

國立中興大學森林學系
碩士學位論文

以過去發表資料為基礎分析臺灣重要人工林和
竹林之碳吸存量

Analysis of Carbon Sequestration for Main
Taiwanese Man-made and Bamboo
Forests Based on the Past Published Data

National Chung Hsing University

指導教授：顏添明 博士

Adviser : Dr. Tian-Ming Yen

研究生：洪千祐

Author : Chien-Yu Hung

中華民國 103 年一月

國立中興大學 森林 學研究所

碩士學位論文

題目：以過去發表資料為基礎分析臺灣重要人工林和竹
林之碳吸存量

姓名：洪千祐 學號：7100033014

經 口 試 通 過 特 此 證 明

論文指導教授

顏添明

論文考試委員

林金樹

李久安

李介禎

陳明訓

中華民國 103 年 1 月 14 日

謝誌

在論文完成之際，首先由衷地感謝李久先老師與顏添明老師在論文撰寫上鉅細靡遺的指導。在研究方向、文章架構、詞句修改等各方面皆叨擾老師許多；在求學態度及人生觀上也從老師身上獲益良多。當然也要感謝李介祿老師擔任口試委員，平時在專討即對學生之論文提出許多寶貴的意見；感謝陳朝圳老師及林金樹老師百忙之中抽空前來擔任口試委員，所提出之精闢指正皆使本論文益臻完善；最後謝謝兩年多來修課過程中所有老師的諄諄教誨。

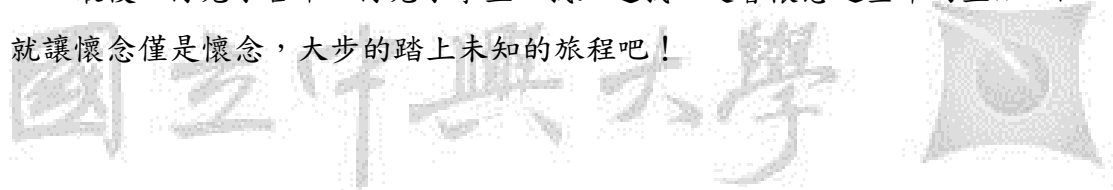
曾半開玩笑的說過，謝誌大概是整篇論文裡最想寫的部分了，不需參考文獻也沒有標準格式，可讓人隨意書寫是多麼地自由與暢快！如果說要感謝誰，私以為將名字一個個打出來實在稍顯冗長，我衷心地感謝生命出現過的所有人，不管是在哪個時間、哪個地方相識；像是知心好友一起喝酒吃宵夜高談闊論、出遊踏青吃喝玩樂的歡樂時光、在各方面給予我幫助的所有人、留在研究室邊寫邊罵的趕報告夜晚、眾宅男在遊戲裡互相叫罵嘻鬧、在網路世界的對話視窗裡聊著彼此心情與近況……等等，沒營養的話題也好、有深度的談話也好，所有的一切皆豐富了我的學生生涯。謝謝所有我認識的人，沒有你們，我的人生是多麼無趣。當然，我一定要特別感謝我的家人，父母對我的照顧及妹妹的鼓勵與陪伴，都讓我知道不管發生什麼事，仍然有最愛我的家人在背後支持我；非常慶幸能擁有如此溫馨的家庭，讓我回到家皆可放下煩心的一切享受天倫之樂，然後再度打起精神面對挑戰。

對於學生生涯的結束其實感觸良多，當初在準備研究所考試時，只是很單純的想要使自己最後一個學歷更好看，但是對於要研究什麼、未來的發展卻沒有深思，或許也是因此才跌跌撞撞了兩年半撞出了這一張畢業證書；在這兩年半的碩士生活中，對於未來的想法也逐漸改變，原本束之高閣的外語學習開始變得迷人、開始細思我的未來除了林業出身的高普考之外，是否有其他發展的可能性。在現今油電雙漲、房價飆漲的年代，對於社會新鮮人其實是充滿著許多考驗與挑戰，看不到政府對於勞方的照顧，看不到未來是否仍有美好願景，看不到經濟好轉的跡象；只看得到政府濫權、官員無能、財團蠻橫、企業黑心、資方剝削，這些現象讓我對於寶島臺灣的未來難免灰心。儘管如此，雖不知以後變化如何，依然期許不管在哪裡，我仍可以莫忘初衷並牢記自己的理想，在未來的每一天可以隨心

所欲開心的笑、痛快的哭。

如果你還在看著這篇更像是心情抒發文的謝誌，我想在這分享更多心得；在跟高中好友聊天時曾聊到：在成長的過程中，有很多事情、很多選項是我們不知道的，像是令人嚮往的留學、交換學生，總是錯過了才驚覺自己已沒剩下多少時間及機會去嘗試。當時真的非常心有戚戚焉，在過去念書時常虛擲光陰而不自覺，但現在後悔也無事於補，只能彼此勉勵，努力地達到心中成功的目標。因此，如果你有著可以到外面世界闖蕩的機會，請務必好好把握，因為沒有親身出去體驗這世界的廣闊，是無法想像世界的寬度已經達到了什麼境界；當活生生的世界從書本及網路上躍然眼前，彷彿可以感受到不同城市的呼吸、異國文化的脈動，那將會是一個對於自身認知的巨大衝擊，讓你了解到不需要自我設限，人生充滿了無限的可能性，共勉之。

最後，再見了台中，再見了學生。我知道我一定會懷念這些年的生活，但，就讓懷念僅是懷念，大步的踏上未知的旅程吧！



National Chung Hsing University

千祐

歲次甲午年正月 筆

摘要

本研究主要目的在於藉由蒐集臺灣地區過去發表人工林及竹林之文獻資料以了解臺灣人工林年碳吸存之潛力，文獻範圍以臺灣地區林業學術期刊為主，蒐集內容包括蓄積材積量、生物量、碳貯量之相關文獻。將其結果統一轉換為碳貯量再換算成年碳吸存進行分析，並將資料依樹種不同分為針葉樹人工林、闊葉樹人工林、竹類人工林，旨在探討人工林林分性態值之間相關及差異、林分性態值與年碳吸存之關係；此外也針對針葉樹人工林進行不同林齡及主要樹種之年碳吸存差異比較，另外也將三種人工林在過去發表資料中較代表性樹種進行年碳吸存比較。研究結果發現，各人工林之林分性態值之相關關係有著一致的趨勢，而影響年碳吸存的各項變因，其趨勢和影響人工林生長收穫的因子相同；三種人工林在各林分性態值上皆具顯著差異，而竹類人工林在碳貯量上雖低於針葉樹及闊葉樹人工林，但其年碳吸存效益卻是三者之中最高。針葉樹人工林在不同林齡的年碳吸存比較結果可知，年碳吸存會隨著林齡增加而減少，在幼齡期時年碳吸存效率最為快速；而不同樹種的年碳吸存比較結果指出，針葉樹人工林的主要樹種在年碳吸存上並無顯著差異；三種人工林之代表性樹種以竹類人工林之孟宗竹顯著高於針葉樹及闊葉樹人工林之樹種，而針葉樹及闊葉樹並無顯著差異。

【關鍵字】臺灣人工林、過去發表資料、年碳吸存、林分性態值、林齡、樹種

Abstract

The purpose of this research was to compare Taiwanese man-made forests carbon sequestration by collecting published data. The scope of data was from official published forest research in Taiwan, including stock volume, biomass and carbon storage. Data will transform to carbon sequestration and classified by tree species to three kinds: conifer man-made forests, broad leaf man-made forests, bamboo man-made forests. The main study purpose was to know the correlation and the different of stand characteristics, the correlation of carbon sequestration and stand characteristics, the carbon sequestration different in different age of conifer man-made forests, the different of tree species of carbon sequestration in conifer man-made forests and three kinds forest type. The results showed that there was a same trend in the correlation of stand characteristics and carbon sequestration, bamboo man-made forests had a smallest carbon storage but had largest carbon sequestration. The carbon sequestration was lower as the age increase in conifer man-made forests, and the main tree species' carbon sequestration showed no obvious difference in conifer man-made forests, the Moso bamboo carbon sequestration had obvious higher difference.

【keywords】 Taiwanese man-made forests, published data, carbon sequestration, stand characteristics, age, tree species

目錄

摘要.....	i
Abstract.....	ii
目錄.....	iii
表目錄.....	v
圖目錄.....	vi
壹、前言.....	1
貳、前人研究.....	3
一、臺灣地區之森林資源.....	3
二、森林生物量及碳貯量之推估.....	4
(一)生物量之推估.....	4
(二)森林碳量之推估.....	5
三、臺灣針葉樹及闊葉樹人工林蓄積量的相關研究.....	7
(一)臺灣針葉樹及闊葉樹人工林之概況.....	7
(二)針葉樹及闊葉樹人工林之蓄積量相關研究.....	7
四、臺灣竹類人工林之相關研究.....	9
(一)臺灣竹類資源之概況.....	9
(二)竹類生長特性.....	10
(三)臺灣竹類人工林蓄積量之相關研究.....	11
五、次級資料之相關研究.....	13
參、研究材料與方法.....	14
一、研究資料蒐集.....	14
二、研究方法.....	19
(一)分析臺灣人工林之碳吸存情形.....	20
(二)臺灣人工林林分性態值及年碳吸存之比較分析.....	20
(三)臺灣人工林特殊林型之年碳吸存比較.....	21
肆、結果與討論.....	22
一、針葉樹人工林.....	22
(一)林分性態值.....	22
(二)林分性態值之相關分析.....	23
(三)年碳吸存之回歸分析.....	24
二、闊葉樹人工林.....	25

(一)林分性態值	25
(二)林分性態值之相關分析	27
(三)年碳吸存之回歸分析	28
三、竹類人工林	29
(一)林分性態值	29
(二)林分性態值之相關分析	30
(三)年碳吸存之回歸分析	32
四、不同人工林之林分性態值比較探討	33
五、人工林碳吸存量之特性分析	39
(一)林齡對年碳吸存之影響	39
(二)針葉樹人工林樹種別對年碳吸存之差異	41
(三)不同林型代表性樹種之年碳吸存差異	42
伍、結論與建議	44
一、結論	44
二、建議	45
陸、參考文獻	47
附錄	57

表目錄

表 1.臺灣森林主要林型之面積.....	3
表 2.臺灣人工林之蓄積量相關研究.....	8
表 3.臺灣竹類人工林之相關研究.....	12
表 4.本研究進行林分碳吸存評估所蒐集資料來源.....	14
表 5.臺灣重要木材比重與碳含量係數.....	15
表 6.本研究所收集文獻之研究區域在臺灣之分布.....	16
表 7.本研究所蒐集資料之各林型主要樹種統計.....	18
表 8.臺灣針葉樹人工林之林分性態值.....	22
表 9.臺灣針葉樹人工林之林分性態值 Pearson 相關分析.....	23
表 10.臺灣針葉樹人工林之年碳吸存量回歸表.....	25
表 11.臺灣闊葉樹人工林之林分性態值.....	26
表 12.臺灣闊葉樹人工林之林分性態值 Pearson 相關分析.....	27
表 13.臺灣闊葉樹人工林之年碳吸存量回歸表.....	28
表 14.臺灣竹類人工林之林分性態值.....	30
表 15.臺灣竹類人工林林分性態值之 Pearson 相關表.....	31
表 16.臺灣竹類人工林之年碳吸存量回歸表.....	32
表 17.三種人工林林型之林分性態值 ANOVA	33
表 18.臺灣針葉樹人工林不同齡級之 ANOVA 分析.....	39
表 19.臺灣針葉樹人工林不同齡級之碳吸存比較.....	40
表 20.臺灣針葉樹人工林不同樹種年碳吸存之 ANOVA 分析.....	41
表 21.臺灣針葉樹人工林主要樹種之年碳吸存比較.....	41
表 22.臺灣人工林代表樹種年碳吸存之 ANOVA 分析.....	43
表 23.臺灣人工林代表樹種之年碳吸存比較.....	43

圖目錄

圖 1.竹林永續收穫模式圖.....	11
圖 2.針葉樹研究區域圖.....	17
圖 3.闊葉樹研究區域圖.....	17
圖 4.竹類研究區域圖.....	17
圖 5.研究流程圖.....	19
圖 6.不同林型之平均胸徑變化.....	34
圖 7.不同林型之平均樹高變化.....	35
圖 8.不同林型之林分密度變化.....	35
圖 9.不同林型之年均溫變化.....	36
圖 10.不同林型之海拔變化.....	36
圖 11.不同林型之碳貯量變化.....	37
圖 12.不同林型之年碳吸存變化.....	37
圖 13.臺灣針葉樹人工林之林齡與年碳吸存散佈圖.....	40



壹、前言

自 18 世紀工業革命以後，工廠林立導致大量溫室氣體排放，造成嚴重環境汙染及全球暖化現象，近年來由於環境趨於劣化，嚴重影響到人類生存，尤其是全球暖化現象已成為國際間的焦點。CO₂ 為主要的溫室氣體之一，其濃度自工業革命以後不斷增加，根據 CO₂ 濃度長期監測，工業革命前 CO₂ 濃度僅 280ppm，2013 已高達 391 ppm (NOAA, 2013)。聯合國為解決氣候變遷的全球性環境問題，特別成立政府間氣候變化專門委員會(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)，針對溫室氣體減量的問題於 1997 年在日本京都召集世界各國簽署了「京都議定書(Kyoto Protocol)」，以期世界各國達成溫室氣體減量協議，其目標為至 2012 年時全球碳排放量可以比 1990 年減少 5.2%。而減少碳排放量除了可從政策面著手以外，也可藉由「植林減碳」來降低大氣中 CO₂ 濃度，木本植物可經由光合作用機制將碳素固定於體內，Yude *et al.*(2011)曾估算全球森林碳蓄積總量約 861 Pg (Pg=10⁹ Mg)，1990~2007 期間碳吸存量約為 2.4 Pg C year⁻¹，因此植林減碳已成為當今世界各國努力的目標(Chen *et al.*, 2009; Yen *et al.*, 2010; Yen and Lee, 2011)。

森林為陸地上最大的碳貯存庫，臺灣具有豐富的森林資源，森林覆蓋面積接近全島面積 60%，其中天然林 1,527,500 ha，人工林 422,600 ha，竹林 152,300 ha(林務局，2005)。林裕仁等(2002)曾以第三次森林資源調查之蓄積量資料，估算臺灣森林碳貯量約為 71.68 Mg ha⁻¹，年碳吸存量約 2.17 Mg ha⁻¹ yr⁻¹，略高於亞洲及美洲熱帶森林年碳吸存 0.49 Mg ha⁻¹ yr⁻¹ (Lewis *et al.*, 2009)。臺灣天然林雖占有廣大面積，但天然林經營著重於生態保育，雖有一定的蓄積量，但由於生長緩慢，因此對碳吸存的貢獻較為有限(Yen and Wang, 2013)，人工林之經營以木材生展為主要目標，過去臺灣碳吸存之研究，大都以人工林為主；而竹類由於生長快速，近年來其碳吸存的研究也逐漸受到重視(王義仲，2011；林裕仁，2011；黃裕星，2011)。

由於不同林型在蓄積及特性上有很大的差異，探討不同林型在碳貯存及碳吸存上的差異，可作為植林減碳策略的參考(顏添明、黃凱洛，2006；Chen *et al.*, 2009；Yen *et al.*, 2011)。臺灣過去所發表之森林相關文獻雖然眾多，但多為地區性或單一樹種之調查，較少將大量文獻進行有系統歸納統整之研究；因此本研究為瞭解

不同人工林及竹林林型之碳吸存量差異及探討環境屬性與森林現況之關係，收集臺灣地區所發表之人工林蓄積量、生物量及碳貯存量等相關文獻，以臺灣主要林業學術期刊、相關單位研究報告為主，將所得資料依林型不同分為針葉樹人工林、闊葉樹人工林、竹類人工林等三大林型進行統整分析，並將原先資料為蓄積量、生物量之結果轉換為碳貯存量，再換算為年碳吸存量進行探討。

本研究旨在研究林分性態值與年碳吸存關係及不同林型在年碳吸存之差異。研究主要目的為：(1)探討臺灣人工林林分性態值與碳吸存量之關係 (2)比較三種主要人工林林型：針葉樹人工林、闊葉樹人工林、竹類人工林之林分性態值及碳量差異 (3)探討針葉樹人工林在不同林齡的年碳吸存差異，以及在過去發表資料之中數量較多的人工林樹種及竹種進行碳吸存量差異之比較探討。希望藉由本次研究所得結果，提供做為臺灣人工林碳吸存量之參考。

國立中興大學



National Chung Hsing University

貳、前人研究

一、臺灣地區之森林資源

臺灣森林資源豐富，森林面積 2,102,400 ha，約接近全島土地面積 60%；如依森林建造方式可分為天然林及人工林，其中天然林面積 1,527,500 ha，以天然闊葉林 975,800 ha 為主，人工林面積 422,600 ha，以人工針葉林 218,400 ha 為主，其次為人工闊葉林 144,600 ha，竹林 152,300 ha。茲將臺灣主要林型面積整理於表 1(林務局，2005)。

表 1. 臺灣森林主要林型之面積

Table 1. The main forest type area of Taiwan

林型	面積(ha)	森林面積百分比(%)
天然林	1,527,500	72.7
天然針葉林	220,100	10.5
天然闊葉林	975,800	15.8
天然針闊混淆林	331,600	46.4
人工林	422,600	20.1
人工針葉林	218,400	10.4
人工闊葉林	144,600	6.9
人工混淆林	59,600	2.8
竹林	152,300	7.2

資料來源:林務局(2005)

除依森林建造方式不同進行分類之外，在林業經營上多以森林的功能面向來進行分區管理，而森林的六項基本功能與價值為木材及副產物之生產、涵養水源及國土保安、提供野生動物棲息環境、生態保育及重要基因庫、提供民眾森林遊樂以及碳吸存的功能；依照上述之不同功能，臺灣將森林區分為自然保護區、國土保安區、森林遊樂區、林木生產區等四區，分別制定相關法規以利維護管理，依照經營方式不同，自然保護區、國土保安區、森林遊樂區多為天然林，林木生產區多以人工林為主，森林碳吸存的功能在人工林之中更有其探討價值。

王瑞閔(2007)以森林資源調查圖層、紀錄簿等資料及 IPCC 所公布之碳轉換

係數(50%)，估算臺灣國有林地共 1,456,900 ha 之碳吸存量，推估結果國有林地碳貯量約 99.52 Mg ha^{-1} ，略高於全球平均之 71.5 Mg ha^{-1} ，可見臺灣森林資源在碳量之貢獻。臺灣人工林面積雖遠比天然林來得要少，但在妥善的人為管理之下，林分對於碳貯存及碳吸存的貢獻卻較天然林為大，另外竹林快速生長的特性在近幾年逐漸受到重視，可在短期間內累積乾物質的特性在造林減碳的議題中扮演了重要的角色，Yen and Wang (2013)比較臺灣地區天然林、人工林、竹林之碳貯存與碳吸存，發現天然林在碳貯存上雖為最高，但碳吸存效率卻最低，竹林則相反，人工林居中。因此現今多以人工林及竹林作為研究對象，進行生物量估算及碳量推估等研究。

二、森林生物量及碳貯量之推估

(一)生物量之推估

生物量為單位面積內所有生物之乾重總合，或是某一段時間內生產力之累積，也是評估生物資源之生產力與未來趨勢之重要判斷指標；而森林生物量為林分養分循環與分布的基礎(高毓斌、張添榮，1989；林國銓等，1994)，因此如何估算森林生物量以了解林分生長情形具有其重要性。現今所使用之生物量估算方法如下(王子定、高毓斌，1980):

1. 平均木法(mean tree method):由各齡級中符合平均胸徑之竹木，測其總乾重再分別乘以各齡級之株數，所得即為林分生物量。
2. 平均木修正法(modified mean tree method):由各齡級符合平均胸徑±標準差之三株樣木，測其總乾重再乘以各齡級之株數。
3. 底面積比率法(basal area ratio method):由各齡級選取樣木之各部位乾重總合，再乘上樣區內立木底面積與樣木底面積之比率。
4. 株數比率法(culm number ratio method):各齡級之樣木各部位乾重總合，以各齡級株數與伐採樣木之株數比率乘之。
5. 回歸估算法(estimation by regression equations):選取樣木之後以各部位鮮重與乾重建立與胸徑的重量關係式，再將樣區內所有立木之胸徑帶入即可得到總生物量。此法可建立關係式以預測未來生長趨勢，準確性高，因此國內外學者現今多採用此方法。

目前最常使用估算生物量的方法為回歸估算法，由於此法所抽取之樣本數量較多，可減少統計上之誤差，所得之結果亦較接近實際值，且可建立異率生長模式(Allometric model)關係式以預測未來生長趨勢，國內外學者現今多採用此方法(王子定、高毓斌，1980；薛銘童、許博行，2003；林世宗等，2008；Chambers *et al.*, 2001；Zianis, 2008；Zhaodi *et al.*, 2010)。在建立關係式時，多以胸高直徑作為係數值，因胸徑在野外調查時為最易取得之資料，因此通常以胸徑與生物量兩者之關係建立方程式；但此種方程式多為經驗模式，將會受到樹種及地區等限制，無法運用於大面積之推估(孫正華等，2011；Yen *et al.*, 2009)。

(二)森林碳量之推估

木本植物可藉由光合作用機制將二氧化碳吸存到體內，成為生物量的一部分，因此可以藉由得知森林生物量進而估算森林整體碳量，森林碳貯存的能力又可分為碳貯存(Carbon storage)與碳吸存(Carbon sequestration)兩種。碳貯存為林木在一特定時間點所單位面積所貯存的碳量，為一個生物量累積的概念，通常以公噸來表示(Mg ha^{-1})；碳吸存指的是林木在某段特定時間內所吸收的碳量，類似於生長量的概念，除了公噸以外會加上時間單位，多以年為主的($\text{Mg ha}^{-1} \text{yr}^{-1}$)來表示(林國銓等，2006)。

估算林分碳量的方法主要可分為(李意德等，1997；李國忠等，2000；袁力民頁，2006)：

(1):由森林蓄積量為基礎:以森林地面調查資料所得之材積，以林木乾重密度求算乾材生物量，並求得各部位之生物量比例，再以碳濃度係數換算為碳貯量；由於此法是以地面調查之蓄積量資料為主，且臺灣在材積式的建立上較為齊全，運用上較為便利，因此較適合大面積的推估，常用於國家森林資源調查上。

(2)由森林生物量為基礎:直接以生物量與碳含量轉換係數進行估算，以單位面積林木生物量、各部位生物量比例、各部位之碳含量濃度及森林面積等資料估算出整體林分碳量，此法雖較繁瑣但卻較為精準，適合小面積林分的估算。

碳含量轉換係數也就是碳濃度，除了以理論值 50% 進行估算以外，也有學者為求精準而針對不同林木或部位進行碳濃度分析以求出精確之碳含量係數(游麗

玉，1995；林俊成等，2002；顏添明、黃凱洛，2006；紀怡嘉，2008)。碳量基本推估公式如(1)式所示(李國忠等，2000)：

$$C_{\text{plant}} = (N \times V_{\text{stem}}) \times \frac{V_{\text{whole}}}{V_{\text{stem}}} \times W_o/V_g \times C_{\text{con}} \quad (1)$$

(1)式中代號意思如下：

C_{plant} :林木每公頃碳貯存量

N :每公頃存活株數

V_{stem} :單株桿材積

$\frac{V_{\text{whole}}}{V_{\text{stem}}}$:單株桿材積與全株材積之轉換係數

W_o/V_g :生材平均比重

C_{con} :碳含量轉換係數

此公式主要是先求出林木之單桿材積量，接著以材積與生物量比重係數求得生物量，再以生物體中碳含量轉換係數將生物量轉換為碳貯存量，再加以換算為全林分之碳貯量。林裕仁等(2002)為提高臺灣地區森林碳量推估之精確度，針對針葉樹及闊葉樹主要用材樹種進行材積比重及碳含量係數之估算，以元素分析儀進行分析，發現針葉樹及闊葉樹之碳含量平均值分別為48.21%、46.91%，皆比碳含量理論值之50%要來得低；顏添明等(2009)為了解生物體碳含量係數及傳統推估50%濃度兩數值在生物量推估上有無差異，以臺灣主要針葉樹種進行比較，結果發現以50%濃度係數進行生物量估算上會產生高估的情形，紅檜與柳杉分別高估3.96%、1.83%，且在統計上有顯著差異。因此為避免產生高估之情形，如有確切碳含量係數之數據，建議還是以此數據為基礎進行推估，在計算碳貯量上較為精確。

三、臺灣針葉樹及闊葉樹人工林蓄積量的相關研究

(一)臺灣針葉樹及闊葉樹人工林之概況

臺灣人工林面積 422,600 ha，其中面積最大的為針葉樹人工林 218,400 ha，而針葉樹人工林主要之栽植樹種有紅檜(*Chamaecyparis formosensis* Matsum.)、柳杉(*Cryptomeria japonica* (L.f.))、杉木(*Cunninghamia lanceolata* (Lamb.))、臺灣杉(*Taiwania cryptomerioides* Hay.)，據林務局統計(1995)事業區內紅檜人工林材積約 1,496,000 m³，柳杉人工林約為 9,330,000 m³；這些主要栽植樹種除了具廣大面積及大量材積之外，木材之利用及經濟價值深受大家所喜愛，因此已成為針葉樹人工林之重要樹種。

而闊葉樹人工林面積 144,600 公頃，僅次於針葉樹人工林，樹種多為相思樹(*Acacia confuse* Merr.)、光臘樹(*Fraxinus formosana* Hay.)、臺灣欒(*Zelkova serrate* (Thunb.))等三種，此三種樹種由於近年造林運動的大量栽植，使得各樹種分布面積大幅上升，現已成為闊葉樹人工林之重要資源。據第三次森林資源調查顯示(林務局,1995)，相思樹面積為闊葉人工林之首位，面積達 21,200 ha，材積約 1,338,000 m³，其次為面積 9,900 ha 之光臘樹，材積約 748,000 m³。

(二)針葉樹及闊葉樹人工林之蓄積量相關研究

本研究著重於針葉樹及闊葉樹人工林蓄積量研究之收集統整，隨著時代演變，臺灣人工林從早期的木材生產目標已逐漸轉變為公益性價值，如綠美化、生物多樣性、碳吸存等，而其中森林之碳吸存功能越來越受到重視，且為配合京都議定書，政府開始大力推動平地造林政策，政策目標除了環境綠美化之外更要達到碳吸存之效果；因此臺灣森林相關研究從早期的結果多注重於材積量，近年來已漸轉變為以生物量、碳貯量為主。

茲將臺灣針葉樹及闊葉樹人工林之蓄積量相關研究整理如表 2，從表 2 可發現臺灣早期人工林研究多以蓄積量為主，如黃溪旺(1947)在大埔進行相思樹研究、洪良斌等(1979)雙流地區之光臘樹研究及洪良斌等(1980)調查蓮華池之肖楠等，皆以探討蓄積量作為研究主軸；而後隨著時代演變、森林注重之價值已逐漸變為生物量及碳貯量，相關研究如表 2；在碳貯量的計算方式多以先求得蓄積量或生

物量之後，以實測方式如元素分析儀取得生物體碳含量係數，在以此係數進行轉換，或參考前人研究所發表相同樹種之碳含量結果進行推估，如林裕仁等(2002)所發表之臺灣重要樹種碳轉換係數。

表 2. 臺灣人工林之蓄積量相關研究

Table 2. The research of Taiwanese man-made forests growing stock

樹種	地區	林分密度 (trees ha ⁻¹)	林齡 (years)	研究結果			參考文獻
				蓄積量	生物量	碳貯量	
相思樹	大埔	3764	16	✓	-	-	黃溪旺(1947)
	苗栗	310	47	-	✓	✓	林國銓等(2007)
	臺東	530	30	-	✓	✓	林國銓等(2009)
光臘樹	雙流	2333	14	✓	-	-	洪良斌等(1979)
	六龜	2500	26	-	✓	✓	林國銓等(2010)
	太麻里	1090	27	-	✓	✓	林國銓等(2010)
	清水溝	1600	19	✓	✓	✓	江博能等(2010)
	雲林	941	8	-	✓	✓	林郁評(2011)
	花蓮	941	6	✓	-	✓	沈柔含(2011)
	屏東	1400	8	✓	-	✓	廖宜緯等(2011)
臺灣檫	內茅埔	706	9	-	✓	✓	柯淑惠(2006)
	雲林	1500	8	-	-	✓	林郁評(2011)
	花蓮	776	6	✓	-	✓	沈柔含(2011)
柳杉	溪頭	1470	30	-	✓	-	李訓煌(1978)
	霧社	1300	31	-	✓	-	張峻德(1986)
	溪頭	1280	35	-	✓	-	林世宗(1989)
	巒大	759	25	-	✓	✓	袁力民頁(2006)
	阿里山	540	84	✓	-	-	魏浚紘(2008)
	對高岳	948	94	-	✓	✓	沈介文等(2009)
	溪頭	1200	70	-	✓	✓	黃冠理(2010)
	人倫	36	36	-	✓	-	杜清澤等(2011)

表 2(續). 臺灣人工林之蓄積量相關研究

Table 2. The research of Taiwanese man-made forests volume (Continued)

樹種	地區	林分密度 (trees ha ⁻¹)	林齡 (years)	研究結果			參考文獻
				蓄積量	生物量	碳貯量	
紅檜	大雪山	1340	29	-	✓	-	陳俊文(1993)
		678	30	-	-	✓	哀力民頁(2006)
	六龜	1619	25	-	✓	✓	邱志明等(2011)
臺灣杉	六龜	2110	27	-	✓	✓	林國銓等(2004)
		424	33	-	✓	✓	劉興旺等(2009)
肖楠	內茅埔	915	26	✓	-	-	洪良斌等(1980)
	蓮華池	1100	31	✓	-	-	劉宣誠等(1986)
杉木	八仙山	364	54	-	✓	-	顏添明等(2004)
臺灣扁柏	棲蘭山	1820	30	-	✓	-	葉青峯(2004)

四、臺灣竹類人工林之相關研究

(一)臺灣竹類資源之概況

臺灣地理位置良好，位處亞熱帶與熱帶之間，多變的氣候與海拔垂直分布更是達到溫帶林與熱帶林並存的環境，對於竹類生長及分布具備了相當良好的條件。根據林務局(2005)之統計，臺灣竹林面積 152,300 ha，約占全島面積 4.24%；臺灣現今的竹種約 18 屬 58 種，其中有六種竹種因竹筍因具有食用價值或竹材可供利用而歸類於經濟竹種，分別是孟宗竹(*Phyllostachys pubescens* Mazel)、桂竹(*Phyllostachys makinoi* Hay.)、麻竹(*Dendrocalamus latiflorus* Munro)、長枝竹(*Bambusa dolicholada* Hay.)、荊竹(*Bambusa stenostachya* Hackel)、綠竹(*Bambusa oldhamii* Munro in Trans. Linn.)；前兩者為單桿散生型竹類，以生產竹材為主，竹筍為輔；後四者為合軸叢生型竹類，其中麻竹、綠竹以竹筍生產為主，荊竹、長枝竹則是竹材生產為主(路統信，1999；顏添明，2002)。

(二)竹類生長特性

竹類生長特性與一般林木不同，可分為兩個階段，第一階段為快速生長期，在快速生長期竹筍在 40~45 天之內快速破土而出，此時竹筍吸收養分快速，迅速抽高及開枝展葉，但此時期僅是完成高生長，因此桿部、枝部強度很低，而此階段過後竹子的胸徑、高度就少有變動；第二階段為乾物質累積期，時間為高生長完成之後至竹材可供收穫之期間，大約 3~4 年，此階段竹子外型變異不大，主要為吸收養分及加厚細胞壁、增加重量，而隨著竹材強度增加，含水率也會逐漸下降(顏添明，2002；王義仲，2004)。

從生長特性可看出竹類有著快速生長、短期累積高生產力等特性，長久以來卻未受到重視，近幾年氣候暖化的問題益趨嚴重，竹類可快速累積生物量及碳量之重要性始被各國所重視(顏添明，2002；Scurlock *et al.*, 2001；Yen *et al.*, 2010)。而竹林每年皆會萌發新竹，成為異齡林之結構，因此若是無人管理之竹林林分，過多老竹會影響新竹之生長空間，進而導致林分老化、生產力下降；但如可以利用此特性經營竹林林分訂定收穫系統，在過熟老竹與新竹之間取得伐採平衡，竹林將可達到永續收穫之狀態，永續收穫模式如圖 1 所示

National Chung Hsing University

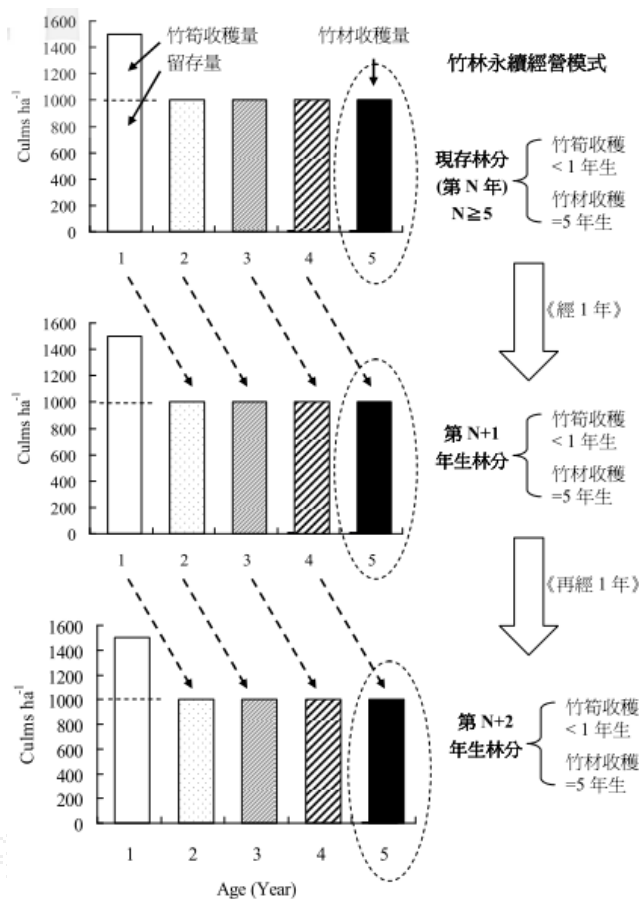


圖 1. 竹林永續收穫模式圖 (參考自顏添明, 2011)

Fig. 1. Sustainable management of bamboo stands

National Chung Hsing University

(三) 臺灣竹類人工林蓄積量之相關研究

茲彙整臺灣地區竹類人工林蓄積量相關文獻如表 3。從表 3 中可發現臺灣竹類研究之結果多為探討其生物量或碳貯量，在蓄積量上較少文獻著墨於此，其因為竹類中空有節，在計算材積上較為困難，且竹材在販賣上多以捆束來計價(李久先、楊忠義, 1980)，因此材積較少作為研究之目標，多以生物量作為探討對象，而後開始重視到竹類碳吸存的能力，才漸漸轉為以碳貯量及碳吸存量為研究目標，研究中最為常見之竹種為孟宗竹、桂竹、麻竹。

在獲取植體碳濃度之方式上，大多採用元素分析儀取得數據，較少使用理論值 50% 直接進行推估；紀怡嘉(2008)針對臺灣主要經濟竹種進行植體碳濃度分析，碳濃度最高為孟宗竹 48.29%，最低為麻竹 45.79%，皆比理論值之 50% 來的低，因此如果以理論值進行推估將會產生高估的情形。

竹林生長情況之好壞受到林分經營管理之影響相當顯著，雖然經營策略及目的會因竹種不同而有所差異，但基本的撫育方式仍是不可忽略，如：鋤草、培土、灌溉、施肥、密度管理等等，其中又以施肥及密度管理為最常採用之經營方式(林文鎮、呂錦明，1978；汪大雄，2011)，顏添明(2003)也指出疏伐管理與施肥會影響桿高之生長速率，疏伐之影響力較施肥來得要大。

表 3. 臺灣竹類人工林之相關研究

Table 3. The research of Taiwanese bamboo man-made forests

竹種	地區	林分密度 (culms ha ⁻¹)	研究結果			參考文獻
			蓄積量	生物量	碳貯量	
孟宗竹	臺灣地區	4936	-	✓	-	劉宣誠等(1972)
	溪頭	3535	-	✓	-	王子定(1980)
	溪頭	3360	-	✓	-	高毓斌(1985)
	惠蓀林場	2744	-	✓	✓	王仁等(2009)
	石棹	2522	-	✓	✓	王仁等(2009)
	竹山	4133	-	✓	✓	羅佑杰(2009)
	惠蓀林場	10633	-	✓	✓	王仁等(2010)
	鹿谷	5167	-	✓	-	陳財輝等(2011)
	鹿谷	8400	-	✓	✓	孫百寬等(2011)
桂竹	臺灣	20986	✓	-	-	劉宣誠等(1971)
	竹山	10271	-	✓	-	呂錦明等(1992)
	惠蓀林場	17445	-	✓	-	游麗玉(1995)
	竹山	21175	-	✓	✓	紀怡嘉(2008)
	大溪	18767	-	✓	-	陳財輝等(2009)
	竹東	11667	-	✓	-	陳財輝等(2009)
	蓮華池	19667	-	✓	-	鍾欣芸等(2010)
麻竹	臺灣	2855	✓	-	-	劉宣誠等(1974)
	六龜	4550	-	✓	-	高毓斌等(1991)
	魚池	9085	-	✓	✓	王義仲(2004)
	竹山	400(叢)	-	✓	✓	孫百寬(2012)

五、次級資料之相關研究

研究資料的獲得大致可分為初級資料(primary data)及次級資料(secondary data)兩種，初級資料為研究者直接依照研究目的而進行調查所取得之原始資料，許多研究皆採用此方法，詳列如前表 2 及表 3；次級資料為引用先前已發表之初級資料來作為研究的材料，整合內容並針對探討的問題進行內容分類、數據分析等工作，以獲得所想要之結果。

關於次級資料的優點，David W. Seward(1993)認為次級資料具有省時、降低研究成本的優點，且可在不同領域、不同時間點上收集資料，在資料整理歸納中可了解到研究目標之趨勢變化，而資料來源多為圖書館、學術期刊、政府資料庫等等，但在收集過程中必須了解資料特性及資料來源，因此要如何選取適當的次級資料是需要花時間去辨認與選取；Gurevitch *et al.*(1992)也認為次級資料的分析可將許多獨立的研究結合，進而成為一個有效分析問題的工具。但次級資料之研究仍有其缺點所在，例如資料蒐集過程中常會遇到困難、所收集到之資料與研究目標較不符、在數值單位上需要再進行整理統一等等。

而次級資料研究法在近年來也漸漸應用在森林之領域上，如國內學者林俊成等(2002)以林務局所公布之造林成果之蓄積量，推算全民造林運動在 CO₂ 吸存潛力之探討，王瑞閔(2007)以林務局事業區永久樣區之資料，推算國有林地碳吸存；國外學者 Alain *et al.* (2006)研究四種地區森林之密度與生長關係，蒐集相關研究整理發現，以傘伐及除伐的林分在透光度、林木生長上表現皆良好；Piotto (2008)收集 14 篇研究進行熱帶及寒帶地區人工純林與人工混合林生長之比較，結果發現在人工純林的胸徑生長速率高於混合林，但在樹高生長速率上並無差異，而混合林有其經濟及生態上的效益，重要性仍不可忽略；Bonner *et al.*(2013)以次級分析比較天然次生林與人工純林的地上部生物量累積差異，研究顯示人工純林年平均生物量累積速率高於天然次生林，特別是在樹冠覆蓋度高或是高降雨量的地區。

參、研究材料與方法

一、研究資料蒐集

本研究文獻主要來源為臺灣地區林業學術期刊(中華林學季刊、臺灣林業科學、林業研究季刊、林業試驗所報告、臺大實驗林研究報告)、其他研究報告所刊錄之文獻，資料蒐集對象以臺灣針葉樹人工林、闊葉樹人工林、竹類人工林為主，並以森林蓄積量、生物量及碳貯存量等關鍵字進行搜尋，整理所蒐集文獻之試驗地資料及研究樹種資料、生育地因子。詳細建檔資料如下:樹種、胸高直徑、樹高、林齡、林分密度、年均溫、海拔、年降雨量及結果數據(蓄積量、生物量、碳貯存量)；總計所收集之文獻總數 56 篇，以中華林學季刊為首位，共 14 篇，其次為臺灣林業科學 12 篇，茲將文獻來源整理如表 4。

表 4. 本研究進行林分碳吸存評估所蒐集資料來源

Table 4. The resource of stand carbon sequestration paper

文獻來源	篇數
中華林學季刊	14
臺灣林業科學 (含林業試驗所研究報告季刊)	12
林業研究季刊	7
林業試驗所報告	11
臺大實驗林研究報告	10
其他研究報告	2

臺灣森林之研究早期多著重於材積收穫之結果，結果通常以材積量為主，近年來森林經營目標改變，森林碳吸存之效益逐漸受到重視，研究目標逐漸變成探討森林生物量、碳貯量或是碳吸存量；因此在資料上包括蓄積量、生物量及碳貯存量等資料，在森林層級上以林分為主。

由於本研究的主要目的在於探討碳吸存量，如數據結果為蓄積量，則先將其轉換為生物量再轉換為碳貯存量；生物量則轉換為碳貯存量，碳貯存量則直接引用；其中生物量及碳貯存量之轉換係數參考林裕仁等(2002)所建立之生物量轉換

係數及碳濃度轉換係數進行轉換，茲將參考木材比重與碳含量係數值整理於表 5，如碳濃度轉換係數有缺少者將以 50% 作為推估基礎。

表 5. 臺灣重要木材比重與碳含量係數

Table 5. Wood gravity and carbon content of Taiwanese main tree species

樹種	絕乾比重(g/cm ³)	碳含量百分比(%)
紅檜	0.42	48.64
柳杉	0.36	49.03
臺灣杉	0.32	48.32
相思樹	0.77	47.17
光臘樹	0.73	46.83
大葉桃花心木	0.5	47.26
臺灣櫟	0.73	47.66

(參考自林裕仁等，2002)

將所蒐集資料依林型不同做區分，分別為針葉樹人工林、闊葉樹人工林、竹類人工林，三者之資料數分別為 67 筆、29 筆、35 筆，並將收集到文獻之研究地區詳列於表 7 及標示於圖 1~3。從圖表中可看出研究區域多集中於中部地區的實驗林及山區(惠蓀林場、大雪山、八仙山、蓮華池)、臺灣大學實驗林(溪頭、清水溝、內茅埔)及林業試驗所高雄六龜分所。闊葉樹人工林由於平地造林運動的實施，因此研究區域散布於屏東、花蓮等造林運動實施地區，而竹類人工林多位於南投竹山、鹿谷、惠蓀林場、蓮華池等處，北部、南部、東部有零星研究；針葉樹人工林以中部臺大實驗林及中興實驗林等地方為主，在北部、南部較少分布。

表 6. 本研究所收集文獻之研究區域在臺灣之分布

Table 6. The research areas in Taiwan of collecting datas

地區	林型	詳細地區及樹種
北部	針葉樹	-
	闊葉樹	三義(相思樹)、後龍(木麻黃)、苑裡(木油桐)
	竹類	大溪(桂竹)、竹東(桂竹)、陽明山(包籜矢竹)
中部	針葉樹	大雪山(紅檜)、巒大(柳杉)、八仙山(杉木)、大甲溪(臺灣二葉松)、溪頭(柳杉)、內茅埔(臺灣杉)、人倫(柳杉)、對高岳(柳杉)、蓮華池(肖楠)、霧社(柳杉)
	闊葉樹	清水溝(光臘樹)
	竹類	鹿谷(孟宗竹)、蓮華池(桂竹)、惠蓀林場(孟宗竹)、魚池(麻竹)、溪頭(孟宗竹)、竹山(孟宗竹)、人倫(孟宗竹)、蓮華池(孟宗竹)
南部	針葉樹	六龜(紅檜、臺灣杉)、恆春(貝殼杉)
	闊葉樹	六龜(光臘樹、山黃麻)、屏東(光臘樹、欖仁、苦楝、水黃皮、大葉桃花心木)、嘉義(相思樹)、恆春(光臘樹)
	竹類	六龜(馬來麻竹)
東部	針葉樹	-
	闊葉樹	太麻里(光臘樹、楓香)
	竹類	-

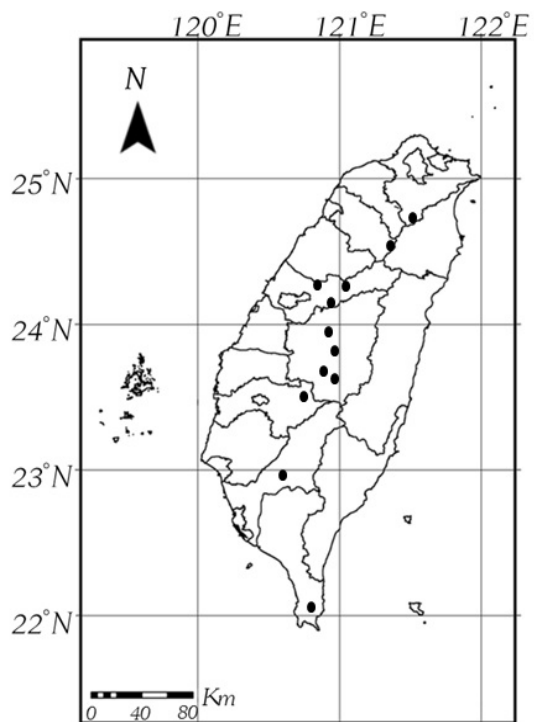


圖 2. 針葉樹研究區域圖

Fig. 2. The study site of conifer

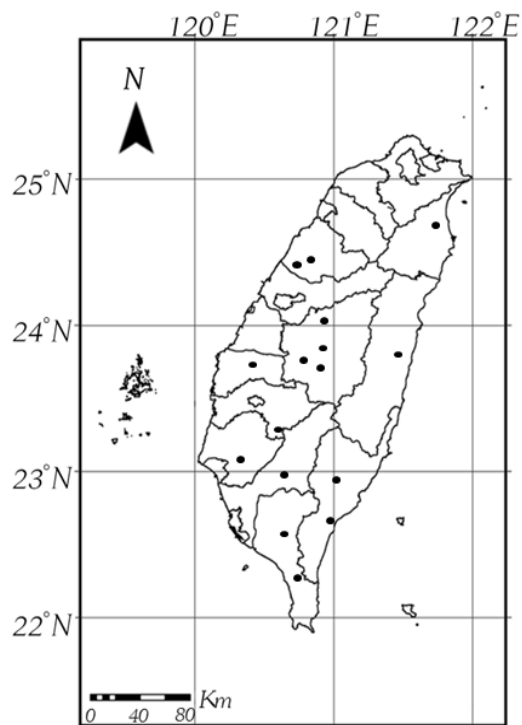


圖 3. 闊葉樹研究區域圖

Fig. 3. The study site of broad leaf

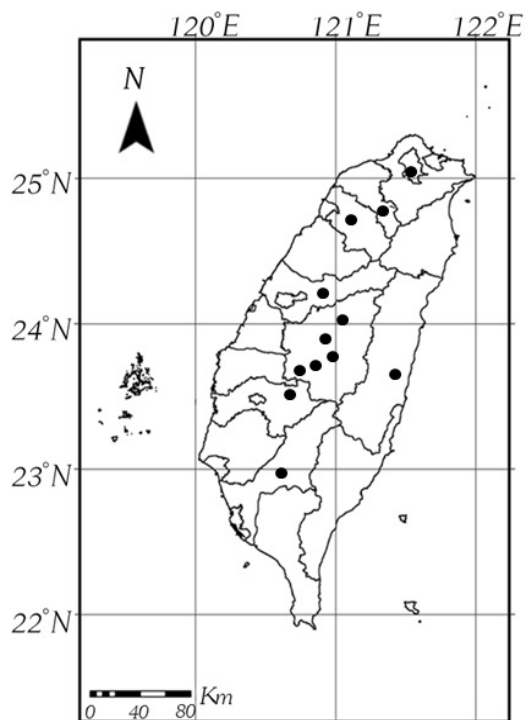


圖 4. 竹類研究區域圖

Fig. 4. The study sites of bamboo

檢視所蒐集資料並統計其結果後發現，針葉樹人工林 67 筆當中以紅檜、臺灣杉之資料數目最多，兩者資料數分別為 22 筆及 18 筆，其餘樹種如：柳杉、杉木、臺灣二葉松、肖楠、貝殼杉等之文獻較為分散，一共收集到 28 筆；闊葉樹人工林共 29 筆，以光臘樹之 17 筆為最多，其他樹種如：臺灣檫、相思樹、大葉桃花心木等共佔 12 筆；竹類人工林資料數目共 35 筆，以孟宗竹 19 筆及桂竹 10 筆為主。茲將詳細之樹種分類列於表 7。

表 7. 本研究所蒐集資料之各林型主要樹種統計

Table 7. The counting of main tree species of collecting data

林型	筆數排序	樹種別	資料數
針葉樹人工林	1	紅檜	22
	2	臺灣杉	18
	3	肖楠	14
	4	柳杉	9
	5	其他	4
闊葉樹人工林	1	光臘樹	17
	2	其他	12
竹類人工林	1	孟宗竹	19
	2	桂竹	10
	3	其他	6

National Chung Hsing University

二、研究方法

本研究之研究流程如圖 5 所示：

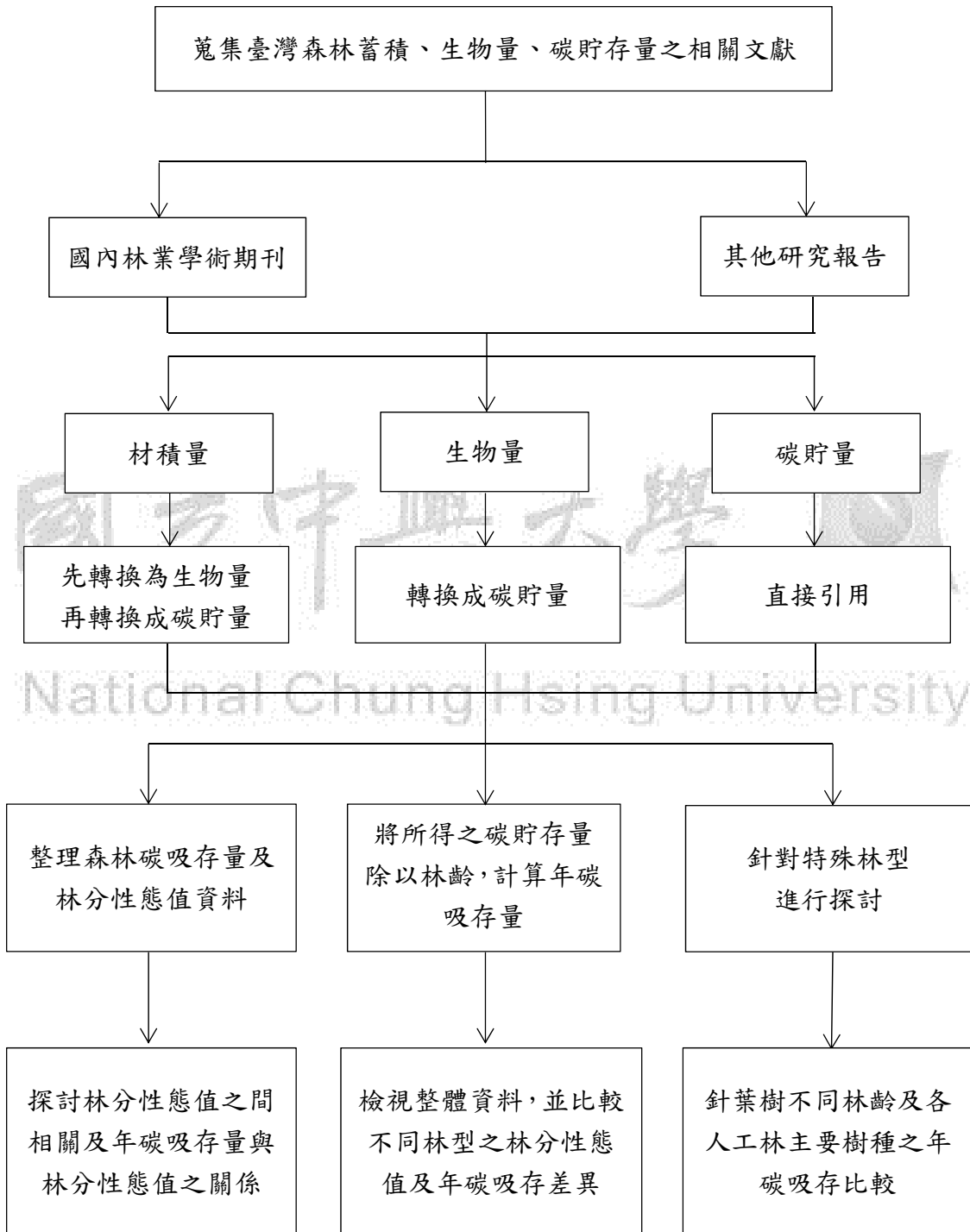


圖 5. 研究流程圖

Fig. 5. The flow chart of this study

在蒐集臺灣人工林相關文獻時，僅蒐集正式發表之學術期刊所刊登之文獻，碩博士論文由於並非正式發表之資料，因此本研究便不將其數據結果列入分析；蒐集資料並將其建檔分類，並將其結果統一轉換為碳貯量，以利後續碳吸存分析。將所收集文獻依其研究樹種區分，分為闊葉樹、針葉樹、竹類，整理其研究地區、林分性態值如：樹種、胸徑、林分密度、樹高、林齡、海拔、年均溫、年降雨量、蓄積量、生物量、碳貯量等資料。

為利於後續統計比較分析，碳貯量將換算為年碳吸存，換算概念參考自Piotto(2008)所提出的年平均生長概念去估算樹木生長狀況，此計算方式可將年齡的影響降到最低，因此本研究採用此概念，將每筆資料統一換算為碳貯存量，再除以林齡以年碳吸存量($\text{Mg ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$)進行分析。

本研究之統計分析皆使用統計軟體 SPSS 18.0 進行。詳細分析方法及內容如下：

(一)分析臺灣人工林之年碳吸存情形

以敘述性統計(descriptive statistics)檢視整體資料，將針葉樹人工林、闊葉樹人工林、竹類人工林之林分性態值及環境因子之平均數、標準差、最大值、最小值列出，可做為本次研究數據的概況了解，在以 Pearson 相關分析分別了解各林型之中各林分性態值：平均胸徑、平均樹高、林分密度、林齡、海拔、年均溫、年降雨量彼此之間相關性為何，先做初步的探討；但由於以相關分析僅能了解變數與變數之間關係，並無法控制住單一變數了解其餘變數對其影響力大小，因此將年平均碳吸存做為依變數，平均胸徑、平均樹高、林分密度、海拔高、年均溫、年降雨量等因子做為自變數，以回歸分析之結果去了解各人工林林型之年碳吸存與林分性態值關係及影響力大小。

(二)臺灣人工林林分性態值及年碳吸存之比較分析

為瞭解臺灣針葉樹人工林、闊葉樹人工林、竹類人工林林型在林分性態值及碳量上有無差異，以單因子變異數分析(analysis of variance, ANOVA)分析平均胸徑、平均樹高、林分密度、海拔、年均溫、年降雨量、碳貯量等因子，可了解臺灣人工林在林分性態值上之差異為何，再將每筆資料之碳貯量除以

林齡，求得年平均碳吸存($\text{Mg ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$)並比較三種人工林的年碳吸存量之間有無差異，並將有呈顯著差異的變數繪製盒鬚圖，從圖可更了解資料分散及差異程度，將比較結果與相關文獻結論做比較探討。

(三)臺灣人工林特殊林型之年碳吸存比較:

將收集到各林型之資料再加以細分，依其年齡及樹種分類，將此些資料歸類為特殊林型，並以 ANOVA 分析進行比較。在林齡之部分僅探討針葉樹人工林，原因在於針葉樹人工林林齡資料所涵括範圍較大，較易進行比較分析，而闊葉樹人工林之文獻多為探討平地造林運動之樹種，在林齡範圍上較為狹窄；竹類人工林由於其生長特性的緣故，多為異齡林之構造而無法進行林齡之分類探討比較。因此本研究便以針葉樹人工林之林齡作為探討對象，旨在比較不同林齡時對於年碳吸存之影響。檢視所收集針葉樹人工林資料後，將其區分為齡級 I:30 年生以下、齡級 II:31~60 年生、齡級 III:61 年生以上進行分析。

在樹種分類上目的在於了解在過去研究中人工林最常出現之代表樹種在年碳吸存上是否有所差異。針葉樹人工林之代表樹種包括臺灣杉、紅檜、柳杉、肖楠及其他樹種，以此五種分類進行比較探討；在各林型之代表樹種包括紅檜、臺灣杉、光臘樹、孟宗竹，為不影響比較結果，在資料篩選上皆選擇未達輪伐期之資料進行比較。

肆、結果與討論

一、針葉樹人工林

(一)林分性態值

本研究所蒐集之針葉樹人工林資料共計 67 筆，將其進行敘述性統計分析，求得平均值、標準差、最大值、最小值及中位數等數值，結果如表 8 所示。由表 8 結果得知，針葉樹人工林平均林齡 35 年生，平均胸徑及平均樹高分別為 26.54 cm、16.50 m，林分密度平均值為 984 trees ha⁻¹，平均分布於海拔 1271 m、年均溫約 19.1°C、年降雨量 2,638 mm 之地區；原始之 67 筆資料中有 39 筆已有碳貯存資料，另 28 筆係由本研究以材積量或生物量進行轉換，此外將所得之碳貯量除以年齡計算平均年碳吸存，所得之平均碳貯存量及平均年碳吸存分別為 83.61 Mg ha⁻¹、2.69 Mg ha⁻¹ yr⁻¹。

從資料上可得知，本次研究收集之針葉樹人工林在林齡部分，從 12 年生至 100 年生範圍橫跨甚大，平均林齡也已達 35 年生；從海拔及年均溫之資料可看出，依植群分布帶之分類臺灣針葉人工林大多位於亞熱帶及暖溫帶地區，如紅檜適合生長環境為海拔 1500~2150 m、柳杉適合生長在海拔 1000~2000 m(劉業經等，1994)；在林分密度上最大值 2380 trees ha⁻¹與最小值 145 trees ha⁻¹相差甚大，因為本研究所得之資料來自不同時期、樹種及地區，資料之標準差較大，此為可預期之結果。

表 8. 臺灣針葉樹人工林之林分性態值

Table 8. The stand characteristics of Taiwanese man-made conifer forests

針葉樹人工林之 林分性態值 (n=67)	平均值	標準差	最大值	最小值	中位數
平均胸徑(cm)	26.54	11.49	68.60	11.18	23.85
平均樹高(m)	16.50	4.97	29.20	8.04	15
林齡(years)	35	22	100	12	26
林分密度(trees ha ⁻¹)	984	502	2380	145	948
年均溫(°C)	19.10	2.31	22.45	12.86	18.6

表 8 (續). 臺灣針葉樹人工林之林分性態值

Table 8. The stand characteristics of Taiwanese man-made conifer forests (Continued)

針葉樹人工林之 林分性態值 (n=67)	平均值	標準差	最大值	最小值	中位數
年降雨量(mm)	2638	542	3459	1852	2280
海拔(m)	1271	390	2600	740	1310
碳貯量(Mg ha ⁻¹)	83.61	42.42	272.36	9.67	80.46
年碳吸存(Mg ha ⁻¹ yr ⁻¹)	2.69	1.04	5.78	0.65	2.69

(二)林分性態值之相關分析

將表 8 所示之項目，分別為平均胸徑、平均樹高、林分密度、林齡、海拔、年均溫、年降雨量、碳貯量、年碳吸存等 9 項因子；以 Pearson 相關進行分析，所得分析結果如表 9。

表 9. 臺灣針葉樹人工林之林分性態值 Pearson 相關分析

Table 9. The Pearson correlation of Taiwanese conifer man-made forests stand characteristics

	平均胸徑	平均 樹高	林分 密度	林齡	海拔	年均溫	年降 雨量	碳貯量	年碳 吸存
年碳吸存	-0.235	-0.213	0.574 ^{***}	-0.449 ^{***}	-0.100	0.179	-0.120	0.177	1
碳貯量	0.682 ^{***}	0.752 ^{***}	-0.238	0.733 ^{***}	-0.010	0.010	0.020	1	
年降雨量	-0.201	-0.228	0.133	0.052	-0.390 ^{**}	0.239	1		
年均溫	0.041	0.023	-0.284 [*]	-0.172	-0.805 ^{***}	1			
海拔	-0.212	-0.189	0.223	0.062	1				
林齡	0.821 ^{***}	0.889 ^{***}	-0.596 ^{***}	1					
林分密度	-0.636 ^{***}	-0.651 ^{***}	1						
平均樹高	0.934 ^{***}	1							
平均胸徑	1								

註:*為 p 值小於 0.05，**為 p 值小於 0.01，***為 p 值小於 0.001

從表 9 得知平均胸徑與碳貯量、林齡、平均樹高呈現顯著正相關，與林分密度呈顯著負相關，而平均樹高之相關結果也與平均胸徑相同；林分密度之相關分析結果，在平均胸徑、平均樹高、林齡、年均溫呈現負相關，僅與年碳吸存呈現正相關；林齡與碳貯量為正相關，年碳吸存量為負相關；海拔與年均溫及年降雨量呈現負相關。

本研究所得之結果和前人研究相符合，一般胸徑會隨著林齡而增加，且與樹高有著極密切之正相關(孫正華等，2011)；林分株數越多，其平均胸徑及平均樹高會受到負向影響(顏添明，1993；李隆恩，2010)。在林分密度、林齡與年均溫部分，株數越多會使得整體林分碳貯量上升，進而使年碳吸存增加，因此為正相關；吳秉珊(2012)認為溫度適當地提高會增加植物生長速率，但相對地也會使得競爭作用、自我疏伐更容易發生，進而使林分株數下降因此與林分密度呈現負相關。

而本研究所分析之林齡與碳貯量呈顯著正相關卻與年碳吸存呈現顯著負相關，推論原因在於林木生長所累積之碳貯量會逐漸增加，但年碳吸存可視為一淨生長的概念，林木到了成熟林狀態之後便會逐漸開始老化，在生長量上將會逐漸降低甚至會達到負成長，因此林齡才會與年碳吸存呈現負相關，此結果在以往的相關文獻上也得到相同之結論(劉素玲等，2009；鄭景鵬等，2010；衛強等，2010；王亞男等，2011；洪志祐，2012)。

(三)年碳吸存之回歸分析

由於表 9 相關分析僅能了解變數與變數之間關係為何，並無法瞭解影響力之大小，為更了解林分性態值對於年碳吸存之影響差異大小，將資料再進行回歸分析。將年碳吸存作為依變數，其餘因子如：平均胸徑、平均樹高、林分密度、年均溫、海拔、年降雨量當作自變數，以逐步回歸法進行分析，由於林齡已在換算年碳吸存時所使用到，因此便不列入自變數當中，針葉樹人工林年碳吸存之回歸結果如表 10 所示。

從表 10 可知，與年碳吸存呈顯著相關因子為林分密度、年均溫、平均樹高、海拔等四項，四者皆呈顯著正相關，F 值 33.697，調整後 R^2 為 0.712，以林分密度之標準化係數值 1.031 最大，表示林分密度對於年碳吸存量之影響力最高，其

次為年均溫之標準化係數值 0.926。回歸分析之結果與前人相似:如邱志明等(2011)發現強度疏伐林分之材積淨生長量高於未疏伐林分,顯現林分密度對於年碳吸存具有顯著影響力。

表 10. 臺灣針葉樹人工林之年碳吸存量回歸表

Table 10. The regression of Taiwanese conifer man-made forests annual carbon sequestration

變數	未標準化係數	標準化係數	t 值	F 值	調整後 R ²
常數	-8.283		-6.086 ^{***}	33.697 ^{***}	0.712
林分密度	0.002	1.031	9.869 ^{***}		
年均溫	0.324	0.926	7.114 ^{***}		
平均樹高	0.092	0.523	5.117 ^{***}		
海拔	0.001	0.448	3.451 ^{**}		

註:***代表 p 小於 0.001, **代表 p 小於 0.01

綜合相關分析及回歸結果可得知,在各林分性態值當中彼此之相關關係有正有負,而影響針葉樹人工林之年碳吸存之最主要因子為林分密度、年均溫、平均樹高及海拔等四項。年均溫及海拔對於年碳吸存為正向影響,推測為本研究所收集之資料導致此一結果;而從林分密度及平均樹高的結果可知;在經營針葉樹人工林林分時,除了需考量到栽植地區之環境條件是否恰當,更需特別針對林分株數進行管理,因林分株數會影響胸高斷面積及樹高生長,如果林分過於鬱閉會進而產生競爭作用、出現枯死率上升之情形,使得林分整體材積量減少及淨生長率下降,碳吸存效率也隨之降低。因此如要使針葉樹人工林年碳吸存上升,控制林分密度以進行管理是不可或缺的經營方式。

二、闊葉樹人工林

(一)林分性態值

臺灣闊葉樹人工林之描述性統計資料如表 11,從表 11 之結果可了解在過去發表資料中,臺灣闊葉樹人工林之平均胸徑及平均樹高分別約為 11.24 cm、10.46 m,平均林齡 14 年生,平均林分密度 1877 trees ha⁻¹,在生長地區部分,平均海拔 385 m,年均溫及年降雨量分別為 22.34 °C 及 2904 mm;原始之 29 筆資料中有 18 筆已有碳貯存資料,另 11 筆係由本研究以材積量或生物量進行轉換,將所

得之碳貯量除以年齡計算平均年碳吸存，所得之平均碳貯存量及平均年碳吸存分別為 33.87 Mg ha⁻¹、2.20 Mg ha⁻¹ yr⁻¹。

從闊葉樹人工林之敘述性統計可看出，過去發表之闊葉樹人工林資料在平均胸徑、平均樹高及林齡的表現上低於針葉樹人工林許多，分布地區多位於熱帶及亞熱帶地區，屬榕楠林帶及楠櫛林帶，原因為闊葉樹人工林在過去發表資料中多為探討造林政策成效之文獻，而全民造林運動及景觀平地造林運動分別於1997、2002年執行，且栽植地區多位於低海拔地區，因此在林齡、栽植地區上之結果較為一致。林分密度也受到造林政策要求之存活率目標影響，多維持在 1500 trees ha⁻¹ 以上，僅有少數資料為早期試驗地資料或林齡過大而使林分密度較低；在碳貯量部分上由於多為幼齡林，因此較低於針葉樹人工林，但在統計上有無顯著差異將於後續進行比較。

表 11. 臺灣闊葉樹人工林之林分性態值

Table 11. The stand characteristics of Taiwanese broad leaf man-made forests

闊葉樹人工林之 林分性態值 (n=29)	平均值	標準差	最大值	最小值	中位數
平均胸徑(cm)	11.24	6.24	34	4.92	8.65
平均樹高(m)	10.46	3.80	18.9	3.63	10.67
林齡(years)	14	9	47	8	9
林分密度(trees ha ⁻¹)	1877	907	3764	310	1600
年均溫(°C)	22.34	2.06	24.5	18.5	22.30
年降雨量(mm)	2904	858	3804	1860	2931
海拔(m)	385	289	1050	80	325
碳貯量(Mg ha ⁻¹)	33.87	28.91	136.8	2.37	31.72
年碳吸存(Mg ha ⁻¹ yr ⁻¹)	2.20	1.07	3.64	0.30	2.45

(二)林分性態值之相關分析

將表 11 所示之林分性態值如:平均胸徑、平均樹高、林分密度、林齡、海拔、年均溫、年降雨量、碳貯量及年碳吸存等九項變數進行相關分析，詳細分析結果如表 12 所示。

表 12. 臺灣闊葉樹人工林之林分性態值 Pearson 相關分析

Table 12. The Pearson correlation of Taiwanese broad leaf man-made forests stand characteristics

	平均胸徑	平均樹高	林分 密度	林齡	海拔	年均溫	年降 雨量	碳貯量	年碳 吸存
年碳吸存	0.296	0.690***	0.443*	0.283	0.469*	-0.490**	0.645***	0.594**	1
碳貯量	0.858***	0.828***	-0.137	0.919***	0.620**	-0.517**	0.125	1	
年降雨量	0.065	0.379*	0.625***	-0.052	0.178	-0.315	1		
年均溫	-0.519**	-0.638***	-0.081	-0.444*	-0.874***	1			
海拔	0.642***	0.694***	-0.046	0.581**	1				
林齡	0.918**	0.724***	-0.295	1					
林分密度	-0.423*	-0.115	1						
平均樹高	0.793***	1							
平均胸徑	1								

註:*為 p 值小於 0.05，**為 p 值小於 0.01，***為 p 值小於 0.001

從表 12 中可看出平均胸徑與碳貯量、海拔、林齡皆呈顯著正相關，與林分密度呈現顯著負相關；平均樹高與年碳吸存、碳貯存、海拔、林齡皆為顯著正相關，與年均溫呈顯著負相關；林分密度與年碳吸存、年降雨量皆呈顯著正相關，林齡與碳貯量、海拔呈顯著正相關，與年均溫呈顯著負相關；海拔與年碳吸存及碳貯量呈顯著正相關，與年均溫負相關；年均溫則與碳貯量及年碳吸存量皆呈顯著負相關；而年降雨量及碳貯量皆與年碳吸存呈現顯著正相關。

此相關分析之結果與針葉樹人工林所呈現之結果類似，林分密度會影響平均胸徑及平均樹高生長，此一結果也與前人研究結果相符，江博能等(2010)指出光臘樹在樹高生長到一定程度之後，便轉為胸徑生長，且從林分密度與胸徑之關係

可看出林分競爭情形，林郁評(2012)亦指出林分密度過高會導致樹冠產生鬱閉情形，需在適當時間進行撫育修枝之工作以減少競爭情形，因此本研究之胸高斷面積與林分密度呈現負相關之原因在於平地造林初期皆採密植方式進行，進而限制了胸徑生長，使得胸高斷面積會與林分密度呈現負相關；水分則是植物生長初期最需要養分之一，良好充足的水分可促進植物生長並避免枯死，因此年降雨量與平均樹高、林分密度及年碳吸存皆呈顯著正相關；而林齡與年均溫及海拔之關係推測是由於本研究收集之資料原本型態導致此一相關情形產生。

(三)年碳吸存之回歸分析

為更了解闊葉樹人工林之林分性態值對年碳吸存之影響力大小，將年碳吸存作為依變數，平均胸徑、平均樹高、林分密度、海拔、年均溫、年降雨量等作為自變數，以逐步回歸法進行分析，分析結果如表 13。回歸結果平均樹高及林分密度與年碳吸存皆呈正向顯著相關，兩者標準化係數值分別為 0.743 及 0.560，以平均樹高對於年碳吸存之影響力最大，F 值 46.392，調整後 R^2 為 0.771。

表 13. 臺灣闊葉樹人工林之年碳吸存量回歸表

Table 13. The regression of Taiwan broad leaf man-made forests annual carbon sequestration

變數	未標準化係數	標準化係數	t 值	F 值	調整後 R 平方
常數	-1.320		- 3.483**	46.392***	0.771
平均樹高	0.211	0.743	8.033***		
林分密度	0.001	0.560	6.046***		

註:***代表 p 小於 0.001

將回歸結果與相關分析之結果作比較可發現，由於闊葉樹人工林大多位處平地，生長環境條件大多雷同，原本在相關分析當中有呈現顯著相關之海拔、年均溫、年降雨量，在回歸之結果當中並無顯著，而平均樹高與林分密度與年碳吸存仍呈現顯著正向相關；表示在因子情況下，海拔、年均溫、年降雨量之解釋能力已被平均樹高及林分密度所取代，且從相關分析結果了解平均樹高又會受到林分密度之影響，因此對於年碳吸存所影響最大之因子僅剩平均樹高及林分密度

綜合之前所探討之結果，平均樹高也會受到林分密度影響，因此為提升年碳吸存，闊葉樹人工林進行林分密度管理為必要之撫育措施。本研究結果也與前人

結果類似，林金樹(2008)認為林分密度過高及鬱閉度會影響平地造林之胸徑生長及高生長，如光臘樹之胸徑生長及高生長在 10 年生時即受到限制，需進行疏伐提高生長速率，而疏伐強度可依林分鬱閉度進行調整。

三、竹類人工林

(一)林分性態值

竹類人工林之敘述統計結果如表 14，由於竹林林分為異齡林之狀態，在區分林齡上較有所困難，因此林齡在林分性態值探討上便不列入比較。從表 14 之結果可知，過去發表之竹類人工林之平均胸徑及平均稈高為 7.14 cm 及 9.65 m，平均分布於海拔 777 m、年均溫 20.15°C、年降雨量 2,764 mm 之地區；林分密度受到竹類生長特性散生及叢生影響，比起針葉樹人工林及闊葉樹人工林呈現較高之密度，平均為 7,686 culms ha⁻¹；原始之 35 筆資料中有 12 筆已有碳貯存資料，另 24 筆係由本研究以材積量或生物量進行轉換，將所得之碳貯量除以年齡計算平均年碳吸存，所得之平均碳貯存量及平均年碳吸存分別為 27.36 Mg ha⁻¹、5.47 Mg ha⁻¹ yr⁻¹。

從資料上可發現在林分密度上的資料相差甚大，除了受到竹種生長特性之影響，原因在於林分經營程度也會顯著影響林分密度(孫百寬，2012)，因此許多學者會針對此一影響進行實驗控制(王仁等，2010；鍾欣芸等，2010；孫百寬等，2013)；由於竹林研究多為私有林之林分，在追求竹筍產量之目標下，大多研究地區分布於中低海拔地區、雨量豐富等適合竹類生長之環境，在植群分布帶上屬於亞熱帶地區，此一現象也與林文鎮、呂錦明(1987)所提出雨量多寡會影響竹林生長之結論相符。

表 14. 臺灣竹類人工林之林分性態值

Table 14. The stand characteristic of Taiwanese bamboo man-made forests

竹類人工林之 林分性態值 (n=35)	平均值	標準差	最大值	最小值	中位數
平均胸徑(cm)	7.14	4.90	29.9	2.60	6.80
平均稈高(m)	9.65	3.09	21.40	6.30	8.87
林分密度(culms ha ⁻¹)	9897	5825	24255	2855	8344
年均溫(°C)	20.15	2.65	23.00	11.5	20.8
年降雨量(mm)	2764	573	4618	2135	2600
海拔(m)	777	350	1500	118	700
碳貯量(Mg ha ⁻¹)	27.36	19.21	89.59	6.84	23.20
年碳吸存(Mg ha ⁻¹ yr ⁻¹)	5.47	3.84	17.92	1.37	4.64

(二)林分性態值之相關分析

為了解竹類人工林之林分性態值彼此之間相關性為何，以 Pearson 相關進行分析，由於竹林為異齡林之狀態，要區分林分之竹齡較為困難，因此林齡便不列入相關探討，且竹類中空有節，無詳細資料無法計算胸高斷面積，因此以平均胸徑、平均稈高、林分密度、海拔、年均溫、年降雨量、碳貯量、碳吸存量進行相關分析，分析結果詳列於表 15。

從表 15 可發現碳貯存與年碳吸存之相關結果一致，原因在於竹類到了林齡 4~5 年生之後竹稈會開始產生縱裂之現象，漸漸老化並失去利用價值，故竹類迴歸期多為 5 年為一期(顏添明, 2011)，因此年碳吸存計算方式多將碳貯存除以 5，以求得每年平均新竹生長量，此計算方式使得碳貯存與年碳吸存之相關結果數據相同，因此以下探討皆以年碳吸存為主。從表 16 中可看出平均胸徑與海拔、平均稈高皆為顯著正相關，與林分密度呈顯著負相關；平均稈高則與年碳吸存、年降雨量、海拔等呈顯著正相關，與林分密度為負相關；林分密度與年降雨量呈顯著正相關，與年均溫呈顯著負相關；海拔則與年碳吸存及年降雨量成顯著正相關；年均溫與年碳吸存及年降雨量皆為負相關；年降雨量與年碳吸存為顯著正相關。

表 15. 臺灣竹類人工林林分性態值之 Pearson 相關表

Table 15. The Pearson correlation of Taiwanese bamboo man-made forests stand characteristics

	平均胸徑	平均稈高	林分密度	海拔	年均溫	年降雨量	碳貯量	年碳吸存
年碳吸存	0.294	0.534**	0.060	0.421*	-0.557***	0.659***	1	1
碳貯量	0.294	0.534**	0.060	0.421*	-0.557***	0.659***		
年降雨量	0.284	0.538**	0.388*	0.388*	-0.627**	1		
年均溫	-0.330	-0.239	-0.415*	-0.281	1			
海拔	0.443**	0.353*	-0.305	1				
林分密度	-0.514**	-0.359*	1					
平均稈高	0.602**	1						
平均胸徑	1							

註:*為 p 值小於 0.05，**為 p 值小於 0.01，***為 p 值小於 0.001

從相關分析結果可了解，竹類人工林林分密度對於平均胸徑及平均稈高的影響結果與針葉樹、闊葉樹人工林一致，林分株數過多皆會使得平均胸徑及平均數高受到壓迫，進而使林分整體生物量下降；而海拔及年降雨量、年均溫等因子皆會影響竹類發育，其中又以年降雨量對於平均稈高、林分密度之影響最為重要，水分在竹類發育時扮演了重要的角色，充足的水分可促進新竹生長、累積乾物質，由於竹類於高生長階段完成之後，胸徑及稈高便不再有明顯增加，僅累積乾物質及強化稈部組織，竹類的外型自一開始便影響著碳貯存量，進而影響年碳吸存，因此對於年碳吸存呈正相關。

相關分析所得之結果也與前人相符，羅佑杰(2009)認為竹林之密度管理即是疏伐作業，如未進行疏伐作業將會影響新竹萌發、林分老化，使得林分平均胸徑下降；孫百寬(2012)研究指出林分密度過密之竹林林分胸徑明顯較小，且胸徑大小與經營程度(施肥、灌溉、疏伐)有顯著之關係；林文鎮、呂錦明(1987)及 Kleinhenz *et al.*(2003)也指出水分及溫度對於竹筍萌發有著密切的關係，如雨季遲來則需進行林地灌溉以促進發筍。

(三)年碳吸存之回歸分析

為更了解竹類人工林林分性態值與年碳吸存之影響力關係，以逐步回歸法進行回歸分析，分析結果如表 16。回歸結果平均胸徑、年均溫、平均稈高等三項因子與年碳吸存均呈顯著影響，兩者皆為正向影響，僅年均溫為負向影響，以平均胸徑影響力最大，其標準化係數值為 0.414，模式 F 值 38.245，調整後 R² 為 0.817。

表 16. 臺灣竹類人工林之年碳吸存量回歸表

Table 16. The regression of Taiwanese bamboo man-made forests carbon sequestration

變數	未標準化係數	標準化係數	t 值	F 值	調整後 R 平方
常數	8.330		3.008	38.245***	0.817
平均胸徑	0.460	0.414	3.757**		
年均溫	-0.501	-0.378	-4.255***		
平均稈高	0.420	0.406	3.689**		

註:***代表 p 小於 0.001

與相關分析之結果做比較之後可發現，林分密度在回歸分析結果上呈現顯著影響，而海拔及年均溫在回歸結果中並無顯著；表示在控制住其他因子情況下，林分密度對於年碳吸存具有顯著之影響，而海拔及年均溫之影響能力推測是被年降雨量所取代，因竹類生長地區差異並不大，海拔及年均溫之解釋能力較不良好，而水份對於竹類生長發育是不可或缺的，因此年降雨量對於年碳吸存呈顯著正向影響。

綜合相關及回歸之分析結果可知，主要影響竹類人工林之年碳吸存的因子有：平均胸徑、年降雨量、平均稈高等三項因子，而胸高直徑及稈高又會受到林分密度、年降雨量之影響，因此如要促進竹類人工林林分之年碳吸存，必須加強林地灌溉及林分密度管理之撫育工作，在發筍期進行灌溉並每年擇伐老竹以增加新竹生長空間，促進新竹發筍及提高新筍品質，進而使林分之平均胸徑、平均稈高增大，使得整體林分之碳吸存效益提高。

四、不同人工林之林分性態值比較探討

由於僅以敘述性統計無法看出各林型在林分性態值上之實際差異，因此進行 ANOVA 分析了解各林型上是否有顯著差異，由於竹類人工林多屬於異齡林狀態，所以在林分性態值上不將林齡列入分析。將三種人工林之平均胸徑、平均樹高、林分密度、年均溫、年降雨量、海拔、碳貯量、年碳吸存以 ANOVA 分析比較有無顯著差異，並將有顯著差異之林分性態值繪製盒鬚圖，從盒鬚圖可更清楚資料之差異，分析結果如表 17 及圖 6~圖 12 所示。

表 17. 三種人工林林型之林分性態值 ANOVA

Table 17. The ANOVA of three kind man-made forests stand characteristics

	針葉樹人工林	闊葉樹人工林	竹類人工林	F 值
平均胸徑(cm)	26.54 ^a	11.24 ^b	7.14 ^c	155.599***
平均樹高(m)	16.50 ^a	10.46 ^b	9.65 ^b	26.120***
林分密度(trees ha ⁻¹)	994 ^b	1877 ^b	9897 ^a	113.121***
年均溫(°C)	19.10 ^b	22.34 ^a	20.15 ^b	40.751***
年降雨量(mm)	2638	2904	2764	3.915
海拔(m)	1271 ^a	385 ^c	777 ^b	100.388***
碳貯量(Mg ha ⁻¹)	83.61 ^a	33.87 ^b	27.36 ^b	60.121***
年碳吸存(Mg ha ⁻¹ yr ⁻¹)	2.69 ^b	2.20 ^b	5.44 ^a	45.873***

註:***為 p<0.001

從圖 6~圖 12 及表 17 之結果，可看出臺灣三種人工林之林分性態值比較結果上，在平均胸高直徑、平均樹高、林分密度、年均溫、海拔、碳貯量、年碳吸存量皆有所差異。針葉樹人工林之研究資料在林齡分布上橫跨範圍較大，年齡變化甚大，因此在分析結果上平均胸高直徑及平均樹高皆與闊葉樹人工林及竹類人工林有顯著差異；林分密度之結果由於竹類生長特性及平地造林政策等影響，在各人工林也呈顯著差異。

在碳貯量及年碳吸存的項目上，針葉樹人工林在碳貯量上最大，但年碳吸存最小，竹類人工林則是相反。而盒鬚圖之結果可從最大最小值分布範圍看出資料之分散程度，雖有些許極端值存在，但其在整體趨勢上仍呈現明顯的差異，在碳貯量上針葉樹人工林之最大值顯明顯高於闊葉樹及竹類人工林，但在年碳吸存上即可看出針葉樹及闊葉樹人工林兩者相差不大，竹類人工林明顯較高。

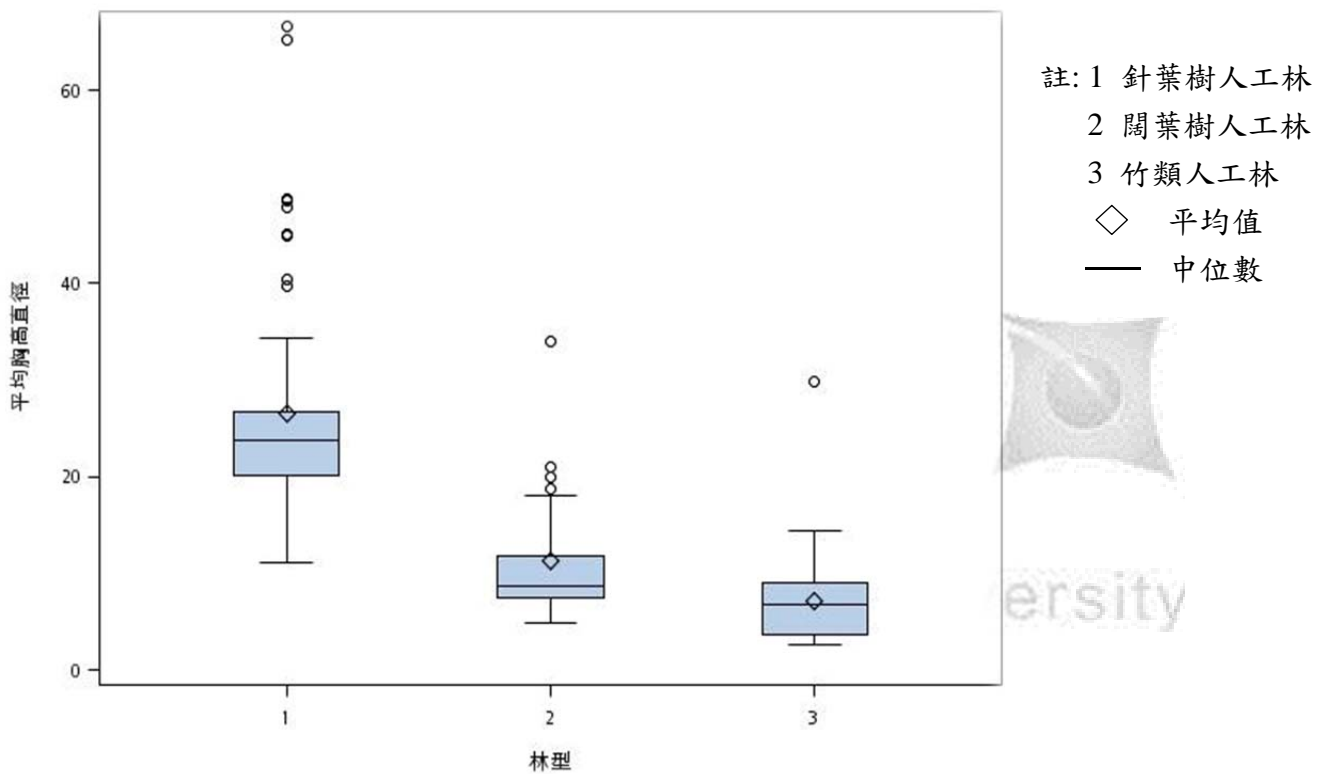


圖 6. 不同林型之平均胸徑變化

Fig. 6. The distribution of mean DBH among three different forests types by box-plot

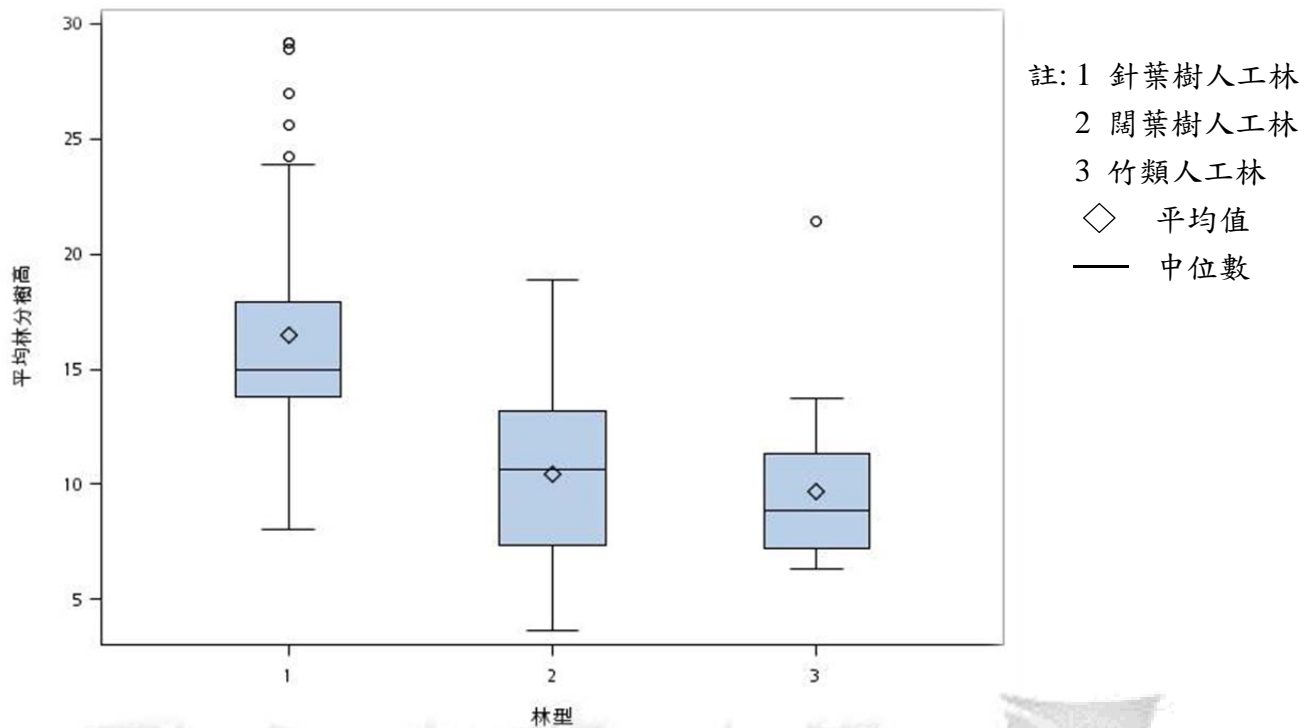


圖 7. 不同林型之平均樹高變化

Fig. 7. The distribution of mean H among three different forests types by box-plot

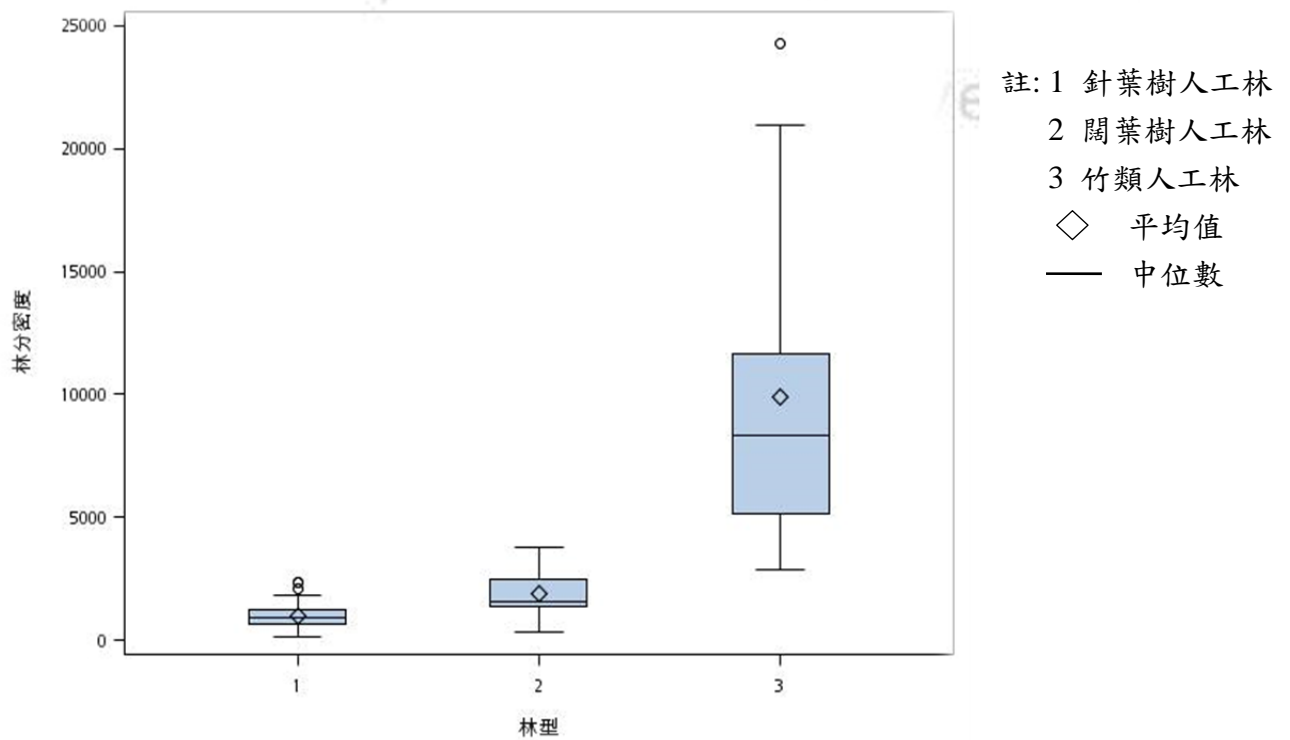


圖 8. 不同林型之林分密度變化

Fig. 8. The distribution of mean density among three different forests types by box-plot

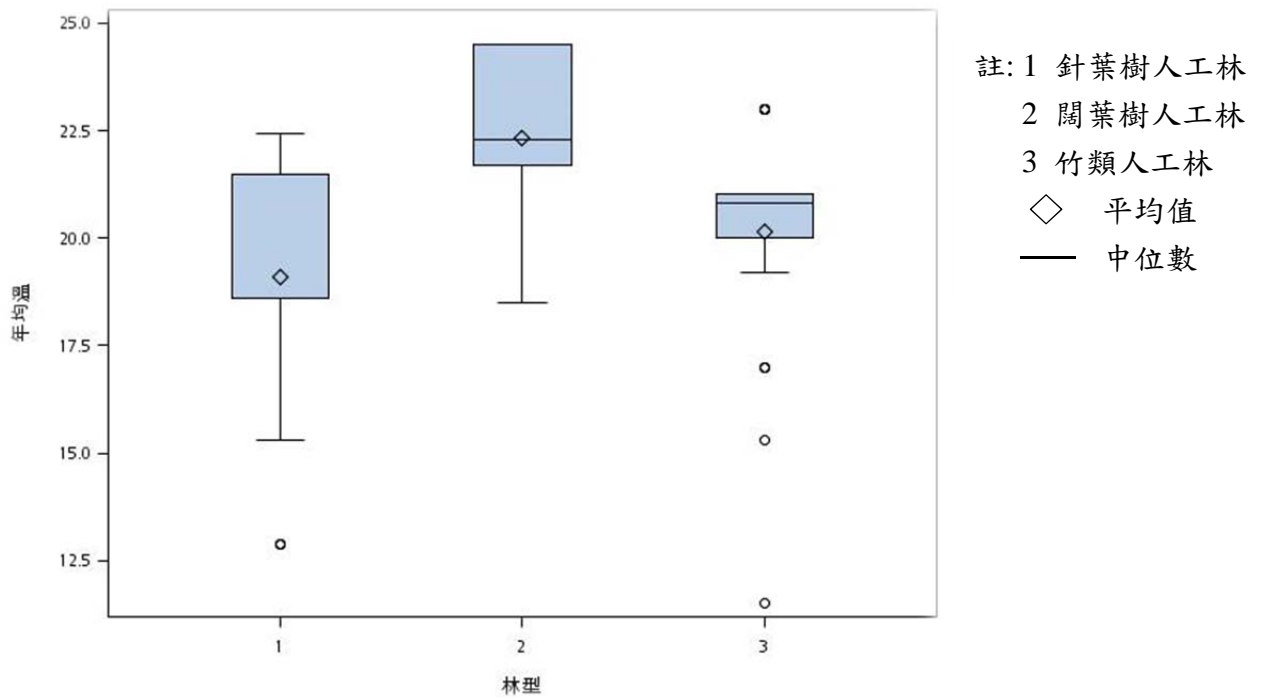


圖 9. 不同林型之年均溫變化

Fig. 9. The distribution of mean annual temperature among three different forests types by box-plot

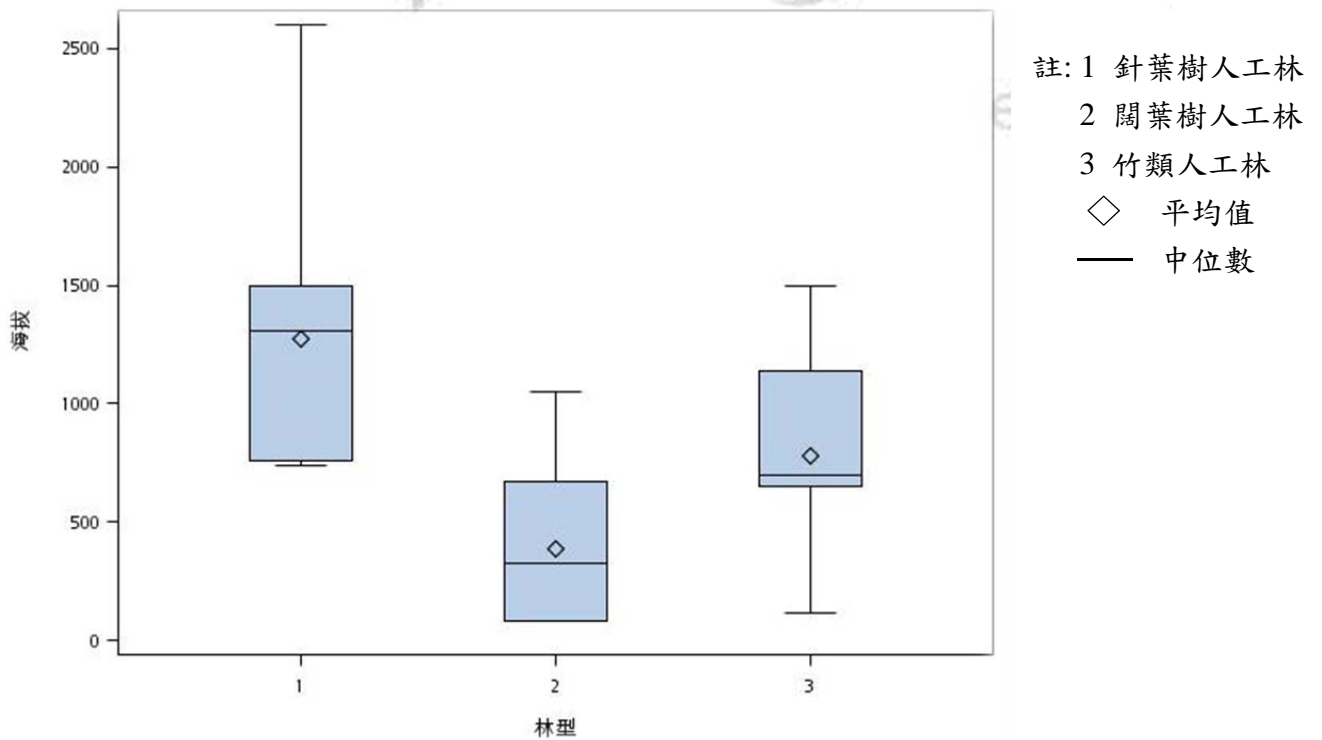


圖 10. 不同林型之海拔變化

Fig. 10. The distribution of altitude among three different forests types by box-plot

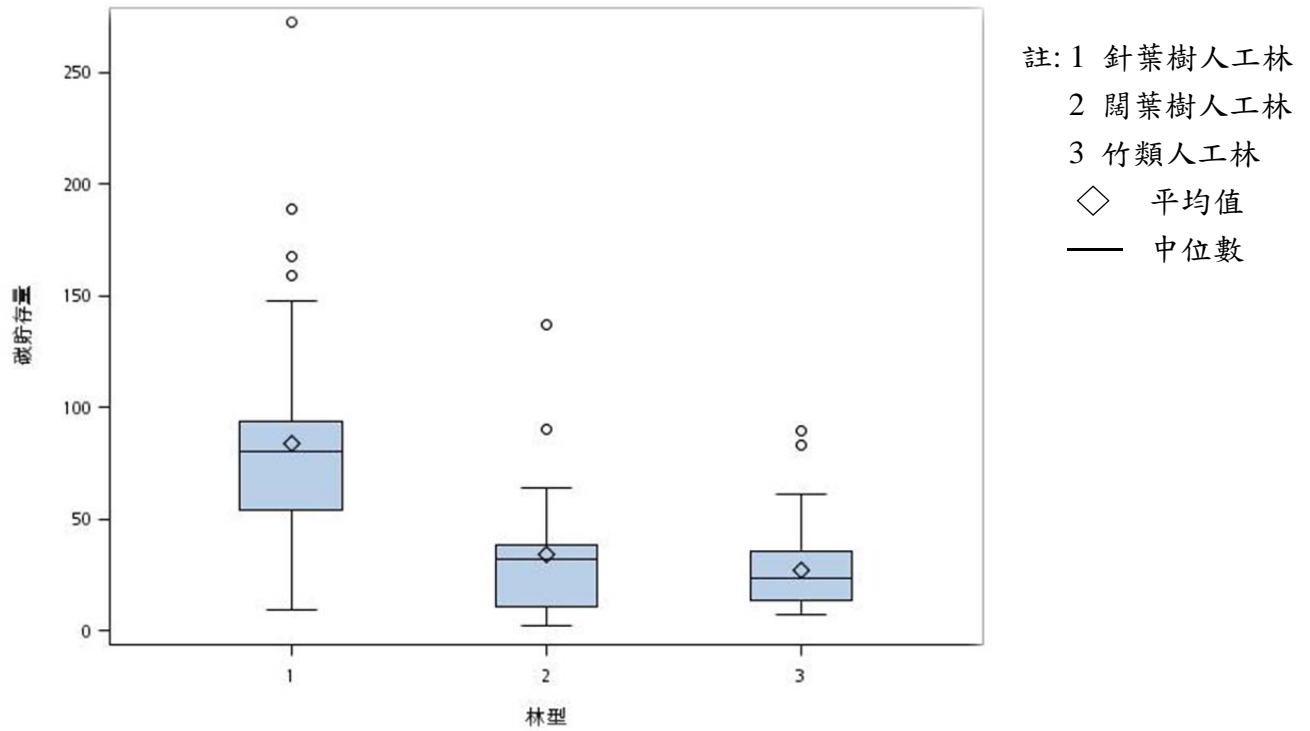


圖 11. 不同林型之碳貯量變化

Fig. 11. The distribution of carbon storage among three different forests types by box-plot

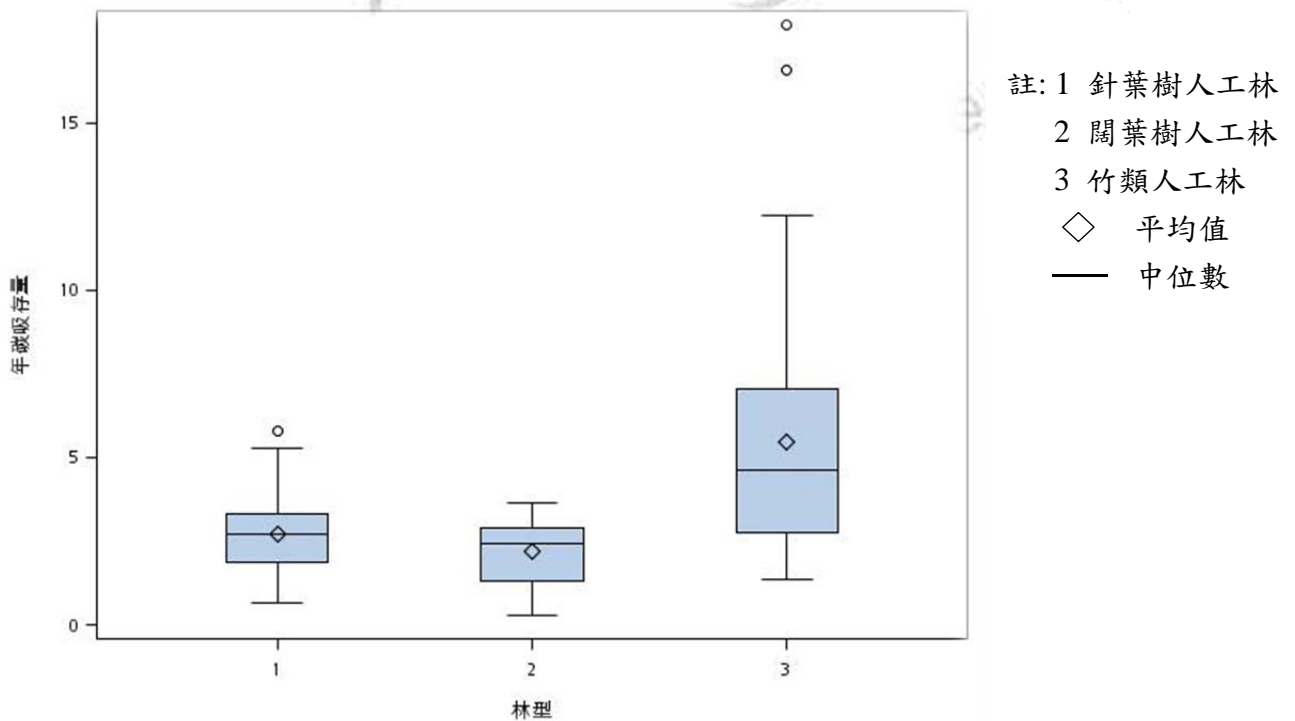


圖 12. 不同林型之年碳吸存變化

Fig. 12. The distribution of carbon sequestration among three different forests types by box-plot

有關不同類型森林碳吸存量的研究，Yen *et al.*(2011)比較孟宗竹與杉木之碳吸存，兩者碳吸存分別為 8.13 Mg ha^{-1} 、 3.35 Mg ha^{-1} ，經比較後發現孟宗竹之碳吸存速度顯著高於杉木；Bonner *et al.*(2013)比較緯度 30 度以內的天然次生林與人工純林之地上部生物量累積速率，結果指出人工純林在現有生物量上低於天然次生林，但在生物量累積速率上卻遠高於天然次生林；Yen and Wang (2013)比較臺灣中部地區之天然林、人工林(紅檜)、竹林(孟宗竹)之碳貯量及碳吸存效率，竹林雖在碳貯量部分低於天然林及人工林，但由於竹類生長快速，每年之新竹會增加可觀之生物量，結果指出竹林碳吸存 $8.13 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ 顯著大於天然林及人工林的 $0.67 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ 、 $3.47 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ 。

臺灣人工林在各林分性態值中因樹種不同及栽植目的的不同皆有所顯著差異，而在現今世界關心之森林碳量議題上，針葉樹人工林在現有碳貯量上較大，竹類人工林碳貯量則顯著低於針葉樹人工林及闊葉樹人工林，但在年碳吸存上由於針葉樹人工林之林齡普遍較大，在生長曲線上已處於下滑階段，因此年碳吸存已顯著低於竹類人工林；而竹林林分每年皆會萌發新竹且生長快速，竹桿在 4~5 年生時為最適當的伐採時機，因此竹林林分若連年進行擇伐移除林分內之老竹，所清理出來之空間可供新筍生長，而每年所萌發新竹之淨生長量便是深具潛力之碳吸存資源(汪大雄，2011；孫百寬等，2013；Yen *et al.*,2010)。如竹林未實施擇伐，林分之碳吸存量也會隨之衰退(顏添明，2002；林信輝等，2007；Yen and Wang, 2013)。

因此為增加臺灣人工林碳吸存貢獻，對原有針葉樹及闊葉樹人工林必須進行森林健康管理，防止病蟲害發生影響林分生長，並對林齡較大之林分在適當時機進行疏伐或擇伐處理，以增加生長空間及提升材積淨生長量，避免林分老化使得年碳吸存降低，以達到增加碳貯量及碳吸存之目的；在竹類人工林的部份，林分理想管理狀態下應實施經營撫育措施如：施肥、灌溉、林分密度管理，林分密度管理即是每年擇伐老竹進行利用，一來避免林分存在過多老竹，影響林分生長；二來可維持林分之生產力。

五、人工林碳吸存量之特性分析

(一)林齡對年碳吸存的影響

林木生長速率會隨著時間改變，通常在初期生長速率最為快速，隨著時間增加生長速率將會慢慢下降，為了解針葉樹在不同齡期之年碳吸存差異多大，將本研究林齡資料集區分為三個齡級，齡級 I :30 年生以下；齡級 II :31~60 年生；齡級 III:61 年生以上等三類進行分組，以 ANOVA 分析及事後檢定比較進行年碳吸存量之差異比較並繪製林齡與年碳吸存散佈圖以了解其分佈情形。

ANOVA 及事後檢定結果如表 18 及表 19 所示，從表 18 結果 F 值 9.151，三者有顯著差異，表 19 之結果得知針葉樹人工林齡級 I 年碳吸存為 $3.04 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ 、齡級 II 及齡級 III 分別為 $2.15 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ 、 $1.82 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ ，檢定統計值 9.151；從圖 13 之分佈也可看出年碳吸存量隨著林齡不同之變化，齡級 I 之資料點所分布之年碳吸存較高，齡級 II 及齡級 III 之年碳吸存資料點分布範圍較小。檢定結果齡級 I 的年碳吸存顯著高於齡級 II 及齡級 III 之年碳吸存，齡級 II 之結果雖略高於齡級 III，但在統計比較上則無顯著差異。

表 18.臺灣針葉樹人工林不同齡級之 ANOVA 分析

Table 18. The ANOVA test of different age Taiwanese conifer man-made forests carbon sequestration

	平方和	自由度	平均平方和	F 值
組間	15.78	2	7.89	9.151***
組內	55.18	64	0.86	
總和	70.96	66		

註:*** 為 $p < 0.001$

表 19.臺灣針葉樹人工林不同齡級之碳吸存比較

Table 19. The comparison of different age Taiwanese conifer man-made forests carbon sequestration

	齡級 I (n=44)		齡級 II (n=15)		齡級 III (n=8)	
	Mean	SD	Mean	SD	Mean	SD
年碳吸存量 (Mg ha ⁻¹ yr ⁻¹)	3.04 ^a	1.03	2.15 ^b	0.69	1.82 ^b	0.63

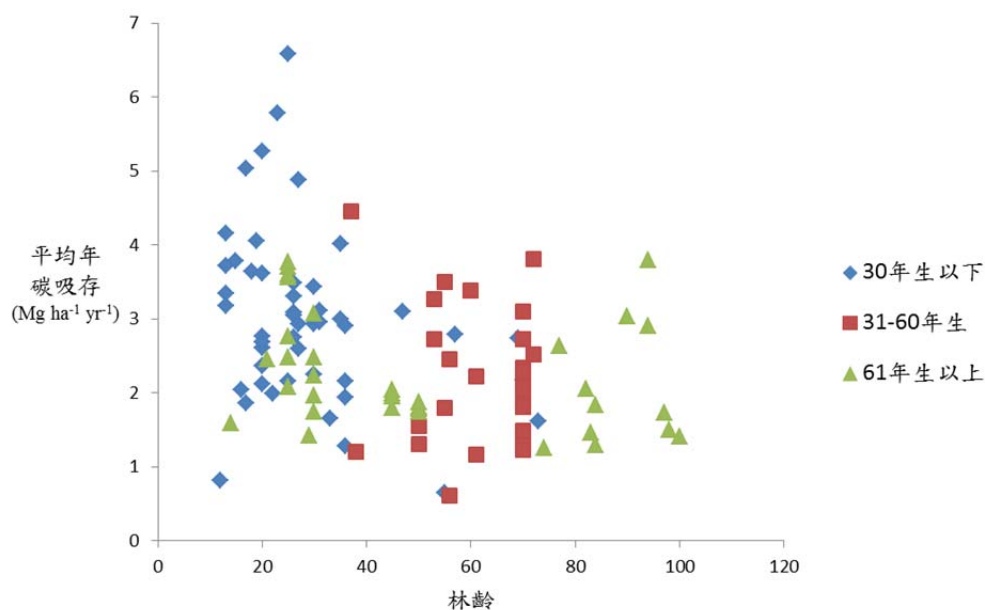


圖 13. 臺灣針葉樹人工林之林齡與年碳吸存散佈圖

Fig. 13. The scatter graph of Taiwanese conifer man-made forests age and carbon sequestration

由圖 13 及表 19 結果顯示臺灣針葉樹人工林在生長初期時林木生長速率快速且較高，隨著林齡增加生長速率開始減慢。此結果與其他學者之研究結果類似。根據洪志祐(2012)探討溪頭地區柳杉長時間之碳吸存效率，所得結果 60 年生與 90 年生之年碳吸存約為 4.73 Mg ha⁻¹ yr⁻¹、1.46 Mg ha⁻¹ yr⁻¹，而淨生產力會隨著林齡增加而逐漸下降，隨著林齡增加年碳吸存會慢慢減少，土壤肥力也會影響整體生態系的生產力大小，老齡林如不妥善經營，在碳吸存上可能會達到負值，對於碳吸存貢獻反而有害無益；王亞男等(2011)探討柳杉人工林長時間下材積之變化，

發現林分密度會隨著林齡增加而下降，但如未經管理林分仍處於鬱閉狀態，為維持淨生產力需依照林分狀態及林分結構實行適當的經營管理方式以維持林分生產力。綜合以上結果可知，針葉樹人工林在三個齡級之年碳吸存有顯著差異，碳吸存效率會隨著林齡上升而逐漸下降，老齡林分之年碳吸存相較於幼齡期通常極少甚至會到負值；因此對於碳吸存效率較低之林分須進行撫育管理及注意其森林健康，以防。

(二) 針葉樹人工林樹種別對年碳吸存之差異

為了解針葉人工林中樹種別對於碳吸存差異性，將過去研究中常出現之重要樹種資料加以分類，以臺灣杉、紅檜、柳杉、肖楠、及其他針葉樹種等 5 類進行分析，為避免老齡林木影響分析結果，資料皆使用未達輪伐期資料進行分析，以 ANOVA 分析及事後檢定進行針葉樹人工林主要樹種之年碳吸存比較，結果如表 20 及 21 所示。

表 20. 臺灣針葉樹人工林不同樹種年碳吸存之 ANOVA 分析

Table 20. The ANOVA test of different tree species Taiwanese conifer man-made forests carbon sequestration

	平方和	自由度	平均平方和	F 值
組間	9.626	4	2.407	2.433
組內	61.34	62	0.989	
總和	70.96	66		

表 21. 臺灣針葉樹人工林主要樹種之年碳吸存比較

Table 21. The comparison of Taiwan main conifer man-made tree species annual carbon sequestration

	其他針葉樹種		臺灣杉		肖楠		紅檜		柳杉	
	(n=6)		(n=18)		(n=12)		(n=22)		(n=9)	
	Mean	SD	Mean	SD	Mean	SD	Mean	SD	Mean	SD
年碳吸存量 (Mg ha ⁻¹ yr ⁻¹)	3.41	1.70	3.00	1.28	2.85	0.4	2.37	0.73	2.19	0.87

從表 20 結果可知 F 值 2.433，在 ANOVA 分析上並無顯著差異；表 21 之事後檢定結果可知，其他針葉樹種、臺灣杉、肖楠、紅檜、柳杉之年碳吸存分別為 $3.41 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ 、 $3.00 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ 、 $2.85 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ 、 $2.37 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ 、 $2.19 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ ，此五種樹種並無顯著差異，針葉樹人工林之重要樹種在年碳吸存能力上並無顯著差異，但從前面所探討之林分性態值分析結果，可得知栽植地區性可能會影響到年碳吸存之效益；洪良斌(1974)針對臺灣中部及南部地區 34 年生臺灣杉進行生長調查，研究結果發現中部地區之臺灣杉生長較南部來得佳，且海拔適應性較柳杉來得佳，劉興旺等(2009)也指出臺灣杉為本土特有種，在生長及環境適應上皆較柳杉來得好，年碳吸存效益也相當可觀，為一深具發展潛力的針葉樹人工林造林樹種。

綜合樹種比較及前面碳吸存分析結論，可得知樹種在年碳吸存上雖無顯著差異，但林分整體生長會受到環境因子及林分密度影響，相同樹種在不同地區之生長特性也會不同，因此如要增進針葉樹人工林之年碳吸存，除了前述的經營管理措施，適地適木的原則也是必須考慮的。

(三)不同林型代表性樹種之年碳吸存差異

為了解臺灣人工林在各林型研究中最常出現樹種在年碳吸存上之差異性，將各林型之主要樹種如：闊葉樹人工林之光臘樹、針葉樹人工林之柳杉及紅檜、竹類人工林之孟宗竹等，以 ANOVA 及事後檢定進行年碳吸存差異性比較，此些樹種也是各人工林在造林中的重要樹種。ANOVA 分析結果如表 22，F 值 19.96 具顯著差異；事後檢定比較結果如表 23 所示，孟宗竹年碳吸存 $5.25 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ ，顯著高於臺灣杉 $3.00 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ 、紅檜 $2.38 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ 、光臘樹 $2.64 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ ，臺灣杉、紅檜、光臘樹三者則無顯著差異。

表 22.臺灣人工林代表樹種年碳吸存之 ANOVA 分析

Table 22. The ANOVA test of main tree species Taiwanese man-made forests carbon sequestration

	平方和	自由度	平均平方和	F 值
組間	202.82	3	67.61	19.96***
組內	243.87	72	3.39	
總和	446.69	75		

註:***為 p 小於 0.001

表 23. 臺灣人工林代表樹種之年碳吸存比較

Table 23. The comparison of Taiwanese man-made forests main species annual carbon sequestration

	孟宗竹 (n=19)		臺灣杉 (n=18)		紅檜 (n=22)		光臘樹 (n=17)	
	Mean	SD	Mean	SD	Mean	SD	Mean	SD
年碳吸存量 (Mg ha ⁻¹ yr ⁻¹)	5.25 ^a	2.58	3.00 ^b	1.28	2.64 ^b	0.81	2.38 ^b	0.71

研究結果發現竹類不管在整體林分或是各竹種上，年碳吸存效益皆比針葉樹及闊葉樹人工林來得高，此一結論也與前人研究結果相符合，根據林俊成等(2002)評估全民造林運動樹種之碳吸存潛力，推估結果光臘樹在 20 年生時碳貯量約 311.05 Mg ha⁻¹、柳杉 112.35 Mg ha⁻¹，針葉樹之碳貯量結果會與闊葉樹相近或略低；王仁等(2009)之研究結果也指出，孟宗竹之年碳吸存效益比起北半球溫帶森林、非洲熱帶森林等地區之年碳吸存高出數倍，在碳吸存上有著高效率；Yen *et al.*(2011)比較孟宗竹與杉木兩者碳吸存差異，孟宗竹之年碳吸存 8.13 Mg ha⁻¹ 比起杉木之年碳吸存 3.35 Mg ha⁻¹ 高，且有顯著上的差異。

從研究結果可知，不同樹種在年碳吸存效益上會有所差異，主要在於竹類與林木之差別，而闊葉樹與針葉樹人工林樹種幾無差異，但兩者之輪伐期通常差異甚大，因此在造林時需要考慮到造林目標及年限、環境等因子選擇適當樹種進行造林，在碳貯存及碳吸存之貢獻上才可達到更大成效。

伍、結論與建議

一、結論

本研究之目的在於探討臺灣地區人工林主要樹(竹)種之碳吸存量，藉由蒐集過去臺灣地區主要發表的文獻，主要為林學期刊，包括臺灣林業科學、中華林學季刊、林業研究季刊、臺大實驗林研究報告，主要以林分層級為主，蒐集的內容包括材積蓄積量、生物量及碳貯量等；如內容為材積量或生物量，先將其轉換為碳貯量再換算為年碳吸存進行比較。在分類上依樹種不同分為針葉樹人工林、闊葉樹人工林、竹類人工林，旨在探討林分性態值之間相關、林分性態值與年碳吸存之關係，此外，由於針葉樹在過去發表上文獻較豐富，本研究將其區分為不同齡級及樹種進行年碳吸存量之比較；另外也選擇針葉樹、闊葉樹、竹類人工林中出現較多的樹種進行分析，所得結果可供作為人工(竹)林碳吸存能力之參考，本研究所得的具體結論如下：

(1) Pearson 相關分析的結果，不論在針葉樹人工林、闊葉樹人工林、竹類人工林皆有一致的趨勢，林分密度及環境因子如：海拔、年均溫、年降雨量皆和平均胸徑、平均樹高有顯著相關，而平均胸徑、平均樹高對於碳貯量及年碳吸存量也有著高度相關；在回歸分析結果上，針葉樹人工林及闊葉樹人工林其年碳吸存皆受到林分密度及平均樹高之影響，竹類人工林之年碳吸存量則是受到平均胸徑及平均樹高影響。綜合本研究所得之結果，影響年碳吸存的各項變因，其趨勢和影響人工林生長收穫的因子相同，雖然這些因子隨樹種、地位、林齡而異，但在整體的趨勢上仍可歸納出一定的趨勢。

(2)三種人工林之林分性態值比較結果可得知，三種人工林除了在年降雨量無顯著差異之外，在平均胸徑、平均樹高、林分密度、海拔、年均溫、碳貯量、年碳吸存量上皆有顯著差異。從此結果可了解到臺灣人工林在地區分佈上及林分整體情形皆有所差異；在碳貯量及年碳吸存量的差異部分，針葉樹人工林在碳貯量上為最大，其次為闊葉樹人工林及竹類人工林，但竹類人工林之年碳吸存卻顯著高於針葉樹人工林及闊葉樹人工林。造成此一原因在於竹類具有每年萌發新竹快速生長、短時間內累積生物量之特性，雖在現有碳貯量上低於其他人工林，但如可對竹林進行經營管理，在老竹與新竹伐採之間達到永續收穫模式，其累積之

碳吸存量卻是高於其他兩類林型，在植林減碳以減少全球暖化的造林政策，竹類人工林對於碳吸存有著明顯的貢獻。

(3)為了解針葉樹人工林在不同林齡時年碳吸存之差異性，將所收集針葉樹人工林林齡分為三個齡級，分別為齡級Ⅰ:30年生以下、齡級Ⅱ:31~60年生、齡級Ⅲ:61年生以上進行分析。結果具明顯的趨勢，在年碳吸存上齡級Ⅰ大於Ⅱ和Ⅲ，而齡級Ⅱ與Ⅲ則無顯著差異。顯示林分在齡級較小時其碳吸存的速率較快，會隨著林齡上升而逐漸下降，林分在幼齡期生長速率較快為合理之現象，但應考量到林分是否達伐期，因能進行收穫利用對於增進碳吸存的功能才具有具體的效果。

(4)探討臺灣針葉樹人工林及各林型中在過去發表研究中最常出現樹種在年碳吸存之差異性，針葉樹人工林之探討樹種分為臺灣杉、紅檜、肖楠、柳杉及其他針葉樹種，經比較分析後發現針葉樹人工林之樹種別在年碳吸存上並無明顯差異。而各林型之代表樹種共選擇四種樹種進行比較，包括孟宗竹、光臘樹、紅檜、臺灣杉，經比較後發現孟宗竹之年碳吸存顯著高於其他三者，此結果和竹類高於針葉樹及闊葉樹之碳吸存的結論一致，其主要原因為竹類主要採用擇伐的模式經營，雖林分整體的蓄積量遠較針葉樹及闊葉樹人工林小，但其每年可吸存的碳量卻相當可觀。

二、建議

本研究之研究限制為資料形式較無法掌控，以次級資料進行研究時所取得之數據結果差異性甚大，因此如要將各林型之林分性態值再做進一步之細分比較，如區分中低海拔、同樣林分密度之比較，在操作上較有所困難；在材積轉換上有些需使用擴展係數轉換為地上部生物量，但臺灣主要人工林在擴展係數相關研究上尚未臻成熟，運用上限制較多；文獻來源主要為臺灣正式發表的林業期刊，但也有許多資料為碩博士論文或臺灣地區的研究結果發表於國外期刊上，在資料蒐集利用上時較有所困難。如未來要更深入探討，在收集文獻時可將範圍訂定的更為精確，如皆蒐集中海拔以上或疏伐處理之相關文獻進行分析比較，如此即可在林分性態值上區分得更為精細。而本研究之針葉樹及闊葉樹在林齡上之差異，主要與造林政策相關，針葉樹之造林從早期即有開始進行，因此林齡範圍橫跨甚大；而近年政府才開始推行平地造林獎勵政策，因此闊葉樹人工林的資料在林齡上較

小。此一現象為次級資料研究上無可避免之情形，希望未來針對人工林之相關研究能更為擴增，以增加臺灣森林研究之多樣性。

從本研究之結果可得出以下建議，竹類人工林雖具有較高的碳吸存效益，但仍需遵循經營模式，即每年進行擇伐，但臺灣大部分的竹林已成荒蕪狀態，其碳吸存成效將不如預期，此現象應行改善。而臺灣針葉樹及闊葉樹人工林目前除實施疏伐外，大部分並無進行收穫伐採，因此有大面積人工林已達伐期齡而過熟，由本研究結果顯示，高齡之人工林將會對年碳吸存造成不利影響，因此希望臺灣林業能對於此些過熟林分進行收穫管理，一方面可提升國產材自給率，另一方面也能增進整體林分碳吸存。

國立中興大學



National Chung Hsing University

陸、參考文獻

- 王子定、高毓斌 (1980) 孟宗竹地上部生物量之測定。臺大農學院研究報告 20(1):54-59。
- 王仁、陳財輝、張華洲、鍾欣芸、李宗宜、劉瓊霖 (2009) 惠蓀林場與石棹孟宗竹林分結構及地上部生物量和碳儲存量。林業研究季刊 31(4):17-26。
- 王仁、陳財輝、陳信佑、鍾欣芸、劉恩好、李宗宜、劉瓊霖 (2010) 孟宗竹林伐採後兩年間地上部生物量與碳吸存量動態。林業研究季刊 32(3):35-44。
- 王成泰 (2007) 大雪山地區天然林林分結構及動態生長之研究。國立中興大學森林所碩士論文。83 頁。
- 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效益之研究。臺大實驗林研究報告 24(2):157-167。
- 王亞男、蔡明哲、劉啟福、鄭景鵬 (2009) 不同林分密度臺灣杉人工林下層疏伐對其生長之影響。臺大實驗林研究報告 23 (4):295-307。
- 王亞男、顏添明、李隆恩、陳涓婷 (2012) 生長空間對柳杉人工同齡林胸高斷面積生長及存活之影響。臺大實驗林研究報告 25 (2):129-138。
- 王瑞閔 (2007) 臺灣國有林地森林碳吸存估算方法之探討。國立臺灣大學森林學研究所碩士論文。148 頁。
- 王義仲 (2004) 麻竹釋之生物量與碳蓄積量推估。林產工業 23(1):13-22。
- 王義仲 (2006) 竹林生物量調查回顧與展望。2006 年森林碳吸存研討會。第 167-188 頁。
- 王義仲 (2011) 竹林經營對減緩溫室效應之助益。林業研究專訊 18(1):8-11。
- 江博能、王亞男、梁治文 (2010) 臺灣中部地區光臘樹人工林生長量與碳存量之研究。臺大實驗林研究報告 24(3):185-194。

行政院農業委員會林務局 (2005) 國有林事業區森林地林型面積。行政院農業委員會林務局。

行政院農業委員會林務局 (2005) 森林資源調查專案-全島土地利用型面積。行政院農業委員會。

吳秉珊 (2012) 臺灣森林地上部生物量與環境因子之關係。國立臺灣大學生命科學院生態學與演化生物學研究所碩士論文。79 頁。

呂錦明、陳財輝 (1992) 桂竹之林分構造及生物量--桶頭桂竹林分之例。林業試驗所研究報告季刊 7(1):1-13。

李久先、楊志義 (1980) 桂竹桿形及捆束計量之研究。中華林學季刊 13(4):101-116。

李宣德、馮豐隆 (2010) 臺灣地區樟樹生物量擴展係數之建立。林業研究季刊 32(3):45-54。

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。國立臺灣大學森林系碩士論文。83 頁。

李國忠、林俊成、陳麗琴 (2000) 臺灣杉人工林碳吸存潛力及其成本效益分析。臺灣林業科學 15(1):115-123。

李隆恩 (2011) 疏伐對紅檜人工林單木及林分層級之影響—以臺灣中部疏伐示範區為例。國立中興大學森林學研究所碩士論文。86 頁。

李意德、曾慶波、吳仲民、周光益、陳步峰 (1997) 我國熱帶天然林植被碳貯存量的推估。林業科學研究 11(2):156-162。

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(3):401-412。

汪大雄 (2011) 臺灣竹林資源與經營。林業研究專訊 18(1):3-7。

- 汪大雄、謝漢欽、湯適謙、鍾智昕 (2010) 六龜地區臺灣杉人工林林分生長模擬之研究。臺灣林業科學 25(2):155-169。
- 沈介文、江博能、梁治文、王亞男 (2009) 金剛鑽柳杉地上部生物量與碳存量估算。臺大實驗林研究報告 23(3):255-266。
- 沈柔含 (2011) 地景階層林地碳儲存量之估算—以花蓮光復鄉平地造林為例。國立臺灣大學森林系碩士論文。79 頁。
- 周楨 (1968) 森林經理學。國立編譯館。
- 林文鎮、呂錦明 (1987) 孟宗竹之培育與經營。現代育林 2(2):3-22。
- 林世宗、鍾智昕、邱祈榮、林朝欽 (2008) 臺灣二葉松地上部生物量及碳吸存量之估算。中華林學季刊 41(4):521-535。
- 林金樹 (2008) 疏伐強度對平地造林林分蓄積及地上部生物量影響之研究。行政院農委會研究計畫。
- 林俊成、李國忠 (2003) 臺灣地區木質材料消費之碳流動與貯存量研究。臺灣林業科學 18(4):293-305。
- 林俊成、鄭美如、劉淑芬、李國忠 (2002) 全民造林運動二氧化碳吸存潛力之經濟效益評估。臺灣林業科學 17(3):311-321。
- 林信輝、賴俊帆、陳耀榮 (2007) 桂竹林崩塌地根系型態與其後續崩塌之調查研究。水土保持學報 39(2):173-187。
- 林郁評 (2011) 平地景觀造林樹種臺灣檫、光臘樹樹冠特性及碳貯存量之研究—以雲林地區為例。國立中興大學森林所碩士論文。76 頁。
- 林國銓 (1980) 山黃麻生物量及養分含量之研究。中華林學季刊 13 (2):77-86。
- 林國銓、王巧萍、黃菊美、洪富文、邱志明 (2003) 六龜試驗林兩臺灣杉人工林生物量和碳儲存量之估算。臺灣林業科學 18(2):85-94。

- 林國銓、杜清澤、徐嘉君、黃菊美 (2006) 六龜試驗林亞熱帶天然闊葉林地上部碳貯存量之估算。臺大實驗林研究報告 20(3):153-164。
- 林國銓、杜清澤、黃菊美 (2007) 苗栗地區相思樹和木油桐人工林碳和氮累積量及生產量之估算。中華林學季刊 40(2):201-218。
- 林國銓、杜清澤、黃菊美 (2009) 臺東地區相思樹與楓香兩人工林碳累積量。林業研究季刊 31(3):55-68。
- 林國銓、杜清澤、黃菊美 (2010) 光臘樹人工林碳貯存量和吸存量之估算。中華林學季刊 43(2):261-276。
- 林國銓、洪富文、游漢明、馬復京 (1994) 福山試驗林闊葉林生態系生物量與葉面積指數的累積與分布。林業試驗所研究報告季刊 9(4):299-315。
- 林裕仁 (2011) 臺灣竹材利用技術回顧與展望。林業研究專訊 18(1):49-55。
- 林裕仁、李國忠、林俊成 (2002) 以生物量與材積關係式推估臺灣森林林木碳貯存量之研究。臺大實驗林研究報告 16(2):71-79
- 林裕仁、劉瓊霖、林俊成 (2002) 臺灣地區主要用材比重與碳含量測定。臺灣林業科學 17(3):291-299。
- 邱志明、唐盛林、鍾智昕、林振榮 (2011) 紅檜人工林生物量和不同疏伐策略對二氧化碳吸存之效應。中華林學季刊 44(3):385-400。
- 袁力頤(2006) 紅檜與柳杉人工林地上部碳貯存量之推估。國立中興大學森林學研究所碩士論文。64 頁。
- 柯淑惠 (2006) 臺灣檫人工林生物量及碳儲存量之研究。國立中興大學森林所碩士論文。58 頁。
- 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。國立臺灣大學森林學研究所碩士論文。53 頁。

- 洪良斌、羅卓振南 (1979) 光臘樹人工林疏伐效果之研究。林業試驗所試驗報告第 324 號。16 頁。
- 洪良斌、羅卓振南 (1980) 蓮華池林區肖楠造林木生長之研究。林業試驗所試驗報告第 342 號。11 頁。
- 洪富文、夏禹九、唐凱軍 (1986) 蓮華池次生暖溫帶山地雨林地上部生物量及業面積之估算。林業試驗所試驗報告第 465 號。9 頁。
- 紀怡嘉 (2008) 臺灣中部地區桂竹林生物量與碳貯存量之研究。國立中興大學森林學研究所碩士論文。105 頁。
- 孫正華、顏添明、李久先 (2011) 不同相對關係式推估針葉樹及竹類地上部生物量之比較。林業研究季刊 33(1):1-8。
- 孫百寬 (2012) 麻竹與孟宗竹林分結構及碳貯存量推估之研究。國立中興大學森林學研究所碩士論文。79 頁。
- 孫百寬、陳滄婷、顏添明、李隆恩 (2013) 臺灣中部地區孟宗竹林不同經營強度林分性態值、地上部生物量及碳貯存量之比較。林業研究季刊 35(1):23-32。
- 高毓斌 (1985) 臺灣孟宗竹林之生產力與生物性養分循環。國立臺灣大學森林學研究所博士論文。191 頁。
- 高毓斌 (1991) 巨竹與馬來麻竹物質生產比較之研究。林業試驗所研究報告季刊 6(3):249-282。
- 高毓斌、張添榮 (1989) 馬來麻竹人工林之生長與生物量生產。林業試驗所研究報告季刊 4(1):31-42。
- 陳俊文、張峻德 (1993) 大雪山地區紅檜人工林地上部生物量與養分累積。中華林學季刊 26(4):35-48。
- 陳財輝、劉瓊霖、鐘欣芸 (2011) 南投縣鳳凰山孟宗竹產筍林分之生長與生物量。中華林學季刊 44(1):19-28。

- 陳麗琴、黃進睦、林俊秀、邱祈榮 (1997) 六龜試驗林臺灣杉人工林蓄積量及生長估測之研究。臺灣林業科學 12(3):319-327。
- 游麗玉 (1995) 惠蓀實驗林場桂竹林生物量與養分聚積。國立中興大學森林學研究所碩士論文。87 頁。
- 馮豐隆、羅紹麟 (1986) 臺灣二葉松人工林生長與收穫之研究。中華林學季刊 19(2):17-31。
- 黃冠理 (2010) 以空載光達資料推估森林生物量與碳儲存量。國立屏東科技大學森林系碩士學位論文。70 頁。
- 黃溪旺 (1947) 相思樹人工播種林間伐時林分構成狀態之統計研究。林業試驗所試驗報告第 14 號。20 頁。
- 黃裕星 (2011) 臺灣竹類資源調查、利用及新技術開發。林業研究專訊 18(1):1-2。
- 董旭英、黃儀娟(譯) (2000)次級資料研究法(原著作者 David W. Steward)。212 頁。
- 廖宜緯、陳美光、陳羽康、鐘玉龍、吳守從 (2011) 臺糖公司屏東縣平地造林碳貯存量調查。中華林學季刊 44(3):373-384。
- 劉宣誠、任憶安 (1971) 臺灣主要竹林生育地與生長之研究(一)-桂竹。林業試驗所試驗報告第 212 號。10 頁。
- 劉宣誠、任憶安、柯承吉 (1972) 臺灣主要竹林生育地與生長之研究(三)-麻竹。林業試驗所試驗報告第 230 號。13 頁。
- 劉宣誠、任憶安、葉天薰、柯承吉 (1972) 臺灣主要竹林生育地與生長之研究(二)-孟宗竹。林業試驗所試驗報告第 222 號。5 頁。
- 劉宣誠、吳萬益 (1986) 蓮華池地區肖楠造林林之生長與材質之研究。林業試驗所試驗報告第 463 號。14 頁。

- 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。臺大實驗林研究報告 23(3):189-200。
- 劉慎孝、洪良斌 (1960) 肖楠木林疏伐方式之研究。林業試驗所試驗報告第 66 號。18 頁。
- 劉業經、呂福原、歐辰雄 (1994) 臺灣樹木誌。925 頁。
- 劉興旺、鍾立展、王亞男、陳和田、鄭景鵬 (2009) 臺灣中部地區臺灣杉人工林之生長量與碳吸存量之研究。臺大實驗林研究報告 23(3):201-212。
- 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。臺大實驗林研究報告 24(3):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。臺灣大學實驗林研究報告 23 (4):147-156。
- 薛銘童、許博行 (2003) 關刀溪次生闊葉林地上部生物量與葉面積指數之研究。林業研究季刊 25(2):11-24。
- 鍾欣芸、劉瓊霖、陳財輝 (2010) 不同伐採強度對蓮華池桂竹林生長與生物量的影響。中華林學季刊 43(2):223-231。
- 顏添明 (1993) 不同間伐強度對紅檜人工林生長之影響。國立中興大學森林學研究所碩士論文。73 頁。
- 顏添明 (2002) 竹林經營法講義。32 頁。
- 顏添明 (2011) 竹林碳吸存潛力之探討。林業研究專訊 18(1):19-22。
- 顏添明、李久先、黃凱洛 (2010) 臺灣中部地區紅檜及柳杉人工林疏伐示範區生長收穫模式建立之研究。林業研究季刊 30(3):31-40。
- 顏添明、李久先、黃凱洛、劉兆昌 (2004) 杉木人工林成熟林分林木生長及生物量之探討。中華林學季刊 37(2):157-168。

顏添明、哀力民頁、李介祿、李久先、黃凱洛 (2009) 臺灣主要三種針葉樹種地上部之碳含量及碳貯存量。臺灣林業科學 24(9):91-102。

顏添明、黃凱洛 (2006) 杉木地上部碳儲存量之推估。臺灣林業科學 21(2):273-280。

羅佑杰 (2009) 竹類與林木效益的探討-以孟宗竹與杉木為例。國立中興大學森林所碩士論文。75 頁。

Chambers J.Q., J.D. Santos and R.J. Ribeir (2001) Tree damage, allometric relationships, and above-ground net primary production in central Amazon forest. *Forest Ecology and Management* 152:73-84.

Chen X., X. Chang, Y. Zhang, T. Booth and X. He (2009) Changes of carbon stocks in bamboo stands in China during 100 years. *Forest ecology and Management* 258:1489-1496.

Daniel Piotta (2008) A meta-analysis comparing tree growth in monocultures and mixed plantations. *Forest Ecology and Management* 255:781-786。

Dehai Z., B. Borders and M. Wilson (2004) Individual-tree diameter growth and mortality models for bottomland mixed-species hardwood stands in the lower Mississippi alluvial valley. *Forest Ecology and Management* 199:307-322.

Hennessey T.C., P.M. Dougherty, R.F. Lynch and E.M. Lorenzi (2001) Long-term growth and ecophysiological responses of a southeastern Oklahoma loblolly pine plantation to early rotation thinning. *Forest Ecology and Management* 192:97-116.

Hoover C. and S. Stout (2007) The carbon consequences of thinning techniques: stand structure makes a difference. *Journal of Forestry* 105(5):266-270.

IPCC (2007) *Climate Change 2007: Synthesis Report*. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, Pachauri, R. K. and Reisinger, A.(eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 104 pp.

- Jessica G., L. Laura, Morrow, A. Wallace and J.S. Walsh (1992) A meta-analysis of competition in field experiments. *The American Naturalist* 140(4):539-572.
- Kleinhenz V., J. Milne., K. B. Walsh and D. J. Midmore (2003) A case study on the effects of irrigation and fertilization on soil water and soil nutrient status, and on growth and yield of bamboo (*Phyllostachys pubescens*) shoots. *Journal of Bamboo and Rattan* 2(3):281-293.
- Lewis, S. L., G. Lopez-Gonzalez, B. Sonké, K. Affum-Baffoe, T. R. Baker, L. O. Ojo, O. L. Phillips, J. M. Reitsma, L. White, J. A. Comiskey, D. K. Marie-Noël, C. E. N. Ewango, T. R. Feldpausch, A. C. Hamilton, M. Gloor, T. Hart, A. Hladik, J. Lloyd, J. C. Lovett, J. R. Makana, Y. Malhi, F. M. Mbago, H. J. Ndangalasi, J. Peacock, K. S. H. Peh, D. Sheil, T. Sunderland, M. D. Swaine, J. Taplin, D. Taylor, S. C. Thomas, R. Votere and H. Wöll (2009) Increasing carbon storage in intact African tropical forests. *Nature* 457: 1003-1006.
- Mark T.L. Bonner, S. Schmidt and L.P. Shoo (2013) A meta-analytical global comparison of aboveground biomass accumulation between tropical secondary forests and monoculture plantations. *Forest Ecology and Management* 291:73-86 .
- National Oceanic and Atmospheric Administration (2013) <http://www.noaa.gov/> .
- Yen T.M. and C.T. Wang (2013) Assessing carbon storage and sequestration for natural forests, man-made forests, and bamboo forests in Taiwan. *International Journal of Sustainable Development & World Ecology* 20(5):455-460 .
- Yen T.M., J. S. Lee, C. L. Li and Y. T. Chen (2013) Aboveground biomass and vertical distribution of crown for Taiwan red cypress 20 years after thinning. *Dendrobiology* 70:107-114.
- Yen T.M. and J.S. Lee (2011) Comparing aboveground carbon sequestration between moso bamboo (*Phyllostachys heterocyla*) and China fir (*Cunninghamia lanceolata*) forests based on the allometric model. *Forest Ecology and Management* 261:995-1002.

Yen T.M., Y.J. Ji, and J.S. Lee (2010) Estimating biomass production and carbon storage for a fast-growing makino bamboo (*Phyllostachys makinoi*) plant based on the diameter distribution model. *Forest Ecology and Management* 260:339-344.

Yude P., R. A. Birdsey, J. Fang, R. HoughMg, P. E. Kauppi, W. A. Kurz, O. L. Phillips, A. Shvidenko, S. L. Lewis, J. G. Canadell, P. Ciaris, R. B. Jackson, S. W. Pacala, A. D. Mcguire, S. Piao, A. Rautiainen, S. Sitch and D. Hayes (2011) A large and persistent carbon sink in the world's forests. *Science* 333: 988-993.

Zhaodi G., J. Fang, Y. Pan and R. Birdsey (2010) Inventory-based estimates of forest biomass carbon stocks in China: A comparison of three methods. *Forest Ecology and Management* 259:1225-1231.

Zianis D. (2008) Predicting mean aboveground forest biomass and its associated variance. *Forest Ecology and Management* 256:1400-1407.



附錄：本研究分析參考之文獻

針葉樹人工林

篇名	作者	出處
恆春四種引種樹種之生長研究	劉慎孝、楊寶霖(1952)	林業試驗所報告
肖楠木林疏伐方式之研究	劉慎孝、洪良斌(1960)	林業試驗所報告
蓮華池林區肖楠造林木生長之研究	洪良斌、羅卓振南(1980)	林業試驗所報告
蓮華池地區肖楠造林木之生長與材質之研究	劉宣誠、吳萬益(1986)	林業試驗所報告
臺灣中北部柳杉林分之生長量生產力	張峻德(1986)	中華林學季刊
大雪山地區紅檜人工林地上部生物量與養分 累積	陳俊文、張峻德(1993)	中華林學季刊
六龜試驗林臺灣杉人工林蓄積量及生長估測 之研究	陳麗琴等(1997)	臺灣林業科學
臺灣杉人工林碳吸存潛力及其成本效益分析	李國忠等(2000)	臺灣林業科學
六龜試驗林兩臺灣杉人工林和碳儲存量之估 算	林國銓等(2003)	臺灣林業科學
應用地理資訊系統估算六龜試驗林森林蓄積 變動之二氧化碳吸存效應	謝漢欽等(2003)	臺灣林業科學
六龜臺灣杉人工林碳和氮的累積和分布	林國銓等(2004)	臺灣林業科學
杉木地上部碳儲存量之推估	黃凱洛等(2006)	臺灣林業科學
臺灣二葉松地上部生物量及碳吸存量之估算	林世宗等(2008)	中華林學季刊
臺灣中部地區紅檜及柳杉人工林疏伐示範區 生長收穫模式建立之研究	顏添明等(2008)	林業研究季刊
金剛鑽柳杉林地上部生物量與碳存量估算	沈介文等(2009)	臺大實驗林研究 報告
臺灣中部地區臺灣杉人工林之生長量與碳吸 存量之研究	劉興旺等(2009)	臺大實驗林研究 報告
溪頭門田柳杉生長量及二氧化碳貯存量效益 之研究	劉素玲等(2009)	臺大實驗林研究 報告

溪頭三叉崙柳杉生長量及碳貯存量效益之研究	王亞男等(2010)	臺大實驗林研究報告
六龜地區臺灣杉人工林林分生長模擬之研究	汪大雄等(2010)	臺灣林業科學
臺大實驗林溪頭營林區西川試驗地柳杉生長量之研究	衛強等(2010)	臺大實驗林研究報告
溪頭試驗地柳杉人工林材積生長的長期變化	王亞男等(2011)	臺大實驗林研究報告
人倫地區柳杉人工林地上部與地下部生物量之估算	杜清澤等(2011)	中華林學季刊
紅檜人工林生物量和不同疏伐策略對二氧化碳吸存之效應	邱志明等(2011)	中華林學季刊

國立中興大學



National Chung Hsing University

闊葉樹人工林

篇名	作者	出處
相思樹人工播種林間伐時林分構成 狀態之統計研究	黃溪旺(1947)	林業試驗所報告
光臘樹人工林疏伐效果之研究	洪良斌、羅卓振南(1979)	林業試驗所報告
山黃麻生物量及養分含量之研究	林國銓等(1980)	中華林學季刊
苗栗海岸砂丘木麻黃人工林之生長 及林分生物量	陳財輝、呂錦明(1988)	林業試驗所研究 報告季刊
苗栗地區相思樹和木油桐人工林碳 和氮累積量及生產量之估算	林國銓等(2007)	中華林學季刊
森林碳吸存資源調查推估模式系統 —以臺灣樟樹為例	李宣德等(2008)	臺灣林業科學
臺東地區相思樹與楓香兩人工林碳 累積量	林國銓等(2009)	林業研究季刊
臺灣中部地區光臘樹人工林生長量 與碳存量之研究	江博能等(2010)	臺大實驗林研究 報告
光臘樹人工林碳貯存量和吸存量之 估算	林國銓等(2010)	中華林學季刊
臺糖公司屏東縣平地造林碳貯存量 調查	廖宜緯等(2011)	中華林學季刊

竹類人工林

篇名	作者	出處
臺灣主要竹林生育地與生長之研究(一)--桂竹	劉宣誠、任憶安 (1971)	林業試驗所報告
臺灣主要竹林生育地與生長之研究(二)--孟宗竹	劉宣誠等(1972)	林業試驗所報告
臺灣主要竹林生育地與生長之研究(三)--麻竹	劉宣誠等(1972)	林業試驗所報告
孟宗竹之地上部生物量及淨生產量	王子定(1980)	臺大實驗林研究 報告
馬來麻竹人工林之生長與生物量生產	高毓斌(1989)	林業試驗所研究 報告季刊
巨竹與馬來麻竹物質生產之比較研究	高毓斌(1991)	林業試驗所研究 報告季刊
桂竹之林分構造及生物量--桶頭桂竹林分之例	呂錦明、陳財輝 (1992)	林業試驗所研究 報告季刊
麻竹桿之生物量與碳蓄積量推估	王義仲(2004)	林產工業
桂竹林崩塌地根系型態與其後續崩塌之調查研究	林信輝等(2007)	水土保持學報
惠蓀林場和石棹孟宗竹林分結構及地上部生物量和 碳儲存量	王仁等(2009)	林業研究季刊
石門水庫集水區桂竹林之生長及生物量	陳財輝等(2009)	中華林學季刊
孟宗竹伐採後兩年間地上部生物量與碳吸存量動態	王仁等(2010)	林業研究季刊
不同伐採強度對蓮華池桂竹林生長與生物量的影響	鍾欣芸等(2010)	中華林學季刊
南投縣鳳凰山孟宗竹產筍林分之生長與生物量	陳財輝等(2011)	中華林學季刊
臺灣中部地區孟宗竹林不同經營強度林分性態值、 地上部生物量及碳貯存量之比較	孫百寬等(2013)	林業研究季刊