

氣候變遷情境下台灣地區雨量 不均勻性變化之探討

Changes of Rainfall Unevenness in Taiwan under Climate Change

國立成功大學水利及海洋工程學系

碩士班研究生

陳柏元

Po-Yuan Chen

教授

蕭政宗

Jenq-Tzong Shiau

摘 要

台灣地區年平均降雨量豐沛，但雨量多集中在夏季，呈現乾濕分明的現象，特別是在南部地區，降雨豐枯不均的現象更為明顯。近年來全球氣候變遷對雨量的影響備受關注，降雨不均勻性是否會因氣候變遷的影響更行加劇，是水資源規劃與管理重要的議題之一，因其會影響未來水資源供應與災害防治。因此，本文研究目的為透過全球氣候模式(Global Climate Model)模擬不同暖化情境下之日雨量，以分析台灣地區雨量不均勻性之變化。本研究採用量化雨量不均勻性的指標為半年雨量的最濕日數 (the wettest days to 50% of annual precipitation)，簡稱WD50。本研究以AR6統計降尺度日降雨量資料為基礎，分析在未來不同時段(2021–2040、2041–2060、2061–2080、及2081–2100)、不同暖化情境(SSP1–2.6、SSP2–4.5、SSP3–7.0、及SSP5–8.5)下WD50之變化情況。研究結果顯示，隨著暖化程度提高，WD50數值由SSP1–2.6 逐步減少至 SSP2–4.5 及 SSP3–7.0，但在SSP5–8.5情境下，WD50數值有所回升(仍低於基期)，這顯示雨量不均勻程度相較於基期更嚴重，即極端降雨在未來氣候變遷情境下的影響是不可忽略的。

關鍵詞：雨量不均勻性、氣候變遷、日雨量、半年雨量最濕日數

Abstract

Uneven rainfall in Taiwan is noted since that the major portion of rainfall is concentrated in summer, especially in southern Taiwan. Impacts of climate change on rainfall unevenness gain increasing concerns in water resources planning and management since it would affect future water supply and mitigation measures of rainfall extreme. This study aims to quantify changes of rainfall unevenness in Taiwan through the projected daily rainfall by GCMs. The rainfall unevenness index adopted in this study is the wettest days to 50% of annual precipitation, denoted as WD50. The AR6 downscaled daily rainfall from various GCMs are used in this study. Changes of rainfall unevenness in terms of WD50 for various future periods (2021–2040, 2041–2060, 2061–2080, and 2081–2100) and scenarios (SSP1–2.6, SSP2–4.5, SSP3–7.0, and SSP5–8.5) are explored in Taiwan. The results indicated that WD50 decreases from SSP1–2.6 to SSP2–4.5 and SSP3–7.0. However, under the SSP5–8.5 scenario, the WD50 value rebounds (still lower than the historical), which imply that rainfall unevenness gets further exacerbated severe in Taiwan.

Keywords: Rainfall unevenness, climate change, daily rainfall, WD50

一、前言

台灣地區年平均降雨量約為世界平均值的 2.6 倍，相當的豐沛，但因地狹人稠，且降雨季節及空間分布不均，另外陡峭的地形也使得河川流量快速入海，再加上近年來全球氣候的異常，使得實際可用的水資源相當有限。為合理的調配水資源，了解台灣各地區降雨季節及空間分布是十分重要的。因此，若能透過分析台灣地區在未來不同時段(2021–2040、2041–2060、2061–2080、及 2081–2100)、不同暖化情境(SSP1–2.6、SSP2–4.5、SSP3–7.0、及 SSP5–8.5)下降雨於時間上變化情況，研擬相關的因應措施，應能提升水資源運用效率，並減少相關災害的發生。

降雨在時間上的不均勻性源自於降雨時間分布的差異，有時出現多日無雨的情況，有時則伴隨傾盆大雨。這種降雨的時間不均勻或不對稱性可能導致乾旱或洪水的發生，並且會對未來的水資源供應及災害防治產生重大影響。

近年來全球氣候變遷對雨量的影響備受關注，降雨不均勻性是否會因氣候變遷的影響更行加劇，是水資源規劃與管理重要的議題之一，有關降雨不均勻性的相關研究有 Rajah 等人(2014)利用基尼係數(Gini index)(經濟不平等的衡量標準)進行雨量不均勻性的量化，並發覺降水不均勻性在二十世紀後期有所增加，而 Pendergrass and Knutti (2018)引入了一個更直觀的指標，即「年降水總量一半的天數」，並發現在許多地區大約需要 12 個最潮濕的降雨日便能達到一年中 50% 的降水量 (WD50)，在此之後 WD50 被 Chen (2020)、Han 等人(2021)、Wu 等人(2021)於分析中國的降雨分佈以及 Goffin 等人(2023)用於探討歐洲的降雨不均勻性。

本研究將使用 AR6 統計降尺度資料(台灣地區)，並利用 WD50 分析台灣地區在未來不同時段(2021–2040、2041–2060、2061–2080、及 2081–2100)、不同暖化情境(SSP1–2.6、SSP2–4.5、SSP3–7.0、及 SSP5–8.5)下降雨於時間上變化情況，以利未來水資源管理與災害防治。

二、研究資料

本研究使用 AR6 統計降尺度 0.05°網格資料，包括台灣本島 1383 格以及外島 27 格共 1410 格，為了得到台灣地區未來受到氣候變遷影響的推估資訊，必須得使用全球氣候模式的模擬資料，但是對於台灣而言，全球氣候模式的空間尺度太大以至於無法直接使用，必須透過降尺度方法提高空間解析度，以得到地理氣候區域的推估。在全球氣候模式日雨量資料經統計降尺度後，以歷史觀測資料為基底，結合模式過去同一時期的歷史模擬，建立長期且穩定之統計關係，並將此統計關係應用於未來的推估資料中。

三、研究方法

本研究分析台灣地區在未來不同時段(2021–2040、2041–2060、2061–2080、及 2081–2100)、不同暖化情境(SSP1–2.6、SSP2–4.5、SSP3–7.0、及 SSP5–8.5)下 WD50 於時間及空間上的變化情況。

3.1 WD50

WD50 是一個簡單直觀的指標，為 Pendergrass and Knutti (2018)所發展，最早的概念為「達到目標雨量所需天數」，而目標雨量通常為總雨量的百分之幾(依據研究目標可能為 50%或 80%等)，之後為了更簡單直觀變衍生出「年降水總量一半的天數」即 WD50。

為計算 WD50，首先由大至小排列各年份日雨量，並由大至小累加日雨量同時計算累加天數，直至累加雨量大於或等於當年份總雨量之半，所累加的天數即為 WD50。

3.2 基期與未來時期

為了瞭解在不同排放情境之下，未來氣候推估相對於過去的變化，所有模式需要使用同一段過去的時間來比較，稱之為「基期」。同時，為了瞭解在基期的實際氣候狀態，觀測資料也需要選取相同一段時期作為對照。根據 IPCC AR6 使用的參考時期，基期為 1995–2014 年，並將未來時期分為短期(2021–2040)年、中期(2041–2060)年、長期(2081–2100)年，不論是歷史基期或未來時期皆使用 20 年氣候平均，本研究將未來時期分為近未來(2021–2040)、中未來(2041–2060)、中遠未來(2061–2080)、及遠未來(2081–2100)以保持時間上的連續性。

3.3 共享社會經濟路徑(Shared Socioeconomic Pathway , SSP)

IPCC 於 2021 年發布的第六次評估報告(AR6)中，在氣候變遷情境設定上結合國際氣候變遷研究界多個研究社群成果，提出「共享社會經濟路徑」(SSP, Shared Socioeconomic Pathway)，透過加入社會經濟發展元素，豐富過往僅考量溫室氣體變化的代表濃度路徑(RCP)情境，情境之間主要差異為不同的社會經濟假設，例如經濟成長、全球化程度、土地利用變化、技術發展、受教育機會等，情境對應的調適與減緩挑戰大小。本研究選取 SSP1–2.6、SSP2–4.5、SSP3–7.0、及 SSP5–8.5 作為研究對象，這些暖化情境的特徵與選擇理由如表 1 所示。

表 1、暖化情境的特徵與選擇理由

暖化情境	情境內容
SSP1–2.6	為低強迫路徑，其模擬結果顯示在 2100 年將產生低於 2°C 的多模式平均值，選擇 SSP1 是因其具有顯著的土地利用變化（全球森林覆蓋率增加），代表了該情境低脆弱性、低減緩壓力和低輻射強迫力的綜合特性。
SSP2–4.5	為中間路徑，選擇 SSP2 原因，在於它的土地利用和氣溶膠路徑相對於其他 SSP 較不極端，為中等社會脆弱性與中等輻射強迫力的組合。
SSP3–7.0	為中高強迫路徑，SSP3 結合相對較高的社會脆弱性和輻射強迫力，過往 AR5 的無氣候政策干預情境(no climate policy)分析極度仰賴 RCP8.5 情境，SSP3–7.0 的加入提供中高排放路徑的另一個選擇，與 SSP5–8.5 不同的是，SSP3–7.0 具有強烈的土地利用變化和高 NTCF ² 排放。
SSP5–8.5	為高強迫路徑，選擇此社會經濟情境的原因，在於 SSP5 是唯一排放量高到足以在 2100 年產生 8.5W/m ² 輻射強迫力的 SSP 情境。

四、結果與討論

4.1 不同情境及未來時期 WD50 空間分布

WD50 在不同暖化情境(SSP1–2.6、SSP2–4.5、SSP3–7.0、及 SSP5–8.5)及未來不同時段(2021–2040、2041–2060、2061–2080、及 2081–2100)的空間分布分別示於圖 1~4，由圖可看出不論何種排放情境及時期，WD50 數值較低的網格大多集中於從台中至高雄的西部沿海及部分台東沿海，代表其降雨不均勻性較為顯著，即發生極端降雨的機會較高；東北部地區 WD50 數值相較於其他地區較高，代表其降雨不均勻性較不顯著，即發生極端降雨的機會較高。而不同情境間以 SSP3–7.0 情境下數值低的網格數較多，代表其降雨不均勻性較其他情境為顯著，在此情境下台灣會面臨更嚴峻的水資源使用情形。

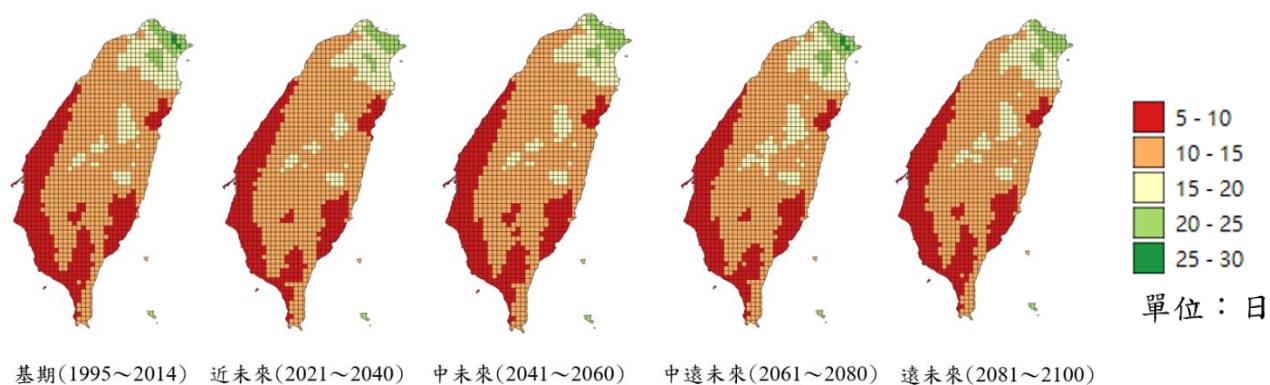


圖 1、SSP1-2.6 情境 WD50 空間分布與基期之比較

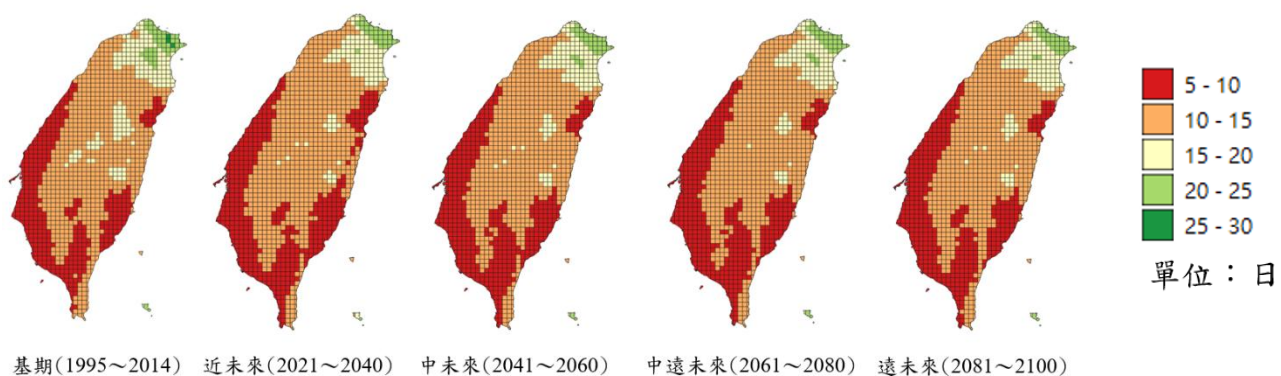


圖 2、SSP2-4.5 情境 WD50 空間分布與基期之比較

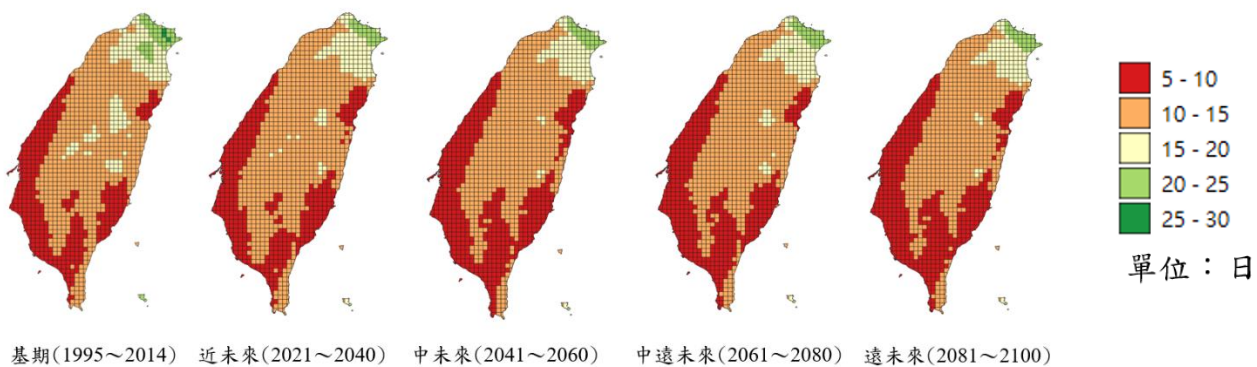


圖 3、SSP3-7.0 情境 WD50 空間分布與基期之比較

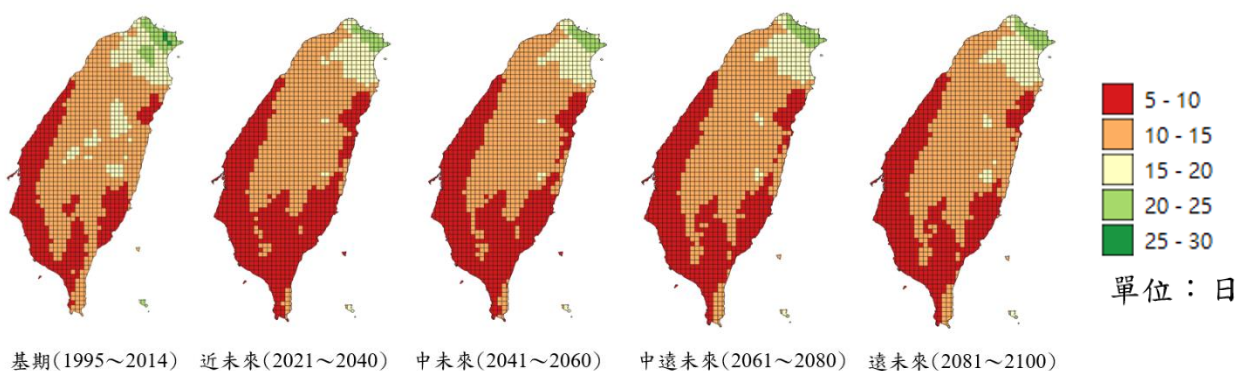


圖 4、SSP5-8.5 情境 WD50 空間分布與基期之比較

4.2 WD50 於不同情境及未來時期之變化

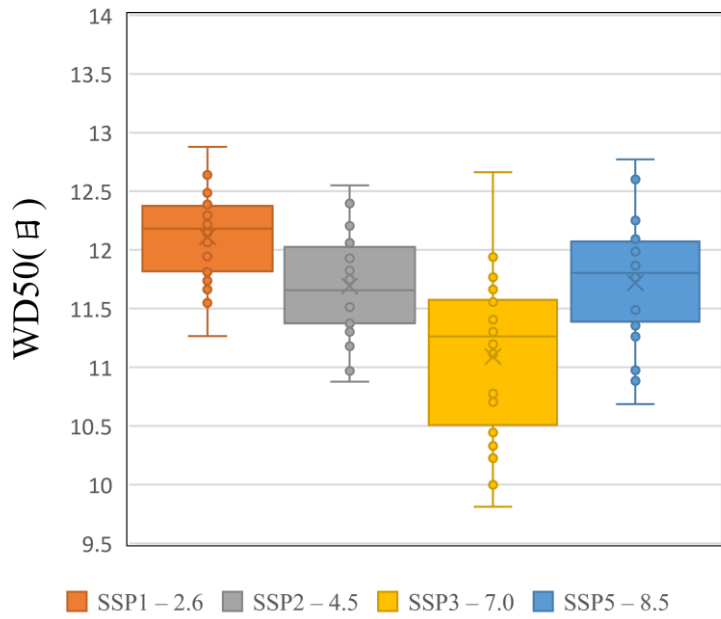
為了更深入地分析不同時段（2021－2040、2041－2060、2061－2080、2081－2100）及不同暖化情境（SSP1－2.6、SSP2－4.5、SSP3－7.0、SSP5－8.5）下的 WD50 變化，本研究將 WD50 在各情境及未來各時段的空間分布依據其數值進行分區（5 日～10 日、10 日～15 日、15 日～20 日、20 日～25 日、25 日～30 日），並統計各分區的網格數量，結果如表 2 所示。

表 2 WD50 在不同暖化情境及未來各時期的數值分布

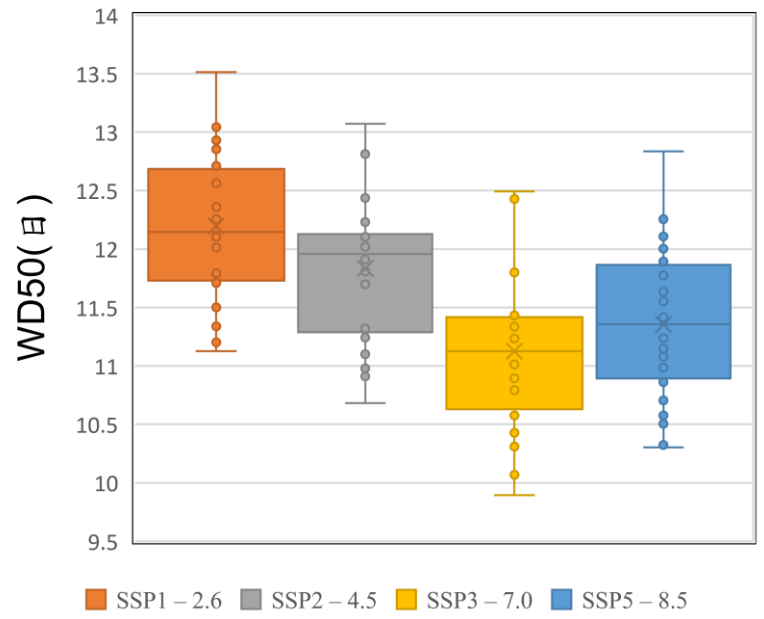
暖化情境	時段	WD50 網格數				
		5~10 日	10~15 日	15~20 日	20~25 日	25~30 日
基期(historical)		432	751	169	55	3
SSP1 - 2.6	近未來	396	824	146	44	0
	中未來	412	786	160	52	0
	中遠未來	390	770	190	57	0
	遠未來	414	759	181	56	0
SSP2 - 4.5	近未來	495	757	123	35	0
	中未來	495	736	136	43	0
	中遠未來	498	741	128	43	0
	遠未來	481	753	136	40	0
SSP3 - 7.0	近未來	635	644	104	27	0
	中未來	623	654	104	29	0
	中遠未來	571	698	110	31	0
	遠未來	551	708	118	33	0
SSP5 - 8.5	近未來	457	803	121	29	0
	中未來	558	715	106	31	0
	中遠未來	520	732	123	35	0
	遠未來	567	702	109	32	0

由表 2 可看出，WD50 為 5 日～10 日及 10 日～15 日的網格總數，在所有暖化情境和時段中，均佔據了台灣地區總網格數的絕大多數，皆超過總網格數的 82%。此外，在 SSP3-7.0 情境下，WD50 為 5 日～10 日的網格數量顯著高於其他情境。以上現象表示台灣地區在各暖化情境和時段中，WD50 主要集中於 5～15 日範圍內。且在 SSP3-7.0 情境下，WD50 為 5 日 10 日的網格佔比最高，最嚴重的時段占比達到 45%，顯示出降雨不均勻性的加劇更為明顯。

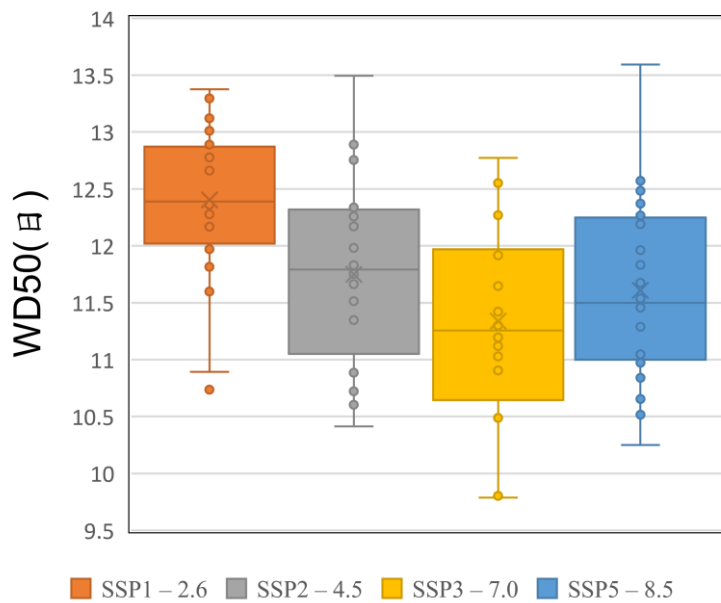
為進一步探討台灣地區 WD50 的整體數值變化，本研究將台灣地區的所有網格(包括台灣本島 1383 格以及外島 27 格共 1410 格)進行平均，分析台灣地區 WD50 在不同暖化情境及未來各時期的平均變化，結果如圖 5、圖 6、圖 7、圖 8 所示。



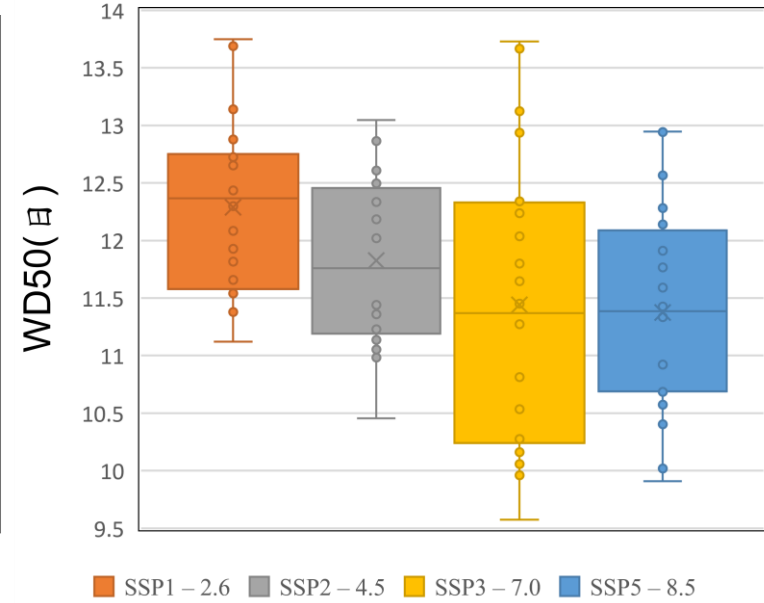
(a)



(b)



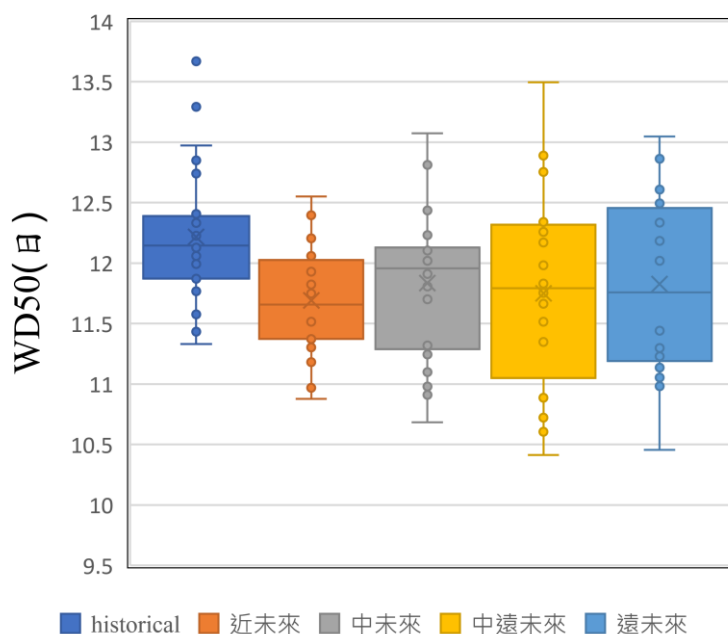
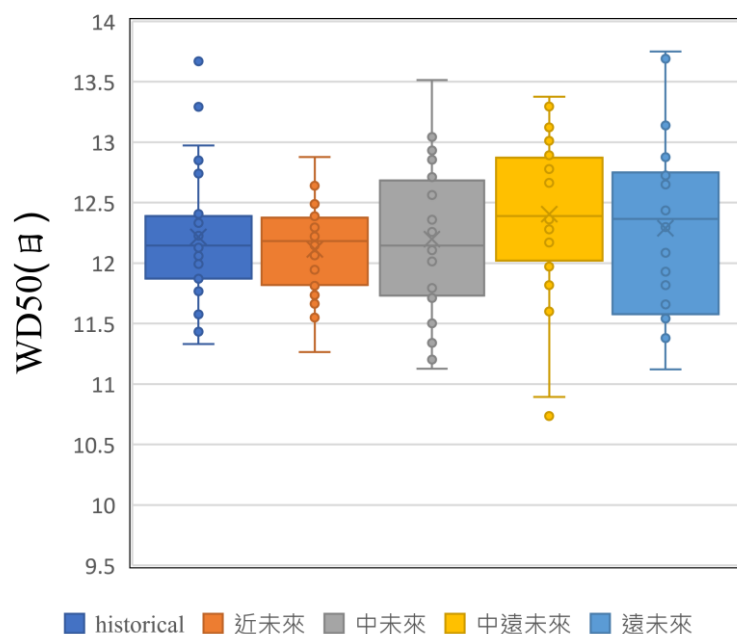
(c)



(d)

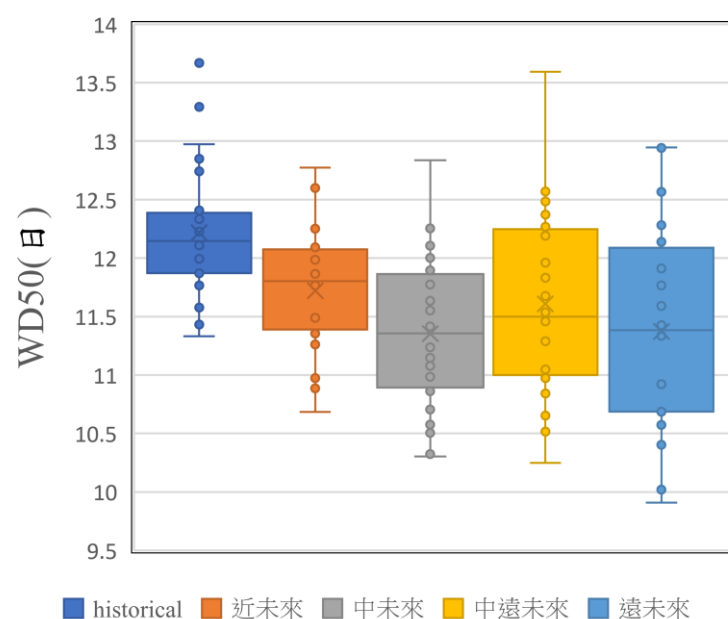
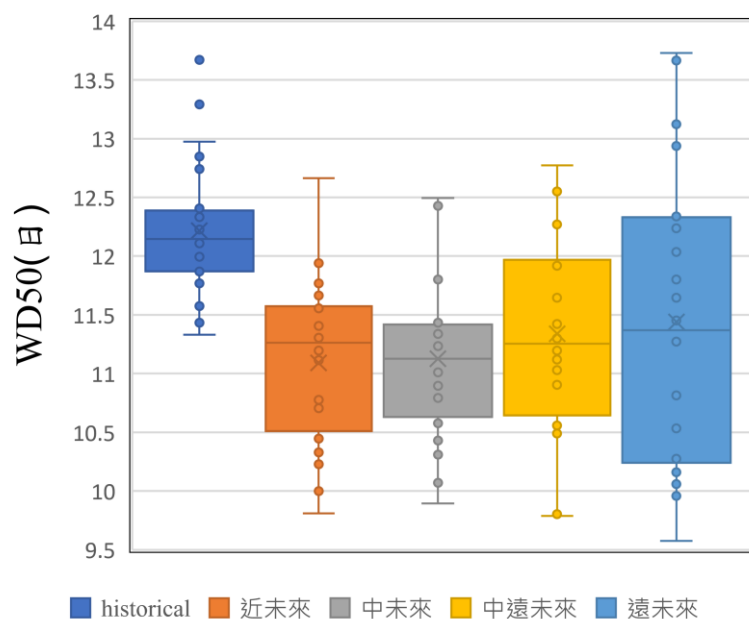
圖5 WD50在台灣地區不同時段下各暖化情境的盒狀圖，(a)近未來，(b)中未來，
(c) 中遠未來，(d) 遠未來

圖5 展示了未來不同時段下四種暖化情境的平均 WD50 比較結果，從圖中可以觀察到，所有未來時期的平均WD50數值由SSP1-2.6 逐步減少至 SSP2-4.5 及SSP3-7.0，但在SSP5-8.5情境下，平均WD50數值有所回升。這一現象表明，在SSP3-7.0情境下，降雨不均勻性達到最嚴重的程度。



(a)

(b)



(c)

(d)

圖 6 WD50 在台灣地區不同暖化情境下各時段的盒狀圖，(a) SSP1-2.6，
(b) SSP2-4.5，(c) SSP3-7.0，(d) SSP5-8.5

圖 6 展示了四種暖化情境下，基期與四個未來時期平均 WD50 的比較，在 SSP1-2.6 情境下，四個未來時期的 WD50 與基期差異不大，顯示出較低的變化幅度，在 SSP2-4.5 情境下，WD50 在近未來時期低於基期。在 SSP3-7.0 情境下，四個未來時的平均 WD50 均顯著低於基期，表明未來降雨不均勻性將顯著加劇，至於 SSP5-8.5 情境，雖然四個未來時期的平均 WD50 亦低於基期，但其差異相較於 SSP3-7.0 情境較小。

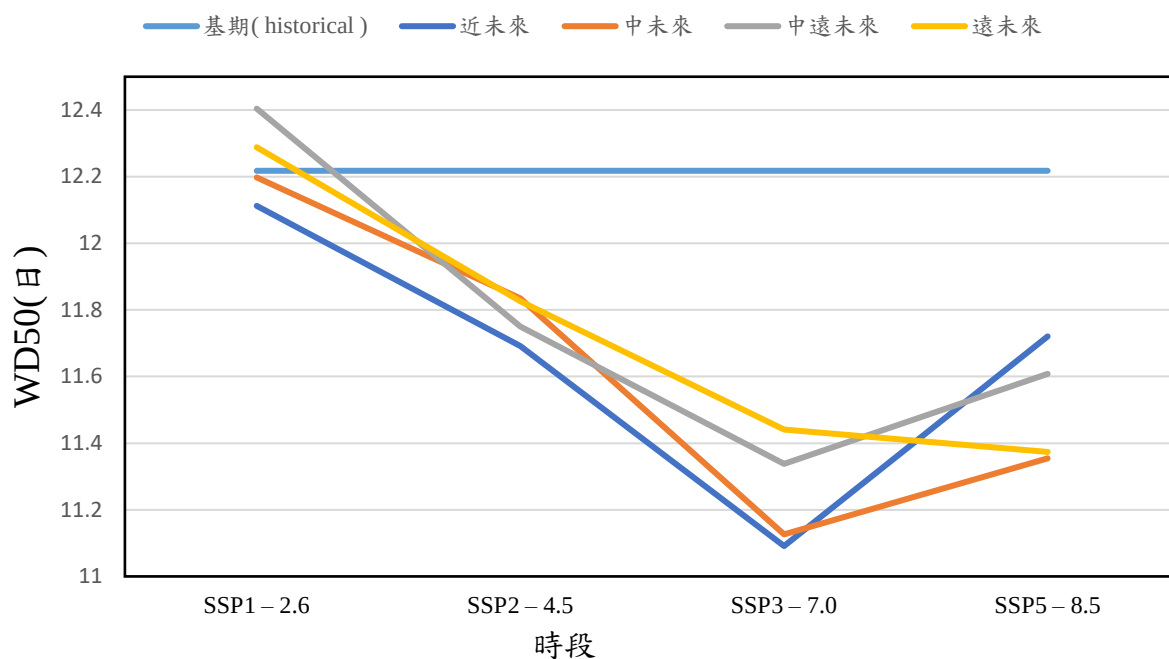


圖 7 WD50 在台灣地區各時段不同暖化情境變化圖

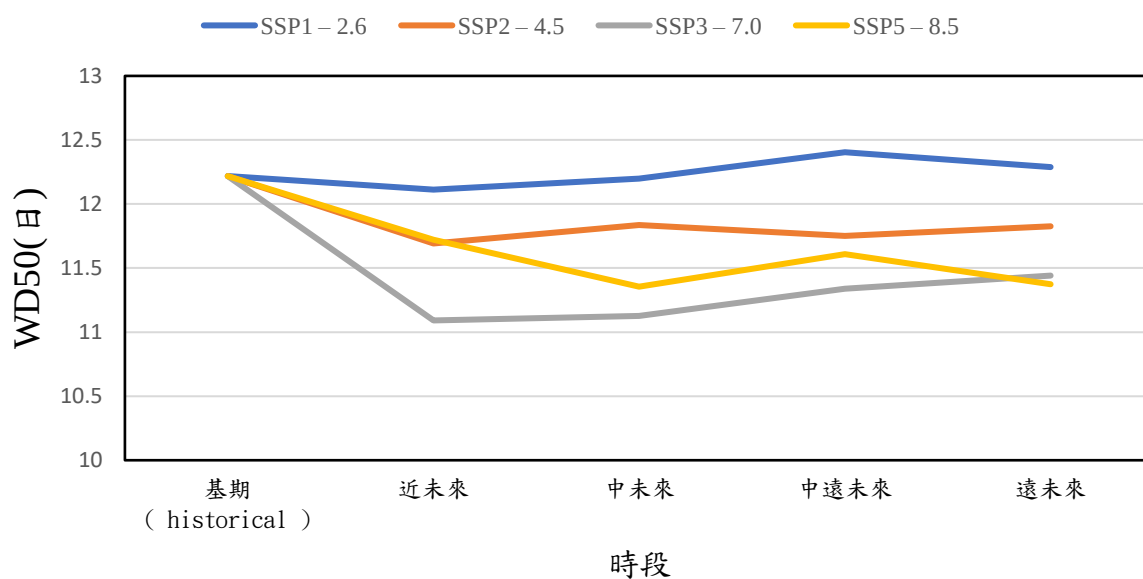


圖 8 WD50 在台灣地區各暖化情境不同時段變化圖

圖 7 展示了各時段下 WD50 平均值隨暖化情境的變化，圖中顯示 SSP1-2.6、SSP2-4.5 和 SSP3-7.0 情境下，近未來時期的平均 WD50 值為最低；而在 SSP5-8.5 情境下，中未來和遠未來的平均 WD50 值最低。

圖 8 展示了各暖化情境下 WD50 平均值隨各時段的變化，從圖中可以明顯看出，各情境間 WD50 的平均值從高至低依序為 SSP1-2.6、SSP2-4.5、SSP5-8.5 和 SSP3-7.0。不同情境間以 SSP3-7.0 情境下的 WD50 平均值最低，代表此情境下降雨的不均勻性最為顯著。

五、結論與建議

依據以上的分析結果，可獲致以下結論：

1. 無論排放情境或時段，WD50 數值較低的網格主要集中在台中至高雄的西部沿海地區及部分台東沿海地區，而東北部地區的 WD50 數值則相對較高，此現象顯示在各暖化情境和未來時期，台灣地區降雨不均勻性空間分布差異不大。
2. WD50 在 5 日~ 10 日及 10 日~ 15 日範圍內的網格總數，無論在何種暖化情境或時段下，約佔據台灣地區總網格數的 82% 至 90% 之間。這表明在各排放情境或時段，台灣地區的 WD50 值主要集中在 5 日~ 15 日之間。
3. 在不同的氣候變遷情境下，隨著全球暖化程度的增加，WD50 數值亦顯示出下降趨勢，尤其是在 SSP3-7.0 情境下表現最為顯著

WD50 數值的減少，意味著未來降雨分佈將變得更加極端，極端降雨事件預計將更加頻繁，這可能導致水資源供應的不穩定性和災害風險的增加。極端降雨事件的增多將顯著提升洪水風險，城市排水系統設計之標準需提升。此外，因雨量集中而引發的乾旱發生頻率可能也會增加，進一步威脅農業生產和生態系統的平衡。

最後，本文針對研究成果提出以下幾點建議，作為未來研究目標：

1. 本研究主要集中於 WD50 指標的分析，然而，降雨不均勻性的全面評估需考慮多個不同指標。因此，未來的研究可增加其他降雨不均勻性指標，如 Gini 係數、降雨集中度指數（PCI），以更全面地反映氣候變遷對降雨不均勻性的影響。
2. WD50 的減少意味著極端降雨事件的增多，這對水資源供應和災害風險管理具有重大影響。未來的研究應進一步探討極端降雨事件對區域水資源管理、基礎設施穩定性以及農業生產的長期影響，並考慮如何制定因應措施以減少潛在的負面影響。

六、謝誌

本研究承國科會經費補助（NSTC 113-222-E-006-001），謹致謝忱

七、參考文獻

1. Chen, Y. (2020). Increasingly uneven intra-seasonal distribution of daily and hourly precipitation over Eastern China. Environmental Research Letters, 15(10), 104068.
2. Goffin, B. D., Kansara, P., & Lakshmi, V. (2023). Intensification in the wettest days to 50 percent of annual precipitation (WD50) across Europe. Geophysical Research Letters, 51, e2023GL107403.
3. Han, J., Miao, C., Duan, Q., Wu, J., Gou, J., & Zheng, H. (2021). Changes in unevenness of wet-day precipitation over China during 1961–2020. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 126(19), e2020JD034483.
4. IPCC. (2021). Sixth assessment report (AR6). Intergovernmental Panel on Climate Change. Retrieved from <https://www.ipcc.ch/assessment-report/ar6/>
5. Pendergrass, A. G., & Knutti, R. (2018). The uneven nature of daily precipitation and its change. Geophysical Research Letters, 45(21), 11980–11988.
6. Rajah, K., O’Leary, T., Turner, A., Petrakis, G., Leonard, M., & Westra, S. (2014). Changes to the temporal distribution of daily precipitation. Geophysical Research Letters, 41(24), 8887–8894.

7. Wu, G., Li, Y., Li, T., Ma, Z., & Shi, C. (2021). The unevenness in observed daily precipitation in mainland China. Theoretical and Applied Climatology, 146(3–4), 1031–1041.