

台灣春季乾旱研究：氣候變遷推估與診斷

翁春雄 許晃雄

中央研究院環境變遷研究中心

摘要

研究結果顯示，過去台灣春季雨量偏低時，台灣東側菲律賓海上存在一低層氣旋式環流距平，此時台灣附近呈現東北風距平，低層西南氣流與水氣通量減弱，造成台灣春季少雨。如果此環流距平在未來變強且更加頻繁，將不利於台灣春季降雨的發生，亦即春季乾旱趨勢將愈加明顯。

鑒於台灣地區春季的乾旱年與大尺度環流、水氣通量場有顯著相關性，我們以大尺度環流(流函數)場為指標，計算技術得分(skill score)，挑選5個最適合推估台灣春季乾旱變遷趨勢的CMIP5氣候模式(CCSM4, MIROC5, MPI-ESM-LR, IPSL-CM5A-LR, GFDL-ESM2M)。由於CMIP5模式解析度約為100公里，不適合直接用來分析台灣乾旱變遷趨勢，我們測試並選擇最能反映台灣春季雨量變化的區域(110°E-123°E, 21°N-28°N)，分析其標準降雨指數SPI(Standard Precipitation Index)的變遷(2028-2073年與1960-2005年的差異)。在RCP8.5情境下，未來(2028-2073年)台灣與鄰近區域，乾旱年(SPI3<-1)機率增加(15.65%)，多雨年(SPI3>1)機率減少5.65%，呈現乾旱發生頻率越趨頻繁，連續乾旱年增加，乾旱程度也越趨嚴重的趨勢。

低層環流與水氣通量場顯示乾旱年時，台灣附近呈現東北風距平，低層西南氣流水氣通量與水氣輻合減弱，是造成未來台灣春季少雨原因。

關鍵字：春季乾旱、大尺度環流、氣候變遷、全球暖化

一、前言

台灣地區每年二月至四月間的降雨稱為春雨，春雨與梅雨、颱風季降雨並稱為台灣三大重要氣候降水，春雨降雨量的多寡影響台灣地區第一期稻作播種。受到台灣的中央山脈地形影響，秋冬季時中南部降雨偏少，為中南部乾季，而台灣中南部平原是台灣重要的稻作產區，如果乾季過後的春季降水又偏少，將嚴重影響水庫蓄水量、民生用水與農作物生長。統計台灣乾旱發生的季節，多發生於春季(國家災害防救科技中心, 2016)，加上在全球暖化情況下，台灣地區暖化嚴重，氣溫升高造成地表蒸發量增加，少雨日增加，春季氣象乾旱現象加劇農業乾旱、水文乾旱與社會經濟乾旱現象，衝擊台灣社會經濟與生態(童等, 2017; 周等, 2017)。所以研究台灣地區過去乾旱現象的成因、頻率與相應大尺度環流關係及未來台灣春季乾旱現象的變遷推估與診斷是非常重要的議題。

過去研究台灣地區的春雨變化，除發現具有年際變化與年代際變化的特性外，熱帶中、東太平洋海溫與台灣附近大尺度環流場變化也扮演非常重要角色(Hung et al, 2004; 陳思良, 2006)。Wang et al.(2000)發現冬季中熱帶中太平洋附近較高(低)的海溫所誘發的羅士培波(Rossby Wave)會影響台灣與東亞附近的環流場，進而增加(減少)降雨量。Hung et al.(2004)

發現太平洋年代際振盪(Pacific Decadal Oscillation, PDO)也會改變台灣春季附近環流場，進而影響台灣北部的冬季降雨，在PDO正(負)向位時，菲律賓海附近出現反氣旋式(氣旋式)環流，此環流場會增強(減弱)台灣附近的西南氣流帶來水氣，增加(減少)台灣冬季降雨。

陳(2006)發現在赤道東太平洋的暖海溫對台灣春季的降水影響較大，這和Wang et al.(2000)的研究類似，主要是由菲律賓海的反氣旋環流造成台灣附近有西南風距平，並且提供更多水汽。而台灣少雨年則是受PDO的影響較大，這與Hung et al.(2004)結果類似，少雨年皆分佈在PDO的負相位，認為PDO對台灣乾旱的影響較重要。

由以上研究顯示，影響台灣地區的春季乾旱因素除了太平洋海溫之外，主要就是台灣附近大尺度環流場與水氣通量場。所以，在研究台灣春季乾旱，我們使用行政院法人國家災害防救科技中心(National Science and Technology Center for Disaster Reduction, 簡稱NCDR)提供1960-2012年水平解析度5公里的3個月標準化降雨指標(Standardized Precipitation Index, 簡稱SPI) SPI3 (Mckee et al., 1993)來分析台灣地區的春季乾旱，挑選春季乾旱年(SPI3<-1)與多雨年(SPI3>1)。此外我們使用NCEP/NCAR Reanalysis 1 850hPa水平、垂直風場與比濕場來計算低層大氣的水氣通量、水氣通量的輻合輻散、垂直速度與流函數場，分析在乾旱年與多雨

年時，台灣附近低層大氣大尺環流場、垂直速度與水氣通量場特性。在海溫方面，我們使用NOAA Extended Reconstructed Sea Surface Temperature (簡稱NOAA_ERV4_SST) 來分析乾早年與多兩年時，太平洋與台灣附近海溫特性。在分析台灣未來(2028年-2073年)的乾旱特性時，我們使用CMIP5模式的Historical Run與RCP8.5情境下的模擬差異來評估未來台灣地區乾旱的變遷與特性。

二、本文

為瞭解台灣地區春季乾旱年際變化特性，首先我們分析1960-2012年台灣春季SPI3年際變化與年代際變化特性。圖1a為台灣地區春季原始SPI3的所有網格點平均值的年際變化，圖1b是圖1a經過九年滑動平均後的結果。圖1c是圖1a減去圖1b的結果。圖1b顯示台灣地區春雨具有顯著年代際變化特性，在去除年代際變化之後(圖1c)，就是實際台灣春季降雨的年際變化，我們發現乾早年受到年代際變化的影響略大於多兩年，這與陳(2006)研究結果類似。

為瞭解乾早年與多兩的低層大尺度環流、水氣通量場、水氣通量場輻合輻散、垂直速度與海溫的關係，我們將圖1a中的乾早年(1963, 1964, 1976, 1977, 2002, 2011年)與多兩年(1968, 1978, 1983, 1990, 1992, 1998年)的NCEP R1 850hPa水氣通量與水氣通量的輻散場、垂直速度場與NOAA ERV4 SST的距平場作合成分析(圖2a至圖2f)。結果顯示在台灣春季乾旱(多與)年時，菲律賓海附近出現低層氣旋(反氣旋)式距平環流場，台灣附近則出現低層東北(西南)風環流距平與水氣通量的輻散(輻合)與下沉(上升)運動距平，台灣與中、東熱帶太平洋附近海溫則為負(正)距平，這與Wang et al.(2000)、Hung et al.(2004)及陳(2006)研究結果類似。

為了嚴謹評估CMIP5模式對台灣春季乾旱的模擬結果，並考量影響台灣春季降雨相關較大者為台灣與菲律賓海附近環流場，我們使用Taylor(2001)的Skill Score來評估所有CMIP5模式在台灣附近不同大小區域的流函數場，找出在評估台灣乾旱(多雨)年的CMIP5模式的Historical Run與NCEP Reanalysis 1的Skill Score值大於0.5的最佳五個模式(CCSM4, MIROC5, MPI-ESM-LR, IPSL-CM5A-LR, GFDL-ESM2M)。利用這五個模式來評估在未來RCP8.5情境下，台灣地區春季乾旱與多兩年的未來變遷與特性。

鑒於CMIP5模式的水平解析度評估台灣地區降雨過於粗略，考量台灣地區春季降雨與大陸華南的地區降雨的氣候相關性(圖3)，在利用CMIP5模式評估台灣地區乾旱時，我們使用比台灣地區略大區域(21°N-28°N, 110°E-123°E)的模式雨量推估SPI3值來分析CMIP5模式在乾早年與多兩年的特性。

結果我們發現五個CMIP5模式在過去(1960-2005年)的Historical Run，對於模擬低層環流場、水氣通量與水氣通量輻合輻散上，與觀測資料相比，都能掌握乾早年與多兩年的環流與水氣通量輻合輻散特性(圖4a至圖4l)。

為瞭解CMIP5模式在RCP8.5情境下，模擬未來乾早年與多兩年的特性與差異，我們使用圖3區域的未來(2028-2073年)RCP8.5情境模擬減去Historical Run(1960-2005年)，以瞭解SPI3在不同乾旱與多兩年強度的機率差異(圖5)。結果發現未來(2028-2073年)台灣地區乾旱機率增加，在乾早年(SPI3<-1)機率增加15.65%，多兩年(SPI3>1)則減少5.65%。

分析台灣地區未來(2028-2073年)春季乾旱持續年次數方面(圖6)，結果顯示未來台灣春季連續乾旱年次數有增加趨勢，連續濕年則是減少。而連續乾旱年嚴重程度呈現增強(負值)趨勢(圖7)。

分析CMIP5的五個最佳模式在Historical Run(1960-2005年)與未來(2028-2073年)RCP8.5情境下對850hPa水氣通量與水氣通量的輻散場模擬合成結果(圖8a至圖8g)，顯示在乾早年時，台灣與華南地區低層大尺度環流場呈現東北風距平，水氣通量呈現輻散距平，而菲律賓海附近具有氣旋式環流距平(圖8a與圖8c)。如果以未來(2028-2073年)RCP8.5情境模擬減去Historical Run(1960-2005年)，發現未來乾早年台灣北部與華南地區有較強東北風環流伴隨顯著水氣通量輻散(圖8e)。而未來乾早年與多兩年相比，台灣北部與華南地區亦呈現有較強東北風環流伴隨顯著水氣通量輻散(圖8g)。

三、結論

分析1960-2012年台灣地區乾早年時的低層環流與水氣通量特性，發現台灣春季乾旱時，菲律賓海附近存在低層氣旋式環流距平，此氣旋式環流距平會增強台灣附近東北風距平，使低層西南氣流與水氣通量減弱，台灣附近水氣通量輻散場增強，造成台灣春季少雨。

在使用CMIP5模式推估未來(2028-2073年)在RCP8.5情境下，台灣與鄰近區域，乾早年(SPI3<-1)機率增加(15.65%)，多兩年(SPI3>1)機率減少5.65%，乾旱發生頻率將越趨頻繁，連續乾旱年增加，程度也呈現越趨嚴重的趨勢。低層環流與水氣通量場顯示乾早年時，台灣附近呈現東北風距平，低層西南氣流水氣通量與水氣輻合減弱，是造成未來台灣春季少雨原因。

四、參考文獻

周佳, 陳維婷, 羅敏輝, 李威良, 李時雨, 陳昭安, 許晃雄, 藍嘉偉, 黃筱晴, 王啟芸, 劉千義, 蘇世顯, 2017: 台灣氣候變遷科學報告2017-物理現象與機制, 第一章全球氣候變遷觀測。國家災害防救科技中心編印, 61-170頁。

陳思良, 2006: “台灣春季乾旱與大尺度環流之關係”, 國立台灣大學大氣科學研究所碩士論文, 81頁。

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, 李河清, 2017: 台灣氣候變遷科學報告2017-衝擊與調適面向。國家災害防救科技中心編印, 659頁。

國家災害防救科技中心, 2016: 臺灣氣候變遷災害衝擊風險評估報告。行政法人國家災害防救科技中心。新北市。

Hung, C.-W., Hsu, H.-H., and Lu, M. -M., 2004: “Decadal oscillation of spring rain in northern Taiwan”, *Geophys. Res. Lett.*, 31, L2206.

Mckee, T.B., Doesken, N.J. and Kleist, J., 1993: “The Relationship of Drought Frequency and Duration Times Scales”, *American Meteorological Society. 8th Conference on Applied Climatology*, 17-22 Janvier, Anaheim, 179-184.

Taylor, K. E., 2001: “Summarizing multiple aspects of model performance in a single diagram”, *J. Geophys. Res.*, 106, 7183- 7192.

Wang, B., R. Wu, and X. Fu., 2000: “Pacific - East Asian teleconnection: How does ENSO affect East Asian climate?”, *J. Clim.*, 13, 1517 - 1536.

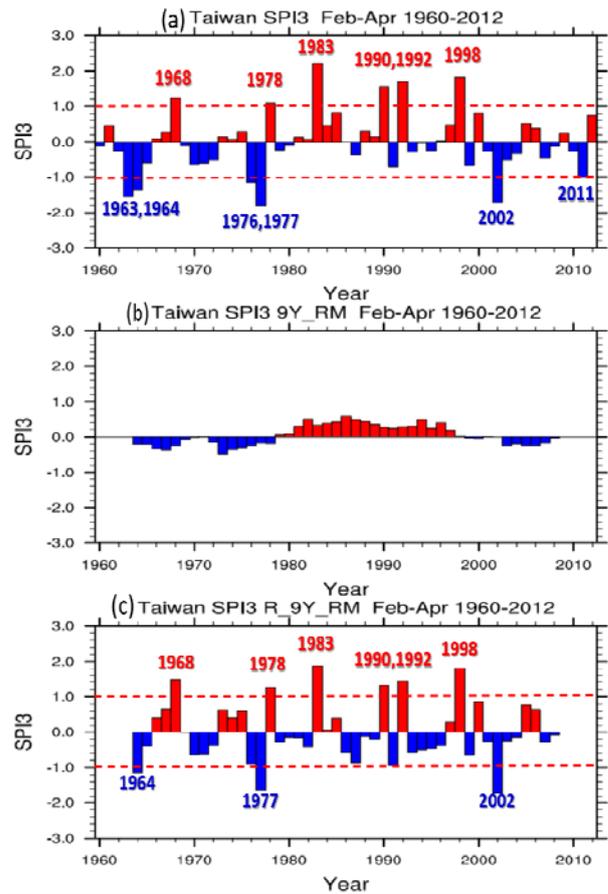


圖1 (a)條狀圖為台灣地區春季(2月至4月)SPI3的平均值的年際變化，紅色虛線代表SPI3值正負1，紅色與藍色長條分別表示正負SPI3值，紅藍色數字分別表示SPI3>1或SPI3<-1的年份。圖1(b)是圖1(a)經過九年滑動平均後的結果。圖1(c)是圖1(a)減去圖1(b)的結果。

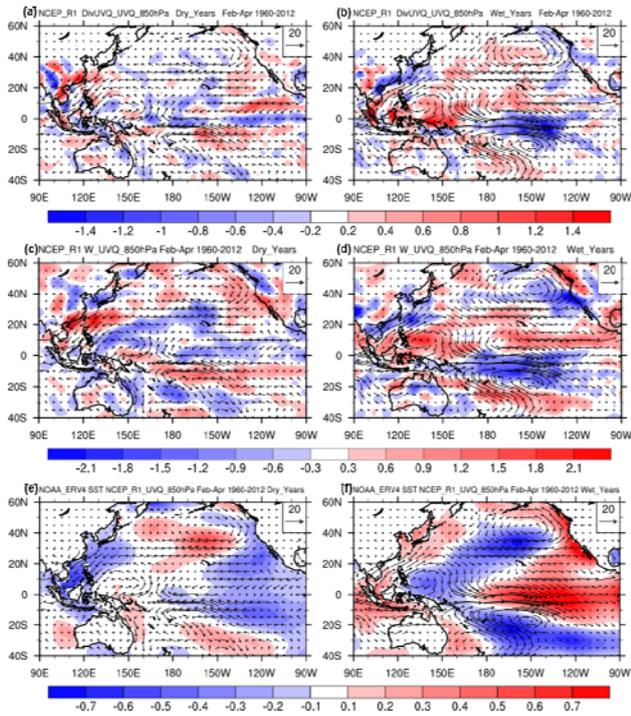


圖2(a)與圖2(b)為1960-2012年春季乾早年(SPI₃<-1)與多雨年(SPI₃>1) NCEP R1 850hPa水氣通量與水氣通量的輻散場合成圖。圖2(c)與圖2(d)為1960-2012年春季乾早年(SPI₃<-1)與多雨年(SPI₃>1)NCEP R1 850hPa水氣通量與垂直速度場合成圖。圖2(e)與圖2(f)為1960-2012年春季乾早年(SPI₃<-1)與多雨年(SPI₃>1)NCEP R1 850hPa水氣通量與NOAA ERV4 SST的合成圖。

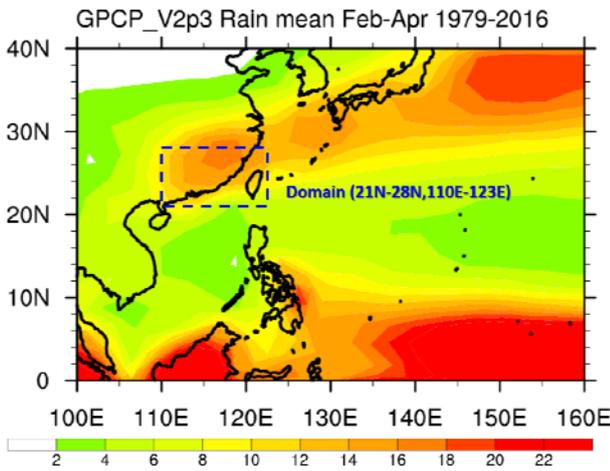


圖3 為1979-2016年春季2月至4月GPCP Version 2.3 Combined Precipitation雨量平均圖。藍色斷線圍成的區域範圍為(21°N-28°N,110°E-123°E)。

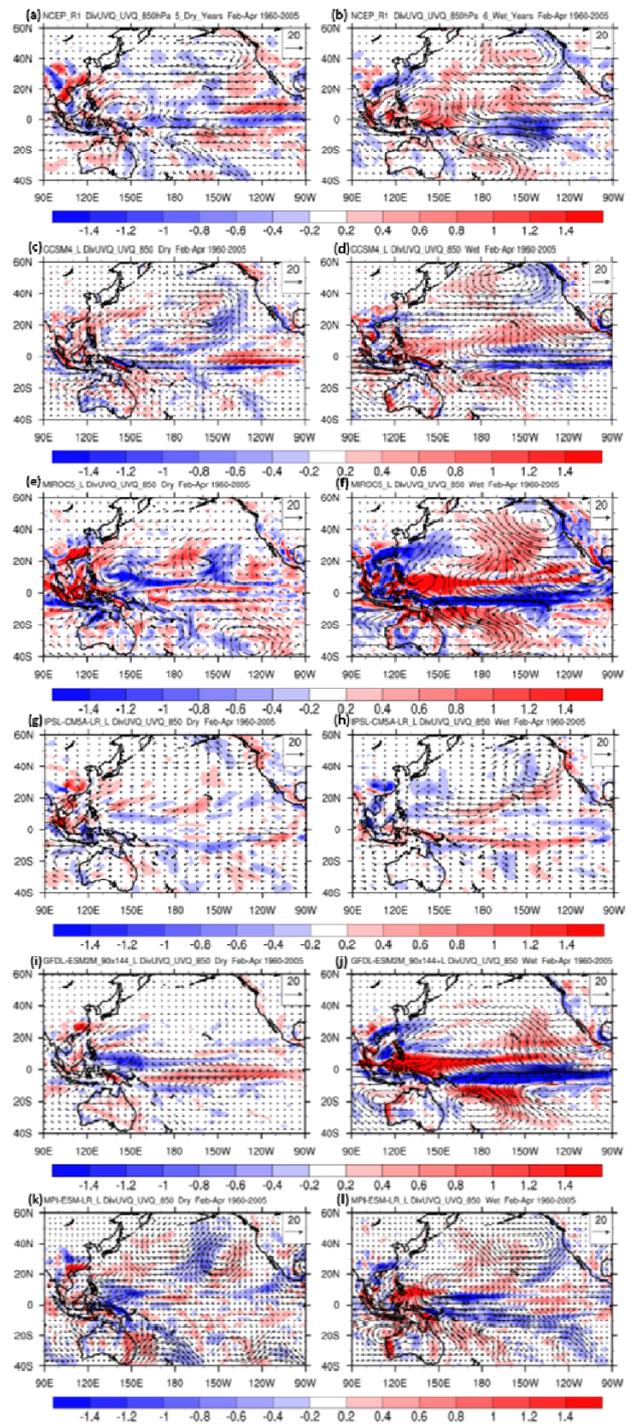


圖4(a)與圖4(b)為1960-2005年春季乾早年(SPI₃<-1)與多雨年(SPI₃>1) NCEP R1 850hPa水氣通量與水氣通量的輻散場合成圖。圖4(c)與圖4(d)說明同圖4(a)與圖4(b)，但為CCSM4模式。圖4(e)與圖4(f) 說明同圖4(a)與圖4(b)，但為MIROC5模式。圖4(g)與圖4(h) 說明同圖4(a)與圖4(b)，但為IPSL_CM5A_LR模式。圖4(i)與圖4(j) 說明同圖4(a)與圖4(b)，但為GFDL_ESM2M模式。圖4(k)與圖4(l) 說明同圖4(a)與圖4(b)，但為MPI_ESM_LR模式。

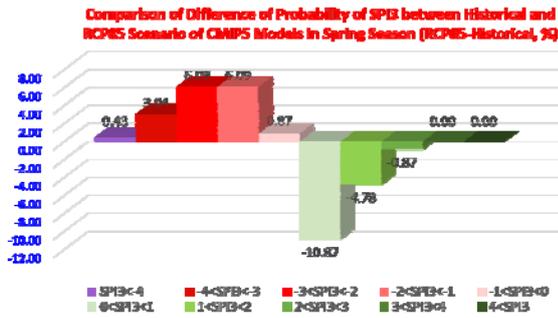


圖5 為春季CMIP5模式在圖3區域的未來(2028-2073年)RCP8.5情境模擬減去Historical Run(1960-2005年)的SPI3在不同乾旱與多雨年強度的機率差異圖。

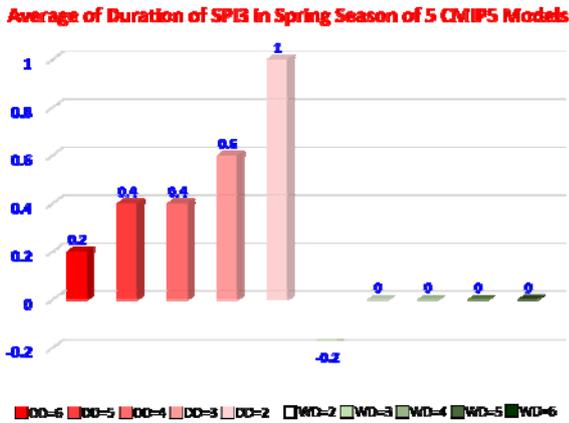


圖6為春季CMIP5模式在圖3區域的未來(2028-2073年)RCP8.5情境模擬減去Historical Run(1960-2005年)的SPI3在乾旱年與多雨年不同連續年份的平均數值圖。"DD=2"代表乾旱連續2年，"WD=2"代表多雨年連續2年，其餘依此類推。

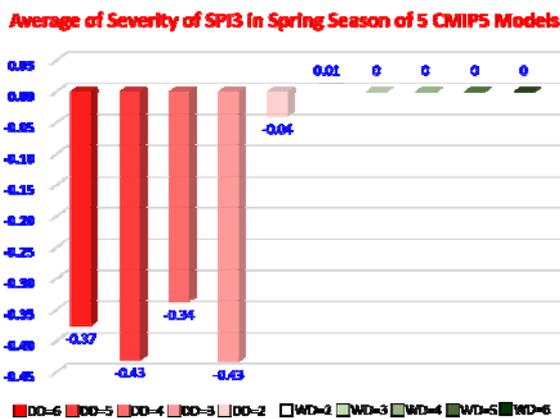


圖7為春季CMIP5模式在圖3區域的未來(2028-2073年)RCP8.5情境模擬減去Historical Run(1960-2005年)的SPI3在乾旱與多雨年不同連續年份的平均強度圖。

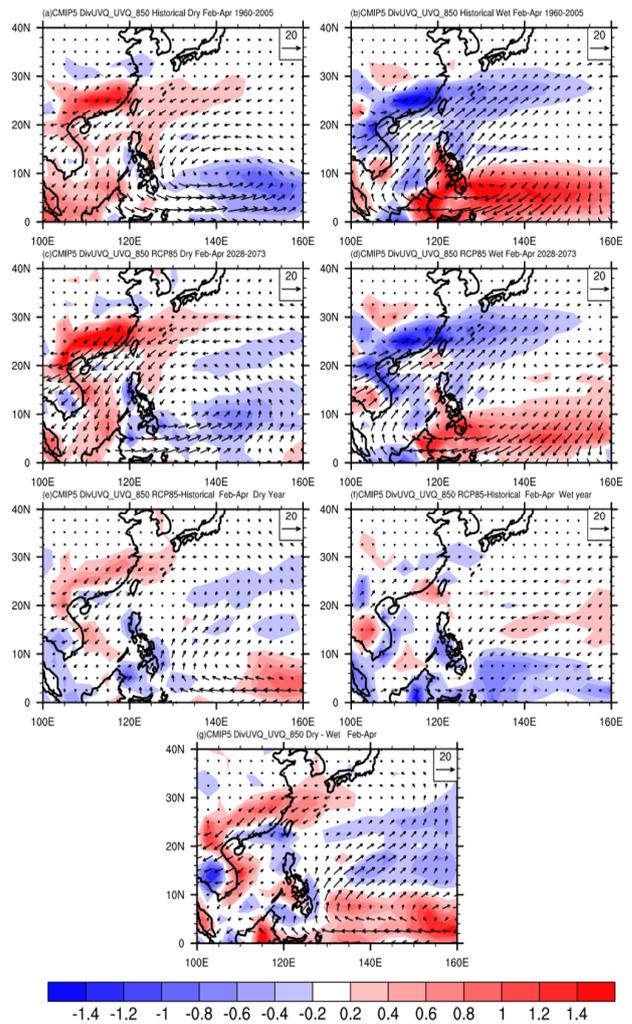


圖8(a)與圖8(b)為CMIP5模式的Historical Run在1960-2005年春季乾旱年(SPI3<-1)與多雨年(SPI3>1)850hPa水氣通量與水氣通量的輻散場平均合成圖。圖8(c)與圖8(d)說明同圖8(a)與圖8(b)，但為在未來(2028-2073年)RCP8.5情境模擬。圖8(e)與圖8(f)說明同圖8(a)與圖8(b)，但為未來(2028-2073年)RCP8.5情境模擬減去Historical Run(1960-2005年)。圖8(g)為與圖8(c)減去圖8(f)的結果。