

碳藏於林

國產林產品的固碳潛力

文、圖／柳婉郁（通訊作者 | 國立中興大學森林學系終身特聘教授）

林佑聰（國立中興大學景觀與遊憩碩士學位學程碩士）

薛宇傑（國立中興大學生物永續科技碩士學位學程碩士）

蔡政達（資拓宏宇國際股份有限公司工程師）

隨著氣候變遷的加劇，全球暖化已成為世界各國共同關注的議題，儘管全球已投入無數資源在氣候治理與研究，但其引發的災難頻率與強度持續攀升。而為應對氣候變遷所帶來的挑戰，至今已超過 140 個國家承諾 2050 年達成淨零排放，並強調需增加自然資本、節約能源並制定更永續的發展目標，來滿足對物質與能源的需求。

全球淨零浪潮下的綠色契機

在這場全球淨零行動中，以森林為本的自然資源至關重要，透過永續的森林經營管理與木材加工技術，使樹木在成長中吸收大氣中二氧化碳並儲存，隨著木材製成建材、家具等林產品（Harvested Wood Product, HWP），既可替代高碳排放的傳統建材與化石燃料，也能在使用過程中繼續封存碳。也就是說，森林與林產品不僅扮演綠色景觀的角色，更是邁向 2050 淨零排放路徑上的關鍵拼圖。

當我們談論廣闊林海時，樹木的每一次光合作用，都在悄然將大氣中的二氧化碳固定於樹幹、枝葉及根系之中，形成大自然的碳庫。而其固碳的效益，並未在伐採後結束。當這些木材被加工為建材、家具或其他林產品時，碳匯仍會封存在木材內。未來，若能以木材取代高碳排的混凝土與鋼材，整體建築生命週期的碳足跡可大幅降低，形成所謂的「替代效益」。因此，森林與林產品碳匯成為臺灣碳移除與減排上的策略核心。

近年來臺灣也愈加重視利用本土木材資源降低碳足跡。回顧臺灣政策，自 1990 年代起以行政命令全面禁止天然林伐採。此舉雖讓森林得以復育、碳匯功能增強，但國內木材需求並未減少，反而導致超過 9 成木材依賴進口，木材自給率長期不足 1%。大量進口雖一方面滿足需求，卻也削弱國內林產業發展的可能性，並因跨洋運輸而增加額外的碳排放。此外，進口木材供應鏈複雜，更難追蹤來源與加工

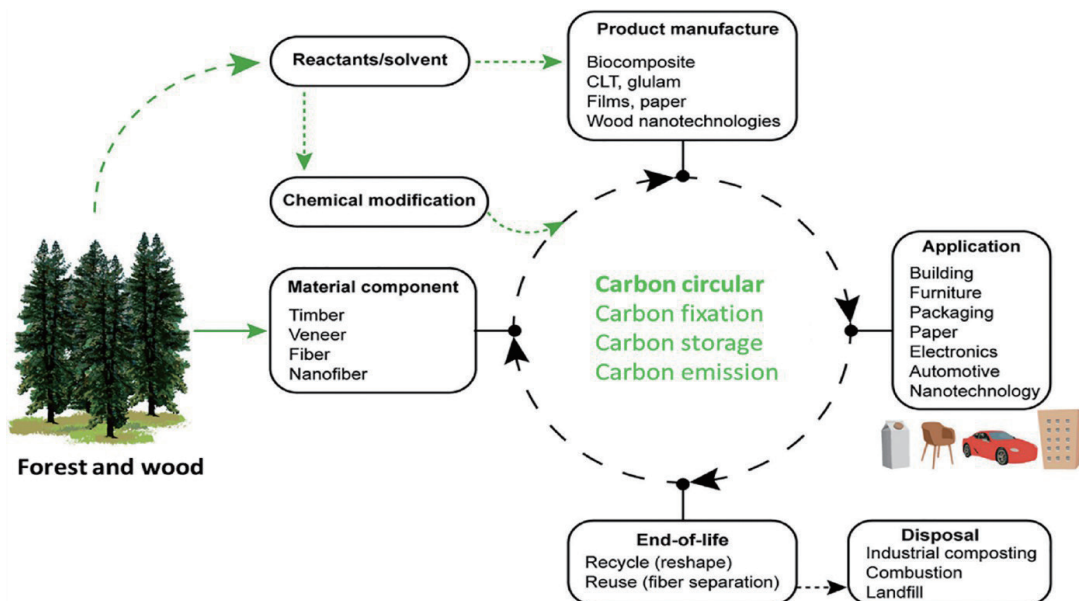
過程中的碳排放。有鑑於此，推廣國產材具有多項優勢，不僅可縮短物流距離、減少運輸碳排放，更可以透過完善的供應鏈管理追溯木材來源、製造能耗與配銷資訊，使碳效益評估更具在地可驗證性。

森林與林產品的碳匯及碳替代效益

自然碳匯 (Carbon Sink) 是指從自然環境中吸收並儲存二氧化碳的載體，常見的碳匯有森林、草原、濕地、海洋生態系統，不同樹種間固碳的潛力也不盡相同。而森林作為世界上最重要的碳匯之一，覆蓋地球表面近 1/3

的面積，透過植物行光合作用，將吸收約 18% 的全球二氧化碳排放量儲存於植物體內或土壤中。

木材作為一種重要且用途廣泛的自然資源，除了能夠擔任延續森林碳封存 (Carbon Sequestration) 的關鍵角色外，也對人類文明與環境來說非常重要，它廣泛應用於建築、家具以及紙張的生產。其中，國際上已有眾多研究表明，將 HWP 用於建築比起紙張的碳平衡的效果更好，因木質建築替代傳統建築能大幅減少溫室氣體排放，且木材使用壽命長，使森林能有更長的時間再生。因此透過 HWP 替代碳密集型材料 (水泥、鋼鐵) 以及替代化石燃料 (煤炭)，不僅可以



■ 森林與林產品的碳循環圖
資料來源：Singh *et al.* (2022)

有效降低碳排放之外，還能提升廢棄林木的使用效率，另一方面也能促進林木產業鏈的經濟效益，進而達成森林永續發展的目的。

隨著全球氣候變遷的風險日趨顯著，減碳不再只是能源結構的問題，也關乎到材料與供應鏈的選擇。森林在成長中固定二氧化碳，形成穩定而可量化的生物碳庫，也稱作森林碳匯，為自然碳匯的其中一環。而當木材砍伐後加工為建築、室內裝修材或課桌椅及其它家具時，過去儲存的生物碳其實並未消失，而是以木產品的形式持續被封存。也就是說樹的一生從種植開始固碳，直至伐採後製成收穫林產品（HWP）後仍可以繼續儲存碳匯。這也讓林產品不但具有儲存碳匯的潛力，也能取代高耗能、高碳足跡的水泥、鋼鐵以及塑膠等原料，使其成為一項重要的永續發展資源。

森林與林產品終其一生的碳循環，從樹木成長過程中開始固碳，砍伐後製成木材製品仍可延續碳匯，而最終產品報廢後的處理方式（例如再利用或生質能轉換）亦對碳釋放造成影響。然而，木製品儲存碳仍屬於暫時性封存，當產品壽命期滿而遭棄置、腐朽或焚燒，先前封存的生物碳終將回歸大氣。具體而言，林產品的碳平衡取決於木材的碳密度、伐木林產品的替代效應與原料採伐、產品的運輸及製造過程中所造成的排放以及新舊木材的使用壽命等，決定它們的碳何時排放至大氣中。

因此在評估林產品碳匯時，需同時考量產品使用階段的儲碳以及最終處置時的碳排放，例如以生命週期評估（LCA）方法分析生物碳延遲排放的影響。相關研究亦指出用木材結構替代混凝土與鋼材建材，每公斤木材中的碳約可避免 1.2 公斤的碳排放，若一棟建築改用木造建築，平均可減少約 60% 的溫室氣體排放，進一步證實以木材取代水泥和鋼鐵等高碳材料的減碳效益。

從材積到碳量 林產品碳匯計算方式

歐洲標準委員會 CEN/TC 175 發布 EN 16449：2014 準則《木材及林產品 - 計算木材的生物基碳含量並轉化為二氧化碳》。該標準的主要目的是評估木材所吸收或固定的二氧化碳量（CEN, 2014）。如公式所示，以木材材積 v_{ω} (m^3) 及其木材含水率 ω 來計算木材的重量，再將碳量乘上二氧化碳對碳的比例 (44/12) 後，可得木製產品中的碳匯量。其中，國際標準化公式中的 $\frac{1}{1+\frac{\omega}{100}}$ 是一個修正項，主要將木材的氣乾密度轉換為絕乾密度，因氣乾密度本身包含水分的重量，因此需要扣除水分對總重量的影響，修正後的密度會變為木材絕乾狀態下的密度（即為絕乾密度），因此計算林產品碳匯可在氣乾狀態與絕乾狀態中，根據其參數進行轉換。

國際生物碳儲存的計量方法是根據BS EN 16449：2014所計算，其計量公式如下：

氣乾狀態	<p>1</p> $CS = \frac{P_{\omega} \times v_{\omega}}{1 + \frac{\omega}{100}} \times cf \times \frac{44}{12}$ <p>該公式可將木材由氣乾狀態變為絕乾狀態</p>	<ul style="list-style-type: none"> CS為HWP中的生物碳儲存量 (kg CO₂e) v_ω為HWP的體積 (m³) ω 為HWP的水分含量 P_ω 為HWP的氣乾密度(kg/ m³) cf 為HWP碳含量係數 <p>木材中含有水分 需先扣除水分! (CEN, 2014)</p>
絕乾狀態	<p>2</p> <p>含水率ω為0，即可簡化為下式</p> $G_i = \sum_i \left[V_i \times D_i \times CF_i \times \frac{44}{12} \right]$	<ul style="list-style-type: none"> G_i為HWP中的生物碳儲存量 (kg CO₂e) V_i為HWP的體積 (m³) D_i為HWP的絕乾密度(kg/ m³) CF_i為HWP碳含量係數 <p>木材中無水分 無需扣除水分! (CEN, 2014)</p>
絕乾狀態	<p>3</p> <p>若已知重量，即可簡化為下式</p> $G_i = \sum_i \left[W_i \times CF_i \times \frac{44}{12} \right]$	<ul style="list-style-type: none"> G_i為HWP中的生物碳儲存量 (kg CO₂e) W_i為HWP的重量(體積×絕乾密度) (m³) CF_i為HWP碳含量係數

林產品的碳匯轉換計量公式

$$CS = \frac{P_{\omega} \times v_{\omega}}{1 + \frac{\omega}{100}} \times cf \times \frac{44}{12}$$

公式中，CS 為木材中的生物碳貯存量 (kg CO₂e)，cf 為木材碳含量百分比 (%)，P_ω 為木材的氣乾密度，v_ω 是木材的體積 (m³)，ω 為木材含水率 (%)。

建構智慧化「林產品碳匯估算系統平臺」

林業及自然保育署（簡稱林業保育署）與國立中興大學研究團隊合作建立「林產品碳匯試算平臺」數位系統。該平臺整合國際通用的碳匯演算法與海運碳排放模型，內建國內外木材參數資料庫，可即時更新擴充，提供友好的操作介面，包括一般民眾、企業以及公家機關皆可使用，滿足不

同使用需求。平臺採用響應式網頁設計 (RWD)，支援電腦與行動裝置瀏覽，並區分「一般試算模式」與「專業試算模式」2種使用介面，滿足不同層次使用者的需求。

該平臺的電腦版與手機版界面中，可見一般使用者可不需登入即可使用試算功能；而專業使用者則須具備木材種類、材積等更詳盡的參數知識，以進行進階計算，未來隨著木材類別與碳匯係數的持續更新，以及國產材憑證機制的導入，該平臺將能更完整地反映各種應用場域的減碳效益。

讓碳匯成為生活的一部分

目前，林業保育署積極推動國產材產業振興，期望在 2040 年將木材自給率提升至 10%，以降低進口依賴並創造國產林產品的綠色價值。然而，



■ 林產品碳匯試算平臺（雙平臺）介面示意圖

現階段木材自給率尚不足 1%，目標與現實之間的落差顯示，單靠產業自身的發展仍難以達成長遠的永續發展目標願景。這也意味著，未來國產林產品的推廣必須結合更廣泛的社會力量，從基礎教育開始，培養民眾對木材應用與碳匯效益的認知，透過學校課程讓下一代理解木構產品、建築與減碳間的具體關聯，同時，企業與公部門亦需透過公共工程、綠色採購與建築規範，率先示範木材在減碳上的應用潛力，逐步改變社會對木造產品

選擇的既有偏好，方能有效提升臺灣的木材自給率及利用率。

而現階段的林產品碳匯試算平臺，雖已初步奠定基礎，但在功能深度與社會普及層面仍有提升空間。未來，系統必須不斷擴充可納入計算的木材類別，並逐步整合國內外最新的碳匯係數與建材資料庫，配合國產材憑證機制的完善與上路，便能有效滿足不同使用者需求，並反映各種應用場域的減碳效益。同時，操作介面的設計也需朝向更友善與高互動性的方向發展，讓一般民眾可直觀理解碳匯計算結果，專業使用者則能進行精細化分析。如此一來，試算平臺才能真正成為連結政策、產業與公眾認知的橋梁，推動木材應用從零星示範走向全民普及。

試想，當我們步入一間教室，成排木製課桌椅不再只是靜默的家具，而是具體且可量化的碳匯儲存產品；在一棟木構建築內，牆體與地板材料的選擇，也不再僅是設計美學的議題，而是牽動城市碳排結構的重要決策。要讓這些潛藏於日常中的減碳與碳替代貢獻被看見，必須依循一致且透明的計算方法，並建構可重複驗證的資料流程。從產品生命週期界定、生物碳含量推估，到配銷運輸的排放量化，每一個環節皆需要在統一的技術框架下運作，如此方能確保國產林產品的固碳與減排效益，真正成為政策與市場決策中可比較、可追溯的科學依據。

一般使用者

- 點選一般使用者試算介面**

- 瞭解林產品科普知識**

- 輸入簡易試算資訊**


4 平臺即可呈現木產品碳匯效益、國產材運輸減碳效益及碳替代效益



專業使用者

- 點選專業使用者試算介面**

- 選定林產品所含之木材材種**

- 詳細輸入材種尺寸、重量、材積及相關運輸參數**


4 呈現木材清單中整體木產品碳匯效益、進口航運碳排放量

序號	木材名稱	尺寸	重量	材積	來源	木材碳匯	進口航運碳排放	木材碳匯淨量
1	大葉欖心木(高葉欖)	1吋	從	0.000	國外	921.885	0.000	921.885
2	大葉欖心木(中葉欖)	1吋	從	0.000	國外	921.885	0.000	921.885

5 各別木材呈現碳匯量、國產材運輸減碳、碳替代效益等資訊



林產品碳匯試算平臺（碳匯計算功能及碳替代效益）試算結果示意圖

未來，透過標準化的碳匯計算方法、數位化的林產品試算平臺與政策工具連結、完善相關配套措施，並配合全民攜手的大力推廣，國產林產品有望在建築減碳、碳市場發展及企業 ESG 實踐中發揮更大作用。森林及林產品的碳匯功能既能減少溫室氣體

排放，又可以延長碳儲存時間，進而成為推動氣候目標的重要籌碼。相信隨著相關制度與技術的持續完善，森林與林產品碳匯應用將成為臺灣邁向 2050 淨零目標的重要基石。♻️

（參考文獻請逕洽作者）