

氣候變遷情境下之影響臺灣的颱風特徵變遷

陳淡容¹、鄭兆尊¹、陳正達²
國家災害防救科技中心¹
國立臺灣師範大學地球科學系²

摘要

氣候變遷下極端天氣現象特徵的改變是個相當重要的課題。對臺灣而言，颱風是最受關注的極端事件之一。臺灣複雜的地形對颱風影響期間降雨分布的影響很大，而颱風路徑的推估在其中也扮演著主導的角色。本研究使用可解析出颱風發展的日本氣象廳氣象研究所之高解析度(20 km)大氣環流模式(MRI-AGCM3.2S)所做的全球模式氣候推估資料，來研究全球暖化情境下影響臺灣颱風在臺灣地區的降雨變化。考慮到CMIP5模式對未來海溫推估的不確定性，MRI-AGCM3.2S使用了4組RCP8.5暖化情境下21世紀末的不同海溫進行氣候模擬推估。本研究將推估資料透過5公里解析度WRF模式進行動力降尺度後分析，分析著重在不同暖化的海溫分布對影響臺灣颱風的影響，以及使用單一組推估資料與使用多組系集資料在局部區域颱風降雨變化特徵的差異。

關鍵字：氣候變遷、颱風變異

一、前言

伴隨著颱風的強降水常在臺灣引發嚴重的天然災害，譬如淹水、土石坍塌、土石流、路基流失、堤防潰決等。另一方面，颱風帶來的降水卻又是重要的水資源。颱風是防災工作及水資源管理所高度關切的對象之一，在氣候變遷對臺灣地區影響的研究中，颱風降水的推估是相當重要的一個課題。隨著電腦計算能力迅速發展，近年來已有不少高解析度的全球/區域氣候模式發展，並能模擬出如颱風、暴雨、強對流系統等中尺度劇烈天氣現象，其中模式模擬之颱風發生頻率、生成位置、颱風強度與觀測結果相比具有相當高的掌握度(Knutson et al., 2008、Mizuta et al., 2011)。Sugi et al. (2009) 分析高解析度氣候模式的結果指出全球暖化會導致本世紀末颱風發生頻率減少。Knutson et al. (2010) 的研究中指出，根據高解析度動力模式的模擬，21世紀末全球颱風發生的頻率減少6-34%，但是強颱風比率增加，颱風暴風半徑100 km內降雨強度增加約20%，然而這些變化在各海域的變動程度有著相當大的差異。對於臺灣地區而言，這些伴隨著全球暖化所產生的變化值得做進一步的探討。

目前的研究發現使用多組模式推估的結果所計算得到的系集平均的結果比大多數單一模式結果佳，也傾向以系集平均來判定最可能對未來時期的推估，並以多模式的結果計算出推估數值可能變動的範圍。一般而言，大多數模式的變遷趨勢會與系集平均的變化趨勢相同，但是就以一組推估的結果

而言，是有可能與系集平均的趨勢相左。由於高解析度動力降尺度資料的計算曠日廢時，獲得多組的區域降尺度資料實屬不易，但若僅靠一組推估資料來研判，很有可能會對未來變化的趨勢造成誤判。本研究即以使用多組不同海溫設定進行動力降尺度之結果，比較分析在RCP8.5的暖化情境設定下，21世紀末臺灣地區颱風變遷特徵在單一資料與系集平均資料的差異。

二、模式及資料說明

本研究採用MRI-AGCM3.2S (Mizuta et al. 2012) 全球模式進行氣候推估資料進行颱風分析並進行動力降尺度。此模式為日本氣象研究所(Meteorological Research Institute, MRI)發展之高解析度大氣環流模式，水平解析度約20 km，MRI對現在時期大氣環流的模擬掌握得相當不錯。本研究分為現在和世紀末二時期來探討氣候變遷情境下的颱風變異特徵，其中現在和世紀末時期分別為1979-2003年和2075-2099年，使用之暖化情境為RCP8.5，模式未來暖化的情境採用28組CMIP5的洋溫暖化趨勢來設定未來海溫情境以驅動大氣模式，其中不同海溫設定為28組模式的平均海溫(c0)、及將28組未來海溫變化的空間分布進行群落分析進一步將模式區分為三類：8組模式的平均海溫(c1)、14組模式的平均海溫(c2)、6組模式的平均海溫(c3)。

由於MRI-AGCM是20公里解析度，不足以解析臺灣地區高聳地形造成的降雨特徵，因此使用了5公里解析度的區域模式WRF進行動力降尺度。所使用的區域模式是WRF模式(Weather Research and Forecasting model) 3.5.1版本，為5 km解析的單層網格，網格點數為380 × 400，垂直解析度均為36層；模擬區域的最外19層為緩衝區，大尺度環流的訊號即是透過此緩衝區以及對整區做spectral nudging來驅動模式的運行。因為使用了spectral nudging，WRF模式中的颱風會維持與AGCM中的颱風走相同的路徑，但是也會讓對流的發展受到些許的抑制。如此的設計，目的在讓區域模式與全球模勢所計算出的區域氣候變遷訊號不至於相左，但又能獲得高解析度的訊息。

為比較模擬現在時期與觀測的差異，本文所使用之觀測路徑資料為日本氣象廳之颱風路徑，雨量資料則使用中央氣象局雨量站逐時觀測資料內差至網格點資料，時間範圍為1992-2010年。受限於雨量資料，在比較模擬與觀測之降雨分布時，目前僅以19年觀測(101場颱風)之平均氣候值進行比較，而探討颱風強度和路徑之差異時，則使用相同基期之1979-2003年(115場颱風)資料。

三、影響臺灣颱風的模擬與變遷趨勢

本研究著重在分析影響臺灣的颱風，其定義為颱風中心有落入距海岸線300公里範圍內之颱風為影響臺灣颱風，此定義下之觀測和全球模式推估現在和世紀末時期影響臺灣之颱風路徑密度分布如圖1所示，觀測結果顯示在臺灣東南外海有較高的路徑密度、南海次之，陸地上則在東部有較高的密度，但模式則是在西部陸地上有較高的路徑密度，顯示模式模擬出的颱風路徑與觀測存在偏差。颱風密度分布圖顯示世紀末時期密度顯著減少，雖然密度減少，但四組不同海溫設定的結果皆顯示在臺灣附近海域有較高的密度，其中c3顯示登陸颱風的密度較高。

雖然21世紀末海溫皆增加，但不同的海溫分布所模擬出來的颱風路徑存在不小的差異。表1為觀測和模式推估之颱風個數，觀測顯示現在時期影響臺灣的颱風個數為115場，模式有低估的現象，僅87場；西北太平洋颱風中影響臺灣的比例觀測和模式分別為18%和13%，模式亦有低估的情形。模式模擬之颱風強度有高估的情形，中度和強烈颱風所占比率有顯著高估的情形，尤其是強烈颱風高估將近兩倍之多。模式推估21世紀末影響臺灣的颱風個數於不同

海溫設定下同樣皆有減少的趨勢，以c1減少趨勢最為顯著，減少69%，c2減少25%最輕微，這與21世紀末西北太平洋颱風減少的關係相似。

颱風強度變遷部分除了c3於21世紀末輕度颱風所占比率有些微增加的趨勢外，其餘海溫設定皆顯示21世紀末輕度颱風比率有減少的趨勢，以c2減少最顯著；中度颱風除了系集平均海溫c0外，其餘海溫設定皆顯示21世紀末中度颱風所占比率是減少的，以c1減少最顯著；強烈颱風則顯示所有海溫設定的結果都呈現增加的趨勢，以c1增加最顯著、c2次之。

圖2為動力降尺度前、後以及觀測的最低海平面氣壓和近中心最大風速的關係圖，強度較強的颱風(近中心最大風速約> 40 m/s)於相同最低海平面氣壓所對應的近中心最大風速全球模式與觀測相比有偏高的情形，顯示模式於颱風強度有高估的現象，強度越強高估越明顯。經過動力降尺度後，模式中風速高估的部分有減弱為與觀測結果較為相似。圖3則為近中心最大風速和最低海平面氣壓於降尺度前、後的關係圖，最低海平面氣壓則於降尺度前後的差異並不太大。

近中心最大風速和最低海平面氣壓的機率密度函數分布圖如圖4所示，與觀測相比，AGCM現在時期的風速在<40 m/s的部分顯著低估，>40 m/s的部分則顯著高估；最低海平面氣壓在950 hPa以下有明顯高估的情形，高於950 hPa的部分則顯著低估，再次顯示AGCM在較弱颱風部分低估、較強颱風高估。

未來颱風強度的變遷顯示，AGCM世紀末時期近中心最大風速在< 25 m/s的發生機率有增加的趨勢，在40~55 m/s間的發生機率則有明顯減少的趨勢，> 70 m/s的發生機率有些微增加的趨勢；最低海平面氣壓值小於960 hPa的發生機率有減少的趨勢，高於960 hPa的發生機率則有增加的趨勢。降尺度後現在時期風速< 40 m/s的發生機率有增加的情形，> 40 m/s的發生機率則降低，改善了AGCM強度偏強的情形，但降尺度後除了小於30 m/s的機率仍有低估的情形外，其餘風速區間的發生機率與觀測結果較相似；最低海平面氣壓低於950 hPa的發生機率減少、高於950 hPa的發生機率則是增加。

動力降尺度後的結果顯示世紀末風速小於30 m/s的發生機率有減少的趨勢，高於30 m/s的發生機率則是增加，海平面氣壓低於960 hPa的發生機率有明顯增加的趨勢，高於960 hPa的發生機率則減少。降尺度後的變化趨勢雖不盡與降尺度前完全相同，但世紀末時期颱風強度增加的趨勢是一致的。

圖5為氣候模式模擬出的颱風降雨於降尺度前後的分佈圖，圖中顯示降尺度前20公里解析度在量值上有明顯低估的情形，降雨極值的分佈位置與觀測結果存在偏差，但透過動力降尺度後降雨值整體有明顯增加的情形。

四、影響臺灣之颱風降雨變遷

雖然動力降尺度過後的降雨量值有提升的情形，但與觀測相比總降雨量仍有低估的情形，低估的原因與模式中影響臺灣颱風個數偏少有關。四組海溫設定的結果皆顯示21世紀末時期臺灣地區颱風降雨量有減少的趨勢，主要降雨集中在中央山脈、雪山山脈和阿里山山區，其中c1的降雨量是四組海溫設定中最少的。年平均颱風降雨和降雨強度(Simple Daily Precipitation Intensity Index, SDII)的改變率如圖6所示，年平均颱風降雨顯示21世紀末時期颱風帶來的雨量除了c0和c3西南部地區有些微增加的趨勢外，其餘皆普遍呈現減少的趨勢，減少程度以c1最顯著，尤其是中部地區。c1減少趨勢最顯著的原因與影響臺灣的颱風個數明顯減少一致(表1)，同時c1陸地上和附近海域的路徑密度相對較低(圖1)，登陸的颱風相對更少，也是造成c1於21世紀末颱風降雨減少最顯著的原因。

雖然c3於21世紀末時期颱風個數減少的趨勢較c2顯著，但因陸地上颱風密度較高，因此降雨減少的程度較輕微，甚至於西南部地區有些微增加的趨勢。降雨強度於各組海溫設定間有不同的變化趨勢，除了c2呈現21世紀末降雨皆增強的趨勢外，c0和c3顯示在東南部地區降雨強度有些微減弱的趨勢，其餘地區皆增強，以西南部地區增強最顯著；c1的變化趨勢則與另外三組較不相同，在恆春半島有最顯著的增強趨勢，中部地區的降雨強度則明顯減弱。

因為多組模式系集平均的誤差可能會比單一模擬的誤差低，在此我們也將c0~c3的結果取系集平均，與利用平均海溫(c0)單一模擬的結果作比較。不同模式和系集平均所推估出的21世紀末颱風降雨改變率和降雨強度改變率如圖6所示，在此皆利用動力降尺度的結果作評估。年平均颱風降雨的部分顯示取系集平均的結果減少趨勢較c0顯著，21世紀末時期c0於西南部地區降雨有些微增加的趨勢，但取系集平均後則全臺皆呈現降雨減少的趨勢。降雨強度部分c0於西半部地區皆呈現顯著增加的趨勢，於東南部和恆春半島有減弱的趨勢，但取系集平均後降雨強度增強和減弱的程度皆減緩，東南部大部

分區域和恆春半島降雨減弱的趨勢甚至變為增強的趨勢。

進一步將降雨區分為北、中、南、東和挑出臺灣五大流域(淡水、高屏、大甲、曾文、濁水)的平均降雨看21世紀末的降雨改變趨勢(表2)，表中數字表示各區降雨排名前10%和5%的平均降雨，粗斜體為世紀末降雨減少的變化率，深灰底為有通過95%統計檢定、淺灰底為通過90%統計檢定。c0結果顯示各分區僅東部的降雨改變沒有通過統計檢定，除了東部前5%的降雨有減少的趨勢外其餘皆呈現增加的趨勢，前10%增加最顯著的區域為北部地區，增加最少的地區為東部，五大流域則以大甲和曾文增加最顯著，濁水增加較輕微；前5%增加最顯著的地區同樣為北部，五大流域則以淡水和曾文最顯著，除了北部、南部、淡水和濁水流域外其餘分區和流域都顯示前10%的降雨增加趨勢較前5%顯著。取了系集平均後東部仍然沒有通過統計檢定，21世紀末前10和5%的降雨皆呈增加趨勢，皆以南部地區和曾文流域增加最為顯著，東部和濁水流域增加較輕微，前5%的變化趨勢較前10%顯著。

五、結論與討論

過去使用的氣候模式僅使用單一情境(RCP 8.5)的海溫設定(c0)來模擬，本研究加入了三組不同海溫設定的模擬結果進行比較，模式顯示不論何種海溫設定下，21世紀末影響臺灣地區的颱風總數有減少的趨勢，其中以c1和c3減少最顯著、c2減少最少。年平均颱風降雨以c1減少最顯著，其中造成雨量減少最顯著的原因為c1於世紀末影響臺灣的颱風個數減少最為顯著(-69%)。

由於過去研究指出取系集平均後，原本各模式間不同的設定所造成的誤差會被抵消掉，系集平均的誤差是較小的。本研究也針對模式的c0~c3取系集平均，結果顯示21世紀末平均颱風降雨和降雨強度的改變率在取系集平均後於各地區有不同的改變趨勢，有些地區在取平均後改變趨勢變顯著有些地區變不顯著(表2)。

本研究為了增加樣本數和降低誤差而取系集平均，但在計算21世紀末之改變率時需要減去現在時期的平均值。目前現在時期只有一組模擬結果，且此模擬結果與觀測存在誤差，因此計算改變率時無法排除現在時期所造成的誤差，導致局部地區降雨改變率的推估結果仍有相當大的不確定性。未來必須再增加現在時期的模擬，期望透過取系集平均或是在取得夠多的颱風樣本數後使用重複取樣的技術

能減少現在時期的颱風降雨推估誤差，以得到更可靠的未來變遷推估結果。

參考文獻

Knutson, T. R., J. J. Sirutis, S. T. Garner, G. A. Vecchi, and I. M. Held, 2008: Simulated reduction in Atlantic hurricane frequency under twenty-first-century warming conditions. *Nature Geoscience*. 18 May 2008.

Knutson, Thomas R., John L. McBride, Johnny chan, Kerry emanuel, Greg Holland, Chris Landsea, Isaac Held, James P.

Kossin, A. K. Srivastava and Masato Sugi, 2010: Tropical cyclones and climate change. *Nature Geoscience*, **3**, 157-163.

Mizuta, R., H. Yoshimura, H. Murakami, M. Matsueda, H. Endo, T. Ose, K. Kamiguchi, M. Hosaka, M. Sugi, S. Yukimoto, S. Kusunoki, and A. Kitoh, 2012: Climate simulations using MRI-AGCM3.2 with 20-km grid. *J. Meteor. Soc. Japan*, **90A**, 233-258.

Sugi, M., H. Murakami, and J. Yoshimura, 2009: A Reduction in Global Tropical Cyclone Frequency due to Global Warming. *SOLA*, **5**, 164-167.

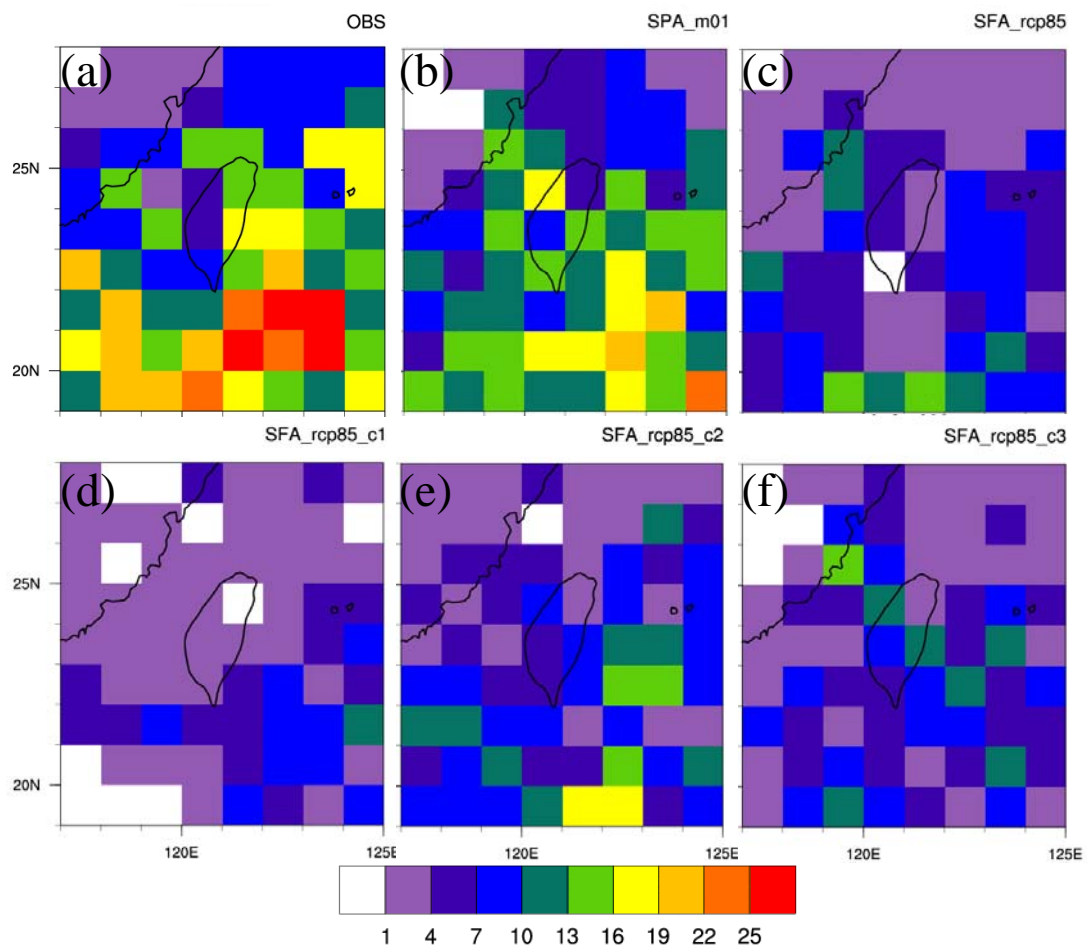


圖1 MRI 影響臺灣之颱風路徑密度分布圖，(a)至(f)分別為觀測、模式現在、21 世紀末四組不同海溫模擬下之分布結果(單位：次數)

表1 MRI 現在和21 世紀末不同海溫模擬下影響臺灣之颱風個數、各強度所占比例，其中颱風個數外關位中括弧內之數字表示21 世紀末個數改變率

模式	颱風個數	輕度	中度	強烈
觀測	115	30%	53%	17%
現在	87	28%	40%	32%
世紀末_c0	48 (-45%)	17%	42%	42%
世紀末_c1	27 (-69%)	26%	19%	56%
世紀末_c2	65 (-25%)	15%	32%	52%
世紀末_c3	50 (-43%)	34%	28%	38%

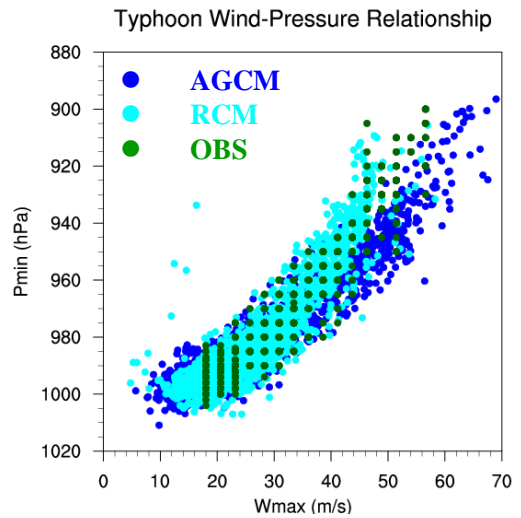


圖 2 最低海平面氣壓(縱軸)和近中心最大風速(橫軸)關係圖，其中綠、藍、淺藍色分別為觀測(OBS)、降尺度前(AGCM)和降尺度後(RCM)之結果

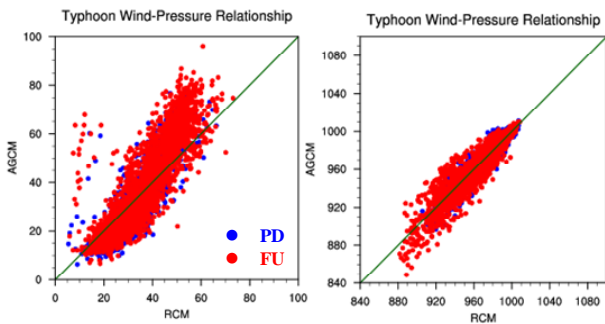


圖 3 近中心最大風速(左)和最低海平面氣壓(右)於降尺度前、後的散佈圖，其中縱軸為降尺度前、橫軸為降尺度後，藍色(PD)和紅色(FU)分別為現在和21 世紀末時期

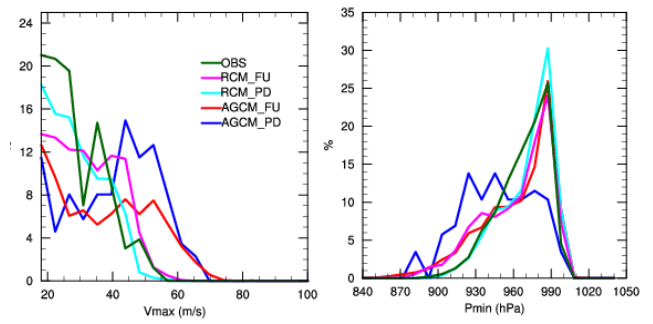


圖 4 近中心最大風速(左)和最低海平面氣壓(右)的機率密度分布圖，其中綠色線為觀測，深藍和淺藍分別為現在時期降尺度前和後，紅和桃紅則為21 世紀末降尺度前和後的結果

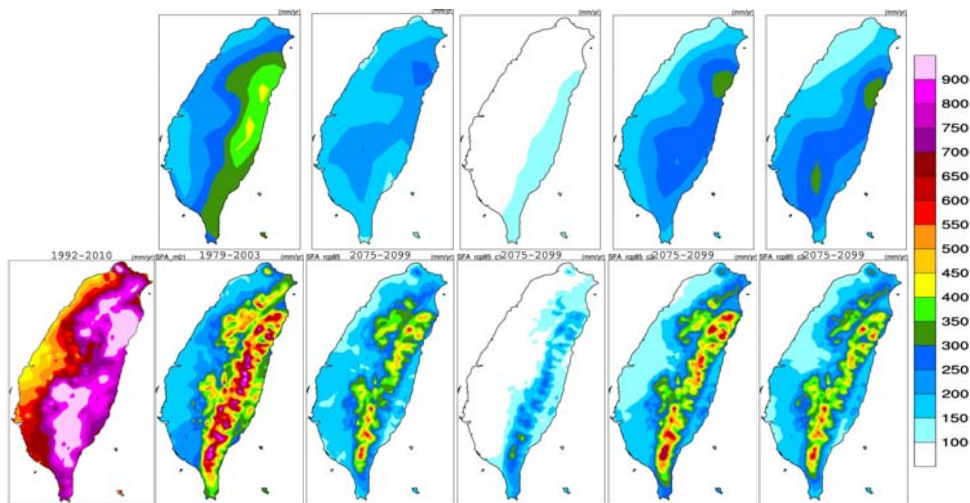


圖 5 平均每年颱風降雨(mm/yr)，上下排分別為 AGCM 和動力降尺度後之分布，由左至右分別為觀測(第一欄)、現在(第2 欄)和21 世紀末不同海溫(c0-c3，第3~6 欄)模擬之結果

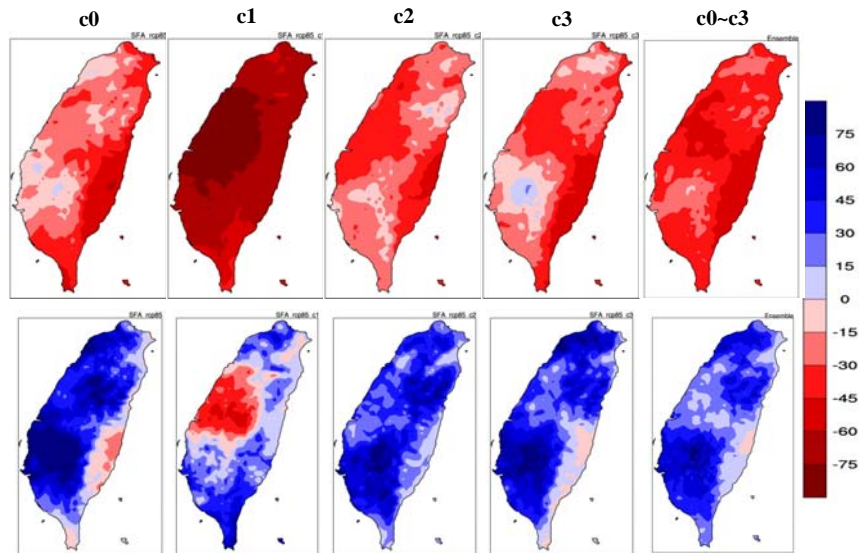


圖6 年平均颱風降雨(上排)和颱風降雨強度(下排)改變率，其中藍色系表示降雨增加(強)、紅色系表降雨減少(弱)，由左至右分別為平均海溫(c0)、c1 至 c3 不同海溫設定和 c0~c3 取系集平均之結果

表2 WRF-MRI_c0 和 WRF-MRI 系集平均推估四大分區、全臺和五大流域颱風總降雨區域平均前 10%、5%平均值在 21 世紀末的改變率(單位：%)，其中粗斜體代表降雨減少，深灰底為通過 95%統計檢定，淺灰為通過 90%統計檢定

模式	WRF-MRI-c0									
總雨量	北	中	南	東	全臺	淡水	大甲	濁水	曾文	高屏
TOP 5%	63	47	41	-3	36	61	51	33	61	49
TOP10%	54	49	33	8	41	58	65	31	67	52
模式	WRF-MRI Ensemble									
總雨量	北	中	南	東	全臺	淡水	大甲	濁水	曾文	高屏
TOP 5%	40	34	68	17	46	55	33	28	79	74
TOP10%	29	23	41	14	35	41	31	18	57	51