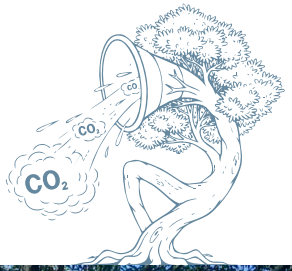
# 森林撫育之碳吸存效益——以臺灣肖楠林為例




文／董麗瑩[1]、黃盟元[2]、王經文[3]、楊智凱[1]、廖禎茹[4]、吳宜穗[4]、陳忠義[1*]
圖／董麗瑩

圖 1　森林具有吸收及固定二氧化碳的功能

[1] 國立屏東科技大學森林系
[2] 國立中興大學生命科學系
[3] 國立臺灣師範大學生命科學專業學院
[4] 臺北市政府工務局大地工程處
[*] 通訊作者（cichen@mail.npust.edu.tw）

## 前言

近年來森林碳儲存能力受到廣泛重視，作為地球上龐大的碳儲存庫（Carbon Pool）之一，森林可儲存全球陸地約 80% 的地上部有機碳和 40% 的地下部有機碳。因此各國都制定不同的政策來增加森林面積，以達到最佳結果。根據聯合國糧食及農業組織 2020 年全球森林資源評估資料顯示，目前世界森林面積達到 40.6 億 ha，覆蓋全球近 1/3 的土地，全球人均森林面積達到約 0.52 ha（FAO. 2020）。林務局（林業及自然保育署）在 2014 年進行的臺灣第四次森林資源調查顯示，全臺森林面積 219 萬 ha，占總土地面積的 60.7%，全臺人均森林面積僅有 0.093 ha，較世界平均的少。在 2021 年聯合國氣候變化大會（COP26）所簽訂的「格拉斯哥氣候協定」也提出多項與減緩氣候變遷有關的策略，不僅期望在 2050 年能實現碳排放淨零，並承諾在 2030 年終結森林濫伐。而臺灣也透過提出更多相關政策緩和溫室效應和減少 $CO_2$，以達到政府所提出「2050 淨零排放」的目標。因此，森林的碳吸存量估算也相形重要。

由於森林生態系統易受到自然和外部干擾，影響林木生長情況，進一步影響其碳儲存量。充裕的可用光源和生長空間不僅能刺激林木生長，也能充分發揮其生長潛力，以達到最佳生長效率，因此森林撫育在人工林經營上扮演著相當重要的角色（圖 1），其生長量不但較天然林迅速，且可經由適當的經營規劃策略而達到經濟、生態與社會等各項目標之發展（陳瑩達等，2011）。根據林務局「國有人工林疏伐作業規範」指出疏伐作業具有多項效益，包括可增加林木之肥大生長及提升形質、增加生物多樣性、留存生長旺盛之林木，光合作用效率高，故能增進 $CO_2$ 之吸存，減低溫室效應。

臺灣肖楠（*Calocedrus macrolepis* var. *formosana* (Florin) W.C.Cheng & L.K.Fu）為臺灣特有種，是臺灣重要的造林樹種，其碳吸存能力值得深入探討，而撫育作業對林木的生長有一定程度的影響，也會進一步影響造林木的碳吸存量。因此，本研究將針對「經森林撫育」與「未經森林撫育」的兩處造林地，以林木光合作用配合葉面積推估法進行調查，探討臺灣肖楠碳吸存量在不同經營管理下之差異。

## 試驗地簡介

本研究試驗地點位於臺北市士林區的大崙頭尾山林地，坡度平緩，面積約 77 ha。區域內包含兩處試驗地，分別為大崙尾山石頭厝——碧溪步道，以及大崙頭山華朋觀景亭，兩處各有一個試驗樣區，大崙尾山為未撫育樣區（圖 2），大崙頭山為撫育樣區（圖 3）。未撫育樣區坡度較平緩，疏伐後受樹冠的遮蔽較少，受光較高，環境濕度較低，為塊狀疏伐造林地；撫育樣區坡度較陡峭且光線不易穿透樹冠，林地受光易受到太陽角度所影響，為帶狀疏伐造林地。撫育樣區會定期進行除草除蔓及修枝，當中需要根據雜草藤蔓於不同季節的生長特性而調整撫育次數。

試驗地栽植之臺灣肖楠為臺灣特有種，屬於臺灣針葉樹一級木，材質優良且富經濟價值，適合生長在臺灣北部與中部，主要分布在海拔 300 ～ 1,900 m，也是臺灣常見的造林樹種之一。由於臺灣肖楠生長迅速且樹型優美，能夠在臺灣廣泛種植，具有高經濟、高生態價值及景觀功能（圖 4）。

本研究於撫育及未撫育樣區林地各劃設 3 個樣區。針對撫育及未撫育兩區之臺灣肖楠量測其光合作用速率，配合氣象資料及林木葉面積推算林木碳吸存。首先在樣區內各挑選 3 ～ 5 株樣木，於 2022 ～ 2023 年間以氣體交換及螢光光合作用分析儀（portable gas exchange fluorescence system, GFS-3000FL, Walz, Germany）量測樣木葉片並建立光合作用

圖 2　未撫育樣區的林下景觀

圖 3　撫育樣區的林下景觀

圖 4　試驗地的臺灣肖楠造林木生長良好

光反應曲線，以計算出各項光合參數，藉以推估臺灣肖楠之碳吸存效益。

碳同化估算方式參考 Sands（1995）、Biswas et al.（2014）、陳忠義（2017）提出的模式進行估算。藉由量測及模式計算後求得葉片平均同化速率，配合日照時間及總葉面積把將尺度上推至全株單日同化量，再換算至各月份二氧化碳同化量。夜間呼吸量以光反應曲線計算的暗呼吸速率估算，利用暗呼吸速率與夜間時間，便可計算出單株單日夜間呼吸量，一樣換算至各月份夜間呼吸量，將林木的同化量扣除呼吸量即可得林木各月份的淨同化量。而單株林木總葉面積以葉面積指數（leaf area index, LAI）配合樹冠幅進行估算，LAI 使用植物冠層分析儀（LAI-2200C, LI-COR, USA）於樹冠層上方及下方量測後（圖 5），以 FV2200 套裝軟體計算樣木之 LAI。

## 林木碳同化能力

由於樹冠大小可以決定林木的生長效益（Barbier et al. 2010），因此可透過葉面積指數的大小瞭解林木的樹冠大小以及整體林木生長狀況。研究結果顯示撫育處理之 LAI 與總葉面積均高於未撫育處理，代表經撫育處理的林木枝葉較茂密，而兩處理之臺灣肖楠總葉面積均隨著時間而增加，也代表林木樹冠持續增長。

（表 1）為各季節日照時間以及兩撫育處理之臺灣肖楠單株二氧化碳同化量，撫育處理之同化量最高為夏季的 1,384.6 g $CO_2$ $month^{-1}$，最低為冬季的 1,047.4 g $CO_2$ $month^{-1}$；未撫育處理之同化量最高為夏季的 308.3 g $CO_2$ $month^{-1}$，

圖 5　臺灣肖楠葉面積指數量測情形

表 1　臺灣肖楠於各季節日照時間及單株二氧化碳同化量

| 季節 | 日照時間（hr） | 二氧化碳同化量（g $CO_2$ $month^{-1}$） | |
|---|---|---|---|
| | | 撫育樣區 | 未撫育樣區 |
| 2022 夏季 | 105.8 ～ 221.4 | 1384.6 | 308.3 |
| 2022 秋季 | 76.9 ～ 131.7 | 1090.7 | 306.6 |
| 2022 冬季 | 73.4 ～ 91.8 | 1047.4 | 250.1 |
| 2023 春季 | 102 ～ 147.1 | 1123.6 | 135.5 |

最低為春季的 135.5 g $CO_2$ $month^{-1}$，呈現出不同季節與有無撫育間的差異。此外，從日照時間可發現月份間差距較大，可能因季節或天候影響使日照時間較不穩定，導致某些月份林木進行光合作用的時間較短，呼吸作用的時間變長而有可能造成林木呈現碳排放的情況，同化量在不同月份上存在明顯差異。整體來說，碳吸存效果以撫育處理較高。而平均單株臺灣肖楠的同化量也是以撫育處理結果較優，比未撫育處理多超過 4 倍。

## 影響林木碳吸存之因子

**（1）光度**

本研究主要以光合作用光反應曲線所計算的參數來進行推估碳吸存，而環境因子對林木光合作用速率的影響，能夠反應在光合曲線的參數上（Laing 1985, Xu et al. 2013）。光度對於林木光合作用有直接且重要的影響，光合作用是林木利用太陽輻射將 $CO_2$ 和水轉化為有機物質的過程，因此光度是影響淨光合作用速率的關鍵因素（Pearcy 1987, Tang et al. 1999, Wu et al. 2016, 洪儷文 & 王亞男 2003）。許多研究也顯示，影響淨光合作用速率的各項環境因子中，以「光度」最為重要。加上，當林木處於不同光度下，會調整自身的生理反應，以維持光合作用的能力，促進其生長（Brouwer et al. 2012）。

**（2）季節**

利用光反應曲線推估之二氧化碳同化量在各季節有不同結果，主要原因為日照時間及光合速率的季節性變化，由於夏季日照時間較長，因此臺灣肖楠整體光合作用同化量提高。在氣候溫和且日照時數較少的季節，林木的太陽輻射會較易受到限制，呼吸作用會比光合作用更明顯，導致林木碳同化效益降低（Petrík et al. 2023）。Heskel & Tang（2018）以美國溫帶森林進行研究，發現光合作用速率會受到季節與溫度影響而變化，也使二氧化碳同化量呈現出差異。

**（3）葉面積指數**

葉面積指數是植被和生態系研究中，常用的林木冠層葉片面積的衡量方法，能夠應用在不同空間尺度上測量與分析，從單一林木或大面積森林均可使用（Asner et al. 2003）。因此，葉面積指數已成為研究冠層結構及植被狀況的重要參數。而葉面積指數是以「樹冠幅大小」為主要影響因素，其結構與功能會受到氣候環境、生物活動等因素所影響，而林木生長狀況也會間接反映在葉面積指數上，屬於林木的表現特徵之一（Arias et al. 2007, Behera et al. 2015）。葉面積指數與林木淨同化速率有正相關，也會影響林木光合作用與呼吸作用的所吸收或排放的二氧化碳量（Bonan 1993, Kimura et al. 1998），而隨著季節變遷，許多樹種的葉面積也會隨之改變，葉面積的改變直接影響葉片的總吸收光量，也對林木的碳同化能力有重大的影響，較大的林木葉面積雖能夠提高光合作用的碳吸存效率，但也增加呼吸作用的碳排放量（Gond et al. 1999, Behera et al. 2015, 林國銓等 1994）。整體來說，由於未撫育樣區之葉面積指數、光合速率均低於撫育樣區，因此碳同化量也較低。

## 森林撫育的效益

本次研究前期採用整理伐進行伐採，「整理伐」作為疏伐的其中一種，屬於森林撫育極為重要的策略之一，其效益一直都是許多研究的目標。根據林務局「國有人工林疏伐作業規範」指出疏伐作業具有多項效益，包括可增加林木之肥大生長及提升形質、增加生物多樣性、留存生長旺盛之林木，光合作用效率高，故能增進 $CO_2$ 之吸存，減低溫室效應，而在林木栽植後的撫育過程也進行除草修枝等工作，減少留存木競爭，促進其生長。

許多研究顯示疏伐會改變林內的微環境，影響林分內的環境參數，如林下光度、土壤溫度等，進而影響林木的生物量與碳吸存能力，而不同的森林撫育策略會改變林分密度及樹冠的差異，對林木碳儲存和增長量具有顯著影響（Kim et al. 2009, 邱志明 2006, 陳瑩達等 2011）。總括而言，森林撫育策略對於林分具有不同程度的影響，但對於林木生長及其碳吸存能力仍然極為重要。森林撫育不僅具有促進林木生長，提高林木碳吸存的能力，也能透過不同撫育方法調整林木碳吸存的效益。因此，適當的森林撫育工作，對林木生長與碳吸存具有正面效果。

## 結語

由研究結果可知，臺灣肖楠具有一定程度的碳吸存潛力，且在有無撫育的經營下有明顯的差異，這與許多研究結果相似，顯示撫育作業能促進林分生長，強化林木的碳吸存效益。臺灣肖楠是臺灣重要的用材樹種，經濟價值很高，也是常見的造林樹種，其碳吸存能力也不應被忽視。藉由此研究結果，有助於未來植林減碳時經營管理的參考。