

研究報告

新化林場大葉桃花心木人工林直徑分布量化 及碳吸存能力評估

顏添明^{1*} 林政融² 謝傳凱³

【摘要】本研究的目的在於量化大葉桃花心木人工林之林分直徑分布及評估碳貯存量，研究區域位於臺灣南部的新化林場，隸屬於國立中興大學，該林分於1975年開始栽植，為監測林分的發展，本研究於2019年開始設置3個永久樣區，並於2019及2020年進行兩次調查，調查時林分的林齡分別為44及45年生。本研究採用胸高直徑建立樹高曲線式用以預測單木樹高，並應用Weibull機率密度函數量化林分直徑分布，所得之Weibull函數 a 、 b 和 c 參數值分別為12.5、20.69和1.81，經Kolmogorov-Smirnov適合度測驗結果顯示Weibull函數可有效模擬林分之直徑分布。林分於45年生時之材積量及碳貯存量分別為 $436.9 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ 和 235.6 Mg ha^{-1} 。此外，在二次調查期間不論材積或碳貯存量皆呈現連年生長量大於平均生長量，亦即此林分在材積生長和碳貯存能力仍具有很大的潛力，本研究所得之結果可提供大葉桃花心木人工林經營之重要資訊。

【關鍵詞】樹高曲線式、Weibull機率密度函數、人工林經營。

Research Paper

Quantifying diameter distribution and assessing carbon storage capacity of a mahogany (*Swietenia macrophylla*) plantation in Hsinhua Forest Station

Tian-Ming Yen^{1*} Zheng-Rong Lin² Fu-Kai Hsieh³

【Abstract】The purpose of this study was to quantify diameter distribution and to assess carbon storage capacity of a mahogany (*Swietenia macrophylla*) plantation established in 1975. The plantation is located at the Hsinhua Forest Station of National Chung Hsing University, south Taiwan. To monitor stand development, 3 permanent plots were installed in 2019 and surveyed in 2019 and 2020 when the stand ages were 44 and 45 years old, respectively. The tree height equation was built based on diameter at breast height

1. 國立中興大學森林學系。

Department of Forestry, National Chung Hsing University.

* 通訊作者，40227臺中市南區興大路145號。

Corresponding author. 145 Xingda Rd., South Dist., Taichung City 40227, Taiwan.

Email: tmyen@dragon.nchu.edu.tw

for predicting individual tree height. The Weibull probability density function was employed to quantify diameter distribution and the parameters a , b and c were predicted to be 12.5, 20.69 and 1.81, respectively. The result showed that the Weibull function was suitable for quantifying diameter distribution by the Kolmogorov-Smirnov test. Moreover, volume and carbon storage at 45 years old were estimated to be 436.9 $\text{m}^3 \text{ha}^{-1}$ and 235.6 Mg ha^{-1} , respectively. We also found that the current annual increment was higher than the mean annual increment in volume and carbon storage during the two survey periods, indicated that this stand still had potential in the increment of volume and carbon storage. Our findings provide important information for mahogany plantation management.

【Key words】 tree height equation; Weibull probability density function; plantation management.

一、前言

人工林 (plantation) 一般係以森林經營目的為導向所建造的森林，在於滿足民眾需求及謀求人類最大福祉，以提供不同面向的生態服務 (ecological service)，諸如涵養水源、環境保全、供給木材及副產物等多元化產物、提供人類休閒遊憩的場所、提供野生動物重要棲息環境等多元功能 (Davis et al. 2001; 顏添明 2013; 陳朝圳&陳建璋 2015)。臺灣早期人工林的建造大部分為天然林伐採後，在原伐木區域採用相同之經濟樹種或適合該區域之經濟樹種進行造林，因此著重林木經濟性生產概念 (顏添明 2013)。此外，也有些人工林的建造是為了國土保安及其他經濟生產以外的目的，如眾所周知的保安林及景觀林。然而不論人工林為何種經營目的，森林所能發揮之效能和森林的特性之間有密不可分的關聯性，尤其是森林的結構和蓄積量，不但可作為森林特性的重要指標，可用以評估傳統的經濟效益，也可進而評估公益性效能，如森林蓄積量可轉換為碳貯存量，以瞭解森林對於全球暖化 (global warming) 的具體貢獻 (Yen et al. 2009, 2020; Yen & Wang 2013; Chuang & Yen 2017; 林國銓等 2009; 陳忠義等 2012; 洪千祐&顏添明 2015; 莊采蓁等 2019)。

林分結構 (stand structure) 為森林區域 (一般常以林分為單位) 內，樹種組成及林木大小

之分布狀態 (Husch et al. 1982)。由於林木的胸高直徑 (diameter at breast height, DBH) 為林木重要性狀值之一，和材積及生物量間具有密切的相關性，因此DBH分布 (以下簡稱直徑分布 diameter distribution) 可用以表示林木大小的直徑分布狀態，尤其在樹種組成單一的純林中，林分直徑分布常用來表示林分結構 (Bailey & Dell 1973; Yen et al. 2010; Huang et al. 2015)。量化直徑分布可瞭解不同直徑級的分布狀態及不同直徑級之材積蓄積量，以提供森林經營的具體資訊，Weibull機率密度函數為廣泛應用於量化林分直徑分布的良好模式，具有模擬曲線富彈性、參數可解釋曲線的幾何特性、累計分布函數易於求得等優點，因此不論應用於天然林、人工林或竹林，皆有良好的量化效果，可有效解釋不同林型之直徑分布 (Bailey & Dell 1973; Yen et al. 2010; Huang et al. 2015; 李久先&陳朝圳 1991; 李久先&顏添明 1992; 顏添明 1999a, 1999b; 李隆恩&顏添明 2010; 孫百寬&顏添明 2017)。

本研究以大葉桃花心木 (*Swietenia macrophylla*) 人工林為研究對象，位於臺南市新化區之新化林場，隸屬於國立中興大學實驗林管理處之四大林場之一，本試驗林場有大面積之大葉桃花心木純林及混交林，該樹種在臺灣南部地區生長良好，不但具生長快速的特性，其木材在利用上也很廣泛，因此有很高的

經濟價值。大葉桃花心木也是目前政府推行平地造林之重要樹種，由於過去不泛此樹種在生長收穫的相關研究 (馮豐隆&黃志成 1993；鍾智昕等 2013；陳忠義等 2015)，且由於該樹種生長快速，因此具有碳吸存潛力 (Tsai et al. 2012; 莊秉潔 2010；林金樹等 2012；蔡正一等 2012)。本研究主要以大葉桃花心木人工同齡純林為研究對象，目的在於 (1) 建立本區域之樹高曲線式；(2) 以Weibull機率密度函數模擬林分之直徑分布及；(3) 分析林分之蓄積量及碳貯存量。

二、材料與方法

(一) 研究區域

本研究之試驗區域位於臺灣南部新化林場 (東經120° 21' 10.53"至120° 23' 03.09"，北緯23° 00' 05.91" 至23° 01' 46.15")，隸屬於國立中興大學實驗林管理處所轄之四大實驗林場之一，行政區界屬於臺南市新化區礁坑里，林場之總面積為505.05 ha，而屬新化林場所轄之國有林地面積佔373.92 ha (本林場有部份屬私有林地)，林場共劃分為10個林班。本林場雖為實驗林，但在森林功能劃分上屬於保安林，主要涵養臺南市虎頭埤水庫之水源 (馮豐隆等 1997；中興大學實驗林管理處 2020)，本研究之試驗地位於第1林班，為1975年進行林相改良所栽植之大葉桃花心木人工林。

(二) 研究方法

本研究於2019年1月14日至20日於第1林班之大葉桃花心木人工林設置3個面積0.05 ha (20 m×25 m) 之永久樣區並設有8 m緩衝帶，並進行每木調查，包括DBH及樹高等基本資料，並於隔年 (2020年1月12日至18日) 進行再次調查。

1. 建立樹高曲線式

本研究採用第一次調查所得之數據，全部大葉桃花心木計94株，用以建立本區域大葉桃花心木之樹高曲線式，採用DBH為自變數，樹高為因變數，模式的選取係參考自Husch et al.

(1982)、Clutter et al. (1983)、李久先&陳朝圳 (1988)、顏添明等 (2004)、Yen et al. (2008)，詳如表2所示。模式模擬之良窳，本研究採用殘差均方根 (root mean squared error, RMSE) 為指標，用以表示觀測值 (observed values) 和理論值 (predicted values) 之差異量，RMSE的計算方式如 (1) 式所示 (Draper & Smith 1981)：

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Y_i - \hat{Y}_i)^2}{n-p}} \dots\dots\dots (1)$$

(1) 式中，RMSE為殘差均方根， n 為樣本數， Y_i 為觀測值， \hat{Y}_i 為理論值， p 為模式參數個數

RMSE值越小，表示觀測值與理論值的差異量小，亦即模式的配適效果較佳。本研究將選擇RMSE值最小者為代表，進行本研究區域後續樹高之推估。

2. 以Weibull機率密度函數模擬林分之直徑分布

為量化本研究區域之直徑分布，本次研究採用三參數之 Weibull 機率密度函數模擬林分之直徑分布，由於各樣區之株數不多，因此將3個樣區的株數整合進行模擬，有關Weibull機率密度函數及其累積分布的型態如 (2)、(3) 式所示 (Bailey & Dell 1973)：

$$f(x) = \frac{c}{b} \left[\frac{(x-a)}{b} \right]^{c-1} \exp \left\{ - \left[\frac{(x-a)}{b} \right]^c \right\} \dots (2)$$

$$F(x) = 1 - \exp \left\{ - \left[\frac{(x-a)}{b} \right]^c \right\} \dots\dots\dots (3)$$

(2)、(3)式中， x 為林木之胸高直徑， a 、 b 、 c 為模式參數

本研究採用最小平方方法 (least-squares estimation, LSE) 求解Weibull函數參數，LSE求解方法中，需先行求解 a 參數，本研究 a 參數的求解採用最小直徑法，即採用林分調查所得之最小DBH值作為 a 參數值。參數求解，主要參考自Cao (2004)、Lei (2008)、Huang et al. (2015)。於參數求解後，模擬效果的評估採用

Kolmogorov-Smirnov (K-S) 適合度測驗檢測其適合度 (Sokal & Rohlf 2012)。由於二次調查的時間相近，林分直徑分布的差異不大，本研究採用第二次調查的資料進行模擬。

3. 林分蓄積量、生長量、碳貯存量及碳吸存量之推估

本研究林分蓄積量的推估係以單株林木材積合計進行計算，單株林木材積則是以林木之 DBH 及樹高為基礎，即由 DBH 及樹高配合材積式推估材積。林木之材積式採用林務局第三次全國森林資源調查所採用貴重闊葉樹種材積式，其公式如 (4) 式所示 (林務局 1995)。

$$V=0.000035555 \times H \times DBH^2 \dots\dots\dots(4)$$

(4) 式中， V 為林木材積 (m^3)， H 為樹高 (m)， DBH 為胸高直徑 (cm)

本研究有兩次調查資料，第一次調查資料具有每木調查之 DBH 和樹高，而第二次調查僅具 DBH，為讓林木的樹高在兩次調查期間的趨勢呈一致性，本研究二次調查皆採用 DBH 為基礎，以所建立之樹高曲線式進行樹高推估，再將 DBH 及樹高配合 (4) 式推估材積。

林分碳貯存量之推估係以材積量法為基礎，一般以材積量法推估林分碳貯存量必需考量幾個要素，(1) 森林面積、(2) 森林材積、(3) 將材積量轉換為樹幹或地上部 (葉、枝、幹) 生物量之擴展係數 (biomass conversion and

expansion factors, BCEFs)、(4) 地下部生物量與地上部生物量之比值、(5) 林木碳含量百分比 (percent carbon content, PCC) 或碳含量轉換係數。有關此計算式可以 (6) 式表示 (高裕閔 & 王兆桓 2014)。

$$CS=A \times V \times BCEFs \times (I+R) \times PCC \dots\dots\dots(5)$$

(5) 式中， CS 為森林碳貯存量 (Mg)， A 為森林面積 (ha)， V 為林木樹幹材積 ($m^3 ha^{-1}$)， $BCEFs$ 為樹幹材積轉換為地上部生物量之擴展係數， R 為森林地下部生物量與地上部生物量比值， PCC 為林木碳含量百分比 (%)

本研究之資料來自樣區面積之推估，因此以每 ha 表示，林木樹幹材積則是依材積式計算單株合計， $BCEFs$ 參考行政院環境保護署 (2019) 之闊葉樹建議值 0.92，該值的意義為：(樹幹絕乾重量/樹幹體積) × (地上部生物量與樹幹生物量之比值)，森林地下部生物量與地上部生物量比值亦參考行政院環境保護署 (2019) 之闊葉樹建議值 0.24， PCC 為 47.26% (林裕仁等 2002)。

本研究分別計算兩次調查期間之蓄積量及碳貯量，期間之生長量為兩次調查蓄積量之差 (第二次調查減第一次調查)；期間碳吸存量为兩次調查碳貯量之差 (第二次調查減第一次調查)。

表1. 本研究區域大葉桃花心木人工林兩次調查之林分性狀值。

Table 1. The stand characteristics of two repeated survey data for the *Swietenia macrophylla* plantation of this study area.

調查時間	性狀值1)	樣本數	平均值±標準差	最小值	最大值
2019年1月	N (trees ha ⁻¹)	3	653.3±205.3	480	880
	BA (m ² ha ⁻¹)	3	52.7±11.2	45.9	65.7
	H (m)	3	15.7±1.4	14.4	17.2
2020年1月	N (trees ha ⁻¹)	3	653.3±205.3	480	880
	BA (m ² ha ⁻¹)	3	54.9±11.0	46.6	67.3

1) N為林分株數，BA為胸高斷面積，H為樹高。

三、結果與討論

(一) 林分性狀值

有關本研究區域兩次調查期間之林分性狀值，如表1所示。

本區域之大葉桃花心木為1975年所栽植之大葉桃花心木，第1次調查時間為2019年，林分為44年生，調查對象為DBH大於10 cm以上的林木，株數為 $653.3 \pm 205.3 \text{ trees ha}^{-1}$ ，胸高斷面積為 $52.7 \pm 11.2 \text{ m}^2 \text{ ha}^{-1}$ ，林木平均樹高為 $15.7 \pm 1.4 \text{ m}$ 。本次調查的資料也發現，除於樣區1有黑板樹 (*Alstonia scholaris*) 1株 (DBH 17.6 cm)、樣區2有龍眼樹 (*Dimocarpus longan*) 1株 (DBH 20.8 cm) 及樣區3有龍眼樹2株 (DBH 22.8 及 25.0 cm) 外，其餘林木皆為大葉桃花心木，由此可知此林分在樹種的均質性很高，為大葉桃花心木純林。第2次調查時間為2020年，林分為45年生，株數和第1次調查完全相同，並未發生枯死林木，胸高斷面積較前次調查增加，為 $54.9 \pm 11.0 \text{ m}^2 \text{ ha}^{-1}$ ，樹高在此次並未調查，因此後續將以第1次調查所得之資料，建立樹高曲線式，進行林木樹高之推估。

(二) 樹高曲線式

本研究第1次調查3個樣區立木之DBH和樹

高分布，如圖1所示。由圖1可知，3個樣區內立木之DBH和樹高的關係趨勢相近，因此後續的研究中將合併此3個樣區的資料為觀測值，建立樹高曲線式。

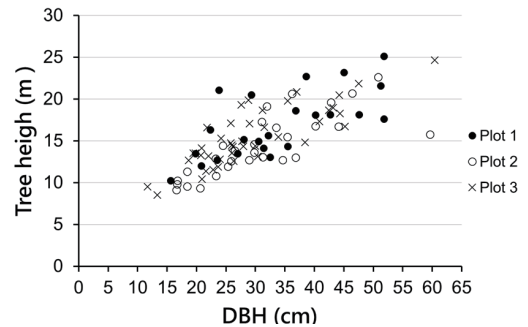


圖1. 本研究3個樣區內之立木胸高直徑和樹高之關係。

Figure 1. The relationship between diameter at breast height and tree height of standing trees within the 3 plots of this study area.

本研究以7種樹高曲線式推估林木DBH和樹高的關係，所得結果如表2所示。由表2可知，7種樹高曲線式模擬結果所得之RMSE值很

表2. 本研究區域大葉桃花心木樹高曲線式之推估結果。

Table 2. The tree height equations for prediction of *Swietenia macrophylla* in this study area.

編號	模式 ¹⁾	Parameter a	Parameter b	RMSE (m)
1	$H = a + b \times \log DBH$	-13.453	19.743	2.387
2	$H = a \times DBH^b$	2.391	0.549	2.397
3	$H = 1.3 + a \times DBH^b$	1.855	0.597	2.400
4	$H = \left(\frac{DBH}{a+b \times DBH} \right)^2$	2.124	0.181	2.390
5	$H = 1.3 + \left(\frac{DBH}{a+b \times DBH} \right)^2$	2.434	0.181	2.387
6	$H = 1.3 + a \times DBH + b \times DBH^2$	0.636	-0.005	2.391
7	$H = e^{a+b \times \log DBH}$	0.872	1.263	2.397

¹⁾ H為樹高，DBH為胸高直徑，a、b為模式參數

接近，範圍自2.387至2.400 m，此值小表示理論值和觀測值的差異量小，即模式的模擬效果較佳。整體而言，7種樹高曲線式模擬所得之效果差異不大，其中又以模式1及5的RMSE值最小。

為瞭解理論值和觀測值之差異，茲將觀測值和不同模式的關係繪製成圖2所示。由圖2可知，林木之樣本數為94株，其DBH分布之值域分布為11.7-60.4 cm，7種樹高曲線式在此值域的分布範圍內軌跡相近，不同模式在曲線的兩端微有差異，在7種模式中，以模式1及5的RMSE值最小，皆為2.387 m，唯模式1在林木DBH < 4.8 cm時，樹高會呈現負值，為此模式的缺點，因此後續的研究將採用模式5進行模擬。

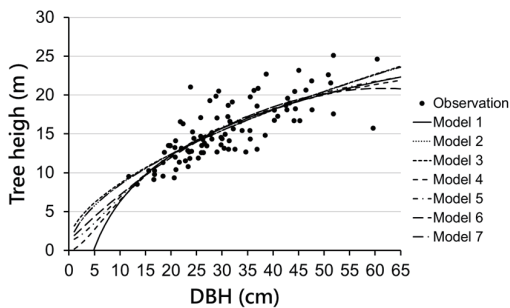


圖2. 大葉桃花心木樣木之觀測值和7種樹高曲線式之關係 (n=94)，模式編號請參考表1。

Figure 2. The relationship between observation and 7 tree height curves for the *Swietenia macrophylla* (n=94) and the number of model please refer to Table 1.

(三) Weibull機率密度函數模擬林分之直徑分布

本研究以Weibull函數採用LSE法模擬大葉桃花心木之直徑分布，所得模式之 a 、 b 、 c 參數值分別為12.5、20.69、1.81，將觀測值之累積分布和Weibull函數之累積分布 ((3)式) 進行K-S檢定，所得之 D_n 值為0.0403，而K-S檢定 $\alpha=0.05$ 的臨界值為 $D_{.05}=0.0878$ ， $D_n < D_{.05}$ 表示觀測值之分布符合Weibull分布，亦即Weibull

函數可有效描述大葉桃花心木之直徑分布。茲將觀測值之分布與模擬所得之Weibull分布繪製成圖，所得之結果如圖3所示。

Weibull函數之 a 參數表示林分中可能存在最小DBH之林木，本研究在此參數的設定直接採用調查資料中之最小林木DBH (12.5 cm) 為 a 參數值； b 參數為影響分布範圍，本研究模擬所得之 b 參數為20.69； c 參數為影響分布曲線之型態，本研究模擬所得之 c 參數為1.81，當該參數值的值域為 $1 < c < 3.6$ 時，屬於正偏歪分布 (positively skewed distributions) (Bailey & Dell 1973; Huang et al. 2015)，然而 b 、 c 參數會彼此交互影響，有時較難以採用單一參數進行解釋，應綜合進行考量。

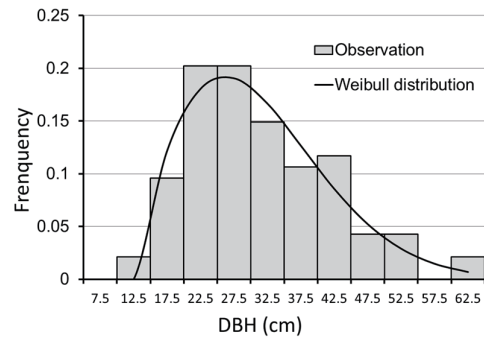


圖3. 大葉桃花心木人工林之觀測值和Weibull分布。

Figure 3. The relationship between observation and Weibull distribution for the *Swietenia macrophylla* plantation.

(四) 林分蓄積及碳貯存量

本研究林分材積量係以單株林木材積合計進行推估，根據兩次調查之DBH，配合表2之模式5推估樹高，再以公式 (5) 計算材積。根據以上方法計算所得之林分材積，配合公式 (6) 計算林分之碳貯存量，有關二次調查所得之林分材積量及碳貯存量如表3所示。

由表3可知，林分44年生之材積量為425.7 $\text{m}^3 \text{ha}^{-1}$ ，碳貯存量為229.5 Mg ha^{-1} ；45年生之材積量為436.9 $\text{m}^3 \text{ha}^{-1}$ ，碳貯存量為235.6 Mg

表3. 大葉桃花心木人工林兩次調查之全林分材積量及碳貯存量。

Table 3. The volume and carbon storage of whole stand between two survey periods for the *Swietenia macrophylla* plantation.

調查次數	項目	樣本數	平均值±標準差	最小值	最大值
第1次調查	材積量(m ³ ha ⁻¹)	3	425.7±70.3	376.8	506.3
	碳貯存量(Mg ha ⁻¹)	3	229.5±37.9	203.2	273.0
第2次調查	材積量(m ³ ha ⁻¹)	3	436.9±73.9	404.7	521.5
	碳貯存量(Mg ha ⁻¹)	3	235.6±39.6	207.3	281.2

ha⁻¹。茲以二次調查期間樣區材積和碳貯存之連年增加量 (current annual increment, CAI) 和第二次調查45年生樣區此兩性狀值之年平均增加量 (mean annual increment, MAI) 進行比較, 所得之結果如圖4所示。由圖4可知, 林分二次調查期間材積之CAI為11.21±3.77 m³ ha⁻¹ year⁻¹, MAI為9.71±1.64 m³ ha⁻¹ year⁻¹, CAI > MAI表示林分的發展仍具有潛力; 而碳貯存量之CAI為6.04±2.03 Mg ha⁻¹ year⁻¹, MAI為5.23±0.89 Mg ha⁻¹ year⁻¹, 其趨勢和材積生長量相同, 亦為CAI > MAI, 由於本研究採用材積推估碳貯存量, 因此碳貯量和材積量的變化具一致性。

由於大葉桃花心木為臺灣之重要樹種, 因此過去會有許多研究著重於此樹種的生長收穫及碳貯存量之相關研究, 唯大部分以幼齡林為主, 如馮豐隆&黃志成 (1993) 探討新化林場大葉桃花心木人工林生長收穫, 7、10、12、14年生林分之蓄積量為18.97、90.97、137.36、135.54 m³ ha⁻¹, 如將其換算MAI為2.71-11.45 m³ ha⁻¹ year⁻¹, 本研究所得45年生之MAI仍高達9.71 m³ ha⁻¹ year⁻¹。另外, 有關於碳吸存量的研究, Tsai et al. (2012) 曾建立本區域大葉桃花心木幼齡林之地上及地下部單木層級之生物量相對關係式, 可應用於單木層級生物量之推估, 進而計算碳貯存量。洪千祐&顏添明 (2015) 分析過去發表於期刊之臺灣地區人工闊葉樹林, 所得之碳吸存量為2.20±1.07 Mg ha⁻¹ year⁻¹,

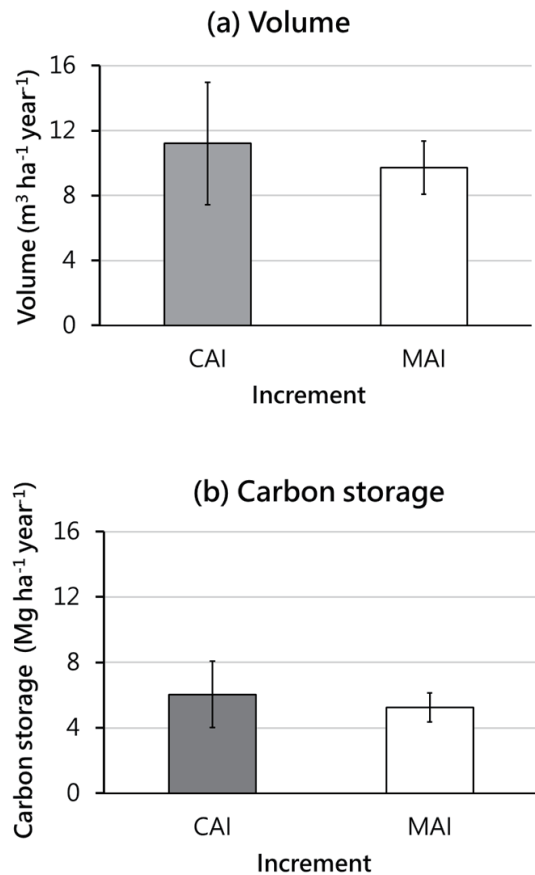


圖4. 大葉桃花心木人工林 (a) 材積及 (b) 碳貯存之連年生長量 (CAI) 和平均生長量 (MAI)。

Figure 4. The current annual increment (CAI) and mean annual increment (MAI) of (a) volume and (b) carbon storage for the *Swietenia macrophylla* plantation.

本研究所得之結果高於此平均值很多，此結果顯示大葉桃花心木為具有相當碳吸存潛力的樹種，至45年生仍有很高的碳吸存能力。

四、結論

本研究以南部地區新化林場之大葉桃花心木人工林為研究對象，探討林分直徑分布和推估林分碳貯存量，所得之結論如下：

- (一) 本研究以7種樹高曲線式推估林木DBH和樹高的關係，所得之RMSE值很接近，其中又以 $H = 1.3 + \left(\frac{DBH}{a+b \times DBH}\right)^2$ 的推估效果較佳，因此選擇此模式做為推估單株層級樹高之基礎。
- (二) 本研究以Weibull函數量化林分之直徑分布，所得模式之 a 、 b 、 c 參數值分別為 12.5、20.69、1.81，林分屬於正偏歪分布，經K-S檢定顯示觀測值之分布符合Weibull分布，亦即Weibull函數可有效描述大葉桃花心木之直徑分布。
- (三) 林分44年生之材積量為 $425.7 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ ，碳貯存量為 229.5 Mg ha^{-1} ；45年生之材積量為 $436.9 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ ，碳貯存量為 235.6 Mg ha^{-1} 。在二次調查期間不論材積或碳貯存量皆呈現連年生長(增加)量大於平均生長(增加)量，亦即此林分不論在材積生長和碳貯存能力仍具有很大的潛力。
- (四) 本研究之調查期間僅歷經一年的間隔，所反映之生長表現較為有限，未來仍需長期蒐集永久樣區的資料，進行林分發展之監測及分析，以瞭解大葉桃花心木在碳貯存量的變化。

致謝

本計畫承蒙國立中興大學實驗林管處計畫「新化林場第1林班大葉桃花心木人工林生長之監測 (1091011B-03)」經費補助，謹致謝忱。

五、引用文獻

- Bailey RL, Dell TR (1973) Quantifying diameter distributions with Weibull function. *Forest Sciences* 19: 97-104.
- Cao QV (2004) Predicting parameters of a Weibull function for modeling diameter distribution. *Forest Science* 50: 682-685
- Chuang TJ, Yen TM (2017) Public views on the value of forests in relation to forestation projects—a case study in central Taiwan. *Forest Policy and Economics* 78: 173-179.
- Clutter JL, Fortson JC, Pienaar LV, Brister GH, Bailey RL (1983) *Timber management: A quantitative approach*. John Wiley & Sons, New York.
- Davis LS, Johnson KN, Bettinger PS, Howard TE (2001) *Forest Management*. McGraw-Hill, New York.
- Draper NR, Smith H (1981) *Applied regression analysis*. 2nd Edition. John Wiley & Sons, New York.
- Huang KL, Wang CH, Yen TM, Li LE (2015) Evaluation of the applicability of the Weibull probability density function with different approaches for diameter distributions of plantations of four conifer species. *Taiwan Journal of Forest Science* 30(1): 1-13.
- Husch B, Miller CJ, Beers TW (1982) *Forest Mensuration*. Krieger Publishing, New York.
- Lei Y (2008) Evaluation of three methods for estimating the Weibull distribution parameters of Chinese pine (*Pinus tabulaeformis*). *Journal of Forest Science* 54: 566-571.
- Sokal RR, Rohlf FJ (2012) *Biometry: the Principles and Practice of Statistics in Biological Research*. 4th edition. W.H. Freeman and Co., New York.
- Tsai JI, Chang KL, Feng FL (2012) Building allometric models to estimate above-ground

- and below-ground biomass of mahogany sapling. *Taiwan Journal of Forest Science* 27(3): 229-238.
- Yen TM, Ai LM, Li CL, Lee JS, Huang KL (2009) Aboveground carbon contents and storage of three major Taiwanese conifer species. *Taiwan Journal of Forest Science* 24(2): 92-102.
- Yen TM, Huang KL, Li LE, Wang CH (2020) Assessing carbon sequestration in plantation forests of important conifers based on the system of permanent sample plots across Taiwan. *Journal of Sustainable Forestry* 39(4): 392-406.
- Yen TM, Ji YJ, Lee JS (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.
- Yen TM, Lee JS, Huang KL (2008) Growth and yield models for thinning demonstration zones of Taiwan red cypress (*Chamaecyparis formosensis Matsum.*) and Japanese cedar (*Cryptomeria Japonica* D. Don) plantations in central Taiwan. *Quarterly Journal of Forest Research* 30(3): 31-40.
- Yen TM, Wang CT (2013) Assessing carbon storage and carbon sequestration for natural forests, man-made forests, and bamboo forests in Taiwan. *International Journal of Sustainable Development & World Ecology* 20(5): 455-460.
- 中興大學實驗林管理處 (2020) <https://exp-forest.nchu.edu.tw/forest/>
- 行政院環境保護署 (2019) 2019年中華民國國家溫室氣體清冊報告。 https://unfccc.saveoursky.org.tw/nir/tw_nir_2019.php
- 李久先、陳朝圳 (1988) 大雪山地區紅檜人工幼齡林單木生長模式之研究。 *中華林學季刊* 21(2) : 25-44。
- 李久先、陳朝圳 (1991) 濁口溪集水區天然林林分結構與樹種組成之研究。 *臺灣省立博物館年刊* 13 : 11-32。
- 李久先、顏添明 (1992) 間伐對大雪山地區紅檜人工林直徑分布的影響。 *中興大學實驗林研究報告* 14(2) : 89-101。
- 李隆恩、顏添明 (2010) 紅檜人工林疏伐後4年對林分及單木層級之影響。 *中華林學季刊* 43(2) : 249-260。
- 林金樹、鄭景鵬、王亞男、馬曉恩、劉哲璋 (2012) 九鬮農場大葉桃花心木、印度紫檀及小葉南洋杉人工林的林分初期生長特性。 *中華林學季刊* 45(2) : 151-167。
- 林務局 (1995) 第三次臺灣森林資源及土地利用調查。行政院農業委員會林務局。
- 林國銓、杜清澤、黃菊美 (2009) 臺東地區相思樹與風相兩人工林碳累積量。 *林業研究季刊* 31(3) : 55-68。
- 林裕仁、劉瓊霏、林成俊 (2002) 台灣地區主要用材比重與碳含量測定。 *臺灣林業學科* 17(3) : 291-299。
- 洪千祐、顏添明 (2015) 以過去發表資料為基礎分析臺灣地區人工針葉樹林、闊葉樹林和竹林之碳吸存量。 *林業研究季刊* 37(4) : 259-268。
- 孫百寬、顏添明 (2017) 應用Weibull機率密度函數模擬不同經營型態麻竹與孟宗竹之林分結構。 *農林學報* 64(4) : 233-243。
- 高裕閔、王兆桓 (2014) 和平事業區森林永久樣區調查與分析CO₂吸存效應。 *宜蘭大學生物資源學刊* 10 : 1-22。
- 莊采秦、林政融、顏添明 (2019) 楓香人工幼齡林林分結構之量化及碳吸存能力之評估—以惠蓀林場為例。 *林業研究季刊* 41(1) : 65-80。
- 陳忠義、王亞男、徐唯恩、吳亭潔、余瑞珠、吳宗賢 (2012) 評估平地造林地之土肉桂、

- 水黃皮及楓香地生長與CO₂吸存量。國立臺灣大學生物資源暨農學院實驗林研究報告 26(4)：251-260。
- 陳忠義、余瑞珠、王亞男 (2015) 屏東萬隆農場大葉桃花心木之成長及CO₂吸存量。中華林學季刊 48(4)：331-341。
- 陳朝圳、陳建璋 (2015) 森林經營學。正中書局出版。
- 馮豐隆、林子玉、黃志成、陳志賢、陳英彥、林明進 (1997) 新化林場第二次林木資源調查與地理資料庫之建立。中興大學實驗林研究彙刊 19(1)：1-21。
- 馮豐隆、黃志成 (1993) 新化林場大葉桃花心木生長收穫之探討。國立中興大學實驗林研究報告 15(1)：121-141。
- 蔡正一、呂俊廷、馮豐隆 (2012) 應用植物生理特徵推估新化林場大葉桃花心木面積。林業研究季刊 34(3)：215-226。
- 鍾智昕、林謙佑、林振榮 (2013) 臺灣南部大葉桃花心木徑向生長量季節性差異之研究。中華林學季刊 46(1)：15-26。
- 顏添明 (1999a) 百分位數法應用於建立空中照片材積表之研究。中華林學季刊32(2)：233-247。
- 顏添明 (1999b) 直接及間接推估模式應用於紅檜人工林林分結構之比較。中華林學季刊 32(3)：347-356。
- 顏添明 (2013) 活化人工林經營：提升林分品質與效益。林業研究專訊 20(6)：12-14。
- 顏添明、李久先、黃凱洛、劉兆昌 (2004) 杉木人工林成熟林分林木生長及生物量之探討。中華林學季刊 37(2)：157-168。