



國立臺灣大學生物資源暨農學院森林環境暨資源學系

碩士論文

School of Forestry and Resource Conservation

College of Bio-Resources and Agriculture

National Taiwan University

Master Thesis

德國的榛子與帚石楠在暖化下的始花日期趨勢

Trends of First Flowering Dates of Hazel and

Heather in Germany under Warming

丁多加

TO-CHIA TING

指導教授：關秉宗 博士

Advisor: Biing T. Guan, Ph.D.

中華民國 108 年 1 月

January 2019



謝誌

我們有點幸運，能走進臺灣大學念書，能在純粹的科學問題裡思考，能嘗試學界是否為我們的可待之處。論文的完成，是開心的。一方面是因為這是思考與學習的產出，另一方面是這是身為學生的我對自己、對世界多了一些些瞭解的過程，而這個過程有太多人的幫助。

謝謝實驗室的阿焜學長，你給的許多建議，常讓我在事後有「原來如此」之感。我記得，為了瞭解榛子測站間差異的可能原因，我看了一整晚的衛星照片，你在要離開前對我說：「不要再看那些照片了，它們不會給你更多的information」。謝謝實驗室的仲霖，你為我解惑，這包含如何理解 EEMD、信賴區間等，好感謝有人可以討論！一如實驗室有彥竹和可風，讓我的思考與生活豐富，讓我有更多學習的機會。還有森林系的學長姊與學弟妹們，你們的加油與幫助都讓這篇論文得以完成。

謝謝我的指導老師，關老師，幫我修改履歷、各式出國學習的申請動機信與論文，關老師您能看到我的不足與缺點，並給我改進的機會。謝謝森林系的丁老師、昆蟲系的 Toshinori 老師與心理系的彭老師，成為我的學習對象。謝謝李老師、陳老師和 Nakai 老師，給我當助教的機會，讓我不僅能對自己的生活負責，也有機會練習做人與做事。

謝謝樂儀、佳璇與雅玲等好朋友，我受了你們很多的鼓勵。謝謝家人、高中的吳老師與促使我開始物候研究的先輩們，你們讓我有努力的機會。謝謝大家給的包容與笑容、理解與聆聽、耐心與接納。

目錄



表目次	iii
圖目次	iv
中文摘要	v
ABSTRACT	vi
第一章 前言	1
第二章 文獻回顧	5
2.1 國外的物候研究	5
2.1.1 歐洲	5
2.1.2 美國	6
2.1.3 亞洲	7
2.1.4 南半球	7
2.2 臺灣的物候研究	8
2.3 驅動溫帶植物春季物候的環境因子	9
2.4 物候與氣象資料的分析方法	9
2.4.1 非線性與非平穩的資料	9
2.4.2 總體經驗模態分解法(Ensemble Empirical Mode Decomposition)	11
2.4.3 趨勢的動態變化	14
2.4.4 最大熵值重複置還取樣法(Maximum Entropy Bootstrap)	14
第三章 研究方法	18
3.1 物候資料	19
3.1.1 資料來源	19
3.1.2 資料特性	20
3.1.3 資料初步分析	22
3.2 氣象資料	23
3.2.1 溫度資料來源	23
3.2.2 場域相關性分析	23
3.2.3 NAO 指數資料來源	25
3.3 EEMD 的白噪參數與集體大小	26
3.4 趨勢分析	27
第四章 結果	28
4.1 物候資料初步分析	28
4.1.1 榛子	28
4.1.2 帚石楠	30
4.2 榛子和帚石楠 FFD 距平序列與溫度距平序列的相關性	33



4.3 NAO _{GS} 指數與榛子的 FFD 及 JFM Tmax 距平序列的相關性	33
4.4 FFD 與溫度距平序列的趨勢分析	35
4.4.1 榛子	35
4.4.2 榛子 FFD 的三十年移動平均	55
4.4.3 帚石楠	57
第五章 討論	67
5.1 物種受暖化的影響不一致	67
5.2 榛子的始花物候、始花物候前數月的溫度和 NAO _{GS} 指數的關係	68
5.3 榛子 FFD 距平序列的趨勢領先 JFM Tmax 距平序列的趨勢	68
5.4 海拔對物候的影響	69
5.5 全測站的代表性	70
第六章 結論	71
參考文獻	72
附錄一	79
附錄二	95

表目次



表 1、榛子各測站的經緯座標與海拔	21
表 2、帝石楠各測站的經緯座標與海拔	22
表 3、榛子各測站對應的溫度類型	25
表 4、榛子各測站 JFM Tmean 和 JFM Tmax 距平序列的 OCs 與 FFD 距平序列的 OCs 的相關係數	25
表 5、帝石楠各測站對應的溫度類型	25
表 6、JFM Tmax 距平序列和榛子 FFD 距平序列的相關係數	33
表 7、AMJ Tmean 距平序列和帝石楠 FFD 距平序列的相關係數	33
表 8、榛子各測站的 FFD 距平序列和平均 JF NAO _{GS} 、FM NAO _{GS} 與 JFM NAO _{GS} 的相關係數	34
表 9、榛子各測站的 JFM Tmax 距平序列和平均 JF NAO _{GS} 、FM NAO _{GS} 與 JFM NAO _{GS} 的相關係數	34
表 10、榛子各測站與全測站的 FFD 和 JFM Tmax 距平序列的趨勢分析摘要	53
表 11、帝石楠各測站與全測站的 FFD 和 AMJ Tmean 距平序列的趨勢分析摘要	66

圖目次

圖 1、EMD 過程中 IMFs 的萃取.....	13
圖 2、最大熵值機率密度分布圖.....	16
圖 3、MEB 產生重複取樣的方法	17
圖 4、研究方法流程圖	18
圖 5、榛子的測站分布圖	21
圖 6、帚石楠的測站分布圖	22
圖 7、榛子 10 個測站的 FFD 距平序列的逐年盒鬚圖	28
圖 8、榛子 FFD 距平序列的逐年盒鬚圖中離群值於各測站的分布	29
圖 9、榛子各測站與全測站的 FFD 於 1951 至 2015 年的盒鬚圖.....	30
圖 10、帚石楠 5 個測站的 FFD 距平序列的逐年盒鬚圖.....	31
圖 11、帚石楠 FFD 距平序列的逐年盒鬚圖中離群值於各測站的分布	31
圖 12、帚石楠各測站與全測站的 FFD 於 1951 至 2015 年的盒鬚圖	32
圖 13、榛子測站 DE2294 的 JFM Tmax 和 FFD 兩距平序列的趨勢分析	38
圖 14、榛子測站 DE3866 的 JFM Tmax 和 FFD 兩距平序列的趨勢分析	39
圖 15、榛子測站 DE4054 的 JFM Tmax 和 FFD 兩距平序列的趨勢分析	40
圖 16、榛子測站 DE4495 的 JFM Tmax 和 FFD 兩距平序列的趨勢分析	41
圖 17、榛子測站 DE3744 的 JFM Tmax 和 FFD 兩距平序列的趨勢分析	42
圖 18、榛子測站 DE4420 的 JFM Tmax 和 FFD 兩距平序列的趨勢分析	45
圖 19、榛子測站 DE4256 的 JFM Tmax 和 FFD 兩距平序列的趨勢分析	46
圖 20、榛子測站 DE4239 的 JFM Tmax 和 FFD 兩距平序列的趨勢分析	47
圖 21、榛子測站 DE3984 的 JFM Tmax 和 FFD 兩距平序列的趨勢分析	48
圖 22、榛子測站 DE3824 的 JFM Tmax 和 FFD 兩距平序列的趨勢分析	50
圖 23、榛子全測站的 JFM Tmax 和 FFD 兩距平序列的趨勢分析	52
圖 24、榛子 FFD 的 30 年移動平均(FFD 距平序列的趨勢於分析時間內均顯著低於零的測站).....	56
圖 25、榛子 FFD 的 30 年移動平均(FFD 距平序列的趨勢於分析時間內不均顯著低於零的測站).....	56
圖 26、帚石楠測站 DE2853 的 AMJ Tmean 和 FFD 兩距平序列的趨勢分析	58
圖 27、帚石楠測站 DE3744 的 AMJ Tmean 和 FFD 兩距平序列的趨勢分析	59
圖 28、帚石楠測站 DE3876 的 AMJ Tmean 和 FFD 兩距平序列的趨勢分析	61
圖 29、帚石楠測站 DE4239 的 AMJ Tmean 和 FFD 兩距平序列的趨勢分析	62
圖 30、帚石楠測站 DE2075 的 AMJ Tmean 和 FFD 兩距平序列的趨勢分析	64
圖 31、帚石楠全測站的 AMJ Tmean 和 FFD 兩距平序列的趨勢分析	65

中文摘要

近期以來，暖化使部分溫帶地區的開花物候有提早出現的趨勢；然而，不同物種對暖化的反應並不相同，本研究以詳盡地分析方法驗證這件事。

本研究分析德國的榛子(*Corylus avellana* L.)與帚石楠(*Calluna vulgaris* L.)在不同測站的始花日期(First flowering dates, FFD)與溫度之距平序列(Anomaly series)，分析時間皆為 1951 至 2015 年(基底時間為 1961 至 1990 年)。本研究同時分析兩物種測站平均的 FFD 和該區域的溫度距平序列。此外，本研究檢驗榛子的 FFD 與其對應溫度距平序列兩者與北大西洋震盪(North Atlantic Oscillation)的相關性。

考量物候資料常為非線性(Nonlinear)與非平穩(Nonstationary)，本研究使用總體經驗模態分解法(Ensemble empirical mode decomposition)萃取 FFD 與溫度距平序列的趨勢。為進一步瞭解趨勢的呼應情形和未來可能的演變，本研究估計所萃取趨勢的速度和加速度。最後，本研究使用最大熵值重複置還取樣法(Maximum entropy bootstrap)建立趨勢與這些估算的信賴區間。

結果顯示，榛子的 FFD 距平序列大多具提前的趨勢，其對應溫度距平序列具上升的趨勢，兩相呼應。不僅如此，所估計的榛子 FFD 與溫度趨勢之速度與加速度也呼應。相對的，帚石楠的 FFD 距平序列的趨勢並不呼應溫度距平序列的趨勢。然而，榛子的 FFD 距平序列的趨勢顯著提前的時間早於與其對應溫度距平序列的趨勢顯著上升的時間，這可能是因為榛子的 FFD 對溫度變化較敏感。最後，榛子的 FFD 與其對應溫度距平序列分別和平均一至三月的北大西洋震盪指數呈負與正相關。暖化若持續，榛子的 FFD 距平序列的趨勢在大部分測站會持續提前。然而，位於最高海拔的測站，其暖化與 FFD 距平序列提前的趨勢可能趨緩。

關鍵字：暖化、始花日期、總體經驗模態分解法、最大熵值重複置還取樣法



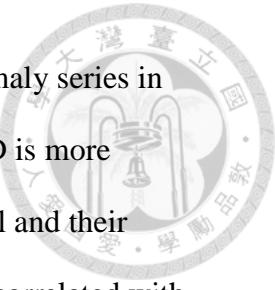
ABSTRACT

Over the past several decades, flowering phenology of many species in some temperate regions has advanced in response to warming. However, species response to warming differently. This thesis intends to analyze the complex relationships between warming and plant flowering.

This study analyzed the first flowering dates (FFD) of hazel (*Corylus avellana* L.) and heather (*Calluna vulgaris* L.) and the corresponding temperature anomalies at different phenological observation stations in Germany. The observation period was from 1951 to 2015 (base period 1961- 1990). This study also analyzed the averaged across stations FFD and the corresponding regional temperature anomalies of both species. In addition, this study examined the correlations between the North Atlantic Oscillation and the FFD of hazel and their corresponding temperature anomaly series.

Because phenological data are usually nonlinear and nonstationary, this study used ensemble empirical mode decomposition to extract temperature and FFD anomaly trends. In order to thoroughly understand the correspondence between the two anomaly trends and their possible future directions, this study estimated the velocities and accelerations of the extracted trends. Finally, this study used maximum entropy bootstrap to establish confidence intervals of the trends and their estimated velocities and accelerations.

The results showed that the advancing trends of FFD anomaly series of hazel corresponded well to the rising trends of the temperature anomaly series. Moreover, the estimated velocities and accelerations of the extracted trends of FFD and temperature anomaly series also corresponded well. In contrast, FFD anomaly trends of heather did not correspond to the temperature anomaly trends. This study also found that time lags



existed between the extracted trends of the temperature and FFD anomaly series in hazel with the FFD trends leading. The reason maybe that hazel's FFD is more sensitive to temperature variations. Lastly, the FFD anomalies of hazel and their corresponding temperature anomalies were negatively and positively correlated with the average January to March North Atlantic Oscillation, respectively. Based on the estimated velocities and accelerations, FFD anomaly trends of hazel will keep advancing in most of the stations if warming continues. As for the highest station, both the warming and the advancing FFD anomaly trends of hazel are likely to slow down in the future.

Keywords: warming, first flowering dates (FFD), ensemble empirical mode decomposition, maximum entropy bootstrap



物候學乃研究生物生活史中特定週期性事件的發生時間點，與驅動此事件的生物或非生物因子(Lieth, 1974)。這是一門古老的學問，因為它與人們的生活密切相關，如中國二十四節氣中某些特定的節氣就是根據人們觀察生物隨時序的活動所訂定(竺可楨與宛敏渭，1963；謝東佑與邱祈榮，2013)，又如日本櫻花(*Prunus jamasakura*)在日本文化扮演的角色，使日本有 1200 年的櫻花開花紀錄(Primack et al., 2009)，或者是歐洲 500 多年的葡萄收成紀錄(Menzel, 2005)。1853 年，比利時的植物學家 Charles Morren 正式將物候引入學術界，而瑞典的 Carolus Linnaeus，則是第一位系統性地進行物候觀測的植物學家。他提出編制植物年曆的方法，其內容包含物候資料與當地的氣象紀錄，物候資料如植物的展葉(Leaf unfolding)、開花、結實、與落葉(Hopp, 1974)。

近年來，物候研究的重要性越來越顯著，因為探討物候可以讓我們瞭解氣候變遷對生態系的衝擊。物候相(Phenophase)具備季節性(Seasonality)，這表示物候相會在一年中特定的時間範圍發生，因此可以經由統計分析，幫助我們推論物候相的提早或延遲和哪些因子相關(Lieth, 1974)。自 20 世紀中葉以來，全球暖化使春季物候相提前(Parmesan & Yohe, 2003; Root et al., 2003)。其他區域性的研究也發現暖化和提前的物候相關。如 1959 到 1993 年間，部分北美的春季物候相隨著春季溫度的上升，平均已提前 5 至 6 天(Schwartz & Reiter, 2000)。類似的，部分歐洲的春季物候相在 1971 到 2000 年間，以每十年平均 2.5 天的速度提前(Menzel et al., 2006)。中國主要 4 種樹木的平均始葉日期(First leafing date)在 1960 到 2009 年間，以每十年平均 1.1 天的速度提前(Dai et al., 2014)。臺灣雖沒有長期的物候監測資料，但是王玉婷等(2015)以館藏標本探討溫度與高山地區溫帶樹種始花日期(First flowering dates, FFD)的關聯，他們發現當年平均溫度上升 1°C，FFD 會提前 18 天。除此之外，一些在生長季早期始花的物種，其物候提前的程度較生長



季晚期的物種大(Miller-Rushing et al., 2007; Miller-Rushing & Inouye, 2009; Cook et al., 2012)。在植物的始花物候中，Munguia-Rosas et al. (2011)發現較早的開花物候是可被選擇的性狀，因為提早開花可以幫助植物爭取更多的種子成熟和個體生長的時間，這對其生長有利。然而，提早開花可能會面臨霜害，因此植物需在爭取生長時間與避免霜害間取得平衡。Körner & Basler (2010)認為榛屬植物屬於演替早期的物種，其物候對溫度的變化敏感，他們願意冒受霜害的風險，以增加生長的時間。

春季物候除了反映氣溫的變化，它也反映區域性的氣候指標的變化，如北大西洋震盪(North Atlantic Oscillation，NAO)。NAO 為歐洲區域之大氣環流，影響歐洲冬季與春季的溫度、降水和風的變化(Hurrell, 1995)。NAO 為冰島(Iceland)和伊比利半島末端的英屬直布羅陀(Gibraltar)兩地標準化的海平面氣壓差。NAO 在正相位時，北大西洋北方(冰島)的海平面氣壓低於平均、北大西洋中部(英屬直布羅陀)的海平面氣壓高於平均。這會將溫暖的水氣帶入歐洲，使得歐洲的冬天較為溫暖。反之，當 NAO 在負相位時，歐洲的冬天會較冷(Hurrell, 1995)。是以其相位變化和歐洲的春季物候趨勢相關(Chmielewski & Rotzer, 2001; Ahas et al., 2002; Cook et al., 2005; Hubalek, 2016)。Chmielewski & Rotzer (2001)發現當二到四月的 NAO 指數在 1980 年代出現正相位的趨勢時，不論是大尺度的全歐洲生長季開始日期，或位於歐洲不同地區小尺度的生長季開始日期，皆有提早的趨勢。

我們需要詳盡地瞭解物候的趨勢，因為生物對暖化的反應不同。物候相的改變(Phenophase shift)對生態系的衝擊常是不可預測的(Fitter et al., 1995; Cook et al., 2012)，其影響層面包括基因的流動(Fitter & Fitter, 2002)、族群的數量與結構、生態系的食性關係、棲地的利用與元素的循環(Walther et al., 2002; Parmesan, 2006; Cleland et al., 2007; Forrest & Miller-Rushing, 2010; Walther, 2010; Donnelly et al., 2011)。例如蟲媒植物的開花物候和授粉昆蟲出現時間可能跟隨暖化同步提前，但昆蟲出現的時間可能會早於植物開花的時間，造成生物間互動的時序失配

(Mismatch)。這種狀況下，兩物種的族群數量會改變，與之共組食物網的生物也會受到波及(Parmesan, 2006; Donnelly et al., 2011)。我們從生態系中獲得的資源，如水果、堅果、木材、蜂蜜等都會受到衝擊，影響人類的社會與經濟(Polgar & Primack, 2011)。因此，瞭解暖化對物候的影響是一個重要的課題，世界各地的物候研究因而於晚近幾年急遽增加(Sparks et al., 2009)。

更詳盡的探討暖化和物候趨勢的呼應情形有助物候研究。此面相的研究有賴趨勢的分析方法。大部分的物候研究以線性迴歸分析物候與溫度的趨勢(王玉婷等，2015；Schwartz & Reiter, 2000; Chmielewski & Rotzer, 2001; Ahas et al., 2002; Fitter & Fitter, 2002; Menzel et al., 2006; Delbart et al., 2008; Miller-Rushing & Primack, 2008; Crepinsek et al., 2012; Romanovskaja et al., 2012; Wu & Liu, 2013)。這個方法不夠完善，因為物候與溫度的資料可能屬於非線性(Nonlinear)與非平穩(Nonstationary)的資料(Gordo & Sanz, 2009)。此類型的資料源自生物對溫度的反應並非線性(Zheng et al., 2002; Mulder et al., 2017)、驅動物候的因子不只溫度(Prodon et al., 2017)，或者是生物已適應了環境的改變(Walther, 2010)。前人發現溫度與物候具有非線性的趨勢(Zheng et al., 2002; Schaber & Badeck, 2005; Gordo & Sanz, 2009; Fu et al., 2014; Prodon et al., 2017; Mulder et al., 2017)。我們在萃取物候與溫度資料的趨勢時，若能對資料施加最少的假設，例如，物候趨勢為線性的假設，則能確保所得之趨勢屬於資料的一部分，進而看到資料在分析時間內固有的(Intrinsic)變化(Wu et al., 2007)。趨勢是一個動態過程，欲進一步瞭解兩趨勢動態過程的呼應情形則需估計趨勢的速度與加速度。我們同樣欲使用對資料做最少假設的方法估計趨勢的速度與加速度。

不同時期或地點的溫度與物候趨勢是否有顯著差異有賴趨勢信賴區間的建立。一般為資料建立信賴區間的方法需假設資料的機率分布，但是這和假設資料的趨勢模式遇到的問題相同：資料不一定符合我們的假設。若能同樣使用不對資料做假設的方法建立趨勢的信賴區間，則能使我們對資料的瞭解不受侷限。基於以上

的考量，本研究使用不假設資料為平穩與線性的總體經驗模態分解法(Ensemble empirical mode decomposition，EEMD)萃取物候與溫度資料的趨勢。並使用差分(Difference)估計所萃取趨勢的速度和加速度。最後，本研究使用最大熵值重複置還取樣法(Maximum entropy bootstrap，MEB)建立趨勢與這些估算的信賴區間。

本研究分析 1951 至 2015 年位於德國的榛子(*Corylus avellana* L.)和帚石楠(*Calluna vulgaris* L.)的 FFD 距平序列(Anomaly series，基底時間為 1961 至 1990 年)，以探討它們的 FFD 趨勢和暖化的呼應情形。榛子與帚石楠分別有 10 個與 5 個測站，本研究分析各測站的 FFD 與其相對應溫度的距平序列，與兩物種測站平均的 FFD 與其相對應的區域性溫度距平序列。除此之外，本研究也檢驗榛子 FFD 和其相對應溫度距平序列與北大西洋震盪指數(North Atlantic Oscillation Gibarltar-Stykkishólmur index，NAO_{GS})的關係。



2.1 國外的物候研究

2.1.1 歐洲

歐洲不僅有 500 多年的葡萄收成紀錄(Menzel, 2005)，民眾也熱衷於記錄物候相，如候鳥初次抵達的時間、植物的始葉與始花日期等，這使歐洲的物候資料豐富。這些大量的物候資料由專門的機構彙整後，可供研究人員使用，歐洲的物候研究因而蓬勃發展(Parmesan, 2006)。

歐洲的研究發現春季物候提前的趨勢和物候發生前數月的溫度相關，且物候相越早發生的物種，對溫度越敏感，生長季晚期的物候趨勢則不明顯。如 Schaber & Badeck (2005)分析 20 世紀德國南方的春季物候，他們發現 20 世紀下半葉的春季物候提早了 5 到 20 天，與此現象相呼應的是三到四月的溫度變化，而秋季物候則延後 3 到 5 天，趨勢不明顯。又如 Fitter & Fitter (2002)分析 1950 到 2000 年間英國 385 種植物的 FFD，他們發現 1990 到 2000 年間的 FFD 較前 40 年提前了 4.5 天，且 FFD 的變化受始花前的月均日溫影響。Penuelas et al. (2002)分析 1952 到 2000 年間地中海地區的物候，他們發現此區的物候趨勢亦和物候發生前數月的溫度相關，植物的展葉和開花平均提前 6 至 16 天，落葉物候則平均延遲 13 天。

溫度和物候的關聯可以作為暖化影響物候的證據(Parmesan, 2006)。然而，假設溫度與物候的趨勢為線性並不適宜(Walther, 2010)。近年來，學者已開始使用不同的方法萃取溫度與物候的趨勢，希望能更詳盡的瞭解物候的趨勢與暖化的關聯(Dose & Menzel, 2006)。

2.1.2 美國

美國大型的物候監測計畫較歐洲晚開始，一些早期的物候紀錄則是個人觀測。例如 Miller-Rushing & Primack (2008) 利用自然學家 Henry David Thoreau 在 1852 到 1858 於美國 Concord 的 FFD 紀錄，發現 2004 到 2006 年的冬季與春季溫度比當初上升了 2.4°C ，此地 43 種常見植物的 FFD 也比當初提早了 7 天。這些植物的 FFD 和一月份的溫度與始花前兩個月的溫度相關性高。他們認為，全球暖化和都市化(Urbanization)是造成物候變化的原因。

2007 年，United States of America National Phenology Network(USA NPN)創立，它的成員包含個人、機構與專業人士，他們共紀錄 1200 種動植物的物候(Schwartz et al., 2012)。USA NPN 雖然成立的晚，但是已有學者使用其資料預估全美國的物候，肯定其資料價值(Crimmins & Crimmins, 2008)。

根據我們的瞭解，在 USA NPN 創立前，美國農業部(United States Department of Agriculture)於 1950 年代末對紫丁香(*Syringa vulgaris* L.)和新疆忍冬(*Lonicera tatarica* L.)的物候觀測是唯一有系統、大規模的紀錄(Schwartz et al., 2012)。

Schwartz & Reiter (2000)即以這些資料分析暖化對美國物候的影響。他們使用 1959 至 1993 年間美國西部的紫丁香與美國東部的混種紫丁香(*Syringa* *×* *chinensis*)的展葉與始花物候，與其他氣象參數推估北美 1900 至 1997 的春季物候指數，並發現春季物候在 1959 到 1993 年間，平均提前了 5 至 6 天。此現象在美國的西北與加拿大的西南部最明顯，次之為美國東北部與加拿大西洋沿岸的省分，這種區域上的差異可能是因為東西兩岸逐月溫度的變異不同，北美西部和東部的物候變化分別和三到五月與四月的溫度相關。

目前為止，美國的物候研究已發現春季物候的趨勢和暖化相關。然而，若需確認物候趨勢是否源於人為暖化，以及預測未來趨勢的變化，則須持續觀測與分析，USA NPN 的創立有助其發展。



2.1.3 亞洲

日本的文化使其有 1200 年的櫻花開花紀錄。學者發現 1970 到 2000 的平均櫻花開花日期(Flowering date)比整段紀錄時期的平均開花日期提前了 7 天，此提早程度是 1200 年來最多的(Primack et al., 2009)。除了櫻花開花的紀錄，日本氣象局在 1953 年起，於 102 個氣候站監測 120 種動植物的物候相。Ibanez et al. (2010) 利用此紀錄，同時分析日本與南韓 1953 至 2005 年的春季與秋季物候相，他們發現，溫度升高 1 °C 春季物候平均提前零至 8 天；秋季物候平均延後 4 到 5 天。

和歐洲的物候研究相比，日本雖有長時間的紀錄，但是資料多以日文記載，不易被其他國家的學者分析，增加這些資料的可及性有助物候研究(Nagai et al., 2016)。此外，欲瞭解暖化對生態系的衝擊，尚須擴展物候監測的範圍(即不限於氣象站)，與研究物種間的時序失配對生態系的影響(Primack et al., 2009; Ibanez et al., 2010)。

中國的物候研究自 1960 年代開始，由竺可楨教授帶領。中國在 1963 年建立了中國物候觀測網(Chinese Phenological Observation Network)。根據中國物候觀測網收集的資料，學者於 1980 年代開始分析這些資料和暖化的關聯(Zheng et al., 2002)。他們發現晚近的 50 年來，木本植物春季物候的趨勢以平均每十年 1.1 到 2.29 天的速度提前(Dai et al., 2014; Ge et al., 2015)，呼應了不同區域的溫度上升趨勢。

2.1.4 南半球

南半球的物候資料較北半球少。根據本研究的瞭解，Chambers et al. (2013) 分析以植物和鳥類為主，並大多位於澳洲和紐西蘭的物候，在 347 種生物中，逾八成的陸域生物和逾四成的海域生物具物候提前的現象。這個現象是否和暖化相關尚待進一步的研究。他們呼籲，若要瞭解與預測氣候變遷對生態系的影響，長期生態監測系統的架設勢在必行，特別是在南美洲與非洲，以及淡水生物群。

2.2 臺灣的物候研究



臺灣早期的物候研究著重在農業與商業的運用上。例如郭華仁與吳怡君(2008)編譯貴田武捷與小早川利次於1941年發表的「台北雜草物候學調查」。該書開宗明義即點出，調查雜草的物候是為了田間管理。至1970年代，曾文柄(1973)編寫了物候觀測手冊，並認為物候可作為區域性的氣候指標。他於手冊中詳述物候現象的定義、物候觀測的方法，以及提出數種具觀賞或經濟價值的樹種作為觀測對象。

近年來，臺灣的物候研究擴展到自然生態系，主要集中在林業試驗地(張乃航等，2000)、長期生態樣區(王相華等，2011；王玉婷等，2014)或國家公園(呂理昌，1990；夏禹九，2012；潘振彰等，2017)。這些研究的調查時間短，較難分析長期的物候趨勢(張仲德等，2011；謝東佑與邱祈榮，2013)。研究結果多為不同科別的植物開花物候模式，或比較短時間內物種對溫度的敏感度，再選出適合的監測物種，建議作為氣候變遷研究之用，如普遍分布於低海拔山區的烏皮九芎(*Styrax formosana*)和黑星櫻(*Prunus phaeosticta*)(王玉婷等，2014；潘振彰等，2017)。



2.3 驅動溫帶植物春季物候的環境因子

光週期(Photoperiod)、春化作用(Vernalization)與熱量累積(Heat accumulation)是驅動溫帶植物春季物候的主要機制(Saxe et al., 2001; Polgar & Primack, 2011; Tang et al., 2016)。這三個機制對不同物種的始花物候具不等的驅動力。全球暖化下，這些機制的交互作用變得更加複雜，且物種的反應不一致(Heide, 1993; Hänninen, 1995)。一般而言，冬季時，植物為了不受低溫傷害，進入休眠狀態(Dormancy)。植物藉由低溫的刺激或光週期的變化，確認冬季的結束、打破休眠，這個過程為春化作用。植物打破休眠所需的低溫量稱為冷積需求(Chilling requirement)。部分植物的春化作用，需要低溫和光週期共同作用，如挪威雲杉(*Picea abies* L.) (Polgar & Primack, 2011)。植物接受較冷積需求溫暖的溫度驅動芽的發育，這個機制稱為熱量累積。熱量累積可能從打破休眠後開始(Saxe et al., 2001)，也可能和冷積需求並行發生(Harrington et al., 2010)。

每一種植物的冷積需求不同(Guo et al., 2013; Nanninga et al., 2017)，當冷積需求無法滿足時，植物對熱量累積的需求會增加(Murray et al., 1989)。若光週期參與植物打破休眠的過程，植物開始接收熱量的時間會受限制(Keller & Körner, 2003; Körner & Basler, 2010)。然而，Wadgymar et al. (2018)亦發現暖化可以改變熱量累積與光週期的關係。

2.4 物候與氣象資料的分析方法

2.4.1 非線性與非平穩的資料

自然觀測資料是一組沿著時間依序出現的數值，我們稱此類型的資料為時間序列，記為 x_k , $k=1,2,\dots,K$, K 為此時間序列的長度。若 x_k 為平穩，表示 x_k 的期望值(式 1)和變異數(式 2)是定值，且任兩時期的共變數和時間差(Lag) T 有關而與時間之起點無關(式 3)。

$$E(x_k) = \mu$$

$$Var(x_k) = \sigma^2, \sigma^2 < \infty$$

$$Cov(x_k, x_{k+T}) = I_T$$



對於平穩的時間序列，我們有多種描述資料的模式，如移動平均模式(Moving averaging model，MA Model)、自迴歸模式(Autoregressive model，AR Model)與整合自迴歸模式(Autoregressive moving averaging model，ARMA Model)。但是，自然觀測資料常是非線性與非平穩(Vinod, 2006; Huang & Wu, 2008)。非線性的資料表示資料在不同時期的平均數不相等；非平穩的資料表示不同時期，資料的平均數或變異數不相等(葉小蓁，1998)。

Vinod (2006)認為和生物反應有關的資料不應假設為平穩的時間序列。因為平穩的時間序列代表兩觀測值之間的關係僅和時間差有關，和起始值無關，但是生物的反應會受起始值影響。實際上 Gordo & Sanz (2009)也發現物候資料是非平穩與非線性，他們分析 29 種位於地中海地區的終年生植物，並發現在 1943 到 2003 年間，大部分植物春季物候的平均與變異皆隨時間改變，並以 1970 年代為界，於此之前春季物候較晚發生，於此之後春季物候較早發生；於此之前春季物候的變異逐年增加，於此之後春季物候的變異逐年減少。Mulder et al. (2017)則發現物候對溫度的反應是非線性的，他們分析加拿大苔原地區石楠科(*Ericaceous* spp.)和鹽沼(Salt marshes)生態系的開花物候，並發現溫度較低時，開花物候的變化較溫度較高時大。

物候研究中，我們需要將資料中的趨勢與非趨勢部分分離，以觀察暖化的趨勢和物候的趨勢兩者之間的關聯。對於不平穩的時間序列，常見的作法是將資料進行轉換(Transformation)，如差分、對數變換或開根號，使資料平穩，再使用其他模式分析資料，如整合自迴歸移動平均模型(Autoregressive integrated moving average model，ARIMA Model)。但是對於機制尚不明確的自然現象，我們很難說明選擇這個轉換方法的理由(葉小蓁，1998；Wu et al., 2007)。



根據定義，趨勢是資料的固有性質，在分析的時間內，趨勢是單調函數或是具單一極值的函數(Wu et al., 2007)，以先設(*a priori*)的函數形式(Functional form)描述趨勢會侷限我們對資料的瞭解。若物候或溫度資料為線性，則使用此方法是適宜的。然而，一些研究已發現物候或溫度的趨勢是非線性的(Zheng et al., 2002; Schaber & Badeck, 2005; Gordo & Sanz, 2009; Fu et al., 2014; Prodon et al., 2017; Mulder et al., 2017)。如 Schaber & Badeck (2005)分析 20 世紀德國南方春季物候的趨勢，並發現受三、四月溫度的影響，春季物候的趨勢在 1984 年由延後轉為提前。又如 Fu et al. (2014)分析 1982 到 2011 年間於西歐的展葉物候，並發現早春植物在 1982 到 1999 年間，展葉物候具提前的趨勢，但是在 2000 到 2011 年間，展葉物候具延後的趨勢，這可能和 2000 到 2011 年間的冬季溫度較高有關。

2.4.2 總體經驗模態分解法(Ensemble Empirical Mode Decomposition)

假設趨勢的函數形式，可能掩蓋資料固有的性質，若能使用具適應性(Adaptive)的分析方法萃取物候與溫度的趨勢，則可避免此情形。Huang et al. (1998)提出的經驗模態分解法(Empirical mode decomposition, EMD)即是具適應性的資料分析方法，它可用於分析非平穩與非線性的資料。此方法的特色是不在資料上加諸先設的函數形式，因而使萃取的趨勢為資料固有的一部分。它已被廣泛的運用於地球物理、大氣、氣候與海洋研究，能恰當的將資料的趨勢與非趨勢部分分離(陳姿彤，2011；Huang & Wu, 2008; Guan, 2014)。

EMD 假設資料是由有限多個的週期性元素與餘數組成(式 4, x_k 為輸入資料， C_j 為週期性元素， r_n 為餘數， n 為週期性元素的個數)。藉由過篩的過程(Shifting process)，這些週期性元素依照資料固有的性質，逐次從資料萃取出。當資料不含週期性元素時，剩下的部分稱為餘數。餘數是具有單一極值的函數、單調函數，或是常數；餘數若不為常數，則為趨勢(Wu et al., 2007)。

$$x_k = \sum_i^n C_j + r_n \quad (式 4)$$

EMD 分解中，週期性元素稱為內秉模態函數(Intrinsic mode functions, IMFs)，它須符合下列兩個定義：

第一：區域極大值與區域極小值的個數總和，與跨零點(Zero crossing)個數之差最多大於一。

第二：依據局部極大值與局部極小值形成的上下包絡線(Envelope)之和為零，即 IMF 均數為零。

IMFs 的萃取是一個反複疊代(Iterative)的過程(圖 1)。第一個 IMF 被萃取出後，剩餘的部分會被視為新的輸入訊號(圖 1 f)，進而再從中萃取第二個 IMF，直到資料不含週期性的元素為止(即式 4 中的餘數)。



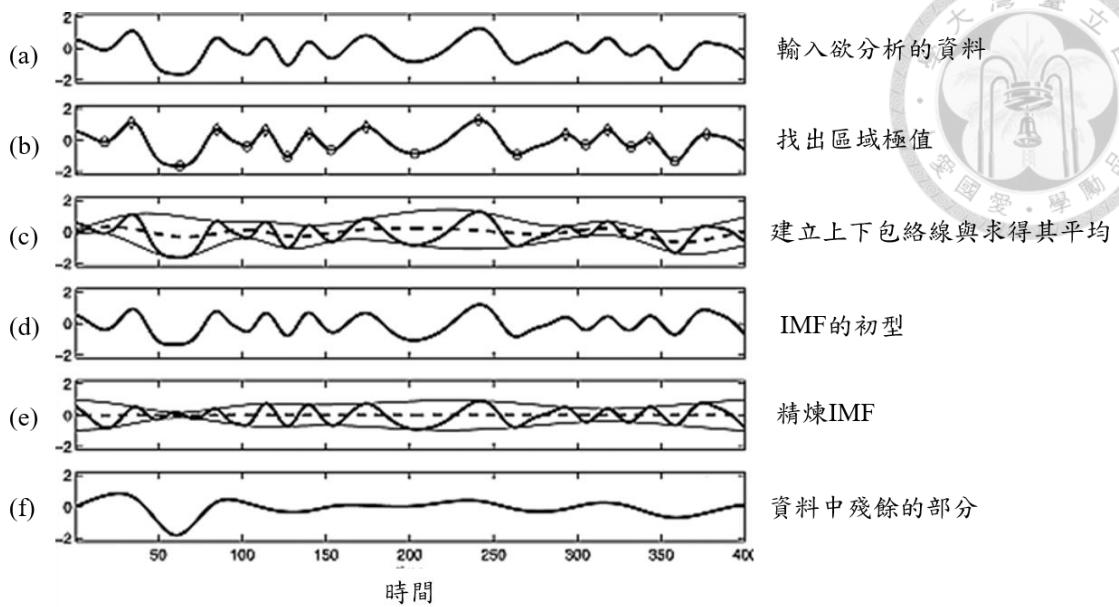


圖 1、EMD 過程中 IMFs 的萃取

(a) 輸入資料，(b)標記資料中的區域極值，菱形與圓形分別為區域極大值與極小值，(c)以三次雲規線(Cubic spline)連接區域極值，形成上下包絡線，並計算上下包絡線的平均，由圖中的虛線表示，(d)輸入的資料扣除(c)中的包絡線平均，得到 IMF 的初型。若它符合 IMF 的定義，則資料中的第一個 IMF 被萃取出；若否，則(e)將 IMF 的初型視為輸入資料，重複(b)~(d)，直到萃取出符合定義的 IMF。(f)資料扣除萃取出的 IMF 後即為殘餘的部分，將之視為新的輸入訊號，重複步驟(a)~(e)，萃取第二個 IMF(修改自 Huang & Wu, 2008, 圖 2)。

IMFs 是一組頻率不相同的元素，第一個 IMF 頻率最高，爾後被萃取出的 IMFs 的頻率逐次降低。但當資料存有間歇性訊號(Signal intermittency)時，意即訊號並不持續地出現在資料中，而是在數個不連續的時間區間中短暫的出現，則相鄰的兩個 IMFs 可能會出現頻率相同的訊號，或者是同一個 IMF 具有不同頻率的訊號，這代表訊號被混在一起了，此現象稱為模態混合(Mode mixing)。為了克服這個問題，Wu & Huang (2009)對 EMD 進行修改，提出了 EEMD。EEMD 利用加入白噪的方式，使整筆資料的變化更為清楚，讓不同頻率的訊號的分離更為容易。而白噪本身的效應可藉由重複加入白噪，再加總平均後消除(Wu & Huang, 2009)。

進行 EEMD 時，需先決定白噪的參數，與總體大小(Ensemble size，即重複加



入白噪的次數)。白噪的參數乘以欲分解資料的標準偏差(Standard deviation)即為白噪強度(White noise strength)，常用的白噪參數為 0.1 至 0.3(Wu & Huang, 2009)。總體大小由結果確認。當加總平均的次數夠多，即使再提高總體大小，分解出的結果將不會有區別(洪暉程，2009)。

經過 EEMD 分解後，IMFs 之和表示氣候研究中的準週期性振盪元素(Quasi-Oscillatory component，OC)；餘數若不為常數，則為趨勢。OC 與趨勢的相關性越低，表示資料的非趨勢和趨勢部分分離的越徹底。

2.4.3 趨勢的動態變化

趨勢是資料固有的一部分，其單位和資料相同。趨勢同時也是動態的，若將趨勢進行對時間的一階微分(First order time-derivative)，則可得其在各時間點的變化程度，即趨勢的速度(Wu et al., 2007; Chen et al., 2017)。若將趨勢進行二階微分，則得趨勢的加速度，藉由趨勢的速度與加速度，可以更瞭解趨勢的動態變化。如 Wu et al. (2007)以 EMD 萃取年均全球地表溫度距平序列(Global surface air temperature anomaly)的趨勢，並發現一階微分後的全球地表溫度距平序列的趨勢恰當的描述地表自 19 世紀以來的暖化速度：19 世紀中，全球地表的暖化速度近乎為零，到了 2000 年，地表約以每世紀 0.8 °K 的速度暖化。

2.4.4 最大熵值重複置還取樣法(Maximum Entropy Bootstrap)

信賴區間幫助我們瞭解趨勢顯著異於基底時間的時刻，讓萃取出的趨勢具有統計意義。但是對於不再現的自然觀測資料，我們無法確定其機率分布，因而無法得到趨勢的信賴區間。重複置還取樣法(Bootstrap)可以為機率分布不確定的資料建立信賴區間。此法假設資料為獨立同態分布(Independent identical distribution)，並將原始資料假想為母體，對其重複取樣。每次取樣後，會將觀測值置還(Replacement)回原始資料。取樣次數和原始資料的長度相等，構成一筆「新」的

資料。反複進行此過程(即模擬產生「新」資料的過程)，得到多筆「可能的」資料，進而推論統計值的機率分布，即可為原始資料的統計值建立信賴區間(James et al., 2013)。

時間序列的觀測值相依(Dependent)，觀測值隨時間的起伏變化構成資料的時間結構，為時間序列建立信賴區間時，需要考量該方法是否能保存資料的時間結構。重複置還取樣法因為假設資料獨立，所以無法保存資料的時間結構。在 2.4.1 非線性與非平穩的資料中提及，平穩的時間序列可用一些模式表達(如 ARMA Model)，對於此類型的資料，因為模式的參數是有限維(Finite-dimensional parametric model)，所以可以使用一般的重複置還取樣法。若資料不能以模式表達，但為平穩，則集區重複置還取樣法(Block bootstrap)是常用的方法，此法將資料劃分為數個集區，對集區進行重複置還取樣，再將取樣的集區依序相接，構成新的時間序列。但是此法的準度(Accuracy)和集區的大小有關，目前並沒有方法幫助我們決定集區的大小，因而限制了此法的運用(Hardle et al., 2003)。對於非平穩的時間序列，目前的方法是將資料進行轉換。然而，如前所述，我們不易解釋使用此種轉換方法的意義與對資料的影響。

MEB 是一個專門為非平穩與相關的資料建立信賴區間的方法，它不要求資料具備平穩與線性的性質(Vinod & López-De-Lacalle, 2009)。此法利用順序統計(Order statistics)和反累積分布函數(Inverse cumulative distribution function)的概念，使重複取樣保存原始資料的時間結構，並使每一年的重複取樣數值有最大的變化，亦即資料被分析方法限制的程度最低。一般的重複置還取樣，是對原始資料的數值進行重複抽取，所以重複取樣的數值和原始資料相同，但是 MEB 並不直接對原始資料取樣，而是在數個均一分布(Uniform distribution)所組成的資料機率密度分布中取樣(圖 2)，其中，每一個均一分布皆含有一個觀測值，因此，組成此機率密度分布的均一分布之個數即為觀測資料的個數。

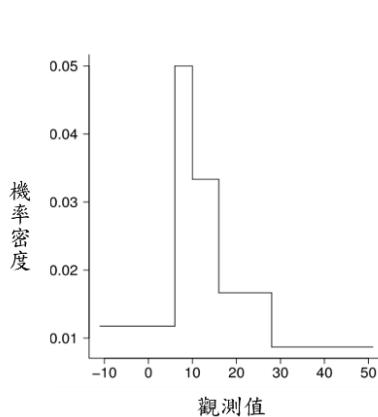


圖 2、最大熵值機率密度分布圖

示意使用 MEB 所建立的最大熵值機率密度分布圖。在此機率密度分布中，每一個均一區間皆含有一個觀測值(修改自 Vinod & López-De-Lacalle, 2009, 圖 1)。

使用 MEB 建立機率密度分布與重複取樣的方法如下，完整說明請參考 Vinod & López-De-Lacalle (2009)：

第一：建立排序資料 $x_{(k)}$ 。將原始資料 x_k 由小到大排序，並且記錄原始資料的出現順序 I_{rev} 。

第二：建立每個觀測值在最大熵值密度分布的半開放區間 I_t 。先計算排序資料的中間值，再以相鄰的兩中間值構成一個半開放區間。每個區間包含一個觀測值，其在最大熵值密度分布的面積為 $1/K$ (即區間的機率相等)。最小與最大觀測值的區間請見下一步驟。

第三：計算排序資料的上下界。將排序資料的最小值與最大值，分別減去與加上截尾均數(Trimmed mean)¹，可分別得排序資料的上界與下界。排序資料的上界作為第一個區間的上界，排序資料的下界則為最末區間的下界。

第四：計算每一個區間的平均 m_t ，方法如下

¹ 截尾均數是為了決定資料最大與最小值所屬的區間。截尾均數的計算如以下四步驟。第一，計算資料中兩連續觀測值的距離，並予以排序。第二，決定截尾百分比。第三，估算欲刪除的距離數值的首、末個數。第四，平均剩餘的距離數值。例如，有 T 個觀測值，預計算 10% 的截尾均數，先計算兩連續觀測值間的距離，共得 $(T-1)$ 個數值，再將此 $(T-1)$ 個數值排序後的前後 $(T-1) \times 10\%$ 個數值刪除，再平均剩下的距離數值，即得截尾均數。根據 Vinod (2006)，截尾百分比建議設為 10%，而當資料長度大於 30 時，截尾百分比的決定不影響重複取樣的結果。



$$\text{第一個區間 } m_1 = 0.75x_{(1)} + 0.25 x_{(2)}$$

$$\text{第 } t \text{ 個區間 } m_t = 0.25x_{(t-1)} + 0.5 x_{(t)} + 0.25 x_{(t+1)}$$

$$\text{最末個區間 } m_K = 0.25x_{(K-1)} + 0.75 x_{(K)}$$

這種計算方法能確保重複取樣的平均與資料的平均相同。

第五：計算重複取樣的數值。從 $(0, 1)$ 的均一分布中，抽取 K 個數值，根據原始資料建立的反累積分布函數，計算重複取樣的數值(圖 3 左)。

第六：依照 I_{rev} ，重新排序重複取樣(圖 3 右)。

第七：重複步驟第五到第六 J 次，模擬 J 次資料產生的過程。

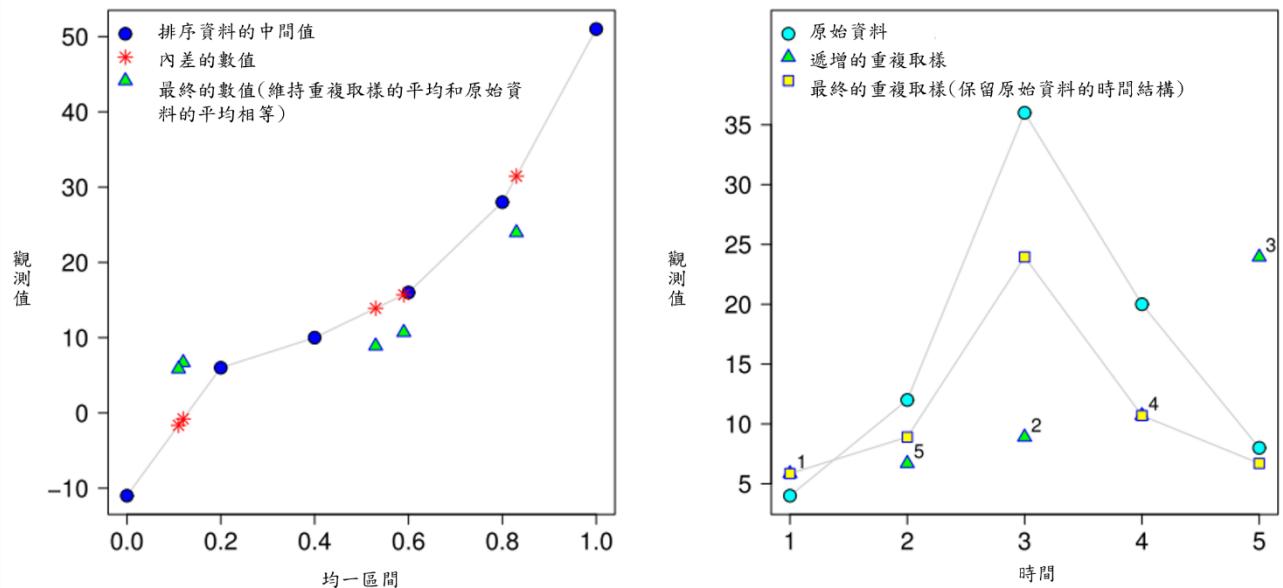


圖 3、MEB 產生重複取樣的方法

假設原始資料有 5 個觀測值，根據步驟第二與第三建立觀測值的半開放區間，如左圖中的藍點。步驟第五中(左圖)，從 $(0, 1)$ 的均一分布中隨機抽取的 5 個數值，為重複取樣的百分位數，先標示在藍點的連線間，即左圖的紅星符號，再根據反累積分布函數，計算紅星相對應的數值，得重複取樣的數值，即左圖的綠色三角形。步驟第六(右圖)，依照原始資料的 I_{rev} ，將步驟第五重複取樣的數值予以排序(修改自 Vinod & López-De-Lacalle, 2009, 圖 2)。

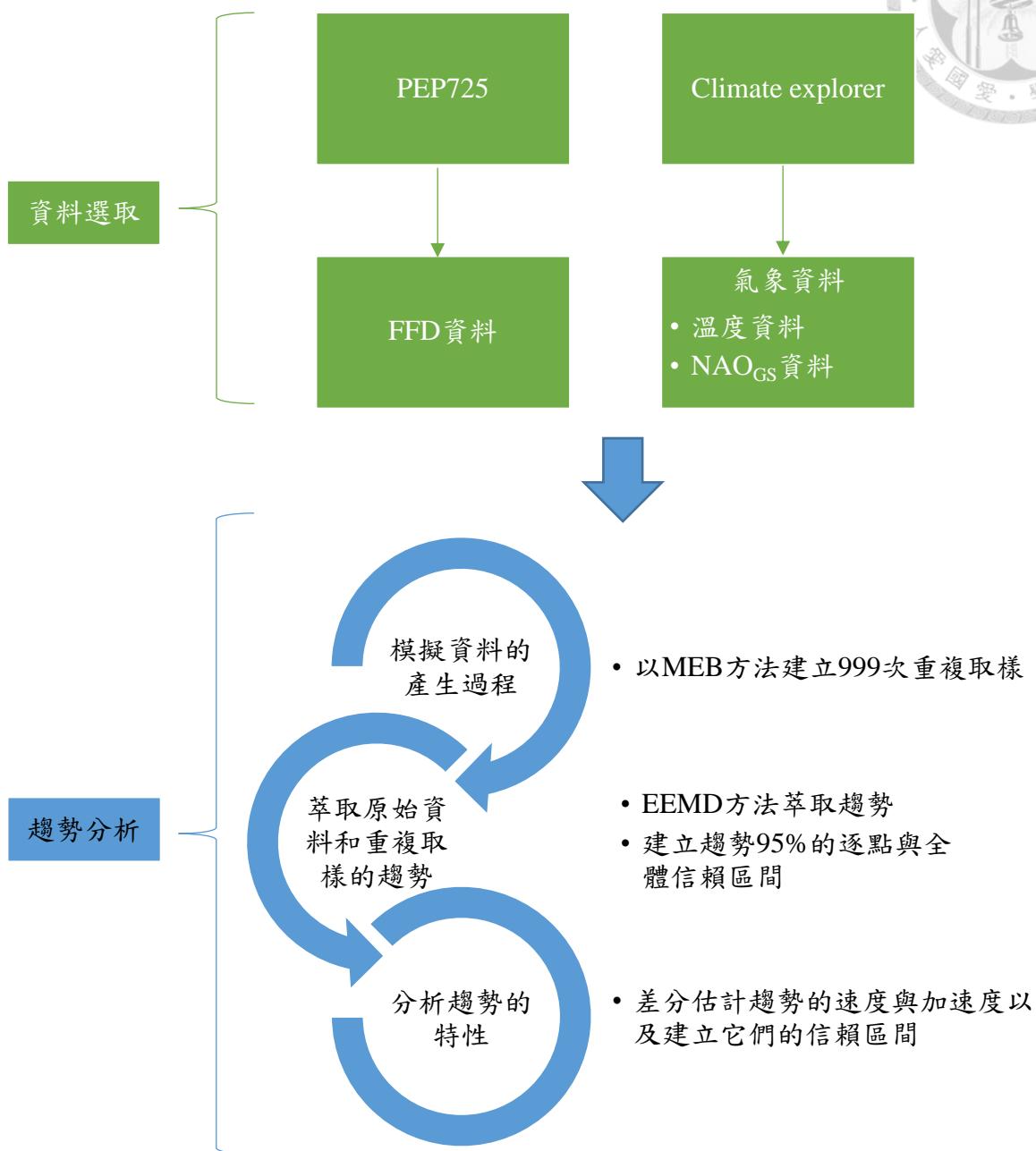


圖 4、研究方法流程圖

本研究先選取物候資料，再決定其相對應的溫度資料(綠色部分)，最後以 EEMD 與 MEB 方法分析兩資料的趨勢，趨勢的性質，與建立它們的信賴區間(藍色部分)。



3.1 物候資料

3.1.1 資料來源

物候資料來自 Pan European Phenological database (PEP725，<http://www.pep725.eu/index.php>)。PEP725 為奧地利中央氣象與地質動力院 (Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik)的計畫，此計畫旨在收集歐洲植物的物候資料，並公開給大眾使用，以促進氣候變遷的研究。此計畫的物候資料可追溯至 1868 年，目前共有 32 個歐洲國家參與，紀錄 265 種植物、46 個物候相(Templ et al., 2018)。此計畫的資料庫以植物的學名為檢索，再依照國家分類。每個國家有不同數量的物候測站，每個測站紀錄的物候相不完全相同。

物候測站是指紀錄物候相的空間範圍，此範圍的海拔差異需小於海拔 50m (Above sea level, a.s.l)，方圓大致一公里以內，且不位於微氣候極端迥異的場所，如背陽面或乾燥坡。單一生長季的觀測以單一植株或單一林分(Stand)的植物為主，連年的觀測也盡可能如此。若為單一林分的觀測，則物候相的紀錄以該林分至少有 50% 的植株符合該物候相為準則(Meier, 2001)。觀測的人員需受過訓練，若此人無法再調查，須將調查方法傳授給接續者。

物候相依照植物發育物候編碼系統(Biologische Bundesanstalt, Bundesortenamt and Chemical Industry, BBCH, Meier, 2001)登記。BBCH 的制定是為了使學者在國際間能精確地描述物候相。此編碼系統為二位數字，其十位數描述植物的主要生長階段，將植物從萌芽(Germination)到老化畫分為零到 9 個階段，其中，「6」代表主枝條開花。編碼的個位數則描述植物在該生長階段的發展程度，同樣以零到 9 畫分。始花物候的編碼為 60，「0」代表花朵的綻放是突發性的(Sporadic)(Meier, 2001)。始花物候的定義為觀測個體至少已有三處的花藥在未完全綻放的花瓣內可見且可釋放；葦荑花序則為花藥必須突出，且用手指輕彈後，可見花藥釋放(Phänologie, 2013)。



3.1.2 資料特性

本論文選取的兩物種的物候相需分別發生於生長季早期和晚期，以分析不同生長時期的物候相對暖化的反應差異。物候資料需符合下列兩個準則：第一，觀測時間越長越好。第二，觀測資料須為連年資料，且各測站的觀測起始與終止時間點須相同。第一點是為了能夠分析物候趨勢，而第二點能避免分析時產生偏誤(Bias)(Schaber & Badeck, 2005)。根據以上的要求，本論文選取德國的榛子和帚石楠的 FFD(BBCH 60)，其中榛子屬於雌雄異花，雄花是葇荑花序，PEP 725 紀錄的為雄花的 FFD。根據 Ahas et al. (2002)，榛子的始花物候變異大，有可能表示其對溫度變化敏感度較其他物種大。

榛子與帚石楠分別有 10 個(圖 5 與表 1)與 5 個(圖 6 與表 2)物候測站，兩物種的觀測時間皆始於 1951 年，終於 2015 年。除了各測站的資料，本論文另以榛子與帚石楠各測站的逐年平均代表區域性的物候資料，以「全測站(Station-wide)」註記。因此，本論文共分析榛子 11 筆與帚石楠 6 筆的 FFD。物候資料在進行分析前，均轉為距平序列，以 1961 至 1990 的平均年序日(Day of the year, DOY)作為基底年序日，此為比較基準。

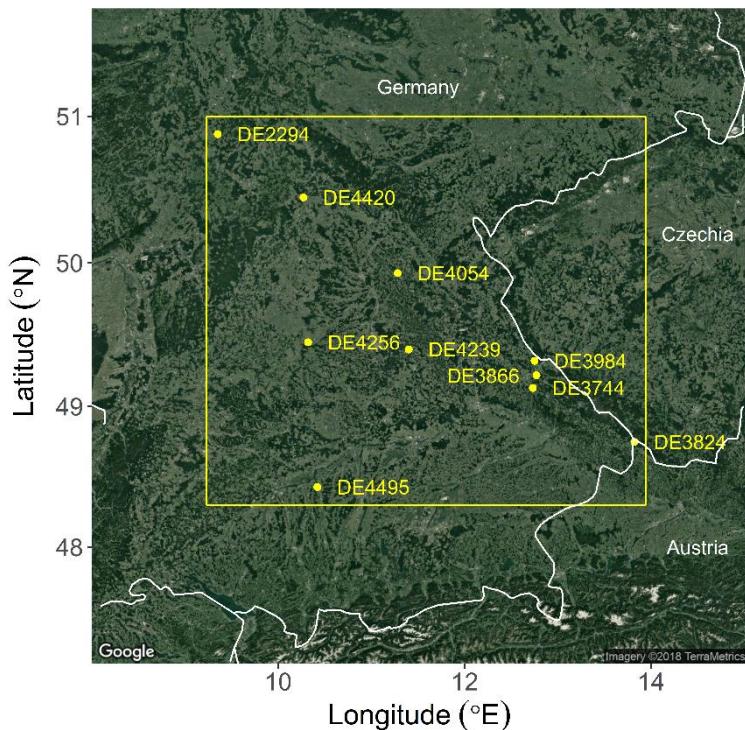


圖 5、榛子的測站分布圖

黃點為測站，黃點右方的代碼為測站代碼，但測站 DE3866 的代碼位於黃點左方，此測站位於測站 DE3984 和 DE3744 之間。黃色方框為全測站溫度資料的選取範圍(地圖資料來源 Kahle & Wickham, 2013)。

表 1、榛子各測站的經緯座標與海拔

測站代碼	經度(°E)	緯度(°N)	海拔(m a.s.l)
DE2294	9.35	50.88	270
DE4420	10.27	50.45	280
DE4054	11.29	49.93	400
DE4256	10.32	49.45	350
DE4239	11.40	49.40	450
DE3984	12.75	49.32	420
DE3866	12.77	49.22	480
DE3744	12.73	49.13	480
DE3824	13.82	48.75	720
DE4495	10.42	48.43	460

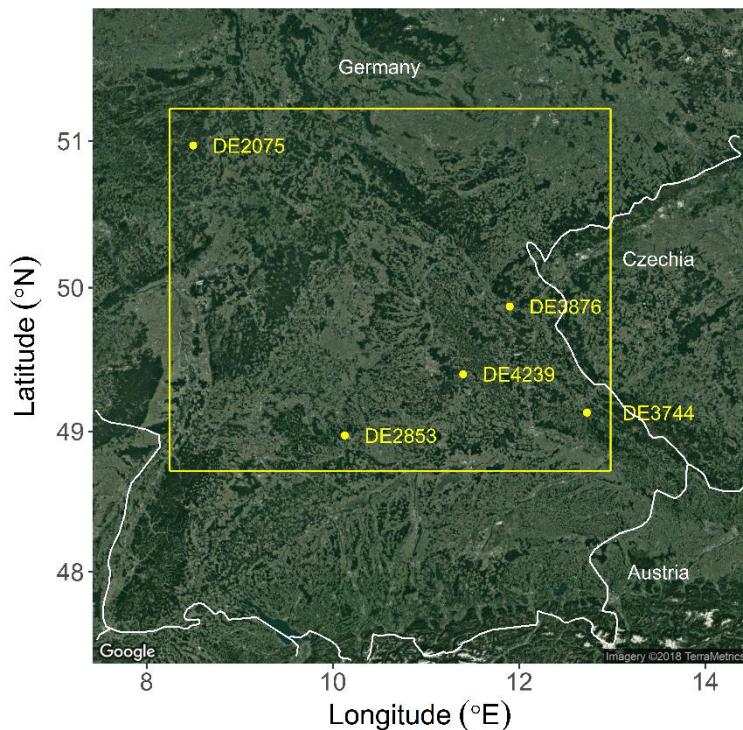


圖 6、帝石楠的測站分布圖

黃點為測站，黃點右方的代碼為測站代碼。黃色方框為全測站溫度資料的選取範圍(地圖資料來源 Kahle & Wickham, 2013)。

表 2、帝石楠各測站的經緯座標與海拔

測站代碼	經度(°E)	緯度(°N)	海拔(m a.s.l)
DE2075	8.50	50.97	420
DE3876	11.90	49.87	460
DE4239	11.40	49.40	450
DE3744	12.73	49.13	480
DE2853	10.13	48.97	440

3.1.3 資料初步分析

為了瞭解資料在測站內的變異，以物候測站為主角，將各測站 65 年的觀測值繪製成盒鬚圖；同時，為瞭解資料在測站間的變異，以年為主角，將所有測站於該年的物候觀測值繪製成盒鬚圖。



3.2 氣象資料

3.2.1 溫度資料來源

溫度資料擷取自 Royal Netherlands Meteorological Institute Climate Explorer (<http://climexp.knmi.nl>) (Trouet & Van Oldenborgh, 2013)，此網站以下簡稱 Climate explorer。Climate explorer 除了提供各種氣象資料，還可分析這些資料與來自使用者的資料。本研究首先使用 Climate explorer 中場域相關性(Field correlation)的分析功能，尋找可能和榛子與希石楠始花物候相關的溫度類型。溫度類型確認後，再從 Climate explorer 中的 E-OBS 17.0 資料集選取該溫度類型更精密的網格資料(解析度 0.25°)，選取範圍是測站的經緯座標向東南西北四方位各延伸 0.25° ，因此每個測站所使用對應溫度是四個網格的平均。全測站的選取範圍選自最南、最北、最東與最西的測站分別在南、北、東與西四方位的座標延伸 0.25° 後的經緯座標。

3.2.2 場域相關性分析

使用 Climate explorer 中的場域相關性分析時，需先選擇溫度類型與場域範圍。溫度的類型有層次與時期的差別，溫度的層次分為三種：月均日溫(Tmean)、月均最高日溫(Tmax)，與月均最低日溫(Tmin)。溫度的時期可分為單月，與連續多月的平均，本研究使用英文月份的字首表示連續的月份，如 JFM Tmax 表示平均一至三月的月均最高日溫、JFM Tmean 表示平均一至三月的月均日溫、AMJ Tmean 表示平均四至六月的月均日溫。本研究的場域範圍以物候測站的經緯度座標為中心，再朝東西經、南北緯各延伸 5° ，全測站的中心為各測站的平均經緯度座標。各場域的範圍是南北緯與東西經各橫跨 10° 。場域相關性分析的步驟為：輸入 FFD 距平序列、計算其與去除線性趨勢後的溫度資料在場域中逐格的相關性，最後，將所得的相關係數繪製成等值圖。我們根據此結果檢測 FFD 距平序列和該溫度資料在空間上的相關程度。

若場域相關性分析不足以區分何種溫度類型與 FFD 距平序列相關性較高，則使用 EEMD 方法，先萃取不同類型的溫度資料與 FFD 兩距平序列的 OCs，再計算兩 OCs 的相關程度。若多數測站的 FFD 距平序列的 OC 與該類型的溫度資料的 OC 相關性高，則選擇該類型的溫度資料作為該物種 FFD 對應的溫度類型。

Climate explorer 場域分析的結果顯示 JFM Tmean 和 JFM Tmax 與各測站榛子 FFD 距平序列的相關程度接近(附錄一與表 3)。因此比較兩類型的溫度距平序列的 OCs 與 FFD 距平序列的 OCs 的相關性(表 4)。根據表 4，6 個測站與全測站的 JFM Tmax 距平序列的 OCs 與 FFD 距平序列的 OCs 之相關性高於 JFM Tmean 距平序列的 OCs 與 FFD 距平序列的 OCs 之相關性，因此使用 JFM Tmax 作為榛子相對應的溫度類型。和榛子相比，帚石楠各測站的 FFD 距平序列最相關的溫度類型都不同(附錄一與表 5)，而測站 DE3876 不與任何溫度類型相關。本研究決定以與全測站最相關的溫度類型，AMJ Tmean，作為帚石楠各測站相對應的溫度類型。JFM Tmax 與 AMJ Tmean 的資料皆轉為距平序列，並以 1961 至 1990 的平均溫度作為基底溫度。本研究檢驗了榛子與帚石楠 FFD 的距平序列分別與 JFM Tmax 與 AMJ Tmean 距平序列的相關性。

表 3、榛子各測站對應的溫度類型

測站	DE2294	DE4420	DE4054	DE4256	DE4239	DE3984
溫度 類型	JF Tmax	JFM Tmean	JFM Tmax	JF Tmax 或 JF Tmean	JFM Tmean 或 JF Tmax	JFM Tmean
測站	DE3866	DE3744	DE3824	DE4495	全測站	
溫度 類型	JFM Tmean 或 JFM Tmax	JFM Tmean 或 JFM Tmax	FM Tmax	JFM Tmax	JFM Tmean	

註：JF Tmean 表示平均一至二月月均日溫、JFM Tmean 表示平均一至三月月均日溫、JF Tmax 表示平均一至二月月均最高日溫、JFM Tmax 表示平均一至三月月均最高日溫。

表 4、榛子各測站 JFM Tmean 和 JFM Tmax 距平序列的 OCs 與 FFD 距平序列的 OCs 的相關係數

測站	DE2294	DE4420	DE4054	DE4256	DE4239	DE3984
JFM Tmax	-0.67	-0.74	-0.68	-0.81	-0.70	-0.74
JFM Tmean	-0.68	-0.71	-0.67	-0.81	-0.70	-0.75
測站	DE3866	DE3744	DE3824	DE4495	全測站	
JFM Tmax	-0.71	-0.47	-0.76	-0.65	-0.85	
JFM Tmean	-0.69	-0.46	-0.72	-0.62	-0.84	

註：粗體表示該溫度類型距平序列的 OC 與榛子 FFD 距平序列的 OC 較相關。

表 5、帚石楠各測站對應的溫度類型

測站	DE2075	DE2853	DE3744	DE3876	DE4239	全測站
溫度 類型	June Tmean	MJJA Tmean	AMJ Tmean	無相關	May Tmean 與 July Tmax	AMJ Tmean

註：May Tmean 表示五月平均日溫、June Tmean 表示六月平均日溫、July Tmax 表示七月平均最高日溫、MJJA Tmean 表示平均五至八月月均日溫、AMJ Tmean 表示平均四至六月月均日溫。

3.2.3 NAO 指數資料來源

NAO Gibarltar-Stykkishólmur 指數(NAO_{GS}, hPa)的資料亦來自 Climate explorer。

本研究利用 Climate explorer 分析不同時期的 NAO_{GS} 指數與榛子各測站和全測站的 FFD 與相對應溫度距平序列的相關性，NAO_{GS} 指數單月的相關性均較平均連

續兩個月或三個月的相關性低。因此僅呈現平均一至二月、二至三月與一至三月的 NAO_{GS} 相關性分析結果。本研究同樣以英文月份的字首表示連續的月份，如 JFM NAO_{GS} 指數表示平均一至三月的 NAO_{GS} 指數、JF NAO_{GS} 指數表示平均一至二月的 NAO_{GS} 指數等。

3.3 EEMD 的白噪參數與集體大小

本論文將相同物種與溫度類型使用的白噪參數設為相同，因此選擇的白噪參數為能使該距平序列普遍於各測站的 OCs 和趨勢相關性最低者。榛子各測站的 FFD 距平序列經過 EEMD 分解後，其 OCs 和趨勢的相關性在白噪參數 0.05 至 0.3 的範圍內沒有一致的變化(附錄二的表 1)。白噪參數的增加，會使部分測站的 FFD 距平序列的 OCs 和趨勢的相關性降低(測站 DE2294 與 DE4420)、上升(測站 DE4054、DE4256、DE3744 與 DE4495，和全測站)，也可能沒有規則(測站 DE4239、DE3984 與 DE3866)或不變(測站 DE3824)。本研究決定使用建議的白噪參數 0.1，分析榛子的 FFD 距平序列。各測站的 JFM Tmax、JFM Tmean、帚石楠的 FFD 和 AMJ Tmean 距平序列在白噪參數分別為 0.6、0.6、0.1 與 0.8 時，OCs 和趨勢的相關性普遍較低，因此擇其為該距平序列的白噪參數(見附錄二的表 2、3、4 與 5)。每筆距平序列使用的集體大小均為 5000。



3.4 趨勢分析

本研究先以 MEB 的方法，建立物候和溫度距平序列 999 次的重複取樣，再將原始資料與所有的重複取樣以 EEMD 方法分解，得到原始資料的趨勢，與重複取樣的趨勢，進而建立趨勢的 95% 的逐點與全體信賴區間(圖 4)。

從 EEMD 萃取出的趨勢為平滑曲線，故其速度與加速度可以差分的方法估計，而它們的信賴區間同樣由 MEB 產生的重複取樣建立。我們將 FFD 距平序列趨勢的估計加速度作為測站的分類依據，FFD 距平序列的估計加速度可能為正、為負或與零無顯著區別。

溫度及 FFD 趨勢與兩者的估計速度和加速度皆是我們檢視溫度與 FFD 呼應情形的方法。溫度的趨勢若為單調遞增的函數(表示溫度趨勢逐年上升)；物候的趨勢若為單調遞減的函數(表示物候趨勢逐年提前)，則物候的趨勢呼應了溫度的趨勢。類似的，當溫度的趨勢的估計速度往溫度升高的方向演變；物候的趨勢的估計速度往物候提前的方向演變，則兩趨勢的估計速度也呼應。最後，當溫度與物候的趨勢的估計加速度分別為正與負，則表示兩趨勢的估計加速度也呼應。

趨勢的加速度四捨五入至小數點下四位數，若逐年加速度四捨五入後均相同，則視此估計加速度為等加或等減速度，其值以逐年平均代表。逐點與全體信賴區間若四捨五入至小數點第四位數後相同，則兩信賴區間視為相同，僅稱「趨勢的信賴區間」。統計分析皆在統計軟體 R 3.4.3 進行(R Core Team, 2017)，其中 EEMD、MEB 與 95% 的逐點和全體信賴區間的計算分別以 **Rlibeemd**(Helske & Luukko, 2016)、**meboot**(Vinod & López-De-Lacalle, 2009)與 **boot**(Canty & Ripley, 2017)分析模組執行。



4.1 物候資料初步分析

4.1.1 榛子

4.1.1.1 測站間的 FFD 變異

FFD 在測站間的離群值主要分布在 1980 年代以前(共 22 個，圖 7 與圖 8)，尤其是在 1960 年代，並以測站 DE3744 最多。離群值在 1980 年代後變少(共 10 個)，主要分布在 2011 到 2015 年間。1980 年代以前，離群值的個數雖多，但盒鬚圖的全距卻普遍較 1980 年代後小，表示 1980 年代以前，具有離群值的測站，其始花物候較其他測站的迥異。

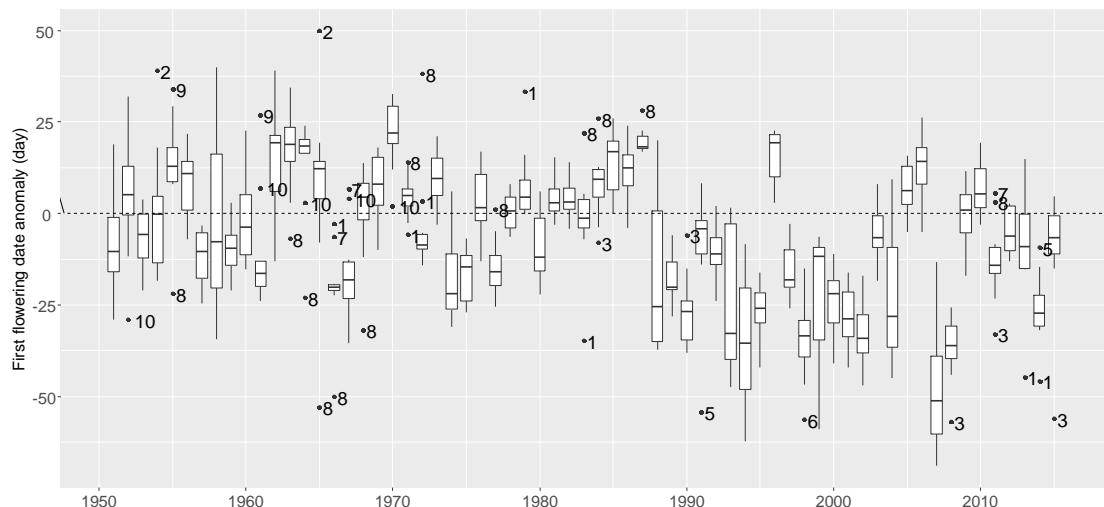


圖 7、榛子 10 個測站的 FFD 距平序列的逐年盒鬚圖

縱軸為 FFD 距平序列(天)，橫軸為年。離群值右方的編號代表測站，1 到 10 分別代表測站 DE2294、DE4420、DE4054、DE4256、DE4239、DE3984、DE3866、DE3744、DE3824 與 DE4495。

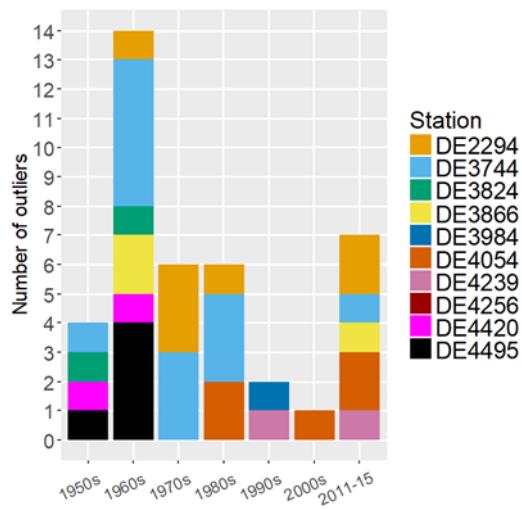


圖 8、榛子 FFD 距平序列的逐年盒鬚圖中離群值於各測站的分布

縱軸為離群值個數，橫軸為年代，以每 10 年為單位，最後 5 年例外。顏色代表測站，其佔有的格數為離群值屬於該測站的個數。

4.1.1.2 測站內 FFD 的變異

榛子的 FFD 在大部分的測站大約發生於一月底至四月初，且四分位距落於立春(以國曆 2 月 3 日為代表)與春分(以國曆 3 月 21 日為代表)間，表示一半的 FFD 分布在這段時間(約 44 天內，圖 9)。海拔最高的測站 DE3824 的 FFD 分布不同於其他測站，其 FFD 在二月底至四月底發生，且四分位距落於春分後，表示此測站的始花物候較其他測站晚。另外，6 個測站(DE2294、DE4054、DE4256、DE4239、DE3984 與 DE4495)和全測站的 FFD 盒鬚圖之中位數至最小值間的長度大於中位數至最大值間的長度，代表提早的 FFD 分布較延後的 FFD 分布之變異大；3 個測站(DE4420、DE3866 與 DE3824)則無此現象，而測站 DE3744 提早的 FFD 分布則較延後的 FFD 分布變異小。

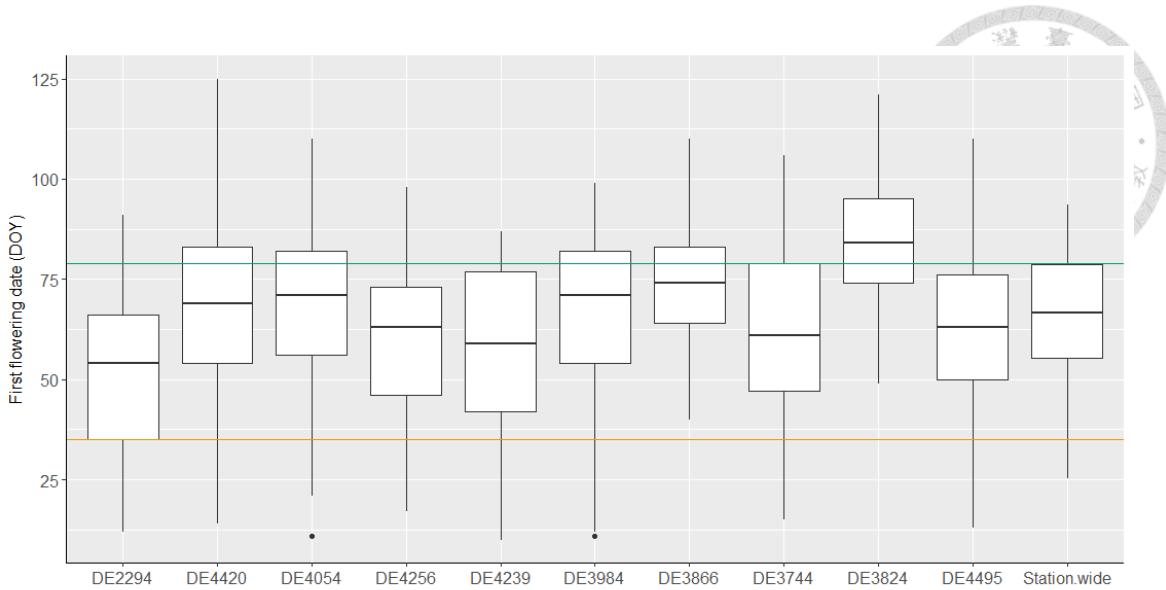


圖 9、榛子各測站與全測站的 FFD 於 1951 至 2015 年的盒鬚圖

縱軸為 FFD(DOY)，橘色與綠色的線分別代表立春與春分。橫軸為測站，測站由左到右為地圖上由北而南的方向。

4.1.2 帚石楠

4.1.2.1 測站間 FFD 的變異

帚石楠測站間 FFD 之離群值除了在 1980 年代較少外，其他時期均較多(圖 10)，主要分布在測站 DE3876 和 DE2853(圖 11)。此外，前者的離群值是延後始花，後者是提前始花。

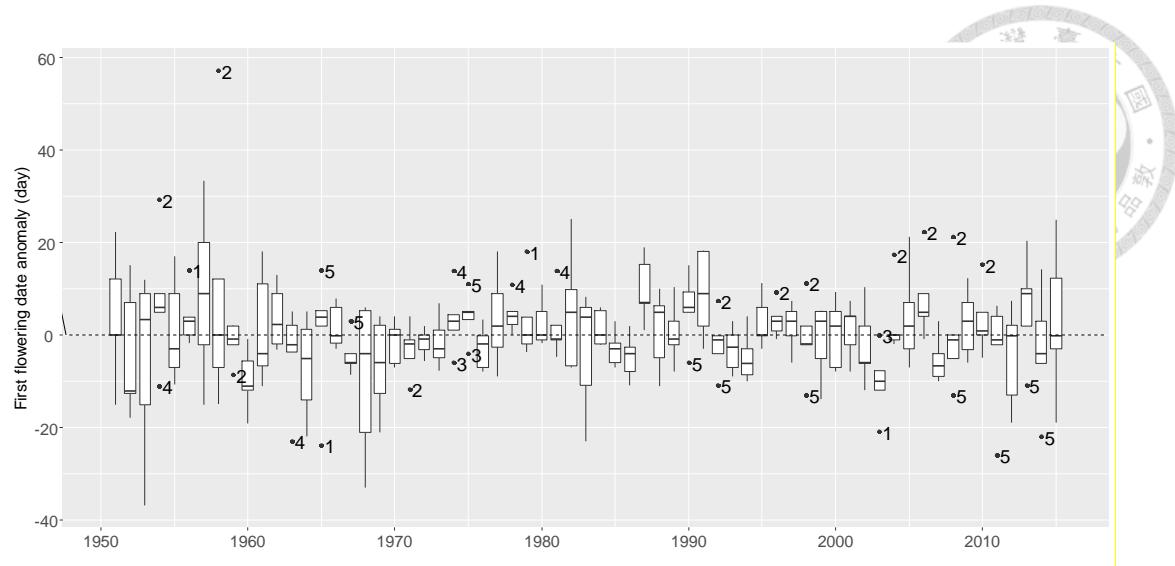


圖 10、帚石楠 5 個測站的 FFD 距平序列的逐年盒鬚圖

縱軸為 FFD 距平序列(天)，橫軸為年。離群值右方的編號代表測站，1 到 5 分別代表測站 DE2075、DE3876、DE4239、DE3744 與 DE2853。

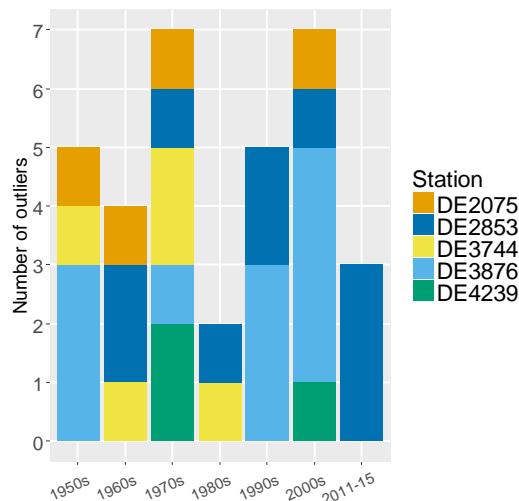


圖 11、帚石楠 FFD 距平序列的逐年盒鬚圖中離群值於各測站的分布

縱軸為離群值個數，橫軸為年代，以每 10 年為單位，最後 5 年例外。顏色代表測站，其佔有的格數為離群值屬於該測站的個數。



4.1.2.2 測站內 FFD 的變異

帚石楠的 FFD 主要分布在七月底至八月初間(50 天內，圖 12)，且各測站的四分位距相近，除了測站 DE2075 與 DE3876，前者的 FFD 四分位距較其他測站晚，後者的則較其他測站早。帚石楠各測站的 FFD 皆有離群值，且主要分布在 FFD 提早的時候。和榛子測站內 FFD 的變異相比較，帚石楠沒有提早的 FFD 變異較延後的 FFD 變異大的現象。

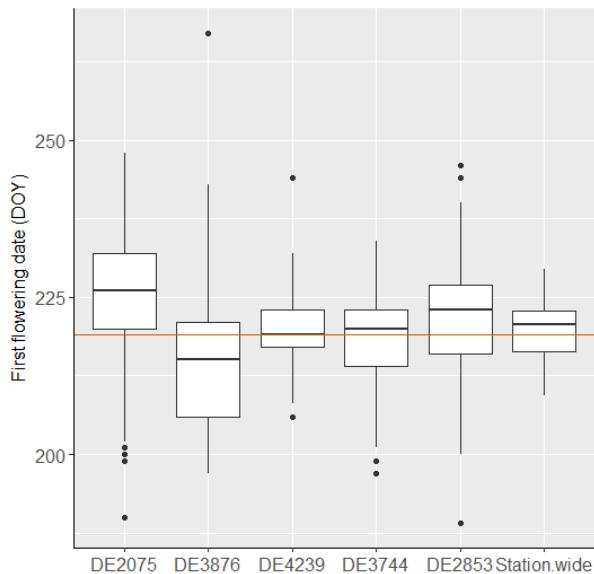


圖 12、帚石楠各測站與全測站的 FFD 於 1951 至 2015 年的盒鬚圖
縱軸為 FFD(DOY)，橘色的線代表秋分(以國曆 8 月 7 日為代表，測站 DE4239 的 FFD 中位數恰為秋分)。橫軸為測站，測站由左到右為地圖上由北而南的方向。

以上的分析顯示，一方面，兩個物種測站間的 FFD 距平序列變異大，榛子測站間的 FFD 距平序列的離群值主要分布在 1980 年代前，帚石楠測站間的 FFD 距平序列的離群值則幾乎普遍分布於各期。另一方面，兩物種測站內的 FFD 變異大，但是榛子是 FFD 盒鬚圖的全距大，帚石楠是離群值多。最後，大部分測站的榛子，其提早的 FFD 變異大於延後的 FFD 變異，但是帚石楠各測站提早與延後的 FFD 變異之表現分歧。



4.2 榛子和帚石楠 FFD 距平序列與溫度距平序列的相關性

榛子各測站的 JFM Tmax 距平序列與 FFD 距平序列呈負相關，表示溫度越高，FFD 越早發生(表 6)，兩距平序列僅於測站 DE3744 的相關性較低。帚石楠各測站 AMJ Tmean 和 FFD 的兩距平序列呈負弱相關 (表 7)，僅測站 DE2853 與全測站較高。

表 6、JFM Tmax 距平序列和榛子 FFD 距平序列的相關係數

測站	DE2294	DE4420	DE4054	DE4256	DE4239	DE3984
相關性	-0.69	-0.75	-0.71	-0.82	-0.73	-0.79
測站	DE3866	DE3744	DE3824	DE4495	全測站	
相關性	-0.74	-0.41	-0.78	-0.68	-0.87	

表 7、AMJ Tmean 距平序列和帚石楠 FFD 距平序列的相關係數

測站	DE2075	DE3876	DE4239	DE3744	DE2853	全測站
相關性	-0.33	-0.03	-0.02	-0.27	-0.49	-0.49

4.3 NAO_{GS} 指數與榛子的 FFD 及 JFM Tmax 距平序列的相關性

表 8 顯示，榛子的 FFD 距平序列與 NAO_{GS} 指數呈負相關。五個測站與全測站的 FFD 距平序列與平均 JFM NAO_{GS} 指數相關；測站 DE2294 與 DE4256 和平均 JF NAO_{GS} 指數相關；測站 DE3866 與 DE3824 和平均 FM NAO_{GS} 指數相關；測站 DE4495 與平均 FM NAO_{GS} 指數和平均 JFM NAO_{GS} 指數的相關性相當。而各測站的榛子 FFD 距平序列與 NAO_{GS} 指數最相關的時期大致和各測站 Climate explorer 中，場域分析所得的對應溫度之時期的結果相同。JFM NAO_{GS} 指數普遍與榛子各測站的 JFM Tmax 和 FFD 距平序列相關(表 9)，且前者與 JFM NAO_{GS} 指數的相關程度高於後者與 JFM NAO_{GS} 指數的相關程度。



表 8、榛子各測站的 FFD 距平序列和平均 JF NAO_{GS}、FM NAO_{GS} 與 JFM NAO_{GS} 的相關係數

測站	DE2294	DE4420	DE4054	DE4256	DE4239	DE3984
JF NAO_{GS}	-0.64	-0.51	-0.47	-0.58	-0.49	-0.41
FM NAO_{GS}	-0.47	-0.48	-0.46	-0.49	-0.46	-0.47
JFM NAO_{GS}	-0.61	-0.55	-0.51	-0.57	-0.53	-0.49
測站	DE3866	DE3744	DE3824	DE4495	全測站	
JF NAO_{GS}	-0.51	-0.23	-0.40	-0.32	-0.56	
FM NAO_{GS}	-0.56	-0.20	-0.57	-0.38	-0.55	
JFM NAO_{GS}	-0.55	-0.27	-0.55	-0.38	-0.62	

註：JF NAO_{GS} 表示平均一至二月 NAO_{GS} 指數、FM NAO_{GS} 表示平均二至三月 NAO_{GS} 指數、JFM NAO_{GS} 表示平均一至三月 NAO_{GS} 指數。粗體表示該時期的 NAO_{GS} 指數與 FFD 距平序列最相關。

表 9、榛子各測站的 JFM Tmax 距平序列和平均 JF NAO_{GS}、FM NAO_{GS} 與 JFM NAO_{GS} 的相關係數

測站	DE2294	DE4420	DE4054	DE4256	DE4239	DE3984
JF NAO_{GS}	0.72	0.71	0.72	0.69	0.70	0.71
FM NAO_{GS}	0.65	0.64	0.65	0.64	0.65	0.65
JFM NAO_{GS}	0.75	0.73	0.75	0.72	0.74	0.76
測站	DE3866	DE3744	DE3824	DE4495	全測站	
JF NAO_{GS}	0.67	0.68	0.68	0.68	0.72	
FM NAO_{GS}	0.62	0.62	0.64	0.64	0.65	
JFM NAO_{GS}	0.71	0.72	0.73	0.72	0.75	

註：JF NAO_{GS} 表示平均一至二月 NAO_{GS} 指數、FM NAO_{GS} 表示平均二至三月 NAO_{GS} 指數、JFM NAO_{GS} 表示平均一至三月 NAO_{GS} 指數。粗體表示該時期的 NAO_{GS} 指數與 JFM Tmax 距平序列最相關。



4.4 FFD 與溫度距平序列的趨勢分析

4.4.1 棣子

依據 FFD 距平序列的趨勢之估計加速度將測站分為三類，另獨立呈現全測站的分析結果。各測站 FFD 距平序列的趨勢之估計加速度可能顯著小於零(介於-0.0240 到-0.0024 天/年/年)、與零無顯著區別，以及顯著大於零，據此將測站依序分為類別一、二與三。此估計等加速度於全測站為-0.0077 天/年/年，其 95% 的逐點與全體信賴區間分別為(-0.0098, -0.0048)與(-0.0114, -0.0010)。

4.4.1.1 類別一： FFD 距平序列的趨勢之估計加速度顯著小於零

此類別的測站共 5 個，為 DE2294(圖 13)、DE3866(圖 14)、DE4054(圖 15)、DE4495(圖 16)與 DE3744(圖 17)。前 3 個測站的 FFD 距平序列的趨勢和 JFM Tmax 距平序列的趨勢之呼應情形較後 2 個測站佳：前 3 個測站的 JFM Tmax 距平序列的趨勢在分析的期間內逐年升高，FFD 距平序列的趨勢在分析的期間內逐年提前，而後 2 個測站的兩趨勢的呼應情形在分析後期較明顯。除此之外，此類別大部分測站的 FFD 與 JFM Tmax 距平序列的趨勢之估計速度與加速度皆呼應。它們的 JFM Tmax 距平序列的趨勢之估計速度往溫度升高的方向演變，FFD 距平序列的趨勢之估計速度往始花提前的方向演變。更進一步地，它們的 JFM Tmax 距平序列的趨勢之估計加速速為正值，而 FFD 距平序列的趨勢之估計加速度為負值，是為呼應。

但是測站 DE2294 的 JFM Tmax 距平序列的趨勢顯著高於基底溫度(以下簡稱顯著升高)的時間不同於其 FFD 距平序列的趨勢顯著提前於基底年序日的時間(以下簡稱顯著提前)，JFM Tmax 距平序列的趨勢大約在 1976 至 1977 年後顯著上升，而 FFD 距平序列的趨勢大約在 1971 至 1972 年後顯著提前。FFD 距平序列的趨勢領先 JFM Tmax 距平序列的趨勢 5 年。此測站的 JFM Tmax 距平序列的趨勢之估



計速度在 1955 年後顯著大於零，此趨勢的估計等加速度為 $0.0006\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{年}/\text{年}$ ，其 95% 的逐點與全體信賴區間分別為 $(0.0003, 0.0010)$ 與 $(0.0002, 0.0010)$ 。此測站的 FFD 距平序列的趨勢之估計速度在 1976 年後顯著小於零，此趨勢的等加速度為 $-0.0144\text{ 天}/\text{年}/\text{年}$ ，其 95% 的逐點與全體信賴區間分別為 $(-0.0199, -0.0105)$ 與 $(-0.0227, -0.0076)$ 。

測站 DE3866 與 DE4054 的 JFM Tmax 距平序列的趨勢分別大約在 1980 至 1981，與 1975 至 1976 年後顯著升高，它們的估計速度皆往溫度上升的方向演變，並分別在 1954 與 1955 年後顯著大於零，但是其在測站 DE3866 的估計等加速度和零沒有顯著區別，其在測站 DE4054 的估計等加速度為 $0.0006\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{年}/\text{年}$ ，95% 的逐點與全體信賴區間分別為 $(0.0004, 0.0011)$ 與 $(0.0001, 0.0013)$ 。

測站 DE3866 與 DE4054 和測站 DE2294 不同的地方在於，前兩測站的 FFD 距平序列的趨勢在分析時間內均顯著提前。測站 DE3866 與 DE4054 的 FFD 距平序列的趨勢之估計速度皆往提前的方向演變，且分別在 1973 與 1966 年後顯著小於零。此趨勢在測站 DE3866 的估計等加速度為 $-0.0024\text{ 天}/\text{年}/\text{年}$ ，其 95% 的信賴區間為 $(-0.0047, -0.0007)$ 。此趨勢在測站 DE4054 估計的等加速度為 $-0.0240\text{ 天}/\text{年}/\text{年}$ ，其 95% 的逐點與全體信賴區間分別為 $(-0.0291, -0.0217)$ 和 $(-0.0291, -0.0216)$ 。

測站 DE4495 與 DE3744 的 JFM Tmax 距平序列的趨勢大約在 1976 至 1977，與 1979 到 1980 年後顯著上升，它們的估計速度往溫度升高的方向演變，並在分析的時間內均顯著大於零。在測站 DE4495，此趨勢的估計等加速度為 $0.0005\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{年}/\text{年}$ ，95% 的信賴區間為 $(0.0003, 0.0010)$ ，在測站 DE3744 則為 $0.0004\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{年}/\text{年}$ ，95% 的信賴區間為 $(0.0002, 0.0010)$ 。兩測站的 FFD 距平序列的趨勢在分析的時間內均顯著提前，但是不同於類別一的其他三個測站，此兩測站的 FFD 距平序列趨勢為具單一極大值的曲線。這表示在分析的前期，FFD 距平序列的趨勢提前的天數漸趨減少，直到單一極大值發生後(即 FFD 距平序列的趨勢提前天數最少後)，其提前的天數開始漸趨增加。在測站 DE4495，FFD 距平序列的



趨勢提前天數最少的時刻發生於 1972 年，提前了 5.21 天，其 95% 的逐點與全體信賴區間分別為 $(-6.69, -4.19)$ 與 $(-7.18, -3.71)$ 。在測站 DE3744，FFD 距平序列的趨勢則在 1983 年提前天數最少，為 2.78 天，其 95% 的逐點與全體信賴區間分別為 $(-4.07, -1.07)$ 與 $(-4.50, -0.79)$ 。但是，此兩測站 FFD 與 JFM Tmax 距平序列的趨勢之估計速度與等加速度仍呼應。測站 DE4495 與 DE3744 的 FFD 距平序列的趨勢之估計速度均往提前的方向演變，並分別在 1978 與 1987 年後顯著小於零，呼應往溫度升高方向演變的 JFM Tmax 距平序列的趨勢之估計速度。此兩測站的 FFD 距平序列的趨勢之估計等加速度分別為 -0.0187 與 -0.0177 天/年/年，其 95% 的信賴區間分別為 $(-0.0243, -0.0151)$ 與 $(-0.0251, -0.0155)$ ，呼應其對應的 JFM Tmax 距平序列的趨勢之估計加速度(數值為正)。

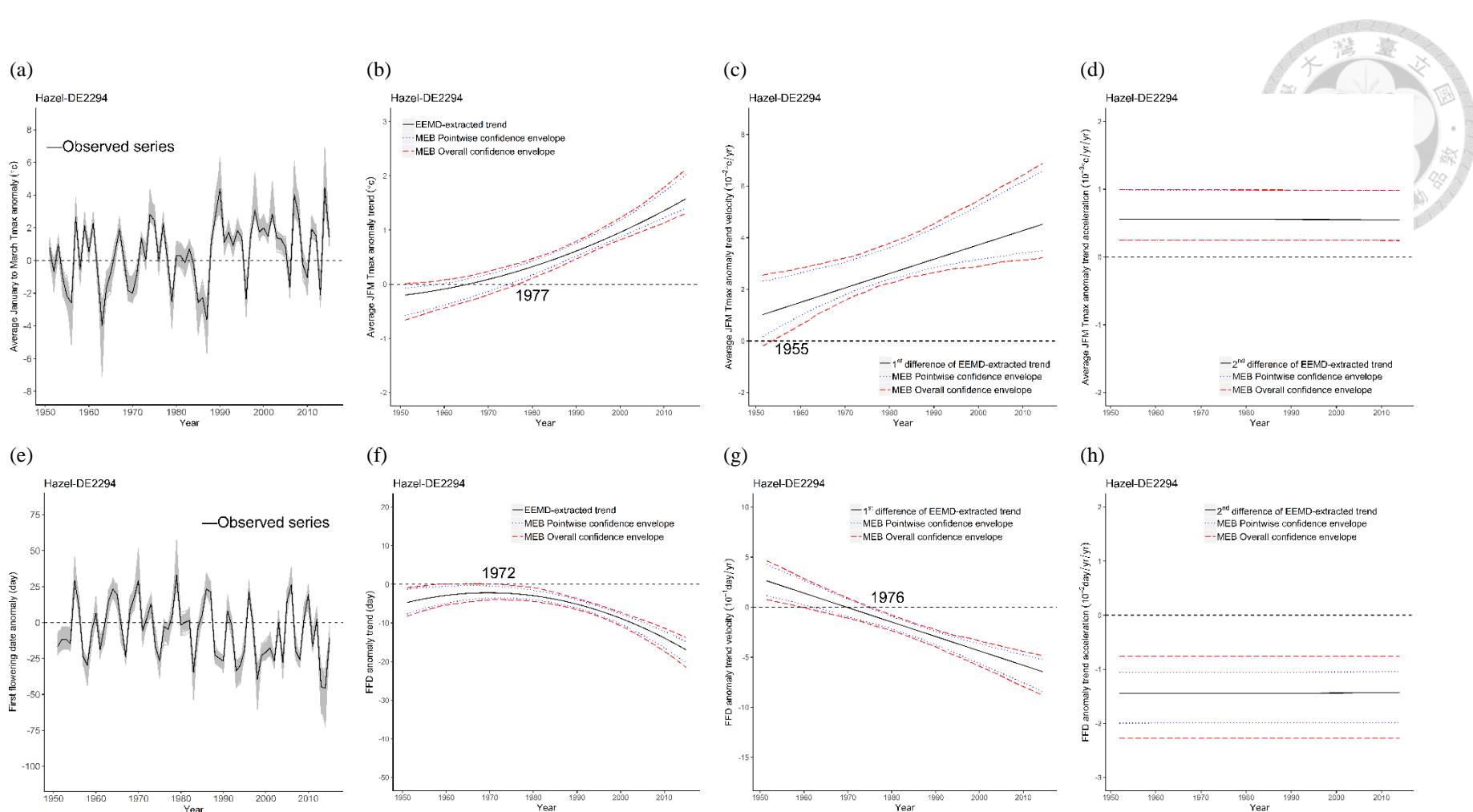


圖 13、榛子測站 DE2294 的 JFM Tmax 和 FFD 兩距平序列的趨勢分析

上行與下行分別描述 JFM Tmax 與榛子 FFD 距平序列。 (a) 與 (e) 為原始資料的距平序列 (黑色實線) 與 MEB 產生的 999 筆重複取樣 (疊加為灰色部分)。 (b) 與 (f) 為 EEMD 自原始資料萃取出的趨勢 (黑色實線)，與根據 MEB 重複取樣所建立趨勢的 95% 的逐點 (圓點藍色虛線) 和全體 (長條紅色虛線) 的信賴區間。 (c) 與 (g) 估計趨勢的速度與信賴區間。 (d) 與 (h) 估計趨勢的加速度與信賴區間。小圖中的年份代表該曲線或直線顯著異於零的時刻，黑色水平虛線表縱軸數值為零。

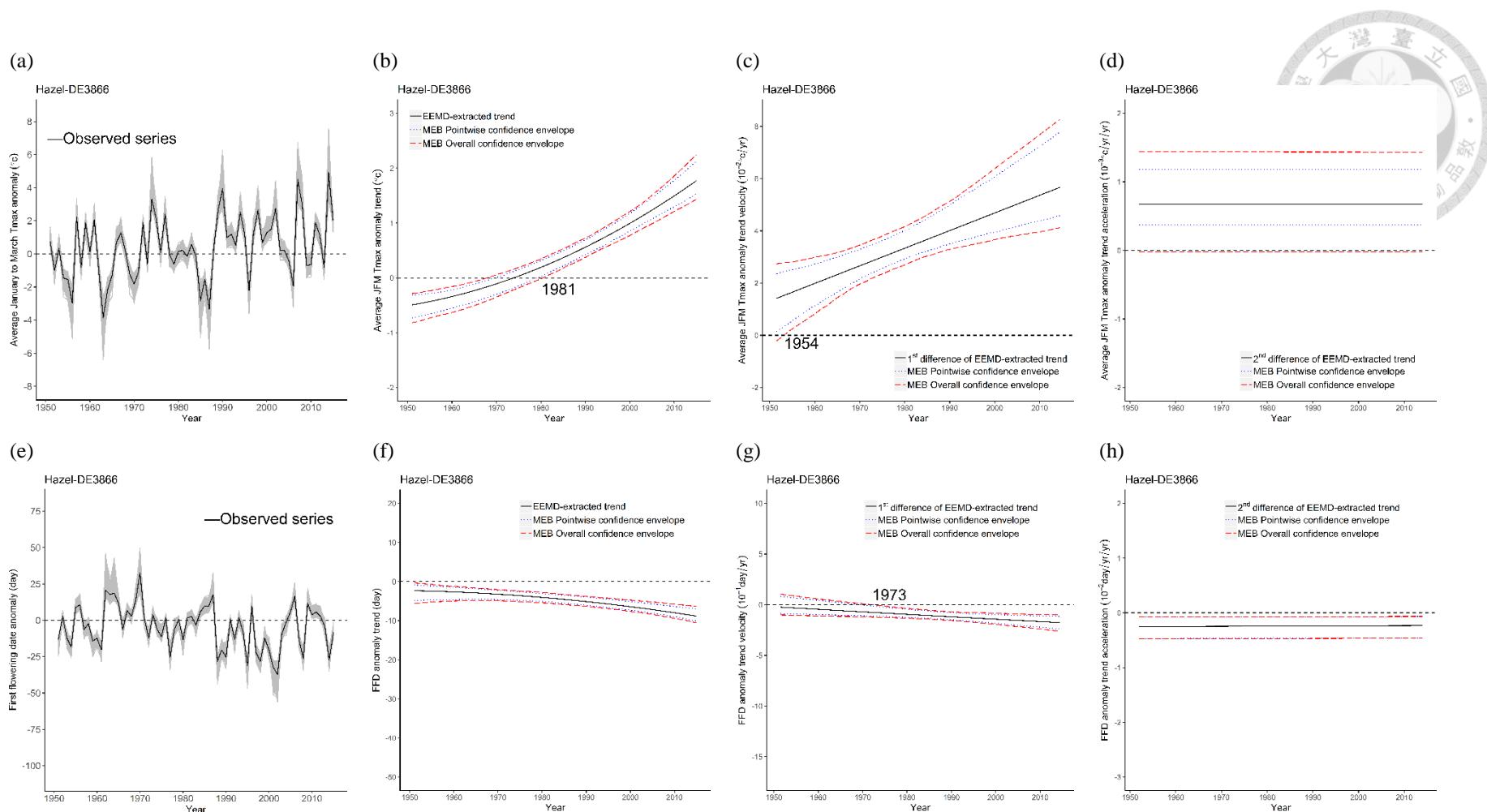


圖 14、榛子測站 DE3866 的 JFM Tmax 和 FFD 兩距平序列的趨勢分析

圖說如圖 13。此測站的 JFM Tmax 距平序列的趨勢之估計等加速度的全體信賴區間顯示，此估計等加速度和零沒有顯著區別。

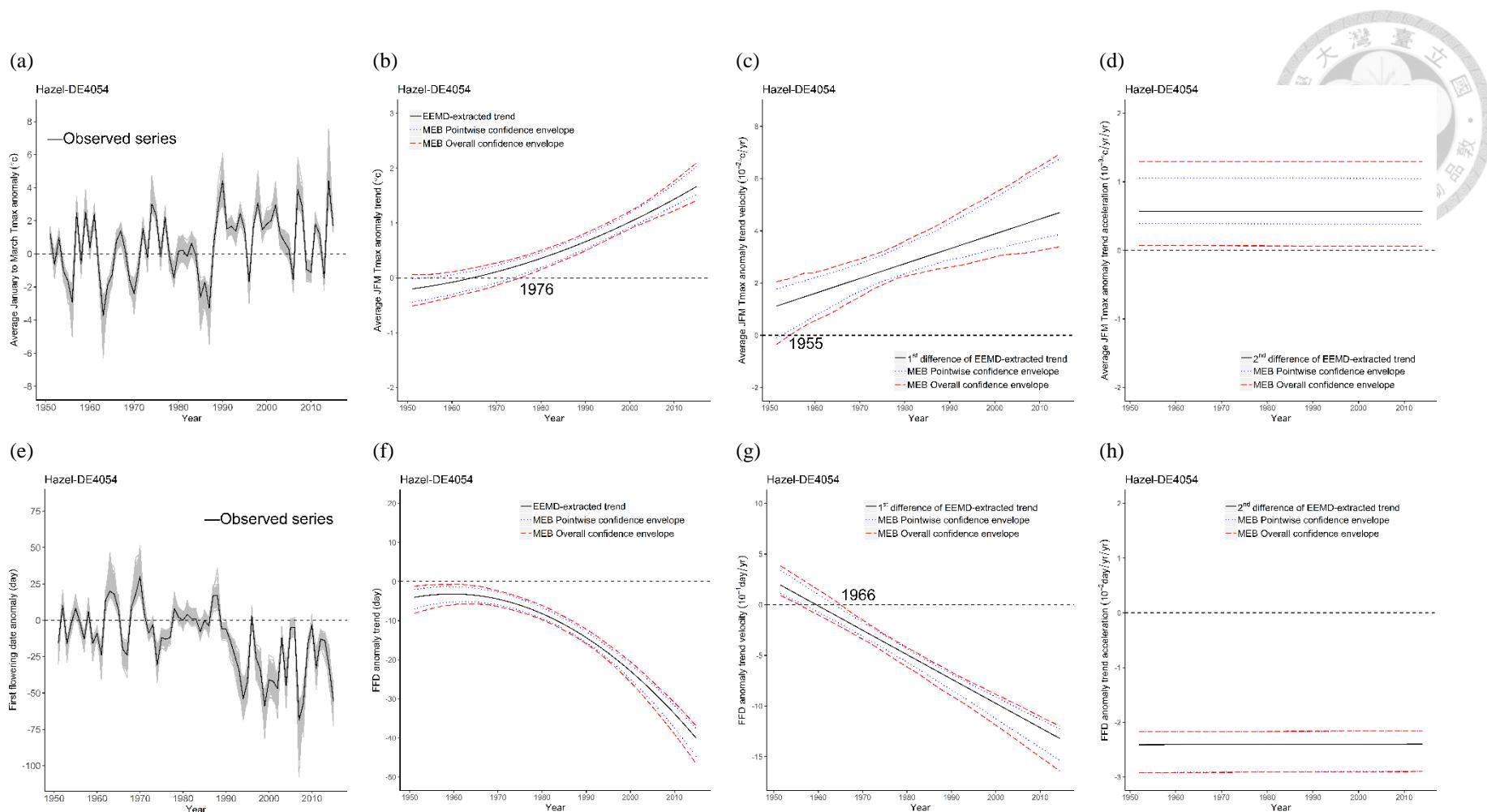


圖 15、榛子測站 DE4054 的 JFM Tmax 和 FFD 兩距平序列的趨勢分析

圖說如圖 13。

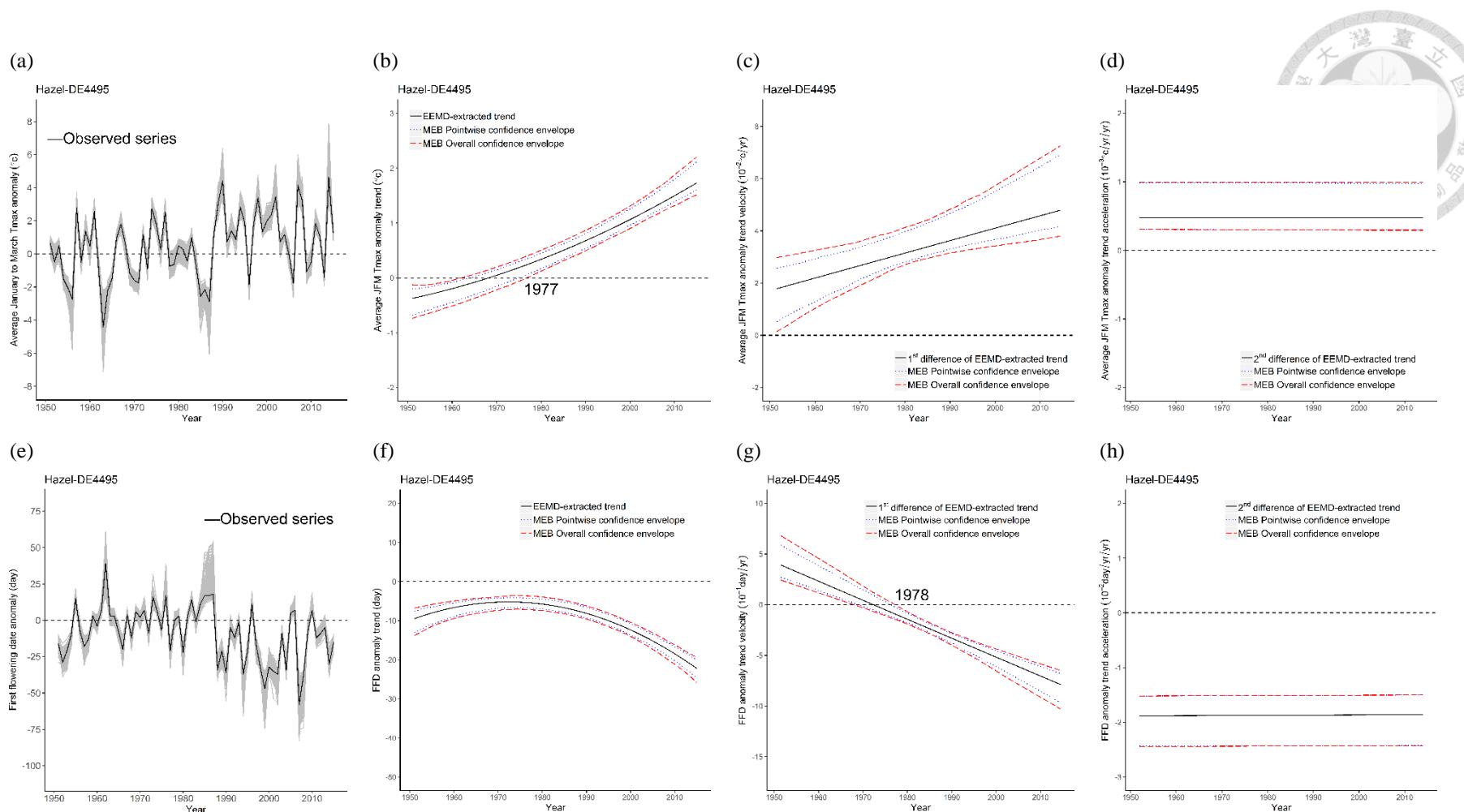


圖 16、榛子測站 DE4495 的 JFM Tmax 和 FFD 兩距平序列的趨勢分析

圖說如圖 13。

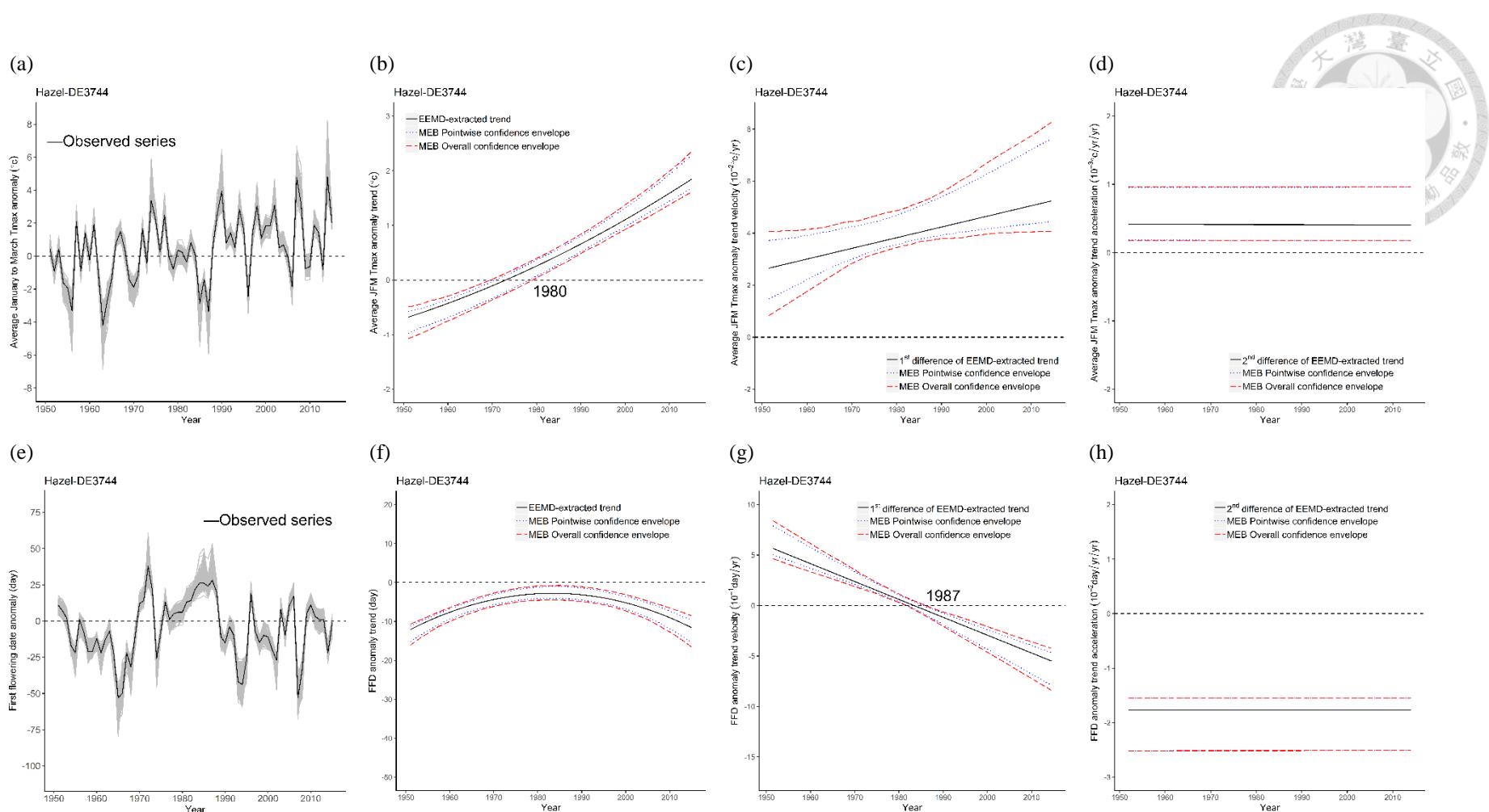


圖 17、榛子測站 DE3744 的 JFM Tmax 和 FFD 兩距平序列的趨勢分析

圖說如圖 13。

4.4.1.2. 類別二：FFD 距平序列的趨勢之估計等加速度與零無顯著區別

類別二共有 4 測站，為 DE4420(圖 18)、DE4256(圖 19 圖 19)、DE4239(圖 20)與 DE3984(圖 21)。這些測站的 JFM Tmax 距平序列的趨勢逐年升高，且 FFD 距平序列的趨勢逐年提前，兩相呼應。除此之外，這些測站的 JFM Tmax 距平序列的趨勢之估計速度若非往溫度升高的方向演變，則為無顯著變化，因此，其估計的加速度若非為正，則和零無顯著區別。

測站 DE4420 與 DE4256 的 JFM Tmax 距平序列的趨勢分別大約於 1975 至 1976，與 1976 至 1977 年後顯著升高，然而它們的 FFD 距平序列的趨勢顯著提前的時間相距甚大，FFD 距平序列的趨勢在測站 DE4420 和 DE4256 顯著提前的時間分別落於 1973 至 1974 年間，與 1962 至 1963 年間，分別領先其對應的 JFM Tmax 距平序列的趨勢 2 年與 14 年。JFM Tmax 距平序列的趨勢在測站 DE4420 與 DE4256 的估計速度均往上升的方向演變，並分別在 1964 與 1958 年後顯著大於零，其估計的等加速度分別為 0.0009 與 0.0006 °C/年/年，前者的 95% 的信賴區間為(0.0007, 0.0015)，後者的則為(0.0003, 0.0011)。

測站 DE4420 與 DE4256 的 FFD 距平序列的趨勢之估計等加速度和零無顯著區別，表示 FFD 距平序列的趨勢之估計速度無顯著變化，此趨勢的估計速度之逐年平均在測站 DE4420 與 DE4256 分別為-0.47 與-0.17 天/年，前者的逐年平均的 95% 的逐點與全體信賴區間分別為(-0.59, -0.39)與(-0.62, -0.37)，後者的逐年平均的 95% 的逐點與全體信賴區間分別為(-0.21, -0.11)與(-0.23, -0.09)。

測站 DE4239 與 DE3984 的 JFM Tmax 距平序列的趨勢大約分別在 1975 到 1976，與 1977 到 1978 年後顯著上升；它們的 FFD 距平序列的趨勢則分別在 1960 到 1961，與 1968 到 1969 年後顯著提前，FFD 距平序列的趨勢分別領先相對應的 JFM Tmax 距平序列的趨勢 15 與 9 年。此兩測站的 JFM Tmax 距平序列的趨勢之估計等加速度均和零無顯著區別，而其趨勢的估計速度之逐年平均分別為 0.030

與 $0.039^{\circ}\text{C}/\text{年}$ ，前者的逐年平均的 95% 逐點與全體信賴區間分別為 $(0.022, 0.039)$ 與 $(0.020, 0.041)$ ，後者的逐年平均的 95% 逐點與全體信賴區間分別為 $(0.031, 0.047)$ 與 $(0.030, 0.050)$ 。測站 DE4239 與 DE3984 的 FFD 距平序列的趨勢之估計速度的逐年平均分別為 -0.24 與 -0.39 天/年，前者的 95% 逐點與全體信賴區間分別為 $(-0.30, -0.18)$ 與 $(-0.33, -0.16)$ ，而後者的逐年平均 95% 逐點與全體信賴區間分別為 $(-0.48, -0.34)$ 與 $(-0.51, -0.32)$ 。

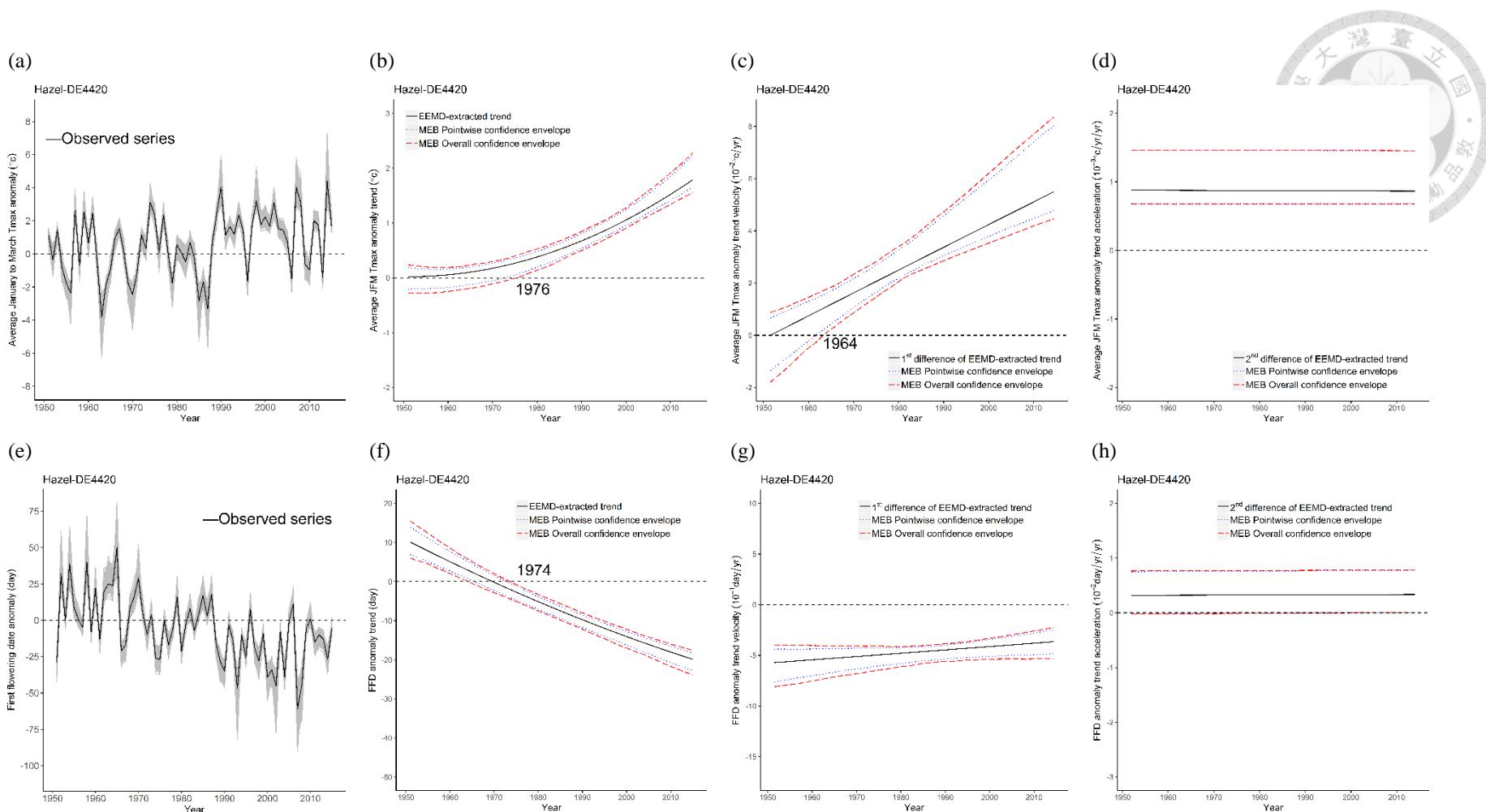


圖 18、榛子測站 DE4420 的 JFM Tmax 和 FFD 兩距平序列的趨勢分析

圖說如圖 13。全體信賴區間顯示，此測站的 FFD 距平序列的趨勢之估計等加速度和零無顯著區別。

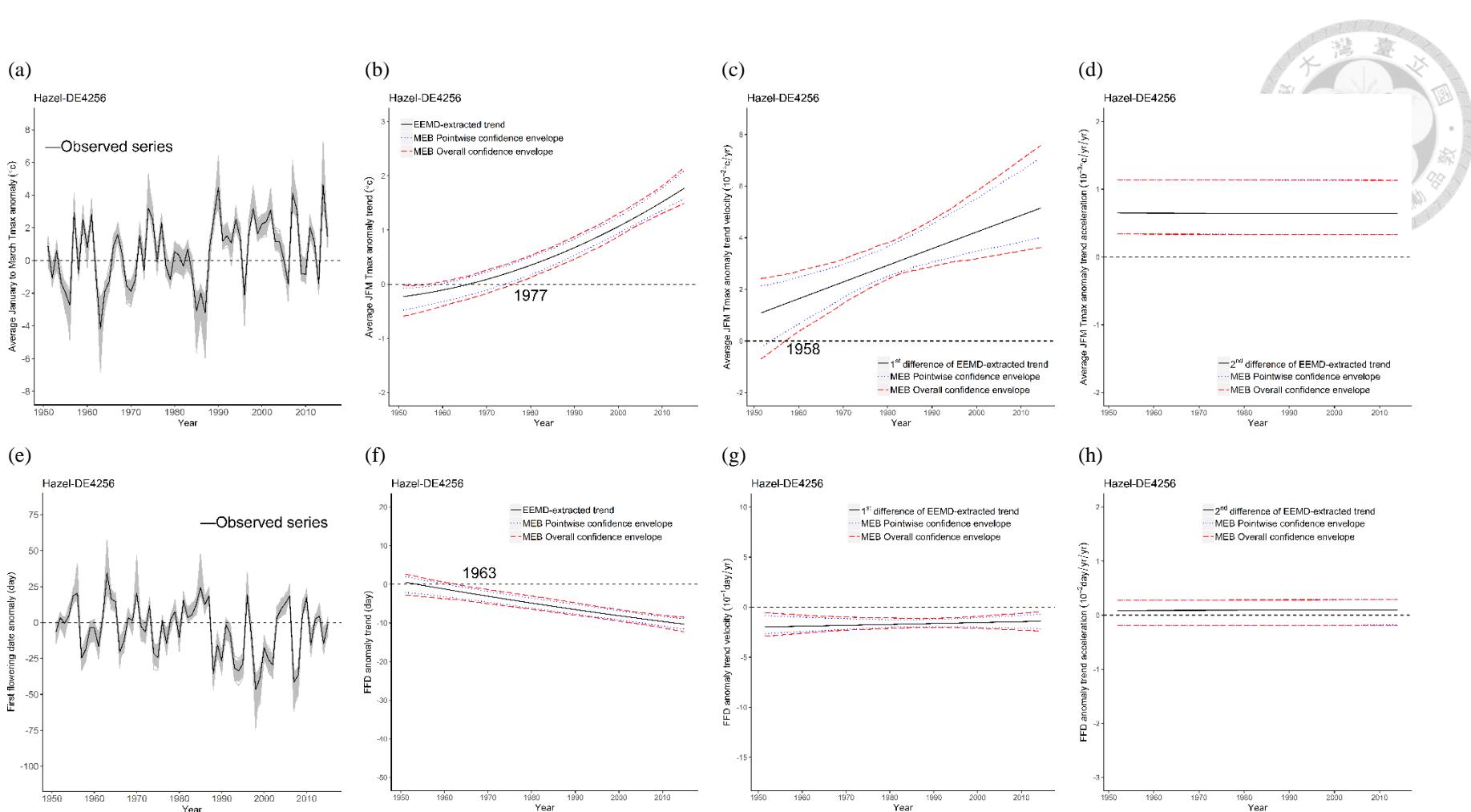


圖 19、榛子測站 DE4256 的 JFM Tmax 和 FFD 兩距平序列的趨勢分析

圖說如圖 13。

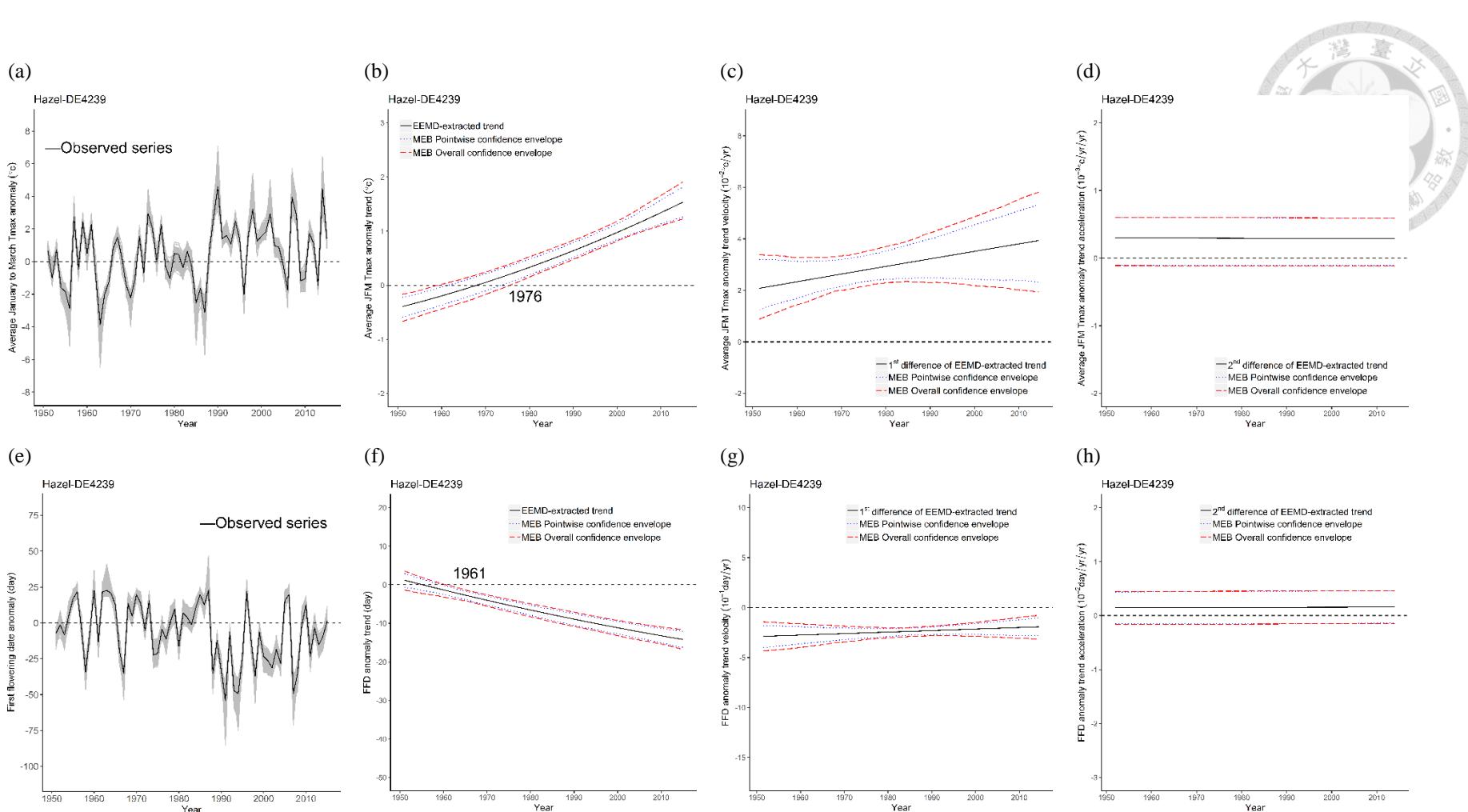


圖 20、榛子測站 DE4239 的 JFM Tmax 和 FFD 兩距平序列的趨勢分析

圖說如圖 13。

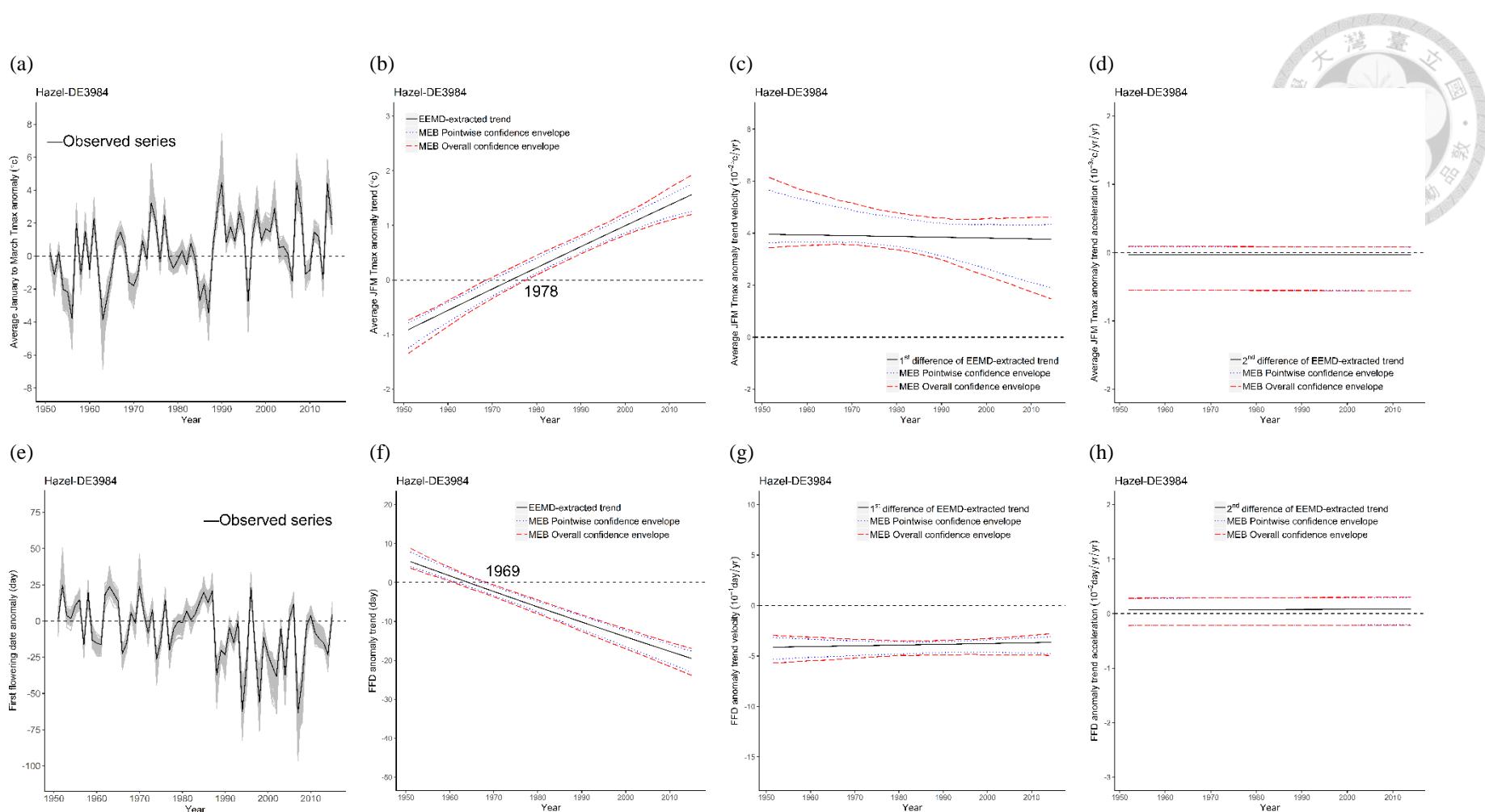


圖 21、榛子測站 DE3984 的 JFM Tmax 和 FFD 兩距平序列的趨勢分析

圖說如圖 13。

4.1.3 類別三：FFD 距平序列的趨勢之估計等加速度顯著大於零

此類別僅有測站 DE3824(圖 22)，此測站的海拔是所有測站中最高的。此測站的 JFM Tmax 距平序列的趨勢逐年遞增，並在 1980 至 1981 年後顯著上升。除此之外，此趨勢的曲線凹口向下，其他測站的 JFM Tmax 距平序列的趨勢若非凹口向上，則近為直線。連帶地，在測站 DE3824，此趨勢的估計速度往溫度遞減的方向演變，且其估計的等加速度為 $-0.0007\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{年}/\text{年}$ ，95% 的信賴區間為 $(-0.0010, -0.0002)$ 。此測站的 FFD 距平序列的趨勢在 1975 至 1976 年後顯著提前，是所有測站的 FFD 距平序列的趨勢最慢顯著提前的。除此之外，在測站 DE3824，此 FFD 距平序列的趨勢為凹口向上的曲線，此趨勢在其他測站若非凹口向下，則近為直線。因此，在測站 DE3824，其 FFD 距平序列趨勢的估計速度往始花延後的方向演變，並在 2008 年後和零無顯著區別，但是在分析的時間內並未顯著大於零。此趨勢的估計等加速度為 $0.0107\text{ 天}/\text{年}/\text{年}$ ，95% 的信賴區間為 $(0.091, 0.0156)$ 。測站 DE3824 的 FFD 和 JFM Tmax 兩距平序列的趨勢之呼應情形較其他測站特別，依照兩趨勢的估計等加速度，FFD 距平序列的趨勢在未來可能不會提前，而 JFM Tmax 距平序列的趨勢則可能不會上升。

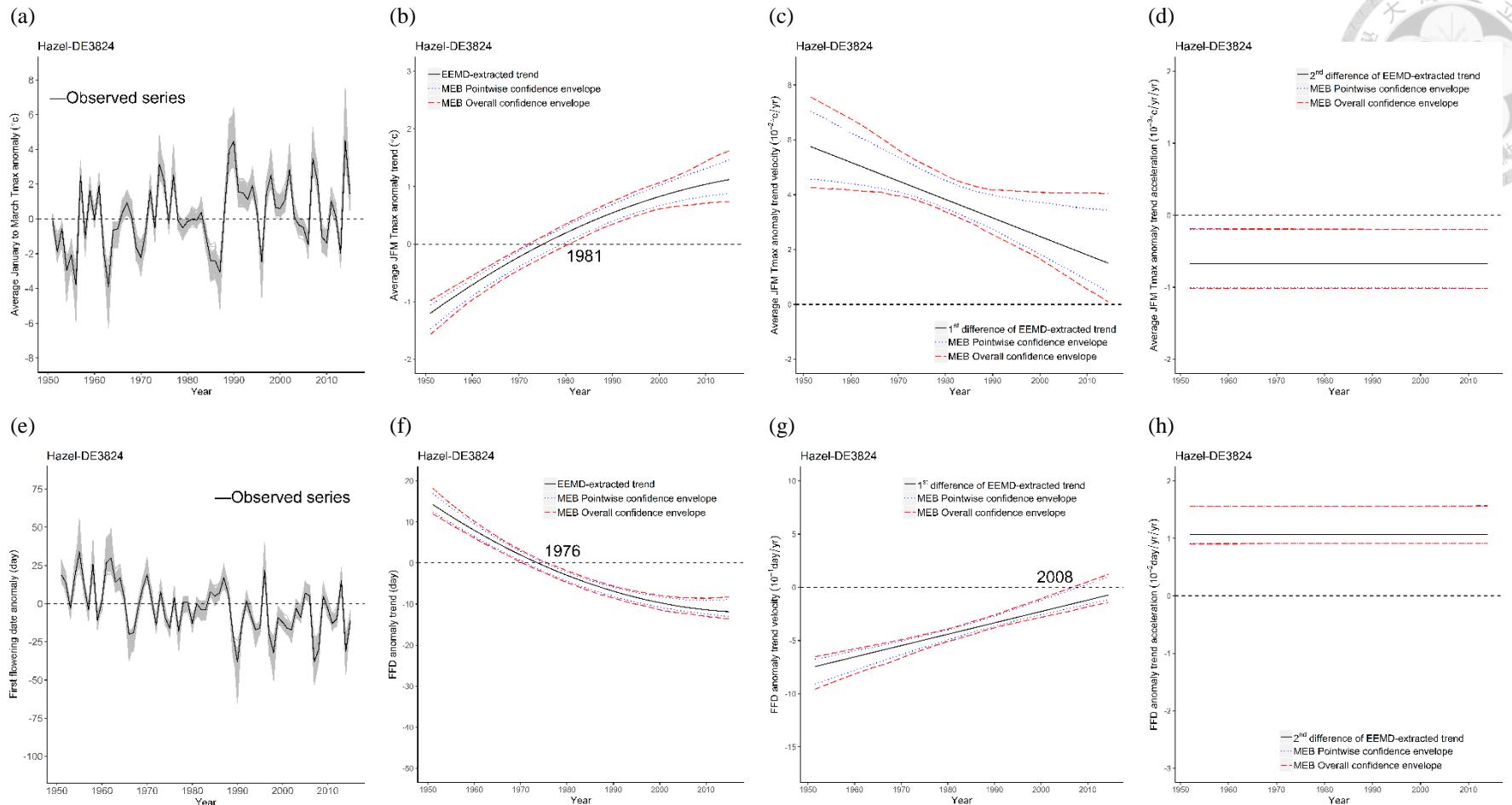


圖 22、榛子測站 DE3824 的 JFM Tmax 和 FFD 兩距平序列的趨勢分析

圖說如圖 13。在此測站中，JFM Tmax 距平序列的趨勢之估計等加速度是負的，而 FFD 距平序列的趨勢之估計等加速度是正的。

全測站的 JFM Tmax 與 FFD 距平序列的趨勢代表此區域的分析結果(圖 23)。

此區域的 JFM Tmax 距平序列的趨勢逐年上升，並在大約 1977 至 1978 年後顯著升高，其估計速度往上升的方向演變，並在分析的時間內均顯著大於零，而其估計等加速度為 $0.0004\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{年}/\text{年}$ ，95% 的逐點和全體信賴區間分別為 $(0.0003, 0.0010)$ 與 $(0.0001, 0.0012)$ 。此區域的 FFD 距平序列的趨勢逐年提前，並在大約 1964 至 1965 年後顯著提前，FFD 距平序列的趨勢領先 JFM Tmax 距平序列的趨勢 13 年。此區域的 FFD 距平序列的趨勢之估計速度往始花提前的方向演變，並在 1959 年後顯著小於零，其估計等加速度為 $-0.0077\text{ 天}/\text{年}/\text{年}$ ，95% 的逐點和全體信賴區間分別為 $(-0.0098, -0.0048)$ 與 $(-0.0114, -0.0010)$ 。

大部分的測站的 JFM Tmax 與 FFD 兩距平序列的趨勢、趨勢的估計速度與等加速度相呼應。類別一的測站 DE4495 與 DE3744 的 FFD 與 JFM Tmax 兩距平序列的趨勢之呼應僅在後期較明顯。另外，測站 DE3824 兩趨勢與其估計的速度和等加速度具有和其他測站不同的呼應關係。各測站與全測站的 FFD 和 JFM Tmax 兩距平序列的趨勢顯著改變的時刻，與估計的逐年平均的速度或等加速度摘要於表 10。

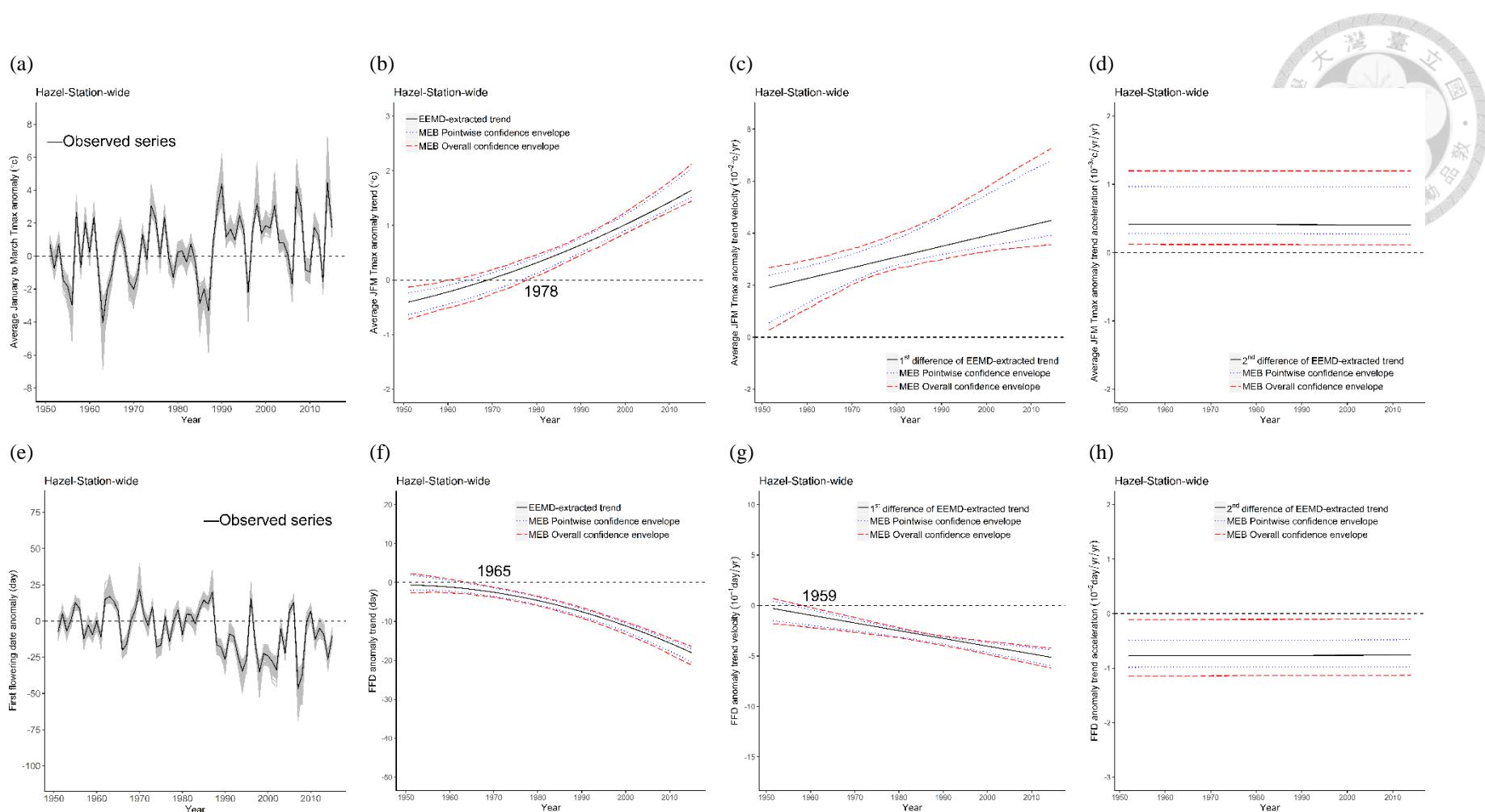


圖 23、榛子全測站的 JFM Tmax 和 FFD 兩距平序列的趨勢分析

圖說如圖 13。此為區域性趨勢分析結果。



表 10、榛子各測站與全測站的 FFD 和 JFM Tmax 距平序列的趨勢分析摘要

此表摘要各測站與全測站的 FFD 和 JFM Tmax 距平序列的趨勢顯著改變的年份與兩趨勢顯著改變年份的時間差，負號代表 JFMTmax 距平序列的趨勢延遲。在趨勢的估計速度部分，摘要其顯著大於零或小於零的時間，而趨勢的估計等加速度部分，則記錄其原始資料之趨勢的估計值和其逐點與全體信賴區間(上行與下行分別為逐點與全體信賴區間)。另外，當趨勢的估計等加速度不顯著亦於零時，則記錄其逐年平均的趨勢估計速度與逐年平均的逐點與全體信賴區間。部分估計值的逐點與全體信賴區間可視為相等，因此其估計值僅記錄一個信賴區間。當趨勢或趨勢的估計速度在分析時期內皆顯著大於或小於零時，則無顯著改變的年份，以「*」註記。粗體表示估計值顯著亦於零。

		趨勢			趨勢的估計速度			趨勢的估計加速度	
		JFM Tmax	FFD	時間差 (年)	JFM Tmax	FFD	JFM Tmax (°C/年/年)	FFD (天/年/年)	
類別一	DE2294	1977	1972	-5	1955	1976	0.0006 (0.0003, 0.0010) (0.0002, 0.0010)	-0.0144 (-0.0199, -0.0105) (-0.0227, -0.0076)	
	DE3866	1981	*	*	1954	1973	0.0007 (0.0004, 0.0012) (0, 0.0014)	-0.0024 (-0.0047, -0.0007)	
	DE4054	1976	*	*	1955	1966	0.0006 (0.0004, 0.0011) (0.0001, 0.0013)	-0.0240 (-0.0291, -0.0217) (-0.0291, -0.0216)	
	DE4495	1977	*	*	*	1978	0.0005 (0.0003, 0.0010)	-0.0187 (-0.0243, -0.0151)	
類別二	DE3744	1980	*	*	*	1987	0.0004 (0.0002, 0.0010)	-0.0177 (-0.0251, -0.0155)	
	DE4420	1976	1974	-2	1964	-0.47 (-0.59, -0.39) (-0.62, -0.37)	0.0009 (0.0007, 0.0015)	0.0033 (0, 0.0076) (-0.0001, 0.0077)	
	DE4256	1977	1963	-14	1958	-0.17 (-0.21, -0.11) (-0.23, -0.089)	0.0006 (0.0003, 0.0011)	0.0009 (-0.0019, 0.0028)	

	趨勢			趨勢的估計速度			趨勢的估計加速度	
	JFM Tmax	FFD	時間差 (年)	JFM Tmax	FFD	JFM Tmax (°C/年/年)	FFD (天/年/年)	
DE4239	1976	1961	-15	0.03 (0.020, 0.039) (0.020, 0.041)	-0.24 (-0.30, -0.18) (-0.33, -0.16)	0.0003 (-0.0001, 0.0006)	0.0015 (-0.0015, 0.0045) (-0.0016, 0.0045)	
DE3984	1978	1969	-9	0.039 (0.031, 0.047) (0.030, 0.050)	-0.39 (-0.48, -0.34) (-0.51, -0.32)	0 (-0.0006, 0.0001)	0.0007 (-0.0021, 0.0029) (-0.0022, 0.0029)	
類別三	DE3824	1981	1976	-5	*	2008 (-0.0010, -0.0002)	-0.0007 (0.0091, 0.0156)	
全測站		1978	1965	-13	*	1959 (0.0003, 0.0010) (0.0001, 0.0012)	0.0004 (-0.0098, -0.0048)	
							-0.0077 (-0.0114, -0.0010)	



4.4.2 棍子 FFD 的三十年移動平均

類別一中的測站 DE3866、DE4054、DE4495 與 DE3744 的 FFD 距平序列的趨勢在分析時間皆顯著提前，是以懷疑它們的基底年序日和其他時段相比為最晚。本研究依據 FFD 的 30 年移動平均圖，確認此一假說。圖 24 顯示，和其他時間點的 30 年平均相比，前三個測站的確以 1961 至 1990 的 30 年平均為大，這個情形在測站 DE3744 較不明顯。除了上述 4 個測站，其他測站的 FFD 距平序列的趨勢在分析時間內不全小於零，這些測站最大的 30 年平均大約發生在 1950 年代初(類別二的測站 DE4420 與類別三的測站 DE3824)與 1950 年代末(類別一的測站 DE2294、類別二的 DE4256、DE4239 和 DE3984)。另外，全測站的最大 30 年平均發生在 1950 年代末(圖 25)。

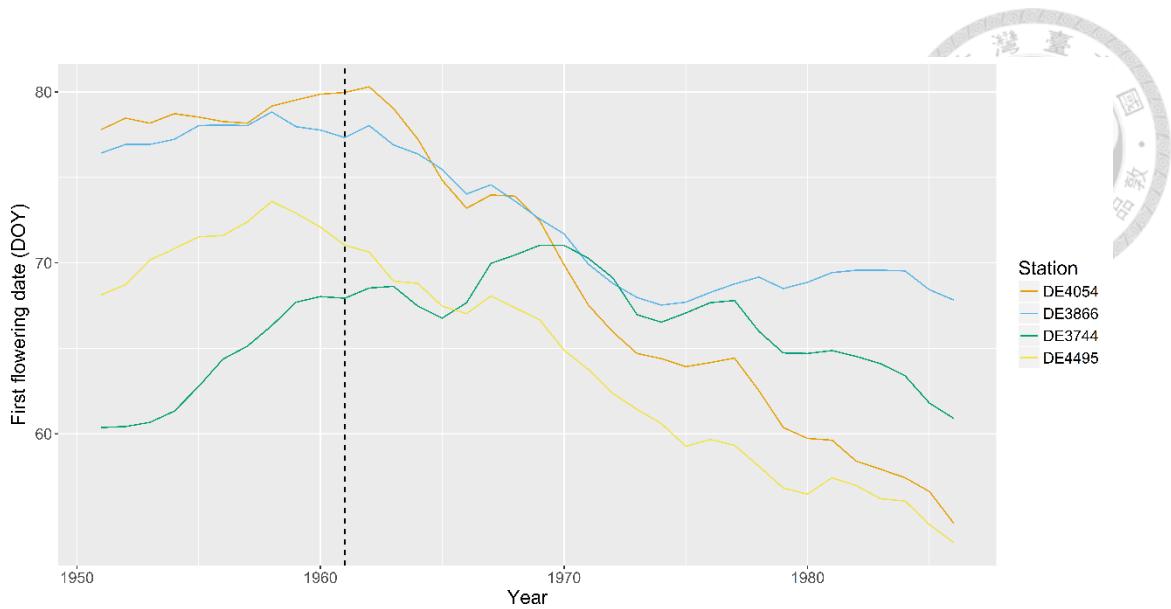


圖 24、榛子 FFD 的 30 年移動平均(FFD 距平序列的趨勢於分析時間內均顯著低於零的測站)
 橫軸為年，縱軸為 FFD(DOY)。垂直虛線與各測站 30 年移動平均相交的點為該測站 1961 至 1990
 的平均 FFD(即該測站的基底年序日)。

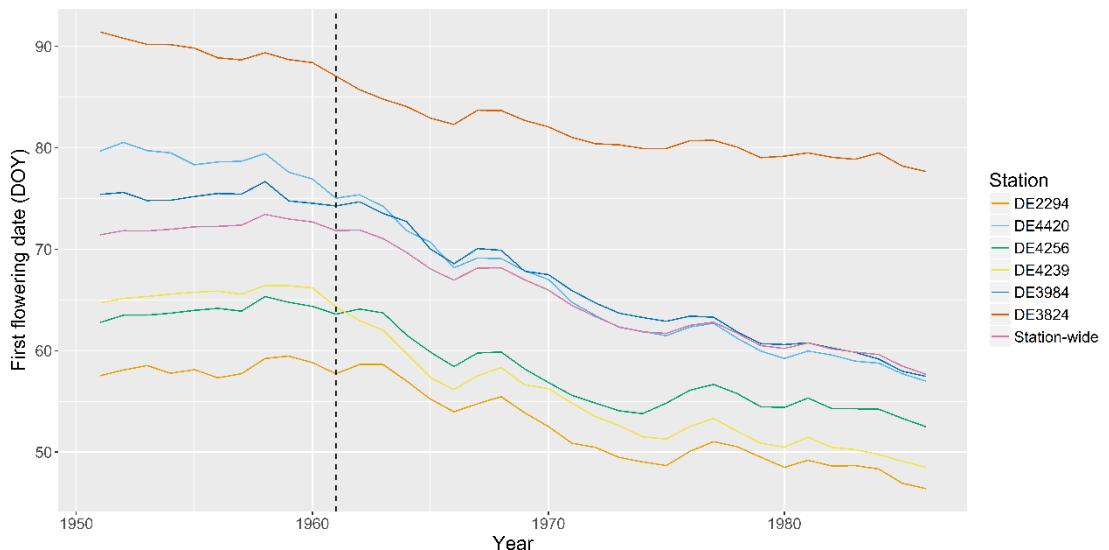


圖 25、榛子 FFD 的 30 年移動平均(FFD 距平序列的趨勢於分析時間內不均顯著低於零的測站)
 橫軸為年，縱軸為 FFD(DOY)。垂直虛線與各測站 30 年移動平均相交的點為該測站 1961 至 1990
 的平均 FFD(即該測站的基底年序日)。



4.4.3 帚石楠

根據 FFD 距平序列的趨勢，帚石楠的測站可分為三種類別：類別一，FFD 距平序列的估計等加速度為負。類別二，FFD 距平序列的估計等加速度為正，以及類別三，FFD 距平序列不具趨勢。除此之外，全測站的趨勢分析結果不分類，其 FFD 距平序列不具趨勢。

4.4.3.2 類別一：FFD 距平序列的趨勢之估計等加速度為負

此類別有兩個測站：測站 DE2853 與 DE3744。測站 DE2853 的 FFD 距平序列在 1953 年時較基底年序日提早了 37 天始花（圖 26 e），在分析的其他時間點，FFD 距平序列的變動則維持在一個月內。該趨勢在 1950 年代初的信賴區間因而較分析的其他時期寬（圖 26 f）。此趨勢為逐年提前，並大約在 1980 至 1981 年後顯著提前，其估計速度往始花提前的方向演變，並在 1978 年後顯著小於零，其估計的等加速度為 -0.0143 天/年/年，95% 的逐點與全體信賴區間分別為 $(-0.0203, -0.0059)$ 與 $(-0.0233, -0.0032)$ 。

測站 DE3744（圖 27 h）的 FFD 距平序列的趨勢是具有單一極大值的曲線，且此趨勢同時具有提前與延後的始花時期。大約在 1983 至 2012 年間，FFD 距平序列的趨勢顯著延後，在此時期之前與之後，此趨勢則為提前。在分析的時期內，此趨勢最多延後始花 1.67 天（發生於 1993 年），其 95% 的逐點與全體信賴區間分別為 $(1.25, 2.45)$ 和 $(1.02, 2.76)$ 。此趨勢的估計速度往始花提前的方向演變，並在 1997 年後顯著小於零，其估計的等加速度為 -0.0180 天/年/年，95% 的逐點和全體信賴區間分別為 $(-0.0212, -0.0167)$ 與 $(-0.0238, -0.0149)$ 。

測站 DE2853 與 DE3744 的 AMJ Tmean 距平序列的趨勢皆為上升，並分別在 1971 與 1978 年後顯著上升，其估計速度皆往溫度升高的方向演變，並分別在 1966 與 1968 年後顯著大於零，而其估計的等加速度分別為 0.0012 和 0.0010 $^{\circ}\text{C}/\text{年}/\text{年}$ ，它們的 95% 的信賴區間分別為 $(0.0010, 0.0015)$ 與 $(0.0010, 0.0013)$ 。

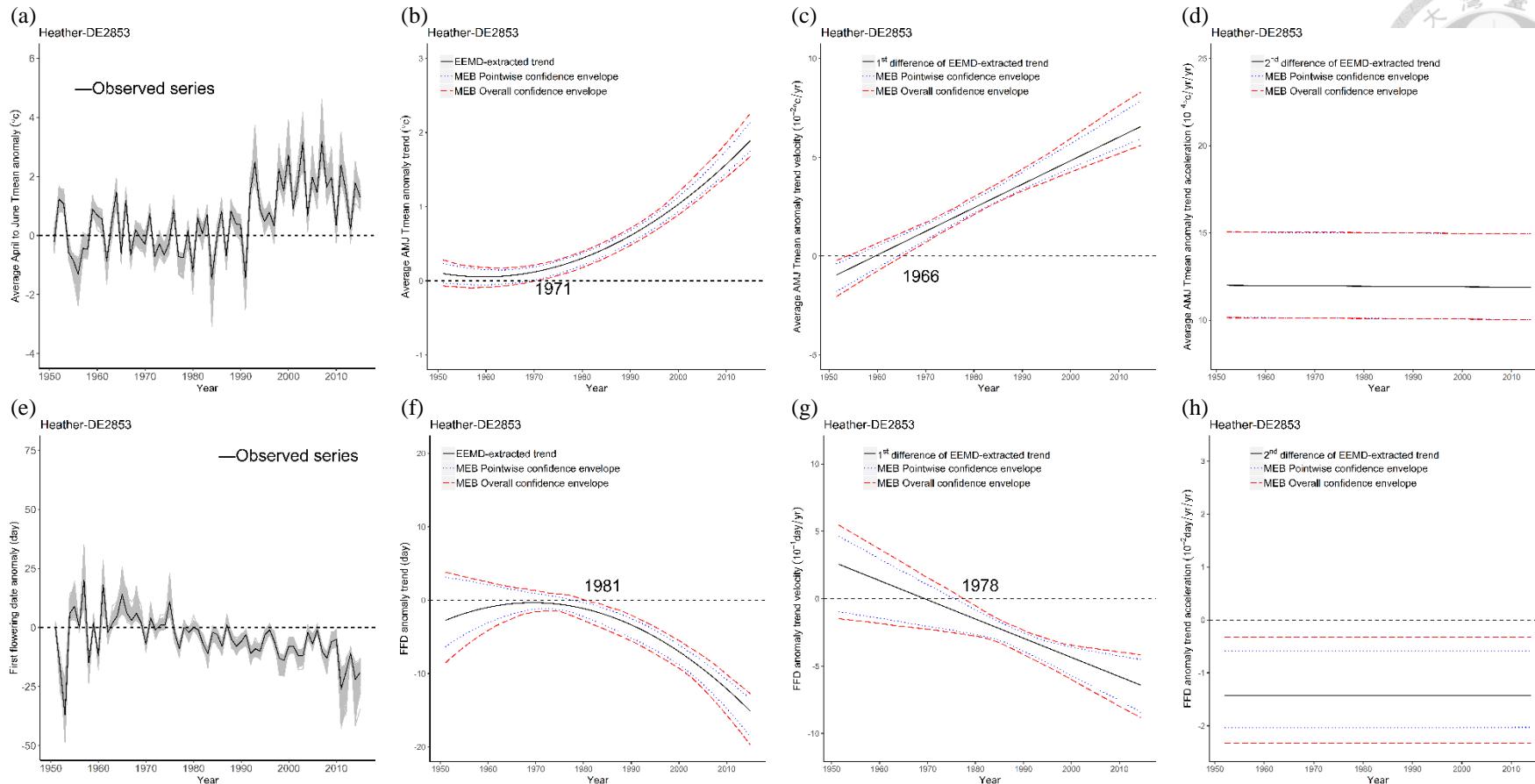


圖 26、希石楠測站 DE2853 的 AMJ Tmean 和 FFD 兩距平序列的趨勢分析

上行與下行分別描述 AMJ Tmean 與希石楠 FFD 距平序列。(a)與(e)為原始資料的距平序列(黑色實線)與 MEB 產生的 999 筆重複取樣(疊加的灰色部分)。(b)與(f)為 EEMD 自原始資料萃取出的趨勢(黑色實線)，與根據 MEB 重複取樣所建立趨勢的 95% 的逐點(圓點藍色虛線)和全體(長條紅色虛線)的信賴區間。(c)與(g)估計趨勢的速度與信賴區間。(d)與(h)估計趨勢的等加速度與信賴區間。小圖中的年份代表該曲線或直線顯著異於零的時刻，黑色水平虛線表縱軸數值為零。此測站的 FFD 距平序列在初期有明顯的提前，由 MEB 方法所建立的信賴區間在趨勢與趨勢的估計速度的初期較其他時期寬。

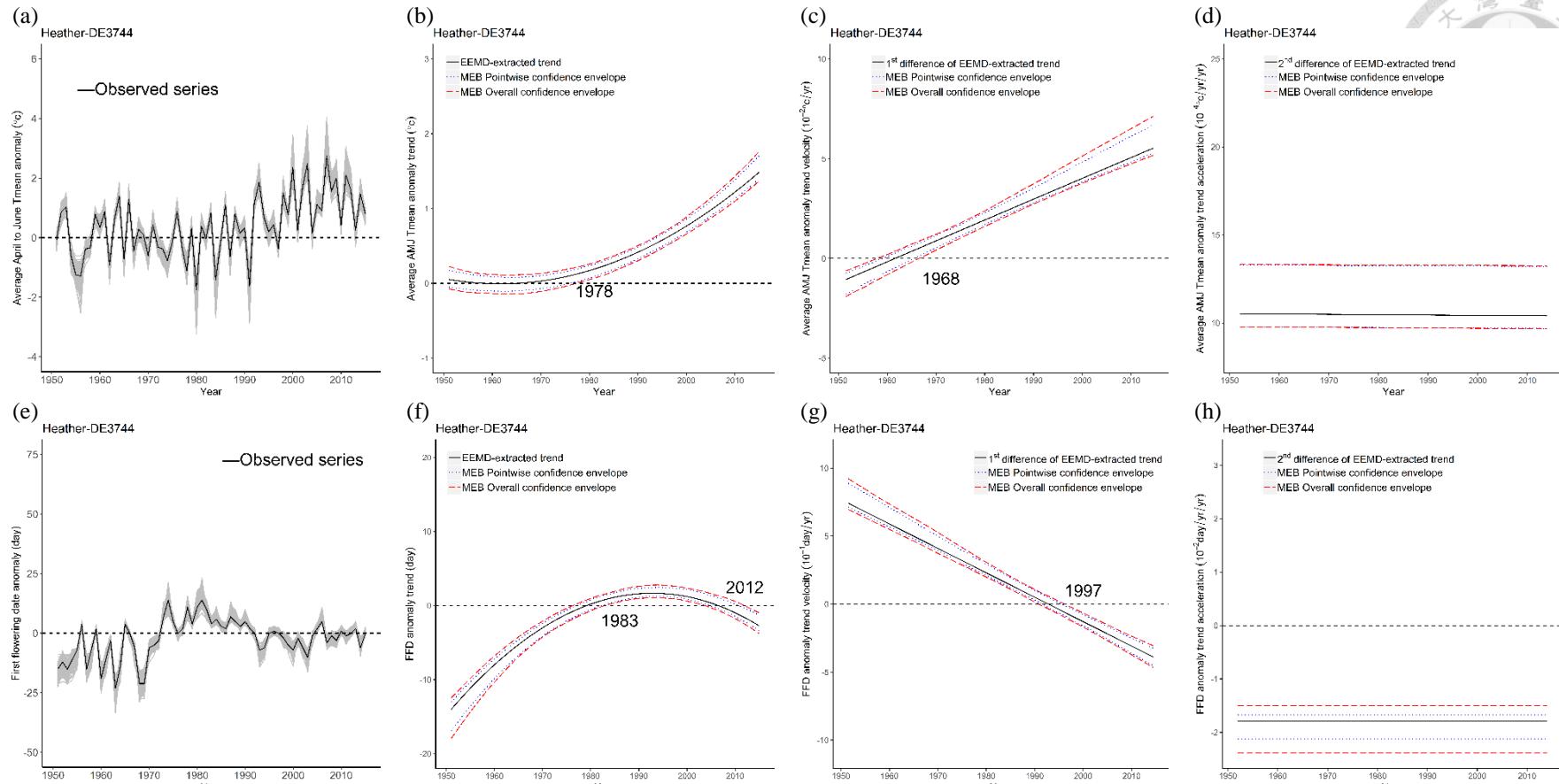


圖 27、希石楠測站 DE3744 的 AMJ Tmean 和 FFD 兩距平序列的趨勢分析
圖說如圖 26。



4.4.3.3 類別二：FFD 距平序列的趨勢之估計等加速度為正

此類別共兩個測站，測站 DE3876 與 DE4239。測站 DE3876 的 FFD 距平序列(圖 28 e)在 1950 年代有 4 次大幅延後始花(發生於 1951、1954、1957 與 1958 年，分別延後 22、29、33 與 57 天)，其他時期距平序列的變動大多維持在 20 天內，因此，此測站 FFD 距平序列在早期的變動相對較其他時期大。此距平序列具延後的趨勢，且為具單一極小值的曲線，其發生時間為 1983 年，此時始花延後了 1.81 天，其 95% 的逐點與全體信賴區間分別為(0.78, 2.77)與(0.43, 3.32)。此趨勢的估計速度往延後始花的方向演變，並在 1987 年後顯著大於零，其估計的等加速度為 0.0241 天/年/年，其 95% 的逐點與全體信賴區間分別為(0.0183, 0.0310)與(0.0182, 0.0311)。

測站 DE4239 的 FFD 距平序列的趨勢(圖 29 f)在分析的初期與末期顯著延後(大約在 1959 至 1960 年以前，和大約 1991 至 1992 年以後)。在分析時間的中期，此趨勢和零無顯著區別。其估計速度往延後始花的方向演變，並在 1983 年後顯著大於零，其估計的等加速度為 0.0091 天/年/年，95% 的逐點與全體信賴區間分別為(0.0047, 0.0138)和(0.0028, 0.0182)。

測站 DE3876 的 AMJ Tmean 距平序列的趨勢逐年增加，此趨勢大約於 1974 至 1975 年後顯著升高。測站 DE4239 的 AMJ Tmean 距平序列的趨勢在分析時期皆顯著大於零，是具單一極小值的曲線，此極小值發生在 1969 年，為 0.24 °C，其 95% 的逐點與全體信賴區間分別為(0.12, 0.32)與(0.090, 0.35)。測站 DE3876 與 DE4239 的 AMJ Tmean 距平序列的趨勢之估計速度皆往溫度升高的方向演變，並分別在 1967 與 1973 年後顯著大於零。前者的估計等加速度為 0.0012 °C/年/年，其 95% 的信賴區間為(0.0011, 0.0015)；後者的則為 0.0017 °C/年/年，其 95% 的逐點與全體信賴區間分別為(0.0016, 0.0021)與(0.0015, 0.0024)。

類別一與類別二的 AMJ Tmean 與 FFD 距平序列的趨勢分析結果顯示，儘管暖化確實在發生，帚石楠的 FFD 距平序列之變化可能和暖化不相關，因為其 FFD 距平序列的趨勢可能提前，或可能延後。不僅如此，類別一中的 FFD 距平序列雖具提前的趨勢，但其在兩測站的趨勢曲線之變化不同，這表示暖化與提前的 FFD 趨勢之關係並不是這麼明確。

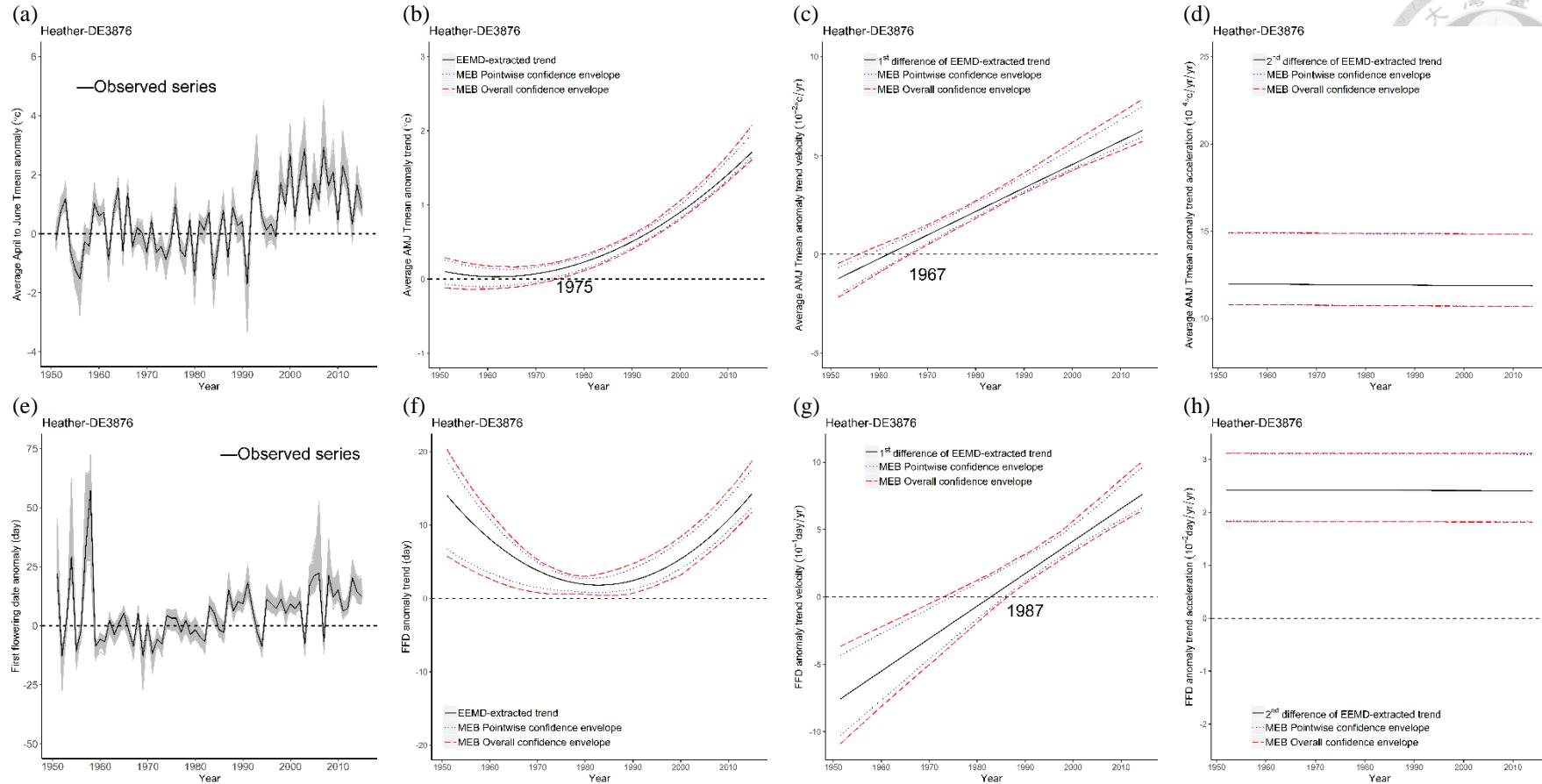


圖 28、希石楠測站 DE3876 的 AMJ Tmean 和 FFD 兩距平序列的趨勢分析

圖說如圖 26。此測站的 FFD 距平序列在分析初期的變動較其他時期大，其趨勢與趨勢的估計速度之信賴區間在初期較其他時期寬。

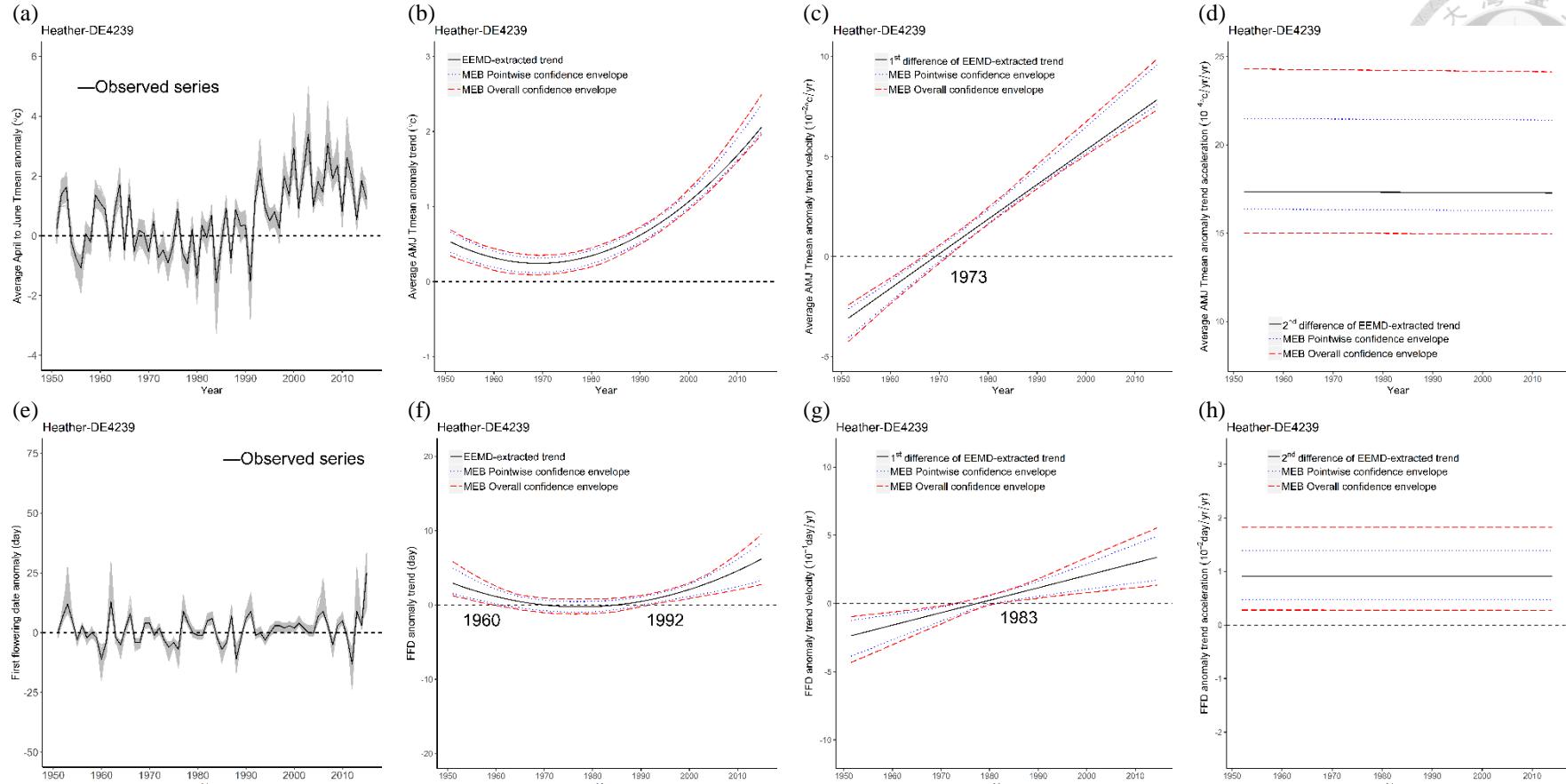


圖 29、希石楠測站 DE4239 的 AMJ Tmean 和 FFD 兩距平序列的趨勢分析
圖說如圖 26。



4.4.3.1 類別三：FFD 距平序列不具趨勢

此類別僅有測站 DE2075。FFD 距平序列經由 EEMD 分解後，其餘數僅在 1961 至 1973 年間顯著大於零(圖 30 f)，由於此時期短，且其信賴區間之下界貼近零，此距平序列可視為不具趨勢。進一步估計此 FFD 距平序列的餘數之速度和加速度，亦皆顯示兩估計值和零無顯著區別(圖 30 g 與 h)。AMJ Tmean 距平序列的趨勢逐年上升，並大約在 1975 至 1976 年間顯著升高。此趨勢的估計速度往上升的方向演變，並在 1971 年後顯著大於零，此趨勢的估計等加速度為 $0.0011\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{年}/\text{年}$ ，95% 的信賴區間為 $(0.0010, 0.0015)$ 。此測站的 FFD 距平序列不具趨勢，突顯了希石楠 FFD 距平序列可能和暖化無關的想法。

全測站的 FFD 距平序列不具趨勢(圖 31)，此 FFD 距平序列的餘數之估計速度往始花提前的方向演變，且在 1990 年後與零無顯著區別，儘管如此，在此之前，此趨勢的估計速度之信賴區間接近零，我們視此估計速度與零無顯著區別。此餘數的估計等加速度為 $-0.0021\text{ 天}/\text{年}/\text{年}$ ，95% 的逐點與全體信賴區間分別為 $(-0.0033, -0.0008)$ 與 $(-0.0041, 0.0003)$ ，全體信賴區間顯示此趨勢之估計等加速度和零無顯著區別。全測站的 AMJ Tmean 距平序列具上升的趨勢，並大約在 1971 至 1972 年後顯著上升，其估計速度往溫度升高的方向演變，並大約在 1972 年後顯著大於零，而其估計的等加速度為 $0.0012\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{年}/\text{年}$ ，95% 的信賴區間為 $(0.0011, 0.0015)$ 。各測站與全測站的趨勢與趨勢之估計速度和加速度摘要於表 11。

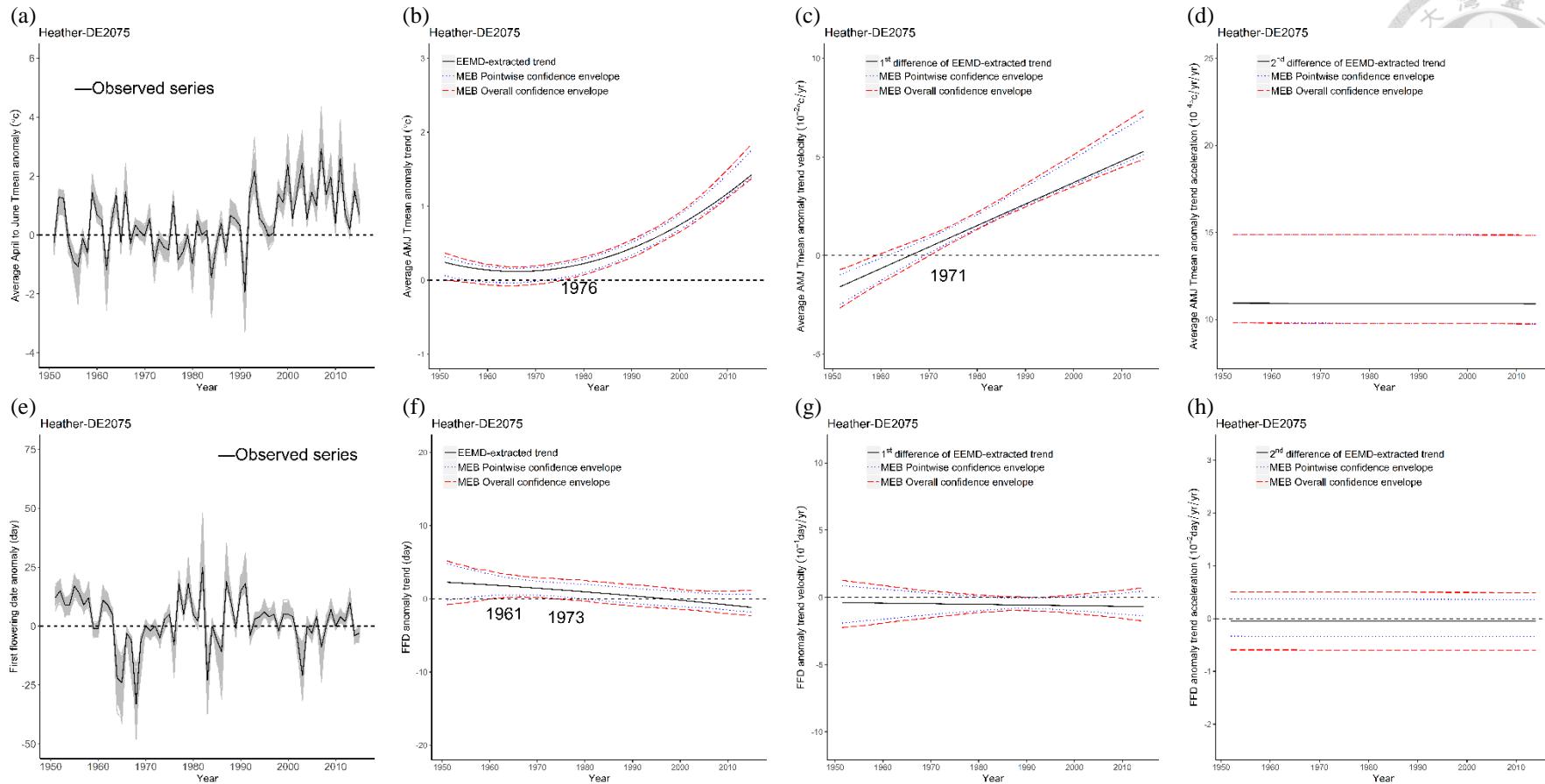


圖 30、希石楠測站 DE2075 的 AMJ Tmean 和 FFD 兩距平序列的趨勢分析

圖說如圖 26。此測站的 FFD 距平序列的趨勢在 1961 至 1973 年間顯著大於零，但是此時該趨勢的信賴區間的下界和零相距甚微。

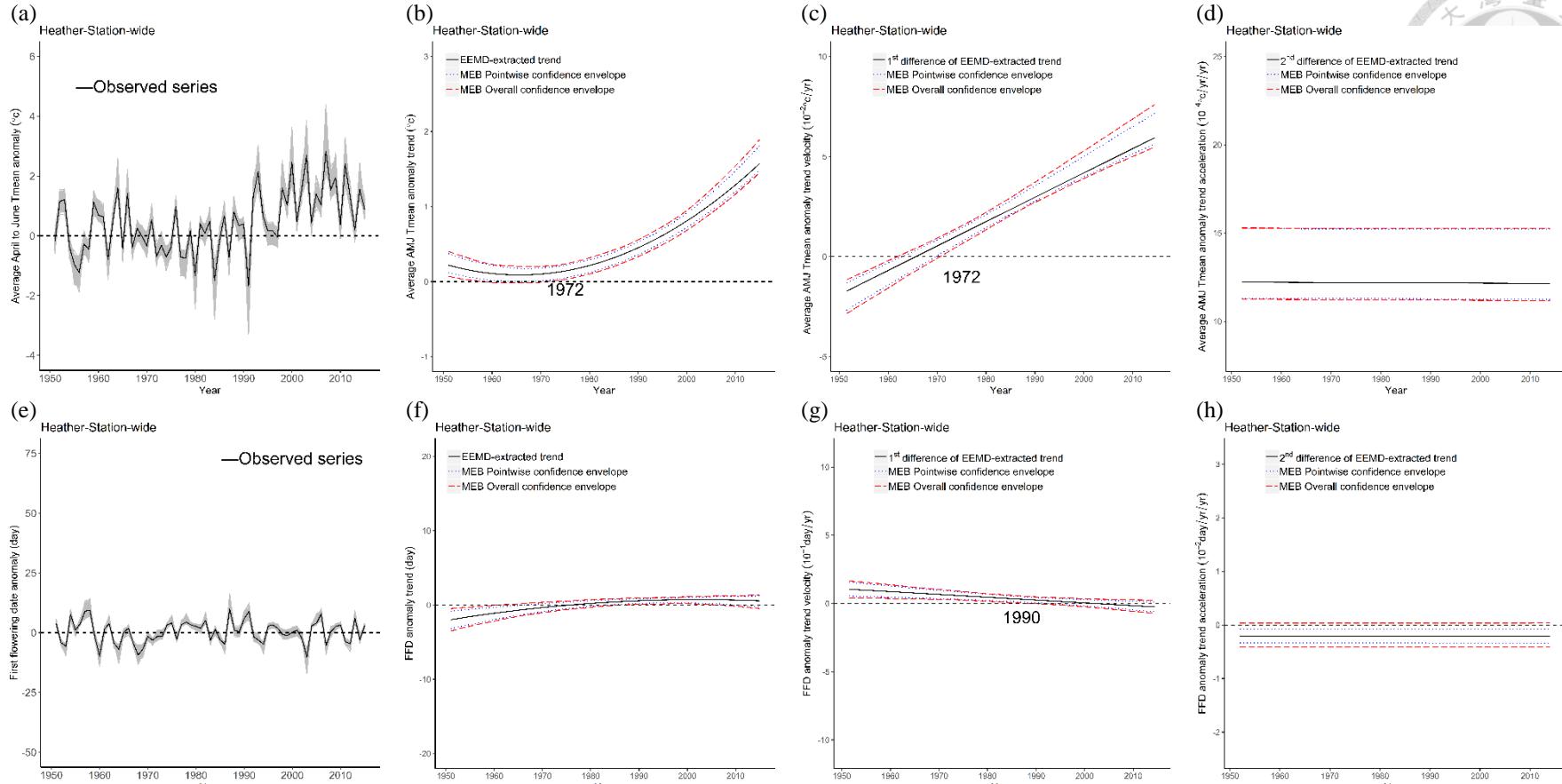


圖 31、希石楠全測站的 AMJ Tmean 和 FFD 兩距平序列的趨勢分析
圖說如圖 26。



表 11、帚石楠各測站與全測站的 FFD 和 AMJ Tmean 距平序列的趨勢分析摘要

此表摘要各測站與全測站的 FFD 和 AMJ Tmean 距平序列的趨勢顯著改變的年份，測站 DE3744、DE4239 與 DE2075 的 FFD 距平序列的趨勢皆有兩個顯著改變的時刻。在趨勢的估計速度部分，摘要其顯著大於零或小於零的時間，而趨勢的估計等加速度部分，則記錄其原始資料之趨勢的估計值和其逐點與全體信賴區間(分別為上行與下行)。部分估計值的逐點與全體信賴區間可視為相等，因此其估計值僅記錄一個信賴區間。當趨勢或趨勢的估計速度在分析時期內皆顯著大於或小於零時，則無顯著改變的年份，以「*」註記。粗體表示估計值顯著亦於零。

	趨勢		趨勢的估計速度		趨勢的估計加速度	
	AMJ Tmean	FFD	AMJ Tmean	FFD	AMJ Tmean (°C/年/年)	FFD (天/年/年)
類別一	DE2853	1971	1981	1966	1978	0.0012 (0.0010, 0.0015)
	DE3744	1978	1983/2012	1968	1997	0.0010 (0.0010, 0.0013)
類別二	DE3876	1975	*	1967	1987	0.0012 (0.0011, 0.0015)
	DE4239	*	1960/1992	1973	1983	0.0017 0.0091 (0.0016, 0.0021) (0.0015, 0.0024)
類別三	DE2075	1976	1961/1973	1971	*	0.0011 (0.0010, 0.0015)
全測站	1972	*	1972	1990	0.0012 (0.0011, 0.0015)	-0.0005 -0.0021 (-0.0034, 0.0037) (-0.0060, 0.0050) (-0.0033, -0.0008) (-0.0041, 0.0003)

註：類別一測站 DE3744 的 FFD 距平序列之趨勢在 1983 至 2012 間顯著大於零，其餘分析時段則顯著小於零，此測站的 AMJ Tmean 距平序列之估計等加速度和其 95% 的信賴區間下界的估計值相同(至小數點後四位數)。類別二的測站 DE4239 的 FFD 距平序列之趨勢在 1960 至 1992 年間與零無顯著區別，其他分析時段則顯著大於零。類別三的測站 DE2075 的 FFD 距平序列之趨勢在 1961 至 1973 年間顯著大於零，其他分析時段則與零無顯著區別。



5.1 物種受暖化的影響不一致

榛子的 FFD 距平序列的趨勢呼應 JFM Tmax 距平序列的趨勢，而且兩趨勢之估計速度與加速度也呼應。Romanovskaja et al. (2012)與 Crepinsek et al. (2012)分別分析立陶宛與斯諾維尼亞在二十世紀下半葉的榛子春季物候，他們均發現榛子的春季物候提前，且和春季物候前數月的溫度相關。Crepinsek et al. (2012)同時發現暖化不僅造成榛子春季物候提前，也使榛子雌雄蕊成熟的時間改變。這會影響榛子的果實產量與族群之間的基因流動，未來的研究需要觀察此現象是否亦在本研究的區域發生。

相比之下，帚石楠各測站與全測站的 AMJ Tmean 距平序列的趨勢均為逐年上升，但是其對應的 FFD 距平序列的趨勢並非均逐年提前，顯示兩趨勢並不呼應，暗示帚石楠的始花物候可能受溫度以外的因子控制或是帚石楠的始花物候對暖化的反應非亦步亦趨。根據前人的實驗結果，帚石楠的生長型(Grant & Hunter, 1962; Bannister, 1978)與降雨變異(Nagy et al., 2013)均可能影響其始花物候。

此結果顯示物種對暖化的反應不同，此差異可能和生長季早晚期的環境變化有關。Pau et al. (2011)認為，生長季早期的溫度影響植物的適應性(Fitness)甚鉅，因此生長季早期的物候相，如開花與結實，會反映溫度的變化。因為植物若無法察覺此時的溫度變化，在溫度不宜的時刻開花或結實，花朵或果實可能會遭受霜害(Frost)，將不利於族群的生存。生長季晚期，溫度的變化相對不影響植物的適應性，若環境的水分充足，植物的物候多仰賴穩定的環境訊號，如光週期，使植物社會能恰當的利用環境資源，減輕彼此的競爭。本研究並未分析測站的降雨情形與探討其他因子的影響，因此無法推論驅動帚石楠始花物候的因子，但是本研究的結果支持生長季早期的物候趨勢反映溫度趨勢的說法。

5.2 榛子的始花物候、始花物候前數月的溫度和 NAO_{GS} 指數的關係

JFM Tmax 距平序列反映 JFM NAO_{GS} 指數的變化，而榛子各測站的 FFD 距平序列也普遍反映 JFM NAO_{GS} 指數的變化。這和 Hájková et al. (2017) 分析捷克榛子 FFD 和 NAO 指數的結論相符。而榛子的 FFD 距平序列與 JFM Tmax 距平序列的相關性高於其與 JFM NAO_{GS} 指數的相關性，可能是因為 NAO_{GS} 指數同時還包含降水、風等其他環境因子的變化。Scheifinger et al. (2002) 的研究發現，NAO 指數對溫度與物候的影響隨海拔增高而遞減。海拔最高的測站 DE3824 的 JFM Tmax 和 FFD 兩距平序列與 JFM NAO_{GS} 的相關性並未較其他測站低，我們尚不瞭解可能原因為何。

5.3 榛子 FFD 距平序列的趨勢領先 JFM Tmax 距平序列的趨勢

FFD 距平序列的趨勢顯著提早的時間早於 JFM Tmax 距平序列的趨勢顯著升高的時間，這是較為意外的結果，以下提出兩個可能原因。原因一，我們的資料無法區別 JFM Tmax 中冷積與熱積驅動榛子 FFD 距平序列的程度。冷積是溫帶樹種能夠始花的必要機制 (Fadón & Rodrigo, 2018)。雖然大部分的研究顯示暖化會使春季物候提早，但是，Laube et al. (2014) 與 Flynn & Wolkovich (2018) 的實驗指出暖化對春季物候的影響要從冷積需求與熱量累積，兩個機制共同思考。假若冬天和春天均具升溫的趨勢，且升溫後的冬季溫度符合榛子冷積的溫度範圍，則榛子的冷積需求會加速達成，此情況會使熱積需求亦快速滿足，這將造成榛子的 FFD 具提早的趨勢。Cook et al. (2012) 和 Asse et al. (2018) 皆認為在分析觀測資料時，需考量冷積的效果，他們分別分析位於英國和法國阿爾卑斯山區的春季物候，Cook et al. (2012) 的分析結果為，榛子屬於對冷積和熱積皆不敏感的物種，另一方面，Asse et al. (2018) 則認為榛子的冷積需求極低，不受暖化的冬天影響，因為他們發現暖冬造成部分物種的爆芽 (BBCH 07) 和開花物候 (BBCH 61) 的冷積不足，使物候延後，但是榛子的開花物候卻持續提前。本研究建議，在榛子始花物候的變異大的情形下，觀測研究的結果若能結合實驗研究，將能更清楚的解釋現象。

原因二，JFM Tmax 與 FFD 兩距平序列的資料屬性不同，前者為一至三月的平均資料，且是月均最高溫，後者是一年一次的現象，屬於開花事件的機率分布的一尾，且可能是對個體的觀察，而非單一林分的表現。因此，JFM Tmax 距平序

列較不易改變，而 FFD 距平序列的變化較大。從榛子的 FFD 與 JFM Tmax 兩距平序列的趨勢分析結果中，我們亦看到榛子的 FFD 距平序列的趨勢與趨勢的估計速度和加速度，其縱座標的尺度均較相對應的 JFM Tmax 距平序列的趨勢與趨勢的估計速度和加速度大 10 倍左右，顯示 FFD 距平序列是變化較大的資料。

物候研究常分析生物生命事件的首次發生時刻，但是其趨勢不一定代表該生命事件的趨勢，換句話說，分析首次生命事件的發生日期僅能讓我們看到暖化對該事件的片面影響。Miller-Rushing et al. (2008)認為 FFD 的變化可能受取樣努力量 (Sampling effort)和族群數量影響，因此造成 FFD 趨勢顯著提前的因素可能不只溫度。Dai et al. (2018)分析中國亞熱帶的開花物候，他們的結果顯示不同物種的 FFD、最末開花日期與開花天數三變數中，FFD 顯著提前的比例最高，次之為最末開花日期，開花天數在不同物種中顯著改變的比例最低。類似的現象亦出現在候鳥遷徙的物候研究上，Miles et al. (2017)發現，在候鳥抵達日期的物候事件中，第 25% 和第 75% 分位數的候鳥抵達日期不具趨勢，但是候鳥首次抵達與最末抵達的日期具趨勢。綜合他們的研究與本研究的結果，我們建議，若能記錄與分析 BBCH 60 至 BBCH 69 間的開花物候，將有助氣候變遷下的物候研究。

5.4 海拔對物候的影響

榛子的物候測站中，測站 DE3824 的海拔最高，該測站的 FFD 距平序列的趨勢在未來提前的程度可能會趨緩，此現象與可能趨緩的暖化趨勢相呼應。此測站的 FFD 本較其他測站晚(圖 9)，若其他測站的 FFD 距平序列的趨勢均朝提前始花的方向演變，則測站 DE3824 與其他測站的 FFD 差距將拉大。這可能代表不同海拔梯度暖化的趨勢不同，使得物候差異增加。但是，Vitasse et al. (2018)則發現 1960 到 2016 年間，位於歐洲阿爾卑斯山主要溫帶樹種的始葉日期(Leaf-out date)在高海拔與低海拔的差距有減少的趨勢，尤其是榛子。他們發現此減少的趨勢是由於高海拔物候提前的天數較低海拔多，並認為這可能是因為冬季的溫度升高，造成高海拔的冷積需求加速達成。不過他們討論的海拔差異較本研究大，在他們的研究中，高海拔是 808m 以上(平均 1306m)，低海拔是 522m 以下(平均 414m)，而且他們探討的物候相是始葉物候，其驅動機制可能和始花物候不同。此外，他們為了降低因觀測人員改變造成測站間物候的變異，有刪除部分測站的資料。上述的原

因都可能造成本研究的結果和他們的結果不同。然而，本研究僅有一個測站的海拔明顯較其他測站高，該測站與其他測站的趨勢分析結果之差異是否源於海拔，仍須進一步驗證。高低海拔的物候差距會影響族群的基因交流，也會影響相關動植物的播遷，對生態系的影響層面廣大，值得深入探討。

5.5 全測站的代表性

本研究顯示兩物種的始花趨勢皆有測站間的差異，尤其是帚石楠。Menzel et al. (2001)與 Ibanez et al. (2010)皆點出，相同物種對暖化的呼應情形會因測站而異，因為測站間的環境因子如土壤的酸鹼性與降水變化不同(Wielgolaski, 2001)，這些因子與生物因子的交互作用可使個體產生遺傳上的變異(Franks et al., 2006)。本研究認為當物候趨勢呼應暖化的趨勢時，全測站的趨勢適宜代表區域性的物候趨勢，如本研究的榛子。然而，當物候趨勢未呼應暖化的趨勢時，不宜以全測站的物候趨勢作為該物種於該區域的物候趨勢，因為各測站的物候趨勢很可能不同，如本研究的帚石楠。此看法與 De Keyzer et al. (2017)相近，他們認為增加或減少測站，可能都會影響區域性物候的分析結果。



1. 生長季早期始花的榛子，其 FFD 距平序列的趨勢呼應暖化，但是在生長季晚期始花的帚石楠，其 FFD 距平序列的趨勢不呼應暖化，顯示暖化對不同物種的始花物候有不同的影響。
2. 榛子的 FFD 距平序列和 JFM Tmax 距平序列與 JFM NAO_{GS} 分別呈負相關與正相關，顯示大尺度的氣候概況可反映在小尺度的溫度與物候上。
3. 榛子 FFD 與 JFM Tmax 兩距平序列的趨勢雖相呼應，但是榛子 FFD 距平序列的趨勢顯著提早的時間早於 JFM Tmax 距平序列的趨勢顯著升高的時間。這可能和物種特性、資料的性質與開花的機制有關。
4. 暖化若持續，除了位於最高海拔的測站 DE3824 的 FFD 可能會延後，其餘測站的 FFD 可能會持續提前。
5. EEMD 與 MEB 方法能分別得到物候與溫度資料的趨勢和信賴區間，適合分析非平穩與非線性的資料，而藉由差分估計趨勢的速度與加速度讓我們瞭解趨勢未來可能的演變方向，這些方法適宜分析物候資料。

參考文獻

王玉婷、田玉娟、李孟諭、陳萬濱與王相華，2014。年初氣溫變化對於福山植物園栽植樹種花期之影響。臺灣生物多樣性研究 16: 63-76。

王玉婷、林奐宇、陳建文與王相華，2015。由館藏標本探討溫度變化對臺灣熱帶及溫帶植物花期之影響。臺灣生物多樣性研究 17: 15-27。

王相華、劉家如、林則桐、陳萬賓、李孟諭與蘇聲欣，2011。福山試驗林樟科及殼斗科植物的開花結實物候。中華林學季刊 44: 349-362。

呂理昌，1990。玉山國家公園植物開花物候之研究。

竺可楨與宛敏渭，1963。物候學。北京。

洪暉程，2009。總體經驗模態分解法(EEMD)結合自回歸(AR)模型在旋轉機械之元件鬆脫故障診斷之應用。碩士，國立中央大學。

夏禹九，2012。太魯閣物候監測。

張乃航、黃吳清標、陳永修、傅昭憲、陳玄武與賴一民，2000。大葉楠香南杜英長尾栲三年的物候現象。臺灣林業科學 15: 497-506。

張仲德、王素芬與林登秋，2011。氣候變遷與不同尺度植物物候研究之回顧。地理學報 63: 1-33。

郭華仁與吳怡君，2008。一九四〇年在台北之雜草物候學調查(編譯)。雜草學會會刊 29: 153-165。

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，國立臺灣大學。

曾文柄，1973。物候觀測手冊。中央氣象局，台北。

葉小蓁，1998。時間序列分析與運用，台北。

潘振彰、邱清安、曾彥學、郭礎嘉與曾喜育，2017。雪山雪東線步道蟲媒花植物開花物候及其與溫度之關聯。林業研究季刊 39: 159-176。

謝東佑與邱祈榮，2013。植物物候在氣候變遷研究之回顧與展望。中華林學季刊 46: 391-410

Ahas, R., A. Aasa, A. Menzel, V. G. Fedotova and H. Scheifinger. 2002. Changes in European spring phenology. International Journal of Climatology 22: 1727-1738.

Asse, D., I. Chuine, Y. Vitasse, N. G. Yoccoz, N. Delpierre, V. Badeau, A. Delestrade and C. F. Randin. 2018. Warmer winters reduce the advance of tree spring phenology induced by warmer springs in the Alps. Agricultural and Forest Meteorology 252: 220-230.

Bannister, P. 1978. Flowering and shoot extension in heath plants of different geographical origin. Journal of Ecology 66: 117-131.

Canty, A. and B. Ripley. 2017. boot: Bootstrap R (S-Plus) functions, R package version

1.3-20.

Chambers, L. E., R. Altweig, C. Barbraud, et al. 2013. Phenological changes in the southern hemisphere. *PLoS One* 8: e75514.

Chen, X., X. Zhang, J. A. Church, C. S. Watson, M. A. King, D. Monselesan, B. Legresy and C. Harig. 2017. The increasing rate of global mean sea-level rise during 1993–2014. *Nature Climate Change* 7: 492-495.

Chmielewski, F. M. and T. Rotzer. 2001. Response of tree phenology to climate change across Europe. *Agricultural and Forest Meteorology* 108: 101-112.

Cleland, E. E., I. Chuine, A. Menzel, H. A. Mooney and M. D. Schwartz. 2007. Shifting plant phenology in response to global change. *Trends in Ecology & Evolution* 22: 357-365.

Cook, B. I., T. M. Smith and M. E. Mann. 2005. The North Atlantic Oscillation and regional phenology prediction over Europe. *Global Change Biology* 11: 919-926.

Cook, B. I., E. M. Wolkovich and C. Parmesan. 2012. Divergent responses to spring and winter warming drive community level flowering trends. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 109: 9000-9005.

Crepinsek, Z., F. Stampar, L. Kajfez-Bogataj and A. Solar. 2012. The response of *Corylus avellana* L. phenology to rising temperature in north-eastern Slovenia. *International Journal of Biometeorology* 56: 681-694.

Crimmins, M. A. and T. M. Crimmins. 2008. Monitoring plant phenology using digital repeat photography. *Environmental Management* 41: 949-958.

Dai, J., Y. Xu, H. Wang and Q. Ge. 2018. Changes of flowering phenology and their response to climate in subtropical zone in China from 1963 to 2012. *Phenology 2018 One planet, two hemispheres, many regions*. Melbourne, Australia, International Society of Biometeorology Phenology Commission.

Dai, J., H. Wang and Q. Ge. 2014. The spatial pattern of leaf phenology and its response to climate change in China. *International Journal of Biometeorology* 58: 521-528.

De Keyzer, C. W., N. E. Rafferty, D. W. Inouye and J. D. Thomson. 2017. Confounding effects of spatial variation on shifts in phenology. *Global Change Biology* 23: 1783-1791.

Delbart, N., G. Picard, T. Le Toans, L. Kergoat, S. Quegan, I. Woodward, D. Dye and V. Fedotova. 2008. Spring phenology in boreal Eurasia over a nearly century time scale. *Global Change Biology* 14: 603-614.

Donnelly, A., A. Caffarra and B. F. O'Neill. 2011. A review of climate-driven mismatches between interdependent phenophases in terrestrial and aquatic ecosystems. *International Journal of Biometeorology* 55: 805-817.

Dose, V. and A. Menzel. 2006. Bayesian correlation between temperature and blossom onset data. *Global Change Biology* 12: 1451-1459.

Fadón, E. and J. Rodrigo. 2018. Unveiling winter dormancy through empirical experiments. *Environmental and Experimental Botany* 152: 28-36.

Fitter, A. H. and R. S. R. Fitter. 2002. Rapid changes in flowering time in British plants. *Science* 296: 1689-1691.

Fitter, A. H., R. S. R. Fitter, I. T. B. Harris and M. H. Williamson. 1995. Relationships between first flowering date and temperature in the flora of a locality in central England. *Functional Ecology* 9: 55-60.

Flynn, D. F. B. and E. M. Wolkovich. 2018. Temperature and photoperiod drive spring phenology across all species in a temperate forest community. *New Phytologist* 219: 1353-1362.

Forrest, J. and A. J. Miller-Rushing. 2010. Toward a synthetic understanding of the role of phenology in ecology and evolution. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences* 365: 3101-3112.

Franks, S. J., S. Sim and A. E. Weis. 2006. Rapid evolution of flowering time by an annual plant in response to a climate fluctuation. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 104: 1278-1282.

Fu, Y. H., S. Piao, M. O. D. Beeck, N. Cong, H. Zhao, Y. Zhang, A. Menzel and I. A. Janssens. 2014. Recent spring phenology shifts in western central Europe based on multiscale observations. *Global Ecology and Biogeography* 23: 1255-1263.

Ge, Q., H. Wang, T. Rutishauser and J. Dai. 2015. Phenological response to climate change in China: a meta-analysis. *Global Change Biology* 21: 265-274.

Gordo, O. and J. J. Sanz. 2009. Long-term temporal changes of plant phenology in the Western Mediterranean. *Global Change Biology* 15: 1930-1948.

Grant, S. A. and R. F. Hunter. 1962. Ecotypic differentiation of *Calluna vulgaris*(L.) in relation to altitude. *New Phytologist* 61: 45-55.

Guan, B. T. 2014. Ensemble empirical mode decomposition for analyzing phenological responses to warming. *Agricultural and Forest Meteorology* 194: 1-7.

Guo, L., J. Dai, S. Ranjikar, H. Yu, J. Xu and E. Luedeling. 2013. Chilling and heat requirements for flowering in temperate fruit trees. *International Journal of Biometeorology* 58: 1195-1206.

Härdle, W., J. Horowitz and J.-P. Kreiss. 2003. Bootstrap methods for time series. *International Statistical Review* 71: 435-459.

Harrington, C. A., P. J. Gould and J. B. St.Clair. 2010. Modeling the effects of winter environment on dormancy release of Douglas-fir. *Forest Ecology and Management* 259: 798-808.

Heide, O. M. 1993. Daylength and thermal time responses of budburst during dormancy release in some northern deciduous trees. *Physiology Plantarum* 88: 531-540.

Helske, J. and P. Luukko. 2016. Rlibeemd: Ensemble empirical mode decomposition (EEMD) and its complete variant (CEEMDAN), R package version 1.3.7

Hájková, L., Z. Hubálek, V. Kožnarová, L. Bartošová and M. Možný. 2017. Flowering of allergenically important plant species in relation to the North Atlantic Oscillation system and thermal time in the Czech Republic. *Aerobiologia* 34: 157-169.

Hänninen, H. 1995. Effects of climatic change on trees from cool and temperate regions: an ecophysiological approach to modelling of bud burst phenology. *Canadian Journal of Botany* 73: 183-199.

Hopp, R. J. 1974. Plant phenology observation network. *Phenology and seasonality modeling*. H. Lieth. New York, Springer-Verlag: 25-43.

Huang, N. E. and Z. Wu. 2008. A review on Hilbert- Huang transform: Method and its applications to geophysical studies. *Reviews of Geophysics* 46: 1-23.

Huang, N. E., Z. Shen, S. R. Long, M. L. C. Wu, H. H. Shih, Q. N. Zheng, N. C. Yen, C. C. Tung and H. H. Liu. 1998. The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis. *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical Physical and Engineering Sciences* 454: 903-995.

Hubalek, Z. 2016. The North Atlantic Oscillation system and plant phenology. *International Journal of Biometeorology* 60: 749-756.

Hurrell, J. W. 1995. Decadal trends in the North Atlantic Oscillation regional temperatures and precipitation. *Science* 269: 676-679.

Ibanez, I., R. B. Primack, A. J. Miller-Rushing, E. Ellwood, H. Higuchi, S. D. Lee, H. Kobori and J. A. Silander. 2010. Forecasting phenology under global warming. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences* 365: 3247-3260.

James, G., D. Witten, T. Hastie and R. Tibshirani. 2013. An introduction to statistical learning with applications in R, Springer Science+Business Media New York.

Körner, C. and D. Basler. 2010. Phenology under global warming. *Science* 327: 1461-1462.

Kahle, D. and H. Wickham. 2013. ggmap: Spatial Visualization with ggplot2. *The R Journal* 5: 144-161.

Keller, F. and C. Körner. 2003. The role of photoperiodism in alpine plant development. *Arctic, Antarctic, and Alpine Research* 35: 361-368.

Laube, J., T. H. Sparks, N. Estrella, J. Hofler, D. P. Ankerst and A. Menzel. 2014. Chilling outweighs photoperiod in preventing precocious spring development. *Global Change Biology* 20: 170-182.

Lieth, H. 1974. Purposes of a phenology book. *Phenology and seasonality modeling*. H. Lieth. New York, Springer-Verlag: 3-19.

Meier, U. 2001. Growth stages of mono-and dicotyledonous plants. Bonn, Federal Biological Research Centre for Agriculture and Forestry.

Menzel, A., T. H. Sparks, N. Estrella, et al. 2006. European phenological response to climate change matches the warming pattern. *Global Change Biology* 12: 1969-1976.

Menzel, A. 2005. A 500 year pheno-climatological view on the 2003 heatwave in Europe assessed by grape harvest dates. *Meteorologische Zeitschrift* 14: 75-77.

Menzel, A., N. Estrella and P. Fabian. 2001. Spatial and temporal variability of the

phenological seasons in Germany from 1951 to 1996. *Global Change Biology* 7: 657-666.

Miles, W. T., M. Bolton, P. Davis, et al. 2017. Quantifying full phenological event distributions reveals simultaneous advances, temporal stability and delays in spring and autumn migration timing in long-distance migratory birds. *Global Change Biology* 23: 1400-1414.

Miller-Rushing, A. J., D. W. Inouye and R. B. Primack. 2008. How well do first flowering dates measure plant responses to climate change? The effects of population size and sampling frequency. *Journal of Ecology* 96: 1289-1296.

Miller-Rushing, A. J. and D. W. Inouye. 2009. Variation in the impact of climate change on flowering phenology and abundance: An examination of two pairs of closely related wildflower species. *American Journal of Botany* 96: 1821-1829.

Miller-Rushing, A. J. and R. B. Primack. 2008. Global warming and flowering times in Thoreau's concord: A community perspective. *Ecological Society of America* 89: 332-341.

Miller-Rushing, A. J., T. Katsuki, R. B. Primack, Y. Ishii, S. D. Lee and H. Higuchi. 2007. Impact of global warming on a group of releted species and their hybrids: Cherry tree (*Rosaceae*) flowering at Mt. Takao, Japan. *American Journal of Botany* 94: 1470-1478.

Mulder, C. P., D. T. Iles and R. F. Rockwell. 2017. Increased variance in temperature and lag effects alter phenological responses to rapid warming in a subarctic plant community. *Global Change Biology* 23: 801-814.

Munguia-Rosas, M. A., J. Ollerton, V. Parra-Tabla and J. A. De-Nova. 2011. Meta-analysis of phenotypic selection on flowering phenology suggests that early flowering plants are favoured. *Ecology Letters* 14: 511-521.

Murray, M. B., M. G. R. Cannell and R. I. Smith. 1989. Date of budburst of fifteen tree species in Britain following climatic warming. *Journal of Applied Ecology* 26: 693-700.

Nagai, S., K. N. Nasahara, T. Inoue, T. M. Saitoh and R. Suzuki. 2016. Review: advances in situ and satellite phenological observations in Japan. *International Journal of Biometeorology* 60: 615-627.

Nagy, L., J. Kreyling, E. Gellesch, C. Beierkuhnlein and A. Jentsch. 2013. Recurring weather extremes alter the flowering phenology of two common temperate shrubs. *International Journal of Biometeorology* 57: 579-588.

Nanninga, C., C. R. Buyarski, A. M. Pretorius and R. A. Montgomery. 2017. Increased exposure to chilling advances the time to budburst in North American tree species. *Tree Physiology* 37: 1727-1738.

Parmesan, C. and G. Yohe. 2003. A globally coherent fingerprint of climate change impacts across natural systems. *Nature* 421: 37-42.

Parmesan, C. 2006. Ecological and evolutionary responses to recent climate change. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics* 37: 637-669.

Pau, S., E. M. Wolkovich, B. I. Cook, T. J. Davies, N. J. B. Kraft, K. Bolmgren, J. L.

Betancourt and E. E. Cleland. 2011. Predicting phenology by integrating ecology, evolution and climate science. *Global Change Biology* 17: 3633-3643.

Penuelas, J., I. Filella and P. Comas. 2002. Changed plant and animal life cycles from 1952 to 2000 in the Mediterranean region. *Global Change Biology* 8: 531-544.

Phänologie, A. 2013. Beobachtungsanleitung für die Phänologie. Vienna, Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik (ZAMG).

Polgar, C. A. and R. B. Primack. 2011. Leaf-out phenology of temperate woody plants: from trees to ecosystems. *New Phytologist* 191: 926-941.

Primack, R. B., H. Higuchi and A. J. Miller-Rushing. 2009. The impact of climate change on cherry trees and other species in Japan. *Biological Conservation* 142: 1943-1949.

Prodon, R., P. Geniez, M. Cheylan, F. Devers, I. Chuine and A. Besnard. 2017. A reversal of the shift towards earlier spring phenology in several Mediterranean reptiles and amphibians during the 1998-2013 warming slowdown. *Global Change Biology* 23: 5481-5491.

R Core Team. 2017. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL <https://www.R-project.org/>

Romanovskaja, D., E. Bakàienë, A. Raùkas and L. Tripolskaja. 2012. Influence of climate change on the European Hazel (*Corylus avellana* L.) and Norway Maple (*Acer platanoides* L.) phenology in Lithuania during the period 1961-2010. *Baltic Forestry* 18: 228-236.

Root, T. L., J. T. Price, K. R. Hall, S. H. Schneider, C. Rosenzweig and J. A. Pounds. 2003. Fingerprints of global warming on wild animals and plants. *Nature* 421: 57-60.

Saxe, H., M. G. Cannell, ø. Johnsen, M. G. Ryan and G. Vourlitis. 2001. Tree and forest functioning in response to global warming. *New Phytologist* 149: 369-399.

Schaber, J. and F.-W. Badeck. 2005. Plant phenology in Germany over the 20th century. *Regional Environmental Change* 5: 37-46.

Scheifinger, H., A. Menzel, E. Koch, C. Peter and R. Ahas. 2002. Atmospheric mechanisms governing the spatial and temporal variability of phenological phases in central Europe. *International Journal of Climatology* 22: 1739-1755.

Schwartz, M. D. and B. E. Reiter. 2000. Changes in north American spring. *International Journal of Climatology* 20: 929-932.

Schwartz, M. D., J. L. Betancourt and J. F. Weltzin. 2012. From Caprio's lilacs to the USA National Phenology Network. *Frontiers in Ecology and the Environment* 10: 324-327.

Sparks, T. H., A. Menzel and N. C. Stenseth. 2009. European cooperation in plant phenology. *Climate Research* 39: 175-177.

Tang, J., C. Körner, H. Muraoka, S. Piao, M. Shen, S. J. Thackeray and X. Yang. 2016. Emerging opportunities and challenges in phenology: a review. *Ecosphere* 7. DOI: 10.1002/ecs2.1436

Templ, B., E. Koch, K. Bolmgren, et al. 2018. Pan European Phenological database (PEP725): a single point of access for European data. *International Journal of Biometeorology* 62: 1109-1113.

Trouet, V. and G. J. Van Oldenborgh. 2013. KNMI Climate Explorer: A web-based research tool for high-resolution paleoclimatology. *Tree-Ring Research* 69: 3-13.

Vinod, H. D. 2006. Maximum entropy ensembles for time series inference in economics. *Journal of Asian Economics* 17: 955-978.

Vinod, H. D. and J. López-De-Lacalle. 2009. Maximum Entropy Bootstrap for Time Series: The meboot R Package. *Journal of Statistical Software* 29: 1-19.

Vitasse, Y., C. Signarbieux and Y. H. Fu. 2018. Global warming leads to more uniform spring phenology across elevations. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 115: 1004-1008.

Wadgymar, S. M., J. E. Ogilvie, D. W. Inouye, A. E. Weis and J. T. Anderson. 2018. Phenological responses to multiple environmental drivers under climate change: insights from a long-term observational study and a manipulative field experiment. *New Phytologist* 218: 517-529.

Walther, G.-R., E. Post, P. Convey, A. Menzel, C. Parmesan, T. J. C. Beebee, J.-M. Fromentin, O. Hoegh-Guldberg and F. Bairlein. 2002. Ecological responses to recent climate change. *Nature* 416: 389-395.

Walther, G. R. 2010. Community and ecosystem responses to recent climate change. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences* 365: 2019-2024.

Wielgolaski, F. 2001. Phenological modifications in plants by various edaphic factors. *International Journal of Biometeorology* 45: 196-202.

Wu, X. and H. Liu. 2013. Consistent shifts in spring vegetation green-up date across temperate biomes in China, 1982-2006. *Global Change Biology* 19: 870-880.

Wu, Z. and N. E. Huang. 2009. Ensemble empirical mode decomposition: a noise-assisted data analysis method. *Advances in Adaptive Data Analysis* 1: 1-41.

Wu, Z., N. E. Huang, S. R. Long and C. K. Peng. 2007. On the trend, detrending, and variability of nonlinear and nonstationary time series. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 104: 14889-14894.

Zheng, J., Q. Ge and Z. Hao. 2002. Impacts of climate warming on plants phenophases in China in the last 40 years. *Chinese Science Bulletin* 47: 1826-1831.



榛子 FFD 距平序列和不同溫度類型的場域相關性分析

各測站與不同溫度類型的場域相關性分析結果以一張圖內嵌四小圖呈現，小圖的左上方標示分析的溫度類型：Tmean 代表月均日溫、Tmax 代表月均最高日溫、JF 代表平均一至二月、JFM 代表平均一至三月而 FM 代表平均二至三月。右側的量尺代表 FFD 距平序列和去除線性趨勢後的溫度之相關性，並非所有測站的尺度都相同。測站位置以紅點表之。

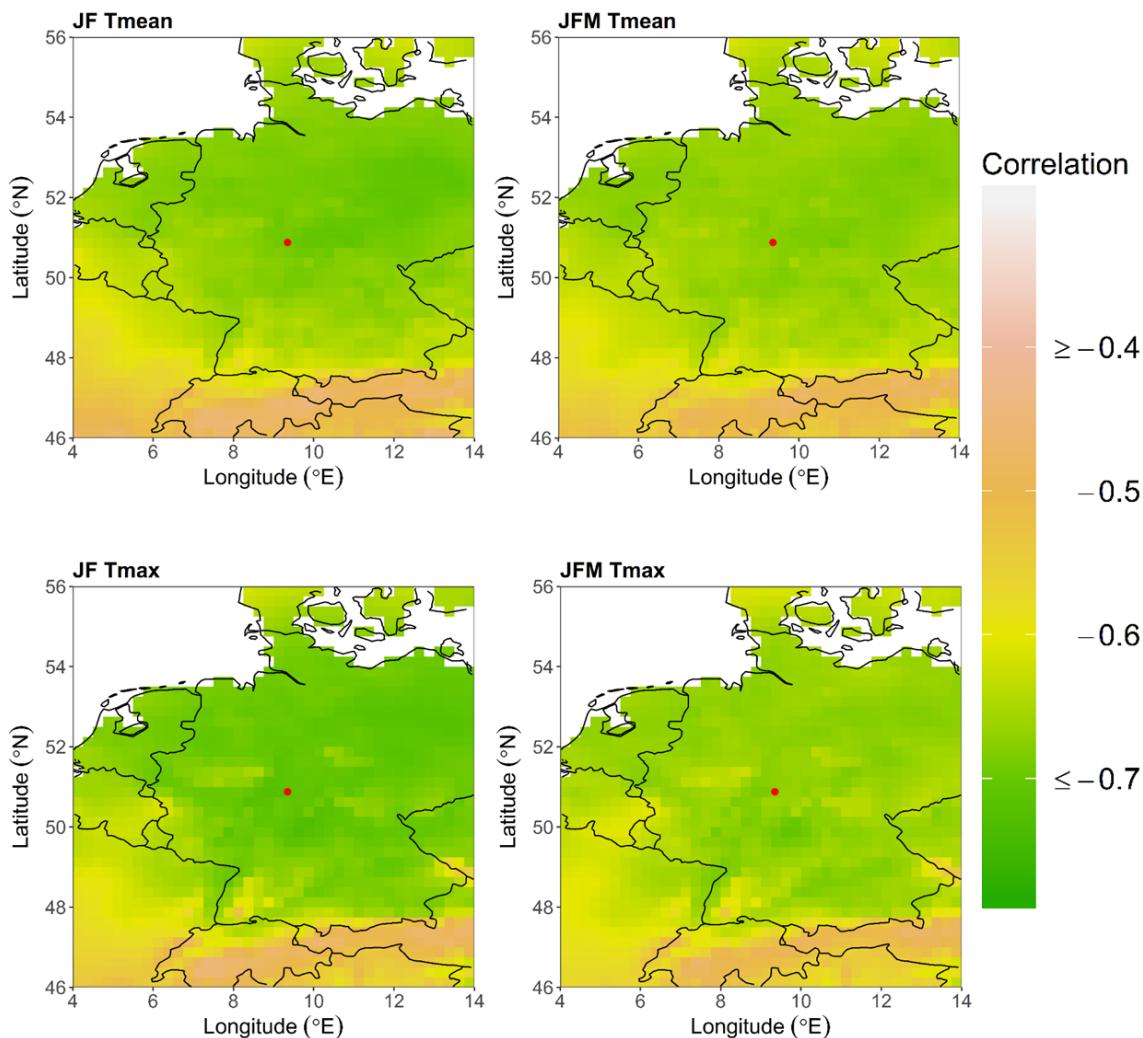


圖 1、測站 DE2294 的場域相關性分析
JF Tmax 是與此測站的 FFD 距平序列最相關的溫度類型(左下)

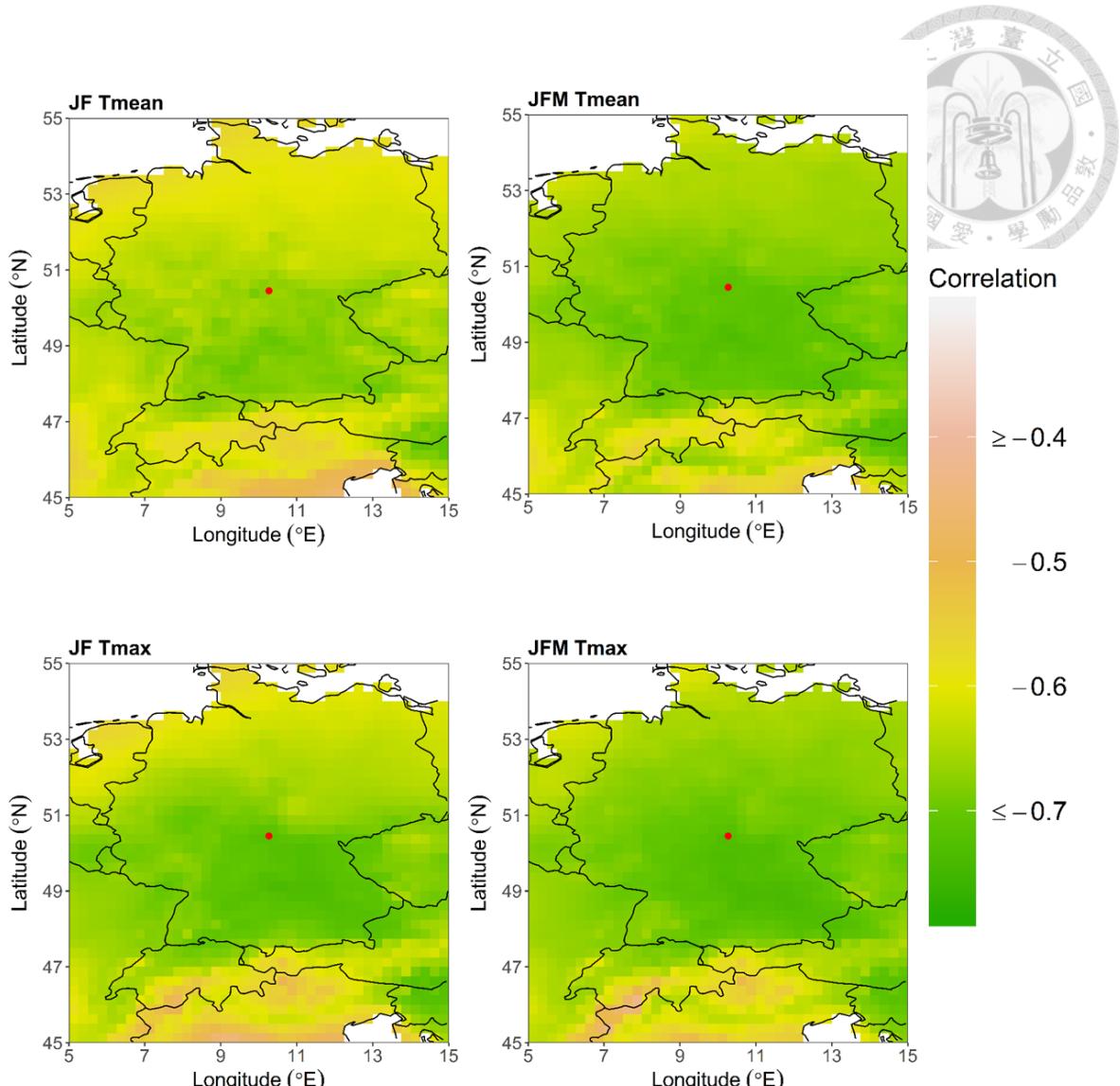


圖 2、測站 DE4420 的場域相關性分析
JFM Tmean 是與此測站的 FFD 距平序列最相關的溫度類型(右上)

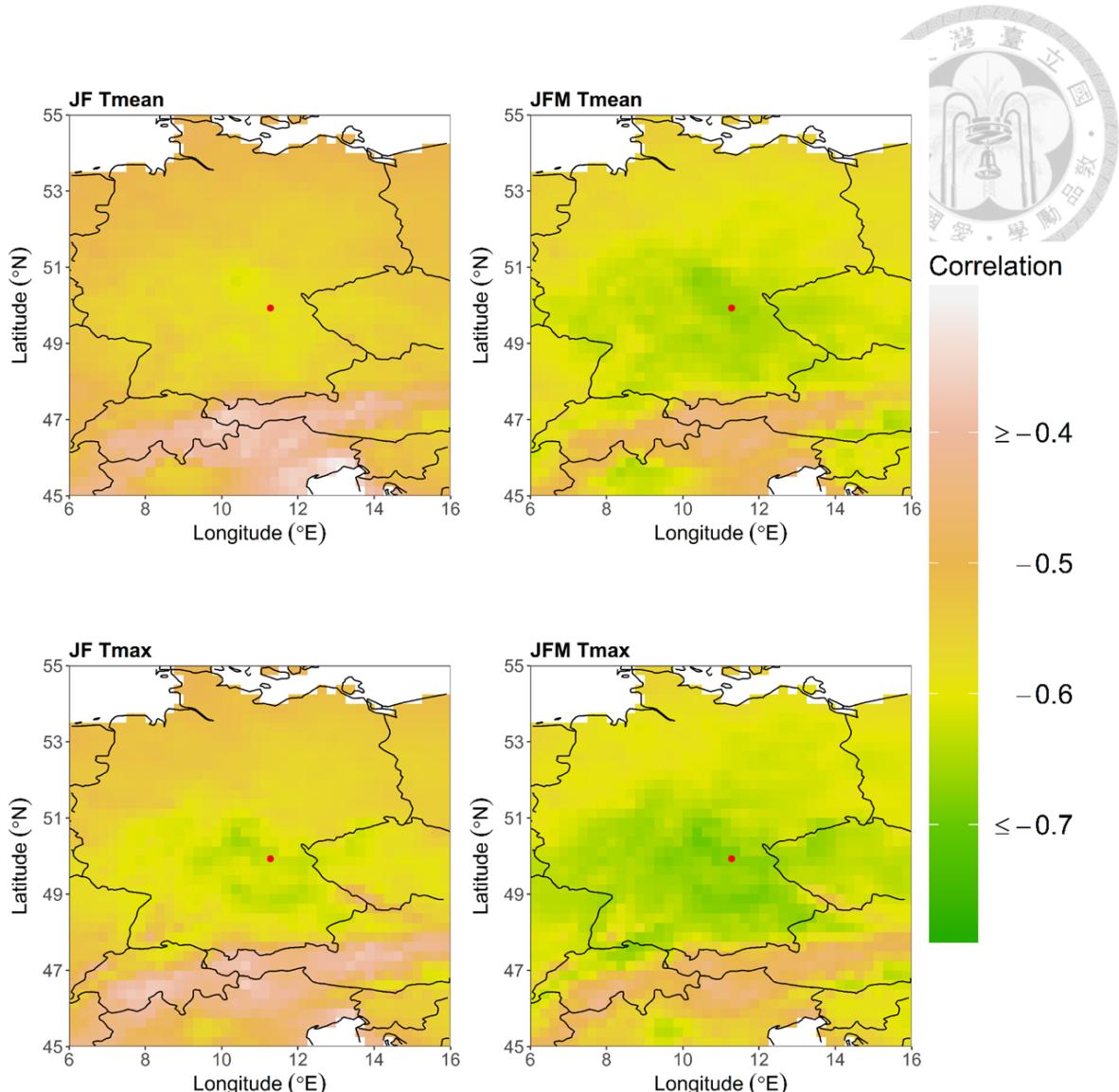


圖 3、測站 DE4054 的場域相關性分析
JFM Tmax 是與此測站的 FFD 距平序列最相關的溫度類型(右下)

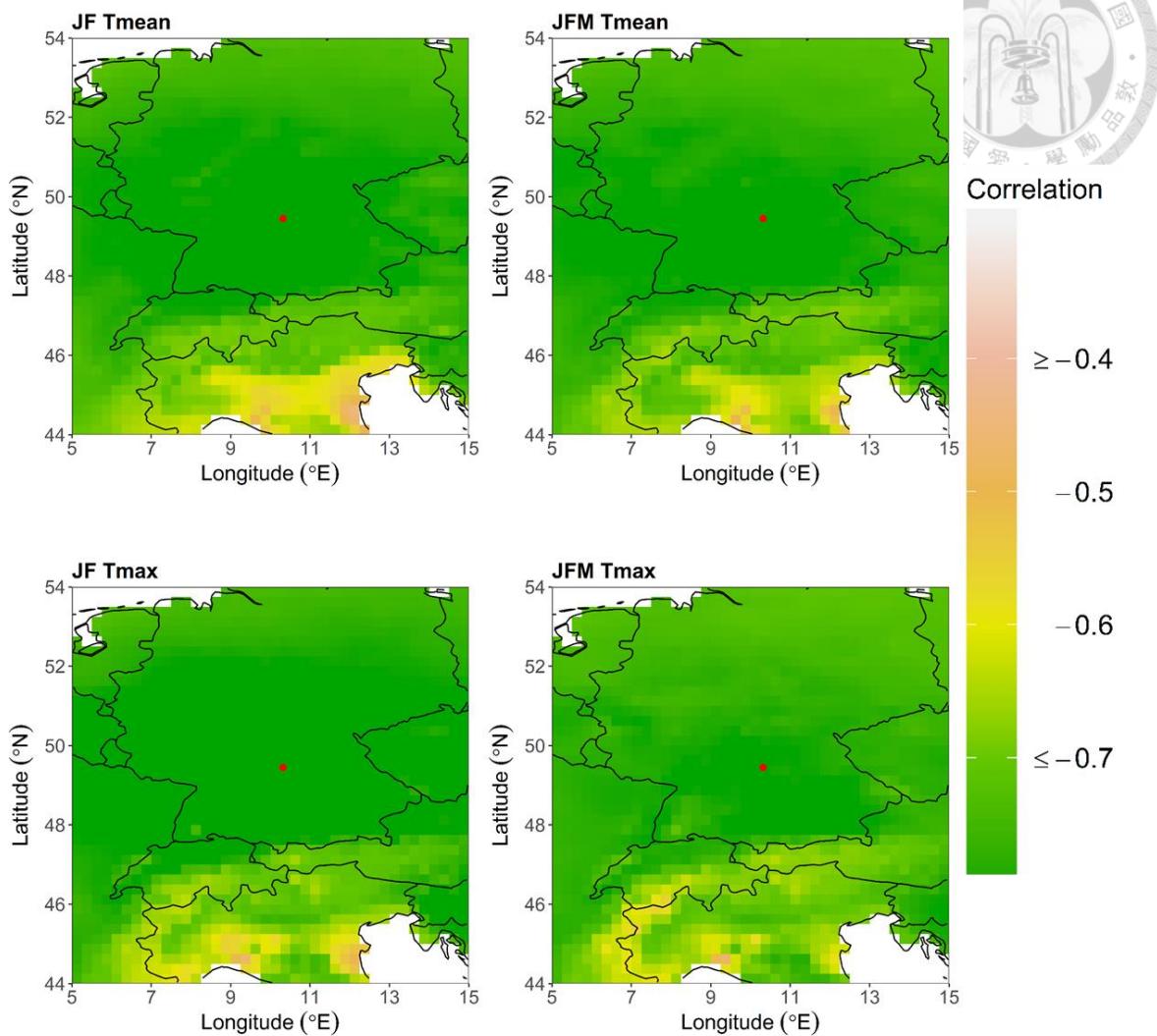


圖 4、測站 DE4256 的場域相關性分析

JF Tmean 與 JF Tmax 皆與此測站的 FFD 距平序列相關(分別為左上與左下的小圖)

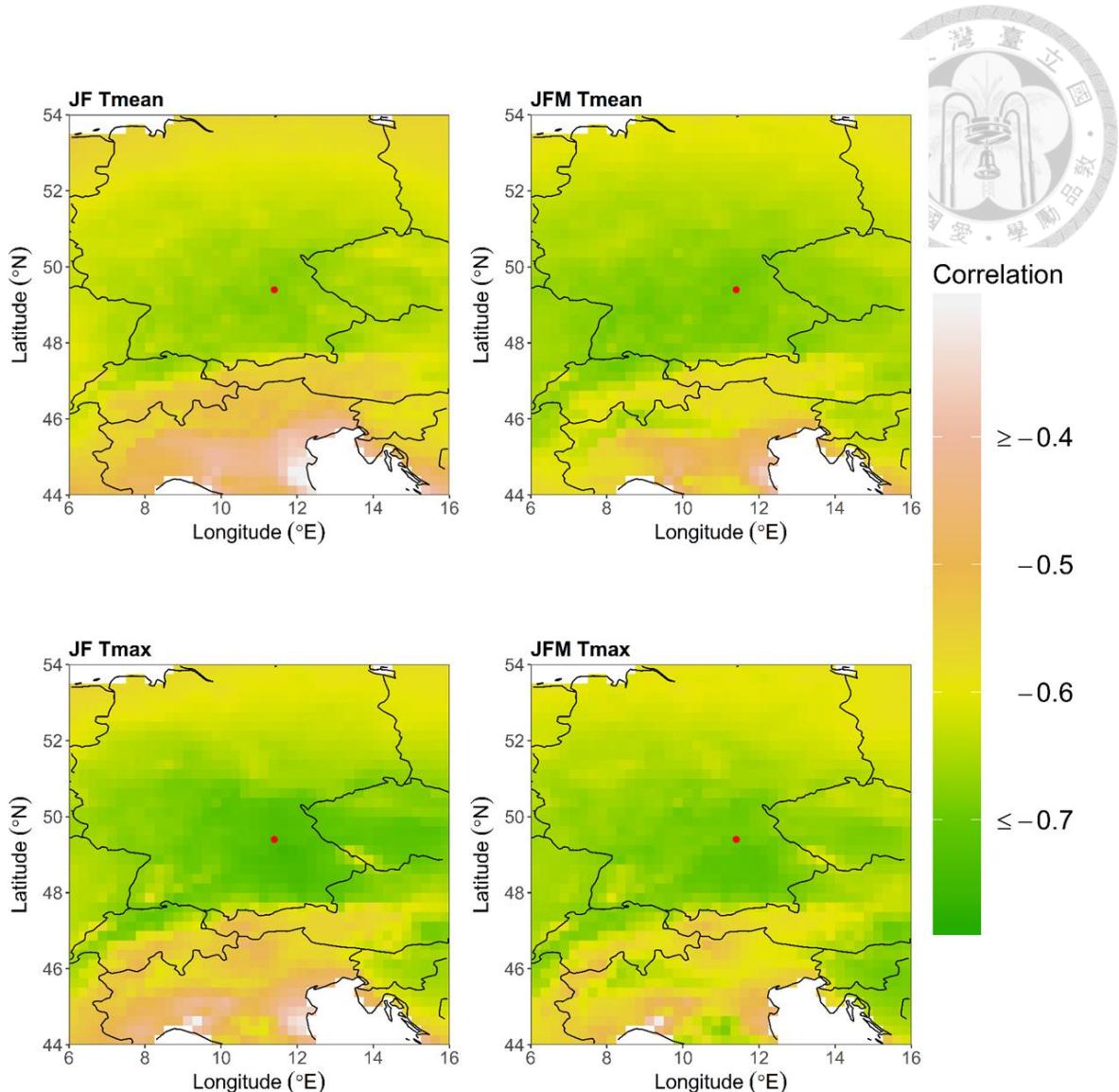


圖 5、測站 DE4239 的場域相關性分析

JF Tmax 與 JFM Tmean 皆與此測站的 FFD 距平序列相關(分別為左下與右上的小圖)

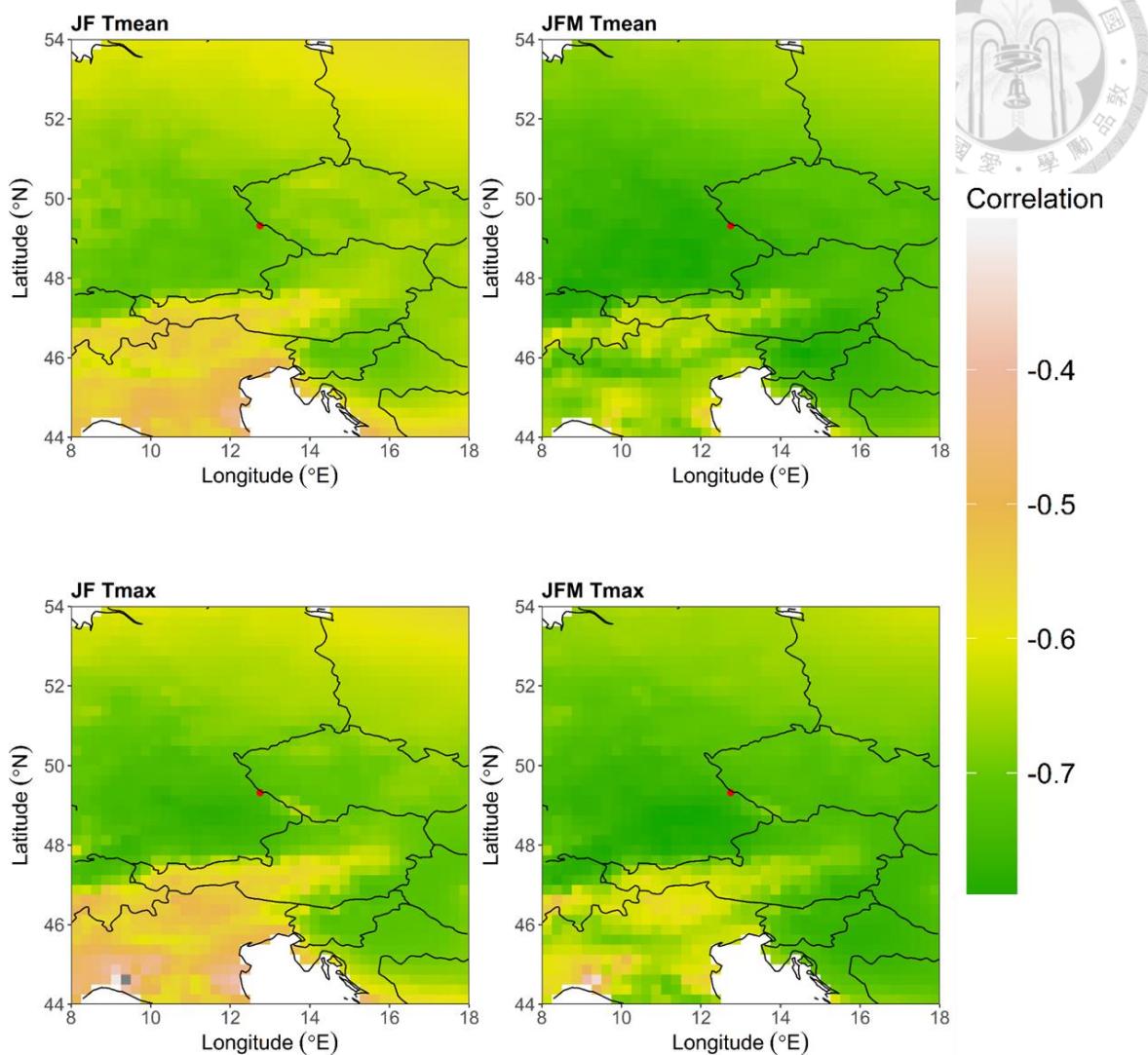


圖 6、測站 DE3984 的場域相關性分析
JFM Tmean 是與此測站的 FFD 距平序列最相關的溫度類型(右上)

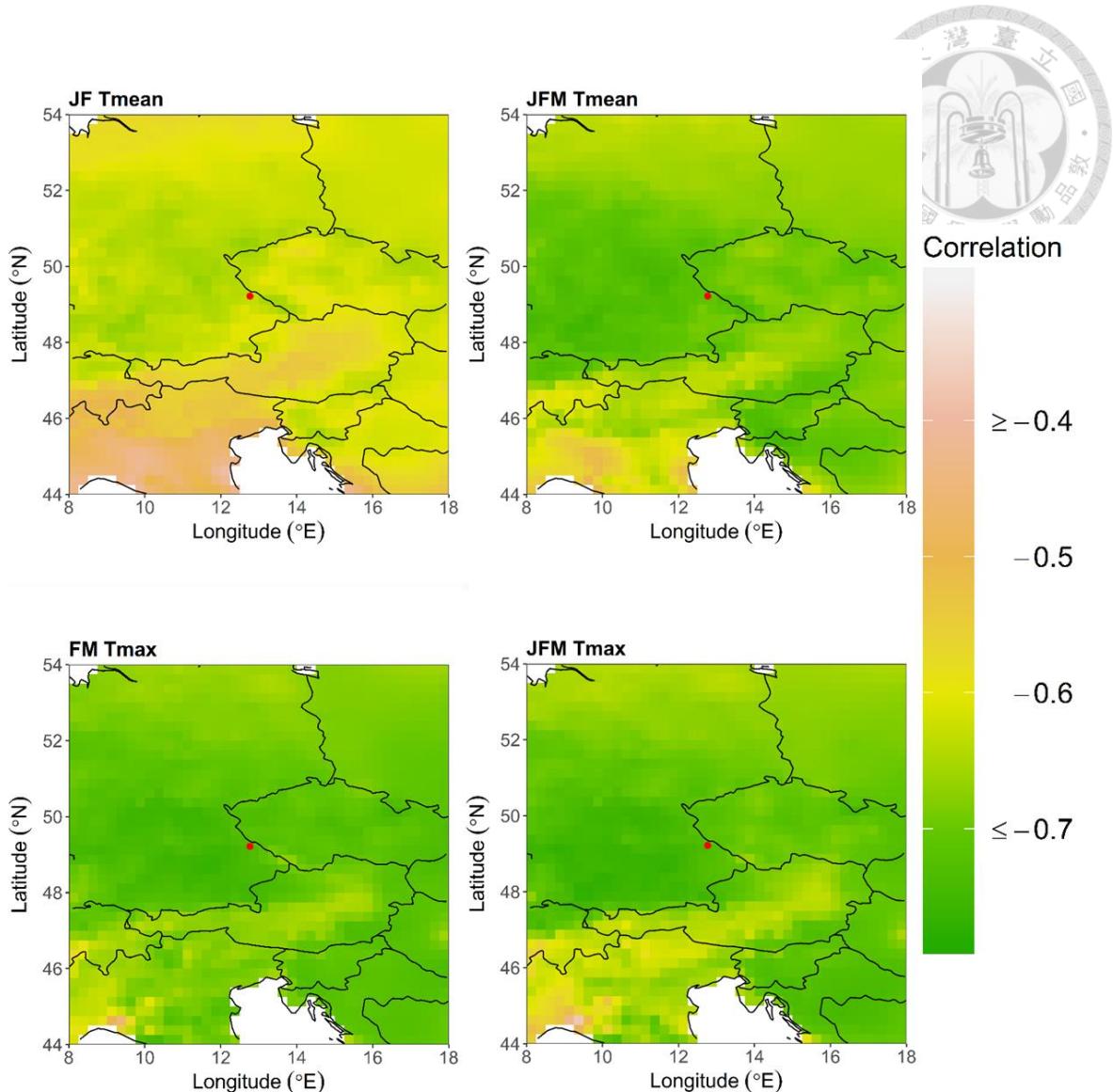


圖 7、測站 DE3866 的場域相關性分析

JFM Tmean 與 JFM Tmax 皆與此測站的 FFD 距平序列相關(分別為右上與右下的小圖)

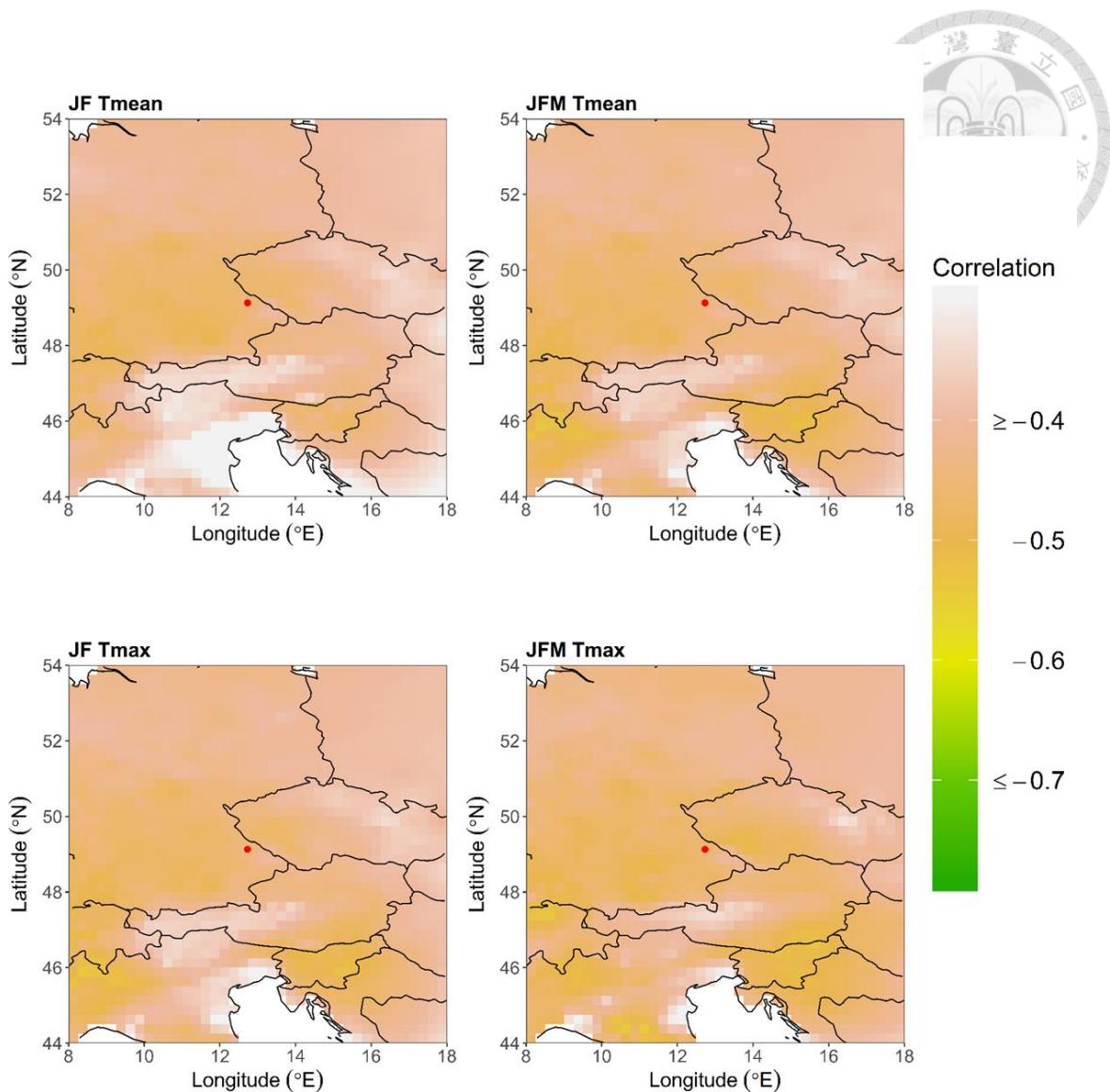


圖 8、測站 DE3744 的場域相關性分析
 JFM Tmean 與 JFM Tmax 皆與此測站的 FFD 距平序列相關(分別為右上與右下的小圖)

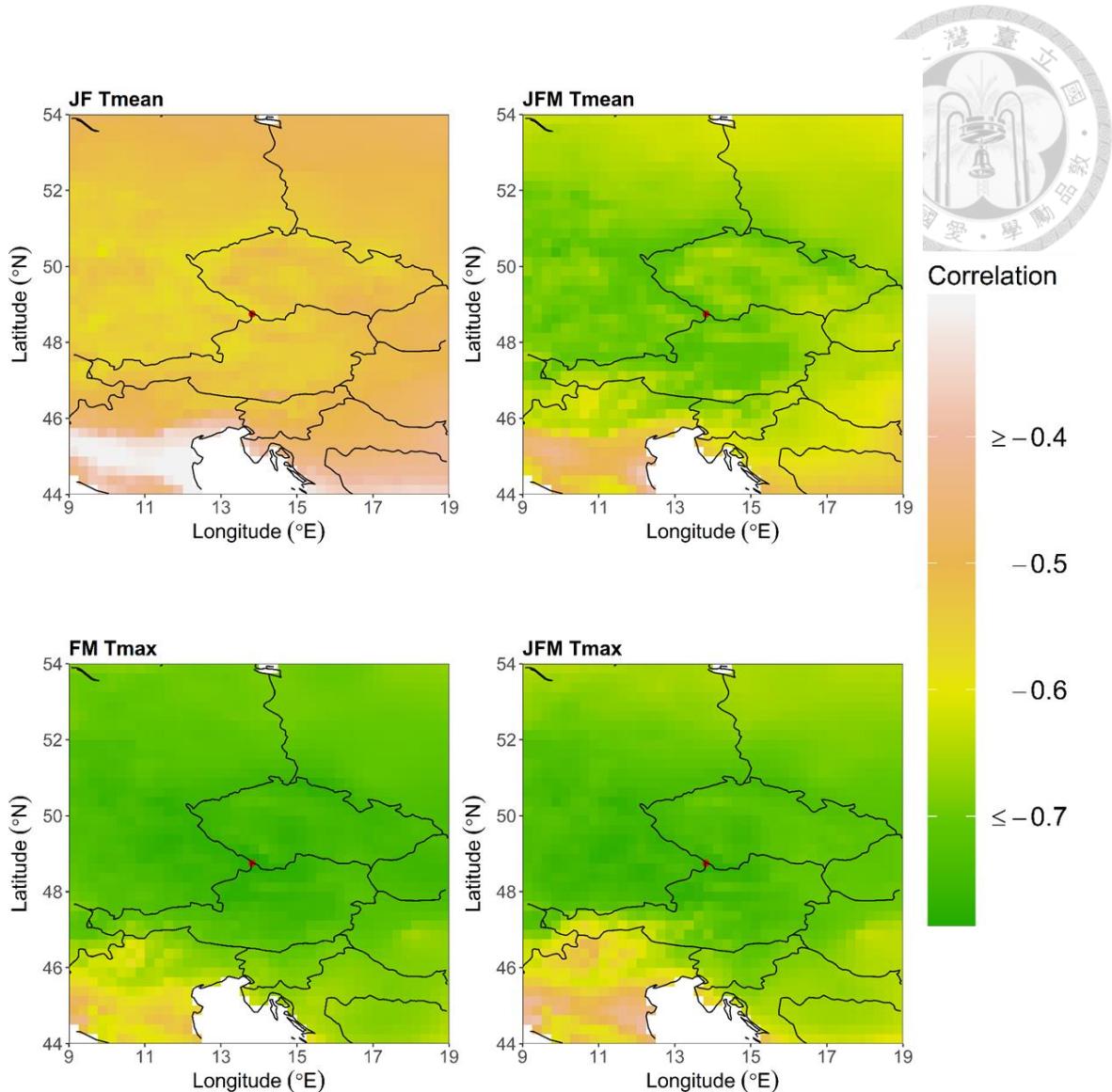


圖 9、測站 DE3824 的場域相關性分析
 FM Tmax 是與此測站的 FFD 距平序列最相關的溫度類型(左下)

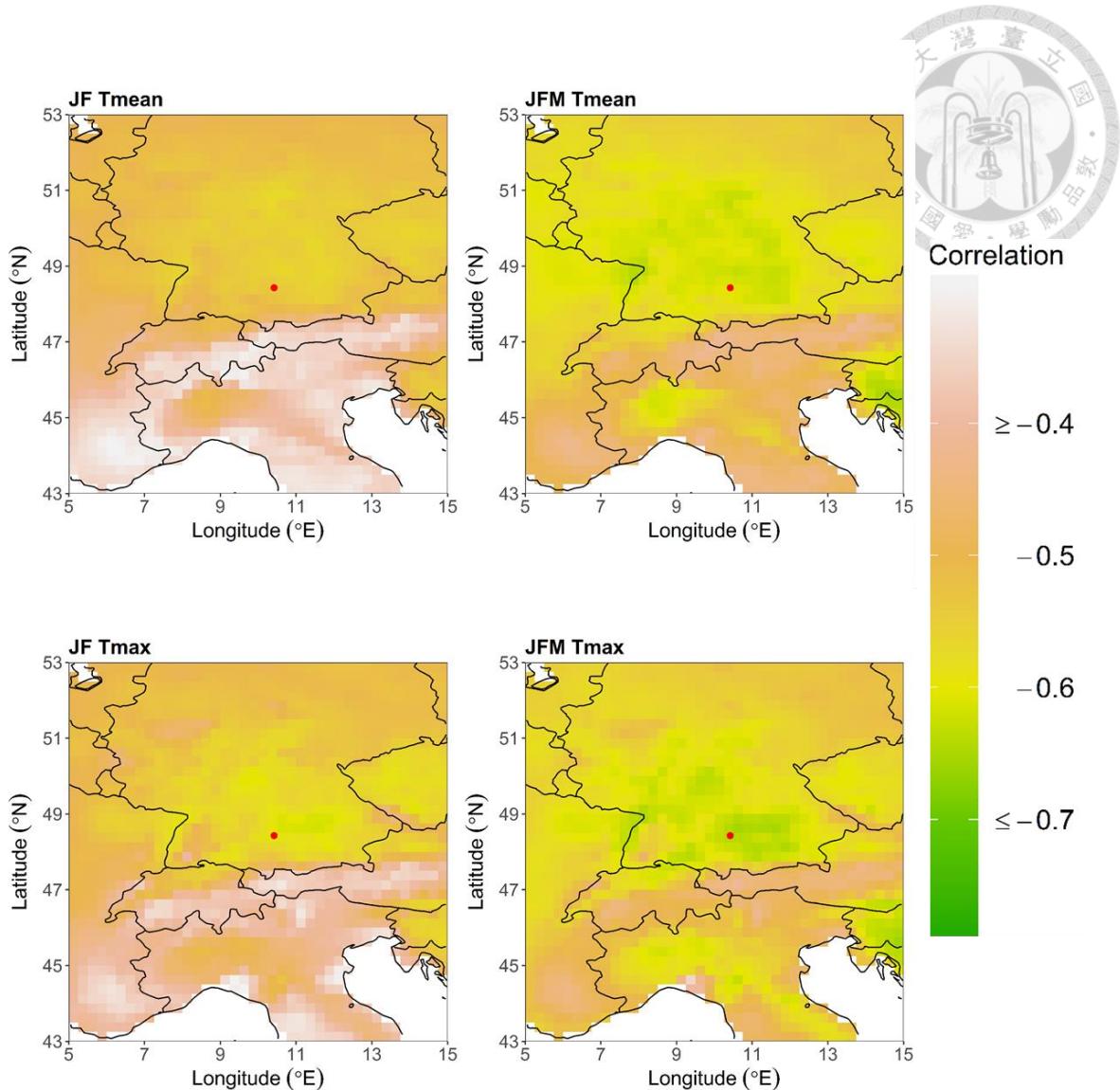


圖 10、測站 DE4495 的場域相關性分析
JFM Tmax 是與此測站的 FFD 距平序列最相關的溫度類型(右下)

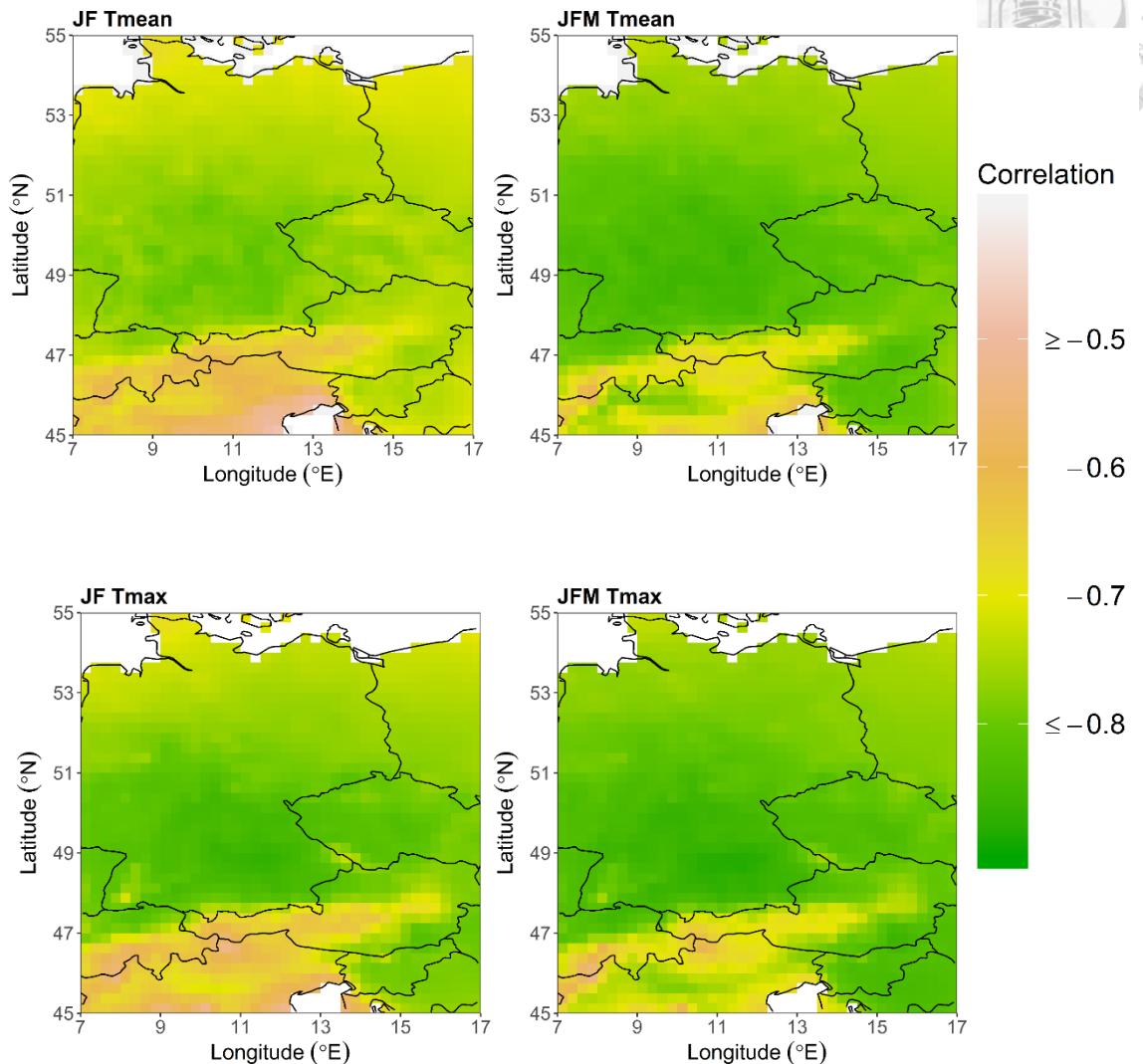


圖 11、全測站的場域相關性分析
JFM Tmean 是與此區域的 FFD 距平序列最相關的溫度類型(右上)

帶石楠 FFD 距平序列和不同溫度類型的場域相關性分析

本研究先尋找與各測站的 FFD 距平序列最相關的溫度類型，再以與全測站 FFD 距平序列呈最相關的 AMJ Tmean 和始花前一個月的溫度(即七月的溫度)，檢測增加這些月份的溫度是否提高各測站 FFD 距平序列與各溫度類型的相關性。每一張圖的量尺刻度並不相同。小圖的左上方標示分析的溫度類型：Tmean 代表月平均日溫、Tmax 代表月均最高日溫、June 為六月、July 為七月、May-June 代表平均五至六月、June-July 代表平均六至七月、AMJ 代表平均四至六月、MJJA 代表平均五至八月、AMJJA 代表平均四至八月。測站位置以紅點表之。另外，測站 DE3876 的 FFD 距平序列並不與任何溫度類型相關。

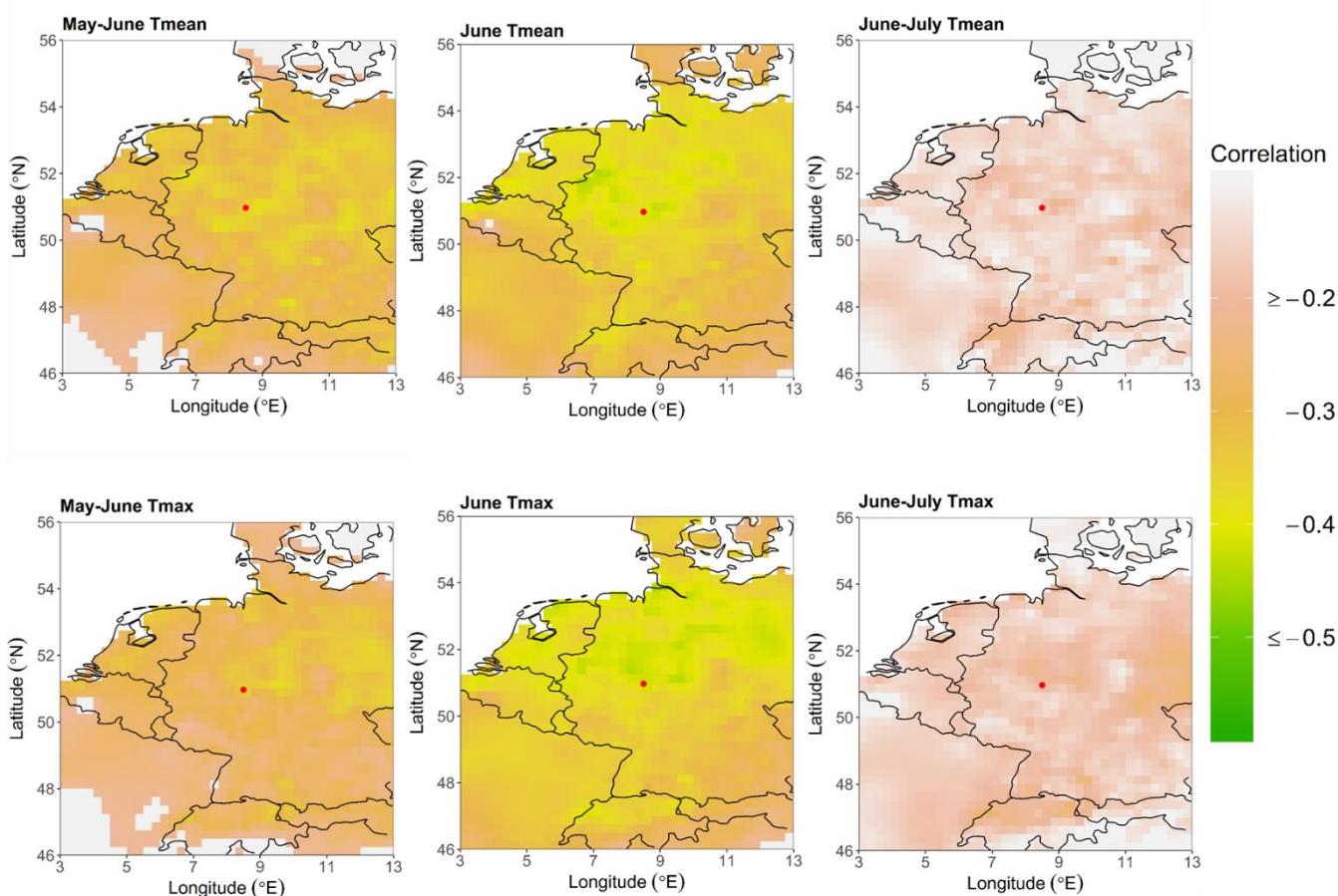


圖 1、測站 DE2075 的場域相關性分析
June Tmean 是與此測站的 FFD 距平序列最相關的溫度類型(中上)

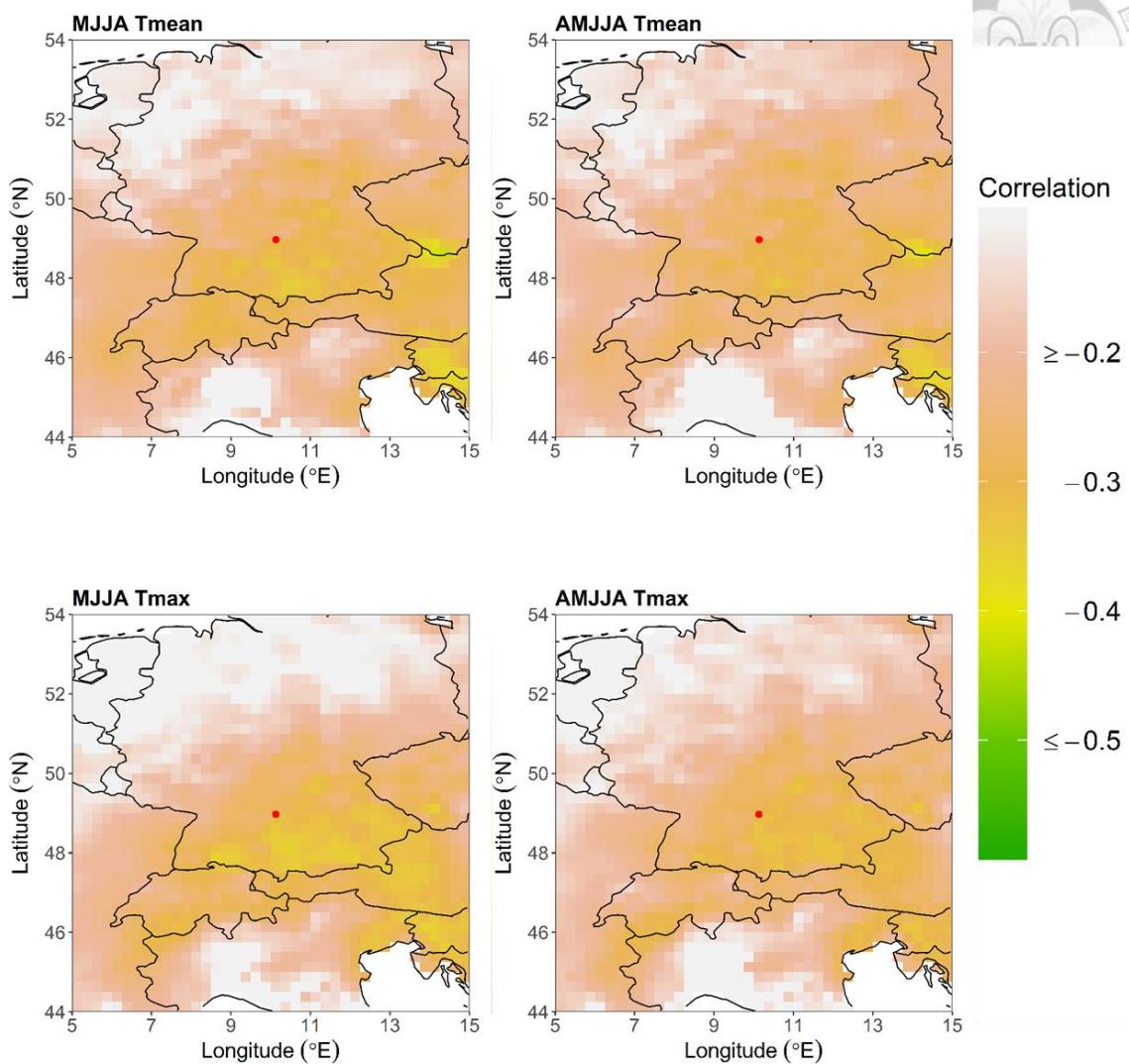


圖 2、測站 DE2853 的場域相關性分析
MJJA Tmean 是與此測站的 FFD 距平序列最相關的溫度類型(左上)

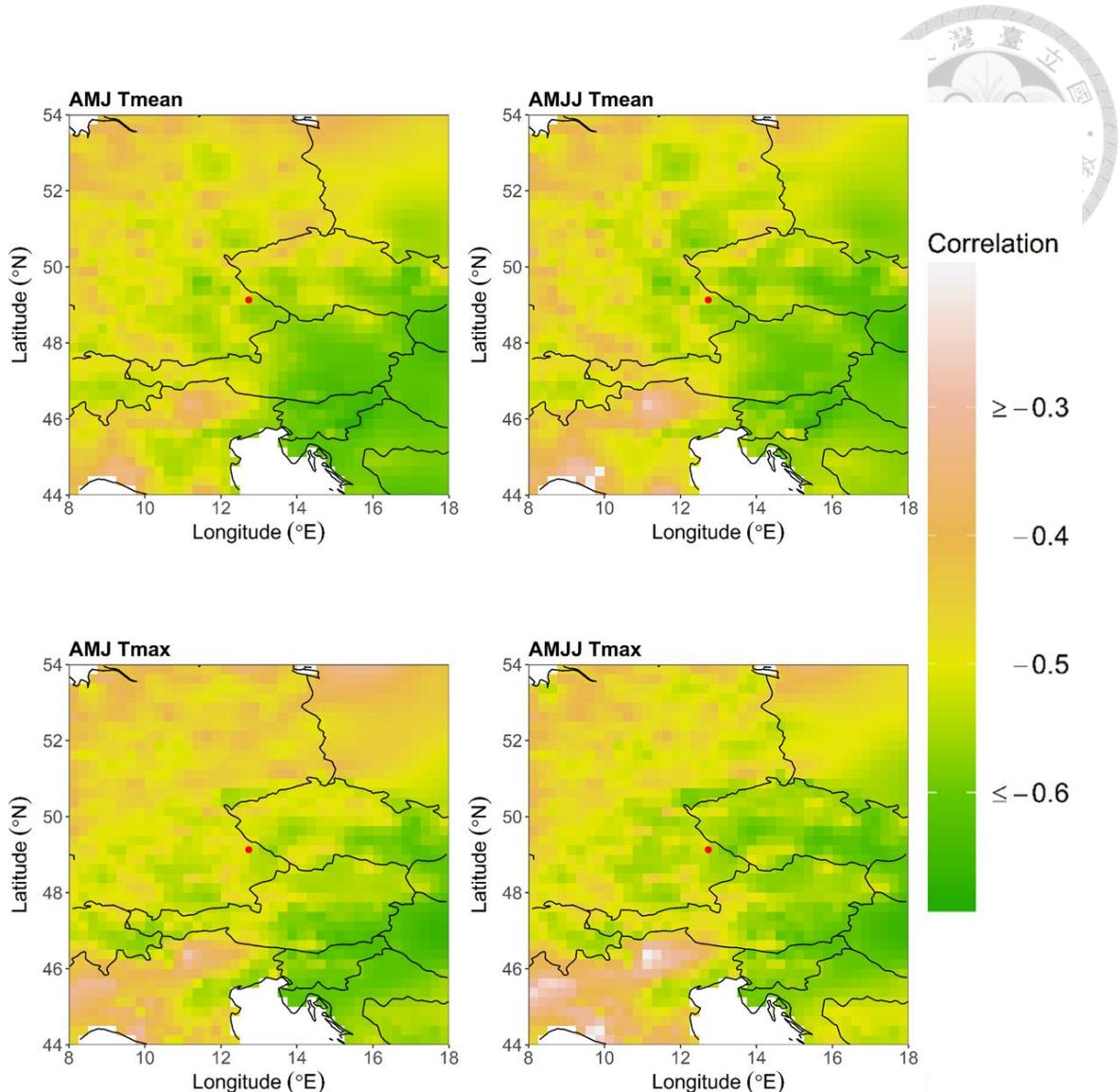


圖 3、測站 DE3744 的場域相關性分析
AMJ Tmean 是與此測站的 FFD 距平序列最相關的溫度類型(左上)

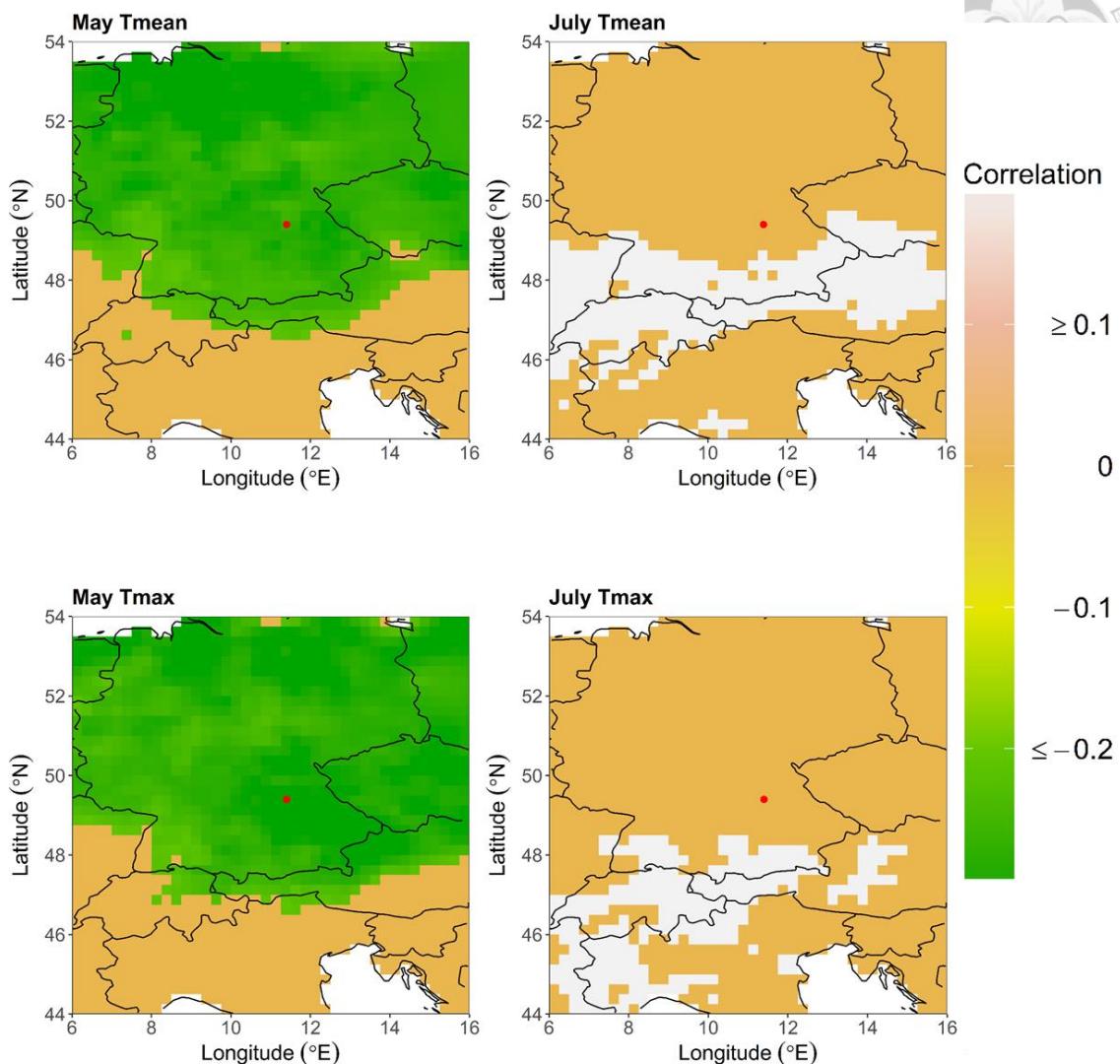


圖 4、測站 DE4239 的場域相關性分析
May Tmean 與 July Tmax 分別與此測站的 FFD 距平序列呈弱的負與正相關(分別為
左上與右下的小圖)

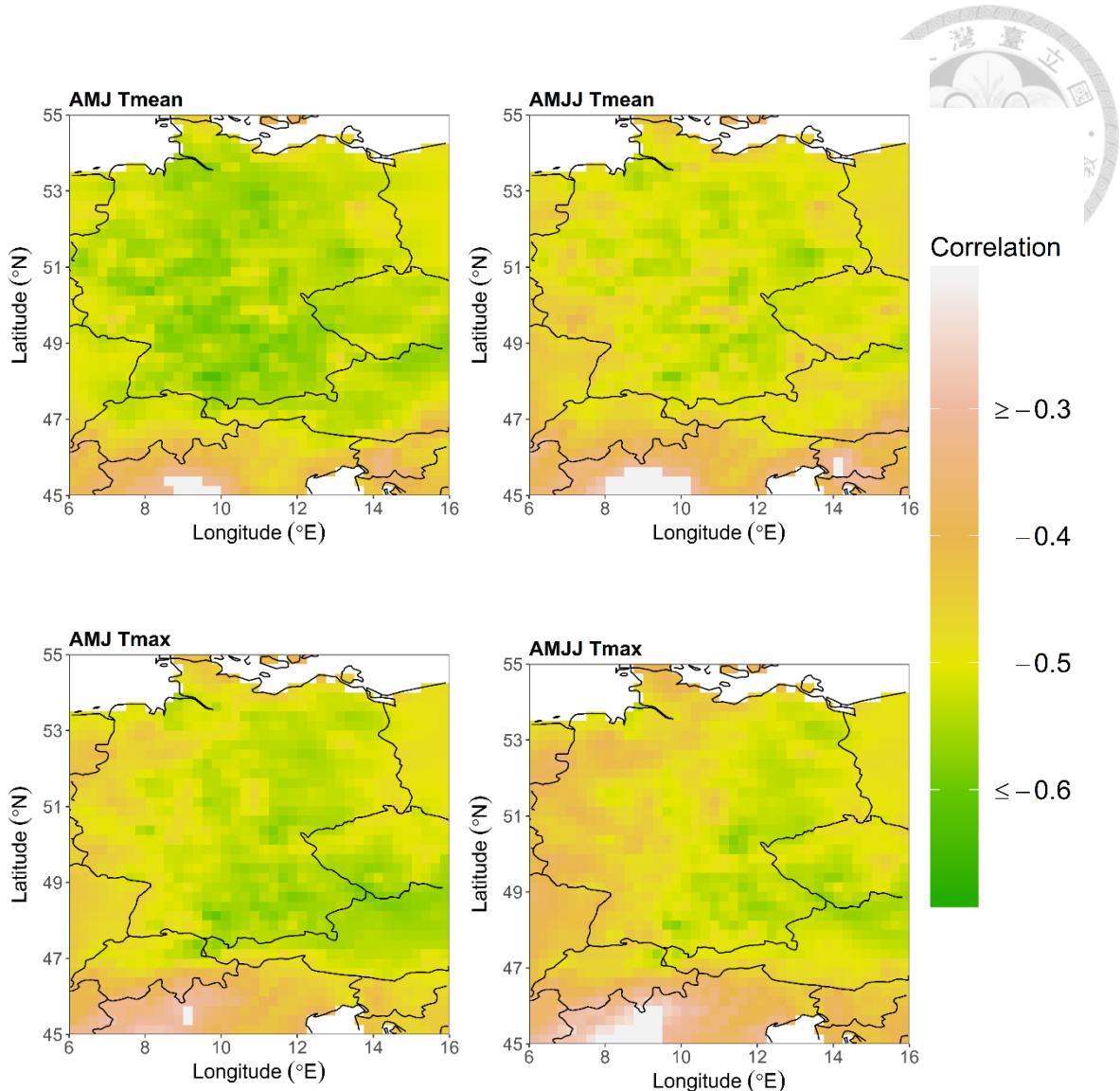


圖 5、全測站的場域相關性分析
AMJ Tmean 是與此測站的 FFD 距平序列最相關的溫度類型(左上)

附錄二



表 1、榛子各測站 FFD 距平序列的 OCs 和趨勢在不同白噪參數中的相關係數

	白噪參數							
	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09	0.1	0.2	0.3
DE2294	0.07	0.06	0.06	0.07	0.07	0.07	0.06	0.05
DE4420	0.15	0.15	0.14	0.14	0.13	0.14	0.11	0.11
DE4054	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07	0.06	0.07	0.09
DE4256	0.03	0.03	0.04	0.04	0.05	0.05	0.07	0.08
DE4239	0.11	0.10	0.10	0.10	0.11	0.11	0.11	0.12
DE3984	0.08	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.06	0.08
DE3866	0.09	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.08	0.08
DE3744	0.03	0.04	0.04	0.04	0.04	0.05	0.05	0.06
DE3824	0.03							
DE4495	0.11	0.12	0.12	0.12	0.12	0.13	0.13	0.12
全測站	0.06	0.06	0.06	0.07	0.08	0.08	0.08	0.07

註：粗體表示該距平序列在該白噪參數下 OC 和趨勢的相關性較在其他白噪參數下低。

表 2、JFM Tmax 距平序列的 OCs 和趨勢在不同白噪參數中的相關係數

	白噪參數						
	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8
DE2294	0.01	0.01	0.02	0.03	0.04	0.04	0.04
DE4420	0.01	0.01	0.02	0.03	0.04	0.04	0.05
DE4054	-0.02	-0.02	0	0.01	0.02	0.03	0.03
DE4256	-0.01	-0.01	0	0.01	0.02	0.03	0.04
DE4239	-0.04	-0.03	-0.02	0	0.01	0.02	0.02
DE3984	-0.09	-0.07	-0.04	-0.02	-0.01	0	0.01
DE3866	-0.09	-0.08	-0.06	-0.04	-0.03	-0.02	-0.01
DE3744	-0.08	-0.05	-0.03	-0.02	0	0.01	0.01
DE3824	-0.11	-0.10	-0.07	-0.05	-0.04	-0.02	-0.01
DE4495	-0.04	-0.02	0	0.02	0.02	0.03	0.04
全測站	-0.05	-0.04	-0.02	-0.01	0.01	0.02	0.02

註：粗體表示該距平序列在該白噪參數下 OC 和趨勢的相關性較在其他白噪參數下低。

表 3、JFM Tmean 距平序列的 OCs 和趨勢在不同白噪參數中的相關係數

	白噪參數						
	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8
DE2294	-0.04	-0.02	0	0.02	0.03	0.04	0.04
DE4420	-0.08	-0.03	0	0.01	0.02	0.03	0.04
DE4054	-0.11	-0.05	-0.02	0.01	0.02	0.04	0.04
DE4256	-0.06	-0.03	-0.01	0.01	0.01	0.02	0.03
DE4239	-0.10	-0.07	-0.03	-0.01	0	0.02	0.02
DE3984	-0.15	-0.10	-0.06	-0.03	-0.01	0	0.01
DE3866	-0.16	-0.11	-0.07	-0.05	-0.03	-0.02	-0.01
DE3744	-0.13	-0.08	-0.05	-0.03	-0.02	-0.01	0
DE3824	-0.14	-0.11	-0.07	-0.05	-0.02	-0.01	-0.01
DE4495	-0.05	-0.02	0	0.01	0.02	0.03	0.03
全測站	-0.12	-0.07	-0.04	-0.01	0	0.01	0.02

註：粗體表示該距平序列在該白噪參數下 OC 和趨勢的相關性較在其他白噪參數下低。

表 4、帝石楠各測站 FFD 距平序列的 OCs 和趨勢在不同白噪參數中的相關係數

	白噪參數									
	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5
DE2075	-0.07	-0.04	-0.01	-0.01	-0.01	0	-0.04	-0.05	-0.04	-0.06
DE3876	-0.12	-0.09	-0.06	-0.03	-0.01	0	0.10	0.11	0.12	0.11
DE4239	0.02	0.01	0.01	0	0	-0.01	-0.01	-0.01	-0.02	-0.01
DE3744	-0.04	-0.03	-0.02	0	0	0.01	0.06	0.06	0.05	0.06
DE2853	0.11	0.11	0.10	0.11	0.11	0.11	0.11	0.11	0.1	0.12
全測站	-0.16	-0.16	-0.16	-0.16	-0.15	-0.15	-0.07	-0.03	-0.01	0

註：粗體表示該距平序列在該白噪參數下 OC 和趨勢的相關性較在其他白噪參數下低。

表 5、AMJ Tmean 距平序列的 OCs 和趨勢在不同白噪參數中的相關係數

	白噪參數									
	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1
DE2075	0.13	0.17	0.17	0.15	0.14	0.14	0.13	0.14	0.14	0.13
DE3876	0.19	0.20	0.18	0.14	0.13	0.12	0.12	0.12	0.12	0.12
DE4239	0.37	0.32	0.26	0.23	0.21	0.19	0.19	0.18	0.18	0.18
DE3744	0.08	0.12	0.13	0.13	0.12	0.11	0.11	0.11	0.11	0.11
DE2853	0.18	0.19	0.16	0.14	0.13	0.13	0.12	0.12	0.13	0.13
全測站	0.23	0.23	0.20	0.16	0.14	0.14	0.13	0.13	0.12	0.12

註：粗體表示該距平序列在該白噪參數下 OC 和趨勢的相關性較在其他白噪參數下低。