

紅檜和台灣杉人工林單木直徑生長與 枯死模式之研究

陳鈺惠 楊銘鑫 王兆桓*

國立宜蘭大學森林暨自然資源學系

摘要

在林分發展過程中生長和枯死是重要因子，本研究選用紅檜人工林與台灣杉人工林建立紅檜與台灣杉的單木直徑生長及枯死模式。資料以林務局森林永久樣區複測的調查資料。自變數為胸高直徑、林分斷面積、大於目標林木的斷面積合計值、活冠比、地位指數、平均優勢木樹高等。生長模式的應變數為胸高直徑生長量，使用 SAS 統計軟體的 NLIN 程式分析。枯死模式的應變數為死亡與存活，使用 SAS 統計軟體的 Logistic 程式分析，並以其卡方檢定(χ^2)與AIC值進行自變數的篩選。在目前的資料中，有些樣區缺乏造林年度，所以使用平均優勢木樹高來代替地位指數。結果顯示在紅檜的單木直徑生長模式中 D、SI(或 Hd)、CR、BAL、BA 具有影響。在台灣杉的單木直徑生長模式中 D、Hd、CR、BAL、BA 具有影響。在紅檜的單木枯死模式中 D、D²、SI(或 Hd)、BAL、CR 具有影響。在台灣杉的單木枯死模式中 D、CR、SI(或 Hd) 具有影響。當缺少造林年度時，可使用平均優勢木樹高建立單木直徑生長模式和枯死模式。

關鍵詞：單木模式，Logistic 模式，直徑生長

Individual Tree Diameter Growth and Mortality Models for *Chamaecyparis formosensis* and *Taiwania cryptomerioides* Plantations

Yu- Hui Chen Ming- Xin Yang Chao- Huan Wang*

Department of Forestry and Natural Resources, National Ilan University

Abstract

The model in forest development and harvesting is needed to contain growth and death. Equations are presented to construct individual diameter growth and mortality models for *Chamaecyparis formosensis* and *Taiwania cryptomerioides* plantations using the first and the second survey data from Taiwan Forestry Bureau permanent plots. The independent variables are diameter at breast height (DBH), site index (SI), crown ratio (CR), stand basal area (BA), stand basal area in trees larger than subject tree (BAL) and the average dominant tree height(Hd). The dependent variable of the diameter growth model is the diameter growth, using the SAS Proc NLIN for analysis. The dependent variable of the mortality model is a

binomial variable for survival and death, using the SAS Proc Logistic for analysis, and its chi-square test (χ^2) and the AIC value for the independent variables selection. Not all of the plots have the planting year records, so the average dominant tree height is used to replace the site index to establish both models. The results of fitting diameter growth models show that D, SI(or Hd), CR, BAL and BA are significantly effecting diameter increment of trees in *Chamaecyparis formosensis* plantation; D, Hd, CR, BAL and BA are significantly effecting diameter increment of trees in *Taiwania cryptomerioides* plantation. The results of fitting mortality models show that D, D², CR, SI(or Hd) and BAL have significant impact the tree mortality rate in *Chamaecyparis formosensis* plantation; D, CR and SI(or Hd) have significant impact the tree mortality rate in *Taiwania cryptomerioides* plantation. When the lack of the planting year record, we can use Hd instead of SI to establish both models.

Key words: individual tree model, Logistic model, diameter growth

*Corresponding author. E-mail : ying@niu.edu.tw

前言

森林經營的目的，在於指導如何利用林地、經營林地，使林地發揮最佳利用，誘導組織規律化，促使森林經營獲得較高的效益，貢獻全民福祉。台灣森林採永續經營為原則，整合「森林永續經營」、「森林資源多目標利用」及「維護生物多樣性」三大理念。在經營理念上秉持生態的方法，融合民眾需求與環境價值，達成國家森林的多目標永續經營。在林分發展的過程中生長和枯死的資訊是極為重要的，任何模式在建構林分的發展與收穫是必須包含生長和枯死。然而，在國內與生長和收穫模式的研究相較之下，可能是因為較難收集到足夠的資料進行分析的緣故，所以枯死的研究較缺乏。

一般直徑生長模式與枯死模式主要可以分成五個方向探討：林木的大小、林木的活力、林分的生產力、林木受競爭的位置和林分密度。本研究主要方向為：一、建立紅檜與台灣杉的單木直徑生長模式。二、建立紅檜與台灣杉的單木枯死模式。

材料方法

一、材料

本研究採用林務局森林永久樣區複測的調查資料。林務局所管轄國有林地地區分成 8 個林區 37 個事業區，在全島設置 3,206 個永久樣區。本研究選用土地利用型為紅檜及台灣杉林型的樣區，挑選樣區內樣木株數大於 5 株，且具有兩次資料的樣區。經篩選後紅檜林型樣區數為 109 個，台灣杉林型樣區數為 65 個。

紅檜(學名：*Chamaecyparis formosensis* Matsum.)是柏科扁柏屬(*Chamaecyparis*)植物，為台灣特有種，分布於中海拔 1,000 ~ 2,900 公尺的山區，常形成純林或和台灣扁柏、鐵杉、闊葉林等混生成林(劉業經，1980；楊遠波等，1999)。

台灣杉(學名：*Taiwania cryptomerioides* Hayata)是一種杉科台灣杉屬(*Taiwania*)植物，為台灣特有種。分布於台

灣中央山脈中至高海拔山區約 1,100~2,500 公尺處，與其他針葉樹混生或生長於闊葉林內，亦常形成小面積的純林(劉業經，1980；楊遠波等，1999)。

二、方法

本研究所使用的符號如下：DG =生長量(cm)；P_n=枯死率，D =胸高直徑(cm)；SI =地位指數(m)；CR =活冠比(1-枝下高/樹高)；BAL =大於目標林木的斷面積合計值(m²/ha)(樣區內大於目標木斷面積的加總)；BA =林分斷面積(m²/ha)；Hd =平均優勢木樹高(m)。

全林分模式較適用於同林齡，而單株模式可應用於異林齡及混淆林。與全林分生長模式不同，單株模式可直接判斷單木的生長狀況和潛力。單株模式可分為單株－距離獨立模式(distance-independent)及單株－距離相依模式(distance-dependent)兩種，單株－距離相依模式需要用到林木位置圖才可計算，相對的成本較高，而且單株－距離獨立模式也較容易融合於各種的調查資料。所以，通常比較傾向於使用單株－距離獨立模式，單株模式包含單木生長模式與枯死模式兩個部分加總可得到林分資訊。單株模式的建立雖然較全林分模式為困難，但其彈性較大及可塑性較高，可應用於同林齡、異林齡、純林及混淆林。

在變數選擇以 DBH 代表林木大小；以 SI 代表林地生產力；以 CR 代表林木的活力；以 BA 代表林分的密度；以 BAL 代表該林木受到競爭壓力的位置。地位指數參考顏添明(2010)，其地位指數曲線採用林齡及平均優勢木樹高(Hd，樣區內目標樹種前 10%的平均樹高)轉換。但並非所有的資料都具有造林年度，所以使用平均優勢木樹高直接取代地位指數。

(一)單木直徑生長模式

依生長量部位的不同，可區分成：(1)直徑生長，(2)斷面積生長，(3)樹高生長，(4)材積生長，而斷面積生長與材積生長是由直徑生長量和樹高生長量推算出來的。在單木直徑生長模式的解釋變數之選擇上，常見的有 D、CR、SI、BA、BAL、CCH(單木樹冠的頂端處之其他

競爭木樹冠斷面積合計值)、CCF(冠層競爭指數)、CC₆₆(單木樹冠長度 66%處之其他競爭木樹冠斷面積合計值)、CW(冠幅)。其中BAL、CCH、CCF、CC₆₆代表林木間的競爭，在國外因樹冠資料齊全，所以可以使用與樹冠層有關的變數，但在國內尚未有在冠層競爭方面完整之研究，且因永就樣區的資料上無法建立樹冠的體型模式，不能計算CCH、CC₆₆和CCF，故本研究以BAL代表競爭關係。採用Hann and Larsen(1991)、Zumrawi and Hann(1993)以及Bravo et al.(2001)研究的直徑生長方程式為基礎建立模式。

方程式(1)使用於有造林年度的資料：

$$DG = \exp(a_0 + a_1 \times \ln(D+1) + a_2 \times D^2 + a_3 \times SI + a_4 \times CR + a_5 \times BAL + a_6 \times BA) \quad (1)$$

方程式(2)，以Hd取代SI，使用於全部資料：

$$DG = \exp(a_0 + a_1 \times \ln(D+1) + a_2 \times D^2 + a_3 \times \ln(Hd) + a_4 \times CR + a_5 \times BAL + a_6 \times BA) \quad (2)$$

資料的分析使用 SAS 統計軟體中 Proc NLIN 程式，進行自變數的篩選，直到變數皆達到顯著水準(P<0.05)。

(二)單木枯死模式

Logistic 函數是最常用來建立單木枯死模型。其性質：(1) Logistic 函數值介於 0 和 1 之間，包括預測枯死率的潛在的範圍；(2) 選擇適當的轉換係數和變數，可以用來敘述大部分自然發生的枯死；(3) 非線性推估方程式(非線性最小平方法和最大概似法)中能有效的推估出 Logistic 模式的參數，但不受所選初始值的影響(向偉等，2008；杜紀山，1999；Hann and Wang, 1990；Hann and Hanus, 2001)

本研究使用 Logistic 程式來預測單木的枯死。其方程式為：

$$P_m = \frac{1}{[1 + \exp(-Z)]} \quad (3)$$

式中：P_m 為單木枯死率；當 P_m = 1 時，代表林木枯死；當 P_m = 0 時，代表林木存活。Z = f(x, β)，x = 自變數，β = 迴歸係數。

方程式(4)使用於有造林年度的資料：

$$Z = b_0 + b_1 \times D + b_2 \times D^2 + b_3 \times \frac{1}{D} + b_4 \times BA + b_5 \times BAL + b_6 \times CR + b_7 \times SI \quad (4)$$

方程式(5)，以Hd取代SI，使用於全部資料：

$$Z = b_0 + b_1 \times D + b_2 \times D^2 + b_3 \times \frac{1}{D} + b_4 \times BA + b_5 \times BAL + b_6 \times CR + b_7 \times Hd \quad (5)$$

資料的分析使用SAS統計軟體的Proc Logistic程式，並以其卡方檢定 (χ²)與Akaike information criterion(AIC)值及後退刪除法的方式進行自變數的篩選，逐步刪除未顯著中最大的P值，直到變數皆達到顯著水準(P<0.05)。

結果與討論

一、單木直徑生長模式

表 1a 和 1b 各為僅有造林年度資料和全部資料的樣本統計值。紅檜人工林全部資料有效樣本數為 2746 株，有造林年度的資料有效樣本數為 2029 株。台灣杉人工林全部資料有效樣本數為 1642 株，有造林年度的資料有效樣本數為 1224 株。

本研究以 SAS 統計軟體，將篩選後有造林年度的資料配方程式(1)，全部的資料配製方程式(2)，其結果分別顯示在表 2 和表 3。

前人研究顯示，CR(活冠比)和 SI(地位指數)與直徑生長量呈現正效應，BA(林分斷面積)和 BAL(大於目標林木的斷面積合計值)與直徑生長量呈負效應，而 D 與生長量呈現曲線效應(Hann and Larsen, 1991；Zumrawi and Hann, 1993；Bravo et al., 2001；Hann et al., 2006)。本研究顯示，CR 與直徑生長量呈現正效應，CR 值越大，代表林木的活力越強，直徑生長量也相對越快。BAL 與直徑生長量呈現負效應，BAL 越大，代表該林木在林分內受到競爭的壓力越大，故其直徑生長量也會相對的較小。BA 與直徑生長量呈負效應，BA 越大，代表林分密度越大，直徑生長量越小；Hd(平均優勢木樹高)與直徑生長量呈

表 1a 配製生長模式的樣木統計值(有造林年度的資料)

Table 1a Summary statistics for the diameter growth models(with planting year records data)

	Mean	Min	Max	SD	Mean	Min	Max	SD
	紅檜人工林(n=2029)				台灣杉人工林(n=1224)			
DG	2.75	0.00	16.67	2.48	2.67	0.00	14.00	2.71
D	17.68	2.00	66.00	7.81	18.81	4.00	59.00	7.48
SI	13.73	7.00	24.53	2.62	15.09	6.45	24.67	3.74
CR	0.53	0.09	0.95	0.19	0.50	0.04	0.93	0.21
BAL	23.38	1.06	102.92	17.05	33.98	1.10	104.82	24.59
BA	36.02	2.49	103.31	19.74	52.34	8.45	106.96	27.77

表 1b 配製生長模式的樣木統計值(全部資料)

Table 1b Summary statistics for the diameter growth models(with all data)

	Mean	Min	Max	SD	Mean	Min	Max	SD
	紅檜人工林(n=2746)				台灣杉人工林(n=1642)			
DG	2.57	0.00	16.67	2.40	2.73	0.00	14.00	2.74
D	17.42	2.00	66.00	7.73	19.81	2.20	59.00	7.78
Hd	12.09	4.30	27.50	4.11	14.78	5.30	29.30	4.41
CR	0.52	0.09	0.97	0.19	0.51	0.04	0.93	0.20
BAL	24.82	1.06	102.92	17.94	34.71	1.10	112.07	24.11
BA	37.96	1.87	103.31	20.47	53.85	8.45	112.84	26.80

表 2 紅檜與台灣杉人工林生長模式(1)的迴歸係數(有造林年度的資料)

Table 2 Regression coefficients for *Chamaecyparis formosensis* and *Taiwania cryptomerioides* plantations of diameter growth model(1) (with planting year records data)

	n	ln(D+1)		D ²	SI	CR	BAL	R ²	MSE	P 值
		b ₀	b ₁	b ₂	b ₃	b ₄	b ₅			
紅檜	2029	0.8202 (0.096) ¹	-0.0081 (0.0020)		0.0589 (0.0055)	0.3135 (0.0878)	-0.0344 (0.0017)	0.67	4.53	<.0001
台灣杉	1224	-0.2541 (0.356)	0.4124 (0.1292)	-0.0001		0.9906 (0.1378)	-0.016 (0.0016)	0.59	5.97	<.0001

註：1. 括弧內為標準差

表 3 紅檜與台灣杉人工林生長模式(2)的迴歸係數(全部資料)

Table 3 Regression coefficients for *Chamaecyparis formosensis* and *Taiwania cryptomerioides* plantations of diameter growth model(2) (with all data)

	D		D ²	ln(Hd)	CR	BAL	BA	R ²	MSE	P 值
	b ₀	b ₁	b ₂	b ₃	b ₄	b ₅	b ₆			
紅檜(n=2746)										
	2.04 (0.13) ¹	0.0169 (0.0066)	-0.00011	-0.387 (0.058)	0.438 (0.084)	-0.0194 (0.0023)	-0.0078 (0.0018)	0.64	4.45	<.0001
台灣杉(n=1642)										
	1.38 (0.20)	0.109 (0.011)	-0.00121 (0.00022)	-0.667 (0.082)	0.525 (0.113)		-0.0112 (0.0011)	0.61	5.86	<.0001

註：1. 括弧內為標準差

現負相關(表 2、3)。D與直徑生長呈負效應或曲線效應，表 2 的紅檜，其直徑生長隨D增加而減少；依表 3 台灣杉人工林的迴歸係數以東勢林區管理處大安溪事業區之第 61 樣區為例繪製成圖，其中Hd與BA為固定值，分別為 30 cm及 106 m² / ha。將活冠比(CR)分別固定為 0.1、0.45、0.8 會製成曲線(0.1 和 0.8 分別為該樣區的最小值及最大值)。由圖 1 可明顯看出直徑生長隨D增加而增加，當DBH=45 cm時，其生長量達到最大，之後的生長量會隨D增加而減少。

紅檜及台灣杉林木配製方程式(1)和(2)皆為收斂，皆

達顯著水準($\alpha=0.05$)，表 2 中紅檜林的R²和MSE分別為 0.67 和 4.53，台灣杉林的值分別為 0.59 和 5.97。表 3 紅檜林的值分別為 0.64 及 4.45，台灣杉林的值分別為 0.61 和 5.86。

二、單木枯死模式

表 4a 為紅檜、台灣杉人工林(有造林年度)的統計值，其有效樣本數分別為 2445 與 1462 株。表 4b 為紅檜、台灣杉人工林(全部)的統計值，其有效樣本數分別為 3263 與 1937 株。方程式(4) 和(5)的分析結果分別顯示在表 5 和 6。

以 AIC 值越小越好，甚至可為負值(Geenwood, 2008)。由表 5、6 顯示出，紅檜林的 AIC 值分別，由 1460.36 下降至 1457.03 以及由 1877.26 下降至 1871.52；臺灣杉林的 AIC 值由分別，由 839.83 下降至 834.80 以及由 1018.12 下降至 1014.30。

依據 AIC 最小值與較為顯著的 P 值做為選擇最適的迴歸式：

方程式 6、7 為紅檜人工林最適的迴歸式，其 AIC 值分別為 1457.03 及 1871.52。

$$P_m = \frac{1}{[1+\text{EXP}(-Z)]}$$

其 Z 函數如下：

$$Z = -2.5023 - 0.1644 \times D + 0.00184 \times D^2 + 0.00967 \times \text{BAL} - 0.7181 \times \text{CR} + 0.1695 \times \text{SI} \quad (6)$$

$$Z = -1.2802 - 0.1763 \times D + 0.00145 \times D^2 + 0.1021 \times \text{Hd} \quad (7)$$

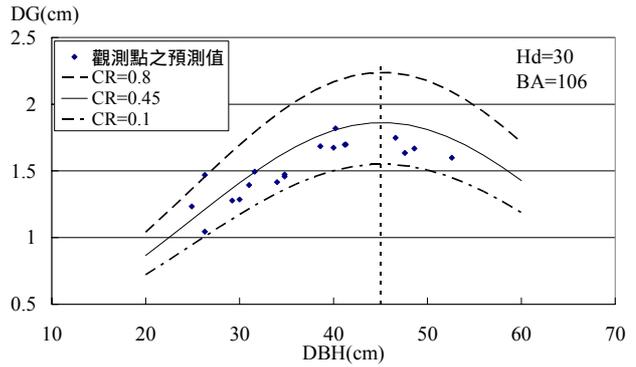


圖 1 生長模式(2)台灣杉人工林直徑與生長量的關係圖

Fig. 1 The relationship between diameter and growth for *Taiwania cryptomerioides* plantations of diameter growth model(2)

表 4a 配製枯死模式的樣木統計值(有造林年度的資料)

Table 4a Summary statistics for the mortality models(with planting year records data)

	Mean	Min	Max	SD	Mean	Min	Max	SD
	紅檜人工林 (n=2445)				台灣杉人工林 (n=1462)			
D	17.24	2.00	66.00	7.79	18.43	4.00	59.00	7.39
BA	36.12	2.49	103.31	19.48	51.76	8.45	106.96	26.91
BAL	24.19	1.06	102.92	17.12	34.45	1.02	105.95	24.16
CR	0.52	0.06	0.95	0.19	0.50	0.04	0.93	0.21
SI	13.84	7.00	24.53	2.71	15.31	6.45	24.67	3.84

表 4b 配製枯死模式的樣木統計值(全部資料)

Table 4b Summary statistics for the mortality models(with all data)

	Mean	Min	Max	SD	Mean	Min	Max	SD
	紅檜人工林 (n=3263)				台灣杉人工林 (n=1937)			
D	16.97	2.00	66.00	7.70	19.31	2.20	59.00	7.69
BA	37.98	1.87	103.31	20.46	53.62	8.45	112.84	26.28
BAL	25.60	1.06	102.92	18.30	35.67	1.02	112.48	24.20
CR	0.52	0.06	0.97	0.19	0.50	0.04	0.93	0.21
SI	12.19	4.30	27.50	4.10	15.04	5.30	29.30	4.64

表 5 紅檜與臺灣杉人工林枯死模式的變數篩選過程(有造林年度的資料)

Table 5 The variables selection process for *Chamaecyparis formosensis* and *Taiwania cryptomerioides* plantations of mortality models (with planting year records data)

截距項	D	D ²	D ⁻¹	BA	BAL	CR	SI	AIC
b ₀	b ₁	b ₂	b ₃	b ₄	b ₅	b ₆	b ₇	
紅檜								
*	**	*	NS	NS	NS	*	****	1460.36
****	****	*	.	NS	NS	*	****	1458.47
****	****	*	.	.	**	*	****	1457.03
臺灣杉								
NS	NS	NS	NS	NS	NS	***	****	839.83
NS	NS	NS	NS	NS	.	***	****	837.84
NS	***	.	NS	NS	.	***	****	835.90
***	****	.	.	NS	.	***	****	834.80
****	****	.	.	.	.	***	****	**834.95

註：NS 代表不顯著；*代表 p<0.05；**代表 p<0.01；***代表 p<0.001；****代表 p<0.0001

表 6 紅檜與臺灣杉人工林枯死模式的變數篩選過程(全部資料)

Table 6 The variables selection process for *Chamaecyparis formosensis* and *Taiwania cryptomerioides* plantations of mortality models (with all data)

截距項	D	D ²	D ⁻¹	BA	BAL	CR	Hd	AIC
b ₀	b ₁	b ₂	b ₃	b ₄	b ₅	b ₆	b ₇	
紅檜								
NS	***	*	NS	NS	NS	NS	****	1877.26
NS	***	*	NS	.	NS	NS	****	1875.28
****	****	*	.	.	NS	NS	****	1873.43
****	****	*	.	.	NS	.	****	1872.07
****	****	*	.	.	.	.	****	**1871.52
臺灣杉								
NS	NS	NS	NS	NS	NS	***	****	1018.12
NS	****	.	NS	NS	NS	***	****	1016.18
NS	****	.	NS	.	NS	***	****	1014.30
**	****	.	.	.	NS	***	****	1014.40
**	****	.	.	.	.	***	****	**1014.30

註：NS 代表不顯著；*代表 p<0.05；**代表 p<0.01；***代表 p<0.001；****代表 p<0.0001

方程式 8、9 為臺灣人工杉林最適的迴歸式，其 AIC 值分別為 834.95 及 1014.30。

$$Z = -2.0608 - 0.0775 \times D - 1.4517 \times CR + 0.1124 \times SI \quad (8)$$

$$Z = -1.27 - 0.0994 \times D - 1.4789 \times CR + 0.0841 \times Hd \quad (9)$$

本研究所選出的臺灣杉林最適迴歸式(8)的 AIC 值不是最小值。在表 5 中所示的迴歸式中，最小的 AIC 值為 834.80，但其中有一個變數(BA)為不顯著，所以不選用。

前人研究顯示，D、CR與枯死率呈現負效應，SI、BAL與枯死率呈現正向效應(Hann and Wang, 1990；Hann and Hanus, 2001；Hann *et al.*, 2006)；向偉等(2008)研究顯示D⁻¹、D²、BA與枯死率呈現正向效應。本研究顯示，D⁻¹及BA是不具影響力(P>0.05)。D與林木枯死呈現負向效

應，D值代表林木的大小，當D值越大，枯死率會下降。依一般林木生長的規律，幼齡期D值小，植株密度大，林木間競爭強，枯死率較大；成熟期D值大，植株密度降低，林木間競爭減緩，枯死率下降；直到林木進入老熟期枯死率才再度上升。SI及Hd與林木枯死為正向效應，即代表SI及Hd值越大時，林地生產力越高，造成林木間競爭越大，因此枯死率會上升，留存的林木生長快速。在方程式(6)中D²在紅檜人工林具顯著的正向效應(P<0.05)，以嘉義林區管理處阿里山事業區之第 26 樣區為例繪製成圖，其中的SI = 13.5 為固定值，每株林木有不同的CR、BAL值，分別將其固定為 0.1、0.4、0.9 和 0.0、59.1、81.9(分別為該樣區的最小值、平均值以及

最大值)。由圖 2 可明顯看出林木初期枯死率會隨 D 增加而減少，但當 $D > 45\text{cm}$ 時，枯死率會增加。林木初期因林木直徑較小，故其 CR 值較小，BAL 值較大，所以樣本分佈會比較接近 $\text{CR}=0.1$ 、 $\text{BAL}=81.9$ 的曲線，隨著 D 的增加，CR 會隨之增加，但 BAL 會隨之降低，樣本分佈也會慢慢的向 $\text{CR}=0.9$ 、 $\text{BAL}=0.0$ 移動。CR 在臺灣杉林有顯著($P < 0.001$)的負向效應，但在紅檜林僅有方程式 (6) 具負向效應($P < 0.05$)，當 CR 值越大時，代表林木的活力強，枯死率會下降。BAL 僅有在方程式(6)的紅檜林具有正向效應($P < 0.05$)，其值越大，代表該林木在林分內受到競爭越大，枯死率會增加。

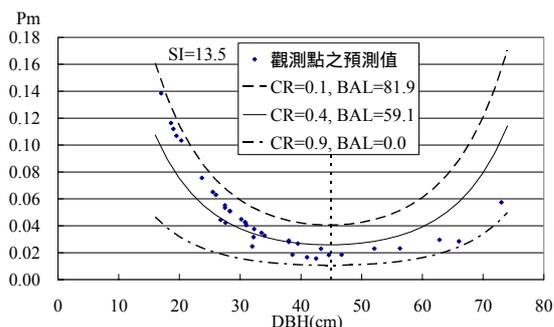


圖 2 枯死模式(6)紅檜人工林直徑與枯死率的關係圖
Fig. 2 The relationship between diameter and mortality rate for *Chamaecyparis formosensis* plantations of mortality model(6)

結 論

在單木直徑生長模式中，CR 與直徑生長有正效應，當 CR 越大，其生長量越大。BAL 與直徑生長呈負效應，除了在 Hd 的台灣杉模式中不具影響。BA 在全部資料的紅檜與台灣杉直徑生長中呈負效應，BA 越大，其生長量越小。Hd 對於紅檜和台灣杉直徑生長皆呈負效應。SI 僅對紅檜直徑生長呈正效應。D 與直徑生長關係，在有 SI 的紅檜生長模式為負效應，其他皆為曲線效應。

在單木枯死模式中，D 與枯死率為負向效應，當 D 增加時，枯死率會減少，但對紅檜而言，當 D 達到某大小後其枯死率會再度增加。SI、Hd 越大，枯死率會越大。CR 越大，枯死率會越小，但 CR 在有 SI 的紅檜枯死模式中為不顯著。BAL 僅在有 SI 的紅檜枯死模式中有顯著的正向效應，BAL 越大，枯死率越大。當缺少造林年度時，可使用平均優勢木樹高建立單木直徑生長模式和枯死模式。

誌 謝

本研究承蒙行政院農委會林務局經費補助(99 農科-8.3.1-務-e1)，林務局提供的森林永久樣區資料，黃鶯小姐在資料及文書整理上給予的幫助，皆在此表達衷心的感謝。

參考文獻

- 向偉、雷相東、劉剛、徐光、陳光法。2008。近天然落葉松雲冷杉林單木枯損模型研究。北京林業大學學報 30(6)：90-98。
- 杜紀山。1999。落葉松林木枯損模型。林業科學 35(2)：45-47。
- 楊遠波、劉和義、呂勝游。1999。台灣維管束植物簡誌(第二卷)。行政院農委會。台北。pp. 12-16。
- 劉業經。1980。台灣重要樹木彩色圖誌。國立中興大學和台灣省林務局合作研究報告。pp. 137-147。
- 顏添明。2010。建置森林生長量與蓄積量分析系統及碳吸存估計之研究。(未發表)。
- Bravo, F., D. W. Hann, and D. A. Maguire. 2001. Impact of competitor species composition on predicting diameter growth and survival rates of Douglas-fir trees in southwestern Oregon. *Can. J. For. Res.* 31: 2237-2247.
- Geenwood, D. L. and P. L. Weisberg. 2008. Density-dependent tree Mortality in Pinyon-Juniper woodlands. *Forest Ecol. Manag.* 255: pp. 2129-2137.
- Hann, D.W. and C. H. Wang. 1990. Mortality equations for individual trees in southwest Oregon. *Forest Research Laboratory, Oregon State University, Corvallis, Ore. Res. Bull.* 67.
- Hann, D.W. and D.R. Larsen. 1991. Diameter growth equations for fourteen tree species in southwest Oregon. *Forest Research Laboratory, Oregon State University, Corvallis, Ore. Res. Bull.* 69.
- Hann, D.W. and M.L. Hanus. 2001. Enhanced mortality equations for trees in the mixed conifer zone of southwest Oregon. *Forest Research Laboratory, Oregon State University, Corvallis, Ore. Res. Contrib.* 34.
- Hann, D.W., D. D. Marshall and M.L. Hanus. 2001. Reanalysis of the SMC-Oregon equations for diameter-growth rate, height-growth rate, and mortality rate of Douglas-fir. *Forest Research Laboratory, Oregon State University, Corvallis, Ore. Res. Contrib.* 49.
- Zumrawi, A.A. and D.W. Hann. 1993. Diameter growth equations for Douglas-fir and grand fir in the western Willamette Valley of Oregon. *Forest Research Laboratory, Oregon State University, Corvallis, Ore. Res. Contrib.* 4.

99 年 10 月 23 日投稿

99 年 12 月 20 日接受