

研究報告

福衛二號光譜土壤調整植生指數與地測葉面積指數 於光蠟樹材積推估之比較

謝漢欽^{1,4)} 林謙佑²⁾ 汪大雄¹⁾ 鍾智昕¹⁾ 黃俊元³⁾

摘要

面對全球暖化日趨嚴重，人工造林地木材積蓄積量具有碳吸存環境效益，應用遙測技術連結地面樣區調查資料，精確量測大面積平地造林地的林木材積蓄積量，是一個國際的重要課題。本研究以花蓮縣光復鄉台糖大農及大富農場平地造林光蠟樹林地為試驗區，應用福衛二號光譜土壤調整植生指數(SAVI)分級，進行分層目的取樣法，選取60個具空間獨立的地面樣區。於每一樣區上進行每木調查獲取材積蓄積量，並使用孔隙率透光分析法(gap light analyzer, GLA)測量地面樣區的兩個葉面積指數及樹冠鬱閉度。應用曲線估計迴歸統計分析方法，建立SAVI指數、葉面積指數及樹冠鬱閉度指數對材積推估最適迴歸式；另建立SAVI指數推估葉面積指數及樹冠鬱閉度最適迴歸式，比較各類最適推估模式的關係及優缺點。研究結果顯示經本研究所得之最適迴歸式，推估可解釋的變異量達94%以上。連結福衛二號光學遙測SAVI植生指數與GLA地面量測的葉面積指數，可用來推估光蠟樹人工林蓄積量、葉面積指數及樹冠鬱閉度；所得成果可繪製大面積空間異質性分布圖，具有相當的可應用性。未來一部分每木調查樣區可用GLA法量測的葉面積指數取代，連結樣區的SAVI進行多重取樣的林木蓄積量調查與估算，將可節省地面樣區調查的人力與時間成本。

關鍵詞：植生指數、葉面積指數、林分材積、平地造林地、福衛二號。

謝漢欽、林謙佑、汪大雄、鍾智昕、黃俊元。2017。福衛二號光譜土壤調整植生指數與地測葉面積指數於光蠟樹材積推估之比較。台灣林業科學32(2):159-75。

¹⁾ 林業試驗所森林經營組，10066台北市南海路53號 Division of Forest Management, Taiwan Forestry Research Institute, 53 Nanhai Rd., Taipei 10066, Taiwan.

²⁾ 林業試驗所植物園組，10066台北市南海路53號 Division of Botanical Garden, Taiwan Forestry Research Institute, 53 Nanhai Rd., Taipei 10066, Taiwan.

³⁾ 林業試驗所太麻里研究中心，96341台東縣太麻里鄉大王村橋頭6號 Taimali Research Center, Taiwan Forestry Research Institute, 6 Bridge Header, Taimali Township, Taitung County 96341, Taiwan.

⁴⁾ 通訊作者 Corresponding author, e-mail:micky@tfri.gov.tw

2016年6月送審 2016年8月通過 Received June 2016, Accepted August 2016.

Research paper

Comparison of FORMOSAT-2 SAVI and GLA LAI in Estimating Stand Volume of *Fraxinus* Afforestation

Han-Ching Hsieh,^{1,4)} Chien-Yu Lin,²⁾ Dar-Hsiung Wang,¹⁾
Chih-Hsin Chung,¹⁾ Chun-Yuan Huang³⁾

【 Summary 】

To mitigate the impacts of global warming, afforested plantations have a considerable amount of wood stock volume with environmental benefits for carbon sequestration. Applying remote sensing technology linked to ground plot data has been an important international topic to precisely measure wood volume in large areas of afforestation. This study focused on *Fraxinus griffithii* (*Fg*) plantations, owned by Danong and Dafu Farms of the Taiwan Sugar Company, in Guangfu Township, Hualien County, Taiwan. The soil-adjusted vegetation index (SAVI) from a FORMOSAT-2 (FS2) satellite image acquired on February 13, 2009 was classified into 5 separate grades to perform a stratified purposive sampling scheme for the setting up of 60 spatially independent ground plots. In each plot, the *Fg* wood volume (VOL) was determined by a field survey of each tree, and 2 leaf area indices (LAI4 and LAI5, i.e., LAIs) and a canopy closure index (CCI) were measured by utilizing gap light analyzer (GLA) method. SAVI and LAIs or CCI were adopted as independent variables in curve regression analyses to establish optimal regressions on the VOL estimation. In addition, the SAVI was used in curve regression analyses to estimate LAI and CCI. The advantage of these 2 optimal equation sets was saving time and labor in the field for ground plot surveys and VOL mapping. Results showed that the optimal regressions could explain more than 94% of the variation of the estimations. Linking SAVI derived from the FS2 image or ground measurements of LAI5 or the CCI to the VOL from ground plots is well suited to infer the VOL, LAIs, or CCI of *Fg* plantations. Using these optimal regressions has the benefit for mapping the VOL, CCI, and LAIs by providing their distributions of spatial heterogeneities. In the future, the time and labor required to investigate, estimate, and map of the *Fg* stand volume should be greatly reduced by using the LAI calculated from the GLA and linking it to multiphase sampling derived from the SAVI.

Key words: vegetation index, leaf area index, stand volume, afforestation, FORMOSAT-2.

Hsieh HC, Lin CY, Wang DH, Chung CH, Huang CY. 2017. Comparison of FORMOSAT-2 SAVI and GLA LAI in estimating stand volume of *fraxinus* afforestation. *Taiwan J For Sci* 32(2):159-75.

緒言

葉面積指數(leaf area index, LAI)最常用的定義為單位土地面積之葉片投影量，若以遙測的觀點，則定義為地表單位面積植生葉表面積

的一半(Chen et al. 2006)，是植生冠層結構重要基本特徵參數。LAI直接影響植生的光合作用效率、蒸散作用及對太陽光能之截留(Liu et

al. 2013)。在森林方面，LAI與生育地的水分收支平衡、淨初級生產量、幹材生長、樹冠覆蓋度(或鬱閉度)，以及材積蓄積量等有線性或曲線性相關(Hamlyn and Vaughan 2010, Song et al. 2011)。若在大尺度研究上，僅靠地面LAI觀測是不足的，將LAI結合適合的遙測植生指數(vegetation index)，建立統計經驗模式的研究方法，可擴展至林分、地景及地區尺度上，有關於碳、能量及水分通量方面的研究(Glenn et al. 2008, Hanes 2014)。

有關地面樣區LAI的地面量測的方法可分為直接測量法及間接測量法，直接測量法包括收穫量法、落葉收集法及生長測定(allometry)法，其中收穫量法為破壞性方法，費時費工(Lin et al. 1994)，不適用於大面積調查；在林業研究方面建立葉面積與胸徑或邊材面積關係式，不失為一個非破壞性的方法。間接測量法是指藉由儀器或數位照相機，測量冠層輻射得透過率，使用輻射傳輸方程式來計算LAI，是一種非破壞性方法(Jonckheere et al. 2004, Zheng and Moskal 2009)，近年來可應用的儀器種類至少有6種以上(Jarcuska 2008)。過去在國內用於研究方面，以魚眼光學感測器測的LAI-2000攜帶式樹冠分析儀(LiCor Inc., Nebraska, USA)居多(Cheng et al. 1997, Chen et al. 2007, Peng et al. 2008, Luo et al. 2009, Lin et al. 2014)，該儀器同時測量5個天頂角的透光率來估測LAI，算是一種利用半球面影像透光原理的測量方法(Lin and Chiang 2002)，已經可以省力、快速量測樣區冠層的LAI。上述研究將測得的LAI與材積或光達冠層穿透度進行迴歸式建立，由於試驗區多位於山區，受地形效應影響，一般迴歸判定係數皆介於0.3~0.6之間。近年來由加拿大Simon Fraser大學資源與環境管理學校發展的GLA (gap gight analyzer, 本文以下稱之為GLA葉面積指數測量法)林冠孔隙透光分析LAI測量法(Frazer et al. 1999)，是一種應用魚眼鏡頭數位相機取像(hemispherical photography)，透過GLA程式計算林冠的孔隙率(gap fraction)，間接估算LAI的方法(Frazer et al. 2000, Jarcuska et al. 2010)，其在法上能於較短時間內於較大

的範圍取樣，量測具一致性，測量精度與效率與LAI-2000相當，是一個方便有效率的方法(Frazer et al. 2001)。

過去12年來在政府獎勵政策下，已於台糖土地上完成近萬餘公頃平地造林，此一造林成果之林木生長材積對碳吸存(carbon sequestration)的具有一定的成效，可減緩因大氣二氧化碳濃度的增加而引起有關氣候暖化的災害效應。在後京都時期，乃至2015年底的多國簽訂的巴黎協定之第五條內容，森林碳匯仍然是被持續關注，並要求林業部門處理的重要課題。

因此在林業研究方面，如何藉由高解析度光學遙感探測的植生指數，透過地面樣區容易量測的葉面積指數，連結地面調查樣區的林木材積蓄積量(Madugundu et al. 2008)，建立統計推估模式，以節省地面調查的時間與人力成本的投入，精確估算大面積人工造林地的林分材積蓄積量；進而以樹種的各種碳轉換係數推估二氧化碳的吸存量，可提供林業相關單位作為決策的科學依據。

有鑒於此，本研究應用福衛二號衛星影像(FORMOSAT-2, 以下簡稱FS2)來估算光蠟樹(*Fraxinus griffithii*)平地造林的蓄積量，主要目的為(1)探討土壤調整植生指數與地面調查樣區生長材積的相關性，(2)建立地面樣區之單位材積量與土壤植生指標(soil-adjusted vegetation index, SAVI)之迴歸式(3)，使用GLA葉面積指標測量法來計算樹冠開闊度(canopy openness index, COI)，並建立樹冠開闊度與LAI和單位材積量之迴歸式。期望研究所得成果，能有助於大面積平地造林地材積精確推估技術的發展。

材料與方法

一、研究試驗地與材料

本研究以花蓮縣光復鄉台糖大農及大富農場，2002年至2007年平地造林地為試驗地範圍。使用林務局提供2002年至2005年整合平地造林地地理資訊的屬性資料，加上台糖公司造林地地籍圖修正處理後之地理資訊圖層及造林資料(Hsieh et al. 2011)，配合林務局農林航空

測量所提供2008年的1:2500製圖精度的航照正射數位影像，以及本研究於2009年9月至11月現地調查核對過程，所建立試驗地造林地之地理資訊。依據建置之台糖大農及大富農場造林地地理資訊為試驗地範圍，使用FS2所感測之試驗地影像(感測日期為2009年2月13日)多光譜影像(具有8 m空間解析度)，做為分析之來源。並挑選總面積最大(共167.85 ha)之光蠟樹純林造林地為研究分析之目標。本研究試驗地的光蠟樹純林造林地區塊分布如Fig. 1。

二、研究方法

(一)影像前處理與植生指數的建立

首先對FS2影像輻射值常態化處理與幾何再對位處理，包含波段輻射值轉換、太陽入射角糾正，以及FS2影像與平地造林地理資訊區塊之幾何再對位處理。要從眾多光學遙測多光譜波段組合的植生指數中，選取對試驗地材積推估有效的指數，由於植生指數之間彼此相關性高，並且受到林木所處地況的影響，分析時應該謹慎選取適

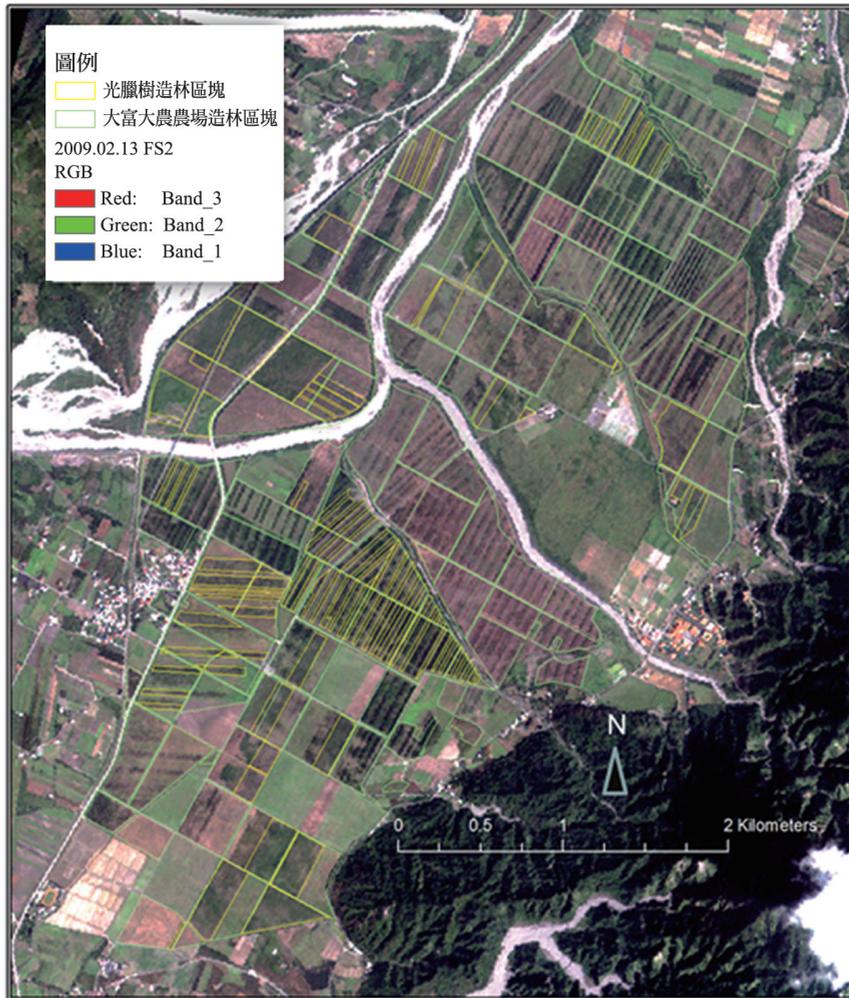


Fig. 1. Map of the experimental area showing the radiation-normalized FS2 image acquired on 13 February 2009. The overlaid green lines are boundaries of plantations, and the yellow lines stand for the boundaries of *Froxinus griffithii* plantation patches.

合試驗地環境背景之有力植生指標。本研究選擇以近紅外光與紅光波段組合的SAVI植生指數如第(1)式(Huete et al. 1988)，當作本研究代表的遙測植生指數，主要原因是考量本試驗地7至9年生幼齡光蠟樹林之冠層非鬱閉與現地的地被狀況，進而採用近紅外光段與紅光段組合的SAVI指數取代NDVI植生指數(Hsieh et al. 2011)。

第(1)式的L為土壤調整因子，會隨植被的覆蓋度而變化。以常數作為L的調整值，可用來減低NDVI對不同土壤反射變化的敏感性。當L值為0時SAVI值與NDVI值相等；當植被覆蓋度高的地區L值接近於0.25、植被覆蓋度中等的區域L值接近於0.5，植被覆蓋度低的區域L值接近於1。本研究區域的光蠟樹造林，根據前人研究地面樣區調查地的實況(Hsieh et al. 2011)，屬於植被覆蓋度中等的區域，因此本研究採用L值為0.5進行調整。

$$SAVI = \frac{(1+L)(\rho_{nir} - \rho_{red})}{\rho_{nir} + \rho_{red} + L} \quad (1)$$

L：土壤調整因子；

ρ_{nir} ：FS2近紅外光段；

ρ_{red} ：FS2紅光段

(二)植生指數分級與地面樣區的設置

以ISODATA影像非監督聚集分類法，將光蠟樹林分布區之SAVI影像依據指數值從低到高分成5級，以利依據分層目的取樣法(McCoy 2005)設定

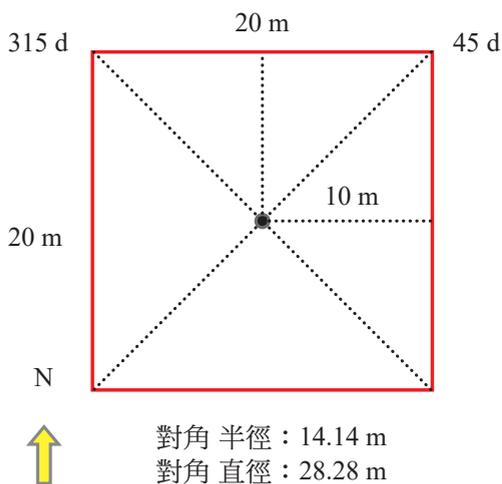


Fig. 2. Design of ground plots.

樣區分布位置(Hsieh et al. 2011)。地面樣區設置則以SAVI分級圖，針對光蠟樹林分布區塊內SAVI分級狀況，以每兩公頃設定一個20×20 m地面樣區(如Fig. 2)，要求樣區北方與遙測影像的像元方向一致，詳細方法請參考Hsieh et al. (2011)一文。本次配合LAI地面測量研究，共設置了70個地面樣區。

(三)地面樣區每木調查與材積計算

針對每個地面樣區進行每木調查，調查人員配合次米級GPS導航至樣區中心位置，應用羅盤儀快速定位出樣區的四個端點(如Fig. 2黑色虛線)，劃定樣區邊界(如Fig. 2紅色線)。於樣區內進行每木調查，以胸徑尺寸量取每木之胸高直徑(diameter at breast height, DBH)、以測高竿量測樹高(three height, H)。有關光蠟樹樣區立木材積計算，本研究採用(Luo and Feng 1986)光蠟樹材積式如第(2)式，當作地面樣區每木調查之光蠟樹總材積(wood volume, VOL) (m³)及平均每ha蓄積(m³/ha)數值計算的依據，詳細方法請參考Hsieh et al. (2011)。

$$VOL = 0.0000772 \times DBH^{1.8780277} H^{0.9124601} \quad (2)$$

VOL：立木材積(m³)；

DBH：胸高直徑(m)；

H：樹高(m)。

(四)地面樣區葉面積指數測量

本研究GLA法葉面積量測使用2台Canon 5D II全片幅數位單眼相機，搭配SIGMA (8 mm F3.5 EX DG Circular Fisheye)魚眼鏡頭，同時在林外開闊無遮蔽地架設一台，朝天頂拍攝，求取完全的全天空光(散射光)域作為拍攝當時的全天空光基準照片。另一台用在每一個20×20 m地面樣區內，平均設置4個觀測點(拍攝位置如Fig. 3的藍色點)，每點之間相隔距離至少10 m，可避免重複取樣，將相機鏡頭朝天頂，固定於離地1.3m高度的腳架上；為克服地形崎嶇影響，用水平儀將鏡頭調至水平，將焦距設定為無窮遠，朝上拍攝冠層180度全天空照片。拍攝時使記錄的相片頂部與正北方向重合，同時應避免攝影者進入拍攝範圍。為避免藍色天空背景影響全天空照片品質，照片選在陰天進行拍照(攝取的相片例如Fig. 4)。

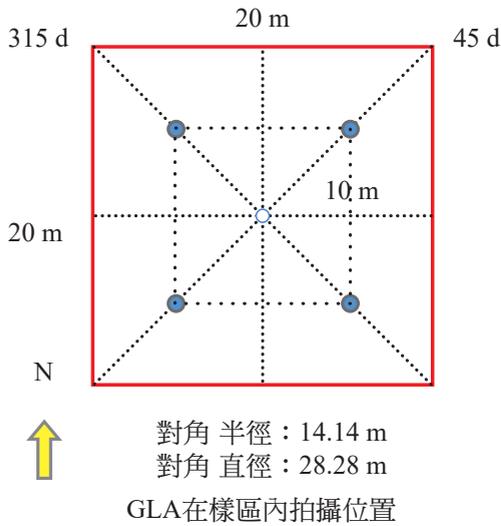


Fig. 3. The 4 blue points in the ground plot represent locations where photos were captured by the GLA method.

將每一樣區攝取的4張照片，以GLA軟體程式計算各別的冠層開闊度(COI)、葉面積指數LAI ring 4 (60°天頂角，以下簡稱LAI4)、LAI ring 5 (75°天頂角，以下簡稱LAI5) (Frazer et al. 2000)。以4張照片所得平均值當作樣區平均值，調查所得之COI

基本上代表冠層的孔隙率單位為%，值域範圍為[0,100]%，為了與材積量有正相關呈現，便利於後續最適迴歸式的分析，將其換算為本研究所定義的樹冠鬱閉度指數(canopy closure index, CCI)，其中 $CCI = 100 - COI$ (%) (Jelaska 2004, Guevara-Escobar et al. 2005, Paletto and Tosi 2009)。本研究樣區拍攝時間配合地面樣區每木調查完成後進行，70個樣區拍攝調查時間分別在2010年3月兩個陰天日及2010年10月兩個陰天日調查完成。

(五)蓄積量最適迴歸推估模式的建立

以每一個樣區之平均每ha林木材積蓄積量(VOL)作為依變數(dependent variable)，平均SAVI、CCI、COI、LAI4及LAI5分別當作自變數(independent variable)，除了進行單一變數線性迴歸分析外，依據前人研究成果(Qi et al. 2000, Song et al. 2011)，選取包含指數、二次式、三次式、冪次、對數及倒數等曲線估計(curve estimation)之迴歸統計分析；再依據個別曲線估計迴歸式的迴歸判定係數(解釋變異量) R^2 最大，且估計標準誤(estimated standard error, 或稱之為root mean square error, RMSE)最小為準則，從中與選取最適代表迴歸式。

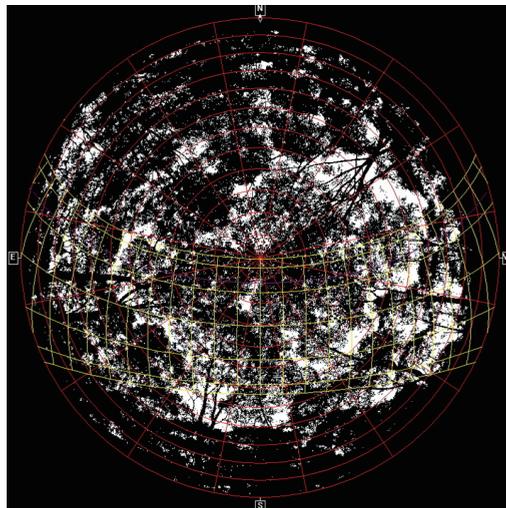


Fig. 4. For each measured point, the gap light analyzer (GLA) program was used to calculate the gap fraction of a hemispheric photo to obtain the canopy openness index (COI), leaf area index (LAI4) (60°), and LAI5 (75°).

(六)植生指數推估葉面積指數最適迴歸式的建立

以每一樣區平均CCI、COI、LAI4及LAI5 (以下將LAI4及LAI5兩者合稱LAI_s)分別當作依變數，平均SAVI當作自變數，進行單一變數線性迴歸及包含指數、二次式、三次式、冪次、對數及倒數曲線估計之迴歸統計分析；再依據個別曲線估計迴歸式的 R^2 最大且RMSE最小為準則，從中與選取最適代表迴歸式。

(七)最適材積推估式比較

針對從第(五)及第(六)步驟所得之最適推估迴歸式進行比較，以迴歸式估計殘差均方變異數F檢定法(Kovacs et al. 2004)，分析最適迴歸推估式之間的誤差的差異顯著性，並討論其優缺點。以SAVI最適材積推估迴歸式、最適LAI推估迴歸式及最適CCI推估迴歸式。由於SAVI影像得自FS2，所以FS2影像上每個像元(pixel)為 8×8 m空間解析度，都具有一個SAVI指數值，因此可以透過上述最適迴歸式，以SAVI (自變數)製作全試驗地光蠟樹林地VOL、LAI及CCI (應變數)空間分布圖。此外，可進一步代入一連串相乘積的碳吸存估算轉換係數。

以光蠟樹而言，其乘積最終值為平均每 m^3 生物量可以吸存0.446 ton的碳(Hsieh et al. 2011)，因而可推估得到光蠟樹碳吸存量空間分布圖。最後綜合整體研究結果，提出未來技術應用之建議與展望。

結果

一、樣區設置與調查

本研究考量FS2 SAVI指數在光蠟樹造林地林分內的空間異質分布，對SAVI從高到低分成5個等級當作分層的依據。以分層目的取樣法於試驗地內共設計並調查了70個地面樣區(70個樣區的調查時間從2009年11月至2010年11月，於一年內由林業試驗所森林經營組調查完成)。選用適用的光蠟樹材積式(第(2)式)計算樣區光蠟樹的蓄積量。運用統計資料探索過程及空間相關分析，過濾不符合簡單線性迴歸分析假定的樣區(Hsieh et al. 2011)，最後以60個地面樣區(樣區分布如Fig. 5)當作取樣的代表，依據每一樣區所在位置及面積，計算每一樣區的平均每ha的單位材積蓄積與平均SAVI值。

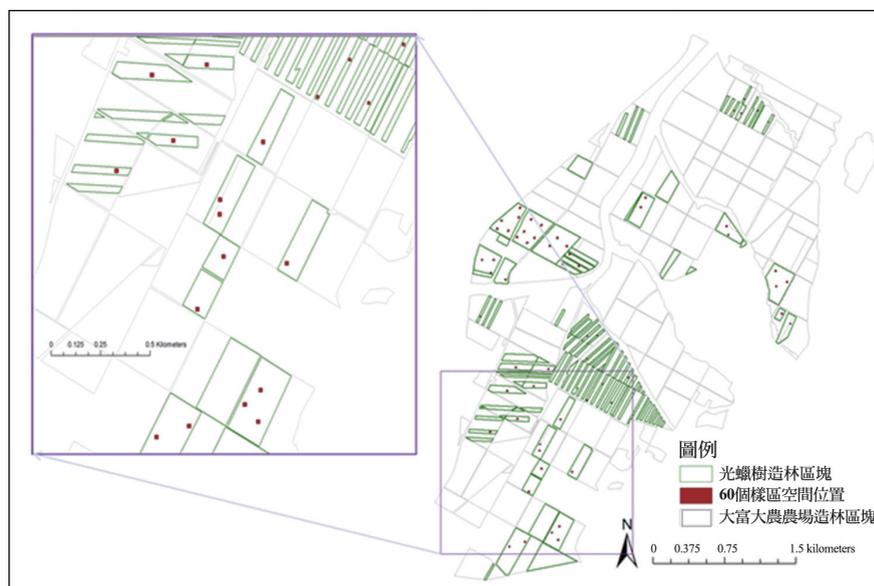


Fig. 5. Distribution of 60 ground plots in *Froxinus griffithii* stands (right), and partially enlarged view (left).

二、變數之間的相關分析

將本研究使用於統計分析之60個樣區平均值SAVI、CCI、LAI5、LAI4，胸高直徑(DBH)、樹高(H)、胸高斷面積(basal area, BSA)及VOL等八個變數進行兩兩相關分析，依據所得相關分析表(如Table 1)。分析結果得知8個變數之間兩兩具有顯著相關性，相關係數幾乎達到7.0以上，其中CCI、LAI4及LAI5三個變數之間具有相關係數9.0以上之高度相關性。SAVI與H相關性高於其他6個變數，LAI5、LAI4及CCI對VOL相關性高於H、DBH及BSA。H、DBH及BSA彼此之間相關性高相關係數皆大於0.9。以上變數，若當成自變數看待，彼此相關性高，代表有重複選取及可互相替代的可能性。

三、材積推估最適迴歸式

使用SAVI、LAI4、LAI5、COI及CCI對VOL建立的的最適推估式，除了COI對VOL的推估 R^2 為0.835外，其餘4者解釋變異量 R^2 皆可達0.94以上的高水準(如Table 2及Fig. 6)；其中CCI及SAVI為最適指數推估式，LAI5即LAI4為最適直線式，COI最適迴歸式為二次曲線式。CCI及SAVI兩者最佳指數估式，經由殘差均方變異數F檢定($MSE_{CCI}/MSE_{SAVI} = 2.378 > F(58,58)_{0.01} = 1.856$)，兩者估值有顯著差異($p > 0.01$)。LAI5即LAI4為最適直線式，經由殘差均方變異數F檢定($MSE_{LAI5}/MSE_{LAI4} = 1.044 < F(58,58)_{0.05} = 1.546$)，兩者估值無顯著差異($p < 0.05$)。

Table 1. Correlation coefficients among 8 variables

	SAVI	CCI	LAI5	LAI4	DBH	H	BSA	VOL
SAVI								
CCI		0.708**						
LAI5	0.703**	0.953**						
LAI4	0.694**	0.948**	0.989**					
DBH	0.726**	0.803**	0.765**	0.751**				
H	0.785**	0.812**	0.770**	0.758**	0.930**			
BSA	0.698**	0.765**	0.758**	0.740**	0.987**	0.904**		
VOL	0.735**	0.889**	0.909**	0.902**	0.869**	0.882**	0.863**	

**在顯著水準為0.01時(雙尾)，相關顯著。

SAVI, soil-adjusted vegetation index; CCI, canopy closure index; LAI5, leaf area index ring 5; LAI4, leaf area index ring 4; DBH, diameter at breast height; H, three height; BSA, basal area; VOL, wood volume.

Table 2. Optimal volume regression formulas through the soil-adjusted vegetation (SAVI), or leaf area indices (LAIs), or crown closure index (COI)

最適迴歸式	R^2	RMSE ($m^3 ha^{-1}$)	曲線類型
$\ln(VOL) = 0.046 CCI$	0.975**	0.404 (1.498)	指數
$\ln(VOL) = 2.805 SAVI$	0.948**	0.623 (1.864)	指數
$VOL = 19.348 LAI5$	0.946**	4.741	線性
$VOL = 17.880 LAI4$	0.944**	4.844	線性
$VOL = 49.522 - 1.013 COI$ $+ 0.006 COI^2$	0.835** (0.830)**	4.471	二次曲線

樣本數(N) = 60 **達0.001顯著水準 (R^2): 調整 R^2 (數值): 指數轉換值

RMSE, root mean square error; VOL, wood volume; SAVI, soil-adjusted vegetation index; CCI, canopy closure index; LAI5, leaf area index ring 5; LAI4, leaf area index ring 4, COI, crown openness index.

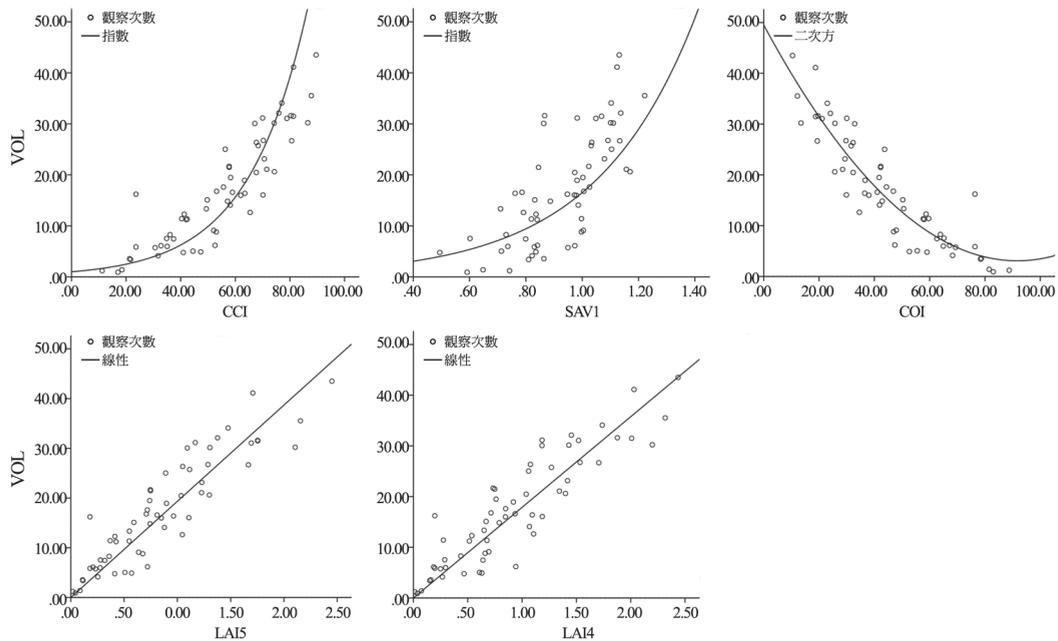


Fig. 6. Observation scatter diagrams and optimal regression curves using the soil-adjusted vegetation index (SAVI) and leaf area indices (LAIs) (x-axis) to estimate the wood volume (VOL) (y-axis).

四、SAVI與LAIs最適迴歸式

使用SAVI推估CCI、COI、LAI4及LAI5指數，所得結果除了SAVI對CCI最適推估式為指數式外，其餘3者皆能建立無常數項之二次曲線最適推估式，其解釋變異量皆達0.858以上的高水準(如Table 3及Fig. 7)。其中由SAVI推估CCI的指數式，解釋變異 R^2 最高達到0.983，RMSE經指數換算後為1.67%，相對SAVI對COI的最佳二次曲線估式 R^2 可達0.948，但RMSE高達13.863%。SAVI對LAI4及LAI5最適二次曲線RMSE分別為0.391及0.420，經由殘差均方變異數F檢定($MSE_{LAI4}/MSE_{LAI5} = 1.154 < F(58,58)_{0.05} = 1.546$)，兩者的推估式無顯著差異($p < 0.05$)。

討論

一、最適材積推估模式比較

從前述結果第三、分析結果得知，使用CCI、SAVI及LAIs推估材積皆可達到良好結果，因為將COI轉換為CCI後，CCI代

表樣區的平均樹冠鬱閉度與SAVI代表綠色生物量的高低較為一致，所以使用COI直接推估VOL的解釋變異量較低(Table 2)，不如轉換後的CCI。其中由SAVI推估式經指數換算後的RMSE = 1.864 $m^3 ha^{-1}$ ，由CCI推估式經指數換算後的RMSE = 1.498 $m^3 ha^{-1}$ ，兩者最佳指數推估式經由殘差均方變異數F檢定兩者估值有極顯著差異，因此由CCI推估VOL的指數式誤差較小，優於SAVI推估式，成為本研究的使用GLA法測得的指數最佳VOL指數型推估式：

$$\ln(VOL) = 0.046 CCI \quad R^2 = 0.975 \quad (3)$$

迴歸檢定變異數分析表如Table 4

使用FS2 SAVI指數推估VOL的最適指數型推估式為：

$$\ln(VOL) = 2.805 SAVI \quad R^2 = 0.948 \quad (4)$$

LAI5及LAI4對VOL最適推估式皆為直線式，兩者RMSE分別為4.741 $m^3 ha^{-1}$ 、4.884 $m^3 ha^{-1}$ ，經由殘差均方變異數F檢定，兩者並無顯著差異，從Table 1相關分析表的知LAI5與LAI4兩

者相關係數高達0.989，因此兩者是重複的自變數，只要從中選取一種當作自變數來推估材積即可。因此本研究的最適LAI推估材積式為：

$$VOL = 19.384 LAI5 \quad R^2 = 0.946 \quad (5)$$

所以應用第(4)式SAVI最適推估模式的建

立，可以間接推估光蠟樹林分的材積(VOL)，並可透過福衛二號8 m空間解析度，展繪出單位面積材積空間分布圖(如Fig. 8)，顯現出光蠟樹造林成果的空間異質性，達成推估之最大效益。然而使用CCI及LAI只能推估60個樣區的材

Table 3. Optimal leaf area index (LAI) regression formulas through the soil-adjusted vegetation index (SAVI)

最適迴歸式	R^2	RMSE	曲線類型
$\ln(CCI) = 4.163 SAVI$	0.983**	0.513 (1.670%)	指數
$COI = 202.89 SAVI - 161.67 SAVI^2$	0.924** (0.921)**	13.863%	二次曲線
$LAI4 = -1.001 SAVI + 2.093 SAVI^2$	0.860** (0.855)**	0.420	二次曲線
$LAI5 = -1.035 SAVI + 2.042 SAVI^2$	0.858** (0.853)**	0.391	二次曲線

樣本數(N) = 60 **達0.001顯著水準 (R^2): 調整 R^2 (數值): 指數轉換值

RMSE, root mean square error; SAVI, soil-adjusted vegetation index; CCI, canopy closure index; LAI5, leaf area index ring 5; LAI4, leaf area index ring 4; COI, crown openness index.

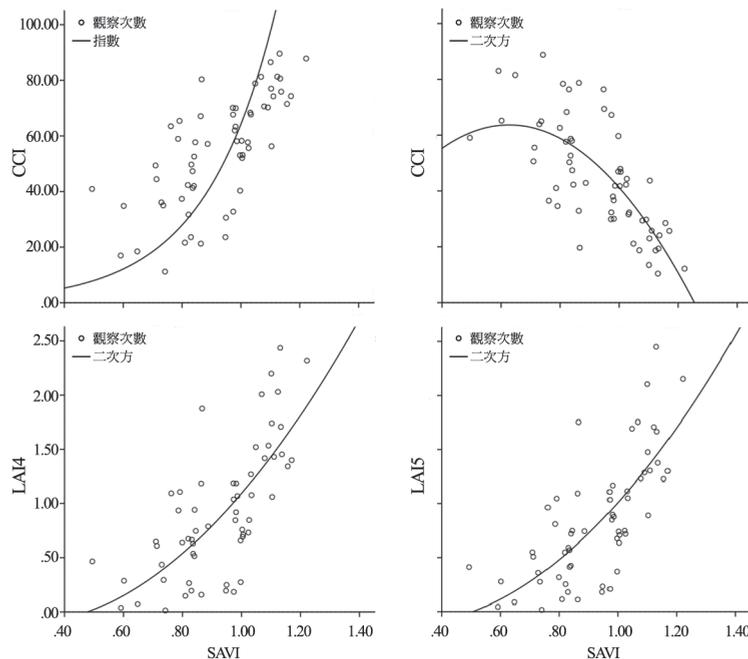


Fig. 7. Observation scatter diagrams and optimal regression curves using the soil-adjusted vegetation index (SAVI) (x-axis) to estimate leaf area indices (LAIs), canopy openness index (COI), and crown closure index (CCI) (y-axis).

Table 4. Variance test of the regression analysis using the crown closure index (CCI) to estimate wood volume (VOL)

(a) 模式摘要^a

	<i>R</i>	<i>R</i> 平方	調過後的 <i>R</i> 平方	估計的標準誤
	0.988	0.975	0.975	0.404

自變數是CCI；CCI, crown closure index；依變數是ln (VOL)；VOL, wood volume.
方程式在沒有常數條件的情況下加以估計。

(b) ANOVA^a

	平方和	df	平均平方和	<i>F</i>	顯著性
迴歸	428.629	1	428.629	2332.733	0.000
殘差	10.841	59	0.184		
總數	439.470	60			

自變數是CCI；CCI, crown closure index.

a. 方程式在沒有常數條件的情況下加以估計。

(c) 係數

	未標準化係數		標準化係數	<i>t</i>	顯著性
	B之估計值	標準誤	Beta分配		
CCI	0.046	0.001	0.988	48.298	0.000

積，以樣區調查法(Hsieh et al. 2011)推估試驗地的光蠟樹平均單位材積及總材積量，無法繪製空間分布圖。

二、最適葉面積指數推估式比較

從前述結果第四、分析結果得知，SAVI對LAI4與LAI5的最適推估迴歸式為二次曲線式，兩者無顯著差異，此與兩者對材積最適推估式相似(Table 3)，皆起因於LAI4及LAI5具有高相關，事實上僅選用LAI5這個代表葉面積指數即可。因此本研究SAVI對LAI最適推估迴歸式為：

$$LAI5 = -1.035 SAVI + 2.042 SAVI^2 \quad adj R^2 = 0.853 \quad (6)$$

迴歸檢定變異數分析表如Table 5

由於SAVI對COI的最適推估二次曲線的RMSE高達13.68%，相對將COI轉換為CCI後，SAVI對CCI推估最適指數式，其對數轉換後的RMSE只有1.67%，因此本研究的SAVI對CCI最適推估迴歸式為：

$$\ln (CCI) = 4.163 SAVI \quad R^2 = 0.983 \quad (7)$$

因而應用SAVI對葉面積指數最適推估模式第(6)及第(7)式，可以間接推估光蠟樹林分的CCI、LAI5，透過福衛二號8 m空間解析度的個別像元之SAVI值，可展繪出CCI林冠鬱閉度分布圖(如Fig. 9)及LAI5葉面積指數分布圖(如Fig. 10)，顯現出光蠟樹造林冠層結構參數的空間異質性。缺點是為獲取正確的SAVI等植生指數，在遙測影像的前處理及影像分析流程較專業且複雜，惟在技術上可以建立標準作業流程(standard operating procedures, SOP)，加以推廣應用。

三、GLA估算樣區的葉面積指數的應用

使用GLA葉面積指數法於地面樣區從冠層底部往上拍攝量測，可測得LAIs及COI (可轉換成CCI)，不但方法簡易，而且比起在地面樣區中進行每木調查所需時間及人力少了很多。GLA之LAI樣區調查法可以取代耗時且耗工、僅能從少數樣區取樣之破壞性LAI測量的方法。GLA樣區調查法所得知CCI可以取代測量樣區

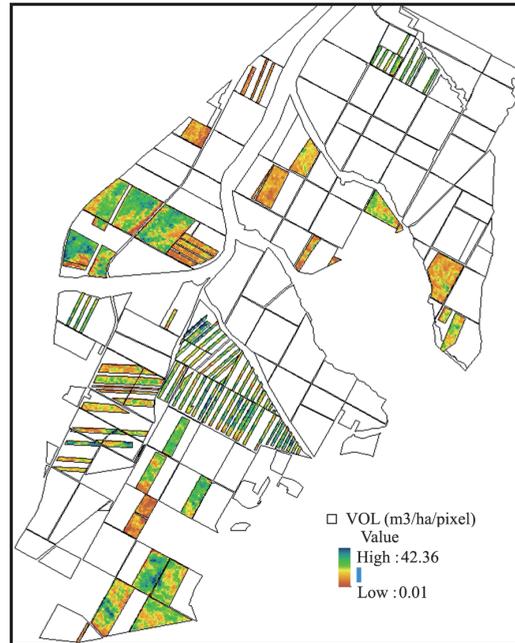


Fig. 8. Map showing heterogeneous distributions of estimated *Froxinus griffithii* volumes ($\text{m}^3 \text{ha}^{-1} \text{pixel}^{-1}$) through the optimal soil-adjusted vegetation index (SAVI) regression curve.

Table 5. Variance test of the regression analysis using the soil adjusted vegetation index (SAVI) to estimate leaf area index ring 5 (LAI5)

(a) 模式摘要^a

	<i>R</i>	<i>R</i> 平方	調過後的 <i>R</i> 平方	估計的標準誤
	0.926	0.858	0.853	0.391

自變數是 SAVI ; SAVI, soil adjustes index ; 依變數是LAI5; LAI5, leaf area index ring 5.

a. 方程式在沒有常數條件的情況下加以估計。

(b) ANOVA^a

	平方和	df	平均平方和	<i>F</i>	顯著性
迴歸	53.492	2	26.746	174.950	0.000
殘差	8.867	58	0.153		
總數	62.359	60			

自變數是 SAVI ; SAVI, soil adjustes index.

a. 方程式在沒有常數條件的情況下加以估計。

(c) 係數

	未標準化係數		標準化係數	<i>t</i>	顯著性
	B之估計值	標準誤	Beta分配		
SAVI	-1.035	.370	-.954	-2.796	.007
SAVI ²	2.042	.375	1.860	5.450	0.000



Fig. 9. Canopy closure index (CCI) estimation map through the optimal soil-adjusted vegetation index (SAVI) regression curve.

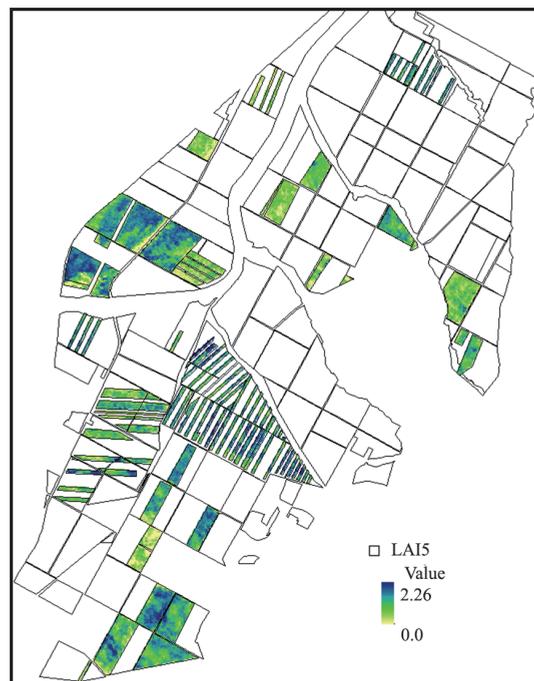


Fig. 10. Leaf area index (LAI) estimation map through the optimal soil-adjusted index (SAVI) regression curve.

每木樹冠投影之橢圓長短軸所測量的冠幅投影，粗略估算竊耗時的冠幅(樹冠覆蓋度)的量測方法。缺點是，單獨應用GLA之LAI、CCI最適材積推估式，無法繪製如FS2 SAVI遙測植生指數推估CCI、LAI及VOL分布圖，只能適用於樣區推估法推估試驗區域的總材積量。未來若能充分整合空載光達、衛星或無人機光學遙測影像之植生指數、連結地面GLA LAI、CCI及地面樣區每木調查的材積，使用多重取樣的調查方法(Kangas and Maltamo 2006, Lupke et al. 2012, Stephens et al. 2012)，運用GLA之LAI及CCI樣區數位半球照片量測，取代一部分地面樣區的每木調查，可節省時間及人力投入之成本，進而快速達成大面積平地造林蓄積量，再代入相關的轉換係數(Hsieh et al. 2011)，可獲得碳吸存估測空間分布圖製作(如Fig. 11)。

四、未來研究的展望

本研究目前僅使用容易取得(可省力、省

時)的FS2 SAVI植生指數及GLA LAI指數，已在平地造林地之幼齡光蠟樹純林獲得良好材積的推估。後續研究可先朝向平地造林地之其他樹種或混交種植區，甚至不同林齡及林分結構人工林栽植區進行研究，以拓展研究的應用價值。若能同樣獲得良好研究成果，則可進一步在其他地形起伏較大的山坡地人工造林區，針對不同林型進行研究；畢竟過去在山區進行的研究(Cheng et al. 1997)，遙測光譜資訊受到地形遮蔽及大氣效應的影響不容忽視。

本研究目前僅使用SAVI或LAI單變數的簡單迴歸分析，即能獲得良好的材積推估。由於所選用的自變數(如Table 1)彼此之間相關係數高，不適合一起當作自變數，用於多元迴歸式的建立。若未來在其他山地進行研究SAVI指數變異可能變大時，可再加入H、DBH、BSA、LAIs、COI與CCI等多個自變數，應用多變數主成分分析或因素分析等方法，減低相關係數高的自變項間之相互影響及共線性等問題，並以

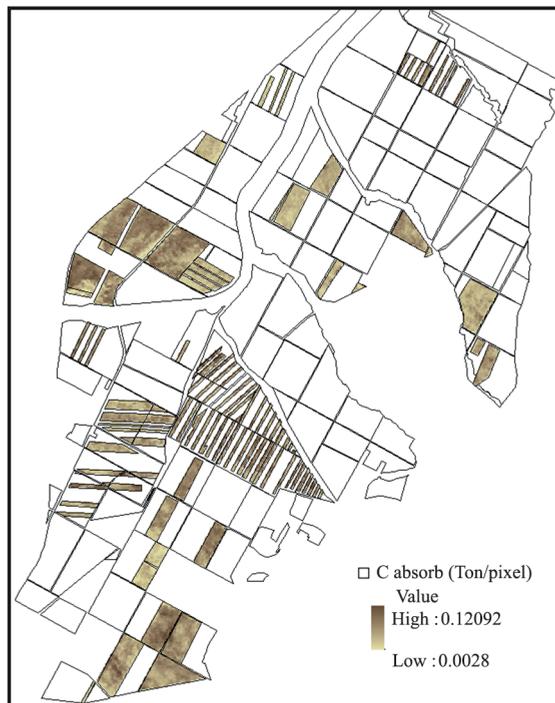


Fig. 11. Carbon sequestration (ton pixel⁻¹) map derived from Fig. 8 multiplied by the relevant conversion factors of *Froxinus griffithii*.

多元逐步迴歸分析法選取有效的變數，建立最合適迴歸模式，供人工造林地材積推估的研究。

結論

本研究所建立的最適迴歸式解釋變量達94%以上，研究結果顯示連結高解析度福衛二號光學遙測植生指數與地面量測的GLA葉面積指數，用來推估光蠟樹單人工林蓄積量具有相當的可應用性。研究成果可透過FS2 8 m空間解析度的像元，展繪出蓄積量、葉面積指數、及林冠開闊度(鬱閉度)等分布圖，表現出平地造林成果的空間異質性，達成空間推估之製圖效益。雖然使用遙測影像的前處理及影像處理流程較為專業且複雜，但在技術上可以建立SOP程序加以推廣應用。使用GLA法於地面樣區能快速量測可得LAIs及COI，量測方法相對簡易，比起於地面樣區中每木調查所需時間及人力少了很多，惟其所得最適材積推估式，單獨應用無法繪製如遙測影像推估的空間分布圖，只能適用於以樣區調查法推估試驗區域的總材積量。未來若能充分整合樣區的遙測所得之植生指數及一部分由地面樣區GLA測量之LAI，以之連結較少樣區數的每木調查的材積，應用多重取樣的方法，進行林分蓄積量的推估，將可解省地面樣區每木調查所需的時間及人力投入，達成大面積平地造林蓄積量精確估測，也有利於大面積平地造林成果對碳吸存量之良好估測。

謝誌

本研究報告得以順利發表，要感謝2位匿名專業審查委員悉心閱讀及審查內容，並提供寶貴修正意見。此外，本研究調查工作得以完成，要感謝林業試驗所植物園組林謙佑在GLA現場調查，及估算上的幫忙。同時要感謝林業試驗所經營組邱志明組長調派地面樣區調查人力，組成本研究的光蠟林調查小隊。其中小隊長為謝漢欽，參加調查的隊員有張鈞媛、彭建祥、謝亦棠、李靜怡、王慈憶、林鈺蓉、吳宜蓁、汪大雄、劉錦坤及鍾智昕等。有了他們參與的貢獻，本研究才

能於短期內完成所有70個地面樣區的調查工作。本研究經費由農委會林試所森林經營組科技計畫及林業發展計畫支援，在此一併致謝。

引用文獻

- Chen CH, Lin TC, Hwong JL. 2007.** Variations in the leaf area index and its effect on estimations of primary production in a natural hardwood forest and a *Cunninghamia lanceolata* plantation at the Lienhuachi experimental forest, central Taiwan. *Taiwan J For Sci* 22(4): 423-39. [in Chinese with English summary].
- Chen JM, Govind A, Sonnentag O, Zhang Y, Barr A, Amiro B. 2006.** Leaf area index measurements at Fluxnet-Canada forest sites. *Agric For Meteorol* 140:257-68.
- Cheng CC, Chiou CR, Chen YC. 1997.** Applying a remote sensing method for estimating leaf area index of Taiwan plantations. *Taiwan J For Sci* 12(3):309-17. [in Chinese with English summary].
- Frazer GW, Canham CD, Lertzman KP. 1999.** Gap Light Analyzer (GLA), Version 2.0: imaging software to extract canopy structure and gap light transmission indices from true-colour fisheye photographs, users manual and program documentation. Simon Fraser Univ. BC, Canada, and the Institute of Ecosystem Studies, Millbrook, NY.
- Frazer GW, Canham CD, Lertzman KP. 2000.** Departments-Technological Tools_Gap Light Analyzer. version 2.0. *Bulle Eco Soci America* July:191-6.
- Frazer GW, Fournier RA, Trofymow JA, Hall RJ. 2001.** A comparison of digital and film fisheye photography for analysis of forest canopy structure and gap light transmission. *Agric For Meteorol* 109:249-63.
- Glenn EP, Huete AR, Nagler PL, Nelson SG. 2008.** Relationship between remotely-sensed vegetation indices, canopy attributes and plant

- physiological processes: What vegetation indices can and cannot tell us about the landscape. *Sensors* 8(4):2136-60.
- Guevara-Escobar A, Tellez J, Gonzalez-Sosa E. 2005.** Use of digital photography for analysis of canopy closure. *Agrofor Syst* 65(is3): 175-85.
- Hanes JM, editor. 2014.** Biophysical applications of satellite remote sensing. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag Press. p 230.
- Hamlyn GJ, Vaughan RA. 2010.** Remote sensing of vegetation-principles, techniques, and applications. New York: Oxford Univ. Press. p 352.
- Hsieh HC, Wang DH, Wang TZ, Chang JY, Chiu CM. 2011.** Applying Formosat-2 image and field survey data to estimate carbon sequestration in *Fraxinus* farm afforestation. *J Photog Remote Sens* 16(2):79-99. [in Chinese with English summary].
- Huete AR. 1988.** A soil adjusted vegetation index (SAVI). *Int J Remote Sens* 9:295-309.
- Jarcuska B. 2008.** Methodological overview to hemispherical photography, demonstrated on an example of the software GLA. *Folia Oecol* 35(1):66-9.
- Jarcuska B, Kucbel S, Jalovlar P. 2010.** Comparison of output results from two programmes for hemispherical image analysis: Gap Lighter Analyser and WinScanopy. *J For Sci* 56(4):147-53.
- Jelaska SD. 2004.** Analysis of canopy closure in the Dinaric silver fir-beech forests (*Omphalodo-Fagetum*) in Croatia using hemispherical photography. *Hacquetia* 3/2.2004:43-9.
- Jonckheere I, Fleck S, Nackaerts K, Muys B, Coppin P, Weiss M, Baret F. 2004.** Review of methods for in situ leaf area index determination. Part I. Theories, sensors and hemispherical photography. *Agric For Meteorol* 121:19-35.
- Kangas A, Maltamo M (Eds.). 2006.** *Forest_Inventory_Methodology and applications.* Dordrecht, the Netherlands: Springer. p 362.
- Kovacs JM, Florres-Verdugo F, Wang J, Aspen LP. 2004.** Estimating leaf area index of degraded mangrove forest using high spatial resolution satellite data. *Aquat Bot* 80:13-22.
- Lin KC, Horng FW, Yu HM, Ma FC. 1994.** Biomass and leaf area index estimates of broadleaf forests in Fu-shan forest. Taiwan. *Q J For Inst Res* 9(4):299-315. [in Chinese with English summary].
- Lin LP, Wang CK, Tseng YH, Chu HJ. 2014.** Estimation of forest canopy model and leaf area index using airborne LiDAR data. *J Photog Remote Sens* 19(2):107-23. [in Chinese with English summary].
- Lin TC, Chiang JM. 2002.** Applications of hemispherical photographs in studies of forest ecology. *Taiwan J For Sci* 17(3):387-400. [in Chinese with English summary].
- Liu Y, Liu R, Chen J, Cheng X, Zheng G. 2013.** Current status and perspectives of leaf area index retrieval from optical remote sensing data. *J Geo-Inf Sci* 15(5):734-43. [in simple Chinese with English summary].
- Luo SF, Wei CH, Lee CC, Chen CT. 2009.** Forest health inventory by remote sensing technology for the *Cryptomeria* plantation forest in Chitou area. *Q J For Res* 3(1):37-54. [in Chinese with English summary].
- Luo SL, Feng HL. 1986.** Taiwan's first change of forest afforestation-tree growth and growth situation investigation. Taipei, Taiwan: Taiwan Forest Bureau, Taichung, Taiwan: National Chung Hsing Univ. Press. [in Chinese with English summary].
- Lupke NV, Hansen J, Saborowski J. 2012.** A three-phase sampling procedure for continuous forest inventory with partial re-measurement and updating of terrestrial sample plots. *Eur J For Res* 131:179-90.
- Madugundu R, Nizalapur V, Jha CS. 2008.**

Estimation of LAI and above-ground biomass in deciduous forests: Western Ghats of Karnataka, India. *Int J Appl Earth Observ* 10:211-9.

McCoy RM. 2005. Field methods in remote sensing. New York: The Guilford Press. p 159.

Paletto A, Tosi V. 2009. Forest canopy cover and canopy closure: comparison of assessment techniques. *Eur J For Res* 128:265-72.

Peng BS, Hsieh YT, Chen CT. 2008. Relationship between the airborne laser penetration index and leaf area index by LiDAR data analysis of a Sugi plantation. *Taiwan J For Sci* 23(Suppl):S63-73. [in Chinese with English summary].

Qi J, Kerr YH, Moran MS, Weltz M, Huete AR, Sorooshian S, Bryant R. 2000. Leaf area

index estimates using remotely sensed data and BRDF models in a semiarid region. *Remote Sens Environ* 73:18-30.

Song C, Gray JM, Gao F. 2011. Remote sensing of vegetation with Landsat imagery. In: Weng Q, editor. *Advances in environmental remote sensing-sensors, algorithms, and applications*. New York: CRC Press. p 3-23.

Stephens PR, Kimberley MO, Beets PN, Paul TSH, Searles N, Bell A, et al. 2012. Airborne scanning LiDAR in a double sampling forest carbon inventory. *Remote Sens Environ* 117:348-57.

Zheng G, Moskal LM. 2009. Retrieving leaf area index (LAI) using remote sensing: theories, methods and sensors. *Sensors* (9):2719-45.

