

研究報告

應用相對關係式推估桂竹及孟宗竹生物量

孫正華¹ 顏添明²

【摘要】本研究旨在探討不同相對關係式 (allometric equation) 推估桂竹 (*Phyllostachys makinoi* Hook.) 及孟宗竹 (*Phyllostachys makinoi* Hayata.) 地上部之生物量。研究區位於台灣中部地區，取樣數量分別為20株桂竹及25株孟宗竹，以不同徑級為取樣標準，並嘗試以合併兩樣本資料，建立適合模擬兩竹種的相對關係式。本研究採用四種相對關係式模擬之，分別為一般相對關係式、WBE 相對關係式 (I)、WBE 相對關係式 (II) 及 Ruark 相對關係式模擬此二種竹類之生物量，並採用殘差均方根(RMSE)來比較模式間的模擬效果。模擬結果顯示Ruark相對關係式之 RMSE 值最小 (1.41)，而 WBE 相對關係式 (II) RMSE 值最大 (16.70)，此外一般相對關係式、WBE 相對關係式 (I) 及 Ruark 相對關係式之 RMSE 值相近 (1.41-1.85)。此結果意味著理論模式 WBE 相對關係式 (II)，a 與 b 參數值分別為0.10與2.67，並不適於模擬竹木種類之生物量；然而當 b 參數值固定為2.67而 a 參數值求得為0.0378時，RMSE 值則降低至1.85。此結果表示竹類亦能由理論模式 WBE 相對關係式 (I) 模擬，b 參數值為2.67而 a 值則會隨物種及森林情況修正。

【關鍵詞】生物量、桂竹、孟宗竹、相對關係式

Research paperUsing allometric equation to predict bamboo biomass based on combined data of makino bamboo (*Phyllostachys makinoi*) and moso bamboo (*Phyllostachys pubescens*)Cheng-Hua Sun¹ Tian-Ming Yen²

【Abstract】The purpose of this study was to adopt the different allometric models to predict the aboveground biomass of two bamboos of makino bamboo (*Phyllostachys makinoi*) and moso bamboo (*Phyllostachys heterocyclus*). The study site was located in central Taiwan and the 20 and 25 bamboo samples were obtained based on diameter class for makino bamboo and moso bamboo. This study tried to combine the samples of these two bamboo species in order to develop an allometric relationship which can be suitable for these two bamboos. The four allometric equations were adopted to predict these samples,

1. 國立中興大學森林學系博士候選人

Ph.D. Candidate, Department of Forestry, NCHU.

2. 國立中興大學森林學系副教授，通訊作者，40227台中市南區國光路250號。

Associate Professor, Department of Forestry, National Chung Hsing University.

Corresponding Author. No.250, kuo-kung Rd., South Dist., Taichung City, 40227, Taiwan (R.O.C).

namely, the general allometric model, the WBE model (I), the WBE model (II) and the Ruark model. The predicted effects among the four models were compared by the RMSE. We found that the Ruark model had a smallest RMSE (1.41) while the WBE model (II) had a largest RMSE (16.70). Moreover, the general allometric model, WBE model (I) and Ruark model had a near RMSE (1.41-1.85). It was implicated that the theoretical model of WBE model (II) was not suitable for bamboo species, because the parameters a and b of this model were fixed as 0.1 and 2.67. Whereas, only the parameter b was fixed (2.67) and the parameter a was predicted as 0.0378, the RMSE were obviously reduced as 1.85. This result showed that bamboo plants also supported the theoretical model of the WBE model (I) that the parameter b can use 2.67 while the parameter a may vary with species and other forest conditions.

【**Key words**】 biomass; makino bamboo (*Phyllostachys makinoi*); moso bamboo (*Phyllostachys heterocycla*); allometric model.

一、前言

自1997年世界各國於日本京都簽署「京都議定書 (Kyoto Protocol)」後，木本植物及森林對於CO₂吸存的貢獻成爲全球所矚目的焦點，森林生物量 (forest biomass) 的研究也再度引起國際間的重視 (Gifford, 2000; Lamolom and Savidge, 2003; Smith *et al.*, 2006; 顏添明、黃凱洛, 2006; Kindermann *et al.*, 2008; Yen *et al.*, 2009, 2010; Yen and Lee, 2011)。生物量和碳貯存量 (carbon storage) 二者間具有密切的相關性，碳貯存量可透過生物量之碳含量百分比 (percent carbon content, PCC) 或碳濃度 (carbon concentration) 來計算碳貯存量，目前這類研究被廣泛地應用於森林碳貯存量的估算，因此森林生物量爲計算碳貯存量的基礎 (Lamolom and Savidge, 2003; Yen *et al.*, 2009, 2010; Yen and Lee, 2011)。

目前推估林分 (stand) 生物量的方式大都以胸高直徑 (diameter at breast height, DBH) 進行分層取樣，計算不同部位 (葉、枝、幹、地上部及地下部等) 之生物量後，由 DBH 推導不同部位之生物量的關係式，而此關係式常以相對關係式 (或稱異率關係式) (allometric equation) 建立模式並廣泛被應用在森林生物量的推估 (Zianis and Mencuccini, 2004; Zianis, 2008; Yen *et al.*, 2009, 2010; Yen and Lee, 2011)。

桂竹 (*Phyllostachys makinoi*) 與孟宗竹

(*Phyllostachys pubescens*) 是臺灣地區兩大重要的經濟竹種 (呂錦明, 2001; 顏添明, 2003)。這兩種竹類具有多種用途，竹材具經濟價值而竹筍則可供爲食用 (李久先、徐火權, 1983; 呂錦明, 2001; 顏添明, 2003; 顏添明等, 2003a, b)，此外，這兩種竹種具有生長快速、伐期短特性，因此在碳貯存上有很大的貢獻 (Yen *et al.*, 2010; Yen and Lee, 2011)。而這兩種竹木均屬於單稈散生型竹類，具有相同的生長型態 (呂錦明, 2001; Yen *et al.*, 2010; Yen and Lee, 2011)。過去以相對關係式推估桂竹及孟宗竹生物量的研究多是採單一種類爲研究對象 (陳財輝等, 2009; Yen *et al.*, 2010; Yen and Lee, 2011)，然而，這兩種竹種具有許多相似之處，因此本研究嘗試將這兩竹種調查資料合併後發展出一共同之相對關係式，並以不同之相對關係模式探討模擬效果。

二、材料與方法

(一) 研究材料

本研究以桂竹及孟宗竹兩種單稈散生型竹類爲材料，其特性及區域分述如下：(1) 桂竹研究區域位於南投縣竹山地區之竹林，位於 23°45'N, 120°45'E，海拔高度介於 468-507 m 間，平均氣溫 19.2°C，年降雨量 2405 mm，林分密度爲 21,191 culms ha⁻¹，共伐取樣竹 20 株 (Yen *et al.*, 2010)。(2) 孟宗竹研究區域位於

南投縣竹山地區之竹林，位於 23°29'~24°29'N, 120°15'~120°48'E，海拔高度介於 600-1,500 m 間，全年氣溫在11~22°C間，年降雨量 1,900-2,500 mm，林分密度為 7,078 culms ha⁻¹，共伐取樣竹25株 (Yen and Lee, 2011)。所得之45株樣竹已於2007年取樣調查，且不同部位 (葉、枝及桿) 之生物量已於先前的研究測定完成 (Yen *et al.*, 2010; Yen and Lee, 2011)，樣竹細部性狀說明如表1所示。

(二) 研究方法

1. 樣竹基本資料

本研究所採用之樣竹基本資料，包含兩種竹類之 DBH 及地上部生物量，如同上述兩竹類之不同部位(葉、枝及桿)之生物量資料已測定完成，並以 DBH 為自變數，地上部生物量(包含葉、枝及桿)為應變數，本研究先將兩竹類樣本資料進行合併，依據合併之樣本資料建立相對關係式。

2. 相對關係式模式

本研究所採用之相對關係式模式有兩大類，包括2參數及3參數之相對關係式。其

中2參數者稱之為一般相對關係式 (General allometric model) 為 $Y = a \times X^b$ (Y 為應變數；X 為自變數，a、b 為參數)，是最被廣泛應用於推估相對關係的模式 (Baskerville, 1965; Cannell, 1984; Ter-Mikaelian and Korzukhin, 1997)，本研究除採用此2參數的一般相對關係式進行模擬外，由於該模式在應用過程中，曾有學者將模式參數一般化 (generalized)，其中較著名者如 West *et al.*(1999) 將此模式一般化後，推導出 b 參數約為2.67(8/3)，以下稱為 WBE 理論模式 (I) [WBE model (I)]；另外，Chambers *et al.*(2001) 提出以0.10作為 a 參數的理論值，因此本研究將採用 a=0.10 且 b=2.67 的一般相對關係式，稱之為WBE理論模式(II) [WBE model (II)] (Zianis, 2008)，本研究在2參數模式的推估上，即採用一般相對關係式、WBE model (I)及WBE model (II)進行模擬。

此外，Ruark *et al.*(1987) 曾提出3參數的相對關係模式(Ruark model)，茲將該關係模式與上述模式型態詳列如表2所示。

3. 模擬效果比較

表1. 桂竹與孟宗竹樣本不同部位之生物量(Yen *et al.*, 2010; Yen and Lee, 2011)

Table1. The different section biomass of the samples for makino and moso bamboos.

竹種	BDH (cm)	樣本數	葉 (kg)	枝條 (kg)	桿 (kg)	地上部(kg)
桂竹	2.30-6.20	20	0.27 ± 0.21 ^a	0.56 ± 0.38	2.69 ± 1.52	3.53 ± 2.04
孟宗竹	6.10-10.50	25	0.44 ± 0.30	1.44 ± 0.58	9.89 ± 4.64	11.77 ± 5.45

^a Mean ± standard deviation.

表2. 本研究所應用之不同相對關係式

Table 2. The different allometric equations in this study.

模 式	模式型態	引用資料來源
General allometric model	$Y = a \times DBH^b$	Baskerville (1965), Cannell (1984), Ter-Mikaelian and Korzukhin (1997)
WBE model (I)	$Y = a \times DBH^{2.67}$	West <i>et al.</i> (1999)
WBE model (II)	$Y = 0.10 \times DBH^{2.67}$	Enquist <i>et al.</i> (1998; 1999), Chambers <i>et al.</i> (2001)
Ruark model	$Y = a \times DBH^b \exp^{c \times DBH}$	Ruark <i>et al.</i> (1987)

註：Y為生物量；DBH 為胸高直徑；a、b、c 為模式參數

本研究採用上述模式推估相對關係，計算殘差平方根 (the root mean squared error, RMSE) 比較不同模式的模擬效果，並繪圖說明觀測值與理論值間的關係以探討模擬效果。

三、結果與討論

本研究以相對關係式推估兩竹種之生物量，其結果如表3所示。

比較四種模式間 RMSE 值的差異可知，WBE 理論模式 (II) 的 RMSE 值為16.70大於其他模式，表示該模式並不適用於竹類 (表3)。此外，一般相對關係式、WBE理論模式

(I) 及 Ruark 相對關係式之 RMSE 值相近，其中 Ruark 相對關係式之 RMSE 值最小，顯示此模式模擬效果最佳。另一方面，本研究中的 WBE 理論模式 (I) 與 WBE 理論模式 (II) 的表現明顯不同，WBE 理論模式 (II) 的 a 值與 b 值皆為固定值，表現出較大的 RMSE 值，因為該模式參數值固定而沒有彈性，反之，WBE 理論模式 (I) 只固定 b 值，其 RMS 值相較之下有明顯的降低。

茲將四種不同的模式 (表3) 推估桂竹與孟宗竹生物量，其中觀測值與模式曲線間的關係如圖1所示。

表3. 以DBH推估桂竹與孟宗竹生物量之相對關係模式參數

Table 3. The parameters of allometric models for predicting biomass of makino bamboo and moso bamboo with DBH including a, b, c and the root mean squared error (RMSE).

模 式	模式參數			RMSE ^a
	a	b	c	
General allometric model	0.0941	2.26	—	1.76
WBE model (I) ^b	0.0378	2.67	—	1.85
WBE model (II) ^c	0.1000	2.67	—	16.70
Ruark model	1.8063	-0.77	0.41	1.41

註：^a RMSE 為殘差平方根

^b WBE 理論模式 (I)，b 值為 2.67。

^c WBE 理論模式 (II)，a 質與 b 值分別為 0.10 與 2.67。

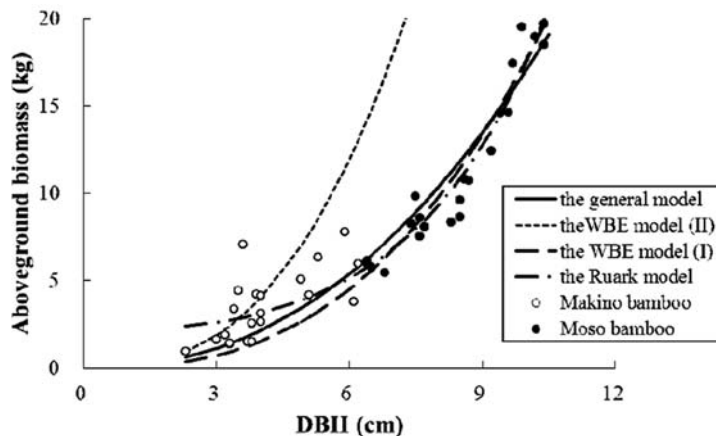


圖1. 不同模式推估桂竹與孟宗竹生物量與 DBH 之關係

Fig. 1. Relationships between biomass of makino bamboo and moso bamboo and DBH of moso bamboo and the different allometric models were used to predict the biomass.

圖1可明顯瞭解觀測值與不同模式分布的關係，其中 WBE 理論模式 (II) 明顯高估樣本的生物量，尤其在 DBH 大於 6cm 以上更為明顯，然而，若a 值不固定，則WBE理論模式 (I) 可有效推估竹木生物量。

另一方面，為了解個別竹木的模擬效果，分別計算四種模式模擬個別樣本生物量的 RMSE 值如表4所示。

由表4可知，不同模式模擬桂竹之 RMSE

值的範圍在 1.44 與 2.56 之間，其中 WBE 理論模式 (II) 之 RMSE 值最高；孟宗竹部分亦明顯是 WBE 理論模式 (II) 之 RMSE 值最高，顯示該模式之推估誤差最大，將此結果對照圖1可知，WBE 理論模式 (II) 明顯高估孟宗竹之生物量。

此外，為進一步比較模擬結果，本研究以觀測值減去理論值，計算不同模式之殘差分布 (residual distributions) 如圖2所示。

表4. 不同模式模擬桂竹與孟宗竹之殘差平方根

Table 4. The root mean squared error (RMSE) for makino bamboo and moso bamboo in the different allometric models.

模 式	竹 種		
	桂竹	孟宗竹	兩竹種合併
General allometric model	1.49	2.20	1.76
WBE model (I)	1.66	2.17	1.85
WBE model (II)	2.56	103.24	16.70
Ruark model	1.44	2.23	1.41

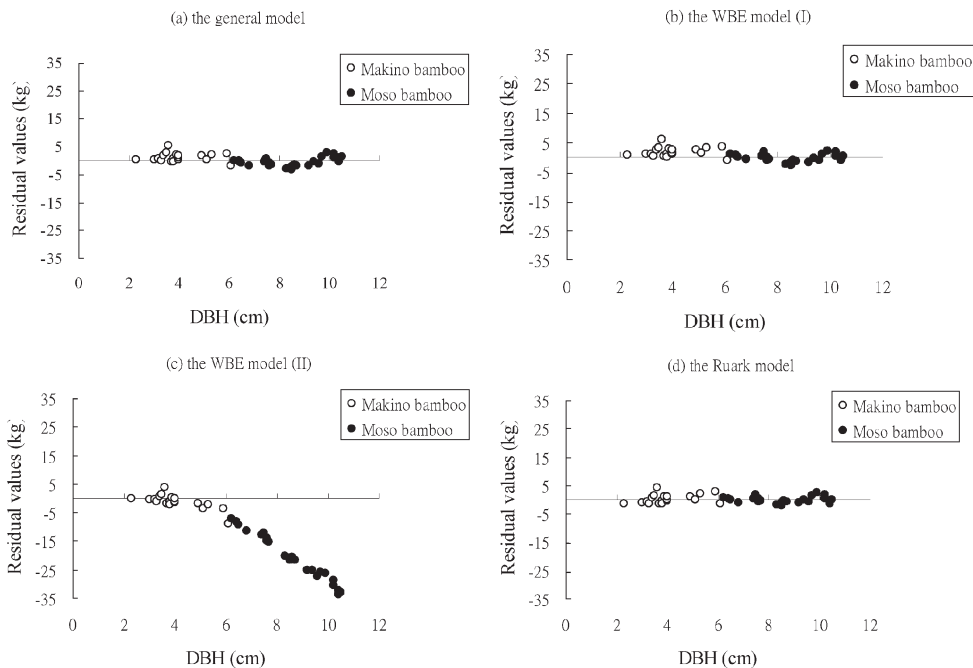


圖2. 不同模式之殘差分布

Fig. 2. The residual distributions for the different models.

由圖2可知，一般相對關係式、WBE 理論模式 (I) 與 Ruark 相對關係式之殘差分布型態相近，而 WBE 理論模式 (II) 則與其他三種模式有顯著差異。比較以 WBE 理論模式 (II) 模擬桂竹與孟宗竹之殘差分布可知，WBE 理論模式 (II) 模擬孟宗竹之殘差較大，且明顯隨 DBH 增加有增大的趨勢。整體而言，WBE 理論模式 (II) 不適合用於推估竹類生物量，尤其是孟宗竹。

四、討論

近年來，由於林木在碳循環中扮演了決定性的角色，因此森林與竹林生物量的評估逐漸成為重要的研究議題 (Gifford, 2000; Lamolom and Savidge, 2003; Smith et al., 2006; 顏添明、黃凱洛, 2006; Kindermann et al., 2008; Yen et al., 2009, 2010; Yen and Lee, 2011)。

長期以來，透過測量林木 DBH 的相對關係，藉以推估生物量與碳貯存量是重要且被廣泛使用的方法 (Niklas, 1994; Kaitaniemi, 2004; Zianis and Mencuccini, 2004; Zianis, 2008)，藉由相對關係式可將 DBH 和生物量的關係數量化，以推估林分的生物量，而相對關係式的型態隨公式結構與參數的數目不同在推估效果會有所差異 (Ruark et al., 1987; Zianis and Mencuccini, 2004; Yen et al., 2009)。一般而言， $Y=aX^b$ 是簡單且最常被應用的相對關係式，過去有大量的研究在不同樹種、森林及立地條件下，使用該模式來推估森林生物量 (Niklas, 1994; Kaitaniemi, 2004; Zianis and Mencuccini, 2004; Zianis, 2008; Yen et al., 2009; 2010; Yen and Lee, 2011)，更有許多研究嘗試在不同物種間尋求一個通用法則以簡化相對關係的推估或進行參數分析以尋求其共通性，如 West et al. (1999)、Enquist et al. (1998; 1999) 及 Chambers et al. (2001) 等人的研究，對大面積的森林生物量推估而言，這類研究有其重要性。

本研究在探討桂竹與孟宗竹生物量與

DBH 間的相對關係，先前的研究已分別推導出兩竹類的一般相對關係式，其 a 與 b 參數在桂竹為 0.16 與 2.12，在孟宗竹為 0.02 與 2.95 (Yen et al., 2010; Yen and Lee, 2011)，且結果顯示該模式模擬效果良好 (具有高 R^2 及低 RMSE 值)，表示各個建立的模式適用於個別竹種。毫無疑問一般相對關係式可成功推估個別樹種，包括林木及竹類 (e.g., Niklas, 1994; Kaitaniemi, 2004; Zianis and Mencuccini, 2004; Zianis, 2008, Yen et al., 2010; Yen and Lee, 2011)。本研究試著合併桂竹及孟宗竹資料以建立竹類系統的相對關係，並且測試採用不同模式推估竹類的適合度。

本研究比較四種模式，一般相對關係式最適用於資料 (表3及圖1) 其 a 與 b 參數可合理的解釋觀測值，研究發現 b 參數固定為 2.67 的 WBE 理論模式 (I) 亦能適用於推估兩竹類，此結果和 Chambers et al. (2001)、Ketterings et al. (2001)、Zianis and Mencuccini (2004) 及 Pilli et al. (2006) 等人對林木的研究結果相同，顯示 WBE 理論模式 (I) 不僅適用於林木亦適用於竹類。相反地，兩參數固定為 $a=0.10$ 與 $b=2.67$ 的 WBE 理論模式 (II)，用於竹類推估時有較大的限制。此外，三參數的 Ruark 相對關係式比其他模式具有較好的模擬效果，可預期參數的增加能提升推估能力。

有許多研究以 DBH 與生物量的相對關係，推估不同樹種、林分與立地條件的林木生物量 (Baskerville, 1965; Cannell, 1984; Ter-Mikaelian and Korzukhin, 1997; West et al., 1999; Enquist et al., 1998, 1999; Chambers et al., 2001; Kaitaniemi, 2001; Zianis and Mencuccini, 2004; Zianis, 2008; Yen et al., 2009, 2010; Yen and Lee, 2011)。更有部份的研究試著推導通用法則以適用於不同物種，像是應用某些參數 (West et al., 1999; Chambers et al., 2001; Zianis, 2008)。本研究以該理論測試竹類相對關係式的適合性，發現 b 參數固定為 2.67 的相對關係模式適用於竹類，而 a 與 b 參數皆固定的 WBE 理論

模式 (II) 則不適用於推估竹類觀測值，未來也將調查並分析更多竹木種類來驗證相對關係式的適用性。

五、結論

本研究以不同模式模擬孟宗竹及桂竹之 DBH 和生物量，經分析結果顯示3參數之 Ruark 模式有著較佳的模擬效果。此外，本研究採用之理論模式 WBE 理論模式 (I) 及 WBE 理論模式 (II) 分析兩種竹類，發現後者並不適用，主要是將兩參數固定後模式受到很大的限制，而前者仍可適用於竹類。然而，由於本研究只採用兩種竹類進行研究，在研究材料上較受到限制，未來應多加入不同的種類進行分析，以尋求竹類在模式上所表現之共同特性。

六、引用文獻

- 呂錦明 (2001) 竹林之培育及經營管理。行政院農委會林業試驗所。林業叢刊第135號，204頁。
- 李久先、徐火權 (1983) 竹山地區桂竹林經營之成本分析 (I)。中華林學季刊16(4): 403-410。
- 陳財輝、鍾欣芸、汪大雄、林信輝 (2009) 石門水庫集水區桂竹林之生長及生物量。中華林學季刊 42(4): 519-527。
- 顏添明 (2003) 三種生長模式應用於孟宗竹稈高生長之探討。中華林學季刊36(3): 285-296。
- 顏添明、胡曉琅、李久先 (2003a) 竹山地區孟宗竹林竹材之經濟分析。林業研究季刊 25(1): 25-36。
- 顏添明、胡曉琅、李久先 (2003b) 竹山地區孟宗竹竹筍經營之探討。林業研究季刊 25(2): 43-54。
- 顏添明、黃凱洛(2006)杉木地上部碳儲存量之推估。台灣林業科學21(2): 273-280。
- Baskerville, G. L. (1965) Estimation of dry weight

of tree components and total standing crop in conifer stands. *Ecology* 46: 867-869.

- Cannell, M. G. R. (1984) Woody biomass of forest stands. *Forest Ecology and Management* 8: 299-312.
- Chambers, J.Q., J. Santos., R.J. Ribeiro, and N. Higuchi. (2001) Tree damage, allometric relationships, and above-ground net primary production in central Amazon forest. *Forest Ecology and Management* 152: 73-84.
- Enquist, B. J., G. B. West, E. L. Charnov, and J. H. Brown. (1999) Allometric scaling of production and life-history variation in vascular plants. *Nature* 401: 907-911.
- Enquist, B. J., J. H. Brown., and G. B. West. (1998) Allometric scaling of plant energetics and population density. *Nature* 395: 163-165.
- Gifford, R. M. (2000) Carbon contents of above-ground tissues of forest and woodland trees. National Carbon Accounting System Technical Report no. 22. Australian Greenhouse Office, Canberra, 17 pp.
- Kaitaniemi, P. (2004) Testing allometric scaling laws. *Journal of Theoretical Biology* 228: 149-153.
- Ketterings, Q.M., R. Coe, M. van Noordwijk, Y. Ambagau, and C.A. Palm. (2001) Reducing uncertainty in the use of allometric biomass equations for predicting aboveground tree biomass in mixed secondary forests. *Forest Ecology and Management* 146: 199-209.
- Kindermann, G.F., I. McCallum, S. Fritz and M. Obersteiner. (2008) A global forest growing stock, biomass and carbon map based on FAO statistics. *Silva Fennica* 42(3): 387-396.
- Lamolom, S. H. and R. A. Savidge. (2003) A reassessment of carbon in wood: within and between 41 North American species. *Biomass and Bioenergy* 25: 381-388.

- Niklas, K. J. (1994) Plant Allometry. The Scaling of Form and Process. The University of Chicago Press, Chicago.
- Pilli, P., T. Anfodillo., and M. Carrer. (2006) Towards a functional and simplified allometry for estimating forest biomass. *Forest Ecology and Management* 237: 583-593.
- Ruark, G. A., G. L. Martin., and J. G. Bockheim. (1987) Comparison of constant and variable allometric ratios for estimating *Populus tremuloides* biomass. *Forest Science* 33: 294-300.
- Smith, J. E., L. S. Heath, K. E. Skog and R. A. Birdsey. (2006) Methods for calculating forest ecosystem and harvested carbon with standard estimates for forest types of the United States. General Technical Report NE-343. USDA Forest Service, Washington, DC, p. 222.
- Ter-Mikaelian, M. T. and M. D. Korzukhin. (1997) Biomass equations for sixty-five North American tree species. *Forest Ecology and Management* 97: 1-24.
- West, G. B., J. H. Brown, and B. J. Enquist. (1999) A general model for the structure and allometry of plant vascular systems. *Nature* 400: 664-667.
- Yen, T. M. and J. S. Lee (2011) Comparing aboveground carbon sequestration between moso bamboo (*Phyllostachys heterocycla*) and China fir (*Cunninghamia lanceolata*) forests based on the allometric model. *Forest Ecology and Management* 261: 995-1002.
- Yen, T. M., L. M. Ai., C. L. Li., J. S. Lee., and K. L. Huang. (2009) Aboveground carbon contents and storage of three major Taiwanese conifer species. *Taiwan Journal of Forest Science* 24(2): 91-102.
- Yen, T. M., Y. J. Ji., J. S. Lee. (2010) Estimating biomass production and carbon storage for a fast-growing makino bamboo (*Phyllostachys makinoi*) plant based on the diameter distribution model. *Forest Ecology and Management* 260: 339-344.
- Zianis, D. (2008) Predicting mean aboveground forest biomass and its associated variance. *Forest Ecology and Management* 256: 1400-1407.
- Zianis, D. and M. Mencuccini. (2004) On simplifying allometric analyses of forest biomass. *Forest Ecology and Management* 187: 311-332.