

行政院農業委員會林務局委託研究計畫系列 100-00-5-07

遙測技術應用於平地造林碳匯計量之研究(3/3)

期末報告



委託機關：行政院農業委員會林務局

執行機關：國立臺灣大學森林環境暨資源學系

中華民國 100 年 11 月

章節目錄

章節目錄.....	I
圖目錄.....	III
表目錄.....	VII
摘要.....	1
壹、計畫目標.....	2
貳、研究架構.....	3
一、研究地區.....	3
二、研究材料.....	4
三、研究流程.....	6
四、研究方法.....	9
(一) 三種量測樹冠方法特色比較.....	9
(二) 樹冠模擬模型之建立.....	19
(三) 林分景觀模擬之建立.....	29
參、前年度研究結果回顧.....	43
一、98年度研究結果.....	43
二、99年度研究結果.....	50
(一) 樣區設置與調查.....	50
(二) 立地條件調查與分析.....	52
(三) 迴歸分析.....	55
(四) 材積估算與碳含量轉換結果.....	59
肆、本年度研究成果.....	61
一、更新研究區域內平地林地 GIS 資料庫.....	61

二、 樹冠景觀模擬結果.....	72
三、 林分景觀模擬結果	76
四、 樹冠模型模擬林分鬱閉展示—以光臘樹為例	78
五、 三種量測樹冠方法結果	81
六、 林分景觀變化模擬	90
七、 三年度計畫研究結果	91
伍、 結論與建議.....	92
陸、 參考文獻.....	94
附錄一、100 年度委託研究計畫期中報告委員審查意見辦理情形表.....	97
附錄二、100 年度委託研究計畫期末報告委員審查意見辦理情形表.....	99

圖目錄

圖 1 研究地區.....	3
圖 2 研究流程圖.....	6
圖 3 量測樹冠方法比較圖.....	10
圖 4 (a)冠層鬱閉度與(b)冠層覆蓋度示意圖.....	12
圖 5 同樣角度下樹冠孔隙度受樹高影響情形.....	13
圖 6 半球面影像.....	14
圖 7 半球面攝影使用器材.....	14
圖 8 半球面影像模擬介面.....	16
圖 9 半球面影像模擬過程.....	17
圖 10 半球面影像模擬成果.....	18
圖 11 Onyx TREE BROADLEAF 7.0.....	19
圖 12 Onyx 樹冠模擬軟體介面.....	20
圖 13 樹幹組成設定介面.....	21
圖 14 大樹枝組成設定介面.....	22
圖 15 各級樹枝組成設定介面.....	23
圖 16 小細枝組成設定介面.....	24
圖 17 枝幹材積參數設定介面.....	25
圖 18 葉柄與樹葉組成設定介面.....	26
圖 19 2D 樹冠模型模擬成果匯出介面.....	27
圖 20 3D 樹冠模型模擬成果匯出介面.....	28
圖 21 Visual Nature Studio.....	29
圖 22 建立新檔案介面.....	30

圖 23 匯入林分 Shapefile 介面	30
圖 24 設定地圖座標系統.....	31
圖 25 檢視林分 Shapefile database.....	31
圖 26 影像地形高程設定介面.....	32
圖 27 匯入樹冠模型介面.....	32
圖 28 檢視匯入之 3D 物件.....	33
圖 29 對焦於匯入之 3D 物件.....	33
圖 30 調整參數.....	34
圖 31 調整樹冠顯示色彩介面-1	35
圖 32 調整樹冠顯示色彩介面-2	36
圖 33 調整樹冠顯示色彩介面-3	36
圖 34 調整樹冠顯示色彩介面-4	37
圖 35 調整後色彩屬性與原檔比較.....	37
圖 36 建立林分位置圖層與樹冠模式關聯性-1	38
圖 37 建立林分位置圖層與樹冠模式關聯性-2	39
圖 38 設定林分地表模擬.....	40
圖 39 設定林分地表組成.....	41
圖 40 林分景觀模擬設定介面.....	42
圖 41 光臘樹林分參數與光譜資訊迴歸結果.....	44
圖 42 光臘樹林分覆蓋度與成活率之二次多項式迴歸.....	47
圖 43 林分覆蓋度、林分材積、成活率之像元空間分布圖.....	47
圖 44 現地林木生長狀況照片與林分材積像元空間分布圖之連結.....	49
圖 45 1 公頃樣區樹種分布與次樣區編號.....	50

圖 46	1 公頃樣區與均質區套疊圖(黑色區域為均質林分).....	50
圖 47	二種立地級分類結果散布圖.....	52
圖 48	二種立地級分類次樣區分布圖.....	53
圖 49	林分鬱閉、林分樹冠、林分覆蓋立地級分布圖.....	56
圖 50	樣區推算與模式估算蓄積量空間分布圖.....	59
圖 51	造林小區.....	62
圖 52	光臘樹樹冠模型模擬結果.....	65
圖 53	檫樹冠模型模擬結果.....	66
圖 54	茄冬樹冠模型模擬結果.....	67
圖 55	台灣欒樹樹冠模型模擬結果.....	68
圖 56	楓香樹冠模型模擬結果.....	69
圖 57	杜英樹冠模型模擬結果.....	70
圖 58	樟樹樹冠模型模擬結果.....	71
圖 59	台灣赤楊樹冠模型模擬結果.....	72
圖 60	烏心石樹冠模型模擬結果.....	73
圖 61	無患子樹冠模型模擬結果.....	74
圖 62	楠木樹冠模型模擬結果.....	75
圖 63	光臘樹林分景觀模擬結果-1.....	76
圖 64	光臘樹林分景觀模擬結果-2.....	76
圖 65	光臘樹林分景觀模擬結果-3.....	77
圖 66	光臘樹各級樹冠模型.....	78
圖 67	各種光臘樹林分組成景觀及半球面影像(圖組).....	80
圖 68	每木位置圖.....	82

圖 69 三種樹冠量測結果與林分材積之迴歸.....	83
圖 70 三種樹冠量測方法之迴歸分析.....	84
圖 71 實際與模擬半球面影像對照(圖組).....	86
圖 72 林分材積與光譜資訊迴歸圖.....	87
圖 73 光臘樹光譜資訊與三種樹冠量測結果之迴歸圖.....	89
圖 74 光臘樹林分修枝前後模擬景觀.....	90
圖 75 應用三年度研究方法於 100 年度資料之結果.....	91

表目錄

表 1 臺糖公司造林地基本屬性台帳資料(節錄).....	4
表 2 光復造林地各樹種栽植面積(整理自臺糖公司台帳資料).....	5
表 3 光臘樹光譜資訊與林分參數推估模式之 R^2 值.....	43
表 4 各模型函式表.....	44
表 5 98 年度計畫樣區調查結果.....	45
表 6 各模式估算結果與樣區估算結果比較.....	48
表 7 公頃次樣區調查資料表.....	51
表 8 各立地級平均林分參數與土壤性狀.....	54
表 9 各迴歸預測式之決定係數(R^2).....	55
表 10 林分鬱閉立地級平均林分參數與土壤性狀.....	57
表 11 各最佳預測式之變數標準化係數整理.....	58
表 12 光復造林地樹種權種面積.....	63
表 13 模擬光臘樹林分組成分級表.....	79
表 14 三種量測光臘樹樹冠方法結果.....	81
表 15 林分材積與覆蓋度/鬱閉度之迴歸結果.....	83
表 16 光臘樹林分材積與光譜資訊之迴歸結果.....	87
表 17 光臘樹光譜資訊與三種樹冠量測結果之迴歸結果.....	88

摘要

本計畫為三年期延續性計畫，前二年建置光復造林地空間資訊資料庫，內含樹種分布、樹種面積等資訊，結合衛星影像光譜資訊發展樣區設置流程，利用樣區每木調查資料和光譜資訊 NDVI、SAVI 迴歸分析建立林分參數估算模式，第二年度並引進林分鬱閉度變數，進行多元迴歸分析，增加估測模式預測能力，繪製出林分材積空間分布圖，能夠清楚掌握林分生長好壞分布情形。第三年度計畫發展景觀模擬作業流程，根據前二年調查之每木生長資料與每木位置，模擬現地真實情況，合成出模擬半球面影像，分析得到模擬鬱閉度，作為與光譜資訊結合的媒介，結果發現模擬鬱閉度可以代替林分鬱閉度作為估測變數，建立之林分材積估測模式 R^2 高達 0.98，此法省去大規模的現地調查作業，更快速建立大面積地景林分參數估測模式，以及預測不同撫育作業之未來生長趨勢景觀，幫助森林經營管理者做決策。

關鍵字：平地造林、林分材積、覆蓋度、鬱閉度、半球面影像、景觀模擬

壹、計畫目標

近年來隨著氣候變遷議題逐漸獲得重視，而森林因光合作用過程中具有吸收二氧化碳的能力(Roy & Ravan, 1996)，因此森林碳匯功能，已成為森林經營的重點(S. Brown, Schroederb, & Kernb, 1999)，在台灣地區亦成為平地造林的重要目的之一。然而在森林碳匯功能的評估上，需要完整的定量評估方式，亦就是能透過量化的計算，讓實際的碳匯數量能夠被計算出來，而此種計量的方式因尺度不同而會應用不同的調查技術。例如在大範圍的大尺度方面，可透過各式遙測技術來進行，至於小區域的尺度上，則利用地面樣區的數量，精確地估算林分蓄積量，此種林分層級尺度的計量方式，在森林經長期的發展已形成完整的估算方式，但在地景尺度(Landscape Scale)方面，則尚未形成良好的估算作業方法，尚有待加強研究如何形成林分—地景完整的計量模式。本計畫前2年已建立光譜資訊加入立地條件的大面積蓄積量估算模式，但成果常受到不同林分鬱閉程度之影響，故仍須建立快速且正確的林分鬱閉評估技術，以整合林分鬱閉資訊來提高光譜資訊估算大面積蓄積量之正確性。本計畫結合遙測與地面調查技術，發展適用於估算大面積平地造林地碳匯數量的作業方法，以期快速且正確掌握平地造林現況，重要工作項目如下。

1. 更新研究區域內平地林地 GIS 資料庫
2. 建立常見造林樹種樹冠模擬模型，做為鬱閉度與景觀評估之用
3. 利用樹冠模擬模型模擬林分鬱閉情形
4. 利用樹冠模擬模型模擬林分景觀，評估其景觀變化情形
5. 林分鬱閉度量測：魚眼鏡頭拍攝影像與 LAI 樹冠分析儀量測
6. 比較評估三種林分鬱閉量測技術（冠幅測量、半球面影像分析、LAI 計算）
7. 建立不同光譜植生指數與林地鬱閉度關係
8. 整合 1 公頃大樣區與臨時樣區建立光譜與林分參數關係
9. 建立光譜植生指數推估林分材積之材積空間分布模式

貳、 研究架構

一、 研究地區

臺糖公司所屬平地造林占國內「平地造林與綠美化計畫」造林面積逾8成以上，係為臺灣平地造林重點部分(陳仲賢、何湘梅，2008)，其造林台帳資料完整清楚，樹種面積、栽植年度與栽植密度等皆有記載，本研究對象遂以臺糖公司花蓮縣光復鄉大富大農農場平地造林計畫為主要執行區域為試驗地(圖 1)。

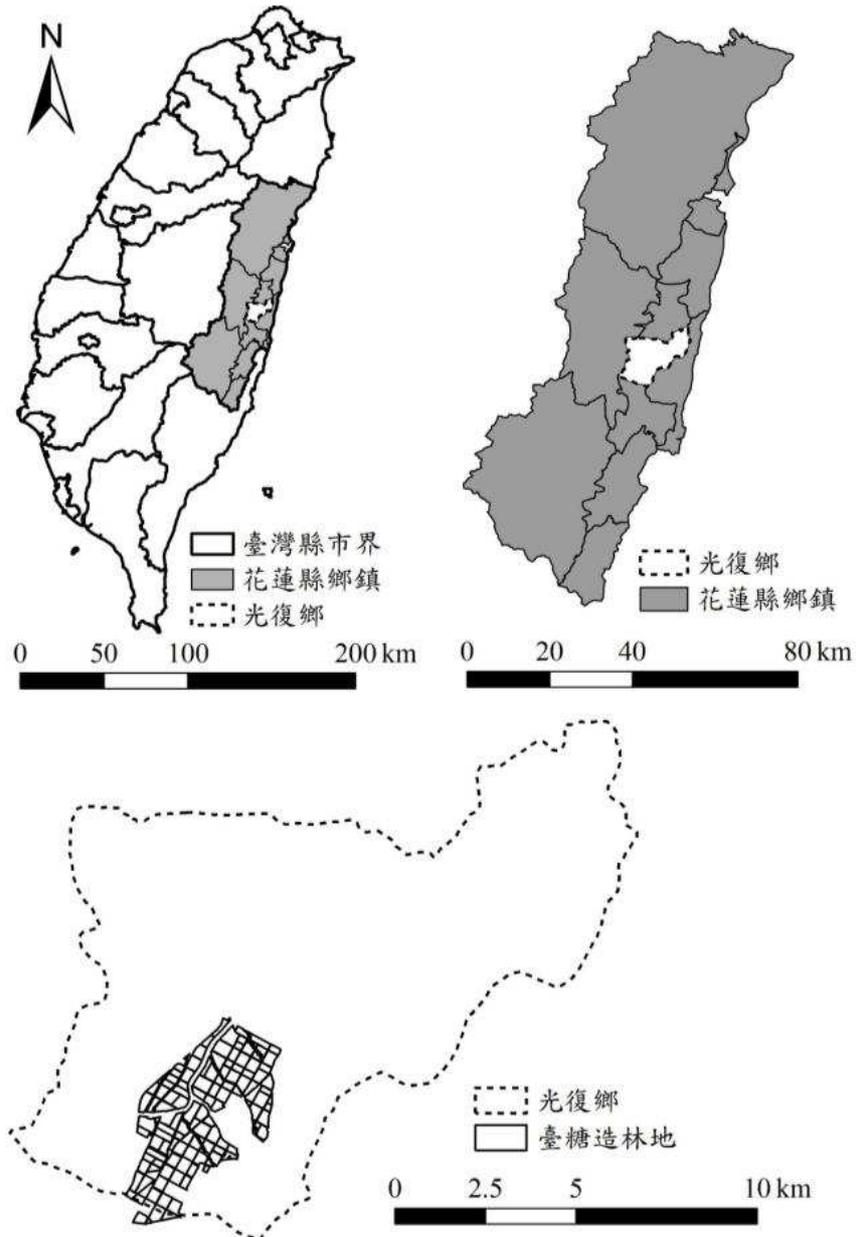


圖 1 研究地區

二、 研究材料

本研究於光復造林地進行研究時，以臺糖公司所提供之台帳資料為依據，對該造林地有初步的瞭解後，利於更進一步的調查。臺糖公司造林地台帳之基本屬性資料完整，包含地籍資料、申請年度、土地面積、樹種、樹種面積、種苗株數等，節錄資料如表 1。

表 1 臺糖公司造林地基本屬性台帳資料(節錄)

原區號	造林地點名稱	造林年度	地段	土地面積	樹種名稱	樹種面積	種苗株數
001	光復鄉	91	大富	0.81	欖樹	0.81	1215
002	光復鄉	91	大全	0.04	楓香	0.04	60
003	光復鄉	91	光復	8.60	光臘樹	8.60	12900
004	光復鄉	91	富田	0.26	台灣赤楊	0.26	390

由臺糖公司造林地基本屬性之樹種面積資料部份，可統計出各樹種所栽植之面積，光復鄉各樹種所栽植之面積如表 2。由於既有的造林地資料係由造林登記卡為基本，主要以地籍單元為主，在此區域內可能混植不同樹種，其混植情形可能為單一樹種小區栽植，亦可能為多樹種混合栽植的情形，造成本區造林地交錯栽植情形頻繁，此種栽植的差異會造成日後進行樹種光譜分析時的誤差，不易使用衛星影像直接分類林分組成，為提升衛星影像與地面的連結精準性，有必要在地面上配合實際之樹種栽植情形進行地面的造林小區境界測量。大部分面積造林地每隔 6 至 10 排即更換樹種栽植，行距平均 3 m，株距平均約 2 m，將每個不同種植情形之林分以精度 30 cm 之全球定位系統(Geographic Positioning System, GPS)建置出造林小區空間分布資料庫，俾供日後研究之用，此處所指造林小區為基本的造林單元，為單一造林樹種或均勻多樹種混植的造林地範圍。

表 2 光復造林地各樹種栽植面積(整理自臺糖公司台帳資料)

樹種名稱	大全	大富	光復	富田	總計	所占面積 (%)
水黃皮	-	-	-	5.76	5.76	0.58
台灣肖楠	-	3.84	-	-	3.84	0.39
台灣赤楊	-	25.55	-	16.87	42.42	4.28
欖樹	-	43.57	31.52	56.60	131.69	13.28
台灣欒樹	-	33.33	23.14	39.50	95.97	9.68
光臘樹	-	101.18	57.85	36.15	195.18	19.68
印度紫檀	-	-	-	7.10	7.10	0.72
肉桂類	7.63	30.72	10.20	48.12	96.67	9.75
杜英	-	32.44	-	15.73	48.17	4.86
青楓	-	1.00	0.67	-	1.67	0.17
苦楝	-	0.60	-	28.35	28.95	2.92
茄冬	0.46	45.05	5.69	65.13	116.33	11.73
烏心石	-	19.20	-	12.99	32.19	3.25
烏柏	-	-	8.25	-	8.25	0.83
無患子	-	20.07	2.02	-	22.09	2.23
楠木類	-	4.35	-	6.79	11.14	1.12
楓香	-	47.60	-	33.89	81.49	8.22
樟樹	3.44	41.72	2.19	15.29	62.64	6.32
合計(ha)	11.53	450.22	141.53	388.27	991.56	100.00

三、 研究流程

研究流程略分為四部分，第一部分為樹冠模型、林分鬱閉模擬與林分景觀模擬及變化情形；第二部分為林分鬱閉實際量測方法與比較；第三部分為林分鬱閉與植生指數間之迴歸關係分析；第四部份，也就是本研究之目標，建立光譜資訊植生指數推估林分鬱閉度之模式。研究流程圖如圖 2 所示。

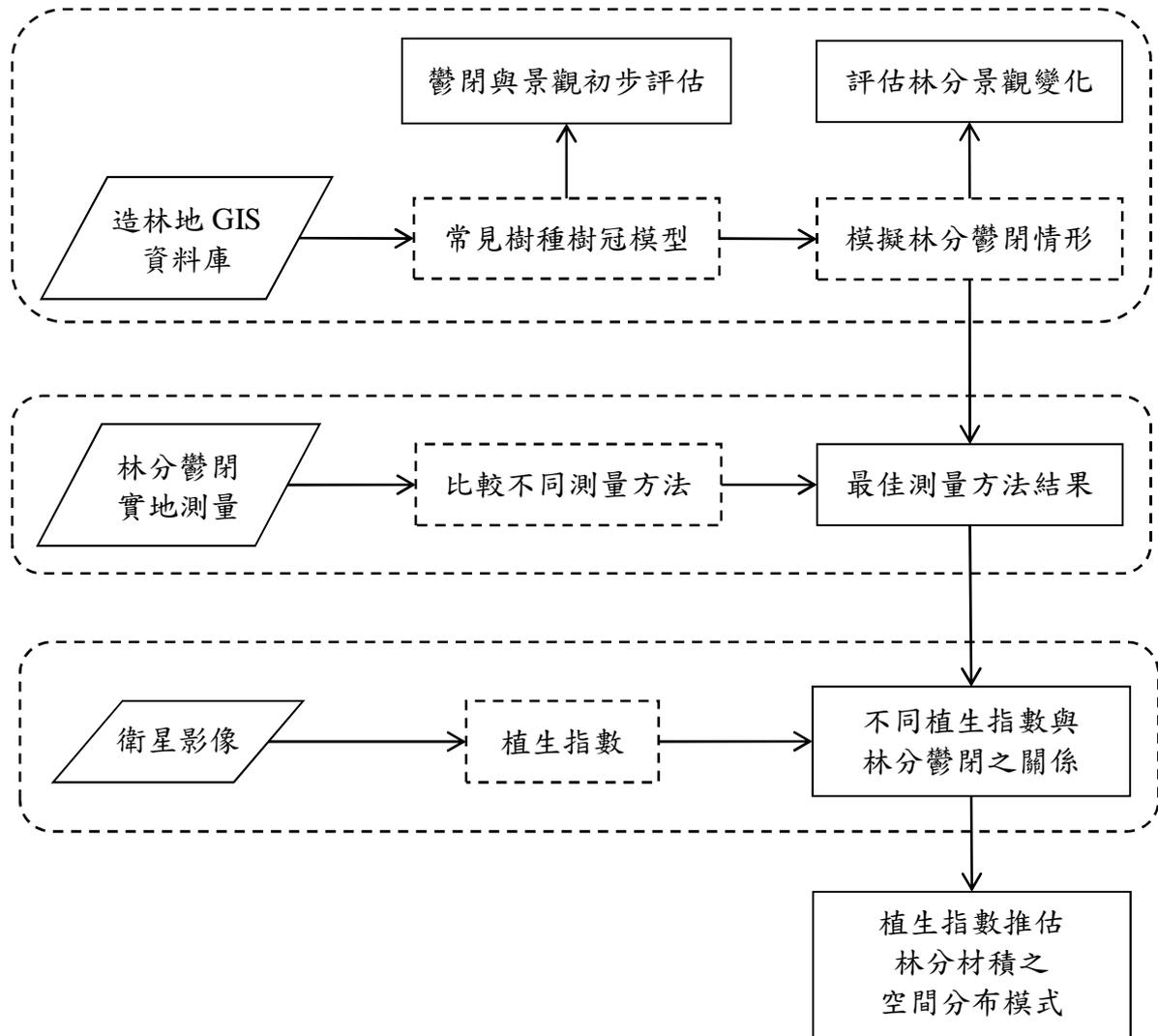


圖 2 研究流程圖

以下依重要工作項目順序敘述其內容與做法。

1. 更新研究區域內平地林地 GIS 資料庫

承續上年度的造林地 GIS 資料庫，除維護既有資料外，亦將新植造林地及新調查樣區資訊納入 GIS 資料庫，以增加 GIS 資料內容，亦可利用該 GIS 資料庫計算實際樹種權重面積。

2. 建立常見造林樹種樹冠模擬模型，做為鬱閉度與景觀評估之用

根據已建立的 GIS 空間資料庫，得知目前本區域的造林樹種以光臘樹、檫、台灣欒樹、楓香、茄冬、杜英等樹種栽植面積為較多，因此將以這些樹種為對象，建立其樹冠模擬模型。在樹冠模擬方面，將以 Onyx TREE BROADLEAF 7.0 (Onyx Computing Inc.) 軟體進行模擬，透過實物照片與電腦模擬之進行，將可以模擬出不同樹種的樹冠模型。當完成各樹種的樹冠模擬模型之後，將進一步建立模擬影像資料庫，以供後續地景模擬之用。

3. 利用樹冠模擬模型模擬林分鬱閉情形

利用前述所建立的樹冠模型資料庫，配合林分株數或立木位置相關資訊，模擬出其林分立木樹冠分布情形，再經由林分旋轉投影等方式，估算其林分立體鬱閉情形，做為探討林分鬱閉之依據。

4. 利用樹冠模擬模型模擬林分景觀，評估其景觀變化情形

在樹冠模擬時，已將模擬其不同林齡的樹冠，因此將可透過林木生長估算之林分參數，代入林分景觀模擬軟體 Visual Nature Studio (3D Nature LLC.)，用來模擬未來林木生長的林分景觀情形，以評估未來林分景觀變化情形。

5. 林分鬱閉度量測：魚眼鏡頭拍攝影像與 LAI 樹冠分析儀量測

由於林木樹冠結構因樹種及生長而有所不同，致無法僅憑林木株數或樹冠大小來表示林分鬱閉情形，因此將運用不同的林分鬱閉量測方法來加以量測。首先應用魚眼鏡頭，拍攝林地冠層覆蓋影像，進而估算其林分鬱閉情形。另外，也將使用 LAI 樹冠分析儀，該儀器之感測器亦為魚眼鏡頭之概念，

但於儀器內建影像分析軟體及參數，可即時將所拍攝之半球面影像，進行計算處理得到鬱閉度與 LAI 數據。惟 LAI 樹冠分析儀需在短時間內先於林外空曠處進行基準量測，以校準參數，而陽光照射角度及雲層分布變化迅速，常有校準不佳導致誤差之情形。

6. 比較評估三種林分鬱閉量測技術

本研究將會採用上述三種樹冠鬱閉度量測方法：魚眼鏡頭攝影法、LAI 樹冠分析儀及樹冠模擬法，進行評估，討論何種方法較適合作為估算林分鬱閉度之量測方法。在評估方面，將分別從作業難易程度、資料分析可靠性及應用性為主。

7. 建立不同光譜植生指數與林地鬱閉度關係

由於光譜資訊受到林分鬱閉情形影響甚大，因此將透過林分鬱閉程度估算方法，估算出林分鬱閉度，進而與不同光譜植生指數加以連結，來探討林分鬱閉度與不同光譜植生指數之關係，並透過此關係，建立運用植生指數估算林分鬱閉度的技術，並瞭解林分鬱閉度如何影響光譜植生指數的變動。

8. 整合 1 公頃大樣區與臨時樣區建立光譜與林分參數關係

上年度已建立 1 公頃大樣區，本年度將進一步配合臨時樣區的設置，並整合衛星影像的光譜植生指數與地面調查資料，建立運用光譜植生指數推算不同樹種混生林分的林分參數。

9. 建立光譜植生指數推估林分材積之材積空間分布模式

運用衛星影像的光譜植生指數，結合林分鬱閉度估算值，來估算林分蓄積，進而建立林分材積空間分布圖，以掌握林分在地景層級上的生長情形，同時，亦將與傳統地面樣區的估算結果，比較地景層級蓄積量估算之差異。

四、 研究方法

(一) 三種量測樹冠方法特色比較

森林測計學中，測量冠幅取得平均直徑測定值後，假設樹冠投影面積為規則的橢圓形以計算冠層覆蓋率，但樹冠可能重疊、樹冠外型不規則而且並非完全鬱閉，誤差極大，利用空照圖圈畫樹冠覆蓋部分也有樹冠內部是否完全鬱閉之問題產生誤差(楊榮啓、林文亮，2003)。半球面影像可永久記錄樹冠疏密程度其孔隙分布(林登秋、江智民，2002)，已有許多團隊開發應用軟體(Becker, Erhart, & Smith, 1989; Chazdon & Field, 1987; Frazer, C. D. Canham, & Lertzman, 1999; Rich, 1990)，使得分析半球面影像快速、準確且便利，在生態研究上大幅利用(Bellingham, Tanner, Rich, & Goodland, 1996; C. Canham, Finzi, Pacala, & Burbank, 1994; Percy & Yang, 1996)。但在拍攝半球面影像時必須極為熟悉作業流程，充分掌握拍攝條件及時間，不然容易產生誤差。一天當中能夠拍攝半球面影像的時間有限，若要取得大面積林分的半球面影像，極其費時。本計畫致力於發展模擬林分真實狀況之作業流程，蒐集不同生長狀況之林木資料，建立樹冠模型資料庫，依據不同林分密度與林分組成，於不同地形條件下模擬出連續林分之景觀，不論是樹冠 2D 投影面積還是半球面影像皆能從模擬資料庫中取得，不僅可以做為替代現地林地資訊之資料庫，大幅縮減現地調查之時程，亦可模擬不同生長趨勢之未來林分景觀，可更進一步瞭解與掌握造林地之全方面生長狀況。以上所述冠幅測量法、拍攝半球面影像以及模擬林分景觀三種方法之優缺點，以圖示解說呈現如圖 3。

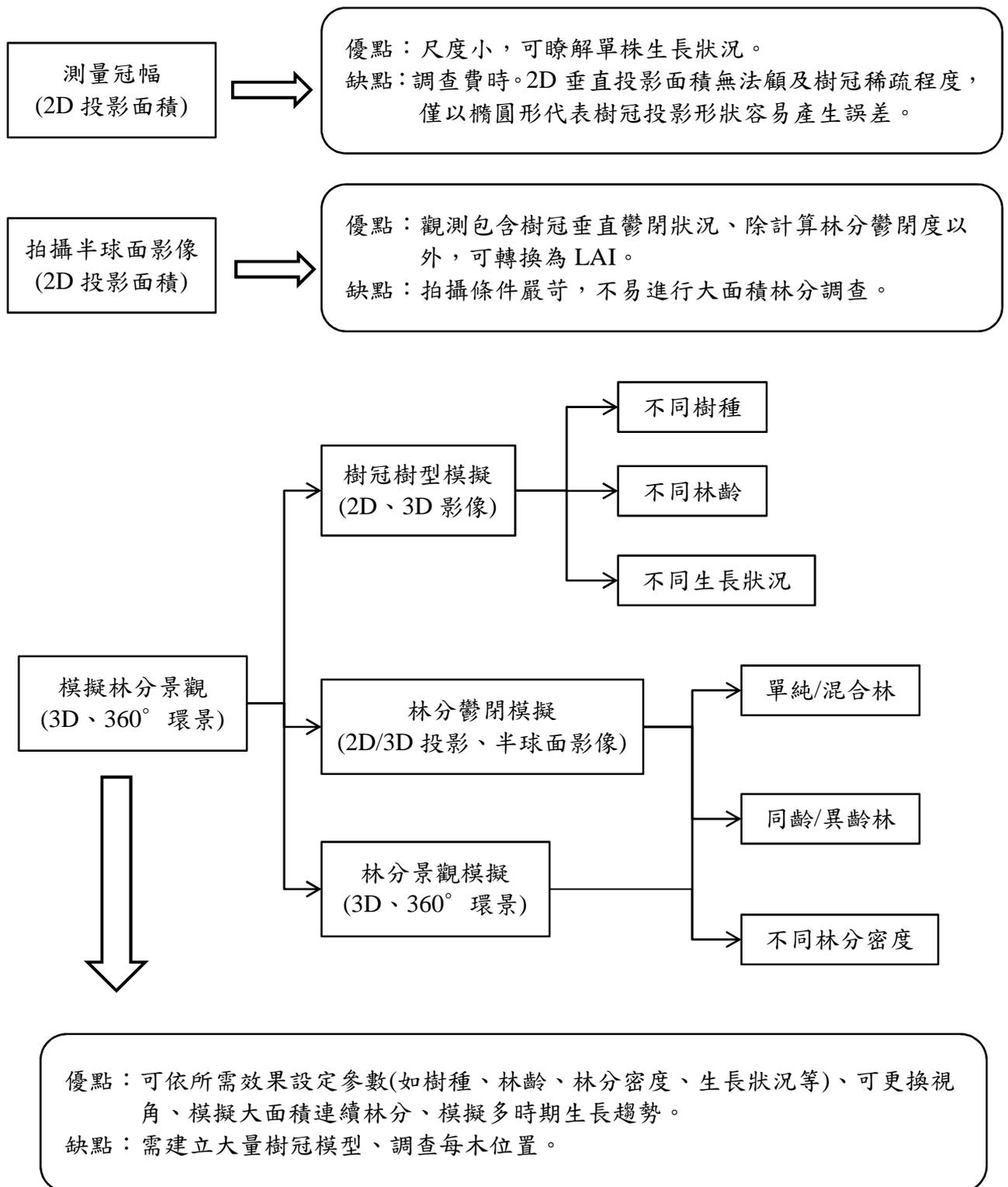


圖 3 量測樹冠方法比較圖

1. 林分鬱閉度量測與計算

依據樹冠量測目標的不同，Jennings *et al.*(1999)定義二種主要區別：冠層覆蓋度(Canopy Cover)及冠層鬱閉度(Canopy Closure)。冠層覆蓋度，係指以各垂直角度量測樹冠之覆蓋面積、或樹冠投影面積稱為冠層覆蓋度，此為本研究中以樹冠面積計算之林分覆蓋度基礎概念，惟本研究為求了解單木生長表現，故於量測時取其冠幅全長之測值，後續求算林分覆蓋度時是以全幅冠長計算單木樹冠橢圓面積後將次樣區內所有單木樹冠面積加總而得，故林分覆蓋度會有大於 100 % 之情況，乃因林木之間已有出現樹冠重疊之現象所致。冠層鬱閉度則是以林分中單點向上延伸之半球面面積被林份遮蔽的比例(圖 4)，則為此報告中之林分鬱閉度。此兩種量測方式在過去的討論中經常被誤用或混用，並容易產生理解上之差異。此外，進行兩種測量時，冠層鬱閉度會因樹高改變而受到影響，冠層覆蓋度則不受影響(圖 5)。除了在定義上的不同，兩者在生態上的意義也不相同，冠層覆蓋度與穿落水(Throughfall)及林木間競爭程度關聯較大，而冠層鬱閉度則和林下的光環境、不同時間下斑光的情況有關。

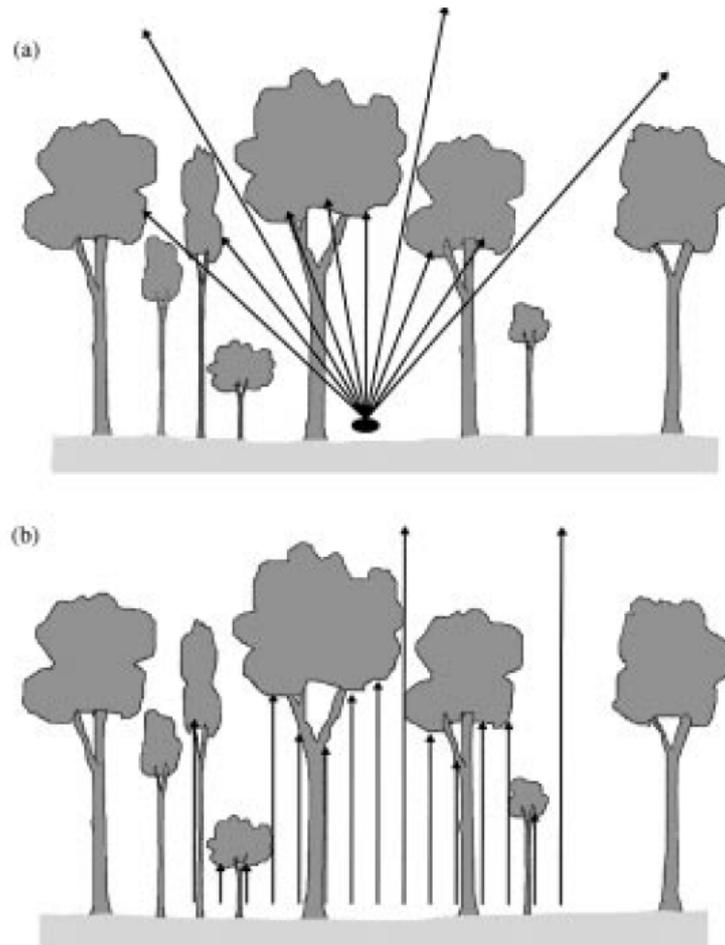


圖 4 (a)冠層鬱閉度與(b)冠層覆蓋度示意圖(Jennings, et al., 1999)

半球面影像的發展肇因於近年來數位影像的快速進步，以及電腦影像分析技術的快速發展(Lin & Chiang, 2002)。相較於過去以人力方式分析影像，利用電腦軟體分析是省時又省力且有客觀依據的做法，也因此利用半球面影像來估算林份下光照以及 LAI 的研究日益增加(Lin & Chiang, 2002)。另外半球面影像可以為當時的林分狀態留下永久紀錄，對於干擾後林相的恢復、苗木生長、森林生產力及生理生態的研究也得以發展的更加完備(Lin & Chiang, 2002)。

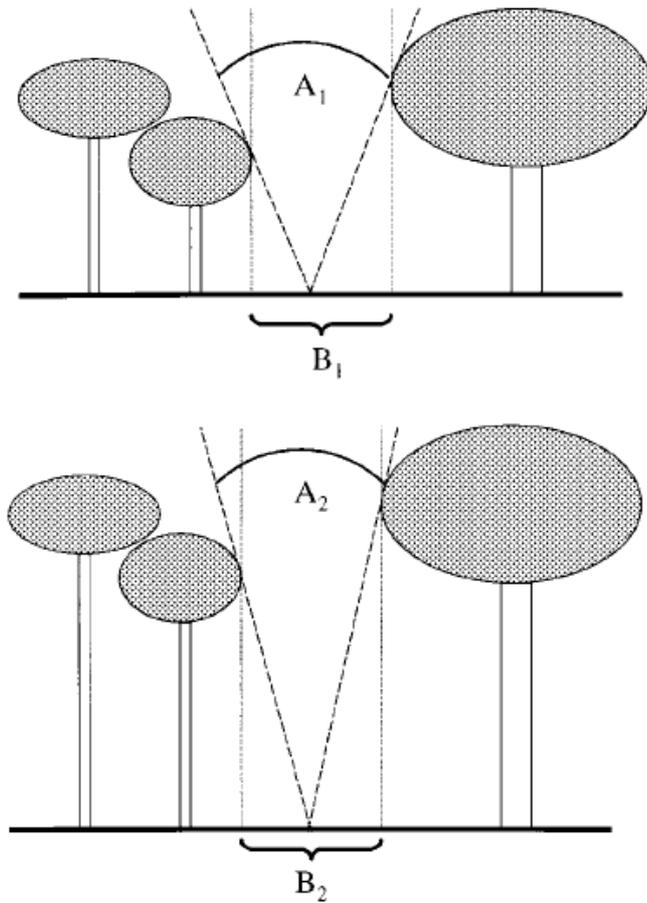


圖 5 同樣角度下樹冠孔隙度受樹高影響情形(Jennings, et al., 1999)

半球面影像係以 180 度的超廣角(魚眼)鏡頭所拍攝而得的影像，在確定拍攝方位後，只要加入海拔、經緯度等因子，便可以推算出太陽之移動軌跡、藉由林分內空隙的分佈及角度，即可得知太陽輻射的變化方式以及強度。另外藉由樹冠下不同高度的半球面影像，亦可以用來評估林份內的垂直光照變化以及樹冠結構的組成。

要拍攝半球面影像需要可以拍攝 180 度的超廣角(魚眼)鏡頭，以及具有魚眼模式的相機才能取得全視野影像(圖 6)。拍攝時需注意以下要點：

1. 拍攝方位一致：由於需要分析光的來源與移動，在配合太陽軌跡時需確定方位。
2. 相機架設水平：可使用自動水平腳架或外加水準器以輔助調整，避免因角度不同、拍攝到的範圍不同而產生的誤差。
3. 天空背景：背景以晴天或均值的陰天為佳，若有雲層則在調整臨界值時容易

發生要將臨界值降低(亦即增加亮度)以區分出天空的狀況，可能會將接近地平線之較暗孔隙視為枝葉導致計算誤差；但若陽光過強則會造成斑光(圖 52 左)，因此拍攝魚眼照片時以天氣晴朗的黎明或黃昏為佳。

4. 光照情況：在使用影像分析軟體時，軟體一般只能利用輻射強度的強弱來分別是否為植物體，因此拍攝影像時不能有直射葉片之陽光，以免造成程式誤將葉片判定為天空。另外就算是雲層均質的陰天，為避免些微光斑照成的影響，還是以黎明或黃昏為佳。



圖 6 半球面影像。左：斑光情形。中：正確半球面影像。右：軟體處理後之影像。

本研究使用 Nikon Coolpix 990 相機搭配 EC-F8 魚眼鏡頭進行半球面影像攝影(如圖 7)。



圖 7 半球面攝影使用器材

半球面影像處理係應用 GLA 軟體進行(Frazer et al., 1999)，流程如下：

1. 界定出影像之南北向及範圍
2. 調整濾鏡顏色，一般以藍光光譜較適合用於植物分析
3. 調整臨界值(亮度)
4. 計算開闊度

半球面影像之缺點：

1. 半球面影像在取得的過程中會受到環境因子的限制而無法得到較佳品質的影像、必須透過長時間的等候以取得受環境影響較少的影像。
2. 人為進行臨界值調整時，由於臨界值高低為操作者主觀認定，操作者之穩定性必須納入考量。
3. 分析軟體的分析方式以及模式是否適合所有生態區系、或是枝條與樹葉之間分別的方式也是誤差產生的來源。

2. 林分半球面影像模擬

半球面模擬影像係由林分模擬延伸而來，如同在現場林分之下進行拍攝一般，將模擬好的林分景觀經過 Photoshop 軟體變形效果，即成為半球面影像。因此部分軟體操作延續「三、林分景觀模擬」節中之「(一) 樹冠模型模擬之操作介面」操作步驟，先述如下。

1. 先開啟一個新的視窗(Hualian Camera_fisheye)，於 Camera Editor 視窗中的 General 選單中，勾選 Camera Type 中的 Targeted 選項。同時選取 Realistic Lens Distortion 選項。
2. 接著於 Camera Editor 視窗中的 Len 選單中，將水平視角(Horizontal Field of View)給定值大於 100 度。
3. 另於 Camera Editor 視窗中的 Position & Orientation 選單中，將鏡頭仰角(Pitch)定值於-90 度。
4. 設定適當之觀景位置，焦距與角度，即可執行(Render a preview, F9)樹冠鬱閉度之半魚眼鏡頭影像模擬(Semi-fish-eye-image Simulation)。其中參數模擬設定與步驟 8a 相似。

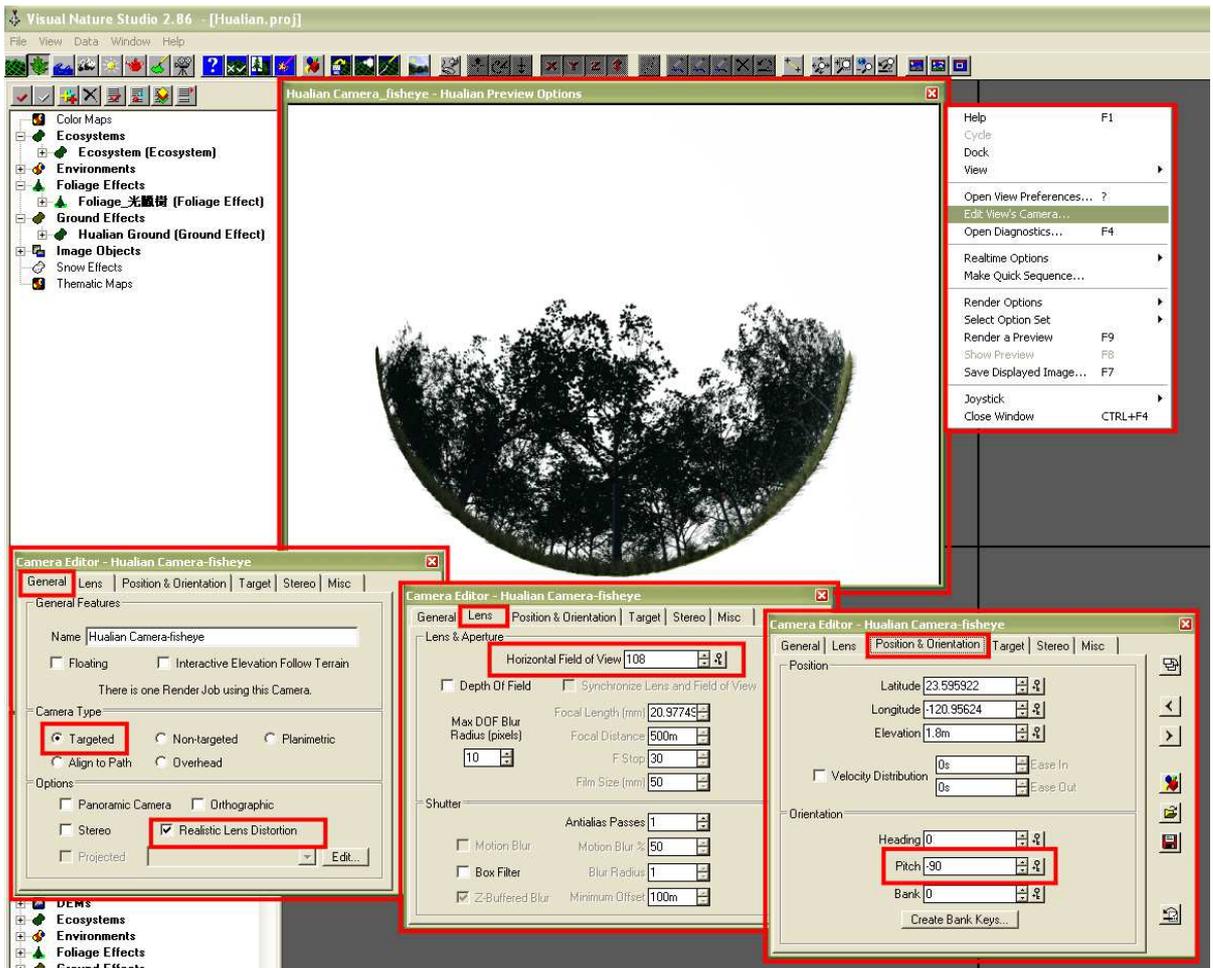


圖 8 半球面影像模擬介面

5. 為了模擬出完整的樹冠鬱閉度半球面影像，調整 Position & Orientation 選單中鏡頭面向(Heading)的角度(如 0 度、90 度、180 度、與 270 度)，即可模擬出各個面向的半魚眼鏡頭影像模擬結果。

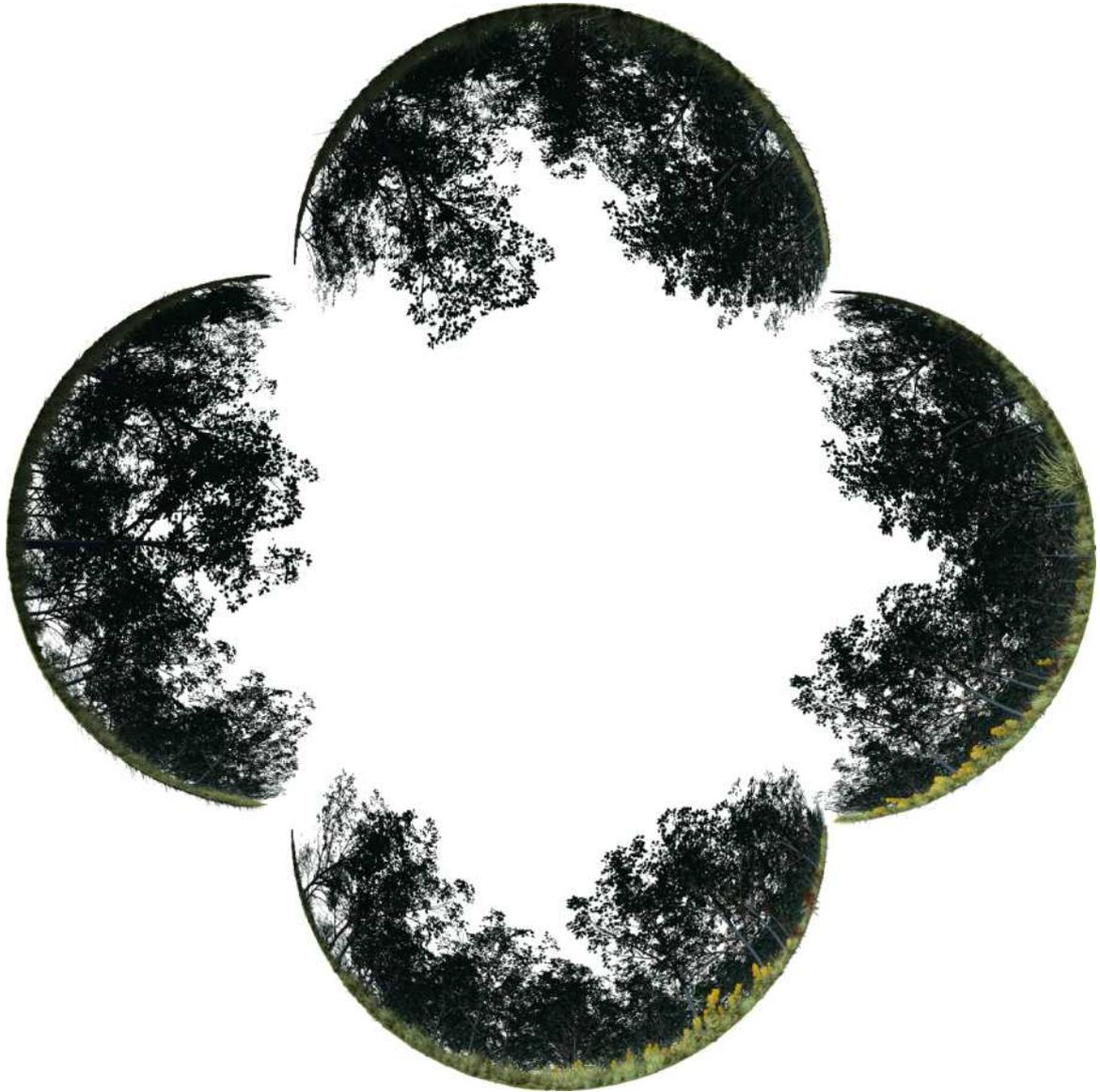


圖 9 半球面影像模擬過程

6. 透過影像處理軟體(如 Photoshop)，整合所模擬出的各面向之半魚眼鏡頭影像，即可得出樹冠鬱閉度之半球面影像模擬成果。



圖 10 半球面影像模擬成果

(二) 樹冠模擬模型之建立

樹冠模型模擬使用樹冠模擬軟體 Onyx TREE BROADLEAF 7.0 (Onyx Computing Inc.) (圖 11)進行，以光臘樹樹冠模型模擬為例，以下介紹軟體運作之介面與操作步驟，使瞭解樹冠模擬所需參數、可調參數與模擬可以達到的程度。



圖 11 Onyx TREE BROADLEAF 7.0

1. 以光臘樹為例，在此軟體中，光臘樹樹冠模型包括八個成分: Trunk(Tr)、Bough(Bg)、1°Branch(B1)、2°Branch(B2)、3°Branch(B3)、Twig(T)、Stem(S)、與 Leaf(F)。



圖 12 Onyx 樹冠模擬軟體介面

2. 樹幹(Trunk)組成設定

- 首先於  參數控制列中選取枝幹組成設定介面。
- 透過 Trunk Height 與其視窗，調整樹幹高度與樹幹扭曲\直立程度。

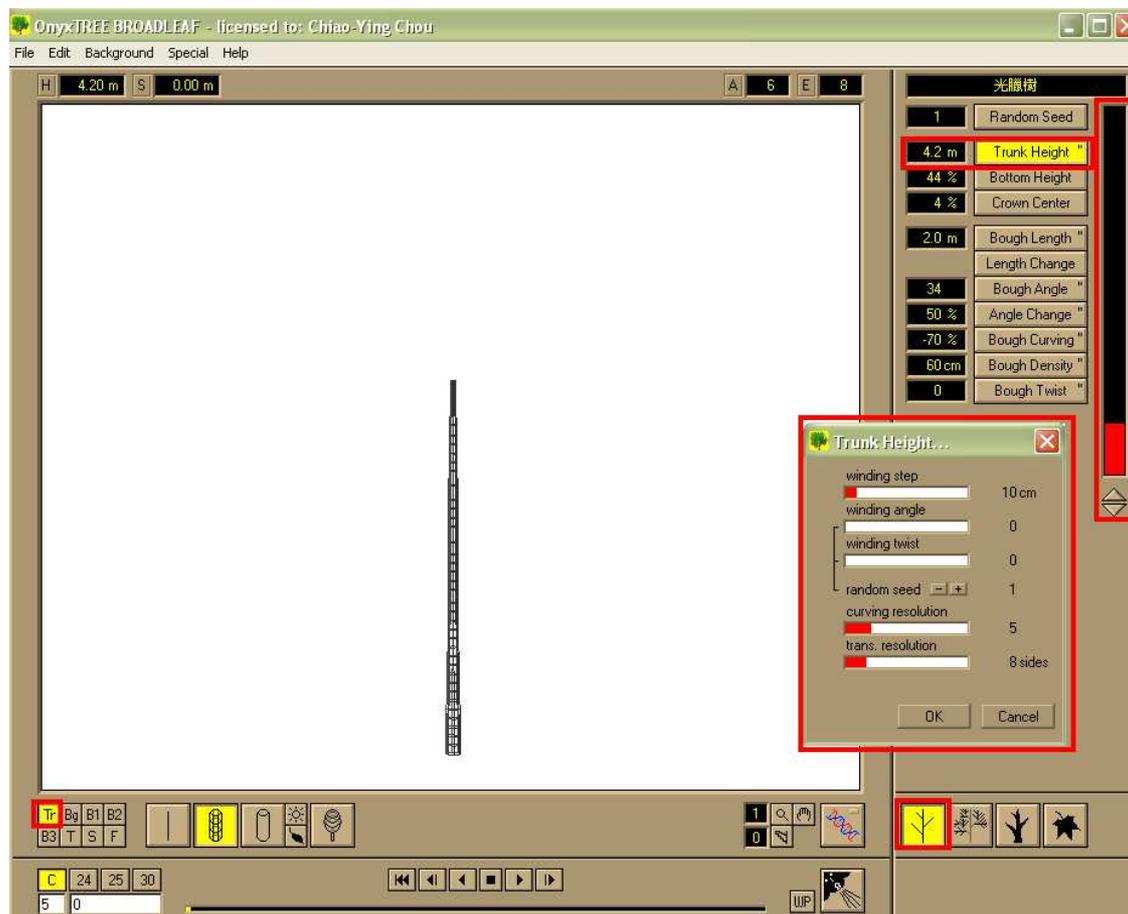


圖 13 樹幹組成設定介面

3. 大樹枝(Bough)組成設定

- 於枝幹組成之參數控制列  中。
- 透過 Bottom Height 設定枝下高之參數。
- 透過 Bough Length 設定 冠幅之參數。
- 透過 Crown Center 設定最長樹枝相對於樹幹的位置。
- 透過 Bough Length Change 視窗設定樹枝長度之變化參數。
- 透過 Bough Angle、Angle Change、與 Bough Curving 視窗設定大樹枝與樹幹的角度與其變化程度。
- 透過 Bough Density 設定大樹枝間的距離。

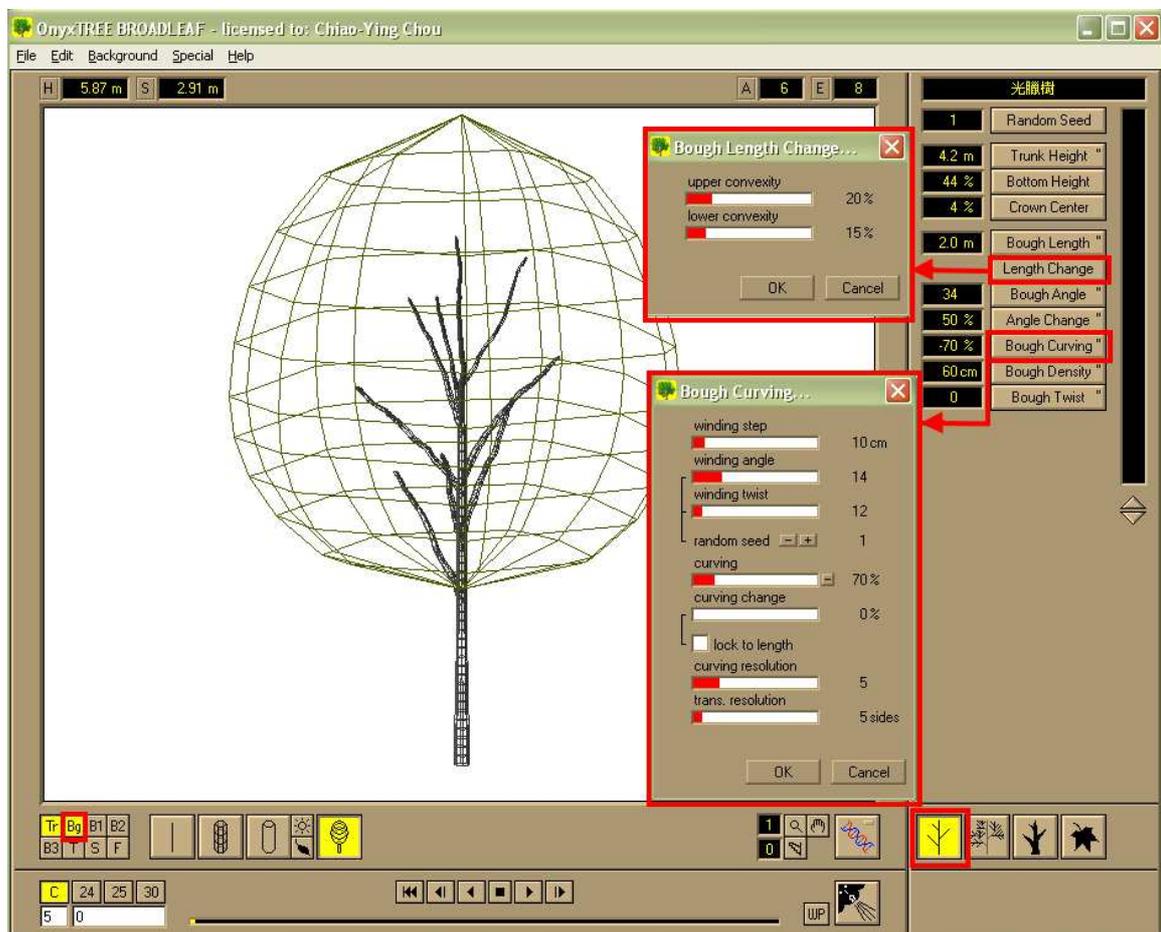


圖 14 大樹枝組成設定介面

4. 各級樹枝(1°Branch, 2°Branch, 3°Branch)組成設定

- 首先於     參數控制列中選取枝條組成設定介面。
- 透過 Branch Length 視窗與 Length Change 設定各級樹枝與最長樹枝的相對長度與長度改變程度。
- 透過 Branch Angle 視窗與 Angle Change 設定各次級枝條與上級枝條。(branch-to-parent)的相對角度與其變化程度。
- 透過 Branch Curving 視窗設定各級枝條的扭曲程度。
- 透過 Branch Density 視窗設定各級枝條生長的間距，相對於上級枝條的生長位置，與修枝程度。

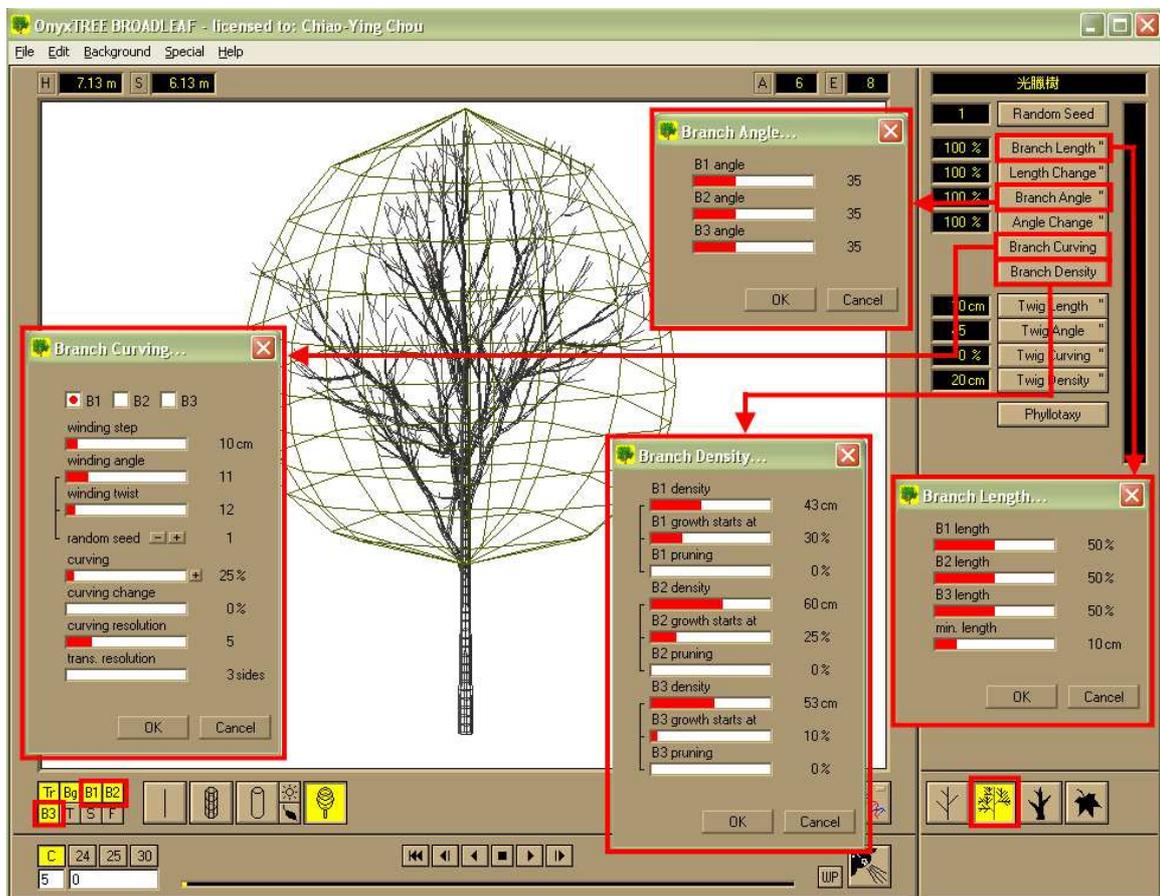


圖 15 各級樹枝組成設定介面

5. 小細枝(Twig)組成設定

- 於     枝條組成之參數控制列中。
- 透過 Twig Length 設定小細枝的平均長度。
- 透過 Twig Angle 設定小枝條與上級枝條(twig-to-parent)的相對角度。
- 透過 Twig Curving 視窗設定小枝條的扭曲程度。
- 透過 Twig Density 設定小枝條的生長間距。
- 透過 Phyllotaxy 設定各級枝條組成(如 1B、2B、3B、與 T)的生長序列。

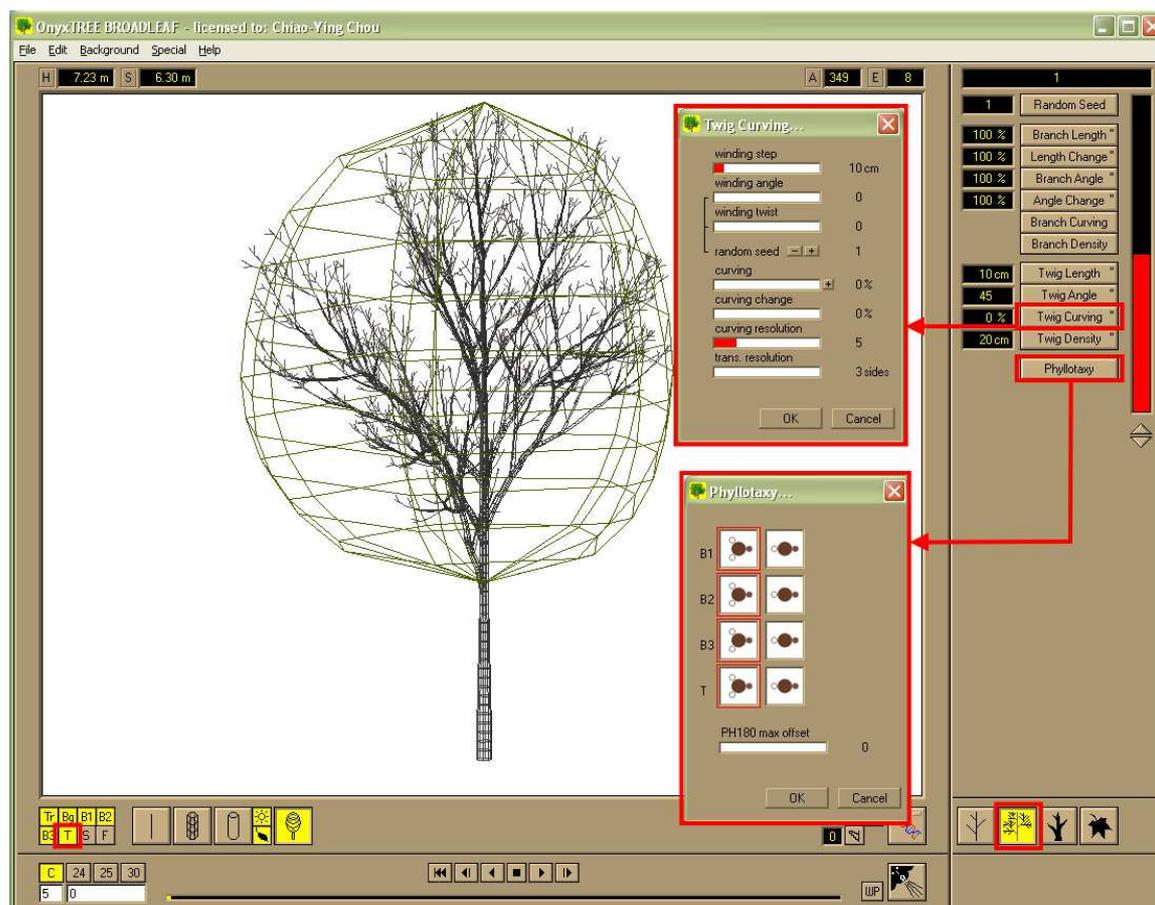


圖 16 小細枝組成設定介面

6. 枝幹材積參數之設定

- 首先於  參數控制列中選取枝幹材積設定介面。
- 透過 Trunk Width 視窗設定樹幹長之各分段的比率與粗細度。
- 透過 Trunk Mode 視窗設定樹幹身型參數。
- 透過 Branch Width 設定枝條的粗細度。
- 透過 Trunk and Branch Color 視窗設定枝幹的整體色彩分布。

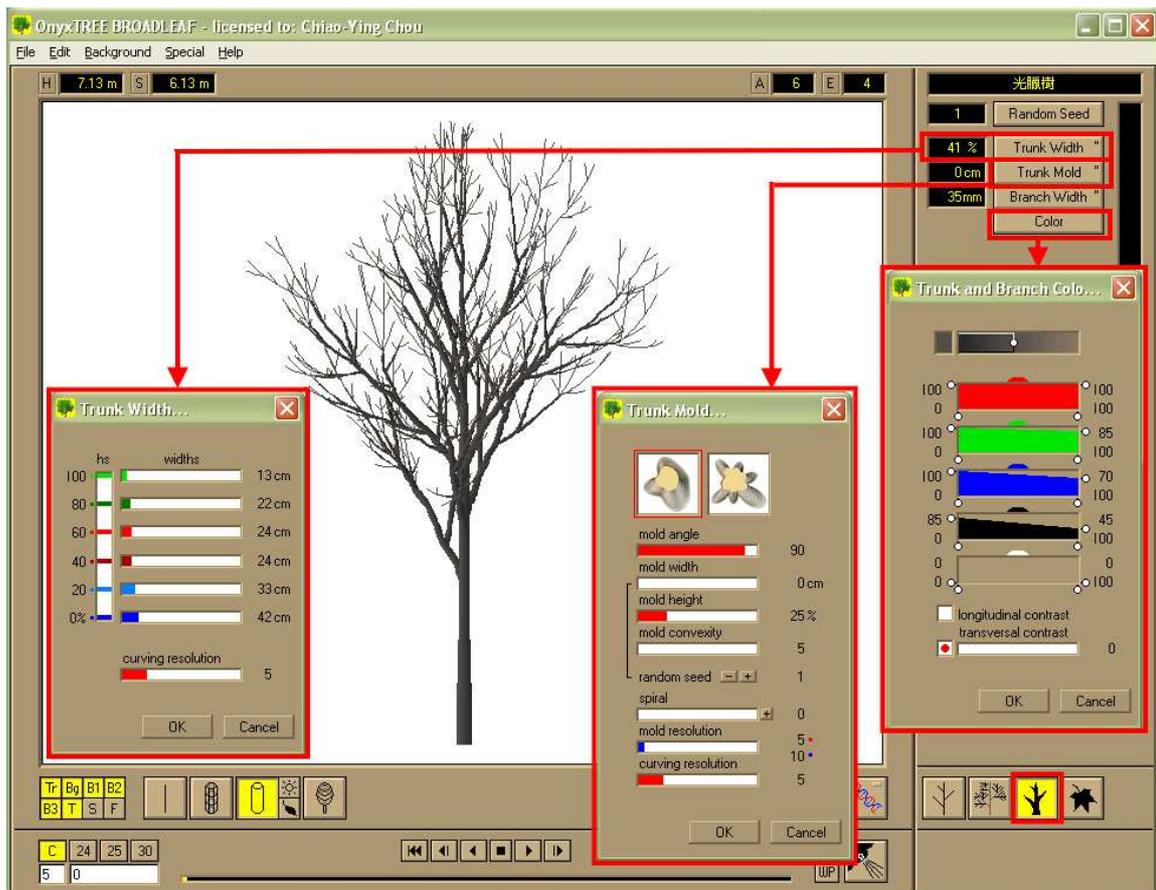


圖 17 枝幹材積參數設定介面

7. 葉柄(Stem)與樹葉(Leaf)組成設定

- 首先於  參數控制列中選取莖葉設定介面。
- 透過 Leaf Type 視窗選擇葉型與大小。
- 透過 Leaf Density 設定葉子的生長間距。
- 透過 Stem Length 設定葉柄的長度。
- 透過 Stem Angle 與 Stem Curving 設定葉柄與小枝條間(stem-to-twigg)的角度與葉柄扭曲程度。
- 透過 Phyllotaxy 視窗設定葉序。
- 透過 Foliage Color 視窗設定葉子的顏色組成。

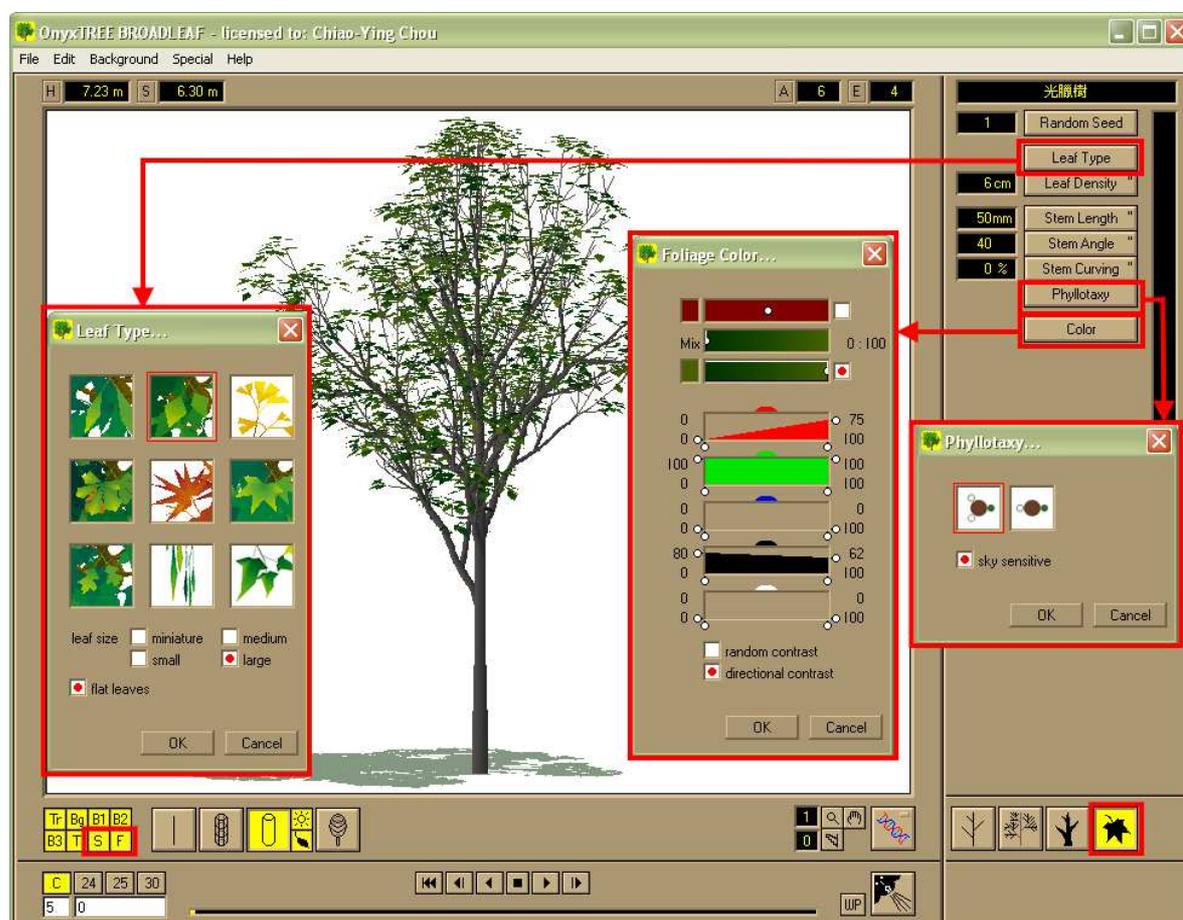


圖 18 葉柄與樹葉組成設定介面

8. 樹冠模型模擬成果之匯出

- a. 2D 圖檔: 將檔案存成 BMP(Bitmap File), 同時透過圖檔匯出視窗調整其解析度。

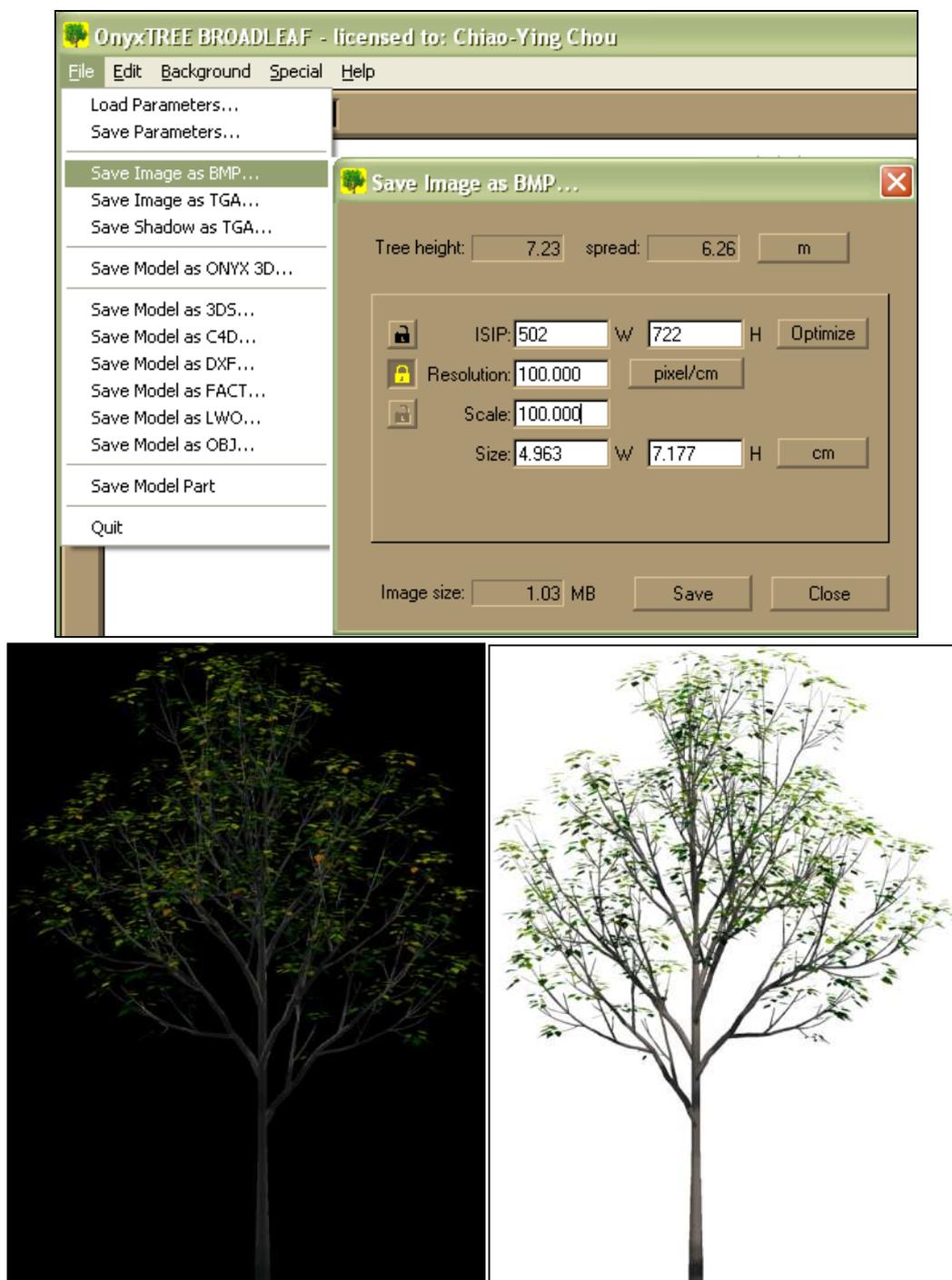


圖 19 2D 樹冠模型模擬成果匯出介面

- b. 3D 模型檔: 此軟體提供多種 3D 模型匯出類型, 本研究選擇 DXF (Drawing Interchange File) 方式存取。於檔案匯出介面, 可選擇樹冠

模型之各組成的解析程度，以調整匯出模型之檔案解析度與大小。為增加本計畫接下來利用此樹冠 3D 模型進行林分鬱閉度之模擬速度，同時維持一定的檔案解析度，此處透過 Minimize 功能，將 Twig 與 Stem 組成移除，則最終匯出之樹冠模擬 3D 模型檔共有六種成分(Trunk、Bough、B1、B2、B3、與 Leaf)。

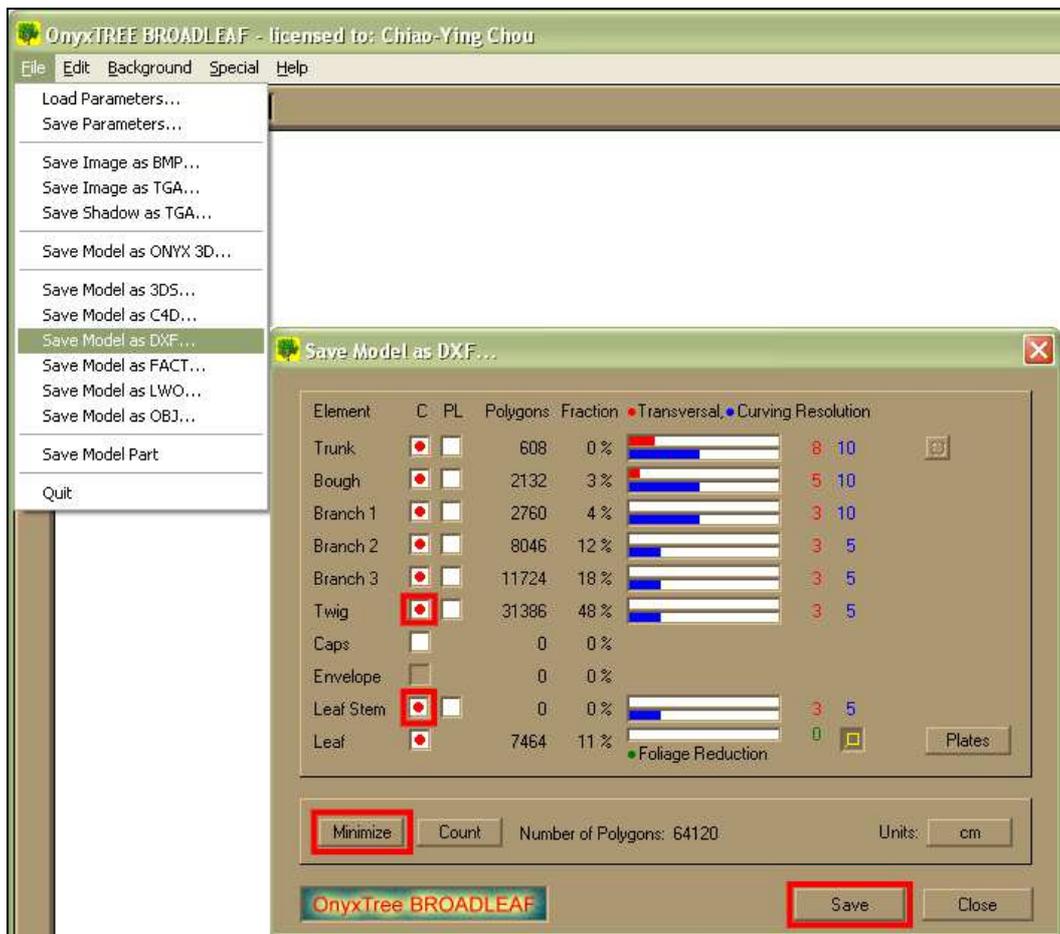


圖 20 3D 樹冠模型模擬成果匯出介面

(三) 林分景觀模擬之建立

種樹冠模擬模型如同森林中的單木要素，許多單木集合起來即可成為林分，進而形成連續的地景。進行林分模擬時，便是將多株樹冠模型植入地景背景之中，形成林分或森林的模擬景觀。接下來介紹如何應用 Onyx Tree 製作的樹冠模型於林分景觀模擬軟體 Visual Nature Studio(3D Nature LLC.) (圖 21) 之中，完成林分景觀模擬，操作介面與詳細操作步驟如後敘。

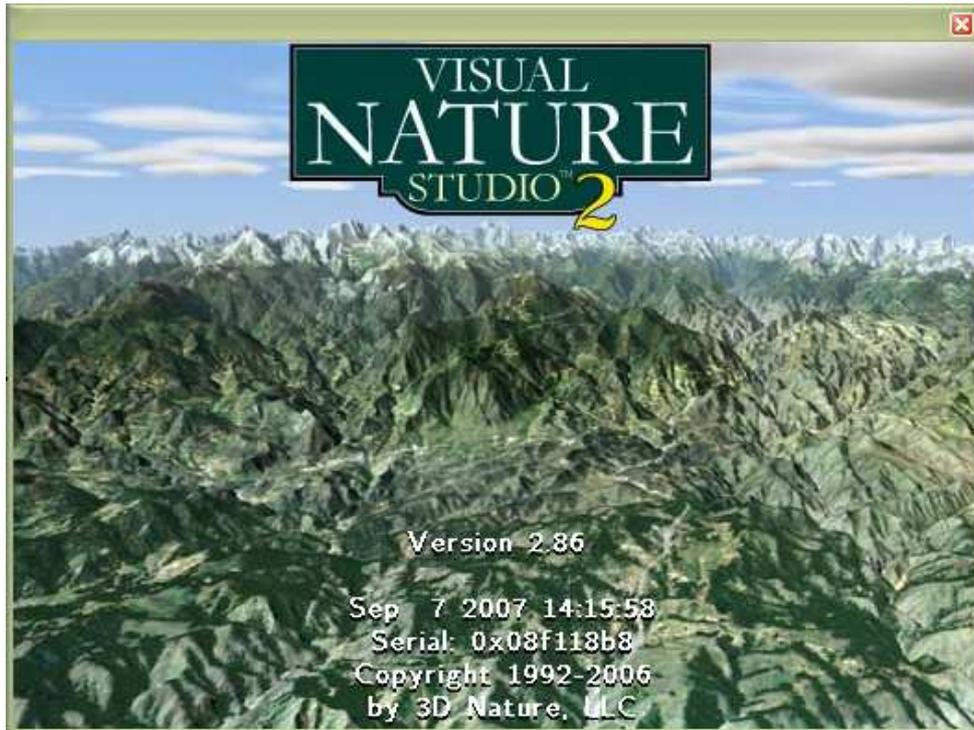


圖 21 Visual Nature Studio

1. 於 Visual Nature Studio 中建立新檔案：檔案名稱與資料夾位置設定

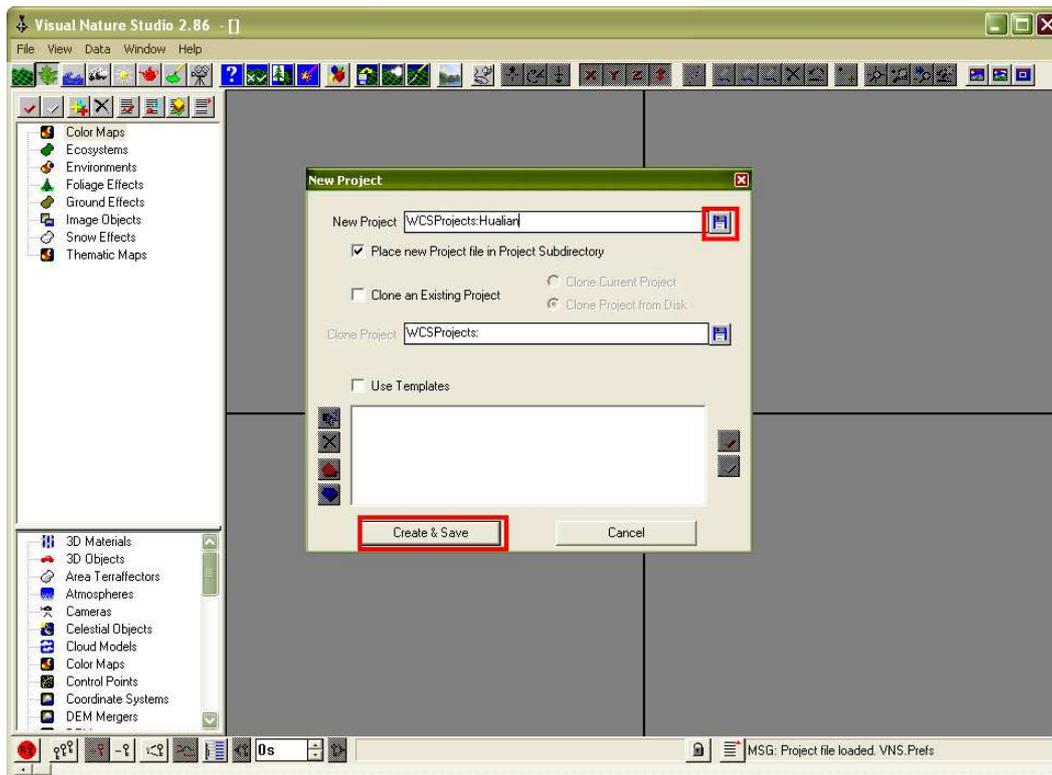


圖 22 建立新檔案介面

2. 匯入具有林分屬性與相對位置之 Shapefile。此處不同之林分 Shapefile 將影響林分鬱閉程度之模擬。

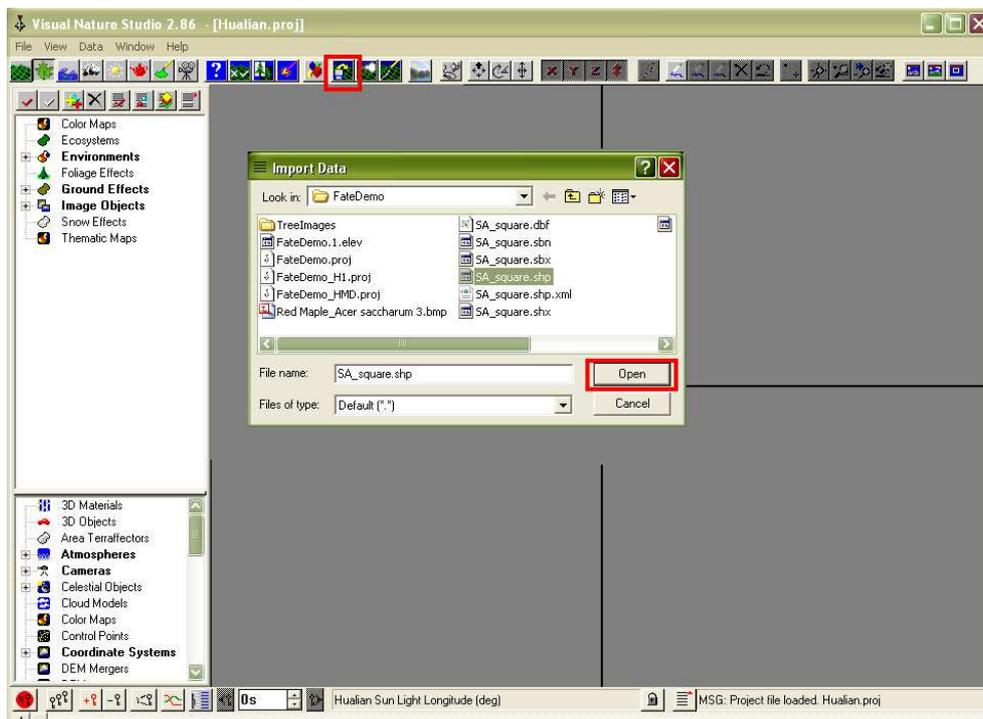


圖 23 匯入林分 Shapefile 介面

- a. 設定相對於研究區域的地圖座標系統。

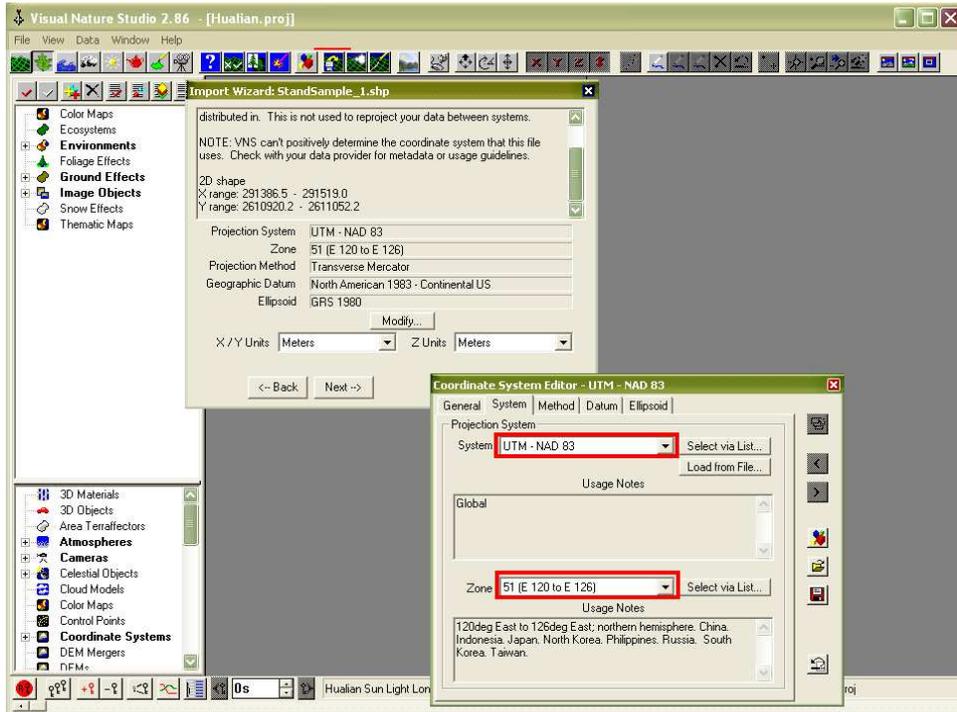


圖 24 設定地圖座標系統

- b. 開啟匯入之 Shapefile，且檢視其 database。下圖新開的視窗中，紅點即為各株樣木所在位置。

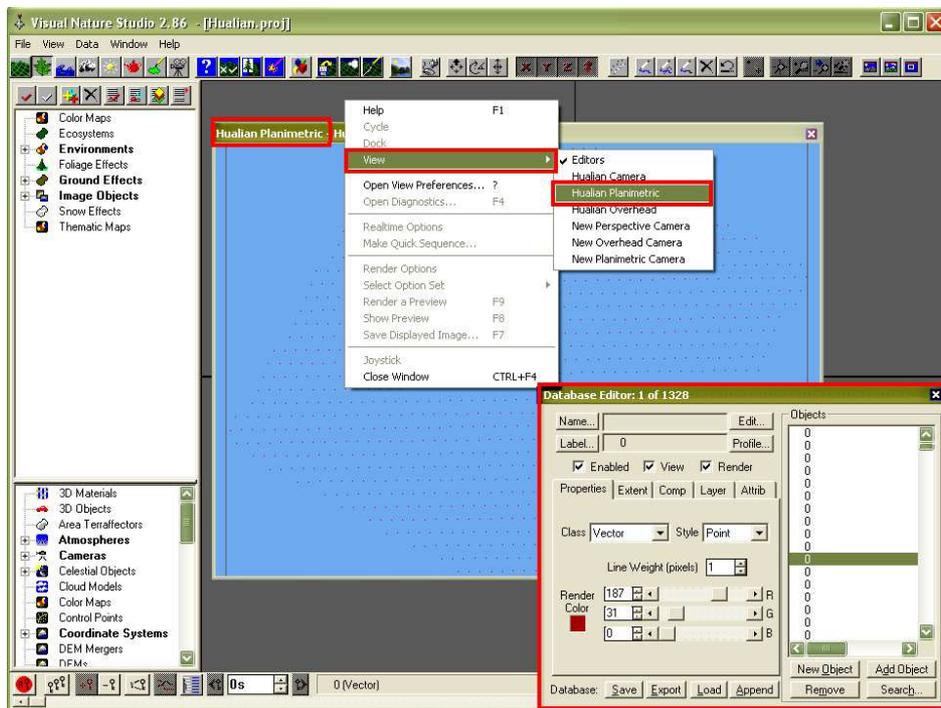


圖 25 檢視林分 Shapefile database

3. 影像地形高程之設定: 此處可以利用軟體設定的虛擬相對高程，或是匯入已有的 DEM。因本研究區域之地形普遍平坦，此處選用虛擬高程之建立。

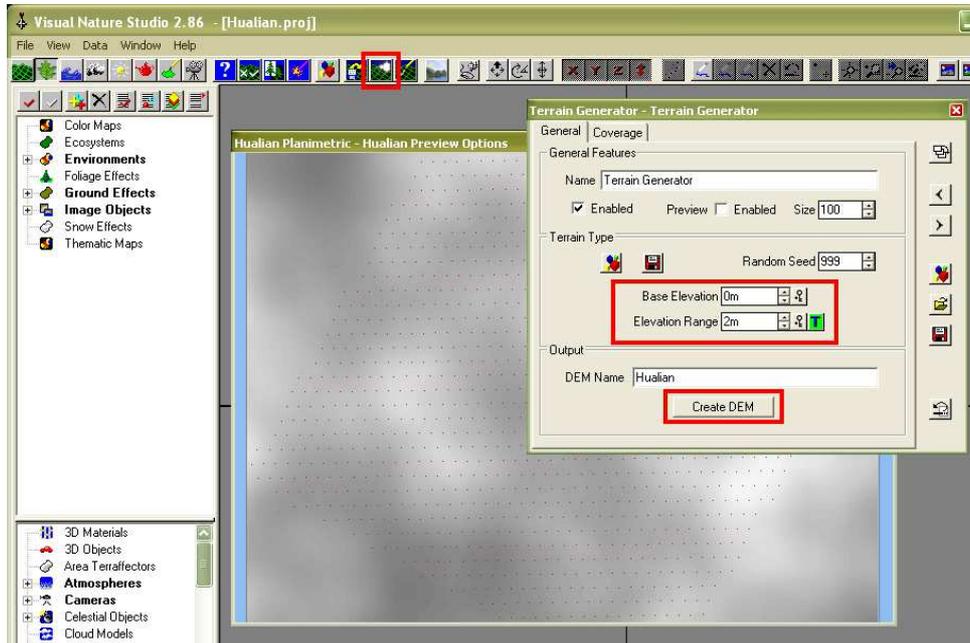


圖 26 影像地形高程設定介面

4. 匯入於 Onyx TREE BROADLEAF 7.0(Onyx Computing Inc.)軟體中建立之樹冠模擬模型檔案(DXF FILE)。此處不同大小之樹冠模擬模型將影響不同生長狀況之林分景觀模擬。

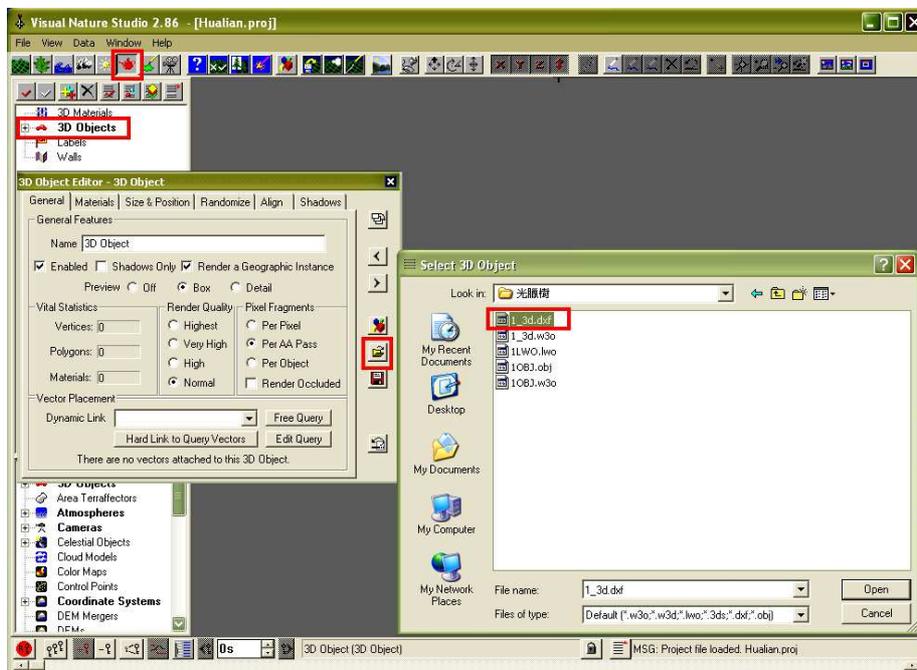


圖 27 匯入樹冠模型介面

- a. 開啟 PERSPECTIVE CAMERA 視窗，檢視匯入之 3D 物件(視窗中黃色方塊)。

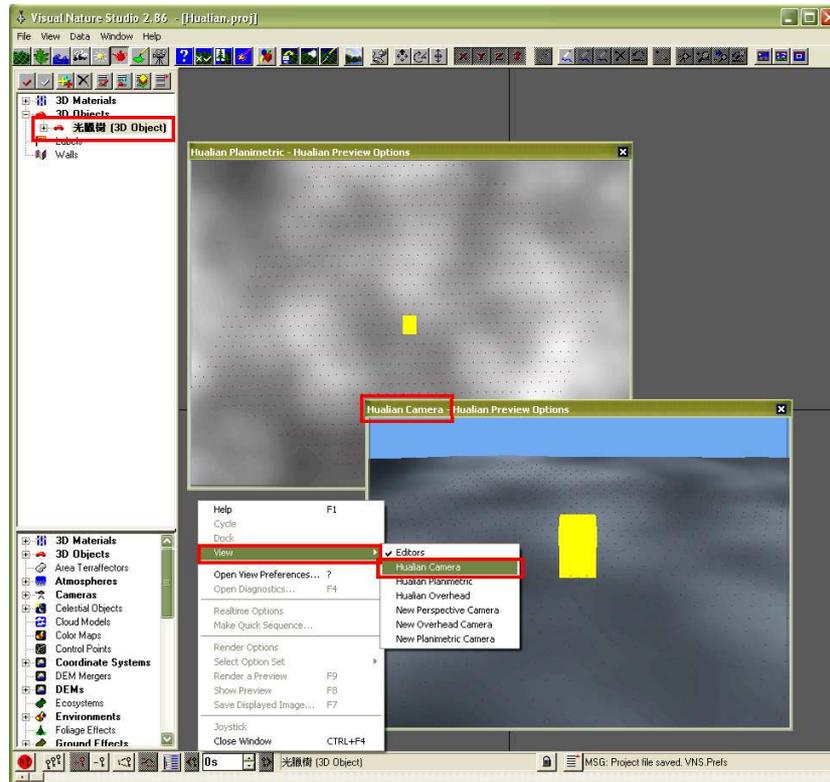


圖 28 檢視匯入之 3D 物件

5. 設定 3D 物件(光臘樹樹冠模式)中之成分屬性

- a. 調整 PERSPECTIVE CAMERA 視窗，使其對焦於此 3D 物件。

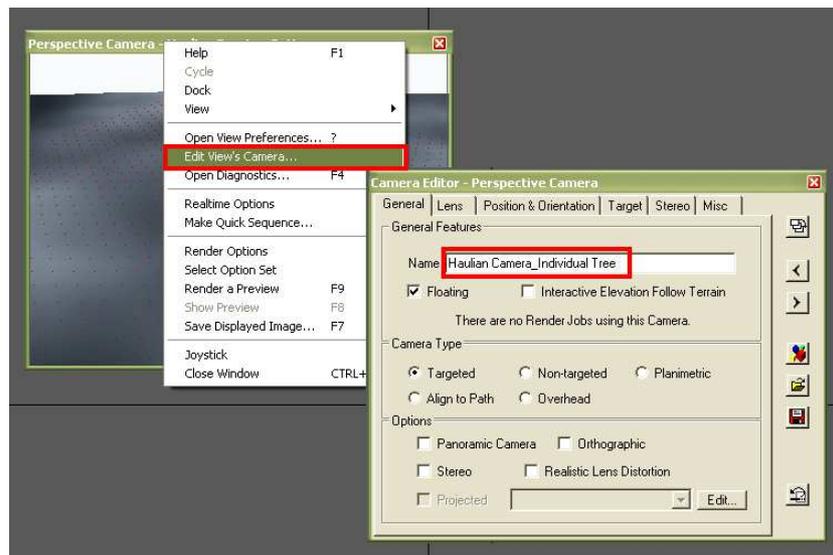


圖 29 對焦於匯入之 3D 物件

b. 調整 Lens 與 Position & Orientation 類別中的參數。

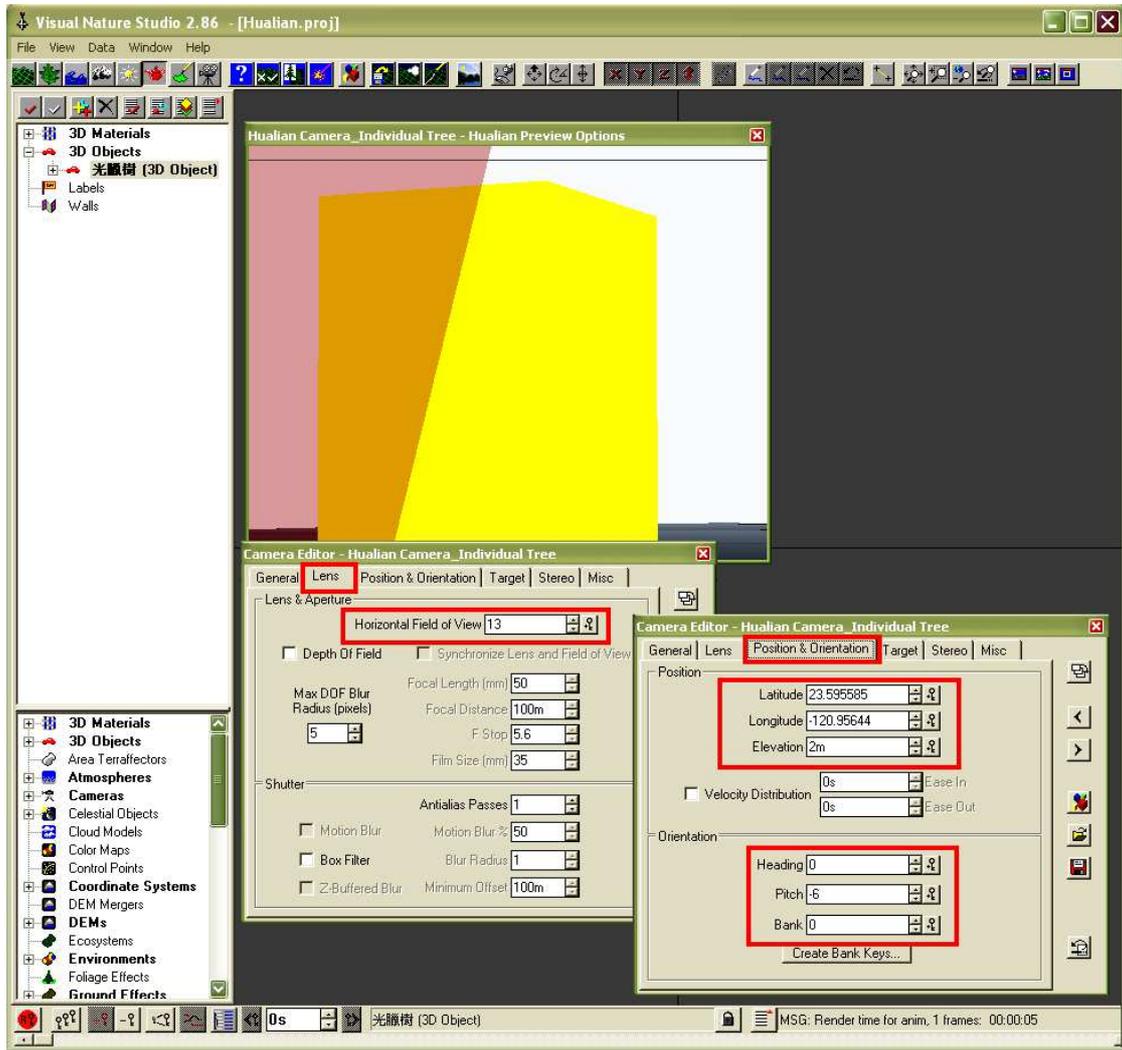


圖 30 調整參數

- c. 執行此設定下的模擬(Render a Preview(F9)): 此模擬出的 3D 樹種未呈現其所應屬的相對色彩，利用其屬性編輯(Material Editor)視窗修改。此 3D 物件(光臘樹樹冠模式)共由六個成分組成: Trunk、Bough、Branch1、Branch2、Branch3、與 Leaf1。此與 Onyx TREE BROADLEAF 軟體中的組成相對應。

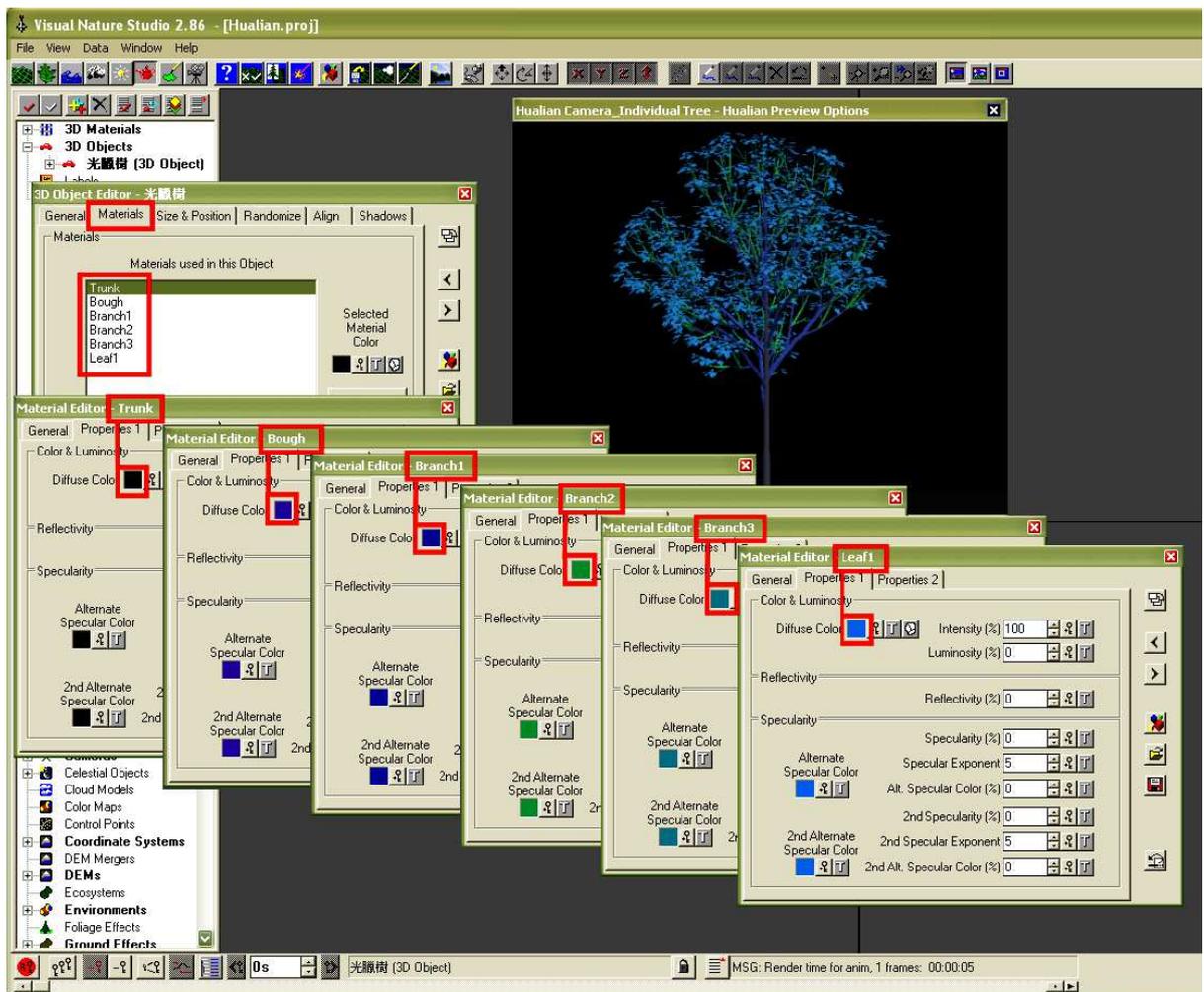


圖 31 調整樹冠顯示色彩介面-1

- d. 設定光臘樹樹冠模式其組成之相對色彩屬性:
- i. 建立 Trunk 成分之屬性, 並透過 Color Editor 視窗調整所對應之色彩。

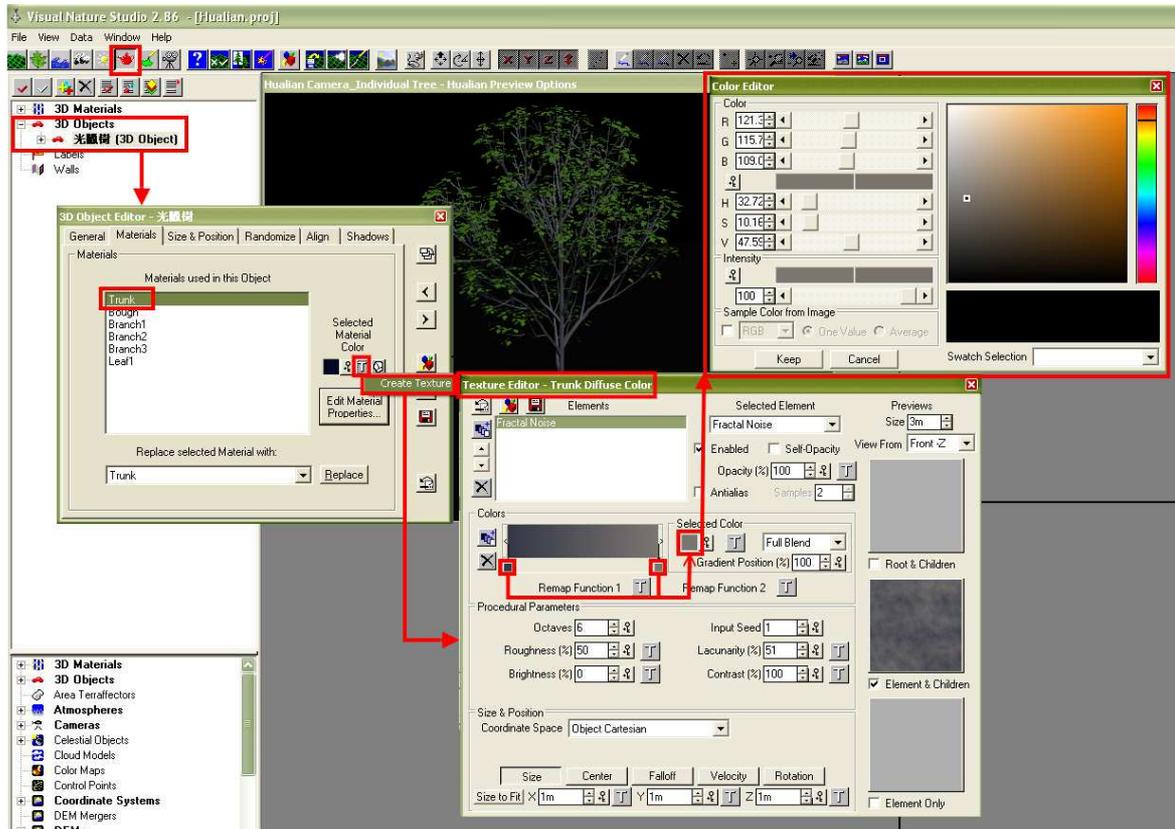


圖 32 調整樹冠顯示色彩介面-2

- ii. 因 Trunk 成分之色彩屬性與另四種成分(Bough、Branch1、Branch2、與 Branch3)之色彩屬性相同, 因此將其屬性套用之。

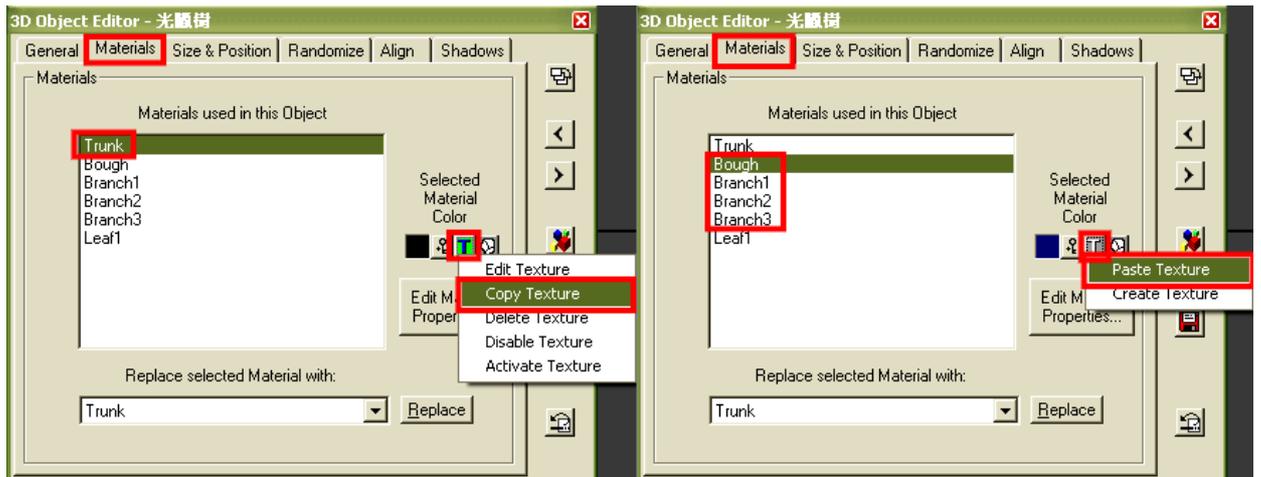


圖 33 調整樹冠顯示色彩介面-3

- iii. 另建立 Leaf 成分之屬性，同樣透過 Color Editor 視窗調整所對應之色彩。

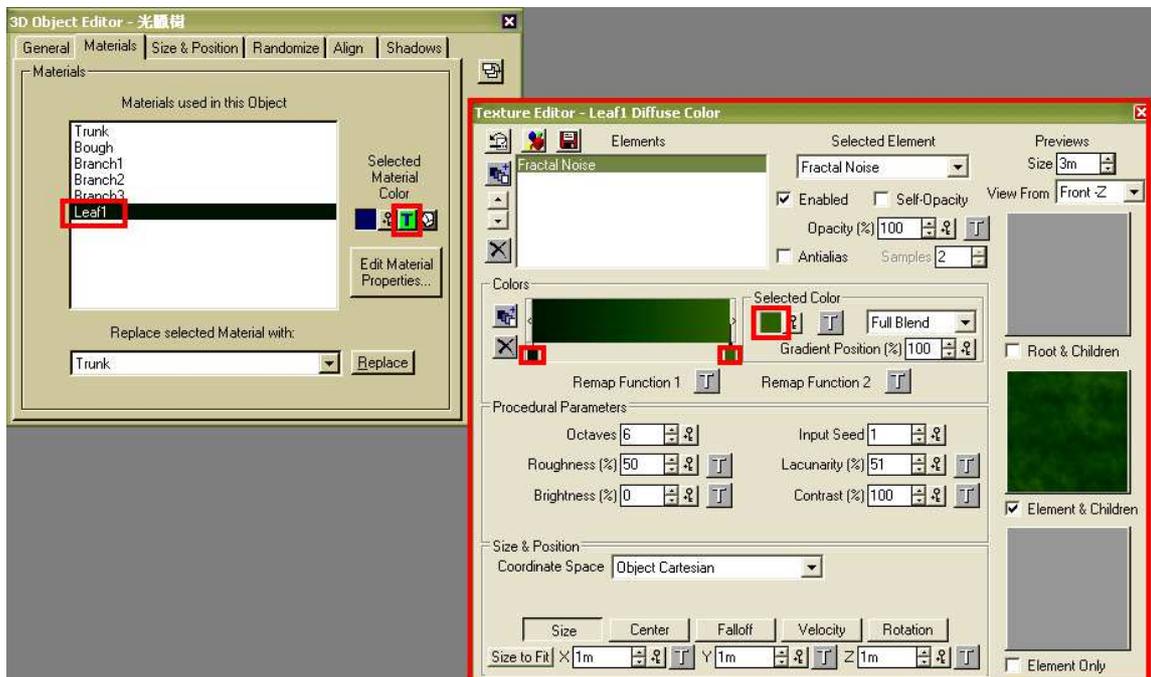


圖 34 調整樹冠顯示色彩介面-4

- e. 光臘樹樹冠模式之色彩屬性調整後(左)與 Onyx TREE BORADLEAF 之原檔比較(右)。

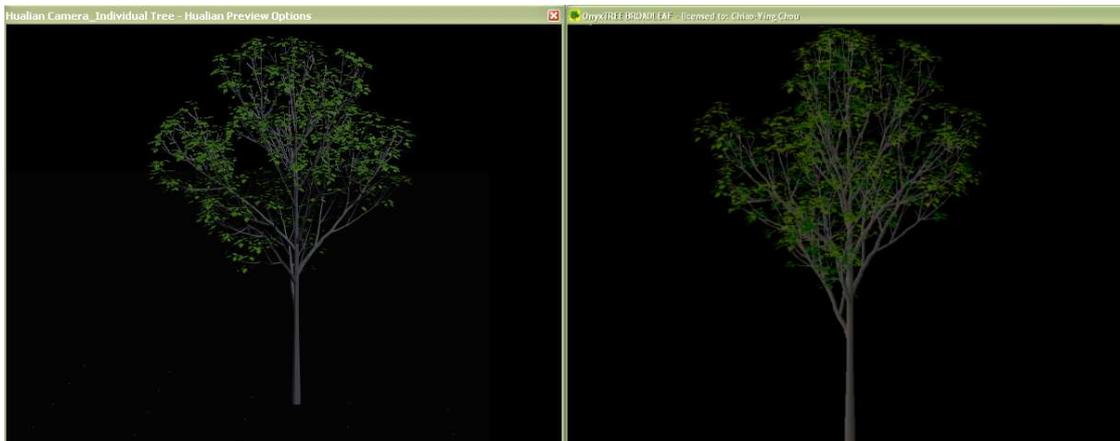


圖 35 調整後色彩屬性與原檔比較

6. 林分位置圖層(Shapefile)與樹冠模式(3D 物件)關聯性之建立

a. Foliage Effects 之建立

- i. 於 General 選單中設定其名稱。
- ii. 於 Height & Elevation 選單中設定其林分之最大與最小樹高。
- iii. 於 Groups 選單中建立樹冠等級(如上木、中木、下木)，同時並可設定其相對於林分之樹高與密度。
- iv. 於 Objects 選單中加入相對應於 Groups 之 3D 物件(林木樹冠模式)，同時可調整其相對於 Groups 之樹高與密度。

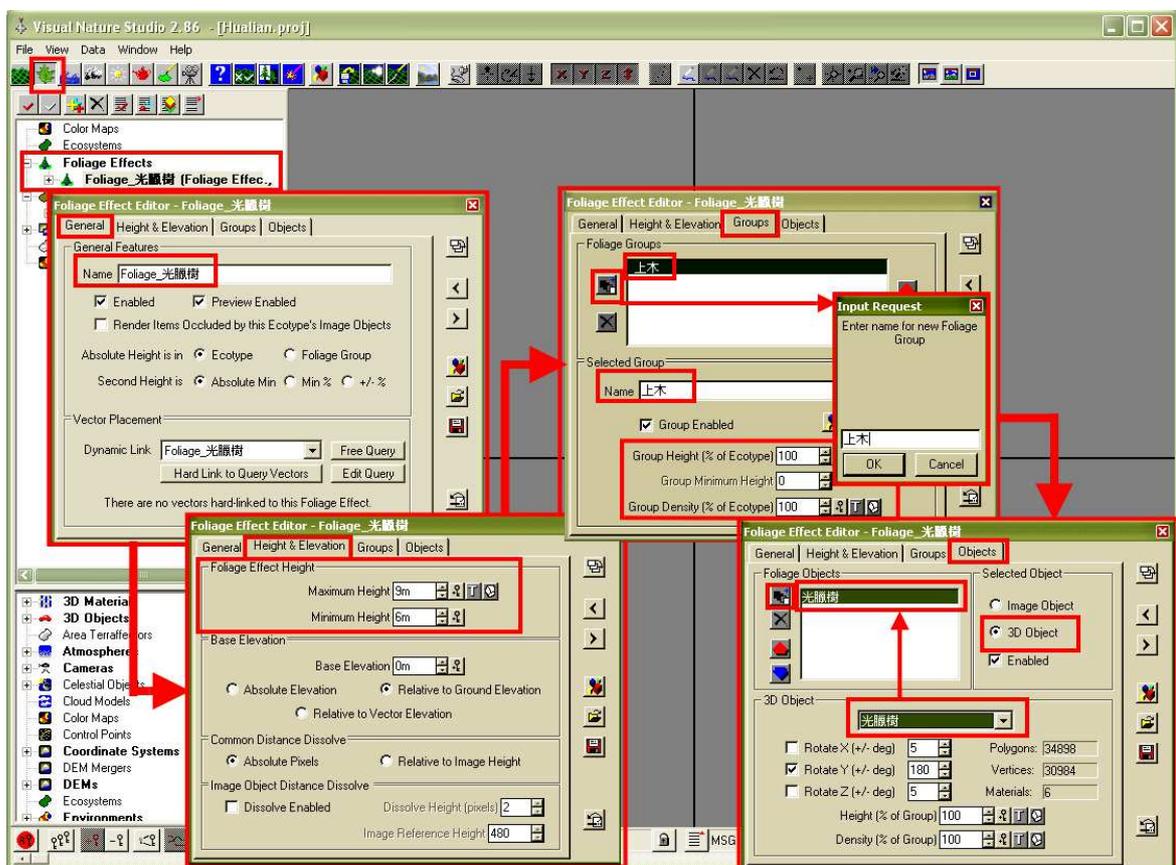


圖 36 建立林分位置圖層與樹冠模式關聯性-1

- b. 透過此 Foliage Effect (Foliage_光臘樹)，建立林分位置圖層(Shapefile)與樹冠模式(3D 物件)之關聯性
 - i. 於 Foliage Effect Editor 視窗中之 General 選單，建立其連結設定(Edit Query)。
 - ii. 此時 Search Query 視窗開啟，於 Selected Filter 選單中設定相對應的林分圖層屬性。接著回到 General 選單中執行關聯屬性選取 (Select Items Now)。
 - iii. 接著開啟 Component Library 視窗，選擇 Foliage Effects 內之 **Foliage_光臘樹**。執行關聯性建立(Attach)後，原本代表林分中單株林木之紅點其轉成光臘樹樹冠模型之 3D 物件(步驟 4a 圖 40 中之黃色方塊)。

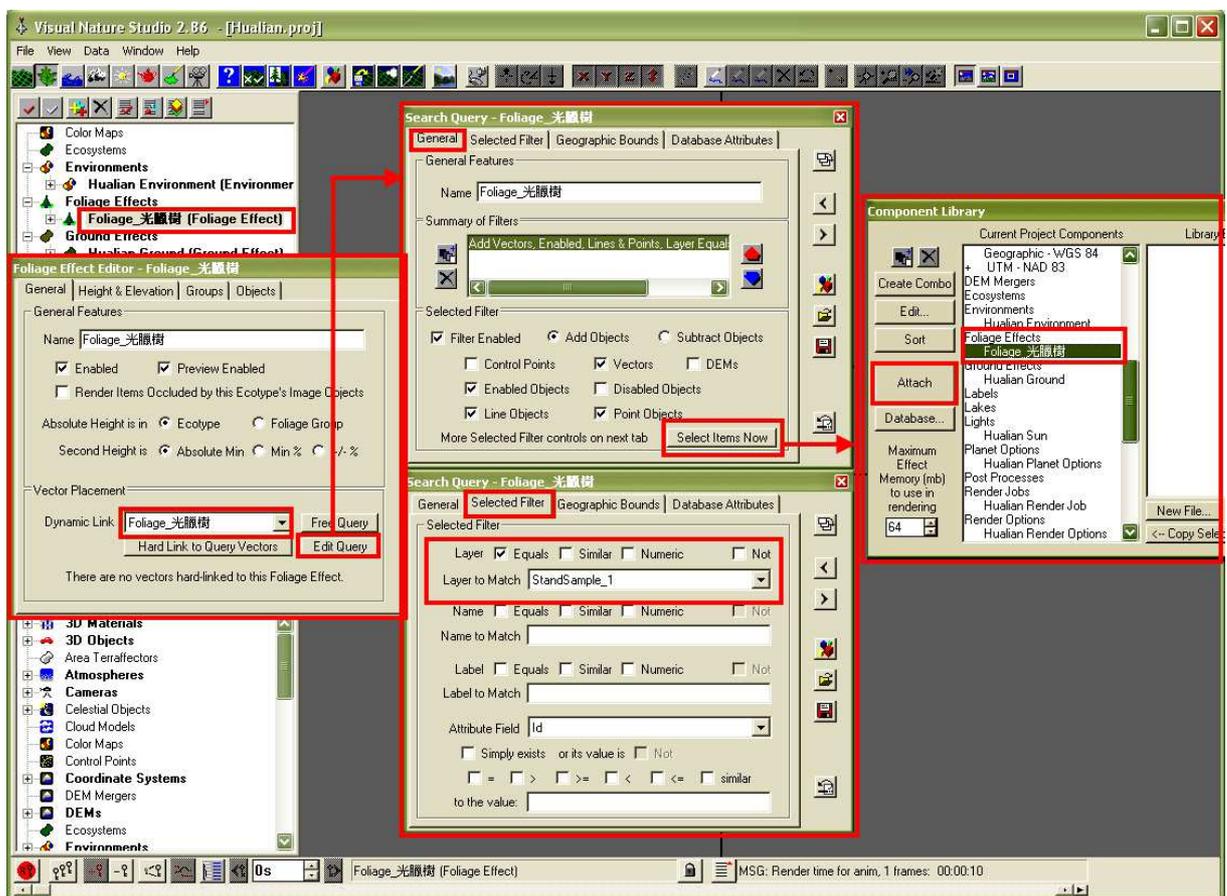


圖 37 建立林分位置圖層與樹冠模式關聯性-2

7. 林分地表模擬之設定

- 透過 Ecosystem Editor 中的 Material & Foliage 選單，設定其 Understory 組成。
- Ecotype Editor-Ecosystem Understory 視窗開啟後，於 Ecotype 選單設定地表組成之最大與最小高度，同時可設定地表組成之密度。

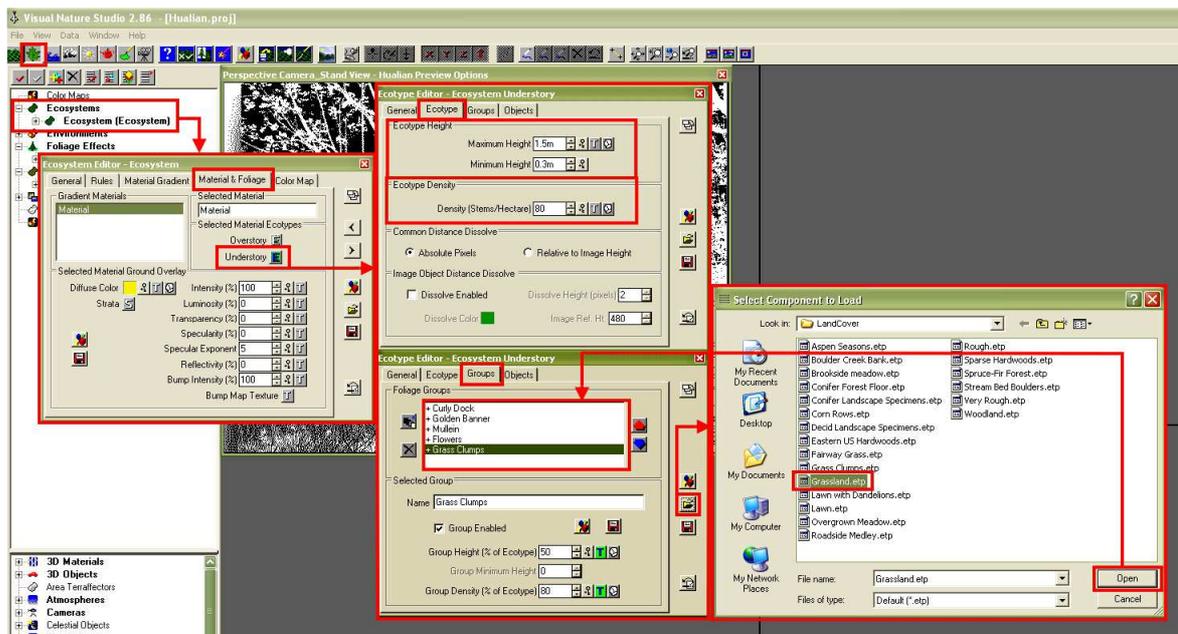


圖 38 設定林分地表模擬

- c. 於 Ecotype Editor-Ecosystem Understory 視窗之 Groups 選單中設定地表組成物的總類、比率與相對高度。此時可透過 Visual Nature Studio 所內設之 LandCover Library 匯入可用之地表組成物(如草本與開花等植被)。

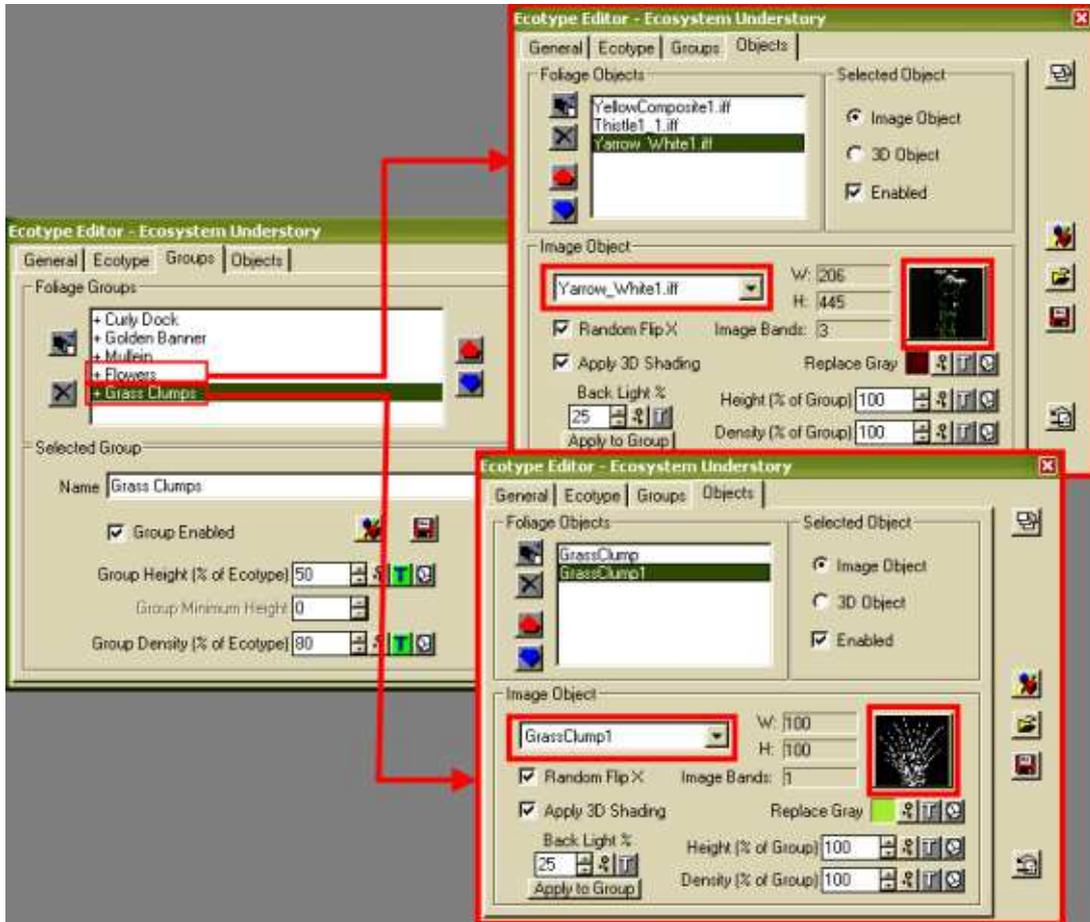


圖 39 設定林分地表組成

8. 林分景觀模擬之設定

開啟一個新的視窗(Perspective Camera_Stand View)，設定適當之觀景位置，焦距與角度，即可執行林分景觀之模擬(Render a preview, F9)。其中參數設定之原則與步驟 5b 之選項相同。

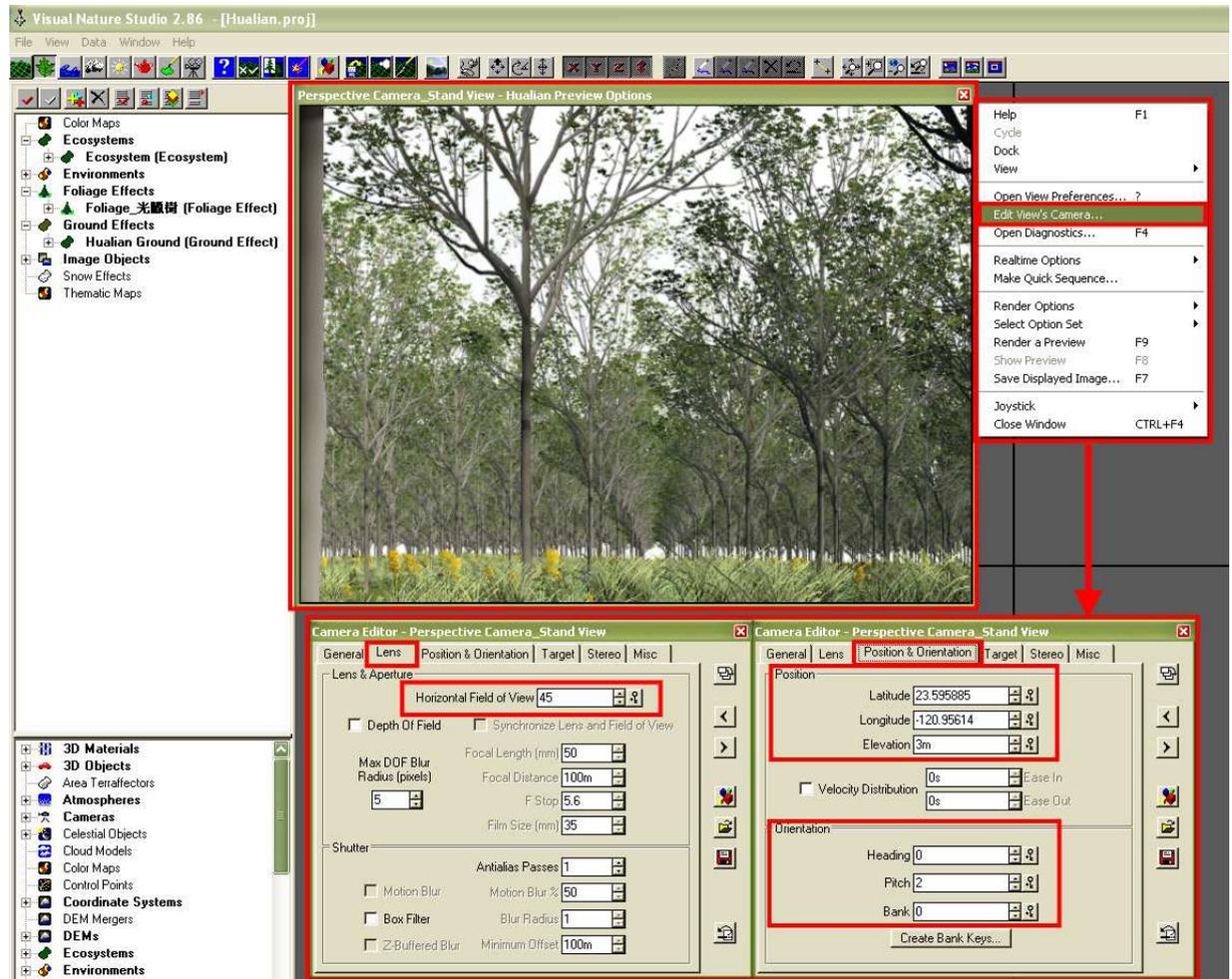


圖 40 林分景觀模擬設定介面

參、 前年度研究結果回顧

一、 98 年度研究結果

本研究於98年度利用R波段光譜反射值與常態化植生指數 (Normalized Difference vegetation Index, NDVI) (Rouse, Haas, Schell, Deering, & Harlan, 1974) (公式如下) 建立之櫟樹與光臘樹林分參數 (林分覆蓋度、林分材積、成活率) 模式, 其預測能力以光臘樹模式為佳。本年度加入土壤適應植生指數 (Soil-Adjusted Vegetation Index, SAVI) (Huete, 1988) (公式如下) 為預測變數建立指數模式, 並調整98年度模式類型以及刪減不正常極值之資料點以增加R²值, 結果如圖41, 並將各模式R²值整理為表3、各模式之函式整理為表4。

$$NDVI = (NIR - R) / (NIR + R)$$

$$SAVI = (NIR - R) * (1 + L) / (NIR + R + L)$$

式中

NIR：近紅外光反射值

R：紅光反射值

L：土壤線常數，全球通用L=0.5

表 3 光臘樹光譜資訊與林分參數推估模式之 R² 值

林分參數	影像日期	光譜資訊		
		R	NDVI	SAVI
林分 覆蓋度	20090513	0.87 ^a	0.94 ^b	0.95 ^b
	20090624	0.88 ^a	0.93 ^b	0.92 ^b
林分材積	20090513	0.68 ^a	0.88 ^b	0.88 ^b
	20090624	0.66 ^a	0.86 ^b	0.86 ^b
成活率	20090513	0.60 ^c	0.59 ^c	0.62 ^c
	20090624	0.62 ^c	0.70 ^c	0.70 ^c

^{a)} 簡單線性模式；^{b)} 指數模式；^{c)} 二次多項式模式。

表 4 各模型函式表

林分參數	光譜資訊	2009/5/13	2009/6/24
林分覆蓋度 (%)	R	$y = -4.29x + 174.42$	$y = -3.75x + 171.98$
	NDVI	$y = 6.73 e^{3.89x}$	$y = 5.82 e^{4.07x}$
	SAVI	$y = 6.18 e^{2.70x}$	$y = 4.75 e^{2.95x}$
林分材積 (m ³ /ha)	R	$y = -2.32x + 82.02$	$y = -2.07x + 81.49$
	NDVI	$y = 0.08 e^{9.36x}$	$y = 0.06 e^{9.81x}$
	SAVI	$y = 0.07 e^{6.46x}$	$y = 0.04 e^{7.10x}$
成活率 (%)	R	$y = 0.63x^2 - 43.29x + 775.79$	$y = 0.58x^2 - 43.70x + 857.68$
	NDVI	$y = 1066.24x^2 - 775.86x + 170.00$	$y = 1312.60x^2 - 1025.25x + 227.09$
	SAVI	$y = 529.52x^2 - 588.94x + 191.33$	$y = 618.44x^2 - 747.30x + 255.97$

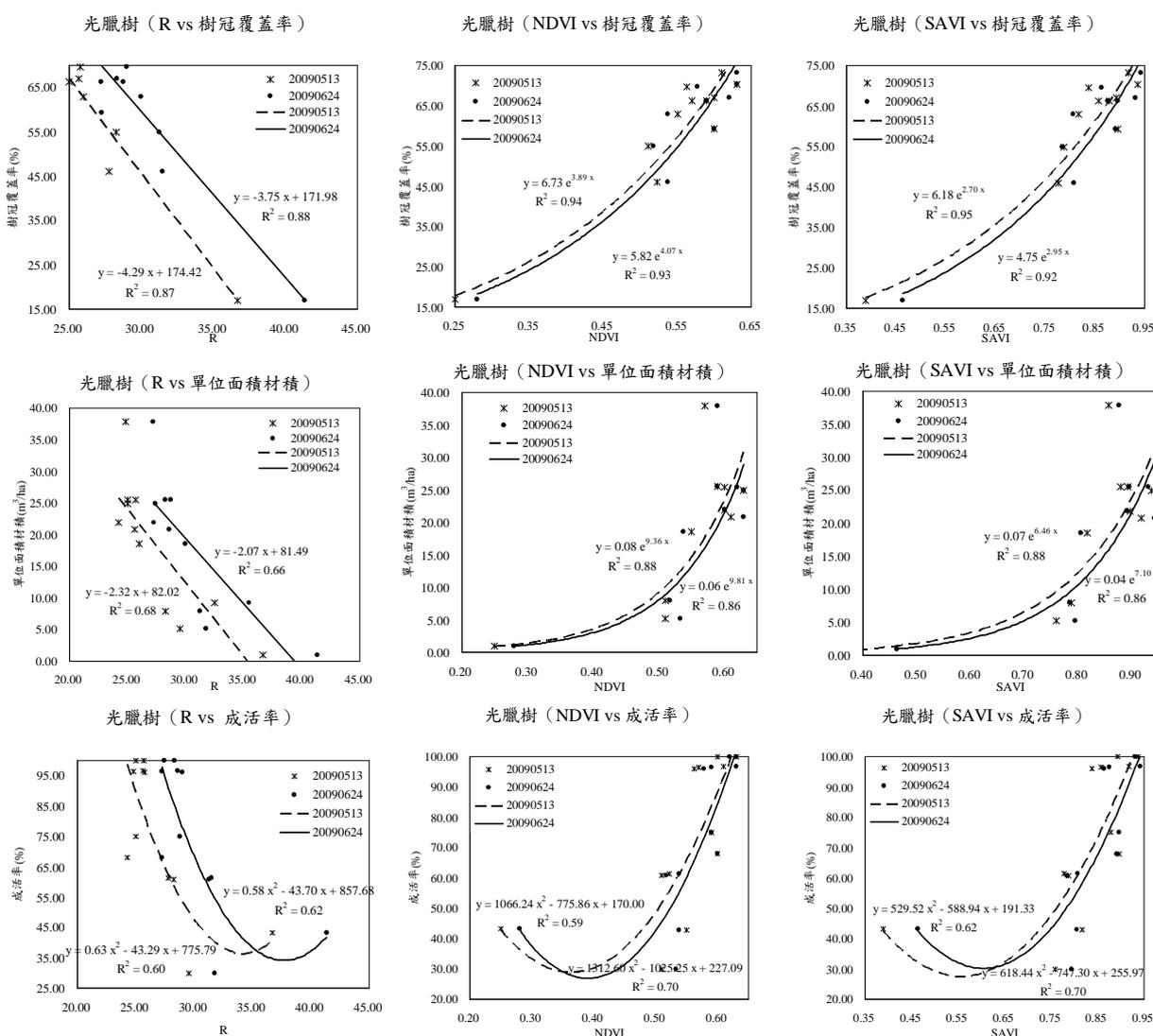


圖 41 光臘樹林分參數與光譜資訊迴歸結果

其中成活率之模式類型為二次多項式，呈現勾狀趨勢，似乎不甚合理。為解釋此一情形，將 98 年度調查之樣區資料附於表 5：

表 5 98 年度計畫樣區調查結果

樹種	編號	造林 年度	平均胸徑 (cm)	平均樹高 (m)	平均冠幅 (m)	林分覆蓋度 (%)	成活株數	林分密度 (n/ha)	成活率 (%)	林分材積 (m ³ /ha)	總平均生長量 (m ³ *ha ⁻¹ *y ⁻¹)
檫樹	A13	93	3.22	3.10	1.50	13.14	26	900	43.33	1.16	0.23
	A12	93	3.27	3.11	1.63	25.03	44	800	72.13	1.76	0.35
	A03	93	6.26	3.22	2.97	24.84	14	280	21.54	1.83	0.37
	A02	92	3.78	3.57	2.13	37.26	40	400	47.62	3.04	0.51
	A01	92	3.47	3.90	2.11	41.69	45	920	53.57	3.42	0.57
	A05	92	4.73	3.85	1.97	37.18	46	760	85.19	4.27	0.71
	A04	93	6.15	3.85	2.85	32.90	20	840	24.69	4.85	0.97
	A07	92	6.81	4.15	2.37	53.56	42	1040	84.00	8.49	1.42
	A08	91	6.01	4.70	2.15	47.36	52	1020	88.14	10.29	1.47
	A09	91	6.49	4.73	2.06	45.76	51	1060	92.73	10.54	1.51
	A06	92	6.97	6.12	2.87	60.78	38	680	58.46	11.96	1.99
	A10	92	6.02	6.25	2.69	81.87	53	880	73.61	18.75	3.13
	A11	92	8.36	6.49	3.44	82.75	34	520	57.63	18.96	3.16
光臘樹	B06	92	3.22	2.36	1.62	16.91	29	980	43.28	0.97	0.16
	B04	93	7.05	4.30	2.56	28.63	20	860	29.85	5.18	1.04
	B02	92	5.41	3.94	2.28	46.00	43	900	61.43	5.89	0.98
	B03	92	5.24	4.73	2.46	54.92	45	400	60.81	7.94	1.32
	B12	93	4.88	5.78	2.44	61.55	51	840	91.07	9.17	1.83
	B01	92	6.28	5.70	2.68	69.67	49	580	96.08	12.85	2.14
	B05	93	6.96	5.55	2.72	62.96	42	1180	42.86	18.56	3.71
	B10	92	6.57	8.16	2.48	73.21	59	1020	96.72	20.81	3.47
	B09	92	7.28	5.38	2.41	59.34	51	1020	68.00	21.87	3.65
	B11	92	6.41	9.50	2.48	70.41	58	1180	100.00	24.88	4.15
	B07	92	7.19	6.75	2.42	67.02	59	1160	100.00	25.48	4.25
	B08	92	6.73	5.24	2.62	66.28	51	1020	75.00	25.50	4.25
	B13	92	8.46	7.12	2.43	66.31	55	1100	96.49	37.89	6.32

98 年度調查之樣區覆蓋率測量原則為重疊之樹冠並不測量，若是有兩棵林木之樹冠重疊則冠幅僅取至中心線，因此林分覆蓋度僅為投影至地上 2D 平面之面積，與單株冠幅或林分之樹冠層數無關。由圖 3 之光譜資訊與林分覆蓋度之指數模型可看出二者有高度正比相關，而事實上紅光波段反射值與植生指數的確常被用做為綠度(Greenness)指標使用，紅光波段反射值越低或植生指數越高代表地被植物之豐度及覆蓋度越高 (Hoffer, 1978)。接著，由樣區資料發現林分覆蓋度與成活率之間的二次多項式模型也有高相關性(圖 5)，同樣和光譜與成活率之趨勢出現勾狀，茲將左下兩個資料點分別為 B04 與 B06 提出來討論。

B04 與 B06 兩者栽植密度相同，成活率分別為 29.85 % 與 43.28 %，前者成活株數為 20、後者為 29 株，但是 B04 之林分覆蓋度 28.63 % 卻大於 B06 之 16.91 %，平均胸徑、樹高、冠幅等是 B06 之 1.5 - 2 倍不等，材積更是高達 5 倍多；另外在分叉率部分，B04 之林木沒有分叉情形，B06 則有 20.7 % 的林木出現分叉，可見 B04 成活林木生長普遍比 B06 好。

從以上兩段討論中可以歸納出 2 項問題，一是原先採取之林分覆蓋度之測量方法是否適用於本研究計畫使用。首先林木冠幅不一定足夠代表覆蓋率多寡，因為樹冠生長不一定是鬱閉的，有可能葉片稀疏但枝條伸展幅度廣，就會出現林分覆蓋度高卻低植生指數，因此若能使用魚眼鏡頭照相技術測定覆蓋率將會是較佳的測量方法；另外光譜值反映的林分覆蓋度會與林分冠層結構有更高的相關性，如葉面與葉肉細胞層數越多則近紅外光被反射越多 (Myers, 1970)，而能夠反應葉面積層數的指數為葉面積指數(Leaf Area Index, LAI)(鄭祈全、邱祈榮、陳燕章，1997)，如能測定林地之 LAI 並將其作為林分參數之一以建立成活率估算模式，預期可以提升模式估算之準確度。第二，由 B04 與 B06 二樣區之調查資料可以發現雖然栽植密度相同，但是成活率及生長狀況卻有相當大的差異，可見立地條件的不同對此二樣區有頗大的影響，故若能利用立地條件的不同將林分加以分級，各別討論在不同級別立地條件下的光譜與林分參數關係，即能夠大幅提升模式之準確度。

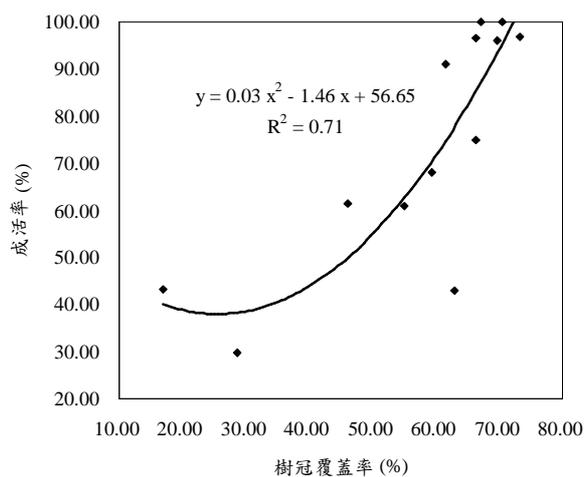


圖 42 光臘樹林分覆蓋度與成活率之二次多項式迴歸

利用光臘樹 R^2 值最佳之模式推估光復鄉全區造林地之各項林分參數，其像元 (pixel) 空間分布圖如圖 43 所示。



圖 43 林分覆蓋度、林分材積、成活率之像元空間分布圖

依照各模式將全區的林分參數各別計算出來之結果為表 6。「光臘樹樣區」係以 98 年度設置於光臘樹純林之樣區調查結果推估全區，「混合樣區」則為 98 年度檫樹與光臘樹二樹種樣區之平均數作為參數推估全區。使用混合樣區的用意是為更貼近全區造林地之平均生長狀況，因光臘樹之材積等林分參數普遍比檫樹來得高，若僅以光臘樹樣區數據推估全區並不適當。全區之造林範圍圖層因包含道路邊緣及空缺造林地等，故光譜值推估全區成活率結果小於樣區值應合理。

表 6 各模式估算結果與樣區估算結果比較

		林分覆蓋度 (%)	總材積 (m ³)	總碳量 (ton)	成活率 (%)
光臘樹樣區*		57.17 ±9.25	16214.00 ±5627.95	7213.37 ±3127.80	73.97 ±13.49
混合樣區*		51.05 ±8.05	11818.05 ±3670.42	5257.68 ±1861.55	67.86 ±9.30
R		48.61	13931.17	6197.77	56.74
2009/5/13	NDVI	46.93	9321.11	4146.82	52.25
	SAVI	46.38	9522.23	4236.30	51.13
R		50.35	14143.11	6292.06	57.41
2009/6/24	NDVI	46.42	9591.66	4267.19	49.41
	SAVI	45.19	9842.17	4378.63	50.02

*樣區推估值皆附上 95 % 信賴區間值

根據上述林分材積像元空間分布圖至造林地現地勘查，使用 GPS 定位系統輔助，前往材積特別高、特別低之造林地進行拍照攝影，接著進行內業利用地理資訊系統 (GIS) 技術將照相點位與林分材積像元空間分布圖套疊，連結照片檔與模式推估之結果，其展現之情形如下圖 44，可見模式推估結果與現地林木生長趨勢狀況符合。

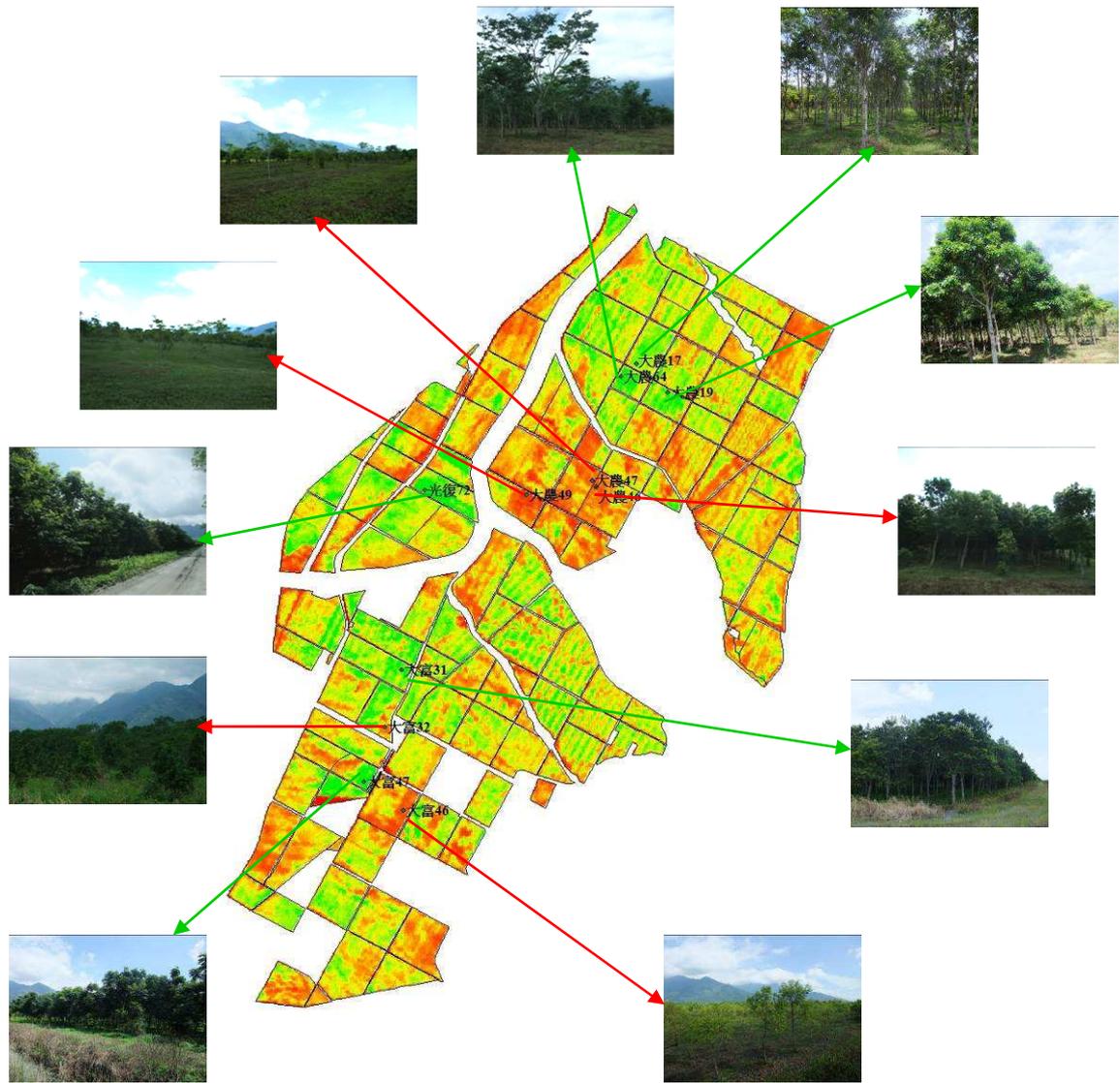


圖 44 現地林木生長狀況照片與林分材積像元空間分布圖之連結

紅色線連結生長差之林分，綠色線連結生長佳之林分

二、 99 年度研究結果

(一) 樣區設置與調查

為了發展混合樹種模式以符合大多數平地造林混植之狀況，並與 98 年度建立之檫樹與光臘樹純林模式作比較，99 年度計畫特別規劃 1 公頃樣區進行調查。其原則為在 1 公頃樣區範圍內應含有檫樹與光臘樹以及第三樹種之純林分，並有一部分林分為混合樹種，圖 45 為示意圖。同時，須確認規劃之 1 公頃樣區是否落於均質區之外(圖 46)，以免該樣區無法代表多數混合生長的造林地，期能以此樣區建構適用於廣泛造林地之林分參數模式。

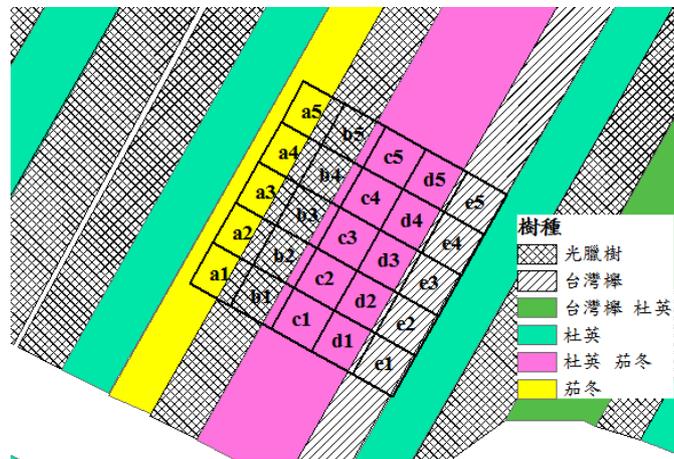


圖 45 1 公頃樣區樹種分布與次樣區編號

因應 SPOT-5 衛星影像之空間解析度為 10 m，1 公頃樣區內之次樣區遂規劃為 20 m × 20 m，俾能避免次樣區與像元範圍不一而無法萃取光譜值之情形。故 1 公頃樣區內之次樣區共有 25 個，其編碼排列方式如圖 46。樣區調查結果如表 7。

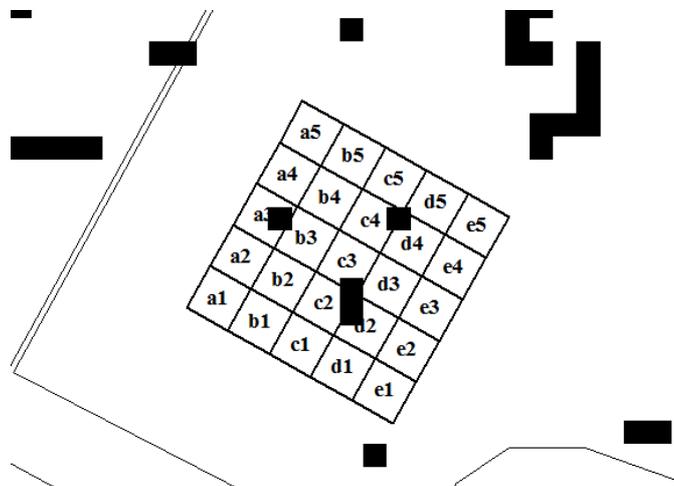


圖 46 1 公頃樣區與均質區套疊圖(黑色區域為均質林分)

表 7 公頃次樣區調查資料表

樣區	樹種	立木年	平均樹高 (m)	平均胸徑 (cm)	平均冠幅 (m)	存活株數	林分密度 (存活株數/ha)	成活率 (%)	林分覆蓋度 (%)	林分鬱閉度 (%)	林分材積 (m ³ /ha)	總平均生長量 (m ³ *ha ⁻¹ *y ⁻¹)
a1	光臘樹, 茄冬	91	3.77	4.54	2.26	11	275	24.44	12.41	28.66	1.35	0.17
a2	茄冬, 光臘樹	91	4.02	7.45	3.07	29	725	64.44	56.49	52.60	2.26	0.28
a3	茄冬, 臘樹	91	5.00	11.45	4.02	33	825	70.21	107.01	69.41	20.05	2.51
a4	茄冬, 光臘樹	91	9.54	6.98	5.46	38	950	80.85	109.72	71.19	24.24	3.03
a5	茄冬, 光臘樹	91	9.95	6.84	4.42	33	825	58.93	165.87	72.41	30.75	3.84
b1	光臘樹	91	4.40	4.47	2.74	40	1000	74.07	61.63	47.84	7.39	0.92
b2	光臘樹, 杜英	91	5.73	7.05	3.23	44	1100	81.48	93.53	58.99	20.34	2.54
b3	光臘樹	91	7.95	6.82	3.57	50	1250	92.59	130.58	68.61	49.02	6.13
b4	光臘樹, 杜英	91	9.60	8.89	4.23	59	1475	98.33	249.83	69.94	58.19	7.27
b5	光臘樹, 杜英	91	8.60	9.14	4.04	53	1325	92.98	235.52	77.79	58.57	7.32
c1	杜英, 光臘樹	91	7.22	10.71	3.29	28	700	51.85	62.76	54.79	27.98	3.50
c2	杜英	91	7.00	13.02	2.97	52	1300	94.55	92.22	70.51	63.51	7.94
c3	杜英	91	12.67	8.13	3.81	58	1450	98.21	193.06	78.27	103.47	12.93
c4	杜英	91	13.81	9.67	3.99	51	1275	100.00	184.87	81.75	105.85	13.23
c5	杜英, 光臘樹	91	11.48	9.08	3.94	28	700	86.44	175.70	82.07	70.71	8.84
d1	杜英	91	7.48	10.32	3.42	28	700	59.57	67.42	56.08	26.74	3.34
d2	杜英	91	8.41	13.47	3.60	46	1150	64.79	120.05	72.19	74.43	9.30
d3	杜英	91	13.60	9.23	4.36	36	900	62.07	147.62	81.08	71.20	8.90
d4	杜英	91	12.99	8.34	4.33	39	975	68.42	167.81	84.49	68.64	8.58
d5	光臘樹	91	12.84	9.01	3.65	37	925	55.22	111.28	82.98	63.96	7.99
e1	欖木	91	4.02	5.94	3.34	57	1425	93.44	132.41	57.78	11.72	1.46
e2	欖木	91	5.37	6.96	3.66	58	1450	96.67	154.15	61.46	18.28	2.28
e3	欖木	91	6.99	4.70	3.58	56	1400	88.89	155.01	69.76	15.24	1.90
e4	欖木	91	7.40	6.33	3.60	56	1400	98.25	172.96	76.65	26.58	3.32
e5	欖木	91	7.49	6.72	4.25	56	1400	83.58	215.31	78.97	22.82	2.85

(二) 立地條件調查與分析

根據 98 年度樣區調查結果發現林分生長狀況不甚均勻，為了解光復大農大富造林地立地條件分布狀況，99 年度依據 98 年度估算之林分材積像元空間分布圖，選取位於同一塊光臘樹純林內生長差異大之林分作為一組土壤採集樣塊，於其中生長好與壞之林分選擇採樣區，並以「混合採樣(Composite Sampling, CS)法」進行採樣使統計結果具有可性度。土壤調查項目有土壤質地分析以及 C、H、N 元素成分分析。

本研究嘗試以不同林分參數作為分類變數，對 25 個次樣區進行立地級分類，第一種分類依據為林木生長因子：平均胸徑與平均樹高，分為三級，稱為生長表現 (Growth Performance)；第二種分類則以林分密度與成活率作為因子，分為二級，稱為立木數量 (Tree Amount)。分類結果散布圖如 47 所示。

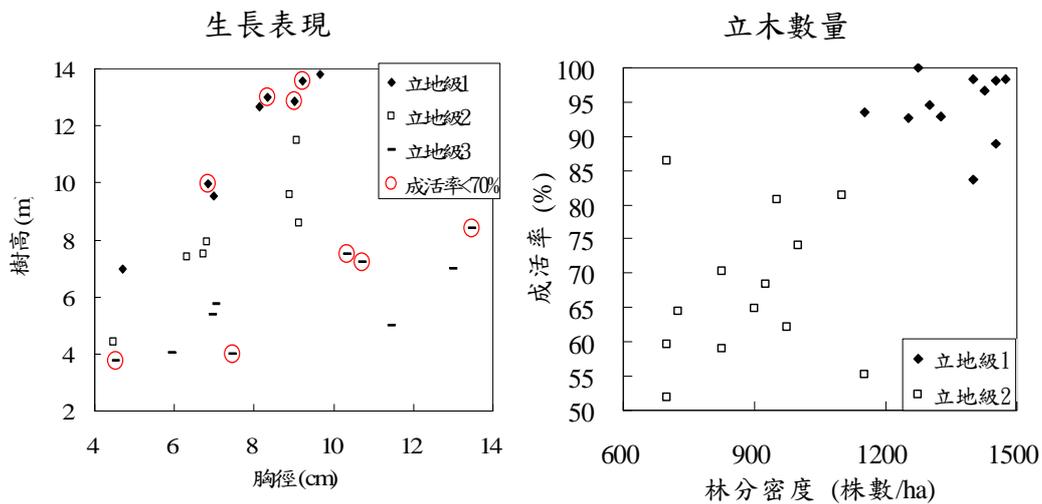


圖 47 二種立地級分類結果散布圖

建立上述立地級分類之後，標示出每個次樣區的立地級分屬(圖 48)，至現場進行土壤採樣動作，並做土壤分析後，將各立地級平均林分與土壤性狀整理於表 8。可以看出生長表現分類大致以平均樹高為主要依據，符合一般傳統立地級(site index)之定義，第一級不僅樹高特別高，其林分材積也明顯高於其他二級，分析該類別樣區之土壤發現與其他樣區有明顯的不同，係為壤土而其餘皆為砂質壤土表層，其 C、H、N 三元素也為所有分類群土壤中最高者。其餘二級土壤性質表現相近，可進一步評估是否能夠將此二級別合併。在立木數量分類方面，二級別之林分密度與成活率有非常明顯之差異，相較其他林分參數則沒有明顯的不同，而該二級別的土壤表現近乎一致，僅在粉粒與黏粒的比例上有些微不同。究其原因，應係 1 公頃範圍之樣區對於土壤空間變異來說空間解析度太小，土壤性質與母岩成分相關性較高，一地理區之母岩通常變動不大，雖本處花蓮光復台糖造林地客土情況普遍，但仍屬均質連續之鋪設情形，故在此範圍內採集之土壤變異不大係屬正常。未來若能在全區散布永久樣區，推測應能提高立地級別之間之土壤特性判準依據。

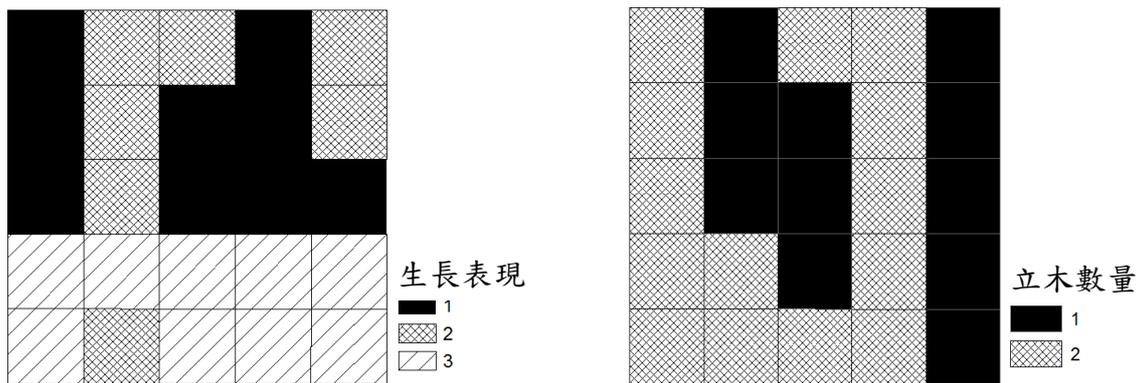


圖 48 二種立地級分類次樣區分布圖

表 8 各立地級平均林分參數與土壤性狀

立地分類		生長表現			立木數量	
立地級	1	2	3	1	2	
	平均胸徑 (cm)	7.86	7.35	9.09	7.85	8.49
	平均樹高 (m)	11.55	8.13	5.80	8.26	8.32
	平均冠幅 (m)	4.20	3.77	3.29	3.73	3.70
林分參數	林分覆蓋度 (%)	154.40	177.36	89.84	174.17	104.23
	林分鬱閉度 (%)	77.74	71.70	58.25	71.95	65.34
	林分材積 (m ³ /ha)	60.42	41.90	26.66	48.47	36.43
	原始栽植密度 (株數/ha)	1443.75	1457.14	1347.50	1472.73	1358.93
	林分密度 (株數/ha)	1087.50	1221.43	965.00	1377.27	839.29
	成活率 (%)	76.57	89.46	70.15	94.32	64.49
	C (%)	0.77	0.63	0.72	0.70	0.70
	H (%)	0.42	0.34	0.35	0.36	0.36
土壤性狀	N (%)	0.10	0.08	0.09	0.09	0.09
	Sand (%)	51.82	71.89	70.55	63.86	68.68
	Clay (%)	16.06	10.04	9.37	12.05	10.44
	Silt (%)	32.12	18.07	20.08	24.09	20.88
	USDA 土壤質地分類	壤土	砂質壤土	砂質壤土	砂質壤土	砂質壤土

*生長表現：以平均樹高與平均胸徑為因子進行 DCA 分群。

*立木數量：以林分密度與成活率為因子進行 K 平均法分群。

*USDA 土壤質地分類：依美國農業部 (USDA) 土壤質地分類標準分類。

(三) 迴歸分析

迴歸分析略分為三部份：1. 林分參數之間(式 1-7)；2. 林分參數與光譜值(式 8-12)；3. 林分參數與林分參數結合光譜值之關係(式 13-15)，先將所有變數加入進行逐步迴歸分析後，選擇相關性最高的變數因子出來，接著分別在沒有立地級虛擬變數、加入生長表現立地級虛擬變數、加入立木數量立地級虛擬變數三種情況下進行強迫選入法迴歸分析，總共得到 15 類迴歸式，分為三種虛擬變數情形故總數為 45 個迴歸預測式，並以調整後決定係數(adjusted R square)為判準選擇出最佳預測模型(底框為灰色者)，所有迴歸式之 R^2 總表如表 9，可以看出大部分預測式皆以有加入立地級之虛擬變數為佳，其調整的幅度最高達 0.39(式 12)。

表 9 各迴歸預測式之決定係數(R^2)

編號	預測項	因子	無		生長表現		立木數量	
			R^2	調整 R^2	R^2	調整 R^2	R^2	調整 R^2
1	SV	H, DBH	0.81	0.80	0.83	0.80	0.88	0.86
2	SV	H, DBH, SD	0.86	0.84	0.87	0.84	0.88	0.85
3	SV	SCL	0.51	0.49	0.52	0.45	0.51	0.46
4	SCO	SCL	0.55	0.54	0.67	0.62	0.74	0.71
5	SCO	SCL, SD	0.71	0.68	0.78	0.73	0.74	0.70
6	SCO	SCL, CW	0.57	0.53	0.69	0.63	0.79	0.76
7	SR	SD	0.76	0.75	0.78	0.75	0.77	0.75
8	SV	SAVI, NDVI	0.46	0.41	0.50	0.40	0.46	0.38
9	SCO	R	0.49	0.47	0.70	0.65	0.61	0.57
10	SCL	R, SAVI	0.83	0.81	0.92	0.91	0.83	0.81
11	SD	R	0.33	0.30	0.89	0.87	0.80	0.79
12	SR	R	0.29	0.26	0.41	0.33	0.68	0.65
13	SV	SCL, NDVI, SAVI	0.60	0.54	0.61	0.51	0.60	0.52
14	SV	SCO, SCL, NDVI, SAVI	0.60	0.52	0.61	0.48	0.60	0.50
15	SV	H, DBH, NDVI, SAVI	0.83	0.80	0.85	0.80	0.90	0.88

*平均胸徑(DBH)、平均樹高(H)、平均冠幅(CW)、林分覆蓋度(SCO)、林分鬱閉度(SCL)、林分密度(SD)、成活率(SR)、林分材積(SV)、紅光反射值(R)、常態化差異植生指數(NDVI)、土壤適應指數(SAVI)

*底框灰色者為預測式較佳迴歸結果

上述迴歸分析結果顯示加入立地級虛擬變數之預測式的確有佳化的效果，即便在調整後 R^2 變低的式中(如式 3、8、13、14)其原始 R^2 值仍有微幅上升的趨勢，可見如能調整式中變數項或樣區變數數據品質，此方法依然具有發展潛力。

綜觀表 9 之結果發現應用光譜值 R 與 SAVI 參數推估林分鬱閉度(式 10)之預測能力相當高，沒有加入立地級虛擬變數前之調整 R^2 值已高達 0.83(調整後為 0.81)，因此嘗試將林分鬱閉度作為立地級分類依據之一進行分群分析，同時將同質性高的林分覆蓋度一併分群分析以作比較參考，得到下圖 49 之分布結果：

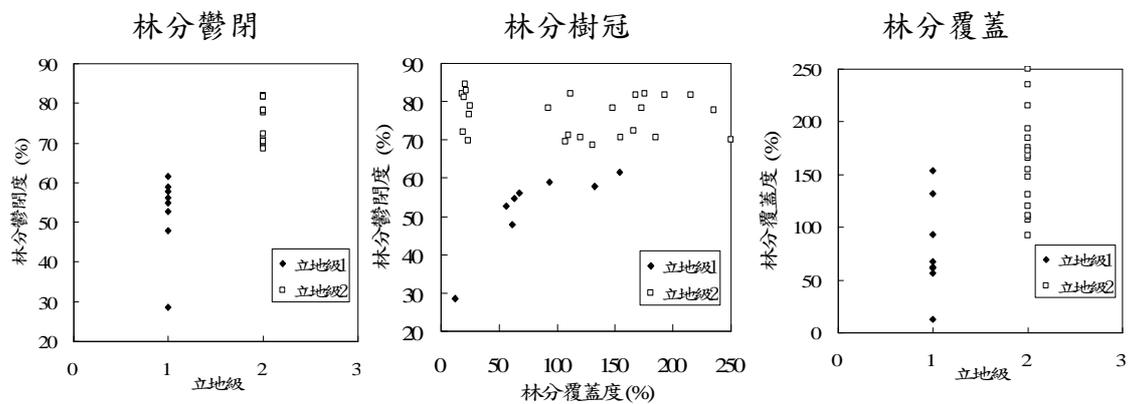


圖 49 林分鬱閉、林分樹冠、林分覆蓋立地級分布圖

其中以林分鬱閉度為單一分類因子的「林分鬱閉(Canopy Closure)」散布圖與以林分鬱閉度及林分覆蓋度二分類因子「林分樹冠(Canopy)」散布圖有明顯的分群結果，但上述二者皆可以林分鬱閉度約 65 %作為分界線，而以林分覆蓋度為單一分類因子的「林分覆蓋(Canopy Cover)」則沒有明顯界線，故選用較簡單之林分鬱閉立地分級結果進行後續分析。本研究主要目的為應用遙測技術估算大面積碳含量，而林分材積為換算碳含量之重要中間林分參數，故以林分材積為目前階段最為重視之林分參數之一。回顧表 9 中式 8，林分材積與植生指數 NDVI、SAVI 迴歸結果之調整後 R^2 值分別為 0.41、0.40、0.38，可見生長表現與立木數量二種立地級分類對林分材積估算沒有明顯效益。但將林分鬱閉立地級轉換為虛擬變數後加入該預測式中得到的 R^2 與調整後 R^2 值分別為 0.54 與 0.47，雖然僅提升 0.08 與 0.06，但在生態意義上，林分鬱閉度與光譜反射值之間關係的確密不可分，對於增加光譜值估測林分材積的能力而言並非沒有絕對影響。以林分鬱閉為立地級分類依據的各項平均林分參數與土壤性狀如表 10。發現不論是林分參數或土壤性狀，立地級 2 者皆比第 1 級佳。

表 10 林分鬱閉立地級平均林分參數與土壤性狀

立地分類		林分鬱閉	
立地級		1	2
林分參數	平均胸徑 (cm)	7.18	8.69
	平均樹高 (m)	5.25	9.72
	平均冠幅 (m)	3.13	3.99
	林分覆蓋度 (%)	80.10	160.85
	林分鬱閉度 (%)	52.27	75.77
	林分材積 (m ³ /ha)	14.51	54.54
	原始栽植密度 (株數/ha)	1312.50	1454.41
	林分密度 (株數/ha)	921.88	1148.53
	成活率 (%)	68.25	82.02
	土壤性狀	C (%)	0.61
H (%)		0.33	0.37
N (%)		0.08	0.10
Sand (%)		79.92	61.86
Clay (%)		8.03	12.05
Silt (%)		12.05	26.10
USDA 土壤質地分類		壤質砂土	砂質壤土

*林分鬱閉：以林分鬱閉度為因子進行 K 平均法分群。

*USDA 土壤質地分類：依美國農業部 (USDA) 土壤質地分類標準分類。

成活率估測部分，在式 7 中可見成活率與林分密度有高度相關，調整後 R² 值達 0.75，因林分密度本係為成活株數與樣區面積之比值，與成活率有高度相關甚為合理。續見式 11，R 光譜反射值與林分密度調整後 R² 值高達 0.87，綜合前述成活率與林分密度之關係，未來檢測平地造林成活率時可先行利用衛星影像 R 光譜反射值推估林分密度，再以估測林分密度值估算造林成活率。

各最佳預測式之變數標準化係數整理如表 11。以林分鬱閉立地級虛擬變數加入式 8 強迫選入迴歸結果預測式取代原來沒有加入虛擬變數之結果列於下表式 8。

表 11 各最佳預測式之變數標準化係數整理

編號	預測項	標準化係數模式
1	SV	$= 0.748H + 0.348DBH + 0.256TA$
2	SV	$= 0.75H + 0.349DBH - 0.21SD + 0.275TA$
3	SV	$= 0.712SCL$
4	SCO	$= 0.634SCL + 0.440TA$
5	SCO	$= 0.45SCL + 0.381SD + 0.137GP1 + 0.33GP2$
6	SCO	$= 0.392SCL + 0.324CW + 0.493TA$
7	SR	$= 0.826SD + 0.009GP1 + 0.159GP2$
8	SV	$= -23.37NDVI + 23.623SAVI - 0.426CC$
9	SCO	$= -0.565R + 0.271GP1 + 0.523GP2$
10	SCL	$= -0.464R + 0.351SAVI + 0.329GP1 + 0.299GP2$
11	SD	$= -0.747R + 0.369GP1 + 0.258GP2$
12	SR	$= -0.532R - 0.75GP1 + 0.316GP2$
13	SV	$= 0.714SCL - 21.158NDVI + 21.13SAVI$
14	SV	$= 0.36SCO + 0.87SCL - 20.072NDVI + 19.913SAVI - 0.88GP1 - 0.16GP2$
15	SV	$= 0.828H + 0.436DBH - 3.825NDVI + 3.62SAVI + 0.298TA$

*平均胸徑(DBH)、平均樹高(H)、平均冠幅(CW)、林分覆蓋度(SCO)、林分鬱閉度(SCL)、林分密度(SD)、成活率(SR)、林分材積(SV)、紅光反射值(R)、常態化差異植生指數(NDVI)、土壤適應指數(SAVI)、生長表現立地級 1(GP1)、生長表現立地級 2(GP2)、立木數量立地級 1(TA)、林分鬱閉立地級 1(CC)

(四) 材積估算與碳含量轉換結果

1. 樣區材積估算結果

根據次樣區調查表 7 資料計算出 1 公頃樣區總蓄積量 41.73 m^3 ，此為地面真實資料之真值，其 95 % 信賴區間為 11.564 m^3 ，而模式(式 13)推估的總蓄積量為 53.95 m^3 ，比之真值 95 % 信賴區間上界 53.29 m^3 略高，預測效果仍有改善空間。圖 50 為 1 公頃次樣區之蓄積量空間分布圖，左為樣區蓄積量真值，右為使用預測式 13 的推估結果，可以看見模式推估結果較為樂觀，大部分次樣區皆高估，顯現不出極端狀況，尤其以 a1-a5、b1-b3 及 e1-e5 次樣區高估情況最為明顯。a1 次樣區成活率僅 24.44 %，立木株數 11 棵，地被植物覆蓋率約略為 70 %；a2-a5 次樣區樹種為茄冬，其冠層濃密形狀渾圓；b1-b3 次樣區樹種為光臘樹，生長表現(平均胸徑、平均樹高)與樹冠重疊情形(林分覆蓋度)較 b4、b5 為低；e1-e5 次樣區樹種為欖木，其樹冠形狀特性為枝條纖長、向外伸展但冠層稀疏，根據上述觀察結果推測模式高估之原因可能與地表草本植物背景與樹冠特性有關，因模式 13 中的參數有使用到植生指數，其值並無法將背景中的草本植物也就是非目標植物之光譜值過濾去除，造成草本植物之光譜反射值一併計入估算當中，使得材積估算結果變高，此情形應適用於解釋 a1、b1-b3 及 e1-e5 次樣區；另外，冠層過於濃密，導致光線在樹冠中多次折射、反射不斷累積其光譜值，最後被衛星上之感測器接收，此現象對 NIR(近紅外光)之影響最為明顯，當葉面層數增加，其反射率最高可達 85 % (Myers, 1970)。

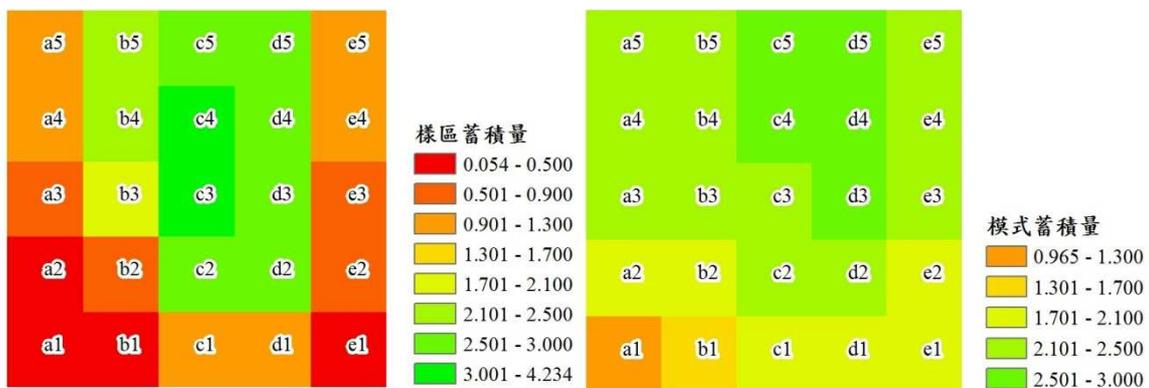


圖 50 樣區推算與模式估算蓄積量空間分布圖

2. 樣區碳含量轉換結果

依據 IPCC (1997) 估算森林林木碳量之方法與試算原則，推估林木碳量有兩個重要步驟：1.藉由林木平均比重將林木單位面積材積換算成林木生物量。2.再利用林木生物量與碳含量轉換係數估算出碳量。依此原則，森林林木碳量的基本估測模式如下（李國忠等，2000）：

$$C_s = A \times V \times EF \times D \times CF$$

式中

C_s ：森林林木碳量

A：林分面積 (ha)

V：單位面積材積 (m^3/ha)

EF：擴展係數 (carbon factor)

D：基礎密度 (density)

CF：碳含量轉換係數 (carbon fraction)

擴展係數根據 IPCC (1997) 的建議，天然林之擴展係數 (EF) 為 1.75、人工林為 1.90、竹林為 2.00，因此本研究採用之擴展係數 (EF) 為 1.90。基礎密度 (D) 是為原木連皮之密度，一般採用 0.5 (IPCC, 1997)。而碳含量轉換係數 (CF) 根據林裕仁等 (2002、2005) 的研究，闊葉樹平均為 0.469。

將上節計算所得之蓄積量帶入上述林木碳量基本估測模式中所得之空間分布圖如圖 24，左為樣區蓄積量真值估測碳含量，總碳量為 18.59 ton；右為模式推估蓄積量估測碳含量，總碳量為 24.04 ton。

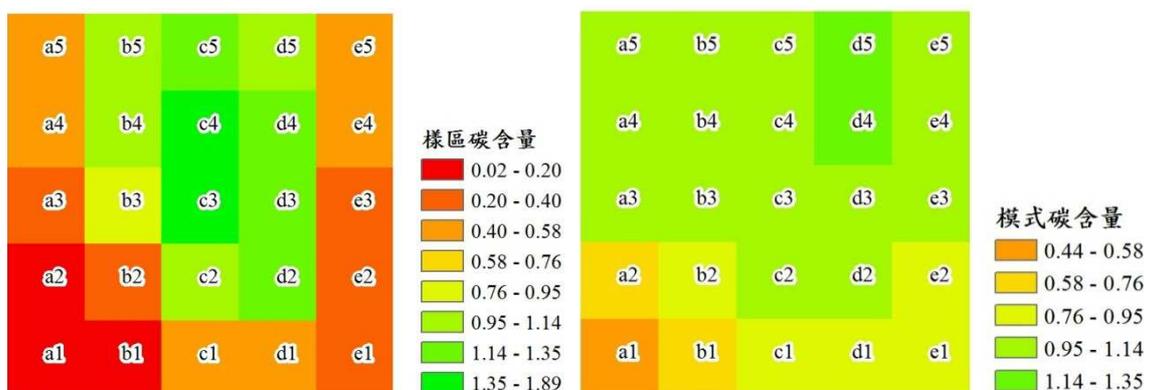


圖 24 樣區推算與模式估算碳含量空間分布圖

肆、 本年度研究成果

一、 更新研究區域內平地林地 GIS 資料庫

98 年度計畫完成光復鄉大農大富 900 餘公頃造林地之造林小區境界調查與樣區設置，並劃分成 1076 造林小區，完成造林地 GIS 資料庫的建置。99 年度計畫承續 98 年度的造林地 GIS 資料庫，進行 98 下半年栽植的造林地之境界調查，亦將新增的一公頃樣區資訊納入既有的造林地 GIS 資料庫。本年度持續維護空間資料庫，更新造林小區狀況，目前光復造林地約 902.3 ha，計有 1080 個造林小區，其中純林分約占總造林面積 87.2%，樹種混植之林分約占 12.8%。造林小區空間分布圖請見圖 51。

為瞭解實際上光復造林地各樹種面積栽植情形，利用造林小區 GIS 空間資料庫為依據，進行面積權重計算。若該造林小區為純林，則該樹種在小區內之面積權重為 1；若造林小區內有 2 樹種混植，則平均分配權重於該 2 樹種，意即每個樹種之面積權重為 0.5；若造林小區內有 3 樹種混植，則各樹種之面積權重為 0.33。雖然現場混植狀況並非每個樹種平均分配栽植面積，，但此方法能提供進一步更加細微的種植資訊。取得各樹種之造林小區內面積權重後，與造林小區面積相乘，總和即可得各樹種面積。表 12 列出光復造林地樹種權種面積大於 5 ha 之 15 種常見樹種。

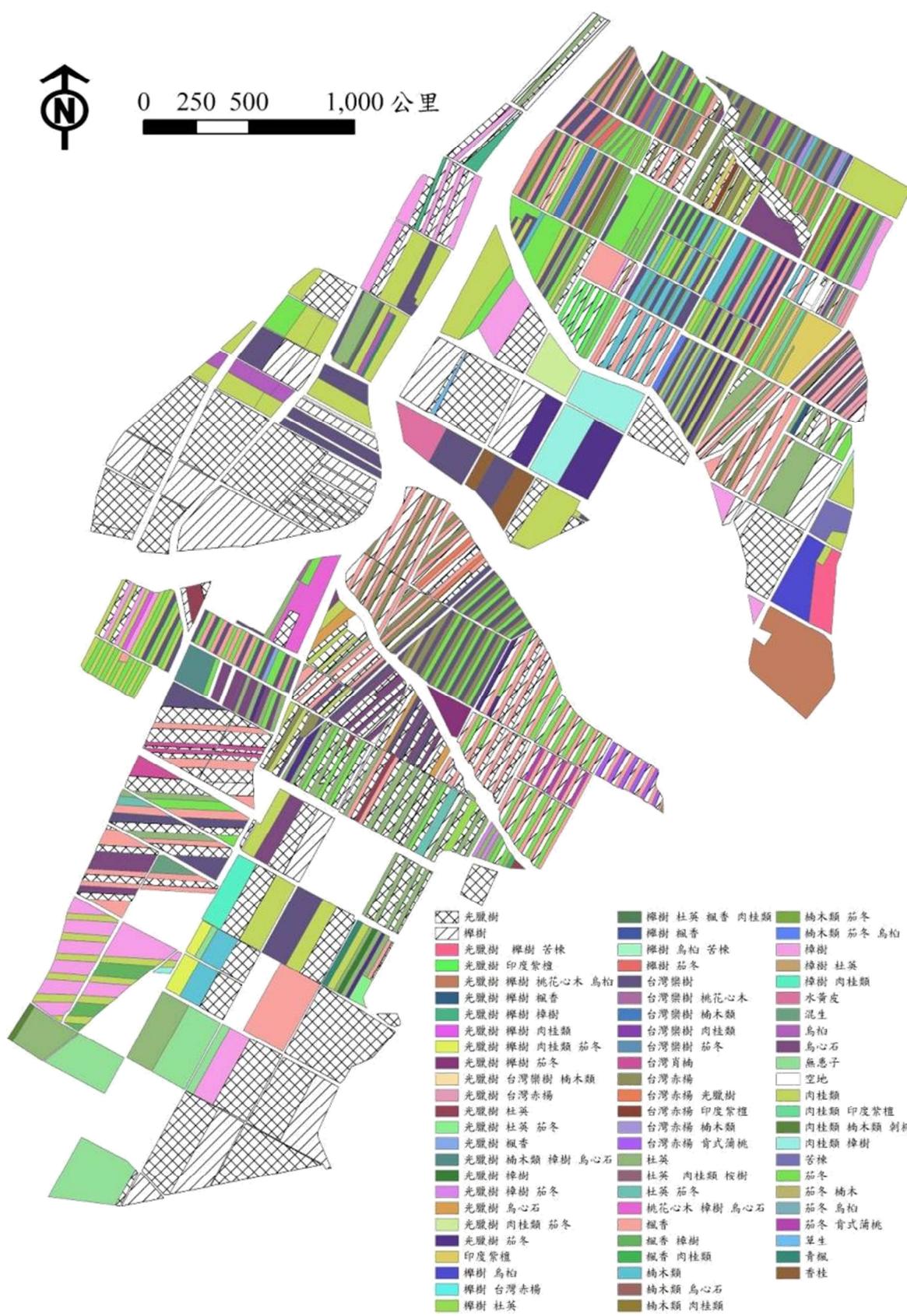


圖 51 造林小區

表 12 光復造林地樹種權種面積

排序	樹種	權重面積 (ha)	所占比例 (%)
1	光臘樹	211.52	26.12
2	檫	121.44	14.99
3	茄冬	75.95	9.38
4	台灣欒樹	75.57	9.33
5	楓香	72.94	9.01
6	杜英	58.25	7.19
7	樟樹	45.15	5.57
8	台灣赤楊	36.91	4.56
9	烏心石	24.21	2.99
10	無患子	21.69	2.68
11	楠木	20.88	2.58
12	印度紫檀	8.74	1.08
13	陰香	8.41	1.04
14	烏柏	8.15	1.01
15	桃花心木	5.06	0.62
	合計	794.89	98.15

二、 樹冠模型模擬結果

實際模擬樹冠模型時，不僅模擬標準木之樹冠，不同生長狀況之樹冠情形會一併模擬。本研究參考光復造林地設置的樣區每木資料，依據各樹種生長梯度分層選取代表樣木進行模擬，對象為權重面積大於 20 ha 之樹種，依序為光臘樹、檉、茄冬、台灣欒樹、楓香、杜英、樟樹、台灣赤楊、烏心石、無患子、楠木等 11 個樹種，以一種樹冠生長狀況模擬模型為代表呈現之。

1. 光臘樹

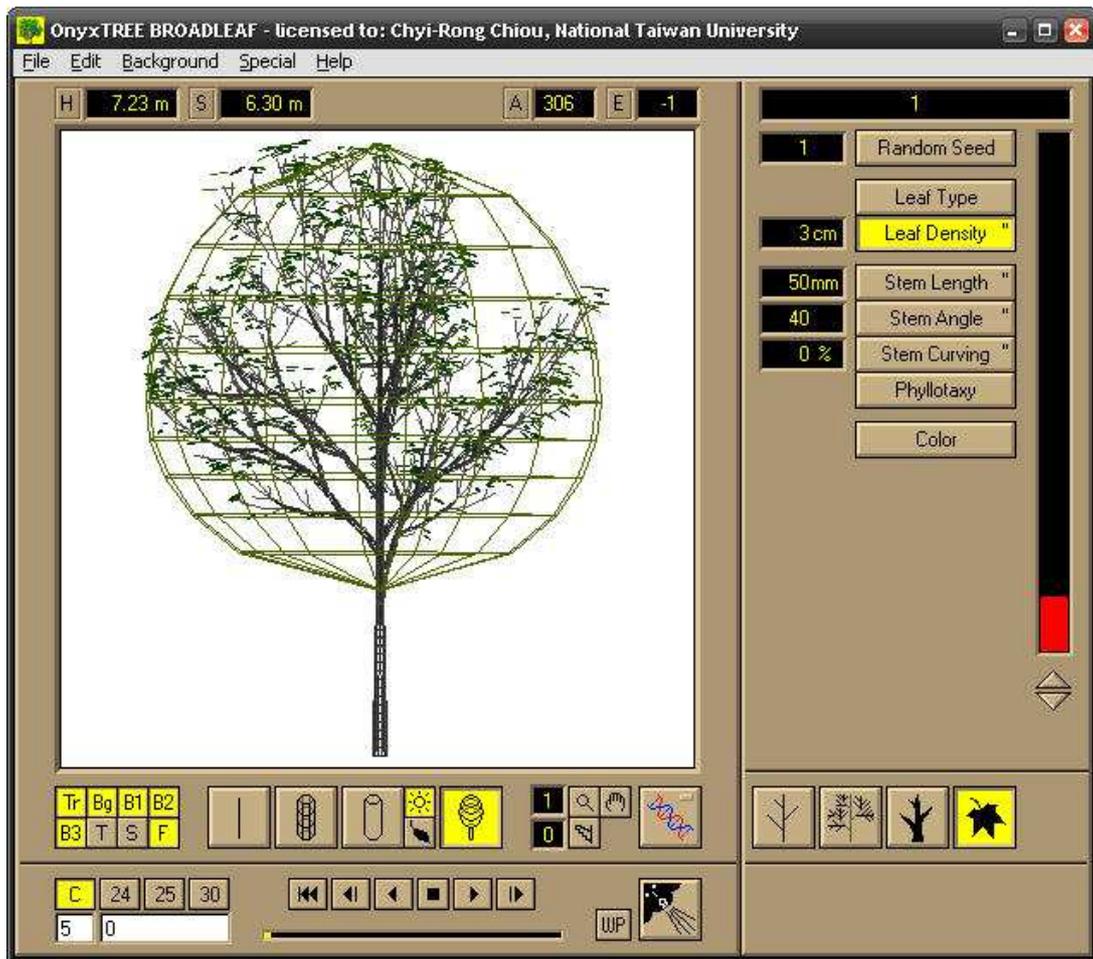


圖 52 光臘樹樹冠模型模擬結果

2. 櫟

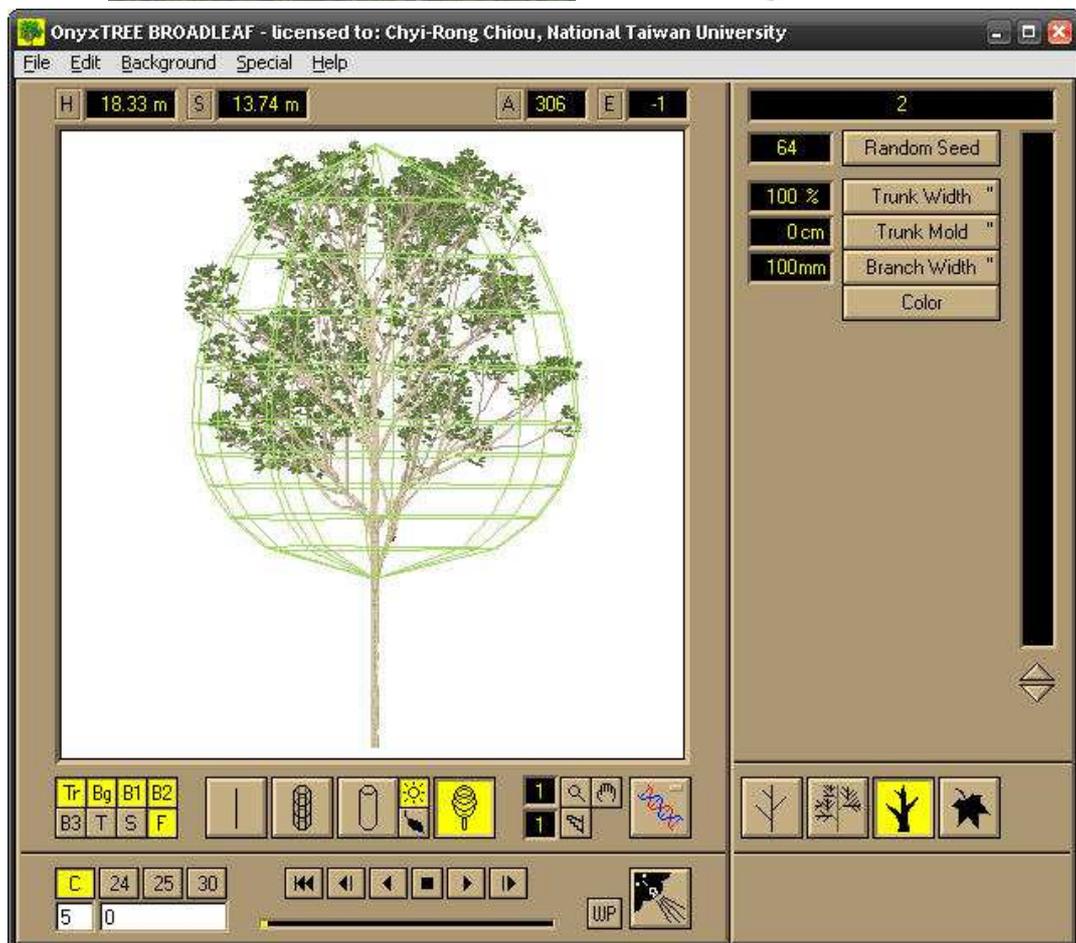


圖 53 櫟樹冠模型模擬結果

3. 茄冬

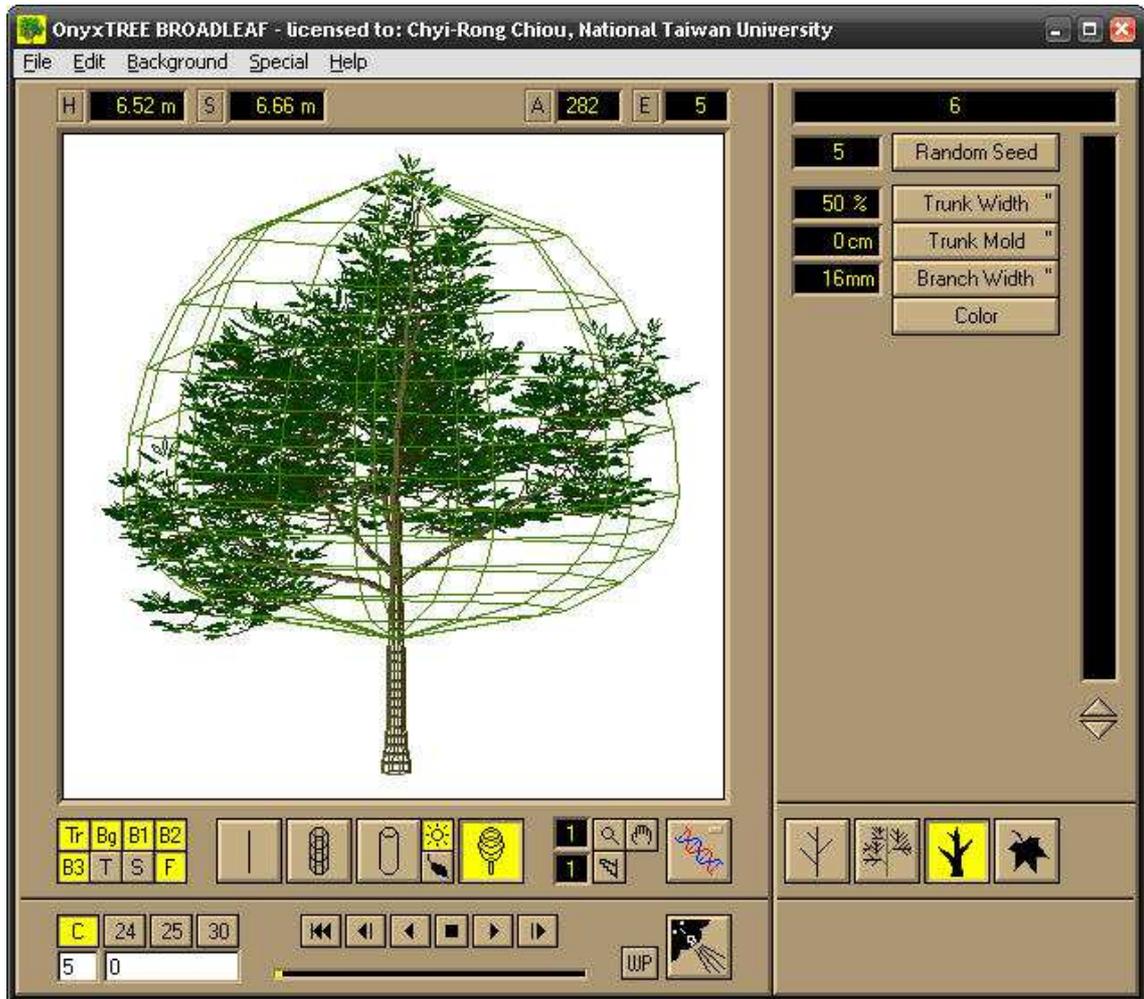


圖 54 茄冬樹冠模型模擬結果

4. 台灣欒樹

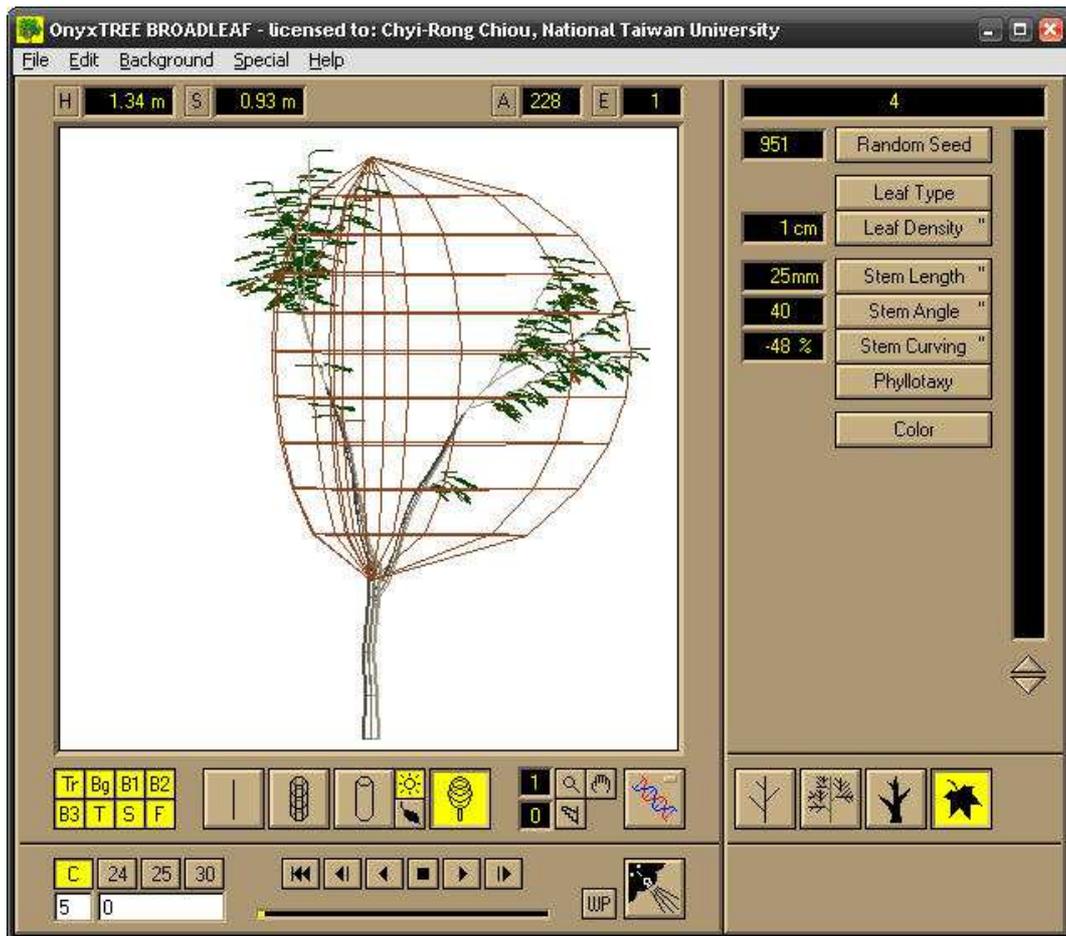


圖 55 台灣欒樹樹冠模型模擬結果

5. 楓香

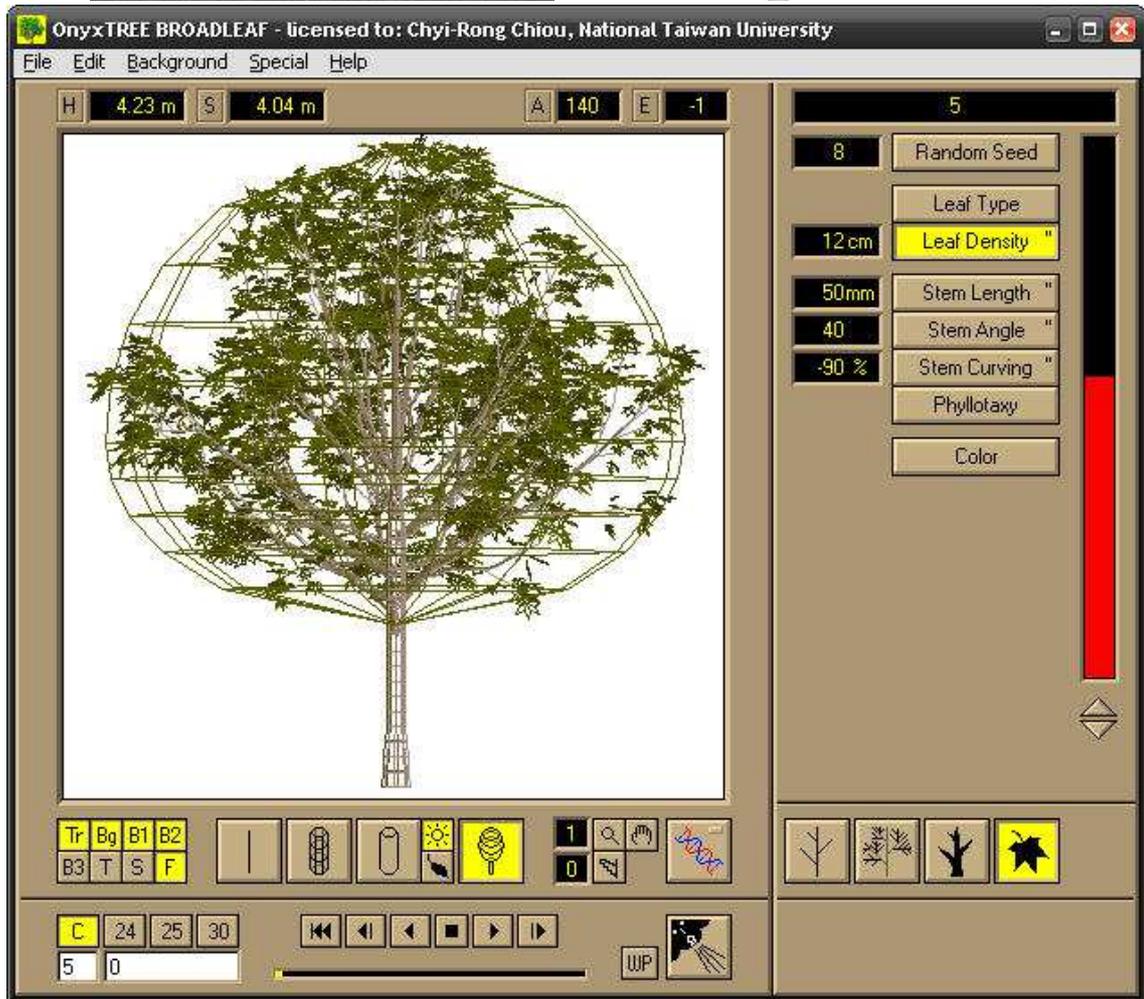


圖 56 楓香樹冠模型模擬結果

6. 杜英



圖 57 杜英樹冠模型模擬結果

7. 樟樹

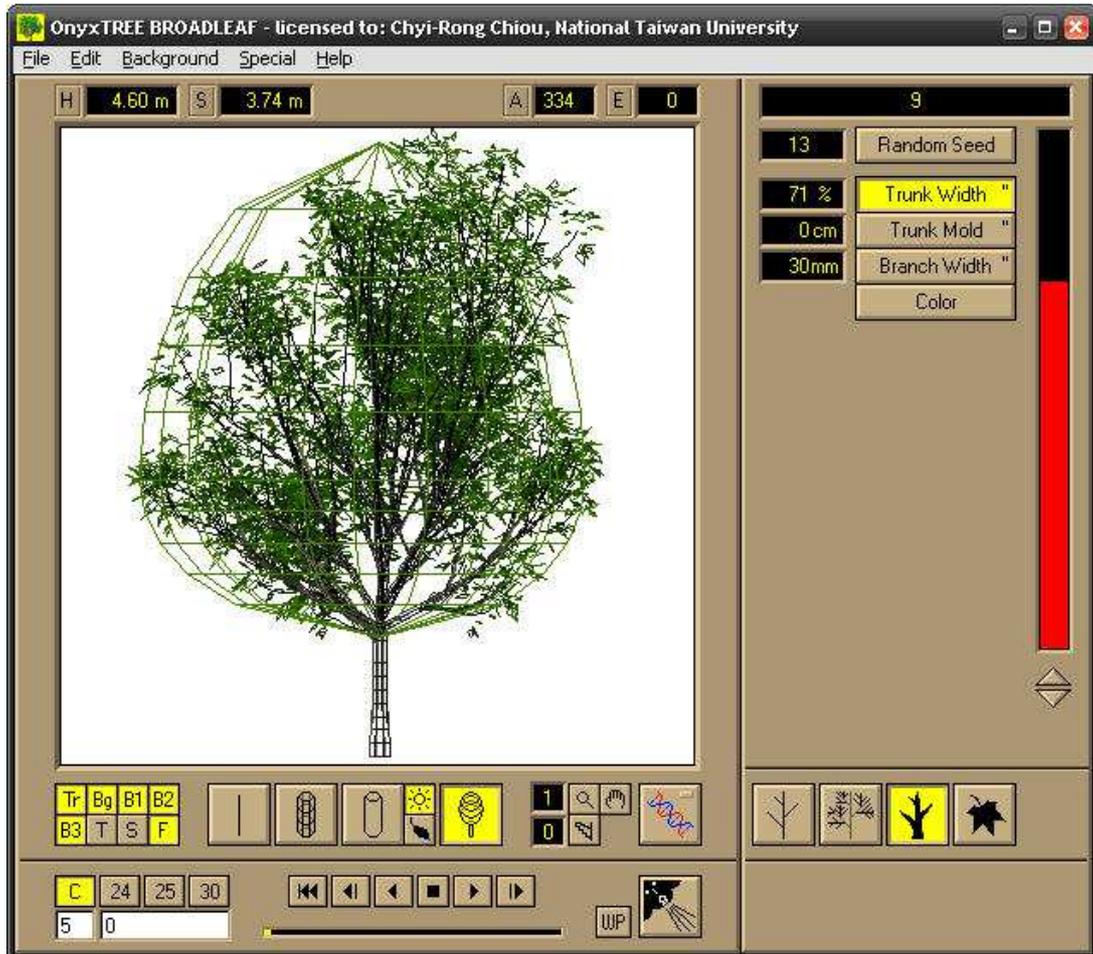


圖 58 樟樹樹冠模型模擬結果

8. 台灣赤楊

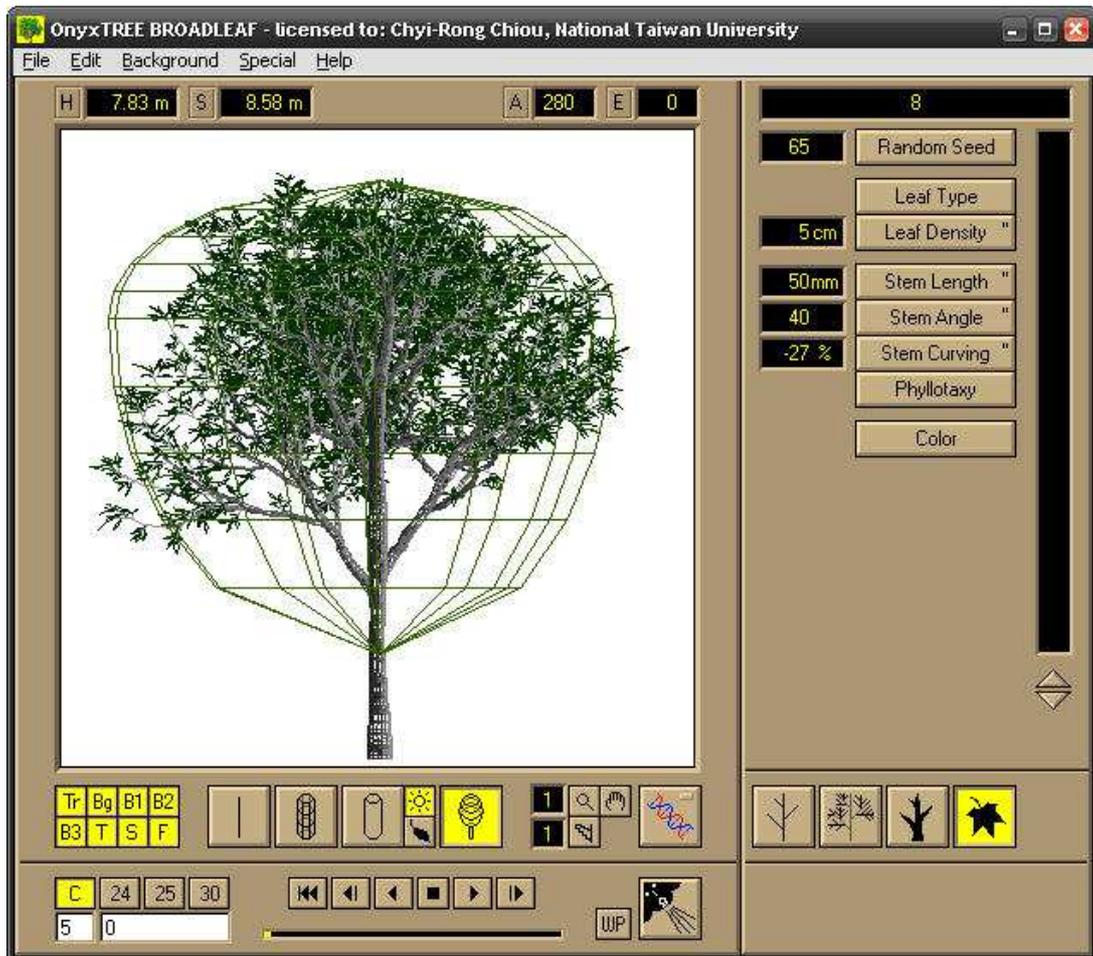


圖 59 台灣赤楊樹冠模型模擬結果

9. 烏心石

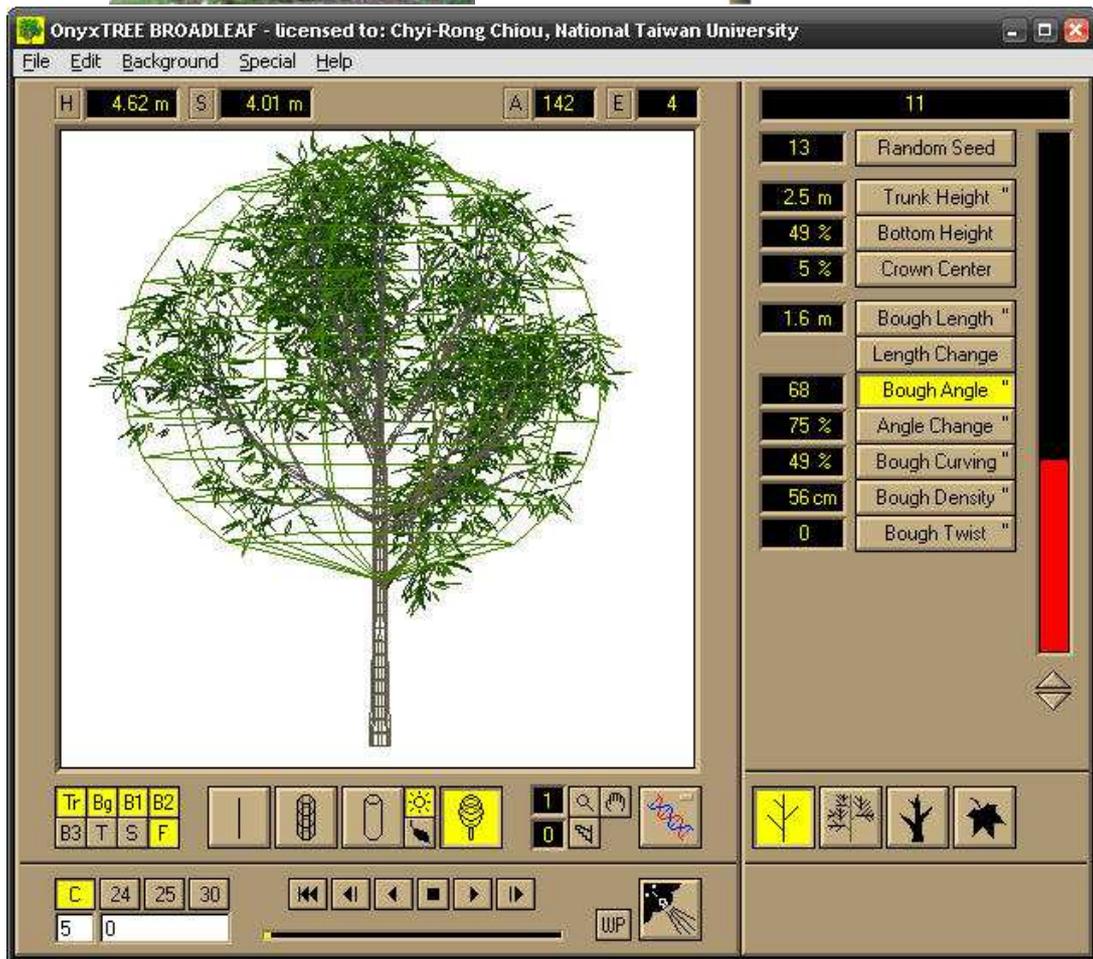


圖 60 烏心石樹冠模型模擬結果

10. 無患子

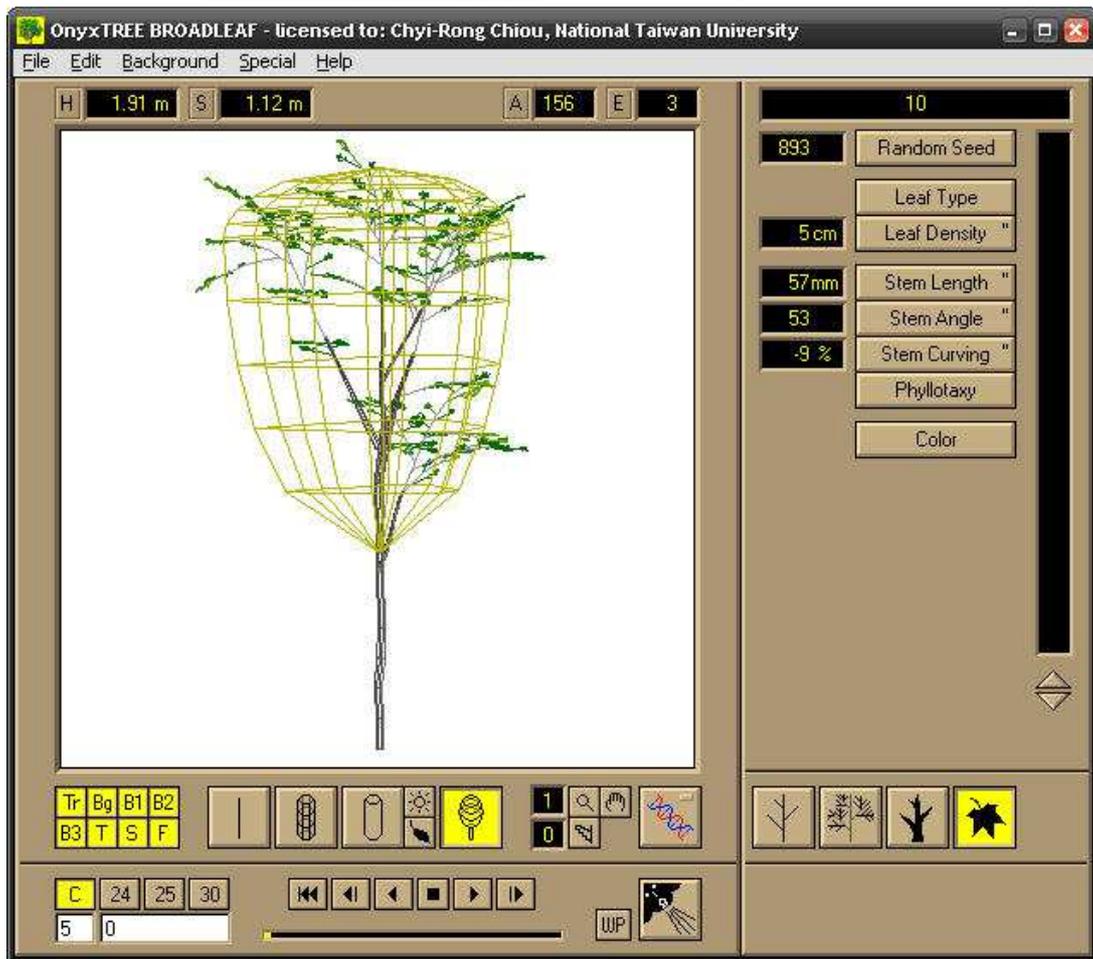


圖 61 無患子樹冠模型模擬結果

11. 楠木

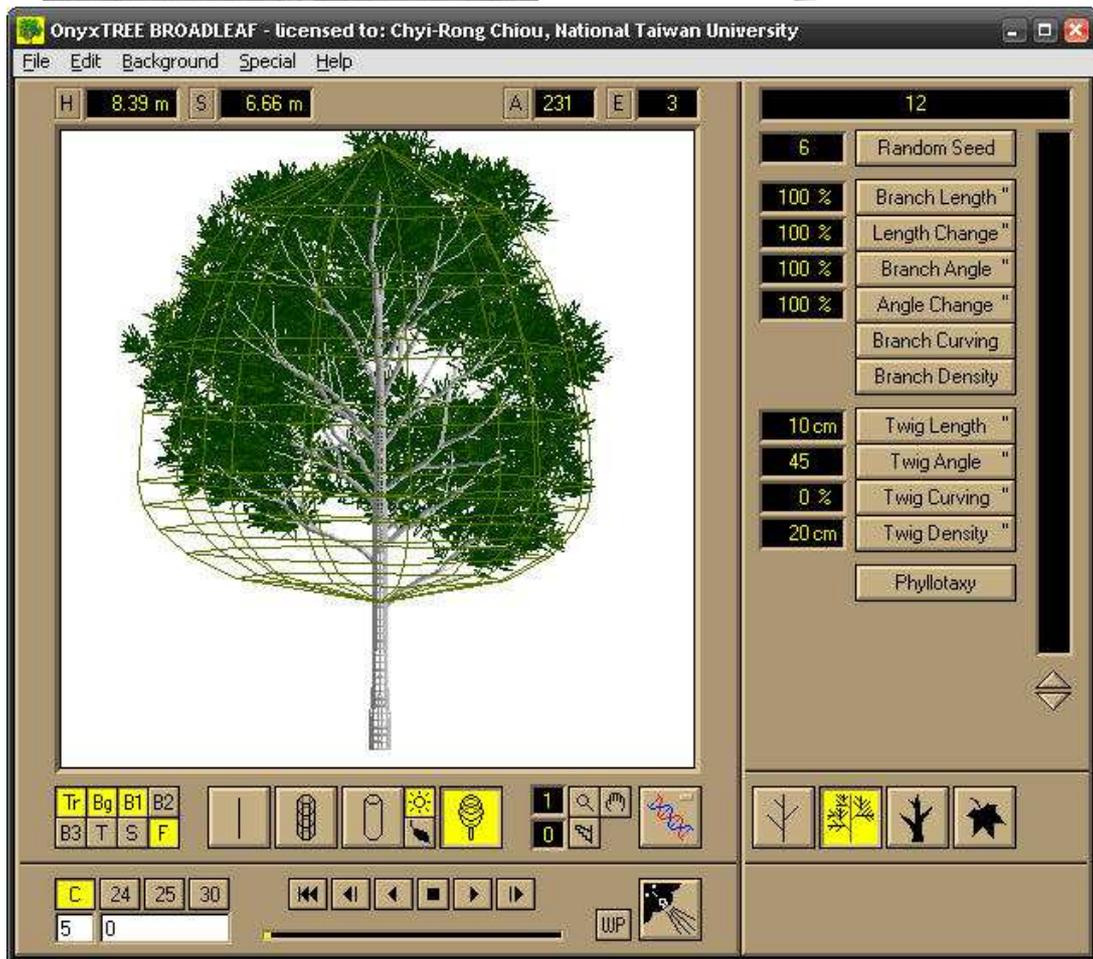


圖 62 楠木樹冠模型模擬結果

三、 林分景觀模擬結果



圖 63 光臘樹林分景觀模擬結果-1



圖 64 光臘樹林分景觀模擬結果-2



圖 65 光臘樹林分景觀模擬結果-3

四、 樹冠模型模擬林分鬱閉展示—以光臘樹為例

本研究依據現有樣區每木調查資料，在單木尺度上，將樹冠分成五個層級(圖 57)：上木(樹高 8-9 m)、中上木(樹高 6.5-7.5 m)、中木(樹高 5-6 m)、中下木(樹高 4-5 m)、下木(樹高 2.5-4 m)。林分尺度上，林分密度分為平均約 1340 株/ha、低密度 500 株/ha 二個層級，林分組成則依表 13 分為五個層級。以樹種面積最大的光臘樹林分為例，分別將模擬成果呈現如後。

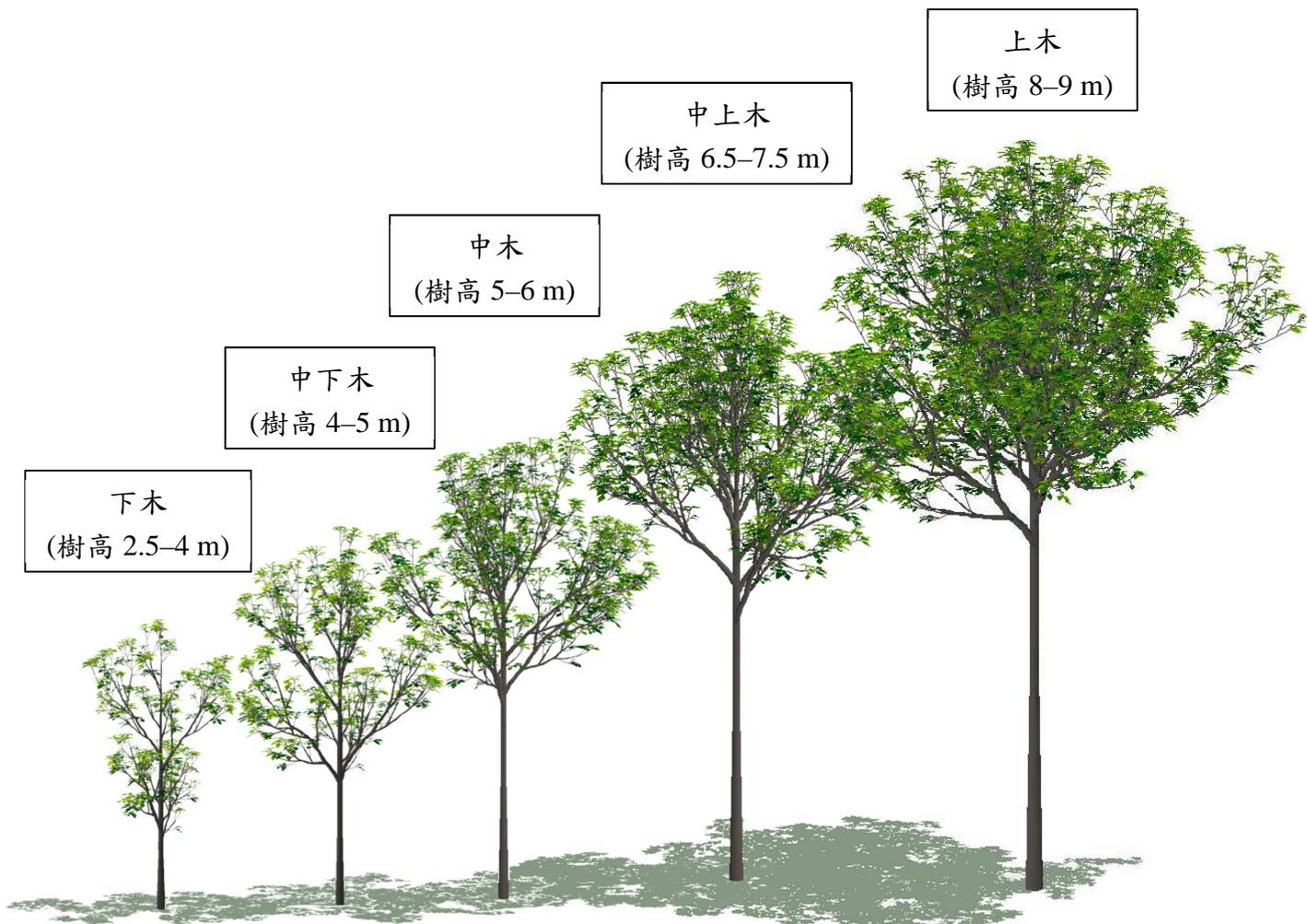


圖 66 光臘樹各級樹冠模型

表 13 模擬光臘樹林分組成分級表

樹冠層分級	各樹冠級於林分中的組成比(%)				
	I	II	III	IV	V
上木 (8-9 m)	75	25	20	10	-
中上木 (6.5-7.5 m)	25	25	25	15	-
中木 (5-6 m)	-	50	30	20	30
中下木 (4-5 m)	-	-	25	20	30
下木 (2.5-4 m)	-	-	-	30	40

註：此林分組成分級表不具生態意義，僅為展示使用

依不同林分密度模擬層級呈現林分景觀圖以及半球面影像模擬圖 67，分為平均林分密度(1340 株/ha)與林分密度低(500 株/ha)者。

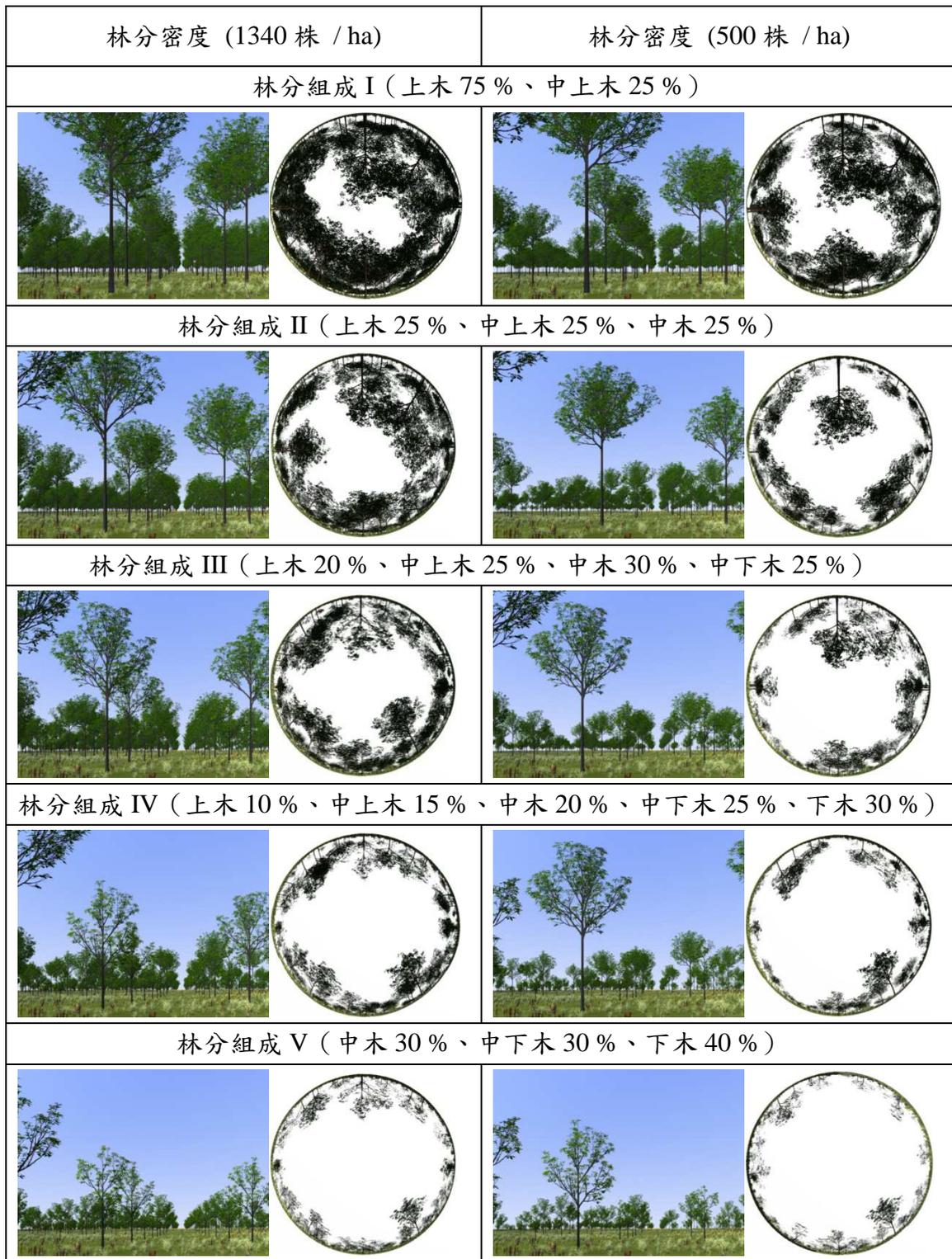


圖 67 各種光臘樹林分組成景觀及半球面影像(圖組)

五、三種量測樹冠方法結果

林分景觀模擬工作需要根據平地造林之每木位置資料來繪製，才能與現地林況相符合，故在進行樹冠量測與模擬工作之前，本研究先將 99 年度設置之一公頃樣區之每木位置調查如圖 68。

本研究對光復造林地純光臘樹樣區進行三種樹冠量測的方法，分別為冠幅測量、半球面影像攝影以及半球面影像模擬。經過計算分析後，第一種方法所得數值為樹冠覆蓋度，後二者所得為樹冠鬱閉度。光臘樹純林樣區共有 6 個，茲將三種方法所得覆蓋度/鬱閉度整理於表 14 中，其中半球面影像數據部分，是 1 個樣區所拍攝的 5 張半球面影像鬱閉度平均值，模擬影像則為 1 張。光復造林地栽植密度為 1500 (n/ha)，樣區 a1 生長極差，成活株數僅有 11 株，林分密度為 275 (n/ha)，其餘樣區密度有 1000 (n/ha) 以上。以樹冠測量的方法得到的覆蓋度，樣區 b4 與 b5 鬱閉度超過 100%，顯然不合理。係因林分密度較高、樹冠重疊情況普遍，測量冠幅時難免會量測到別株之樹冠，且此方法係將冠幅判定為實心橢圓投影面積，與實際樹冠有鏤空的情形不同，因而會有超過 100% 之狀況出現，單從此覆蓋度數值來看，即可初步合理判斷量測樹冠之投影面積不是很理想的方法。

表 14 三種量測光臘樹樹冠方法結果

樣區編號	樹冠測量 覆蓋度	半球面影像 鬱閉度	模擬半球面影像
a1	40.47	28.84	13.5
b1	228.9	45.14	28.4
b2	250.71	48.132	43.42
b3	381.42	50.774	59.21
b4	466.82	58.57	60.91
b5	402.47	59.456	62.81

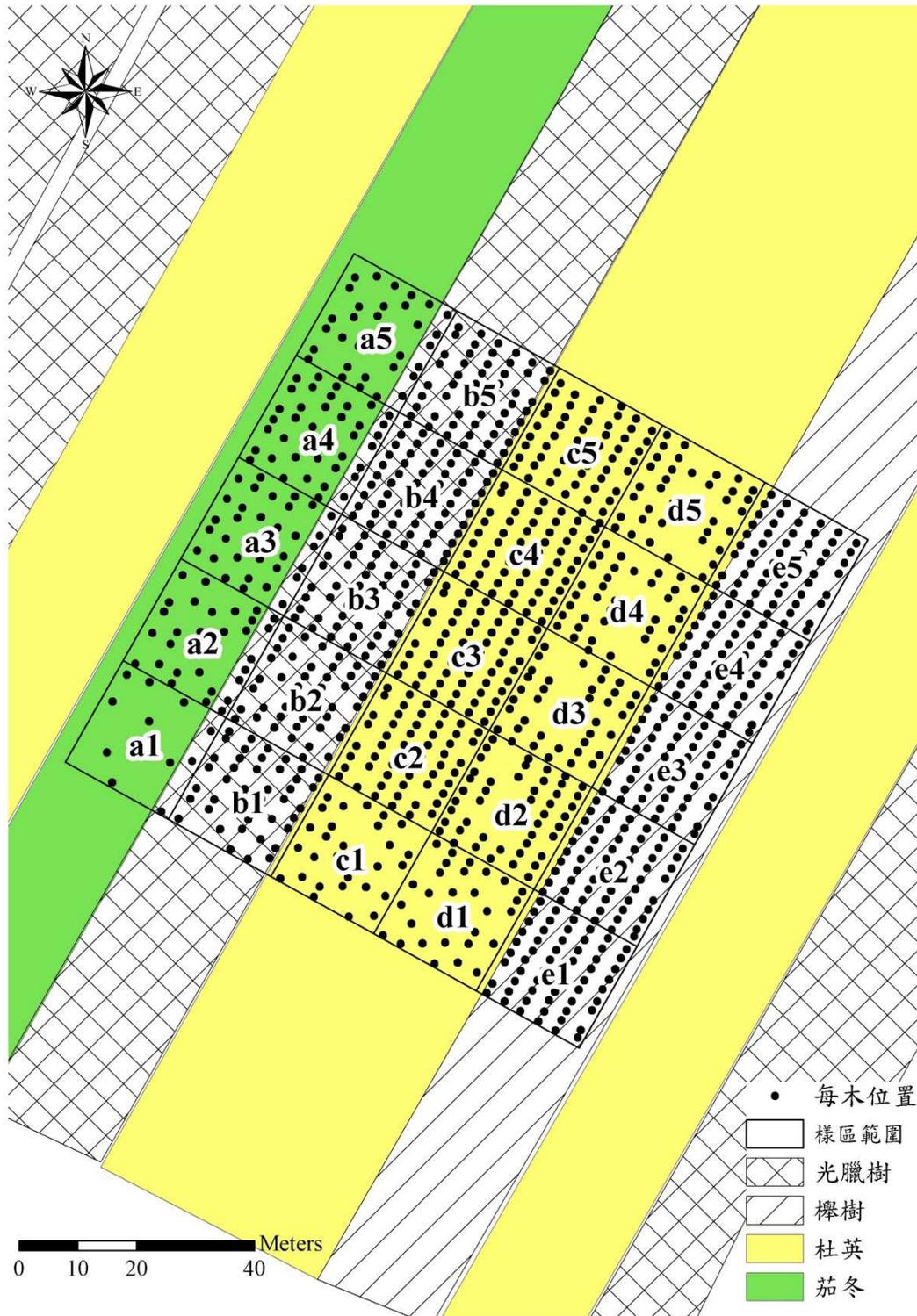


圖 68 每木位置圖

(一) 三種量測樹冠方法與林分材積之關係

首先來檢視三種樹冠量測方法連結林分材積的能力，以三種覆蓋/鬱閉度結果與林分材積作迴歸分析(圖 69)，結果發現三種方法皆與林分材積有良好的連結關係，其指數模式決定係數 R^2 值都在 0.9 以上，覆蓋度 R^2 值有 0.90、鬱閉度 R^2 值為 0.94、模擬鬱閉度 R^2 值則有 0.97 的極高相關性，且模擬鬱閉度的資料點散佈情形最為集中，表示其確實和林分材積有很好的預測關係。

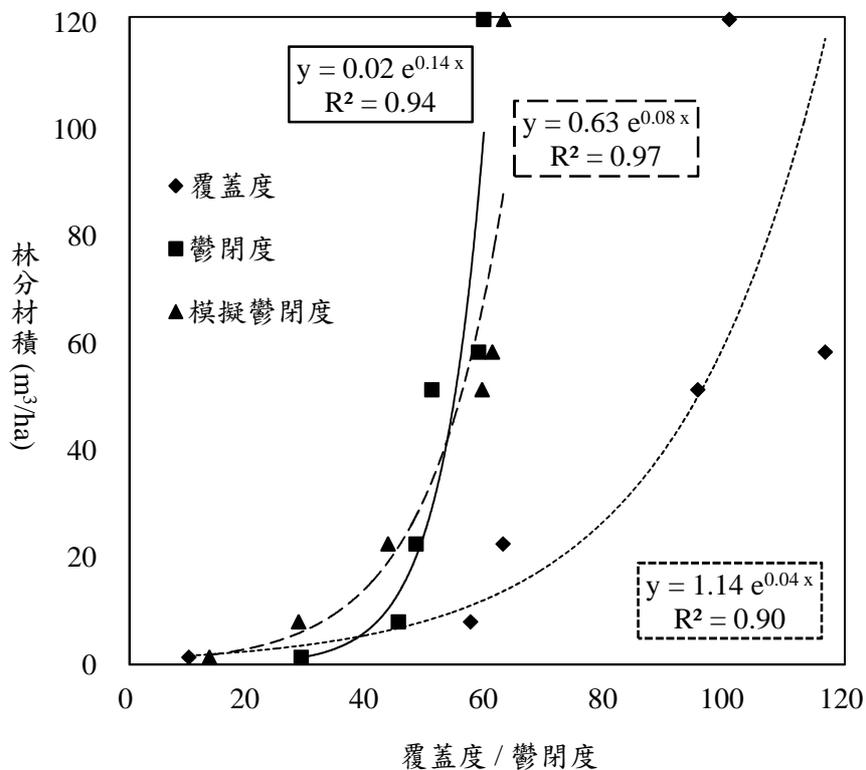


圖 69 三種樹冠量測結果與林分材積之迴歸

表 15 林分材積與覆蓋度/鬱閉度之迴歸結果

被預測變數(y)：林分材積(m ³ /ha)		
預測變數(x)	迴歸式	R ²
覆蓋度	$y = 1.14 e^{0.04x}$	0.90
鬱閉度	$y = 0.02 e^{0.14x}$	0.94
模擬鬱閉度	$y = 0.63 e^{0.08x}$	0.97

(二) 三種量測樹冠方法互相比較

再來比較三種方法之結果，將三種結果兩兩配對進行迴歸分析如圖 70，冠幅測量與兩種影像之 R^2 值皆高達 0.93，顯示兩種影像之結果不僅與傳統冠幅測量結果近似，更能夠修正覆蓋度超過 100% 之問題。而模擬影像與實際影像鬱閉度之 R^2 值為 0.89，說明模擬影像有極高的估測鬱閉度能力，可以作為間接取得現地林分參數的參考來源。圖 71 為半球面影像(5 張)與模擬半球面影像(1 張)對照。

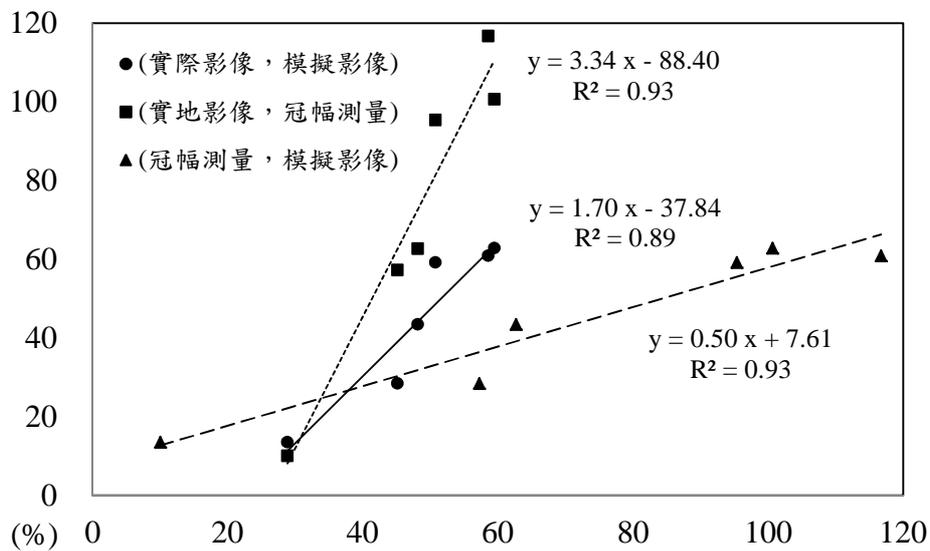
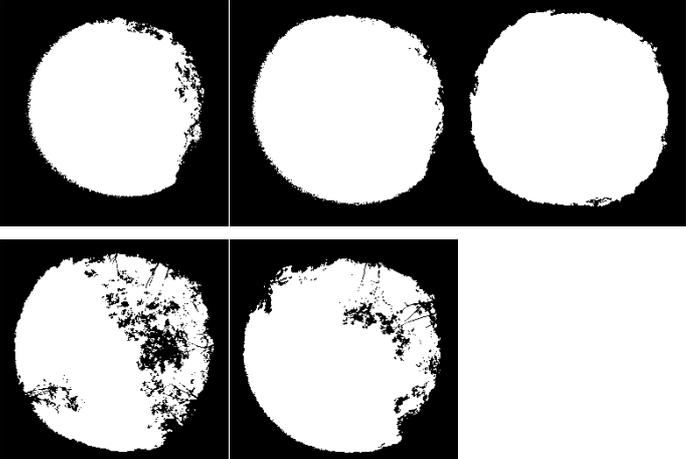
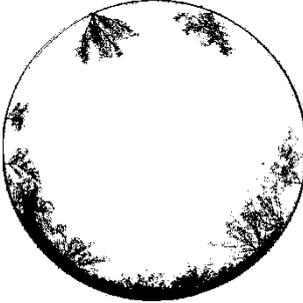
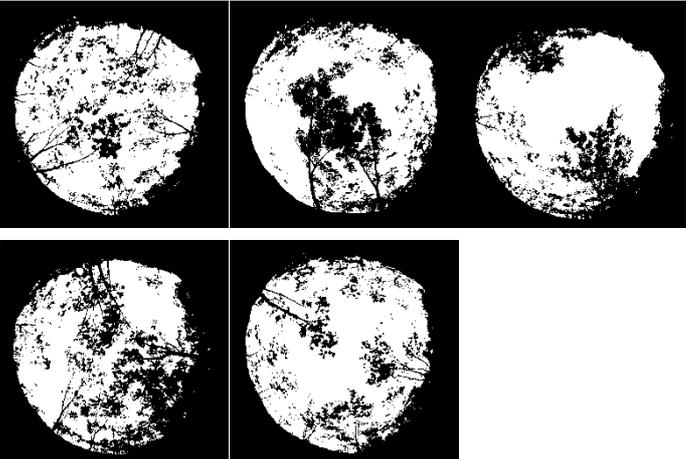
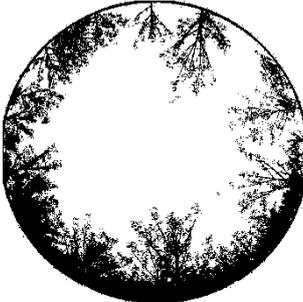
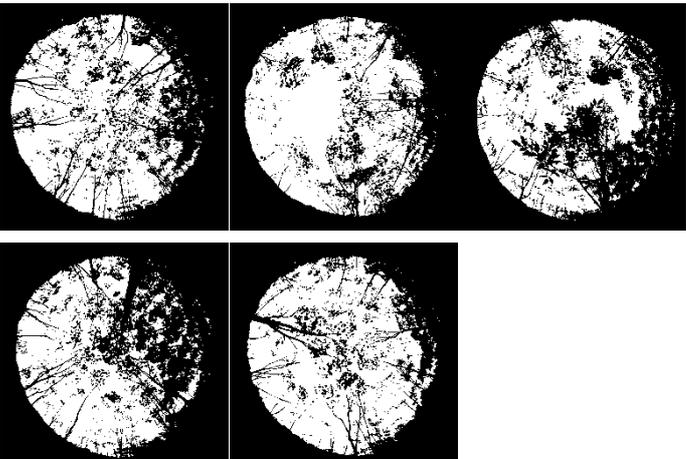
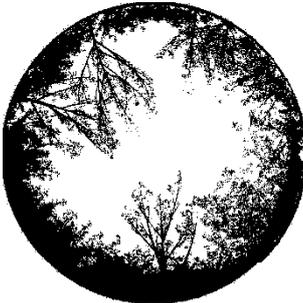


圖 70 三種樹冠量測方法之迴歸分析

實際半球面影像	模擬半球面影像
<p>a1</p> 	
<p>b1</p> 	
<p>b2</p> 	

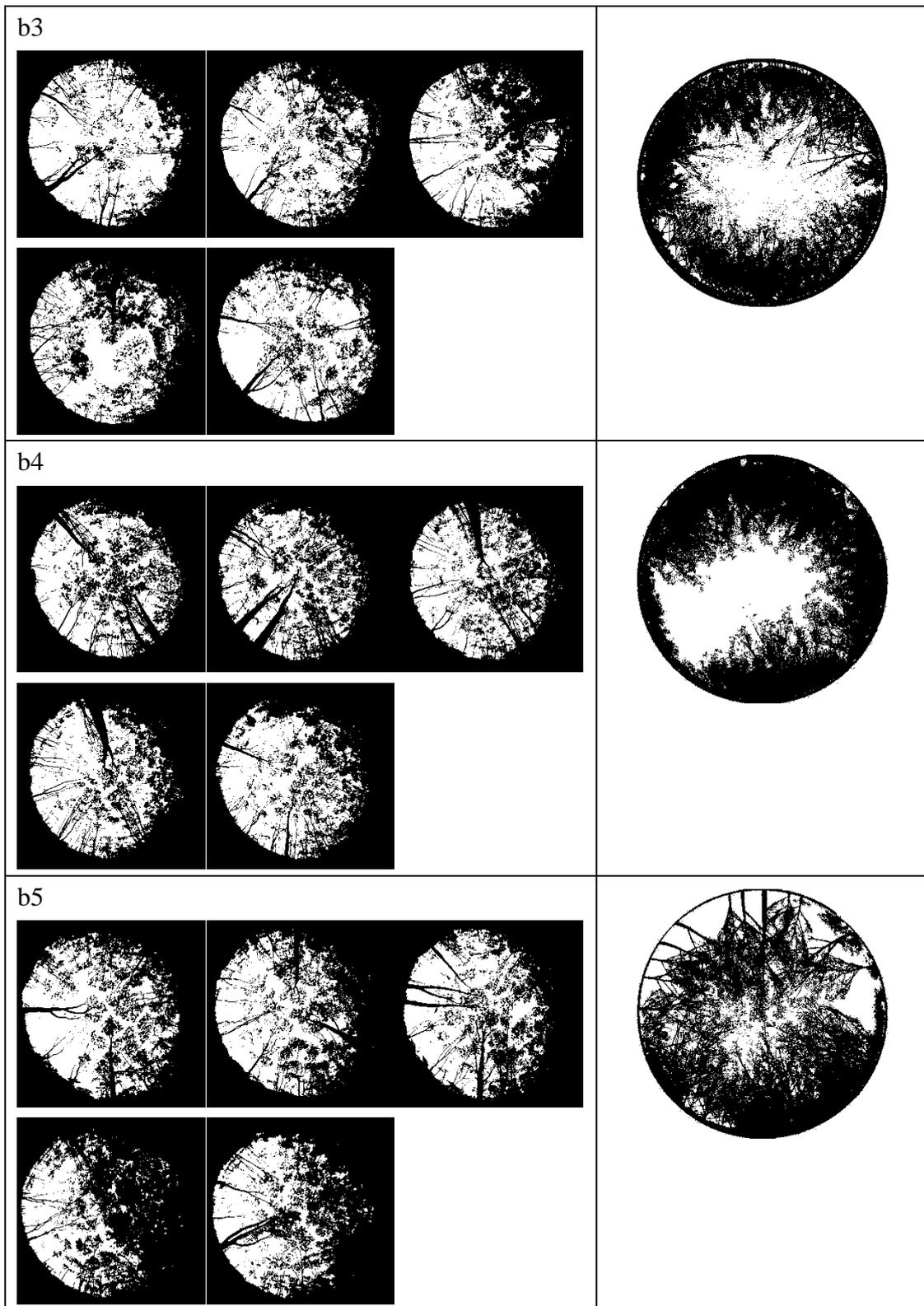


圖 71 實際與模擬半球面影像對照(圖組)

(三) 衛星影像光譜值檢驗

1. 林分材積與光譜值之關係

將今年度複查的其中 6 個純光臘樹樣區之林分材積(m³/ha)與衛星影像光譜值進行迴歸分析，從迴歸結果圖 72 中可見光譜資訊與林分材積之相關性極高，三種關係的 R² 皆在 0.96 以上，且資料點幾乎分布於趨勢線上，並沒有偏離太遠，因此我們可以推論光譜資訊能夠反映林分現地生長狀況，作為林分參數的指標，幫助檢驗樹冠量測結果。

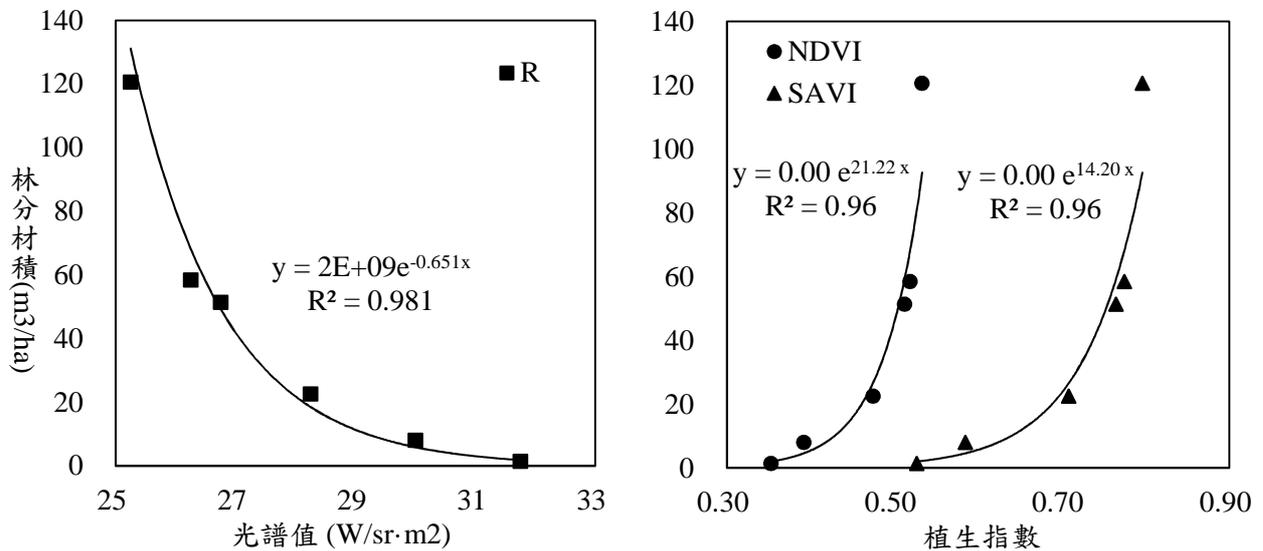


圖 72 林分材積與光譜資訊迴歸圖

表 16 光臘樹林分材積與光譜資訊之迴歸結果

被預測變數(y)：林分材積(m ³ /ha)		
預測變數(x)	迴歸式	R ²
R	$y = 2E+09e^{-0.651x}$	0.98
NDVI	$y = 0.0011e^{21.22x}$	0.96
SAVI	$y = 0.0011e^{14.198x}$	0.96

2. 三種量測樹冠結果與光譜值之關係

三種量測樹冠的方法，測量冠幅、拍攝半球面影像、模擬半球面影像，分別得到的林分參數是為覆蓋度、鬱閉度及模擬鬱閉度。此三種結果再與三項光譜資訊，R 波段光譜值、植生指數 NDVI、SAVI 作迴歸分析，結果模擬鬱閉度不管是與那項光譜資訊的決定係數(R^2)都是最高 0.98，覆蓋度與鬱閉度部分則都在 0.85 以上，以光譜資訊來說則是 R 的表現普遍比植生指數來得高。迴歸結果整理於表 17 之中，迴歸圖於圖 73 所示。與上一小節「1. 林分材積與光譜值之關係」之結果綜合而論，R 波段反射值能夠最佳反映林地狀況，而與 R 反射值決定係數最高的是從模擬半球面影像求得的模擬鬱閉度，可見模擬半球面影像確實可以很直接的創造和林地接近的生長狀況，提供需要且精確的林分資訊。

表 17 光臘樹光譜資訊與三種樹冠量測結果之迴歸結果

光譜值		冠幅測量	半球面影像	模擬半球面影像
R	迴歸式	$y = -14.88x + 491.07$	$y = -4.33x + 169.84$	$y = -8.13x + 272.57$
	R^2	0.90	0.91	0.98
NDVI	迴歸式	$y = 211.90 \ln(x) + 238.89$	$y = 60.89 \ln(x) + 95.93$	$y = 117.67 \ln(x) + 136.40$
	R^2	0.87	0.86	0.98
SAVI	迴歸式	$y = 211.63 \ln(x) + 153.89$	$y = 60.81 \ln(x) + 71.51$	$y = 117.52 \ln(x) + 89.20$
	R^2	0.87	0.86	0.98

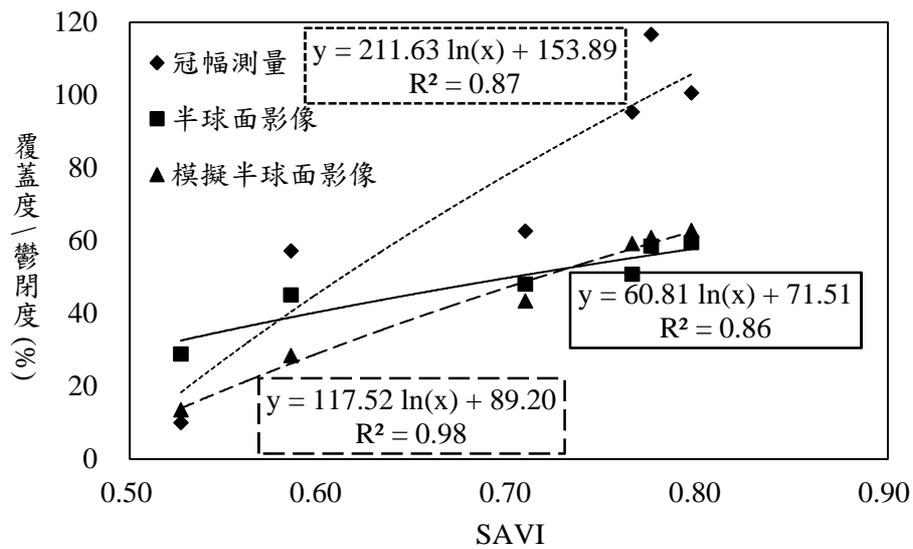
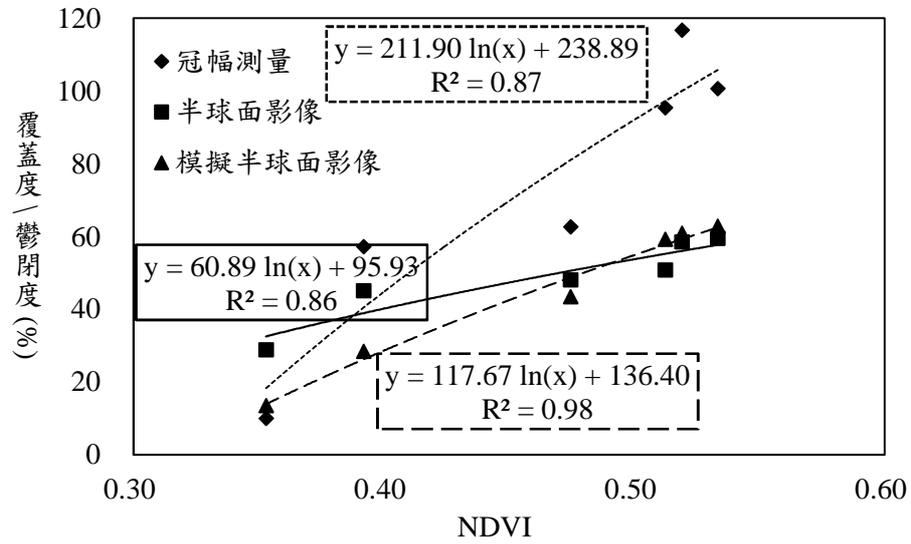
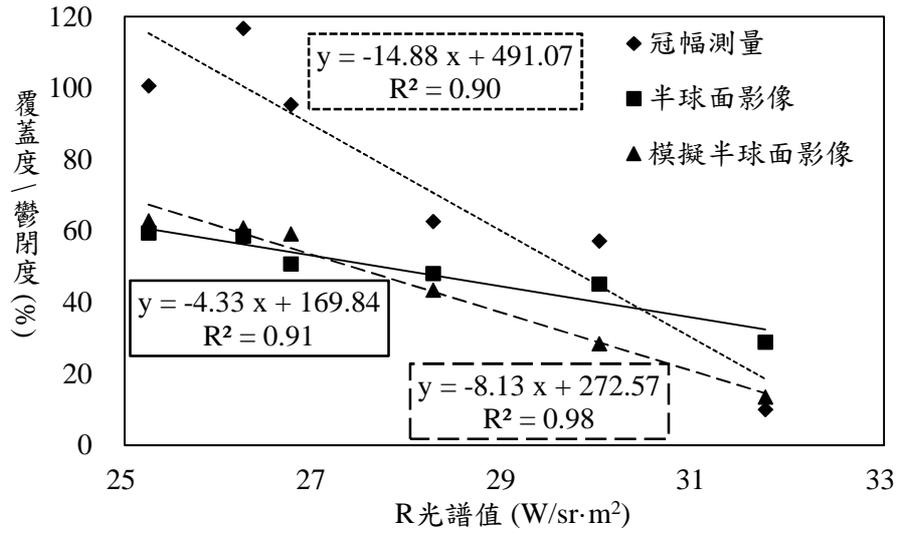


圖 73 光臘樹光譜資訊與三種樹冠量測結果之迴歸圖

六、 林分景觀變化模擬

花蓮縣光復鄉台糖公司造林地於 2011 年春天開幕大農大富平地森林遊樂園區，園區設施規畫多元，其中有園區自然步道、自行車道等會穿梭於林分之間，而遊客的遊憩體驗感受最直接的來源是為林分景觀，為提升平地森林遊樂園區的遊客感受度，有需要進行撫育作業。在撫育作業前，我們可以利用林分景觀模擬軟體 Visual Nature Studio(3D Nature LLC.) 製作撫育前後的景觀改變模擬效果(圖 74)，提供給經營決策者做參考。

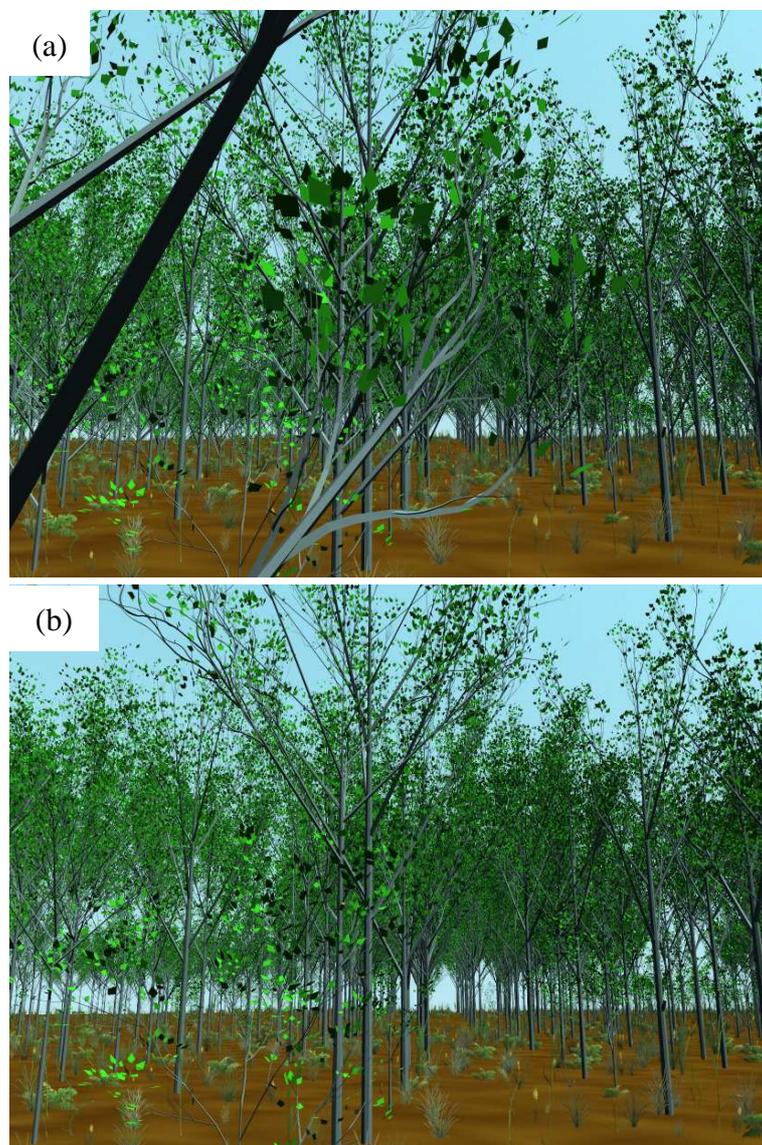


圖 74 光臘樹林分修枝前後模擬景觀

七、 三年度計畫研究結果

在延續三年的研究計畫中，光譜資訊不僅是作為樣區設置的絕佳參考媒介，也是預測林分材積的重要變數之一。98 年度在光譜資訊中選出 NDVI 發展林分材積估測式，線性模式 R^2 值為 0.651，指數成長模式則提高為 0.949。99 年度引進 SAVI，並加入林分鬱閉度進行多元線性迴歸分析，調整後 R^2 值由 0.798 提升至 0.802。今年度模擬林分景觀，從中取得模擬鬱閉度，取代林分鬱閉度建立模式，得到的 R^2 為 0.981，可說有相當高的預測林分材積能力。

SV = 林分材積	98 年度		98 年度
	$f(\text{NDVI})$	線性	
	$f(\text{NDVI})$	指數	$R^2 = 0.949$
	99 年度		99 年度
	$f(\text{NDVI, SAVI})$	線性	
	$f(\text{NDVI, SAVI, SCL})$	線性	$R^2 = 0.802$
100 年度		100 年度	
$f(\text{NDVI, SAVI, SSCL})$	線性	$R^2 = 0.981$	

圖 75 應用三年度研究方法於 100 年度資料之結果

伍、 結論與建議

本計畫為三年期跨年度計畫，研究方法結合衛星遙測技術、地面樣區調查與林分景觀模擬，應用 GIS 分析技術連結三個面向的資料，建立林分材積預測模型。前二年建置光復造林地空間資訊資料庫，內含樹種分布、樹種面積等資訊，結合衛星影像光譜資訊發展樣區設置流程，利用樣區每木調查資料和光譜資訊 NDVI、SAVI 迴歸分析建立林分參數估算模式。首先蒐集夏季可用衛星影像，計算光譜均質區以規劃樣區設置範圍，再至現場進行樣區每木調查，調查項目包含胸徑、樹高、冠幅以及林分密度，並根據 IPCC 公式計算林分材積。第二年度引進林分鬱閉度變數，以魚眼鏡頭搭配相機拍攝半球面影像，利用 GLA 軟體計算林分鬱閉度，和其他林分參數及光譜資訊進行多元迴歸分析，增加估測模式預測能力，繪製出林分材積空間分布圖，能夠清楚掌握林分生長好壞分布情形。第三年度計畫發展景觀模擬作業流程，根據前二年調查之每木生長資料(胸徑、樹高及冠幅)與每木位置，模擬現地樹木樹冠資料庫，合成出模擬半球面影像，分析得到模擬鬱閉度，作為與光譜資訊結合的媒介，結果發現模擬鬱閉度可以代替林分鬱閉度作為估測變數，省去大規模的現地調查作業，更快速建立大面積地景林分參數估測模式，以及預測不同撫育作業之未來生長趨勢景觀。林分景觀模擬不僅可以模擬純林，亦可根據造林地樹種進行混植模擬，除了模擬當下生長的狀況，也能模擬未來生長林況，只要能夠掌握林分生長趨勢，就能預估未來碳匯含量。

陸、 參考文獻

- 林登秋、江智民. (2002). 半球面影像在森林生態研究的應用. *台灣林業科學*, 17(3), 387-400.
- 楊榮啓、林文亮. (2003). 森林測計學 (初版., pp. 51-52). 臺南市: 國立編譯館.
- 陳仲賢、何湘梅. (2008). 推動平地景觀造林及綠美化計劃執行成果. *農政與農情*, 192.
- Becker, P., Erhart, D., & Smith, A. (1989). Analysis of forest light environments. I. Computerized estimation of solar radiation from hemispherical photographs. *Agric For Meteorol*, 44, 217-232.
- Bellingham, P., Tanner, E., Rich, P., & Goodland, T. (1996). Changes in light below the canopy of a Jamaican montane rainforest after a hurricane. *J. Trop. Ecol.*, 12, 699-722.
- Brown, S., Schroeder, P., & Kern, J. (1999). Spatial distribution of biomass in forests of the eastern USA. *Forest Ecology and Management*, 123(1), 81-90. doi: 10.1016/S0378-1127(99)00017-1.
- Canham, C., Finzi, A., Pacala, S., & Burbank, D. (1994). Causes and consequences of resource heterogeneity in forests: interspecific variation in light transmission by canopy trees. *Can. J. For Res.*, 24, 337-349.
- Chazdon, R., & Field, C. (1987). Photographic estimation of photosynthetically active radiation: evaluation of a computerized technique. *Oecologia*, 73, 525-532.
- Frazer, G. W., Canham, C. D., & Lertzman, K. P. (1999). *Gap Light Analyzer (GLA), vers. 2.0: Imaging software to extract canopy structure and gap light transmission indices from true-colour fisheye photographs, users manual and program documentation*. Burnaby, British Columbia: Simon Fraser Univ. and Millbrook.
- Huete, A. (1988). A soil-adjusted vegetation index (SAVI). *Remote Sens. Environ.*, 25, 295-309.

- Jennings, S. B., Brown, N. D., & Sheil, D. (1999). Assessing forest canopies and understorey illumination: canopy closure, canopy cover and other measures. *Forestry*, 72(1), 59-74. doi: 10.1093/forestry/72.1.59.
- Pearcy, R., & Yang, W. (1996). A three-dimensional crown architecture model for assessment of light canopy carbon gain by understory plants. *Oecologia*, 108, 1-12.
- Rich, P. (1990). Characterizing plant canopies with hemispherical photographs. *Remote Sensing of Environment*, 5(1), 13-29.
- Rouse, J., Haas, R., Schell, J., Deering, D., & Harlan, J. (1974). Monitoring the vernal advancement and retrogradation of natural vegetation. USA MD: NASA/GSFC.
- Roy, P., & Ravan, S. (1996). Biomass estimation using satellite remote sensing data: an investigation on possible approaches for nature forest. *Ecol. Manage.*, 123, 81-90.

附錄一、100 年度委託研究計畫期中報告委員審查意見辦理情形表

計畫編號：100-00-5-07

計畫名稱：遙測技術應用於平地造林碳匯計量之研究(3/3)

審查委員意見	辦理情形
1. 林分在二氧化碳固定及景觀功能等研究值得予以評估。	感謝委員意見。林分在碳匯的議題上與人類的生活息息相關，也提供人們極佳的遊憩效益。
2. 本研究所用之冠層覆蓋度定義來評估林分內競爭具有價值，但用在二氧化碳固定之評估可能有較大偏差。	感謝委員意見。本研究旨在利用衛星光譜資訊估測碳匯含量，而在研究中發現冠層覆蓋度與光譜值之間有良好的連結關係，因此冠層覆蓋度在此研究中是作為中間媒介，增加光譜資訊穩定預測碳含量能力之用。
3. 冠層鬱閉度與林況有密切關係，尤其與每一樹種之林分胸高斷面積與材積之關係若可建立，可用鬱閉度來評估林分。	感謝委員意見。本研究發現冠層鬱閉度與林分生長狀況有很強的相關性，故以鬱閉度作為估測林分材積之媒介之一。
4. 建議期末報告將遙測資訊與地面調查資料予以整合，且提出具體建議。	感謝委員意見。已將遙測資訊與地面調查資料整合結果放入「六、三種量測樹冠方法結果」之中。
5. 第 68 頁漏列。	謝謝委員提醒。已改正。
6. 第 14 頁 Onyx 樹冠模擬軟體是否為免費軟體？林分景觀模擬軟體是否亦為免費軟體？	回答委員：樹冠模擬軟體 Onyx Garden 售價約 500 美元，林分景觀模擬軟體 Visual Nature Studio 3 約 1750 美元。
7. 如何克服落葉樹之調查問題？是否在落葉期會有低估問題？	回答委員：會根據物候狀況，在植物生長季進行調查，其他如衛星影像、半球面影像拍攝等皆在生長季進行，以避免植物落葉造成的改變。
8. 中文參考文獻宜先列。	感謝委員指正，已更正。
9. 缺摘要。	感謝委員指正，已補上。
10. 建議將過去 2 年所建立的光譜資料和本年度樹冠模擬資料對林分材積和碳匯進行比較及整合之估算。	感謝委員建議，已將三年度計畫研究結果之估測式比較補充至「八、三年度計畫研究結果」

附錄二、100 年度委託研究計畫期末報告委員審查意見辦理情形表

計畫編號：100-00-5-07

計畫名稱：遙測技術應用於平地造林碳匯計量之研究(3/3)

審查委員意見	辦理情形
1. 第 14 至 19 頁應為本研究理論基礎之一部分，列為工作（研究）成果並不適當。	謝謝委員指正，已將研究理論基礎部分新增於「貳、研究架構」下「四、研究方法」章節。
2. 表 4 各層級林木有不同比例，請敘明其各出現在何種樹種、林分，以及各占花蓮光復造林地面積多少比例？	回應委員提問，本研究僅模擬光臘樹純林林分，表 4 之林分組成比例為展示軟體可作不同程度之模擬，並不具生態意義。
3. 修枝是否會干擾本研究方法所估算的固碳能力？	感謝委員提問。修枝是干擾的一種，日後可設立監測樣區，調查修枝前後之材積變動，以瞭解修枝之效果。而本研究是以總累積估算碳量為主。
4. 請敘明第 45 至 60 頁是何種樹種、林分之研究結果？	回應委員提問，模擬軟體可應用於各樹種樹冠及林分，而本研究模擬對象皆為光臘樹純林分。
5. 圖及表請註明研究之樹種。	感謝委員提醒，已將圖表標題補充完整
6. 在結論與建議部分，請敘明林務局及研究單位如何藉遙測技術估算其他平地造林林分之碳匯能力。	感謝委員意見，已在結論與建議中簡述研究材料與方法，日後會將此部分獨立出來寫為專章以供林務機關參考。
7. 森林碳匯做法有無必要做如此深入分析，雖然本計畫分析效果良好，但相對也較為耗力。	感謝委員意見。此報告依據 IPCC 之原則進行調查，其他細節則是對地區適應性延伸發展，方法流程建立過程較為繁複，待研究方法架構確立後，可免除試驗研究的部分，提升效率。
8. 標題說明有無必要？	感謝委員意見，已將多餘之圖表標題精簡，以俾閱讀。
9. 第 11 頁表 3，茄冬及陰香肉桂名詞是否有誤？	感謝委員指正。根據《臺灣維管束植物簡誌》統一名稱為「茄冬」，陰香肉桂則更正為「陰香」。
10. 參考文獻有無必要以斜體表示？	感謝委員指正，已統一字體格式。
11. 本計畫三年期的期末報告，對於模擬林分鬱閉度、覆蓋度和預測林分材積，都可獲得很好的成果，以供未來預估碳匯含量。本報告撰寫佳、可提供委託機關參考使用。	感謝委員意見。
12. 結論與建議部分，建議增加 1 段，簡述若要預測林分鬱閉度和林分材積	感謝委員意見。已在結論與建議中簡述研究所需材料與方法流程，以供參考。

時，如何作業，需要哪些基本資料，如林分樣區調查、影像拍攝等，然後在電腦上模擬估算，以獲得資料。	
13. 何謂哥測變數?	感謝委員指正，應為「估測變數」，已改正。