研究報告

臺灣北部現有柳杉人工林林分之生長評估

林笙翰[1] 陳秋萍[2] 鄭智馨[3*]

（收件日期：民國111年12月28日、接受日期：民國112年3月10日）

【摘 要】森林碳吸存被認爲是降低大氣二氧化碳濃度最有效方法之一，然而當森林林分從初期發展至老齡階段，森林林分可能因生長趨緩而形成碳中和現象。以臺灣現有柳杉(*Cryptomeria japonica*)人工林而言，多數柳杉人工林林分是由日本與早期林相變更政策所種植，林齡已超過傳統林業認知的30 – 50年輪伐期或已逐漸進入”老齡”階段。因此，對現有柳杉人工林之生長近況了解，爲重要森林管理議題。本研究藉由北部柳杉人工林之林分調查，包括(1)過去發表文獻樣區再調查與(2)新竹林區管理處永久樣區調查，透過不同時間調查資料，評估單株林木與整體林分之生長特性。兩調查結果均顯示柳杉人工林單株林木與整體林分的持續生長，林分密度隨林齡增加而降低，而單株林木胸高直徑、林分平均胸高直徑與多數林分材積則隨林齡增長而增加。雖有少數樣區林分材積量略爲減少，若僅檢視存活木材積生長，則所有樣區呈現持續材積生長，顯示柳杉林木並未因林齡增加而停止生長。調查結果亦顯示單株林木胸高直徑生長速率與胸徑大小呈顯著正相關，胸徑較大林木，其年平均胸徑生長量也較多。本研究結果可作爲柳杉人工林經營參考，我們認爲北部現有多數柳杉人工林分仍持續生長，可提供林木碳吸存，竹東與南庄等地區之柳杉人工林具備較高林分材積與生長潛力，可發揮碳吸存或木材生產功能。

【關鍵詞】柳杉人工林、林分發展、碳吸存、永久樣區、老齡林。

[1] 國立台灣大學森林環境暨資源學系研究生。106台北市羅斯福路四段一號森林館。
School of Resource Conservation and Forestry, National Taiwan University. Forest Hall, No.1, Sec. 4, Roosevelt Rd, Taipei 106, Taiwan.
[2] 國立台灣大學生物資源暨農學院實驗林管理處副研究員。557南投縣竹山鎮前山路一段12號。
NTU Experimental Forest. No.12, Sec. 1, Qianshan Rd., Zhushan Township 557, Taiwan.
[3] 國立台灣大學森林環境暨資源學系副教授。106台北市羅斯福路四段一號森林館。*通訊作者。
School of Resource Conservation and Forestry, National Taiwan University. Forest Hall, No.1, Sec. 4, Roosevelt Rd, Taipei 106, Taiwan.
*Corresponding Author, email: chengch@ntu.edu.tw.

Research paper

Growth Assessments Of Present Japanese Cedar Plantations In Northern Taiwan

Sheng-Han Lin[1] Chiou-Pin Chen[2], and Chih-Hsin Cheng[3*]

（Received: December 28, 2022; Accepted: March 10 , 2023）

【Abstract】Forest carbon sequestration is one of the most effective strategies to reduce carbon dioxide concertation in the atmosphere. However, as forest stands develop from young to old stages, the abilities of forests to sequester carbon dioxide may decline or even become carbon neutral at the later stages. Most Japanese cedar (*Cryptomeria japonica*) plantations in Taiwan were established during the period of Japanese Colonial Rule or in the early years of current government. The stand age of these stands is beyond the recommended rotation length of 30 – 50 years and being assumed to reach the “old-growth” stage. Therefore, growth assessment of present Japanese cedar plantations is critical for forest management and forest carbon cycle. In order to evaluate the stand development of present Japanese cedar plantations in northern Taiwan, we (1) re-investigated the stands from previous publications, and (2) examined the permanent plots of two recent censuses of Hsinchu Forest District Office. The results indicated the continuing stand development in the present Japanese cedar stands, showing decreasing stand density but increasing mean diameter at breast height and most of the stand volume with stand age. Although a few stands had a slight net negative value in stand volume accumulation, continuing growing trends could be observed for all stands if the dead trees were deducted. The results also indicated the diameter growth of the individual trees correlated well with the tree size, where the trees with larger diameters grew more than those with smaller diameters. Our results can be applied to the management of present Japanese cedar plantations. Most stands are still developing and offer the carbon sequestration. The sites in Zhudong and Nanchung areas contain with higher volume stocks and growth potentials and could be selected as better sites for carbon sequestration or wood production.

【Key words】Japanese cedar plantations, Stand development, Carbon sequestration, Permanent plots, Old-growth forest

I、前言

隨著大氣二氧化碳平均濃度上升，加上伴隨引起全球暖化與氣候變遷影響的加劇，使得碳源與碳匯管理成爲當今社會重要議題。在碳循環管理上，除了需要減少人爲碳排放外，增加森林碳吸存與碳儲存的能力，被認爲是降低大氣二氧化碳濃度最有效率方法之一，全球陸域植物碳吸存貢獻所增加人爲碳排放量的31%，並以森林環境佔了絕大多數吸存碳量(Pan et al., 2011)。

然而森林碳吸存能力可能存在限制，當森林林分發展從年輕、成熟至老齡(old-growth)時，其碳吸存量隨之降低，甚至老齡林分可能因生長趨緩而形成碳中和(carbon neutral)現象(Odum, 1969)。不過，仍有許多實際研究案例，質疑老齡森林是否不具碳吸存功能，例如Luyssaert et al. (2008)提出和以往老齡林達成碳中和之不同觀點，作者以淨初級生產力(net primary production)、生態系統呼吸與淨生態系統生產力(net ecosystem production)計量方式，推估溫帶與寒帶不同林齡林分碳吸存量數值，結果顯示老齡森林仍可以持續固碳，並指出林齡超過200年老齡林，平均碳吸存量仍可達2.4 ± 0.8 Mg C ha^{-1} yr^{-1}。此外，以挪威林齡100年以上雲杉(*Picea abies*)人工林(已超過當地建議之輪伐期)研究爲例(Stokland, 2021)，結果顯示當林分進入老齡階段後，林分材積生長量並非急速下降，而維持一定值，此定值也並非一定低於最適輪伐期林齡之材積生長量。對日本林齡大於100年以上老齡柳杉的生長調查，同樣顯示這些老齡單株林木與林分材積的持續生長增加，而非生長停滯形成無材積增加或無碳吸存能力(Takeuchi, 2005; Hashimoto et al., 2020; Hiroshima et al., 2020)。

柳杉在臺灣種植始於1896年，爲日本引進造林樹種，由於初期試驗成果良好，故大力推廣柳杉造林至全臺各地，並廣泛植栽於國有林、大學實驗林與私有林等，爲國內造林面積最大樹種，也是現有人工林單位面積蓄積量最高樹種(林務局，1994、1995、2023)。現有柳杉林人工林多數爲日本與早年林相變更所種植，林齡已超過傳統林業認知之30 – 50年之輪伐期，或已逐漸進入”老齡”階段(楊榮啓，1975)。早期研究顯示，柳杉人工林以林齡25 – 30年時的年材積增加量最高，當林齡在30年之後，則隨林齡增加而下降(楊榮啓，1975；李訓煌，1978；游漢明，1981)。Chang et al. (2017)研究顯示柳杉人工林每公頃年材積增加量，在40 – 50年生時達到高峰，而後隨林齡增加而急速下降。目前國內對”老齡”柳杉林分生長降低的推測，仍與國際上老齡林分研究結果或是日本老齡柳杉仍持續生長的研究結果有所出入，因此對現有柳杉人工林單株林木生長與整體林分發展的評估，爲森林管理重要課題。

本研究調查樣區以臺灣北部新竹林區管理處柳杉人工林爲主，依據林務局造林清冊(林務局，1994)指出，新竹林區管理處柳杉人工林面積爲14,199 ha，爲柳杉人工林種植面積最大林管處，柳杉人工林種植面積佔全臺柳杉人工林面積35%。調查至2021年爲止，新竹林區管理處林齡超

過50年柳杉林分面積約佔其柳杉林分面積63%，且受到造林政策改以種植原生樹種之影響，1987年後幾乎無柳杉林木種植(林務局，1990)，故本研究主要爲40年生以上柳杉人工林之生長評估。我們藉由兩種調查方式，包括文獻樣區再調查與永久樣區的生長調查資料，研究目的爲：(1)評估現有北部柳杉人工林之單株林木與整體林分生長，包括林分密度、單株林木胸高直徑(diameter at breast height, DBH)、林分平均DBH、林分材積與林分林木生物量等特性，同時並評估單株林木的生長差異，比較單株林木胸徑生長與林木大小關係，與(2)比較現有北部柳杉人工林林分與溪頭柳杉人工林林分之生長差異。

II、材料與方法

(I) 研究樣區

本研究樣區位於新竹林區管理處柳杉人工林，樣區調查分成兩部分進行，第一部分爲文獻再調查樣區，第二部分爲林管處柳杉人工林永久樣區，兩部分調查皆透過不同調查時間資料，評估同一林分之林木生長與林分發展。

第一部分樣區乃藉過去發表文獻的重新再調查，比較不同時間下，柳杉人工林林分之生長差異。在蒐集文獻中，以張峻德(1986)於烏來(Wulai)與觀霧(Guanwu)柳杉人工林調查資料最完整，作者詳細提供樣區地圖及林分特性等數據。蕭怡茹、王立志(2005)也於2002年時，對烏來樣區進行林分調查。我們依據張峻德(1986)與蕭怡茹、王立志(2005)所提供樣區地圖與描述，並參照造林台帳與護管人員協助，於2020年重新於烏來與觀霧樣區進行林分調查，藉由所建立3 個 20 × 20 m樣區的現地再調查，了解柳杉林分之生長概況。

烏來與觀霧柳杉樣區基本資料如表1所示，烏來樣區位置爲北緯24° 50′ ，東經121° 34′ ，位於桶后林道13K處，海拔約550 m，坡度約20 – 30° ，造林時間爲1964年。觀霧樣區經位置爲北緯24° 31′ ，東經121° 06′ ，位於大鹿林道20K處，海拔約1,820 m，坡度約10 – 20° ，造林時間同樣爲1964年。不同調查時間資料，分別以Survey I (1982年調查，包含烏來與觀霧樣區，林齡均爲18年，資料取自張峻德，1986)、Survey II (2002年調查，烏來樣區，林齡爲38年，資料取自蕭怡茹、王立志，2005)與Survey III (2020年調查，包含烏來與觀霧樣區，林齡均爲56年)表示。

表1 烏來與觀霧柳杉人工林樣區基本資料

Table 1. Basic site properties of Japanese cedar plantations in Wulai and Guanwu

	Altitude (m)	Slope (°)	Establishing (year)	Survey I (year)	Survey II (year)	Survey III (year)
Wulai	550	20 – 30°	1964	1982	2002	2020
Guanwu	1,820	10 – 20°	1964	1982		2020

第二部分爲新竹林區管理處柳杉人工林永久樣區，選擇柳杉林木密度超過80%之永久樣區，共計16個樣區，涵蓋大湖(Dahu，2個)、大溪(Daxi，1個)、竹東(Zhudong，4個)、南庄(Nanchung，6個)及烏來(Wulai，3個)等事業區。永久樣區位置與林地特性如表2所示，樣區面積大小爲0.02或 0.05 ha，海拔分布範圍介於410 – 2,392 m，坡度介於3 – 43° 。造林時間介於1954 – 1976年間，但大湖34及竹東43樣區由於缺乏造林時間資料，爲利後續林齡與生長量之評估，將大湖34樣區林齡設定成40年(同大湖37樣區)，竹東43樣區則設定成45年(使用竹東33、37與41樣區之平均林齡)。

選擇永久樣區最近兩次調查資料，進行單株林木與整體林分生長評估，最近兩次調查資料，依時間順序標示爲Census I與Census II，Census I爲前一期資料，Census II爲最近一次調查資料。Census I 與Census II調查時間間隔除烏來3個樣區調查間隔爲10年外，其它樣區調查間隔爲5年。Census I之樣區林齡介於31 – 59年，Census II之樣區林齡介於41 – 64年。永久樣區Census I 與Census II之間，並無疏伐與林木晉級生長之記錄。

表2 新竹林區管理處柳杉人工林永久樣區基本資料

Table 2. Basic site properties of Japanese cedar permanent plots in the Hsinchu Forest District Office

	E	N	Altitude (m)	Slope (°)	Establishing (year)	Census I (year)	Census II (year)
Dahu 34	121.0033	24.4123	1,750	23	1974	2014	2019
Dahu 37	120.9853	24.4099	1,430	15	1974	2014	2019
Daxi 58	121.4129	24.8325	1,005	15	1953	2012	2017
Zhudong 33	121.1147	24.5218	1,907	3	1965	2011	2016
Zhudon 37	121.1096	24.5311	1,500	20	1965	2011	2016
Zhudon 41	121.1937	24.6160	1,297	25	1968	2011	2016
Zhudon 43	121.1759	24.6452	1,200	10	1968	2011	2016
Nanchung 35	121.0653	24.5054	2,392	22	1970	2013	2018
Nanchung 36	121.0139	24.5171	1,950	30	1954	2013	2018
Nanchung 40	121.0193	24.5188	1,650	26	1962	2013	2018
Nanchung 42	121.0246	24.5255	1,400	13	1958	2013	2018
Nanchung 43	120.9903	24.5225	1,135	43	1960	2013	2018
Nanchung 44	120.9877	24.5367	825	15	1970	2013	2018
Wulai 50	121.6448	24.8435	700	35	1976	2007	2017
Wulai 54	121.6490	24.8395	600	20	1965	2007	2017
Wulai 56	121.5297	24.8293	410	17	1954	2007	2017

兩部分調查資料結構呈現時間與空間之差異，在時間上，文獻再調查樣區時間間隔長(林齡間隔38年)，調查結果可作爲林分長時間之生長變化；林管處永久樣區則爲近期調查結果，可用以評估最近5 – 10年林分變化。空間上，文獻再調查樣區僅烏

來、觀霧2處有完整紀錄可供重新調查，重新調查造林地編號與位置雖盡可能符合原文獻內容，但仍有小範圍調查樣地差異之可能；永久樣區則空間分布較廣，涵蓋林管處不同事業區，但樣區面積偏小且無重複設置。我們認爲兩部分資料結構可彼此互補，能較爲完整地評估現有北部柳杉人工林分生長。

(II) 林木生長評估

柳杉林木生長評估項目，包括林分密度、單株林木DBH，林分平均DBH與林分材積等(Takeuchi, 2005; Cheng et al., 2013)。在調查樣區中，文獻再調查樣區並無單株林木生長資料，僅進行不同調查時間下整體林分密度、林分平均DBH與林分材積變化量評估。永久樣區則具備單株林木與整體林分生長記錄，可分別進行單株林木與整體林分之生長評估。

林分密度爲單位面積之林木株數(trees ha^{-1})，單株林木DBH爲林木地面高度1.3 m之胸徑，使用胸徑捲尺進行現地胸圍量測，DBH爲胸圍除上圓周率。單株林木DBH增加量爲不同調查時間之DBH變化量，除以調查年份間隔，可得到DBH年增加量。林分平均年DBH增加量，爲樣區單株林木DBH年增加量之平均。

林木材積計算參考楊榮啓(1975)於溪頭的林木材積推估，該推估模式爲國內少數以大徑木柳杉所建立的推估模式，模式推估來自587棵伐倒柳杉林木，林木最小DBH爲9 cm，最大爲50 cm，樹高介於9 – 30 m，推估模式如式(1)與式(2)所示。

$$H = 3.4842 \times (DBH)^{0.5228} + 1.3 \quad (1)$$

$$\text{Log } V = -4.193148 + 0.9333828 \times \log (DBH^2 \times H) \quad (2)$$

H爲林木樹高(m)，DBH爲林木胸高直徑(cm)，V林木樹幹材積(m^3)。爲驗證模式於北部柳杉樣區林木之推估準確性，我們於觀霧、烏來與南庄等樣區，利用雷射測距儀實測林木樹高，並與推估模式樹高(式(1))進行比較。圖一顯示量測樹高與推估樹高之差值盒狀圖，大多數林木樹高差異小於±2 m，平均樹高差異值爲-0.15 – 0.24 m間，成對樣品t檢定(paired t-test)亦顯示兩數值並無顯著差異(P-value > 0.05)，結果顯示北部柳杉林木與溪頭柳杉林木間，其DBH與樹高相關關係應無顯著差異，即可應用此模式，由所調查北部柳杉林木之DBH，推估其林木樹高與材積。

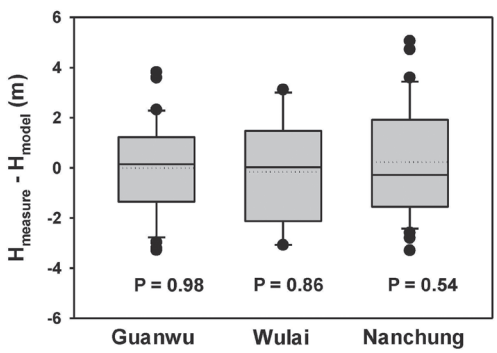

圖1 觀霧(n = 32)、烏來(n = 10)與南庄(n = 32)柳杉林木實測樹高與推估樹高差值盒狀圖與成對樣品t-test檢定分析p值。盒狀圖中實線為差值中位數，需線為差值平均。

Fig. 1 Boxplot of tree height differences between measured and modeled heights in Guanwu (n = 32), Wulai (n = 10), and Nanchung (n = 32) and the paired t-test p-values between the samples. Solid line within the box means the median value and dashed line means the average value.

林分材積爲調查樣區內單株林木材積之加總，不同調查時間林分材積變化，受到林木生長與林木死亡影響，淨材積變化可能呈現正值或是負值，正值表示在調查期間內，材積生長高於死亡材積，負值則爲死亡材積高於生長材積。若僅考慮存活林木，則爲存活林木材積生長。我們也進一步將林分材積依全株林木擴展係數(expanding factor, EF)與木材密度，將林分材積量換算成林分全株林木生物量，計算式如式(3)：

$$\text{Stand tree biomass (Mg ha}^{-1}) = WV \times EF \times \rho \quad (3)$$

WV爲林分材積(m^3 ha^{-1})，EF爲全株林木擴展係數(Mg Mg^{-1})，ρ爲木材密度(Mg m^{-3})。EF數值參考Cheng et al. (2013)，該文獻指出超過40年林齡的柳杉林木，其全株林木擴展係數接近1.545定值，以此數值代入本研究樣區。木材基本密度(ρ)採用林務局所發表之0.416 Mg m^{-3} (林務局，2010)。林分林木生物量乘上碳轉換係數，可以計算林分林木碳量，碳轉換係數計算採用49.5% (Cheng et al., 2013)。

(III) 資料分析

張峻德(1986)於1982年調查烏來與觀霧樣區時，僅以直方圖呈現調查結果，並無記載林分密度與林分平均DBH等數值，我們透過座標轉換方式進行數值計算，經計算後，烏來樣區Survey I林分密度約爲1,660 trees ha^{-1}，平均林分DBH爲17.5 cm (表3)。蕭怡茹、王立志(2005) 2002年對烏來樣區再調查，經過兩次疏伐(分別爲1992年及2002年)後，Survey II林分密度爲1,100 trees ha^{-1}，平均林分DBH爲20.0 cm。觀霧樣區Survey I資料經座標轉換計算後，林分密度約爲1,567 trees ha^{-1}，平均林分DBH爲19.6 cm。

爲了解永久樣區內單株林木生長差異，我們進一步分析樣區內單株林木DBH增加量與初始DBH相關回歸(Inoue et al., 2008; Masaki et al., 2006; Sheil et al., 2017)，關係式如式(4)所示：

$$\triangle DBH = a + b \times (DBH)_{census\ I} \quad (4)$$

△DBH爲單株林木DBH年增加量，$DBH_{census\ I}$爲初始DBH，a、b爲推估參數。線性相關係數愈高，表示單株林木生長受到林木大小影響愈明顯，在正相關關係(b > 0)下，單株林木DBH愈大，其林木△DBH生長量也愈多。

此外，我們將北部柳杉人工林林分密度、林分平均DBH、林分材積與林分生物量等生長資料，與溪頭柳杉進行比較，了解不同地區生長差異。溪頭柳杉林分生長數據主要依Cheng et al. (2013)論文，該文獻應用Mitscherlich回歸方程式，建立溪頭柳杉林分特性與林齡生長關係模式。

III、結果

(I) 文獻再調查樣區

比較張峻德(1986)及蕭怡茹、王立志(2005)文獻資料，Survey III (2020年)調查結果顯示烏來及觀霧兩樣區呈現明顯林分持續發展(表3)，林分密度隨林齡增加而減少，林分DBH與林分材積則隨林齡增加

而增加。烏來與觀霧樣區林分密度自最初1,600及1,567 trees ha^{-1}，分別降低至675與1,317 trees ha^{-1}。林分平均DBH於烏來樣區從最初17.5 cm，Survey II增加至20.0 cm，Survey III增加至29.2 cm。林分平均DBH於觀霧樣區則從19.6 cm增加至34.1 cm。林分材積於烏來樣區從最初 312.6 m^3 ha^{-1}，Survey II因疏伐而降低至306.5 m^3 ha^{-1}，Survey III則再增加至 463.9 m^3 ha^{-1}，觀霧樣區林分材積則從Survey I的389.8 m^3 ha^{-1}，增加至Survey III的1,264.4 m^3 ha^{-1}。

表3 烏來與觀霧柳杉人工林樣區於1982、2002與2020年調查之林分特性

Table 3. Stand characteristics of Japanese cedar plantations surveyed in 1982, 2002, and 2020, respectively, in Wulai and Guanwu

	Stand density (trees ha^{-1})			Mean DBH (cm)			Stand volume (m^3 ha^{-1})		
	Survey I	Survey II	Survey III	Survey I	Survey II	Survey III	Survey I	Survey II	Survey III
Wulai	1,660	1,100	675	17.5	20.0	29.2	312.6	306.5	463.9
Guanwu	1,567	-	1,317	19.6	-	34.1	389.8	-	1,264.4

(II) 永久樣區林分特性與生長

16個柳杉人工林永久樣區最近兩次調查資料如表4，林分密度、林分平均DBH與林分材積於永久樣區間呈現極高變異，以Census I資料爲例，樣區林分密度介於540 – 1,550 trees ha^{-1}，林分平均DBH介於19.9 – 45.3 cm，林分材積介於311.2 – 1,772.2 m^3 ha^{-1}，其中，竹東33與4個南庄永久樣區的林分材積更是超過1,000 m^3 ha^{-1}。圖2爲Census I資料之林分密度、林分平均DBH、林分材積與林分林木生物量與林齡相關關係，林分平均DBH、林分材積與林分林木生物量與林齡與呈正相關趨勢，而林分密度與林齡則無顯著相關，反應不同地區之柳杉人工林林分平均DBH、林分材積與林分林木生物量受林齡影響，而林分密度則可能受林齡以外其它性質影響，如樣區地點、林分管理或外來干擾等影響。

比較Census I與Census II兩次調查資料林分特性差異(表5)，結果顯示林分密度除少數樣區因無林木死亡而維持不變外，多數樣區林木密度隨林齡增加而減少，每年每公頃減少株數介於0 – 30棵。樣區林分平均DBH則隨林齡增加而增加，年DBH增加量介於0.12 – 0.74 cm yr^{-1}，16樣區平均年DBH增加量爲0.35 cm yr^{-1}。淨林分材積變化介於-8.0 – 29.7 m^3 ha^{-1} yr^{-1}間，其中僅大湖37、南庄44及烏來56三永久樣區，由於死亡材積高於生長材積，而呈現林分材積量減少。若檢視存活木生長，林分材積生長量介於6.5 – 29.7 m^3 ha^{-1} yr^{-1}，以大湖34、竹東33、南庄36與南庄42等樣區，分別呈現24.6、26.9、29.7及20.5 m^3 ha^{-1} yr^{-1}高材積生長速率，相當於15.8、17.4、19.0與13.1 Mg ha^{-1} yr^{-1}增加林木生物量，或相當於7.8、8.7、9.5與6.6 Mg C ha^{-1} yr^{-1}增加林木碳量 。

表4 新竹林區管理處柳杉人工林永久樣區最近兩次調查資料林分特性

Table 4. Stand characteristics of Japanese cedar permanent plots at two recent censuses in the Hsinchu Forest District Office

	Stand density (trees ha^{-1})		Mean DBH (cm)		Stand volume (m^3 ha^{-1})		Living tree biomass (Mg ha^{-1})	
	Census I	Census II	Census I	Census II	Census I	Census II	Census I	Census II
Dahu 34	720	640	28.8±7.1（17.9–47.7）[a]	32.5±8.8（17.9–54.1）	469.4	561.1	301.7	360.6
Dahu 37	440	360	29.9±6.5（18.9–43.1）	32.7±7.5（18.8–47.2）	311.2	309.2	200.0	198.7
Daxi 58	700	680	37.1±8.4（21.6–57.9）	38.4±8.8（21.5–60.0）	809.8	851.0	520.5	547.0
Zhudong 33	1,350	1,350	33.7±3.3（26.5–38.6）	35.3±3.6（27.4–41.0）	1,177.9	1,312.4	757.1	843.5
Zhudong 37	840	840	34.7±5.7（23.2–43.9）	35.9±6.1（24.0–45.9）	802.9	871.4	516.0	560.1
Zhudong 41	820	820	32.1±5.8（15.3–44.8）	33.4±6.4（15.5–48.2）	657.3	727.9	422.5	467.8
Zhudong 43	1,550	1,550	28.2±6.5（17.1–40.1）	28.8±6.9（17.1–41.4）	951.2	1,004.9	611.4	645.9
Nanchung 35	580	560	25.1±9.9（7.8–46.2）	25.8±10.6（7.8–48.6）	304.1	323.0	195.5	207.6
Nanchung 36	900	900	45.3±14.6（13.7–73.5）	46.8±15.4（13.7–79.3）	1,772.2	1,920.7	1,139.0	1,234.5
Nanchung 40	1,350	1,200	31.4±7.9（20.9–52.7）	33.5±8.4（20.9–54.3）	1,081.7	1,113.9	695.2	715.9
Nanchung 42	800	750	43.8±11.4（26.4–73.7）	46.8±11.8（26.5–73.7）	1,418.7	1,506.9	911.8	968.5
Nanchung 43	800	800	39.3±9.4（23.5–61.0）	40.1±10.0（23.0–61.0）	1,061.5	1,124.5	682.2	722.7
Nanchung 44	950	850	31.4±7.6（17.9–44.1）	32.2±7.9（17.9–45.0）	744.6	714.1	478.6	459.0
Wulai 50	1,160	960	19.9±5.1（11.6–36.0）	24.9±6.0（14.0–46.0）	327.3	443.2	210.4	284.9
Wulai 54	780	660	28.2±9.7（14.9–65.2）	33.0±11.0（16.0–73.4）	523.0	635.7	336.1	408.6
Wulai 56	540	380	35.5±10.0（20.3–58.4）	39.2±10.6（24.0–64.0）	592.3	512.8	380.7	329.6

[a]Mean ± Standard deviation (Minimum–Maximum)

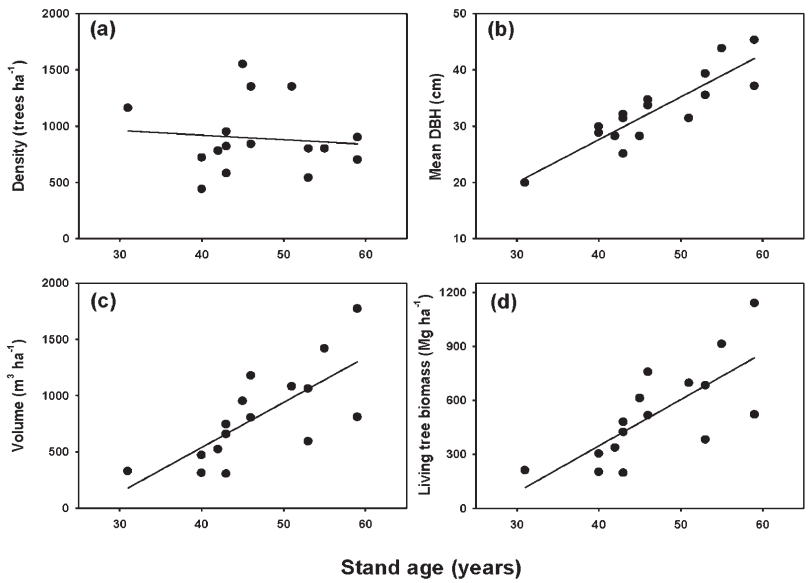

圖2 新竹林區管理處柳杉人工林永久樣區林分特性與林齡關係。(a)林分密度，(b)林分平均DBH，(c)林分材積，(d)林木生物量。

Fig. 2 Relationships between stand characteristics and stand age of Japanese cedar permanent plots in the Hsinchu Forest District Office. (a) stand density, (b) mean DBH, (c) stand volume, and (d) stand living tree biomass.

表5 新竹林區管理處柳杉人工林永久樣區最近兩次調查資料林分特性年平均差異

Table 5. Stand developments of Japanese cedar permanent plots between two recent censuses in the Hsinchu Forest District Office

	△Stand density (trees ha^{-1} yr^{-1})	△Mean DBH (cm yr^{-1})	△Stand Volume (m^3 ha^{-1} yr^{-1})			△Stand biomass (Mg ha^{-1} yr^{-1})		
			Net	Growth	Mortality	Net	Growth	Mortality
Dahu 34	-16	0.74	18.3	24.6	6.3	11.7	15.8	4.0
Dahu 37	-16	0.56	-0.4	6.5	6.9	-0.2	4.2	4.4
Daxi 58	-4	0.26	8.3	11.2	2.9	5.3	7.3	2.0
Zhudong 33	0	0.32	26.9	26.9	0	17.4	17.4	0
Zhudong 37	0	0.24	13.7	13.7	0	8.9	8.9	0
Zhudong 41	0	0.26	14.1	14.1	0	9.1	9.1	0
Zhudong 43	0	0.12	10.7	10.7	0	6.9	6.9	0
Nanchung 35	-4	0.14	3.8	8.2	4.4	2.4	5.3	2.8
Nanchung 36	0	0.30	29.7	29.7	0	19.0	19.0	0.0
Nanchung 40	-30	0.42	6.4	16.4	10	4.0	10.5	6.5
Nanchung 42	-10	0.60	17.6	20.5	2.9	11.3	13.1	1.8
Nanchung 43	0	0.16	12.6	12.6	0	8.1	8.1	0
Nanchung 44	-20	0.16	-6.1	11.0	17.1	-3.8	7.1	10.9
Wulai 50	-20	0.50	11.6	15.0	3.4	7.5	9.7	2.2
Wulai 54	-12	0.48	11.3	16.5	5.2	7.3	10.7	3.4
Wulai 56	-16	0.37	-8.0	9.2	17.2	-5.1	5.9	10.9
Mean	-9.3	0.35	10.7	15.4	4.7	6.9	9.9	3.1

(III) 永久樣區單株林木生長

在永久樣區林分內，單株林木△DBH增加量與初始$DBH_{census\ I}$呈現顯著相關(表6)，除南庄42、南庄44與烏來56等三樣區無相關外，其他樣區$DBH_{census\ I}$可以解釋0.17 – 0.57 變異量，且所有樣區相關斜率b值均爲正值，顯示初始$DBH_{census\ I}$愈大林木，單株林木△DBH增加量也相對愈多，而初始$DBH_{census\ I}$較小林木，呈現相對較小△DBH增加量。

表6 新竹林區管理處柳杉人工林永久樣區單株林木DBH生長(△DBH)與初始DBH線性關係 ($\triangle DBH = a + b \times (DBH)_{census\ I}$)

Table 6. Linear relationships between △DBH growth and initial $DBH_{census\ I}$ ($\triangle DBH = a + b \times (DBH)_{census\ I}$) of Japanese cedar permanent plots in the Hsinchu Forest District Office

	No. trees	a	b	R^2	P-value
Dahu 34	32	-0.707	0.045	0.57	< 0.01
Dahu 37	18	-0.593	0.028	0.56	< 0.01
Daxi 58	34	-0.130	0.009	0.36	< 0.01
Zhudong 33	27	-0.071	0.012	0.17	0.03
Zhudong 37	42	-0.177	0.012	0.31	< 0.01
Zhudong 41	41	-0.272	0.017	0.34	< 0.01
Zhudong 43	31	-0.207	0.012	0.30	< 0.01
Nanchung 35	28	-0.041	0.013	0.49	< 0.01
Nanchung 36	18	-0.190	0.011	0.31	0.02
Nanchung 40	24	-0.229	0.013	0.32	< 0.01
Nanchung 42	15	0.031	0.006	0.09	0.29
Nanchung 43	16	-0.307	0.012	0.29	< 0.01
Nanchung 44	17	-0.017	0.008	0.16	0.11
Wulai 50	48	0.079	0.016	0.32	< 0.01
Wulai 54	33	0.080	0.011	0.19	0.01
Wulai 56	19	0.160	0.005	0.18	0.07

圖3爲永久樣區中斜率b值相對較高與較低的各兩個樣區爲例，對林木△DBH增加量與初始林木$DBH_{census\ I}$作圖，在較高b值樣區中，較大徑木△DBH增加量可達 1.0 cm yr^{-1}，較小b值樣區大徑木△DBH增加量僅爲0.5 cm yr^{-1}；而小徑木的△DBH增加量，在所有樣區均呈現甚低△DBH增加量或無生長增加。

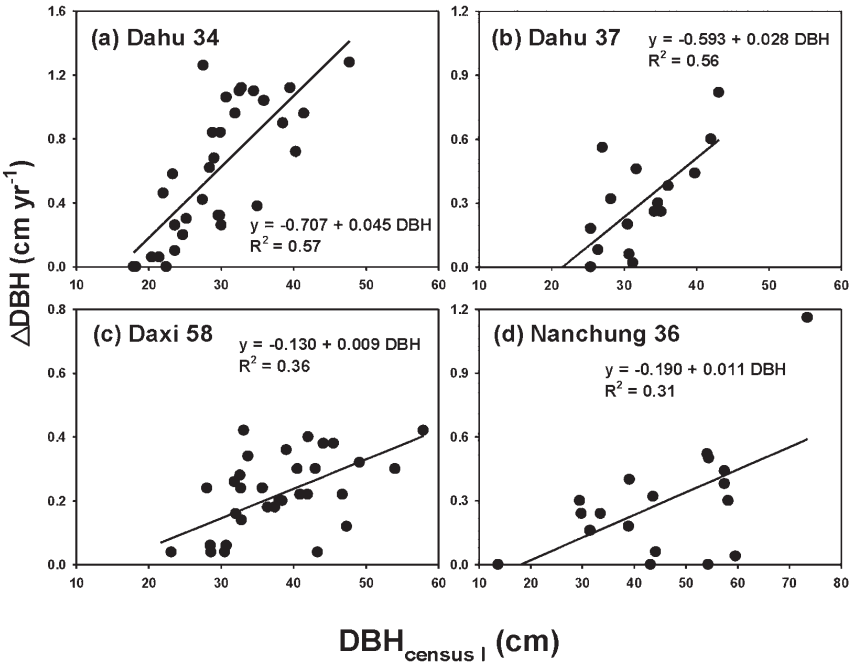

圖3　新竹林區管理處柳杉人工林永久樣區單株林木DBH生長量與初始胸徑關係。(a)大湖34與(b)大湖37為相關斜率較高永久樣區；(c)大溪58與(d)南庄36為相關斜率較低永久樣區。

Fig. 3　Relationships between annual DBH growth and initial DBH at Census I of Japanese cedar permanent plots in the Hsinchu Forest District Office. (a) Dahu 34 and (b) Dahu 37 are the plots with higher slopes, and (c) Daxi 58 and (d) Nanchung 36 are the plots with lower slopes.

(IV) 溪頭林分比較

新竹林區管理處永久樣區林分特性與溪頭柳杉林分特性生長比較如圖4所示，圖中黑色實線爲溪頭林分隨林齡生長曲線，不同顏色與形狀標記符號爲永久樣區Census I與Census II資料。圖4中可看出永久樣區林分密度發展大致與溪頭林分相似，但仍有部份樣區林分密度高於溪頭林分(如竹東43、竹東33)，或是低於溪頭林分(如大湖37、南庄35)。永久樣區林分平均DBH普遍高於溪頭林分，僅少部份樣區(如烏來50、南庄35與竹東43)林分平均DBH低於溪頭林分。多數永久樣區林分材積高於溪頭林分材積，從圖4(a)與4(b)可看出同林齡永久樣區較高之林分材積，可來自較高林分平均DBH與林分密度(如竹東33、南庄36)，或是較高林分平均DBH (如竹東37、南庄43)，而竹東43與南庄40較高林分材積則來自高林分密度。

若比較最近兩次調查資料對現階段林分發展(表5、圖4)，圖4中的斜率可看出多數近期北部柳杉林分發展速率已接近溪頭柳杉林分，以溪頭柳杉林分而言，於林齡40、50與60年時，其林分平均DBH增加量分別爲0.46、0.41與0.36 cm yr^{-1}，林分材積增加量爲9.6、8.9與8.2 m^3 ha^{-1} yr^{-1}，而永久樣區林分平均DBH增加量爲0.35 cm yr^{-1}，平均林分材積增加量爲10.7 m^3 ha^{-1} yr^{-1}。不過，仍有部份樣區近期林分發展仍低於溪頭林分(如南庄35、大湖37、烏來56等)。

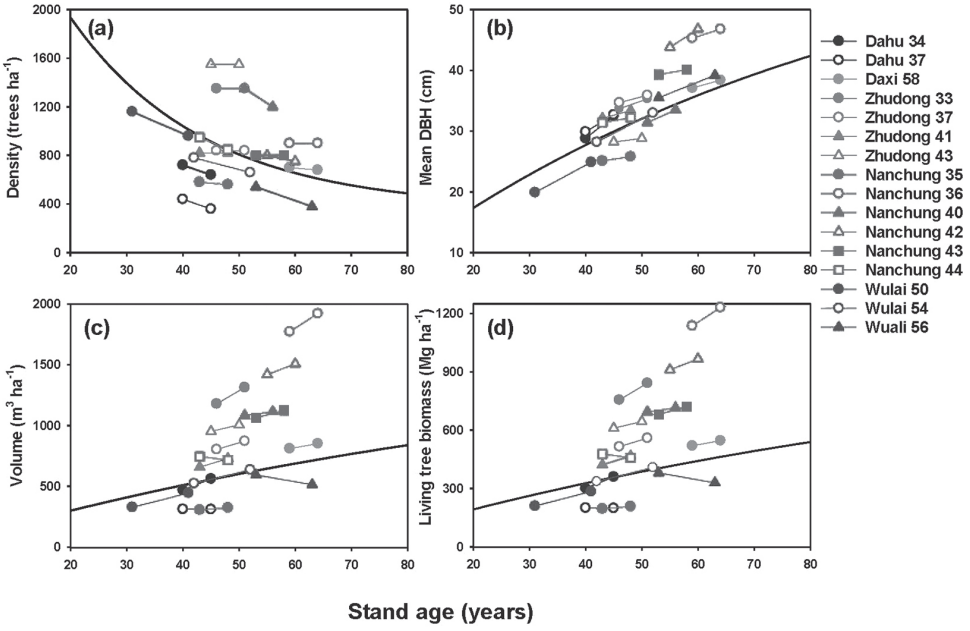

圖4 新竹林區管理處柳杉人工林與溪頭柳杉人工林林分特性比較，分布樣點代表新竹林區管理處柳杉人工林永久樣區於不同調查時間下的林分特性，實線為溪頭柳杉人工林Mistcherlich生長模式。(a)林分密度，(b)林分平均DBH，(c)林分材積，(d)林木生物量。

Fig. 4 Comparisons of stand characteristics of Japanese cedar stands between Hsinchu Forest District Office and Xitou. The scatter points represent Japanese cedar permanent plots in the Hsinchu Forest District Office and black solid line represents the Mistcherlich growth model in Xitou (Cheng et al. 2013). (a) stand density, (b) mean DBH, (c) stand volume, and (d) stand living tree biomass.

IV、討論

(I) 現有柳杉林分生長

本研究均呈現現有柳杉單株林木與整體林分特性的持續生長，林分密度隨林齡增長而減少，而林分平均DBH則隨著林齡增長而增加，縱使林分密度因林木死亡而減少，林分材積生長增加普遍高於林木死亡材積，使得多數林分之淨林分材積或淨林分林木生物量呈現隨林齡增加而增加。在林齡31 – 59年調查柳杉林分中，北部柳杉人工林仍未表現生長減緩或停止生長現象，本論文研究結果與高裕閔、王兆桓(2014)於羅東林管處和平事業區2001 – 2011年調查結果類似，同樣呈現柳杉人工林分之持續生長。Cheng et al. (2013)以溪頭柳杉林分爲例，也提出林齡超過80年柳杉林分，其林分平均DBH、林木材積與林分生物量仍持續增加。

現有柳杉林分之持續生長，與日本老齡柳杉林分調查結果相符(Nishimura et al., 1992; Osumi et al., 2000; Fukuda et al., 2003; Takeuchi, 2005; Hashimoto et al., 2020; Hiroshima et al., 2020; Okayama and Nakajima, 2021)。以最近日本研究報告爲例，Hashimoto et al. (2020)調查千葉演習林林齡超過100年的老齡柳杉，結果指出老齡柳杉林分的持續生長。Okayama and

Nakajima (2021)於日本富山縣內20個柳杉人工林之調查結果，也證明老齡柳杉林分的持續生長。另外，Osumi et al. (2000)、Masaki et al. (2015)和Hiroshima et al. (2020)同樣指出即使林齡超過100年的柳杉林分，其單株林木與整體林分還是維持很高的生長趨勢。國內目前僅溪頭柳杉有超過100年生，並無其他高齡柳杉林分可供佐證，日本高齡柳杉生長概況可作爲國內柳杉人工林生長趨勢之參考。

除柳杉人工林外，鄭智馨等(2014)也發現林齡74年的臺灣杉(*Taiwania cryptomerioides*)人工林林分仍持續生長且無減緩現象。對老齡森林持續生長之現象，國際上同樣有類似結果(Luyssaert et al., 2008; Harmon and Pabst, 2015; Stokland, 2021)，如調查林齡超過100年以上的挪威歐洲雲杉(Stokland, 2021)與奧勒岡州花旗松(*Pseudotsuga menziesii*) (Harmon and Pabst 2015)，研究結果皆顯示老齡雲杉與花旗松林分年生長量並不會因林齡增加而下降，而是呈現平緩減少過程，使得老齡林分生長量遠高於預期生長量。

不同於早期研究所提出人工林林分生長隨林齡老化而快速減緩，老齡人工林分仍能維持良好生長趨勢，主要差異來源在於老齡林木生長速率並未如預測般地下降(Acker et al., 1998; Hiroshima et al., 2020)，以Hiroshima et al. (2020)對東京大學演習林柳杉長期試驗地研究爲例，該研究指出後期老齡柳杉林木(> 100年林齡)若以早期年輕林木建立之推估式推估，普遍有低估現象，顯示老齡柳杉林木生長速率並未趨緩，且可能高於生長前期與中期柳杉林木生長。另一個造成老齡林分持續生長原因，則在於生長後期林木死亡率低於預測值(Stokland, 2021)，導致林分材積生長仍高於死亡材積，而維持林分材積持續增加。林木死亡率的預估，往往是依據林分建構初期時，在高林分密度與高競爭死亡率下的預估，即以初期較高林木死亡率推估後期較低死亡率，因而呈現對後期林木死亡率的高估現象(Luyssaert et al., 2008; Stokland, 2021)。

在過去研究中，仍有一些對於柳杉林分因林齡增加而降低林分材積之研究，以Chang et al. (2017)研究爲例，作者認爲溪頭柳杉人工林林分材積於林齡50年後會減少，但由於該文獻僅引用4個林齡超過50年樣區，且內文中並無提及林分密度與林分平均胸高直徑變化，減少淨材積生長量仍有可能因爲個別樣區受到外在干擾影響，特別是溪頭地區的高外在干擾事件(Cheng et al., 2016, 2020)，經干擾後林地不僅地上部林木損失，降低的土壤養分也可能影響後續林木生長(Cheng et al., 2016)。

(II) 單株林木生長

新竹林區管理處柳杉人工林永久樣區資料顯示，多數樣區內單株林木△DBH生長量與胸徑大小呈顯著正相關，胸高直徑較大林木，其△DBH增加量也較多(圖3)，此結果與於日本柳杉林木生長趨勢相符(Masaki et al., 2006, Takeuchi, 2005)。除柳杉林木外，林政融等(2017)以32個平均林齡21年臺灣杉永久樣區爲例，同樣提出單株林木生長速率與林木大小間呈正相關，大徑木臺灣杉林木不僅生長速率高於較小徑木林木，且大徑木林木死亡比率也低於

小徑木林木。對熱帶、亞熱帶及溫帶樹種的生長調查，同樣發現單株林木生長速率與林木DBH呈現正相關趨勢(Stephenson et al., 2014; Sheil et al., 2017; Meakem et al., 2018)。DBH愈大林木生長速率愈快原因，主要來自DBH較大林木個體，其樹高一般較其它林木高，可競爭獲取更多日照資源，亦具有更深更廣之根系吸收水分與養分，因而產生更大冠幅進行光合作用，形成正回饋機制(Stephenson et al., 2014; Forrester, 2021)。相反地，DBH較小林木往往個體較小，日照資源競爭不足，使得生長速率下降，且可能因競爭不足而停滯生長或死亡。

在三個單株林木△DBH生長量與胸徑大小無顯著回歸相關樣區中(南庄42、南庄44與烏來56等三樣區)，無顯著相關原因主要來自樣區內少數大棵林木生長緩慢或停滯，如南庄42樣區內最大棵柳杉林木在兩次調查中DBH並無改變(均爲73.7 cm)；南庄44樣區則是因爲DBH大於40 cm的1棵林木呈現生長緩慢所致(間隔5年DBH僅生長0.3 cm)，但這些樣區內少數大徑木柳杉的生長遲緩現象，則需要更多林木生理或土壤調查資料，方能說明生長遲緩原因。

(III) 與溪頭柳杉人工林比較

相較溪頭柳杉人工林，同林齡永久樣區普遍呈現較大林分材積，較高林分材積來自較大的林木DBH或是維持較多的林分密度(圖4)。林分生長差異，受到氣候環境、立地條件或森林干擾影響(楊榮啓1975)，在國內早期研究中，劉愼孝(1950)提出柳杉人工林林分於阿里山與奮起湖生長差異比較，於林齡15年時，奮起湖柳杉造林地生長優於阿里山造林地。劉宣誠、洪富文(1978)指出阿里山柳杉林分材積生長量稍稍高於臺大實驗林柳杉林分，且兩者皆顯著高於烏來柳杉林分。張峻德(1986)研究數據也指出觀霧柳杉林分生長量，高於人倫、霧社與烏來等地，本研究文獻再調查樣區結果，同樣指出觀霧林分的生長量高於烏來樣區。

(IV) 結果應用

國際上對老齡林並無完整且明確定義，不過老齡林木(如林齡大於150年林木)的持續生長，已發表於許多報告中(Spies and Franklin, 1988; Acker et al., 1998; Johnson and Abrams, 2009)。Takeuchi (2005)提出日本奈良縣吉野地區林齡介於101 – 229年老齡柳杉林分之調查，結果顯示所有調查樣區均呈現林分平均DBH與材積量的生長增加。美國溫帶森林中鐵杉(*Tsuga canadensis*)、橡樹(*Quercus rubra, Q. velutin, Q. Montana*)與黑膠樹(Blackgum, *Nyssa sylvatica*)等林木，也發現林齡200年以上林木的持續生長，且其生長速率並無減緩(Johnson and Abrams, 2009)。因此，我們需要重新審視國內對於”老齡”柳杉林的認定，以及對老齡柳杉林分停滯生長並爲碳中和的認知，以本研究與近年研究結果爲例(高裕閔、王兆桓，2014; Cheng et al., 2013)，至少現有北部、東部與溪頭多數柳杉人工林，並未呈現生長停滯而無林木碳吸存情形。

應用研究結果，我們提出對現有柳杉人工林經營管理建議，包括：

1. 北部現有多數柳杉人工林分仍持續生長，可提供二氧化碳吸存能力。

2. 竹東與南庄等地區之柳杉人工林具備較高林分材積與生長潛力，可發揮碳吸存或木材生產功能。然柳杉人工林可能森林經營方式仍須更多資料予以評估，例如國內柳杉木材可能存在黑心問題，但目前尚缺乏樣區林分木材材質狀況，無法針對木材品質進行評估。此外，若要進行伐木造林，適合的二代林木種植種類、撫育管理措施、生長模式評估或是對環境與水土影響等，同樣須要仰賴後續更深入研究。
3. 柳杉林分單株林木的生長差異，呈現林木△DBH增加量與胸高直徑正相關，有「大者恆大」之現象，而小徑木林木△DBH增加量則較低甚至無△DBH生長增加，此結果可作爲林分經營管理的參考方針。
4. 目前國內仍缺乏大徑木柳杉材積式，調查樣區中有部分林木DBH大於50 cm (表4)，高於楊榮啓(1975)於溪頭所用材積推估模式之最大DBH數值，可能導致推估誤差。故建立現今國內柳杉材積式仍是必要的，另外若能新增柳杉樹幹解析資料，亦可更完整評估現有柳杉之生長。
5. 擴展更多研究樣點至臺灣其它林地，整體評估全臺各地可能的林分生長差異。早期研究如楊榮啓(1975)曾對臺灣大學實驗林內的不同柳杉林分地位等級進行評估，少數個案也提出部分地區極高柳杉林分材積與林分生長，如沈介文等(2009)提出臺大實驗林對高岳營林區金鋼鑽永久樣區林分材積高達2000 m^3 ha^{-1}，材積生長量更高達 75 m^3 ha^{-1} yr^{-1}。劉愼孝等(1964)等也曾對全臺各地杉木(*Cunninghamia lanceolata*)林分進行收穫評估，整合更多研究，可幫助對臺灣不同地區林地生產力的整體評估。

V、結論

本研究利用過去發表文獻樣區再調查與新竹林區管理處永久樣區調查資料，評估臺灣北部柳杉人工林之生長近況，研究結果顯示現有北部柳杉人工林仍持續生長，林分密度隨林齡增加而減少，但單株林木DBH、林分平均DBH及多數林分材積與林分林木生物量則隨林齡增加而增加，研究結果和日本老齡柳杉之生長趨勢雷同。在永久樣區資料中，於大湖、竹東與南庄等地區，皆有近期材積生長量高達20 $m^3ha^{-1}yr^{-1}$以上樣區，顯示部分北部柳杉人工林林分具極高生長潛勢。另外，單株柳杉林木生長速率與胸高直徑呈正相關，有「大者恆大」之現象，和Takeuchi (2005)與Masaki et al. (2006)之結果雷同。多數北部柳杉人工林林分材積高於同林齡溪頭柳杉人工林，且現有部分樣區林分材積甚至相當於日本高齡(> 150 years)柳杉林分材積(Takeuchi, 2005)。調查結果可提供全臺柳杉人工林管理之重要參考，我們認爲(1)北部現有多數柳杉人工林分仍持續生長，可提供二氧化碳吸存能力；(2)竹東與南庄等地區之柳杉人工林具備較高林分材積與生長潛力，可發揮碳吸存或木材生產功能。

VI、致謝

作者感謝農委會林務局永久樣區資料提供，並感謝臺灣大學森林環境暨資源學系劉宇祥、朱毅豪、張皓雲、范筱翊以及林務局吳俊奇、涂嘉灝、吳秉昇、邱建勳、許曉琪、蔣麗雪等協助樣區調查。感謝科技部大專生計畫對林的補助以及臺灣大學核心群計畫經費補助。

VII、引用文獻

李訓煌(1978)不同齡級柳杉之生長與樹木生物量生產之研究。國立台灣大學森林學研究所碩士論文。

沈介文、江博能、梁治文、王亞男(2009)金鋼鑽柳杉林地上部生物量與碳存量估算。國立臺灣大學生物資源暨農學院實驗林研究報告 23: 255-266。

林政融、王兆桓、顏添明(2017)以永久樣區兩次重覆調查資料分析臺灣杉人工林林分及徑級生長性狀值之變化。農林學報 65:15-26。

林務局(1990)林業統計年報79年版。臺灣省農林廳林務局 213頁。

林務局(1994)林務局各林區國有林直營造林地清查結果報告，臺灣省農林廳林務局 114頁。

林務局(1995)第三次台灣森林資源及土地利用調查，臺灣省農林廳林務局 258頁。

林務局(2010)育林實務手冊。行政院農業委員會林務局 310頁。

林務局(2023)第四次森林資源調查報告，行政院農業委員會林務局 79頁。https://www.forest.gov.tw/0002393 (access on 2023/2/1)。

高裕閔、王兆桓(2014)和平事業區森林永久樣區調查與分析CO_2吸存效應。宜蘭大學生物資源學刊 10:1-22。

游漢明(1981)。不同齡級柳杉林分地上部之生物量與淨生產量。國立台灣大學森林學研究所碩士論文。

張峻德(1986)臺灣中北部柳杉林分之生物量生產力。中華林學季刊 19:45-85

楊榮啓(1975)臺灣大學實驗林產柳杉之生長與收穫的研究。臺大實驗林研究報告116號 1-149。

鄭智馨、洪志祐、黃于軒、李俊佑、陳秋萍、白創文(2014)溪頭台灣杉人工林之林分特性與發展。中華林學季刊 47:155-168。

劉宣誠、洪富文(1978)本省柳杉人工林生找與收穫之研究(II)- 阿里山地區。臺灣省林業試驗所報告309號 1-47。

劉愼孝(1950)杉木及柳杉在不同產地上之生長研究。臺灣省林業試驗所報告24號 1-40。

劉愼孝、陳松藩、謝水旺(1964)臺灣杉木林收穫表。臺灣省林業試驗所報告104號 1-24。

蕭怡茹、王立志(2005)烏來地區次生闊葉林、桂竹人工林、柳杉人工林之枯落物動態。臺大實驗林研究報告19:217-230。

Acker, S.A., T.E. Sabin, L.M. Ganio, and W.A. McKee (1998) Development of old-growth structure and timber volume growth trends in maturing Douglas-fir stands. Forest Ecology and Management 104:265-280.

Chang, F.C., C.H. Ko, P.Y. Yang, K.S. Chen, and K.H. Chang (2017) Carbon sequestration and substitution potential of subtropical mountain Sugi plantation forests in central Taiwan. Journal of Clean Production 167:1099-1105.

Cheng, C.H., C.Y. Hung, C.P. Chen, and C.W. Pei (2013) Biomass carbon accumulation in aging Japanese cedar plantations in Xitou, central Taiwan. Botanical Studies 54:60.

Cheng, C.H., S.C. Hsiao, Y.S. Huang, C.Y. Hung, C.W. Pai, C.P. Chen, and O.V. Menyailo (2016) Landslide-induced changes of soil physicochemical properties in Xitou, Central Taiwan. Geoderma 265:187-195.

Cheng, C.H., C.Y. Lee, H.R. Lee, C.P. Chen, and O.V. Menyailo (2020) Effects of typhoon disturbances on seasonal and interannual patterns of litterfall on coniferous and broadleaf plantations in Xitou, central Taiwan. Journal of Forest Research 25:155-162.

Forrester, D.I. (2021) Does individual-tree biomass growth increase continuously with tree size? Forest Ecology and Management 481:118717.

Fukuda, M., T. Iehara, and M. Matsumoto (2003) Carbon stock estimates for Sugi and hinoki forests in Japan. Forest Ecology and Management 184:1-16.

Harmon, M.E. and R.J. Pabst (2015) Testing predictions of forest succession using longterm measurements: 100 yrs of observations in the Oregon Cascades. Journal of Vegetation Science 26:722-732.

Hashimoto, S., T. Owari, T. Karukome, T. Chishima, M. Mitsugi, Y. Tsurumi, M. Suzuki, T. Yonemichi, T. Tsukagoshi, Y. Adachi, I. Murakawa, S. Oishi, and K. Toyama (2020) Current situation of *Cryptomeria japonica* (Sugi) plantations aged over 100 years at the University of Tokyo Chiba Forest, Japan. Bulletin of the Tokyo University Forestry 142:17-36. [In Japanese with English summary].

Hiroshima, T., K. Toyama, S.N. Suzuki, T. Owari, T. Nakajima, and S. Ishibashi (2020) Long observation period improves growth prediction in old Sugi (*Cryptomeria japonica*) forest plantations. Journal of Forest Research 25:183-191.

Inoue, S., T. Shirota, Y. Mitsuda, H. Ishii, and G. Gyokusen (2008) Effects of individual size, local competition and canopy closure on the stem volume growth in a monoclonal Japanese cedar (*Cryptomera japonica* D. Don) plantation. Ecological Research 23:953-964.

Johnson, S.E., and M.D. Abrams (2009) Age class, longevity and growth rate relationships: protracted growth increases in old trees in the eastern United States. Tree Physiology 29:1317-1328.

Luyssaert, S., E.D. Schulze, A. Börner, A. Knohl, D. Hessenmöller, B. Law, P. Ciais, and J. Grace (2008) Old-growth forests as global carbon sinks. Nature 455:213-215.

Masaki, T., S. Mori, T. Kajimoto, G. Hitsuma,

S. Sawata, M. Mori, K. Osumi, S. Sakurai, and T. Seki (2006) Long-term growth analyses of Japanese cedar trees in a plantation: neighborhood competition and persistence of initial growth deviations. Journal of Forest Research 11:217-225.

Masaki, T., K. Osumi, T. Seki, S. Mori, T. Kajimoto, G. Hitsuma, T. Yagihashi, M. Shibata, and M. Noguchi (2015) Long-term growth of a planted forest of Japanese cedar at Soehatazawa Experimental Forest under various thinning intensities of trees 45-104 years old. Bulletin of Forest and Forest Products Research Institute 14:65-72. [In Japanese with English summary].

Meakem, V., A.J. Tepley, E.B. Gonzalez-Akre, V. Herrmann, H.C. Muller-Landau, S. Joseph Wright, S.P. Hubbell, R. Condit, and K.J. Anderson-Teixeira (2018) Role of tree size in moist tropical forest carbon cycling and water deficit responses. New Phytologist 219:947-958.

Nishimura, T., K. Yoshikawa, A. Ikemoto, and M. Nagamori (1992) Biomass and growth of old *Cryptomeria japonica* plantations. (1) 80-year-old stand in Kochi Okuminakawayama nation forest. Bullen of Kochi University Forest 19:73-81. [In Japanese with English summary].

Odum, E.P. (1969) The strategy of ecosystem development: an understanding of ecological succession provides a basis for resolving man's conflict with nature. Science 164:262-270.

Okayama, Y., and H. Nakajima (2021) The growth records of Tateyama-sugi (*Cryptomeria japonica* D.Don) stands and verification of the system yield table“Silv-no-mori”. Bulletin of Toyama Forest Research Institute 13:11-15. [In Japanese with English summary].

Osumi, K., M. Mori, S. Sakurai, K. Saito, S. Sato, and T. Seki (2000) Long term growth records of old-aged Sugi (*Cryptomeria japonica*) plantations in Akita Prefecture, North-eastern Japan. Journal of Japanese Forest Society 82:179-187. [In Japanese with English summary].

Pan, Y., R.A. Birdsey, J. Fang, R. Houghton, P.E. Kauppi, W.A. Kurz, O.L. Phillips, A. Shvidenko, S.L. Lewis, J.G. Canadell, P. Ciais, R.B. Jackson, S.W. Pacala, A.D. McGuire, S. Piao, A. Rautiainen, S. Sitch, and D. Hayes (2011) A large and persistent carbon sink in the world's forests. Science 333:988–993.

Sheil, D., C.S. Eastaugh, M. Vlam, P.A. Zuidema, P. Groenendijk, P. van der Sleen, A. Jay, and J. Vanclay (2017) Does biomass growth increase in the largest trees? Flaws, fallacies and alternative analyses. Functional Ecology 31:568-581.

Spies, T.A., J.F. Franklin (1988) Old growth and forest dynamics in the Douglas-fir region of western Oregon and Washington. Natural Areas Journal 8:190-201.

Stephenson, N.L., A.J. Das, R. Condit, S.E. Russo, P.J. Baker, N.G. Beckman, D.A.

Coomes, E.R. Lines, W.K. Morris, N. Rüger, E. Álvarez, C. Blundo, S. Bunyavejchewin, G. Chuyong, S.J. Davies, A. Duque, C.N. Ewango, O. Flores, J.F. Franklin, H.R. Grau, Z. Hao, M.E. Harmon, S.P. Hubbell, D. Kenfack, Y. Lin, J.R. Makana, A. Malizia, L.R. Malizia, R.J. Pabst, N. Pongpattananurak, S.H. Su, I.F. Sun, S. Tan, D. Thomas, P.J. van Mantgem, X. Wang, S.K. Wiser, and M.A. Zala (2014) Rate of tree carbon accumulation increases continuously with tree size. Nature 507:90-93.

Stokland, J.N. (2021) Volume increment and carbon dynamics in boreal forest when extending the rotation length towards biologically old stands. Forest Ecology and Management 488:119017.

Takeuchi, I. (2005) The growth of diameters and stand stem volumes in old man-made Sugi (*Cryptomeria japonica*) stands. Journal of Japanese Forest Society 87:394-401. [In Japanese with English summary].