

台灣氣溫季節循環的長期變遷

李庭慧¹ 黃威凱² 許晃雄¹

1 中央研究院環境變遷中心 2 交通部民用航空局

(中華民國 107 年 09 月 10 日收稿，中華民國 107 年 11 月 21 日定稿)

摘 要

在全球暖化的趨勢下，本研究圖顯了台灣氣溫季節的循環在 20 世紀早期有顯著的變化，並且在較暖的未來仍有持續變遷的訊號。使用台灣六個百年測站(台北、台中、台南、恆春、花蓮、台東)的觀測資料，我們發現自 1900-2014 年間台灣的夏季有變長的訊號，各測站定量分析顯示季節大約增長 5.29–12.51 天/10 年，主要歸因於夏季起始時間的提前與夏季結束時間的延後。相反的，冬季由於起始時間延後與結束時間提前，因此冬季的長度是有縮短的訊號(2.74–4.63 天/10 年)。長期的趨勢上測站結果顯示與全球暖化相同的趨勢，但從台灣測站資料發現 1950 年代早期，夏季有突然增長的訊號，其中南部測站特別明顯，但這部分還需要另外研究以找出原因。

利用美國國家環境預測中心與日本氣象廳所產製的重分析資料(20C 與 JRA55)分析季節變遷趨勢也呈現與觀測類似的結果。但是相對於觀測資料，重分析資料在夏季變遷結果較為低估，而在冬季部分又稍微高估。第五階段耦合氣候模式對比計畫(CMIP5)中 15 個模式也模擬出類似的趨勢，夏季的季節變遷較為顯著，有超過半數的模式顯示夏季有劇烈的擴張情況；但多數模式對於冬季的季節變遷估計較弱。雖然模式結果之間有相當大的差異，但是仍可提供有參考價值的未來季節變遷資訊。以 1961-1990 年間的氣候值做季節轉變門檻，在輻射強迫力達到每平方公尺 8.5 瓦(RCP8.5)的情境下，台灣氣溫季節變遷的幅度將會比現在還要更大。21 世紀末的結果顯示，台灣全年將有超過 50% 的日子為夏季，而冬季將減少到最多僅持續一個月左右，甚至有部分模式顯示 2050 年後，台灣將沒有冬季存在。

關鍵字：氣溫季節循環、全球暖化、CMIP5 模式

一、前言

全球暖化一直是非常熱門的議題。2007年政府間氣候變遷專門委員會(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)的第四次報告即指出過去百年來全球平均溫度已上升 0.74°C (Solomon et al., 2007)。2013年IPCC的第五次報告也指出暖化現象涵蓋了幾乎所有的陸地與海洋，1880-2012年間在全球各地造成了 $0.65\text{-}1.06^{\circ}\text{C}$ 的增溫(Stocker et al., 2013)。暖化效應改變了地球的平均溫度場狀態。

由於地球的自轉軸與公轉軸有一夾角，使得太陽的輻射會隨著時間從不同的角度入射，使得地球有季節的變化。各地、各季節有不同的天氣特徵，但在全球暖化的背景下，我們現在所熟知的自然季節在未來將會改變。Sparks and Menzel(2002)以及Menzel (2003)指出全球暖化會導致秋季肇始時間延後且春季肇始時間提前。Qian et al. (2009)分析斯德哥爾摩的觀測日平均溫度資料也發現1885-1999年間的春季肇始有提前的趨勢。Ye et al. (2003)分析北京、海拉爾以及蘭州等地區在1950-2000年間的季節變遷，發現這些城市的夏(冬)季愈來愈長(短)，夏(冬)季的起始時間提早(延後)，結束時間延後(提早)。Miao and Wang (2007)以及Yan et al. (2011)的研究也得到類似的結果。Yan et al. (2011)分析1960-2008年間541個中國各地觀測站的日均溫，並發現中國冬季的長度變遷趨勢為減少(2-6天/10年)，而夏季則是增加(2-4天/10年)。

季節變遷不僅是改變四季的肇始、結束時間，暖季的增長，也影響到植物的生長季節(Sparks and Menzel, 2002; Menzel et al., 2003; Ye et al., 2003)。Menzel et al. (2003)發現全球暖化的趨勢下，歐洲地區的無霜期會增長，將會增加植物的生長季節。不過2017年的台灣氣候變遷科學報告呈現相反的結果，報告指出台灣作物的生育日期在暖化的情境下會縮短並導致農業產量減少(童等，2017)。除此之外，Sparks and Menzel (2002)分析生物與環境變遷的關係時，發現鳥類的遷徙在近幾十年來有提前的趨勢。特別是英國的灰沙燕，20世紀中時灰沙燕大概都在3月中抵達艾塞克斯郡，但是到了20世紀末，灰沙燕提前了大概半個月抵達。因此季節變遷的探討將不僅有助於農作物在耕種與收成的規劃，對生態系的變遷也非常重要，並且也可為未來極端天氣現象的變遷提供一個背景場的參考。

根據2011年台灣氣候變遷科學報告的研究結果，六個台灣百年平地氣象測站暖化程度比全球平均還要快速(許等，2011)。本研究將針對台灣6個擁有百年觀測資料的測站進行分析，了解台灣目前氣溫季節循環的變遷趨勢，並比對重分析資料的分析結果，再利用第五階段耦合氣候模式對比計畫(Coupled Model Intercomparison Project Phase 5; CMIP5; Taylor et al., 2012)中的模式，對台灣未來暖化情境下的氣溫季節循環變遷進行推估。

二、 資料與方法

(一) 資料

本研究將對中央氣象局有百年觀測時間之測站，分析氣溫的季節變遷特性。臺灣測站溫度資料使用中央氣象局之臺北、臺中、臺南、恆春、臺東、花蓮等測站資料。資料開始時間，臺北、臺南、恆春為 1900 年，臺東、臺中為 1901 年，花蓮為 1911 年；結束時間皆為 2015 年。為了討論未來氣溫季節循環的變遷，本研究將使用 CMIP5 模式來進行推估，並利用重分析資料來評估模式的模擬能力。重分析資料使用 National Centers for Environmental Prediction (NCEP) Twentieth Century Reanalysis V2(20C; Compo et al. 2011)及 Japanese 55-year Reanalysis Project (JRA55; Kobayashi et al. 2015) 兩組再分析資料的日均溫。資料解析度與時間分別為 $2^{\circ}\times 2^{\circ}$ 、1900-2012 年(20C)，以及 $1.25^{\circ}\times 1.25^{\circ}$ 、1958-2015 年(JRA55)。為了比較模式與重分析資料，解析度低於 $2^{\circ}\times 2^{\circ}$ 的模式將不予使用。因此僅留下 15 個 CMIP5 模式 (ACCESS1.0、ACCESS1.3、CCSM4、CESM1-BCG、CMCC-CM、CMCC-CMS、CNRM-CM5、CSIRO-Mk3-6-0、INM-CM4、IPSL-CM5A-MR、MIROC5、MPI-ESM-LR、MPI-ESM-MR、MRI-CGCM3、NorESM1-M)進行分析。詳細的模式資訊記錄在表 1 中。由於解析度的關係，在重分析資料與模式中皆以台灣整體的季節變遷作為討論，不再對台灣進行分區討論，因此選取 $20-25^{\circ}\text{N}$ 、 $120-125^{\circ}\text{E}$ 的區域平均氣溫代表台灣氣溫。

(二) 季節變遷的定義

台灣位於四季分明的亞熱帶地區，為了定義出明確的季節變化，本研究將利用一些數學方法對日均溫進行濾波，將季節以下的訊號濾除，只留下較長周期的溫度變化訊號，以得到季節轉換的資訊。Yan et al. (2011) 將日均溫資料以 EEMD (Ensemble Empirical Mode Decomposition) 方法作分解 (Wu and Huang, 2009)，再將長周期 (周期近一年及以上) 的部分合併，得到一組新的長周期日均溫資料 (Qian et al., 2009) 進行分析。本研究參考 Yan et al. (2011) 的方式，將日均溫資料以 Fourier Transform 方法做分解後再合併，以得到長周期之日均溫資料。但是由臺灣測站的波譜分析 (圖未顯示) 可以得知，日均溫的時間序列為年頻率 1 主宰，即周期為一年的訊號最強，其次為年頻率 2 (半年週期) 的部分，第三為年頻率 6 (週期 2 個月) 的訊號，但第三強的訊號實際僅佔微弱的強度。考量上述情形，加上本研究重點在於季節 (3 個月以上) 的變化，故於合成長周期訊號時，僅取年頻率在 2 以下 (周期在半年以上) 的部分進行合成。為避免濾波對資料頭尾的影響，以及在最後一年的冬季會出現有起始而沒有結束時間 (結束時間出現在次年) 的情形，資料頭尾各一年的季節時間將不予決定。以台北站為例，該站之資料區間為 1900-2015 年間，濾波後去掉頭尾各一年，因此只有分析 1901-2014 年間之資料。

為了分析季節在這幾十年以及未來的變遷，本研究訂定 1961-1990 年期間的平均值為

氣候值，以此期間所得到的冬夏氣溫閾值作為季節變換的門檻值。季節閾值定義的方法如下，首先將此期間的日均溫透過濾波再合併得到長周期日均溫的氣候值(如圖 1 紅色實線)，以滑動的方式計算出最暖(冷)的 90 日溫度，取頭尾兩日的溫度平均做為夏(冬)季起始與結束的閾值。我們將此閾值與每年氣溫時間序列比較，就可定義出每年的夏(冬)季的起始與結束時間、季節長度、季節峰值溫度與發生時間。本研究分析前述變數在每一測站或網格的逐年變化，

研判夏冬兩季的季節變遷趨勢。

以上述方法分析台灣六個測站之季節閾值，結果呈現在表 2。原則上較低緯度的測站，其夏季閾值溫度應該會比位在較高緯度的測站還要高，但是可看到台北與台南的夏季閾值溫度，分別都比台中與恆春的溫度還高，可能是由於都市熱島效應的關係。冬季閾值溫度則呈現隨著緯度愈低溫度越高的分布，恆春、臺東在 20°C 以上，臺南、花蓮於 19°C 左右，臺中、臺北則在 18°C 以下。

表 1 為所選定的模式之詳細資訊。

模式	模式名稱	解析度(Lat*lon)	機構
ACCESS1-0	Australian Community Climate and Earth System Simulator 1.0	1.25° x 1.875°	CSIRO (Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation, Australia), and BOM (Bureau of Meteorology, Australia)
ACCESS1-3	Australian Community Climate and Earth System Simulator 1.3	1.25° x 1.875°	
CCSM4	Community Climate System Model version 4.0	0.9° x 1.25°	National Center for Atmospheric Research
CESM1-BGC	Community Earth System Model, version 1-Biogeochemistry	0.9° x 1.25°	National Science Foundation, Department of Energy, National Center for Atmospheric Research
CMCC-CM	CMCC Climate Model	0.75° x 0.75°	Centro Euro-Mediterraneo per I Cambiamenti Climatici
CMCC-CMS	CMCC Climate Model with a resolved Stratosphere	1.865° x 1.875°	
CNRM-CM5	CNRM Coupled Global Climate Model, version 5	1.4° x 1.406°	Centre National de Recherches Meteorologiques / Centre Europeen de Recherche et Formation Avancees en Calcul Scientifique
CSIRO-Mk3-6-0	Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation	1.87° x 1.875°	Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation in collaboration with the Queensland Climate Change Centre of Excellence

	Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation, Mark 3.6.0		
INM-CM4	Institute for Numerical Mathematics Climate Model Version 4	2° x 1.5°	Institute for Numerical Mathematics
IPSL-CM5A-MR	IPSL Coupled Model, version 5, coupled with NEMO, mid resolution	2.5° x 1.267°	Institut Pierre-Simon Laplace
MIROC5	Model for Interdisciplinary Research on Climate, version 5	1.4° x 1.406°	Atmosphere and Ocean Research Institute (The University of Tokyo), National Institute for Environmental Studies, and Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology
MPI-ESM-LR	MPI Earth System Model, low resolution	1.865° x 1.875°	Max Planck Institute for Meteorology (MPI-M)
MPI-ESM-MR	MPI Earth System Model running on medium resolution grid	1.875° x 1.875°	
MRI-CGCM3	MRI Coupled Atmosphere–Ocean General Circulation Model, version 3	1.121° x 1.125°	Meteorological Research Institute
NorESM1-M	Norwegian Earth System Model, version 1	2.5° x 1.895°	Norwegian Climate Centre

表 2 以 1961-1990 年期間的日均溫為標準，所計算出的台灣六個百年測站之冬、夏季溫度閾值。單位為°C。

	臺北	臺中	臺南	恆春	臺東	花蓮
夏季	27.41	27.37	28.09	27.63	27.66	26.99
冬季	17.30	18.01	19.18	22.10	20.49	19.08

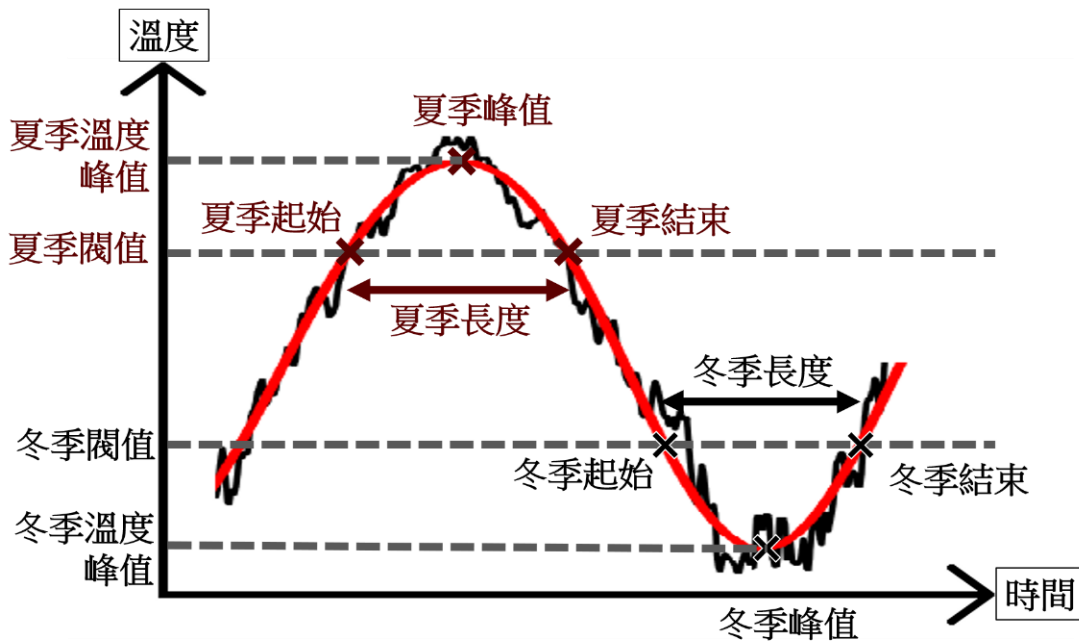


圖 1 以溫度定義夏冬兩季之方法。黑色細實線代表為原始日均溫，紅色粗實線為濾波後之溫度長周期變化。

三、 分析結果

(一) 台灣各測站之氣溫季節變遷

臺北(圖 2a)、花蓮(圖 2b)與台中(圖 2c)站的氣溫季節變遷結果顯示，夏季起始(結束)時間從 20 世紀初到 21 世紀初百年間，提前(延後)了約 1-1.5 個月，夏季的長度從原本的 1.5 個月增加到近 4 個月。不過以 1961-1990 年作為氣候值而訂出的氣候閾值來看台南(圖 2d)、恆春(圖 2e)、台東站(圖 2f)的夏季變遷，會發現約莫 1950 年以前這些測站都很難定義出明確的夏季。根據 Hung (2009)分析結果，發現此一跳躍現象應該與測站的遷移或者更換儀器而造成資料的不連續無關，其中一佐證就是圖 3d-f 中的冬季溫度變化並不存在類似的跳躍現象，而分析這些測站的平均溫度時，發現在 20 世紀前期較低，溫度幾乎都低於門檻值(圖未顯

示)，因此用 20 世紀後期的溫度作為標準，則這些測站在 20 世紀前期會較難定義夏季的起始與結束。此夏季溫度在 50 年代初的跳躍式上升，Lo and Hsu (2008)的研究中也有提到，且不僅是台灣，東亞鄰近地區也發生類似的現象。分析海溫與環流變化後，他們發現可能與太平洋年代振盪(Pacific Decadal Oscillation)的相位轉換有關。另一方面也可從此結果發現，這三個位於台灣南部的測站，其在 20 世紀後半暖化的幅度比位於北部、中部的三個測站還要大(圖未顯示)。但即使是從 1950 年以後來看夏季的季節變遷，六個測站依然可看到夏季起始時間提前、結束時間延後的趨勢。另外可看到除了台北與花蓮站以外，其他測站皆顯示夏季的起始與結束時間有較大的年際差異。

六測站的冬季起始時間與結束時間差異較小(如圖 3)。在 20 世紀初，約從 12 月初開

始到 3 月份結束，持續長度約 3.5 個月。但隨著時間冬季的延時愈來愈短，冬季的開始延後到 12 月中末至 1 月初左右，結束也提早到 2 月底、3 月初。在 21 世紀初，相對於 20 世紀初的冬季長度，減少了約 1.5 個月的時間。有趣的是，幾乎所有測站都可看到在 1990 年代有一個跳躍性的變化，特別是臺北、臺中、花蓮，臺南，冬季長度明顯變短。

各測站的夏季峰值發生時間(圖 2 的十字部分)較不固定，臺北、花蓮的峰值相對較集中，約發生於七月中到八月中之間，但台中、台南、恆春以及台東的峰值散布較廣。這可能由於南部地處溫度的變化相對較小，因此比較容易受到局部的加熱效應或強對流造成的降溫效應影響溫度的變化，進而影響到峰值時間點。然而各測站冬季的峰值時間點(圖 3 十字部分)就較一致了，大約都是發生在一月底二月初，主要也與冬季的季節特性有關。

表 3 為量化圖 2 與圖 3 後得到的百年(1912-2014 年間)、50 年(1965-2014 年間)趨勢分析。所有測站皆一致顯示夏季季節變化的百年趨勢呈現起始時間提前(2.43-5.65 天/10 年)、結束時間延後(2.86-7.32 天/10 年)，夏季延時變長(5.29-12.51 天/10 年)。冬季起始時間延後(1.13-2.16 天/10 年)、結束時間提前(1.45-2.47 天/10 年)、冬季延時變短(2.74-4.63 天/10 年)。有趣的是，各測站在夏季變遷的幅度都比冬季變遷的幅度還要大，此現象在南部測站更是明顯。前述的百年趨勢都通過 95% 統計檢定。台北與台中站的近 50 年夏季長度變遷趨勢比百

年變遷趨勢還要大，顯示近 50 年來台北台中兩站的季節變遷有加劇的現象。但是台南、恆春、花蓮與台東這幾個測站的百年夏季長度變化趨勢比 50 年夏季變化趨勢更大，主要是由於這幾個測站在 20 世紀初期沒有明顯的夏季起始與結束點，而是在 1950 年代以後(花蓮站的跳躍點出現在 1920 年代)才開始有明顯的、跳躍性的夏季始末時間點。冬季則沒有類似的問題。從冬季的趨勢分析可以發現，各測站近 50 年來的季節變遷速率都比過去百年還要劇烈，且大部分都有通過檢定。

在百年趨勢上也可看到，夏、冬季起始的變化量值小於夏、冬季結束的變化量值；相對應的夏季的峰值較多呈現延後的趨勢，冬季則為提前的趨勢。各測站夏冬兩季的起始、結束變化量值在 50 年趨勢上較不一致；但是夏季多數測站峰值發生時間也是呈現延後、冬季峰值為提前的趨勢。至於峰值溫度，所有測站皆顯示溫度是增加的。以百年趨勢而言，兩季約增加 0.08-0.17°C/10 年；50 年趨勢則是台北與台中站的峰值溫度增加最多，夏季約增加 0.32°C/10 年，冬季約增加 0.31°C/10 年，其他測站的峰值溫度也有上升 0.10-0.22°C/10 年的趨勢。其中台北、台中兩站 50 年峰值溫度的趨勢幾乎是百年趨勢的兩倍，顯示緯度較高且較都市化的地區在溫度有較大的變異度。冬季峰值溫度也都是增加趨勢，且所有測站均顯示 50 年趨勢近乎是百年趨勢的兩倍。

表 3 臺灣六個百年測站於 1912-2014 年間的冬、夏兩季的百年、50 年長期變遷趨勢，單位為每 10 年之日數與溫度變化量(日/10 年、°C/10 年)。負值表示日期提早、日數減少或溫度下降。正值表示日期延後、日數增長或溫度上升。粗體表通過 95%統計檢定。

		夏季					冬季				
		起始	峰值	結束	長度	峰值溫度	起始	峰值	結束	長度	峰值溫度
台北	1912-2014	-2.43	0.3	2.86	5.29	0.16	2.16	-0.19	-2.47	-4.63	0.17
	1965-2014	-4.42	0.17	4.29	8.7	0.32	3.88	-0.21	-4.27	-8.15	0.31
台中	1912-2014	-2.77	0.92	3.74	6.52	0.10	1.69	-0.19	-2.02	-3.71	0.16
	1965-2014	-4.42	0.17	4.29	8.7	0.32	3.88	-0.21	-4.27	-8.15	0.31
台南	1912-2014	-5.65	1.33	6.86	12.51	0.17	1.13	-0.29	-1.68	-2.81	0.12
	1965-2014	-4.7	2.93	6.51	11.21	0.16	2.08	0.03	-1.98	-4.05	0.21
恆春	1912-2014	-3.61	1.82	7.32	10.93	0.10	1.29	-0.14	-1.45	-2.74	0.08
	1965-2014	-4.37	0.79	4.1	8.48	0.10	1.92	0.34	-1.33	-3.25	0.12
台東	1912-2014	-4.76	0.71	5.7	10.47	0.16	1.52	-0.14	-1.77	-3.29	0.09
	1965-2014	-4.4	0.35	4.48	8.88	0.17	2.7	0.43	-1.86	-4.57	0.17
花蓮	1912-2014	-3.9	0.22	4.13	8.03	0.15	1.81	-0.16	-2.13	-3.94	0.11
	1965-2014	-3.44	-0.04	3.32	6.76	0.17	3.3	0.67	-2.19	-5.5	0.22

表 4 同表 3，但為 20C 與 JRA55 重分析資料於 1958-2011 年間之長期變化趨勢與峰值溫度趨勢。

	夏季					冬季				
	起始	峰值	結束	長度	峰值溫度	起始	峰值	結束	長度	峰值溫度
20C	-2.19	1.19	4.22	6.41	0.12	5.2	0.04	-5	-10.2	0.37
JRA55	-0.61	0.34	1.54	2.14	0.03	3.14	0.26	-2.57	-5.71	0.21

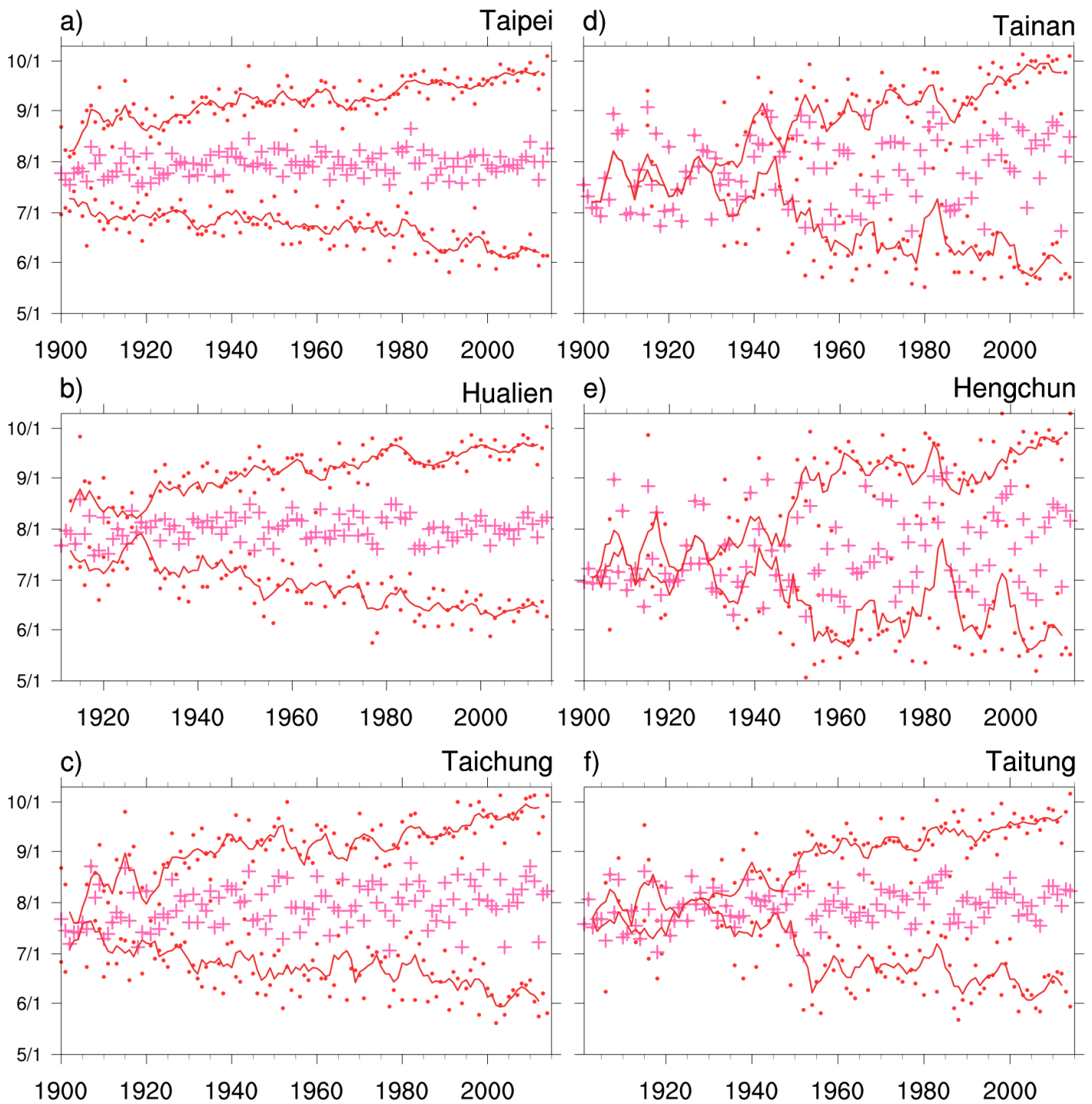


圖2 台灣六個百年測站所定義出的夏季之始末日期(圓點)。細實線為五年移動平均的結果。十字為峰值日期。橫軸為月份，縱軸為日期。

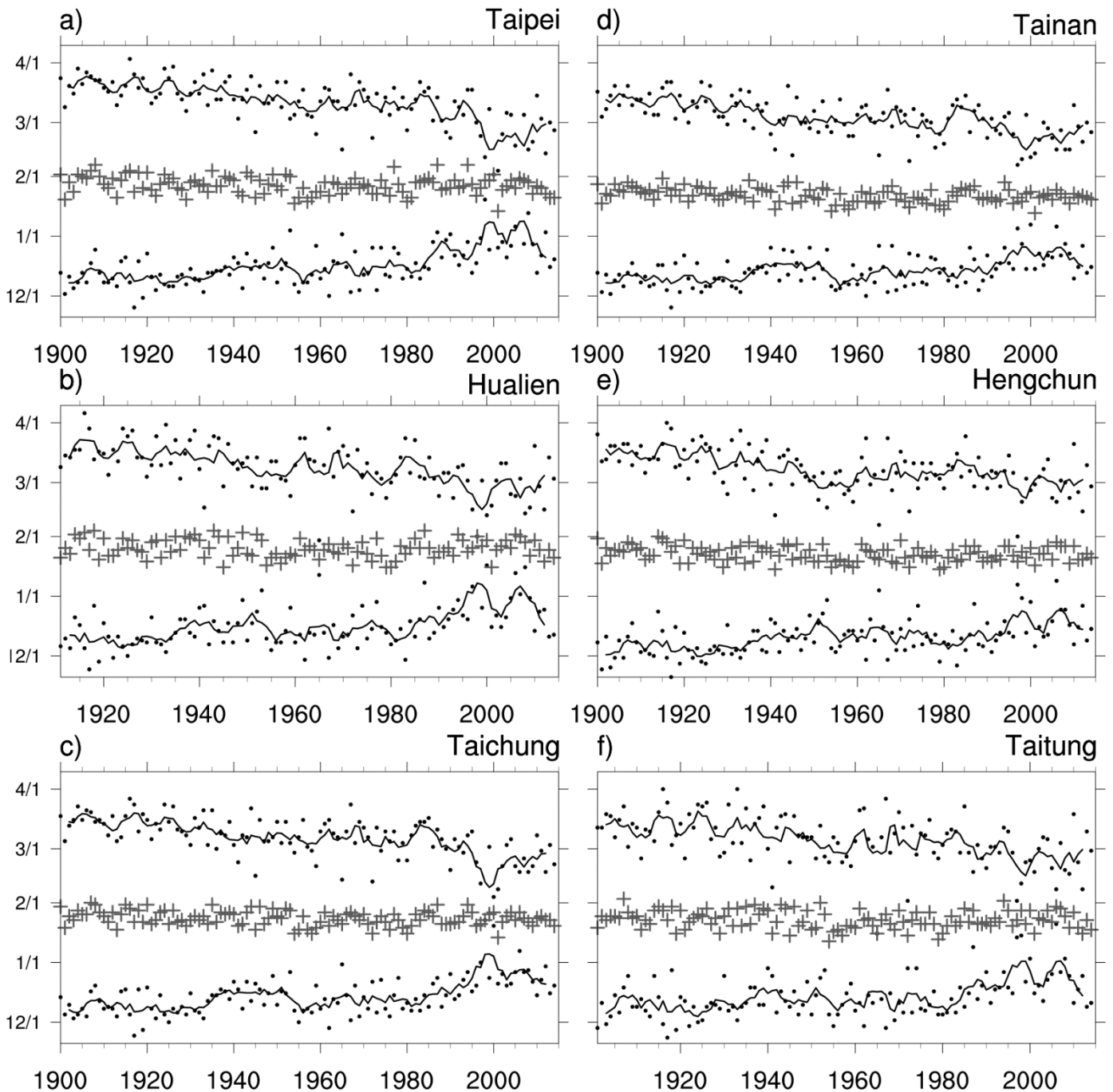


圖3 同圖2，但為冬季之結果。

(二) 重分析資料中的台灣氣溫季節變遷

20C 跟 JRA55 的季節變遷(如圖 4、圖 5)，也呈現與台灣觀測站類似的現象。由圖 4 可看到 20C 資料顯示 20 世紀初期的夏季從 7 月初開始到 8 月中末左右結束，延時約 2 個月；冬

季從約 11 月底、12 月初開始，一直到隔年 3 月底、4 月初結束，延時約 4 個月。20 世紀中期，20C 與 JRA55 的冬、夏兩季起始與結束時間皆差不多，此時已經可以發現相對於世紀初期，夏季的起始(結束)時間變早(晚)，冬季的起始(結束)時間變晚(早)。到了 21 世紀初，夏季

延時擴張近一倍(約持續 3-4 個月), 冬季延時則縮減近一半(約持續 2-3 個月, 如圖 5); 夏季的起始(結束)時間提早(延後)到 6 月份(9 月份), 冬季的起始(結束)時間延後(提早)到 12 月底、一月初(2 月底、3 月初)左右。由圖 5 可看到兩筆重分析資料皆顯示夏季增長, 冬季減短的趨勢。其中在 1990 年代, 兩筆資料的冬季起始與結束時間都有跳躍性的變化(如圖 4), 這部分跟台灣測站的觀測結果吻合。1990 年後夏季起始與結束時間的年際變化幅度更大更明顯。

將圖 4 與圖 5 的結果以數值呈現出 1958-2011 年間的季節變遷情況 (如表 4)。可以看到 20C 與 JRA55 的夏季起始時間分別提前 2.19、0.61 天/10 年, 結束時間則分別延後 4.22、1.54 天/10 年。而冬季的起始時間分別延後 5.2、3.14 天/10 年, 結束時間則分別提前 5、2.57 天/10 年。夏季持續時間分別增加 6.41、2.14 天/10 年, 冬季持續時間分別減少 10.2、5.71 天/10 年。夏季的起始時間提前幅度較小, 結束時間延後的幅度較大, 因此峰值出現的時間呈現延後的趨勢; 冬季起始時間延後的幅度比結束時間提前的幅度還要大, 因此冬季的峰值出現的時間有延後的趨勢。冬、夏兩季的峰值溫度在這 1958-2011 年間有增加的趨勢, 增加量約為 0.03-0.37°C/10 年。這邊也可以發現冬季峰值溫度的增加趨勢比夏季還要多, 重分析資料的夏季季節變遷都比較輕微, 冬季則是有相對較明顯的變遷; 相對的, 觀測顯示相反的結果, 夏季的變遷幅度較冬季大。同時, 20C 資料的

溫度增幅比 JRA55 大, 從量化的結果可以明顯看到 JRA55 冬、夏季節變遷的變化量比 20C 小, 且趨勢較少通過統計檢定。

而氣溫季節變遷不僅僅發生在台灣, 利用 JRA55 分析東亞地區的季節變遷(如圖 6, 20C 之結果與 JRA55 相似, 因此未呈現 20C 之結果), 可發現顯示整個東亞地區的夏(冬)季有顯著的增長(縮減)(見圖 6a、b), 此結果與 Ye et al. (2003)與 Yan et al. (2011)的研究果一致。而夏季峰值溫度與冬季峰值溫度(圖 6c、d)也可看到暖化效應下極端溫度增加的結果(Founda et al. 2004; Alexander et al. 2006, 2007; Della-Marta et al. 2007)。

(三) 台灣氣溫季節變遷在 CMIP5 模式中的表現

15 個 CMIP5 模式在夏季的起始與結束時間評估中呈現相當大的差異(圖未顯示), 最多可以相差 2 個月, 各模式在 1950 年代的夏季起始時間大概發生在 6 月初到 8 月初之間, 結束大概落在 8 月中到 10 月初之間。到了 21 世紀初, 多數模式都顯示夏季有擴張的情形, 起始時間提前到整個 6 月份, 結束時間延後到 9 月中到 10 月中之間。圖 7a 為夏季長度的變遷。各模式在夏季長度的評估也有很大的差異, 1950 年代的夏季長度約 40-110 天, 隨著全球暖化, 夏季長度也持續的增加, 到了 21 世紀初夏季的長度增加到 95-130 天左右。

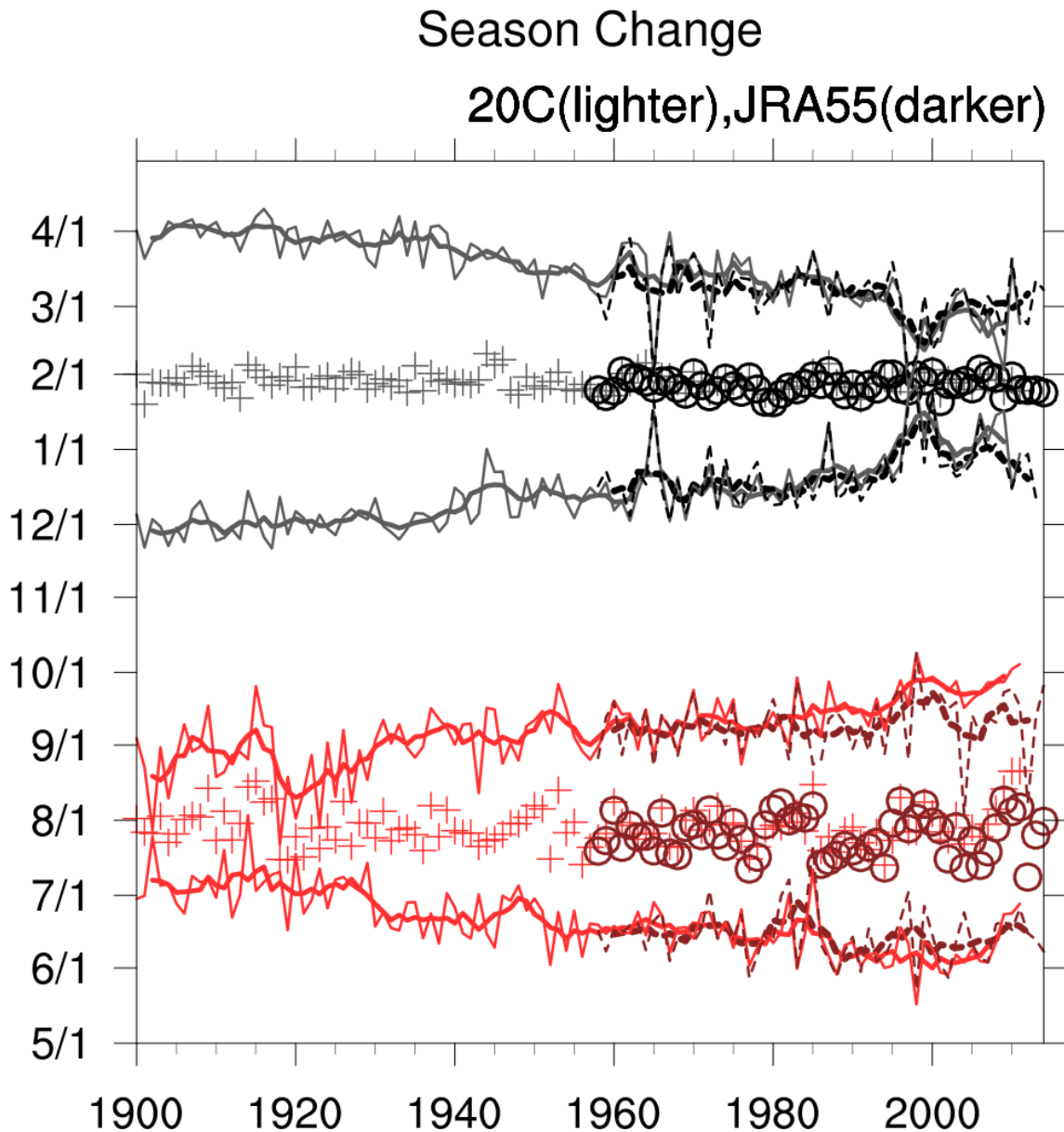


圖 4 20C(淺色實線)與 JRA55(深色虛線)重分析資料的台灣冬、夏季季節變遷，資料選取範圍為 20-25°N；120-125°E。紅色細線部分與黑色細線部分分別為夏季與冬季之始末日期。粗線為 5 年滑動平均的結果。十字(20C)與圓環(JRA55)為峰值發生日期。

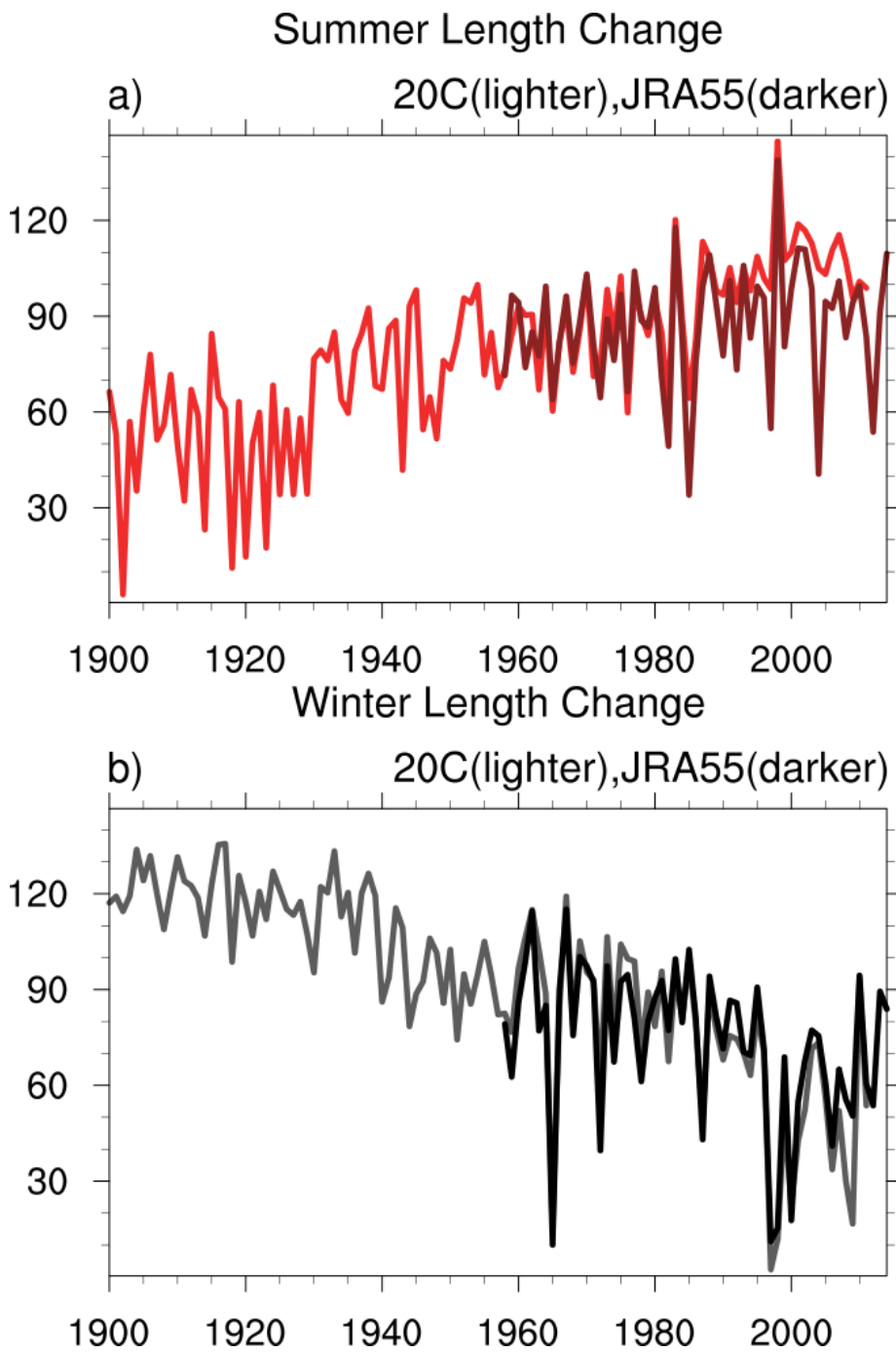


圖 5 20C(淺色實線)與 JRA55(深色虛線)重分析資料的台灣冬、夏季季節變遷，資料選取範圍為 20-25°N；120-125°E。a)為夏季長度的趨勢。b)為冬季長度變遷趨勢。縱軸單位為天數。

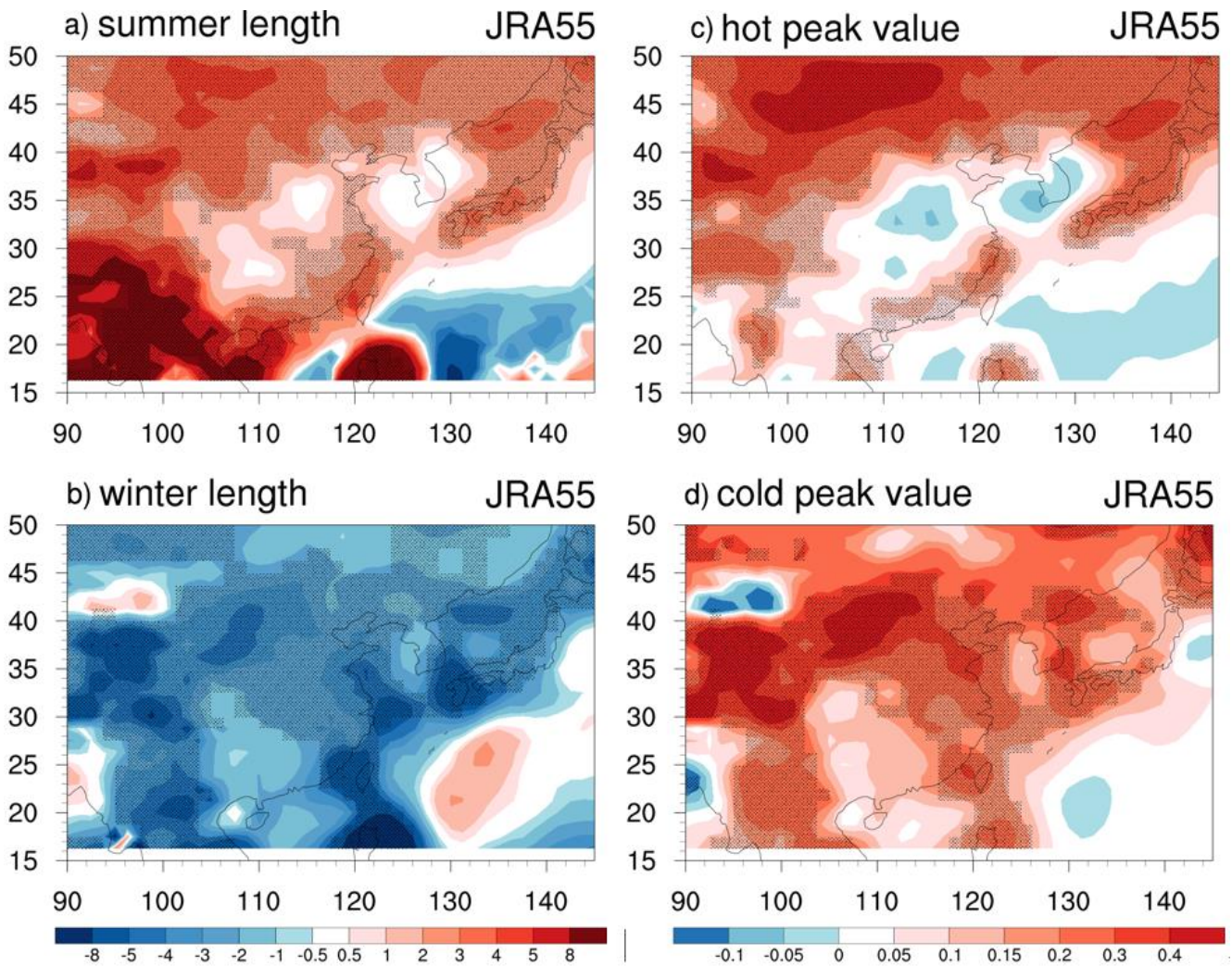


圖 6 JRA55 於 1958-2015 年間之東亞 a)夏季、b)冬季長度變遷(單位：天/10 年)以及 c)夏季、d)冬季峰值溫度之變遷情況(單位：°C/10 年)。

而冬季時，各模式冬季起始與結束時間之間的差異相對較小(圖未顯示)。1950 年代，各模式冬季開始的時間，大約落在 12 月中到 1 月初之間，結束時間多落在 3 月中、底的時候。但 CMIP5 多數模式呈現冬季的季節變遷較少，21 世紀的冬季開始時間僅有些微延後，大概發生在 12 月中到 1 月中，冬季結束時間有些微提前，大概提前到 2 月底到 3 月中。部分模式

在冬季開始時間並沒有明顯的變遷趨勢。冬季長度的變遷趨勢也不大(如圖 7b)。1950 年代 CMIP5 模式呈現冬季長度大概是 64-95 天，到了 21 世紀初季節長度僅些微減少，約在 53-86 天之間。模式中也看得到冬季縮減的特徵，且與台灣測站的觀測類似，夏季的季節變遷都比冬季來的明顯。

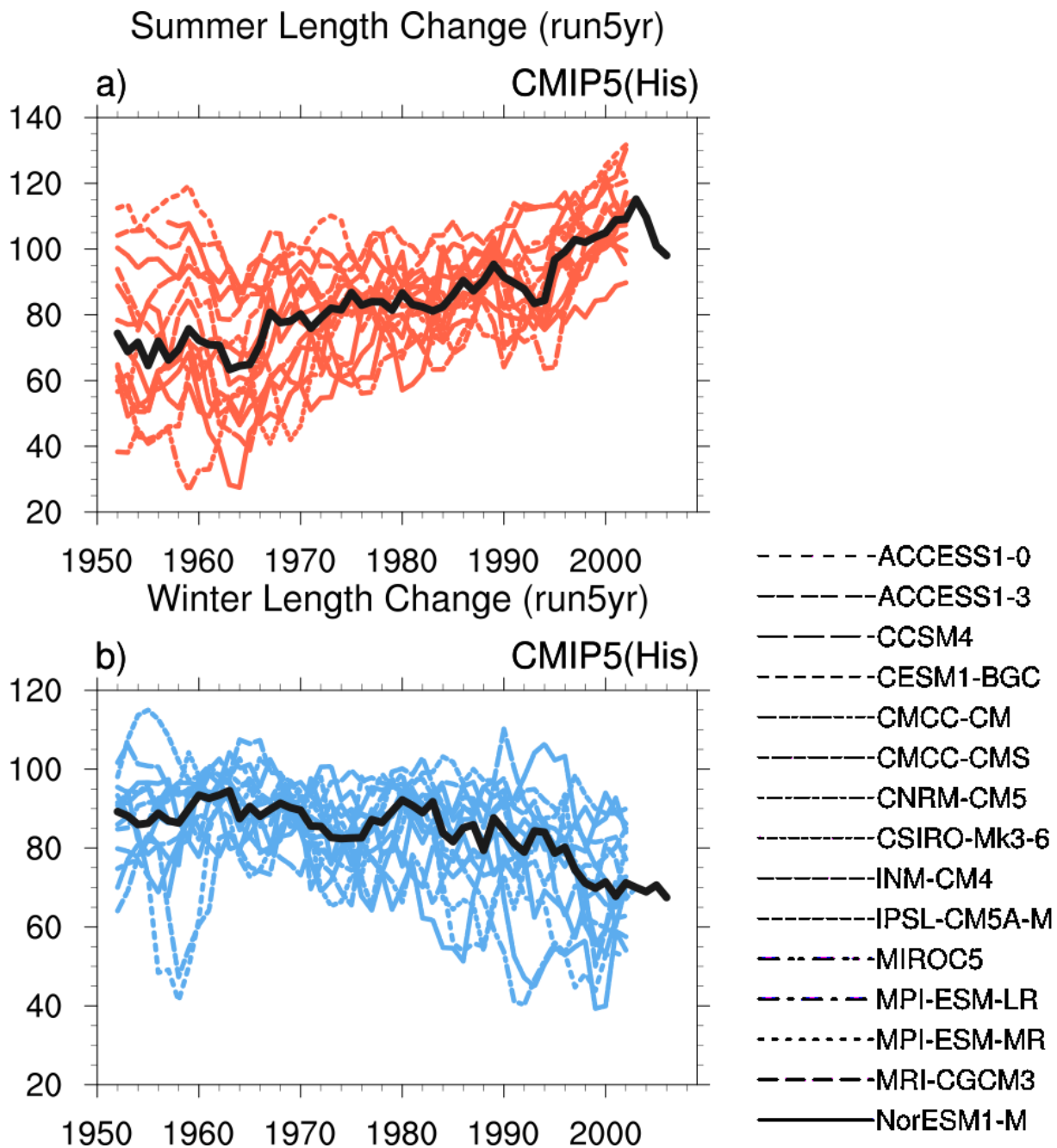


圖 7 CMIP5 中 15 個高解析度模式於 1950-2005 年間的季節長度變遷。a)夏季。b)冬季。黑線部分為模式的中位數結果。縱軸單位為天數。此處的線條為五年滑動平均後的結果。

同樣將上面的結果以量化的方式呈現(如表 5)。可以看到所有模式都顯示夏季的起始時間提前(0.25-7.92 天/10 年)、結束時間延後(0.82-7 天/10 年)，整體夏季是拉長的，增加幅度大約是 1.07-12.82 天/10 年。夏季峰值發生

時間的變遷與季節起始和結束時間的變遷幅度有較大關係，夏季若起始提前的趨勢較結束延後較大的話，則峰值發生日期也會提前，反之亦然。不過從表 5 可看到 CMIP5 中各模式的夏季峰值時間有的提前有的延後，且多數沒

通過統計顯著性。但是多數模式都顯示峰值溫度有顯著的增加。

表 5 也清楚呈現冬季的起始時間延後(0.1-4.26 天/10 年)，但各模式在冬季結束時間的評估上有不同的結果。多數模式都顯示冬季結束時間有提前(0.19-5.25 天/10 年)，但 CSIRO-Mk3-6-0 與 MIROC5 卻顯示冬季的結束時間延後 0.33、0.14 天/10 年，不過未通過統計檢定。多數模式仍顯示冬季長度在縮短，縮短幅度大約是 0.7-9.51 天/10 年。其中可看到 MIROC5 的結果不太一致，該模式的冬季起始與結束都延後，且結束時間延後幅度較大，因此冬季的長度相對呈現增加的情況。不過該模式的結果並未通過 95% 的統計檢定。而在冬季的峰值發生時間，各模式也有不同的結果，但是幾乎所有模式都呈現峰值溫度有增加的趨勢。表格中也可看到冬季的季節變遷幾乎沒有通過統計顯著檢定，僅 CMCC-CMS、IPSL-CM5A-MR、MPI-ESM-LR 與 MRI-CGCM3 有較顯著的冬季季節變遷。

雖然說多數模式在季節變遷趨勢上的評估有相當大的差異，但季節的起始、結束時間以及長度上都與觀測和重分析資料有一致的趨勢。不過可以發現多數的 CMIP5 模式在夏季的季節變遷有高估的傾向，但在冬季的季節變遷就較接近觀測與 JRA55 重分析資料。

(四) 台灣未來季節變遷的推估

雖然模式間的差異頗大，但是模式仍可以掌握到與觀測、重分析資料一致的季節變遷訊

號，因此我們利用 CMIP5 模式分析在 RCP8.5(溫室氣體高度排放情境下，世紀末之輻射強迫力達到每平方公尺 8.5 瓦)情境下探討台灣未來的季節變遷。這裡的季節定義依然是用 1961-1990 年間的氣候值做標準。圖 8a 是夏季起始與結束時間在 2006-2100 間的變遷，可看到各模式在夏季的結果差異依然很大，最多相差 1.5 個月，但所有模式都一致有夏季擴張的趨勢。21 世紀初期，夏季的起始時間約在 5 月底-6 月底之間，結束在 9 月底-10 月底之間。到了 21 世紀末，夏季的起始時間平均提前到 4 月初到 5 月初之間，結束時間則延後到 11 月份。夏季的總天數也從 21 世紀初的 90-150 天，延長到 190-240 天左右(見圖 9a)。

模式模擬的冬季季節變遷結果，則有與夏季相反的趨勢(見圖 8b)。所有模式皆顯示冬季有縮短的趨勢，但是模式之間的差異甚大。多數模式呈現 21 世紀初的冬季起始(結束)時間約莫在 12 月底-1 月份(2 月底-3 月)。從圖 9b 中可看到，台灣冬季天數在 RCP8.5 情境下有非常劇烈的減少，21 世紀初冬季長度還有 1-3 個月左右，但超過半數模式(ACCESS1-0、ACCESS1-3、CMCC-CM、CMCC-CMS、CSIRO-Mk3-6-0、MIROC5、MPI-ESM-LR、MPI-ESM-MR)顯示 21 世紀中末的冬季將只剩下幾天甚至是完全消失，最長的冬季頂多僅持續 1 個月(CESM1-BCG、CMCC-CM)。因此可以發現，若以現在的標準來看未來的季節，在全球溫度劇烈上升的 RCP8.5 情境下，台灣未來幾乎只有夏季沒有冬季。其中圖 9a 可以看

到 ACCESS1-0、ACCESS1-3 兩個模式在 RCP8.5 暖化情境下，夏季擴張的幅度特別大，該模式在 2050 年後就幾乎沒有冬季了。主要是由於這兩個模式日均溫的季節變化較小(圖

未顯示)，未來可以通過夏季門檻值的天數較多，因此兩個模式在夏季的擴張與冬季的消失明顯比其他模式還要劇烈。

表 5 同表 3，但為 CMIP5 中 15 個模式於 1955-2004 年間之長期變化趨勢。

	夏季					冬季				
	起始	峰值	結束	長度	峰值溫度	起始	峰值	結束	長度	峰值溫度
ACCESS1-0	-1.17	0.02	1.3	2.47	0.02	2.83	-0.12	-3.25	-6.08	0.05
ACCESS1-3	-1	0.52	2.11	3.11	0.04	0.97	-0.1	-1.1	-2.07	0.02
CCSM4	-6.37	0.77	5.55	11.91	0.15	1.49	-0.28	-2.09	-3.58	0.11
CESM1-BGC	-5.71	-1.3	3.36	9.07	0.11	1.31	0.17	-1.22	-2.53	0.07
CMCC-CM	-2.04	0.93	3.2	5.24	0.09	1.87	-0.17	-2.14	-4.01	0.11
CMCC-CMS	-5.49	-0.97	4.15	9.64	0.16	4.26	-0.41	-5.25	-9.51	0.24
CNRM-CM5	-4.03	1.94	4.97	9	0.10	0.63	-0.88	-2.25	-2.89	0.04
CSIRO-Mk3-6-0	-0.25	0.11	0.82	1.07	0.04	1.03	0.76	0.33	-0.7	0.05
INM-CM4	-4.08	-0.1	3.92	8	0.08	1.57	-0.19	-1.99	-3.56	0.09
IPSL-CM5A-MR	-6.31	-0.66	4.33	10.64	0.15	2.13	-0.24	-2.71	-4.84	0.20
MIROC5	-3.13	0.83	2.49	5.62	0.08	0.1	0.1	0.14	0.04	-0.01
MPI-ESM-LR	-7.92	-1.31	4.89	12.82	0.18	2.7	-0.73	-4.38	-7.08	0.20
MPI-ESM-MR	-5.12	1.71	7	12.12	0.19	2.49	-0.09	-2.54	-5.03	0.14
MRI-CGCM3	-2.2	-1.4	0.92	3.11	0.04	1.73	0.54	-0.86	-2.59	0.05
NorESM1-M	-5.65	1.62	5.35	11	0.15	1.39	0.67	-0.19	-1.57	0.01

將圖 8 與圖 9 的結果量化成表 6。夏季起始時間提前幅度為 4.08-11.24 天/10 年、結束時間延後幅度為 4.3-7.67 天/10 年左右。夏季長度增長幅度為 8.38-18.91 天/10 年。而冬季起始時間延後的幅度為 1.11-5.25 天/10 年，結束時間提前幅度為 2.63-5.45 天/10 年左右，冬季長度約減少 4.04-10.53 天/10 年。其中可以

看到 ACCESS1-0、ACCESS1-3 及 CSIRO-Mk3-6-0，在 2006-2100 年間的季節變遷趨勢，相對於 1955-2004 年間還要劇烈，主要是由於這三個模式在 RCP8.5 情境下的暖化趨勢幾乎是現在的 7.56-12.14 倍(圖未顯示)所致。而 CCSM4、CESM1-BGC、MPI-ESM-LR、MPI-ESM-MR 在現在的暖化趨勢就已經相當劇烈了，因此氣溫

季節變遷在現在已經有很顯著的增加趨勢。另外可以發現冬季的季節變遷相對於夏季，變化幅度較小。不過在 RCP8.5 的季節變遷評估中，可以看到冬季與夏季的變化都有通過顯著性檢定。各模式在兩季峰值的發生時間依然有不

同的結果，但是峰值溫度都有顯著的增加，且變遷的幅度都比現在還要劇烈(0.13-0.51/10年)，夏季峰值增溫的幅度大於冬季峰值的增溫。

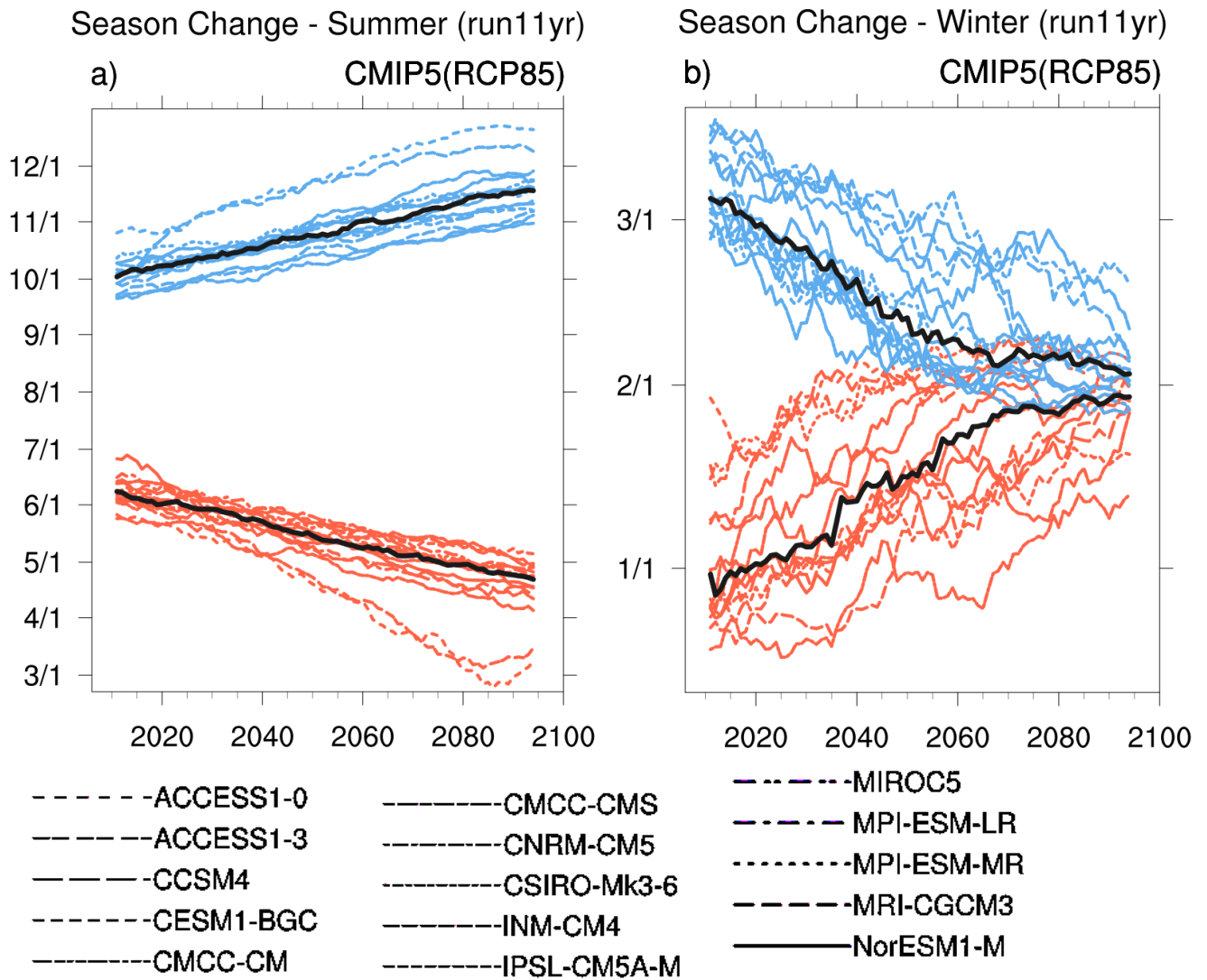


圖 8 CMIP5 中 15 個高解析度模式，在 RCP8.5 情境下，2006-2100 年間的季節起始時間(紅色線)、結束時間(藍色線)之長期變遷趨勢。黑線部分為模式的中位數結果。a)夏季。b)冬季。縱軸為日期。此處的線條為經過 11 年滑動平均後的結果。

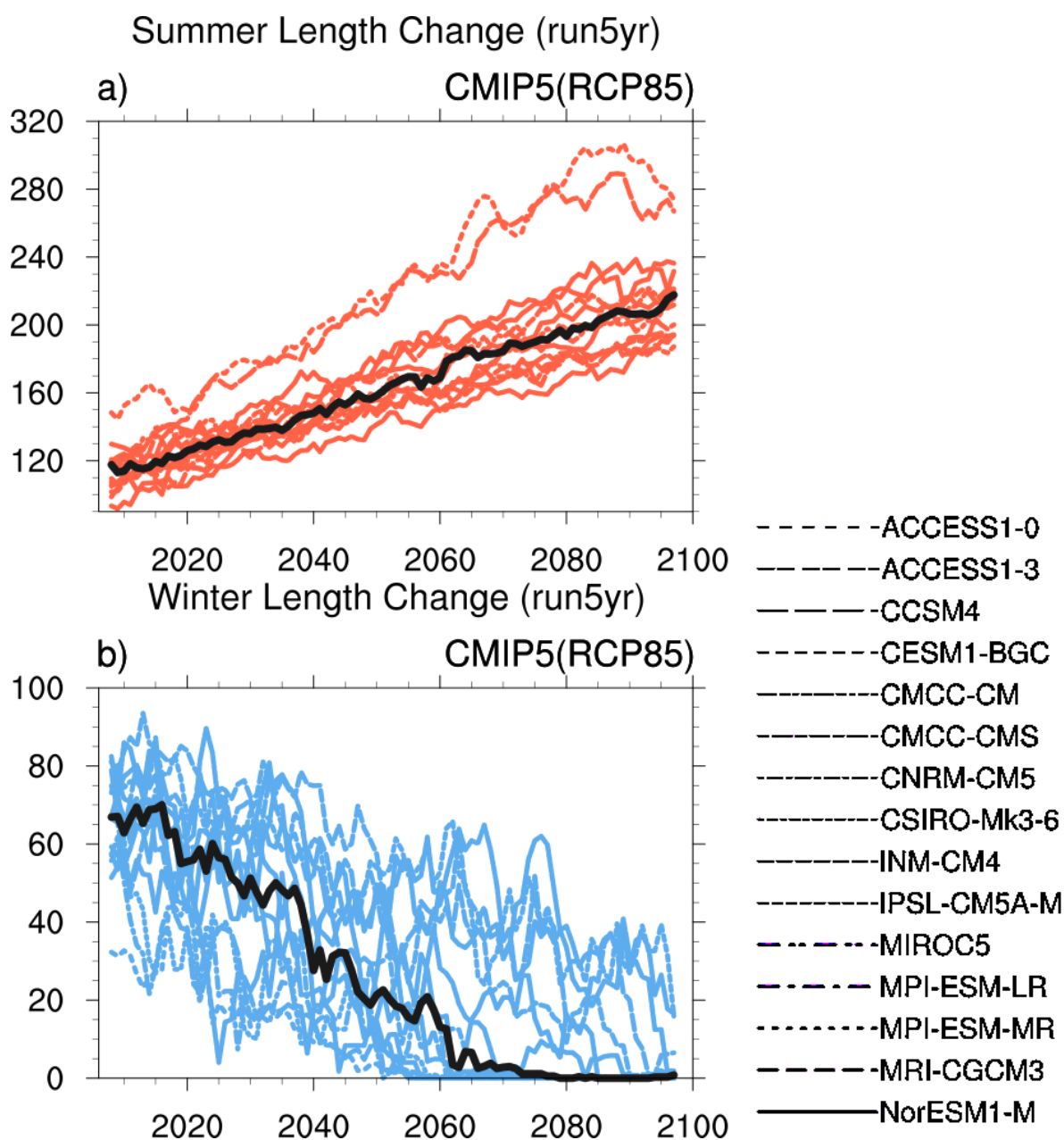


圖 9 同圖 7。但為 RCP8.5 情境下，2006-2100 年間的季節長度變遷。

表 6 同表 3，但為 CMIP5 中 15 個模式在 RCP8.5 情境下，於 2006-2100 年間之長期變化趨勢。

	夏季					冬季				
	起始	峰值	結束	長度	峰值溫度	起始	峰值	結束	長度	峰值溫度
ACCESS1-0	-10.96	0.41	7.66	18.62	0.35	1.11	-0.9	-2.93	-4.04	0.31
ACCESS1-3	-11.24	-0.62	7.67	18.91	0.36	1.91	-1.28	-4.49	-6.4	0.30
CCSM4	-4.57	0.47	4.49	9.06	0.31	3.65	0.02	-3.71	-7.35	0.26
CESM1-BGC	-4.08	0.75	4.3	8.38	0.29	2.82	-0.09	-3.04	-5.86	0.16

CMCC-CM	-6.24	0.19	6.87	13.1	0.42	4.57	0.61	-3.51	-8.08	0.38
CMCC-CMS	-6.51	0.48	7.2	13.71	0.43	3.37	0.24	-2.97	-6.34	0.40
CNRM-CM5	-5.05	0.42	4.75	9.79	0.28	3.24	0.37	-2.63	-5.87	0.13
CSIRO-Mk3-6-0	-6.91	-1.29	4.85	11.77	0.43	3.76	-0.76	-5.45	-9.21	0.51
INM-CM4	-4.81	-0.21	5.31	10.13	0.26	2.22	-0.45	-3.1	-5.32	0.14
IPSL-CM5A-MR	-5.33	1.12	5.58	10.9	0.48	4.32	-0.02	-4.51	-8.83	0.35
MIROC5	-7.6	1.02	6.35	13.95	0.37	4.62	0.25	-4.35	-8.96	0.41
MPI-ESM-LR	-6.6	-0.82	5.69	12.3	0.37	2.3	-0.34	-3.07	-5.37	0.32
MPI-ESM-MR	-5.75	-0.73	5.07	10.82	0.35	2.49	-0.18	-2.94	-5.42	0.31
MRI-CGCM3	-4.52	-0.16	5.17	9.69	0.33	5.25	-0.01	-5.27	-10.53	0.32
NorESM1-M	-8.15	0.15	4.8	12.95	0.34	4.22	0.15	-4.2	-8.42	0.35

四、 結論與討論

從六個百年測站(台北、台中、台南、恆春、花蓮、台東)的觀測資料結果可發現，台灣各地的夏(冬)季愈來愈長(短)，夏(冬)季的起始時間提早(延後)，結束時間延後(提早)。其中台北、台中及恆春的夏季起始與結束時間在近 50 年的變遷趨勢比過去百年的變遷趨勢還要劇烈，但台南、台東與花蓮的近 50 年變遷趨勢較百年變遷趨勢小。變遷趨勢較大且較顯著的為季節的起始與結束時間、長度以及峰值溫度，季節峰值發生的時間較沒有顯著的趨勢變化。

20C 跟 JRA55 資料呈現的台灣季節變遷趨勢也呈現與觀測站的結果類似。但是相對於觀測資料，重分析資料在夏季變遷結果較為低估，而在冬季部分又稍微高估。重分析資料亦顯示季節變遷不僅在台灣地區，整個東亞都有類似的季節變遷訊號。

CMIP5 模式也模擬到類似的季節變遷趨勢。不過，CMIP5 中 15 個模式的結果顯示，

1955-2004 年間，夏季的季節變遷較冬季季節變遷更為顯著，特別是 CCSM4、CESM1-BCG、CMCC-CMS、CNRM-CM5，INM-CM4、IPSL-CM5A-MR、MPI-ESM-LR、MPI-ESM-MR 與 NorESM1-M 等，有超過半數的模式顯示夏季有劇烈的擴張情況。但多數模式對於冬季的季節變遷估計較弱，且僅 CMCC-CMS、IPSL-CM5A-MR 與 MPI-ESM-LR 有顯著的變遷結果。

雖然模式結果之間有相當大的差異，但是仍可提供有參考價值的未來季節變遷資訊。以 1961-1990 年間的氣候值做季節轉變門檻，未來在 RCP8.5 情境下季節將加速變遷的幅度，各模式皆顯示夏(冬)季會有劇烈的擴張(縮減)。到了 21 世紀末，台灣全年將有超過 50% 的日子為夏季，而冬季將減少到最多僅約一個月左右，甚至有部分模式(Access1-0、Access1-3、CMCC-CM、CMCC-CMS、CSIRO-Mk3-6-0、MIROC5、MPI-ESM-LR 與 MPI-ESM-MR)

顯示 2050 年後，台灣就將沒有冬季存在。

五、 致謝

本研究在國科會研究計畫編號 MOST 107-2119-M-001-010 -的資助下完成,特此致謝。

六、 參考文獻

許晃雄、吳宜昭、周佳、陳正達、陳永明與盧孟明，2011：臺灣氣候變遷科學報告—衝擊與調適面向。

童慶斌、李培芬、林幸助、李明旭、盧虎生、蘇慧貞、張靜貞、詹士樑、許泰文與李河清，2017：臺灣氣候變遷科學報告—衝擊與調適面向。

Alexander, L. V., X. Zhang, T. C. Peterson, J. Caesar, B. Gleason, A. M. G. Klein Tank, M. Haylock, D. Collins, B. Trewin, F. Rahimzadeh, A. Tagipour, K. Rupa Kumar, J. Revadekar, G. Griffiths, L. Vincent, D. B. Stephenson, J. Burn, E. Aguilar, M. Brunet, M. Taylor, M. New, P. Zhai, M. Rusticucci, and J. L. Vazquez-Aguirre, 2006: Global observed changes in daily climate extremes of temperature and precipitation. *J. Geophys. Res.*, 111, D05109, DOI:10.1029/2005JD006290.

_____, P. Hope, D. Collins, B. Trewin, A. Lynch, and N. Nicholls, 2007: Trends in Australia's climate means and extremes: A global context. *Aust. Meteor. Mag.*, **56**, 1–18.

Compo, G.P., J.S. Whitaker, P.D. Sardeshmukh, N. Matsui, R.J. Allan, X.

Yin, B.E. Gleason, R.S. Vose, G. Rutledge, P. Bessemoulin, S. Brönnimann, M. Brunet, R.I. Crouthamel, A.N. Grant, P.Y. Groisman, P.D. Jones, M. Kruk, A.C. Kruger, G.J. Marshall, M. Maugeri, H.Y. Mok, Ø. Nordli, T.F. Ross, R.M. Trigo, X.L. Wang, S.D. Woodruff, and S.J. Worley, 2011: The Twentieth Century Reanalysis Project. *Quarterly J. Roy. Meteorol. Soc.*, **137**, 1-28, DOI: 10.1002/qj.776 Free and Open Access

Della-Marta P. M., M. R. Haylock, J. Luterbacher and H. Wanner, 2007: Doubled length of Western European summer heat waves since 1880. *J. Geophys. Res.*, 112, D15103.

Founda, D., K. H. Papadopoulos, M. Petrakis, G. Giannakopoulos, and P. Good, 2004: Analysis of mean, maximum, and minimum temperature in Athens from 1897 to 2001 with emphasis on the last decade: Trends, warm events, and cold events. *Global Planet. Change*, **44**, 27–38.

Hung, C. W., 2009: Temperature Discontinuity Caused by Re location of Meteorological Stations in Taiwan. *Terr. Atmos. Ocean. Sci.*, **20(4)**, 607-617

Kobayashi, S., and Coauthors, 2015: The JRA-55 reanalysis: General specifications and basic characteristics. *J. Meteor. Soc. Japan*, **93**, 5–48, doi:10.2151/jmsj.2015-001.

Lo, T.-T., and H.-H. Hsu, 2008: The early 1950s Regime Shift in temperature in Taiwan and East Asia. *Climate Dynamics*,

- 31(4)**, 449-461, DOI 10.1007/s00382-007-0311-4.
- Menzel A., G. Jakobl, R. Ahas, H. Scheifinger and N. Estrella, 2003: Variations of the climatological growing season (1951–2000) in Germany compared with other countries. *Int. J. Climatol.* **23**, 793–812
- Menzel A., 2003: Plant phenological anomalies in Germany and their relation to air temperature and NAO. *Clim. Change*, **57**, 243–263
- Miao, Q. L., and Y. Wang, 2007: The duration and characteristic analysis of four seasons in China. *Collected Works for the Climate Change by Chinese Meteorological Society in 2007*, 693–701. (in Chinese)
- Qian, C., C. B. Fu, Z. H. Wu, and Z. W. Yan, 2009: On the secular change of spring onset at Stockholm. *Geophys. Res. Lett.*, **36**, L12706, doi:10.1029/2009GL038617.
- Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K. B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (eds.), 2007: *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA
- Sparks, T. H. and A. Menzel, 2002: Observed changes in seasons: an overview. *Int. J. Climatol.* **22**, 1715–1725
- Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.), 2013: *Climate Change 2013: The Physical Science Basis, Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment, Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom
- Taylor, K. E., R. J. Stouffer, G. A. Meehl, 2012: An overview of CMIP5 and the experiment design. *Bull Am Meteorol Soc.*, **93**, 485–498. doi:10.1175/BAMS-D-11-00094.1
- Wu, Z. and N. E. Huang, 2009: Ensemble empirical mode decomposition: a noise-assisted data analysis method. *Adapt. Data Anal.*, Vol. 1, No. 1, 1–41
- Yan, Z. W., J. J. Xia, C. Qian, and W. Zhou, 2011: Changes in Seasonal Cycle and Extremes in China during the Period 1960–2008. *Adv. Atmos. Sci.*, 28(2), 269–283
- Ye, D. Z., Y. D. Jiang, and W. J. Dong, 2003: The Northward Shift of Climatic Belts in China During the Last 50 Years and the Corresponding Seasonal Responses. *Advances in Atmospheric Sciences*, **20(6)**, 959–967.

Long-term Trend in Seasonal Cycle of Taiwan Temperature

Ting-Hui Lee¹ Wei-Kai Huang² Huang-Hsiung Hsu¹

1 Research Center for Environmental Changes, Academia Sinica

2 Civil Aeronautics Administration

(manuscript received 10 September 2018 ; in final form 21 Nonember 2018)

Abstract

This research reveals, under the influence of global warming tendency, the characteristics of seasonal cycle of temperature in Taiwan have changed significantly since the early 20th century and will continue to change in the warming future. Using six CWB stations (Taipei, Taichung, Tainan, Hengchun, Hualian, and Taitung) daily temperature data, we identify a lengthening (5.29–12.51 days/10years) of the summer duration due to the earlier onset and delayed termination of the season from the 1900s to 2014. By contrast, the winter has shortened by 2.74–4.63 days/10years because of delayed onset and early termination. A sudden lengthening of summer season, stations in southern Taiwan in particular, in the early 1950s is also reported. The long-term trend is evidently associated with the global warming trend, whereas the sudden lengthening in the 1950s needs further study to attribute the cause. Similar tendencies are also found in the 20C and JRA55 reanalysis. Both reanalyses exhibit an underestimated (overestimated) 50-year trend in summer (winter) relative to the observed. Most of the CMIP5 models in the historical experiments also simulate a significant expanding trend in the summer duration. However, the winter trend is weaker in the CMIP5 models. Based on the climatological thresholds in current climate, the CMIP5 models project an enhancement of the current trends under the RCP8.5 scenario with high consensus among models. By the end of the 21st century, the summer will last for more than half a year while the winter duration will be shortened to only one month. Some CMIP5 models even project a climate without winter in the late 21st century.

Key Words: Seasonal temperature cycle, global warming, CMIP5 model.

doi: 10.3966/025400022018094603003