

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



探討各種生長收穫模式對柳杉人工林

蓄積量模擬結果之分析

Investigating simulation results of different growth/yield
models on the stocking estimation of Japanese Cedar
(*Cryptomeria japonica*) Plantations

陳柏蓉

Po-Jung Chen

指導教授：鄭舒婷 博士

Advisor: Su-Ting Cheng, Ph.D.

中華民國 109 年 7 月

July 2020

國立臺灣大學碩士班學生論文

口試委員會審定書

探討各種生長收穫模式對柳杉人工林
蓄積量模擬結果之分析

Investigating simulation results of different growth/yield
models on the stocking estimation of Japanese Cedar
(*Cryptomeria japonica*) Plantations

本論文係陳柏蓉君 (R04625009) 在國立臺灣大學森林環境暨資源
學系完成之碩士班學生論文，於民國 109 年 7 月 22 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：

鄭舒婷 (簽名)

王培蓉 (簽名)

鄭智馨 (簽名)

系主任：曲書華 (簽名)

謝誌



轉眼間從研究所入學走到了如今畢業的階段，當初的對學術研究的懵懵懂懂，至今感受到研究領域的永無止盡，回首這些年來不僅僅是在人生道路以及學術生涯上經歷多少峰迴路轉的曲折，時常以為山窮水盡之時，卻又柳暗花明的循環過程……，而這學業得以完成，實為受到許多人的指引與提攜，除了感謝還是感謝。

這篇論文的緣起與完成，非常感謝指導我的鄭舒婷老師，研究始於碩一上學期修課一時的起心動念，在老師不斷的指導與支持下，逐步手把手的幫助我建構研究雛形，老師的慧眼總是在我不曉得該如何進行下去、甚至想放棄時提供我方向與意見，並鼓勵我參加研討會，勇敢挑戰以英文來講述自己的研究成果，這是從來沒有經歷過與想過的體驗。感謝口試委員王培蓉組長與鄭智馨老師提出寶貴的意見，讓我勇於面對研究的不足之處，使論文方向與構思得以更加完善。

我由衷感謝在生命中出現的所有人，感謝林法勤老師當初的引薦、劉奇璋老師的教導，開啟我對於臺灣人工林的好奇心，即使國產材之路要努力的方向還很多，但林學與林產的結合是在臺灣林業的發展上密不可分的部分；感謝 SEM 研究室這個大家庭：陳怡秀學姊、戴嘉瑩、陳又嘉、徐仕璿、李弘恩、汪子洋、魏碩、李東翰、潘巍中、廖鴻宇、房浩、何弘國、何勻、Desmond，一同在研究室奮鬥及打拼，彼此提供技術與想法上的支持與陪伴；感謝林試所經營組的研究員們、同事們，總是在對於林業相關議題的討論中獲益良多，也逐漸去探索心中對於林業、森林發展的疑惑；感謝在南投的友人們，讓我感受到人情的溫暖與重建自我的信心，並始終心心念念著回家咖啡的感動；感謝在過去休學的兩年間所遇到的所有人事物，都是成長道路上的養分、人生的歷練。

最後，感謝家人的默默支持，自始自終都是自己的心境與壓力所致的心魔，回過頭，家人永遠都在，那兒永遠是家！

在求學與研究的過程中，畢業與論文的完成是個里程碑，但並不是終點，往後人生的旅途上仍需不斷探尋與自我實踐、在抉擇與過程中了解自我，而這一切只是個開端，繼續迎向未知的旅程。

柏蓉 謹誌於

臺灣大學森林系航測館 SEM 研究室

歲在 庚子 荔月 季夏

中文摘要

森林經營涉及層面相當廣泛，與社會、經濟、環境、生態相互依存，有著密不可分之多元關係。隨著國際上對於永續經營的重視，聯合國提出許多與森林經營相關的永續發展目標（Sustainable Development Goals, SDGs），更彰顯出森林資源永續管理之重要地位。然而臺灣林業自 1991 年頒布「臺灣森林經營管理方案」以來，走入以森林資源保育為主之趨勢，同時期人工林經營亦幾近停滯。近年來政府因應國內外永續發展趨勢，藉由國產材推廣、林業永續多元輔導等來振興林業的生產，在這重啟的過程，林業資源盤點為訂定經營方針的基石。

現行林務局轄屬經濟林的林木資源中，屬柳杉人工林（*Cryptomeria japonica*）為早期大量推廣造林，且至今還存有廣大面積與蓄積之樹種，累積相當多之生長收穫研究，為了解不同生長收穫模式對林分蓄積推估可能產生的不確定性範圍，本研究以柳杉作為研究樹種，透過次級資料的蒐集，包括林業統計、發表過之文獻期刊，利用前人之研究，將林務局轄屬柳杉經濟林之面積與蓄積量資料進行轉換，以林齡作為自變數，推估胸高直徑、樹高，並比較不同公式組合下產生之差距變化，建立各齡級林木株數與立木材積估算之基礎數據。接著，本研究建立林分系統動態模型，考量實際統計數據所得之林木生長率、枯損率、人為砍伐及少數新植之柳杉人工林，估算單木、林分、全林三個層級隨著時間在蓄積量上產生的連續性變化。

研究結果發現，使用不同公式組合推估樹高與立木材積，會因組合之基本樣態不同而使產生之曲線趨勢有所差異。在樹高表示上，樹高生長趨緩之估算區間在 20-30 公尺左右；在立木材積式表現上，初期之表現差距並不明顯，但在過了 30 齡級後，差距逐漸拉大，至老年立木材積估算範圍由 1.24 至 1.86 m³/tree，最多可差至 1.5 倍以上；利用不同生長收穫式以林分系統動態模擬 2009-2100 年柳杉林分動態，結果顯示隨著時間的拉長，林分蓄積差距有越來越大的趨勢，若從新造林林分每年蓄積變化量來看，隨著林齡的增長，每單位蓄積增加量會先上升至林齡 35-55 以後慢慢轉為下降，表示林木在蓄積量、碳吸存的表現上漸為趨緩。

這樣的結果也突顯在進行生物量或碳吸存的估算時，若以過去所建立之經驗式來推估樹高或立木材積，對於不同之地點、時間及未來預估能力都有其限制；蓄積量估算之不確定性之範圍為何，對林業決策或施業精度而言，為一重要之資訊，應加以評估。此外，隨著柳杉林齡的老齡化，推估公式的適用性也有待考驗，若估

算出來之數值都與實際情形存有相當大的落差時，恐會造成錯誤之決策，進而影響森林資源的永續利用。因此，本研究建議：不論是國產材之生產或是碳匯量之評估，林業相關單位在提供資源盤點資訊時，應將生產蓄積等不確定性範圍納入考量，作為振興林業可以著力的重點方向之一，以提昇經營者對於林分資訊的掌握程度，有效評估誤差風險，達成永續森林經營之目標。

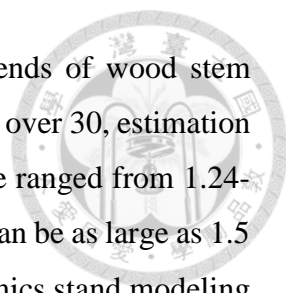
【關鍵字】 柳杉人工林、生長收穫式、蓄積量、系統動態、永續森林經營

Abstract

Forest management involves a variety of multiple aspects closely associated with and interdependent to society, economy, environment and ecology. With increasing international awareness on sustainable management, the United Nations (UN) proposed several targets related to the forest management in the “Sustainable Development Goals (SDGs)”, which further demonstrates the importance of sustainable management of forest resources. However, since the “Taiwan forest operation and management program” promulgated in 1991, the focus of forest management has been shifted from economic harvesting to resources conservation, and plantation management has ever since been nearly stagnated. Recently, Taiwanese government tries to cope with global and domestic sustainable development trends, and has been devoted to promote domestic timber supply and sustainable forestry counseling to revive the forest production. As such, forestry resources inventory acts as the fundamental base for policy making and forestry planning.

Among the Forestry Bureau of Taiwan jurisdictional plantation resources, the Japanese cedar (*Cryptomeria japonica*) plantation is one of the economic species of which large plantation areas and stockings remains since early initial afforestation periods. There have been a great amount of growth- and yield-related research studies of Japanese cedar. This research took Forestry Bureau of Taiwan jurisdictional Japanese cedar plantation as the study species to understand the uncertainties arising from different modeling equations in growth and yield on stocking estimations. The gathered secondary data of areas and surveyed stockings from available forestry statistics reports and published papers were transformed to estimate numbers of Japanese cedar trees in each age class and their associated diameter at breast height (DBH), tree height, and wood stem volume by different equations specific to Japanese cedar in Taiwan. A total of twelve combinations of allometric equations were applied to evaluate uncertainties of stocking estimations. After that, a system dynamics stand modeling was constructed considering tree growth, mortality rate, cutting, and actual afforestation based on actual data from forestry statistics reports to simulate the accumulated stocking dynamics at individual, stand, and total levels.

The results showed that using different allometric equations would result in different estimations of trends in tree heights and wood stem volumes. For example, tree height



growth slowed down at height between 20 to 30 meters, while trends of wood stem volume did not show obvious variation in the early stage until ages of over 30, estimation differences started to increase. Estimations of the wood stem volume ranged from 1.24-1.86 m³/tree for older age classes, for which the greatest differences can be as large as 1.5 times. Based on the total stand stocking simulations by system dynamics stand modeling from 2009 to 2110, the differences of stand stocking of Japanese cedar forest accumulated with time by various combination of allometric equations. According to the current annual increment (CAI) simulations on the new afforestation in 2016 (stand 0), the unit stocking increased at beginning, and then started to decline during ages of 35 to 55, demonstrating decreases in the total volume of stocking as well as carbon storages as the plantation ages.

Such results also clearly showed the potential issues when estimating biomass or carbon sequestration using empirical equations of tree height or tree volume, as these equations were usually limited to their locations and specific time frame, and would impose a constraint on the predicting power of future forecasting. In addition, uncertainties of stocking estimations are critical information for forestry decision making and implementation accuracy. Furthermore, the suitability of the equations on aging Japanese cedar should be tested. If there were obvious gaps between simulated conditions and the reality, it could result in wrong decision-making, and affect the sustainable use of the forest resources. As a result, this study suggests that, whether for production of domestic timber or assessment of carbon sequestration, the forestry-related authority units should take the uncertainty of stocking estimations into consideration and provide such information on the inventory of forest resources. This should be taken as one of the key points for revitalizing forestry, so that stand information can be reasonable obtained by managers to effectively estimate risks associated with this uncertainty to achieve the goal of sustainable forest management.

【Key words】 Japanese cedar plantation, growth and yield equations, stocking, system dynamics, sustainable forest management

目錄



謝誌.....	I
中文摘要.....	II
Abstract.....	IV
第一章 緒論.....	1
第一節 研究背景與動機.....	1
第二節 研究目的.....	5
第二章 文獻回顧.....	6
第一節 生長收穫模式.....	6
第二節 森林生長模式之架構.....	7
第三節 前人建立之生長收穫式.....	9
第三章 研究材料與方法.....	13
第一節 研究架構.....	13
第二節 研究方法.....	14
第三節 林分系統動態模型.....	24
第四章 結果.....	28
第一節 空間尺度下林木存量之推估.....	28
第二節 枯損率推估.....	37
第三節 2009-2018 年砍伐株數推估.....	39
第四節 柳杉動態模型模擬.....	43
第五章 討論.....	55
第六章 結論與建議.....	63
參考文獻.....	64

圖目錄

圖 1、研究流程圖	13
圖 2、臺灣國有林區林地分區圖	14
圖 3、臺灣國有林區之林木經營區柳杉造林分布圖	14
圖 4、模型架構	18
圖 5、以蓄積量-平均立木材積估算株數	24
圖 6、STELLA 模型架構圖	27
圖 7、不同林齡下柳杉之平均胸高直徑 (DBH) 生長趨勢	28
圖 8、不同樹高曲線式下柳杉之生長趨勢 (齡級區間為 1 至 90 年)	29
圖 9、不同樹高曲線式下柳杉之生長趨勢 (齡級區間為 1 至 200 年)	29
圖 10、不同林齡下依不同立木材積組合之單木表現 (齡級區間為 1 至 90 年) .	33
圖 11、不同林齡下依不同立木材積組合之單木表現 (齡級區間為 1 至 200 年)	34
圖 12、2009 年各齡級推估之每公頃株數盒形圖	36
圖 13、柳杉各齡級與自然對數死亡率之迴歸式	38
圖 14、移除林齡 57 年、68 年後之柳杉各齡級與自然對數死亡率迴歸式	38
圖 15、2009-2018 年林務局轄屬柳杉經濟林之生產用材量	40
圖 16、2009-2110 年之柳杉全林分動態蓄積模擬 (最高與最小值)	45
圖 17、2009-2110 年之柳杉全林分動態蓄積模擬 (現行林務局所用之材積式) .	46
圖 18、2009-2110 年柳杉全林分每年每公頃蓄積量盒形圖	47
圖 19、2009-2110 年柳杉全林分連年生長量模擬	47
圖 20、新造之柳杉林分 (stand 0) 之 2016-2110 年動態蓄積模擬	50
圖 21、新造之柳杉林分 (stand 0) 連年生長量 (CAI) 動態模擬	52
圖 22、新造之柳杉林分 (stand 0) 與不同研究預測結果之比較	54

表目錄

表 1、各林型主要樹種單位面積蓄積	4
表 2、依不同變數與常用型態之生長收穫模式	7
表 3、林木非線性生長/收穫模式在林齡與林分特性之研究應用與方法	11
表 4、文獻資料來源	16
表 5、2009 年林務局轄屬經濟林柳杉人工林之各齡級面積與蓄積	17
表 6、柳杉人工林之林分特性關係式	21
表 7、Stella 軟體之組成基本元素 (Stella 技術手冊)	25
表 8、2009 年柳杉各齡級之人工林平均胸高直徑、樹高之表現	30
表 9、搭配式 H-1 在不同立木材積式下之表現估算	31
表 10、搭配式 H-2 在不同立木材積式下之表現估算	31
表 11、搭配式 H-3 在不同立木材積式下之表現估算	32
表 12、搭配式 H-4 在不同立木材積式下之表現估算	32
表 13、不同立木材積組合下之各齡級單株立木材積	33
表 14、以立木材積組合推估 2009 年柳杉各齡級立木株數	35
表 15、模擬不同立木材積組合推估下之株數敘述統計分析	35
表 16、柳杉各齡級株數死亡估算	37
表 17、不同齡級下柳杉單位面積株數枯損率	39
表 18、2009-2018 年生產用材統計	40
表 19、2009-2018 年依不同立木材積組合下之伐採株數估算	41
表 20、在立木材積組合推估下之 2009-2018 年砍伐株數敘述統計分析	42
表 21、柳杉全林分於不同公式模擬下之每公頃蓄積量	44
表 22、2009-2110 年之柳杉全林分在不同公式模擬下之每公頃蓄積量敘述統計	44
表 23、新造之柳杉林分 (stand 0) 於 2016-2105 之存活株數模擬	48
表 24、新造之柳杉林分 (stand 0) 於不同立木材積組合模擬下之每公頃蓄積量	49
表 25、新造之柳杉林分 (stand 0) 於不同公式模擬下之每公頃蓄積量敘述統計	49
表 26、不同立木材積組合下之最大連年生長量	51
表 27、不同研究模擬之結果比較	53
表 28、主要林型之面積與單位面積蓄積	61
表 29、主要林型之單位蓄積量及平均年生長量	62

方程式目錄

推估公式

式 1	20
式 2	20
式 3	22
式 4	22
式 5	22
式 6	23
式 7	23
式 8	24
式 9	37

胸高直徑式

式 D-1	21
-------------	----

樹高曲線式

式 H-1	21
式 H-2	21
式 H-3	21
式 H-4	21

蓄積公式

式 V-1	21
式 V-2	21
式 V-3	21





第一章 緒論

第一節 研究背景與動機

壹、國際森林趨勢

隨著天然林的消失與退化，國際越發重視森林之永續經營，於 2015 年聯合國之永續發展大會擬定了 17 項永續發展目標（Sustainable Development Goals, SDGs），亦稱永續發展議程（Agenda 30），作為至 2030 年前實踐的方向，希望消除貧困、飢餓，以永續發展的面向整合經濟、社會、環境等，促進全球人類的健康與福祉。其中 SDG 15 旨在保護、恢復與促進陸地生態系統的永續利用、永續管理森林、對抗沙漠化、制止和扭轉土地退化，並防止喪失生物多樣性，並以此目標揭露森林資源永續管理的重要性(FAO, 2016; 財團法人農業科技研究院農業政策研究中心，2017)。

在此目標之下，2017 年聯合國第 12 屆森林論壇會議（The 12th session of the UN Forum on Forests, UNFF12）也呼應了永續發展目標，提出 2017-2030 年全球森林策略計劃（United Nations strategic plan for forests, 2017-2030, UNSPF）做為指導原則，其包含 6 個森林目標及 26 個子目標(林俊成，2018)：

森林目標 1. 透過永續森林經營，包括保護、復育、造林和再造林，減緩全球森林覆蓋下降的趨勢，並防止森林劣化，應對氣候變化。

森林目標 2. 提高以森林為基礎的經濟，社會和環境效益，包括改善依賴森林為生的人們的生計。

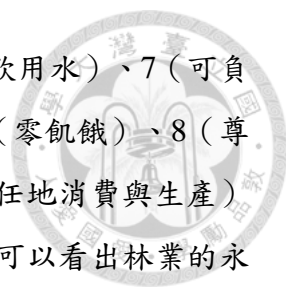
森林目標 3. 顯著增加全球和其他可永續經營的受保護森林面積，以及永續經營森林的森林產品比例。

森林目標 4. 為實施永續森林經營、加強科學技術合作與夥伴關係，從各個來源籌募財政資源。

森林目標 5. 通過「聯合國森林文書」建立完善森林永續管理的治理體系，提高森林對 2030 年永續發展議程的貢獻。

森林目標 6. 加強各層面森林相關問題的合作，包括聯合國系統和森林合作夥伴關係成員組織以及各部門與權益相關者。

這些森林目標在林業資源永續管理上不僅對應 SDG 15 外，與其他永續



發展目標，如：與 SDG3（良好的健康和福祉）、6（乾淨飲用水）、7（可負擔與潔淨的能源）、13（氣候行動）等有直接關聯；與 2（零飢餓）、8（尊嚴勞動和經濟成長）、11（永續城市和社區）、12（負責任地消費與生產）等，亦有直接與間接的關聯（Hazarika & Jandl, 2019），可以看出林業的永續性對社會整體發展與政策擬定上，扮演著重要的地位。

貳、國內林業現況

相較國際的永續林業趨勢下，回顧近來臺灣林業發展，在過去臺灣林業政策因應保育意識的興起以及臺灣的天然林長時間被大肆砍伐之背景下，自 1991 年頒布「臺灣森林經營管理方案」後開始全面禁伐天然林，並訂定每年之伐木量不超過 20 萬 m^3 ，因此人工林的伐採自彼時起幾乎停滯。根據研究，長期以來臺灣的木材自給率不到 1%，而 2011 年臺灣生產之國產材僅 2.4 萬 m^3 ，但國內木質材料之需求量高達 529 萬 m^3 ，不僅伐木量遠低於政府所訂定的生產上限外，木材自給率更僅僅只有 0.45%。由此可看出，國內當前之木材市場極度依賴進口，再進一步追蹤進口木質材料的國家，可發現其中有相當比例的木材是來自於非法伐採或未能達到永續經營森林的國家（黃裕星，1999；邱祈榮等，2012；陳麗琴等，2012；林俊成與邱祈榮，2017），此現象在經濟生產面上與國際所推行之永續林業的目標有所出入。

為了臺灣停滯許久的林業，並因應現今人工林缺乏撫育而呈現有林無材、臺灣傳統林業生產端式微、過去造林政策（全民造林、平地造林等政策）期滿等背景下，林務局先後於 2016 年提出「國產材元年」的口號、2019 年推出「林業永續多元輔導方案」，希望一步步振興林業的多元生產，增加林業附加價值、並提高國人對於國產木材的利用。

然而林業相關的產業鏈涉及之層面相當廣泛，以國產材為例，從造林準備前期的選種、育林、至上游的造林、撫育、修枝、疏伐的實務技術及措施、與中下游的林產加工、乾燥、國產材的銷售，皆為國產材之經營涉獵範疇（邱祈榮，2019；許立達，2011）。在國產材的重啟之路上，仰賴對產業資源之了解，且需層層把關，以利整體規劃與營運。以過去大雪山林業公司（1958-1973 年）的實例作為借鏡，其為美援經建時期（1958-1974 年）由政府成立



的公營公司，經營業務含括伐木、製材、木材銷售等，也因當初設立之時，投資金額龐大，其中又以大製材廠（1964-1970年）原先預設處理的產能及料源供應有所出入（每年可供給之原木量小於大製材廠須用量），整體上廠房在原設計與實際經營情形差距頗多，最終大雪山林業公司僅十餘年之光景即結束營運（臺灣大雪山林業公司，1966；林務局，2003；簡義倫，2010）。

時隔近四十餘年的現今，在分析與面對國產材供需與利用之問題現況中，卓志隆（2018）整理歸納在經營面、政策面、環境面、市場面、輔導面於現階段國產材政策所面臨之挑戰，其中在法規及自給率規劃面上，點出臺灣現行人工林之資源須清點、盤查，而未來人工林生長量之趨勢實為推展國產材生產之潛力，應適度規劃其經營目標。在實務上該如何將上游林地與下游的木業重新整合、盤點，使得森林得以達到生態、生產、生活的永續管理，考驗著產官學界對於資源的掌握與管理。

參、臺灣的森林資源概況

對於森林資源的掌握、管理與瞭解可從森林資源調查著手，臺灣在森林資源的盤點上，自戰後初期至今共進行了四次全臺森林資源調查，分別為第一次：1954-1956年、第二次：1972-1977年、第三次：1990-1995年及第四次：2008-2014年。據第四次森林資源調查報告成果指出，臺灣全島林地總面積為1,991,145公頃，若依所有權屬來區分，以國有林面積1,847,758公頃，佔92.7%為最大宗，而國有且分屬林務局管理的林地共計1,616,268公頃、其餘則為公有林面積6,832公頃，佔0.3%、私有林面積136,555公頃，佔6.8%；若從生產為目的之經營角度上，依聯合國糧食及農業組織（Food and Agriculture Organization, 簡稱FAO）之森林經營使用類別標準，將位於國有林中林木經營區或森林育樂區之營林區且有栽植紀錄者劃分為生產性人工林，面積有270,606公頃，佔全林地面積的13.6%（邱立文等，2015；楊筑雲，2015；林務局，2016）。

在森林蓄積的推估上，第四次森林資源調查延續第三次森林資源調查之方法，採取航照與地面調查之雙重取樣法，在地面調查的部分以間隔3,000公尺進行系統取樣設置矩形樣區，並分為一般林木樣區（0.05公頃）與竹林樣

區 (0.01 公頃)，調查樣區內之單株林木蓄積的方式估算，其蓄積量推估亦沿用第三次森林資源調查之樹種材積式，計算各樣區蓄積後再依樣區面積換算成單位面積蓄積 (m^3/ha)。整體而言，全臺森林覆蓋率由 58% 上升至 60%，然而人工林面積因缺乏撫育、經營措施，使得部分人工林遭遇次生林入侵而退化的情形，恐與過去林業衰退停滯有關 (林務局，1995；楊筑雲，2015；林務局，2016)。

肆、柳杉人工林現況

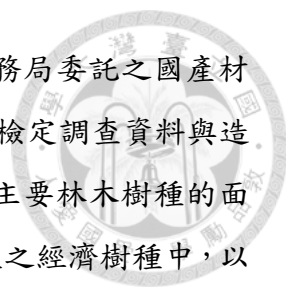
在過去臺灣造林經驗中，柳杉 (*Cryptomeria japonica* D. Don) 為日本主要的造林樹種之一，其自 1896 年引進栽植以來，由於初期生長速度快，在日治時期與戰後初期在臺灣大量推廣造林，成為當時主要推廣的造林樹種，然而隨著時空背景的變遷，人民保育意識抬頭、國際上木材經濟價格低落、林業保育政策之走向，大面積的柳杉則被留在山林之中，近年又隨著碳吸存議題的興起而再度受到關注 (劉孝慎，1975；林俊成，1999；王亞男等，2010；王培蓉等，2013)。

現今柳杉人工林的資源，依第四次森林資源調查報告 (林務局，2016) 指出柳杉人工林面積 41,390 公頃，總蓄積約有 11,882,000 m^3 ，而在地面樣區之調查資料計算上，柳杉人工林其每公頃蓄積 388.89 m^3/ha ，屬針葉樹人工林中最高者 (表 1)。

表 1、各林型主要樹種單位面積蓄積

林型	針葉樹 林型	檜木 人工林	肖楠 人工林	松類 人工林	杉木 人工林	柳杉 人工林	臺灣杉 人工林	其他人工 針葉林
每公頃蓄 積量 (m^3/ha)	318.05	320.43	86.18	296.31	222.57	388.89	258.11	230.71

資料來源：行政院農業委員會林務局 (2016)。



隨著政府致力於提高國內森林資源利用與生產，在林務局委託之國產材潛勢分析計畫案中，許立達（2011）依林務局 98 年第二輪檢定調查資料與造林紀錄來盤點人工林資源，將林務局轄屬經濟性人工林依主要林木樹種的面積與蓄積以每十年為一齡級加以分類，發現在過去推廣種植之經濟樹種中，以柳杉栽植面積 7,204.9 公頃為最大，且大部分趨於 31-40 齡級以上，甚至有高達 80 齡級之柳杉經濟林，若以全民造林獎勵樹種所設定之柳杉 20 年輪伐期（林務局，1998），則現行大部分之柳杉林已到達或超過輪伐期，儘管現在不再推廣種植柳杉，然而柳杉林的經營管理與木材生產面在未來終究是需要面臨的議題（Lam & Guan, 2020）。

第二節 研究目的

過去在前人研究的積累下，林木在資源管理面已建立多項基礎資料研究，可進行人工林的生長蓄積、收穫材積之推估，這些研究多利用數學關係式在自然界中尋找各因子（如林齡、胸高直徑、樹高、地位指數）間的關聯。在科技日益進步之下，森林經營的學門也衍生出不少的工具與方法應用於森林環境的量測與監測上，在這些基礎資料的蒐集與建構下，都能提供森林經營者在擬定經營方針的建議。因此本研究企圖將這些前人研究的林業相關因子進行串聯、整合，將林木生產因子間的聯動關係以系統動力學（或稱系統動態學，system dynamics）的方式來呈現，利用彼此間的反饋機制、連結系統相互作用，協助了解不同生長收穫模式對於柳杉人工林蓄積量推估之影響與其不確定範圍。

本研究試圖將過去與現有之林業先進、學者們的研究及生長收穫式做林木蓄積量之推估，而在過去造林的經濟樹種中，以柳杉屬大規模種植、且有建立長期觀測資料之樹種，因此以柳杉作為臺灣經濟人工林分蓄積推估之探討樹種。

本研究目的為：

- (1) 匯整現行林務局轄屬柳杉經濟林分之蓄積量數據，建立系統動力學模型，模擬單木、林分、全林在時間尺度上的連續性變化。
- (2) 利用不同生長收穫式估算蓄積量，了解不確定性範圍，以提供柳杉人工林經營或臺灣國產材生產基礎資料及柳杉碳匯評估之參考。

第二章 文獻回顧

森林為連續變動的動態系統，森林之生長(growth)指林木隨時間序列的變化，而收穫(yield)則為生長量之累積，兩者有密切的關聯。從森林生態角度來看，森林生態系統與環境彼此存在養分、能量、基因庫等之間的流動關係，此交互關係反應在森林生長的增加與損失上，充滿著不穩定之因素(Clutter, 1963; Spiecker *et al.*, 1996; Pretzsch, 2009)。生理機制上，林木藉由光合作用吸收二氧化碳，並轉化碳的形態儲藏於生物體內，而有生物量的產生，再分配到林木的各個部位，其中林木材積的生長屬較為直觀可量測且為非破壞性方式來推估生長收穫量的方法。

影響林木生長收穫的因子相當多，依照不同層級由小至大可分為單木與林分、全林層級，在單木及林分層級上其影響因子大致上可包含外在環境因子(如林分密度、撫育作業、地位因子)與內在環境因子(如樹種特性、基因潛能)等，透過這些影響因子間以迴歸式表示彼此相互關聯性，是常用的生長模式(growth model)。

第一節 生長收穫模式

生長模式係用來表達生長現象之模式，例如以林木之胸高直徑(diameter at breast height, DBH)與樹高間的關聯，推估林木之生長與收穫，將胸高直徑作為自變數之生長模式，常使用以乘冪式呈現之胸徑-樹高曲線式及以胸高、樹高為變數之對數材積式。若是將時間作為自變數，來表示其生長之情形，較常為研究者使用之生長模型如 Schumacher、Mitscherlich、Logistic、Gompertz、Richards、Modify-Weibull、Schnute 等，這些模式皆曾用於模擬林木之生長，其變數與常用模式之基本型態如表 2 所示(林子玉, 1963; 馮豐隆與林子玉, 1992; 顏添明與李久先, 1998; Sharma & Parton, 2007; 鄭景鵬等, 2014)。

生長模式在林學的應用上相當廣泛，能提供量化的資訊有助掌握林木生長的現況及發展預測，並給予經營者決策上之依據。隨著模式的方程式結構、樹種之生長特性不同，其林木的適用性亦有所差異，一個良好之生長模式應具有：(1) 良好的結構及生物學上之理論基礎(2) 具有描述能力、解析能力與預測能力(3) 模擬之難易程度。簡言之，良好的生長模式可以對實際的生長狀況進行有效推估，並對未來發展進行預測(大隅真一, 1976; Sweda & Koide, 1981; 楊榮啟, 1987; 顏

添明與李久先, 1998)。而在人工林生長收穫模式的建構上, 歸納諸多的影響因子, 以林齡 (age)、地位 (site) 與林分密度 (stand density) 是影響收穫的主要因素 (Husch *et al.*, 1982; Clutter *et al.*, 1983; Avery & Burkhart, 1994; 楊榮啟, 1987; 顏添明, 1997; 顏添明與李久先, 1998; 黃凱洛等, 2011; 陳忠義等, 2017)。

表 2、依不同變數與常用型態之生長收穫模式

自變數	模式名稱	模式基本型態	備註說明
胸高直徑	樹高曲線式	$H=a \times D^b$	a、b：模式參數
		$H=a \times D^{b+c}$	a、b、c：模式參數
		$H=a+bD+cD^2$	a、b、c：模式參數
		$H=a+b \frac{1}{D^2}$	a、b：模式參數
胸高直 徑、樹高	對數材積式	$\log V=a \times \log D+b \times \log H+k$	a、b、k：模式參數
林齡	Schumacher	$Y=\exp^{a-b(\frac{1}{t})}$	a、b：模式參數
	Mitscherlich	$Y=A \times (1-B \times \exp^{-kt})$	A、B、k：模式參數
	Logistic	$Y=A / (1+B \times \exp^{-kt})$	A、B、k：模式參數
	Gompertz	$Y=A \times \exp^{-B \times \exp^{-kt}}$	A、B、k：模式參數
	Richards	$Y=A \times (1-\exp^{-kt})^{\frac{1}{1-m}}$	A、k、m：模式參數
	Modify-Weibull	$Y=A \times (1-\exp^{-Bt^c})$	A、B、c：模式參數

註：H 為樹高 (m)；D 為胸高直徑 (cm)；V 為材積 (m³)；Y 為生長量 (m²/ha)；t 為林齡 (y)。

第二節 森林生長模式之架構

Weiskittel *et al.* (2011) 將森林生長模式 (亦稱森林林分發展模式, forest stand development model) 依其建立之目的, 分為統計型 (statistical)、處理型 (process)、混合型 (hybrid) 與孔隙型 (gap) 四種型態。汪大雄 (2012) 則指出統計型乃以統計與經驗資料為基礎, 探討林分屬性變化與周遭影響因素之因果關係; 而處理型則為依據植物之生理過程, 如光合作用, 來推估林分生長; 混合型為結合統計型與處

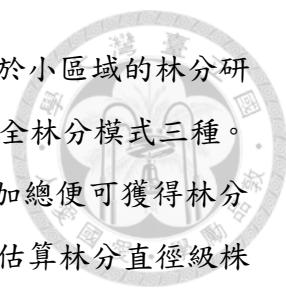
理型模式之優點來瞭解植物生理行為與強化預測之正確性，但其難度過高，代表模式（如 3-PG 模式，Landsberg & Waring, 1997）數量較少；孔隙型則利用生態學理論探討與解釋森林長期之生態過程、機制、動態等因素之間的關係。其中統計型模式為現行多數之林木生長模式所使用。

在過去國內所發展之林木生長模式，常以胸徑與樹高的增加作用通用的模擬架構來預測生長，以枯損率來預估在時間區間內林木的死亡機率 (Hasenauer, 2006)；而馮豐隆與林子玉 (1991) 也提出完整的生長收穫系統需整合許多推測模式，包括 (1) 樹高曲線式、(2) 材積式、(3) 地位指數式、(4) 自然間伐式 (natural thinning function) 或稱枯死模式 (mortality model)，以求得生長蓄積之估計。

林分之枯損量 (或稱枯死量) 是整個森林生態系統動態一個重要的過程，其由相當多的變因且複雜現象所組成，具有高度變動性，經營者也可透過人工施業來影響枯損量之降低，如以林木枯死前先行伐除，增進有效利用林木資源。森林之枯損屬自然死亡 (natural mortality) 的一環，學者將自然死亡又分為規律死亡 (regular mortality) 與不規律死亡 (irregular mortality) 兩種，規律死亡來自於林木之間的競爭，如爭取陽光、水、土壤養分、樹種基因特性等；而不規律死亡則歸因於環境之不可抗力因素，如火災、風災、下雪、或蟲害等 (Adame *et al.*, 2010; Peet & Christensen, 1987; Alenius *et al.*, 2003; 陳朝圳與陳建璋, 2015)。其中規律死亡是可以被預測的，而不規律死亡在模擬模型中有時是以為隨機事件來呈現 (Liu & Ashton, 1995; Pothier & Mailly, 2006; Chiu *et al.*, 2016)。

枯損率在國內之相關研究並不多，Chiu *et al.* (2016) 試圖建立在高密度栽植下之臺灣杉與紅檜人工林，因自然現象而致使死亡之年枯損量 (單位: tree/ha/yr) 公式，其假設前提為枯損率是由密度所驅動。方法為測量樣區之胸高直徑、樹高，並以計算出之株數密度 (trees/ha)、林木平均胸高斷面積 (m^2/tree)、林分胸高斷面積 (m^2/ha) 作為枯損量之自變數，將變數之方程式以自然對數呈現，而枯損量作為自變數，以非線性最小平方法 (least squares method) 進行模式之擬合。模式模擬結果平均枯損率隨著林分密度的增加而增加，顯示林木彼此間相互競爭的結果 (Piao *et al.*, 2014)，然而在臺灣杉與紅檜的競爭表現上有所不同，推測其與物種對於耐蔭性、競爭能力有所關連。

而林分之蓄積多以現地樣區調查其林分特性，再予以進行不同變數間關係式




的模擬與建立，隨著調查方法的多元與科技的進展下，現多應用於小區域的林分研究。若依模式處理之單元體可分為單株林木模式、直徑級模式與全林分模式三種。單株林木模式以單木層級做為處理單元，透過單木的資料再行加總便可獲得林分單位面積之結果（汪大雄，2012），直徑級模式為使用林分表法估算林分直徑級株數分佈之變化；而全林分模式為最易發展之模式之一，現行國內生長模式研究大多為此類型。

第三節 前人建立之生長收穫式

早期的研究中，因受限於科技的普及，與從業人員的便利作業，多以胸高直徑為自變數以建構樹高曲線式，以單株林木層級調查樣木，再行推估至林分層級之林木材積，如楊榮啟（1975）、羅紹麟與馮豐隆（1985）分別建立臺大實驗林與全臺之柳杉樹高曲線與立木材積式；而第三次森林資源調查所使用之材積推估式亦由胸高直徑與樹高所推估而來，此式即姚鶴年（1987）整理劉慎孝、楊寶霖、徐渙榮與陳松藩（1955）所彙編之立木材積式，並以此推估式延用至第四次森林資源調查（邱立文等，2015）。

在過去以柳杉作為經濟樹種為目的之造林時期，希望從經濟與材積收穫上獲得最大收益，因而許多前人對於柳杉的生長狀況進行研究，（馮豐隆與吳昶清，2002；王亞男等，2010）。常見之柳杉生長模式例如：楊榮啟（1975）利用臺大實驗林之柳杉作為研究對象，選用實驗林中溪頭、清水溝、水里、內茅埔、和社、對高岳 6 處造林地共 188 個樣區，量測林齡分布為 10-60 齡級之柳杉林分進行材積式之編制，並以胸高直徑、樹高做為變數，以最小二乘法進行迴歸分析，此研究所建置之樹高曲線式與立木材積式至今尚為研究學者所使用，多用來估算溪頭地區之柳杉林分蓄積、碳吸存量，如王亞男等（2010）、Cheng *et al.*（2013）。

以全臺做為研究樣區之材積式以姚鶴年（1987）整理劉慎孝等（1955）建立之柳杉材積收穫表而來，現仍為林務局於森林資源調查所使用，其調查全臺北、中、南、東，林齡介於 10-45 年生之柳杉造林地，共 234 個樣區資料，測定立木 35,856 株，樹幹解析 74 株，其樹高測定選取中央木量測平均樹高，將求積與樹幹解析之結果製成材積表。而羅紹麟與馮豐隆（1985）針對全臺國有林事業區進行林齡分布介於 7-21 年之柳杉造林地調查，分為直徑、樹高與樹幹解析三個部分進行量測，



並編制樹高曲線式與單木材積式，其中直徑樣區 328 個、樹高樣區 118 個、中央木 61 株進行樹幹解析，其研究目的主要分析柳杉在各直徑、樹高分布情形，並以估算柳杉人工林之蓄積量。儘管上述之研究皆有建立材積式，但因研究目的不同而有不同的分類依歸，且資料之調查及處理方式亦有所不同。此外，張森、陳麗琴、任憶安（1987）對全臺林務局人工林進行生長收穫之預測，屬早期分析全臺層級的柳杉收穫預測報告，當時之柳杉人工林多數屬於幼齡期，林齡於 15 年生以下者之面積達柳杉人工林 62%，然而其在分析結果上提及與其他人工林生長收穫試驗報告結果相差甚遠，所獲數據為偏高的預測。

而林分模式層級多用於表達林齡與其林分特性之關聯，如林齡-蓄積量的關係，在 Fukuda *et al.* (2003) 及劉知妤與王兆桓 (2008) 之研究可參考，其以 Mitscherlich 生長模式（亦稱 monomolecular 模式）建立不同地區的蓄積生長量模式，以便於估算該地區之蓄積量；林齡-地位指數曲線的建立，可參照黃凱洛等（2011）以 Chapman-Richards 生長模式建構林齡與地位之關聯，研究中指出地位指數常以優勢木樹高來作為量化地位優劣的指標；林齡-胸徑、林齡-樹高生長等林木特性之研究較多，可參見劉興旺等（2012）、Cheng *et al.* (2013)、鄭智馨等（2014）、鄭景鵬等（2014）之研究，分別應用到 Gompertz、Mitscherlich、Chapman-Richards 生長模式來模擬林木之生長，而研究中提到生長模式之使用，除了注意擬合之迴歸指數外，尚須注意擬合結果與觀測值表現是否合理，能否解釋其生長現象。除了單以時間為自變數外，Lam & Guan (2020) 尚加入胸高斷面積來探討在不同栽植密度下對於柳杉林分生長的變化，將生長模式作為混合模型來建模。

以時間為變數之非線性生長模式，隨著電腦、計算工具的普及而廣為研究應用，其相關之應用整理於表 3。

表 3、林木非線性生長/收穫模式在林齡與林分特性之研究應用與方法



研究目的	樣區及 研究樹種	方法	研究者
收穫模式			
臺大實驗林之柳杉生長與收穫材積式編制	臺大實驗林 / 柳杉	依實驗林之柳杉造林地為對象，量測胸高直徑與樹高，建立實驗林之樹高曲線式與立木材積式，並與臺大實驗林之柳杉生長狀況與日本當地的生長進行比較。	楊榮啟 (1975)
建立林齡較小之柳杉林分的生長收穫材積	全臺國有林事業區 / 柳杉	調查全臺國有林事業區之柳杉造林地，整理造林台帳資料，應用直徑分布法來估算每公頃蓄積量，另外也分別建立樹高曲線式與材積式。材積式的建立是以選取中央木將其伐倒後採取樹幹解析的方式量測材積編製而成。	羅紹麟與馮豐隆 (1985)
建立柳杉收穫表	全臺事業區 / 柳杉	材積收穫表之建立以共線圖表法建置而成，將造林地分為三級，進行下列林分特性應用：地位指數曲線與各齡級之每公頃株數、平均胸高直徑、立木材積（連皮）等。	劉慎孝等 (1955)、 姚鶴年 (1987)
生長模式			
建立生長收穫模式，並進行生長預測	全臺國有林事業區 / 柳杉、杉木	將各林管處之人工林依樹種、面積、單位蓄積、林齡以林齡-單位面積蓄積量建立柳杉人工林生長與收穫方程式，並分析全臺與各事業區人工林之年平均生長量、連年生長量。	張森等 (1987)
估算人工林之蓄積量、生物量、碳吸存量	日本地區 / 日本柳杉、日本扁柏 永久樣區 / 柳杉、檜木	以林齡-蓄積量與林齡-各部位生物量之比例（根+幹/全株）為基礎，以非線性方程式建立其與林齡的關係式。 以林齡-蓄積量模式為指引曲線，推估後續的蓄積量。再由蓄積量推估生物量，經由碳轉換係數求得碳值，以評估碳貯存量。	Fukuda <i>et al.</i> (2003) 劉知好與王兆桓 (2008)



建立地位指數 曲線	永久樣區 /紅檜、柳 杉、杉木、 臺灣杉	以林齡-林分之優勢木樹高為基礎，採用指導曲線法 (the guild curve method)，以柳杉之基準齡為 20 年，建立地位指數曲線，所得之參數，以永久樣區複查資料進行模型驗證，由誤差之殘差均方根值 (RMSE) 作為驗證模式適應性的比較基礎。	黃凱洛等 (2011)
不同林齡下胸 徑、樹高生長	溪頭地區 /臺灣杉	以不同林齡試驗地之資料建立林齡-胸徑、林齡-樹高之生長數據，探討台灣杉在不同林齡間胸徑、樹高生長之關係。理論上生長曲線之反曲點為生長率最高點，而通過反曲點後生長率逐漸下降。	劉興旺等 (2012)
	溪頭地區 /柳杉	分為 (1) 生物量之估算：以平均胸高直徑 (DBH) 依過去建立之經驗式來推估樹高，再計算立木材積； (2) 建立林齡-林分生長特性，探討其整體趨勢。	Cheng <i>et al.</i> (2013)
	溪頭地區 /臺灣杉	選擇四塊林齡介於 22-74 年之臺灣杉人工林，於每塊調查林分隨機設置 3 個 20 公尺 x 20 公尺調查樣區並量測樣區內林木株數、DBH、優勢與次優勢木之平均樹高。以公式推估單株材積、每公頃碳量。	鄭智馨等 (2014)
溪頭地區 /柳杉	將各林齡樹高分為下、中、上層木，由生長模式預測值 95% 信賴區間刪去不合理的偏低數據所預測的三層級林分樹高生長。而以乘冪式推估所需林齡之胸徑-樹高曲線。	鄭景鵬等 (2014)	
林齡、胸高斷 面積於不同栽 植密度的生長 模擬	臺大實驗林 /柳杉	以 65 年間之測量資料，依不同的栽植密度按林齡生長與胸高斷面積生長進行模擬，模型以非線性混合效應 (non-linear mixed-effects, NLME) 的方法建模。	Lam & Guan (2020)

第三章 研究材料與方法



本研究將森林視為本體，藉由公開之統計資料，以系統動態模型軟體(Stella)，透過回饋控制的概念，將林分消長之變因以互動關係利用不同的組成單位(單株林木與林分層級)，描述人工林在放任式管理下，林木生長、收穫間的變動關係，藉此模型預測人工林蓄積量的變化，並提出在不同生長收穫關係式組合的使用下，其所估算蓄積量之差距。

第一節 研究架構

研究之架構與流程以發現問題、並釐清與所要確立之問題與目的後，進行資料的蒐集、探討系統模型間各因子間之相互關聯，以作為模型建構的參考，模型建立之初需對於所得資料做前處理，並透過假設、因子間之關係式、參數等來建置整個系統模型，建置後的模型經過不斷的測試與修正，依據模擬結果來分析在使用不同的單株林木材積式中對於推估柳杉人工林之林分消長的差異及其影響(圖1)。

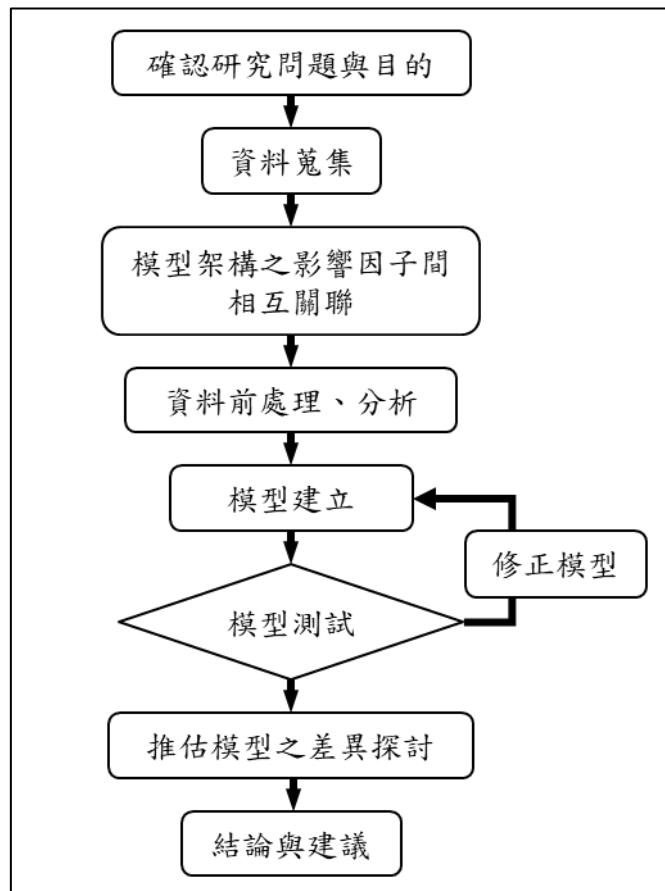


圖 1、研究流程圖

第二節 研究方法

壹、研究區域概述

將全臺林地的依所有權屬（國有林、公有林、私有林）及林務局國有林地分區（自然保護區、國土保安區、森林育樂區、林木經營區，圖 2）的架構下（管立豪，2003；林務局，2016），本研究的區域範圍以全臺林務局轄屬經濟林（即國有林依經營目的所區劃之林木經營區）中的柳杉造林（圖 3）與生產統計資料為主要之研究對象，並以此尺度進行長時間之林分動態模擬分析，圖資來源使用農委會資料開放平台之國有林區林地分區圖與國有林造林地籍圖。

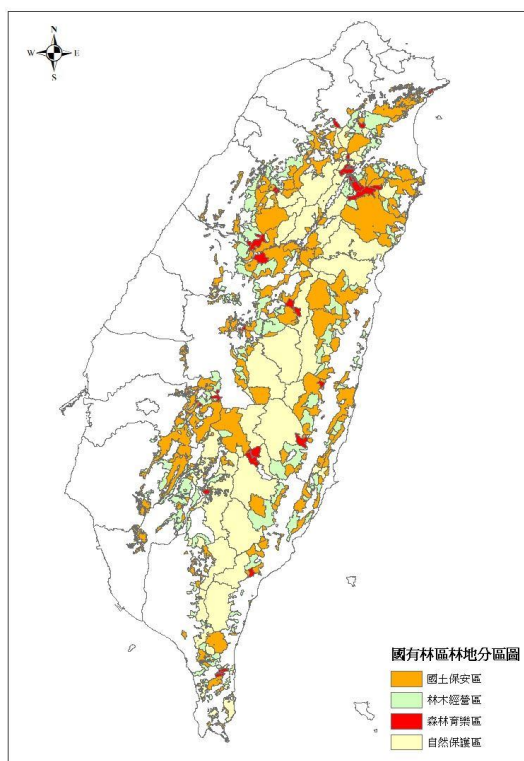


圖 2、臺灣國有林區林地分區圖

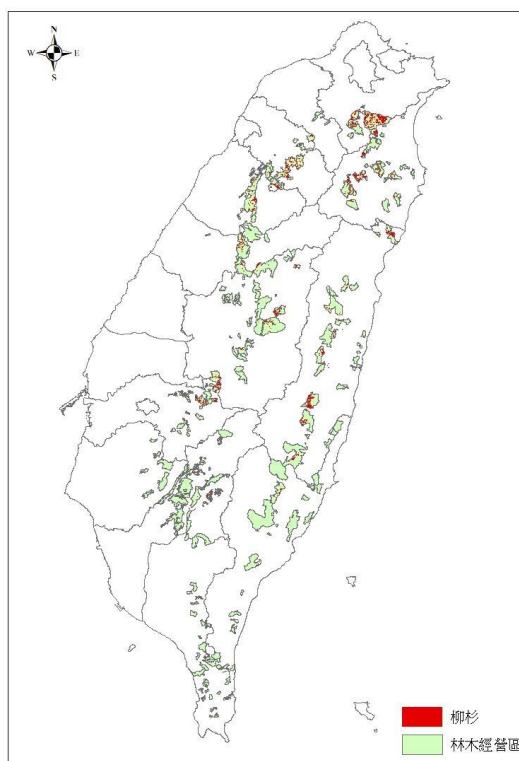


圖 3、臺灣國有林區之林木經營區柳杉造林分布圖

貳、研究資料蒐集與限制

本研究以過去前人研究、彙整之發表資料與政府公開資料等次級資料為基礎，進行模式的建構與模擬，而使用的資料來源有：林業統計資料、行政院農業委員會林務局委託研究計畫資料、臺大實驗林與臺大森林系長期研究調

查，資料的種類與相關說明分述如下，並詳列於表 4。將這些資料加以整理後得到林分面積、蓄積等資訊，並輔以單木材積模式細推至單株層級，以求得較詳細之林木生長變化。然而林務局轄屬經濟林範圍廣大，加上所得之次級資料僅有大略的林齡、面積、蓄積分布，在資料的處理上僅能以林齡作為變數，透過較大尺度的方式進行粗估，為本研究先天上之限制。

一、林業統計資料

2009-2018 年造林與生產用材統計來自於行政院農業委員會林務局之林業統計年報。在林木收穫的部分，以每年之生產用材（單位： m^3 ）為統計資料，依利用率為 70%（行政院農業委員會辦理國有林林產物處分作業要點第八點）進行推估，並假設砍伐之齡級為 31-40 年生之林木，將林分層級推估至單木層級，依此來估算當年度林木伐採株數。

二、行政院農業委員會林務局委託研究計劃資料

研究使用之林務局轄屬經濟林柳杉之各齡級面積與蓄積來自行政院農業委員會林務局 100 年委託研究：「國產材產銷分析及資訊系統建置規劃」中盤點 2009 年林務局轄屬經濟林主要樹種之各齡級面積與蓄積（表 5）。此屬林分層級資料，依過去對於柳杉人工林分在不同林齡中之林分特性，轉化資料之型式至單木層級的林木株數，並以此作為動態模型的存量基本單位。

三、臺大實驗林與臺大森林系長期研究調查

柳杉在不同林齡中所對應之人工林林分特性資料，如：林分密度（tree density, 單位： $tree/ha$ ）、蓄積量（volume, 單位： m^3/ha ）來自臺大實驗林與臺大森林系利用長期研究調查以 Mitscherlich 推估模式所建立起的關係式，其中模擬所使用的柳杉林木推估模式參考自 Cheng *et al.* (2013) 研究溪頭老齡柳杉之生物碳含量所得出的林齡-林分特性（平均胸徑、樹高）推估式。

本研究之自然死亡是以臺大實驗林長期生長量試驗地歷年調查之林木存活株數資料，分別發表自臺大實驗林研究報告王亞男等（2010）及鄭景鵬等（2010），以作為估算各齡級柳杉死亡率之參考。以自然對

數迴歸式找出樹種死亡株數之迴歸式，並以迴歸式與栽植密度的校正來推算在不同齡級下柳杉的枯損量。



表 4、文獻資料來源

資料種類	敘述	資料年分	單位	資料來源
林務局 98 年第二輪檢定調查資料	林務局轄屬經濟林主要樹種各齡級面積與蓄積—柳杉	2009	齡級：1-90，以 10 年為一齡級 面積：公頃 蓄積：m ³	許立達 (2011)
造林統計	林務局經濟林之造林面積及數量—柳杉	2009-2018	面積：公頃 數量：株	林務局林業統計 ^a >一般造林面積及數量>按樹種分>經濟林
生產用材 (指木材伐採後可取出利用之材積)	林務局轄屬直營之林木生產用材—柳杉	2009-2018	各林管處、m ³	林務局林業統計 ^a >臺灣地區木材生產-用材>林務局轄屬--直營--按樹種分
臺大實驗林長期生長量試驗地歷年調查	溪頭三叉崙柳杉生長量試驗地歷年調查林分結構表	1945-2010	年、株數、胸徑、蓄積、胸高斷面積、樣區材積、蓄積量、定期生長量、定期生長率	王亞男等 (2010)

^a 本研究之造林統計與生產用材資料整理自行政院農業委員會林務局編印之林業統計，研究期間為 2009-2018 年。

表 5、2009 年林務局轄屬經濟林柳杉人工林之各齡級面積與蓄積

齡級	蓄積量 (m ³)	面積 (ha)	單位面積蓄積 (m ³ /ha)
1-10	-	-	-
11-20	177.35	18.98	9.34
21-30	38,189.24	383.20	99.66
31-40	625,487.35	3,432.12	182.25
41-50	176,021.99	1,442.45	122.03
51-60	150,595.82	870.03	173.09
61-70	21,148.61	161.25	131.15
71-80	141,169.23	688.17	205.14
81-90	11,085.81	208.70	53.12
總計	1,163,875.40	7,204.9	161.54

資料來源：作者整理自許立達（2011）。

參、模型建構與假設

森林為一個連續變動的動態系統，本模型以柳杉為模擬對象，以現今全臺林務局轄屬經濟林之柳杉林分資料，建立林務局轄屬經濟林柳杉林分動態模型，以作為未來人工林分經營之通用模組。

研究所建構的林分模型架構層級由小而大為單株林木、齡級林分、人工林全林，考慮林分間之消長以增長（林分增加）與損失（林分減少）兩大系統來調控全林分動態變化，在增長的部分考慮造林（afforestation）、林分生長趨勢，而損失的部分則考慮人為因素的砍伐與自然枯損，模型之架構與流程如圖 4，資料的組成由實際值、假設推估值、模型參數、現行法規組成，以不同底色表示之。

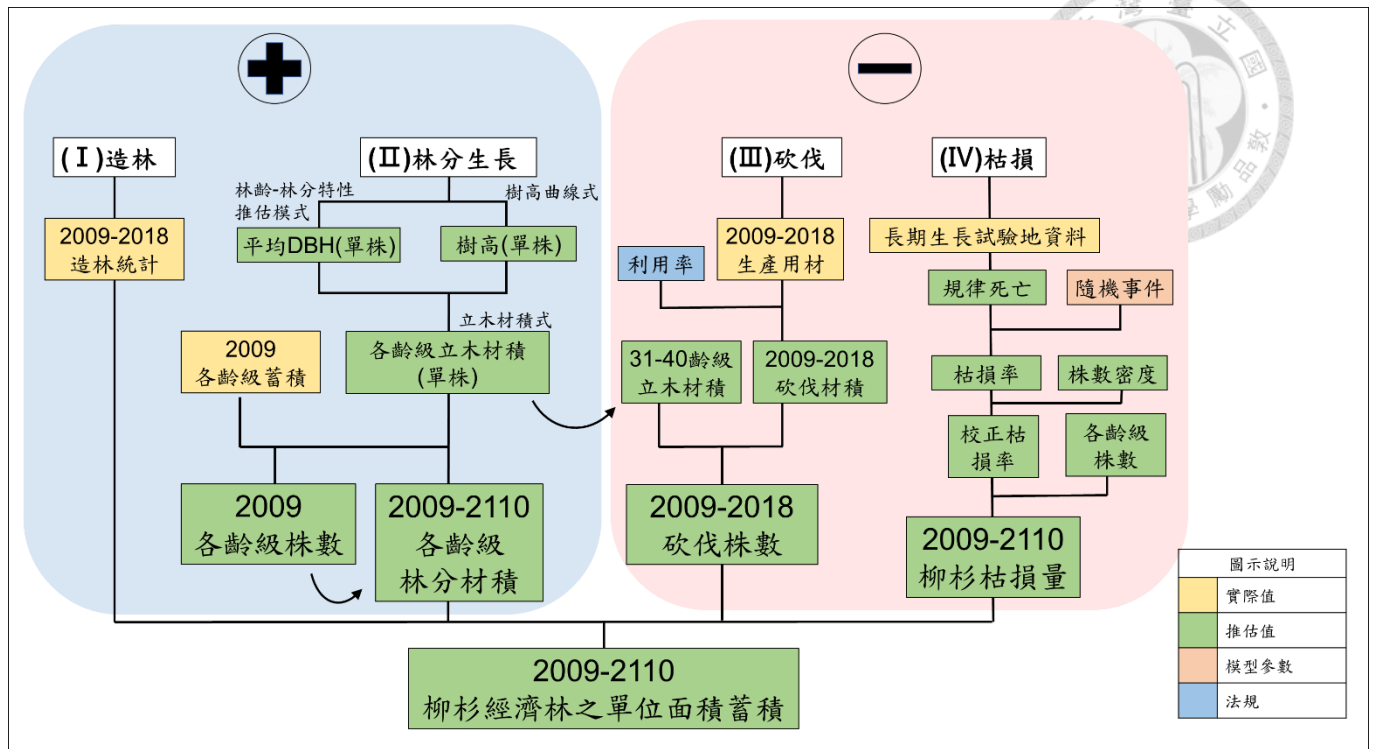


圖 4、模型架構

本模型林分系統動態分為三個層級：(1) 以單木株數為基本存量之運算單位，(2) 由各齡級間林木之消長組成林分，單一林齡之林分以單一模組 (module) 呈現，(3) 各齡級的集合則為柳杉之全林分結構。依據模式之架構，以單株林木為動態消長之基本單位，在增長系統中利用林木生長之胸高直徑、樹高的生長推估林分生長蓄積，而新造林則視為個別林分來模擬其動態變化；在損失系統中，利用依生產用材 (saw timber) 按利用率 (usage rate) 及假設砍伐齡級之平均單木蓄積來推估該年度砍伐株數，枯損率則依長期生長試驗資料所推估之規律死亡加上不規律死亡之隨機事件來模擬之。透過兩大系統的增減來影響林分株數密度 (stand density, 單位: trees/ha) 與蓄積至整體森林的消長，首先以 2009 年為基準年的空間下，將不同林齡下之蓄積資料轉換為株數資料，並以此時間點做模擬的起始年，本研究將模擬之時間軸分為兩個段落：(1) 模擬 2009-2018 年之生長與收穫關係，(2) 往後模擬預測至 2110 年柳杉林的動態變化，並再行探討使用不同材積收穫式模擬柳杉森林變動時其產生之差異。



為處理闕漏之資料與大量參數與關係式等數據，以利建構系統動態模型，本研究有以下之假設：

假設 1：

將現行柳杉人工林之各齡級面積視為獨立土地之林分，在面積不變動、各齡級林分不相互干擾的情形下，因許立達(2011)盤點之結果無 1-10 齡級之柳杉，故訂 11-20 齡級者為 stand 1、21-30 齡級者為 stand 2，以此類推至 81 齡級以上者為 stand 8，而每筆新造林土地也視為獨立土地，依據林務局林業統計資料，由於 2009-2018 年間僅 2015 年有一筆少量柳杉造林，將此筆新造林土地設為 stand 0。

假設 2：

由於柳杉在林地中不太有天然更新的情形，因而除了人工栽植外之因素，不考慮柳杉天然更新之情形。

假設 3：

系統模式以單木為基本運算單位，為模擬林分之生長，假設全臺人工林其生長模式相同，以林分蓄積與單株立木材積估算各齡級起始株數。

假設 4：

林木從林地立木材積的推估至砍伐成為生產用材，因受限於林業統計中僅有每年生產用材之紀錄，並未註明該年度砍伐之林地之伐採林齡、面積與株數，在模型中為估算單木層級之砍伐量，統一假設其砍伐之林分為 31-40 齡級者，而該林分也為許立達(2011)盤點柳杉人工林資源中在所有柳杉齡級所占之面積與蓄積量最大者。

假設 5：

在枯損率的估算中，規律死亡由長期生長資料推估得來，而不規律死亡為考慮隨機事件對林木造成的影響，在各齡級之規律死亡的變數中加入一個 random 函數，其變動範圍設為 0.01-0.15。

肆、模式公式與相關參數說明

一、林分生長估算與林齡之關係

由於需要將柳杉各齡級之面積與蓄積從林分層級轉化至單木層級，因此以林分特性與林齡之間關係進行資料的前處理，研究中利用楊榮啟(1975)、羅紹麟與馮豐隆(1985)、黃凱洛等(2011)、Cheng *et al.*(2013)以不同生長模式柳杉人工林在不同林齡下之平均胸高直徑(DBH)與樹高關係式，再使用立木材積公式推估不同齡級下之林木起始株數(式 1)，在此基準下，連續時間上林分材積變動即為單株立木材積與當時株數之乘積(式 2)。

$$\text{各齡級起始株數} = \frac{\text{各齡級蓄積}}{\text{單株立木材積}} \quad \text{式 1}$$

$$\text{林分材積} = \text{單株立木材積} \times \text{當時株數} \quad \text{式 2}$$

研究所使用之立木材積式以楊榮啟(1975)、羅紹麟與馮豐隆(1985)及姚鶴年(1987)建立的材積式分別估算之，並將用之公式與編號列於表 6，平均胸高直徑(DBH)之公式以式 D 表示、樹高(H)以式 H 表示、立木材積式則以式 V 表示之。而公式的建立與研究背景可參考前章之第三節與表 3 之說明。

表 6、柳杉人工林之林分特性關係式

項目	關係式	編號	參考文獻
平均胸高直 徑 (D)	$D=67.0 \times (1-0.9365 \times e^{-0.0117 \times \text{age}})$	式 D- 1	Cheng <i>et al.</i> (2013) ^b
單位：cm			
	$H=3.4842 \times D^{0.5228} + 1.30$	式 H- 1	楊榮啟 (1975) ^c
樹高 (H)	$H=e^{0.393170+0.692453 \times \ln(D)}$	式 H- 2	羅紹麟與馮豐隆 (1985) ^d
單位：m	$H=20.4613 \times (1-e^{-0.0549 \times \text{age}})^{0.7392}$	式 H- 3	黃凱洛等 (2011) ^e
	$H=30.2 \times (1-0.9481 \times e^{-0.0323 \times \text{age}})$	式 H- 4	Cheng <i>et al.</i> (2013)
立木材積 (V)	$\log V = -4.193148 + 0.9333828 \times \log(D^2 \times H)$	式 V- 1	楊榮啟 (1975)
單位： m ³ /tree	$V=5.979663 \times 10^{-5} \times D^{1.8753322} \times H^{0.9740340}$	式 V- 2	羅紹麟與馮豐隆 (1985)
	$\log V = -4.0449 + 1.9886 \times \log D + 0.6879 \times \log H$	式 V- 3	劉慎孝等 (1955)、 姚鶴年 (1987) ^f

^b 研究之樣區林木範圍：臺大實驗林溪頭營林區柳杉造林地，除長期永久樣區生長數據外，現地調查年之柳杉林分平均 DBH 23.1-48.8 cm，冠幅樹高 20.8-30.8 m，樣區林齡分布 37-93 年生；永久樣區生長數據林齡分布長達 6-93 年生。

^c 研究之樣區林木範圍：臺大實驗林柳杉造林地，平均 DBH 9.86-36.78 cm，平均樹高 8.49-28.97 m，樣區林齡分布 10-60 年生。

^d 研究之樣區林木範圍：全臺國有林事業區柳杉造林地，DBH 0.8-51.3 cm，樹高 1.1-21.5 m，樣區林齡分布 7-21 年生。

^e 研究之樣區林木範圍：全臺國有林事業區永久樣區柳杉造林地，優勢木平均樹高 10-33 m，樣區林齡分布 18-73 年生。

^f 研究之樣區林木範圍：全臺柳杉造林地，DBH 6-70 cm，樹高 4.5-27 m，樣區林齡分布 10-45 年生。



二、造林 (afforestation)

現行已不推廣柳杉造林，加上在文獻中鮮少提及自然更新的植株，因此柳杉造林之數據在 2009-2018 年以林務局年報統計之造林資料為參考基準。

三、枯損率 (mortality rate)

本研究以林木的枯損率來模擬人工林的損失，枯損率包括規律死亡及不規律死亡（即隨機事件）。規律死亡參考之參數以臺大實驗林之三叉崙柳杉長期生長試驗地（王亞男等，2010）調查之存活株數，每公頃株數（即株數密度）逐年減少，而呈倒 J 型（馮豐隆與林子玉，1991）。在枯損的模式中先建立每齡級之枯損迴歸式，在假設栽植密度為 2,500 株數/公頃下之規律死亡。

除了單位株數密度死亡外，考慮外在環境因子如蟲害、天然災害等而導致林木死亡，因而在枯損率中加入隨機事件模擬自然界中不規律發生的環境因子，變動範圍設為 0.01-0.15，已於研究假設說明，該齡級枯損率如式 3 所示。此外林分密度在模型中會依自然與人為因素林木而有所變動，因此以校正枯損率調整之，如式 4，整體上該齡級之枯損量為株數與校正枯損率之乘積（式 5），公式展示如下：

$$\text{該齡級枯損率} = \text{規律死亡} \times (1 + \text{隨機事件機率}) \quad \text{式 3}$$

$$\text{校正枯損率} = \text{枯損率} \times (\text{株數密度}/2500) \quad \text{式 4}$$

$$\text{該齡級枯損量} = \text{該齡級株數} \times \text{該齡級校正枯損率} \quad \text{式 5}$$

四、利用率 (usage rate)

本研究之利用率為生產用材 (saw timber) 之利用率，指木材伐採後可取出利用之材積，亦即從林木的立木材積到取出林地後的生產用材，參照林俊成等(2015)之做法將用材利用材積轉換立木材積。周楨(1968)亦以用材率（研究中稱之為利用率）作為立木材積轉換為伐倒木材積之轉換比率。

依行政院農業委員會辦理國有林林產物處分作業要點第八點規定：「造林木用材其利用材積與立木材積之換算比率(即利用率)為70%」，配合林業統計之林木生產資料為生產用材，故回推柳杉造林木之立木材積，按其利用率70%，估算方法則為計算立木材積後之70%利用率為生產用材，如式6所示：

$$\text{生產用材} = \text{立木材積} \times \text{利用率} \quad \text{式 6}$$

五、生產用材 (saw timber)

柳杉生產用材數據在2009-2018年間以林務局年報統計之生產用材資料為參考基準，基於許立達(2011)之柳杉人工林資源以31-40林齡不論在面積、蓄積、單位面積蓄積量皆為最高者(表5)，因而假設伐採31-40林齡之造林木，依利用率70%、31-40齡級單位面積蓄積量來推估該年度林木伐採之面積與株數(式7)。

$$\text{該年度伐採株數} = \text{該年度生產用材量} \div \text{利用率} \div \text{立木材積} \quad \text{式 7}$$

伍、資料前處理

由於已有之原始資料為柳杉人工林各齡級之蓄積與面積，為估算不同齡級下之單木株數，由Cheng *et al.* (2013)所建立之柳杉在不同齡級之平均胸高直徑(DBH)(式D-1)，推估在各齡級下之胸高直徑生長概況後，再以過去所建立之4種不同模式之樹高曲線式求得樹高生長情形。

為求得以不同材積推估式所得蓄積量之差異範圍，模擬4種樹高曲線式、3種立木材積式所搭配而成之12種組合，分別以V1-1-1至V1-4-3表示，V代表立木材積，而後三個數字為所使用之平均胸高直徑(DBH)、樹高、立木材積式，並依此立木材積組合所推估之齡級株數以T1-1-1至T1-4-3表示，T代表齡級株數，而後三數字組合同上述所示(圖5)。以此12種材積推估組合，來檢視模型進行推估後其最大與最小單位蓄積量之差距範圍。

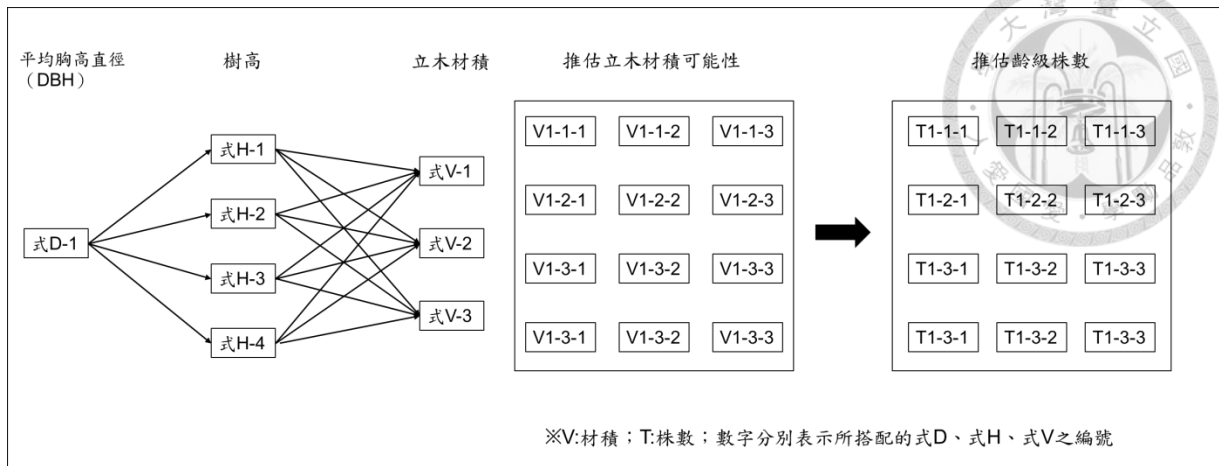


圖 5、以蓄積量-平均立木材積估算株數

而在動態模型中，各齡級之單木株數存量則以該齡級蓄積量除以單木立木材積計算（式 8），以此來進行連續時間上整體柳杉人工林之變動趨勢。

$$\text{該齡級單木株數} = \text{蓄積量} \div \text{單木立木材積} \quad \text{式 8}$$


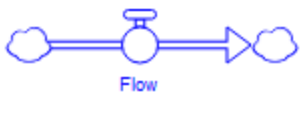


第三節 林分系統動態模型

本研究應用系統動力學，建立林分系統動態模型，結合森林生長模式中之統計型及處理型模式，以混合型模式呈現，同時反應預測的正確性（統計型特點）與林木生理機制（處理型特點），並呈現於模擬結果上。系統動力學（system dynamics）始於 1960 年代由美國麻省理工學院 Jay W. Forrester 教授提出，其透過結構化的回饋機制（feedback loop structure）與時間延遲（time delay）的過程來描述、模擬複雜的動態問題、處理非線性問題等，而其應用的領域相當廣泛，如環境變化、政策影響、經濟行為、醫學、工程等領域，且提供了一個通用的架構，可將其應用於隨時間變化而影響的尺度上，透過系統的建置與模擬，以通盤的角度來處理人們對於理解與解決所身處的問題（Forrester, 1993；李良山，2007）。

研究使用的工具為 ISEE Systems, Inc 公司所開發的 Stella Architect 軟體，其提供了對使用者相對友善的介面，也是第一個獲得廣泛應用的動態系統模型之一，其餘的系統動力模擬軟體尚有 Vensim、iThink 等。而 Stella 以圖像的介面來建立動態系統模型，並透過程式語言的編寫操縱、建構因子間之方程式，藉由系統的存量（stock）、流量（flow）、輔助變數（converter）之間的連結（connector）形成動

態系統之結構，其組成之元素與圖示說明如表 7 (Costanza & Voinov, 2001)。

表 7、Stella 軟體之組成基本元素 (Stella 技術手冊)

元素名稱	圖示	說明
存量 (Stock)		系統內流量的累積
流量 (Flow)		在單位時間內影響存量變化流出或流入之流動速率
輔助變數 (Converter)		在存量與流量間控制速率或數量之變量
連結 (Connector)		傳遞訊息與連接變數間的相互關聯

模型依照結構的組成的處理單元由大至小，分為人工林全林、齡級林分、單株林木，共三個層級，整體架構如圖 6 所示。

架構圖中，四大流量系統以不同顏色底標示，如造林以亮綠色、林木生長以紅褐色、砍伐以黃色、枯損以灰色表示；此外，重要變數亦以不同底色加強表示，如面積以咖啡色、蓄積以淺藍色、株數以綠色之底色。

全林層級由各齡級林分與新造林林分組成；齡級林分層級則由在時間基準下其各林分於空間尺度中之蓄積量與株數組成；在單株林木層級下，以林木株數作為推估之基本單位，並依 4 項變因：造林 (stand 0)、林分生長、砍伐 (stand 3) 與枯損作為模型之變因控制。



一、造林

造林在近期統計中僅一處於林務局經濟林中行柳杉造林（2015 年造林柳杉 2.15 公頃，1,075 株），以 stand 0 表示，且在該造林年度加入造林流量進系統中，其餘林分則無造林流量的加入。

二、林分生長

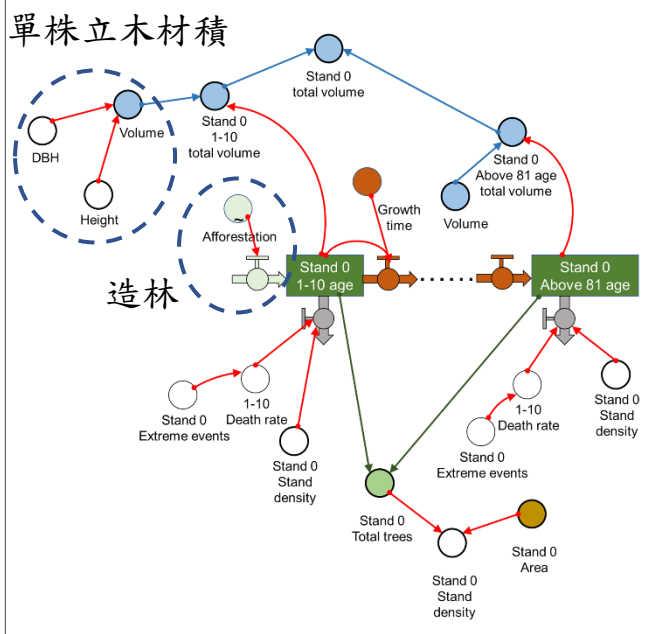
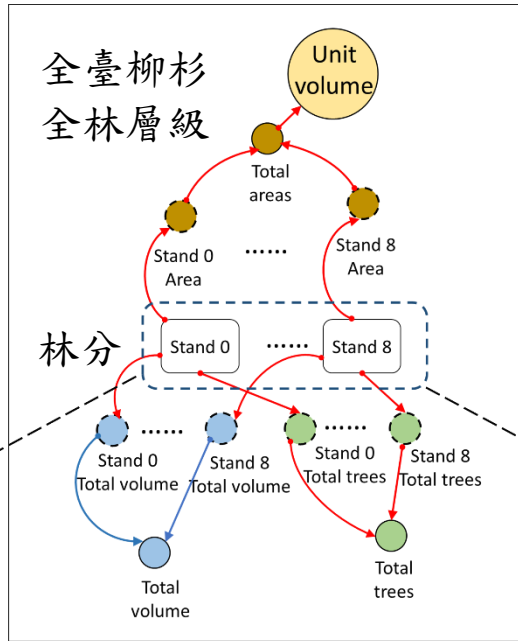
林分生長依 10 年為一個生長期（growth time），從 1-10 齡級至 81 齡級以上分為 9 個生長期（圖中綠色底之存量），而其單株立木材積以平均胸高直徑（DBH）、樹高、立木材積式再經由株數加總推估而來，由單株林木層級，經由一層層加總而至齡級林分與全林層級。

三、砍伐

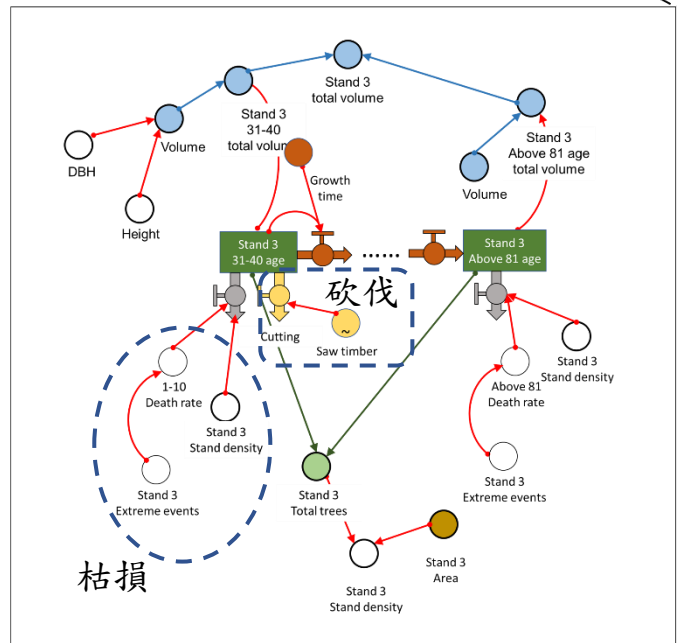
砍伐量以估算之平均砍伐株數表示，並以砍伐 31-40 齡級之 stand 3 為主，其餘齡級林分則尚不加考慮流量的流出。

四、枯損

枯損則由規律死亡、不規律死亡（隨機事件）、株數密度調控，其中不規律死亡以浮動的機率值由系統模擬之，整體枯損率以比率的方式表示，固定每年有一定比率的林木株數在自然因素下死亡而流出系統。



新造林—stand 0



砍伐—stand 3

圖 6、STELLA 模型架構圖

第四章 結果

第一節 空間尺度下林木存量之推估



壹、柳杉人工林分生長趨勢推估

由式 D-1 所建立之柳杉在不同齡級之平均胸高直徑 (DBH)，推估在各齡級下之胸高直徑生長概況後，再以過去所建立之四種不同模式之樹高曲線式求得樹高生長情形，由圖 7 可看出柳杉之之平均胸高直徑 (DBH) 之生長隨林齡而上升，然而生長趨勢尚未有明顯趨緩之情形。

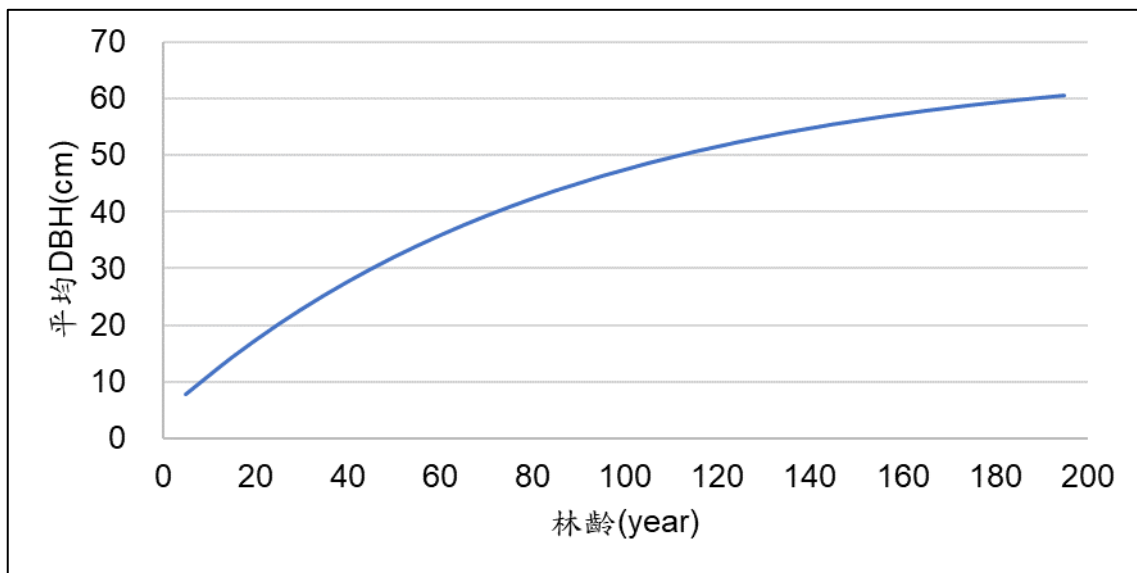


圖 7、不同林齡下柳杉之平均胸高直徑 (DBH) 生長趨勢

而在樹高之推估上，四個樹高推估式皆呈逐漸趨緩 (圖 8)，在起始樹高推估上，以式 H-1 之起始樹高較高而其餘三者起始樹高差異並不大，隨著林齡的增加，樹高漸趨緩，其中又以式 H-3 趨勢最為明顯，在老齡化後，四個樹高曲線式之樹高區間約坐落於 20-30 m 之間。若再將齡級區間拉至 200 年，其樹高曲線式之表現如圖 9，且齡級 80-90 區間時，式 H-3；式 H-2 之曲線式兩條曲線相交，而後式 H-3 之樹高成長幾乎為停滯狀態，屬四式中樹高表現最低者。另，式 H-1；式 H-4 之表現於 150 年後相交，在 150 年之前，以式 H-4 樹高表現為最高，而 150 年後則以式 H-1 表現趨勢最高。將以上各項組合所得之推估加以整理所得之人工林分特性之比較表，如表 8 所示。

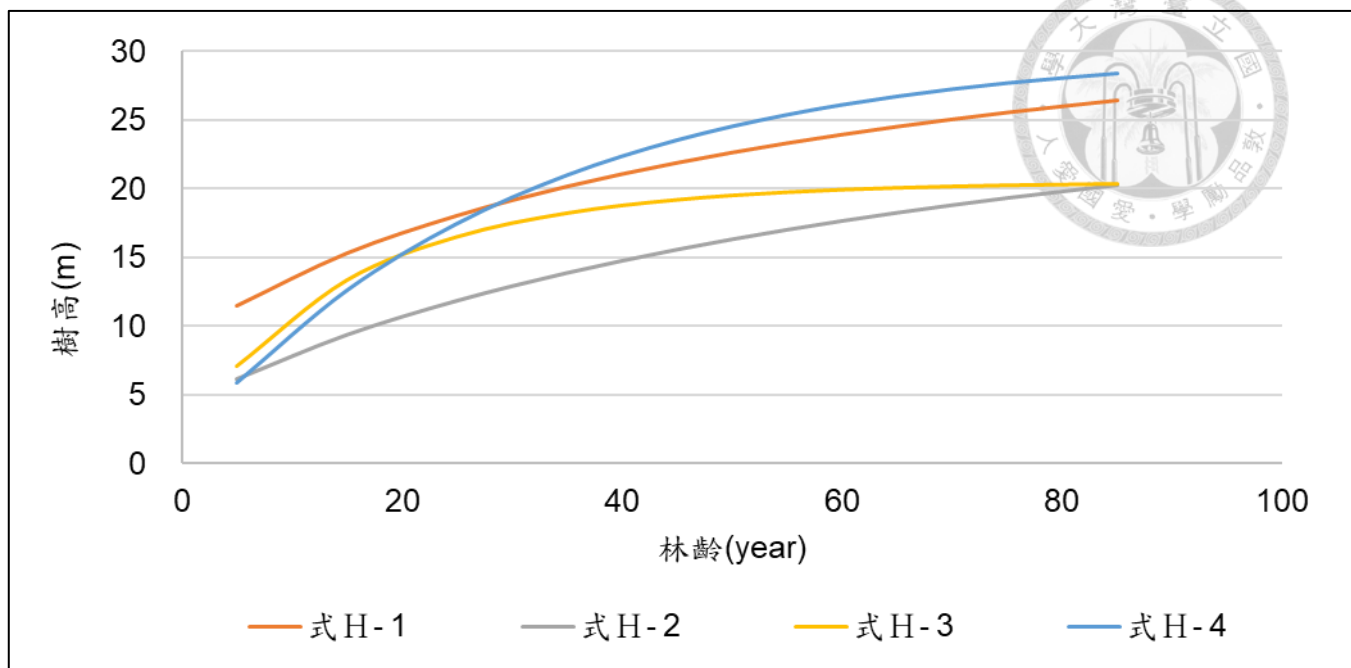
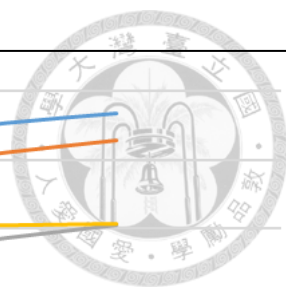


圖 8、不同樹高曲線式下柳杉之生長趨勢 (齡級區間為 1 至 90 年)

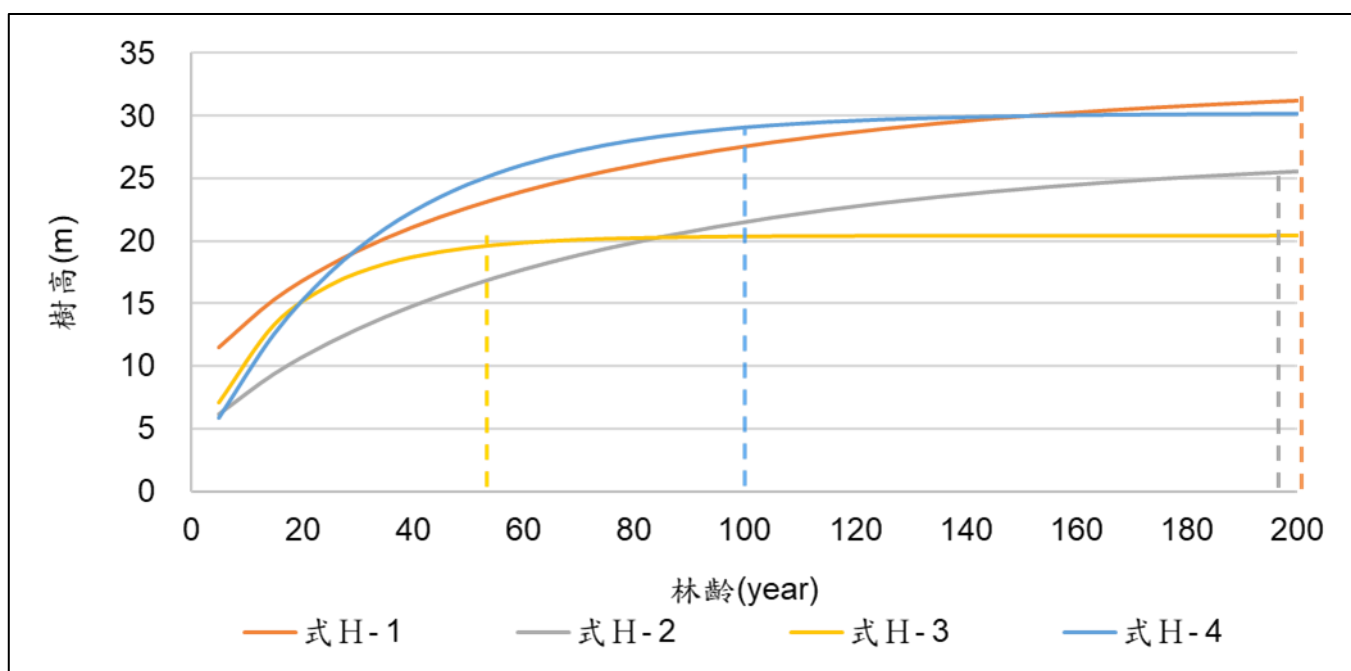


圖 9、不同樹高曲線式下柳杉之生長趨勢 (齡級區間為 1 至 200 年)

表 8、2009 年柳杉各齡級之人工林平均胸高直徑、樹高之表現

齡級 (year)	面積 (ha)	蓄積量 (m ³)	推估柳杉人工林林分特性				
			平均胸高直徑 (DBH) (cm)			樹高 (m)	
			式 D- 1	式 H- 1	式 H- 2	式 H- 3	式 H- 4
1-10	-	-	7.82	11.51	6.16	7.13	5.84
11-20	18.98	177.35	14.35	15.33	9.37	13.35	12.56
21-30	383.20	38,189.24	20.17	18.06	11.86	16.48	17.43
31-40	3,432.12	625,487.35	25.34	20.18	13.89	18.20	20.96
41-50	1,442.45	176,021.99	29.94	21.90	15.59	19.17	23.51
51-60	870.03	150,595.82	34.03	23.33	17.04	19.72	25.35
61-70	161.25	21,148.61	37.67	24.54	18.28	20.03	26.69
71-80	688.17	141,169.23	40.91	25.55	19.36	20.21	27.66
81-90	208.70	11,085.81	43.79	26.43	20.29	20.32	28.36
總計	7,204.9	1,163,875.4					

貳、不同立木材積式之單株立木材積表現

因每齡級階段之樹高表現有所不同，為了解立木材積式推估之表現差異與範圍，以式 D- 1 之胸高直徑表現，分別搭配式 H- 1；式 H- 2；式 H- 3；式 H- 4 之樹高曲線式，所得之立木材積表現如表 9 至表 12。而依所搭配之 12 種立木材積組合分別以 V1-1-1 至 V1-4-3 表示，第一個 V 表示立木材積組合結果，而後的 3 個數字分別為所使用的平均胸高直徑 (DBH)、樹高、立木材積公式，結果彙整於表 13。

為了解不同立木材積組合之單木表現在不同林齡區間下之差異，以圖 10、圖 11 之曲線圖表示，1-10 齡級由於林木平均胸高直徑與樹高尚小，單木立木材積表現較為集中，隨著林齡增長，單木立木材積差距隨之變大，在林齡增長至百年以上後，其立木材積的生長也漸趨緩。

表 9、搭配式 H-1 在不同立木材積式下之表現估算

齡級 (year)	胸高直徑 (cm)	樹高 (m)	不同公式之立木材積 (m ³ /tree)			
			式 H-1	式 V-1	式 V-2	式 V-3
1-10	7.82	11.51	0.0292	0.0306	0.0289	
11-20	14.35	15.33	0.1183	0.1262	0.1179	
21-30	20.17	18.06	0.2601	0.2801	0.2594	
31-40	25.34	20.18	0.4419	0.4789	0.4409	
41-50	29.94	21.90	0.6513	0.7091	0.6499	
51-60	34.03	23.33	0.8775	0.9589	0.8756	
61-70	37.67	24.53	1.1117	1.2185	1.1094	
71-80	40.91	25.55	1.3472	1.4800	1.3444	
81-90	43.79	26.43	1.5787	1.7378	1.5755	

表 10、搭配式 H-2 在不同立木材積式下之表現估算

齡級 (year)	胸高直徑 (cm)	樹高 (m)	不同公式之立木材積 (m ³ /tree)			
			式 H-2	式 V-1	式 V-2	式 V-3
1-10	7.82	6.16	0.0163	0.0166	0.0188	
11-20	14.35	9.37	0.0748	0.0782	0.0840	
21-30	20.17	11.86	0.1758	0.1860	0.1943	
31-40	25.34	13.89	0.3119	0.3329	0.3410	
41-50	29.94	15.59	0.4744	0.5094	0.5145	
51-60	34.03	17.04	0.6546	0.7062	0.7055	
61-70	37.67	18.28	0.8450	0.9152	0.9064	
71-80	40.91	19.36	1.0396	1.1293	1.1107	
81-90	43.79	20.29	1.2335	1.3433	1.3135	

表 11、搭配式 H-3 在不同立木材積式下之表現估算

齡級 (year)	胸高直徑 (cm)	樹高 (m)	不同公式之立木材積 (m ³ /tree)			
			式 H-3	式 V-1	式 V-2	式 V-3
1-10	7.82	7.13	0.0186	0.0192	0.0208	
11-20	14.35	13.35	0.1040	0.1103	0.1072	
21-30	20.17	16.48	0.2390	0.2563	0.2436	
31-40	25.34	18.20	0.4014	0.4331	0.4107	
41-50	29.94	19.17	0.5751	0.6228	0.5929	
51-60	34.03	19.72	0.7501	0.8141	0.7800	
61-70	37.67	20.03	0.9203	1.0004	0.9652	
71-80	40.91	20.21	1.0825	1.1780	1.1443	
81-90	43.79	20.32	1.2350	1.3450	1.3147	

表 12、搭配式 H-4 在不同立木材積式下之表現估算

齡級 (year)	胸高直徑 (cm)	樹高 (m)	不同公式之立木材積 (m ³ /tree)			
			式 H-4	式 V-1	式 V-2	式 V-3
1-10	7.82	5.84	0.0155	0.0158	0.0181	
11-20	14.35	12.56	0.0983	0.1040	0.1028	
21-30	20.17	17.43	0.2517	0.2706	0.2532	
31-40	25.34	20.96	0.4578	0.4968	0.4524	
41-50	29.94	23.51	0.6958	0.7598	0.6823	
51-60	34.03	25.35	0.9484	1.0400	0.9273	
61-70	37.67	26.69	1.2029	1.3230	1.1758	
71-80	40.91	27.66	1.4506	1.5988	1.4198	
81-90	43.79	28.36	1.6860	1.8612	1.6537	

表 13、不同立木材積組合下之各齡級單株立木材積

齡級 (year)	1-10	11-20	21-30	31-40	41-50	51-60	61-70	71-80	81-90
立木材積 組合編號	立木材積推估 (m ³ /tree)								
V1-1-1	0.0292	0.1183	0.2601	0.4419	0.6513	0.8775	1.1117	1.3472	1.5787
V1-1-2	0.0306	0.1262	0.2801	0.4789	0.7091	0.9589	1.2185	1.4800	1.7378
V1-1-3	0.0289	0.1179	0.2594	0.4409	0.6499	0.8756	1.1094	1.3444	1.5755
V1-2-1	0.0163	0.0748	0.1758	0.3119	0.4744	0.6546	0.8450	1.0396	1.2335
V1-2-2	0.0166	0.0782	0.1860	0.3329	0.5094	0.7062	0.9152	1.1293	1.3433
V1-2-3	0.0188	0.0840	0.1943	0.3410	0.5145	0.7055	0.9064	1.1107	1.3135
V1-3-1	0.0186	0.1040	0.2390	0.4014	0.5751	0.7501	0.9203	1.0825	1.2350
V1-3-2	0.0192	0.1103	0.2563	0.4331	0.6228	0.8141	1.0004	1.1780	1.3450
V1-3-3	0.0208	0.1072	0.2436	0.4107	0.5929	0.7800	0.9652	1.1443	1.3147
V1-4-1	0.0155	0.0983	0.2517	0.4578	0.6958	0.9484	1.2029	1.4506	1.6860
V1-4-2	0.0158	0.1040	0.2706	0.4968	0.7598	1.0400	1.3230	1.5988	1.8612
V1-4-3	0.0181	0.1028	0.2532	0.4524	0.6823	0.9273	1.1758	1.4198	1.6537

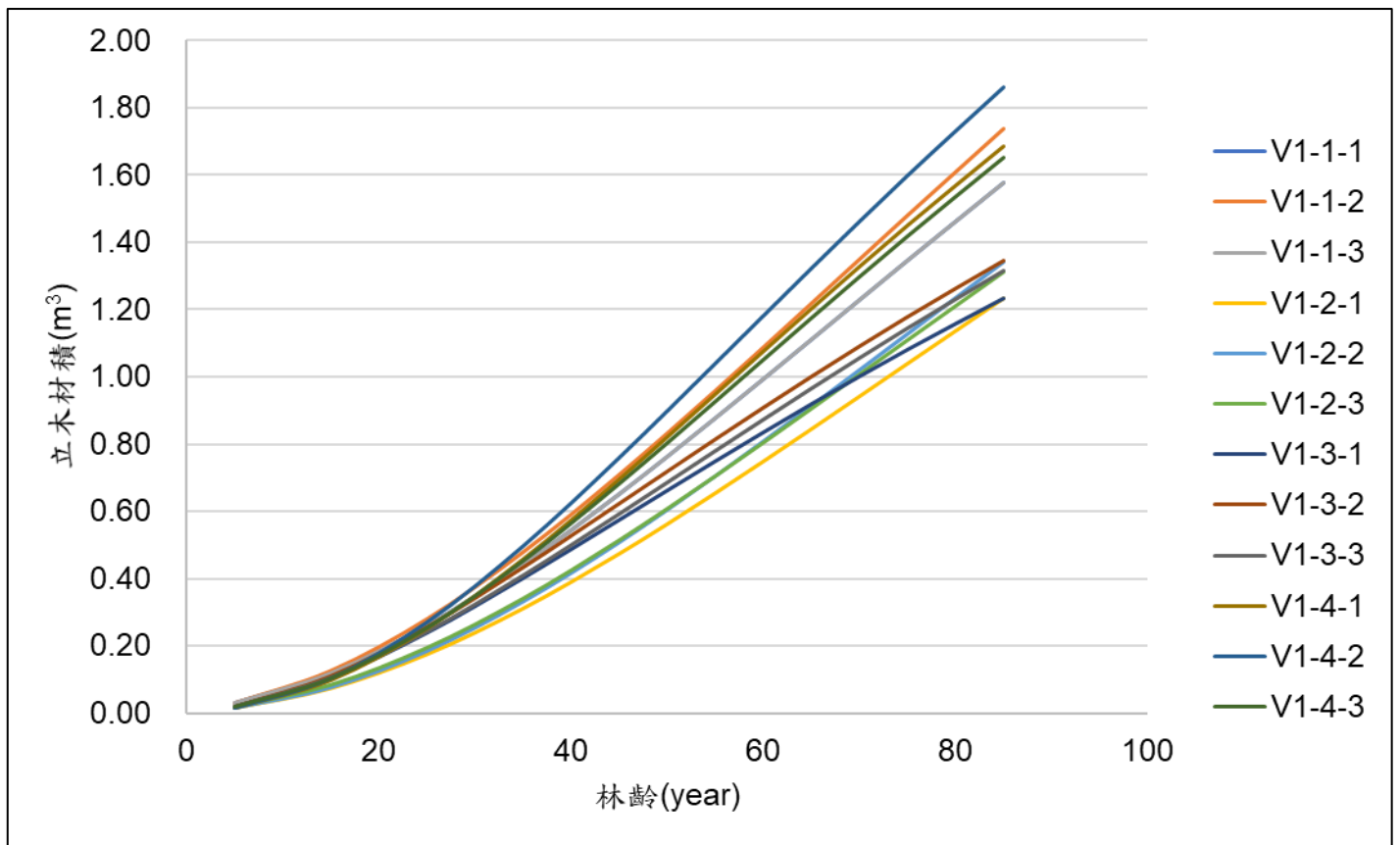


圖 10、不同林齡下依不同立木材積組合之單木表現 (齡級區間為 1 至 90 年)

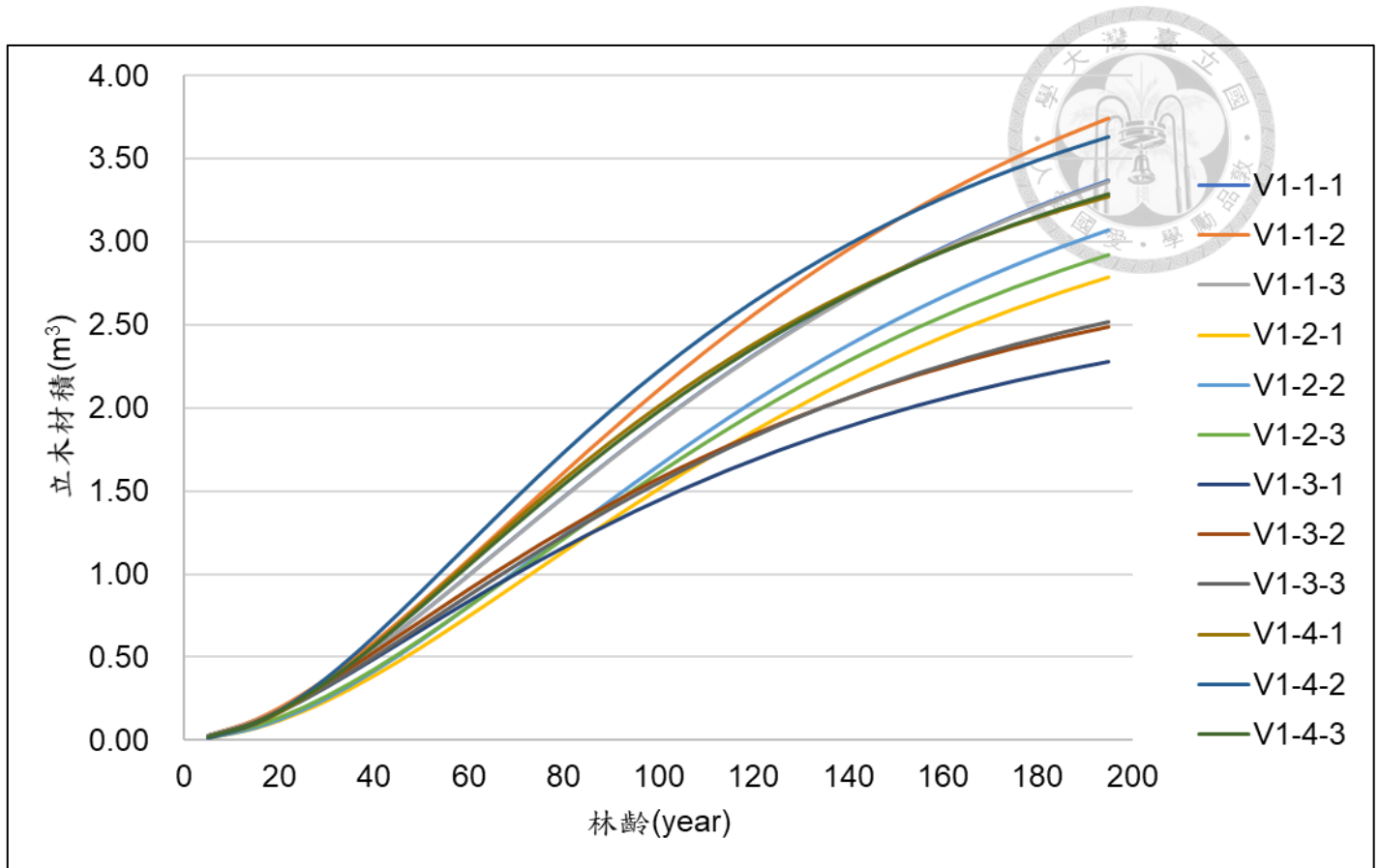


圖 11、不同林齡下依不同立木材積組合之單木表現 (齡級區間為 1 至 200 年)

參、在不同立木材積組合下之各齡級株數推估表現

為將 2009 年空間下概估林木株數，利用不同立木材積組合，以林齡-平均胸高直徑 (DBH) (式 D-1)、樹高表現 (式 H-1 至式 H-4)，使用式 V-1；式 V-2；式 V-3，會得出 12 種立木材積組合 (V1-1-1 至 V1-4-3)，以其推估之各齡級株數分別以 T1-1-1 至 T1-4-3 表示，各齡級株數以該齡級蓄積量除以該齡級立木材積所得之，不同齡級下株數表現，結果如表 14。以不同生長推估式，各齡級林木株數會有些許的差距，並以推估之林木株數取其平均數作為在 2009 年空間下不同齡級之存量基準來建置柳杉動態模型。推估林木株數之敘述統計分析與各林分所推估每公頃株數之盒形圖分佈如表 15、圖 12 所示。

表 14、以立木材積組合推估 2009 年柳杉各齡級立木株數

林分名稱	stand 1	stand 2	stand 3	stand 4	stand 5	stand 6	stand 7	stand 8
齡級 (year)	11-20	21-30	31-40	41-50	51-60	61-70	71-80	81-90
面積 (ha)	18.98	383.20	3432.12	1442.45	870.03	161.25	688.17	208.70
蓄積 (m ³)	177.35	38,189.24	625,487.35	176,021.99	150,595.82	21,148.61	141,169.23	11,085.81
立木材積組合	各齡級下之株數推估 (tree)							
T1-1-1	1,498	146,797	1,415,348	270,267	171,625	19,023	104,789	7,022
T1-1-2	1,405	136,343	1,306,070	248,217	157,046	17,356	953,83	6,379
T1-1-3	1,504	147,230	1,418,801	270,862	171,983	19,062	105,002	7,036
T1-2-1	2,371	217,284	2,005,303	371,066	230,073	25,027	135,788	8,987
T1-2-2	2,268	205,287	1,878,770	345,529	213,234	23,109	125,002	8,252
T1-2-3	2,110	196,570	1,834,178	342,138	213,449	23,332	127,099	8,439
T1-3-1	1,704	159,815	1,558,381	306,064	200,780	22,980	130,411	8,976
T1-3-2	1,607	148,984	1,444,102	282,620	184,985	21,140	119,841	8,241
T1-3-3	1,654	156,744	1,523,125	296,866	193,066	21,911	123,370	8,431
T1-4-1	1,804	151,707	1,366,392	252,984	158,782	17,580	97,318	6,575
T1-4-2	1,705	141,105	1,258,963	231,676	144,803	15,985	88,297	5,956
T1-4-3	1,725	150,844	1,382,466	257,986	162,402	17,985	99,430	6,703
平均株數 (trees)	1,780	163,226	1,532,658	289,690	183,519	20,374	112,644	7,583

表 15、模擬不同立木材積組合推估下之株數敘述統計分析

林分	最小值 (tree)	最大值 (tree)	株數差距 (tree)	平均數 (tree)	標準誤差 (tree)	標準差 (tree)
	Min	Max	Max-Min	Mean	Std. Error	Std. Deviation
stand 1	1,405	2,371	966	1,780	89.3	309.5
stand 2	136,343	217,284	80,941	163,226	7,825.5	27,108.4
stand 3	1,258,963	2,005,303	746,340	1,532,658	69,949.9	242,313.5
stand 4	231,676	371,066	139,390	2,896,890	12,622.2	43,724.6
stand 5	144,803	230,073	85,270	183,519	7,721.2	26,747.0
stand 6	15,985	25,027	9,042	20,374	839.6	2,908.5
stand 7	88,297	135,788	47,491	112,644	4,605.8	15,954.9
stand 8	5,956	8,987	3,031	7,583	310.7	1,076.4

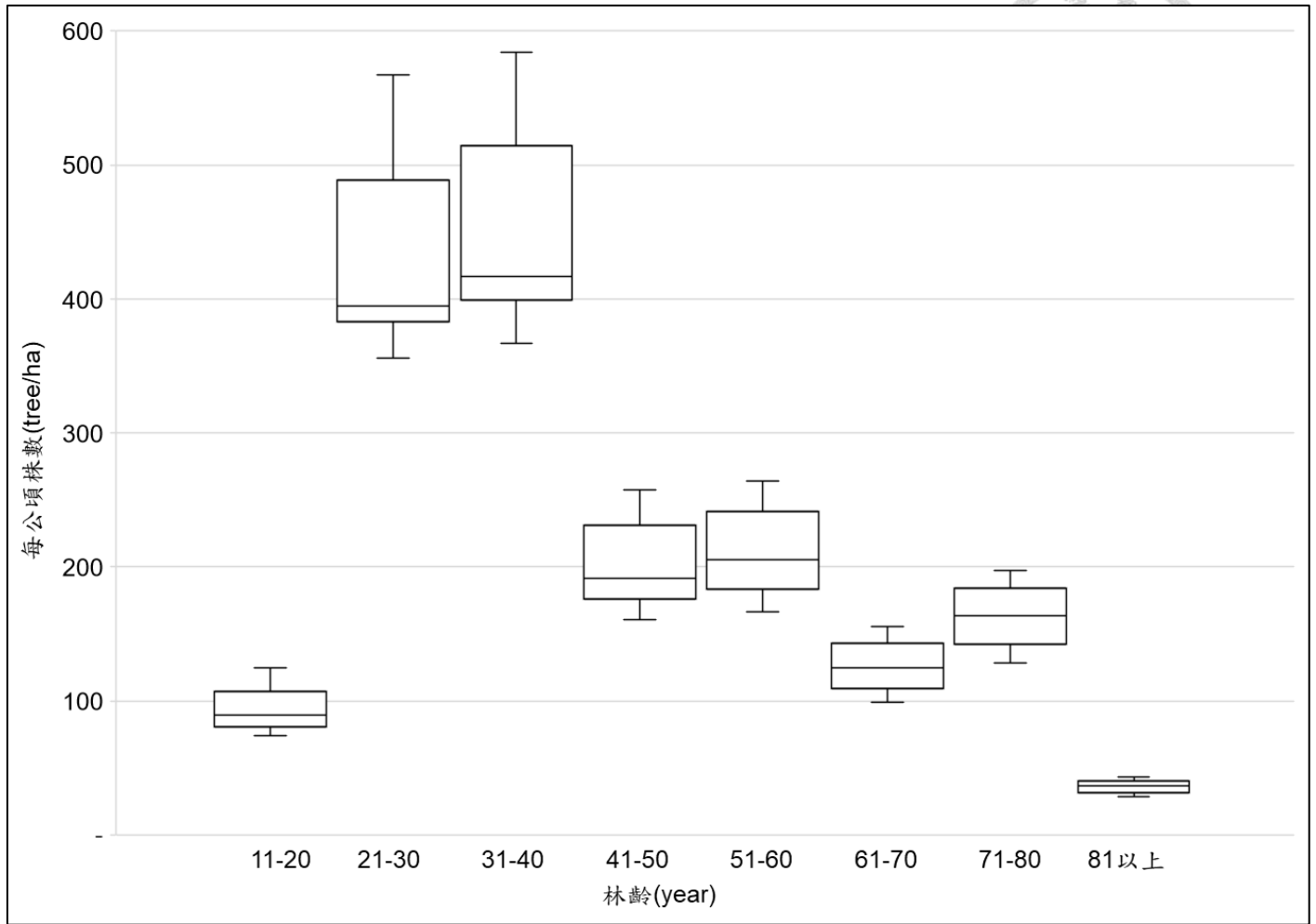


圖12、2009年各齡級推估之每公頃株數盒形圖

第二節 枯損率推估



壹、柳杉各齡級規律死亡推估結果

以臺大實驗林長期試驗區所記錄之柳杉調查資料(王亞男等, 2010), 將其進行單位死亡株數(每年每公頃之死亡株數)取其自然對數的計算結果如表 16 所示。

表 16、柳杉各齡級株數死亡估算

調查年份 (year)	林齡 (year)	株數 (tree)	每公頃株數 (tree/ha)	單位死亡株數 (tree/ha/y)	樣區災害	備註
1945	10	208	2,512	--		
1947	12	199	2,403	54.4		
1955	20	107	1,292	138.9	1955 年艾 瑞絲颱風	
1968	33	95	1,147	11.2		
1981	46	85	1,027	9.3		
1992	57	34	411	56.0	1986 年韋 恩颱風	因颱風而造成樣 區樣本木死亡
2003	68	34	411	0.0		無林木死亡
2010	75	33	399	1.7		

從趨勢上看, 林分整體死亡率依林齡增加而遞減, 而 1981 年至 1992 年之間林木死亡率從 9.29 % 升高至 55.99 %, 大幅上升之原因可能為 1986 年樣區遭受韋恩颱風的侵襲, 而使得樣本木大量死亡; 另外 1992 年至 2003 年之間儘管時隔超過 10 年, 但樣區林木皆無死亡。將各齡級與單位死亡株數之自然對數進行分布圖與迴歸, 所得之結果如圖 13, 在去除 1992 年(齡級 57 年)與 2003 年(齡級 68 年)的高死亡率後, 再一次進行自然死亡迴歸式之推估, 其結果如圖 14 所示, 得出之迴歸公式為如下 (R^2 為 0.9237)。

$$\text{單位面積死亡株數}(\text{tree/ha/yr}) = e^{7.7889e^{-0.033 \times \text{age}}} \quad \text{式 9}$$

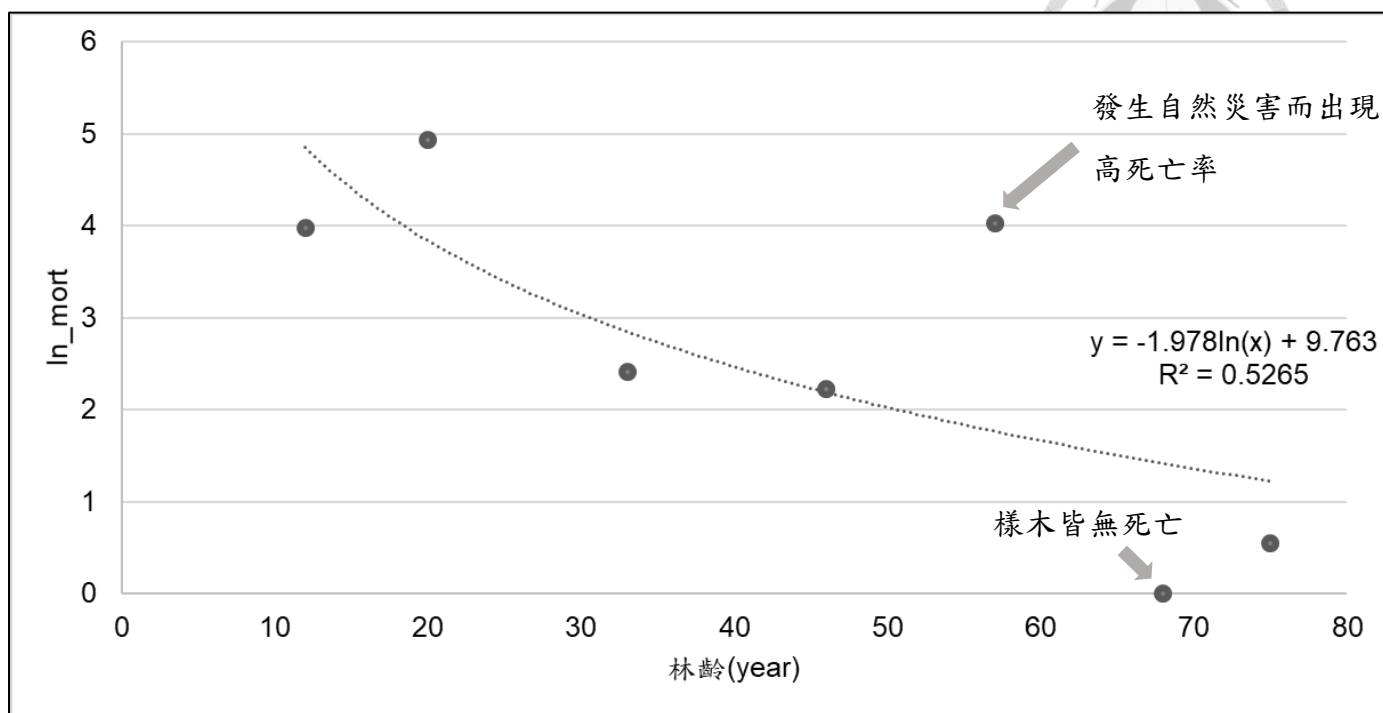


圖 13、柳杉各齡級與自然對數死亡率之迴歸式

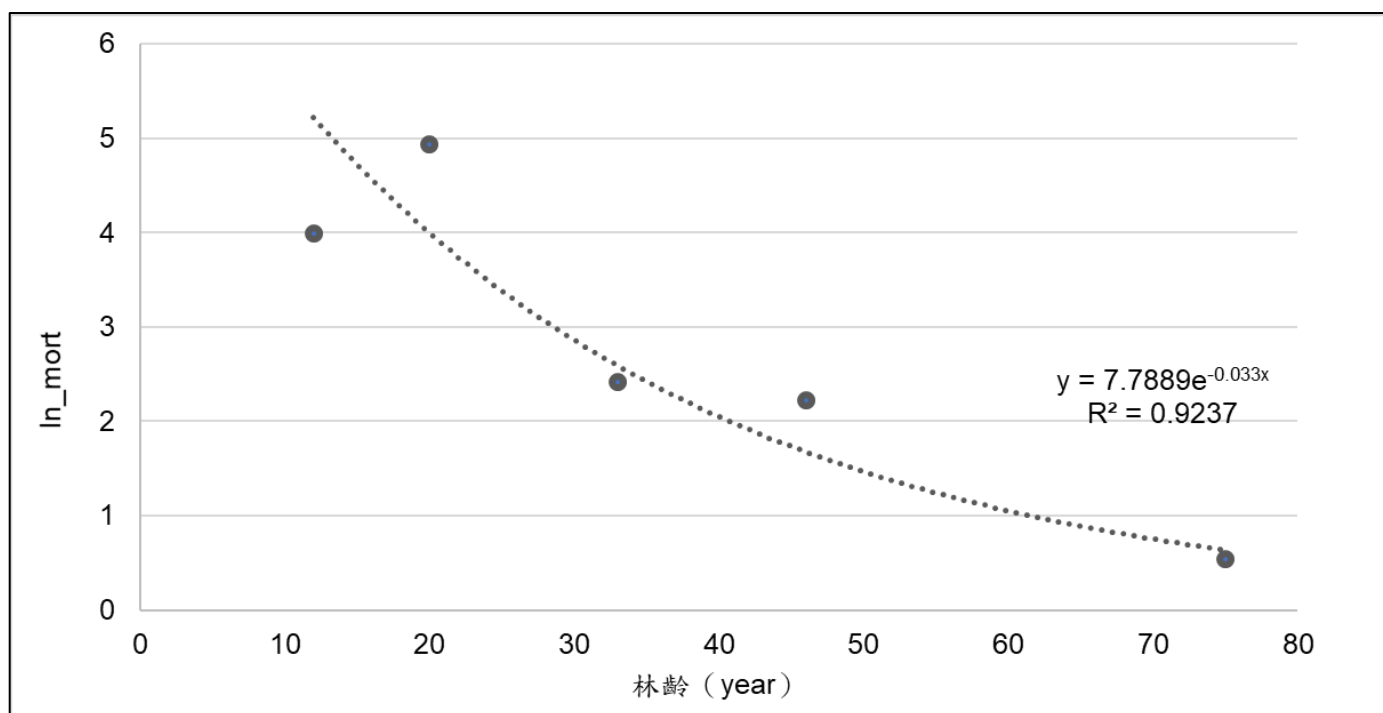


圖 14、移除林齡 57 年、68 年後之柳杉各齡級與自然對數死亡率迴歸式

將所得之迴歸式以假設初始栽植密度為每公頃 2,500 株(相當於栽植密度 2 公尺 x2 公尺)，計算各齡級下之單位面積死亡株數後，可求得枯損率，如表 17 所示。



表 17、不同齡級下柳杉單位面積株數枯損率

齡級 (year)	死亡株數 (tree/ha/y)	枯損率 (%)	備註
1-10	738.2	0.2953	假設栽植密度為每公頃 2,500 株(相當於栽植密度 2 公尺 x 2 公尺)之單位面積株數死亡率
11-20	115.3	0.0461	
21-30	30.4	0.0121	
31-40	11.6	0.0047	
41-50	5.8	0.0023	
51-60	3.6	0.0014	
61-70	2.5	0.0010	
71-80	1.9	0.0008	
81 以上	1.6	0.0006	

第三節 2009-2018 年砍伐株數推估

依 2010-2019 年林務局之林業統計中記錄柳杉經濟林於 2009-2018 年之生產用材量，以長條圖表示(圖 15)，10 年間之總生產用材共計 55,955.3 m³，平均每年之生產用材為 5,595.5 m³/y。將生產用材以利用率回推砍伐立木材積，約相當於每年伐採 7,993.6 m³ 之立木材積(表 18)，其中又以 2014 年生產最多柳杉用材，達 11,131.9 m³，約相當於 15,902.7 m³ 之立木材積；以 2010 年生產最少柳杉用材，僅 1,957.3 m³，約相當於 2,796.2 m³ 之立木材積。

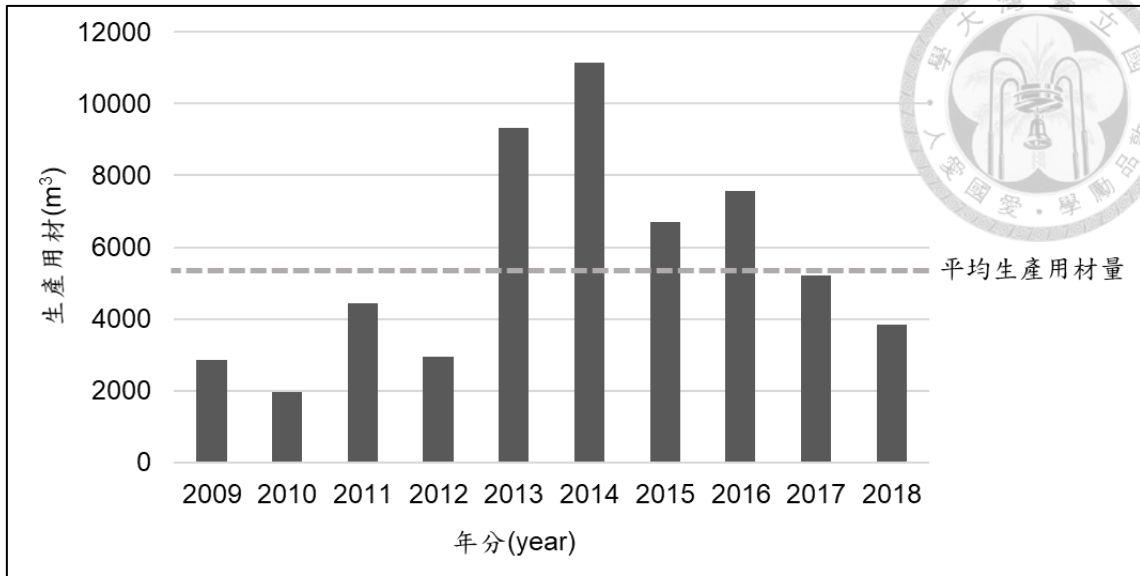


圖 15、2009-2018 年林務局轄屬柳杉經濟林之生產用材量（資料來源：作者整理自林務局 2010-2019 年林業統計）。

表 18、2009-2018 年生產用材統計

年分	生產用材 (m^3)	立木材積 (m^3)
2009	2,862.3	4,089.0
2010	1,957.3	2,796.2
2011	4,421.9	6,317.0
2012	2,948.9	4,212.7
2013	9,313.0	13,304.3
2014	11,131.9	15,902.7
2015	6,695.4	9,564.8
2016	7,565.6	10,808.0
2017	5,209.7	7,442.5
2018	3,849.2	5,498.9
總計 (m^3)	55,955.3	79,936.1
平均 (m^3/y)	5,595.5	7,993.6

按不同立木材積組合下估算每年所砍伐之株數，取其平均值作為 2009-2018 年之砍伐株數基準（表 19，並以此輸出值帶入柳杉動態模型，根據不同立木材積組合下砍伐株數之敘述統計，最多為 2014 年之 38,967 株，最少為 2010 年之 6,851 株（表 20）。每年度以不同立木材積組合下所砍伐之株數範圍皆有相當大之差距，表示林木在不同生長條件下之變異性大，並隨著砍伐條件不同會出現差異。

表 19、2009-2018 年依不同立木材積組合下之伐採株數估算

年分	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018
生產用材 (m ³)	2,862.3	1,957.3	4,421.9	2,948.9	9,313.0	11,131.9	6,695.4	7,565.6	5,209.7	3,849.2
立木材積 (m ³)	4,089.0	2,796.2	6,317.0	4,212.7	13,304.3	15,902.7	9,564.8	10,808.0	7,442.5	5,498.9
立木材積 組合編號	株數推估 (tree)									
T										
1-1-1	9,253	6,327	14,295	9,533	30,106	35,987	21,644	24,458	16,841	12,443
T										
1-1-2	8,538	5,838	13,190	8,796	27,780	33,206	19,972	22,568	15,540	11,482
T										
1-1-3	9,274	6,341	14,327	9,554	30,175	36,068	21,693	24,513	16,880	12,472
T										
1-2-1	13,109	8,965	20,253	13,506	42,655	50,986	30,666	34,652	23,861	17,630
T										
1-2-2	12,282	8,399	18,975	12,654	39,964	47,770	28,731	32,466	22,356	16,518
T										
1-2-3	11,991	8,199	18,524	12,354	39,015	46,635	28,049	31,695	21,825	16,125
T										
1-3-1	10,186	6,966	15,737	10,495	33,144	39,618	23,828	26,925	18,541	13,699
T										
1-3-2	9,441	6,456	14,585	9,726	30,718	36,718	22,084	24,955	17,184	12,696
T										
1-3-3	9,956	6,808	15,381	10,257	32,394	38,720	23,289	26,316	18,121	13,389
T										
1-4-1	8,931	6,107	13,798	9,202	29,061	34,737	20,893	23,608	16,257	12,011
T										
1-4-2	8,230	5,628	12,715	8,479	26,779	32,010	19,252	21,755	14,980	11,068
T										
1-4-3	9,038	6,180	13,963	9,311	29,408	35,151	21,142	23,890	16,451	12,154
平均伐採 株數 (tree)	10,019	6,851	15,479	10,322	32,600	38,967	23,437	26,483	18,236	13,474

表20、在立木材積組合推估下之2009-2018年砍伐株數敘述統計分析

年分	最小值 (tree)	最大值 (tree)	株數差距 (tree)	平均數 (tree)	標準誤差 (tree)	標準差 (tree)
	Min	Max	Max-Min	Mean	Std. Error	Std. Deviation
2009	8,230	13,109	4,879	10,019	457.3	1,584.2
2010	5,628	8,965	3,337	6,851	312.8	1,083.5
2011	12,715	20,253	7,538	15,479	706.5	2,447.5
2012	8,479	13,506	5,027	10,322	471.2	1,632.3
2013	26,779	42,655	15,876	32,600	1,488.1	5,154.8
2014	32,010	50,986	18,976	38,967	1,778.7	6,161.6
2015	19,252	30,666	11,414	23,437	1,069.8	3,706.0
2016	21,755	34,652	12,897	26,483	1,208.9	4,187.7
2017	14,980	23,861	8,881	18,236	832.4	2,883.6
2018	11,068	17,630	6,562	13,474	615.1	2,130.6

第四節 柳杉動態模型模擬



將 STELLA 所建置之柳杉全林模型，依不同立木材積組合之模式進行 2009-2110 年之柳杉林分動態模擬，並分別探討 2016 年新造之柳杉林分 (stand 0) 與柳杉全林分模擬結果。

壹、柳杉全林分動態模擬

模擬柳杉之全林分於 2009-2110 年之動態變化，其每公頃蓄積量在不同立木材積組合下不同之變化趨勢，如表 21 所示。在這 12 種立木材積組合下所模擬的每公頃蓄積量之敘述統計中 (表 22)，其差距範圍由 2010 年之 80.4 m^3/ha 擴大至 2110 年之 385.2 m^3/ha ，隨著時間的推移而推估之差距逐漸拉大；而柳杉全林分之平均每公頃蓄積量則由 2010 年之 182.9 m^3/ha 成長至 2110 年之 869.3 m^3/ha ，在模擬之 200 年間其平均年生長量 (mean annual increment, MAI) 介於 5.0 至 8.3 $\text{m}^3/\text{ha}/\text{y}$ 之間，由圖 16 之曲線圖可看到立木材積組合隨著時間的變化，至 2110 年單位面積蓄積表現最低者為 V1-3-1 (咖啡色線) 之 667.7 m^3/ha ，最高者為 V1-4-2 (橘色線) 之 1,052.9 m^3/ha 。另外，依現行林務局所使用之立木材積式 (式 V-3) 表現，由圖 17 之全林分模擬至 2110 年其單位面積蓄積表現上以 V1-4-3 之 944.8 m^3/ha 為最高，而 V1-3-3 之 728.6 m^3/ha 為最低。

從單位面積蓄積之盒形圖 (圖 18) 來看，在起初 2010 年時中位數之分布一開始多集中於接近 200 m^3/ha ，漸偏於較高的蓄積量，而後隨著模擬時序的拉長，中位數漸往中間移動，尺度差距也漸拉長。

儘管整體之蓄積量為不斷累積上升，然而從連年生長量來看 (圖 19)，2009-2018 年因實際砍伐的影響，整體生長量隨該年度之伐採量而變動，在 2019 年後若任其自然生長，則連年生長量隨時間推移而下降，其差距範圍隨不同立木材積之組合約為 4.0 $\text{m}^3/\text{ha}/\text{y}$ ，從其變化量的趨勢也能看出在不同組合下之生長趨勢其下降幅度與斜率有所不同。

表 21、柳杉全林分於不同公式模擬下之每公頃蓄積量

年分 (year)	2010	2020	2030	2040	2050	2060	2070	2080	2090	2100	2110	平均年 生長量 (m ³ /ha/ y)
立木材積 組合編號	不同公式下之每公頃蓄積量 (m ³ /ha)											
V1-1-1	193.6	255.9	336.4	419.6	503.2	585.2	664.3	739.6	810.5	876.6	937.8	7.4
V1-1-2	210.3	279.1	368.0	460.3	553.1	644.4	732.7	816.8	896.1	970.1	1,038.7	8.3
V1-1-3	193.1	255.3	335.7	418.8	502.2	584.0	663.0	738.1	808.8	874.7	935.8	7.4
V1-2-1	138.8	188.5	252.8	320.6	389.8	458.5	525.6	590.1	651.2	708.6	762.0	6.2
V1-2-2	148.7	202.8	273.2	347.6	423.7	499.6	573.8	645.2	713.1	776.9	836.4	6.9
V1-2-3	151.1	203.8	271.9	343.4	416.0	487.9	557.8	624.9	688.3	747.7	803.0	6.5
V1-3-1	171.8	221.7	283.4	343.6	401.0	454.9	505.0	551.3	593.7	632.5	667.7	5.0
V1-3-2	191.3	250.1	322.3	393.0	460.5	524.0	583.1	637.6	687.5	733.0	774.3	5.8
V1-3-3	176.8	229.6	295.8	361.4	424.7	485.0	541.6	594.3	643.0	687.7	728.6	5.5
V1-4-1	201.5	272.9	362.0	451.8	539.3	622.3	699.9	771.5	836.9	896.3	950.0	7.5
V1-4-2	219.3	298.5	397.3	497.2	594.6	687.2	773.8	853.7	926.7	993.0	1,052.9	8.3
V1-4-3	198.9	267.7	354.4	442.3	528.5	611.1	689.0	761.5	828.2	889.3	944.8	7.5

表 22、2009-2110 年之柳杉全林分在不同公式模擬下之每公頃蓄積量敘述統計

年分 (year)	最小值 (m ³ /ha)	最大值 (m ³ /ha)	蓄積量差距 (m ³ /ha)	平均數 (m ³ /ha)	標準誤差 (tree)	標準差 (m ³ /ha)
	Min	Max	Max-Min	Mean	Std. Error	Std. Deviation
2010	138.8	219.3	80.4	182.9	7.4	25.7
2020	188.5	298.5	110.0	243.8	9.9	34.4
2030	252.8	397.3	144.6	321.1	13.1	45.4
2040	320.6	497.2	176.6	400.0	16.3	56.6
2050	389.8	594.6	204.8	478.0	19.5	67.7
2060	454.9	687.2	232.4	553.7	22.6	78.4
2070	505.0	773.8	268.8	625.8	25.6	88.7
2080	551.3	853.7	302.4	693.7	28.4	98.4
2090	593.7	926.7	332.9	757.0	31.1	107.6
2100	632.5	993.0	360.5	815.5	33.6	116.3
2110	667.7	1,052.9	385.2	869.3	35.9	124.4

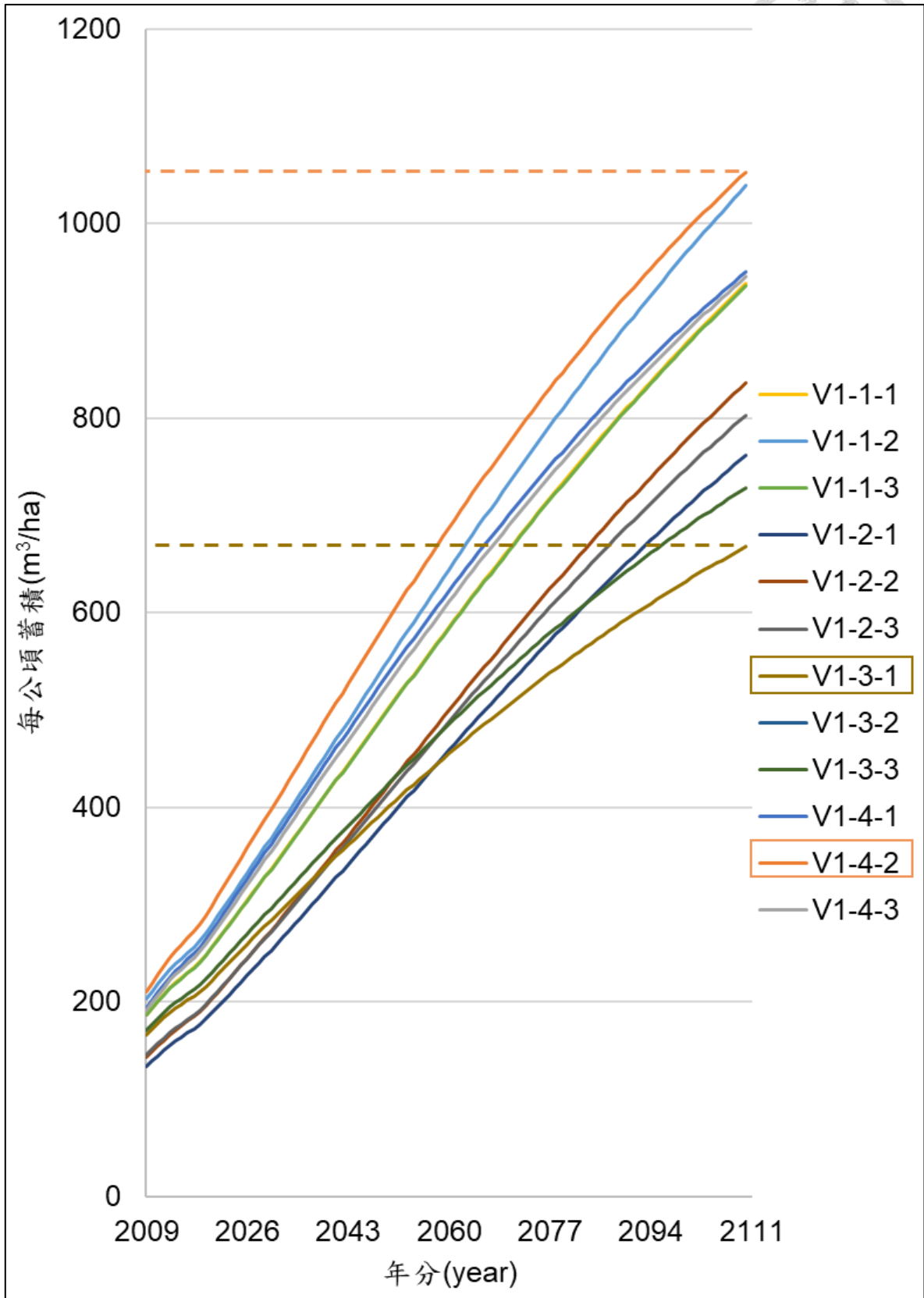


圖16、2009-2110年之柳杉全林分動態蓄積模擬（最大與最小值）

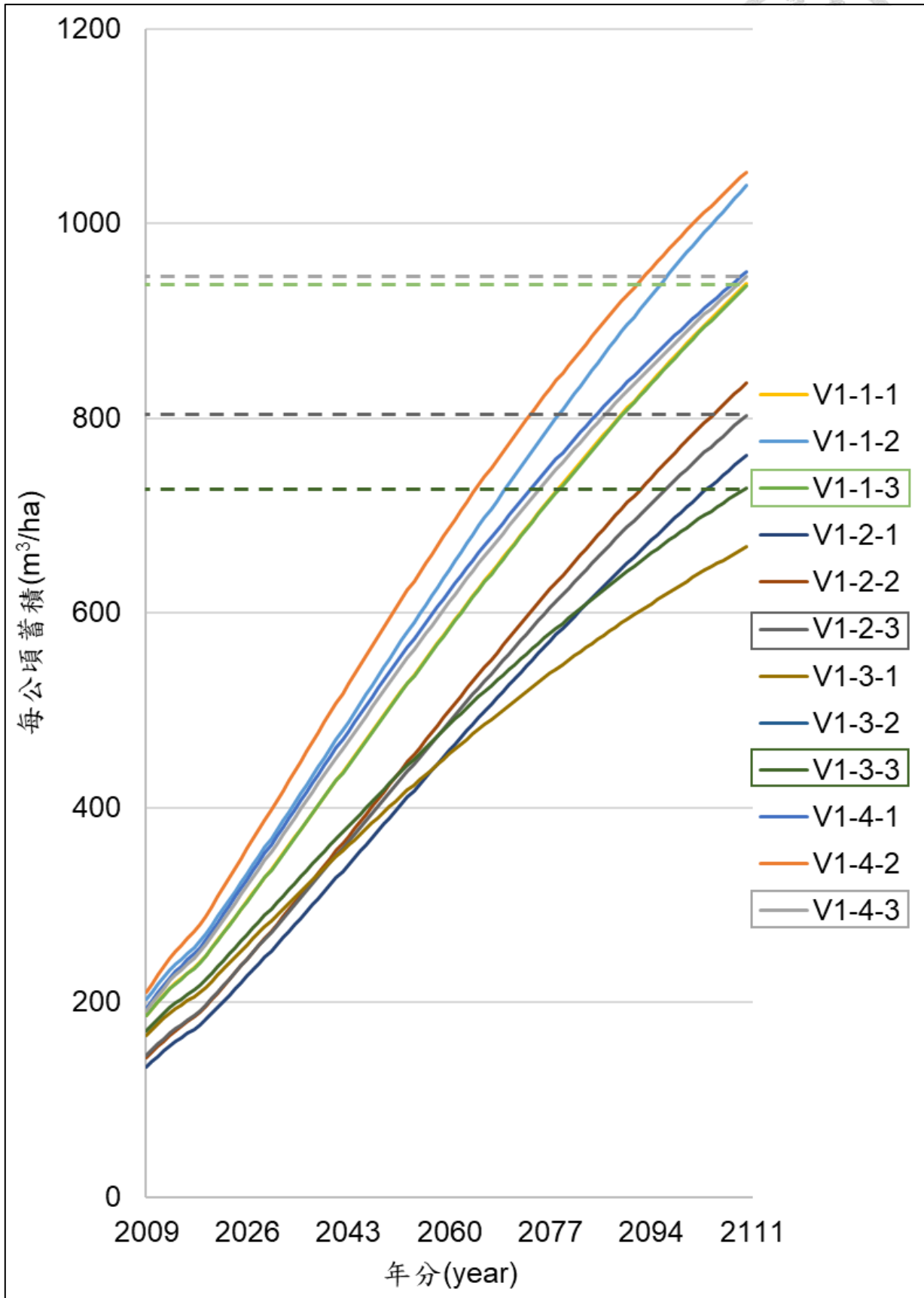


圖 17、2009-2110 年之柳杉全林分動態蓄積模擬（現行林務局所用之材積式）

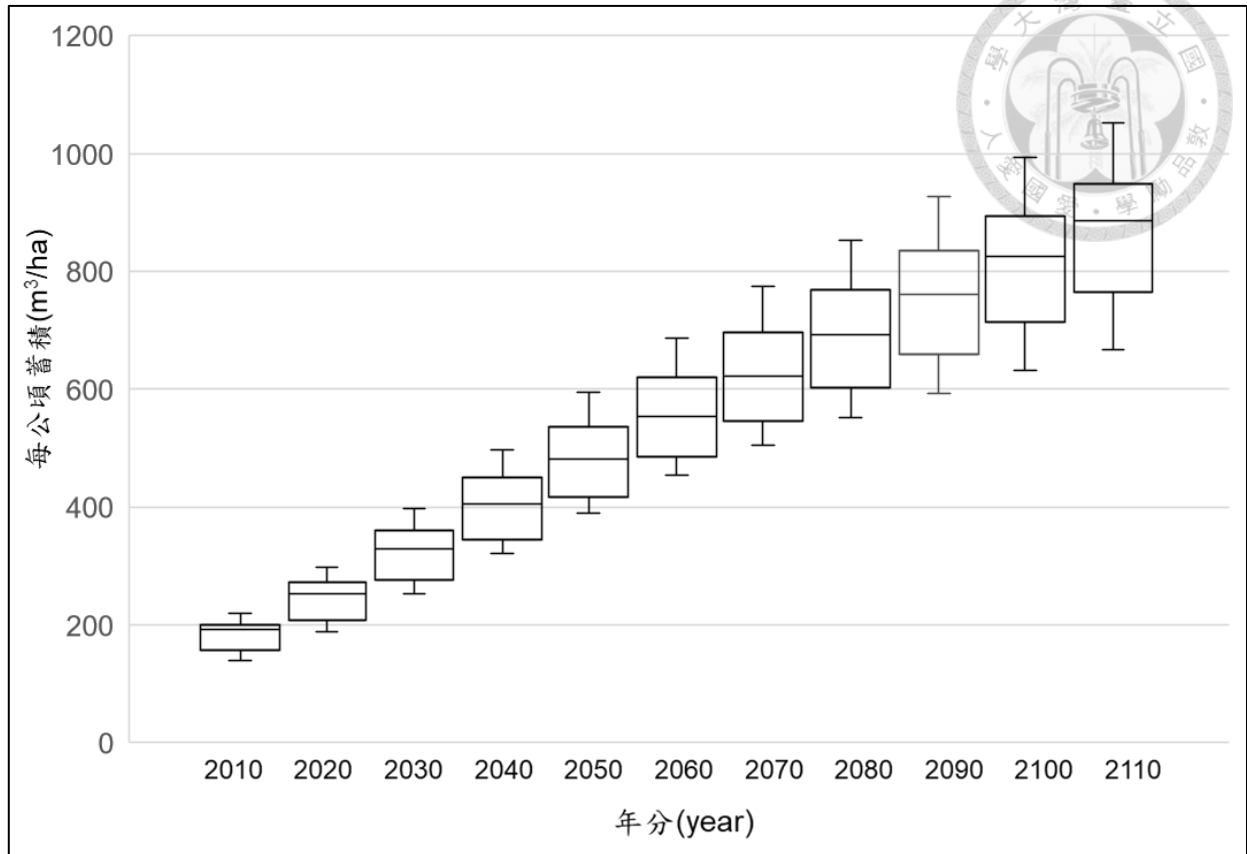


圖 18、2009-2110 年柳杉全林分每年每公頃蓄積量盒形圖

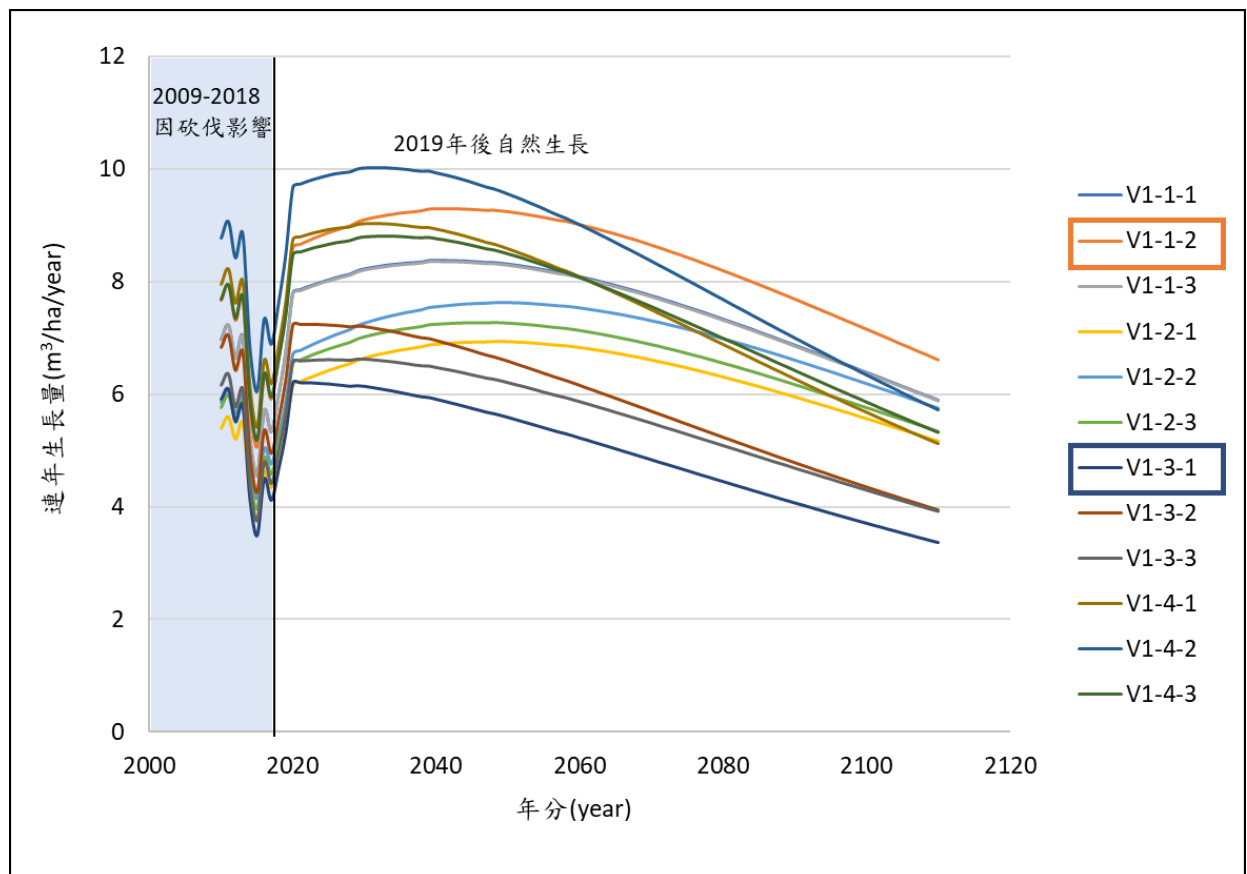


圖 19、2009-2110 年柳杉全林分連年生長量模擬



貳、新造林柳杉林分 (stand 0) 動態模擬

一、每公頃蓄積量模擬

依據林務局林業統計 2009-2018 年之資料，2015 年有一處新造柳杉林分 (2.15 公頃，1075 株)，若採取自然生長之方式，自造林起始年至 2110 年，隨著時序變化而存活株數隨林齡增加而下降，如表 23 所示，在每公頃蓄積量模擬上，由不同立木材積組合可能會產生不同生長的情勢 (表 24)。由每公頃蓄積量模擬可看出其變化差距隨著時間尺度的推移而逐漸變大，至林齡 90 年 (2105 年) 時，其每公頃蓄積量模擬最大值為 592.7 m³/ha，最小值為 389.3 m³/ha，範圍差距為 203.4 m³/ha (表 20)。以 12 種立木材積組合之模擬結果來看，平均林齡為 20 年生時，每公頃蓄積量為 49.3 m³/ha；平均林齡為 30 年生時，每公頃蓄積量為 96.4 m³/ha；平均林齡為 40 年生時，每公頃蓄積量為 153.5 m³/ha；平均林齡為 50 年生時，每公頃蓄積量為 216.4 m³/ha；平均林齡為 60 年生時，每公頃蓄積量為 281.9 m³/ha；平均林齡為 70 年生時，每公頃蓄積量為 347.7 m³/ha；平均林齡為 80 年生時，每公頃蓄積量為 412.1 m³/ha；平均林齡為 90 年生時，每公頃蓄積量為 474.1 m³/ha，平均年生長量 (mean annual increment, MAI) 介於 4.3 至 6.7 (m³/ha/y) 之間，整體林分每公頃蓄積量呈上升的趨勢 (圖 20)。

表 23、新造之柳杉林分 (stand 0) 於 2016-2105 之存活株數模擬

年分 (year)	2016	2025	2035	2045	2055	2065	2075	2085	2095	2105
林齡 (year)	新植	15	25	35	45	55	65	75	85	95
存活株數 (trees)	1,075	680	644	640	640	640	640	640	640	640

表 24、新造之柳杉林分 (stand 0) 於不同立木材積組合模擬下之每公頃蓄積量

年分 (year)	2020	2030	2040	2050	2060	2070	2080	2090	2100	2110	平均年 生長量
林齡 (year)	5	15	25	35	45	55	65	75	85	95	
立木材積 組合編號	每公頃蓄積量 (m ³ /ha)										(m ³ /ha /y)
V1-1-1	11.9	36.3	77.7	131.5	193.8	261.1	330.8	400.9	469.8	536.3	5.7
V1-1-2	12.1	38.7	83.6	142.6	211.2	285.6	362.8	440.7	517.5	591.8	6.2
V1-1-3	11.4	36.1	77.2	130.9	192.9	259.9	329.4	399.1	467.7	534.0	5.6
V1-2-1	6.4	22.9	52.4	92.8	141.1	194.7	251.3	309.2	366.9	423.3	4.5
V1-2-2	6.5	23.9	55.2	98.8	151.1	209.5	271.5	335.0	398.5	460.7	4.9
V1-2-3	7.4	25.8	58.1	101.7	153.5	210.4	270.3	331.3	391.8	450.7	4.8
V1-3-1	7.3	31.9	71.3	119.5	171.3	223.4	274.1	322.4	367.8	410.1	4.3
V1-3-2	7.5	33.8	76.2	128.6	184.9	241.7	297.0	349.7	399.3	445.5	4.7
V1-3-3	8.2	32.8	72.8	122.4	176.8	232.6	287.8	341.2	392.0	439.8	4.7
V1-4-1	6.1	30.1	75.0	136.1	206.9	282.0	357.7	431.3	501.3	566.8	6.0
V1-4-2	6.2	31.9	80.9	148.2	226.7	310.3	394.7	477.0	555.3	628.6	6.7
V1-4-3	7.2	31.6	75.7	135.0	203.6	276.7	350.8	423.6	493.4	559.3	5.9

表 25、新造之柳杉林分 (stand 0) 於不同公式模擬下之每公頃蓄積量敘述統計

年分 (year)	林齡 (year)	最小值 (m ³ /ha)	最大值 (m ³ /ha)	蓄積量差距 (m ³ /ha)	平均數 (m ³ /ha)	標準誤差 (m ³ /ha)	標準差 (m ³ /ha)
		Min	Max	Max-Min	Mean	Std. Error	Std. Deviation
2025	10	12.6	22.3	9.7	17.0	0.9	3.1
2035	20	36.0	58.8	22.8	49.3	2.1	7.3
2045	30	71.4	112.7	41.3	96.4	4.0	13.8
2055	40	116.1	186.5	70.4	153.5	6.3	22.0
2065	50	167.4	268.2	100.8	216.4	9.0	31.1
2075	60	222.8	352.6	129.9	281.9	11.8	40.8
2085	70	280.2	436.3	156.1	347.7	14.6	50.5
2095	80	338.2	516.8	178.6	412.1	17.3	60.0
2105	90	389.3	592.7	203.4	474.1	20.0	69.2

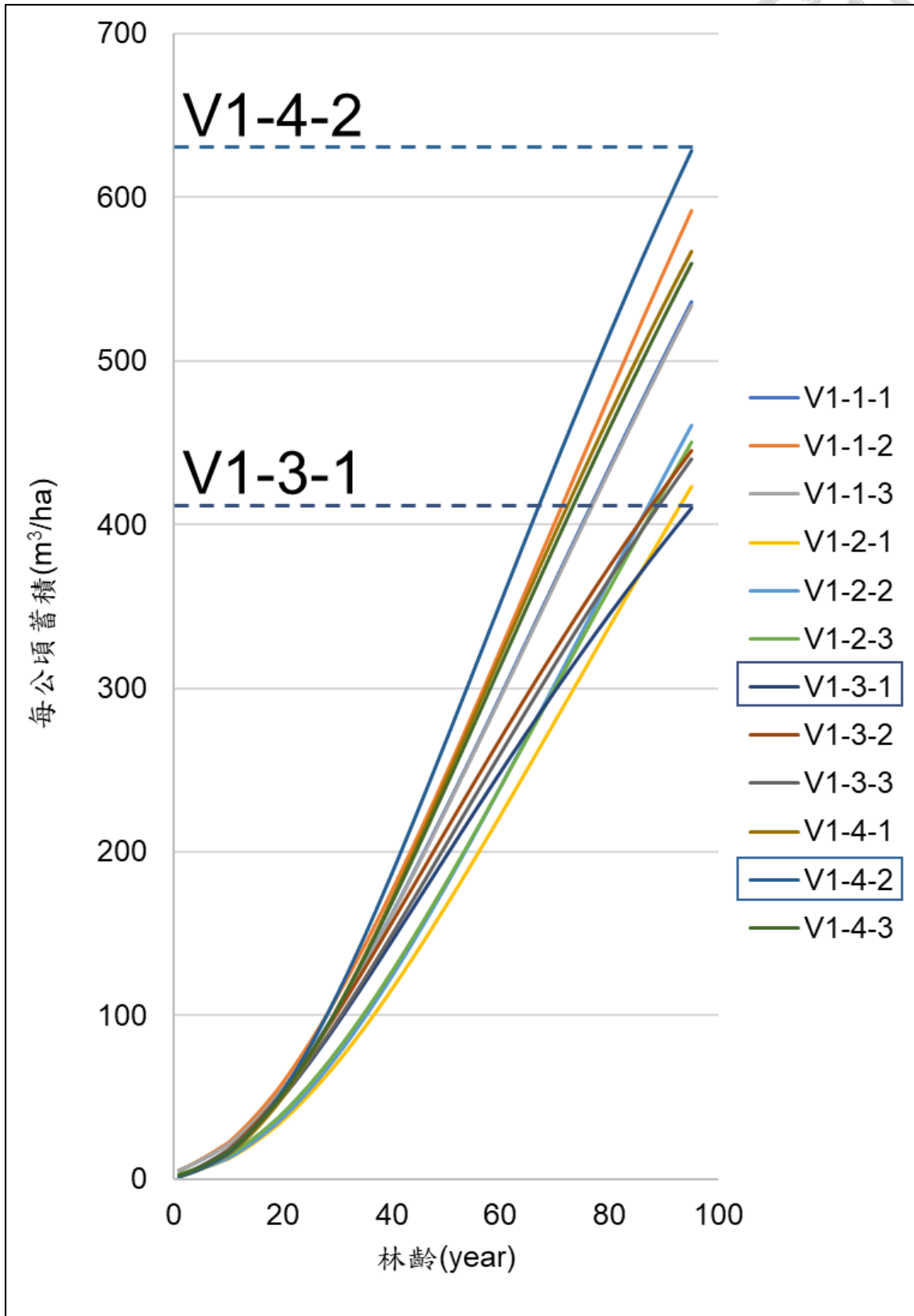


圖 20、新造之柳杉林分 (stand 0) 之 2016-2110 年動態蓄積模擬



二、連年生長量 (current annual increment, CAI) 比較

儘管整體林分之每公頃蓄積量呈上升趨勢，然而若從連年生長量 (current annual increment, CAI) 來看，圖 21 (a) 將 12 種立木材積組合之連年生長量以曲線圖表示，可看出在造林初期 (前 10 年) 柳杉受枯損量影響，使得連年生長變化較緩，待柳杉林生長漸趨穩定後，林分達最大連年生長量的時間，則因立木材積組合的不同而有林齡上的差異。因研究使用之立木材積組合在平均胸高直徑上僅一變數，在立木材積的變化由樹高與立木材積式調控，又以樹高式之影響較立木材積式大，如圖 21(b) - (e) 將達最大連年生長之林齡依使用之樹高式加以分類可推知--式 H-1 之材積組合最大連年生長量坐落於林齡 66-67 年生；式 H-2 坐落於 71-74 年生；式 H-3 坐落於 46-51 年生；而式 H-4 則坐落於 56-58 年生。

表 26、不同立木材積組合下之最大連年生長量

立木材積組合	達最大連年生長量之林齡 (year)	最大連年生長量 (m ³ /ha ³ /y)
V1-1-1	66	7.02
V1-1-2	67	7.80
V1-1-3	66	6.99
V1-2-1	73	5.80
V1-2-2	74	6.37
V1-2-3	71	6.10
V1-3-1	46	5.23
V1-3-2	46	5.70
V1-3-3	51	5.59
V1-4-1	56	7.59
V1-4-2	57	8.47
V1-4-3	58	7.43

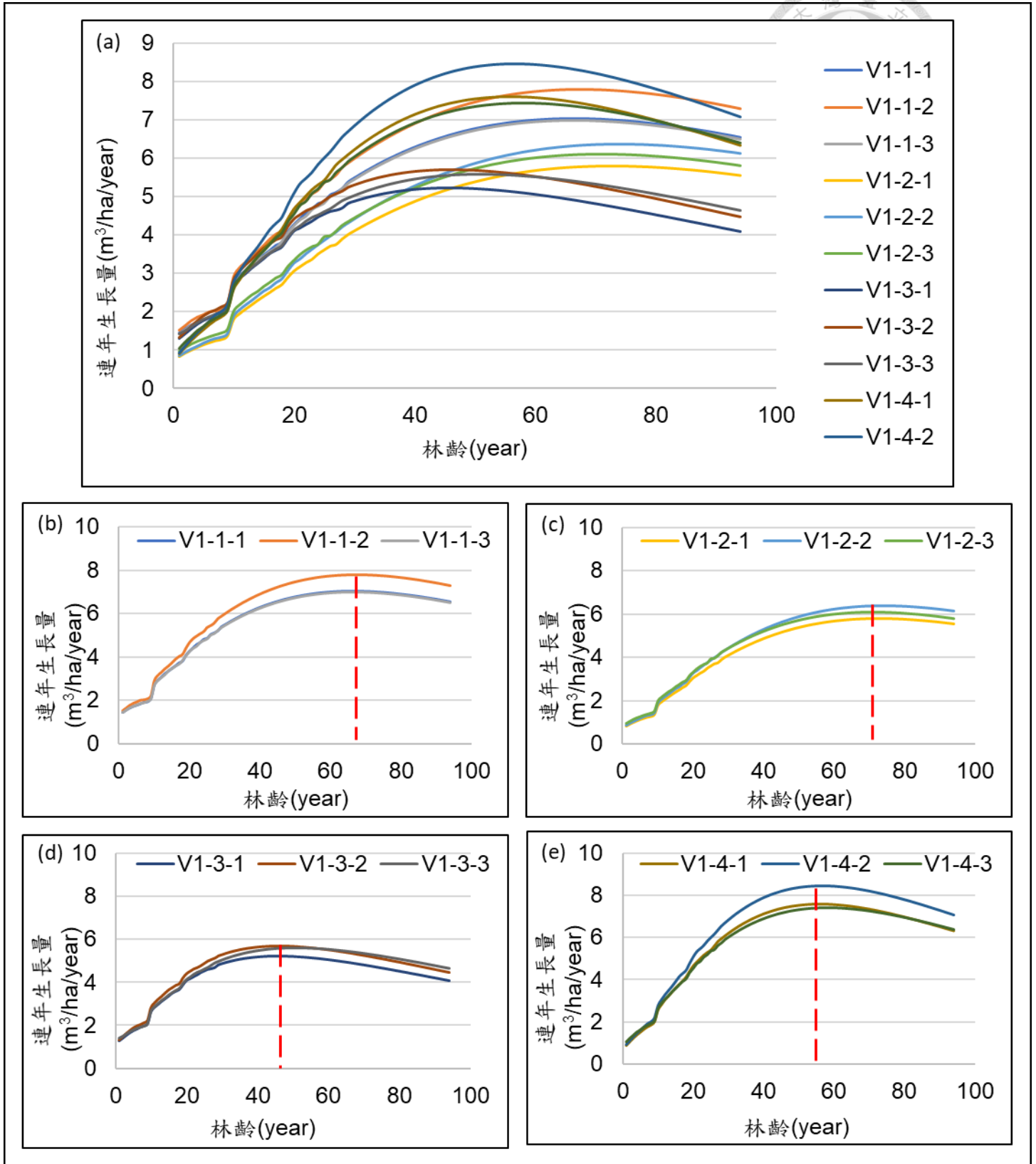


圖 21、新造之柳杉林分 (stand 0) 連年生長量 (CAI) 動態模擬：(a) 12 種材積組合結果、(b) 式 H-1 之 CAI 表現 (c) 式 H-2 之 CAI 表現 (d) 式 H-3 之 CAI 表現 (e) 式 H-4 之 CAI 表現。



三、不同生長模式模擬預測比較

本研究預測新造林 stand 0 之生長情形，並與張森等 (1987)、Fukuda *et al.* (2003) 及劉知好與王兆桓 (2008) 等人所建立之林齡-蓄積量生長模式進行比較 (表 27)，由預測曲線圖 (圖 22) 可看出：本研究之模擬預測結果較其餘研究結果預測者小，然而，張森等 (1987) 針對全臺的柳杉林分所做之推估，由於研究期間較早，僅預估 20 及 40 年生柳杉之收穫量，未能看出其生長速率變化，在第 40 年之時預測值與本研究平均值差距較近，而本研究之模擬預測曲線其斜率與 Fukuda *et al.* (2003) 所推估之北日本與中日本柳杉林分、劉知好與王兆桓 (2008) 所推估之臺灣中、南部柳杉林分之預測曲線斜率較相近，但在預估值上差距甚遠，反而在林齡 90 年時其預估值較劉知好與王兆桓 (2008) 所推估之臺灣東、北部之柳杉林分預估值較近 (圖 22)。

表 27、不同研究模擬之結果比較

林齡 (year)	研究平均值	地區				
		臺灣		日本		
		張森等 (1987)	劉知好與王兆桓 (2008)		Fukuda <i>et al.</i> (2003)	
		全臺	東、北區	中、南區	北日本	中日本
		每公頃蓄積量 (m ³ /ha)				
10	17.0	-	114.4	144.2	44.3	84.3
20	49.3	99.0	232.8	255.2	190.1	244.4
30	96.4	-	319.3	365.3	319.3	364.2
40	153.5	191.0	382.5	474.6	433.9	453.9
50	216.4	-	428.7	582.9	535.6	520.9
60	281.9	-	462.4	690.4	625.8	571.1
70	347.7	-	487.0	797.1	705.7	608.7
80	412.1	-	505.0	902.9	776.7	636.8
90	474.1	-	518.2	1007.8	839.6	657.8

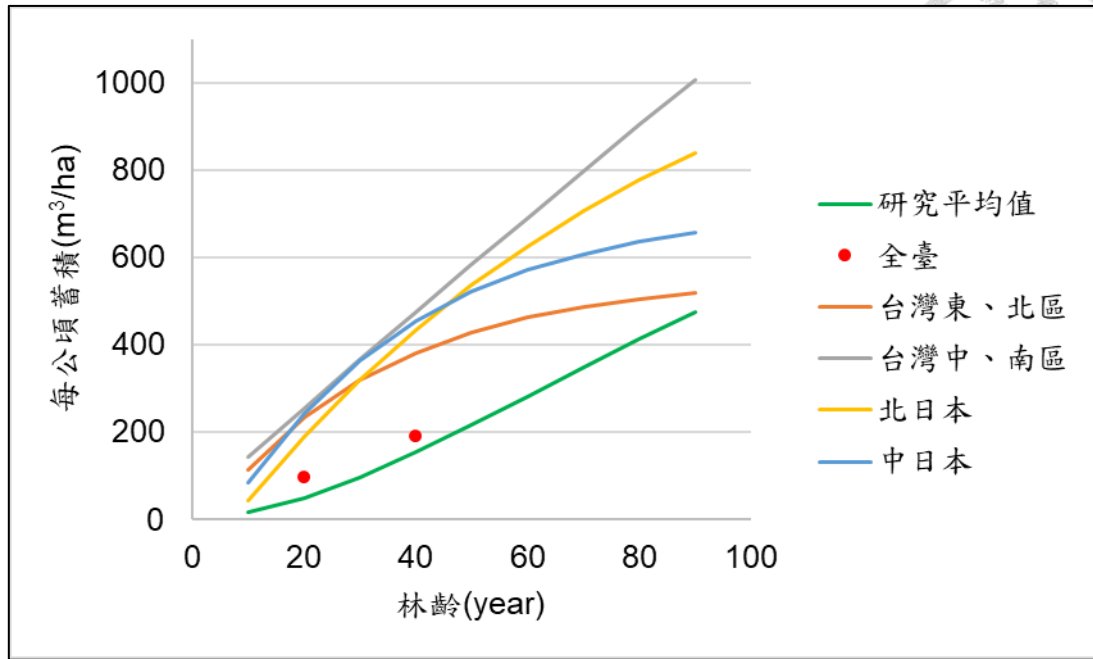


圖 22、新造之柳杉林分 (stand 0) 與不同研究預測結果之比較

第五章 討論



根據以上研究之結果，從模型探討、立木材積組合、林分估算之不確定性、模型模擬侷限與利用不同方式下進行估算之差距此五方向提出以下討論。

壹、模型模擬之探討

在時間尺度上，研究模擬了 2009-2110 年柳杉林分之動態，在不同生長收穫式的推估下，隨著預估時間越長，其推估的差距有越來越大的趨勢，最終之每公頃蓄積量差距可達 1.5 倍以上，最高表現為 V1-4-2 ($1,052.9 \text{ m}^3/\text{ha}$)、最低表現為 V1-3-1 ($667.7 \text{ m}^3/\text{ha}$)。

由於 2009-2018 年間每年有小規模對柳杉進行經營撫育作業，從模擬趨勢看來，其蓄積趨勢的擾動與人為進行的砍伐作業相互連動，然而整體蓄積趨勢仍然呈現逐步成長之現象。其原因可能為現行伐採量受限於法規規範限制，僅能以小規模的砍伐進行森林經營，在砍伐量小於生長量的情形，即使有實施伐採，整體的全林單位面積蓄積量仍會持續升高，針對這樣的生長趨勢可否提高伐採量，為一值得探討的課題。

在預測林分動態模擬上，由於材積公式的增長與平均胸高直徑的增加而呈正比，因此在胸高直徑的增長趨勢尚未減緩下，其蓄積量也會隨著推估時間的推移而增加，然而不論是整體之柳杉全林或新造林之 stand 0，從蓄積量的年變化量看出其隨著時間的推移與林齡邁向老齡化後而下降，代表柳杉不論在生長或是碳吸存的功能上是逐漸衰退的。

貳、立木材積組合之結果概述

研究中依 12 種立木材積組合，其結果以不同齡級區間加以描述、分類之。

一、31-40 齡級前

生長期初期組合表現較為集中，可分出 V1-2-1、V1-2-2、V1-2-3 這三個表現較低者，推測式 H-2 在初期之樹高生長上並不突出。

二、31-40 齡級至 81-90 齡級

此區間可將組合之表現分為較高與較低表現之兩群體，V1-4-2 之模擬結果在齡級 40 年後即為所有組合中立木材積之最高者，次之表現者則

屬 V1-1-2、V1-4-1、V1-4-3 組合群，而 V1-1-1 與 V1-1-3 近為重合曲線，相差並不大，可合併起來看之。

另表現較低的組合群以 V1-2-1 則為組合中表現屬最低者，然而至後期，其表現結果近於 V1-3-1；V1-2-3 與 V1-2-2 在齡級 61-70 年前表現差異不大，其後才逐漸表現出高低；V1-3-2 在齡級 31-40 年以前屬表現較高者，然而在之後生長表現逐漸降低；V1-3-3 同 V1-3-1 之表現，在生長前期屬中高表現群，在 31-40 齡級後逐漸轉為中低表現群，而 V1-3-1 之生長衰退的速度特別快，即將邁入表現最低者。

三、91 齡級以後

若林木之立木材積生長照此 12 種組合表現，至老齡後表現逐漸趨穩，以 V1-1-2 與 V1-4-2 為高表現群，次之中高表現群屬 V1-1-1、V1-1-3、V1-4-3 及 V1-4-1；中表現群則以 V1-2-2、V1-2-3、V1-2-1 為穩定生長之型態；低表現群則為 V1-3-3、V1-3-2、V1-3-1 者。由此，樹高之表現對於後期立木材積之影響有其重要性。

參、林分數據估算之不確定性

關於柳杉之生長收穫研究，從過去之收穫探討隨著對於碳吸存的重視而轉向生物量、碳吸存量的估算，而前人在立木材積與蓄積量之估算公式上，常以胸高直徑、樹高做為重要的生長收穫變數，然而林木之生長，除胸高直徑的生長外，尚受到許多因子之影響，因此在本研究的模型架構下，僅能以林齡-胸高直徑作為簡易的生長模式，推估在不同齡級分布下林木之生長趨勢。而從其林齡-胸高直徑之分布，可以看出以溪頭樣區公式進行之估算下，胸高直徑隨林齡增加而增長，且至老齡化時在胸高直徑生長上仍未有明顯之趨緩，此情形使得後續立木材積、蓄積量之整體趨勢亦隨著胸高直徑的增加而上升。

值得一提的是，在進行森林之生物量或碳吸存之估算時，常依照過去所建立之經驗式來推估樹高、林木蓄積，如 Cheng *et al.* (2013)、第三次森林資源調查（林務局，1995）、第四次森林資源調查（邱立文等，2015），然而經驗式的適用區間取決於當時公式建立的時空背景，對於未來預估能力有其限制，隨著柳杉林齡的老齡化，推估公式的適用性也有待考驗，若是使用不善，所估

算出來之數值都可能存在與實際上有相當大的落差，而使得蓄積量估算之不確定性增加。

一、樹高、立木材積、株數存量估算探討


在使用不同公式推估樹高時，因不同公式之基本樣態不同，所產生之曲線趨勢亦有所差異，至老齡之樹高估算區間在 20-30 公尺左右；在不同立木材積式的表現上，在初期之表現差距並不明顯，但在過了 30 齡級後，差距逐漸拉大，至老年立木材積表現可差距至 1.5 倍以上；而各齡級株數之推估上，從不同公式之推估結果有所不同，當資料尺度越大時，估算所產生之差距也會越大，在如此估算過程其誤差傳遞將使得數據落入不確定性中。

鑒於日本因應柳杉人工林之老齡化，Hiroshima *et al.* (2020) 調查老齡林柳杉的生長數據，並進行生長模型之校正來提高對於老齡級生長估算的準確性。而研究中使用之數據除了黃凱洛(2011)、Cheng *et al.*(2013) 建立之生長模式資料，其調查之林齡有超過 60 年生外的資料，其餘皆為年齡分布較輕者，尤以羅紹麟與馮豐隆(1985)所建立之小林齡生長收穫式，因而在整體的預估上，將其做生長趨勢的外推結果是不可信賴的。現行林務局尚在使用姚鶴年(1987)整理劉慎孝等(1955)建立之收穫式，當初樣木之年齡分布僅 10-45 年生，如今林務局轄屬經濟林之柳杉人工林已有超過 81 林齡以上者，模式的繼續使用可能會使估算誤差及不確定性變大，對於此公式之使用有待政府與相關機構進行更深入之研究與校準。

此外，而當初推估式的建立與其取樣的地點、地位條件相關，如胸高直徑-樹高曲線式，若方程式中無林齡、環境等變數，若超過當初模型建構之範圍，往往無法得到良好的預估與解釋力，而在缺乏林地更詳細之資訊時(如林木生長情形、該地有無撫育措施與疏伐紀錄、氣候條件等)，如何準確估算大尺度森林資源，仍有待相關林業研究投入發展。

二、枯損量估算之探討

林木枯損率之估算上，由於林木彼此競爭資源而使得林分密度的降低，加上環境、天災等影響，皆會使得樣區林木生長量有所變化，因此在



規律死亡率之計算上，以林齡-自然對數之死亡株數做推估，使死亡率隨著林齡的增長而降低，為較粗放、簡單的估算方法，並以栽植密度作為株數死亡率之調控因子，若是在日後需較詳細的推估，則長期生長調查資料必不可少。

規律死亡之枯損率與林分密度相關，而柳杉人工林之枯損與最初之栽植密度所有關聯，據劉慎孝（1975）的研究指出，過去進行柳杉栽植時多以每公頃 2,500 株的密度栽種，而後尚有每公頃 3,330 株、每公頃 4,440 株，甚至更為密植者，臺灣廣大的山林資源多為政府所管理，然而時空背景下人工林之經營撫育的停滯，使得人工經濟林以粗放式的方式管理，加上當時林木在初始栽植時之林分密度偏高，使得林分生長之影響因子存在多樣的變因。

在缺乏各造林地資料與相關撫育、伐採資料的情形下，本研究僅能簡單以每公頃 2,500 株作為初始栽植密度的假設，對於先前可能採取高密度栽植的柳杉人工林，在邁入老齡化後其生長情形是否能適用在當時之時空背景下所建立之生長收穫模式來加以推估，抑或是存在另一個不確定因子的風險，在進行數據、公式的使用上是需要去注意的。

三、柳杉人工林生長差異探討

劉業經等（1979）對於早期造林所進口之柳杉種子種類有所記載，其進口之柳杉依生長習性可分為短伐期柳杉及長伐期柳杉，亦稱早生型與晚生型，短伐期柳杉自戰後初期至 1979 年（民國 68 年）期間都尚持續引進採購，而長伐期柳杉的引進自 1959 年（民國 48 年）至 1963 年（民國 52 年），因種子價格較短伐期者高，且當時林務局評估不適合當前需求，即停止購入。兩者之生長特性具有相當不同之處，短伐期柳杉在幼年期生長迅速，然而在林齡達 50-60 年後，即呈現衰退現象；長伐期柳杉在幼齡期至壯齡期呈現持續的生長，且在樹齡達百年以上尚未呈現衰老現象。

然而現存之柳杉造林屬何種品系未能得知，而引進至臺灣的生長表現也會與在日本當地有所不同，從研究中得出之連年生長量其衰退趨勢依生長公式組合的表現結果有所不同，約落於 35-55 年生的時期，而整體之蓄積量依舊呈現上升狀態；黃凱洛等（2011）對於國有林事業區之永久

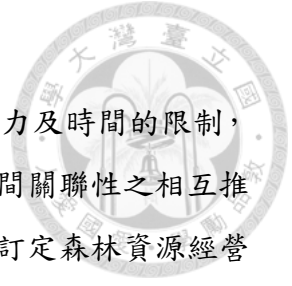
樣區進行柳杉之調查，其在不同林齡之樹高表現上變異甚大，依量測之同齡級林木其樹高可差 20 m。這些生長變異的因素除受後天影響外，先天因素之影響也是其中一項變數。

從柳杉訂定之輪伐期來看，林務局全民造林之獎勵造林實施要點中對其輪伐期訂為 20 年生（林務局，1998）、臺大實驗林原將輪伐期訂為 35 年生，近年調整為 50 年生（國立臺灣大學生物資源暨農學院實驗林管理處，2019），除了為符合柳杉人工林之現況與期望生產較大徑材外，也看出初期在柳杉造林上是以短期經營為主要之目的，但在當下時空背景，造林容易撫育難，加上國際趨勢木材價格不佳與臺灣產業結構的改變下（王培蓉等，2013），使得柳杉人工林經營政策與目的在現況下的調整更顯得重要。

肆、模型建構之侷限

本研究之模型架構乃以林木株數作為處理之單元體，僅能粗略假設全臺柳杉人工林皆以相同的生長趨勢生長，利用平均胸高直徑加以模擬立木材積。另外，臺灣歷年在資源調查上，以建造全林模式之發展為多，故政府公開資料型式多為提供林分單位面積與蓄積資訊，在蒐集所得之資料型式之侷限下，為模擬整體柳杉林之動態變化，僅能藉以前人研究之經驗公式，以胸高直徑、樹高、林齡等較為直觀的物理性質尺度來模擬其生長，先求得單株林木生長模式，再行加總模擬全林層級。

此外，每塊造林地因地位、氣象環境的不同，會有不同的生長情形，甚至在林齡表現上也會因撫育措施之有無，而有所不同。本研究因無法取得該項紀錄或資訊，無法採取具生理機制的模擬方法來評估柳杉人工林之立木材積在不同林齡表現上之差距，難以反應森林較為細部的生長過程，是為本模型在建構上所受到的限制。爾後若想發展較為詳細的森林生長模式，建議在森林經營時能加入環境因子之監測及記錄，如此長期環境監測資訊搭配林木之生理機制，可使林木生長模式之建立更有彈性，並可將未來可能之環境變化納入考量，例如全球氣候變遷對柳杉人工林生長可能造成之影響，提供相關管理單位可信賴之科學模擬數據，提早準備因應措施與辦法。



伍、不同方式下進行單位蓄積量推估之差距

由於林業相關研究在資料蒐集與取得上常受到人力、財力及時間的限制，而使得在研究在操作、分析與利用上有其困難性，藉由彼此間關聯性之相互推估，也增大了將資源過於高估或低估的風險，致使在評估、訂定森林資源經營時易有錯估的態勢。

依第四次森林資源調查之經營類別，生產性人工林之單位面積蓄積量為 $220.6 \text{ m}^3/\text{ha}$ ，總蓄積為 $57,260,000 \text{ m}^3$ （邱立文等，2015），而柳杉人工林之單位面積蓄積量為 $389.0 \text{ m}^3/\text{ha}$ ，在所有生產性人工林中蓄積屬較大者，然而研究中使用之許立達（2011）整理林務局 98 年檢定資料中轄屬柳杉經濟林的面積與蓄積量分別為面積 $7,204.9 \text{ ha}$ 、蓄積量 $1,163,875.4 \text{ m}^3$ ，估算下來之單位面積蓄積量為 $161.5 \text{ m}^3/\text{ha}$ ，與第四次森林資源調查之柳杉人工林比較，在單位蓄積量上差距足足有一倍之多，若是將其與第四次森林資源調查之生產性人工林單位面積蓄積量 $220.6 \text{ m}^3/\text{ha}$ 相比，柳杉經濟林之單位面積蓄積量依舊是偏低（表 28）。然而，對照張森等（1987）對各林管處之人工林進行生長收穫之分析，

然而從林務局之森林資源調查報告中，可看到以不同方式計算所得之單位面積蓄積間存在著估算的差距，如柳杉人工林在報告中提到其蓄積量為 $11,882,000 \text{ m}^3$ ，而柳杉人工林面積為 $41,390 \text{ ha}$ ，以此計算出之單位面積蓄積量為 $287.1 \text{ m}^3/\text{ha}$ ，回推可得平均年生長量為 $2.4 \text{ m}^3/\text{ha}/\text{y}$ ，而經地面樣區取樣調查計算出之單位面積蓄積為 $389.0 \text{ m}^3/\text{ha}$ ，平均年生長量為 $7.5 \text{ m}^3/\text{ha}/\text{y}$ ，兩者在蓄積量的推估上有著 $101.9 \text{ m}^3/\text{ha}$ 的差距，而此差距也造成平均年生長量（MAI）在估算上出現 $5.1 \text{ m}^3/\text{ha}/\text{y}$ 之差距（表 29），此數據尚可對比依森林資源調查所推估出來的人工林平均年生長量（ $6.8 \text{ m}^3/\text{ha}/\text{y}$ ）與人工針葉林平均年生長量（ $8.1 \text{ m}^3/\text{ha}/\text{y}$ ）之推估數據，及其他研究推估之柳杉平均年生長量（ $5.0\text{--}8.3 \text{ m}^3/\text{ha}/\text{y}$ ），以了解依不同方式取樣、量測所得之數據差距，如何影響森林資源估算之不確定性，以作為未來國產材經營、碳匯資料等各類林業政策訂定之參考。

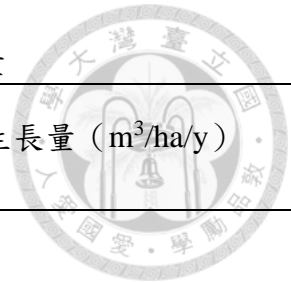
表 28、主要林型之面積與單位面積蓄積

資料來源	森林類型	蓄積 (m ³)	面積 (ha)	單位面積蓄積 ^g (m ³ /ha)	依資源調查報告指出之單位面積蓄積 (m ³ /ha)
第四次森林資源調查	生產性人工林	57,260,000	290,385	197.2	220.6
(林務局，2016；邱立文等，2015)	柳杉人工林	11,882,000	41,390	287.1	389.0 ^h
許立達(2011)	轄屬柳杉經濟林	1,163,875.4	7,204.9	161.5	-
研究推估	轄屬柳杉經濟林	-	-	133.4-210.5	-

^g 此單位面積蓄積為全國森林資源調查報告中之蓄積與面積相除得之的數據。

^h 389.0 m³/ha 之單位面積蓄積量為依地面樣區取樣調查計算而來，亦出現於資源調查報告中的數據。

表 29、主要林型之單位蓄積量及平均年生長量



項目	單位蓄積量 (m ³ /ha)		平均年生長量 (m ³ /ha/y)
	第三次森林資源調查之林型 單位面積蓄積量 ⁱ	第四次森林資源調查之林型 單位面積蓄積量 ^j	
人工林	113	248.4	6.8
人工針葉林	156	318.1	8.1
柳杉人工林	238.6 ^e	287.1	2.4
		389.0	7.5
研究推估	--	--	5.0-8.3

ⁱ 此單位面積蓄積量之數值依第三次森林資源調查 (林務局, 1995) 之林務局轄屬事業區之柳杉人工林面積 39,100 ha 與蓄積 9,330,000 m³ 計算得來。

^j 此資料數據源自林務局 (2016)、邱立文等 (2015)。

第六章 結論與建議

本研究藉由蒐集政府公開資訊、前人發表過之文獻研究，對於臺灣之柳杉人工林動態與蓄積量進行推估比較，蒐集之內容包括林務局公布之柳杉人工林面積、蓄積量、前人研究所發表與建立之推估公式、長期試驗資料進行分析，目的在探討使用不同推估公式下可能造成資源盤點估算上的不確定性，對於此差距所造成的風險與範圍乃經營者需要評估的項目，而研究所得結果可提供未來在進行資源盤點評估與相關經營決策上之參考。未來不論是在國產材之生產評估，甚至臺灣碳吸存之估算，如何將推估所造成之誤差風險降低、得出更詳盡之資源盤點資訊，都是未來在振興林業經營上著力之重點方向，更是考驗森林經營者對於林分資訊的掌握程度。

研究結果發現：在不同立木材積組合式之推估下，產生之估算差距隨預估時間的增加而越來越大，其差距範圍以倍數差之。此情形顯示在林分數據的推估，一層一層的方程式與估算使得數據暴露於估算之不確定性中，而公式的適用性是否可通用於全國性資料與其預估模式也是在估算時面臨的考驗。

現今在政府逐漸重啟森林經營的過程中，森林資源的掌握與經營是相當重要的一環，加上國際越發重視自然資源的趨勢，人類與自然資源存在相互依存的關聯，而臺灣也須面對在保育與適度經營之間取得平衡的境況。為對柳杉經濟林之林況有更深入的了解，許多天然環境因子或是人為活動皆會直接或間接影響林木生長動態，建議森林管理單位應致力於樣區環境的監測、建立長期資料庫，累積林木生長資料，了解林木生理機制等，惟透過環境之長期監測、調查與研究，不論未來柳杉人工林之經營目標為國產材生產目標或作為碳吸存的交易手腕，才有機會利用這些資料及數據，搭配與氣候條件，建立較具有彈性的森林生長模式，為日後制訂森林經營計畫，提供可信之科學評估與參考。

參考文獻




中文

- 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。臺大實驗林研究報告，24 (2)，157-167。
- 王培蓉、汪大雄、林俊成 (2013)。台灣柳杉造林歷史回顧及經營方式探討。中華林學季刊，46 (2)，179-188。
- 石哲宇 (2014)。應用生長收穫模式模擬不同栽植密度柳杉人工林胸高斷面積生長之探討。國立中興大學森林學系碩士班碩士學位論文。
- 汪大雄 (2012)。赴美國研習森林生長模式之發展和森林結構空間數量化之研究報告。行政院農業委員會林業試驗所出國報告。
- 李良山 (2007)。應用系統動力學軟體探討牡蠣在潟湖中對生態環境的影響。國立中山大學海洋環境及工程研究所碩士論文。
- 卓志隆 (2018)。國產材供需與利用之問題現況。林產工業，37 (2)，121-126。
- 邱立文、黃群修、吳俊奇、謝小恬 (2015)。第4次全國森林資源調查成果概要。台灣林業，41 (4)，3-13。
- 邱祈榮、林俊成、何幸耘 (2012)。REDD 施行對臺灣進口原木與制裁衝擊之評估。中華林學季刊，45 (2)，271-288。
- 邱祈榮 (2019)。臺灣林業的升級之路—從林業永續多元輔導方案看森林經營模式運用。豐年雜誌，69 (9)，64-72。
- 林子玉 (1963)。林分生長量表簡易編製法及預測方法比較之研究。農林學報，12，142-174。
- 林俊成、李國忠、林裕仁 (1999)。柳杉人工林碳貯存效果與適應成本研究。臺大實驗林研究報告，13 (1)，51-60。
- 林俊成、邱祈榮 (2017)。臺灣進口實木產品曝險程度分析。林業研究專訊，24 (6)，44-49。
- 林俊成、陳幸君、吳孟珊 (2015)。1991~2013 年台灣木材伐採與生產量分析。台灣林業科學 30 (2)：121-30。
- 林俊成 (2018)。2017-2030 年全球森林策略計畫。台灣林業，44 (4)，26-33。
- 林務局 (1995)。第三次台灣森林資源及土地利用調查。台灣省農林廳林務局印。



- 林務局 (1998)。全民造林運動手冊。臺北：行政院農業委員會林務局。
- 林務局 (2003)。大雪山林業史話。臺中：行政院農業委員會林務局。
- 林務局 (2016)。第四次森林資源調查報告。擷取自：
<https://www.forest.gov.tw/0002393>。最後擷取日期：2020/04/01。
- 林華慶 (2017)。永續林業・生態臺灣。台灣林業，43 (2)，10-19。
- 周楨 (1968)。森林經理學。臺北：正中書局。
- 姚鶴年 (1987)。臺灣主要樹種立木材積求積式之解析。台灣林業，13 (5)，3-13。
- 財團法人農業科技研究院農業政策研究中心編譯 (2017) 聯合國 2030 永續發展目標 (SDGs) 簡介。
- 張森、陳麗琴、任憶安 (1897)。林務局普通施業地人工林生長與收穫之分析。林業試驗所研究報告季刊，2 (1)，17-29。
- 許立達 (2011)。國產材產銷分析及資訊系統建置規劃。行政院農業委員會林務局委託研究計劃系列，100-00-5-22。
- 國立臺灣大學生物資源暨農學院實驗林管理處 (2019)。國立臺灣大學生物資源暨農學院實驗林經營計畫 (民國一〇七年七月至民國一一六年十二月)。南投：國立臺灣大學生物資源暨農學院實驗林管理處編。
- 陳忠義、林亨勳、王經文、王亞男 (2017)。植林減碳—淺談森林的碳吸存。自然保育季刊，99，3-15。
- 陳朝圳、陳建璋 (2015)。森林經營學。新北市：正中書局股份有限公司。
- 陳麗琴、林俊成、吳俊賢、黃進睦、陳溢宏 (2012)。臺灣地區木質材料需求量之現況分析。林業研究季刊，34 (4)，287-296。
- 黃裕星 (1999)。全民造林與提高木材自給率之探討。台灣林業，25 (4)，4-7。
- 黃凱洛、王兆桓、顏添明 (2011)。臺灣主要四種針葉樹人工林地位指數建立之研究。中華林學季刊，44 (4)，553-566。
- 馮豐隆、吳昶清 (2002)。森林生長模式之發展及應用。台灣林業，28 (5)，14-19。
- 馮豐隆、林子玉 (1991)。百分數法在直徑分布模式上應用之研究。興大實驗林研究報告，13 (2)，65-80。

- 
- 馮豐隆、林子玉 (1992)。台灣林分結構生長模擬模式系統的建立。興大實驗林研究報告, 14 (2), 55-58。
- 楊筑雲 (2015)。建構台灣林地蓄積量之估算-以苗栗縣為例。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。
- 楊榮啟 (1975)。台灣大學實驗林產柳杉之生長與收穫的研究。台灣大實驗林研究報告, 116, 1-149。
- 楊榮啟 (1987)。森林生物統計學。國立編譯館。661 頁。
- 管立豪 (2003)。國有林地分區及經營規範建立。農政與農情, 135, 41-48。
- 劉慎孝、楊寶霖、徐渙榮、陳松藩 (1955)。臺灣柳杉林收穫表。臺灣省林業試驗所合作報告, 1。臺北: 臺灣省林業試驗所印。
- 劉慎孝 (1975)。台灣柳杉林分理想立木度之查定研究。農林學報, 24, 129-142。
- 劉知好、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 (1), 35-45。
- 劉業經、林文鎮、林維治 (1979)。台灣經濟樹木育林學 (一)。臺中: 國立中興大學教務處出版組。
- 劉興旺、王亞男、蔡明哲、洪志遠、楊勝驛、鄭景鵬 (2012)。溪頭地區臺灣杉人工林不同林齡胸徑與樹高生長之研究。臺大實驗林研究報告, 26(2), 103-111。
- 臺灣大雪山林業公司 (1966)。大雪山林業公司大製材工廠經營之研討。臺中: 臺灣大雪山林業公司編。
- 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。臺大實驗林研究報告, 28 (1), 17-29。
- 鄭智馨、洪志祐、黃于軒、李俊佑、陳秋萍、白創文 (2014)。溪頭台灣杉人工林之林分特性與發展。中華林學季刊, 47 (2), 155-168。
- 顏添明 (1997)。台灣大雪山地區紅檜人工林生長收穫系統之研究。國立中興大學森林學研究所博士論文。178 頁。
- 顏添明、李久先 (1998)。七種生長模式模擬紅檜人工林疏伐林分單木胸高斷面積生長適用性之比較。中華林學季刊, 31 (1), 13-24。
- 簡義倫 (2010)。日式伐木系統與美式伐木系統之比較—以八仙山林場及大雪山林業公司為例。人文暨社會科學期刊, 6 (2), 35-45。

羅紹麟、馮豐隆 (1985) 。林相變更之柳杉造林地的林分構造與收穫。興大實驗林
研究報告，6，73-91。



外文

大隅真一 (1976) 。RICHARDS ソ生長函數シガソ林木生長デソ應用。日本林學
大會論文集 87 回。

Adame, P., Del Río, M., & Cañellas, I. (2010) . Model individual-tree mortality in
Pyrenean oak (*Quercus pyrenaica* Willd.) stands. *Annals of forest science* 67,810.
<https://doi.org/10.1051/forest/2010046>.

Alenius V., Hökkä H., Salminen H., & Jutras S., 2003. Evaluating estimation methods
for logistic regression in modelling individual-tree mortality. In: Amaro A., Reed D.,
and Soares P. (Eds.) , *Modelling forest systems*, CAB International, Wallingford,
225–236.

Avery, H. E. & Burkhart, H. E. (1994) . *Forest measurements*. 4th ed. McGraw-Hill.
Inc.

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 (1) , 60.

Chiu, C. M., Chien, C. T., & Nigh, G. (2016) . Density-dependent mortality in *Taiwania
cryptomerioides* and *Chamaecyparis formosensis* stands in Taiwan. *Cogent
Environmental Science*, 2 (1) , 1148301.

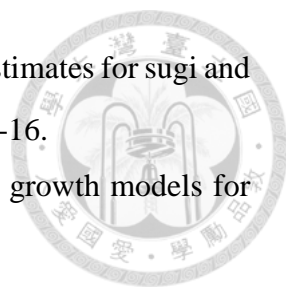
Clutter, J. L. (1963) . Compatible growth and yield models for Loblolly pine. *Forest
Science* 9 (3) , 354-371.

Clutter, J. L., Fortson, J. C., Pienaar, L. V., Brister, G. H. & Bailey, R. L. (1983) .
Timber management : A quantitative approach.

Costanza, R., & Voinov, A. (2001) . Modeling ecological and economic systems with
STELLA: Part III. *Ecological Modelling*, 143, 1-7.

FAO (2016) . *Sustainable Development Goals*.

Forrester, J. W. (1993) . System dynamics and the lessons of 35 years. In *A systems-
based approach to policymaking*. Springer, Boston, MA., 199-240.

- 
- Fukuda, M., Iehara, T., & Matsumoto, M. (2003) Carbon stock estimates for sugi and hinoki forests in Japan. *Forest Ecology and Management*, 184, 1-16.
- Hasenauer, H. (Ed.) (2006) . Sustainable forest management: growth models for Europe (No. 634.92 S964) . Berlin : Springer.
- Hazarika, R & Jandl, R. (2019) . The nexus between the Austrian forestry sector and the Sustainable Development Goals : A review of the interlinkages. *Forests*, 10 (3) , 205.
- Hiroshima, T., Toyama, K., Suzuki, S. N., Owari, T., Nakajima, T., & Ishibashi, S. (2020) . Long observation period improves growth prediction in old Sugi (*Cryptomeria japonica*) forest plantations. *Journal of Forest Research*, 25 (3) , 183-191.
- Husch, B., Miller, C. I. & Beers, T. W. (1982) . Forest mensuration. 3rd ed. New York: The Ronald Press Co., 276-364.
- Lam, T. Y., & Guan, B. T. (2020) : Modeling stand basal area growth of *Cryptomeria japonica* D. Don under different planting densities in Taiwan. *Journal of Forest Research*, 1-9. <https://doi.org/10.1080/13416979.2020.1733171>.
- Landsberg, J. J., & Waring, R. H. (1997) . A generalized model of forest productivity using simplified concepts of radiation-use efficiency, carbon balance and partitioning. *Forest Ecology and Management*, 95 (3) , 209-228.
- Liu, J., & Ashton, P. S. (1995). Individual-based simulation models for forest succession and management. *Forest Ecology and Management*, 73, 157–175.
- Peet R.K. & Christensen N.L., 1987. Competition and tree death. *Bioscience* 37 : 586–595.
- Piao, T., Chun, J. H., Yang, H. M., & Cheon, K. (2014) . Negative density dependence regulates two tree species at later life stage in a temperate forest. *PloS one*, 9 (7) .
- Pothier, D., & Mailly, D. (2006) . Stand-level prediction of balsam fir mortality in relation to spruce budworm defoliation. *Canadian Journal of Forest Research*, 36, 1631–1640. <http://dx.doi.org/10.1139/x06-062>.
- Pretzsch, H. (2009) . Forest dynamics, growth, and yield. In *Forest dynamics, growth and yield*, 1-39. Springer, Berlin, Heidelberg.
- Sharma, M., & Parton, J. (2007) . Height–diameter equations for boreal tree species in

Ontario using a mixed-effects modeling approach. *Forest Ecology and Management*, 249, 187-198.

Spiecker, H., Mielikäinen, K., Köhl, M., & Skovsgaard, J. P. (1996). Conclusions and summary. In *Growth trends in European forests*, 369-372. Springer, Berlin, Heidelberg.

Sweda, T. & Koide, T. (1981). Applicability of growth equations to the growth of trees in stem radius (I) application to white spruce. *Journal of the Japanese Forestry Society*, 63 (4), 113-124.

Weiskittel, A. R., Hann, D. W., Kershaw Jr, J. A., & Vanclay, J. K. (2011). *Forest growth and yield modeling*. John Wiley & Sons.