

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

Department of Forestry & Resource Conservation

College of Bio-Resources & Agriculture

National Taiwan University

Master Thesis

松鼠為害對溪頭地區柳杉人工林樹高生長之影響
及其空間分佈

The Effect of Squirrel Damage on Height Growth
and its Spatial Distribution in Xitou Japanese Cedar
(*Cryptomeria japonica*) Plantation

連維得

Wei-Te Lien

指導教授：林增毅 博士

Advisor: Tzeng-Yih Lam, Ph.D.

中華民國 109 年 5 月

May 2020

誌謝



回想當初剛進到研究所時，那一份雀躍、好奇與忐忑的心，走到現在兩年也過去了，是時候前往下一站、向人生的另一個階段邁進。現在心裡充滿的是滿滿的感謝與期待，感謝的是過去的兩年所帶給我的收穫與成長，期待的是未來的日子將要經歷與學習的功課。有太多想感謝的人、事、物，就讓我一一表達我的感謝之情吧！

本論文承蒙恩師 林增毅副教授的指導，給予我在論文上許多寶貴的建議，指出我在研究上的不足之處，以及討論論文的發展方向，讓我在研究上有許許多多的學習與體悟。非常感謝我在大學時期的導師—顏添明教授，因著老師的照顧與指導，讓我對測計領域有較深的認識與興趣，使我走進博大精深的測計領域。也特別感謝我的戰友們，就是測計研究室的各位，有柏豪學長、荷童學姊、慧瑜學姊、舜英學姊、品洵學妹與偉誠學弟，我們一起出差的時光真的是我在研究所時最難忘的體驗，一起辛苦地收集數據、調查、做紀錄，在收工之後我們一起去吃飯、買飲料喝，那真的是超棒的感覺啊！不論是在論文寫作中遇到的問題，口試申請的流程細節，以及許多出差工作的時光，我非常非常感謝有你們在，也祝福你們未來的一切都很順利、很有成就。

我也要感謝我的爸爸媽媽、我的姐姐們與女朋友和朋友們，若不是你們的鼓勵還有陪伴，在許多孤獨、單調的日子當中，我可能難以堅持下去、把論文完成，謝謝你們使我的生活有動力、有樂趣，也讓我更有衝勁勇往直前。畢業就剩最後一哩路了，我最後要感謝的是我所信靠的上帝，每逢沮喪、難過、失望與煩亂的時候，在禱告之中使我再次獲得力量，不斷地催促我面對挑戰、相信過程，研究所的時光將會成為我生命中的一段故事，使我成長茁壯。就讓我繼續往前看、向前走吧！把這些珍貴的回憶與辛苦的汗水封存於此時、此刻，然後，頭也不回，向著標竿直跑。

20200504

中文摘要



本研究以國立臺灣大學生物資源暨農學院實驗林管理處所轄溪頭營林區 2 林班 49-1 號造林地試驗區中的柳杉林分為研究材料。本研究之目的為，第一為對樣木進行樹幹解析，再以樹高估算方法估算樹高值，並以 Richards 生長模式模擬樹高生長結果，建立柳杉健全木與鼠害木的樹高生長模型，比較兩者在樹高生長上之差異，第二為建立鼠害快速目測評估機制，評估鼠害之空間分佈與嚴重程度，透過林分視覺化系統呈現此研究區域中之松鼠為害情形。

研究結果顯示以三種樹高估算方法（Graves、Lenhart's、Carmean's）之樹高估算結果建立健全木之樹高生長模型，樹高生長率最大值在 2 年內達到最高，顯示柳杉於生長初期即能達到最高生長率。鼠害木樹高生長停滯的年齡較健全木生長停滯的年齡晚，顯示鼠害造成林木樹高生長延遲。樹高生長模型參數之信賴區間在 Lenhart's 與 Carmean's 的預估結果所建立之樹高生長模型中近乎相同，顯示此兩種樹高生長模型高度重合。樹高估算方法的預估結果以 Graves 方法高於 Lenhart's 與 Carmean's 方法。

鼠害調查研究結果顯示，此區鼠害木百分比高達 80.98% ($\pm 7.65\%$)，其林分為易受害之柳杉純林，樣木遭受鼠害的比率由試驗區西南方向東北方遞增。以樹冠顏色來判斷鼠害走向，顯示鼠害發生的走向可能由試驗區西南方向東北方移動。受鼠害影響程度以樣區 6 較輕微，樣區 4、樣區 5 較嚴重。樣區 6、樣區 7 樣木重複遭受鼠害之比率較高。樣區 4 鼠害木百分比最高，亦具有最多的鼠害分岔，顯示樣木重複受害之比率最高，且鼠害規模較大。鼠害分岔之高度有由南向北、由西向東增加之趨勢，從木材利用的角度來看，試驗區西南部的可用材少於試驗區東北部。以林分視覺化系統展示鼠害分佈之情形，可以看出鼠害分岔高度越高之樣區，其樹冠層佔樹高的百分比越低。使用林分視覺化系統對於評估林分中之鼠害情形將更有效與準確。

關鍵詞：樹高生長模型、樹高估算方法、鼠害空間分佈、鼠害快速評估機制

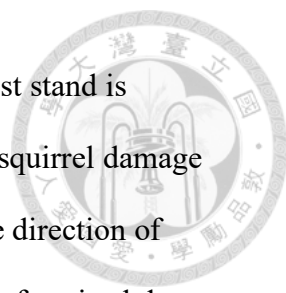
Abstract



A Japanese cedar (*Cryptomeria japonica*) plantation in the 49-1 Forest Stand in the NTU Experimental Forest was studied. The purposes of this study were two-folds. Firstly, sampled trees were felled and stem analysis were carried out, tree height estimation methods were used to estimate tree height at each given age, and Richards' growth model was used to model tree height growth for healthy trees and squirrel damaged trees, which differences in tree height growth between the two were compared. Secondly, a rapid visual evaluation mechanism for squirrel damage was established, spatial distribution and severity of squirrel damage of the forest stand were assessed, and the Stand Visualization System was used to present the conditions of squirrel damage in the research area.

Results compared estimation of tree height between three height estimation methods (namely, Graves, Lenhart's, Carmean's). The estimated heights were successfully used to establish height growth models of healthy and squirrel damaged trees. The age for the fitted tree height growth curves to reach their highest growth rate was between 0 and 2 years old suggesting that Japanese cedar reached its highest growth rate in early development stage. The age at which height growth stagnate for squirrel damaged trees was later than that of healthy trees indicating that squirrel damage caused delay in tree height growth. The confidence intervals of the parameters of the fitted tree height growth models were almost the same between the two tree height growth models built from Lenhart 's and Carmean 's estimates, showing that the two fitted tree height growth models were highly coincident. The predictions from the tree height growth model fitted with height estimated by the Graves' method was higher than that of Lenhart 's and Carmean 's methods.

The results of the squirrel damage assessment showed that percentage of squirrel



damage trees in this area was as high as 80.98% ($\pm 7.65\%$). This forest stand is vulnerable because of its pure Japanese cedar plantation. The rate of squirrel damage increased from southwest to northeast of the forest stand. Judging the direction of squirrel damage by the color of the tree crown showed that the trend of squirrel damage might move from the southwest to the northeast of the forest stand. The impact of squirrel damage was light in sample plot 6, whereas sample plots 4 and 5 were more serious. The sample area 6 and the sample area 7 have a higher rate of repeated squirrel damage. Sample area 4 had the highest percentage of squirrel damage, and also had the largest number of branching due to squirrel damage indicating that the rate of repeated damage to sample trees was the highest and the scale of squirrel damage was relatively large. The height of the squirrel damage bifurcation tended to increase from the south to the north and from the west to the east. From the perspective of wood utilization, available materials in the southwest of the forest stand were less than those in the northeast of the forest stand. Using the Stand Visualization System to display distribution of squirrel damage, it could be seen that the sample plots with higher squirrel damage bifurcation height had lower percentage of its canopy layer in the tree height. The use of Stand Visualization Systems is more effective in assessing squirrel damage in stands.

Keyword : tree height growth model 、 tree height estimation method 、 squirrel damage spatial distribution 、 squirrel damage rapid visual evaluation mechanism



目 錄

誌謝.....	i
中文摘要.....	ii
英文摘要.....	iii
第一章 研究動機與目的.....	1
第二章 相關理論與文獻回顧.....	3
第一節 樹幹解析之應用	3
第二節 樹幹解析作業流程.....	4
第三節 以樹幹解析重建樹高生長之估算方法.....	6
第四節 樹高生長估算方法相關研究	13
第五節 松鼠危害對於林木生長之影響	16
第三章 材料與研究方法.....	17
第一節 柳杉的樹種介紹	17
第二節 研究區域概況	17
第三節 研究方法	18
第四章 研究結果.....	27
第一節 以三種樹高估算方法建立樹高生長模型	27
第二節 鼠害空間分布與嚴重程度	36
第五章 討論	42
第一節 以三種樹高估算方法建立樹高生長模型	42
第二節 鼠害空間分佈與嚴重程度	44

第六章 結論與建議..... 48

引用文獻..... 51





圖目次

圖 1. 樹幹解析示意圖.....	5
圖 2. 樹幹解析取樣位置與隱藏芽點示意圖.....	6
圖 3. 隱藏芽點的位置與樹高預測公式中所使用之符號.....	7
圖 4. 使用 ISSA 方法計算三個連續的圓盤斷面年輪數量的二次差值.....	9
圖 5. 以 TARG 方法估算樹高之示意圖與公式符號.....	11
圖 6. 鼠害對於樹冠顏色變化之影響.....	18
圖 7. 鼠害導致樹木主幹呈現 U 型分岔.....	18
圖 8. 研究區域位置圖與樣區排列方式.....	19
圖 9. 本研究樹幹解析之取樣單位長度示意圖.....	21
圖 10. 以電動砂磨機進行砂磨作業.....	22
圖 11. 柳杉樣木之年輪變異情形.....	23
圖 12. 以 Richard's 生長模式擬合三種樹高預估公式之健全木樹高生長結果...29	
圖 13. 不同樹高估算公式建立之樹高生長模型參數 (β_0 、 β_1 、 β_2) 之信賴區間比較圖 (健全木).....	30
圖 14. 以 Richard's 生長模式擬合三種樹高預估公式之鼠害木樹高生長結果...33	
圖 15. 不同樹高估算公式建立之樹高生長模型參數 (β_0 、 β_1 、 β_2) 之信賴區間比較圖 (鼠害木).....	34
圖 16. 試驗區中 9 個樣區的鼠害木數量百分比.....	36
圖 17. 試驗區中柳杉木樹冠顏色之分布情形.....	38
圖 18. 鼠害第一個分岔高度與所估樹高之百分比.....	40
圖 19. 林分視覺化圖.....	41
圖 20. 鼠害木分岔處之樹心腐朽情形.....	46



表目次

表 1. 樹高估算法整理.....	12
表 2. 樹幹解析相關研究.....	15
表 3. 樣區調查結果之直徑級與樹高等級分配表.....	20
表 4. 樣木之直徑級與樹高等級分配表.....	20
表 5. 不同樹高公式建立的健康木樹高生長模型之模型摘要	27
表 6. 參數估計(β_0 、 β_1 、 β_2)與 95%信賴水準下的信賴區間與樹高生長回歸式 .	28
表 7. 不同樹高公式建立的鼠害木樹高生長模型之模型摘要	31
表 8. 參數估計(β_0 、 β_1 、 β_2)與 95%信賴水準下的信賴區間與樹高生長回歸式 .	32
表 9. 健康木與鼠害木之生長結果比較.....	35
表 10. 樣區內樹木以樹冠顏色分類及其數量百分比.....	37
表 11. 樣區內鼠害木以分岔數量分類及其數量百分比	39



第一章 研究動機與目的

松鼠危害對台灣林木之影響極為嚴重（郭寶章，1957；1984；王子定、郭寶章，1980）。林木受松鼠危害影響，輕則影響林木之發育，重則導致林木更容易遭受蟲害或真菌的入侵，使木材腐朽、降低木材之利用價值。遭受松鼠危害之林木的樹皮傷口若不能完整癒合，將導致樹幹局部停止生長或是畸形發育，樹梢部分受害則容易造成頂芽枯萎，導致樹高生長停止，大大降低造林之成果（郭寶章，1984）。目前影響溪頭地區樹高生長已知的干擾因子主要有兩項，其一為松鼠危害（郭寶章，1957；1984；朱紀實，1986；郭寶章等，1990；鄭景鵬等，2018），又以啃食頂芽造成紅頭柳杉（red-headed Japanese cedar）並導致樹高生長不良的情況為主。二是颱風危害，主因為強風導致林木之樹冠受損及風倒等情況（劉宣誠，1957；蔡輝，1967；1968；魏聰輝、簡文村，1989；鄭景鵬等，2018）。

以樹幹解析（stem analysis）進行森林測量調查已有百年之久的歷史（Mlodziansky, 1898；Dyer and Bailey, 1987；Kariuki, 2002）。所謂樹幹解析係從樹幹的基部位置到樹冠頂稍為止，隔一定距離截取一個橫切面，並透過橫切面之年輪預測林木直徑、樹高與材積的生長過程（陳朝圳、陳建璋，2015）。透過樹幹解析取得林木的生長資料，可以得知林木在樹錐度與材積上的變化（Dyer and Bailey, 1987）。將林木的生長資料擬合（fitting）樹高一年齡曲線，可以建立樹高生長與地位指數曲線（site index curves）（Carmean, 1972；Kilgour, 1982；Kariuki, 2002）。然而，透過樹幹解析取得之樹高生長資料，並不能正確計算出林木在某一個時間點的樹高，真實的樹高值會比圓盤斷面的高度更高一些，過去有許多專家學者以溫帶針葉樹種為研究對象試著解決這個問題（Carmean, 1972；Dyer and Bailey, 1987；Rayner, 1991）。有許多專家學者以樹幹解析方法重建林木的樹高生長過程，並提出許多的樹高預測公式，如 Graphic（1898），Graves（1906），Lenhart's（1972），Carmean's（1972），Newberry's（1978），Ratio（cited in Dyer




and Bailey, 1987), ISSA (1994), TARG (2002)。透過樹幹解析方法所獲得的斷面高度與年輪數量的資料，能使用在不同的樹高預測公式上，也有許多專家學者以 Richards' (1959) 生長模式擬合樹高-年齡 (height-age) 資料 (Newberry, 1978; Kilgour, 1982; Dyer and Bailey, 1987; Rayner, 1992; Kariuki, 2002)，藉由不同的樹高預測公式建立樹高生長模型。

郭寶章 (1984) 對鼠害造成造林木生長及木材損害之影響進行研究，研究結果顯示柳杉健康木的樹高生長明顯高於鼠害木。鄭景鵬等 (2018) 對溪頭地區的柳杉人工林最大樹高與林分樹冠受損預測進行研究，探討不同林木層級間的樹冠受損率，以了解人工林的林木生長狀況，研究結果顯示上層木的樹冠受損率較大。王子定、郭寶章 (1980) 研究台灣造林木遭松鼠危害之程度與樹齡的關係，研究結果顯示柳杉各齡級之危害率呈顯著差異，以幼齡木危害較輕、壯齡木較嚴重，而老齡木又趨輕微。林木受害之部分亦因樹齡而有所差異，幼齡木以樹幹下部為主，隨樹齡增加，受害部分逐漸上移至樹冠層。

本研究針對溪頭地區的鼠害問題，以本區域的柳杉 (*Cryptomeria japonica* (L. f.) D. Don) 人工林林木作為研究對象，研究之目的有二，第一為針對溪頭營林區 2 林班 49-1 號造林地中的柳杉進行樹幹解析，以不同的樹高預測公式 (Graves、Lenhart's、Carmean's) 建立柳杉健全木與鼠害木的樹高生長模型，並比較其在樹高生長上的差異，第二為建立鼠害快速目測評估機制，調查溪頭營林區 2 林班 49-1 號造林地的鼠害嚴重程度與鼠害空間分佈情形，並以林分視覺化系統 (Stand Visualization System, SVS) 展示試驗區松鼠危害之空間分佈。

第二章 相關理論與文獻回顧

第一節 樹幹解析之應用



樹幹解析 (stem analysis) 作為森林測量調查的方法已有百年之久 (Mlodziansky, 1898 ; Dyer and Bailey, 1987 ; Kariuki, 2002) , 樹幹解析流程包括先砍倒林木, 將側枝與主幹分離, 再於固定距離下進行圓盤取樣以重建林木過去的樹高與胸徑生長。從樹幹解析中, 可記錄每個圓盤直徑大小、其距離地面之高度以及年輪數量。樹幹解析生長資料可被用來建構林木之樹錐度 (tree taper) 與材積 (Dyer and Bailey, 1987) , 以及預測其樹高與胸徑逐年的生長量。不僅如此, 樹幹解析所得資料亦可使用於樹高生長曲線與地位指數的研究上。前人在樹幹解析的研究中普遍上會遇到一個問題為: 林木的年齡可以透過計算圓盤斷面的年輪數量得知, 但是每個圓盤斷面的高度並不同林木當年真實的樹高, 因此過去許多學者以溫帶針葉樹種為調查對象來探討這個問題 (Carmean, 1972 ; Dyer and Bailey, 1987 ; Rayner, 1991) 。鍾智昕 (2005) 在樹幹解析的研究中也指出這種差異的產生是因為樹幹解析圓盤取樣位置所在的高度並非林木的真實高度, 並且樹高的位置應在莖端頂芽生長停止處, 此處為每年頂芽生長停止而形成類似橫隔膜 (nodal diaphragm) 的組織, 即隱沒在樹幹裡的隱藏芽點 (hidden tip) 。因此, 許多的專家學者提出各式樹高預測公式, 預測樹幹中的隱藏芽點位置, 以找出林木不同年度的真實樹高。相較於設置永久樣區取樣調查需要長時間才能獲取足夠的資訊, 樹幹解析只需伐倒樹木、切割成圓盤、計算年輪數量以重建林木的樹高生長過程, 相較之下是更為快速及短時間內取得大量樹高生長資料的方法 (Subedi and Sharma, 2010) 。



第二節 樹幹解析作業流程

樹幹解析作業需經過選取樣木、分離主幹與枝條、於主幹上固定的距離下切割圓盤、將圓盤磨光並進行年輪計數等程序，才能進行後續年輪與樹高的分析研究，樹幹解析的示意圖如圖 1 所示。在前人的研究中無論是樣木選取條件、圓盤取樣的間距等等，於不同的文獻中皆有不一樣的作業規則。Dyer and Bailey

(1987) 之樹幹解析研究中，所挑選的樣木需符合以下四個條件：(1)樹齡至少 10 年以上、(2)以擇伐作業去除受損傷或沒有經濟價值的林木、(3)未經過疏伐和施肥，以及(4)未受過嚴重損傷比如蟲害、病害或氣候危害等，其樣木以 5 ft 為單位進行切割。於 Fabbio *et al.* (1994) 之研究中，選取自西元 1963 年皆伐後、未經過疏伐與修枝作業的林地中之未受任何損傷的歐洲黑松 (*Pinus nigra* Arn.) 作為樣木，以每 50 cm 為單位進行圓盤取樣，每個圓盤厚度約 3 cm。Kariuki (2002) 之研究中，從林分中以隨機取樣方式挑選樣木，在樹幹基部與離地 1.5 m 處噴漆後，伐倒樹木並以 1.5 m 為單位進行圓盤取樣，直到林木直徑小於 5 cm 為止，所切割下來的圓盤經過風乾、打磨、拋光直到年輪清楚浮現。Subedi and Sharma

(2010) 在樹幹解析研究中，挑選外表沒有畸形的林木為樣木，像是主幹分岔、受損或是頂芽受損、枯萎等等，在離地 0.15 m、0.5 m、0.9 m、1.3 m 處進行圓盤取樣，另外，從 1.3 m 到樹頂之間，則以此段樹木長度的 5% 為單位進行取樣。

鍾智昕 (2005) 之研究中，挑選無分岔、無頂折、無嚴重損傷與蟲害者之林木為樣木，而後進行砍伐與分段，自 0.3 m 處開始，每隔 1 m 分段並切割為厚度 10 cm 的圓盤，待圓盤風乾後再施以砂磨處理，當砂磨作業完成後再進行年輪計數。

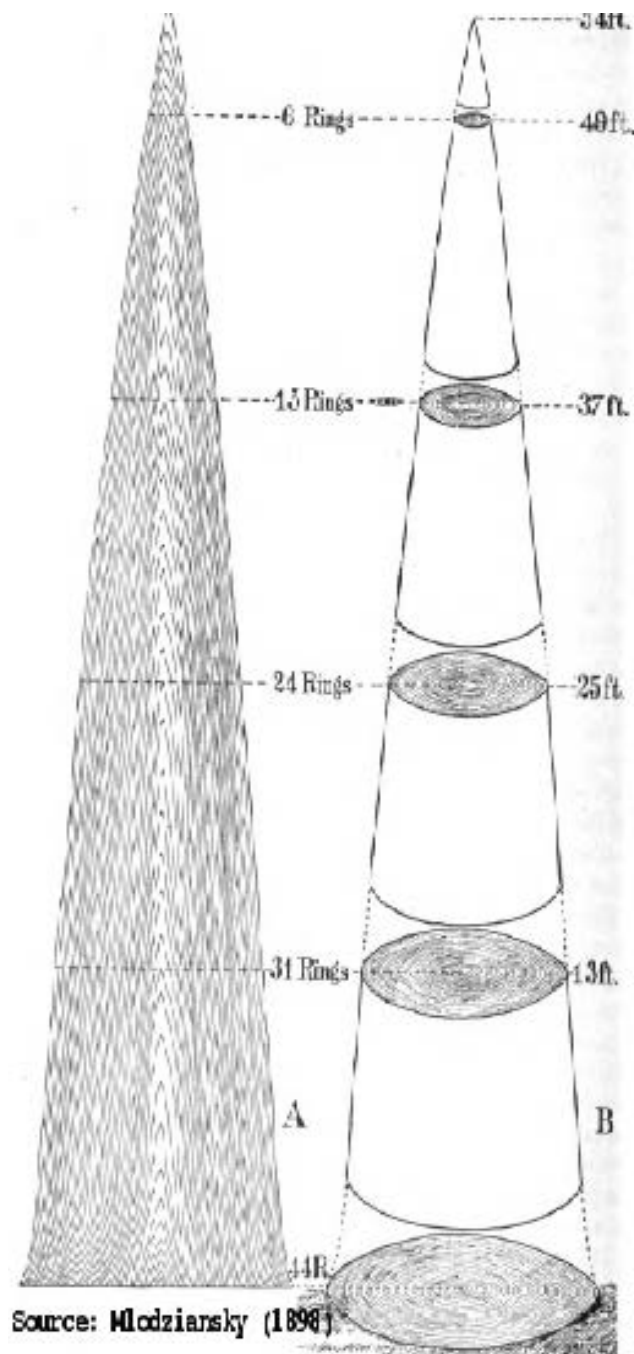


圖 1. 樹幹解析示意圖 (引自 Salas and Gregoire, 2013)



第三節 以樹幹解析重建樹高生長之估算方法

自 19 世紀末以來，樹幹解析的技術已成為森林測量工作中不可缺的一部分 (Mlodziansky, 1998 ; Dyer and Bailey, 1987)，藉由胸徑與樹高生長的變化，可以得知林木的生長歷程，並建立樹高生長曲線。然而，藉由樹幹解析預測樹高生長存在著一個問題，經由計算樹幹解析圓盤上的年輪數量可以得知樹木於該圓盤之年齡，但是真實的樹高位置通常高於圓盤斷面處，位於最內圈年輪延伸的隱藏芽點，換句話說，圓盤斷面的高度加上到隱藏芽點的長度才是真實的樹高，如圖 2 所示。因此，為了克服此問題，許多專家學者也提出了各式根據圓盤資料的樹高預測公式，以估算隱藏芽點的位置，以重建樹高生長曲線。

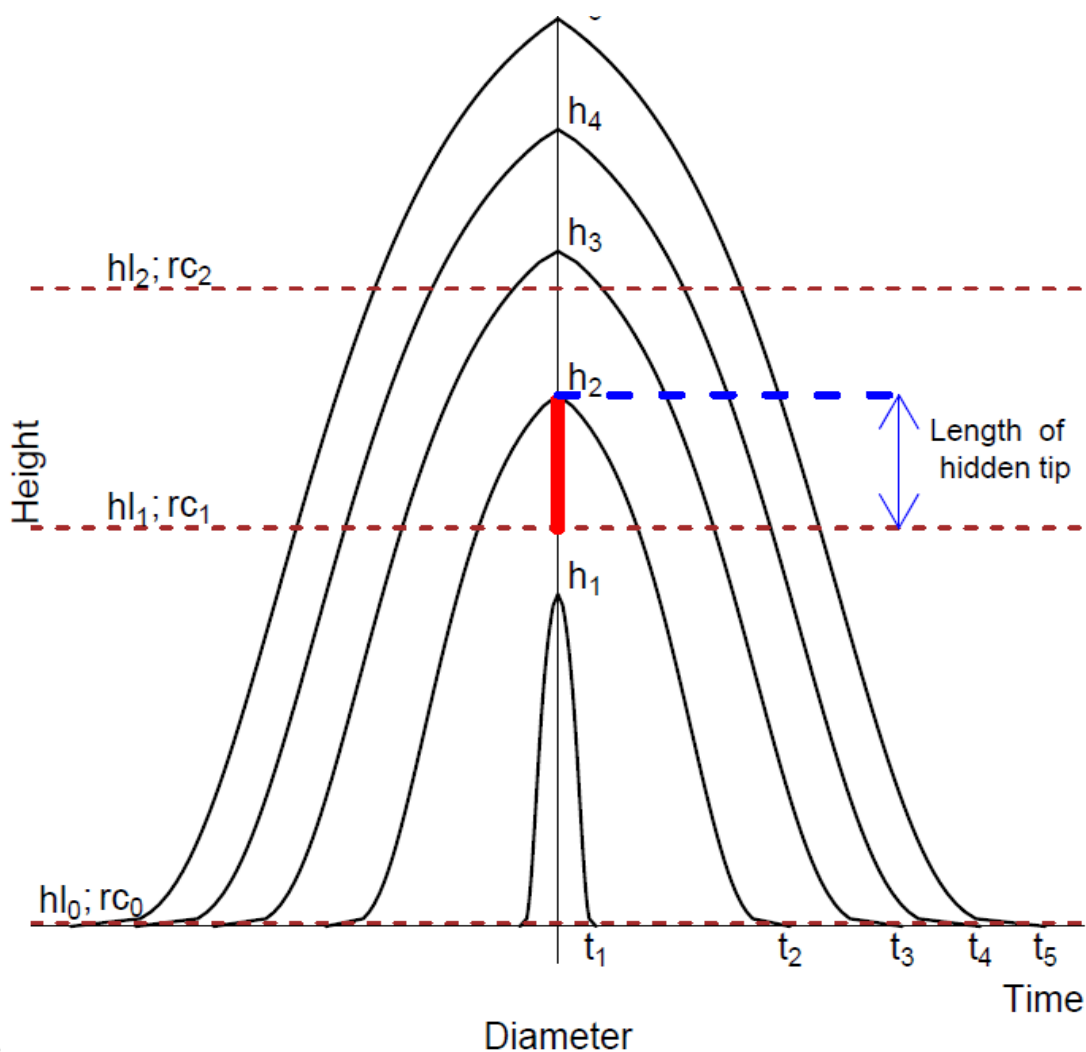


圖 2. 樹幹解析取樣位置與隱藏芽點示意圖 (引自 Salas and Gregoire, 2013)



前人研究提出之樹高估算方法整理如下，樹幹解析將樣木切割成許多段並取出圓盤，並以肉眼觀察或是影像數化等方式計算年輪總數，在樹高估算方法中，每段取下的圓盤， i 表示其圓盤的順序、 j 表示由內而外的第幾層年輪、 r 為年輪的數量，舉例來說： r_i 為第 i 個圓盤上年輪的總數。以下為其它符號的定義：
 n ：樹齡； h_i ：第 i 個圓盤的高度； $t_{ij} = n - r_i + j$ ，第 i 個圓盤上第 j 層年輪對應的樹齡； H_{ij} = 第 t_{ij} 年的樹高（圖 3）。

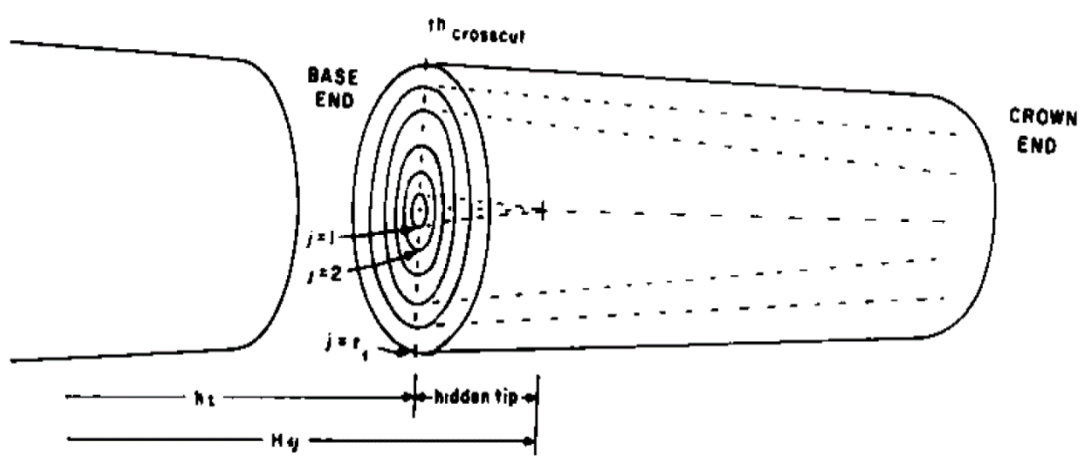


圖 3. 隱藏芽點的位置與樹高預測公式中所使用之符號（引自 Rayner, 1991）

以下為主要 8 個樹高估算公式：

一、Graphic

Mlodziansky (1898) 提出這個方法，預估樹木最內圈年輪對應的高度為樹幹解析圓盤斷面的高度如下。

$$H_{i1} = h_i \quad \dots\dots\dots \text{公式 1}$$

二、Graves

Graves (1906) 提出此方法，並假設樹高每年之生長量相同，且隱藏芽點位於連續兩個圓盤取樣位置之中，以數學公式表示如下。

$$H_{ij} = h_i + j(h_{i+1} - h_i)/(r_i - r_{i+1}) \quad \dots\dots\dots \text{公式 2}$$

三、Lenhart's

Lenhart's (1972) 將 Graves 之估算方法做了微調，Lenhart's 之公式假設樹幹



解析後，每段樹幹的隱藏芽點位置與圓盤斷面的距離是相同的。

$$H_{ij} = h_i + j(h_{i+1} - h_i)/(r_i - r_{i+1} + 1) \dots\dots\dots \text{公式 3}$$

四、Carmean's

Carmean's (1972) 方法有兩項假設：(1)每年樹高之生長量相同，及(2)假設樹幹解析的斷面位置為樹高年生長之中點。以數學公式表示如下。

$$H_{ij} = h_i + (h_{i+1} - h_i)/[2(r_i - r_{i+1})] + (j - 1)(h_{i+1} - h_i)/(r_i - r_{i+1}) \dots\dots\dots \text{公式 4}$$

五、Newberry's

Newberry's (1978) 使用相似三角形的原理預測樹木與年輪對應的樹高，以樹心至年輪之距離與樹幹解析斷面至年輪對應之樹高的距離計算正切值，以數學公式表示如下。 α ：樹心、年輪的半徑和樹高三個點所構成的兩條邊的夾角。 w_j ：從樹幹中心到第 j 圈年輪的半徑。

$$H_{ij} = h_i + (\text{Tan}\alpha)w_j \dots\dots\dots \text{公式 5}$$

六、Ratio

Ratio (cited in Dyer and Bailey, 1987)，這個方法使用不同年輪半徑間的比率，預測樹幹解析中包含樹頂的圓盤中任一圈年輪所對應的樹高，可用以下數學公式表示。 w_j = 第 j 圈年輪的半徑。 $j = 1, 2, \dots, k$ 。 w_k = 圓盤之半徑。 k = 年輪總數。

$$H_{ij} = h_i + (h_{i+1} - h_i)(w_j/w_k) \dots\dots\dots \text{公式 6}$$

七、ISSA

此方法由 Fabbio *et al.* (1994) 提出，於樹幹解析後進行年輪計數，再將不同的圓盤進行前後比對來預測實際的樹高，此法按順序計算三個不同斷面的高度與連續的圓盤年輪總數的二次差值，如圖 4 所示。 D'' = 不同圓盤間年輪數量的差。 e_i = 樹木在第 i 個圓盤斷面時的樹齡。以下為其數學公式：

$$D'' = (r_{i-1} - r_i) - (r_i - r_{i+1}) \dots\dots\dots \text{公式 7}$$

$$e_i = n - r_i + 1/(2 + D'') \quad \text{假設 } D'' > 0 \dots\dots\dots \text{公式 8}$$



$$e_i = n - r_i + 1 - 1/(2 - D'') \quad \text{假設 } D'' < 0 \quad \dots\dots\dots \text{公式 9}$$

當 $D'' = 0$ 時，表示樹高生長是固定的。不同樹齡的樹高可以經由線性差值法計算。

$$H_{ij} = h_i + (t_{ij} - e_i)(h_{i+1} - h_i)/(e_{i+1} - e_i) \quad \dots\dots\dots \text{公式 10}$$

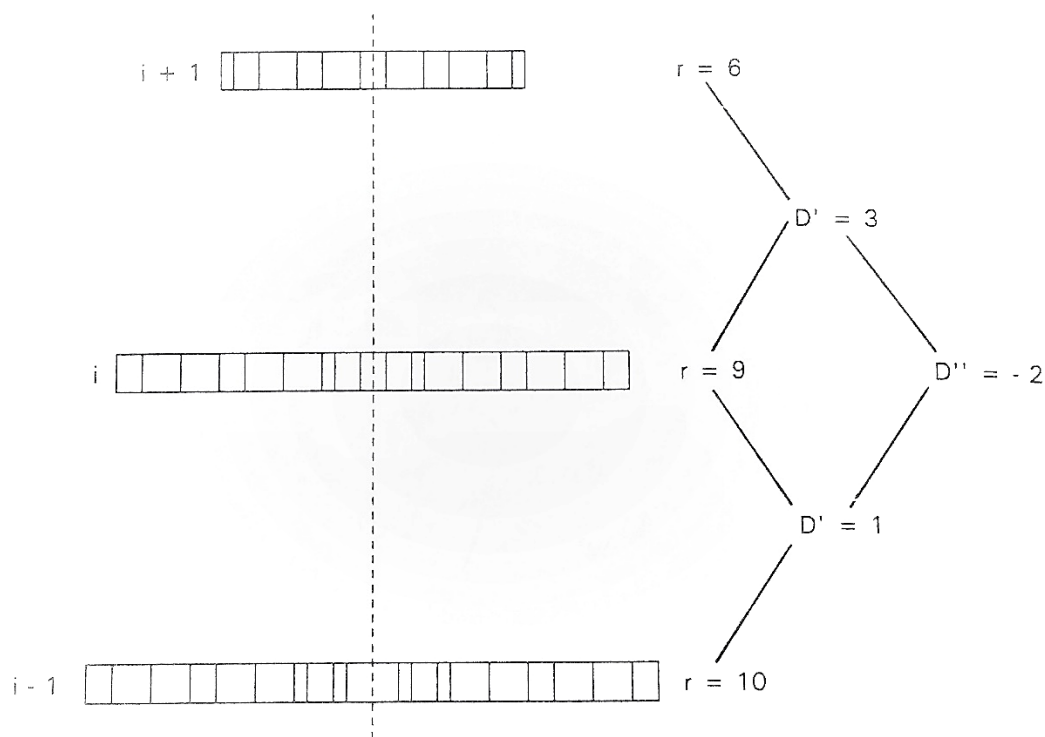


圖 4. 使用 ISSA 方法計算三個連續的圓盤斷面年輪數量的二次差值 (引自 Fabbio *et al.*, 1994)。

八、TARG

Kariuki (2002) 在研究中探討 Tree annual radial growth (TARG) 方法是否比其它樹高估算公式更為精確，TARG 方法將不同斷面的樹高生長分成 x 和 y 兩個部分，前者為斷面之下的樹高生長，後者為斷面之上的樹高生長 (圖 5)，此法假設樹高年生長量與直徑年生長量成正比。L = 樹幹解析圓盤的長度； W_k = 第 k 層年輪的半徑； W_j = 第 j 層年輪的半徑。

$$x = L((W_{k+1} - W_k)/W_{k+1}) \quad \dots\dots\dots \text{公式 11}$$

將 $W_{k+1} - W_k$ 定義為 ΔW 。

$$x = L(\Delta W/W_{k+1}) \dots\dots\dots \text{公式 12}$$

$L-x$ 表示在樹幹解析斷面之上與 W_k 對應的樹高生長量， ΔL 表示樹幹解析取下的圓盤中最內層的年輪所對應的樹高生長量。

$$\Delta L = W_j(L - L(\Delta W/W_{k+1}))/W_k \dots\dots\dots \text{公式 13}$$

綜合 12 式與 13 式，可得公式 14。

$$\Delta L = W_j(L - x)/W_k \dots\dots\dots \text{公式 14}$$

樹幹解析取下的圓盤長度為 $(h_{i+1} - h_i)$ ，樹高可用以下公式表示。

$$H_{ij} = h_i + W_j(L - x)/W_k$$

$$H_{ij} = h_i + \Delta L \dots\dots\dots \text{公式 15}$$



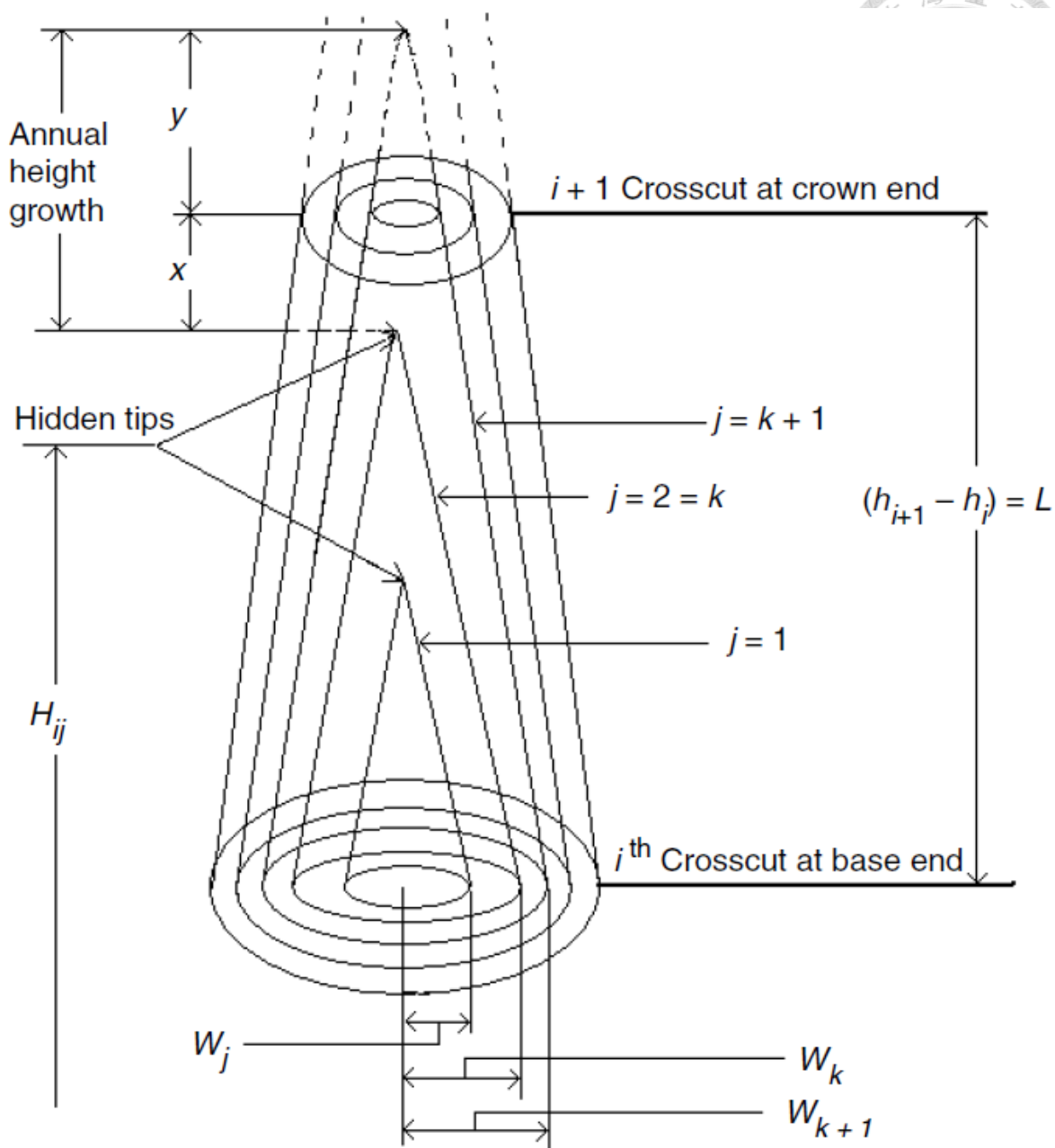


圖 5. 以 TARG 方法估算樹高之示意圖與公式符號 (引自 Kariuki, 2002)。

本研究將前人所提出的樹高估算法整理如下（表 1）。


表 1. 樹高估算法整理

方法	公式	符號解釋
Graphic	$H_{i1} = h_i$	n = 總樹齡。
Graves (1906)	$H_{ij} = h_i + j(h_{i+1} - h_i) / (r_i - r_{i+1})$	i = 圓盤次序。 $j = 1, 2, 3, \dots, r_i$, 年輪由內而外次序。
Lenhart's (1972)	$H_{ij} = h_i + j(h_{i+1} - h_i) / (r_i - r_{i+1} + 1)$	r_i = 第 i 個圓盤斷面的年輪數量。 $t_{ij} = n - r_i + j$ 。第 i 個圓盤斷面中第 j 圈年輪表示之樹齡。
Carmean's (1972)	$H_{ij} = h_i + (h_{i+1} - h_i) / [2(r_i - r_{i+1})] + (j - 1)(h_{i+1} - h_i) / (r_i - r_{i+1})$	H_{ij} = 樹齡於 t_{ij} 時的估算樹高。 h_i = 第 i 個圓盤斷面的高度。
Newberry's (1978)	$H_{ij} = h_i + (\tan \alpha) w_j$	α = 樹心、年輪的半徑和樹高三個點所構成的兩條邊的夾角。 w_j : 從樹心到第 j 圈年輪的半徑。
Ratio (1987)	$H_{ij} = h_i + (h_{i+1} - h_i)(w_j / w_k)$	w_j = 第 j 圈年輪的半徑。 w_k = 第 k 圈年輪的半徑。 k = 圓盤年輪數量。
ISSA (1994)	$H_{ij} = h_i + (t_{ij} - e_i)(h_{i+1} - h_i) / (e_{i+1} - e_i)$	e_i = 樹木於第 i 個圓盤斷面的樹齡。
TARG (2002)	$H_{ij} = h_i + W_j(L - x) / W_k$ $H_{ij} = h_i + \Delta L$	x = 斷面之下的樹高生長。 L = 樹幹解析圓盤的長度。 W_k = 第 k 層年輪的半徑。 W_j = 第 j 層年輪的半徑。



第四節 樹高生長估算方法相關研究

以樹幹解析法預估樹木在不同樹齡之高度是許多研究者所遇到的挑戰 (Carmean's, 1972; Fabbio *et al.*, 1994; Subedi and Sharma, 2010)。為此，也不少研究者提出了許多不同的估算方法為了解樹高與年齡的關係，以預測樹高隨時間的變化並建立樹高生長模型，檢驗不同的樹高預估公式之間的預估效果。相關研究結果整理如下 (表 2)。Dyer and Bailey (1987) 將 28 棵火炬松 (*Pinus taeda* L.) 進行樹幹解析，並套用以下六種預測樹高的公式，分別是 Mlodziansky 於 1898 年提出的 Graphic 公式、Graves (1906)、Lenhart's (1972)、Carmean's (1972)、Newberry's (1978) 以及 Brister and Schultz 所提出的 Ratio 公式 (cited by Dyer and Bailey, 1987)，並探討這些公式之間的準確度，研究結果顯示最準確的是 Carmean's 公式，而 Lenhart's 公式高估了樹幹解析最上端那段圓盤的樹高，Graphic 公式則是嚴重低估了樹高，Ratio 和 Graves 公式將最上端圓盤的高度視為樹高，因此，研究結論指出 Carmean's 公式有比較高的準確度，另 Lenhart's 與 Newberry's 公式也達到一定的準確度。Rayner (1991) 使用 30 棵尤加利桉 (*Eucalyptus diversicolor* F. Muell) 進行樹幹解析並套用以下六種公式，分別是 Graphic、Graves、Lenhart's、Carmean's、Newberry's、Ratio，比較這些公式預估樹高之間的準確度，其研究結果顯示 Carmean's 和 Lenhart's 公式預估的樹高最為準確，且與真實樹高並無顯著差異。如上所言，Fabbio *et al.* (1994) 提出估算樹高的方法—ISSA，所分析的材料為自 1963 年皆伐後未經過疏伐與修枝的林分的 27 棵歐洲黑松 (*Pinus nigra* Arn.)，資料分析時比較三種估算公式：Carmean's, Lenhart's, ISSA，另也比較在三種不同取樣長度 (50 cm、100 cm、150 cm) 之下的精確度，其研究結果顯示當取樣單位長度越短時，ISSA 公式比起 Carmean's、Lenhart's 公式預估樹高生長有更好的精確度，另外，如當圓盤取樣單位長度與樹高年生長量接近時，樹高估算更為精確。Kariuki (2002) 在其研究中提出 TARG 公式是一種樹幹解析後，以年輪寬度預估樹高生長的方法，此研究之調查地區位



於澳大利亞的 New South Wales 和 Victoria，對四棵 *Eucalyptus fastigata* 進行樹幹解析，使用公式如下：Carmean's、Lenhart's、Newberry's、ISSA 與 TARG 公式並以兩種不同取樣長度單位（1.5、3 m）進行分析，結果顯示 Carmean's 與 Lenhart's 公式在 1.5 m 的取樣單位之下有一定的準確度，然而預估效果最佳的是 TARG 公式，無論是在 1.5 m 或是 3 m 的取樣長度單位之下，但是由於 TARG 公式必需計算年輪的寬度數據，比起 Carmean's 與 Lenhart's 公式，使用 TARG 公式分析是較花費時間與人力成本的方法。

Subedi and Sharma (2010) 使用樹幹解析針對六種預測樹高的公式探討它們的準確度與適用性，使用的公式如下：Graves、Lenhart's、Carmean's、Newberry's、Ratio、Issa，研究中取樣的樹種為位於加拿大安大略省之黑雲杉 (*Picea mariana* [Mill] B.S.P) 和北美短葉松 (*Pinus banksiana* Lamb.) 位於加拿大安大略省的 Canada's Boreal forest，研究結果顯示 Graves 和 Ratio 公式預估黑雲杉與北美短葉松林分的優勢木與次優勢木樹高的準確度較其它的公式高，當圓盤取樣總數越多時，樹高預測之準確度越高。然而，究竟是否有哪一種樹高估算方法普遍上是較佳的?這個問題取決於預測樹高所需要的數據為何，在其研究中 Graves 和 Ratio 公式預估樹高有較佳的準確度，但若比較兩種不同公式所需要的數據，Graves 公式在數據收集上較為簡單且有效率。

表 2. 樹幹解析相關研究

研究者/年代	選用樹種	使用的樹高估算公式	研究結果
Dyer, M. E. and Bailey, R. L. (1987)	火炬松 (<i>Pinus taeda</i> L.)	Graves、Graphic、 Lenhart's、Carmean's、 Newberry's、Ratio	Carmean's 公式的 預測結果最準確， Lenhart's 公式與 Newberry's 次之，但仍 有一定準確度。
Rayner, M. E. (1991)	加利桉 (<i>Eucalyptus diversicolor</i> F. Muell)	Graves、Graphic、 Lenhart's、Carmean's、 Newberry's、Ratio	研究結果顯示 Carmean's 和 Lenhart's 公式預估的樹高最為 準確與真實樹高並無 顯著差異。
Fabbio <i>et al.</i> (1994)	歐洲黑松 (<i>Pinus nigra</i> Arn.)	Lenhart's、 Carmean's、 ISSA	研究結果顯示當 取樣單位長度越短 時，ISSA 公式比起 Carmean's、Lenhart's 公式預估樹高生長有 更好的精確度。
Kariuki, M. (2008)	高桉 (<i>Eucalyptus fastigata</i>)	Lenhart's、Carmean's、 Newberry's、ISSA、 TARG	研究結果顯示 Carmean's 與 Lenhart's 公式在 1.5 m 的取樣長 度單位下有一定的準 確度，但預估效果最 佳的是 TARG 公式。
Subedi, N. and Sharma, M (2010)	黑雲杉 (<i>Picea mariana</i> [Mill] B.S.P)、 北美短葉松 (<i>Pinus banksiana</i> Lamb.)	Graves、Lenhart's、 Carmean's、 Newberry's、Ratio、 ISSA	研究結果顯示 Graves 和 Ratio 公式預 估黑雲杉與北美短葉 松林分的優勢木與次 優勢木樹高的準確度 較其它的公式高，當 圓盤取樣總數越多 時，樹高的預測越準 確。



第五節 松鼠危害對於林木生長之影響

松鼠危害台灣林木的情形極為嚴重，能造成造林木枯萎或枯死，損壞之林木更可能被微生物入侵，造成造林木腐朽，進而降低木材之利用價值，郭寶章（1984）比較柳杉（*Cryptomeria japonica*）與杉木（*Cunninghamia lanceolata*）健全木與松鼠危害木間的生長量，並以樹幹解析結果分析受害林木之實際年齡、傷口數，評估松鼠危害之程度。松鼠危害林木之部分，包括毬果、花芽、嫩枝、枝條與樹幹等，尤其以樹幹較為嚴重，樹幹之為害以撕剝樹皮為主，造成塊狀、環狀、條狀的傷口（郭寶章，1957；1984；Backman, 1971；Eiberle and Ziegler, 1967；Irving, 1963）。松鼠撕咬樹皮深達形成層，導致傷口難以癒合，而影響林木水分與養分的運輸，嚴重地影響林木健康。Ryu（1969）提到林木之樹皮遭受松鼠撕咬後極易引起二次傷害，二次傷害為樹皮遭受傷害後，傷口遭病菌侵入之危害。郭寶章（1984）對鼠害造成造林木生長及木材損害進行研究，研究結果顯示柳杉造林木遭松鼠危害後，健全木的胸徑生長遠高於受害嚴重之受害木，且在10年後，生長之差距更大，杉木則不甚明顯。健全木之樹高生長趨勢亦與胸徑生長類似，健全木之樹高生長亦遠高於受害木之樹高生長，表示松鼠危害能降低柳杉造林木之樹高生長，杉木的結果則不甚明顯。鼠害對於材積生長之影響極為明顯，健全木的材積生長遠高於受害木，且隨著年齡增加，生長差異越大，杉木造林木受到鼠害之後，材積生長仍有影響，但不若柳杉明顯。鄭景鵬等（2018）指出影響溪頭的柳杉樹高的干擾因子，其一為松鼠危害（郭寶章，1957；朱紀實，1986；郭寶章等，1990；鄭景鵬等，2018），以松鼠啃食柳杉頂芽造成紅頭柳杉的狀況也導致了樹高明顯地縮減。



第三章 材料與研究方法

第一節 柳杉的樹種介紹

柳杉屬於杉科 (Taxodiaceae) 柳杉屬 (*Cryptomeria*)，英文名稱為 Japanese Cedar 或俗稱 sugi，原產於日本及中國大陸，於日治時期引入台灣，柳杉分布於全島中海拔 1000~2000 公尺，為中海拔最主要的造林樹種，幹皮呈紅褐色，縱向溝裂，長條片狀，可作為建築、家具用材 (劉業經、呂福原、歐辰雄，1994)。

第二節 研究區域概況

本研究試驗地位在隸屬於國立臺灣大學生物資源暨農學院實驗林管理處下的溪頭營林區第 2 林班 49-1 號造林地之中，全區面積 1.70 公頃。林區內樹種以柳杉為主，亦有少數的闊葉樹、攀緣植物、蕨類及地被植物等，研究區域位於海拔 1250 公尺左右，地形複雜且陡峭，具豐富之生物資源。此區氣候終年潮濕有霧、無缺水現象，月均溫變動範圍在 11.0~20.8°C，年均溫為 16.6°C，平均年降雨量 2,635.18 mm，依桑士偉 (C. Warren Thornthwaite) 氣候分類屬 AB 'ra' 型，即溫暖重溼氣候型 (溪頭自然教育園區官方網站，2008)。溪頭的柳杉林土壤 pH 值介於 3.6 - 4.8 之間，屬於極強酸性土壤 (extreme acid, pH 3.5 - 4.4)，含有大量的有機質，分解後的有機酸與有機鹽類，能補充土壤中的氫離子含量 (黃育歆，2014)。



第三節 研究方法

壹、鼠害調查方法

造林木遭受松鼠危害，將導致樹幹局部停止生長，或是樹幹畸形膨大發育，頂芽若受害易造成頂芽枯萎，使樹高生長停止，影響林木之發育（郭寶章，1984）。當林木遭受鼠害後，容易導致紅頭柳杉的情形發生，本研究在野外調查中以肉眼進行判釋，若柳杉樹冠呈現紅色或灰色時，表示受松鼠危害導致頂芽受損的可能性極大（圖 6）。松鼠危害亦會導致樹幹的畸形膨大生長及樹幹分岔的產生，鼠害木的樹幹分岔通常呈現如同鳥籠狀的 U 型分岔（圖 7）。因此，以樹幹分岔形狀是否為 U 型分岔搭配樹冠顏色，作為樣木是否為鼠害木或健全木之判斷依據。

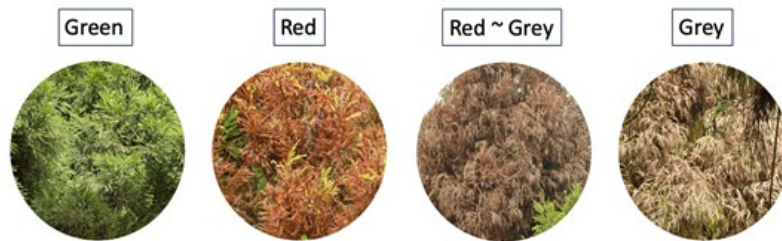


圖 6. 鼠害對於樹冠顏色變化之影響



圖 7. 鼠害導致樹木主幹呈現 U 型分岔



貳、林分調查與樣區設置

研究地點位於臺大實驗林溪頭營林區第 2 林班 49-1 號造林地，東經 $122^{\circ}59'27.373''$ ，北緯 $23^{\circ}39'14.838''$ 。海拔高約 1200 – 1300 m，造林地樹種以柳杉為主，栽植面積為 1.70 ha，此區為強度疏伐作業之預定樣區，研究區域位置圖與樣區排列方式如圖 8 所示。樣區設置標準作業流程：

1. 以 ArcGIS 軟體讀取臺大實驗林提供的 49-1 號造林地之.shp 檔，並進行編輯，劃設 9 個 30 m × 30 m 之樣區。
2. 在樣區中心設立界樁，並以樣區中心為基準設置圓形樣區進行取樣，圓形樣區半徑為 11.28 m，每個圓形樣區面積為 400 m²。
3. 每個樣區的邊界附近，以白色粉筆標示出界木。
4. 紀錄每個樣區中樣木之樹高、胸徑、枝下高與分岔數量、樹冠顏色與樹幹分岔高度，以了解造林地的林分結構狀態。

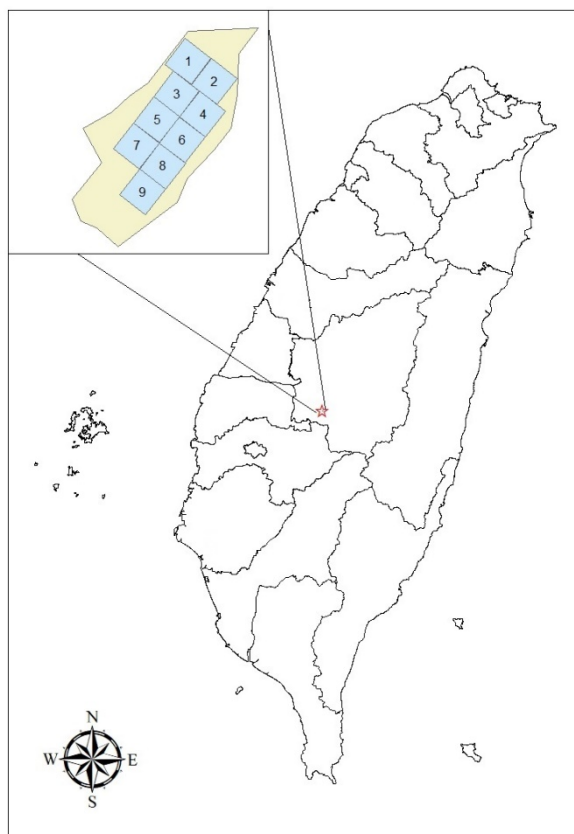


圖 8. 研究區域位置圖與樣區排列方式



參、樣木選取與圓盤取樣

本研究中 9 個樣區經調查後共計 255 株柳杉，其中 50 株為健全木、205 株為鼠害木。依胸高直徑大小 5 cm 為一個徑級，總共有 9 個徑級；樹高以 5 m 為單位，劃分為 5 個等級，製作直徑級與樹高等級分配表（表 3）。

表 3. 樣區調查結果之直徑級與樹高等級分配表

Diameter class (cm)	Height class (m)					Totals
	<=10	15	20	25	30	
<=15	1					1
20		3	6	2	1	12
25		4	34	15		53
30			46	30		76
35		1	18	35		54
40			9	17	4	30
45			6	9	3	18
50			1	3	3	7
55				3	1	4
Totals	1	8	120	114	12	255

在 9 個樣區之中，從每個樣區中各挑選至少一株鼠害木與一株健全木做為樣木，共 24 株，樣木之直徑級與樹高等級分配表如表 4 所示。此經過挑選之 24 株樣木於現場進行樹幹解析作業。

表 4. 樣木之直徑級與樹高等級分配表

Diameter class (cm)	Height class (m)					Totals
	<=10	15	20	25	30	
<=15						
20						
25			1	2		3
30			4	2		6
35				2		2
40			3	3	1	7
45				3	2	5
50						
55				1		1
Totals			8	13	3	24

樹幹解析圓盤製作之流程，基本上參考 Kershaw *et al.* (2016) 書中進行樹幹解析之步驟，並依照本研究欲探討之面向微調，本研究所制定之樹幹解析標準作業流程如下：

1. 樣木伐倒前，於樣木北面與南面噴上黃色與藍色的漆作為標示。
2. 樣木距離地面 0.3 m 處伐倒，伐倒後，從樹木基部開始分段，每隔 1 m 噴上紅漆作為標示，直到樹幹直徑小於 3 cm 為止，紅漆部分為樣木分段、截取圓盤之位置，截取之圓盤厚度約為 5 cm 左右（圖 9）。
3. 若樣木分岔，將樣木分岔處噴上紅漆，截取分岔處之圓盤。另外，並在分岔處及前一個圓盤取樣位置之中點，噴上紅漆、再次截取一個圓盤。
4. 樣木若有分岔，選擇分岔後直徑最大的樹幹，繼續進行圓盤取樣，至樹幹直徑小於 3 cm 為止。

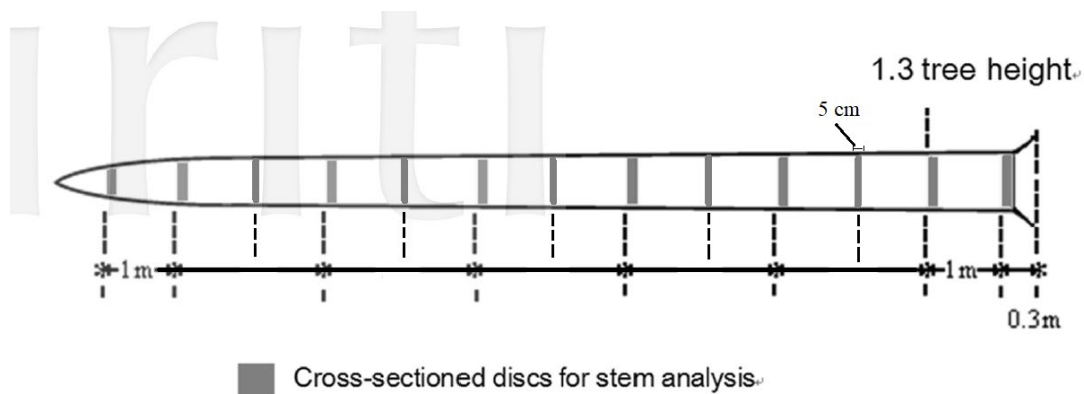


圖 9. 本研究樹幹解析之取樣單位長度示意圖（修改自謝依達等，2013）



肆、圓盤處理與年輪計算

將樣木伐倒、截取圓盤後，於砍伐現場將圓盤根端標記樣區號碼、樹號、圓盤編號與段木長度，以防過多圓盤混雜、導致無法區分之情形發生。而後將圓盤裝袋運送至臺灣大學森林環境暨資源學系館，將所有圓盤擺放整齊、使其自然風乾約 1 個月左右，待圓盤風乾後送至臺灣大學森林環境暨資源學系林產館，以電動砂磨機將欲進行樹高生長重建的目標樣木之圓盤整平、拋光後，使年輪清晰浮現以利判讀、計算年輪數量（圖 10）。



圖 10. 以電動砂磨機進行砂磨作業

通常樹木每年會生長一個完整的年輪，但年輪形成有時會有變異產生，因此，在進行年輪計數時，需特別注意年輪變異的情況，年輪變異的情況有以下幾種情形：（一）年輪界限不明顯：因早材與晚材顏色和密度差異不大，使年輪不易辨識、（二）不連續年輪：被壓木或是老年的樹木，部分年輪中斷，由於生長

荷爾蒙不足，導致形成層生長停止，使該處年輪當年無細胞分裂、(三) 偽年輪 (false annual ring)：嚴寒氣候或蟲害等因素，導致樹木生長暫時停止，造成一個年輪中含有一個以上的輪紋、(四) 丟失輪 (missing)：在樹幹基部有部分年輪無法辨識，可能因為形成層當年尚未完全分化，或是形成之木材不易區分年輪界限、(五) 霜輪 (frost ring)：樹木生長期間，若遇嚴重霜害，會造成木質細胞生長畸形 (馮豐隆、詹明勳，2005)。

本研究中所挑選的柳杉樣木之樹幹解析圓盤可能因為鼠害對樹木生長造成影響而有年輪變異的情形發生，故推斷其年輪變異之情形屬於偽年輪 (圖 11)。本研究進行年輪計數之作法如下：每一個樹幹解析圓盤以每 5 個完整年輪為單位，以鉛筆在圓盤上標記，找出從樹心至樹皮最遠的距離作為半徑，並用肉眼計算其年輪總數，若遇年輪變異之情形，則對照變異部分以外仍能辨識出明顯年輪的部分接續計算並記錄年輪總數於 Excel 表格中。



圖 11. 柳杉樣木之年輪變異情形



伍、樹高估算方法重建樹高生長

本研究中以各式樹高估算方法重建樹高生長有以下兩項重點：(一) 使用 3 種樹高估算方法預測樣木在不同年齡時的樹高，從眾多的估算方法中，本研究挑選的方法為 Graves (公式 2)、Lenhart's (公式 3) 及 Carmean's (公式 4) 方法，這 3 種樹高估算方法皆以圓盤斷面高度與年輪數量來推估樹木在特定年齡時的真實高度、(二) 根據 Graves、Lenhart's 及 Carmean's 樹高估算方法估算出之樹高值，擬和 Richards' (1959) 生長模式以重建樹高生長趨勢。過去許多專家學者皆以 Richards' 生長模式擬和樹高與年齡的生長資料，建立樹高生長模型 (Newberry, 1978; Kilgour, 1982; Dyer and Bailey, 1987; Rayner, 1992; Kariuki, 2008)。

本研究從 24 株進行樹幹解析的樣木中剔除因搬運過程導致整體圓盤毀損較嚴重的樣木與整體圓盤中心腐朽程度較嚴重之樣木後，選取其中整體圓盤毀損程度低的 4 株樣木，包括兩株柳杉健全木與兩株柳杉鼠害木，將圓盤拋光、整平，使年輪清晰浮現後，計算年輪數量與斷面高度並用 Graves、Lenhart's 及 Carmean's 樹高估算方法估算每株樹對應其年齡的樹高值，根據估算所得之樹高值以 Richards' 生長模式 (公式 16) 建立柳杉健全木與柳杉鼠害木之樹高生長模型。

本研究採用 Richards' 生長模式，其特性為參數簡單、曲線具彈性。因其特性，Richards' 生長模式能用於描述林木生長變化。楊榮啟、林文亮 (2003) 描述林木生長變化，幼壯期一開始生長緩慢，以後開始加速生長，成熟期開始從加速生長漸趨穩定生長，中間部份幾乎呈直線，而後減速以致衰老期，衰老期為減速生長，至一定大小後，生長曲線接近漸近線。Richards' 生長模式為：

$$H = \beta_0(1-\exp(-\beta_1 A))^{\beta_2} \quad \dots\dots\dots \text{公式 16}$$

$$H' = \beta_0 \beta_1 \beta_2 \exp(-\beta_1 A)(1-\exp(-\beta_1 A))^{\beta_2-1} \quad \dots\dots\dots \text{公式 17}$$

$$H'' = -\beta_0(\beta_1)^2 \beta_2 \exp(-\beta_1 A)(1-\exp(-\beta_1 A))^{\beta_2-2}(1-\beta_2 \exp(-\beta_1 A)) \quad \dots\dots\dots \text{公式 18}$$

H：生長量。 β_0 ：漸進線值。 β_1 ：生長速率參數。 β_2 ：同化作用冪次指數。A：時



間。H'：一次微分式。H''：二次微分式。

鄭景鵬等（2014）於樹高曲線之研究中提到樹高生長曲線中的反曲點（inflection point）能用來描述樹高生長速率在何年達到最大值以及生長率變化，而 Richard's 生長模式的 β_1 值能表示生長速率參數特性，將公式 16 以 H 對 A 微分得公式 17（一次微分式）及公式 18（二次微分式），將公式 17 帶入時間 A，得 $H'(A)$ 為第 A 年樹高生長率， $H'(A)$ 最大值為曲線反曲點，計算公式 17 之 $y' = \beta_1$ 時為何年，表示在該林齡時樹高進入生長停滯期。當 $H'' = 0$ ，解公式 18 求出曲線反曲點座標 $(A_{\text{反曲點}}, H_{\text{反曲點}})$ ， $A_{\text{反曲點}} = \frac{\ln(\frac{1}{\beta_2})}{-\beta_1}$ ， $H_{\text{反曲點}} = \beta_0 \left(1 - \frac{1}{\beta_2}\right)^{\beta_2}$ 。

本研究使用統計分析軟體-R 語言建立柳杉樹高生長模型，以非線性最小平方法（Nonlinear Least Squares）計算非線性迴歸模型之模型參數，於分析過程中使用 modelr（Wickham, 2018）套件。



陸、鼠害空間分布

本研究於臺大實驗林 49-1 號柳杉造林地試驗區進行鼠害調查，以探討鼠害的空間分布情形，研究方向有以下兩項重點：(一) 根據三項鼠害指標，包括樹冠顏色、鼠害分岔數量與鼠害分岔高度評估鼠害之嚴重程度、(二) 以林分視覺化系統 (Stand Visualization System, SVS) 呈現鼠害在 3D 立體空間中的分布情形。

本研究建立柳杉林分中鼠害快速目測之評估機制，將此評估機制套用於現場調查，並嘗試評估其結果，以期增進現場鼠害評估效率，快速掌握林分中之鼠害情形。雖然航遙測技術成熟，搭配無人機技術能快速評估鼠害程度，然而，樹冠層以下之目測評估方法仍有其必要性，因為航遙測技術無法偵測到樹幹的鼠害分岔高度以及鼠害分岔數量。本研究將樹冠層以下能觀察到的鼠害特徵分為以下三項指標，以評估鼠害之嚴重程度：

(一) 樹冠顏色：

樹木頂芽若受鼠害影響，其樹冠於第一期呈現紅色、第二期呈現灰色，第三期樹冠呈枯死狀況。每一期約隔一年左右，記錄下來的顏色分為四種：綠色、紅色、灰色及暗紅色（紅灰色相間）。

(二) 材幹鼠害分岔數量：

同一株柳杉若樹幹有多處分岔，表示此株柳杉曾遭受多次鼠害，導致樹幹有多處分岔。樹幹分岔處越多，表示此株柳杉鼠害的嚴重程度越高，對於樹木生長之影響亦更嚴重。

(三) 材幹鼠害分岔高度：

透過樹幹解析方法，能以鼠害分岔高度推估鼠害發生的時間點。若鼠害分岔的高度越低，表示樹木受鼠害影響的時間點越早；鼠害分岔的高度越高，則樹木受鼠害影響的時間較晚。另外，鼠害分岔處越低，將會導致樹木可用材積減少，因此木材的經濟價值就越低。

第四章 研究結果

第一節 以三種樹高估算方法建立樹高生長模型



壹、健全木之樹高生長模型

本研究中對兩株柳杉健全木以三種樹高估算方法的樹高預測結果擬和 Richards' 生長模式並建立三種樹高生長模型，模型摘要如表 5 所示。無論是以 Graves、Lenhart's、Carmean's 建立的樹高生長模型參數 (β_0 、 β_1 、 β_2) 皆顯著不等於 0 ($p < 0.05$)，以 Shapiro-Wilk 常態性檢定檢測殘差值是否符合常態分佈，檢測結果顯示 Shapiro-Wilk 常態性檢定之 W 值除了 Graves 樹高公式模擬的樹高生長模型未達顯著，Lenhart's 與 Carmean's 公式模擬的樹高生長模型之 W 值皆達顯著 ($p < 0.05$)，顯示殘差值不符合常態分佈。

表 5. 不同樹高公式建立的健全木樹高生長模型之模型摘要

樹高公式	參數	模型參數值	標準誤差	t 值	顯著性
Graves	β_0	18.6759	0.7317	25.523	$< 2 * 10^{-16}$
	β_1	0.0816	0.0117	6.992	$6.64 * 10^{-7}$
	β_2	1.0903	0.1053	10.353	$1.05 * 10^{-9}$
Lenhart's	β_0	18.6397	0.7205	25.870	$< 2 * 10^{-16}$
	β_1	0.0847	0.0116	7.297	$3.48 * 10^{-7}$
	β_2	1.2103	0.1205	10.047	$1.78 * 10^{-9}$
Carmean's	β_0	18.5963	0.6683	27.826	$< 2 * 10^{-16}$
	β_1	0.0847	0.0107	7.895	$1.02 * 10^{-7}$
	β_2	1.2261	0.1136	10.798	$4.97 * 10^{-10}$

以樹齡作為預測變項，不同樹高公式的樹高預測結果作為依變項，樹齡與樹高之關係皆呈現高度相關，依序分別為 Graves、Lenhart's、Carmean's 公式所預測之皮爾森相關係數 (Pearson correlation coefficient, PCC)， $\rho = 0.9159$ 、 0.9202 、 0.9224 ，且皆達到統計顯著性，樹高生長模型的 R^2 、回歸方程式以及為檢驗使用不同樹高預測方法擬合的樹高生長模型之參數敏感度在 95% 信賴水準之下建立的信賴區間如表 6 所示。

表 6. 參數估計(β_0 、 β_1 、 β_2)與信賴區間及樹高生長回歸式 (健全木)

樹高公式	R ²	參數	信賴區間(95%)		回歸式
			下限	上限	
Graves	0.9848	β_0	17.3122	20.5835	$H = 18.6759 (1 - \exp(-0.0816 * A))^{1.0903}$
		β_1	0.0577	0.1083	
		β_2	0.8925	1.3494	
Lenhart's	0.9855	β_0	17.2873	20.4888	$H = 18.6397(1 - \exp(-0.0847 * A))^{1.2103}$
		β_1	0.0612	0.1111	
		β_2	0.9877	1.5046	
Carmean's	0.9876	β_0	17.3313	20.2846	$H = 18.5963(1 - \exp(-0.0847 * A))^{1.2261}$
		β_1	0.0629	0.1091	
		β_2	1.0143	1.501	

以 Richards' 生長模式模擬健全木之樹高生長結果 (圖 12), R² 值皆達 0.9 以上, 模擬效果良好, 三種樹高生長模型 (Graves、Lenhart's、Carmean's) 的樹高漸進線為 18.6759、18.6397、18.5963, 將樹高對林齡微分、計算不同樹高公式模擬的生長模型的反曲點之林齡, 依序為 1.09、1.06、0.23 年生, 生長率最大值分別為 121.7%、101.3%、102.6%, 由參數 β_1 計算的樹高生長停滯之林齡分別為 36.9、36.6、36.8 年生, 以上三種樹高生長模型的預測結果顯示柳杉在生長初期即能達到最高生長率, 且 Graves 公式相較於 Lenhart's、Carmean's 公式的樹高生長模型有較高的最大生長率, 而三種公式預測樹高生長停滯的林齡亦十分相近。

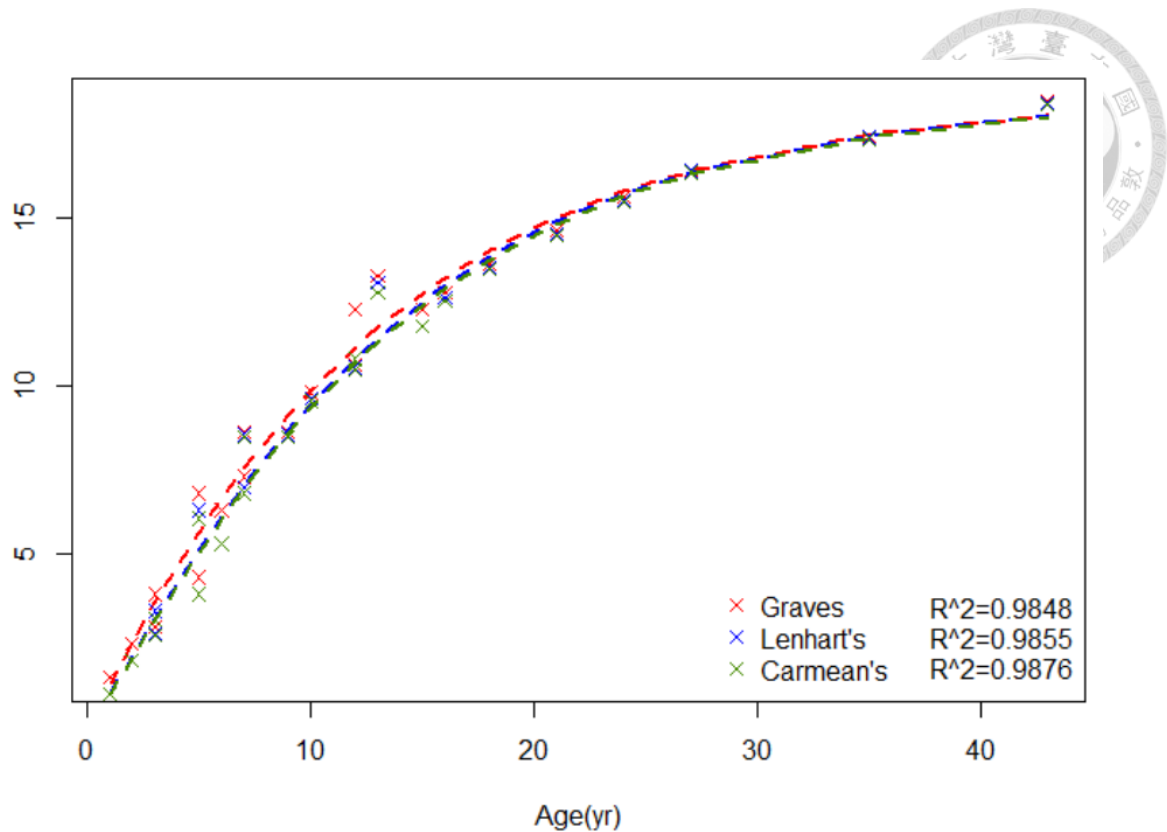


圖 12. 以 Richard's 生長模式擬合三種樹高預估公式之健全木樹高生長結果

以樹高生長模型的三個參數 (β_0 、 β_1 、 β_2) 在 95% 的信賴水準下所建立的信賴區間檢驗不同樹高預測公式擬合的生長模型參數的敏感度， β_0 參數預測的信賴區間在 Graves、Lenhart's、Carmean's 的預測結果十分接近，信賴區間互相重疊的部分超過 90% (圖 13a)； β_1 參數預測的信賴區間在 Graves、Lenhart's、Carmean's 的預測結果亦十分接近，信賴區間重疊的部分超過 90% (圖 13b)； β_2 參數預測的信賴區間在 Lenhart's、Carmean's 公式的預測結果中十分接近，信賴區間重疊的部分超過 90%，而 Graves 公式的預測結果與 Lenhart's、Carmean's 公式的預測結果差異較大，信賴區間重疊的部分小於 80% (圖 13c)。

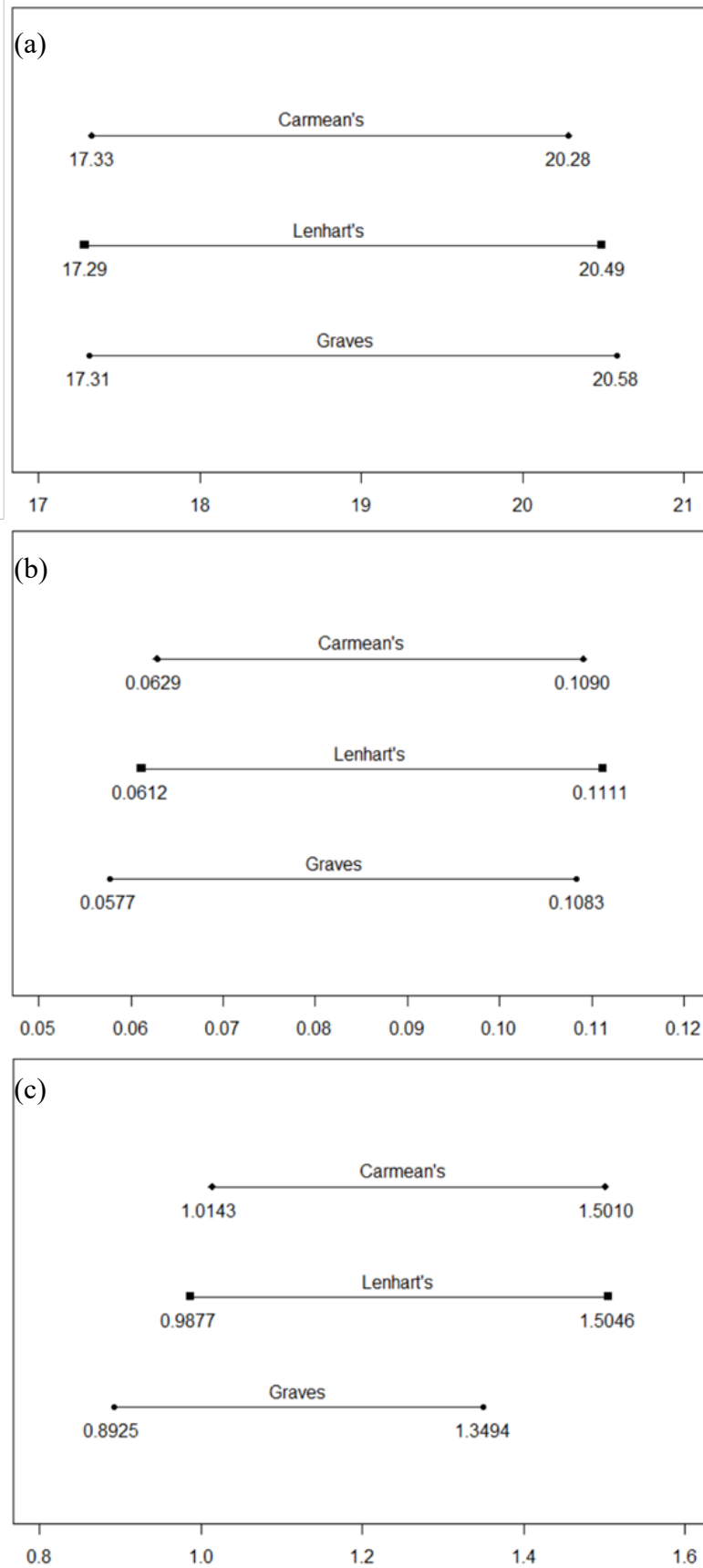


圖 13. 不同樹高估算公式建立之樹高生長模型參數 (β_0 、 β_1 、 β_2) 之信賴區間比較圖 (健全木)。(a) β_0 之信賴區間。(b) β_1 之信賴區間。(c) β_2 之信賴區間



貳、鼠害木之樹高生長模型

本研究中對兩株柳杉鼠害木以三種樹高預測公式的預測結果擬合 Richards' 生長模式並建立三種樹高生長模型，模型摘要如表 7 所示。無論是以 Graves、Lenhart's、Carmean's 建立的樹高生長模型參數 (β_0 、 β_1 、 β_2) 皆顯著不等於 0 ($p < 0.05$)，以 Shapiro-Wilk 常態性檢定檢測殘差值是否符合常態分佈，檢測結果顯示 Shapiro-Wilk 常態性檢定之 W 值在 Graves、Lenhart's、Carmean's 公式建立的樹高生長模型中皆未達到顯著，顯示殘差值符合常態分佈之假設。

表 7. 不同樹高公式建立的鼠害木樹高生長模型之模型摘要

樹高公式	參數	模型參數值	標準誤差	t 值	顯著性
Graves	β_0	19.0745	1.1331	16.834	$< 2 * 10^{-16}$
	β_1	0.0636	0.0140	4.549	$7.34 * 10^{-5}$
	β_2	1.1058	0.1593	6.944	$7.29 * 10^{-8}$
Lenhart's	β_0	18.4323	0.9124	20.203	$< 2 * 10^{-16}$
	β_1	0.0733	0.0139	5.287	$8.63 * 10^{-6}$
	β_2	1.2855	0.1862	6.903	$8.18 * 10^{-8}$
Carmean's	β_0	18.3586	0.9063	20.258	$< 2 * 10^{-16}$
	β_1	0.0740	0.0140	5.296	$8.39 * 10^{-6}$
	β_2	1.3030	0.1906	6.836	$9.89 * 10^{-8}$

以樹齡作為預測變項，不同的樹高公式預測結果作為依變項，樹齡與樹高之關係皆呈高度相關，依序分別為 Graves、Lenhart's、Carmean's 公式所預測之皮爾森相關係數， $\rho = 0.9439$ 、 0.9441 、 0.9440 ，且皆達到統計上的顯著性，樹高生長模型的 R^2 、回歸方程式以及為檢測使用不同樹高預測方法擬和的樹高生長模型之參數敏感度在 95% 信賴水準之下建立的信賴區間如表 8 所示。

表 8. 參數估計(β_0 、 β_1 、 β_2)與其信賴區間及樹高生長回歸式 (鼠害木)

樹高公式	R ²	參數	信賴區間(95%)		回歸式
			下限	上限	
Graves	0.9662	β_0	17.2363	23.2504	$H = 19.0745*(1-\exp(-0.0636*A))^{1.1058}$
		β_1	0.0335	0.0957	
		β_2	0.8132	1.5271	
Lenhart's	0.9691	β_0	16.8864	21.4343	$H = 18.4323*(1-\exp(-0.0733*A))^{1.2855}$
		β_1	0.0436	0.1051	
		β_2	0.9453	1.7792	
Carmean's	0.9688	β_0	16.8217	21.3322	$H = 18.3589*(1-\exp(-0.0740*A))^{1.3030}$
		β_1	0.0442	0.1060	
		β_2	0.9558	1.8083	

以 Richards' 生長模式模擬鼠害木之樹高生長結果 (圖 14), R² 值皆達到 0.9 以上, 模擬效果良好, 三種樹高生長模型的樹高漸進線為 19.0745、18.4323、18.3589, 將樹高對林齡微分、計算不同樹高公式模擬的樹高生長模型 (Graves、Lenhart's、Carmean's) 的反曲點之林齡, 依序為 1.58、3.43、3.58 年生, 生長率最大值分別為 94.6%、87.9%、87.3%, 由參數 β_1 計算的樹高生長停滯時之林齡分別為 46.6、43.0、42.6 年生, 以上三種樹高生長模型的預測結果顯示柳杉在生長初期即能達到最大生長率, 又以 Graves 公式建立的樹高生長模型最快達到最大生長率且生長率的最大值亦高於 Lenhart's、Carmean's 公式建立的樹高生長模型, 樹高生長停滯的年齡以 Graves 公式建立的樹高生長模型最晚, 而 Lenhart's、Carmean's 公式建立的樹高生長模型所模擬的樹高生長結果十分接近。

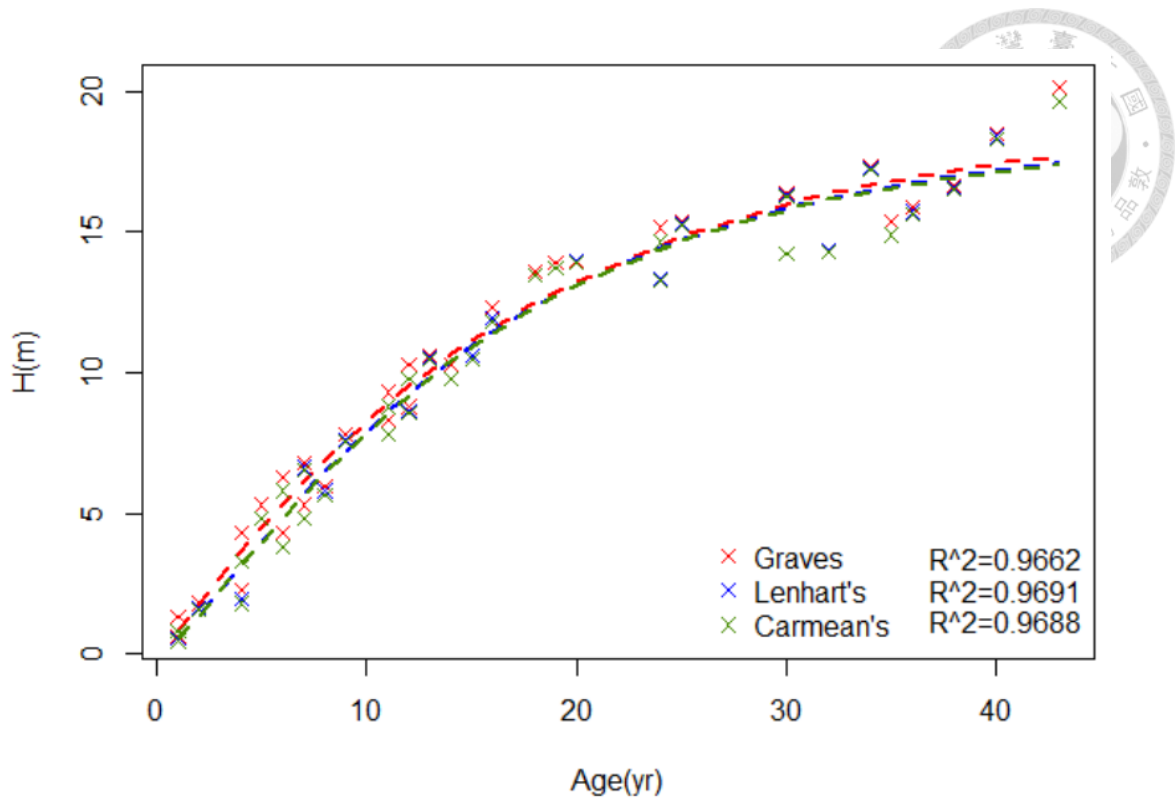


圖 14. 以 Richard's 生長模式擬合三種樹高預估公式之鼠害木樹高生長結果

以樹高生長模型的三個參數 (β_0 、 β_1 、 β_2) 在 95% 的信賴水準下所建立的信賴區間檢驗不同樹高預測公式擬合之生長模型參數的敏感度， β_0 參數預測的信賴區間在 Lenhart's、Carmean's 公式的預測結果中非常接近、近乎重合，而以 Graves 公式建立的樹高生長模型之 β_0 參數信賴區間範圍較大，且與 Lenhart's、Carmean's 公式的信賴區間重疊部分小於 80% (圖 15a)； β_1 參數預測的信賴區間在 Lenhart's、Carmean's 公式的預測結果中亦非常接近、近乎於重合，Graves 公式的預測結果與上述兩個公式的模型參數之信賴區間重疊的部分約 80%，但明顯不同於其他兩個公式的預測結果 (圖 15b)； β_2 參數預測的信賴區間在 Lenhart's、Carmean's 公式的預測結果中十分接近，但 Graves 公式的參數預測結果與 Lenhart's、Carmean's 公式的預測結果有所不同，信賴區間重疊部分小於 80% (圖 15c)。

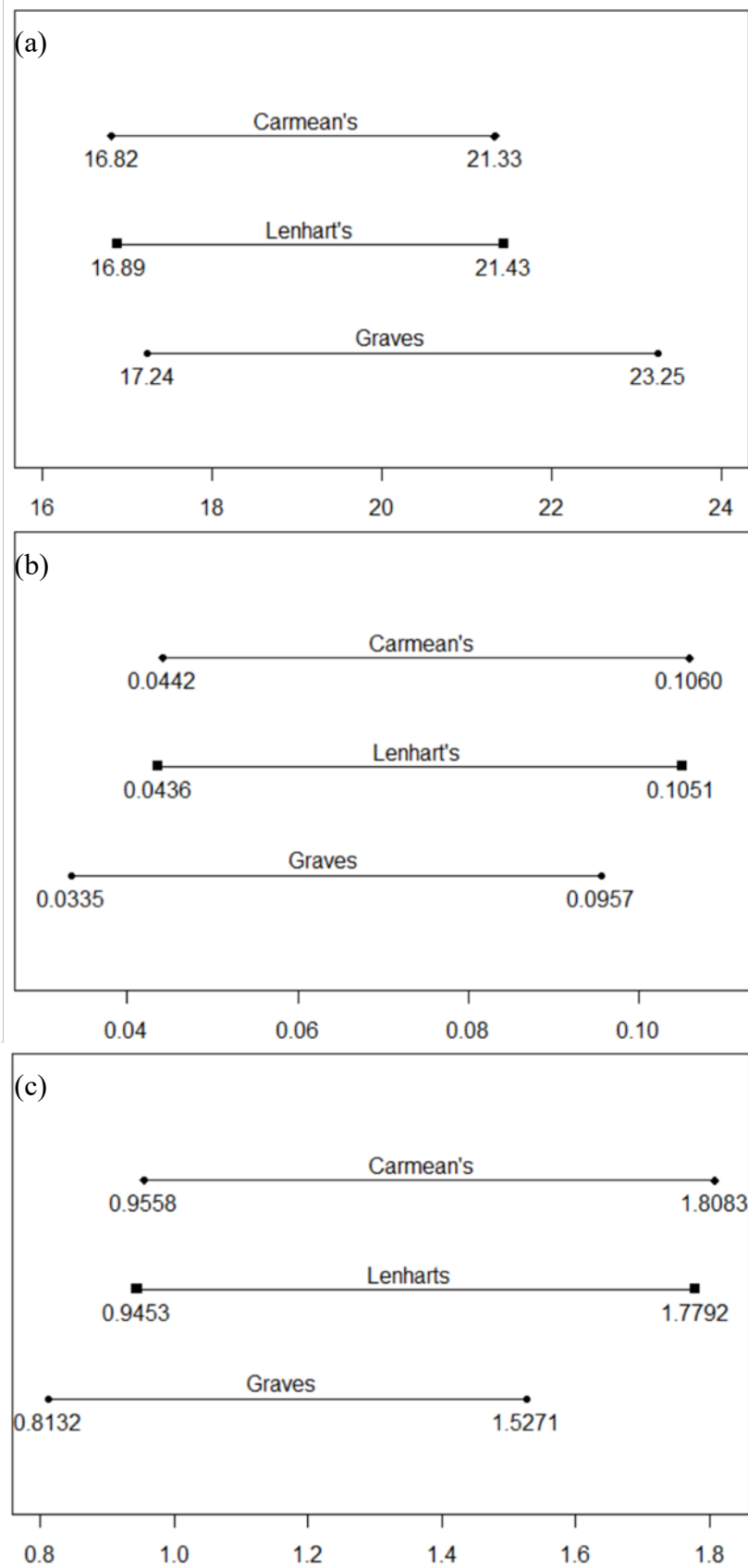


圖 15. 不同樹高估算公式建立之樹高生長模型參數 (β_0 、 β_1 、 β_2) 之信賴區間比較圖 (鼠害木)。(a) β_0 之信賴區間。(b) β_1 之信賴區間。(c) β_2 之信賴區間



參、健全木與鼠害木之生長結果比較

本研究使用樹幹解析方法和樹高預測公式擬合 Richards' 生長模式進一步建立溪頭柳杉鼠害木的樹高生長模型，比較健康木與鼠害木的樹高生長模擬結果，結果如表 9 所示。

表 9. 健康木與鼠害木之生長結果比較

樣木類別	樹高公式	生長率 最大值(%)	達生長率最大值 之林齡(yr)	樹高生長停滯時 之林齡(yr)
健康木	Graves	121.7	1.09	36.9
	Lenhart's	101.3	1.06	36.6
	Carmean's	102.6	0.23	36.8
鼠害木	Graves	94.6	1.58	46.6
	Lenhart's	87.9	3.43	43.0
	Carmean's	87.3	3.58	42.6

無論是健全木或是鼠害木的樹高生長模型，Graves 公式的樹高生長率之最大值皆高於 Lenhart's 與 Carmean's 公式的最大值，表示生長模型的切線斜率最大值在預測結果中 Graves 公式高於 Lenhart's 與 Carmean's 公式。在健全木或鼠害木的樹高生長模型中，Lenhart's 與 Carmean's 公式的樹高預測結果皆十分相似。健全木與鼠害木樹高生長模型的不同處在於，健全木的生長率最大值之林齡及樹高生長停滯之林齡以健全木早於鼠害木。



第二節 鼠害空間分布與嚴重程度

本研究之另一個目的為以建立之鼠害目測評估機制探討臺大實驗林 49-1 號柳杉造林地試驗區中之鼠害分布情形，試驗區中各樣區平均鼠害木百分比為 80.99% ($\pm 7.65\%$)，即樣區內約有 4/5 的樣木為鼠害木。圖 16 顯示試驗區中 9 個樣區的鼠害木百分比。以整體試驗區而言，試驗區的 1、2、4、5 號樣區之鼠害情形較為嚴重，鼠害木的百分比皆達到 80% 以上，4 號樣區的鼠害木百分比更高達 90% 以上，而 3 號樣區的鼠害木百分比較其周圍的樣區低。試驗區中部的 6 號樣區的鼠害木數量最低，其鼠害木百分比低於 70% 以下。7、8、9 號樣區的鼠害木百分比落在 75% 左右。

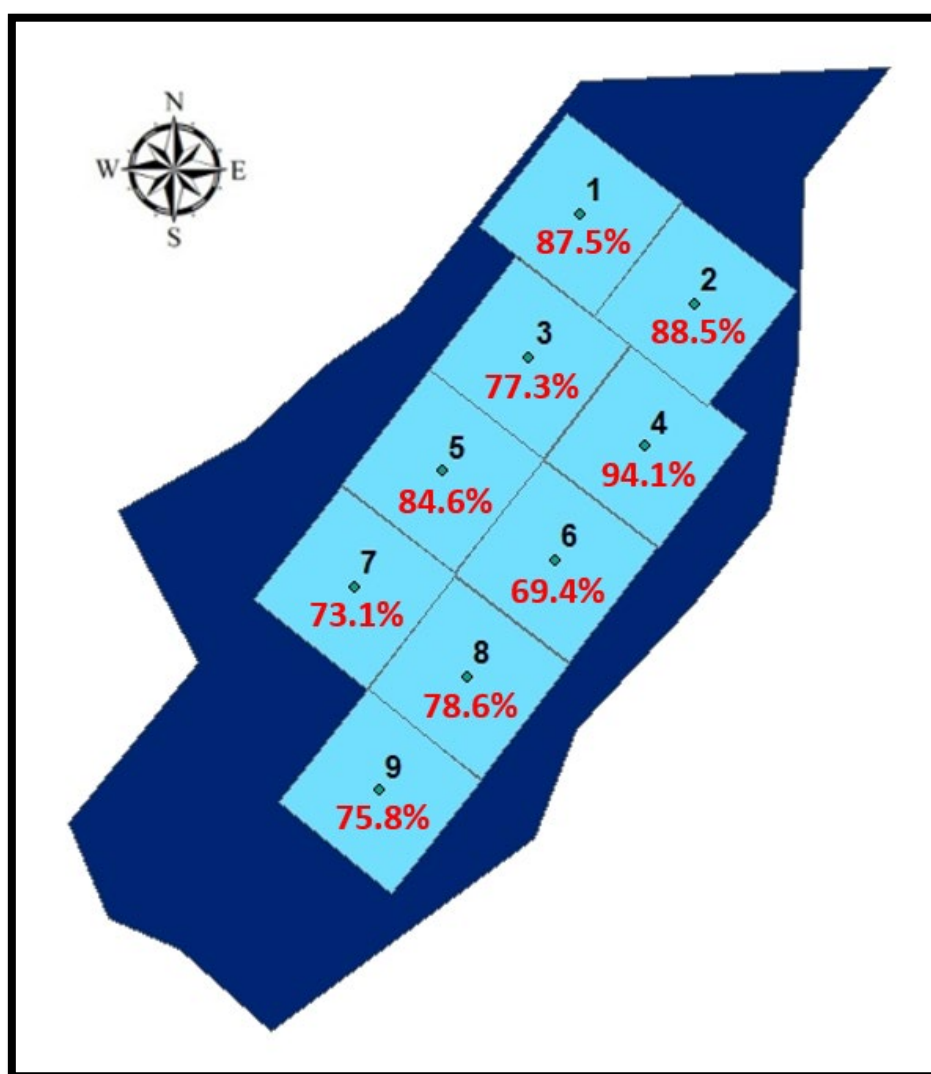


圖 16. 試驗區中 9 個樣區的鼠害木數量百分比

本研究中有三項判斷鼠害特徵的指標：(一) 樹冠顏色、(二) 鼠害分岔數量、(三) 鼠害分岔高度。表 10 中呈現 9 個樣區中不同顏色的柳杉樹冠之百分比。樣區 6 的柳杉木擁有最多綠色樹冠，百分比為 50.00%，樣區 4、樣區 5 的柳杉木擁有最多紅色樹冠，百分比為 41.18%、34.62%，樣區 3 的柳杉木擁有最多暗紅色樹冠，百分比為 54.54%，樣區 7、樣區 8 的柳杉木擁有最多灰色樹冠，百分比為 57.69%、57.14%。在樣區 2、樣區 3、樣區 6 與樣區 8 沒有紅色樹冠。

表 10. 樣區內樹木以樹冠顏色分類及其百分比

樣區號碼	樹冠顏色之百分比(%)			
	綠色	紅色	暗紅色	灰色
1	29.17	12.50	16.66	41.67
2	38.46	0	26.92	34.62
3	22.73	0	54.54	22.73
4	29.41	41.18	5.88	23.53
5	7.69	34.62	19.23	38.46
6	50.00	0	5.56	44.44
7	19.23	7.69	15.39	57.69
8	35.72	0	7.14	57.14
9	45.46	9.09	3.03	42.42

一般空間分佈型態可分為三大類，有群聚 (clustered)、分散 (dispersed)、隨機 (random) 等類型 (Mitchell, 2005)。本研究中以林分視覺化系統呈現試驗區中柳杉木樹冠顏色的空間分布情形如圖 17 所示。就空間分佈上的定義來說，有綠色樹冠的柳杉木在樣區 1、樣區 2、樣區 3、樣區 6、樣區 8、樣區 9 為群聚分佈，樣區 4、樣區 5、樣區 7 為隨機分佈；將紅色、暗紅色與灰色樹冠視為受鼠害影響可能性極大的柳杉木，其空間分佈類型以樣區 2、樣區 4 及樣區 6 為群聚分佈，其餘樣區為隨機分佈。就視覺直觀上而論，並沒有觀察到試驗區中的 9 個樣區內有分散分佈的情形。另外，樣區 8 外圍以灰、紅色樹冠的柳杉木為主，樣區中心則以綠色樹冠的柳杉木為主。

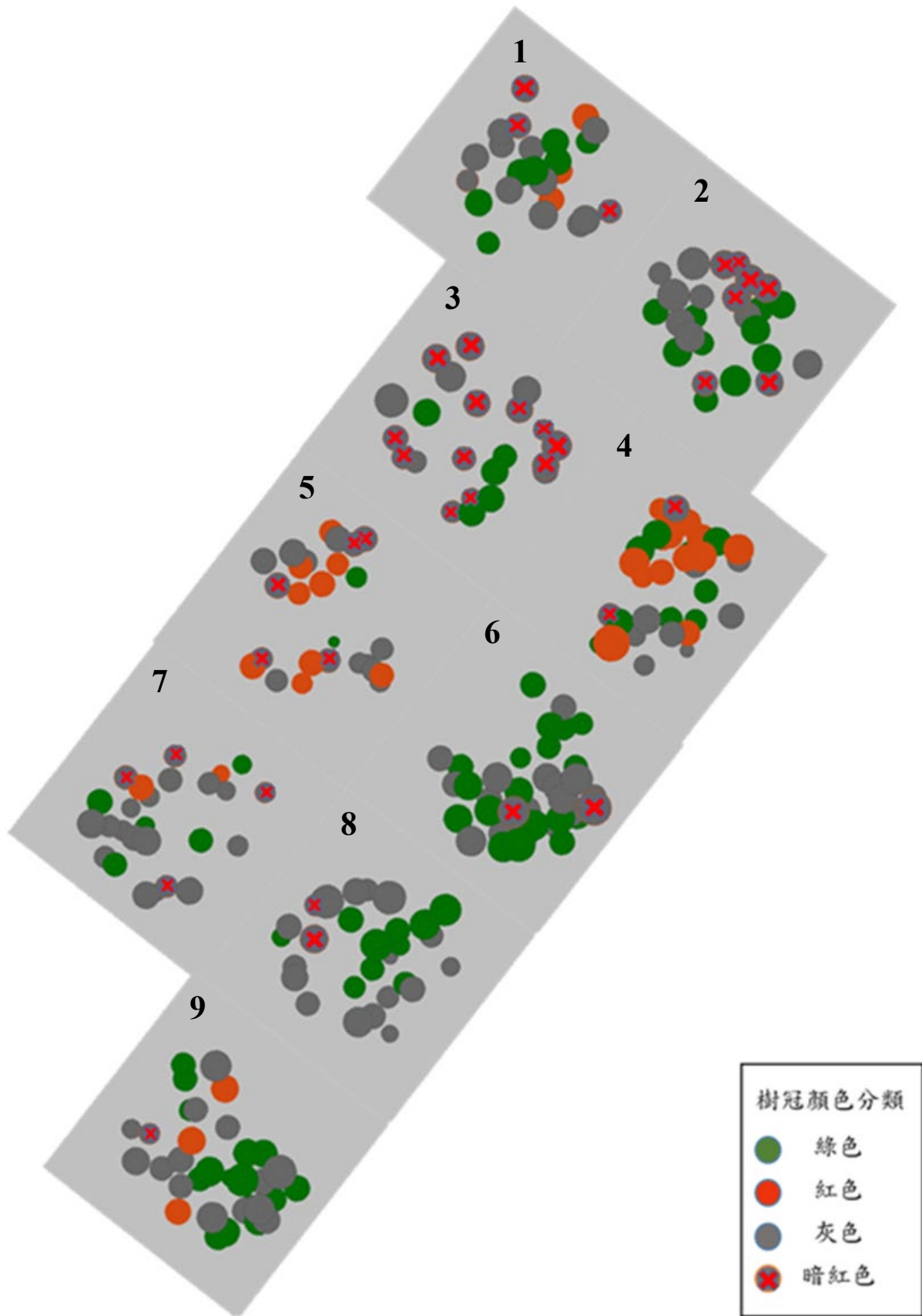


圖 17. 試驗區中柳杉木樹冠顏色之分布情形

表 11 呈現 49-1 號柳杉造林地試驗區設置的 9 個 0.04 公頃圓形樣區中鼠害木分岔數量的百分比。各樣區中只有一個鼠害分岔的鼠害木百分比介於 37.50 - 86.36%之間。樣區中有兩個分岔的鼠害木在 13.64 - 42.11%之間，表示這些鼠害木至少遭受兩次以上的松鼠危害，又以樣區 6 及 7 的數量較多。樣區中有 3 個分岔的鼠害木佔鼠害木總數的百分比較低，但在樣區 4 中有多達 31.25%的鼠害木具有 3 個以上的鼠害分岔，在 8 號樣區中沒有鼠害木具有 3 個以上的分岔。

表 11. 樣區內鼠害木以分岔數量分類及其數量百分比

樣區號碼	鼠害木分岔數量之百分比(%)		
	1	2	>3
1	57.14	38.10	4.76
2	65.22	21.74	13.04
3	76.47	17.65	5.88
4	37.50	31.25	31.25
5	68.18	22.73	9.09
6	52.00	40.00	8.00
7	47.37	42.11	10.53
8	86.36	13.64	0.00
9	64.00	32.00	4.00

49-1 號柳杉造林地試驗區中鼠害木第一個分岔的平均高度為 13.04m (± 1.17 m)，在鼠害木樹高之 64.94% (± 3.43 %)處，表示分岔後的樹幹佔整株樹的樹高 1/3 左右。圖 18 顯示試驗區中的 9 個樣區之鼠害木第一個分岔的平均高度及第一個分岔高度佔樹高的百分比的林分空間分佈。以 9 個樣區中之鼠害木的第一個分岔高度來說，在林分空間分佈上並無明顯的差異（圖 18a）。然而，若換算為百分比，則分岔高度的空間分佈呈現明顯的差異（圖 18b）。相鄰的樣區 1、3 的鼠害木分岔高度百分比皆為 61.5%，顯示此兩個樣區之鼠害分岔高度百分比有一致的趨勢，相鄰的樣區 2、4 的鼠害木分岔高度百分比在 70.5%左右，與樣區 1、3 有明顯的差異，樣區 5、6、7、8 的鼠害木分岔高度百分比在 65%左右，樣區 9 的鼠害木分岔高度百分比最低，只有 60.4%。

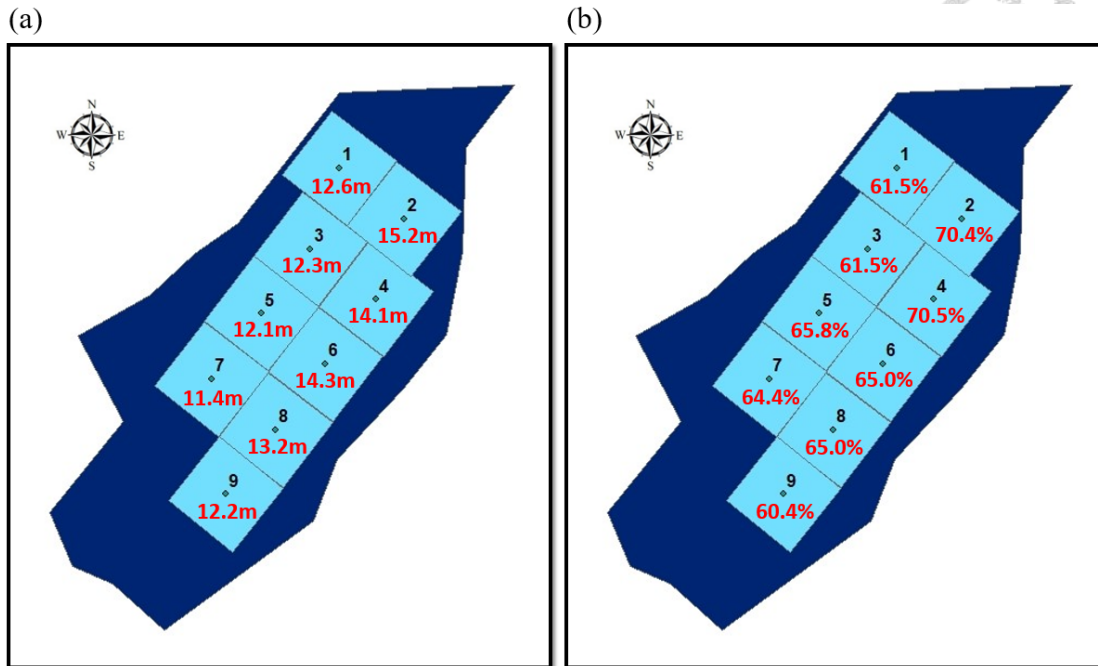


圖 18. 鼠害第一個分岔高度與所佔樹高之百分比。(a)各樣區中柳杉鼠害木第一個分岔的平均高度。(b)各樣區中鼠害木第一個分岔高度佔樹高的百分比

透過鼠害快速目測評估機制，林分視覺化系統能呈現在 3D 空間松鼠危害情形。經由觀測試驗區中柳杉木的第一個分岔高度後，得知各個樣區中柳杉木的第一個分岔高佔樹高的百分比平均介於 60.4% 至 70.5% 之間，將這 9 個樣區以分岔高佔樹高的百分比從高到低分為 3 個等級，由高到低分別為：等級 a (70.4% - 70.5%)、等級 b (64.4% - 65.8%)、等級 c (60.4% - 61.5%)，並各以一個樣區作為代表，比較不同等級之下，鼠害對於樹木分岔高度的影響，以林分視覺化系統呈現 (圖 19)。

鼠害分岔高度百分比是分岔高度與樹高的比例，若分岔高度不變但樹高越低或者樹高不變但鼠害分岔高度越高，則其鼠害分岔高度百分比越高。目前林分視覺化系統的設定無法呈現鼠害分岔的形狀、高度與分岔數量，然而可以透過此系統可以呈現樣木的枝下高、樹冠層分佈與樹冠顏色。圖 19a 為鼠害分岔高度百分比比較高的 a 類樣區，以樣區 4 為代表呈現，樣區 4 樹高平均為 20.1m、平均鼠害分岔高度為 14.1m、平均鼠害分岔高度百分比為 70.5%。a 類樣區由於鼠害分岔高度百分比比較高，表示樣木在樹高生長上受鼠害的影響較輕微，將樣區視覺化後，

即可看出樹冠層佔樹高的比例較其他等級的樣區來得低。圖 19b 為鼠害分岔高度百分比次高的 b 類樣區，以樣區 6 為代表呈現。樣區 6 樹高平均為 21.5m、平均鼠害分岔高度為 14.3m、平均鼠害分岔高度百分比為 65.0%。b 類樣區的鼠害分岔高度百分比較 a 類樣區低，表示樣木在樹高生長上受鼠害的影響較 a 類樣區嚴重，將樣區視覺化後，即可看出樹冠層佔樹高的比例較 a 類樣區高。圖 19c 為鼠害分岔高度百分比最低的 c 類樣區，以樣區 9 為代表呈現。樣區 9 樹高平均為 20.1m、平均鼠害分岔高度為 12.2m、平均鼠害分岔高度百分比為 60.4%。c 類樣區由於鼠害分岔高度百分比最低，表示樣木在樹高生長上受鼠害影響最為嚴重，將樣區視覺化後，即可看出樹冠層佔樹高的比例最高。

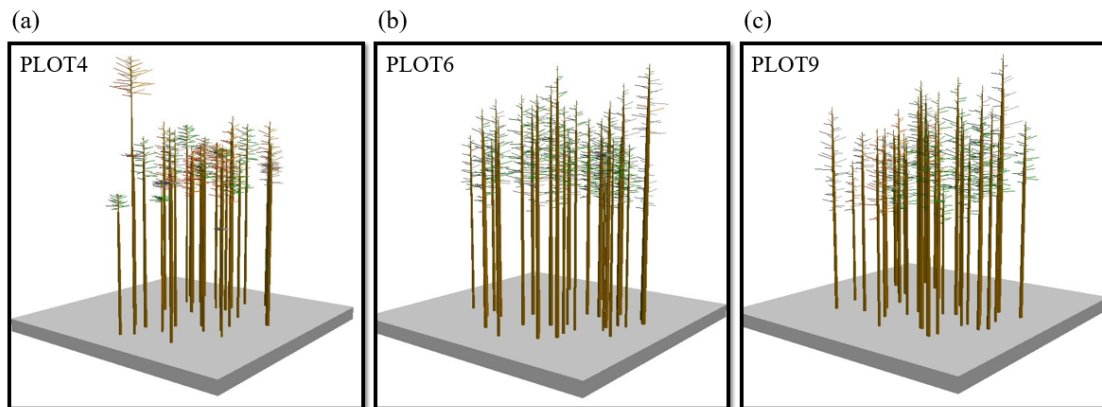


圖 19. 林分視覺化圖。(a) a 類樣區。(b) b 類樣區。(c) c 類樣區



第五章 討論


第一節 以三種樹高估算方法建立樹高生長模型

鍾智昕 (2005) 在其樹幹解析之研究中檢驗 Graves、Carmean's、ISSA 與 TARG 等四種樹高估算方法在不同分段長度 (100 cm、200 cm、300 cm) 下之估算精確性。研究結果顯示在分段長度為 100 cm、200 cm 時，Carmean's 方法估算最精確，Graves 方法則在不同的分段長度下皆顯著地高估樹高生長。本研究中以 Graves、Lenhart's、Carmean's 方法估算出樹高值，並擬合 Richards' 生長模式建立樹高生長模型，樹高預估值以 Graves 方法高於 Lenhart's 方法與 Carmean's 方法，與鍾智昕 (2005) 之研究結果有相似之處。

賴怡蓉 (2011) 應用不同的生長模式探討紅檜 (*Chamaecyparis formosensis*) 及柳杉人工林單木生長，以 Schumacher 模式、Richards' 模式、Mitscherlich 模式、Logistic 模式及 Gompertz 模式模擬樹高生長、胸高斷面積生長及材積生長，並以 RMSE 值探討及評估模擬效果，再以模擬效果最佳之生長模式探討不同直徑級之樹高生長。其研究結果顯示紅檜及柳杉各徑級達到最大生長速率的時間皆在 0~5 年之間，表示樹高生長在林木幼齡期已達到最大生長速率值。

鄭景鵬等 (2014) 將各林齡樹高分成下層木、中層木、上層木，以 Richard's 生長模式探討溪頭地區歷年柳杉樹高生長之趨勢，所有樣木林齡由 5 年生至 102 年生，其研究結果顯示各層級達到最大生長速率的時間由上層木到下層木分別為 4.5、4.9、7.6 年生，進入生長停滯期的年齡分別為 62.4、63.6、54.8 年生，顯示柳杉於生長初期即能達到最大生長率。

本研究中應用 Richards' 生長模式探討健康木與鼠害木的樹高生長差異，研究結果顯示健全木的樹高生長結果，在三種樹高估算方法 (Graves、Lenhart's、Carmean's) 中達到最高生長速率的時間皆在 0~2 年之間，顯示柳杉於生長初期即能達到最高生長率，與賴怡蓉 (2011) 及鄭景鵬等 (2014) 之研究結果相似。在三種樹高估算方法中，健全木進入生長停滯期的年齡皆於 36 年生左右，早於鄭



景鵬等 (2014) 探討溪頭柳杉樹高生長之研究結果許多，推測可能原因為樣木的生長環境、立地品味不同所導致。至於鼠害木的樹高生長結果，在三種樹高估算方法中達到最大樹高生長率的時間為 1.58、3.43、3.58 年生，進入生長停滯期的年齡為 46.6、43.0、42.6 年生。鼠害木之最大樹高生長率發生的時間在 1~4 年之間，顯示柳杉於生長初期即能達到最大生長率，鼠害木進入生長停滯期的年齡較健康木晚，推測可能因為鼠害對於林木生長的干擾，導致柳杉樹高生長短暫停止或延遲，在鼠害發生後之恢復期間，林木加快其樹高生長之速率，以致於鼠害木生長停滯的年齡比起健康木更晚。本研究因無法取得試驗區域之造林台帳，亦不清楚林木種植於苗圃及至出栽經過多長時間，研究結果顯示達到樹高最大生長率之時間點約在林木尚在苗圃培育的時期，若能得知何時苗木出栽及苗木出栽時之樹高，將能建立更為準確的樹高生長模型，此外，若以其它的生長模式模擬樹高生長，並比較不同模式之差異性，或能更準確評估健全木與鼠害木之樹高生長。

本研究中以三種樹高預測公式之樹高預測結果建立樹高生長模型，無論是以健全木或鼠害木之樹高-年齡 (Height-age) 數據所建立的樹高生長模型，模型參數的信賴區間在 Lenhart's 與 Carmean's 公式的預測結果中近乎相同，顯示此兩種樹高估算方法的估算結果建立的樹高生長模型高度重合，與 Dyer and Bailey (1987)、Kariuki (2002) 在樹幹解析研究中的研究結果一致。



第二節 鼠害空間分佈與嚴重程度


本研究建立鼠害快速目測評估機制，藉由觀測柳杉樹冠顏色與分岔形狀作為判斷柳杉是否遭受鼠害之依據，再以三項指標評估鼠害的嚴重程度，分別有

(一) 樹冠顏色、(二) 鼠害分岔數量、(三) 鼠害分岔高度。

郭寶章(1985)之研究提到柳杉與杉木的調查結果中，混合林之松鼠受害率較純林者為低，尤其是不易遭受松鼠危害之台灣杉混植之林分更為明顯。49-1柳杉造林地試驗區的東南方為55-1林班，其林分組成為台灣杉純林，49-1柳杉造林地試驗區的西北方為56-1林班，其林分組成為台灣杉-柳杉混合林。49-1柳杉造林地試驗區的鼠害木百分比為80.98% ($\pm 7.65\%$)，較前人的調查結果高出許多，推測是因其相鄰的林班多為台灣杉-柳杉混合林或是台灣杉純林。鼠害木的數量百分比以49-1柳杉造林地試驗區東北方較高，沿東北-西南方向遞減，推測可能原因為靠近連外道路，且有遊客會在此處休息區停留，因此導致松鼠類動物有較多食物來源，造成此處的鼠害率較高。

普遍認為松鼠啃食樹幹頂芽，導致紅頭柳杉的情形產生，且因鼠害發生的時間點不同，樹冠的顏色也會產生變化。臺灣大學實驗林的研究員分享其調查經驗中提到，健康的柳杉樹冠顏色呈綠色，若鼠害導致柳杉樹冠損害，則樹冠顏色會由綠轉紅，這個階段約歷時1~2年，而後漸漸地轉變為暗紅色、灰色，歷時約2~3年，樹冠呈灰色枯死狀時則歷時約4~5年。若以樹冠顏色推估鼠害發生的時間與走向，整體來說靠近連外道路的樣區發生鼠害的時間較晚，樹冠顏色呈紅色、暗紅色的百分比較高，表示鼠害發生的走向可能是由試驗區西南向往東北向移動。

郭寶章(1985)於鼠害研究中提到，疏植之柳杉林較密植之柳杉林受害率低。從圖18中可以看出樣區3、樣區7之柳杉分佈較稀疏，對比其與臨近樣區之鼠害百分比可以發現，樣區3、樣區7之鼠害百分比確實低於其臨近樣區，而樣區6雖然柳杉分佈較密集，但其鼠害百分比反而是所有樣區中最低的，與郭寶章



(1985) 之鼠害研究結果不同。樣區 6 樹冠顏色呈綠色的百分比最高、鼠害百分比最低，顯示樣區 6 受鼠害影響較輕微，樣區 4、樣區 5 有超過 30% 以上的柳杉木樹冠呈現紅色，並且其鼠害百分比也都高於 80%，顯示樣區 4、樣區 5 受鼠害影響較為嚴重。樣區 7、樣區 8 樹冠呈灰色的百分比最高，但其鼠害木百分比在試驗區中並非最高，樣區 3 柳杉木樹冠呈暗紅色之百分比超過 50%，但其鼠害木百分比並非最高，推測可能原因為本研究中歸納為鼠害木必須符合兩項條件，(一) 具有 U 型分岔、(二) 樹冠顏色為紅、暗紅色、灰色，因此，可能有柳杉木樹冠受害，但不具有 U 型分岔，因此不將之記錄為鼠害木，造成鼠害百分比有低估之情形發生。在試驗區中的鼠害空間分佈型態主要以隨機分佈與群聚分佈為主。由圖 18 可以發現鼠害空間分佈型態在樣區 3、樣區 7 為隨機分佈，而樣區 2、樣區 4 及樣區 6 為群聚分佈，推測可能因為樣區 3、樣區 7 的柳杉木空間分佈較稀疏，造成鼠害的空間分佈呈現隨機分佈，而樣區 2、樣區 4 及樣區 6 的柳杉木空間分佈較密集，造成鼠害的空間分佈呈現群聚分佈。

49-1 柳杉造林地試驗區中所有的鼠害木至少都具有一次以上的鼠害分岔，在樣區 6、樣區 7 中的鼠害木具有兩處鼠害分岔佔 40% 以上，顯示其在生長過程中至少遭逢兩次以上的鼠害，但此兩樣區的鼠害木數量百分比相較於其他樣區偏低，顯示同株樣木重複受害之情形較其他樣區比率較高。樣區 4 中具有三處以上的鼠害分岔之鼠害木，百分比超過 30%，而其鼠害木百分比是所有樣區中最高的，顯示此樣區鼠害發生的頻率與同株樣木重複受害之比率最高。

松鼠啃食柳杉及杉木樹皮所遺留之傷口，無論是否有癒合，足能造成林木不正常發育，減低林木之生長，且使傷口處容易受病蟲侵入，發生二次危害，影響木材利用價值，使木材生產上蒙受經濟損失(郭寶章，1984)。郭寶章等

(1990) 研究鼠害對於杉木及柳杉造林木材質之影響，研究結果顯示風折木之斷裂位置常發生於鼠害之傷口處，故鼠害會使造林木抗風能力降低。本研究中對鼠

害木進行樹幹解析後，發現鼠害分岔位置處之樹幹中心之上常有樹心腐朽的情形



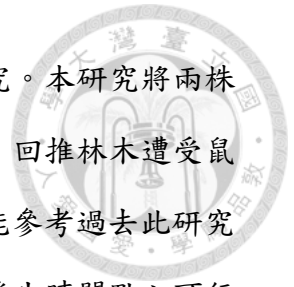
圖 20. 鼠害木分岔處之樹心腐朽情形

形，如圖 20 所示。

鼠害造成的傷口處會降低造林木的抗風能力，也多有腐朽之情形發生，會使木材的利用價值與木材強度下降。若鼠害分岔的高度越高，對林木在木材利用上的影響也會較小。本研究調查 49-1 柳杉造林地試驗區的鼠害分岔高度，此試驗區的地形起伏大，坡向為西南—東北向，研究結果顯示鼠害分岔高度有由南向北、由西向東增加的趨勢，和本研究中推估鼠害發生的走向有相同的趨勢，從木材利用的層面來看，試驗區西南方的可用材少於試驗區東北方。樹冠顏色之轉變，為評估鼠害發生時間之依據，但樹冠顏色變化僅能推估近幾年發生的鼠害，因為當樹冠部分受損、枯萎死亡後，樹冠會萌蘖出新芽，使樹冠顏色又再轉變，因此，若要判斷林木從苗木出栽至今之所有鼠害發生時間點仍以鼠害分岔高度為較好之評估依據。本研究以鼠害分岔高度百分比進行分類，並以林分視覺化系統展示，將試驗區中的 9 個樣區分為 3 類。從林分視覺化系統中可看出，鼠害分岔高度百分比愈高的樣區，其樹冠層佔樹高的百分比也越低。透過林分視覺化系統的輔助，得以快速評估林分遭受鼠害的嚴重程度，對於林木之培育、木材生產考量與林業政策規劃有所助益。

於鼠害分岔處截取圓盤，計算其年輪數量，可以回推鼠害發生的時間點，或

能精確重建過去鼠害發生的歷史，但此部份尚無人進行相關研究。本研究將兩株鼠害木進行樹幹解析，在鼠害分岔處截取圓盤、進行年輪計數，回推林木遭受鼠害之年齡，得知發生鼠害之年齡分別為 19 年生與 13 年生，若能參考過去此研究區域之鼠害調查紀錄，將能評估以樹幹解析方法重建過去鼠害發生時間點之可行性。





第六章 結論與建議

本研究以臺大實驗林溪頭營林區 2 林班 49-1 號造林地試驗區之柳杉人工林為材料，研究內容有以下兩項重點：(一) 以樹幹解析方法搭配樹高估算公式計算樹高值，再以 Richards' 生長模式建立健全木與鼠害木的樹高生長模型，探討鼠害對於柳杉樹高生長的影響、(二) 建立林分中鼠害快速目測評估機制，分析試驗區的鼠害空間分佈情形，並以林分視覺化系統呈現。所得之結論與建議分述如下：

- 一、以 Richards' 生長模式模擬健全木之樹高生長結果，研究結果顯示三種樹高估算方法建立之樹高生長模型，達到最高生長速率的時間皆介於 0~2 年生之間，顯示柳杉於生長初期即能達到最高生長率。樹高生長停滯的年齡皆於 36 年生左右，柳杉生長停滯期較早，推測可能原因為樣木生長環境、立地品味不同所導致。
- 二、以 Richards' 生長模式模擬鼠害木之樹高生長結果，研究結果顯示三種樹高估算方法建立之樹高生長模型，達到最高生長速率的時間介於 1~4 年生之間，顯示柳杉於生長初期即能達到最高生長率。樹高生長停滯的年齡較健全木晚，推測極有可能因為鼠害對林木生長的干擾導致樹高生長延遲，使鼠害木生長停滯的年齡較晚。
- 三、本研究建立之樹高生長模型，無論是以健全木或鼠害木之樹高-年齡 (Height-age) 數據所建立的樹高生長模型，模型參數的信賴區間在 Lenhart's 與 Carmean's 樹高估算方法的預測結果中近乎相同，顯示以此兩種樹高估算方法建立之樹高生長模型高度重合。此兩種樹高估算方法所估算之樹高值，無論是健全木或是鼠害木的樹高預測結果，皆低於 Graves 樹高估算方法所估算之樹高值。
- 四、49-1 柳杉造林地試驗區的鼠害木百分比高達 80.98% ($\pm 7.65\%$)，很可能是因其林分組成為柳杉純林，且鄰近林班為較不易受害之台灣杉純林或台灣杉-



柳杉混合林。樣木遭鼠害的比率由試驗區西南方往東北方遞增，此處靠近聯外道路，且有遊客會在此處休息區停留，可能導致松鼠類動物有較多食物來源，造成此處鼠害率較高。

五、本研究之樹冠顏色調查結果顯示，靠近連外道路的樣區之鼠害發生的時間較晚，樣區中樹冠呈紅色、暗紅色的百分比最高，表示鼠害發生的走向可能是由試驗區西南向往東北向移動。樣區 6 中樹冠呈現綠色的百分比最高且鼠害木的百分比最低，顯示樣區 6 的鼠害情形較輕微。樣區 4、樣區 5 中樹冠呈現紅色的百分比超過 30% 且鼠害木百分比也都高於 80%，顯示樣區 4、樣區 5 受鼠害影響較為嚴重。


六、樣區 3、樣區 7 之柳杉木分佈較稀疏，鼠害木百分比較低、鼠害空間分佈呈現隨機分佈；樣區 2、樣區 4 與樣區 6 之柳杉木分佈較密集，鼠害空間分佈呈現群聚分佈。推測在林分中之栽植密度越大或林木彼此之間距離越小，受鼠害影響的機率越大，鼠害空間分佈呈現群聚分佈的機率也越大。

七、在樣區 6、樣區 7 中的鼠害木超過 40% 具有 2 處鼠害分岔，而此兩樣區鼠害木百分比較低，顯示同株樣木重複受害之比率較高。樣區 4 具有三處以上的鼠害分岔之鼠害木，其百分比超過 30%，且鼠害木百分比最高，顯示樣區 4 鼠害發生之次數與同株樣木重複受害之比率最高。

八、鼠害造成的傷口處會導致林木抗風能力降低，也多有腐朽的情形發生，會降低木材的利用價值。本研究結果顯示，鼠害分岔高度有由南向北、由西向東增加的趨勢，從木材利用的角度來看，試驗區西南部的可用材少於試驗區東北部。

九、以林分視覺化系統展示樣區中之鼠害分佈情形，可以看出鼠害分岔高度百分比越高的樣區，其樹冠層佔樹高的百分比也越低。透過林分視覺化系統的輔助，對於快速評估鼠害的影響與空間分佈有所助益。

本研究探討鼠害對於林木生長之影響與其空間分佈情形，但本研究結果僅能代表此研究區域之鼠害情形與鼠害對林分中樹高生長之影響。本研究之缺點與限




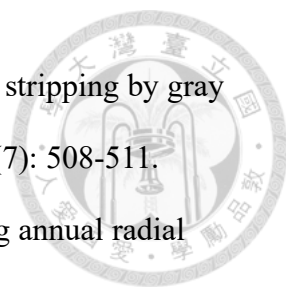
制為：(一) 因樣木圓盤有腐朽、毀損的情形，能將樣木圓盤磨光、進行年輪計數的樣木甚少，故所建立之樹高生長模型代表性稍嫌不足，實屬可惜。(二) 鼠害快速目測評估機制中，若能增加空拍機的應用，對於樹冠顏色的調查將更為快速與全面。(三) 不僅只有鼠害，蟲害或風害也有可能導致樹冠顏色的改變，因此鼠害對於林木造成的鼠害分岔是很重要的鼠害指標，但亦有可能鼠害造成樹冠顏色變化，卻沒有鼠害分岔的產生，使本研究低估鼠害木的數量。若能增加空間推估方法的使用，並收集更多、範圍更廣的鼠害調查監測數據，搭配本研究建立之鼠害快速目測評估機制，結合過去許多專家學者提出的鼠害特徵與實際野外調查人員的經驗，以林分視覺化系統從各個視角觀察鼠害在研究區域中的影響範圍、空間分布型態與受害程度，對未來評估林分中之鼠害情形將更有效率、全面與準確。



引用文獻

- 王子定、郭寶章 (1980) 松鼠對臺灣經濟林木之為害。科學發展月刊 8(6)：527-550。
- 朱紀實 (1986) 臺灣杉、柳杉和杉木內皮化學成分與松鼠危害之相關性。國立臺灣大學森林環境暨資源學系碩士論文。63 頁。
- 郭寶章 (1957) 台灣松鼠為害林木之初步調查。國立臺灣大學農學院實驗林研究報告第 12 號。
- 郭寶章 (1984) 松鼠害對造林木生長及木材損害之影響。國立臺灣大學農學院實驗林研究報告第 149 號。
- 郭寶章 (1985) 台灣赤腹松鼠對於松林為害及其防除之造林學的研究。國立臺灣大學農學院研究報告第二十五卷第二號。
- 郭寶章、劉炯錫、江燕飛 (1990) 松鼠為害對杉木與柳杉造林木材質之影響。臺大實驗林研究報告 4(2)：117-136。
- 陳朝圳、陳建璋 (2015) 森林經營學。正中書局 417 頁。
- 馮豐隆、詹明勳 (2005) 年輪學應用於森林與環境的關係。林業研究季刊 27(3)：37-50。
- 黃育歆 (2014) 溪頭三種林相之土壤性質、團粒穩定度和氮磷劃分研究。國立臺灣大學生物資源暨農學院農業化學系碩士論文。91 頁。
- 劉宣誠 (1957) 颱風危害林木之調查 (第一報)，黛娜及芙瑞達之危害。臺大實驗林林業叢刊 16 號。
- 劉業經、呂福原、歐辰雄 (1994) 臺灣樹木誌。925 頁。
- 蔡輝 (1967) 林木之風害。臺大實驗林通訊(13)：20-24。
- 蔡輝 (1968) 臺大實驗林歷年來林木颱風災害調查。臺大實驗林通訊(16)：6-10。
- 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。
- 鄭景鵬、衛強、曹崇銘、楊勝驛 (2018) 溪頭地區不同齡級柳杉人工林最大樹高與林分樹冠受損預測之研究。臺大實驗林研究報告 32(1)：37-50。
- 賴怡蓉 (2011) 應用生長模式於紅檜及柳杉人工林單木生長之探討。國立中興大學森林學系研究所碩士學位論文。66 頁。
- 鍾智昕 (2005) 臺灣中部塔塔加地區臺灣雲杉人工林之樹幹解析研究。國立臺灣大學森林環境暨資源學系碩士論文。62 頁。
- 謝依達、吳守從、鄭祖安、魏浚紘、鍾玉龍、陳建璋 (2013) 氣象因子對臺東地區柳杉與樟樹人工林生長之影響。作物、環境與生物資訊 10：209-216。
- 魏聰輝、簡文村 (1989) 從最大風速特性檢討韋恩颱風對臺大實驗林林木之危害。臺大實驗林研究報告 3(4)：21-28。
- Backmann, P. (1971) Barking damage by squirrels in 1969 in Canton berne. Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen 122(4):164-180.
- Carmean, W. H. (1972) Site index curves for upland oaks in the central states. Forest Science 18(2): 109-120.
- Christian, S., G. G. Timothy (2013) A stochastic algorithm for reconstructing tree height growth with stem analysis data. Forest Biomass Conference. Faculty of Forestry, Poznan University of Life Sciences. Poznan, Poland. October 7, 2013.
- Dyer, M. E., R. L. Bailey (1987) A test of six methods for estimating true heights from stem analysis data. Forest Science 33: 3-13.
- Eiberle, K., F. Ziegler (1967) Barking damage by squirrels. Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen 118(11): 713-723.
- Fabbio, G., M. Frattegiani and M. C. Manetti (1994) Height estimation in stem analysis using second differences. Forest Science 40(2): 329-340.
- Hadley Wickham (2018). modelr: Modelling Functions that Work with the Pipe. R package version 0.1.2. <https://CRAN.R-project.org/package=modelr>

- 
- Irving, F. D., J. R. Beer (1963) A six year record of sugar maple bark stripping by gray squirrels in Minnesota Oak-maple stand. *Journal of Forestry* 61(7): 508-511.
- Kariuki, M. (2002) Height estimation in complete stem analysis using annual radial growth measurements. *Forestry* 75(1): 63-74.
- Kershaw, J. A., Jr., M. J. Ducey, T. W. Beers and B. Husch (2016) *Forest Mensuration*. 5th ed. John Wiley & Sons, Ltd. 591pp.
- Kilgour, B. A. (1982) A yield model for uneven-aged messmate stands of south west Victoria. M. Sc thesis, University of Melbourne. 127pp.
- Mitchell, A. (2005) : *The ESRI Guide to GIS Analysis, Volume 2: Spatial Measurements and Statistics*. Redlands: ESRI Press.
- Mlodziansky, A. K. (1898) Measuring the forest crop. *USDA Div. For. Bull.* 20. 71pp.
- Newberry, J. D. (1978) Dominant height growth models and site index curves for site-prepared slash pine plantations in the lower Coastal Plain of Georgia and North Florida. M. S. thesis, University of Georgia. 47pp.
- Rayner, M. E. (1991) Estimation of true height from karri (*Eucalyptus diversicolor*) stem analysis. *Australian Forestry* 54(1/2): 105-108.
- Richards, F. J. (1959) A flexible growth function for empirical use. *Journal of Experimental Botany* 10: 290-300.
- Ryu, E. (1968) Virulence diminution of new castle disease virus following damage through squirrel. *Chinese Journal of Microbiology* 1: 145.
- Subedi, N., M. Sharma (2010) Evaluating height-age determination methods for jack pine and black spruce plantations using stem analysis data. *Northern Journal of Applied Forestry* 27(2): 50-55.