

台灣杉人工林不同疏伐策略碳吸存效應

邱志明

一、中文摘要：

本研究以 78 株樹幹解析及區分材積，求得最適之台灣杉材積式，建議單木可用 $V = 11.7943D^{2.5081}$ 較方便，樹幹地上部和根部生物量和材積或胸徑之迴歸式，建議地上部生物量可以使用胸徑指數式 $M = 4200.3D^{2.3973}$ 或無截距直線式之生物量和材積轉換式 $M = 411.1476V$ 。本研究求得根佔地上部之比例平均為 0.28 ± 0.08 ，以 x-ray 掃描生長錐木軸探討不同疏伐處理時間系列之台灣杉年輪構造和木材密度之變化，8 個年輪特徵值有不同程度之影響，強度疏伐會降低木材密度，平均 0.345g/cm^3 ，而其餘疏伐度密度變化，平均 $0.362\text{-}0.369\text{g/cm}^3$ ，差異不大。林齡愈大或疏伐後經過時間愈久，密度有較大之趨勢。以林齡而言，第一次疏伐，不同疏伐程度定期淨生長量至 26 年生時(疏伐後 9 年)，中度和強度疏伐較對照區及弱度增加 10% 以內，差異較小，但經第二次疏伐至林齡 40 年生時(第二次疏伐後 14 年，第一次疏伐後 23 年)，強度和中度疏伐較未疏伐之對照區定期碳吸存量可增加 25% 以上，而弱度較未疏伐可增加碳吸存量 11%。若以第一次及第二次疏伐後累積之淨生長量而言，至 40 年生時，強度疏伐為對照區之 113%，中度疏伐為 112%，弱度和對照區相若。若將疏伐之林木搬出利用，以林產品之形式儲存，則二次疏伐累積之淨碳吸存量+疏伐木之碳貯存量，至 40 年生，強度疏伐可達 128.9 ton/ha，中度為 117.1 ton/ha，弱度為 100 ton/ha，而對照區僅 91.8 ton/ha。強度之碳吸存量為對照區之 140%，中度疏伐為對照區之 127%，弱度疏伐為對照區之 109%。由此可知，林分不同疏伐策略對碳吸存效益，因策略之不同，變化很大，視林分疏伐開始之林齡，疏伐之強度及疏伐之間隔及次數而異。因此適當之經營始能增進人工林分吸存效果，太強度之疏伐，林地若未能充分利用，或林分不疏伐，即放任不經營，枯死大於生長，則碳吸存效果是負面的。且隨著林分林齡之增長，適當疏伐撫育之林分較放任未疏伐經營之林分，差距會愈大，以本研究台灣杉人工林為例，對照區未疏伐之林分，林分林齡 35 年，林分碳之吸存量與枯死腐朽之碳之釋放量，約略相等，碳吸存之生產力不再增加。

二、前言

台灣杉為台灣固有之珍貴樹種，用途廣大，材質優良，且其幼齡期生長迅速，對病蟲害之抵抗力又強，又能免除松鼠為害，故已漸成為台灣中高海拔之主要造林樹種。全球氣候變遷綱要公約下的京都議定書歷經10年多的國際折衝，在俄羅斯總統普丁（Vladimir Putin）於2004年11月簽署京都議定書，正式跨過1990年設定之55%CO₂排放總量的生效門檻，已於2005年2月正式生效。為因應京都議定書，除將高耗能之產業移往低耗能、低污染及高附加價值之產業外，積極增加能源效率；同時因一國森林所吸存的CO₂量可抵減該國使用石化能源所排放碳量，因而備受各國重視，台灣林業部門亦必須面對森林吸收與排放之估算議題。然而不容忽視的是樹木在幼年期生長快速、壯齡生長速度開始減緩、老年期停滯生長或枯死，所估測之生物量會因樹種、林齡、立地環境、人工撫育方法、人為或自然因素干擾之歷程之不同而隨時間變動。為了配合達成台灣杉人工林碳吸存量之估算，本研究選擇不同徑級大小之台灣杉人工林進行生物量及相關擴張係數之測定，以做為台灣杉人工林碳吸存量估算之依據。根據IPCC之土地使用、土地使用改變及林業之良好活動指南（Good Practice Guidance for Land Use, Land-Use Change and Forestry; GPG-IPCC），將森林區域碳庫（Carbon pool）區分為(1)活體生物量。(2)死體有機物。(3)森林土壤有機物等三大類。活體生質碳量之估算時區分為地上部生質及地下部生質碳量（IPCC, 2003）。估算地上部生質碳量，先需調查地上部生物量，生物量的取得，主要有兩種方式，第一種為由生長蓄積量調查，再藉由容積密度及擴展係數（Extension Factor, EF）轉換為生物量。第二種為直接的生物量調查。估算地下部生質碳量，取得主要有兩種方式，第一種為由根莖比（Root/Shoot; R/S）轉換為生物量，第二種為直接的地下部生物量調查。經估算之地上部及地下部生物量合計，即為活體生質生物量，由生物量乘上碳濃度（一般之碳濃度依理論值0.5計算）即可得其碳量。本報告以實測地上部生物量，包含幹、枝、葉、皮為主，並以樹幹解析Huber區分求積法實測樣木材積，以求算樹幹材積和地上部生物量之擴張係數（Biomass expansion Factor, BEF）及地上部全幹生物量和樹幹生物量比之擴張係數（Expansion Factor, EF），及實測不同疏伐處理時間系列之碳含量及木材比

重之變異，以做為將來人工林不同疏伐策略時林木材積之調查時，生物量、碳含量及CO₂吸存量轉換之用。

三、研究成果

(一) 重要工作項目及實施方法：

1. 材積及生物量

南部地區台灣杉人工林永久樣區林分經每木性狀調查後，依試驗地林分直徑分佈狀況，砍伐 7.3-72.8cm 各徑級樣木共 78 株，徑級分布如圖 1 所示。配合樹幹解析方式分段，即樹幹基部至 0.3 m，1.3 m 及 3.3 m，分別量其末口直徑，供樹幹解析，計算立木材積，3.3 m 以上均以 2 m 為長度直至樹梢，並分段秤樹幹、枝條及葉子鮮重。主幹至頂端褐色梢端處，樹冠褐色部份屬枝條，綠色部份則歸屬葉子部分。待分段秤鮮重後，各分段各取 3-5 cm 一圓盤，稱取重量，再攜回實驗室，至烘箱中 $103 \pm 2^{\circ}\text{C}$ 乾燥至恆重，以求算乾鮮比（含水率）轉換各段木之絕乾重量，再彙總為全幹重。而樹冠層則分三等分，各分別取其混合大小枝條樣本 500-300g、混合葉子樣本約 200 g，經實際秤鮮重後裝袋編號，同樣攜回實驗室以 $103 \pm 2^{\circ}\text{C}$ 烘至絕乾重，求得樣本乾鮮比。供推估該樣木各層枝、葉乾重，將各層枝、葉乾重加總後可得到該樣木枝與葉之總乾重。

2. 木材密度之測定

選定不同疏伐處理樣區，以生長錐每一樣木分別鑽取木軸二條，分別進行容積密度、絕乾比重及含水率測定後再進行碳轉換係數之測定，另一木軸進行 x-ray 掃描分析。每一不同處理區，各鑽取近似中央木 6 株，取平均值做為該處理之密度。使用 soft-x-ray (Tree Ring X-ray Scanner, Model QTRS-01X, 為美國 QMS 製) 掃描分析不同處理之生長與密度隨林齡變化之關係，可解析樹木年輪構造及密度 8 個特徵值之連續變異(圖 2、3)，以解析生長和密度之變化。

3. 碳濃度之測定

碳濃度之測定，取前述之生長錐木軸，以元素分析儀測定不同處理及不同林齡樣

品的碳含量濃度。碳含量之測定，則以元素分析儀（Elementar Analysen-systeme, Hamburg, Germany）測定樣品的碳含量組成百分比。木材試料先依年輪別，研磨成細粒粉末後（通過 meshno, 80），取 2-4mg 經絕乾後之試材粉末裝入該儀器專用錫盒內，再放入儀器中進行測定。

（二）主要執行成果：

1. 材積式與生物量

林木生物量之估算，可直接量測幹、枝、葉、皮等實測值，但一般皆配合生長蓄積調查胸徑、樹高、形數，求得樹幹材積，再配合生物量轉換式或乘以容積密度，求算生物量，較為方便可行，尤其對大面積，大尺度生物量之估算，更非仰賴材積式不可，因此如何精確求出材積式，變成為迫切之作，本計畫使用78株樣木，胸徑7.3~72.8cm，樹高6.5~30.1m，材積則以Huber區分材積法實測材積，並使用6種材積與胸徑或材積與胸徑及樹高兩因子之關係式，如表1所示，雖材積受胸徑、樹高及形數所影響，但樹高一般和胸徑關係密切，雖然形數受林分密度、林齡及地位所支配，但最終之影響因子仍是樹高和胸徑二因子之關係。因此材積以胸徑或胸徑、樹高所得之迴歸式之決定係數 R^2 均在0.92以上，雖使用胸徑和樹高二因子，不論 $V = a + bD^2H$ ， $V = aD^2H$ 或 $V = a(D^2H)^b$ 均較一因子胸徑 $V = a + bD^2$ ， $V = aD^2$ 或 $V = aD^b$ ， R^2 來得大或MSE來得小，如表1及圖4，尤其5式和1、3、6式差異甚小，故建議可使用5式一因子胸徑指數式（ $V = 11.7943D^{2.5081}$ ）之材積式較為方便，因樹高施測困難，且誤差大。

本研究使用78株幹、地上部（含幹、枝、葉、皮）、根生物量與胸徑及材積不同徑級台灣杉樹幹、地上部、根之生物量之關係，如圖5、6、7以無截距之直線式（因其較有截距之直線式之適合性佳）及指數式進行迴歸，發現指數式適合性較無截距之直線式稍優（R-square較大，MSE較小）（如表2），但差異很小，故以無截距式之直線式表示較為簡便，而胸徑、材積推估各部份生物量之關係，MSE及 R^2 兩者結果相近，因此，依使用之時機，兩者皆可。地上部含樹幹、枝、葉、皮和樹幹比例與胸徑之關係，如圖8所示，不因胸徑之大小，大致為一常數，範圍1.06-1.52，平均 1.23 ± 0.08 。值得一提的是根部生物量和胸徑及材積之迴歸式，為一指數或直線式，如圖9、表2，

但不論無截距之直線式或指數式，其和地上部之關係為一直線式（如圖10），MSE較大， R^2 較低，其原因為本研究僅使用胸徑9.0-42.5cm，12株樣木估算（圖11），本研究根佔地上部之比例範圍為0.18-0.41，平均為 0.28 ± 0.08 ，根部生物量佔地上部生物量的比例，熱帶林平均0.24，寒帶林平均0.27，針葉樹平均值0.26（Cairns *et al.*, 1997），Mokany *et al.*（2006）指出地上部生物量大於 125 ton ha^{-1} 者其比例平均值為0.24(0.22-0.33)，本研究結果和其相近。

2. 木材密度

本研究以x-ray探討不同疏伐處理時間系列之台灣杉年輪構造及木材密度之變化，結果如表3，結果顯示不同疏伐處理對早材寬、年輪寬差異極顯著，早材密度、平均密度、晚材率、最低密度差異顯著，而晚材寬、晚材密度及最高密度差異不顯著，而不同林齡對早材寬、年輪寬、晚材率、平均密度、最低、最高密度差異均極顯著，而晚材寬差異顯著，早材及晚材密度差異不顯著。疏伐度和林齡交感效應，9個年輪特徵值差異均不顯著。以年輪寬為例，疏伐處理差異極顯著，F值7.51， $Pr < 0.0001$ ；不同林齡差異亦極顯著，F值232.7， $Pr < 0.0001$ ，疏伐和林齡則無交感效應，F值1.03， Pr 為0.428；平均密度不同疏伐處理差異顯著，F值3.40， Pr 值為0.0207，林齡差異顯著，F值6.63， $Pr < 0.0001$ ，疏伐和林齡之交感效應不顯著，F值0.38， $Pr < 0.9681$ 。年輪平均密度RD之變化為強度 0.345 g/cm^3 ，中度 0.369 g/cm^3 ，弱度 0.362 g/cm^3 ，對照 0.368 g/cm^3 ，顯示強度疏伐會降低木材之密度（如表4所示）。而林齡第一次疏伐前（16年生） 0.334 g/cm^3 ，第一次疏伐至第二次疏伐前 0.353 g/cm^3 ，第二次疏伐後1-5年（27-32年生） 0.369 g/cm^3 ，第二次疏伐後6-10年（33-38年生） 0.373 g/cm^3 ，第二次疏伐後11年生至樹皮（39-40年生） 0.365 g/cm^3 ，如表5，林齡之變化顯示台灣杉幼齡16年生以前，密度較小，而後隨著林木林齡之增加密度會增加，約至30年生左右，即保持一定值之波動。

3. 碳濃度

台灣杉不同疏伐處理之碳濃度，強度 $47.56 \pm 0.71\%$ ，中度 $47.57 \pm 0.94\%$ ，對照 $47.40 \pm 0.47\%$ ，經變方分析顯示，不同疏伐處理碳濃度差異不顯著，平均 47.51% 。

四、台灣杉人工林不同疏伐處理不同時間系列地上部林分碳吸存量之估算

(一)林分結構

本案例子，台灣杉人工林試驗地位於屏東林管處藤枝森林遊樂區附近，為台灣施行第一次林相變更地，亦為台灣人工林最早之大面積造林地。本試驗地由林齡 4 年生開始設置試區，6 年生開始進行觀測，17 及 26 年生進行二次疏伐，目前已 40 年生。台灣杉人工林不同林齡施行不同程度疏伐後其生長之變化，如表 6 所示。台灣杉林分於 6 年生時，林分平均胸徑約為 9.4 cm，樹高約 5.6 m，此時每公頃存活之株數為 1601 株，每公頃斷面積 11.6 m²，林分尚未鬱閉，此時林分曾進行 1/3~1/4 樹高修枝，至 11 年生時觀測，以 1/4 樹高修枝效果最佳（洪良斌，1979），11 年生時，林分平均胸徑為 17.6 cm，樹高平均 11.0 m，林分每公頃存活株數為 1567 株，斷面積每公頃 39.5 m²，林分已開始鬱閉產生競爭，至 17 年生時，林分競爭激烈，下側枝條枯死，枝下高升高，地被雜草、灌木漸稀，已產生明顯之自我疏伐現象。此時林分每公頃株數 1500 株，因此以胸高斷面積保留量為基準，施行 4 種不同程度之疏伐，胸高斷面積由 41~59 m²/ha，每公頃株數由 900~1500 株。

又由表 7、8、9 及圖 12 可知，台灣杉 17 年生強度疏伐材積疏伐量為 133.1 m³/ha，碳吸存量 25.99 ton/ha，26 年生時，疏伐材積量為 131.5 m³/ha，碳吸存量 25.69 ton/ha，二次疏伐材積合計為 264.6 m³/ha，碳吸存量 51.68 ton/ha，40 年生時，林分現存材積為 690.6 m³/ha，碳吸存量 134.9 ton/ha。中度疏伐 17 年生第一次疏伐材積為 70.6 m³/ha，碳吸存量 13.8 ton/ha，第二次 26 年生時，疏伐材積為 74.8 m³/ha，碳吸存量 14.6 ton/ha，二次疏伐材積合計為 145.4 m³/ha，碳吸存量 28.4 ton/ha，40 年生林分現存材積為 783.3 m³/ha，碳吸存量 153.0 ton/ha。弱度疏伐第一次疏伐材積為 57.2 m³/ha，碳吸存量 11.2 ton/ha，第二次 26 年生時為 41.5 m³/ha，碳吸存量 8.1 ton/ha，二次疏伐合計 98.2 m³/ha，碳吸存量 19.3 ton/ha，40 年生時林分現存材積 797.3 m³/ha，碳吸存量 155.7 ton/ha；而對照區未疏伐之林分至 40 年生時材積為 905.6 m³/ha，碳吸存量 176.85 ton/ha，以現存林分碳吸存而言，未疏伐區林分單位面積碳吸存量最大，強度疏伐區最小，惟若

加上兩次疏伐量之碳量，則碳吸存變化量由 186.5 ton/ha 至 175 ton/ha，有強度、中度大於未疏伐區及弱度疏伐區之勢。此和許多研究結果相似（坂口勝美 1982），又林分 35 年生以上時（圖 12），對照區單位面積之林分生產力已近乎停滯，亦即林木之生產和枯死，亦近乎相等。

林分每公頃初始栽植株數為 2500 株，於 6 年生時約 70% 成活率，於 17 年生及 26 年生經過 2 次不同程度之疏伐，由圖 13 可發現強度和中度疏伐樣區經過 2 次疏伐，至 40 年時，強度試區留存約 600 株、中度約 800 株、弱度約 1000 株、對照約 1100 株；對照區株數枯死率 26 至 40 年達 28.3%，6 年生至 40 年生時，已達 45.5%，弱度枯死率（26 至 40 年），枯死率為 4.3%，而強度及中度疏伐樣區因競爭而枯死現象發生自我疏伐枯死現象在 2% 左右。

(二) 定期生長

藤枝台灣杉不同疏伐策略及不同時間系列碳吸存量之變化，如表 8、9、10 及 11 所示。台灣杉人工林 17 年生第一次疏伐後 4 年，其定期生長量，強度為 27.16 ton/ha（每年 6.79 ton/ha），中度為 28.29 ton/ha（每年 7.07 ton/ha），弱度為 25.06 ton/ha（每年 6.26 ton/ha），而對照為 25.78 ton/ha（每年 6.44 ton/ha），強度和中度疏伐其碳吸存量均超越未疏伐之對照區約 5-10%。惟疏伐後隨時間之增長，又由 21-26 年生至 5 年之定期生長量觀之，不同疏伐區已降至 1.9-2.2 m³/ha/yr，第一次疏伐後 9 年，不同疏伐處理之 9 年間定期生長量（表 9），除弱度疏伐稍低外（42.14 ton/ha），則約略相等 45.21-47.34 ton/ha，平均每年 5.02-5.26 ton/ha。此顯示林分已再度鬱閉，林木間又開始產生競爭，必須再度疏伐。因此，於 26 年生時進行第二次疏伐，第二次疏伐後 5 年（第一次疏伐後 14 年），強度疏伐定期生長量 27.81 ton/ha，平均每年 5.56 ton/ha，中度疏伐 29.40 ton/ha，平均每年 5.88 ton/ha，弱度 24.87 ton/ha，平均每年 4.97 ton/ha，而對照區則為 25.14 ton/ha，平均每年 5.03 ton/ha；強度和中度疏伐仍大於弱度疏伐和對照區，約大於 11-17%。若第二次疏伐後經過 14 年（第一次疏伐後 23 年），40 年生時，強度疏伐 14 年間之定期生長量為 55.87 ton/ha，中度為 57.32 ton/ha，弱度為 49.73 ton/ha，未疏伐之對照區為 44.46 ton/ha，若以定期年平均生長量強度、中度、弱度、

對照分別為 3.99、4.09、3.55、3.19 ton/ha/yr。14 年間之定期生長強度疏伐為對照區之 1.25 倍，中度為對照區之 1.28 倍，弱度為對照區之 1.11 倍。由此可知對台灣杉而言，林分若未疏伐，隨著林齡之增長，林分彼此間對空間、水分、養分之競爭越來越激烈，最後造成林分生長之量與枯死之量幾乎平衡，致單位面積之生產力停滯。本案例台灣杉林分 35 年生以上（圖 12、13），單位面積生產力停滯(定期生長量為零或負數)，而疏伐林分，不同之疏伐程度，將影響其單位面積之生產力。

(三)時間系列之變化

第一次疏伐經過 4 年及 9 年（林齡分別為 21 及 26 年生），至 26 年生累積之淨生長差異並不明顯，已如前述，但若以第一次及第二次疏伐後之累積淨生長量進行比較，可發現除弱度疏伐外，強度和中度疏伐，疏伐後 14 年，即 31 年生時，累積之碳淨生長量為 72.24-75.15 ton/ha，平均每年 5.16-5.37 ton/ha，不同疏伐度間誤差在 5% 以內，對隨著林分林齡之增長，疏伐後間隔時間之增長，不同疏伐策略之林分，差距則愈來愈大，至 40 年生時，第一次疏伐後 23 年間，累積之淨生長量，強度為 103.21 ton/ha，中度為 102.53 ton/ha，弱度為 91.87 ton/ha，對照區為 91.76 ton/ha。若以 23 年之定期年平均，強度、中度、弱度、對照分別為 4.49、4.46、3.99、3.99 ton/ha/yr；強度疏伐為未疏伐對照區之 1.13%，中度為對照區之 1.12，弱度和對照區相等。

(四)疏伐木搬出與不搬出之差異

若將疏伐林木搬出利用，則疏伐木之碳量可轉換為林產品形式貯存，則林分中之碳之吸存量和疏伐時之碳量可累加（表 9、10、11），林分 31 年生時，強度疏伐林分碳量為 100.84 ton/ha，中度 89.22 ton/ha，弱度 75.14 ton/ha，對照為 72.24 ton/ha；強度為對照區之 1.40 倍，中度為對照區之 1.23 倍，弱度為對照區之 1.04 倍。若林分 40 年生時（第一次疏伐後 23 年），強度疏伐林分碳量為 128.9 ton/ha，中度為 117.1 ton/ha，弱度為 100.0 ton/ha，對照區為 91.8 ton/ha，強度疏伐之碳量為未疏伐之對照區之 1.40 倍，中度疏伐為未疏伐之對照區之 1.27 倍，弱度疏伐為未疏伐之對照區之 1.09 倍。若計入林分枯死量，因林分若不疏伐，林木因競爭而產生樹冠分級，進而產生自我疏伐現象，這些枯死之林木，將快速腐朽迴歸大氣，致減損碳之吸存量，因疏伐之林分，

尤其強度疏伐林分枯死量較少，至 40 年生僅約%，但未疏伐之對照區達 27%（如圖 13），則疏伐和未疏伐林分碳吸存量之差異量更大。

林分疏伐後，初期會促進留存林木之生長，但隨著疏伐後時間之增長，林分若恢復鬱閉，而產生彼此間競爭，疏伐之效果會愈來愈不明顯，淨生長甚至低於未疏伐之林分，因此林分必須再次疏伐，才能增顯疏伐之效益，尤其林分產生嚴重競爭時更明顯。以本案例而言，林分經過二次疏伐，不同疏伐期間之定期生長量，由第一次疏伐後開始稍增大，再隨林齡增大而減小，經第二次疏伐後，隨林齡之增加，疏伐林分比未疏伐林分淨生長量增大，至 40 年生時，疏伐最高比未疏伐可達到 128%。但台灣杉人工林未疏伐林分現存之碳吸存量會大於疏伐後之林分現存之碳吸存量，但若加計疏伐木搬出利用，則強度及中度疏伐之碳吸存量大於未疏伐及弱度疏伐。

五、結論

以林齡而言，第一次疏伐，不同疏伐程度定期淨生長量至 26 年生時(疏伐後 9 年)，中度和強度疏伐效果 10% 以內，差異較小，但經第二次疏伐至林齡 40 年生時（第二次疏伐後 14 年，第一次疏伐後 23 年），強度和中度疏伐較未疏伐之對照區定期碳吸存量可增加 25% 以上，而弱度較未疏伐可增加碳吸存量 11%。

若以第一次及第二次疏伐後累積之淨生長量而言，至 40 年生時，強度疏伐為對照區之 113%，中度疏伐為 112%，弱度和對照區相若。

若將疏伐之林木搬出利用，以林產品之形式儲存，則二次疏伐累積之淨碳吸存量+疏伐木之碳貯存量，至 40 年生，強度疏伐可達 128.9 ton/ha，中度為 117.1 ton/ha，弱度為 100 ton/ha，而對照區僅 91.8 ton/ha。強度之碳吸存量為對照區之 140%，中度疏伐為對照區之 127%，弱度疏伐為對照區之 109%。

林分不同疏伐策略對碳吸存效益，因策略之不同，變化很大，視林分疏伐開始之林齡，疏伐之強度及疏伐之間隔及次數而異。因此適當之經營始能增進人工林分吸存效果，太強度之疏伐，林地若未能充分利用，或林分不疏伐，即放任不經營，枯死大於生長，則碳吸存效果是負面的。且隨著林分林齡之增長，適當疏伐撫育之林分較放任

未疏伐經營之林分,差距會愈大,以本研究台灣杉人工林為例,對照區未疏伐之林分,林分林齡 35 年,林分碳之吸存量與枯死腐朽之碳之釋出量,約略相等,碳吸存之生產力不再增加。

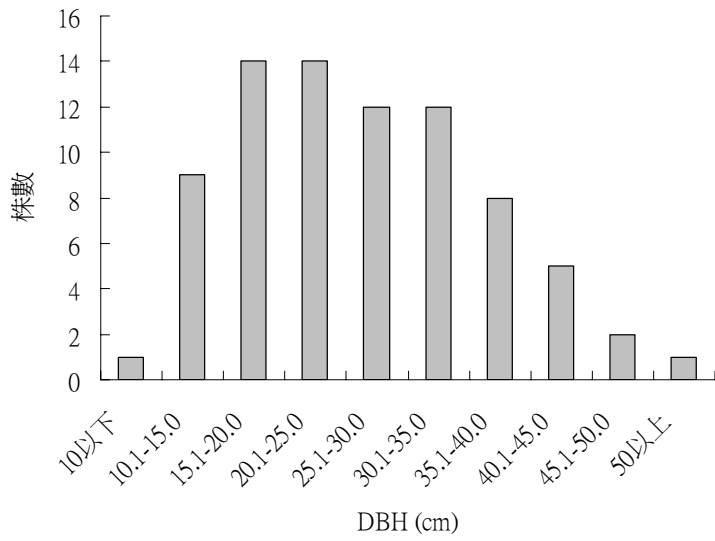
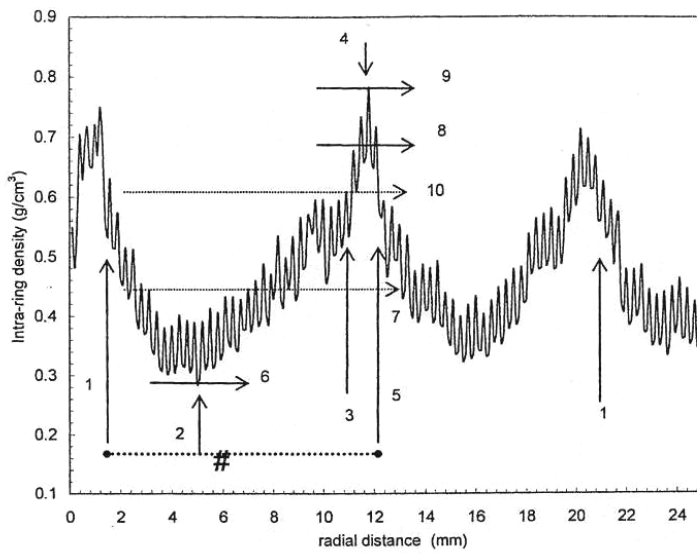


圖1 78株台灣杉胸徑(DBH)徑級分布圖

Fig. 1 Tree's DBH classes distribution of 78 sampled trees Taiwania



- | | |
|-------------|--------------|
| X軸 | Y軸 |
| # : 年輪 | 6 : 最小密度 |
| 1 ↔ 3 : 早材寬 | 7 : 平均早材密度 |
| 3 ↔ 5 : 晚材寬 | 8 : 平均晚材密度 |
| 2 : 最小密度 | 9 : 最大密度 |
| 4 : 最大密度 | 10 : 早材與晚材境界 |

圖2 年輪構造木材比重之解析，8個年輪特徵值

Fig. 2 Density Profile and eight ring characteristics

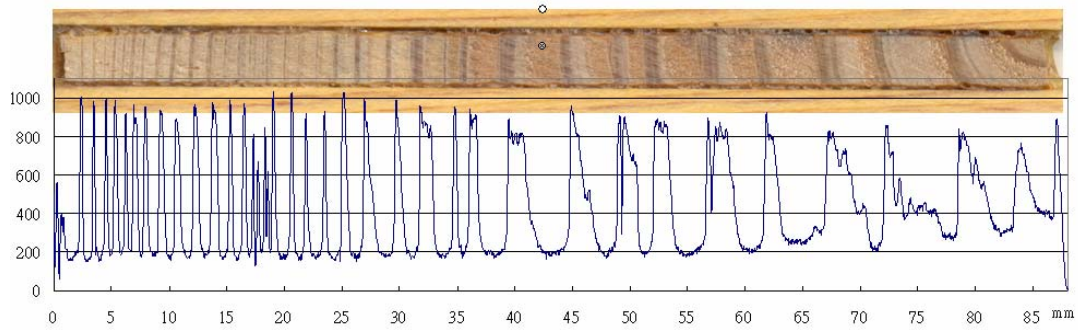


圖3 X-ray解析圖

Fig. 3 X-ray scanning and density profile of sampled core

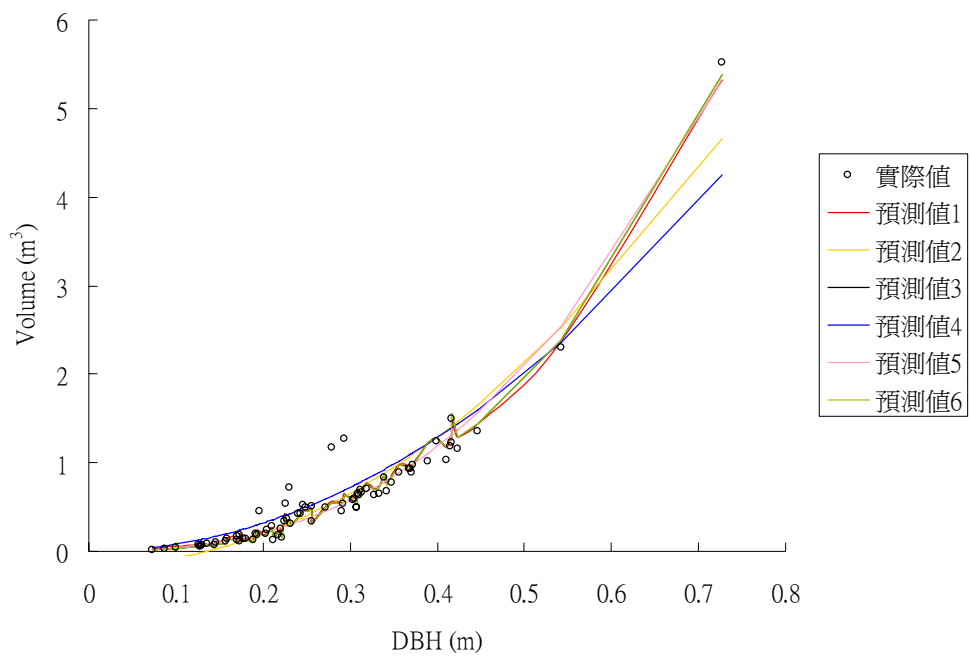


圖4 胸徑與材積迴歸式

Fig. 4 Regression formulas for the relationships between DBH and volume.

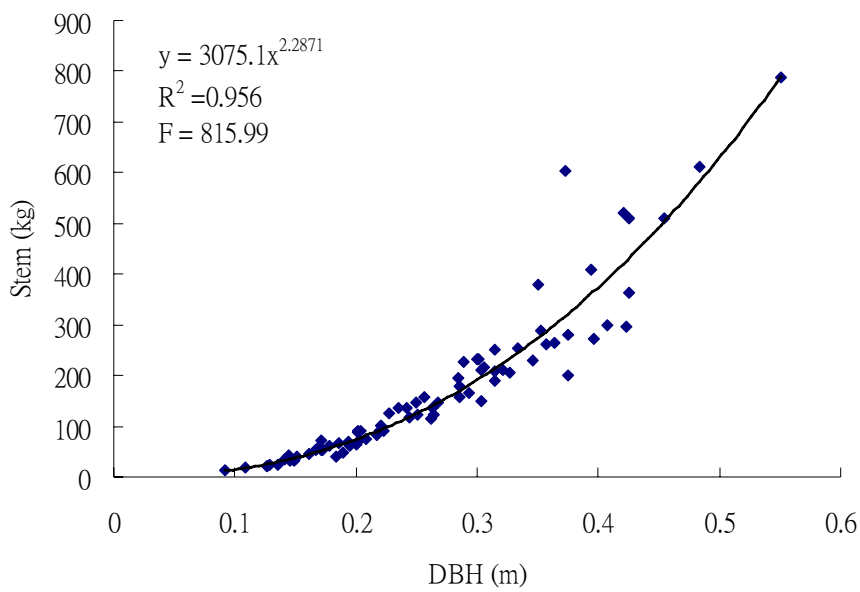


圖5 台灣杉DBH與樹幹生物量之關係

Fig. 5 Relationship between DBH and stem biomass of Taiwania tree.

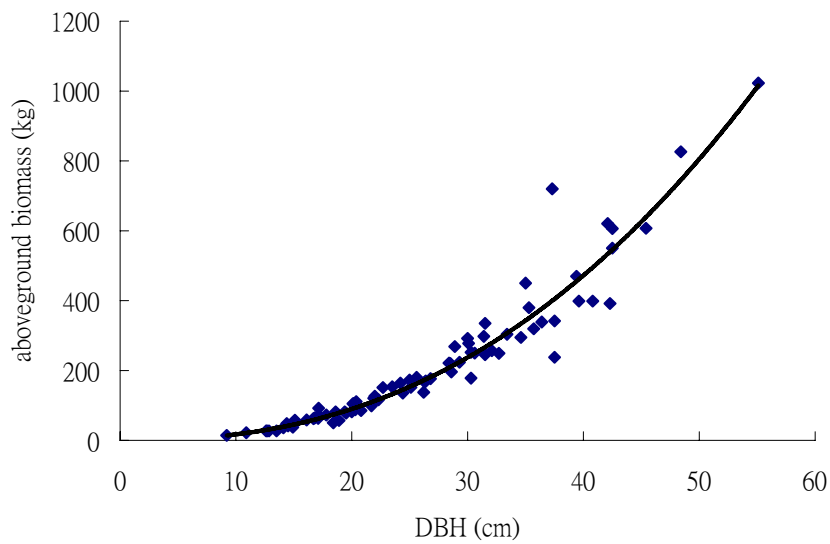


圖6 台灣杉地上部生物量和胸徑(DBH)之關係

Fig. 6 Relationship between biomass above ground and DBH of Taiwania tree.

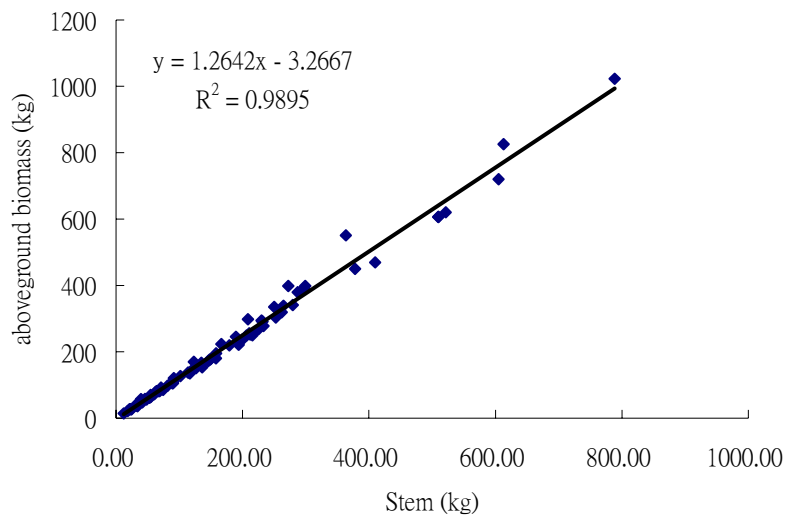


圖7 地上部生物量與樹幹生物量之關係

Fig. 7 Relationship between biomass above ground and volume.

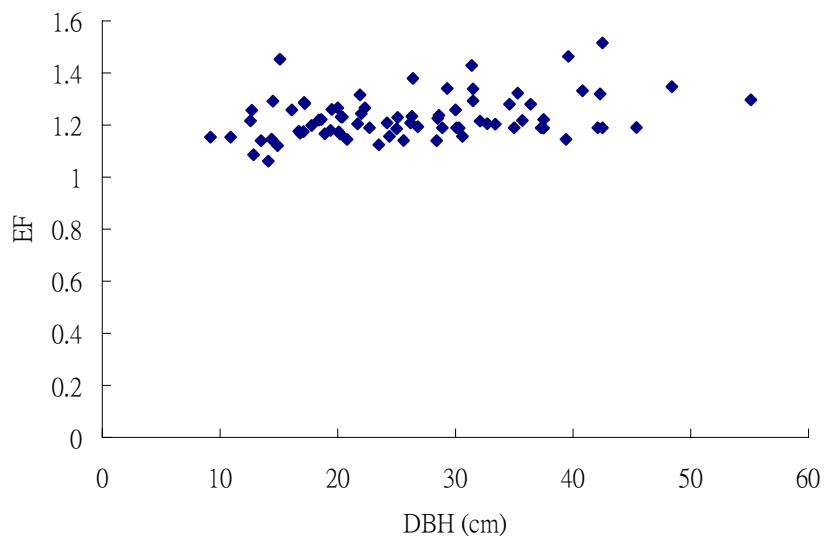


圖8 台灣杉地上部全幹生物量和樹幹之擴張係數(Expansion Factor, EF)和DBH之關係

Fig. 8 Relationship between DBH and expansion factor.

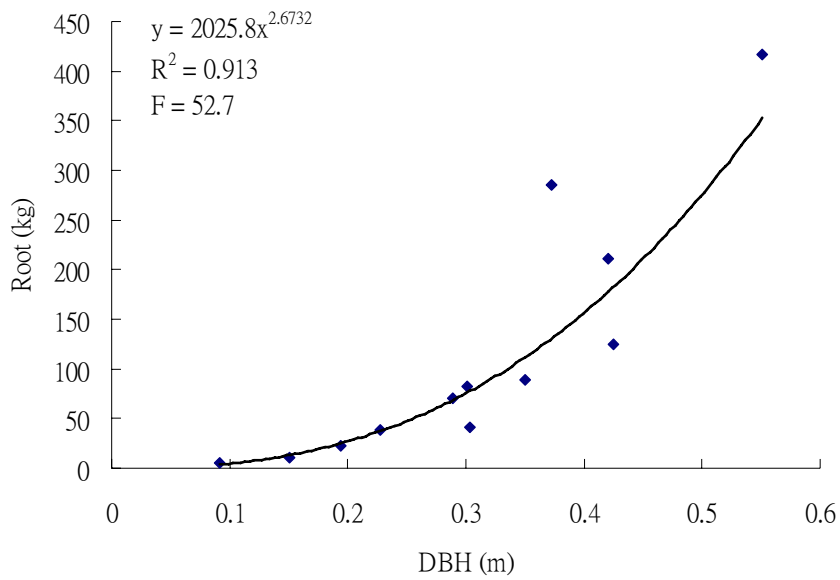


圖9 根部生物量和DBH之關係

Fig. 9 Relationship between DBH and root biomass.

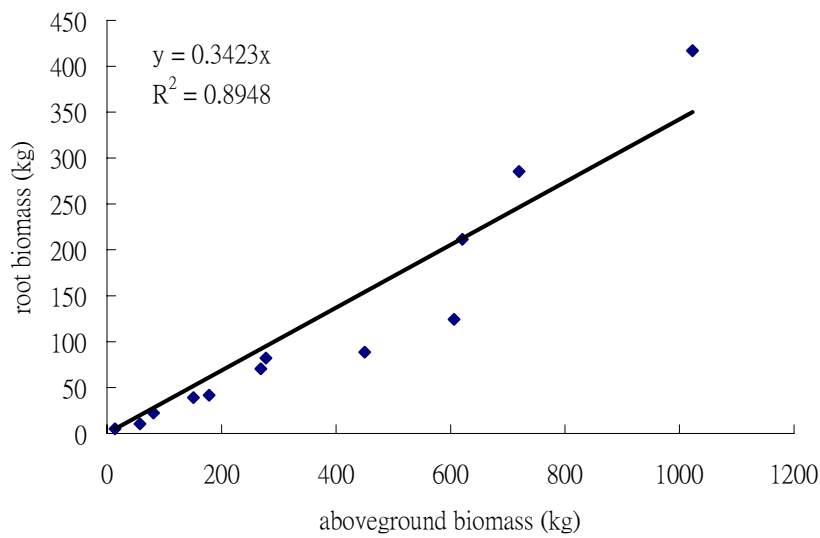


圖10 地上部生物量與根部生物量之關係

Fig. 10 Relationship between biomass aboveground and root biomass.

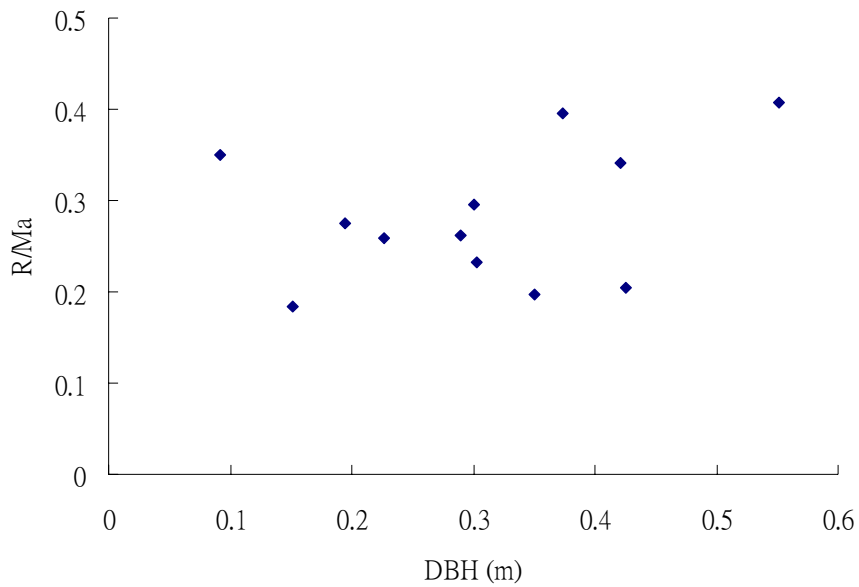


圖11 台灣杉人工林胸徑和根與地上部生物量 (Ma) 之比

Fig. 11 Relationship between root biomass/tree biomass above ground and DBH.

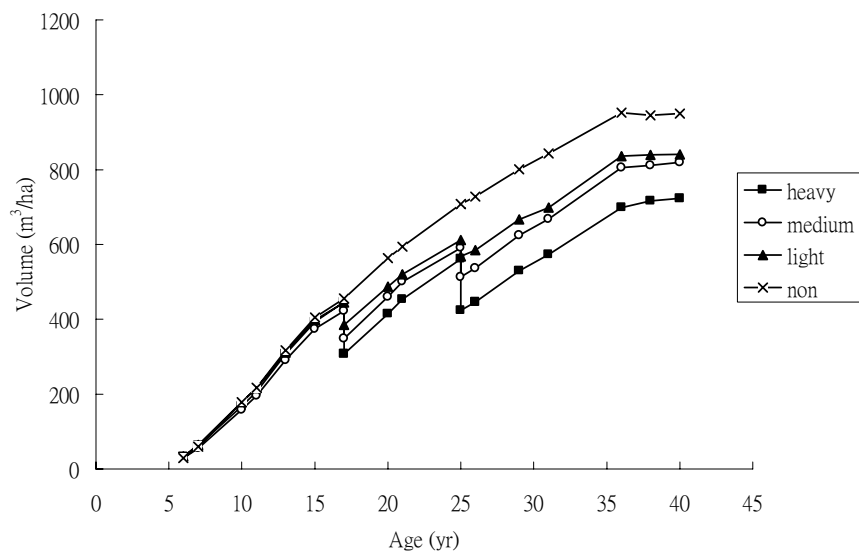


圖12 台灣杉人工林不同疏伐度林分每公頃材積生長與林齡之關係

Fig. 12 The relationship between volume growth per hectare and ages for various thinning intensities of Taiwania plantation.

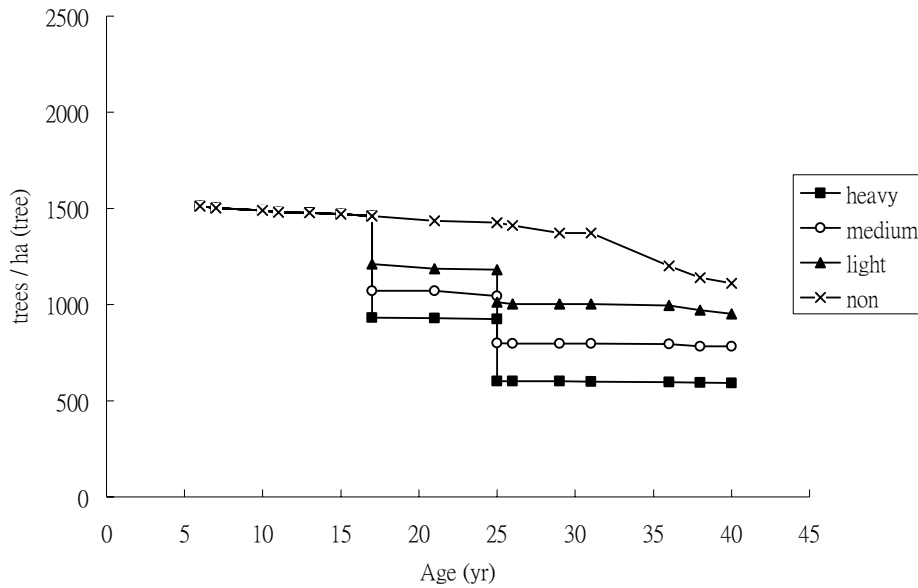


圖13 台灣杉人工林不同疏伐度每公頃株數和林齡之關係

Fig. 13 The relationship between trees per hectare and ages for various thinning intensities of Taiwan plantation.

表1 台灣杉樹幹解析材積(m³)與D(m)、D²H之關係

Table 1 Relationships between volume (V, m³), DBH (D, m), and tree height (H, m) of Taiwan tree trunk.

Volume	No.	Regression equations	MSE	Adj R ²	F value	P value
Volume	1	$V=0.02364+0.33219D^2H$	0.0165	0.969	2254.2	<.0001
	2	$V=-0.16795+9.12241D^2$	0.0404	0.923	879.2	<.0001
	3	$V=0.33761D^2H$	0.0166	0.981	3824.2	<.0001
	4	$V=8.02154D^2$	0.0527	0.940	1156.4	<.0001
	5	$V=11.7943D^{2.5081}$	0.0253	0.972	1241.8	<.0001
	6	$V=0.3372(D^2H)^{1.0007}$	0.0168	0.981	1885.9	<.0001

表2 台灣杉之地上部、幹部、根部生物量(kg)及材積(m³)與D(m)之關係

Table 2 Relationships between biomass (M, kg), volume (V, m³), and DBH (D, m), of Taiwania trees aboveground, stem, and root

Biomass	Regression equations	MSE	R ²	P value
Aboveground biomass	$M=4200.3D^{2.3773}$	3064.0	0.965	<.0001
	$M=412.7V^{0.9701}$	3353.0	0.962	<.0001
	$M=411.14763V$	3334.1	0.962	<.0001
Stem biomass	$M=3075.1D^{2.2871}$	2487.2	0.956	<.0001
	$M=328.6V^{0.9408}$	2367.5	0.958	<.0001
	$M=326.28686V$	2399.1	0.957	<.0001
Root biomass	$M=2025.8D^{2.6732}$	2934.6	0.913	<.0001
	$M=145.9V^{1.1141}$	3894.4	0.885	<.0001
	$M=153.76163V$	3630.0	0.882	<.0001

表3 台灣杉不同疏伐度8個年輪特徵值之變方分析表

Table 3 ANOVA of eight ring characteristics of different Taiwania stand densities and tree ages.

Source		EW	LW	RW	ED	LD	RD	Max	Min
疏伐度	<i>F</i>	7.51**	0.01	6.58**	2.72*	2.26	3.40*	0.32	2.89*
	<i>Pr</i>	0.0001	0.9977	0.0004	0.0486	0.0864	0.0207	0.8122	0.0392
林齡	<i>F</i>	232.70**	31.24*	301.90**	0.73	2.38	4.83**	6.63**	3.6**
	<i>Pr</i>	<.000	<.0001	<.0001	0.5758	0.0567	0.0013	<.0001	0.0088
疏伐度×林齡	<i>F</i>	1.03	1.2	0.59	0.23	0.33	0.38	0.49	0.37
	<i>Pr</i>	0.428	0.2962	0.8443	0.9968	0.9823	0.9681	0.9181	0.9719

** *Pr* <0.01

* *Pr* <0.05

表4 台灣杉不同疏伐度8個年輪特徵值之鄧肯分析

Table 4 Comparison of eight characteristics of different thinning treatments.

Source	EW (mm)	LW (mm)	RW (mm)	ED (g/cm ³)	LD (g/cm ³)	RD (g/cm ³)	Max (g/cm ³)	Min (g/cm ³)
疏伐度 強	2.999 ^a	0.937 ^a	3.936 ^a	0.289 ^b	0.492 ^a	0.345 ^b	0.618 ^a	0.239 ^b
中	2.980 ^a	0.913 ^a	3.893 ^a	0.307 ^a	0.523 ^a	0.369 ^a	0.633 ^a	0.255 ^a
弱	2.679 ^a	0.927 ^a	3.605 ^a	0.292 ^b	0.509 ^a	0.352 ^{ab}	0.627 ^a	0.243 ^{ab}
對照	2.095 ^b	0.922 ^a	3.017 ^b	0.298 ^{ab}	0.502 ^a	0.368 ^a	0.624 ^a	0.254 ^a

表5 台灣杉不同林齡8個年輪特徵值之鄧肯分析

Table 5 Comparison of eight characteristics of different tree ages.

Source	EW (mm)	LW (mm)	RW (mm)	ED (g/cm ³)	LD (g/cm ³)	RD (g/cm ³)	Max (g/cm ³)	Min (g/cm ³)
林齡 第2次疏伐後10年至樹皮 (39-40年)	0.860 ^d	0.424 ^c	1.284 ^d	0.304 ^a	0.499 ^{ab}	0.364 ^a	0.573 ^b	0.264 ^a
第2次疏伐後6-10年 (33-38年)	1.460 ^c	0.741 ^b	2.201 ^c	0.294 ^a	0.518 ^a	0.373 ^a	0.629 ^a	0.248 ^b
第2次疏伐後1-5年 (27-32年)	1.604 ^c	0.740 ^b	2.344 ^c	0.296 ^a	0.522 ^a	0.369 ^a	0.650 ^a	0.247 ^b
第1次疏伐後至第2次疏伐前 (16-26年)	2.496 ^b	0.920 ^b	3.416 ^b	0.293 ^a	0.508 ^{ab}	0.353 ^{ab}	0.652 ^a	0.241 ^b
第1次疏伐前 (16年生)	6.771 ^a	1.798 ^a	8.568 ^a	0.295 ^a	0.485 ^b	0.334 ^b	0.625 ^a	0.239 ^b

表6 台灣杉不同疏伐處理之林分構造

Table 6 The stand structure of Taiwania plantation with different thinning strategy.

Treatment	Age (yr)	Density (trees/ha)	Mean DBH (cm)	Mean height (m)	Basal area (m ² /ha)	Volume (m ³ /ha)	Biomass (ton/ha)	Carbon storage (ton/ha)
Heavy thinning	6	1714	9.31	5.60	12.244	31.5	12.957	6.15
	11	1692	17.14	10.82	40.227	197.3	81.105	38.52
	17 Before thinning	1678	21.47	15.31	62.594	426.7	175.428	83.33
	17 After thinning	931	23.77	16.19	41.687	293.6	120.716	57.34
	21	931	27.26	18.04	54.955	432.7	177.887	84.50
	26 Before thinning	922	29.43	19.12	63.813	536.0	220.373	104.68
	26 After thinning	603	31.25	19.68	47.052	404.5	166.291	78.99
	31	600	34.37	22.07	56.808	546.9	224.839	106.80
	40	592	36.52	24.83	63.567	690.6	283.918	134.86
Medium thinning	6	1547	9.25	5.50	10.916	27.5	11.318	5.38
	11	1497	17.53	11.03	37.257	187.2	76.962	36.56
	17 Before thinning	1478	22.00	15.43	58.410	403.7	165.998	78.85
	17 After thinning	1067	23.60	16.05	47.313	333.1	136.953	65.05
	21	1067	26.74	17.85	60.896	478.0	196.508	93.34
	26 Before thinning	1047	28.47	18.78	67.716	564.6	232.134	110.26
	26 After thinning	800	29.91	19.28	57.718	489.8	201.376	95.65
	31	797	32.39	21.43	67.826	640.3	263.261	125.05
	40	783	33.90	24.08	73.554	783.3	322.045	152.97
Light thinning	6	1631	9.62	5.61	12.525	32.0	13.152	6.25
	11	1603	17.57	11.06	40.599	206.7	84.981	40.37
	17 Before thinning	1586	21.77	15.35	61.670	425.6	174.980	83.12
	17 After thinning	1186	23.62	16.08	52.302	368.4	151.460	71.94
	21	1186	26.07	17.66	64.017	496.7	204.213	97.00
	26 Before thinning	1181	27.52	18.47	71.417	584.2	240.178	114.08
	26 After thinning	1014	28.34	18.75	65.601	542.6	223.089	105.97
	31	1003	29.98	20.70	73.101	669.9	275.437	130.83
	40	936	31.72	23.46	76.717	797.3	327.788	155.70
No thinning	6	1511	9.32	5.51	10.909	28.0	11.494	5.46
	11	1478	18.15	11.30	39.814	207.5	85.315	40.52
	17	1458	22.75	15.61	62.022	435.7	179.142	85.09
	21	1433	24.96	17.14	73.330	567.7	233.416	110.87
	26	1425	26.45	17.96	82.537	676.9	278.304	132.19
	31	1372	28.03	19.81	89.282	805.6	331.231	157.33
	40	1103	30.98	23.07	87.215	905.6	372.320	176.85

表7 台灣杉人工林不同疏伐策略材積定期生長量、累積生長量

Table 7 Thinning volume, periodic, accumulating and total net volume after thinning regimes for Taiwania plantations.

Treatment	Age	after thinning year	thinning volume (m ³ /ha)	periodic net volume after thinning regime (m ³ /ha)	accumulating net volume after thinning regimes (m ³ /ha)	total net volume after thinning regimes (m ³ /ha)	thinning volume + total net volume after thinning regimes (m ³ /ha)	thinning volume + stand volume (m ³ /ha)
Heavy thinning	17	After thinning	133.072					
	21			139.05	139.05	139.05	272.12	565.73
	26	Before thinning	9	103.34	242.39	242.39	375.46	669.07
	26	After thinning		131.540				
	31		14	142.40	142.40	384.79	516.33	811.47
	40		23	143.69	286.09	528.48	660.02	955.16
Medium thinning	17	After thinning	70.643					
	21		4	144.85	144.85	144.85	215.49	548.59
	26	Before thinning	9	86.65	231.50	231.50	302.14	635.24
	26	After thinning		74.811				
	31		14	150.52	150.52	382.02	456.83	785.76
	40		23	142.98	293.49	524.99	599.80	928.74
Light thinning	17	After thinning	57.204					
	21		4	128.31	128.31	128.31	185.51	553.90
	26	Before thinning	9	87.47	215.78	215.78	272.99	641.37
	26	After thinning		41.565				
	31		14	127.32	127.32	343.10	384.67	768.69
	40		23	127.33	254.65	470.43	512.00	896.02
No thinning	17			228.21	407.76			
	21		4	132.00	132.00	132.00	132.00	567.72
	26		9	109.18	241.18	241.18	241.18	676.90
	31		14	128.73	128.73	369.91	369.91	805.63
	40		23	99.94	228.67	469.85	469.85	905.56

表8 台灣杉人工林不同疏伐策略定期平均生長量及平均生長量

Table 8 Periodic, accumulating and total annual net volume after thinning regimes for
Taiwania plantations.

Treatment	Age	after thinning year	periodic annual net volume	accumulating annual net volume	mean annual net volume	mean annual net volume + thinning volume	
	(yr)		(m ³ /ha/yr)	(m ³ /ha/yr)	(m ³ /ha/yr)	(m ³ /ha/yr)	
Heavy thinning	17	After thinning					
	21		4	34.76	34.76	34.76	68.03
	26	Before thinning	9	11.48	26.93	26.93	41.72
	26	After thinning					
	31		14	28.48	28.48	27.48	36.88
	40		23	10.26	20.44	22.98	28.70
Medium thinning	17	After thinning					
	21		4	36.21	36.21	36.21	53.87
	26	Before thinning	9	9.63	25.72	25.72	33.57
	26	After thinning					
	31		14	30.10	30.10	27.29	32.63
	40		23	10.21	20.96	22.83	26.08
Light thinning	17	After thinning					
	21		4	32.08	32.08	32.08	46.38
	26	Before thinning	9	9.72	23.98	23.98	30.33
	26	After thinning					
	31		14	25.46	25.46	24.51	27.48
	40		23	9.09	18.19	20.45	22.26
No thinning	17			20.75	37.07		
	21		4	33.00	33.00	33.00	33.00
	26		9	12.13	26.80	26.80	26.80
	31		14	25.75	25.75	26.42	26.42
	40		23	7.14	16.33	20.43	20.43

表9 台灣杉人工林不同疏伐策略地上部碳吸存定期生長量、累積生長量

Table 9 Thinning carbon, periodic, accumulating and total net carbon after thinning regimes for Taiwan plantations.

Treatment	Age	after thinning year	thinning carbon (ton/ha)	periodic net carbon after thinning regime (ton/ha)	accumulating net carbon after thinning regimes (ton/ha)	total net carbon after thinning regimes (ton/ha)	thinning carbon + total net carbon after thinning regimes (ton/ha)	thinning carbon + stand carbon (ton/ha)
Heavy thinning	17	After thinning	25.988					
	21		4	27.16	27.16	27.16	53.14	110.48
	26	Before thinning	9	20.18	47.34	47.34	73.33	130.67
	26	After thinning		25.689				
	31		14	27.81	27.81	75.15	100.84	158.48
	40		23	28.06	55.87	103.21	128.90	186.54
Medium thinning	17	After thinning	13.796					
	21		4	28.29	28.29	28.29	42.08	107.14
	26	Before thinning	9	16.92	45.21	45.21	59.01	124.06
	26	After thinning		14.610				
	31		14	29.40	29.40	74.61	89.22	153.46
	40		23	27.92	57.32	102.53	117.14	181.38
Light thinning	17	After thinning	11.172					
	21		4	25.06	25.06	25.06	36.23	108.17
	26	Before thinning	9	17.08	42.14	42.14	53.31	125.26
	26	After thinning		8.117				
	31		14	24.87	24.87	67.01	75.12	150.12
	40		23	24.87	49.73	91.87	99.99	174.99
No thinning	17			44.57	79.63			
	21		4	25.78	25.78	25.78	25.78	110.87
	26		9	21.32	47.10	47.10	47.10	132.19
	31		14	25.14	25.14	72.24	72.24	157.33
	40		23	19.52	44.66	91.76	91.76	176.85

表10 台灣杉人工林不同疏伐策略地上部碳吸存定期平均生長量及平均生長量

Table 10 Periodic, accumulating and total annual net carbon after thinning regimes for
Taiwania plantations.

Treatment	Age (yr)		after thinning year	periodic annual net carbon (ton/ha/yr)	accumulating annual net carbon (ton/ha/yr)	mean annual net carbon (ton/ha/yr)	mean annual net carbon + thinning carbon (ton/ha/yr)
Heavy thinning	17	After thinning					
	21		4	6.79	6.79	6.79	13.29
	26	Before thinning	9	2.24	5.26	5.26	8.15
	26	After thinning					
	31		14	5.56	5.56	5.37	7.20
	40		23	2.00	3.99	4.49	5.60
Medium thinning	17	After thinning					
	21		4	7.07	7.07	7.07	10.52
	26	Before thinning	9	1.88	5.02	5.02	6.56
	26	After thinning					
	31		14	5.88	5.88	5.33	6.37
	40		23	1.99	4.09	4.46	5.09
Light thinning	17	After thinning					
	21		4	6.26	6.26	6.26	9.06
	26	Before thinning	9	1.90	4.68	4.68	5.92
	26	After thinning					
	31		14	4.97	4.97	4.79	5.37
	40		23	1.78	3.55	3.99	4.35
No thinning	17			4.05	7.24		
	21		4	6.44	6.44	6.44	6.44
	26		9	2.37	5.23	5.23	5.23
	31		14	5.03	5.03	5.16	5.16
	40		23	1.39	3.19	3.99	3.99

表11 台灣杉人工林不同疏伐策略地上部碳之吸存效應

Table 11 Effects of thinning on the periodic, accumulating, mean net carbon sequestration of Taiwan plantation.

Treatment	Age (yr)	after thinning year	periodic net carbon after thinning regime	accumulating net carbon after thinning regimes	total net carbon after thinning regimes	thinning carbon + total net carbon after thinning regimes
Heavy thinning	17	After thinning				
	21		4	1.05	1.05	2.06
	26	Before thinning	9	0.95	1.00	1.56
	26	After thinning				
	31		14	1.11	1.11	1.04
	40		23	1.44	1.25	1.12
						1.40
Medium thinning	17	After thinning				
	21		4	1.10	1.10	1.63
	26	Before thinning	9	0.79	0.96	1.25
	26	After thinning				
	31		14	1.17	1.17	1.03
	40		23	1.43	1.28	1.12
						1.28
Light thinning	17	After thinning				
	21		4	0.97	0.97	1.41
	26	Before thinning	9	0.80	0.89	1.13
	26	After thinning				
	31		14	0.99	0.99	0.93
	40		23	1.27	1.11	1.00
						1.04
						1.09
No thinning	17					
	21		4	1.00	1.00	1.00
	26		9	1.00	1.00	1.00
	31		14	1.00	1.00	1.00
	40		23	1.00	1.00	1.00