

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、許晃雄²、陳正達³

國家災害防救科技中心¹

中央研究院環境變遷研究中心²

國立臺灣師範大學地球科學系³

摘要

氣候變遷下極端天氣現象特徵的改變對於防災準備而言是個相當重要的課題。本研究分析兩組可解析出颱風發展的氣候模式，分別為解析度約20公里的日本氣象廳氣象研究所之高解析度大氣環流模式(MRI-AGCM)及解析度約23公里的美國普林斯頓大學地物動力實驗室所發展的HiRAM所模擬出的氣候推估資料中影響臺灣的颱風，評估不同模式對在氣候變遷情境下的未來颱風變異。由於臺灣為一地形複雜之海島，對颱風影響期間的降雨分布影響很大，本研究使用WRF模式(空間解析度為5 km)對AGCM資料進行動力降尺度以提供更切實的降雨分布。本研究將著重在兩組AGCM對影響臺灣颱風的統計分析和AGCM及RCM中颱風強度及降水的特徵，並評估世紀末臺灣地區颱風降雨的變化特徵。

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，譬如造成排水能力較差的地區淹水、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來源之一，不足的颱風降水常使得隔年出現乾旱的機率大幅提高。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。

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，世紀末全球颱風發生的頻率減少6-34%，但是強颱風頻率增加，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。

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。而這類高解析度氣候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)。以高解析度模式進行氣候模擬將日趨增多，本研究將分析幾個高解析度氣候模式模擬之影響臺灣地區之颱

風變異，並比較模式間模擬結果之差異。為了提供更高解析度以供區域衝擊研究所需，本研究也檢視了這些氣候模式資料中影響臺灣颱風經過5 km區域模式進行動力降尺度前後的差異，首先比較颱風強度的差異，再來分析颱風降雨的變遷，最後針對各地區的強降雨颱風做降雨強度的分析。

二、模式及資料說明

本研究採用MRI及HiRAM兩個不同高解析度大氣環流模式(Atmospheric General Circulation Mode, AGCM)的氣候推估資料進行颱風分析。其中MRI AGCM3.2S (Mizuta et al. 2012)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。HiRAM為美國普林斯頓大學地物動力實驗室(GFDL)所發展的HiRAM2 (High-Resolution Atmospheric Model, version 2)，模擬劇烈天氣系統能力甚佳(Chen and Lin 2011)，而本研究使用C384版本在臺灣附近的網格水平解析度約23公里。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，為便於比較，兩個模式未來暖化的情境採用相同CMIP5的洋溫暖化趨勢來設定未來海溫情境以驅動大氣模式。

本研究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。

為比較2組AGCM現在時期的模擬與觀測的差異，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(115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年資料。

三、降尺度前後颱風強度差異

本研究定義颱風中心有進入到距海岸線300 km範圍內之颱風為影響臺灣，MRI和HiRAM模擬之影響臺灣颱風個數如表1所示，現在時期MRI和HiRAM模擬之影響臺灣颱風個數分別為85和128場，觀測為115場，MRI模擬之影響臺灣颱風個數有低估的情形，HiRAM則些微高估；世紀末時期影響臺灣之颱風個數則分別為47和44場，皆呈現減少的趨勢。

MRI和HiRAM模擬之颱風強度與觀測比較結果如圖1所示，近中心最大風速和最低海平面氣壓關係圖中顯示當颱風強度較弱時模式與觀測之關係結果相近，而強度較強的颱風則顯示MRI風速有高估的情形，MRI模擬相同的最低海平面氣壓下所對應到之風速較觀測高；HiRAM的模擬結果則與MRI呈現相反的情形，於相同最低海平面氣壓下所對應之近中心最大風速較觀測低，顯示颱風強度有低估的現象，且MRI風速高估、HiRAM風速低估的情形隨著模擬之颱風強度越強有越顯著的現象。

MRI和HiRAM經過動力降尺度前後之比較分別如圖2和圖3所示，其中縱軸和橫軸分別為動力降尺度前(AGCM)和後(RCM)的結果，左、右圖分別為近中心最大風速和最低海平面氣壓，上、下排為現在和世紀末時期，降尺度前後差異越小，散布圖位置會越接近圖中紅線。MRI現在時期顯示颱風強度較弱時，降尺度後的風速有增加的情形、當颱風強度較強時，降尺度後的風速則有變弱的情形，對照圖1的結果，顯示動力降尺度能改善MRI-AGCM在模擬影響臺灣的颱風強度時高估的現象。

世紀末於降尺度前後的變化結果則與現在時期相似。MRI兩個時期之最低海平面氣壓於降尺度前後差異不大。HiRAM兩個時期之近中心最大風速的結果普遍呈現降尺度後(RCM)近中心最大風速有增強的現象，對照圖1顯示動力降尺度能改善HiRAM-AGCM低估颱風強度的情形；最低海平面氣壓的結果與MRI相似，降尺度前後的差異並不大。

將兩組模式模擬之近中心最大風速和最低海平面氣壓以機率密度函數分布呈現的結果如圖4所示，上、下排分別為MRI和HiRAM的結果，左、右分別為近中心最大風速和最低海平面氣壓，其中因觀測資料沒有小於35 kts(約18 m/s)的風速資料，所以風速機率從18 m/s開始分析。

MRI顯示在弱颱風的比例部分有顯著低估的情形、強颱風則明顯高估，而透過動力降尺度能讓弱颱風比例提高、強颱風比例降低，但與觀測相比仍舊有弱颱風低估強颱風高估的情形。世紀末顯示弱颱風比例有減少的趨勢、強颱風則有增加的趨勢。最低海平面氣壓約於930~990 hPa間的比例有低估的情形，> 990 hPa的比例則為高估，動力降尺度前後之差異不大。世紀末的結果顯示海平面氣壓較低的比例有增加的趨勢，較高海平面氣壓的比例則降低。

HiRAM於弱颱風比例的部分同樣有低估的情形，但低估的程度較MRI小，在強颱風的部分其比例亦有些微低估的情形。兩個時期的模擬結果在經過動力降尺度後較強颱風的比例皆有增加，其中世紀末於弱颱風的發生比例有減少的趨勢、強颱風發生比例則為增加的趨勢。HiRAM最低海平面氣壓的部分變化趨勢較MRI顯著，< 930 hPa的部分模式比例有些微高估的情形，介於930~970 hPa的部分比例則有低估的情形。兩個時期透過降尺度後於970~990 hPa間有較顯著的變化，降尺度過後的比例有增加的情況，而世紀末時期氣壓較低的比例有顯著增加的趨勢、較高海平面氣壓比例則呈現些微增加的趨勢。

四、影響臺灣之颱風降雨變遷

由前一節的分析結果顯示經過動力降尺度後的結果與原氣候模式之結果相近，僅氣候模式低估或高估的部分經過動力降尺度後有被些微修正的情形，因此本節直接使用動力降尺度後之結果分析臺灣區之颱風變異。圖5為觀測(1992-2010)及兩組模式現在(1979-2003)和世紀末(2075-2099)時期之年平均降雨及其改變率，觀測資料顯示颱風降雨主要分布在阿里山山區、南部山區、宜蘭地區及雪山山脈，地形影響降雨的效應非常顯著。MRI模擬現在時期之年平均降雨有顯著低估的情形，造成低估的原因可

能與MRI模式中影響臺灣的颱風個數偏少有關；MRI模擬的降雨主要集中在中央山脈，阿里山山區的降雨較不顯著。除了雨量觀測網的空間分布不均勻之外，造成降雨分布差異的原因可能與模式中影響臺灣的颱風路徑和觀測存在偏差有關。HiRAM模擬之年平均颱風降雨較強的位置仍舊發生在中央山脈地區，與觀測相比有高估的情況，其餘地區仍舊有低估的情形，但低估的程度較小，其中HiRAM影響臺灣之颱風數目偏多可能是造成降雨高估的原因。

降雨強度的部分本研究使用降雨強度指標(Simple Daily Precipitation Intensity Index, SDII)來分析，即日降雨 ≥ 1 mm的總累積雨量除上日降雨 ≥ 1 mm的總降雨日數，圖6所示為觀測和兩組模式於現在和世紀末時期之降雨強度指標分布圖，觀測資料顯示降雨強度較強的位置發生在宜蘭地區及阿里山和高屏山區。MRI現在時期的模擬結果顯示降雨較強的位置發生在中央山脈地區，東部地區的降雨強度與觀測相比有高估的情形，但對於阿里山和高屏山區的降雨強度則是有低估的情形；HiRAM的模擬結果與MRI相似，在東部山脈區域有較強的降雨強度、於阿里山和高屏山區的降雨強度同樣有低估的情形，不同於MRI的是HiRAM於雪山山脈的降雨強度亦有高估的情況。

世紀末時期兩組模式皆顯示年平均降雨量(圖5)較大的位置皆發生在山區，MRI顯示除了西半部地區年平均降雨有增加的趨勢外其餘皆呈現減少的趨勢，以東南部地區減少最為顯著；HiRAM則顯示世紀末時期各地皆呈現減少的趨勢，於南部和東半部地區減少最顯著。降雨強度的部分(圖6)兩組模式皆顯示世紀末時期降雨強度較強的位置發生在雪山山脈、阿里山和高屏山區，中央山脈地區亦有強度較強的降雨發生，平地地區則以北海岸和中部地區有強度較強的降雨，其中HiRAM模擬的強度較MRI高，改變率的部分除了東南部地區降雨強度有減弱的趨勢外，其餘地區皆呈現增強的趨勢，其中以中部地區增加最顯著。

各分區平均颱風降雨排名前10和5名的總降雨改變率如表2所示，其中紅色數字代表減少、黑色數字代表增加，深灰底表示該區變化率有通過95%統計檢定，淺灰底顯示僅通過90%統計檢定。以全臺和北、中、南、東四大分區有通過統計檢定的平均降雨來看，MRI顯示世紀末時期前5~10名的平均降雨皆為增加的趨勢，以北部增加趨勢最為顯著，未通過統計檢定的東部則呈現降雨減少的趨勢。HiRAM在21世紀末的結果都是減少的，但多數都未通過統計檢定，有通過統計檢定的僅有東部地區的減少較為顯著。

五大流域(淡水河、高屏溪、大甲溪、曾文溪和濁水河流域)各排名有通過統計檢定的平均值顯示MRI於世紀末時期平均颱風降雨皆呈現增加的趨勢，其中以曾文溪增加最顯著；HiRAM僅曾文溪前5名平均降雨的改變率有通過統計檢定，於世紀末時期呈現降雨增加的趨勢，其餘未通過統計檢定的部分則顯示各流域各排名平均幾乎都呈現降雨減少的趨勢。

部分對於災害衝擊研究關心的另一個重點是最大24小時降雨，在此也針對各區域的最大24小時降雨做相同的分析。最大24小時降雨的分析結果較不會受到颱風影響期間長短的干擾，較能直接反映出降雨強度。這裡各區域最大24小時降雨是先將每小時的降雨做區域的平均，之後再從24小時的滑動平均中取出最大值，各分區平均最大24小時颱風降雨排名前10和5名的降雨改變率如表3所示。以全臺和北、中、南、東四大分區來看MRI有通過統計檢定的部分皆顯示世紀末平均降雨有增加的趨勢，其中以北部和南部增加較為顯著；HiRAM顯示中、南、東部、全臺前5名平均呈現增加的趨勢，其餘未通過統計檢定的部分普遍呈現降雨減少的趨勢。五大流域有通過統計檢定的平均值則顯示MRI世紀末時期降雨皆呈現增加的趨勢，其中以曾文溪增加最為顯著，增加率達86%，濁水溪增加率相對少很多，僅14%；HiRAM的變化趨勢與四大分區的結果相似，前5名平均值為增加的趨勢，但增加的程度與MRI相比明顯較弱，增加最為顯著的曾文溪僅17%，以淡水河減少最為顯著。其中因未來時期樣本數劇減的影響，會導致相同名次之颱風位於不同百分位的情形，使得前10與前5名平均的變遷存在差異。

五、結論與討論

本研究使用日本氣象廳氣象研究所之高解析度大氣環流模式(MRI-AGCM)和美國普林斯頓大學地物流力動力實驗室所發展的HiRAM模式所做之氣候推估來探討臺灣地區世紀末颱風變遷，2組氣候模式均能有效地模擬出颱風。模擬結果顯示受氣候變遷影響下，影響臺灣之颱風個數均有減少的趨勢，此現象與WMO依據模式推估未來在21世紀溫室氣體排放情境下的變化趨勢一致(Knutson et al., 2010)，皆顯示於世紀末時期影響臺灣之颱風中輕度颱風比率會減少、強烈颱風比例則有增加的趨勢。

世紀末時期影響臺灣之颱風個數顯著減少，但MRI模擬之颱風總降雨於西部地區有增加的趨勢，而東部地區則呈現減少的趨勢；HiRAM的模擬則顯示世紀末時期全臺各地的颱風總雨量是減少的。雖然

颱風總降雨量顯示除了MRI西半部地區有增加的趨勢外皆呈現降雨減少的趨勢，但降雨強度則顯示除了東南部地區有減弱的趨勢外，其餘各區皆顯示世紀末颱風造成的降雨強度是變強的，其中以中部地區增加最為顯著。由歷史乾旱事件發現若夏季颱風降雨不足未將水庫蓄滿將會影響下一年度的用水調配(許等，2011)，而2組模式皆顯示世紀末颱風降雨大幅減少很可能會導致水資源的短缺、甚至增加乾旱事件發生頻率。

兩組模式各分區降雨分析結果顯示降雨排名前5名的平均颱風降雨皆呈現增加的趨勢(僅針對通過90%以上統計檢定的部分而言)，排名前10名的平均降雨部分MRI顯示降雨皆為顯著增加，HiRAM多為不顯著減少的趨勢，HiRAM的模擬結果顯示世紀末時期颱風造成的降雨將非常極端，前幾名降雨強，其餘颱風降雨較弱。颱風期間的降雨強度變強則可能讓排水系統超過容量負擔或河川流量超過堤防之防護標準而造成淹水事件增加。

然而將模式現在時期的颱風頻率分布與觀測做比較，發現模式所模擬之颱風路徑與實際觀測存在偏差，又因為颱風路徑顯著地影響著臺灣地區颱風降水的分布，因此模式在推估世紀末之降水變異時有可能也與實際情形存在偏差。探討分區極端事件的降雨改變率時，雖同樣取前10、5名極端降雨事件做平均，但因未來時期颱風個數劇減，會導致相同名次之颱風位於不同百分位的情形，使得前10與前5名平均的變遷存在差異。

參考文獻

許晃雄、陳正達、盧孟明、陳永明、周佳、吳宜昭等，2011：臺灣氣候變遷科學報告 2011。行政院國家科學委員會，362 頁。

Chen, J.-H., and S.-J. Lin, 2011: The remarkable predictability of inter-annual variability of Atlantic hurricanes during the past decade. *Geophys. Res. Lett.*, **38**, L11804.

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.

Murakami, H., B. Wang and A. Kitoh, 2011: Future changes in the western North Pacific typhoons: Projection with a 20-km-mesh global atmospheric model. *J. Climate*, **24**, 1154-1169.

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

表1 MRI、HiRAM於現在和世紀末時期及觀測影響臺灣之颱風個數和時數列表

模式	時期	總數	各強度之颱風比率 (%)		
			輕度	中度	強烈
MRI	1979-2003	85	18	51	32
	2075-2099	43	14	44	42
HiRAM	1979-2003	128	50	50	0
	2075-2099	44	39	50	11
OBS	1979-2003	115	30	53	17

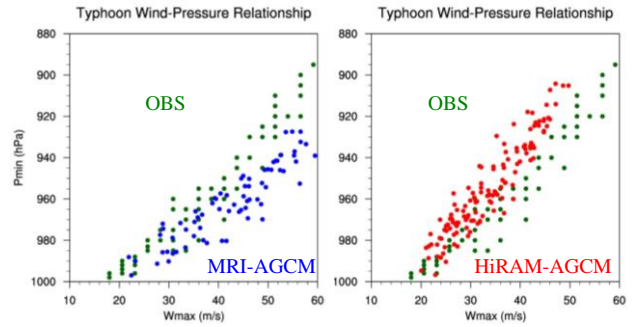


圖1 MRI(左)和HiRAM(右)與觀測比較之近中心最大風速(橫軸)與最低海平面氣壓(縱軸)關係圖，其中綠點為觀測的結果，藍、紅點分別為MRI及HiRAM氣候模式的模擬結果，期間皆為1979-2003年

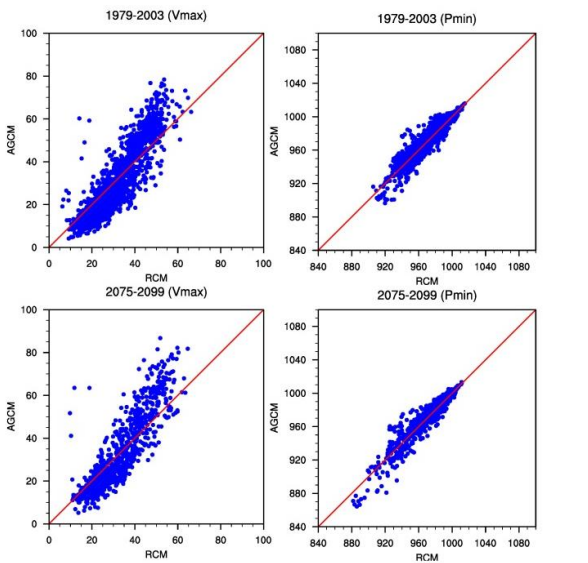


圖2 MRI現在(上排)和世紀末(下排)近中心最大風速(左)和最低海平面氣壓於降尺度前後的變化，其中縱軸為降尺度前，橫軸為降尺度過後之結果

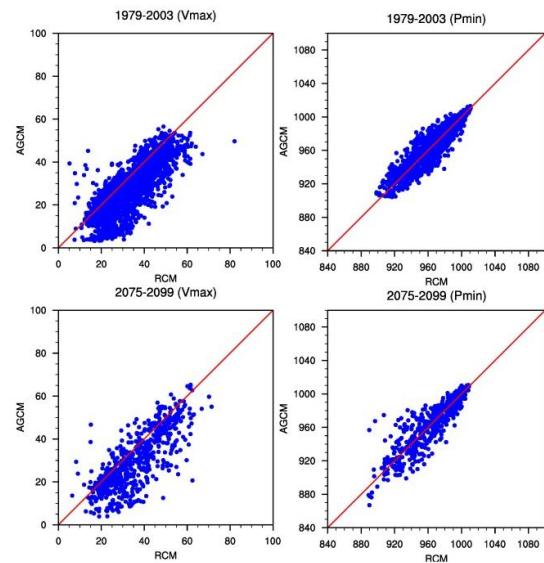


圖3 同圖2，但為HiRAM之結果

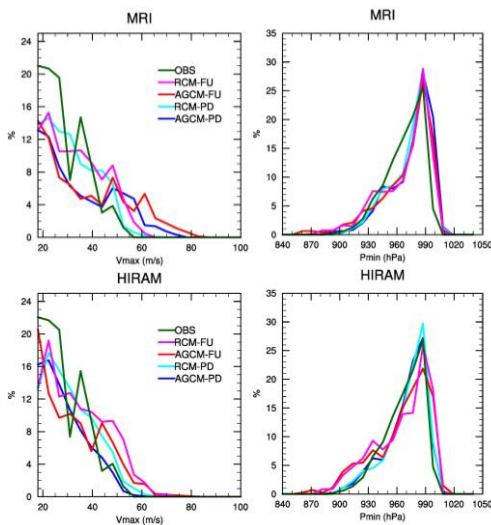


圖4 觀測、MRI(上)和HiRAM(下)近中心最大風速(左)和最低海平面氣壓(右)於降尺度前後之機率密度分布函數圖，其中綠色為觀測、藍色系和紅色系分別為現在和世紀末時期，深、淺色系分別為氣候模式和區域模式之結果

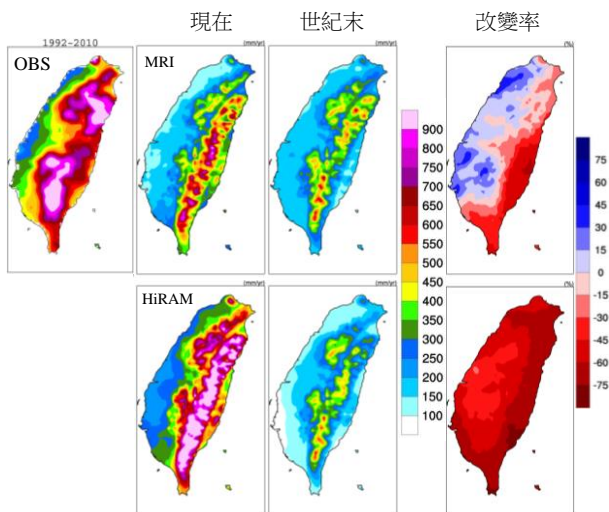


圖5 年平均颱風降雨分布，上排為觀測和WRF-MRI的結果，下排為WRF-HiRAM的結果

表2 WRF-MRI和WRF-HiRAM於各分區之整場颱風降雨改變率(單位：%)，其中深灰底為有通過95%統計檢定，淺灰底為僅通過90%統計檢定之結果

模式	MRI	HiRAM	MRI	HiRAM
區域	北		淡水河	
TOP 10	32.07	-22.10	29.89	-24.17
TOP 5	49.48	-0.61	52.69	-6.86
	中		高屏溪	
TOP 10	24.18	-12.30	34.24	-21.35
TOP 5	25.77	3.73	41.13	-9.27
	南		大甲溪	
TOP 10	12.93	-25.51	30.50	-18.68
TOP 5	14.79	-15.06	35.82	-1.68
	東		曾文溪	
TOP 10	-10.09	-37.41	62.89	-8.91
TOP 5	-12.72	-36.31	74.43	14.36
	全臺		濁水溪	
TOP 10	24.18	-23.06	13.42	-15.71
TOP 5	20.44	-11.75	11.88	4.60

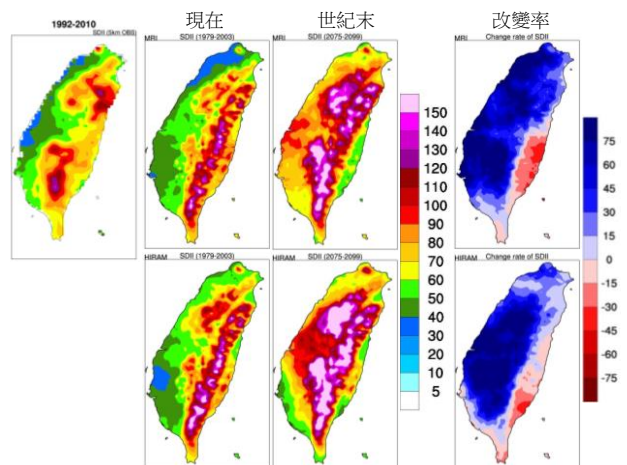


圖6 降雨強度指標(SDII)，即日降雨 ≥ 1 mm的總累積雨量除上降雨 ≥ 1 mm的總降雨日數。上排為觀測和WRF-MRI的結果，下排為WRF-HiRAM的結果

表3 同表2，但為最大24小時降雨之結果

模式	MRI	HiRAM	MRI	HiRAM
區域	北		淡水河	
TOP 10	31.61	-29.90	33.57	-31.21
TOP 5	57.94	-4.64	61.12	-7.55
	中		高屏溪	
TOP 10	22.43	-14.24	52.76	-10.39
TOP 5	33.49	8.70	74.93	10.89
	南		大甲溪	
TOP 10	36.58	-13.61	27.05	-22.17
TOP 5	48.29	8.56	52.42	5.68
	東		曾文溪	
TOP 10	-0.77	-10.31	75.60	-5.95
TOP 5	9.67	4.56	86.02	16.95
	全臺		濁水溪	
TOP 10	42.93	-4.43	14.52	-13.10
TOP 5	65.19	12.94	13.85	13.56