0.6786	2.1510	0.1425

¹⁾ Annotations same as in Table 2.

Table 5. Summary of stepwise procedure for dependent variable, NDVI

Step	Variable ¹⁾		Number in	Partial R ²	Model R ²	F	Prob > F
	entered	removed					
1	TEMP		1	0.2189	0.2189	2218.3008	0.0001
2		DIR	2	0.0403	0.2592	430.9655	0.0001
3		WET	3	0.0046	0.2638	49.6326	0.0001
4		AGE	4	0.0040	0.2678	43.0719	0.0001
5		CRD	5	0.0042	0.2721	16.1220	0.0001
6		SKYF	6	0.0003	0.2724	3.1672	0.0752

¹⁾ Annotations same as in Table 2.

材積迴歸式之迴歸判定係數達 0.6785，提高了 15%。

(三) NDVI 為應變數之逐步迴歸分析：以 NDVI 為應變數，DIR、WET、SKYF、TEMP、AGE、CRD 為應變數，進行之逐步迴歸分析，結果如 Table 5。共有 5 個變數選入，但迴歸判定係數並不高，只有 0.2721。其中主要貢獻量來自 TEMP，有 0.2198 之多，其餘皆很小。

二、以地形組構因子分層，評析地形變異對材積推估式的影響之結果

(一) 地形組構影像之聚集分析：地形組構因子的值域在 0.0 至 2.0 之間，本區之地組構因子平均值為 1.7667，地形變異很大。將本區的地形組構影像，以 ISODATA 聚集分析法，聚集成組類分離度高之適當數目的組類。方法採用不預設初始平均值、分成最多組類數為 10、演算重複次數為 15、趨合界值 (convergence threshold) 為 0.95，而分成組類間之轉換分離度大於 1,900。當完成分類之後，評估其結果，刪除或合併不合標準之組類，最後得到 6 個分離的聚

集組。除去 0 值像元的聚集組 (屬於事業區外圍之 0 值像元區)，依地形組構因子之由低到高的順序，分成 5 個組類。分類圖如 Fig. 5，各組類之轉換分離度如 Table 6 所示，其中第 4 和第 5 組類分離度較低。

(二) 依序遞除高地形變異組類之逐步迴歸分析結果：以地形組構因子分類影像依序過濾較高地形變異之像元，每遞除 1 個聚集組，都以逐步迴歸分析法，同前述的變數組合，建木材積迴歸式。即於過程中，依序遞除第 5、4、3、2 聚集組所在的像元，得到另外 4 組逐步迴歸分析結果。大體而言變數選入的順序如同 Table 3、Table 4 及 Table 5，但在材積推估方面 NDVI 被選入的序位從第 5 位提昇到第 3 或第 4 位。如不加入 CRD 的迴歸式，仍以 AGE 和 TEMP 貢獻量為大；加入 CRD 者，則以 CRD 及 TEMP 貢獻量為大。而全模式的迴歸判定係數卻依次而遞增，當遞除到只剩第 1 組類時，其迴歸判定係數最高可達 0.6636，如 Table 7；加入 CRD 者可達 0.8142 如 Table 8。Table 7、Table 8 顯示其逐步迴歸分析結果。將各個遞減組類之迴

Table 6. Transformed divergence between classes

Class Pairs:									
1 : 2	1 : 3	1 : 4	1 : 5	2 : 3	2 : 4	2 : 5	3 : 4	3 : 5	4 : 5
Separability:									
2000	2000	2000	2000	1972	2000	2000	1942	2000	1480 ¹⁾

¹⁾ Transformed divergence < 1900.

Table 7. Summary of stepwise procedure for dependent variable, VOL

Step	Variable ¹⁾		Number in	Partial	Model	F	Prob > F
	entered	removed		R ²	R ²		
1	AGE		1	0.2651	0.2651	463.0986	0.0001
2	TEMP		2	0.3302	0.5952	1046.4675	0.0001
3	WET		3	0.0274	0.6226	93.0013	0.0001
4	NDVI		4	0.0248	0.6474	90.1593	0.0001
5	DIR		5	0.0098	0.6572	36.6554	0.0001
6	SKYF		6	0.0064	0.6636	24.3753	0.0001

¹⁾ Annotations same as in Table 2.

Table 8. Summary of stepwise procedure for dependent variable, VOL

Step	Variable ¹⁾		Number in	Partial	Model	F	Prob > F
	entered	removed		R ²	R ²		
1	CRD		1	0.5212	0.5212	1397.8164	0.0001
2	TEMP		2	0.2021	0.7233	936.8905	0.0001
3	AGE		3	0.0700	0.7933	434.5035	0.0001
4	NDVI		4	0.0117	0.8051	77.1726	0.0001
5	DIR		5	0.0050	0.8101	33.9717	0.0001
6	SKYF		6	0.0041	0.8142	28.1238	0.0001
7	WET		7	0.0004	0.8146	2.9392	0.0867

¹⁾ Annotations same as in Table 2.

Table 9. Pixel number and regression coefficient of different variable combinations of each class

Class	Pixel number	NCRD ¹⁾	ACRD ²⁾	NDVID ³⁾
		R ²	R ²	R ²
S2 ⁴⁾	1285	0.6636	0.8412	0.2144
S3	1708	0.6196	0.7810	0.2114
S4	3402	0.5687	0.7445	0.2548
S5	6270	0.5368	0.6938	0.2673
Wh ⁵⁾	7917	0.5268	0.6785	0.2721

¹⁾NCRD : Without CRD variable.

²⁾ACRD : Including CRD variable.

³⁾NDVID : Using NDVI as dependent variable.

⁴⁾SN : Class after removing the number N cluster from Wh accumulatively.

⁵⁾Wh : Whole area pixels selected on Taiwan stands.

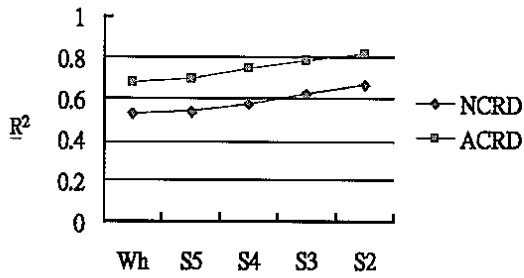


Fig. 6. Regression coefficient curves of NCRD and ACRD between different classes. NCRD: without CRD variable. ACRD: including CRD variable. Wh: whole area pixels selected on Taiwan stands. SN: The class after removing the number N clusters from Wh accumulatively.

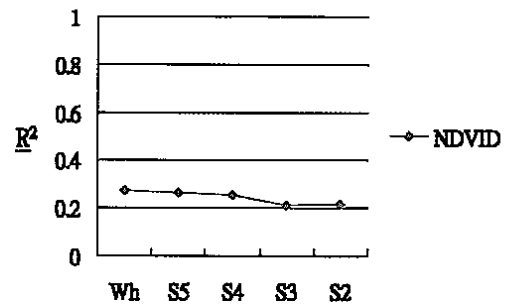


Fig. 7. Regression coefficient of NDVID between different classes. NDVID: Using NDVI as dependent variable. Wh: whole area pixels selected on Taiwan stands. SN: The class after removing the number N clusters from Wh accumulatively.

歸判定係數以趨勢圖表示之，如 Fig. 6。

以 NDVI 為應變數之逐步迴歸分析，在各個遞減之迴歸係數並無多大改變，略呈遞減之趨勢，各個遞減之迴歸係數以趨勢圖表示之，如 Fig. 7。自變數中，TEMP 仍為最大的貢獻變數，DIR 卻因地形變異之逐漸減小，失去影響力，被選入的順序往後移。Table 9 顯示各個遞減之選取像元數目、不加入 CRD、加入 CRD 及以 NDVI 為應變數組成之最佳迴歸式的迴歸判定係數。

三、差異性統計評估結果

(一) 各分層最佳迴歸式推估結果差異比較：Table 10 顯示各分層組類所選取之最佳迴歸式。以最佳迴歸式推估 VOL 或 NDVI，所得之全區像元，按造林地號為單元，求取像元推估值的平均值，以地號配對行配對 t-test 檢定，比較兩兩之間有無差異，結果 NCRD 各層間的顯著差異水準皆小於 0.05，呈顯著差異。ACRD 之 S4、S5、Wh 兩兩之間差異並不顯著外，其餘兩者之間接呈顯著的差異。NDVID 各

Table 10. Best regression model of each class

(a) NCRD²⁾:

AGE	TEMP	WET	NDVI	DIR	SKYF	INTP ¹⁾
0.170	0.0213	-0.00772	-1.532	-0.0373	1.185	0.0814
AGE	TEMP	NDVI	WET	DIR	SKYF	INTP
0.169	0.0200	-1.727	-0.00663	-0.0342	0.892	0.397
AGE	TEMP	DIR	NDVI	WET	SKYF	INTP
0.156	0.0188	-0.0387	-1.411	-0.00505	-0.301	1.597
AGE	TEMP	DIR	NDVI	WET	SKYF	INTP
0.143	0.0185	-0.0331	-1.298	-0.00429	-0.586	1.458
AGE	TEMP	DIR	WET	NDVI	SKYF	INTP
0.138	0.0187	-0.0330	-0.00426	-1.176	-0.646	1.426

¹⁾ INTP: intercept of regression model.

²⁾ Annotations same as in Table 2 and Table 9.

Table 10. Best regression model of each class(continued)

(b) ACRD²⁾:

CRD	TEMP	AGE	NDVI	DIR	SKYF	INTP ¹⁾
0.430	0.0173	0.0842	-1.0689	-0.0274	0.921	0.567
CRD	TEMP	AGE	NDVI	DIR	SKYF	INTP
0.436	0.0172	0.0823	-1.240	-0.0234	0.685	-0.505
CRD	TEMP	AGE	DIR	NDVI	INTP	
0.446	0.0156	0.0666	-0.0264	-0.879	0.315	
CRD	TEMP	AGE	NDVI	DIR	SKYF	INTP
0.409	0.0160	0.0621	-0.860	-0.0207	-0.340	0.238
CRD	TEMP	AGE	NDVI	DIR	SKYF	INTP
0.394	0.0160	0.0598	-0.0198	-0.860	-0.433	0.285

¹⁾ INTP: intercept of regression model.

²⁾ Annotations same as in Table 2 and Table 9.

(c) NDVID²⁾:

TEMP	AGE	CRD	DIR	INTP ¹⁾	
-0.000928	0.00475	-0.0117	0.00158	0.746	
TEMP	AGE	CRD	DIR	INTP ¹⁾	
-0.000932	0.00509	-0.0124	0.00113	0.776	
TEMP	DIR	WET	AGE	CRD	INTP
-0.00114	0.00220	0.000270	0.00373	-0.0103	0.729
TEMP	DIR	WET	AGE	CRD	INTP
-0.00125	0.00254	0.000203	0.00335	-0.00956	0.727
TEMP	DIR	WET	AGE	CRD	INTP
-0.00130	0.00263	0.000238	0.00285	-0.00700	0.725

¹⁾ INTP: intercept of regression model.

²⁾ Annotations same as in Table 2 and Table 9.

Table 11. Result of paired - comparisons t - test

Variable ¹⁾	Mean	Std error	T	Prob > T
NCRD - VOL	1.040	0.157	6.614	0.0001
ACRD - VOL	0.692	0.125	5.551	0.0001
ACRD - NCRD	-0.348	0.084	-4.121	0.0010

¹⁾ Annotations same as in Table 2 and Table 9.

層之間的除 S5 與 Wh 之間顯著機率為 0.0028 呈顯著外，其餘兩者之間差異並不顯著。

(二)最適推估式選取及差異性比較：1. 最適材

積推估式的選取：如果樹冠鬱閉度(CRD)的資訊容易取得，則宜選取地形變異較小之分層(S2)，且變數逐一加入時其累積 R₂ 變化最小時

Table 12. Result of paired – comparisons t – test

Variable ¹⁾	Mean	Std error	T	Prob > T
NDVID – NDVI	-0.000885	0.000764	-1.1578	0.2470

1) Annotations same as in Table 2 and Table 9.

之最適迴歸模式，如第(3)。如果樹冠鬱閉度的資訊不容易取得、或缺如，則可選取地形變異較小之分層(S2)，且變數逐一加入時其累積 R² 變化最小時之最適迴歸模式，如第(4)式。將第(3)式與第(4)式之材積推估結果與地理資訊的材積值，以造林地號為單元進行配對 t – test 檢定，所得結果如 Table 11，兩者之材積推估值與造林地號材積有明顯之差異，其中 NCRD 相差達 1 個材積級；ACRD 較少，相差 0.69 個材積級。而第式(3)與第式(4) (ACRD 與 NCRD) 推估值亦有明顯之差異，相差在 0.35 個材積級。

$$\text{VOL} = 0.429 \text{ CRD} + 0.0175 \text{ TEMP} + 0.0839 \text{ AGE} - 1.161 \text{ NDVI} - 1.644$$

$$N = 1285 \quad R^2 = 0.805 \dots\dots(3)$$

$$\text{VOL} = 0.170 \text{ AGE} + 0.0211 \text{ TEMP} - 0.00674 \text{ WET} - 1.675 \text{ NDVI} - 1.412$$

$$N = 1285 \quad R^2 = 0.647 \dots\dots(4)$$

2. 最適 NDVI 推估式的選取：以 NDVI 為應變數的迴歸分析中，由於各分層之間的 R² 和推估結果並無明顯差異，故選取全區(Wh)之較佳迴歸結果，且變數逐一加入時其 R² 變化最小時之最適迴歸模式，如第(5)式。將第(5)式之 NDVI 推估結果與 SPOT NDVI，以全區像元對像元，行配對 t – test 檢定。所得結果如 Table 12，兩者相差非常小，差異不顯著，但各變數在迴歸式的斜率很小，並不佔重要性。

$$\text{NDVI} = -0.00147 \text{ TEMP} + 0.00308 \text{ DIR} + 0.000329 \text{ WET} + 0.726$$

$$N = 7917 \quad R^2 = 0.264 \dots\dots(5)$$

討論

應用台灣杉造林地之 4 個林地生育地因子和 SPOT NDVI，加上容易取得之林齡，當作自

變數，所組成的材積推估式，以全區而言 R² 只達 0.51。由偏迴歸係數判定變數的影響力，則依次以林齡、溫度指數及直射光入射比率 3 個因子據為主要的貢獻量。迴歸式若再加入樹冠鬱閉度，則可提高 R² 至 0.67，此時主要的貢獻因子依次為樹冠鬱閉度、溫度指數、林齡及直射光入射比率 4 個。由於 R² 只達 0.67，材積推估式仍不太適用。由迴歸變數之選入情形觀之，NDVI 對於台灣杉之材積推估並無明顯的助益。

應用台灣杉造林地之 4 個林地生育地因子、林齡及樹冠鬱閉度，當作自變數，所組成的 NDVI 推估式，以全區而言 R² 只達 0.27。從偏迴歸係數得知，只有溫度指數具有較明顯的貢獻量。整體而言，NDVI 與各因子並無適用的直線迴歸關係。依地形組構因子之高低，以聚集分析法合理分層；依次遞除高地形變異的聚集組的像元，建器材積迴歸式。當高地形變異像元逐次減除時，可逐次提高迴歸式的 R²。其中不加入樹冠鬱閉度的 R² 可提昇至 0.66，提昇了 15%，加入樹冠鬱閉度的 R² 可達 0.81，提昇了 14% (如 Table 8)。由各分層之最佳迴歸式之材積推估結果，以造林地號為單元之配對 t – test 差異檢定，各層之間差異多為顯著差異。此一現象顯示，地形變異足以影響適用迴歸式的建立；當地形變異減少時，迴歸式的可用性隨之提高。相對於 NDVI 的推估，各層差異並不顯著，減少地形變異並無法提高迴歸判定係數，NDVI 與各變數並無直線迴歸的關係。

本研究採用的分析程序旨在求得最適的材積推估式。依減少地形變異可提高迴歸判定係數之前提下，選取地形變異少之分層。首先以多變異逐步迴歸分析法，按變數的重要性逐步選取具影響力的變數，再考慮樹冠鬱閉度資

訊較不容易取得；故另外求取不加入樹冠鬱閉度的最適迴歸式。經此原則求得之最適迴歸式如第(3)和第(4)式。其中加入樹冠鬱閉度之第(3)式，解釋材積變異可達 80%，以造林地號之配對 t-test 檢定結果，差異為 0.69 個材積級，在 1 個材積級範圍內，尚稱可用；此時的重要影響變數依次是樹冠鬱閉度、溫度指數、林齡及 NDVI。缺少樹冠鬱閉度之第(3)式，解釋材積變異可達 65%，以造林地號之配對 t-test 檢定結果，差異在 1 個材積級，勉強可用。在上述兩式中 NDVI 被選為有效變數，顯見 NDVI 對台灣杉材積之推估，於地形變異減小時才顯效力。如同第四節分析程序所得之 NDVI 最適迴歸式第(5)式，其配對 t-test 檢定結果差異雖很小，但各選入變數在組成之迴歸式的斜率很小，其能解釋的 NDVI 變異只有 26%，直線迴歸並不足取。

研究使用的台灣杉造林地之造林地號材積及樹冠鬱閉度係一平均值，受限於地理資訊的空間解析度。採用之 4 個林地生育地因子則與地形及位置分佈有關，各以 20 m x 20 m 大小之網格式數值地形資料推導，NDVI 的空間解析度亦為 20 m x 20 m，統計觀測值之取樣乃依此大小之網格進行取樣。同時在 SPOT NDVI 之地形效益無法完全去除之前提下，即進行迴歸分析，是本研究美中不足之處。這也是整合地理資訊與遙測資料應用時，經常碰到的難處。

研究使用台灣杉人工林分為單元，如要進行迴歸式可以林分為單元的平均值進行 12 個觀測值其所得結果在本研究中其推估成效並不彰。故採用以像元為取樣對象。透過地形組構因子的分層過濾逐步找到地形平坦的像元。進行迴歸分析。

結論

本研究以台灣杉人工造林地 SPOT 影像常態化差異植生指數，及由數值地形資料推算之溫度指數、相對水分梯度、全天空光域、全年平均直射光空域，以及台灣杉人工造林地之地理資訊的林齡和樹冠鬱閉度，當作自變數，材積當作應變數。以多變值逐步回歸分析，配合地

形組構因子的合理分層方法，進行材積推估模式的建立與分析。研究結果顯示，全區材積推估模式受到地形效應的影響，加入樹冠鬱閉度之最佳迴歸式，對材積變異的解釋只達 68%，而依地形組構因子之合理分層，以減少地形變異，可提高材積推估的百分比達 80%。經逐步迴歸分析選取的變數，按其影響程度大小排序，依序為樹冠鬱閉度、溫度指數、林齡及 NDVI，其中樹冠鬱閉度及林齡來自地理資訊，溫度指數來自數值地形的推導，NDVI 綠度值來自 SPOT 衛星影像的波段組合，整合了 3 種資料來源的資訊。如考慮樹冠鬱閉度取得不易之情況下，可選定只由林齡、溫度指數、相對水分指數及 NDVI 組成之最適台灣杉材積推估模式，其對材積變異的解釋達 65%。NDVI 在地形變異減小時，才被選為最適台灣杉材積推估式之影響變數，故 NDVI 仍受地形之影響。而 NDVI 與上述自變數之間並無明顯的直線迴歸關係。

謝誌

本研究承蒙行政院農業委員會 86 - 遙測 - 02 - 002 研究計畫補助經費，林務局提供地理資訊資料，中央大學遙測中心提供 SPOT 衛星影像及數值地形資料，得以順利完成，在此一併致謝。

引用文獻

- Ahern, F. J. 1991.** A quantitative relationship between forest growth rates and Thematic Mapper reflectance measurements. *Int. J. Remote Sensing* 12(3): 387 - 400.
- Butera, M. K. 1986.** A correlation and regression analysis of percent canopy closure versus TM spectral response for selected forest sites in the San Juan National Forest, Colorado. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing* 24(1): 122 - 129.
- Burgan, R. E., and R. A. Hartford. 1993.** Monitoring vegetation greenness with satellite data. *USDA Forest Service Intermountain*

Research Station General Technical Report INT - 297. 32 pp.

Chen, C. J. 1997. Status and development of nature resources satellite receiving station. The conference paper of applying photogrammetry, remote sensing and geographic information on forest resources management. Pages 17 - 25, Forest Photogrammetric Engineering Lab, Nat. Taiwan Univ., January 10, 1987, Se-lian Hall, Nat. Taiwan Univ. 445 pp. [in Chinese].

Chen, L. C., G. M. Huang, J. S. Lin, and C. R. Chiou. 1997. Growing stock and growth estimation of *Taiwania* plantations in the Liukuei area. *Taiwan J. For. Sci.* 12(3): 319 - 327. [in Chinese with English summary].

Cheng, C. C., and J. F. Jan. 1996. Application of SPOT data for monitoring plantations. *Taiwan J. For. Sci.* 11(3): 323 - 332. [in Chinese with English summary].

Cheng, C. C., C. R. Chiou, and Y. Chen. 1997. Applying a remote sensing method for estimating leaf area index of *Taiwania* plantations. *Taiwan J. For. Sci.* 12(3): 309 - 317. [in Chinese with English summary].

Chiao, K. M. 1997. Applying vegetation index on tree estimation. The conference paper of applying photogrammetry, remote sensing and geographic information on forest resources management. Pages 1 - 16, Forest Photogrammetric Engineering Lab, National Taiwan Univ., January 10, 1997, Se-lian Hall, Nat. Taiwan Univ. 445 pp. [in Chinese].

Chiao, K. M., and C. L. Cauo. 1992. A study on using spectral reflectance to estimate crown closure. *Quart. J. Exp. For. Nat. Taiwan Univ.* 6(4): 149 - 176. [in Chinese with English abstract].

Chung, Y. L. 1996. Studies on the application of geographic information system and remotely sensed data on vegetation ecosystem change detection - An illustration of Wutoushan Nature Reserve. Ph.D. Thesis, Graduate Institute of Forestry, Nat. Taiwan Univ. 204 pp. [in Chinese].

Doizer, J. 1990. Rapid calculation of terrain

parameters for radiation modeling for digital elevation data. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing* 28 (2): 963 - 969.

Hsieh, H. C. 1996. Applying SPOT imagery and geographic information in greenness analysis on forest land-use. *Taiwan J. For. Sci.* 11(1): 77 - 86. [in Chinese with English summary].

Hsieh, H. C. 1997. Applying a digital terrain model to derive forest habitat factors - A geographic information system approach. *Taiwan J. For. Sci.* 12(1): 1 - 14. [in Chinese with English summary].

Hsieh, H. C., 1992. Studies on the application of MSS data in the stand crown closure and volume estimate of *Cryptomeria*. Ph.D. Thesis, Graduate Institute of Forestry, National Taiwan Univ. 166 pp. [in Chinese with English summary].

Hsieh, H. C. and C. C. Cheng. 1995. An analysis of vegetation greenness of Fu-shan with SPOT XS multitemporal data. *Bull. Taiwan For. Res. Inst.* 10 (1): 105 - 120.

Howard, J. A. 1991. Remote sensing of forest resources - Theory and application. Chapman and Hall, New York. 416 pp.

Liaw, J. W. 1997. Application of GIS on the selection of *Taiwania* plantation. Master's Thesis, Graduate Institute of Forestry, Nat. Taiwan Univ. 74 pp. [in Chinese].

Niemann, K. O. 1995. Remote sensing of forest stand age using airborne spectrometer data. *Photogram. Engineering Remote Sensing* LXI(9): 1119 - 1127.

Proy, C. D., and P. Y. Deschamps. 1989. Evaluation of topographic effects in remotely sensed data. *Remote Sensing Environ.* 30(1): 21 - 32.

Su, H. J. 1987. Forest habitat factors and their quantitative assessment. *Quart. J. Chinese For.* 20 (1): 1 - 14. [in Chinese with English abstract].

Taiwan Forest Bureau. 1995. The third forest resources and land inventory in Taiwan. 258 pp. [in Chinese].