

以MRI-AGCM動力降尺度的結果推估21世紀末臺灣地區季節降雨的變遷

林宜穎¹ 鄭兆尊¹ 陳淡容¹ 陳正達² Masato Sugi³

國家災害防救科技中心¹

國立臺灣師範大學地球科學系所²

日本氣象廳海洋研究開發機構³

摘要

本研究以日本氣象研究所的全球模式(MRI-AGCM)模擬結果作為初始場及邊界資料，以進行臺灣地區氣候推估的動力降尺度，再針對季節降雨的變遷做進一步的探討。MRI-AGCM的水平解析度約為20 km，經過動力降尺度之後得到的是5 km高解析度的氣候推估，模式進行三個時期，分別為現在(1979-2003年)、近未來(2015-2039年)及21世紀末(2075-2099年)，共75年的模擬。結果顯示，MRI-AGCM模擬臺灣地區季節降雨的空間分布，大多集中在東部地區且有明顯高估之現象，但經降尺度模擬後即改善此現象，並且對春季、秋季與冬季降雨量以及的空間配置都有很好的掌握，但是對於夏季與梅雨季的降雨模擬則較不理想。另外，全年平均降雨的變遷趨勢在降尺度前後都是一致的：整體而言，皆呈現隨著暖化而有增加的趨勢；分區域來看，在21世紀末北部地區的平均降雨減少約10%，中南部地區則增加約10-30%。而在季節平均降雨的推估中，除了秋季在21世紀末為減少的趨勢，其他季節的降水則呈現增加的趨勢。最後，在幾種降雨的類別中，推估21世紀末的結果顯示春雨的改變率最大(增加15.5%)，其次是梅雨(增加11.2%)，再者是冬季降雨(增加9.6%)。

關鍵字：動力降尺度、季節降雨、氣候變遷

一、前言

近年來，氣候變遷相關的研究在國內外十分盛行，臺灣屬於災害高風險區，氣候變遷的衝擊已成為不容忽視之課題。氣候變遷下導致的降雨特性變動受到相當之重視，尤其是季節降雨的變化趨勢在水資源調節及運用上更是重要。有鑑於極端氣候的變異可能越趨於嚴重，本研究將使用一區域模式來進行動力降尺度，以解析度較低的大尺度大氣環流及洋溫資料來驅動區域模式，利用區域模式較高的時空解析能力以產出一高時空解析度的天氣或氣候資料，來推估未來臺灣地區季節降雨的變遷。

動力降尺度的目地是藉由動力模式進行數值模擬來得到高時空解析度的資料，以呈現出較小尺度的天氣現象及區域性的氣候特徵。目前不外乎是利用高解析度的全球模式或是區域模式來執行動力降尺度的工作。自1990年起區域氣候模式的研究興起後(Giorgi and Bate, 1989; Giorgi and Mearns, 1991)，區域氣候模式便成為執行動力降尺度的一有效工具，在過去通常用來獲得數十公里解析度的結果。雖然近年計算能力的發展迅速，在日本已經有全球氣候模式可以得到解析度約20 km的氣候推估

(Mizuta et al., 2011)，並獲得相當不錯的結果，尤其是能夠模擬出中尺度的劇烈天氣現象(如颱風、暴雨強、對流系統等)的一些氣候特徵。

然而，對於臺灣地區的氣候研究而言，即使是空間解析度高到20 km，模式對某些局部地區的天氣及氣候特徵的描述仍有不足之處。由於臺灣的地形崎嶇陡峭，高山縱谷交錯，使用高解析度的地形能讓區域模式對於臺灣的區域氣候特徵掌握的更好，動力降尺度的工作對於氣候模擬應有相當大的價值。第二節介紹模式的設定及研究中所使用的資料說明。第三節為評估模式的氣象場表現。第四節探討WRF模式模擬臺灣地區未來降雨的結果，最後第五節為歸納總結。

二、模式設定與資料介紹

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小時提供一筆的三度空間資料，包括風場、溫度場、濕度場及重

力位場等。MRI-AGCM具有TL959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)。

執行動力降尺度所採用的區域模式為美國大氣研究中心(NCAR)發展的天氣研究與預報模式系統(Weather Research and Forecasting modeling system，之後簡稱WRF模式)。模式設定為單層網格，其水平網格數為 380×400 ，解析度5 km，垂直方向上有36層。模式海溫的部分，MRI-AGCM提供6小時解析的海溫資料至模式中當作底層的邊界條件。物理參數設定(Bukovsky and Karoly, 2009)：邊界層參數化採用Yonsei University scheme、微物理參數化採用WSM 5-class scheme、積雲參數化採用KF cumulus scheme、近地表面過程的計算採用Noah land surface module、表面層的計算則用Monin-Obukhov surface layer scheme，為了輸出一些診斷分析使用的變數，模式部分的程式碼也已經做了修改，並且將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)。除了更高解析度的地形之外，本研究使用一組更貼近臺灣目前土地使用現況的地表資料(戴等，2008)。此組資料採用了跟隨WRF模式所提供的美國地質調查(USGS, US Geological Survey)的土地利用資料、MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer)土地利用資料及中鼎工程顧問公司的高解析度土地利用資料(CTCI)合成得之。

由於區域模式與驅動它的全球模式在使用的解析度、地形、地表特徵、動力計算方式及物理模組皆大不相同，兩模式模擬出的平衡狀態多半有所差異。在氣候模擬中兩者的氣候狀態亦不相同，而有所謂的氣候偏移。與Feser and Storch (2008)採用的一樣方法：為了避免執行降尺度所導致太大的氣候偏移，而無法重現與全球模式相同的大尺度環流特徵，在此研究中採用波譜調整(spectral nudging)的方法，以減少大尺度環流的氣候偏移(Kida et al., 1991)。為保留高解析度地形及土地利用所模擬出的氣候的特徵，在本研究中僅針對邊界層以上的風場、重力位以及溫度做波譜調整。

本研究使用美國國家環境預測中心全球重分析資料(NCEP-reanalysis)及NCEP-CFSR(Climate Forecast System Reanalysis)資料進行高度場及可降

水量的分析比對。觀測資料採用臺灣氣候變遷推估與資訊平台計畫(TCCIP)產製的月平均資料，水平網格解析度為1 km，時間長度為1979-2003年。另外，在臺灣地區各類降雨的分析上，因為要區分颱風的降雨以及呈現日夜變化夏季午後對流，需要使用逐時的資料，因此部分降雨觀測資料則採用國家災害防救科技中心(NCDR)產製的網格資料，水平解析度為0.0125度，時間長度為1992-2010年。

三、氣象場的評估

本節針對25年(1979-2003年)的模擬結果進行氣候分析，瞭解WRF模式的平均氣候場特性。使用1-12月每月的月平均值，與NCEP分析場進行比對，並使用泰勒圖(Taylor Diagram)來表示WRF模式與MRI-AGCM模擬結果的差異，將型態相關(pattern correlation)、均方根誤差(RMSE)及標準化程序後的標準差繪製在同一張圖上，比較兩者的分布型態是否類似及各變數的差異情況，以量化的方式來評估模式的氣候場表現。

在高度場的分析比對中(圖1)，WRF模式在降尺度之後的模擬結果與NCEP-reanalysis的相似性相當高，相關係數大於0.9，除了850 hPa的平均高度場6-8月有低估之外，其他月份皆為高估。另外，在可降水量的校驗方面，WRF模式與NCEP-CFSR的相關係數也相當高(大於0.9)，如圖2所示。為了瞭解在降尺度前後資料之間的差異，本研究以泰勒圖來表示兩者之間的空間分布型態是否相似(型態相關)，及比較兩者間的誤差(均方根誤差及標準差值)。以MRI-AGCM當作參考基準點(落在標準差為1的橫軸上)，由圖3可明顯看到WRF模式在降尺度之後，低層(紅色:1000 hPa)的氣象場(高度場、風場、溫度場及水氣場)及各層(850 hPa、500 hPa及200 hPa)水氣場的型態相關數值較小(約0.7-0.8)，而低層的水氣場差異最大，均方根誤差為4個標準差(距離基準點最遠表示均方根誤差越大，型態相關數值約0.55)。整體而言，WRF模式在低層的氣象場與各層的水氣場差異較大，其他層的氣象場差異較小，型態相關數值約0.95-0.98之間，均方根誤差約為1個標準差。

除了定量的分析區域平均的氣候場表現外，降雨空間分布情況的比對以圖4及圖5來表示。校驗結果顯示，MRI-AGCM降水在臺灣東部地區有明顯的系統性誤差，而在經過動力降尺度之後，WRF模式能將此誤差修正至較佳的結果，其空間分布情形與觀測值相似，並可看到與地形作用產生的降雨分布。但嚴格來說，東部宜蘭地區明顯高估，而南部地區有低估現象。若分不同季節來看(依臺灣降雨的

氣候特徵來分2-4月為春季，5-6月為梅雨季，7-8月為夏季，9-11月為秋季，12-1月為冬季)，MRI-AGCM的降水在各季節的東部地區皆有明顯高估現象，而在經過動力降尺度正後，能掌握到春季、秋季及冬季的氣候特徵，成功的模擬出降雨的空間配置及平均值。大致而言，除了夏季及梅雨季西南部地區明顯低估之外，WRF模式對降水的模擬皆掌握得相當不錯。

四、臺灣地區降雨推估

本節透過WRF模式在近未來與21世紀末的模擬結果，推估未來臺灣地區及臺灣四大分區(依照中央氣象局的分類方法將臺灣測站分為北、中、南、東四大分區)的降雨變化及空間分布情形。並將降雨分為春雨(2-4月)、梅雨(5-6月)、颱風雨、夏季午後對流雨(7-8月午後)、夏季熱帶系統降雨(7-8月)、秋天降雨(9-11月)及冬天降雨(12-1月)七種類別，進行未來降雨變化的推估，颱風降雨已從各類別的降雨中排除。

由於臺灣的地理位置及特殊的地形造就了獨特的降雨空間分布，冬季有來自西伯利亞的大陸冷高壓，以東北季風為主；夏季則有來自太平洋的海洋性高壓，以西南季風為主，再加上中央山脈地形的影響，降雨的空間及時間分布上極不均勻，區域性的差異也相當大。圖6為MRI-AGCM與WRF模式相較於現在的全年平均降雨，在近未來與21世紀末的改變率，模擬結果顯示WRF模式與MRI-AGCM的整體變化是一致的，北部地區在近未來及21世紀末皆呈現降雨減少的趨勢，減少約10%；中南部地區在近未來及21世紀末皆呈現降雨增加的趨勢，增加約10-30%，在21世紀末增加的更顯著；而東部地區在21世紀末的模擬結果與MRI-AGCM的結果卻是反相位，可能是MRI-AGCM在東部地區有系統性誤差所致。另外，值得一提的是，透過動力降尺度的技術，WRF模式的降雨分布情形呈現出較小尺度的氣候特徵，比MRI-AGCM的模擬結果更為細緻。

若以各季節的模擬結果來看(見圖7與表1)，WRF模式在近未來的降雨推估方面，春季時中部及南部地區呈現增加的趨勢，以沿海地區較為顯著，可能是該地區的平均降雨量原本就很小；北部及東部地區則呈現減少的趨勢，全臺灣平均為減少之趨勢，平均改變率為-0.8%。夏季時受到潮濕的西南季風影響，中部地區呈現增加的趨勢，其他地區皆呈現減少的趨勢，全臺灣平均的改變率為-2.3%。秋季時中部及南部地區呈現增加的趨勢，北部及東部地區則呈現減少的趨勢，全臺灣平均改變率-1.0%。冬季時

主要是受到東北季風之影響，北部地區為減少的趨勢，其他地區皆呈現增加的趨勢，以南部沿海地區較為明顯，全臺灣平均改變率為2.9%。梅雨季時南部地區增加的趨勢較為明顯，其他地區皆呈現減少的趨勢，全臺灣平均改變率為-4.1%。

在21世紀末的季節平均降雨推估方面，區域性的降雨變化較為一致，全臺灣在春季及冬季時皆呈現增加的趨勢，平均改變率分別為13.2%及9.9%。夏季時除了北部地區為減少的趨勢，其他地區皆呈現增加的趨勢，全臺灣平均改變率為1.2%。秋季及梅雨季時，北部及東部地區為減少的趨勢，中南部地區則呈現增加的趨勢，全臺灣平均改變率分別為-1.0%及9.8%。不同的季節與不同的區域，其降雨變化亦不相同。

臺灣主要的降雨來源有颱風、熱帶系統及梅雨鋒面等，再加上夏季的午後對流，Wang 與 Chen (2008)將1993年至2005年5月至9月的降雨事件依據各種天氣系統分類，發現午後對流、颱風及雨暴各佔近三分之一的貢獻量，對於午後對流造成的降雨是不容小覷。然而，在氣候變遷之影響下，這些易致災的天氣型態是如何變化，目前卻不為人知。因此，本研究將臺灣的降雨分為春雨、梅雨、颱風雨、夏季午後對流雨、夏季熱帶系統降雨、秋天降雨及冬天降雨七種類別，進行未來降雨變化的推估。圖8為觀測值及MRI-AGCM模式與WRF模式的平均降雨量(各類別的降雨已扣除颱風的降雨)。灰色為觀測值，紅色為MRI-AGCM，藍色為WRF模式，每一降雨類別由左至右分別為觀測值，MRI-AGCM(橘紅色系)與WRF模式(藍色系)的現在(Present)、近未來(Near Future)及21世紀末(End of Century)平均降雨值。由圖中可明顯看到，MRI-AGCM模式在春季、夏季午後對流、秋季及冬季的平均降雨有高估之現象，主要是因為MRI-AGCM模式在東部地區一直存在著系統性誤差所致。梅雨及颱風雨的模擬結果中，MRI-AGCM與WRF模式皆低估，尤其以颱風最為明顯，而全球模式中被低估的梅雨降水，經過降尺度之後減少的更加顯著。在21世紀末的降雨推估上，不同類別的降雨亦有不同的結果，春雨的改變率最大(增加15.5%)，其次是梅雨(增加11.2%)，再者是冬季降雨(增加9.6%)。由於WRF模式對颱風降雨的嚴重低估，若不考慮颱風的降雨，全年平均降雨在21世紀末的推估則呈現增加的趨勢(增加5.8%)。大致而言，MRI-AGCM模式與WRF模式皆呈現增加的趨勢。

五、結論

本研究使用MRI-AGCM當作初始場及邊界條件來執行動力降尺度，模擬時間為現在、近未來及21世紀末三個時期各25年。從WRF模式所模擬的氣候場與NCEP分析場相驗證，高度場與可降水量的相關係數皆達0.9以上，相似性很高。泰勒圖中降尺度後的模擬結果顯示850 hPa、500 hPa及200 hPa的氣象場與MRI-AGCM的差異較小，型態相關數值約0.95-0.98之間，低層(1000 hPa)的氣象場及各層的水氣場與MRI-AGCM的差異最為顯著，可能是因為模式設定邊界層未採用波譜調整的方法有關。比對降雨的空間分布上，MRI-AGCM在臺灣東部地區有明顯的系統性誤差，而WRF模式在經過動力降尺度之後，將誤差修正並掌握到春季、秋季及冬季的氣候特徵，成功的模擬出降雨的空間配置及平均值。

全年平均降雨的推估中，比較WRF模式與MRI-AGCM的降雨變化，整體而言是一致的，相較於現在(1979-2003年)的平均降雨，21世紀末北部地區減少約10%，中南部地區則增加約10-30%。季節平均降雨的推估中，以WRF模式的結果顯示，近未來的降雨變化呈現明顯的區域性差異，北部地區在各季節的改變率介於-0.4%至-11.2%，皆呈現減少趨勢；中部地區只有在梅雨季節為減少趨勢(-1.4%)，其他季節為增加趨勢(改變率介於0.2%至3.9%)；南部地區在夏季為減少趨勢(-2.0%)，其他季節則為增加趨勢(改變率介於2.5%至12.6%)；東部地區在冬季為增加趨勢(3.5%)，其他季節為減少趨勢(改變率介於-1.4%至9.9%)。而在21世紀末的降雨推估中顯示，區域性的降雨變化較為一致，大致而言，秋季為減少的趨勢，全臺灣降雨平均改變率為-1.0%，其他季節皆呈現增加的趨勢。

最後，臺灣降雨分為七種類別進行未來變化的推估中，相較於現在(1979-2003年)的降雨平均值，21世紀末的推估結果顯示，春雨的改變率最大(增加15.5%)，其次是梅雨(增加11.2%)，再者是冬季降雨(增加9.6%)。若不考慮颱風的降雨，全年平均降雨在21世紀末則呈現增加的趨勢(增加5.8%)。整體而言，MRI-AGCM與WRF模式皆呈現隨著暖化而有增加的趨勢。

利用動力降尺度的結果對降雨的推估是有助於瞭解未來的變化，但仍必須考慮到它的不確定性，由於本研究僅採用單一模式來進行模擬，其結果的適用性需進一步探討，對於下游的衝擊評估及因應策略研究者在使用資料時需非常小心。

參考文獻

- Bukovsky, M. S., and D. J. Karoly, 2009: Precipitation Simulations Using WRF as a Nested Regional Climate Model. *J. Appl. Meteor. Clim.*, **48**, 2152–2159.
- Feser, F., and H. Storch, 2008: A Dynamical Downscaling Case Study for Typhoons in Southeast Asia Using a Regional Climate Model. *Mon. Wea. Rev.*, **136**, 1806–1815.
- Giorgi, F. and G. T. Bates, 1989: The climatological skill of a regional model over complex terrain. *Mon. Wea. Rev.*, **117**, 2325-2347.
- Giorgi, F. and L.O. Mearns, 1991: Approaches to the simulation of regional climate change: a review. III-85 *Reviews of Geophysics*, **29**, 191–216.
- Kida, H., T. Koide, H. Sasaki, and M. Chiba, 1991: A new approach for coupling a limited area model to a GCM for regional climate simulations. *J. Meteor. Soc. Japan*, **69**, 723–728.
- 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, doi:10.2151/jmsj.84.165.
- 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*
- Wang, S.-Y., and T.-C. Chen, 2008: Measuring East Asian summer monsoon rainfall contributions by different weather systems over Taiwan, *J. Appl. Meteor. Clim.*, **47**, 2068-2080.
- 戴俐卉、洪景山、莊秉潔、蔡徵霖與倪佩貞，2008：WRF 模式臺灣地區土地利用類型之更新與個案研究。大氣科學，**36**，43-62。

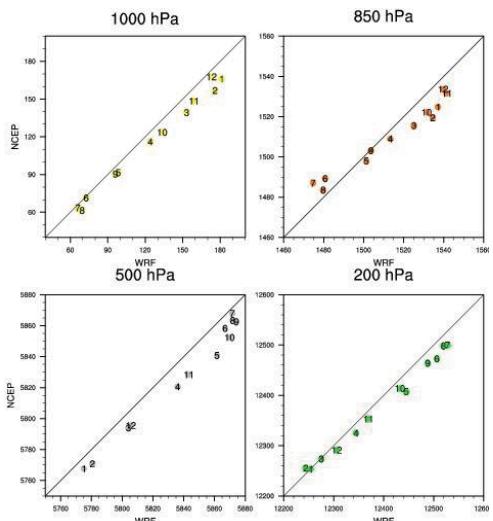


圖1. 1979-2003年1-12月WRF模式與NCEP-reanalysis資料區域平均高度場(1000 hPa、850 hPa、500 hPa及200 hPa)之散佈圖。(橫軸為WRF，縱軸為NCEP)

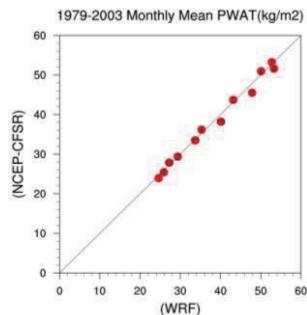


圖2. 1979-2003年1-12月WRF模式與NCEP-CFSR區域平均可降水量之散佈圖。(橫軸為WRF，縱軸為NCEP-CFSR，單位: kg/m^2)

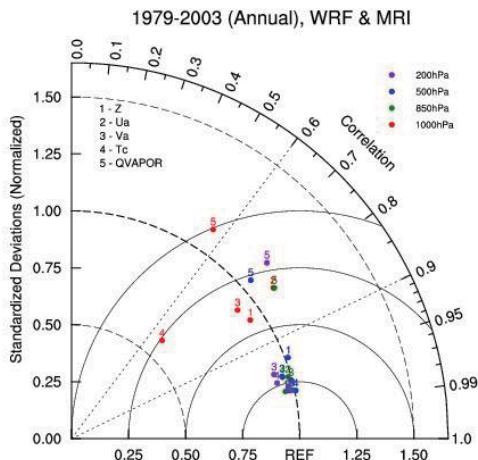


圖3. 泰勒圖。1979-2003年MRI-AGCM與WRF模式不同高度(1000 hPa、850 hPa、500 hPa及200 hPa)的高度場(1)、風場(2 & 3)、溫度場(4)及水氣場(5)。(橫軸與縱軸為標準化程序後的標準差，扇形弧上的刻度為型態相關，基準點落在標準差為1的橫軸上)

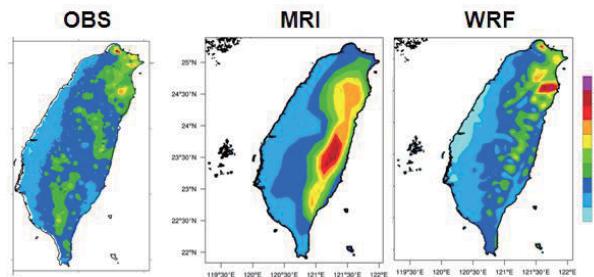


圖4. 觀測、MRI-AGCM及WRF模式25年(1979-2003年)平均降雨空間分布圖。(單位:mm/day)

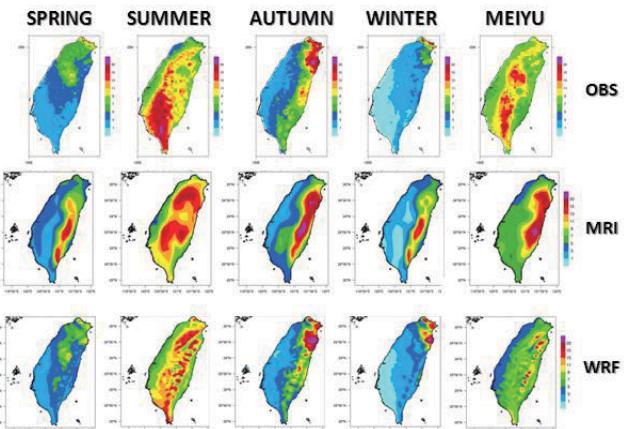


圖5. 1979-2003年觀測、MRI-AGCM及WRF模式25年春季、夏季、秋季、冬季及梅雨季之平均降雨空間分布圖。(單位:mm/day)

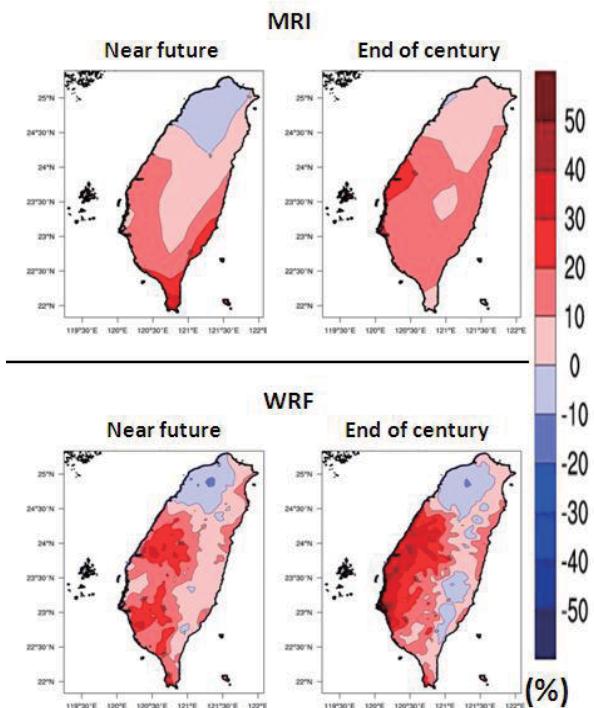


圖6. MRI-AGCM(上圖)與WRF模式(下圖)相較於現在(1979-2003年)的平均降雨，在近未來(2015-2039年，左圖)與21世紀末(2075-2099年，右圖)的改變率。(單位:%)

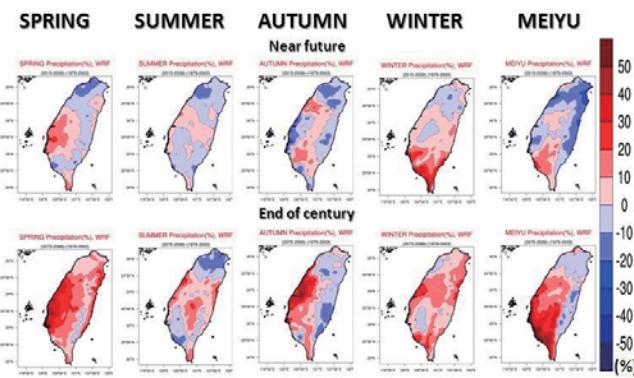


圖7. WRF模式在近未來(2015-2039年,上圖)與21世紀末(2075-2099年,下圖)各季節的降雨改變率。(單位:%)

表1. 臺灣地區及臺灣四大分區(依照中央氣象局的分類方法將臺灣分為北、中、南及東部)的平均降雨量(1979-2003年)、近未來(2015-2039年)及21世紀末(2075-2099年)各季節的降雨改變率

	Spring	North	Central	South	East	Taiwan
Precipitation (mm/day)	5.7	4.1	2.9	4.3	4.1	
Near future change rate (%)	-6.9%	3.9%	2.5%	-1.4%	-0.8%	
End of century change rate (%)	10.2%	18.6%	14.0%	9.9%	13.2%	
Summer	North	Central	South	East	Taiwan	
Precipitation (mm/day)	10.6	9.9	11.6	10.6	10.4	
Near future change rate (%)	-5.8%	0.6%	-2.0%	-2.5%	-2.3%	
End of century change rate (%)	-6.9%	6.8%	0.9%	1.9%	1.2%	
Autumn	North	Central	South	East	Taiwan	
Precipitation (mm/day)	6.4	3.3	3.7	9.9	5.8	
Near future change rate (%)	-6.3%	0.2%	1.4%	-5.0%	-3.8%	
End of century change rate (%)	-0.9%	6.4%	6.0%	-5.3%	-1.0%	
Winter	North	Central	South	East	Taiwan	
Precipitation (mm/day)	5.1	1.7	1.3	4.8	3.2	
Near future change rate (%)	-0.4%	1.8%	12.6%	3.5%	2.9%	
End of century change rate (%)	7.4%	10.6%	6.9%	12.0%	9.9%	
Meiyu	North	Central	South	East	Taiwan	
Precipitation (mm/day)	6.3	6.5	6.9	8.3	7	
Near future change rate (%)	-11.2%	-1.4%	7.8%	-9.9%	-4.1%	
End of century change rate (%)	-1.0%	13.9%	31.8%	-1.8%	9.8%	

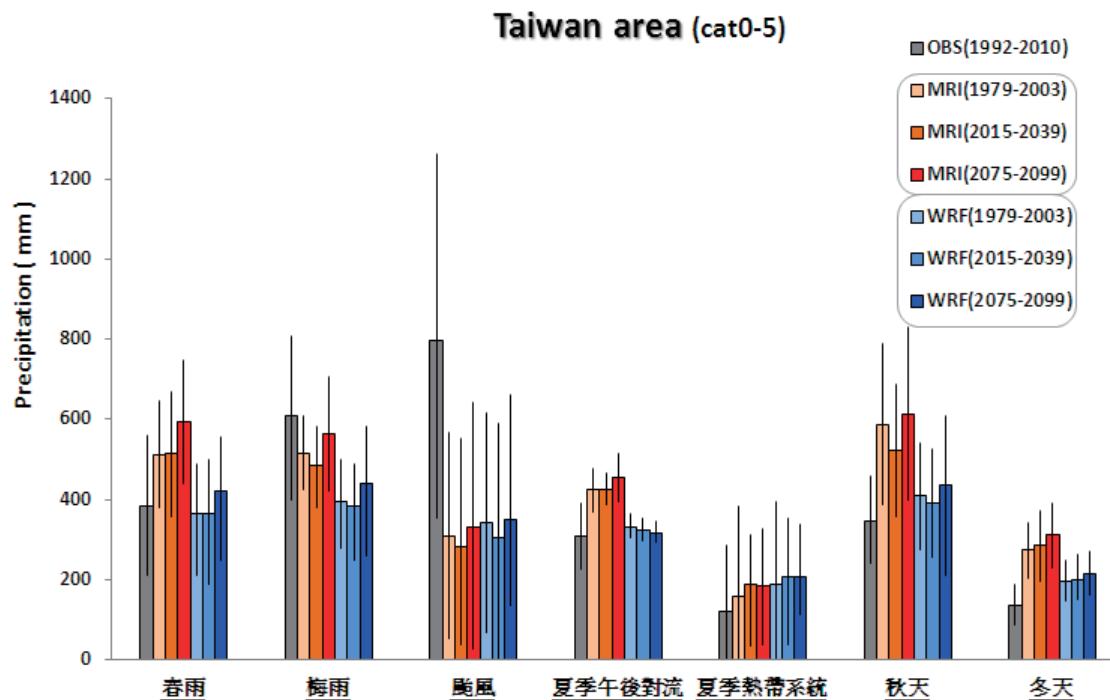


圖8. 觀測值及MRI-AGCM與WRF模式的平均降雨量(各類別的降雨已扣除颱風降雨)。灰色為觀測值，橘紅色系為MRI-AGCM，藍色系為WRF模式。在每一降雨類別中，由左至右分別為觀測值，MRI-AGCM與WRF模式的現在、近未來及21世紀末的平均降雨量。每個長條上的直線表示其標準差，如圖例所示。