

臺灣重要經濟竹種之碳匯效益

李隆恩^{1*}、林俊成¹、陳巧瑋¹、林鴻志¹

前言

110年4月22日世界地球日，蔡英文總統宣示將「2050淨零轉型」列為臺灣的長期發展目標之一，政府隨後於隔(111)年3月公布「臺灣2050淨零排放路徑及策略總說明」。今(112)年2月，再將「溫室氣體減量及管理法」正式修正為「氣候變遷因應法」，其各項子法及運作規劃也將於未來陸續推行，一連串的政策方向，使得「淨零排放」及「碳權」議題迅速在社會上掀起熱議。竹類由於生長快速的特性，因此被認為具有很高的碳吸存潛力，根據第4次全國森林資源調查的結果，臺灣的竹林面積計18萬3千餘公頃，占總森林面積的8%，如能妥善的運用竹林資源，將能發揮一定的碳匯效益。本文目的即在於探討竹林碳匯的估算方式，並比較臺灣5種重要經濟竹種之碳匯效益，以作為竹產業振興及永續經營之參考。

竹類特殊的碳匯估算方式

竹類為禾本科(Poaceae)竹亞科(Bambusoideae)植物，屬於單子葉被子植物，雖然外觀形態上大多為喬木或灌木，但由於其莖(通稱秆)內維管束不成環狀，無年輪構造且無法逐年生長以增大直徑(外徑)，又因其秆高生長通常在發筍後1至3個月內即已完成，故竹類於高生長完成後，其竹秆外徑與高度均不再有顯著變化，其外徑材積可於當年度生長完成後確立。

然而，竹秆呈中空有節之構造，導致竹類於計算碳貯存量時，難以比照實心的樹木，直接以材積乘上基本比重計算其生物量。因此竹林碳匯的研究，並非採用材積估算，而是直接測定其生物量，再以異速生長模式(allometric model)建立單秆生物量推估模式，並藉由轉換係數估算其碳貯存量(圖1)。過去竹類生物量或碳貯存量的研究中，推估

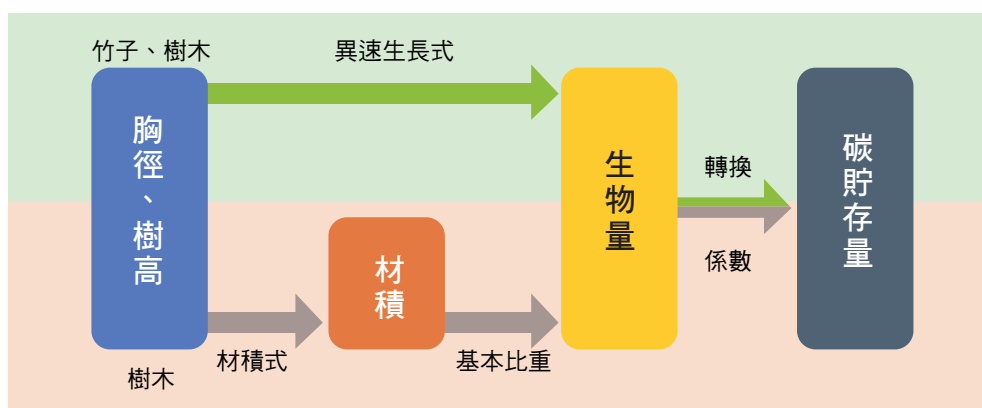


圖1 竹類與其他樹木推估碳貯存量之路徑(陳巧瑋製)

¹ 林業試驗所

* 通訊作者 (taiwania@tfri.gov.tw)

竹類生物量的異速生長模式所使用的解釋變數與樹木相同，均以稈（胸）徑及稈高為主，而竹稈發育的過程，新生竹稈的含水率較高而生物量較低，隨著稈齡的增加，光合作用的部分產物積聚於細胞壁中，增加了竹稈的乾物質(生物量)，是以部分研究亦嘗試加入稈齡變數進行模擬。

雖然部分研究中加入稈高及稈齡變數，有助於提升竹稈生物量的推估精度，但礙於稈高的測定較為不易，誤差也較大，稈齡的辨識同樣也需要較高的技術，因此多數研究仍僅以稈徑進行模式推估。本文整理文獻之竹類地上部生物量與稈徑異速生長模式，其中，桂竹為 $Y = 0.156 \times D^{2.118}$ (Yen et al., 2010)，孟宗竹為 $Y = 0.051 \times D^{2.499}$ (孫百寬等, 2013)，荊竹為 $Y = 0.166 \times D^{2.246}$ (Li et al., 2016)，麻竹為 $Y = 0.542 \times D^{1.533}$ (Yen et al., 2023)。

竹林的經營特性

竹林的生長繁殖係由地下莖萌芽成筍，筍體逐漸發育成稈，竹林每年會萌發新竹，竹稈隨著年齡增加而組成異齡林的結構，雖為單一物種為主的純林，卻有別於一般同時間造林的同齡人工經濟林，逐漸老化的竹稈應適時予以伐採。竹林由於此特殊的發育機制，每個生長年度的竹筍繁殖養分分配受到限制，同一齡級的單稈平均稈徑往往與當年度新生竹密度成反比，亦即當年度所生長的竹稈數越多，則平均稈徑就越小；而整個竹林中，4年生以上的竹稈，其生理活動力逐漸減弱，倘若林分中留存過多老竹，消耗林分的養分且占據生長空間時，幼齡竹也會因養分供應不足而使得稈徑逐漸變小，株數亦隨

之下降，整體竹林即呈現老化而生產力降低之現象(圖2)。

由於老化之竹稈容易脆裂，失去其利用價值，故竹林之撫育方式與一般森林有別，其經營方向應促使各齡級的株數比例均勻，此時竹稈的直徑分布，在各齡級與全齡級中應皆趨向於常態分布，方能維持整體林分的活力，並兼顧竹筍生產與竹材的永續收穫。由前述可知，竹齡的正確判斷(圖3－圖5)與老齡竹的適時伐採，在竹林經營中扮演著相當重要的角色。



圖2 老化的竹林生產力下降，新竹的數量與徑級也會隨之減低(李隆恩 攝)



圖3 新生竹稈上常具有明顯白粉，是許多竹類判斷稈齡的重要依據(李隆恩 攝)



圖4 老齡竹稈上常布滿青苔與黴菌，顏色也會逐漸轉移為黃綠、棕綠色乃至棕色、黑色 (李隆恩 攝)



圖5 竹箨是由葉片特化而來，著生於節環上，具有保護新生竹的功能，竹稈長成之後，竹箨就會逐漸脫落，因此竹箨的宿存與否也是判斷稈齡的一個重要參考 (李隆恩 攝)

臺灣5種重要經濟竹種之碳匯效益

臺灣共有6大經濟竹種，分別為桂竹 (*Phyllostachys makinoi*)、孟宗竹 (*P. edulis*)、麻竹 (*Dendrocalmus latiflorus*)、刺竹 (*Bambusa blumeana*)、綠竹 (*B. oldhamii*) 及長枝竹 (*B. dolichoclada*)。其中前2種為單稈散生型竹種，後4種為合軸叢生型竹種。此二型於林分外觀形態上有很大的差異，單稈散生型以單稈形態散生於林地中，合軸叢生型則竹稈聚集以束狀叢生的方式形成竹叢，以叢為單元散布於林地。長枝竹之研究較為缺乏，故本文僅比較前5種竹種之生物量及碳吸存效益。另竹林永續經營模式的收穫期一般訂為5年，

故參考文獻若未提供年生長量或吸存量資料者，則以林分每公頃生物量除以5，作為年平均生長量，再進行推算碳吸存量。

本文整理各竹種的研究資料如表1，可知桂竹、孟宗竹、麻竹、刺竹及綠竹林分的年平均碳吸存量分別約為6.61、8.01、5.25、5.36及5.53 $\text{Mg ha}^{-1} \text{ year}^{-1}$ ，各竹種多個林分取其平均值，其中綠竹林分無4–5年生老竹，以3年平均計算年碳吸存量。根據表1的參考文獻資料顯示，竹類的每公頃年平均碳吸存量約在2.46–12.22 $\text{Mg ha}^{-1} \text{ year}^{-1}$ 之間，林分間的差異頗大，此係因各文獻的研究目的、不同竹林間經營目標與集約程度不同所導致，然整體而言，散生型竹林的碳吸存量約略較叢生型竹林為高。

表 1 高海拔受脅植物於臺大山地實驗農場開花之情況

竹種	每公頃生物量 (Mg ha ⁻¹)	每公頃年平均碳吸存量 (Mg ha ⁻¹ year ⁻¹)	參考文獻
桂竹	33.6-105.3	3.26-9.96	Wang, 2009 Yen et al., 2010
孟宗竹	38.6-124.3	3.80-12.22	孫百寬等，2013
麻竹	32.4-77.9	2.96-7.54	王義仲，2004 Yen et al., 2023
刺竹	58.5	5.36	Li et al., 2016
綠竹	15.6-54.5	2.46-8.60	陳財輝等，2015

(李隆恩 製)

若與其他人工林相較，依我國國家溫室氣體排放清冊報告所載，人工針葉林、人工針闊葉混淆林及人工闊葉林林型之年生長量換算為地上部年平均每公頃碳吸存量，分別為2.03、3.24及1.60 Mg ha⁻¹ year⁻¹，則竹林的碳吸存量約為人工林的1.6–5倍不等，如能以永續經營及恆續收穫的管理模式，配合有效率的竹材利用方式，竹林將具有非常可觀的碳吸存及碳保存潛力。

由於竹林經營有時也兼具收穫竹筍之目的，因此，經營方式也與其他人工林有很大的差異，經營者為求竹筍產量，有時會採用施肥、逐年擇伐，甚或灌溉等集約經營之方式，這在人工林經營中較為少見。文獻顯示，集約經營之竹林其林分生物量可為粗放經營竹林的2–3倍，竹筍之收穫量亦為粗放經營竹林的1.5–2倍 (孫百寬等，2013；顏添明等，2003)。

隨著臺灣碳費制度明年正式上路，森林碳匯成為產業進行溫室氣體減量的一大誘因，但「溫室氣體減量及管理法」時期的溫

室氣體抵換專案中，與林業有關的方法學僅有「造林與植林碳匯專案活動」，並限定於2000年1月1日以後開始造林的專案活動。由於竹類獨特的生長與經營特性，採伐木質產品 (Harvested wood products, HWP) 所產生的碳保存效益，對於竹林碳匯來說更為重要。因此，研擬合適的竹林碳匯計量與監測方法學，應為現階段自願減量專案發展的重點方向之一。此舉不僅可以增加竹農收益進而提升其經營意願，亦可改善現階段許多竹林荒廢的問題，使得竹林碳匯及其他環境效益得以發揮，也使臺灣竹產業獲得轉型與振興的契機。⊗