

台灣季節循環的長期變遷

李庭慧¹ 黃威凱² 許晃雄¹
中央研究院環境變遷中心¹ 交通部民用航空局²

摘要

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；但在冬季的變遷趨勢上，各測站的變遷趨勢都很一致。

20C 跟 JRA55 的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。CMIP5 中 15 個模式的結果顯示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，未來世紀末在 RCP85 情境下，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：季節變遷、CMIP5 模式

一、前言

台灣有明顯的四季轉變，各季節有不同的天氣特徵，但在全球暖化的背景下，未來的季節將會改變。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，發現這幾個城市的夏(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)。而季節變化影響自然環境與人類社會的生產活動甚深，特別是農產品與季節變化息息相關，在氣候變遷的趨勢下，季節的變遷也會影響到稻穀的生長季節(Ye et al., 2003)。因此探討台灣的季節變遷不僅有助於未來稻作在耕種與收成的規劃，對於台灣未來的極端天氣現象變遷也可提供一個背景場的參考。本研究將針對台灣 6 個擁有百年觀測資料的測站進行季節變遷的分析，並比對重分析資料的分析結果，最後利用第五階段耦合氣候模式對比計畫(Coupled Model Intercomparison Project Phase 5; CMIP5)中的模式對台灣未來的季節變遷進行推估。

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，分析季節變遷的特性。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 2014 年。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)。模式部分考量到模式解析度，本研究將解析度較低的模式剔除。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。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，因此選取範圍皆為 $20-25^\circ\text{N}$ ， $120-125^\circ\text{E}$ 。

(二) 季節變遷的定義

氣候變遷下，季節的長度、起始及結束的時間，可能發生改變。本研究以新的定義來決定季節循環的時間，並量化其長期變化的趨勢。將日均溫資料以 Fourier Transform 方法做分解，由臺灣測站的波譜分析(圖未顯示)可以得知，日均溫的時間序列主要為年頻率 1，即周期為一年的訊號佔最強，其次為

年頻率2的部分，第三為年頻率6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，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。為避免資料頭尾在濾波得到長周期訊號後的影響，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。

本研究訂定 1961-1990 年期間為氣候值，以此期間計算出的冬夏氣候閾值作為季節變換的門檻值。透過上述方法可得到溫度的季節變化(如圖 1 紅色實線)，並以氣候值最熱及最冷的連續 90 日，其頭尾兩日的平均溫度，做為夏季與冬季的閾值，因此可以兩季的溫度閾值定義出夏季與冬季的起始、結束、季節長度、季節峰值時間、峰值溫度。

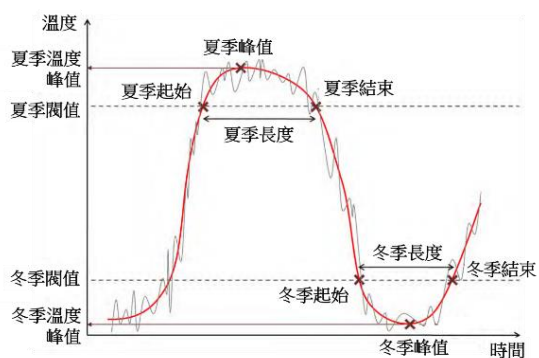


圖 1 以溫度定義夏冬兩季之方法。細實線代表為原始日均溫，粗實線為濾波後之溫度長周期變化。

三、結果

(一)台灣各測站之季節變遷

臺北(圖 2a)、花蓮(圖 2b)與台中(圖 2c)站的季節變遷結果顯示，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 作為氣候值而訂出的氣候閾值來看台南、恆春、台東站的夏季變遷，會發現約莫 1950 年以前這些測站都很難定義出明確的夏季，但是與測站的遷移或者更換儀器而造成資料的不連續無關(Hung, 2009)，而是因為這些測站的平均溫度在 20 世紀前期較低，做完濾波以後，溫度幾乎都低於門檻值(圖未顯示)，因此在 20 世紀前期這些測站較難定義夏季的起始與結束。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，其中又以台南與恆春的變化最為劇烈。

六測站的冬季起始時間與結束時間差異較小，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，21 世紀初相對於 20 世紀初的冬季長度，減少了 1 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，臺東。

各測站的夏季峰值發生時間較不固定，臺北、花蓮、台東的峰值相對較集中，約發生於七月中到八月中之間，但台中、台南、恆春的峰值散布較廣，可能發生於夏季期間的任何一時間點，可能南部由於地處熱帶，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

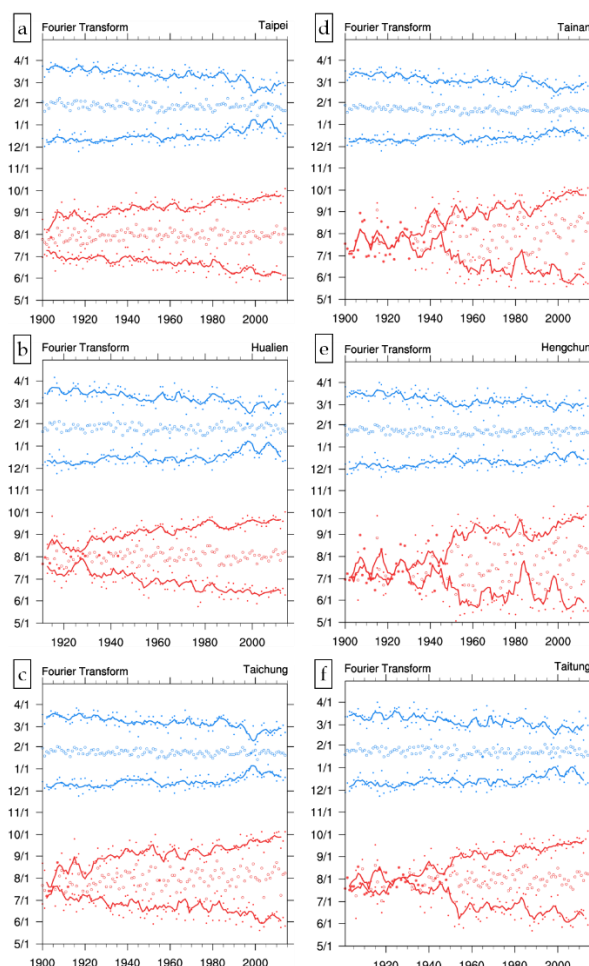


圖2 以Fourier Transform方法計算台灣六個百年測站所定義出的夏季(紅色圓點)、冬季(藍色圓點)之始末日期。線為五年移動平均的結果。圓環為峰值日期。橫軸為年份，縱軸為日期。

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。

(二)台灣季節變遷在重分析資料的表現

20C 跟 JRA55 的季節變遷(如圖 3)，也呈現與觀測類似的結果。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，兩筆資料的冬、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)，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、三月初)左右，兩筆資料皆顯示夏季增長，冬季減短的趨勢。其中在 1990 年代，

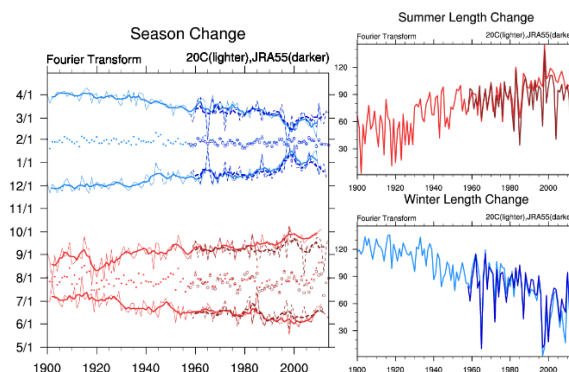


圖 3 20C 與 JRA55 重分析資料的台灣冬、夏季季節變遷，資料選取範圍為 20-25°N；120-125°E。a)為夏季(紅色細線)、冬季(藍色細線)之始末日期。粗線為 5 年滑動平均的結果。20C 為淺色實線、JRA55 為深色虛線。圓點(20C)與圓環(JRA55)為峰值發生日期。b)為夏季長度的趨勢。c)為冬季長度變遷趨勢。20C 為淺色實線、JRA55 為深色實線。

兩筆資料的冬季起始與結束時間都有跳躍性的變化，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。

表 2 為 CMIP5 中 15 個模式於 1955-2004 年間之長期變化趨勢。其中峰值溫度趨勢單位為(°C/1955-2004 年間)。其餘的部分變化趨勢單位為(日數/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。粗斜體表通過 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
ACCESS1-0	-1.17	0.02	1.3	2.47	0.09	2.83	-0.12	-3.25	-6.08	0.27
ACCESS1-3	-1	0.52	2.11	3.11	0.19	0.97	-0.1	-1.1	-2.07	0.11
CCSM4	-6.37	0.77	5.55	11.91	0.75	1.49	-0.28	-2.09	-3.58	0.53
CESM1-BGC	-5.71	-1.3	3.36	9.07	0.53	1.31	0.17	-1.22	-2.53	0.35
CMCC-CM	-2.04	0.93	3.2	5.24	0.45	1.87	-0.17	-2.14	-4.01	0.56
CMCC-CMS	-5.49	-0.97	4.15	9.64	0.81	4.26	-0.41	-5.25	-9.51	1.2
CNRM-CM5	-4.03	1.94	4.97	9	0.51	0.63	-0.88	-2.25	-2.89	0.19
CSIRO-Mk3-6-0	-0.25	0.11	0.82	1.07	0.18	1.03	0.76	0.33	-0.7	0.24
INM-CM4	-4.08	-0.1	3.92	8	0.4	1.57	-0.19	-1.99	-3.56	0.43
IPSL-CM5A-MR	-6.31	-0.66	4.33	10.64	0.75	2.13	-0.24	-2.71	-4.84	1.02
MIROC5	-3.13	0.83	2.49	5.62	0.42	0.1	0.1	0.14	0.04	-0.07
MPI-ESM-LR	-7.92	-1.31	4.89	12.82	0.9	2.7	-0.73	-4.38	-7.08	1.01
MPI-ESM-MR	-5.12	1.71	7	12.12	0.95	2.49	-0.09	-2.54	-5.03	0.68
MRI-CGCM3	-2.2	-1.4	0.92	3.11	0.22	1.73	0.54	-0.86	-2.59	0.27
NorESM1-M	-5.65	1.62	5.35	11	0.73	1.39	0.67	-0.19	-1.57	0.03

(三)台灣季節變遷在 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。各模式在夏季長度的評估也有很大的差異(圖未顯示)，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。表 2 為 15 個 CMIP5 模式的長期變化趨勢。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)，其中夏季起始時間提前的幅度比結束時間延後的幅度還要大。整體夏季是拉長的，增加幅度大約是每 10 年增加 1.07-12.82 天。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 2 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。

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。部分模式在冬季起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(圖未顯示)。1950 年代 CMIP5 模式呈現冬季長度大概是 64-95 天，21 世紀季節長度僅些微減少，約在 53-86 天之間。模式中也可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。表 2 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。但多數模式仍顯示冬季長度在縮短，縮短幅度大約是每 10 年減少 0.7-9.51 天。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 RCP85 情境下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 4a 可看到各模式在夏季的結果差異較小，最多相差 1.5 個月，且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-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 5a)。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 4b)，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 月中(3 月份)。而從圖 5b 中可看到，台灣冬季天數在 RCP85 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，但多數模式顯示世紀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

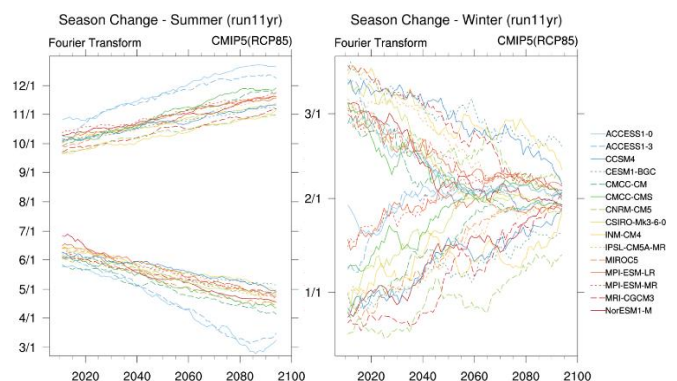


圖 4 CMIP5 中 15 個高解析度模式，在 RCP85 情境下，2006-2100 年間的季節起始時間、結束時間之長期變遷趨勢。a)夏季。b)冬季。縱軸為日期。此處的線條為經過 11 年滑動平均後的結果。

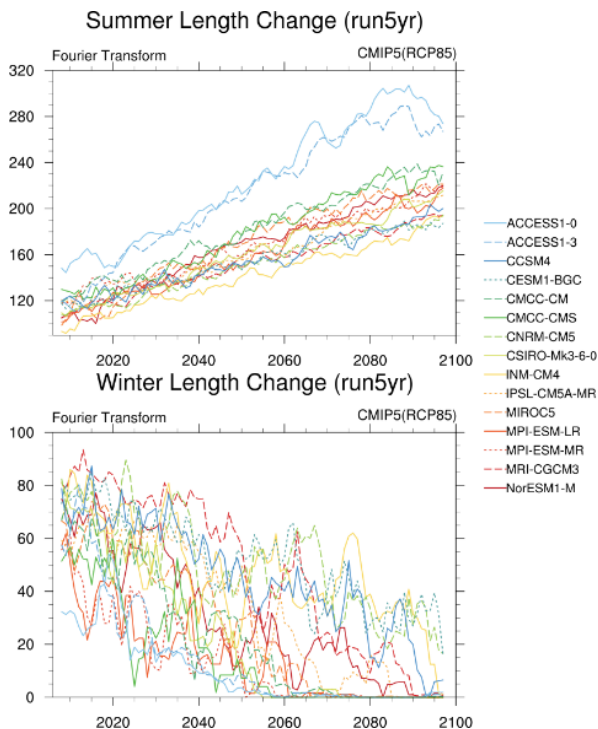


圖 5 CMIP5 中 16 個高解析度模式從 2006-2100 年間的季節長度變遷。a) 夏季。b) 冬季。縱軸單位為天數。此處的線條為五年滑動平均後的結果。

現在的標準來看未來的季節，在全球溫度劇烈上升的 RCP85 情境下，台灣未來幾乎只有夏季沒有冬季。其中圖 4 可以看到 ACCESS1-0、ACCESS1-3 兩個模式在 RCP85 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。

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。在冬季的變遷趨勢上，各測站的變遷趨勢都很一致。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 的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。CMIP5 中 15 個模式的結果顯示夏季的季節變遷較為顯著，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，未來世紀末在 RCP85 情境下，台灣全年將有超過 50% 的日子為夏季，而冬季將減少到最多一個月左右，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，台灣將沒有冬季存在。

王等(1984)以溫度、降雨為標準，劃分台灣整年度的自然季節。但在暖化的背景下，我們現在所熟知的自然季節將隨之變化，有研究提出暖化情境下夏、冬季季風的肇始與結束很可能提前或延後(Kitoh and Uchiyama, 2005; Ashfaq et al., 2009; Loo et al., 2015)，未來降水的季節變化也可能會與現在不同。季節變遷的結果，除了可預期未來農作物的耕種與收成時間並做完整的規劃以外，也可提供做為中小尺度天氣分析的背景場參考。

五、參考文獻

- Ashfaq M., Y. Shi, W.-W. Tung, R. J. Trapp, X. Gao, J. S. Pal, and N. S. Diffenbaugh, 2009: Suppression of south Asian summer monsoon precipitation in the 21st century. *Geophys. Res. Lett.*, 36, L01704, doi:10.1029/2008GL036500
- Chih-wen Hung, 2009: Temperature Discontinuity Caused by Re location of Meteorological Stations in Taiwan. *Terr. Atmos. Ocean. Sci.*, 20(4), 607-617
- 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

Kitoh A., and T. Uchiyama, 2005: Changes in Onset and Withdrawal of the East Asian Summer Rainy Season by Multi-Model Global Warming Experiments. J. Meteor. Soc. Japan, 84(2), 247-258

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

Loo Y. Y., L. Billa, A. Singh, 2015: Effect of climate change on seasonal monsoon in Asia and its impact on the variability of monsoon rainfall in Southeast Asia. Geoscience Frontiers, 6,, 817-823

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