

竹林碳匯估算的基本概念

林裕仁¹

前言

竹子具高韌性木質組織，數千年來是提供人類生活所需用品之重要材料與資源，且竹子於適當生育條件下，生長快速、拓殖力強、更新容易，具極佳之碳吸存效率。根據國際竹與藤組織 (International Network For Bamboo and Rattan, INBAR) 研究報告對竹類生物量多項研究顯示，竹類之平均碳吸存效率優於熱帶森林和北半球溫帶森林，因此，在目前國際間推動淨零政策的趨勢下，竹子因固碳能力比一般林木強，被視為最具碳匯功能潛力的再生材料資源。然如何較精確地計算竹子聚集成林的碳匯量？應採行何種估算方式？筆者謹藉由本文淺述目前國內竹林經營及伐採作業方式，提出適宜估算方式之建議供交流與討論。

為何木竹材具備碳匯功能？

木本植物如林木與竹子，透過其體內葉綠體，利用太陽光能，吸收大氣中二氧化碳進行光合作用，植物體在多年生長的過程中形成木質素、纖維素與半纖維素等有機碳型態，將所吸收的碳長期固定於植物體內，與草本植物的差異就在於，木本植物在生長過程細胞的木質化具備穩定的碳貯存功能，而大部分草本植物生命週期短，植物體無法木質化，生長期過後易枯萎腐朽，生長期間所吸存的碳在短時間內即回歸於大氣中，無法長時間將碳固定於植

物體，故草本植物所固定的碳在碳匯減量專案活動中往往未被採計。

根據聯合國政府間氣候變遷小組IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) 估算林業部門二氧化碳與碳吸存量方法之試算程序中，係將木材材積先藉由木材比重換算出木材生物量，再藉由木材之碳含量 (carbon content) 將木材生物量轉換估算為所吸存之碳量，兩大重要步驟可以 (表1) 公式 (1) 表示。其中，木材種類之比重與碳含量是估算木材碳吸存量之重要係數。

竹稈的生長特性

竹子屬單子葉植物禾本科，不論竹種為何，竹稈佔地上部全株最大比例，呈現中空管柱狀，管柱中由許多隔膜將竹稈分節，竹節與竹節之間形成節間，枝條則往往在竹稈的節上長出，竹葉則附著於枝條擴展生長。竹稈不具如林木般的形成層，故無年輪，竹稈形體通常於發筍後三個月內完成生長，其後不再長高，竹稈的直徑也不再增大。

竹稈的生命週期通常不超過10年，竹稈成熟若不伐採利用，老化的竹稈會在林地自然乾枯腐朽，竹齡4-5年間伐採是竹稈利用的最佳時間，此時竹稈的物理與化學性質成分保持在最佳利用狀態。成熟竹稈經伐採後，竹林地內所遺留的空間，可促進新筍的發生與竹林的更新。因此，竹林如適當經營，伐採愈多成熟竹稈，可促使地下莖萌發愈多新

¹ 林業試驗所林產利用組

* 通訊作者 (yujen@tfri.gov.tw)

筍，竹林愈加健康。

散生竹與叢生竹伐採作業不同

臺灣係地理位置南北橫跨北回歸線之島嶼，加上中央山脈之高山地形，使得臺灣同時擁有分布溫帶之單稈散生型 (monopodial) 與分布熱帶之叢生型 (sympodial) 兩大竹類 (圖1及圖2)，單稈散生竹種如孟宗竹 (*Phyllostachys edulis*)、桂竹 (*P. makinoi*) 屬之，叢生型竹種有綠竹 (*Bambusa oldhamii*)、麻竹 (*Dendrocalamus latiflorus*)、荊竹 (*B. blumeana*)、長枝竹 (*B. dolichoclada*)，為臺灣主要的六大經濟竹種。單稈散生型竹種經營方式易於竹林中採行擇伐作業伐採成熟竹稈，叢生型因成熟竹年齡辨識不易，其經營方式概以叢為單元伐倒叢內全數竹稈，再依據竹稈型態進行分級分類之作業。



圖1 單稈散生之孟宗竹竹林 (林裕仁 攝)

竹稈結構影響碳吸存量的估算方式

竹子地上部竹稈的生物量或淨體積雖然與竹稈的直徑與高度具有相關性，然竹稈與林木幹材的結構不同，竹稈是中空的 (圖3)，不若林木是實心的 (圖4)。另竹林的年生長量係以每年萌發之新竹來估算，和一般林木每年長高及透過形成層增加直徑，並以直徑與樹高計算生長材積式來評估的方式不同。此外，無論是單稈散生竹種採行的擇伐作業，或叢生竹種的類皆伐作業，在林地伐採收穫之計量實務上，均採用竹稈支數或重量並行的方式，作為數量與竹稈價格的衡斷。形質佳或可提供特殊用途的竹稈 (如竹構建築、支撐架等) 直接以支論價；形質較差的稈材作一般加工用途 (如製作竹籤、竹筷、金紙等) 則以重量計價。因此，無論理論或實務層面，以材積方程式為基礎，用於估算一般林木生物



圖2 叢生狀之荊竹林 (林裕仁 攝)



圖3 中空狀無年輪之竹子橫切面 (林裕仁 攝)



圖4 實心且具年輪之一般林木橫切面 (林裕仁 攝)

量、碳儲存量與價值的相關方法，並不適用於竹稈或竹林的推估。

竹林碳吸存量估算方式之建議

基於竹稈中空的特殊結構，且竹林收穫量實務上概以重量作為估算依據，筆者建議竹稈碳吸存量可以生物量（重量）為基礎計算，針對單稈竹及竹林估算方式說明（表1）公式（2）～（4）：

由（表1）公式（2）～（4）可知，單稈竹 CO_2 儲存量估算式是推估竹林碳儲存量的基礎，為利於量測實務，謹依據筆者經驗簡述操作步驟如下：

1. 在竹林選取樣竹（單稈散生竹：各竹齡3-5株；叢生竹：未成熟竹與成熟竹各3-5株）；
2. 於樣竹接近地面之竹稈基部伐倒竹株；
3. 將竹枝與竹葉分離收集、分別秤重；
4. 以竹稈全長區分為上、中、下三段，分別切斷秤取各段重量，再加總為全竹稈重量；
5. 切取上、中、下各段大小適中之竹稈樣本，以封口袋攜回實驗室；
6. 竹樣本裁切適當大小，進行烘乾量測各段平均含水率，藉以推估全稈含水率及絕乾量；
7. 另以元素分析儀量測竹各段及各部之含碳

率，求取平均含碳率；

8. 彙整各項量測所得數據，推估單稈竹之碳儲存量。

由於推算竹林碳儲存量所需之單位面積平均稈數、單位面積平均竹叢數及每叢平均稈數，需於現地以小樣區進行抽樣調查，樣區數量多寡則依測計學學理、竹林面積大小、竹林地形地貌及調查經費等進行事前規劃，不列於本文討論，但樣區代表性及樣區數量會影響推估之準確性。

結論

竹子生長快速、繁殖力強、更新容易，在國際淨零政策趨勢的推動下，竹林吸存碳匯能力優於林木所組成森林2-3倍而受到全球的重視，被視為最具碳匯潛力的再生材料資源。由於竹稈與樹幹結構的不同，過去以材積方程式為基礎推估林木生物量及碳儲存量的相關方法，並不適用於竹稈或竹林地上部的碳匯估算。本文以國內竹林收穫實務與簡易操作性為考量，簡述估算單稈竹地上部吸存二氧化碳的方式，並藉以擴展推估散生與叢生竹林碳吸存量的可行方法，提供易於落實且好操作的竹林碳匯估算方法參考。⊙

表1 植物與竹類碳吸存計算公式

(1) 植物碳吸存計算公式： $C_{\text{plant}} = V_{\text{stem}} \times V_{\text{whole/stem}} \times W_0 / V_g \times C_{\text{con}} \times (CO_2 / C)$ C_{plant}：單株CO₂儲存量 V_{stem}：幹材材積 $V_{\text{whole/stem}}$：全株材積與幹材材積轉換係數，亦稱擴展係數(Expansion Factor, EF) W_0 / V_g：重量與材積轉換係數，即幹材基礎密度(Density, D) C_{con}：碳含量轉換係數(Carbon Fraction, CF(%))，一般以0.5計算 CO_2 / C：二氧化碳與碳轉換係數，CO₂分子量為44，C分子量為12
(2) 單稈竹CO₂儲存量估算式： $C_{\text{bamboo}} = ((W_{\text{o-culm}} \times C_{\text{con-culm}}) + (W_{\text{o-branch}} \times C_{\text{con-branch}}) + (W_{\text{o-leaf}} \times C_{\text{con-leaf}})) \times (CO_2 / C)$ C_{bamboo}：單稈竹CO₂儲存量 $W_{\text{o-culm}}$：竹稈絕乾重 $C_{\text{con-culm}}$：竹稈含碳率 $W_{\text{o-branch}}$：竹枝條絕乾重 $C_{\text{con-branch}}$：竹枝條含碳率 $W_{\text{o-leaf}}$：竹葉絕乾重 $C_{\text{con-leaf}}$：竹葉含碳率 CO_2 / C：二氧化碳與碳轉換係數，CO₂分子量為44，C分子量為12
(3) 單稈散生竹林CO₂儲存量估算式： $C_{\text{monopodial}} = C_{\text{bamboo-monopodial}} \times N_1 \times A$ $C_{\text{monopodial}}$：單稈散生竹林CO₂儲存量(kg/ha) $C_{\text{bamboo-monopodial}}$：散生單稈竹平均CO₂儲存量(kg/culm) N_1：每公頃平均稈支數(culm/ha) A：公頃數(ha)
(4) 叢生竹林CO₂儲存量估算式： $C_{\text{sympodial}} = C_{\text{bamboo-sympodial}} \times N_1 \times N_2 \times A$ $C_{\text{sympodial}}$：叢生竹林CO₂儲存量(kg/ha) $C_{\text{bamboo-sympodial}}$：叢生單稈竹平均CO₂儲存量(kg/culm) N_1：每叢平均稈支數(culm/clump) N_2：每公頃平均叢數(clump/ha) A：公頃數(ha)

(林裕仁 製)