

# 台灣長期忽視的生物資源—竹

文、圖 ■ 王 仁 ■ 國立中興大學森林學系研究生

陳財輝 ■ 農委會林業試驗所育林組研究員

劉瓊霖 ■ 國立中興大學森林學系副教授（通訊作者）

## 一、前言

竹類實屬家喻戶曉之植物，以其在台灣之能見度而言，從平地至高山地帶，不論是人類活動的區域或者是原野地區，隨處皆可見，就早期而言，從竹屋、竹筷、竹筏、家庭各類用具、樂器、農漁業用具等等，凡是民生食、衣、住、行、育、樂有關者，莫不以竹為材料，此外，在文化上亦是文人墨客常用的素材，如歲寒三友「松、竹、梅」，及四君子「梅、蘭、竹、菊」等（呂錦明，2001），可見竹類與大眾的生活及文化息息相關。

早期台灣亦生產竹筍外銷日本與美國，且年出口總值達到5,000萬美元（Scurlock *et al.*, 2000）。然而經濟活動之轉型，生活水準與產業結構之提升，導致工資高漲，農村人口銳減，尤其近年受到工資低廉之中國產品的影響，致使台灣竹類相關產業漸行沒落與衰退，而竹林資源亦漸失管理與經營，甚至遭到荒廢而無法有效利用，誠屬資源之浪費（林裕仁等，2003）。

目前面臨二氧化碳所造成之溫室效應加

劇，對生態系統之具體影響已於世界各地受到關注，如農作物產量改變（Chmielewski *et al.*, 2004）、鳥類繁殖期提早（Ball, 1983；Both *et al.*, 2004）且遷徙時間改變（Todhunter, 1995）、極地冰層融化使海平面上升（Michener *et al.*, 1997）森林界線向高海拔移動（Bradley *et al.*, 1999；Gamache and Payette, 2004）、湖泊分層結構改變影響魚類垂直分布（Livingstone, 2003）、生物多樣性下降（Root *et al.*, 2003）等情形。而變更土地利用型及大量燃燒石化燃料，為現今公認之二氧化碳濃度迅速上升之主因（Elliott *et al.*, 1985），林業活動可藉由碳保存（Carbon Conservation）、碳吸存（Carbon Sequestration）（IPCC, 2005）和碳替代（Carbon Substitution）（IPCC, 2007）等三項策略施行，達到大氣中二氧化碳減量，使溫室效應趨緩之目的。竹類生長豐美，繁殖力強，連年發筍（杜大治等，2003），生育期短，更新簡便，可恆續收穫，實屬於極佳之再生資源，理應可彰顯碳吸存與碳替代之



功能，且資源利用過程中亦不會發生如林木利用時砍伐林地所產生環境生態受到嚴重破壞之問題（Ueda, 1960；Uchimura, 1978）。環境保護意識抬頭，再生資源利用逐漸受到重視，因此，如何解決竹材資源利用上之困境，再次提生竹產業之經濟效能與產值，為台灣農村經濟發展政策中之重要課題。本文針對竹類之基本特性與成分、竹林林分之養分循環、淨生產力、碳儲存和碳吸存量做資料之彙整，並論析未來竹產業和碳替代功能之發展，期望能對台灣竹產業永續經營有所助益。

## 二、竹類之基本特性與成分

### （一）竹類之基本特性

#### 1．竹類之分布

竹類大多為大型木質草本植物，目前世界上竹類約75屬1,250種，其中大部分生長力驚人，可實施短伐期之經營策略，但鮮少開花。矮竹可低至10 cm之高度，但較高大之物種可能達到15~20 m，目前生長之最高紀錄為巨竹，高可達40 m，直徑可達30 cm。竹類植物主要分布於熱帶地區，世界上所有大陸，除了歐洲以外，亞熱帶與溫帶地區，在北緯46°至南緯47°之間皆有竹類植物之蹤跡（Liese, 1985；Tewari, 1992）。亞洲佔了約1,000種竹子，其覆蓋面積超過180萬平方公里（相當於美國密蘇里州、德國國土總面積之半之面積），且大多數為原生竹林，較少部分為栽植引進。中國約有300種，44屬，佔33,000 km<sup>2</sup>或3%的國家的森林總面積（Qiu *et al.*, 1992）。另一個主要竹生產國則為印度，

約有130種竹類，涵蓋96,000 km<sup>2</sup>或約13%之森林總面積（Shanmughavel and Francis, 1996）。其它國家有較蓬勃之竹生產和利用，包括孟加拉、印度尼西亞和泰國等（Scurlock *et al.*, 2000）。而日本和台灣則面臨勞動成本過高，竹林資源亦漸失管理與經營，目前大多已荒蕪（邱祈榮等，2009）。

#### 2．竹類之生理特性

各種竹類有不同之生態適應幅度與生理特性，依地下莖生長方式可分為合軸叢生（Pachymorph）和單桿散生（Leptomorph）兩大類型（McClure, 1966；呂錦明，2001），熱帶大都為前者，而溫帶地區則兩者皆有可能（Lipangile, 1987）。儘管有些竹子可適應環境的幅度較大，但大多數的竹子較喜好濕暖的狀態（例如年均溫約15~20℃，年降雨量約1,000~1,500 mm之間等）。

竹類之地下莖約分布於地表下30~50 cm不等，通常在冬末春初，地下莖之芽點則會迅速向上生長，地上部在2至3個月內高生長即完成，往後幾年則會使竹桿增厚、增加乾物質累積（Sturkie *et al.*, 1968）。

竹類之葉面積指數（Leaf Area Index, LAI）在成熟的林分頗高，如孟宗竹（*Phyllostachys pubescens*）8.02和桂竹（*Phyllostachys makino*）11.6（Qiu *et al.*, 1992；Isagi *et al.*, 1993），因而吸收了約95%的太陽輻射（Solar Radiation）（Qiu *et al.*, 1992）。且大都為半落葉（Semi-deciduous）林型態，即植物之老葉脫落時，新葉正啟動其生長機制，如刺竹屬（Sturkie *et al.*, 1968），或如孟宗竹屬

之竹類，為二年1循環之豐欠年交替落葉型態（Liese, 1985；Qiu *et al.*, 1992）。

有少數的竹類植物可連年開花，並不會馬上死亡，如東印度洋安大曼群島（Andaman Islands）上的*Banbusa atra*（Tewari, 1992；Liese, 1985）然而絕大多數的竹類植物如麻竹、孟宗竹和桂竹等，皆會在某一年同時開花，而後大量死亡，其生命週期約30~60年不等，甚至亦有超過60年以上者（林維治，1996），故目前仍鮮少關於竹類開花生理研究相關之報告。

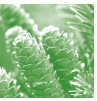
某些學者認為竹類植物可能缺乏C4型光合作用之解剖構造（Jaleh, 1986；Scurlock *et al.*, 2000），所以並沒有辦法如其它同為禾本科植物，如甘蔗、芒草等有高生產力（周昌弘，2007；Kim and Dale, 2004）。亦有學者認為某些竹類可能是C4型光合作用植物（Mulkey, 2004）。但Rowan（1999）等人認為，C3和C4型植物之間並沒有如此明顯之分野，通常兩者間皆存在過渡物種，例如某些物種無明顯分離卡爾文循環（Calvin Cycle）與Hatch - Slack pathway（Slack and Hatch, 1967）兩者反應之腔室，但卻有NADP-ME（Nicotinamide Adenine Dinucleotide Phosphate Malic Enzyme）或NAD - ME（Nicotinamide Adenine Dinucleotide Malic Enzyme）酵素等於Hatch - Slack Pathway中，進行快速促使3碳醣與二氧化碳結合，又因此二反應腔室並無完全分離，導致碳水化合物生成之效率將比完整C4型光合作用植物差，卻又比C3植物佳，故將C3與C4之中間種定義為C3 - C4中間型光合

作用植物。理論上各式各樣之光合型態皆有可能存在於不同種竹類之中，但由於竹類生命週期過長，花與果得來不易，只能以外觀與生長型態分類竹亞科之植物種群，並礙於種群之地緣和人類社會文化間之差益導致其重要性不甚廣泛，研究其光合作用型態對人類社會並無太大之經濟效益，故目前鮮少直接驗證竹類種群光合作用型態之相關報告，只能以其光合作用速率（Gratani *et al.*, 2008）與淨初級生產力（Net Gross Production, NGP）做為間接判斷之依據。

## （二）竹類之成分

美國農業部植物研究站（USDA Plant Introduction Station）以孟宗竹、桂竹和紫竹（*Phyllostachys nigra*）等3種不同竹種之3個不同年齡的樣本做燃料分析，以確定其燃料特性是否相對於其他有潛力的生質能源作物更有使用之價值（Scurlock *et al.*, 2000）。

其結果如表1所示，竹種之年齡和其含水率（Moisture）並無顯著之關係，且所有竹類樣本之灰分（Ash）含量約在1%以下，和竹之年齡亦無顯著相關（表1）。相較於其他生質材料，其灰分含量可媲美現今之木質生質材料，優於許多草本植物，如芒草和甘蔗等，而所有竹類之生物量皆有非常類似之熱值，範圍從19.09~19.57 GJ Mg<sup>-1</sup>（表2），但只略低於大部分木質生質原料，卻高於大多數草本植物（Nordin, 1994）。事實上，竹類樣品的鹼指標（Alkali Index）（定義為每GJ的能量產生多少kg的鹼金屬氧化物）低於一般0.17~0.34kg GJ<sup>-1</sup>之不利燃燒系統的限制（Miles *et*



*al.*, 1996; Baxter *et al.*, 1998), 故為良好之綠色替代燃料 (Green Alternative Fuels)。

竹類植物濕化學分析的結果如表3所示。與美國國家標準和技術研究所 (NIST) 的標準材料蔗渣做比較, 在總木質素 (Lignin)、葡聚糖 (Glucan)、木聚糖 (Xylan)、聚甘露糖 (Mannan)、阿拉伯聚糖 (Arabinan) 和半乳聚糖 (Galactan) 等, 皆無太大之差異, 且

灰分與乙醇萃取物 (Ethanol Extractives) 皆明顯低於蔗渣。而以COSLIF程序 (The Modified Cellulose Solvent and Organic Solvent Based Lignocellulose Fractionation) 處理自然乾燥的孟宗竹後, 其葡聚糖 (Glucan) 的消化率為88.2%, 葡萄糖 (Glucose) 和木糖 (Xylose) 的產率亦高達86.0%和82.6%, 可做為生質酒精之基本原物料 (Sathitsuksanoh *et al.*, 2010), 亦

表1 竹類樣本之燃料分析 (Scurlock *et al.*, 2000)

	<i>Phyllostachys nigra</i>			<i>Phyllostachys makino</i>			<i>Phyllostachys pubescens</i>		
	1 years	2 years	4 years	1 years	2 years	4 years	1 years	2 years	4 years
Proximate analysis (% as received)									
Moisture	8.42	8.79	13.62	22.61	12.92	9.54	8.52	10.66	21.97
Ash	0.86	0.87	0.41	0.66	0.84	0.53	1.14	0.78	0.90
Volatiles	73.94	73.66	72.27	62.93	70.51	75.55	73.18	72.24	64.99
Fixed carbon	16.78	16.68	13.70	13.80	15.73	14.38	17.16	16.32	12.14
Higher heating value (GJ Mg <sup>-1</sup> dry basis)	19.57	19.48	19.27	19.49	19.53	19.09	19.42	19.50	19.51
Alkali index (kg alkali oxide GJ <sup>-1</sup> )	0.21	0.24	0.08	0.20	0.21	0.09	0.30	0.19	0.20
Ultimate analysis (% dry matter)									
C	51.89	51.19	51.39	52.28	51.84	50.85	51.22	51.70	51.07
H	5.21	5.29	5.25	5.09	5.18	5.40	4.90	5.00	4.51
N	0.40	0.29	0.21	0.59	0.60	0.38	0.55	0.30	0.32
S	0.04	0.03	0.03	0.05	0.05	0.04	0.05	0.03	0.05
Cl	0.19	0.14	0.05	0.06	0.06	0.04	0.07	0.03	0.06
Ash	0.94	0.95	0.47	0.85	0.96	0.59	1.25	0.87	1.15
O	41.52	42.12	42.61	42.10	41.33	42.75	41.98	42.11	42.91

表2 竹類與其它生質能源作物燃料特性之比較

Fuel property	Bamboo <sup>1)</sup>	Miscanthus ( <i>Miscanthus x giganteus</i> ) <sup>2)</sup>	Switchgrass ( <i>Panicum virgatum</i> ) <sup>3)</sup>
Gross heating value (dry; GJ Mg <sup>-1</sup> )	19.1~19.6	17.1~19.4	18.3
Moisture content (%)	8.4~22.6	15	15
Ash content (%)	<1.0	1.5-4.5	4.5~5.8

<sup>1)</sup> Reference. (Scurlock *et al.*, 2000)

<sup>2)</sup> Data for miscanthus from (Scurlock, 1999)

<sup>3)</sup> Data for switchgrass from (McLaughlin *et al.*, 1996)

可將竹材焙燒，生產生質煤（biocoal）作為火力發電廠之燃料（Sridhar *et al.*, 2007），顯示竹類確實有作為生質能源原料之潛能。

### 三、竹林碳循環和淨生產力

目前面臨二氧化碳所造成之溫室效應加劇，對生態系統之具體影響已於世界各地受到關注，而林業活動可藉由碳保存、碳吸存和碳替代等三種策略施行，達到大氣中二氧化碳減量，使溫室效應趨緩之目的。

台灣過往已發表諸多篇關於竹類生物量之相關報告指出（高毓斌、張添榮，1989；呂錦明、陳財輝，1992；紀怡嘉，2008；王子定、高毓斌，1980a；王子定、高毓斌，1980b；呂錦明、劉哲政，1982；高毓斌，1985；王仁等，2009）不同竹類，其單位面積生物量皆不相同，差異頗大，最低約50Mg ha<sup>-1</sup>最高至200Mg ha<sup>-1</sup>不等（表4）。惟單純計算竹林地地上部與地下部之生物量和碳保存量對於整體竹林生態系的碳吸存、保存

表3 竹類樣本濕化學分析（Scurlock *et al.*, 2000）

Sample	Ash (%)	Ethanol Extractives (%)	Total lignin (%)	glucan (%)	xylan (%)	mannan (%)	rabinan (%)	galactan (%)
<i>P. pubescens</i>	1.0	2.0	27.7	42.8	24.3	0.4	1.4	1.4
<i>P. makino</i>	0.7	1.5	26.2	43.3	24.6	0.6	1.2	1.3
<i>P. nigra</i>	0.5	1.8	27.1	43.4	23.7	0.6	1.3	1.3
NIST reference material # 8491 (bagasse)	1.8	4.4	23.1	41.7	24.7	0.7	1.6	1.6

表4 台灣不同竹林林分立地生物量

Species	Status			Aboveground biomass (Mg ha <sup>-1</sup> )				Reference
	DBH (cm)	Height (m)	Density (per stem ha <sup>-1</sup> )	Leaf	Branch	Stem	Total	
<i>Deudrocalamus asper</i>	10.08	—	3,380	2.0	5.2	93.8	100.9	高毓斌、張添榮（1989）
<i>Phyllostachys makino</i>	4.0	9.14	10,271	1.2	6.7	19.8	27.6	呂錦明、陳財輝（1992）
	4.4	—	21,175	6.1	11.4	58.3	75.8	紀怡嘉（2008）
<i>Phyllostachys pubescens</i>	9.5	14.3	3,535	3.7	7.6	45.1	56.4	王子定、高毓斌（1980a）
	9	14.6	3,712	3.9	8.3	43.2	55.4	王子定、高毓斌（1980b）
	8.8	14.5	3,816	4.0	8.5	44.2	56.7	王子定、高毓斌（1980b）
	3.7	7.3	19,575	2.8	8.0	35.8	41.6	呂錦明、劉哲政（1982）
	6.2	10.8	11,000	4.1	9.5	58.1	71.7	呂錦明、劉哲政（1982）
	8.3	13.4	6,300	5.4	12.2	61.9	79.5	呂錦明、劉哲政（1982）
	9	14.3	5,000	4.1	7.2	49.9	61.2	呂錦明、劉哲政（1982）
	8.5	—	5,098	3.4	6.5	35.3	45.2	高毓斌（1985）
	6.83	9.9	7,933	3.6	9.7	43.1	57.9	王仁等（2009）
	10.56	18.2	8,344	4.4	12.0	151.7	171.3	王仁等（2009）





和排放，僅能片面的了解，並無法得知確切的情況，故如欲定量竹類林分之碳吸存，應以整個竹林生態系之碳循環之吸存與排放著手探討之（Isagi *et al.*, 1997）。

由圖1和表5可知，孟宗竹林分於適當的生長條件下，其碳吸存的速率為 $5.4 \text{ Mg C ha}^{-1} \text{ year}^{-1}$ ，相較於熱帶森林和北半球溫帶森林平均來的有效率，故可應用於有限面積內有效提升碳吸存量的造林樹種，而台灣地狹人稠，如欲在有限的土地上大量且迅速提升森林中二氧化碳吸收之淨值，則可利用更高效之碳吸存樹種造林，如栽植竹類植物，進而達到在有限的空間裡，強化碳減量之效率。

#### 四、竹林穩坡固砂之功用

根據林信輝等（2007）的試驗結果，認為單桿散生竹類對抗地表沖蝕能力甚佳，且日本傳統上亦將其作為河濱帶防止沖刷的選用植物，即利用密集之地下莖來穩定邊坡土壤（Toko and Takayuki, 2010），因此竹類生長對於穩山固土有其貢獻。倘若竹林未進行適當之撫育經營，恐使林分生產力下降，其原本密集的地下莖與根系分布減緩，進而導致竹林防止崩塌及地滑的能力下降（陳財輝等，2009），因此，單桿散生之竹類可做為良好之河濱防坡固土之材料，但亦需進行適度擇伐逾齡老竹或枯死竹等之林相整理，以改善竹林老化之情況。

表5 不同地區森林之碳吸存量

Region	Carbon sequestration ( $\text{Mg C ha}^{-1} \text{ year}^{-1}$ )	
African tropical forests	0.63	Lewis <i>et al.</i> (2009)
Asia and America tropical forests	0.49	Lewis <i>et al.</i> (2009)
Northern forests	0.50	Myneni <i>et al.</i> (2001)

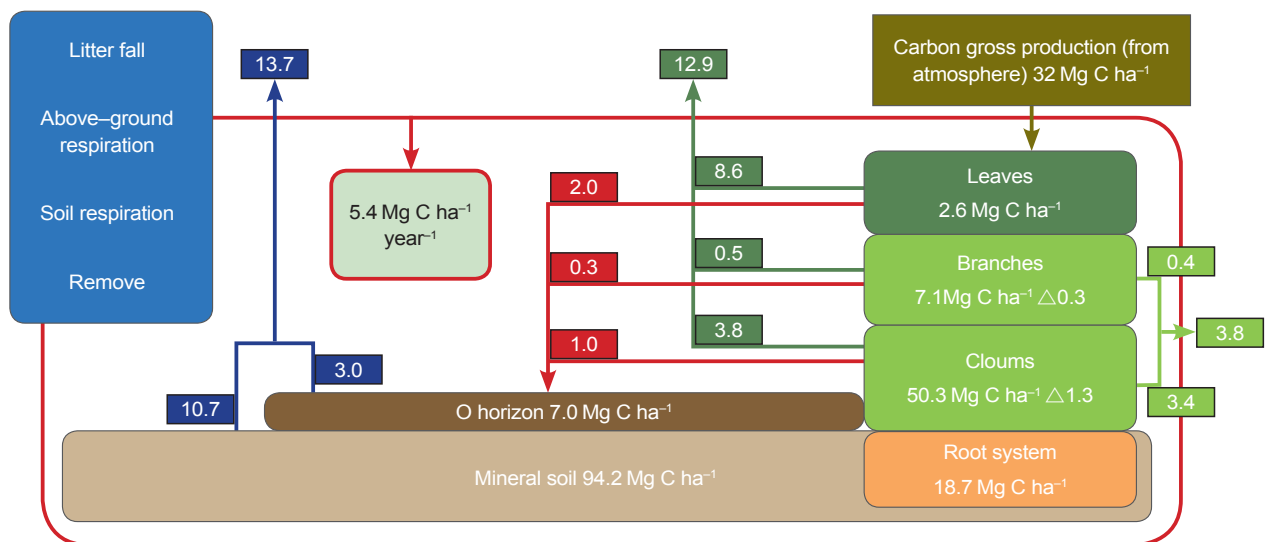


圖1 孟宗竹林分地之碳儲存與循環圖（Isagi *et al.*, 1997）。

## 五、竹產業和碳替代功能之發展

變更土地利用型及大量燃燒石化燃料，為現今公認之二氧化碳濃度迅速上升之主因（Elliott *et al.*, 1985）。根據全球能源總署（International Energy Agency, IEA）2007年發表的統計數字表示，台灣平均每人排放二氧化碳約 $12.08 \text{ Mg year}^{-1}$ （古森本，2008），相當於每人排放 $3.29 \text{ Mg year}^{-1}$ 的碳於大氣之中，倘若欲以植林均衡台灣人排放之量，如以上述孟宗竹林林分之碳吸存量估算，至少需要約1,400萬公頃以上，倘若以整體森林平均碳吸存量（表5）估算，更需約15,000萬公頃，故根本不可能以植林減碳來平衡人類所排放之二氧化碳。如欲抑止全球暖化之現象，就必須完全禁用石化燃料，改採用生質能源等其它策略，否則減緩溫室效應永遠不可能成功。

地球的資源有限，特別是地下蘊藏之各種寶貴的能源物質，但人類無止盡的追求經濟發展，造成各種傳統能源日漸枯竭，終有耗盡的一天。目前全球能源主要來自石油（35%）、煤（23%）、天然氣（21%）、生質能源（10%）與核能（7%）（Schiermeier *et al.*, 2008），其他能源（包含太陽能、風力、



▲ 竹林需適度的進行逾齡老竹與枯立竹之擇伐，以改善劣化的情況。

水力、地熱與潮汐等）大約佔4%。台灣自有能源則更為有限，98%的石油仰賴進口，加上當前國際油價持續高漲，除了節省能源之外，積極尋找符合環保與永續之綠色替代燃料及再生能源（Renewable Energy）益顯急迫。竹類植物經營簡便、灰分低、組成成分與蔗渣相當、單位面積產量高，實為綠色替代燃料及再生能源之理想物種。

從前文敘述可知，竹類植物之低灰分和高生產力，除了適合作為生質能源原料之外，亦可進行高階竹炭產品的研發，如以奈米技術開發之竹炭聚酯絲（林裕仁、黃國雄，2005）、製造澱粉／竹纖維生物可降塑料（Liu, 2010）、殼聚醣／竹碳粉複合薄膜（Nitayaphat *et al.*, 2009）以二氧化碳噴壓法速凝研製台灣杉／竹炭複合水泥板（尹華文等，2004），不但可使竹類產品替代高耗能材料如鋼筋水泥等，行碳替代策略，亦可使台灣竹業結合高科技之工業，再振興農村經濟，推廣成為新興之產業。因屬初期發展階段，此產業政策若只著重在量產，其競爭力將無法與中國大陸之低廉成本及低價位相競爭，應將產品定位在生產具特殊性、高品質、高科技和高價位之用途，以創造市場之競爭優勢（林裕仁等，2003）。而竹炭及竹醋液性質的基礎研究亦需加強，進而強化產品的應用研發，拓展應用領域，開拓更大的市場，為台灣地區竹產業的永續經營奠定良好基礎。▲

參考文獻（請逕洽作者）