



國立臺灣大學生農學院森林環境暨資源系

碩士論文

School of Forestry and Resource Conservation

College of Bioresources and Agriculture

National Taiwan University

Master Thesis

以臺灣黃杉早材重建過去 200 年來七家灣溪溪流量
A Reconstruction of Chichiawan Stream Streamflow for
the Past 200 Years Using *Pseudotsuga wilsoniana*
Earlywood Width

鄭可風

KE-FENG Cheng

指導教授：關秉宗教授

Advisor : Dr. Biing T. Guan

中華民國 109 年 1 月

January, 2020

誌謝



終於!!!完成論文了!!!花了比一般來說更長的時間,過程中總是對自己懷疑,雖然總是笑著但還是有很多悲觀的念頭。真的非常感謝關老師,在我轉換領域來到森林系的時候給我很多的幫助,不管是實驗的過程或是論文的撰寫都給了我很多的觀念跟建議,最後的論文也花非常多時間幫助我修改,也給了我很大的空間去學習不同的東西,能在森林系遇到關老師真的非常幸運。也非常感謝願意來當口委的魏國彥老師跟黃婉如老師,口試中給我許多鼓勵跟建議,讓我收穫良多。還有感謝臺灣電力公司提供樣區附近的流量測站跟氣候站資料供我在研究上使用,在我提出資料有部分問題時,也花時間幫忙我,真的十分感謝。

來到森林系遇到各式各樣的人們,可以感受到這裡是個包容性很高的系所,所以即使一開始有很多不瞭解的,也總是有很多人幫助。特別感謝 217 的大家,實驗室大家都很互相照顧,謝謝梁小姐在各種方面的事情都很熱心的幫助我,謝謝阿焜在實驗上的指導、還有無從說起的各種幫助和總是帶甜點零食餵食大家,謝謝彥竹跟多加能一起共度實驗室的時光,有人能互相陪伴聊天詢問都是非常幸福的事,也非常謝謝仲霖不只在實驗上幫忙我,在很多事情上也常常麻煩你幫忙。

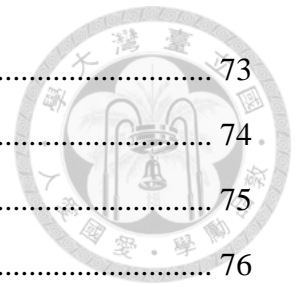
謝謝鹿老師、豐丞老師、增毅老師、小葉老師與靜峯老師在森林系對我的指導跟關心。謝謝星凡老師、樹森老師跟清福老師幫助我來到台大森林系。謝謝從以前開始就一直陪伴跟照顧我各種情緒的欣雅、憶萍、家尉、正涵、怡孜跟柔程。謝謝常常來 217 找我玩找我吃飯,讓我不邊緣的聿筠、嘉寶跟安怡。謝謝閑哥與景崧偶爾的邀約吃飯,可以一起聊天紓壓吃好料非常開心。也謝謝系排的大家讓我特別在森林系有個歸屬感,還有謝謝每個在森林系曾經照顧、幫助跟關心我的學長姊、同學跟學弟妹,真的有太多太多人的幫忙很抱歉無法一一點名。最後真的非常謝謝我的家人:爸爸、媽媽跟兩位姐姐,不只讓我能無憂無慮的讀書外,也總是在我沮喪的時候安慰我,讓我不慌張,謝謝你們總是以我為榮,我愛你們!

目錄



目錄	i
圖目錄	iii
表目錄	vi
中文摘要	1
Abstract	2
第一章 前言	4
第二章 文獻回顧	8
2.1 樹輪的形成與變異	8
2.2 樹木年代學原理	9
2.3 樹木氣候學與樹木水文學的演進	13
2.4 遙相關	18
第三章 材料與方法	26
3.1 研究材料與採樣地點	26
3.2 武陵地區氣候與流量資料	30
3.3 樣本採集、處理與定年	33
3.4 集成經驗模態分解法建立輪寬年表	35
3.5 重建七家灣流量指標	40
3.6 遙相關場域分析	43
第四章 結果	44
4.1 臺灣黃杉樹輪寬度年表	44
4.2 臺灣黃杉年表與流量因子間相關性分析	45
4.3 模型建立檢測	49
4.4 七家灣溪流量重建	53
4.5 七家灣溪標準化流量指標重建	64
第五章 討論	73

5.1 流量與標準化流量指標重建比較	73
5.2 濕季末期對早材生長影響	74
5.3 異常流量事件	75
5.4 遙相關對臺灣中部氣候影響	76
5.5 七家灣溪流量因子重建比較	79
第六章 結論	82
參考文獻	84
附錄	102



圖目錄



圖 1、針葉樹樹幹截面.....	8
圖 2、交叉定年示意圖.....	11
圖 3、前一年五到當年四月平均海平面氣壓(Sea level pressure, SLP)與南方振盪指數在 1958–1998 年期間的相關性場域分析.....	20
圖 4、正常、El Niño 與 La Niña 氣候示意圖.....	21
圖 5、El Niño 與 La Niña 海面冷熱溫度分布.....	21
圖 6、太平洋十年際振盪分布範圍與時間變化.....	23
圖 7、太平洋十年際振盪暖相位時，異常循環示意圖.....	23
圖 8、全世界一月氣壓圖.....	25
圖 9、研究方法流程圖.....	26
圖 10、臺灣黃杉在臺灣之分布.....	27
圖 11、臺灣黃杉樹形、樹葉、樹皮與毬果示意圖.....	28
圖 12、臺灣黃杉採樣地點、七家灣溪流量測站與環山測候站地點圖.....	29
圖 13、環山測候站平均月降雨量與月均溫.....	31
圖 14、七家灣溪流量測站 1967–2015 月流量金鬚圖.....	31
圖 15、樹芯初步定年標示圖.....	34
圖 16、經驗模態分解法篩選過程.....	37
圖 17、經驗模態分解法分解結果.....	37
圖 18、臺灣黃杉輪寬集成經驗模態分解法分解圖.....	39
圖 19、臺灣黃杉樹芯樣本數量累積.....	45
圖 20、臺灣黃杉早材內秉模態函數(Intrinsic mode functions, IMF) IMF1-3 年表 20 年低通濾波之結果.....	47
圖 21、臺灣黃杉早材 IMF1-3 年表之多正交窗口頻譜.....	47

圖 22、臺灣黃杉早材 IMF1-3 與七家灣溪流量(Streamflow, SF)間的 26 年移動平均相關性.....	52
圖 23、臺灣黃杉早材 IMF1-3 與七家灣標準化溪流量指數(Standardized Streamflow Index, SSFI)間的 26 年移動平均相關性.....	53
圖 24、以臺灣黃杉早材 IMF1-3 重建七家灣溪流量在 1968–2009 (2013)期間分期驗證結果.....	54
圖 25、以臺灣黃杉早材 IMF1-3 重建 1785–2009 (2013)之前一年九月至當年二月七家灣溪流量(SF _{SF})與前一年九月至當年三月七家灣溪流量(SF _{SM}).....	55
圖 26、以臺灣黃杉早材 IMF1-3 重建 1785–2009 (2013)之七家灣 SF _{SF} 與 SF _{SM} 距平序列 20 年低通濾波結果與均方根誤差所建立之區間.....	56
圖 27、觀測及重建七家灣 SF _{SF} 與海面溫度(Sea surface temperature, SST)在 1968–2009 期間之相關性場域分析.....	58
圖 28、觀測及重建七家灣 SF _{SF} 與 SST 在 1968–2013 期間之相關性場域分析.....	59
圖 29、觀測及重建七家灣 SF _{SM} 與 SST 在 1968–2009 期間之相關性場域分析.....	59
圖 30、觀測及重建七家灣 SF _{SF} 與 SLP 在 1968–2009 (2011)期間之相關性場域分析.....	61
圖 31、觀測及重建七家灣 SF _{SM} 與 SLP 在 1968–2009 期間之相關性場域分析.....	62
圖 32、觀測及重建七家灣 SF _{SF} 與 SLP 在 1968–2009 (2013)期間之相關性場域分析.....	62
圖 33、觀測及重建七家灣 SF _{SM} 與 SLP 在 1968–2009 期間之相關性場域分析.....	63
圖 34、觀測之七家灣 SF _{SF} 及 SF _{SM} 與 CRU TS 雨量在 1968–2013 期間之相關性場域分析.....	63
圖 35、環山測候站九至十月平均雨量在 1952–2017 期間與九到十月的 SLP 之相關性場域分析.....	63
圖 36、以臺灣黃杉早材 IMF1-3 重建七家灣 SSFI _{SF} 在 1968–2009 (2013)期間之分	

期驗證法結果.....	65
圖 37、以臺灣黃杉早材 IMF1-3 重建七家灣 SSFI _{SF} 乾濕事件發生頻率.....	66
圖 38、以臺灣黃杉早材 IMF1-3 重建 1785–2009 (2013)之七家灣 SSFI _{SF}	67
圖 39、觀測及重建前一年九月至當年二月七家灣標準化溪流量指標(SSFI _{SF})與 SST 在 1968–2009 期間之相關性場域分析.....	69
圖 40、觀測及重建七家灣 SSFI _{SF} 與 SST 在 1968–2013 期間之相關性場域分析	69
圖 41、觀測及重建七家灣 SSFI _{SF} 與 SLP 在 1968–2009 (2011)期間之相關性場域 分析.....	71
圖 42、觀測及重建七家灣 SSFI _{SF} 與 SLP 在 1968–2009 (2013)期間之相關性場域 分析.....	72
圖 43、觀測七家灣 SSFI _{SF} 與 CRU TS 雨量在 1968–2013 期間之相關性場域分析	72
圖 44、以臺灣黃杉早材重建七家灣 SF _{SF} 及 SF _{SM} 與重建 SSFI _{SF} 之比較.....	73
圖 45、印度洋增暖影響長江中下游地區冬天降雨增加示意圖.....	79
圖 46、以臺灣黃杉早材重建七家灣之 SSFI _{SF} 與 Guan et al. (2018a)所重建七家灣 之 SSFI _{OF} 比較.....	80
圖 47、以臺灣黃杉早材重建七家灣之 SF _{SF} 及 SF _{SM} 與 Guan et al. (2018a)所重建 七家灣之 SSFI _{OF} 比較.....	81

表目錄



表 1、標準化溪流量指數(Standardized Stream Flow Index, SSFI)等級分類	32
表 2、臺灣黃杉早材與晚材對應內秉模態函數(Intrinsic mode functions, IMF)間的 相關性	40
表 3、臺灣黃杉樹輪輪寬相關統計表	44
表 4、臺灣黃杉全輪 IMF1-3 年表與七家灣溪流量(Streamflow, SF)及 SSFI 間最高 相關性	48
表 5、臺灣黃杉早材 IMF1-3 年表與七家灣 SF 及 SSFI 間最高相關性	48
表 6、臺灣黃杉校正晚材 IMF1-5 年表與七家灣 SF 及 SSFI 間最高相關性	49
表 7、依據臺灣黃杉早材 IMF1-3 所建立在 1968–2009 期間之前一年九月至當年 二月七家灣 SF (SF_{SF})線性模型分期驗證檢測	50
表 8、依據臺灣黃杉早材 IMF1-3 所建立在 1968–2013 期間之七家灣 SF_{SF} 線性模 型分期驗證檢測	51
表 9、依據臺灣黃杉早材 IMF1-3 所建立在 1968–2009 期間之前一年九月至當年 三月七家灣 SF (SF_{SM})線性模型分期驗證檢測	51
表 10、依據臺灣黃杉早材 IMF1-3 所建立在 1968–2009 期間之前一年九月至當 年二月七家灣 SSFI ($SSFI_{SF}$)線性模型分期驗證檢測	51
表 11、依據臺灣黃杉早材 IMF1-3 所建立在 1968–2009 期間之七家灣 $SSFI_{SF}$ 線 性模型分期驗證檢測	52

中文摘要



臺灣在水文議題上，多以觀測流量進行評估與研究。然而，短時間的紀錄僅能得知頻率較高的乾濕事件變異，無法瞭解低頻乾濕趨勢變異，因此本研究將針對樹輪與水文的關係進行研究。本研究延伸前人對於七家灣溪流量的研究，於更靠近七家灣溪的樣區取樣，加上更長流量紀錄的基礎下，以臺灣黃杉(*Pseudotsuga wilsoniana* Hayata)樹輪輪寬重建溪流量(Streamflow, SF)與標準化溪流量指數(Standardized Streamflow Index, SSFI)。本研究以 COFECHA 軟體檢驗校正定年，篩選出 72 根樹芯，並以集成經驗模態分解法(Ensemble Empirical Mode Decomposition)分別建立早材、晚材與全輪年表。分析年表與 SF 及 SSFI 間的相關性，最後以早材重建 1785–2009 與 1785–2013 年前一年九到當年二月的七家灣溪流量(SF_{SF})與 SSFI (SSFI_{SF})，和 1785–2009 年前一年九到當年三月的七家灣溪流量(SF_{SM})。本研究也將觀測及重建的七家灣 SF_{SF}、SF_{SM} 及 SSFI_{SF}，與荷蘭皇家氣象署 Climate Explorer 氣象資料庫的海平面溫度及海平面氣壓做場域分析。

結果顯示，研究地區臺灣黃杉早材生長受濕季末期(九月)與乾季(十至三月)的土壤水分影響大。重建的七家灣 SF_{SF}、SF_{SM} 及 SSFI_{SF} 與觀測值及前人重建的七家灣 SSFI 波動相似，因此，研究結果支持臺灣黃杉早材重建流量因子的可行性。重建七家灣 SF 有較高的解釋率，但重建 SSFI 對於判別乾濕事件發生更有優勢。藉由年表頻譜分析加上重建七家灣 SSFI_{SF}，可觀察到大約每 10–20 年有乾旱事件。海面溫度場域分析(Field analysis)顯示太平洋十年際振盪及聖嬰–南方振盪現象的跡象；海平面氣壓的場域分析則顯示亞澳季風系統與北極振盪(Arctic Oscillation)對此地區冬季雨量及流量的影響。尤其九到十月雨量及流量除了受颱風影響外，也受北極振盪暖相位直接與間接的影響。


關鍵字：樹木水文學、臺灣黃杉、溪流量重建、標準化流量指數、遙相關

Abstract



Taiwan often uses flow observation data to study and evaluate hydrologic issues. However, the short-term instrumental records could only reflect high frequency variability of dry/wet events. Therefore, to understand possible low frequency variability, this research focused on the relationship between the tree-ring and streamflow. This study reconstructed the past variability of Chichiawan (CCW) streamflow. This study used a set of sampled *Pseudotsuga wilsoniana* Hayata (Taiwan Douglass-fir, TDF) trees that were closer to the CCW than those used in the previous research. It also used gaged flow data with a longer observation period. This study then reconstructed the CCW streamflow (SF) and its standardized streamflow index (SSFI) based on the tree-ring width variations of TDF. This study used COFECHA to statistically validate the cross-dating, and 72 cores were selected to construct earlywood, latewood, and total ring width chronologies developed using Ensemble Empirical Mode Decomposition. After analyzing the correlations between chronologies and SF/SSFI, this study selected earlywood ring width chronology to reconstruct CCW SF/SSFI from September to February for 1785–2009 and for 1785–2013 ($SF_{SF} / SSFI_{SF}$), and CCW SF from September to March (SF_{SM}) for 1785–2009. After the reconstructions, this study correlated the observed and reconstructed CCW $SF_{SF} / SF_{SM} / SSFI_{SF}$ with the sea surface temperature and sea level pressure fields.

The results showed that TDF earlywood growth in the study area was affected by the soil moisture conditions from the end of wet season (September) and through out the dry season (October to March). The fluctuations of the observed and reconstructed CCW SF_{SF} 、 SF_{SM} or $SSFI_{SF}$ were similar. Also, they were similar to the October to February SSFI reconstruction of a previous study. Thus, the results supported the



possibility of using TDF earlywood to reconstruct CCW dry season SF and SSFI. Although the reconstructed SF had a higher explanation power, the reconstructed SSFI was better for determining the occurrences of dry/wet events. The reconstructed SSFI_{SF} showed that dry events could happen around every 10 to 20 years. The sea surface temperature field analysis showed traces of the cold phase of the Pacific Decadal Oscillation and El Niño-Southern Oscillation, whereas the sea level pressure field analysis showed that the precipitation and the streamflow in the studied area were affected by the Asian-Australian monsoon system and the Arctic Oscillation. The precipitation and the streamflow in September to October were affected not only by typhoons, but also directly and indirectly by the warm phase of the Arctic Oscillation.

Keywords: Dendrohydrology, *Pseudotsuga wilsoniana*, Reconstructed streamflow, Standardized streamflow index, Teleconnection.


第一章 前言



氣候變遷是近年來全球所高度關注的議題，在這個議題下最常討論到的課題之一即為極端天候的發生。IPCC (2012)定義氣候變遷為氣候狀態的平均值或是變異特性發生「持續性」的改變。影響原因可能是自然或人為因素改變大氣成分及土地使用所造成。極端天候(Climate extreme)則定義為某一天候變數(如降水或溫度)數值高於或低於某一門檻值，門檻值是觀測值區間的上限或下限(如 1、5、10%)。是否歸類於極端天候通常是與現有的氣象紀錄比較，但有些自然氣候變異的週期比現有紀錄長，就無法從現有氣候紀錄觀察中得到某一極端天候是源於自然或人為變異的結論。若能重建古氣候(Paleoclimate)，則有可能解決此一困境，因重建古氣候能幫助我們瞭解過往的自然氣候變異，進而用來分析現今面對的狀況及未來氣候波動。

古氣候重建的工具大致可分為四個類型：冰川(Glaciological)、地質(Geological)、生物(Biological)及歷史(Historical) (Bradley, 1985)。常見的自然資源檔案庫(Natural archive)像是冰芯(Ice core)、孢粉(Pollen)、樹輪(Tree-ring)、珊瑚(Coral)、海洋或湖泊沉澱物、湖水位升降等，適合的重建時間尺度、分布潛在地點、定年精確度都有所差異。例如海洋沉積，雖然存在範圍廣，可提供數百萬年氣候資料，但難以精確定年，通常用於低頻率古氣候重建；湖泊沉積的沉積物豐富，但卻不易精確定年且易受干擾破壞；冰芯能藉由氣體含量記錄許多氣候訊息，但存在範圍侷限。樹輪與上述相比，存在範圍能比冰芯與湖泊廣，溫帶或是生長季與非生長季分明的地區都容易找到樹輪明顯的物種。雖然重建長度大約百年或千年，相對於其他代用指標來的短，但最小間隔能以「年」為單位來定年，屬於高頻率古氣候重建。


林木位於季節性氣候地區，如中高緯度地區或某些乾濕分明的熱帶地區，可隨著生長而記錄環境的變化(Speer, 2010)。樹輪寬度、穩定同位素、密度及木材解剖特徵都是林木記錄環境變化的方式，繼而可成為環境變化的代用指標(Proxy)。



由於量測樹輪寬度變化在花費及儀器使用技術等限制較低，是以樹輪研究為最常使用的代用指標。然而，因不同林木個體對同樣因子有相異的敏感度，繼而形成不同的紀錄，所以在使用樹輪重建古氣候之前，如何將樹輪準確定年是一重要的課題。研究如何確定每一樹輪形成的年分及將樹輪所含的各種代用指標結合其他領域的科學被稱為「樹木年代學」(Dendrochronology)，也稱樹輪分析(Tree-ring analysis)。如樹木氣候學(Dendroclimatology)就是藉由樹輪能反映氣候的特性，將樹輪定年後，找出氣候與樹輪間的關係，進而重建過往的氣候變化，只要是能限制或影響樹木生長的氣候因子都有機會能藉由樹輪重建。樹木氣候學中，溫度、降雨及乾旱指標等為最常重建的因子，利用樹輪重建水位及流量的樹木水文學(Dendrohydrology)也歸類在樹木氣候學內。

美國為最早發展樹木水文學的國家，而位於美國西南部的科羅拉多河流域(Colorado river basin)為此研究的重點區域(Meko & Woodhouse, 2005; Meko et al. 2012; Stockton & Jacoby, 1976; Woodhouse et al., 2006; Woodhouse & Lukas, 2006)。除了可利用樹輪年表重建流量變化與流量指標外，重建地下水位、湖泊與水庫水位等等都包含在樹木水文學裡，其中以流量重建最為常見(Meko & Woodhouse, 2011)。位於乾旱地區的河流附近的樹木常與降雨及流量有強烈相關，雖然樹輪輪寬與流量間沒有直接相關，但會反映土壤濕度等水文因子(DeRose et al., 2015)。由於雨水需降至地表被土壤吸收後才能被樹木吸收利用，樹木生長更準確來說受土壤濕度影響。

在樹木氣候或樹木水文學中，不論以樹輪重建降雨或流量，乾旱都是常關注的重點，因為乾旱對農業、水資源利用、生態等都有很大的影響。流量的重建通常和水文乾旱最為密切。水文乾旱指一段時間間隔內土壤濕度偏低，通常是降水或負責水分運輸的大氣循環模式異常造成(Meko & Woodhouse, 2011)。然而，雖然流量重建能看出歷史流量高低，但流量低至多少才能稱之「乾旱」？評估乾旱常見的有帕瑪乾旱指標(Palmer Drought Severity Index, PDSI) (Palmer, 1965)與標準化



降水指標(Standardized Precipitation Index, SPI)等。在水資源管理上，乾旱指標為判斷乾旱的重要依據，因此在樹木氣候與樹木水文學中，也常用樹輪重建乾旱指標(Cook & Jacoby, 1977; Gedalof et al., 2004; Guan et al., 2018a; Herweijer et al., 2007; Touchan et al., 2005)。McKee et al. (1993)發展之 SPI 可用以量化不同時間尺度的降雨，藉由將觀測降雨量標準化成標準分布之 Z 值，可經由連續時間內觀察到的降雨量計算出(Guttman, 1998)。PDSI 和 SPI 相較，SPI 單純利用雨量標準化而來，Serrano et al. (2012)則指出 SPI 比 PDSI 偵測乾旱的能力更高。美國農業部亦將 SPI 列為重要乾旱指標之一，並於作物長期間持續發布與更新各地區之 SPI 值。水文乾旱指標之一的標準化溪流量指數(Standardized Streamflow Index, SSFI)的概念即來自於 SPI，是將觀測流量標準化成 Z 值。

樹木氣候學與水文學在國外已發展多年，已廣泛用於延長氣候與水文變異。臺灣目前雖已有樹木氣候學研究，但甚少有樹木水文學相關研究，在水文議題上，多以觀測流量進行評估。李俊逸(2013)曾用 1970–2010 期間數個觀測流量測站資料，指出高海拔集水區的低流量逐漸下降。然而，如同上述提及臺灣大部分現有紀錄僅能得知頻率較高的乾濕事件變異，對低頻的乾濕事件變異則無法瞭解，是以本研究將針對樹輪與水文的關係進行研究，以樹輪重建溪流量(Streamflow, SF)與 SSFI。本研究之研究區為臺灣中部武陵地區。蔣麗雪(2011)敘及該地區由於雪山山脈及中央山脈阻擋東北季風帶來的水分，屬於冬季乾旱地區。其研究針對臺灣山區對水分敏感的樹種—臺灣黃杉(*Pseudotsuga wilsoniana* Hayata)，以其早材(Earlywood, EW)輪寬重建臺灣中部地區雨量及溫度，結果指出臺灣黃杉早材生長會受到土壤水份限制。Guan et al. (2018a)曾利用蔣麗雪(2011)所得的黃杉早材輪寬年表重建七家灣溪(Chichiawan stream, CCW)的前一年十月至當年二月的 SSFI (October to February SSFI, SSFI_{OF})。

七家灣溪流量測站為目前位在海拔 2000 公尺以上的觀測流量測站中，水文紀錄資料最長的溪流(李俊逸，2013)，有大約 50 年的流量紀錄，且為中部重要流域—

大甲溪的上游，其流量變化會影響大甲溪的流量。本研究將再次使用臺灣黃杉早材輪寬重建位在武陵地區七家灣溪的 SF 與 SSFI。樣木取樣的區域比蔣麗雪(2011)的樣區更靠近七家灣溪，觀測流量紀錄也增加約 10 年。本研究與 Guan et al. (2018a) 的重建有重疊之處，是以本研究所得的重建結果將與該重建結果比較異同，以瞭解在不同樣區與更長的流量紀錄下，是否會得到更佳的重建結果。另外，亦期望藉由新的 SF 及 SSFI 重建結果能更深入瞭解七家灣溪的乾旱與潮濕的發生頻率及強度，及討論影響流量變化的主要大氣及海洋驅動力為何。

第二章 文獻回顧



2.1 樹輪的形成與變異

樹輪為具有維管束形成層(次生分生組織, Secondary meristem)的喬木或灌木在生長季期間徑向生長之結果(圖 1), 亦稱為生長輪(Growth ring)。生長輪包含生長季節早期的薄壁細胞(稱早材, Earlywood)及生長季節中晚期的厚壁細胞(稱晚材, Latewood)(馮豐隆&詹明勳, 2005)。在一年中有明顯「季節」的地區, 樹輪的生長通常可以「年」輪表示, 且早材與晚材界線清楚。早材的細胞壁較薄、密度小, 顏色較淺; 晚材的細胞壁較厚、密度大, 顏色則較深。然而並非所有喬木或灌木的樹輪均有易辨識的早晚材, 會依環境與樹種有所差異, 但整體來說針葉樹早晚材的變化通常會比闊葉樹明顯, 生長在溫帶的樹其早晚材因為有季節性差異, 也會比生長在熱帶的樹容易辨識。另外, 闊葉樹因形成層生長特性會有樹種差異, 有些樹種為環孔材(Ring-porous wood), 有些則為散孔材(Diffuse-porous wood), 屬於散孔材的樹種較不適合作為樹木年代學樣本, 因為缺乏明確生長輪界線。

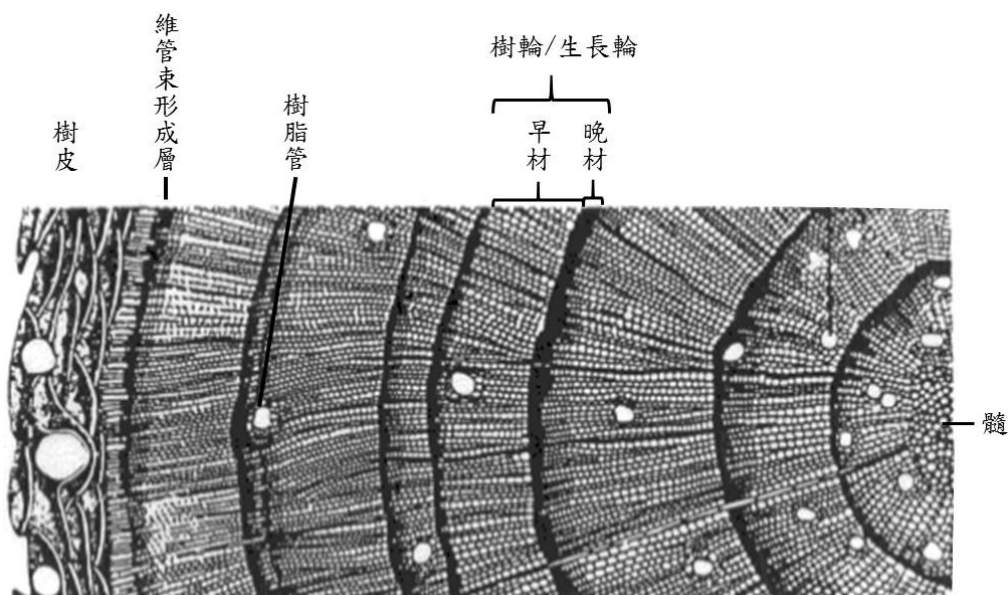


圖 1、針葉樹樹幹截面(依據 Fritts, 1976)。

在每年季節分明的地區, 會以髓心(Pith)為中心產生一完整樹輪, 但在各種環境狀況影響下則不盡然。以下介紹最常見的兩個樹輪變異狀況: 缺輪(Missing ring)

與偽輪(False wood)。若未能正確辨別缺輪與偽輪，樹輪定年結果將有誤差。

(1) 缺輪

樹木生長時大致會呈現圓錐體狀—上細下粗。生長荷爾蒙(Hormone)，像是生長素(Auxin)或是細胞分裂素(Cytokinin)會從頂端往下流動，生長素觸發細胞分裂經由次級生長產生樹輪。在環境狀況不好時，樹木產生的生長素不足，莖上某些部分未能開始生長，因而產生缺輪，尤其在靠近樹輪基部的地方最有可能產生(Speer, 2010)。

(2) 偽輪

偽輪為林木遭遇逆境，導致生長季初期有一短暫期間所分化深類似晚材之木質細胞，當逆境減緩或消失後樹木回復生長時分化正常木質細胞。逆境可能為晚霜或蟲害引起的落葉造成，亦有可能是乾旱。由於偽輪是木質細胞異常生長，細胞不會像正常狀況逐漸變小，然卻於應為正常早材區域，忽然有類似晚材的細胞(Speer, 2010)。

2.2 樹木年代學原理

每個科學基於重複觀察與實驗得到基礎歸納，這些基礎歸納可被視為此學科的「原則」(Principle)，樹木年代學大致可分出以下幾個原則(Fritts, 1976; Speer, 2010)：

(1) 均一性原理

均一性原理(Principle of uniformitarianism)，也可稱為古今一致原理(The present is the key to the past)為許多學科如中常應用的原理之一。在古氣候研究中，此原理假設氣候在過去、現在及未來都是同一性質，並非表示過去與現在的氣候是一樣的，是指過去出現過的氣候在現在及未來都有可能再次出現，而其對特定樹種的過去、現在及未來之影響均相同。基於此原理，樹木氣候學可用現有的氣候資料與樹輪做相關性分析，並回推過往氣候，因此均一性原理也可說是奠定氣候樹木學的重要原理。所以假如樹被移植過，導致過去與現在生長環境不同，就不符合此原理，也不可用來當作樹木氣候學的樣本。



(2) 限制因子原理與敏感性

限制因子原理(Principle of limiting factors)提出生物的生長受限於主要限制因子影響的範圍內，當主要限制因子消失，生物可持續生長直到新的限制因子出現(Fritts, 1976)。具限制性的環境因子掌控樹的生長速率，也暗示在具有限制的氣候狀況下，窄輪比起寬輪能提供更精確的訊息。敏感度(Sensitivity)則代表林木反應限制因子的程度，當樹對環境因子限制愈敏感，輪寬間的變化會愈明顯，亦即敏感度愈高。高敏感度也可能導致偽輪的產生，因為當樹太容易受限制因子影響，也較容易在年間產生偽輪。

(3) 自相關

自相關(Autocorrelation)為時間序列的記憶效應，是環境或自身內部影響林木生長造成累積的效應，常經由再次利用儲存的物質，影響爾後生長。例如當年的氣候影響熱能、降雨與二氧化碳濃度等，這些因子在當年影響樹木生長，但也透過芽的發育、糖份儲存與賀爾蒙影響翌年的生長，也可能透過影響未來葉、果與根的發育，影響林木未來的生長。

(4) 生態幅度與生育地選擇

生態幅度(Ecological amplitude)指的是生物適應環境的耐性範圍。生態幅度大的生物在地理分布上通常會更廣泛；反之，生態幅度小的容易受限於特定環境。在樹木年代學中樣本的選擇上，選擇樹木耐性範圍邊界的地點，在輪寬上更容易有變化，例如選擇乾旱地區邊緣的樹，會更容易受水份影響。生態幅度會影響生育地的選擇，樹生長在其生態幅度中央的地區，輪寬變動小。生育地的選擇(Site selection)若適當，可以最大化樹輪所包含的訊號紀錄。需依據研究目標，選擇適合的生育地，例如若想重建降雨量，在乾燥環境中取樣是較為適合的；想討論乾旱事件，就選擇生長在生態幅度邊界的樹種。

(5) 交叉定年

交叉定年(Crossdating)是為了確定每一輪輪寬(或其他生長特徵)能對應到正確的生成年份，所以對於樹木年代學十分重要。樹內、樹間的樹芯藉由比對樹輪寬

窄(或其他生長特徵)變化的排列形式，能相互確定定年的正確性，尤其特寬或特窄的輪寬更可幫助比對進行。交叉定年也可以幫助辨別偽輪或缺輪，避免造成定年錯誤。交叉定年亦可延長重建的時間長度(圖 2)。

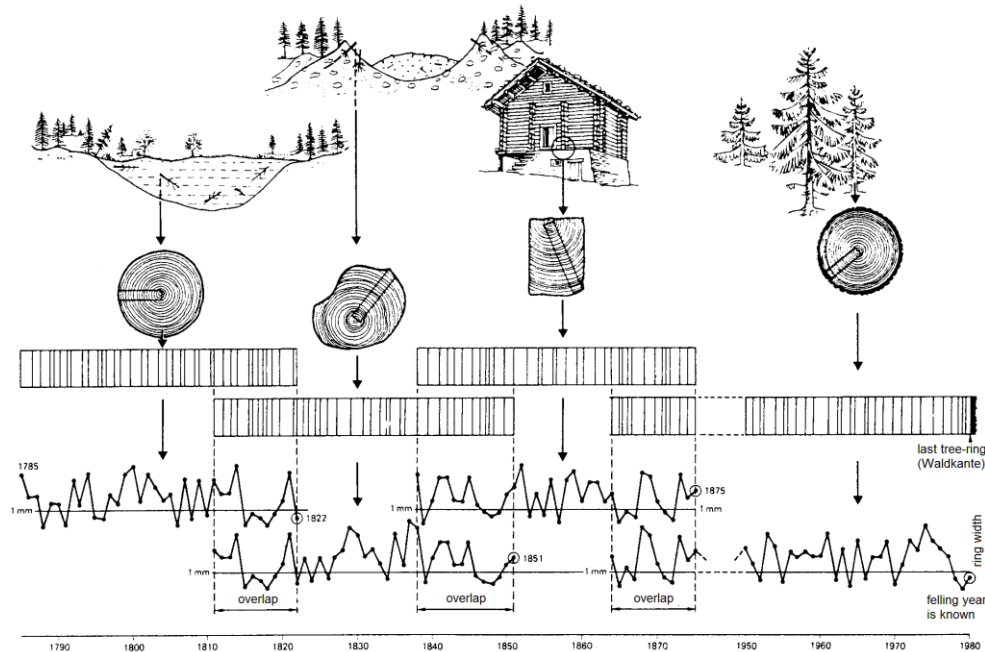


圖 2、交叉定年示意圖(取自 Schweingruber, 1983)。

(6) 複本原理

由於環境因子影響的尺度不同，樹內與樹間輪寬有差異。複本原理(Repetition)指出需要一定量的樣本數，進行相互比較並過濾不必要的干擾。大量樣本能夠避免偽輪或缺輪等干擾，也能藉由平均的動作消除對氣候反映上的變異。通常一棵樹至少會鑽兩根樹芯，一地區也至少要十棵以上的樹做為樣本。

(7) 標準化

輪寬不只含有環境波動的訊息，也反映樹在不同年齡系統性的生長改變。移除生長的訊號，只留下氣候訊號稱為標準化(Standardization)，轉換得到的值則稱為樹輪寬度指標(Ring-width index)。



(8) 生長模型

Fritts (1976)提到模型可以是代表一系列基礎事實和相互關係的陳述、方程式或圖表。細胞生長的速度受外在環境與內在因子影響，Cook (1985)提出一線性生長模型(growth model) (2.1)解釋輪寬生長概念被沿用至今：

$$R_t = A_t + C_t + \delta D_{1t} + \delta D_{2t} + E_t \quad (2.1)$$

其中， R_t 為輪寬或其他序列(如密度)； A_t 為林齡相關的生長趨勢； C_t 為共有的氣候因子影響； δD_{1t} 代表林分內在因子的干擾； δD_{2t} 代表林分外在因子的干擾； E_t 則是非以上因素的其他因子。

此線性模型表示，第 t 年樹輪寬(或其他序列)由多個因子決定。由一生長趨勢(A_t)，加上兩個共同訊號(C_t 、 δD_{2t})與兩個個別訊號(δD_{1t} 、 E_t)。 A_t 、 C_t 與 E_t 為連續訊號， δ 為二元參數，若存在則為 1，不存在則為 0，表示擾動可能只發生在某段時間內，並非一直存在。生長趨勢因為與年齡相關，所以會隨年齡改變。在開放環境中，樹輪寬度隨著時間呈現指數性下降；在密度高的環境下，由於易受競爭影響，輪寬變化會比較複雜，輪寬序列也可能隨樹木年齡增加。 C_t 像是溫度、降雨量、流量等，此為樹木氣候學的重要因子，樹木氣候學目的就是保留此訊號，並將其他訊號移除。 δD_{1t} 像是競爭； δD_{2t} 像是火災、颱風、伐木等等，而擾動可能增進森林的演替，或使生存下來的樹有更多資源與空間可以利用，並非對樹木生長都是不好的。 E_t 則像是測量誤差、因子改變，或者其他沒考慮到的因子。



2.3 樹木氣候學與樹木水文學的演進

Andrew Ellicott Douglass 為近代樹木年代學之父。Douglass 實際上為美國天文學家，為證明太陽黑子週期為 11 年，意外地發展出樹木年代學。他在觀察到松樹斷面的輪寬有寬窄變化後，想知道濕度是否會影響輪寬的寬窄模式，意味著在乾早年是否輪寬會較窄。Douglass 不僅注意到樹輪寬度的變化，也發現一地區不同樹木的輪寬變異也相似，總體而言他對樹木年代學最重要的兩個貢獻為(1)將交叉定年的方法應用在樹木年代學上；(2)輪寬的變化形態(Pattern)記錄一地區的環境狀況。他也將樹木定年學應用於考古學上，並在 1937 年於亞利桑那大學成立第一間樹輪研究室。由於樹木年代學發展至今，已結合許多科學：考古、氣候、生態、地形及化學等，接下來僅針對與本研究相關的樹木氣候學做介紹。

2.3.1 樹木氣候學

樹木氣候學算是樹木年代學中最早開始發展的學科之一。在樹木氣候學中，最常討論的因子為溫度及雨量，或是藉由這兩個因子轉換的乾旱指數，與水文相關的因子如流量、水位等也歸類在樹木氣候學中。

Leonardo da Vinci 早在 15 世紀就注意到樹輪寬窄變化與乾濕季節有關 (Schulman, 1951)。Douglass 也在 19 世紀初，發現樹輪寬度變化受氣候影響，並致力發展樹木年代學。他的學生—Edmund P. Schulman 則為樹木氣候學的先驅學者之一，除了建立美洲許多地區的樹輪年表外，也投入樹輪年表與降雨、溫度或流量的相關性分析、研究氣候對樹輪年表的影響等(Schulman, 1942, 1951, 1953, 1956)。Bailey (1947)提到樹木氣候學在 1920 到 1947 的發展，著重於中長期年表發展與長期氣候波動分析。接著約從 1970 年代開始，由於氣候變遷議題逐漸受重視，每年有關樹木氣候學的發表刊物急遽上升，全球也開始有非常多以樹輪重建溫度與降雨或乾旱指標的研究。藉由重建的氣候資料瞭解過往乾旱或潮濕的時間點及頻率，

亦有從中探討遙相關如何影響氣候，幫助瞭解未來氣候的可能變化。

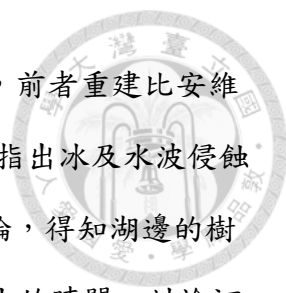
臺灣關於樹木氣候學的研究大約從 1990 年代開始。Sheu et al. (1996)測量臺灣冷杉中的碳穩定比例($\delta^{13}\text{C}$)，發現碳 $\delta^{13}\text{C}$ 反映五到十月的溫度。鄒佩珊(1998)以臺灣冷杉(*Abies kawakamii*)和臺灣紅檜(*Chamaecyparis formosensis*)樹輪建立長達 1100 年的樹輪寬度年表，重建臺灣山區五百年來的夏季與冬季溫度變化與春雨變化。該研究結果表示臺灣山區的氣候深受熱帶西太平洋的影響，由於聖嬰-南方振盪現象(El Niño-Southern Oscillation, ENSO)能影響西太平洋海溫，進而影響臺灣降雨。張繡慧(1999)使用臺灣北部大屯山昆欄樹(*Trochodendron aralioides*)的全輪寬度、早材寬度、晚材寬度、最大密度、最小密度跟氣溫及雨量做相關性分析，並提出未來可用昆欄樹做低海拔重建。詹明勳等(2005)以塔塔加地區的臺灣雲杉輪寬與氣候做相關性分析，並以樹輪特徵值推估溫度變化。張世振(2006)建立北大武山及大鬼湖地區的臺灣杉(*Taiwania cryptomerioides*)與臺灣鐵杉(*Tsuga chinensis*)年表，重建當地秋冬溫度與梅雨季雨量，結果也提到樹輪寬度在聖嬰年大多偏寬，反之反聖嬰年大多偏窄。蔣麗雪(2011)以武陵地區的臺灣特有種-臺灣黃杉重建臺灣中部地區的十月至五月平均月降水量與五月平均最高溫，並以重建結果提出 ENSO 間接影響輪寬生成與西太平洋颱風生成數量與輪寬的間接關係。陳信豪(2015)以紅檜建立樹輪穩定氧同位素($\delta^{18}\text{O}$)序列，並重建霧林帶過去 480 年來(1533–2012 年)五到六月的降水量。Wright et al. (2015)以臺灣扁柏樹輪寬度年表重建東亞副熱帶噴射氣流指標(East Asian subtropical jet index)。除了針對氣候變化外，也有比較不同方法建立樹輪年表差別的研究(陳姿彤，2011)。樹木氣候學雖在臺灣的研究並不多，但從 1990 年代起，陸續都有相關研究對臺灣氣候貢獻一份心力。



2.3.2 樹木水文學

1930 年代，美國西部開始探討樹木生長與流量的關係，以樹輪延長流量紀錄的研究開始發展(Meko & Woodhouse, 2011)。Hardman (1936)鑽取美國西部黃松(*Pinus ponderosa*)建立樹輪年表，延長 Truckee river 的流量至 400 年前，為第一個檢驗樹輪與流量關係的研究。Hawley (1937)與 Keen (1937)也接著提出流量與樹輪的相關研究。Schulman (1945)比較輪寬變化與科羅拉多河流量間的關係，由於科羅拉多河流域橫跨美國西部七個州，為美西水資源供給的重要河流，開啟未來樹木水文學重點區域；Potts (1962)以樹輪研究科羅拉多河乾旱紀錄，幫助丹佛水務局(Denver Water Board)評估丹佛市未來水資源的供給與儲存(Meko & Woodhouse, 2011)，表示從樹木水文學發展初期對於評估水資源管理就有一定的貢獻；Stockton 在 1970 中期至 1980 初期藉由開發快速計算電腦與新的定量方法發表多篇長時間的流量重建(Stockton & Boggess, 1981, 1983; Stockton & Fritts, 1973; Stockton & Jacoby, 1976)。1922 年的科羅拉多河協定(Colorado River Compact)以法律分成上游與下游流域的水資源配置，但後期卻因為水資源短缺引發爭議。Stockton & Jacoby (1976)改善流量估計的校正方法，用 12 個流量測站的紀錄重建科羅拉多河上游流域，結果提到 1922 年為過去 450 年中最潮濕的時期，因此以當時的流量進行水資源分配會造成水供應不足的情況。由此可知，長期流量紀錄的重建對於水資源管理非常重要，後續許多研究也多著重在乾旱與水資源管理的應用(Bonin & Burn, 2005; Meko & Woodhouse, 2011; Meko et al., 2012; Woodhouse & Lukas, 2006)。另外也有生態相關的應用，像 Coble & Kolb (2012)以樹輪輪寬探討麥克菲水壩建成後對於下游河流河濱樹木生長的影響。美國除了西南地區外，樹木水文學研究也漸漸蔓延至其他地區。

從美國開始發展，世界各地也漸漸有樹木水文學相關研究。加拿大在 20 世紀末開始有樹木水文學相關研究，一開始的研究並非著重於研究乾旱或水資源管理。



Lepage & Bégin (1996)與 Bégin (2000)用樹輪與水位討論湖岸線，前者重建比安維爾湖(Lake Bienville)水位，指出極端水位使湖岸線受干擾；後者指出冰及水波侵蝕魁北克兩大湖的湖岸，並透過計算比較壓縮的樹輪與正常的樹輪，得知湖邊的樹受到侵蝕而傾斜。George & Nielsen (2000)重建流量找出洪水發生的時間，討論河岸邊的樹木如何適應長時間被淹沒的狀況。從上述的研究可以看出樹木水文學更多不同的面向，21 世紀，加拿大發展更多關於極端天候與水資源管理應用的研究，尤其以農業與畜牧業為主的草原三省，對於水資源的應用管理非常看重(Axelsson et al., 2009; Case & MacDonald, 2007; Sauchyn et al., 2015)。

南美地區、歐亞地區與大洋洲地區的樹木水文學研究，大約從 20 世紀末或 21 世紀初開始發展，多藉由重建流量幫助當地水資源管理(Akkemik et al., 2007; Allen et al., 2015; Gallant & Gergis, 2011; Jones et al., 1984; Urrutia et al., 2011; Yang et al., 2011; Yuan et al., 2007)。章節 2.3.1 提到臺灣在樹木氣候學的研究歷史，但若只針對樹木水文學，除了 Guan et al. (2018a)重建七家灣溪的研究外，目前沒有其他相關的研究。臺灣現有的流量紀錄幾乎很少超過 50 年，在水資源管理上無法有效的利用這些現有紀錄做評估。



2.3.3 早/晚材與季節性

Meko & Woodhouse (2011)指出冷季降雨與融雪水比起暖季降雨能貢獻更多的水，是因為通常在暖季的蒸發量更大且土壤更需要水來保持濕度。比起整年的氣候重建，輪寬可能與特定季節的相關性較高，像是 Cleaveland (2000)發現美國東部的落羽松(*Taxodium distichum*)全輪輪寬對夏天的環境更敏感，更適合重建當地夏季低流量而非全年流量。因此，找出與樹輪對應的季節或月份，能提高以樹輪年表重建氣候的可信度。

在部份研究中發現早晚材的輪寬、解剖特徵或同位素測定比起全輪對特定季節或月份的相關性更高。早晚材對何季節相關性較高，通常要看影響早晚材樹輪變化的限制因子在何時段出現，相鄰的地區因為氣候相近，相關性高的月份就會類似。研究指出位在亞高山地區的樹，跟冬季或春季降雨關聯性較強；在低海拔地區又對濕度敏感的樹，則跟生長季節降雨(通常是夏季)較相關(Gedalof et al., 2004)，表示生處在不同環境，氣候限制因子也會不同。

有許多文獻指出早材與水文訊號有關聯。在歐洲的低地洪水區，Okonński & Koprowski (2016)和 Koprowski et al. (2018)發現歐洲白蠟樹(*Fraxinus excelsior*)早材解剖特徵及密度與水文參數有強烈相關。前者指出早材與降雨及流量都有正相關，且對於生長在河谷的歐洲白蠟樹，流量比起降雨更為重要；後者指出在前一年九月到翌年一月的高水位流量可被視為影響生長因子。Meko et al. (2013)和 Sara et al. (2002)使用早材輪寬重建冷季降雨量(冬春季)；Crawford et al., (2015)發現在愛達荷州(Idaho)中部、蒙大拿州(Montana)西南方山谷，早材與春季降雨有顯著相關性；Guan et al. (2018a)則是以早材輪寬重建乾季溪流量。其他研究則指出晚材對於夏季降雨、夏季乾旱、生長季的降雨，比早材的敏感度更高(Crawford et al., 2015; Kern et al., 2013; Lebourgeois, 2000; Meko & Baisan, 2001)。



2.4 遙相關

流量最主要受降雨影響，也受溫度造成的蒸發影響。已有許多流量重建研究指出流量和一些氣候的準週期變化有關(Brito-Castillo et al., 2003; Meko & Woodhouse, 2005; Shah et al., 2014; Verdon & Franks, 2006)。造成這些區域性氣候變化的原因之一，為海洋與大氣系統間的交互作用(王作臺&許晃雄，1994)。這種氣候上的大尺度的交互作用可以導致距離遙遠的兩地氣候相互影響，稱為遙相關(Teleconnection)。

Ångström (1935)第一次使用遙相關這個詞彙，遙相關為影響氣候變化的自然驅動因子，簡單來說指一個區域的環流變化，能讓距離遙遠的另一個區域的環流也有所變化。Hildebrandsson 在 1874 年觀察到遙相關的現象，他發現澳洲和阿根廷首都布宜諾斯艾利斯的地表氣壓，在某些時期會產生相對高低壓的變化，Lockyers 在 1902 年確認這個發現(Walker, 1928)。Walker (1928)提出了全球三大振盪：北大西洋振盪(North Atlantic Oscillation, NAO)、北太平洋振盪(North Pacific Oscillation, NPO)及南方振盪(Southern Oscillation, SO)均屬於遙相關。遙相關影響氣候變化，像是近幾年大家關注全球溫度的上升及暖化加速並非全是人為影響。Wu et al. (2011)分析全球平均地表與海面溫度(Sea Surface Temperature, SST)，結果指出多年代際變化是讓二十世紀後期的變暖速度增快的原因，溫鹽環流(Thermohaline Circulation)增強極有可能為影響原因之一。Redmond & Koch (1991)指出遙相關可能有時間延遲(Time lagged)的現象，所以瞭解這些遙相關可能可以預測區域水文狀況進而幫助水資源管理的問題(Steinschneider & Brown, 2011)。

海洋與大氣交互作用不僅影響區域氣候，透過大氣波動的傳遞，也會對遙遠地區產生衝擊，造成全球氣候異常(張振瑋，2008)。另外，遙相關在不同的地點與時間長度有不同類型，季風氣候帶還會受到季風的影響，接下來僅介紹三個對臺灣影響較大的大氣海洋環流現象。



2.4.1 聖嬰-南方振盪現象

在一百多年前，南美海岸邊的漁民發現約每 2 到 7 年聖誕節時期會因為海溫升高補不到魚，由於時間點位於聖誕節前後則被稱為聖嬰(El Niño，西班牙文意為上帝之子)。在二十世紀初期，Walker 藉由發現介於南太平洋地區東、西方向氣壓呈現的振盪現象提出 SO。他使用大溪地及達爾文兩地的氣壓資料進行迴歸分析，並發現太平洋東(大溪地)西(達爾文)兩處氣壓變化呈現負相關的現象(圖 3)，並將兩地氣壓差以南方振盪指數(Southern Oscillation index, SOI)表示。有趣的是，SO 被提出後並沒有在一開始發現與聖嬰現象有關，直到 1969 年時氣象學家 Jacob Bjerknes 才首度提出 SO 為太平洋海溫的年際變化(El Niño)導致，後來的科學家才將兩者合併稱為 ENSO。其發生週期通常為 2 到 7 年(Arpe et al., 2000)。

在沒有 ENSO 發生時，熱帶太平洋東部的氣壓會比西部高，造成氣流由東邊的流向西邊，風由東邊吹向西邊帶動東太平洋表面的海水流向西太平洋，東太平洋深處的低溫海水向上湧出形成一循環(圖 4)。ENSO 發生時，東太平洋的氣壓降低，西太平洋之氣壓增高，使熱帶東風帶減弱，甚至轉為西風帶，於是東太平洋表面海水不流動，抑制低溫海水上湧(圖 4)。當 ENSO 為暖相位(El Niño)時，SOI 為負值，東太平洋氣壓低溫度高。ENSO 冷相位則稱做反聖嬰或聖女嬰現象(La Niña)，SOI 為正值，東太平洋氣壓高溫度低。La Niña 簡言之是正常年增強狀況，氣流由東邊的流向西邊更為強烈。

對臺灣的影響，像是對颱風生成位置有較大的影響。ENSO 在暖相位時，西北太平洋颱風生成位置會距離臺灣與東亞陸地較遠，導致颱風在海面上的時間較長，颱風強度也會偏強(Camargo & Sobel, 2005)。Kuo & Ho (2004)提到 ENSO 暖相位影響臺灣海峽的溫度，因為影響到臺灣海峽上的風力變弱減緩暖流，造成 SST 較低。ENSO 也會影響臺灣海峽沿岸上升流年際變化，並影響黑潮流入臺灣海峽強度(Hong et al., 2009; Huang et al., 2015)。在降雨方面，ENSO 暖相位時，臺灣九、十

月偏乾；冷相位時，十月偏濕(盧孟明, 2000)。原因為當 ENSO 暖相位時，西太平洋溫度較低，蒸發量下降，導致降雨減少；冷相位時，西太平洋溫度較高，蒸發量增加，導致降雨增加(圖 5)。不僅如此，由於 ENSO 正在發展時，就會影響西太平洋海溫。造成在 El Niño (La Niña)的前一年，西太平洋海溫偏低(偏高)，進而影響臺灣降雨減少(增加) (Wang et al., 2012)。Guan et al. (2018a)研究結果也支持臺灣十到二月的雨量與 SSFI 會提早反映 ENSO 的發生。此結果也能解釋臺灣的濕年或乾年，通常都是連年發生：第一年為提早反映 ENSO 的影響，第二或甚至三年為 ENSO 發生所造成的影響。

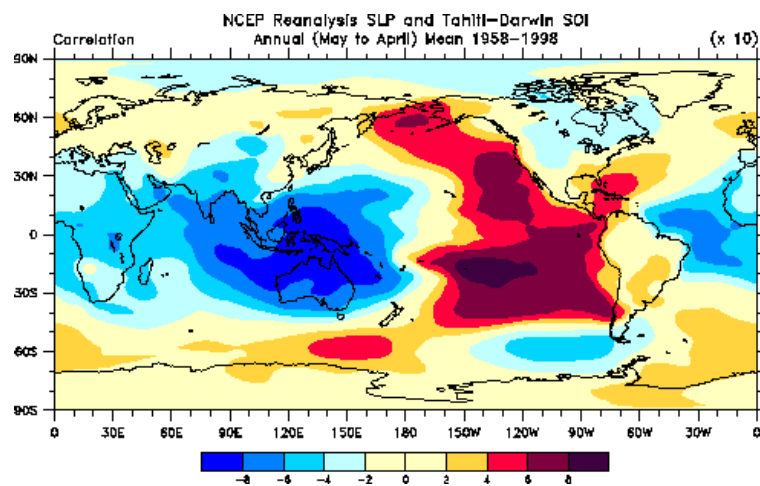


圖 3、前一年五到當年四月平均海平面氣壓(Sea level pressure, SLP)與南方振盪指數 (Southern Oscillation Index)在 1958–1998 年期間的相關性場域分析(Trenberth & Caron, 2000) (取自 www.cgd.ucar.edu/cas/ENSO/enso.html.sav)。

。

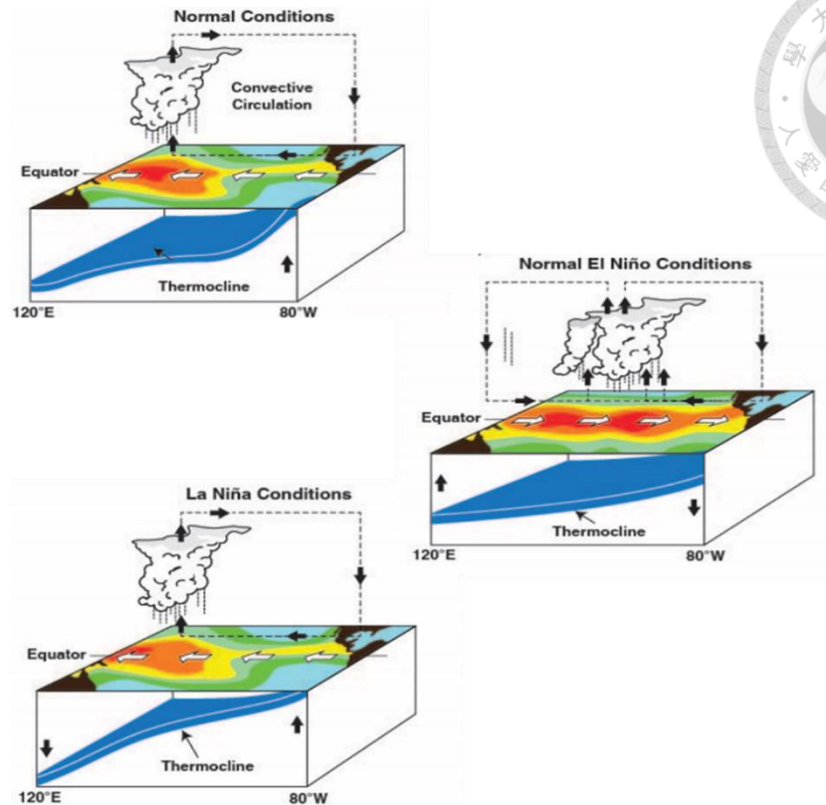


圖 4、正常、El Niño 與 La Niña 氣候示意圖。正常年(上)；El Niño(中)；La Niña(下)，
包含海面溫度、風、空氣上升地區與溫鹽環流的模型(取自
<https://www.theweatherclub.org.uk/node/491>)。

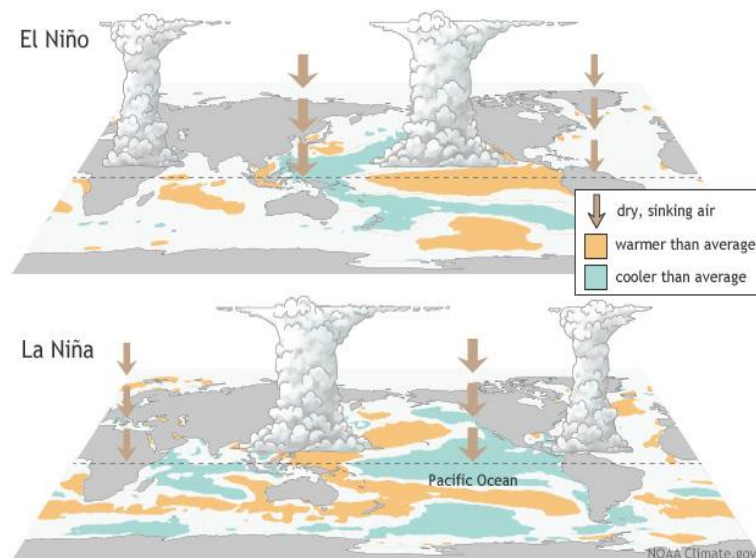


圖 5、El Niño 與 La Niña 海面冷熱溫度分布(取自 <https://www.climate.gov/enso>)。



2.4.2 太平洋十年際振盪

Trenberth (1990)已觀察到年代週期變化的特徵，北半球面 SST 與海平面氣壓 (Sea level pressure, SLP)異常。研究指出在 1988 前，阿拉斯加洲地區表面溫度大幅度上升，但北太平洋中央偏西溫度下降。另外，在 1977 至 1988 年冬季的阿留申低壓(Aleutian Low)更深入的向東，造成北太平洋 SLP 異常低。許多研究也都指出 1976 年後，幾乎整個北太平洋在 SLP 與 SST 上有很大的反轉，1976/77 也被當作北太平洋上「氣候體系」(Climate Regime)的一個轉變(Graham, 1994; Miller et al., 1994; Namias, 1978; Trenberth, 1990)。Zhang (1996)提到從 20 世紀以來，北太平洋已發生過三次氣候體系的轉移，分別是 1925、1947 和 1977 年。Mantua et al. (1997)藉由阿拉斯加鮭魚產量長期紀錄，發現鮭魚產量與北太平洋溫度的轉變有關，在 1970 後原本漁獲量明顯下降，但太平洋西北地區的漁民獲得的漁貨量卻上升，並將這個週期變化稱為太平洋十年際振盪(Pacific Decadal Oscillation, PDO)。

太平洋十年際振盪為北緯 20 度以北的太平洋 SST 異常偏暖或冷的變化，PDO 暖相位時熱帶東太平洋 SST 高於平均值，北太平洋中央 SST 低於平均值(圖 6 左)，由於北太平洋中央 SST 低，阿留申低壓強烈並向東深入，冷相位則與暖相位相反。目前 PDO 處於暖相位，通常 PDO 週期變換約為 20 到 30 年，但從 1988 年到近期 PDO 冷暖相位轉換快速(圖 6 右)(王作臺&許晃雄，1994; Mantua & Hare, 2002)。

Hung et al. (2004)發現臺北降雨量與 PDO 指數的逐年變化相似。PDO 位於暖相位時，可能造成菲律賓海上產生反氣旋異常流動(圖 7)，反氣旋在北半球為順時針旋轉，其中心氣流下沉，造成水氣無法上升，氣候上會偏乾。林和駿與洪致文(2015)研究指出臺灣北部二至四月的春雨與九至十月的秋雨均受 PDO 的影響。春季時，菲律賓海上的反氣旋離臺灣較遠，加深經過臺灣的槽線(從低壓中心延伸出或兩低壓中心間，通常氣壓會更低)，造成臺北春雨降雨量上升；秋季時，菲律賓海上的反氣旋離臺灣近，秋雨降雨量下降。反之，PDO 位於冷相位時，秋雨降雨量上升。

除了對於氣候的研究外，Guan et al. (2012)提出 ENSO 與 PDO 週期變化均對臺灣雲杉(*Picea morrisonicola*)高生長有顯著影響。

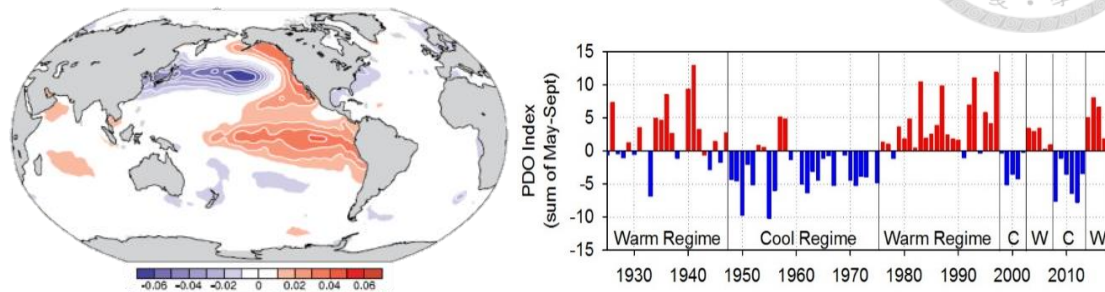


圖 6、太平洋十年際振盪分布範圍與時間變化。左圖為分部介於北緯 20 度以北的太平洋地區，紅色為海面溫度(Sea Surface Temperature, SST)偏高，藍色為 SST 偏低(取自 Trenberth et al., 2007)；右圖為 1925–2017 年五至九月 PDO 指數時間序列變化。正值代表 PDO 處於暖相位，負值代表 PDO 處於冷相位(取自 <https://energyeducation.ca/encyclopedia>)。

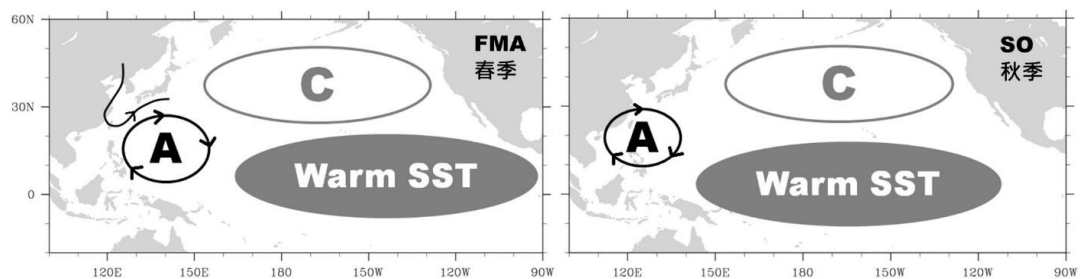


圖 7、太平洋十年際振盪暖相位時，異常循環示意圖。左圖為春季；右圖為秋季，A 和 C 分別代表反氣旋異常和氣旋異常(取自 Hung et al., 2004; 林和駿&洪致文，2015)。



2.4.3 東亞季風

季風(Monsoon)簡言之指依季節轉換方向的風。其成因由於季節不同(主要為冬季、夏季)，影響海洋與陸地在溫度、空氣密度與氣壓的變化，影響風的吹向。冬季由於陸地(比熱小)降溫較海水(比熱大)快，溫度較低，冷空氣密度大導致空氣下沉，造成氣壓較海洋高，風從陸地往海洋方向吹。反之，夏季由於海洋升溫慢；陸地升溫快，海洋溫度較低，造成氣壓較陸地高，風從海洋往陸地方向吹。交通部中央氣象局指出季風最盛行的地方為亞洲南部及東部，因為亞洲大陸為地球上最大陸地，臺灣則剛好位在季風最盛行的位置。依其所在位置，臺灣的降雨週期受東亞季風(East Asian monsoon)影響，冬天有東亞冬季季風(East Asian Winter Monsoon, EAWM)；夏天除了有東亞夏季季風(East Asian Summer Monsoon, EASM)還有西北太平洋夏季季風(Western North Pacific Summer Monsoon)。

對於臺灣，夏天的 EASM 為南印度洋或澳洲高壓帶來水氣的西南季風為主，EASM 也與 ENSO 與 NAO 有關。當 ENSO 與 EASM 相關性較強的年分，東亞及北太平洋西部會有更多降雨，反之，在相關性較弱的年分，降雨則較少(Liu et al., 2018)。NAO 則能調節 EASM 降水，NAO 暖相位會增強 EASM，反之，在冷相位會減弱 EASM (Zheng et al., 2016; Zuo et al., 2013)。

冬天的 EAWM 主要則以歐亞大陸上的西伯利亞與蒙古高壓(Siberian Mongolian High, SMH)系統為代表。EAWM 影響範圍大，氣流從歐亞大陸開始從東部沿岸往東南亞流動，甚至延伸至印度、阿拉伯海與非洲(圖 8)。高壓往低壓移動以及柯氏力的影響，氣流往南下流動，氣流經過海洋會夾帶水分，使臺灣北部冬天以寒冷及潮濕的東北季風聞名。正常來說，EAWM 的強弱會影響臺灣冬季北部降雨。強度越強，會帶來更多的降雨，反之則減少。然而，近幾十年的 EAWM 減弱，卻發現臺灣北部冬季雨量增加，其原因為 EAWM 減弱的同時，南海 SST 增加，加上華南地區南風異常增強，反而帶來更多水氣(許晃雄等，2012; Chang & Lu,

2012; Huang & Kao, 2010)。前人研究指出 EAWM 也與 ENSO、PDO、NAO 等遙相關有關，Chan & Li (2004)與 Li & Bates (2007)均指出當 ENSO/NAO 暖相位時，EAWM 通常較弱；Chen et al. (2012)則指出 PDO 影響 EAWM 與隨後發生的 EASM 之間的關係，當 PDO 處於暖相位，出現較弱的 EAWM，隔年隨後出現較強的 EASM 會比當 PDO 處於冷相位時還強。

Thompson & Wallace (1998)認為 NAO 實際上為北極振盪(Arctic Oscillation, AO)區域變異的表現。雖然 NAO 與 AO 間的關係尚未完全釐清，然而兩者趨勢間的相關已有許多不同方面的研究驗證，例如北大西洋海面溫度、平流層溫度與西太平洋及印度洋的海面溫度強烈增溫等現象(Cohen & Barlow, 2005)。AO 可直接或間接的影響 EAWM：當 AO 指數高(暖相位)，EAWM 減弱(Wu & Wang, 2002)。此外，AO 可透過西伯利亞高壓(Siberian High, SH)間接影響 EAWM：AO 冷相位時，西伯利亞地區平均 SLP 增強，導致 SH 增強的機率增加(Jeong & Ho, 2005)。

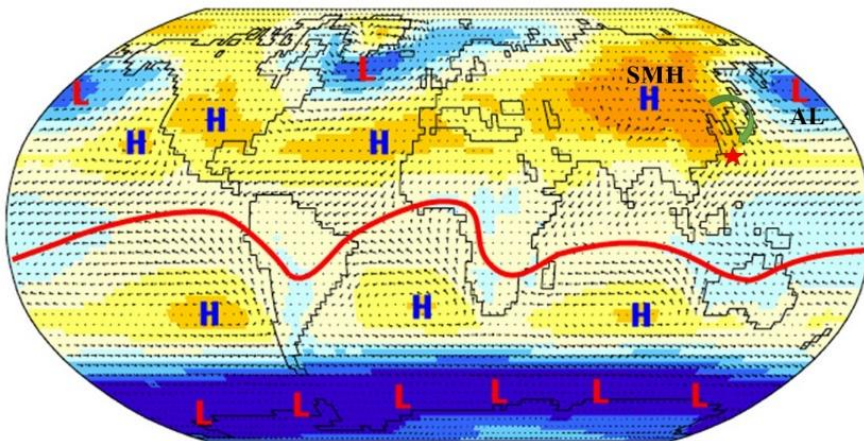


圖 8、全世界一月氣壓圖。星號為臺灣，箭頭為季風的氣壓流向(修改自 NCEP/NCAR, Reanalysis Project 1959–1997)。

第三章 材料與方法



3.1 研究材料與採樣地點

本篇研究方法，可參考圖 9 的流程圖。

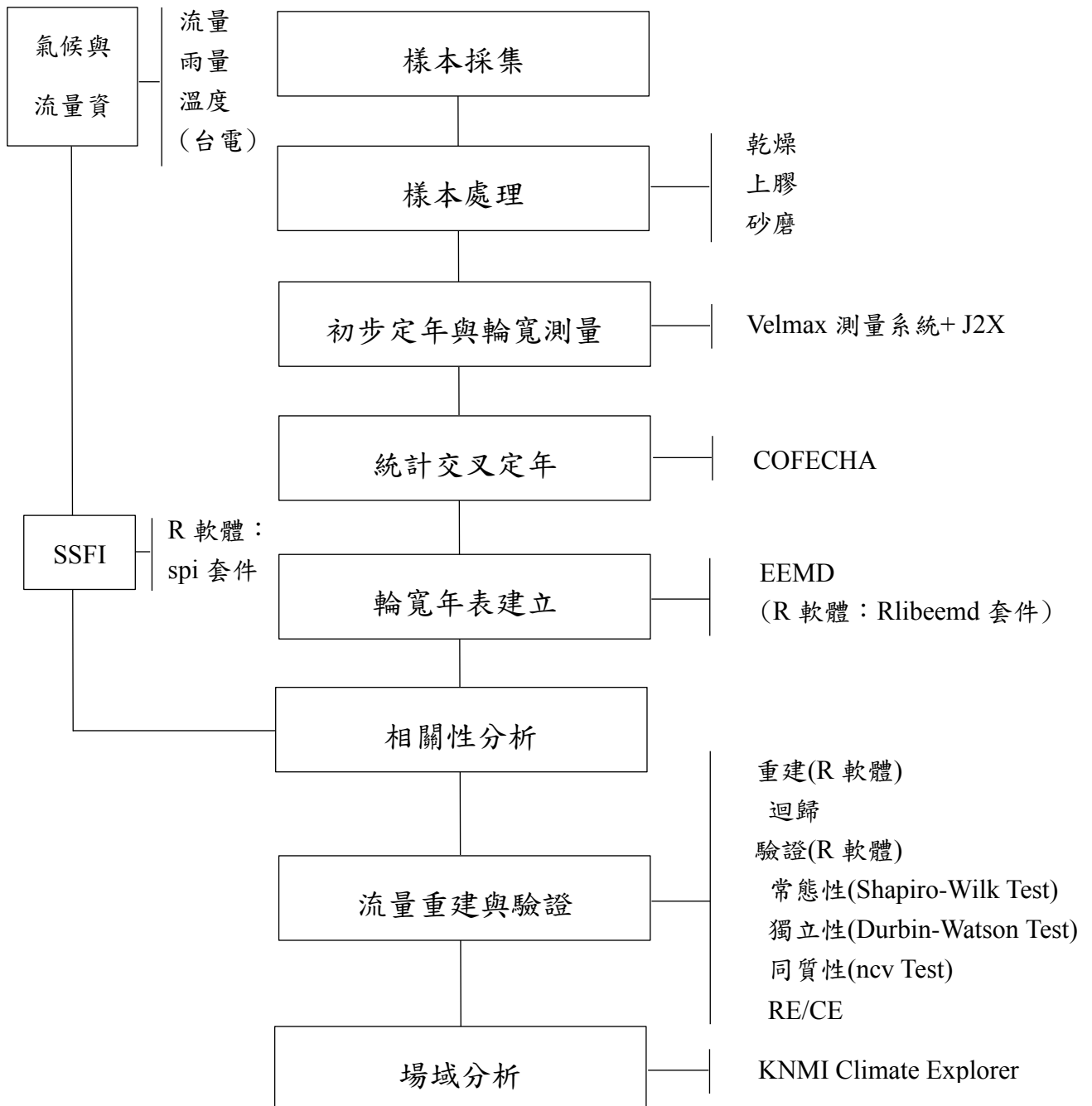


圖 9、研究方法流程圖。



3.1.1 研究材料-臺灣黃杉

臺灣黃杉為臺灣特有種，分布在海拔 1000–2700 公尺，中央山脈中低海拔山區的闊葉林中。過往調查中，臺灣黃杉在臺灣本島中部山區分布最多(雪霸國家公園內)，太魯閣與玉山國家公園內也有分布(圖 10)。臺灣黃杉(圖 11)為常綠喬木，樹幹筆直；樹皮厚，深縱裂；葉線形，扁平，扭成 2 列；毬果的種鱗腎形，前端三裂的苞鱗明顯露出(楊遠波等，1997)。Guan et al. (2018a)提到臺灣黃杉對土壤濕度敏感，加上前言中提到臺灣黃杉生長會受水份限制影響，且臺灣黃杉的早晚材均明顯，適合用來做為樹木水文學研究題材。

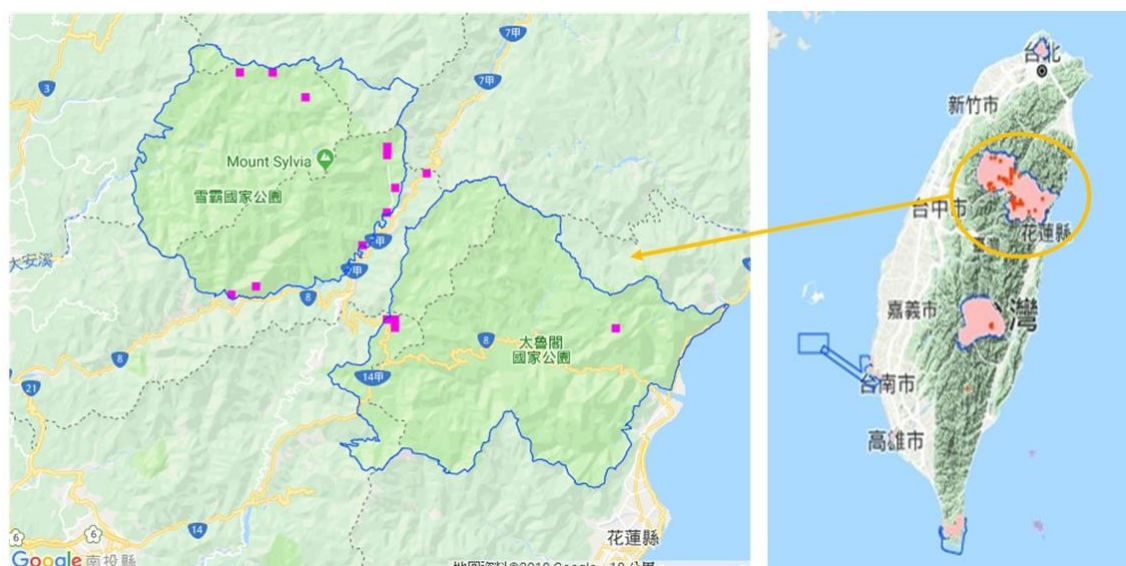


圖 10、臺灣黃杉在臺灣之分布。左圖為臺灣黃杉在臺灣中部山區的分布，右圖為臺灣黃杉在臺灣本島分布。紅點及粉點為臺灣黃杉調查點分布，藍色框線及粉色範圍為國家公園(修改自臺灣國家公園生物多樣性資料庫與知識平臺)。



圖 11、臺灣黃杉樹形、樹葉、樹皮與毬果示意圖。



3.1.2 採樣地點

採樣範圍大約落在武陵農場(2429° 24' 14" N, 121° 18' 14" E)內沿七家灣溪往上至桃山登山口，與周圍的香菇溪及蘭花溪旁，最遠則到臺 7 甲武陵路附近(圖 12)，海拔約在 1750–1950 公尺間。武陵地區地質為四稜砂岩層和水長流層，七家灣溪沿岸階地多為侵蝕性河階，板岩岩盤常露出(王筱雯，2015；張石角，1995)。

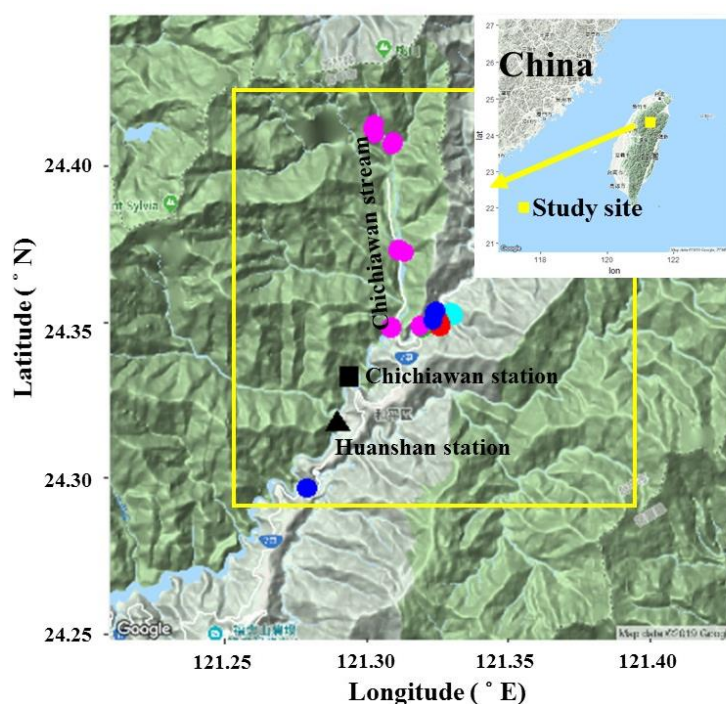


圖 12、臺灣黃杉採樣地點、七家灣溪流量測站與環山測候站地點圖。■為七家灣溪流量測站；▲為環山測站；實心原點為黃杉樣本，不同顏色為不同區，●為武陵農場到桃山登山口；●為蘭花橋附近；●為香菇橋附近；●為武陵地區、臺 7 甲路邊。



3.2 武陵地區氣候與流量資料

蔣丙然(1954)依照柯本氣候分類系統(Köppen climate classification)，將武陵地區氣候歸類為中部山地溫暖濕潤氣候(GCfa)。邱祈榮等(2004)根據崔瓦沙氣候分類系統(Trewartha climate classificatio)，使用全台各地測候站的降雨量與氣溫，以 GIS 套疊，將武陵地區氣候歸在「山地溫帶海洋性夏涼氣候」(GDob)有 78%加上「山地亞熱帶夏季濕潤涼爽氣候」(GCfb)有 22%。兩個系統對武陵地區的分類相似，只是後者做更為精細的分類。在崔瓦沙的氣候分類系統中，GCfb 需超過海拔 600 公尺、雨量小於 3000 毫米(mm)、一年中至少超過 8 個月的最暖月均溫超過 10 °C、夏半年(四至九月)最乾月降水量超過 3 公分且少於 8 個月的平均氣溫超過 10 °C；GDob 海拔也需超過 600 公尺，一年中要有 4 到 7 個月的最暖月均溫超過 10 °C、最冷月均溫超過 0 °C 且少於 8 個月的平均氣溫超過 10 °C。

由圖 10 可知樣本採集位置約分散在武陵地區，因此氣候資料選擇靠近此地區測站。雨量與氣溫的資料是由臺灣電力公司電源開發處環山測候站(24° 19' 02.0" N, 121° 17' 23.0" E)提供；流量資料也由臺電的七家灣溪流量測站(24° 19' 56.0" N, 121° 17' 38.0" E)提供。選用這兩個測站的原因除了位置靠近採樣地點外(圖 12)，測站資料也比附近其他測站(例如：松茂流量測站、合歡溪流量測站、有勝溪流量測站……)長與齊全。

3.2.1 環山雨量與氣溫/七家灣溪流量

環山地區為斯基蘭溪和桃山發源的七家灣溪交會處。根據環山測候站提供的資料，雨量資料長度為 1952–2017；月平均每日最高、月平均每日最低與月平均每日均溫資料為 1958–2017，但每日最高及最低溫在 1961–1966 年有缺失。臺電的七家灣溪流量測站資料從 1967–2017 年，但 2016 年十一月到 2017 年七月，因測站整修暫時停測。環山雨季及高溫月份重疊為五至九月，十至一月則為明顯乾季(圖

13)。七家灣溪濕季約在六至九月，乾季在十一至二月(圖 14)，可跟環山測候站雨量配合。然而，考慮到七家灣溪受人為干擾嚴重，有可能無法確實反映真實流量狀況，Guan et al. (2018a)將鄰近的南湖溪與七家灣溪流量做相關性分析，發現相關性高達 0.87。由於南湖溪受人為干擾較小，是以此相關性可推測七家灣溪流量依然能反映真實流量。

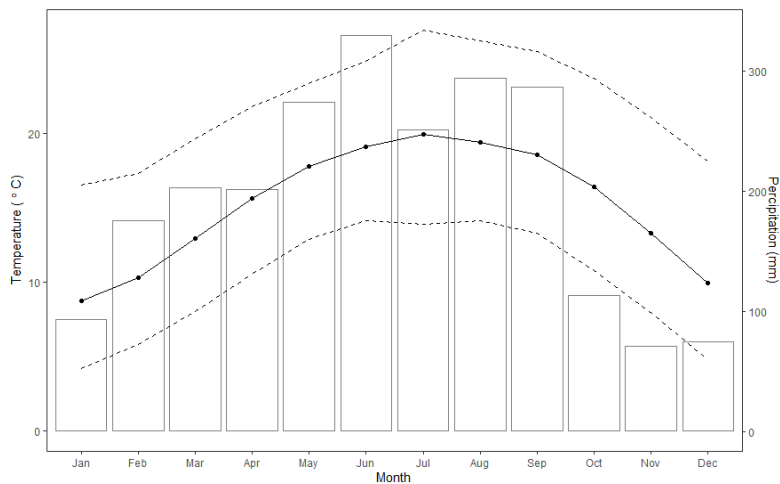


圖 13、環山測候站平均月降雨量與月均溫。長條圖為 1952–2017 平均月降雨量；1958–2017 黑點為月平均每日均溫；虛線為月平均每日最高與月平均每日最低溫。

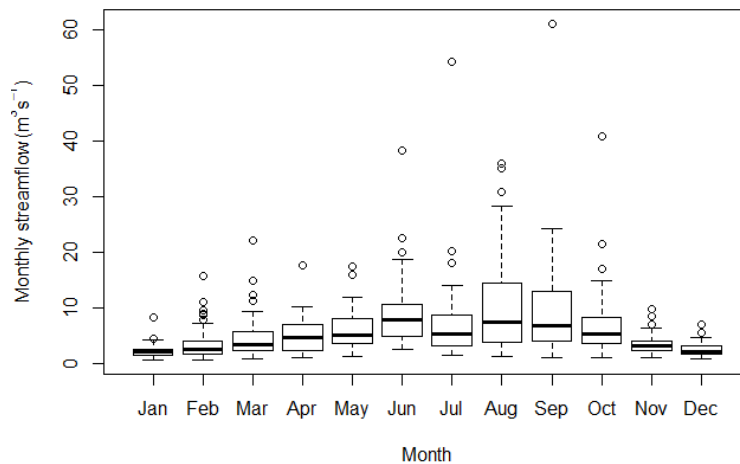


圖 14、七家灣溪流量測站 1967–2015 月流量盒鬚圖。盒鬚圖界線由上而下依序為最大值、第 1 四分位數、中位數、第 3 四分位數及最小值；圓點為極端流量值。



3.2.2 標準化溪流量指數

標準化溪流量指數(SSFI)修改自 McKee et al. (1993)發展的 SPI，可將溪流量以不同的時間尺度(1、2、3、...、12 個月或更長)標準化轉換成 SSFI(Z 值)，例如 SSFI₆ 表示六個月的時間尺度，如八月 SSFI₆ 表示從八月往前推 6 個月(即三至八月)，係由三至八月的平均流量再轉換成 SSFI。標準化後的乾濕程度判定如表 1。建立的方式使用 R 中的 spi 套件(Neves, 2012)，計算 SSFI 的分布函數設定為邏輯斯分布(Logistic distribution)。SSFI (SPI)的優點有：(1)計算簡單，只要溪流量(降雨量)就可計算；(2)時間尺度可變動，應用範圍廣，幫助釐清乾旱的動力機制與開始結束的時間；(3)標準化能確保極端事件在任何時間、地點的發生頻率是一致的(洪致文 & 施明甫，2017)。

表 1、標準化溪流量指數(Standardized Stream Flow Index, SSFI)等級分類

SSFI (Z value)	乾濕程度
≥ 2.00	極端濕潤(extremely wet)
1.50 – 1.99	非常濕潤(very wet)
1.00 – 1.49	中度濕潤(moderately wet)
-0.99 – 0.99	正常(normal)
-1.00 – -1.49	中度乾旱(moderately drought)
-1.50 – -1.99	嚴重乾旱(severely drought)
≤ -2.00	極端乾旱(extremely drought)

註：修改自 McKee et al. (1993)。



3.3 樣本採集、處理與定年

3.3.1 樣本採集

在樣樹的挑選上，為了降低樹輪變異的情況與獲得較長的時間序列，以沒有明顯外傷、樹冠完整且胸徑大的臺灣黃杉為目標。以孔直徑 0.5 公分的生長錐(Increment borer)為採樹芯樣本的工具。生長錐由三個部份組成：把手(Handle)、錐(Borer bit)及抽出器(Extractor)。使用時，生長錐需垂直樹幹，且盡量靠近髓心，高度約在離地面 1.3 公尺位置。通常每棵樹採兩根樹芯，但若地形危險則可能只採一根，取樣後將樣本暫時置放在透明吸管内，封住兩端，接著寫上編號與日期，同時記錄胸徑大小、生長錐鑽取方向並以 GPS 定位樣樹位置。

本論文的樣本在 2014–2016 年採集完畢，總共有 87 棵樹，158 根樹芯。

3.3.2 樣本處理

採回的樹芯樣本需依序進行三階段的前處理：乾燥、上膠與砂磨。首先將樹芯樣本以紙膠帶固定兩端在特製木條上進行乾燥，並用重物壓制固定好的樣本至少一個禮拜，避免樣本扭曲、變形和彎曲。接著將樣本以少許白膠黏至木條上，固定時需注意樹芯纖維要垂直木條(亮帶在兩側)，才能觀察到完整的輪。完成上膠的步驟後，最後用不同粗細的砂紙(砂紙使用順序粗至細：400→600→800 目)砂磨，讓樹輪能以肉眼或顯微鏡清楚看到。

3.3.3 初步定年與輪寬測量

在初步定年時，會以顯微鏡或肉眼數樹輪。從有樹皮的最外圍往髓心數，以十年為一單位用鉛筆做記號，常用的記號標示在圖 15。最外圍通常為採樣那年或前一年，若在年初採樣，因為還未長當年生長輪，最外圍就會為前一年。初步定年會先比較同一棵樹的兩根樹芯的輪寬變異模式是否一樣，倆倆互相比對進行簡單

調整。接著也會跟樣本狀況良好、輪寬明顯，且沒有疑似偽輪或缺輪狀況的樣本進行交叉比對。

為了能夠使用統計交叉定年再確認定年正確性，需先測量每根樹芯樣本每輪的寬度數值。使用 Velmax 測量系統加上 J2X 軟體測量早材與晚材寬度，通常在細胞開始變窄小的地方及為早晚材界線。Velmax 測量系統包含顯微鏡、量測移動載臺加上數位轉換器(Unislid assembly with acu-rite linear encoder)、即時數位輸出器(Quick-check digital readout)等，解析度為 0.001 mm，精準度在 $\pm 1.8 \mu\text{m}$ 間。

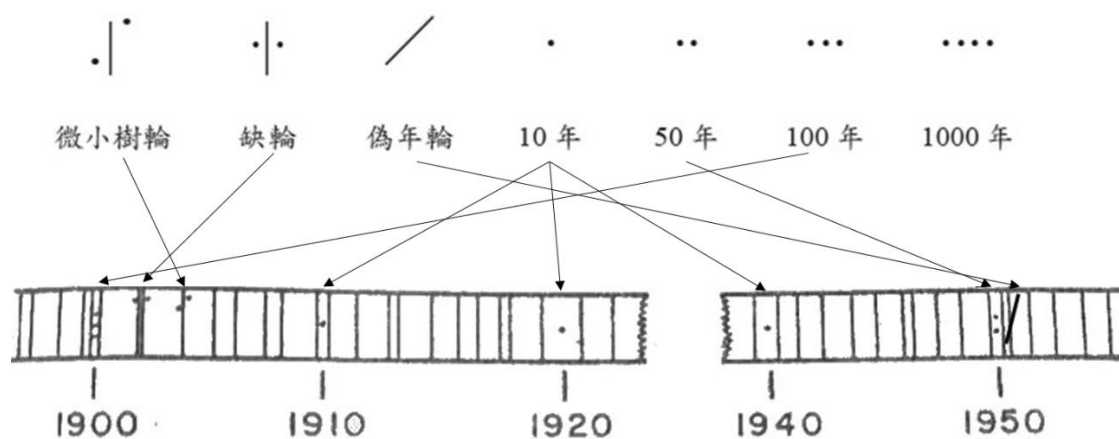


圖 15、樹芯初步定年標示圖(修改自 Stokes & Smiley, 1968；蔣麗雪，2011)。

3.3.4 統計交叉定年

Holmes (1983)開發軟體 COFECHA，將測量的樹輪輪寬進行統計交叉定年，此軟體依舊沿用至今。在 COFECHA 設定上，以 32 年視窗(Window size)的三次平滑樣條曲線(Cubic smoothing spline)過濾低頻訊號，因為 Holmes 發現 32 年視窗的三次平滑樣條曲線是最適合的曲線長度，能增強年際變異進而導致有力的定年(Speer, 2010)。參考蔣麗雪(2011)對 COFECHA 軟體的設定，每個輪寬序列進行自然對數轉換(Natural log-transferred)可突顯窄輪或寬輪的效應，再將所有的序列加總平均得到主序列年表(Master chronology)。為了比對各序列與主序列的相關性，設

定 50 年移動視窗並以 1 年的方式進行移動比對。以相關性的結果判斷是否在初步定年有延遲或超前的狀況，再返回初步定年的步驟進行確認及調整，反覆進行直到每根調整完畢。大致以跟主年表相關性 0.35 以上當作挑選基礎，調整過後不符合的則不使用，但在以下這兩種狀況即使相關性較差一點(0.3 左右)還是會納入使用：(1)樹芯樣本長，(2)檢查過樣本，判斷定年沒有問題。第一點是因為通常樹芯樣本太長，前面的年份樣本較少，導致相關性降低。藉由 COFECHA 幫助，最後從 158 根樹芯中篩選出 72 根樣本。

篩選出的樹芯樣本以 ARSTAN(Cook and Holmes, 1986)計算樣本量總體代表性(Expressed population signal, EPS)。Wigley et al. (1984)提出 EPS，用來幫助判別有限數量的序列平均值是否足以代表總體的平均。可藉由移動平均樹間相關性跟樹芯平均數量，算出每年氣候重建的可信度，本文以 EPS 值 0.8 為指標，大於 0.8 表示具有足夠可信度。越早期樣本數會越少，代表性較容易不足。

3.4 集成經驗模態分解法建立輪寬年表

3.4.1 經驗模態分解法原理

傳統樹輪年表建立常使用 ARSTAN，但使用 ARSTAN 需要決定去除生長趨勢(Detrend)的函數，以及可能移除非生長訊號的低頻率訊號的問題。導致在選擇去趨勢函數時，需要更多的經驗，且容易造成不客觀的結果(Guan et al., 2018 a, b)。Huang et al. (1998)開發新方法—經驗模態分解法(Empirical Mode Decomposition, EMD)處理非平穩及非線性的資料。EMD 不需事先假設趨勢，屬於後設(*a posteriori*)，這個方法能較為客觀的建立年表。EMD 可將任何複雜的時間序列分解，保留資料固有的特性，將資料拆解成有限的數個週期性振盪加上一殘差項(3.1)。每一振盪可被視為一「內秉模態函數」(Intrinsic mode functions, IMF)。殘差項可能是單一極值、單調函數或常數，若不是常數，則可視為分析資料的趨勢(Trend)。

$$X_{(t)} = \sum_{i=1}^n IMF_i + r \quad (3.1)$$

$X_{(t)}$ 為分析資料； IMF_i 為第 i 個 IMF； r 為殘差項、趨勢； n 為 IMF 個數。IMFs 需從原始資料 $X_{(t)}$ 中一次一次被萃取出。首先每一個 IMF 都必須符合以下兩個條件 (Huang & Wu, 2008)：

- (1) 在資料中，局部極值點個數與橫跨零的點個數須相等或最多相差 1。
- (2) 在資料中任一點會包含在一個局部極大值與極小值中，而這兩個極值的平均需為零。

如何萃取出 IMFs 可配合圖 16 解說。將要分析的原始資料 $X_{(t)}$ 輸入(圖 16 a)，接著找出原始資料所有的局部極大與極小值(圖 16 b)。將這些局部極大值與極小值的點分別用三次樣條(Cubic spline)曲線連接，藉由兩條上下界曲線可算出平均(虛線)(圖 16 c)。將原始資料減掉上一步驟算出的平均，則得到圖 16 d 的曲線，為 IMF 原型，然而原型尚未符合上述 IMF 的條件，會反覆進行 b 到 d 的步驟，直到符合 IMF 的兩個條件後，得到第一個 IMF(圖 16 e)。將原始資料減掉圖 16 e 的曲線，得到的殘差值。此殘差值將會被當作一個新的原始資料，再重新進行 a 到 d 的步驟，得到第二個 IMF 與殘差值，反覆進行直到殘差值無法再萃取出新的 IMF。圖 17 表示萃取出數個 IMFs (c1-c8)，IMF 會從高頻到低頻依序萃取出，加上一個最後無法再萃取出 IMF 的殘差(趨勢)。

資料中的各個訊號應該要持續性的出現，但當訊號有間歇性時，會造成模態混雜(Mode mixing)的問題。模態混雜為資料無法分離清楚，表示一 IMF 內會有兩種不同頻率的訊號交雜，因此 EMD 優化出更進一步的版本集成經驗模態分解法 (Ensemble Empirical Mode Decomposition, EEMD) (Wu & Huang, 2009)。與 EMD 不同的是，EEMD 會在每次萃取 IMF 前，先加入一組白噪(White noise)，讓可能交雜的訊號可以更清楚的被分離。為了抵消白噪，會多次重覆整個步驟，重複次數夠大則可利用加總平均平分掉加入的白噪。每次加入相同強度的白噪，萃取出 IMFs 加一殘差，藉由平均相同頻率的 IMFs 與各個殘差，得到 EEMD 的結果。本論文

將參考 Guan et al. (2018b)以 EEMD 建立臺灣黃杉樹輪寬度年表。

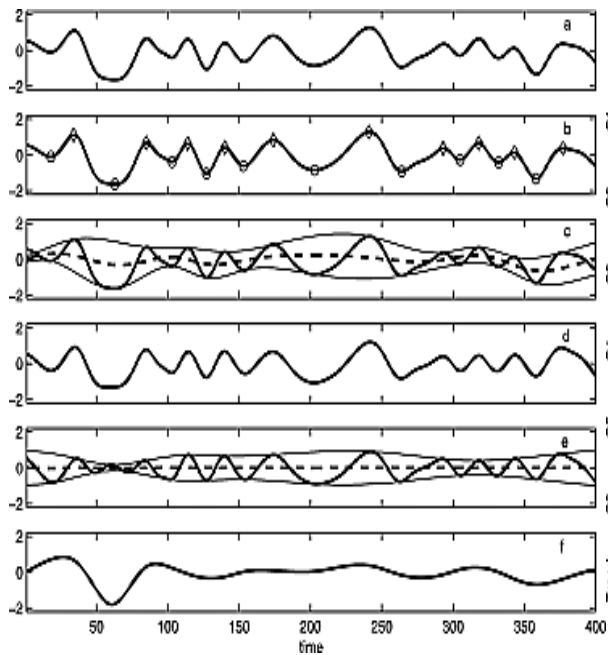


圖 16、經驗模態分解法(Empirical Mode Decomposition, EMD)篩選過程。(a)原始資料示意圖；(b)定義原始資料局部極大與極小值；(c)局部極大值與極小值分別形成上下界線(實線)與平均值(虛線)；(d)內秉模態函數(Intrinsic mode functions, IMF)原型，未符合 IMF 條件；(e)反覆精煉得到的 IMF，符合 IMF 條件；(f)資料萃出 IMF 剩餘的部分(取自 Huang & Wu, 2008)。

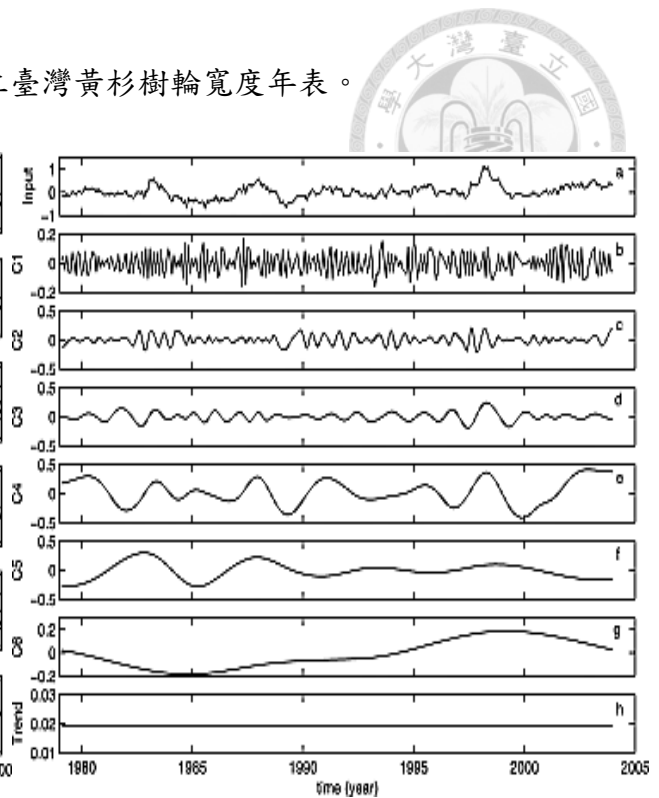


圖 17、經驗模態分解法分解結果。(a-g)IMFs；(h)殘差(趨勢)(取自 Huang & Wu, 2008)。



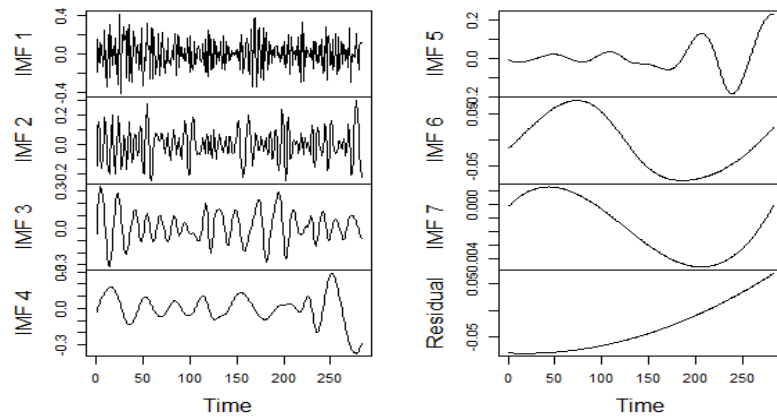
3.4.2 輪寬年表建立

氣象資料屬於非線性的資料(Guan, 2014)，因此樹輪中包含的氣候因子訊號也屬於非線性。樹木的生長從幼年到壯年到老年，通常從逐漸旺盛到趨緩，導致生長趨勢趨近 S 型或有單一極值。藉由 EEMD 可將樹木的生長趨勢與非生長趨勢分離。非生長趨勢的各個 IMF 可能為氣候訊號或其他內部與外部因子訊號。本論文希望能找到樹輪中的水文訊號(屬於氣候因子一種)，會藉由 EEMD 移除生長趨勢，從萃取出的 IMFs 中找水文訊號(Guan et al., 2018 a, b)。

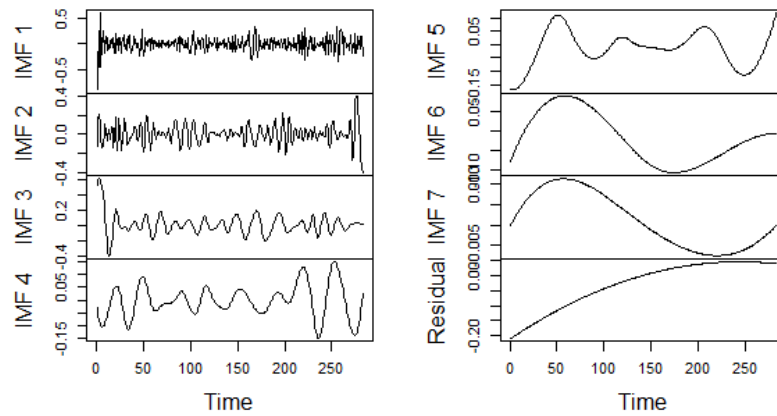
本研究使用 R 軟體中 Rlibeemd 套件(Luukko et al., 2016)的 eemd 函數。在參數設定上，嘗試相對於輸入資料的標準差：0.01、0.05、0.1、0.15、0.2、...、0.5 倍的白噪強度，最後選擇 0.1 的白噪強度，因為建立出的年表跟 SF 與 SSFI 的相關性最高。集成大小(Ensemble size)即為 3.4.1 提及重複的次數，設定 5000。以早材為例，在操作上首先會對每一根黃杉樹芯的早材序列做第一次 EEMD，使每根樹芯得到一組 IMFs 跟一趨勢。移除每一根樹芯的生長趨勢，把每一組的 IMFs 加總，得到 72 組時間序列，再將這 72 組以相同年分進行平均，得到一新時間序列。將新序列再進行一次 EEMD，將殘留的所有趨勢都去除，最後得到 IMF1、IMF2、...、IMF7 加一殘差(圖 18 a)。晚材與全輪也以同樣步驟進行，則可得到晚材與全輪的分解訊號組成(圖 18 b、c)。以 EEMD 進行的好處，除了客觀且能保留資料特性外，也能保留原本的單位。樹輪寬度經 EEMD 轉換後，其單位依舊為毫米。

早材、晚材與全輪都各有 7 個 IMF，將 IMF 以 IMF1、IMF1-2、IMF1-3、...、IMF1-7(例如 $IMF1-3 = IMF1 + IMF2 + IMF3$ ，其他以此類推)，分成 7 個早材年表，7 個晚材年表與 7 個全輪年表，共 21 個年表。將 7 個 IMF 相加的波動，表示移除生長趨勢後樹輪寬，單位為毫米。0 為一基準，表示移除生長趨勢後的平均生長的樹輪寬，負值表示比平均少，並非負向生長。

(a)



(b)



(c)

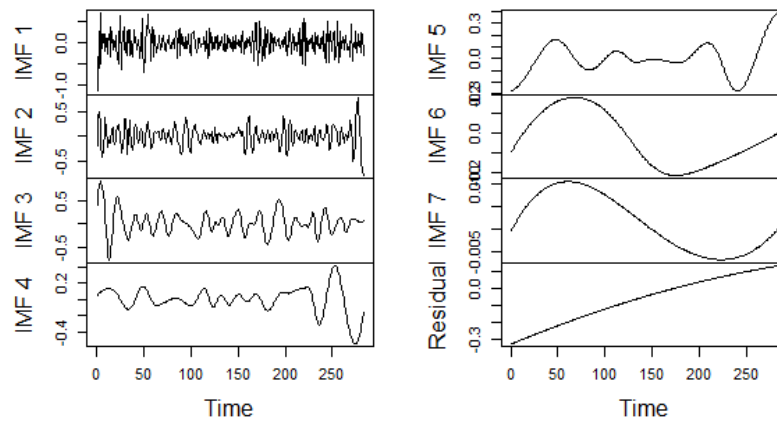


圖 18、臺灣黃杉輪寬集成經驗模態分解法(Ensemble Empirical Mode Decomposition, EEMD)分解圖。(a)黃杉早材；(b)黃杉晚材；(c)黃杉全輪。



3.4.3 校正晚材

Meko & Baisan (2001)發現早晚材有正相關，表示晚材也受之前環境影響，並非只與夏季降雨有關，導致研究晚材與其季節性影響的相關性降低。因此本研究將移除早晚材間的相互關聯，提高晚材與季節性氣候影響的相關性。依照 Meko & Baisan (2001)的方法建立校正晚材，以晚材做為依變數；早材為自變數，建立早晚材間的線性模型。從迴歸模型中找出殘差值，加上常數 1，恢復平均值為 1 的數列，最後所得的數列就被稱為「校正晚材」(Adjusted latewood)。以 EEMD 得到的各個 IMF 早晚材年表做相關性分析(表 2)，每組之間都有正相關，接著依照上述方法建立校正晚材，後續的統計分析使用校正晚材而非晚材。

表 2、臺灣黃杉早材與晚材對應內秉模態函數(Intrinsic mode functions, IMF)間的相關性

IMF1	IMF1-2	IMF1-3	IMF1-4	IMF1-5	IMF1-6	IMF1-7
0.41	0.54	0.65	0.66	0.65	0.66	0.66

3.5 重建七家灣溪流量指標

3.5.1 相關性分析

將 21 個年表：早材、校正晚材與全輪輪寬年表(IMF1、IMF1-2、...、IMF1-7)與各種時間尺度的七家灣 SSFI (SSFI1、SSFI2、...、SSFI12)和 SF 資料，上傳到荷蘭皇家氣象署(The Royal Netherlands Meteorological Institute；荷蘭文 Koninklijk Nederlands Meteorologisch Instituut, KNMI) Climate Explorer (<http://climexp.knmi.nl/>)上，進行相關性分析(Trouet & Van Oldenborgh, 2013)，找出相關性最高的配對。最後篩選且驗證完的年表，以 R 軟體中 dplR 套件(Bunn et al., 2019)進行 20 年低通濾

波(low-pass filter)分析及 astrochron 套件(Meyers, 2014)進行多正交窗口頻譜分析(Multitaper method spectrum analysis)。



3.5.2 模型建立

找到相互間相關性高的臺灣黃杉輪寬年表與流量因子後，以 R 軟體建立線性迴歸模型，輪寬年表為自變數；流量因子則是依變數。初步建立線性模型後，再加入單獨的 IMF 輪寬年表(IMF2、IMF3、...、IMF7)為自變數，以逐步選取法(Stepwise selection)，觀察相關性是否有提高。例如若選到的年表為全輪 IMF1-4，會再加入全輪 IMF5、IMF6 與 IMF7 做逐步選取法。在選取的方法上，結合向前選取法(Forward selection) 和向後選取法(Backward selection)，同時考慮新增及移除變數的差異。最後以變異數分析(Analysis of variance)確認若增加新的變異數有無顯著差異(Guan et al., 2018 a, b)。

3.5.3 模型驗證

本研究以分期驗證的方式(Split-period validation)的方式驗證所建立的模式在時間上的重建的穩定性。在檢驗模型時，將流量資料分成三部分：依時間分成前後兩段加上整段。三段流量資料建立的線性模型均需要滿足誤差項的三大線性模型假設前提(Dibiasi & Bowman, 1997; Kutner et al., 2005; Razali & Wah, 2011)：

(1) 常態性(Normality)

若樣本是常態分布，誤差項也會呈現常態分布。常態檢驗使用 Shapiro-Wilk 常態性檢定(R 軟體內建)，在假設時， H_0 是表示誤差項是常態分布，所以需要接受 H_0 ，模型才符合假設。

(2) 獨立性(Independency)

自變數的誤差項之間需獨立，不能有自相關，否則在估參數時，會讓統計



檢定力下降。檢定使用 car 套件之 durbinWatsonTest 函數(Fox & Weisberg, 2019)， H_0 表示殘差值間沒有自相關存在，接受 H_0 ，模型才符合假設。

(3) 變異數同質性(Constant variance)

變異數若不相等，會讓應變數沒辦法有效被估計。在 R 中，檢定變異數同質性使用 car 套件(Fox & Weisberg, 2019)之 ncvTest 函數。

另外，為了驗證誤差縮減值(Reduction of error, RE)與效率係數(Coefficient of efficiency, CE) (Cook et al, 1994; Cook et al, 1999)，將流量資料依時間長度分成前後兩段。RE 與 CE 值介於負無窮大到 1 之間，若值介於 0 到 1 之間表示重建技巧可信，負值表示觀測值跟預測值不相似，且 CE 的檢測標準會比 RE 嚴格。計算方法先以後段資料作為校正期建立線性模型，再用前段資料當作檢驗期進行驗證，接著將校正期與檢驗期的前後段資料互相交換，再驗證一次。若兩個模型都通過驗證，表示模型穩定。計算公式如下。

$$(1) RE = 1.0 - \frac{\sum_{(i=1)}^n (y_i - \hat{y})^2}{\sum_{(i=1)}^n (y_i - \bar{y}_c)^2} \quad (2) CE = 1.0 - \frac{\sum_{(i=1)}^n (y_i - \hat{y})^2}{\sum_{(i=1)}^n (y_i - \bar{y}_v)^2}$$

y_i : 檢驗期觀測值 \hat{y} : 檢驗期推估值

\bar{y}_c : 校正期觀測值平均 \bar{y}_v : 檢驗期觀測值平均

在後續模型建立及驗正後，使用 R 軟體設定固定移動視窗並以 1 年的方式進行移動，建立每段移動平均相關性(Moving average correlation)。接著建立每個相關性的信賴區間，確定信賴區間不包含 0，表示相關性是穩定的，並確定每一段的線性迴歸結果都符合常態分布。最後，為觀察重建流量趨勢，將重建流量以重建值減去相對應月份的平均觀測值，得重建距平序列(Anomaly)，並以 20 年低通濾波轉換。

SSFI 已是轉換過的指標則不需再做低通濾波轉換。



3.6 遙相關場域分析

荷蘭皇家氣象署 KNMI Climate Explorer 為氣象資料庫，除含有各式各樣的氣象資料外，也能直接在網站上進行分析。使用的網格資料，SST 資料是經過英國哈德利氣候預測與研究中心(Met Office Hadley Center)已處理成 $1^\circ \times 1^\circ$ 經緯度網格的全球海面溫度重建值(HadISST1 1° reconstruction)，時間長度從 1870 年到現在(每月更新)。SLP 的資料來自於美國國家海洋暨大氣總署(National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA)開發的 20 世紀重分析數據(Reanalysis data)與 Kalnay et al.(1996)的 40 年重分析計畫數據。重分析數據為利用觀測數值進行模擬，建立一組更好的三維觀測資料。前者長度從 1851–2011(目前供應至 2011 年)每月平均網格化(經緯度各 2°)的北半球海平面氣壓重分析數據；後者則從 1948 開始持續到現在。重分析數據能彌補觀測資料的不足，因為在匯入即時觀測資料時，可能會有缺失或勘誤。另外，為了確定流量與雨量的關係，使用 Climatic Research Unit Time-Series (CRU TS)數據集 $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ 經緯度網格的雨量，由英國自然環境研究委員會(Natural Environment Research Council) 和美國能源部提供。

將觀測與重建的 SF 及 SSFI 上傳到 KNMI Climate Explorer，先與 Climate Explorer 上提供的 PDO、Niño3、Niño3.4、Niño4、NAO 與 AO 指數做相關性分析，找到相關性較高的月份，SF 及 SSFI 再分別跟 SST、SLP 及 CRU TS 雨量等資料進行場域相關性分析。藉由繪出的場域相關性圖，觀察是否受大氣海洋交互作用的遙相關影響，在哪個月份受到最大的影響與重建的氣候是否跟觀測氣候表現一致。繪出的範圍設定為緯度 -90° 到 90° ；經度 0° 到 360° 。另外，為了觀察北極振盪的影響，也會繪出北極平面投影(North polar stereographic)的地圖類型。

第四章 結果



4.1 臺灣黃杉樹輪寬度年表

以 COFECHA 調整及挑選樹芯，最終篩選完建立年表的樹芯有 72 根，時間從 1732–2014。樹間相關性以 0.35 進行挑選，最終平均樹間相關性介於 0.44–0.53 間，最高為早材；最低為晚材，敏感度則介於 0.32–0.40(表 3)。敏感度稍高蔣麗雪(2011)研究中臺灣黃杉的平均敏感度 0.29–0.37。與過往研究比較，即可發現臺灣黃杉的敏感度較許多樹種高，例如冷杉、雲杉、紅檜等(陳信豪，2015；陳姿彤，2011；黃聖焜，2013；鄒佩珊，1998)。雖然樣本長度從 1732 年開始(圖 19)，但之後重建僅呈現有足夠樣本的部分，早材 EPS 在 1785 年後才達到 0.80；全輪在 1795 年後；晚材則在 1800 後(表 3)。

有 32 個年分，部份樹芯有缺輪現象，但在 1910 與 1963–1967 年，為較多樣本發生缺輪的年分。此地區有發生火災的現象，像是有樹芯在 1963 年有火疤的痕跡，表示此地的缺輪有可能受火災影響。

表 3、臺灣黃杉樹輪輪寬相關統計表

	平均樹間相關性	平均敏感度	EPS > 0.8
全輪	0.51	0.32	1795–2014
早材	0.53	0.34	1785–2014
晚材	0.44	0.40	1800–2014

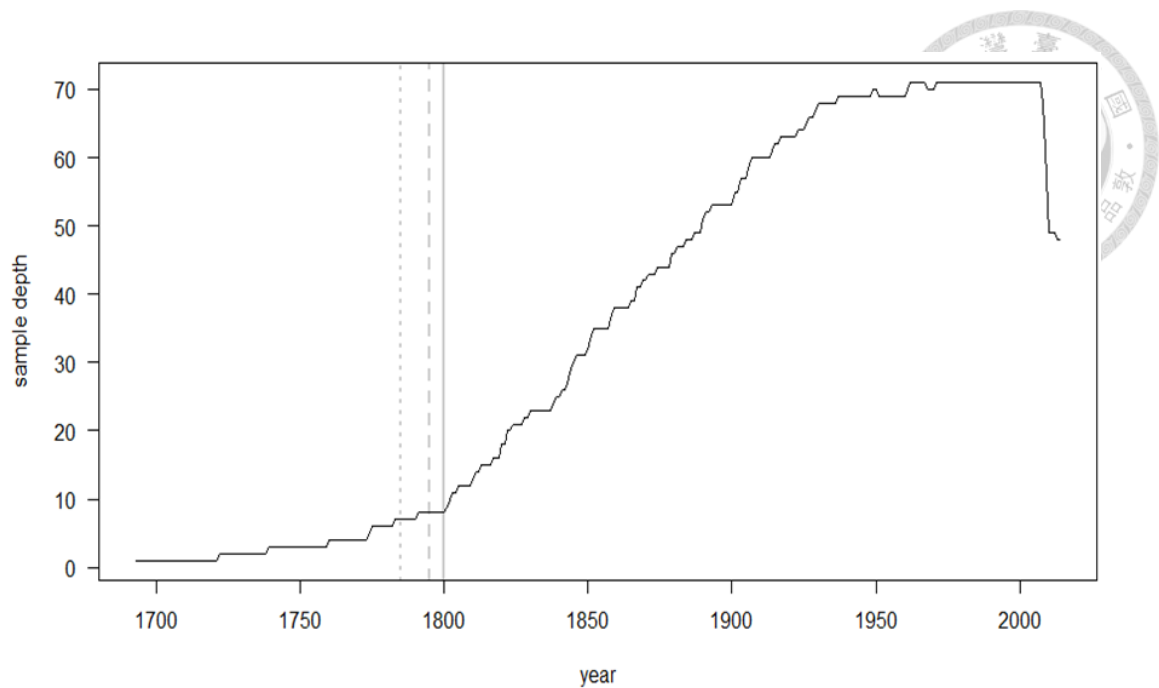


圖 19、臺灣黃杉樹芯樣本數量累積。灰線由左至右為早材、全輪與晚材樣本量總體代表性(Expressed population signal, EPS)開始大於 0.8，依序為 1785、1795 與 1800。

4.2 臺灣黃杉年表與流量因子間相關性分析

首先，以全輪、早材與校正晚材的各 7 個 IMF 年表與七家灣溪各個時間尺度的 SF 及 SSFI 做相關性分析。結果顯示全輪與早材的 IMF1-3 年表跟流量因子(SF、SSFI)的相關性最高；校正晚材則是 IMF1-5 年表有最高的相關性。全輪 IMF1-3 與早材 IMF1-3 跟時間尺度為 6、7、8、9 個月的 SSFI 相關性較好(表 4、表 5)；校正晚材 IMF1-5 的結果則不同，跟時間尺度為 1、9、10、11 個月的 SSFI 相關性較好(表 6)。

樹輪年表的長度為 1785–2014 年，七家灣溪流量紀錄為 1967–2015 年，相關性分析的範圍落在重疊的兩時間點間：1967–2014 年。然而分析兩序列在 1967–2014 期間的相關性時，發現相關性不高，所以嘗試縮短時間長度。由於 Guan et al. (2018a) 研究已重建到 2008 年，若以大於 2008 年為目標，最後結果在 1968–2009 年，兩

時間序列的相關性會最高；1968–2013 期間次之，最終重建結果以這兩段時間的資料建立模型。

不論時間序列長度是 1968–2009 或 1968–2013 年，均為早材 IMF1-3 與七家灣 SF 及 SSFI 的相關性最高。全輪 IMF1-3(表 4)與早材 IMF1-3(表 5)的結果相似，均與自二月回推 6 個月(即前一年九月至當年二月 September to February)的 SF (SF_{SF}) 及 SSFI ($SSFI_{SF}$)、自三月回推 7 個月的 SF (SF_{SM})及 SSFI ($SSFI_{SM}$)、由四月回推 8 個月的 SF (SF_{SA})及 SSFI ($SSFI_{SA}$)與由五月回推 9 個月 SF (SF_{SMay})及 SSFI ($SSFI_{SMay}$)間的相關性較好。早材 IMF1-3 跟全輪 IMF1-3 與 SSFI 的結果也可以跟平均流量相關性最高的月份相互呼應。早材跟全輪的 IMF1-3 與 SF 及 SSFI 相關性分析的結果相似，但早材 IMF1-3 跟流量因子的相關性更好，所以在後續重建上使用早材 IMF1-3 嘗試重建 $SSFI_{SF}$ 、 $SSFI_{SM}$ 、 $SSFI_{SA}$ 與 $SSFI_{SMay}$ ，及 SF_{SF} 、 SF_{SM} 、 SF_{SA} 與 SF_{SM} 。相關性結果以 0.7 左右為標準，由於後續迴歸模型的解釋變異能力(亦即決定係數，Coefficient of determination, R^2)為相關性的平方值，所以至少要相關性 0.7 左右其迴歸模型解釋變異能力才約有 50%。校正晚材 IMF1-5(表 6)則與早材與全輪的結果相異，且校正晚材跟流量因子的相關性都過低，重建並沒有太大意義。

以最終篩選出的早材 IMF1-3 經 20 年低通濾波(圖 20)後可看出年表大致的趨勢，在 1880–1940 期間有較明顯的起伏。經由多正交窗口頻譜分析並以紅噪(Red noise)為背景所建立的信賴水準，可看出早材 IMF1-3 年表的顯著週期為 2–4、14–17 與 19–24 年，配合 2.4.1 與 2.4.2 中 ENSO 與 PDO 週期，是以黃杉樹輪中應含有 ENSO 與 PDO 的訊號(圖 21)。

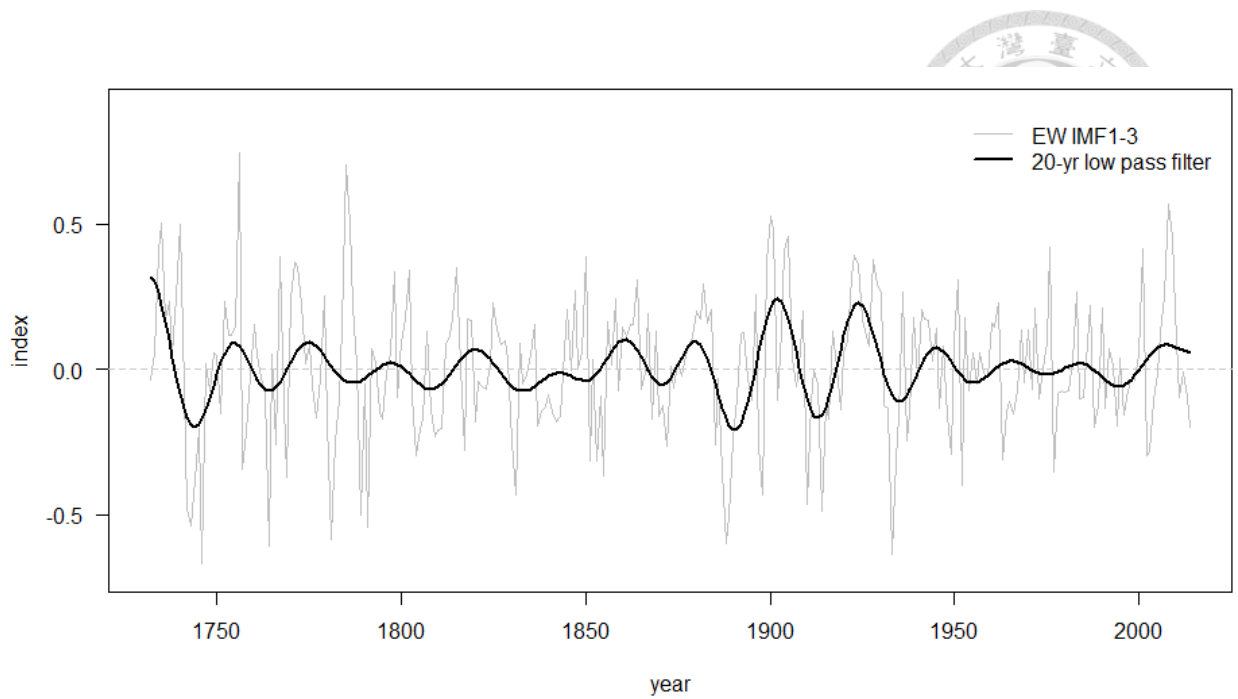


圖 20、臺灣黃杉早材內秉模態函數(Intrinsic mode functions, IMF) IMF1-3 年表 20 年低通濾波之結果。

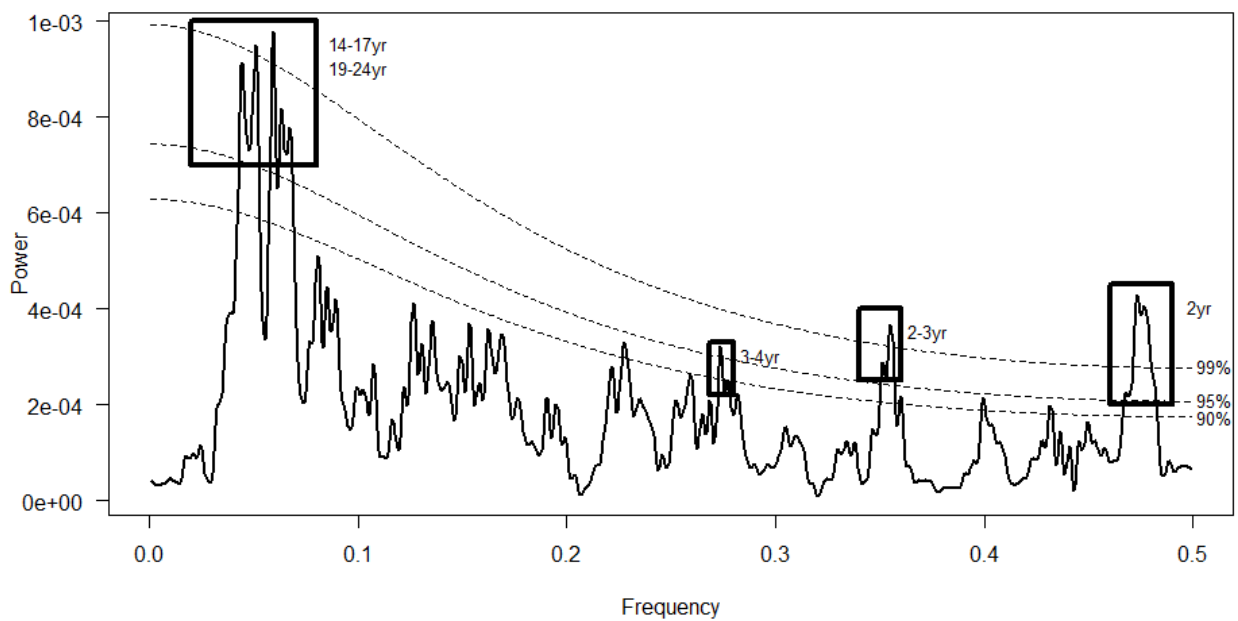


圖 21、臺灣黃杉早材 IMF1-3 年表之多正交窗口頻譜。矩形內為高於以紅噪為背景所建立的 95%或 99%信賴區間頻率之週期。

表 4、臺灣黃杉全輪 IMF1-3 年表與七家灣溪流量(Streamflow, SF)及 SSFI 間最高相關性



		1968–2009		1968–2013
		Month	Correlation	Correlation
七家灣溪	SF	9_{p-2}	0.66	0.65
		9_{p-3}	0.67	0.66
		9_{p-4}	0.68	0.66
	SSFI	9_{p-5}	0.68	0.64
		9_{p-2}	0.67	0.63
		9_{p-3}	0.68	0.65
		9_{p-4}	0.67	0.64
		9_{p-5}	0.68	0.62

表 5、臺灣黃杉早材 IMF1-3 年表與七家灣 SF 及 SSFI 間最高相關性

		1968–2009		1968–2013
		Month	Correlation	Correlation
七家灣溪	SF	9_{p-2}	0.72	0.70
		9_{p-3}	0.75	0.72
		9_{p-4}	0.76	0.73
	SSFI	9_{p-5}	0.74	0.70
		9_{p-2}	0.71	0.67
		9_{p-3}	0.74	0.70
		9_{p-4}	0.74	0.71
		9_{p-5}	0.73	0.68



表 6、臺灣黃杉校正晚材 IMF1-5 年表與七家灣 SF 及 SSFI 間最高相關性

		1968–2009		1968–2013
		Month	Correlation	Correlation
七家灣溪	流量	12 _p –4	0.53	0.49
		4 _p –1	0.53	0.50
		4 _p –2	0.53	0.50
	SSFI	7	0.49	0.47
		5 _p –1	0.43	-
		4 _p –1	0.43	-
		12 _p –4	-	0.42
		12 _p –5	-	0.42

註：表 4 至表 6 的時間長度分別為 1968–2009 與 1968–2013， p 表示前一年。

4.3 模型建立檢測

從 4.2 的相關性的結果來看，早材 IMF1-3 與七家灣溪流量因子的相關性最好 (表 5)。然而，流量資料在 2005 年後，有偏高的流量值。造成原先以原始平均流量建立的模型，殘差在同質性分析時，變異數異質，有些微隨著時間增加的趨勢。當資料的誤差變異數異質，若以系統方式轉換資料可以有效穩定變異數(Kutner et al., 2005)。資料轉換最常使用的有平方根轉換與對數轉換，經過嘗試後，平方根轉換能解決變異數異質的問題。最後將七家灣溪平均溪流量(SF_{SF} 、 SF_{SM} 、 SF_{SA} 與 SF_{SMay})經過平方根轉換，再以早材 IMF1-3 年表建立其模型。SSFI 已是標準化的因子，可直接以早材 IMF1-3 年表建立模型。

建立的線性模型以常態檢測、變異數同質性與自相關檢測殘差是否為：(1)常態；(2)變異數齊一；(3)獨立，以時間長度分成 Model I: 1968–2009 期間與 Model II：

1968–2013 期間，再以分期驗證法驗證模型穩定性，將時間分成兩半進行檢測。

Model I (1968–2009) 拆成 1968–1988 與 1989–2009，Model II (1968–2013) 拆成 1968–1990 與 1991–2013，檢測數值呈現於附錄附表。最後，以 RE 與 CE 確認觀測值與重建值是否相似，一樣以分期驗證法，將時間拆半相互檢測。溪流模型檢測結果顯示，Model I 跟 II 的七家灣 SF_{SF} 與 Model I 的 SF_{SM} 通過所有檢測(附表 1–6)，且 RE 與 CE 均大於 0 (表 7–表 9)，表示重建可信。Model II SF_{SF} 的 RE 與 CE 值，前後期較接近。若 RE 與 CE 的前後期值越接近表示前後期訊號穩定。從 R^2 來看，Model I 的 SF_{SM} 的重建解釋率最高(56%)，接著為 Model I 的 SF_{SF} 的為 53%，Model II 的 SF_{SF} 的為 49%。模型 SSFI 檢測結果顯示，以 Model I 跟 II 重建的 $SSFI_{SF}$ 通過所有檢測，且 RE 與 CE 均大於 0，表示重建的 $SSFI_{SF}$ 可信(表 10、表 11)。Model II 中，RE 為 0.42、0.46，CE 為 0.40、0.43，值比 Model I 接近，表示前後訊號更穩定。後續以 Model I (1968–2009) 重建 $SSFI_{SF}$ 的重建值，解釋率為 50%，大於以 Model II (1968–2013) 重建 $SSFI_{SF}$ (解釋率 45%)。Model I 的解釋率較高，但 Model II 前後訊號更一致。

表 7、依據臺灣黃杉早材 IMF1-3 所建立在 1968–2009 期間之前一年九月至當年二月七家灣 SF (SF_{SF}) 線性模型分期驗證檢測

Calibration		Verification		
Period	R^2	Period	RE	CE
1968–1988	0.42	1989–2009	0.54	0.50
1989–2009	0.59	1968–1988	0.38	0.27
1968–2009	0.53			

表 8、依據臺灣黃杉早材 IMF1-3 所建立在 1968–2013 期間之七家灣 SF_{SF} 線性模型
分期驗證檢測

Calibration		Verification		
Period	R ²	Period	RE	CE
1968–1990	0.47	1991–2013	0.48	0.45
1991–2013	0.51	1968–1990	0.44	0.38
1968–2013	0.49			

表 9、依據臺灣黃杉早材 IMF1-3 所建立在 1968–2009 期間之前一年九月至當年三
月七家灣 SF (SF_{SM}) 線性模型分期驗證檢測

Calibration		Verification		
Period	R ²	Period	RE	CE
1968–1988	0.50	1989–2009	0.58	0.56
1989–2009	0.60	1968–1988	0.49	0.44
1968–2009	0.56			

表 10、依據臺灣黃杉早材 IMF1-3 所建立在 1968–2009 期間之前一年九月至當年二
月七家灣 SSFI (SSFI_{SF}) 線性模型分期驗證檢測

Calibration		Verification		
Period	R ²	Period	RE	CE
1968–1988	0.43	1989–2009	0.53	0.51
1989–2009	0.54	1968–1988	0.43	0.38
1968–2009	0.50			

表 11、依據臺灣黃杉早材 IMF1-3 所建立在 1968–2009 期間之七家灣 SSFI_{SF} 線性
模型分期驗證檢測

Calibration		Verification		
Period	R ²	Period	RE	CE
1968–1990	0.48	1991–2013	0.42	0.40
1991–2013	0.44	1968–1990	0.46	0.43
1968–2013	0.45			

從所有檢測結果來看，後續以早材 IMF1-3 重建七家灣 SF_{SF}、SF_{SM} 與 SSFI_{SF} 的重建值是可信的。設定 26 年為移動視窗寬度並以 1 年移動，分別建立與 IMF1-3 移動平均相關性與其信賴區間。可以發現所有時間序列間的相關性，95%信賴區間都大於 0 (圖 22、圖 23)，且每段的 Shapiro 殘差常態檢測也都為常態分布($p > 0.05$)，表示相關性穩定，幫助佐證這段時間序列裡氣候的影響為穩定。

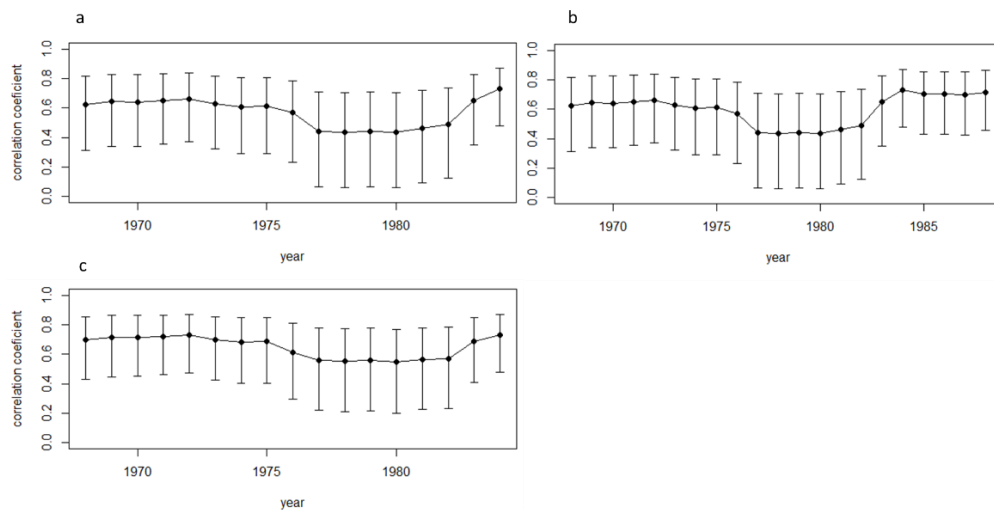


圖 22、臺灣黃杉早材 IMF1-3 與七家灣溪流量(Streamflow, SF)間的 26 年移動平均
相關性。(a)以 1968–2009 期間重建(Model I)之 SF_{SF}；(b)以 1968–2013 期間
重建(Model I)之 SF_{SF}；(c)以 1968–2009 期間重建(Model I)之 SF_{SM}，上下界
為每段相關性的信賴區間。

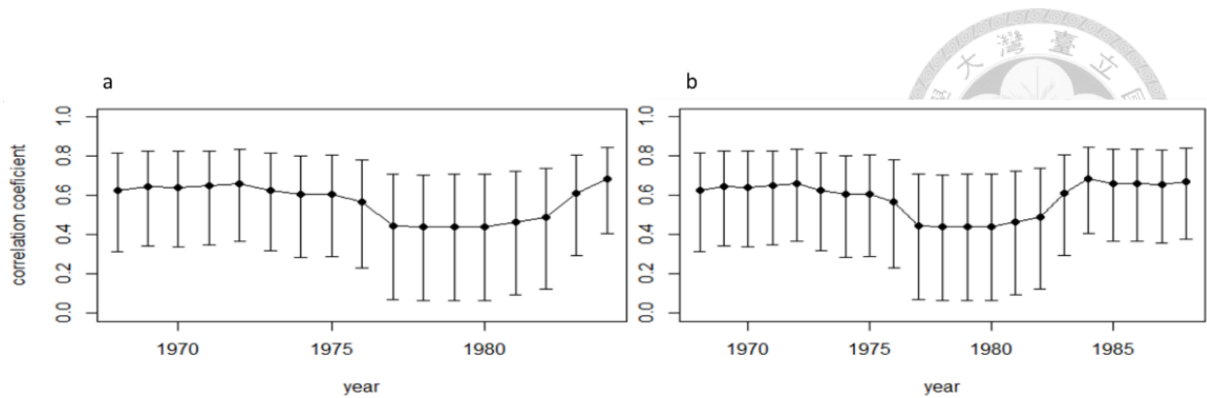


圖 23、臺灣黃杉早材 IMF1-3 與七家灣標準化溪流量指數(Standardized Streamflow Index, SSFI)間的 26 年移動平均相關性。(a) Model I (1968–2009) $SSFI_{SF}$ ；(b) Model II (1968–2013) $SSFI_{SF}$ ，上下界為每段相關性的信賴區間。

4.4 七家灣溪流量重建

4.4.1 SF_{SF} 、 SF_{SM} 重建分析

流量方面，以 Model I (1785–2009 期間)重建的 SF_{SF} 與 SF_{SM} 及以 Model II(1785–2013 期間)重建的 SF_{SF} ，三者的重建值都非常接近(圖 24)。九到二月與九到三月開根號的觀測流量，在波動上並沒有太大差別，由於三月流量偏低造成平均之後影響更小，導致重建 SF_{SM} 與 SF_{SF} 幾乎沒差別。重建的溪流量與觀測值相比，較易於高估低流量，亦即容易低估乾旱的嚴重性，例如 1969、1984、1994 與 1996 年。

早材樣本在 1785 年時，樣本數才足夠($EPS > 0.8$)，所以後續僅呈現 1785 年後的重建值。圖 25 中，重建 Model I 與 II 的 SF_{SF} 與重建 Model I 的 SF_{SM} ，能看出這三個模型的重建非常相似。然而， SF_{SF} (Model I) 的重建值比起其於兩者，更傾向高值更高；低值更低。 SF_{SF} (Model II) 比起其於兩者更為保守，尤其在偏濕的重建上，值會比另外兩者低。且由於本研究最終呈現的流量值為開根號的流量，若換算為原本的流量單位，會使流量的高低落差較為明顯。原本流量單位為每秒多少立方公尺的流量(cubic meter per second, cms, m^3/s)，但由於最後重建為開根號流量，單位以 root of cms (rcms, $\sqrt{m^3/s}$) 呈現。

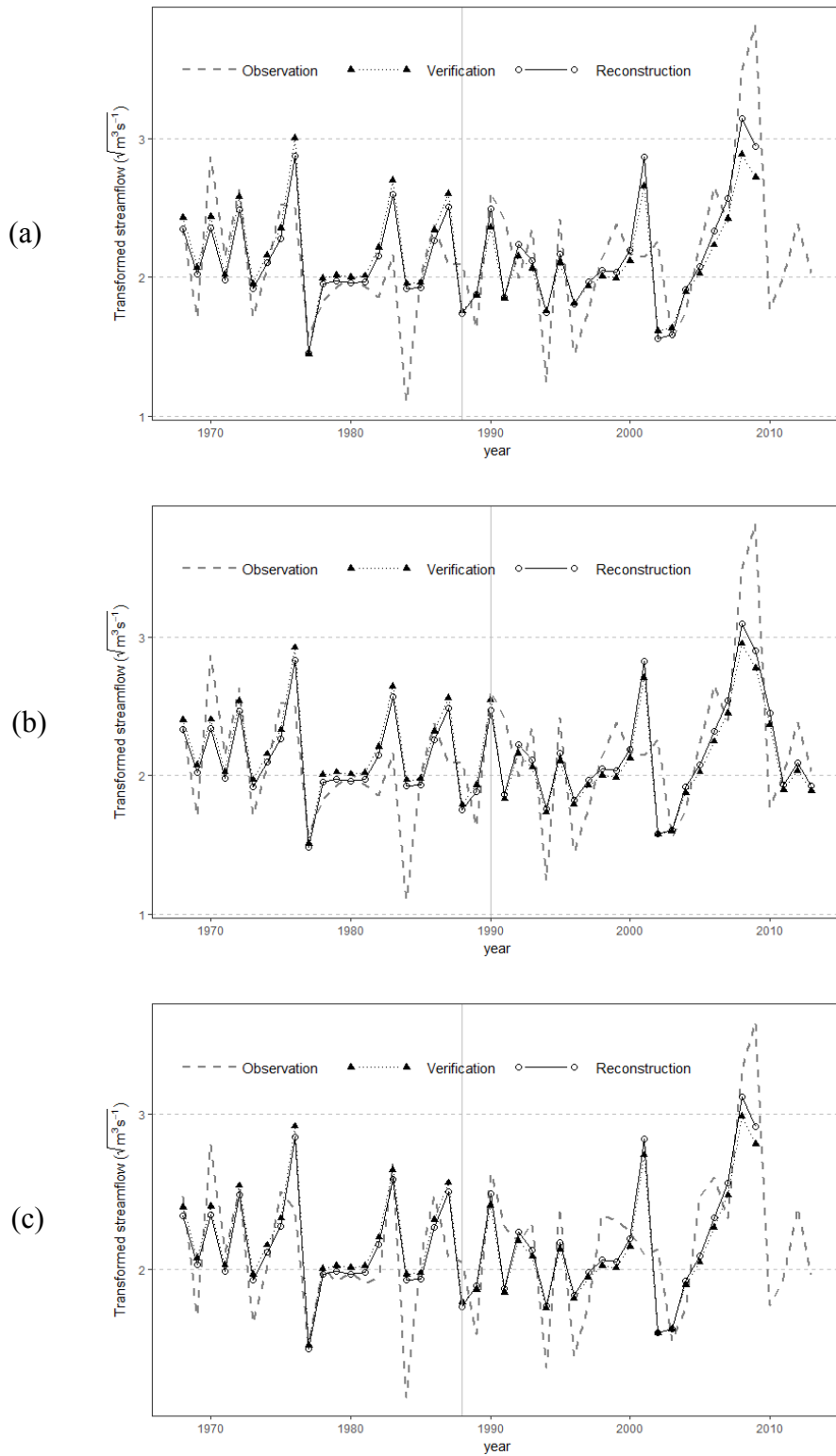


圖 24 以臺灣黃杉早材 IMF1-3 重建七家灣溪流量在 1968–2009 (2013) 期間分期驗證結果。(a) SF_{SF} (Model I)；(b) SF_{SF} (Model II)；(c) SF_{SM} (Model I)。灰色垂直線為交差驗證之分界年份。

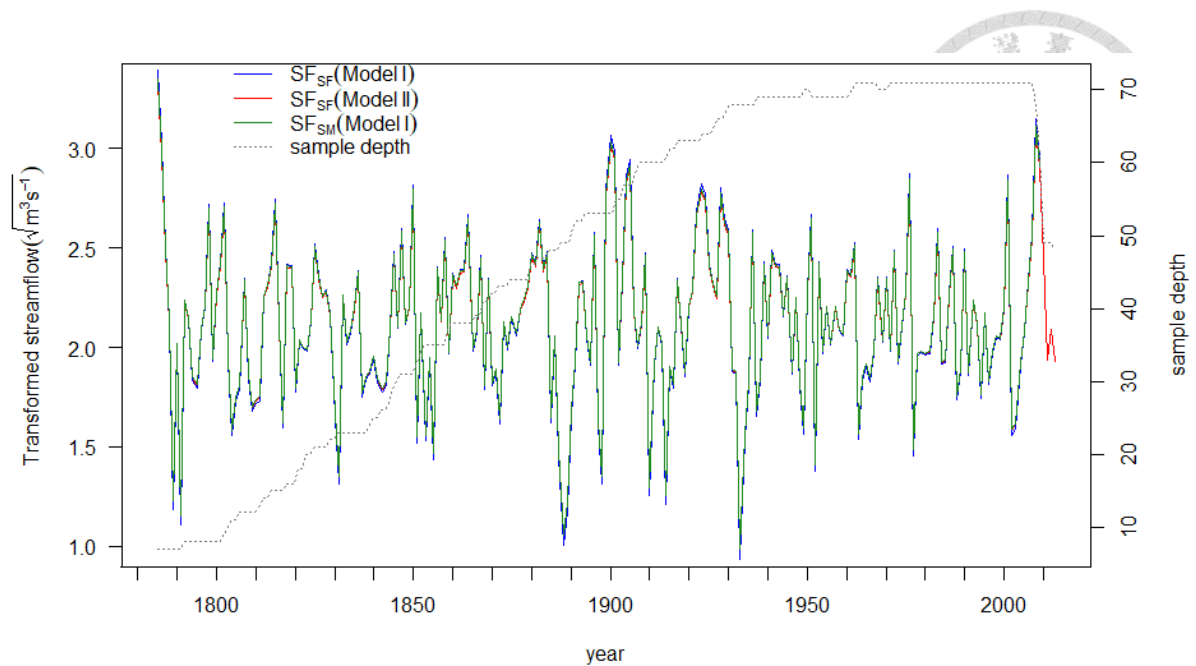


圖 25、以臺灣黃杉早材 IMF1-3 重建 1785–2009 (2013) 之前一年九月至當年二月七家灣溪流量(SF_{SF})與前一年九月至當年三月七家灣溪流量(SF_{SM})。

圖 26 為重建流量距平序列經過 20 年低通濾頻後加上以每一模型其均方根誤差 (Root mean square error, RMSE) 建立之區間，若超過或接近上下兩區間，表示那段時期偏濕或偏乾。使用 20 年低通濾頻是配合多正交窗口頻譜分析結果(圖 21)，在 20 年左右有顯著週期。圖 26a、b 及 c 的 RMSE 上下區間值依序為 ± 0.358 、 ± 0.361 及 ± 0.323 ，雖然值不同但十分接近，重建 SF_{SM} (Model I) 的 RMSE 區間稍微較小。圖中較值得注意的為在 1880–1940 期間連續發生較為顯著的乾旱及潮濕事件，1880 前與 1940 後均較為平緩，2000 年後始顯著偏濕。兩百多年的重建可看出乾溼事件明顯有交替發生。

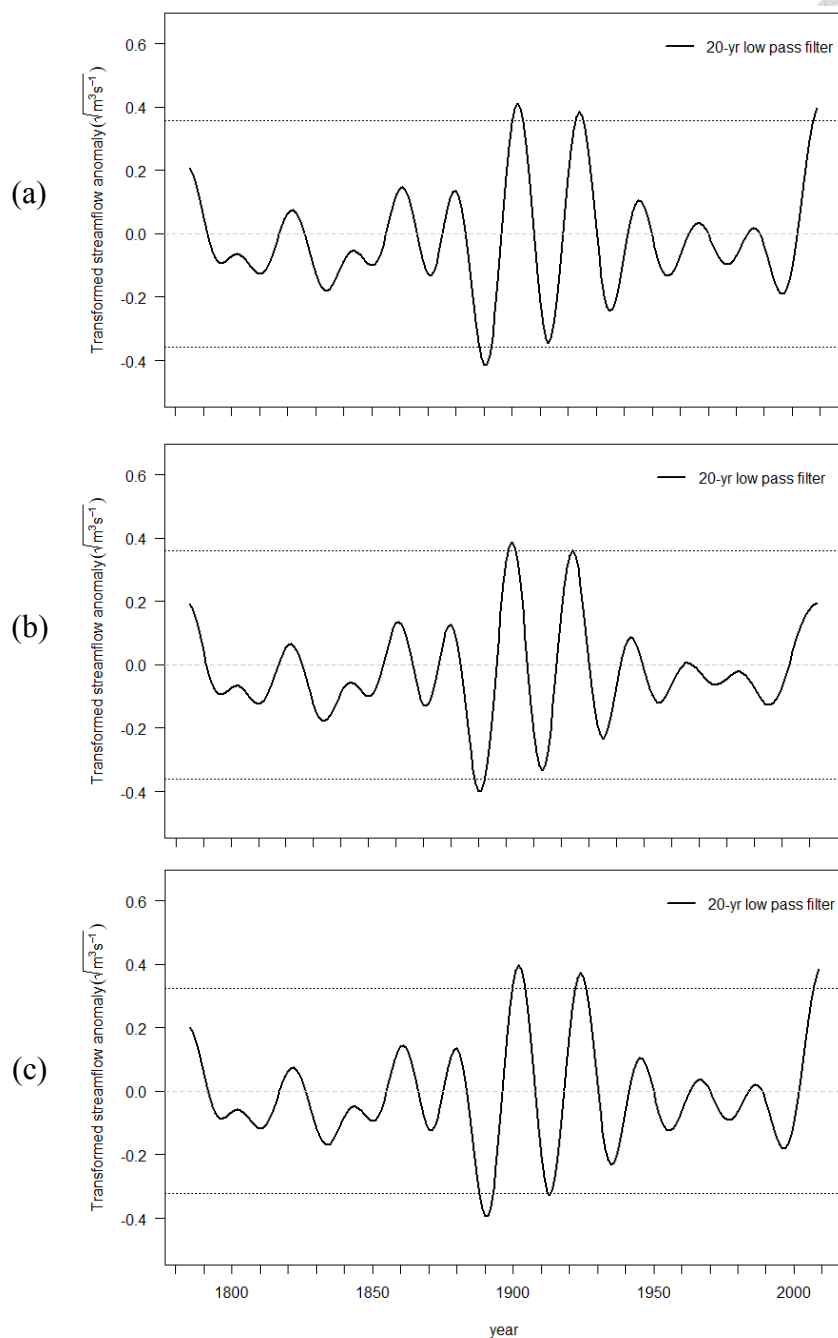


圖 26、以臺灣黃杉早材 IMF1-3 重建 1785–2009 (2013) 之七家灣 SF_{SF} 與 SF_{SM} 距平序列 20 年低通濾波結果與均方根誤差(Root mean square error, RMSE)所建立之區間。(a)重建 SF_{SF} (Model I)；(b)重建 SF_{SF} (Model II)；(c)重建 SF_{SM} (Model I)。重建距平序列係以原始重建值減去各重建值平均值，上下水平線為 ± 1 倍 RMSE 界線。



4.4.2 七家灣流量重建與海面溫度

不論觀測或重建七家灣 SF_{SF} 與 SF_{SM} ，均與 SST 有相關。以兩個重建的 SF_{SF} 與重建的 SF_{SM} 及其相對應的觀測流量均與當年四到五月(圖 27-圖 29 a 與 d)、前一年十一月(圖 27-圖 29 b 與 e)與前一年三月(圖 27-圖 29 c 與 f)的 SST 有顯著相關。重建 SF_{SF} 或 SF_{SM} 均與其相對應時間的觀測 SF_{SF} 或 SF_{SM} 與 SST 間相關性場域分析結果相似，但觀測 SF 與 SST 的相關性大部分較高。

分析相關性的範圍分布，前一年九月到當年二月的七家灣溪流量(SF_{SF})與當年四到五月的 SST 北美沿岸 SST 在 1968–2009 (2013)期間有負相關；與北太平洋中央有正相關，類似 PDO 的痕跡(圖 27-圖 29 a 與 d)，顯示七家灣溪流量的變化似乎領先 PDO 發生的時間。觀測及 Model I SF_{SF} 分別與當年四到五月的 PDO 指數，在 1968–2009 期間的相關性為-0.56 ($p < 0.01$)與-0.36 ($p = 0.02$)；觀測及 Model II SF_{SF} 分別與當年四到五月的 PDO 指數，在 1968–2013 期間的相關性為-0.52 ($p < 0.01$)與-0.31 ($p = 0.04$)；觀測及 Model I SF_{SM} 分別與當年四到五月的 PDO 指數，在 1968–2009 期間的相關性為-0.44 ($p < 0.01$)與-0.37 ($p = 0.02$)。重建 SF_{SF} 或 SF_{SM} 與 PDO 指數間的相關性與場域分析都比觀測 SF_{SF} 與 SF_{SM} 弱。

圖 27-圖 29 的 b 與 e 中，也有類似 PDO 的痕跡，且在東太平洋赤道地區有 ENSO 外圍痕跡。觀測及 Model I SF_{SF} 分別與前一年十一月的 PDO 指數，在 1968–2009 期間的相關性為-0.50 ($p < 0.01$)與-0.39 ($p = 0.01$)；觀測 SF_{SF} 與 Model II SF_{SF} 分別與前一年十一月的 PDO 指數，在 1968–2013 期間相關性為-0.47 ($p < 0.01$)與-0.34 ($p = 0.02$)；觀測與 Model I SF_{SM} 分別與前一年十一月的 PDO 指數，在 1968–2009 期間的相關性為-0.47 ($p < 0.01$)與-0.39 ($p = 0.01$)。圖 27-圖 29 的 b 與 e 中，同時也與北大西洋 SST 有正相關，然而 SF_{SF} 或 SF_{SM} 與前一年十一月 NAO 指數的關係，並沒有十分顯著。

圖 27-圖 29 c 與 f 中，與赤道及北美沿岸 SST 有負相關，類似 ENSO 的痕跡，

然而在圖 27–圖 29 c 中的 ENSO 痕跡似乎並非那麼典型，觀測 SF_{SF} 與北緯 20 度左右的北美沿岸的 SST 的負相關最顯著。觀測/重建 SF_{SF} 與 SF_{SM} 整體來說，與前一年三月的 Niño3.4 指數有較高的相關性。場域分析的結果中，與前一年三月的 SST 的場域分析結果也能看到 ENSO 痕跡。觀測及 Model I SF_{SF} 分別與前一年三月的 Niño3.4 指數，在 1968–2009 期間的相關性為 -0.34 ($p = 0.03$) 與 -0.41 ($p < 0.01$)；觀測及 Model II SF_{SF} 分別與前一年三月的 Niño3.4 指數，在 1968–2013 期間的相關性為 -0.31 ($p = 0.04$) 與 -0.39 ($p < 0.01$)；觀測 SF_{SM} 及 Model I SF_{SM} 分別與前一年三月的 Niño3.4 指數，在 1968–2009 期間的相關性為 -0.32 ($p = 0.04$) 與 -0.41 ($p < 0.01$)。

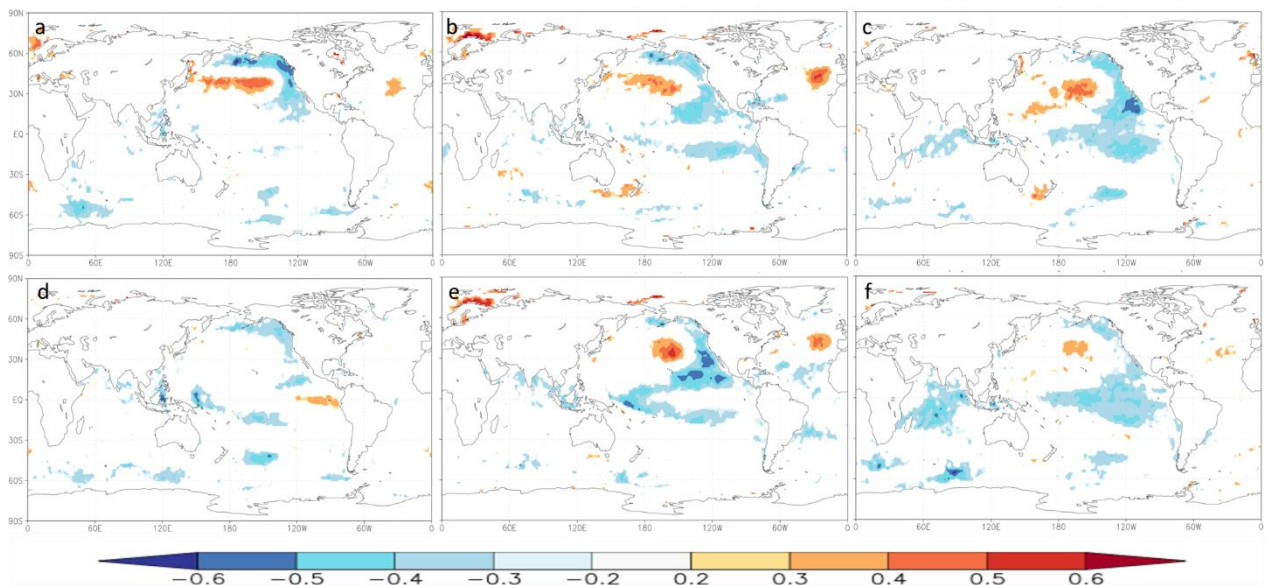


圖 27、觀測及重建七家灣 SF_{SF} 與海面溫度(Sea surface temperature, SST)在 1968–2009 期間之相關性場域分析。上排為觀測 SF_{SF} ，下排為重建 SF_{SF} (Model I)，分別與(a) (d)當年四到五月平均；(b) (e)前一年十一月；(c) (f)前一年三月的 SST 相關性。圖僅顯示 $p < 0.1$ 之區域。

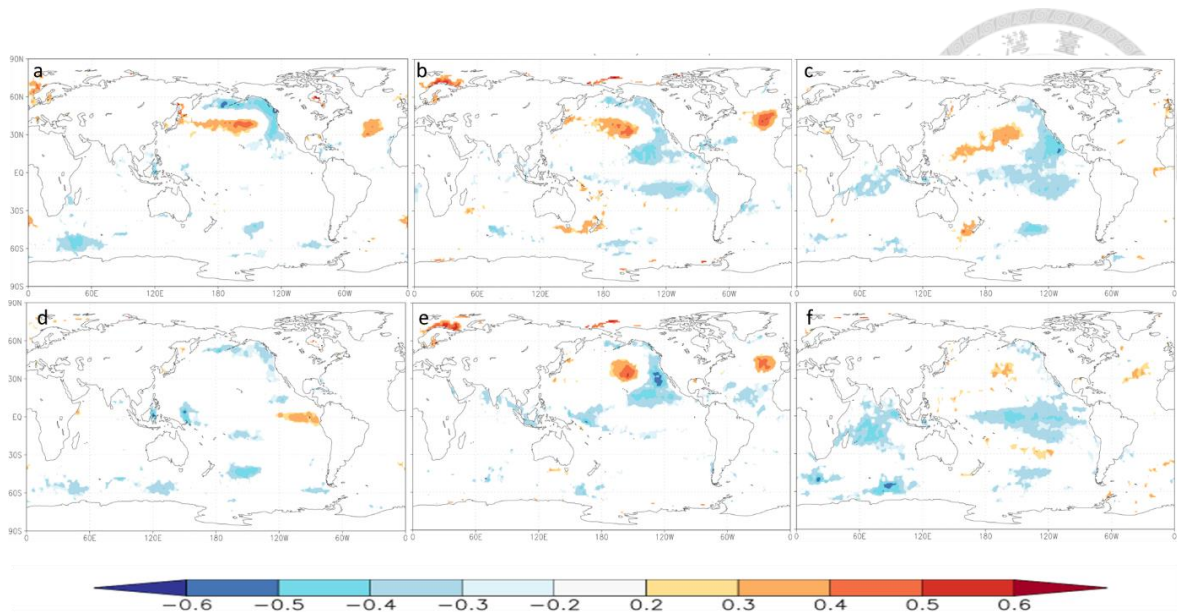


圖 28、觀測及重建七家灣 SF_{SF} 與 SST 在 1968–2013 期間之相關性場域分析。上排為觀測 SF_{SF} ，下排為重建 SF_{SF} (Model II)，分別與(a) (d)當年四到五月平均；(b) (e)前一年十一月；(c) (f)前一年三月的 SST 相關性。圖僅顯示 $p < 0.1$ 之區域。

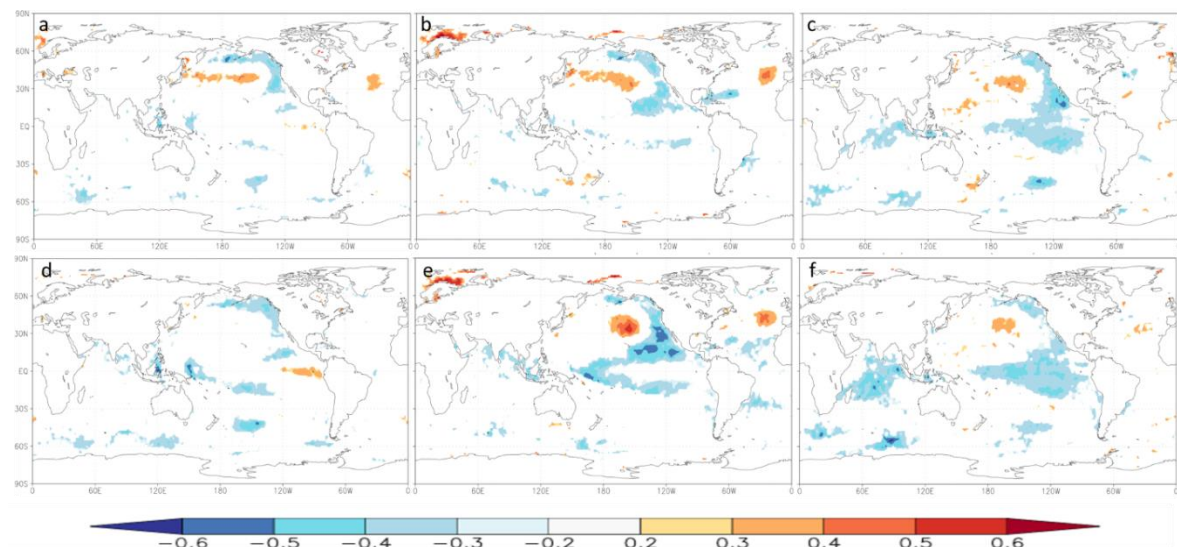


圖 29、觀測及重建七家灣 SF_{SM} 與 SST 在 1968–2009 期間之相關性場域分析。上排為觀測 SF_{SM} ，下排為重建 SF_{SM} (Model I)，分別與(a) (d)當年四到五月平均；(b) (e)前一年十一月；(c) (f)前一年三月的 SST 相關性。圖僅顯示 $p < 0.1$ 之區域。



4.4.3 七家灣流量重建與海平面氣壓

平均觀測七家灣 SF_{SF} 及 SF_{SM} 與重建 SF_{SF} (Model I、II) 及 SF_{SM} (Model I) 均與前一年八到十二月的 SLP 有顯著相關(圖 30、圖 31)，也均與前一年九到十月北極上方的 SLP 有顯著相關(圖 32、圖 33)。

圖 30 與圖 31 中，七家灣 SF_{SF} 及 SF_{SM} 與去年八到十二月 SLP 間的場域分析，在 1968–2009 (2011) 期間，從臺灣延伸到東南亞、印度洋與非洲，屬於在亞澳季風系統一部分(亞澳季風系統包含東亞、南亞與澳洲季風)為負相關。然而，相關性分析中卻少了西伯利亞、貝加爾湖地區(沒有顯著相關性)，表示七家灣溪所在的武陵地區在冬天可能並非直接或是強烈受到東亞冬季季風影響，反而在印度洋上的強烈負相關，可能代表七家灣溪流量變化與印度洋上的水氣有關。 SF_{SF} 及 SF_{SM} 與北大西洋上的 SLP 有正相關，類似北大西洋振盪(NAO)的痕跡，但 4.4.2 已提到與 NAO 指數並沒有明顯相關。由於 NAO 為北極振盪(AO)區域性變化(Thompson & Wallace, 1998)，所以嘗試以七家灣 SF_{SF} 及 SF_{SM} 分別與 AO 指數的進行相關性分析及北極正射投影的 SLP 場域分析。相關性分析結果顯示觀測及 Model I 七家灣 SF_{SF} 分別與去年九到十月的 AO 指數，在 1968–2009 期間的相關性為 0.38 ($p = 0.02$) 與 0.48 ($p < 0.01$)；觀測及 Model II SF_{SF} 分別與去年九到十月的 AO 指數，在 1968–2013 期間的相關性為 0.39 與 0.46 ($p < 0.01$)。觀測及 Model I SF_{SM} 分別與去年九到十月的 AO 指數，在 1968–2009 期間的相關性為 0.37 ($p = 0.02$) 與 0.48 ($p < 0.01$)。流量與北極地區的 SLP 場域分析中(圖 32、圖 33)，不論觀測/重建 SF_{SF} 及 SF_{SM} 與前一年九到十月的 SLP 場域分析均有類似 AO 的痕跡(北極上空的氣壓與周圍中高緯度地區氣壓圍負相關，尤其北歐、北大西洋與北太平洋地區高壓特別明顯)，並且發現此時流量也與臺灣地區的 SLP 呈現負相關。

綜合上述，AO 與七家灣的流量有一定的關係。然而，AO 是如何影響七家灣溪流量呢？首先由於流量最直接受到雨量影響，因此藉由觀測七家灣 SF_{SF} 及 SF_{SM}

分別與 CRU TS 雨量做場域分析，觀測七家灣 SF_{SF} 及 SF_{SM} 與臺灣地區雨量有顯著正相關(圖 34)。接著，使用七家灣溪附近環山測候站雨量，以環山九到十月雨量與九到十月 AO，在 1952–2017 期間做場域分析(圖 35)，可以看到 AO 的痕跡及與臺灣地區的 SLP 有顯著相關。環山雨量及七家灣溪流量與臺灣上空及北極冰海地區 SLP 為負相關，表示當這些地區低壓時(AO 暖相位)，雨量高。統整上述的結果，流量與 AO 指數為正相關，表示當 AO 暖相位越強，流量越高，且當 AO 暖相位時，臺灣地區九到十月為低壓，同時影響臺灣地區降雨增加，進而造成流量增加。

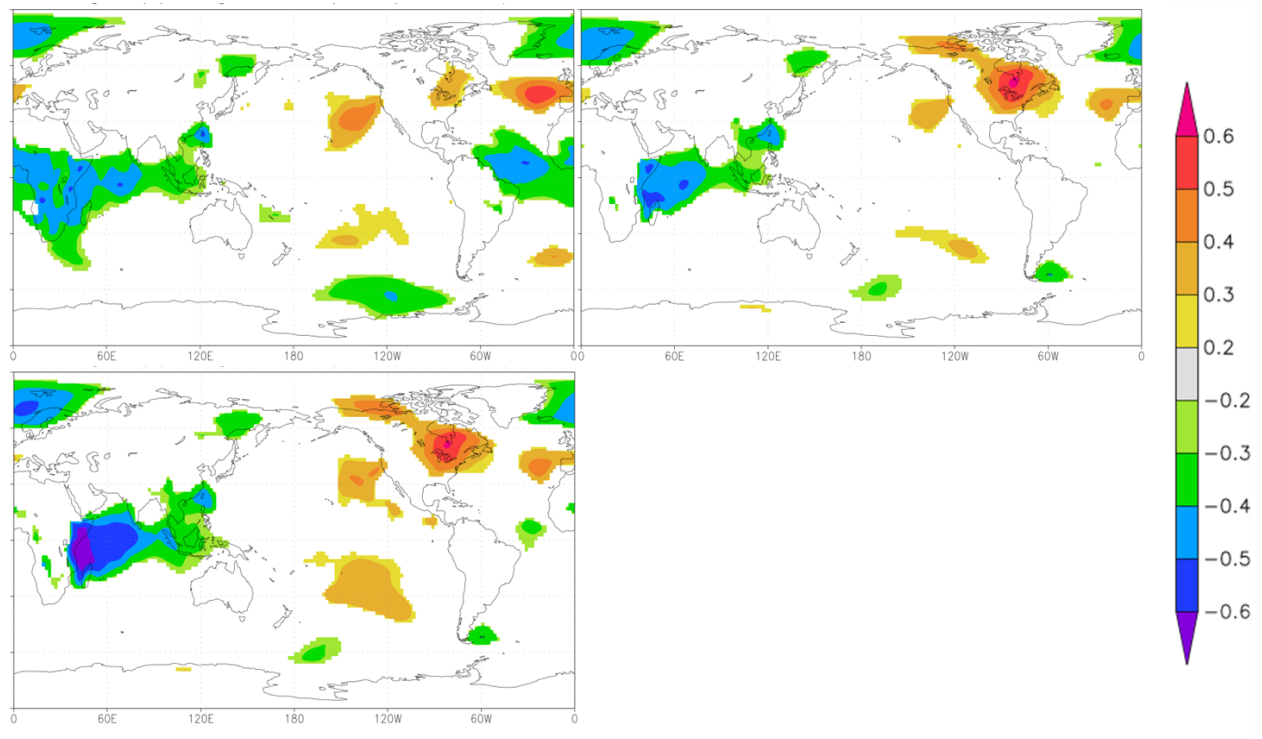


圖 30、觀測及重建七家灣 SF_{SF} 與 SLP 在 1968–2009 (2011) 期間之相關性場域分析。左上為 1968–2011 觀測 SF_{SF} ，左下為重建 SF_{SF} (Model I)，右上為重建 SF_{SF} (Model II)。三者與前一年八到十二月平均 SLP 相關性。圖僅顯示 $p < 0.1$ 之區域。

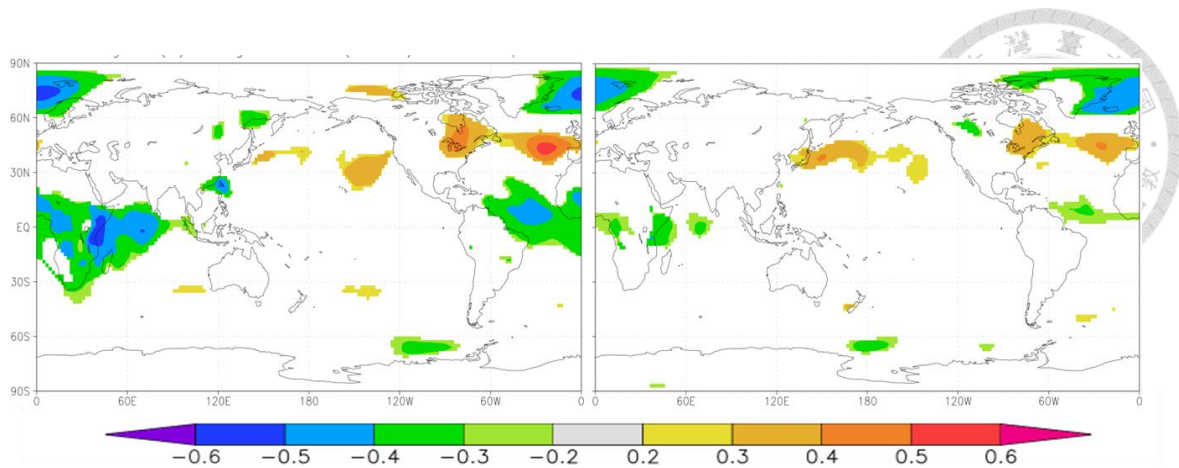


圖 31、觀測及重建七家灣 SF_{SM} 與 SLP 在 1968–2009 期間之相關性場域分析。左為觀測 SF_{SM} ，右為重建 SF_{SM} (Model I)。兩者分別與前一年八到十二月平均 SLP 相關性。圖僅顯示 $p < 0.1$ 之區域。

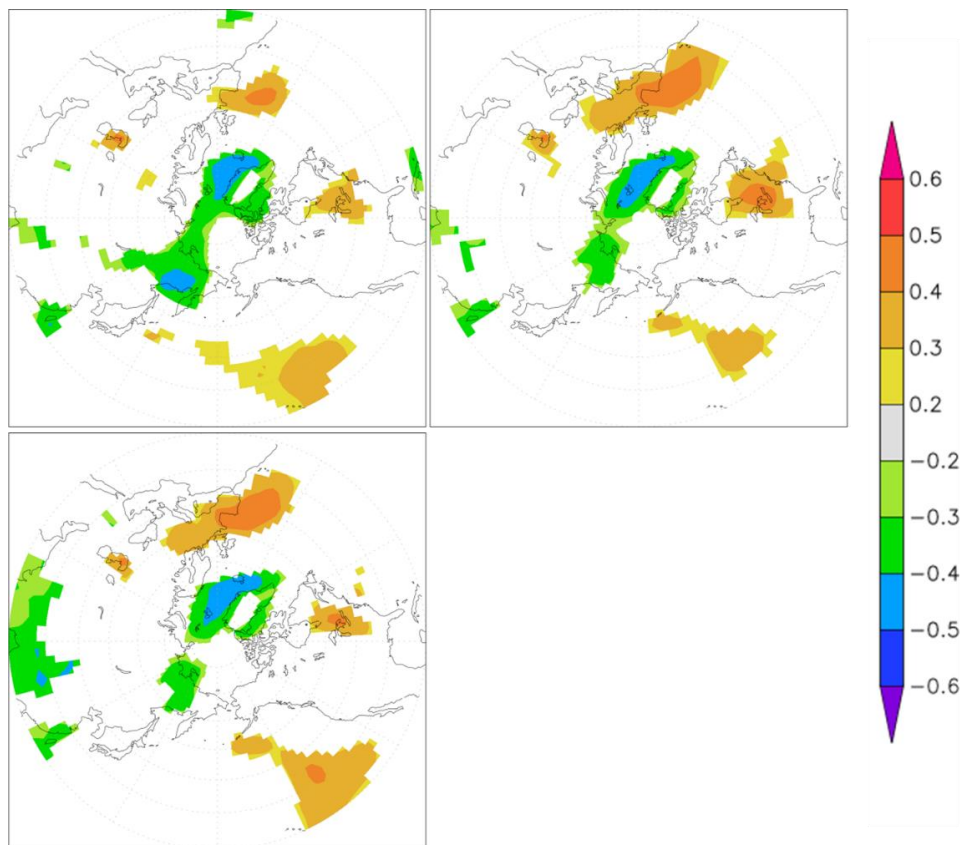


圖 32、觀測及重建七家灣 SF_{SF} 與 SLP 在 1968–2009 (2013) 期間之相關性場域分析 (北極正射投影)。左上為 1968–2013 觀測 SF_{SF} ；右上為重建 SF_{SF} (Model II)；左下為重建 SF_{SF} (Model I)，三者與前一年九到十月平均 SLP 相關性。圖僅顯示 $p < 0.1$ 之區域。

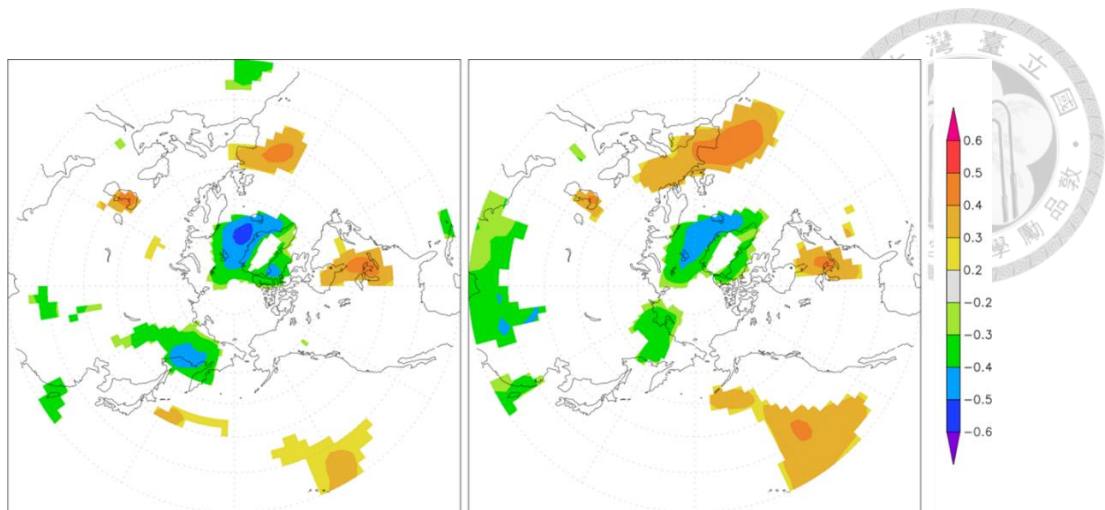


圖 33、觀測及重建七家灣 SF_{SM} 與 SLP 在 1968–2009 期間之相關性場域分析(北極正射投影)。左為觀測 SF_{SM} ；右為重建 SF_{SM} (Model I)，兩者分別與前一年九到十月的 SLP 相關性。圖僅顯示 $p < 0.1$ 之區域。

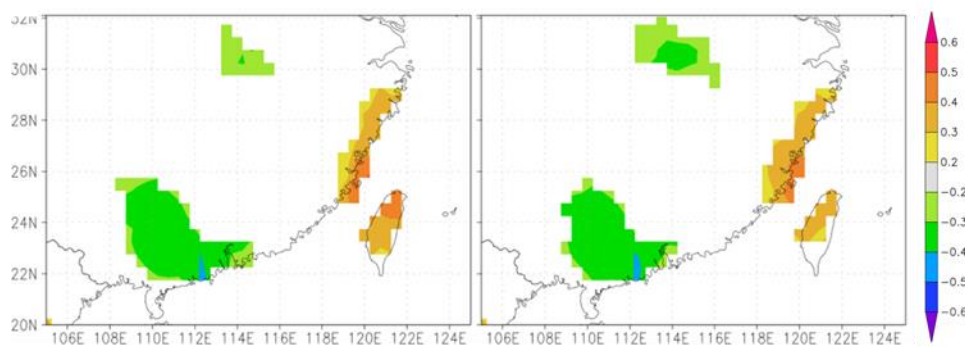


圖 34、觀測之七家灣 SF_{SF} (左)及 SF_{SM} (右)與 CRU TS 雨量在 1968–2013 期間之相關性場域分析。圖僅顯示 $p < 0.1$ 之區域。

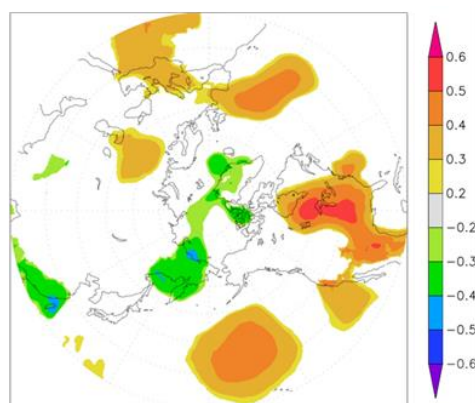


圖 35、環山測候站九至十月平均雨量在 1952–2017 期間與九到十月的 SLP 之相關性場域分析(北極正射投影)。圖僅顯示 $p < 0.1$ 之區域。



4.5 七家灣標準化流量指標重建

4.5.1 SSFI_{SF} 重建分析

以 Model I (1968–2009)與 Model II (1968–2013)重建跟觀測的七家灣 SSFI_{SF} 波動大致雷同(圖 36)；然而，在 1991–1993、1998–2001 與 2010–2013 中的波動較不符合。兩個 Model 的七家灣 SSFI_{SF} 重建值也相差不大，但兩者的重建值均容易低估乾旱事件，例如 1969、1984、1994 與 1996 年，僅在 2002 年時，有明顯高估乾旱事件。高估與低估潮濕事件則較平均，在 1976 與 2001 年時，高估潮濕事件；在 1970 與 2006 年時，低估潮濕事件。

以 Model I (1968–2009)與 Model II (1968–2013)分別重建 1785–2009 與 1785–2013 的七家灣 SSFI_{SF} 重建值，兩者有些許不同，Model I 的重建值負值更負，正值更正，但整體波動相同(圖 38)。在 1970 前，七家灣溪流量指數正負值比例較平均，七家灣 SSFI_{SF} 正值通常會持續 3 年以上，有時候甚至十幾年，才會轉換成負值，負值則持續 2–10 年；在 1970 後，七家灣 SSFI_{SF} 正值通常只出現 1 年就轉換成負值(除了 2006–2010，約持續 2–5 年)。有些氣候極端的形成(例如：乾旱)可能是多個非極端事件的個別天氣或氣候事件累積而成(IPCC, 2012)，表示連續性的負值也是值得注意的，尤其當潮濕年縮短時更有可能導致乾旱的發生。重建值中，明顯有連續乾旱事件的時期為 1789–1791、1851–1855、1887–1889、1933–1934、2002–2003 年，2002–2003 的觀測紀錄，只有 2003 年有發生乾旱事件。明顯有連續潮濕事件的時期為 1785–1786、1899–1901、1922–1924、2008–2009 年，2008–2009 有觀測紀錄可以支持潮濕事件的發生。

將正常年移去，特別檢視乾濕事件的發生，七家灣溪在 1950 前發生乾旱或潮濕事件的頻率更高且強度更大，近 50 年的乾濕事件不論在頻率及強度均有減緩的趨勢(圖 37)。本研究顯示七家灣溪大約每 10–20 年，會發生乾旱事件，但在 1880–1940 年間，頻率及強度都特別大，且這段時間也是嚴重乾旱事件發生頻率最高的

一段時間，1880–1915 間就發生 4 次(圖 37)。潮濕事件發生較為平均分散在各個時期，較無規律性，且強度多為中度潮濕事件。除了在 1900–1930 間發生的頻率與強度均較高，尤其在 1900–1905 期間為強度較高的嚴重潮濕事件。以乾濕事件頻率比較，乾旱比潮濕事件更頻繁發生。

若將兩個 Model 重建的七家灣 SSFI_{SF} 的分級比對觀測值 SSFI_{SF} 的分級(觀測與重建 SSFI_{SF} 事件相同的個數/觀測值時間序列總長度)。Model I 的重建正確率為 0.69，低估率為 0.24，高估率為 0.07；Model II 的重建正確率為 0.72，低估率為 0.22，高估率為 0.07。Model II 的相關性與解釋率較低，重建率卻相對高，是因為雖然 2010–2013 重建值與觀測值的波動有明顯落差，但以分級來看卻都是落在正常的範圍內。

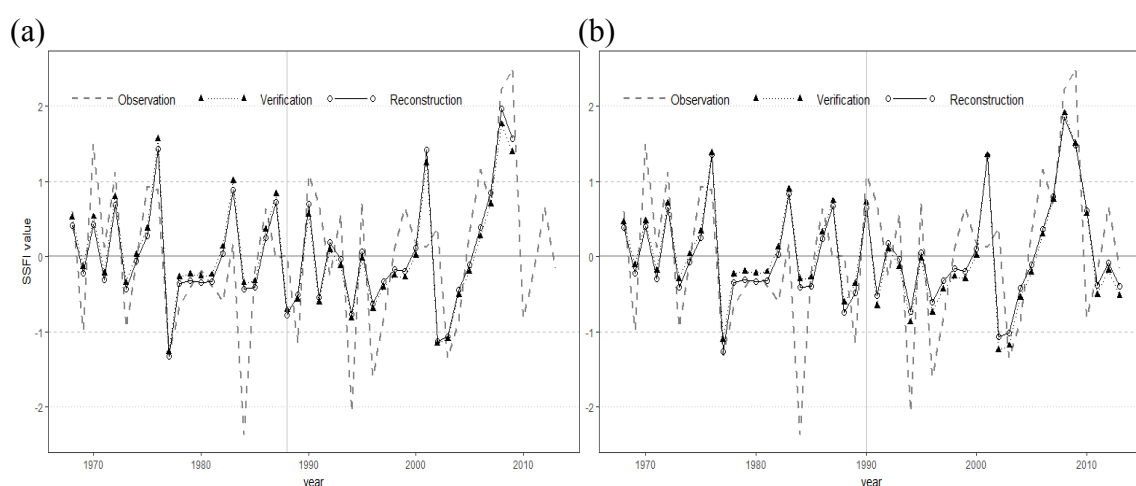
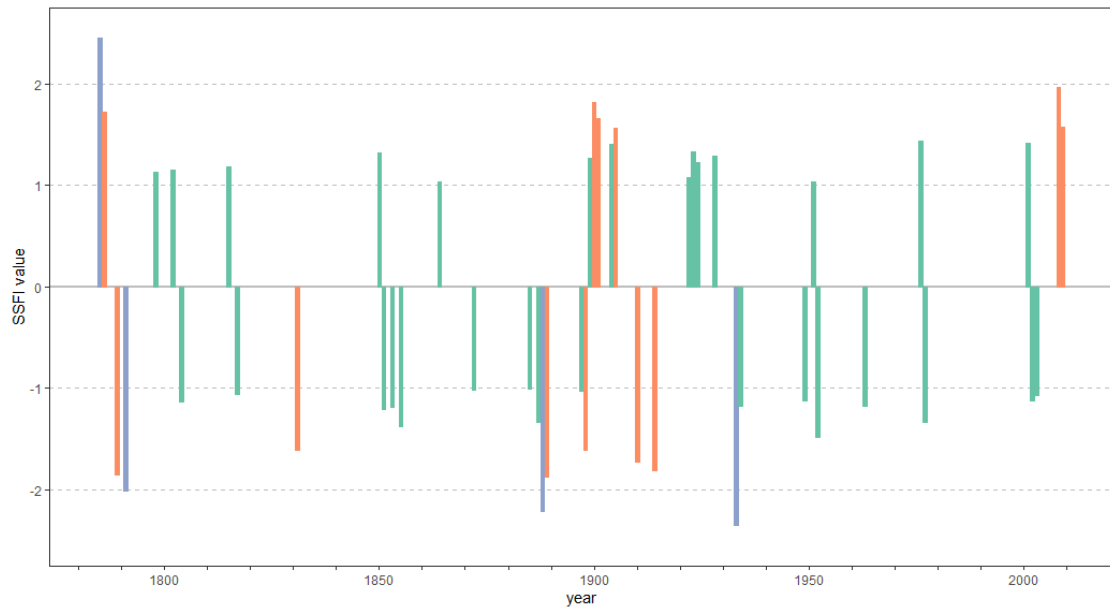


圖 36、以臺灣黃杉早材 IMF1-3 重建七家灣 SSFI_{SF} 在 1968–2009 (2013)期間之分期驗證法結果。(a) SSFI_{SF} (Model I)；(b) SSFI_{SF} (Model II)。垂直線為交叉驗證分期年份。

(a)



(b)

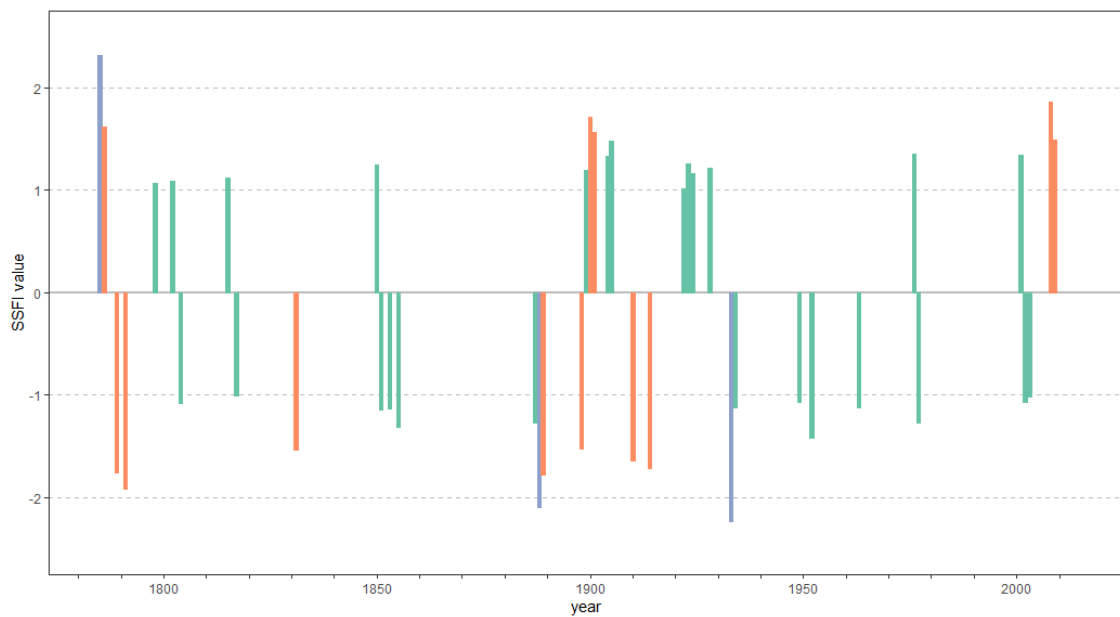
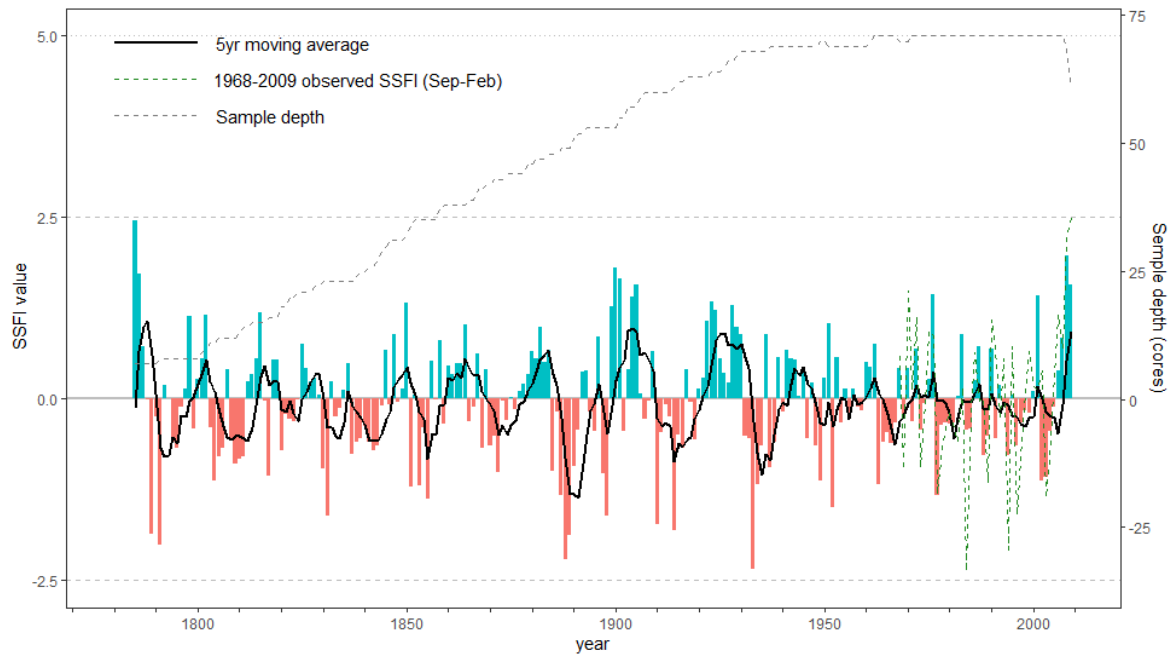


圖 37、以臺灣黃杉早材 IMF1-3 重建七家灣 $SSFI_{SF}$ 乾濕事件發生頻率。(a)重建 1785–2009；(b)為重建 1785–2013；■ 為極端事件；■ 為嚴重事件；■ 為中度事件。

(a)



(b)

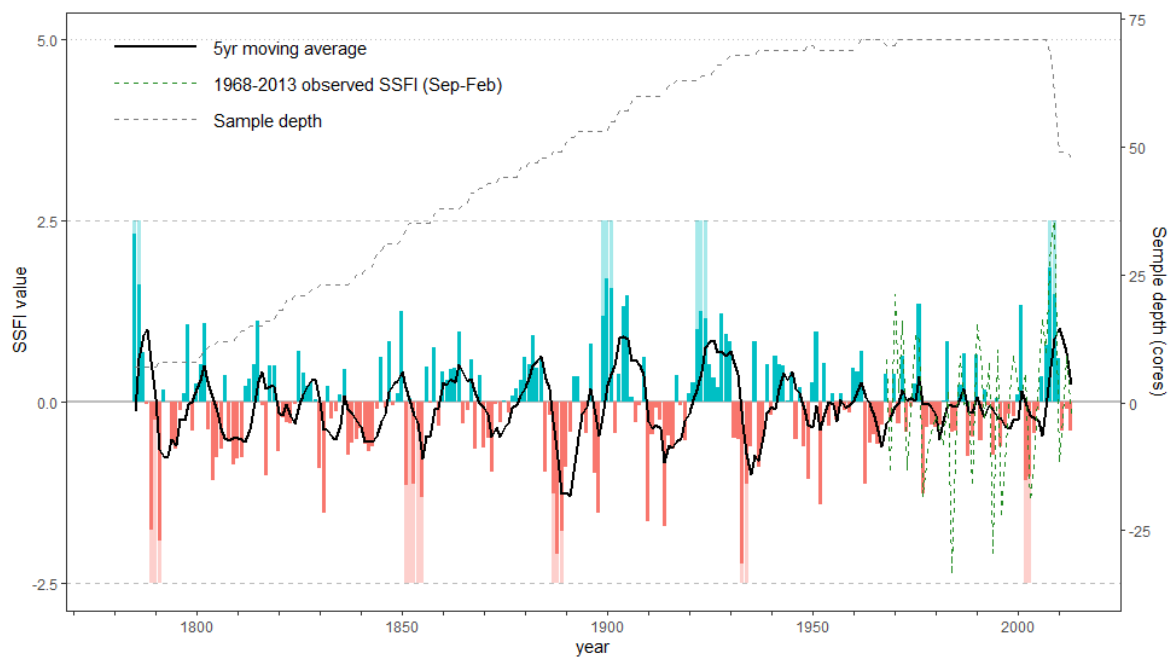


圖 38、以臺灣黃杉早材 IMF1-3 重建 1785–2009 (2013) 之七家灣 $SSFI_{SF}$ 。(a) Model

I：重建 1785–2009；(b) Model II：重建 1785–2013。藍色塊為偏潮濕 $SSFI_{SF}$

(>0)，粉色塊為偏乾旱 $SSFI_{SF}$ (<0)，藍色或粉色背景為連續潮濕或乾旱事

件。



4.5.2 七家灣標準化流量指標與海面溫度

兩段以不同時間長度重建的七家灣 $SSFI_{SF}$ 及其相對應的觀測 $SSFI_s$ 均也與當年四到五月(圖 39–圖 40 a 與 d)、前一年十一月(圖 39–圖 40 b 與 e)與前一年三月(圖 39–圖 40 c 與 f)的 SST 有顯著相關。七家灣 $SSFI_{SF}$ 與 SST 的場域分析結果,與 4.4.2 七家灣 SF_{SF} 非常相似。

分析相關性的範圍分布,圖 39–圖 40 a、b、d 與 e 中,與北美沿岸 SST 有負相關;與北太平洋中央有正相關,類似 PDO 的痕跡,觀測及 Model I 七家灣 $SSFI_{SF}$ 分別與前一年十一月的 PDO 指數,在 1968–2009 (2013)期間的相關性為-0.53 ($p < 0.01$)與-0.39 ($p = 0.01$);觀測及 Model II 七家灣 $SSFI_{SF}$ 分別與前一年十一月的 PDO 指數,在 1968–2013 期間的相關性為-0.51 ($p < 0.01$)與-0.34 ($p = 0.02$)。圖 39–圖 40 的 b 與 e 中,在東太平洋赤道地區有 ENSO 外圍痕跡,同時也與北大西洋 SST 有正相關,但七家灣 $SSFI_{SF}$ 與前一年十一月 NAO 指數,沒有十分顯著。

從時間上來看,七家灣 $SSFI_{SF}$ 的場域分析結果與 4.4.2 相同,一樣有領先 PDO。觀測及 Model I $SSFI_{SF}$ 分別與當年四到五月的 PDO 指數,在 1968–2009 (2013)期間的相關性為-0.52 ($p < 0.01$)與-0.37 ($p = 0.02$);觀測及 Model II $SSFI_{SF}$ 分別與當年四到五月的 PDO 指數,在 1968–2013 期間的相關性為-0.49 ($p < 0.01$)與-0.31 ($p = 0.04$)。重建 $SSFI_{SF}$ 與 PDO 指數間的相關性與場域分析也都比觀測 $SSFI_{SF}$ 弱。

圖 39–圖 40 c 與 f 中,與赤道 SST 有負相關;與北太平洋有些微正相關,一樣類似 ENSO 的痕跡,但和 4.4.2 的七家灣溪流量結果一樣較不典型。觀測與重建的七家灣 $SSFI_{SF}$ 一樣與前一年三月的 Niño3.4 指數有較高的相關性。場域分析的結果中,與前一年三月的 SST 的相關性也較為明顯能看到 La Niña 的痕跡。觀測及 Model I $SSFI_{SF}$ 分別與前一年三月的 Niño3.4 指數,在 1968–2009 期間的相關性為-0.33 ($p = 0.04$)與-0.41 ($p < 0.01$);觀測及 Model II $SSFI_{SF}$ 分別與前一年三月的 Niño3.4 指數,在 1968–2013 期間的相關性為-0.30 ($p = 0.05$)與-0.39 ($p < 0.01$)。

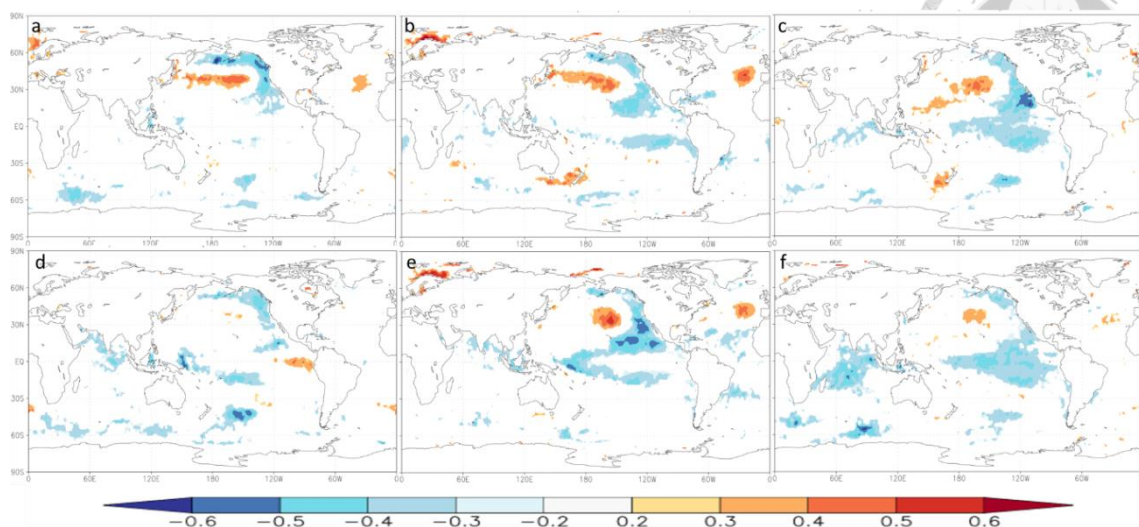


圖 39、觀測及重建前一年九月至當年二月七家灣標準化溪流量指標(SSFI_{SF})與 SST 在 1968–2009 期間之相關性場域分析。上排為觀測 SSFI_{SF}，下排為重建 SSFI_{SF} (Model I)，分別與(a) (d)當年四到五月平均；(b) (e)前一年十一月；(c) (f)前一年三月的 SST 相關性。圖僅顯示 $p < 0.1$ 之區域。

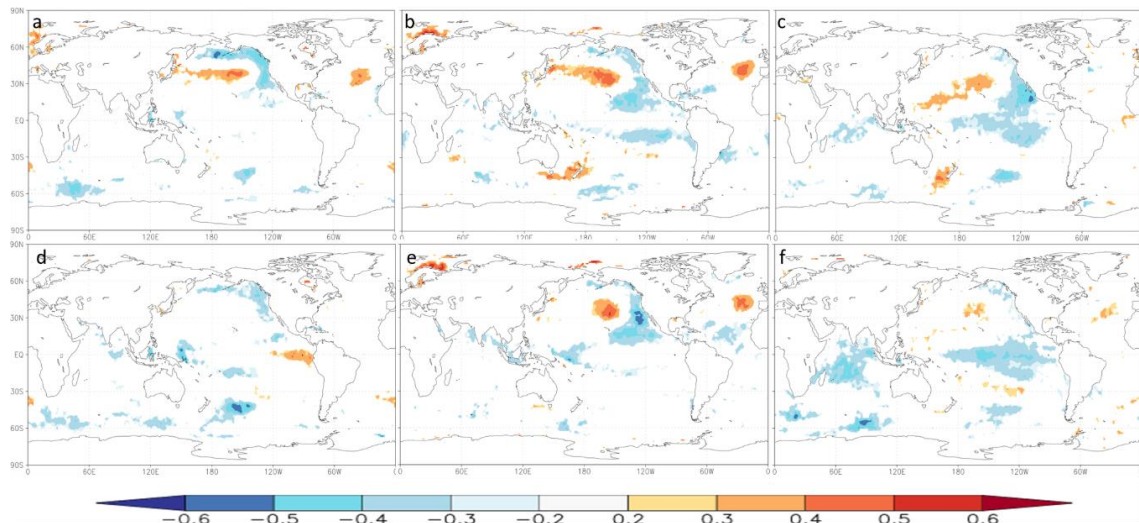


圖 40、觀測及重建七家灣 SSFI_{SF} 與 SST 在 1968–2013 期間之相關性場域分析。上排為觀測 SSFI_{SF}，下排為重建 SSFI_{SF} (Model II)，分別與(a) (d)當年四到五月平均；(b) (e)前一年十一月；(c) (f)前一年三月的 SST 相關性。圖僅顯示 $p < 0.1$ 之區域。



4.5.3 七家灣標準化流量指標與海平面氣壓

七家灣標準化流量指標與 SST 的場域分析結果，一樣與溪流量非常相似。觀測與重建 $SSFI_{SF}$ (Model I、II) 與前一年八到十二月的 SLP 有顯著相關(圖 41)，也與前一年九到十月北極上方的 SLP 有顯著相關(圖 42)。

圖 41 中， $SSFI_{SF}$ 與去年八到十二月 SLP 在 1968–2009 (2011) 期間的場域分析有顯著負相關：從臺灣延伸到東南亞、印度洋與非洲，屬於在亞澳季風系統一部分。然而 $SSFI_{SF}$ 與 SLP 相關性分析結果和流量結果相同，均與西伯利亞、貝加爾湖地區沒有顯著相關，一樣代表七家灣溪流量變化可能與東南亞、印度洋的水氣有關。 $SSFI_{SF}$ 與從北大西洋的 SLP 有正相關，也有類似 NAO 的痕跡，但與 NAO 指數相關性不高。因此， $SSFI_{SF}$ 也與 AO 指數做相關性分析及北極正射投影的 SLP 場域分析。觀測及 Model I $SSFI_{SF}$ 分別與去年九到十月的 AO 指數，在 1968–2009 期間的相關性為 0.37 ($p = 0.02$) 與 0.48 ($p < 0.01$)；觀測及 Model II $SSFI_{SF}$ 分別與去年九到十月的 AO 指數，在 1968–2013 期間的相關性為 0.39 與 0.46 ($p < 0.01$)。與流量相同，觀測或重建 $SSFI_{SF}$ 分別與前一年九到十月北極正射投影的 SLP，在 1968–2009 (2013) 期間的場域分析也有類似 AO 的痕跡，且也與臺灣地區的 SLP 呈現負相關(圖 42)。從觀測 $SSFI_{SF}$ 與 CRU TS 雨量間，在 1968–2013 期間場域分析中(圖 43)，觀測 $SSFI_{SF}$ 也與臺灣地區雨量有顯著正相關。 $SSFI_{SF}$ 與 SLP 場域分析的結果，如同 4.4.3 結果同樣也可支持 AO 對臺灣地區雨量及流量的影響。

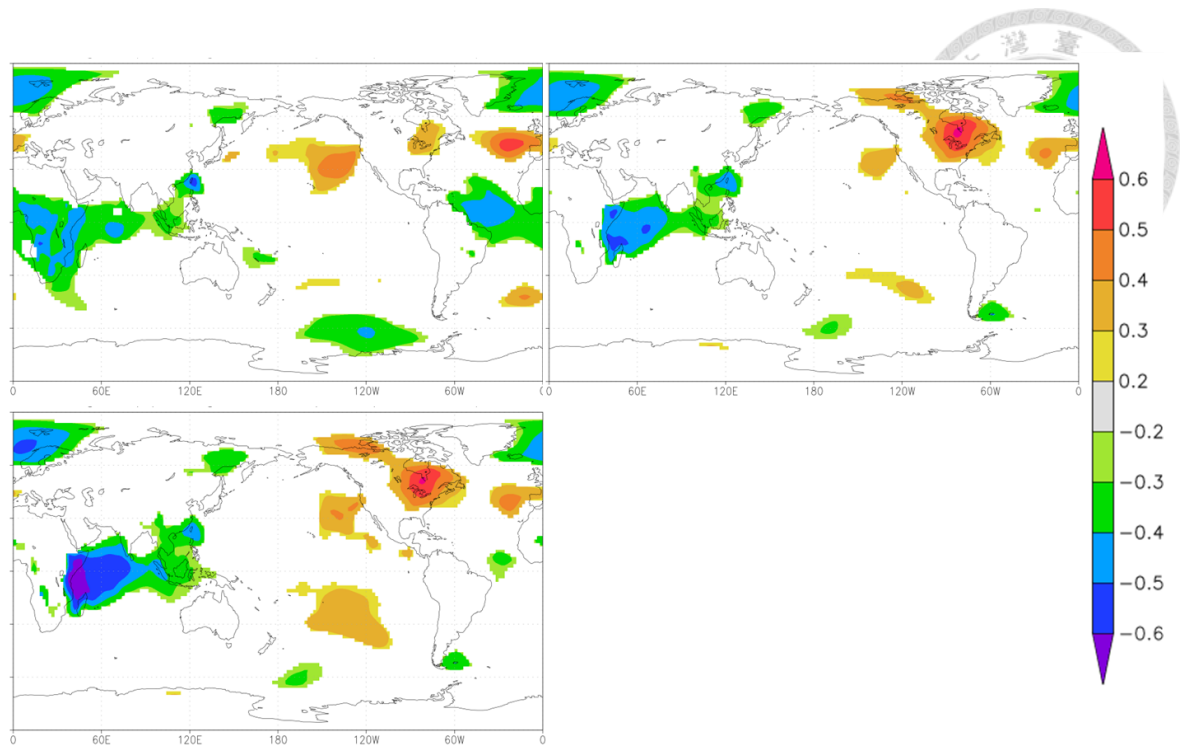


圖 41、觀測及重建七家灣 SSFI_{SF} 與 SLP 在 1968–2009 (2011) 期間之相關性場域分析。左上為 1968–2011 觀測 SSFI_{SF}；左下為重建 SSFI_{SF} (Model I)；右上為重建 SSFI_{SF} (Model II)，三者與前一年八到十二月平均 SLP 相關性。圖僅顯示 $p < 0.1$ 之區域。

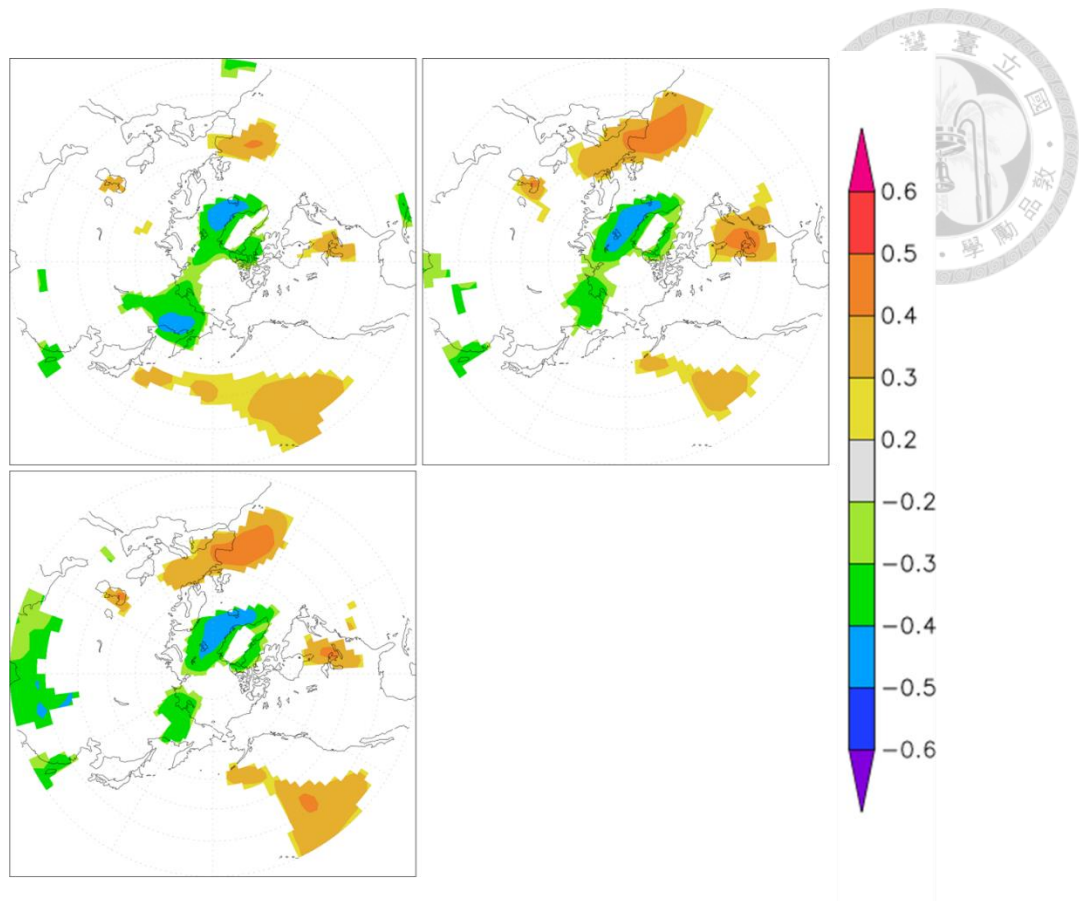


圖 42、觀測及重建七家灣 SSFI_{SF} 與 SLP 在 1968–2009 (2013) 期間之相關性場域分析(北極正射投影)。左上為 1968–2013 觀測 SSFI_{SF}，右上為重建 SSFI_{SF} (Model II)；左下為重建 SSFI_{SF} (Model I)，三者與前一年九到十月平均 SLP 相關性。圖僅顯示 $p < 0.1$ 之區域。

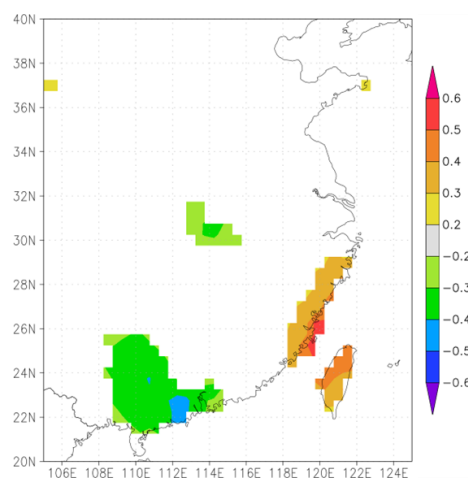


圖 43、觀測七家灣 SSFI_{SF} 與 CRU TS 雨量在 1968–2013 期間之相關性場域分析。圖僅顯示 $p < 0.1$ 之區域。

第五章 討論



5.1 七家灣溪流量與標準化流量指標重建比較

比較重建的七家灣溪流量與標準化流量指標(Model I、II 重建 SSF_{ISF} 相近，最終僅呈現以 Model II 重建的 SSF_{ISF})，兩者波動一致(圖 44)。由於標準化流量指標以流量進行轉換，所以重建波動一致。雖然流量重建的相關性與解釋率較高(表 7-表 11)，但判別潮濕或乾旱事件不如乾旱指標方便。流量無法像 SSFI 直接以 0 做為基準判別乾濕事件，本文將重建流量距平序列加上 RMSE 建立的信賴區間可看出每段時期偏乾或濕的變化，但無法像 SSFI 將每年細分為中度、嚴重與極端事件。兩者比較下來，若要以判別乾濕事件的發生為目標，建立 SSFI 是更好的選擇。然而，直接重建流量，能獲得確切值(每一秒有多少立方公尺水流量)，而非相對值，在後續應用上應能更為廣泛。

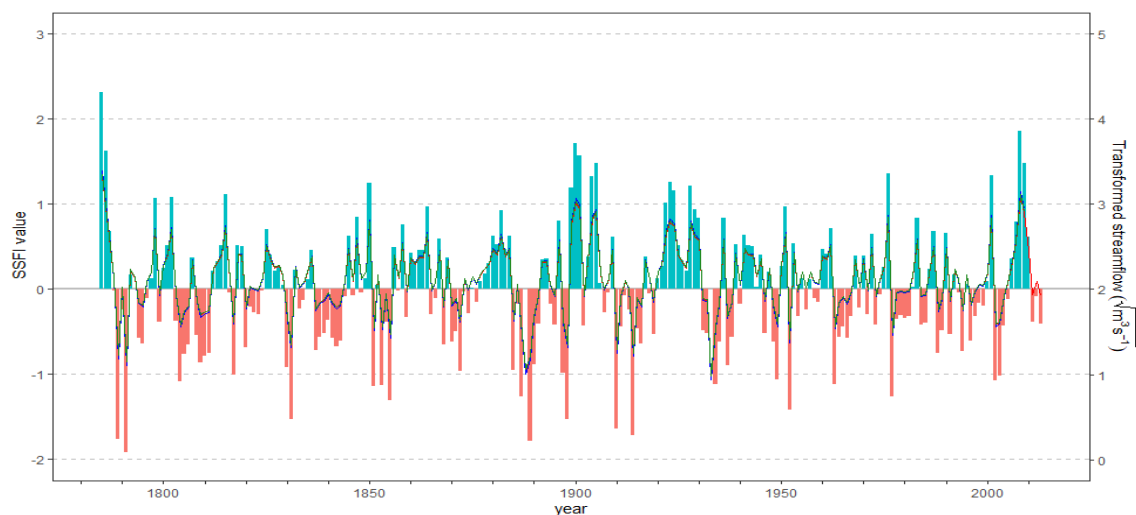



圖 44、以臺灣黃杉早材重建七家灣 SF_{SF} 及 SF_{SM} 與重建 SSF_{ISF} 之比較。色塊為本研究重建 SSF_{ISF} (Model II) 結果，藍色塊為偏潮濕 SSF_{ISF} (> 0)，粉色塊為偏乾旱 SSF_{ISF} (< 0)；綠線為重建 SF_{SM} (Model I)；藍線為重建 SF_{SF} (Model I)；紅線為重建 SF_{SF} (Model II)。



場域分析中，由 Model I 重建的 $SSFI_{SF}$ 與 SF_{SF} 不論在 SST 或 SLP 的結果都相似。然而，不論是 SF_{SF} 、 SF_{SM} 或 $SSFI_{SF}$ ，以 Model I (1968–2009) 進行重建，似乎更為穩定，且解釋率較高。近幾年輪寬無法很好反映氣候，可能因為越外圍的輪寬越窄變化越不易判別，且 2010–2013 年的流量均為正常，沒有明顯的變化。造成雖然比起過往的研究有更長的輪寬及流量紀錄，但卻無法有更好的相關性。

5.2 濕季末期對早材生長影響

本研究結果提到臺灣黃杉早材比起全輪或校正晚材，跟七家灣溪流量與 $SSFI$ 的相關性更好，此結果與過往研究指出早材與水文訊號有明顯相關的結果相符合 (Koprowski et al., 2018; Okoński & Koprowski, 2016)。臺灣黃杉早材 IMF1-3 與前一年九到當年二月、前一年九到當年三月、前一年九到當年四月及前一年九到當年五月七家灣流量因子($SSFI$ 與 SF)的相關性最好，其範圍介於濕季結束前到濕季剛開始，能支持 Gedalof et al. (2004)提到早材與冬春季降雨相關。本研究最後是以臺灣黃杉早材 IMF1-3 年表重建七家灣 $SSFI_{SF}$ 、 SF_{SF} 與 SF_{SM} ， $SSFI_{SF}$ 與 SF_{SF} 。

從圖 13 與圖 14 的雨量及流量來看，此地在此十到四月為乾季(尤其十到二月)，九月通常是潮濕季節的最後一個月分。從現有流量紀錄來看，歸類在潮濕(1970、1972、1990、2006、2009)或乾旱(1977、1984、1989、1994、1996)事件的年分，發現前一年九月的七家灣溪流量會特別高或低。另外，也發現若是九月流量高，但十到二月的流量偏低(低於 1968–2013 期間前一年十月至二月的流量平均值 3.83 cms)的狀況下，反而幾乎不會被歸類到乾旱事件。表示前一年九月的流量高低很大可能與生長在流域附近的黃杉隔年早材的生長有關。雖然已有許多研究指出土壤溼度與地下水影響植物生長(Casper & Jackson, 1997; Denmead & Shaw, 1962; Veihmeyer & Hendrickson, 1950)，然而，濕季末期流量或雨量是否補充地下水含量或土壤濕度而影響隔年早材生長，及如何影響早材生長，則需要進一步研究證實。




5.3 異常流量事件

由於重建的月分橫跨到前一年，因此在比對過往的乾旱或潮濕事件時，也需將前一年的狀況納入考量。將七家灣 SF_{SF} 、 SF_{SM} 及 $SSFI_{SF}$ 重建值與觀測值相比之下，發現乾旱事件較容易被低估。七家灣溪於 1984、1989、1994 與 1996 年，在觀測值中都呈現較低流量，也能對應到有紀錄的乾旱事件，例如 1983 與 1988 年影響全球的嚴重乾旱(Mishra & Singh, 2010; Wang et al., 2014)及 1993–1995 臺灣共發生約 50 起乾旱事件(中央氣象局將 20 天以上連續無可量的降水紀錄者稱為「乾旱」；林雪美，2004)。然而，上述的乾旱事件在本研究中無法重建出來，推測原因有二：(1)臺灣黃杉為耐旱樹種(柳楷，1971)，對乾旱較能容忍；(2)所採樣本多生長在流域附近，土壤濕度易偏高，較不容易感到缺水。重建值中，為極端乾旱事件的年份(1791、1888 與 1933 年)，雖然沒有觀測流量輔助確認，但在過去歷史文獻中有乾旱發生的紀錄，可間接證明重建可信度。1933 應屬於 1930 年代的嚴重乾旱(Gedalof et al., 2004)；1887–1889 可能為 ENSO 暖相位造成的亞洲地區乾旱，清代史料中也有乾旱紀錄(Buckley et al., 2010; 徐泓，1986)；1791 年應屬於 Cook et al. (2010)提到 18 世紀晚期，El Niño 造成的全球乾旱。推測生長在流域附近的樹，更需要乾旱持續性發生，才能影響樹輪輪寬生長。

本研究於 2008 與 2009 年，低估極端潮溼事件為嚴重潮溼事件，可能是由於植物生長跟土壤濕度之間的線性關係需在一定範圍內，當超過臨界值，植物生長將無法反映(Guan et al., 2018a; Meko & Woodhouse, 2011; Meko et al., 2012)。1976 與 2001 年，高估正常年為中度潮溼事件，在比對七家灣溪流量觀測值後，推測因為當年乾季雨量(十一到二月)偏高，進而影響到早材的生長。不論是低估乾旱事件或高估潮溼事件，另一可能則是統計方面導致的問題，Serrano et al. (2012)提到 $SSFI$ 在計算上會傾向低估最極端負值的頻率，相反地，也會傾向高估最極端正值。

由於七家灣 $SSFI_{SF}$ 範圍有涵蓋前一年九月，九月依然是颱風侵臺的熱門月分，



十月也偶有颱風發生，推測潮濕事件受颱風帶來的雨水甚大。2008 及 2009 年發生的嚴重(或極端)潮濕事件，應分別是因為 2007 年十月的科羅莎強颱風與 2008 年九月的辛樂克及薔蜜強颱風的來襲。其他如 1970 年，在前一年九月或十月也有較強的颱風經過臺灣。李正安與黃婉如(2015)秋颱風震盪週期變化的研究中，提供 1945–2015 秋季颱風降雨距平之時間序列，其振盪高點能對應到本研究的有 1970、2001、2008 及 2009 年的潮濕事件。另外，薛鍾彝(1948)統計 1897–1946 年間，侵襲臺灣的颱風有 900 多次，其中以每一年九月的次數最多。配合圖 26 中 1895–1905 及 1918–1930 間有較為明顯的潮濕事件，以及圖 37 中 1900–1930 年的潮濕事件為重建 200 多年來發生頻率最高的一段時間。更早之前的潮濕事件，雖然無法找到歷史紀錄配對，但推測多為颱風雨造成。

Dai(2011)提到全球乾旱在 1970 年代後大幅增加，但本研究藉由重建七家灣溪 200 多年的 SF_{SF} 、 SF_{SM} 與 $SSFI_{SF}$ ，可以發現至少目前秋季末至冬天的乾旱或潮溼事件並非大眾認為的日趨嚴重，反而 1950 年後不論事件的頻率或強度均有減緩的趨勢。要注意的是，在可能低估過往旱澇事件的狀況下，必須注意未來中部地區有可能發生更為嚴重的乾旱或潮溼事件。

5.4 遙相關對臺灣中部氣候影響

從重建七家灣 SF_{SF} 、 SF_{SM} 與 $SSFI_{SF}$ 的結果指出，乾旱或潮濕事件常連年出現。尤其藉由 $SSFI$ 值判斷，可以發現通常會連續出現正值(負值)，很少出現一年就轉換。此結果可以支持臺灣雨量或七家灣溪流量領先 ENSO 的論點(Guan et al., 2018a; Wang et al., 2012)。因為 ENSO 在發展時，即 ENSO 年的前一年，已會影響靠近臺灣的西太平洋海溫，進而影響臺灣降雨。當 ENSO 年來到，會持續影響臺灣降雨，甚至影響下一年，造成連幾年偏乾或濕。然而，不論是 SF_{SF} 、 SF_{SM} 或 $SSFI_{SF}$ 與 Climax Explorer 上的 Niño3、Niño3.4 與 Niño4 指數的相關性分析結果上，都沒有領先的



結果。反而是與 PDO 指數有出現領先的反應，但目前尚未能解釋此現象。另外，1970 年後開始出現零星的 SSFI 正值，常出現一年就轉換為負值。是否是受遙相關影響，可能需要更長的紀錄及後續研究。

藉由海溫場域分析的結果，可以看到 ENSO 痕跡，由於結果的流量因子與東太平洋赤道地區海溫為負相關，表示當七家灣溪流量越高海溫越低，會類似 La Niña 痕跡；反之流量越低海溫越高，類似 El Niño 痕跡。此結果似乎可與 2.4.1 提到 ENSO 暖相位時，西太平洋溫度較低，蒸發量下降，導致降雨減少；ENSO 冷相位則反之的現象解釋。然而，ENSO 對臺灣的影響不只東西氣流的影響，還包含南北向氣流變化，Lin et al.(2015)指出典型 El Niño 發生時，臺灣冬季降雨增加；典型 La Niña 發生時，僅秋季(九、十月)降雨增加明顯。另一方面，ENSO 更複雜的是發現與典型 ENSO 不同的異常 ENSO 變化，稱為 ENSO Modoki (Ashok et al., 2007)。ENSO Modoki 暖相位(El Niño Modoki)時，太平洋中央海溫異常偏高，太平洋兩側海溫異常偏低，ENSO Modoki 冷相位(La Niña Modoki)時則反之(Kug et al., 2009; Shinoda et al., 2011)。El Niño Modoki 發生時，對臺灣的影響幾乎是與典型 El Niño 相反的特徵，在十一至二月相對寒冷海溫產生高壓，空氣下流造成降雨減少，加上西太平洋上空異常風型，東北風減少南海帶上來的的水氣，抑制降雨；La Niña Modoki 發生時，也會有秋季降雨增加的現象，但兩種 La Niña 的影響並不那麼明顯(Lin et al., 2015)。因此綜合上述，七家灣溪流量因子的變化也可能受 ENSO Modoki 帶來的影響，尤其 El Niño Modoki 發生時，臺灣冬季降雨減少似乎與本研究結果更相符。然而是否此地區真的受 ENSO Modoki 影響，應在未來更深入進行相關研究。

場域分析的結果也有看到類似 PDO 的痕跡，加上七家灣 SF_{SF} 、 SF_{SM} 與 $SSFI_{SF}$ 跟 PDO 指數有負相關。PDO 除了影響北部春雨外，林和駿與洪致文(2015)指出 PDO 跟臺灣北部秋季降雨量為負相關。當 PDO 為暖相位時，東太平洋海溫距平靠近臺灣，使反氣旋距平壟罩臺灣，抑制臺灣北部降雨；PDO 冷相位時，降雨增加。配合的 PDO 相位變化(圖 6 b)與 SF_{SF} 、 SF_{SM} 及 $SSFI_{SF}$ 觀測/重建值(圖 24、圖 36)，發

現 1990 年代末期到現今的幾個相位轉換，能配合 SF_{SF} 、 SF_{SM} 及 $SSFI_{SF}$ 重建/觀測值：在 PDO 冷相位時， SF_{SF} 、 SF_{SM} 與 $SSFI_{SF}$ 較高；在 PDO 暖相位時， SF_{SF} 、 SF_{SM} 與 $SSFI_{SF}$ 較低。因此，本研究認為 PDO 對臺灣中部地區的流量有影響，也支持 Guan et al. (2018a)認為林和駿與洪致文(2015)的結果可以在空間上更往南移動，涵蓋到武陵地區。

臺灣冬天降雨受東亞冬季季風(EAWM)影響，雖然東北季風被中央山脈擋住，無法將水分帶至武陵地區。然而，近三十幾年的 EAWM 僅在十一月增強，漸弱的 EAWM 加上中國南海溫暖 SST，使向北移動的濕氣增加(Chang & Lu, 2012; Guan et al., 2018a)。搭配海平面氣壓場域分析的結果，在冬天並沒有與西伯利亞地區有顯著相關，反而與南海、阿拉伯海與印度洋的負相關明顯，可能表示七家灣溪流量因子的變化與那些地區所帶來的水氣有關。Li et al. (2015)的研究提到熱帶印度洋海溫與西北太平洋 SLP 為正相關，當海溫越高加劇西北太平洋氣壓增加，影響氣流變化造成華南南風異常，最終使長江中下游地區冬季降雨增加(圖 45)。臺灣位於中國東南方，依圖 45 的氣流流動，臺灣的確有可能也受相同的機制影響，所以在未來對於臺灣冬季氣候的研究，也可針對印度洋做進一步研究。

在 4.4.4 與 4.5.4 結果指出北極振盪 AO 暖相位可能使臺灣中北部地區九到十月的雨量增加，進而影響到流量。AO 暖相位時，歐亞大陸北部西風比正常情況強(北極極地噴射氣流增強)，導致北極寒風無法往南，影響 EAWM 減弱，冷相位則反之(Wu & Wang, 2002)。另外，中緯度地區對流層顯著異常向上流動也發生在 AO 暖相位的時間點。由於 SH 主要取決高空氣流下降，當 AO 暖相位時 SH 會比正常狀況更弱，間接影響 EAWM 減弱(Ding et al., 1991; He et al., 2017)。減弱的 EAWM 如 2.4.3 提及，會使中國南海水氣向北移動，且此時低壓壟罩，造成雨量增加，接著影響流量增加。

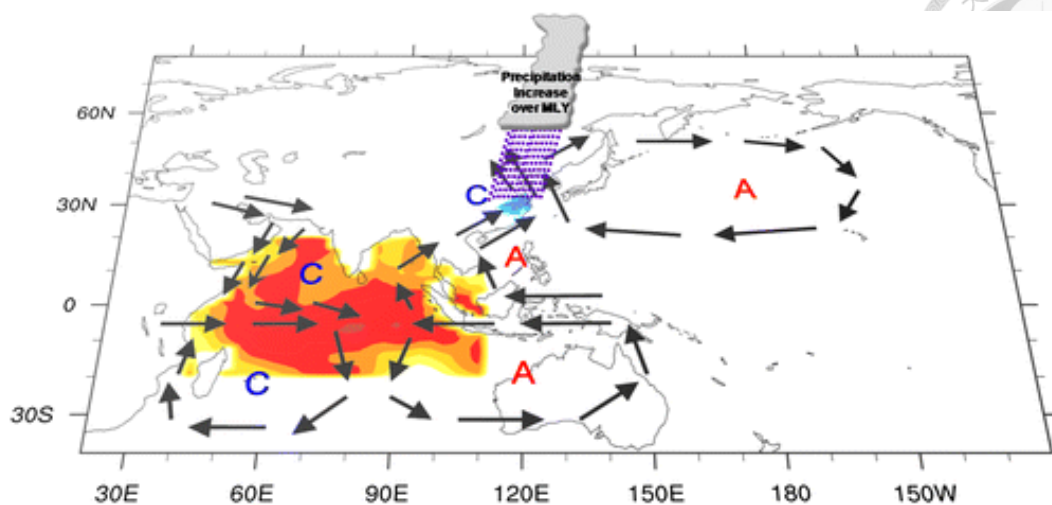


圖 45、印度洋增暖影響長江中下游地區冬天降雨增加示意圖(取自 Li et al., 2015)。

A 為反氣旋循環；C 為氣旋循環。

5.5 七家灣溪流量因子重建比較

Guan et al. (2018a)以臺灣黃杉早材輪寬重建七家灣 $SSFI_{OF}$ ，本研究以同樹種早材輪寬 IMF1-3 年表重建的流量因子多了前一年九月的流量($SSFI_{SF}$ 、 SF_{SF} 與 SF_{SM} ， $SSFI_{SF}$ 與 SF_{SF})， SF_{SM} 除了九月又多了當年三月的流量。兩個研究同樣位於武陵地區且同樣以臺灣黃杉輪寬做為重建樹種，然本研究與 Guan et al. (2018a)的結果相比，在樣本數更多、流量紀錄更長及更靠近七家灣溪流域的狀況下，早材與水文訊號的相關性並沒有更好。將本文重建七家灣溪流量因子結果與 Guan et al. (2018a)的七家灣 $SSFI_{OF}$ 重建結果比較(圖 46、圖 47)，雖然重建的月分不同，但不論是七家灣 SF_{SF} 、 SF_{SM} 或 $SSFI_{SF}$ 與 $SSFI_{OF}$ 重建比較，整體波動基本上雷同。主要乾濕事件都能對應到，重建七家灣 $SSFI_{OF}$ 與 $SSFI_{SF}$ 僅在 1870–1880 中期與 1790 年代有明顯不同(圖 46)。但在這兩段時間內，雖然波動不相符，但幾乎都是屬於正常事件的範圍內，所以並非嚴重的差異。雖然重建七家灣 SF_{SF} 、 SF_{SM} 與 $SSFI_{SF}$ 的波動基本上是一致的，但重建七家灣 SF_{SF} 與 SF_{SM} 為經過平方根轉換的流量，波動變化看似相對較保守。重建 $SSFI_{OF}$ 與 SF_{SF} 及 SF_{SM} 的差異，反而在 1980 末至 1990 末較明

顯(圖 47)，重建七家灣 SF_{SF} 及 SF_{SM} 偏濕； $SSFI_{OF}$ 則偏乾，甚至有中度乾旱發生。造成其差異的原因，可能為這段時間的九月帶來較多的雨量。

本研究在七家灣溪潮濕事件的重建上，相對來說更保守，在乾旱事件的重建上，兩重建發生嚴重與極端事件的頻率比起潮濕事件更高。本研究的重建卻更容易有極端乾旱事件的發生，推測雖然生長在河邊的樹不容易感到乾，但若有嚴重的乾旱發生，反應會更為強烈。兩者重建的結果均在 1950 年後，乾旱和潮濕事件的頻率及強度減緩，且均容易低估乾旱，表示過去發生的嚴重或極端乾旱事件，在未來有機會再次發生且可能比觀測紀錄的更為嚴重。除了樣本與模型不同外，重建的月份也並非完全相同，造成兩者在重建上的波動並非完全一致，但整體變化依然相似。因此，本研究再次證明以臺灣黃杉早材輪寬重建溪流流量的可行性。

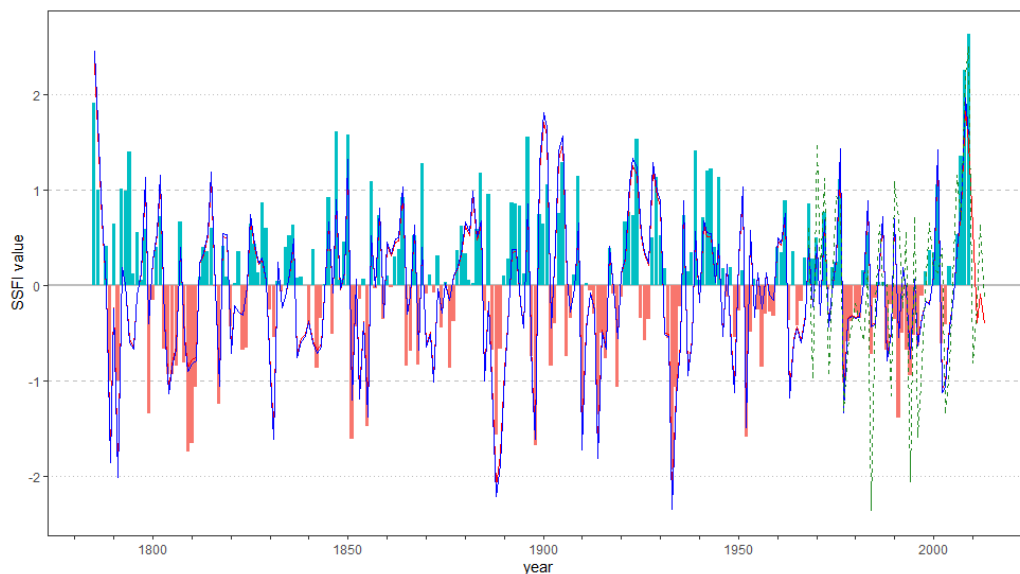


圖 46、以臺灣黃杉早材重建七家灣之 $SSFI_{SF}$ 與 Guan et al. (2018a)所重建七家灣之 $SSFI_{OF}$ 比較。色塊為 Guan et al. (2018a) $SSFI_{OF}$ 重建結果，藍為偏潮濕，粉為偏乾旱；綠虛線為觀測 $SSFI_{SF}$ ；藍線為重建 $SSFI_{SF}$ (Model I)；紅線為重建 $SSFI_{SF}$ (Model II)。

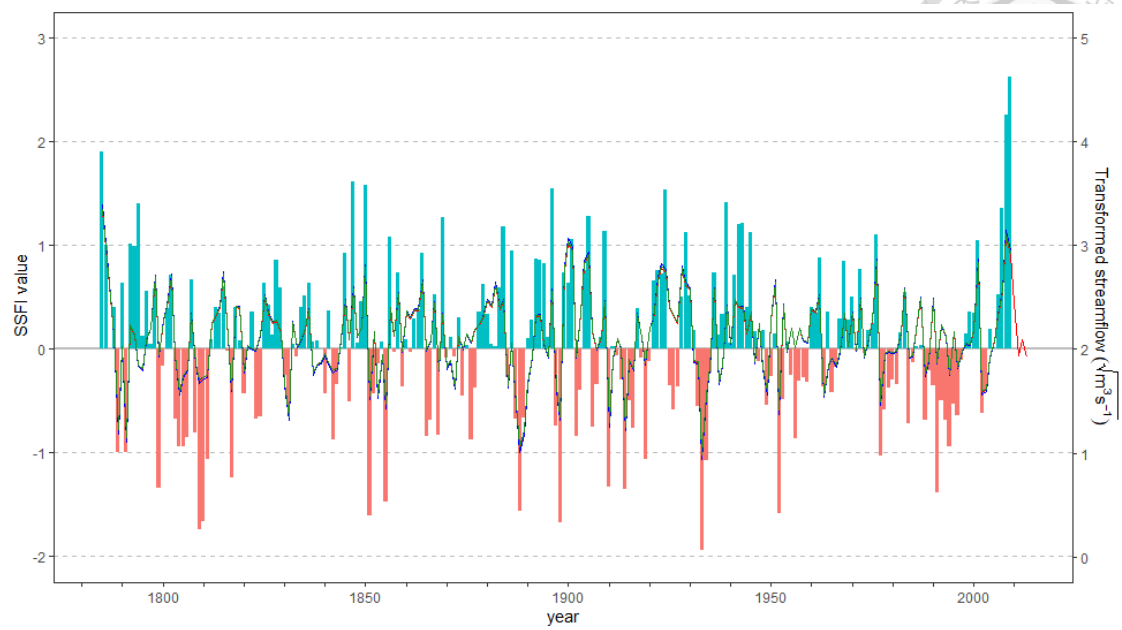


圖 47、以臺灣黃杉早材重建七家灣之 SF_{SF} 及 SF_{SM} 與 Guan et al. (2018a) 所重建七家灣之 $SSFI_{IOF}$ 比較。色塊為 Guan et al. (2018a) $SSFI_{IOF}$ 重建結果，藍為偏潮濕，粉為偏乾旱；藍線為重建 SF_{SF} (Model I)；紅線為重建 SF_{SF} (Model II)；綠線為重建 SF_{SM} (Model I)。


第六章 結論



本研究最後以臺灣黃杉早材輪寬 IMF1-3 年表重建西元 1785 年以來七家灣溪前一年九到當年二月及前一年九到當年三月经由開根號後轉換的平均流量(SF_{SF} 、 SF_{SM})與前一年九到當年二月七家灣標準化流量指標($SSFI_{SF}$)。從相關性分析中，早材比起晚材及全輪與水文訊號的相關性最好，並指出此地區的臺灣黃杉早材生長受乾季與濕季末期(九月)的水分影響。另一方面，濕季末期比起乾季，有更大的流量變化，九月或十月的颱風雨，極有可能影響黃杉早材生長甚大。

重建的七家灣 SF_{SF} 、 SF_{SM} 與 $SSFI_{SF}$ ，在波動變化上相似。重建七家灣 SF_{SF} 與 SF_{SM} 有較高的解釋率，且重建流量值的應用更為廣泛，但對於乾濕事件判定不比 $SSFI$ 好。藉由重建七家灣 $SSFI_{SF}$ 可觀察到大約每 10–20 年會有乾旱事件發生，整體來說，乾旱事件較潮濕事件發生的頻率更高，且在 1950 年後不論潮濕或乾旱事件發生的頻率及強度都有減緩的現象。多數的乾旱事件可以找到前人研究或歷史紀錄支持，潮濕事件雖較少相對應的歷史紀錄及文獻，然而由於重建月份涵蓋九至十月加上部分文獻支持，可推測潮濕事件的發生受颱風影響。其次，不論乾濕事件都有低估的情況，尤其乾旱事件較為嚴重。低估原因牽涉 $SSFI$ 統計計算或植物生長跟土壤濕度之間的問題，但不論原因為何，需要注意未來可能發生更為嚴重的乾旱或潮濕事件。

除此之外，觀測或重建七家灣 SF_{SF} 、 SF_{SM} 及 $SSFI_{SF}$ ，均可看出遙相關的影響，且在 1968–2009 (2013)期間，觀測或重建七家灣 SF_{SF} 、 SF_{SM} 及 $SSFI_{SF}$ 與 AO、PDO 與 Niño3.4 指數均有顯著相關。藉由與 SST 的場域分析，看到 PDO 與 ENSO 的痕跡。本研究結果支持 PDO 不僅僅影響北臺灣的春雨，藉由菲律賓海反氣旋異常變化，對於中部高山的秋冬季水文應也有影響。ENSO 對於七家灣溪流量因子的影響除了受典型 ENSO 影響外，也可能受 ENSO Modoki 影響：El Niño Modoki 發生，使冬季降雨減少，流量偏低；La Niña Modoki 發生，使秋季九到十月降雨增加，流



量增加，另外，藉由七家灣 $SSFI_{SF}$ 重建結果指出過去已有連年偏乾或偏濕的情況，搭配 ENSO 的痕跡，可以支持臺灣在雨量及流量上領先 ENSO 的現象。本研究也發現流量領先 PDO 的現象，然而尚需更多研究針對於此進行驗證及討論。在與 SLP 的場域分析上，有亞澳季風系統、NAO 與 AO 的痕跡，與南海、阿拉伯海及印度洋的負相關，可能顯示臺灣旱季水氣來源於這些區域，過往研究指出印度洋增溫影響西北太平洋高壓，接著影響氣流的流動，可能為印度洋水氣流動至此地區的原因。重建 1968–2009 (2013) 期間七家灣 SF_{SF} 、 SF_{SM} 或 $SSFI_{SF}$ 與 AO 的 SLP 場域分析也指出，AO 暖相位配合 EAWM 減弱及南海海溫異常增加，影響此地區九到十月雨量的增加，進而影響流量增加。

本研究重建的七家灣 SF_{SF} 、 SF_{SM} 與 $SSFI_{SF}$ 與 Guan et al. (2018a) 重建的七家灣 $SSFI_{OF}$ 波動一致，再次證明臺灣黃杉早材輪寬重建流量因子的可行性。有差異的部分，除了樹木個體差異外，是否可能為樣樹更靠近溪流所造成也需更多研究證實。臺灣樹木水文學研究甚少，本文藉由觀測及重建七家灣 SF_{SF} 、 SF_{SM} 與 $SSFI_{SF}$ 證明七家灣溪流量不僅受單一因子影響，颱風及 AO、EAWM、ENSO 與 PDO 等多項遙相關因子，影響臺灣中部地區雨量及流量變化。希望本研究能為未來的相關研究，提供棉薄之力，並對臺灣日後的水文管理有所幫助。

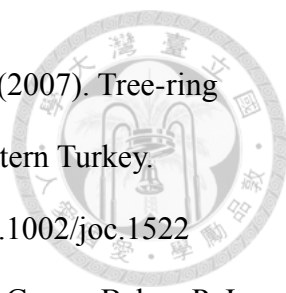
參考文獻




- 王作臺與許晃雄 (1994)。北半球冬季遙相關系統及東亞夏季季風研究之回顧。大氣科學，22(4)，545–563。
- 王筱雯 (2015)。七家灣溪水文影像監測計畫。內政部營建署雪霸國家公園管理處。
- 李正安與黃婉如 (2018)。臺灣秋季降雨之低頻擾動變遷。臺灣師範大學地球科學系學位論文，1–56。
- 李俊逸 (2013)。臺灣山地集水區河川流量特徵變化：以觀測與模式取徑分析(碩士論文)。國立臺灣大學地理環境資源學研究所，臺北市。
- 林和駿與洪致文 (2015)。臺灣秋季與春季年代際降雨之反相位關係研究。大氣科學，43(4)，301–314。
- 林雪美 (2004)。台灣地區近三十年自然災害的時空特性。台灣師大地理研究報告，41，99–128。
- 邱祈榮、梁玉琦、賴彥任與黃名媛 (2004)。臺灣地區氣候分區與應用之研究。臺灣地理資訊學刊，1，41–62。
- 柳楷 (1971)。臺灣植物群落分類之研究(II)臺灣高山寒原及針葉樹林群系。臺灣省林業試驗所報告第 203 號。
- 洪致文與施明甫 (2017)。台灣氣象乾旱指數的建立與嚴重乾旱事件分析。大氣科學，45(2)，45–165。
- 徐泓 (1986)。清代台灣自然災害史料新編。臺北市：國家科學委員會。
- 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(碩士論文)。輔英科技大學環境工程與科學系，高雄市。
- 張石角 (1995)。雪霸國家公園武陵地區災害敏感區之調查與防範研究。國家公園學報，6(1)，1–24。
- 張振璋 (2008)。太平洋大氣與海洋系統中年際至年代震盪研究(碩士論文)。中國文



- 化大學地學研究所，臺北市。
- 張繡慧 (1999)。台灣北部昆欄樹樹輪對氣候因子之反映(碩士論文)。國立台灣大學地質學研究所，臺北市。
- 許晃雄、羅資婷、洪致文、洪志誠、李明營、陳雲蘭、…與隋中興 (2012)。氣候自然變異與年代際變化。大氣科學，40(3)，249–295。
- 陳信豪 (2015)。利用樹輪穩定氧同位素重建台灣霧林帶歷史氣候變異(碩士論文)。國立成功大學生命科學系，臺南市。
- 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(碩士論文)。國立臺灣大學地質科學研究所，臺北市。
- 馮豐隆與詹明勳 (2005)。年輪學應用於森林與環境的關係。林學研究季刊，27(3)，37–50。
- 黃聖焜 (2013)。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(碩士論文)。國立臺灣大學森林環境暨資源學研究所，臺北市。
- 楊遠波、劉和義與呂勝由 (1997)。臺灣維管束植物簡誌—II 種子植物門。臺北市：中華民國行政院農委會。
- 詹明勳、王亞男與葉永廉 (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。
- 鄒佩珊 (1998)。台灣山區近五百年的氣候變化:樹輪寬度的證據(博士論文)。國立臺灣大學地質研究所，臺北市。
- 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(碩士論文)。國立臺灣大學森林環境暨資源學研究所，臺北市。
- 盧孟明 (2000)。聖嬰現象與台灣異常氣候關係之探討。大氣科學，28(2)，91–114。
- 薛鍾彝 (1948)。五十年颱風侵襲臺灣之統計(1897–1946)。臺北市：臺灣氣象所。

- 
- Akkemik, Ü., D'Arrigo, R., Cherubini, P., Köse, N., & Jacoby, G. C. (2007). Tree-ring reconstructions of precipitation and streamflow for north-western Turkey. *International Journal of Climatology*, 28(2), 173–183. doi:10.1002/joc.1522
- Allen, K. J., Nichols, S. C., Evans, R., Cook, E. R., Allie, S., Carson, G., . . . Baker, P. J. (2015). Preliminary December–January inflow and streamflow reconstructions from tree rings for western Tasmania, southeastern Australia. *Water Resources Research*, 51(7), 5487–5503. doi:10.1002/2015WR017062
- Ångström, A. (1935). Teleconnections of climatic changes in present time. *Geografiska Annaler*, 17(3-4), 242–258. doi:10.1080/20014422.1935.11880600
- Arpe, K., Bengtsson, L., Golitsyn, G. S., Mokhov, I. I., Semenov, V. A., & Sporyshev, P. V. (2000). Connection between Caspian Sea level variability and ENSO. *Geophysical research letters*, 27(17), 2693–2696.
- Ashok, K., Behera, S. K., Rao, S. A., Weng, H., & Yamagata, T. (2007). El Niño Modoki and its possible teleconnection. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 112(C11).
- Axelson, J. N., Sauchyn, D. J., & Barichivich, J. (2009). New reconstructions of streamflow variability in the South Saskatchewan River Basin from a network of tree ring chronologies, Alberta, Canada. *Water Resources Research*, 45(9).
- Bégin, Y. (2000). Reconstruction of subarctic lake levels over past centuries using tree rings. *Journal of Cold Regions Engineering*, 14(4), 192–212. doi:10.1061/(ASCE)0887-381X(2000)14:4(192)
- Bailey, H. P. (1947). Trees as climatic indicators. *Yearbook of the Association of Pacific Coast Geographers*, 9(1), 23–29.
- Bonin, D. V., & Burn, D. H. (2005). Use of tree ring reconstructed streamflows to assess drought. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 32(6), 1114–1123.

- 
- Bradley, R. S. (1985). *Quaternary paleoclimatology : methods of paleoclimatic reconstruction*. Boston: Unwin Hyman.
- Brito-Castillo, L., Díaz-Castro, S., Salinas-Zavala, C. A., & Douglas, A. V. (2003). Reconstruction of long-term winter streamflow in the Gulf of California continental watershed. *Journal of Hydrology*, 278(1), 39–50.
doi:[https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(03\)00131-8](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(03)00131-8)
- Buckley, B. M., Anchukaitis, K. J., Penny, D., Fletcher, R., Cook, E. R., Sano, M., . . . Hong, T. M. (2010). Climate as a contributing factor in the demise of Angkor, Cambodia. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 107(15), 6748–6752. doi:10.1073/pnas.0910827107
- Bunn, A. G., Korpela, M., Biondi, F., Campelo, F., Mérian, P., Qeadan, F., & Zang, C. (2019). dplR: Dendrochronology Program Library in R. R package version 1.7.0.
<https://CRAN.R-project.org/package=dplR>
- Camargo, S. J., & Sobel, A. H. (2005). Western North Pacific tropical cyclone intensity and ENSO. *Journal of Climate*, 18(15), 2996–3006. doi:10.1175/JCLI3457.1
- Case, R. A., & MacDonald, G. M. (2007). Tree ring reconstructions of streamflow for three canadian prairie rivers. *Journal of the American Water Resources Association*, 39(3), 703–716. doi:10.1111/j.1752-1688.2003.tb03686.x
- Casper, B. B., & Jackson, R. B. (1997). Plant competition underground. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 28(1), 545–570.
- Chan, J., & Li, C. Y. (2004). The East Asia Winter Monsoon. In C.P Chang (Ed), *East Asian Monsoon*. World Scientific, 54–106.
- Chang, C. P., & Lu, M. M. (2012). Intraseasonal predictability of Siberian high and East Asian Winter Monsoon and its interdecadal variability. *Journal of Climate*, 25(5), 1773–1778. doi:10.1175/JCLI-D-11-00500.1

Chen, W., Feng, J., & Wu, R. (2012). Roles of ENSO and PDO in the link of the East Asian Winter Monsoon to the following summer monsoon. *Journal of Climate*, 26(2), 622–635. doi:10.1175/JCLI-D-12-00021.1



Cleaveland, M. K. (2000). A 963 year reconstruction of summer (JJA) stream flow in the White River, Arkansas, USA, from tree-rings. *The Holocene*, 10(1), 33–41. doi:10.1191/095968300666157027

Coble, A., & Kolb, T. (2012). Riparian tree growth response to drought and altered streamflow along the Dolores River, Colorado. *Western Journal of Applied Forestry*, 27(4), 205–211.

Cohen, J., & Barlow, M. (2005). The NAO, the AO, and global warming: How closely related?. *Journal of Climate*, 18(21), 4498–4513.

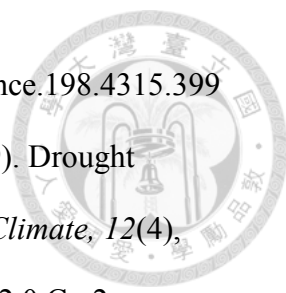
Cook, E. R. (1985). A time series analysis approach to tree ring standarization (Dendrochronology, Forestry, Dendroclimatology, Autoregressive Process). In: ProQuest Dissertations Publishing.

Cook E. R., & Holmes R. L. (1986). User's manual for program ARSTAN. In R.L. Holmes, R.K. Adams, & H.C. Fritts (Eds.), *In Tree-ring Chronologies of Western North America: California, Eastern Oregon and Northern Great Basin* (pp 50–56). Arizona, AZ : University of Arizona

Cook, E. R., Anchukaitis, K. J., Buckley, B. M., D'Arrigo, R. D., Jacoby, G. C., & Wright, W. E. (2010). Asian Monsoon failure and megadrought during the last millennium. *Science*, 328(5977), 486. doi:10.1126/science.1185188

Cook, E. R., Briffa, K. R., & Jones, P. D. (1994). Spatial regression methods in dendroclimatology: A review and comparison of two techniques. *International Journal of Climatology*, 14(4), 379–402. doi:10.1002/joc.3370140404

Cook, E. R., & Jacoby, G. C. (1977). Tree-ring-drought relationships in the Hudson

- 
- Valley, New York. *Science*, 198(4315), 399. doi:10.1126/science.198.4315.399
- Cook, E. R., Meko, D. M., Stahle, D. W., & Cleaveland, M. K. (1999). Drought reconstructions for the continental United States. *Journal of Climate*, 12(4), 1145–1162. doi:10.1175/1520-0442(1999)012<1145:Drftcu>2.0.Co;2
- Crawford, C. J., Griffin, D., & Kipfmueeller, K. F. (2015). Capturing season-specific precipitation signals in the northern Rocky Mountains, USA, using earlywood and latewood tree rings. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 120(3), 428–440. doi:10.1002/2014JG002740
- Dai, A. (2011). Drought under global warming: a review. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change*, 2(1), 45–65. doi:10.1002/wcc.81
- Denmead, O. T., & Shaw, R. H. (1962). Availability of soil water to plants as affected by soil moisture content and meteorological conditions 1. *Agronomy journal*, 54(5), 385–390.
- DeRose, R. J., Bekker, M. F., Wang, S. Y., Buckley, B. M., Kjelgren, R. K., Bardsley, T., . . . Allen, E. B. (2015). A millennium-length reconstruction of Bear River stream flow, Utah. *Journal of Hydrology*, 529, 524–534. doi:https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.01.014
- Dibiasi, A., & Bowman, A. (1997). Testing for constant variance in a linear model. *Statistics & Probability Letters*, 33(1), 95–103. doi:10.1016/S0167-7152(96)00115-0
- Ding, Y., Wen, S., & Li, Y. (1991). A study of dynamic structures of the Siberian high in winter. *Acta Meteorologica Sinica*, 49(4), 430–439.
- Fritts, H. C. (1976). *Tree rings and climate*. London, Academic Press.
- Fox, J., & Weisberg, S. (2019). *An R Companion to Applied Regression*, Third edition. Sage, Thousand Oaks CA.

<https://socialsciences.mcmaster.ca/jfox/Books/Companion/>.



Gallant, A. J. E., & Gergis, J. (2011). An experimental streamflow reconstruction for the River Murray, Australia, 1783–1988. *Water Resources Research*, 47(12).

doi:10.1029/2010WR009832

Gedalof, Z. E., Peterson, D. L., & Mantua, N. J. (2004). Columbia river flow and drought since 1750. *Journal of the American Water Resources Association*, 40(6), 1579–1592. doi:10.1111/j.1752-1688.2004.tb01607.x

George, S. S., & Nielsen, E. (2000). Signatures of high-magnitude 19th-century floods in *Quercus macrocarpa* tree rings along the Red River, Manitoba, Canada. *Geology*, 28(10), 899–902.

doi:10.1130/0091-7613(2000)28<899:SOHTFI>2.0.CO;2

Graham, N. E. (1994). Decadal-scale climate variability in the tropical and North Pacific during the 1970s and 1980s: observations and model results. *Climate Dynamics*, 10(3), 135–162. doi:10.1007/BF00210626


Guan, B. T. (2014). Ensemble empirical mode decomposition for analyzing phenological responses to warming. *Agricultural and forest meteorology*, 194, 1–7.

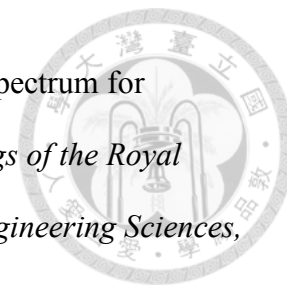
Guan, B. T., Wright, W. E., Chung, C. H., & Chang, S. T. (2012). ENSO and PDO strongly influence Taiwan spruce height growth. *Forest Ecology and Management*, 267, 50–57. doi:10.1016/j.foreco.2011.11.028

Guan, B. T., Wright, W. E., Chiang, L. H., & Cook, E. R. (2018a). A dry season streamflow reconstruction of the critically endangered Formosan landlocked salmon habitat. *Dendrochronologia*, 52, 152–161.

doi:10.1016/j.dendro.2018.10.008

Guan, B. T., Wright, W. E., & Cook, E. R. (2018b). Ensemble empirical mode

- 
- decomposition as an alternative for tree-ring chronology development. *Tree-ring Research*, 74(1), 28–38. doi: 10.3959/1536-1098-74.1.28
- Guttman, N. B. (1998). Comparing the Palmer Drought index and this standardized precipitation index. *Journal of the American Water Resources Association*, 34(1), 113–121. doi:10.1111/j.1752-1688.1998.tb05964.x
- Hardman, G. (1936). The relationship between tree-growths and stream-runoff in the Truckee River Basin, California-Nevada. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 17(2), 491–493. doi:10.1029/TR017i002p00491
- Hawley, F. M. (1937). Relationship of southern cedar growth to precipitation and run off. *Ecology*, 18(3), 398–405.
- He, S., Gao, Y., Li, F., Wang, H., & He, Y. (2017). Impact of Arctic Oscillation on the East Asian climate: A review. *Earth-Science Reviews*, 164, 48–62.
- Herweijer, C., Seager, R., Cook, E. R., & Emile-Geay, J. (2007). North American droughts of the last millennium from a gridded network of tree-ring data. *Journal of Climate*, 20(7), 1353–1376. doi:10.1175/JCLI4042.1
- Holmes, R. L. (1983). Computer-assisted quality control in tree-ring dating and measurement. *Tree-ring bulletin*.
- Hong, H., Zhang, C., Shang, S., Huang, B., Li, Y., Li, X., & Zhang, S. (2009). Interannual variability of summer coastal upwelling in the Taiwan Strait. *Continental Shelf Research*, 29(2), 479–484. doi:https://doi.org/10.1016/j.csr.2008.11.007
- Huang, C. W., & Kao, P. K. (2010). Weakening of the winter monsoon and abrupt increase of winter rainfalls over northern Taiwan and southern China in the early 1980s. *Journal of Climate*, 23(9), 2357–2367.
- Huang, N. E., Shen, Z., Long, S. R., Wu, M. L. C., Shih, H. H., Zheng, Q., . . . Liu, H. H.



- (1998). The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 454(1971), 903–995.
- Huang, N. E., & Wu, Z. (2008). A review on Hilbert-Huang transform: Method and its applications to geophysical studies. *Reviews of Geophysics*, 46(2).
doi:10.1029/2007RG000228
- Huang, T. H., Chen, T. A., Zhang, W. Z., & Zhuang, X. F. (2015). Varying intensity of Kuroshio intrusion into Southeast Taiwan Strait during ENSO events. *Continental Shelf Research*, 103, 79–87. doi:10.1016/j.csr.2015.04.021
- Hung, C. W., Hsu, H. H., & Lu, M. M. (2004). Decadal oscillation of spring rain in northern Taiwan. *Geophysical Research Letters*, 31(22).
doi:10.1029/2004GL021344
- IPCC. (2012). Summary for policymakers: Managing the risks of extreme events and disasters to advance climate change adaptation. In C. B. Field, V. Barros, T. F. Stocker, Q. Dahe, D. J. Dokken, K. Ebi, M. Mastrandrea, K. J. Mach, G. K. Plattner, S. K. Allen, M. Tignor, & P. M. Midgley (Eds.), *A Special Report of Working Groups I and II of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (pp. 1–19). Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press.
- Jeong, J. H., & Ho, C. H. (2005). Changes in occurrence of cold surges over East Asia in association with Arctic Oscillation. *Geophysical Research Letters*, 32(14).
- Jones, P. D., Briffa, K. R., & Pilcher, J. R. (1984). Riverflow reconstruction from tree rings in southern Britain. *Journal of Climatology*, 4(5), 461–472.
doi:10.1002/joc.3370040502

Keen, F. P. (1937). Climatic cycles in Eastern Oregon as indicated by tree rings.

Monthly Weather Review, 65(5), 175–188.

doi:10.1175/1520-0493(1937)65<175:CCIEOA>2.0.CO;2



Kalnay, E., Kanamitsu, M., Kistler, R., Collins, W., Deaven, D., Gandin, L., ... & Zhu, Y.

(1996). The NCEP/NCAR 40 year reanalysis project. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 77(3), 437–472.

Kern, Z., Patkó, M., Kázmér, M., Fekete, J., Kele, S., & Pályi, Z. (2013). Multiple

tree-ring proxies (earlywood width, latewood width and $\delta^{13}\text{C}$) from pedunculate oak (*Quercus robur* L.), Hungary. *Quaternary International*, 293, 257–267.

doi:10.1016/j.quaint.2012.05.037

Koprowski, M., Okoński, B., Gričar, J., & Puchalka, R. (2018). Streamflow as an

ecological factor influencing radial growth of European ash (*Fraxinus excelsior* (L.)). *Ecological Indicators*, 85, 390–399. doi:10.1016/j.ecolind.2017.09.051

Kug, J. S., Jin, F. F., & An, S. I. (2009). Two types of El Niño events: cold tongue El

Niño and warm pool El Niño. *Journal of Climate*, 22(6), 1499–1515.

Kuo, N. J., & Ho, C.R. (2004). ENSO effect on the sea surface wind and sea surface

temperature in the Taiwan Strait. *Geophysical Research Letters*, 31(13).

doi:10.1029/2004GL020303

Kutner, M. H., Nachtsheim, C. J., Neter, J., & Li, W. (2004). *Applied Linear Statistical*

Models 5thed. McGraw Hill Irwin Boston, New York, 1396.

Lebourgeois, F. (2000). Climatic signals in earlywood, latewood and total ring width of

Corsican pine from western France. *France. Annals of Forest Science*, 57(2), 155–164.

Lepage, H., & Bégin, Y. (1996). Tree-ring dating of extreme water level events at Lake

Bienville, Subarctic Quebec, Canada. *Arctic and Alpine Research*, 28(1), 77–84.

doi:10.1080/00040851.1996.12003150

Li, S., & Bates, G. T. (2007). Influence of the Atlantic Multidecadal Oscillation on the winter climate of East China. *Advances in Atmospheric Sciences*, 24(1), 126–135. doi:10.1007/s00376-007-0126-6

Li, X. F., Li, J., & Li, Y. (2015). Recent winter precipitation increase in the middle–lower Yangtze River Valley since the late 1970s: A response to warming in the tropical Indian Ocean. *Journal of Climate*, 28(9), 3857–3879.

Lin, C. C., Liou, Y. J., & Huang, S. J. (2015). Impacts of two-type ENSO on rainfall over Taiwan. *Advances in Meteorology*, 2015, 7. doi:10.1155/2015/658347

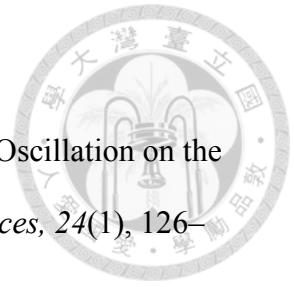
Liu, B., Huang, G., Hu, K., Wu, R., Gong, H., Wang, P., & Zhao, G. (2018). The multidecadal variations of the interannual relationship between the East Asian summer monsoon and ENSO in a coupled model. *Climate Dynamics*, 51(5), 1671–1686. doi:10.1007/s00382-017-3976-3


Luukko, P. J. J., Helske, J., & Räsänen, E. (2016). Introducing libeemd: A program package for performing the ensemble empirical mode decomposition. *Computational Statistics* 31: 545–557. doi:10.1007/s00180-015-0603-9.

Mantua, N. J., & Hare, S. (2002). Pacific-Decadal Oscillation (PDO). *Encyclopedia of Global Environmental Change*, 1, 592–594.

Mantua, N. J., Hare, S. R., Zhang, Y., Wallace, J. M., & Francis, R. C. (1997). A Pacific interdecadal climate oscillation with impacts on salmon roduction. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 78(6), 1069–1080.
doi:10.1175/1520-0477(1997)078<1069:APICOW>2.0.CO;2

McKee, T. B., Doesken, N. J., & Kleist, J. (1993). The relationship of drought frequency and duration to time scales. *Proceedings of the 8th Conference on Applied Climatology*, 17(22), 179–183. Boston, MA: American Meteorological Society.



- 
- Meko, D. M., & Baisan, C. H. (2001). Pilot study of latewood-width of conifers as an indicator of variability of summer rainfall in the North American monsoon region. *International Journal of Climatology*, 21(6), 697–708.
doi:10.1002/joc.646
- Meko, D. M., Touchan, R., Díaz, J. V., Griffin, D., Woodhouse, C. A., Castro, C. L., . . . Leavitt, S. W. (2013). Sierra San Pedro Mártir, Baja California, cool-season precipitation reconstructed from earlywood width of *Abies concolor* tree rings. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 118(4), 1660–1673.
doi:10.1002/2013JG002408
- Meko, D. M., & Woodhouse, C. A. (2005). Tree-ring footprint of joint hydrologic drought in Sacramento and Upper Colorado River basins, western USA. *Journal of Hydrology*, 308(1), 196–213. doi:10.1016/j.jhydrol.2004.11.003
- Meko, D. M., & Woodhouse, C. A. (2011). Application of streamflow reconstruction to water resources management. In M. K. Hughes, T. W. Swetnam, & H. F. Diaz (Eds.), *Dendroclimatology: Progress and Prospects* (pp.231–261). Dordrecht: Springer Netherlands.
- Meko, D. M., Woodhouse, C. A., & Morino, K. (2012). Dendrochronology and links to streamflow. *Journal of Hydrology*, 412, 200–209.
doi:10.1016/j.jhydrol.2010.11.041
- Meyers, S.R. (2014). Astrochron: An R Package for Astrochronology.
<https://cran.r-project.org/package=astrochron>
- Miller, A. J., Cayan, D. R., Barnett, T. P., Graham, N. E., & Oberhuber, J. M. (1994). The 1976–77 climate shift of the Pacific Ocean. *Oceanography*, 7(1), 21–26.
- Mishra, A. K., & Singh, V. P. (2010). A review of drought concepts. *Journal of Hydrology*, 391(1), 202–216. doi:10.1016/j.jhydrol.2010.07.012

Namias, J. (1978). Multiple causes of the North American abnormal winter 1976–77.

Monthly Weather Review, 106(3), 279–295.

doi:10.1175/1520-0493(1978)106<0279:MCOTNA>2.0.CO;2



Neves, J. (2012). Package ‘spi’. *Compute SPI index*. Wien: CRAN.

Okoński, B., & Koprowski, M. (2016). Are vessel traits of earlywood storing effect of hydroclimatic factors on radial growth of European ash? The case study of a floodplain forest. *Forestry Letters*, 109(10).

Palmer, W. C. (1965). Meteorological drought. Weather Bureau Research Paper 45, U.S. Department of Commerce, Washington, DC.

Potts, H. (1962). *A 600 year record of drought recurrences*. First water resources engineering conference, American Society of Civil Engineers, Omaha, Nebraska.

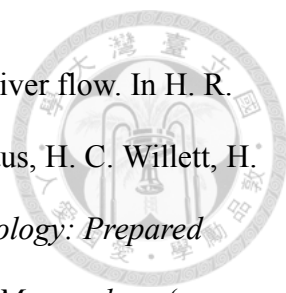
Razali, N. M., & Wah, Y. B. (2011). Power comparisons of Shapiro-Wilk, Kolmogorov-Smirnov, Lilliefors and Anderson-Darling tests. *Journal of Statistical Modeling and Analytics*, 2(1), 21–33.

Sara, C. D. Â., Matthew, D. T., David, W. S., & Malcolm, K. C. (2002). Chihuahua (Mexico) winter-spring precipitation reconstructed from tree-rings, 1647–1992. *Climate Research*, 22(3), 237–244.

Sauchyn, D., Vanstone, J., Jacques, J. M. S., & Sauchyn, R. (2015). Dendrohydrology in Canada’s western interior and applications to water resource management. *Journal of Hydrology*, 529, 548–558. doi:10.1016/j.jhydrol.2014.11.049

Schulman, E. (1942). Centuries-long tree indices of precipitation in the Southwest (II). *Bulletin of the American Meteorological Society*, 23(5), 204–217.

Schulman, E. (1945). *Tree-ring hydrology of the Colorado River basin* (Vol. 16). Arizona, AZ: University of Arizona Press.

- 
- Schulman, E. (1951). Tree-ring indices of rainfall, temperature, and river flow. In H. R. Byers, H. E. Landsberg, H. Wexler, B. Haurwitz, A. F. Spilhaus, H. C. Willett, H. G. Houghton, & T. F. Malone (Eds.), *Compendium of Meteorology: Prepared under the Direction of the Committee on the Compendium of Meteorology* (pp. 1024–1029). Boston, MA: American Meteorological Society.
- Schulman, E. (1953). Tree-ring evidence for climatic changes. In H. Shapely (Ed) *Climatic Change: Evidence, Causes, and Effects. Edited* (pp.209). Cambridge, MA: Harvard University Press.
- Schulman, E. (1956). *Dendroclimatic changes in semiarid America*. Arizona, AZ: University of Arizona Press.
- Schweingruber, F. H. (1983). Der Jahrring. *Standort, Methodik, Zeit und Klima in der Dendrochronologie*, 1–234.
- Serrano, S. M. V., Moreno, J. I. L., Beguería, S., Lacruz, J. L., Molina, C. A., & Tejeda, E. M. (2012). Accurate computation of a streamflow drought index. *Journal of Hydrologic Engineering*, 17(2), 318–332.
doi:10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0000433
- Shah, S. K., Bhattacharyya, A., & Chaudhary, V. (2014). Streamflow reconstruction of Eastern Himalaya River, Lachen ‘Chhu’, North Sikkim, based on tree-ring data of *Larix griffithiana* from Zemu Glacier basin. *Dendrochronologia*, 32(2), 97–106. doi:10.1016/j.dendro.2014.01.005
- Sheu, D. D., Kou, P., Chiu, C. H., & Chen, M. J. (1996). Variability of tree-ring $\delta^{13}\text{C}$ in Taiwan fir: Growth effect and response to May–October temperatures. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 60(1), 171–177.
doi:https://doi.org/10.1016/0016-7037(95)00401-7
- Shinoda, T., Hurlburt, H. E., & Metzger, E. J. (2011). Anomalous tropical ocean

circulation associated with La Niña Modoki. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 116(C12).



Speer, J. H. (2010). *Fundamentals of Tree-ring Research*. Tucson: University of Arizona Press.

Steinschneider, S., & Brown, C. (2011). Influences of North Atlantic climate variability on low-flows in the Connecticut River Basin. *Journal of Hydrology*, 409(1), 212–224. doi:10.1016/j.jhydrol.2011.08.038

Stockton, C. W., & Boggess, W. R. (1981). Tree rings: a proxy data source for hydrologic forecasting. In: R.M. North, L.B. Dworsky, & D.J. Allee (Eds), *Symposium proceedings, unified river basin management* (pp.609–624). American Water Resources Association Press.

Stockton, C. W., & Boggess, W. R. (1983). Tree-ring data: valuable tool for reconstructing annual and seasonal streamflow and determining long-term trends. *Transportation Research Record*, 922, 10–17.

Stockton, C. W., & Fritts, H. C. (1973). Long-term reconstruction of water level changes for Lake Athabasca by analysis of tree rings. *Journal of the American Water Resources Association*, 9(5), 1006–1027.


Stockton, C. W., & Jacoby, G. C. (1976). Long-term surface-water supply and streamflow trends in the Upper Colorado River basin based on tree-ring analyses. *Lake Powell Research Project Bulletin 18*, National Science Foundation, Arlington, Va.

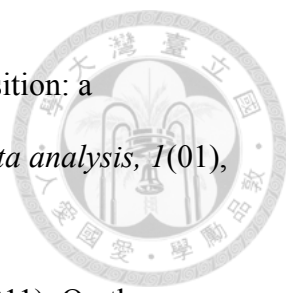
Stokes, M. A., & Smiley, T. L. (1968). *An Introduction to Tree-Ring Dating*. Arizona, AZ: University of Arizona Press.

Thompson, D. W., & Wallace, J. M. (1998). The Arctic Oscillation signature in the wintertime geopotential height and temperature fields. *Geophysical research*



- letters, 25(9), 1297–1300.
- Touchan, R., Funkhouser, G., Hughes, M. K., & Erkan, N. (2005). Standardized precipitation index reconstructed from Turkish tree-ring widths. *Climatic Change*, 72(3), 339–353. doi:10.1007/s10584-005-5358-9
- Trenberth, K. E. (1990). Recent observed interdecadal climate changes in the northern hemisphere. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 71(7), 988–993. doi:10.1175/1520-0477(1990)071<0988:ROICCI>2.0.CO;2
- Trenberth, K. E., & Caron, J. M. (2000). The Southern Oscillation revisited: sea level pressures, surface temperatures, and precipitation. *Journal of Climate*, 13(24), 4358–4365. doi:10.1175/1520-0442(2000)013<4358:TSORSL>2.0.CO;2
- Trenberth, K. E., Jones, P., Ambenje, P., Bojariu, R., Easterling, D., Klein Tank, A., . . . Rusticucci, M. (2007). Observations: surface and atmospheric climate change. Chapter 3. *Climate change*, 235–336.
- Trouet, V., & Van Oldenborgh, G. J. (2013). KNMI Climate Explorer: A web-based research tool for high-resolution paleoclimatology. *Tree-ring Research*, 69, 3–13. doi:10.3959/1536-1098-69.1.3
- Urrutia, R. B., Lara, A., Villalba, R., Christie, D. A., Le Quesne, C., & Cuq, A. (2011). Multicentury tree ring reconstruction of annual streamflow for the Maule River watershed in south central Chile. *Water Resources Research*, 47(6). doi:10.1029/2010WR009562
- Veihmeyer, F. J., & Hendrickson, A. H. (1950). Soil moisture in relation to plant growth. *Annual Review of Plant Physiology*, 1(1), 285–304.
- Verdon, D. C., & Franks, S. W. (2006). Long-term behaviour of ENSO: Interactions with the PDO over the past 400 years inferred from paleoclimate records. *Geophysical Research Letters*, 33(6). doi:10.1029/2005GL025052

- 
- Walker, G. (1928). World weather. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 54(226), 79–87. doi:10.1002/qj.49705422601
- Wang, Q., Wu, J., Lei, T., He, B., Wu, Z., Liu, M., . . . Liu, D. (2014). Temporal-spatial characteristics of severe drought events and their impact on agriculture on a global scale. *Quaternary International*, 349, 10–21. doi:10.1016/j.quaint.2014.06.021
- Wang, S. Y., L'Heureux, M., & Chia, H. H. (2012). ENSO prediction one year in advance using western North Pacific sea surface temperatures. *Geophysical Research Letters*, 39(5). doi:10.1029/2012GL050909
- Wigley, T. M. L., Briffa, K. R., & Jones, P. D. (1984). On the average value of correlated time series, with applications in dendroclimatology and hydrometeorology. *Journal of Climate and Applied Meteorology*, 23(2), 201–213. doi:10.1175/1520-0450(1984)023<0201:OTAVOC>2.0.CO;2
- Woodhouse, C. A., Gray, S. T., & Meko, D. M. (2006). Updated streamflow reconstructions for the Upper Colorado River Basin. *Water Resources Research*, 42(5). doi:10.1029/2005WR004455
- Woodhouse, C. A., & Lukas, J. J. (2006). Multi-century tree-ring reconstructions of Colorado streamflow for water resource planning. *Climatic Change*, 78(2), 293–315. doi:10.1007/s10584-006-9055-0
- Wright, W. E., Guan, B. T., Tseng, Y. H., Cook, E. R., Wei, K. Y., & Chang, S. T. (2015). Reconstruction of the springtime East Asian Subtropical Jet and Western Pacific pattern from a millennial-length Taiwanese tree-ring chronology. *Climate Dynamics*, 44(5), 1645–1659. doi:10.1007/s00382-014-2402-3
- Wu, B., & Wang, J. (2002). Winter Arctic oscillation, Siberian high and East Asian winter monsoon. *Geophysical research letters*, 29(19), 3.

- 
- Wu, Z., & Huang, N. E. (2009). Ensemble empirical mode decomposition: a noise-assisted data analysis method. *Advances in adaptive data analysis*, 1(01), 1–41.
- Wu, Z., Huang, N. E., Wallace, J. M., Smoliak, B. V., & Chen, X. (2011). On the time-varying trend in global-mean surface temperature. *Climate Dynamics*, 37(3), 759. doi:10.1007/s00382-011-1128-8
- Yang, B., Qin, C., Shi, F., & Sonechkin, D. M. (2011). Tree ring-based annual streamflow reconstruction for the Heihe River in arid northwestern China from ad 575 and its implications for water resource management. *The Holocene*, 22(7), 773–784. doi:10.1177/0959683611430411
- Yuan, Y., Shao, X., Wei, W., Yu, S., Gong, Y., & Trouet, V. (2007). The potential to reconstruct Manasi River streamflow in the northern Tien Shan Mountains (NW China). *Tree-Ring Research*, 63(2), 81–93. doi:10.3959/1536-1098-63.2.81
- Zhang, Y. (1996). An observational study of atmosphere-ocean interactions in the northern oceans on interannual and interdecadal time-scale. Ph.D. dissertation, University of Washington, Seattle, Washington.
- Zheng, F., Li, J., Li, Y., Zhao, S., & Deng, D. (2016). Influence of the Summer NAO on the Spring-NAO-Based Predictability of the East Asian Summer Monsoon. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 55(7), 1459–1476. doi:10.1175/JAMC-D-15-0199.1
- Zuo, J., Li, W., Sun, C., Xu, L., & Ren, H. L. (2013). Impact of the North Atlantic sea surface temperature tripole on the East Asian summer monsoon. *Advances in Atmospheric Sciences*, 30(4), 1173–1186. doi:10.1007/s00376-012-2125-5



附錄

附表 1、依據臺灣黃杉早材 IMF1-3 所建立在 1968–2009 (2013)期間之七家灣前一年九月至當年二月 SF (SF_{SF})、前一年九月至當年三月 SF (SF_{SM})、前一年九月至當年四月 SF (SF_{SA})與前一年九月至當年五月 SF (SF_{SMay})線性模型檢測

		Model I (1968–2009)				Model II (1968–2013)			
		Sep-Feb	Sep-Mar	Sep-Apr	Sep-May	Sep-Feb	Sep-Mar	Sep-Apr	Sep-May
常態檢測 (Shapiro Test)		0.99	0.74	0.38	0.64	0.98	0.53	0.18	0.43
獨立性 (Non-Constant Error Variance)		0.12	0.14	0.06	0.03	0.05	0.06	0.03	0.03
	lag 1	0.62	0.10	0.07	0.14	0.12	0.01	0.01	0.11
	lag 2	0.66	0.80	0.99	0.59	0.64	0.32	0.52	0.36
自相關 (Durbin-Watson Test)									
	lag 3	0.12	0.10	0.09	0.17	0.19	0.10	0.11	0.28
	lag 4	0.65	0.92	0.84	0.54	0.92	0.77	0.73	0.75
	lag 5	0.78	0.52	0.45	0.90	0.69	0.73	0.71	0.68

註：表中數值為檢測之 p 值；粗斜體字表示 $p < 0.05$ 。

附表 2、依據臺灣黃杉早材 IMF1-3 所建立所建立在 1968–2009 (2013)期間之七家灣前一年九月至當年二月 SSFI (SSFI_{SF})、前一年九月至當年三月 SSFI (SSFI_{SM})、前一年九月至當年四月 SSFI (SSFI_{SA})與前一年九月至當年五月 SSFI (SSFI_{SMay})線性模型檢測

		Model I (1968–2009)				Model II (1968–2013)			
		Sep-Feb	Sep-Mar	Sep-Apr	Sep-May	Sep-Feb	Sep-Mar	Sep-Apr	Sep-May
常態檢測 (Shapiro Test)		0.96	0.28	0.04	0.15	0.78	0.13	0.02	0.13
獨立性 (Non-Constant Error Variance)		0.44	0.84	0.91	0.20	0.73	0.54	0.30	0.17
	lag 1	0.17	0.08	0.03	0.03	0.09	0.02	0.20	0.14
	lag 2	0.85	0.68	0.91	0.52	0.88	0.41	0.64	0.40
自相關 (Durbin-Watson Test)	lag 3	0.46	0.25	0.20	0.37	0.47	0.21	0.22	0.50
	lag 4	0.96	0.67	0.58	0.80	0.93	0.65	0.57	0.89
	lag 5	0.80	0.50	0.39	0.82	0.69	0.72	0.71	0.74

註：表中數值為檢測之 p 值；粗斜體字表示 $p < 0.05$ 。

附表 3、依據臺灣黃杉早材 IMF1-3 所建立在 1968–2009 (2013)期間之七家灣 SF_{SF}

線性模型分期驗證檢測

		Sep-Feb			
		1968–1988	1989–2009	1968–1990	1991–2013
常態檢測(Shapiro Test)		0.59	0.93	0.64	0.92
獨立性(Non-Constant Error Variance)		0.93	0.33	0.90	0.10
	lag 1	0.94	0.40	0.60	0.11
	lag 2	0.65	0.71	0.53	0.50
自相關(Durbin-Watson Test)	lag 3	0.49	0.34	0.65	0.49
	lag 4	0.87	0.30	0.93	0.41

註：表中數值為檢測之 p 值。

附表 4、依據臺灣黃杉早材 IMF1-3 所建立在 1968–2009 期間之七家灣 SF_{SM} 與 SF_{SA}

線性模型分期驗證檢測

		Sep-Mar		Sep-Apr	
		1968–1988	1989–2009	1968–1988	1989–2009
常態檢測(Shapiro Test)		0.50	0.91	0.54	0.36
獨立性(Non-Constant Error Variance)		0.69	0.26	0.51	0.15
	lag 1	0.05	0.51	0.03	0.45
	lag 2	0.91	0.43	0.76	0.44
自相關(Durbin-Watson Test)	lag 3	0.10	0.39	0.07	0.30
	lag 4	0.55	0.57	0.66	0.84

註：表中數值為檢測之 p 值；粗斜體字表示 $p < 0.05$ 。

附表 5、依據臺灣黃杉早材 IMF1-3 所建立在 1968–2009 (2013)期間之七家灣 SSFI_{SF}

線性模型分期驗證檢測

		Sep-Feb			
		1968–1988	1989–2009	1968–1990	1991–2013
常態檢測(Shapiro Test)		0.37	0.88	0.28	0.36
獨立性(Non-Constant Error Variance)		0.79	0.41	0.81	0.87
自相關(Durbin-Watson Test)	lag 1	0.94	0.15	0.54	0.12
	lag 2	0.77	0.78	0.65	0.88
	lag 3	0.54	0.72	0.72	0.86
	lag 4	0.75	0.48	0.78	0.33

註：表中數值為檢測之 p 值。

附表 6、依據臺灣黃杉早材 IMF1-3 所建立在 1968–2009 (2013)期間之七家灣 SSFI_{SMA}

與 SSFI_{SMA} 的線性模型分期驗證檢測

		Sep-Mar		Sep-May	
		1968–1988	1989–2009	1968–1990	1991–2013
常態檢測 (Shapiro Test)		0.08	0.38	0.10	0.33
獨立性 (Non-Constant Error Variance)		0.55	0.31	0.31	0.32
自相關 (Durbin-Watson Test)	lag 1	0.04	0.64	0.02	0.89
	lag 2	0.96	0.22	0.65	0.13
	lag 3	0.12	0.62	0.44	0.86
	lag 4	0.58	0.93	0.47	0.97

註：表中數值為檢測之 p 值；粗斜體字表示 $p < 0.05$ 。