

# 應用遙測方法估測台灣杉林分之葉面積指數\*

鄭祈全<sup>1,3)</sup> 邱祈榮<sup>2)</sup> 陳燕章<sup>2)</sup>

## 摘 要

本研究旨在探討應用衛星遙測資料估測六龜台灣杉人工林葉面積指數之可行性。採用樹冠透光法，於地面估算其葉面積指數。衛星遙測資料方面，採用二期SPOT衛星影像資料依去除外在效應之有無與超圓方向餘弦轉換等共分七種處理組合，探討NDVI與NIR/R值與葉面積指數之關係。結果顯示SPOT衛星影像資料若僅使用原始輻射值仍嫌不足，有必要去除外在效應，方可得到與LAI較佳之相關關係。而夏天影像受路徑輻射影響較大，於去除路徑輻射後，其NDVI推估LAI之迴歸式為： $LAI = -24.17 + 33.81 NDVI$  ( $R^2 = 0.71$ )。冬天影像則以地形漫射效應影響較大，經HSDC轉換去除該效應後，其NDVI推估LAI之迴歸式為： $LAI = -11.48 + 28.07 NDVI$  ( $R^2 = 0.44$ )。上式中，NDVI推估冬天LAI值效果有限，若欲應用冬天影像估測冬天LAI，其影響之真正機制仍待進一步研究。

關鍵詞：樹冠透光法、葉面積指數、路徑輻射、天空光效應、地形效應。

鄭祈全、邱祈榮、陳燕章 1997 應用遙測方法估測台灣杉林分之葉面積指數。台灣林業科學 12(3) : 309-317。

## Applying a Remote Sensing Method for Estimating Leaf Area Index of Taiwania Plantations

Chi-Chuan Cheng,<sup>1,3)</sup> Chyi-Rong Chiou<sup>2)</sup> and Yen-Chang Chen<sup>2)</sup>

### 【 Summary 】

The purpose of this study is to apply a remote sensing method for estimating the Leaf Area Index, LAI, of Taiwania plantations in the Lukuei area. Based on the canopy transmittance method, LAI was derived from the Beer-Lambert Law with an assumed light extinction coefficient of 0.52. Two SPOT images were used to estimate LAI of Taiwania plantations with the remote sensing method. Based on the consideration of path radiation, sky light, and topographic effects, 7 treatments were compared in this study. Both normalized difference vegetation index (NDVI) and near infrared/red (NIR/R) were utilized to estimate LAI. The results indicate that the removal of the external effects was necessary for estimating LAI. There was a high correlation between NDVI and LAI when the path radiation was removed from the original radiation in the summer image. The regression for using NDVI to estimate LAI is as follows:  $LAI = -24.17 + 33.81 NDVI$  ( $R^2 = 0.71$ ). The topographic effect is the main factor in the winter image. Therefore, the NDVI calculated by hyperspherical direction cosine transformation (HSDC) had the highest correlation with LAI. The regression equation is:  $LAI = -11.48 + 28.07 NDVI$  ( $R^2 = 0.44$ ). Because the correlation between NDVI and LAI was low, further studies need to be done in the future in order to understand the main effect of estimating LAI in the winter image.

1) 台灣省林業試驗所副所長室，台北市南海路 53 號 Deputy Director, Taiwan Forestry Research Institute. 53 Nan-Hai Rd., Taipei, Taiwan, ROC.

2) 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 Nan-Hai Rd., Taipei, Taiwan, ROC.

3) 通訊作者 Corresponding author

1997 年 1 月送審 1997 年 4 月通過 Received January 1997, Accepted April 1997.

\* 本研究承國科會專題研究計畫(NSC85-2321-B-054-003)經費補助，特予致謝。

**Key words:** canopy transmittance method, leaf area index, path radiation, sky light effect, topographic effect.

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

## 一、緒言

植物葉量最常用的表示方法為葉面積指數(Leaf Area Index, LAI)，即每單位土地面積上之葉片投影面積(projected area)。植物之進行呼吸作用、光合作用與蒸發散作用，以及對太陽光能量之截留，均取決且受限於葉部面積之多寡(Gholz *et al.*, 1976; Jarvis and Leverenz, 1983)。葉面積指數與生育地之水分收支平衡(Grier and Running, 1977; Gholz, 1982)、淨初級生產量(Gholz, 1982)、幹材生長(Schroeder *et al.*, 1982)以及材積生長(McLeod and Running, 1988)等均極具相關。因此，精確地量測葉面積指數於研究森林生態系之碳、水分及陽光能量流轉等課題中，的確居於關鍵性之地位。

估測葉面積指數的方法頗多。直接收穫法雖最準確，但卻耗時費力，且屬破壞性取樣，無法於森林中廣泛執行。Marshall and Waring (1986)發現枯枝落葉法、邊材面積與葉面積關係式法及樹冠透光法均能精確估測林分之葉面積指數。然而，對常綠樹種而言，枯枝落葉法必須假設林分葉面積已達動態平衡，且必須測定極易變動的葉片更換率(turnover rate)。邊材面積與葉面積指數關係式法則受地理位置及林分密度不同之影響而無法廣泛應用。Lang(1987)及Burton等人(1991)發現樹冠透光法為估測葉面積指數極佳且極為實用之替代方法。

此外，亦有人嘗試利用遙測的方法來估測林分的LAI，並獲致相當不錯的結果(Running *et al.*, 1986; Peterson *et al.*, 1987; Herwitz *et al.*, 1990; Spanner *et al.*, 1990a; Spanner *et al.*, 1990b; Smith *et al.*, 1991; Lathrop and Pierce, 1991; Curran *et al.*, 1992)。遙測方法成像的原理，即在於利用電磁波感測物體時所反射的能量加以記錄成像。由於各物體對於不同波長的反射情形各不相同，因此可利用此一特性來檢測所感興趣物體的性狀值。因此，本研究係用樹冠透光法估測台灣杉林分之葉面積指數，探討應用遙測方法估測葉面積指數之可能性。

## 二、材料與方法

### (一)地面樣區與設置與調查

於地面樣區設置規劃方面，由於本研究使用到衛星遙測的資料，而冬天衛星遙測資料因太陽高度角偏低，加上試區內地形起伏甚大，致使冬天影像中完全遮陰區(即因地形遮蔽效應使太陽直射光完全無法到達)相當多。根據以往山區影像分析的經驗，完全遮陰區內的影像資料可利用度相當低(謝漢欽, 1992)。所以，本研究為求資料分析之單純化，決定將其剔除，暫不考慮完全遮陰區。於實際規劃作業上，除剔除完全遮陰區外，尚考慮坡度與林道等因素。選出位於六龜試驗林內(1)鳳崗山第3林班1973年建造、(2)1980年建造及(3)多納第20林班1985年建造之台灣杉人工林造林地，並依現場實際情況，做必要之調整以設置地面樣區。因各造林地地形面積之限制，分別於(1)(2)(3)造林地中設置4個、3個、及2個40 m x 40 m之正方形地面樣區。

本研究先後於1995年12月(乾季)及1996年8月(雨季)，對各樣區進行地面調查，調查其葉面積指數。本研究係用樹冠透光法估測台灣杉林分之葉面積指數，樹冠透光法係以植物蒸散率分析儀(porometer)配合光量子光度計(quantum sensor, LI-190SB)，於晴朗無雲之日上午10時至下午14時之間，在樣區內每隔10公尺設一樣點，每一樣點上，水平手持光度計每隔90度測一光度，計4個光度。合計每一樣區共測4 x 16=64個光度，取其平均值做為林內光度(Q<sub>i</sub>)。林外全光度(Q<sub>o</sub>)則於測定林內光度之同時，以另一組儀器於開闢空曠地(鳳崗山苗圃及多納林道)測定之。最後將校正後之林內、林外光度導入Beer-Lambert定律，用以推估林分葉面積指數(LAI)。

Beer-Lambert定律： $LAI = [-\ln(Q_i/Q_o)]/k$

其中ln為自然對數。Q<sub>i</sub>/Q<sub>o</sub>為樹冠透光率或孔隙率(gap fraction)。k則為消光係數(light extinction coefficient)，本研究以Jarvis 和Leverenz (1983)所發表針葉樹k值(0.40~0.65)之中間值0.52為基準，用以推估各林分之LAI。此消光係數(0.52)已獲Pierce 和Running (1988)證實適用於各種林分構造之針葉林。

### (二) SPOT 衛星影像基本資料

國外類似研究所用之衛星影像大都為美國大地衛星(Landsat TM)的資料，但由於Landsat衛星自1984年發射至今已逾十個年頭，其軌道參數及感測器參數可靠性不足，加上衛星本身無法側視之限制與臺灣地區受雲之影響甚鉅，致使獲得臺灣地區良好無雲之Landsat TM資料之機率相當低。相對的，因法國SPOT衛星影像可側視，大大提高其偵測臺灣地區之次數，使得臺灣地區較易獲得良好無雲之SPOT衛星影像資料，故本研究乃以法國SPOT衛星影像為主。

SPOT衛星影像資料因天候及雲覆蓋之影響，僅有1996年1月1日及1996年6月5日兩期影像可供使用。因此共計有二期SPOT衛星影像資料進行分析，其基本參數資料，如Table 1所列。

(三) SPOT 衛星影像資料處理

由於衛星感測器所接收之輻射成份主要包括有下列四部份(謝漢欽, 1992): 直接太陽反射輻射、路徑輻射、天空漫射輻射反射及鄰近地形散射輻射。而我們真正有興趣的是在於物體的直接太陽反射輻射，因此對於其他部份應予去除，以免造成資料分析上的誤差。但因每個時期的各方面(如大氣、地面等)狀況均不相同，造成非感興趣的輻射量組成不同，效應亦大小不一。因此本研究特針對各種不同情況予以分離，以便於分別探討各種不同效應對衛星影像資料與葉面積指數關係之影響。

1. 輻射值之轉算

由中央大學太空及遙測研究中心所購買之SPOT衛星影像資料，係經配合數值地形模型(Digital Terrain Model, DTM)完成幾何糾正之LEVEL 10的產品，可直接與其他地理資訊套合使用。為配合數位影像處理，感測器於感測之際，利用感測器內自動記錄之絕對校正參數，將反射輻射值轉成介於0-255的數位(Digital Number, DN)值。因此，我們可利用其影像所附之絕對校正參數(如Table 1所列)，將影像資料所記錄之DN值轉成輻射值。對SPOT影像資料而言，其轉換公式非常

簡單，直接以DN值除絕對校正參數即得。就輻射值計算結果而言，其結果為實數(real number)。應以實數方式予以儲存，否則將喪失其精度。

2. 路徑輻射之計算

計算路徑輻射之原理及方法相當多，本研究採用謝漢欽(1992)所發展之方法，其演算步驟如下：

- (1) 觀察綠光或紅光段原始DN值直方圖(histogram)，選取綠光或紅光段做為起始計算波段。
- (2) 由上述所選的起始計算波段原始DN值直方圖，選擇累積超過1%之DN值，做為暗區像元值。並轉算成暗區輻射值。
- (3) 依據影像日期的天氣狀況，選定散射效應與波長的適當關係，再據以計算出各波段之平均波長的散射效應。
- (4) 計算各波段路徑輻射

因於計算各波段路徑輻射時，係採用相對之比例關係，故需依前述各波段平均波長的散射效應計算起始計算波段以外的波段之相對乘積因子。於得到各波段相對乘積因子之後，再與起始計算波段之暗區輻射值相乘即得各波段之路徑輻射值。

3. 天空漫射光效應

因完全遮陰區(cast-shadowed area)的輻射值，如不考慮鄰近地形散射輻射之影響，則應全部是由天空漫射光效應所提供。故可由完全遮陰區的輻射值，反向推求天空漫射光效應之多寡。於實際計算上，先利用數值地形資料，依不同時期之影像日期的太陽參數(太陽入射角及太陽入射高度角)，計算出完全遮陰區的區域。再計算所有位於完全遮陰區內所有像元的平均輻射值，做為無遮蔽情況下，天空漫射光效應的輻射值。再由數值地形資料計算各像元的天空光入射比例因子(sky-view factor)，其計算及方法可參照謝漢欽一文(1992)。最後，以無遮蔽天空漫射光效應輻射值乘以各像元的天空光入射比例因子，即得各像元之

Table 1. Basic parameters of 2 SPOT images

Date	Incidence	Azimuth	Elevation	Absolute calibration coefficient		
				Green	Red	NIR
1 Jan. 1996	27.5464	161.6191	41.7980	0.9911	1.3297	1.1656
5 Jun. 1996	27.5484	89.0920	77.0868	1.6569	1.3260	1.1639

天空漫射光效應輻射值。

#### 4. 地形效應之修正

於地形效應之修正上有許多種不同方式，大都需利用數值地形資料來進行修正 (Chiou *et al.*, 1992)，也有少數不需利用數值地形資料者，如比例法及超圓方向餘弦轉換法 (Hyperspherical Direction Cosine Transformation, HSDC)。其中 HSDC 轉換法之優點乃在於轉換後仍保有該向量的特性並可除去地形及多期影像之不同入射時間的影響，適於多期影像之常態化處理 (謝漢欽, 1992)。有關 HSDC 轉換法原理的詳細說明，可參考謝漢欽於 1992 年一文。本研究即以 HSDC 轉換來去除地形效應。在使用 HSDC 轉換時，應注意其『各波段有同等大小之值域』之假設前提，於必要時，應對原始 DN 值或輻射值做線性轉換，以符合其假設。

#### 5. SPOT 衛星影像資料處理組合

由於前人的研究中均強調應用衛星影像資料尋求葉面積指數時，應去除影像中如前述的各種不同效應影響。如 Spanner 等人於 1990 一文中，強調去除路徑輻射之必要性 (Spanner *et al.*, 1990)；Peterson 等人於 1987 一文中，則考慮路徑輻射及地形效應修正 (Peterson *et al.*, 1987)。為詳細探討 SPOT 衛星影像資料與葉面積指數之關係，本研究乃根據各種效應之修正與否，共分成 7 種不同的資

料處理組合，做為分析探討之依據。其 7 種處理組合如 Table 2 所列。

應用 HSDC 轉換因需於不同波段上，具有相同大小之值域範圍，故以各波段最大及最小值行線性轉換，對單一像元而言，因轉算輻射值及去除路徑輻射值與天空光效應輻射值，在線性轉換上而言，仍具有相同之資料特性，並無任何差異。而在實際計算之結果亦證實毫無差異。故在 HSDC 轉換部份，僅列出以原始 DN 值行 HSDC 轉換 (處理 G)。

因綠色植物具吸收紅光而反射近紅外光的特性，所以大部份應用遙測方法推估 LAI 的研究中，均用到此二波段，且獲致不錯效果。其中最常使用的有 NDVI (normalized difference vegetation index, NDVI) 與 NIR/R (近紅外光對紅光之比值)。NDVI 值係衛星遙測資料中常被用來評估地面植生狀況 (謝漢欽、鄭祈全, 1995)，亦曾被用以評估 LAI (Curran *et al.*, 1992; Spanner *et al.*, 1990)，均獲得不錯之結果。同樣的，NIR/R 亦曾被用來推估 LAI，且證實具最佳結果 (Peterson *et al.*, 1987)。因此，本研究利用上述 7 種資料處理組合之影像數值據以計算 NDVI 與 NIR/R 值，並將之與葉面積指數資料進行簡單直線迴歸分析，探討其彼此間之關係，以期找出影響最大之修正效應，並比較推估 LAI 時，NDVI 與 NIR/R 何者較佳。

**Table 2. List of 7 treatments**

Treatment	Description
A	Original DN value
B	Original radiation (units : $Wm^{-2}sr^{-1}$ )
C	Remove path radiation from original radiation
D	Remove DN value of cast-shadowed area from original DN value
E	Remove sky light radiation from original radiation
F	Remove both path radiation and sky light radiation from original radiation
G	HSDC transformation

**Table 3. Results of LAI by canopy transmittance method**

Plot	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Dec. 1995	6.97	9.11	6.89	6.13	4.74	5.40	6.55	2.97	4.12
Aug. 1996	7.47	9.50	7.69	6.64	6.17	5.89	6.91	4.34	4.44

**三、結果與討論**

- (一)二次地面調查之葉面積指數結果列如 Table 3。
- (二)七種處理 NDVI、NIR/R 值之結果與 LAI 相關分析。

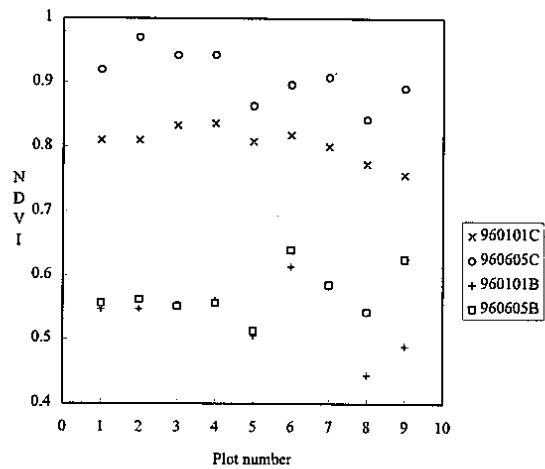
Table 2中所列的七種處理組合，分別計算出各樣區NDVI與NIR/R值，列於Table 4，並與各樣區葉面積指數測定值進行簡單直線迴歸分析，其結果列於Table 5（表中處理組合代號如Table 2所列）。

比較Table 5中之NDVI、NIR/R對LAI之相關關係，可以發現除少數處理組合外，NDVI在推估LAI的整體表現較NIR/R為佳。因此以下的各項討論將以NDVI部份為主，必要時方將NIR/R部份列入討論。

從Table 5可發現處理A與處理B之結果相差不多，這可由Table 1獲得部份解釋。從Table 1得知二期影像的紅光段與紅外光段的絕對校正係數，相差相當有限，造成當利用原始DN值及其轉算輻射值推算NDVI或NIR/R時，彼此間差異亦不大，致使處理A與處理B之具有類似的結果。此外，亦可看出冬天影像(960101)的處理A與處理B之NDVI與LAI有較高之相關關係( $R^2$ 較高)，夏天影像(960605)於處理A與處理B之NDVI與LAI則相關情形極差。在NIR/R部份亦有相同的情形。

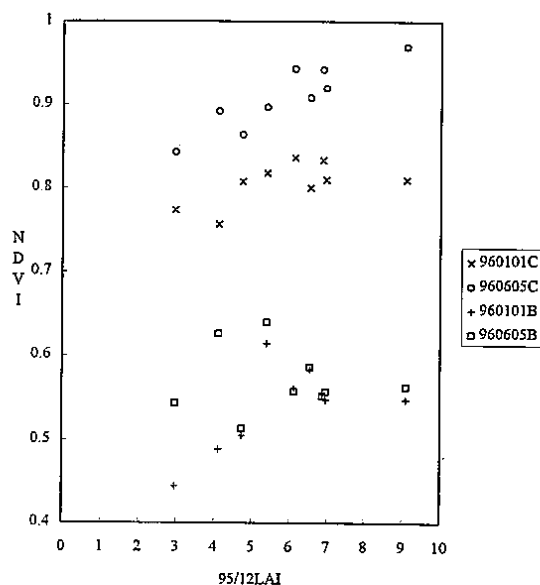
就路徑輻射效應而言，如前所述，夏天的影像具有較高之路徑輻射值。而由Table 5中可以得知，夏天影像於去除路徑輻射值後，其NDVI值與LAI具有極高之相關情形，相反的，冬天影像則無明顯增加NDVI值與LAI值之相關。若比較路徑輻射效應校正前後(處理B及C)各樣區的NDVI值(Fig.1)，即可有助於對此一現象之瞭解。

由Fig.1可以發現，9個樣區由各期影像原始輻射值(處理B)所推算之NDVI值之分佈來看，雖然整體而言，夏天影像之NDVI值較冬天影像之NDVI值為高，但於樣區3與4出現冬天影像NDVI值較高之現象。理論上而言，夏天時，因植物生長旺盛，光合作用強，其影像應具較高NDVI值，Spanner等人曾用AVHRR



**Fig. 1. Relationship between treatments B and C.**

資料研究NDVI的季節變化，證實夏天的NDVI值確實較冬季者高(Spanner *et al.*, 1990)。反觀去除路徑輻射值(處理C)所計算之NDVI值，於各樣區中，夏天影像均明顯的具較高的NDVI值，且與冬天影像亦能有所區別。由此不難看出去除路徑輻射值確實有助於釐清計算NDVI值時的干擾。Fig.2與Fig.3雖屬不同季節的LAI資料，但960605及960101影像均在去除路徑輻射後，其NDVI值與LAI值更具相關性。另由Fig.2與Fig.3亦可明確看出，去除路徑輻射值後，二期影像之NDVI值更能區分開來，形成960101的NDVI值較低，960605的NDVI值較高，即隨著時間而增高NDVI值的現象，此亦符合植物生長的自然現象。



**Fig. 2. Relationship between treatments B and C, and LAI (Dec. 1995).**

Table 4. Results of NDVI and NIR/R of 7 treatments

Date	Value	Plot	Treatment						
			A	B	C	D	E	F	G
960101	NDVI	1	0.5000	0.5478	0.8106	0.8252	0.8118	1.4718	0.6275
		2	0.5000	0.5478	0.8106	0.8252	0.8250	1.5127	0.6275
		3	0.5068	0.5541	0.8336	0.8596	0.8567	1.6493	0.6508
		4	0.5135	0.5604	0.8367	0.8628	0.8543	1.6061	0.6564
		5	0.4545	0.5052	0.8080	0.8323	0.8053	1.7845	0.6051
		6	0.5714	0.6141	0.8185	0.8229	0.8133	1.1881	0.6639
		7	0.5385	0.5836	0.8005	0.8026	0.7876	1.2069	0.6343
		8	0.3898	0.4442	0.7733	0.7917	0.7704	2.2900	0.5458
		9	0.4366	0.4884	0.7566	0.7550	0.7340	1.4500	0.5535
	NIR/R	1	3.0000	3.4224	9.5600	10.4436	9.6251	-5.2391	4.3697
		2	3.0000	3.4224	9.5600	10.4436	10.4285	-4.9013	4.3697
		3	3.0556	3.4858	11.0157	13.2452	12.9588	-4.0802	4.7269
		4	3.1111	3.5492	11.2439	13.5770	12.7244	-4.2996	4.8214
		5	2.6667	3.0421	9.4186	10.9226	9.2722	-3.5495	4.0651
		6	3.6667	4.1830	10.0220	10.2961	9.7096	-11.6301	4.9503
		7	3.3333	3.8027	9.0238	9.1321	8.4183	-10.6687	4.4691
		8	2.2778	2.5985	7.8214	8.6001	7.7116	-2.5504	3.4034
		9	2.5500	2.9091	7.2165	7.1640	6.5201	-5.4444	3.4790
960605	NDVI	1	0.5102	0.5568	0.9199	0.9611	0.8396	-3.7451	0.8427
		2	0.5165	0.5627	0.9702	1.3473	1.0877	-1.3646	0.8736
		3	0.5054	0.5523	0.9423	1.1160	0.9770	-1.4861	0.8532
		4	0.5106	0.5572	0.9433	1.1068	0.9509	-1.8169	0.8559
		5	0.4639	0.5135	0.8640	0.7030	0.6586	-2.8110	0.7914
		6	0.6000	0.6401	0.8971	0.8761	0.8386	1.8611	0.8627
		7	0.5413	0.5857	0.9084	0.9042	0.8088	5.3748	0.8488
		8	0.4955	0.5431	0.8430	0.7083	0.6996	6.4652	0.7948
		9	0.5846	0.6259	0.8919	0.8634	0.8204	1.9902	0.8548
	NIR/R	1	3.0833	3.5127	23.9737	50.3804	11.4679	-0.5785	11.7183
		2	3.1364	3.5731	66.2249	-6.7595	-23.7965	-0.1542	14.8282
		3	3.0435	3.4673	33.6821	-18.2398	85.9477	-0.1955	12.6197
		4	3.0870	3.5168	34.2517	-19.7193	39.7731	-0.2900	12.8826
		5	2.7308	3.1110	13.7007	5.7348	4.8583	-0.4752	8.5884
		6	4.0000	4.5570	18.4426	15.1404	11.3914	-3.3227	13.5662
		7	3.3600	3.8279	20.8284	19.8839	9.4598	-1.4572	12.2254
		8	2.9643	3.3771	11.7392	5.8575	5.6578	-1.3660	8.7478
		9	3.8148	4.3460	17.4932	13.6363	10.1377	-3.0198	12.7775

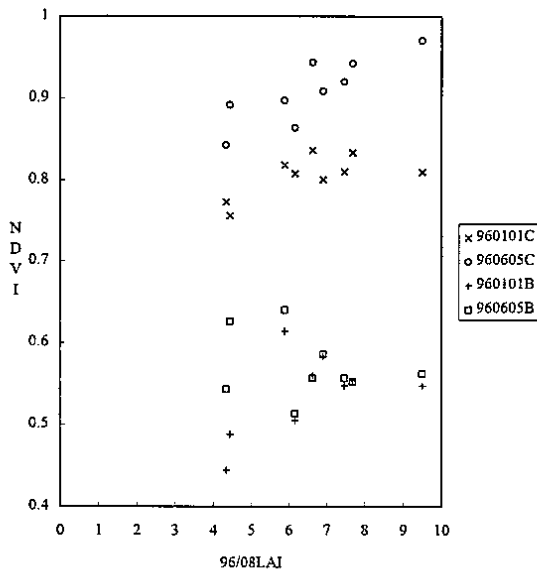


Fig. 3. Relationship between treatments B and C, and LAI (Aug. 1996).

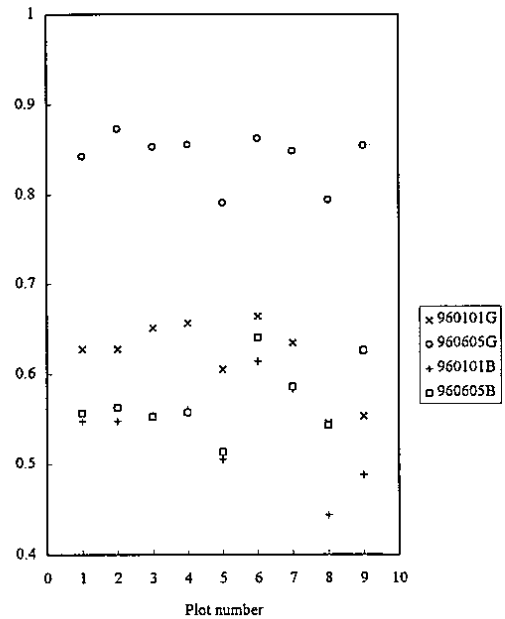


Fig. 4. Relationship between treatments B and G.

**Table 5. Coefficient of determination between NDVI and NIR/R, and LAI**

Date	Treatment	NDVI vs. 95/12 LAI	NIR/R vs. 95/12 LAI	NDVI vs. 96/08 LAI	NIR/R vs. 96/08 LAI
960101	A	0.3715	0.2905	0.2729	0.2026
	B	0.3740	0.2905	0.2751	0.2026
	C	0.3560	0.3122	0.4162	0.3573
	D	0.2518	0.2023	0.3511	0.2742
	E	0.3764	0.3160	0.4635*	0.3760
	F	0.2485	0.0268	0.1170	0.0012
	G	0.4398	0.3868	0.4091	0.3511
960605	A	0.0044	0.0121	0.0659	0.0856
	B	0.0042	0.0121	0.0654	0.0856
	C	0.8273**	0.7323**	0.7092**	0.7142**
	D	0.7735**	0.0102	0.6896*	0.0246
	E	0.6702*	0.0002	0.5631*	0.0000
	F	0.2607	0.2628	0.3096	0.4172
	G	0.4580*	0.4888	0.2648	0.3016

<sup>1)</sup> 5% significance level ;

<sup>2)</sup> 1% significance level.

就天空光效應而言，處理D與處理E亦存有與處理C類似的情形，即與處理A、B相較，於夏季影像似可有效提高NDVI與LAI之相關(Table 5)。然而，檢查處理D與E之NDVI值時，發現部份樣區於夏天影像其NDVI值大於1或出現負值。此種現象表示於天空光效應修正時，因過度修正，造成紅光段或紅外光段的DN值或輻射值小於0所致。同樣的，當路徑輻射與天空光效應同時去除時(處理F)，其過度修正之現象更為明顯，導致降低NDVI與LAI之相關性。

就HSDC轉換效果而言，經轉換後，亦能將二期影像的NDVI值區分(Fig.4)。從Fig.4得知，不論夏天或冬天影像，HSDC轉換之NDVI與LAI之相關性均較原始輻射值為佳(Table 5)，尤其於冬天影像之NDVI與LAI具最高之相關性(R<sup>2</sup> = 0.44)。至於夏天影像，HSDC轉換之表現則不若去除路徑輻射或天空光效應那樣有效。

總結上述三種效應修正結果而論，利用原始DN值或輻射值所計算之NDVI值於夏天影像與LAI有較佳之相關性。而去除路徑輻射效應，能提高NDVI對LAI之相關性，此種相關性於夏天影像最為明顯。至於天空光效應之去除，對夏天影像或有過度修正之虞，冬天影像則尚可。HSDC轉換均能提高NDVI與LAI之相關性。

此外，於夏天臺灣杉人工林分LAI的估測，由Table 5中得知使用NDVI或NIR/R來推估LAI時，兩者之相關情形極為接近。其推算式分別如下：

$$LAI = -24.17 + 33.81 NDVI \quad (R^2 = 0.7092)$$

$$LAI = 4.39 + 0.08135 (NIR/R) \quad (R^2 = 0.7142)$$

於NDVI部份，與Curran等人於1988至1989年間利用三次Landsat資料在美國Florida對slash pine LAI所做的研究比較(Curran *et al.*, 1992)，發現對於夏季情況，其迴歸直線之斜率為33.99，與本研究結果極為接近。另外，亦與Spanner等人於1990文中所強調去除路徑輻射之必要性相吻合(Spanner *et al.*, 1990)。於NIR/R部份，因其整體表現不如NDVI穩定(見Table 5)，且其值域範圍極大(見Table 4)，顯示NIR/R之計算受輻射值變動影響劇烈。雖其與LAI之相關性較高，但建議暫不採行，仍應再深入探討，以確定其功效。

至於冬天臺灣杉人工林分LAI的估測工作，因冬天影像NDVI值與LAI相關性均非很高，最高者為經HSDC轉換之NDVI值與LAI之相關性(R<sup>2</sup>僅0.44)。其迴歸式如下：

$$LAI = -11.48 + 28.07 NDVI \quad (R^2 = 0.44)$$

由於R<sup>2</sup>值並不高，這代表對於影響冬天影像的主要機制仍尚未掌握，此一部份工作仍有待日後進一步探討。

#### 四、結論

由二期SPOT衛星影像資料與葉面積指數關係分析，可獲致下列結論：

(-) SPOT 衛星影像資料僅使用原始輻射值仍嫌不

- 足，有必要去除外在效應，方可得到與 LAI 較佳之相關關係。
- (二) 夏天影像受路徑輻射影響明顯，而冬天影像所受之外在效應並不明顯。依結果判斷，冬天影像受地形漫射效應影響較大，唯其確實性仍有待進一步研究證實。
- (三) HSDC 轉換對增進 NDVI 與 LAI 之相關性有所幫助，尤其在冬天影像效果最為顯著。
- (四) 夏天影像於去除路徑輻射後，其 NDVI 或 NIR/R 值均與 LAI 呈現極高的相關關係。
- (五) 於推估 LAI 整體表現上，NDVI 較佳，且值域範圍小，受輻射值變動影響較小。
- (六) 夏天影像於去除路徑輻射後，其 NDVI 推估 LAI 之迴歸式為：
- $$\text{LAI} = -24.17 + 33.81 \text{NDVI} \quad (R^2 = 0.71)$$
- (七) 冬天影像以 HSDC 轉換後，其 NDVI 推估 LAI 之迴歸式為：
- $$\text{LAI} = -11.48 + 28.07 \text{NDVI} \quad (R^2 = 0.44)$$
- 因其  $R^2$  不高且無統計顯著，因此於應用 NDVI 估測冬天 LAI，仍有待進一步探討其主要影響機制。

## 謝誌

本研究承行政院國家科學委員會之計畫 (NSC85-2321-B-054-003) 經費補助，謹此致謝。

## 引用文獻

- 謝漢欽 1992 多譜掃描資訊於柳杉林分樹冠鬱閉度及材積推估功效上之研究。國立台灣大學森林學系研究所博士論文。166 頁。
- 謝漢欽、鄭祈全 1995 福山地區 SPOT 多期影像植生綠度分析。林業試驗所研究報告季刊 10(1): 105-120。
- Burton, A. J., K. S. Pregitzer, and D. D. Reed. 1991. Leaf area and foliar biomass relationship in northern hardwood forests located along an 800 km acid deposition gradient. *For. Sci.* 37(4): 1041-1059.
- Chiou, C.R., V. L. Thomas, and R. M. Hoffer. 1992. Comparison of four techniques for topographic normalization of Landsat TM Data. Pages 184-196 in ASPRS/ACSM/RT 1992 Technical Papers, Vol. 4, Reno, NV.
- Curran, P. J., Dungan, J. L., and Gholz, H. L. 1992. Seasonal LAI in slash pine estimated with Landsat TM. *Remote Sensing Environ.* 39: 3-13.
- Gholz, H. L. 1982. Environmental limits on aboveground net primary production, leaf area, and biomass in vegetation zones of the Pacific Northwest. *Ecology* 63: 469-481.
- Gholz, H. L., F. K. Fitz, and R. H. Waring. 1976. Leaf area differences associated with old-growth forest communities in the western Oregon Cascades. *Can. J. For. Res.* 6: 49-57.
- Grier, C. C., and S. W. Running. 1977. Leaf area of mature northwestern coniferous forests: relation to site water balance. *Ecology* 58: 893-899.
- Herwitz, S. R., Peterson, D. L., and J. R. Eastman. 1990. Thematic Mapper detection of changes in the leaf area of closed canopy pine plantations in Central Massachusetts. *Remote Sensing Environ.* 29: 129-140.
- Jarvis, P. G., and J. W. Leverenz. 1983. Productivity of temperate deciduous and evergreen forest. Pages 223-280 in O. L. Lange, P. S. Nobel, C. B. Osmond, and H. Ziegler, eds. *Encyclopedia of plant physiology*, Vol. 12D. Springer-Verlag, New York.
- Lang, A. R. G. 1987. Simplified estimate of leaf area index from transmittance of the sun's beam. *Agric. For. Meteorol.* 41: 179-186.
- Lathrop, R. G., and L. L. Pierce. 1991. Ground-based canopy transmittance and satellite remotely sensed measurements for estimation of coniferous forest canopy structure. *Remote Sensing Environ.* 36: 179-188.
- Marshall, J. D., and R. H. Waring. 1986. Comparison of methods of estimating leaf area index in old-growth Douglas-fir. *Ecology* 67(4): 975-979.
- McLeod, S. D., and S. W. Running. 1988. Comparing site quality indices and productivity in Ponderosa pine stands of western Montana. *Can. J. For. Res.* 18: 346-352.
- Peterson, D. L., Spanner, M. A., Running, S. W., and K. B. Teuber. 1987. Relationship of Thematic



- Mapper simulator data to leaf area index of temperate coniferous forests. *Remote Sensing Environ.* 22: 323-341.
- Pierce, L. L., and S. W. Running.** 1988. Rapid estimation of coniferous forest leaf area index using a portable integrating radiometer. *Ecology* 69(6): 1762-1767.
- Running, S. W., Peterson, D. L., Spanner, M. A., and K. B. Teuber.** 1986. Remote sensing of coniferous forest leaf area. *Ecology* 67(1): 273-276.
- Schroeder, P. E., B. McCandlish, R. H. Waring, and D. A. Perry.** 1982. The relationship of maximum canopy leaf area to forest growth in eastern Washington. *Northwest Sci.* 56(2):121-129.
- Smith, N. J., Borstad, G. A., Hill, D. A., and R. C. Kerr.** 1991. Using high-resolution airborne spectral data to estimate forest leaf area and stand structure. *Can. J. For. Res.* 21: 1127-1132.
- Spanner, M. A., Pierce, L. L., Peterson, D. L., and S. W., Running.** 1990a. Remote sensing of temperate coniferous forest leaf area index - the influence of canopy closure, understory vegetation and background reflectance. *Int. J. Remote Sensing* 11(1): 95-111.
- Spanner, M. A., Pierce, L. L., Running S. W., and D. L. Peterson.** 1990b. The seasonality of AVHRR data of temperate coniferous forests: relationship with leaf area index. *Remote Sensing Environ.* 33: 97-112.