

氣候變遷情境下南化水庫入流量特性分析

Analysis of Streamflow Characteristics of Nanhua Reservoir under Climate Change Scenarios

國立成功大學水利及海洋工程學系
碩士班研究生 教授
林秀惠 蕭政宗
Siou-Hui Lin Jenq-Tzong Shiau

摘要

台灣地區降雨多集中於夏、秋兩季，降雨豐枯不均的現象在南部區域特別明顯，穩定水源的供應就須倚賴供水水庫貯蓄豐水期流量以應枯水期之需。然而氣候變遷導致極端降雨事件的發生頻率與強度增加，可能改變水庫入流量的時序與總量，對水資源調度構成挑戰。因此，量化氣候變遷對水庫入流量的影響，為因應氣候變遷水資源管理策略的重要議題之一。本研究研究目的為評估氣候變遷對南化水庫入流量流制的影響，首先利用 25 組全球氣候模式 (Global Climate Model, GCM) 之降尺度日雨量資料，結合機器學習降雨-逕流模式推估南化水庫日入流量資料，其次分析不同時期 (2021-2040 與 2041-2060) 及不同暖化情境 (SSP2-4.5 與 SSP5-8.5) 下入流量的變化趨勢。為掌握水庫入流量的變化特性，本研究評估多項流量指數，包括年總流量 (FTOT)、豐水期流量 (FWS)、枯水期流量 (FDS)、年最大 1 日與 2 日流量 (FX1D、FX2D)、年最小 7、30、90 日流量 (FN7D、FN30D、FN90D)，及衡量月流量分布不均勻性的季節指數 (Seasonality Index, SI)，以分析氣候變遷在不同時間尺度對入流特性的影響與變異。研究結果顯示，在 SSP5-8.5 情境下，FTOT 及 FWS 減少且變異增加，FDS 略升但變異性增加。FX1D、FX2D 減少，但變異性增加。FN7D 增加但 FN30D 及 FN90D 減少，變異皆增加，顯示低流量短時間尺度略增加，但長時間尺度低流量減少。SI 值平均與變異皆上升，反映年內流量分布更為不均勻。

關鍵詞：氣候變遷，流量指數，水庫入流變異

Abstract

Taiwan's southern region exhibits pronounced intra-annual precipitation variability, with rainfall heavily concentrated during the summer and autumn months. Maintaining reliable water supply requires reservoirs to store wet-season runoff for subsequent use during the dry season. Anthropogenic climate change may significantly alter the magnitude and temporal distribution of extreme precipitation events, potentially reshaping reservoir inflow patterns and

complicating water resources management. This study evaluates projected changes in the streamflow characteristics of Nanhua Reservoir under future climate change scenarios. Daily projected precipitation outputs from 25 bias-corrected Global Climate Models (GCMs) were coupled with a machine learning-based rainfall-runoff model to project daily inflow time series. Hydrological variability was assessed for two future periods (2021-2040 and 2041-2060) under two Shared Socioeconomic Pathways scenarios (SSP2-4.5 and SSP5-8.5). Streamflow characteristics were quantified using multiple hydrological flow indices, including annual total inflow (FTOT), wet-season inflow (FWS), dry-season inflow (FDS), annual maximum 1-day and 2-day flows (FX1D, FX2D), annual minimum 7-, 30-, and 90-day flows (FN7D, FN30D, FN90D), and the Seasonality Index (SI), which describes the unevenness of monthly flow distribution. The results under the SSP5-8.5 scenario indicate that declining trends are noted in FTOT and FWS, accompanied by increased interannual variability. FDS shows slight increases with greater variability. High-flow indices (FX1D, FX2D) are projected to decrease, while their variability intensifies. FN7D increases, whereas FN30D and FN90D decrease, all with rising variability, suggesting increasing short-duration low flows and decreasing long-duration low flows. Both the mean and variability of SI increase, indicating greater irregularity in intra-annual flow distribution.

Keywords: climate change, flow indices, reservoir inflow variability

一、前言

氣候變遷已然成為全球關注的重要議題，其對水文循環的影響日益顯著。根據 IPCC 第六次評估報告 (AR6) 指出，全球地表溫度在本世紀中仍將持續上升，並可能超過 1.5 至 2.0°C，即使在不同暖化情境下，此趨勢依然存在。未來氣溫升高導致降雨事件更集中，極端降雨及乾旱發生頻率皆呈上升趨勢，而氣溫上升將改變水文循環的能量與水分傳輸，使降雨模式與水循環結構產生顯著改變。Milly et al. (2008) 指出，人類活動導致的氣候變遷已使傳統水文分析中假設的定常性失效。而極端氣候導致強降雨及乾旱的發生頻率及強度上升，將對水資源的可用性造成影響。Zhang and Fueglistaler (2019) 指出全球暖化將使熱帶地區降雨不均勻性增加、強降雨事件更集中、乾旱期間更持久，此現象顯示降雨時序的極端化趨勢。Donat et al. (2016) 進一步指出氣候變遷加快水文循環速率，使全球乾濕地區雨量差異擴大，日極端降雨在乾濕地區均有增加的趨勢。

台灣南部為典型降雨豐枯不均的區域，受梅雨及颱風影響，豐水期與枯水期降雨量差異甚大，然而氣候變遷將導致豐水期面臨更高的洪水風險，枯水期更可能面臨更嚴峻的低流量而使供水不足問題更加嚴重。Mallakpour et al. (2018) 指出在美國北加州有因全球暖化將加劇「豐水期越豐、枯水期越枯」的趨勢，至世紀末這種現象將更加明顯。上述情況影響河川逕流及時序，進一步影響水庫入流量特性。若不能掌握未來入流量特性與變異，將難以研擬水資源風險並制定因應氣候變遷的調適策略。

與降雨相比，針對河川流量受氣候變遷影響的研究相對較少，相關的研究包括

Faghiih and Brissette (2023) 針對美國東部 133 個集水區，分析不同分位數流量與不同重現期洪水與低流量在暖化情境下的變化，結果顯示極端高及低流量均呈現顯著變動。Mallakpour et al. (2018) 指出暖化情境將擴大豐枯流量的差距；Murphy et al. (2023) 針對愛爾蘭 26 個集水區，探討季節平均流量、低流量 (Q95) 及 20 年重現期的洪水變化，發現暖化情境下低流量下降且洪水流量上升，顯示季節性變異及極端事件強度同步加劇。Vidal et al. (2016) 研究南法阿爾卑斯山區流量指出，不同 GCM、降尺度與水文模式會造成低流量預測差異大，顯示流量模擬不確定性高。此外，Imteaz and Hossain (2023) 亦指出季節指數 (Seasonality Index, SI) 在暖化情境下將增加，代表流量分布更不均勻，將會提升水資源管理的難度。

南化水庫為台灣南部區域重要的公共供水來源，供應台南及高雄部分地區之民生用水。考量未來氣候變遷可能導致入流量特性顯著改變，本研究針對南化水庫入流量進行氣候變遷情境下的入流量特性評估，對於掌握水資源特性具重要意義。本研究結合第六期耦合模式比較計畫 (CMIP6) 中 25 組全球氣候模式 (GCM) 之降尺度日雨量資料，並應用降雨-逕流模式推估未來入流量資料，針對兩個暖化情境 (SSP2-4.5 與 SSP5-8.5) 及兩個未來期程 (2021-2040 與 2041-2060)，分析入流特性的變化趨勢。本研究採用多項流量指數進行分析，包括年總流量 (FTOT)、豐枯水期流量 (FWS、FDS)、極端高流量指數 (FX1D、FX2D)、低流量指數 (FN7D、FN30D、FN90D)，以及衡量年內流量分布不均勻性的季節指數 (SI)。透過多個流量指數、多時間尺度的評估，揭示總量、極端事件與季節分布的變異情形，進而掌握氣候變遷對南化水庫入流量特性的影響，為未來水資源調適與風險管理提供科學依據。

二、 研究地區與使用資料

2.1 研究區域

本研究以台灣南部區域南化水庫作為分析對象，該水庫位於台南市楠西區，在曾文溪支流後堀溪上游，為南部地區重要的公共供水設施。集水面積約為 108.52 平方公里，原水庫庫容為 158.05 百萬立方公尺，主要功能為供應台南及高雄地區之民生用水，是單目標水庫。南化水庫除了由後堀溪集水區提供自然入流外，另有自旗山溪甲仙攔河堰引水之越域補注系統，然本研究僅聚焦於集水區內自然入流量特性之變化。

2.2 全球氣候模式

由於全球氣候模式在結構與模擬能力上存在差異，採用多模式系集可降低單一模式帶來的不確定性，因此本研究選用 CMIP6 中 25 組全球氣候模式作為日雨量資料來源。25 個 GCM 如表 1 所示。

表 1、25 組 GCM 的名稱、機構/國家、及空間解析度

名稱	機構/國家	空間解析度(# of lon.×#of lat.)
ACCESS-CM2	CSIRO/澳洲	192×144
ACCESS-ESM1-5	CSIRO/澳洲	192×144
AWI-CM-1-1-MR	AWI/德國	384×192
BCC-CSM2-MR	BCC/中國	320×160
CanESM5	CCCMA/加拿大	128×64
CMCC-ESM2	CMCC/義大利	288×192
EC-Earth3-CC	EC/歐洲	512×256
EC-Earth3-Veg-LR	EC/歐洲	320×160
EC-Earth3-Veg	EC/歐洲	512×256
EC-Earth3	EC/歐洲	512×256
FGOALS-g3	CAS/中國	180×80
GFDL-CM4	NOAA-GFDL/美國	288×180
GFDL-ESM4	NOAA-GFDL/美國	288×180
INM-CM4-8	INM/俄羅斯	180×120
INM-CM5-0	INM/俄羅斯	180×120
IPSL-CM6A-LR	IPSL/法國	144×143
KIOST-ESM	KIOST/韓國	180×80
MIROC6	MIROC/日本	256×128
MPI-ESM1-2-HR	MPI/德國	384×192
MPI-ESM1-2-LR	MPI/德國	192×96
MRI-ESM2-0	MRI/日本	320×160
NESM3	NUIST/中國	192×96
NorESM2-LM	NCC/挪威	144×96
NorESM2-MM	NCC/挪威	288×192
TaiESM1	AS-RCEC/台灣	288×192

2.3 降雨-逕流模式與入流量資料

考量 GCM 所產製雨量的空間解析度較大，難以直接反映台灣地區複雜的地形與氣候特徵，須透過統計降尺度以提升空間解析度，故本文採用來自台灣氣候變遷推估資訊與調適知識平台（TCCIP）所產製之高解析度（5 km × 5 km）網格日雨量資料。

由於 GCM 未直接產出入流量資料，故須結合降雨-逕流模式將降雨資料轉換為水庫入流量資料，本研究參考「國科會學門主題式計畫—南區新興水源探索與整合技術研發計畫」(2024)所建立之降雨-逕流模式，該模式以極限學習機（Extreme Learning Machine, ELM）為基礎，應用於推估南化水庫不同暖化情境下的日入流量。

三、 研究方法

本研究分析南化水庫在未來不同時期（2021-2040 與 2041-2060）及不同暖化情境（SSP2-4.5 與 SSP5-8.5）下，相較於基期（1995-2014）入流量變化趨勢。

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

共享社會經濟路徑是依據未來社會、經濟、科技與政策發展可能性所建立的五種情境路徑（SSP1 至 SSP5）。在 CMIP6 中，各 SSP 情境可搭配不同溫室氣體排放路徑，進行未來氣候變遷模擬。CMIP6 中常使用的四組模擬情境（Tier1 模式）為 SSP1-2.6、SSP2-4.5、SSP3-7.0 及 SSP5-8.5，涵蓋從低排放至高排放的暖化情境。其中，數字代表 2100 年的輻射強迫值（單位： W/m^2 ），可用以推估對應的全球氣溫變化程度。

本研究採用兩種常見的氣候變遷情境，分別為中排放情境 SSP2-4.5 與高排放情境 SSP5-8.5。SSP2-4.5 代表全球朝永續發展邁進的趨勢，但仍面臨挑戰，其社會經濟與政策發展趨勢較為穩定；而 SSP5-8.5 對應高度依賴化石燃料的經濟快速成長情境，屬於高排放、高暖化風險的發展路徑。本研究以 1995-2014 年為基期，評估近未來（2021-2040）及中未來（2041-2060）在不同 SSP 情境下的變化。

3.2 流量指數

為全面評估氣候變遷情境下南化水庫入流特性之變異，本研究選取多項流量指數進行量化分析，包含年總流量、豐枯期流量、極端值與月流量分布不均勻性等。流量指數說明如下：

1. 年總流量（FTOT）：年內日流量加總，單位為 cms。
2. 豐枯期流量：包含豐水期流量（FWS）及枯水期流量（FDS）。豐水期為該年五至十月的日流量加總，枯水期為該年一至四月及十一至十二月的日流量加總，單位為 cms。
3. 極端值：涵蓋極端大值及極端小值。極端大值包括年最大 1 及 2 日流量（FX1D、FX2D），代表年內 1 日及連續 2 日最大的入流量。極端小值包括年最小 7、30 及 90 日流量（FN7D、FN30D、FN90D），代表年內連續 7、30 及 90 日最小的入流量。單位皆為 cms。
4. 月流量分布不均勻性：流量不均勻指入流量在一年之中時間的分布差異，即流量是否集中在幾個月份或平均分布於全年。本研究選取季節指數（seasonality index, SI）作為衡量月流量分布不均勻性的指數，其定義如下式：

$$SI = \frac{1}{FTOT} \sum_{j=1}^{12} \left| F_j - \frac{FTOT}{12} \right| \quad (1)$$

其中， F_j 為 j 月入流量。SI 值介在 0 到 1.83 之間，當 SI 值等於 0，為流量最均勻分布的情況，即各月份流量一致；當 SI 值等於 1.83，為流量最不均勻分布

的情況，即年總量集中於單一月份。

3.3 量化流量指數相對於基期的改變狀況

為量化氣候變遷情境下流量指數相對於基期的變化，本研究以 20 年期程的平均值及標準差相對於基期平均值及標準差的變化率，以表示流量指數受氣候變遷影響的程度。相對改變率的定義如下：

$$\text{相對改變率} = (\text{未來值} - \text{基期值}) / \text{基期值} \times 100\% \quad (2)$$

由於 25 組 GCM 模式彼此間存在差異，故本研究採用系集平均改變率 (Ensemble Mean Change Rate) 作為各流量指數於不同情境與未來時期下的代表性變化趨勢。系集平均改變率係對各 GCM 模式所計算之相對改變率取平均，表徵整體模式系集之變化情形，其定義如下：

$$\text{系集平均改變率} = \frac{1}{25} \sum_{i=1}^{25} \text{第 } i \text{ 個 GCM 的相對改變率} \quad (3)$$

四、 結果與討論

4.1 各流量指數未來期程相對於基期的相對改變率

為評估氣候變遷情境下南化水庫入流量特性的變化，本研究首先利用 25 組 GCM 模式模擬的未來日流量資料，依據前述計算 9 項流量指數。各流量指數分別計算基期(1995-2014)及兩個未來期程 (2021-2040 與 2041-2060) 在兩種暖化情境 (SSP2-4.5、SSP5-8.5) 下的數值，並進一步求取未來期程相較於基期的平均值與標準差之相對改變率，以作為評估氣候變遷影響的依據，各流量指數平均值與標準差相對改變率如圖 1 至圖 6 所示。

圖 1 與圖 2 所示為年總量、豐水期流量及枯水期流量平均值與標準差相對改變率的盒鬚圖。年總量與豐水期流量在 SSP2-4.5 近未來多數模式平均值相對改變率呈現正值，且中位數多為正值，顯示大多數模式預測未來年總量與豐水期流量會增加。但四分位距較大，顯示不同模式間對變化幅度的估計差異較大。枯水期流量的平均值相對改變率在所有情境與期程中位數大多為正，且部分模式預測增幅明顯，顯示氣候變遷下枯水期流量普遍上升。各情境與期程年總流量與豐水期流量的標準差相對改變率多呈正值，且中位數上升，反映未來年總量及豐水期流量的年際變異性將增強。枯水期流量的標準差相對改變率則在所有情境中均顯著增加，結合前述提及枯水期流量平均值相對改變率增加，變異性大幅提升，顯示未來枯水期的水資源管理更具挑戰。

圖 3 與圖 4 所示為年最大 1 日、2 日流量及季節指數平均值與標準差相對改變率的盒鬚圖。年最大 1 日與 2 日流量在 SSP5-8.5 中未來的平均值相對改變率中位數多為負值，表示多數模式預測極端高流量事件的平均值下降，但四分位距較大，仍有部分模式顯示增加趨勢。季節指數 (SI) 在各情境下均呈現平均值相對改變率中位數上升，且離群值分布不對稱，顯示暖化下流量年內分布更不均勻的趨勢為多數模式的共識。在未來

各情境下標準差相對改變率多為正值，尤其季節指數在所有情境與期程均明顯上升，反映月流量分布的不均勻性及變異性顯著增強。極端高流量指數的標準差相對改變率同樣提升，顯示極端大流量事件的年際變異變得更加顯著與不穩定。

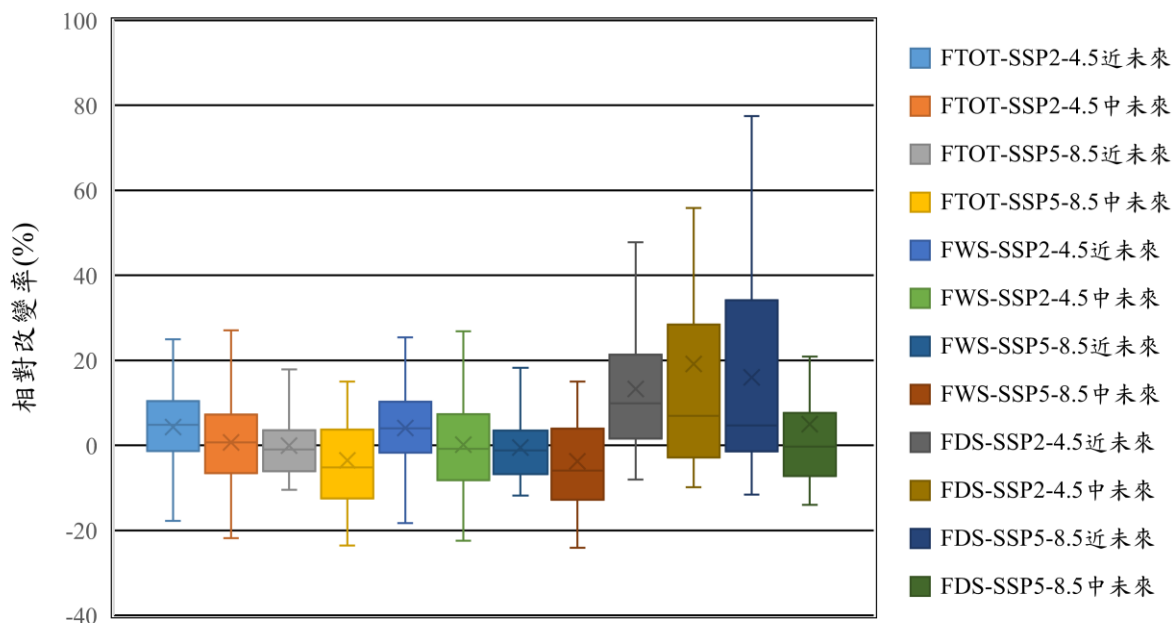


圖 1、年總量、豐水期流量及枯水期流量平均值相對改變率

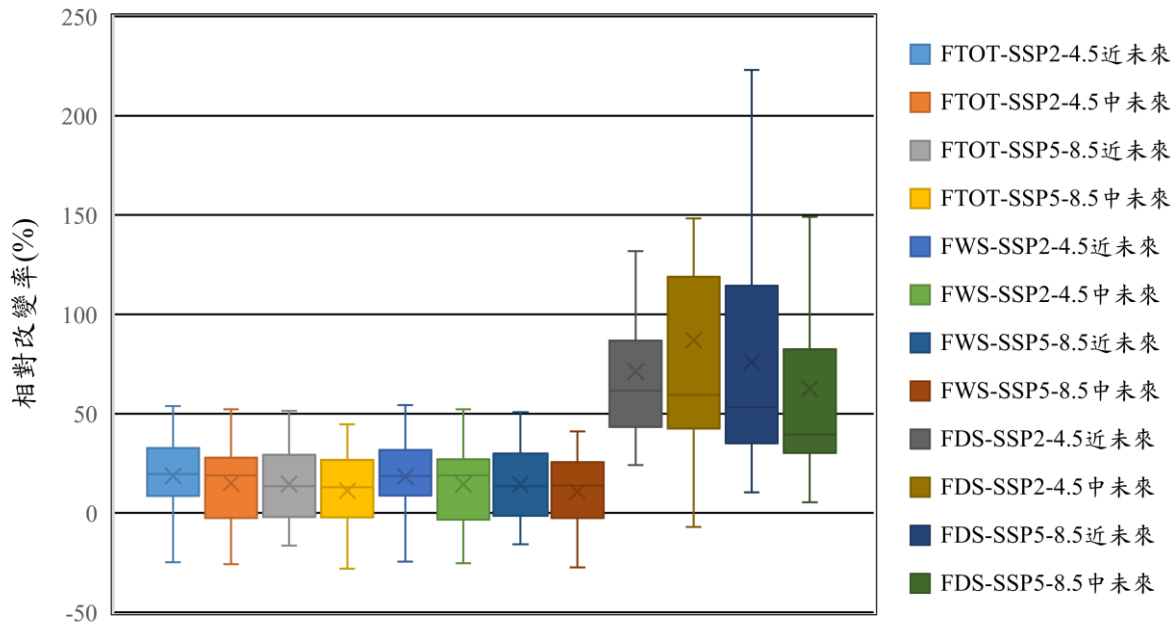


圖 2、年總量、豐水期流量及枯水期流量標準差相對改變率

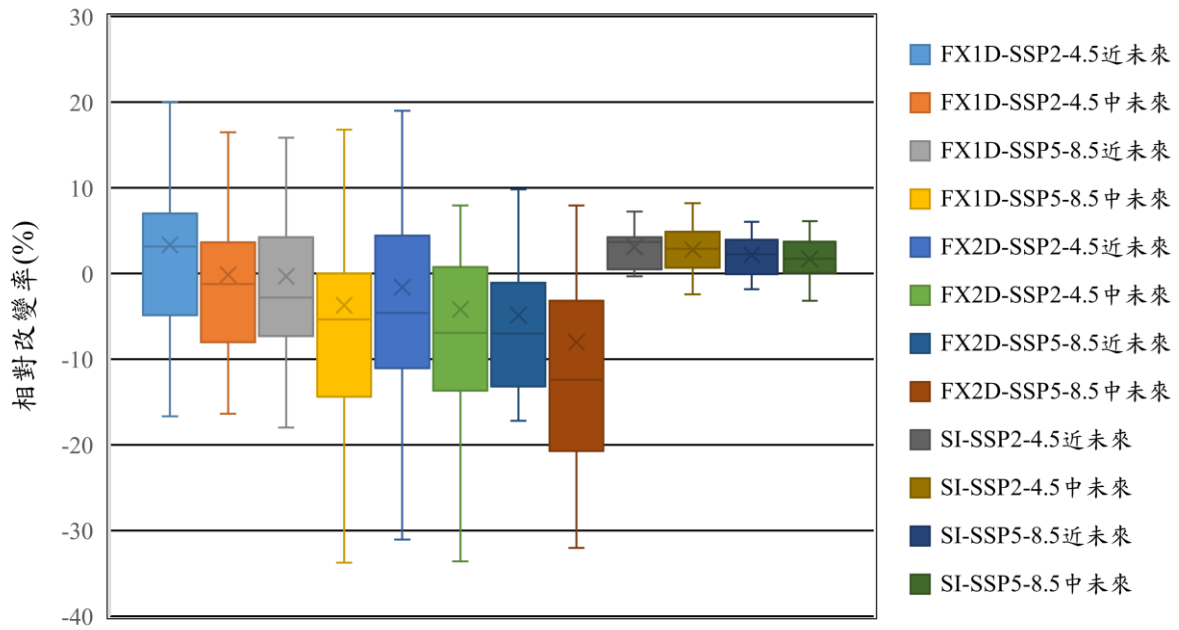


圖 3、年最大 1 日、2 日流量及季節指數平均值相對改變率

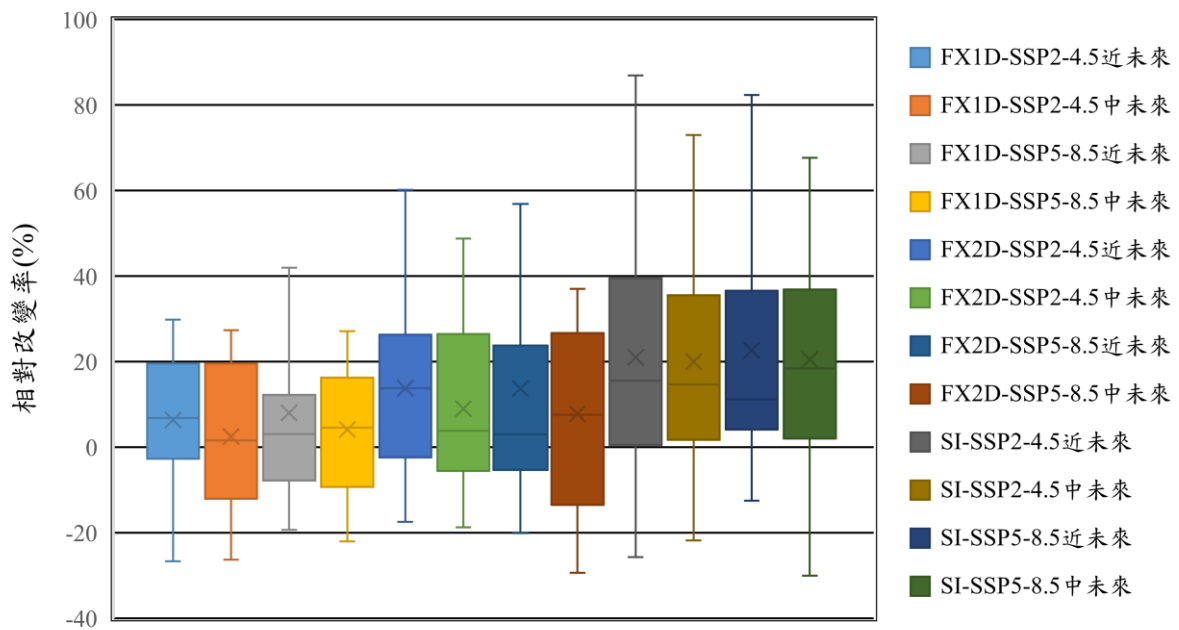


圖 4、年最大 1 日、2 日流量及季節指數標準差相對改變率

圖 5 與圖 6 所示為年最小 7 日、30 日及 90 日流量平均值與標準差相對改變率的盒鬚圖，年最小 7 日流量平均值相對改變率在部分情境下中位數略為上升，而年最小 30 日與 90 日流量則大多呈下降趨勢，反映短時間尺度低流量在部分模式中可能增加，但長時間尺度低流量則減少。標準差的改變率普遍為正值，顯示未來不同時間尺度低流量的年際變異將增大。

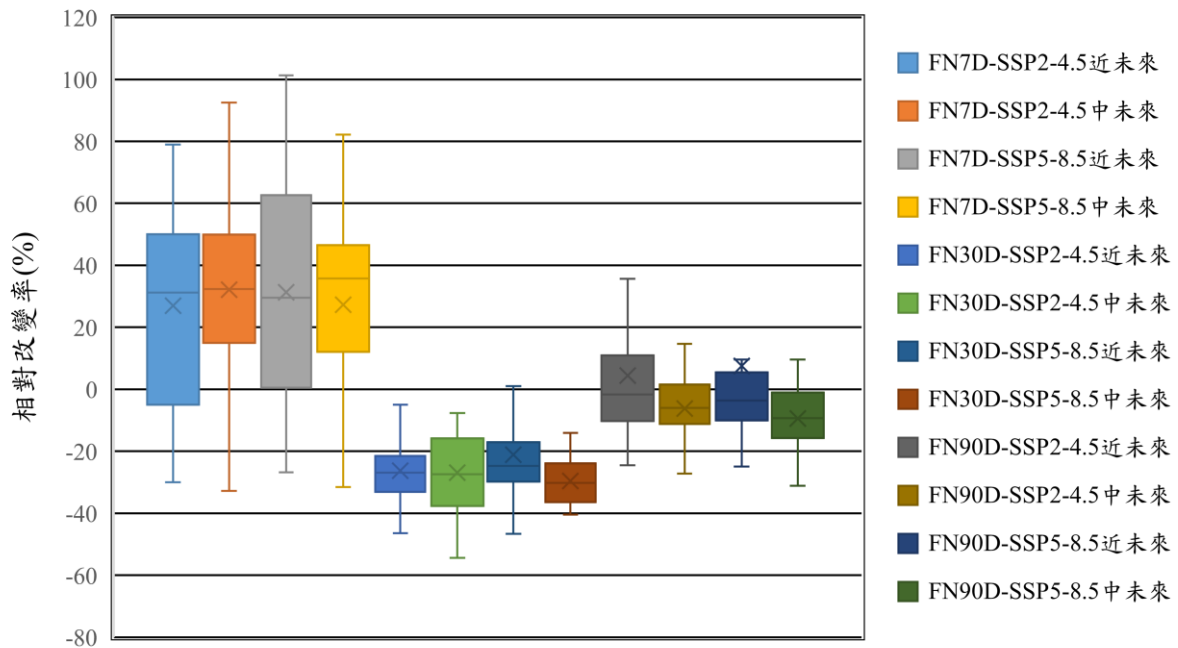


圖 5、年最小 7 日、30 日及 90 日流量平均值相對改變率

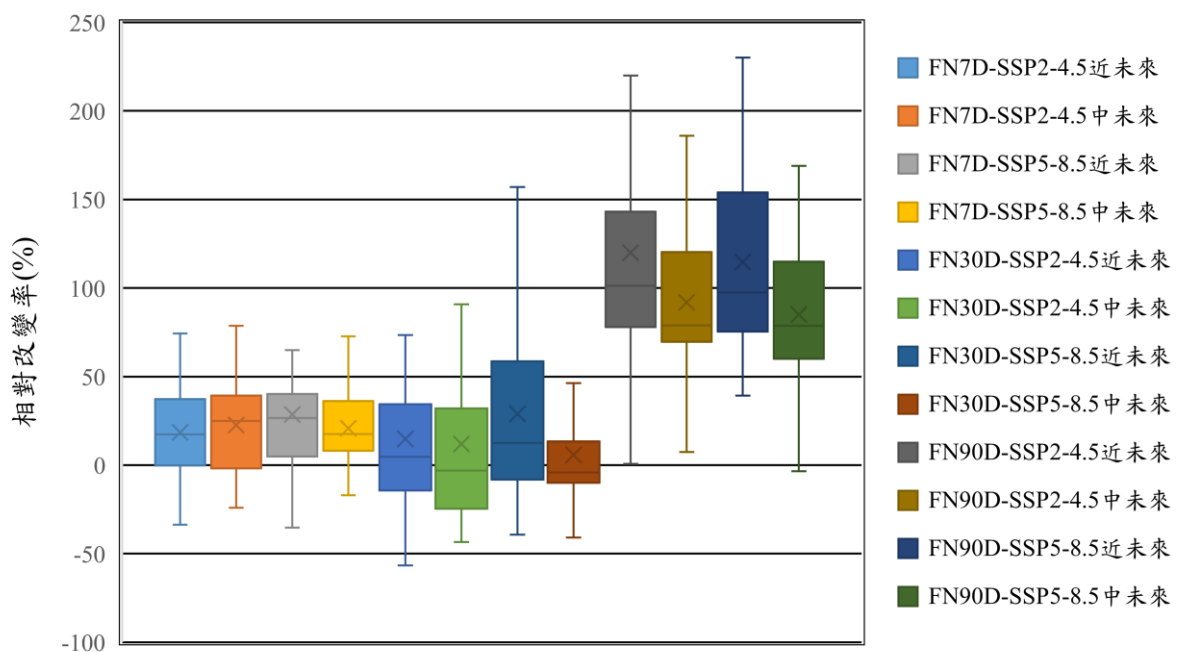


圖 6、年最小 7 日、30 日及 90 日流量標準差相對改變率

4.2 流量指數機率分布變化類型統計

為探討不同流量指數在氣候變遷情境下的分布特性變化，本研究依據各 GCM 在不同時期（2021-2040 與 2041-2060）相較基期（1995-2014）的相對改變率，分別判斷平均值與標準差相對改變率的正值或負值，並據此歸類為九種類型：

類型 I：平均值減少、標準差減少；

類型 II：平均值不變、標準差減少；

類型 III：平均值增加、標準差減少；

類型 IV：平均值減少、標準差不變；

類型 V：平均值不變、標準差不變；

類型 VI：平均值增加、標準差不變；

類型 VII：平均值減少、標準差增加；

類型 VIII：平均值不變、標準差增加；

類型 IX：平均值增加、標準差增加。

其中，變化範圍在 3% 以內視為不變。

各流量指數 25 個 GCM 模式平均值及標準差相對改變率屬於這 9 種類型的個數如表 2 所示，年總量（FTOT）與豐水期流量（FWS）在 SSP2-4.5 情境下多呈現平均與變異同步增加，SSP5-8.5 情境則較常出現平均下降但變異增加的情形，顯示暖化加劇可能削弱平均入流量並增加年際波動，但年總量 SSP5-8.5 中未來較多模式出現平均值與標準差皆增加。枯水期流量（FDS）各情境普遍為平均與變異同為增加，但在 SSP5-8.5 中未來，平均增加的趨勢不如 SSP2-4.5 一致。整體而言，SSP2-4.5 情境更傾向平均與變異同步上升，而 SSP5-8.5 情境則可能出現平均下降伴隨變異增加。

極端高流量指數（FX1D、FX2D）在不同情境下分布較分散，SSP2-4.5 情境中部分呈現平均與變異同增，但 SSP5-8.5 情境皆出現平均下降伴隨變異增加，顯示暖化加劇可能削弱極端高流量強度並提升不確定性。季節指數（SI）在各情境與期程中多呈現平均與變異同步增加，反映年內流量分布將更集中於少數月份，且年際差異加大。

短延時低流量指數（FN7D）在多數情境下呈現平均與變異同步增加，顯示短期低流量可能略有增多且變異性上升。相較之下，中長延時低流量指數（FN30D、FN90D）則多為平均下降伴隨變異增加，反映長延時低流量減少，但發生強度與頻率的年際波動加劇。

表 2、不同情境與期程下流量指數平均值與標準差的變化類型統計表（單位：個）

流量指數	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX
FTOT-SSP2-4.5 近未來	2	3	0	0	0	0	4	2	14
FTOT-SSP2-4.5 中未來	5	2	0	0	0	0	5	4	9
FTOT-SSP5-8.5 近未來	3	1	2	1	1	0	6	5	6
FTOT-SSP5-8.5 中未來	5	0	1	1	0	0	8	2	8
FWS-SSP2-4.5 近未來	2	2	0	0	1	0	4	3	13
FWS-SSP2-4.5 中未來	5	2	0	0	0	0	6	4	8
FWS-SSP5-8.5 近未來	2	1	2	2	1	0	6	5	6
FWS-SSP5-8.5 中未來	6	0	1	0	0	1	8	2	7
FDS-SSP2-4.5 近未來	0	0	0	0	0	0	3	4	18
FDS-SSP2-4.5 中未來	1	0	0	0	0	0	6	3	15
FDS-SSP5-8.5 近未來	0	0	0	0	0	0	4	5	16
FDS-SSP5-8.5 中未來	0	0	0	0	0	0	12	1	12
FX1D-SSP2-4.5 近未來	3	0	3	4	0	0	3	2	10
FX1D-SSP2-4.5 中未來	7	2	1	0	1	2	3	3	6
FX1D-SSP5-8.5 近未來	6	0	3	2	0	1	8	2	3
FX1D-SSP5-8.5 中未來	8	0	0	2	0	0	8	4	3
FX2D-SSP2-4.5 近未來	4	0	2	2	0	0	9	2	6
FX2D-SSP2-4.5 中未來	8	0	2	1	0	0	8	2	4
FX2D-SSP5-8.5 近未來	8	1	0	2	0	0	8	3	3
FX2D-SSP5-8.5 中未來	10	0	0	1	0	0	9	1	4
FN7D-SSP2-4.5 近未來	5	0	1	0	0	0	1	0	18
FN7D-SSP2-4.5 中未來	2	0	3	2	0	0	0	0	18
FN7D-SSP2-4.5 中未來	4	0	1	0	0	0	2	0	18
FN7D-SSP5-8.5 近未來	2	0	2	0	0	0	3	0	18
FN30D-SSP2-4.5 近未來	11	0	0	0	0	0	13	0	1
FN30D-SSP2-4.5 中未來	14	0	0	0	0	0	11	0	0
FN30D-SSP5-8.5 近未來	8	0	0	0	0	0	14	1	2
FN30D-SSP5-8.5 中未來	13	0	0	1	0	0	11	0	0
FN90D-SSP2-4.5 近未來	0	0	0	1	0	0	11	4	9
FN90D-SSP2-4.5 中未來	0	0	0	0	0	0	17	2	6
FN90D-SSP5-8.5 近未來	0	0	0	0	0	0	15	2	8
FN90D-SSP5-8.5 中未來	1	0	0	0	0	0	17	4	3
SI-SSP2-4.5 近未來	0	2	2	0	1	2	0	5	13
SI-SSP2-4.5 中未來	0	2	2	0	0	3	1	7	10
SI-SSP5-8.5 近未來	0	3	1	0	0	1	0	9	11
SI-SSP5-8.5 中未來	1	2	1	0	0	2	1	10	8

4.3 系集平均改變率分析

表 3 與圖 7 所示為流量指數平均值相對改變率系集平均，年總量（FTOT）與豐水期流量（FWS）在 SSP2-4.5 近未來期均呈現增加（4.29%與 4.04%），但在 SSP5-8.5 中未來則轉為下降（-3.54%與-3.77%），顯示高排放情境下長期可能導致總入流量與豐水期入流量減少。枯水期流量（FDS）則在所有情境與期程均增加，增幅介於 4.94%至 19.17% 之間，反映氣候變遷可能使枯水期入流量增加。

極端高流量指數 (FX1D、FX2D) 普遍變化幅度較小，在 SSP5-8.5 中未來呈現下降 (-3.71%與-8.01%)，顯示高排放情境下，短延時極端高流量可能減弱。低流量指數方面，FN7D 在各情境各期程均顯著增加，但 FN30D 與 FN90D 在 SSP5-8.5 中未來分別下降 2.53%與 9.48%，顯示 SSP5-8.5 中未來長延時低流量可能衰退。季節指數 (SI) 在所有情境期程中均為正值，代表年內流量分布不均性將持續加劇。

表 3、各流量指數於不同情境與期程下的平均值相對改變率系集平均 (單位：%)

情境與期程	FTOT	FWS	FDS	FX1D	FX2D	FN7D	FN30D	FN90D	SI
SSP2-4.5 近未來	4.29	4.04	13.31	3.33	-1.62	26.92	-26.26	4.47	3.10
SSP2-4.5 中未來	0.70	0.19	19.17	-0.17	-4.19	32.15	-26.87	-6.20	2.75
SSP5-8.5 近未來	-0.05	-0.49	16.00	-0.35	-4.86	31.29	-21.13	7.56	2.15
SSP5-8.5 中未來	-3.54	-3.77	4.96	-3.71	-8.01	27.31	-29.63	-9.48	1.67

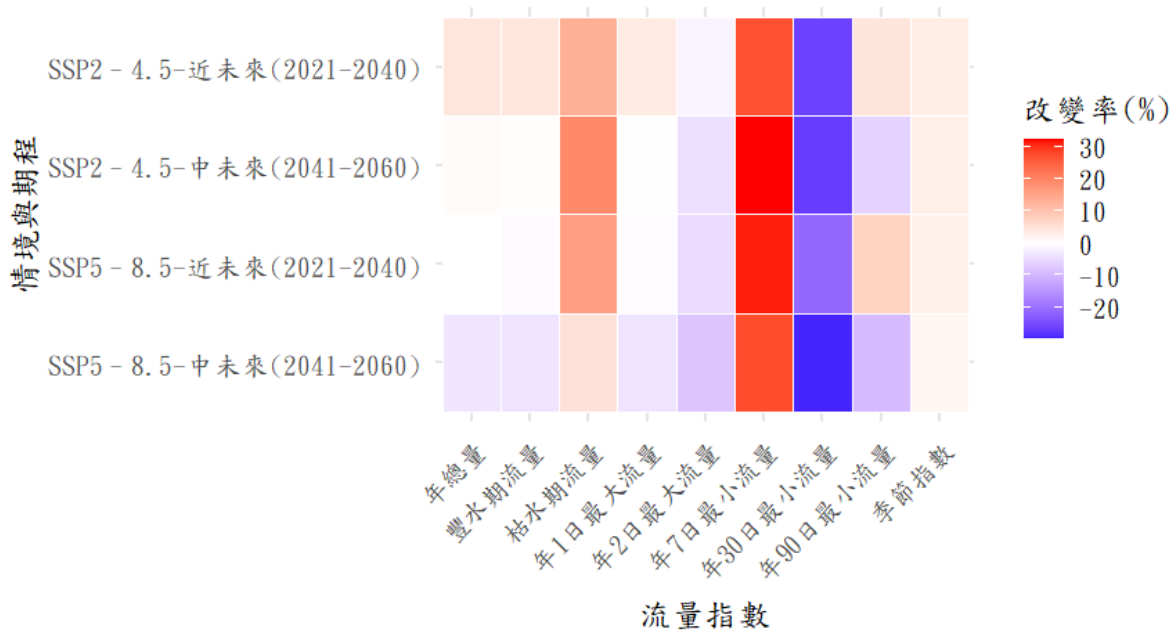


圖 7、南化水庫入流量流量指數平均值相對改變率系集平均熱圖

表 4 與圖 8 所示為流量指數標準差相對改變率系集平均，標準差的相對改變率系集平均多為正值，尤其在枯水期流量與低流量指數 (FN7D、FN30D、FN90D) 最為顯著，其中 FN90D 在 SSP2-4.5 與 SSP5-8.5 近未來分別增加 119.92%與 114.59%，FN7D 與 FN30D 亦全面增加但幅度較小 (5.68%至 29.01%)，顯示未來長期低流量的年際變異將大幅提高。相對而言，FX1D 與 FX2D 的標準差變化幅度較低 (2.45%至 13.78%)，顯示極端事件的年際變異僅有小幅增加。

表 4、各流量指數於不同情境與期程下的標準差相對改變率系集平均（單位：%）

情境與期程	FTOT	FWS	FDS	FX1D	FX2D	FN7D	FN30D	FN90D	SI
SSP2-4.5 近未來	18.68	18.34	71.30	6.37	13.78	18.43	14.76	119.92	21.00
SSP2-4.5 中未來	14.86	14.44	86.93	2.45	8.95	22.64	11.84	91.87	19.98
SSP5-8.5 近未來	14.65	14.45	75.90	7.99	13.73	28.47	29.01	114.59	22.63
SSP5-8.5 中未來	11.17	10.73	62.50	4.14	7.75	20.72	5.68	85.05	20.46

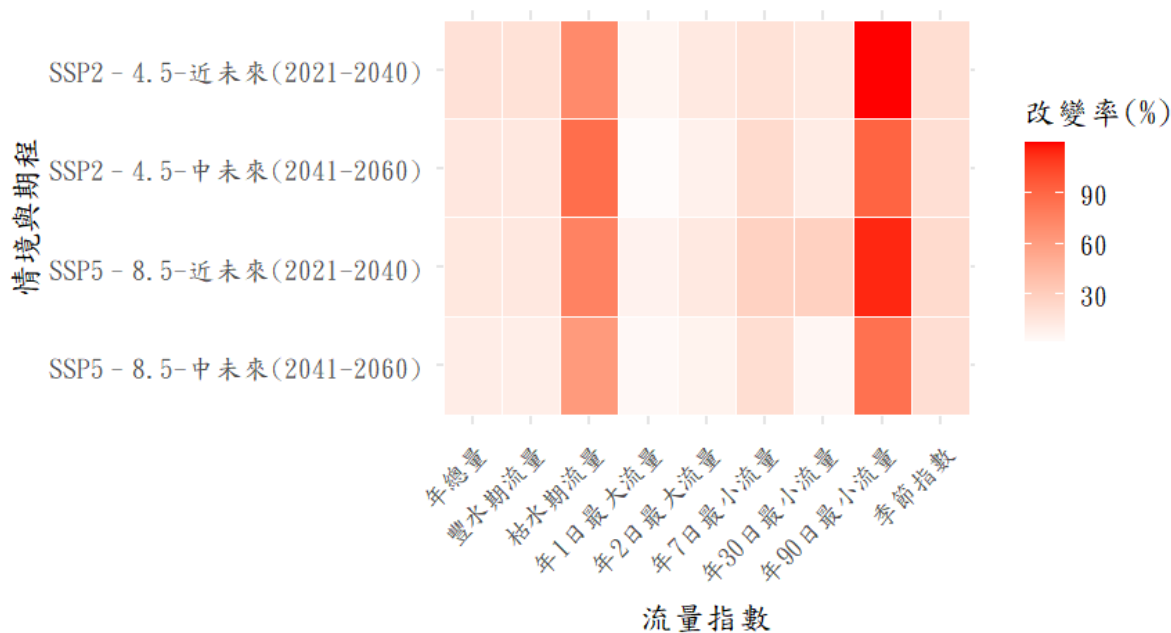


圖 8、南化水庫入流量流量指數標準差相對改變率系集平均熱圖

五、 結論與建議

依據本研究對南化水庫入流量指數在不同氣候變遷情境及未來時期的分析結果，可獲致以下結論：

1. 在 SSP2-4.5 情境下，多數流量指數呈現平均與變異同步增加，顯示中排放情境下未來入流量及其年際波動普遍上升。
2. 在 SSP5-8.5 情境下，總流量與豐水期流量多為平均下降伴隨變異增加，顯示暖化加劇可能減少入流量並提高波變動性。
3. 枯水期流量在多數情境下皆增加，但 SSP5-8.5 中未來一致性下降，顯示枯水期變化不確定性較高。
4. 極端高流量指數 (FX1D、FX2D) 在 SSP5-8.5 情境下普遍減少，且變異增加，增加洪水事件發生的不確定性。

5. 季節指數平均與變異皆上升，反映年內流量分布更加集中於少數月份，年際差異擴大。
6. 短延時低流量(FN7D)平均略增且變異擴大，中長延時低流量(FN30D、FN90D)則減少但波動加劇。

本文針對研究成果提出以下幾點建議，作為未來研究方向與應用參考：

1. 引入 Kullback-Leibler 散度 (KLD) 方法，量化不同時期流量指數的機率分布差異，以補足系集平均在正負變化互相抵消時的不足。
2. 可加入更多不同型態的流量指數進行比較分析，讓氣候變遷下水庫入流特性的變化能被更全面、多元地掌握。透過流量指標的擴充，不僅能提高評估的精確度，也有助於釐清極端事件、季節分布及長短期低流量變動等多層次的水資源風險，增強結果的參考價值與應用彈性。
3. 未來可進一步將南化水庫入流量的變化結果，結合水資源系統的實際運作與風險評估，針對供水安全、調度管理及枯水期應變等層面進行分析。這將有助於提前發現潛在供水危機，並提升氣候變遷下南化水庫整體水資源調適與韌性的規劃效益。

六、 謝誌

本研究承國科會經費補助 (NSTC113-2221-E-006-059-MY2)，謹致謝忱。

七、 參考文獻

1. Donat, M. G., Lowry, A. L., Alexander, L. A., O’Gorman, P. A., & Maher, N. (2016). More extreme precipitation in the world’s dry and wet regions. *Nature Climate Change*, 6(5), 508-513.
2. Faghih, M., & Brissette, F. (2023). The role of internal climate variability on future streamflow projections. *Journal of Hydrology*, 625, 130101.
3. Imteaz, M., & Hossain, I. (2023). Climate change impacts on ‘seasonality index’ and its potential implications on rainwater savings. *Water Resources Management*, 37(6-7), 2593-2606.
4. IPCC. (2021). Sixth assessment report (AR6). Intergovernmental Panel on Climate Change. Retrieved from <https://www.ipcc.ch/assessment-report/ar6/>
5. Mallakpour, I., Sadegh, M., & AghaKouchak, A. (2018). A new normal for streamflow in California in a warming climate: Wetter wet seasons and drier dry seasons. *Journal of Hydrology*, 567, 203-211.
6. Milly, P. C. D., Betancourt, J., Falkenmark, M., Hirsch, R. M., Kundzewicz, Z. W.,

- Lettenmaier, D. P., & Stouffer, R. J. (2008). Stationarity is dead: Whither water management? *Science*, 319(5863), 573-574.
7. Murphy, C., Kettle, A., Meresa, H., Golian, S., Bruen, M., O'Loughlin, F., & Mellander, P. E. (2023). Climate change impacts on Irish river flows: High resolution scenarios and comparison with CORDEX and CMIP6 ensembles. *Water Resources Management*, 37(5), 1841-1858.
 8. Vidal, J. P., Hingray, B., Magand, C., Sauquet, E., & Ducharne, A. (2016). Hierarchy of climate and hydrological uncertainties in transient low-flow projections. *Hydrology and Earth System Sciences*, 20(9), 3651-3672.
 9. Zhang, Y., & Fueglistaler, S. (2019). Mechanism for increasing tropical rainfall unevenness with global warming. *Geophysical Research Letters*, 46(24), 14836-14843.
 10. 國家科學及技術委員會補助專題研究計畫報告,學門主題式計畫—南區新興水源探索與整合技術研發計畫, NSTC 112-2221-E-006-147,(2024).