

研究報告

紅檜與台灣扁柏林分自我疏伐之初探

邱志明^{1,2)} 彭炳勳¹⁾ 唐盛林¹⁾

摘 要

為反應生態環境保護與自然資源保育之世界潮流，天然林之繼續禁伐仍為必然之趨勢，在此情況下，透過育林技術，永續並集約經營現有人工林，使之成為林產物供應之主要來源，已成為林業經營上一項主要課題。紅檜與台灣扁柏均為台灣重要之鄉土樹種且材質優異，可做為優良之傢俱用材，紅檜試驗地位於太平山事業區20林班，造林時，栽植密度為10,000株 ha⁻¹，株行距為1×1 m，於林齡8年生時，林分已發生嚴重自我疏伐現象，因此進行5種密度調整，每公頃分別保留10,000(對照區未調整8608)、5000、2500、1660及1110株，台灣扁柏試驗地位於大溪事業區94林班，林分天然更新後，15年生時密度達11,200株 ha⁻¹，因此，同樣進行除伐之林分密度調整，每公頃留存5000、3300、2000株，另太平山事業區32林班32年生時，未干擾之對照區林分約1500~2000株。惟不同林分密度之存活株數達最大密度時，隨著林木生長株數會減少，最後成自我疏伐曲線一致軌跡變化之趨勢。又本試驗以密度調整後，藉由發生自我疏伐，枯死率達5%之樣區，視為林分最大密度或林分自我疏伐門檻，求出林分單木材積(v)與每公頃密度(ρ)的迴歸式，紅檜為 $v = 4.73544 \times 10^4 \rho^{-1.67604}$ ，台灣扁柏 $v = 4.12392 \times 10^5 \rho^{-2.12166}$ 。達最大密度時，林分二次方根平均胸徑(QMD)和林分株數之關係為紅檜 $\log QMD = 3.379 - 0.662 \log \rho$ ，台灣扁柏 $\log QMD = 3.669 - 0.801 \log \rho$ ，台灣扁柏自我疏伐斜率及截距均大於紅檜，本研究結果可做為台灣北部檜木人工林決定不同生長階段或林齡，疏伐策略決定之重要資訊。

關鍵詞：紅檜、台灣扁柏、林分結構、自我疏伐曲線。

邱志明、彭炳勳、唐盛林。2018。紅檜與台灣扁柏林分自我疏伐之探討。台灣林業科學33(1):77-88。

¹⁾ 林業試驗所森林經營組，10066台北市南海路53號 Division of Forest Management, Taiwan Forestry Research Institute, 53 Nanhai Rd., Taipei 10066, Taiwan.

²⁾ 通訊作者 Corresponding author, e-mail: cmchiu@tfri.gov.tw

2017年2月送審 2017年3月通過 Received February 2017, Accepted March 2017.

Research paper

Preliminary Analysis of the Self-Thinning in Even-Aged *Chamaecyparis formosensis* and *Chamaecyparis obtusa* var. *formosana* Stands

Chih-Ming Chiu,^{1,2)} Ping-Hsun Peng,¹⁾ Sheng-Lin Tang¹⁾

【 Summary 】

The protection of ecological environments and conservation of natural resources are current trends would wide. Therefore, the ban of natural forest cutting is still a continuing tendency. Under these circumstances, sustainable and intensive management of forest plantations through silvicultural practices should render them the main provider of forest products. *Chamaecyparis formosensis* (red false cypress) is a native species to Taiwan and has good wood properties which can serve as an excellent timber for furniture. The stand we investigated underwent serious self-thinning at 8 yr of age, and stand densities of treatment plots were while that of the control plot was 8606 trees ha⁻¹ were adjusted to 5000, 2500, 1660, and 1110 trees ha⁻¹, while *Chamaecyparis obtusa* var. *formosana* (yellow false cypress) sites were located at compartment no. 94 of Ta-Shi and no. 32 of the Tai-Ping-Shan working circle at Chi-lan Mt. in northern Taiwan. The former site was a naturally regenerated stand after site preparation. Stand density reached 11,200 trees ha⁻¹ at 15 yr of age, due to serious competition. The stand densities for the treatment plots were adjusted to 5000, 3300, and 2000 trees ha⁻¹. At the latter site, stand densities were 1500~2000 trees ha⁻¹ at 32 yr old for non-thinned plots. However, the above different stand densities, while reaching maximum densities for both species, should decrease with increasing stand growth, and then are expected to level off to a constant trajectory. In this report, the mortality ratio reached 5%, and served as the full-density or self-thinning threshold. The relationship between the mean stem volume (v) and stand density (ρ) for red cypress was: $v = 4.73544 \times 10^4 \rho^{-1.67604}$; and for yellow false cypress was: $v = 4.12392 \times 10^5 \rho^{-2.12166}$. When reaching the maximum density, the quadratic mean diameter (QMD) and stand density (ρ) equations were: red false cypress QMD = $2.393 \times 10^3 \rho^{-0.662}$, and yellow false cypress QMD = $4.667 \times 10^3 \rho^{-0.801}$. Results of this study can serve as a useful reference for thinning practices of *Chamaecyparis* plantations at difference stand growing stages or ages.

Key words: *Chamaecyparis formosensis*, *Chamaecyparis obtusa* var. *formosana*, stand structure, self-thinning curve.

Chiu CM, Peng PH, Tang SL. 2018. Preliminary analysis of the self-thinning in even-aged *Chamaecyparis formosensis* and *Chamaecyparis obtusa* var. *formosana* Stands. Taiwan J For Sci 33(1):77-88.

緒言

紅檜(*Chamaecyparis formosensis*)與台灣扁柏(*Chamaecyparis obtusa* var. *formosana*)屬於柏科(Cupressaceae)，扁柏屬(*Chamaecyparis*)之大喬木，為台灣珍貴之鄉土樹種，材質優良，具有許多特質，為高級之建築家具用材，而聞名於中外，分布海拔1050~2800 m之間，或成純林，或兩者彼此、鐵杉(*Tsuga chinensis*)、松類(*Pinus*)及闊葉樹混生。由於其經濟價值甚高，紅檜幼齡生長快速，造林容易，逐漸為台灣中高海拔之主要造林樹種，尤其近三十年來，造林面積迅速增加，根據林務局(TFB 2006)統計，累計有造林台帳之面積為38,279 ha，為僅次於松類及柳杉(*Cryptomeia japonica*)之造林樹種。而台灣扁柏生長緩慢，人工造林面積較少，約3460 ha，而棲蘭山則大部份為擇伐整地後之天然更新林分。

針葉樹人工純林之建造，由於最近十年來社會環境之改變，已由最初以林木生產為目標，轉變為愈來愈重視森林健康之維護和增進生物多樣性和生態反應。因此生態反應、多樣性之提升和木材生產，變成森林經營者需面對之嚴肅課題，經營者必須發展和測試不同之經營策略，以期達到生態、社會和經濟之三重目的(Kohm and Franklin 1997, Fujimori 2001)。此外，政府自1990年開始禁伐天然林，為保育天然林，此趨勢必然持續，因此，木材供給之重點，即落在人工林上，如何加強人工林經營疏伐撫育作業，因適當林分密度控制除可促進林分質與量之提升外，對生物歧異度，水土保持，改善動物棲息環境方面，均有許多正面效果(Fujimori 2001, Hunter 2001, Chiu 2007)。

但對於單位面積之栽植密度，生長過於鬱閉、分叉側枝繁多等問題，有些作業，至目前為止，仍未定論，如栽植密度及不同林齡之密度控制等。今日資源保育與利用已廣為社會大眾所重視，天然林之繼續禁伐已是不可擋之趨勢，而有龐大造林面積之檜木林，由造林至伐期間之撫育工作已成為今日林務工作之重點，但不論密植或疏植，林分因林齡之增加生長鬱閉後，同樣均會面臨保持最適密度之疏伐問

題，但在施業上，不同地區、不同林齡、不同立地最適密度之控制，可供參考之資料甚少。

有關植物不同密度自我疏伐和重量大小之關係，Yoda et al. (1963)探討蘿蔔(radish)、大豆(soybean)、芝麻(sesame)、蕎麥(buckwheat)等草本植物不同密度自我疏伐之情形和其重量大小之關係，得知植物密度之上限和其重量有一定之關係，其後發現此關係亦可適用於木本植物。此植物大小之變數以重量、材積或胸高斷面積表示，密度之變數以單位面積表示，且可應用於任一林齡及地位之林分。此植物平均大小和單位面積之株數在以雙對數方格紙上繪圖，為一簡單之直線式。此即最大密度線或自我疏伐斜率，其斜率值一般為 $-3/2$ 近似值，故又稱為 $-3/2$ 次法則($-3/2$ power rule)，已被許多學者認同和證實。(Curtis 1971, Drew and Flewelling 1977, 1979, Kikuzawa 1983, Smith and Hann 1984, Zeide 1991)。楊榮啟等(Yang 1975, Yang and Lin 1980)根據林分密度與生長之關係，導出林分密度效果(competition density effect)，編製溪頭及台灣北部柳杉人工林林分密度管理圖(stand density control diagram)，作為決定柳杉由栽植至伐期所應保持最適密度，疏伐方法及收穫預測之用；而此不同林分密度不同林齡密度之控制，在日本已編製有各地區，不同重要經濟樹種之林分密度管理圖，並廣為應用，做為施業之依據(Kira et al. 1953, Tadaki 1963, Ando 1968, Ando et al. 1968, Kihachiro 1981, Cochran and Dahms 2000)，而歐美地區亦有相同情形(Briegleb 1952, Curtis 1970, Drew and Flewelling 1977, 1979, White 1981, Smith and Hann 1984, Weller 1987, Puettmann et al. 1993, Reineke 1993)。可見不同立地條件、不同林齡林分密度管理圖建立之後，可依林分生長現況，進行不同林齡、不同密度之控制、疏伐及收穫預測，為林業施業之有效利器。而台灣目前有關檜木疏伐修枝、林分構造生長，已有不少著墨(Lo-Cho et al. 1985, 1997, Lee and Chen 1985, Lee and Yen 1994, Chiu and Lo-Cho 2002, Yen 2002, Yen et al. 2013, Yen 2015)，但檜木栽植密度，最大林分密度管理及其不同林齡生長、最適留

存株數資料甚為缺乏。棲蘭山為台灣檜木林主要分布地區，本研究選擇不同林分密度之永久樣區，觀測不同林分密度下隨著林齡之增長，在不進行人為干擾下，林分之生長及競爭狀況，調查林木生長之最大密度(full density)及自我疏伐(self-thinning)現象，將來進一步結合相同地區，紅檜不同林分密度，更大齡級生長及自我疏伐枯死資料，可做為編製檜木人工林密度管理圖，求取自造林至主伐期間，不同階段所應保持之最適林分密度，做為檜木人工林疏伐撫育及符合生態原則管理之依據。

材料與方法

一、試驗林分概況

(一) 紅檜人工林

本試驗林地位於棲蘭山，太平山事業區第20林班，以前為一苗圃地，地形甚為平坦，海拔高約1100 m，土壤為灰色粘壤土及黃褐色粘壤土，表土深而肥沃，此區域年平均溫度為13°C，年平均相對溼度為89%，冬季受東北季風影響，夏季多颱風，故全年雨量充沛，年平均降雨量達4000 mm。後因造林面積減少，將苗圃地改為造林地，依1×1 m株行距栽植，面積約1.0 ha，造林後成活良好，於林齡8年生時，為了解不同密度控制對生長之影響及林分生存競

爭自我疏伐狀況，除對照區外，配合林業單位最常施行之栽植密度，調整林分密度如下：

1. 株行距3×3 m，即每公頃1110株。
2. 株行距2×3 m，即每公頃1660株。
3. 株行距2×2 m，即每公頃2500株。
4. 株行距1×2 m，即每公頃5000株。
5. 株行距1×1 m，即每公頃10,000株，對照組全數保留，至8年生時，存活8608株。

調整方式，優先伐除被壓木、分叉木、斷頂木、彎曲木等形質不良立木，再依序擴及中勢木、次優勢木，至所設定每公頃之株數。立木伐除時，並考慮立木在林地內能均勻配置，伐除之林木則棄置林地。每一樣區大小為20×20 m = 400 m²，完全逢機排列，每一處理，重複3次，共15個試區，每3~5年定期調查林分各項生長性狀及林分競爭枯死自我疏伐狀況，共調查7次，目前紅檜人工林林齡為30年生，105個樣區不同林分密度每公頃株數、平均胸徑、平均樹高、平均單株(木)材積之最大和最小範圍，如Table 1，平均單株材積為實測樣區內每木胸徑、樹高求算單株材積彙總為樣區材積，除以樣區株數，即得平均單木材積，每公頃林分密度由樣區株數換算求得。

(二) 台灣扁柏天然更新檜木林

台灣扁柏擇伐天然更新試驗地，位於棲蘭山林區170線林道0.54 km處，屬於大溪事業區

Table 1. Structure of different stand densities for *Chamaecyparis obtusa* var. *formosana* (CO) and *Chamaecyparis formosensis* (CF)

Species	CF		CO		CO	
Site	Tai-Ping-Shan no. 20 working circle		Tai-Ping-Shan no. 32 working circle		Ta-Shi no. 94 working circle	
No. of plots	105		34		76	
Item	Max.	Min.	Max.	Min.	Max.	Min.
Trees (trees ha ⁻¹)	9450	825	2100	625	13,900	1100
Mean DBH (cm)	24.7	4.2	21.7	8.4	15.8	1.3
Mean tree height (m)	13.9	4.4	13.1	8.4	8.8	1.8
Volume (m ³ tree ⁻¹)	0.3915	0.00645	0.2426	0.02426	0.08671	0.00012

DBH, diameter at breast height.

第94林班，試驗地海拔高約1800 m，坡向為西北向，林地坡度約為15°~40°之間，位於35°以上者約佔15%，表土層淺薄且多石礫，枯枝落葉及腐植質層堆積深厚。土壤為黑色或紅黃色之粘質壤土。試驗地于1977年進行整地下種更新試驗(Lo-Cho et al. 1989)，本試驗於林齡15年生時(1992)平均每公頃更新林木約11,200株，其中台灣扁柏約佔95%，紅檜佔5%，平均胸徑約1.8 cm，平均樹高約2.2 m (Lo-Cho et al. 1999)，由於生長競爭激烈，林木生長停滯，因此進行不良立木之除伐，期能促其生長並提升立木形質，以增進林地生產力，達到永續經營之目標。

本試驗試區排列為完全逢機，共40個小區(每處理10重複)，每小區面積 $10 \times 10 \text{ m} = 100 \text{ m}^2$ ，每主區外圍設有3 m緩衝帶。除伐處理分為4種：

1. 每公頃保留2000株。
2. 每公頃保留3300株。
3. 每公頃保留5000株。
4. 未除伐之對照區，約11,000株。

本試驗除伐對象以傾斜、斷頂、鼠害、被壓木及分叉木為優先，且留存之更新稚木以均勻配置於林地為原則。樣區林分枯死率達5%以上時，始列為評估自我疏伐之對象，目前林齡35年生，各樣區不同林分密度每公頃株數、平均胸徑、平均樹高、平均單株材積生長範圍，如Table 1。

另一處天然更新檜木林位于棲蘭山林區太平山事業區第32林班，棲蘭山100線林道14.5 km林道下側。于1961年進行留存母樹下種更新，其更新配合結實年度及雨季，更新狀況良好，至1993年設區時，林分32年生，進行下層疏伐，將形質不良木進行除伐，未除伐之對照區，每公頃株數約1500~2000株，中度疏伐，每公頃留存1000株，弱度疏伐，每公頃留存1300株(Chiu et al. 1993)。樣區面積0.04 ha，每一處理6重複，共18個樣區，每3~5年定期監測其生長及自我疏伐狀況。樣區林分枯死率達到5%以上時，始列為評估自我疏伐數據資料，目前林齡52年生，各樣區不同林分密度每公頃株數、平均胸徑、平均樹高、平均單株材積生長範

圍，如Table 1。

二、最大密度線與自我疏伐曲線

林分發育過程中，隨著林齡之增加，林木個體間會發生競爭，優勝劣敗結果，淪為被壓之立木則漸漸枯死，此種現象稱作自我疏伐，或自然疏伐(natural thinning)，因此林分在不發生自我疏伐情況下，其密度之上限稱作最大密度(full density, maximum size density)，此時，材積與密度間有一定關係存在，可以列模式(Tadaki 1963, Yoda et al. 1963, Curtis 1971, Smith and Hann 1984, Weller 1987)表示：

$$v = K\rho^{-d} \dots\dots\dots (1)$$

式中v：單木平均材積($\text{m}^3 \text{株}^{-1}$)

ρ ：單位面積最大密度(株 ha^{-1})

K及d：為依樹種而變化之參數

此項最大密度線，在單位面積之幹材積合計V(= $v\rho$)與密度之關係亦可成立，可改寫如下式：

$$V = K\rho^{1-d} \dots\dots\dots (2)$$

式中，符號同前，因此本試驗使用完全鬱閉並已發生激烈自我疏伐，即對照區及枯死率達5%以上之樣區為資料(Sun et al. 2010)，使用最小二乘法，應用(1)式求出最大密度線或自我疏伐曲線。

三、林分胸徑與林分密度關係

另一常用來表示林分密度指數，亦稱為Reineke's林分密度指數(Reineke 1933, Zeide 1995, Rio et al. 2001, Chen and Chen 2015)在一立木度完整之林分，且已發生自我疏伐之林分，Reineke (1933)提出林分最大密度和林分二次方根平均胸徑關係式(QMD, quadratic mean diameter)，有如下之關係：

$$\log QMD = K \times A \log \rho \dots\dots\dots (3)$$

式中 ρ = 單位面積林分最大密度(株 ha^{-1})

$$QMD = \sqrt{\sum d_i^2 / n}$$

d_i ：樣區每株樣木之胸徑(cm)

n：樣區株數

K及A：為依樹種而變化之常數

亦即林分達最大密度時，單位面積之二次

平均胸徑兩者取對數時，會有直線關係(Rio et al. 2001)。

結果

一、最大密度與自我疏伐曲線

本試驗選用紅檜人工林已鬱閉，並已發生自我疏伐之樣區，以發生枯死率達5%之樣區為資料，調查林分自我疏伐後，每公頃留存株數(ρ)和平均單木材積(v)，配合(1)式最大密度曲線式 $v = k\rho^{-d}$ ，以最小二乘法求出實驗式，

$$v = 4.73544 \times 10^4 \rho^{-1.67604} \quad R^2 = 0.968, F = 3152^{**} \quad \dots\dots\dots(4)$$

若以10為底之對數，則(4)為 $\log v = 4.67536 - 1.67604 \log \rho$

紅檜人工林其實際觀測值和實驗式如Fig. 1所示，由(4)式知其斜率d值為-1.67604，截距k值取對數後為4.6754。

台灣扁柏天然更新林，以170線0.5 km，以對照區、5000株 ha⁻¹及3300株 ha⁻¹，枯死率達

5%之樣區，及太平山32林班，以對照區同樣枯死率達到5%之樣區為資料，使用(1)式以最小二乘法，求出最大密度曲線之實驗式如下：

$$v = 4.12392 \times 10^5 \rho^{-2.12166} \quad R^2 = 0.819, F = 493.4^{**} \quad \dots\dots\dots(5)$$

或 $\log v = 5.6153 - 2.12166 \log \rho$

其實際觀測值和實驗式如Fig. 1所示，由(5)式知，台灣扁柏其斜率d值為-2.12166，截距k值取以10為底之對數為5.6153。

二、單木大小與林分密度之關係

紅檜人工林於8年生時調整成5種林分密度(每公頃1110株(取以10為底之常用對數則為log 3.04)、每公頃1660株(log 3.2)、每公頃2500株(log 3.4)、每公頃5000株(log 3.7)、每公頃10,000株(log 4.0))，將各樣區歷次定期調查資料之林分平均單木材積和存活株數關係繪圖，如Fig. 2所示，而台灣扁柏亦將歷年定期調查之林分大小和存活株數繪圖，如Fig. 3。此可由Figs. 2和3紅檜和台灣扁柏不同林分密度皆隨著

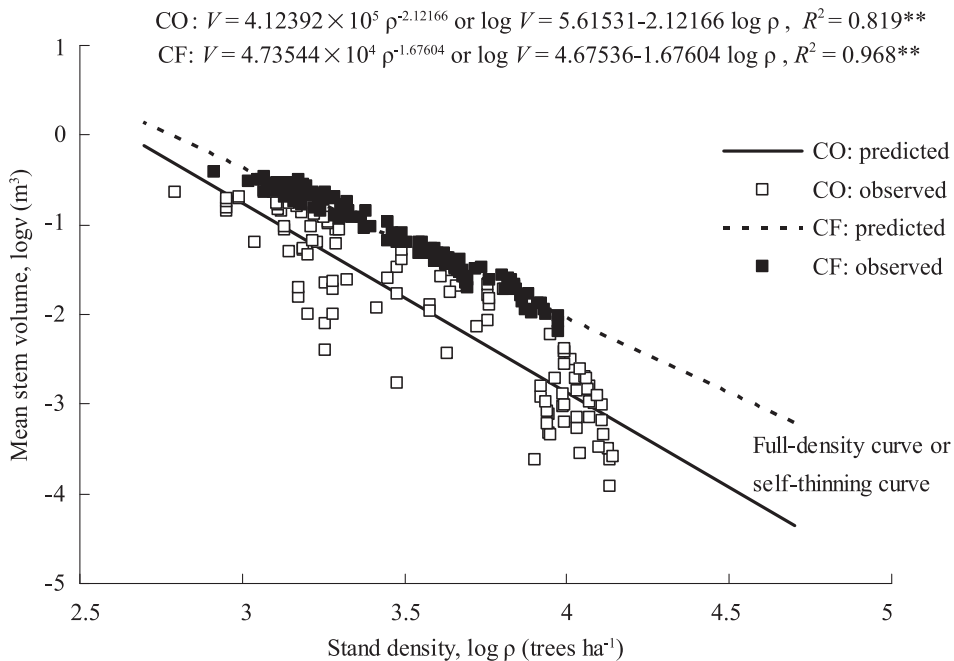


Fig. 1. Comparison of full-density curves for *Chamaecyparis formosensis* and *Chamaecyparis obtusa* var. *formosana*. Data are trees mortality ratios of plots that reached a 5% threshold.

林木生長(林齡增加), 單木胸徑、材積不斷增大, 未達最大密度前, 林木尚有足夠空間, 每公頃株數幾乎不變, 但單木胸徑、材積不斷增加, 至達最大密度時, 林木單株大小和每公頃株數關係, 則循最大密度曲線之軌跡而變化。林分未達最大密度, 亦可能受其他原因影響而枯死, 此亦本報告將樣區枯死率必須達5%以上時, 始列為求出最大密度曲線之原因(Zeide 1991, Rio et al. 2001, Sun et al. 2011)。

三、林分胸徑與林分密度

紅檜人工林在一立木度完整之林分, 同樣使用最小二乘法應用(3)式求出林分密度與林分二次方根平均胸徑(QMD)之關係。

$$\log QMD = 3.379 - 0.662 \log \rho, R^2 = 0.968, F = 3405.1^{**} \dots\dots\dots(6)$$

$$\text{或} QMD = 2.393 \times 10^3 \rho^{-0.662}$$

台灣扁柏天然更新林分最大密度和二次平均直徑關係式為

$$\log QMD = 3.669 - 0.801 \log \rho, R^2 = 0.826, F = 519.2^{**} \dots\dots\dots(7)$$

$$\text{或} QMD = 4.667 \times 10^3 \rho^{-0.801}$$

(6)式求出之決定係數達0.968, (7)式求出之決定係數達0.826, 達到 $p < 0.01$ 之極顯著水準, 故實驗式具有意義(Fig. 4), 本試驗每公頃株數以10為底數之常數對數。

討論

本試驗所使用不同密度紅檜人工林之自我疏伐曲線, 其自我疏伐斜率d值為-1.68, 截距k值為4.68, 台灣扁柏天然更新林分, 自我疏伐斜率d為-2.12, 截距k值為5.62, 最大密度曲線斜率與截距發現台灣扁柏更新林分斜率及截距均大於紅檜人工林。Yoda et al. (1963) 指出, 此自我疏伐法則, 其參數斜率(d)及截距(k), 有二特性, (1)其斜率與截距於種間呈變化, 惟變化不大。(2)種內之自我疏伐斜率不受生育環境

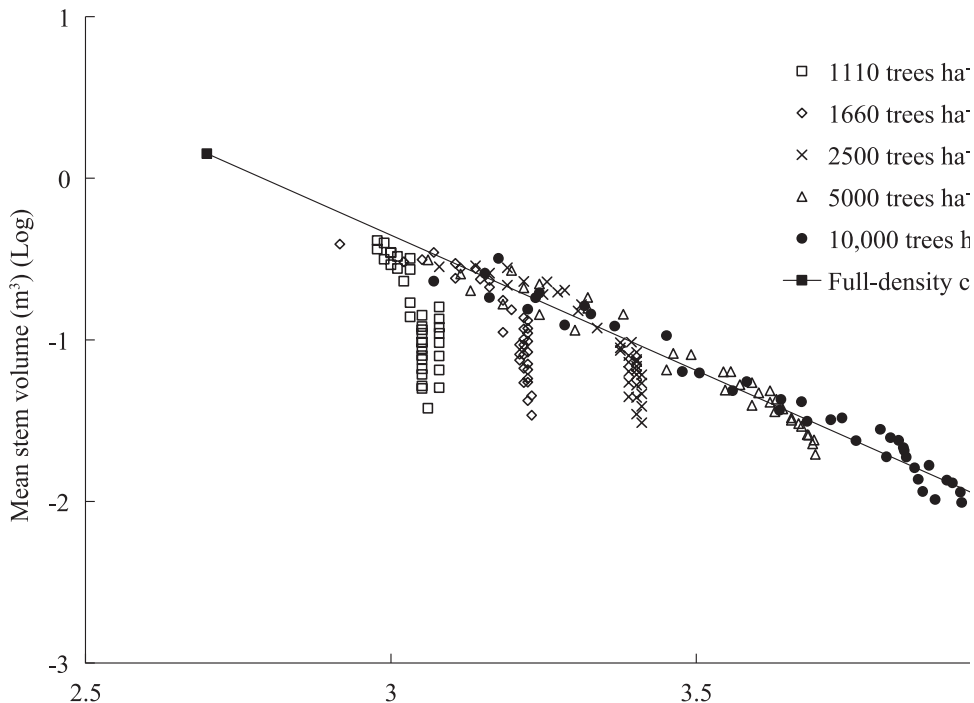


Fig. 2. Mean stem volume trajectory and the self-thinning asymptote for *Chamaecyparis formosensis* plantation at 5 stand densities. Data are results of periodic investigations, including of the mean stem volume and stand density, for all plots.

影響。惟其認為自我疏伐斜率為 $-3/2$ ，卻被許多學者懷疑，如White (1981)曾列舉36種植物，包括草本及木本；發現其斜率介於 -1.30 至 -1.80 間，截距為 $3.06\sim 4.41$ 間。而Weller (1987)依收穫表及野外調查資料分析63種植物(含草本及大本植物)之自我疏伐曲線之斜率，發現其中有19種不支持 $-3/2$ 法則，另20種斜率有明顯差異，僅24種符合此法則。截距之變化除少部分變化較大外，但大部分在 $3\sim 5$ 之間。

Tadaki (1963)調查日本一些重要經濟樹種之自我疏伐斜率，結果柳杉為 -1.94 ，扁柏為 -1.74 ，松類大致為 -1.50 左右。而自我疏伐截距，柳杉為 6.18 ，扁柏為 5.18 ，松類為 4 左右。而北美之赤楊(*Alnus rubra*)及花旗松(*Pseudotsuga menziesii*)自我疏伐之軌跡(trajectory)斜率分別為 -1.64 及 -1.52 (Puettmann et al. 1993)。Rio et al. (2001)調查西班牙蘇格蘭松(Scots pine, *Pinus sylvestris*)未疏伐之人工林，自我疏伐之斜率為 -1.75 。Yang (1975)所編製之北部柳杉人工林密度管理圖，其自我疏伐斜率為 -1.92 ，截距為 6.20 ；因此不少學者認為最大密度之自我疏伐之斜率，因樹種而異，並非所有樹種皆有共通斜率。其原因為林分密度相互競爭並不是植物枯死

之唯一原因，林木之枯死是受氣象(乾旱、風)、立地環境、生理、火災、病蟲害等因素影響，在林分發育過程中，任一時期均可能受衝擊，但其最可能發生在生長勢變弱時，此在樹冠鬱閉後開始發生，而在接近最大密度時會加速發生(Drew and Flewelling 1979, Puettmann et al. 1993, Rio et al. 2001, Sun et al. 2011)。亦有學者認為其斜率和截距和樹種之耐蔭性有關，耐蔭性樹種較陽性樹種斜率和截距均較大(Tadaki 1963, Weller 1987)，此結果和本研究結果一致。

由此可知，最大密度線為林木密度之最上限，但其自我疏伐之軌跡(或斜率)，有可能在未達最大密度線即發生，但最後均會達此一自我疏伐軌跡漸近線(asymptote) (Drew and Flewelling 1977, 1979, Puettmann et al. 1993)。由Fig. 2及永久樣區資料得知，紅檜人工林8年生調整之林分密度至林齡30年生時，每公頃 $10,000$ 、 5000 及 2500 株 ha^{-1} 枯死率均已超過 20% ，已達最大密度線，自我疏伐亦已發生，每公頃 1110 株之樣區，雖已開始枯死或發生自我疏伐現象，但似乎仍未達最大密度線。Sun et al. (2011) 探討不同林分密度杉木永久樣區試驗地，以枯死率不同等級門檻探討自我疏伐曲

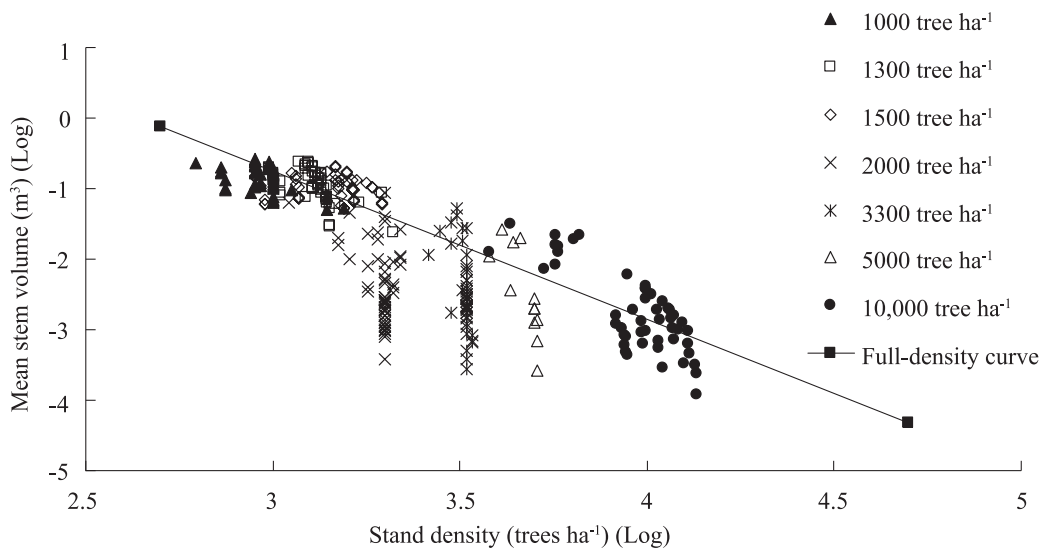


Fig. 3. Mean stem volume trajectory and self-thinning asymptote for *Chamaecyparis obtusa* var. *formosana* at 7 stand densities. Data are results of periodic growth, mean stem volume, and stand density for all plots.

線，發現枯死率5%為合適之門檻，其自我疏伐斜率大致為-1.5。台灣扁柏天然更新林分，兩地區7種林分密度，大溪事業區94林班(170線0.5 km)，每公頃2000株和太平山事業區32林班(100線14.5 km)每公頃1000株、1300株林分之樣區，同樣雖已發生枯死或自我疏伐，但似乎仍未達最大密度曲線(Fig. 3)。以致單木材積或胸徑不斷增大，但每公頃株數卻大致不變，致達最大密度時，才循最大密度曲線(自我疏伐)曲線軌跡趨勢變化。Tadaki (1963)對日本扁柏研究發現自我疏伐曲線，斜率和截距分別為-1.74和5.18，兩參數值介於台灣扁柏與紅檜間，尤其斜率台灣扁柏比日本扁柏大，但紅檜比日本扁柏小。林木QMD與林分密度關係式中，為何不直接使用單木平均胸徑，而使用QMD，因其更能表示單位面積內林分之狀況(Curtis and Marshall 2000)。又據Sakaguchi (1961)調查日本扁柏QMD和最大密度林分單位面積株數之關係式為 $\log QMD = 3.787 - 0.737 \log \rho$ 。比對紅

檜截距為3.379，斜率為-0.662公式(6)，台灣扁柏截距3.669，斜率為-0.801公式(7)。可知日本扁柏胸徑和株數關係之斜率介於紅檜和台灣扁柏之間。

台灣扁柏和紅檜其天然分布，台灣扁柏分布于海拔1300~2600 m，紅檜則分布于800~2200 m，同一地區，台灣扁柏大部分位于山稜，山谷則大部分為紅檜，山腹或中坡則為兩者混生或與少量鐵杉、台灣杉、巒大杉、紅豆杉混生(Su 1985, 1992)。幼苗時，台灣扁柏之耐陰性高於紅檜，但成熟林木則差異不大(Lin et al. 2010, Lai 2006)。比對Fig. 4，兩種樹種在幼木階段，相同徑級下每公頃株數台灣扁柏多於紅檜，但徑級在100 cm以上時，兩者樹種每公頃株數皆在100株左右，兩者幾乎相等。

惟本試驗紅檜人工林資料僅至35年生，胸徑約25 cm，台灣扁柏天然更新林分，大溪事業區94林班林分約35年生，林木平均胸徑約10 cm，太平山事業區約52年生，林木平均胸

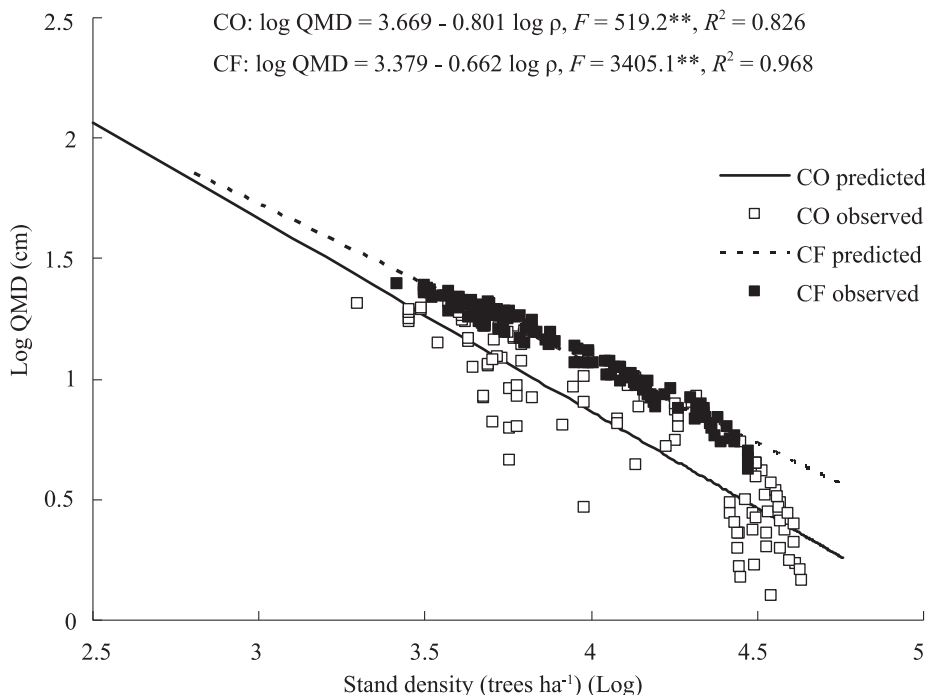


Fig. 4. Relationship between the quadratic mean diameter (QMD) and mean stand density at full-density curves for *Chamaecyparis formosensis* (CF) and *Chamaecyparis obtusa* var. *formosana* (CO).

徑約19 cm，均尚屬於幼齡林階段，且模式配合之每公頃密度資料偏於1000~10,000株這一區間(Table 1, Fig. 1)，因此，紅檜及台灣扁柏最大密度或自我疏伐曲線之求得，有待將來對試區繼續維護及調查或搭配相同地區較大齡級檜木林生長與林分密度資料，可求得更精確之結果。此最大密度曲線之求得可做為檜木林經營撫育之重要參據。

結論

本研究探討棲蘭地區紅檜5種林分密度，台灣扁柏兩地區7種林分密度，每公頃株數與單木材積之關係，發現不同林分密度生長材積或胸徑，有隨林木之增長，在未達最大密度前，材積或胸徑增加，但株數不變，至達最大密度時，隨著林木生長單株材積、胸徑增大，但每公頃株數會減少，最後成自我疏伐曲線一致軌跡變化之趨勢，以林分枯死率達5%時，視為林分達最大密度，發生自我疏伐，求出林分最大密度或林分自我疏伐曲線紅檜 $v = 4.73544 \times 10^4 \rho^{-1.67604}$ ，台灣扁柏 $v = 4.12392 \times 10^5 \rho^{-2.12166}$ ，以QMD和林分密度表示時，紅檜 $\log QMD = 3.379 - 0.662 \log \rho$ ，台灣扁柏 $\log QMD = 3.669 - 0.801 \log \rho$ (式中 v 、QMD及 ρ 分別代表單株材積、林分二次方根平均胸徑及林分每公頃株數)，台灣扁柏自我疏伐斜率及截距均大於紅檜。

引用文獻

Ando T. 1968. Ecological studies on the stand density control in even-aged pure stand. Bull Govt For Exp Sta 210:1-153.
Ando T, Hatiya K, Doi K, Kataoka H, Kato Y, Sakahuchi K. 1968. Studies on the system of density control of sugi (*Cryptomeria japonica*) stand. Bull Govt For Exp Sta 209:1-76.
Briegleb PA. 1952. An approach to density measurement in Douglas fir. J For 50:529-36.
Chen CT, Chen JC. 2015. Forest manage-

ment. City, Taiwan: Cheng Chung Book. 417 p.
Chiu CM. 2007. Symposium on ecosystem and biodiversity conservation on plantation forests. Taipei, Taiwan: Taiwan Forestry Research Institute. p160-89.

Chiu CM, Lo-Cho CN. 2002. Studies on stand density of young red cypress (*Chamaecyparis formosensis* Matsum) plantations. Taiwan J For Sci 17(2):205-17.

Chiu CM, Lo-Cho CN, Chung HH. 1993. The cypress stand structure of natural regeneration sites in Chi-Lan-Shan area. Bull Taiwan For Res Inst New Series 8(4):389-402.

Cochran PH, Dahms WG. 2000. Growth of lodgepole pine thinning to various densities on two sites with differing productivities in central Oregon. Citys ST: USDA For Serv Pacific NW Res Sta PNW-RP-520. 59 p.

Curtis RO. 1970. Stand density measures: an interpretation. For Sci 16:403-14.

Curtis RO. 1971. A tree area power function and related stand density measure for Douglas fir. For Sci 17:146-59.

Curtis RO, Marshall DD. 2000. Technical note: why quadratic mean diameter? West J App For 15:137-9.

Drew TJ, Flewelling JW. 1977. Some recent Japanese theories of yield-density relationships and their application to Monterey pine plantations. For Sci 23(4):517-34.

Drew TJ, Flewelling JW. 1979. Stand density management: an alternative approach and its application to Douglas fir plantations. For Sci 25(3):518-32.

Fujimori T. 2001. Ecological and silviculture strategies for sustainable forest management. Tokyo: Elsevier Science. 398 p.

Hunter MG. 2001. Management in young forests: the young stand thinning and diversity study. Cascade Center for Ecosystem Management. Available at <http://www.fsl.orst.edu/ccem/yst>. Accessed day month year. 28 p.

- Kihachiro K. 1981.** Quantitative studies on the thinning effect (I) Analysis utilizing the yield-density diagram. *J Jpn For Soc* 63:51-9.
- Kikuzawa K. 1983.** Yield-density diagram: compactness indexes for stands and stand components. *For Ecol Manage* 7:1-10.
- Kira T, Ogawa H, Sakazaki N. 1953.** Intra-specific competition among higher plants I. competition-density-yield interrelationship in regularly dispersed population. *J Inst Polytech Osaka City Univ. Ser D4*:1-16.
- Kohm K, Franklin JF (eds.). 1997.** Creating a forestry for the 21st century: the science of ecosystem management. Washington, D C: Island Press. 475 p.
- Lai IL. 2006.** Effects of light environment on the growth and establishment of the seedlings of two *Chamaecyparis species* in the subtropical cloud forest in Chi-lan-shan area. Taipei, Taiwan: Institute of Ecology and Evolutionary Biology, National Taiwan University. 128 p.
- Lee JS, Chen ZJ. 1985.** Study on the thinning of Taiwan red cypress of young plantation in Tahsueh Shan - influence of thinning on diameter distribution. *Q J Chin For* 18(1):19-29.
- Lee JS, Yen TM. 1994.** A study on the growth of plantations. The effect of thinning to stand structure and growth. *Bull Expt For NCHU* 16(1):103-13.
- Lin CY, Chiu CM, Lin ST, Chung CH, Lin CL. 2010.** Regeneration development after row thinning in *Cryptomeria japonica* plantations at Chi-lan-shan area. *Q J Chin For* 43(2):233-47.
- Lo-Cho CN, Chiu CM, Chen YC. 1999.** Effects of cleaning and pruning on natural-regenerated cypress stands. *Taiwan J For Sci* 14(3):315-21.
- Lo-Cho CN, Chung HH, Chiu CM. 1997.** Effect of thinning and pruning on the growth of Taiwan red cypress (*Chamaecyparis formosana* Matsum) plantations. *Taiwan J For Sci* 12(2):145-53.
- Lo-Cho CN, Chung HH, Chiu CM, Chou CF, Lo SS. 1989.** Natural regeneration of cypress old growth by selective cutting and intensive site preparation. *Bull Taiwan For Res Inst New Ser* 4(4):197-217.
- Lo-Cho CN, Chung HH, Lo SS, Chou CF. 1985.** The effect of thinning on Taiwan red cypress (*Chamaecyparis formosana* Matsum) plantations. Taipei, Taiwan: Bull Taiwan For Res Inst 488. 9p.
- Puettmann KJ, Hann DW, Hibbs DE. 1993.** Evaluation of the size-density relationship for pure red alder and Douglas fir stands. *For Sci* 39(1):7-27.
- Reineke LH. 1933.** Perfecting a stand density index for even-aged forests. *J Agric Res* 46:627-38.
- Rio M del, Montero G, Bravo F. 2001.** Analysis of diameter density relationships and self-thinning in non-thinned even-aged Scots pine stands. *For Ecol Manage* 142: 79-87.
- Sakaguchi K. 1961.** Studies on basic factors in thinning. City, country: Bull Gov For Exp Sta 131 95 p.
- Smith NJ, Hann DW. 1984.** A new analytical model based on the $-3/2$ power rule of self-thinning. *Can J For Res* 14:605-9.
- Su HJ. 1985.** Studies on the climate and vegetation types of the natural forests in Taiwan. (III) A scheme of geographical climatic regions. *Q J Chin For* 18(3):33-44.
- Su HJ. 1992.** Vegetation of Taiwan: altitudinal vegetation zones and geographical climatic regions. Taipei, Taiwan: Institute of Botany, Academic Sinica monograph series no. 11: 39-53.
- Sun H, Zhang J, Duan A, He C. 2011.** Estimation of the self-thinning boundary line within even-aged Chinese fir (*Cunninghamia lanceolata* (Lamb.) Hook.) stands: onset of self-thinning. *For Ecol Manage* 261:1010-5.
- Tadaki Y. 1963.** The pre-estimating of stem

yield based on the competition-density effect. Bull Gov For Exp Sta 154:1-19.

Taiwan Forestry Bureau 2006. The plantations area of national forest. Taipei, Taiwan: Taiwan Forestry Bureau.

Weller DE. 1987. A reevaluation of the $-3/2$ power rule of self-thinning. Ecol Monogr 57:23-41.

White J. 1981. The allometric interpretation of the self-thinning rule. J Theor Biol 89:475-500.

Yang YC. 1975. Studies on the growth and yield of *Cryptomeria* in the experimental forest of Taiwan University. Taipei, Taiwan: Bull Exp For Nat Taiwan Univ. 116. 149 p.

Yang YC, Lin WL. 1980. Stand density control diagram of *Cryptomeria* plantations in the northern part of Taiwan. Taipei, Taiwan: Bulletin of National Taiwan University in Cooperation with Taiwan Forestry Bureau no. 31.

Yen TM. 2015. Relationships of *Chamaecyparis formosensis* crown shape and parameters with thinning intensity and age. Ann For Res 58(2): 323-32.

Yen TM, Lee JS, Li CL, Chen YT. 2013. Aboveground biomass and vertical distribution of crown for Taiwan red cypress 20 years after thinning. Dendrobiology 70:109-16.

Yen TM. 2002. Stand density management of *Chamaecyparis formosensis* plantations. Q J Chin For 35(1):55-67.

Yoda K, Kira T, Ogawa K. 1963. Self-thinning in overcrowded pure stands under cultivated and natural conditions. J Biol Osaka City Univ. 14:107-29.

Zeide B. 1991. Self-thinning and stand density. For Sci 37(21):517-23.

Zeide B. 1995. A relationship between size of trees and their number. For Ecol Manage 72:265-72.