

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

詹明勳¹ 王亞男² 葉永廉³

(收件日期：民國 93 年 9 月 7 日、接受日期：民國 94 年 1 月 25 日)

【摘要】本研究利用樹輪氣候學的方法，解析塔塔加地區台灣雲杉立木樹輪特徵值對於氣候因子的反應。推估該地區過去 245 年來溫度與降雨量的變化。用反應函數與相關函數均達顯著水準月份之平均溫度與降雨量，建立轉換迴歸方程式，經過交叉檢驗。季節平均溫度部分，樹輪寬度年表的組合年表推估春季與秋季溫度序列，氣象觀測站實際觀測值相關係數分別為 $r = 0.41$ 與 0.45 ，早材密度年表與最小密度年表的組合年表推估春季與夏季溫度序列，氣象觀測站實際觀測值之相關性係數分別為 $r = 0.46$ 與 0.52 。季節降雨量部分，樹輪寬度年表的組合年表推估之夏季降雨量序列及早材寬度年表的組合年表推估之秋季降雨量序列，與氣象觀測站之夏季降雨量及秋季降雨量之實際觀測值相關係數分別為 $r = 0.51$ 與 0.44 ；晚材寬度年表的組合年表推估之冬季降雨量序列，與氣象觀測站之冬季降雨量之實際觀測值相關係數為 $r = 0.45$ 。

【關鍵詞】台灣雲杉、樹輪、氣溫、降雨

TEMPERATURE AND PRECIPITATION VARIATIONS DURING THE LAST 245 YEARS AS IN TA-TA-CHIA AREA OF CENTRAL TAIWAN DENDROCLIMATIC STUDY OF FROM TAIWAN SPRUCE (*PICEA MORRISONICOLA*) TREE-RING CHARACTER VALUES

Ming-Hsun Chan¹ Ya-Nan Wang² Yung-Lien Yeh³

(Received: September 7, 2004; Accepted: January 25, 2005)

【Abstract】The influence of climate on the radial growth and wood density of Taiwan spruce (*Picea morrisonicola*) during the last 245 years in the Ta-Ta Chia area central Taiwan, was investigated at elevations of, 2200 m and 2600 m, respectively. By response function and simple correlation analyses. During the growth season, both May and September temperatures and July precipitation is positively correlated with tree-ring width chronologies, whereas May and June precipitations are negatively correlated with tree-ring width. Both September temperature and July precipitation positively correlate well with

¹ 國立台灣大學生物資源暨農學院實驗林管理處教學研究組助理研究員兼組長。

Assistant Research Fellow, The Experimental Forest, College of Bio resource and Agriculture, National Taiwan University.

² 國立台灣大學生物資源暨農學院森林環境暨資源學系教授兼實驗林管理處處長，通訊作者。

Professor and Director, The Experimental Forest, College of Bio resource and Agriculture, National Taiwan University. Corresponding author.

³ 國立台灣大學生物資源暨農學院實驗林管理處教學研究組組長、森林育樂組組長。

Teaching department director and Forest recreation department director, Administration of Experimental Forest, College of Bio resource and Agriculture, National Taiwan University.

maximum wood densities. The results reveal the potential of Taiwan spruce for reconstructing past climate in the Ta-Ta- Chia area

【Key words】 *Picea morrisonicola*, Tree-ring, Temperature, Rainfall

I、前言

樹輪的特性（包括樹輪寬度、木材密度、細胞構造），化學元素濃度（如 Ca、Mg、K etc.）及同位素的比率（ O^{18}/O^{16} ，D/H， C^{14}/C^{12} ， C^{13}/C^{12} ）反映樹木複雜的生理及生態環境。而氣候扮演一個影響這些特性角色。

每個生長輪可被當作是獨特因子合併表現的結果。為了獲得氣候訊息，必須要分離出樹木生長輪的特徵，哪一些是屬於氣候因子及哪一些是非氣候因子。樹輪特徵，可以反應空間尺度的氣候型態。所以，樹輪年代學者，有時候從距離生育地數千公里遠的地方，可以定年（Fritts, 1976; Schweingruber, 1983）。從已知生態環境的地區所採得的樹木樣本，經交叉定年所得到的年輪序列，記錄了該區的氣候參數。

一般利用從靠近森林界線的地方取得生立木，建立長的年表以重建氣候（LaMarche, 1974），全球生態系受暖化的衝擊時，樹木生長及環境的改變，首先發生在位於森林界線的樹種。

樹輪是最好的氣候變化替代資訊（proxy information）來源之一。最近這幾年，樹輪氣候學者工作網絡（network）已經應用這些替代資訊，建立大地區氣候變化的歷史（例如 Briffa et al. 1988; Meko et al. 1993）。樹輪的記錄在歐洲與北美地區已經相當完整，亞洲地區則僅有幾個生育地與樹種有比較詳細的資料（Hughes 1995），包括中國大陸與日本（Kojo 1987; Sweda 1994）。近年台灣地區樹輪氣候學的研究首推 Tsou 和 Liu（1996）由台灣冷杉樹輪寬度與氣候的關係，重建玉山地區 300 年來的夏季平均溫度變化。

Sander 等人（1995）在捷克 Krkonose 山

區挪威雲杉（*Picea abies*）南向坡與北向坡採集 141 株雲杉年輪樹芯樣本，樹芯所包含的年表由 1930-1990 年，以樹輪氣候學方法，探討樹輪寬度與最大晚材密度對於月平均溫度與月平均降雨量之相關性。

雲杉屬植物依據 Schweingruber（1993）列舉，可作為樹輪氣候學研究約有 14 種。台灣雲杉分佈於雲杉地理分佈之最南端，有其的特殊意義，研究顯示對於地理氣候上屬於反應比較敏感的樹種（詹明勳，1999）。台灣雲杉樹輪的基礎研究，已發展出利用軟 X-射線-微密度計於台灣雲杉立木年輪寬度及密度分析（詹明勳等，1999），並且建立樹輪寬度、最大密度、與溫度、降雨間之關係（詹明勳等，1999），本研究嘗試將已建立之樹輪分析基礎，應用樹輪氣候學方法以台灣雲杉作為研究材料，重建過去 245 年台灣中部塔塔加地區氣候（包括溫度與降雨等）變化史。提供重建台灣地區過去較高解析度氣候的方法與資料。

II、材料與方法

(I) 採樣地概況

本研究選用之台灣雲杉生育地，位於台灣大學生物資源暨農學院實驗林和社營林區第 34 林班（圖 1）。台灣雲杉主要分佈在沙里仙溪的上游，玉山前鋒向北北西之坡面（圖 2），海拔約 2000 m-2600 m 之間，上限可達 3000 m 而下限則延伸到 1800 m。常為單株並與櫟林帶混生（曾彥學，1991）。本研究取樣台灣雲杉樹芯樣本，為海拔 2600 m 約在分佈的上限；另一是海拔 2200 m 為分佈的中心區域等 2 個生育地。選用之取樣樣木胸高直徑 60 cm-120 cm 之間，平均樹冠層高度 30-40 m。本研究選取海拔 2600 m 與 2200 m 之樣木各 30 株，合計 60

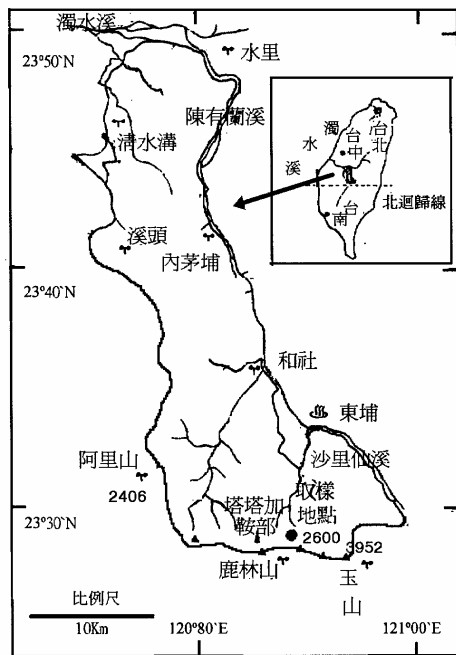


圖 1 塔塔加地區研究試驗地(●)及氣象觀測站(▲)。試驗地：取樣地點 (23°28'N, 120°53'E)；氣象觀測站：阿里山 (23°30'N, 120°48'E)；鹿林山 (23°27'N, 120°82'E)；玉山 (23°26'N, 120°90'E)

Fig.1 Map of Ta-Ta-Chia area showing the locations of study sites (●) and meteorological stations (▲). Study sites : site sample (23°28'N, 120°53'E); Meteorological stations : Alishan (23°30'N, 120°48'E) ; Lulinshan (23°27'N, 120°82'E) ; Yushan (23°26'N, 120°90'E)

株。生長錐 (increment core) 在胸高直徑 1.3 m 處鑽取直徑 (5 mm) 樹芯 (core)，每株立木各採取樹芯 2 支。

本地區之屬於第三紀之砂頁岩互層 (陳正祥 1961) 表土為 15 cm-30 cm 不等之黑瘠表育層 (umbric epepedon) 或僅 13-15 cm 厚之淡色表育層 (ochric)，隨地形而有變化 (蔣先覺, 1994)。其下有一明顯的灰白層 (albic horizon, E)，最下層則為變育層 (cambic horizon, Bw)。依美國土壤分類法，可分類為弱育土綱，淡色弱育土亞綱，寒冷淡色弱育土類。本樣體之物理性質為中質地之粘質壤土，其 pH 值介於 4.6-5.1

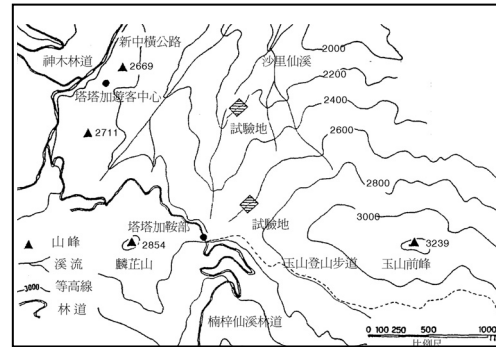


圖 2 塔塔加取樣試驗地位置圖

Fig. 2 Map of Ta-Ta-Chia showing the locations of the site sampled

之間，屬強酸性土壤。有機物含量約在 1-11%，表土層更高達 11%。

(II) 氣候

依據 Su (1984a) 以柯本 (Koppen) 氏法對台灣氣候分類，塔塔加地區屬於中部山地溫暖濕潤夏雨型氣候，雨期集中在 5-9 月，降雨量約 3000 mm；乾期 10 月至隔年 4 月，降雨量約 600 mm。研究區之 1 月平均溫度 4.77°C，7 月平均溫度 13.42°C，年平均溫度 9.55°C。本研究氣候資料由交通部中央氣象局阿里山測候站 (海拔 2406 m) (1935-1995 年) 與玉山測候站 (海拔 3950 m) 取得 (1953-1995 年) 每月平均溫度與月總降雨量資料。兩測候站相距 15 Km，塔塔加 (海拔 2600m) 位於兩測候站中間。最鄰近塔塔加之測候站為鹿林山測候站該站 (1961-1967 年) 資料不足，故該站資料僅作為校正之用。

本研究所用之氣候資料為最鄰近之玉山測候站每月平均溫度和月總降雨量 (1953-1995 年)，與鹿林山測候站有 (1961-1967 年) 8 年之月平均溫度與月總降雨量資料，使用直線迴歸法及內差法，推算鹿林山測候站 1953-1995 年月平均溫度資料；月總降雨量使用玉山測候站的資料，一併用於反應函數與相關函數分析。

(III) 軟 X-射線-微密度計法

取樣樹芯以甲醇（98%）溶液浸洗，之後再以 80°C 熱水進行抽出，確保抽出乾淨完全，再用蛋白膠固定樹芯後用高精密度平台鋸切割樹芯成厚 2 mm、寬 5 mm。樹芯樣本在恆溫恆濕箱中調整含水率至 12-15%。拍攝樹芯樣本之軟 X-射線機（HP CABINE X-ray system series MODEL 43855B）為惠普公司生產，照射條件：(1)X-射線距離樹芯 62.5 cm，照射負片的範圍 25.4 cm × 11.5 cm（4.5 in × 10 in），（Kodak Industrex film M (ready pack II)）；(2)X-射線強度 14 PkeV，3 mA，照射 7 分鐘。X-射線負片用微密度計（日製型號：Model MPM-2 Micor-photometer）解析，檢測速率 2mm/sec，檢測面積 100 μm × 300 μm。樹輪密度的連續資料，解析為樹輪 8 項特徵值。計算工作非常繁複，故採用 Nobori（1989）所撰寫的 Tree-Ring Analysis Program，以解析樹輪密度連續資料。台灣雲杉應用軟 X-射線-微密度計法訂定出早晚材密度的境界為 560 kg/m³（詹明勳等，1999）。

(IV) 樹輪氣候學研究法

1. 交互定年（cross-dating）

交互定年的程序以目視與統計程式兩部份共同執行。目視定年使用識圖定年法（skeleton plot process）（Stokes and Smiley 1968），在 X-射線負片上核對寬輪與窄輪序列是否相符。量測所得的各寬度序列，再以程式 TSAP Program（Rinn 1996）或 COFECHA program（Holmes *et al.* 1986）進行交互定年的相關檢驗，以確定量測和定年的準確性。

最大密度序列與窄輪序列皆顯示低頻變化（low frequency fluctuations），這些變化同時隨樹輪寬度的變異發生。顯示最大密度與窄輪除受樹輪寬度變異的影響外，還包括由於雲杉林分干擾競爭之相關低頻變化。

為檢驗各樣本序列之低頻變化與窄輪對於主序列之正確性，採用波長 32 年的三次弧線函數（cubic spline function）先濾去各樹芯序列的低頻變化，再做對數轉換，以凸顯出窄

輪的效應，而且將所有序列加總平均，得到涵蓋所有序列年份的主序列。之後，以 50 年為一時段，除了求取個別序列與主序列同時段之相關係數之外，並計算與滯後和超前主序列 1 至 10 年的相關性，藉由各序列與主序列某一時段的最大相關性，可作為判定定年或量測寬度是否正確的參考。

2. 標準化（standardization）

樹輪寬度標準化的意義有二：(1)從樹輪寬度序列移除非氣候訊息的因素；這些非氣候訊息主要來自樹木年齡造成的不同生長趨勢（壯齡生長快速，老齡生長較緩慢）與干擾的效應（競爭、病蟲害與火災等因子）。(2)移除單株林木由於不同生長率及不同林齡的因素。將標準化後的結果進入平均值函數的序列，此序列為蘊含最大共同特性的序列。標準化的程序目的在轉化樹輪寬度由非平穩型時間序列（non-stationary time series）的生長輪寬度進入一新的平穩（stationary）型時間序列。相對樹輪寬度的指數被定義在均值（mean value）為 1，並且相對變異數為常數，上下振幅（amplitude）的均值為 1 的一個時間序列。平穩型機率過程對其過程之變動有固定水準或固定均值（μ），變異數（σ²）為測度隨機過程對其水準變化之程度。樹輪寬度的指數（It）等於每一樹輪寬度的值（Rt）除以它的期望值（expected value Gt）

$$It = \frac{Rt}{Gt}$$

Gt 的估算由波長 66 年 50%之三次弧線平滑函數擬合（Cook and Peter. 1981），除去因不同林齡的趨勢，產生指數序列的年表；並且應用雙權重穩健平均法（biweight robust mean；Mosteller and Tukey 1977）除去林分內在因子的干擾效應產生平均年表。最大密度的序列標準化程序以通過年表序列之平均值或直線迴歸值擬合，得到（Gt）之期望值，樹輪密度指數（It）則等於實際樹輪密度特徵值（Rt）減去期望值（Gt）

$$It = Rt - Gt$$

「標準化」處理後的序列，再以時間序列分析中的自迴歸模式 (autoregressive model) 擬合 (Box and Jenkins, 1976) 自迴歸模式 (autoregressive model) 的指數序列通常會增強共同的訊息，依第一最小 AIC (Akaike Information Criterion) 求得每一序列的自迴歸係數和自迴歸模式的階數，再將序列中每年的值除以對應當年的自迴歸模式擬合曲線值，計算出殘差序列，同樣以雙權重穩健平均法合併成一種「殘差 (residual, RES) 年表」(Holmes *et al.*, 1986)。這種殘差年表只含所有樣本共同具有的高頻變化，不包含樹木個體特有和群體共有的低頻變化，因此不具有 STD 年表中所含有的「自相關」(auto-correlation) 特性。樹輪寬度與最大密度標準化後，以「殘差 (residual; RES) 年表」與氣候因子求相關函數與反應函數。樹輪寬度與最大密度年表標準化程序和各項統計值的計算 (表 1)，由 ARSTAN 程式 (Cook, 1985; Holmes, 1994) 來完成。

3. 氣候因子的反應

研究樹輪寬度變化與氣象因子間之關係，最常用的方法是相關函數 (correlation function) 和反應函數 (response function) (Fritts, 1976)。相關函數是計算樹輪寬度年表與氣象資料之間的簡單相關係數。反應函數是採用多變量分析

法，將多個氣象因子先作主成分分析後，再和樹輪資料做逐步迴歸分析 (stepwise regression)，之後將主分量的迴歸係數轉換回對應於原始氣象因子的迴歸係數，其值的大小和正負符號代表樹木徑向生長對氣候的反應程度。

本研究所用氣候資料為鹿林山測候站之每月平均溫度與玉山測候站每月總降雨量。依據楊金昌等 (1999) 在塔塔加地區對台灣雲杉物候學之研究，台灣雲杉立木葉芽於 4 月突破芽鱗展新葉。新枝自 9 月逐漸增長，於翌年 4 月展出新葉。形成層細胞分裂較晚於新葉的伸展。另外 Topuoglu (1940) 指出形成層活動開始於芽的發生，並且緊接著由莖部到根部。Ladefoged (1952) 指出裸子植物與被子植物 (例如 spruce, scots pine, linde and hornbeam) 胸高直徑處之細胞分裂與根部 1.5 m 遠之細胞分裂兩者之間在時序上相差 1 至 2 個星期左右。他們之間的時序差距有時可以達 5 或 6 個星期 (例如 birch, hazel, and alder)。 (例如 ash, oak)。具有環孔材的被子植物之形成層活動開始的時間在莖部與根部大致上很類似。Meier (1973) 一些個案的研究指出，木質部細胞的加厚早於韌皮部的細胞。

基於上述物候學的觀察與文獻的佐證，台灣雲杉可能的生長季節 (形成層細胞活動) 大約從 5 月至 9 月，休眠季節大約從 10 月開始

表 1 六個鑽孔位置資料

Table 1 Location information of six boring

	Ring width		Maximum density	
	Alt. 2600	Alt. 2200	Alt. 2600	Alt. 2200
Number of tree (core) in Chronology	11(22)	15(24)	11(22)	15(24)
Span of chronology	1757-1998	1745-1998	1757-1998	1745-1998
Standardized chronology				
Fitting curves (line, spline) ^a	0,150	0,150	0,120	0,120
Mean sensitivity	0.12	0.15	0.03	0.02
Stand deviation	0.13	0.17	0.04	0.03
First-order auto-correlation	0.64	0.58	0.53	0.25
Mean correlation between trees ^b	0.14	0.26	0.11	0.07
Signal-to-noise ratio ^b	1.42	2.05	1.48	1.12
Variance in first eigen-vector(%) ^b	26	27	20	15

^a Number of trees for which data were fitted to linear regression lines and smoothing splines with a 50% frequency response cutoff of 66 years.

^b Calculated for the common intervals.

至翌年 4 月開始長新葉。實際進行相關分析，由 10 月休眠季節開始至隔年 9 月生長季節結束，對應於月平均溫度與月總降雨量共 24 個氣候自變量。反應函數對信賴區間、特徵向量與氣候參數反應較為敏感 (Blasing *et al.* 1983)。因此，考慮樹木生長與氣候之間的關係時，反應函數雖同時考慮樹木生長對多個氣候因子的反應，但是其迴歸係數的信賴區間常被估計得過窄，造成過分強調某些氣候因子的作用。相關函數的計算較簡單、易解釋，然而只考慮單個氣候因子與樹木的關係。因此在實際分析時，兩種方法均予採用。為樹輪寬度與最大密度對氣候因子的反應 1953-1995 ($n=42$) 期間，程式由 PRECON-K 執行 (Fritts 1994)。

4. 重建生育地氣候推估計算程式

將樹木徑向生長的訊息轉換成過去氣候的變化，是樹輪氣候學研究的主要目的。古氣候重建的步驟大致為：1. 尋找適當推估季節；2. 校準分析—找出氣候與樹輪寬度年表之間的反應方程式；3. 驗證分析—經交叉檢驗後，建立氣候的轉換方程式；4. 以建立的轉換方程式推估過去氣候 (Fritts, 1976；鄒佩珊, 1998)。

依據樹木徑向生長對氣候之反應，選擇適當推估季節，以不同季節組合，與寬度年表進行相關分析。對相關性高的季節組合，進一步做校準迴歸分析。迴歸方法有簡單迴歸法，就是將單個年表或將所有年表皆引進迴歸方程式，以最小平方估計各迴歸係數值；或是逐步迴歸法，即是將變異數大到一定顯著水準的因子引進方程式，剔除變異數不大的因子，直到只包含顯著因子。此外，還可考慮是否採用年表的主分量進行迴歸分析。

驗證分析是採用交叉驗證法 (cross verification)，有別於以往將氣象觀測記錄分成校準和驗證兩部份之獨立驗證法。此法是利用在校準分析時段內，捨棄某一年以組成新序列作迴歸分析，用所得的迴歸方程預測捨棄那年的值，依次捨棄分析時段內的每一年，便可得到一預測序列。檢查預測方程的迴歸係數是否在原校準分析中迴歸係數的兩個標準差之內，以驗證校準分析所建立的方程式是否穩定。

為確定推估值與實際值之相似性，通常以下述四種統計值來檢驗推估序列的可信度 (Fritts, 1976；Fritts *et al.*, 1990)：

1. 符號檢驗 (sign test)：

主要檢驗推估值和實際值相對於各自平均值之離差正負號是否一致，反應兩序列在低頻變化上的相似程度。對兩序列作一階的差值轉換，再進行符號檢驗，瞭解序列年際間高頻變化的一致性。

2. 乘積平均值檢驗 (product means test)：

將推估值與實際值相乘後，可得到二者符號一致的正值序列，其平均值為 m_1 ，標準差為 s_1 ，個數有 n_1 個；另外有符號不一致的負值序列，平均值為 m_2 ，標準差為 s_2 ，共有 n_2 個。以 t 檢驗兩序列的平均值是否有差別，可表示為：

$$t = \frac{|m_1| - |m_2|}{\sqrt{\frac{s_1^2}{n_1} + \frac{s_2^2}{n_2}}}$$

其中，自由度為 $n_1 + n_2 - 2$ ，當 t 值大於臨界值時，為通過顯著性檢驗；表示符號一致和不一樣的序列存在顯著不同。

3. 誤差縮減 (reduction of error；RE) 值。RE 值為：

$$RE = 1.0 - \frac{\sum_{i=1}^n (\bar{Y}_i - Y_i)^2}{\sum_{i=1}^n Y_i^2}$$

$\bar{Y}_i$ 和 Y_i 分別是驗證時段的實際值和推估值，與校準時段平均值之離差。RE 值的範圍一般在 1 和 1.0。等於 1 時，表示推估序列與實際序列完全相同；表示負值時，通常表示沒有相似性。在交叉驗證中，誤差縮減值為相關係數的平方。

4. 相關係數

量測推估序列和實際序列的線性相關係數。相關係數值越大，推估的古氣候序列越接近實際序列。

III、結果與討論

(I) 採樣點過去氣候之推估

選取不同海拔樹輪寬度特徵值年表與樹輪密度特徵值年表，對於反應函數與相關函數呈顯著相關之月份平均溫度與降雨量，建立轉換迴歸方程式。經過交叉檢驗後，推估生育地平均溫度包括春季、夏季與秋季溫度；夏季、秋季與冬季降雨量。生育地平均溫度的推估係由3-5月、9-10月份樹輪寬度年表；早材密度年表之2-3月份平均溫9月份早材寬度與2月份晚材寬度之推估。

1. 採樣點平均溫度的推估

不同海拔樹輪寬度推估之春季與秋季平均溫度，溫度變化的範圍在 2°C 的範圍內圖3(b)。圖3(a)是3個不同海拔之樹輪寬度年表的組合年表推估之春季與秋季溫度序列（實線），與鹿林山氣象觀測站之春季與秋季溫度實際觀測值（點線）之相關性係數（春季 $r = 0.41$ ）（秋季 $r = 0.45$ ）。圖3(b)生育地推估之

春季與秋季溫度序列。

夏季溫度主要是由最小密度所建立之年表推估。春季溫度主要是由早材密度建立之年表推估；樹輪密度特徵值對溫度反應之敏感性較高，選擇密度年表推估春季與夏季地平均溫度可以獲得一定程度的解析度，圖4(b)顯示推估之春季與夏季平均溫度的變化範圍在 2°C 內，圖4(a)是由不同海拔之早材密度年表與最小密度年表的組合年表推估之春季與夏季溫度序列（實線），與鹿林山氣候觀測站之夏季溫度實際觀測值（點線）之相關性係數，分別為（ $r = 0.46$ 與 0.52 ）。圖4(b)推估之春季與夏季平均溫度可以發現，低溫期的變化分別為與由樹輪寬度年表推估之春季與秋季平均溫度變化相當一致。

2. 採樣點降雨量的推估

夏季降雨量主要由樹輪寬度所建立之年表推估；秋季降雨量主要由早材寬度所建立之年表推估，圖5(a)是不同海拔之樹輪寬度年表的組合年表推估之夏季降雨量序列（實線）及由早材寬度年表的組合年表推估之秋季降雨量序

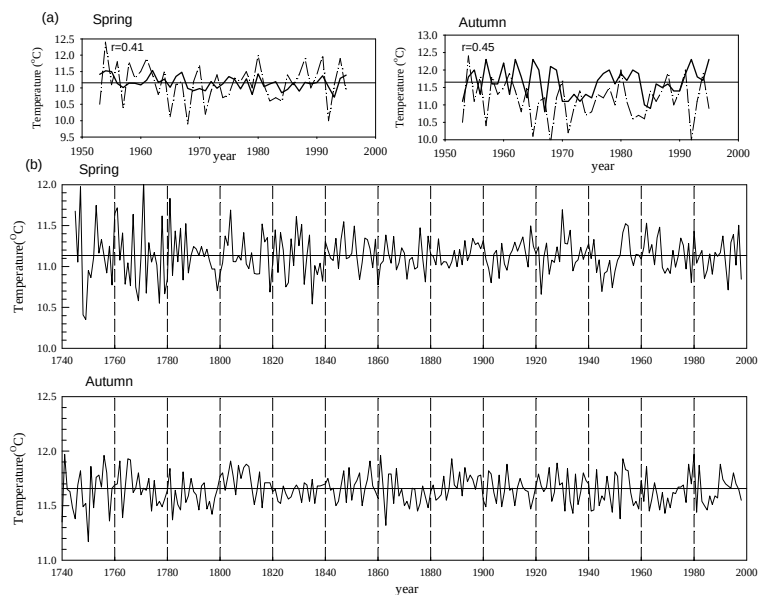


圖3 (a)生育地春季溫度與秋季溫度推估序列（實線），與氣象觀測值序列（虛線）之比較

(b)生育地春季溫度與夏季溫度推估序列（1740-1995年）

Fig. 3 (a) The estimation temperature of spring and autumn series (solid line) with weather observation data (dash line)

(b) The estimation temperature of spring and autumn series. (1740-1995)

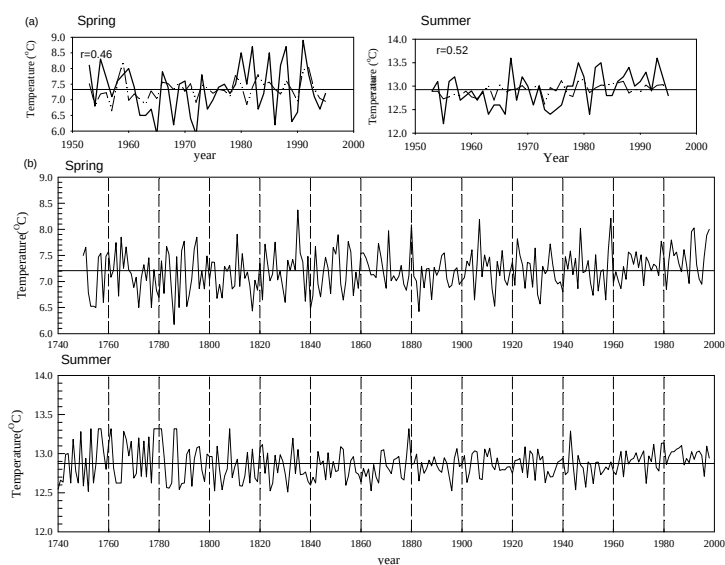


圖 4 (a)生育地春季溫度與夏季溫度推估序列（實線），與氣象觀測值序列（虛線）之比較

(b)生育地春季溫度與夏季溫度推估序列（1740-1995 年）

Fig. 4 (a)The estimation temperature of spring and summer series (solid line) with weather observation data(dash line)

(b)The estimation temperature of spring and summer series (1740-1995)

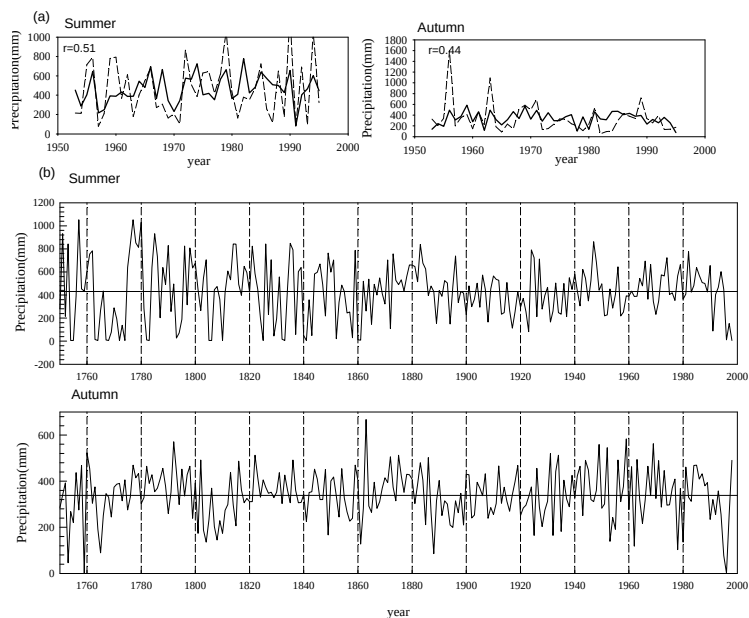


圖 5 (a)生育地夏季降雨量與秋季降雨量推估序列（實線），與氣象觀測值序列（虛線）之比較

(b)生育地夏季降雨量推估序列（1750-1995 年）

Fig. 5 (a)The estimation precipitation of summer and autumn series (solid line) with weather observation data(dash line)

(b)The estimation precipitation of summer and autumn series (1740-1995)

列（實線），與玉山氣候觀測站之夏季及秋季降雨量之實際觀測值（點線）之相關性係數（夏季 $r = 0.51$ ；秋季 $r = 0.44$ ）。圖 5(b)為推估之夏季與秋季降雨量序列。

冬季降雨量主要由晚材寬度所建立之年表推估，圖 6(a)是由不同海拔之晚材寬度年表的組合年表推估之冬季降雨量序列（實線），與玉山氣候觀測站之冬季降雨量之實際觀測值（點線）之相關性係數 $r = 0.45$ 。圖 6(b)為推估之冬季降雨量序列。

3. 以 5 年滑動平均法，探討過去 245 年溫度的變動

本研究以樹輪寬度特徵值推估生育地之秋季的溫度，樹輪密度特徵值推估生育地夏季與春季的溫度，相對於為基準溫度以 1750-1996 年平均值的 5 年滑動平均溫度的曲線，探討生育地過去溫度的變動。

圖 7(a)為推估之夏季溫度，其變動如下：1755-1780 年偏暖時期；1780-1870 年偏低溫時期；1870-1930 年平穩時期；1930-1960 年偏低溫時期；1960 年以後溫度逐漸上升。

圖 7(b)推估溫度春季的變化，與夏季推估溫度之變化趨勢稍有不同，1750-1760 年低溫期；1760-1770 年偏溫暖時期；1770-1830 年低溫期；1830-1840 年春季溫度又明顯的回暖；

1840-1850 年偏低溫期；1850-1870 年溫度很明顯的變暖；1870-1900 年溫度偏低期；1900-1960 年溫度每間隔 10 年，溫度變暖或變冷較有規律，1900-1910 年的偏暖期，1910-1920 年的偏低溫期、1920-1925 年溫度又回暖與 1930-1940 年的溫度偏低。1960 年以後春季的溫度有逐漸上升的趨勢。

圖 8(b)表示那個季節各時期溫度的變化：1750-1770 年偏溫暖時期；1770-1800 年偏低溫時期；1800-1810 年偏暖時期；1815-1845 年偏低溫時期；1845-1865 年偏暖時期；1870-1885 年偏低溫期；1885-1900 年偏暖時期；1900-1950 年平穩期；1960-1970 年明顯偏低時期；1980-1985 年溫度有明顯偏低的趨勢。

將推估之春季、夏季與秋季 3 個季節合併之平均溫度如圖 8(a)所示，各時期的變動如下，1755-1770 年溫度偏暖；1770-1830 年溫度又偏冷時期。全球大部份的區域在 1790-1825 年被認為是沒有夏季的時期（ref）中可以得到明顯的印證。1830-1835 年又有回暖的趨勢；1835-1840 年偏冷期；1845-1850 年有回暖的趨勢；1850-1870 年平穩期，溫度變動不大；1870-1890 年偏低期；1890-1930 年平穩期；1930-1950 年溫度又偏低；1950 年以後溫度有逐漸上升的趨勢。

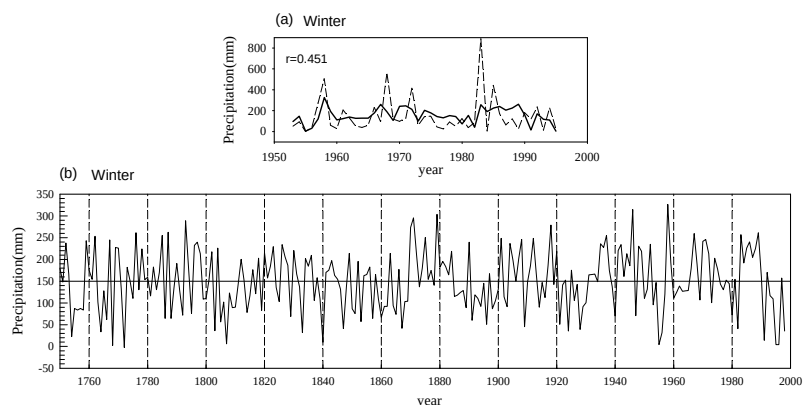


圖 6 (a)生育地冬季降雨量推估序列（實線），與氣象觀測值序列（虛線）之比較

(b)生育地夏季降雨量推估序列（1750-1995 年）

Fig. 6 (a) The estimation precipitation of winter series (solid line) with weather observation data (dash line)

(b) The estimation precipitation of winter series. (1740-1995)

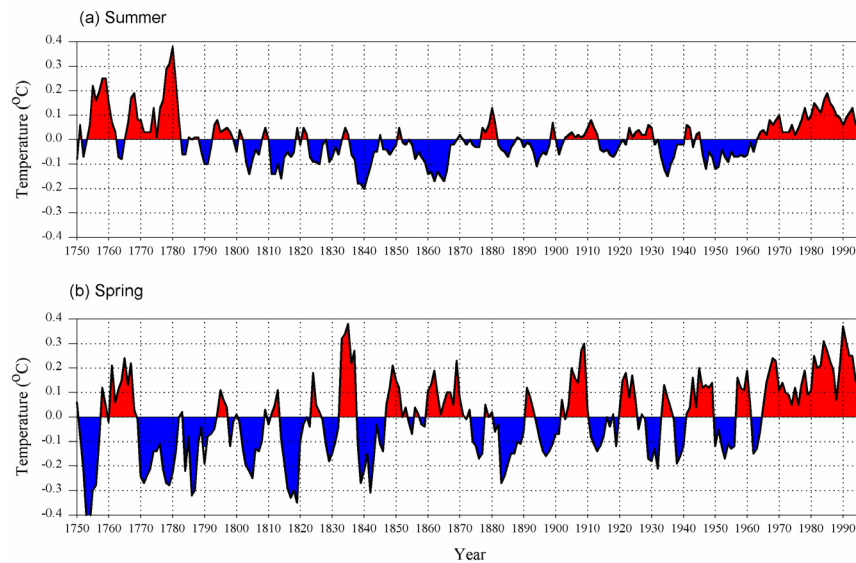


圖 7 推估生育地之夏季平均溫度(a)與春季平均溫度(b)，相對於基準溫度為 (1750-1996) 平均值的 5 年滑動平均曲線。夏季平均溫度(a)為 12.87°C；春季平均溫度(b)為 7.21°C。紅色表示偏暖期，藍色代表低溫期

Fig. 7 The estimation means temperature of summer (a) and spring (b) contrastive basis during (1750-1996) 5 year moving average temperature curve. The summer average temperature is 12.87°C and spring average temperature is 7.21°C

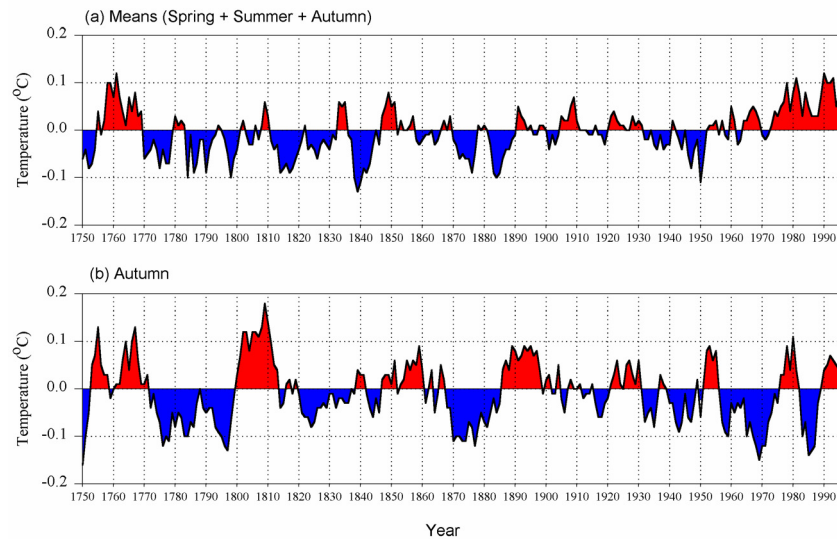


圖 8 推估生育地之 3 個季節 (春季、夏季及秋季) 平均溫度(a)與秋季平均溫度(b)，相對於基準溫度為 (1750-1996) 平均值的 5 年滑動平均曲線。3 個季節平均溫度(a)為 10.72°C；秋季平均溫度(b)為 11.66°C。紅色表示偏暖期，藍色代表低溫期

Fig. 8 The estimation 3 seasonal means temperature of spring , summer and autumn (a) and autumn (b) contrastive base during (1750-1996) 5 year moving average temperature curve. The seasonal average temperature is 10.72°C and autumn average temperature is 11.66°C

4. 以 5 年滑動平均，探討礫樣點過去 245 年降雨量的變動

採樣點降雨量主要推估之夏季、秋季與冬季之降雨量顯示，夏季及秋季為採樣點主要之濕季，冬季則為乾季。以下為 5 年滑動平均值，探討各季節乾濕期的變動。

圖 9(a)為推估夏季降雨量，生育地各時期乾濕的變動如下。1750-1760 年為偏濕期；1765-1775 年明顯少降雨之偏乾期；1775-1790 年為偏濕期，尤其以 1775-1780 年為明顯之多雨期；1790-1795 年為偏乾期。19 世紀之 1795-1805 年又為偏濕期；1805-1810 年為偏乾期；1810-1820 年為偏濕期；1820-1870 年又明顯偏乾，但 1835-1837 年與 1845-1850 年有短暫的濕期；1870-1890 年又明顯偏濕期。1890-1910 年降雨量減少，轉為輕微偏乾期；1910-1940 年為明顯偏乾期，但 1925-1927 年有短暫的濕期；1940-1950 年降雨量又增加，變為偏濕期；1950-1960 年降雨量驟然減少，轉變為偏乾時期；1990 年以後降雨量減少，轉為偏乾時期。

圖 9(b)顯示推估之秋季降雨量，各時期乾濕的變動如下。1750-1770 年降雨量較少，偏乾期；1760-1770 年與夏季推估的降雨量相同，有偏乾的趨勢；1770-1800 年降雨量較多，轉為偏濕期。1800-1820 年生育地降雨量減少，轉變為偏乾的趨勢；1820-1885 年主要為偏濕期。其中 1850-1860 年降雨量有較少的趨勢。1885-1930 年偏乾期，其中 1910-1920 年間降水量維持在平均值；1930-1950 年偏濕期；1950-1960 年明顯的偏乾期；1960-1975 年偏濕期，1975-1980 年有明顯的偏乾期；1990 年以後降雨量減少，逐漸偏乾。

圖 10(a)為推估採樣點冬季降雨量，生育地各時期乾濕的變動如下。1750-1775 年偏乾期，僅在 1760 年偏濕；1775-1800 年偏濕期，僅在 1790 年較偏乾。1800-1820 年為偏乾期，而 1820-1830 年則為偏濕期；1830-1870 年大部份為偏乾期，僅在 1835 年及 1845 年較濕，略呈偏濕；1870-1885 年則為明顯的偏濕期，但在 1885-1900 年則為偏乾期。1900-1920 年

為偏濕期，僅在 1915 年略呈偏乾期；1920-1930 年為偏乾期；1930-1950 年則為偏濕期；1950-1960 年為偏乾期；1960-1980 年大部份為偏濕期，僅在 1960-1965 年期間及 1980 年為偏乾期；1980-1990 年為明顯的偏濕期，但自 1990 年後則呈偏乾期。

5. 採樣點與台南及全球近百年來平均溫度變動差異

採樣點推估之春季、夏季與秋季合併之 3 個季節的平均溫度做 5 年滑動平均，採樣地與台南地面氣象觀測站溫度變化趨勢比較。台南氣象站之實際觀測值（汪中和等，1996），自 20 世紀初到 1995 年世紀末溫度上升約 1.2℃（圖 11b），溫度上升最快的時期為 1920-1940 年，在 20 年間溫度大約上升 1℃，1950 年代溫度明顯的下降，在 1960 年左右稍微回升，但基本上低溫持續至 1980 年代初期才又迅速上升。1980 年之後，仍有小幅度起伏，但大致上維持上升的趨勢，1995 年達到最高溫。生育地推估之 3 個季節平均溫度的變動曲線（圖 11a）顯示，溫度上升最快的時期在 1950-1990 年之間，在 40 年間上升約 0.25℃，與台南氣象觀測站溫度上升的值相同，同時也與全球（圖 12b）之 5 年滑動平均溫度在 1950-1990 年上升的趨勢相近。

採樣地推估期之 5 年滑動平均值與台南氣象站 5 年滑動平均值之相關係數 $r = 0.31$ ；全球 5 年滑動平均值（圖 12b）與採樣地推估值反應相當一致，相關係數 $r = 0.34$ 。

IV、結論

本研究以 soft x-ray 微密度計法分析樹輪 8 個特徵值，x-ray 底片樹輪影像可對偽年輪作精確比對，進一步得到精確定年雲杉年表。樹輪 8 個特徵進入樹輪氣候學的方法解析，較傳統僅用單一樹輪寬度變數與氣候因子進行分析，獲得更多有關樹輪對氣候反應的資訊；這些資訊包括形成層分裂與分化所代表的生理

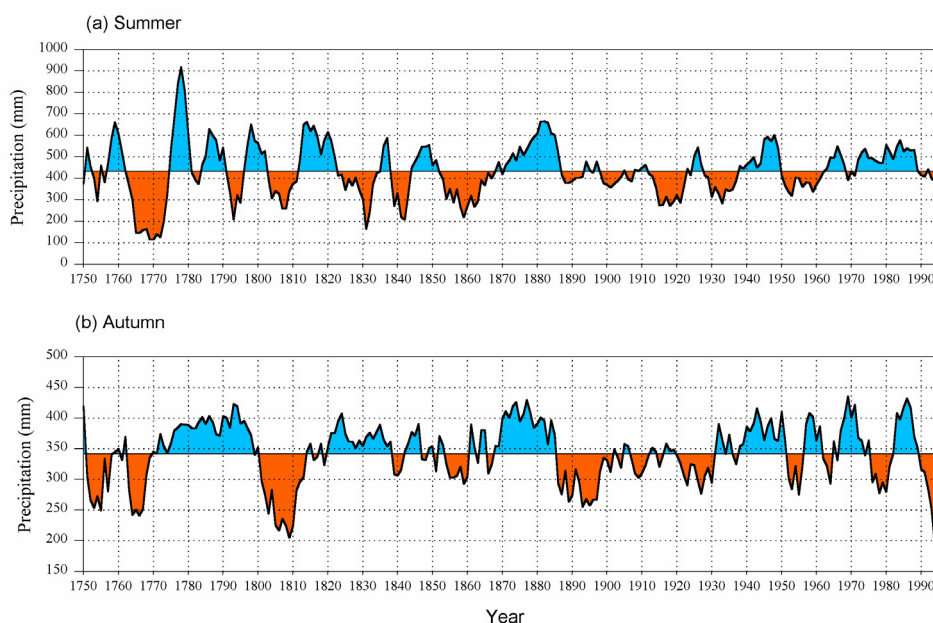


圖 9 推估生育地之夏季降雨量(a)與秋季降雨量(b)之 5 年滑動平均曲線。水藍色表示偏濕期，土色代表偏乾

Fig. 9 The estimation site precipitation of summer (a) and autumn (b) 5 year moving average temperature curve

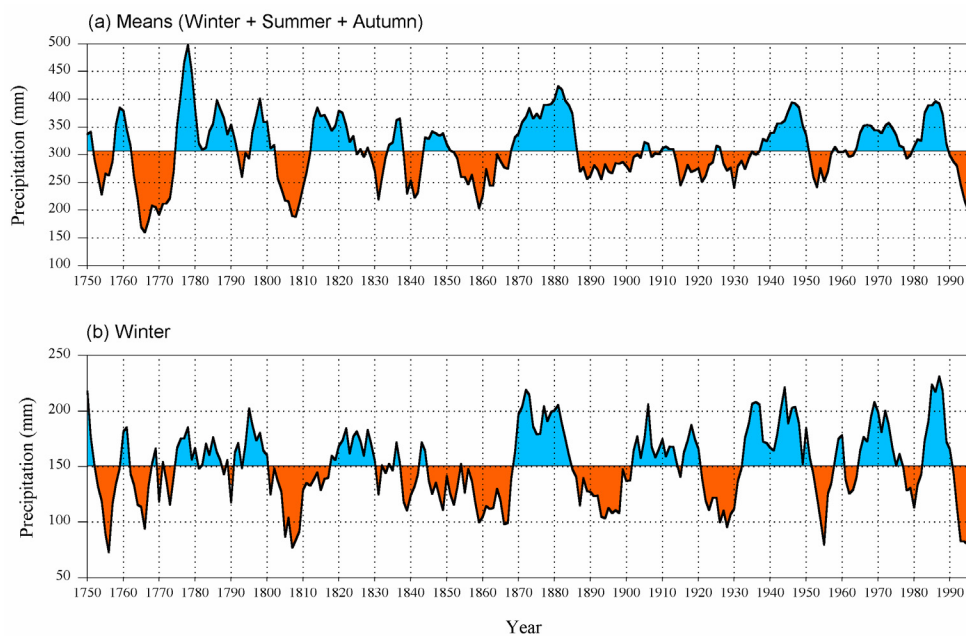


圖 10 推估生育地之 3 個季節平均降雨量(a)與冬季降雨量(b)之 5 年滑動平均曲線。水藍色表示偏濕期，土色代表偏乾

Fig. 10 The estimation 3 seasonal average recipitation (a) and winter(b) 5 year moving average temperature curve. The blue colors show wet and The brown colors show dry

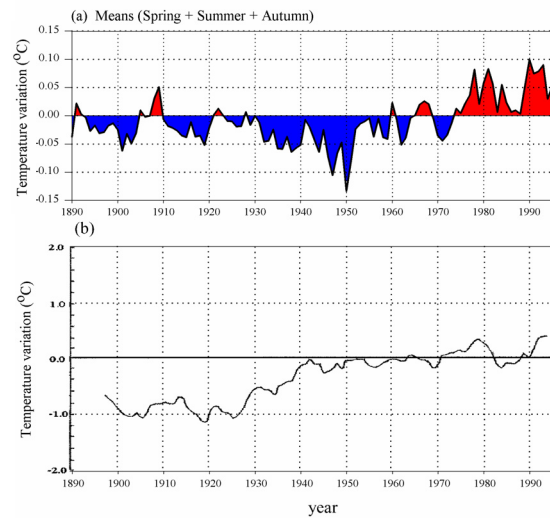


圖 11 推估生育地 3 個季節（春季、夏季與秋季）合併之平均溫度變動趨勢（自 1890-1996 年溫度平均上升尺度 0.25°C ）(a)，與台南氣象站溫度變動趨勢（自 1890-1996 年溫度平均上升尺度 1°C ）(b)（汪中和等，1996）之比較。基準溫度係 1951-1980 年平均溫度之 5 年滑動平均值

Fig. 11 The estimation 3 seasonal (spring, summer and autumn) trending combine means temperature (from means temperature 1890-1996 increasing 0.25°C) (a) with Tainan weather station trending (from means temperature 1890-1996 increasing 1°C) (b) (wang et al. 1996). The base temperature from 1951-1980 means temperature 5 moving average temperature

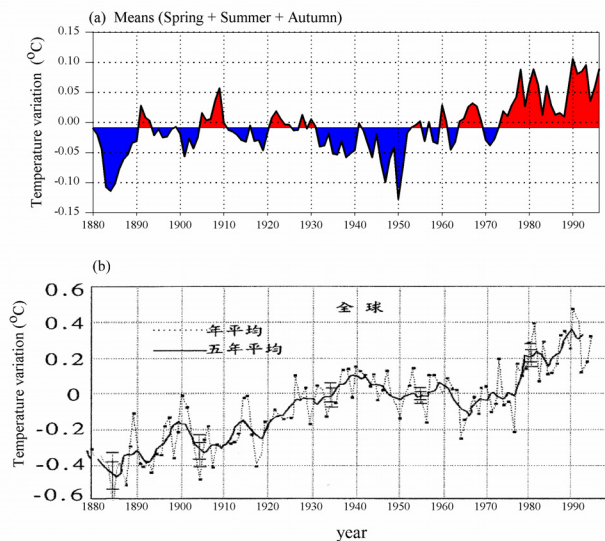


圖 12 推估生育地 3 個季節（春季、夏季與秋季）合併之平均溫度變化趨勢（自 1880-1996 年溫度平均上升尺度 0.25°C ）(a)，與全球溫度變化趨勢（自 1880-1996 年溫度平均上升尺度 0.8°C ）(b)（US National Science and Technology Council，1996）之比較。基準溫度係 1950-1981 年平均溫度之 5 年滑動平均值

Fig. 12 The estimation 3 seasonal (spring, summer and autumn) trending combine means temperature (from means temperature 1890-1996 increasing 0.25°C) (a) with Tainan weather station trending (from means temperature 1890-1996 increasing 0.8°C) (b) (US National Science and Technology Council, 1996). The base temperature from 1951-1981 means temperature 5 moving average temperature

生態上的意義，樹輪寬度與形成層細胞分裂有關，樹輪密度與形成層細胞分化有關數，同時形成層細胞的分裂與分化速度與形成受到氣候環境的影響。

對季節平均溫度反應，本研究獲得樹輪寬度年表指數反應春季與秋季溫度序列，相關係數分別為 $r = 0.41$ 與 0.45 ；早材密度年表與最小密度年表指數反應春季與夏季溫度序列，相關性係數分別為 $r = 0.46$ 與 0.52 。

對季節降雨量反應，樹輪寬度年表指數反應夏季降雨量序列相關係數為 $r = 0.51$ ；早材寬度年表指數反應秋季降雨量序列相關係數為 $r = 0.44$ ；晚材寬度年表指數反應冬季降雨量序列相關係數為 $r = 0.45$ 。

樹輪特徵值推估之採樣地平均溫度變化曲線，與實測的變動趨勢年間之變動有較大的一致性，但是在長期（1890-1940 年）實際增溫的趨勢，推估的溫度來顯現，值得進一步探討研究。

V、引用文獻

- 陳正祥（1961）台灣地誌 敷明產業地理研究所報告 94(3)：909-935。
- 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。國立台灣大學碩士論文 p20-25。
- 蔣先覺（1994）台灣高山森林土壤形態性質與分類。台灣省林業試驗所出版。
- 楊金昌、王亞男、姜家華、賴玉芳（1999）塔塔加地區台灣雲杉、台灣鐵杉及玉山箭竹物候學之初步研究。中華林學季刊 31(3)：251-263。
- 詹明勳、王亞男、林法勤、王松永、姜家華（1999）軟 X-射線-微密度計應用於台灣雲杉立木生長輪寬度及密度曲線分析之探討。中華林學季刊，32(4)：555-567。
- 詹明勳（1999）塔塔加地區天然生台灣雲杉樹輪氣候學之研究。國立台灣大學博士論文，pp.152。

- 詹明勳、王亞男、姜家華（2000）臺灣中部塔塔加地區氣候因子對臺灣雲杉立木徑向生長輪寬度與最大密度之關係。中華林學季刊 33(1)：23-36。
- 詹明勳，王亞男，王松永（2004）軟 X-射線-影像分析法應用於天然林台灣櫟、樟樹、烏心石樹輪寬度及密度分析之研究。中華林學季刊，37(4)。
- 汪中和、柳中明（1996）全球氣候變遷統計資料。全球環境變遷中心出版。
- 鄒佩珊（1998）台灣地區近五百年的氣候變化：樹輪寬度的證據。國立台灣大學博士論文 pp.181。
- Blasing, T. J., D. N. Duvick, and E. R. Cook (1983) Filtering the effects of competition from ring-width series. *Tree-Ring Bulletin* 43: 19-30.
- Briffa, K. R., P. D. Jones, and F. H. Schweingruber (1988) Summer temperature patterns over Europe: a reconstruction from 1750 A.D. based on maximum latewood indices of conifers. *Quat. Res.* 30: 36-52.
- Briffa, K. R. (1995) Interpreting high-resolution proxy climate data - The example of dendroclimatology. In Storch, H. von, and Navarra, A., eds., *Analysis of Climate Variability: Applications of Statistical Techniques*. Springer-Verlag, Berlin: 77-94.
- Box, G. E., and G. M. Jenkins (1976) *Time Series Analysis: forecasting and control* Holden-Day, San Francisco. pp. 575.
- Cleaveland, M. K. (1986) Climatic response of densitometric properties in semiarid site tree rings. *Tree-Ring Bulletin* 46: 13-29.
- Cook, E. R. (1985) A time series analysis approach to tree-ring standardization. *Tree-Ring Laboratory, Lamont-Doherty Geological Observatory, Palisades, New York*, 171 p.
- Cook, E. R. and W. K. Peter (1981) The

- smooth spline: a new approach to standardizing forest interior tree-ring width series for dendroclimatic studies. *Tree-Ring Bulletin* 41, 45-53.
- Fritts, H. C. (1976) Tree rings and climate. Academic Press, London, U. K.
- Fritts, H. C. (1994) PRECON-K version 5.11. Dendro Power, Tucson, Ariz.
- Holmes, R. L. (1994) Dendrochronology Program Library User's Manual. Laboratory of Tree-Ring Research, University of Arizona, Tucson.
- Holmes, R. L., R. K. Adams and H. C. Fritts (1986) Tree-Ring chronologies of Western North America: California, Eastern Oregon and northern Great Basin with procedures used in the chronology development work including users manuals for computer programs COFECHA and ARSTAN. Laboratory of Tree-Ring Research, University of Arizona, Tucson.
- Hughes, M. K. (1995) Role of dendrochronology in PAGES. In Paleoclimate and environmental variability in Austral-Asian transect during the past 2000 years. Proceedings of the 1995 Nagoya IGBP-PAGES/PEP-II Symposium, 287 Nov.-1 Dec. 1995, Nagoya, Japan. Edited by T. Mokami, E. Matsumoto, S. Ohta, and T. Sweda. Nagoya University, Nagoya, Japan. pp.39-44.
- Kaennel, M., and F. H. Schweingruber (1995) Multilingual glossary of dendrochronology. Paul Haupt Publishers, Bern, Switzerland.
- Kienasr, F., F. H. Schweingruber, O.U. Braker, and E. Schar (1987) Tree-ring studies on conifers along ecological gradients and the potential of single-year analyses. *Can. J. For. Res.* 17: 683-696.
- Kobayashi, O., K. Fukazawa, and J. Ohtani (1995) Densitometric analysis on tree rings of non-vital conifers growing in Hokkaido, Japan. In Tree Rings, from the Past to the Future. Proceedings of the International Workshop on Asian and Pacific Dendrochronology, 4-9 Mar. 1995, Tsukuba, Japan. Edited by S. Ohta, T. Fujii, N. Okada, M. K. Hughes, and D. Eckstein. For. For. Prod. Res. Inst. Sci. Meet. Rep. 1: 58-63.
- Kojo, Y. (1987) A dendrochronological study of *Cryptomeria japonica* in Japan, *Tree-Ring Bull.* 47: 1-21.
- Kuo P. C. (1961) The effects of time of transplanting on rooting ability of China fir and *Cryptomeria* seedlings. Memoirs of the College of Agriculture, National Taiwan University. Vol. 6, No. 1 Taipei, Taiwan, China.
- Meko, D., E. R. Cook, D. W. Stahle, C. W. Stockton, and M. K. Hughes (1993) Spatial patterns of tree-growth anomalies in the United States and southeastern Canada. *J. Climate*, 6: 1773-1786.
- Nobori, Y. (1989) Shin-Nenrin Kaiseki Program (Tree Ring Analysis Program) ver.2.1. Oij co. Institute of forestry Improvement. Kuriyama, Hokkaido.
- Sander C., D. Eckstein, J. Kyncl and J. Dobry (1995) The growth of spruce (*Picea abies*) in the Krkonoše-(Giant) Mountains as indicated by ring width and wood density. *Ann. Sci. For.* 52: 401-410.
- Schweingruber, F. H., H. C. Fritts, O. U. Braker, L. C. Drew, and E. Schar (1978) The X-ray technique as applied to dendrochronology. *Tree-Ring Bull.* 38: 61-91.
- Schweingruber, F. H. (1988) Tree rings: Basics and Applications of Dendrochronology, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, Netherlands. pp.276.
- Schweingruber F. H. (1993) Trees and Wood in Dendrochronology. Springer-Verlag pp.

- 402.
- Stokes, M. A., and T. L. Smiley (1968) An Introduction to Tree-ring Dating. The University of Arizona Press, Tucson, Arizona. pp. 73.
- Su, H. J. (1984a) Studies on the climate and vegetation type of the natural forest in Taiwan (I). Analysis of the variation in climatic factors. Quart. Journ. Chin. For., 17(4): 57-73.
- Su, H. J. (1984b) Studies on the climate and vegetation type of the natural forest in Taiwan (II). Altitudinal vegetation zones in the relation to temperature gradient. Quart. Journ. Chin. For., 17(4): 57-73.
- Sweda, T. (1994) Dendrochronological reconstruction for the last submillennium in Central Japan. Terr. Atmos. Ocean. Sci. 5: 431-442.
- Rinn, F. (1996) TSAP Time series analysis and presentation. Heidelberg, Germany pp.263.
- Tsou, P. S. and T. K. Liu (1996) Temperature in Taiwan during the last 300 years as reconstructed from tree-ring records. In Dean, J. S., Meko, D. M., and Swetnam, T. W., eds, *Tree Rings , Environment , and Humanity*. Radiocarbon 1996, Department of Geosciences, The University of Arizona Tucson:325-334.
- Yasue, K., R. Funada , K. Fukazawa, and J. Ohtani (1997) Tree-ring width and maximum density of *Picea glehnii* as indicators of climatic changes in northern Hokkaido, Japan. Can. J. For. Res. 27(12): 1962-1970.