

NCDR 112-T24

不同氣候變遷時期下之臺灣颱風推估差異分析
Taiwan Typhoon Projection in different Climate
Change Periods



國家災害防救科技中心

National Science and Technology Center
for Disaster Reduction

國家災害防救科技中心

中華民國 113 年 01 月

不同氣候變遷時期下之臺灣颱風推估差異分析
Taiwan Typhoon Projection in different Climate
Change Periods

鄭兆尊、林思穎、簡毓瑋、王俊寓



中文摘要

本研究分析 CMIP5 RCP8.5 情境下的高解析度全球模式臺灣地區動力降尺度資料，比較世紀中、末取出 20 年的時期(2040–2059、2080–2099)以及全球暖化 2°C、4°C 的 20 年時期的影響臺灣颱風推估差異。結果看出世紀中的氣候統計值與全球暖化 2°C 的結果相似，世紀末與全球暖化 4°C 的結果相似，後續分析影響臺灣颱風時，可將所有的世紀中、末的颱風結果視為未來中、長期的結果，以增加颱風的樣本數、強化統計結果的代表性。結果顯示在未來中、長期颱風個數減少約 10%、50%；強颱出現的頻率增加約 105%、60%；陸地上風速增加約 8%及 10%；陸地上降雨強度增加約 20%、40%，西部平原地區增加較為顯著。

隨著颱風頻率減少，陸地上累積的颱風降雨在中期微幅增加，長期在臺灣西部可能減少 10-30%、東北部減少 30-50%。在基期最常見到的是每年受到 5 場颱風影響，在中期降為每年 3 場，到了長期最常見到的是每年 1 場。世紀末甚至有近 1/6 的年分沒有颱風造訪。強颱出現的頻率在中期增加了一倍、長期增加了近 6 成，這也代表著未來對面對防洪、抗旱的頻率增加。

關鍵字：氣候變遷、颱風推估、全球暖化程度、動力降尺度

ABSTRACT

Dynamical downscaling data of HiRAM climate projection under CMIP5 RCP8.5 scenario were used to compare the projection of typhoons affecting Taiwan in global warming level 2°C (4°C) with that in the mid (end) of 21st century periods. The results of the warming 2°C (4°C) and the middle (end) of 21st century is similar. Therefore, using all simulated typhoons of in the mid (end) of 21st century can also reasonably represent the results of global warming level 2°C (4°C). Longer climate periods can include more typhoons to reduce the statistical uncertainty. Results show that typhoon frequency reduced 10% (50%), intense typhoon frequency increase 105% (60%), wind speed over land increase 8% (10%), and precipitation over land increase 20% (40%) in the middle (end) of 21st century.

Along with the reduction in typhoon frequency, the accumulation of typhoon precipitation over land slightly increases (decrease 10-50%) in the middle (end) of 21st century. Most frequent typhoon frequency is 5 typhoons per year in base period and that is reduce to 3 (1) typhoons per year in the middle (end) of 21st century. There won't be any typhoon approaching Taiwan in nearly 1/6 of years in the end of 21st century. In the meantime, the frequency of typhoons stronger than category 3 increase 50%.

Keywords: climate change, typhoon projection, global warming level, dynamical downscaling

目錄

第一章 前言.....	1
第二章 研究方法介紹	6
2.1 模式推估資料	6
2.2 HiRAM 的全球暖化程度計算	10
2.3 侵臺颱風定義與颱風風雨合成分析方法	14
2.3.1 侵臺颱風定義	14
2.3.2 依颱風中心位置分類的颱風風雨合成分析	15
第三章 全球暖化情境下的影響臺灣颱風	17
3.1 影響臺灣颱風統計值的時間序列	17
3.2 影響臺灣颱風未來改變率的機率分布	22
第四章 臺灣陸地上的颱風風雨變遷	27
4.1 颱風降雨改變率	27
4.2 依據颱風位置分別計算颱風風雨改變率	31
4.3 固定颱風路徑下的未來颱風總降雨改變率	37
第五章 小結與討論	40
致謝.....	43
參考文獻.....	44

圖目錄

- 圖 1 執行動力降尺度的模擬範圍，(a) 是 HiRAM C384 降尺度、(b) 是 HiRAM C192 降尺度範圍。..... 9
- 圖 2 HiRAM 四個系集成員模擬全球地表氣溫相對於基期 1995–2014 的變化 (左側 y 軸)，以及相對於 1850–1900 的變化 (右側 y 軸)。x 軸 Period 1-7 分別代表世紀中 2040–2059 (Period 1) 至 2046–2065 (Period 7)，以及世紀末 2075–2094 (Period 1) 至 2081–2100 (Period 7)。..... 10
- 圖 3 HiRAM 四個系集成員全球地表氣溫相對於基期 1995–2014 (左側 y 軸) 以及相對於 1850–1900 (右側 y 軸) 的變化。x 軸代表 20 年氣候時期的起始年，其中 2039/2074 以前為線性迴歸估計值，2040/2075 以後為模式模擬結果。..... 13
- 圖 4 HiRAM C0 模擬所使用海溫的全球平均逐年變化。..... 14
- 圖 5 (a) 計算影響臺灣颱風所使用的範圍。颱風中心進到紅線圈起區域的颱風才算。(b) 1979–2015 的觀測資料中，颱風中心出現次數的空間分布。黑框為分析的重點。..... 15
- 圖 6 1995–2014 觀測颱風中心在不同位置時的平均降雨強度空間分布。左上角的數字為參與平均值計算的颱風時數，颱風標誌標示著颱風所在位置。圖幅的配置對應著颱風中心在圖 5b 的網格位置。..... 16
- 圖 7 每年影響臺灣颱風的 (a) 所有颱風頻率、(b) 強烈颱風頻率、(c) 平均降雨強度、(d) 近中心最大風速的平均，單位分別是次數/年、次數/年、mm/hr、m/s。粗灰線為觀測值、細灰線為每個系集成員模擬結果；粗黑線為觀測值的 20 年滑動平均，粗藍、橘、紅、棕線為每個系集成員模擬的 20 年滑動平均。..... 21
- 圖 8 WHiRAM C384 中，(a) 影響臺灣颱風頻率、(b) 強颱風頻率、(c) 颱風最強時近中心最大風速、(d) 颱風最強時距中心 200km 內平均雨量在 2040–2059 (黃色)、GWL+2°C (棕色)、2080–2099 (紅色)、GWL+4°C (暗紅色) 相對於基期 1995–2014 改變率的盒鬚圖。圓點表示平均值，盒鬚圖表示 95、75、50、25、5 百分位 (單位：%)。..... 23
- 圖 9 同圖 8，只是為世紀中 2031–2065 與世紀末 2071–2099 相對於基期 1979–2015 的未來改變率，世紀末改變率一併整合 WMRI 的推估結果。..... 24
- 圖 10 影響臺灣颱風頻率所發生的機率 (出現的年數除以全部年數)。其中黑色為歷史觀測 (1979–2020)、灰色為模式歷史基期 (1979–

	2015)、黃色為 21 世紀中 (2031–2065)、紅色為 21 世紀末 (2071–2099)。	25
圖 11	HiRAM C192 中所有影響臺灣颱風合成的海表面溫度 (單位: K)、垂直層水氣 (單位: mm)、地面風速 (單位: m/s)、降雨 (單位: mm/hr) 在徑向分布以及未來的改變量與改變率 (單位: %)，橫軸是距颱風中心的距離 (單位: 公里)。藍、黃、紅線分別為基期、世紀中、世紀末的推估結果。	27
圖 12	(a)–(d)為單場次平均颱風降雨的改變率、(e)–(h)為每年平均颱風降雨改變率，單位: %。順序由左至右圖(a)與圖(e)為 GWL+2°C、圖(b)與圖(f)為 GWL+4°C 相較於 1995–2014 的改變率；圖(c)與圖(g)為 2040–2059、圖(d)與圖(h)為 2080–2099 相較於 1995–2014 的改變率。	29
圖 13	觀測與系集推估的影響臺灣颱風路徑密度空間分布，單位: %。(a) 1995–2014 觀測、(b) 1995–2014、(c) GWL+2°C、(d) GWL+4°C。	30
圖 14	類似圖 6，只是變數改為未來 2039–2065 相對於基期 1979–2015 的颱風降雨平均時雨量改變率，單位: %。左上角的 2 個數字為參與平均值計算的颱風時數 (未來/基期)。颱風標誌標示著颱風中心位置，圖幅的配置對應著颱風中心在圖 5b 粗黑框線內的網格位置。	32
圖 15	同圖 14，只是變數改為未來 2075–2099 的颱風降雨平均時雨量改變率，單位: %。左上角的 2 個數字為參與平均值計算的颱風時數 (未來/基期)。	33
圖 16	長期颱風平均時雨量的改變率，單位: %。(a) 為 2075–2099 相對於 1979–2015、(b) 為 GWL+4°C、(c) 為 2080–2099 相對於 1995–2014 的改變率。(d) 為圖 a–c 的 3 個時期改變率的盒鬚圖，呈現改變率的第 95、75、50、25、5 百分位，圓點表示系集平均、(e) 為改變率的機率密度函數。圖 d 與圖 e 中的黃、紅、紫色分別代表圖 a–c 的 3 個氣候時期。	34
圖 17	同圖 16，只是變數為地面風速的改變率。	35
圖 18	中、長期影響臺灣颱風的降雨改變率，單位: %。(a)、(b) 為 2039–2060、2075–2099 相對於 1979–2015 的改變率，(c) 為降雨改變率的盒鬚圖，呈現改變率的第 95、75、50、25、5 百分位，圓點表示系集平均、(d) 為降雨的改變率的機率密度函數。圖(c)與圖(f)中的黃、紅色分別代表圖(a)–(c)中期、長期。	36
圖 19	同圖 18，只是變數為地面風速的改變率。	37

圖 20 以歷史颱風資訊所建製未來平均颱風降雨的 (a) 中期、(b) 長期降雨改變率。進一步考慮未來颱風頻率減少的狀況下所算出 (c) 中期、(d) 長期的颱風平均年總雨量改變率，單位：%。 .38



表目錄

表 1 HiRAM 模擬的系集數目以及模擬年份。	7
表 2 HiRAM 四個系集成員模擬全球地表氣溫相對於基期 1995–2014 的變化，以及相對於 1850–1900 的變化 (由觀測資料顯示 1995–2014 相對於 1850–1900 已升溫 0.85°C)。第一欄為 20 年氣候時期的起始年。黃底代表線性迴歸估計 $\text{GWL}+2^{\circ}\text{C}$ 需往前模擬到該年分。	11
表 3 與表 2 相似，黃底代表線性迴歸估計 $\text{GWL}+4^{\circ}\text{C}$ 需往前模擬到該年分。	12
表 4 HiRAM 四個系集成員通過 $\text{GWL}+2^{\circ}\text{C}$ 、 4°C 估計時間。	13
表 5 基期與升溫情境下每年影響臺灣颱風頻率 (單位：場/每年)、百分比為基期偏差 (相較於觀測值) 與未來改變率 (相較於基期)。括弧內標示氣候時期年分的取法。	18



第一章 前言

每隔 6-7 年出版的聯合國跨政府氣候變遷專門委員會 (Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC) 氣候變遷評估報告各自使用了不同期的全球氣候耦合模式比對計畫 (Coupled Model Intercomparison Project, CMIP) 實驗的氣候推估資料，作為氣候變遷推估的主要依據。這些不同時期推估資料的品質與可信賴的程度也隨著模式解析度的提高、物理過程的改善而有所提升。除了模式的改善之外，每期 CMIP 實驗採用暖化情境的設定不同，也是造成推估資料與前期不同的主要差異。在 2007 出版的 AR4 使用的 CMIP3 資料，A1、A1B、B1…情境設定是基於社經發展程度導致不同濃度的溫室氣體排放；在 2013 出版的 AR5 使用 CMIP5 資料，則以能量收支的觀點，使用輻射強迫程度的大小來定義排放情境 RCP2.6、RCP4.5、RCP6.5、RCP8.5；在 2021 出版的 AR6 使用 CMIP6 則是一併考慮社經發展程度與輻射強迫，而有了複合情境 SSP1-2.6、SSP2-4.5、SSP3-7.0、SSP5-8.5。照理說最新的 CMIP6 資料品質最好，但是舊的 CMIP5 資料仍有值得參考之處。

為了應付各種可能發生的人為對氣候的影響，不同期的 CMIP

實驗中，溫室氣體排放從有效控制到追求發展恣意的排放狀況涵蓋地很廣，容易讓資料使用者迷失在情境不確定性的疑惑中，也比較不容易聚焦討論氣候變遷的衝擊。在 2018 年 IPCC 出版全球暖化 1.5°C 特別報告 (The Special Report on Global Warming of 1.5°C, SR15)，報告裡首次將全球暖化定義為「30 年平均的全球平均表面溫度相對於近似工業革命前 (1850–1900) 的升溫幅度」，評估當全球暖化 1.5°C 與 2°C 時的氣候變遷，以及比較兩者之間變化程度的差異，這方式更被廣泛用在 IPCC 第六次評估報告 (AR6, 2021) 中。IPCC AR6 除了使用新一代的溫室氣體排放情境，更重要的是，報告大量使用全球暖化程度 (Global Warming Level, GWL) 做為評估全球暖化造成氣候變遷衝擊的一種呈現方式。

相較於過去氣候變遷研究常用的固定 20 年或是 30 年氣候時期，使用不固定特定年分時期的 GWL 有一些好處，尤其是當全球模式的敏感度偏低或是過高的狀況下，例如 CMIP6 中許多模式模擬的溫度偏高，使用 GWL 可避開這些溫度偏高的問題，仍可以使用這些模式的資料進行應用、分析與比較。此外 GWL 不需要考慮排放情境之間的差異，而只是將氣候模式模擬升溫達到特定門檻值 (例如全球暖化 2°C) 的時段擷取出來進行分析，因此

每個模式成員或情境取出的時期都不盡相同，但都代表著相同暖化程度。如此一來可以減少模式由於不同排放情境或氣候敏感度導致在固定時期的升溫差異，有助於減少氣候推估的不確定性範圍。GWL 不但可以用在 CMIP6 的資料上，也可以套用在 CMIP5、CMIP3 的資料來進行研究。

為了得到未來暖化環境下的颱風推估資料，在國科會臺灣氣候變遷推估資訊與調適知識平台計畫 (Taiwan Climate Change Projection Information and Adaptation Knowledge Platform, TCCIP) 中執行了高解析度全球模式 (High Resolution Atmospheric Model, HiRAM) 臺灣地區動力降尺度。高解析度 HiRAM，不過資料的產製相當耗時，要等到 CMIP 實驗完成資料釋出、下載 CMIP 資料進行未來海溫的計算、帶入全球模式進行長期氣候模擬、進行區域模式模擬、進行降尺度資料偏差修正，之後才能提供給研究者進行衝擊研究應用。在 CMIP6 架構下 HiRAM 高解析全球模式模擬與降尺度需要 2 年的時間完成。為了在短時間內提供全球暖化 2°C 與 4°C (之後以 GWL+2°C、4°C 表示之) 情境的氣候推估資訊，TCCIP 計畫將 CMIP5 架構 RCP8.5 情境下 HiRAM 的全球氣候模擬往前展延，新增 2031–2039、2071–2074 時期的系集模擬，並完成其臺灣地區動力降尺度。如此一來便可在較短的時間內，

依 $GWL+2^{\circ}C$ 、 $4^{\circ}C$ 的資料年分取出臺灣地區高解析度的 $GWL+2^{\circ}C$ 、 $4^{\circ}C$ 區域氣候資料。有了充分的資料年分之後，本研究針對 GWL 與不同年分時期的統計值，分析侵臺颱風的數目、風力與降雨的強度變化的差異。

前期計畫所執行 HiRAM 氣候推估的動力降尺度的結果，進行了 RCP8.5 的世紀中 (2040–2065) 與世紀末 (2075–2100) 的氣候推估。這些結果在多個領域都有廣泛應用。但其所模擬年分並不能提供 $GWL+2^{\circ}C$ 、 $4^{\circ}C$ 的資訊，因此本年度的研究重點為透過展延模擬年分、提供這些資訊，以滿足未來氣候變化研究的需要。具體而言，本計畫將 HiRAM 模式的 CMIP5 RCP8.5 情境系集模擬往前展延，世紀中的模擬年分將被新增至 2031，世紀末的模擬年分將被增加至 2071。利用 AR6 根據觀測資料得到基期相較於工業革命前全球平均升溫 $0.85^{\circ}C$ ，再計算 HiRAM 在世紀中、世紀末推估的 20 年全球平均氣溫相較於基期的升溫。將基期觀測的升溫幅度疊加模式模擬的結果，評估相較於工業革命前 HiRAM 各系集 $GWL+2^{\circ}C$ 、 $4^{\circ}C$ 的年分。最後，使用此升溫情境年分來分析影響臺灣颱風的推估，並與前期計畫分析之結果比較。本研究中在比較不同時期會用到基期、21 世紀中、世紀末的氣候推估來描述，這些時期泛指模式模擬的資料年分或僅取出其

中一段固定年分進行分析，另外也使用「中期」來表示 $\text{GWL}+2^{\circ}\text{C}$ 與世紀中的氣候推估，「長期」表示 $\text{GWL}+4^{\circ}\text{C}$ 與世紀末的氣候推估。



第二章 研究方法介紹

2.1 模式推估資料

本研究分析的颱風推估資料以超高解析度大氣模式 HiRAM C384 (解析度為 25 公里) 的模擬資料為主、以高解析度的 HiRAM C192 (解析度為 50 公里) 的模擬資料為輔，皆為國科會 TCCIP 計畫的產出。該模式為美國地球物理流體力學實驗室所發展。由於高解析度 HiRAM 對颱風的生成、影響臺灣颱風數目的推估都模擬得不錯 (Chen and Lin, 2013)，TCCIP 計畫自第 2 期計畫開始使用 HiRAM C384 進行全球氣候推估以及後續的臺灣地區動力降尺度 (TCCIP, 2015)。

HiRAM 是個大氣環流模式 (Atmospheric General Circulation Model, AGCM)，須給定海表面溫度 (Sea Surface Temperature, SST) 來驅動它，本研究中進行歷史時期模擬時所用的海溫是觀測的海溫，執行未來暖化情境模擬時，用來驅動的 SST 是從 28 組 CMIP5 的海氣耦合環流模式模擬結果計算出來的增溫趨勢疊加上移去趨勢後的觀測年際變異。為了考慮暖化後 SST 推估的不確性，Mizuta et al. (2014) 以 RCP8.5 情境 21 世紀末的海溫推估結果進行群落分析，將 28 組未來海溫推估分三類，以進行系集模擬。我們將其所用的 28 組模式系集平均建立的海溫稱 C0，C1-

C3 為群落分析的結果建立的 3 組海溫。這四組海溫的空間分布不同但其全球平均暖化趨勢都相同，都可代表 RCP8.5 暖化情境。

Mizuta et al. (2014) 的圖 2 可以看到 4 組海溫都以赤道及北半球高緯度海域增溫較為顯著。乍看之下 4 組海溫增溫的空間分布蠻接近的，呈現如聖嬰年的海溫距平，經過檢視 C1–C3 與 C0 的差異，才比較容易看出 4 組海溫的一些差異：C1 在赤道及北半球高緯度海域增溫較弱、南半球海域增溫偏高；C2 較接近 C0 只是中太平洋赤道的溫度稍高；C3 則與 C1 相反，南半球海域增溫較少、北半球增溫較多。在臺灣及日本附近的海溫 C1 低於 C0，C2 接近 C0，C3 則高於 C0；4 組海溫變動範圍在此區約為 0.5°C。

表 1 HiRAM 模擬的系集數目以及模擬年份。

HiRAM C384	基期	21 世紀中期	21 世紀末期
模擬年分	1979-2015	2031-2065	2071-2099
不同海溫數目	1	4	4
不同初始時間	3	1	1
系集總數	3	4	4
HiRAM C192	基期	21 世紀中期	21 世紀末期
模擬年分	1979-2008	2039-2065	2075-2099
不同海溫數目	1	4	4
不同初始時間	4	4	4
系集總數	4	16	16

由於局部地區的極端事件（如颱風事件）發生的次數少，以有限的少數樣本數進行統計很難得到具有意義的統計數字，得到的

未來改變率也可能是以偏概全的結果。研究上常透過多組的模擬(常以系集模擬稱之)得到更多的極端事件模擬樣本,來減少極端事件未來推估的不確定。TCCIP 計畫也使用不同時間的大氣環流當作模擬的初始條件來進行多組的系集模擬,HiRAM C384 的基期模擬使用了 3 種不同時間的大氣環流做為模式的初始場,得到 3 組基期的推估資料。未來推估方面,由於 HiRAM C384 的 4 組不同海溫模擬的計算量大,就不再設計不同初始值的系集模擬實驗。為了增加系集模擬數目,也使用解析度稍低的 HiRAM C192 (水平解析度約 50 公里)來進行不同初始值的系集模擬。可用的系集模擬資料整理如表 1 所示。

TCCIP 計畫中執行 HiRAM 推估資料的動力降尺度,所使用的模式為美國大氣研究中心 (NCAR) 的天氣研究與預報模式系統 (Weather Research and Forecasting modeling system, WRF) 3.5.1 版本。輻射的計算則採用 NCAR 的 Community Atmosphere Model version 3 (CAM3) 的短波及長波輻射參數化,其所使用的溫室氣體濃度為 RCP8.5。HiRAM C384 降尺度的模擬範圍如圖 1a 所示,水平解析度為 5 公里,其他模式參數化的設定詳見臺灣氣候變遷推估與資訊平台建置計畫第二期 (1/3) 成果報告 (林李耀, 2014)。由於 HiRAM C192 水平解析度為 50 公里,降尺度時執行

2 巢模擬，模擬範圍如圖 1b 所示。外巢解析度 15 公里使用積雲參數化、內巢 (圖 1b 白框內) 解析度 5 公里不使用積雲參數化。HiRAM C192 的降尺度只針對颱風事件，海氣交互作用蠻重要的，所以開啟了 ocean mixed layer (OML) 海洋模組，除此之外其餘參數化設定與 HiRAM C384 降尺度相同。本文第三、四章用的推估資料都是降尺度之後的結果，若有使用到 HiRAM C192，則會以 WHiRAM C192 標示之。若無特別交代，則是以 HiRAM C384 的降尺度結果 WHiRAM C384 為主。

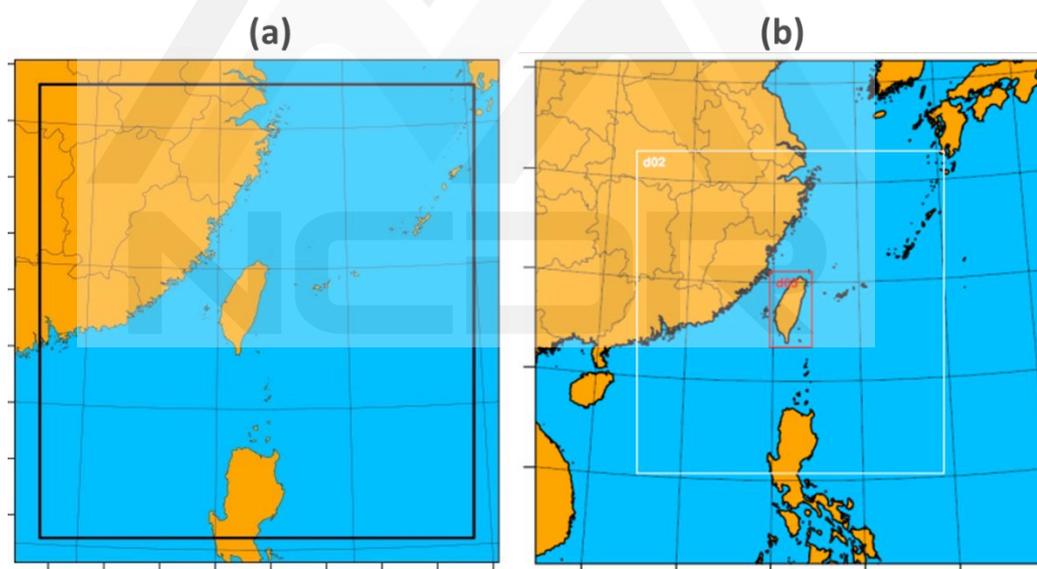


圖 1 執行動力降尺度的模擬範圍，(a) 是 HiRAM C384 降尺度、(b) 是 HiRAM C192 降尺度範圍。

除了 HiRAM 的降尺度資料，部分的分析也用到了 TCCIP 的日本超高解析度 MRI-AGCM 3.2S 動力降尺度資料(Kitoh and Endo, 2016)，之後以 WMRI 表示之。執行這部分降尺度的 WRF

模式設定與 WHiRAM C384 (模擬範圍同圖 1a) 相同，模擬的結果基期 1979–2003 有 2 組以及 4 組不同海溫暖化的世紀末 2075–2099 的推估資料。

2.2 HiRAM 的全球暖化程度計算

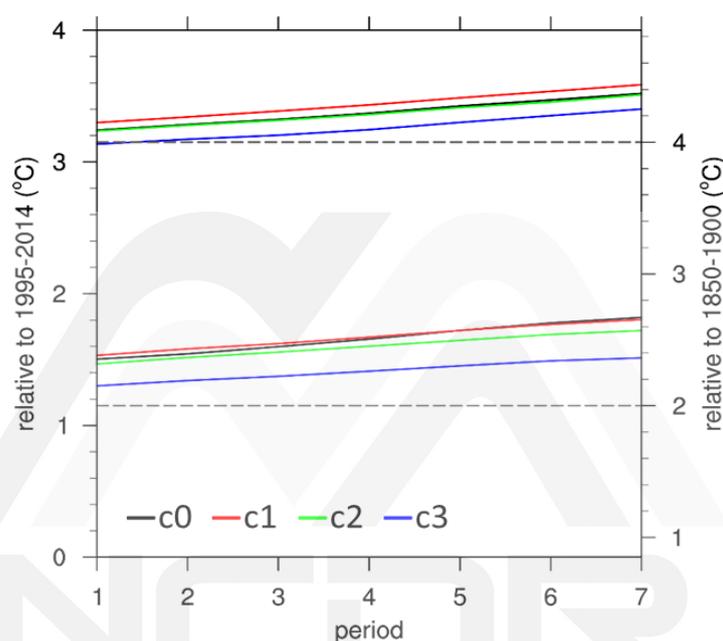


圖 2 HiRAM 四個系集成員模擬全球地表氣溫相對於基期 1995–2014 的變化 (左側 y 軸)，以及相對於 1850–1900 的變化 (右側 y 軸)。x 軸 Period 1-7 分別代表世紀中 2040–2059 (Period 1) 至 2046–2065 (Period 7)，以及世紀末 2075–2094 (Period 1) 至 2081–2100 (Period 7)。

本研究參考 AR6 使用 1850–1900 作為工業革命前基準以及 20 年時期代表氣候平均 (有別於 WMO 使用 30 年氣候平均)。定義全球暖化的計算方式為「20 年滑動平均的全球表面溫度相對於 1850–1900 的變化」，而 GWL+2°C、4°C 便是指全球暖化第一次通過 2°C 與 4°C 的 20 年時期。其中全球表面溫度有兩種選擇，一種

是使用陸地與海冰區域的 2 米氣溫及海洋的海表溫度；另一種是使用全球地表 2 米氣溫。本研究使用後者，並利用網格面積加權計算得到全球平均溫度，對 HiRAM 模擬 GWL+2°C、4°C 的時間進行評估。

表 2 HiRAM 四個系集成員模擬全球地表氣溫相對於基期 1995–2014 的變化，以及相對於 1850–1900 的變化（由觀測資料顯示 1995–2014 相對於 1850–1900 已升溫 0.85°C）。第一欄為 20 年氣候時期的起始年。黃底代表線性迴歸估計 GWL+2°C 需往前模擬到該年分。

起始年	相對於 1995–2014 溫度變化(°C)				相對於 1850–1900 溫度變化(°C)			
	C0	C1	C2	C3	C0	C1	C2	C3
2031	1.01	1.12	1.08	0.97	1.86	1.97	1.93	1.82
2032	1.06	1.16	1.12	1.01	1.91	2.01	1.97	1.86
2033	1.12	1.21	1.17	1.05	1.97	2.06	2.02	1.9
2034	1.17	1.26	1.21	1.08	2.02	2.11	2.06	1.93
2035	1.23	1.3	1.25	1.12	2.08	2.15	2.1	1.97
2036	1.28	1.35	1.3	1.16	2.13	2.2	2.15	2.01
2037	1.34	1.39	1.34	1.19	2.19	2.24	2.19	2.04
2038	1.39	1.44	1.38	1.23	2.24	2.29	2.23	2.08
2039	1.45	1.49	1.42	1.26	2.3	2.34	2.27	2.11

由於前期 TCCIP 計畫所完成的 HiRAM C384 模擬結果，只有基期 1979–2015 以及 21 世紀中(2039–2065) 及世紀末 (2075–2100) 的推估資料，由於採取模擬特定時期的時間切片(time-slice) 模擬策略，並沒有完整連續至 2100 年的模擬結果，因此計算全球暖化的方式必須有所調整。根據 AR6 指出全球觀測資料顯示基期 1995–2014 相較於 1850–1900 已升溫 0.85°C，因此 GWL+2°C、4°C 可以視為相對於基期再升溫 1.15°C 與 3.15°C。利用原有的

2040–2065 與 2075–2100 推估資料，計算每一個 20 年時期相對於基期的升溫值，評估 HiRAM C384 四個系集成員模擬通過 GWL+2°C、4°C 的時期，結果如圖 2 所示。所有系集成員在 2040–2059 皆已超過 2°C；除了 C3 模擬第一次通過升溫 4°C 發生在 2076–2095，其他系集成員在 2075–2094 皆已超過 4°C，因此多數系集成員都需要往前模擬一段時間。

表 3 與表 2 相似，黃底代表線性迴歸估計 GWL+4°C 需往前模擬到該年分。

起始年	相對於 1995–2014 溫度變化(°C)				相對於 1850–1900 溫度變化(°C)			
	C0	C1	C2	C3	C0	C1	C2	C3
2070	3.01	3.06	3.01	2.91	3.86	3.91	3.86	3.76
2071	3.05	3.11	3.05	2.96	3.9	3.96	3.9	3.81
2072	3.1	3.15	3.1	3	3.95	4	3.95	3.85
2073	3.15	3.2	3.14	3.05	4	4.05	3.99	3.9
2074	3.19	3.25	3.19	3.09	4.04	4.1	4.04	3.94
2075	3.24	3.3	3.24	3.13	4.09	4.15	4.09	3.98
2076	3.29	3.35	3.28	3.18	4.14	4.2	4.13	4.03

由圖 2 可以看出全球溫度變化接近線性，因此本研究將 2040–2065 與 2075–2100 推估的 20 年滑動平均溫度變化，以簡單線性迴歸計算線性趨勢，去估算每一個系集成員 GWL+2°C、4°C 的，如表 2、表 3 及圖 3 所示。由上述結果可知，C0 通過 GWL+2°C、4°C 時期約為 2034–2053 與 2073–2092；C1 通過的時期約為 2032–2051 與 2072–2091；C2 通過的時期約為 2033–2052 與 2074–2093；C3 通過的時期約為 2036–2055 與 2076–2095，整理如表 4。

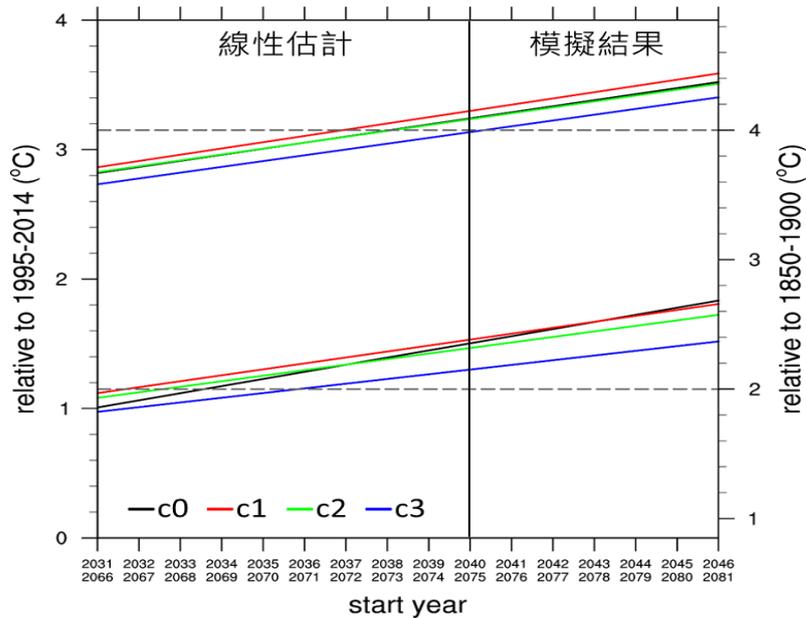


圖 3 HiRAM 四個系集成員全球地表氣溫相對於基期 1995–2014 (左側 y 軸) 以及相對於 1850–1900 (右側 y 軸) 的變化。x 軸代表 20 年氣候時期的起始年，其中 2039/2074 以前為線性迴歸估計值，2040/2075 以後為模式模擬結果。

表 4 HiRAM 四個系集成員通過 GWL+2°C、4°C 估計時間。

系集成員	GWL+2°C	GWL+4°C
C0	2034–2053	2073–2092
C1	2032–2051	2072–2091
C2	2033–2052	2074–2093
C3	2036–2055	2076–2095

為此，這一期 TCCIP 追加完成了 HiRAM C384 的 2031–2039 與 2071–2075 臺灣地區 5 公里解析度的動力降尺度資料。不過原先 HiRAM 模擬所使用的未來海溫是系集平均海溫的暖化線性趨勢，疊加上觀測的自然變異。但是此次新增的往前模擬年分則未考慮海溫的年際變化。也就是依然使用與 2038、2075 相同的海溫空間分布，只是讓海溫往前線性遞減，與該分群系集平均海溫的

暖化線性趨勢相同，如圖 4 的紅線部分所示。

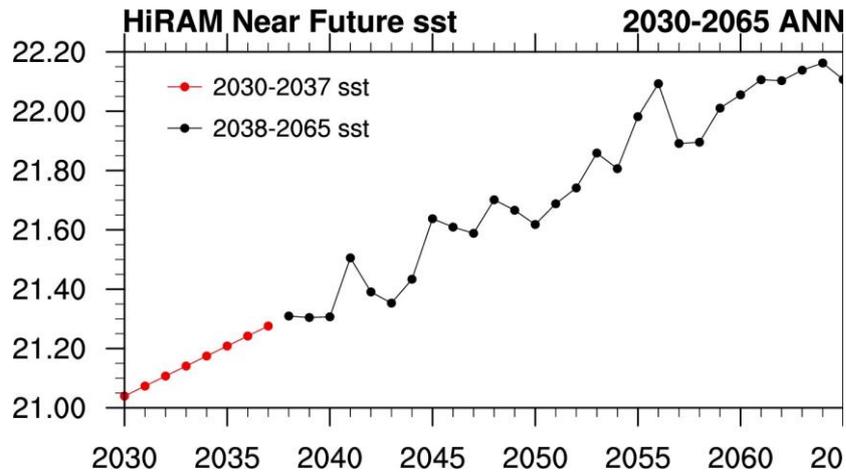


圖 4 HiRAM C0 模擬所使用海溫的全球平均逐年變化。

2.3 侵臺颱風定義與颱風風雨合成分析方法

2.3.1 侵臺颱風定義

本研究聚焦在影響臺灣的颱風，為了客觀的計算影響臺灣颱風數目，採用李和盧 (2012) 的方法將颱風中心進入距離臺灣海岸線 300 公里範圍 (如圖 5a 所示) 內的颱風定義為影響臺灣的颱風。颱風停留在此範圍的期間定義為颱風影響期間，影響期間小於 12 小時的颱風也不予考慮。觀測資料的颱風中心位置使用 The International Best Track Archive for Climate Stewardship (IBTrACS) 的最佳路徑資料 (Knapp et al., 2010)。至於模式模擬的颱風中心，先參考 HiRAM 全球模式模擬所偵測的颱風中心位置為準，在鄰近搜尋降尺度後資料的 700hPa 重力位高度的最小值所在位置來定位之。為了避免高山地形影響氣壓的計算，所以不使用海平面

氣壓來做為偵測颱風中心的參數。

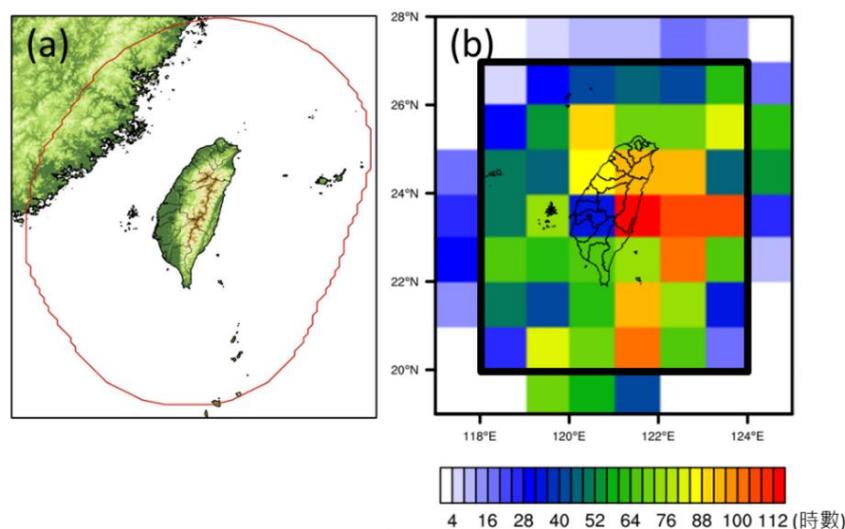


圖 5 (a) 計算影響臺灣颱風所使用的範圍。颱風中心進到紅線圈起區域的颱風才算。(b) 1979–2015 的觀測資料中，颱風中心出現次數的空間分布。黑框為分析的重點。

2.3.2 依颱風中心位置分類的颱風風雨合成分析

由於臺灣的地形高聳複雜，陸地上的颱風風雨的空間分布與颱風中心所在的相對位置有很大的關係，颱風過山前後的風雨強度落差很大，整個侵臺時期的平均值並無法呈現颱風對局部地區的衝擊。所以本研究在計算颱風風雨的氣候統計值時，在 117–125°E、19–28°N 以 $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ 的網格 (如圖 5b 所示，共有 $8 \times 9 = 72$ 個網格) 區分颱風中心所在的位置。使用整個氣候時期中的每小時資料，在颱風中心進入 $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ 網格時的資料分別進行合成分析，也就是分別進行 72 次的合成分析，得到 72 張颱風風雨氣候值的空間分布圖。如圖 6 所示為 72 張 1995–2014 觀測颱風的平均降

雨強度的空間分布。

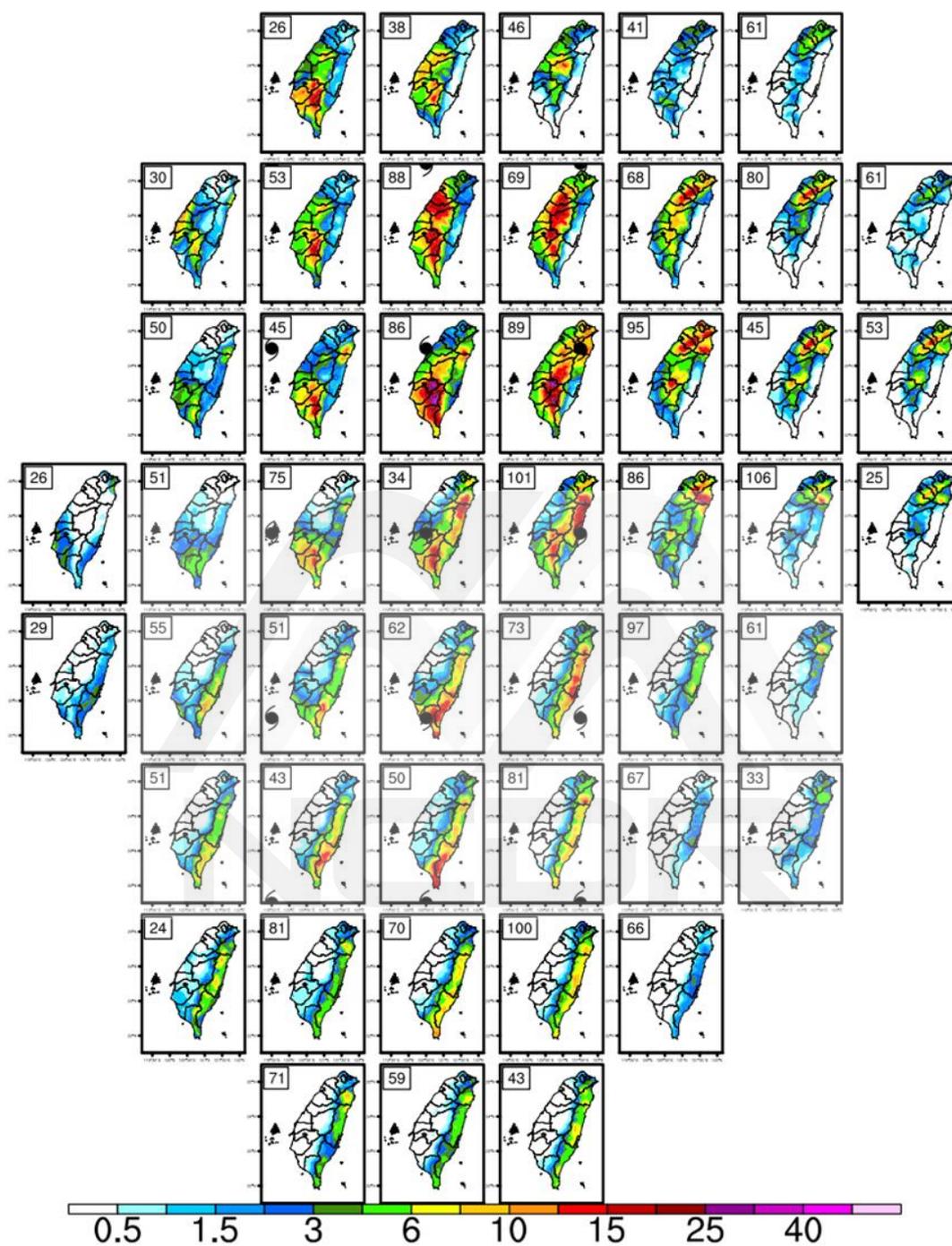


圖 6 1995–2014 觀測颱風中心在不同位置時的平均降雨強度空間分布。左上角的數字為參與平均值計算的颱風時數，颱風標誌標示著颱風所在位置。圖幅的配置對應著颱風中心在圖 5b 的網格位置。

第三章 全球暖化情境下的影響臺灣颱風

3.1 影響臺灣颱風統計值的時間序列

在 IPCC 報告中用 4 個指標，颱風頻率、強烈颱風頻率、近中心最大風速、降雨量，來呈現受到全球暖化影響下的影響臺灣颱風的變化趨勢。HiRAM C192 的颱風數目高估許多，不適合進行颱風頻率的相關分析，故本節以分析 HiRAM C384 的結果為主。本節也使用 GWL 全球暖化程度與設定 20 年的固定年分來探討這 4 個指標使用不同氣候時期所得到的結果。首先檢視颱風頻率。表 5 中統計了觀測資料、HiRAM C384 模式推估基期與暖化情境下不同氣候時期的每年影響臺灣颱風數目，統計的年分有根據 GWL 的標準、也有過去常用的取一段固定年分的時期的作法。根據基期與觀測資料的比較，在不同氣候時期模式時有高估、有低估，偏差值約在 10% 以內。在未來暖化影響下，推估的颱風數目呈現減少的趨勢，世紀中 2040–2065 與 GWL+2°C 的減少頻率相差不多，大約在 -10% 左右；世紀末 2075–2099 與 GWL+4°C 的減少頻率也相差不多，大約在 -50 至 -55% 之間。

雖然表 5 中的統計數值相近，中、長期的頻率在四捨五入到小數一位後是一樣的，為了檢視因氣候時期的取法不同而造成統計數值的差異，在此先將每個系集成員的 4 個指標的年平均時間序

列畫出。因為在 IPCC 報告中所使用的氣候時期至少是 20 年，所以也疊上了計算 20 年的滑動平均來顯示 20 年的氣候統計值，如圖 7 中所示，每個點代表著該年往前、後各取 10 年的平均值。

表 5 基期與升溫情境下每年影響臺灣颱風頻率 (單位：場/每年)、百分比為基期偏差 (相較於觀測值) 與未來改變率 (相較於基期)。括弧內標示氣候時期年分的取法。

氣候時期	觀測	基期系集	中期系集	長期系集
GWL	(1995–2014) 5.2	(1995–2014) 4.96 -8.5%	(GWL+2°C) 4.29 -10.4%	(GWL+4°C) 2.22 -52.1%
固定年分	(1979–2015) 4.7	(1979–2015) 4.88 +3.2%	(2040–2065) 4.33 -11.4%	(2075–2099) 2.24 -54.1%

由圖 7a 可以看出颱風頻率每年的變異度很大，觀測的氣候值呈現持續增加，說明雖然表 5 中的統計數值相近，中、長期的頻率在四捨五入到小數一位後是一樣的，為了檢視因氣候時期的取法不同而造成統計數值的差異，在此先將每個系集成員的 4 個指標的年平均時間序列畫出。因為在 IPCC 報告中所使用的氣候時期至少是 20 年，所以也疊上了計算 20 年的滑動平均來顯示 20 年的氣候統計值，如圖 7 中所示，每個點代表著該年往前、後各取 10 年的平均值。

表 5 中 2 個觀測的統計值有所不同，往前統計到 1979 的數值會少一些。不過每年的觀測值在 2005 後有減少的趨勢，此趨勢的

持續或許將會讓滑動平均值開始呈現下降趨勢。這裡可看到觀測的滑動平均的變動，顯示存在著長於 20 年周期的變化。至於基期模擬的氣候值相對比較穩定，滑動平均看不出明顯的變化趨勢，這也解釋了雖然表 5 中的統計數值相近，中、長期的頻率在四捨五入到小數一位後是一樣的，為了檢視因氣候時期的取法不同而造成統計數值的差異，在此先將每個系集成員的 4 個指標的年平均時間序列畫出。因為在 IPCC 報告中所使用的氣候時期至少是 20 年，所以也疊上了計算 20 年的滑動平均來顯示 20 年的氣候統計值，如圖 7 中所示，每個點代表著該年往前、後各取 10 年的平均值。

表 5 中 2 個基期的統計值是差不多的。3 個成員滑動平均的系集平均在 1988–2005 間的趨勢是每年增加 0.01 個。不同氣候時期的選擇對基期颱風頻率的統計結果並不會有太大的影響。

雖然不同系集成員間未來颱風頻率有明顯差異，但是每個成員滑動平均的趨勢較觀測的小，4 個成員滑動平均的系集平均在 2040–2055 間的趨勢是每年增加 0.007 個。世紀末的颱風頻率，滑動平均的趨勢受到 C3 在 2083 之前顯著下降的影響，其他成員的趨勢相對小很多，滑動平均的系集平均在 2080–2089 趨勢是每年

減少 0.05 個，2084–2090 的趨勢是每年減少 0.02 個。除了世紀末 2083 之前的氣候值有較大減少趨勢外，其他成員的滑動平均（氣候值）的年變化並無明顯的趨勢。

圖 7b 呈現的是強烈颱風頻率，由於頻率小，這裡只看滑動平均的結果。觀測的強颱頻率在進入 21 世紀初增加了不少，有顯著的短期趨勢。模式推估結果大致維持一穩定的狀態，無論是基期、世紀中、世紀末，各時期內皆無顯著的短期趨勢。不過系集成員間的推估差異頗大，這也凸顯出系集模擬的重要性，對於發生頻率低的極端事件，依賴單一的模擬結果容易出現偏差而不自覺。雖無短期內的趨勢，世紀中、末時期的強颱頻率相對於基期推估增加了不少，世紀中各系集成員間差異頗大，系集平均增加快一倍；世紀末各系集成員間的差異較小，平均來看也增加約一半。

至於影響臺灣颱風的降雨量指標，本節計算推估模擬中颱風暴風半徑 200 公里內的每小時累積雨量的區域平均值，並計算每年所有颱風影響時期的平均值，颱風影響期間越長其佔平均值的權重越大，結果如圖 7c 所示。風力指標方面則是取每年影響期間颱風風力最強當下的近中心最大風速（離地 10 米風場）進行平均，每一場颱風的權重都一樣，結果如圖 7d 所示。

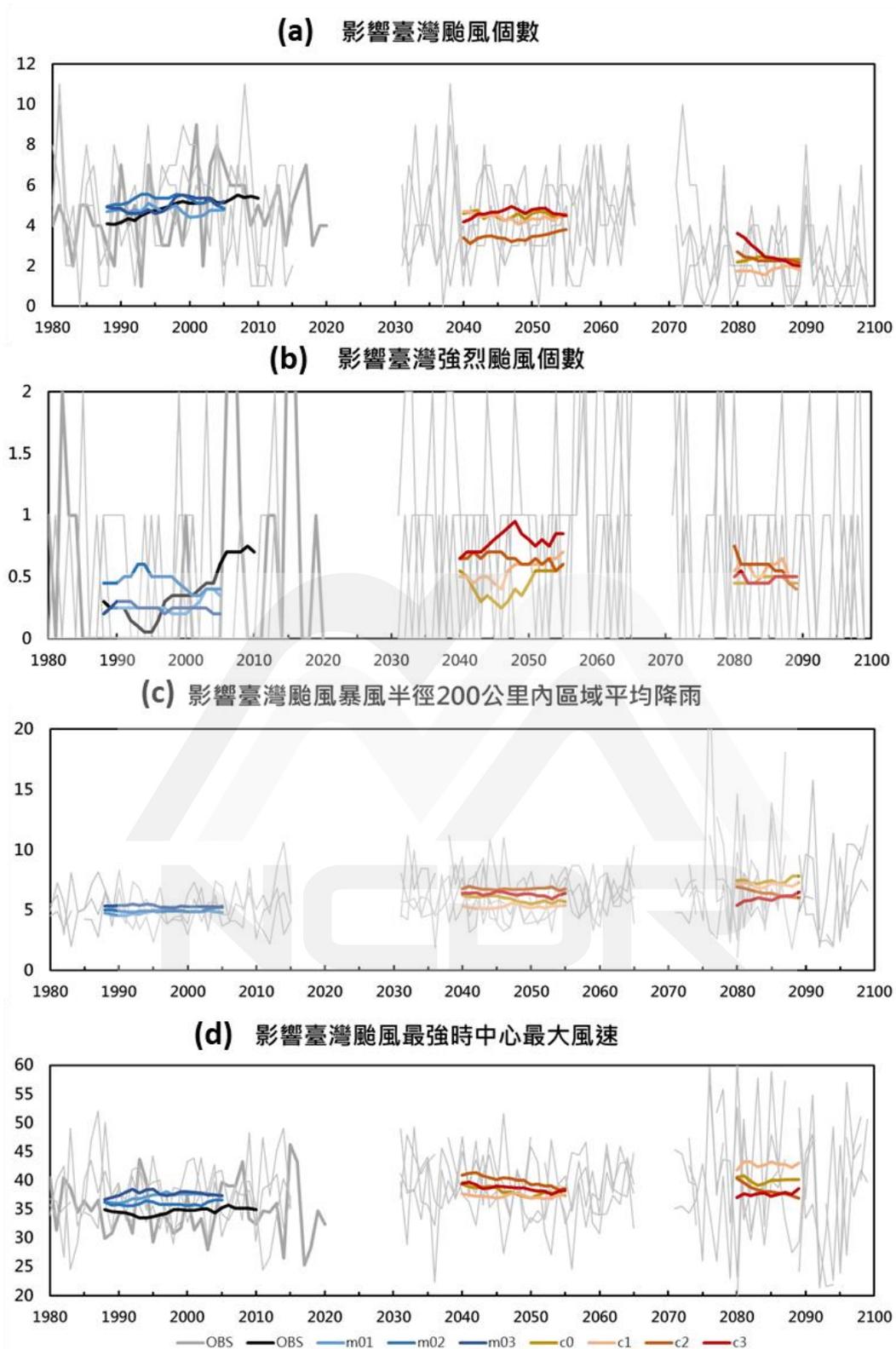


圖 7 每年影響臺灣颱風的 (a) 所有颱風頻率、(b) 強烈颱風頻率、(c) 平均降雨強度、(d) 近中心最大風速的平均，單位分別是次數/年、次數/年、mm/hr、m/s。粗灰線為觀測值、細灰線為每個系集成員模擬結果；粗黑線為觀測值的 20 年滑動平均，粗藍、橘、紅、棕線為每個系集成員模擬的 20 年滑動平均。

在圖 7c 中顯示出颱風降雨年變異度很大，受到暖化的影響，變異度在世紀中、世紀末的模擬也是越來越大，標準差相較基期分別增加了 23%、142%。滑動平均也顯示不同時期颱風降雨的平均值也是受到暖化的影響而增加。至於滑動平均的線性趨勢，比較大的趨勢是 C0 世紀中每年減少 0.8%、C2 世紀末每年減少 1.6% 與 C3 世紀末每年增加 1.4%。其他組模擬的線性趨勢就遠小於每年 1%，所以任意選用氣候時期的氣候值差異也就比較小。

至於颱風風力，圖 7d 中的變異度在世紀中無顯著變化、但是在世紀末標準差增加了 90%。只看滑動平均可看到未來颱風風力稍有增加，世紀末系集成員之間的差異性大，颱風數目最少的 C1 風力增強最明顯。至於滑動平均的線性趨勢，比較大的是 C2 的世紀末每年減少 0.9%，世紀中看似有減弱的趨勢，但其數值都小於每年 0.5%。基期 3 組的線性趨勢就更小，小於每年 0.25%，任意選用氣候時期氣候值的差異也就比較小。

3.2 影響臺灣颱風未來改變率的機率分布

本節中以盒鬚圖來呈現 4 個颱風指標定量的變化的統計分布以及其變動範圍的大小（降雨為颱風最強時距颱風中心半徑 200km 內的區域平均降雨，與前一節使用所有颱風影響期間有所

不同)，並比較 GWL 與傳統固定年分 (世紀中 2040–2059、世紀末 2080–2099) 的選取對統計結果的影響。圖 8 是 4 個颱風指標在 2040–2059、GWL+2°C、2080–2099、GWL+4°C 相對於基期 1995–2014 的改變率，使用的氣候時期年分都是 20 年。在本節中，為了計算繪製盒鬚圖所需不同百分位的大小，我們採取隨機重複取樣的方法。將所有系集成員符合的年分視為樣本放在一起，一共有基期 $20 \times 3 = 60$ 年、未來 $20 \times 4 = 80$ 年的樣本，隨機抽樣出基期與未來各 20 年，分別計算抽出的 20 年的平均值後，再計算相對於基期的改變率。如此重複取樣 1 萬次，以期得到較完整的改變率的機率分布，再取其 95、75、50、25、5 百分位製成盒鬚圖。

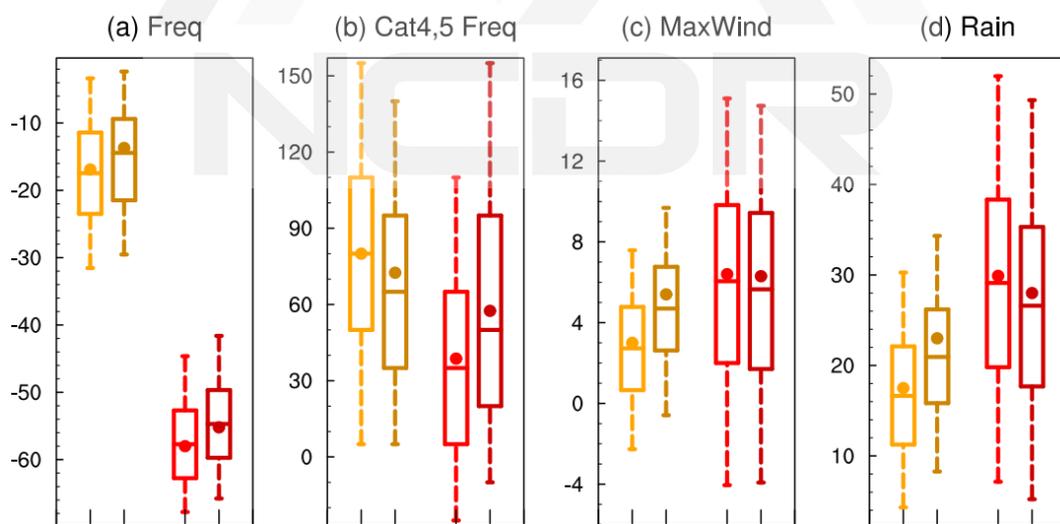


圖 8 WHiRAM C384 中，(a) 影響臺灣颱風頻率、(b) 強颱風頻率、(c) 颱風最強時近中心最大風速、(d) 颱風最強時距中心 200km 內平均雨量在 2040–2059 (黃色)、GWL+2°C (棕色)、2080–2099 (紅色)、GWL+4°C (暗紅色) 相對於基期 1995–2014 改變率的盒鬚圖。圓點表示平均值，盒鬚圖表示 95、75、50、25、5 百分位 (單位：%)。

圖 8 顯示 4 個指標改變率的不確定性，以強颱風頻率改變率的

不確定性最大，其次是降雨改變率。強颱風頻率改變率的盒子大小(第 75 與第 25 百分位的差距) 將近有 60%、鬚的長度(第 95 與第 5 百分位的差距) 將近有 150%；降雨改變率的盒子大小將近有 20%、鬚的長度將近有 40%。比較 GWL 與固定 20 年之間的差別(中期為 GWL+2°C 對比 2040–2059、長期為 GWL+4°C 對比 2080–2099)，颱風頻率在中、長期的比較都相差不大，長期的風、雨亦相差不大，至於其他指標或氣候時期的差異就比較大，不過彼此的中位數都還可以落在對方的第 75 與第 25 百分位之間。

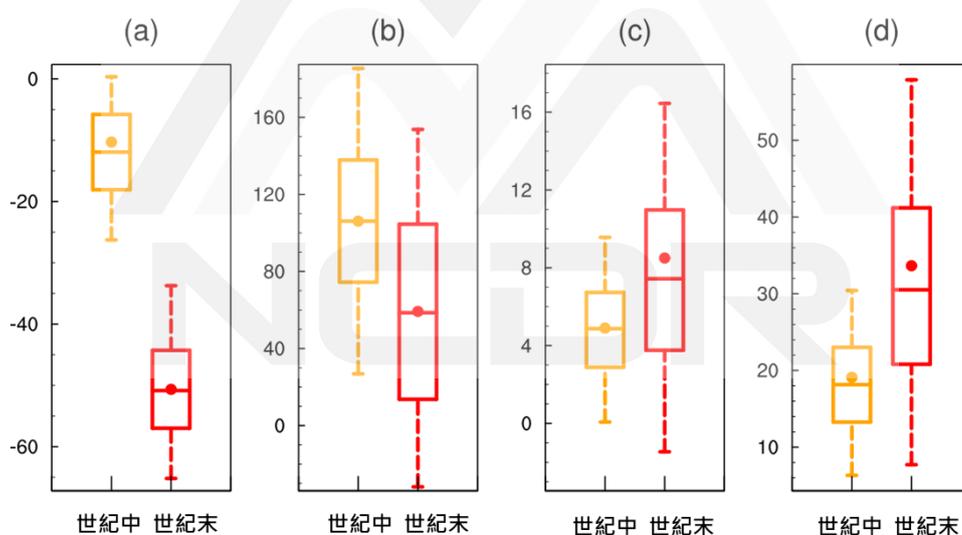


圖 9 同圖 8，只是為世紀中 2031–2065 與世紀末 2071–2099 相對於基期 1979–2015 的未來改變率，世紀末改變率一併整合 WMRI 的推估結果。

這裡也另外分析包含更多年分的資料，盡可能地增加颱風的樣本數目，也加入另一個模式 WMRI 的資料，所繪製的盒鬚圖如圖 9 所示。圖 9 中使用了 WHiRAM C384 2031–2065 (以世紀中標示) 與 2071–2099 (以世紀末標示) 相對於 1979–2015 的未來改變

率，世紀末的部份一併整合了 WMRI 世紀末 2075–2099 相對於 1979–2003 的未來改變率。圖 9 顯示 4 個指標中，改變率最大的是世紀末颱風個數、以及世紀中的強颱風頻率；最大風速的改變率最小，其中以強颱風頻率的不確定性最大。以平均值的結果來看，世紀中與世紀末颱風個數減少分別約 10%、50%；強颱風出現的頻率增加約 105%、60%；最大風速增加約 5%、9%；颱風降雨增加約 20%、35%。由圖 7ab 中各系集成員差異大可以推論導致颱風頻率變化差異的主要來源，很大的原因來自使用了不同的海溫暖化空間分布。因為較長基期的颱風頻率比較高，圖 9a 的未來改變率也比圖 8a 的稍為小了一些。

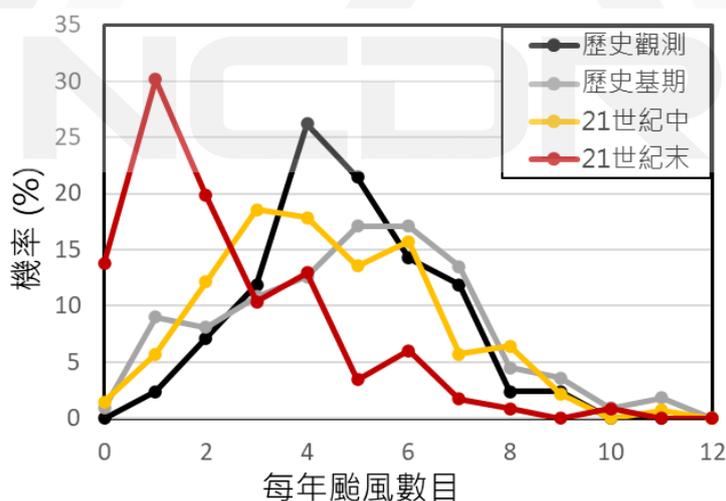


圖 10 影響臺灣颱風頻率所發生的機率（出現的年數除以全部年數）。其中黑色為歷史觀測（1979–2020）、灰色為模式歷史基期（1979–2015）、黃色為 21 世紀中（2031–2065）、紅色為 21 世紀末（2071–2099）。

前述颱風頻率的變異度很大，為了看出最常出現的頻率，我們將影響臺灣颱風頻率的 histogram 畫出來，將頻率發生的機率以

折線圖表示之。圖 10 中的橫軸表示每年發生的次數，縱軸為頻率所發生的機率（出現的年數除以全部年數）。可以看到觀測資料中最常出現的頻率是每年 4 次，基期推估的為每年 5 次，世紀中降為每年 3 次，到了世紀末最常出現的是每年只有 1 場颱風來訪，甚至有 15% 的年分沒有受到颱風的影響。可預期颱風降雨所帶來水資源的減少。



第四章 臺灣陸地上的颱風風雨變遷

4.1 颱風降雨改變率

雖然在前一章節提到 HiRAM C192 的颱風頻率高估許多，所以不參與分析。不過都是在 RCP8.5 的暖化環境下產生的颱風，其颱風的風、雨強度的模擬仍具參考價值。分析不同時期 HiRAM C192 中所有系集、所有颱風場次 (基期 705 場、世紀中 2328 場、世紀末 1360 場)、所有影響臺灣期間降尺度資料的合成平均值，可以得到颱風風雨的改變，如圖 11 所示。

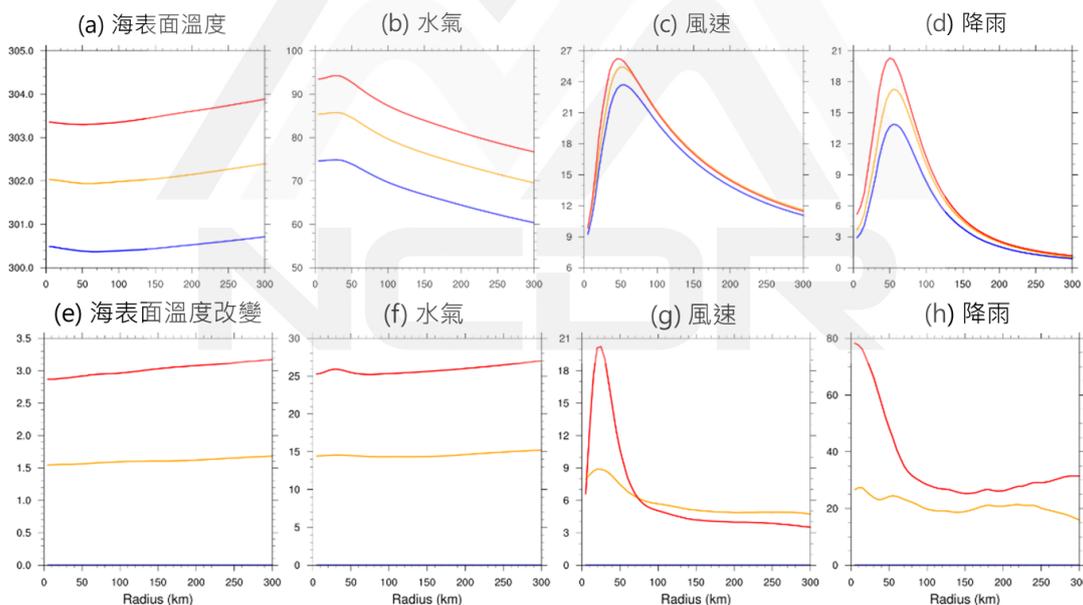


圖 11 HiRAM C192 中所有影響臺灣颱風合成的海表面溫度 (單位: K)、垂直層水氣 (單位: mm)、地面風速 (單位: m/s)、降雨 (單位: mm/hr) 在徑向分布以及未來的改變量與改變率 (單位: %), 橫軸是距颱風中心的距離 (單位: 公里)。藍、黃、紅線分別為基期、世紀中、世紀末的推估結果。

圖 11 呈現的是以各項變數的徑向 1 維空間分布，原點是颱風中心，橫軸是距颱風中心的距離，縱軸表示各變數合成平均後的

數值大小。可看到世紀中、世紀末的海表面氣溫相對於基期 1979–2008 分別增加了約 1.5°C、3°C，水氣量增加約 15%、25%。颱風風雨最大的眼牆約出現在距中心 50 公里處，眼牆處的風力約增加了 7%、10%，眼牆降雨增加了約 25%、50%，眼牆外的降雨約增加 20%、30%。風、雨的改變率都落在圖 9 的盒鬚圖的範圍中。

相對於前述以颱風中心定位進行合成分析的結果，更令人關心的是陸地上颱風風雨變化的空間分布。圖 11h 顯示颱風中心附近降雨強度在中期、長期可增加 25%、50%，但在台灣陸地上的颱風降水改變率是否也是如此？此節分析臺灣陸地上的颱風降雨改變率，比較在 GWL+2°C、4°C (相較於 1995–2014) 與固定年分 2040–2059、2080–2099 (相較於 1995–2014) 推估中，颱風降雨改變率的異同。由於 HiRAM C192 無法參與 GWL 的分析，以下分析比較皆使用 HiRAM C384 的推估結果。所分析的平均每場颱風降雨為氣候時期颱風總降雨量除上颱風場次 (圖 12a–d)，平均每年颱風降雨為氣候時期颱風總降雨量除上年分 (圖 12e–h)。

將 GWL 與固定年分的平均每場颱風降雨改變率進行比較，發現它們的空間分布大致相似。臺灣西北部的平均每場颱風降雨量在中期先減少，而後在長期推估中大幅增加，尤其在中部地區最

明顯，長期的降雨增加程度均可超過 50%以上；東南部降雨雖也是增加，但增加量小於 50%，且中期增加地比長期推估多。

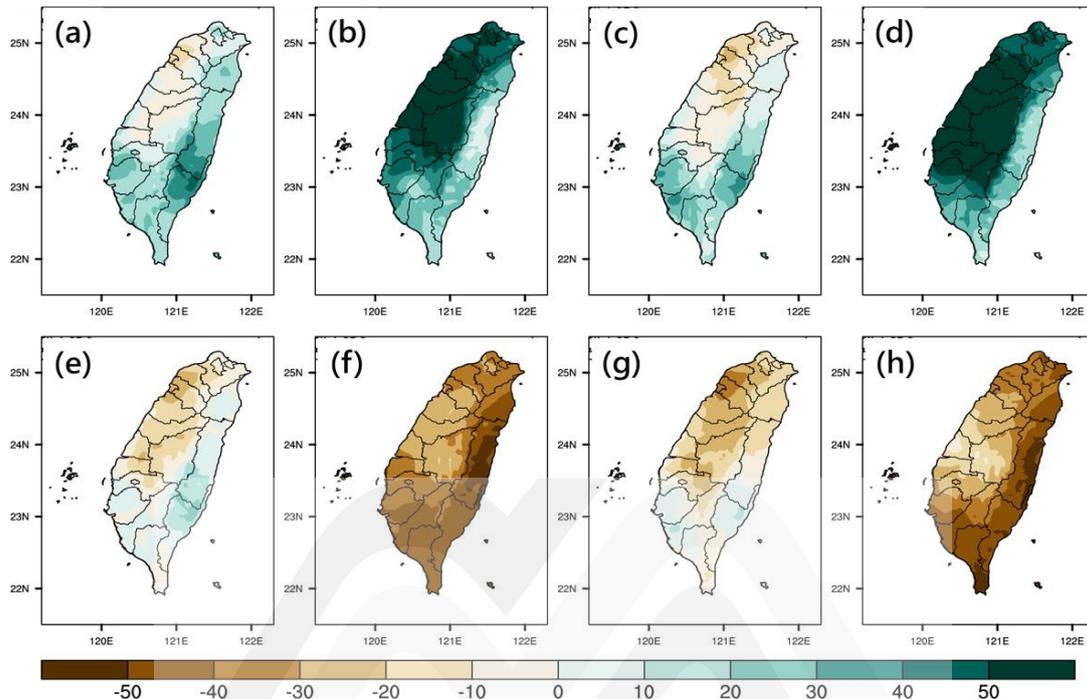


圖 12 (a)–(d)為單場次平均颱風降雨的改變率、(e)–(h)為每年平均颱風降雨改變率，單位：%。順序由左至右圖(a)與圖(e)為 GWL+2°C、圖(b)與圖(f)為 GWL+4°C相較於 1995–2014 的改變率；圖(c)與圖(g)為 2040–2059、圖(d)與圖(h)為 2080–2099 相較於 1995–2014 的改變率。

中期西北部降雨的減少與長期東南部降雨的增加偏少，這類空間上不均勻的變化應與颱風路徑的改變有關。圖 13 是颱風路徑密度的空間分布，為颱風中心在該網格出現的次數除上全區域颱風次數的總和。可以看到長期推估在東南部海域的路徑密度比基期的少，意味著颱風中心在東南沿海出現的比重減少，解釋了為何台灣東南部陸地降雨的增加量偏低；而颱風中心進入北部陸地的比例增加，更是有利西半部降水的增加。至於中期推估中，颱風中心出現在北海岸沿岸的比重降低，這會導致西北部颱風降

雨的偏少。GWL 的颱風路徑密度分布與圖 13 類似，其改變對降雨改變率的空間分布的影響也是一樣，就不在此另外討論。

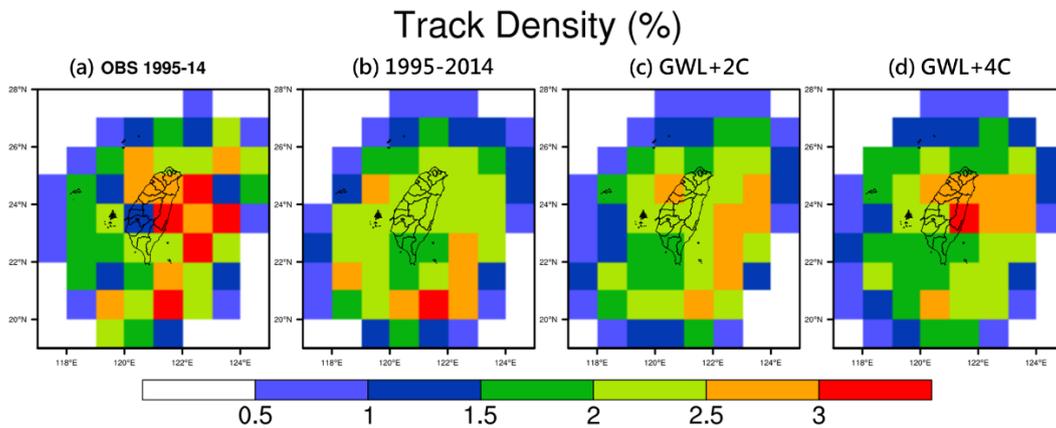


圖 13 觀測與系集推估的影響臺灣颱風路徑密度空間分布，單位：％。(a) 1995–2014 觀測、(b) 1995–2014、(c) GWL+2°C、(d) GWL+4°C。

至於颱風年總降雨改變率，GWL+2°C的改變率呈現西北部減少、東南部增加的趨勢外（圖 12e），GWL+4°C呈現全島都減少的趨勢，東南部減少較多（圖 12f）。2040–2059 與 2080–2099 皆呈現全島減少趨勢，長期減少的較多，東南部減少得比西北部更為明顯（圖 12h）。颱風年總降雨改變率在空間中相對的分布情況其實跟每場颱風降雨的改變相似（圖 12a–d），還是受到路徑改變的影響，主要呈現中期的西北部較少、東南部較多；長期的西北部較多、東南部較少。這裡年颱風雨量的減少，除了前述颱風路徑改變的影響之外，主因還是受颱風頻率減少所導致（圖 8a），長期颱風頻率減少約 50%、中期減少約 10%，導致世紀末與 GWL+4°C 減少得比世紀中與 GWL+2°C 還多。

4.2 依據颱風位置分別計算颱風風雨改變率

前一節顯示局部地區的降水變化，除了跟颱風本身的降水能力增加之外 (如圖 11h)，還受到颱風路徑的影響。為了去除颱風路徑對降雨變化計算的影響，這裡使用 2.3.2 節提到的合成分析方法，計算基期推估與未來推估資料 72 個不同颱風中心位置的颱風降雨平均時雨量的空間分布，再以其算出 72 個未來颱風降雨改變率的空間分布，部分的結果如圖 14、圖 15 所示 (只呈現部分 $6 \times 7 = 42$ 幅圖)。為避免小雨計算出大的改變率，平均雨量小於 1 mm/hr 的資料不參與改變率的計算。

得到如圖 14、圖 15 的 72 個未來颱風降雨改變率的空間分布之後，可以看到大部分都是呈現降雨增加，但也是有部分出現減少，其中很多是出現在離颱風中心較遠的網格點，屬於颱風外圍環流降雨。為了簡化問題，這裡只討論颱風中心附近的降雨，篩選濾除離颱風中心 250 公里外的降雨不予考慮。濾掉颱風外圍降雨後，再將 72 張颱風降雨改變率的空間分布圖平均起來，得到如圖 16a-c 所示的長期颱風降雨改變率的平均值。另外也將全部 72 張在陸地上網格點 (約 1600 格點) 的颱風降雨改變率作為樣本 (共有 $1600 \times 72 = 115200$ 個改變率，再扣掉颱風外圍的部分)，以其繪製降雨改變率的盒鬚圖 (圖 16d) 以及機率分布函數 (圖 16e)。

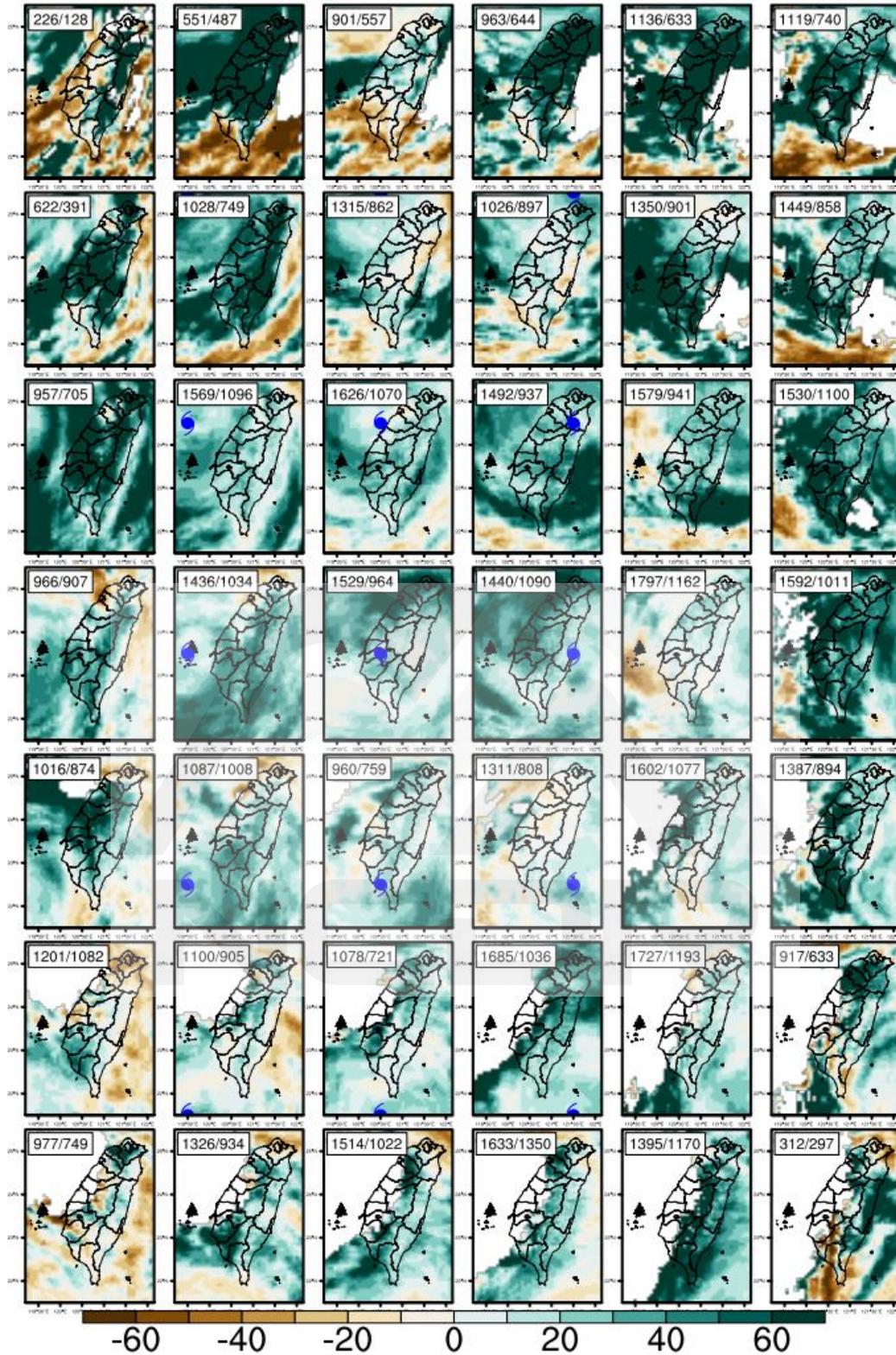


圖 14 類似圖 6，只是變數改為未來 2039–2065 相對於基期 1979–2015 的颱風降雨平均時雨量改變率，單位：%。左上角的 2 個數字為參與平均值計算的颱風時數（未來/基期）。颱風標誌標示著颱風中心位置，圖幅的配置對應著颱風中心在圖 5b 粗黑框線內的網格位置。

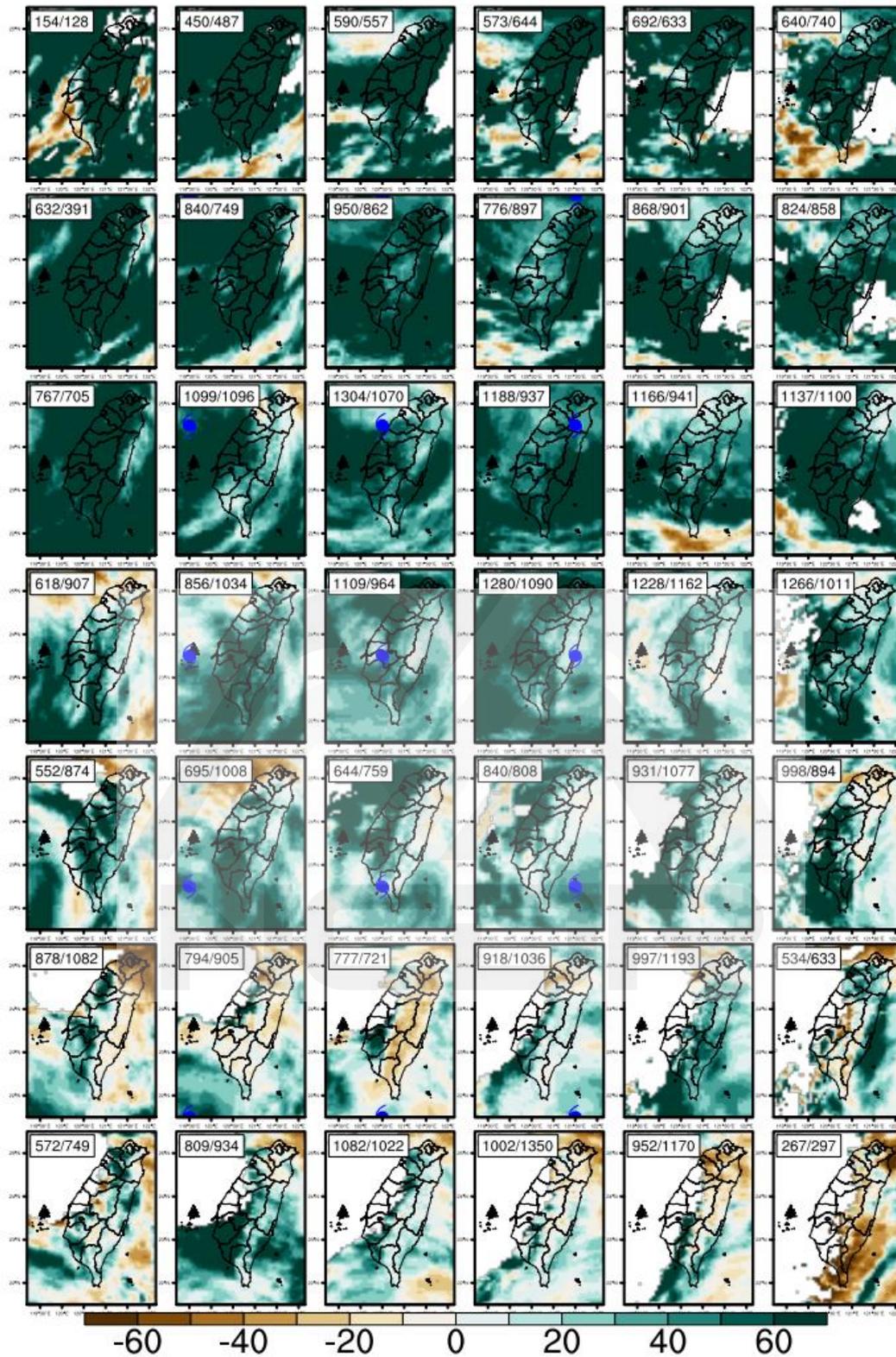


圖 15 同圖 14，只是變數改為未來 2075–2099 的颱風降雨平均時雨量改變率，單位：%。左上角的 2 個數字為參與平均值計算的颱風時數（未來/基期）。

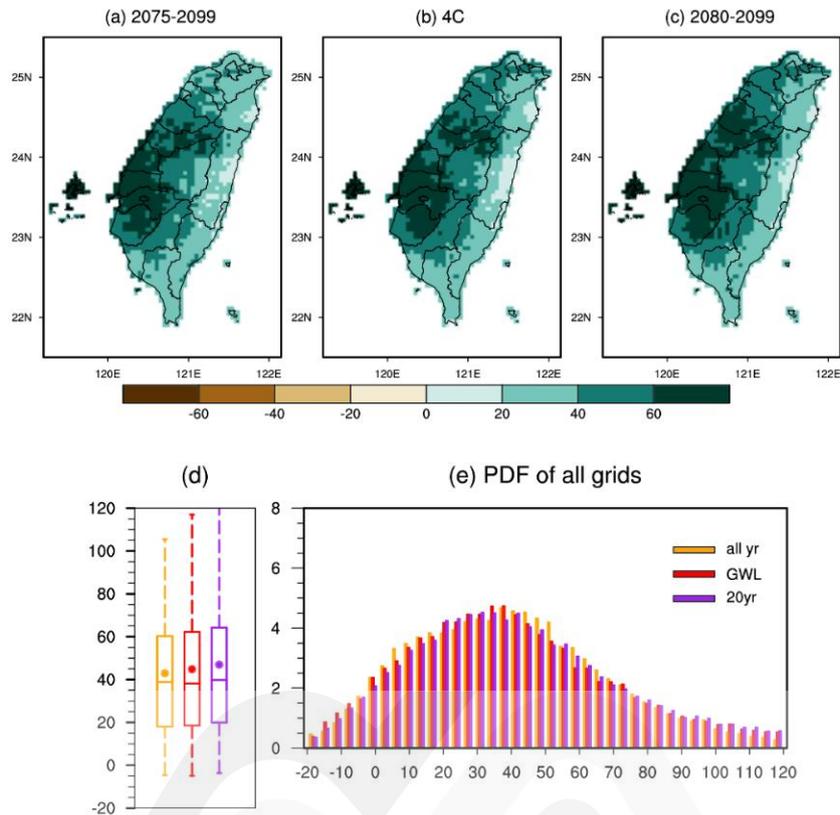


圖 16 長期颱風平均時雨量的改變率，單位：%。(a) 為 2075–2099 相對於 1979–2015、(b) 為 GWL+4°C、(c) 為 2080–2099 相對於 1995–2014 的改變率。(d) 為圖 a–c 的 3 個時期改變率的盒鬚圖，呈現改變率的第 95、75、50、25、5 百分位，圓點表示系集平均、(e) 為改變率的機率密度函數。圖 d 與圖 e 中的黃、紅、紫色分別代表圖 a–c 的 3 個氣候時期。

圖 16a–c 是 3 個不同氣候時期取法下的長期颱風降雨改變率的平均值，已經不受長期颱風路徑改變的影響。可以看 3 張圖呈現的主要特徵相同，西部的降雨改變率大於東部，比較大的數值出現在苗栗到台南間的平地。一般而言山區降雨量大於平地，增加的百分比雖然沒平地多，增加的絕對量還是比較可觀的。由 PDF (圖 16d、e) 可以看到長期的降雨改變率雖仍有負值出現，但是絕大多數都是正值，有一半集中在 20%–60% 之間 (圖 16d)，中位數與平均值約為在 +40%。3 種氣候時期的分法結果相差並不

大，2080–2099 的年分比其它 2 種算法相較於基期更久遠，改變率也稍微多了點。

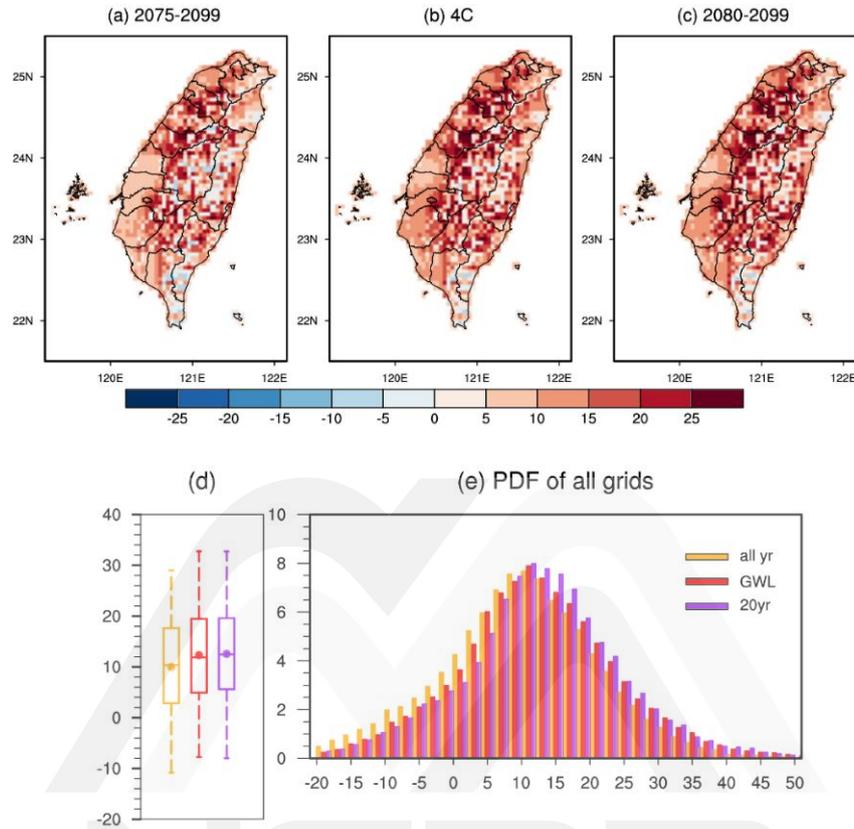


圖 17 同圖 16，只是變數為地面風速的改變率。

除了計算降雨改變率，相同的方法也可應用來分析每小時的地面風速改變率，結果如圖 17 所示。風力增加比較多的地方比較沒有明顯的空間分布特徵，約略是山區多於平地、台中以北的縣市增加比較多一點。風力變化大多是增加的，有一半集中在 5%–20% 之間 (圖 17d)，中位數與平均值約為在 +12% 左右。跟雨量一樣，風力的變化，3 種氣候時期的分法結果相差不大，2080–2099 的年分比其它 2 者更遠，風力改變率也稍大了些。

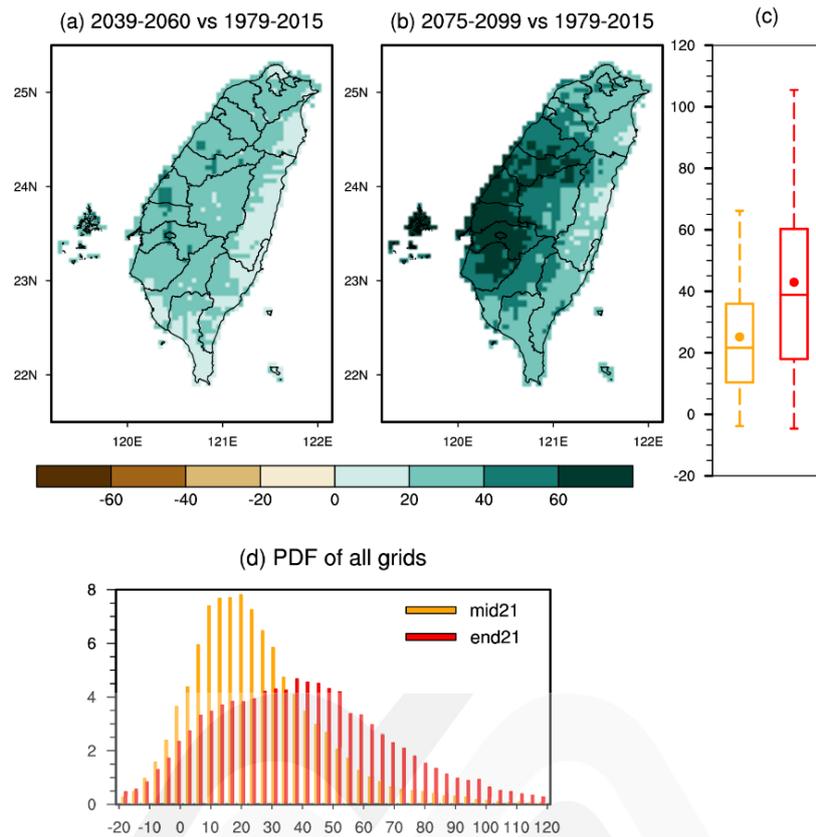


圖 18 中、長期影響臺灣颱風的降雨改變率，單位：%。(a)、(b) 為 2039–2060、2075–2099 相對於 1979–2015 的改變率，(c) 為降雨改變率的盒鬚圖，呈現改變率的第 95、75、50、25、5 百分位，圓點表示系集平均、(d) 為降雨的改變率的機率密度函數。圖(c)與圖(f)中的黃、紅色分別代表圖(a)–(c)中期、長期。

既然不同氣候時期的取法對前述風、雨的改變率的計算並沒有太大的影響，接著我們便以所用資料長度較長的取法，來比較中期 2039–2060、長期 2075–2099 相較於基期 1979–2099 的颱風風、雨的改變率，結果如圖 18、圖 19 所示。降雨方面中期的結果跟長期的類似，還是西岸大於東岸，中期降雨改變率的中位數與平均值約為 22%與 25%、長期約為 40%與 45%。可以看到相較於中期，長期的改變率 PDF 除了往右移之外，離散度也比中期的增加不少，有 1/4 樣本的改變率超過 60%。風力方面，中期改

變率的中位數與平均值約為 8%、長期約為 10%。相較於中期，長期的改變率 PDF 除了往右移之外，離散度並沒有增加太多

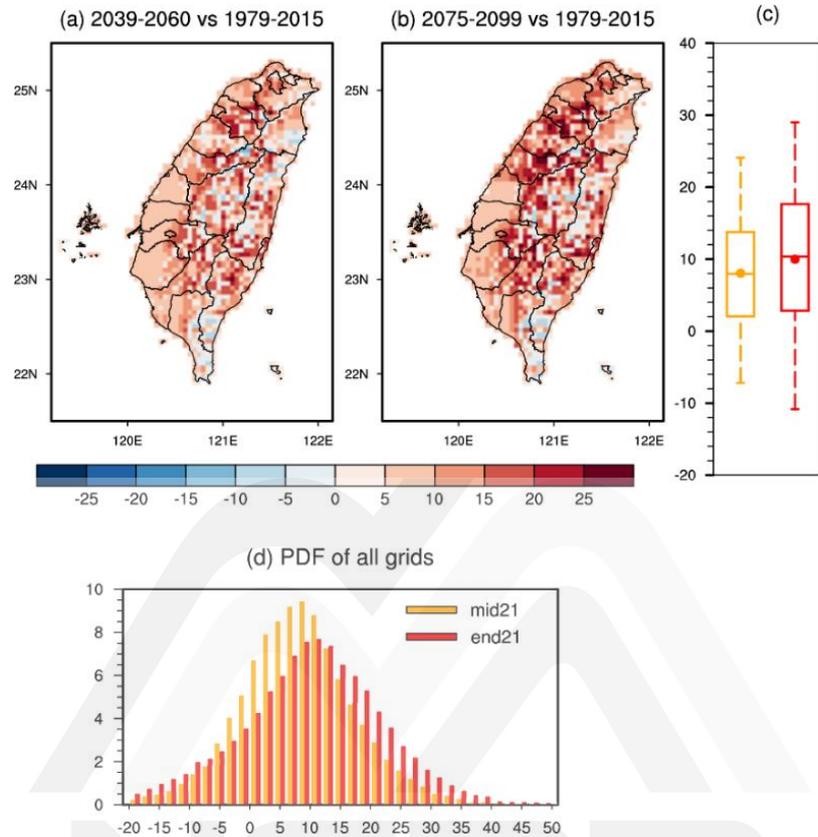


圖 19 同圖 18，只是變數為地面風速的改變率。

4.3 固定颱風路徑下的未來颱風總降雨改變率

前一節所算的颱風降雨強度改變率並無法告訴大家未來颱風總雨量的變化情況，因為總雨量累積的計算牽涉到颱風路徑、停留的時間，也就是圖 13 所呈現的訊息。也正因為圖 13 中未來推估的路徑密度改變不確定性太大，這些改變目前我們認為尚屬颱風路徑模擬的誤差範圍，沒太多物理意義，所以在前一節濾掉它

的影響。在本節為了呈現颱風總雨量，我們捨棄使用推估的颱風路徑，改以歷史颱風資訊建製未來颱風總雨量。這裡使用了類似圖 6 的觀測平均颱風時雨量只是基期改用 1979-2015，分別乘上圖 14、圖 15 的未來颱風時雨量改變率，再乘以圖 5b 上的數值除以總年分 37 年（亦即每年的平均時數）作為權重，再累加各不同颱風位置所貢獻的雨量，建置出固定颱風路徑下的未來平均每年颱風總雨量。

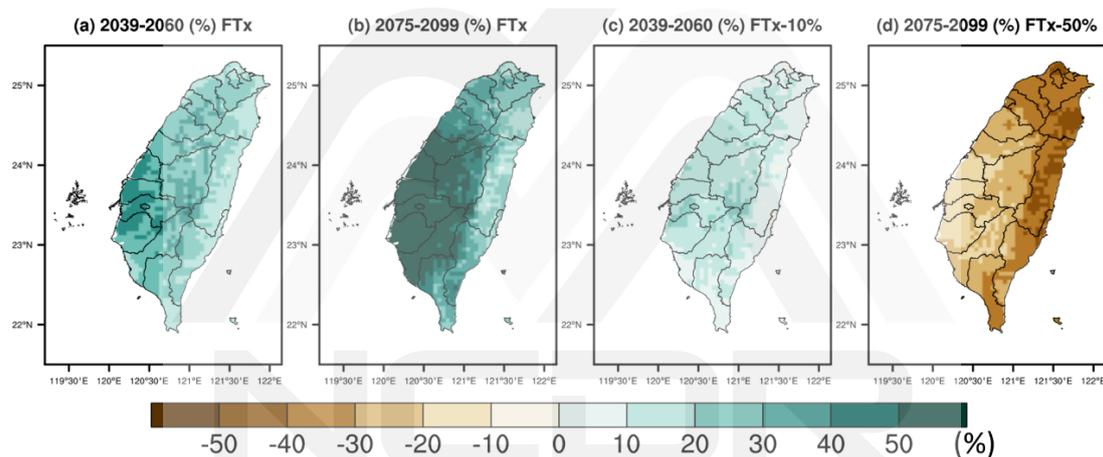


圖 20 以歷史颱風資訊所建製未來平均颱風降雨的 (a) 中期、(b) 長期降雨改變率。進一步考慮未來颱風頻率減少的狀況下所算出 (c) 中期、(d) 長期的颱風平均年總雨量改變率，單位：%。

建置出固定颱風路徑下的未來平均每年颱風總雨量，便可估算未來年平均雨量的改變率，如圖 20a、b 所示。圖 20a、b 的結果其實與圖 18a、b 還蠻接近的，有著相同的西部增加較多的空間特徵，雖是不同方式算出來的，但在數值上也很接近。然而圖 20a、b 並未考慮未來颱風頻率的減少，其結果不能反應出颱風減少的

影響，所以我們進一步將前面所分析颱風頻率在中期減少 10%、長期減少 50%的結果直接計算在圖 20a、b 上，所得到圖 20c、d 更能呈現較合理的結果。圖 20c、d 中，中期的颱風年平均雨量略有增加，降雨強度的增加大於頻率減少的影響；長期的年平均雨量都是減少的，颱風頻率減少的影響大於降雨強度的增加。這些結果與沒有濾除路徑變化的因素的圖 12 有蠻大的差異，尤其是中期在圖 12a、c 中許多縣市是呈現減少的趨勢。



第五章 小結與討論

本研究根據 HiRAM 高解析全球氣候模式系集模擬在 CMIP5 RCP8.5 情境下所模擬出的颱風事件降尺度結果，分析在不同氣候時期的切割下，颱風統計結果的差異大小。著重在比對 20 年的 GWL、20 年固定年份以及大於 20 年的時期以納入更多颱風樣本數後的統計結果。結果可看到不同氣候時期的選擇，使用相同基期的 GWL+2、4°C 與取 20 年的世紀中、末，相對於基期變化率的差異並不算大，以中位數或是平均值而言，都在彼此的不確定範圍內。使用較長年份基期時與前述二者的差異會稍大一點，不過會有更多的颱風樣本，分析結果的統計值會更有代表性：在未來中、長期颱風個數減少約 10%、50%；強颱出現的頻率增加約 105%、60%；強颱出現的頻率增加約 105%、60%；最大風速增加約 5%、9%；颱風降雨增加約 20%、35%。其中以強颱頻率分析不確定性最大。

除了分析颱風頻率以及颱風中心附近的風、雨強度變化外，臺灣陸地上的風、雨在未來的變化和颱風路徑息息相關。為避免不確定性大的颱風路徑偏差干擾分析結果，本研究以颱風中心位置作為分類的標準，將資料拆解分類並進行合成分析，得到每個分

類中的臺灣陸地上平均風、雨強度以及未來的變化率。以此去除路徑影響後，未來臺灣颱風的風、雨強度多呈現增加趨勢，陸地上平均時雨量強度在中期增加約 20%、長期增加約 40%，西部平原地區增加較為顯著。地面平均風速變化比降雨強度的趨勢小，在中、長期分別增加約 8%及 10%。這些陸地上的風、雨強度變化率與前述近颱風中心的最大風、雨統計值的變化率就比較接近。

颱風雨量的累積勢必會受到颱風路徑的影響，既然無意義的路徑不確定性影響太大，本研究在估算颱風累積雨量時就設法控制颱風路徑不變，搭配歷史颱風路徑建置固定颱風路徑下的累積雨量，並考慮颱風頻率中期減少 10%、長期減少 50%的影響。結果顯示颱風平均年降雨累積量在中期會增加（不超過 20%），可反應出降雨強度的增加大於頻率減少的影響。不過降雨累積量在長期卻會減少，反應出颱風頻率減少的影響大於降雨強度的增加，其中臺灣西部可能減少 10-30%、東北部減少 30-50%。

雖然前述平均颱風年雨量減少 5 成已經減少很多了，但考慮到颱風頻率的年際變化，這衝擊其實會更大。分析每年發生颱風次數的頻率，發現在基期最常見到的每年 5 場颱風，在世紀中最

常見到的降為每年 3 場、到了世紀末最常出現的則是每年只有 1 場颱風來訪，甚至有 15% 的年分沒有受到颱風的影響。世紀末約 1/6 的年份看不到颱風，這些年份的颱風降水其實是減少 100%，若無其他降水機制的補注，可預期將會對臺灣水資源的調度帶來很大的壓力。另外需要注意的是強颱出現的頻率，在中期幾乎增加了一倍、長期颱風頻率減少 5 成的狀況下，強颱出現的頻率卻是多出近 6 成。這些結果也代表著未來對面對防洪、抗旱的頻率都是增加的。



致謝

感謝國科會國科會臺灣氣候變遷推估資訊與調適知識平台計畫 (Taiwan Climate Change Projection Information and Adaptation Knowledge Platform, TCCIP) 提供研究經費與寶貴的資料讓本研究得以順利進行。



參考文獻

- Chen, J.-H., and S.-J. Lin (2013). Seasonal Predictions of Tropical Cyclones Using a 25-km-Resolution General Circulation Model. *J. Climate*, 26, 380–398. doi: <http://dx.doi.org/10.1175/JCLI-D-12-00061.1>
- Kitoh A. and H. Endo (2016). Changes in precipitation extremes projected by a 20-km mesh global atmospheric model. *Weather Clim. Extrem.*, 11, 41–52.
- Knapp, K. R., M. C. Kruk, D. H. Levinson, H. J. Diamond, and C. J. Neumann (2010). The International Best Track Archive for Climate Stewardship (IBTrACS): Unifying tropical cyclone best track data. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 91, 363-376. doi:10.1175/2009BAMS2755.1
- Mizuta, R., O. Arakawa, T. Ose, S. Kusunoki, H. Endo, and A. Kitoh (2014). Classification of CMIP5 future climate responses by the tropical sea surface temperature changes. *SOLA*, 10, 167-171, doi:10.2151/sola.2014-035.
- IPCC (2021). *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, In press, doi:10.1017/9781009157896
- IPCC (2018). *Summary for Policymakers. In: Global warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty* [V. Masson-Delmotte, P. Zhai, H. O. Pörtner, D. Roberts, J. Skea, P.R. Shukla, A. Pirani, W. Moufouma-Okia, C. Péan, R. Pidcock, S. Connors, J. B. R. Matthews, Y. Chen, X. Zhou, M. I. Gomis, E. Lonnoy, T. Maycock, M. Tignor, T. Waterfield (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, pp. 3-24, doi:10.1017/9781009157940.001.
- 李清勝、盧孟明 (2012)。從氣候觀點探討影響臺灣颱風的定義問題。氣象學報。48, 4, 25-37。

林李耀等 (2015)。臺灣氣候變遷推估與資訊平台建置 (1/3) 第二期計畫成果報告。



不同氣候變遷時期下之臺灣颱風推估差異分析

發行人：陳宏宇

出版機關：國家災害防救科技中心

地址：新北市新店區北新路三段 200 號 9 樓

電話：02-8195-8600

報告完成日期：中華民國 112 年 12 月

出版年月：中華民國 113 年 01 月

版 次：第一版

非賣品



地址： 23143 新北市新店區北新路三段 200 號 9 樓

電話： ++886-2-8195-8600

傳真： ++886-2-8912-7766

網址： <https://www.ncdr.nat.gov.tw>