栽植密度對六龜地區台灣杉生長之影響

陳麗琴[1)]　黃進睦[2)]　張添榮[3)]　洪富文[4)]

摘　要

本研究的目的爲應用 Weibull 機率密度函數及指數迴歸生長模式，探討六龜地區台灣杉人工林12年生以後，不同栽植密度不同林齡下之林分直徑分布結構及其生長情形，試驗地點爲六龜地區台灣杉人工林七種不同栽植密度28年生之永久試驗樣區。各樣區所調查之每木胸徑資料經檢定均適合3因子 Weibull 函數模式，再經 $Q(A, PD) = a_0 e^{a_1/A + a_2/PD^2}$ 得栽植密度及林齡與 Weibull 函數母數 a.b.c.值及存活株數的關係式，發現 a 與 b 值均隨栽植密度增加而減少，隨年齡增加而加大，c 值則不受栽植密度影響，僅隨林齡增加而略爲下降。經預測模式可發現密度愈大，同林齡之林分材積也愈高，但單株材積卻愈小，會形成此現象，主要是單株多寡足以影響林分材積，同時也預測了不同栽植密度不同林齡之林分直徑分布結構及其生長與收穫量，32年生林分從栽植密度爲1111株/ha 到4444株/ha，其收穫量分別從424.5 m^3/ha 到746.9 m^3/ha，後者爲前者的1.76倍，但栽植密度低的大徑木較多。由小到大的栽植密度之林分材積年生長率從12年生的16.2%－19.3%到32年生的2.35%－2.7%，而不論何種栽植密度下之林分生長或單株生長均以12－18年生最爲旺盛，而栽植密度2000株/ha－2500株/ha 以下的林分單位栽植密度所增加之生長量較高，又如每公頃栽植密度2000株林齡32年生之林分，胸徑20 cm 以下有460株，21－30 cm 之間有530株，31 cm 以上有138株，材積收穫量爲644.1 m^3/ha，平均年生長量爲20.1 m^3/ha。如果經營目標爲收穫量最大，則需選擇栽植密度較高者，若考量林分品質或經濟價植，則大徑木的多寡及林分材積的大小是經營者同時需要考慮的；本文提供不同栽植密度不同林分大小徑級株數預測表，可供經營者依其目標選擇栽植距離之參考。

關鍵詞：台灣杉、Weibull 機率密度函數、直徑分布、栽植密度、生長與收穫。
陳麗琴、黃進睦、張添榮、洪富文　1996　栽植密度對六龜地區台灣杉生長之影響。台灣林業科學，11(1)：1-11。

The Effect of Planting Density on the Growth of Taiwan－fir Plantations at Lu－Kuei Area

Lih－Chin Chen[1)], Gin－mu Hunag[2)], Ten－yong Chang[3)] and Fu－wen Horng[4)]

【Summary】

Taiwan－fir (*Taiwania cryptomerioides*) is a mono species of Taiwania genus in Taiwan. Due to its fast growth and good wood quality Taiwan－fir has

1) 台灣省林業試驗所林業經濟系　Divison of Forest Economics, Taiwan Forestry Research Institute.
2) 台灣省林業試驗所森林經營系　Divison of Forest Management, Taiwan Forestry Research Institute.
3) 台灣省林業試驗所林業推廣系　Divison of Forest Extension, Taiwan Forestry Research Institute.
4) 台灣省林業試驗所育林系　Divison of Silviculture, Taiwan Forestry Research Institute.
1994 年 11 月送審　1995 年 4 月通過　Received November 1994, Accepted April, 1995.

become an important species for middle elevation conifer plantations for past 20 years. At Lu－Kuei of Southern Taiwan, a density trial plantation has been established for 28 years. The densities were 1111, 1333, 1600, 2000, 2500, 3333 and 4444 trees/ha with 3 replicates of 0.05 ha plots for each density. The dbh of individual trees was measured at the age of 12, 15, 22, 25 and 28 years old. In this study, the Weibull probability density function and exponetial regression growth model were used to analyze the density and the timber growth of this permanent trial plantation. The dbh data of the three plots for each density were lumped together to test its fitness for the Weibull distribution function. The results indicated that the data of each density fitted a 3－parameter Weibull distribution function; and through the regression model of $Q(A, PD) = a_0 e^{a_1/A + a_2/PD^2}$, the relationship of stand density and age and parameters of a, b, c of Weibull distribution and survival rates could be predicted. From this prediction equation, it showed that the per unit volume growth increased with the increase of stand density at the same age, while the individual tree volume decreased with the higher stand densities. The 32－yr－old stand volume growth would be 425 m^3/ha to 747 m^3/ha with the planting density of 1111 trees/ha to 4444 trees/ha, and the dbh distribution with 2000 trees/ha at planting density would result in a stand of 460 trees of dbh < 20 cm, 530 trees/ha of dbh between 21－30 cm, 138 trees of dbh > 31 cm, and its mean annual increment being 21.1 m^3/ha/year, and total volume growth 644 being m^3/ha. If the maximum volume is the management target, a higher planting density is recommended, However, if the timber quality or economic value is considered the timber (dbh) size and economic value should be evaluated simultaneously. This study also tabulated the tree number for each dbh class at different planting density from 12 to 32 years old of Taiwania plantations for the choice of forest manager at Lu－Kuei and surrounding areas.

Key words: *Taiwania cryptomerioides*, Weibull probability density function, diameter distribution, planting density, growth and yield.

Chen, Lih－chin, Giu－mu Hunag, Ten－yong Chang, and Fu－wen Horng 1996 The Effectof Planting Density on the Growth of Taiwan－fir Plantations at Lu－kuei Area. Taiwan J. Forest Sci.,11(1):1－11.

一、緒言

台灣杉（*Taiwania cryptomerioides*）是台灣地區重要造林樹種之一。台灣省林業試驗所六龜分所自1972年起開始種植台灣杉，迄今已有約1000公頃的造林面積，爲六龜試驗林最重要之造林樹種。吾人知道欲對此資源加以合理經營管理，必須先具備相關林木生長、蓄積及林分結構等資訊，以爲林木經營時間與空間規劃之基礎。栽植距離的多寡，是經營的第一步，和將來林分生長有著密切的關係，卻一直因擾著育林工作者，而這方面長期研究又不多見。有鑑於此，林緋治先生乃於1965年設立1.05公頃台灣杉永久樣區，實施七種不同栽植距離及三個重覆之生長試驗地，十年後發表「台灣杉栽植距離試驗」研究報告（1975），强調十年間不同栽植距離下材積生長及其變化，後經張添榮，洪富文與六龜分所同仁等對該試驗地繼續加以維護及調查，迄今已有28年連續資料。有關六龜地區台灣杉人工林的研究方面，以洪良斌（1974）及林維治（1975）較早，前者主要在單株生長研究，後者爲栽植距離試驗，後有劉宣誠等（1984）著重於單株生長及材質研究，林照松與洪富文（1991）强調多項生長變數間之關係之研究，這些研究均提供了一些有關台灣杉一般性的生長的研究。最近劉浚明（1991、1993）在六龜試驗林設置了65個永久樣區及113棵樣木進行樹幹解析，進行詳細的林木生長，林分結構的推估及預測，並企圖建立決策支援系統，以達推估林分生長及蓄積量之目的；由於樣區林齡較淺且長期林分枯死資料不易取得，

該研究應較適合幼齡林短期林分生長之推估，而其研究方法則採用較有生物生長解釋能力的生長模式及推估方式，較爲進步但方法複雜。馮豐隆（1992）已完成林分結構生長模式系統（Stand & Tree Growth Simulated Modeling System，STGMS）可說是支援決策系統的核心，模式庫內容主要包括 Weibull 函數來描述直徑分佈，及生物觀點發展的 Schnut 生長模式等。其他姚榮邦（1993）分析了溪頭地區台灣杉人工林與林分密度關係，主要强調定期生長量與栽植密度的關係，羅卓振南等（1991）於苗濃事業區進行17年生之疏伐試驗。

林分生長與收穫的探討，一般可以二種方式加以區分，一種是全林分生長模式，僅考慮全林分生長及收穫，無法提供林木大小分布資料，傳統上均使用之，另一種則以直徑分布爲基礎之生長模式，具考慮林分結構的特性，最近國內也朝向使用直徑分佈法分析林木生長的結構，目前最常用來描述直徑分布情形的方法，是 Weibull 機率密度函數，此法經 Bailey 及 Dell（1973）進行林分直徑分布之模擬後，即被廣泛應用。此法的主要優點是累積分布函數容易求得及曲線配合同齡林或異齡林之直徑分佈效果理想，該函數有二個母數式及三個母數式二種，國內有多篇文獻均對此方法有詳細說明（馮豐隆與林子玉，1992；劉浚明，1993；陳麗琴與黃進睦，1992）。

本研究重點主要强調爲應用在六龜試驗林七種不同栽植密度台灣杉永久樣區28年生連續生長調查資料，分析不同栽植密度與生長之關係，建立生長模式，並以 Weibull 機率密度函數求解不同林分之直徑分布狀況，藉以了解及預測不同栽植密度在不同林齡下林木時空配置，林分結構及林分總生長量，期能爲將來台灣杉之經營在質與量之經濟考量下，提供一重要參考依據。

二、材料與方法

本研究試驗地係台灣省林業試驗所六龜分所扇平第三林區林維治先生於1965年所設置台灣杉人工林不同栽植距離試驗永久樣區，其海拔爲900公尺，地質岩層爲中生代上部粘板岩層，上層由黝黑色至黑色之粘岩及灰色砂岩構成，下層由黑色粘板岩及硬沙岩交互構成。土壤爲紅黃色灰化土，土壤呈酸性，腐植質層厚，爲粘質壤土。年平均氣溫20.6℃，最高38.2℃，最低2.6℃；年平均降雨量3275 mm；年平均濕度84%，極適宜台灣杉之生育。本樣區至今已有28年歷史，其七種栽植距離分別爲1.5x1.5 m（每公頃4444株），1.5x2.0 m（每公頃3333株），2.0x2.0 m（每公頃2500株），2.0x2.5 m（每公頃2000株），2.5x2.5 m（每公頃1600株），2.5x3.0 m（每公頃1333株），3.0x3.0 m（每公頃1111株），各三個重覆，每樣區爲0.06公頃，我們應用連續調查12、15、22、25及28年生之樣區每木胸高直徑及成活株數，進行不同栽植密度及不同林齡下台灣杉林分生長及直徑分布之林分結構之研究，其方法如下：

㈠應用陳仲木氏（1975）求解3 個母數 Weibull 機率密度函數程式，分別求算不同栽植密度及林齡下台灣杉人工林胸高直徑分布之 a、b、c 值，其函數式如下：

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

$$\infty > x \geq a > 0$$

$$b > 0$$

$$c > 0$$

其中 x 爲胸徑，a、b、c 分別代表位置（location）、大小（scale）與形狀（shape）之母數。

㈡以 K－S 法（Kolmogorov－Smirnov test）作函數式的適合度測驗（test of goodness of fit），K－S 檢定法的檢定統計量爲 $D=MAX|F(x)-S(x)|$，$F(x)$ 爲理論分配各階段的累加機率，$S(x)$ 則爲實際分配各階段之累加相對次數，利用兩者的最大差異 D 來檢定實際與理論分配的適合度，該法係以機率或相對次數爲依據，其檢定效率不會因樣本太大或太小而影響檢定效率，而卡方檢定法則有樣本大小的困擾（顏月珠，1986）。

㈢以 Nautiyal 及 Cauto（1982）所推導之收穫模式：

$$Q(A,PD)=\alpha_0 e^{(\alpha_1/A+\alpha_2/PD^2)}$$

推估栽植密度及林齡與 a、b、c 值之關係並進行存活株數的預測，以爲進一步預測將來林分結構之用，其模式爲：

$$a=Q(A,PD) \quad (3)$$

$$b=Q(A,PD) \quad (4)$$

$$c=Q(A,PD) \quad (5)$$

$$SN=Q(A,PD) \quad (6)$$

A：林齡

PD：栽植密度

SN：每公頃存活株數

a，b，c：Weibull 函數母數

α_0，α_1，α_2：求解係數

㈣將㈠步驟所求得 a，b，c 值代入直徑級上、下限之二個 Weibull 累積直徑分布函數，經相

減後即可取得不同栽植密度及不同林齡下各直徑級之機率，其相減函數如下：

$$P(D_\ell < X < Du) = \exp\{-[(D_\ell - a)/b]^c\} - \exp\{-[(Du - a)/b]^c\} \quad (7)$$

D_u、D_ℓ：直徑級上、下限

㈤依（7）式之直徑級機率與（6）式之估算留存株數模式求得各齡級各直徑級株數。

㈥應用劉宣誠氏（1984）所估算之樹高與年齡之關係式：

$$HT = -0.1420 + 1.0982A - 0.012A^2 \quad (8)$$

及 Ht＝Q（A，PD）模式可推估不同栽植密度不同年齡 DBH 相對應之 Ht，再利用材積式：

$$V = 0.0630 - 0.0237D + 0.0007D^2 + 0.0012\ DxHt \quad (9)$$

Ht：樹高

D：胸徑

V：立木材積

㈦與由㈤步驟求得不同栽植密度及林齡之林分各直徑級株數，以下式求算直徑級材積，進而求得各單位面積材積及年平均生長量，並預測未來不同栽植密度下台灣杉生長狀況。

$$V_j = N_t \int_{d_{uj}}^{d_{lj}} g(X_j)\ f(X_j, \theta_t)\ dX \quad (10)$$

V_j：直徑級 j 材積

N_t：在 t 林齡時之株數

$g(X_j)$：X_j 的材積式

θ_t：在 t 林齡之直徑分布機率密度函數之母數向量，即 a.b.c 值

$f(X_j, \theta_t)$：在 t 林齡時之 Weibull 函數 Xj 的機率

㈧應用指數模式 $Q(A) = \alpha_0 e^{\alpha_1/A}$ 分別求取不同栽植密度下林齡與單位面積材積總生長量之關係式，並加以比較。此模式以林齡 A 微分兩次，得－$a_1/2$為最大連年生長量（CAI）的林齡，若模式經 log 轉換後，再微分一次，得 $(1/Q)\cdot dQ/dA = -a_1/A^2$，意義為連年生長模式除以當年總生長量，即是年生長率＝a_1/A^2。

三、結果與討論

㈠七種不同栽植密度連續調查12，15，22，25，28年生之台灣杉人工林各樣區每木胸高直徑及留存株數經配置3母數 Weibull 機率密度函數所得直徑分佈之 a，b，c 母數值，經 K－S 法，作 $\alpha = 0.05$之適合度檢定測驗均不顯著，顯示各樣區直徑分佈皆適合採用 Weibull 函數模式，各樣區直徑分佈各母數之統計特徵值如 Table 1及 Table 2所示，各樣區平均胸高直徑的變異係數在24.7%到31.1%之間，變異相當穩定。從 Fig. 1可顯示平均胸徑係隨著栽植密度的增加而降低，且仍在繼續生長中，在28年生時從27.36 cm 到20.88 cm，差異達6.48 cm，七種密度中大致可分爲3組，栽植密1111及1333爲一組，1600及2000株爲一組，2500，3333及4444株一組。從密度大的林木其胸徑較小的現象，可發現在12年生時已發生了競爭。

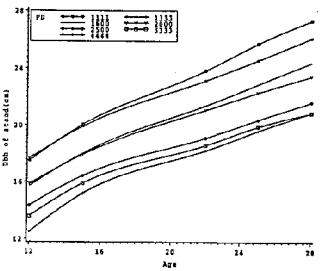


Fig. 1. The average dbh of stand in different planting densities and ages(pd = trees/ha).

㈡應用 Nautiyal 及 Cauto 之指數遞歸模式推估栽植密度及林齡與 a，b，c 值的關係及存活株數的預測所配置之模式如下式所列：

$a = 10.788621\ e^{415678/PD^2 - 11.945525/A}$　　$R^2 = 0.558$

$b = 20.271724\ e^{344261/PD^2 - 7.050643/A}$　　$R^2 = 0.716$

$c = 2.323577\ e^{2.769107/A}$　　$R^2 = 0.221$

$surv = 1314.802838\ e^{-1204894/PD^2 + 4.835693/A}$　　$R^2 = 0.94$

PD：栽植密度

A：林齡

a、b、c：分別代表 Weibull 函數之位置、大小及型狀

surv：留存株數/公頃

經 $\alpha = 0.01$之 F 值檢定測驗，均呈極顯著，由上式及 Fig. 2到 Fig. 5顯示 a 及 b 值隨栽植密度增加而減少，隨林齡增加 而加大，a 值爲代表林分最小的胸高直徑，b 值爲直徑分布的大小狀況，c 值則爲曲線的形狀，c 值不受栽植密度的影響，略呈隨林齡增加而下降，曲線呈正偏歪，雖模式檢定呈極顯著，唯決定係數共有0.221，

代表性相當低，各樣區c值的範圍並不大，平均爲2.7143，在本文仍使用該模式預測c值，但即使使用c之平均值來預測亦無不可。存活株數則隨栽植密度增加而增加，隨林齡增加而變小。從Fig. 5可看出密度高的株數隨林齡增加而下降較快，但自20－25年生時已趨緩和，到28年生時，各栽植密度並未到達收斂。不同栽植密度及林齡之樣區直徑分佈 Weibull 函數 a、b、c 值之推估狀況如 Table 3所示：

Table 1. The average DBH of stand in different planting densities and ages.

Planting density (trees/ha)	Age	Mean (cm)	STD	Minimum (cm)	Maximum (cm)	CV%	Trees /ha
1111(3.0x3.0 m)	12	17.50	4.87	7.00	29.00	27.79	740
1111	15	20.05	5.66	7.00	33.00	28.24	727
1111	22	23.84	6.89	7.00	43.00	28.89	667
1111	25	25.76	7.48	9.00	49.00	29.02	613
1111	28	27.36	7.68	11.00	53.00	28.07	593
1333(2.5x3.0 m)	12	17.67	4.76	7.00	27.00	26.95	953
1333	15	19.91	5.55	7.00	31.00	27.89	940
1333	22	23.14	6.60	7.00	39.00	28.54	867
1333	25	24.59	7.32	7.00	45.00	29.78	847
1333	28	26.14	7.53	7.00	45.00	28.80	793
1600(2.5x2.5 m)	12	15.70	4.81	5.00	29.00	30.66	1200
1600	15	18.01	5.33	7.00	33.00	29.62	1153
1600	22	21.39	6.28	7.00	39.00	29.35	1060
1600	25	22.89	6.77	7.00	43.00	29.56	1007
1600	28	24.41	7.11	7.00	45.00	29.14	947
2000(2.0x2.5 m)	12	15.85	4.52	3.00	25.00	28.51	1173
2000	15	17.93	4.99	7.00	29.00	27.81	1140
2000	22	21.07	5.66	9.00	35.00	26.84	1067
2000	25	22.31	6.13	9.00	37.00	72.45	1053
2000	28	23.44	6.25	9.00	39.00	26.66	993
2500(2.0x2.0 m)	12	14.34	4.02	3.00	25.00	28.05	1567
2500	15	16.42	4.24	7.00	27.00	25.80	1427
2500	22	19.11	5.12	9.00	31.00	26.78	1353
2500	25	20.39	5.70	9.00	35.00	27.97	1260
2500	28	21.62	6.15	9.00	39.00	28.44	1200
3333(1.5x2.0 m)	12	13.60	3.63	3.00	3.00	26.68	1980
3333	15	15.89	3.93	7.00	25.00	24.70	1760
3333	22	18.59	5.17	9.00	35.00	27.82	1660
3333	25	19.91	5.93	1.00	41.00	29.80	1533
3333	28	20.87	6.29	7.00	43.00	30.11	1473
4444(1.5x1.5 m)	12	12.50	3.89	3.00	25.00	31.13	2147
4444	15	15.18	3.97	5.00	27.00	26.16	1800
4444	22	18.21	4.97	5.00	33.00	27.28	1667
4444	25	19.61	5.49	7.00	37.00	28.00	1540
4444	28	20.88	5.99	7.00	41.00	28.70	1467

Table 2. the average parameter a, b and c values of diameter distribution tion function with different plots.

Parameters	Mean	STD	Minimum	Maximum	CV%
a	6.7714286	1.8000934	3.0000000	9.0000000	26.5836573
b	5.7602383	2.9657388	11.1025600	22.4662600	18.8178552
c	2.7143001	0.3068147	2.2948220	3.5443440	11.3036398

Table 3. The estimates of parameter a, b and c values of diameter distribution function ofdifferent planting densities and ages.

Planting density (trees/ha)	Age	a	b	c	Trees/ha
1111(3.0x3.0 m)	12	5.583401	14.888373	2.924237	741.19
1111	16	7.161097	17.244062	2.760888	670.16
1111	20	8.314345	18.832838	2.667291	630.85
1111	24	9.184601	19.972521	2.606663	605.93
1111	28	9.861444	20.828568	2.564203	588.74
1111	32	10.401613	21.494597	2.532812	576.17
1333(2.5x3.0 m)	12	5.037790	13.672918	2.924237	998.57
1333	16	6.461313	15.836311	2.760888	902.87
1333	20	7.501864	17.295365	2.667291	849.91
1333	24	8.287080	18.342007	2.606663	816.35
1333	28	8.897781	19.128168	2.564203	793.18
1333	32	9.385164	19.739823	2.532812	776.24
1600(2.5x2.5 m)	12	4.689874	12.886115	2.924237	1228.75
1600	16	6.015038	14.925017	2.760888	1110.99
1600	20	6.983778	16.300109	2.667291	1045.83
1600	24	7.714765	17.286523	2.606663	1004.52
1600	28	8.283291	18.027444	2.564203	976.02
1600	32	8.737015	18.603902	2.532812	955.18
2000(2.0x2.5 m)	12	4.423588	12.277136	2.924237	1455.63
2000	16	5.673557	14.219682	2.760888	1316.13
2000	20	6.587245	15.529790	2.667291	1238.93
2000	24	7.276728	16.469587	2.606663	1190.00
2000	28	7.812973	17.175494	2.564203	1156.23
2000	32	8.240935	17.724709	2.532812	1131.64
2500(2.0x2.0 m)	12	4.261154	11.902580	2.924237	1622.35
2500	16	5.465224	13.785862	2.760888	1466.88
2500	20	6.345362	15.056000	2.667291	1380.68
2500	24	7.009527	15.967126	2.606663	1326.30
2500	28	7.526082	16.651496	2.564203	1288.67
2500	32	7.938329	17.183956	2.532812	1261.14
3333(1.5x2.0 m)	12	4.136983	11.619249	2.924237	1765.09
3333	16	5.306531	13.457701	2.760888	1595.93
3333	20	6.163435	14.697605	2.667291	1502.32
3333	24	6.808558	15.587041	2.606663	1442.98
3333	28	7.310302	16.255121	2.564203	1402.04
3333	32	7.710730	16.774906	2.532812	1372.10
4444(1.5x1.5 m)	12	4.071777	11.462778	2.924237	1850.86
4444	16	5.222335	13.276473	2.760888	1673.48
4444	20	6.063357	14.499680	2.667291	1575.32
4444	24	6.698005	15.377139	2.606663	1513.11
4444	28	7.191602	16.036222	2.564203	1470.17
4444	32	7.585528	16.549007	2.532812	1438.78

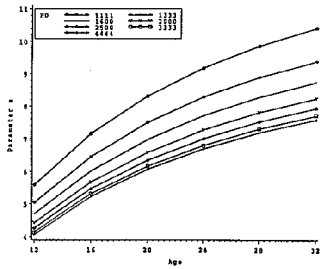


Fig. 2. The relationship of planting density and age and parameter a of Weibull function of dbh(pd = trees/ha).

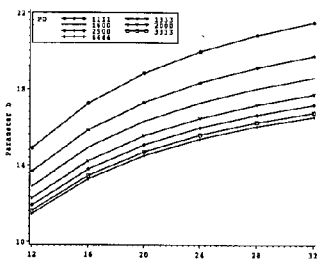


Fig. 3. The relationship of planting density and age and parameter b of Weibull function of dbh(pd = trees/ha).

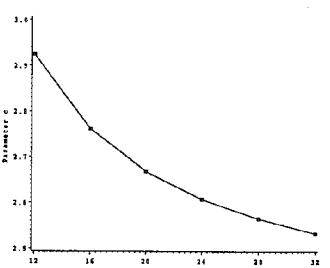


Fig. 4. The relationship of planting density and age and parameter c of Weibull function of dbh(pd = trees/ha).

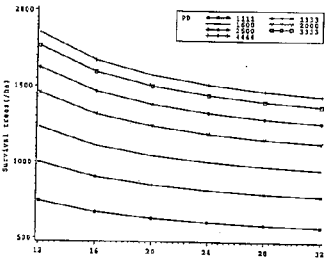


Fig. 5. The relationship of planting density and age and survival trees of stand (pd = trees/ha).

由此四個預測模式之預測值代入 Weibull 累積直徑分佈相減函數，即可預測不同栽植密度不同林齡下各直徑級之機率密度及留存株數。同林齡下，栽植密度愈小，直徑分布愈大，大徑木的株數也較多。如未來栽植密度爲每公頃2000株及林齡32年生之林分，其直徑分佈 a、b、c 預測值分別爲8.240935、17.724709及2.532812，而留存株數則下降爲每公頃1131株。台灣杉32年生人工林不同栽植密度之直徑分佈如 Fig. 6所示。

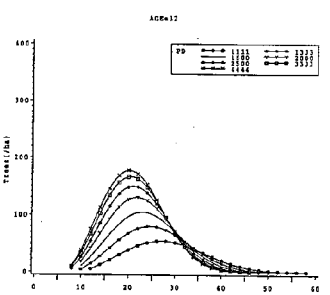


Fig. 6. The dbh distribution with the different planting densities of 32 years old(pd = trees/ha).

(三)應用劉宣誠氏（1984）所估算樹高與林齡關係與 $Ht = a_0 e^{(a_1/A) + (a_2/PD2)}$ 之模式推估不同栽植密度不同林齡 DBH 相對應 Ht 及材積式經過

$V_j = Nt \int_{d_{uj}}^{d_{\ell j}} g(X_j) f(X_j, \theta t) dX$ 方程式，算出之不同栽植密度不同林齡各直徑級材積及林分總材積，而各齡級之單位面積總材積如 Table 4 所示，以預測林齡32年生林分而言，栽植密度1111，其每公頃立木材積及年平均生長量爲424.5 m^3/ha 及13.3 m^3/ha，而栽植密度4444者，分別爲746.9 m^3/ha 及23.3 m^3/ha，後者林分材積爲前者的1.76倍，在此模式中仍可發現各栽植密度林從 Fig. 7及 Fig. 9可看出，每公頃材積年平均生長量（MAI）及連年生長量（CAI）均隨栽植密度增加而增加（CAI 可從 Fig. 7各曲線之斜率看出，斜率愈高，表示 CAI 愈大），在此模式中仍可發現各栽植密度林分材積在28年生以後仍繼續在生長中。從 Fig. 8可看出林分材積年生長率隨著栽植密度增加而增加，從 Fig. 9也可發現最大年平均生長量的林齡也會較高。在栽植密度爲4444株/ha 之林分，林齡爲12到32年生，其材積年生長率爲19.3%到2.7%，最大 MAI 爲23.6 m^3/ha，其林齡爲28年生。在栽植密度爲1111株/ha 之林分，其各林齡之材積年生長率爲16.2%到2.3%，最大 MAI 爲13.9 m^3/ha，林齡爲24年生。應用指數模式 $Q(A) = \alpha_0 e^{\alpha_1/A}$，分別求算不同栽植密度下林齡與單位面積材積之關係式如下列所示：

栽植密度		
	1111	$\ln Q = 6.781832 - 23 \cdot 390725/A$
	1333	$\ln Q = 7.000519 - 24.526452/A$
	1600	$\ln Q = 7.158605 - 25.470518/A$
	2000	$\ln Q = 7.292181 - 26.377127/A$
	2500	$\ln Q = 7.379953 - 27.033527/A$
	3333	$\ln Q = 7.446827 - 27.517406/A$
	4444	$\ln Q = 7.483633 - 27.764586/A$

$-\alpha_1/A^2$爲年生長率，$-\alpha_1/2$爲最大連年生長量之林齡，隨栽植密度之增加依次爲12到14年生。

Table 4. The estimates of stand volume and annual growth rate per hectare of different planting densities and ages.

Planting density (trees/ha)	Age						unit: m^3
	12	16	20	24	28	32	
1111	125.54	204.37	273.77	332.69	382.39	424.48	
	(0.1624)	(0.0914)	(0.0585)	(0.0406)	(0.0298)	(0.0223)	
1333	142.12	236.89	321.89	394.88	456.95	509.82	
	(0.1703)	(0.0958)	(0.0613)	(0.0426)	(0.0313)	(0.0240)	
1600	153.86	261.57	359.63	444.67	517.47	579.78	
	(0.1769)	(0.0995)	(0.0637)	(0.0442)	(0.0325)	(0.0249)	
2000	163.05	282.48	392.81	489.38	572.57	644.13	
	(0.1832)	(0.1030)	(0.0659)	(0.0458)	(0.0336)	(0.0258)	
2500	168.54	296.00	415.00	519.86	610.62	688.94	
	(0.1877)	(0.1056)	(0.0676)	(0.0469)	(0.0345)	(0.0264)	
3333	173.07	307.04	433.09	544.72	641.66	725.53	
	(0.1911)	(0.1075)	(0.0688)	(0.0478)	(0.0351)	(0.0269)	
4444	175.90	313.67	443.81	559.35	659.87	746.94	
	(0.1928)	(0.1085)	(0.0694)	(0.0482)	(0.0354)	(0.0271)	

Note: ( )Annual growth rate.

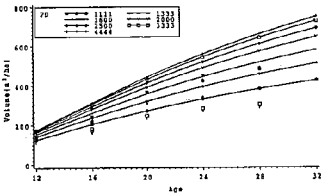


Fig. 7. The relationship of planting density and age and stand volume per hectare (pd = trees/ha).

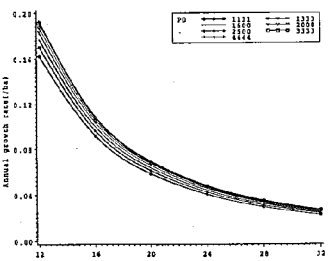


Fig. 8. The relationship of planting density and age and annual growth rate of stand volume per hectare(pd = trees/ha).

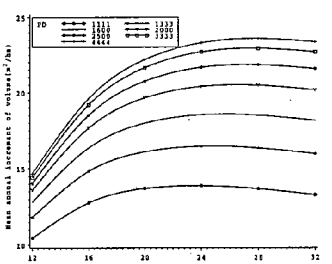


Fig. 9. The relationship of planting density and age and mean annual increment of stand volume per hectare(pd = trees/ha).

四若以單株生長狀況來分析，從 Fig. 10及 Fig. 11可觀察到，栽植距離對單木的材積生長及年平均生長量的影響恰與上述相反，即栽植密度愈大，單木生長量則愈小，但由於林木留存株數夠多足以影響到整個林分的材積，所以密度大者，其林分材積仍是比較多。以32年生的林分爲例，其栽植密度爲1111之單木材積及年平均生長量爲0.73673 m^3及0.0230 m^3，而栽植密度爲4444者，則分別下降到0.5191 m^3及0.0162 m^3，此種關係從12年生即已出現，表示早已有林木競爭的存在，因此疏伐者在12年前進行，將會提早大徑木的產出，但相對的林分總材積可能會下降。

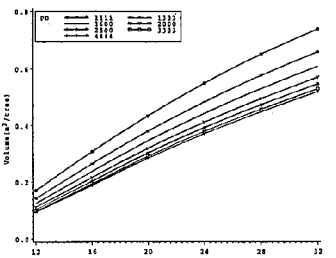


Fig. 10. The relationship of planting density and age and volume per tree (pd = trees/ha).

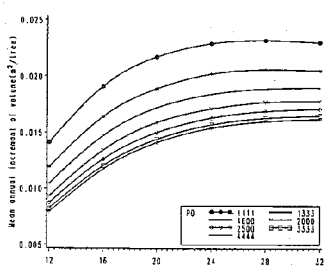


Fig. 11. The relationship of planting density and age and mean annual increment of volume per tree(pd = trees/ha).

㈤不論何種栽植密度，一般以12～18年生長最爲旺盛，由 Fig. 12曲線的斜率顯示，在不同栽植密度同林齡林分材積之比較下，林齡愈高單位栽植密度所增加之生長量較高，但一般而言，栽植密度2000株/ha～2500株/ha以下之單位栽植密度所增加之生長量較高，以上則較低，此研究與姚榮耀（1993）溪頭地區台灣杉人工林生長研究獲得一致的結果，表示超過2000株/ha～2500株/ha以上之材分，已有競爭壓力，生長緩慢。

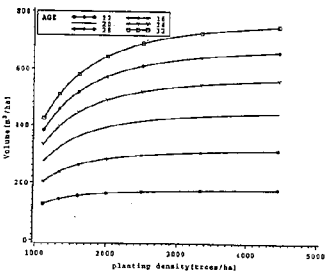


Fig. 12. The relationship of planting density and age and stand volume per hectare.

從 Fig. 6可看出各栽植密度32年生台灣杉預測直徑分布狀況，其胸徑在32 cm 以下之各直徑級株數隨栽植密度愈大而增多，但32 cm 以上者則呈現相反狀況，其他16、20、24及28年生林分依次以胸徑20、24、26、28、30 cm 爲分界點，因此，雖然栽植密度愈大，林分材積愈高，但小徑木的比率卻更高，換言之，若僅以林分材積收獲最大爲唯一目標，當然是以密度每公頃4444株，即1.5x1.5 m²爲最好的栽植距離，若考量林木品質或經濟價值，則大徑木的多寡及林分材積的大小是經營者要同時考慮的，Table 5爲將直徑級分爲五等級之不同栽植距離不同林齡林分大小徑級株數預測表，在栽植密度爲1111株/ha，12年年生林分直徑階21－30 cm 以上已有196株了，而栽植密度爲4444者，林木幾乎集中於11－20 cm 及1－10 cm 二個直徑階，到32年生時，胸徑31 cm 以上的則只有99株了。此表可供經營者依其目標選擇栽植距離之參考。台灣杉不同品等的經濟價值若能評估，則用此種 Weibull 機率密度函度預測將林分胸高直徑的分布結構，分別算出各單木的材積及價值，進而求得整個林分的價值，可說是一個相當理想的預測方法。

Table 5. The estimates of the tree number for each DBH class at different planting densities and ages.

Planting density (trees/ha)	DBH class	Age					
		12	16	20	24	28	32
1111	01－10	60.60	19.61	7.08	3.51	1.71	—
1111	11－20	484.69	304.20	211.06	159.88	128.72	108.15
1111	21－30	192.36	302.87	311.84	295.15	275.45	257.85
1111	31－40	3.48	42.69	94.22	131.47	154.72	168.81
1111	41－ >	—	0.58	5.60	15.71	28.02	40.42
1333	01－10	129.12	46.87	23.02	10.91	6.91	4.51
1333	11－20	716.40	505.02	371.74	292.78	242.77	208.91
1333	21－30	151.94	328.12	387.45	395.20	386.41	373.40
1333	31－40	0.67	21.34	66.08	109.62	143.16	167.39
1333	41－ >	—	—	1.50	6.10	13.30	21.80
1600	01－10	211.67	81.42	43.52	26.12	14.53	10.50
1600	11－20	900.73	693.56	533.38	431.64	364.91	318.78
1600	21－30	114.66	320.86	422.79	457.92	464.82	460.73
1600	31－40	0.18	10.86	45.03	86.23	122.71	151.87
1600	41－ >	—	—	0.44	2.48	6.65	12.17
2000	01－10	311.31	133.38	70.23	44.66	30.57	18.81
2000	11－20	1057.00	878.40	701.66	580.99	499.00	441.13
2000	21－30	83.70	298.81	434.94	497.42	522.35	520.84
2000	31－40	—	5.42	29.89	65.49	100.95	131.70
2000	41－ >	—	—	0.12	0.99	3.30	6.75
2500	01－10	395.22	175.18	99.88	61.52	43.43	32.25
2500	11－20	1165.92	1010.36	827.88	695.99	603.96	537.98
2500	21－30	65.36	277.85	433.34	514.57	553.19	570.14
2500	31－40	—	3.27	21.85	52.70	85.95	116.37
2500	41－ >	—	—	—	0.54	1.94	4.32
3333	01－10	73.75	215.36	116.78	78.09	56.27	42.65
3333	11－20	1230.57	1119.52	936.29	796.73	697.04	624.60
3333	21－30	52.41	258.48	426.76	522.60	572.73	598.06
3333	31－40	—	2.03	16.62	43.45	74.28	103.72
3333	41－ >	—	—	—	0.25	1.16	2.89
4444	01－10	523.74	241.41	131.69	88.99	64.80	49.63
4444	11－20	1271.24	1183.17	1001.22	887.95	754.09	678.01
4444	21－30	45.79	246.61	421.00	524.91	581.75	612.12
4444	31－40	—	1.56	13.99	38.60	67.85	96.48
4444	41－ >	—	—	—	0.18	0.90	2.32

(七)本試驗僅調查胸徑資料，再應用前人研究樹高曲線及材積式推估樹高及材積，在楊榮啓（1975）研究上提及形數會隨林分密度增加而變大，因此材積推估結果準確性會有誤差，將來再繼續調查時，應增加樹高調查，若可能時則選取若干樣木進行樹幹解析求其形數，以增加生長資料的準確性。

四、結論

(一)六龜地區七種不同栽植密度連續調查12、15、22、25、28年生之台灣杉人工林各樣區每木胸高直徑及留存株數經配置3母數 Weibull 機率密度函數所得直徑分佈之 a、b、c 母數值，經 K－S 法，作 $\alpha = 0.05$ 之適合度檢定測驗均不顯著，顯示各樣區直徑分佈皆適合採用 Weibull 函數模式，平均胸徑係隨著栽植密度的增加而降低，隨林齡增加而上升，28年以後仍在繼續增加中。

(二)應用 Nautiyal 及 Cauto 之指數迴歸模式推估栽植密度及林齡與 a、b、c 值的關係及存活株數的預測所配置之模式，顯示 a 及 b 值隨栽植密度增加而減少，隨林齡增加而加大，c 值不受栽植密度的影響，略呈隨林齡增加而下降，曲線呈正偏歪，栽植密度高的留存株數隨林齡增加而下降較快，但自20－25年生已趨緩和，至28年生時各栽植密度之留存株數並未到達收斂。

(三)從全林分生長狀況來分析，每公頃材積及年平均生長量隨栽植密度增加而增加，若以單株生長狀況來分析，則栽植距離對單木的材積生長及年平均生長量的影響恰與上述相反，即栽植密度愈大，單木生長量則愈小，但由於林木留存株數夠多，仍足以影響到整個林分的材積，此種關係從12年生即已出現，表示早已有林木競爭的存在，因此疏伐在12年前進行，將會提早大徑木的產出，但相對的林分總材積會下降。栽植密度4444株/ha，32年生的材積收穫量預測值爲746.9 m^3/ha。栽植密度1111者爲424.5 m^3/ha，前者爲後者的1.76倍，年生長率在2.7%及2.3%，最大 CAI 之林齡隨栽植密度增加依次爲12到14年生。

(四)若僅以林分材積收穫最大爲唯一目標，以密度每公頃4444株，即1.5x1.5 m 爲最好的栽植距離，若考量林木品質或經濟價值，則大徑木的多寡及林分材積的大小是經營者要同時考慮的，Table 5爲將直徑級分爲五等級之不同栽植距離不同林齡林分大小徑木株數預測表，可供經營者依其目標選擇栽植距離之參考。

引用文獻

林維治　1975　台灣杉栽植距離試驗。中華林學季刊，8(4)：18－27。

林照松、洪宮文　1991　六龜地區台灣杉人工林之生長。林業試驗所研究報告季刊，(6)：229－248。

洪良斌　1974　台灣杉人工林分生長之研究。林業試驗所研究報告第236號。

姚榮輝　1993　台灣杉人工林生長與林分密度關係之研究。台大實驗林研究報告，7(4)：1－12。

馮豐隆、林子玉　1992　台灣林分結構生長模擬模式系統之建立。中興大學實驗林研究報告。

陳麗琴、黃進睦　1992　Weibull 機率密度函數於連華池杉木人工林原木經濟假值之研究。林業試驗所研究報告季刊，7(93)：221－230。

楊榮啓　1975　台灣大學實驗林產柳杉之生長與收穫的研究。台大實驗林研究報告第116號。

劉宣誠、林國銓、唐讓雪　1984　六龜地區台灣杉造林木之生長與林質之研究。林業試驗所研究報告408號。

劉浚明、鍾旭和　1991　台灣杉生長與收穫之試驗研究。中華林學季刊，24(4)：9－14。

劉浚明　1993　建立決策支援系統以推估林分生長及蓄積量。農委會合作計畫報告。

顏月珠　1986　實用無母數統計方法。34－35頁。

羅卓振南、鍾旭和、邱志明、周朝富、羅新興　1991　疏伐與修枝對台灣杉人工林生長之影響。林業試驗所研究報告季刊，6(2)：155－168。

Bailey, R. L., and T. R. Dell　1973　Quantifying diameter Distribution with Weibull Function. For. Sci. 19(2):97－104.

Chen, C. M., and D. W. Rose　1975　Estimating a height distribution from a diameter distribution in even－age stands. Univ. of Sci. Serv. No.9376.

Nautiyal, J. C., and L. Cauto　1982　The use of production function analysis in forest management: eucalypts in Brazil, a case study. Can. J. For. Res. 12:452－458.