

CMIP5多模式評估台灣乾、濕季降雨變遷

童裕翔¹ 朱容練² 陳韻如³ 陳永明²
TCCIP¹ 氣象組² 坡地與洪旱組³
國家災害防救科技中心

摘要

每年臺灣降雨的乾(11~4月)、濕(5~10月)季變化循環都與亞洲夏季季風降雨變化習習相關。我們定義臺灣梅雨季5、6月間為濕季的來臨；而10、11月間降雨由夏季對流或颱風型態轉為冬季鋒面型態則定義為乾季的開始。面對未來氣候變遷可能的氣候型態改變(季風降雨開始與結束時間的提前或延後；持續時間的延長或縮短)，進而影響到水資源的管理應用，有必要針對可能要面對的不同情境下所帶來的影響做評估。

本研究採用CMIP5(Couple Model Intercomparison Projects Phase-5)計畫中18個CGCM(Couple General Climate Model)模擬結果，在現今氣候(Historical, 1981-2000)與未來暖化嚴重情境(RCP8.5, 2081-2100)的降雨模擬結果做分析。為提供水資源在未來可能要面對的衝擊面影響評估，針對臺灣周圍區域大尺度降雨型態，利用T-Skill (Taylor Skill) Score整合分析模式對季風降雨時間模擬，各挑選5個模擬最佳(TOP5)與最差(LAST5)，加上18個全部(ALL)系集模式平均(Multi-Model Ensemble mean, MME)的3組可能出現模擬情境。經由模式與歷史觀測資料(GPCP)比較，發現濕季3組MME模擬季風雨帶降水量均呈現負偏差，且LAST5最顯著。分析模式未來RCP8.5推估降雨變化，發現TOP5與ALL MME濕季降雨時序偏移不明顯；LAST5則呈現提早且縮短。進一步使用高解析度觀測與統計降尺度資料，分析長期時序變化趨勢發現，TOP5的分組能減少模式的不確定性；LAST5則可提供最大的不確定性區間，作為需求未來變遷趨勢與衝擊影響研究領域參考依據。

關鍵字：CMIP5, 氣候變遷, 夏季季風, 統計降尺度, 模式不確定性

一、前言

每年臺灣降雨的乾、濕季循環變化都與亞洲夏季季風降雨變化習習相關。亞洲夏季季風所帶來的季節降雨帶，就氣候上而言肇始(onset)最早從5月初開始，在南亞印度與孟加拉灣有第一波雨帶，隨著時間由印度南向北推進；接著在5月中在臺灣附近產生梅雨鋒面降雨帶，同樣隨著時間向中國長江，日本南部以及韓國推進。而雨帶的消退(retreat)在臺灣附近約在9-10月期間(Wang, 2002)。上述的研究與臺灣水文定義5~10月為濕季；11~4月為乾季一致。

面對未來可能的乾、濕季氣候變遷，CMIP5(Couple Model Intercomparison Projects Phase-5)的計畫由全球各地氣候中心，提供多組氣候模式CGCM(Couple General Climate Model)，進行多組人為產生的溫室氣體不同的情境，可能導致的加熱路徑(Representative Concentration Pathways, RCPs)做長時間的氣候模擬。從過去研究發現(Tung, 2014)，CMIP5模式模擬現今氣候亞洲夏季季風的降雨時序推演，消退時間點的模擬結果較好而肇始時間點較差，但降雨的持續(duration)時間長度都模擬不錯，原因是在模式中與季風降雨相關的深對流參數化法，一旦夏

季季風降雨因大尺度環流場的改變而被觸發，各個模式都可以模擬整個季風環流的過程，特別是年總降雨量，只是肇始時間不同而已。

如何應用多組CMIP5 CGCM在未來氣候推估上的分析則是另一個課題。Knutti(2010)研究發現，將每一個模式視為等權重的單一系集成員是最佳分析策略，原因是目前還未研究出一個完美的模式可以準確模擬現今氣候，各個CGCM模擬結果可能受到模式裡其中一個因素(如陸-氣、海-氣過程、積雲參數化...等)而影響長期積分結果。就統計而言，運用多個不同來源的CGCM做系集平均(ensemble mean)，可以有效去除氣候模式在做未來氣候推估時，可能造成的氣候系統偏差。就水資源管理的角度而言，面對未來氣候變遷可能的氣候型態改變(季風降雨開始與結束時間的提前或延後；持續時間的延長或縮短)，進而影響到水資源的管理應用，有必要針對未來情境下可能要面對的衝擊影響做評估。Kitoh(2006)應用Taylor Skill Score(T-Skill Score)統合空間相關係數(pattern correlation coefficient)與均方根誤差(root mean square error)的統計因子，分析模式與觀測場間的季風降雨時序變化統計相關性。類似應用相同的方

法,可挑選合適的模式組合作為衝擊影響相關的研究參考依據。特別是水文流量衝擊評估部份,在計算資源受限制下且要符合大氣環境背景下做衝擊影響推估,如何挑選可能最劣模擬情境則是一大難題。

因應臺灣地理與水文環境特性,在未來推估這方面的研究,若使用一般CGCM (約2.5°x2.5°)低解析度模式資料無法符合水文應用領域需求。但高解析度區域氣候模式(Regional Climate Model, RCM)的多系集模擬(Multi-Model ensemble members),對於長期氣候模擬將需要大量的計算資源。目前全球各國在氣候變遷資料應用端,在運算資源不足的情況下,多傾向發展由CGCM模擬資料,應用統計降尺度的方法產製特徵高解析度模式資料。

二、資料與方法

為驗證模式模擬臺灣乾、濕季降雨量的季節循環,本研究應用的大尺度降水場是需要收集長期而穩定的觀測資料,使用NASA GPCP(Global Precipitation Climatology Project)計畫產製的衛星反演資料,提供空間解析度為2.5°x2.5°、時間為1981~2000的5日平均(Pentad)。模式部份則是使用CMIP5 (Couple Model Intercomparison Projects Phase-5)18個CGCM(Couple General Climate Model)的日降水資料。包含現今氣候(ALL, 1981~2000)與未來暖化嚴重情境(RCP8.5, 2081~2100) 模擬。各氣候中心模式名稱、代號與解析度如表1所示。

在應用於多模式系集平均 (Multi-Model Ensemble mean, MME)分析前,將不同空間解析度CGCM內差成與觀測資料一致的時-空解析度做為驗證比較。而為呈現臺灣的高解析度、區域上之時序變化,使用臺灣氣候變遷推估資訊平台(Taiwan Climate Change Projection Information Platform, TCCIP)產製的5km高解析度觀測,與相同表1CMIP5相對應模式之統計降尺度月平均降水場。

本研究挑選模式是使用東亞地區(90°E-135°E, 10

表 1 使用對比觀測資料(CMAP)、CMIP5 MME、18 個 CMIP5 CGCM 模擬資料列表,包含模式代號、名稱與空間網絡解析度;與本研究所使用統計降尺度的模式資料一致。

No	Model	Resolution
1	CMAP	144*73
2	MME(18 Models)	144*73
3	ACCESS1.0	192*145
4	BCC-CSM1.1	128*64(T42)
5	BNU-ESM	128*64(T42)
6	CanESM2	128*64(T42)
7	CCSM4	288*192
8	CNRM-CM5	256*128(T85)
9	CSIRO-MK3.6.0	192*96(T63)
10	FGOALS_g2	128*60
11	GFDL-ESM2M	144*90
12	GISS-E2-R	144*90
13	HADGEM2-ES	192*145
14	INM-CM4	180*120
15	IPSL-CM5A-MR	144*143
16	MIROC5	256*128(T85)
17	MIROC-ESM-CHEM	128*64(T42)
18	MPI-ESM-LR	192*96(T63)
19	MRI-CGCM3	320*160(T106)
20	NORESM1-M	144*96

°N-40°N), 模式模擬夏季季風降水的肇始(onset)與消退(retreat)時間的準確度做為判別依據。由於各別模式在降水的季節循環模擬時,存在著不同的系統性誤差,因此使用Tung(2014)的分析方式,對模式的5日平均降雨做傅立葉(Fourier)低頻濾波以及標準化為RPI(ratio of monsoon precipitation index),目的是增加挑選模式在模擬乾、濕季時序變化的準確度。另外為定量評估模式結果,應用統計相關性比較 Taylor-Skill Score (T-Skill Score)(Taylor, 2001)整合分析多模式模擬季節降雨時序變化。

$$S = \frac{4(1+R)^4}{(\hat{\sigma}_f + 1/\hat{\sigma}_f)^2(1+R_0)^4} \quad (2.1)$$

方程式(2.1)之中 $\hat{\sigma}_f$ 為模式相對於觀測資料的標準差;R為模式與觀測的空間相關係數;R₀則是最大可能相

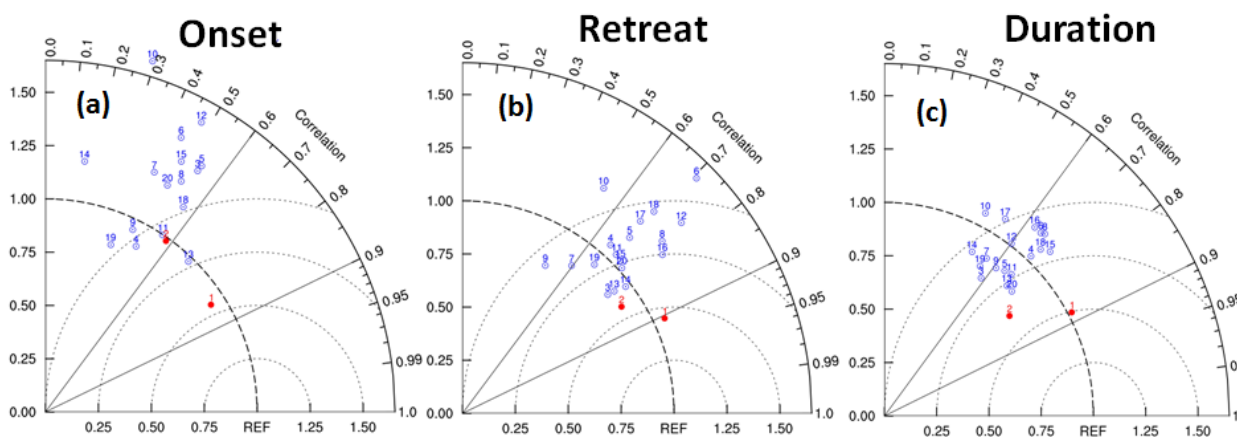


圖 1 如表 1 模式代碼所示,各別模式與參考觀測資料(GPCP),在東亞地區(90°E-135°E, 10°N-40°N)夏季季節降雨時序變化之泰勒圖(Taylor Diagram)。a、b、c 分別為肇始、消退與持續時序的統計相關性分析。

關係數值(在本研究 $R_0=1$)。

三、結果分析

(一) 模式驗證與挑選

一般臺灣水文氣候上定義5~10月為濕季，這與CMAP觀測資料分析東亞夏季季風降雨帶在臺灣附近肇始時間為5~6月、消退為9~10月期間的時間點一致(Wang and LinHo, 2009)。於是在本研究定義臺灣梅雨季5、6月間為濕季的來臨；而10、11月間降雨由夏季對流或颱風型態轉為冬季鋒面型態則定義為乾季的開始。由觀測資料發現，臺灣周圍區域乾、

濕季降雨特性，與東亞區域(90°E-135°E, 10°N-40°N)之夏季季風降雨帶肇始與消退的分布有很高相關性。但運用夏季降雨推演時間點分辨乾、濕季的方法在模式結果具有一定的困難度，因為5~6月期間模式模擬季風降雨往往是偏乾的情況(童, 2014)；但模擬消退時間點與觀測分析結果有很高的一致性；另一方面，模式也很難做到年降水時序與強度變化(annual cycle)都一致。過去的研究(Sperber, 2014; Tung, 2014)也發現，即使CMIP5大部份模式在模擬東亞夏季季風的濕季肇始時間點表現不佳，但在全年的總降雨量(total precipitation)結果不錯，因而可用來做為標準化模式年降雨循環的背景因子。

用總降雨量標準化年循環變化產生的RPI指標，找出模式季風降雨開始與結束時間點，有助於增加更多模式的可用度與準確度。圖1為應用Taylor圖分析18個模式模擬雨季從肇始、消退到持續時間在空間上與觀測資料的相關性評估結果。與之前研究(Tung, 2014)分析大範圍亞洲地區(50°E-180°E, 0°N-50°N, APM)夏季雨帶推演時間結論一致，即肇始時間點效果最差，各模式評估結果多落在低相關係數、高均方根誤差分布範圍，然後是消退、再來是持續時間的模擬。值得注意的是持續時間的比較結果，模式有很好的的一致性。

進一步應用T-Skill Score定量整合分析模擬結果，

Table of ASM Taylor skill score(CMIP5)

	APM_OS	APM_RT	APM_DR	EA_OS	EA_RT	EA_DR
CMAP	0.86	0.87	0.85	0.71	0.82	0.78
CMIP5	0.57	0.61	0.62	0.39	0.7	0.59
ACCESS1-0	0.51	0.46	0.43	0.32	0.61	0.37
bcc-csm1-1	0.32	0.35	0.51	0.3	0.48	0.5
BNU-ESM	0.32	0.43	0.47	0.32	0.5	0.45
CanESM2	0.38	0.39	0.51	0.24	0.44	0.46
CCSM4	0.43	0.42	0.42	0.24	0.4	0.36
CNRM-CM5	0.48	0.46	0.58	0.31	0.57	0.48
CSIRO-Mk3-6-0	0.23	0.4	0.31	0.26	0.29	0.41
FGOALS-g2	0.32	0.37	0.38	0.13	0.33	0.28
GFDL-ESM2M	0.38	0.35	0.46	0.36	0.52	0.49
GISS-E2-R	0.25	0.41	0.3	0.25	0.54	0.41
HadGEM2-ES	0.47	0.45	0.5	0.51	0.62	0.5
inmcm4	0.24	0.51	0.35	0.11	0.64	0.29
IPSL-CM5A-MR	0.39	0.53	0.55	0.27	0.55	0.54
MIROC5	0.27	0.49	0.4	0.21	0.61	0.43
MIROC-ESM-CHEM	0.28	0.37	0.42	0.14	0.48	0.34
MPI-ESM-LR	0.36	0.54	0.51	0.36	0.47	0.51
MRI-CGCM3	0.37	0.33	0.41	0.21	0.48	0.35
NorESM1-M	0.39	0.4	0.57	0.29	0.57	0.53

圖2 T-Skill (Taylor Skill) Score 統計定量整合 CMIP5 個別模式空間分布之矩陣分析圖。橫軸分別為亞洲地區(50°E-180°E, 0°N-50°N, APM)與東亞地區(90°E-135°E, 10°N-40°N, EA) 模擬夏季降雨肇始(onset, OS)、消退(retreat, RT)與持續(duration, DR)時序。縱軸為另一組觀測資料(CMAP)、MME(CMIP5)與各別模式評估結果。

呈現於圖2的矩陣分析圖中。此矩陣同時分析大範圍亞洲季風(Asia Pacific Monsoon, APM)區與東亞季風(East Asia Monsoon, EA)區。發現較小區域的EA在分析onset的部份，其T-Skill Score都比APM低，原因是東亞地區處於整個夏季季風環流區的下游，且影響因子多且複雜(如MJO、SST...等)。值得注意的是東亞地區的retreat(EA_RT)都比APM_RT的技術得分高，說明各個模式模擬的氣候系統，在建立完整個季風環流系統後，由夏季轉變成秋、冬季大陸型高壓主導的降雨系統之時序推演機制都掌握的不錯。因應臺灣水資源衝擊影響評估需求，從各模式評估的矩陣分析圖(圖2)找出5個最佳技術得分的模式做MME為

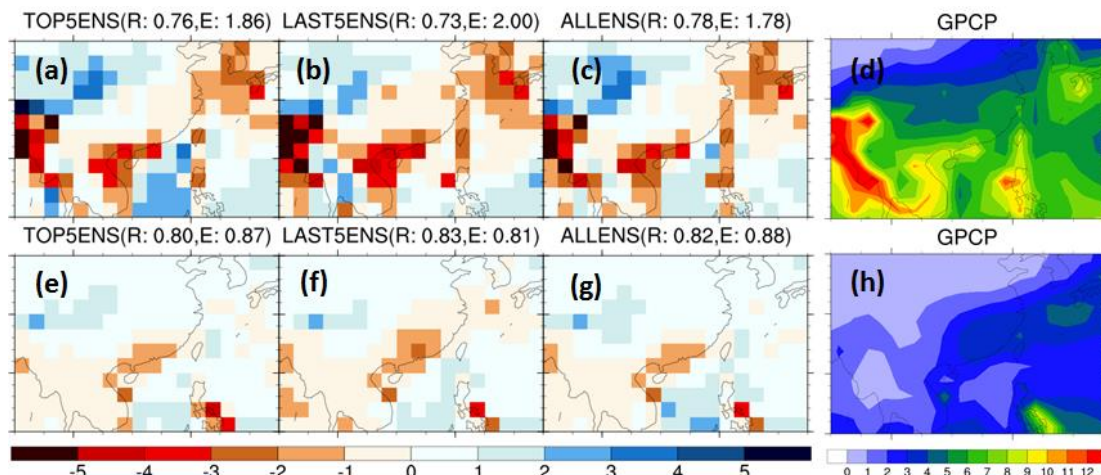


圖3 乾(11~4月)、濕(5~10月)季觀測(d, h)與 TOP5(a, e)、LAST5(b, f)與 ALL(c, g)3組分類之MME的降雨偏差空間分布。第1列為濕季、第2列為乾季。R值為模式與觀測間的相關係數、E為均方根誤差。(單位：mm/day)

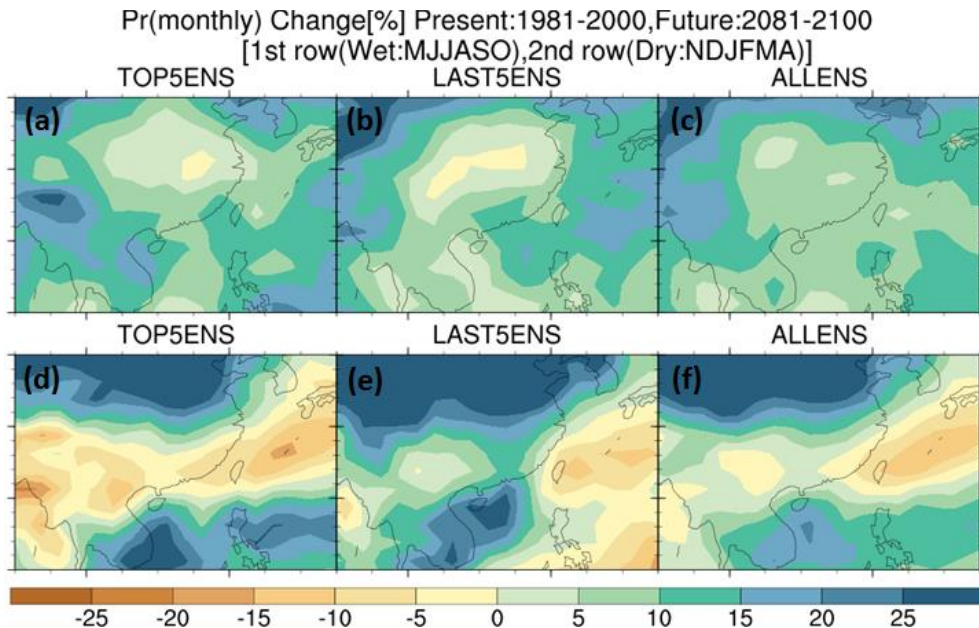


圖 4 模式 MME 在 21 世紀末(2081~2100)相對於現今氣候(1981~2000)降水場的變化(單位：%)。a、d 為 TOP5ENS；b、e 為 LAST5ENS；c、f 為 ALLENS。

TOP5ENS。其中包含BCC-CSM1.1、HadGEM2-ES、IPSL-CM5A-MR、MPI-ESM-LR與NorESM1-M；另外找 5 個最低得分做 MME 為 LAST5ENS。包含 CSIRO-Mk3-6-0、FGOALS-g2、MIROC-ESM-CHEM、MRI-CGCM3與CCSM4；加上一般常用的分析方法將所有 18 個模式做 MME 為 ALLENS。目的是比較使用最好的 TOP5 是否能得到類似所有模式 ALL 的結果，而 LAST5 模擬結果是否為未來氣候變遷裡的最劣情境。

(二) 東亞與臺灣乾、濕季降雨變遷之空間分布

我們想了解氣候變遷下，乾、濕季的未來推估前，要先了解模式模擬歷史氣候。圖 3 所示為本研究模式設定的 3 組 MME(TOP5ENS、LAST5ENS 與 ALLENS)1981~2000 氣候平均，與觀測資料(GPCP)的偏差值在東亞地區空間分布。氣候上濕季的最大平均降雨量出現在孟加拉灣與泰國附近，而臺灣附近平均降雨量約 10[mm/day](圖 3d)。模式的偏差部份，3 組 MME 在整夏季季風西南氣流雨帶(從中南半島、南海、臺灣一直到日本南部)均為負偏差，說明所有模式都普遍存在西南雨帶強度模擬偏弱的問題；臺灣附近 3 組同樣也都出現輕微的負偏差(約 -2mm/day)，差別在 TOP5ENS 這組模擬結果最好。呼應模式模擬季風消退的結果，乾季降雨模擬在氣候上評估部份，3 組 MME 的空間相關係數都超過 0.8 以上。

在 21 世紀末(2081~2100)模式推估的部份，以降雨的百分比變化表示(圖 4、5)。濕季在中國的中、南部變乾；而臺灣附近則變濕(TOP5 與 LAST5ENS 約增加 10~15%；ALLENS 增加 5%)。在乾季時臺灣周圍降雨量則減少 5~10%，且在東亞地區 3 組 MME 都呈現乾燥帶從日本南部外海，經臺灣一直延伸到中國南部與

孟加拉一帶，臺灣未來乾季降雨量減少很可能與這個大尺度現象有關，這部份的機制有待未來進一步探討。進一步以 TCCIP 統計降尺度分析更高解析度臺灣的降雨變遷。圖 5a-c 呈現與全球模式類似結果，且降雨的變化有地區上的差異，TOP5ENS 與 ALLENS 一致表現未來降雨增加，且平地比高山更加明顯。而 LAST5ENS 則呈現西部平地增加比東部更加明顯的差異，蘭陽平原原有最少的增加率。圖 5d-f 顯示乾季臺灣未來區域上的變化，TOP5ENS 與 ALLENS 都表示西部降雨減少比東部更加明顯；而 LAST5ENS 則相對變化較小。以上結果無論大尺度東亞區域，或高解析度臺灣網格，都說明臺灣未來降雨變化是濕季變更濕、乾季變更乾；西部比東部明顯、平地比高山更嚴重。

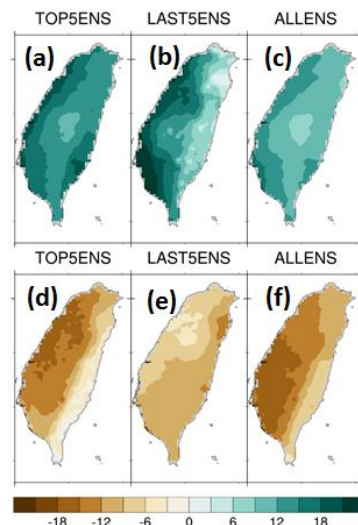


圖 5 同圖 4 但使用 TCCIP 統計降尺度 5kmx5km 解析度，臺灣全島乾(d, e, f)、濕(a, b, c)季變化(單位：%)。

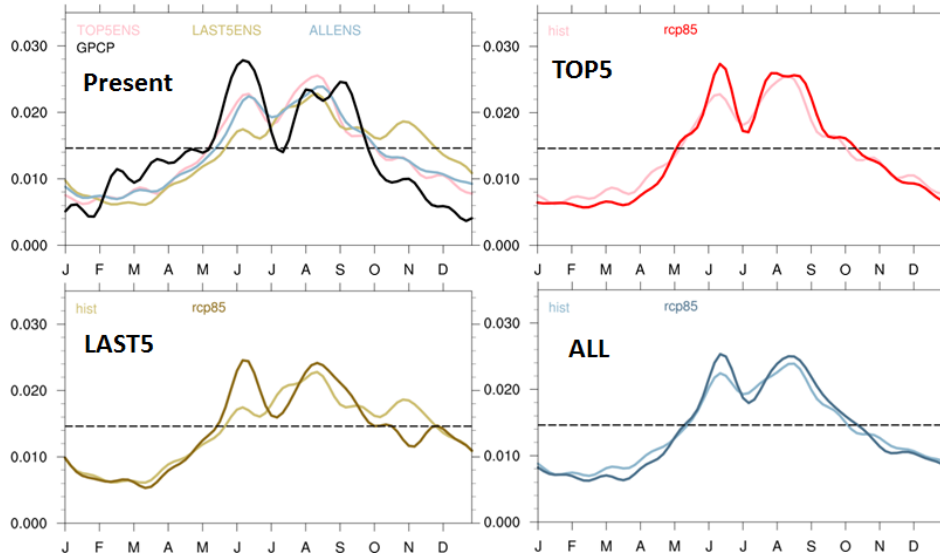


圖 6 從 3 組 MME 資料(2.5°x2.5°)於臺灣附近區域(21.25°N~26.25°N,118.75°E~122.5°E)RPI 平均值。現今氣候(Present)圖中包含觀測(GPCP)與 3 組模式 MME 年降水循環線。紅色為比較 TOP5 未來(rcp85)與現今氣候(hist)年降水循環；深黃色為 LAST5；深藍色為 ALL。虛線為季風降雨肇始(消退)的門檻值。

(三) 臺灣年降雨變化趨勢

為了解臺灣未來情境下的降雨變化趨勢，我們進一步分析年降水循環與逐年的空間平均值。圖6從全球網格資料，截取臺灣附近的區域平均值(21.25°N~26.25°N,118.75°E~122.5°E)。在現今氣候(Present)分析圖中的觀測(GPCP)年降水循環線，超過RPI門檻值(0.015)的時段(5~10月)定義為濕季、而其它低於門檻值時段(11~4月)則定義為乾季。在濕季期間出現2個降水峰值，第1個即為梅雨鋒面伴隨的降雨，時間為6月；第2個則為颱風貢獻，時間為8~9月；符合臺灣長期氣候的特徵。模式現今氣候部份，3組MME中TOP5NES與ALLENS無論濕季開始、結束時間，降雨的雙峰型態都掌握的不錯，只是強度稍弱。而LAST5ENS則呈現濕季開始與結束時間太晚的情況。

OBS&CMIP5 over Taiwan(5km)

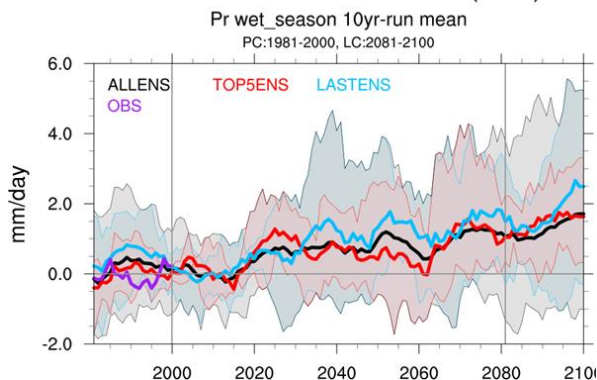


圖 7 為統計降尺度高解析度模式資料，應用在臺灣全島陸地上濕季降水場的空間平均值，從現今氣候(1981~2000)到 21 世紀末(2081~2100)的 20 年滑動平均時序變化圖。紫色粗實線為 TCCIP 產製的觀測資料。紅色陰影區為 TOP5 模式的散佈情況，而粗實線為 TOP5ENS。藍色為 LAST5，而黑色為所有 18 個模式 ALL。(單位：mm/day)

MME在未來推估與現今氣候的年降水循環比較部份，濕季在TOP5ENS與ALLENS沒有出現明顯的漂移，約略呈現乾、濕季節更加分明的情況。值得探討的是LAST5ENS在現今氣候的濕季偏差，氣候模式在RCP8.5暖化情境對的加熱之下，開始回復正常的氣候型態降雨。原因可能是LAST5的模式對啟動季風降雨的機制反應較遲鈍，加熱之後則觸發降雨回復正常的季節型態。

臺灣在RCP8.5最嚴重暖化情境下，3組MME逐年降雨量的變化情況是否符合模式模擬氣候變化範圍之內；所挑選的3組系集模式，在減少模式不確定性分析的效果是接下來想探討的。本研究使用TCCIP產製的5km高解析度觀測與統計降尺度資料則較為符合資料在地化，以方便下游研究應用領域所使用。從圖7現今氣候濕季的時序變化(1981~2000)比較發現，觀測部份雖然在1990年代出現降雨偏少的年代際變化，但都含括在所有18個模式散布曲線內，且挑選最佳TOP5模式則可限制在最小範圍。在未來推估的部份，TOP5在大部份時間點都具有最小散佈範圍，且TOP5ENS的變化趨勢都跟隨著ALLENS，特別是21世紀末(2081~2100)都最明顯的效果呈現。說明挑選TOP5模式分析逐年降雨量變化趨勢的策略，可減少多模式間的不確定性，加速應用領域在分析模式模擬未來氣候變遷不確定性推估的進程。而LAST5模式散佈範圍多分布在18個系集模式的最上與最下極限區間，同時也最大化所有模式的散佈範圍、符合大氣物理環境背景場的降水變化基礎，故可視為最劣情境分佈，最適於應用在衝擊面研究領域。

四、結論

本研究使用18個CMIP5模式分析臺灣乾、濕季降雨，在21世紀末的未來推估結果。先針對模式歷史氣

候模擬做驗證，挑選適於應用領域的模式組合做分析。從大範圍東亞地區降水帶，再進一步到臺灣全島區域性的降雨季節變遷做深入性探討。

整體而言，CGCM模擬在歷史氣候的驗證方面，東亞地區夏季降雨持續時間長度模擬的最好，再來是消退、而肇始時間點效果最差。原因是各個氣候模式的季風系統，由夏季季風環流系統，轉變成秋、冬季大陸型高壓主導的降雨系統之消退時序推演機制都掌握的不錯。季風降雨肇始時間模擬結果不佳的原因是，東亞地區處於整個亞洲夏季季風環流區的下游，且受到影響因子多且複雜(如MJO、SST...等)。模式的氣候偏差部份，3組MME在整夏季季風西南氣流雨帶(從中南半島經南海、臺灣一直到日本南部)均有強度模擬偏弱的問題；但乾季氣候模擬的空間相關係數平均都超過0.8以上。在未來推估部份，無論CGCM或高解析度統計降尺度，都呈現臺灣未來降雨變化是濕季變更濕、乾季變更乾；且西部比東部明顯、平地比高山更嚴重。

比較模擬臺灣氣候年降水循環的結果，TOP5NES與ALLENS的現今氣候無論濕季開始、結束時間，或降雨梅雨與颱風季雙鋒型態都掌握的不錯，只是強度稍弱。但LAST5ENS則呈現整個濕季偏晚的趨勢。模式挑選策略對未來推估的不確定性評估，TOP5組合可有效減少，而LAST5可最大化所有18個模式的散佈範圍、且建立在大氣物理環境背景場的合理變化基礎，可視為最劣情境分佈，最適於應用在衝擊面研究領域。

參考文獻

- 童裕翔, 2014: “氣候變遷下的亞洲－極端事件與夏季季風”，國立台灣師範大學地球科學系博士論文，第三章，第二節，13-19
- Kitoh, A., & Uchiyama, T. 2006: "Changes in Onset and Withdrawal of the East Asian Summer Rainy Season by Multi-Model Global Warming Experiments". *Journal of the Meteorological Society of Japan*, 84(2), 247 – 258.
- Knutti, R., Furrer, R., Tebaldi, C., Cermak, J., & Meehl, G. a. 2010: "Challenges in combining projections from multiple climate models". *Journal of Climate*, 23, 2739 – 2758.
- Tung, Y.-S., Chen, C.-T., & Hsu, P.-C. 2014: "Evolutions of Asian Summer Monsoon in the CMIP3 and CMIP5 Models". *Sola*, 10(2002), 88 – 92.
- Wang, B., & LinHo. 2002: "Rainy Season of the Asian – Pacific Summer Monsoon*". *Journal of Climate*, 15(4), 386 – 398.