

以MRI-AGCM推估未來臺灣地區颱風降雨的變遷

陳淡容¹ 鄭兆尊¹ 林宜穎¹ 陳永明¹ 陳正達² Masato Sugi³

¹國家災害防救科技中心

²國立臺灣師範大學地球科學所

³日本氣象廳海洋研究開發機構

摘要

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)推估臺灣地區21世紀末之颱風降雨變遷，主要著重於分析臺灣地區颱風降雨的氣候特徵。由於臺灣為一地形複雜之海島，對颱風侵襲期間的降雨分布影響很大，透過動力降尺度可提供更切實的降雨分布，因此使用WRF模式(空間解析度為5 km)對MRI-AGCM資料(空間解析度為 20km)進行動力降尺度。做了降尺度之後的降水，因地形效應被突顯，使降水的空間分布模擬獲得很大的改善。

分析結果顯示21世紀末侵襲臺灣的颱風個數減少，但颱風降雨強度以及強降雨發生頻率卻增加。儘管動力降尺度可提供更合理、更詳細的颱風降雨變遷資訊，然而模式中颱風路徑與觀測路徑存在偏差，使得在臺灣地區颱風降雨衝擊的推估上造成困難。

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。

此外，除了發生頻率及降雨強度的改變外，颱風路徑的改變也會影響到臺灣地區颱風降雨的分布。Murakami et al. (2011)分析MRI-AGCM的颱風生成位置，發現暖化之後西北太平洋颱風發生的地點有往東北方向移動的傾向，連帶著影響了西北太平洋颱風行徑的路線。由於地形鎖定的效應，颱風降雨的空間分布與颱風路徑有密切的關係(Cheung et al., 2008；Chang et al., 1993)，所以颱風路徑的改變也是本研究所考慮的一個重點。

本研究將針對MRI-AGCM高解析度氣候模式(Mizuta et al., 2011)中所模擬出的侵臺颱風的發生頻率、路徑、降水特徵以及其未來的推估做分析。但是MRI-AGCM 20 km的解析度還是無法解析臺灣複雜陡峭的地形以及伴隨著地形的詳細降水特徵，為了得到更高空間解析度的資料，本研究將MRI-AGCM的資料做進一步的動力降尺度，得到5 km解析度的結果，用來分析颱風降水的特徵。

二、 模式介紹

本研究採用日本氣象廳 (Japan Meteorological Agency, JMA) 氣象研究所 (Meteorological Research Institute, MRI) 發展的高解析度大氣環流模式 (MRI-AGCM) 所模擬的氣候推估結果，當作初始場及邊界條件來進行動力降尺度，模式每6小時提供一筆三度空間資料，包括風場、溫度場、濕度場、重力位場及海溫等。MRI-AGCM具有TL 959極高的水平解析度，全球網格數為1920 × 960，網格間距約20 km，垂直方向上有60層(Mizuta et al., 2006)。此模式採時間切片(time-slice)的實驗設計方式，先以大氣海洋環流耦合模式的模擬結果計算出未來海溫隨時間線性增加的趨勢，再將現今海溫的變異加諸在隨時間線性增加的海溫上，來驅動高解析度大氣環流模式，推估未來大氣環流的變化。模擬三個時間切片的時間共75年，分為現在(1979-2003年)、近未來(2015-2039年)及21世紀末(2075-2099年)。

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)，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。為了輸出一些診斷分析使用的變數，以及將IPCC AR4中A1B情境的溫室氣體濃度改變的情境納入輻射的計算(使用CAM3的輻射計算模組)，模式部分的程式碼也已經做了修改。

三、降尺度前後資料分析

(一)MRI-AGCM颱風資料

本研究中偵測與追蹤颱風的方法為參考Vitart et al. (1997)的方式，利用850 hPa的渦度場、海平面氣壓、風暴中心附近是否存在高層暖心結構及局部厚度最大值來偵測颱風，且颱風在接下來6小時內不得超出400 km範圍，以及模式中最低層風速需大於17 m/s至少1.5天以上。由於Vitart et al. (1997)所提出的偵測方法是針對較低解析度的GCM所發展出的，因為MRI-AGCM的解析度較一般GCM高，經敏感度測試後，各變數之門檻值均被調高以濾除非颱風個案。

本研究定義颱風中心有進入到距海岸線300 km 範圍內之颱風為侵臺颱風，據此定義，MRI-AGCM三個時期的侵臺颱風個數分別為86、79和73場。為比較MRI-AGCM之現在時期的模擬與觀測的差異，本文所使用的觀測路徑資料為日本氣象廳之最佳路徑，雨量資料則使用國家災害防救科技中心所產製之網格資料。降雨資料空間解析度為0.0125度，網格數為 162×275 ，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年觀測之平均氣候值進行比較，而探討路徑之差異時，則使用相同基期之1979-2003年資料。

雖然MRI-AGCM的高解析度模式中可以模擬出颱風的存在，但在現在(1979-2003)的模擬中，不論是整個西北太平洋上模擬出的颱風總數或侵臺颱風總數均有低估的現象。表1是逐月侵臺颱風個數的推估以及觀測值，顯示模式現在的模擬中侵臺颱風個數比觀測值少了約51%(MRI-AGCM西北太平洋颱風總數為430場，同時期觀測為641場，模式低估約49%)。表1也 同時指出，在未來各時期侵臺颱風個數呈現逐漸減少的趨勢，在近未來及21世紀末各減少了8.14%和15.12%。

圖1為整場颱風降水在臺灣本島的平均值前60名，比較模式與觀測的結果顯示模式中颱風的整場降水均有低估的情形。然而模式顯示受氣候變遷影響下，世紀末整場颱風平均降雨在前30名有增加的趨勢，但30名之後則呈現減少的趨勢，未來颱風降

雨將變得比較極端。進一步分析颱風期間日降雨累積分布函數(Cumulative Distribution Function, CDF)，發現在氣候變遷影響下，大雨發生頻率遞增，小雨發生頻率遞減。若比較各時期累積機率為95%時的日雨量，近未來的雨量較現在增加22.58%，世紀末的則是增加了76.57% (圖2)。

(二)降尺度前後差異

在此利用降雨強度指標(Simple Daily Precipitation Intensity Index, SDII)來分析模式中不同時期降雨的變化(圖3)。SDII的定義為降雨日的平均降雨強度，在此以整個時期的颱風降水除以當地颱風時期的降雨日數得之。MRI-AGCM結果顯示北部地區的降雨強度為遞減，臺東地區的降雨強度在近未來先增強，至世紀末減弱，其餘地區的降雨強度則增強。比較MRI-AGCM跟WRF的結果，兩者變化的趨勢是相似的，唯獨分布型態有些許不同，MRI-AGCM較強的降雨出現在東部地區，但是經過降尺度後較強的降雨位於中央山脈、雪山山脈及阿里山山區等山地地形上，顯示區域模式能較有效的掌握地形對降雨的效應，同時亦提供了更多降雨的細節。

以世紀末(2075-2099)的結果為例，檢視這幾場為臺灣地區帶來高降水量的颱風其經過動力降尺度後降雨量的改變。圖4為模式中前六名強降雨颱風的整場降雨空間分布圖，上排為MRI-AGCM的模擬，下排為相對應的WRF模擬，而其降尺度前後整場降雨的區域平均及極大值列於表2中。圖3顯示降尺度之後的降水空間分布比較能確實地反映出真實地形的影響，而能使得降水集中在山麓的迎風面上，也同時模擬出較高的降水強度。表2則顯示降尺度前後對於整場颱風降水的模擬，超過半數的個案在降尺度後其區域平均降雨減少。相較之下最大降雨的改變率則比較一致，除了第一名的最大降雨減少約14%之外，其餘颱風最大降雨可增加4%~157%。

四、未來颱風降雨推估

降雨強度指標(SDII)分析顯示受氣候變遷影響下，臺灣地區颱風期間平均降雨強度有增強的趨勢。進一步分析不同降雨強度發生的頻率(圖5)，比較現在(1979-2003)與觀測(1992-2010)的降雨機率密度函數(Probability Density Function, PDF)分布發現模式降雨強度小於20 mm/day 發生的頻率有高估、而降雨強度大於20 mm/day 發生的頻率則有低估的情形。模式模擬世紀末降雨的變化則顯示小雨發生的頻率有減少的現象，大於200 mm/day 的大雨發生的頻率則有增加的趨勢。

圖6所示為觀測和模式中三個不同時期的颱風平均降雨分布圖，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顯而易見。模式中模擬現在的主要颱風降雨分布在中央山脈及雪山山脈，在中部山區和阿里山山區有明顯低估的情形。模式推估至世紀末時，北部地區、雪山山脈、宜蘭、花蓮和臺東地區之降雨將比現在少，其餘西半部地區、阿里山山區和南部山區降雨則增加，以阿里山山區增加最為顯著。

臺灣地區颱風降雨之分布受颱風路徑影響顯著，分析1992-2010年颱風路徑機率分布(圖7)顯示颱風多以第二、第三路徑(依中央氣象局十大路徑分類)侵襲臺灣，造成之降雨分布即為圖6所示，然而MRI-AGCM所模擬之颱風路徑機率分布與觀測結果有所差異，因此導致模式模擬的降雨分布與觀測存在偏差。模式模擬之現在時期臺灣附近颱風路徑出現頻率較高的區域位於臺灣海峽南側、巴士海峽以及臺灣北部海面，登陸臺灣的路徑則以通過恆春半島居多，這是造成降雨主要集中在西北部山區以及東半部的原因。模式推估世紀末時颱風路徑機率較高的區域為巴士海峽，同時颱風由臺灣中部通過臺灣本島的頻率亦增加，特別是臺灣西半部地區，此路徑的改變也是造成世紀末時西半部地區、阿里山山區和南部山區降雨增加的部份原因。

五、結論

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)的推估來探討臺灣地區世紀末之颱風降雨變遷。MRI-AGCM能有效地模擬出颱風，模擬結果顯示受氣候變遷影響下，西北太平洋和侵臺颱風個數均有遞減的現象，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)。臺灣地區之颱風降雨分布受路徑影響很大，以不同路徑侵襲臺灣的颱風造成之降雨分布有所不同(Cheung et al., 2008)，MRI-AGCM亦能成功模擬出此降雨分布的差異(圖4)，然而模式模擬之降雨極大值以及其出現位置仍然有所偏差，進行降尺度後受地形效應影響之降水分布和降雨量極大值有被修正和突顯出來。

由降雨頻率分析亦顯示未來颱風所造成的大雨發生機率會增加，小雨的機率則是減少。雖然模式推估未來侵臺颱風頻率減少，因而造成近未來臺灣地區颱風總降雨的減少，但降雨強度的大幅增加克服颱風頻率減少的因素，造成21世紀末臺灣地區颱風總降雨的增加。降雨強度的大幅增加除了暖化的因素之外與颱風侵臺路徑的改變亦有所關係。

然而將模式現在的颱風頻率分布與觀測相比較，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。在本文的分析中可看出，降尺度後未來降雨之改變趨勢與MRI-AGCM的改變大致一致，但是因為颱風路徑的變化的推估仍具有很高的不確定性，對於經由動力降尺度之後資料的適用性仍需進一步探討。

參考文獻

- Cheung, K. K., L.-R. Huang, and C.-S. Lee, 2008: Characters of rainfall during tropical cyclone periods in Taiwan. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, **8**, 1463-1474.
- Chang, C.-P., T.-C. Yeh, and J.-M. Chen, 1993: Effects of terrain on the surface structure of typhoons over Taiwan, *Mon. Weather Rev.*, **121**, 734 – 752.
- 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., K. Oouchi, H. Yoshimura, A. Noda, K. Katayama, S. Yukimoto, M. Hosaka, S. Kusunoki, H. Kawai, and M. Nakagawa, 2006: 20-km-mesh global climate simulations using JMA-GSM model – mean climate states –. *J. Meteor. Soc. Japan*, **84**, 165-185.
- 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, 2011: Climate simulations using the improved MRI-AGCM with 20-km grid. *J. Meteor. Soc. Japan, submitted*.
- 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.
- Vitart, F., J. L. Anderson, and W. F. Stern, 1997: Simulation of Interannual Variability of Tropical Storm Frequency in an Ensemble of GCM Integrations. *J. Climate*, **10**, 745–760.

表1 MRI-AGCM各時期及觀測(1979-2003)侵臺颱風之生成月份與總數

	JAN	FEB	MAR	APL	MAY	JUN	JUL	AUG	SEP	OCT	NOV	DEC	Total
1979-2003	0	0	0	2	5	12	23	20	14	6	3	1	86
2015-2039	0	0	1	2	3	8	23	19	15	6	1	1	79
2075-2099	0	0	0	1	5	6	19	23	7	9	2	1	73
1979-2003(OBS)	0	0	0	1	7	16	30	41	21	11	2	1	130

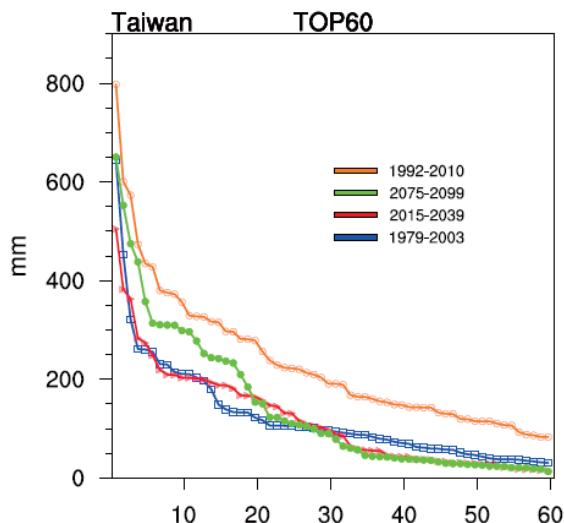


圖1 臺灣平均颱風降雨前60名。縱軸代表整場降水的區域平均，橫軸代表名次。黃、藍、紅、綠分別代表觀測及MRI-AGCM之現在、近未來、及未來時期的颱風

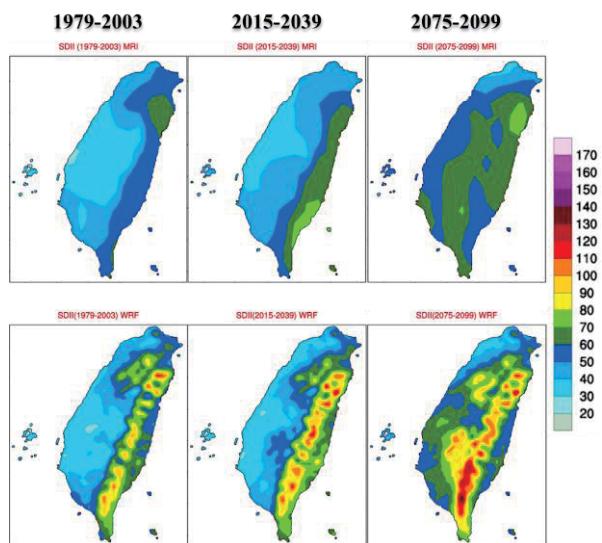


圖3 降雨強度指標(SDII)，即日降雨 ≥ 1 mm的總累積雨量除上降雨 ≥ 1 mm的總降雨日數。上排為MRI-AGCM的結果，下排為WRF的結果

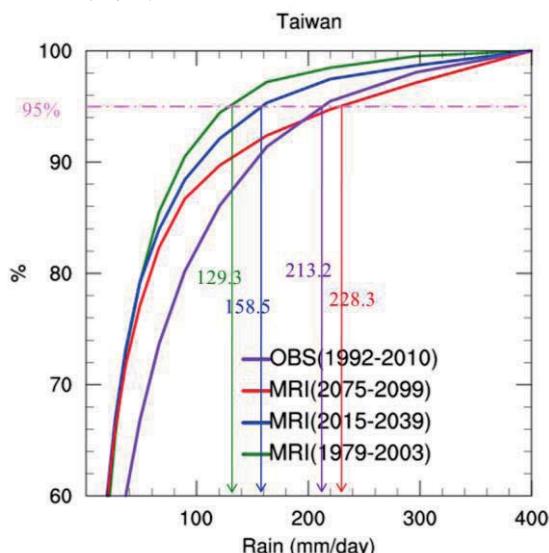


圖2 颱風日降雨累積分布函數(CDF)，縱軸為累積機率，橫軸為日雨量，紫、綠、藍、紅分別代表觀測及MRI-AGCM之現在、近未來、及未來時期，圖中數值為各時期累積機率95%時的日降雨量大小(在計算CDF時，只考慮颱風時期日雨量大於1 mm/day 的網格點)

2075-2099

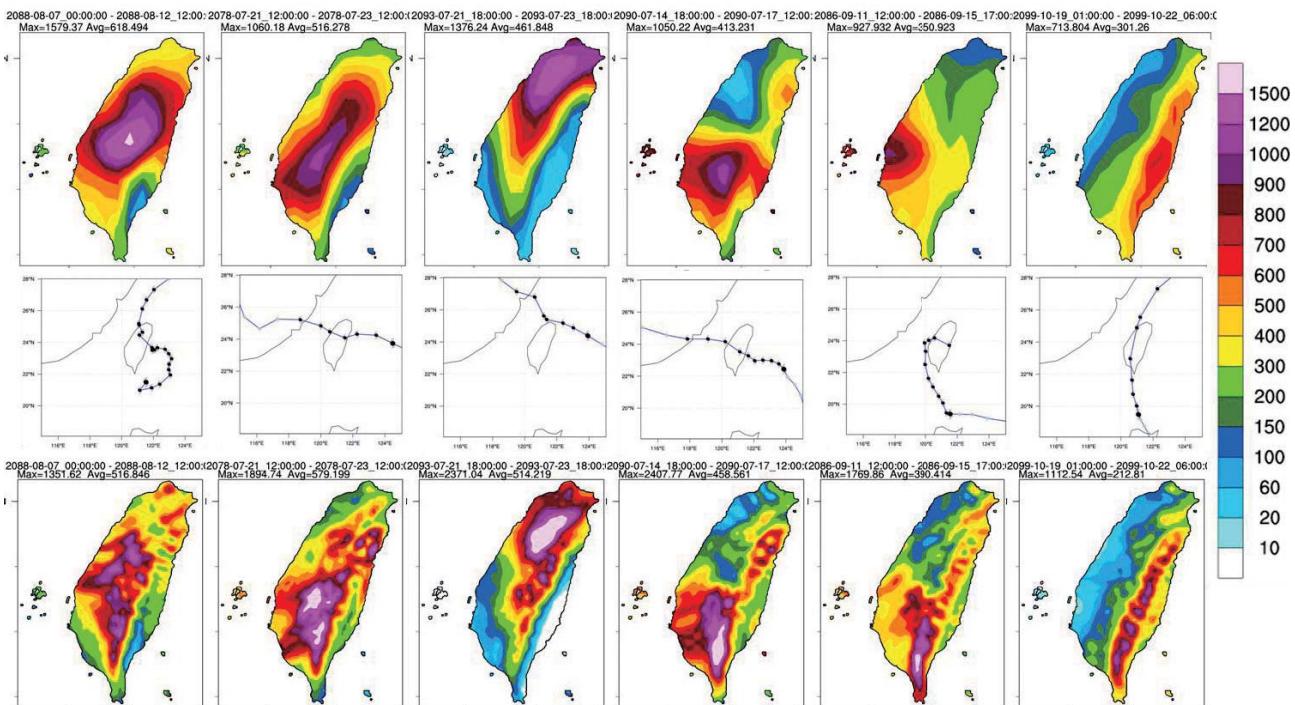


圖4 未來時期前5名颱風整場降水的空間分布圖。上排為MRI-AGCM的颱風降水，下排為WRF的颱風降水

表2 降尺度前後整場降雨的區域平均與極大值

時期	2075-2099			
	Max		Avg	
模式 名次	MRI	MRI-WRF	MRI	MRI-WRF
1	1579.37	1351.62	618.49	516.85
2	1060.18	1894.74	516.28	579.2
3	1376.24	2371.04	461.85	514.219
4	1050.22	2407.77	416.23	458.56
5	927.93	1769.86	350.92	390.41
6	713.8	1112.54	301.26	212.81
7	610.13	641.32	296.59	199.1
8	607.06	1112.62	295.61	375.31
9	649.6	1122.94	289.96	289.5
10	650.64	1673.1	288.7	267.57
11	606.8	630.89	275.04	189.72
12	818.55	1111.46	266.38	277.73
13	655.19	1001.48	242.86	220.91
14	587.28	1116.6	240.97	200.85
15	747.65	908.25	238.16	249.25
16	670.29	744.91	235.79	206.79
17	553.1	1000.38	223.63	319.53
18	551.5	1128.58	192.24	207.7
19	594.07	858.75	178.07	137.64
20	487.49	991.32	161.18	102.89

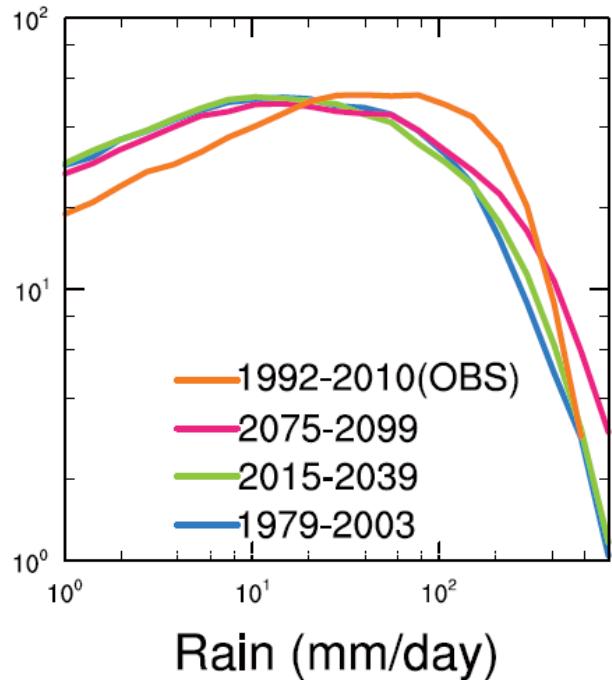


圖5 颱風日降雨機率密度函數(PDF)，縱軸為發生機率(%)，橫軸為日降雨量，藍、綠、紅、橘分別代表WRF之現在、近未來、未來時期及觀測(1992-2010)

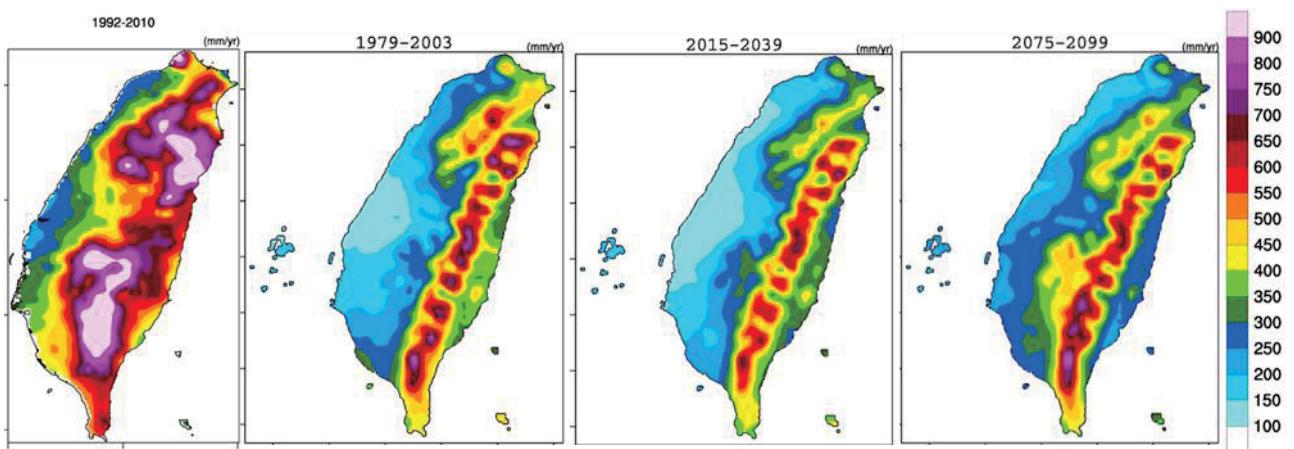


圖6 平均每年颱風降雨分布圖，由左至右分別為觀測(1992-2010)和WRF之現在、近未來、未來時期

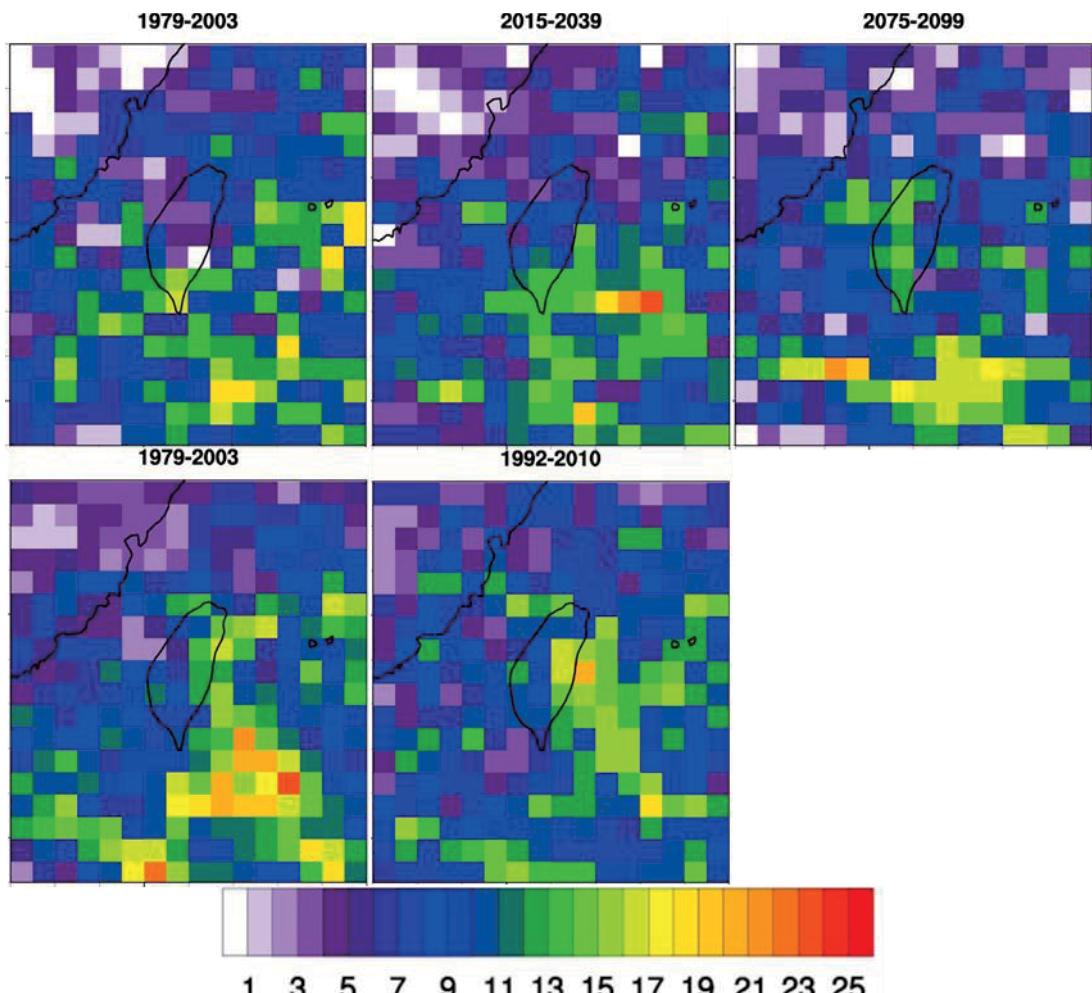


圖7 颱風頻率分布圖，即以經緯0.5 度的網格統計每個格區內觀察到的颱風個數，每個颱風在每個網格內不重複計算，上排為MRI-AGCM之現在、近未來、未來時期，下排為1979-2003和1992-2010之觀測結果。因各時期颱風總數不同，為突顯空間分布的差異，圖中代表數值有經過標準化