



公開  
 密件、不公開

執行機關(計畫)識別碼：1802030100

## 農業部林業試驗所113年度科技計畫研究報告

計畫名稱：**研究森林經營之碳匯成效** (第2年/全程4年)  
(英文名稱) **Analyzing the carbon sink effect of forest management**

計畫編號：113前瞻-18.2.3-森-01

全程計畫期間：自 112年1月1日 至 115年12月31日  
本年計畫期間：自 113年1月1日 至 113年12月31日

計畫主持人：**李隆恩**  
研究人員：**董景生、王韻皓、詹為巽、王培蓉、唐盛林、嚴晟瑋、李志璇**  
執行機關：**農業部林業試驗所**



1132475



# 項目一：人工林撫育技術之碳匯成效評估

## 壹、前言

淨零是全球面臨氣候危機所提出的對策，也是國家整體的重要目標。在淨零碳排的發展規劃中，產業總有以各種方式仍難以削減之碳排，最後將透過碳匯進行中和。其中，森林碳匯是人類最為熟悉且早已行之有年的技術。森林碳匯為陸域生態系重要的碳匯系統，其中包含生物量、枯落物及土壤碳庫，生物量部分，生物體(主要為林木)藉由光合作用將碳固定於木材中。根據 IPCC 國家溫室氣體清冊指南，碳貯存量、碳吸存量及碳移除量可透過一系列之係數關聯至森林蓄積量、生長量及伐採量，故森林碳匯議題即可回歸至森林經營最基本之生長收穫問題，並透過創新經營模式建構永續林產業發展藍圖。

研究森林經營之碳匯成效，可分為森林、林分及單木三個層級進行。為分析森林整體碳匯成效，必先建立精確之碳匯估計模式，現階段可著力之關鍵區分為二部分：其一為蓄積量及生長量推估之模式，由於森林樹種眾多且面積廣闊，森林蓄積量之推估均以取樣，統計建模，推算母體之方式進行，故其計算，多有賴於選取具代表性之樣本進行統計模擬。二為自蓄積量推估至碳量所需之一系列係數，包含生物量擴展係數(將主幹生物量轉換為全株生物量)、比重(將蓄積轉換為主幹生物量)及碳含量比例(將生物量轉換為碳量)等。此部分可參照我國國家溫室氣體排放清冊報告所目前使用 8 種主要林型之各項轉換係數(生物量擴展係數、比重及碳含量比例)。

由於受氣候與地理因素影響，我國擁有豐富之氣候帶環境，人工林樹種亦隨氣候帶變化而多元，進而增加了蓄積量推估之複雜度。在過去二十年遙測技術的快速發展為大尺度生物量及碳吸存的估算提供了有效的解決方案，其中森林碳吸存模型模擬隨著演算技術的發展及對森林生態系統結構與功能的深入了解，極具發展潛力，森林碳吸存模型是定量描述生態系統碳吸存過程及其與全球變化的關係，可由遙測獲得森林結構與環境數據，與碳吸存資料結合，最後獲得區域性森林生態系統的碳吸存資料。目前有研究提出使用森林地上生物量(AGB)、葉面積指數(LAI)、林齡、樹高等森林參數進行各種模型估算，也有學者提出為優化模型需區別不同環境條件或不同植被類型。此外，光達技術之發展亦提供林業研究者以非破壞性之方式，取得多元化的性態值，進而提供更多森林資訊，以配合大尺





度之蓄積量推估作業。

而在人工林經營中，加強森林經營 ( Improved Forest Management, IFM ) 之各項活動措施可促使森林提升蓄積量，其額外增加的碳吸存量亦有一定之增匯成效。其中，疏伐為常見之撫育措施，可增進保留木的生長，增加林分碳吸存效益，亦可透過疏伐木的合理利用，增加林產品之碳保存或碳替代效益。本計畫分 2 部分進行，透過遙航測與演算法之應用，開發較大尺度之森林碳匯監測模式；此外，針對本所於六龜試驗林進行之臺灣杉中度疏伐試驗，進行疏伐成效監測，並分析其增匯效益。

## 貳、研究材料與方法

本計畫之試驗地選定於本所六龜試驗林，研究方法如下：

### 一、運用航遙測技術優化森林碳匯變化監測體系：

#### (一) 地面樣區調查

本(2024)年度目標為完成六龜試驗林 10 個地面樣區調查，本年度目標業已全數完成，每樣區面積規劃為 0.05 公頃，調查項目包含胸高直徑、樹高、樹種、立木至基線的垂直與水平距離，每樣區定位則是選取樣區長邊的中央基線，利用 RTK 測量定位基線端點，立木的座標位置，則是利用立木至基線相對位置解算求得，完成地面樣區之樣區位置分布圖如圖 1。



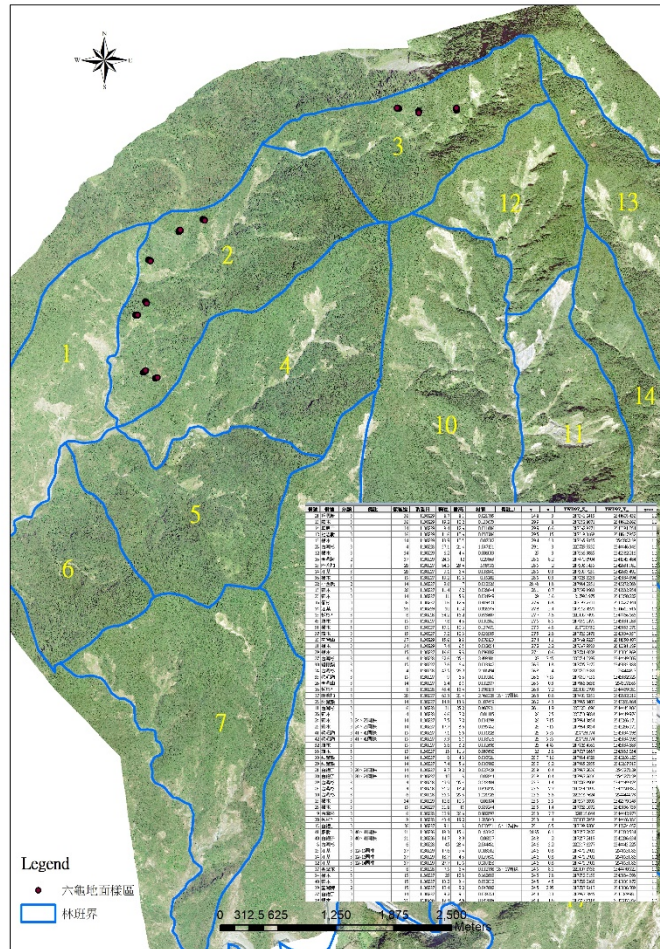


圖 1. 六龜試驗林 10 個樣區位置分布圖

## (二) 使用資料

### 1. UAV 光達

主要拍攝區域為六龜試驗林轄區第 1、2、3 及 4 林班範圍內，掃瞄日期 2023 年 6 月，點雲平均密度每平方公尺 210 點，點雲產製之 DSM 與 DEM，空間解析度為 0.2m \* 0.2m，相關作業及拍攝成果剖面圖如圖 2。



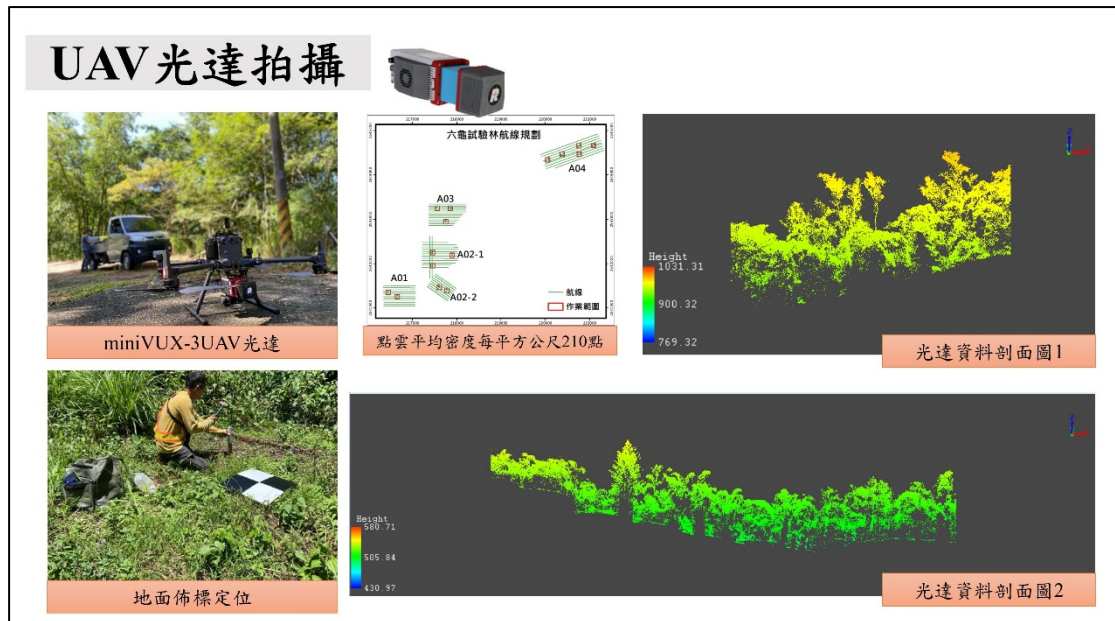


圖 2. UAV 光達拍攝作業及地形成果剖面圖

## 2.冠層結構指標

冠層結構指標主要利用本所拍攝 UAV 空載光達所生成的 DEM 與 DSM 資料來製作樹冠高度模型 (Canopy Height Model, CHM) , CHM 的計算方式為將 DSM 減去 DEM , 以獲取樹冠的高度資訊 ( 如圖 3) , 並利用 CHM 計算四種冠層結構指標。

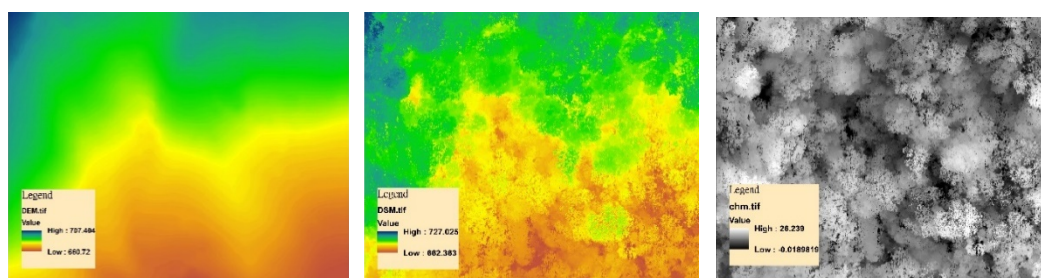


圖 3. DEM(左)、DSM(中)及 CHM(右)示意圖

### (1)冠層覆蓋率(Canopy Cover Ratio, CCR)

冠層覆蓋率定義為空間單元內，高度超過 2m 之像元面積佔該單元總面積的





百分比，旨在量化樹冠覆蓋於單元內的比例，用以表達冠層覆蓋的程度，其公式如式 (1)。

$$CCR = \frac{\sum_i \text{Area of CHM}_{i, \text{value} > 2\text{m}}}{\text{Area of CHM}_{\text{stands}}} \times 100\% \quad (1)$$

其中  $\text{CHM}(i, \text{value} > 2\text{m})$  表示空間單元內像元值大於 2 m 的第  $i$  個像元，

$\text{CHM}_{\text{stands}}$  為空間單元內所有 CHM 像元。

### (2) 平均冠層高 (Mean Top-of-the-Canopy, TCH)

平均冠層高指的是空間單元內冠層高度的平均值，用於量化整體冠層高度，其公式如式 (2)。

$$TCH = \frac{\sum_i \text{CHM}_i}{\text{Number of CHM}_{\text{stands}} \text{ pixels}} \quad (2)$$

$\text{CHM}_i$  為空間單元內 CHM 的第  $i$  個像元值。

### (3) 冠層高度變異數 (Variance of Canopy Height, VCH)

冠層高度變異數是指空間單元內樹冠高度的變異係數，用於量化冠層高度的變異程度。VCH 值越高表示冠層高度的變化越大，冠層表面呈現較高的粗糙度，顯示出更多的冠層孔隙；相反，較低的 VCH 值則代表冠層高度差異較小，冠層表面變化較為平緩。該指標能有效反映空間單元內冠層結構的垂直異質性，其公式如式 (3)。

$$VCH = \text{Coefficient of variation of CHM}_{\text{stands}} \quad (3)$$

### (4) 冠層容積率 (Canopy Volume Ratio, CVR)

冠層容積率 (CVR) 是一種量化空間單元內冠層垂直空間分布程度的指標，用於描述樹冠在垂直空間的分布情形，當其值接近 1 時，代表單元內主要由單一樹冠層佔據，而其值接近 0 時，代表冠層有多層次的垂直結構，意即有更高的垂





直異質性，其公式如式(4)。

$$CVR = \frac{\sum_i CHM_i}{\max(CHM) \times area} \quad (4)$$

其中  $CHM_i$  為空間單元內 CHM 的第  $i$  個像元值； $\max(CHM)$  為空間單元中最大 CHM 值； $area$  為空間單元面積。

### 3. 衛星影像

本計畫所使用之 Worldview2 衛星影像，拍攝日期為 2023 年 11 月，包含八個多光譜波段分別為 coastal blue (400~450 nm)、blue (450~510 nm)、green (510~580 nm)、yellow (585~625 nm)、red (630~690 nm)、red-edge (705~745 nm)、NIR1 (770~895 nm) 和 NIR2 (860~1040 nm)。解析度為 50 公分，拍攝日期為 2023 年 11 月。

植生指標通常可以反應出地表植生的密度，本計畫使用之常態化差異植生指標 (NDVI)，主要利用 worldview2 影像計算求得，其公式如式 (5) 所示。因為影像有 2 個近紅外光波段，因此可生成 2 個 NDVI 值。

$$NDVI = (NIR - R) / (NIR + R) \quad (5)$$

NIR 為近紅外光段，R 為紅光段。

## (三) 蓄積量推估

### 1. 模型自變量

本研究以 5 米空間解析度建置並整合變數資料集，所納入的變數包括來自 UAV 光達的四個冠層結構指標 (CCR、TCH、VCH、CVR) 及 Worldview-2 高解析度衛星影像的八個光譜波段 (Red、Green、Blue、NIR1、Red-Edge、Coastal、Yellow、NIR2)，並加入兩個植生指標 (NDVI1 及 NDVI2)。

由於地面樣區為 0.05 公頃，為了確保樣區內變數的代表性，針對上述 14 個變數進行樣區範圍內的統計值萃取，包含總和、最大值、最小值、範圍、平均





值、中位數、標準差與第 90 百分位數。最後共計生成 112 個變數作為多元迴歸模型的自變量，用以預測蓄積量，為模型建構提供充足且具代表性的資料基礎。

## 2. 模型因變量

本研究包含本年度所調查的 10 個樣區，並結合 2022-2023 年所調查的 18 個樣區，針對各樣區內單木材積進行計算，並將其加總以獲得單位樣區的蓄積量，作為多元迴歸模型的因變量。

## 3. 模型選取

本研究主要採用多元迴歸分析，結合逐步篩選法選擇最適變數，建立蓄積量推估模型。模型適用性通過調整後決定係數 ( $R^2_{adj}$ ) 進行評估，並計算均方根誤差 (RMSE) 以檢測模型的預測準確性。

## 二、人工林經營之碳匯成效：

### (一) 疏伐試驗





本次試驗位於六龜試驗林第 12 林班(少部分延伸至第 3 林班，如圖 4)，面積共計約 7.9 公頃，林分於 1978 年營造為臺灣杉純林，栽植密度為每公頃 2,500 株，該林分曾於 14 及 21 年生時實施疏伐，並於 1990 年時劃設作為人工林中後期撫育經營試驗地，以供長期研究試驗之用。2021 年由於觀察到林分過度鬱閉，故再次施行疏伐作業，作業含中層疏伐、下層疏伐及未疏伐(對照處)計 3 種處理方式。各處理計 3 重複，延環境梯度變異之垂直方向(等高線)設置處理區，處理區之配置採隨機，受限於地形，各重複面積約 0.5-1.5 公頃不等，各處理合計面積約 2.5 至 3.0 公頃不等，伐採前於各處理內選取樹形良好、生長勢旺盛，具發展潛力之未來木，以進一步分析不同處理方式對未來木生長之影響。

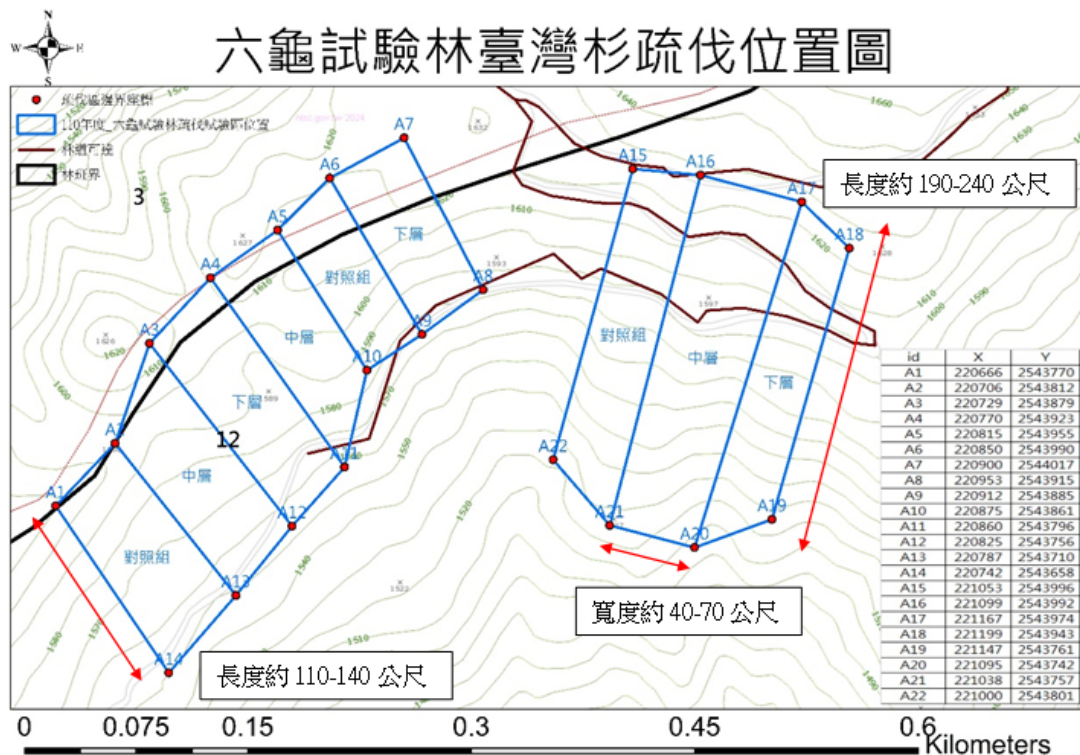


圖 4. 六龜試驗林臺灣杉疏伐位置圖

疏伐採中層及下層設計，中層疏伐伐採對未來木具競爭壓力之競爭木，下層疏伐則不考慮未來木影響，只針對生長劣勢之被壓木進行伐採。伐採強度為株數疏伐率 30%，同時為利後續收穫作業，一併開設集材線。為監測疏伐之各項效益，伐採時每個重複設置 1 個樣區，共計 9 個樣區(3 處理×3 重複)，每個樣區為 0.05 公頃。疏伐工作於 2021 年完成，並於當年度完成第 1 次樣區調查作業，本年度完成第 2 次樣區調查作業，監測保留木之生長並完成相關分析工作。

2 次調查之項目包含樹木編號、樹種與胸徑，並運用 2021 年之疏伐木資訊所建立之樹高曲線式及立木材積式計算單株樹高與材積，其公式引用自李隆恩等





(2021)六龜地區臺灣杉人工林生長模式之建立，如式(6)、(7)所示。

$$H = -3.6988 + 7.0735 \times \ln DBH \quad (6)$$

$$V = DBH^2 / [348.7 + (25541/H)] \quad (7)$$

H 為樹高、DBH 為胸徑、V 為立木材積、ln 為自然對數。

本計畫引用 Lin et al. (2003)、邱志明等(2018)及我國國家溫室氣體排放清冊報告之數據計算林木之二氧化碳當量，如式(8)、(9)所式。

$$B = V \times BCEF \times (1 + R) \quad (8)$$

$$CO_2e = B \times CF \times 44 \div 12 \quad (9)$$

B 為林木全株生物量、V 為立木材積、BCEF 為地上部生物量轉換擴展係數(411.15 kg m<sup>-3</sup>)、R 為根莖比(0.22)、CO<sub>2</sub>e 為二氧化碳當量、CF 為碳含量轉換係數(47.5%)。

## 參、結果與討論

### 一、運用航遙測技術優化森林碳匯變化監測體系：

本計畫多元逐步迴歸的成果如表 1，其 28 個樣區預測值與實際值的展點圖如圖 5，模式的 R<sup>2</sup> 為 0.936，調整後的 R<sup>2</sup> 為 0.925，模式的 RMSE 為 64.4m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup>。

表 1. 多元逐步迴歸模式結果

	未標準化係數		標準化係數	t	顯著性	共線性統計量	
	B 之估計值	標準誤差	Beta 分配			允差	VIF
(常數)	-1139.454	588.576		-1.936	.065		
TCH最大值	31.948	5.140	.430	6.215	.000	.576	1.735
NDVII中位數	1983.047	626.822	.220	3.164	.004	.570	1.756
BAND1中位數	-283.651	38.911	-.525	-7.290	.000	.533	1.877
NDVI2標準差	-24761.288	6093.047	-.288	-4.064	.000	.552	1.812



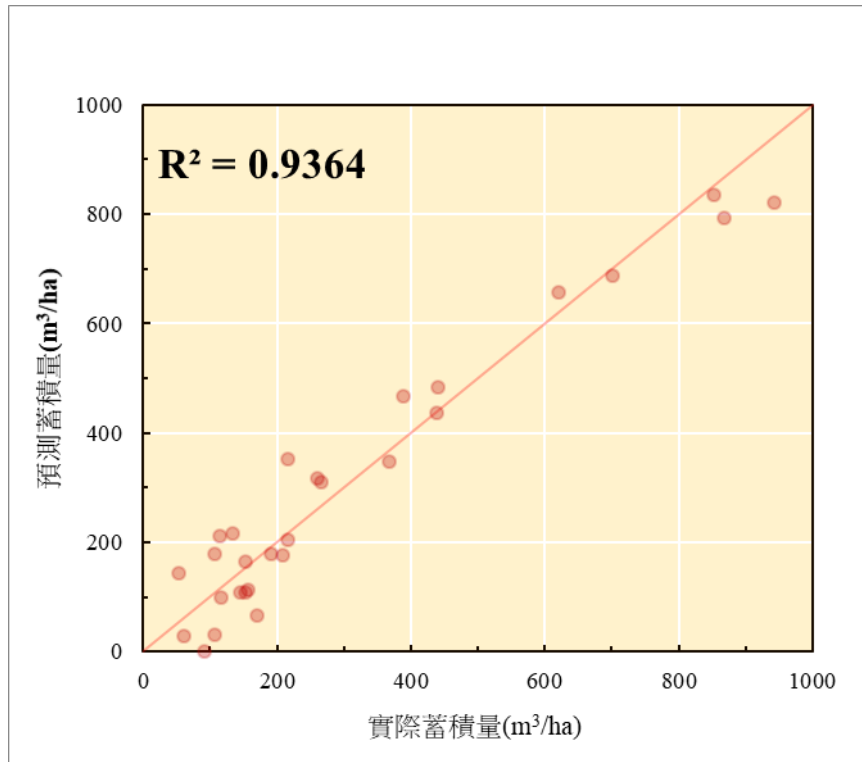


圖 5. 模式預測值與實際值對比圖

結果顯示，蓄積量推估模式  $R^2_{adj}$  為 0.925，代表模式具有高度解釋力與準確性，顯示出模式能夠解釋 92.5% 的蓄積量變異。模式的 RMSE(均方根誤差) 為  $64.40 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ ，也顯示出模式預測蓄積量的誤差範圍在合理範圍內。

在此模式中，共納入了四個主要變數進行分析：TCH\_max、NDVI1\_median、BAND1\_median 和 NDVI2\_STD，並得出各變數在模式中的迴歸係數與其顯著性。結果顯示，BAND1\_median：代表紅光段的中位數，此變數在模式中貢獻最大，係數顯示為負，即變數與蓄積量呈負相關，隨著紅光段的中位數增加，蓄積量隨之下降。TCH\_max：平均樹高最大值為次要影響變數，亦顯示正相關，表示隨著樹高最大值增加，蓄積量也有提升的趨勢。NDVI1\_median：即第 1 個 NDVI 變數，此變數對模式的影響中等，並且與蓄積量呈正相關。儘管其影響力不如 BAND1\_median 和 TCH\_max，但仍能增強模式的預測能力。NDVI2\_STD：即第 2 個 NDVI 變數，在模式中的貢獻相對較小。

總體來看，本計畫建立的蓄積量推估模式顯示，UAV 光達取得的 TCH 變數與 Worldview-2 高解析度衛星影像的紅光波段及兩個 NDVI 指標，與樣區蓄積量之間具有高度的耦合性，顯著提高了模式的預測準確性與解釋能力。





## 二、人工林經營之碳匯成效：

### (一) 蓄積量與生長量分析

監測結果顯示，中層疏伐處理林分每公頃蓄積量為  $442 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ ，每公頃生物量為  $222 \text{ t ha}^{-1}$ ，碳匯量為每公頃  $386 \text{ tCO}_2\text{e ha}^{-1}$ 。下層疏伐處理林分每公頃蓄積量為  $477 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ ，每公頃生物量為  $239 \text{ t ha}^{-1}$ ，碳匯量為每公頃  $416 \text{ tCO}_2\text{e ha}^{-1}$ 。未疏伐處理之對照區林分每公頃蓄積量為  $714 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ ，每公頃生物量為  $358 \text{ t ha}^{-1}$ ，碳匯量為每公頃  $624 \text{ tCO}_2\text{e ha}^{-1}$ 。疏伐林分因於 2021 年進行伐採作業，疏伐率約為 30%，故其蓄積量亦僅約未疏伐林分之 70%，顯著低於未疏伐林分。

比較不同處理林分 3 年間的定期平均生長量，其中，中層疏伐處理林分每公頃每年平均蓄積生長量為  $7.41 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ ，每公頃每年平均生物量增加量為  $3.72 \text{ t ha}^{-1}$ ，每公頃每年平均增匯量為  $6.48 \text{ tCO}_2\text{e ha}^{-1}$ 。下層疏伐處理林分每公頃每年平均蓄積生長量為  $9.20 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ ，每公頃每年平均生物量增加量為  $4.62 \text{ t ha}^{-1}$ ，每公頃每年平均增匯量為  $8.04 \text{ tCO}_2\text{e ha}^{-1}$ 。未疏伐處理之對照區林分每公頃每年平均蓄積生長量為  $9.77 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ ，每公頃每年平均生物量增加量為  $4.90 \text{ t ha}^{-1}$ ，每公頃每年平均增匯量為  $8.54 \text{ tCO}_2\text{e ha}^{-1}$ 。如同前段每公頃蓄積量之結果，因受疏伐影響，疏伐林分之每公頃總量及生長量皆低於未疏伐林分，此係疏伐導致林分內株數下降，故總和量於短期間內有所降低之緣故。

本林分栽植於 1978 年，至本年度計為 46 年生，計算未疏伐林分之年平均生長量(MAI)為  $15.52 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ ，而對比近 3 年之定期年平均生長量(PAI)為  $9.77 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ 。可發現 PAI 已低於 MAI 值，顯示本林分應已逾 MAI 最大值發生之時期(一般林業經營上認知材積收穫最大輪伐期)，林分已可考慮進行收穫。

### (二) 生長率分析

短期內之疏伐效益，過去研究多以生長率之方式分析，本計畫以定期平均生長量除以期初(2021 年)總量計算生長率。比較不同處理林分 3 年間的定期平均生長率，其中，中層疏伐處理林分每公頃每年平均增匯率為 1.80%，下層疏伐處理林分每公頃每年平均增匯率為 2.05%，未疏伐處理之對照區林分每公頃每年平均增匯率為 1.42%。以統計檢定分析疏伐林分與未疏伐林分之差異，結果顯示，中度疏伐處理林分與未疏伐處理林分間無顯著差異( $p = 0.34$ )，下層疏伐則顯著高於未疏伐處理之林分( $p < 0.03$ )。此結果推測係由疏伐之機制所導致，下層疏伐因伐採林分內生長劣勢之被壓木，且釋放生長資源供仍有生長潛力之保留木利用，故餘下之保留木生長速率皆有所提升，反之，本區未疏伐之林分因已達鬱閉，林木





間競爭作用致使生長率較低。另推測中層疏伐林分因僅伐採對未來木產生競爭壓力之競爭木，對於提升全林分生長率之效亦並未如同下層疏伐，故中層疏伐林分與未疏伐林分間生長率無顯著差異。

### (三) 收穫林產品(Harvested wood products, HWP)碳保存效益

根據 2021 年疏伐作業紀錄，本次疏伐計伐採立木材積 787 立方公尺，扣除部分下層疏伐無搬出利用價值之劣勢木與枝梢材，搬出材積量計 551 立方公尺。參考加強森林經營專案活動製材類 40 年使用壽命之留存係數為 22.5%，本次疏伐收穫林產品之碳匯量計為 84 tCO<sub>2e</sub>(木材密度使用 0.32 g cm<sup>-3</sup>)。雖對比林分碳匯量因本次疏伐損失 535 tCO<sub>2e</sub>，損失率達 85%，惟失去的部分應可透過未來的保留木加速生長而逐漸補回。

### (四) 未來木的碳吸存效益

本次疏伐前為了操作中層疏伐，於林分內挑選有 10%的樹木作為未來木培養，為了分析中層疏伐方式對未來木生長促進的效益，本計畫亦於下層疏伐及未疏伐處理林分內，依照同樣的選取原則挑選未來木，惟其處理方式並為針對未來木產生特殊效益。3 種處理未來木的定期年平均生長率分別為 3.3%(中層)、2.6%(下層)及 2.4%(未疏伐)，由於未來木均為優勢木或次優勢木，故其生長率明顯皆高於林分年平均生長率，另經統計檢定結果顯示，中層疏伐處理林分未來木之生長率均顯著高於下層疏伐(p < 0.03)及未疏伐林分(p < 0.03)，而下層疏伐與未疏伐林分間則無顯著差異(p = 0.37)，顯示中層疏伐確實有助於未來木之生長。

表 1、各處理林分疏伐後 3 年碳匯量及

處理	疏伐後 3 年碳匯量 (tCO <sub>2e</sub> ha <sup>-1</sup> )	定期年平均碳匯量 (tCO <sub>2e</sub> ha <sup>-1</sup> )	定期年平均碳匯率 (%)
中層疏伐	386	6.48	1.80
下層疏伐	416	8.04	2.05
未疏伐	624	8.54	1.42

### (五) 小結

疏伐是常見的森林撫育措施之一，透過伐採及促進保留木生長的方式影響碳





匯量。在國去，疏伐對森林生態系碳量的影響呈現不一致的結果，整體而言，對於較高密度的林分，疏伐通常具有提高整體碳匯量的效果，但對於密度偏低或已趨於老熟的林分，疏伐則常導致碳匯量降低。透過疏伐前後的定期監測，可了解疏伐對定期生長量的影響，並比較定期生長量與平均生長量的差異，已決定伐期齡。

## 肆、結論

一、運用遙航測資訊建立的蓄積量推估模式中，UAV 光達取得的 TCH 變數與 Worldview-2 高解析度衛星影像的紅光波段及兩個 NDVI 指標，與樣區蓄積量之間具有高度的耦合性，顯著提高了模型的預測準確性與解釋能力。蓄積量推估模式  $R^2_{adj}$  為 0.925，代表模式具有高度解釋力與準確性，顯示出模式能夠解釋 92.5% 的蓄積量變異。模式的 RMSE (均方根誤差) 為  $64.40 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ ，也顯示出模式預測蓄積量的誤差範圍在合理範圍內。

二、人工林經營具有一定的增匯效益，本計畫參考加強森林經營碳匯專案活動之估算方式，計算出疏伐 HWP 碳匯量為  $69 \text{ tCO}_2\text{e}$ 。另疏伐林分保留木之生長率顯著高於未疏伐處理之林分，因疏伐損失的林分碳匯量應可透過未來的保留木加速生長而逐漸補回。

三、由於森林碳匯的能力受樹種組成、林齡、密度、地位(氣候、地形、土壤)等因素影響，故本計畫操作之疏伐作業對林分碳匯之效益，及引申出對該林分之經營管理建議，均僅適用於該林分。惟本計畫之研究流程及方式可應用於其他林分中，再依其結論決定該林分之經營管理策略。

四、本計畫調查疏伐前、疏伐後當年及疏伐後 3 年之樹木性態值資訊，藉由調查之樹種、胸徑等資訊，配合相關轉換係數推估碳匯量，即國際一般通常使用之生物量擴展係數法；另由於疏伐對保留木之效益約需數年的生長方得以呈現，監測期約以 3-5 年為週期，本計畫之各項調查方式及監測週期均與一般森林調查之方式相同，具有代表性及參考價值。





## 伍、參考資料

1. 李久先、顏添明 (1992) 人工林林分生長之探討 - 疏伐對林分結構及生長的影響。中興大學實驗林研究報告，16(1)：103-113。
2. 李久先、顏添明、鍾昇興 (1996) 森林經營理念及林木資訊相關問題之研究。台灣林業，22(6)：22-26。
3. 李隆恩、顏添明 (2010) 紅檜人工林疏伐後 4 年對林分及單木層級之影響。中華林學季刊，43(2)：249-260。
4. 李隆恩、顏添明 (2019) 紅檜人工林疏伐後不同期間之疏伐效益分析。林業研究季刊，41(4)：273-283。
5. 杜清澤、邱志明、林國銓 (2011) 人倫地區柳杉人工林地上部與地下部生物量之估算。中華林學季刊，44(3)：401-412。
6. 邱志明、唐盛林、彭炳勳、鍾智昕 (2017) 紅檜人工林不同林分密度生長與自我疏伐之研究。中華林學季刊，50(1)：19-32。
7. 陳鈺惠、楊銘鑫、王兆桓 (2010) 紅檜和台灣杉人工林單木直徑生長與枯死模式之研究。宜蘭大學生物資源學刊，6(1)：71-77。
8. 黃進睦、吳孟珊、陳溢宏、陳麗琴 (2014) 蓮華池巒大杉二次疏伐對林份





- 材積影響之研究。林業研究專訊，32(5)：69-72。
9. 顏添明、李久先 (1998) 應用 Richards 生長模式分析疏伐林分之單木生長。中華林學季刊，31(2)：165-176。
  10. 羅卓振南、鍾旭和、邱志明 (1997) 疏伐與修枝對紅檜人工林生長之效應。台灣林業科學，12(2)：145-153。
  11. Abernethy, N. C. (1981) Predicted and projected diameter distributions of thinned old-field slash pine plantations. Masters thesis, School of Forest Research, University of Georgia.
  12. Cannell, M. G. R., P. Rothery and E. D. Ford (1984) Competition within stands of *Picea sitchensis* and *Pinus contorta*. *Annals of Botany* 53: 349-362.
  13. Hamilton, D.A. (1986) A Logistic Model of Mortality in Thinned and Unthinned Mixed Conifer Stands of Northern Idaho. *Forest Science* 32: 989-1000.
  14. Harper, G., M. O'Neill, P. Fielder, T. Newsome and C. DeLong (2009) Lodgepole pine growth as a function of competition and canopy light environment within aspen dominated mixedwoods of central interior British Columbia. *Forest Ecology and Management* 257: 1829-1838.
  15. Kariuki, M. (2008) Modelling the impacts of various thinning intensities on tree growth and survival in a mixed species eucalypt forest in central Gippsland, Victoria, Australia. *Forest Ecology and Management* 256: 2007-2017.
  16. Wang D.-H., S.-C. Tang, H.-C. Hsieh and C.-H. Chung (2008) Site Index Curve for Taiwania Plantations in the Liukuei Area. *Taiwan Journal of Forest Science* 23(4): 335-349.
  17. Wang D.-H., C.-H. Chung, H.-C. Hsieh, S.-C. Tang and T.-H. Chen (2011) Baseline Survey and the Immediate Thinning Impact on the Stand Composition of Woody Plants and Overstory Structure of a Sugi Plantation (*Cryptomeria japonica*) in the Zenlen Area. *Taiwan Journal of Forest Science* 26(3): 295-303.
  18. Wang D.-H., C.-H. Chung, H.-C. Hsieh, S.-C. Tang and T.-H. Chen (2015) Three-year Patch Thinning Effects on the Stand Structure in Overstory Trees of a





- Japanese Cedar Plantation in Taiwan. *Taiwan Journal of Forest Science* 30(1): 55-74.
19. Yen, T. M. (2015) Relationships of *Chamaecyparis formosensis* crown shape and parameters with thinning intensity and age. *Annals of Forest Research* 58(2): 323-332.
  20. Yen, T. M. and C. T. Wang (2013) Assessing carbon storage and carbon sequestration for natural forests, man-made forests, and bamboo forests in Taiwan. *International Journal of Sustainable Development & World Ecology* 20(5): 455-460.
  21. Yen, T. M., J. S. Lee and K. L. Huang (2008) Growth and yield models for thinning demonstration zones of taiwan red cypress (*Chamaecyparis formosensis* Matsum.) and japanese cedar (*Cryptomeria Japonica* D. Don) plantations in central Taiwan. *Quarterly Journal of Forest Research* 30 (3): 31-40.
  22. Yen, T. M., J. S. Lee, C. L. Li, Y. T. Chen (2013) Aboveground biomass and vertical distribution of crown for Taiwan red cypress 20 years after thinning. *Dendrobiology* 70: 109-116.
  23. Yen, T. M., L. M. Ai, C. L. Li, J. S. Lee and K. L. Huang (2009) Aboveground carbon contents and storage of three major taiwanese conifer species. *Taiwan Journal of Forest Science* 24 (2): 91-102.
  24. Yen, T.-M., K.-L. Huang, L.-E. Li and C.-H. Wang (2019) Assessing carbon sequestration in plantation forests of important conifers based on the system of permanent sample plots across Taiwan. *Journal of Sustainable Forestry*. 39(4):392-406.





## 項目二：自然式植栽設計對淨零減碳的貢獻

### 壹、前言

人類對全球碳循環的擾動已大大改變了大氣中的 CO<sub>2</sub> 濃度。大約 75% 的 CO<sub>2</sub> 累積排放來自化石燃料和工業，而 25% 則來自土地利用型的變化。其影響的層面包括大氣中二氧化碳濃度的增加、氣溫上升、降雨模式改變，以及水患、乾旱及風災等事件發生的頻度與強度增加等，直接影響生物的生理調適，進而影響生態系中的物質循環及能量流動。淨零是全球面臨氣候危機所提出的對策，其中，森林碳匯是人類最為熟悉且早已行之有年的技術。然以原生植被提升都市及里山綠地碳匯及多樣性亦是未來重要之趨勢。許多研究證實具有地被植物的棲地相對於裸露的土壤，可以減少碳排放，並增加碳貯存功能，惟現今針對地被植物之碳匯研究仍不足。

自然式景觀植栽設計源於十八世紀的英式庭園與十九世紀造園師威廉羅賓遜 ( William Robinson ) 所創立的野生花園 ( Wild Garden )，其影響遍及北美及歐洲幾個北方國家。起初倡議在設計時要多使用原生植物，經過將近 50 年的演變，自然式植栽設計已不拘泥於使用原生物種，而轉變到同時應用原生與外來種，來模仿自然的植物群落狀態。許多研究證實具有地被植物的棲地，相對於裸露的土壤可以減少碳排放並增加碳儲存功能，都市綠空間除了具有景觀價值，亦可兼具碳匯的功能。當植物適合當地環境生理健康良好時，棲地碳匯提高，且棲地生物量增加，亦可能提高生物多樣性和增加生態韌性的功能。本計畫擬挑選適用於自然式植栽組合之植物作為基礎種類，進行碳吸存及溫室氣體通量之量測，找出具生態韌性、適合綠空間使用、多樣性且具高碳匯功能的自然式植栽組合。目前對於具生態韌性和碳匯功能且適用自然式景觀設計的植栽研究幾乎沒有相關資訊，本計畫相信具有相當大的國際競爭力與潛力，且兼具產業應用之價值。

草地儲存著全球陸地約三分之一的碳庫，是一個重要的土壤碳匯。最近的研究中表示改善放牧管理和生物多樣性的恢復，可以為全球草地提供低成本和高碳增益的自然氣候解決方案。在全球的草地，透過增加生物多樣性，土壤有機碳 (SOC) 的固碳潛力為每年 23 到 73 億噸二氧化碳當量。改善放牧管理每年為 148 到 699 兆噸二氧化碳當量。在牧草地中種植豆科作物每年約為 147 兆噸二氧化碳當量 (Bai and Cotrufo, 2022)。IPCC 所指出的主要溫室氣體減排選項之一是將碳





封存在土壤中。在溫帶地區，提高碳封存的管理方法中與植被有關的包括增加作物種植頻率(減少裸露休耕)。在熱帶地區，混農林業仍然是顯著提高封存率的主要方法，也可透過覆蓋作物增加效益，而對森林邊緣耕地進行造林也是一種替代方法(Hutchinson et al., 2007)。Yang 等(2019)的研究中指出，恢復演替晚期的草地植物多樣性，可讓土壤年碳儲存率增加，在最高多樣性處理的樣區年碳儲存率比該地點的自然演替對照組高出 200%，這與較高的地上生產量和根生物量以及多種植物的存在有關，特別是 C4 類草和豆科植物。這項研究結果顯示在退化和廢棄土地上，恢復高植物多樣性可能大大增加碳捕獲和儲存率。評估碳封存能力應該同時考量對農業活動排放和對土壤碳庫的影響。保護性農業(Conservation agriculture, CA)是其中一種方法，透過最小的耕作及作物的保留，可減少耕作操作時的農業活動排放。對土壤碳匯的 78 個研究案例中，有 40 個顯示 CA 耕作的土壤碳庫顯著高於慣行耕作，有 7 個顯示較低，而 31 個案例沒有顯著差異，顯示長期保有地面植被對土壤碳庫的重要性(Govaerts et al., 2009)。惟針對國內特有環境下各種棲地碳吸排量，目前所得資訊相當有限，爰此，本計畫擬比較綠基盤及裸露地之碳匯能力，進行兩者碳吸存量及溫室氣體通量之量測。選擇可行性植物種類作為基礎種類，進行其碳吸存及溫室氣體通量之量測，找出適合綠空間使用且具高碳匯功能的植栽群。最後，期望能組合出能減少維護管理需求且應對極端氣候較具有韌性的植栽群。

估算碳吸存量的方法已有許多文獻研究，其中遙感探測、生態模型模擬等方法屬於較大尺度的推估方法，需要有實測值作為基礎，而生物量法、光合作用推估法及渦流相關法皆屬於碳吸存量的實測方法。衛星遙測可提供地面清楚的土地覆蓋、分級及植群生長狀況，利用衛星遙測在空間與時間上取得清楚的生態資訊，可評估土地潛在碳通量，但其需要有實測值作為基礎。本計畫擬利用通量法建立植栽碳吸存的實測值，以期未來在都市景觀碳監測上利用，相關研究成果兼具學術與產業上之價值。透過本計畫執行成果，獲得預定量化指標與實際績效，有利建立景觀植物碳收支，提供增加綠空間的碳匯建議，綜以達成具有景觀功能且協助綠空間提升生態韌性，並達到 2050 台灣淨零排放之目標。

此外，森林的邊緣或是森林與人類活動空間交接處經常是被我們忽略的一部分，但這些草地或灌木地通常扮演著緩衝帶的腳色，是很多生物的棲息地，我們在計算森林碳匯或農地土壤碳匯時卻忽略了這些地區的貢獻。這些地區因為經常和人類活動區域重疊，所以在管理及利用方式上通常較沒有顧及生物多樣性的重要，往往以人的角度來看到這些棲地，許多土地遭到荒廢，如果可以利用自然式景觀植栽設計的方式增加這些土地的綠覆率，除了可以增加景觀功能，亦可增加





生物多樣性及減排(增匯)的效果。同時我們對這些地被植物的碳吸排能力如能越了解，未來對森林邊緣地的碳吸存貢獻及管理亦可提供更多的訊息。故本子計畫運用模仿自然原生植物群落狀態之方式，透過自然式植栽設計，開發碳匯議題下最合宜之都市與里山森林營造策略，使都市及里山綠空間除了具有景觀價值外，亦兼具碳匯功能。本計畫選擇可行性植物種類作為基礎種類，進行其碳吸存通量之量測，找出適合綠空間使用且具高碳匯功能的植栽群。112 及 113 年度本計畫在台北、台中及嘉義設置三個樣區，每個樣區選擇 20 種具景觀利用的原生植物進行栽培並比較其碳吸存差異，栽培一個月後之地被碳吸存能力依樣區位置及植物種類有所差異，目前初期測量在三地具有良好碳吸收能力的植物為仙草、龍牙草、台灣澤蘭、馬蘭、台灣大戟、益母草、石薺蓼及澤芹，但有待更進一步試驗驗證。

## 貳、研究方法

### 一、試驗場地：

#### (一)試驗地點：

為比較選擇出之植物於不同地區之碳匯能力差異，故本研究於台灣北中南部設置樣區，北部：台北市中正區台北植物園(25.032618, 121.509490)、中部：台中市霧峰區(24.067496, 120.689867)、南部：嘉義縣水上鄉(23.427283, 120.480730)。其中臺北與臺中之氣候分區為亞熱帶夏季濕潤炎熱氣候，嘉義為熱帶冬乾氣候 ( 邱祈榮等, 2004 )。

#### (二)樣區建立：

樣區建立流程為使用怪手或人工進行現場粗整地，並放樣整理出略高於地





面20-40公分高的畦，以種植植物避免積水，其各地區樣區建立照片如下。

	整地前	整地、放樣	植栽種植
台 北			
台 中			
嘉 義			

## 二、物種選擇依據：

根據實驗地區的氣候特性和植物景觀視覺效果進行初期的植物物種清單篩選，並將物種的生長環境分為乾、濕、半日照、全日照四個象限，總共挑選耐旱植物23種、耐濕植物27種，總共50種植物（圖1）。

因應未來於都市地區之應用，故試驗物種於三區皆以相同種類進行。預計經由三年之試驗結果提出分別適用於不同氣候區之物種，與適應性較廣泛的植物名單。



1132475



112年-實驗物種:

未篩選物種:

蹄蓋蕨科 過溝菜蕨  
 烏毛蕨科 東方狗脊蕨  
 碗蕨科 粗毛鱗蓋蕨  
 合囊蕨科 觀音座蓮  
 腎蕨科 腎蕨  
 腎蕨科 毛葉腎蕨  
 紫萁科 粗齒革葉紫萁  
 水龍骨科 海岸擬蕨蕨  
 鳳尾蕨科 傅氏鳳尾蕨  
 天門冬科 霧社蜘蛛抱蛋  
 天門冬科 長葉隔蜘蛛抱蛋  
 天門冬科 薄葉蜘蛛抱蛋  
 天門冬科 大武蜘蛛抱蛋

菊科 新竹油菊  
 菊科 馬蘭  
 菊科 山菊  
 菊科 台灣山菊  
 金粟蘭科 紅果金粟蘭  
 景天科 石碇佛甲草  
 莎草科 鸞喙薑  
 莎草科 東草  
 莎草科 台灣割雞  
 豆科 截葉胡枝子  
 禾本科 中華草沙蠶  
 唇形科 向天盞  
 唇形科 黃花鼠尾草  
 唇形科 石薺華

唇形科 田代氏黃芩  
 唇形科 印度黃芩  
 唇形科 田代氏鼠尾草  
 蘭科 台灣白及  
 蘭科 白鶴蘭  
 車前科 羅山腹水草  
 報春花科 蓬萊珍珠菜  
 薔薇科 台灣地榆  
 薔薇科 龍牙草  
 薑科 山月桃

乾

全日照，耐旱 23種(耐旱及耐濕併列8種)

紫萁科 粗齒革葉紫萁  
 鳳尾蕨科 粉背蕨  
 水龍骨科 水社擬蕨蕨  
 菊科 島田氏雞兒腸  
 菊科 華薊  
 菊科 台灣狗娃花  
 菊科 台灣澤蘭  
 石竹科 清水山石竹  
 石竹科 巴陵石竹  
 莎草科 黑莎草

大戟科 台灣大戟  
 金絲桃科 元寶草  
 石薺華  
 唇形科 田代氏鼠尾草  
 唇形科 益母草  
 蘭科 台灣白及  
 蘭科 薔草蘭  
 報春花科 蓬萊珍珠菜  
 報春花科 茅毛珍珠菜  
 薔薇科 台灣地榆

薔薇科 龍牙草  
 繖形科 日本前胡  
 繖形科 高氏柴胡

半日照

蹄蓋蕨科 過溝菜蕨  
 烏毛蕨科 東方狗脊蕨  
 碗蕨科 粗毛鱗蓋蕨  
 合囊蕨科 觀音座蓮  
 腎蕨科 腎蕨  
 腎蕨科 毛葉腎蕨  
 紫萁科 粗齒革葉紫萁  
 水龍骨科 海岸擬蕨蕨  
 鳳尾蕨科 傅氏鳳尾蕨  
 爵床科 銀脈爵床  
 天南星科 姑婆芋  
 天南星科 菲律賓扁葉芋  
 天南星科 蘭嶼芋

菊科 馬蘭  
 菊科 山菊  
 菊科 台灣山菊  
 金粟蘭科 紅果金粟蘭  
 景天科 石碇佛甲草  
 莎草科 鸞喙薑  
 莎草科 東草  
 苦苣苔科 俄氏草  
 禾本科 囊稈竹  
 禾本科 中華草沙蠶  
 唇形科 向天盞  
 唇形科 黃花鼠尾草  
 唇形科 石薺華

唇形科 印度黃芩  
 唇形科 田代氏鼠尾草  
 百合科 台灣油點草  
 柳葉菜科 卵葉水丁香  
 蘭科 台灣白及  
 蘭科 白鶴蘭  
 車前科 羅山腹水草  
 胡椒科 台灣胡椒  
 報春花科 蓬萊珍珠菜  
 毛茛科 小毛茛  
 薔薇科 龍牙草  
 薑科 山月桃

濕

全日照，耐濕27種(耐旱及耐濕併列8種)

紫萁科 粗齒革葉紫萁  
 水龍骨科 三叉葉星蕨  
 水龍骨科 水社擬蕨蕨  
 卷柏科 膜葉卷柏  
 菊科 馬蘭  
 菊科 台灣山菊  
 山柑科 毛葉蝴蝶草  
 鴨跖草科 牛鞭草  
 莎草科 東草  
 莎草科 台灣割雞

莎草科 黑莎草  
 豆科 假地豆  
 禾本科 中華草沙蠶  
 金絲桃科 元寶草  
 唇形科 向天盞  
 唇形科 石薺華  
 唇形科 仙草  
 唇形科 田代氏鼠尾草  
 百合科 台灣油點草  
 蘭科 台灣白及

全日照

蘭科 白鶴蘭  
 毛茛科 小毛茛  
 薔薇科 龍牙草  
 薔薇科 蛇莓  
 千屈菜科 圓葉節節菜  
 田蔥科 田蔥  
 澤芹

圖 1 植物特性分類圖

後續根據植物生長環境進行第二次篩選，本次以都市環境，例如公園綠地等為主，此環境通常土壤較為貧脊，因此本次植物物種選擇會以耐旱物種為主；研究初期試驗物種共25種，其中考量利用稀有植物，選出紅皮書名錄中國家極危(CR)植物2種，分別為竹葉蘭和澤芹；國家瀕危(EN)植物1種，為高氏柴胡；國家易危(VU)植物2種，分別為島田氏雞兒腸和巴陵石竹；接近受脅(NT)植物2種，分別為田蔥和臺灣大戟；暫無危機(LC)植物17種，包含臺灣白及、日本前胡、龍牙草等(表1)。

表 1 實驗物種清單

科名	中名	學名	生活型	分佈	日照需求	紅皮書等級
蘭科	臺灣白及	<i>Bletilla formosana</i>	多年生草本	北中南	全日照/半日照	LC
蘭科	竹葉蘭	<i>Arundina graminifolia</i>	多年生草本	北中	全日照	CR





繖形科	日本前胡	<i>Peucedanum japonicum</i>	多年生草本	北	全日照	LC
繖形科	高氏柴胡	<i>Bupleurum kaoi</i>	多年生草本	北中	全日照	EN
繖形科	澤芹	<i>Sium suave</i>	多年生草本	中	全日照	CR
薔薇科	龍牙草	<i>Agrimonia pilosa</i>	多年生草本	北中	全日照/半日照	LC
薔薇科	蛇莓	<i>Duchesnea indica</i>	多年生草本	北中南	全日照	LC
鳳尾蕨科	傅氏鳳尾蕨	<i>Pteris fauriei</i>	多年生草本	北中南	全日照/半日照/耐蔭	LC
菊科	島田氏雞兒腸	<i>Aster shimadae</i>	多年生草本	中	全日照	VU
菊科	臺灣狗娃花	<i>Aster oldhamii</i>	多年生草本	北	全日照	LC
菊科	臺灣澤蘭	<i>Eupatorium cannabinum</i>	多年生草本	北中南	全日照	LC
菊科	馬蘭	<i>Aster indicus</i>	多年生草本	北中南	全日照/半日照	LC
報春花科	蓬萊珍珠菜	<i>Lysimachia remota</i>	多年生草本	北中	全日照/半日照	LC
報春花科	茅毛珍珠菜	<i>Lysimachia mauritiana</i>	一二年生草本	北中南	全日照	LC
唇形花科	向天盞	<i>Scutellaria barbata</i>	多年生草本	北中南	全日照/半日照	LC
唇形花科	益母草	<i>Leonurus heterophyllus</i>	多年生草本	北中南	全日照	LC
唇形花科	石薺葶	<i>Mosla scabra</i>	一二年生草本	北中南	全日照/半日照	LC
唇形花科	仙草	<i>Mesona procumbens</i>	一二年生草本	北中南	全日照	LC
金絲桃科	元實草	<i>Hypericum sampsonii</i>	多年生草本	北	全日照	LC
百合科	臺灣油點草	<i>Tricyrtis formosana</i>	多年生草本	北中南	全日照/半日照	LC
石竹科	巴陵石竹	<i>Dianthus palinensis</i>	多年生草本	北中	全日照	VU
石竹科	清水山石竹	<i>Dianthus seisuimontanus</i>	多年生草本	北(花蓮)	全日照	-
田蔥科	田蔥	<i>Philydrum lanuginosum</i>	多年生草本	北中	全日照	NT
大戟科	臺灣大戟	<i>Euphorbia formosana</i>	多年生草本	北中南	全日照	NT
千屈菜科	圓葉節節菜	<i>Rotala rotundifolia</i>	多年生草本	北中	全日照	LC

註：CR(國家極危)、EN(國家瀕危)、VU(國家易危)、NT(接近受脅)、LC(暫無危機)、

### 三、測量項目與調查週期：

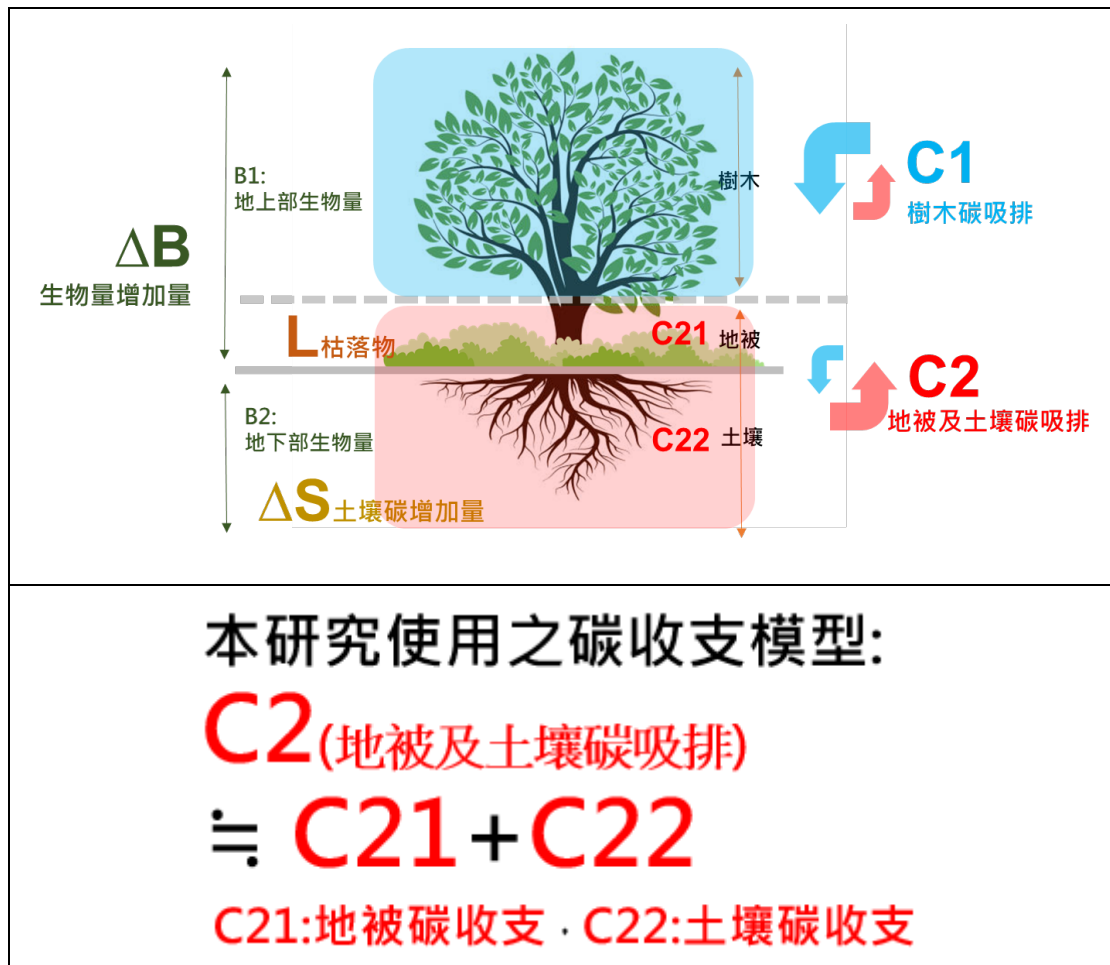
#### (一)測量項目：

##### 1.二氧化碳通量：

二氧化碳通量 (單位：mt CO<sub>2</sub>-eq ha year<sup>-1</sup>)，統一將氣體CO<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub>及N<sub>2</sub>O的排放和吸收量及植物生產量，依據全球暖化潛勢 (Global Warming Potential, GWP) 換算為CO<sub>2</sub>當量單位，經面積加權後，加總得之。



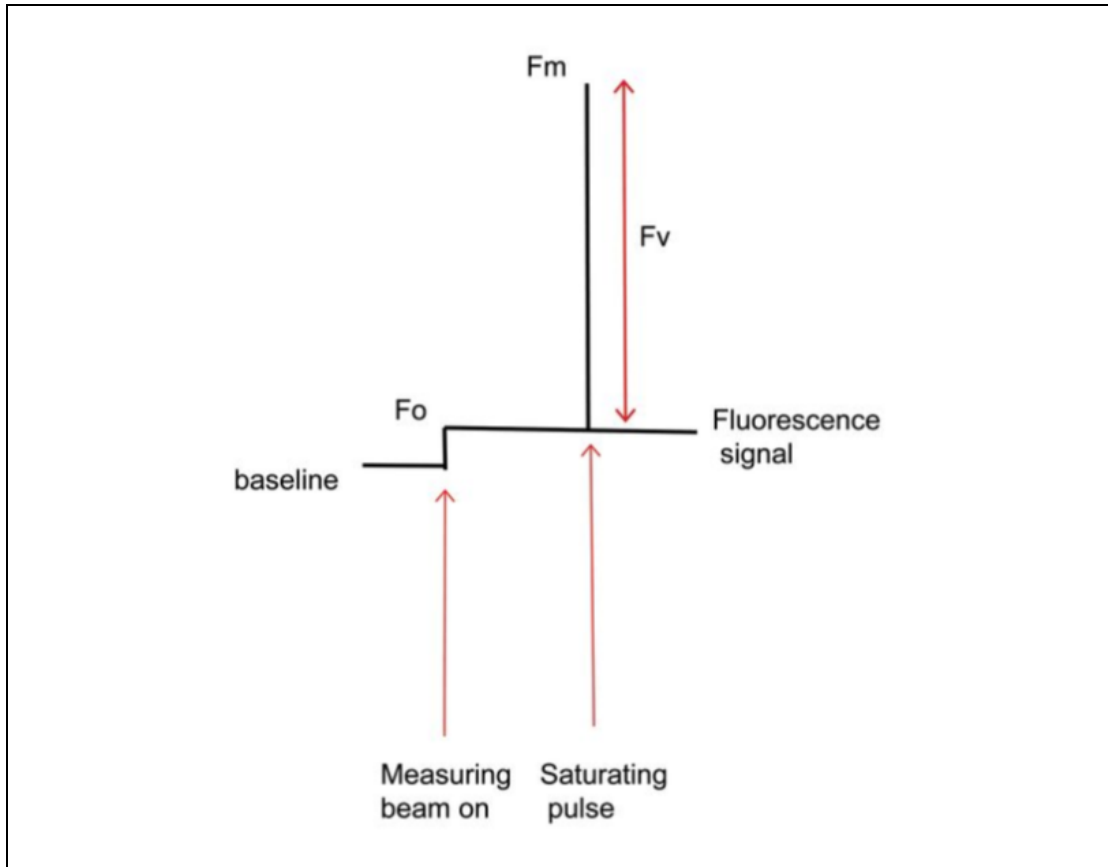
1132475



## 2. 光系統 II 量子效率(QY 值) :

光系統II量子效率為每個被光合色素吸收之光子所驅動的電子轉移數量，數值越高，表示植物在利用光能進行光合作用時的效率越高。高光系統II量子效率也代表植物為健康狀態，能夠有效進行光合作用。反之，低QY值則可能代表植物受到壓力(病害、缺水或營養不足)。故本研究利用光系統II量子效率來評估植物健康狀況。而因其數值受到光照強度影響，測量時需經暗處理，使植物樣本葉綠素恢復到基礎狀態，故本研究於天亮前之凌晨進行測量。





$F_0$ =基礎螢光，反應中心處於開放狀態

$F_m$ =最大螢光，當反應中心關閉時測得

$(F_m - F_0) = F_v$ =變化螢光

$F_v/F_m$ =光系統 II ( PSII ) 化學反應的最大量子效率

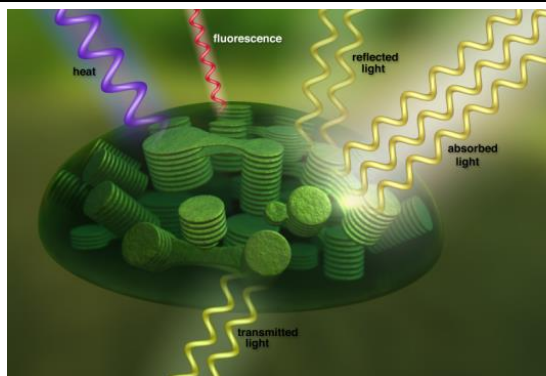


圖 2 光合作用中的光能處理圖



圖 3 FluorPen FP 110 儀器圖

(二)調查週期：





以季為單位，一年共測4次。

## 肆、結果與討論

### 一、結果：

#### (一)二氧化碳通量：

##### 1.台北：

在台北試驗區中，1-3月、4-6月與10-12月調查季度上，大部分物種呈現排放狀態，少數物種呈現吸收，如：1-3月的台灣澤蘭、傅氏鳳尾蕨；7-9月調查季度物種表現雖仍以排放為主，但呈吸收情況之物種增多，如：仙草、馬蘭、日本前胡、田蔥。整年情形，則每一物種呈排放狀態，其中田蔥與台灣白及具較低之排放通量，分別為：-9.66、-15.01噸/公頃。

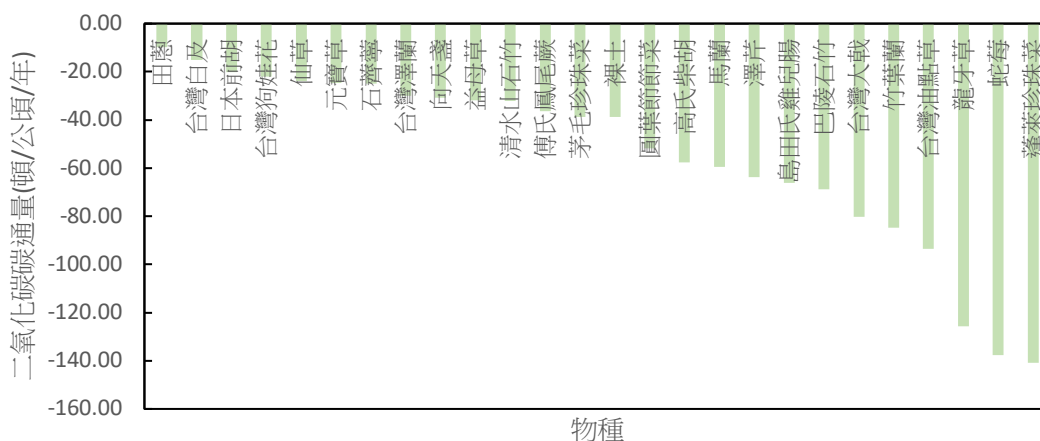


圖 4 台北實驗區物種年碳通量排序圖

表 2 台北實驗區各物種不同季節、整年碳通量數值表





編號	物種	台北二氧化碳通量(噸/公頃)				整年
		113/1.2.3月	113/4.5.6月	112/7.8.9月	112/10.11.12月	
1	仙草	-0.32	-20.87	5.33	-7.90	-23.77
2	馬蘭	-25.84	-26.11	2.69	-10.33	-59.60
3	益母草	-2.35	-9.70	-6.84	-13.07	-31.97
4	龍牙草	-39.51	-49.14	-6.44	-30.68	-125.78
5	台灣大戟	-2.19	-57.69	-12.66	-7.55	-80.09
6	茅毛珍珠菜	-2.35	-9.70	-13.69	-13.07	-38.81
7	傅氏鳳尾蕨	1.80	-7.44	-12.49	-18.14	-36.28
8	台灣狗娃花	-2.35	-9.70	-5.19	-4.82	-22.05
9	島田氏雞兒腸	-18.67	-25.34	-5.38	-16.83	-66.22
10	台灣澤蘭	1.89	-10.07	-2.60	-19.06	-29.85
11	日本前胡	-9.91	-9.29	1.76	-2.69	-20.13
12	元寶草	-11.86	-9.70	-5.46	2.29	-24.74
13	巴陵石竹	-17.66	-24.41	-18.22	-8.50	-68.78
14	台灣白及	-0.92	-3.73	-4.90	-5.46	-15.01
15	清水山石竹	-2.96	-9.70	-19.20	-0.29	-32.15
16	竹葉蘭	-2.05	-69.54	-21.89	8.81	-84.67
17	蛇莓	-8.23	-128.53	-8.80	7.92	-137.65
18	石薺葶	-2.35	-9.70	-4.15	-8.75	-24.95
19	向天盞	-3.00	-9.70	-4.97	-13.07	-30.74
20	圓葉節節菜	-4.64	-42.18	10.15	-15.09	-51.77
21	澤芹	-11.90	-35.58	-3.54	-12.68	-63.71
22	田蔥	-1.30	-10.38	4.88	-2.84	-9.66
23	台灣油點草	-9.15	-82.60	-2.19	0.47	-93.47
24	蓬萊珍珠菜	-28.83	-66.30	-13.71	-31.87	-140.72
25	高氏柴胡	-0.59	-32.15	-17.65	-7.16	-57.54
26	裸土	-2.35	-9.70	-13.69	-13.07	-38.81

註：紅字表示此次測量調查該植物休眠或死亡，以裸土代替。

## 2.台中：

在台中試驗區中，1-3月調查季度上，物種表現不一，有7種植物呈吸收狀態，如：仙草、龍牙草...等；4-6月調查季度有9種呈吸收狀態，且表現出強力





的吸收能力，如：台灣大戟(23.35噸/公頃)、圓葉節節菜(26.77噸/公頃)；7-9月調查季度上，有11種植物呈吸收狀態，如：龍牙草、傅氏鳳尾蕨...等；10-12月調查季度有8種植物呈現吸收，如：仙草、台灣狗娃花...等。

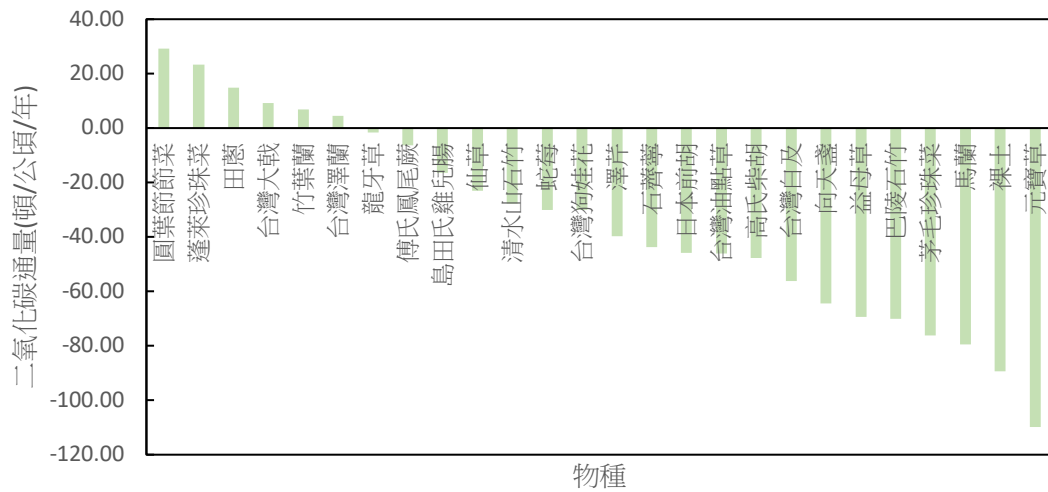


圖 5 台中實驗區物種年碳通量排序圖

表 3 台中實驗區各物種不同季節、整年碳通量數值表

編號	物種	台中二氧化碳通量(噸/公頃)				整年
		113/1.2.3 月	113/4.5.6 月	112/7.8.9 月	112/10.11.12 月	
1	仙草	2.65	12.63	-38.70	0.49	-22.94
2	馬蘭	-0.54	-28.34	-50.04	-0.50	-79.42
3	益母草	-9.62	-37.68	-5.19	-16.94	-69.43
4	龍牙草	0.71	8.34	4.61	-15.39	-1.74
5	台灣大戟	-7.50	23.35	-0.30	-6.29	9.26
6	茅毛珍珠菜	-9.62	-37.68	-12.06	-16.94	-76.30
7	傅氏鳳尾蕨	-3.65	-4.28	3.27	-1.62	-6.29
8	台灣狗娃花	-8.33	-20.57	-7.05	5.76	-30.19
9	島田氏雞兒腸	0.86	-13.79	-13.68	10.20	-16.41
10	台灣澤蘭	-19.92	2.13	1.80	20.45	4.46
11	日本前胡	-3.02	-29.53	3.49	-16.85	-45.91
12	元寶草	-4.76	-37.68	-4.30	-63.14	-109.88
13	巴陵石竹	-10.40	-18.79	-10.80	-30.19	-70.18
14	台灣白及	-8.11	-37.68	-5.34	-5.17	-56.30
15	清水山石竹	-9.99	-20.18	0.45	1.94	-27.77





16 竹葉蘭	-15.44	18.90	8.75	-5.45	6.76
17 蛇莓	0.71	-24.74	4.31	-10.27	-29.99
18 石薺葶	-9.62	-37.68	1.99	1.48	-43.83
19 向天盞	-0.64	-37.68	-9.23	-16.94	-64.50
20 圓葉節節菜	-1.09	26.77	8.02	-4.53	29.18
21 澤芹	3.49	9.39	-23.34	-29.31	-39.76
22 田蔥	1.56	20.46	9.57	-16.71	14.88
23 台灣油點草	4.53	-9.10	-16.80	-24.65	-46.02
24 蓬萊珍珠菜	-12.86	13.78	21.85	0.58	23.35
25 高氏柴胡	-25.75	-16.16	-7.01	1.24	-47.67
26 裸土	-9.62	-37.68	-25.21	-16.94	-89.46

註：紅字表示此次測量調查該植物休眠或死亡，故以裸土代替。

### 3.嘉義：

在嘉義試驗區中，1-3月調查季度上，大部分物種呈現吸收狀態，少數物種呈現排放，如：馬蘭、龍芽草...等；4-6月調查季度有13種呈吸收狀態，如：仙草、馬蘭、台灣大戟...等；7-9月與10-12調查季度則大部分物種呈排放狀態。

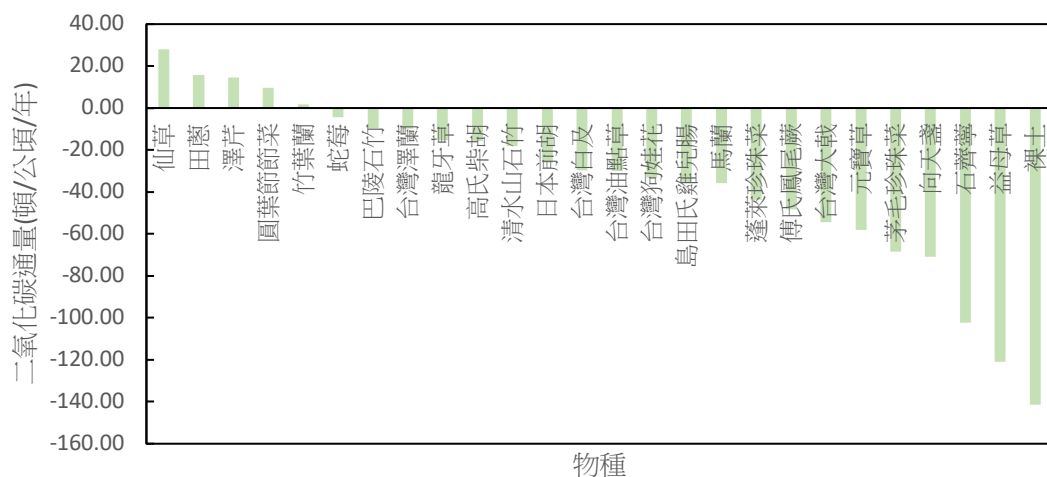


圖 6 嘉義試驗區物種年碳通量排序圖

表 4 嘉義試驗區各物種不同季節、整年碳通量數值表

編號	物種	嘉義二氧化碳通量(噸/公頃)
----	----	----------------



1132475



	113/1.2.3 月	113/4.5.6 月	112/7.8.9 月	112/10.11.12 月	整年
1 仙草	8.00	15.05	1.45	3.63	28.13
2 馬蘭	-3.96	6.19	-21.00	-16.97	-35.74
3 益母草	4.55	-49.96	-40.31	-35.28	-121.01
4 龍牙草	-2.19	12.09	-16.40	-8.85	-15.35
5 台灣大戟	-0.16	6.24	-33.35	-27.15	-54.42
6 茅毛珍珠菜	-11.95	-9.64	-32.66	-14.10	-68.35
7 傅氏鳳尾蕨	2.01	14.79	-47.49	-17.74	-48.44
8 台灣狗娃花	8.33	-12.59	-18.14	-10.62	-33.02
9 島田氏雞兒腸	6.50	-2.21	-27.54	-11.96	-35.21
10 台灣澤蘭	8.62	-5.20	-14.56	1.29	-9.84
11 日本前胡	-0.49	9.24	-17.86	-16.92	-26.03
12 元寶草	-0.16	-49.96	-6.38	-1.71	-58.21
13 巴陵石竹	3.27	7.32	-18.91	-1.23	-9.55
14 台灣白及	10.53	-17.76	-10.99	-11.40	-29.62
15 清水山石竹	7.33	-6.82	-9.71	-8.81	-18.00
16 竹葉蘭	2.81	19.20	-12.79	-7.40	1.82
17 蛇莓	2.92	11.10	-17.37	-0.89	-4.24
18 石薺葶	-23.44	-49.96	-14.41	-14.66	-102.47
19 向天盞	0.80	-17.02	-19.49	-35.28	-70.98
20 圓葉節節菜	8.19	16.30	-4.58	-10.35	9.56
21 澤芹	5.71	24.79	-2.20	-13.68	14.61
22 田蔥	9.54	17.13	-2.92	-8.05	15.70
23 台灣油點草	6.34	-4.84	-16.17	-15.21	-29.87
24 蓬萊珍珠菜	2.51	-9.07	-14.53	-22.54	-43.63
25 高氏柴胡	4.73	4.78	-10.54	-14.66	-15.69
26 裸土	-23.44	-49.96	-32.66	-35.28	-141.331

註：紅字表示此次測量調查該植物休眠或死亡，故以裸土代替。

## (二)葉綠素螢光：

### 1.台北：

四次調查季度光合量子效率平均值大於0.75者有9種，如：台灣澤蘭、台灣

大戟、馬蘭、仙草...等。



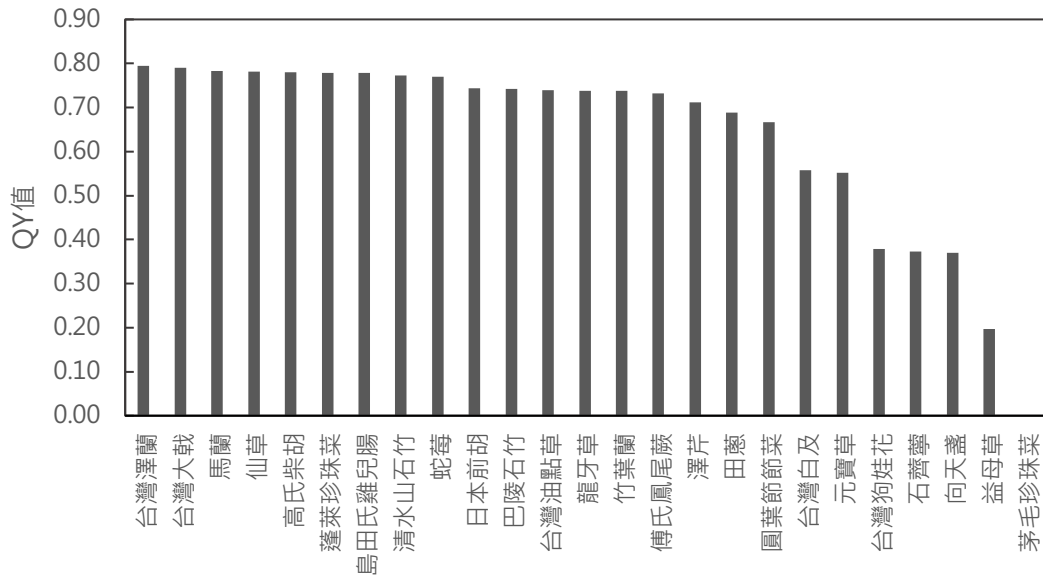


圖 7 台北實驗區物種二季測量 QY 平均值排序圖

表 5 台北實驗區物種四季測量 QY 數值表

編號	物種	台北光合量子效率(QY)				平均
		113/1.2.3 月	113/4.5.6 月	112/7.8.9 月	112/10.11.12 月	
1	仙草	0.76	0.76	0.80	0.80	0.78
2	馬蘭	0.80	0.77	0.79	0.77	0.78
3	益母草	0.00	0.00	0.79	0.00	0.20
4	龍牙草	0.72	0.71	0.80	0.72	0.74
5	台灣大戟	0.76	0.81	0.82	0.77	0.79
6	茅毛珍珠菜	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
7	傅氏鳳尾蕨	0.71	0.74	0.73	0.74	0.73
8	台灣狗娃花	0.00	0.00	0.84	0.68	0.38
9	島田氏雞兒腸	0.77	0.78	0.83	0.73	0.78
10	台灣澤蘭	0.78	0.79	0.81	0.80	0.79
11	日本前胡	0.71	0.70	0.76	0.80	0.74
12	元寶草	0.71	0.00	0.80	0.70	0.55
13	巴陵石竹	0.73	0.72	0.77	0.74	0.74
14	台灣白及	0.66	0.00	0.80	0.76	0.56
15	清水山石竹	0.81	0.77	0.81	0.70	0.77
16	竹葉蘭	0.72	0.71	0.71	0.81	0.74
17	蛇莓	0.78	0.80	0.80	0.70	0.77
18	石薺葶	0.00	0.00	0.80	0.69	0.37
19	向天盞	0.73	0.00	0.75	0.00	0.37
20	圓葉節節菜	0.77	0.78	0.39	0.71	0.67





21 澤芹	0.71	0.71	0.70	0.73	0.71
22 田蔥	0.78	0.73	0.56	0.69	0.69
23 台灣油點草	0.71	0.74	0.76	0.75	0.74
24 蓬萊珍珠菜	0.79	0.76	0.77	0.79	0.78
25 高氏柴胡	0.79	0.78	0.80	0.75	0.78

註：紅字表示此次測量調查該植物休眠或死亡。

## 2.台中：

四次調查季度光合量子效率平均值大於0.75者有9種，如：台灣大戟、台灣澤蘭、島田氏雞兒腸、竹葉蘭...等。

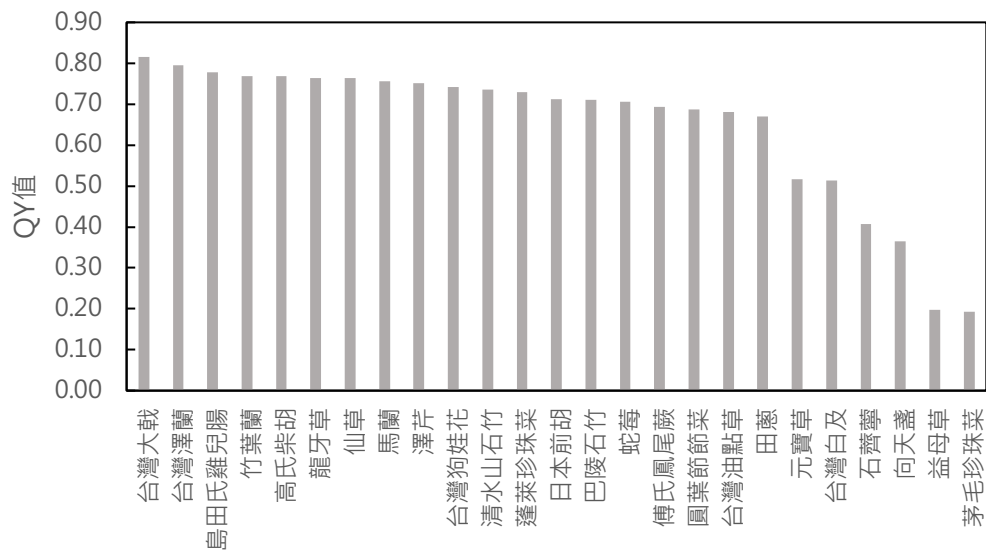


圖 8 台中實驗區物種三季測量 QY 平均值排序圖

表 6 台中實驗區物種四季測量 QY 數值表

編號	物種	台中光合量子效率(QY)				平均
		113/1.2.3 月	113/4.5.6 月	112/7.8.9 月	112/10.11.12 月	
1	仙草	0.77	0.71	0.80	0.77	0.76
2	馬蘭	0.73	0.72	0.79	0.78	0.76
3	益母草	0.00	0.00	0.79	0.00	0.20
4	龍牙草	0.75	0.74	0.80	0.78	0.76
5	台灣大戟	0.79	0.81	0.82	0.83	0.81
6	茅毛珍珠菜	0.00	0.00	0.77	0.00	0.19





7 傅氏鳳尾蕨	0.67	0.69	0.73	0.69	0.69
8 台灣狗娃花	0.66	0.71	0.84	0.76	0.74
9 島田氏雞兒腸	0.78	0.76	0.83	0.74	0.78
10 台灣澤蘭	0.78	0.75	0.81	0.84	0.79
11 日本前胡	0.71	0.70	0.76	0.67	0.71
12 元寶草	0.67	0.00	0.80	0.60	0.52
13 巴陵石竹	0.75	0.74	0.77	0.57	0.71
14 台灣白及	0.67	0.00	0.80	0.59	0.51
15 清水山石竹	0.78	0.75	0.81	0.60	0.74
16 竹葉蘭	0.79	0.80	0.71	0.78	0.77
17 蛇莓	0.80	0.71	0.80	0.52	0.71
18 石薺葶	0.00	0.00	0.80	0.82	0.41
19 向天盞	0.71	0.00	0.75	0.00	0.37
20 圓葉節節菜	0.78	0.79	0.39	0.78	0.69
21 澤芹	0.71	0.76	0.70	0.83	0.75
22 田蔥	0.79	0.69	0.56	0.64	0.67
23 台灣油點草	0.68	0.64	0.76	0.65	0.68
24 蓬萊珍珠菜	0.77	0.71	0.77	0.66	0.73
25 高氏柴胡	0.79	0.82	0.80	0.66	0.77

註：紅字表示此次測量調查該植物休眠或死亡。

### 3.嘉義：

四次調查季度光合量子效率平均值大於0.75者有14種，如：台灣澤蘭、島田氏雞兒腸、台灣大戟、清水山石竹...等。



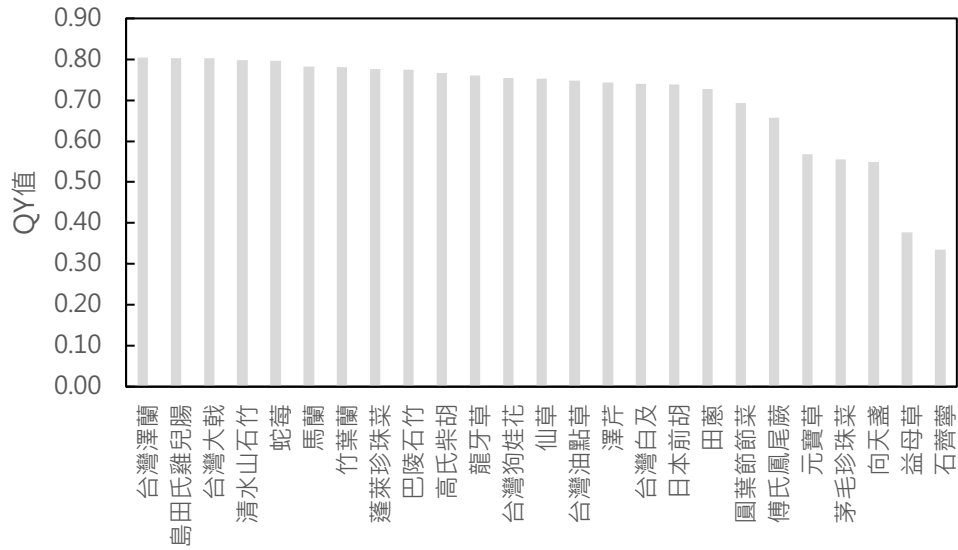


圖 9 嘉義實驗區物種二季測量 QY 平均值排序圖

表 7 嘉義實驗區物種四季測量 QY 數值表

編號	物種	嘉義光合量子效率(QY)				平均
		113/1.2.3 月	113/4.5.6 月	112/7.8.9 月	112/10.11.12 月	
1	仙草	0.74	0.71	0.80	0.76	0.75
2	馬蘭	0.76	0.80	0.79	0.79	0.78
3	益母草	0.72	0.00	0.79	0.00	0.38
4	龍牙草	0.73	0.76	0.80	0.75	0.76
5	台灣大戟	0.77	0.81	0.82	0.80	0.80
6	茅毛珍珠菜	0.75	0.77	0.00	0.71	0.55
7	傅氏鳳尾蕨	0.68	0.65	0.73	0.57	0.66
8	台灣狗娃花	0.67	0.72	0.84	0.79	0.75
9	島田氏雞兒腸	0.78	0.82	0.83	0.78	0.80
10	台灣澤蘭	0.79	0.80	0.81	0.83	0.80
11	日本前胡	0.71	0.72	0.76	0.77	0.74
12	元寶草	0.72	0.00	0.80	0.76	0.57
13	巴陵石竹	0.75	0.78	0.77	0.80	0.77
14	台灣白及	0.67	0.68	0.80	0.81	0.74
15	清水山石竹	0.80	0.78	0.81	0.80	0.80
16	竹葉蘭	0.79	0.82	0.71	0.81	0.78
17	蛇莓	0.80	0.80	0.80	0.79	0.80
18	石薺葶	0.00	0.00	0.80	0.53	0.33
19	向天盞	0.73	0.72	0.75	0.00	0.55
20	圓葉節節菜	0.78	0.80	0.39	0.80	0.69
21	澤芹	0.72	0.74	0.70	0.81	0.74





22 田蔥	0.78	0.79	0.56	0.78	0.73
23 台灣油點草	0.75	0.71	0.76	0.78	0.75
24 蓬萊珍珠菜	0.79	0.73	0.77	0.81	0.78
25 高氏柴胡	0.78	0.73	0.80	0.76	0.77

註：紅字表示此次測量調查該植物休眠或死亡。

## 二、討論：

### (一)影響植物物種碳匯能力之因素：

Bera et al. (2024) 提到森林土壤碳庫之碳量受到許多因素影響，如：氣候條件、地形、土壤、管理策略...等。以整年累計二氧化碳通量來看，台北地區的二氧化碳吸收能力較嘉義和台中地區差。在本研究中台北試驗區周圍被喬木包圍且持續受到上層木擴張後壓迫，相較於台中、嘉義陰暗，可能為導致此結果原因。而物種在不同地區表現也具差異性，如：仙草在嘉義的表現最為優異，在台北則為負值。仙草屬長日照植物，日照不足時生育不良，葉身變薄，但生育後期較喜溫和氣候生長。試驗地區三處平均每日日照時數為嘉義>台中>台北，也可能為導致此結果原因。



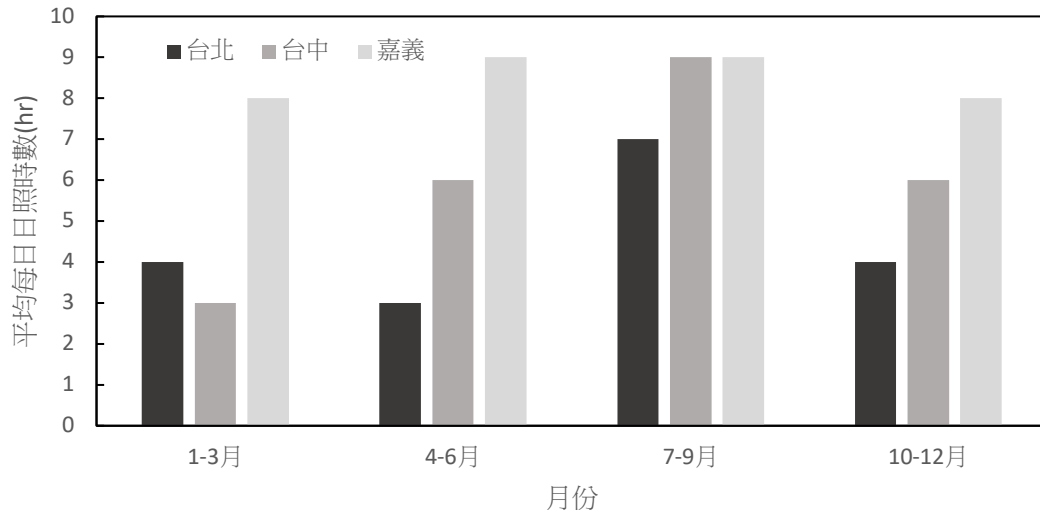


圖 10 台北、台中、嘉義實驗區各調查季度平均每日日照時數

## (二) 台灣台北、台中、嘉義適用於提升碳吸收量之植被：

綜合考量每季之碳通量穩定性與光合量子效率結果，建議未來綠植若以提升碳系收量為目標，北部地區可使用：台灣澤蘭、仙草；中部地區：台灣澤蘭、圓葉節節菜、台灣大戟；嘉義地區：仙草、圓葉節節菜。此外建議可使用分布範圍較廣之物種，如：台灣澤蘭，於台灣高山至平地均有分布，顯示出其具較高之適應性，於試驗結果中雖在部分地區為碳排放結果，但相對較少，且在各季節其通量與量子效率表現均具高度穩定性。此外在碳吸收的目標下應避免使用1-2年生物種，因其在休眠季節，不具碳吸收能力。





## 參考資料

1. Bacenetti, J., D. Lovarelli, D. Tedesco, R. Pretolani, and V. Ferrante. (2018) Environmental impact assessment of alfalfa (*Medicago sativa* L.) hay production. *Sci. T. Env.* 635: 551-558.
2. Bai, Y. and M. F. Cotrufo. (2022) Grassland soil carbon sequestration: Current understanding, challenges, and solutions. *Science*, 377, 6606.
3. Bai, Y., Cotrufo, M.F. 2022. Grassland soil carbon sequestration: Current understanding, challenges, and solutions. *Science* 377: 6606.(Q1)
4. Bera, T., Samui, S., Dey, A., Ankireddypalli, J. (2024). Soil Carbon Sequestration in the Context of Climate Change. In: Pathak, H., Chatterjee, D., Saha, S., Das, B. (eds) *Climate Change Impacts on Soil-Plant-Atmosphere Continuum. Advances in Global Change Research*, vol 78. Springer, Singapore. [https://doi.org/10.1007/978-981-99-7935-6\\_3](https://doi.org/10.1007/978-981-99-7935-6_3)
5. Bretzel, F., Vannucchi, F., Romano, D., Malorgio, F., Benvenuti, S., & Pezzarossa, B. (2016). Wildflowers: From conserving biodiversity to urban greening—A review. *Urban forestry & urban greening*, 20, 428-436.
6. Chen, C. I., Y. N. Wang and J.C. Yu. (2019) Diurnal and seasonal CO<sub>2</sub> assimilation by four plantation species in Taiwan. *Forest science* 65,68–76.
7. Chen, C. I., Y. N. Wang, H. H. Lin, C.W. Wang, J. C. Yu and Y. C. Chen. (2021) Seasonal photosynthesis and carbon assimilation of dynamics in a *Zelkova serrata* (Thunb.) makino plantation. *Forests*, 12, 467.
8. Govaerts, B., Verhulst, N., Castellanos-Navarrete, A., Sayre, K. D., Dixon, J., Dendooven, L. 2009. Conservation Agriculture and Soil Carbon Sequestration: Between Myth and Farmer Reality. *Critical Reviews in Plant Sciences* 28: 97–122.(Q1)
9. Hutchinson, J.J., Campbell, C.A., Desjardins R.L. 2007. Some perspectives on carbon sequestration in agriculture. *Agricultural and Forest Meteorology* 142: 288-302.(Q1)
10. Jassby AD, Platt T. (1976) Mathematical formulation of the relationship between photosynthesis and light for phytoplankton. *Limnol. Oceanogr.* 21(4), 540-547.
11. Li, S. B., P. H. Chen, J. S. Huang, M. L. Hsueh, L.Y. Hsieh, C. L. Lee and H J. Lin. (2018) Factors regulating carbon sinks in mangrove ecosystems. *Glob Change Biol.* 1–16.
12. Lin, H. H., K. H. Lin, J. Y. Jiang, C. W. Wang, C. I. Chen, M.Y. Huang, J. H. Weng. (2021) Comparisons between yellow and green leaves of sweet potato cultivars in





- chlorophyll fluorescence during various temperature regimes under high light intensities. *Scientia Horticulturae* 288, 15, 11033.
13. Migné A, Davoult D, Spilmont N, Menu D, Boucher G, Gattuso JP, Rybarczyk H. (2002) A closed-chamber CO<sub>2</sub>-flux method for estimating intertidal primary production and respiration under emersed conditions. *Mar. Biol.* 140, 865-869.
  14. Norton, B. A., Bending, G. D., Clark, R., Corstanje, R., Dunnett, N., Evans, K. L., ... & Warren, P. H. (2019). Urban meadows as an alternative to short mown grassland: effects of composition and height on biodiversity. *Ecological Applications*, 29(6), e01946.
  15. Petermann, J. S., & Buzhdygan, O. Y. (2021). Grassland biodiversity. *Current Biology*, 31(19), R1195-R1201.
  16. White, T. B., Mukherjee, N., Petrovan, S. O., & Sutherland, W. J. (2023). Identifying opportunities to deliver effective and efficient outcomes from business-biodiversity action. *Environmental Science & Policy*, 140, 221-231.
  17. Yang, Y., Tilman, D., Furey, G., Lehman C. 2019. Soil carbon sequestration accelerated by restoration of grassland biodiversity. *Nat Commun* 10, 718.(Q1)
  18. 有機農業全球資訊網 <https://info.organic.org.tw/>





項次	委員意見	回應
1	無人機所測製之數值高程模型(DEM)在地表植物覆蓋情形下，如何精準得到地面高程。	謝謝委員的意見，無人機搭載之光達有4重回波，光達在空中發射雷射光，其雷射光能量反射後被感測器接收到，因此當雷射光接觸到樹冠層時，部分雷射光能量反射後的第一回波會被光達儀器中的感測器偵測到，其餘雷射能量則繼續穿透到樹冠下層，透過後續的回波，獲取地面的點雲資料。經由這些地面點雲資料，進而生成準確的地面高程數值。
2	釐清林分結構分析模型是否即為蓄積量推估模型。	謝謝委員的意見，利用UAV光達之冠層結構指標及衛星影像之光譜指標，結合28個地面樣區蓄積量資料，完成蓄積量推估模型1式。本計畫使用林分冠層結構指標作為建立蓄積量推估模式之各項備選自變數。
3	請統一研究報告之重量單位(Mg或t)，於請補充標註研究報告相關圖表缺漏之單位(如簡報圖5等)。	謝謝委員意見，圖5缺漏的單位已補充於圖中。
4	建議列表說明森林經營(疏伐)之未來碳吸存效益。	謝謝委員的意見，已修正補充於表1
5	加強本計畫與國內外過去研究之比較與評論，於提出森林經營策略	謝謝委員的意見，已補充於內文結果與討論二、(五)小結章節





	(林分收穫更新伐齡期建議)予林業及自然保育署及相關單位參考。	
6	請補充臺灣杉人工林經營碳匯成效分析結果是否適用文其他人工林，如相思樹、欖木等闊葉樹種。	謝謝委員的意見，已補充於內文結論三
7	請說明相較於傳統地面調查方式，現階段航遙測資訊及技術推估森林碳匯量之模式是否具有應用優勢(包括精確度、成本效益、耗費時間及人力等)?請強化本研究技術連結到淨零碳匯議題之成果效益，提出具體建議，於補充計畫成果是否可應用於自願減量專案?	謝謝委員意見，本計畫蓄積量推估模式的研 究，係找出遙測資料中與地面樣區蓄積量的連結性，以做為日後蓄積量推估模式建立之依據。透過遙測技術建立森林蓄積量推估模式，具有大面積估算森林蓄積的優勢，所耗費時間及人力也較傳統地面測量低，惟目前建立模型，先期仍需要地面樣區的資料，始能進行模型的測試與建構。
8	建議補充碳收支量測方式、頻率、時間點等資訊，以及其是否有代表性。	謝謝委員的意見，已補充於內文結論四

