

根據 CMIP5 模式推估全球氣候變遷對臺灣梅雨季極端降雨事件頻率的影響

卓盈旻 廬孟明

中央氣象局科技中心

摘要

梅雨季劇烈降雨是臺灣重要的災害性天氣，近年來因全球氣候變遷的影響，災害性天氣更是世界共同關心的問題。由於目前全球氣候模式仍無法合理模擬梅雨鋒面的氣候特性，因此難以直接利用模式結果探討梅雨季劇烈降雨的變異特徵。為克服這個限制，本文提出用大尺度環流指數代表臺灣極端降雨發生頻率的方法，及如何依據此大尺度環流指數變化來推估氣候變遷對臺灣梅雨季極端降雨事件發生頻率的影響。

本研究以 1951-2000 年 5~6 月臺灣西部 10 個測站日雨量資料得到 177 天極端降雨事件，分析極端降雨事件的大尺度環流特徵，發現從華南經東海到日本南方的洋面上存在低壓氣旋環流（正渦度區），菲律賓往西北太平洋延伸出高壓反氣旋區（負渦度區），從南海北部到琉球附近有明顯的西南強氣流位於正、負渦度距平之間，表示當台灣西北和東南部分別存在低壓和高壓環流場時，由南海北部來的西南氣流就容易造成台灣地區出現災害性降雨的發生。

根據此低層環流的空間分布，設計了西南氣流指數（Southwest Flow Index，SWFI）來代表臺灣梅雨季極端降雨發生時的大尺度環流條件，並建立極端降雨年發生率與 SWFI 機率的迴歸關係，即當極端 SWFI 年發生日數偏多（少），測站極端降雨的年發生日數亦偏多（少）。然後採用貝氏統計概念為基礎的降尺度分析法，根據用氣候模式模擬結果計算的極端降雨年發生率的機率密度函數隨西南氣流指數的變化，推估氣候變遷對臺灣梅雨季極端降雨事件發生頻率的影響。根據 10 個 IPCC/CMIP5 模式於 RCP8.5 情境下的推估結果顯示未來臺灣梅雨極端降雨的頻率變化有 3 個模式表現增多，3 個表現減少，2 個模式表現先減少後增多，另有 2 個模式表現先持平之後分別是減少和增多，結果相當分歧。

一、前言

梅雨是臺灣地區在春夏季節轉換時最重要的天氣現象，平均而言，每年梅雨季約有 4~5 道鋒面系統出現，梅雨鋒面會伴隨連續性並夾帶豪大雨的降水（陳與紀，1978；陳與蔡，1980）。王等（1985）分析 1960~1984 年中央氣象局所屬 24 個測站發現，每年除了颱風造成的劇烈降水以外，豪大雨發生頻率主要出現在 5 月中至 6 月中之梅雨時期。由於梅雨經常在局部地區帶來劇烈的豪大雨，引發暴洪、淹水、山崩、土石流等災害，因此梅雨季劇烈降雨成為臺灣重要的災害性天氣，尤其近年來，都市快速發展，使得劇烈降水災害發生頻率有增加的趨勢。

利用數值模式研究氣候變遷是重要的工具，雖然近十餘年來氣候數值模式的模擬技術進展快速，但關

於降雨特性的模擬能力仍然非常不足，遑論是易致災性的極端降雨（Randall et al. 2007）。Sun et al. (2006) 針對 1900-2000 年的氣候分析了 18 個數值模式的模擬結果（其中有 11 個模式屬於 IPCC AR4），發現模式普遍低估了強降雨（日雨量大於 10 mm），高估了弱降雨（日雨量介於 1-10 mm 之間），而且不能掌握對年累積雨量有 67% 貢獻的大降雨事件的強度與頻率特徵。Kitoh and Uchiyama (2006) 利用 15 個 IPCC AR4 模式資料推估氣候變遷對東亞的梅雨和雨季的開始與結束時間的影響，發現台灣附近梅雨季將隨氣候暖化增長，而日本南方與長江流域的梅雨時間將縮短，太平洋副高增強是造成這些變化的主導因子；但事實上這些模式對東亞雨量長期平均的時空分布特性都還不能正確掌握。

梅雨期的劇烈降雨主要發生在狹長的梅雨鋒面內，目

前全球模式資料仍無法合理模擬梅雨鋒面的氣候特性，因此難以直接利用全球模式資料來研究梅雨季的劇烈降雨變異特徵。為克服這個限制，本研究將根據這個季節極端降雨事件伴隨的大尺度環流共同特徵，建立一個可以代表台灣梅雨季劇烈降雨發生頻率的大尺度環流指數，並進一步將這個指數應用在 CMIP5 模式資料，期望推估未來極端降雨年發生率的變化，對氣候變遷如何影響梅雨季極端降雨發生頻率提出看法。

二、資料與方法

2.1 使用資料

五、六月是台灣的梅雨季，由陳（1981）的分析可知梅雨季降水主要集中於台灣西部，因此本研究用以判斷極端降雨測站資料有台灣西部 10 個傳統氣象測站（基隆、淡水、台北、新竹、梧棲、台中、嘉義、台南、高雄、恆春）梅雨季（5~6 月）的日雨量資料（圖 1）。大尺度環流分析場使用美國國家環境預報中心和美國國家大氣研究中心提供之日平均水平風場（U、V）重分析資料（NCEP/NCAR Reanalysis-1），網格解析度為 $2.5^\circ \times 2.5^\circ$ 經緯網格。

本研究中的模式資料為IPCC/CMIP5全球氣候模式，依照模式對於臺灣梅雨季模擬的表現和提供風場日資料而挑選10個模式資料進行分析，模式名稱、模式發展機構和來源國家整理在表1。對20世紀氣候模擬（Historical）進行校驗和探討未來RCP8.5變化情境下梅雨季極端降雨發生頻率的變化。

本研究以 1951~2000 年梅雨季（5~6 月）的測站資料選取出極端降雨事件，依據這些極端降雨事件發生的大尺度環流條件，建立可以代表極端降雨事件發生頻率變化的大尺度環流指數。為了評估應用大尺度環流指數判斷極端降雨發生的可能性，以 2001~2015 年來測試大尺度環流指數是否能反應臺灣梅雨季極端降雨發生頻率變化的測試期。

2.2 研究方法

本研究中極端降雨事件的選取是依據每個測站的雨量分布頻率定義，取 1951~2000 年每一年梅雨季（5~6 月）期間日雨量的最大值，將這 50 年日雨量最大值的中位數定為極端降雨事件的雨量門檻值

（ R_c ），當梅雨季期間的日雨量超過 R_c 就視為有一個極端降雨事件。每個測站可以得到其各自的雨量門檻值，各測站的 R_c 值如表 2 所示。此 R_c 值所選取的極端降雨事件相當於使用極端值分析方法估計 24 小時以上累積雨量的重現期距大於 1.5 年的降雨事件。統計 1951~2000 年梅雨季期間每個測站日雨量超過 R_c 值的天數，並將颱風影響（颱風進入臺灣海域 300km 以內）的天數扣除，共有 177 天中至少有一個測站會發生極端降雨事件。

三、研究結果

3.1 臺灣梅雨季極端降雨事件之大尺度環流場

圖 2 為 1951~2000 年 177 個梅雨季極端降雨事件個案大尺度環流場的合成分析圖，發現最明顯的環流結構特徵就是從中南半島延伸到日本南方海域上的西南氣流帶，伴隨西南氣流的正渦度（低壓氣旋環流）出現在從華南經東海到日本南部洋面上，而負渦度（高壓反氣旋環流）出現在從菲律賓往西北太平洋延伸，位於正渦度區的南方。在距平場部分（圖 3），西南氣流距平中心出現在從南海東北角往菲律賓東北角的巴士海峽，低壓環流距平中心出現在華南與台灣海峽，而高壓反氣旋距平中心出現在南海至菲律賓北部，可見西南氣流發生位置和太平洋高壓與華南低壓系統有密切的關係。

為了瞭解有利於臺灣極端降雨發生的環流位置，統計每一個網格點上正、負渦度的極端降雨事件出現頻率，顯示極端降雨事件發生時，臺灣與華南附近區域存在低壓氣旋環流，如圖 4 中的紅點區，南海和菲律賓海附近有高壓反氣旋區（藍點區），從南海北部到琉球附近低層有西南氣流，表示當臺灣西北和東南部分別存在低壓和高壓環流場時，由南海北部來的西南氣流就容易造成臺灣地區出現災害性降雨的發生。

經由 NCEP 重分析日資料的分析可知，當臺灣西北和東南部分別存在低壓和高壓環流場時，臺灣極端降雨事件並不一定會發生，可見除了渦度場條件之外，還有其他的環流條件使極端降雨發生，因此西南氣流的強度是另一個重要的因素。為了瞭解西南氣流強度是否會影響極端事件發生機率，以 SWU 代表在符合渦度條件之下，西南氣流區域（圖 4 的綠點區）

的平均距平緯向風速。圖 5 為使用 NCEP 重分析日資料計算 1951~2000 年梅雨季期間（5~6 月）的 SWU 風速分布頻率，灰色長條為符合渦度條件下的風速強度頻率，顯示 SWU 風速強度發生頻率近似於常態（Normal）分布。藍色長條為 177 天極端降雨事件的風速分布，可以發現大部分事件的風速值都比較偏強，顯示當臺灣發生極端降雨事件時西南氣流的風速值都比較強，因此定義在符合渦度條件之下，SWU 風速分布的第 50 百分位（中位數）的風速值作為極端降雨發生的風速門檻值（SWU_c），風速閾值為 3.99 m/s。

3.2 西南氣流指數 (Southwest Flow Index, SWFI)

由上述分析結果可知，臺灣極端降雨發生時有兩個大尺度環流條件，即（I）渦度條件：臺灣西北和東南部分別存在正、負渦度場，（II）西南氣流風速（SWU）要大於 SWU_c。因此，定義西南氣流指數（Southwest Flow Index, SWFI）為每年梅雨季大尺度環流條件符合的天數，來代表臺灣極端降雨發生的頻率。即梅雨季（5~6 月）期間滿足低層渦度條件下，西南氣流風速值（SWU）大於風速閾值（U_c）的日數。

分析 SWFI 指數和臺灣極端降雨事件之間的相關性，圖 6 為統計 1951~2000 年期間 SWFI 和臺灣梅雨季極端降雨天數的時間序列，發現兩者年發生頻率相關係數達 0.62（超過 0.05 顯著水準），顯示當 SWFI 年發生日數偏多（少）時，臺灣梅雨季極端降雨年發生日數也呈現偏多（少）趨勢。由於梧棲和嘉義建站時間較晚，因此此處統計的每年極端降雨發生天數為採用 8 個測站的結果。

3.3 SWFI 之應用校驗

為了解運用西南氣流指數高低判斷測站極端性降雨年發生率的可行性，分別將 SWFI 和臺灣梅雨季極端降雨年發生日數分為偏多和偏少兩類，來分析類別的對照關係，如圖 7 所示。結果顯示 50 年中（1951~2000 年）SWFI 偏多且測站極端降雨日數也偏多有 12 年，SWFI 偏少且測站日數也偏少有 23 年，兩者合計占強西南氣流與發生極端降雨事件總個案數的 70%，誤判率為 30%（15 年），可見大尺度環流指數 SWFI 與台灣測站極端降雨發生機率的相關性相當高。作為評估期的 2001-2015 年期間的分析結果顯示，

SWFI 和 8 個測站極端降雨發生頻率相關係數達 0.74。將這 14 年依 1951~2000 年的標準，將 SWFI 與極端降雨頻率分為兩個類別，依 SWFI 推測極端降雨頻率偏多的命中率為 40.0%（6 年），依 SWFI 推測極端降雨頻率偏少命中 20.0%（3 年），兩者合計的命中率為 60.0%，依 SWFI 做了錯誤推測的比例為 40.0%，表示西南氣流指標確實具有判斷極端事件多寡的參考價值。

3.4 統計降尺度推估方法之建立

由於目前全球大氣海洋耦合模式仍無法合理模擬出梅雨鋒面的氣候特性，所以無法直接使用模式降雨資料推估台灣梅雨季劇烈降雨的氣候變異特徵。本研究利用簡化的貝氏統計（Bayesian approach）概念發展了一套相當獨特的統計降尺度方法，藉以分析 CMIP5 模式資料，推估未來梅雨季極端降雨年發生率的變化。此種做法以各個氣候模式模擬的大尺度環流指數強度為條件，估計台灣梅雨季極端降雨統計特徵的變化程度。主要利用大尺度環流指數與極端降雨天氣因子之間的關係，根據大尺度氣候條件的改變來詮釋氣象因子的變化，可增加根據物理觀念了解模式推估結果的機會，這是本文提出的方法相較於純統計和動力降尺度方法的優點。

為模擬極端降雨年發生率的機率密度分布函數，本研究先將 1951~2015 年 65 年的 SWFI 指數大小分為偏少（Less）、正常（Normal）和偏多（More）三類，再以 Poisson 分布模擬不同 SWFI 類別的極端降雨年發生率，最後三：根據極端降雨三分類的比例建立極端降雨年發生率關係式如下。

$$PDF_{rate} = 0.3 * PDF_{more} + 0.4 * PDF_{normal} + 0.3 * PDF_{less}$$

圖 8 顯示當 SWFI 指數偏小（大）時，極端降雨年發生率亦出現減少（增多）的情形，可見 SWFI 與台灣測站極端降雨年發生率之間存在顯著之正相關。圖 9 顯示的極端降雨年發生率的機率分布是根據 SWFI 類別 3:4:3 比例計算的，機率分布曲線隨著各類別在樣本空間中所占比例的改變而變化，因此可用以推估氣候變遷對極端降雨年發生率的影響。

3.5 氣候變遷對台灣梅雨季極端降雨變異的影響

各模式以各自對 1986~2005 年的 20 世紀（Historical）氣候模擬結果計算的 SWFI 指數所估算

的台灣梅雨季極端降雨年發生率的機率密度函數為基準，估算模式在近未來20年（2046~2065）和遠未來20年（2081~2100）極端降雨年發生率機率函數相對於基準值的變化，便可推估氣候變遷對極端降雨年發生率的影響。其中未來氣候的SWFI三分類的門檻值乃是沿用20世紀的基準，未來機率函數的變化主要是根據模式模擬的未來氣候SWFI在不同類別的比例變化，再運用Poisson分布推估全機率分布。以CMCCC-CM和IPSL-CM5A-MR模式為例，根據兩個模式SWFI指數變化推估的極端降雨頻率變化顯示在圖10。CMCC-CM表現出未來溫度增加會使極端降雨年發生率偏高的發生機率增加。而IPSL-CM5A-MR則顯示未來極端降雨年發生率偏高的發生機率出現減少的情形。以各模式20世紀極端降雨事件發生頻率累積機率第75百分位做為門檻值，表3顯示模式近未來和遠未來超過第75百分位的累積百分比例變化，10個模式中有3個模式顯示極端降雨年發生率在近未來和遠未來都有減少的趨勢，有3個模式則顯示在兩段未來都有增加趨勢；而有2個模式表現先減少後增多，另有2個模式表現先持平之後分別是減少和增多。各個模式顯示出暖化對台灣梅雨季極端降雨年發生頻率的影響不盡相同，也凸顯出運用氣候模式推估臺灣氣候變化的困難。

四、未來工作

本研究已建立極端降雨年發生頻率變化的推估方法，並應用此方法進行10個IPCC/CMIP5模式進行極端降雨年發生頻率的推估。未來將繼續分析其他的氣候變

遷情境（RCP6.0、RCP4.5、RCP2.6），以及未來氣候的環流變化，運用吾人對梅雨極端降雨發生頻率的了解和物理概念詮釋氣候模式的推估結果。

參考文獻

- 王時鼎、鄭俠、徐晉淮與邱台光，1985：五、六月間台灣地區暴雨之環境條件。天氣分析與預報研討會論文彙編，中央氣象局，P55-72。
- 陳正改，蔡清彥，1980：影響台灣北部地區之梅雨系統。大氣科學，7，49-58。
- 陳泰然，紀水上，1978：台灣梅雨鋒面之中幅度結構。大氣科學，5，35-47。
- Kitoh, A. and T. Uchiyama, 2006: Changes in Onset and Withdrawal of the East Asian Summer Rainy Season by Multi-Model Global Warming Experiments. *J. Meteor. Soc. Japan*, **84**, 247-258.
- Randall D. A., Coauthors, 2007: Climate models and their evaluation. *Climate Change 2007: The Physical Science Basis*, S. Solomon et al., Eds., Cambridge University Press, 589–662.
- Sun, Y., S. Solomon, A. Dai, and R. W. Portmann, 2006: How often does it rain? *J. Climate*, **19**, 916-937.

表 1：本研究中採用的 IPCC/CMIP5 模式名稱、模式發展機構和來源國家。

| 號碼 | 模式名稱 | 發展機構 | 國家 |
|----|--------------|--|-----------|
| 1 | ACCESS1.0 | Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization and Bureau of Meteorology | Australia |
| 2 | BNU-ESM | Beijing Normal University | China |
| 3 | CMCC-CM | Centro Euro-Mediterraneo per i Cambiamenti Climatici | Italy |
| 4 | CNRM-CM5 | Centre National de Recherches Meteorologiques and Centre Europeen de Recherches et Formation Avancees en Calcul Scientifique | France |
| 5 | HadGEM2-CC | Met Office Hadley Centre | UK |
| 6 | IPSL-CM5A-MR | Institute Pierre Simon Laplace | France |
| 7 | MIROC5 | University of Tokyo, National Institute for Environmental Studies, and Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology | Japan |
| 8 | MPI-ESM-MR | Max Planck Institute for Meteorology | Germany |
| 9 | MRI-CGCM3 | Meteorological Research Institute | Japan |
| 10 | NorESM1-M | Norwegian Climate Centre | Norway |

表 2：臺灣西部 10 個測站的梅雨季極端降雨事件門檻值。

| 測站 | 站碼 | Rc (mm/day) |
|----|-------|-------------|
| 淡水 | 46690 | 88.6 |
| 基隆 | 46694 | 99.1 |
| 台北 | 46692 | 89.6 |
| 新竹 | 46757 | 118.2 |
| 梧棲 | 46777 | 112.5 |
| 台中 | 46749 | 102.3 |
| 嘉義 | 46748 | 105.7 |
| 台南 | 46741 | 114.1 |
| 高雄 | 46744 | 105.8 |
| 恆春 | 46759 | 111.8 |

表 3：10 個 IPCC/CMIP5 模式近未來和遠未來超過第 75 百分位的累積百分比例變化。

| 模式號碼 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
|------|-----|-----|----|-----|----|-----|----|----|-----|----|
| 近未來 | -20 | 0 | 25 | -20 | 15 | -25 | 30 | 0 | -20 | -5 |
| 遠未來 | -5 | -15 | 15 | -5 | 10 | -25 | 25 | 30 | 5 | 35 |

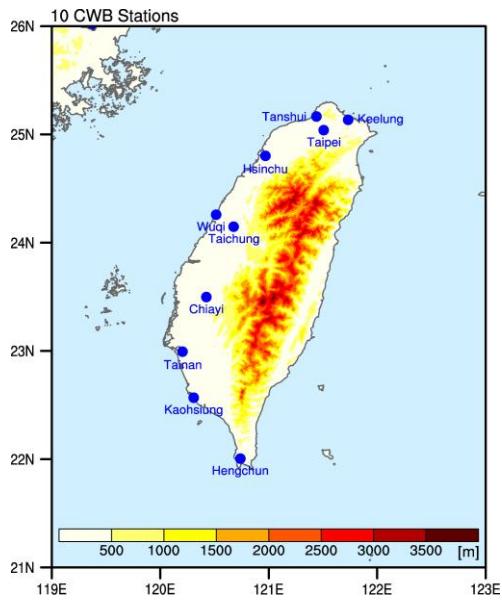


圖 1：臺灣西部 10 個氣象測站（淡水、基隆、台北、新竹、梧棲、台中、嘉義、臺南、高雄、恆春）的位置圖。

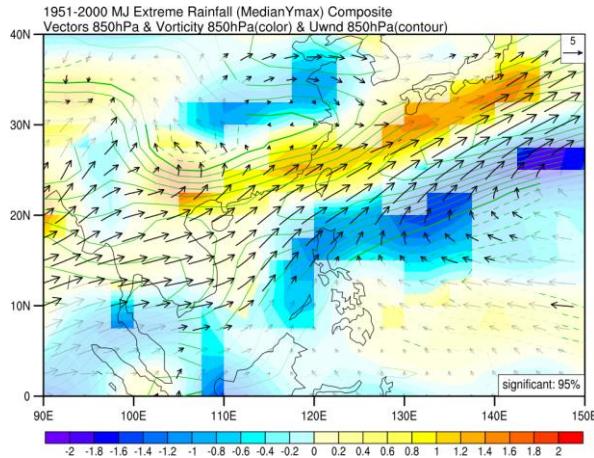


圖 2：1951~2000 年臺灣梅雨季極端降雨事件環流場合成圖（通過 95% 顯著性檢定），顏色為 850mb 涡度場，流線為 850mb 水平風場。

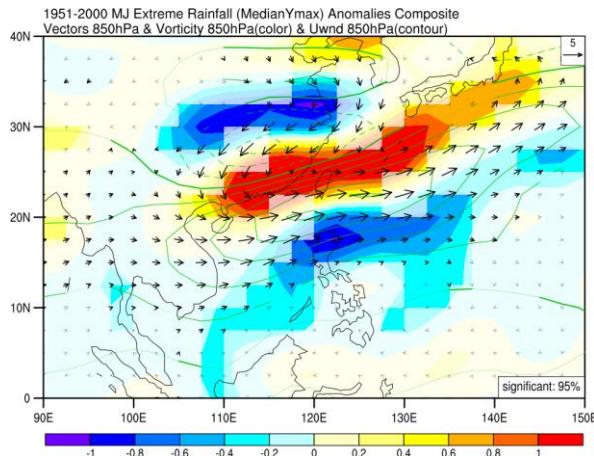


圖 3：1951~2000 年臺灣梅雨季極端降雨事件環流場距平合成圖（通過 95% 顯著性檢定），顏色為

850mb 涡度場，流線為 850mb 水平風場。

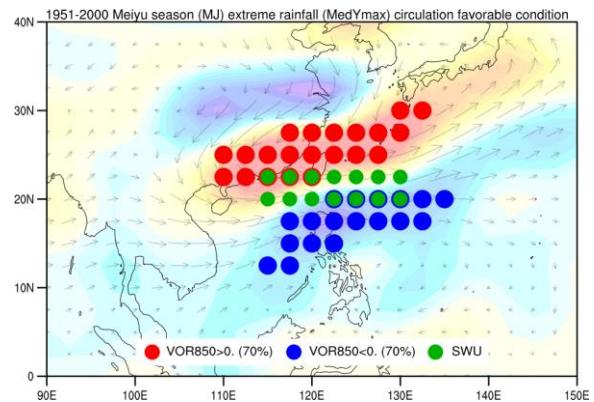


圖 4：有利於臺灣梅雨季極端降雨發生的環流條件區域，紅點和藍點分別代表正渦度和負渦度，綠點代表西南氣流區（SWU）。

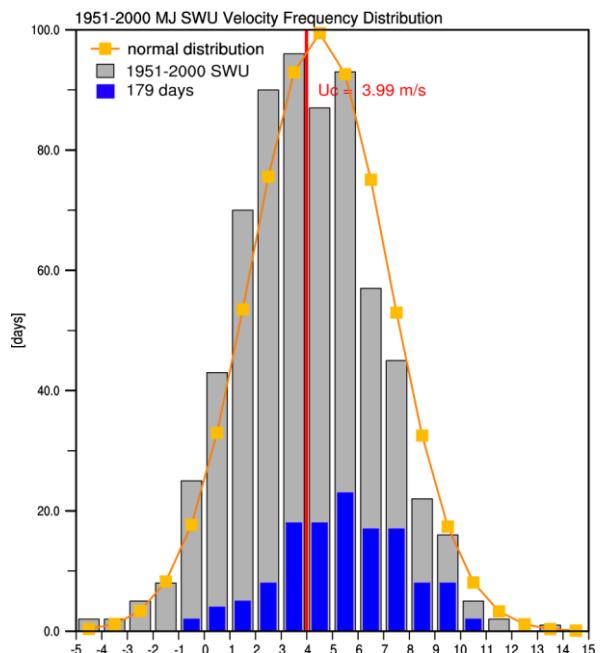


圖 5：1951~2000 年梅雨季期間（5~6 月）的 SWU 風速分布頻率，灰色長條為符合渦度條件下的風速強度頻率，藍色長條為臺灣梅雨季極端降雨事件的風速分布，黃線為理論常態分布。

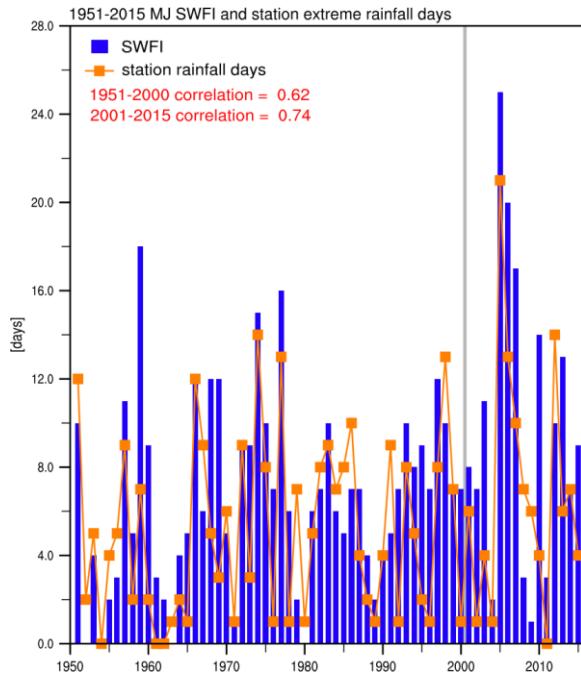


圖 6：1951~2015 年滿足過度條件下西南氣流區距平風速超過 4.0m/s 的年發生日數（藍色長條），與每年 8 個測站超過 50 年最大降雨量中位數的極端性降雨日數（橘線）。

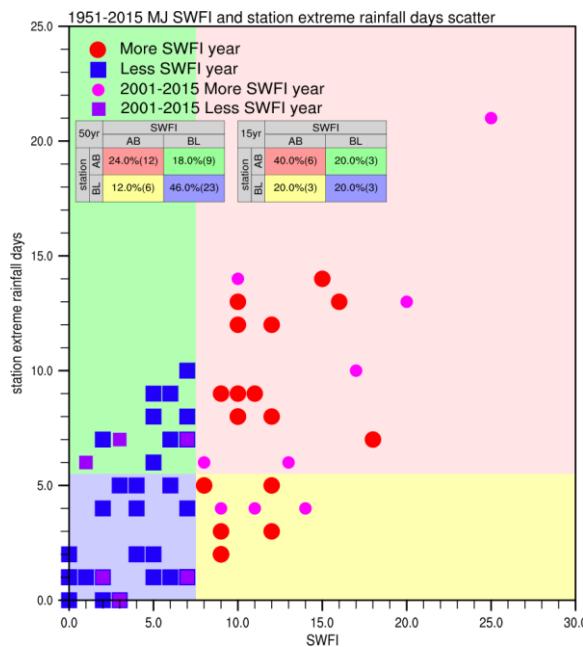


圖 7：1951~2015 年西南氣流指數 SWFI 和臺灣梅雨季極端降雨年發生日數分為偏多和偏少兩類的類別對照關係。

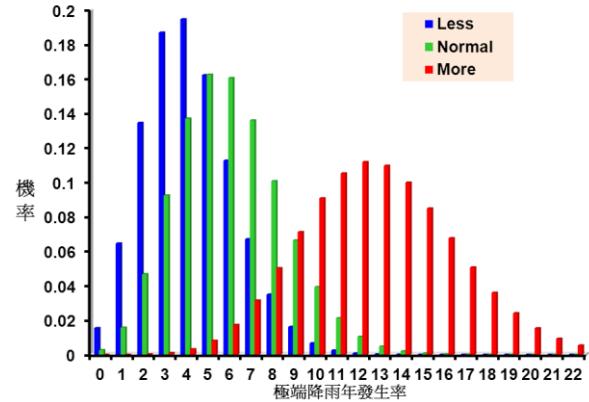


圖 8：以 Poisson 分布模擬之 SWFI 三分類極端降雨年發生率。藍色為偏少之 SWFI，綠色為正常 SWFI，紅色為偏多的 SWFI。

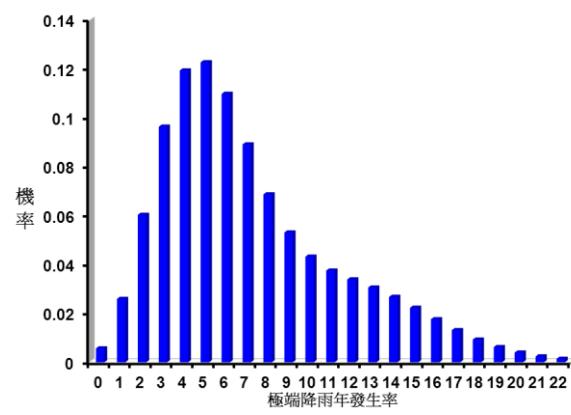


圖 9：根據 1951~2014 年的 SWFI 與極端降雨年發生率關係所模擬的極端降雨年發生機率分布圖。

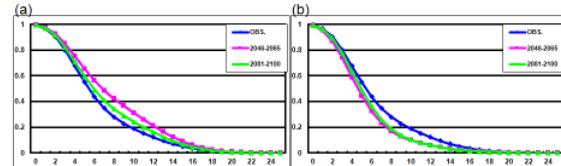


圖 10：(a) 為 CMCCC-CM 模式根據 SWFI 變化於 RCP8.5 情境下所推估的極端降雨頻率變化。(b) 為 IPSL-CM5A-MR 模式的結果。