

## 研究報告

## 評估不同生長模式應用於模擬新生桂竹稈 高初期生長之適用性

劉怡宏<sup>1)</sup> 林政融<sup>1)</sup> 顏添明<sup>1,2)</sup>

### 摘要

桂竹(*Phyllostachys makinoi* Hayata)為臺灣原生之特有竹種，不論竹材或竹筍皆具經濟價值，為臺灣重要經濟竹種之一。本研究之目的在於探討桂竹稈高(culm height, H)生長之特性，研究地區位於臺灣中部大坑地區，對象為人工培育之桂竹林，於該林分設置樣區進行稈高生長調查，調查新生竹每日稈高生長變化記錄其胸高直徑(diameter at breast height, DBH)，於2020年4月8日開始調查，至6月6日共獲68株完成稈高生長之樣竹。將稈高與DBH進行相關分析，兩者呈現顯著的正相關( $R = 0.83$ ,  $p < 0.05$ )，2種變數所建立之回歸模式為： $H = 143.82 + 173.83 \times DBH$ 。根據樣竹之DBH大小，將其區分為5種徑級，並在每個徑級挑選具代表性之樣竹5株建立稈高之生長模式，採用Schurmacher、Mitscherlich及Richards等3種生長模式模擬稈高生長，並以各模式模擬所得之殘差均方根(root mean square error, RMSE)，進行單因子相依變異數分析(repeated measures analysis of variance, RM-ANOVA)及Bonferroni檢定，以比較不同模式的模擬效果，所得結果顯示Richards生長模式具較佳的模擬效果。為瞭解稈高生長與徑級的關係，本研究採用徑級為單位，應用Richards生長模式量化稈高生長，結果顯示稈高生長速率雖會隨著徑級而異，但其最大生長速率及平均生長量之最大值發生的時間則在不同徑級間呈現一致性，稈高最大生長速率發生的時間約在發筍後之第14~15日；而平均生長量之最大值發生的時間約在發筍後之第22~23日。

關鍵詞：桂竹、竹筍、胸高直徑、單因子相依變異數分析、大坑風景區。

劉怡宏、林政融、顏添明。2021。評估不同生長模式應用於模擬新生桂竹稈高初期生長之適用性。台灣林業科學36(2):127-39。

<sup>1)</sup> 國立中興大學森林學系，40227臺中市南區興大路145號 Department of Forestry, National Chung Hsing University, 145 Xingda Rd., South Dist., Taichung 40227, Taiwan.

<sup>2)</sup> 通訊作者 Corresponding author, e-mail:tmyen@dragon.nchu.edu.tw

2021年6月送審 2021年7月通過 Received June 2021, Accepted July 2021.

# Assessment of the Applicability of Various Growth Functions to Predict High Culm Development for Makino Bamboo (*Phyllostachys makinoi* Hayata) Individuals

Yi-Hung Liu<sup>1)</sup> Zheng-Rong Lin<sup>1)</sup> Tian-Ming Yen<sup>1,2)</sup>

## 【 Summary 】

Makino bamboo (*Phyllostachys makinoi* Hayata) is a unique, native species in Taiwan. This bamboo species possesses economic benefits due to its culms and shoots which have high economic value. The purpose of this study was to address the growth characteristics of culm height (H) for Makino bamboo. The study area was located in the Dakeng area of central Taiwan, and sample plots were established to collect data. We recorded the processes of bamboo growth from shoot emergence from the ground to culms reaching their maximum height and also recorded diameter at breast height (DBH) data. From April 8 to June 3, 2020, 68 valid bamboo samples were obtained. A significant correlation ( $r = 0.83, p < 0.05$ ) was shown between culm height and DBH by a correlation analysis. Moreover, DBH was used to predict culm height by a regression model as:  $H = 143.82 + 173.83 \times \text{DBH}$ . We adopted a stratified sampling method to divide these bamboo samples into 5 DBH classes, and 5 samples were taken for each DBH class. The Schurmacher, Mitscherlich, and Richards growth functions were employed to predict culm height development. A repeated-measures analysis of variance analysis (RM-ANOVA) and Bonferroni test were used to examine these 3 models based on values of the root mean square error (RMSE). Results showed that the Richards model was superior to the other 2 models, and this model was further used to quantify culm height development for each bamboo sample. Results showed that the culm height growth rate increased with an increase in the DBH class. However, the occurrence time of the maximum growth rate and maximum mean increment seemed to be consistent regardless of the DBH class, where the former and latter respectively occurred at the 14~15th and 22~23rd days after shoot emergence.

**Key words:** Makino bamboo (*Phyllostachys makinoi* Hayata), bamboo shoot, DBH, RM-ANOVA, Dakeng scenic area.

**Liu YH, Lin ZR, Yen TM. 2021.** Assessment of the applicability of various growth functions to predict high culm development for Makino Bamboo (*Phyllostachys makinoi* Hayata) individuals. Taiwan J For Sci 36(2):127-39.

## 緒 言

據推估全世界竹類超過1000種，主要分布範圍為北緯46°到南緯47°之熱帶和亞熱帶地區，橫跨非洲、亞洲和中南美洲，總面積超過

3600萬ha，相當於世界森林面積的4% (FAO 2014, Wu 2014, Yuen et al. 2017)。臺灣為竹類分布相當重要的區域，不但竹林面積廣闊，且

種類也很豐富(Liu and Yen 2021)。根據第4次全國森林資源調查成果顯示，臺灣竹林覆蓋面積為132,607 ha，佔林地面積約6% (Yen 2015, Liu and Yen 2021, TFB 2021)。由於竹類林型和由林木所構成的森林，不論在生長、生態、經營或利用層面上的特性皆有很大的差異，因此在研究上常將此2類森林予以區分(Yen and Lee 2011)。

一般而言，竹類的生長可區分為單株及林分2個層級，其中在單株層級的竹生長可分成體積生長和材質生長兩個階段，第1階段為竹筍出土至稈高(H)生長完成，此期間所需時間約40~50天；第2階段為H生長完成後至竹材成熟至可供利用的強度為止，時期約4~5年。由於竹子在初期生長相當快速，於第一階段結束時所累積的生物量將近整個收穫期(4~5年)的3/4，唯此時竹稈的強度較低，在利用上受到很大的限制(Yen 2003, 2016)；第2階段竹稈仍會持續累積乾物質和增加竹稈的強度，一般需歷時4~5年以上才能利用。一般穩定發展的竹林，新生竹每年亦會不斷的萌發，而需伐採老竹，因此林分結構中包括1至多年生的立竹均質分布於林分中，為異齡林(uneven-aged stand)的結構(Sun and Yen 2011, Sun et al. 2013)。傳統的竹林收穫系統係以擇伐作業進行，採用存3去4不留7的原則，保留3年生以下之未完全成熟的立竹，擇伐4~7年生的成熟立竹，並移除7年生以上的老竹(Lu 2001)，而一般集約的竹林經營方式為擇伐5年生以上的成熟老竹(Yen 2015, 2016)。

竹林經每年擇伐後，新竹能自行由地下莖萌發更新，伐採後能快速恢復地表覆蓋，因此對林地的衝擊較林木的皆伐作業方式小；此外，竹製品可以替代許多木材產品，減少木材遭到過度砍伐，因此竹材被認為是對於環境友善的非木質森林產品(non-timber product)。由於竹林每年均可收穫竹筍及竹材，其投資報酬回收時間相對於林木經營為短，因此風險也較小。竹材的用途也很廣泛，具有質輕、高韌性等特質，可做為建築材料、建築鷹架，並可經機械加工製作家具及生活用品；竹筍為重要的食材，具健康且口感美味(Lu 2001, Yen et al. 2010)。此外，竹類對

環境耐受性高，是土壤貧瘠地區綠化的良好覆蓋物，其根系的內鬚根量多且強韌，可以穩定土壤結構，發揮固土的功能(Lin et al. 2007)。桂竹(*Phyllostachys makinoi* Hayata)為臺灣原生的特有竹種，主要分布於海拔1500 m以下的山區，主要集中在臺灣中部地區；不論竹材或竹筍均具有高經濟價值，因此被視為臺灣重要的經濟竹種(Lu 2001, Yen et al. 2010)。

生長模式(growth model)為量化生物個體或族群生長隨時間變化的數學模式，應用於林學領域可有效的描述及解釋林木或林分生長特性，提供生長收穫量化的具體資訊(Yen 2003, Sheu and Yen 2005, Shih et al. 2021)。然而對於桂竹生長的研究仍較有限，本研究以臺灣中部地區的大坑風景區為試驗區域，探討桂竹H生長之特性，採用不同生長模式探討桂竹之H生長，並比較模式結果之差異以瞭解其之生長特性，作為竹林經營管理基礎。本研究之目的包括：(1)瞭解桂竹H生長之特性；(2)比較不同生長模式應用於H生長之適用性；及(3)比較不同徑級桂竹H之生長。

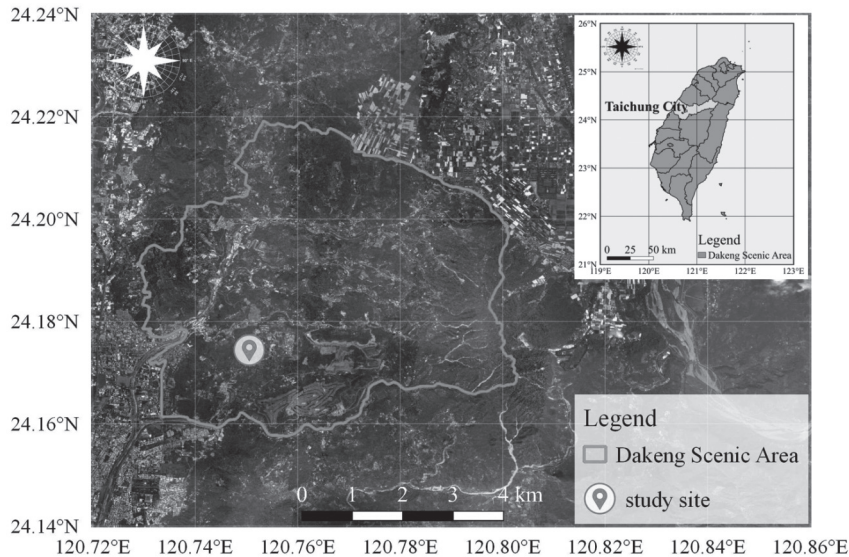
## 材料及方法

### 一、研究區域

本研究區域位於大坑風景區(以下簡稱為大坑地區)，試驗地點位在台中市北屯區民政里之私有桂竹人工林(Fig. 1)，為進行桂竹林之生長收穫系統之研究，林主同意本研究於此區域之竹林進行試驗，林分海拔高度約226 m，根據中央氣象局臺中地區1981~2010年之統計，本區域月平均氣溫為23.7°C，最高溫度發生於7月為28.9°C，最低溫度發生於1月為17°C，相對濕度74.5%，年降雨量1762.8 mm (中央氣象局 2021)。

### 二、樣區設置與擇伐作業

本研究於2019年3月在此桂竹林分採用逢機取樣設置18個樣區，每個樣區面積為25 m<sup>2</sup> (5×5 m)，於樣區設置後隨即進行調查，並將樣區內所有立竹進行編號，調查並紀錄樣區內立竹之胸徑，建立基礎資料，作為後續研究之



**Fig. 1. Location of the study region (NLSC 2021).**

基礎。此桂竹為純林之結構，為瞭解林分密度和新竹生長關係，本研究於當年(2019年)進行擇伐試驗，並於隔年(2020年)竹筍的發筍期(4-5月)調查新生竹之生長。

### 三、稈高生長之量測

本研究於2019年3月完成立竹之竹齡與胸高直徑(diameter at breast height, DBH)的每木調查後，隨即進行擇伐試驗，伐除5年生以上之老竹與生長不良之立竹，並於隔年(2020年)進行新生竹每日H生長監測，其量測方法是以7 M箱尺(Polestar 7 m 5 s)測量H，並輔以雷射測距儀(Leica DISTO X4)分段測量以進行誤差校準。由於新生竹的萌發時間不一致，其高生長期約可於50天內完成(Yen 2003, 2016)，因此本研究擬定60天為期的調查計畫，預定於2020年4月8日至6月6日每日進行H量測，唯此期間囿於天候不佳之因素，部分日數未能到現場進行調查，有效觀測日數為88.33% (53日/60日)，共計調查218株新生竹筍。其中有很大部份的樣竹遭受病蟲害、動物危害、風倒及本身生長不良(退筍)而無法提供完整生長數據，另外也有部份在調查截止日尚有13株樣竹未能完成H生長調查，扣除上列不完整之樣本，於此期間完成高

生長的數量共計68株，有效觀測數為31.19%。

### 四、模式模擬與比較

#### 1. 生長模式

Schurmacher、Mitscherlich和Richards等三種生長模式，過去曾廣泛應用於森林單株及林分層級之生長，包括竹類單株立竹之高生長過程(Yen 2003, 2016)，本研究將所取得樣竹之H生長資料，分別以上述三種生長模式模擬H生長，以非線性最小二乘方法(nonlinear least squares method)進行參數求解，其生長模式之基本型態如Table 1所示。Table 1中的生長模式以參數的數目區分，可分為2參數和3參數兩類，前者為Schurmacher模式，後者為

**Table 1. Three different growth models for Makino bamboo in this study (Schurmacher 1939, Richards 1959)**

Model	Type <sup>1)</sup>
Schurmacher	$Y = \exp [A - B \times (1/t)]$
Mitscherlich	$Y = A \times [1 - B \times \exp (-k \times t)]$
Richards	$Y = A \times [1 - \exp (-k \times t)]^{1/(1-m)}$

<sup>1)</sup> Y is culm height; A, B, k, and m are parameters of the models; and t is growth days.



Mitscherlich模式、Richards模式。

### 2.不同直徑級之分層及取樣

本研究為探討模式在不同直徑級模擬H的差異，將68株樣竹以DBH進行分層取樣。分層的概念係參考前人進行竹類生長特性的研究(Yen 2003, 2015, 2016, Yen et al. 2010, Yen and Lee 2011)。本研究根據2019年DBH調查結果範圍(1.0~4.5 cm)，將直徑級以0.5 cm為間距分為：DBH < 2.5 cm、2.5cm ≤ DBH < 3 cm、3 cm ≤ DBH < 3.5 cm、3.5 cm ≤ DBH < 4 cm和DBH ≥ 4 cm，共分為5種徑級，於每一徑級挑選5株具代表性的新生竹，5個徑級共計25株，各單株分別以3種生長模式模擬H生長。

### 3.模擬效果之評估與比較

為評估不同模式模擬H效果之良窳，本研究採用殘差均方根(root mean squared error, RMSE)作為評估指標，其評比為基於理論值和觀測值的差異量，有關RMSE的計算方式如(1)式所示(Draper and Smith 1981):

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

(1)式中Y<sub>i</sub>為觀測值； $\hat{Y}$ 為理論值；n為樣本數目；p為模式之參數數目(Draper and Smith 1981)。

由於本研究將同一樣本同時採用3種模式進行模擬，亦即同一樣本可獲得3個來自不同模式模擬所得之RMSE，因此在比較模式效果需考量樣本具有對應關係(相依性)，須採用重複量數變異數分析(repeated-measures analysis of variance, RM-ANOVA)比較結果之差異(Lai et al. 2017, Shih et al. 2021)。

進行RM-ANOVA的資料型態必須符合球形假設，本研究採用Mauchly's W球形檢定檢測資料之間差異值的變異數是否符合同質性(Mauchly 1940)。若Mauchly's W檢定呈現不顯著(p > 0.05)，表示資料適合進行RM-ANOVA，可直接由F值判斷各組資料是否具顯著性差異；反之，若Mauchly's W檢定呈現顯著(p ≤ 0.05)，

表示資料不符合球形結構，即各組資料的差異量的變異數非同質性，則需以Greenhouse-Geisser法校正後之F值判斷各組資料差異之顯著性(Greenhouse and Geisser 1959)。若RM-ANOVA結果呈現顯著，採用Bonferroni進行事後檢定之分析(Bonferroni 1936)，比較不同模式之良窳。

由上述之比較結果，再由模擬結果最佳之模式，進行不同直徑級H生長之量化(以徑級內的5株為單位)。

### 五、統計分析

本研究之基本統計採用SPSS統計軟體進行分析。

## 結果

#### 一、稈高與胸徑之關係

經調查獲得68株完整H生長之樣竹，其DBH與H之關係如Fig. 2所示，2者性狀值具顯著正向之相關性(r = 0.83, p < 0.05)，將DBH作為自變數，探討其和H的關係，所得之回歸式為： $H = 143.82 + 173.83 \times DBH$ ，其R<sup>2</sup>為0.69，此模式可應用於推估區域內桂竹林之H與DBH之關係。

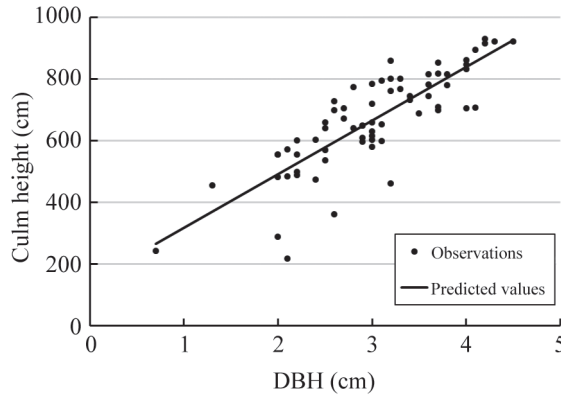
本研究以DBH為分層取樣依據，將68株樣竹分為5種徑級，於每一徑級挑選5株具代表性的樣竹進行H生長分析，合計數量為25株，其樣本性狀值如Table 2所示。由Table 2可知，不同徑級用於H生長分析的取樣率為27.8~50.0%。

#### 二、不同生長模式量化稈高生長

本研究採用3種生長模式分別模擬25株樣竹之H生長，並以RMSE評估模式配適結果，所得結果如Table 3所示。由Table 3可知模式之參數分布及RMSE值，其中以Richards模式之RMSE值最小(23.53 cm)，Schurmacher模式次之(43.36 cm)，Mitscherlich模式最大(55.26 cm)。RMSE值表示理論值和觀測值之差異量，為模式配適良窳的指標，當此值越小者表示模擬效果較佳；反之，其值越大者則表示模擬效果較差。

為比較3種模式在統計上之差異，本研究將上述25株樣竹模擬所得之RMSE值，進行RM-

ANOVA，在Mauchly's W球型檢定結果為顯著 ( $p < 0.05$ )，因此必須以Greenhouse-Geisser法



**Fig. 2. Relationship between diameter at breast height (DBH) and culm height (H) by a regression model ( $H = 143.82 + 173.83 \times DBH$   $R^2 = 0.685$ ) for Makino bamboo.**

**Table 2. Stand characteristics of bamboo samples among different diameter at breast height (DBH) classes**

DBH class	Range (cm)	All samples			Samples used for analysis		
		Number	Mean H (m)	Mean DBH (cm)	Number	Mean H (m)	Mean DBH (cm)
I	DBH < 2.5	15	6.14 ± 2.23	1.99 ± 0.44	5	5.24 ± 0.52	1.66 ± 0.64
II	2.5 ≤ DBH < 3	15	7.86 ± 1.19	2.69 ± 0.16	5	6.83 ± 0.46	2.70 ± 0.12
III	3 ≤ DBH < 3.5	18	6.80 ± 1.18	3.14 ± 0.14	5	7.59 ± 0.96	3.16 ± 0.46
IV	3.5 ≤ DBH < 4	10	6.74 ± 0.91	3.67 ± 0.01	5	8.16 ± 0.25	3.68 ± 0.08
V	DBH ≥ 4	10	5.40 ± 0.83	4.14 ± 0.16	5	9.05 ± 0.27	4.20 ± 0.19

**Table 3. Parameters of growth functions and root mean square error (RMSE) of culm high development of Makino bamboo in this study**

Model	Parameters and RMSE	Number	Max	Min	Mean	Standard deviation
Schurmacher	A	25	7.57	6.48	7.08	0.25
	B	25	35.43	10.70	18.29	5.09
	RMSE	25	72.16	12.26	43.36	13.81
Mitscherlich	A	25	1374866	548	62850	274656
	B	25	1.20	1.00	1.13	0.06
	k	25	0.07	$1.61 \times 10^{-5}$	0.04	0.02
	RMSE	25	85.03	29.91	55.26	15.96
Richards	A	25	35761	484	2190	6995
	k	25	0.14	0.001	0.11	0.03
	m	25	0.88	0.22	0.73	0.14
	RMSE	25	37.01	8.04	23.53	6.50

校正 $F$ 值，經校正之 $F$ 值為112.01 ( $p < 0.001$ )，結果呈現顯著，即表示生長模式間之結果不完全相同，需再以Bonferroni法比較模式之差異，事後檢定結果如Table 4所示。由Table 4之結果顯示，模式之間的結果皆達顯著差異，將RMSE值由小而大探討模擬之優劣，其最佳模式為Richards模式(23.53 ± 6.50 cm)，其次為Schurmacher模式(43.36 ± 13.81 cm)，最後為Mitscherlich模式(55.26 ± 15.96 cm)。因此後續以Richards模式進行不同直徑級H生長之分析。

**Table 4. Comparisons of the root mean square error (RMSE) values among growth models**

Model	Number	Mean±standard deviation <sup>1)</sup>
Mitscherlich	25	55.26 ± 15.96 <sup>a</sup>
Schurmacher	25	43.36 ± 13.81 <sup>b</sup>
Richards	25	23.53 ± 6.50 <sup>c</sup>

<sup>1)</sup> Different letters among models denote a significant difference according to the Bonferroni test at  $p < 0.05$ .

### 三、不同直徑級桿高生長之模擬

本研究以模擬效果最佳的Richards模式，模擬各徑級H生長所得之參數值及RMSE整理如Table 5所示。

茲以徑級 II 之結果為例，探討Richards模式的模擬效果，詳如 Fig. 3所示。由Fig. 3結果得知，Richards模式的曲線型態呈現拉長的S型( $a$ 參數值為707.70； $k$ 參數值為0.12； $m$ 參數值為0.78)，且觀測值和模式間的配適性情形良好

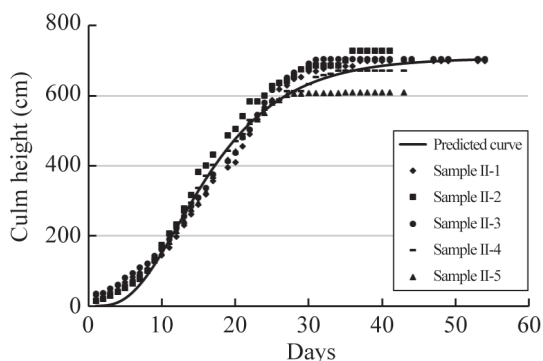
(RMSE值為33.06 cm)。

茲以上例的方式將Table 5各直徑級之模擬結果繪製成H生長曲線，所得之結果如Fig. 4所示，由Fig. 4之生長曲線可得知，各徑級的H生長大致為規律性的變化，而隨著時間的增加，在生長20天後，其趨勢呈現徑級大者的H也會高於徑級較小者，即H之總生長量為：徑級V > IV > III > II > I。

依據Richards模式結果(Table 5)，可將其所得模式對生長時間進行微分，推估各徑級生長速率函數，亦可將模式除以生長時間，推估平均生長量函數，2者函數所得結果彙整如Fig. 5所示。此外，亦可透過2者函數再對時間進行微分，求得生長速率最大值的發生時間(Richards 1959, Pienarr and Turnbull 1973, Yen 2016)，各徑級所得結果如Table 6。結果顯示，桂竹H生長速率之最大值發生時間約在發筍後的第11~14日；而平均生長量最大值發生的時間約在發筍後的第19~23日。由結果可知，桂竹的H生長速率及平均生長量雖在各徑級有所不同，但其最大值發生的時間點相當接近。

### 討論

桂竹為臺灣原生竹類，也是臺灣重要的經濟竹種之一，不論在生態或經濟上皆扮演著重要的角色，由於其竹筍或竹材皆具有很高的經濟價值，被廣泛栽植於全臺低海拔區域(10~1500 m)，



**Fig. 3. Relationship between observations and the Richards growth model for culm height growth in diameter at breast height (DBH) class II.**

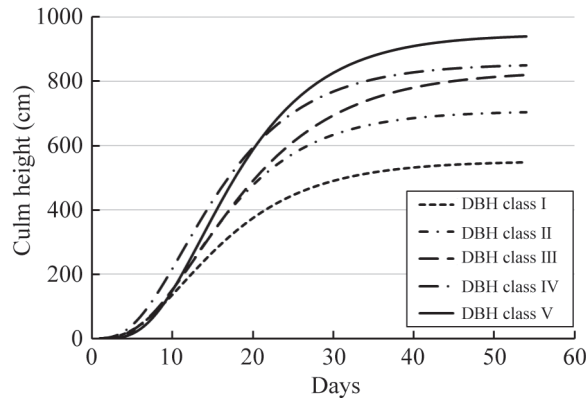


Fig. 4. Richards growth model for culm growth of each diameter at breast height (DBH) class.

Table 5. Parameter estimates and root mean square error (RMSE) of the Richards growth model for culm growth in each diameter at breast height (DBH) class

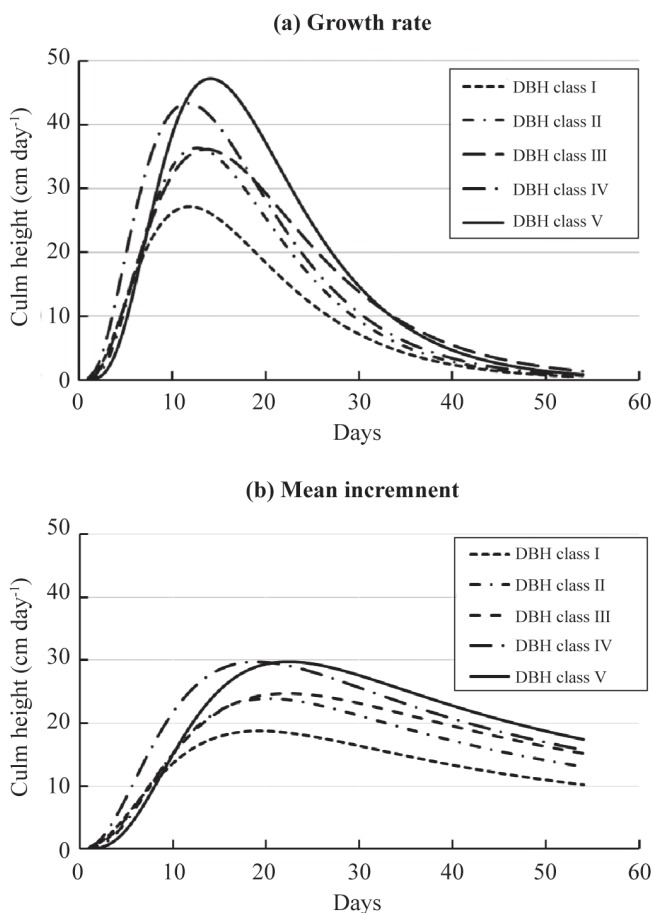
Parameter and RMSE	Class				
	I	II	III	IV	V
$A$	552.75	707.70	832.62	853	946.23
$k$	0.11	0.12	0.10	0.1	0.12
$m$	0.73	0.78	0.74	0.85	0.81
RMSE (cm)	54.45	33.06	58.53	59.72	38.06

特別是在臺灣中部郊區為桂竹主要分布地區(Lu 2001)，本研究位於臺灣中部之大坑地區，為桂竹重要的分布區域，過去的相關研究已建立生物量的推估式，可做生物量及碳貯存量推估之基礎(Yen et al. 2010)。竹產業在1960至1980年代對臺灣經濟發展有很大貢獻(Lin et al. 2011)，早期桂竹林的經營以竹材收穫和竹筍採收2者並重，隨著時代的變遷及產業的轉型，目前的桂竹林經營則較著重於竹筍的收穫，主要原因為採筍的收益遠高於收穫竹材(Lu 2001, Yen 2015)。本研究目的在於探討桂竹的生長，自地下莖芽出土至H生長完成，記錄其在不同時間的高度變化，並記錄各桂竹之DBH，所得結果顯示，成熟桂竹之DBH與H具有顯著的線性相關( $R^2 = 0.685$ )，此結果和Yen et al. (2010)探討中部地區桂竹的研究相同( $R^2 = 0.87$ )，而DBH與H的相關性也廣泛存在於其它竹種，如孟宗竹(*Phyllostachys pubescens*) (Yen 2003, Yen and Lee 2011)、刺竹(*Bambusa stenostachya*) (Li et al. 2016)。瞭解DBH和H的關

聯性，將有助於探討桂竹不同直徑級之H生長。

竹林的生長發展可分為單株和林分2個層級，林分層級著重在竹林的發展與經營策略之關係，如擇伐強度與施肥對於竹林生產力的影響，單株層級大多探討立竹不同階段之生長特性(Lu 2001, Yen 2003, 2015, 2016, Yen et al. 2010)，竹類之單株生長主要分為2個階段，第1階段僅需1.5~3個月，第2階段則需4~5年才能完成(Cherng 1968, Lu 2001, Yen 2003, 2015, 2016, Yen et al. 2010)，雖然就整個生長期程而言，第1個階段僅占短暫的時間，但可以累積的生物量約占整個收穫期的四分之三，其後則仍會累積生物量及增加強度，直到其能提供利用為止(Yen 2003, 2016)。研究立竹在第1階段的生長特性，可瞭解竹類的相關生長機制，包括生長的累積量及生長速率，採用生長模式在林木生長方面的應用相當廣泛，可藉由量化所得之結果，提供具體的資訊，如何時可達到生長速率及平均生長量的最大值，以做為經營決策的參





**Fig. 5. Growth rate and mean increment curves of culm height in each diameter at breast height (DBH) class for Makino bamboo.**

**Table 6. Times the maximum growth rate (MGR) and maximum mean increment (MMI) occurred for each diameter at breast height (DBH) class**

Item	Class				
	I	II	III	IV	V
MGR occurred (d)	11.3	12.6	13.5	11.2	13.8
MMI occurred (d)	19.3	21.0	22.8	19.0	22.8

考(Ito 1988a, 1988b, Ito and Osumi 1984, 1985, 1986, Lee and Yen 1995, Chiou et al. 2013, Lai et al. 2017)。

本研究所採用之3種不同生長模式為非線性型態(nonlinear type)，非線性模式在求解過程必須先設定參數之起始值，當運算過程中疊代達到收斂，才能完成模擬(Sheu and Yen 2005,

Lai et al. 2017)，本研究模式參數初值之設定係以過去發表之相關研究報告為依據(Pienaar and Turnbull 1973, Ito and Osumi 1984, Sheu and Yen 2005, Yen 2016, Lai et al. 2017)，經分析所得之結果，各樣竹採用3種模式皆可以達到收斂，因此可進而比較模式的模擬效果，就模式的特性而言，Richards及Schurmacher模式具有漸近線

及反曲點；而Mitscherlich模式僅具漸近線但不具有反曲點。由於相同之樣竹同時採用3種模式進行模擬，所以適合採用RM-ANOVA進行模式間良窳的比較，本研究以RMSE值做為比較之基礎，其值小表示觀測值與模式的差異量小，亦即模擬的效果較佳；反之亦然，由所得之結果得知Richards模式優於Schurmacher模式；且此2模式皆優於Mitscherlich模式，顯示桂竹在H生長過程中具反曲線點的特性，即可由生長曲線量化生長速率的最大值。在生長模式模擬H生長的研究方面，Yen (2003)以Richards生長模式探討疏伐及施肥處理對於孟宗竹H生長的影响，所得之結果顯示，Richards生長模式可有效地解釋疏伐及施肥處理之H生長過程。此外，Richards生長模式亦可有效地模擬孟宗竹在不同直徑級之H生長，解釋不同徑級之H生長量及生長速率(Yen 2016)。本研究的結果，也顯示Richards生長模式可用於分析桂竹不同徑級之H生長的特性。

林木和竹類的莖在維管束的特性的差異，為造成生長特性不同的重要原因之一。一般林木維管束具有形成層，隨時間增加樹幹體積也會不斷增加；竹類之維管束則散生於稈中，當節間分化完成其體積大致呈固定，節間生長與分化，自整段節間全為居間分生組織至節間內細胞全部成熟為止可分為5個階段，而整個竹稈自出筍到所有節間生長完成的時間僅歷時1.5~2個月，其在外觀體積就不再增加，亦即竹類第一個階段的生長(Liu et al. 1994, Lu 2001, Yen and Lee 2011, Yen 2016)。

就全林的收穫而言，竹類係採用擇伐作業，每年適度收穫竹筍及伐採老竹，而林木之生長期需經數十年方可有收穫(Yen and Lee 2011)。有關竹類H生長之研究，Lin (1958)於高雄六龜地區的研究，顯示孟宗竹及桂竹的平均生長曲線呈現拋物線狀，其生長趨勢於初期略緩，自發筍10日後快速上升，迄22日後漸行下降，至31~33日開始抽葉。Hu (2002)研究孟宗竹之H生長，自發筍初期(前9天)生長緩慢而後急速上升，至第25天達到最高峰，在38~43天開始抽葉，約於43天高生長停止。Yen (2003)探討疏伐與施肥處理對孟宗竹H生長之影

響，研究結果顯示疏伐處理對於竹H生長的促進較施肥處理明顯，但H生長最大生長速率的發生時間則約在發筍後第20天，然而其研究結果也發現，H最大生長速率的發生時間並不會受到不同處理的差異而有所影響。另外，Yen (2016)指出孟宗竹H生長與徑級的關係，也呈現相類似的結果，雖然H生長量會受到直徑級影響，但最大生長速率發生的時間則趨於一致性，約在發筍後第20天達到最大，不會因徑級大小而有明顯差異。本研究發現桂竹之H生長量及生長速率雖會隨著徑級大小而有所不同，然而最大生長速率及最高平均生長量發生的時間點在不同徑級間則很接近，生長速率最大值約發生在發筍後的第11~14日；而平均生長量最大值約在發筍後的第19~23日，亦即在不同徑級間兩者呈現一致性，此和前人研究採用不同竹種所得的結果相類似。

## 結論

本研究以台中市大坑地區之桂竹為研究對象，探討H之生長特性，將其區分不同徑級以生長模式量化其生長，所得之結論及建議如下：

- 一、經高生長完成後之H與DBH經相關分析所得之結果，兩者具有顯著的相關性( $r = 0.83$ )，本研究採用線性回歸建立二者之關係，所得之模式為 $H = 143.82 + 173.83 \times DBH$ 。
- 二、本研究採用Richards、Schurmacher及Mitscherlich等3種生長模式分別模擬樣竹之H生長，以RMSE值評估模擬結果優劣，並採用RM-ANOVA及Bonferroni法比較其差異性，所得結果呈現3種模式結果具顯著差異，其效果優劣順序為：Richards模式 > Schurmacher模式 > Mitscherlich模式。
- 三、桂竹之H生長速率雖呈現隨著徑級增加而提升的趨勢，然而各徑級的生長速率

及平均生長量之最大值發生時間很接近，桂竹H最高生長速率所發生的時間約在發筍後的第11~14日；而最高平均生長量發生的時間約在發筍後的第19~23日。

四、本研究雖儘可能蒐集完整資料，但有少數時日因受限於天候而未能前往野外調查，或部分樣竹於規劃期程之截止日前仍未能完成高生長，致部份樣本在時間序列上較不完整或需予以剔除，為本研究之限制。

## 引用文獻

- Bonferroni CE. 1936.** Teoria statistica classi e calcolo delle probabilita. Pubbl R Ist Super Sci Econ Comm Firenze 8:1-62.
- Cherng LJ. 1968.** Experiments on reproduction of Makino bamboo stands. Q J Chin For 1(2):146-59. [in Chinese with English summary].
- Chiou CR, Cheng CP, Yang SI. 2013.** Application of growth models in tree growth in Taiwan. Q J Chin For 46(4):545-57. [in Chinese with English summary].
- Central Weather Bureau (CWB). 2021.** Monthly mean. Available at <https://www.cwb.gov.tw/V8/C/C/Statistics/monthlymean.html>. Accessed 18 Feb 2021.
- Draper NR, Smith H. 1981.** Applied regression analysis. 2nd ed. Raleigh, NC: J Wiley & Sons. 346 p.
- Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). 2014.** Enhancing the socio-economic benefits from forests. State of the world's forests 2014. Rome: FAO. 119 p.
- Greenhouse SW, Geisser S. 1959.** On methods in the analysis of profile data. Psychometrika 24:95-112.
- Hu HL. 2002.** Studies on management cost and growth of Moso bamboo in Chu-Sun area [dissertation]. Taichung, Taiwan: National Chung Hsing Univ. 96 p. [in Chinese with English summary].
- Ito T. 1988a.** A system of growth models for even-aged pure stand based on the Richards growth function (III) estimation of the parameters using data from remeasured temporary plots. J Jpn For Soc 70(2):57-63.
- Ito T. 1988b.** A system of growth models for even-aged pure stand based on the Richards growth function (IV) estimation of the parameters using data from a temporary sample plot and stem-analyzed sample trees. J Jpn For Soc 70(3):95-103.
- Ito T, Osumi S. 1984.** An analysis of the basal area growth in even-aged pure stands based on the Richards growth function. J Jpn For Soc 66(3):99-108.
- Ito T, Osumi S. 1985.** Growth models for total and average basal area in even-aged pure stands based on the Richards growth function (I) derivation of the models. J Jpn For Soc 67(11):434-41.
- Ito T, Osumi S. 1986.** Growth model for total and average basal area in even-aged pure stands based on the Richards growth function (II) application of the models to stands of sugi (*Cryptomeria japonica*) and hinoki (*Chamaecyparis obtuse*). J Jpn For Soc 68(8):303-13.
- Lai YJ, Wang YN, Yen TM. 2017.** Using growth models to predict diameter growth for different age classes of Taiwan red cypress (*Chamaecyparis formosensis*) in Xitou. Q J Chin For 50(2):145-58. [in Chinese with English summary].
- Lee JS, Yen TM. 1995.** Studies on individual tree growth of *Chamaecyparis formosensis* plantations (II)-The application of Champman-Richards growth model on thinning stand. Bull Exp For NCHU 17(1):129-41. [in Chinese with English summary].
- Li ZY, Wang DH, Su DZ, Chen TH. 2016.**

The stand structure and biomass accumulation of *Phyllostachys lithophila* in Shi-Zhuo, Alishan. *J For Res* 38(2):73-82. [in Chinese with English summary].

**Lin SH, Lai CF, Chen YJ. 2007.** A study on the root system of Makino's bamboo forest and its effect on the subsequent landslide. *J Chin Soil Water Conserv* 39(2):173-87. [in Chinese with English summary].

**Lin WC. 1958.** Studies on the growth of bamboo species in Taiwan. *Bull Taiwan For Res Inst* 54:1-29. [in Chinese with English summary].

**Lin YJ, Wang CH, Wu S. 2011.** Analyzing carbon conversion factors of four species of Taiwanese bamboo. *Taiwan J For Sci* 26(4):341-55.

**Liu YC, Lu FY, Ou CH. 1994.** Trees of Taiwan. Taichung, Taiwan, Natl Chung Hsing Univ. 925 p. [in Chinese].

**Liu YH, Yen TM. 2021.** Assessing carbon storage capacity in bamboo plantations with various species related to its affecting factors across Taiwan. *For Ecol Manage* 481(4):118745.

**Lu CM. 2001.** cultivation and management of bamboo forests. *Taiwan For Res Inst Ext Ser* 135:204. [in Chinese with English summary].

**Mauchly JW. 1940.** Significance test for sphericity of a normal n-variate distribution. *Ann Math Statist* 11(2):204-9.

**National Land Surveying and Mapping Center (NLSC). 2021.** Taiwan MAP service. Available at <http://www.nlsc.gov.tw/>. Accessed 28 May 2021.

**Pienaar LV, Turnbull J. 1973.** The Chapman-Richards generalization of Von Bertalanffy's growth model for basal area growth and yield in even-aged stands. *For Sci* 19(1):2-22.

**Richards FJ. 1959.** A flexible growth function for empirical use. *J Exp Bot* 10(29):290-300.

**Schumacher FX. 1939.** A new growth curve and its application to timber-yield studies. *J*

*For* 37:819-20.

**Sheu BH, Yen TM. 2005.** Growth analysis and growth models for juvenile indigenous tree species in Huisun Forest Experimental Station. *Q J Chin For* 38(3):323-35. [in Chinese with English summary].

**Shih CY, Yen TM, Wang YN. 2021.** Comparison of various growth functions for predicting long-term stand development associated with different initial spacing in 64-year-old Japanese cedar (*Cryptomeria japonica* (L.f.) D. Don) plantations. *Ann For Res* 64(1):87-97.

**Sun BK, Chen YT, Yen TM, Li LE. 2013.** Stand characteristics, aboveground biomass and carbon storage of moso bamboo (*Phyllostachys pubescens*) stands under different management levels in central Taiwan. *J For Res* 35(1):23-32. [in Chinese with English summary].

**Sun CH, Yen TM. 2011.** Using allometric equation to predict bamboo biomass based on combined data of Makino bamboo (*Phyllostachys makinoi*) and moso bamboo (*Phyllostachys pubescens*). *J For Res* 33(3):1-8. [in Chinese with English summary].

**Taiwan Forestry Bureau (TFB). 2021.** Forest resources survey. Available at <https://www.forest.gov.tw/0000052>. Accessed 5 Apr. 2021.

**Wu J. 2014.** International trade of bamboo and rattan 2012. Beijing: International Network for Bamboo and Rattan (INBAR).

**Yen TM. 2003.** Three growth models for moso bamboo (*Phyllostachys heterocycla*) culm height growth. *Q J Chin For* 36(3):285-96. [in Chinese with English summary].

**Yen TM. 2015.** Comparing aboveground structure and aboveground carbon storage of an age series of moso bamboo forests subjected to different management strategies. *J For Res* 20(1):1-8.

**Yen TM. 2016.** Culm height development, biomass accumulation and carbon storage in

an initial growth stage for a fast-growing moso bamboo (*Phyllostachys pubescens*). Bot Stud 57:10 p.

**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. For Ecol Manage 260:339-44.

**Yen TM, Lee JS. 2011.** Comparing aboveg-

round carbon sequestration between moso bamboo (*Phyllostachys heterocyclus*) and China fir (*Cunninghamia lanceolata*) forests based on the allometric model. For Ecol Manage 261:995-1002.

**Yuen JQ, Fung T, Ziegler AD. 2017.** Carbon stocks in bamboo ecosystems worldwide: estimates and uncertainties. For Ecol Manage 393:113-38.



