

氣候變遷下流域環境及永續農業調適策略之制定及評估-以石門水庫上游集水區為例

ESTABLISH THE SUSTAINABLE AGRICULTURE ADAPTATION STRATEGIES
OF THE BASIN UNDER CLIMATE CHANGE- A CASE OF SHIHMEN RESERVOIR

國立臺灣師範大學
地理學系
博士候選人

林冠州
Guan-Zhou Lin

摘要

氣候環境改變將影響流域環境生態並威脅未來糧食生產，了解未來環境變化下臺灣高山集水區水資源及作物生長變化並進行調適為維持上游高山集水區永續發展之關鍵。本研究利用 TCCIP AR5 之統計降尺度資料及 SWAT 模式針對石門水庫上游集水區進行模擬，結合水足跡指標概念針對未來流域環境變化進行分析，針對未來石門水庫上游集水區之農業耕作進行調適以維持上游生態之永續發展。SWAT 模式於 RCP4.5 及 RCP8.5 世紀末之模擬成果說明未來石門水庫上游集水區將面臨降雨乾濕季分布不均之問題，於最嚴峻之 RCP8.5L 情境下乾季藍水平均將下降約 18%，濕季平均將增加 28%，對於石門水庫未來水資源供給有著顯著的威脅與挑戰。此外由於濕季降雨強度增強沖刷大量肥料進入河川於 RCP4.5L 情境下 8 月至 10 月平均需要增加 137% 的灰水量；於 RCP8.5L 情境下 6 月至 11 月的平均灰水需求量增加約 29% 以上成果接說明氣候變遷下若維持原本農業耕作型態將對河川及水庫水質造成嚴重影響並影響作物產量 (RCP8.5L 情境將下降約 21 ~ 36%)。為此本研究嘗試針對施肥量較高的高麗菜園進行轉作，根據轉作成果顯示若於濕季進行地瓜轉作，平均可削減約 10% 的硝酸鹽氮輸出量，全轉作成地瓜平均將能削減約 16% 的硝酸鹽氮輸出量，且地瓜產量於氣候變遷下仍能維持一定產量，高麗菜轉作成地瓜同時亦能提供比原本高出約 4 ~ 5 倍的營養供給量，模式成果亦說明農業轉作及調適將有效於未來氣候變遷情境下達到維持臺灣糧食安全及高山集水區河川生態之永續發展之目標。

關鍵詞：石門水庫上游集水區、SWAT 模式、水足跡、調適策略、流域永續發展。

* 通訊作者，國立臺灣師範大學地理學系博士候選人

106 台北大安區和平東路一段 162 號 · e78272135@gmail.com

ESTABLISH THE SUSTAINABLE AGRICULTURE ADAPTATION STRATEGIES OF THE BASIN UNDER CLIMATE CHANGE- A CASE OF SHIHMEN RESERVOIR

Guan-Zhou Lin

Doctoral Candidate, Department of Geography,
National Taiwan Normal University

ABSTRACT

Climate change will affect the environment and ecology of the watershed and threaten food production in the future. Understanding the differences in water resources and crop growth in watersheds under climate change and making adjustments are the key points to maintaining the sustainable development of upstream high mountain watersheds. In this study, the statistical downscaling weather data, generated from TCCIP AR5 and SWAT model were applied to simulate the upstream watershed of Shihmen Reservoir, and combined with the water footprint concept to analyze the environmental changes of the basin in the future. The simulated results of the SWAT model under the RCP4.5L and RCP8.5L indicated that the upstream watershed of Shihmen Reservoir would face the impact of uneven distribution of precipitation in the wet and dry seasons. Under the most severe RCP8.5L scenario, the blue water will decrease by about 18 % in the dry season, and the wet season will increase by about 28 %, demonstrating a significant threat and challenge to the water supply of Shihmen Reservoir in the future.

In addition, the increased rainfall intensity in the wet season, a large number of fertilizers were washed into the river channel, and the average amount of gray water demand from August to October under the RCP4.5L scenario had to increase by 137 %; under the RCP8.5L scenario, the average graywater demand have to increase by 29 % from June to November. The results demonstrate that maintaining agricultural farming under climate change will seriously affect the water quality of the river and also affect the crop yield (crop yield will decrease by about 21 – 36 % in the RCP8.5L scenario). Therefore, this study attempts to convert cabbage gardens with high fertilization rate. According to the results of conversion, if the sweet potato is converted in the wet season, the export of nitrate can be reduced by about 10 %. The export of nitrate can be reduced by about 16 %, and the yield of sweet potatoes can still maintain a certain yield under climate change. Conversion to sweet potatoes will provide about 4 to 5 times the original nutritional value. This study showed that agricultural transformation and adaptation will be effective in achieving the goal of maintaining food security and sustainable development of river ecology in high mountain watersheds under future climate change scenarios in Taiwan.

Keywords: Upstream watershed of Shihmen reservoir, SWAT model, Water footprint, Adaptation strategies, Sustainable development.

一、前言

全球氣候變遷對於水資源分配及糧食生產有著顯著的衝擊及影響 (Lesk *et al.*, 2016; Qin *et al.*, 2019)，人口增長及農業耕作亦造成水資源供給不足及水質惡化等問題 (Michalak, 2016)。面對全球氣候變遷的衝擊，臺灣亦無法倖免，乾濕季降雨分布改變及高山農業將使臺灣上游集水區面臨更為嚴峻的挑戰，尤以極端降雨事件增強將使肥料大量沖刷進河川造成水質污染及優養化等影響尤為顯著 (Whitehead *et al.*, 2009)，氣候變遷下農業轉作及重新分配已成為目前全球廣泛討論的議題 (Davis *et al.*, 2017)。流域水資源的來源及利用對象不同代表不同的意義，由此水足跡理論開始被學者定義並廣泛應用於水資源評估，水足跡概念即將流域的水資源區分為藍水、綠水及灰水，分別對應不同的使用對象及來源，藉由水足跡指標數值變化能有效運用於氣候變遷對於流域生態系統服務之分析 (Vanham, 2016)，目前已有多國運用水足跡方法評估流域水資源及環境變遷 (Ahmadi *et al.*, 2021; Shrestha *et al.*, 2017) 及全球永續發展目標之評估應用 (Berger *et al.*, 2021)

SWAT 模式為全球普遍應用之複合型流域評估模式，該模式具備多項模組能模擬水流移動路徑、水污染傳遞以及作物生長變化，並運用於全球多個地區人為活動及氣候變遷之衝擊及影響之模擬及分析 (Gassman *et al.*, 2007; Tan *et al.*, 2019, 2020)。臺灣亦有多個 SWAT 模式應用案例分析流域輸砂及農業耕作於上游集水區污染輸出模擬分析 (Chiang *et al.*, 2021; G.-Z. Lin *et al.*, 2022)。SWAT 模式內針對地表逕流、土壤水以及作物蒸發散變化等模擬正可用於流域水足跡之計算，已有相當的研究案例運用 SWAT 模式機制量化流域水資源分佈並搭配水足跡概念框架進行生態系統評估 (Luan *et al.*, 2018; Xie *et al.*, 2020)。鑑於全球環境變遷及永續發展推廣，減少氣候環境改變及農業活動對於流域生態系統之衝擊及危害為目前世界相當重視的一環，農業耕作行為及相關調適策略亦普遍應用於流域環境管理 (Mishra *et al.*, 2018)，區域案例包含印度 (Davis *et al.*, 2018) 及美國 (Davis, Seveso, *et al.*, 2017) 等地區皆有分析作物轉作對於區域水足跡變化及效益，提供最佳化之農業耕作策略建議。

石門水庫為臺灣北部重要之水庫，然而近年來由於降雨分布不均及強降雨事件使桃園地區水資源供給及水庫水質皆面臨嚴峻的挑戰及影響，根據 2021 年國家災害科技防救中心之統計，桃竹苗地區面臨史無前

例的停灌休耕，更產生驚人農業虧損。為探討氣候變遷對於石門水庫上游集水區水資源、水質及作物產量之影響，並制定永續農業耕作調適策略以期達到聯合國近年提倡之全球永續發展目標，本研究運用 SWAT 模式及 TCCIP AR5 統計降尺度之 GCM 模式產製的天氣資料模擬 RCP4.5 及 RCP8.5 於世紀末之水足跡及產量變化，並根據未來氣候變遷下環境變化針對高山農業進行永續農業策略評估，提供未來作物耕作及施肥之相關建議及成效，以期在未來全球氣候變遷嚴峻的挑戰下達到石門水庫上游集水區生態環境系統永續發展並減少集水區農業產量損失之目的。

二、研究方法及流程

2.1 研究區域

石門水庫位於淡水河最大支流大漢溪上，每日平均由水庫調蓄之供水量約 80 萬立方公尺，總供水量最大可達 148 萬立方公尺，主要供應新北市、桃園市及新竹縣湖口鄉之公共用水。石門水庫上游集水區總面積約 763 平方公里 (圖 1)，集水區高程介於 136 至 3,494 m 之間，該地區年平均降雨量大約 2,500 mm，入流至水庫的水量約為 1,424 百萬噸/年。石門水庫上游集水區土地利用以森林為主 (約佔 92%)，其次為農地 (1.3%)、果樹 (1.7%)、都市 (1.3%)、裸露地 (1.1%)、草地 (0.5%)、與水體 (2.1%)。土壤分布則以紅壤所占比最高約為 73%，其次為岩石地約 24%，崩積土約為 1%，石質土 1% 及沖積土 1%。石門水庫普遍水質為普養至優氧，主要導因於農業耕作及崩塌地面積的增加，農業耕作尤以高施肥量的高麗菜種植對於水庫水質具有嚴重的威脅。

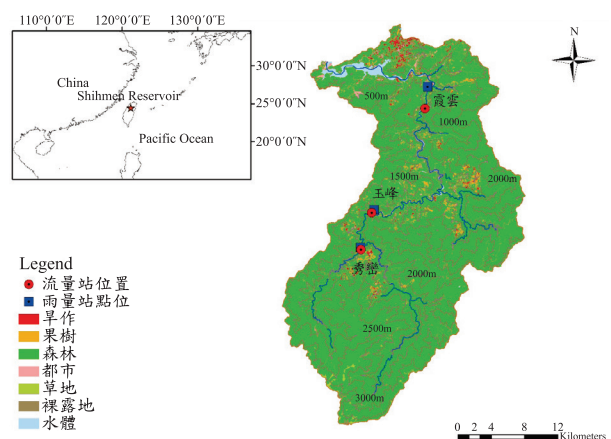


圖 1 石門水庫上游集水區土地利用及流量測站分佈圖

表 1 石門上游各子集水區地景特徵及土地利用

測站	面積 (km ²)	平均坡度 (%)	最低高程 (m)	最高高程 (m)	平均高程 (m)	最小流量 (cms)	最高流量 (cms)
秀巒	118.2	70.14	828	3,375	1,892	0.52	331
玉峰	332.9	61.03	823	3,494	1,669	0.27	920
霞雲	609.4	68.81	238	3,494	1,562	6.84	2,071
測站	農地(%)	果樹 (%)	森林 (%)	都市 (%)	草地 (%)	裸露地 (%)	水體 (%)
秀巒	0.52	0.86	95.89	0.27	0.78	0.97	0.71
玉峰	0.52	0.87	95.52	0.35	0.76	1.31	0.68
霞雲	0.68	1.62	94.04	0.79	0.59	1.27	1.02

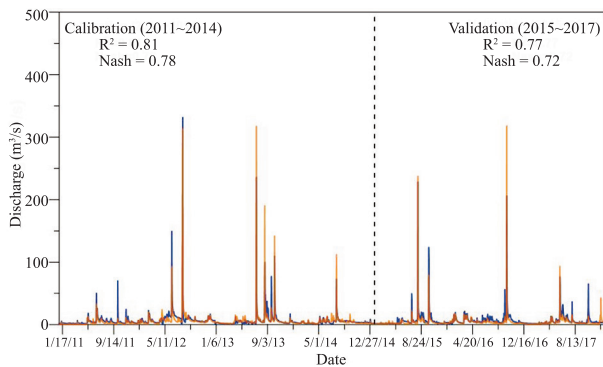


圖 2 秀巒集水區流量測站檢定驗證成果

石門水庫上游集水區共有五個流量測站，包含秀巒、玉峰、稜角、高義與霞雲等站，經由流量與天氣資料之蒐集與分析，本研究挑選流量資料年段完整的流量測站做為模式檢定驗證之標的，測站分別為秀巒、玉峰及霞雲，資料年段為 2011 年至 2017 年共六年，氣象資料則採用復興、秀巒、玉峰、及霞雲等四個天氣測站自 2008 至 2017 共 10 年資料進行模式之建立及流量之模擬。各流量測站之流量變異及子集水區大小如表 1 所示，秀巒集水區為流域最上游，子集水區面積為 118.2 平方公里，平均高程約為 1,892 m，玉峰集水區位於中游，子集水區面積為 332.9 平方公里，平均高程為 1,669 m，霞雲集水區位於最靠近庫區的測站，子集水區為 609.4 平方公里，平均高程為 1,562 m，從測站最小流量及最高流量數值顯示出石門水庫上游集水區流量變異大的特徵，面臨極端天氣事件的威脅下季節性流量變異將更為顯著。

2.2 水文、水質暨作物模擬整合模式-SWAT

SWAT 模式為半分布式 (semi-distributed) 的非點源污染模式，除了流域逕流及氮磷循環過程模擬之

外，SWAT 模式另整合 EPIC 模組，藉以模擬作物生長及土壤營養鹽吸收等機制，綜合分析流域內水文、水質及作物產量於氣候及土地利用變遷等影響。SWAT 模式建構主要應用的資料分為四個部分，分別為氣象資料、數值高程模型 (DEM)、土壤分類資料、土地利用資料。自 SWAT 與 ArcGIS 介面整合以來，憑藉 ArcGIS 內的功能套件應用於次集水區之劃設及水文反應單元 (Hydrological Response Unit, HRU)，每一種水文反應單元則是代表同一種類型的土地利用、土壤及坡度，模式經由計算並加總各水文反應單元的流量及非點源污染輸出量，能依照時間及空間尺度輸出流量、非點源污染及作物產量等資訊，廣泛應用於流域環境及災害分析等用途。

2.3 氣候變遷資料產製

全球暖化造成的天氣影響主要在溫度與雨量，溫度上升與降雨分布變化將影響流域水資源與作物生長，然而氣候變遷是屬於未來的預測，未來隨著輻射強迫力變化幅度會有不同的溫度與降雨變化，為此我們需要使用 TCCIP AR5 統計降尺度大氣模式所估算之未來各月份的溫度與總雨量變化，並搭配氣象合成模式以產製未來每日的氣象資料。由於 AR5 統計降尺度大氣模式繁多，本研究參考 Lin, C. Y., and Tung, C. P. (2017) 文章中最符合臺灣北部氣候變化之 GCM 進行未來的氣候資料產製，分別為 HadGEM2-AO、NorESM1-ME、CSIRO-Mk3-6-0、CCSM4 及 bcc-ccsn1.1n。評估未來氣候變遷於世紀末之影響需要針對未來氣象資料進行資料產製，本研究使用氣象合成模式進行未來溫度與雨量資料的產製。

溫度與降雨於未來 RCP4.5L 及 RCP8.5L 的情境資料，皆是利用石門上游集水區 1995 至 2005 區間的歷史資料為基礎進行產製，溫度及降雨推估公式如下

所示。特定氣候條件下之日溫度模擬，由月均溫度利用一階馬可夫鏈做模擬其方程式如下：

$$T_i = \mu_{Tm} + \rho(T_{i-1} - \mu_{Tm}) + v_i \sigma_T \sqrt{1 - \rho^2} \dots\dots\dots (1)$$

方程式中 T_i 為第 i 天的溫度， μ_T 為對應該月平均溫度， ρ 為該月份 T_i 與 T_{i-1} 之一階序列相關係數， v_i 屬於 $N(0,1)$ (Normal sampling deviate)， ρ_T 為歷史資料對應該月份之標準偏差。日尺度降雨模擬可分成兩部份，分別是降雨事件判別與降雨量的推估。降雨事件判別是藉由歷史降雨機率做為演算基礎，統計各月第 $I-1$ 日降雨時，第 I 日降雨的機率表示為 $P(W|W)$ ；各月中第 $I-1$ 日不降雨時，第 I 日降雨的機率表示為 $P(W|D)$ 。同時會藉由產生 0 到 1 之間的亂數 RN 作為隨機機率設定，當 RN 小於或等於該月降雨機率 $P(W)$ 時，代表此日為降雨日；利用前一日之降雨情形判定為降雨日或非降雨日，依照歷史資料的 $P(W|W)$ 或 $P(W|D)$ ，判定該日為降雨日。降雨量值之模擬由指數分佈 (Exponential distribution) 模擬出理想的氣候資料。

$$P = \mu_p \times [-\ln(1 - RN)] \dots\dots\dots (2)$$

P 為降雨量 (cm/day)； μ_p 為第 j 月兩天之平均降雨量 (cm)； RN 為介於 0 到 1 之間的隨機亂數。

2.4 流域水足跡計算方法

水足跡概念主要由 Hoekstra 於 2002 年引進 (Hung, 2002)，並用於全球與區域水資源管理評估之用途。根據水足跡概念手冊，水的供給來源可分為藍水與綠水兩種，藍水主要代表河川水 (地表水+地下水)，而灌溉、民生跟工業等用水皆為藍水，藍水供給對象主要是民眾，同時也是最直接反映缺水與否的直接指標。綠水指的是土壤水，綠水來源主要來自於降雨，綠水由於儲存於土壤，主要供給植物及土壤蒸發散，為流域維持植物生長之重要水源，綠水之變化量反映作物於流域生長之用水狀況。灰水則代表根據自然背景濃度和現有環境水質標準下河川吸收污染物負荷所需的乾淨水量。利用三項水足跡即可用於分析流域水資源需求狀況以及汙染對於流域所造成的影響，其流域水足跡對應的計算公式如下：

(1)藍水

$$\begin{aligned} \text{Blue water} = & \text{Surfaceflow} + \text{Lateral flow} \\ & + \text{Groundwater recharge} - \text{Evaporation} \\ & - \text{Water abstraction} \end{aligned} \dots\dots\dots (3)$$

藍水主要代表河川水的來源，Surfaceflow 為地表逕流，Lateral flow 為側向流，Groundwater recharge 為地下水補注河川水量，於 SWAT 模式中即為 WYLD (mm)，該數值已有許多相關用於藍水足跡之研究 (Rodrigues *et al.*, 2014)，扣除掉水體蒸發散 (Evaporation) 以及人為抽水量 (Water abstraction) 即為河川可用水量。

(2)綠水

$$\begin{aligned} \text{Green water} = & \text{Percolation} - \text{Evapotranspiration} \\ & - \text{Soil evaporation} \end{aligned} \dots\dots\dots (4)$$

綠水反應植物可吸收利用的水量，於 SWAT 模式中即為 soil water (mm)，土壤水來源主要來自入滲 (Percolation)，扣除每日植物吸收水量 (Evapotranspiration) 以及土壤蒸散 (Soil evaporation) 即為每日土壤綠水含量。

(3)灰水

$$\text{Gray water} = \frac{L}{C_{\max} - C_{\text{nature}}} \dots\dots\dots (5)$$

灰水代表人為活動所造成得汙染輸出需要多少額外的水進行稀釋以維持河川水質，上述公式的 L 代表汙染輸出量 (kg)， $C_{\max}$ 指的是河川可接受的最大汙染濃度 (ppm)，本研究河川所能接受的硝酸鹽氮最高濃度門檻值則以飲用水標準規範中的 10 ppm 做為河川可容忍的最大值， C_{nature} 為自然背景輸出量，由於缺乏相關數據，根據 Hoekstra *et al.* (2011) 可以假設為 0 進行計算。

2.5 模式設置流程及耕作設定

本研究欲探討石門水庫上游集水區氣候變遷下水資源、水質及作物產量的變化，使用 SWAT 2012 版本進行模式建置，模式建置所需資料分別有數值高程模型，土地利用及土壤土層。數值高程模型的解析度為 30 m，資料來源為 Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflect Radiometer (ASTER)，土地利用資料則來自內政部國土測繪中心發佈 2005 年調查之圖層，土壤資料則來自於政府公開平台網站開放之全國土壤測繪圖層。觀測流量資料則來自於石門水庫管理局的年報資料，觀測水質資料則來自於現地採樣，採樣時間為 2002 年至 2004 年的硝酸鹽氮濃度資料並應用 rating curve 法推估未採樣月份之輸出量。

石門水庫上游集水區農業耕作以高麗菜及水蜜桃種植為主，本研究參考農糧署作物栽培手冊中針對高麗菜及水蜜桃兩者的建議施肥量及收穫時間進行模式內

表 2 SWAT 模式石門上游集水區高麗菜施肥及耕作設定

	月	日	施肥量	肥料牌子
高麗菜種植	2	15		高麗菜種植
	3	1	5000	台肥 2 號
	3	12	400	黑旺特 42 號
	3	16	300	台肥 1 號
	4	10	300	台肥 1 號
	5	10	300	台肥 1 號
	6	21	120	台肥 1 號
	6	25		高麗菜收穫
	7	10		高麗菜種植
	7	12	5000	台肥 2 號
	7	15	400	黑旺特 42 號
	7	20	300	台肥 1 號
	8	10	300	台肥 1 號
	9	10	300	台肥 1 號
	9	21	200	台肥 1 號
	10	20		高麗菜收穫

表 3 SWAT 模式石門上游集水區水蜜桃施肥及耕作設定

	月	日	施肥量	肥料牌子
水蜜桃種植	2	15		水蜜桃生長
	2	20	160	台肥 43 號
	4	20	960	台肥 43 號
	6	12	320	台肥 43 號
	7	20		水蜜桃收穫
	8	5	160	台肥 43 號
	9	10	6000	綠林五號

表 4 SWAT 模式石門上游集水區地瓜施肥及耕作設定

	月	日	施肥量	牌子
地瓜種植	3	1		地瓜種植
	3	2	350	台肥 4 號
	3	10	200	台肥 4 號
	5	10	200	台肥 4 號
	7	1		地瓜收穫
	7	5		地瓜種植
	7	6	350	台肥 4 號
	7	12	200	台肥 4 號
	8	21	600	台肥 4 號
	11	15		地瓜收穫

部設定，如表 2 及表 3 所示。除了探討氣候變遷對於水資源、水質及作物產量的影響，耕作調適策略亦為本研究之重點，調適策略情境主要以農業轉作為出發點，探討氣候變遷下轉作或施肥需改變之時機點，根據高山地區常種植旱作評估氣候變遷下轉作效益，本研究將以地瓜作物種植進行調適情境假設並分析其可行性，地瓜作物施肥時機及收穫時間等如表 4 所示。

2.6 SWAT 模式率定驗證及目標函數說明

SWAT-CUP 為美國特別為 SWAT 模式設計之參數率定軟體，包含許多參數率定方法，例如 SUFI-2、GLUE 及蒙地卡羅等，其中 SUFI-2 方法可以進行敏感性分析與不確定性分析 (Abbaspour, 2007)，較廣為使用。SWAT 模式參數的不確定性可以透過 SUFI-2 方

法彙整，在符合可接受的模式模擬成果下取得參數最小的不確定範圍 (Abbaspour, 2007)。使用 SWAT-CUP 進行率定時，需設定參照何種目標函數做為模式參數最佳化之參考依據，本研究預計使用 Coefficient of determination (R^2)，Nash-Sutcliffe efficiency (NSE) 與 Percentage bias (百分比誤差) 三者作為率定流量、水質與產量參數的目標函數。模式參數率定驗證之目標函數門檻值，本研究參考 Moriasi *et al.* (2015) 彙整全球 100 多篇流量及非點源污染模擬成果所定義的目標函數門檻值，作為模式率定驗證是否最佳化之判斷依據。模式率定驗證表現於文章內分為不滿意、滿意、良好及非常好四個層別，本研究於石門上游集水區各流量測站日時間尺度的流量與月尺度非點源污染參數率定驗證將以滿意 (Satisfactory) 所對應的目標門檻值範圍作為模式參數率定之標準。

三、研究結果與討論

3.1 石門水庫上游集水區流量、水質及產量檢定驗證

本研究採用石門水庫上游集水區內的 3 個流量測站資料進行集水區檢定驗證，流量站資料在颱風季有資料監測不全與損毀的情況，為此本研究參考石門水

庫管理局每日水庫入流量資訊與各測站流量資料進行迴歸，求得線性公式以水庫入流量資料進行上游集水區缺漏流量之推估，對比入流量與各個測站的相關性其 R^2 皆有 0.75 以上，顯示上游流量與水庫入流量為良好的線性關係，可用來推估颱風季及缺損之流量資訊。流量及水質參數檢定選擇參考自 Guse *et al.* (2014)；Lam *et al.* (2010) 及 Yen *et al.* (2014) 等文獻，作物參數調整選擇參考自 Trybula *et al.* (2015)，每個子集水區流量參數的檢定選擇有所不同，其原因為參數對應的模擬尺度不同，舉例而言，參數可分為整體流域只有一個數值，而土地利用 CN 值參數則根據各子集水區分別進行調整，各參數對應的土地利用英文代號分別為農地 (AGRL)、果園 (ORCD)、森林 (FRSE)、草地 (PAST)、裸露地 (BARR)。

3.1.1 秀巒集水區流量檢定驗證成果

秀巒集水區為石門上游地區最上游的集水區，集水區面積為 118 平方公里，流量檢定時間為 2011 年至 2014 年，流量驗證時期為 2015 至 2017 年。流量檢定成果如圖 3，藍色線為觀測值，橘色線為模擬值，流量檢定成果 R^2 為 0.81、Nash 值為 0.78，根據 Moriasi *et al.* (2015) 文章中的檢定參數與表現好壞之對照，此模擬是位於良好的範圍內，驗證成果 R^2 為 0.77、Nash 值為 0.72，驗證成果位於良好的範圍內。表 5 為秀巒集水區參數檢定成果，本計畫將土地利用個別進行 CN

表 5 秀巒集水區流量檢定驗證參數表

Parameter	Method	Sensitivity rank	Fitted Value	Min Value	Max Value
CN2 (AGRL)	relative	11	-0.16	-0.24	-0.08
ALPHA_BF	replace	17	0.64	0.57	0.72
GW_DELAY	replace	16	23.85	0.00	30.76
GWQMN	replace	7	3100.27	2704.02	4509.27
CN2 (FRSE)	relative	2*	-0.36	-0.47	-0.30
CN2 (URLD)	relative	13	-0.50	-0.50	-0.48
CN2 (PAST)	relative	9	0.28	0.12	0.42
CN2 (BARR)	relative	15	-0.27	-0.29	-0.09
CN2 (ORCD)	relative	5*	-0.38	-0.50	-0.24
RCHRG_DP	replace	14	0.91	0.86	0.95
REVAPMN	replace	20	133.13	0.00	174.82
GW_REVAP	replace	6	0.04	0.02	0.16
SHALLST	replace	19	4224.79	2930.02	5000.00
DEEPST	replace	12	2571.44	292.42	4996.28
SOL_AWC	relative	1*	0.48	0.18	0.50
SOL_K	relative	3*	0.15	-0.11	0.18
ESCO	replace	4*	0.02	0.00	0.28
CH_N2	replace	8	0.04	-0.01	0.04
ALPHA_BNK	replace	18	0.47	0.25	0.62
GW_SPYLD	replace	10	0.23	0.22	0.36

*p value<0.05

值的百分比調整，其餘參數則是依照模式建議最大最小參數範圍進行挑選替代，敏感性分析排行前五名其 p value 小於 0.05 具有顯著意義。秀巒集水區最敏感參數為 SOL_AWC 土壤田間含水量，第二敏感的參數為森林的 CN 值，第三敏感的參數為 SOL_K 土壤水力傳導度，第四敏感參數為 ESCO，第五敏感的參數為果園之 CN 值參數。由敏感性分析可發現，秀巒集水區為較上游且坡度較陡之流域，流量反應變化快，CN 值參數與土壤含水量之參數對於上游流域流量影像較大，同時反應上游集水區若因開墾變更土地利用行為，將使該流域水文特性有明顯之影響。

3.1.2 玉峰集水區流量檢定驗證成果

玉峰集水區位於石門水庫上游集水區中間，集水區面積為 332.9 平方公里，流量檢定時間為 2011 年至 2014 年，流量驗證時期為 2015 至 2017 年。流量檢定驗證成果如圖 3，藍色線為觀測值，橘色線為模擬值，流量檢定成果 R^2 為 0.86、Nash 值為 0.78，根據 Moriasi *et al.* (2015) 文章中的檢定參數與表現好壞之對照，此模擬是位於良好的範圍內，流量驗證成果 R^2 為 0.88、Nash 值為 0.84，此驗證是位於非常好的範圍內。表 6 為玉峰集水區參數檢定成果，敏感性分析排行前五名其 p value 小於 0.05 具有顯著意義，從敏

感性分析成果顯示玉峰集水區的森林 CN 值為最敏感的參數，檢定成果為 -0.38，該集水區森林水流移動路徑對於河川流量變化最為敏感，第二敏感參數為土壤田間含水量比例，檢定成果為 0.35，第三敏感的參數為 ESCO，土壤蒸發散補充係數檢定成果為 0.02，第四敏感的參數為 SOL_K 土壤水力傳導度，檢定成果為 -0.01，意指相較於原始土壤參數，該流域的土壤水力傳導度較低。以上參數除了 CN 值，多數參數皆與土壤水和地下水補注機制相關，說明玉峰集水區長時間河川流量多來自於土壤及地下水。

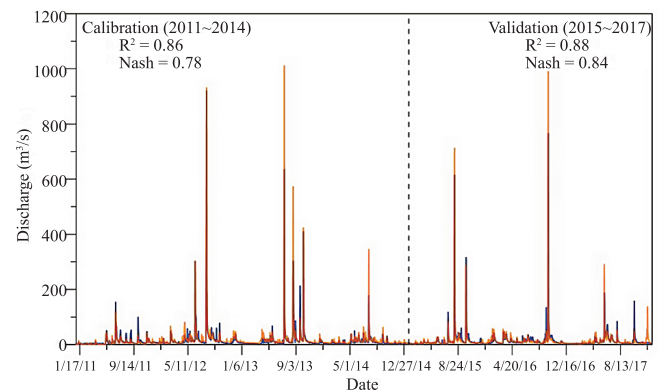


圖 3 玉峰集水區流量測站檢定驗證成果

表 6 玉峰集水區流量檢定驗證參數表

Parameter Name	Method	Sensitivity rank	Fitted Value	Min Value	Max Value
CN2 (AGRL)	replace	20	-0.18	-0.22	0.03
ALPHA_BF	replace	9	0.30	0.14	0.43
GW_DELAY	replace	10	65.19	21.94	66.67
GWQMN	replace	17	968.76	547.06	3267.67
CN2 (FRSE)	relative	1*	-0.38	-0.55	-0.21
CN2 (URLD)	relative	16	-0.47	-0.55	-0.17
CN2 (PAST)	relative	12	-0.18	-0.28	0.10
CN2 (BARR)	relative	13	-0.18	-0.26	0.11
CN2 (ORCD)	relative	6	0.18	0.04	0.30
RCHRG_DP	replace	14	0.89	0.69	1.12
REVAPMN	replace	11	209.71	67.50	251.94
GW_REVAP	replace	19	0.02	-0.02	0.10
SHALLST	replace	18	4136.52	2276.08	5000.00
DEEPST	replace	15	1668.63	0.00	5102.85
SOL_AWC	relative	2*	0.35	0.09	0.35
SOL_K	relative	4*	-0.01	-0.22	0.05
ESCO	replace	3*	0.02	0.00	0.29
CH_N2	replace	7	0.07	0.06	0.18
ALPHA_BNK	replace	5*	0.50	0.30	0.80
GW_SPYLD	replace	8	0.36	0.20	0.38

* p value < 0.05

3.1.3 霞雲集水區流量檢定驗證成果

霞雲集水區為石門上游地區接近水庫蓄水區之區域，集水區面積為 609.4 平方公里，流量檢定時間為 2011 年至 2014 年，流量驗證時期為 2015 至 2017 年。流量檢定成果如圖 4，藍色線為觀測值，橘色線為模擬值，流量檢定成果 R^2 為 0.9、Nash 值為 0.9，根據 (Moriassi *et al.*, 2015) 文章中的檢定參數與表現好壞之對照，此模擬是位於非常好之範圍內。流量驗證的部分，驗證成果其 R^2 為 0.72、Nash 值為 0.67，此驗證是位於可接受的範圍內。表 7 為霞雲集水區參數檢定成果，本計畫將土地利用各別進行 CN 值的百分比調整，以敏感性分析成果，最敏感之參數為森林

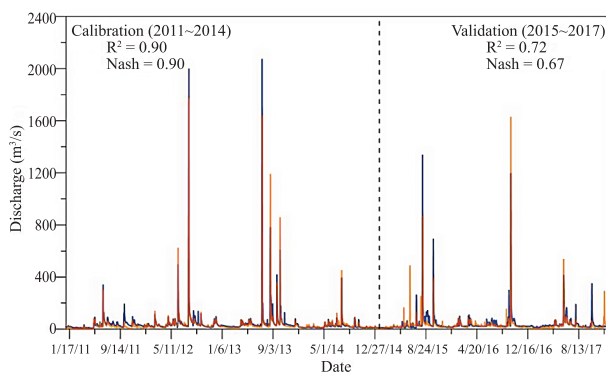


圖 4 霞雲集水區流量測站檢定驗證成果

的 CN 值，建議調整數值為-0.35，意即減少 35 % 的初始 CN 值，檢定成果表示該集水區森林入滲量較美國 SCS Curve number 初始設定值，擁有較好之透水性，第二敏感的參數為 RCHRG_DP，該參數為淺層地下水補注深層地下水之係數，檢定成果為 0.02，第三敏感的參數為 GW_DELAY 地下水補注延遲時間，檢定成果為 65.64 天，第四敏感參數為 SOL_K 土壤水力傳導度，檢定成果為 0.21，意指相較於原始土壤參數，該流域的土壤水力傳導度較高，較有明顯的側向流與入滲行為發生。以上參數除了 CN 值，與秀巒、玉峰流量測站相同其多數參數皆與土壤水和地下水補注機制相關，顯示上游集水區土壤水及地下水補注對於河川流量之重要性。

3.1.4 秀巒集水區硝酸鹽氮檢定驗證成果

為分析氣候變遷對於石門水庫上游水質的影響，本研究參考 2002 年至 2004 年於秀巒現地採樣之水質資料 (約 150 筆樣本)，以流量跟硝酸鹽氮通量之線性關係推估未採樣天數之硝酸鹽氮輸出量，由於樣本為數不多且大多於低流量時期進行採樣，其日通量及高流量之線性推估誤差大等限制，本研究以月尺度方式進行流域硝酸鹽氮輸出之檢定驗證。月尺度硝酸鹽氮檢定時期為 2011 至 2014 年，驗證時期則為 2015 至 2017 年。檢定成果如圖 5，藍色線為觀測值，綠色線

表 7 霞雲集水區流量檢定驗證參數表

Parameter	Method	Sensitivity rank	Fitted Value	Min Value	Max Value
CN2 (AGRL)	replace	20	-0.18	-0.22	0.03
ALPHA_BF	replace	9	0.30	0.14	0.43
GW_DELAY	replace	10	65.19	21.94	66.67
GWQMN	replace	17	968.76	547.06	3267.67
CN2 (FRSE)	relative	1*	-0.38	-0.55	-0.21
CN2 (URLD)	relative	16	-0.47	-0.55	-0.17
CN2 (PAST)	relative	12	-0.18	-0.28	0.10
CN2 (BARR)	relative	13	-0.18	-0.26	0.11
CN2 (ORCD)	relative	6	0.18	0.04	0.30
RCHRG_DP	replace	14	0.89	0.69	1.00
REVAPMN	replace	11	209.71	67.50	251.94
GW_REVAP	replace	19	0.02	-0.02	0.10
SHALLST	replace	18	4136.52	2276.08	5000.00
DEEPST	replace	15	1668.63	0.00	5102.85
SOL_AWC	relative	2*	0.35	0.09	0.35
SOL_K	relative	4*	-0.01	-0.22	0.05
ESCO	replace	3*	0.02	0.00	0.29
CH_N2	replace	7	0.07	0.06	0.18
ALPHA_BNK	replace	5*	0.50	0.30	0.80
GW_SPYLD	replace	8	0.36	0.20	0.38

*p value<0.05

為模擬值，硝酸鹽氮檢定成果 R^2 為 0.79、Nash 值為 0.78，根據 Moriasi *et al.* (2015) 文章中的檢定參數與表現好壞之對照，此模擬是位於非常好之範圍內。硝酸鹽氮驗證的部分，驗證成果其 $R^2 = 0.76$ 、Nash 值為 0.73，此驗證亦位於非常好之範圍內。表 8 為秀巒集水區參數檢定成果，參數敏感性分析成果顯示最敏感參數為 NPERCO，氮入滲參數其參數調整數值為 0.9，第二敏感參數為 NUPIDS，該參數主要影響植物吸收氮的效率，檢定成果為 51.81，第三敏感的參數為 SOL_ORGN(BARR)，代表裸露地初始的有機氮濃度，檢定成果為 22.99 ppm，第四敏感參數為 SHALLST_N(ORCD)，該參數代表果園地下水硝酸鹽氮濃度，檢定成果為 14.21 ppm。秀巒集水區為石門最上游地區，該

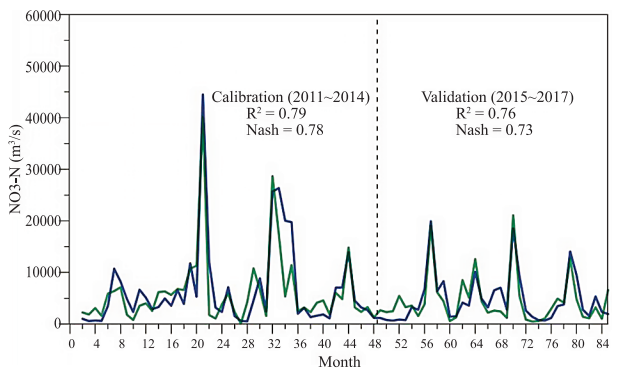


圖 5 秀巒集水區硝酸鹽氮檢定驗證成果

地區農業活動比例不到 1%，卻對河川水質有顯著的影響，施肥行為及農田地下水濃度等等將影響石門水庫上游集水區河道硝酸鹽氮輸出量。

3.1.5 石門水庫上游集水區作物產量檢定驗證成果

石門水庫上游農業種植以高山高麗菜及水蜜桃為主，本研究參照農糧署作物栽培手冊建議之施肥量及作物生長期進行模式設定，以農糧署於 2011 年至 2017 年桃園地區高麗菜及水蜜桃產量統計資料做為石門上游集水區作物產量檢定驗證之標的，高麗菜及水蜜桃產量於檢定期 2011 年至 2014 年產量模擬百分比誤差為 -0.2 % 及 -1.6 %，驗證時期 2015 至 2017 年高麗菜及水蜜桃產量模擬百分比誤差為 22.5 % 及 18.6 %。產量模擬誤差皆控制再 25 % 以內。其中高麗菜的模擬誤差較高其原因為 2015 年後桃園地區高麗菜單位面積產量大為增加，因為市場價格的緣故導致高麗菜於各季節種植面積及產量有大幅度波動而造成模式長時間模擬誤差偏高。作物生長參數檢定成果如表 9 所示，主要以太陽輻射轉換為 biomass 比率 (BIO_E)、植株收成百分比 (HVSTI) 以及作物成熟積溫 (HEAT_UNITS) 三項為主要調整目標。於本研究每一次生長季便會調整一次作物成熟積溫，例如高麗菜的種植於本研究分為兩季，分別春季成熟積溫為 1,100.73 °C，秋季則為 846.62 °C，水蜜桃生長只有一季其成熟積溫為 1660.35 °C。作物收成比例則是調整 biomass 被收割的百分比，其中高麗

表 8 秀巒集水區硝酸鹽氮檢定驗證參數表

Parameter	Method	Sensitivity rank	Fitted Value	Min Value	Max Value
SOL_NO3(AGRL)	replace	17	21.20	20.90	31.18
SOL_NO3(ORCD)	replace	8	32.10	23.21	37.57
SOL_NO3(FRSE)	replace	13	0.91	0.78	1.00
SOL_NO3(BARR)	replace	7	1.78	1.23	3.68
SOL_NO3(PAST)	replace	11	1.61	0.99	1.88
SOL_ORGN(AGRL)	replace	5	21.81	18.06	37.89
SOL_ORGN(ORCD)	replace	10	19.35	12.98	35.64
SOL_ORGN(FRSE)	replace	15	7.65	5.32	15.69
SOL_ORGN(BARR)	replace	3	22.99	18.67	36.91
SOL_ORGN(PAST)	replace	14	0.93	0.00	6.81
NPERCO	replace	1*	0.90	0.75	0.90
SHALLST_N(AGRL)	replace	16	19.17	16.55	22.16
SHALLST_N(ORCD)	replace	4	14.21	12.68	18.63
SHALLST_N(FRSE)	replace	9	0.81	0.71	1.00
SHALLST_N(BARR)	replace	18	0.80	0.66	1.00
SHALLST_N(PAST)	replace	19	0.84	0.65	1.00
BIOMIX(AGRL)	replace	6	0.95	0.74	1.00
BIOMIX(ORCD)	replace	12	0.67	0.58	1.00
N_UPDIS	replace	2*	51.81	43.15	73.96

*p value<0.05

表 9 石門水庫上游集水區作物生長參數檢驗證表

Parameter Name	Method	Fitted Value	Min Value	Max Value
BIO_E(高麗菜)	replace	58.56	36.00	59.09
BIO_E(水蜜桃)	replace	19.20	15.00	20.00
HVSTI(高麗菜)	replace	0.94	0.89	0.98
HVSTI(水蜜桃)	replace	0.45	0.25	0.47
WSYF(高麗菜)	replace	0.83	0.82	0.91
WSYF(水蜜桃)	replace	0.23	0.11	0.30
HEAT_UNITS(高麗菜)	replace	1100.73	736.40	1245.60
HEAT_UNITS(高麗菜)	replace	846.62	713.80	1141.62
HEAT_UNITS(水蜜桃)	replace	1660.35	1411.05	1755.63
HARVEFF(水蜜桃)	replace	0.78	0.62	0.87

菜近乎完全收割，而水蜜桃收穫僅佔整體的 45 %。

3.2 氣候變遷下石門水庫集水區降雨及水資源變化

隨著二氧化碳排放量持續增加，全球面臨顯著的溫度上升及極端降雨事件之威脅，臺灣亦面臨溫度上升且乾濕季降雨分佈不均的困境，對於水庫上游而言，降雨分佈不均及溫度上升皆考驗水庫管理單位於下游水資源之分配。本研究分析 5 個 GCM 模式預測 RCP4.5 及 RCP8.5 於世紀末 2080 至 2099 年之降雨量變化，天氣資料產製年段為 30 年，分析 30 年平均下之降雨變化狀況。RCP4.5 於世紀末各月份降雨百分比變化如圖 6 所示，大部分 GCM 皆指出未來石門水庫上游集水區乾季降雨量將有顯著的減少，平均將減少約 13 % 降雨量；濕季降雨量將有顯著的增加約 22 %，尤其 9 月及 10 月於 5 個 GCM 模式皆顯示於 RCP4.5L 的情境下降雨量將增加 200 ~ 300 % 之多。RCP8.5 於世紀末各月份降雨變化如圖 7 所示，與 RCP4.5L 的情境相似，RCP8.5L 情境下各月份降雨分佈亦呈現乾季越乾濕季越濕的趨勢，然而 RCP8.5L 預測未來乾季降雨並未如 RCP4.5L 那般一致，5 個 GCM 中的 CSIRO_Mk3_6_0 模式於 RCP8.5L 乾季降雨量預測反而是增加的，其餘 4 個 GCM 則皆預測乾季月份降雨量將下降，因此 5 個 GCM 乾季降雨變化量與 RCP4.5L 相比則較不顯著，RCP8.5L 乾季平均降雨量將減少約 6 %，濕季平均降雨量將增加約 30 %。

為了解石門水庫上游集水區於氣候變遷 RCP4.5 及 RCP8.5L 情境下 5 個 GCM 各月份平均水資源變化及農業活動汙染對於河川之影響。本研究利用以校驗參數後之 SWAT 模式輸出石門水庫上游集水區各項水足跡計算數值並分析降雨及溫度條件改變下對於流域整體之影響。圖 8 為石門水庫上游集水區 RCP4.5L

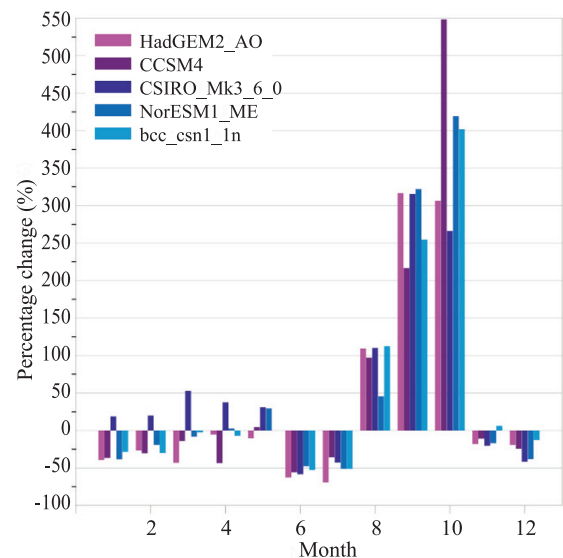


圖 6 石門上游集水區 RCP4.5L 各月份平均降雨百分比變化

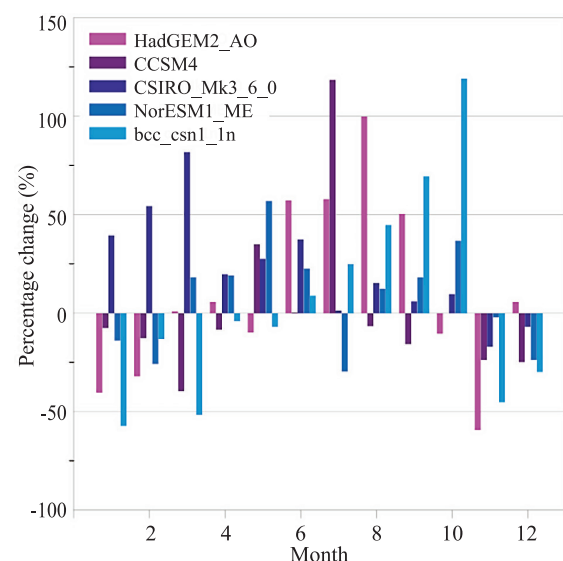


圖 7 石門上游集水區 RCP8.5L 各月份平均降雨百分比變化

各月份藍水變化量，由於 CSIRO_Mk3_6_0 模式於 RCP4.5L 情境下 1 月至 4 月降雨預測為增加，SWAT 模式於 5 個 GCM 情境下平均成果顯示藍水於乾季並無顯著的降低，整體藍水變化以 6 月至 10 月改變較為明顯，SWAT 模式於石門上游集水區預測未來 6 月及 7 月藍水將顯著減少約 40%，並於 8 月至 10 月有顯著的增加（約 150%），該時間段藍水下降與降雨變化趨勢一致，顯示於 RCP4.5L 情境下夏秋季降雨分佈的改變將直接影響河川及水庫可用水量。圖 9 為石門水庫上游集水區 RCP8.5L 各月份藍水變化量，由於 CSIRO_Mk3_6_0 模式於乾季降雨預測有顯著增加之趨勢，使 RCP8.5L 乾季藍水變異比較大，整體而言石門水庫上游集水區乾季仍是呈現顯著的藍水下降（約 11%）。RCP8.5L 濕季時大多數 GCM 成果皆顯示降雨強度及雨量增加之特性，根據模式模擬成果顯示上游集水區濕季藍水將上升約 28%，增加幅度最明顯的月份為 7 月及 9 月其藍水輸出量增加超過 30% 以上。然而 RCP8.5L 情境下 5 個 GCM 模式於石門水庫上游 4 月及 5 月的春雨變化預測之歧異大導致該模式預測流量變異程度相對較高，該時間點對於桃園地區第一期稻作供水將有顯著的衝擊。

綠水反映集水區植物吸收的可用水量，影響土壤水的因子有降雨、溫度及植物生長之影響，生長季節的提前同時將影響流域可用之綠水。本研究針對 RCP4.5L 及 RCP8.5L 情境下 5 個 GCM 情境各月份平均綠水含量進行分析，RCP4.5L 成果如圖 10 所示，整體而言石門水庫上游集水區乾季綠水量呈現下降趨勢（介於-1 至-5%），以 11 月及 12 月下降最多，其原因主要跟溫度上升使作物生長期提前，於冬季植物生長需求更多綠水所導致，溫度上升亦同時增加土壤蒸散量，於該時期降雨減少之狀況下流域綠水於該時期將持續被損耗，並有植物需水量供應不足之風險，颱風季的高強度降雨能於 8 月至 10 月顯著補注流域綠水量，然而需注意的是 6 月及 7 月於 RCP4.5L 降雨也是呈現下降趨勢，夏季高溫及綠水不足將影響該時期作物生長，不利於水蜜桃結果及第二期高麗菜種植。RCP8.5L 成果如圖 11 所示，乾季綠水量亦呈現下降趨勢（介於-0.9 至-7%），以 3 月及 4 月下降最多，主要原因為乾季降雨減少及流域蒸發散增加，9 月及 10 月由於強降雨事件頻繁發生，於同一時段雖有顯著潛在蒸發散量 (PET) 上升，但高強度將與尚能充分補注土壤水量。綜合 RCP4.5L 及 RCP8.5L 之成果說明石門上游集水區乾季綠水量會被持續損耗，隨著降雨極端化以及平均溫度上升，石門上游集水區乾季將面臨作物無法充足獲取水分造成歉收或生長遲緩之風險。

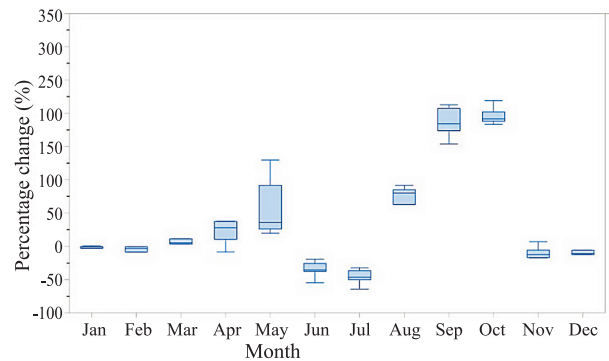


圖 8 石門上游集水區 RCP4.5L 各月份平均藍水變化

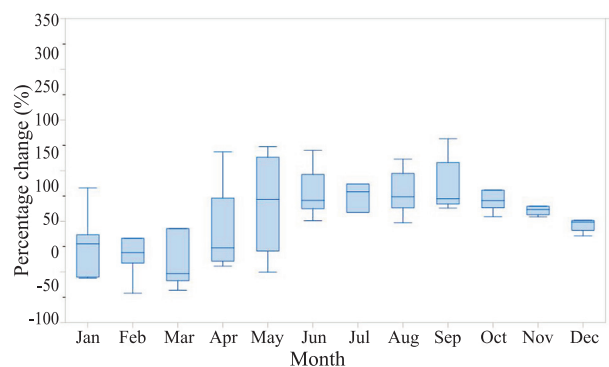


圖 9 石門水庫上游集水區 RCP8.5L 各月份平均藍水變化

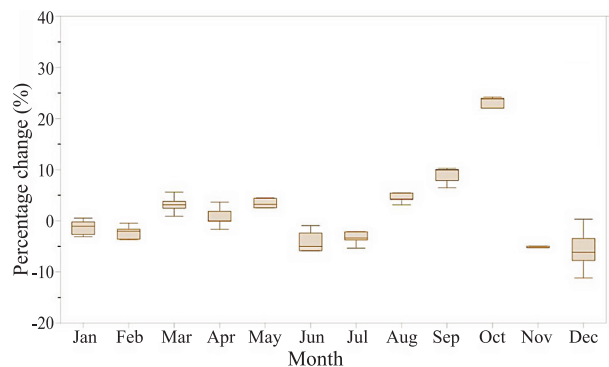


圖 10 石門水庫上游集水區 RCP4.5L 各月份平均綠水變化

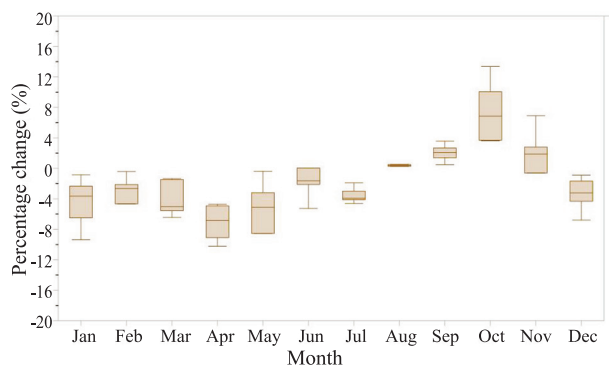


圖 11 石門水庫上游集水區 RCP8.5L 各月份平均綠水變化

3.3 氣候變遷下石門水庫上游集水區汙染及產量變化

施肥行為對於河川水質有顯著的影響，尤其是營養鹽所造成的河川或水庫優養化之問題，本研究同時分析氣候變遷對於石門水庫上游集水區汙染輸出及灰水需求量之變化，分析降雨及溫度之改變高山農業經濟作物產量之影響。圖 12 呈現 RCP4.5L 石門水庫集水區各月份平均灰水需求量變化，由於乾季降雨減少，該時期的營養鹽流失量也相對減少，然而 8 月開始至 10 月由於強降雨的發生及地表逕流產生量增加使流域營養鹽流失量大幅上升，對於該時期的石門水庫上游河川需要更多的乾淨水注入才能維持河川水質，8 月至 10 月平均需要增加 137% 的灰水量，是平常河川灰水需求量的 1 倍之多，好在該時間段於石門水庫上游並無高耗水量之農業耕作，不會抽取河川水進行灌溉或工業用途，然而過多的汙染對於水庫水質仍有其威脅性。圖 13 為 RCP8.5L 各月份平均灰水需求量變化，與 RCP4.5L 相似其乾季時間灰水需求量有顯著下

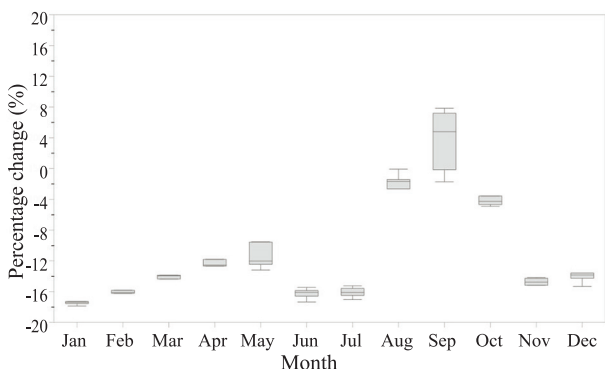


圖 12 石門水庫上游集水區 RCP4.5L 各月份平均灰水需求量變化

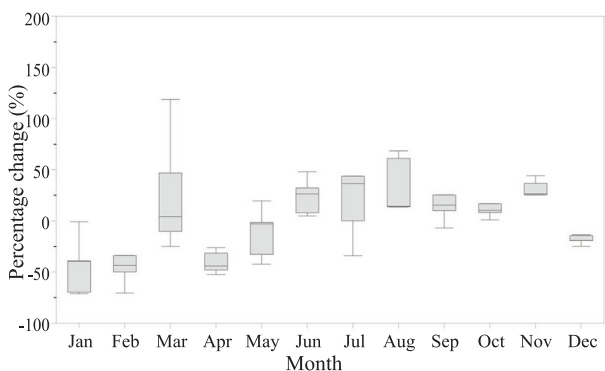


圖 13 石門水庫上游集水區 RCP8.5L 各月份平均灰水需求量變化

降，11 月至隔年 2 月平均灰水需求量可減少約 28%，然而 3 月至 5 月由於 5 個 GCM 預測結果不同其灰水需求量變異較大，3 月變異幅度介於 -24% 至 110%，說明春雨時間段可能發生降雨事件其高麗菜及水蜜桃的施肥行為將可能影響河川水質。RCP8.5L 情境下 6 月至 11 月的平均灰水需求量呈現顯著上升 (約 29%)，從模式分析成果即可推論 RCP8.5L 情境下強降雨事件及第二期高麗菜耕作使大量肥料流失並進入河川影響水質，氣候變遷下夏秋季之農田耕作需考量降雨條件改變並進行施肥行為或轉作調整。

氣候變遷下環境條件之改變影響流域作物生長狀況，為預測未來高麗菜及水蜜桃於正常農法下產量變化狀況，本研究利用 SWAT 模式中的 EPIC 生長模組進行模擬，並量化 5 個 GCM 情境於 RCP4.5L 及 RCP8.5L 之作物產量變化，RCP4.5L 產量分析成果如圖 14 (a) 所示，夏收高麗菜收穫於 RCP4.5L 情境下產量變化介於 -4 至 -16% 之間，秋收高麗菜收穫產量變化則為 -3 至 -16% 之間，水蜜桃產量變化介於 -6 至 -20 之間，由此可知降雨及溫度條件之改變對於高麗菜及水蜜桃產量皆有一定程度的影響，尤其是水蜜桃損失程

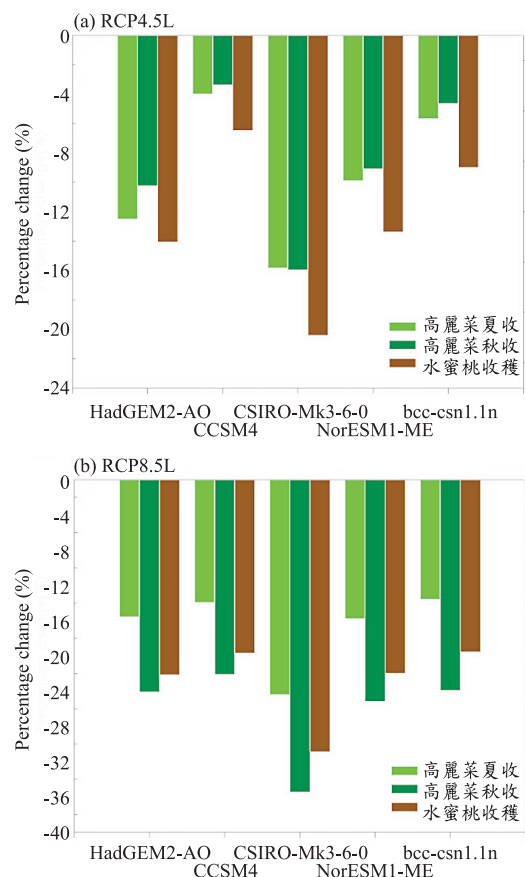


圖 14 石門水庫上游集水區各月份作物產量變化 (a) RCP4.5L ; (b) RCP8.5L

度最高。RCP8.5L 產量分析成果如圖 14(b) 所示，夏收高麗菜收穫變化介於-14 至-24 %之間，秋收高麗菜收穫產量變化則介於-24 至-36 %之間，水蜜桃產量變化介於-19 至-31 %之間，與 RCP4.5L 情境相比，RCP8.5L 的高麗菜及水蜜桃產量減產更為顯著，尤其是高麗菜秋收的產量，其原因可能與 8 月至 10 月的強降雨事件導致肥料流失作物營養不良導致，上述成果告訴我們氣候變遷下依照原本的耕作方式將會造成肥料流失及作物產量下降之風險，需進一步思考如何調適或改變農業耕作方法達到環境永續及經濟損失最小化之目的。

3.4 氣候變遷下石門水庫上游集水區作物轉作調適策略及效益

氣候變遷對於石門水庫上游集水區水資源、汙染及作物生長皆有顯著的影響，水資源面臨的問題為乾濕季降雨分佈不均造成下游乾季供水減少，水庫及河川將面臨濕季汙染大量進入庫區之風險，由於氣候環境條件的改變農民產量同時也將面臨減產之衝擊，面對氣候環境變化的衝擊其水庫上游集水區永續耕作之可行性評估更顯出其重要性。石門水庫上游集水區農業種植大多為經濟作物，尤其以高山高麗菜跟水蜜桃種植面積最多，然而高麗菜種植本身對於環境影響很大，高麗菜根據農糧署建議一年的氮施放量就可達到 800 kg/ha，加上農民為了加速高麗菜收成速度而額外施放肥料及堆肥更使流失問題更為顯著。除了高麗菜之外，上游地區同時有其他額外旱作之種植，由於目前農糧署正推行雜糧及糧食作物之種植及轉作，為此本研究挑選上游高山地區能種植之糧食作物地瓜為轉作之目標作物，同時地瓜亦為非常有營養價值之作物，根據農糧署建議之地瓜每年氮肥施放量僅需 80 kg/ha(是高麗菜的 1/10)，本研究嘗試以地瓜做為高麗菜園之轉作作物，並分析氮肥流失量及可收成產量。圖 15(a) 為氣候變遷 RCP4.5L 情境下作物轉作硝酸鹽氮汙染削減成效，轉作策略分為第二期高麗菜轉作為地瓜以及全轉作地瓜兩種方案，從圖中 5 個 GCM 模式成果顯示出轉作對於流域氣候變遷下硝酸鹽氮輸出量將顯著下降，第二期高麗菜轉作為地瓜平均可削減約 10 %的硝酸鹽氮輸出，而全轉作地瓜更能有 16 %的硝酸鹽氮削減量。圖 15(b) 為 RCP8.5L 情境下高麗菜轉作地瓜之汙染削減成效，第二期高麗菜轉作為地瓜平均可削減約 13 %硝酸鹽氮輸出量，而全轉作地瓜平均則能削減約 20 %的硝酸鹽氮輸出量。於氣候變遷的影響下全轉作地瓜後其產量亦受到降雨分佈不均及極端強降雨事件影響造成田

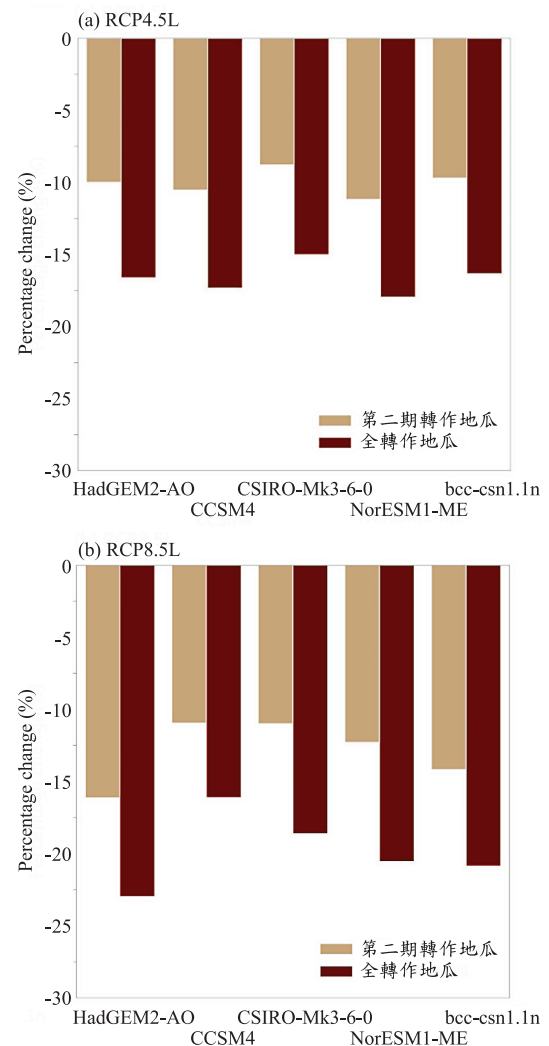


圖 15 石門水庫上游集水區高麗菜轉作地瓜前後之硝酸鹽氮削減成效(a)RCP4.5L ; (b)RCP8.5L

區土壤含水量及其營養鹽儲存量不足，減緩地瓜生長速度，然而地瓜由於具有高耐旱及營養鹽需求較低等優勢，於氣候變遷 RCP4.5L 及 RCP8.5L 情境下轉作地瓜其產量與 Baseline 相比只減少約 5 %及 13 %，與高麗菜及水蜜桃相比氣候變遷對於地瓜生長的衝擊性更小。面對氣候變遷下流域作物減產之影響，氣候變遷 RCP8.5L 情境地瓜兩期皆轉作為地瓜的單位面積產量仍有 17,871 kg/ha，兩期皆種植高麗菜單位面積產量僅有 13,719 kg/ha，顯示氣候變遷對於地瓜生長衝擊較小並且轉作地瓜所減少的肥料量亦有助於減緩氣候變遷對於水庫水質之影響，於現今臺灣高麗菜市場常常面臨供過於求及國內糧食自給率不足的情況下，轉作為地瓜將有助於維持自給率及臺灣人民之營養需求。營養供給部分，根據氣候變遷 RCP8.5L 情境下平均地瓜及高麗菜產量及每公斤地瓜及高麗菜可提供之營養

價值 (地瓜為 850 kcal；高麗菜為 240 kcal)，即可計算第二期轉作地瓜及全轉作地瓜的情況下該地區可提供的營養價值，根據本研究計算 RCP8.5L 情境下第一期種高麗菜配合第二期轉作地瓜 (高麗菜 8,583 kg/ha；地瓜 12,628 kg/ha) 及全轉作地瓜 (17,871kg/ha) 將可提供約 12,793,930 kcal/ha 及 15,190,464 kcal/ha 的營養供給，全種植高麗菜產量 (13,719 kg/ha) 僅能提供約 3,292,560 kcal/h 的營養供給，兩者綜合比較後顯示高麗菜轉作成地瓜將能提供比原本高出約 4 ~ 5 倍的營養供給量。除此之外氣候變遷情境下穩定的地瓜產量亦可為農民帶來相當的收益，於未來環境變遷越來越嚴峻的狀態下達到涵養石門水庫水質之目的，達到環境與地方產業雙贏之目標。

四、結論與建議

本研究利用 SWAT 模式分析石門水庫上游集水區於未來氣候變遷 RCP4.5L 及 RCP8.5L 情境下流域各月份水足跡及作物產量之變化，評估作物轉作對於石門水庫上游集水區水質改善及糧食產量增產之效益及可行性，針對重要研究成果及相關建議如下

1. SWAT 模式於石門水庫上游集水區秀巒、玉峰、霞雲測站日流量模擬皆可達到 Nash 值>0.65 以上之成效，月尺度硝酸鹽氮模擬亦可達到 Nash 值>0.75 以上之成效，顯示 SWAT 模式能有效用於石門水庫上游地區之流量及水質模擬。
2. 氣候變遷情境下石門水庫上游集水區水資源面臨降雨分佈不均且溫度上升之挑戰，RCP4.5L 情境下乾季藍水並無顯著變化，反而於 6 月至 10 月變化相對顯著，尤其是在 8 月至 10 月與 Baseline 時間段相比藍水將增加約 150 %；RCP8.5L 情境下乾季藍水平均將下降約 18 %，濕季平均將增加 28 %，對於石門水庫未來水資源供給有著顯著的威脅與挑戰。
3. 降雨分佈不均及濕季流量上升造成硝酸鹽氮大幅度輸出，流域灰水需求量明顯增加，氣候變遷 RCP4.5L 情境下石門水庫上游河川 8 月至 10 月平均需要增加 137% 的灰水量；於 RCP8.5L 情境下 6 月至 11 月的平均灰水需求量增加約 29 %，說明濕季降雨強度的改變及夏秋季肥料施放將影響河川及水庫水質。
4. 氣候環境改變情況下高麗菜及水蜜桃產量皆有顯著下降，其中高麗菜全年產量下降於 RCP8.5L 情境下可達 20 %，於全國高麗菜產量供過於求的狀況下，本研究將高麗菜田進行轉作，成果顯示將高麗菜轉作成地瓜能有效削減氣候變遷下硝酸鹽氮輸出量 (最高可削減 20 %) 並增加相較於原本高麗菜田 4 ~ 5 倍的營養供給量。

5. 石門水庫上游集水區雖無高耗水作物之種植，隨著氣候環境之改變，依照原本種植作物及施肥方式必定使作物產量及流域永續發展受到影響，需根據未來氣候變遷之特性適當進行農業轉作及調適，減緩氣候變遷對於河川水量及水質之衝擊。
6. 由於土地利用調查資料並無標示各區域旱田的種植作物，本研究以高麗菜跟水蜜桃作為石門水庫上游集水區之代表作物，然而該地區尚其他的作物種植，如能獲得更多的土地利用及地上作物資訊，未來可再加入模式中並增加模式模擬之精確度。
7. 地瓜為目前海拔 1,000 公尺以上能種植之糧食作物，因此本研究以地瓜為替代作物，嘗試提供氣候變遷下可行之調適策略，未來該地區仍有其餘旱作轉作之可行性及嘗試可能。
8. 水蜜桃為多年生之樹種，短時間的轉作對於水蜜桃園來說有其困難性，且水蜜桃為高經濟價值之水果於蔬菜及糧食作物的定位不同，因此並未包含在本研究的轉作對象，建議於未來加上經濟層成面等數據加以考量，完成氣候變遷下流域整體作物轉作的最佳化設計理念及目標。

致謝

本研究感謝臺師大地理系李宗祐副教授提供石門水庫集水區秀巒測站現地水質監測資料。臺大生工系江莉琦副教授解惑 SWAT 模式資料庫及操作相關疑問，在此一併感謝兩位老師的協助及教導，萬分感激。

參考文獻

1. Abbaspour, K. C. (2007). "User Manual for SWAT-CUP, SWAT Calibration And Uncertainty Analysis Programs." *Swiss Federal Institute of Aquatic Science and Technology, Eawag, Duebendorf, Switzerland*, 93.
2. Ahmadi, M., Etedali, H. R., & Elbeltagi, A. (2021). "Evaluation of the Effect of Climate Change on Maize Water Footprint Under RCPs Scenarios in Qazvin Plain, Iran." *Agricultural Water Management*, 254, 106969. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2021.106969>.

3. Berger, M., Campos, J., Carolli, M., Dantas, I., Forin, S., Kosatica, E., Kramer, A., Mikosch, N., Nouri, H., & Schlattmann, A. (2021). "Advancing the Water Footprint into an Instrument to Support Achieving the SDGs—Recommendations from the "Water as a Global Resources" Research Initiative (GRoW)." *Water Resources Management*, 35(4), 1291-1298.
4. Chiang, L.-C., Liao, C.-J., Lu, C.-M., & Wang, Y.-C. (2021). "Applicability of Modified SWAT Model (SWAT-Twn) on Simulation of Watershed Sediment Yields Under Different Land Use/Cover Scenarios in Taiwan." *Environmental Monitoring and Assessment*, 193(8), 1-23.
5. Davis, K. F., Chiarelli, D. D., Rulli, M. C., Chhatre, A., Richter, B., Singh, D., & DeFries, R. (2018). "Alternative Cereals Can Improve Water Use and Nutrient Supply in India." *Science Advances*, 4(7), eaao1108.
6. Davis, K. F., Rulli, M. C., Seveso, A., & D'Odorico, P. (2017). "Increased Food Production and Reduced Water Use Through Optimized Crop Distribution." *Nature Geoscience*, 10(12), 919-924.
7. Davis, K. F., Seveso, A., Rulli, M. C., & D'Odorico, P. (2017). "Water Savings of Crop Redistribution in the United States." *Water*, 9(2), 83.
8. Gassman, P. W., Reyes, M. R., Green, C. H., & Arnold, J. G. (2007). "The Soil and Water Assessment Tool: Historical Development, Applications, and Future Research Directions." *Transactions of the ASABE*, 50(4), 1211-1250.
9. Guse, B., Reusser, D. E., & Fohrer, N. (2014). "How to Improve the Representation of Hydrological Processes in SWAT for a Lowland Catchment—temporal Analysis of Parameter Sensitivity and Model Performance." *Hydrological Processes*, 28(4), 2651-2670.
10. Hoekstra, A. Y., Chapagain, A. K., Aldaya, M. M., & Mekonnen, M. M. (2011). *The Water Footprint Assessment Manual: Setting the Global Standard*. Routledge.
11. Hung, A. H. P. (2002). *Virtual Water Trade A Quantification of Virtual Water Flows Between Nations in Relation to International Crop Trade*.
12. Lam, Q., Schmalz, B., & Fohrer, N. (2010). "Modelling Point and Diffuse Source Pollution of Nitrate in a Rural Lowland Catchment Using the SWAT Model." *Agricultural Water Management*, 97(2), 317-325.
13. Lesk, C., Rowhani, P., & Ramankutty, N. (2016). "Influence of Extreme Weather Disasters on Global Crop Production." *Nature*, 529(7584), 84-87.
14. Lin, C.-Y., & Tung, C.-P. (2017). "Procedure for Selecting GCM Datasets for Climate Risk Assessment." *Terrestrial, Atmospheric & Oceanic Sciences*, 28(1).
15. Lin, G.-Z., Hsu, S.-Y., Ho, C.-C., Chen, C.-F., Huang, J.-C., & Lee, T.-Y. (2022). "Application of Soil and Water Assessment Tool (SWAT) to Evaluate the Fates of Nitrogenous Fertilizer in Subtropical Mountainous Watershed Tea Farms." *Environmental Monitoring and Assessment*, 194(3), 1-23.
16. Luan, X.-B., Yin, Y.-L., Wu, P.-T., Sun, S.-K., Wang, Y.-B., Gao, X.-R., & Liu, J. (2018). "An Improved Method for Calculating the Regional Crop Water Footprint Based on a Hydrological Process Analysis." *Hydrology and Earth System Sciences*, 22(10), 5111-5123.
17. Michalak, A. M. (2016). "Study Role of Climate Change in Extreme Threats to Water Quality." *Nature*, 535(7612), 349-350. <https://doi.org/10.1038/535349a>.
18. Mishra, B., Gyawali, B. R., Paudel, K. P., Poudyal, N. C., Simon, M. F., Dasgupta, S., & Antonious, G. (2018). "Adoption of Sustainable Agriculture Practices Among Farmers in Kentucky, USA." *Environmental Management*, 62(6), 1060-1072.
19. Moriasi, D. N., Gitau, M. W., Pai, N., & Daggupati, P. (2015). "Hydrologic and Water Quality Models: Performance Measures and Evaluation Criteria." *Transactions of the ASABE*, 58(6), 1763-1785.
20. Qin, Y., Mueller, N. D., Siebert, S., Jackson, R. B., AghaKouchak, A., Zimmerman, J. B., Tong, D., Hong, C., & Davis, S. J. (2019). "Flexibility and Intensity of Global Water Use." *Nature Sustainability*, 2(6), 515-523.
21. Rodrigues, D. B., Gupta, H. V., & Mendiondo, E. M. (2014). "A Blue/Green Water-based Accounting Framework for Assessment of Water Security." *Water Resources Research*, 50(9), 7187-7205.
22. Shrestha, S., Chapagain, R., & Babel, M. S. (2017). "Quantifying the Impact of Climate Change on Crop Yield and Water Footprint of Rice in the Nam Oon Irrigation Project, Thailand." *Science of the Total Environment*, 599, 689-699.
23. Tan, M. L., Gassman, P. W., Srinivasan, R., Arnold, J. G., & Yang, X. (2019). "A Review of SWAT Studies in Southeast Asia: Applications, Challenges and Future

- Directions.” *Water*, 11(5), 914.
24. Tan, M. L., Gassman, P. W., Yang, X., & Haywood, J. (2020). “A Review of SWAT Applications, Performance and Future Needs for Simulation of Hydro-climatic Extremes.” *Advances in Water Resources*, 143, 103662.
25. Trybula, E. M., Cibin, R., Burks, J. L., Chaubey, I., Brouder, S. M., & Volenec, J. J. (2015). “Perennial Rhizomatous Grasses as Bioenergy Feedstock in SWAT: Parameter Development and Model Improvement.” *Gcb Bioenergy*, 7(6), 1185-1202.
26. Vanham, D. (2016). “Does the Water Footprint Concept Provide Relevant Information to Address the Water–Food–Energy–Ecosystem Nexus?” *Ecosystem Services*, 17, 298-307.
27. Whitehead, P. G., Wilby, R. L., Battarbee, R. W., Kernan, M., & Wade, A. J. (2009). “A Review of the Potential Impacts of Climate Change on Surface Water Quality.” *Hydrological Sciences Journal*, 54(1), 101-123.
28. Xie, P., Zhuo, L., Yang, X., Huang, H., Gao, X., & Wu, P. (2020). “Spatial-temporal Variations in Blue and Green Water Resources, Water Footprints and Water Scarcities in a Large River Basin: A Case for the Yellow River Basin.” *Journal of Hydrology*, 590, 125222.
29. Yen, H., Bailey, R. T., Arabi, M., Ahmadi, M., White, M. J., & Arnold, J. G. (2014). “The Role of Interior Watershed Processes in Improving Parameter Estimation and Performance of Watershed Models.” *Journal of Environmental Quality*, 43(5), 1601-1613.
- 收稿日期：民國 111 年 10 月 31 日
修改日期：民國 111 年 12 月 03 日
接受日期：民國 111 年 12 月 08 日