

研究報告

遙測技術應用於溪頭地區柳杉人工林之森林健康調查

羅時凡¹ 魏浚紘² 李崇誠³ 陳朝圳⁴

【摘要】衛星遙測之光譜資料，可大面積推估與森林健康有關之常態化植生指標 (Normalized Difference Vegetation Index, NDVI) 及葉面積指數 (Leaf Area Index, LAI)，為森林健康調查之重要資料。本文以前人研究所建立之林木健康指標調查表，進行溪頭地區柳杉人工林之地面健康調查，利用因素分析，建構柳杉人工林 4 種等級之森林健康度，調查資料經因素分析後，7 個林木健康指標萃取出 4 個因素，分別命名為樹冠活力指標、根部損傷指標、活冠層指標及林木競爭指標。利用遙測資料所計算之 NDVI 與地面調查之 LAI 資料，建立兩變數之關係模式，藉由關係模式，繪製溪頭地區之柳杉人工林 LAI 分布圖，並以森林健康度調查樣區之點位進行套疊，以驗證 NDVI、LAI 與森林健康度之關係，結果顯示 LAI 超過 3.00 以上時，柳杉人工林分之健康度有趨於劣化之趨勢，而 LAI 分布介於 2.51-3.00 範圍之間時，樣區林分屬於健康等級中之等級 2，唯因本次調查缺乏 LAI 值低於 2.00 之樣區，對於低 LAI 林分，其森林健康狀態，有進一步研究之必要。

【關鍵詞】健康指標、葉面積指數、常態化差異植生指標

Research paperForest Health Inventory by Remote Sensing Technology for the *Cryptomeria* Plantation Forest in Chitou AreaShin-Fan Luo¹ Chun-Hung Wei² Chung-Cheng Lee³ Chaur-Tzuhn Chen⁴

【Abstract】The spectral characteristics of satellite images can be used in large areas for estimating normalized difference vegetation index (NDVI) and leaf area index (LAI). The NDVI and LAI are important indices for grading forest healthy. This study therefore uses factor analysis to establish tree health indicators in order to assess and to classify the tree health condition. It has extracted four common factors from seven health-related variables, and these factors have been named crown vigor indicator, root damage

1. 國立屏東科技大學森林系碩士班研究生。

Graduate Students, Department of Forestry, National Pingtung University of Science Technology.

2. 國立屏東科技大學生物資源研究所博士班研究生。

Graduate Students of Ph. D, Graduate Institute of Bioresources, National Pingtung University of Science Technology.

3. 國立屏東科技大學亞太熱帶農業研究中心助理。

Assistant, Asian Pacific Research Center for Tropical Agriculture, National Pingtung University of Science and Technology.

4. 國立屏東科技大學森林系教授，通訊作者，91201 屏東縣內埔鄉學府路 1 號。

Professor, Department of Forestry, National Pingtung University of Science and Technology. Corresponding Author. No.1, Shuehfu Rd., Neipu, Pingtung, 91201 Taiwan.

mail: cct@gisfore.npust.edu.tw

indicator, live crown indicator and tree competition indicator. This research was based on NDVI and LAI, it used to construct a simulating relation model for mapping LAI distribution map, and carries on the telescope by the sample health plots, and confirms NDVI, LAI and relations of the forest health. The result showed when LAI surpasses above 3, then health of the Cryptomeria plantation forest has tends the decline risk, but the LAI distribution is situated between 2.51-3 scopes the levels, the sample plots presents the healthy rank. In this research, only LAI lowers the region was non-forest healthy sample plots distribution. So NDVI and LAI between the forest health's relations needs to be further studied.

【Key words】 Health indicators, Leaf area index, Normalized difference vegetation index

一、前言

由於全球人口急速增加，自然資源過度開發利用，使得地球生態日益惡化，影響全球生態系的結構與功能；因此如何維持各種生態系的正常運作，已成為不可忽視的重要課題。歐洲林業先進國家自 1984 年開始進行大面積的森林健康狀況調查，主要目的在於瞭解森林遭受空氣污染的影響情形，而美國在 1990 年則由林務署與環保局共同發展森林健康監測計畫，採取大規模系統取樣，進行國家層級之森林生態系健康監測，其目的在於獲得森林生態系現況、變化和長期趨勢的資訊，以了解環境變遷對森林生態系的影響 (Smith, 2002)。所謂森林健康係指森林生態系功能對外界壓力如乾旱、病蟲害、火災等具有一定的抵抗能力，且能滿足人類對於森林之涵養水源、提供木材、野生動物棲息、環境保育、自我更新及其他多樣化的需求，其簡易的涵義是指森林健康可保持自身良好的生態特性和更新的狀態，以美國林務署 (United States Department of Agriculture, USDA) 歸納出的森林健康定義為提供人類所需之餘，仍維持一定複雜性、多樣性、及生產力的狀況 (Mangold, 1998)。目前國內對於森林健康監測之研究僅針對地面調查為主，利用森林健康指標進行地面調查，配合因素分析法及判別分析法，萃取對森林健康最有利的指標，以判定林木的健康程度 (王兆桓、陳子英，2002)。謝漢欽 (2003) 曾認為僅以地面樣區調查森林遭受蟲害、病害、干擾及其他逆壓危害

時，無法進行廣大面積受害森林之監測，而因衛星影像在感測地面植生時，與樹冠層生育狀態有明顯的相關性，因此藉由光譜反射的特性，對林木枯損、落葉、褪色及枯死進行即時監測，可分辨出健康與非健康植生，為提供大面積監測冠層傷害之最好的材料。另因葉面積指數 (Leaf Area Index, LAI) 可表達林分樹冠垂直結構的變化，並可大範圍的監測植生健康狀態、干擾情形、季節性變化及人為干擾等 (Chen *et al.*, 2002; Kovacs *et al.*, 2005)。另外亦相當多的文獻顯示，常態化植生指標 (Normalized Difference Vegetation Index, NDVI) 與 LAI 具有高度的直線相關性，且為植群樹冠水平面生育狀態的良好指標 (Clough *et al.*, 1997; Green *et al.*, 1997; Nagler *et al.*, 2004; John *et al.*, 2005)，因此本研究之動機在於擬藉由 LAI、NDVI 之關係模式，並結合地面調查之森林健康度資料，探討 NDVI 與 LAI 之關係模式是否可適切的表達林分樹冠之水平與垂直面之健康狀態，並討論遙測技術在森林健康調查之可行性。

二、材料與方法

(一) 研究區概況

本研究選定台大實驗林溪頭營林區 55 年生柳杉造林地為研究樣區，海拔 1,200 m，坡度 15°，其為研究不同栽植距離對柳杉生長關係之目的而設置，其栽植密度共分 1 x 1 m、2 x 2 m、3 x 3 m、4 x 4 m、5 x 5 m 等 5 種處

理，本研究為探討不同林分密度與森林健康之關係，選定此樣區進行森林健康之評估，樣區

位置如圖 1 所示。

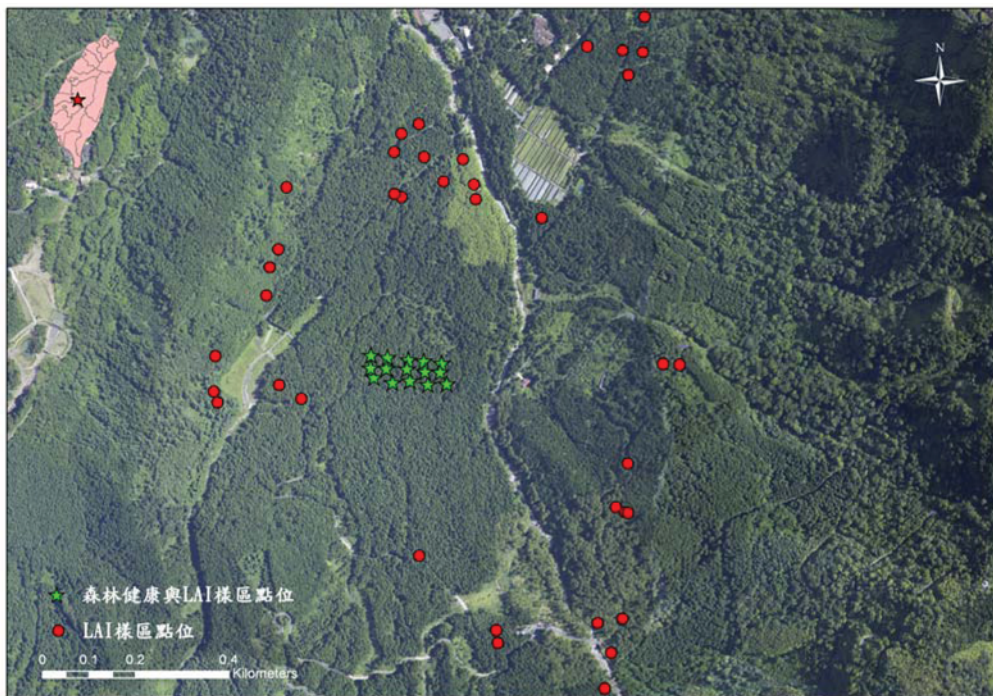


圖 1. 研究地區位置圖

Fig. 1. The location of study area.

(二) 研究材料

1. 樣區之 LAI 量測

本研究以 LAI-2000 植物冠叢分析儀，進行樣區之 LAI 調查，該儀器係利用魚眼鏡頭水平拍攝其正上方冠層上的全天光，及植冠下方被植物葉片遮蔽所測得之光照環境相比，假設林冠的葉子為隨機分布，利用以下的方程式(1)來求得葉面積指數 (LI-COR, 1992 ; Kovacs *et al.*, 2005)。植物冠叢分析儀在量測樹冠層上方之光照環境後，立刻量測樹冠層下方之光照環境，可確保在量測樹冠層上下方時的天空狀況相同。LAI 觀測方式及樣區測定方法如圖 2 所示。

$$LAI = -2 \sum_{i=1}^5 \ln(T(\theta_i)) \cos \theta_i w(\theta_i) \dots (1)$$

θ_1 - θ_5 : 分別為 7°、23°、38°、53°及 68°

T (θ_i) : 冠層下方穿過各環角度值/冠層上方穿過各環角度值

w(θ_i) : 各環值加權因數

圖 2 顯示 LAI 儀器之測定方式，主要以鏡頭上的感應器監測 5 個角度的散射光所形成的影像，再用濾光鏡限制進來的光，以減少由綠色葉面所輻射出來的光波。在樣區 LAI 的測定方面，樣區大小為 40 m × 25 m，以 LAI-2000 植物冠叢分析儀於樣區的中心點進行觀測，因 LAI 的魚眼鏡頭可感測來自以 7°、23°、38°、53°及 68° 範圍的接收角度，利用方法可量測樣區的 LAI。

2. 遙測影像資料

本研究以 SPOT XS 衛星影像為材料，選取溪頭地區 Level-3 影像，並挑選無雲之良好影像，因本調查時間為 2006 年 11 月，因 2006 年 11 月份之衛星影像雲量及陰影等雜訊太多，本研究選用同月份不同年度之 2005 年 11 月衛星影像，所採用之衛星影像參數摘要如表 1。

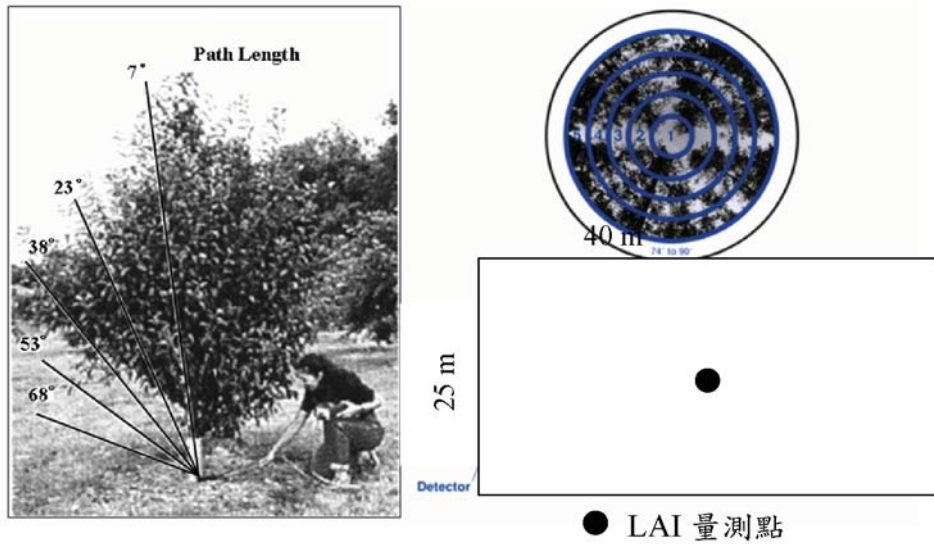


圖 2. LAI-2000 植物冠叢分析儀測定冠層示意圖 (LI-COR, 1992)

Fig. 2. The schematic diagram of LAI-2000 measuring (LI-COR, 1992).

表 1. 本研究所使用之 SPOT XS 衛星影像資料參數

Table 1. The parameters of SPOT XS images in this study

接收日期	太陽入射角	太陽方位角	太陽高度角	校正係數			
				XS1	XS2	XS3	XS4
2005 年 11 月	21.6	164.4	42.2	2.22861	2.84614	1.97513	13.83115

(二) 研究方法

1. 林木健康評估表之建立與調查

本研究係以羅時凡等 (2008) 之調查法，分兩階段建立林木健康指標調查項目，第一階段藉由文獻分析彙整林木健康評估項目及評估方法，並初步發展林木健康度之調查項目。第二階段進行調查人員之訓練及試調並進行修改，其建立的流程圖如下圖 3。

經由上述兩階段完成林木健康評估表後，依照羅時凡等 (2008) 選定適用於台灣林木健康調查之方法，調查項目之示意圖如圖 4 所示，調查者可藉由圖示進行野外調查時比對，以利於準確的進行林木健康度評分。

由圖 4 所顯示之 7 項調查指標及評分標

準，主要以視覺判斷為主，其中根部依受害情形的不同分為四級，受害情形如人為傷害、病害、天然災害造成；冠層狀態為調查活冠層以上落葉之情形，並依照不同落葉比例給予分級；樹冠密度及透視度則利用製作透視卡比對冠層上的葉覆蓋情形，將孔隙去除後，計算所佔之比例；樹冠重疊情形的觀測方法是將冠層切割成四等分，並依據每一等分不同覆蓋之情形給予不同的評分；活冠層比的計算方法為，林木實際總長度視為 y ，活冠長視為 x ，將 x 除以 y 乘以 100 就可得到活冠層比率，為活冠長佔全樹高的比例；樹冠梢枯的調查方法為計算整株林木的枯枝佔整個冠層的比例，發生於橫向枝梢末端持續朝向樹幹或由樹頂向下

縱向的枯死，常出現在樹冠上半部和外部。本研究利用 7 項林木健康度狀態，針對溪頭地區

不同生長密度之 55 年生之柳杉人工林，進行 15 個樣區 959 株之立木健康度調查。

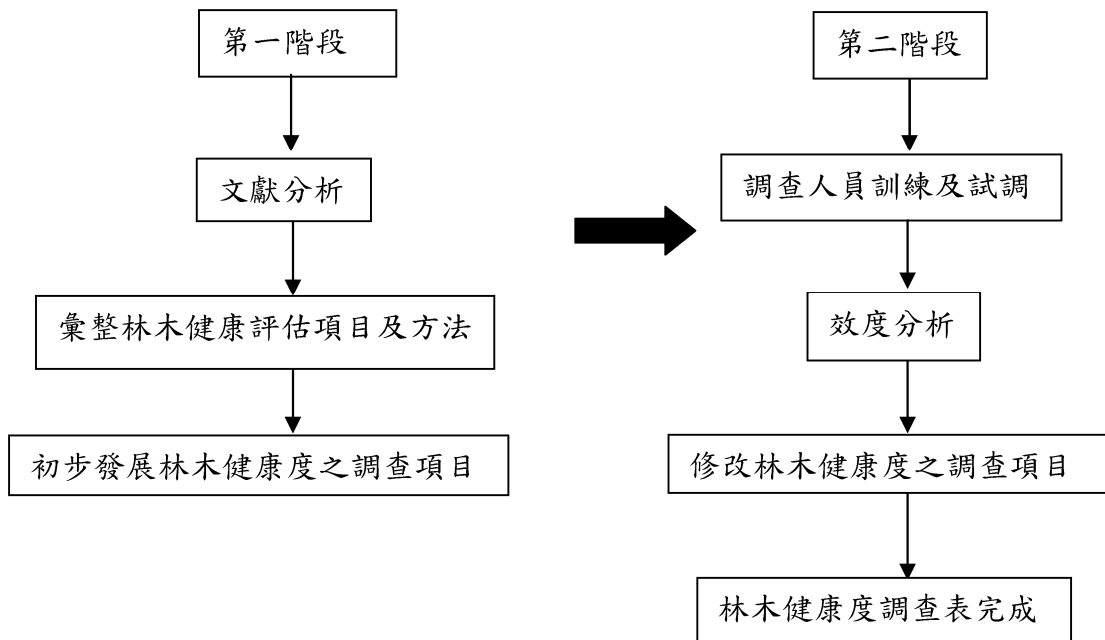


圖 3. 建立林木健康評估表流程圖

Fig. 3. The flow chart of forest health appraisal table.

2. 林木健康調查資料分析

(1) 以因素分析建立林木健康指標

因素分析方法不僅可以建立森林健康指標，同時透過量化指標與可實測的變數，進行個別林木健康狀態的評估。林木健康形態是無法經由人為主觀決定其健康程度，但可經由各種指標加以衡量，如根部有無損傷、落葉的程度及枝梢枯萎等，以整體性的觀點判定林木健康的優劣，將是進行森林健康調查的重點。在進行因素分析前，本研究利用 7 項林木健康狀態，進行林木健康評估。

評估森林健康度時，將調查資料以因素分析法，找出影響森林健康之共同因素，及各因素之相對權重值，將每株立木之健康評分加權平均後，得到加權的因素分數，並將加權過後的因素分數標準化，標準化的因素分數有助於對林木健康的分級，依因素分數的高低，將健

康等級分為五級，分級之依據，係利用各單株林木健康分數資料比對地面調查資料，如胸徑、樹高與 7 項林木健康指標分數等，將健康等級分為等級 5： $x' < -2$ 為枯死；等級 4： $-2 \leq x' < -1$ 為不健康；等級 3： $-1 \leq x' < 0$ 為產生劣化；等級 2： $0 \leq x' \leq 1$ 為健康；等級 1： $x' > 1$ 為很健康，並且可依分數的高低辨別健康程度差異，其流程架構圖如下圖 5 所示。

(2) 森林健康狀態之評估

森林健康係指樣區中所有林木健康程度之總和，其分級係依據因素轉軸後之特徵值解釋量為權重，以加權方式計算加權因素分數 (x)，再將 x 值標準化後得到 x' 值，將每個樣區林木之 x' 值加總，除以各樣區之林木株數，計算出各樣區之健康度平均值，並依健康度平均將健康等級分為四級，其分級之依據係根據林木健康分級之分類標準，而因森林健康屬於林分中

所有林木健康綜合的表現，故在評估森林健康時將枯死等級去除，將健康等級分為等級 4： $x' < -1$ 為不健康；等級 3： $-1 \leq x' < 0$ 為產生

劣化；等級 2： $0 \leq x' \leq 1$ 為健康；等級 1： $x' > 1$ 為很健康。

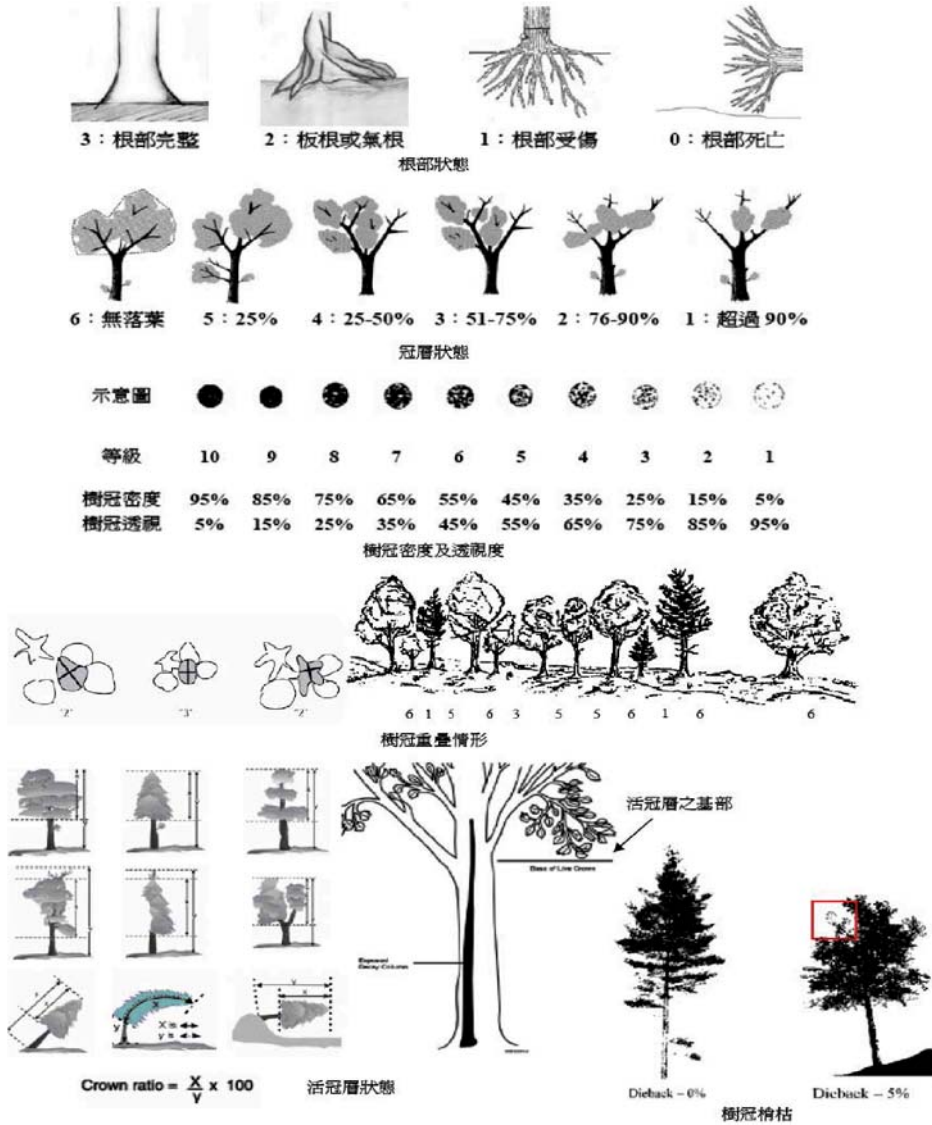


圖 4. 林木健康指標調查之評分標準示意圖(羅時凡等, 2008)

Fig. 4. The schematic diagram of grading criteria for forest health surveying (Luo *et al.*, 2008).

3. NDVI、LAI 與森林健康之關係

(1) LAI 與 NDVI 關係模式之建立

本研究以 2006 年 11 月收集的 43 個樣點之 LAI 資料，如圖 6 所示，主要針對不同密度之林分進行調查，以得知不同林分 LAI 之分布

情形，並配合衛星影像萃取相對應點位之 NDVI，建立 LAI 與 NDVI 之關係模式，利用所建立之 LAI 與 NDVI 關係模式，以 ArcGIS 空間分析模組繪製 LAI 之空間分布圖。

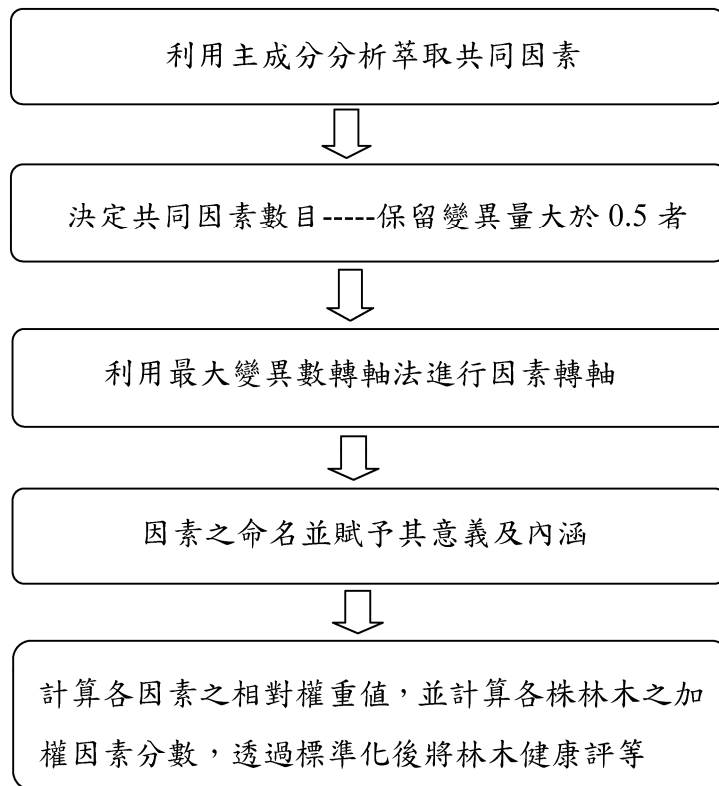


圖 5. 本研究因素分析流程架構圖

Fig. 5. The framework of factor analysis in this study.

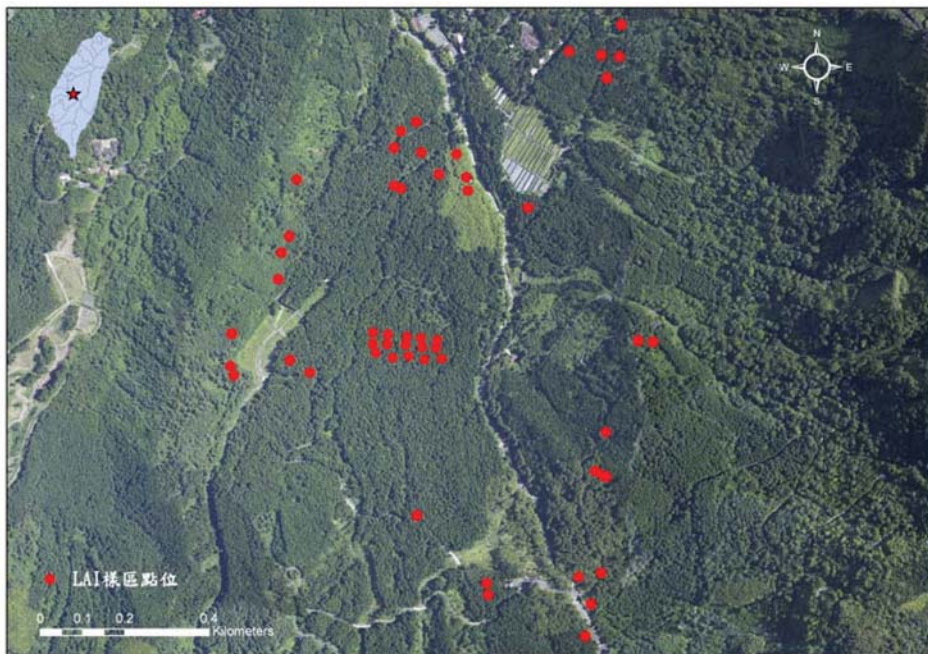


圖 6. 本研究之 LAI 調查樣區位置圖

Fig. 6. The sampling plots of LAI in this study.

4. 利用森林健康驗證 LAI 空間分布圖

利用前述 NDVI 與 LAI 直線迴歸模式所繪製之空間分布圖，將地面 15 個樣區所調查之林木健康度資料，應用因素分析計算森林健康度，以 ArcGIS 套裝軟體將各樣區之森林健康度資料套疊在 LAI 空間分布圖上，比對探討森林健康度的變異與 LAI 高低之關係。

三、結果

(一) 林木健康指標之建構

本研究利用 7 項林木健康度狀態，針對溪頭地區不同生長密度之 55 年生之柳杉人工林，所收集之 15 個樣區 959 株之立木健康度調查

資料，採用主成份法進行 7 項林木健康度狀態之因素抽取，並依據 Kaiser (1970) 所訂出準則指出，選取因素時以特徵值 (Eigenvalue) 大於 1、特徵值大於 0 之共同因素，或以抽取之因素能解釋 75% 之變異量，繼續萃取因素如其變異量之解釋少於 5% 者，則不予以選取，以此標準決定最後抽取因素的數目，並重新定義各項因素之林木健康度調查之涵義。本研究應用共同性估計法對應主因素法萃取林木健康指標，其目的是希望能夠降低指標的調查項目，在一群具有相關性的資料中，找出幾個影響林木健康之共同因素，其結果如表 2 所示。

表 2. 不同因素個數之特徵值與變異量

Table 2. The variation and eigenvalue in different factor numbers

因素個數	特徵值	變異量(%)	累積特徵值	累積百分比(%)
1	4.5767	65.3815	4.5767	65.3815
2	0.8909	12.7279	5.4677	78.1094
3	0.5509	7.8701	6.0186	85.9796
4	0.4774	6.8201	6.4959	92.7997
5	0.3314	4.7349	6.8274	97.5346
6	0.1726	2.4662	6.9998	99.9975
7	0.0002	0.0025	7.0000	100.0000

由表 2 中顯示 4 個萃取因素之累積特徵值為 6.4959，佔總變異的 92.8%，由此可知 4 個因素即可解釋林木健康度的變異性。另外以最大變異數轉軸法對選出的因素進行轉軸，使各因素之代表意義更明顯，且更易於解釋。

表 3 顯示 4 個因素經轉軸後之共同因素特徵值，每個觀測指標的共同性不會因轉軸改變，即轉軸後，所萃取共同因素對個別觀測指標的總變異量不會改變，可代表原始的 7 個林木健康狀態，將 4 個因素依照其性質分成樹冠

活力指標、林木競爭指標、活冠層指標與根部損傷指標，其依據茲分別說明如下：

樹冠活力指標：4 個因素中以樹冠活力指標的解釋力最強，其包含了樹冠密度、樹冠透視度及冠層狀態指標，而此 3 項指標與林木冠層之落葉情形有極大的相關性，如落葉量多，則樹冠愈稀疏，樹冠透視度比例高，而冠層狀態評估等級低，故命名為樹冠活力指標。其中以樹冠密度及樹冠透視度的負荷量最高，達 0.9274。負荷量次高的為冠層狀態，其值為

0.6787，葉子掉落程度越嚴重，表林木活力愈低，本研究以柳杉人工林為主，柳杉為常綠樹

種，故有落葉情形發生時，表示林木受劣化影響，可明顯辨識出落葉比例。

表 3. 轉軸後之因素結構矩陣表

Table 3. The matrix of different factors after varimax rotation analysis

狀 態	因素 1	因素 2	因素 3	因素 4
根部狀態	0.1263	0.1685	0.0977	0.9725
冠層狀態	0.6787	0.4383	0.4060	0.1245
樹冠密度	0.9274	0.2393	0.2283	0.1211
樹冠透視度	0.9274	0.2393	0.2283	0.1211
樹冠重疊	0.3076	0.8564	0.1725	0.2256
樹冠梢枯	0.4798	0.6286	0.3903	0.1838
活冠層比	0.3123	0.1989	0.9084	0.1130
特徵值	2.6189	1.5032	1.2858	1.0881

林木競爭指標：林木競爭指標包含了樹冠重疊及樹冠梢枯兩個指標，負荷量分別為 0.8564 及 0.6286，樹冠重疊表示統計林木與周圍林木冠層重疊的數量，其重疊數愈多則表示此林木生長受到抑制，活力愈低，此指標間接的表示了林木的競爭，意指林木生長發育過程中林木間相互影響，致使一林木造成另一林木生長危害的現象，而競爭的結果阻礙了林木的正常生長，故亦發生枝梢枯萎現象，如枝梢枯萎愈嚴重代表林木活力愈低落，且表示林木遭受劣化的影響。

活冠層指標：主要萃取出活冠層比指標，負荷量為 0.9084。活冠層比為生長葉至樹冠頂佔整株林木之比例，而不包含枯萎及枯死的枝條，纏繞林木的藤蔓類植物亦必須排除在活冠層比的計算內，活冠層的取樣會因林木的胸徑不同而不同，其活冠層比例愈低則活力愈低，由樹高及枝下高間接可測得樹冠比，以推測林木健康程，此變數易顯現出林木活力，且可

間接了解胸徑生長。

根部損傷指標：主要萃取出根部狀態指標，為評估林木根部之健康狀態與否，並給予健康等級，評估時由於柳杉人工林栽植較密，且栽植年齡已達老熟階段，林木間易有盤根、根部裸露及根張等情形產生，通常會導致林木無法吸收養分與水份，容易影響林木的健康狀態。而由於根部裸露及根外部受傷情形，容易以肉眼判釋，其生長於土中根部之受損情形，無法以肉眼判釋，相對的，如根部有受損則易反應於冠層上，故使負荷量達最高，其值為 0.9725。

1. 林木健康之分級

本研究應用先前萃取出之樹冠活力指標、林木競爭指標、活冠層指標與根部損傷指標等 4 個因素，藉由其特徵值的比例，訂定出各共同因素間的相對重要性，以表示所萃取個別因素，對所有指標總變異的貢獻或重要性，因此可將各因素特徵值的比例，視為樹冠活力指

標、林木競爭指標、活冠層指標、根部損傷指標間之相對重要性，依此計算 4 個林木健康指標之相對權重，如表 4，再以加權方式計算加權因素分數，其加權方法為將各株立木原始資

料之共同因素，乘以 4 個萃取指標之相對權重值，將每株林木健康評分加權平均後，得到加權分數。

表 4. 因素加權與林木健康度評估

Table 4. Factor weight and tree health estimating

林 木 編 號	樹冠活力 指 標	林木競爭 指 標	活 冠 層 指 標	根部損傷 指 標	加權因素 分 數 (x)	加權標準化 因 素 分 數 (x')	健 康 等 級
相 對 權 重	0.4032	0.2314	0.1979	0.1675			
1	0.2504	-0.4914	-0.2454	0.0924	-0.0458	-0.0861	3
2	1.2157	-0.3605	-0.0773	-0.0405	0.3846	0.7226	4
3	-0.0416	0.1914	-0.4073	1.1171	0.1340	0.2518	4
4	0.8121	-0.8747	-0.5662	0.1517	0.0384	0.0721	4
5	-1.5939	-1.5961	-1.4879	-1.4993	-1.5576	-2.9262	1
6	0.7703	-0.1715	-0.6545	0.0275	0.1459	0.2742	4
.							
.							
.							
959	-1.5939	-1.4993	-1.4879	-1.5961	-1.5576	-2.9262	1

透過加權分數的平均數和標準差後 (平均數為 0，標準差為 0.5322)，可進行加權分數的標準化之分數，依照林木健康等級共分五級 (等級 5： $x' < -2$ 為林木枯死；等級 4： $-2 \leq x' < -1$ 為不健康；等級 3： $-1 \leq x' < 0$ 為產生劣化；等級 2： $0 \leq x' \leq 1$ 為健康；等級 1： $x' > 1$ 為很健康)，其分類依據為加權標準化因數分數之高低不同，給予健康分級。

本研究應用上述之等級分類，將 959 株林木之加權標準化因素分數予以歸類，其分類結果如表 5 所示，林木健康與很健康等級所佔株數比例最高，計有 633 株，佔總株數的 66%，其次為產生劣化等級，所佔株數計有 214 株，佔總株數的 22.31%，而以不健康等級的株數佔最少，計有 32 株，佔總株數的 3.34%。

表 5. 全區林木健康等級分布

Table 5. The health degree distribution of 959 trees in this study

健康等級	株 數	百分比 (%)
枯 死	80	8.34
不 健 康	32	3.34
產 生 劣 化	214	22.31
健 康	581	60.58
很 健 康	52	5.42

2. 森林健康分級

森林健康分級係依據因素轉軸後之特徵值解釋量為權重，以加權方式計算加權因素分數 (x)，再將 x 值標準化後得到 x' 值，將每個樣區

林木之 x' 值加總，除以各樣區之林木株數，計算出各樣區之健康度平均值，並依健康度平均將林分健康等級分為四級，分別為等級 4： $x' <$

-1 為不健康；等級 3： $-1 \leq x' < 0$ 為產生劣化；等級 2： $0 \leq x' \leq 1$ 為健康；等級 1： $x' > 1$ 為很健康，其森林健康分級結果如表 6。

表 6. 各樣區森林健康度分級

Table 6. The forest health degree in different sample plots

樣 區	株 數	枯死株數	枯亡率	$\Sigma x'$	健康度平均	健康等級
1	77	6	0.08	13.03	0.17	3
2	63	8	0.13	-2.95	-0.05	2
3	48	1	0.02	0.02	0.00	3
4	110	18	0.16	-16.33	-0.15	2
5	43	3	0.07	4.08	0.09	3
6	100	13	0.13	-14.44	-0.14	2
7	27	0	0	12.93	0.48	3
8	51	2	0.04	4.19	0.08	3
9	28	0	0	4.76	0.17	3
10	54	2	0.04	9.84	0.18	3
11	96	9	0.09	-6.70	-0.07	2
12	50	1	0.02	2.26	0.05	3
13	106	14	0.13	-24.68	-0.23	2
14	36	0	0	15.67	0.44	3
15	70	3	0.04	-3.94	-0.06	2

由表 6 中顯示各樣區之健康分級，由表中可知健康林分之樣區為 1、3、5、7~10、12 及 14 樣區，共 9 個樣區；產生劣化林分之樣區為 2、4、6、11、13 及 15 樣區，共 6 個樣區；而本研究樣區中並無不健康及很健康林分之樣區。

(二) NDVI、LAI 與森林健康之關係

1. LAI 與 NDVI 關係模式之建立

本研究以 2006 年 11 月所收集 43 個樣點 LAI 資料作為依變數，並以相對應 2005 年 11 月衛星影像所計算之 NDVI 為自變數，進行迴歸分析，其結果如圖 7 所示。

由圖 7 可知 LAI 與 NDVI 之迴歸模式為 $LAI=0.53+6.39NDVI$ ，其判別係數 $R^2=0.64$ ($P<0.01$)，顯示兩者間具有極顯著之相關性。

2. LAI 空間分布與森林健康度之關係

由 NDVI 與 LAI 所建 的關係式，可用於推估出 LAI 於空間上的分布情形，而影像結構可由影像色調值定量而產生空間變異，其與植生的空間分布有關係 (Wulder et al., 1998)。本研究應用前述所建 NDVI 與 LAI 之直線迴歸模式代入 SPOT-NDVI 影像，推估出 LAI 空間分布圖，結果如圖 8 所示。

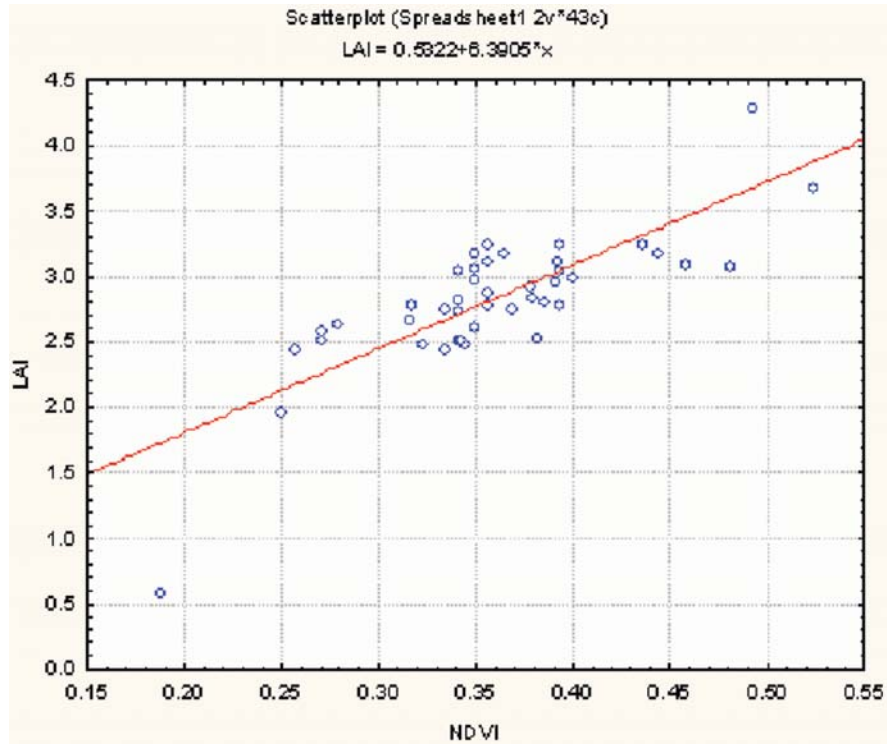


圖 7. LAI 與 NDVI 之迴歸模式
 Fig. 7. The regression equation of LAI and NDVI.

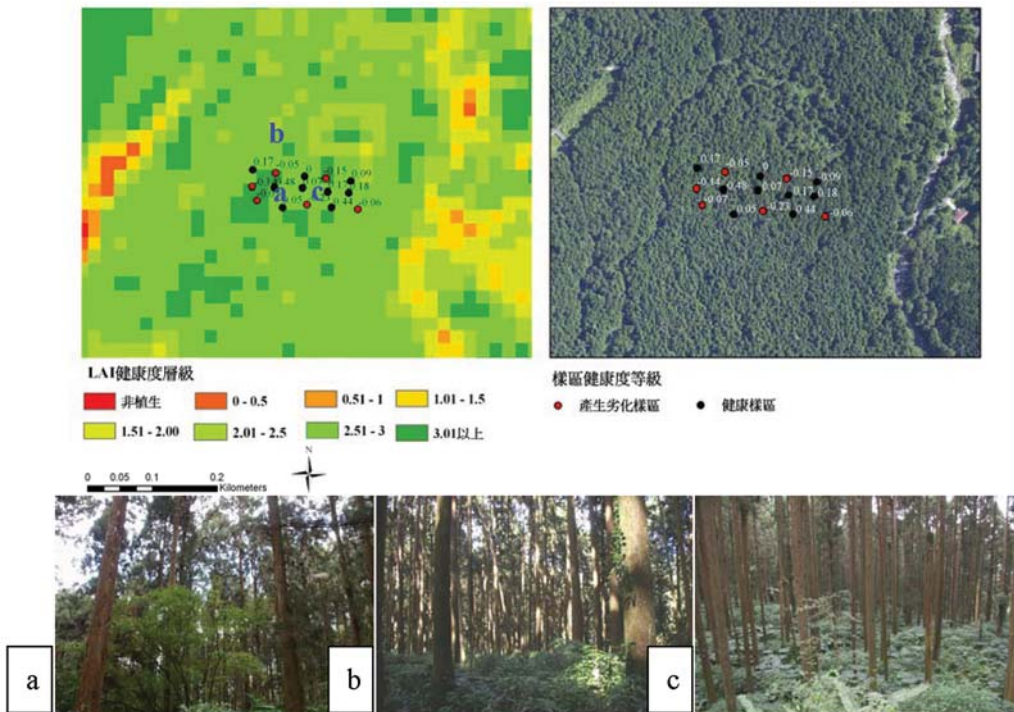


圖 8. LAI 空間分布圖
 Fig. 8. The spatial distribution for LAI.

由圖 8 可知 LAI 分布範圍除了非植生範圍外，其值介於 0 至 3.50 之間，因此將 LAI 的空間分布分成非植生、0-0.50、0.51-1.00、1.01-1.50、1.51-2.00、2.01-2.50、2.51-3.00 與 3.01 以上等 8 個健康層級。圖中顏色越深綠的部分表示 LAI 越高，顏色越黃部份代表 LAI

越低，而橘色至紅色部分為道路、建築物等非植生區域，並利用航空照片比對可清楚的瞭解各地物在空間上的分布情形。經由地面健康度調查之樣點進行套疊後，將點位資料所覆蓋之 LAI 範圍與健康度資料整理成下表 7。

表 7. 地面樣區 LAI 分布範圍及其健康狀態
Table 7. LAI and health condition for this area

樣區編號	LAI 分布範圍	健康度	健康狀態
1	2.51-3	0.17	健康
2	3.01 以上	-0.05	產生劣化
3	2.51-3	0.00	健康
4	3.01 以上	-0.15	產生劣化
5	2.51-3	0.09	健康
6	3.01 以上	-0.14	產生劣化
7	2.51-3	0.48	健康
8	2.51-3	0.08	健康
9	2.51-3	0.17	健康
10	2.51-3	0.18	健康
11	3.01 以上	-0.07	產生劣化
12	2.51-3	0.05	健康
13	132.51-3	-0.23	產生劣化
14	142.51-3	0.44	健康
15	152.51-3	-0.06	產生劣化

由表 7 中顯示 15 個樣區之 LAI 分布範圍介於 2.51-3 及 3.01 以上兩個層級，且健康狀態等級僅侷限在健康及產生劣化等級，而很健康及不健康之樣區在本研究中並無分布。其中產生劣化樣區的健康狀態等級，LAI 多數都落在 3.01 以上的層級 (圖 8a)，僅 2 個樣區落在 2.51-3 的層級 (圖 8c)；健康樣區的健康狀態等級，LAI 皆落在 2.51-3 的層級中 (圖 8b)。由以上結果可知，如 LAI 超過 3 以上時，則柳杉人工林分之健康程度有趨於劣化的危險性，推論是因林分過密，故在空間分布上 LAI 呈現較

高的趨勢，但實際在地面進行健康調查時，根系及枝梢部分多受到林齡及林分密度的影響，漸漸產生不健康之病徵，諸如根部裸露、枝梢枯萎、葉子枯黃等特徵；因各個 LAI 層級分布範圍間距及間距之值接近，使少數劣化的樣區 LAI 分布在 2.51-3 的層級，而樣區健康度為健康等級時，則可確定 LAI 分布介於 2.51-3 範圍之間的層級。由 LAI 空間分布圖可知以綠色區塊佔多數，故得知此範圍大部分都處於健康狀態。

四、討論

(一) 森林健康調查

雖然各國森林健康所面臨的威脅因素不同，其所強調的森林健康議題亦有所不同，以歐美地區為例空氣污染或病蟲害所造成之森林健康影響，被列為重點調查項目 (Mangold, 1998)，而台灣到目前為止僅針對海岸保安林、老熟檜木林與紅樹林進行健康調查評估 (王兆桓、陳子英，2002；王慈憶，2005；李威震，2005；劉玲華等，2007)，以 USDA 對於森林健康的定義在於強調森林提供人類所需之餘，仍維持一定複雜性、多樣性、及生產力的狀況 (Mangold, 1998)，顯然森林健康調查的主要目的在於監測森林是否能維持一定複雜性、多樣性、及生產力，其中複雜性與多樣性的維持屬於森林生態系功能的發揮，而生產力的維持重點則在於森林經濟效益的取得，因此森林健康調查會因所欲追求之森林功能的差異性，其調查對象與調查項目會有所不同，以人工林經營的角度而言，森林健康的期望，會強調林木生長的活力，增加林木的生長速率，因此可從與生長有關之樹冠及樹根生長狀態進行調查。本研究依據此一概念，利用美國林務署所發展之林木健康調查手冊，選定適用於台灣人工林之林木健康調查項目，包括根部狀態、冠層狀態、樹冠密度、樹冠透視度、樹冠重疊、樹冠梢枯、活冠層比等 7 項，調查資料經因素分析後，組成四個主要影響林木健康之指標，包括為樹冠活力指標、林木競爭指標、活冠層指標與根部損傷指標，其累積林木健康變異量達 92.8%，顯示調查表具有鑑別林木健康狀態之能力，而由表 4 之 4 個因素相對權重值可知林木之樹冠活力指標之權重值最高，其次為林木競爭指標，顯現樹冠活力的高低與林木是否產生競爭，對於林木是否健康具有較大的影響力，此一結果亦可說明為何在大面積進行森林健康調查時，可利用具有偵測樹冠活力之遙測光譜資訊，進行森林健康度的調查。

(二) 遙測技術應用於森林健康調查之可行性

NDVI 與植物水平分布密度有密切的相關性，可以判別植生反射量之多寡，適用於監測植生之變化，其被定義為近紅外光波段與紅光波段數值之差與這兩個波段數值之和的比值，且因近紅外光波段可靈敏反應植物葉體之生長勢和健康狀況，紅光波段會被植物葉綠素吸收，因植物葉綠素為光合作用之重要元素，故紅光可視為光合作用的代表波段 (Burgan and Hartford, 1993)，植物葉綠素強烈吸收紅光而反射近紅外光，因此在遙測分析上，常以數學模式組合紅光及近紅外光，計算代表植群量的植生指標 (Baret *et al.*, 1989)。遙測技術可快速獲得大面積之紅光及近紅外光波段，有利於了解森林冠層水平結構之生長健康狀態。

LAI 係指每單位土地面積上植物片之投影面積，可用以表達植物葉量之多寡，是一重要之植被特徵介量 (Wasseige *et al.*, 2003)，透過實地測量之 LAI，可了解到森林垂直結構狀態，其與森林演替、生育地良窳、生物量生產力、樹勢及林木抗蟲力等有著密不可分的關係，在森林生態的研究中普遍認為落葉樹木產生的孔隙 (Gap)，會影響森林社會的組成與結構 (Ryel *et al.*, 2000)，在孔隙中，通常考慮森林冠層從冠部到底部孔隙的延伸，因其受自然的損害、動物啃食、葉片與枝條發生病害、太陽角度於時間與季節的變化，及植物生態的變動等影響，使得即使林分沒有不連接的孔隙，異質性仍會在垂直之冠層結構發生 (Rich *et al.*, 1993)。由於 LAI 必須經由實地測量才可獲得，Solberg *et al.* (2005) 運用空載 LiDAR 影像推估 LAI 值，並與植生指標進行相關性分析，報告中指出 NDVI 與 LAI 之間具有直線正相關性， R^2 高達 0.85。Chen *et al.* (2002) 運用 Landsat TM 影像取得 SR 和修正簡單比植生指標 (Reduced simple ratio, RSR)，估測針葉林、落葉林、混合林與牧草地之 LAI，顯示植生指標與 LAI 呈現正相關。本研究利用上述方式運用 LAI-2000 地面量測之 LAI 與 SPOT XS 衛星影像所計算之 NDVI 進行相關性分析，發現

與前人研究相符合呈現正相關， R^2 為 0.64。

Colombo *et al.* (2003) 研究發現指出不同植生之 LAI 會因不同植生種類、不同土壤條件，顯示出 LAI 的異質性，此一異質性與植物的生長變異有關，所以可以運用 LAI 的空間分布影像，監測不同條件下植物的生長情形，即可監測森林中植生覆蓋的變異，進而推測可能受到破壞或生長狀況遭受逆境之區域。陳朝圳、馬仕穆 (2001) 利用 SPOT 衛星影像推估南仁山森林生態系之 LAI，研究中利用 CI-110 儀器取得 LAI，再與遙測影像計算之 NDVI 進行分析，研究結果得知兩者之 R^2 為 0.43，相關係數 0.66，此結果與本研究相較下 LAI 與 NDVI 之相關係數較低，其原因為南仁山為天然林，且以常綠的闊葉林為主，林分較密，植物歧異度甚高，故在推估 LAI 時困難度提高；在地面量測 LAI 時使用儀器亦不同，CI-110 僅能提供魚眼鏡頭拍攝之正上方樹冠層 LAI 值，其範圍受到限制，故與 NDVI 進行分析時相關性較低。利用遙測資 推估 LAI 因其具備空間分布之特性，其對於氣候、水與生態研究為一重要參數。準確的推估空間性之 LAI，為其他利用 LAI 做為變數進行之研究，是一很重要的前提，許多文獻亦證明 LAI 與植生指標間有正相關性 (Ramsey and Jensen, 1996; Green *et al.*, 1997; Kovacs *et al.*, 2004)。而統計所運算出的迴歸模式可以用來推估 LAI 值，因此可運用 SPOT XS 衛星影像繪製 LAI 在空間上的分布影像。Kovacs *et al.* (2005) 已指出 LAI 常應用在表示密植程度高低的指標，且已應用在紅樹林空間分布之研究，其試驗經由實地的探勘監測後，依不同種類的紅樹林在不同的健康狀態下分為四個部份，其 LAI 的範圍在 0.001-1.1249 為貧瘠白紅樹林 (*Laguncularia racemosa*)，1.125-2.125 為健康白紅樹林，大於 2.125 為健康的大紅樹林。王慈憶 (2005) 研究淡水河紅樹林之健康程度，其經現地調查發現 LAI 為 0.9 以上為水筆仔 (*Kandelia candel*) 植生，且依其 LAI 的分布範圍在 0.9-2.0 為生

長貧瘠之紅樹林，2.0 以上為生長健康之紅樹林。根據 LAI 之定義其值愈高則代表植生量愈多，樹冠愈密，則理論上林分愈健康，但過高時，表示林木間距過密，而導致樹冠鬱閉情形，而因 LAI 與 NDVI 具有正相關性，故 LAI 愈高則 NDVI 亦愈高，本研究為了驗證此情形，將森林健康度套疊至 LAI 空間分布圖，以探討 LAI 與森林健康之關係。Solberg *et al.* (2005) 利用 LAI 帶入 NDVI 影像中繪製 LAI 空間分布圖，將 LAI 區分成 0-1、1-3、3-4 及 4-15 共 4 個等級，發現 LAI 愈高則愈健康，但過高時因林分過於鬱閉，導致林分有不健康的情形與本研究有相似之結果。

本研究嘗試利用此方法應用於柳杉人工林中，以瞭解此方法適用性，且優先採用林木健康指標進行地面調查，以比對 LAI 之資料，研究結果發現 LAI 範圍在 2.51-3 為健康 (圖 8a)，而 3.01 以上之 LAI 範圍，因林分密度過密，可能導致葉量降低及枝梢枯萎，而產生林分劣化的情形 (圖 8b)，而 LAI 範圍在 2.50 以下本研究並無樣區，因此無法決定健康度層級，未來將可由 LAI 空間分布圖挑選 LAI 層級較低的樣區，以驗證不健康及很健康樣區 LAI 之變化趨勢。而台灣地形錯綜複雜，各林型 (檜木、杉木等) 會在不同生育地環境下，依照生長情形的不同，使 LAI 產生差異，而本研究僅針對柳杉人工林建構 LAI 與森林健康之關係，故為了探討其他林型森林健康與 LAI 之關係，未來將可針對不同林型進行森林健康與 LAI 調查，以更完整的建構兩者之關係。

五、結論

綜合上述結果，本研究得到結論為 SPOT 衛星影像波譜解析力低，故所能計算之植生指標亦有限，而目前遙測發展技術成熟，許多高解析及高光譜影像相繼而出，如 IKONOS、QuickBird 等高解析衛星影像，及 AVIRIS、MODIS 等高光譜影像，高光譜影像之特性為各波段所涵蓋之波譜範圍窄且波段數多，及光

譜解析力高於一般多光譜影像，其中高光譜影像所包含之光譜資訊，較傳統多光譜影像來的豐富且精細，可應用之範圍較廣泛，而國外已有研究報告指出，以高光譜影像應用於森林健康監測確實可行，如 Pontius *et al.* (2005) 應用高光譜影像偵測森林健康，利用現存之劣化光譜指標，偵測林木之劣化情形，因此建議未來可利用高光譜影像，計算相關劣化指標，以增進我國的遙測技術，且有效的監測森林健康。Kovacs *et al.* (2005) 應用 IKONOS 1 m 之高解析衛星影像，由於空間解析度高，可明顯的判別研究區內的健康程度，因此未來可應用高解析度的衛星影像 (如福爾摩沙二號)，來提高監測的準確性，且可由影像中，方便快速達成林分生長健康狀況的監測及有效的經營管理。

在選定林木健康指標時，主要針對樹冠層為調查重點，並選用與樹冠層有關的健康指標，如樹冠密度、樹冠梢枯、活冠層比等指標，以利遙測配合使用，未來將可透過遙測衛星影像，監測樹冠層之變化，進而得知大面積森林健康之狀況。本研究所選定柳杉人工林，其林分已達老熟階段，會因競爭的結果，使產生過密的林分，造成生長空間減少，並抑制林木生長，故有少數林木呈現林木劣化、不健康，甚至於枯死狀態，但因無其他危害出現，所以林內大部分林木呈現健康的狀態。

本研究利用 LAI 與 NDVI 進 直線迴歸分析 ($R^2=0.64$)，得知 LAI 與 NDVI 間具有極顯著之相關性，且經由 NDVI 與 LAI 直線迴歸模式繪製空間分布圖，瞭解 LAI 超過 3 以上時，則柳杉人工林分之健康程度有趨於劣化的危險性，而 LAI 分布介於 2.51-3 範圍之間的層級時，樣區之健康度為健康等級。由 LAI 空間分布圖可知 LAI 分布於 2-3 之間佔多數，故得知研究範圍大部分都處於健康狀態。

六、參考文獻

王兆桓、陳子英 (2002) 林木健康指標評估方法之建立-以棲蘭地區老熟檜木為例。政院農

- 業委員會林務局保育研究系列第 91-6 號
 王慈憶 (2005) 遙測技術應用於森林健康之監測-以淡水河紅樹林自然保留區為例。國立屏東科技大學森林系碩士論文。93 頁。
 李威震 (2005) 台灣東北部海岸保安林木麻黃林分健康監測之研究。國立宜蘭大學自然資源學系碩士論文。94 頁。
 陳朝圳、馬仕穆 (2001) 以 SPOT 衛星影像推測南仁山森林生態系葉面積指數。中華林學季刊 34(1): 63-72。
 劉玲華、葉慶龍、王兆桓 (2007) 台灣北中部海岸保安林健康指標之研究。臺灣大學生物資源暨農學院實驗林研究報告 21(2): 147-160。
 謝漢欽 (2003) 淺介美國森林健康監測的近況。林業研究專訊 10(5): 31-37。
 羅時凡、陳清婷、沙學均、陳朝圳 (2008) 林木健康指標之建立與效度評估。林業研究季刊 30(3): 41-52。
 Baret, F., G. Guyot, and D. Major (1989) TSAVI: a vegetation index which minimizes soil brightness effects on LAI and APAR estimation. p.10-14. In: 12th Canadian Symposium. On Remote Sensing and IGARSS'90, Vancouver Canada.
 Burgan, R. E., and R. A. Hartford (1993) Monitoring vegetation greenness with satellite data. USDA Forest Service Intermountain Research Station General Technical Report. 297 pp.
 Chen, J. M., G. Pavlic, L. Brown, J. Cihlar, S. G. Leblanc, H. P. White, R. J. Hall, D. R. Peddle, D. J. King, J. A. Trofymow, E. Swift, J. Van der Sanden, and P. K. E. Pellikka (2002) Derivation and validation of Canada-wide coarse-resolution leaf area index maps using high-resolution satellite imagery and ground measurements. Remote Sensing of Environment 80: 165-184.

- Clough, B. F., J. E. Ong, W. K. Gong (1997) Estimating leaf area index and photosynthetic production in canopies of the mangrove *Rhizophora apiculata*. *Marine Ecology Progress Series*, 159: 285-292.
- Colombo, R., D. Bellingeri, D. Fasolini, and C. M. Marino (2003) Retrieval of leaf area index in different vegetation types using high resolution satellite data. *Remote Sensing of Environment* 86: 120-131.
- Green, E. P., P. J. Mumby, E. J. Alaisdair, C. D. Clark, and A. C. Ellis (1997) Estimating leaf area index of mangroves from satellite data. *Aquatic Botany*, 58: 11-19.
- John M. K., J. Wang, and F. Flores-Verdugo (2005) Mapping mangrove leaf area index at the species level using IKONOS and LAI-2000 sensors for the Agua Brava Lagoon, Mexican Pacific. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 62: 377-384.
- Mangold R. D. (1998) Overview of the forest health monitoring programs. Biose, Idaho, USA, August 16-20,1998.
- Nagler P. L., E. P. Glenn , T. L. Thompson, A. Huete (2004) Leaf area index and normalized difference vegetation index as predictors of canopy characteristics and light interception by riparian species on the Lower Colorado River. *Agricultural and Forest Meteorology* 125 :1-17.
- Kaiser, H. F. (1970) A second generation little jiffy. *Psychometrika* 35: 401-405.
- Kovacs, J. M., F. Flores-Verdugo, J. Wang, and L. P. Aspden (2004) Estimating leaf area index of a degraded mangrove forest using high spatial resolution satellite data. *Aquatic Botany* 80: 13-22.
- Kovacs, J. M., J. Wang, and F. Flores-Verdugo (2005) Mapping mangrove leaf area index at the species level using IKONOS and LAI-2000 sensors for the Agua Brava Lagoon, Mexican Pacific. *Estuarine Coastal and Shelf Science*, 62: 377-384.
- Li-cor. (1992) LAI-2000 Plant Canopy Analyzer Operation Manual. LI-Cor, Lincoln. 90 pp.
- Pontius, J., R. Hallett, and M. Martin (2005) Using AVIRIS to assess hemlock abundance and early decline in the Catskills, New York. *Remote Sensing of Environment* 97: 163-173.
- Ramsey, E., and J. R. Jensen (1996) Remote sensing of mangrove wetlands: relating canopy spectra to site-specific data. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 62: 939-948.
- Rich, M. P., D. B. Clark, D. A. Clark, and S. F. Oberbauer (1993) Long-term study of solar radiation regimes in a tropical wet forest using quantum sensors and hemispherical photography. *Agricultural and Forest Meteorology* 65: 107-127.
- Ryel, R. J., W. Beyschlag, B. Marshall, and J. A. Roberts (2000) *Leaf Development and Canopy Growth..* Academic Press, Sheffield. United Kingdom. 317pp.
- Smith, W. B. (2002) Forest inventory and analysis: a national inventory and monitoring program. *Environmental Pollution* 116:S233-S242.
- Solberg, S., H. Lange, L. Aurdal, R. Solberg, and E. Næsset (2005) Monitoring forest health by remote sensing of canopy chlorophyll: first results from a pilot project in Norway. In: *Proceedings of 31st International Symposium on Remote Sensing of Environment. Global Monitoring for Sustainability and Security*, St. Petersburg, Russia, 20-24 June, 2005. CD-ROM.
- Toby N. Carlson and David A. Ripley (1997) *On the Relation between NDVI, Fractional*

- Vegetation Cover, and Leaf Area Index. *Remote Sensing of Environment*, 62:241-252
- USDA Forest Service (2005) *Forest Inventory and Analysis National Core Field Guide. National Core Field Guide, Version 3.0*. 203pp.
- Wasseige, C. D., D. Bastin, and P. Defourny (2003) Seasonal variation of tropical forest LAI based on field measurements in Central African Republic. *Agricultural and Forest Meteorology*, 199: 181-194.
- Wulder, M. A., E. F. LeDrew, S. E. Franklin, and M. B. Lavigne (1998) Aerial image texture information in the estimation of northern deciduous and mixed wood forest leaf area index (LAI). *Remote Sensing of Environment*, 64: 64-76.