

國立臺灣大學生物資源暨農學院森林環境暨資源學系



碩士論文

School of Forestry and Resource Conservation

College of Bioresources and Agriculture

National Taiwan University

Master Thesis

溪頭柳杉及紅檜老齡人工林之林木生長量、枯落物量
與生態系統碳儲存量

Tree Growth, Litterfall Mass and Ecosystem Carbon
Stocks of Old Japanese Cedar and Taiwan Red Cypress
Plantations in Xitou

李泓儒

Hung-Ru Lee

指導教授：鄭智馨 博士

Advisor : Chih-Hsin Cheng, Ph.D.

中華民國 109 年 8 月

August 2020

國立臺灣大學碩士學位論文
口試委員會審定書

溪頭柳杉及紅檜老齡人工林之林木生長量、枯落物量與生態
系統碳儲存量

Tree Growth, Litterfall Mass and Ecosystem Carbon Stocks of Old
Japanese Cedar and Taiwan Red Cypress Plantations in Xitou.

本論文係李泓儒君（學號 R05625025）在國立臺灣大學森林環境暨資源學系完成之碩士學位論文，於民國109年07月31日承下列考試委員審查通過及口試及格，特此證明。

口試委員：

鄭 智 馨

（指導教授）

陳 秋 萍

中 井 太 郎

系主任、所長

曲 昌 華

誌謝



從大學入學森林系到現在已經過了8年，這段時間就要在此告一段落了，這一路上感謝鄭智馨老師多年來的幫助，不論是在大學時期的專題討論或是現在的碩士論文，從開始進行實驗、野外調查樣區的架設，到撰寫論文、勘誤、修改，研究過程中不論是器材、出差交通、經驗、意見等等，老師給予我很多的幫助跟方向，最後才能完成這篇論文。也感謝鄰居大哥，之前不少的出差都來幫忙，不論是體力活還是開車運載，都給了我不少方便。另外再次感謝陳秋萍博士及中井太郎老師能前來擔任口試委員，並提出許多建議來讓我的論文能更加完善。

自大學部三升四年級的暑假開始進入實驗室幫忙打工，這幾年來感謝森林系301土壤實驗室的大家一路相伴。從一開始的苡涵學姊跟志祐學長，教導各式實驗守則、儀器操作方法、文獻查找、學術撰寫技巧等，可說是我如今研究生生活的基礎。婷雅、佳怡和音蓁，當初我的實驗在劃設樣區初期時，感謝妳們的幫忙跟意見，還有之後每天的研究室日常，其中特別是音蓁，之後的很多出差人力跟有的沒有的大小事。還有昀展，雖然你並沒有進入實驗室，不過在我的實驗上也是有你的一份力，還有感謝當初跟你聊了很多很多，你是個很有條理嚴謹的人，有個跟自己個性不同的人可以聽聽自己說說話，真的是挺不錯的一件事。再來是宇翔跟毅豪，除了有幫我的實驗出差人力之外，平常在實驗室時可以講一堆有的沒的事情，一起聊各種事情、梗圖還有打 Game 之類啥的，還有你們在捏陶粒的時候聊著各種神奇的知識跟奇怪的知識增加了。最後是皓雲，雖然相處只有不到一年的時間，不過因為同樣都身為指揮官都有玩少女前線吧，還有著共同的喜好，所以很快就混熟了，未來研究室還得靠你繼續帶著後輩們走下去，加油吧！

這段研究生的生活，平常不論是聊著正事或其他、日常發生的大小事、每個月的溪頭出差採樣，現在回想起來都是很歡樂充實的時光，可能這也是最後的學生單純生活。最後的最後，就來個最經典的吧！「即無論什麼事，得之於人者太多，出之於己者太少。因為需要感謝的人太多了，就感謝天吧！」

中文摘要



柳杉是台灣造林歷史中，中海拔地區重要的造林樹種之一，根據林務局第四次森林資源調查統計報告，全台灣柳杉林的材積蓄積量已佔全人工林總材積蓄積量的 18.4%，但隨著林業政策變遷，如今的柳杉林已少有伐採和林分更新。因此，本研究選擇溪頭地區 6 個林齡介於 46~97 年生之老齡柳杉造林林分及 1 個林齡 88 年生的老齡紅檜造林林分，藉由老齡人工林樣區之試驗調查，用以了解現有老齡林分之林分現況和於 2017 至 2019 年間之林分生長變化。研究目的主要為 (1)調查溪頭這些不同林齡的老齡柳杉造林地林分之林分特性及生長動態 (2)了解老齡柳杉與紅檜人工林之連年生長量、枯落物量與生態系統碳儲存量。

研究結果顯示，各柳杉林 2017 年度的生長量為 $0.91\sim 2.65 \text{ Mg C ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ ，2018 年為 $0.81\sim 2.14 \text{ Mg C ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ ，2019 年為 $0.88\sim 1.92 \text{ Mg C ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ ；紅檜林則分別為 0.62 、 1.42 、 $1.53 \text{ Mg C ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ 。由於枯落物收集進行期間，溪頭地區皆無受到颱風影響，因此所得之柳杉林枯落物量較過去研究來得低，各柳杉林枯落物量 2017 年為 $2,191\sim 2,810 \text{ kg ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ ，2018 年為 $2,134\sim 3,234 \text{ kg ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ ，2019 年為 $3,507\sim 4,812 \text{ kg ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ ；紅檜林則分別為 $6,814$ 、 $5,248$ 、 $5,307 \text{ kg ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ 。各林分之生態系統碳儲存量 ($229\sim 343 \text{ Mg C ha}^{-1}$) 皆以生立木為最大宗，佔生態系統碳儲存量 70% 以上，柳杉林分林木碳量為 $203\sim 255 \text{ Mg C ha}^{-1}$ 、紅檜林分為 144 Mg C ha^{-1} ；表層 $0\sim 30 \text{ cm}$ 土壤有機碳量含量次之，土壤有機碳儲存量為 $53\sim 78 \text{ Mg C ha}^{-1}$ ，約佔生態系統碳儲存量 25%。林木碳量與土壤有機碳量兩者合計佔生態系統碳儲存量 95% 以上。

連年生長量之結果顯示溪頭老齡柳杉仍然在持續生長吸存二氧化碳，即使是林齡 97 年生的老齡柳杉林分，其生長量也並非停滯，甚至高過一些林齡較為年輕的老齡林分。雖然各林分樹高已接近樹高生長上限，但胸高直徑仍持續增加，使得林分蓄積量隨著胸高直徑的成長增加，這些老齡林分仍可繼續累積碳儲存量。老齡森林也代表了一個巨大的碳庫，將來這些林分如不進行伐採或遭受擾動

損毀，仍然可持續吸存大氣中的二氧化碳固定於林木之中，對於減少碳排放有其貢獻存在。



關鍵字：柳杉、紅檜、老齡人工林、林分生長量、枯落物量、生態系統碳儲存量

ABSTRACT



Cryptomeria japonica (Japanese cedar) is an important plantation species in Taiwan. According to the Fourth Forest Resources Survey Report of the Forestry Bureau, the volume stocks of Japanese cedar plantations accounted for 18.4% of the total plantations' stocks. However, with the change in policies, there is less harvesting and forest regeneration in the Japanese cedar plantations nowadays. In this study, six old Japanese cedar stands with stand age from 46 to 97 years old and one stand of Taiwan red cypress for 88 years old were selected, to investigate their stand characteristics and annual stand growth in 2017 to 2019. The objects of this study are to (1) investigate current stand characteristics and growth dynamics of these old-growth Japanese cedar stands of different ages in Xitou, and (2) understand the annual growth, litterfall mass, ecosystem carbon stocks, and distribution of carbon stocks in these old-growth Japanese cedar and Taiwan red cypress stands.

The study results show that the growths of the Japanese cedar stands are 0.91-2.65 Mg C ha⁻¹ yr⁻¹ in 2017, 0.81-2.14 Mg C ha⁻¹ yr⁻¹ in 2018, 0.88-1.92 Mg C ha⁻¹ yr⁻¹ in 2019, and the growth of the Taiwan red cypress is 0.62, 1.42, 1.53 Mg C ha⁻¹ yr⁻¹ in 2017 to 2019, respectively. Because none of the areas in Xitou were affected by typhoons during the experiment, the mass of litterfall in the Japanese cedar stands are lower than in the previous studies. The mass of litterfall in the Japanese cedar stands are 2,191-2,810 kg ha⁻¹ yr⁻¹ in 2017, 2,134-3,234 kg ha⁻¹ yr⁻¹ in 2018, 3,507-4,812 kg ha⁻¹ yr⁻¹ in 2019, and the Taiwan red cypress is 6,814, 5,248, 5,307 kg ha⁻¹ yr⁻¹ in 2017 to 2019, respectively. In each stand, live standing trees has the largest amount of carbon stocks in the ecosystem (229-343 Mg C ha⁻¹), accounting for more than 70 % of the total carbon stocks. 203-255 Mg C ha⁻¹ in Japanese cedar stands and 144 Mg C ha⁻¹ in Taiwan red cypress stand. The amounts of soil organic carbon range between 53 and 78

Mg C ha⁻¹ and rank the second pools for the ecosystem carbon stocks, accounting for 25% of the total carbon stocks. These two C stocks account for more than 95% of the total ecosystem carbon stocks.

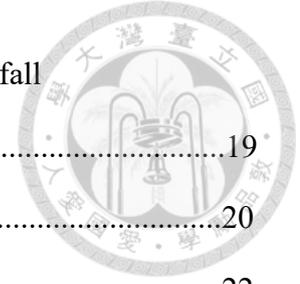
The annual growth results show that the old-growth Japanese cedar stands in Xitou are still growing. The growth of 97 years old Japanese cedar stand is not stagnant, even higher than some younger stands. Although the tree height of each stand is close to its upper limit, these stands will continue to accumulate carbon stocks as their DBH grows in the future. The old-growth forest also represents a huge carbon stock. If they are not harvested or disturbed, they will continue to absorb and fix atmospheric carbon dioxide to reduce carbon emissions.

Key Words: Japanese cedar, Taiwan red cypress, old-growth plantations, forest growth, litterfall mass, ecosystem carbon stocks

目錄



中文摘要	i
ABSTRACT	iii
目錄	v
圖目錄	viii
表目錄	x
一. 前言.....	1
二. 文獻回顧.....	4
(一)林木生長量.....	4
(二)林分枯落物量.....	5
(三)生態系統碳儲存量.....	7
三. 調查地點、材料與方法.....	11
(一)調查地點介紹.....	11
(二)調查樣區概況及介紹.....	12
(三)調查材料及方法.....	14
1. 樣區設立、調查項目及時間.....	16
2. 林分現況調查.....	16
2.1 林分密度 (Stand density).....	16
2.2 胸高直徑 (Diameter at Breast Height, DBH).....	16
2.3 樹高、枝下高及後生枝下高 (Tree height, Live clear length and Epicormic branch clear length).....	16
2.4 樣區林木座標與樹冠幅半徑之測定 (Tree coordinate and Tree crown width).....	18
2.5 葉面積指數 (Leaf Area Index, LAI).....	18



3. 林木生長量及枯落物量調查 (Tree growth and Litterfall production).....	19
3.1 樹徑生長鐵環 (Dendrometer) 架設及測量.....	20
3.2 枯落物網 (Litter trap) 架設及採集.....	22
4. 生態系統碳儲存量計算 (Ecosystem carbon stock).....	23
4.1 林分材積量 (Stand volume) 計算.....	23
4.2 林木碳儲存量 (C_T) 計算.....	25
4.3 地被植物 (Understory and ground vegetation) 採樣及碳儲存量 (C_U) 計算.....	26
4.4 枯立木 (Snags, C_D) 調查及測計.....	27
4.5 枯倒木及木質殘體 (Dead down-timbers and woody debris)之調查、採樣與碳儲存量(C_{WD}) 計算.....	27
4.6 地表枯枝落葉層 (Forest floor) 採樣及碳儲存量 (C_F) 計算.....	29
4.7 森林土壤採樣、性質測定及碳儲存量 (C_S) 計算.....	30
(1) 土壤總體容積密度 (Bulk density).....	30
(2) 土壤採樣、含石率及碳含量測定.....	30
(3) 土壤有機碳量計算.....	31
四. 結果.....	33
(一) 各調查造林地之林分狀態.....	33
1. 各調查林分之林分概況及各項基本資料.....	33
2. 調查林分之樹冠特性.....	36
3. 調查林地之林分葉面積指數.....	41
(二) 各林分的林木生長量及枯落物量.....	41
1. 林木單株生長量及林分生長量.....	42
2. 各林分之年度枯落物量及時間變化.....	48



(三) 生態系統碳儲存量及各部分碳庫之碳儲存量.....	51
1. 林木碳儲存量(C_T).....	53
2. 地被植物碳儲存量(C_U).....	53
3. 枯立木碳儲存量(C_D).....	53
4. 枯倒木及木質殘骸、碎片碳儲存量(C_{WD}).....	53
5. 地表枯枝落葉層碳儲存量(C_F).....	54
6. 土壤有機碳儲存量(C_S).....	54
五. 討論.....	55
(一) 各項林分狀態隨時間之變化.....	55
1. 林分狀態隨時間變化之特性與 Mistcherlich 生長模式比較.....	55
2. 林分之樹高結構.....	58
3. 林分之枝下高、樹冠長和樹冠幅.....	60
4. 林分之後生枝.....	62
(二) 老齡人工林的生長量及其枯落物量.....	64
1. 林木生長量.....	64
2. 枯落物量.....	67
(三) 老齡人工林的生態系統碳儲存量及其各部分碳儲存量.....	71
1. 林木碳儲存量 (C_T).....	71
2. 枯立倒木及木質殘骸、地被植物及地表枯枝落葉層碳儲存量 (C_D 、 C_{WD} 、 C_U & C_F).....	74
3. 土壤有機碳儲存量 (C_S).....	77
4. 生態系統碳儲存量及其分佈.....	80
六. 結論.....	81
七. 參考文獻.....	82
附錄.....	89

圖目錄



- 圖1.** 本研究中溪頭地區各個調查林分之位置地圖。本地形圖取自 Google map 地形圖修改。地圖資料 © 2020 Google.....13
- 圖2.** 樣區架設概況照片。照片為 CJ46 林地，照片中顯示柳杉林分之林木與地被植物概況，左方為枯落物收集網，調查林木上裝置有胸徑生長鐵環。照片拍攝日期為 2017 年 11 月 3 日。.....15
- 圖3.** 樹徑生長鐵環 (Dendrometer) 照片。右方箭頭顯示裝設初期鐵環終點的初始位置，平行箭頭顯示隨林木生長後，鐵環被拉長後的位置。照片拍攝日期為 2017 年 11 月 3 日，胸圍拉長距離約為 15 mm。.....21
- 圖4.** 枯落物收集網 (Litter trap) 照片。照片為 CJ53 樣區中的枯落物收集網，收集網面積為 1 m × 1m，離地高 1 m，每個月收集一次網中所有枯落物，照片拍攝日期為 2017 年 11 月 3 日。.....21
- 圖5.** 溪頭地區各個調查林分各項狀態與林齡之迴歸關係。其中黑色點為柳杉林分，紅色點為紅檜林分，線性迴歸關係僅為柳杉林分計算，不列入紅檜林分。(a) Stand density, (b) Mean DBH, (c) Basal area, (d) Mean tree height, (e) Stand live tree biomass carbon, (f) Individual live tree biomass carbon.....35
- 圖6.** 溪頭地區各個調查林分各項樹冠特性與林齡之迴歸關係。其中黑色點為柳杉林分，紅色點為紅檜林分，線性迴歸關係僅為柳杉林分計算，不列入紅檜林分。(a) Live clear length, (b) Epicormic branch clear length, (c) Crown length, (d) Live crown ratio, (f) Crown width.....38
- 圖7.** 溪頭地區各個調查林分各項樹冠特性與胸高直徑之迴歸關係。其中黑色點為柳杉林分，紅色點為紅檜林分，線性迴歸關係僅為柳杉林分計算，不列入紅檜林分。(a) Live clear length, (b) Epicormic branch clear length, (c) Crown length, (d) Live crown ratio, (e) Crown width, (f) Mean tree height.....39

圖8. 溪頭地區各個調查林分單木樹冠幅與胸高直徑之迴歸關係。(a) CJ73 (b) CJ53 (c) CJ50 (d) CJ46 (e) CJ33 (f) CJ20 (g) CF29.....	40
圖9. 溪頭地區各調查林分3年(2017~2019年)期間單株林木總材積增加量之分布盒狀圖.....	44
圖10. 溪頭地區各個調查林分3年(2017~2019年)期間單株林木材積增加量和單木胸高直徑之迴歸關係。(a) CJ73 (b) CJ53 (c) CJ50 (d) CJ46 (e) CJ33 (f) CJ20 (g) CF29.....	45
圖11. CJ73、CJ50及CJ20連年(2012~2019年)生長量。其中長條圖為單木生長量 ($\text{kg C tree}^{-1} \text{ yr}^{-1}$)，折線圖為林分生長量 ($\text{Mg C ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$).....	47
圖12. CF29之枯落物量。其中紅色圓點為紅檜，白色三角為闊葉樹.....	48
圖13. 溪頭地區各個調查林分各月份6個枯落物網所收集之平均枯落物量。 (a) CJ73 (b) CJ53 (c) CJ50 (d) CJ46 (e) CJ33 (f) CJ20 (g) CF29.....	50
圖14. 溪頭地區各個調查林分之各碳庫碳儲存量(Mg C/ha)。(a) Live tree biomass carbon, (b) Understory and ground vegetation, (c) Snags, (d) Dead down-timbers and woody debris, (e) Forest floor, (f) 0~30 cm Soil organic carbon.....	52
圖15. 溪頭地區各個調查林分各年度的狀態(2012~2020年)和Mistcherlich生長模型之對應。圖中藍色實線為Mistcherlich生長模型之曲線，黑色圓點為本實驗中調查的柳杉林分狀態之連年資料，包含CJ73、CJ50、CJ20之過去連年生長資料，紅色三角形為紅檜林分狀態之連年資料，紅色叉字為Cheng et al. (2013)中的數據資料。(a) Stand density, (b) Mean DBH, (c) Tree height, (d) Basal area, (e) Stand live tree biomass carbon.....	57
圖16. 本實驗所收集之枯落物樣品照片。圖中左邊為柳杉之枯落物，型態多為一段完整之小枝條整個掉落為主；圖中右邊為紅檜之枯落物，型態多為細碎之小葉及部分細長的小枝為主。.....	70

表目錄



表1. 本研究中野外調查時所定義枯倒木之狀態描述、腐朽分級、分級定義及各級枯倒木數量調查結果.....	29
表2. 溪頭地區各個調查林分之土壤性質概況.....	32
表3. 溪頭地區各個調查林分之各項狀態詳細資料 (2017 年).....	34
表4. 溪頭地區各個調查林分之樹冠特性詳細資料 (2017 年).....	37
表5. 溪頭地區各個調查林分於 2017~2019 年度之單株林木材積增加量 ($\text{m}^3 \text{ tree}^{-1} \text{ yr}^{-1}$) 及單株林木碳儲存增加量 ($\text{kg C tree}^{-1} \text{ yr}^{-1}$).....	43
表6. 溪頭地區各個調查林分於 2017~2019 年度之林分材積增加量、林分林木增加碳量與增加百分比.....	46
表7. 溪頭地區各個調查林分年度平均枯落物量 ($\text{kg ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$) 及換算之碳量 ($\text{Mg C ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$).....	49
表8. 溪頭地區各個調查林分之生態系統碳儲存量 (Mg C ha^{-1}).....	51
表9. 溪頭地區各個調查林分碳庫佔生態系統碳儲存量之百分比 (%).....	51
表10. 石井洋二等 (2005) 及 Cheng et al. (2013) Mistcherlich 生長模型結果比較..	58



一、前言

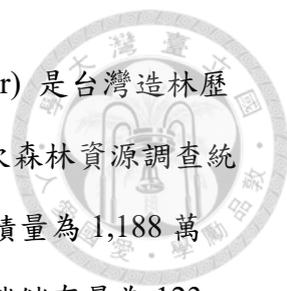
森林會隨著生長不斷的累積碳儲存，同時隨著林分的發展，這些碳也會透過各種途徑轉換輸入到地下部、地被植物、枯立倒木、枯落物、土壤有機物等其他形式的碳儲存庫中，是森林的重要生態系功能之一。森林的生長、發展以及其生態系統碳儲存量等，多年來在全球已有許多森林碳儲存相關的研究，尤其是對於近年來的國際環境，人為造成的 CO₂ 排放一直是個重要的議題 (Malhi et al., 2002; Pan et al., 2011)。IPCC (2014) 的報告中指出，自 1750 年累積以來的人為 CO₂ 排放量中，大約仍有 40 % 保留於大氣之中，另外 30 % 則各分別被植被以及海洋所吸收。在 2015 年底，聯合國氣候高峰會中 195 國通過了巴黎協議，取代京都議定書，希望全球各國能繼續減少 CO₂ 的排放量，共同致力於減緩氣候變遷的趨勢，並擴大全球各國之間的互助合作，共同承擔碳排放減量的責任，努力維持全球氣候不受到人為過度得干擾，對於現今持續增長的碳排放和氣候變遷來說，是個重要的里程碑。

木材是早期重要的工業資源之一，因此當時的森林研究目的多以調查木材的生長量、收穫材積關係、生長影響因子等為主要大宗 (松崎清，1968；高橋宏明，1970；楊榮啟，1975；李訓煌，1978；游漢明，1981)，如今這些研究成果成為了現今森林研究的基礎。一直到了 1997 年 12 月《京都議定書》通過並於 2005 年達簽署標準正式生效，之中規範了 38 個會員國及歐盟國家，以個別或共同的方式控制人為排放之溫室氣體數量，以期減少溫室效應對全球環境所造成的影響。國際間開始重視人為碳排放的議題，除了減少能源的消耗及 CO₂ 的排放量之外，同時也在尋求清除 CO₂ 的機制。森林隨著林木的生長，能透過光合作用不斷地將大氣中的 CO₂ 累積於木材之中，如斯的特性使得森林具有的碳清潔發展機制備受重視，因此出現許多關於森林生態系統碳吸存及碳儲存量的研究，老齡森林的議題也開始逐漸受到了重視。



老齡森林是森林發展的多個階段之一，較為明顯的特徵是通常其林分有一定以上的林齡，同時林分中有較多的大徑級、大體積的林木組成、較低的林份密度、較多量的枯立倒木、大徑木質殘體或碎片、較為複雜多層的垂直和水平森林結構 (Franklin & Van Pelt, 2004; Greenberg et al., 1997; Hoover et al., 2012; Motta et al., 2015; Ziegler, 2000)。從碳儲存的觀點來看，老齡森林無疑是全球重要的碳儲存庫之一，擁有十分大量的碳儲存。一般認為這些老齡森林的生產力已降低，不會再繼續累積碳儲存 (Franklin & Spies, 1984)。但是近年來有研究指出，從整體森林生態系統的觀點來看，老齡林分的淨生態系統生產量 (Net Ecosystem Production, NEP) 仍呈現正值 (Harmon et al., 2004; Law et al., 2001; Luysaert et al., 2008)，表示這些老齡森林仍然具有吸收 CO₂ 的功能，可繼續累積碳儲存。

在全球森林地中，有超過 30% 的森林是未經人為管理的天然森林，當中也包含老齡森林，這些老齡森林累積了數百年的碳，是非常大量的碳儲存庫 (Luysaert et al., 2008)；而 Hoover et al. (2012) 的研究中則認為老齡森林的存在，能夠幫助了解該地區的森林生態系統碳儲存量的時間變化和儲存量上限，具有十分重要的意義。另一方面，從生態系功能的角度來看，老齡森林除了是一個巨大的碳儲存庫之外，其對於生態系穩定和提供的功能也不容忽視，在維護生物多樣性和提供生態系功能上有其重要性 (Martin, 1992)。Spies (2004) 則認為老齡森林之間擁有許多共同的屬性和生態效益，但同時也存在許多差異之處，因此在決策考量上應包含所有階段的森林，以顧及整體森林發展各個階段的不同特性。綜上所述，不論是在碳儲存量還是生態系功能方面，老齡森林都是不可忽略的一環。



柳杉 (*Cryptomeria japonica* (L. f.) D. Don, Japanese cedar) 是台灣造林歷史中，中海拔地區重要的造林樹種之一，根據林務局第四次森林資源調查統計報告，台灣柳杉林的總造林面積達 41,390 ha，總材積蓄積量為 1,188 萬 m³，佔全人工林總材積蓄積量的 18.4%，林分平均的林木碳儲存量為 123 Mg C ha⁻¹；紅檜 (*Chamaecyparis formosensis* Matsum, Taiwan red cypress) 則是台灣中高海拔地區的原生珍貴樹種之一，台灣檜木類人工林造林面積達 17,915 ha，總蓄積量為 574 萬 m³，佔全人工林總蓄積量的 8.9%，全台灣檜木類林分平均的林木碳儲存量為 195 Mg C ha⁻¹ (林務局，2015)。

柳杉自 1896 年引進台灣後，被日本政府廣泛的大量種植於台灣各地，其中又以臺灣大學實驗林的柳杉造林歷史最為悠久，直到近代 1980 年代之後，因栽植本土樹種的意識逐漸興起，而不再將柳杉作為主要造林樹種之一。時至今日，在如今禁伐意識和造林政策演變的背景之下，這些已成林柳杉林分的伐採和林分更新也逐漸緩慢。

本研究之目的在於 (1)調查溪頭這些不同林齡的老齡柳杉造林地林分之狀態及生長動態 (2)針對老齡柳杉與紅檜人工林，了解其林木連年生長量、枯落物量與生態系統碳儲存量。一共選取溪頭地區中六個 40 年生以上之柳杉林分及一個紅檜林分，設立樣區進行調查。研究這些林分的生長和碳儲存量變化，將有助於了解林分的現況和將來經營管理政策的實施。



二、文獻回顧

(一) 林木生長量

地上部淨初級生產力 (Aboveground Net Primary Production, ANPP) 的調查方法依據 Clark et al. (2001)及 Curtis et al. (2002) 的研究，一共可細分為三個部分來合併計算得出，分別為：林木生長量 (Tree growth)、枯落物量 (Litterfall) 以及林下地被植物生產量 (Understory vegetation)。

洪千祐和顏添明 (2015) 以過去發表資料為基礎分析臺灣地區各種林型的碳吸存量和碳儲存量，指出林分的碳吸存量和林分密度呈現正相關，並和林齡呈現負相關。

洪志祐 (2012) 於溪頭地區研究老齡森林的淨初級生態系生產力，利用樹徑生長鐵環 (Dendrometer) 進行測量，37、60、90 年生的 CJ73、CJ50、CJ20，其林分密度分別為 1358、617、408 trees ha⁻¹，林分林木生長量為 4.87、2.92、3.76 Mg C ha⁻¹ yr⁻¹，約佔林分地上部淨初級生產力 55~61 %、林下地被植物生產量則分別為 0.35、0.39、0.44 Mg C ha⁻¹ yr⁻¹，約佔林分地上部淨初級生產力 4~7 %；蘇泓銘 (2013) 同樣於溪頭地區利用樹徑生長鐵環進行測量林木生長量，其結果 42 年生的 CJ71，林分密度為 806 trees ha⁻¹，施肥處理及對照組的林分林木生長量皆為 3.9 Mg C ha⁻¹ yr⁻¹，約佔林分地上部淨初級生產力 57、46 %、林下地被植物生產量為 0.6~0.7 Mg C ha⁻¹ yr⁻¹，約佔林分地上部淨初級生產力 8 %。

根據前人研究，可能影響林木生長量的氣候因子包含月(年)雨量、月(年)均溫、月最高(低)溫、光照、緯度等等 (高橋宏明，1971；川崎達郎和竹內郁雄，1993；Nishizono et al., 2018; Péliissier & Pascal, 2000)。高橋宏明 (1970) 根據伐木跡地之頭木年輪回推林木歷年之生長狀況，發現在相同的氣候環境之下，雖然各林分的生長量有所不同，但是生長量隨年分之趨勢變化是相同的。高橋宏明 (1971) 同樣透過伐木跡地之頭木年輪研究直徑成長和



氣象因子之關係，得出柳杉該年之生長量和 6 月份的降雨量以及 2、3 月之氣溫有正相關，但也得出了許多不合理無法解釋的顯著負相關結果。Masaki et al. (2006) 的研究則指出單株林木生長量多寡和其胸高直徑 (DBH) 或是胸高斷面積 (BA) 大小呈現正相關。

(二) 林分枯落物量

洪志祐 (2012) 的研究中，CJ73、CJ50、CJ20 的枯落物量分別為 3.59、1.91、2.00 Mg C ha⁻¹ yr⁻¹，約佔林分地上部淨初級生產力 32~41 %；蘇泓銘 (2013) 的研究中 CJ71 為 2.4~3.9 Mg C ha⁻¹ yr⁻¹，約佔林分地上部淨初級生產力 35~46 %；劉威伶等 (2018) 的研究得出溪頭地區的平均年枯落物量為 3,867 kg ha⁻¹ yr⁻¹，在不同植生種類間，以柳杉、台灣杉以及紅檜人工林樣區的枯落物量相對較高，柳杉年枯落物量介於 4,123~4,702 kg ha⁻¹ yr⁻¹ 之間，而紅檜枯落物量介於 4,549~4,671 kg ha⁻¹ yr⁻¹ 之間，且一年中以颱風及梅雨季期間的枯落物量為最高；Cheng et al. (2020) 觀察 2012~2018 年間溪頭的柳杉枯落物量變化，柳杉單月的枯落物量介於 15~5,891 kg ha⁻¹ month⁻¹，且颱風侵襲之年分有較大的年間及月間變異。

其他地區之枯落物量研究，蕭怡茹和王立志 (2005) 於烏來地區之柳杉林枯落物量為 3,665 kg ha⁻¹ yr⁻¹，並於 7 月出現明顯的枯落物量高峰，主要為颱風擾動所導致；林國銓等 (2009) 以南投縣巒大事業區 36 年生柳杉人工林為對象，枯落物總量以對照區最高 (3.95 ± 2.46 Mg ha⁻¹ yr⁻¹)，明顯地高於強度疏伐區 (1.61 ± 1.18 Mg ha⁻¹ yr⁻¹)，中度疏伐區介於兩者之間 (2.80 ± 1.67 Mg ha⁻¹ yr⁻¹)，柳杉人工林颱風月份各處理各枯落物組成分和總枯落物量，皆明顯高於非颱風月份者，其中枯落物組成以柳杉葉和小枝差異最大。其原因推測可能是柳杉葉和小枝枯死後不立即脫落，在暴雨和強風時才加速脫落。



劉俊毅 (2008) 於棲蘭山研究紅檜之枯落物量，老齡紅檜林的枯落物量為 $1,934 \sim 3,336 \text{ kg ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ ，天然更新次生林的枯落物量為 $2,556 \sim 4,281 \text{ kg ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ ，一年中有 2~3 次明顯之枯落物量高峰，此季節性變異分別來自於冬季季節性落葉、春季新葉更新及夏季颱風的擾動；林亨勳 (2008) 於太平山的柳杉紅檜混合林枯落物量研究結果為 $6,658 \pm 2,010$ 及 $3,546 \pm 670 \text{ kg ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ ；林熾真 (2014) 同樣於太平山的柳杉紅檜混合林枯落物量研究結果為 $898 \pm 159 \text{ kg ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ 及 $1,532 \pm 154 \text{ kg ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ ，林亨勳 (2008) 及林熾真 (2014) 之結果同樣指出紅檜枯落物量有季節性之變異及受颱風影響之枯落物量增加的現象。

颱風是影響林分枯落物量的一大擾動，強勁的風速和高強度的降雨對於森林樹冠層是強大的機械外力。竹內郁雄等 (2007) 的研究則指出颱風前後，林木樹冠層損失的落葉量可達到原本生物量之 5.1~7.5 %。劉威伶等 (2018) 的研究中，2015 年及 2016 年颱風侵襲所貢獻之枯落物量分別可達到 2,707、1,938 kg ha^{-1} ，佔全年生產量之 66 % 及 53 %。Cheng et al. (2020) 指出遭颱風侵襲之月份，枯落物量可超過 $4,000 \text{ kg ha}^{-1}$ ，有明顯受颱風影響年分之年枯落物量可達無颱風侵襲年分的 2 倍以上，且有明顯受颱風影響的年分其月分和季節間的枯落物量變異極大，但是在無受颱風影響的年分，月分間的枯落物量變異就相對小了許多。



(三) 生態系統碳儲存量

參照前人研究，生態系統碳儲存量為森林生態系中各個不同碳庫之儲存量總和，可細分為林木、地被植物、枯立木、枯倒木及木質殘骸、地表枯枝落葉層及土壤有機碳，6個不同的碳儲存庫（洪志祐，2012）。

洪志祐和顏添明（2015）以過去發表資料為基礎分析臺灣地區各種林型的碳吸存量和碳儲存量，指出林分生立木的碳儲存量和其平均胸高直徑、平均樹高及林齡呈現正相關。

洪志祐（2012）於溪頭地區研究老齡森林的生態系統碳儲存量，37~90年生的柳杉林分，平均 DBH 為 23.1~48.6 cm，其生立木碳儲存量為 164~272 Mg C ha⁻¹；溪頭地區其他各長期試驗林地的報告，報告中利用 DBH² × H × 形數 (form factor) 的方式進行林分蓄積量計算，依長期生長報告最後一年的總蓄積量結果，以本實驗之碳儲存公式、假設 C 含量為 50% 換算而得生立木碳儲存量分別為：三叉崙地區 74 年生柳杉林，平均 DBH 為 40.4 cm，平均樹高 21.1 m，林木碳儲存量為 168 Mg C ha⁻¹（王亞男等，2010）；觀音樹湖地區 81 年生柳杉林，平均 DBH 為 39.8 cm，平均樹高 24.2 m，林木碳儲存量為 221 Mg C ha⁻¹；溪頭湖地區 97 年生柳杉林，平均 DBH 為 48.8 cm，平均樹高 24.5 m，林木碳儲存量為 263 Mg C ha⁻¹（王亞男等，2011）；門田地區 93 年生柳杉林，平均 DBH 為 48.5 cm，平均樹高 25.6 m，林木碳儲存量為 337 Mg C ha⁻¹（劉素玲等，2009）；西川地區 99 年生柳杉林，平均 DBH 為 47.8 cm，平均樹高 29.2 m，林木碳儲存量為 257 Mg C ha⁻¹（衛強等，2010）；清水溝線浸地區 93 年生柳杉試驗地，平均 DBH 為 44.5 cm，平均樹高 27.3 m，林木碳儲存量為 205 Mg C ha⁻¹（王亞男等，2009）；杜清澤等（2011）於南投縣巒大事業區人倫地區的 36 年生柳杉林，平均 DBH 為 26.9 cm，平均樹高 17.9 m，林木碳儲存量為 135 Mg C ha⁻¹（假設 C 含量為 50% 換算）。



而日本地區柳杉碳儲存的相關研究為：岐阜縣 37 年生柳杉林，平均 DBH 為 22.4 cm，平均樹高 21.8 m，林木碳儲存量為 275.5 Mg C ha⁻¹ (渡邊仁志和茂木靖和，2005b)；岐阜縣 39 年生柳杉林為 300 Mg C ha⁻¹ (渡邊仁志和茂木靖和，2005a)；秋田縣 77 年生柳杉林，平均 DBH 為 40.4 cm，平均樹高 25.2 m，林木碳儲存量為 155 Mg C ha⁻¹ (假設 C 含量為 50 % 換算) (澤田智志等，2005)；奈良縣 88 年生柳杉林，平均 DBH 為 23.1 cm，林木碳儲存量為 163 Mg C ha⁻¹ (假設 C 含量為 50 % 換算) (Tateno et al., 2009)；茨城縣 48~78 年生柳杉林，平均 DBH 為 23.1~23.9 cm，平均樹高 19.8~20.5 m，林木碳儲存量為 275~365 Mg C ha⁻¹；群馬縣 16~51 年生柳杉林，平均 DBH 為 11.0~11.5 cm，平均樹高 8.8 m，林木碳儲存量為 172~243 Mg C ha⁻¹；靜岡縣 31~92 年生柳杉林，平均 DBH 為 14.2~14.9 cm，平均樹高 12.2~12.5 m，林木碳儲存量為 236~273 Mg C ha⁻¹ (以本研究之碳儲存公式、假設 C 含量為 50 % 換算) (細田和男等，2012)；秋田縣 83~95 年生柳杉林，平均 DBH 為 45.5~59.0 cm，平均樹高 35.5~40.8 m，林木碳儲存量為 292~590 Mg C ha⁻¹ (以本研究之碳儲存公式、假設 C 含量為 50 % 換算) (大住克博等，2000)；岩手縣 153 年生對照組及疏伐組柳杉林，平均 DBH 為 46.9、50.3 cm，平均樹高 36.8、37.7 m，林木碳儲存量為 387、356 Mg C ha⁻¹ (以本研究之碳儲存公式、假設 C 含量為 50 % 換算) (國崎貴嗣等，1999)；秋田縣 244 年生柳杉林，平均 DBH 為 87.6 cm，平均樹高 42.2 m，林木碳儲存量為 532 Mg C ha⁻¹ (以本研究之碳儲存公式、假設 C 含量為 50 % 換算) (西園朋広等，2006)。



在前人的碳儲存研究中，森林的土壤有機碳儲存量為變異最大的部分，會受到其研究林地的林齡、氣候、環境、植生種類或是調查、計算方法等因素不同而有所差異。Lal (2005) 指出土壤有機物碳儲存量會受到如溫度、降雨、海拔、地上部植生種類、土壤類型、地形、坡度、人為管理措施等各種因子影響。Cheng et al. (2016) 則指出崩塌的擾動會大幅降低土壤的有機物含量並增加含石率，致使土壤有機碳儲存量大幅降低。

溪頭地區碳儲存量相關的研究包含，洪志祐 (2012) CJ73、CJ50、CJ41、CJ20 的表層 0~30 cm 土壤有機碳儲存量為 75.8~140.5 Mg C ha⁻¹，生立木和土壤有機碳分別為最大及次之的碳儲存庫，合計佔生態系統總碳儲存量的 95% 以上；Chen et al. (2016) 於 CJ73 的表層 0~30 cm 土壤為 126.9 Mg C ha⁻¹；白創文等 (2014) 於鳳凰山天文台的柳杉林，表層 0~30 cm 土壤為 85.4~122.3 Mg C ha⁻¹；江博能等 (2018) 於大學池、空中走廊及天文台的柳杉林表層 0~30 cm 土壤分別為 85、68、246 Mg C ha⁻¹；張瑀芳等 (2006) 於和平事業區的 51 年生柳杉林的表層 0~30 cm 土壤為 97.2~166 Mg C ha⁻¹；蔡呈奇等 (2009) 於福山、坪林及太平山 20~51 年生柳杉林的表層 0~30 cm 土壤為 55~70 Mg C ha⁻¹。

除生立木及土壤有機碳之外，林分生態系統中其他的碳庫儲存量所佔比例很低，Badalamenti et al. (2019) 研究地中海不同森林演替階段至老齡森林的碳儲存量，生立木及土壤有機碳佔全生態系統總碳儲存量的 86~94 %；Granata et al. (2016) 於義大利老齡落葉林的研究指出生立木及土壤有機碳約佔全生態系統總碳儲存量的 94 %；Lü et al. (2010) 於中國西南熱帶季風林之研究得出 0~100 cm 土壤有機碳量為 84.4~101.9 Mg C ha⁻¹，佔總碳儲存量 27~32 %，生立木碳儲存量為 162.5~258.4 Mg C ha⁻¹，佔總碳儲存量 62~68 %；Nord-Larsen et al. (2019) 於丹麥半天然溫帶森林中的 0~75 cm 土壤有機碳量為 122.5 Mg C ha⁻¹，佔總碳儲存量 31 %，生立木碳儲存量為 229.8 Mg C ha⁻¹，佔總碳儲存量 58 %。



土壤有機碳和林木的儲存量會隨著林分的發展階段不同，其佔有的比例會有所不同，在幼齡林分中因為地上部林木的發展尚未成熟，其生物量仍然不足，隨著林分逐漸發展成熟後，林木才超過土壤有機碳儲存量。Law et al. (2001) 於俄勒岡州比較年輕和老齡的西黃松 (ponderosa pine) 林分的碳儲存量，其 0~100 cm 土壤有機碳儲存量分別為 43.1、53.3 Mg C ha⁻¹，佔總碳儲存量 43 %、25 %，生立木碳儲存量為 14.6、127.3 Mg C ha⁻¹，佔總碳儲存量 15 %、61 %。



三、調查地點、材料與方法

(一) 調查地點介紹

本研究調查樣區設立於臺灣南投縣鹿谷鄉國立臺灣大學實驗林溪頭營林區溪頭自然教育園區內 (23° 40' N, 120° 53' E)，海拔 1,150 m，溪頭地區地形為四面環山的畚箕形凹谷地形，氣候溫暖潮濕。

根據鄭森信和陳信玄 (2009) 分析溪頭地區 1941 年至 2005 年的氣象站資料，溪頭年均溫為 16.5 °C，各月平均相對濕度介於 88~90 %，平均年蒸發量為 481.1 mm，平均年降雨量為 2,661.5 mm、平均年降雨天數為 168 天，其中降雨主要集中於 5~9 月份，佔年降雨量的 76.5 %，10 月至隔年 4 月則相對較為乾燥少雨，佔年降雨量的 23.5 % (鄭森信和陳信佑，2009)。

溪頭營林區總面積為 2,480 公頃，主要的天然原生優勢植物種類為樟科及殼斗科。營林區中的林相分布，經過了長期的人工造林，原生的天然闊葉樹林主要分布於海拔較高的稜線地區附近 (>1,600m) 以及鳳凰山山麓地區 (沈勇強，1984)，其他地區的林相主要以人造針葉樹林為主，造林樹種包括柳杉 (*Cryptomeria japonica* (L. f.) D. Don, Japanese cedar)、台灣杉 (*Taiwania cryptomerioides* Hayata, *Taiwania*)、巒大杉(香杉) (*Cunninghamia lanceolata* (Lamb.) Hook. var. *konishii* (Hayata) Fujita) 及少數的紅檜 (*Chamaecyparis formosensis* Matsum, Taiwan red cypress)，另有少部分的孟宗竹林 (*Phyllostachys edulis* (Carrière) J. Houz.) 及桂竹林 (*Phyllostachys makinoi* Hataya) 等竹類純林，以及小面積的泡桐 (*Paulownia taiwaniana* Hu & Cheng)、台灣赤楊 (*Alnus formosana* Makino) 等人造闊葉樹林 (劉儒淵，1999)。



(二) 調查樣區概況及介紹

本研究調查對象以人工針葉樹林地為主，一共選取了溪頭地區中六個柳杉人造林地及一個紅檜人造林地做為調查地點，柳杉人造林地林齡介於45~97年生，而紅檜人造林地林齡則是88年生，劃設樣區並架設調查器材。調查林分代號依照其主要樹種及栽植年度，柳杉林分別為：CJ73、CJ53、CJ50、CJ46、CJ33及CJ20，紅檜林則為CF29。

根據臺大實驗林管理處之造林臺帳記錄，各造林地之資料分別如下：

- (1) CJ73 為第二林班 62 - 1 號造林地，造林年分民國 62 年 (1973 年)，最終存留面積 4.18 公頃，為原 200 號造林地風害木及 50 - 1 號造林失敗地補植，該林分於民國 90 年 9 月受桃芝颱風侵襲，林地受損面積 2.0 公頃，於民國 100 年施作下層疏伐，疏伐強度 25 %。
- (2) CJ53 為第六林班 190 號造林地，造林年份民國 42 年 (1953 年)，最終存留面積 2.24 公頃，為原竹林跡地造林，坡向北方 12° 壤土土質，位於土壤適濕地，該林分分別於民國 57 年施作間伐，81 年施作擇伐及部分皆伐，94 年施作工程障礙木移除等作業。
- (3) CJ50 為第三林班 173 號造林地，造林年分民國 39 年 (1950 年)，最終存留面積 16.17 公頃，該林分分別於民國 52、63、81 年共施作多次擇伐，90 年底至 91 年初間共施作 3 次木材伐採供國產木材之利用。
- (4) CJ46 為第三林班 166 號造林地，造林年分民國 35 年 (1946 年)，最終存留面積 7.50 公頃，為原 40、41 號造林地皆伐跡地之再造林地，坡向北方 6° 腐植壤土土質，該林分清理過多次蔓延入侵的竹林，並分別於民國 59 年施作風害木整理、66 年及 87 年施作疏伐作業。
- (5) CJ33 為第三林班 116 號造林地，造林年分民國 22 年 (1933 年)，最終存留面積 7.15 公頃，該林地於民國 75 年清理入侵竹林，並於 81 年施作擇伐共 14 株，90 年底至 91 年初間共施作 3 次木材伐採供國產木材之利用。

(6) CJ20 為第三林班 30 號造林地，造林年分民國 9 年 (1920 年)，最終存留面積 3.00 公頃，當中包含 2.60 公頃之柳杉立木度試驗地，坡向北方 5° 腐植壤土土質，該林分於民國 17、20、48 年共施作多次間伐，22 年施作木材伐採，56 年移除林道建設障礙木，59 年施作風害木整理作業，81 年施作擇伐 32 株，87 年施作風害空隙地補植肖楠 60 株。

(7) CF29 為第三林班 88 號造林地，造林年分民國 18 年 (1929 年)，造林樹種為紅檜，最終存留面積 4.67 公頃，坡向西北方 20° 腐植土質、環境陰濕，該林地於民國 41 年施作雜木弱度間伐、51 年施作間伐，並分別於民國 50、52、74、75、84 年，共施作多次風害木、枯死木清理。

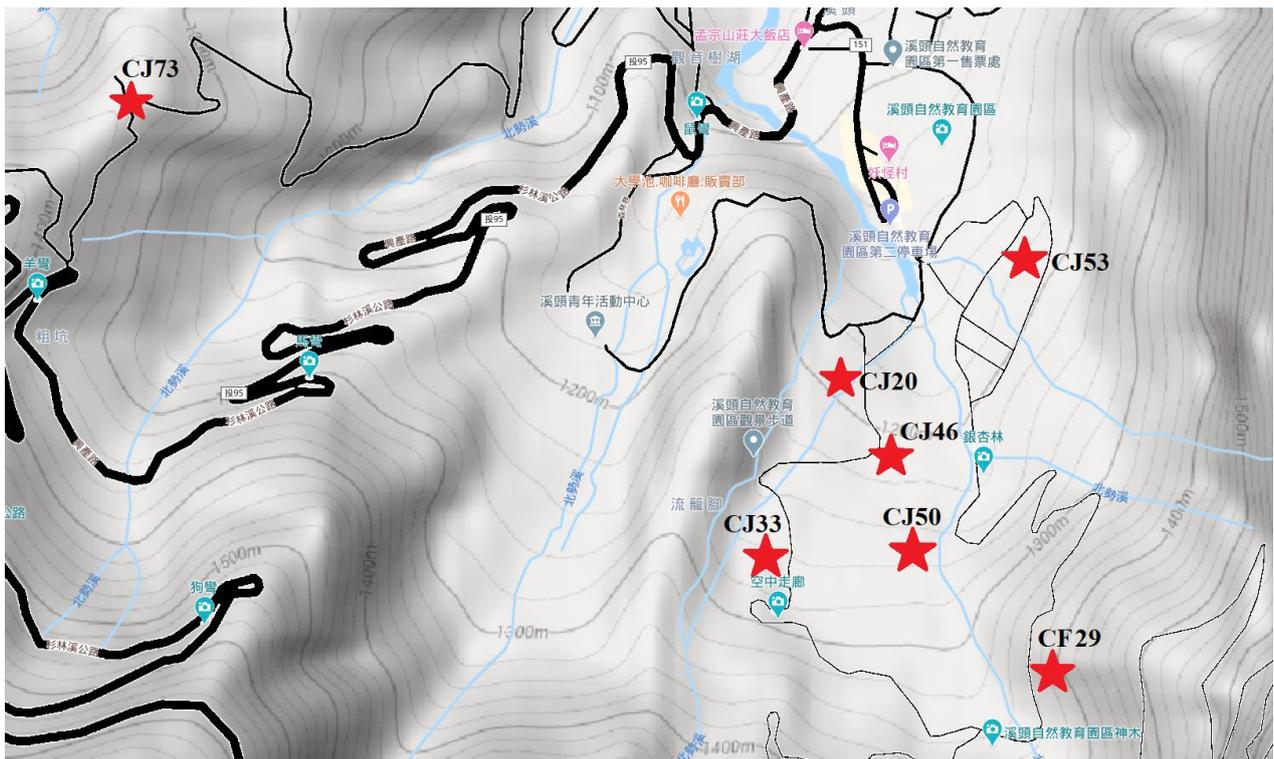


圖 1. 本研究中溪頭地區各個調查林分之位置地圖。本地形圖取自 Google map 地形圖修改。地圖資料 © 2020 Google

Fig. 1 The location of each survey stand in Xitou area. This topographic map is modified from Google map. Map data © 2020 Google



(三) 調查材料及方法

本研究於 2017 年 3 月 27 日全數完成 CJ53、CJ46、CJ53 及 CF29 之樣區設立與調查儀器架設，包括樣區中每木調查資料以及樣區枯落物收集網 (Litter tarp) 與樹徑生長鐵環 (Dendrometer) 之架設。而 CJ73、CJ50 及 CJ20 之樣區設置及生長量調查則起始於 2011 年末 (洪志祐，2012)。

1. 樣區設立、調查項目及時間

首先於各調查造林林分中，劃設三個 20 m × 20 m 的調查樣區，調查樣區的選擇以自然生長無遭受過度擾動區域為原則，避開明顯疏伐跡地及遭受過度擾動、損毀之林地。進行調查樣區之每木調查並逐株噴漆編號、紀錄每株林木之調查初始胸高直徑 (Diameter at Breast Height, DBH)，調查完成後樣區中每株林木皆裝設上樹徑生長鐵環，並在初始刻度位置上剪出刻痕標記，架設方式如下節所示。

調查樣區設立完成後，量測樣區中每木之樹高、枝下高、後生枝下高、樹徑生長鐵環、穿越線枯立倒木測定、葉面積指數 (Leaf Area Index, LAI)；並收集枯落物、樣區地被植物、枯枝落葉層、土壤分層採樣及木質殘骸、碎片採樣。



圖 2. 樣區架設概況照片。照片為 CJ46 林地，照片中顯示柳杉林分之林木與地被植物概況，左方為枯落物收集網，調查林木上裝置有胸徑生長鐵環。照片拍攝日期為 2017 年 11 月 3 日。

Fig. 1 The photo of survey plot. The photo is CJ46, shows an overview of trees and ground vegetations. On the left is a litter trap, trees in the plot with a dendrometer at breast high. This photo was taken on November 3, 2017.



2. 林分現況調查

2.1 林分密度 (Stand density)

林分密度為造林地每單位面積中的林木株樹，單位為每公頃下的林木株樹 (No. ha^{-1})。本研究於各個調查林地中劃設三個 $20\text{ m} \times 20\text{ m}$ 的樣區，各別計算出每一樣區中的林木株樹，再將三個樣區平均之後放大得出該林分一公頃面積下之林木株樹。

2.2 胸高直徑 (Diameter at Breast Height, DBH)

於 2017 年 3 月 5 日、3 月 11 日，於 CJ53、CJ46、CJ33 及 CF29 的樣區中，以胸徑捲尺進行每木測量，測量距離地面 1.3 m 處之林木直徑，單位為 cm。如遇到胸高處有樹瘤、分枝或空洞者，則延樹幹往上順延至平坦處測量其胸徑，將胸徑捲尺測得的胸高樹圍除以圓周率即可換算得出林木之胸高直徑。林分胸高斷面積 (Basal area, BA) 的計算則是將樣區中所有樣木的個別單株胸高斷面積加總，再經單位面積擴大換算而成。

2.3 樹高、枝下高及後生枝下高 (Tree height, Live clear length and Epicormic branch clear length)

樹高以手持式雷射測距儀進行測量，為林木地表之處開始到樹冠頂端之高度，樣區中所有林木皆逐株進行樹高測量，單位為 m。

枝下高 (Live clear length) 的定義指林木活樹冠最下方的分枝點到地面之垂直距離，而後生枝下高 (Epicormic branch clear length) 指林木活樹冠之下方最接近地面的後生活枝條分枝點到地面的垂直距離。

樹高、枝下高以及後生枝下高，皆於各調查樣區現地每木進行測量以及枝下高、後生枝下高之判定。測量完成後按照以下公式進行計算，由樹高減去枝下高之長度可得出林木的樹冠長，將樹冠長除以該林木之樹高即可得到樹冠長率 (Live crown ratio)，單位為%。樣區之中少部分林木個體的後生枝下高，因其樹冠上下連續長度較長且樹冠幅較短小，不易分辨出樹冠枝下高及後生枝之差異，因此將枝下高及後生枝下高視為同一數值。

$$\text{樹冠長率 (\%)} = \frac{\text{樹冠長}}{\text{樹高}} \times 100 \% = \frac{\text{樹高}-\text{枝下高}}{\text{樹高}} \times 100 \% \quad (1)$$

另外，於 CJ73、CJ50 及 CJ20 中，隨著時間推移，林木因為彼此競爭或是外來的擾動 (例如：颱風)，而致有數棵林木死亡，在 2018 年 6 月 8 日測定樹高之前如已死亡之林木就忽略不測定樹高，在後面計算碳量以及過去的生長量時，則採用楊榮啟 (1975) 所提出之臺大實驗林柳杉胸徑-樹高迴歸關係式計算出樹高，以補足數據缺失之部分。

$$H = 3.4842 \times D^{0.5228} + 1.3 \quad (2)$$

(楊榮啟，1975)

其中：

H (m) = 林木之樹高

D (cm) = 林木之胸高直徑 (DBH)



2.4 樣區林木座標與樹冠幅半徑之測定 (Tree coordinate and Tree crown width)

林木座標定位以調查樣區其中一端點設定為原點(0, 0)，以其中一邊界作為 X 軸延伸，另一與之垂直之樣區邊界作為 Y 軸延伸，坐標軸上每一單位代表實際距離 1 m，沿著 X 軸平行前進，以手持式雷射測距儀測出樣區中每一株林木距離 X 軸之距離，即得繪出林木之 XY 座標。

樹冠幅 (Tree crown width) 為林木樹冠兩末端點之寬度，樣區中所有林木皆逐株進行樹冠幅測定，單位為 m。站立於目標林木樹冠端點之地面投影位置，同樣以手持式雷射測距儀進行測量，測量該投影點距離該目標林木之距離，以前述之林木座標系統座標北開始，每隔 45° 進行測量，每株林木一共測量 8 個方位之樹冠末端點，將此 8 個樹冠端點長度平均之後即得出該株林木之平均樹冠半徑，兩倍即為樹冠幅。

各調查林分調查樣區之林木座標及樹冠範圍圖，請參見文末之附錄。

2.5 葉面積指數 (Leaf Area Index, LAI)

葉面積指數為單位地表面積上方，所有樹冠投影面積之總和，單位為 $m^2 m^{-2}$ ，表示每平方公尺之地表上方，共有多少面積的樹冠遮蔽。葉面積指數數值越大代表林分樹冠越鬱閉，當數值大於 $1 m^2 m^{-2}$ 甚至大於 $3 m^2 m^{-2}$ 時，表示該林分樹冠濃密，呈現充分鬱閉的狀態。

本研究使用 LAI-2200 測量各個造林地林分的葉面積指數，利用儀器的魚眼鏡頭感測器，先拍攝空曠地或樹冠頂上方的無遮蔽區域作為空白對照背景，並於林地下方的樣區中，劃設一條 20 m 的穿越線，以 0 m 處開始每 5 m 為單位拍攝一次，之後再隨機於樣區中選取 5 個點拍攝，共拍攝 10 個點位，得出該樣區之葉面積指數，各林分中的三個調查樣區皆按照此方法測定得出數值，最後將全部數值平均而得出該林分之葉面積指數。

3. 林木生長量及枯落物量調查 (Tree growth and Litterfall production)



地上部淨初級生產力 (Aboveground Net Primary Production, ANPP) 的調查方法依據前人研究，一共可細分為三個部分來合併計算得出，分別為：林木生長量 (Tree growth)、枯落物量 (Litterfall) 以及林下地被植物生產量 (Understory vegetation) (Clark et al., 2001; Curtis et al., 2002)。

其中地被植物生產量的部分參考前人同樣於溪頭地區人工林的淨初級生產量研究，其生產量為 $0.3\sim 0.7 \text{ Mg C ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ ，大約佔各個樣區中整體地上部淨初級生產力的 3~8%，和林木生長量及枯落物量比起，地被植物生產量佔有比例較低，因此在本研究中，地被植物的生產量部分忽略不進行測量 (洪志祐，2012；蘇泓銘，2013)。

另外，於本研究調查進行的年度內，2017 年 3 月至 2020 年 3 月，樣品收集的期間之內溪頭地區皆無受到颱風之侵擾。其中柳杉、紅檜等常綠樹木之枯落物量，前人已有許多研究指出其枯落物量容易受到外來擾動 (例如：颱風、豪雨) 的影響而大幅增加 (蕭怡茹和王立志，2005；竹內郁雄等，2007；林國銓等，2009；佐藤保等，2018；劉威伶等，2018；Cheng et al., 2020)，因此和前人溪頭研究中的柳杉枯落物量 $1.9\sim 3.9 \text{ Mg C ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ 比起 (洪志祐，2012；蘇泓銘，2013)，本研究所取得之枯落物量數據相比之下明顯偏低許多。因此後面結果與討論中不將林木生長量及枯落物量合併為地上部淨初級生產力來計算，另將兩者分開個別進行比較及討論。



3.1 樹徑生長鐵環 (Dendrometer) 架設及測量

樹徑生長鐵環為由薄鐵環及彈簧組成的簡易式生長測量記錄儀，將長薄鐵片捲成環狀後箍於林木胸高之處，並穿洞勾上彈簧固定，調整鐵片的長度及鬆緊。長鐵片的長度會稍微多於林木胸圍一段，鐵片的末端會以鋼剪在上方重疊的鐵圈等位置處剪出一小缺口，用以標記架設之時末端初始的位置，作為後續測量的基準點，也就是調查初期的胸徑大小 (Cattelino et al., 1986)。

CJ73、CJ50、CJ20 樣區之樹徑生長鐵環已於 2011 年全部架設完畢，其餘 CJ53、CJ46、CJ33 及 CF29 於 2017 年 3 月初開始，於當月 20 日已全數架設完畢。架設後，每半年進行胸徑生長量調查，利用電子游標尺 (精度為 0.01 mm) 測量鐵片末端距離初始缺口的距離，藉此可得知林木胸圍的增長，並可換算得出胸徑之增加量。將胸徑增加量帶入材積公式之中計算，可得知個別林木生物量之增加，加總樣區中全部樣木，則可換算得出整體林分之生長量。

另外，在 CJ73 中因為每個樣區的樣木數量較多，三個樣區中皆只有大約一半的樣木有裝設樹徑生長鐵環；而在 CJ20 中部分林木因為胸圍過大或是鐵環掉落，使其無法繼續進行紀錄，這些數據缺少的部分於後面計算林木體積及碳儲存量時，會採用以同樣區其他林木的平均生長比例，用以換算未裝設胸徑生長鐵環林木之生長量。在 CF29 中因林分密度較低，有部分闊葉樹種入侵林地中，於選取樣木以及架設裝置時，各樣區之中皆包含有一至二棵的高大闊葉樹樣木，但於後面結果呈現以及討論時，為求比較對象之一致性，各樣區之間除枯落物量針闊葉不分開之外，其他各項性質皆僅以針葉樹之部分進行討論。



圖 3. 樹徑生長鐵環 (Dendrometer) 照片。右方箭頭顯示裝設初期鐵環終點的初始位置，平行箭頭顯示隨林木生長後，鐵環被拉長後的位置。照片拍攝日期為 2017 年 11 月 3 日，胸圍拉長距離約為 15 mm。

Fig. 3 The photo of dendrometer. The arrow at right shows the initial position of the iron ring end, and the parallel arrow shows the elongated position after tree grows. This photo was taken on November 3, 2017, and the elongated distance is 15 mm.



圖 4. 枯落物收集網 (Litter trap) 照片。照片為 CJ53 樣區中的枯落物收集網，收集網面積為 1 m × 1m，離地高 1 m，每個月收集一次網中所有枯落物，照片拍攝日期為 2017 年 11 月 3 日。

Fig. 4 The photo of litter trap. This photo shows the litter trap in CJ53. The area of litter trap is 1 m × 1m, and above ground for 1 m. Collecting litterfall once a month. This photo was taken on November 3, 2017.



3.2 枯落物收集網 (Litter trap) 架設及採樣

枯落物之收集採用枯落物收集網進行，用 PVC 水管圍成 $1\text{ m} \times 1\text{ m}$ 之方形，中間鋪上 1 mm 孔目之細尼龍網並以塑膠夾扣固定四邊製成中間下凹的方形收集網，以 4 根長約 120 cm 的鋁合金管打入土中將捕捉網架起並保持整個方形網平面盡量水平且離地約 1 m ，如枯落物收集網的架設地點位於斜坡之上，則網面仍保持水平並以框架中間點離地 1 m 為準 (劉威伶等，2018)。

每個 $20\text{ m} \times 20\text{ m}$ 的調查樣區中架設 2 個枯落物收集網，每個林分共計 6 個枯落物收集網，架設前將每個樣區劃分為 9 個區域，隨機選取其中的 2 塊區域架設枯落物網，並清除架設點位以及周圍附近區域的所有地被植物以利支架架設與防止干擾後續的枯落物收集。

CJ53、CJ46、CJ33 及 CF29 樣區之枯落物收集網於 2017 年 3 月 20 日全數架設完畢，包含之前已架設完成 CJ73、CJ50 及 CJ20 之枯落物網共有 41 個 (Cheng et al., 2020)，前 4 個調查林分新架設的收集網於同年 4 月 20 日開始每個月收集一次網子中的枯落物，至 2020 年 4 月 10 日為止共收集 36 個月份的枯落物。採集帶回的枯落物裝入大牛皮紙信封之中以 65°C 烘乾至少一星期，秤量枯落物總重量並挑揀分離出針葉樹及闊葉樹的枯落物並按分類個別秤量紀錄各樣區之重量。

4 個新設立林分樣區前 3 個月的枯落物樣品 (2017 年 4 月、5 月及 6 月的樣品)，於秤重完畢後，收集自同林分樣區的枯落物全部混成一份，按照不同的林分及月份各別保存，並將每份混合樣品以絞碎機絞碎再以球磨機球磨成細粉，再以元素分析儀 (Perkin Elmer 2400, Waltham, MA, USA) 分析各個林分枯落物之碳含量比例，3 個月份樣品的碳含量數據平均之後做為計算往後計算枯落物量之碳含量比例之依據。

4. 生態系統碳儲存量計算 (Ecosystem carbon stocks)

本研究選取 CJ53、CJ46、CJ33 及 CF29 共 4 個林分，於調查樣區中進行採樣調查林地之生態系統碳儲存量。參照前人之研究，生態系統的碳儲存量為森林生態系中各個不同碳庫之儲存量總和，本研究中一共測量以下 6 個碳庫 (洪志祐，2012)，包括：

- (1) 林木碳儲存量，包含葉、枝條及根部的儲存量 (Living trees including foliage, branches, stem and coarse root) (C_T)
- (2) 地被植物 (Understory and ground vegetation) (C_U)
- (3) 枯立木 (Snags) (C_D)
- (4) 枯倒木及木質殘骸、碎片 (Dead down-timbers and woody debris) (C_{WD})
- (5) 地表枯枝落葉層 (Forest floor) (C_F)
- (6) 土壤有機碳 (Soil organic carbon) (C_S)

4.1 林分材積量 (Stand volume) 計算：

林木之材積量由各不同樹種的材積迴歸式進行計算，柳杉材積迴歸式使用由楊榮啟 (1975) 所提出的臺大實驗林柳杉之材積迴歸式進行計算；紅檜則使用黃崑崗 (1977) 所提出的溪頭地區第三林班地紅檜材積迴歸式 a 進行計算。把調查所得之單株林木胸高直徑 (DBH) 以及樹高帶入迴歸式中，計算得出單株林木之材積量，將各個樣區中所有林木之材積加總並三個樣區進行平均，再依等比例擴大面積計算即可得出該林分每公頃之材積量。

柳杉材積式：

$$\log V = -4.193148 + 0.9333828 \times \log (D^2 \times H) \quad (3)$$

(楊榮啟，1975)



其中：

$V (m^3)$ = 林木之幹材體積

$H (m)$ = 林木之樹高

$D (cm)$ = 林木之胸高直徑 (DBH)

紅檜材積式：

$$V = -0.00908 - 0.00046 D + 0.00135 H + 0.00004 D^2 \times H \quad (4)$$

(黃崑崗，1977)

其中：

$V (m^3)$ = 林木之幹材體積

$H (m)$ = 林木之樹高

$D (cm)$ = 林木之胸高直徑 (DBH)



4.2 林木碳儲存量 (C_T) 計算：

林分的碳儲存量利用轉換公式進行換算，根據前人研究，常用的公式包含以下兩種，因各樹種所已知的各項轉換係數不同，所以在計算碳儲存量時，所使用的公式也不同（李國忠等，2000；李國忠等，2004；王瑞閔，2007；劉知好和王兆桓，2008；洪志祐，2012；Cheng et al., 2013）。

將前項得出的林分總材積量藉由全株擴展係數換算成林分全林木總體積量，再將總體積乘上各不同樹種之密度換算成林分總生物量，最後總生物量帶入不同樹種之碳量轉換係數即可計算出每公頃林地之碳儲存量 (C_T)。

各樹種碳儲存量轉換公式：

$$\text{柳杉：} C_T = V_{\text{stem/ha}} \times EF \times BD \times C \% \quad (5)$$

$$\text{紅檜：} C_T = V_{\text{stem/ha}} \times V_{\text{whole/stem}} \times VW \times C \% \quad (6)$$

其中：

C_T (Mg ha^{-1}) = 林分每公頃之碳儲存量

$V_{\text{stem/ha}}$ ($\text{m}^3 \text{ha}^{-1}$) = 林分每公頃之總材積量

EF = 林木幹部乾重-全株乾重擴展係數 (Expansion factor)

柳杉：1.545 (洪志祐，2012)

BD (Mg m^{-3}) = 林木之基礎密度 (Basic Density)，為林木幹部乾重/林木生材

材積，柳杉：0.416 (李明仁，2010)

$V_{\text{whole/stem}}$ = 林木幹部材積-全株材積轉換係數

紅檜：1.65 (李國忠等，2004)

VW = 重量與材積轉換係數，即比重，將全株材積轉換成全株乾重

紅檜：0.45 (林裕仁等，2002)

C % = 林木碳含量轉換係數

柳杉：49.03 % (林裕仁等，2002)

紅檜：48.64 % (林裕仁等，2002)



4.3 地被植物 (Understory and ground vegetation) 採樣及碳儲存

量 (C_U) 計算：

溪頭地區的林下及地被植物種類繁多，於調查樣區中常見的植物種類以闊葉樓梯草 (*Elatostema platyphylloides* Shih & Yang)、冷清草 (*Elatostema lineolatum* Forst. var. *major* Thwait.)、糯米團 (*Gonostegia hirta* (Blume) Miq.)、曲莖馬藍 (*Strobilanthes flexicaulis* Hayata) 為主要大宗，以及部分的姑婆芋 (*Alocasia odora* (Roxb.) C. Koch)、觀音座蓮 (*Angiopteris lygodiifolia* Rosenst.) 等大型地被植物，部分樣區有大花曼陀羅 (*Brugmansia suaveolens* Willd. Bercht. & Presl)、牛奶榕 (*Ficus erecta* Thunb. var. *beeheyana* (Hook. & Arn.) King) 及菝葜 (*Smilax china* Linn.) 等分布其中。

本研究選取 CJ53、CJ46、CJ33 及 CF29 共 4 個林分，在林地調查樣區中選取兩個 $2\text{ m} \times 2\text{ m}$ ，地被植物完好且無遭到破壞的區域。將此區域中的地被植物，包括所有的草本、小型木本及蕨類植物等等，以小鐮刀全數收割並於林地中立即以電子秤稱量植物鮮重。

收穫的植物選取一部分稱重、採集裝袋帶回實驗室以 65°C 進行烘乾一星期並稱重，計算出地被植物乾重鮮重比，利用乾鮮重比及總收穫鮮重換算得出每個區域中所有地被植物之總乾重，6 個區域全部平均之後再按照比例放大並計算得出每公頃之地被植物碳儲存量 (C_U)，地被植物之碳含量比例參考前人研究之平均值，以 41.64 % 進行計算 (洪志祐，2012)。

$$C_U = \left(\frac{\sum_{i=1}^6 W_i * R_i}{6} \right) \times C \% \times \frac{2500}{1000} \quad (7)$$

其中：

C_U (Mg ha^{-1}) = 林地中每公頃地被植物之碳含量

W_i (kg) = 原收穫區域中之全地被植物總鮮重

R_i (%) = 取樣乾重/取樣鮮重，乾重鮮重轉換係數

$C\%$ = 地被植物碳含量轉換係數 = 41.64 %



4.4 枯立木 (Snags, C_D) 調查及測計：

枯立木之調查以樣區為單位，分別計算各個樣區中的枯立木數量，並以胸徑捲尺測量其胸高直徑及以手持式雷射測距儀測量樹高，按照樹種帶入前項 4.1 及 4.2 中各自的材積迴歸式及碳儲存量公式計算出全株生物量，並扣除掉葉子部分之生物量 21.6 kg (游漢明，1981)；而僅有幹部之頂部斷裂枯立木，則利用其胸高直徑及樹高直接計算材積，並將地下部生物量以全株之 23% 來進行計算，加總後再換算成碳儲存量 (李訓煌，1978)。計算出該樣區中所有枯立木之材積量及碳儲存量，三個樣區平均再擴大換算成單位面積之後得出該林分中每一公頃的枯立木碳儲存量 (C_D)。

4.5 枯倒木及木質殘體 (Dead down-timbers and woody debris)之

調查、採樣與碳儲存量 (C_{WD}) 計算：

枯倒木及木質殘骸採用穿越線調查法，於每個樣區中拉出一長 20 m 之穿越線，以該線為中心，左右各延伸 50 cm 圍成一面積 20 m² 的長方形調查區域，沿線調查及採樣包含於調查區域中所有的枯倒木及其他木質殘骸，每個樣區中進行兩次穿越線調查。

枯倒木之調查原則上視為是一圓柱體，調查中如穿越線壓過一枯倒木，則測量其穿越線所經過之處的直徑及該倒木處於調查範圍內之長度，超過穿越線長方形調查範圍之枯倒木部分則不予計算長度，單位為 cm。並紀錄其倒木之外觀狀態及最接近狀況的簡易腐朽分級，倒木狀態描述、腐朽分級及分級定義請參見表 1，倒木調查完成後以鋸子鋸下一段圓木切面樣品帶回實驗室，如倒木過大不易鋸下圓盤樣品時，則只採取部分木質的碎片帶回。

採集之木頭樣品以 65°C 進行烘乾一星期以上並秤量其乾重，採樣段木之體積採用排水法測量，將段木樣品或木質碎片包裹於薄塑膠袋之中，盡量排除袋中的空氣後密封，放入裝滿水的水桶中，施力使其剛好完全沒入水中，以量筒測量所排出之水量，即為該樣品之體積，並藉由樣品乾重量/樣品體積，計算出密度，再由以下公式，換算出倒木之碳儲存量，三個樣區所有的倒木碳儲存量加總後平均，經擴大換算成單位面積之後即可得到該林分每公頃之枯倒木碳儲存量 (C_{WD})。

$$C_{WD} = \frac{D^2}{4} \times \pi \times L \times BD \times C \% \times 1000 \quad (8)$$

其中：

C_{WD} (kg) = 單株枯倒木及木質殘骸之碳儲存量

D (cm) = 枯倒木之直徑

L (cm) = 枯倒木處於調查範圍內之長度

BD ($g\ cm^{-2}$) = 樣品之密度 = 樣品乾重量/樣品體積

$C\%$ = 各樹種之碳含量比例，柳杉 = 49.03%，紅檜 = 48.64%



表 1. 本研究中野外調查時所定義枯倒木之狀態描述、腐朽分級、分級定義及各級枯倒木數量調查結果 (參考 Gunn et al., 2014 修改)

Table 1 State description, decay classification, class definitions, and number of dead woods in each class (modified from Gunn et al., 2014).

腐朽分級代號	枯倒木狀態描述	數量
1	樹皮完整或是大部分完整，邊材及心材皆完整無腐朽。	4
2	只剩下少部分樹皮或是無樹皮，邊材已出現少部分腐朽，心材完整無腐朽。	5
3	無樹皮，邊材部分腐朽空洞或是已嚴重腐朽至僅剩部分甚至沒有，但心材仍然完整，原始形狀仍可看出。	9
4	無樹皮，邊材已嚴重腐朽至僅剩部分甚至沒有，心材部分有腐朽空洞，原始形狀已不易看出。	5
5	無樹皮，邊材及心材皆嚴重腐朽呈現多個空洞，或是沒有邊材只剩下部分心材，基本上已無完整的原始形狀。	2

4.6 地表枯枝落葉層 (Forest floor) 採樣及碳儲存量 (C_F) 計算：

於地被植物收割完成後的區域中，選取兩個 $50\text{ cm} \times 50\text{ cm}$ 完好無被踩踏過的小區塊，收集該小區塊中地表上全部的枯枝落葉層，包含完整以及半分解的各式落葉、枝條等，過於細碎的有機物碎屑因不易採集，視為表層土壤的一部分，於後續的調查步驟中進行採樣及測定。

每個樣區中一共採集 4 包樣品，一個林分共 $3 \times 4 = 12$ 包。樣品帶回實驗室後以 65°C 進行烘乾一星期並秤重，取出部分的乾燥樣品用絞碎機絞碎後再將其球磨成均勻細緻粉末，分別秤重並妥善包入小錫囊，送入元素分析儀中測量樣品碳含量比例，計算得出每 0.25 m^2 的枯枝落葉層碳含量，將各樣區中的數據平均之後，再換算成每公頃下的碳含量。



4.7 森林土壤採樣、性質測定及碳儲存量 (Cs) 計算：

本研究中 CJ53、CJ46、CJ33 及 CF29 之土壤質地皆為砂質壤土 (Sandy loam)，土壤的平均 pH 值為 4.2~5.3，林分中各深度之土壤層間 pH 值差異不大；總體容積密度平均為 $0.56\sim 0.96\text{ g cm}^{-3}$ 、含石率平均為 7~27%，皆以表層土壤為最低並隨深度增加而增加；碳含量百分比平均為 1.99~6.74%，皆以表層土壤為最高並隨深度增加而減少（詳細數據請參見表 2）。

調查時於林地每一個 $20\text{ m} \times 20\text{ m}$ 的樣區中隨機選擇 3 個地點，以鏟子挖出深度至少 30 cm 的小規模垂直土壤剖面進行土壤採樣，以 10 cm 為一分層，分別為 0-10 cm、10-20 cm、20-30 cm 三層。

(1) 土壤總體容積密度 (Bulk density)：

各土壤層皆以固定 100 cm^3 體積之不鏽鋼採土環採集一個完整的土壤樣品，用於測定總體容積密度，將採集帶回的土壤樣品裝入紙信封袋中，以 105°C 持續烘乾至少一天之後，確定土壤樣品以達恆重，並秤量其乾土壤重量，便可計算其土壤總體容積密度。

(2) 土壤採樣、含石率及碳含量測定：

進行土壤樣品採樣時，按照每 10 cm 一層的分界進行採集，每一袋土壤樣品皆是由 3 個土壤剖面採集並混合均勻，用以代表該樣區中的該層深度之土壤性質。一個 $20\text{ m} \times 20\text{ m}$ 的樣區共採集 3 袋土樣，一調查林分每個土壤分層皆包含有 3 份土樣共 $3 \times 3 = 9$ 袋。含石率(%)則按照 Munsell Soil Color chart 中之參考圖，對照採樣土樣之剖面得出。採集的土壤帶回後先平鋪置於塑膠盤子上，放於室外陰涼通風處一星期待其自然風乾，風乾的土壤以 2 mm 孔洞之篩網篩選分離出土壤顆粒及石頭，取出部分篩選過的土壤樣品，以球磨機細磨成均勻粉末後並秤重包入錫囊，以元素分析儀 (Perkin Elmer 2400, Waltham, MA, USA) 分析得到土壤碳含量比例。



(3) 土壤有機碳量計算：

土壤有機碳量為三層土壤有機碳儲存量之總和，各土壤分層參照以下公式進行計算其碳儲存量，其中的BD(總體容積密度)以及R%(含石率)同一深度分層有二重複數據，在計算單層土壤有機碳的儲存量時以兩者平均計算，三層土壤層計算完成後加總即是該樣區中的土壤有機碳量，三個樣區分別計算完成後取平均即為該林分之土壤有機碳量。

$$C_s = \text{Depth} \times \text{BD} \times (1 - R\%) \times C\% \times 10000 \quad (9)$$

(洪志祐，2012)

其中：

C_s (Mg ha^{-1}) = 林地中每公頃土壤有機碳量

Depth (m) = 土壤層的厚度 = 0.1 m

BD (Mg m^{-3}) = 土壤之總體容積密度

R% = 土壤之含石率

C% = 各土壤層之碳含量比例

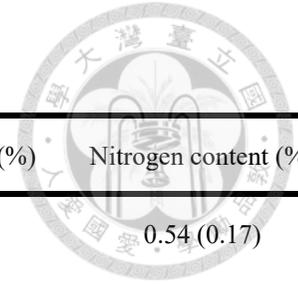


表 2. 溪頭地區各個調查林分之土壤性質概況。 **Table 2** Soil properties of stands in Xitou.

Stand	Depth (cm)	Sand (%)	Silt (%)	Clay (%)	Soil texture ^a	Soil pH ^b	Bulk density (g cm ⁻³)	Rock content (%)	Carbon content (%)	Nitrogen content (%)
CJ53	0-10 cm	69.8	27.7	2.5	Sandy loam	5.1 (0.1) ^c	0.66 (0.06)	10 (2)	6.74 (2.01)	0.54 (0.17)
	10-20 cm	61.6	34.7	3.8	Sandy loam	5.0 (0.1)	0.75 (0.06)	17 (6)	3.54 (0.51)	0.29 (0.03)
	20-30 cm	59.1	36.0	5.0	Sandy loam	4.9 (0.1)	0.83 (0.17)	26 (8)	2.65 (0.08)	0.21 (0.01)
CJ46	0-10 cm	57.5	40.0	2.5	Sandy loam	5.3 (0.6)	0.63 (0.17)	7 (3)	3.64 (1.54)	0.26 (0.16)
	10-20 cm	61.3	35.0	3.8	Sandy loam	5.2 (0.5)	0.84 (0.24)	12 (5)	2.47 (1.44)	0.19 (0.09)
	20-30 cm	58.8	36.3	5.0	Sandy loam	5.1 (0.4)	0.96 (0.18)	19 (13)	1.99 (0.42)	0.15 (0.09)
CJ33	0-10 cm	67.8	29.8	2.5	Sandy loam	5.3 (0.1)	0.56 (0.11)	10 (5)	6.03 (2.21)	0.45 (0.18)
	10-20 cm	60.0	37.5	2.5	Sandy loam	5.1 (0.5)	0.86 (0.34)	18 (3)	4.49 (2.41)	0.31 (0.14)
	20-30 cm	57.6	37.4	5.0	Sandy loam	5.0 (0.5)	0.92 (0.31)	24 (2)	2.97 (1.57)	0.20 (0.08)
CF29	0-10 cm	60.4	37.1	2.5	Sandy loam	4.2 (0.4)	0.61 (0.06)	7 (5)	5.19 (0.32)	0.93 (0.44)
	10-20 cm	47.9	49.6	2.5	Sandy loam	4.7 (0.5)	0.80 (0.09)	15 (9)	3.65 (0.18)	0.63 (0.09)
	20-30 cm	50.1	43.6	6.3	Sandy loam	4.5 (0.2)	0.80 (0.07)	27 (7)	3.24 (0.33)	1.06 (0.46)

^a Soil texture was measured by Bouyoucos hydrometer method. ^b Soil pH was measured of soil water ratio at 1:2.5 by glass electrode.

^c Numbers in parentheses indicate standard deviation.



四、結果

(一) 各調查造林地之林分狀態

1. 各調查林分之林分概況及各項基本資料

七個調查林分之各項詳細基本資料列於表 3，林分之各項狀態按照林齡順序進行比較 (不列入 CF29 進行線性迴歸相關性比較)，林分密度和林齡呈現高度線性負相關 ($R^2 = 0.72, p < 0.05$)；而平均胸高直徑 ($R^2 = 0.91, p < 0.05$)、平均樹高 ($R^2 = 0.78, p < 0.05$)、單木平均碳儲存量 ($R^2 = 0.41, p < 0.05$) 等特性則是皆和林齡呈現高度線性正相關；林分碳儲存量 ($R^2 = 0.19, p = 0.07$) 和林齡呈現低度線性正相關。此外，於本研究的結果中，林分胸高斷面積 ($R^2 = 0.003, p = 0.83$) 和林齡之間並無呈現明顯的相關性(圖 5)。



表 3. 溪頭地區各個調查林分之各項狀態詳細資料 (2017 年)

Table 3 Stand status of each stand in Xitou. (2017)

	CJ73	CJ53	CJ50	CJ46	CJ33	CJ20	CF29
Stand age	46	64	67	71	84	97	88
Stand characteristics							
Stand density (No. ha ⁻¹)	1058 (88) ^a	542 (101)	492 (80)	425 (43)	408 (88)	308 (58)	258 (38)
Mean DBH (cm)	27.8 (0.3)	38.4 (0.6)	42.2 (4.0)	41.1 (1.4)	46.0 (2.2)	52.2 (0.7)	40.2 (3.1)
Basal area (m ² ha ⁻¹)	68.4 (6.8)	64.8 (12.0)	73.0 (17.6)	59.5 (5.7)	72.9 (17.2)	68.2 (10.5)	34.6 (0.6)
Mean tree height (m)	20.4 (0.4)	25.6 (0.9)	27.1 (0.6)	26.3 (1.0)	27.4 (1.9)	30.6 (1.3)	20.3 (2.0)
Stand volume (m ³ ha ⁻¹)	617.6 (62.4)	676.0 (116.3)	819.1 (182.5)	642.8 (65.7)	807.9 (222.8)	811.2 (93.9)	373.9 (6.3)
Stand live tree biomass carbon (Mg C ha ⁻¹)	194.6 (19.7)	213.0 (36.7)	258.1 (57.5)	202.6 (20.7)	254.6 (70.2)	255.6 (29.6)	144.4 (11.1)
Individual Tree							
Individual tree volume (m ³ tree ⁻¹)	0.58 (0.30)	1.25 (0.51)	1.67 (0.90)	1.51 (0.79)	1.98 (1.19)	2.63 (1.09)	1.45 (0.83)
Individual live tree biomass carbon (kg C tree ⁻¹)	183.9 (94.1)	393.3 (161.3)	525.0 (282.2)	476.6 (249.0)	623.5 (373.7)	829.1 (342.2)	522.7 (300.4)

^aNumbers in parentheses indicate standard deviation.

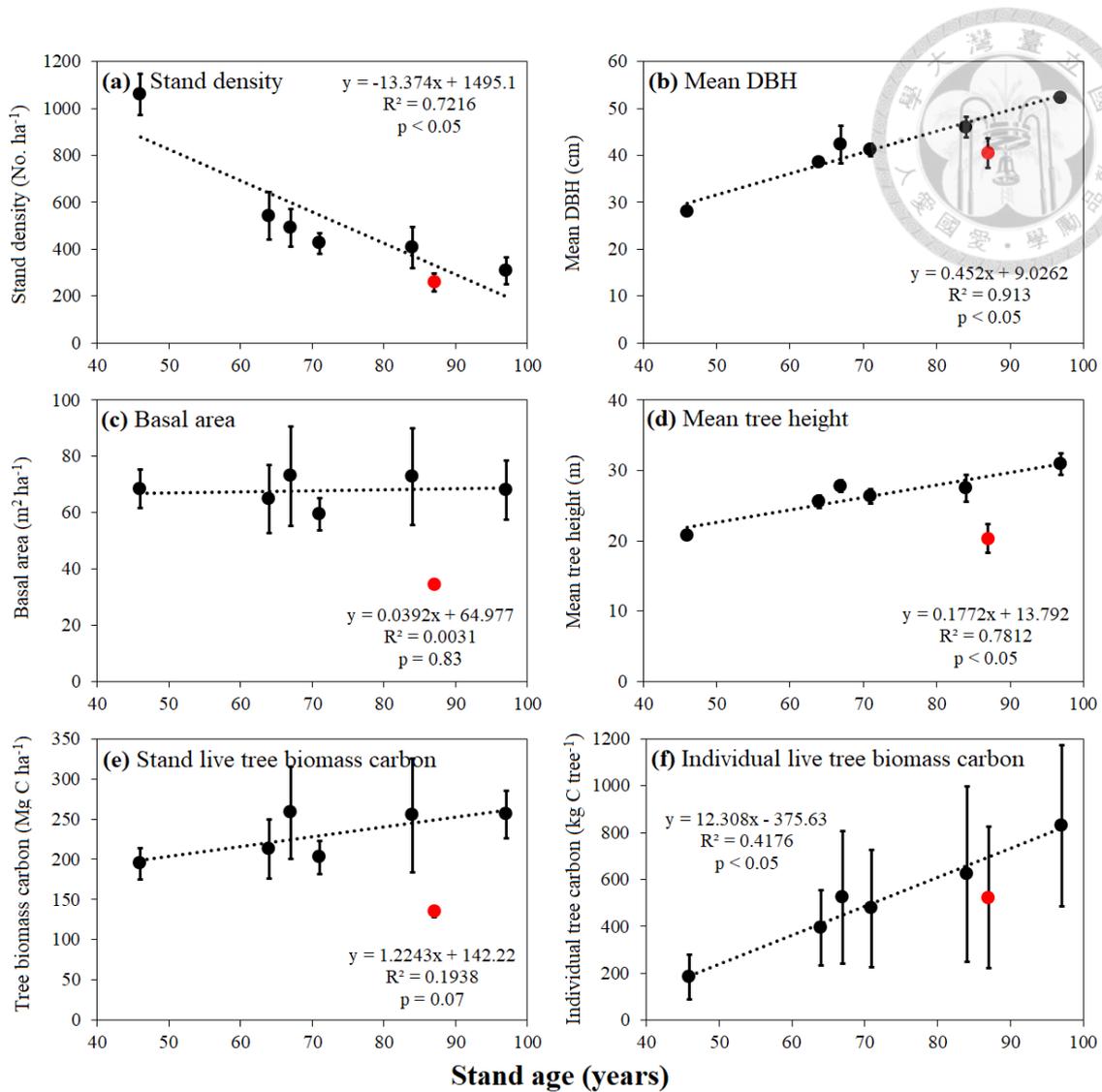
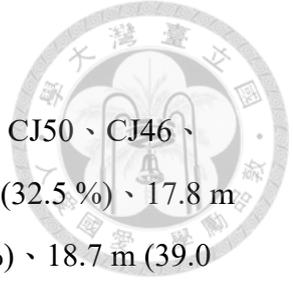


圖 5. 溪頭地區各個調查林分各項狀態與林齡之迴歸關係。其中黑色點為柳杉林分，紅色點為紅檜林分，線性迴歸關係僅為柳杉林分計算，不列入紅檜林分。(a) Stand density, (b) Mean DBH, (c) Basal area, (d) Mean tree height, (e) Stand live tree biomass carbon, (f) Individual live tree biomass carbon

Fig. 5 Relationships between each stand status and stand age. The black points are Japanese cedar stands and the red points are red cypress stand. Linear regression is only calculated Japanese cedar stands, not included red cypress.



2. 調查林分之樹冠特性

七個調查林分之各項特性結果列於表 4，CJ73、CJ53、CJ50、CJ46、CJ33、CJ20 之平均枝下高及其平均樹冠長率分別為 13.9 m (32.5%)、17.8 m (29.4%)、15.7 m (43.4%)、16.0 m (38.7%)、19.2 m (30.5%)、18.7 m (39.0%)，CF29 則為 13.0 m (34.3%)。平均樹冠幅分別為 3.9 m、3.7 m、5.0 m、4.0 m、4.6 m、5.3 m，CF29 則為 6.5 m。

從前項林地狀態資料之結果中，林分林木之平均樹高是和林齡呈現高度線性正相關 ($R^2 = 0.78, p < 0.05$)；而林分平均枝下高 ($R^2 = 0.46, p < 0.05$)、樹冠長 ($R^2 = 0.33, p < 0.05$) 以及樹冠幅 ($R^2 = 0.45, p < 0.05$) 則是和林齡呈現中度線性正相關；但是平均後生枝下高 ($R^2 = 0.14, p = 0.13$) 及樹冠長率 ($R^2 = 0.06, p = 0.34$) 和林齡之間則無呈現明顯的相關性 (圖 6)。

而本研究所得之各項數據結果和林分平均 DBH 對應之間的相關性分別為：和樹高呈現高度線性正相關 ($R^2 = 0.87, p < 0.05$)，和枝下高、樹冠長以及樹冠幅呈現中度線性正相關 ($R^2 = 0.40$ 、 $R^2 = 0.46$ 、 $R^2 = 0.53, p < 0.05$)，但和平均後生枝下高 ($R^2 = 0.09, p = 0.24$) 及樹冠長率 ($R^2 = 0.12, p = 0.15$) 則無呈現明顯的相關性(圖 7、圖 8)。

表 4. 溪頭地區各個調查林分之樹冠特性詳細資料 (2017 年)

Table 4 Canopy characteristics of each survey stand in the Xitou. (2017)

	CJ73	CJ53	CJ50	CJ46	CJ33	CJ20	CF29
Stand age	46	64	67	71	84	97	87
Total tree No. in plots	127	65	59	51	49	37	31
Stand crown characteristics							
Mean tree height (m)	20.4 (0.4) ^a	25.6 (0.9)	27.1 (0.6)	26.3 (1.0)	27.4 (1.9)	30.6 (1.3)	20.3 (2.0)
Live clear length (m)	13.9 (1.0)	17.8 (1.1)	15.7 (0.9)	15.9 (1.5)	18.8 (2.8)	18.6 (1.3)	13.0 (0.5)
Epicormic branch clear length (m)	10.5 (0.5)	10.7 (1.2)	9.7 (0.9)	7.1 (1.5)	10.5 (0.8)	12.8 (1.5)	10.9 (0.8)
Crown length (m)	6.8 (0.8)	7.8 (0.7)	12.0 (0.3)	10.4 (0.6)	8.6 (1.1)	12.3 (2.8)	7.3 (1.8)
Live crown ratio (%)	32.4 (4.1)	29.6 (3.1)	43.2 (2.1)	38.8 (4.1)	31.2 (5.5)	39.8 (7.1)	34.7 (5.6)
Crown width (m)	3.9 (0.1)	3.7 (0.05)	5.0 (0.4)	4.0 (0.4)	4.6 (0.06)	5.3 (0.2)	6.5 (0.5)
Leaf Area Index (m ² m ⁻²)	4.2	3.5 (0.2)	3.2	3.8 (1.1)	3.3 (0.6)	4.0	2.2 (0.4)

^aNumbers in parentheses indicate standard deviation.

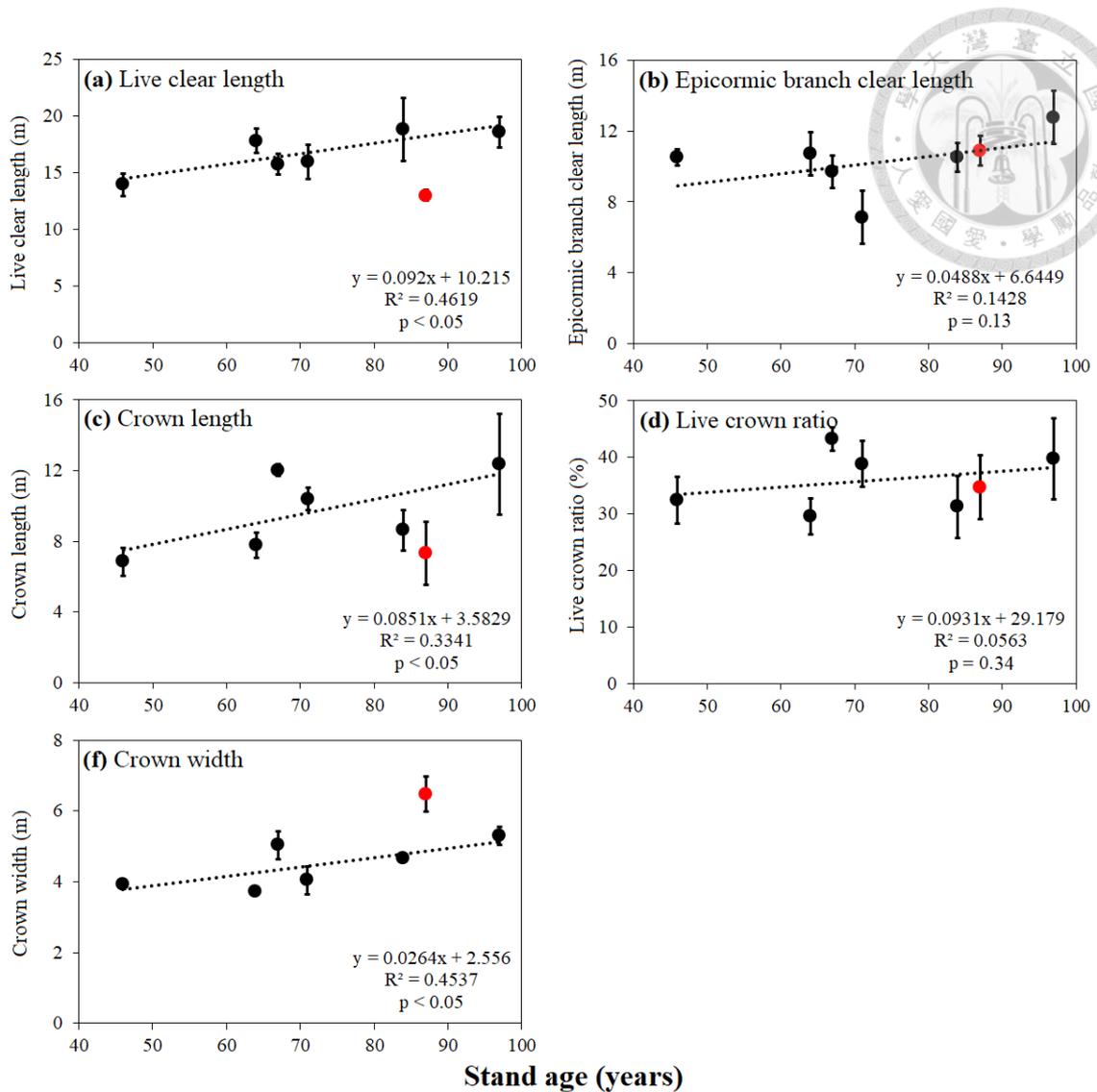


圖 6. 溪頭地區各個調查林分各項樹冠特性與林齡之迴歸關係。其中黑色點為柳杉林分，紅色點為紅檜林分，線性迴歸關係僅為柳杉林分計算，不列入紅檜林分。(a) Live clear length, (b) Epicormic branch clear length, (c) Crown length, (d) Live crown ratio, (f) Crown width

Fig. 6 Relationships between each canopy characteristic and stand age. The black points are Japanese cedar stands and the red points are red cypress stand. Linear regression is only calculated Japanese cedar stands, not included red cypress.

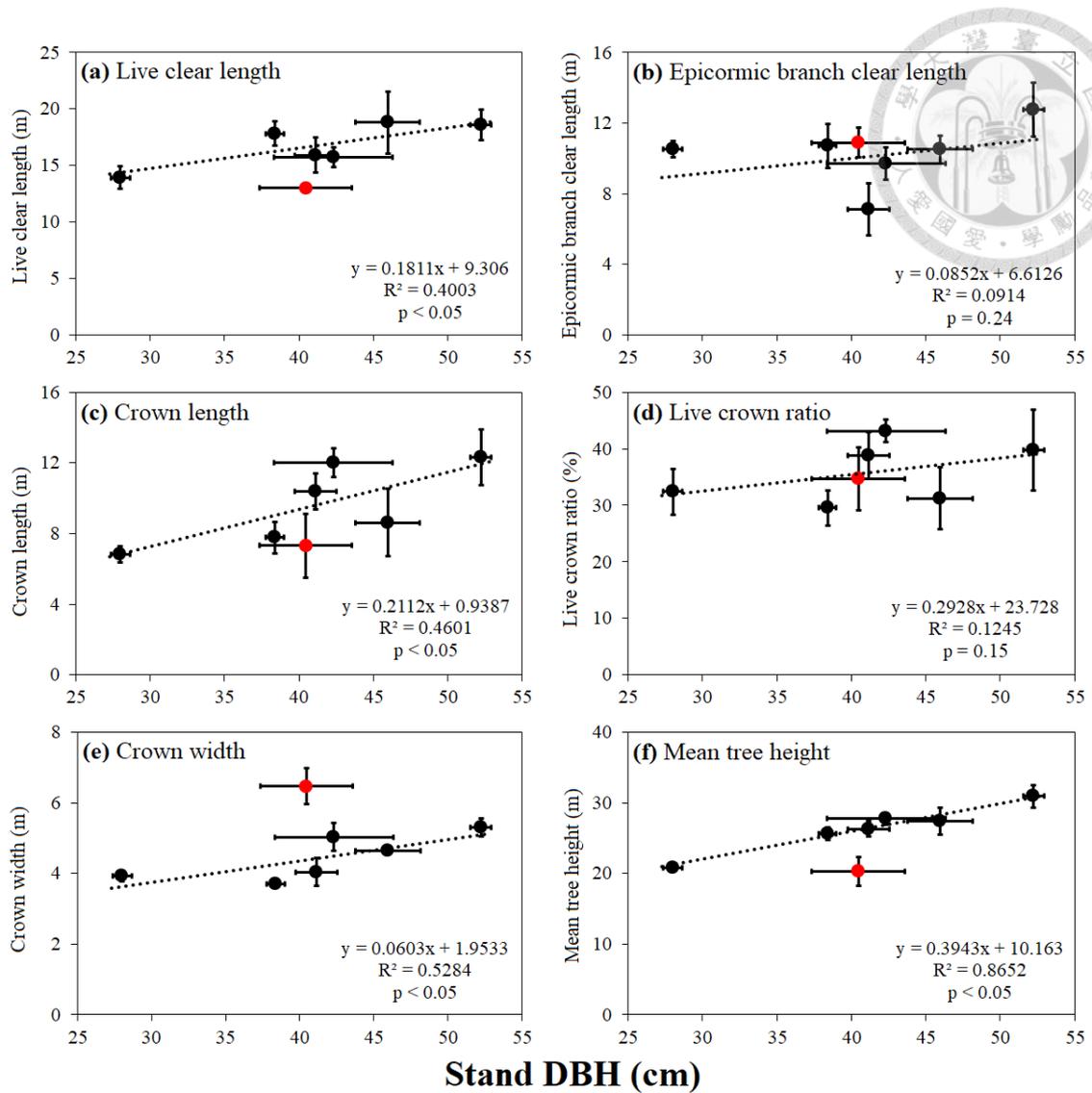


圖 7. 溪頭地區各個調查林分各項樹冠特性與胸高直徑之迴歸關係。其中黑色點為柳杉林分，紅色點為紅檜林分，線性迴歸關係僅為柳杉林分計算，不列入紅檜林分。(a) Live clear length, (b) Epicormic branch clear length, (c) Crown length, (d) Live crown ratio, (e) Crown width, (f) Mean tree height

Fig. 7 Relationships between each canopy characteristic and stand DBH. The black points are Japanese cedar stands and the red points are red cypress stand. Linear regression is only calculated Japanese cedar stands, not included red cypress.

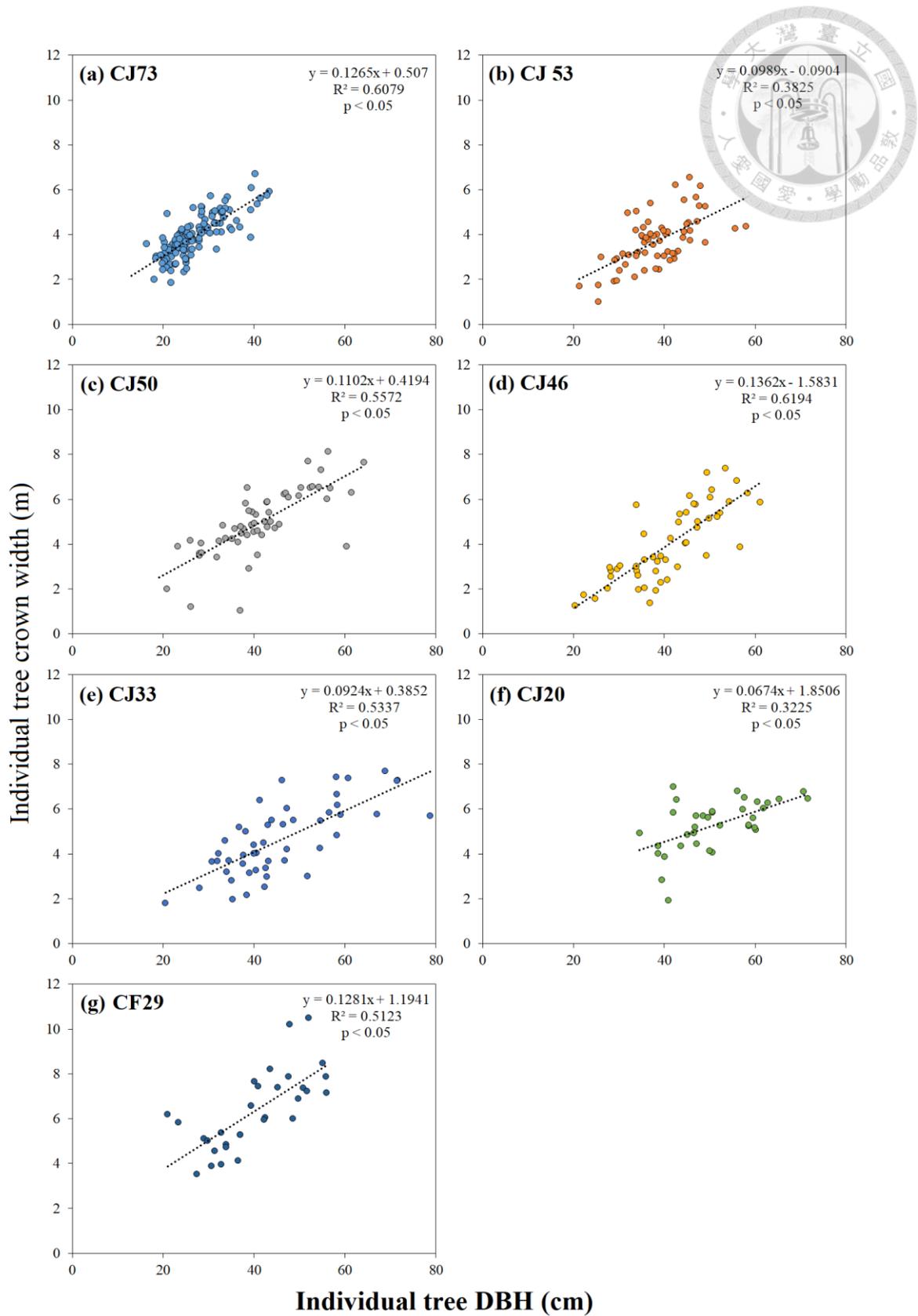


圖 8. 溪頭地區各個調查林分單木樹冠幅與胸高直徑之迴歸關係。(a) CJ73 (b) CJ53 (c) CJ50 (d) CJ46 (e) CJ33 (f) CJ20 (g) CF29

Fig. 8 Relationships between individual tree crown width and DBH.



3. 調查林地之林分葉面積指數

葉面積指數之結果列於表 4，CJ73、CJ53、CJ50、CJ46、CJ33、CJ20 之葉面積指數平均值分別為 4.2、3.5、3.2、3.8、3.3、4.0 $\text{m}^2 \text{m}^{-2}$ ，而 CF29 則為 2.2 $\text{m}^2 \text{m}^{-2}$ 。

從結果看來，各個林分之鬱閉度皆高於 1 $\text{m}^2 \text{m}^{-2}$ ，表示各個林分之樹冠層皆已達到鬱閉的狀態，其中除 CF29 之外，LAI 的結果皆大於 3 $\text{m}^2 \text{m}^{-2}$ ，顯示調查中之各柳杉林分樹冠層濃密且皆呈現良好的鬱閉遮蔭。

(二) 各林分的林木生長量及枯落物量

柳杉、紅檜等常綠樹木之枯落物量，前人已有許多研究指出其枯落物量容易受到外來擾動（例如：颱風、豪雨）的影響而大幅增加（蕭怡茹和王立志，2005；竹內郁雄等，2007；林國銓等，2009；佐藤保等，2018；劉威伶等，2018；Cheng et al., 2020）。本研究於調查進行期間因無受到颱風之侵襲擾動，所收得之年度枯落物量樣品總重量相較於前人研究，柳杉枯落物量 3,867 $\text{kg ha}^{-1} \text{yr}^{-1}$ 、1.9~3.9 $\text{Mg C ha}^{-1} \text{yr}^{-1}$ ，本研究之結果相對偏低許多（洪志祐，2012；劉威伶等，2018；蘇泓銘，2013），因此不將兩者合併計算為地上部淨初級生產力，僅就林木生長量以及枯落物量兩大部分各別進行呈現及之後的討論。



1. 林木單株生長量及林分生長量

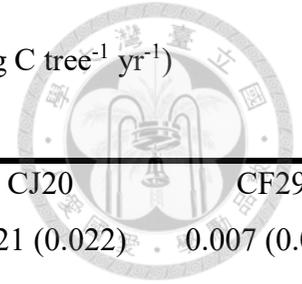
七個調查林分之各年度林分狀態及年度總生長量細項資料，分為林分和單木尺度兩大部分，分別列於表 5 及表 6。其中 CJ73、CJ50 及 CJ20 之樣區設置及生長量調查起始於 2011 年末，為求全體調查林分共同進行比較，僅以 2017~2019 年共 3 年生長量資料和其他林分進行討論，2012~2019 年之連年生長量資料請參考圖 11；而 CJ53、CJ46、CJ33 及 CF29 之樣區設置及生長量調查起始於 2017 年 3 月，至調查結束為止一共包含連續 3 年之生長量資料 (2017~2019 年)。

資料處理的部分，林分生長量表示該調查林分中所有樣區、全部林木該年度生長量之和，經換算擴大面積成一公頃下，並轉換成碳儲存增加量之結果，將三個調查樣區之結果平均後得出該林分之生長量，單位為 $\text{Mg C ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ 。增加百分比表示該年度之林分生長量，佔前一年之儲存量之比例，計算方式為將該年度林分中三個樣區之生長量除以同年度之該林分樣區的碳儲存量，再平均計算得出，單位為%，例如：2017 年度的% = 2017 年生長量 Δ / 2017 年初始之林分碳儲存量，以此方式類推計算。

平均單株林木生長量表示該年度之樣區中全部單株林木平均生長量，單位為 $\text{kg C tree}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ 。和前述林分之計算不同，不按照三個調查樣區區分，以全部的單株林木計算平均值和標準差。各林分單株林木 3 年間總生長量之分布情形請參考圖 9。

表 5. 溪頭地區各個調查林分於 2017~2019 年度之單株林木材積增加量 ($\text{m}^3 \text{ tree}^{-1} \text{ yr}^{-1}$) 及單株林木碳儲存增加量 ($\text{kg C tree}^{-1} \text{ yr}^{-1}$)

Table 5 Annual individual tree volume and carbon growth in each stand in 2017-2019.



		CJ73	CJ53	CJ50	CJ46	CJ33	CJ20	CF29
2017	Annual volume growth ($\text{m}^3 \text{ tree}^{-1} \text{ yr}^{-1}$)	0.008 (0.008) ^a	0.013 (0.010)	0.011 (0.011)	0.007 (0.010)	0.008 (0.012)	0.021 (0.022)	0.007 (0.008)
	Annual carbon growth ($\text{kg C tree}^{-1} \text{ yr}^{-1}$)	2.52 (2.54)	4.16 (3.23)	3.41 (3.52)	2.13 (3.19)	2.47 (3.67)	6.63 (6.99)	2.41 (2.93)
2018	Annual volume growth ($\text{m}^3 \text{ tree}^{-1} \text{ yr}^{-1}$)	0.007 (0.007)	0.009 (0.008)	0.008 (0.009)	0.006 (0.007)	0.011 (0.013)	0.012 (0.010)	0.015 (0.015)
	Annual carbon growth ($\text{kg C tree}^{-1} \text{ yr}^{-1}$)	2.05 (2.06)	2.72 (2.43)	2.57 (2.73)	1.90 (2.35)	3.37 (4.00)	3.91 (3.17)	5.48 (5.27)
2019	Annual volume growth ($\text{m}^3 \text{ tree}^{-1} \text{ yr}^{-1}$)	0.006 (0.006)	0.011 (0.009)	0.006 (0.007)	0.008 (0.008)	0.013 (0.016)	0.017 (0.019)	0.016 (0.016)
	Annual carbon growth ($\text{kg C tree}^{-1} \text{ yr}^{-1}$)	1.77 (1.88)	3.55 (2.98)	1.88 (2.28)	2.40 (2.57)	3.98 (4.99)	5.27 (6.13)	5.91 (5.74)

^aNumbers in parentheses indicate standard deviation.

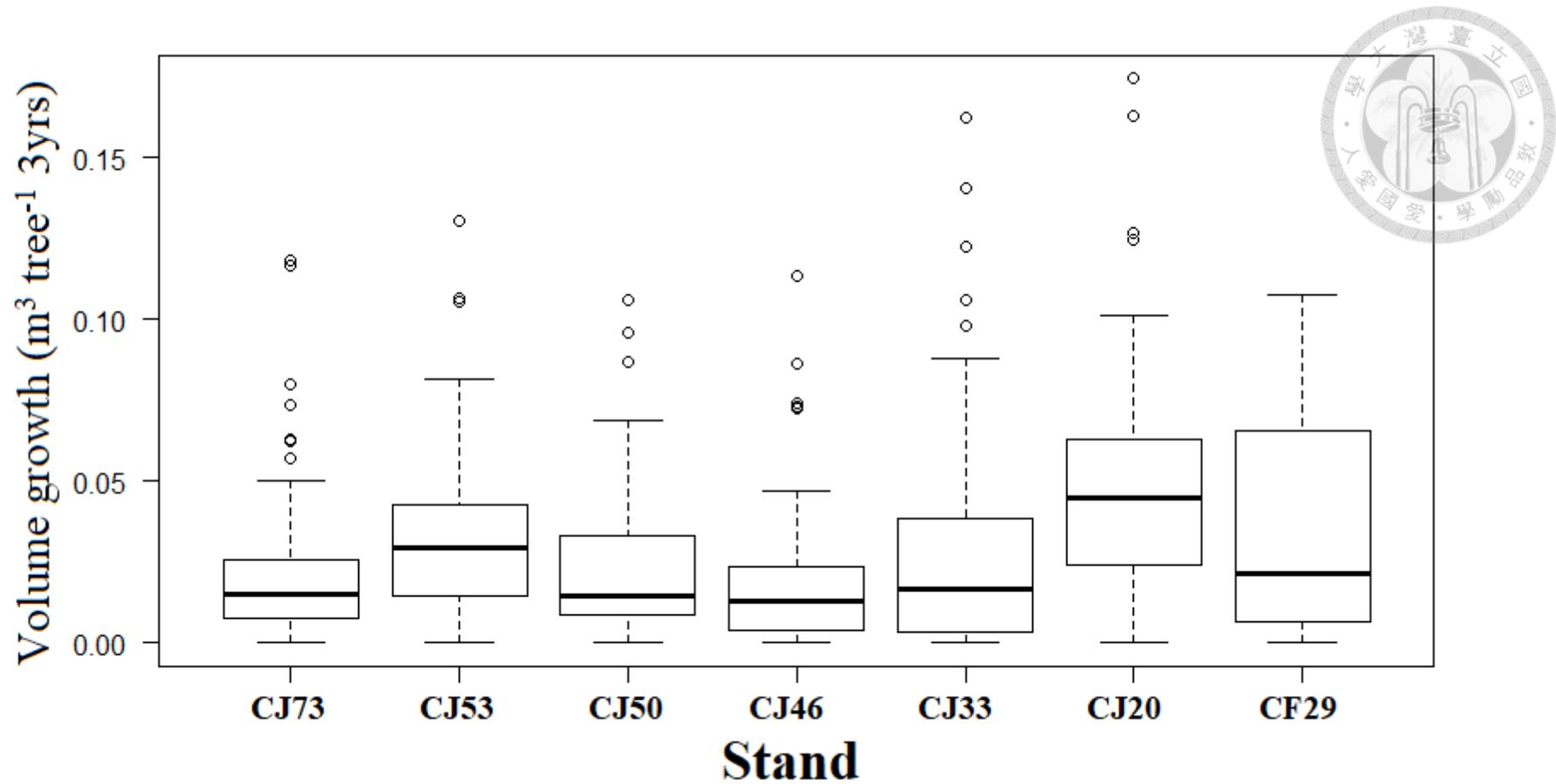


圖 9. 溪頭地區各調查林分 3 年 (2017~2019 年) 期間單株林木總材積增加量之分布盒狀圖
 Fig. 9 Distribution of individual tree total volume growth during 3 years (2017-2019) in each stand.

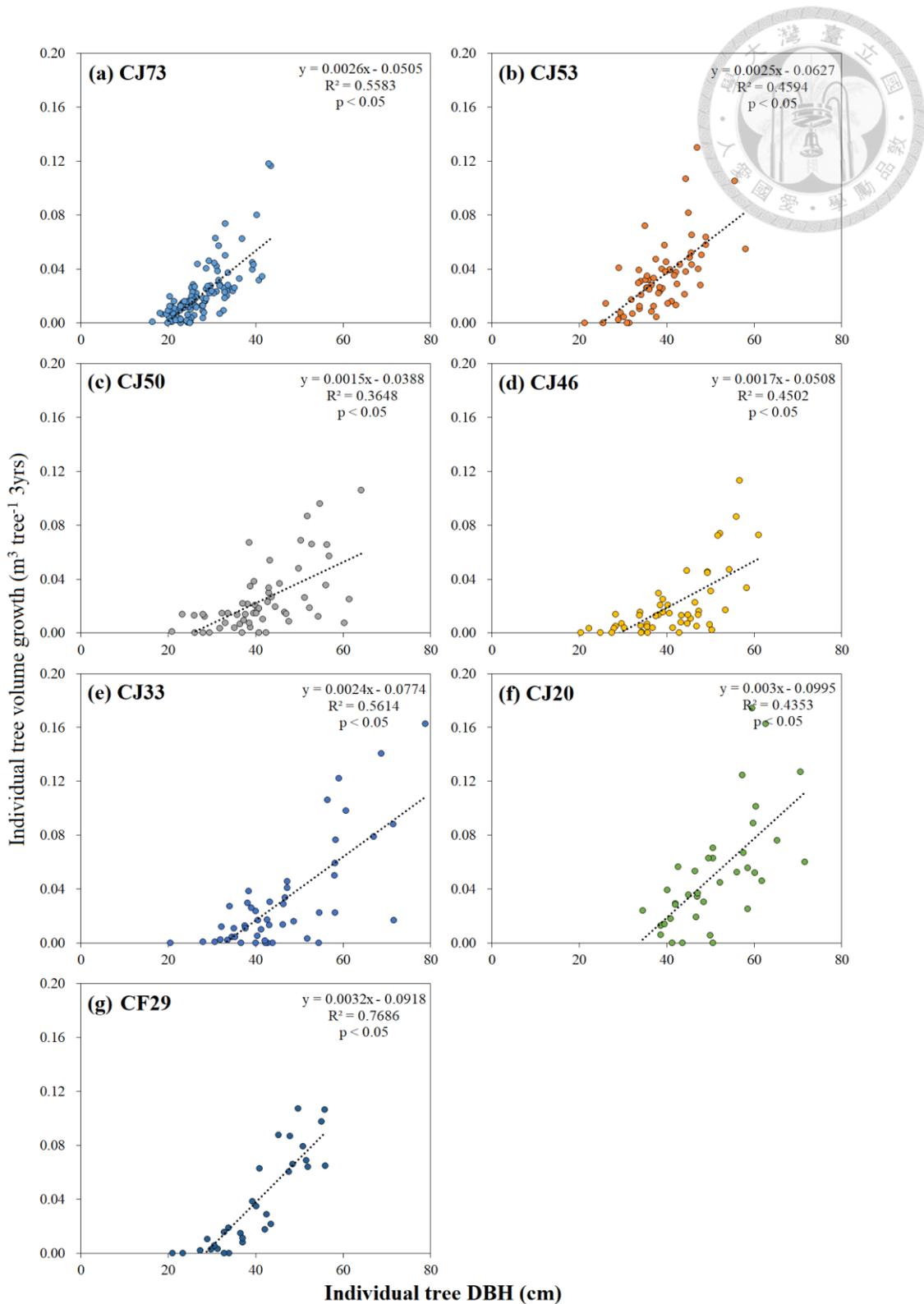


圖 10. 溪頭地區各個調查林分 3 年 (2017~2019 年) 期間單株林木材積增加量和單木胸高直徑之迴歸關係。(a) CJ73 (b) CJ53 (c) CJ50 (d) CJ46 (e) CJ33 (f) CJ20 (g) CF29

Fig. 10 Relationships between individual tree total volume growth during 3 years (2017-2019) and DBH.

表 6. 溪頭地區各個調查林分於 2017~2019 年度之林分材積增加量、林分林木增加碳量與增加百分比

Table 6 Stand volume growth, carbon increase and increasing ratio of each stand in Xitou in 2017-2019.

		CJ73	CJ53	CJ50	CJ46	CJ33	CJ20	CF29
2017	Stand volume growth (m ³ ha ⁻¹ yr ⁻¹)	8.41 (1.15) ^a	7.14 (1.24)	5.14 (0.41)	2.88 (1.49)	3.20 (1.51)	6.49 (1.61)	1.72 (1.06)
	Stand carbon increase (Mg C ha ⁻¹ yr ⁻¹)	2.65 (0.36)	2.25 (0.39)	1.62 (0.13)	0.91 (0.47)	1.01 (0.48)	2.05 (0.51)	0.62 (0.38)
	Stand increase ratio (%)	1.38 (0.30)	1.06 (0.07)	0.65 (0.14)	0.44 (0.19)	0.40 (0.13)	0.80 (0.21)	0.45 (0.26)
2018	Stand volume growth (m ³ ha ⁻¹ yr ⁻¹)	6.78 (0.69)	4.68 (0.78)	3.80 (0.38)	2.56 (0.90)	4.37 (1.36)	3.83 (0.69)	3.92 (0.87)
	Stand carbon increase (Mg C ha ⁻¹ yr ⁻¹)	2.14 (0.22)	1.48 (0.25)	1.20 (0.12)	0.81 (0.28)	1.38 (0.43)	1.21 (0.22)	1.42 (0.31)
	Stand increase ratio (%)	1.10 (0.17)	0.69 (0.12)	0.49 (0.14)	0.39 (0.10)	0.54 (0.08)	0.47 (0.11)	1.04 (0.17)
2019	Stand volume growth (m ³ ha ⁻¹ yr ⁻¹)	5.86 (0.63)	6.10 (0.89)	2.79 (0.10)	3.24 (1.36)	5.16 (1.65)	5.15 (1.13)	4.23 (0.93)
	Stand carbon increase (Mg C ha ⁻¹ yr ⁻¹)	1.85 (0.20)	1.92 (0.28)	0.88 (0.03)	1.02 (0.43)	1.63 (0.52)	1.62 (0.36)	1.53 (0.34)
	Stand increase ratio (%)	0.95 (0.18)	0.89 (0.03)	0.35 (0.08)	0.49 (0.17)	0.63 (0.10)	0.63 (0.15)	1.11 (0.22)

^aNumbers in parentheses indicate standard deviation.

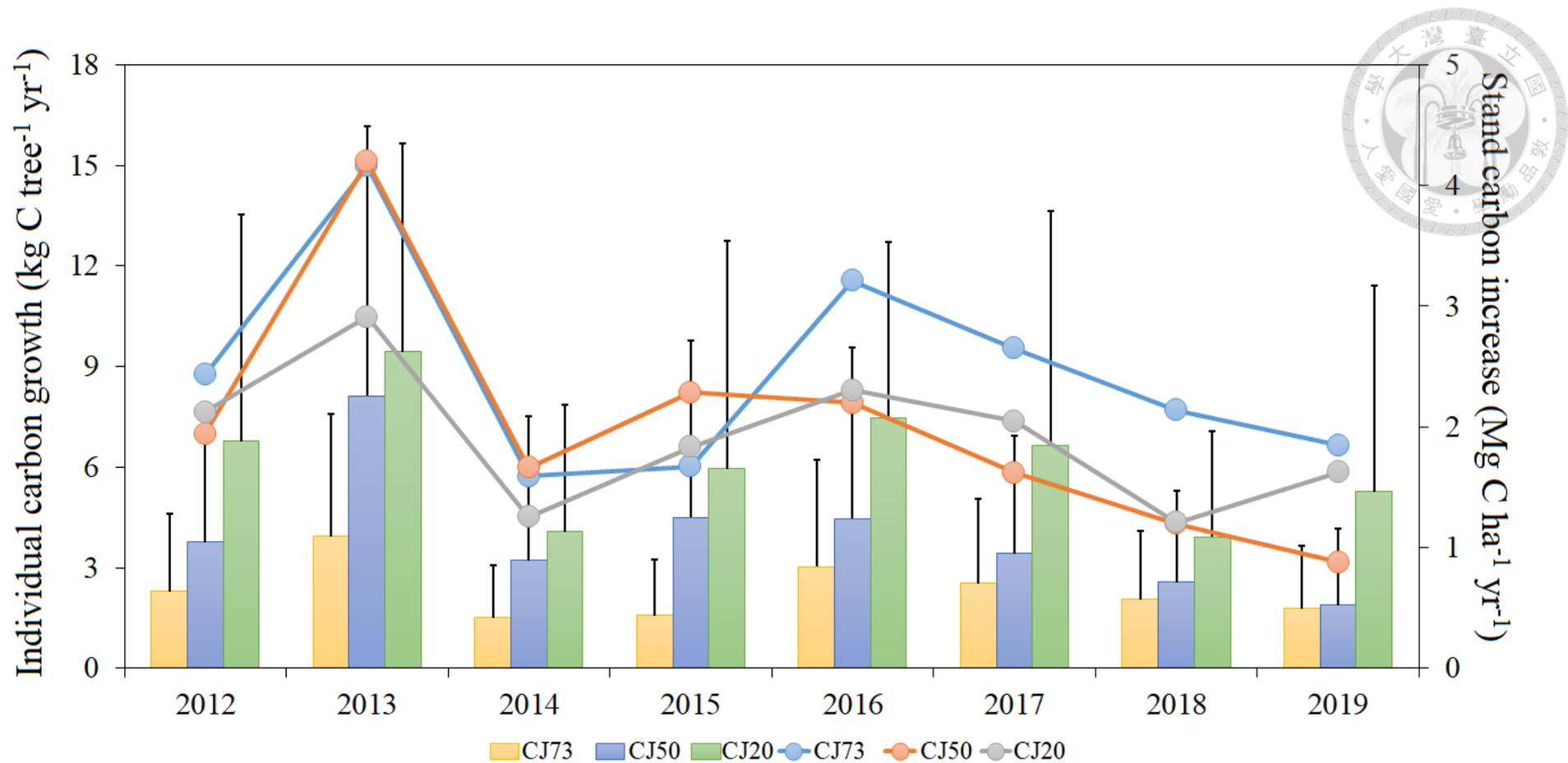


圖 11. CJ73、CJ50 及 CJ20 連年 (2012~2019 年) 生長量。其中長條圖為單木生長量 ($\text{kg C tree}^{-1} \text{ yr}^{-1}$)，折線圖為林分生長量 ($\text{Mg C ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$)

Fig. 11 Growth of CJ73, CJ50 and CJ20 in 2012-2019. The bar graph shows the growth of individual tree, and the polyline graph shows the growth of stands.



2. 各林分之年度枯落物量及時間變化

各調查林分之年度平均枯落物量請參照表 7，其中 CJ73、CJ50 及 CJ20 之樣區設置及枯落物量調查起始於 2011 年末 (Cheng et al., 2020)，為求全體調查林分共同進行比較，僅列出調查開始 2017 年 4 月份至結束 2020 年 3 月份共 36 個月統合之資料。

在各調查林分之枯落物樣品中，CF29 由於造林地受到闊葉樹種入侵，枯落物中包含有許多來自闊葉樹的枯落物，於烘乾後另外挑出秤重，其平均枯落物量和佔據總枯落物量的比例分別為 1,281 (18.8%)、794 (15.1%)、981 (18.5%) $\text{kg ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ 。

圖 13 為七個調查林分之各月份平均枯落物量，從圖中可看出柳杉之枯落物主要集中於 3 月至 8 月這段時間。而紅檜之枯落物因冬季落葉和春季換葉，主要集中於 12 月至隔年 4 月；闊葉樹枯落物則僅有春季換葉，主要集中 3 至 5 月 (圖 12)。

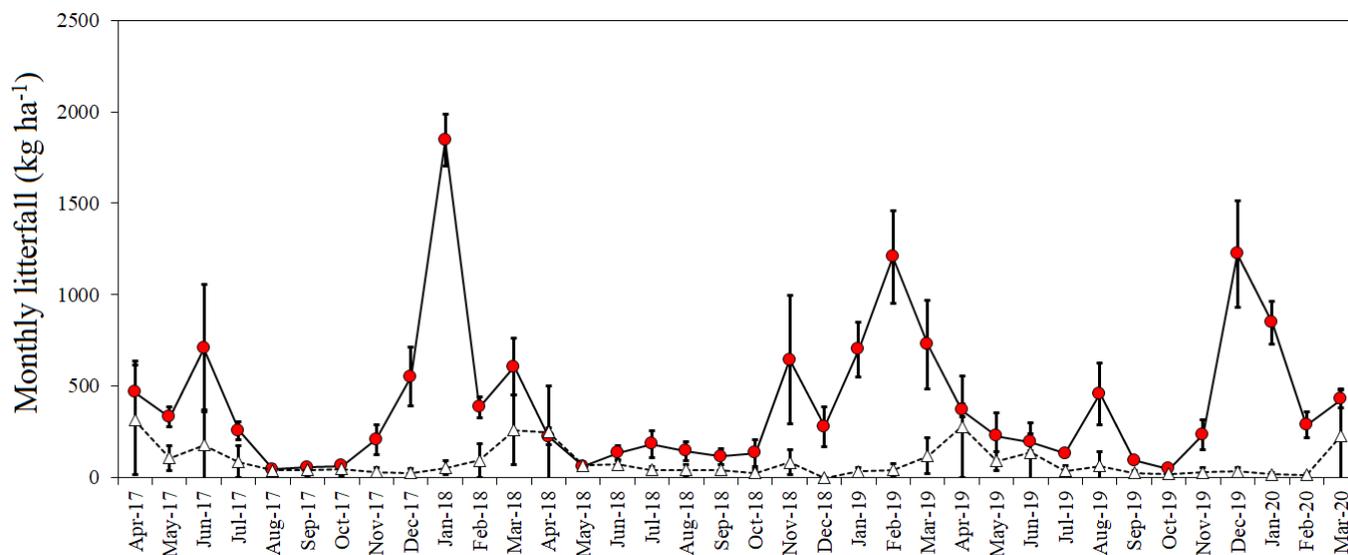


圖 12. CF29 之枯落物量。其中紅色圓點為紅檜，白色三角為闊葉樹

Fig. 12 Litterfall mass of CF29. The red points are red cypress litterfall, and the white triangles are broadleaf litterfall.



表 7. 溪頭地區各個調查林分年度平均枯落物量 ($\text{kg ha}^{-1} \text{yr}^{-1}$) 及換算之碳量 ($\text{Mg C ha}^{-1} \text{yr}^{-1}$)

Table 7 Annual litterfall mass and converted carbon stocks of each stand.

		CJ73	CJ53	CJ50	CJ46	CJ33	CJ20	CF29
	Litterfall							
	Carbon content (%)	53.15 ^a	49.32	49.25 ^a	48.72	50.69	48.86 ^a	49.28
2017	Litterfall	2,809.8	2,438.1	2,190.7	2,694.4	2,254.3	2,394.5	6,813.7
	($\text{kg ha}^{-1} \text{yr}^{-1}$)							
	Litterfall carbon	1.38	1.20	1.07	1.31	1.13	1.17	3.36
	($\text{Mg C ha}^{-1} \text{yr}^{-1}$)							
2018	Litterfall	3,234.0	2,645.7	2,670.0	2,608.7	2,134.4	2,198.8	5,247.7
	($\text{kg ha}^{-1} \text{yr}^{-1}$)							
	Litterfall carbon	1.59	1.30	1.31	1.19	1.08	1.08	2.64
	($\text{Mg C ha}^{-1} \text{yr}^{-1}$)							
2019	Litterfall	4,812.3	3,664.1	3,507.0	3,787.6	4,012.1	4,298.9	5,307.4
	($\text{kg ha}^{-1} \text{yr}^{-1}$)							
	Litterfall carbon	2.36	1.81	1.43	1.84	2.03	2.11	2.73
	($\text{Mg C ha}^{-1} \text{yr}^{-1}$)							

^aLitterfall Carbon content was referred from 洪志祐 (2012).

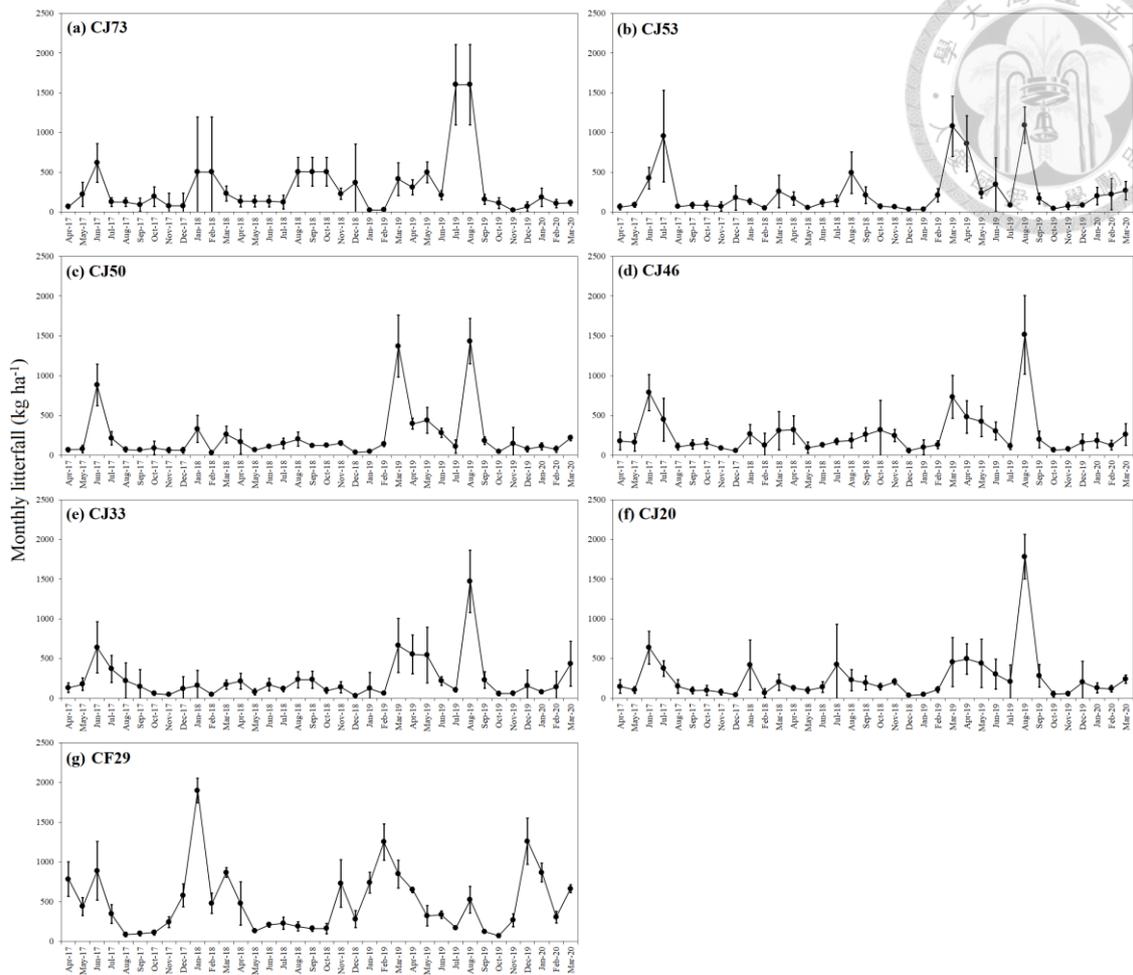


圖 13. 溪頭地區各個調查林分各月份 6 個枯落物網所收集之平均枯落物量。

(a) CJ73 (b) CJ53 (c) CJ50 (d) CJ46 (e) CJ33 (f) CJ20 (g) CF29

Fig. 13 Monthly litterfall mass of each stand.



(三) 生態系統碳儲存量及各部分碳庫之碳儲存量

4 個調查林分之生態系統不同部位碳庫之碳儲存量及所佔總碳儲存量之百分比，分別列於表 8、表 9 及圖 13 中。

生態系統碳儲存量為六個碳庫之總和，CJ53、CJ46、CJ33 及 CF29 之生態系總碳儲存量分別為 302.7、260.3、342.9、229.0 Mg C ha⁻¹，其中以林木 (C_T) 以及土壤有機碳 (C_S) 佔據總碳儲存量的最大量及次之，這兩大碳庫總和之碳儲存量可達到生態系統總碳儲存量的 95% 以上。

表 8. 溪頭地區各個調查林分之生態系統碳儲存量 (Mg C ha⁻¹)

Table 8 Ecosystem carbon stocks of each stand in Xitou.

	CJ53	CJ46	CJ33	CF29
Live trees	213.02 (36.66) ^a	202.55 (20.70)	254.60 (70.22)	144.44 (11.12)
Understory	1.43 (0.49)	0.94 (0.13)	1.29 (0.19)	0.57 (0.11)
Snags	5.16 (5.14)	1.96 (1.97)	6.95 (12.04)	2.91 (5.04)
Woody debris	3.93 (2.23)	0.87 (0.71)	3.63 (3.76)	6.17 (2.90)
Forest floor	1.62 (0.29)	1.12 (0.26)	1.41 (0.44)	1.76 (0.87)
Soil organic carbon ^b	77.58 (9.84)	52.83 (20.10)	74.98 (9.55)	73.12 (2.79)
Ecosystem carbon stocks	302.73 (38.96)	260.28 (70.87)	342.86 (31.63)	228.97 (8.79)

^aNumbers in parentheses indicate standard deviation.

^bSoil organic carbon was measured in depth 0-30 cm.

表 9. 溪頭地區各個調查林分碳庫佔生態系統碳儲存量之百分比 (%)

Table 9 The ratio of each carbon pool in ecosystem carbon stocks.

	CJ53	CJ46	CJ33	CF29
Live trees	70.4	77.8	74.3	63.1
Understory	0.5	0.4	0.4	0.3
Snags	1.7	0.8	2	1.3
Woody debris	1.3	0.3	1.1	2.7
Forest floor	0.5	0.4	0.4	0.8
Soil organic carbon	25.6	20.3	21.9	31.9

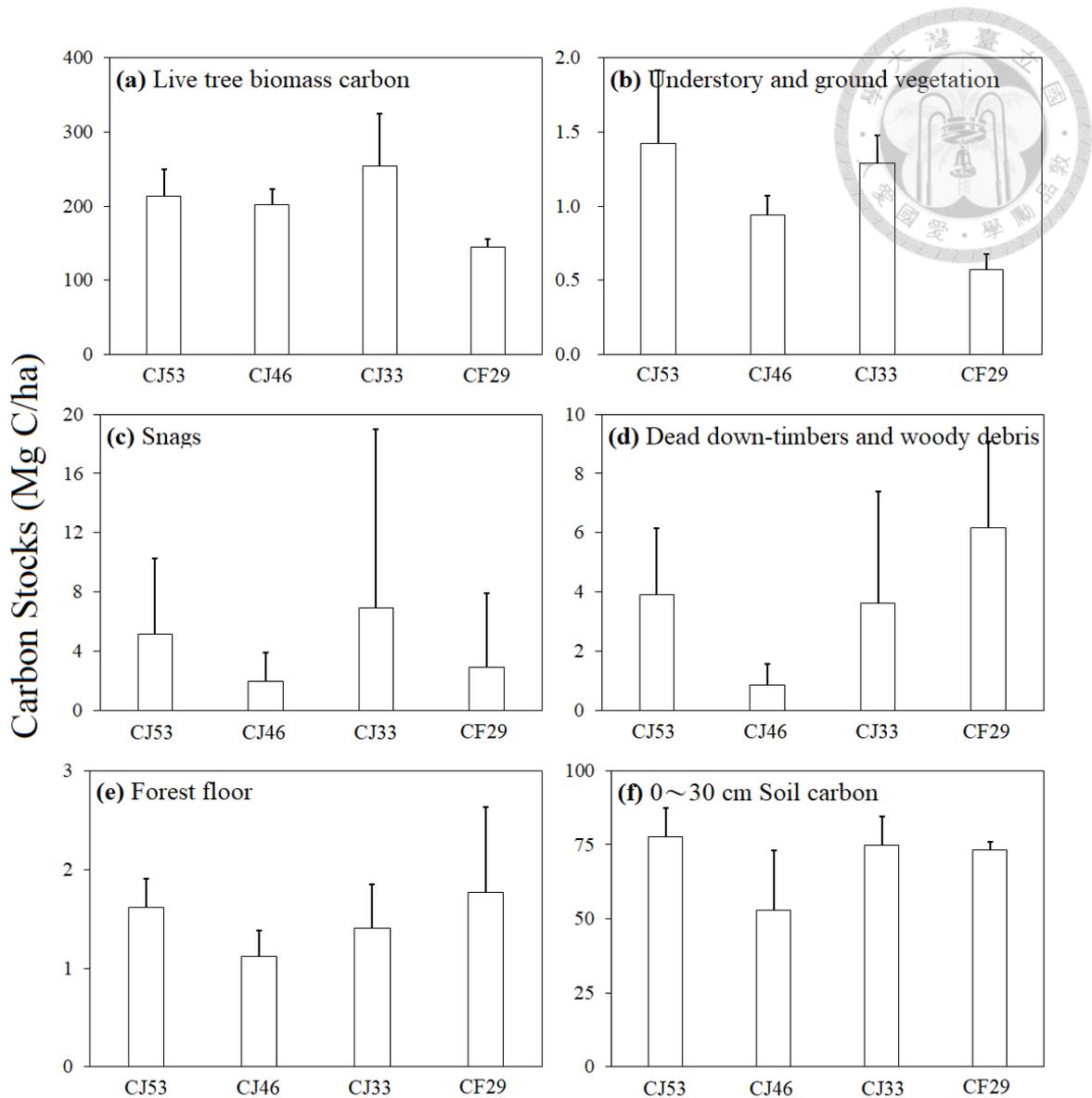


圖 14. 溪頭地區各個調查林分之各碳庫碳儲存量(Mg C/ha)。 (a) Live tree biomass carbon, (b) Understory and ground vegetation, (c) Snags, (d) Dead down-timbers and woody debris, (e) Forest floor, (f) 0-30 cm Soil organic carbon

Fig. 14 Carbon stocks in different carbon pools of each stand in Xitou.



1. 林木碳儲存量 (C_T)

各林分的林木碳庫碳儲存量 (C_T) 及其佔據比例分別為 213.0 (70.4 %)、202.6 (77.8 %)、254.6 (74.3 %)、144.4 (63.1 %) $Mg\ C\ ha^{-1}$ ，從結果中顯示，在各個林分之中皆是以生立活林木所儲存的碳佔據總碳儲存量最大的比例，其平均比例約為總碳儲量的 71%。和前面林分狀態的結果相同，隨著林齡增加，其林木碳儲存量明顯的增加。

2. 地被植物碳儲存量 (C_U)

各林分的地被植物碳儲存量 (C_U) 及其佔據比例分別為 1.4 (0.5 %)、0.9 (0.4 %)、1.3 (0.4 %)、0.6 (0.3 %)，平均比例約為總碳儲量的 0.4 %，佔總碳儲量的比例極少，於各林分之間差異不大，以 CJ53 的碳儲存量及佔據比例較多。

3. 枯立木碳儲存量 (C_D)

各林分的枯立木碳儲存量 (C_D) 及其佔據比例分別為 5.2 (1.7 %)、2.0 (0.8 %)、7.0 (2.0 %)、2.9 (1.3 %) $Mg\ C\ ha^{-1}$ ，平均比例約為總碳儲量的 1.4 %，各林分之間碳儲存量的差異大，以 CJ33 擁有最多的枯立木碳儲存量，而 CJ46 的碳儲存量則是最低的。

4. 枯倒木及木質殘骸、碎片碳儲存量 (C_{WD})

各林分的枯倒木及木質殘骸碳儲存量 (C_{WD}) 及其佔據比例分別為 3.9 (1.3 %)、0.9 (0.3 %)、3.6 (1.1 %)、6.2 (2.7 %)，平均比例約為總碳儲存量的 1.4 %，各林分之間碳儲存量的差異大，和枯立木不同的是，是以 CF29 擁有最多的枯倒木及木質殘骸碳儲存量，而 CJ33 和 CJ53 的碳儲存量相差不多，CJ46 的碳儲存量則最少。

5. 地表枯枝落葉層碳儲存量 (C_F)

各林分的地表枯枝落葉層碳儲存量 (C_F) 及其佔據比例分別為 1.6 (0.5%)、1.1 (0.4%)、1.4 (0.4%)、1.8 (0.8%)，平均比例約為總碳儲量的 0.5%，和地被植物碳儲存量 (C_U) 相同，其佔總碳儲量的比例極少且各林分之間差異不大，以 CF29 的碳儲存量及佔據比例較多。

6. 土壤有機碳儲存量(C_S)

各林分的土壤有機碳儲存量 (C_S) 及其佔據比例分別為 77.6 (25.6%)、52.8 (20.3%)、75.0 (21.9%)、73.1 (31.9%) $Mg\ C\ ha^{-1}$ ，於 4 個林分之結果中皆為第二大的碳儲存庫，平均比例約為總碳儲量的 25%。但是和林木碳儲存量 (C_T) 的趨勢不同，除 CJ46 的土壤有機碳儲存量為 52.83 $Mg\ C\ ha^{-1}$ 呈現偏低之外，其餘 3 個林分之間的土壤有機碳儲存量差異不大。從整體看來，土壤有機碳儲存量和林齡之間並無呈現相關性。

五、討論

(一) 各項林分狀態隨時間之變化

1. 林分狀態隨時間變化之特性與 Mistcherlich 生長模式比較

本研究結果顯示林分密度和林齡呈現高度線性負相關 ($R^2 = 0.72, p < 0.05$)，而平均胸高直徑 ($R^2 = 0.91, p < 0.05$)、平均樹高 ($R^2 = 0.78, p < 0.05$)、單木平均碳儲存量 ($R^2 = 0.42, p < 0.05$) 皆和林齡呈現高度線性正相關；林分碳儲存量 ($R^2 = 0.19, p = 0.07$) 和林齡呈現低度線性正相關；然而林分胸高斷面積卻是呈現無明顯相關性 ($R^2 = 0.003, p = 0.83$) (圖 5)。本研究所得出之結果，除林分胸高斷面積之於各調查林分林齡間呈現無相關性之外，其餘特性和前人溪頭地區之人工林分生長研究的結果相符合 (王亞男等, 2009; 劉素玲等, 2009; 王亞男等, 2010; 衛強等, 2010; 鄭景鵬等, 2010; 王亞男等, 2011)。

根據 Cheng et al. (2013) 的研究，該研究中於溪頭地區收集多個不同林齡的柳杉人工林林分資料，並將各項林分狀態數據隨時間之變化關係統整成對應的 Mistcherlich 生長模型，包含林分密度、平均胸高直徑、樹高、林分胸高斷面積以及碳儲存量，分別與林齡之對應關係，結果的各項 Mistcherlich 生長模型公式如下：

$$\text{林分密度：} \quad y = 360.2 \times (1 + 10.112 \times \exp(-0.0419 \times \text{age}))$$

$$\text{平均 DBH：} \quad y = 67.0 \times (1 - 0.9365 \times \exp(-0.0117 \times \text{age}))$$

$$\text{樹高：} \quad y = 30.2 \times (1 - 0.9481 \times \exp(-0.0323 \times \text{age}))$$

$$\text{林分胸高斷面積：} \quad y = 75.9 \times (1 - 0.9689 \times \exp(-0.0417 \times \text{age}))$$

$$\text{林分碳儲存量：} \quad y = 541.3 \times (1 - 0.9695 \times \exp(-0.0081 \times \text{age}))$$

(Cheng et al., 2013)



本研究所得之各項林分狀態與前述 Cheng et al. (2013) 的 Mistcherlich 生長模型所繪出之曲線相對應的結果如圖 15 中所示，在胸高斷面積和林齡變化關係方面，本研究林分所得出之結果是呈現無明顯相關性，然而前人研究以及 Mistcherlich 生長模型所繪出之曲線結果皆是和林齡變化呈現正相關，推測造成此結果差異之可能原因有：

- (1) 胸高斷面積容易受到林木密度、胸高直徑等其他因素變動之影響，而產生大幅度的變異。林分胸高斷面積之計算因子包含樣區中的林木株樹 (林分密度) 以及各株林木之個別胸高直徑，這些數據的觀測結果容易受到人為管理 (如：疏伐、收穫)、外在擾動 (如：颱風、崩塌) 以及林木自然死亡等因素而導致林木株數大幅減少。再者，林木株數較少的情況下，大徑級林木的死亡和小徑級林木比起，對於胸高斷面積的累積量其影響程度更大，一旦枯損死亡之後會造成林分活樹累積胸高斷面積的計算結果大幅下降 (梶原幹弘，1976；王亞男等，2011)，因此使得各調查林分胸高斷面積之結果產生較大的變異，而和林齡變化之間無明顯相關性。
- (2) 前項中林分胸高斷面積之 Mistcherlich 生長模型，本研究中調查林分所得出之結果多落在模型曲線中較後段的部分，根據模型的結果 (圖 15)，林分發展後期時其胸高斷面積之變化幅度會逐漸變小，顯示隨著林齡增加，因為林分密度下降以及單株林木胸高直徑增加的相互消長，長期看來林分之胸高斷面積會逐漸趨近於一穩定狀態，因此單看較後期的林分胸高斷面積與林齡之關係較容易呈現無相關性。

但另一方面，從個別單一林分的長期發展來看，絕大多數的調查林分及前人的溪頭長期試驗地研究結果 (王亞男等，2009；劉素玲等，2009；王亞男等，2010；衛強等，2010；鄭景鵬等，2010；王亞男等，2011)，胸高斷面積皆是隨著林齡增加而上升，表示在活林木株數穩定無變動的情況下，林木的胸高直徑仍在繼續成長，使得胸高斷面積能持續累積而呈現上升的趨勢。

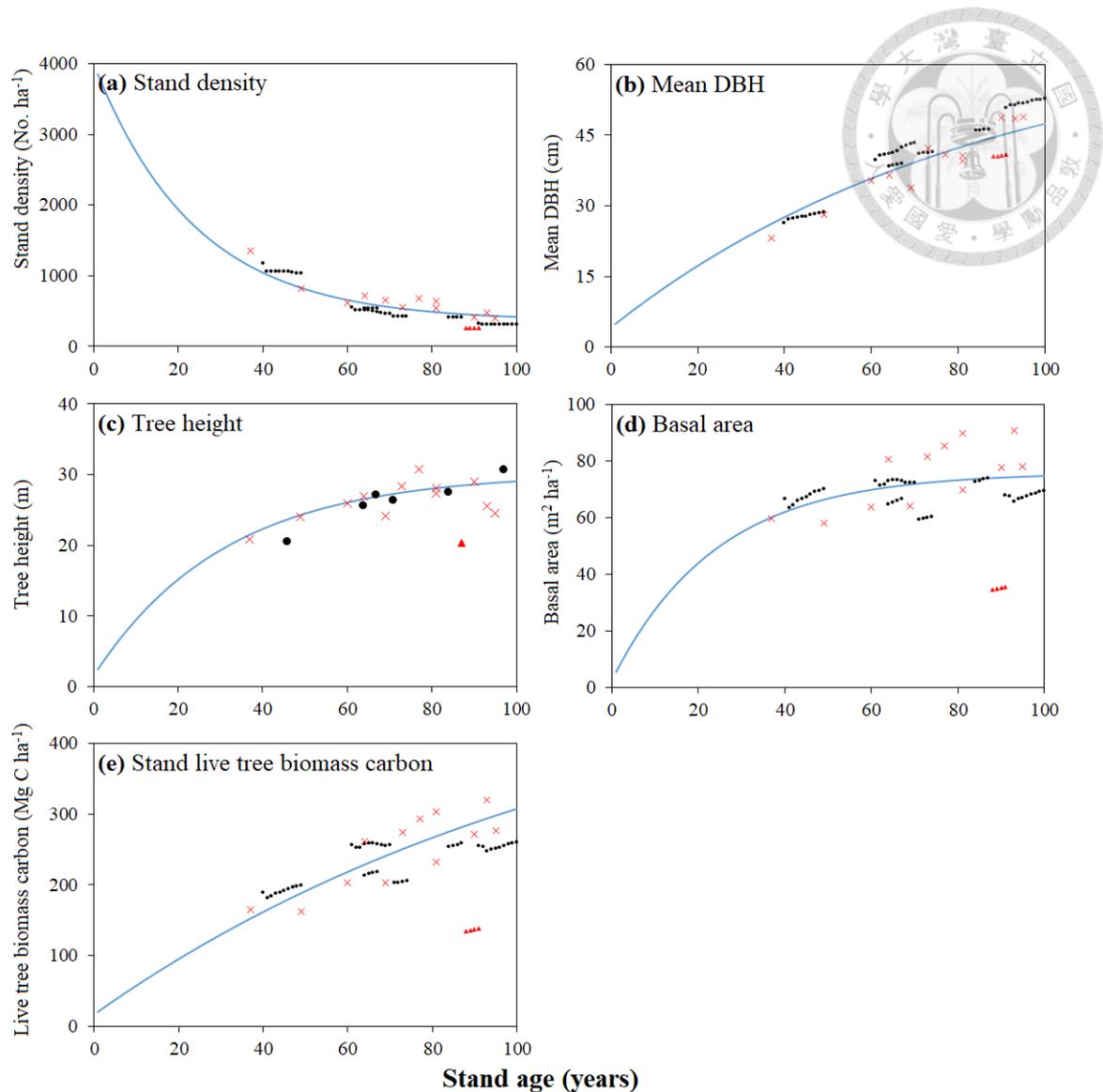


圖 15. 溪頭地區各個調查林分各年度的狀態 (2012~2020 年) 和 Mistcherlich 生長模型之對應。圖中藍色實線為 Mistcherlich 生長模型之曲線，黑色圓點為本實驗中調查的柳杉林分狀態之連年資料，包含 CJ73、CJ50、CJ20 之過去連年生長資料，紅色三角形為紅檜林分狀態之連年資料，紅色叉字為 Cheng et al. (2013) 中的數據資料。(a) Stand density, (b) Mean DBH, (c) Tree height, (d) Basal area, (e) Stand live tree biomass carbon

Fig. 15 Stand status of each stand in 2012-2020 and the Mistcherlich growth model from Cheng et al. (2013). Bule line is the curve of the Mistcherlich growth model, the black points are Japanese cedar stands and the red triangles are red cypress. The red crosses are data from Cheng et al. (2013).



2. 林分之樹高結構

本研究中林分的平均樹高和林齡呈現正線性相關，從 Mistcherlich 模型相比的結果 (圖 15) 來看，CJ73 之樹高仍有繼續生長發展之空間，其餘林分之樹高則已趨近於模型預測的高度。

石井洋二等 (2005) 於福島縣研究高齡柳杉的樹高成長，同樣也繪製出一 Mistcherlich 樹高生長模型，其 Mistcherlich 生長模型公式及各齡級所對應之樹高結果如下所示：

$$\text{樹高} : H = 40.5276 \times (1 - 1.0355 \times \exp(-0.0178 \times \text{age})) \quad (10)$$

(石井洋二等, 2005)

表 10. 石井洋二等 (2005) 及 Cheng et al. (2013) Mistcherlich 生長模型結果比較

Table 10 Mistcherlich tree height models of Ishii et al. (2005) and Cheng et al. (2013).

Age	60	65	70	75	80	85	90	95	100	Reference
Tree Height (m)	26.1	27.4	28.5	29.5	30.5	31.3	32.1	32.8	33.5	石井洋二等 (2005)
Age	60	65	70	75	80	85	90	95	100	Reference
Tree Height (m)	26.1	26.7	27.2	27.7	28.0	28.4	28.6	28.9	29.1	Cheng et al. (2013)

本研究之各林分樹高結果和石井洋二等 (2005) 的 Mistcherlich 樹高生長模型相比，本研究林分之平均樹高皆呈現稍低，另根據鄭景鵬等 (2014) 溪頭長期試驗地之樹高曲線研究的生長模型結果顯示，溪頭地區百年樹高生長紀錄中，上層木擬合的樹高漸進線為 31.9 m，並推估出在林分於 62.4 年生之後進入生長停滯。

王亞男等 (2012) 提出溪頭地區之紅檜 DBH-樹高曲線式及樹高生長模式，顯示其最大生長速率發生在幼齡期，且從生長模型及觀測植的結果得知，紅檜樹高的生長潛能值可達到 30 m。本實驗 CF29 之平均樹高為 20.3 m，平均 DBH 為 40.5 cm，和該研究結果相比，CF29 在樹高及 DBH 上皆仍有可繼續生長的空間，未來仍有繼續增高的潛力。



於日本的屋久島，當地 1000 年生以上之柳杉老齡林之模型推估平衡樹高為 17.5~29.2 m、觀測最大樹高為 28~36.8 m，推算出平均的樹頂損失率為 20.6~48.5 % (Takashima et al., 2009)；Ishii et al. (2010) 同樣位於屋久島的柳杉老齡林研究中，也得出了平均樹高 25.2~25.9 m、觀測最大樹高為 36.0~37.7 m 的結果，且有許多的老齡柳杉有樹頂多次遭到風害折損並復原的情況。

另一方面，竹内郁雄等 (2003) 及竹内郁雄 (2005) 在奈良縣川上村針對林齡 101~229 年生柳杉老齡林的研究中，林齡近 230 年生的柳杉老齡林平均胸高直徑可達到 103 cm 以上，平均樹高近 50 m，且根據其研究得出之預估模型所示，這些柳杉林分的樹高仍有成長的空間；西園朋広等 (2006) 於秋田地方 244 年生的天然柳杉林研究中，最大的林木個體胸高直徑可達到 150 cm、樹高 50 m；石井洋二和齋藤寬 (2005) 於福島縣之高齡柳杉樹高研究中，80 年生以上甚至 110 年生以上的柳杉林分，其上層木平均樹高為 27~37.5 m，且同樣根據模型推估，這些柳杉林分的樹高仍有成長的空間。

從以上這些例子來看，可見風害及其他環境擾動對於樹高生長限制之影響。鄭景鵬等 (2014) 中更推測目前溪頭地區之柳杉觀測樹高並未達到該有之高生長上限，是受到風害或是鼠害影響所限制；而在日本地區的研究中，福島、奈良、秋田等地區和屋久島比起，遭受颱風侵襲的頻率較低，因此柳杉受到擾動較小使樹高較高。

總上所述，以本研究之各個調查林地的現況而言，多數林分的樹高發展已接近後期，樹高結構的變化應會逐漸趨緩並趨近於一穩定高度，之後的林分生長量增加主要將會以林木的胸高直徑增長為主。

3. 林分之枝下高、樹冠長和樹冠幅

根據前人之樹冠特性研究，大多都指出林木之樹高、枝下高、樹冠長以及樹冠幅皆和 DBH 呈現顯著的正相關性 (顏添明等，2006；大野泰之等，2008；橫井秀一和早川幸治，2011；橫井秀一等，2011)，也有指出枝下高、樹冠長以及樹冠幅會和樹高呈現正相關這樣的結果 (梶原幹弘，1976)。而本研究所得之各項樹冠特性結果和 DBH 對應之間的相關性中 (圖 7)，平均後生枝下高 ($R^2 = 0.09$, $p = 0.24$) 及樹冠長率 ($R^2 = 0.12$, $p = 0.15$) 和 DBH 無呈現明顯的相關性。

梶原幹弘 (1976) 研究日本柳杉同齡林之結果，指出樹冠的各項特性隨林分發育階段之變化，枝下高、樹冠長以及樹冠幅和林分平均樹高呈現正相關，但樹冠長之斜率較低；樹冠長率則和林分平均樹高呈現右偏之鐘形曲線，在平均樹高 5 m 處有最大值，之後隨著平均樹高增加會漸漸趨於一穩定值。

台灣其他關於樹冠研究的結果，八仙山地區 19~55 年生的杉木平均枝下高為 4.89~12.55 m、平均樹冠長為 4.91~15.42 m、平均樹冠幅為 3.67~9.27 m，均隨 DBH 徑級及林齡而增加 (顏添明等，2006)；巒大事業區的柳杉平均枝下高為 6.55~11.30 m、平均樹冠長為 6.94~9.72 m、平均樹冠幅為 3.13~4.77 m，但是該林分曾施作過人工修枝，因此皆和 DBH 徑級呈現無顯著相關 (陳洳婷等，2010)。日本研究方面，國崎貴嗣和白旗学 (2014) 研究日本 12 個 51~59 年生的柳杉過密壯齡人工林，其平均樹冠長為 4.1~7.7 m、平均樹冠長率為 18~32%，和無間伐的幼齡林比起稍微較長些。

而本研究所得之柳杉平均枝下高為 13.9~18.8 m、平均樹冠長為 6.8~12.3 m、平均樹冠長率為 29.6~43.2%、平均樹冠幅為 3.7~5.3 m，和前人結果相比起，平均枝下高偏高、樹冠長及樹冠幅則大致相符，但樹冠長及樹冠長率比國崎貴嗣和白旗学 (2014) 的研究來的高。



根據臺大實驗林管理處之造林臺帳紀錄，本研究所選取之各柳杉人工林地皆有施做過疏伐、間伐、障礙木整理或是木材生產等人為擾動，推測結果所得之平均枝下高偏高可能就是受到這些人為管理活動影響，且這些人為擾動有可能就是造成 DBH 與部份樹冠特性參數之相關性不顯著的原因 (陳滄婷等，2010)。

顏添明等 (2006) 指出林木之樹冠幅和 DBH、樹高及樹冠長率呈正相關，本研究所得之結果 (圖 7) 也是和 DBH 呈現正相關。另外本研究發現 CF29 的林木在相同 DBH 之下，其樹冠幅明顯大於各柳杉林分，推測此差異應為林分密度之影響，密度較大者因其林內空間較窄小，林木在彼此競爭影響之下以高生長為主，樹冠橫向伸展的情形較少，造成林木樹冠幅偏低。將 7 個林分之林分密度和其樹冠幅進行相關性分析後，得出相關係數 $r = -0.62$ ($p < 0.05$)，呈現負相關，可見除上述幾項林分特性外，林分密度應也是影響林分樹冠幅因子之一。

平均樹冠長及平均樹冠長率皆比國崎貴嗣和白旗学 (2014) 的研究高，原因可能是溪頭柳杉林並非像該研究之對象為過密柳杉林，本研究之柳杉林密度為 $308 \sim 1038$ 株 ha^{-1} ，而該研究之林份密度為 $725 \sim 1350$ 株 ha^{-1} ，且同時該研究也推算如經過疏伐後，可顯著增加林分之平均樹冠長，因此本研究之結果偏高的原因應是來自於較低的林份密度所影響，也反應出較寬闊的空間有利於樹冠之生長。另外，根據日本林野廳之建議，針葉樹人工林之樹冠長率應為 40% 以下 (准フォレスタ-研修基本テキスト作成委員会編，2013)，本研究所得之結果稍微高出該建議數值，但除了 CJ50 為 43.2% 之外，其餘的林分皆落於 40% 以下，仍算是符合其建議。



總和以上幾點，可得知林分樹冠發育隨時間變化之特性，隨著林齡增加，DBH、樹高會逐漸增加，而枝下高、樹冠長、樹冠幅也會隨之增加且會和其林木之 DBH、樹高呈現正相關性。而樹冠長率在林分發展初期會快速增加至一高峰點，之後隨著林木樹高的快速增加，樹冠長率會逐漸下降，至林分發展後期時，樹高和枝下高會逐漸趨近一穩定值，因此樹冠長率也會隨之趨於穩定。但是枝下高、樹冠長、樹冠長率以及樹冠幅容易受到擾動的影響，例如颱風、人工修枝、伐採等，這些擾動皆會導致樹冠的型態改變。另外林份密度也會影響樹冠之生長，較高的林份密度之下樹冠長、樹冠長率以及樹冠幅會偏低，但如經由施做疏伐等撫育措施之後，能疏開林分空間並促使樹冠發展，使樹冠長、樹冠長率及樹冠幅增加。

4. 林分之後生枝

後生枝指位於林木活樹冠最下方所著生的正常枝或力枝之下的後生枝條，通常為獨立、稀疏、枝齡較年輕且和樹冠不連續的枝條。在林業木材生產上，後生枝的出現會使木材出現多餘的節，而讓木材製品的品質下降 (竹內郁雄，2004)。關於後生枝的發生及其形態，根據竹內郁雄 (2004) 的研究中指出，在林分密度較低、間伐強度較大的林分中，其枝下高低下量 (正常枝的枝下高-後生枝下高) 及枝下高率 (枝下高/樹高) 皆會呈現偏高，且後生枝發生的個體數量比例也較多。

石川實等 (2000) 研究複層柳杉林中後生枝發生的型態，其林分中調查的林木個體林齡為 73~124 年生、DBH 52.5~95.0 cm、樹高 25.7~38.7 m，研究結果枝下高 11.2~17.5 m、後生枝下高 4.8~13.8 m、枝下高低下量 0.4~7.1 m，一般正常枝的枝直徑和著生高度成負相關，而後常枝的著生高度皆較低且枝直徑和著生高度無關、但和枝齡呈正相關。谷口真吾和前田雅量 (2002) 研究 3 個 87~98 年生的柳杉林分，結果發現其中有發生後生枝的林木個體比例為 86.5~98.7%，後生枝下高為 4.3~9.6 m，但是後生枝發生個體比例卻是和林分密度呈正相關。



本研究中各柳杉林分之平均後生枝下高為 7.1~12.8 m，有發生後生枝的林木個體比例為 10.6~85.7%，分別以最年輕的 CJ73 比例最低及最老的 CJ20 比例最高，但就前述各項特性來說，發生個體比例或是枝下高低下量等皆和林齡、密度無相關。

目前關於後生枝是如何發生的尚無一定論，推測可能的原因有變弱的頂芽優勢、較高的開芽率、樹幹內的不定潛伏芽、林內光照環境的變化等等 (菊沢喜八郎, 1995; 橫井秀一和山口清, 1996)，因此較難以解釋後生枝的發生在樣區間發生的變異或是和其他林分特性的關係，但是後生枝的發生能透過人工修枝、降低間伐強度等方式來減少其發生比例。

梶原幹弘 (1975) 研究日本地區柳杉同齡林的樹冠型態，將柳杉的樹冠依據枝條型態及功能分成：樹冠上部呈現圓錐體的陽樹冠以及下部呈現圓柱體的陰樹冠。於本研究的柳杉林分中，少數林木個體有出現難以判別後生枝的情況，其樹冠型態皆為樹冠幅較窄且枝條短小、上下連續樹冠長度較長，無明顯集中的樹冠層或是力枝、正常枝、後生枝的差別，因此在林分調查時將其同時視為枝下高以及後生枝下高。根據梶原幹弘 (1975) 研究中的描述及定義，此應屬於其所定義的樹冠下部連續呈圓柱體之陰樹冠，而非真正的後生枝。



(二) 老齡人工林的生長量及其枯落物量

1. 林木生長量

本研究中老齡林林分的林木生長量結果為 2017 年度：0.91~2.25 Mg C ha⁻¹ yr⁻¹，紅檜為 0.62 Mg C ha⁻¹ yr⁻¹；2018 年度：0.81~2.14 Mg C ha⁻¹ yr⁻¹，紅檜為 1.42 Mg C ha⁻¹ yr⁻¹；2019 年度：0.88~1.92 Mg C ha⁻¹ yr⁻¹，紅檜為 1.53 Mg C ha⁻¹ yr⁻¹。從結果上來看，年度間柳杉林分的平均生長量大致相同，和其他前人研究的結果 2.9~8.5 Mg C ha⁻¹ yr⁻¹ 相比，所有試驗年度的林木生長量皆呈現偏低 (洪志佑，2012；蘇泓銘，2013)。

生長量上仍以較為年輕的 CJ73 為最高，調查 3 年期間的林分平均生長量約為 2.2 Mg C ha⁻¹ yr⁻¹，至於其他的柳杉林分年度間的生長量變化較大，各林分年度間之生長量相比有增加、降低或持平的狀況，但是整體而言多數林分 2018 年的生長量較 2017 年來的低，而 2019 年的生長量較 2018 年來的高。

根據 CJ73、CJ50 及 CJ20 從 2012 年至 2019 年過去的連年生長量資料來看，最近 8 年內 (圖 11) 之林分生長量或是單株林木生長量皆是以 2013 年度為最高峰值，並在隔年 2014 年度大幅下降呈現最低值，之後的 2015 年以及 2016 年度的生長量皆有逐年明顯的上升，至 2017~2019 年間則年度生長量停止上升並開始逐漸下降，CJ20 則在 2019 年之年度生長量有出現上升的情形。

高橋宏明 (1970) 根據伐木跡地之頭木年輪回推林木歷年之生長狀況，發現在相同的氣候環境之下，雖然各林分的生長量有所不同，但是生長量隨年分之趨勢變化是相同的，說明在同樣地區的不同林分，生長量較高及較低的年份是大約一致的。圖 11 的 CJ73、CJ50 及 CJ20 林分連年生長量變化中也能看到相同的結果，不同林分的連年生長量高低變化大約相同，因此根據該研究來看這樣的變化趨勢，可以推測其他 4 個調查林分不同年度間的生長量上升、下降的現象，也是因為相同的變化趨勢。



除此之外，調查期間的林分生長量變異推測可能也和這3年的氣候因子有關，根據前人研究，可能影響的包含月(年)雨量、月(年)均溫、月最高(低)溫、光照、緯度等等許多因子(高橋宏明，1971；川崎達郎和竹內郁雄，1993；Nishizono et al., 2018; Pélissier & Pascal, 2000)，但在本研究中，各個林分所處之位置皆位於溪頭地區，因此對於所有的林分來說，這些雨量、溫度、光照、緯度等氣候因子可視為完全相同。

高橋宏明(1971)透過伐木跡地之頭木年輪研究直徑成長和氣象因子之關係，得出柳杉該年之生長量和6月份的降雨量以及2、3月之氣溫有關，但也得出了許多不合理無法解釋的和氣象因子呈顯著負相關之結果。本研究試將各林分的年生長量資料，包括CJ73、CJ50、CJ20的8年生長資料以及CJ53、CJ46、CJ33、CF29的3年生長資料，和該年度以及前年度之年雨量、生長季雨量、年均溫、生長季均溫、年日照時數、生長季總日照時數、年日照輻射量、生長季總日照輻射量等氣象資料互相對應進行相關性分析。結果顯示除林分生長量和前一年之降雨量之對應有部分吻合之外，其餘皆無呈現明顯相關性，但是生長量和前一年降雨量多寡之對應仍有許多無法解釋不合理之處，因此仍然視為無關係。

推測在溪頭影響這些老齡林分林木生長量多寡的因素中，林木大小的因子可能比起環境因子更加相關(圖9)，Masaki et al. (2006)的研究也得出單株林木生長量多寡和其胸高直徑(DBH)或是胸高斷面積(BA)大小呈現正相關的結果，由此可見在這些林分之中，林木之生長量多寡受到大小的影響。

關於林木大小因子影響生長量，許多研究皆指出林木胸高直徑和樹高呈正相關，也有指出林木胸高直徑和樹冠幅、樹冠長等呈正相關，而林木的胸高直徑也和葉部生物量呈正相關(李訓煌，1978；游漢明，1981)，竹內郁雄等(2007)則指出葉部生物量和林木之 $DBH^2 \times H$ 呈正相關，因此胸高直徑較大的林木個體，往往也會擁有較高的單株樹高、較寬的樹冠幅以及較多的葉部生物量(圖8及圖10)，這些條件使得林木能獲取更多的資源，而呈現較高的生長量。

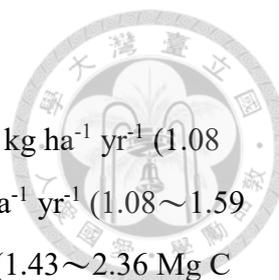


各林分之生長量方面最老的 97 年生 CJ20，其林木生長量並無明顯低於其他年輕的林分，甚至其高過部分調查中其他較為年輕的林分，平均單木生長量也是全部林分中最高的。從 2017~2019 年 3 年的或是連年生長量資料中可發現在同一年度各林分之間有生長量的變異，且該變異之變化和林齡之間並無相關性。

造成這些生長量變異可能的原因推測有各個林分所生長的微環境，即地位因子 (Site index) 的不同所導致的，另一個可能原因是由於各林分之林木生理不同所致 (Delpierre et al., 2016)，但是本研究中並沒有詳細測定各林分之中的微氣候因子，而林木生理的差異更是無法得知。但可根據表 2 林分土壤性質概況和表 8 林分生態系統碳儲存量資料推測，CJ46 的土壤碳含量比例及儲存量和其他林地比起明顯較低，這可能是導致 CJ46 的林分生長量為柳杉林分中最低者的原因。

另一方面，CJ20 主要因於其林分有較大的胸高直徑及樹高，使其平均單木生長量非常高，但是因為林份密度較為稀疏，以整體林分的觀點來看其生長量並不是最高的，但從連年生長量 (圖 11) 顯示其生長並沒有停滯，仍有在持續吸存二氧化碳。

CJ20 已是林齡近百年的老齡林分，其平均胸徑於 2020 年時已達到了 52.7 cm，將來一旦有林木枯損死亡，對於林分材積量及碳儲存量的累積皆會造成大量損失，這是在老齡森林中導致林分生物量累積大量減少的主要原因 (Xu et al., 2012)。



2. 枯落物量

柳杉林分之枯落物量，2017 年為 2,191~2,810 kg ha⁻¹ yr⁻¹ (1.08~1.38 Mg C ha⁻¹ yr⁻¹)、2018 年為 2,134~3,234 kg ha⁻¹ yr⁻¹ (1.08~1.59 Mg C ha⁻¹ yr⁻¹)、2019 年為 3,507~4,812 kg ha⁻¹ yr⁻¹ (1.43~2.36 Mg C ha⁻¹ yr⁻¹)；而 CF29 則為分別為 6,814、5,248、5,307 kg ha⁻¹ yr⁻¹ (3.36、2.64、2.73 Mg C ha⁻¹ yr⁻¹)，扣除闊葉樹枯落物之量為 5,533、4,573、4,559 kg ha⁻¹ yr⁻¹ (2.73、2.25、2.25 Mg C ha⁻¹ yr⁻¹)。

根據劉威伶等 (2018) 的研究結果顯示，溪頭地區的平均年枯落物量為 3,867 kg ha⁻¹ yr⁻¹，在不同植生種類間，以柳杉、台灣杉以及紅檜人工林樣區枯落物量相對較高，年枯落物量介於 4,123~4,702 kg ha⁻¹ yr⁻¹ 之間，且一年中以颱風及梅雨季期間的枯落物量為最高。加上洪志祐 (2012)、蘇泓銘 (2013) 之結果相比，本研究柳杉林分枯落物量之結果可明顯看出偏低，而紅檜之枯落物量則是和劉威伶等 (2018) 的結果相近 (4,549~4,671 kg ha⁻¹ yr⁻¹)。

本研究枯落物收集期間 2017 年 3 月至 2020 年 3 月之內，溪頭地區因無受到颱風之侵擾，造成柳杉枯落物量較前人研究低，其中柳杉、紅檜等常綠樹木之枯落物量，已有許多研究指出其枯落物量容易受到外來擾動 (例如：颱風、豪雨) 的影響而大幅增加 (蕭怡茹和王立志，2005；竹內郁雄等，2007；林國銓等，2009；佐藤保等，2018；劉威伶等，2018；Cheng et al., 2020)，因此本研究所得之結果少了此一最主要的機械外力影響而使枯落物量下降。

根據劉威伶等 (2018) 的結果，2015 年及 2016 年颱風侵襲所貢獻之枯落物量分別可達到 2,707、1,938 kg ha⁻¹，佔全年生產量之 66% 及 53%；竹內郁雄等 (2007) 的研究則指出颱風前後，林木樹冠層損失的落葉量可達到原本生物量之 5.1~7.5%；Cheng et al. (2020) 指出遭颱風侵襲之月份，枯落物量可超過 4,000 kg ha⁻¹，佔全年生產量 70% 以上，並且有受颱風侵襲年分之年枯落物量可達無受颱風侵襲年分的 2 倍以上。從以上前人研究，可見颱風影響年度枯落物量之大。



在此情況之下，本研究期間會影響枯落物量多寡之最主要因子推測應為降雨量之多寡，將各林分之各月份枯落物量和該月份之降雨量進行相關性分析，得出柳杉各林分枯落物量和該月份降雨量之相關係數 r 介於 $0.39\sim 0.65$ ($p < 0.05$)，為中度正相關。溪頭地區之主要降雨月份為 4~9 月份，而本研究柳杉枯落物量主要集中於 3 月至 8 月份這段時間內，在時間尺度上相當符合，由此可見降雨為影響本研究期間枯落物量多寡最主要之機械外力因子。

另一方面，CF29 各月分枯落物量反而則和該月份降雨量呈現無相關性，是因為紅檜之枯落物量主要集中於 12 月至隔年 4 月 (圖 12)，有出現冬季季節性落葉及春季葉部更新之現象，其他前人研究也有發現同樣之季節性落葉現象 (林亨勳, 2008; 劉俊毅, 2008; 林熾真, 2014)，加上紅檜之枯落物量和柳杉相同，同時也會受到颱風、降雨等擾動之影響，於 4~9 月份的雨季期間，枯落物量也有出現一小高峰，但是最主要的生產量貢獻仍然大多數集中於 12 月至隔年 2 月的冬季落葉期間以及次之的 3、4 月春季葉部更新及春雨。林熾真 (2014) 的研究中指出紅檜會因冬季之低溫以及於初春時更換新葉而使得落葉量增加，而林亨勳 (2008) 則指出紅檜之各月份枯落物量會和該月份之月均溫呈現負相關，根據此資訊，將本研究 CF29 之各月分枯落物量和該月份之月均溫進行相關性分析後，得出其相關係數 $r = -0.64$ ($p < 0.05$)，為中度負相關，此結果和前人研究之結果相符合。



另外從柳杉和紅檜所收集到的枯落物型態中，可觀察到柳杉之枯落物大多為大小枝條連帶其他部位如毬果等整個掉落的形式，而紅檜之枯落物多以細碎之小葉以及細小的枝條等形式掉落（圖 16），這樣不同的掉落物形式推測應也和枯落物量有關。柳杉的葉和小枝枯死後不會立即脫落，在遭遇暴雨和強風時才加速脫落掉至地面形成枯落物（林國銓等，2009；Cheng et al., 2020; Matsushita et al., 2017; Yoshida and Hijii, 2006）。在溪頭地區也可觀察到許多的柳杉上有不少的枯枝掛於其樹冠上，這些枯枝如不受到外力影響可於樹冠上持續存在一段時間，在遇到颱風、降雨等機械外力影響之後，掉落至地面而被收集成為枯落物量；而紅檜的掉落物多為細碎之小葉以及細小的枝條，十分容易從樹冠上脫落，因此即使沒有明顯的機械外力影響，仍然會有不少的枯落物量，這樣不同樹種的枯落物量差異對比，在溪頭冬季的乾季時期尤其明顯。

CF29 之中，闊葉樹所貢獻之枯落物量在 2017~2019 年分別可達到 1,281、794、981 kg ha⁻¹ yr⁻¹，佔全年總生產量之 15~19%，其中闊葉樹枯落物之種類包含假長葉楠、瓊楠、五掌葉新木薑子、長葉木薑子、大葉石礫等中大型林木，以及菝契等藤本植物之葉、藤部分。CF29 擁有相對較多量以及比例闊葉樹枯落物之原因，推測應是因為其林分密度相較調查其他的柳杉林分來得低，使得林下擁有較多的空間和光照，讓其他的闊葉樹更容易入侵進入林下生長，本研究 CF29 樣區之中就有包含數棵高大的闊葉樹，以及許多其他的中小型闊葉樹地被植物，造成了該林分擁有較高的闊葉樹枯落物量。



圖 16. 本實驗所收集之枯落物樣品照片。圖中左邊為柳杉之枯落物，型態多為一段完整之小枝條整個掉落為主；圖中右邊為紅檜之枯落物，型態多為細碎之小葉及部分細長的小枝為主。

Fig. 16 Photo of litterfall samples. Left side are Japanese cedar litterfall, most of the litterfall are branchlets. Right side are red cypress litterfall, most of the litterfall are small, fragile leaves and some long branchlets.

(三) 老齡人工林的生態系統碳儲存量及其各部分碳儲存量

本研究調查林分之中，僅有 CJ53、CJ46、CJ33 以及 CF29 進行生態系統碳儲存庫之調查和採樣，除林木碳儲存量 (C_T) 會加入其餘 3 個林分，CJ73、CJ50 及 CJ20 的結果共同進行討論外，其他碳儲存庫之討論僅包含前述 4 個林分的結果。

1. 林木碳儲存量 (C_T)

林木的碳儲存量 (C_T) 為森林生態系統中最主要的碳庫，通常在發展後期的老齡森林中，生立木的碳儲存占最大宗，在調查結果中其平均比例約占生態系統總碳儲量的 71%，在各林分間所占比例為 63.08%~77.82%，皆為最大宗比例的碳庫，而表層 0~30 cm 土壤有機碳為第二大之碳庫。

根據前人研究，生立木和土壤之碳含量比例次序可能會因為所調查的林齡、氣候、環境、植生種類或是調查、計算方法等因素不同，其中尤其是土壤部分變異最大。本研究之結果和其他多數前人研究結果相同，以為生立木為最大比例之碳庫 (Badalamenti et al., 2019; Baishya & Barik, 2011; Granata et al., 2016; Gray et al., 2016; Hoover et al., 2012; Lü et al., 2010; Nord-Larsen et al., 2019; 渡邊仁志和茂木靖和, 2005a, 2005b; 洪志祐, 2012)，而有些調查結果以土壤為最大比例之碳庫 (Cai et al., 2016; Qi et al., 2016; Qi et al., 2010)。



本研究中 6 個柳杉林分林齡介於 46~97 年生，生立木碳儲存量為 195~258 Mg C ha⁻¹，洪志祐 (2012) 37~90 年生柳杉林分之生立木碳儲存量為 165~272 Mg C ha⁻¹；溪頭地區其他各試驗林地，依長期生長報告最後一年的總蓄積量結果，以本研究之碳儲存公式、假設 C 含量為 50 % 換算而得生立木碳儲存量分別為：三叉崙地區 74 年生柳杉林為 168 Mg C ha⁻¹ (王亞男等，2010)；觀音樹湖地區 81 年生柳杉林為 221 Mg C ha⁻¹；溪頭湖地區 97 年生柳杉林為 263 Mg C ha⁻¹ (王亞男等，2011)；門田地區 93 年生柳杉林為 337 Mg C ha⁻¹ (劉素玲等，2009)；西川地區 99 年生柳杉林為 257 Mg C ha⁻¹ (衛強等，2010)；清水溝線浸地區 93 年生柳杉試驗地為 205 Mg C ha⁻¹ (王亞男等，2009)；杜清澤等 (2011) 於南投縣巒大事業區人倫地區的 36 年生柳杉林為 135 Mg C ha⁻¹ (假設 C 含量為 50 % 換算)。

溪頭地區各長期試驗地報告之結果中，林木蓄積量皆是利用 DBH² × H × 形數 (form factor) 的方式進行計算，和本研究所採用的材積迴歸公式計算方法不同，且長期試驗地的造林面積很小且無重複性，因此在放大成一公頃單位計算之下，很有可能會出現偏差產生低估或是高估的情形，因此有像門田地區這樣，儲存量高過本研究及其他大多研究的例子。

本研究之結果和前人研究相比，和其他在溪頭地區柳杉的碳儲存量研究結果大致相同，生立木碳庫最大者為 67 年生的 CJ50、258 Mg C ha⁻¹ 以及 97 年生的 CJ20、256 Mg C ha⁻¹，其中 CJ50 的平均生立木碳庫儲存量高過其他研究中相近林齡的柳杉林，甚至大於部分造林時間較久的造林地；而 CJ20 為本研究中林齡最老的林分，和同一地區林齡相近的溪頭湖、西川地區結果相似，比門田地區來的低。



而日本地區柳杉碳儲存的相關研究為：岐阜縣地位 1 等 37 年生柳杉林為 275.5 Mg C ha⁻¹ (渡邊仁志和茂木靖和, 2005b)；岐阜縣地位 1 等 39 年生柳杉林為 300 Mg C ha⁻¹ (渡邊仁志和茂木靖和, 2005a)；秋田縣地位 4 等 77 年生柳杉林為 155 Mg C ha⁻¹ (假設 C 含量為 50 % 換算) (澤田智志等, 2005)；奈良縣 88 年生柳杉林為 163 Mg C ha⁻¹ (假設 C 含量為 50 % 換算) (Tateno et al., 2009)；茨城縣地位指數 24, 48~78 年生柳杉林為 275~365 Mg C ha⁻¹；群馬縣地位指數 18, 16~51 年生柳杉林為 172~243 Mg C ha⁻¹；靜岡縣地位指數 17, 31~92 年生柳杉林為 236~273 Mg C ha⁻¹ (以本研究之碳儲存公式、假設 C 含量為 50 % 換算) (細田和男等, 2012)；秋田縣地位 1、2 等 83~95 年生柳杉林為 292~590 Mg C ha⁻¹ (以本研究之碳儲存公式、假設 C 含量為 50 % 換算) (大住克博等, 2000)；岩手縣地位 1、3 等 153 年生柳杉林為 356~387 Mg C ha⁻¹ (以本研究之碳儲存公式、假設 C 含量為 50 % 換算) (國崎貴嗣等, 1999)；秋田縣 244 年生柳杉林為 532 Mg C ha⁻¹ (以本研究之碳儲存公式、假設 C 含量為 50 % 換算) (西園朋広等, 2006)。

日本地區之地位等級指標在各縣市之間有所差異，且林分各項狀態，如：密度、樹高、蓄積量、生長量等，也有各自的地位等級指標依據，因此同一生育地環境可能會有多個地位等級。本研究林地之結果和日本的柳杉研究相比，單以林分碳儲存量方面來看，高過前述秋田縣地區相近林齡的地位 3 等和 4 等生育地環境下的柳杉林分，但和地位 1 等、2 等生育地的柳杉林相比起仍然有不少的差距。

國崎貴嗣等 (1999) 和西園朋広等 (2006) 的研究中，日本地區百年以上的老齡柳杉林因著較高的林分密度、較大的胸高直徑和較高的樹高，可達到十分大量的林分蓄積量，也代表著大量的碳儲存量。從本研究之結果來說，溪頭地區的柳杉林分狀態，林分樹高大多已接近上限，將來樹高的成長空間可能有限，但藉由胸高直徑的成長，生立木碳儲存量仍然有增加的可能性。

2. 枯立倒木及木質殘骸、地被植物及地表枯枝落葉層碳儲存量 (C_D 、 C_{WD} 、 C_U & C_F)

本研究中枯立倒木、木質殘骸、地被植物及地表枯枝落葉層這 4 個碳庫的碳儲存量總和平均約佔生態系統總碳儲存量的 3.9%，之中又以枯立倒木 (C_D 、 C_{WD}) 佔大多數，兩者合計平均約佔生態系統總碳儲存量的 2.8%，為除了生立木 (C_T) 以及土壤有機碳 (C_S) 之外第三大的碳儲存庫。

某些研究認為和生立木或土壤有機碳儲存庫相比起，地被植物所含之碳儲存量 (C_U) 佔整體生態系統碳儲存量的比例過少，在估算全生態系統碳儲存量上應可以忽略不計 (Lü et al., 2010)。

本研究中 CJ53、CJ46、CJ33 和 CF29，4 個林分的平均地被植物總碳儲存量為 $1.06 \text{ Mg C ha}^{-1}$ ，平均約佔生態系統總碳儲存量的 0.36%。使地被植物碳儲存量極低的因素除了地上部大量的老齡造林木之外，另外就是地被植物的植物體擁有很高的含水率。

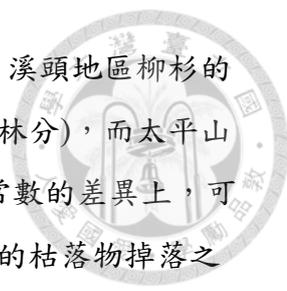
本研究採樣結果中，絕大多數林分的地被植物為低矮的草本植物或灌木，如：闊葉樓梯草、冷清草、曲莖馬藍、觀音座蓮、姑婆芋等，僅有少數小型木本，如：大花曼陀羅、牛奶榕等。全林分調查樣區採樣之地被植物平均鮮種乾種比為 14.5%，這使得地被植物實地採集時雖有不少的生物量，但是換算成碳儲存量時只佔有極少儲存量。但是在一些演替發展初期時的年輕林分之中，地被植物的碳儲存量比例可達到 5%，之後隨著時間林分逐漸發展，生立木才成為最主要的碳儲存庫 (Peichl & Arain, 2006)，這個結果也再次突顯出地上部的生立木隨時間生長、累積碳儲存之重要性。



本研究中枯立倒木 (C_D 、 C_{WD}) 為生態系統中第三大的碳儲存庫，4 個林分枯立倒木的總碳儲存量為 $2.8\sim 10.6 \text{ Mg C ha}^{-1}$ 。在森林生態系統中，枯立倒木等死亡的木質殘骸可提供各種物理的結構性功能、分解釋放出養分或是作為生物的棲息場所。Vandekerkhove et al. (2009) 的結果指出，通常在天然、未經人為管理的林地中會比人為管理的林地擁有更多的枯立倒木，其研究中枯立倒木蓄積量甚至可達到 $500 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ ，而從林分中枯立倒木的數量、累積量等也能反應出環境、林分狀態、擾動強度、人為活動影響等資訊 (Castagneri et al., 2010)。Hoover et al. (2012) 的結果指出從成熟林分發展到老齡林分時，平均枯死木蓄積量有逐漸增加的現象。隨著時間林分逐漸發展成熟，林分中的林木個體常會因為競爭的自我疏伐、病蟲害、火災、風災等擾動因素，而會有較多量的枯立倒木，因此大量的枯立倒木常被視為是老齡森林中的一大特徵 (Greenberg et al., 1997; Hoover et al., 2012)。

本研究林分之枯立倒木碳儲存量總和除 CJ46 為 $2.84 \text{ Mg C ha}^{-1}$ 偏低之外，其餘 3 林分包含 CF29 之枯立倒木碳儲存量總和約為 $9.1\sim 10.6 \text{ Mg C ha}^{-1}$ ，但和其他前人老齡森林的碳儲存研究比起屬於偏低的儲存量。推測是因為溪頭地區的林分仍有持續進行管理，受到人為管理的情況下，林分中的枯立倒木會因整理而被移出，因此和天然無管理老齡森林的研究結果相比，其儲存量會顯得較低。

地表枯枝落葉層 (C_F) 在 4 個林分中之碳儲存量介於 $1.1\sim 1.8 \text{ Mg C ha}^{-1}$ ，其中以 CJ46 為最低、CF29 最高，平均約佔生態系統總碳儲存量的 0.54% 。柳杉和紅檜造林的地表枯枝落葉層碳儲存量及其所佔比例明顯不同，3 個柳杉林分地表枯枝落葉層平均佔生態系統總碳儲存量 0.46% ，而紅檜林分的地表枯枝落葉層則為 0.77% 。這樣的樹種差異推測是因為柳杉和紅檜的枯落物分解難易度不同以及枯落物量的多寡所致。



根據余瑞珠 (2008) 及林熾真 (2014) 的研究，溪頭地區柳杉的枯落物分解常數為 1.17 (未疏伐林分) 和 0.65 (疏伐林分)，而太平山的柳杉紅檜林的枯落物分解常數為 0.267。從分解常數的差異上，可得知紅檜的枯落物分解比柳杉更慢，也就代表紅檜的枯落物掉落之後更容易於地表累積。於林分現地可觀察到紅檜造林的地表有一層細碎小葉的枯落物層，而柳杉造林地的地表則堆積較少或多為部分分解的殘體；加上紅檜有冬季落葉和春季新芽更新落葉的現象，這使得紅檜的年度枯落物量較柳杉林高，較多的枯落物量加上較慢的分解速度，讓紅檜林分擁有較高的地表枯枝落葉層碳儲存量。

地表枯枝落葉層 (C_F) 的碳儲存量和其所占比例在不同的研究中差異很大，Qi et al. (2016) 的中國老齡韓國松森林其地表枯枝落葉層碳儲存量可達到 21 Mg C ha^{-1} ，佔生態系統總碳儲存量 6%；Granata et al. (2016) 研究義大利的灌木林至老齡林的碳儲存，地表枯枝落葉層碳儲存量介於 $9\sim 11 \text{ Mg C ha}^{-1}$ ，依林分發展不同的階段分別佔生態系統總碳儲存量 13.8~5.6%。

台灣地區的研究中，洪志佑 (2012) 溪頭地區生態系統碳儲存量中，地表枯枝落葉層碳儲存量介於 $2\sim 3 \text{ Mg C ha}^{-1}$ ；林國銓等 (2009) 南投縣巒大事業區柳杉林地地表枯枝落葉層生物量介於 $7.8\sim 10.6 \text{ Mg ha}^{-1}$ ，以 C 含量 50% 換算的話其碳儲存量約為 $4\sim 5 \text{ Mg C ha}^{-1}$ 。

本研究結果所得的碳儲存量为 $1.1\sim 1.8 \text{ Mg C ha}^{-1}$ ，和前人研究相比儲存量皆較低。溪頭地區氣候溫暖潮溼，和中高緯度地區比起地表枯枝落葉更容易分解，但和其他國內研究相比仍屬偏低，影響林分地表枯枝落葉層儲存量的原因，除上述氣候因子之外，推測應是因為本研究進行期間並無受到颱風之侵襲，在少了最主要的機械外力的影響下，使本研究各林分之枯落物量較以往研究低了許多，進而使得林分地表枯枝落葉層的輸入量減少，造成儲存量降低，林國銓等 (2009) 也推測林分中地表枯枝落葉層的生物量季節變動，應是和颱風之影響有關。



3. 土壤有機碳儲存量 (C_s)

本研究生態系統土壤有機碳儲存量為 $52.8\sim 77.6 \text{ Mg C ha}^{-1}$ ，以 CJ46 最低、CJ53 為最高。整體看來，土壤有機碳儲存量和林齡之間並無呈現相關性。

在前人研究中，森林的土壤有機碳儲存量為變異最大的部分，會受到其研究林地的林齡、氣候、環境、植生種類或是調查、計算方法等因素不同而有所差異。

Badalamenti et al. (2019) 研究地中海不同森林演替階段至老齡森林的碳儲存， $0\sim 30 \text{ cm}$ 土壤有機碳儲存量為 $70.8\sim 163.3 \text{ Mg C ha}^{-1}$ ，佔總碳儲存量 $85\sim 41\%$ ；Granata et al. (2016) 於義大利老齡落葉林的研究以迴歸公式關係推論土壤有機碳量為 $175.5 \text{ Mg C ha}^{-1}$ ，佔總碳儲存量 42% ；Lü et al. (2010) 於中國西南熱帶季風林之研究得出 $0\sim 100 \text{ cm}$ 土壤有機碳量為 $84.4\sim 101.9 \text{ Mg C ha}^{-1}$ ，佔總碳儲存量 $27\sim 32\%$ ；Nord-Larsen et al. (2019) 於丹麥半天然溫帶森林中的 $0\sim 75 \text{ cm}$ 土壤有機碳量為 $122.5 \text{ Mg C ha}^{-1}$ ，佔總碳儲存量 31% 。

通常來說，溫帶地區的土壤相較於熱帶地區來說，會含有較大量的土壤有機碳，主要的原因是來自於氣候差異所導致的分解速率不同 (Gorte, 2009)，Badalamenti et al. (2019) 及 Granata et al. (2016) 的結果中，其土壤有機碳皆佔了較高的比例。除分解速率的差異之外，老齡森林的土壤有機碳量也會較年輕的林分多，主要是因為枯落物量的影響，老齡森林會擁有較多的枯落物量和地表枯枝落葉層，這些枯落物隨著時間被分解後進入土壤中成為土壤有機碳的一部分，使得老齡森林累積了較多的土壤有機碳。調查土壤所採樣的深度也是一大影響因素，一般來說，土壤有機碳主要儲存於土壤表層，因此越是下層的土壤其所含碳量百分比越低，在大多數研究中只會採集較淺層處的表土，較為下層的土壤則不採集。但在某些情況下，土壤中植物根系的分布也可能使有機碳得以深入較下層的土壤，這使得底層土壤中所累積的碳對於土壤有機碳量的貢獻仍不可忽視 (白創文等, 2014)。



土壤有機碳是生態系統中相對較為穩定不易發生變化的碳庫，如林分狀況無受到巨大擾動導致為環境的改變，土壤有機碳在同一地區大約會呈現一致的儲存量，和植生種類、林分發展階段等較無關係 (白創文等, 2014)。在較年輕的林分中，土壤有機碳儲存量所佔比例較高，這是因為地上部林木的發展尚未成熟，其生物量仍然不足，隨著林分逐漸發展成熟後，林木才超過土壤有機碳儲存量。Law et al. (2001) 於俄勒岡州比較年輕和老齡的西黃松 (*ponderosa pine*) 林分的碳儲存量，其 0~100 cm 土壤有機碳儲存量分別為 43.1、53.3 Mg C ha⁻¹，佔總碳儲存量 43 %、25 %，Qi et al. (2010)、Qi et al. (2016)、Badalamenti et al. (2019) 也有得出相同的階段發展變化結果。從上面 Law et al. (2001) 的研究結果來看，2 個西黃松林分土壤有機碳之間的差異並不大，但是因其地上部林分的階段不同，而使得土壤有機碳的所佔比例差異極大，主要原因是林分地上部生物量累積的不同所致。

溪頭地區關於土壤有機碳儲存量的研究中，洪志祐 (2012) 的研究得出 CJ73、CJ50、CJ41、CJ20 的表層 0~30 cm 土壤有機碳儲存量分別為 140.5、75.8、81.8、78.9 Mg C ha⁻¹；Chen et al. (2016) 於 CJ73 的表層 0~30 cm 土壤為 126.9 Mg C ha⁻¹；白創文等 (2014) 於鳳凰山天文台的柳杉林，表層 0~30 cm 土壤為 85.4~122.3 Mg C ha⁻¹；江博能等 (2018) 於大學池、空中走廊及天文台的柳杉林表層 0~30 cm 土壤分別為 85、68、246 Mg C ha⁻¹。其他地區的柳杉林土壤有機碳儲存量研究中，張瑀芳等 (2006) 於和平事業區的 51 年生柳杉林的表層 0~30 cm 土壤為 97.2~166 Mg C ha⁻¹；蔡呈奇等 (2009) 於福山、坪林及太平山 20~51 年生柳杉林的表層 0~30 cm 土壤為 55~70 Mg C ha⁻¹。



溪頭地區的土壤質地多為砂粒含量偏高的土壤，自 921 大地震及民國 90 年桃芝颱風強降雨擾動之後，多有大小規模的土石崩塌，對於土壤的擾動十分頻繁，部份森林土壤曾受擾動與再堆積，土壤可達 40% 以上的含石量 (林俊全, 2001)。本研究所採樣的 4 個林分土壤質地皆為砂質壤土 (Sandy loam)，結果中以 CJ46 之土壤有機碳儲存量 $52.8 \text{ Mg C ha}^{-1}$ 為最低，其餘三林分的結果大致相同。和前人研究相比，本實驗的結果和洪志祐 (2012) 的 CJ50、CJ41、CJ20、江博能等 (2018) 的大學池、空中走廊之土壤有機碳儲存量相似，但和 CJ73、鳳凰山天文台的結果相比則偏低。從以上前人研究和本研究所得之結果可發現，園區之內的柳杉林分其土壤有機碳儲存量彼此之間較為相近，在海拔較高的天文台或是園區之外的 CJ73，在同樣深度之下其儲存量可達到 100 Mg C ha^{-1} 以上。

造成如此差異的原因推測應是海拔、地形及擾動之影響，溪頭地區之地形為北向開口的畚箕形凹谷地，園區座落於凹谷地形中央且三面環山 (圖 1)，天文台、CJ73 皆位於外圍海拔較高之區域，海拔增加使溫度下降並減緩分解速率，土壤有機碳會更容易累積而隨著海拔增加而增加 (江博能等, 2018; Tsui et al., 2013; Wang et al., 2013)，因此擁有較高的土壤有機碳儲存量；而張瑀芳等 (2006) 提出有機碳儲存量會到地形坡度之影響，坡度較平緩的區域受到沖蝕影響較小；同時在溪頭地區中，凹谷地形內多數區域有遭受較為頻繁的崩塌擾動影響，Cheng et al. (2016) 指出崩塌會大幅降低土壤的有機物含量並增加含石率，致使土壤有機碳儲存量大幅降低。

綜上所述，本實驗各調查林分所得之土壤有機碳儲存量的結果和部分前人研究結果相近，這些林分所處位置海拔較低且多數區域可能受到崩塌影響，使得土壤碳含量比例較天文台、CJ73 等來得低，使土壤有機碳儲存量下降。另外，CJ46 的土壤有機碳儲存量為本實驗中最低，從土壤性質推估，該林分樣區可能包含有過去部分輕度覆蓋的小型崩塌的區域，其表層土壤遭崩塌之土石覆蓋，造成調查所測出之土壤碳含量比例偏低 (表 2)，而使整體表層土壤的有機碳儲存量降低。

4. 生態系統碳儲存量及其分佈

本研究 4 個調查林分的生態系統碳儲存量為 229~342 Mg C ha⁻¹，皆以生立木碳儲存 (C_T) 為最主要的碳庫 (63~78%)，土壤有機碳 (C_S) 則為第二大之碳庫 (20~32%)，兩者合計佔總碳儲存量 95% 以上，其餘的 4 個碳庫總和則佔總碳儲存量 1.2~3.3%。

綜合上面各個碳庫的討論可以得出，在林分的發展過程中，初期時地上的林木生物量仍然不多，這時以土壤有機碳以及地被植物為較大宗的碳庫。隨著林分生長發展，林木的生物量逐漸累積之後，生立木才逐漸超過土壤有機碳成為最主要的碳庫。隨著時間，林分中也會因為競爭、擾動等產生許多枯立倒木、木質殘骸等死木；林木在生長過程中產生的枯落物掉落於地面後形成地表枯枝落葉層，枯枝落葉層被分解後進入土壤之中成為土壤有機碳的一部分，逐漸增加土壤有機碳的儲存量。

因此，在長時間累積之下，老齡森林無疑是一個巨大的碳庫。Pan et al. (2011) 估計亞洲南部區域森林的平均生態系統碳儲存量約為 280 Mg C ha⁻¹，世界森林的平均為 223 Mg C ha⁻¹。本研究林分所得之結果和其平均值相比，CJ53 及 CJ33 的結果高於其所估計之亞洲南部區域森林平均值；而 CJ46 及 CF29，分別因其林分土壤有機碳、生立木碳庫較調查其他林分低，而使總儲存量較低。在 Pan et al. (2011) 的研究中，土壤有機碳所採計之深度為表層 0~100 cm，而本研究所採計之深度為表層 0~30 cm，未採計之下層土壤有機碳儲存量貢獻無從比較，因此 CJ46 及 CF29 生態系統碳儲存量較低也可能是因為忽略了下層土壤有機碳的貢獻，但就結果而言，4 個林分之生態系統碳儲存量皆高於世界森林之平均。

六、結論

在溪頭的老齡林分中，林分的平均胸徑可達到 40 cm 甚至 50 cm 以上，林木持續生長對於累積碳儲存具有正面的效益，雖然各林分之樹高已接近於其上限，但隨著未來胸高直徑的成長，這些林分仍可繼續累積碳儲存量。

從林分的連年生長量結果顯示，2017 年柳杉林分的生長量為 0.91~2.65 Mg C ha⁻¹ yr⁻¹，2018 年為 0.81~2.14 Mg C ha⁻¹ yr⁻¹，2019 年為 0.88~1.92 Mg C ha⁻¹ yr⁻¹，表明這些柳杉林分仍有在持續的生長累積碳儲存；在生態系統碳儲存量方面，生立木在各林分中皆為最主要的碳庫，佔總儲存量的 70% 以上，將來這些林分如不進行伐採或遭受擾動損毀，仍然可持續吸存大氣中的二氧化碳固定於林木之中，對於減少碳排放有其貢獻存在。



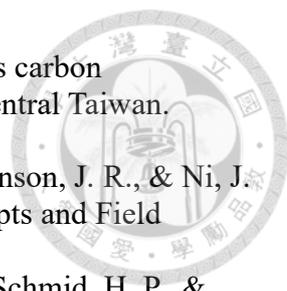
七、參考文獻

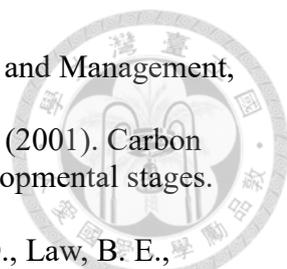
- 王亞男、石哲宇、顏添明、李隆恩 (2012) 溪頭地區紅檜人工林樹高曲線式及樹高生長模式建立之研究。國立臺灣大學生物資源暨農學院實驗林研究報告 26：93-102。
- 王亞男、周宏祈、王介鼎、陳秋萍 (2010) 溪頭三叉崙柳杉生長量及碳貯存量效益之研究。國立臺灣大學生物資源暨農學院實驗林研究報告 24：157-167。
- 王亞男、林金樹、馬曉恩、蔡明哲 (2011) 溪頭試驗地柳杉人工林材積生長的長期變化。國立臺灣大學生物資源暨農學院實驗林研究報告 25：67-80。
- 王亞男、衛強、曾家琳 (2009) 臺大實驗林清水溝營林區線浸柳杉生長量試驗研究。國立臺灣大學生物資源暨農學院實驗林研究報告 23：133-146。
- 王瑞閔 (2007) 台灣國有林地森林碳吸存估算方法之探討。國立臺灣大學森林環境暨資源學系碩士論文。
- 白創文、莊愷瑋、鄭智馨、王亞男、陳秋萍 (2014)。臺灣中部溪頭地區相鄰之天然闊葉林、柳杉人工林與竹林之土壤有機碳儲存量與垂直分布。土壤與環境 17：37-49。
- 江博能、余瑞珠、賴彥任、蔡僑隆 (2018)。臺灣大學實驗林北勢溪集水區人工林土壤養分與碳儲量。中華林學季刊 51：1-20。
- 余瑞珠 (2008) 溪頭柳杉、台灣杉及巒大杉三種人工林疏伐處理對於土壤養份動態和枝葉分解之影響。臺灣大學森林環境暨資源學系碩士論文。
- 李明仁(主編)(2010) 育林實務手冊。行政院農業委員會林務局。
- 李訓煌 (1978) 不同齡級柳杉林之生長及樹木生物量生產之研究。國立台灣大學森林學研究所造林學組碩士論文。
- 李國忠、林俊成、陳麗琴 (2000) 台灣杉人工林碳吸存潛力及其成本效益分析。台灣林業科學 15：115-123。
- 李國忠、林俊成、賴建興、林麗貞 (2004) 台大實驗林森林生態系不同林分經營策略之碳貯存效果。國立臺灣大學生物資源暨農學院實驗林研究報告 18：261-272。
- 杜清澤、邱志明、林國銓 (2011) 人倫地區柳杉人工林地上部與地下部生物量之估算。中華林學季刊 44：401-411。
- 沈勇強 (1984) 台大實驗林天然保護林區植群生態之研究。國立臺灣大學森林學研究所碩士論文。
- 林亨勳 (2008) 疏伐對太平山柳杉-紅檜人工林枯落物及其養分含量之影響。宜蘭大學森林暨自然資源學系學位論文。
- 林俊全 (2001) 溪頭地區桃芝颱風水土災害特徵之探討。中華水土保持學報 32：261-270。
- 林務局 (2015) 第四次森林資源調查報告。行政院農業委員會林務局。
- 林國銓、杜清澤、黃菊美 (2009) 疏伐初期對柳杉人工林枯落物和地表枝葉層的影響。中華林學季刊 42：595-607。
- 林裕仁、劉瓊霏、林俊成 (2002) 台灣地區主要用材比重與碳含量測定。台灣林業科學 17：291-299。
- 林熾真 (2014) 太平山區柳杉紅檜人工林疏伐七年後枯落物之動態。宜蘭大學森林暨自然資源學系學位論文。

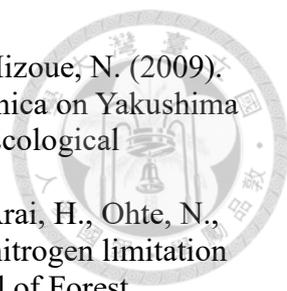
- 
- 洪千祐、顏添明 (2015) 以過去發表資料為基礎分析臺灣地區人工針葉樹林、闊葉樹林和竹林之碳吸存量。林業研究季刊 37：259-268。
- 洪志祐 (2012) 溪頭柳杉老齡林生態系統碳貯存量與淨生態系生產力。國立臺灣大學森林環境暨資源學系碩士論文。
- 張瑀芳、林世宗、蔡呈奇 (2006) 臺灣東北部柳杉人工林土壤有機碳儲量的推估。臺灣林業科學 21：383-393。
- 陳洳婷、顏添明、李介祿 (2010) 柳杉人工同齡林樹冠特性及形態之研究。中華林學季刊 43：213-222。
- 游漢明 (1981) 不同齡級柳杉林分地上部之生物量與淨生產量。國立台灣大學森林學研究所造林組碩士論文。
- 黃崑崗 (1977) 紅檜人工林生長之調查研究。中華林學季刊 10：95-109。
- 楊榮啟 (1975) 臺灣大學實驗林產柳杉之生長與收穫的研究 國立臺灣大學農學院實驗林研究報告 116：1-1490。
- 劉知妤、王兆桓 (2008) 以林齡—蓄積量模式估算柳杉及檜木人工林的碳吸存量。宜蘭大學生物資源學刊 4：35-45。
- 劉俊毅 (2008) 棲蘭山區臺灣扁柏老熟林及次生林枯落物養分動態。國立臺灣大學森林環境暨資源學系碩士論文。
- 劉威伶、余瑞珠、王亞男、鄭景鵬、陳秋萍、鄭智馨 (2018) 溪頭自然教育園區人工林枯落物之時間與空間變異：季節與植生種類的差異。中華林學季刊 51：231-250。
- 劉素玲、王亞男、陳德仁、鄭景鵬 (2009) 溪頭門田柳杉生長量及二氧化碳貯存量效益之研究。國立臺灣大學生物資源暨農學院實驗林研究報告 23：189-200。
- 劉儒淵 (1999) 溪頭地區生物資源的研究概況、干擾及經營策略。國立臺灣大學生物資源暨農學院實驗林研究報告 13：101-117。
- 蔡呈奇、胡庭恩、林國銓、陳尊賢 (2009) 臺灣北部地區人工林土壤碳存量的估算。臺灣林業科學 24：103-115。
- 衛強、王亞男、蔡明哲、鄭景鵬 (2010) 臺大實驗林溪頭營林區西川試驗地柳杉生長量之研究。國立臺灣大學生物資源暨農學院實驗林研究報告 24：169-183。
- 鄭景鵬、許崑衍、林金樹、蔡明哲 (2010) 溪頭地區臺灣杉人工林林分生長的長期變化趨勢。國立臺灣大學生物資源暨農學院實驗林研究報告 24：147-156。
- 鄭景鵬、楊勝驛、王亞男、蔡明哲、邱祈榮 (2014) 溪頭地區柳杉長期樹高生長與胸徑—樹高曲線之研究。國立臺灣大學生物資源暨農學院實驗林研究報告 28：17-29。
- 鄭森信、陳信佑 (2009) 國立臺灣大學生物資源暨農學院實驗林管理處六十五年之氣象 (1941-2005)。國立臺灣大學生物資源暨農學院實驗林管理處，林業特刊第 26 號。
- 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。國立臺灣大學生物資源暨農學院實驗林研究報告 19：217-230。
- 顏添明、劉兆昌、張維仁 (2006) 低密度林分杉木樹冠特性之研究。中華林學季刊 39：303-314。

- 
- 蘇泓銘 (2013) 溪頭人工針葉林淨初級生產力與土壤溫室氣體釋放。國立臺灣大學森林環境暨資源學系碩士論文。
- 大住克博、森麻須夫、桜井尚武、齋藤勝郎、佐藤昭敏、関剛 (2000) 秋田地方で記録された高齢なスギ人工林の成長経過。日本林学会誌 82：179-187。
- 大野泰之、勝矢晃敏、竹本諭 (2008) 樹冠長・枝下高を指標としたウダイカンバ大径材の生産技術。光珠内季報 149：1-5。
- 川崎達郎、竹内郁雄 (1993) ヒノキ人工林における胸高直径成長量の季節変化。日本林学会関西支部論文集 2：157-158。
- 石川実、中岡圭一、田淵隆一、酒井武、倉本恵生、稲垣善之 (2000) 複層林スギ上木の後生枝発生の実態：発生位置と枝齡、枝径について。森林応用研究 9(1)：155-158。
- 石井洋二、齋藤寛 (2005) 福島県中・浜通りにおけるスギ人工高齢林の樹高成長。東北森林科学会誌 10：41-44。
- 石井洋二、齋藤寛、五十嵐正徳 (2005) 福島県会津地方のスギ高齢林の樹高成長。日本森林学会誌 87：419-421。
- 竹内郁雄 (2004) スギ・ヒノキ二段林施業と技術的課題。森林科学 41：8-13。
- 竹内郁雄 (2005) スギ高齢人工林における胸高直径成長と林分材積成長。日本森林学会誌 87：394-401。
- 竹内郁雄、永岩健一、寺岡行雄 (2007) 台風によるヒノキ人工林の落葉被害。日本森林学会誌 89：390-394。
- 竹内郁雄、伊東宏樹 (2003) スギ高齢人工林の樹高成長。日本林学会誌 85：121-126。
- 西園朋広、澤田智志、栗屋善雄 (2006) 秋田地方における高齢天然スギ林の林分構造と成長の推移。日本森林学会誌 88：8-14。
- 佐藤保、齋藤哲、荒木真岳 (2018) 台風攪乱を伴った壮齡コジイ二次林の地上部純一次生産量の変動。森林総合研究所研究報告 17：325-332。
- 谷口真吾、前田雅量 (2002) スギ高齢林における後生枝の発生。森林応用研究 11：39-42。
- 松崎清 (1968) 直径によるスギ幹材積表に関する研究。日林誌 50：165-173。
- 准フォレスター研修基本テキスト作成委員会編 (2013) 准フォレスター研修基本テキスト。林野庁。
- 高橋宏明 (1970) スギ林の年輪生長 (I) スギ林の年輪生長の共通性。日本林学会誌 52：173-177。
- 高橋宏明 (1971) スギ林の直径成長 (IV) 直径成長と気象因子との相関。日本林学会誌 53：315-318。
- 國崎貴嗣、白旗学 (2014) 過密なスギ壮齡人工林における平均樹冠長。日本森林学会誌 96：234-237。
- 國崎貴嗣、藁谷紀恵、柴田信明 (1999) 岩手山麓におけるスギ高齢林の林分構造と成長。日本林学会誌 81：346-350。
- 梶原幹弘 (1975) スギ同齡林における樹冠の形態と量に関する研究 (I) 樹冠形。日本林学会誌 57：425-431。
- 梶原幹弘 (1976) スギ同齡林における樹冠の形態と量に関する研究 (III) 樹冠の形態の生育段階的变化。日本林学会誌 58：313-320。

- 細田和男、西園朋広、佐野真琴、齋藤英樹、家原敏郎 (2012) スギ、ヒノキおよびカラマツ固定試験地における間伐区と対照区の炭素固定量の比較。森林計画学会誌 45: 55-64。
- 渡邊仁志、茂木靖和 (2005a) スギ、ヒノキ、アカマツ同齡人工林における炭素貯留量。日本森林学会大会発表データベース 116: 724-724。
- 渡邊仁志、茂木靖和 (2005b) 壮齡スギ、ヒノキ人工林における林分の炭素貯留量。岐阜県森林科学研究所研究報告 34: 11-16。
- 菊沢喜八郎 (1995) 芽のデモグラフィから予測される後生枝の発生のしやすさ(会員研究発表論文)。日本林学会北海道支部論文集 43: 178-179。
- 横井秀一、山口清 (1996) ミズナラの後生枝の発生起源と間伐がその発達に及ぼす影響。日本林学会誌 78: 169-174。
- 横井秀一、早川幸治 (2011) 林齡 100 年クラスのヒノキ人工林におけるヒノキ個体の胸高直径と樹冠長・樹冠幅の関係。日本森林学会大会発表データベース 123: A19-A19。
- 横井秀一、早川幸治、大洞智宏、田中伸治 (2011) 高齡スギ人工林におけるスギ個体の胸高直径、樹高、枝下高、樹冠幅の関係。日本森林学会大会発表データベース 122: 174-174。
- 澤田智志、三浦義之、福森卓、家原敏郎 (2005) 高齡級スギ人工林の地上部及び地下部のバイオマス量の測定。日本森林学会大会発表データベース 116: 768-768。
- Badalamenti, E., Battipaglia, G., Gristina, L., Novara, A., Rühl, J., Sala, G., Sapienza, L., Valentini, R., & La Mantia, T. (2019). Carbon stock increases up to old growth forest along a secondary succession in Mediterranean island ecosystems. *PLoS ONE*, 14: e0220194.
- Baishya, R., & Barik, S. K. (2011). Estimation of tree biomass, carbon pool and net primary production of an old-growth *Pinus kesiya* Royle ex. Gordon forest in north-eastern India. *Annals of Forest Science*, 68: 727-736.
- Cai, H., Di, X., Chang, S. X., Wang, C., Shi, B., Geng, P., & Jin, G. (2016). Carbon storage, net primary production, and net ecosystem production in four major temperate forest types in northeastern China. *Canadian Journal of Forest Research*, 46: 143-151.
- Castagneri, D., Garbarino, M., Berretti, R., & Motta, R. (2010). Site and stand effects on coarse woody debris in montane mixed forests of Eastern Italian Alps. *Forest Ecology and Management*, 260: 1592-1598.
- Cattelino, P. J., Becker, C. A., & Fuller, L. G. (1986). Construction and Installation of Homemade Dendrometer Bands. *Northern Journal of Applied Forestry*, 3: 73-75.
- Chen, C. P., Juang, K. W., Cheng, C. H., & Pai, C. W. (2016). Effects of adjacent land-use types on the distribution of soil organic carbon stocks in the montane area of central Taiwan. *Botanical Studies*, 57: 32.
- Cheng, C. H., Lee, C. Y., Lee, H. R., Chen, C.-P., & Menyailo, O. V. (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.
- Cheng, C. H., Hsiao, S. C., Huang, Y. S., Hung, C. Y., Pai, C. W., Chen, C. P., & Menyailo, O. V. (2016). Landslide-induced changes of soil physicochemical properties in Xitou, Central Taiwan. *Geoderma*, 265: 187-195.

- 
- Cheng, C. H., Hung, C. Y., Chen, C. P., & Pei, C. W. (2013). Biomass carbon accumulation in aging Japanese cedar plantations in Xitou, central Taiwan. *Botanical Studies*, 54: 60.
- Clark, D. A., Brown, S., Kicklighter, D. W., Chambers, J. Q., Thomlinson, J. R., & Ni, J. (2001). Measuring Net Primary Production in Forests: Concepts and Field Methods. *Ecological Applications*, 11: 356-370.
- Curtis, P. S., Hanson, P. J., Bolstad, P., Barford, C., Randolph, J. C., Schmid, H. P., & Wilson, K. B. (2002). Biometric and eddy-covariance based estimates of annual carbon storage in five eastern North American deciduous forests. *Agricultural and Forest Meteorology*, 113: 3-19.
- Delpierre, N., Berveiller, D., Granda, E., & Dufrêne, E. (2016). Wood phenology, not carbon input, controls the interannual variability of wood growth in a temperate oak forest. *New Phytologist*, 210: 459-470.
- Franklin, J. F., & Spies, T. A. (1984). Characteristics of old-growth Douglas-fir forests. *Proceedings of the Society of American Foresters National Convention*: 10-16.
- Franklin, J. F., & Van Pelt, R. (2004). Spatial Aspects of Structural Complexity in Old-Growth Forests. *Journal of Forestry*, 102: 22-28.
- Gorte, R. W. (2009). Carbon Sequestration in Forests. In: *Congressional Res. Serv. Rep. for Congress, USA*.
- Granata, M. U., Gratani, L., Bracco, F., Sartori, F., & Catoni, R. (2016). Carbon Stock Estimation in an Unmanaged Old-Growth Forest: A Case Study from a Broad-Leaf Deciduous Forest in the Northwest of Italy. *International Forestry Review*, 18: 444-451.
- Gray, A. N., Whittier, T. R., & Harmon, M. E. (2016). Carbon stocks and accumulation rates in Pacific Northwest forests: Role of stand age, plant community, and productivity. *Ecosphere*, 7: e01224.
- Greenberg, C. H., McLeod, D. E., & Loftis, D. L. (1997). An Old-Growth Definition for Western and Mixed Mesophytic Forests. *Gen. Tech. Rep. SRS-16*. Asheville, NC: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Southern Research Station. 21 p.
- Gunn, J. S., Ducey, M. J., & Whitman, A. A. (2014). Late-successional and old-growth forest carbon temporal dynamics in the Northern Forest (Northeastern USA). *Forest Ecology and Management*, 312: 40-46.
- Harmon, M. E., Bible, K., Ryan, M. G., Shaw, D. C., Chen, H., Klopatek, J., & Li, X. (2004). Production, respiration, and overall carbon balance in an old-growth pseudotsuga-tsuga forest ecosystem. *Ecosystems*, 7: 498-512.
- Hoover, C. M., Leak, W. B., & Keel, B. G. (2012). Benchmark carbon stocks from old-growth forests in northern New England, USA. *Forest Ecology and Management*, 266: 108-114.
- IPCC. (2014). *Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 151 pp.
- Ishii, H., Takashima, A., Makita, N., & Yoshida, S. (2010). Vertical stratification and effects of crown damage on maximum tree height in mixed conifer-broadleaf forests of Yakushima Island, southern Japan. *Plant Ecology*, 211: 27-36.
- Lü, X. T., Yin, J. X., Jepsen, M. R., & Tang, J. W. (2010). Ecosystem carbon storage and partitioning in a tropical seasonal forest in Southwestern China. *Forest Ecology and Management*, 260: 1798-1803.

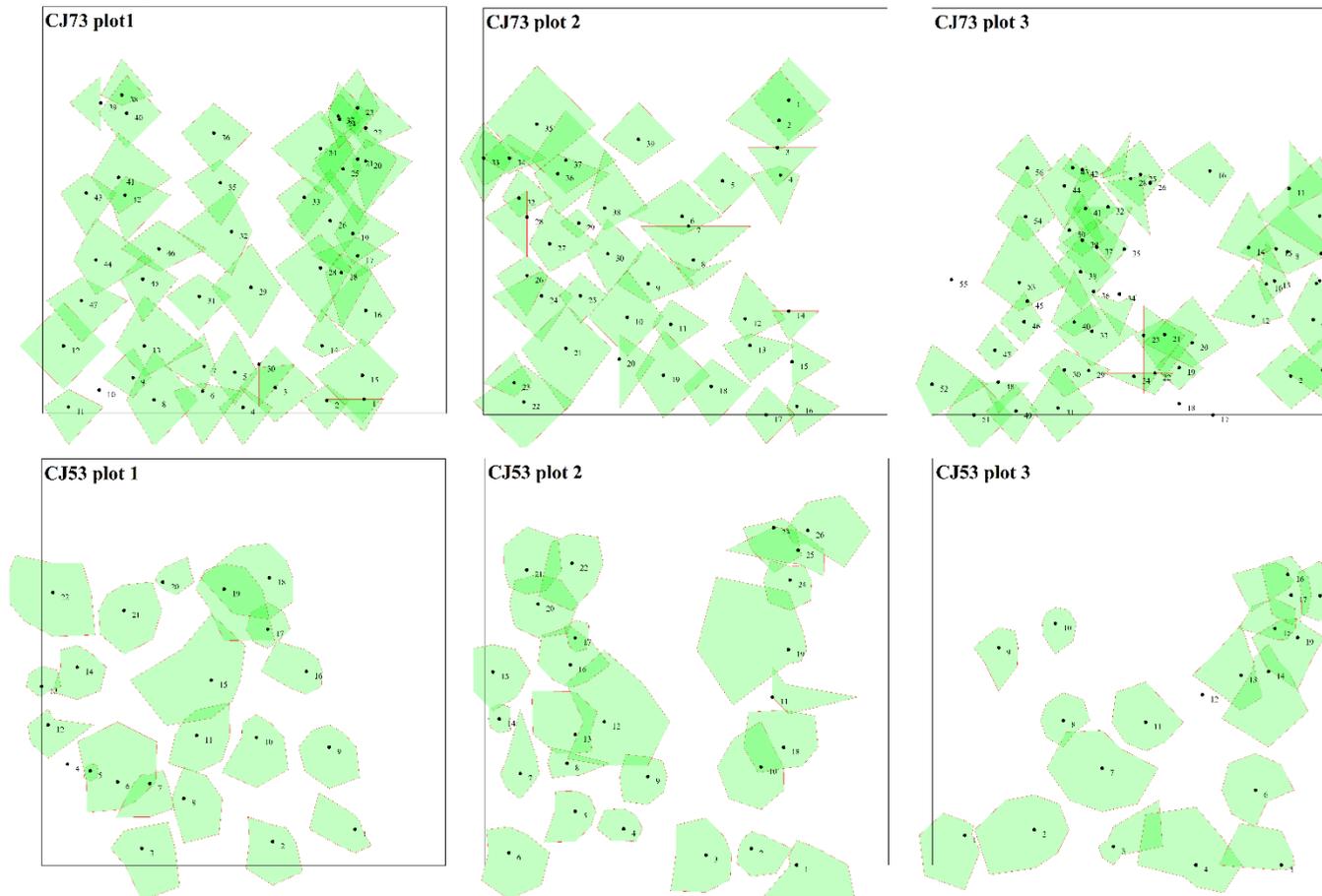
- 
- Lal, R. (2005). Forest soils and carbon sequestration. *Forest Ecology and Management*, 220: 242-258.
- Law, B. E., Thornton, P. E., Irvine, J., Anthony, P. M., & Van Tuyl, S. (2001). Carbon storage and fluxes in ponderosa pine forests at different developmental stages. *Global Change Biology*, 7: 755-777.
- Luysaert, S., Schulze, E. D., Börner, A., Knohl, A., Hessenmöller, D., Law, B. E., Ciais, P., & Grace, J. (2008). Old-growth forests as global carbon sinks. *Nature*, 455: 213-215.
- Malhi, Y., Meir, P., & Brown, S. (2002). Forests, carbon and global climate. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 360: 1567-1591.
- Martin, W. H. (1992). Characteristics of old-growth mixed mesophytic forests. *Natural Areas Journal*, 12: 127-135.
- Masaki, T., Mori, S., Kajimoto, T., Hitsuma, G., Sawata, S., Mori, M., Osumi, K., Sakurai, S., & Seki, T. (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.
- Matsushita, A., Yoshida, T., Hijii, N., & Takenaka, C. (2017). Changes in the chemical compositions of leaf litter in the canopy of a Japanese cedar plantation. *Journal of Forest Research*, 22: 256-260.
- Motta, R., Garbarino, M., Berretti, R., Meloni, F., Nosenzo, A., & Vacchiano, G. (2015). Development of old-growth characteristics in uneven-aged forests of the Italian Alps. *European Journal of Forest Research*, 134: 19-31.
- Nishizono, T., Zushi, K., Hiroshima, T., Toyama, K., Kitahara, F., Terada, F., Takagi, M., & Saito, S. (2018). Latitudinal variation in radial growth phenology of *Cryptomeria japonica* D. Don trees in Japan. *Forestry: An International Journal of Forest Research*, 91: 206-216.
- Nord-Larsen, T., Vesterdal, L., Bentsen, N. S., & Larsen, J. B. (2019). Ecosystem carbon stocks and their temporal resilience in a semi-natural beech-dominated forest. *Forest Ecology and Management*, 447: 67-76.
- Pélissier, R., & Pascal, J. p. (2000). Two-year tree growth patterns investigated from monthly girth records using dendrometer bands in a wet evergreen forest in India. *Journal of Tropical Ecology*, 16: 429-446.
- Pan, Y., Birdsey, R. A., Fang, J., Houghton, R., Kauppi, P. E., Kurz, W. A., Phillips, O. L., Shvidenko, A., Lewis, S. L., Canadell, J. G., Ciais, P., Jackson, R. B., Pacala, S. W., McGuire, A. D., Piao, S., Rautiainen, A., Sitch, S., & Hayes, D. (2011). A Large and Persistent Carbon Sink in the World's Forests. *Science*, 333: 988-993.
- Peichl, M., & Arain, M. A. (2006). Above- and belowground ecosystem biomass and carbon pools in an age-sequence of temperate pine plantation forests. *Agricultural and Forest Meteorology*, 140: 51-63.
- Qi, G., Chen, H., Zhou, L., Wang, X., Zhou, W., Qi, L., Yang, Y., Yang, F., Wang, Q., & Dai, L. (2016). Carbon stock of larch plantations and its comparison with an old-growth forest in northeast China. *Chinese Geographical Science*, 26: 10-21.
- Qi, G., Wang, Q., Dai, L., Wang, X., & Qi, L. (2010). Carbon sequestration in old-growth forest and plantations on Changbai Mountain in northeast China. 2010 4th International Conference on Bioinformatics and Biomedical Engineering, iCBBE 2010, Chengdu.

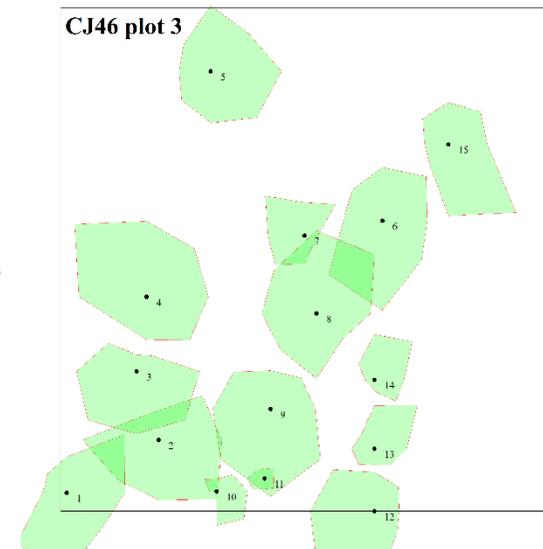
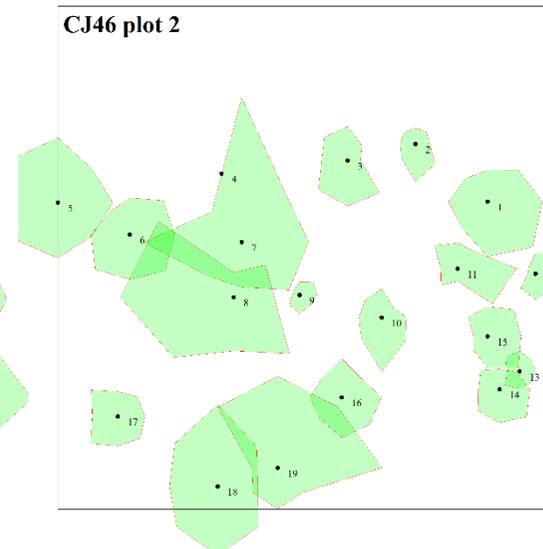
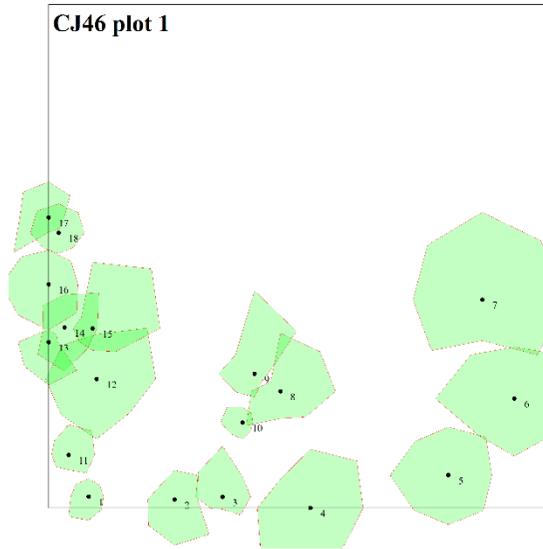
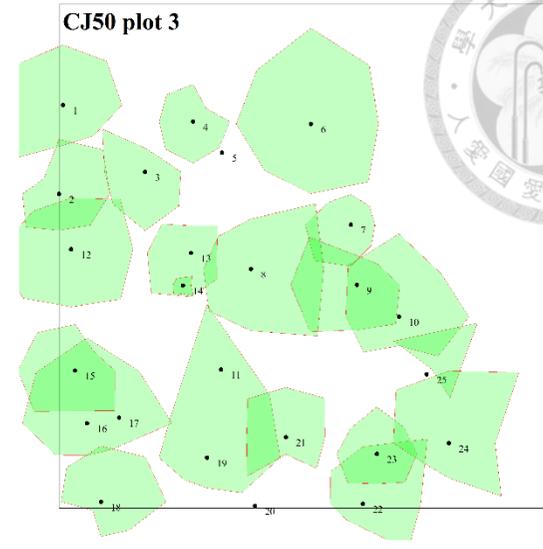
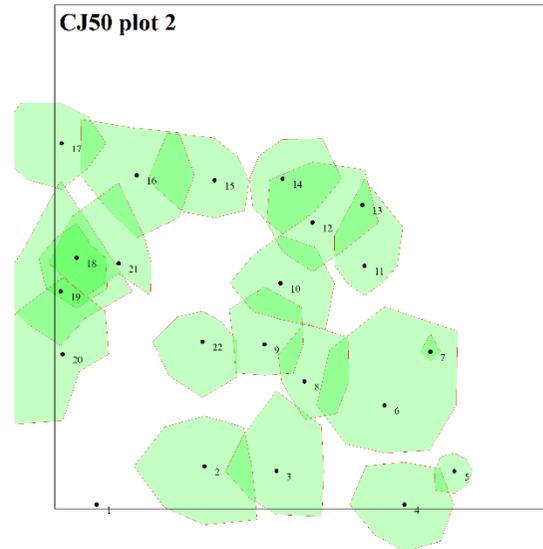
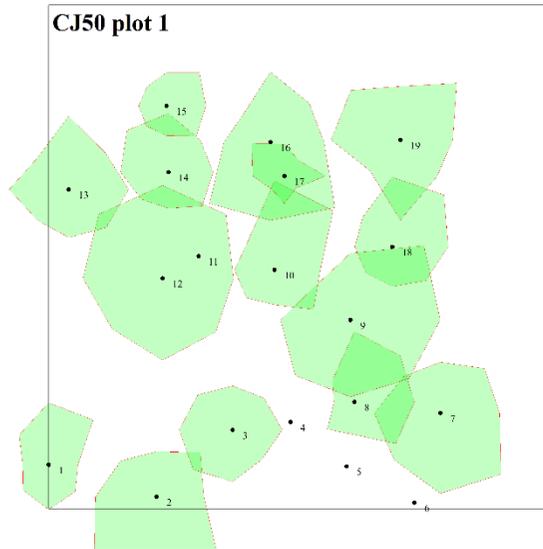
- 
- Takashima, A., Kume, A., Yoshida, S., Murakami, T., Kajisa, T., & Mizoue, N. (2009). Discontinuous DBH–height relationship of *Cryptomeria japonica* on Yakushima Island: effect of frequent typhoons on the maximum height. *Ecological Research*, 24: 1003–1011.
- Tateno, R., Fukushima, K., Fujimaki, R., Shimamura, T., Ohgi, M., Arai, H., Ohte, N., Tokuchi, N., & Yoshioka, T. (2009). Biomass allocation and nitrogen limitation in a *Cryptomeria japonica* plantation chronosequence. *Journal of Forest Research*, 14: 276-285.
- Tsui, C. C., Tsai, C. C., & Chen, Z. S. (2013). Soil organic carbon stocks in relation to elevation gradients in volcanic ash soils of Taiwan. *Geoderma*, 209-210: 119-127.
- Vandekerckhove, K., De Keersmaecker, L., Menke, N., Meyer, P., & Verschelde, P. (2009). When nature takes over from man: Dead wood accumulation in previously managed oak and beech woodlands in North-western and Central Europe. *Forest Ecology and Management*, 258: 425-435.
- Wang, G., Zhou, Y., Xu, X., Ruan, H., & Wang, J. (2013). Temperature Sensitivity of Soil Organic Carbon Mineralization along an Elevation Gradient in the Wuyi Mountains, China. *PLoS ONE*, 8: e53914.
- Xu, C. Y., Turnbull, M. H., Tissue, D. T., Lewis, J. D., Carson, R., Schuster, W. S. F., Whitehead, D., Walcroft, A. S., Li, J., & Griffin, K. L. (2012). Age-related decline of stand biomass accumulation is primarily due to mortality and not to reduction in NPP associated with individual tree physiology, tree growth or stand structure in a *Quercus*-dominated forest. *Journal of Ecology*, 100: 428-440.
- Yoshida, T., & Hijii, N. (2006). Spatiotemporal distribution of aboveground litter in a *Cryptomeria japonica* plantation. *Journal of Forest Research*, 11: 419-426.
- Ziegler, S. S. (2000). A comparison of structural characteristics between old-growth and postfire second-growth hemlock–hardwood forests in Adirondack Park, New York, U. S. A. *Global Ecology and Biogeography*, 9: 373-389.

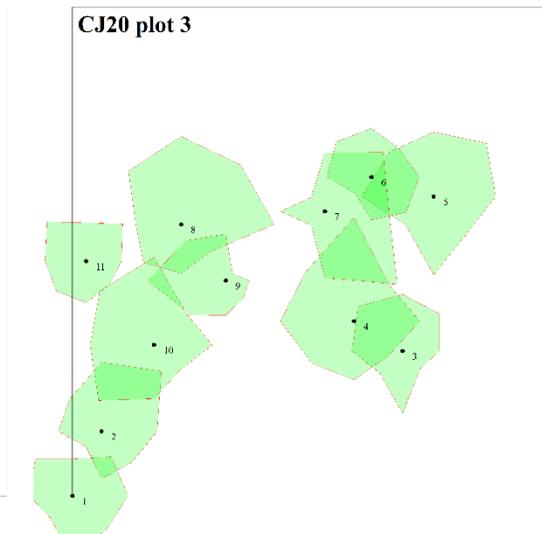
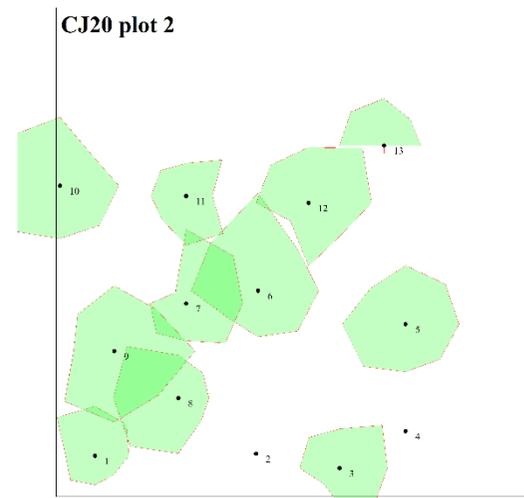
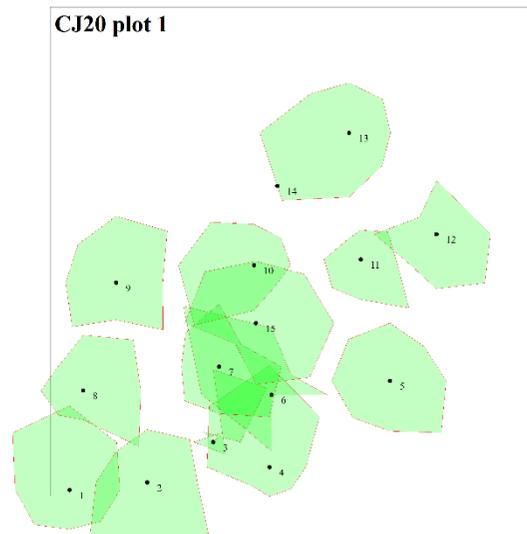
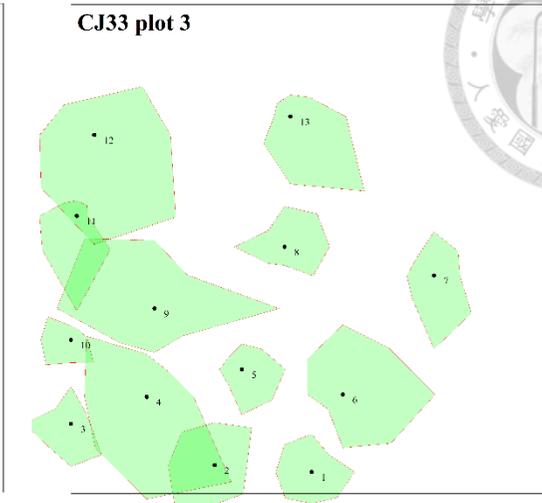
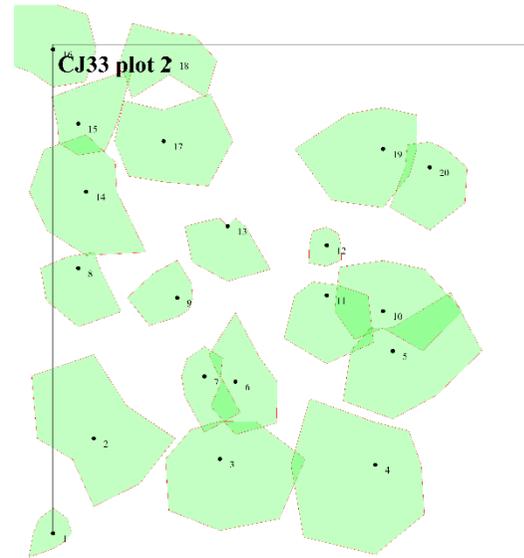
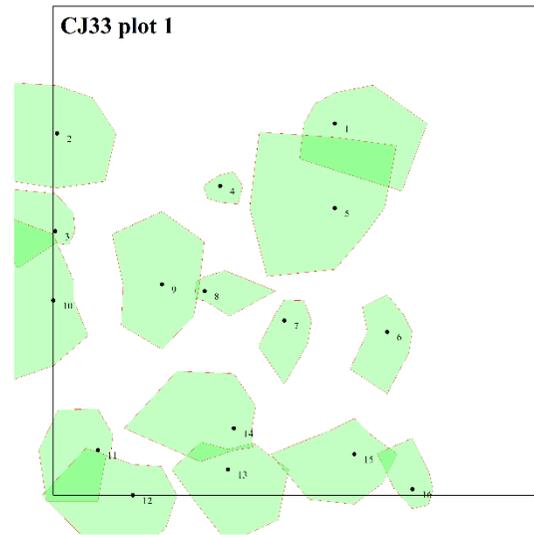
附錄

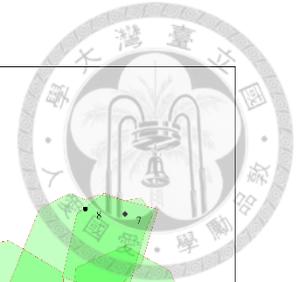
溪頭地區各個實驗林分樣區中，林木之座標及樹冠範圍圖。圖中外框線為 30 m × 30 m 之區域。

The coordinates and canopy range of every trees in each stand plot. The frame line is 30 m × 30 m.

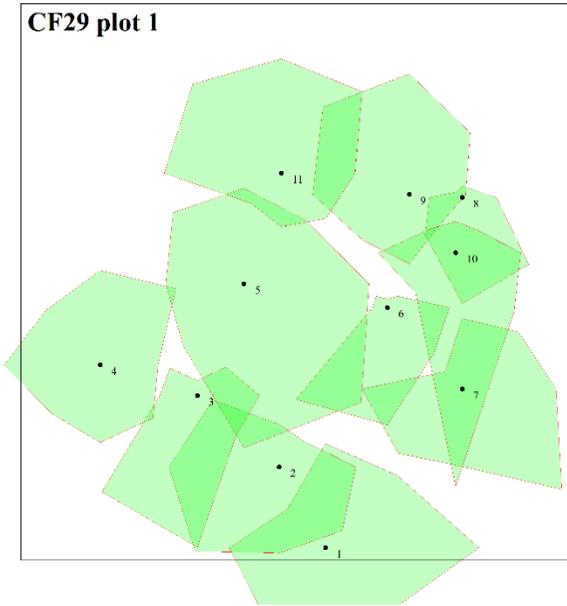




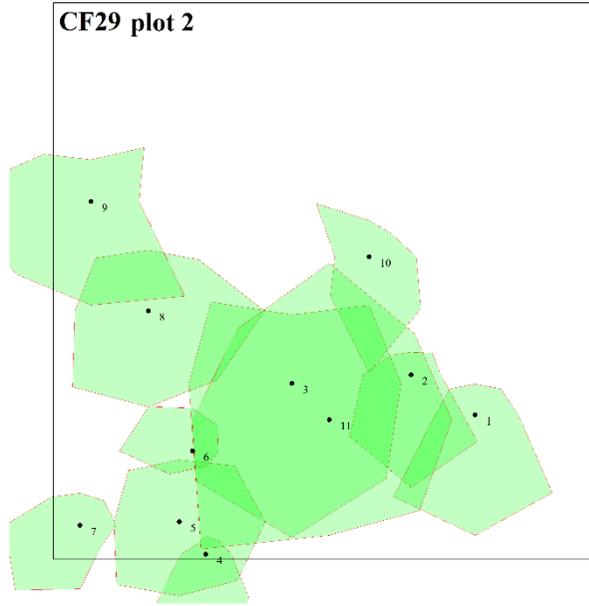




CF29 plot 1



CF29 plot 2



CF29 plot 3

