

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 Bio-Resources and Agriculture

National Taiwan University

Master Thesis

應用樹輪生態學方法重建臺灣中部

塔塔加地區臺灣雲杉林分動態

Understanding Taiwan Spruce (*Picea morrisonicola*)

Stand Dynamics at Tatachia Area, Central Taiwan:

A Dendroecological Approach

黃聖焜 Sheng-Kun Huang

指導教授：關秉宗 博士

Advisor: Dr. Biing T. Guan

中華民國 102 年 6 月

June, 2013



致謝



進入了一個很了不起的研究室啊，悠哉的咖啡時光，出差的歡樂氣氛
指導教授—關秉宗老師的包容，給予學生自由發揮的空間，老師豪爽的待人
處事、豐富的知識令人耳目一新，謝謝老師的教誨，在此致上我由衷的感謝。

感謝口試委員，林世宗老師、詹明勳老師、林宜靜老師，不辭辛勞地奔波，
與提供寶貴的意見，讓我茅塞頓開，使論文更為完整。

塔塔加鑽鑽鑽的採樣工作，在阿康英明的指導下完成了，樣木空間定位資料
也被盈秀買單了，我只要數年輪跟分析就好。可能回歸大地或漂浮在大海之中的
樣樹們，抱歉啊，這篇論文寫得有點久，希望散佈在崩塌地的小苗能順利長大。

路上遇到了很多人，承蒙照顧，智昕學長、啟皓學長、小欣學長、阿武學長、
盈秀學姐、俊毅學長、雅慧學姐、阿康學姐、永翔、士弘、柏因、小雪、菜菜、
阿洪、游長官、William、花媽、悅心學姐、思吟學姐、毓苓、育銘、梁小姐、鯊
鯊、致儀、阿八、臺大手球隊的諸位。感激在心，或許遺漏某些重要人物，請多
包涵。

想很多，做很少，拖拖拉拉遲遲不動手的毛病實在很糟糕啊。

嘿，我的家人，抱歉，我像個公子哥，雜事都不做；嘿，阿婆，我畢業囉。

中文摘要

臺灣位於西太平洋北部之颱風帶，每年颱風季常有颱風挾帶著強風豪雨侵襲。如此頻繁且規模較大的擾動，對於臺灣森林的動態與演替應扮演極為重要的角色，然國內迄今未能對此議題有深入之探討。有鑑於此，本研究以樹輪生態學方法，探討臺灣中部塔塔加地區臺灣雲杉永久樣區之林分動態。經由每木定位及生長錐鑽取臺灣雲杉、臺灣鐵杉、臺灣華山松樹芯，並透過輪寬量測與交叉定年，得出雲杉林每木的年齡與徑向生長量。而後依生長變化率以移動平均法、標準界限曲線法及絕對增加法重建過去擾動年代表，期望瞭解與重建該林分之歷史動態。

結果顯示，本樣區林木最早建立於 1691 年。齡級結構呈雙峰分布，分別於 1760~1850、1870~1930 年有兩個世代的族群建立潮；雲杉與鐵杉的建造歷史相近，可略分為兩個世代，而華山松的建立較為均勻且少量。在林齡的空間分布上，中世代(1760~1850)與新世代(1870 以後)有明顯的塊集鑲嵌現象，分別佔據樣區東半邊與中央偏西北側。

建立雲杉、鐵杉、華山松標準界限曲線 $y = 816.17e^{-1.179x}$ 、 $y = 630.67e^{-0.934x}$ 、 $y = 791.1e^{-1.276x}$ 以估計樹種反應擾動事件的潛在最大生長變化率；擾動重建結果，不同準則方法所重建的擾動年代表類似，林木顯示 1740's、1770's、1850's、1890's、1940's 年代有較大的生長釋放，結合齡級結構、樹齡空間分布與擾動年代表，推測過去曾於 1740's、1850's 年代發生林分取代性擾動。新世代林木所佔據的區塊，與 2009 年莫拉克颱風所造成之崩塌相符合，推測過去於 1850's 年代可能有類似大規模地滑事件造成大面積的林地裸露，並於 30 年後才開始大量建立；而 1740's 年代也潛在有大規模擾動事件發生，但時間較為久遠、留存林木較少，可信度較低。

雲杉與鐵杉的生育地相似，過去文獻指出雲杉需要較大的孔隙才有幼苗更新，崩塌為其可能之更新機制，大規模擾動對於雲杉更新扮演著促進的角色，以維持其族群優勢。

關鍵字：標準界限曲線法、樹輪生態學、擾動重建、林分動態、臺灣雲杉

Abstract

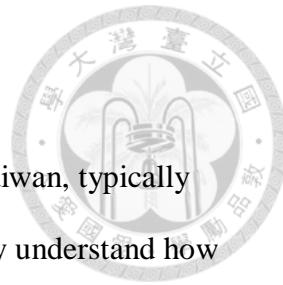
Typhoon is one of the most important natural disturbances of Taiwan, typically bringing heavy rains and strong winds. However, we have yet to fully understand how such disturbances affect Taiwan's forest dynamics and successions. The objective of this study is to reconstruct disturbance chronology and to understand the dynamics of a Taiwan spruce (*Picea morrisonicola*) stand in central Taiwan based on a dendroecological approach.

The stand was mainly comprised of Taiwan spruce, with Taiwan hemlock (*Tsuga chinensis* var. *formansa*) and Taiwan Masters pine (*Pinus armandii* var. *masteriana*) being the co-dominant species. Each tree of the three species within the stand was mapped and cored. Following the standard dendrochronological steps, the age at coring-height of each tree was then determined. By applying the moving-average method, boundary-line method, and absolute-increase method, this study reconstructed the disturbance chronology of the stand.

The results suggested that the oldest tree in the stand was established in 1691. The age structure of the stand showed a bi-modal distribution with two cohorts (1750~1850, 1870~1930). The age structures of spruce and hemlock was similar, whereas the establishments of the pine were rare but evenly distributed. Spatially, the two cohorts occupied the eastern (first cohort) and northwestern sides of the stand, respectively.

The three methods used to reconstruct disturbance chronology showed similar patterns with major growth releases in the 1740's, 1770's, 1850's, 1890's, and 1940's. Based on the age structures, spatial distributions, and disturbance chronology, this study suggested that there were two major stand-replacement events in the 1740's and 1850's.

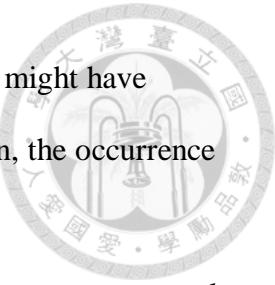
As the second cohort (1870~1930) was largely destroyed by the Morakot typhoon of 2009, it is inferred that an event with a magnitude similar to that of the Morakot



typhoon occurred in the 1850's. Another significant disturbance event might have occurred in the 1740's. However, due to limited amount of information, the occurrence and impact of the event were less certain.

It has been suggested that Taiwan spruce may require large gaps to regenerate and maintain its dominance in the study area. The results from this study confirmed this hypothesis.

Keyword: boundary-line method, dendroecology, disturbance reconstruction, stand dynamic, Taiwan spruce



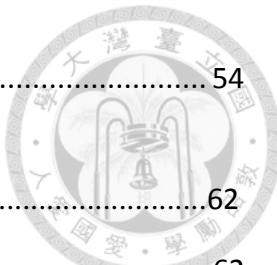
目錄



致謝	ii
中文摘要	ii
Abstract	iii
目錄	v
圖目錄	viii
表目錄	ix
第一章 緒論	1
1.1 摾動與林分動態	1
1.2 樹木年代學與擾動重建	2
1.3 研究目的	3
第二章 前人研究	4
2.1 塔塔加雲杉林	4
2.2 樹輪學基本原理	5
2.3 輪寬生長概念模式	6
2.4 樹木生態學	9
2.5 國外樹輪相關研究	10
2.6 國內樹輪相關文獻	12
2.7 生長釋放	12
2.7.1 移動平均法 (moving-average method)	13
2.7.2 標準界限曲線法 (Boundary-line method)	15
2.7.3 絶對增加法 (Absolute-increase method)	18
第三章 研究材料與方法	19
3.1 樣區描述	19
3.2 主要樹種特性	22



3.3 野外取樣與樣本處理.....	23
3.3.1 野外取樣.....	23
3.3.2 樣本處理.....	23
3.4 交叉定年(cross-dating).....	24
3.4.1 輪寬測量.....	25
3.4.2 統計定年檢驗.....	26
3.5 分析方法.....	26
3.5.1 年齡估算.....	27
3.5.2 摾動重建.....	28
3.5.2.1 標準界限曲線.....	29
3.5.2.2 生長釋放之檢測標準 (criteria of release detection)	30
3.6 摾動年代表的建立.....	31
第四章 結果	32
4.1 林分組成與結構.....	32
4.2 定年結果.....	34
4.3 齡級結構.....	35
4.4 輪寬敘述統計值.....	38
4.5 摾動歷史重建.....	40
第五章 討論	46
5.1 塔塔加雲杉林撿動動態.....	46
5.2 樹輪傷疤證據.....	47
5.3 天然災害紀錄 -地震、颱風.....	48
5.4 樹種組成.....	50
5.5 雲杉優勢.....	50
5.6 釋放偵測方法比較.....	52
第六章 結論	53



參考文獻	54
附錄	62
附錄一、COFECHA 結果：敘述統計	62
附錄二、COFECHA 結果：主序列年表 (master chronology)	65
附錄三、COFECHA：序列修正	68
附錄四、樣芯缺失輪年分	70
附錄五、擾動年代表(以樣芯為單位)	71
附錄六、2009 年 8 月 18 日空照圖(莫拉克颱風過後)	76
附錄七、傷疤解剖特徵	77
附錄八、各林木之釋放歷史	79
附錄九、生長釋放之空間分布	82
附錄十、R code 與 Excel 公式	83

圖目錄



圖 2.1 林木生長影響因子示意圖	8
圖 2.2 摾動反應在樹輪之證據	10
圖 2.3 先前生長率和生長百分變化率計算方法	13
圖 2.4 移動平均法釋放偵測示意圖	15
圖 2.5 標準界限曲線法之建立步驟說明	17
圖 2.6 依對應之標準界限曲線值將生長峰值(growth pulse)分級	17
圖 3.1 塔塔加 1ha 永久樣區位置圖	20
圖 3.2 阿里山測站溫度、雨量圖(1934~2009)	21
圖 3.3 塔塔加樣區地形圖	21
圖 3.4 樹芯打點記號範例	24
圖 3.5 列表比較法示意圖	25
圖 3.6 目視髓心估算法	28
圖 3.7 三樹種之標準界線曲線	29
圖 4.1 不同樹種之徑級結構	32
圖 4.2 徑級的空間分布	33
圖 4.3 各樹種之齡級結構	35
圖 4.4 林木建立年代地圖(胸高年齡)	36
圖 4.5 三樹種之林木建立年代地圖	37
圖 4.6 不同樹種之胸徑與年齡關係	39
圖 4.7 三樹種輪寬盒鬚圖(box plot)	39
圖 4.8 不同方法之擾動年代表	41
圖 4.9 不同方法之相對化擾動年代表	42
圖 4.10 移動平均法之擾動年代表	43
圖 4.11 移動平均法之相對化擾動年代表	43

圖 4.12 標準界限曲線法之擾動年代表	44
圖 4.13 標準界限曲線法之相對化擾動年代表	44
圖 4.14 絶對生長法之擾動年代表	45
圖 4.15 絶對生長法之相對化擾動年代表	45
圖 5.1 歷史擾動可能的空間分布	47
圖 5.2 樹輪傷疤與擾動年表比對	48

表目錄

表 4.1 樣區胸高斷面積(BA)、株數(n)、樣芯定年結果	34
表 4.2 三樹種之輪寬基本統計值	38
表 5.1 擾動事件與影響範圍	49
表 5.2 不同樹種林木生命週期之生長釋放次數比例	52



第一章 緒論

2009年8月初，莫拉克颱風挾帶強風豪雨，短暫卻極端的強降水為臺灣中部阿里山地區帶來超過3,000 mm的雨量，造成中南部與東南部嚴重災害。位於臺灣中部陳有蘭溪支流沙里仙溪上游塔塔加地區之雲杉永久樣區發生嚴重崩塌，60%的林地裸露。有識者認為莫拉克颱風乃人類活動所導致氣候暖化下之極端氣象事件，亦有認為類似莫拉克颱風之豪雨雖為極端事件，但並非未曾發生過，只是發生機率較低，數百年難見。因臺灣地區開始觀測氣象不過百年，是以殊難判斷何者為是。然而若能經由樹輪年代學(Dendrochronology)方法瞭解進而重建塔塔加地區林分動態，不僅可對擾動(disturbance)如何形塑臺灣的中高海拔地區森林有更進一步之認識，亦可推估與瞭解類似之強降水事件之發生頻度。

1.1 擾動與林分動態

森林林分動態乃研究林分結構與組成隨著時間之變化(Oliver & Larson, 1996)。森林發育—森林結構隨著時間發生重大改變；演替—物種組成隨著時間發生改變(Frelich, 2002)。森林發育可分四個階段：林分起始期、林分排除期、下層再現期、老熟林(Frelich, 2002；Oliver & Larson, 1996)。

林分起始期，在大規模擾動(如強風、火災或皆伐)過後，新個體與新物種持續出現，可持續好幾年；**林分排除期**，前期樹木之優勢及持續生長，森林樹冠開始閉合，林下鬱閉使得新個體難以進入，前期樹木因為競爭產生自我疏伐；**下層再現期**，經過前期之疏伐，存活優勢木持續生長，但仍有競爭及死亡現象，林冠開始疏開，林下光線增加，地表出現樹木幼苗或其他灌木、草本，森林結構出現分層；**老熟林**，更久以後，優勢木零星地死亡，部分下層木開始生長晉級至上層，族群轉變成完整的異齡林，有許多不同大小齡級或徑級的冠層樹，可能會有少數最初建立的族群殘留。

天然擾動在時間和空間上的形式強烈影響著森林的組成、結構與功能(Fraver



& White, 2005; Veblen, 1989), 為觸發整個森林動態過程的原動力改變環境資源利用性來促使其他個體更新。古典植群演替理論認為非耐蔭種終會消失，而森林最終僅由耐蔭種所組成，並假定天然的擾動是例外，乃不尋常發生的事件；孔隙動態理論(gap dynamic theory)則認為擾動乃是常態，非耐蔭種藉由孔隙在成熟森林裡更新，維持它的族群，由天然擾動疏開樹冠層而成的孔隙，提供利於樹種更新的微環境條件(高光照、不同的溫濕度與土壤理化特性)，使幼苗得以建立或生長至樹冠層中(Watt, 1947; Whitmore, 1975; Yamamoto, 2000)。

擾動由樹冠層疏開的程度，可分為兩類型：林分取代性(stand-replacing)擾動、林木取代性擾動(tree-replacing disturbance) (Oliver & Larson, 1996)。林分替代性擾動為大規模的擾動，造成整個林分毀滅而全面更新；林木替代性擾動為小規模的擾動，造成單一或數株林木死亡，進而疏開樹冠，產生孔隙。

Oliver (1981)將孔隙內的族群更新變化可分為三個階段：孔隙(gap)期、建造(building)期、成熟期(mature phase)。孔隙期—侵入孔隙的幼苗數逐漸增加；建造期—小樹密度開始飽和，強烈的競爭與自我疏伐發生；成熟期—更新的林木已晉升至樹冠層，競爭趨於和緩。

林分在空間上同時存在不同發育階段的塊集(相同徑級或齡級的集合體)，呈現塊集的鑲嵌分布(mosaic of patches)。擾動造成環境在空間與時間上的異質性，使森林呈現空間上異質、時間上變動的動態鑲嵌體(dynamic mosaic)(梁曉東、葉萬輝，2001)。

1.2 樹木年代學與擾動重建

林木是天然環境的記錄器，在不同環境下，將環境訊號(氣候、擾動)表現於各式細胞生長上(輪寬、木材密度、解剖特徵、化學組成等)(Schweingruber, 2007)。樹木年代學(dendrochronology)，指的是將樹木予以定年的科學，應用至研究各式林木生長限制因子上(Fritts, 1976)。

由於樹木的長壽，與形成層因季節交替所產生清楚的樹輪界線(晚材、早材)，樹輪紀錄有高解析度(以年為單位)、長周期的環境資訊。天然擾動影響樹木的生長，反應在其更新型式、樹冠結構、徑向生長，解剖特徵上。擾動對林分造成死亡、受傷與冠層疏開的孔隙更新，應用樹輪年代學，由植物社會個體的建立時間、樹幹的疤痕、輪寬的生長型式等可以重建較長期間且高解析度的林分擾動歷史(封曉輝等人，2011；Speer，2010)。

前人研究發現，臺灣雲杉(*Picea morrisonicola*)幼樹於林下罕見，其小苗之出現多在溪流向源侵蝕的溝狀崩塌地上，推測其需要較大的孔隙才有幼苗更新，崩塌為其可能之更新機制(柳梧等人，1961；曾彥學，1991)。過去的擾動在空間、時間上是如何塑造林分現在的結構與組成？森林的組成、結構，由其環境、時間、生物等各式因素複合而成，塑造今日的模樣，本研究於莫拉克颱風之前，即在塔塔加永久樣區鑽取樹芯，欲重建林分之擾動動態。該樣區由臺灣雲杉為優勢，伴生臺灣鐵杉(*Tsuga chinensis* var. *formosana*)、臺灣華山松(*Pinus armandii* var. *masteriana*)(以下簡稱為雲杉、鐵杉、華山松)與其他樹種；如2009年八八水災之大規模擾動，過去是否發生類似規模擾動，此類大規模擾動是否為雲杉純林維持的動力，值得深入去探討，時間序列搭配空間資料的演繹，將會對過去的推論更為清楚。

1.3 研究目的

本研究藉由樹輪生態學方法配合林木空間定位，研究目的為：

- (1) 重建過去塔塔加雲杉林三百年的擾動歷史。
- (2) 生長釋放判定方法之比較。
- (3) 比較臺灣雲杉、臺灣鐵杉、臺灣華山松徑向生長表現、生態習性的差異，探討樹種共存、未來演替的推移。

第二章 前人研究



2.1 塔塔加雲杉林

柳櫈(1971)指出，臺灣海拔 2500~3000 m 植群可分類為冷溫帶山地針葉樹林群系，此分布區域於近山脊嶺線之處，形成兩種生育環境，一為陽坡或為近山脊嶺線地帶之乾燥區域，一為山腹平坦及溝谷地帶之陰濕環境，雖伴生分子複雜，但主要組成分子僅有鐵杉、雲杉兩種，其對溫度適應一致，但對水濕及土壤之適應不一，故各自形成單一之群落。

塔塔加雲杉林之植群分類為涼溫帶山地上層針葉樹林-鐵杉雲杉林帶-台灣雲杉林型，此林型中，雲杉幼樹於林下罕見，若樹冠鬱閉良好或全部破裂則不易發生；雲杉屬於中性樹種，認為其為一過渡期之樹種，目前之植生為不安定集團，但環境適當時，過渡時期成小團之純林亦屬自然之事(柳櫈等人，1961)。

曾彥學(1991)採用 24 種樹種依群團分析法將其樣區分為兩個塊集，一為大徑級雲杉為主所組成之塊集，代表成熟期林分，平均樹高為 35 m、平均 DBH 為 40 cm、年齡 159-317 年；另一為小徑級雲杉及中小徑級鐵杉為主所組成之塊集，代表建造期林分，平均樹高為 20 m、平均 DBH 為 18cm、年齡 45-120 年。

指出雲杉小苗無法於建造期及成熟期林下更新，其幼苗之更新可見於溪流源頭帶狀溝蝕之林冠疏開地；單株或少數老木死亡所形成樹冠裂隙中，未見雲杉更新幼苗。並推斷，雲杉需要孔隙在 $1600\text{--}2400\text{ m}^2$ 以上才有利更新；孔隙的形成機制大多為崩塌或地滑之擾動，雲杉可藉此溝蝕作用更新，藉不同塊集之更換而形成全林分之持續與更新(曾彥學，1991)。

劉淑芬(1998)，以聚集強度指數和樣區變異數模式分析其樣區內空間分布，小徑木($<25\text{cm}$)的塊集呈現較為密集，塊集面積約 $400\text{--}500\text{m}^2$ ；中徑木($26\text{--}50\text{cm}$)亦是聚集分布，但聚集度較小，不易確切地劃定，塊集面積約 2600m^2 ；大徑木($>50\text{cm}$)的聚集度很小，接近逢機分布。



樣區可概分為建造期、成熟期與孔隙期，應用 Weibull 機率密度函數與矩陣生長模式得知林分結構以中、小徑木居多，小徑木和大徑木的早期均有較高的晉級機率，後來則趨於平緩。臺灣雲杉，徑級大小與樹齡大致呈線性相關，直徑大小的變異隨樹齡變大而增加。關聯性分析，雲杉與其它針葉樹種為負向相關，而與耐蔭性強的闊葉樹種有正向關聯(劉淑芬，1998)。

根據上述研究，臺灣雲杉之更新，需要較大規模的擾動(林分取代性擾動)來疏開樹冠層，而新建立之同生群(cohort)聚集生長而成塊集，在空間上呈現塊集鑲嵌分布，藉此更換而達全林分之持續。

2.2 樹輪學基本原理

林木生長過程中，除了正常形成層分裂所產生早晚材變異，也可能反應特殊的環境變異(蔣麗雪，2011；Schweingruber，2007)：缺失輪(missing ring)、偽年輪(false ring)、霜輪(frost ring)、傷疤(scar)、反應材(reaction wood)、傷癒樹脂溝(traumatic resin duct)、癒傷組織(callus tissue)。

缺失輪與不完全輪，當環境惡劣、頂端合成之植物荷爾蒙分配不均，使得下面樹幹之形成層無法活化或分裂期較短，而造成缺輪或部分區域無生長的現象。

偽年輪，突然的生長逆境造成形成層停止生長，而留下類似年輪之界線，與正常輪相比，正常輪的晚材形成加厚完畢休眠至隔年的早材生成，其界線清楚，而偽年輪之界線較為漸進。

反應材，當坡度或其他外力因素導致樹幹傾斜，生長素因重力分配不均，生長發生偏心，在顯微鏡下顏色較深，晚材比例異常大於早材。闊葉樹的反應材發生於傾斜樹幹的上側加厚，稱為引張材(tension wood)；而針葉樹加厚於下側又稱為壓縮材(compression wood)。典型的壓縮材細胞為管胞(tracheid)，細胞壁明顯加厚、橫切面為圓角狀，細胞間隙大；縱切面則可看到螺旋狀加厚。

傷疤、傷癒樹脂溝、癒傷組織，為植物的保護機制，產生特化的組織阻隔傷



口與正常組織。當受火災、或外力傷害，造成部分形成層死亡，由兩側活的形成層迅速生長向其覆蓋，而形成傷疤；受蟲咬、真菌感染或其他機械傷害刺激，而分化出大量、排列連續的異常樹脂溝(傷癒樹脂溝)；癒傷組織則為在受傷區域由具有分化能力、無特定形狀的薄壁狀細胞所集結而成。

樹輪學有其基本的理論架構，可列為以下幾點 (鄒佩珊，1998；蔣麗雪，2011；Fritts，1976)：

均一性原理(the uniformitarian principle)乃指所討論之環境變異，過去與現在表現是否一致；自相關(autocorrelation) 乃因當季儲存的光合作用產物等待明年開始恢復生長時利用，或受傷影響林木生長持續數年，在時間上會呈現自相關；限制因子原理(the principle of limiting factors)、生態幅度(ecological amplitude)、生育地選擇(the principle of site selection) 及複本原理(repetition)乃指所選之樣地、樣木所含有之訊號是否具代表性，生長乾旱的地點易受降水量限制，高海拔地區易受溫度限制，高密度樣區則受競爭影響，只有在限制因子存在時，輪寬或其他生長變異才能與之相關，並取足量樣本；交叉定年(crossdating)乃藉由比對生長在鄰近區域樹木間的輪寬變化或其他結構特徵，使得每一樹輪形成的確切年份得以確認，研究結果才可信。

2.3 輪寬生長概念模式

雖然樹輪在研究環境變遷有廣泛地應用，但將想要的訊號從不想要的雜訊中分離卻是困難與充滿不確定性 (Cook，1987)。而訊號與雜訊的分野，視研究者關切的議題而定，對於不同研究主題，樹木氣候學或樹木生態學，某研究者認為的訊號可能為另一研究者的雜訊。

Cook (1987) 提出，林木生長是同時許多影響力不同的因子構成，可視為許多觀測的次序列所線性集結(linear aggregate)而成，此集結序列可表示為：

$$R_t = A_t + C_t + \delta D1_t + \delta D2_t + E_t$$

R_t ：輪寬或其它樹輪序列

A_t ：年齡或大小相關的生長趨勢

C_t ：樹間或林分共有的氣候相關生長變異

$\delta D1_t$ ：林分內在因子的擾動

$\delta D2_t$ ：林分外在因子的擾動

E_t ：上述因子未解釋的逢機變異

樹輪序列可分解為一個趨勢(A_t)、兩個共同訊號(C_t 、 $D2_t$)、兩個個別訊號($D1_t$ 、 E_t)。在 $D1_t$ 、 $D2_t$ 前綴的 δ 為二元參數，當 $\delta=1$ ，表示存在， $\delta=0$ ，表示不存在，這意味著，在時間序列中， A_t 、 C_t 和 E_t 三個因子是連續存在的，而擾動可能只發生於某些時段 t 中。

A_t ，代表了林木的生長趨勢，在開闊環境下生長的樹木，其生長趨勢常呈現指數遞減的情形，此反映了相同的材積分配在幾何上半徑漸增的圓柱體，輪寬隨年齡、徑級遞減的情形。然而，在競爭和擾動較頻繁的林分中，生長趨勢會受影響而曲解，因此 A_t 沒有限定於某特定曲線。但在某些特例下(如：開闊林分)可用負指數曲線之類的特定模式來估算。

C_t ，呈現了不包含擾動的所有氣候相關環境變數，例如降水、溫度與熱積，進而影響土壤濕度、蒸發散量、物候，對同一林分中的林木而言， C_t 是一個共同的訊號。

$D1_t$ ，為樹木對局部或內在擾動的反應，在輪寬序列中其效應是短暫而會消逝的波動(pulse)，來自於林分發育過程中，因樹冠鬱閉與孔隙產生造成的被壓和釋放，在時空上呈現小尺度的逢機事件，影響範圍多僅限於孔隙相鄰的樹木而非整個林分。

$D2_t$ ，為樹木對林分尺度擾動的反應，多源自於火災、風、蟲害、病害、伐木





或汙染等外在因子。與 $D1_t$ 不同的是， $D2_t$ 呈現了林分共有的特徵，例如輪寬突然的增加，會同步地出現在同一林分不同的樣木上。

E_t ，代表上述因子未能解釋的部分，可能來自於微環境、土壤及水文梯度的差異或測量誤差。

不同時期時，林木反應所的主導因子會有所不同(圖 2.1)，於早期時生長趨勢明顯，而幼樹期受競爭影響，當生長至冠層之後，則較能反應出氣候的訊號。

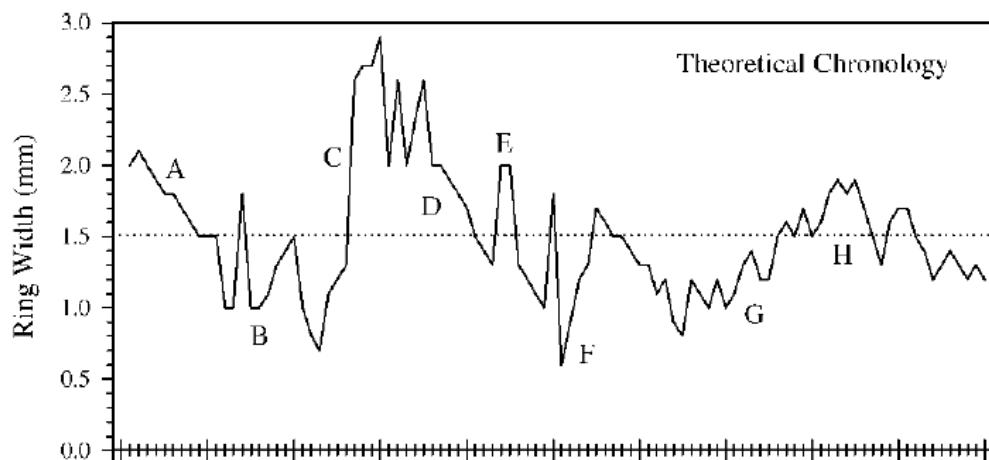


圖 2.1 林木生長影響因子示意圖。A 在開闊地快速的初期生長、B 由於樹冠鬱閉和競爭而生長減緩、C 從被壓中釋放、D 由於樹冠再次鬱閉而生長減緩，E 氣候適當而生長增加、F 乾旱而生長減緩、G 較小的擾動、H 到達冠層後的生長浮動
(Rubino & McCarthy, 2004)



2.4 樹木生態學

自 A.E. Douglass 發展交叉定年以來，樹輪所記錄之高解析度、較長時間的環境變異訊號，讓樹木年代學應用至許多不同領域：考古、氣候、生態、地貌、水文、化學等。藉由樹齡、輪寬變異、木材密度、化學元素組成、火災傷疤、傷癒樹脂溝、反應材的形成，探討議題牽涉氣候變遷、林分動態、植物生理生態、病蟲害爆發、重金屬汙染、地質作用、水位變化等，應用甚廣(Speer, 2010)。

樹木生態學(dendroecology)，應用樹輪研究生態過程，例如樹木界線的移動、林分動態(年齡結構、演替與建立)、或擾動(火災、風害、蟲害)等。不同類型的擾動對樹木個體的影響有所不同，造成直接傷害或對生長造成影響(壓抑或釋放)。火災以火燒傷疤為主要依據，並使用軟體 FHX2 做為分析；病蟲害，則根據害蟲對樹木採食的專一性和樹木之間對氣候反應的同步性，除了疤痕之外，藉由比較寄主樹種的年輪序列(host)與非寄主樹種的年輪序列(reference)，而重建因病蟲害所造成的生長壓抑，可用軟體 OUTBREAK 分析；風害或孔隙重建，則主要以樹輪平均寬度的變化，重建樹冠層打開，孔隙所造成之生長釋放(封曉輝等人，2011)。

樹木地貌學(dendrogeomorphology)，利用樹輪研究並重建地質作用發生的時間，如山崩、河流沈積、冰河活動、火山、地震等。在崩塌地或河道旁所生長樹木的年齡，提供了地質作用過去發生的最小估計年代，另外將樹幹傾斜、受傷、倒伏所造成之反應材、傷疤、癒傷組織、樹脂溝、生長受壓與增加合併成 GD (growth disturbance event)以重建地質事件的發生頻度與範圍(圖 2.2)(Stoffel *et al.*, 2013)。

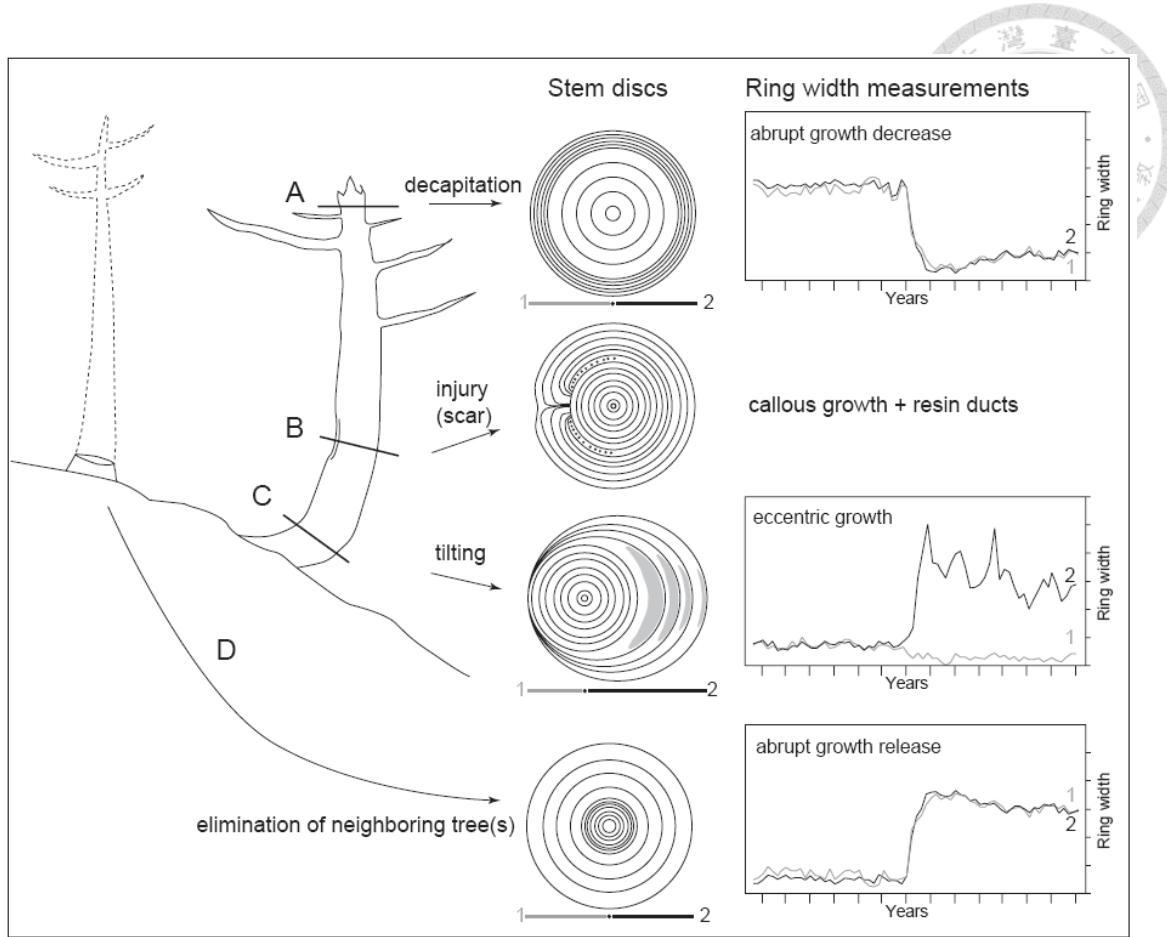


Fig. 5. Evidence used to infer rockfall events.

圖 2.2 擾動反應在樹輪之證據。斷頭、受傷、傾斜、鄰樹的移除，所對應的樹輪反應為突然地生長減少、癒傷生長與樹脂溝、反應材、突然地生長增加 (Stoffel *et al.* , 2005)。

2.5 國外樹輪相關研究

自樹木年代學在歐、北美洲發展以來，逐漸擴展至亞洲、非洲、南美洲，研究樹種也自溫帶樹種增加至熱帶樹種，也擴展至多年生灌木(Buras *et al.* , 2012 ; Cook *et al.* , 2010 ; Rozendaal *et al.* , 2011 ; Shi *et al.* , 2012 ; Wils *et al.* , 2011)。除了樹木氣候學陸續重建過去氣候關係，或發表許多穩定同位素年表；樹木生態、地貌學也應用至冰川界限、擾動、林分動態、雪崩的重建(藍永如等人, 2011 ; Corona *et al.* , 2013 ; Daniels , 2003 ; Trotsiuk *et al.* , 2012 ; Zielonka *et al.* , 2010)。



Lorimer 等人(1988)、Lorimer 與 Frelich(1989) 以生長於鬱閉與無遮蔽之小樹平均輪寬的比較，設定早期生長率之臨界值來判斷林木為開闊生長之機率；由早期生長率、輪寬生長型式(突然釋放、中度釋放、拋物線、不規則等)，決定各單一林木的冠層晉級時間(canopy accession date，林木生長至冠層的時間)，配合胸徑—樹冠幅度迴歸式，估計過去冠層擾動強度，並計算再現期(rotation period)。

Rentch 等人(2010)在美國維吉尼亞州研究紅雲杉(*Picea rubens*)-北方闊葉林的孔隙動態，由枯立、枯倒、根拔木調查孔隙形成木(gap-maker)，並記錄孔隙大小並在周圍鑽取樹芯，以輪寬相對變化率增加 25%、100%，來區分孔隙邊緣木(gap border)、孔隙填充木(gap-filler tree)，並由釋放時間決定孔隙打開的年代；北美水青岡為主要孔隙形成木、紅雲杉為主要孔隙填充木，孔隙鬱閉平均需要 15-20 年，推論紅雲杉生長至冠層(30-60 年)需要一個以上的擾動方可達成。

Panayotov 等人(2011)在保加利亞挪威雲杉林，以相對輪寬變化率(輪寬突然增加 200% 為強度釋放、輪寬減少 60% 為強度受壓)，加上空照圖、風倒跡地調查，區分風倒、蟲害、火災擾動，發現過去 150 年裡，強風為林分塑形的主要因子，森林面積至少有 18% 受到嚴重的風倒。

Hart 等人(2012)在美國田納西州，以 30 棵受壓樹的近三年平均輪寬 0.9 mm，做為北美紅楓受壓或釋放的判斷閾值，由紅楓的建立、受壓、釋放來看，未經歷受壓便晉級至冠層佔 61% (gap-origin)，而其他林木經歷受壓平均 24 年之後晉級冠層，推論在林火減少的情況下，適宜的氣候讓植群相逐漸由櫟樹林向楓樹林演替。

Saez 等人(2012)重建東南法國阿爾卑斯山脈山崩，藉由判斷生長擾動 (GD，生長減緩、反應材、樹脂溝) 在樹輪的位置(早材初期、早材後期、晚材)，配合形成層活動時期(七月中開始形成晚材、十月到五月休眠)，讓重建提高至季節解析度。



2.6 國內樹輪相關文獻

臺灣地區的樹輪研究日漸發展，由研究林木徑向及高生長(鍾智昕, 2005; Guan et al., 2012)、樹種特性(林振榮等, 2010)，而後以氣候重建為主要議題 (詹明勳等, 2005；陳姿彤, 2011；鄒佩珊, 1998；蔣麗雪, 2011)，另應用至環境汙染(杜政翰, 2006；陳彥豪, 2008)、火災(陳明義、施纓煜, 1999)、林木更新模式(詹琬婷, 2004；陳品邑, 2012)、崩塌作用 (柯傑夫, 2010)，也有偏重於方法的探討(曾秀緣, 2011；陳柏因, 2012)。

研究樹種也日漸增加，臺灣雲杉、威氏帝杉、柳杉、樟樹、昆欄樹(張琇慧, 2000)、玉山圓柏(陳建璋, 2011)、台灣二葉松、臺灣冷杉、苦棟、臺灣扁柏、臺灣水青岡等。研究素材包括了樹幹解析、年齡估算、輪寬、密度、穩定同位素(鄭謹緒, 1997)。

詹琬婷(2004)於棲蘭山以臺灣扁柏根株分析其更新機制，由早期生長率、輪寬生長變化率推測扁柏可藉由小尺度之擾動更新。

陳品邑(2012) 於銅山探討臺灣水青岡森林動態與更新，分析上方鬱閉與無遮蔽之小樹的近五年平均輪寬，來設定判定年輪釋放與受壓的臨界值；由受壓-釋放交替的徑向生長模式推估，水青岡可藉由孔隙生長至冠層。

柯傑夫(2010)於鐵立庫崩塌地周圍，取樣了 6 棵傾斜樹，並探討其徑向變異(平行、垂直傾斜方向共取 4 個樣芯)，並以累積生長量討論崩塌發生前後之差異。

2.7 生長釋放

生長釋放定義為，突然地、持續性、大幅度的徑向生長增加(Frelich, 2002)；當冠層因擾動而被打開，下層木獲得較好的光資源，造成突然而持續數年的快速生長(release from suppression)；或週遭木被移除，冠層木從彼鄰競爭中釋放而生長加速(release from competition of neighbors)。

Canham (1985)，設定 0.5 mm 為糖楓(*Acer saccharum*)釋放或受壓的臨界值，若連續 4 年以上平均輪寬低於 0.5 mm，且接下來 3 年無超過 0.5 mm，視為受壓；若受壓以後，連續 4 年以上平均輪寬高於 0.5 mm，則認定為釋放。

關於釋放偵測，或以輪寬平均值，或以輪寬變化率來評估，歸類約有四種主要類型方法：靜態生長法、去趨勢法、移動平均/中位數法、事件反應法；而移動平均法最普遍應用於釋放偵測，並衍生一些改良方法，如標準界限、絕對生長、斷面積生長法 (封曉輝等人，2011；Rubino & McCarthy，2004；Stan & Daniels，2010)。

2.7.1 移動平均法 (moving-average method)

Nawacki 和 Abrams (1997)，採用移動平均法計算每年的相對生長率來鑑定冠層擾動所造成的生長釋放，藉由逐年比較前後 10 年輪寬平均(圖 2.3)，當生長百分變化率之峰值(pulse)超過所預設臨界值(threshold) 時則認定為釋放事件(圖 2.4)。

公式如下：

$$\%GC = [(M_2 - M_1) / M_1] \times 100$$

%GC：生長百分變化率(percentage growth change)

M_1 ：前 10 年輪寬平均(包含當年)

M_2 ：後 10 年輪寬平均(不含當年)

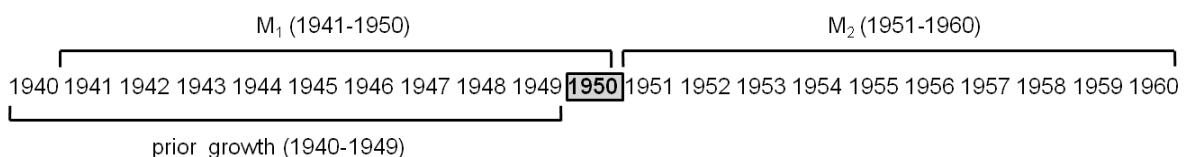


圖 2.3 先前生長率和生長百分變化率計算方法。

以 1950 年為例，計算當年生長百分變化率，公式為 $\%GC = [(M_2 - M_1) / M_1] \times 100$ 。 M_1 為包含當年的前 10 年輪寬平均； M_2 為不包含當年的後 10 年平均；先前生長率 (prior growth rate) 為不包含當年的前 10 年平均 (修改自 Black & Abrams，2004)。

藉由移動平均法計算徑向生長的變化率，以捕捉冠層空間釋放所造成的生長增加，當達到所設定之臨界值便認定為擾動所造成之釋放；並可藉由移動帶寬的調整(設定以幾年平均為計算單位)，以消弭不同頻率之氣候訊號。

三個參數影響了移動平均法的表現：臨界值、移動帶寬、效應持續(threshold、moving average、window)。

1. **臨界值**影響最大，當臨界值愈高，林木顯示釋放之比例愈低(Stan & Daniels, 2010)。單一或小群樹的孔隙打開，徑向生長可能增加 25-99%，反應側邊冠層空間的釋放；若由下層樹晉升至冠層(canopy accession)則可能超過前年生長 100% 以上。
2. **移動帶寬**，十年的輪寬平均可以有效抵消短期氣候造成的生長波動(低溫、乾旱等)和漸進的長期生長趨勢(氣候遷移、由年齡增長或樹幹圓柱幾何生長所造成之生長趨勢) (Nawacki & Abrams, 1997)；而 Song 等人(2011)為了捕捉較高頻率的颱風訊號則選擇五年的帶寬。
3. **效應持續**，冠層空間的打開，其生長釋放會持續一段時間，依擾動性質、強度而有所變異，一般認為會持續 5 年以上。

對於強度較大的擾動，三參數在鑑定釋放上並無太大影響，但在年份會有所差異。

移動平均法，廣泛應用於擾動偵測，並有許多疏伐試驗證據印證，適用於溫帶森林、鬱閉森林，較不適用開闊森林、疏林等地 (封曉輝等人, 2011；Nawacki & Abram, 1997；Rubino & McCarthy, 2004)。另外，由於公式本身結構的關係，輪寬序列最早 10 年與最後 10 年的生長百分變化率無法計算。

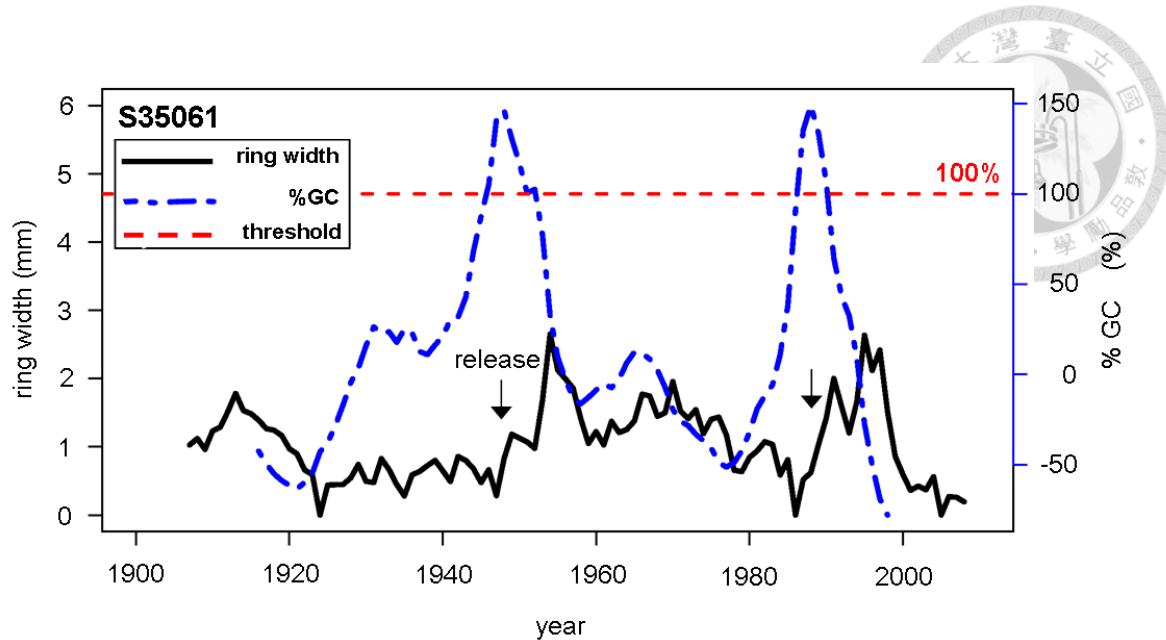


圖 2.4 移動平均法釋放偵測示意圖。以雲杉 S35061 樣本為例，當計算之生長百分變化率%GC 超過所設定之臨界值(100%)時，認定為一次釋放，並依%GC 峰值訂定釋放年分，該樣本共有兩次生長釋放於 1948、1988 年。

2.7.2 標準界限曲線法 (Boundary-line method)

擾動本身的性質、作用的範圍與強度、樹種、樹齡、徑級、先前生長率、樹冠級、年間的氣候變動，皆會影響樹木對孔隙的生長反應。移動平均法所設定的簡單而固定臨界值並未能彈性適應不同情況，相對於年輕、尺寸較小的樹，相同的臨界值對於較老、尺寸較大的樹會比較嚴苛；此外，也必須各別制定物種的臨界值(Black & Abrams, 2003；Frelich, 2002)。

Black 和 Abrams (2003) 在移動平均法的基礎上，提出了標準界限曲線法(boundary-line method)，改採用變動的臨界值來定義釋放事件，依先前生長率(prior growth rate，不包括當年的前 10 年平均輪寬，圖 2.3)以及所對應的生長百分變化率(%GC)，建立特定樹種在擾動事件所引發之潛在最大生長變化率(maximum potential rate)來設定臨界值曲線。

主要可分為兩步驟：1.建立標準界限曲線以決定臨界值、2.將潛在釋放事件依臨界值來分級。

為了建立各樹種特定的標準界限曲線，首先計算%GC 與先前生長率，將成對資料繪製成 prior growth-%GC 散佈圖，並以 0.5mm 為組距將先前生長率劃分為多組(0-0.49、0.5-0.99、1.0-1.49 mm 等)，每組取前 10 高的%GC 計算平均值(直到該組之%GC 大於零的個數不足十個為止)，由各組所得之前 10 高平均值去配適各式不同函數(直線、拋物線、指數、對數曲線…等)，取決定係數(R^2)最高者以決定標準界限曲線(圖 2.5)；通常，標準界限曲線為負指數函數(negative exponential)。

所有大於 10% 的生長百分變化率峰值(pulse) 認定為潛在可能的釋放事件反應，再進一步由標準界限曲線分級，將各峰值除以對應的標準界限曲線值以相對化，峰值落於 20 - 49.9% 標準界限曲線區域，為中度釋放(moderate release)；大於 50% 曲線的值為強度釋放(major release)；而值落在小於 20% 區域者，則視為氣候效應而非釋放所造成(圖 2.6)。

負指數曲線臨界值，或稱標準界限曲線，呈現了不同的先前生長率條件下，林木生理上可能的最大生長百分變化率，以代表最大的釋放反應潛力。

Black 等人(2009)分析 11 種北美樹種，比較耐蔭性、樣本數量、年齡與尺寸效應、樣地等因素對於標準界限曲線建立的影響。不同樹種的標準界限曲線輪廓大致依照耐蔭程度，最陡的曲線通常發生在耐蔭性樹種，但仍有許多例外；置還重複取樣檢測(bootstrapping test)結果，輪寬樣本量在 5 萬筆以上，變異係數才大致趨於穩定；年齡與尺寸效應對非耐蔭種較為明顯，也就是說，當樹變大或變老時，不容易顯示釋放(競爭效應較少)。

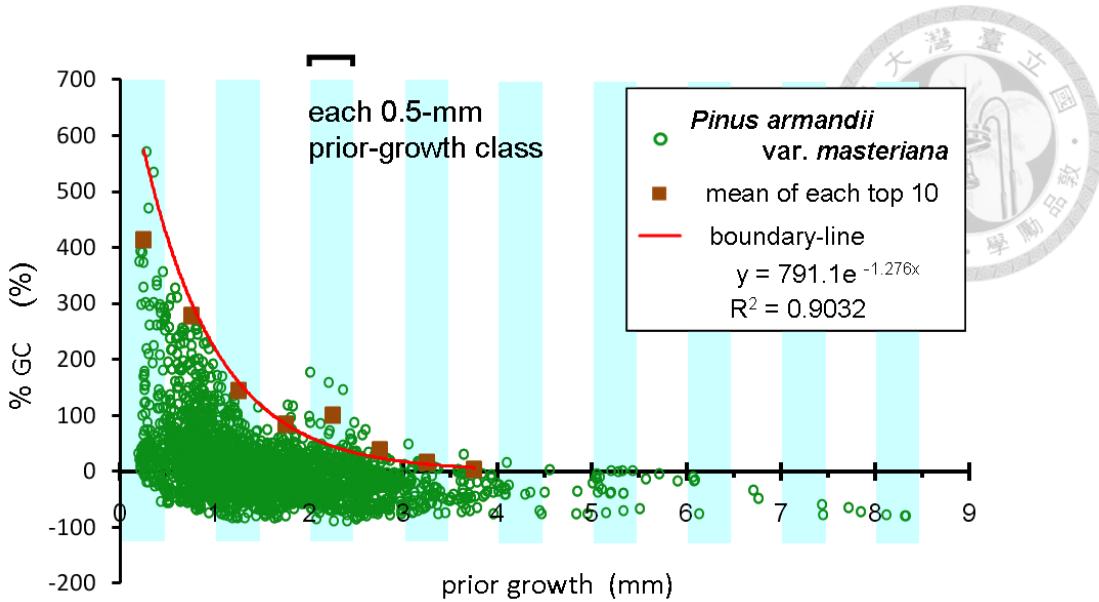


圖 2.5 標準界限曲線法之建立步驟說明。以華山松為例，將所有測量值繪成散布圖（生長百分變化率—先前生長率），並以每 0.5 mm prior-growth 做為分組，每組取最高之 10 筆資料(%GC > 0%)計算平均值，再將各組之平均值配適標準界限曲線，以表示樹種最大的生長變化潛力(仿 Black & Abrams, 2003)。

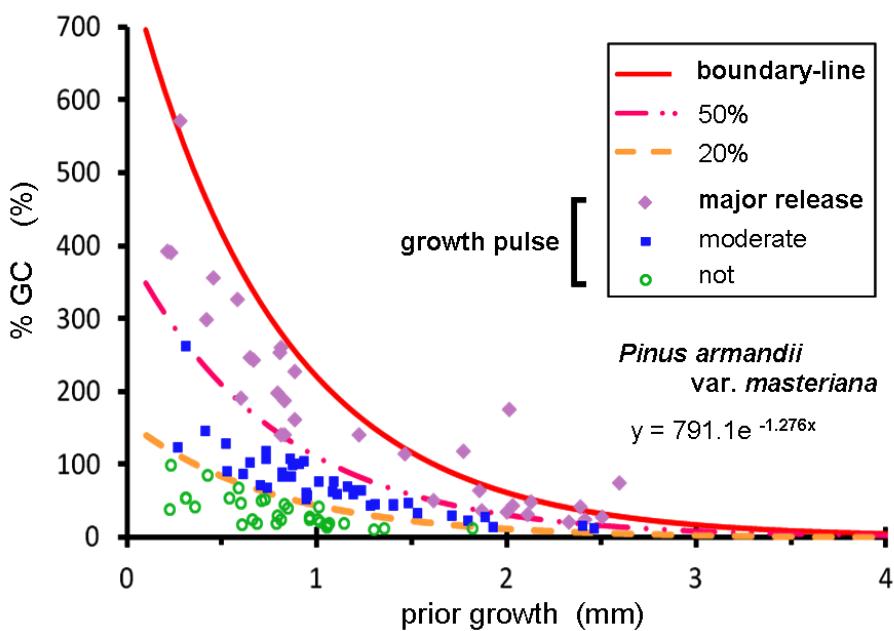


圖 2.6 依對應之標準界限曲線值將生長峰值(growth pulse)分級。以華山松為例，若潛在釋放事件(%GC > 10% 之生長峰值) 位於 50% 標準界限曲線曲線值以上，定義為強度釋放(major release)；落於 20-49.9% 區域，為中度釋放(moderate release)；而值落在 20% 線以下區域者，則不認為是真的釋放(仿 Black & Abrams, 2003)。



2.7.3 絶對增加法 (Absolute-increase method)

Fraver 和 White (2005)針對移動平均法，會在先前生長率低值時過於敏感，高值時則過於嚴苛，而提出了絕對增加法(absolute-increase method)，簡單只採用差值的比較而非商值的比較，再設定一個固定臨界值。臨界值的決定取決於資料本身，一般性的原則是樹勢生長快速者訂定較大的門檻，經由畫圖、經驗法則不斷地重複調整而決定。需要生長反應相關的知識去主觀判斷。

公式如下：

$$ABS = M_2 - M_1$$

ABS：生長絕對值

M_1 ：前十年輪寬平均(包含當年)

M_2 ：後十年輪寬平均(不含當年)

臨界值先從合理的數值(例如 0.5 mm)開始，再應用在實際的樹輪序列不斷修正。藉由軟體繪圖，描繪輪寬一生長百分變化率函數、絕對增加值函數、試驗性的臨界值。經由不斷調整、繪圖、驗證結果，基於各樹種平均敏感度、平均生長率、生長反應的範圍，反覆調整臨界值直到能將有效釋放與較小的生長波動給鑑別分開。

若為不常見樹種或不熟悉其生態特性時，可粗略用絕對增加值的 1.25 倍標準差，或絕對增加值的第 90 分位數來估計適當的臨界值。

相較於移動平均法，絕對增加法在擾動之起始年分估算會有較大的偏差，當絕對增加值到達高峰時往往遲滯了幾年。

同時使用兩種方法可以減低其主觀性，沒有任何算數法可以避免盲點，仍應目視檢查每個序列(Fraver & White, 2005；Niukkanen & Kuuluvainen, 2011)。

第三章 研究材料與方法



3.1 樣區描述

塔塔加長期生態系雲杉永久樣區，設立於南投縣信義鄉沙里仙溪上游集水區，塔塔加鞍部至玉山前峰西面偏北的坡面，海拔約 2,600m，經緯度為 $120^{\circ}54'10''$ E, $23^{\circ}28'40''$ N (圖 3.1)。依中央氣象區阿里山測站 1934~2009 年的資料統計(大氣研究資料庫)，年均溫 10.8°C ，年降雨量為 4,075 mm，夏雨集中，每年 10 月至翌年 4 月為乾季(圖 3.2)。塔塔加雲杉林氣象站 1996~2000 年氣象統計，年均溫 11.1°C ，相對濕度 82.8%，年降雨量 2,418 mm，表土溫度 10.2°C (魏聰輝，2002)。地質屬第三紀層之砂頁岩互層，位於沙里仙溪斷層上，加上溪流上游強烈的向源侵蝕，大型崩塌時而有之(林朝榮，1957；陳正祥，1961；曾彥學，1991)。為岩石崩塌之岩屑地，屬岩屑土，或矽酸鹽—石英土，呈片狀、塊狀或角礫狀與土壤混存，土質較為瘠瘦，偶有大石塊散布其中(曾彥學，1991；魏聰輝，2002)；土壤 pH 值介於 4.7 (水土比例 2:1)，質地為砂質壤土，土壤內含石量高(翁菁羚，2006)。

本研究樣區於 1996 年建立，為塔塔加長期生態研究永久樣區之一。全樣區近似正方形，面積約為 1 ha，切分為 100 個 $10 \times 10 \text{ m}^2$ 的樣方(quadrats)，樣方配置編號為東北 00、東南 09、西北 09、西南 99，海拔範圍 2,588~2657 m，落差 69 m，平均坡度 37 度，坡向為西北向(圖 3.3)。樣區邊界與臺灣雲杉每木定位，由林盈秀於 2008 年以經緯儀測量完成。因莫拉克颱風沖刷樣區，未及定位之臺灣鐵杉、臺灣華山松則以過去前人調查目視所標定的相對位置做為空間定位依據。

樣區森林垂直結構分層明顯，可分為上層針葉樹層、下層闊葉小喬木灌木層、地被層。上層樹冠以臺灣雲杉為優勢，混有少量臺灣鐵杉、臺灣華山松及臺灣冷杉，冠層高度雲杉、華山松約在 20~45 m，鐵杉略低約在 20 m；下層多為闊葉樹種所佔據，高度不高，常見有漸尖葉新木薑子(*Neolitsea acuminatissima*)、玉山木薑子(*Litsea morrisonicola*)、柃木(*Eurya japonica*)、玉山莢蒾(*Viburnum betulifolium*)、臺灣鵝掌柴(*Schefflera taiwaniana*)、刺格(*Osmanthus heterophyllus*)、

臺灣紅榨槭(*Acer morrisonensis*)；地被層則以蕨類、草本為主，玉山箭竹較為少見於樣區內(曾彥學，1991；劉淑芬，1998；劉靜榆，1991；鍾年均，1994)。針葉樹種可見於林地，但小樹或幼苗於林下少見。



依樣區複查資料(忽略為數不多的 DBH<15 cm 小徑木)，針葉樹種依雲杉、鐵杉、華山松、冷杉順序，株數分別為 275、74、23、5 株(Nha^{-1})，相對密度為 72.9%、19.6%、6.1%、1.3%；胸高斷面積為 34.35、7.19、4.29、0.65 m^2ha^{-1} ，相對優勢度為 73.9%、15.5%、9.2%、1.4% (整理於第四章之表 4.1)。

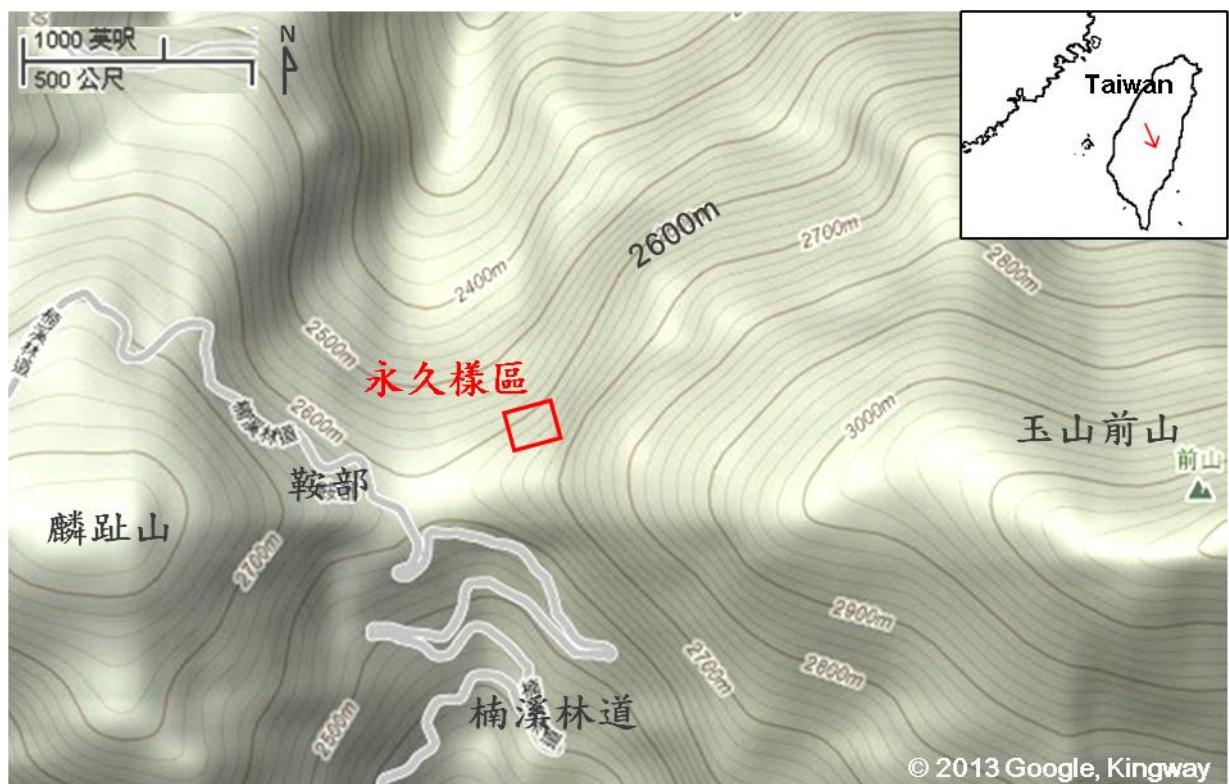


圖 3.1 塔塔加 1ha 永久樣區位置圖(取自 Google map)

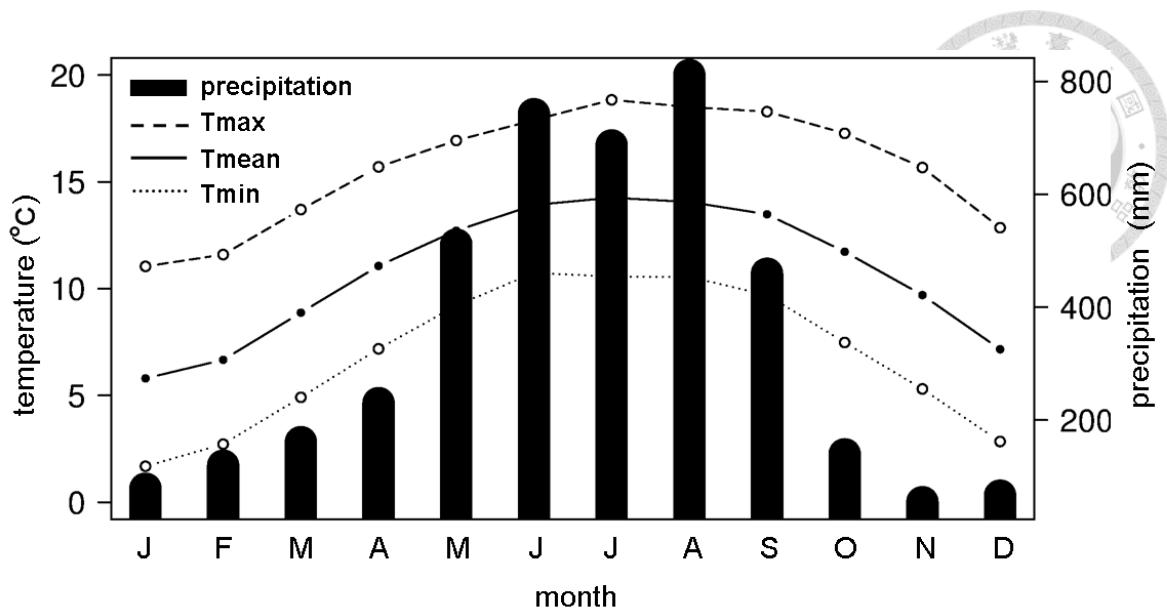


圖 3.2 阿里山測站溫度、雨量圖(1934~2009)。分別呈現月降水量(precipitation)、月平均最高溫(Tmax)、月均溫(Tmean)、月平均最低溫(Tmin) (資料來源：大氣研究資料庫)。

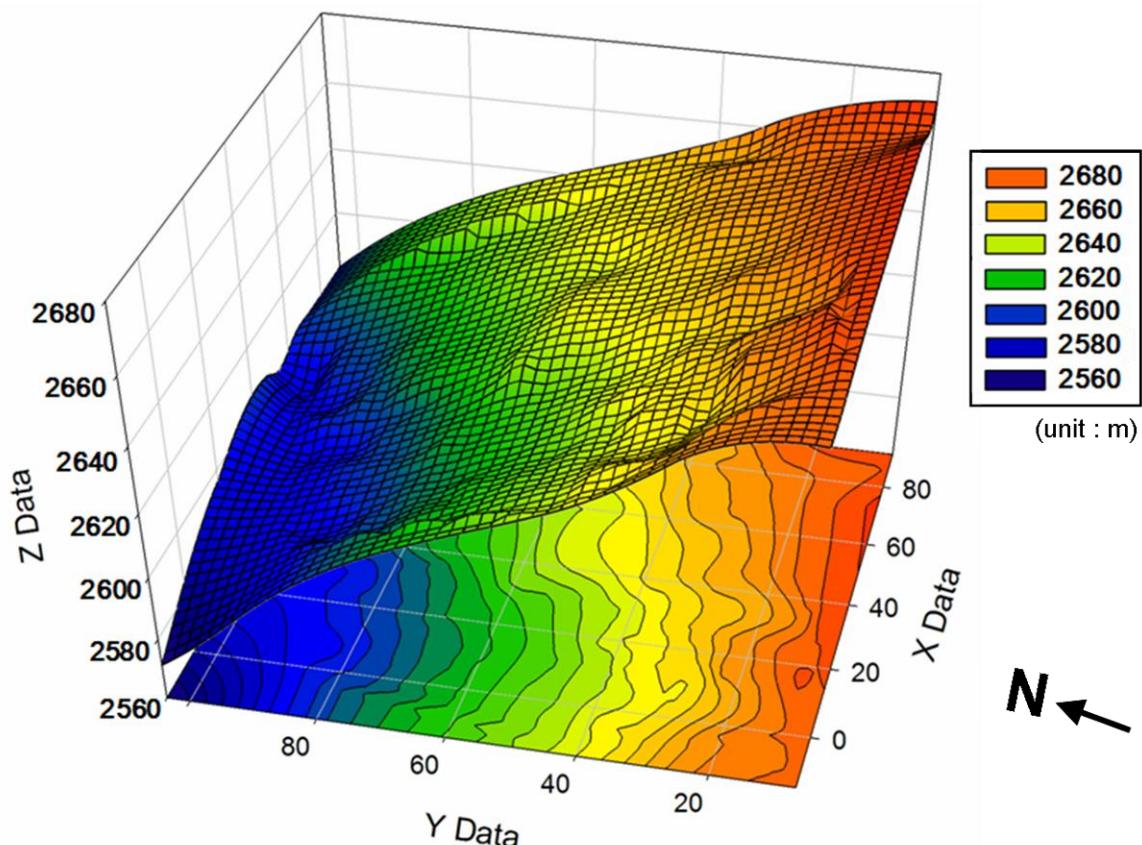


圖 3.3 塔塔加樣區地形圖。X、Y data 為相對座標(原點(0, 0)為二度分帶240022.179、2597114.574)、Z data 為高程資料(單位：公尺)(資料來源：林盈秀)。



3.2 主要樹種特性

將三種主要樹種之型態、生育地、木材特性整理如下(王松永, 1983; 劉棠瑞、廖日京, 1980; Flora of Taiwan 2nd ed., 1994):

臺灣雲杉：常綠大喬木，樹皮褐色，縱裂至薄片狀(fissure into thin flake)；小枝具葉枕，葉針形，四面有稜，偶有3、5稜者；球果懸垂，熟呈暗紫褐色，苞鱗頗小。產中央山脈海拔2300 - 3000公尺間之高山，散布於溝壑(ravines)或山坡，常與鐵杉、華山松等混生，偶成純林；梨山思源啞口1950公尺之處，曾有野生狀態巨大喬木；另梨山、大禹嶺及合歡山一帶，阿里山自忠及答答卡鞍部至沙里仙溪等，為量亦頗多。邊心材之分界不明顯，材白色至黃白色，經久變成黃褐色；年輪清楚均勻，春秋材之界限漸進移行而明顯，具樹脂溝；木理通直，木肌緻密；木質線甚細，呈紡錘形。

臺灣鐵杉：常綠大喬木，樹皮灰色、溝狀；小枝具葉枕，葉線形，旋生而成二列；球果長2 - 2.5公分，種子有翅。產於海拔2000 - 3000公尺之高地，尤喜生於懸崖或陡壁之上，易成純林；登玉山，在海拔3000公尺處，每見有白木群林，乃是經過森林火災而樹皮脫落所殘剩之白樹幹者。無邊心材之區分，色調為黃白色或黃灰色；年輪狹，略呈波狀而不整齊，春秋材之區別明顯，無正常樹脂溝，但有傷癒樹脂溝；管胞含有草酸鈣之結晶體；木理通直均勻，在弦切面之木理會出現白色條紋。木肌稍粗，密度中庸，材質略堅硬。

臺灣華山松：大喬木，枝條水平開展；葉5針一簇，長8 - 10公分，橫切面為三角形，具3樹脂溝；球果長10 - 20公分、寬8公分，種子無翅。產於臺灣中央山脈海拔1900 - 2800公尺之高地，常與雲杉、鐵杉及二葉松等混生，多散生於草地。邊心材之區別明顯，邊材淡黃白色，心材淡黃褐色；年輪明晰均勻，春秋材帶狹而明顯；木質線甚細；樹脂溝小而稀少，在橫切面肉眼不易察出，但在縱切面上顯著；木理通直，木肌中庸，稍具光澤；材質輕軟，保存期中庸，邊材易腐朽。



3.3 野外取樣與樣本處理

3.3.1 野外取樣

2009 年，針對樣區內所有 $DBH \geq 15\text{ cm}$ 的樹以生長錐進行樹芯鑽取，視現地狀況盡量垂直坡向鑽取以避免反應材，每棵樹取至少 2 根不同方向樹芯，並記錄樹種、編號、鑽取方向、DBH、其他生長情況備註。遺漏樹冠級資料之調查。

依每木定位資料繪製樣區地圖並製作調查表格，選定樣木以目視選定鑽取位置，避開節間或生長異常部位，可由反應材方向、枝條生長方向估計髓心位置，生長錐與樹幹直立方向呈垂直鑽入，初期應特別保持穩定以免造成樹芯扭曲，每根樣芯保持原徑向生長排列方向在野外以定製塑膠吸管保存，並以紙膠帶將兩端封口將樣芯編號、鑽取日期記錄其上。鑽取過程中若覺得阻力突然異常變大或變小時，可先將木芯取出檢查是否遇到節或木材腐爛，無異常可再繼續，以避免生長錐在樹內空轉難以取出，減少取樣時間消耗。生長錐若有堵塞，以竹筷自刀口向刀柄戳入進行清除，前端環狀刀口應絕對避免與金屬碰撞；每日工作日結束皆進行生長錐清潔與保養，以擦槍布沾針車油或 WD-40 除鏽劑去除內外部髒污。

樣芯編號有六碼，例如 S5205A，第一碼為樹種編號：S 為雲杉、T 為鐵杉、P 為華山松；第二、三碼為小區編號；第四、五碼為樹木編號；第六碼為樣芯編號：A、B 表示同棵樹不同方向半徑樣芯，1、2 表示同棵樹鑽穿的直徑樣芯。(直徑樣芯由於最內年為相同年份，於定年時可增添徑向比較的確定性)

共鑽取 351 棵樹 (臺灣雲杉 259 株、臺灣鐵杉 65 株、臺灣華山松 21 株、臺灣冷杉 5 株、紅檜 1 株)，取得 732 根樣芯。以下僅將雲杉、鐵杉、華山松三主要樹種納入分析。

3.3.2 樣本處理

野外樣芯取回後進行以下處理流程：乾燥、上膠、砂磨、定年、量測。
將樹芯自吸管取出，放置在有挖空半圓形溝槽的木製載台上暫時以紙膠帶固定，

自然風乾並以重物加壓防止其翹曲變形。為讓日後木質部細胞清楚辨識，樹芯須依纖維方向讓橫切面朝垂直方向放置，可由樹芯兩端檢視纖維方向是否垂直地面或觀察是否有明顯亮帶位於長軸兩側，當樹芯有扭曲時，可用蒸汽加熱過後以外力將其適度扭轉矯正。

待乾燥後，在溝槽塗上適量白膠將樣芯黏牢以棉線綁緊，放置時仍須注意纖維方向，樣芯與木載台接觸面必須皆有白膠塗抹。確定樣芯黏牢後方可進行砂磨，砂紙使用由粗而細，約磨去樣芯 1/3 高度左右即可。用帶狀砂磨機以 320、400 號砂紙大致粗磨，再用鑽孔機改裝之圓盤砂磨機以 600、800 號砂紙細磨，務必讓細胞於顯微鏡下清晰可見，方便日後定年。

取樣工作於 2009 年三月至六月共分三批作業，時間介於休眠期至生長季初，部份樣本已有早材開始生成，因此將最靠近樹皮的完整輪視為 2008 年所生成。在輪寬表面以鉛筆打點做記號，十、五十、百、千年分別做不同圓點，方便清數(圖 3.4)，藉由 40 倍率雙眼解剖顯微鏡比對樹內與樹間的輪寬型式(pattern)，進行目視交叉定年，若比對輪寬型式不一致，參照樣芯本身生長特徵在窄輪、不完全輪、缺失輪或偽輪之處作打點記號修正，並可在木製載台上標記(例：以 LAB 表示缺失輪、f 表示偽輪、m 表示窄輪或不完全輪)。

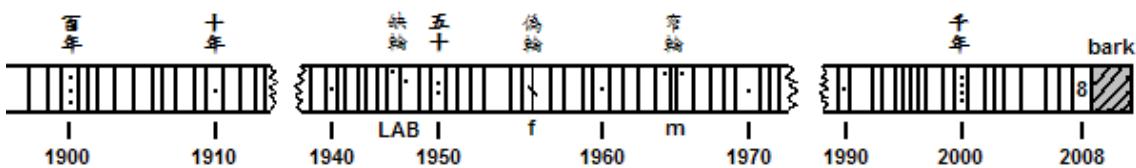


圖 3.4 樹芯打點記號範例，每十年標記一點、五十年打兩點、百年打三點、千年則打四點，窄輪、缺失輪或偽輪則於輪寬界限另做標記(仿照 Speer, 2010)。

3.4 交叉定年(cross-dating)

交叉定年(cross-dating)，藉由比對生長在鄰近區域樹木間的輪寬變化或其他結構特徵，使得每一樹輪形成的確切年份得以確認(Fritts, 1976)。是樹輪研究最重要



的步驟，所需花費的時間也最多。

有一些方法可以應用於目視定年，示意圖定年法(skeleton plot)、列表比較法(list method) (Speer, 2010)。本研究採用列表比較法，此方法多僅應用於活樹取樣(因最外圈輪年份可確定)，挑選品質較佳、輪寬變化型式清楚的樣芯，列出並比對各樣芯窄年出現的年份，經常被標註的年份則視為是可信的標誌年(marker or pointer year)(圖 3.5)。在不同序列間，窄輪比寬輪具有一致性，較適合做為定年的依據，但在缺失輪較多的樣本，窄輪容易缺失，此時寬輪具有較好之標誌年意義。

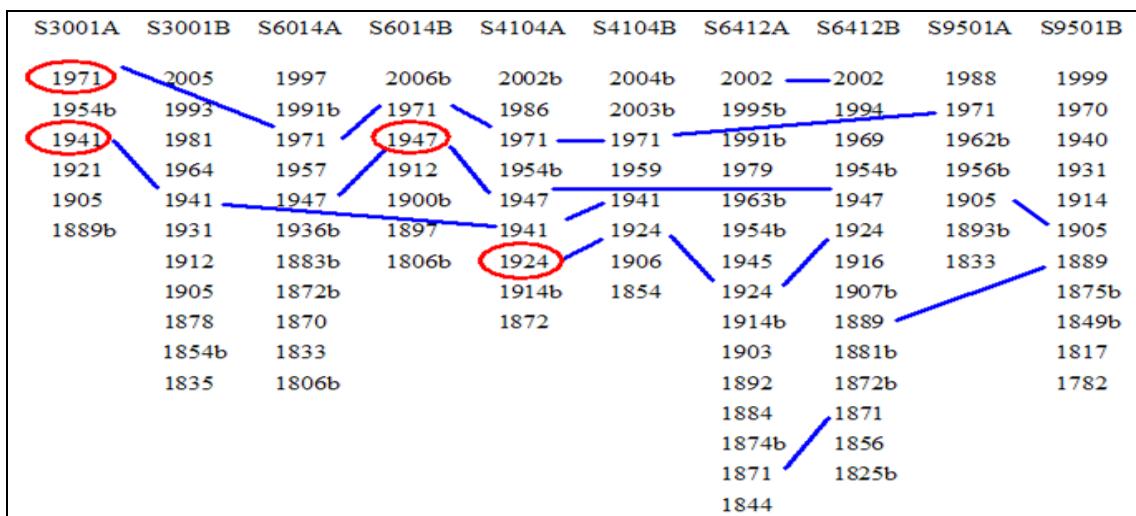
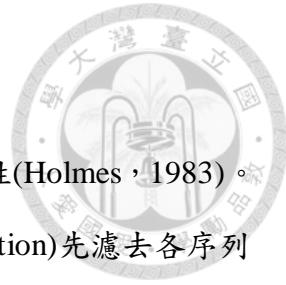


圖 3.5 列表比較法示意圖。將各樹芯樣本之大年、小年記錄下來(b 表示大年)，畫線連接重複出現之年分，做為標誌年之依據。

3.4.1 輪寬測量

目視定年完成的樣芯以 Velmax 測量系統(包括顯微鏡、寬度量測儀，解析度為 0.001 mm)搭配 measureJ2X 軟體進行測量。操作前需先校正顯微鏡的十字絲與測距平台的移動方向一致。輪寬測量以兩輪界限的法線方向為準，若樹輪呈不規則生長，則挑平均值或具代表性的寬度。缺失輪以寬度 0 mm 表示。

測量時需注意輸出年份與樣芯打點記號是否相同，以免浪費時間在重新檢查上，J2X 每測量至十年時會有提示音提醒。



3.4.2 統計定年檢驗

已量測的輪寬序列，使用 COFECHA 程式檢驗定年的正確性(Holmes, 1983)。COFECHA 預設採用 32 年波長的三次弧線函數(cubic spline function)先濾去各序列的低頻變化，再做對數轉換，以突顯出窄輪的效應，並將所有序列加總平均，得到涵蓋所有序列年份的主序列(鄒佩珊，1998；Grissino-Mayer, 2001)。主序列樣本的挑選以樹間相關性 0.4 為標準，並剔除有過多區間相關性奇怪(flags)的樣本。之後，分別選用 30、50、70 年之區間、依序漸進 1 年的設定(30, 50 or 70 years segment length lagged successively by 1 year)，檢視個別序列與主序列同區間之相關係數，是否有出現一致地滯後或超前現象，作為判定交互定年或量測寬度是否正確的參考。修正定年錯誤或切除序列之較差部分，皆需重新檢視原始樣芯，序列的相關性可作為驗證用，但不可盲目相信。

交叉定年的主旨，在於藉由調整輪寬(或其他變數)的型式使得序列同步一致化，共同的輪寬生長型式反應自相同的環境限制因子(如氣候)；若受局部環境影響強烈，則會造成序列相關性會偏低或不穩定，有時並非定年有誤(陳柏因, 2012)。

COFECHA 所產生的主序列，負值，表示輪寬相對於平均值較小的年份；正值，表示輪寬相對於平均值較大的年份(指數大於 1.5 或小於 -1.5，可視為標誌年)(附錄二)，用來比對其他未定年樹芯之輪寬變化型式。

3.5 分析方法

對於物種的建立或生長，擾動扮演著破壞(大部分是)或促進的角色，舊個體的移除或受創使得空間被釋出，而鄰近個體(或下方被壓木)則表現出突然、持續、大幅度的徑向增加(稱為釋放，release)，或新個體得以建立在孔隙之中(稱為孔隙更新，gap origin) (Lorimer & Frelich, 1989)。

結合林分齡級結構與樹輪年代表，配合空間資訊，可進一步瞭解物種建立型式、族群結構、演替動態、擾動(例如颱風、火災、昆蟲爆發)的週期與強度(Black &

Abrams, 2005)。本文由不同線索著手：齡級結構、生長變化率、樹木解剖結構，結合空間資訊以瞭解過去歷程；並以歷史記錄、外部氣象資料做為輔助證據。



3.5.1 年齡估算

齡級結構奠定了重建全林分擾動事件初步的框架(Nawacki & Abram, 1997)。為了確定每棵樹的年齡，輪目計算(ring counting)是第一步，理想的狀況是每根樣芯皆有鑽至髓心，再經交叉定年修正缺失輪的數目。

然而實際取樣時，經常無法準確地鑽到髓心，Applequist (1958)提出了髓心估算法(pith locator)，繪製不同密度的同心圓(e.g. 0.5 mm、1 mm)於透明投影片上，選取最符合樣芯近髓心輪寬密度的同心圓，計數可能偏失的輪數。本研究利用同心圓幾何學原理，參照近髓心輪寬生長速率，目視估計髓心偏移輪數以修正年齡。

本研究樣芯鑽取位置接近胸高，所指的年齡並非自萌芽開始，而是指該林木之胸高年齡(recruitment age)，即當林木至胸高後開始計算之年齡。鍾智昕(2005)以樹幹解析研究塔塔加雲杉人工林的高生長，發現雲杉高生長從 30 cm 至胸高 130 cm 約需 7 年左右的時間。

輪目計算加上髓心偏失修正，以及交叉定年後的缺失輪修正，最後所得即為林木的胸高年齡。

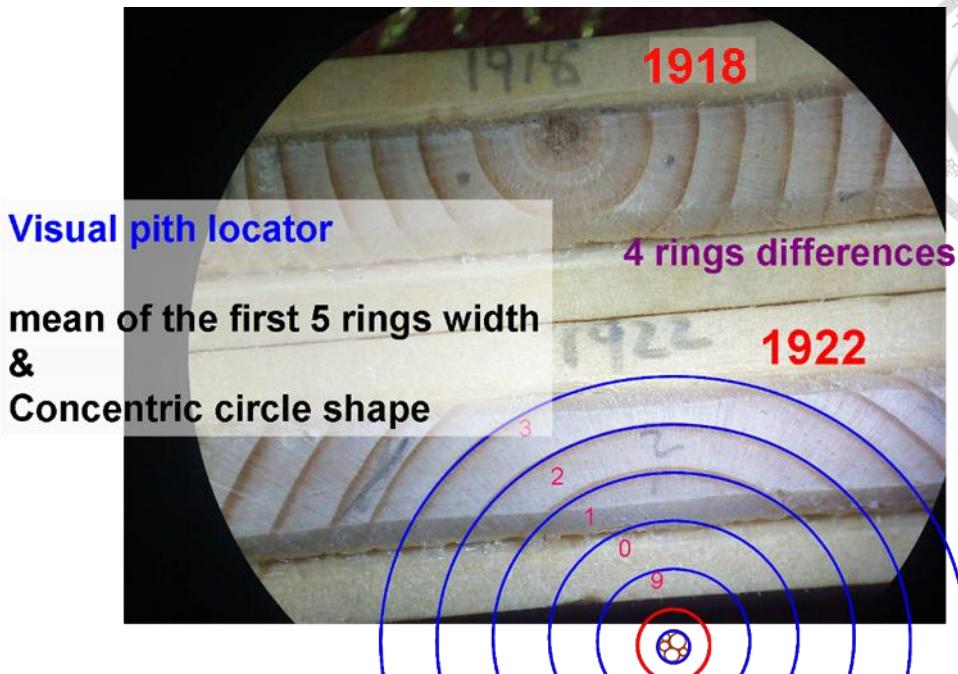


圖 3.6 目視髓心估算法。假定樹木內側生長速率一致，依最接近髓心之 5 年輪寬平均，當作同心圓之固定間距，以估計所偏失之輪數。

3.5.2 摾動重建

本文採用生長釋放做為擾動重建的手段，僅將定年可信之樣本納入分析，並採用移動平均法、絕對增加法、標準界限曲線法共三種方法來偵測林木的釋放動態(可參閱第二章)。

以 RGR 表示移動平均法，計算公式分別為 $\%GC = [(M_2 - M_1) / M_1] \times 100$ ， M_1 ：前十年輪寬平均 (包含當年)， M_2 ：後十年輪寬平均 (不含當年)；
Bound 為標準界限曲線法，公式同樣為 $\%GC = [(M_2 - M_1) / M_1] \times 100$ ；
ABS 為絕對增加法，公式 $ABS = M_2 - M_1$ 。判斷釋放之臨界值另敘述如下。



3.5.2.1 標準界限曲線

標準界限曲線法(boundary-line method)，改採用變動的臨界值來定義釋放事件，依先前生長率(prior growth rate，不包括當年的前十年平均輪寬)以及所對應的生長百分變化率(%GC)，以估計特定樹種在擾動事件所引發之潛在最大生長變化率來設定臨界值曲線(圖 3.7)(Black & Abrams, 2003)。

將雲杉、鐵杉、華山松所有可能的輪寬成對資料納入(資料筆數為 30,683、8,393、2,788 筆，排除連續缺失輪所造成的%GC)，所建立的標準曲線為 $y = 816.17e^{-1.179x}$ 、 $y = 630.67e^{-0.934x}$ 、 $y = 791.1e^{-1.276x}$ ， $R^2 = 0.9715$ 、 $R^2 = 0.9566$ 、 $R^2 = 0.9032$ 。

資料筆數不滿足 50,000 筆(Black *et al.*, 2009)，但仍可以建立具有區域(regional)代表性的標準界限曲線。由%GC 的表現(華山松<雲杉<鐵杉)、曲線的傾斜度(華山松>雲杉>鐵杉)(圖 3.7)；另外，雲杉在先前生長率低值時，%GC 反應較大，可能受樣本取自擾動較高的樣區(研究非氣候取向)所影響。

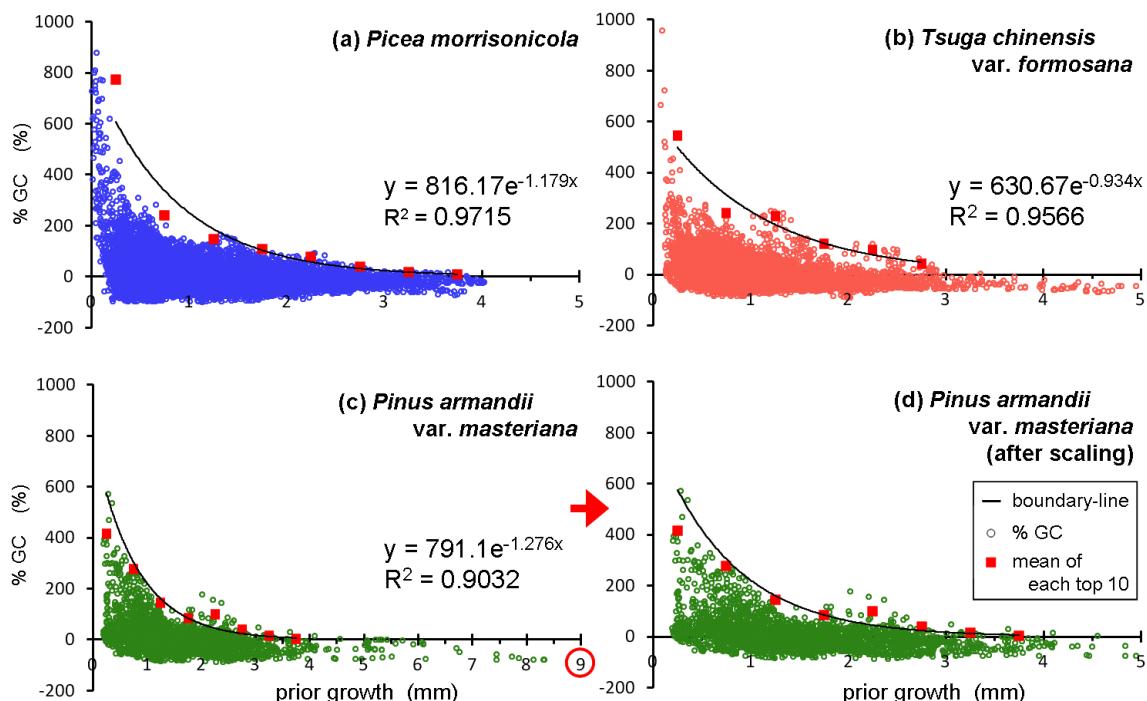


圖 3.7 三樹種之標準界限曲線。建立(a) (b) (c)曲線的資料筆數分別為 30,683、8,393、2,788 筆；為了方便直觀比較，將(c)調整比例繪製成圖(d)。

3.5.2.2 生長釋放之檢測標準 (criteria of release detection)

考量物種特性、擾動效應的持續時間、各方法的特性，分別設立不同的中度釋放、強度釋放的檢測標準(criteria)。

移動平均法，%GC 持續 5 年超過 50% 則為中度釋放；%GC 持續 5 年超過 100% 則為強度釋放。

標準界限曲線法，當%GC 峰值介於標準界限曲線 20% - 49.9% 區域，則為中度釋放；超過 50% 者，則為強度釋放。臺灣雲杉、臺灣鐵杉、華山松三物種個別之標準界限曲線分別為 $y = 8.1617e^{-1.179x}$ 、 $y = 6.3067e^{-0.934x}$ 、 $y = 7.9110e^{-1.276x}$ 。

絕對生長法，對於臺灣雲杉、臺灣鐵杉、華山松，ABS 持續 5 年分別超過 0.7、0.5、0.8mm，則為中度釋放；ABS 持續 5 年分別超過 1.4、1.0、1.6mm，則為強度釋放。

孔隙打開所造成的生長增加會持續一段時間，為了過濾短期氣候的的波動，釋放公式採取以十年輪寬平均做為基準，另外增加必須超過臨界值持續 5 年方才認定為釋放(考量標準曲線法隨先前生長率變動的臨界值，未設立持續 5 年的門檻)。

絕對增加法的臨界值多為依經驗法則而來，可粗略用絕對增加值的 1.25 倍標準差，或絕對增加值的第 90 分位數來估計適當的臨界值(Fraver & White, 2005)。雲杉、鐵杉、華山松，1.25 sd (ABS)為 0.50、0.61、0.99，第 90 分位數為 0.45、0.48、0.75 mm。參考輪寬平均、與耐蔭特性，將標準設成 0.7、0.5、0.8 mm (雲杉較為嚴苛、華山松較為寬鬆)，並以 2 倍標準做為強度釋放的門檻。

移動平均法可結合其他標準(如： $M_2 > 0.5\text{mm}$)，可消除該方法對於先前生長率小值過於敏感的問題(Fraver & White, 2005)。本文為方便方法比較，未採用該混合方法。





3.6 摾動年代表的建立

以軟體 R 將輪寬資料格式轉為軟體 Excel 可讀取之表格，藉由 EXCEL 的公式計算功能(IF、CountIF 等)，計算%GC、ABS，設定各釋放門檻讓其自動判斷是否達到標準(附錄十)；另結合儲存格格式的填滿功能上色，以利直觀，手動刪去同一釋放事件所偵測的連續釋放年分，只保留各事件的起始年分；另外，釋放事件若前十年輪寬之缺失輪達兩年以上，則刪除。

由各釋放%GC、ABS 峰值決定釋放的起始年分，最後將其整理合併成以十年為組距之擾動年表。林木反應冠層打開的生長增加，可能是隔年生長季便立即反應，也可能自身樹冠或其他受到傷害而有所延遲；另外，絕對增加法 ABS 的反應不如%GC 靈敏，可能延遲 3~5 年(生長增加量到達高峰的時間會較晚) (Fraver & White, 2005)。

將樣芯所顯示之釋放次數合併以樹木層級為單位計算，在過程中，常會有樣芯間釋放時間或強度不一致的問題，因此列出以下合併時的規範：

1. 若同棵取樣超過 2 個樣芯，則任意只取兩個樣芯做為代表。
2. 時間上，若兩樣芯所顯示之釋放事件，時間差距在 5 年內，則視為同一事件，開始釋放之年分取較早的時間點；若差距超過 5 年，則檢查原始輪寬與各公式曲線圖做為參考決定；若差距超過 10 年，視為不同的事件。若有疑義，則以原始輪寬生長形式(pattern)為主。
3. 強度上，兩個樣芯與三種強度(無、中度、強度釋放)共有 6 種組合，合併時將其簡化為無釋放(無、無)、中度釋放(無、中；無、強；中、中)、強度釋放(中、強；強、強)

第四章 結果



4.1 林分組成與結構

1ha 樣區以臺灣雲杉為主要優勢，胸高斷面積與所占百分比，雲杉、鐵杉、華山松、冷杉依序為 $34.35 \text{ m}^2 \text{ha}^{-1}$ (73.9%)、7.19 (15.5%)、4.29 (9.2%)、0.65 (1.4%)，株數分別為 275、77、24、5 株(表 4.1)。(小徑木闊葉樹種與零星紅檜不列入計算，胸徑小於 15 公分之針葉樹於調查時可能有遺漏)

徑級結構上，雲杉與鐵杉相似，為右偏分布，集中於 20-30 cm 級距，平均胸徑為 34.5 與 29.4 cm、最大值為 128 與 123 cm；華山松呈鐘形分布，集中於 50 cm 級距，平均胸徑為 46.7 cm、最大值為 81 cm (圖 4.1)。

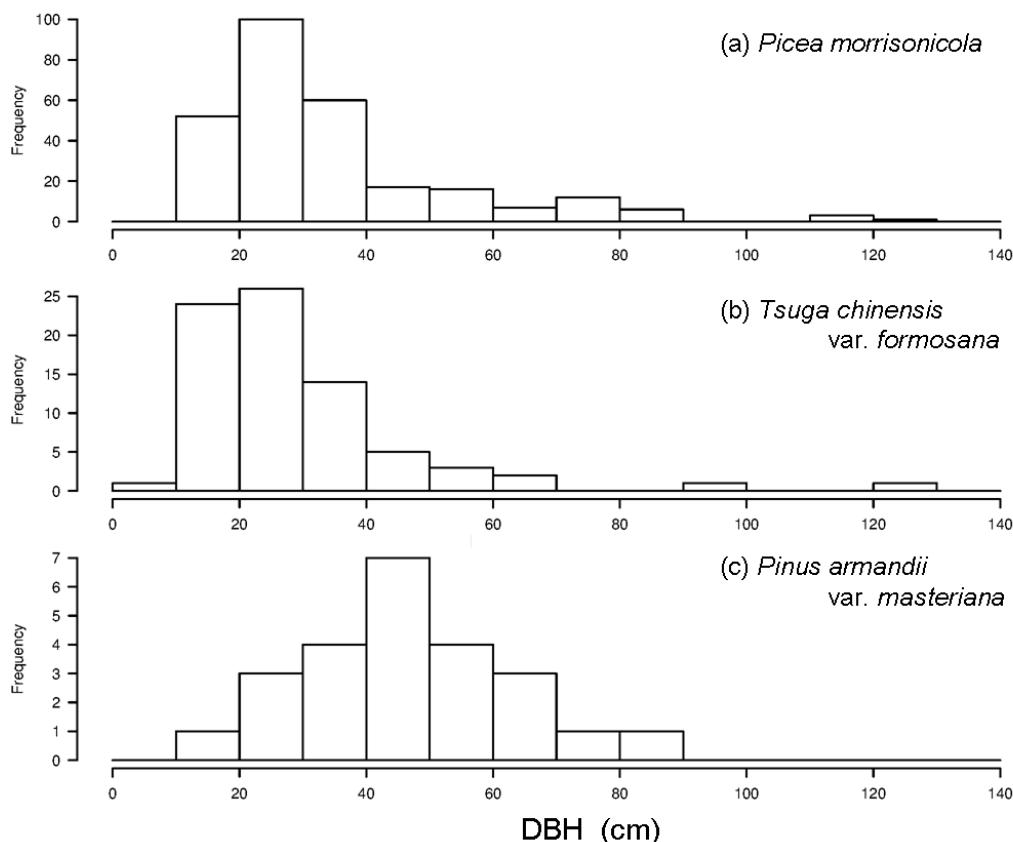


圖 4.1 不同樹種之徑級結構。(a)為臺灣雲杉、(b)為鐵杉、(c)為華山松。樣本數分別為 275、77、24 株。

由徑級的空間分布來看(圖 4.2)，中小徑木多分布於西北方之 1/4 樣區，而大徑木則分布於右半側樣區與樣區最下方(為上坡處)。



雲杉，中、小徑木與大徑木，由樣區對角線(東北至西南)略可以區隔為兩個區塊，中小徑木集中聚集於左上部分。鐵杉分布呈區塊狀，大徑木分布於樣區最上方，附近有小徑木圍繞其分布；另於樣區右側與左上方呈塊集狀。華山松，較為散布，分布形狀呈現一個倒三角形(與雲杉中、小徑木分布類似)，大徑木多位於樣區右側。

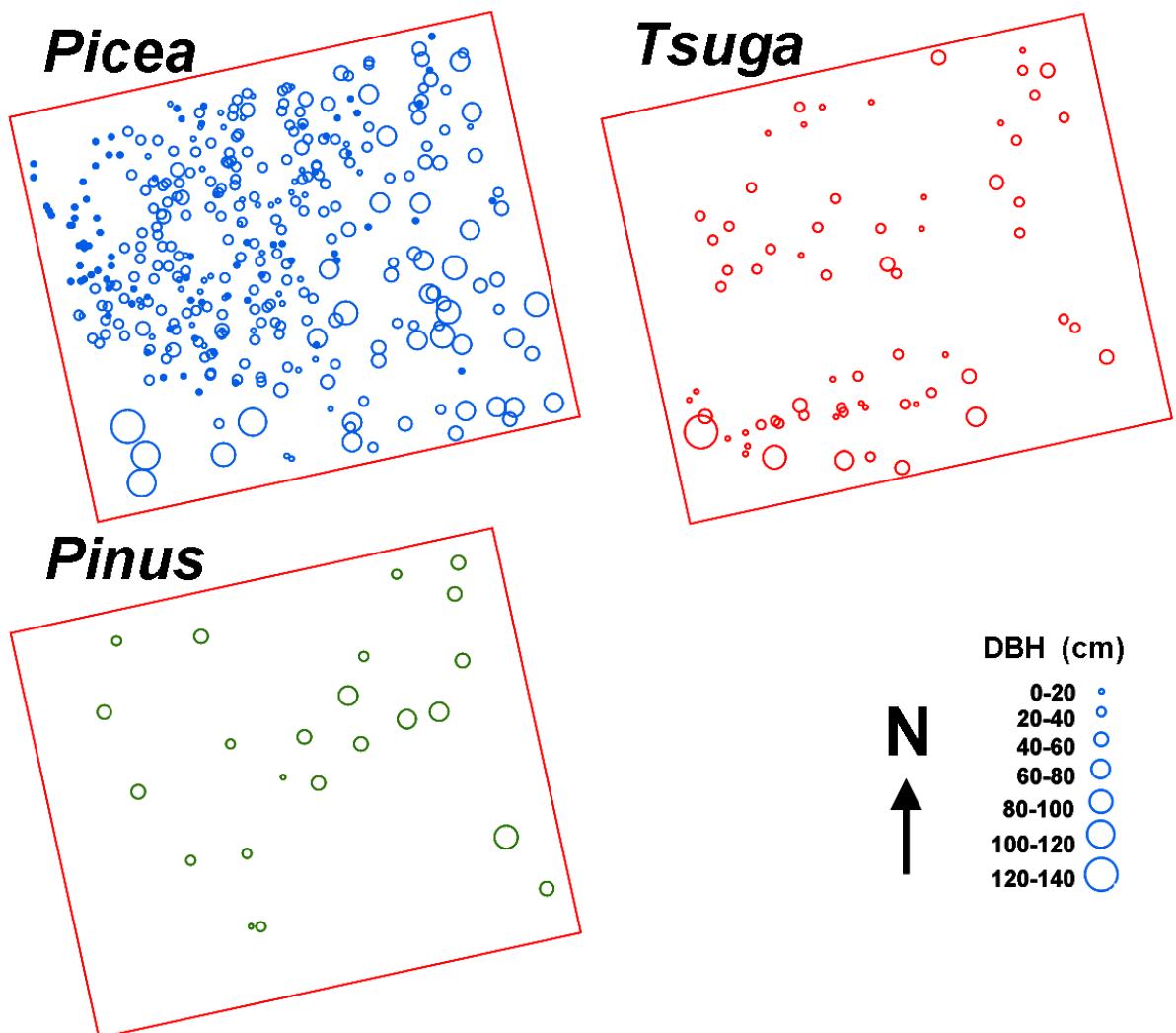


圖 4.2 級級的空間分布。雲杉、鐵杉、華山松分別以藍色、紅色、綠色表示；圓圈大小為徑級大小，實心圓圈為 2009 年複查時死亡的雲杉(上次調查為 2004 年)。僅雲杉由經緯儀測量定位，鐵杉、華山松由過去調查目測定位繪圖。



4.2 定年結果

主序列年表(master chronology)由樹間相關性良好(約大於 0.4)、定年正確的雲杉、鐵杉、華山松樣芯 114、29、16 個序列構成(附錄一、二)。

定年樣木與未定年樣木的數量為 178：167 棵樹，比值為 1.07，定年比例以雲杉較高、鐵杉最低(表 4.1)；依缺失輪多寡分為 bad、correct、good 三種品質，correct、bad 樣本有連續缺失輪的情形發生，可持續 8 年，甚至徑向生長停止近 17 年，缺失輪於 1941、1947、1969~71、1985~87、1995~98、2002、2005 為多。

在定年的過程發現，三樹種偽輪發生的機會稀少(或與連續細輪混淆)，缺失輪的情況較常發生，偶有出現連續數十條以上細輪混合不完全輪的情形(多出現於近代 1950's 以後，納入不能定年樣本)。在生長不良的情況下，鐵杉生長呈現連續數年的細輪(缺失輪較另兩樹種少)，而華山松、雲杉則呈現細輪、不完全輪或缺失輪。

表 4.1 樣區胸高斷面積(BA)、株數(n)、樣芯定年結果。以樹為單位，「cross-dated trees」為定年樣本，bad、correct、good 依缺失輪多寡分為不同品質樣芯，sum 為小計；「ring-counting」為未能交叉定年樣本，僅計算樹輪數。

species	BA			cross-dated trees				ring- counting	total cored-trees
	$m^2\text{ha}^{-1}$	(%)	n	bad	correct	good	(sum)		
臺灣雲杉	34.35	73.9	275	8	59	72	(139)	120	259
臺灣鐵杉	7.19	15.5	74		13	16	(29)	36	65
臺灣華山松	4.29	9.2	23		3	7	(10)	11	21
臺灣冷杉	0.65	1.4	5	-	-	-	-	-	-
total	46.48	100	377	8	75	95	(178)	167	345



4.3 齡級結構

樹齡估計的誤差來自於 1. 未良好定年的樣本、2. 體心偏失的估計。扣除未取樣小徑木(DBH < 15 cm, 數量不多), 由定年樣木加上僅輪目計算之樣木呈現齡級結構(共 345 株), 其呈現雙峰分布, 1760 以前、1760~1860、1860 以後, 可分為三個時期: 宿存老樹、與中世代、新世代兩個同生群(cohort), 分別於 1820、1890 年代為兩個峰值(圖 4.3)。

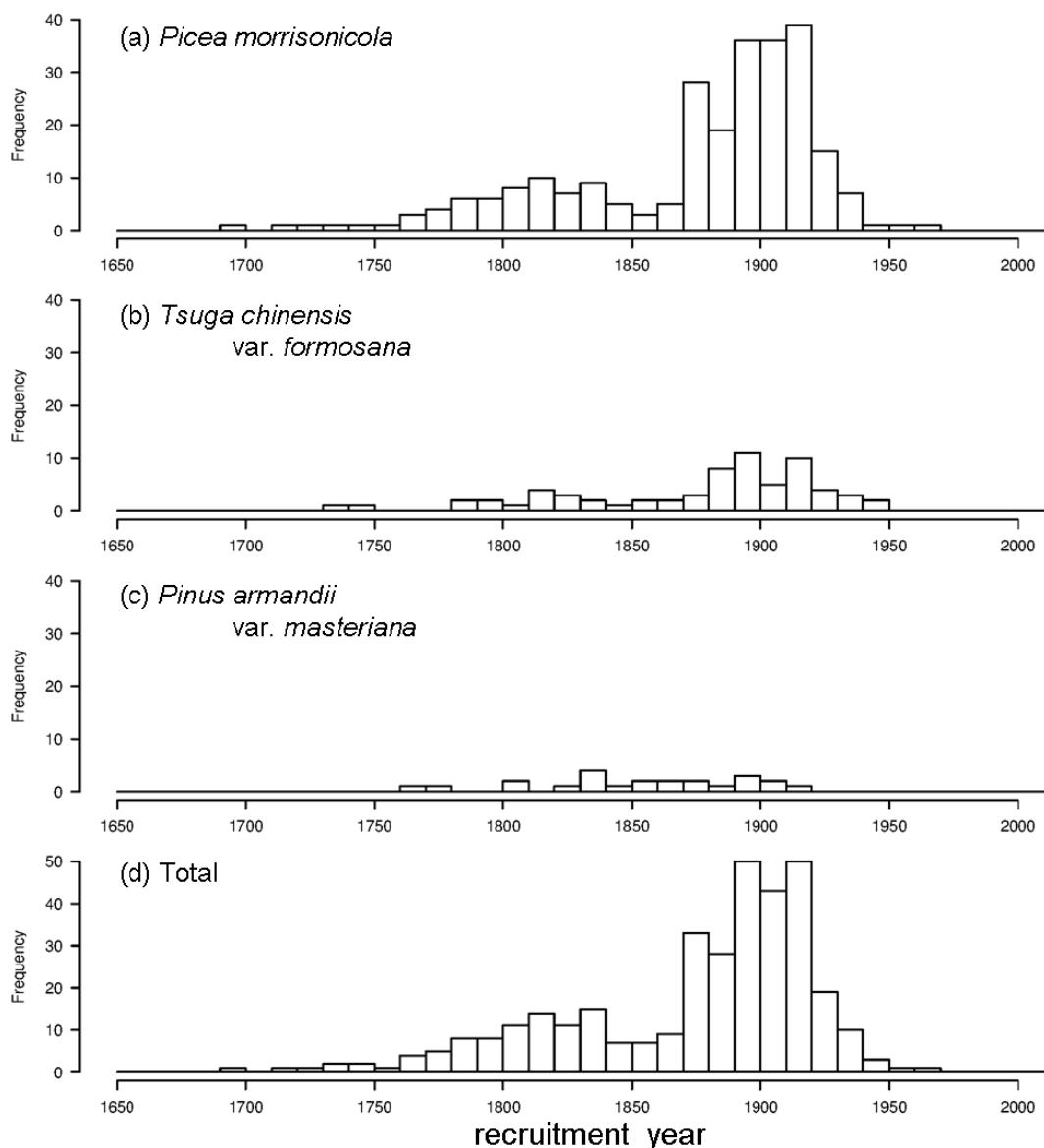


圖 4.3 各樹種之齡級結構，(a)雲杉(b)鐵杉(c)華山松(d)三樹種總和。



在空間分布上(圖 4.4)，宿存老樹位於樣區西南側，中世代位於樣區東側由南向北方建立，而新世代則由樣區西北角與東側向內拓展，族群的建立具有方向性，各時期佔據的區塊於空間上有所區隔。

臺灣雲杉最早自 1691 年開始建立，族群可分为宿存老樹(1760 年以前)、中世代(1760~1850)、新世代(1870 以後)三個階段。三個世代在空間分布上有明顯的區隔(圖 4.5)，老樹多殘存於地勢較高的樣區西南邊；中世代則建立於稍顯平坦的東邊及西北角(於 2005 年崩塌，原調查之 DBH 平均為 28 cm, 最小 8 cm, 最大 69 cm)；新世代則建立於樣區中央偏西北，有小徑級枯立木留存，應是密度過高自我疏伐之結果。

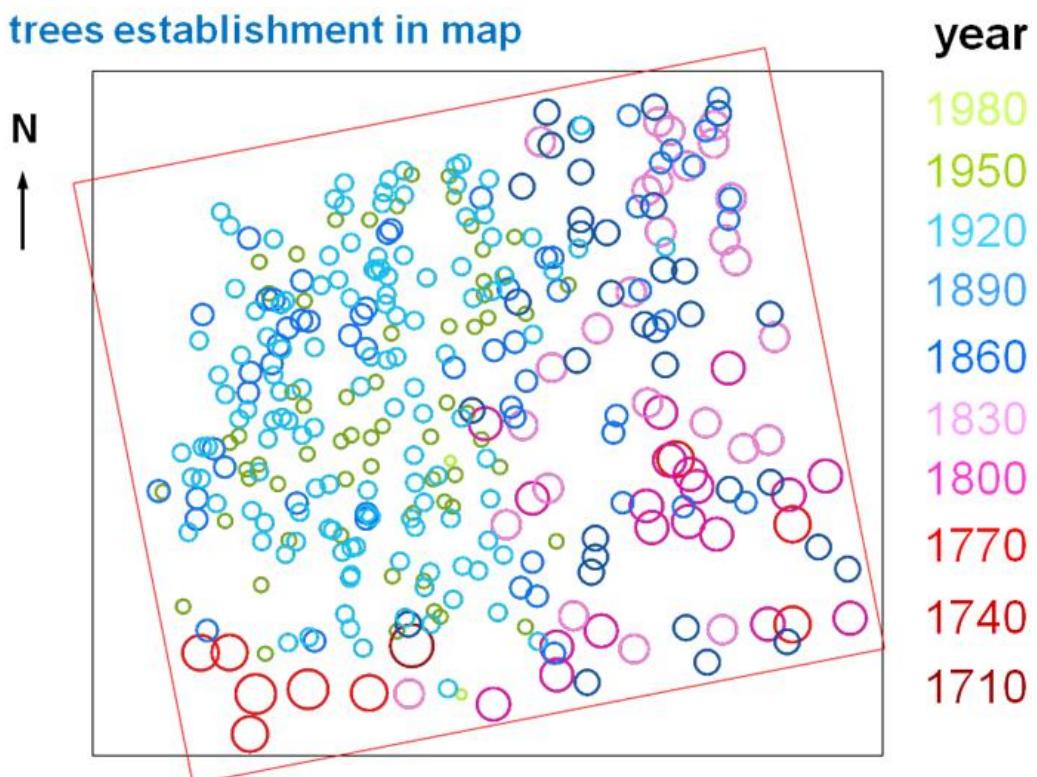


圖 4.4 林木建立年代地圖(胸高年齡)。以圓圈大小、不同顏色表示其建立年代，30 年為級距；傾斜之紅色方塊為樣區邊界。

鐵杉自 1731 年開始建立，由齡級結構來看，與雲杉類似且同步，可分為宿存老樹、中世代、新世代三個階段，1750~1780 齡級闊如，有部分年輕樹聚集於宿存老樹附近。

華山松最早建立於 1767 年，數量不多，自 1767~1916 年陸續建立，1830's 略呈高峰；較老樹集中於樣區東側、年輕樹則位於西側；相較於另兩樹種，並無老樹宿存於西南側，且林木之建立於南側中間出現了較大的空缺。

林木的建立年代，可做為推估過去大規模擾動的最小年代，結合齡級結構與空間分布，兩個主要建立世代分別佔據樣區東側與西側，呈塊集狀(圖 4.4、4.5)，猜測過去 1760、1870 年以前，可能發生大規模擾動；華山松為陽性樹種，其建立期間代表著，樣區持續存在較大的孔隙供其更新。

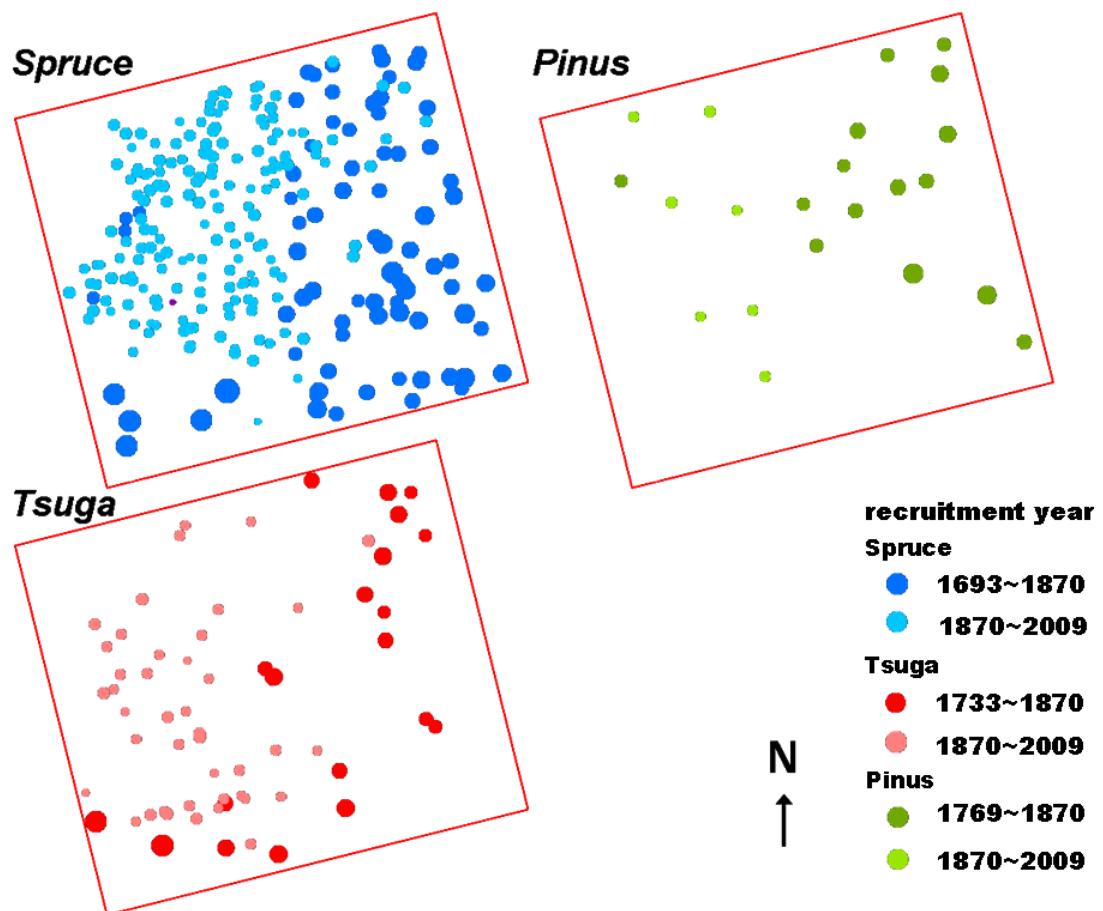


圖 4.5 三樹種之林木建立年代地圖。雲杉、鐵杉、華山松分別以藍色、紅色、綠色表示；圓圈尺寸為齡級大小，以 1870 年代為分界，較淺色圓圈為近代建立之林木。



4.4 輪寬敘述統計值

簡單以線性迴歸雲杉、鐵杉、華山松年齡與胸徑，迴歸式為： $Age = 53.17 + 2.20 \times DBH$ 、 $Age = 65.31 + 2.13 \times DBH$ 、 $Age = 65.69 + 2.19 \times DBH$ (資料來自 $DBH \geq 15$ cm 之林木)，三者相差無幾，雲杉之截距較低(應為受小徑級數量較多所影響)(圖 4.6)。

雲杉、鐵杉、華山松平均每年輪寬分別為 1.11 ± 0.65 、 0.94 ± 0.66 、 1.32 ± 1.01 mm，以鐵杉最低；平均年齡為 134、133、156 年(以 2009 年計算)；平均敏感度為 0.184、0.223、0.248；自相關係數為 0.804、0.826、0.837(表 4.2)。

徑向生長以華山松最為快速，而雲杉略高於鐵杉；同樹種不同定年品質之輪寬差異不大，「good」組的平均值普遍較寬，以華山松變異較大，而雲杉、鐵杉輪寬的變異值相近(圖 4.6)；輪寬變異來自於樹冠優勢度、林齡之生長趨勢、氣候變化、擾動影響或內在遺傳性狀，雖涵蓋因子複雜，但平均輪寬仍可略為代表其樹種生長特性(耐蔭、耐旱程度)。

平均敏感度呈現序列內輪寬變異，相鄰樹輪寬度之平均百分比變化，其值介於 0 至 1 之間，為較高頻、短周期的變化；自相關係數呈現時間序列中數據的連續性，為較低頻、長周期性的變化。與其他研究之不同樹種相比，臺灣冷杉平均敏感度為 0.14，臺灣紅檜為 0.24~0.29，臺灣杉為 0.21、威氏帝杉為 0.29~0.37、樟樹為 0.34~0.59 (張世振，2006；蔣麗雪，2011；劉婉霞，2009；鄒佩珊，1998)；而與相同樹種類似，塔塔加臺灣雲杉平均敏感度為 0.20~0.23、大武山臺灣鐵杉為 0.20 (張世振，2006；詹明勳，1999)。

表 4.2 三樹種之輪寬基本統計值。輪寬(平均值、最大值、標準差)、胸高年齡(recruitment year)、與主序列相關性、平均敏感度(mean sens.)、自相關係數(auto corr.)

sp	ring width (mm)			recruitment year			corr with master	mean sens.	auto corr.
	mean	max	sd	youngest	oldest	mean			
臺灣雲杉	1.11	6.87	0.65	1968	1691	1876	0.542	0.184	0.804
臺灣鐵杉	0.94	6.21	0.66	1942	1731	1877	0.516	0.223	0.826
臺灣華山松	1.32	15.10	1.01	1914	1767	1854	0.457	0.248	0.837

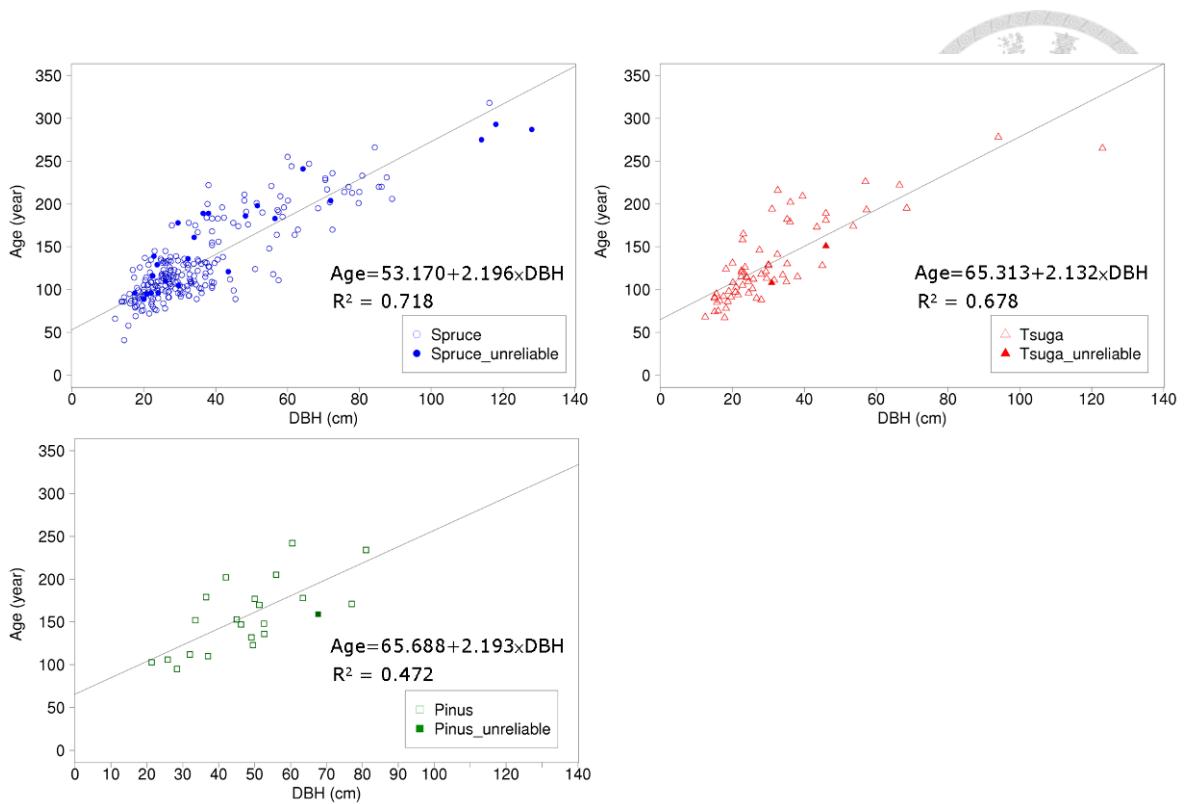


圖 4.6 不同樹種之胸徑與年齡關係。簡單以線性迴歸，「unreliable」為髓心偏失估計超過 15 輪或定年品質為 bad 者，未定年樣本不納入分析（雲杉、鐵杉、華山松採用樣本共 253、67、22 株樹）。

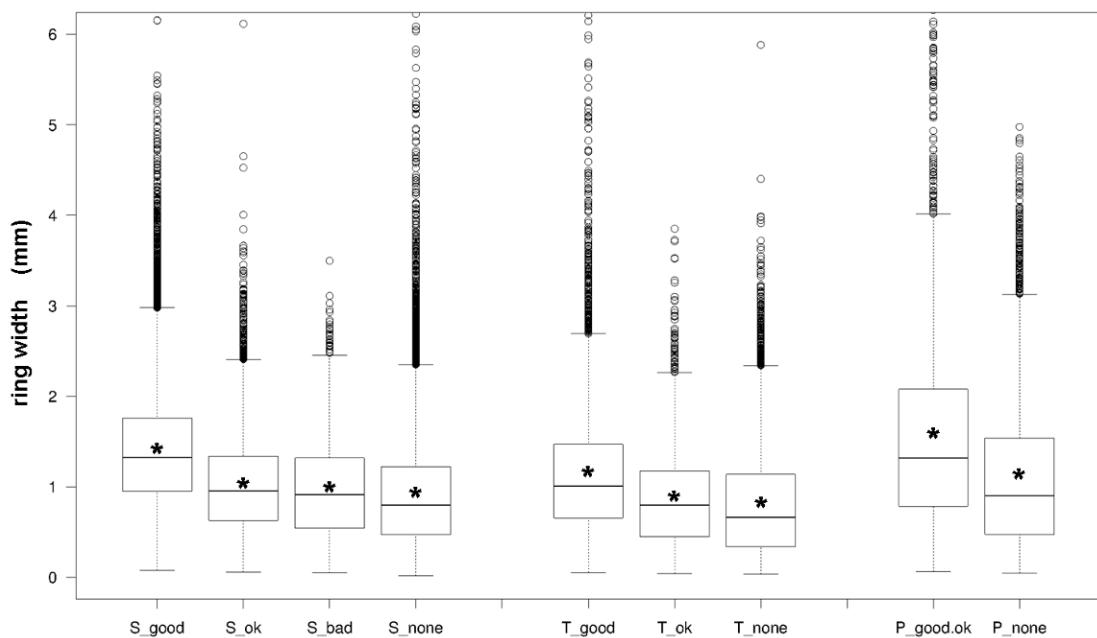


圖 4.7 三樹種輪寬盒鬚圖(box plot)(資料不包含缺失輪；圖片經過裁切，華山松最大值為 15.1mm)，分別以 S、T、P 表示雲杉、鐵杉、華山松；後綴之 good、ok、bad、none 表示各定年品質(ok 與內文的 correct 意思相同)；「*」為各輪寬之平均值。



4.5 摾動歷史重建

將定年可信之樣本採用移動平均法、絕對增加法、標準界限曲線法共三種方法來重建擾動歷史。大規模(stand-wide)擾動定義為在該年代有四分之一的林木顯示釋放表現 (Nawacki & Abram, 1997)。

將樣芯顯示之釋放以樹為單位合併計算，分別呈現擾動年代表與相對化的擾動年代表(將釋放次數除以當年之樣本深度，呈現該年代有多少比例的林木顯示釋放)。由擾動年代表來看(圖 4.8)，1850's、1900's、1920's、1940's、1980's 有較大的擾動發生，強度釋放多發生於 1850's、1940's、1980's 年代。

由相對化擾動年代表來看(圖 4.9)，(1700's)、(1730's)、1740's、1770's、1850's、1890's、1940's 發生大規模擾動(括號內的年代為樣本數太少，較不可信)，強度釋放多發生於 1770's、1850's、1940's 年代；相對來說，1860~1880 年、1930's、1960's 較少有擾動發生。

不同方法呈現相同的趨勢，標準界線曲線法所認定的釋放次數最多，而絕對增加法最少；標準界線曲線法，其雜訊較多(直觀上，峰值不明顯)，可能是未設定持續 5 年的門檻或其變動性的臨界值所影響。三種方法，在 1920's 的釋放出現較大的分歧，絕對增加法呈現較少的釋放次數，猜測與%GC、ABS 的公式本質有關，1910~1940 年雲杉的輪寬平均為 1.24 mm，以 1924 年 0.89 mm 最低，1918、1932 年皆有超過 1.5 mm 的表現，%GC 受 1924 年低值的影響使得輪寬變動率較大，另外，ABS 的反應較%GC 遲滯約 3 年。

比較不同樹種的表現(圖 4.10-15)，大致的趨勢是類似的，三樹種皆在 1850's、1940's 有較大的擾動，鐵杉於 1850's 有 60% 以上林木呈現釋放。

雲杉於 1850's、1910's、1920's、1940's、1980's、有較多的釋放；1940's、1980's 有較多強度釋放，方法之間的呈現較不一致；

鐵杉在 1820's、1850's、1920~30's、1940's、1980's 年代有較多的釋放，1850's、1920's、1940's、1980's 呈現較多的強度釋放；

華山松在 1830's、1850's、1890's、1910's、1940's 年代有較明顯的擾動峰值，在 1940's、1980's 有較多的強度釋放。

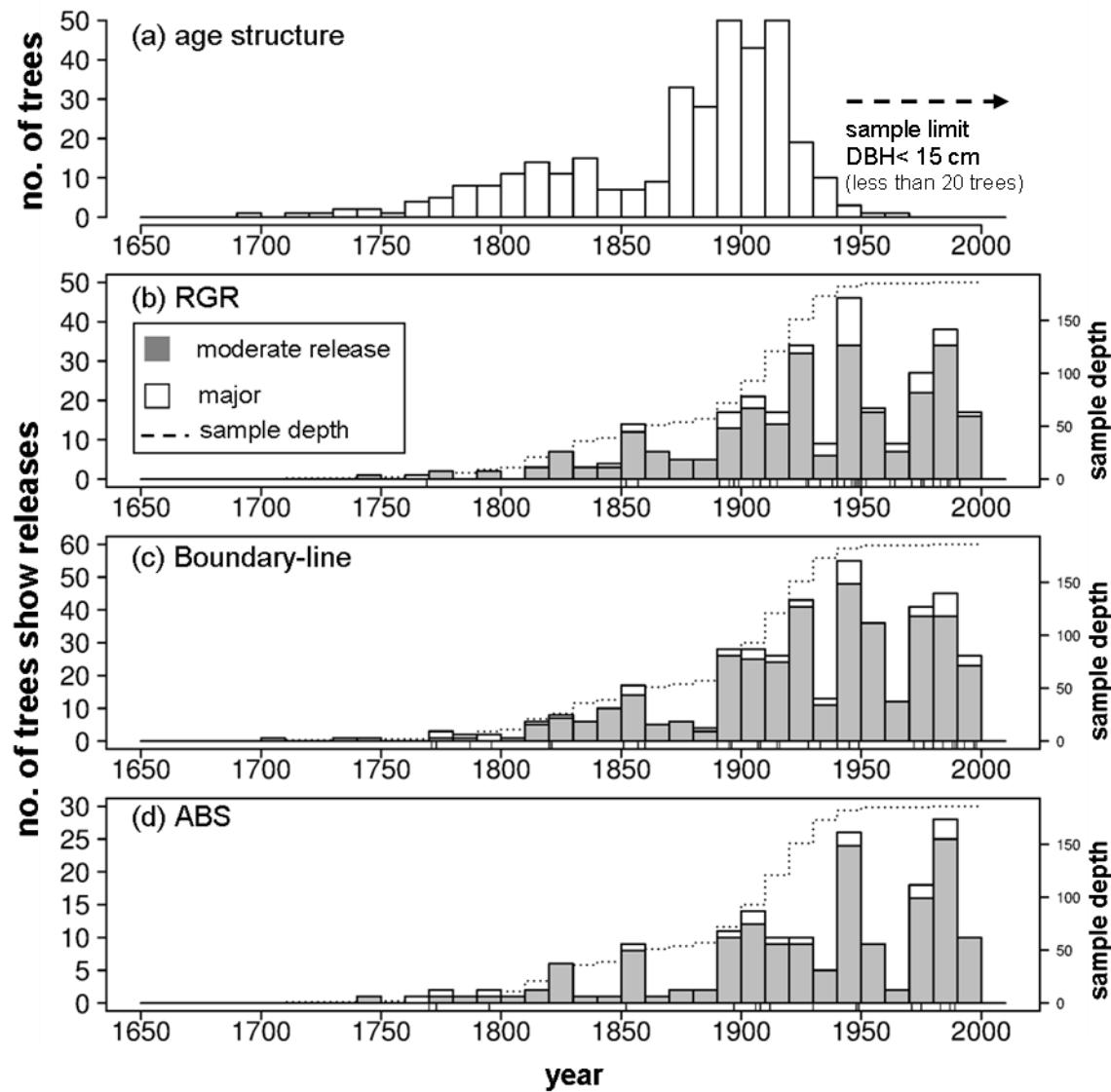


圖 4.8 不同方法之擾動年代表。(a)為齡級結構；(b)、(c)、(d)為不同方法，分別為移動平均法、標準界限曲線法、絕對生長法。直方圖底下之細直線為顯示強度釋放的年分。

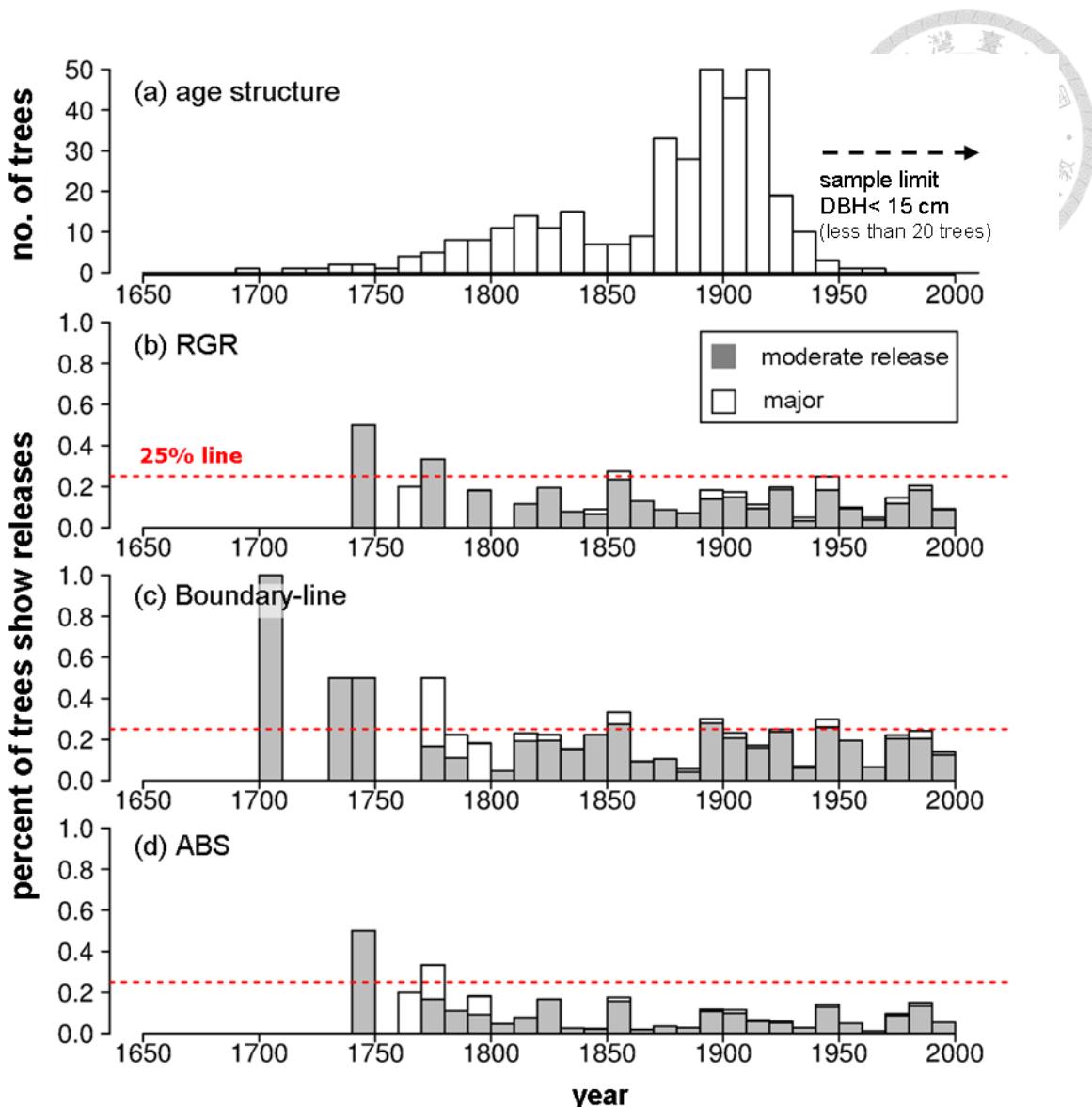


圖 4.9 不同方法之相對化擾動年代表。將釋放次數除以當年之樣本深度(sample depth)做相對化。(a)為齡級結構；(b)、(c)、(d)為不同方法，分別為移動平均法、標準界限曲線法、絕對生長法。

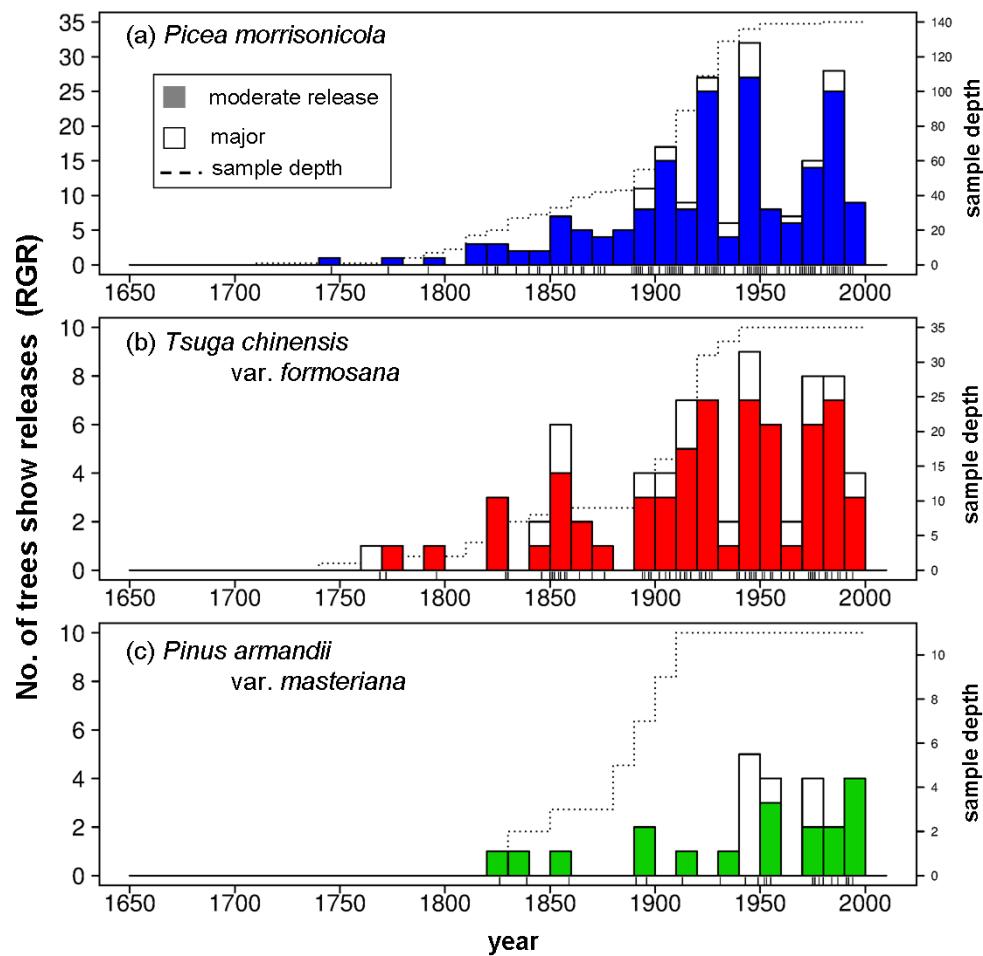


圖 4.10 移動平均法之擾動年代表。(a)、(b)、(c)分別為臺灣雲杉、鐵杉、華山松之釋放年代表。直方圖底下之細直線為顯示釋放的年分。

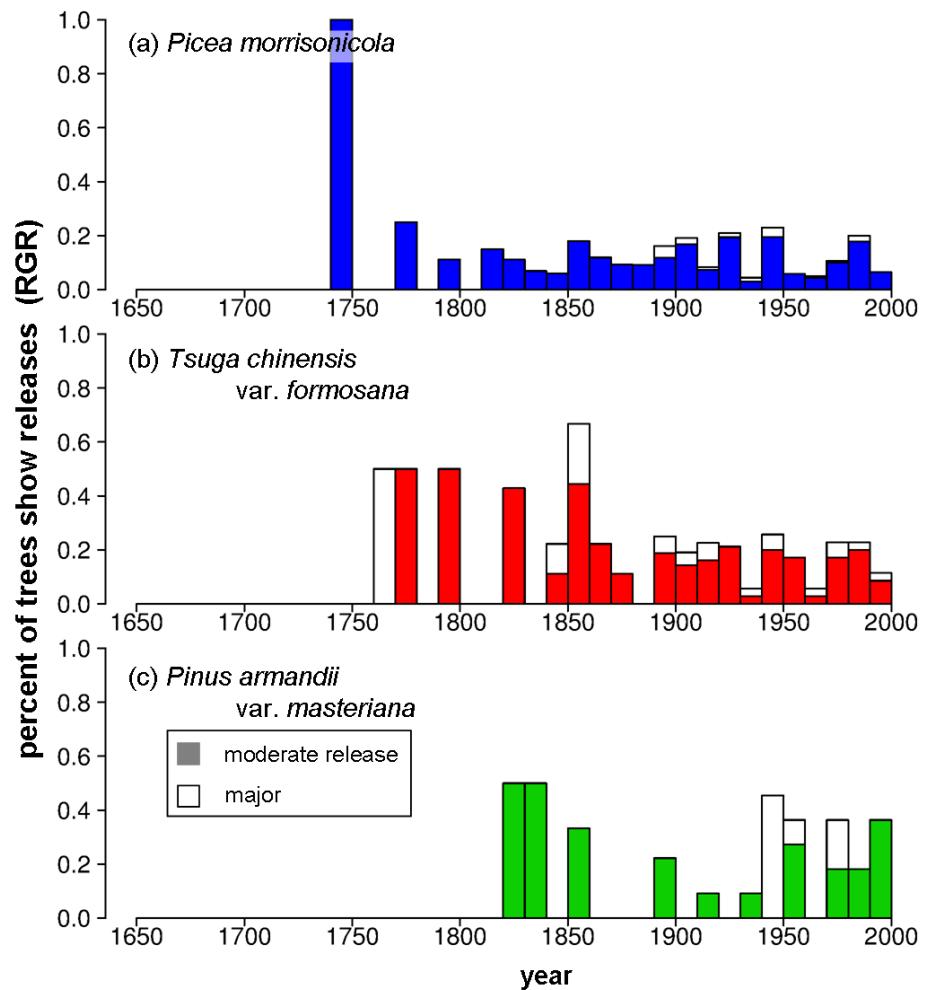


圖 4.11 移動平均法之相對化擾動年代表。將釋放次數除以當年之樣本深度(sample depth)做相對化。(a)、(b)、(c)分別為臺灣雲杉、鐵杉、華山松。

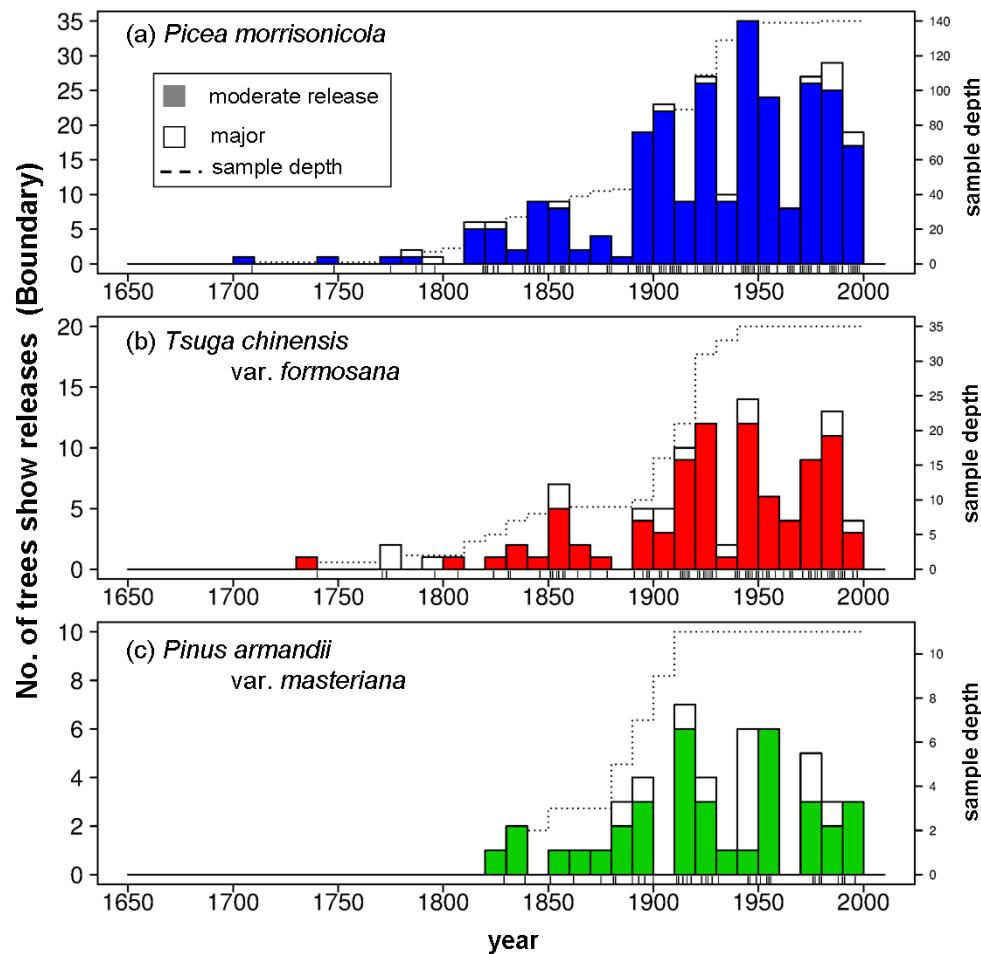


圖 4.12 標準界限曲線法之擾動年代表。(a)、(b)、(c)分別為臺灣雲杉、鐵杉、華山松之釋放年代表。直方圖底下之細直線為顯示釋放的年分。

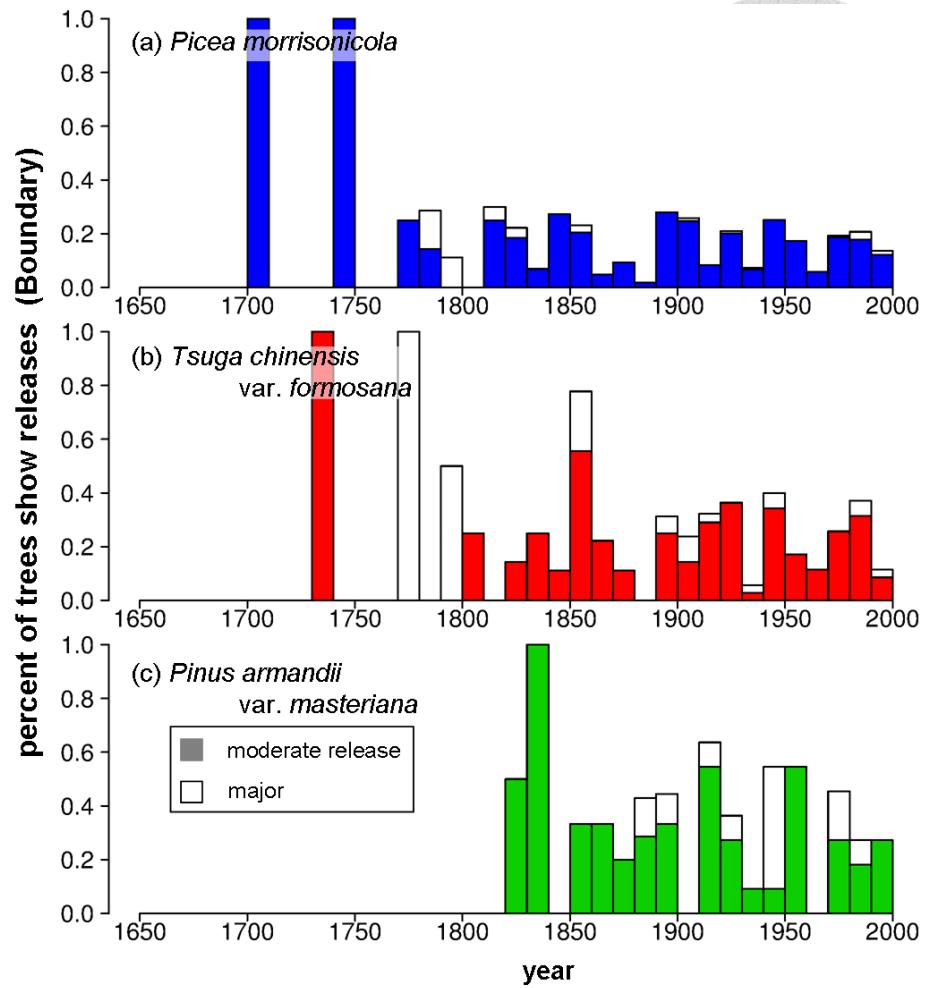


圖 4.13 標準界限曲線法之相對化擾動年代表。將釋放次數除以當年之樣本深度做相對化。(a)、(b)、(c)分別為臺灣雲杉、鐵杉、華山松。

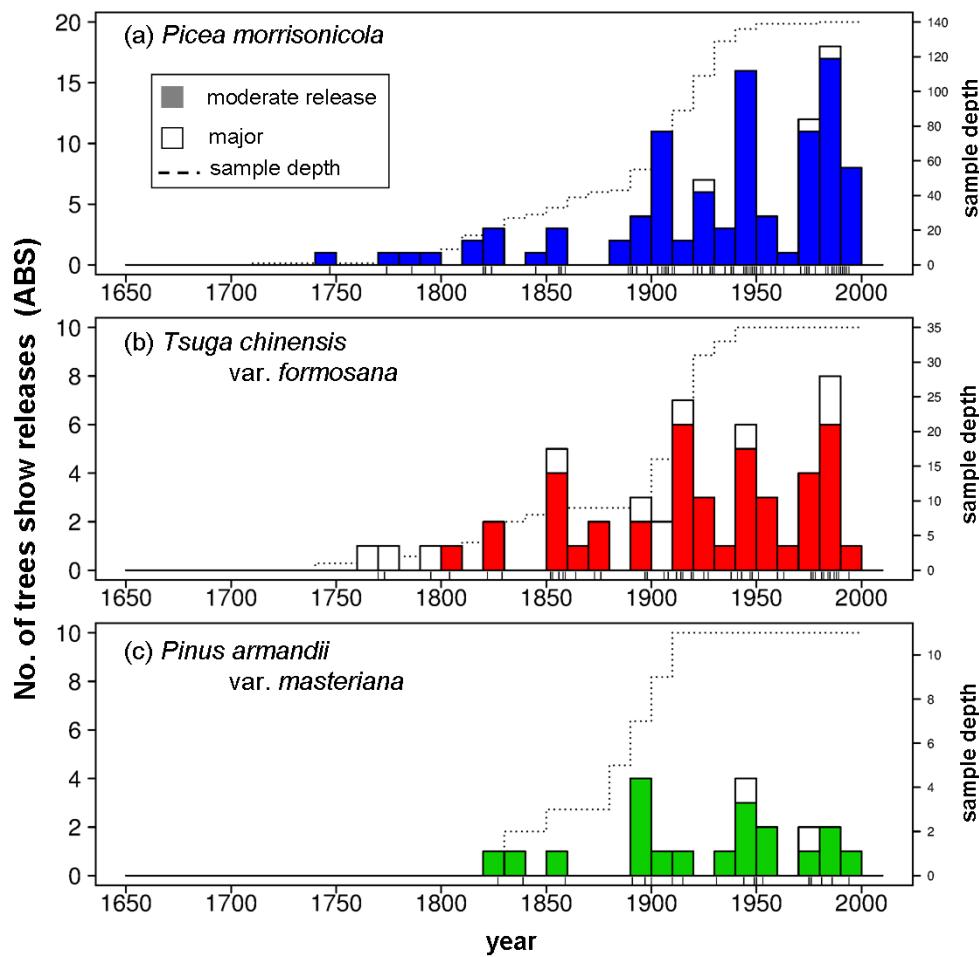


圖 4.14 絶對生長法之擾動年代表。(a)、(b)、(c)分別為臺灣雲杉、鐵杉、華山松之釋放年代表。直方圖底下之細直線為顯示釋放的年分。

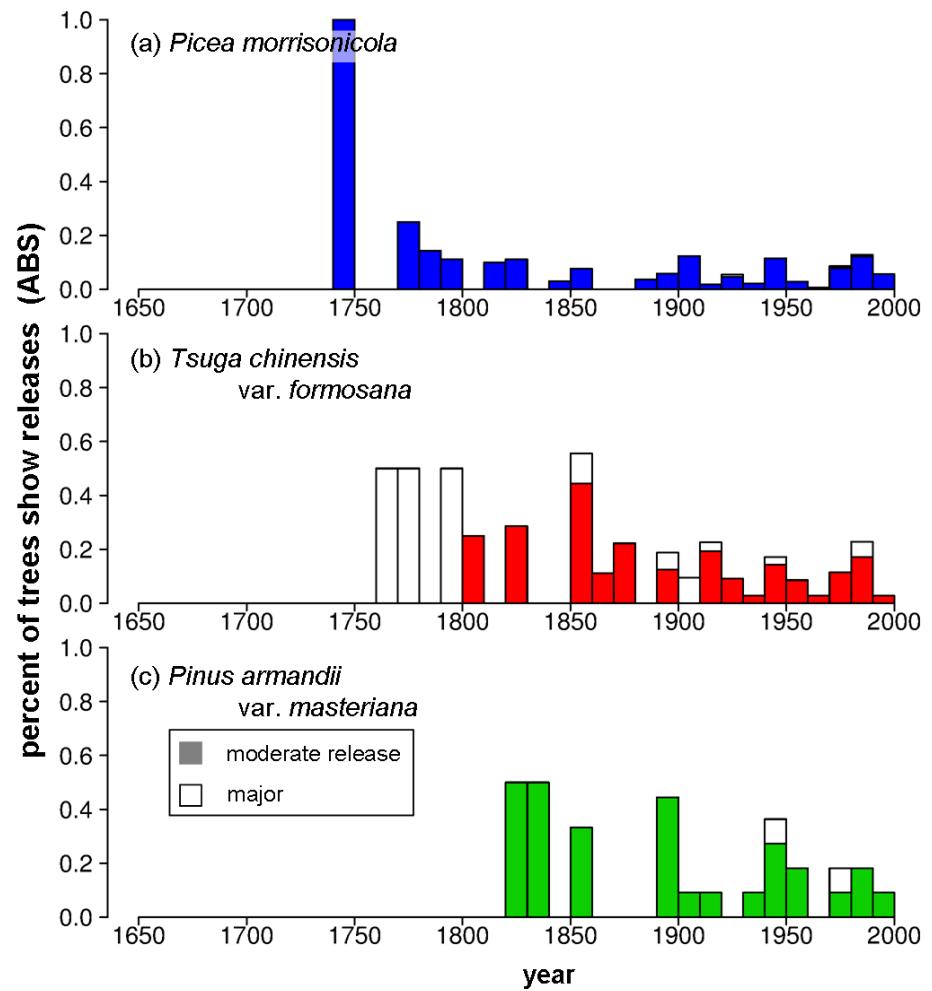


圖 4.15 絶對生長法之相對化擾動年代表。將釋放次數除以當年之樣本深度做相對化。(a)、(b)、(c)分別為臺灣雲杉、鐵杉、華山松。

第五章 討論



5.1 塔塔加雲杉林擾動動態

結合齡級結構與擾動年代表，1740's、1850's、1940's 皆為大規模擾動發生的年代(圖 4.9)，而 1770's、1870's 是兩個同生群開始建立的年代，1940's 的擾動並未造成大規模的裸地更新，崩塌至林木建立所需的時間需要二、三十年(未考慮自萌芽長至胸徑高的時間)。接連的崩塌與崩積，使得樣區地形於中央稍為平坦，下坡(北向)更為陡峭(圖 3.3)，而使得下坡處較為脆弱，較容易反覆出現崩塌。

林分取代性擾動(1740's、1850's、2009 年)發生頻率並不高，大約 110 至 150 年發生一次，在 1770's、1820's、1890's、1980's 仍有釋放高峰，與新個體建立後的釋放有關。

樣區呈現不同發育階段的塊集鑲嵌(圖 5.1)，西南上坡處為殘存老樹、東側樣區為中大徑木(中世代)、而小徑木(新世代)集中於西側下坡處或零星散布，西北角有中徑級(約 1870 年建立)的林木。2009 年，大規模擾動發生(莫拉克颱風，附錄六)；2005 年，西北角崩塌，樣區外產生大面積孔隙。

推測過去 1850's 發生林分取代性擾動，影響範圍樣區西半側(至上坡處老樹殘存為界)，1876 年開始在西北角有雲杉與華山松建立，1880's 由左右兩側向內陸續幅度新增，並於 1900's 達到高峰，1930's 趨於飽和。1850's 發生之擾動應未影響樣區外部之西側，因此孔隙填滿之方向才會由兩側向內。

更早以前，在 1740's 也有潛在的擾動發生，範圍發生於樣區東半側(受 1850's 擾動清洗，西側較不明確)，1756 年雲杉自東側建立，至 1790's 佔據樣區右下象限，1810's 右上角有小聚落同時建立，至 1840's 孔隙差不多飽和。此次孔隙自右上角向下坡與向中間逐波建立，擾動應對東半側未知範圍影響較小(1795 年鐵杉有於中央建立，可能源自東側潛在母樹)。

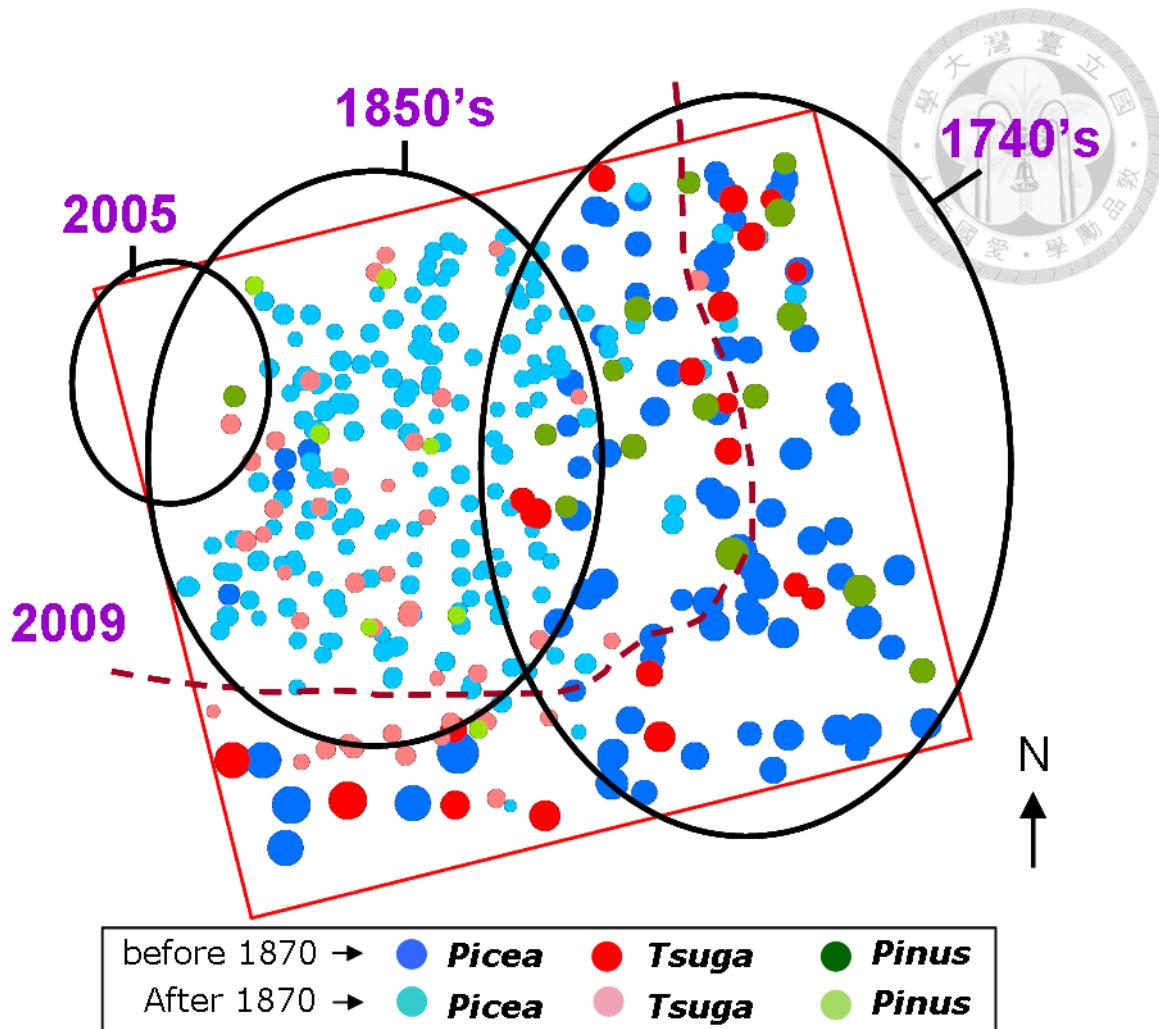


圖 5.1 歷史擾動可能的空間分布。圓圈尺寸為林木建立之年代，越大則越早建立，藍色圓圈為雲杉、紅色為鐵杉、綠色為華山松；並以淺色表示 1870 年後所建立之林木。以虛線表示 2009 年莫拉克颱風所造成之崩塌範圍；並以實線圓圈表示歷史擾動之推測影響範圍。

5.2 樹輪傷疤證據

檢視顯微鏡下樹輪解剖特徵(附錄七)，將可能是擾動所造成的傷害(瘡傷組織、傷疤、樹脂溝、反應材)與擾動年代表比較(圖 5.2)，時間上大致符合，1830's、1910's 有較明顯的受傷高峰，釋放發生較林木受傷延遲約十年或該時期即發生釋放；1830's 年代的受傷與 1850's 釋放相距較久，實際發生大規模災害的時間可能更為提前，受傷林木需要較長的恢復期。

傷疤是比較強烈的證據，在 1798~1804、1818~22、1831~34、1911~17、1943~47 年有較多的發生；為了定年方便，垂直於坡向鑽取樹芯以避免反應材，因此反應材較少；雲杉、華山松皆有正常樹脂溝(鐵杉僅有傷癒樹脂溝)，有可能與擾動所造成傷癒樹脂溝混淆。

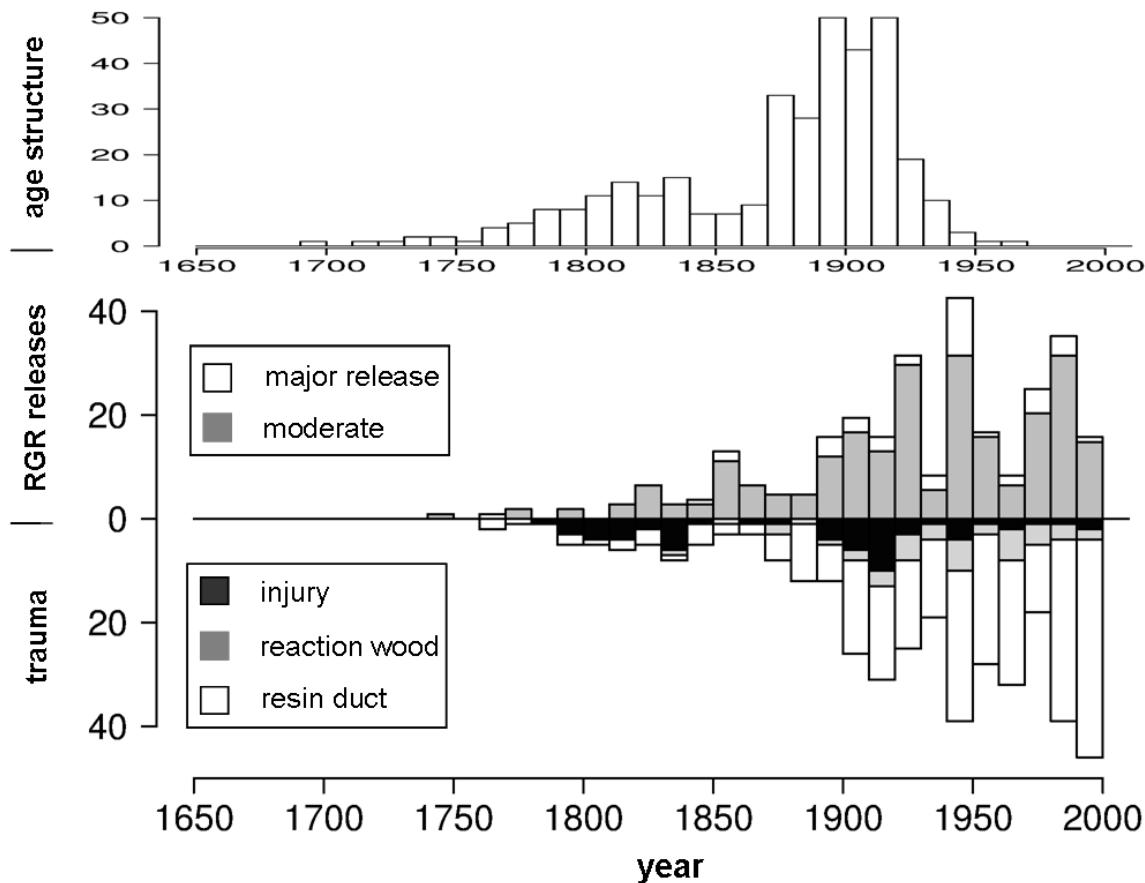


圖 5.2 樹輪傷疤與擾動年表比對。以移動平均法之擾動年代表為例，與樹木解剖證據之受傷、反應材、樹脂溝來做為比對。「injury」包含了癒傷組織、傷疤。

5.3 天然災害紀錄 - 地震、颱風

回顧歷史地震與颱風（侵臺颱風資料庫；曹永和，1979；鄭世楠、葉永田，2004），1848 年彰化地震(1,030 人死亡)、1906 年梅山地震、1916~7 年南投地震系列、1935 年新竹—臺中地震、1941 年中埔地震、1999 年集集地震。

清代史料記載颱風頻繁，幾乎每年都有(曹永和，1979)，康熙六十年(1722)倒塌房屋 10688 間，死者千有餘人；嘉慶十五年(1810)郡中城牆坍塌七百餘丈；道光

二十五年(1845)連日大雨南部成災，死亡 3059 人；光緒十六年(1889)風息後，雨尚如注，各縣山洪暴發。臺中或阿里山測站颱風累計雨量高值者(侵臺颱風資料庫)，有 1920 年 B091 颱風、1940 年 B165 颱風、1944 年 B174 颱風、1946 年 B182 颱風、1956 年黛納、1960 年雪利颱風、1963 年葛樂禮、1965 年瑪麗、1982 年安迪、1985 年尼爾森、1986 年韋恩、1996 年賀伯、2004 年敏督利颱風。

塔塔加地區擾動的主導因子應地震或為颱風挾帶豪雨所造成的崩塌，易發生於地質破碎、逕流集中之處(沙里仙溪上游溝蝕作用)(何立德、廖浤銘，2000)。地震造成土壤與岩層亦多鬆動而出現裂隙，爾後的降雨或地震，都容易引發二次土砂災害，形成新的崩塌地或原有崩塌再擴大(陳志豪，2009)。1980's 年代之強度釋放則應為安迪、尼爾森、韋恩等颱風所引起；1940's 所發生的強度釋放，可能由中埔地震與後續之颱風所共同誘發(表 5.1)；1850's 的林分取代性擾動，則可能為臺中地震、彰化地震，與連日大雨所引發之大規模崩塌(表 5.1、附錄九)。

表 5.1 擾動事件與影響範圍。

year	event	range	earthquake	Typhoon
1740's	stand-wide	east side	1736 Tainan	
1770's	major			
1850's	stand-wide	west side	1845 Taichung 1848 Changhua	1845 typhoon
1890's	moderate			1889 typhoon
1940's	major		1941 Chun-Pu	1944 B174 1946 B182
1980's	major			1982 Andy+Cecil 1985 Nelson 1986 Wayne
2005	landslide	North-West corner	1999 Chi-Chi	2004 Mindulle
2009	landslide	half of site (North)		2009 Morakot

stand-wide = stand-wide disturbance; **major** = major release; **moderate** = moderate release



5.4 樹種組成

雲杉、鐵杉、華山松最早於 1691、1731、1767 年在樣區建立，2009 年時，塔塔加樣區樹種組成為 73.9%、19.4%、6.7% (n=345 棟)，而回溯過去不同時期的樹種組成約為 73%、19%、8%，一直以雲杉為優勢。歷史回溯之樹種組成雖有盲點(過去的資訊受崩塌或其他擾動沖刷，並非整個樣區範圍)，但仍可一窺過去樹種之間的消長。

華山松於 1770's、1860's 兩個年代達到高峰，1770's 三樹種組成為 76.4%、11.8%、11.8% (n=17)、而 1860's 年代 67.3%、19.6%、13.1% (n=107 棟)；鐵杉 1740's、1820's 出現高峰，1740's 為 71.4%、28.6%、0% (n=7)，1820's 為 72.5%、20.3%、7.2% (n=69)；1870's 雲杉由 72 株增加至 100 株，為新增(recruitment)幅度最大的年代。華山松於崩塌之後建立較早，故該樹種組成在擾動時期後達到高峰。鐵杉則與雲杉差不多時期建立。

5.5 雲杉優勢

樣區內雲杉、鐵杉最早建立於 1691、1731 年(317、279 年)，仍未達該種已知之最大年齡雲杉(376、397 年以上)(張世振，2006；陳姿彤，2011)。樣區內樹齡受天然擾動所限制，也與地形有很大關聯，經莫拉克颱風後所留存之樹木位置與老齡木相符(附錄六)。

2012 年，塔塔加之雲杉為結實豐年，地上可見大量球果，並於 2013 年春雲杉小苗成小叢(3-5 株)小範圍散生於崩塌裸地之上。由徑向生長量與生育地特性，推估三樹種之耐蔭程度相近，皆類似陽性樹種，而鐵杉可能稍具耐蔭性，鐵杉>雲杉>華山松。天山雲杉(*Picea schrenkiana*)天然更新的適宜坡向是陰坡和半陰坡，以疏密度 0.4-0.5 時的透光量最適宜天然更新，不同地被植物的根系盤結控制種子發芽更新的難易，鬱閉林分下無更新層(幼樹每公頃不足 400 棟)(劉雲，2000)。



塔塔加臺灣雲杉林下層同樣無幼樹存在，地被玉山箭竹少見；臺灣鐵杉林型則林冠鬱閉，底層少有直射光，林下密生玉山箭竹阻礙更新，但常可見鐵杉風倒木使樹冠疏開，鐵杉或其他闊葉樹幼苗得以更新(鐘年均，1999)。大規模擾動，有助於雲杉更新，並維持其優勢。

大規模擾動塑造塔塔加雲杉林之組成與結構，雲杉幼樹於建立後需要高光照、甚至全光照(劉雲，2000)，大孔隙有助於其生長、更新，鬱閉林下可見大量幼樹枯立木，應為自我疏伐之結果。Svoboda 等人(2012)於捷克亞高山挪威雲杉林(*Picea abies*)重建擾動歷史，呈現後擾動林分結構(post-disturbance stand structure)，多數林木於 1840~60 年同時晉升至冠層中，由低頻率高強度之風暴塑造這個林分，風暴與蟲害有交感效應。而塔塔加雲杉林木於建立之後，數十年後才有釋放發生，可能為開闊地快速生長，樹冠接近鬱閉時間較久(附錄八)。

生育地環境的適宜，加上大規模擾動促進雲杉幼苗更新，裸地附近仍有大量母樹天然下種，雲杉幼樹快速地生長、建立使樹冠鬱閉限制了華山松的更新，鐵杉生長於本樣區略較雲杉劣勢，但仍有部分較小孔隙可供其生長、更新，不同發育階段的塊集鑲嵌與頻繁卻小規模擾動提供三樹種共存之機會。



5.6 釋放偵測方法比較

用移動平均法、絕對增加法、標準界限曲線法共三種方法來偵測林木的釋放動態，不同方法所認定擾動趨勢相似(圖 4.8、4.9、附錄八)，釋放反應的時間點在不同林木上呈現一致，擾動效應的持續時間兩、三年至十多年皆有可能。以標準界限曲線法所偵測之釋放最多、絕對增加法最少(表 5.2)。本研究標準界限曲線法未設定持續效應 5 年的標準，可能是導致其次數最多的原因；各樹種標準界限曲線建立樣本數不均等，未達較穩定的 50,000 筆以上，樣本數最少(2788 筆)之華山松曲線較有疑慮(Black *et al.* , 2009)。

而絕對增加法臨界值設定較高，可做為較嚴苛的評估標準，將較輕微之擾動過濾，兩倍平均輪寬值作為強度釋放的標準，有點類似%GC 大於 100% 的門檻。雲杉 ABS 設定較高，

不同樹種林木生命週期之生長釋放次數比例，雲杉以 0~1 次釋放為多；鐵杉雖亦以 0~1 次釋放為多，但 3 次以上釋放仍佔不少比例；華山松三個方法顯示較不一致，以超過 1 次釋放為多，或許受各方法之臨界值設定有關。

表 5.2 不同樹種林木生命週期之生長釋放次數比例。

sp	RGR		Boundary		ABS		Release times in tree life (%) ... tree samples for the spruce, hemlock, and pine are 140, 35, and 11											
	mod	maj	mod	maj	mod	maj	RGR				Boundary				ABS			
							0	1	2	≥3	0	1	2	≥3	0	1	2	≥3
臺灣雲杉	183	20	260	15	98	3	59.3	22.1	10.7	7.9	55.9	19.4	10.4	14.3	74.6	17.9	5	2.5
臺灣鐵杉	62	16	88	15	42	11	37.2	37.1	11.4	14.3	35.7	25.7	12.9	25.7	52.9	28.6	11.4	7.1
臺灣華山松	18	8	35	12	19	2	18.2	36.3	18.2	27.3	0.0	18.2	9.1	72.7	9.1	27.3	45.4	18.2
total	263	44	383	42	159	16	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

the criteria of moderate or major release

RGR : 50 / 100% continue for 5 yr Boundary : 20 / 50% of specific boundary-line
ABS : 0.7 / 1.4 mm, 0.5 / 1.0 mm and 0.8 / 1.6mm continue for 5 yr in spruce, hemlock, and pine

第六章 結論

塔塔加雲杉林永久樣區，以臺灣雲杉為主要優勢，伴生臺灣鐵杉與華山松，雲杉最早建立於 1963 年，齡級結構呈雙峰分布，分別於 1760~1860、1860 年以後有兩個世代的同生群，並在空間上有明顯區隔，呈現塊集的鑲嵌體，老樹多殘存於地勢較高的樣區西南邊，中世代則建立於稍顯平坦的東邊及西北角，新世代則建立於樣區中央偏西北方。

本研究應用樹輪生態學方法重建過去三百年擾動年代表，三種不同準則方法所重建的結果類似，分別於 1740~50、1770~80、1850~60、1890~2000、1940~50 年代有較大規模的生長釋放；結合齡級結構、樹齡空間分布與擾動年代表，推測過去曾於 1740's、1850's 年代發生林分取代性擾動，地震或颱風挾帶之豪雨造成之大面積崩塌，應為擾動的主要成因，1850's 年代之擾動影響範圍為樣區西半側(與 2009 年莫拉克颱風造成崩塌面積類似)，新建立之族群自東側與西北角向內填滿孔隙，族群建立於 1900's 達到高峰，1930's 趨於飽和；1740's 年代之擾動影響範圍為樣區東半側(受 1850's 擾動清洗，西側較不明確)，新建立之族群自東側上坡處向下坡(北方)與向中間方向逐步填滿孔隙，族群建立至 1840's 年代差不多飽和(樹冠開始鬱閉)。林分取代性擾動發生至林木開始建立所需的時間需要二、三十年。

回推過去各時期之樹種組成，雲杉持續保持著主要優勢，華山松於崩塌之後建立較早，故於擾動時期後達到其樹種組成的相對高峰。過去文獻指出雲杉需要較大的孔隙才有幼苗更新，崩塌為其可能之更新機制。雲杉於大面積崩塌後逐步大量建立並填滿空隙，樹冠鬱閉後，華山松之建立受到限制，下層並無雲杉幼樹存在，而鐵杉或可藉由小面積風倒孔隙更新，大規模擾動促進雲杉的更新，以維持其族群優勢。

三種釋放偵測方法各有優缺，搭配使用可減少主觀性並避免盲點，樹輪生態學研究可重建過去數百年之林分動態，在臺灣仍處於起步階段，對於樹種的建立、生長歷程、生長特性皆能提供進一步的資訊，以提供日後研究的基礎。

參考文獻



- 大氣研究資料庫，網址: <http://dbar.ttfri.narl.org.tw/>
- 王松永。1983。商用木材。臺北市：中華民國林產事業協會。
- 何立德、廖法銘。2000。大鐵杉—塔塔加鞍部—玉山群峰地區之崩塌地初步調查。環境與世界 4：93-103。
- 杜政翰。2006。二仁溪下游地區樟樹樹輪中重金屬含量變化之分析探討。輔英科
技大學環境工程與科學系碩士班碩士論文。
- 林朝榮。1957。臺灣地形。臺北：臺灣省文獻委員會。
- 林振榮、林世宗、鍾智昕。2010。棲蘭山天然更新台灣扁柏林分樹輪及材質之研
究。中華林學季刊 43(1)：131-145。
- 封曉輝、程瑞梅、肖文發、王曉榮、王瑞麗。2011。樹木年輪在干擾歷史重建中
的應用。生態學報 31(11)：3215-3222。
- 柯傑夫。2010。鐵立庫崩塌地，北臺灣：以試驗判斷岩盤湧水扮演的角色。臺灣
大學土木工程學研究所碩士論文。
- 柳梧。1971。臺灣植物群落分類之研究 II。林業試驗所報告 203：1-24。
- 柳梧、葛錦昭、楊炳炎。1961。臺灣主要林型生態之調查 林試所報告 72：1-65。
- 翁菁羚。2006。土壤有機氮形態對臺灣中部三種針葉林土壤氮礦化作用之影響。
臺灣大學森林環境暨資源學研究所碩士論文。
- 張琇慧。2000。台灣北部昆欄樹樹輪對氣候因子之反映。國立臺灣大學地質學研
究所碩士論文。
- 張世振。2006。臺灣西南部大武山區氣候對樹輪寬度變化之影響。輔英科技大學
環境工程與科學系碩士班碩士論文。
- 曹永和。1979。清代台灣水災及蠲恤表。清代臺灣水災與風災(臺灣早期歷史研究)：
399-477。
- 梁曉東、葉萬輝。2001。林窗研究進展。熱帶亞熱帶植物學報 9(4)：355-364。



- 許弘諭。2011。華山松種子發芽與不同階段之低溫層積處理改變華山松種子胚部
激勃素和離層酸濃度之研究。臺灣大學森林環境暨資源學研究所碩士論文。
- 郭寶章。1990。育林學各論。國立編譯館。
- 陳正祥。1961。臺灣地誌。臺北市：敷明產業地理研究所報告。94：909-935。
- 陳彥豪。2008。以苦楝植體化學分析探討二仁溪中下游地區受重金屬污染之研究。
輔英科技大學環境工程與科學系碩士班碩士論文。
- 陳志豪。2009。集集地震後荖濃溪流域崩塌發生特性分析。國立成功大學地球科
學研究所碩士論文。
- 陳姿彤。2011。以臺灣中部雲杉樹輪重建三百年古氣候：利用傳統樹輪及總體經
驗模態分解法。臺灣大學地質科學研究所碩士論文。
- 陳建璋。2011。氣候變遷對於台灣亞高山玉山圓柏與冷杉樹輪氣候學之研究-以太
魯閣國家公園為例。太魯閣國家公園管理處研究生研究報告。
- 陳柏因。2012。栽植距離對柳杉樹輪寬與氣候因子關係之影響。臺灣大學森林環
境暨資源學研究所碩士論文。
- 陳品邑。2012。宜蘭銅山台灣水青岡林長期動態樣區之森林動態與天然更新。國
立宜蘭大學森林暨自然資源學系碩士班碩士論文。
- 陳明義、施纓煜。1999。野火影響雪山地區植群之研究。國家公園學報 9(1)：1-10。
- 曾彥學。1991。台灣中部沙里仙溪集水區植群生態之研究(II)：台灣雲杉森林動態
及族群結構之研究。臺灣大學森林學研究所碩士論文。
- 曾秀緣。2011。宜蘭縣棲蘭山區台灣扁柏近 50 年偽輪的氣候意義初探。臺灣大學
地質科學研究所碩士論文。
- 詹明勳。1999。塔塔加地區天然生台灣雲杉樹木氣候學之研究。國立臺灣大學森
林學研究所博士論文。
- 詹明勳、王亞男、葉永廉。2005。台灣中部塔塔加地區台灣雲杉樹輪氣候學研究
過去 245 年氣溫與降雨量趨勢。中華林學季刊 38(1)：67-82。



詹琬婷。2004。由樹輪分析探討棲蘭山台灣扁柏更新機制。臺灣大學森林學研究所碩士論文。

鄒佩珊。1998。台灣山區近五百年的氣候變化：樹輪寬度的證據。臺灣大學地質研究所博士論文。

劉靜榆。1991。台灣中部沙里仙溪集水區植群生態之研究(I)：植群分析與森林演替之研究。臺灣大學森林學研究所碩士論文。

劉淑芬。1998。塔塔加地區台灣雲杉天然林林分空間結構與生長動態之研究。臺灣大學森林學研究所碩士論文。

劉雲。2000。兩種不同干擾方式下的天山雲杉更新反應研究。新疆農業大學碩士論文。

劉婉霞。2009。不同海拔地區樟樹樹輪徑向生長與氣候因子相關之研究。國立嘉義大學森林暨自然資源學系研究所碩士論文。

劉棠瑞、廖日京。1980。樹木學（上冊）。臺北市：臺灣商務印書館。

蔣麗雪。2011。臺灣中部威氏帝杉樹輪寬變化與當地氣候及中太平洋海面溫度之關係。臺灣大學森林環境暨資源學研究所碩士論文。

鄭世楠、葉永田。2004。地震災害對台灣社會文化的衝擊。災難與重建一九二一震災與社會文化重建論文集：131-162。

鄭謹緒。1997。臺灣玉山冷杉樹輪穩定碳同位素組成記錄之研究。國立中山大學海洋地質及化學研究所碩士論文。

鍾年鈞。1994。台灣中部沙里仙區植群生態與保育特性之研究。臺灣大學森林學研究所博士論文。

鍾年鈞。1999。全球變遷：塔塔加高山生態系長期生態研究—塔塔加高山植群之研究(三)。行政院國家科學委員會專題研究計畫成果報告

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。臺灣大學森林學碩士論文。

藍永如、劉高煥、邵雪梅。2011。近 40a 來基於樹輪年代學的梅里雪山明永冰川變
化研究。冰川凍土 33(6)：1229-1234。

魏聰輝。2002。塔塔加高山生態系表層土壤熱收支特性之研究。臺灣大學森林學
研究所博士論文。

Applequist, M.B. 1958. A simple pith locator for using with off-center increment cores.

Journal of Forestry 56: 141.

Black, B. A. and M. D. Abrams. 2003. Use of boundary-line growth patterns as a basis
for dendroecological release criteria. Ecological Applications 13: 1733-1749.

Black, B. A. and M. D. Abrams. 2004. Development and application of boundary-line.
Dendrochronologia 22: 31-42.

Black, B. A. and M. D. Abrams. 2005. Disturbance history and climate response in an
old-growth hemlock-white pine forest, Central Pennsylvania. Journal of the Torrey
Botanical Society 132: 103-114.

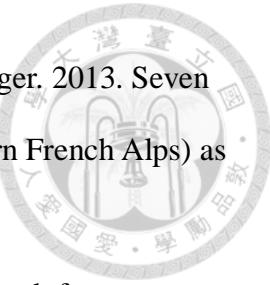
Black, B. A., M. D. Abrams, J. S. Rentch and P. J. Gould. 2009. Properties of
boundary-line release criteria in North American tree species. Annals of Forest
Science 66: 205.

Buras, A., M. Hallinger and M. Wilmking. 2012. Can shrubs help to reconstruct
historical glacier retreats? Environmental Research Letters 7: 044031.

Canham, C.D. 1985. Suppression and release during canopy recruitment in *Acer*
saccharum. Bulletin of the Torrey Botanical Club 112: 134-145.

Cook, E. R. 1987. The decomposition of tree-ring series for environmental studies.
Tree-ring Bulletin 47: 37-59.

Cook, E. R., K. J. Anchukaitis, B. M. Buckley, R. D. D'Arrigo, G. C. Jacoby, W. E.
Wright. 2010. Asian monsoon failure and megadrought during the last millennium.
Science, 328, 486-489.



- Corona, C., J. L. Saez, M. Stoffel, G. Rovera, J. L. Edouard and F. Berger. 2013. Seven centuries of avalanche activity at Echalf (Queyras massif, southern French Alps) as inferred from tree rings. *Holocene* 23(2): 292-304.
- Daniels, L. D. 2003. Western redcedar population dynamics in old-growth forests: Contrasting ecological paradigms using tree rings. *Forestry Chronicle* 79: 517-530.
- Fraver, S. and A. S. White. 2005. Identifying growth releases in dendrochronological studies of forest disturbance. *Canadian Journal of Forest Research* 35: 1648-1656.
- Frelich, L. E. 2002. Forest dynamics and disturbance regimes. Cambridge University Press.
- Fritts, H. C. 1976. Tree rings and climate. Academic Press, London.
- Grissino-Mayer, H. D. 2001. Evaluating crossdating accuracy: A manual and tutorial for the computer program COFECHA. *Tree-Ring Research* 57: 205-221.
- Guan, B. T., W. E. Wright, C. H. Chung and S.T. Chang. 2012. ENSO and PDO strongly influence Taiwan spruce height growth. *Forest ecology and management* 267: 50-57.
- Hart, J. L., M. L. Buchanan, S. L. Clark and S. J. Torreano. 2012. Canopy accession strategies and climate-growth relationships in *Acer rubrum*. *Forest Ecology and Management* 282: 124-132.
- Holmes, R. L. 1983. Computer-assisted quality control in tree-ring dating and measurement. *Tree-Ring Bulletin* 43: 69-78.
- Huang, T. C. et al. 1994. Flora of Taiwan (2nd edition), Vol. 1. Department of Botany, National Taiwan University, Taipei.
- Lorimer, C. G. and L. E. Frelich. 1989. A methodology for estimating canopy disturbance frequency and intensity in dense temperate forests. *Canadian Journal of Forest Research* 19: 651-663.

- Lorimer, C. G., L. E. Frelich and E. V. Nordheim. 1988. Estimating gap origin probabilities for canopy trees. *Ecology* 69: 778-785.
- Niukkanen, L. and T. Kuuluvainen. 2011. Radial growth patterns of dominant trees in two old-growth forests in eastern Fennoscandia. *Journal of Forest Research* 16: 228-236.
- Nowacki, G. J. and M. D. Abrams. 1997. Radial-growth averaging criteria for reconstructing disturbance histories from presettlement-origin oaks. *Ecological Monographs* 67: 225-249.
- Oliver, C. D. 1981. Forest development in North America following major disturbances. *Forest Ecology and Management* 3: 153-168.
- Oliver, C. D. and B. C. Larson. 1996. *Forest Stand Dynamics*. John Wiley & Sons, Inc., USA.
- Panayotov, M., D. Kulakowski, L. L. Dos Santos and P. Bebi. 2011. Wind disturbances shape old Norway spruce-dominated forest in Bulgaria. *Forest Ecology and Management* 262: 470-481.
- Rentch, J. S., T. M. Schuler, G. J. Nowacki, N. R. Beane and W. M. Ford. 2010. Canopy gap dynamics of second-growth red spruce-northern hardwood stands in West Virginia. *Forest Ecology and Management* 260: 1921-1929.
- Rozendaal, D. M. A. and P. A. Zuidema. 2011. Dendroecology in the tropics: a review. *Trees-Structure and Function* 25: 3-16.
- Rubino, D. L. and B. C. McCarthy. 2004. Comparative analysis of dendroecological methods used to assess disturbance events. *Dendrobiology* 21: 97-115.
- Saez, J. L., C. Corona, M. Stoffel, L. Astrade, F. Berger and J. P. Malet. 2012. Dendrogeomorphic reconstruction of past landslide reactivation with seasonal precision: the Bois Noir landslide, southeast French Alps. *Landslides* 9: 189-203.



- Schweingruber, F. H. 2007. Wood structure and environment. Springer-Verlag, Berlin.
- Shi, C., V. Daux, Q. B. Zhang, C. Risi, S. G. Hou, M. Stievenard, M. Pierre, Z. Li and V. Masson-Delmotte. 2012. Reconstruction of southeast Tibetan Plateau summer climate using tree ring delta O-18: moisture variability over the past two centuries. *Climate of the Past* 8: 205-213.
- Song, K., Q. Yu, K. Shang, T. Yang and L. Da. 2011. The spatio-temporal pattern of historical disturbances of an evergreen broadleaved forest in East China: a dendroecological analysis. *Plant Ecology* 212: 1313-1325.
- Speer, J. H. 2010. Fundamentals of tree-ring research. Tucson, University of Arizona.
- Stan, A. B. and L. D. Daniels. 2010. Calibrating the radial-growth averaging method for detecting releases in old-growth forests of coastal British Columbia, Canada. *Dendrochronologia* 28: 135-147.
- Stoffel, M., D. R. Butler, C. Corona. (2013). Mass movements and tree rings: A guide to dendrogeomorphic field sampling and dating. *Geomorphology (in press)*, <http://dx.doi.org/10.1016/j.geomorph.2012.12.017>
- Stoffel, M., D. Schneuwly, M. Bollschweiler, I. Lievre, R. Delaloye, M. Myint and M. Monbaron. 2005. Analyzing rockfall activity (1600-2002) in a protection forest - a case study using dendrogeomorphology. *Geomorphology* 68: 224-241.
- Svoboda, M., P. Janda, T. A. Nagel, S. Fraver, J. Rejzek and R. Bace. 2012. Disturbance history of an old-growth sub-alpine *Picea abies* stand in the Bohemian Forest, Czech Republic. *Journal of Vegetation Science* 23: 86-97.
- Trotsiuk, V., M. L. Hobi and B. Commarmot. 2012. Age structure and disturbance dynamics of the relic virgin beech forest Uholka (Ukrainian Carpathians). *Forest Ecology and Management* 265: 181-190.
- Veblen, T. T. 1989. Tree regeneration responses to gaps along a transandean gradient. *Ecology* 70: 541-543.

Watt, A.S. 1947. Pattern and process in the plant community. *The Journal of Ecology* 35: 1-22.

Whitmore, T. C. 1975. Tropical rain forest of the far east. Clarendon, Oxford.

Wils, T. H. G., I. Robertson, Z. Eshetu, R. Touchan, U. Sass-Klaassen and M.

Koprowski. 2011. Crossdating *Juniperus procera* from North Gondar, Ethiopia.

Trees-Structure and Function 25: 71-82.

Yamamoto, S-I. 2000. Forest gap dynamics and tree regeneration. *Journal of Forest*

Research 5: 223-229.

Zielonka, T., J. Holeksa, P. Fleischer and P. Kapusta. 2010. A tree-ring reconstruction of

wind disturbances in a forest of the Slovakian Tatra Mountains, Western

Carpathians. *Journal of Vegetation Science* 21: 31-42.



附錄一、COFECHA 結果：敘述統計



第一部分為基本資訊：樹芯名稱(Seq Series)、標記問題的區段數(No. Flags)、樹間相關性 (Corr with Master)等；第二部分為輪寬統計值：平均輪寬(Mean msmt)、標準差(Std dev)、自相關係數(Auto corr)、平均敏感度(Mean sens)等。第三部分為用三次平滑曲線、移除自相關等後得到的輪寬指數：指數最大值 (Max value)、自迴歸模式(AR)等。因為大部分延遲效應已被移除，故自相關係數會接近於0；自迴歸模式介於1-4之間，數字越大表示延遲效應越久。表中最下面一行為樣本的總和或平均值。表 A1.1 臺灣雲杉之 COFECHA 敘述統計。

■PART 7: Spruce DESCRIPTIVE STATISTICS:

00:00

Seq Series	Interval	No. Years	No. Segmt	No. Flags	Corr with Master	Unfiltered				Filtered				
						Mean	Max msmt	Std dev	Auto corr	Mean sens	Max value	Std dev	Auto corr	AR ()
1 S0013A	1815 2008	194	145	0	0.627	1.08	3.70	0.477	0.833	0.196	2.45	0.281	-0.014	1
2 S0013B	1858 2008	151	102	0	0.605	1.60	3.99	0.636	0.859	0.164	2.56	0.396	0.005	1
3 S01011	1849 2008	160	111	4	0.529	1.76	4.31	0.873	0.885	0.179	2.69	0.420	-0.031	1
4 S01012	1849 2008	160	111	17	0.515	1.04	4.18	0.565	0.852	0.225	2.49	0.255	-0.023	1
5 S02011	1891 2008	118	69	1	0.449	0.86	1.55	0.268	0.713	0.181	2.35	0.258	-0.001	1
6 S0214B	1857 2008	152	103	7	0.435	1.74	3.98	0.564	0.796	0.139	2.68	0.441	0.009	1
7 S03081	1908 2008	101	52	0	0.655	1.39	3.74	0.667	0.843	0.157	2.57	0.439	0.046	1
8 S03082	1908 2008	101	52	0	0.706	1.33	3.21	0.513	0.751	0.182	2.48	0.410	0.005	1
9 S0311A	1837 2008	172	123	5	0.462	1.21	2.20	0.408	0.837	0.175	2.69	0.406	0.032	2
10 S0311B	1841 2008	168	119	0	0.485	1.03	1.79	0.339	0.843	0.164	2.68	0.369	-0.047	1
11 S05012	1927 2008	82	33	0	0.646	0.63	1.25	0.207	0.518	0.260	2.59	0.463	-0.030	5
12 S05051	1904 2008	105	56	0	0.659	1.64	3.59	0.448	0.854	0.115	2.66	0.439	-0.038	1
13 S05052	1904 2008	105	56	0	0.647	1.61	2.49	0.343	0.695	0.137	2.64	0.448	-0.056	1
14 S05062	1918 2008	91	42	0	0.503	1.35	2.41	0.423	0.739	0.193	2.63	0.629	-0.049	1
15 S1206A	1854 2008	155	106	0	0.641	1.46	2.59	0.441	0.869	0.127	2.62	0.312	-0.044	1
16 S1206B	1854 2008	155	106	0	0.705	1.31	2.41	0.414	0.857	0.139	2.54	0.395	-0.017	1
17 S14071	1926 2008	83	34	0	0.454	2.19	3.70	0.549	0.657	0.161	2.57	0.392	-0.062	1
18 S15022	1881 2008	128	79	28	0.453	1.42	2.99	0.546	0.732	0.212	2.66	0.423	-0.054	4
19 S15031	1883 2008	126	77	0	0.628	1.12	1.96	0.372	0.675	0.221	2.78	0.514	0.030	2
20 S15032	1883 2008	126	77	1	0.514	1.26	2.97	0.553	0.798	0.234	2.59	0.416	-0.042	2
21 S15091	1912 2008	97	48	0	0.635	1.11	1.82	0.326	0.669	0.188	2.57	0.449	-0.063	1
22 S15092	1912 2008	97	48	0	0.701	1.60	3.63	0.544	0.730	0.205	2.82	0.563	-0.044	1
23 S15111	1912 2008	97	48	0	0.591	1.25	2.63	0.504	0.914	0.157	2.45	0.339	-0.044	2
24 S15112	1912 2008	97	48	0	0.601	1.57	2.64	0.336	0.643	0.137	2.45	0.356	-0.057	1
25 S16011	1905 2008	104	55	0	0.563	0.79	1.40	0.281	0.683	0.266	2.49	0.377	-0.001	1
26 S16018	1894 2008	115	66	10	0.507	0.80	1.70	0.299	0.717	0.217	2.54	0.352	-0.046	1
27 S16031	1908 2008	101	52	0	0.604	1.06	1.86	0.350	0.741	0.193	2.68	0.488	-0.027	1
28 S1710A	1885 2008	124	75	4	0.441	1.58	5.46	0.894	0.879	0.190	2.51	0.301	0.012	1
29 S1710B	1915 2008	94	45	0	0.698	2.09	4.97	0.865	0.866	0.172	2.74	0.491	-0.053	2
30 S1712A	1884 2008	125	76	0	0.544	0.95	1.90	0.321	0.766	0.190	2.56	0.466	-0.007	1
31 S1712B	1879 2008	130	81	0	0.520	1.00	2.31	0.370	0.795	0.192	2.68	0.390	-0.031	1
32 S23021	1881 2008	128	79	0	0.532	1.09	2.64	0.386	0.670	0.217	2.42	0.288	-0.014	1
33 S23022	1877 2008	132	83	0	0.525	1.51	2.65	0.499	0.690	0.221	2.83	0.498	-0.016	2
34 S23092	1833 2008	176	127	0	0.535	0.98	2.81	0.570	0.888	0.245	2.51	0.367	-0.045	2
35 S24071	1879 2008	130	81	0	0.488	1.63	2.74	0.471	0.715	0.193	2.41	0.314	-0.061	1
36 S25091	1910 2008	99	50	0	0.445	1.53	4.28	0.851	0.852	0.211	2.64	0.378	-0.027	2
37 S26021	1885 2008	124	75	14	0.385	1.15	3.14	0.515	0.830	0.237	2.61	0.456	-0.049	1
38 S26022	1885 2008	124	75	8	0.473	1.40	2.89	0.512	0.834	0.185	2.61	0.486	-0.020	1
39 S26051	1886 2008	123	74	23	0.490	1.30	4.65	0.651	0.848	0.196	2.72	0.475	-0.014	2
40 S26052	1886 2008	123	74	5	0.504	1.35	2.32	0.444	0.800	0.183	2.58	0.447	-0.056	1
41 S26061	1887 2008	122	73	0	0.450	1.36	3.97	0.506	0.868	0.155	2.63	0.543	0.007	2
42 S26062	1887 2008	122	73	0	0.519	1.18	2.64	0.428	0.811	0.193	2.61	0.463	0.015	2
43 S27012	1880 2008	129	80	9	0.416	1.10	2.34	0.503	0.815	0.260	2.50	0.373	-0.024	1
44 S3001B	1819 2008	190	141	7	0.517	1.51	3.10	0.550	0.869	0.164	2.56	0.321	0.004	1
45 S3103A	1833 2008	176	127	27	0.455	0.91	1.66	0.352	0.752	0.221	2.48	0.243	-0.012	1
46 S3103B	1869 2008	140	91	0	0.495	1.04	2.40	0.375	0.738	0.206	2.39	0.243	-0.074	1
47 S3103C	1859 2008	150	101	0	0.513	0.97	2.02	0.366	0.789	0.208	2.34	0.238	-0.025	1
48 S3103D	1847 2008	162	113	10	0.543	0.99	1.87	0.314	0.756	0.187	2.36	0.260	-0.036	1
49 S34012	1921 2008	88	39	4	0.461	1.17	2.71	0.633	0.938	0.166	2.67	0.416	0.088	1
50 S35011	1901 2008	108	59	0	0.507	1.32	2.22	0.359	0.705	0.152	2.67	0.450	-0.083	1

續表 A1.1 臺灣雲杉之 COFECHA 敘述統計。



Seq	Series	Interval	No. Years	No. Segmt	No. Flags	Corr with Master	Unfiltered				Filtered				AR
							Mean msmt	Max msmt	Std dev	Auto corr	Mean sens	Max value	Std dev	Auto corr	
51	S35012	1901 2008	198	59	31	0.317	1.43	3.68	0.617	0.816	0.196	2.64	0.506	-0.021	1
52	S36031	1938 2008	71	22	8	0.470	1.43	2.27	0.388	0.692	0.193	2.35	0.288	-0.034	1
53	S36032	1938 2008	71	22	8	0.472	0.98	1.50	0.277	0.546	0.227	2.41	0.297	-0.017	1
54	S37112	1923 2008	86	37	8	0.557	1.26	2.20	0.326	0.692	0.168	2.51	0.473	-0.011	1
55	S37151	1893 2008	116	67	9	0.528	1.03	2.72	0.459	0.759	0.220	2.72	0.411	0.020	3
56	S37181	1905 2008	104	55	8	0.574	1.22	2.17	0.402	0.788	0.174	2.48	0.410	0.003	1
57	S38021	1919 2008	98	41	18	0.505	0.87	1.82	0.345	0.735	0.270	2.43	0.351	-0.040	2
58	S38022	1919 2008	98	41	19	0.520	1.07	1.85	0.352	0.567	0.278	2.39	0.273	-0.091	2
59	S38071	1900 2008	109	60	8	0.604	1.20	2.29	0.356	0.747	0.193	2.50	0.354	0.059	1
60	S38072	1900 2008	109	60	8	0.589	1.29	2.32	0.376	0.782	0.168	2.53	0.412	0.020	1
61	S40150	1811 2008	198	149	8	0.530	1.25	3.74	0.532	0.877	0.152	2.51	0.316	-0.030	1
62	S41040	1862 2008	147	98	8	0.676	1.66	4.73	0.756	0.888	0.176	2.75	0.461	-0.045	2
63	S41040	1845 2008	164	115	8	0.611	1.46	3.49	0.495	0.815	0.169	2.43	0.300	-0.026	1
64	S45062	1915 2008	94	45	8	0.509	1.26	2.58	0.571	0.796	0.283	2.58	0.475	-0.029	1
65	S46041	1919 2008	98	41	8	0.431	1.40	2.69	0.506	0.851	0.159	2.69	0.470	0.012	2
66	S46042	1919 2008	98	41	8	0.529	1.59	3.01	0.648	0.901	0.150	2.64	0.475	0.014	2
67	S46081	1899 2008	118	61	13	0.434	1.11	2.26	0.504	0.793	0.266	2.60	0.478	-0.051	2
68	S46101	1902 2008	107	58	8	0.543	1.17	2.10	0.402	0.769	0.180	2.59	0.357	-0.083	1
69	S46111	1912 2008	97	48	2	0.353	1.68	3.57	0.670	0.834	0.189	2.73	0.397	-0.002	1
70	S46112	1913 2008	96	47	8	0.436	1.27	2.88	0.517	0.861	0.172	2.59	0.421	-0.005	2
71	S51080	1814 2008	195	146	8	0.585	1.60	3.08	0.532	0.810	0.166	2.62	0.425	0.022	1
72	S51088	1816 2008	193	144	8	0.581	1.87	3.31	0.497	0.733	0.154	2.81	0.421	-0.003	1
73	S5205A	1777 2008	232	183	20	0.485	1.45	5.06	0.517	0.751	0.160	2.77	0.414	-0.050	1
74	S5205B	1820 2008	189	140	8	0.607	1.12	1.96	0.336	0.800	0.164	2.62	0.384	0.008	1
75	S54031	1904 2008	105	56	8	0.482	1.47	2.95	0.483	0.819	0.161	2.65	0.431	0.021	1
76	S54060	1808 2008	201	152	8	0.619	2.01	4.23	0.639	0.781	0.151	2.73	0.450	0.017	1
77	S5406B	1835 2008	174	125	8	0.583	1.48	3.29	0.512	0.846	0.146	2.64	0.432	-0.004	1
78	S55021	1920 2008	89	40	8	0.652	1.79	2.70	0.346	0.399	0.164	2.53	0.435	-0.035	1
79	S55022	1921 2008	88	39	8	0.566	1.36	2.47	0.429	0.668	0.188	2.45	0.360	0.040	1
80	S56012	1905 2008	104	55	8	0.441	1.60	3.13	0.621	0.872	0.155	2.79	0.470	-0.009	1
81	S57101	1906 2008	103	54	8	0.641	1.46	2.49	0.516	0.842	0.165	2.47	0.363	0.069	1
82	S57102	1906 2008	103	54	8	0.597	0.88	1.65	0.307	0.699	0.250	2.58	0.397	0.032	1
83	S58011	1917 2008	92	43	8	0.568	2.14	4.23	0.798	0.871	0.138	2.57	0.374	-0.018	1
84	S58012	1916 2008	93	44	8	0.553	1.84	4.53	0.737	0.751	0.188	2.57	0.407	-0.045	2
85	S58051	1901 2008	108	59	8	0.446	2.45	6.87	1.212	0.852	0.188	2.61	0.441	0.002	1
86	S58052	1900 2008	109	60	8	0.450	2.68	5.49	1.180	0.892	0.159	2.60	0.430	0.009	2
87	S59061	1907 2008	102	53	1	0.428	1.79	4.36	0.816	0.838	0.207	2.70	0.486	0.032	1
88	S59062	1905 2008	104	55	8	0.563	1.45	3.05	0.540	0.758	0.223	2.50	0.313	0.016	1
89	S6014A	1793 2008	216	167	8	0.645	1.77	4.52	0.696	0.872	0.156	2.67	0.403	0.003	1
90	S6014B	1796 2008	213	164	8	0.614	2.00	5.28	0.702	0.815	0.148	2.60	0.347	-0.061	1
91	S6106A	1777 2008	232	183	8	0.622	1.51	5.32	0.719	0.817	0.212	2.74	0.363	-0.028	2
92	S6106B	1776 2008	233	184	23	0.568	1.48	4.97	0.757	0.849	0.221	2.57	0.406	-0.063	3
93	S6412A	1822 2008	187	138	8	0.599	1.66	2.93	0.446	0.756	0.142	2.68	0.432	0.037	1
94	S6412B	1802 2008	207	158	8	0.588	1.90	3.86	0.489	0.749	0.141	2.79	0.468	0.042	2
95	S6505B	1909 2008	108	51	8	0.632	1.52	3.66	0.553	0.733	0.205	2.60	0.428	-0.031	3
96	S66021	1891 2008	118	69	1	0.450	0.84	2.19	0.477	0.885	0.214	2.57	0.368	-0.025	1
97	S66022	1891 2008	118	69	1	0.458	0.92	2.33	0.492	0.826	0.239	2.52	0.323	-0.052	1
98	S7104B	1797 2008	212	163	32	0.562	1.62	4.08	0.763	0.894	0.161	2.54	0.366	-0.031	1
99	S7104C	1799 2008	210	161	19	0.480	1.46	3.32	0.550	0.854	0.175	2.33	0.236	-0.031	1
100	S7401B	1906 2008	103	54	8	0.635	1.73	3.90	0.722	0.795	0.207	2.83	0.422	-0.102	2
101	S76071	1895 2008	114	65	8	0.518	1.78	3.09	0.468	0.682	0.157	2.55	0.365	-0.041	1
102	S76072	1895 2008	114	65	8	0.604	1.66	3.10	0.474	0.737	0.155	2.52	0.364	-0.033	1
103	S8401A	1823 2008	186	137	8	0.648	1.46	3.43	0.545	0.786	0.178	2.88	0.503	0.011	1
104	S8401B	1793 2008	216	167	8	0.601	1.42	3.45	0.596	0.863	0.163	2.52	0.278	-0.008	1
105	S8601A	1697 2008	312	205	15	0.444	1.16	3.68	0.782	0.925	0.222	2.50	0.269	-0.014	2
106	S8912A	1755 2008	254	205	39	0.388	2.44	5.06	0.981	0.877	0.148	2.76	0.412	-0.015	3
107	S8912B	1760 2008	249	200	11	0.534	1.97	4.79	0.904	0.933	0.148	2.62	0.311	-0.003	1
108	S9012B	1811 2008	198	149	21	0.450	1.54	4.82	0.640	0.780	0.193	2.61	0.356	0.024	1
109	S9105A	1835 2008	174	125	8	0.551	1.58	3.21	0.527	0.793	0.179	2.63	0.436	-0.063	2
110	S9105B	1795 2008	214	165	8	0.628	1.25	2.79	0.593	0.896	0.223	2.60	0.334	-0.030	1
111	S92041	1799 2008	210	161	8	0.629	1.08	2.91	0.514	0.881	0.186	2.59	0.274	-0.024	1
112	S92042	1799 2008	210	161	32	0.464	1.73	2.88	0.422	0.741	0.142	2.33	0.262	0.006	1
113	S9501A	1787 2008	222	173	8	0.584	1.51	3.22	0.614	0.894	0.180	2.48	0.331	0.011	1
114	S9501B	1779 2008	230	181	8	0.566	1.53	4.16	0.712	0.848	0.200	2.83	0.356	0.029	1
Total or mean:		15943	10299	482	0.542	1.43	6.87	0.549	0.804	0.184	2.88	0.383	-0.016		



表 A1.2 臺灣鐵杉之 COFECHA 敘述統計。

PART 7: Tsuga DESCRIPTIVE STATISTICS:

Seq	Series	Interval	Years	No.	No.	No.	Corr with Master	Unfiltered					Filtered					AR()
								Segmt	Flags	Mean msmt	Max msmt	Std dev	Auto corr	Mean sens	Max value	Std dev	Auto corr	
1	T04042	1911 2008	98	49	8	0.514	1.33	4.16	0.837	0.927	0.233	2.54	0.432	-0.008	1			
2	T17151	1898 2008	119	70	9	0.525	1.10	3.37	0.518	0.726	0.254	2.68	0.415	-0.052	2			
3	T17152	1898 2008	119	70	1	0.524	0.90	2.30	0.478	0.803	0.264	2.65	0.437	0.011	1			
4	T1715B	1885 2008	124	75	18	0.510	1.14	3.83	0.555	0.769	0.235	2.62	0.398	-0.074	2			
5	T17201	1921 2008	88	39	8	0.529	0.90	2.98	0.514	0.792	0.247	2.93	0.513	-0.028	1			
6	T17202	1921 2008	88	39	7	0.457	1.12	2.72	0.601	0.804	0.256	2.68	0.388	-0.049	2			
7	T21832	1803 2008	206	157	34	0.391	0.96	3.67	0.641	0.910	0.234	2.57	0.356	0.002	1			
8	T25181	1921 2008	88	39	8	0.612	1.35	2.82	0.517	0.750	0.243	2.57	0.432	0.032	2			
9	T25182	1921 1984	64	15	1	0.381	1.13	2.26	0.462	0.859	0.204	2.61	0.534	0.101	1			
10	T2518B	1899 2008	110	61	8	0.449	1.26	3.03	0.632	0.831	0.236	2.52	0.350	-0.060	1			
11	T36012	1908 2008	101	52	14	0.408	0.69	2.71	0.536	0.937	0.232	2.73	0.495	0.060	1			
12	T37051	1918 2008	91	42	8	0.511	1.02	2.02	0.372	0.639	0.239	2.67	0.415	-0.007	1			
13	T37052	1918 2008	91	42	8	0.563	0.85	2.07	0.342	0.701	0.222	2.68	0.415	-0.020	1			
14	T37212	1906 1992	87	38	8	0.635	0.66	1.78	0.398	0.883	0.237	2.70	0.427	-0.071	2			
15	T38051	1907 2008	102	53	8	0.470	0.88	1.97	0.356	0.766	0.208	2.55	0.407	-0.053	2			
16	T38052	1907 2008	102	53	8	0.497	1.24	2.67	0.450	0.680	0.243	2.52	0.385	-0.029	4			
17	T4413B	1793 2008	216	167	43	0.420	0.69	2.08	0.347	0.835	0.211	2.61	0.329	-0.009	1			
18	T57082	1928 2008	81	32	8	0.622	1.01	3.50	0.612	0.648	0.303	2.52	0.423	-0.068	3			
19	T58062	1886 2008	123	74	8	0.548	1.02	2.19	0.487	0.795	0.246	2.51	0.372	0.007	2			
20	T66051	1898 2008	119	70	8	0.590	1.82	2.92	0.423	0.680	0.151	2.36	0.289	-0.035	2			
21	T66052	1898 2008	119	70	8	0.663	1.27	2.52	0.405	0.725	0.180	2.46	0.295	-0.078	1			
22	T76101	1902 2008	107	58	8	0.574	0.69	2.95	0.490	0.802	0.296	3.01	0.552	-0.011	1			
23	T76102	1902 2008	107	58	4	0.643	0.75	2.91	0.508	0.716	0.382	2.65	0.373	-0.043	2			
24	T7901A	1754 2008	255	206	63	0.481	1.72	6.21	0.944	0.910	0.175	2.80	0.363	-0.009	1			
25	T86031	1903 2006	104	55	8	0.686	1.59	3.85	0.759	0.792	0.271	2.41	0.308	-0.029	1			
26	T8801A	1746 2008	263	214	8	0.549	1.30	5.08	0.747	0.902	0.191	2.62	0.329	0.003	1			
27	T8801B	1731 2008	278	214	5	0.508	1.30	4.47	0.759	0.893	0.196	2.79	0.366	-0.053	2			
28	T9713A	1814 2008	195	146	1	0.472	1.56	5.95	0.974	0.918	0.167	2.81	0.309	-0.054	1			
29	T9713B	1819 2008	190	141	1	0.497	1.58	6.14	1.084	0.939	0.175	2.87	0.365	0.046	1			
Total or mean:				3835	2399	201	0.516	1.18	6.21	0.624	0.826	0.223	3.01	0.381	-0.020			

表 A1.3 臺灣華山松之 COFECHA 敘述統計。

PART 7: Pinus DESCRIPTIVE STATISTICS:

Seq	Series	Interval	Years	No.	No.	No.	Corr with Master	Unfiltered					Filtered					AR()
								Segmt	Flags	Mean msmt	Max msmt	Std dev	Auto corr	Mean sens	Max value	Std dev	Auto corr	
1	P0103B	1864 2008	145	96	12	0.395	0.78	2.89	0.569	0.842	0.335	2.72	0.428	-0.034	1			
2	P06081	1924 2008	85	36	8	0.570	1.51	3.36	0.666	0.790	0.227	2.77	0.540	-0.020	1			
3	P06082	1923 2008	86	37	8	0.515	1.86	7.40	1.681	0.913	0.249	2.79	0.440	-0.003	1			
4	P0608C	1891 2008	118	69	31	0.388	2.98	8.87	1.730	0.887	0.234	2.62	0.384	-0.079	2			
5	P18041	1875 2008	134	85	18	0.512	2.29	15.18	2.158	0.847	0.241	2.77	0.551	0.005	2			
6	P18042	1890 2008	119	70	16	0.449	1.02	4.08	0.546	0.825	0.213	2.79	0.407	0.008	1			
7	P1804B	1891 2008	118	69	41	0.465	1.74	3.64	0.641	0.766	0.205	2.52	0.391	0.010	1			
8	P20021	1818 2008	191	125	26	0.338	1.45	6.27	1.170	0.922	0.227	2.55	0.453	-0.050	1			
9	P27071	1892 2008	117	68	44	0.400	1.54	3.70	0.939	0.852	0.292	2.53	0.347	-0.047	1			
10	P27072	1892 2008	117	68	32	0.443	1.32	3.65	0.820	0.823	0.320	2.59	0.352	0.009	4			
11	P3205A	1864 2008	145	96	13	0.447	1.90	4.45	0.959	0.855	0.235	2.52	0.294	-0.004	1			
12	P3205B	1835 2008	174	125	2	0.492	1.92	5.58	1.015	0.834	0.251	2.63	0.383	-0.034	1			
13	P34061	1873 2008	136	87	8	0.518	1.56	3.17	0.629	0.726	0.267	2.57	0.444	0.035	1			
14	P34062	1873 2008	136	87	8	0.521	1.49	3.30	0.626	0.733	0.248	2.60	0.416	-0.076	2			
15	P45151	1892 2008	117	68	29	0.451	1.44	4.14	0.767	0.869	0.209	2.67	0.450	-0.044	1			
16	P45152	1891 2008	118	69	8	0.493	1.50	4.21	0.817	0.887	0.210	2.61	0.430	0.060	1			
Total or mean:				2056	1255	264	0.457	1.64	15.10	0.982	0.837	0.248	2.79	0.417	-0.018			

附錄二、COFECHA 結果：主序列年表 (master chronology)

主序列年表是由 COFECHA 檢驗後，樹間相關性較好的樹芯組成。用以對未定年的樹芯比對而得到定年修正的參考，其值為負值表示輪寬小，正值表示輪寬大。數值大於 2 或小於 -2，則表示輪寬極寬或極窄。表中 No 代表當年樣本數量，Ab 代表當年發生缺輪的樣本數量，Ab 旁帶有 << 表示發生缺輪的當年，在其他樣本輪寬不窄，即在正常狀況下應該不會發生缺輪。

表 A2.1 臺灣華山松之主序列年表 (●窄年、○寬年)

■PART 3: Pinus Master Dating Series:

Year	Value	No	Ab	Year	Value	No	Ab	Year	Value	No	Ab	Year	Value	No	Ab
1850	-1.152	2		1900	1.045	14		1950	0.057	16		2000	-2.095	16	
1851	1.064	2		1901	0.293	14		1951	-0.605	16		2001	-1.725	16	
○ 1852	2.356	2		1902	0.265	14		1952	-0.945	16		2002	-1.225	16	
1853	0.570	2		1903	1.306	14		1953	-0.122	16		2003	0.011	16	
1854	1.749	2		1904	1.027	14		1954	0.130	16	○	2004	0.792	16	
1855	0.138	2		1905	0.221	14		1955	0.591	16		2005	0.037	16	
1856	0.991	2		1906	0.152	14		1956	0.604	16		2006	0.298	16	
1857	-1.680	2		1907	0.379	14		○ 1957	1.162	16		2007	0.697	16	
1858	-0.253	2		1908	-0.665	14		1958	0.557	16		2008	0.468	16	
1859	0.244	2	●	1909	-1.216	14		1959	-0.494	16					
1860	0.228	2		1910	-0.843	14		1960	0.603	16					
1861	0.585	2		1911	-1.504	14		1961	1.063	16					
1862	1.135	2		1912	0.298	14		1962	0.933	16					
1863	0.212	2		1913	-0.367	14		1963	1.005	16					
1864	1.237	4		1914	-0.239	14	○	1964	1.319	16					
1865	-0.295	4		1915	0.141	14		1965	0.625	16					
1866	-0.916	4		1916	-0.461	14		1966	0.343	16					
1867	-1.269	4		1917	0.609	14		1967	0.778	16					
1818	-1.565	1		1868	-1.129	4		1918	0.816	14		1968	-0.316	16	
1819	-0.719	1		1869	-0.312	4		1919	0.844	14		1969	-0.063	16	
1820	-0.348	1		1870	-0.516	4		1920	0.279	14		1970	-0.695	16	
1821	-0.101	1		1871	1.370	4		1921	-0.621	14		1971	-0.666	16	
1822	2.044	1		1872	1.244	4	●	1922	-1.562	14		1972	-0.111	16	
○ 1823	2.869	1		1873	0.840	6		1923	-0.168	15	○	1973	-0.044	16	
1824	1.756	1		1874	-0.396	6		1924	-0.042	16		1974	-1.556	16	
1825	0.159	1	●	1875	-1.434	7		1925	0.326	16	●	1975	-2.322	16	
1826	0.296	1		1876	-1.540	7		1926	0.051	16	●	1976	-2.193	16	
1827	-0.072	1		1877	-0.761	7		1927	0.401	16		1977	-0.680	16	
1828	-0.193	1		1878	-0.374	7		1928	0.547	16		1978	-0.740	16	
1829	-0.926	1		1879	0.209	7		1929	0.126	16		1979	-1.083	16	
1830	-1.741	1		1880	0.490	7		1930	0.047	16		1980	1.174	16	
1831	0.162	1		1881	1.593	7	○	1931	0.972	16		1981	0.986	16	
1832	0.779	1	○	1882	1.802	7	○	1932	1.057	16	○	1982	1.592	16	
1833	1.824	1		1883	1.009	7		1933	0.842	16		1983	0.029	16	
1834	-2.529	1		1884	-0.283	7		1934	0.300	16		1984	0.171	16	
1835	-0.609	2		1885	-0.241	7		1935	0.796	16		1985	0.441	16	
1836	-2.834	2		1886	-0.484	7	○	1936	0.798	16		1986	-0.075	16	
1837	-1.389	2		1887	-0.186	7		1937	-0.137	16	●	1987	-0.760	16	
1838	0.472	2		1888	0.889	7		1938	-0.396	16	●	1988	-0.770	16	
1839	-0.213	2		1889	0.365	7		1939	-0.112	16		1989	-0.324	16	
1840	0.597	2		1890	0.480	8		1940	-1.252	16		1990	0.826	16	
1841	1.419	2		1891	0.288	11		1941	-1.856	16	○	1991	1.791	16	
1842	0.953	2		1892	-0.421	14		1942	-1.288	16		1992	0.592	16	
1843	0.535	2		1893	0.138	14	○	1943	-0.520	16		1993	0.343	16	
1844	1.514	2	●	1894	-2.067	14		1944	-1.746	16	●	1994	-0.533	16	
1845	1.088	2		1895	-1.616	14	●	1945	-2.670	16		1995	0.177	16	
1846	-0.932	2		1896	-0.564	14		1946	0.144	16		1996	0.576	16	
1847	0.113	2		1897	-0.297	14		1947	-0.091	16		1997	0.387	16	
1848	-0.756	2		1898	0.642	14		1948	-0.266	16		1998	0.096	16	
● 1849	-2.485	2		1899	0.962	14		1949	0.614	16		1999	-0.784	16	

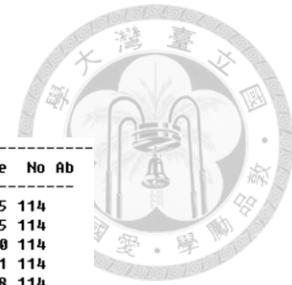


表 A2.2 臺灣雲杉之主序列年表 (●窄年、○寬年)

[PART 3: Spruce Master Dating Series:

00:00 檔案 0000 Page 5																					
Year	Value	No Ab	Year	Value	No Ab	Year	Value	No Ab	Year	Value	No Ab	Year	Value	No Ab	Year	Value	No Ab	Year	Value	No Ab	
1700	0.418	1	1750	-0.035	1	1800	-0.197	16	1850	0.341	37	1900	0.655	71	1950	-0.651	114	2000	-0.265	114	
● 1701	-2.462	1	1751	1.299	1	1801	-0.742	16	1851	-1.012	37	1901	0.331	74	1951	-0.612	114	2001	0.205	114	
1702	-1.734	1	1752	1.088	1	1802	0.802	17	1852	-0.658	37	1902	-0.205	75	1952	-0.728	114	2002	-0.680	114	
1703	-1.242	1	1753	1.076	1	1803	0.597	17	1853	-0.077	37	1903	-0.631	75	1953	0.411	114	2003	0.191	114	
1704	-1.203	1	1754	0.566	1	1804	-0.040	17	1854	-0.344	39	1904	-0.513	78	● ○ 1954	1.879	114	2004	0.978	114	
1705	-1.485	1	1755	1.692	2	1805	0.568	17	1855	0.035	39	1905	-1.088	82	1	1955	1.162	114	● 2005	-1.467	114
1706	-1.598	1	1756	0.664	2	○ 1806	1.066	17	1856	-0.889	39	1906	-0.019	85	1956	0.918	114	2006	0.148	114	
1707	-0.634	1	1757	0.504	2	1807	0.158	17	1857	-0.640	40	1907	0.078	86	1957	0.495	114	2007	0.165	114	
1708	0.602	1	1758	0.916	2	○ 1808	0.968	18	1858	0.065	41	1908	-0.850	89	1958	-0.894	114	2008	0.567	114	
1709	1.391	1	1759	-1.082	2	1809	0.052	18	1859	0.687	42	● 1909	-1.641	98	● 1959	-0.792	114	1			
1710	1.318	1	1760	0.238	3	1810	-0.005	18	1860	-0.384	42	1910	0.302	91	1960	-0.811	114				
1711	0.439	1	1761	0.679	3	1811	0.431	20	1861	-0.419	42	1911	0.388	91	1961	-0.372	114				
1712	-0.454	1	1762	0.481	3	1812	0.293	20	○ 1862	0.869	43	● 1912	0.462	96	○ 1962	1.364	114				
1713	0.892	1	1763	1.294	3	1813	0.253	20	1863	-0.141	43	1913	1.193	97	1963	0.999	114				
1714	1.537	1	1764	-0.168	3	1814	-0.488	21	1864	0.494	43	1914	1.219	97	● 1964	-0.779	114				
1715	1.925	1	1765	-0.784	3	1815	-0.727	22	1865	0.124	43	1915	0.302	99	1965	0.353	114				
○ 1716	1.819	1	1766	-0.248	3	1816	-0.452	23	1866	0.296	43	● 1916	-0.031	100	1966	0.697	114				
○ 1717	2.401	1	1767	-0.998	3	1817	-1.326	23	1867	-0.778	43	1917	0.819	101	1967	0.798	114				
1718	1.323	1	1768	-1.246	3	● 1818	-2.798	23	1868	-0.069	43	1918	1.272	102	1968	-0.345	114				
1719	1.169	1	1769	-0.466	3	1819	-1.584	24	1869	0.364	44	1919	0.277	106	● 1969	-1.110	114	1			
1720	0.715	1	1770	0.426	3	1820	-0.898	25	● 1870	-1.708	44	1	1920	-0.572	107	● 1970	-1.600	114	1		
1721	0.804	1	1771	0.501	3	1821	0.492	25	1871	-0.842	44	1921	-0.771	109	● 1971	-2.596	114	4			
1722	-0.770	1	1772	0.648	3	○ 1822	1.264	26	○ 1872	1.461	44	1922	-0.508	109	1972	-1.002	114				
1723	-0.012	1	1773	0.439	3	1823	0.371	27	1873	0.278	44	1923	-0.087	110	1973	-0.065	114				
1724	0.234	1	1774	0.748	3	1824	-0.035	27	1874	0.522	44	● 1924	-2.249	110	1974	0.156	114				
1725	-1.404	1	1775	-1.251	3	1825	0.994	27	○ 1875	1.575	44	1925	-0.654	110	1975	0.368	114				
● 1726	-3.786	1	1776	-0.128	4	1826	0.708	27	1876	-0.808	44	1926	-1.151	111	○ 1976	1.681	114				
1727	-1.121	1	1777	0.599	6	1827	0.821	27	1877	-0.093	45	1927	-0.610	112	1977	0.552	114				
1728	-0.466	1	1778	0.568	6	1828	0.418	27	1878	-0.630	45	1928	-0.409	112	● 1978	-0.456	114				
1729	1.378	1	1779	0.616	7	1829	1.572	27	1879	0.174	47	1929	1.008	112	1979	0.164	114				
1730	1.471	1	1780	0.517	7	1830	1.228	27	○ 1880	-0.110	48	1930	0.256	112	○ 1980	1.616	114				
1731	1.188	1	1781	-0.219	7	1831	0.918	27	○ 1881	1.441	50	1931	-0.031	112	1981	0.521	114				
● 1732	-0.728	1	● 1782	-1.942	7	1832	0.531	27	1882	0.573	50	○ 1932	1.696	112	1982	0.823	114				
● 1733	-2.872	1	1783	0.189	7	● 1833	-1.342	29	1883	0.978	52	1933	0.583	112	1983	0.606	114				
1734	-0.128	1	1784	0.053	7	1834	0.589	29	1884	-0.412	53	1934	1.157	112	1984	-0.787	114	1			
1735	0.886	1	1785	-0.636	7	1835	-0.250	31	1885	-0.125	56	1935	-0.240	112	● 1985	-1.280	114	3			
○ 1736	1.589	1	1786	-1.283	7	1836	-1.233	31	1886	-0.329	58	○ 1936	1.027	112	● 1986	-1.293	114	2			
○ 1737	1.832	1	1787	-0.481	8	● 1837	-2.647	32	1887	-0.458	60	1937	-0.767	112	● 1987	-1.474	114				
1738	0.984	1	1788	-0.549	8	1838	-0.977	32	● 1888	-0.887	60	1938	0.099	114	1988	-0.698	114				
1739	-0.406	1	1789	-0.277	8	1839	-0.550	32	1889	-0.901	60	1939	-0.162	114	1989	0.023	114				
1740	-1.066	1	1790	0.182	8	1840	0.553	32	1890	-0.315	68	1940	0.987	114	1990	0.528	114				
● 1741	-3.119	1	1791	0.509	8	1841	-0.544	33	1891	0.059	68	● 1941	-1.211	114	1	○ 1991	2.081	114			
1742	-3.569	1	1792	0.954	8	1842	-0.086	33	● 1892	-0.818	68	1942	0.512	114	1992	0.257	114				
1743	-3.627	1	○ 1793	1.583	10	○ 1843	1.195	33	○ 1893	0.656	64	1943	0.906	114	1993	0.072	114				
1744	0.014	1	1794	-0.622	10	1844	0.344	33	1894	-0.357	65	● 1944	-0.832	114	1994	0.073	114				
1745	0.568	1	1795	0.123	11	1845	0.466	34	1895	-0.117	67	1945	-0.988	114	1	1995	0.334	114			
1746	-0.063	1	1796	-1.031	12	1846	0.485	34	1896	0.746	67	1946	-0.795	114	1	1996	0.234	114			
1697	1.363	1	1797	-0.216	13	1847	0.888	35	1897	-0.598	67	● 1947	-1.935	114	12	1997	-0.592	114	1		
1698	1.605	1	1798	0.377	13	1848	0.212	35	1898	0.417	67	1948	0.640	114		1998	-0.274	114			
1699	0.768	1	1799	0.179	16	1849	0.975	37	○ 1899	1.133	68	1949	0.294	114		1999	-0.198	114			



表 A2.3 臺灣鐵杉之主序列年表 (●窄年、○寬年)

■PART 3: Tsuga Master Dating Series:

												00:00	博	0000	Page	3			
Year	Value	No	Ab	Year	Value	No	Ab	Year	Value	No	Ab	Year	Value	No	Ab	Year	Value	No	Ab
1750	1.204	2		1800	-0.690	4		1850	-0.524	7		1900	0.875	14		1950	-0.645	29	
1751	1.140	2		1801	0.158	4		1851	-1.720	7		1901	-0.518	14		1951	0.342	29	
1752	-1.313	2		1802	1.542	4		1852	-0.289	7		1902	-0.306	16		1952	-0.366	29	● 2002 -2.742 27
1753	-1.123	2		1803	0.080	5	○	1853	-0.099	7		1903	-0.201	17		1953	0.288	29	2003 -0.438 27
1754	0.391	3		1804	1.311	5		1854	-0.226	7		1904	0.100	17		1954	0.929	29	2004 0.095 27
1755	1.376	3		1805	0.244	5		1855	-0.853	7		1905	0.846	17		1955	0.705	29	2005 -0.047 27
1756	1.285	3		1806	1.204	5		1856	-0.427	7		1906	0.039	18	○	1956	1.588	29	2006 0.586 27
1757	1.570	3	●	1807	-0.954	5		1857	0.714	7		1907	0.646	20		1957	0.168	29	2007 0.175 26
1758	-0.487	3		1808	0.796	5		1858	-0.258	7	○	1908	1.003	21		1958	-0.128	29	2008 0.270 26
1759	-1.545	3		1809	1.120	5		1859	-0.139	7		1909	-0.088	21		1959	-0.001	29	
1760	-1.123	3		1810	0.119	5		1860	0.813	7		1910	0.023	21		1960	-0.382	29	
1761	-0.221	3		1811	-0.396	5		1861	0.350	7		1911	-0.548	22		1961	-0.177	29	
1762	0.396	3		1812	0.523	5		1862	1.276	7		1912	-0.483	22		1962	-0.347	29	
1763	1.348	3		1813	-0.239	5		1863	0.646	7	●	1913	-0.997	22	●	1963	-0.865	29	
1764	1.203	3		1814	0.265	6		1864	0.821	7		1914	-0.576	22		1964	-0.303	29	
1765	0.816	3		1815	0.558	6		1865	1.419	7		1915	-0.400	22		1965	0.250	29	
1766	-0.520	3		1816	0.610	6		1866	1.053	7		1916	-0.135	22		1966	1.074	29	
● 1767	-2.256	3		1817	1.113	6		1867	0.411	7	○	1917	1.286	22		1967	0.474	29	
● 1768	-2.078	3		1818	0.964	6		1868	-0.673	7		1918	0.736	24		1968	0.673	29	
● 1769	-2.331	3		1819	0.538	7		1869	-0.927	7		1919	-0.361	24	●	1969	-2.411	29	
1770	-1.401	3		1820	0.463	7	●	1870	-3.029	7		1920	-0.429	24		1970	-1.105	29	
1771	-1.065	3		1821	-1.075	7	●	1871	-2.258	7		1921	-0.256	28		1971	-0.595	29	
1772	-0.931	3		1822	-0.456	7		1872	0.764	7		1922	0.164	28		1972	0.755	29	
1773	-0.471	3		1823	-0.487	7		1873	-0.367	7		1923	0.804	28		1973	1.209	29	
1774	1.243	3		1824	-1.609	7		1874	-0.325	7	●	1924	-1.205	28		1974	0.523	29	
1775	1.036	3		1825	-1.110	7		1875	0.741	7		1925	-0.207	28		1975	0.168	29	
1776	1.510	3		1826	0.902	7		1876	1.463	7		1926	-0.203	28	○	1976	0.588	29	
○ 1777	1.808	3		1827	-1.012	7		1877	0.894	7		1927	-0.334	28		1977	-1.444	29	
○ 1778	2.021	3		1828	-0.648	7		1878	-0.121	7	○	1928	0.798	29		1978	-0.947	29	
1779	1.107	3		1829	-0.340	7		1879	-1.249	7		1929	0.293	29		1979	0.024	29	
1780	0.992	3		1830	0.160	7		1880	0.545	7		1930	-0.070	29	○	1980	1.253	29	
● 1781	1.079	3		1831	-0.668	7	○	1881	2.267	7		1931	0.011	29		1981	-0.554	29	
● 1782	-0.119	3		1832	0.176	7		1882	1.350	7	○	1932	0.795	29		1982	0.705	29	
1783	-1.196	3		1833	-0.389	7		1883	0.838	7	○	1933	1.161	29		1983	0.536	29	
1784	-0.107	1		1834	-0.814	7		1884	0.353	7	○	1934	1.412	29		1984	0.237	29	
1785	-0.449	1		1835	0.263	7		1885	0.472	8		1935	0.977	29		1985	-0.559	28	
1786	1.489	1		1836	0.901	7		1886	-0.054	9		1936	0.006	29		1986	-0.205	28	
1787	-0.328	1		1837	0.957	7		1887	-0.264	9		1937	-0.863	29		1987	-0.801	28	
1788	2.233	1		1838	0.283	3		1888	0.819	9		1938	-1.089	29	●	1988	-1.681	28	
1789	-0.993	1		1839	1.699	7	●	1889	-1.717	9		1939	-0.401	29		1989	-1.387	28	
1790	1.278	1		1840	1.799	7		1890	0.115	13		1940	0.138	29		1990	-0.036	28	
1791	1.555	1		1841	0.714	7		1891	-0.202	13	●	1941	-1.478	29		1991	0.771	28	
1792	2.423	1		1842	-0.824	7		1892	-1.632	13		1942	-0.230	29	○	1992	1.861	28	
1793	0.624	1		1843	0.172	7		1893	0.185	13		1943	0.224	29		1993	0.988	27	
1794	0.587	1	●	1794	-1.111	4		1844	-0.550	7		1894	-0.087	13		1944	0.068	29	
1795	-0.425	4		1845	-0.335	7		1895	-0.677	13		1945	0.266	29		1995	0.061	27	
1796	0.393	2		1796	-0.495	4		1846	0.569	7		1896	-0.342	13	●	1946	-1.337	29	● 1996 -0.197 27
1797	0.816	2		1797	-1.579	4		1847	-0.366	7		1897	-0.717	13		1947	-0.581	29	○ 1997 1.385 27
1798	1.269	2		1798	-0.618	4		1848	-1.689	7		1898	-0.246	13	○	1948	1.243	29	1998 0.610 27
● 1799	-2.523	2	●	1799	-3.309	4		1849	-1.208	7		1899	1.688	14	1	1949	-1.051	29	1999 -0.365 27



附錄三、COFECHA：序列修正

在 COFECHA 輸出的最後一部分，提供了給未定年序列的修正建議，藉由與主序列的各時間區段的相關性排名，可做為序列需要平移(shift)幾年的參考。

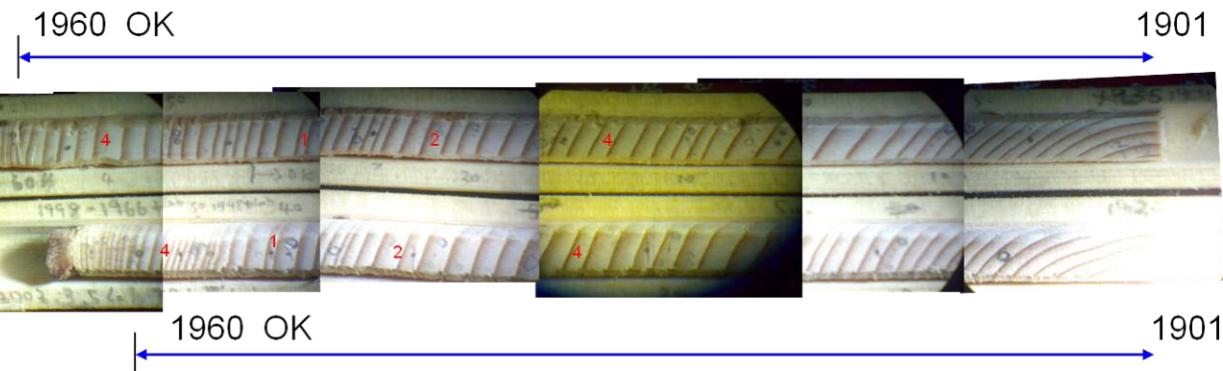
Add 若為 0，則表示序列不需平移；若為負值，則表示需要加入缺失輪；若為正值，則要檢查是否有偽輪或有測量錯誤。觀察相關性突然下降的區段，找出可能的修正位置；

以 S1307 樣本為例，樣芯一號的建議是要加 10 個缺失輪、二號是 4 個，因為這個樹芯是直徑鑽取在分為兩半，最內的髓心年代應該是一致的，考量原先測量的開始年分(1924、1918)，若修正後會同樣為 1914 年，推測此建議應為可信的，並檢視原始樣本，加入缺失輪於 1985-9、1994-8 年(一號)，1985-6、2005-6(二號)。另以 S5908 為例，建議同為加 34 缺失輪，可能兩樣芯呈現同樣的氣候周期，抑或真的缺少如此多輪。採納 COFECHA 建議時皆需檢查原始樣本，不可盲從。

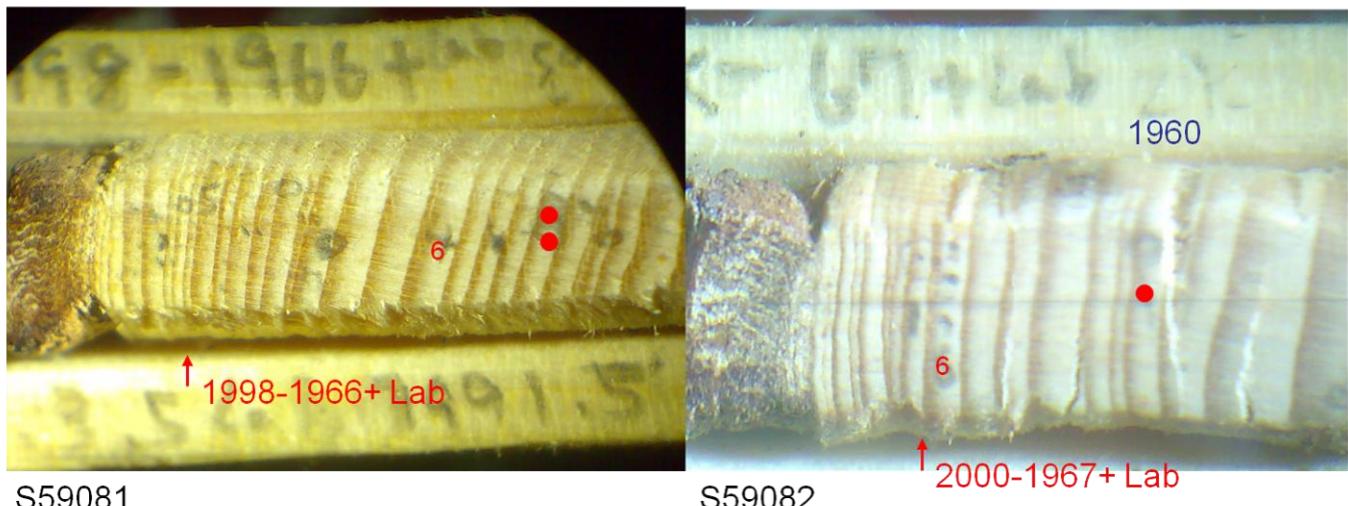
Series	Counted Segment	Corr Add # 1
S13071	1924 1973	-10 .58
S13071	1925 1974	-10 .59
S13071	1926 1975	-10 .59
S13071	1927 1976	-10 .60
S13071	1928 1977	-10 .59
S13071	1929 1978	-10 .59
S13071	1930 1979	-10 .60
S13071	1931 1980	-10 .62
S13071	1932 1981	-10 .63
S13071	1933 1982	-10 .63
S13071	1934 1983	-10 .63
S13071	1935 1984	-10 .54
S13071	1936 1985	-10 .54
S13071	1937 1986	-10 .56

Series	Counted Segment	Corr Add # 1
S13072	1918 1967	-4 .55
S13072	1919 1968	-4 .56
S13072	1920 1969	-4 .57
S13072	1921 1970	-4 .58
S13072	1922 1971	-4 .57
S13072	1923 1972	-4 .58
S13072	1924 1973	-4 .60
S13072	1925 1974	-4 .56
S13072	1926 1975	-4 .52
S13072	1927 1976	-4 .54
S13072	1928 1977	-4 .54
S13072	1929 1978	-4 .47
S13072	1930 1979	-4 .47
S13072	1931 1980	-4 .51
S13072	1932 1981	-4 .51
S13072	1933 1982	-4 .50
S13072	1934 1983	-4 .49
S13072	1935 1984	-4 .51
S13072	1936 1985	-4 .51
S13072	1937 1986	-4 .47

Counted	Corr	Corr	Corr	Corr	Corr	Counted	Corr	Corr	Corr	Corr	
Series	Segment	Add # 1	Add # 2	Add # 3	Add # 4	Series	Segment	Add # 1	Add # 2	Add # 3	Add # 4
S59081	1935 1984	-34 .44	-91 .41	2 .36	-72 .34	S59082	1935 1984	-34 .53	-45 .40	-28 .36	-136 .33
S59081	1936 1985	-34 .45	-91 .41	2 .39	-72 .34	S59082	1936 1985	-34 .54	-45 .39	-28 .36	-102 .36
S59081	1937 1986	-34 .46	-91 .41	2 .38	-151 .36	S59082	1937 1986	-34 .54	-28 .38	-194 .35	-99 .34
S59081	1938 1987	-34 .46	-91 .43	2 .39	16 .36	S59082	1938 1987	-34 .54	-194 .38	-28 .34	-45 .33
S59081	1939 1988	-34 .49	-91 .39	2 .38	16 .35	S59082	1939 1988	-34 .57	-28 .35	-45 .35	-232 .31
S59081	1940 1989	-34 .48	2 .41	-91 .40	-236 .35	S59082	1940 1989	-34 .56	-28 .36	-45 .35	-210 .32
S59081	1941 1990	-34 .49	-91 .41	2 .39	-236 .35	S59082	1941 1990	-34 .57	-28 .37	-45 .34	-210 .33
S59081	1942 1991	-34 .44	2 .36	-91 .36	-72 .33	S59082	1942 1991	-34 .58	-28 .39	-45 .35	-210 .33
S59081	1943 1992	-34 .43	2 .35	-91 .35	-72 .32	S59082	1943 1992	-34 .57	-28 .37	-99 .33	-232 .32
S59081	1944 1993	-34 .41	2 .35	-91 .34	-173 .32	S59082	1944 1993	-34 .59	-28 .35	-99 .34	-232 .31
S59081	1945 1994	-34 .40	2 .36	-243 .36	-91 .33	S59082	1945 1994	-34 .59	-99 .34	-28 .34	-102 .31
S59081	1946 1995	-34 .41	2 .36	-243 .33	-91 .32	S59082	1946 1995	-34 .59	-28 .32	-99 .30	-210 .30
S59081	1947 1996	-34 .42	2 .35	-243 .34	-60 .32	S59082	1947 1996	-34 .57	-28 .31	-210 .30	-99 .29
S59081	1948 1997	-34 .45	2 .36	-243 .34	-60 .31	S59082	1948 1997	-34 .56	-99 .31	-28 .31	-45 .29
S59081	1949 1998	-34 .47	-243 .33	2 .32	-121 .31	S59082	1949 1998	-34 .55	-28 .33	-45 .30	-175 .28
S59081	1950 1999	-34 .46	-243 .33	2 .32	-121 .31	S59082	1950 1999	-34 .56	-45 .32	-210 .30	-28 .30
S59081	1951 2000	-34 .47	-243 .33	2 .33	-60 .30	S59082	1951 2000	-34 .57	-45 .32	-210 .30	-28 .30
S59081	1952 2001	-34 .46	-243 .32	2 .32	-187 .29	S59082	1952 2001	-34 .55	-210 .38	-45 .31	-99 .30
S59081	1953 2002	-34 .46	-243 .35	-187 .32	-115 .29	S59082	1953 2002	-34 .57	-210 .37	-99 .31	-45 .31
S59081	1954 2003	-34 .47	-243 .33	-187 .31	-115 .30	S59082	1954 2003	-34 .58	-175 .31	-28 .31	-210 .31
S59081	1955 2004	-34 .43	-243 .33	-132 .31	2 .30	S59082	1955 2004	-34 .54	-175 .34	-28 .33	-132 .31
S59081	1956 2005	-34 .46	-243 .32	-187 .32	-132 .32	S59082	1956 2005	-34 .54	-175 .33	-28 .33	-132 .32
S59081	1957 2006	-34 .46	-132 .33	-243 .33	-187 .31	S59082	1957 2006	-34 .54	-175 .35	-132 .32	-28 .32
S59081	1958 2007	-34 .46	-132 .32	-243 .30	-121 .30	S59082	1958 2007	-34 .54	-175 .41	-132 .31	-28 .31
S59081	1959 2008	-34 .43	-243 .34	-115 .33	-132 .32	S59082	1959 2008	-34 .54	-28 .34	-175 .33	-253 .30
25 segments -											
Number of segments											
Add No R_av	Add No R_av	Add No R_av	Add No R_av	Add No R_av	Add No R_av	Add No R_av	Add No R_av	Add No R_av	Add No R_av	Add No R_av	Add No R_av
-34 25 0.45	+2 22 0.35	-91 20 0.34	-45 20 0.28	-121 11 0.28	-187 11 0.30	-60 11 0.29	+3 8 0.27	-222 7 0.29	-227 6 0.27	-173 6 0.29	+16 6 0.32
-222 7 0.29	-227 6 0.27	-173 6 0.29	+16 6 0.32	-64 4 0.28	-125 3 0.24	-44 3 0.24	-158 3 0.27	-232 14 0.29	-136 11 0.28	-194 10 0.27	-253 9 0.2
Chronological order											
Add No	Add No	Add No	Add No	Add No	Add No	Add No	Add No	Add No	Add No	Add No	Add No
-243 20 -237 5 -236 14	-227 6 -222 7 -216 7	-227 6 -222 7 -216 7	-227 6 -222 7 -216 7	-227 6 -222 7 -216 7	-227 6 -222 7 -216 7	-227 6 -222 7 -216 7	-227 6 -222 7 -216 7	-227 6 -222 7 -216 7	-227 6 -222 7 -216 7	-227 6 -222 7 -216 7	-227 6 -222 7 -216 7



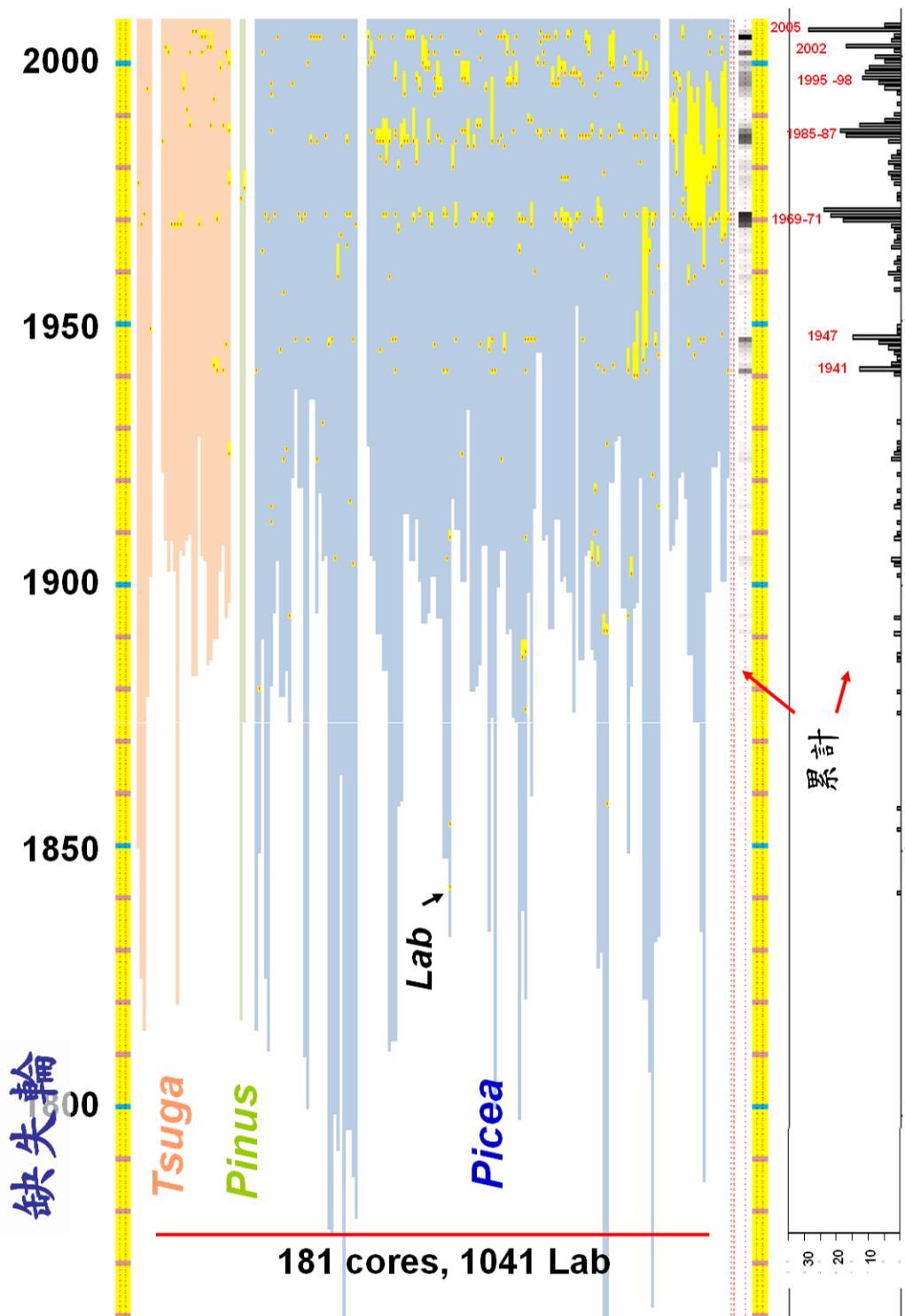
missing rings 的確切位置可能差一點點但大概真的差了34年





附錄四、樣芯缺失輪年分

數字為各刻度之年代，粉紅、粉綠、淺藍色色塊為鐵杉、華山松、雲杉，每條色塊代表一個樣芯，長度為其起始年分；黃色色塊為缺失輪(Lab)、內部紅字為缺失輪起始年分；下方以灰階色塊、直方圖，表示不同年份缺失輪的累計次數。





附錄五、擾動年代表(以樣芯為單位)

將未合併成樹之樣芯擾動年代表呈現如下，與合併成樹之擾動年代表相比，兩者趨勢不變，合併成樹之後，強度釋放變少(因為將樣芯「無-強度釋放」合併成樹「中度釋放」)，相對化擾動年代表的數值較高。

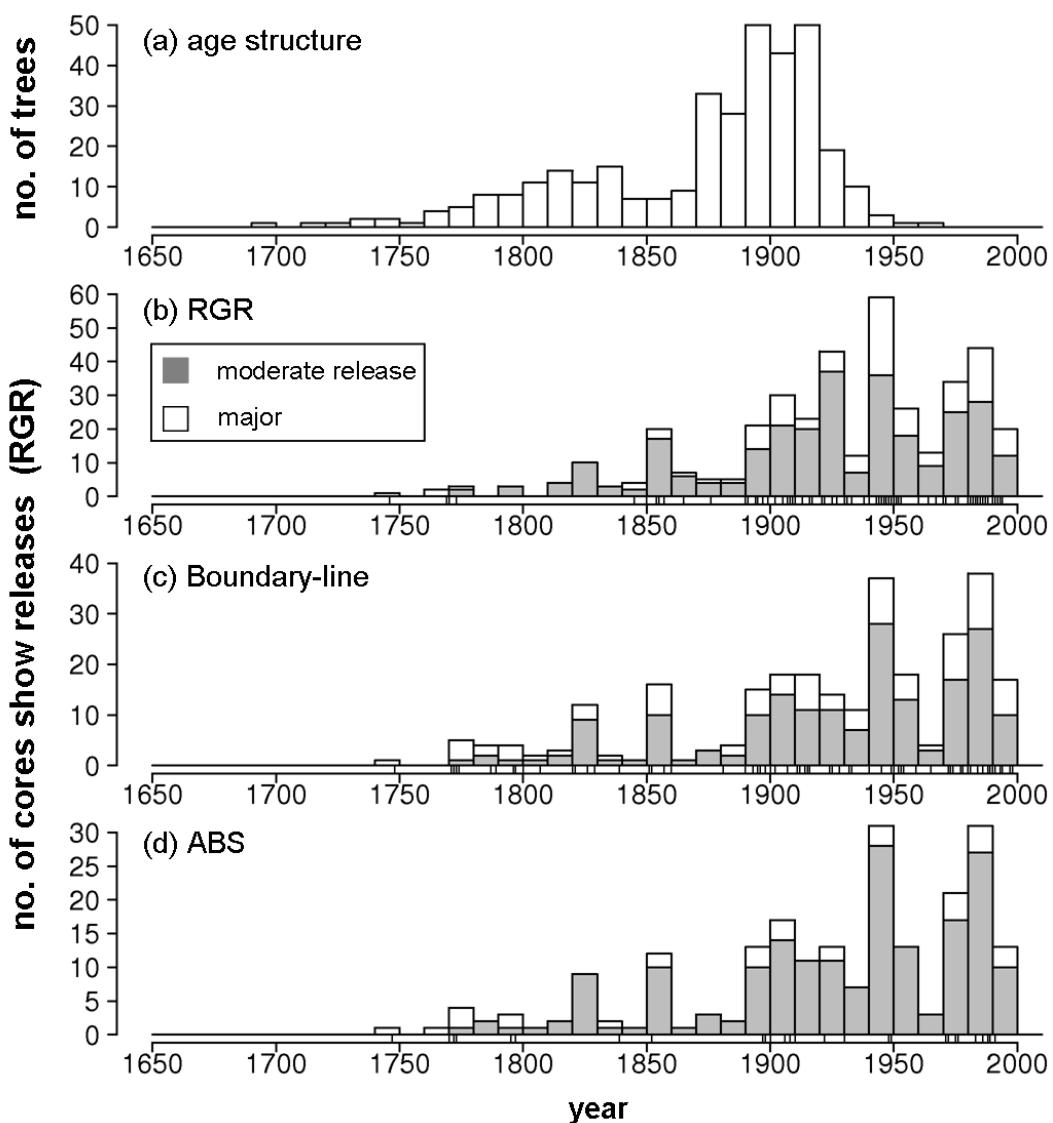


圖 A5.1 不同方法之樣芯擾動年代表。(a)為齡級結構；(b)、(c)、(d)為不同方法，分別為移動平均法、標準界限曲線法、絕對生長法。直方圖底下之細直線為顯示強度釋放的年分。

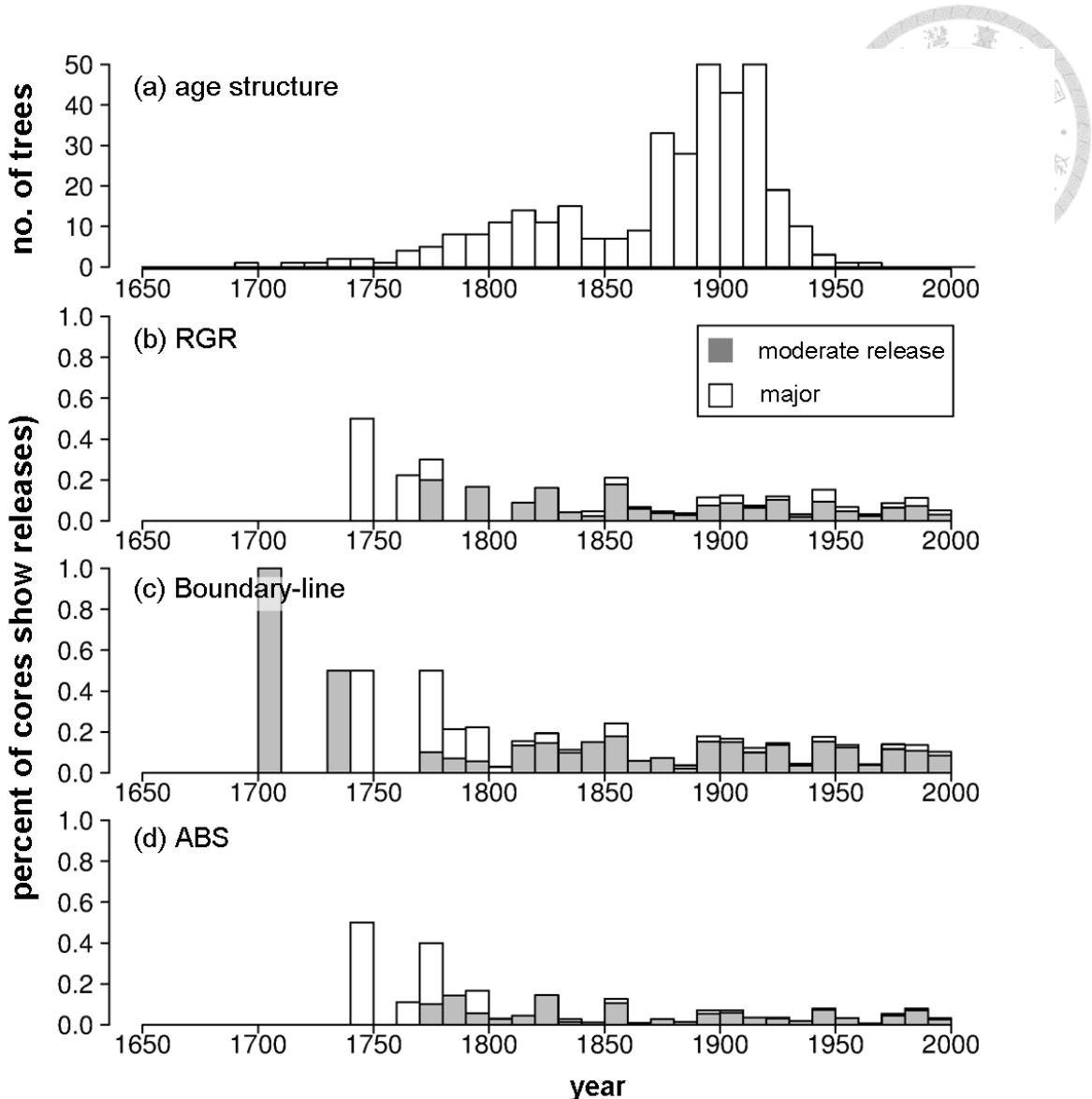


圖 A5.2 不同方法之相對化樣芯擾動年代表。將釋放次數除以當年之樣本深度 (sample depth) 做相對化。(a)為齡級結構；(b)、(c)、(d)為不同方法，分別為移動平均法、標準界限曲線法、絕對生長法。

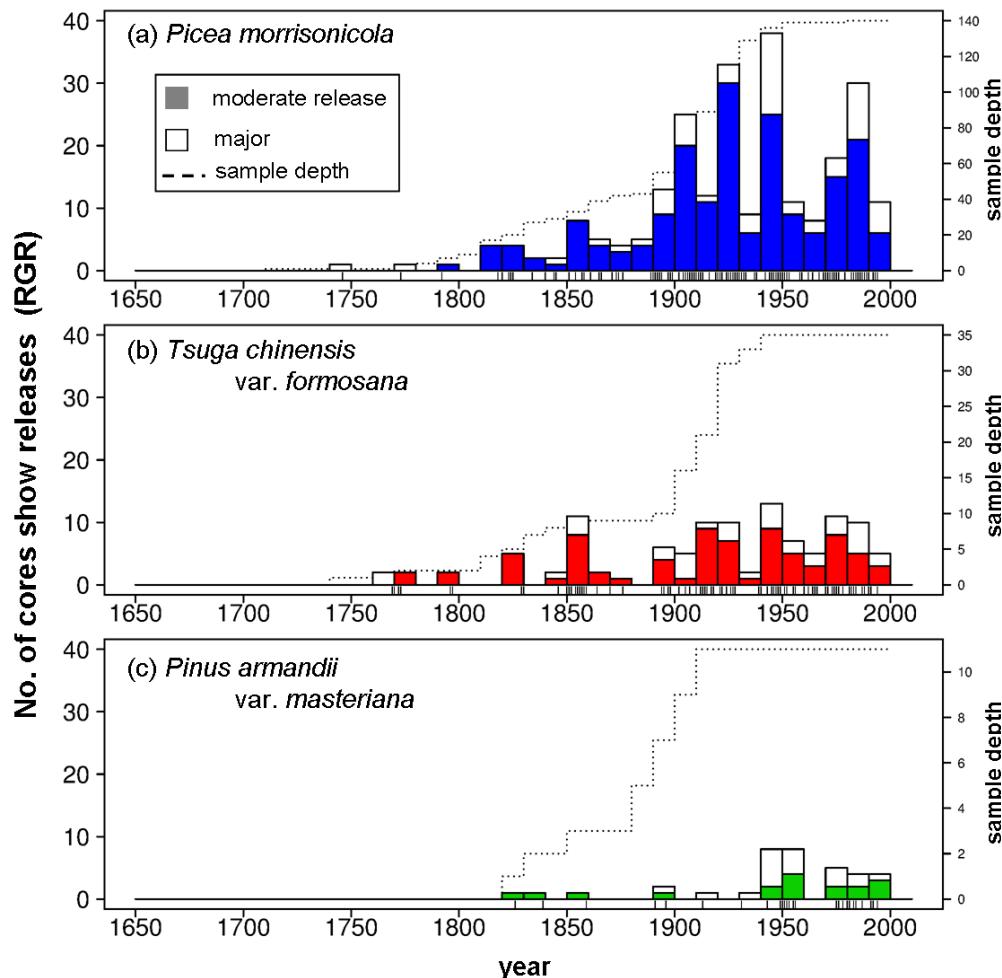


圖 A5.3 移動平均法之樣芯擾動年代表。(a)、(b)、(c)分別為臺灣雲杉、鐵杉、華山松。直方圖底下之細直線為顯示釋放的年分。

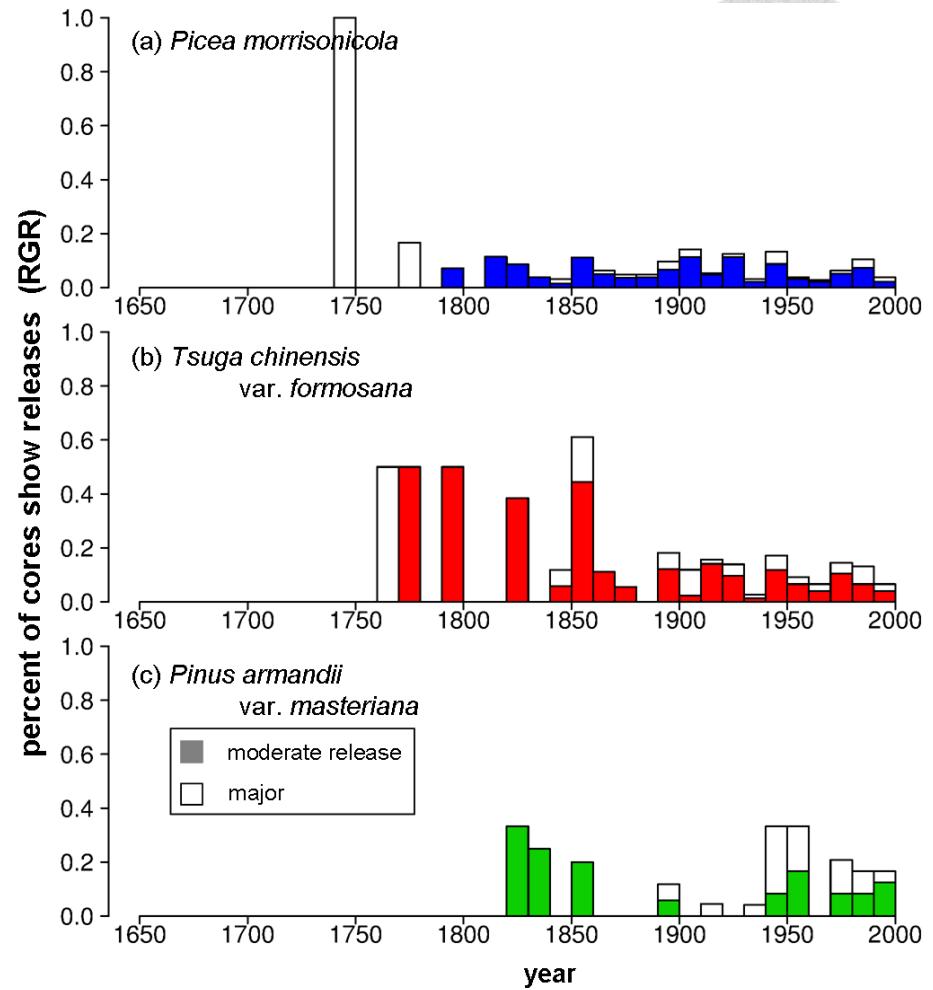


圖 A5.4 移動平均法之相對化樣芯擾動年代表。將釋放次數除以當年之樣本深度做相對化。(a)、(b)、(c)分別為臺灣雲杉、鐵杉、華山松

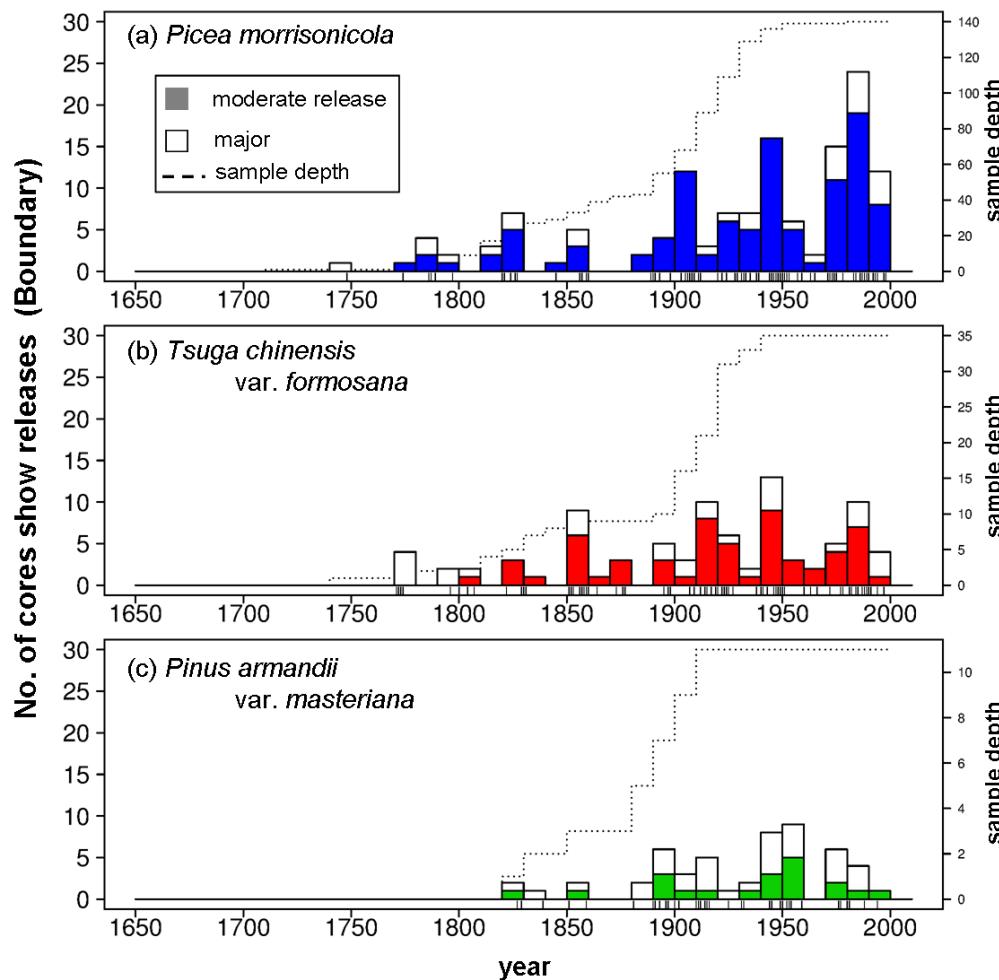


圖 A5.5 標準界限曲線法之樣芯擾動年代表。(a)、(b)、(c)分別為臺灣雲杉、鐵杉、華山松。直方圖底下之細直線為顯示釋放的年分。

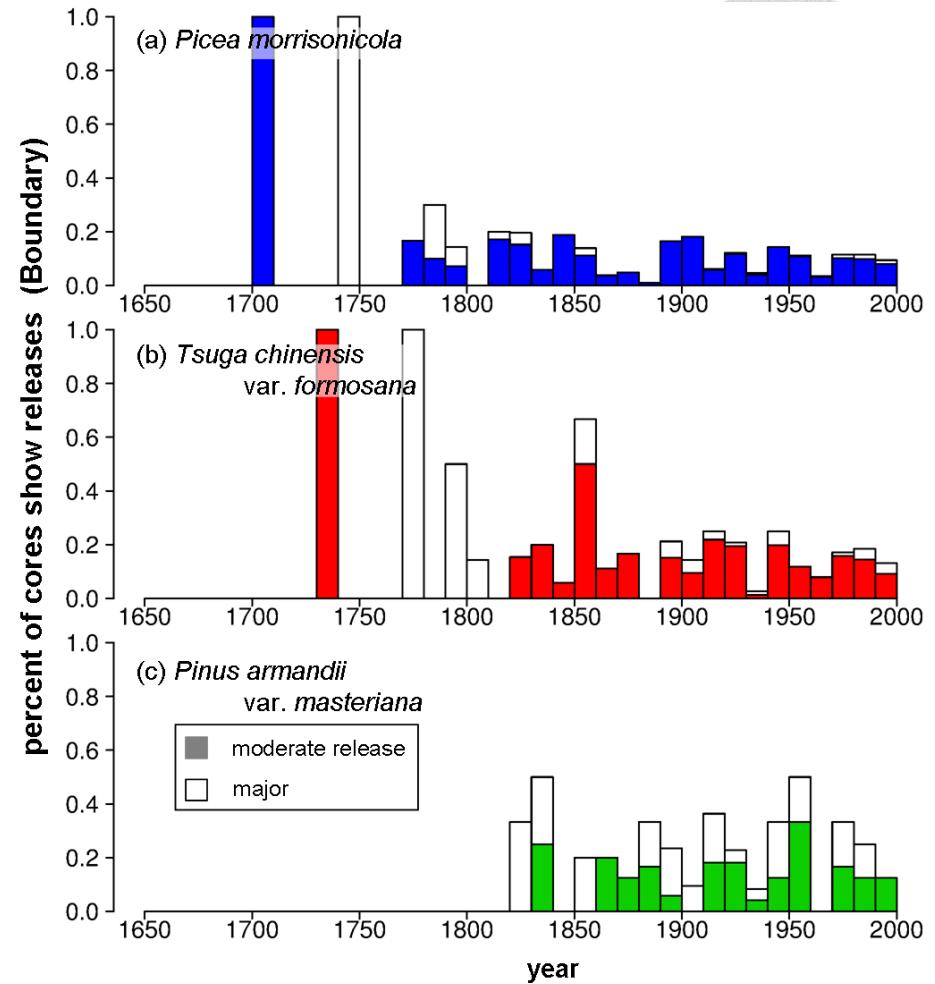


圖 A5.6 標準界限曲線法之相對化樣芯擾動年代表。將釋放次數除以當年之樣本深度做相對化。(a)、(b)、(c)分別為臺灣雲杉、鐵杉、華山松

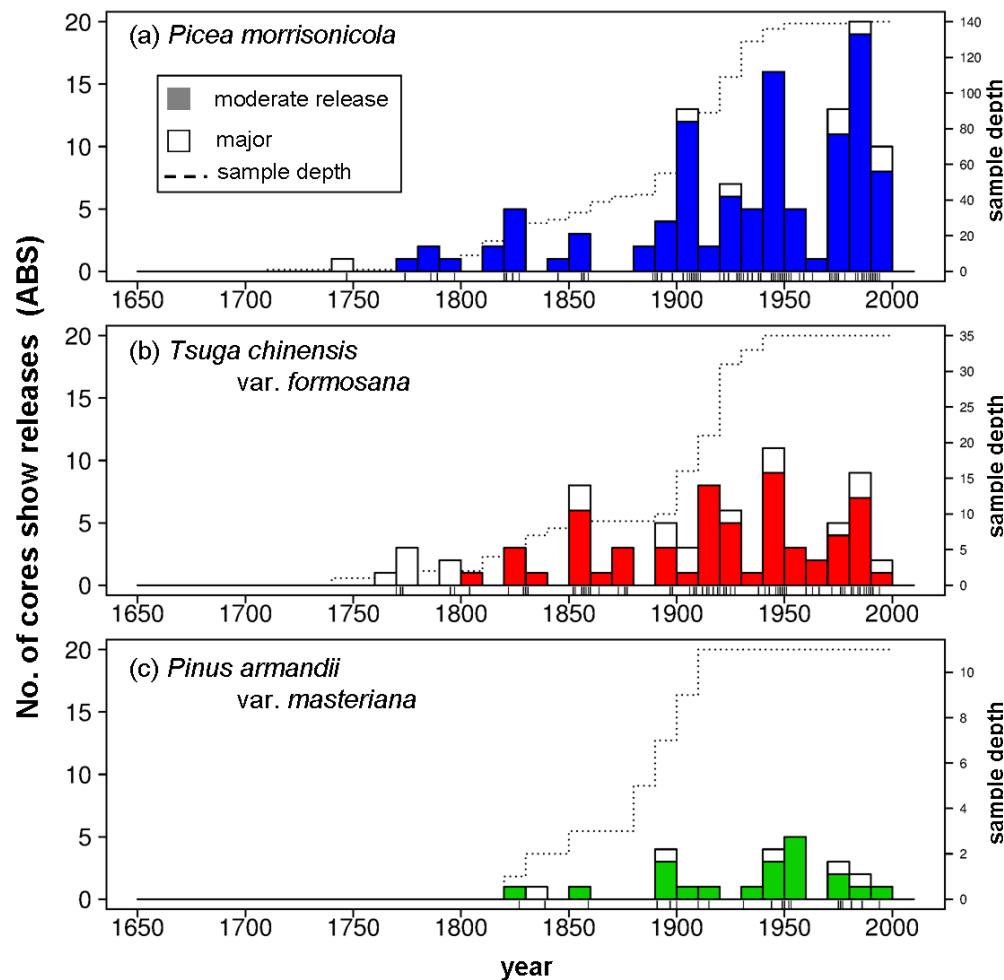


圖 A5.7 絶對生長法之樣芯擾動年代表。(a)、(b)、(c)分別為臺灣雲杉、鐵杉、華山松。直方圖底下之細直線為顯示釋放的年分。

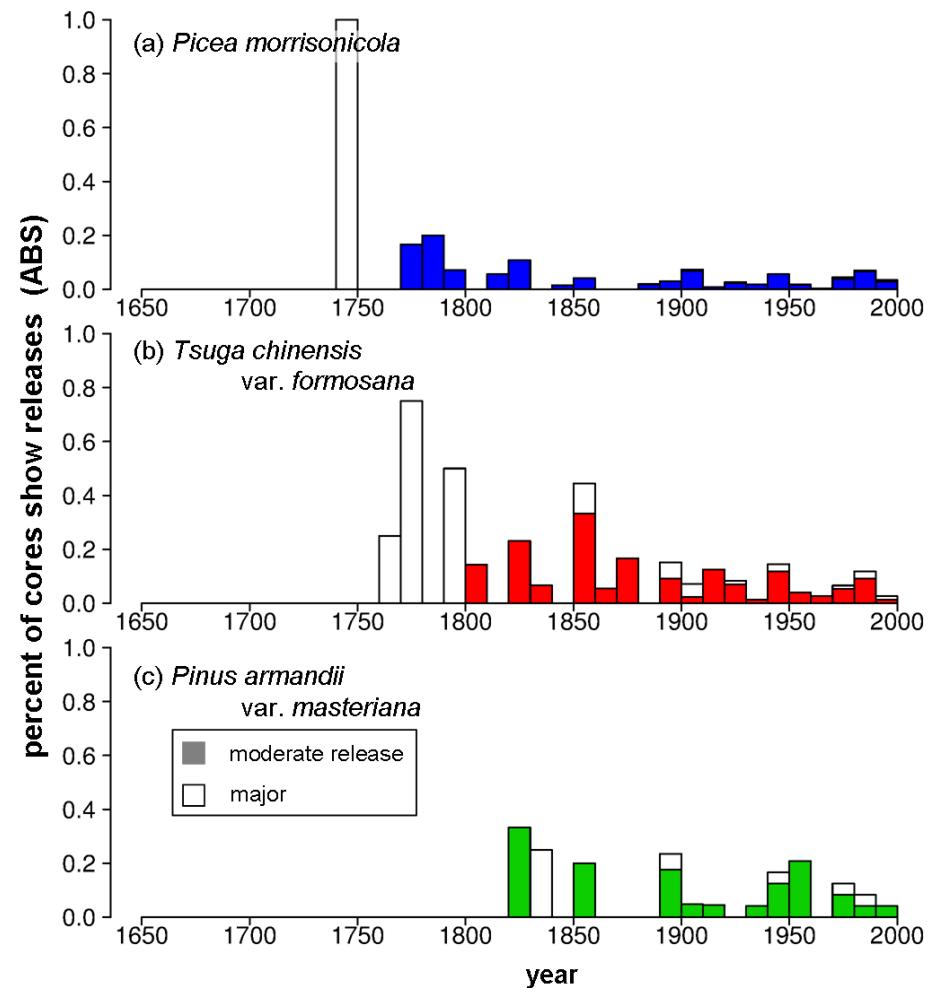
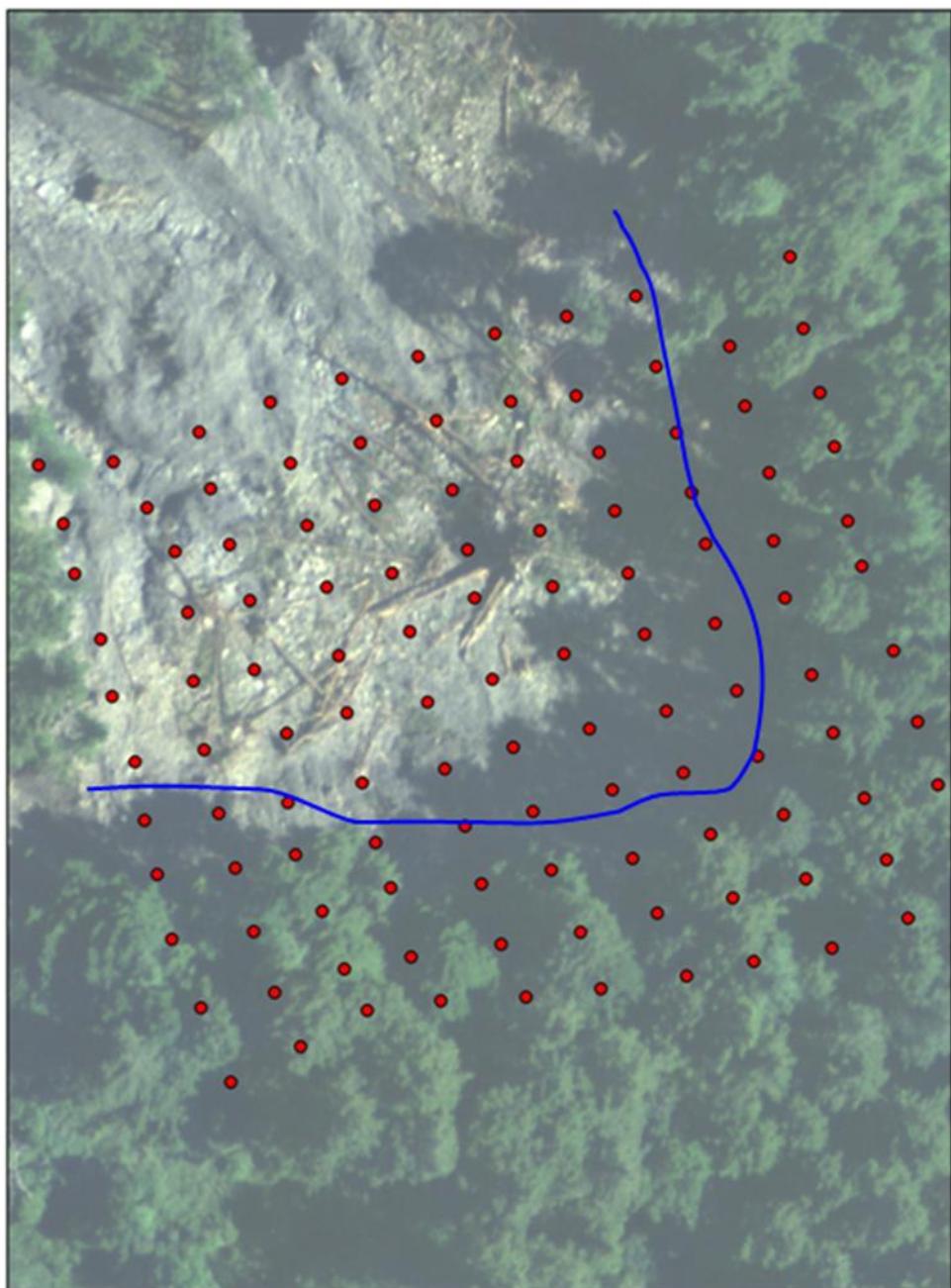


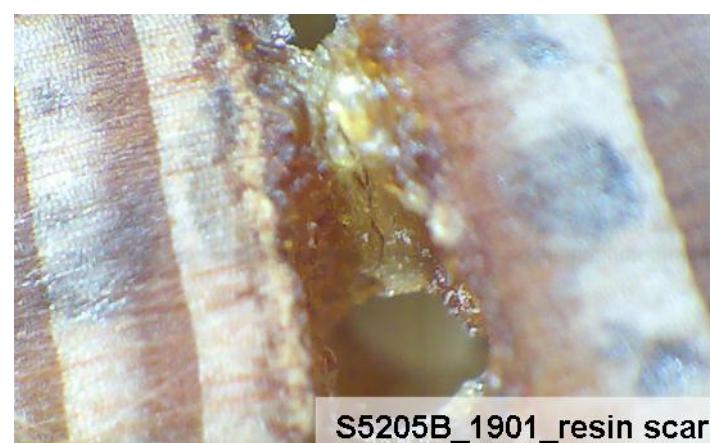
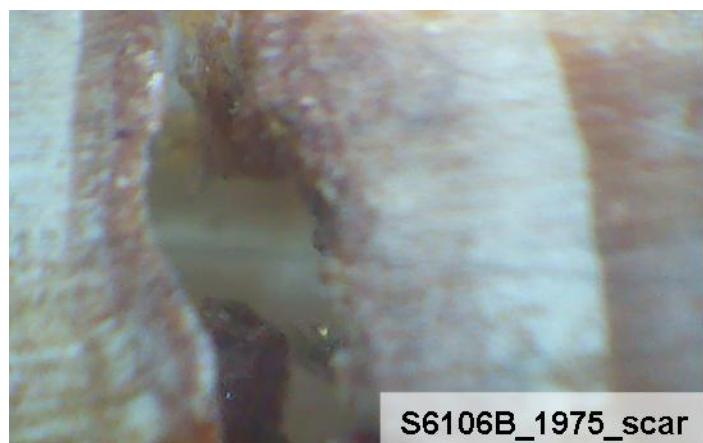
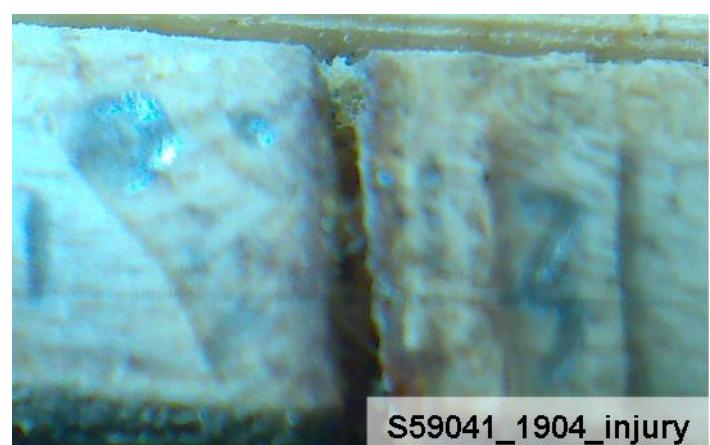
圖 A5.8 絶對生長法之相對化樣芯擾動年代表。將釋放次數除以當年之樣本深度做相對化。(a)、(b)、(c)分別為臺灣雲杉、鐵杉、華山松

附錄六、2009 年 8 月 18 日空照圖(莫拉克颱風過後)



附錄七、傷疤解剖特徵

傷疤、傷癒樹脂溝、癒傷組織、反應材、生長減緩等，皆為林木受擾動所影響之證據。





S7201A_1956,8_resin



S7201B_1957,8_resin



S16012_1923_25_reaction

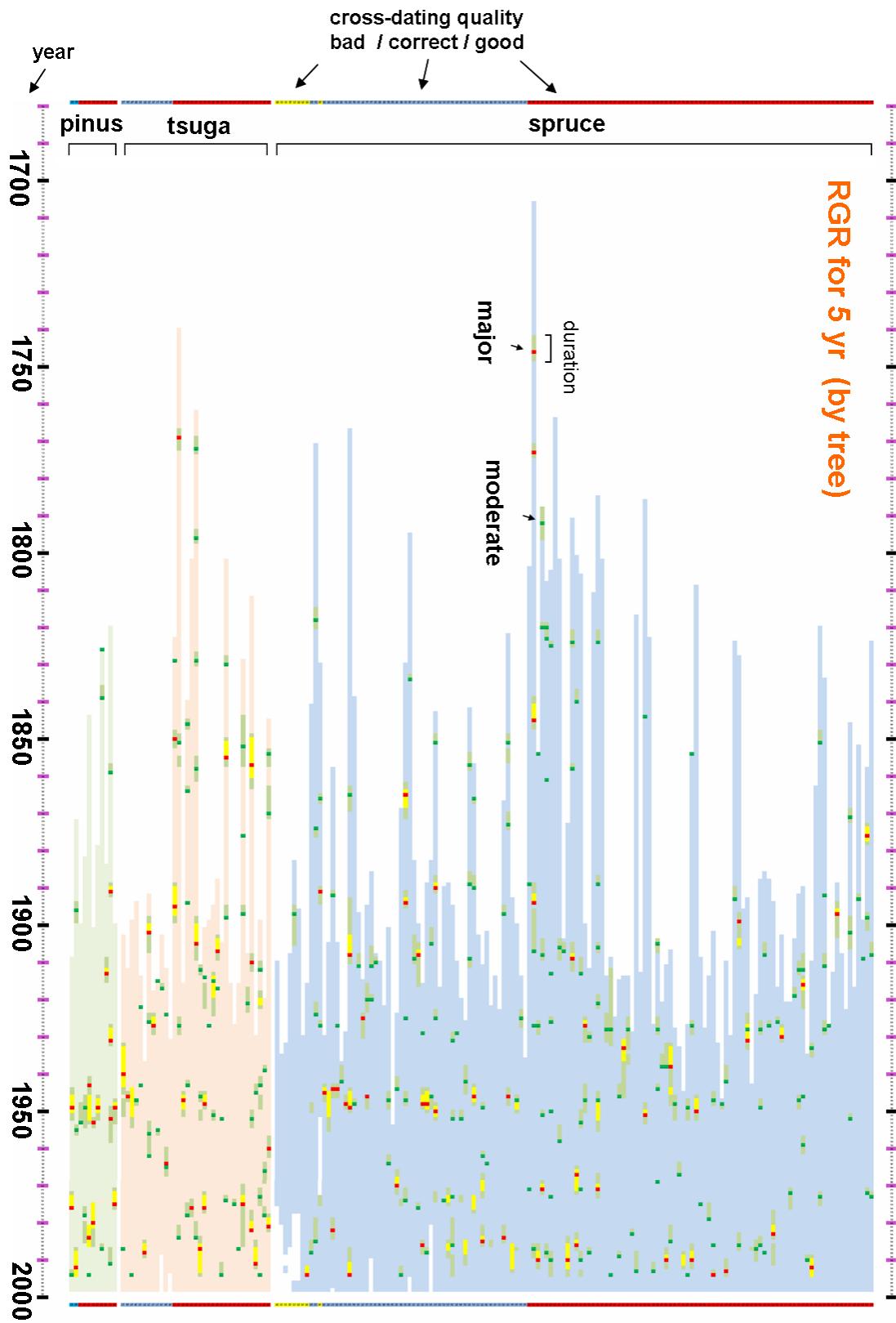


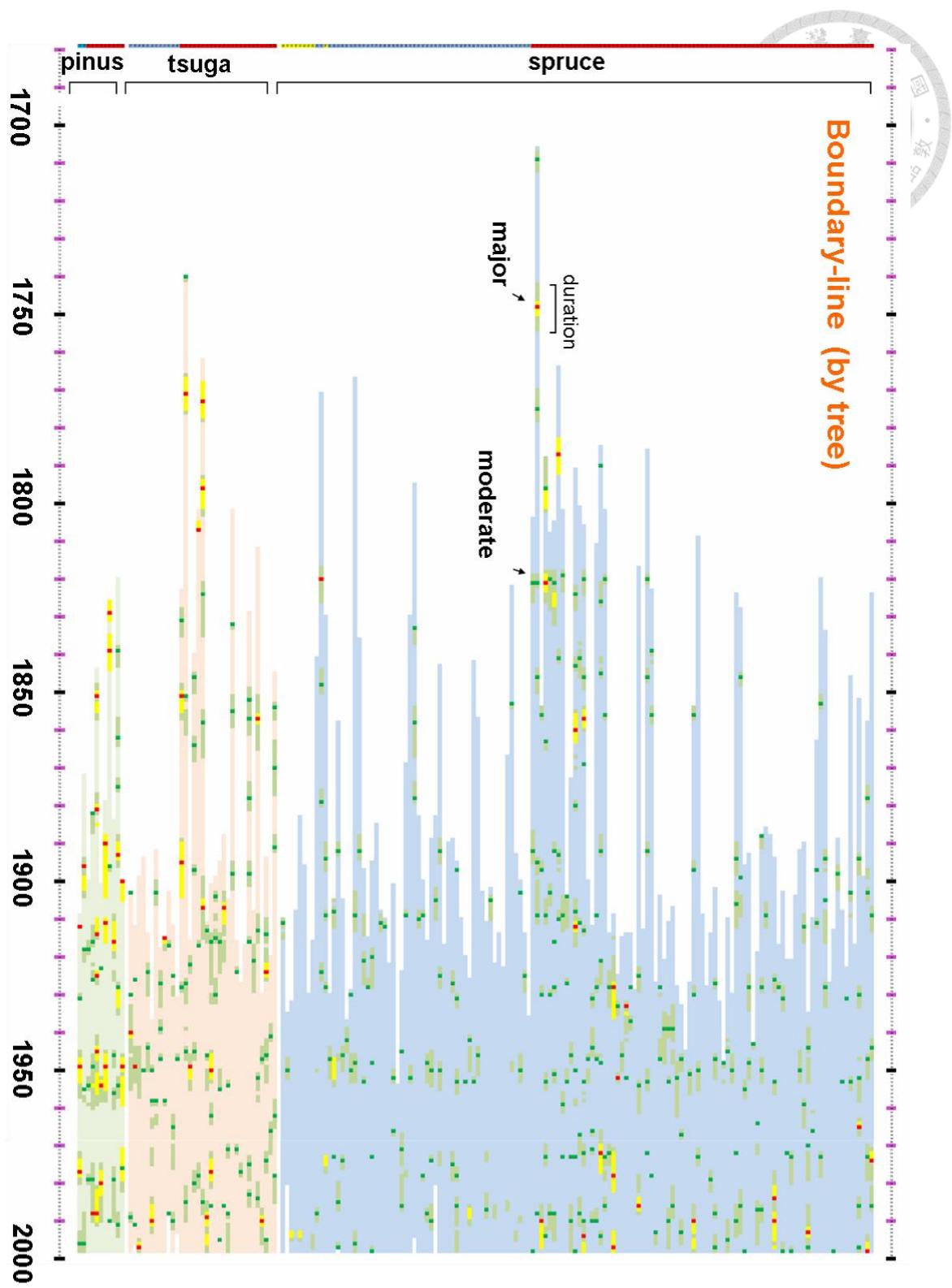
T4107A 1960's~ reduction

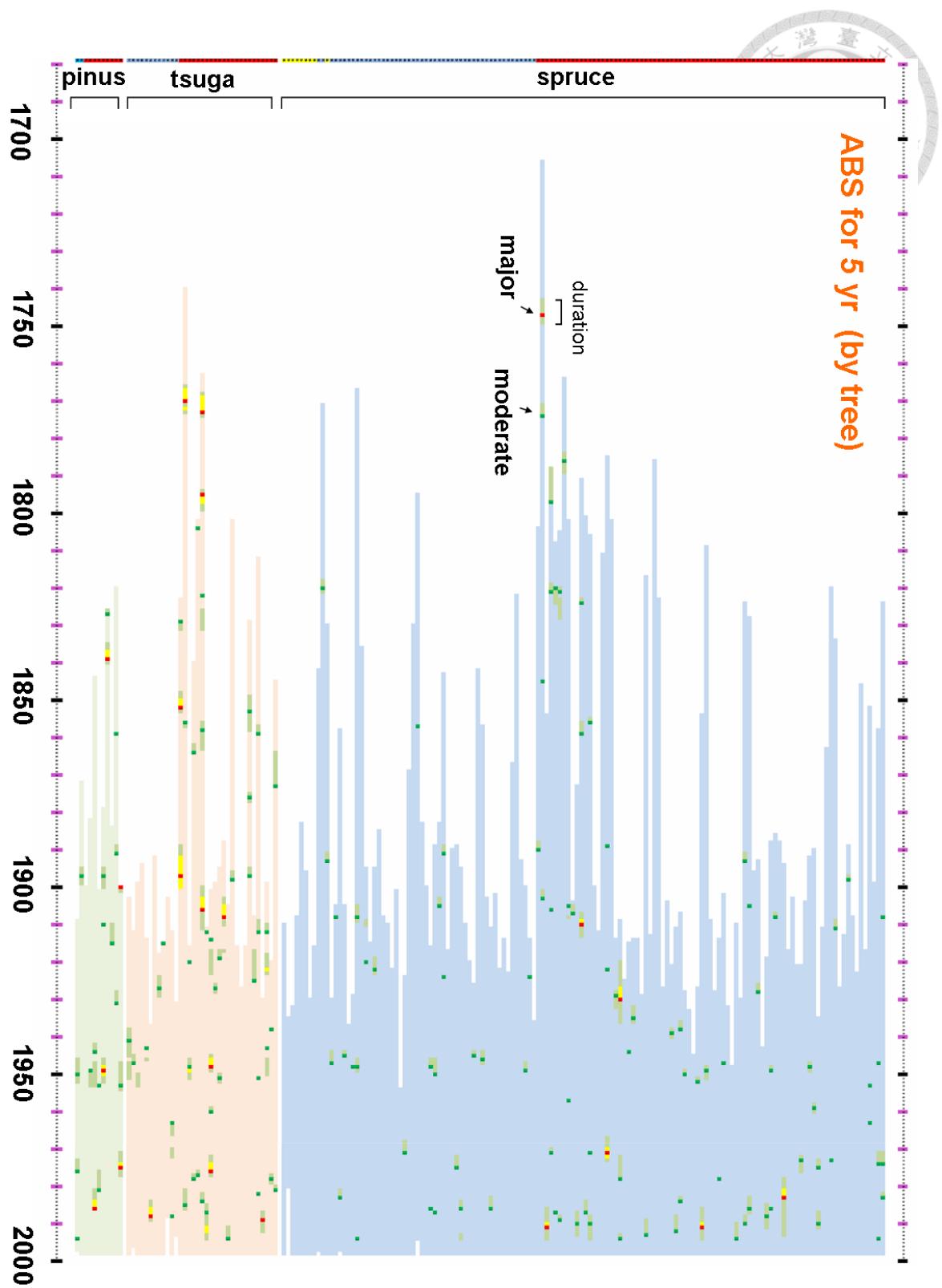


附錄八、各林木之釋放歷史

粉綠、粉紅、淺藍色色條為華山松、鐵杉、雲杉，每條色條代表一棵樹，長度為其自起始年分開始；紅色色塊為強度釋放、深綠色塊為中度釋放，(黃色、淡綠色塊為釋放之持續時間)(缺失輪則刪除留白)。

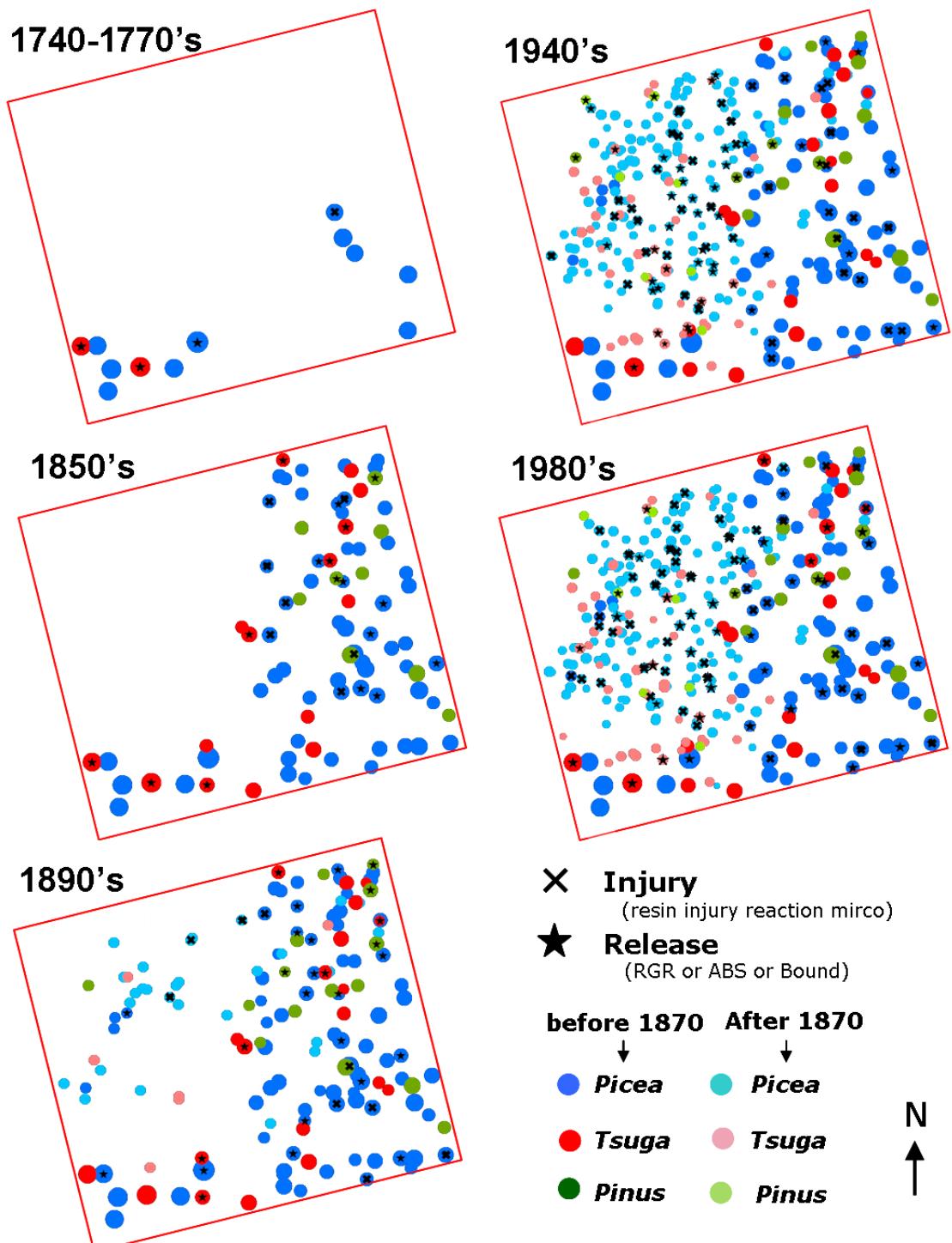






附錄九、生長釋放之空間分布

將樹輪傷疤與各方法所偵測之生長釋放，繪成空間分布圖，1850's 年代之擾動分布，範圍集中於小樹區之邊緣，樣區東側較無影響；1940's 與 1980's 之擾動，範圍散布全樣區，但多分布於小樹區。





附錄十、R code 與 Excel 公式

R 的 code

將 tucson 格式 轉成 excel 可讀格式

```
# 下載 dplR 配件 (package)
setwd("c:/data")    # 路徑可自行設定
library(dplR)
temp=read.rwl("Pall_1",header=F)      # 引號內為原始檔案名稱
temp.stat=rwl.stats(temp)
write.csv(temp,'Pall_1.csv',quote=F)    # 引號內為欲輸出之檔名

# 將 excel 格式 轉成 tucson 格式
setwd("c:/data")    # 路徑可自行設定
library(dplR)
temp=read.csv("Pall_1.csv",header=T)      # 檔案要先把"年分"的那行砍掉
rownames(temp)=1770:2009                 # 手動把"年分"加回來
colnames(temp)=c('P3003A','P3003B')      # 更改 core 名稱，非必要
# 若數字開頭的 core 名稱，R 會自動加上"X"，若超過六碼則無法轉換
# 需用此行程式更改回原名稱，或於檔案將名稱改為文字開頭
write.rwl(temp, fname='Pall_1.rwl', prec=0.001)    # prec 預設是 0.01，可自行調整
```

Excel 公式

分別另開新的工作表來計算 %GC、ABS、prior

計算 $\%GC = [(M_2 - M_1) / M_1] \times 100$

在儲存格 B11 輸入

```
=(AVERAGE(raw!B12:B21)-AVERAGE(raw!B2:B11))/AVERAGE(raw!B2:B11)*100
```

計算 $ABS = (M_2 - M_1)$

在儲存格 B11 輸入

```
=(AVERAGE(raw!B12:B21)-AVERAGE(raw!B2:B11))
```

計算 prior growth

在儲存格 B12 輸入

```
=AVERAGE(raw!B2:B11)*100
```

上述公式向下向右填滿後，必須刪除包含錯誤值之儲存格公式，先全選再用「選取...到(F5)」裡的「特殊」去選取有錯誤的公式值，用 delete 把它們刪去；另外需要手動刪除公式內有包含空白儲存格的部份，錯誤檢查會在儲存格的左上角顯示。此選取特殊儲存格的方式可應用至選取輪寬值，並將儲存格塗色方便直觀。

釋放偵測

RGR >100% 持續五年 (RGR10 為取十年窗口的%GC之工作表)

在儲存格 B2 輸入

```
=if(countif('RGR10'!B2:B6,>1)=5,"major",if(countif('RGR10'!B2:B6,>0.5)=5,"moderate",""))
```

ABS >0.5 mm 持續五年

在儲存格 B2 輸入

```
=if(countif('ABS10'!B2:B6,>0.5)=5,"major",if(countif('RGR10'!B2:B6,>0.5)=5,"moderate",""))
```

Boundary-line 為 $y = 816.17e^{-1.179x}$ (%GC>10%)

在儲存格 B2 輸入

```
=IF(AND('RGR10'!B2>=0.5*816.17*EXP(-1.179*prior!B2),'RGR10'!B2>10),"major",IF(AND('RGR10'!B2>=0.2*816.17*EXP(-1.179*prior!B2),'RGR10'!B2>10),"moderate",""))
```

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M
1		P06081	P06082	P0608C	P1001B	P18041	P18042	P1804B	P20021	P20022	P2310B	P27071	P2707
137	1815												
138	1816												
139	1817												
140	1818												
141	1819												
142	1820					-0.162888							
143	1821					-0.181435							
144	1822					-0.146882							
145	1823					-0.010036							
146	1824					0.094782							
147	1825					-0.036531							
148	1826					-0.105542					0.647555		
149	1827					-0.112953					-0.489999	0.669593	
150	1828					-0.131299					-0.508911	0.570405	
151	1829					-0.125206					-0.48905	0.746644	
152	1830					-0.10164					-0.406821	0.553795	
153	1831					-0.058107					-0.361111	0.344425	
154	1832					-0.084205					-0.279832	0.183518	
155	1833					-0.135616					-0.145612	0.050187	
156	1834					0.10427					0.152616	0.081612	

R 批次繪圖，可用來直觀輪寬 pattern (批次後，多餘的錯誤圖片需自行刪除)

```

setwd("C:/ R/draw/splot")          # 資料夾自行設定

he=read.csv('he.csv',header=F)      # 檔案僅有一列的樣芯編號
RAW=read.csv('RAW.csv',header=T)    # 輪寬檔案第一行年份的標題需補上"yr"
RGR=read.csv('RGR.csv',header=T)    # 檔案為%GC 值
ABS=read.csv('ABS.csv',header=T)    # 檔案為 ABS 值

for(i in 1:290)                   # 長度視樣本數量而決定
{
  bitmap(file=paste(he[1,i],".tif",sep=""),res=300)
  par(mfrow=c(4,1),mar=c(3, 4, 1, 3))

  plot(RAW$yr,RAW[,i],type="l",lwd=2,xlab=RAW[1,i],ylab=he[1,i])
  par(new=TRUE)
  plot(RAW$yr,RGR[,i],type="l",lwd=2,col="blue",yaxt='n',xlab="",ylab="")
  abline(h=0.5,col="blue",lty=4,lwd=2)
  abline(h=1,col="blue",lty=2,lwd=2)
  axis(4,col="blue")

  plot(RAW$yr,RAW[,i],type="l",lwd=2,xlab=RAW[1,i],ylab=he[1,i])
  par(new=TRUE)
  plot(RAW$yr,ABS[,i],type="l",lwd=2,col="red",yaxt='n',xlab="",ylab="")
  abline(h=0.7,col="red",lty=4,lwd=2)
  abline(h=1.4,col="red",lty=2,lwd=2)
  axis(4,col="red")

  plot(RAW$yr,RAW[,i+1],type="l",lwd=2,xlab=RAW[1,i+1],ylab=he[1,i+1])
  par(new=TRUE)
  plot(RAW$yr,RGR[,i+1],type="l",lwd=2,col="blue",yaxt='n',xlab="",ylab="")
  abline(h=0.5,col="blue",lty=4,lwd=2)
  abline(h=1,col="blue",lty=2,lwd=2)
  axis(4,col="blue")

  plot(RAW$yr,RAW[,i+1],type="l",lwd=2,xlab=RAW[1,i+1],ylab=he[1,i+1])
  par(new=TRUE)

```



```

plot(RAW$yr,ABS[,i+1],type="l",lwd=2,col="red",yaxt='n',xlab="",ylab="")
abline(h=0.7,col="red",lty=4,lwd=2)
abline(h=1.4,col="red",lty=2,lwd=2)
axis(4,col="red")

dev.off()
}

```

