

# 桃園臺地氣候變遷水資源衝擊與 調適策略評估研究

A STUDY ON ASSESSING CLIMATE CHANGE IMPACT AND WATER RESOURCES ADAPTATION MEASURES OF THE  
TAOYUAN TABLELAND

國立中央大學  
水文與海洋科學研究所  
專任人員

**林庭仔**  
Ting-Yu Lin

國立中央大學  
水文與海洋科學研究所  
教授

**李明旭\***  
Ming-Hsu Li

中華農業  
暨水利事業發展協會  
理事

**簡傳彬**  
Chuan-Pin Chien

## 摘要

本研究建構桃園臺地水資源系統動力模型，整合區內各項供水設施功能與各標的用水需求，分析桃園臺地受氣候變遷影響之水資源衝擊，並評估不同調適策略在脆弱度指標、可靠度指標、回復力指標與停灌次數等指標之效益。桃園臺地於中期在 SSP5-8.5 情境下，相較於基期將面臨更趨嚴峻的水資源供水挑戰，逕流量將減少、停灌次數將增加、公共用水供水缺口將擴大。為降低區內水資源衝擊，進一步規劃 4 種單一調適策略，分別為埤塘疏浚、埤塘支援公共用水、水庫浚漂、分區輪灌等與結合前述 4 種的複合型調適策略 1 種，評估其對提升水資源供水系統韌性之效益。桃園臺地於中期 SSP5-8.5 情境下，埤塘疏浚能有效降低農業用水供水缺口與提高穩定性，但對改善公共用水衝擊效益並不顯著。若採用複合型調適策略 E (A+B+C+D) 則可同時有效降低公共用水供水缺口與減少農業停灌次數。透過指標分析結果顯示，公共用水之脆弱度指標可由 1,630 %-day 降低至 701 %-day，回復力指標能由 36 days 減緩至 20 days，可靠度指標可由 82.34 % 提高至 91.8%，並可有效降低一期作停灌次數由 8 次降至 1 次。綜合前述調適策略與指標分析結果顯示，透過不同調適策略的複合式操作將可有效提高水資源系統因應氣候變遷之韌性。未來若進一步輔以成本效益分析，將使各項調適策略更具政策可行性。

**關鍵詞：**氣候變遷、水資源、乾旱、調適策略、桃園臺地。

\* 通訊作者，中央大學水文與海洋科學研究所教授

320317 桃園市中壢區中大路 300 號 · mli@ncu.edu.tw · mlincuihs@gmail.com.tw

## A STUDY ON ASSESSING CLIMATE CHANGE IMPACT AND WATER RESOURCES ADAPTATION MEASURES OF THE TAOYUAN TABLELAND

**Ting-Yu Lin**

Graduate Institute of  
Hydrological and Oceanic  
Sciences, National Central  
University, Taiwan

**Ming-Hsu Li\***

Graduate Institute of  
Hydrological and Oceanic  
Sciences, National Central  
University, Taiwan

**Chuan-Pin Chien**

Chinese Association for  
Agricultural and Water  
Resources Development,  
Taiwan

### ABSTRACT

A water resource system dynamic model was built for the Taoyuan Tableland by integrating functions of various water supply facilities and all sectoral water demands to investigate climate change impact on the water resources system and assess the effectiveness of different adaptation measures with indicators including vulnerability, availability, resilience, and the number of irrigation fallow events. Under the SSP5-8.5 scenario in the mid-term, the Taoyuan Tableland is expected to face increasingly severe water supply challenges due to reduced runoff, more frequent irrigation fallow, greater deficits and decreased availability in public water supply. To mitigate the impact on regional water resources, four individual adaptation measures, including pond dredging, use of pond water to supplement public water supply, reservoir dredging, and rotational irrigation, and one integrated strategy incorporating all four measures, were proposed and assessed for their potential to enhance the resilience of the water resource system. Under the SSP5-8.5 scenario in the mid-term, applying the pond dredging measure can effectively reduce the deficit in agricultural water supply and enhance stability, though its benefits in mitigating the impacts on public water supply are limited. With the integrated adaptation measure, the public water supply deficit can be significantly reduced, and the number of irrigation fallow events can also be lowered. The vulnerability indicator of public water supply can be reduced from 1,630 %-days to 701 %-days; the resilience indicator can be shortened from 36 days to 20 days; and the availability indicator can be improved from 82.34% to 91.8%. Moreover, the irrigation fallow events in the first cropping season can be reduced from eight to one. In response to the impacts of climate change, the integrated adaptation measure can effectively enhance the climate resilience of the water resources system. Further incorporating benefit–cost evaluations in future studies will improve the overall feasibility of these adaptation measures to support decision-making.

**Keywords:** Climate change, Water resources, Drought, Adaptation measures, Taoyuan Tableland.

Lin, T.Y., Li, M.H., & Chien, C.P.\* (2026). "A Study on Assessing Climate Change Impact and Water Resources Adaptation Measures of the Taoyuan Tableland." *Journal of Taiwan Agricultural Engineering*, 72(2), 33-45. [https://doi.org/10.29974/JTAE.202606\\_72\(2\).0003](https://doi.org/10.29974/JTAE.202606_72(2).0003)

## 一、緒論

聯合國政府間氣候變遷專門委員會 (Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC) 2021 年所公布的氣候變遷第六次評估報告 (The Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, AR6) 即指出, 未來幾十年若無大幅降低大氣中 CO<sub>2</sub> 和其他溫室氣體的排放, 中期 (2041 ~ 2060 年) 之全球地表增溫極有可能超出 2 °C (Lee *et al.*, 2021)。而我國官方發布之國家氣候變遷科學報告 2024 中亦指出, 臺灣近年的升溫趨勢由每 10 年平均上升 0.15 °C 增加至 0.27 °C, 夏季將提前開始並延後結束, 冬季延後開始並提前結束, 日最低溫較日最高溫具明顯的增溫趨勢, 致使日夜溫差逐漸縮減。於 SSP2-4.5、SSP5-8.5 以及 GWL 2 °C 情境下, 未來臺灣北區之梅雨及颱風降雨延遲發生機率有增加的趨勢, 整體而言, 乾溼季差距隨暖化程度增強而增加, 極端降雨強度及連續無雨日未來皆會增加 (許晃雄等, 2024)。季節性與極端降雨的改變及暖化將改變水文循環並進而衝擊水資源供給韌性, 桃園市為近年人口淨移入增加的直轄市, 區內各項公共建設及工商經濟發展皆將帶來新增用水需求, 因此有必要評估氣候變遷對桃園臺地水資源的潛在衝擊, 並進而擬定調適策略因應, 以提升水資源韌性。

桃園臺地主要供水來源為石門水庫, 區內降雨有顯著的豐枯水期, 往往在枯水期, 容易出現水資源短缺的風險。石門水庫集水區於過去發生多起極端乾旱事件, 像是 2014 年至 2015 年之 251 天抗旱作戰 (經濟部水利署北區水資源分署, 2015) 以及 2020 年至 2021 年的 286 天抗旱作戰 (鄭文燦, 2022), 主要成因在於降雨量偏少、供水量逐年上升與水庫庫容因淤積逐年減少 (林永禎, 2007), 進而影響桃園臺地整體水資源供水穩定性。此外桃園市政府環境保護局 (2017) 推估指出, 桃園地區未來將持續升溫 1~2 °C, 冬季至春季的降雨將減少, 豐枯水期的降雨量差距將越來越大, 更不利於水資源操作的穩定。針對桃園臺地因氣候變遷及社會經濟變化對用水需求所帶來的衝擊, 經濟部水利署 (2021) 擬定「臺灣各區水資源經理基本計畫」予以因應。根據 Fang 等 (2012) 與 Chien 等 (2021) 進行桃園大圳第 8 支線與第 10 支線之模擬結果, 顯示桃園地區在埤塘疏浚及實施埤塘串聯與精密灌溉下, 可有效提升區域抗旱韌性; 另為因應全球氣候變遷對農業灌溉所帶來的衝擊, 農業部農田水利署 (2023) 提出於豐水期施行超量引灌及枯水期執行分

區輪灌等方法以提高供水調度韌性等策略。

綜合前人對桃園臺地水資源相關研究, 亟需建立因應氣候變遷水資源衝擊的系統性調適策略, 並評估比較不同調適策略之效益。因此本研究建立桃園臺地水資源系統動力模型, 整合石門水庫、淨水場操作及埤塘系統, 並提出包含水庫浚淤、埤塘疏浚、停灌與分區輪灌等多情境調適策略並進行量化效益評估。氣候變遷情境則以中期 (2041 ~ 2060 年) 共享社會經濟路徑 (Shared Socioeconomic Pathway, SSP) 之極端排放情境 (SSP5-8.5) 為研究案例, 並藉由各項指標量化基期 (1995 ~ 2014 年) 與中期 SSP 5-8.5 情境下的供水能力變化。再根據分析結果, 進一步提出相應的調適策略組合, 以評估不同的調適策略對水資源供水系統的穩定性以及供水調度之韌性, 提供科學評估數據作為未來相關決策單位參考。

## 二、研究區域

### 2.1 石門水庫及桃園臺地區域河川集水區

石門水庫集水區總面積約為 763.4 平方公里, 年平均降雨量為 2,492 毫米, 降雨量集中在 5 月至 10 月, 約佔全年的 73%, 主要來自梅雨與颱風降水。年平均入庫流量為 14 億 4,586 萬立方公尺, 平均 8 月與 9 月之入庫流量加總高達 5 億 7,884 萬立方公尺 (經濟部水利署北區水資源分署, 2025)。桃園臺地內尚有南崁溪、老街溪、新街溪等桃園市管河川, 也是農業灌溉的重要水源之一, 然而由於桃園臺地境內河川缺乏長期水文測站資料, 故以鄰近的三峽 (2) 流量站作為推估桃園臺地區內河川逕流量的參考基準。

### 2.2 桃園臺地供水設施

桃園臺地境內之公共用水與農業用水之水源來源, 主要為石門水庫透過桃園大圳與石門大圳輸送原水至淨水場以及石門與桃園管理處轄下之農田 (如圖 1)。石門水庫約供應桃園臺地 68.4% 之用水 (李明旭, 2024), 為桃園臺地主要供水設施, 但因歷年颱風事件而減少 37% 設計庫容, 由原設計庫容 3 億 912 萬立方公尺降至 2 億 462 萬立方公尺。為延長水庫使用年限, 經濟部水利署北區水資源分署以年浚淤 390 萬立方公尺為目標, 持續增進排砂機組的處理能力, 以延長石門水庫的使用壽命 (經濟部水利署北區水資源分署, 2025)。

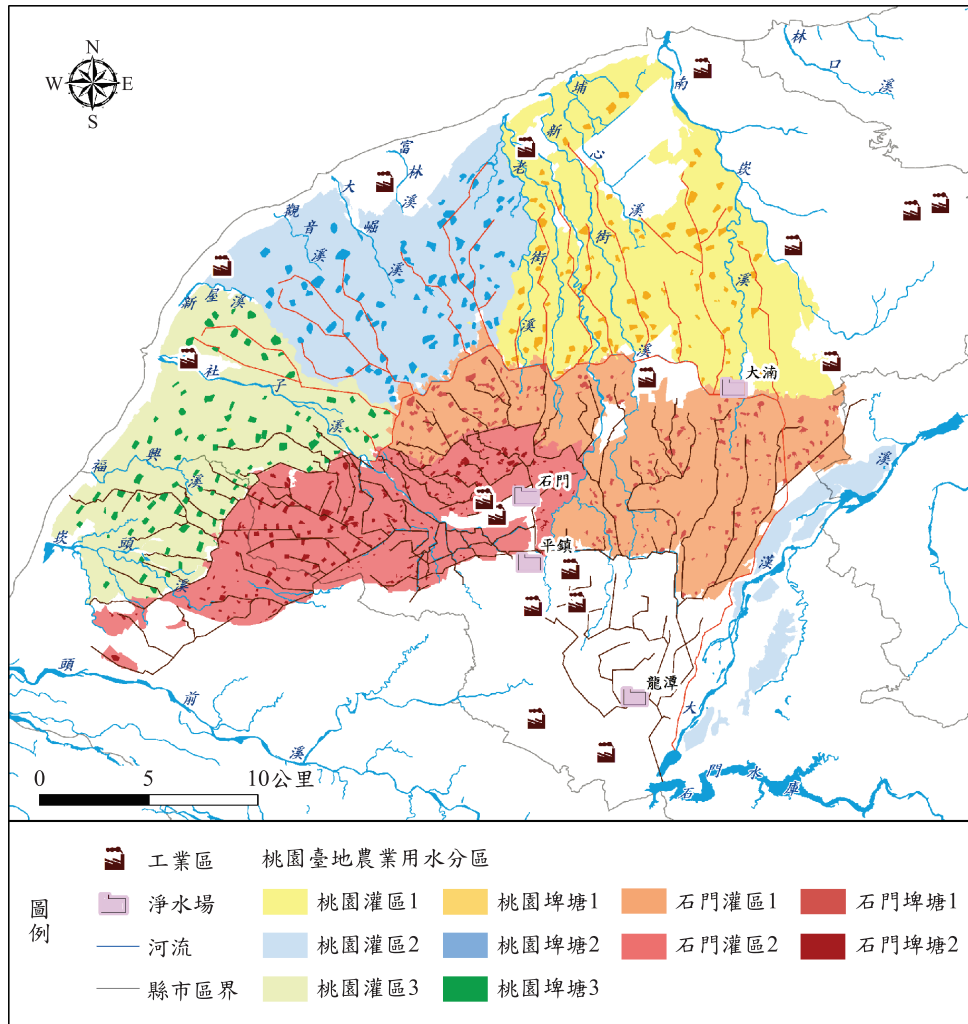


圖 1 石門水庫主要供水區域與桃園及石門灌區空間分布圖

桃園臺地的公共用水主要藉由龍潭、石門、平鎮與大湳淨水場供應，其設計出水量分別為 19、12、60 與 45 萬噸/日。農田水利署石門與桃園管理處轄下之數百口埤塘，總容量約為 5,689.93 萬立方公尺，連結灌區河川與圳路交織而成的灌排系統，供應石門及桃園管理處所轄之農業用水 (簡傳彬, 2006) 以及支援部分工業用水。區內的埤塘、圳路等灌溉系統，因為為數眾多且散落在臺地空間 (如圖 1)，在建構水資源系統動力模型時必須要進行一定程度的簡化，研究方法內將說明簡化方式與依據。

### 三、研究方法

#### 3.1 水資源系統動力模型與氣候變遷推估資料

本研究蒐集 2019 至 2023 年之桃園臺地水資源供

需資料，並以 Vensim 軟體建立水資源系統動力模型。為利於情境假設與模擬，本研究依工作站將石門及桃園管理處劃分為五大分區，桃園管理處之桃園、大竹、大園及大崙工作站，稱之為「桃 1」灌區，總計 7,560 公頃之灌溉面積；草漯、新坡、觀音、大溪工作站總計之 7,190 公頃灌溉面積，稱其為「桃 2」灌區；新屋與湖口工作站之 7,174 公頃為桃 3 之灌溉面積；石門管理處之八德、中壢與過嶺工作站命名為「石 1」灌區，共計 6,452 公頃的灌溉面積；楊梅、富岡及湖口工作站之 5,633 公頃則為「石 2」灌溉面積。埤塘的區域劃分則是將上述五大分區所對應的埤塘，將灌區內所有埤塘容量加總，依分區命名為「桃埤 1」、「桃埤 2」、「桃埤 3」、「石埤 1」及「石埤 2」，對應之容量分別為 1,489.28、1,695.81、1,468.04、424.48 及 612.32 萬立方公尺。系統動力模型在水平衡的基礎下進行各項參數之設置，包括公共用水透過石門水庫供水至龍潭、石門、平鎮及大湳淨水場，以供應本研究區之民

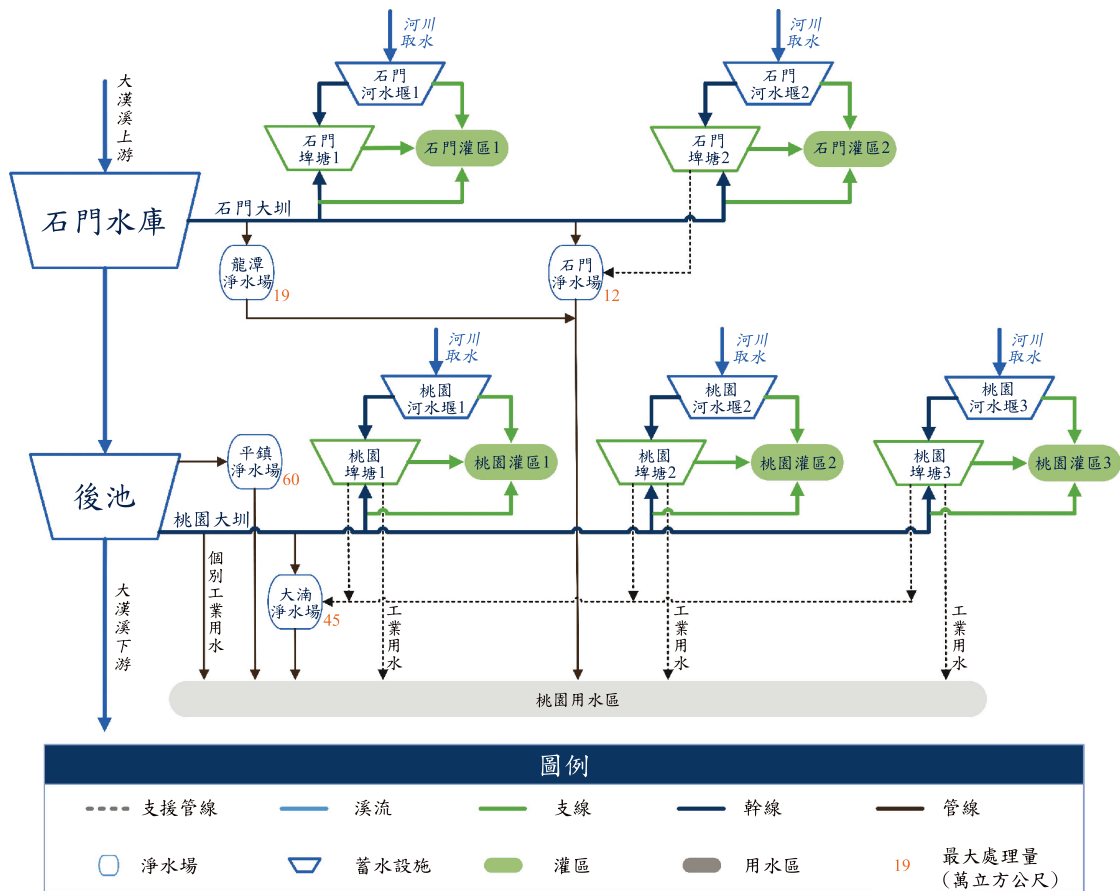


圖 2 桃園臺地水資源系統簡圖

生及工業用水。當水庫供水不足時，可藉由埤塘作為源水輸送至淨水場，如石埤 2 輸水至石門淨水場。農業用水可透過石門水庫、河川與埤塘間的調度，供應桃園與石門管理處轄下之五大分區（如圖 2）。

為評估 AR6 中期 SSP5-8.5 情境下桃園臺地水資源系統供水韌性，本研究利用氣候變遷整合評估模式 (Taiwan Water Resources Assessment Program to Climate Change, TaiWAP) 進行石門水庫集水區入流量及桃園臺地境內桃園市管河川逕流量模擬，如前所述因缺乏區內市管河川長期流量資料，本研究以三峽河流量模擬後依流域面積比推估區內市管河川流量。氣候變遷資料使用臺灣氣候變遷推估資訊與調適知識平台計畫 (Taiwan Climate Change Projection and Information Platform, TCCIP) 所產製之 SSP5 - 8.5 情境下中期的日均溫及日降雨量。為減少大氣環流模式 (General Circulation Model, GCM) 模擬值與測站觀測值之系統性誤差，應將資料集進行偏差修正 (連宛渝, 2013)。故本研究先進行日均溫及日降雨量偏差修正後，再輸入於 TaiWAP 軟體中進行逕流量模擬，以作為水資源系統動力模型之基礎輸入資料。

### 3.2 水資源衝擊評估指標

受氣候變遷及社會經濟發展等影響，將對水資源系統之功能與運作帶來衝擊，而透過提高系統面對災害時的復原能力，使系統回復原有功能與穩定運作，為韌性一詞之核心概念 (Holling, 1996)。本研究採用回復力指標 1 與回復力指標 2、可靠度指標及脆弱度指標 1 與脆弱度指標 2 等指標 (Li *et al.*, 2017)，建立水資源系統的指標評估架構，計算流程如圖 3 所示。經由量化基期與中期 SSP5-8.5 情境下之缺水程度與系統回復時間，以評估桃園臺地供水系統之供水韌性。

前述指標之意義，脆弱度指標 1 與脆弱度指標 2 為量化水資源系統於缺水事件中的衝擊程度指標。脆弱度指標 1 為量化模擬期間各缺水事件之最大缺水程度，公共用水及農業用水之脆弱度指標 1 分別以  $DPD_{max}$  和  $TD_{max}$  計算，該值越高表示水資源系統失敗的程度越嚴重。 $DPD_{max}$  計算公式如式 (1) 及 (2) 所示。

$$DPD_j = \sum_{i=1}^N \left( 1 - \frac{S_{j,i}}{D_{j,i}} \right) \times 100, \text{ 其中 } S_{j,i} < D_{j,i} \dots\dots\dots (1)$$

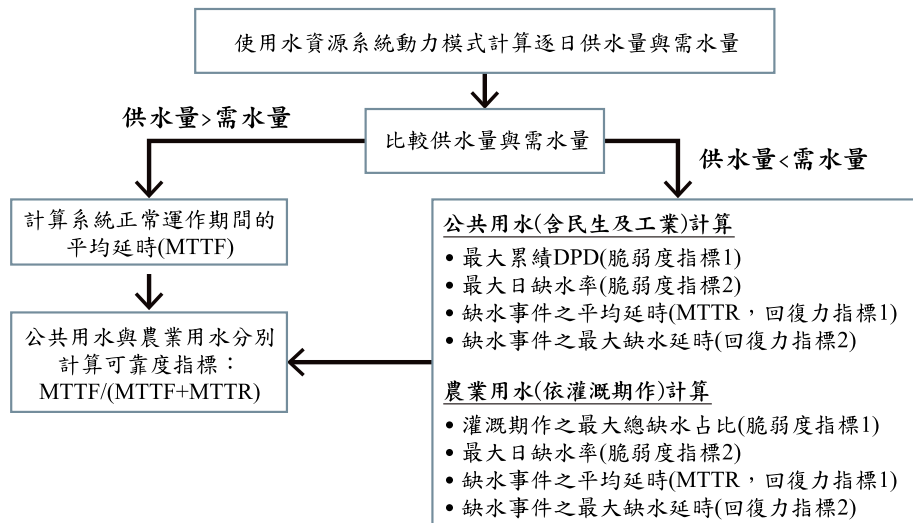


圖 3 脆弱度指標、回復力指標與可靠度指標計算流程圖

$$DPD_{\max} = \max_{1 \leq j \leq m} DPD_j \dots\dots\dots(2)$$

其中,  $DPD_j$  表示第  $j$  次缺水事件之缺水程度 (%-day);  $N$  表示第  $j$  次缺水事件中, 水資源系統供水量無法滿足需水量之連續日數 (days);  $S_{j,i}$  表示第  $j$  次缺水事件之第  $i$  日供水量 (萬立方公尺);  $D_{j,i}$  表示第  $j$  次缺水事件之第  $i$  日需水量 (萬立方公尺);  $DPD_{\max}$  為公共用水最大缺水程度, 為公共用水之脆弱度指標 1 (%-day);  $m$  表示公共用水缺水事件之總次數。

農業用水之脆弱度指標 1 為以  $TD_{\max}$  計算, 計算公式如下

$$TD_j^{Ag} = \left( \frac{\sum_{i=1}^N (D_i - S_i)}{\sum_{i=1}^N D_i} \right) \times 100, \text{其中 } S_i < D_i \dots\dots\dots(3)$$

$$TD_{\max} = \max_{1 \leq j \leq m} TD_j^{Ag} \dots\dots\dots(4)$$

其中,  $TD_j^{Ag}$  表示一期作或二期作的第  $j$  次缺水事件, 總缺水量占總需水量百分比 (%);  $N$  表示農業一期作或二期作之灌溉總日數 (days);  $S_i$  表示第  $i$  日供水量 (萬立方公尺);  $D_i$  表示第  $i$  日需水量 (萬立方公尺);  $TD_{\max}$  為農業用水之最大缺水百分比, 為農業用水之脆弱度指標 1 (%);  $m$  表示模擬期間一期作或二期作的農業用水缺水事件總次數。

脆弱度指標 2 為計算公共用水與農業用水於各缺水事件中的日最大缺水率, 該值越大即表示單日缺水程度越嚴重, 計算方式如式 (5) 所示。

$$\text{缺水率}_{\max} = \max_{1 \leq i \leq m} \left( 1 - \frac{S_i}{D_i} \right) \times 100, \text{其中 } S_i < D_i \dots\dots(5)$$

其中, 缺水率<sub>max</sub> 為脆弱度指標 2 (%);  $m$  表示缺水事件總次數;  $D_i$  表示第  $i$  日需水量(萬立方公尺);  $S_i$  表示第  $i$  日供水量 (萬立方公尺)。

回復力指標 1 ( $MTTR$ ) 為計算供水量小於需水量之平均延時 ( $TTR$ , Time To Repair), 以量化水資源系統於供水不足恢復至正常供水之平均時間, 公共用水與農業用水分開計算。該值越小即表示系統的回復力越佳, 其計算方式如式 (6) 所示。

$$MTTR = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m TTR_j \dots\dots\dots(6)$$

其中,  $TTR_j$  表示第  $j$  次缺水事件的連續缺水日數 (days);  $m$  表示模擬期間發生缺水事件之總次數;  $MTTR$  為回復力指標 1 (days)。

回復力指標 2 ( $TTR_{\max}$ ) 為計算缺水事件中的最大連續缺水日數, 用以量化極端缺水事件的最長缺水延時, 公共用水與農業用水分開計算。該值越大表示系統在極端乾旱事件的回復力越弱, 其計算方式如式 (7) 所示。

$$TTR_{\max} = \max_{1 \leq j \leq m} TTR_j \dots\dots\dots(7)$$

其中,  $m$  表示發生缺水事件之總次數。  $TTR_{\max}$  為回復力指標 2 (days)。

可靠度指標為計算系統正常運作的平均延時 ( $MTTF$ , Mean Time To Failure) 除以系統失敗的平均延時 ( $MTTR$ ) 與系統正常運作的平均延時 ( $MTTF$ ) 的總和, 系統正常運作定義為供水量大於需水量, 系統失敗則為供水量小於需水量, 可靠度指標用以量化系統正常運作的平均時間比值。可靠度指標數值愈高

表示系統之供水可靠度相對較高，公共用水與農業用水分開計算，*MTTF* 與可靠度指標的計算，如式 (8) 及 (9) 所示。

$$MTTF = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n TTF_j \dots\dots\dots (8)$$

$$\text{可靠度} = \frac{MTTF}{MTTR + MTTF} \times 100 \dots\dots\dots (9)$$

其中，*MTTF* 為計算供水量大於等於需水量期間的平均總日數 (days)；*n* 表示正常供水期間的總次數；*TTF<sub>j</sub>* 表示第 *j* 次正常供水期間之總日數 (days)；可靠度指標為系統正常運作的平均時間比值 (%)。

### 3.3 水資源調適策略

桃園臺地因氣候變遷及社會經濟發展對未來用水需求帶來衝擊，若無相關調適因應措施，臺地供水系統將面臨更嚴峻的挑戰。本研究探討中期 SSP5-8.5 情境下桃園臺地水資源衝擊，擬定五項調適策略，透過水資源系統動力模擬評估現況風險、未來風險及不同調適措施之效益。並以指標量化評估各項調適策略為供水系統帶來的供水穩定性以及供水調度的韌性。五項調適策略如表 1：調適選項 A，擬透過埤塘疏浚增加 3,403.38 萬立方公尺的蓄水容量，可將剩餘之河川水存儲其中，以期達蓄豐濟枯之效，具進行分散式貯水潛力；調適選項 B，規劃分別利用石埤 2 與桃埤 1 支援石門淨水場與大滴淨水場，評估降低公共用水供水缺口之效益；調適選項 C，擬提高石門水庫庫容，透過進行 3,403.38 萬立方公尺之浚濬，使其回復 11% 之設計庫容，具集中式貯水潛力；調適選項 D，規劃透過間歇性輪流配水從而減少輸水損失之效益，桃園

灌區以石門水庫供水至桃園大圳之農業供水量小於 299,860 立方公尺/天為界，輪流配水予三大分區 (桃 1、桃 2 及桃 3)，石門灌區則以石門水庫供水至石門大圳之農業供水量小於 159,840 立方公尺/天為限，輪流配水至兩大分區 (石 1 及石 2)；調適選項 E，則為複合上述四項調適策略以進行供水穩定性以及供水調度的韌性評估。

## 四、結果與討論

### 4.1 檢定與驗證

逕流量為桃園臺地水資源系統動力模型重要的輸入資料，影響桃園臺地每日供需水量以及水庫蓄水量變化。為檢驗水文模擬與水資源系統準確性，本研究分別對 2019 至 2023 年之石門水庫蓄水量，以 *R<sup>2</sup>*、*NSE* 及 *RMSE* 指標行檢定與驗證。其中模型之水庫溢流標準採用 2021 年進行測試，故該年為檢定年，其檢定結果之 *R<sup>2</sup>*、*NSE* 及 *RMSE* 分別為 0.99、0.99、531.93 萬立方公尺/天 (如圖 4)。而驗證年則以 2023 年為例，該驗證結果之 *R<sup>2</sup>*、*NSE* 及 *RMSE* 分別為 0.95、0.95、1072.70 萬立方公尺/天 (如圖 5)。上述之檢定與驗證結果，皆顯示模型能有效模擬石門水庫蓄水量於豐枯水期之變化，反映自然流量與人為操作對於水文與水資源系統變化的影響。同理，為檢視 TaiWAP 模式模擬逕流量之準確性，本研究以石門水庫為例，分別對 1995 至 2004 年與 2005 至 2014 年進行逕流深度之檢定與驗證。該檢定與驗證結果之 *R<sup>2</sup>*、*NSE* 及 *RMSE* 分別為 0.93、0.94、5.23 cm (如圖 6) 與 0.94、0.95、4.71 cm (如圖 7)，模擬結果皆表現良好，可應用於中期 SSP5-8.5 情境之逕流量模擬。

表 1 調適策略

調適策略別	調適策略	說明
A	埤塘疏浚	埤塘之分散式貯存潛力評估 (增加 3,403.38 萬立方公尺蓄水容量並擴大河川取水量)
B	埤塘支援公共用水	降低公共用水之用水缺口效益評估 (石埤 2 支援石門淨水場與桃埤 1 支援大滴淨水場)
C	水庫浚濬	石門水庫之集中式貯存潛力評估 (浚濬 3,403.38 萬立方公尺)
D	分區輪灌	間歇性輪流配水之效益評估 (桃園大圳農業供水量小於 299,860 立方公尺/天與 石門大圳供水量小於 159,840 立方公尺/天)
E	A+B+C+D	複合型效益評估

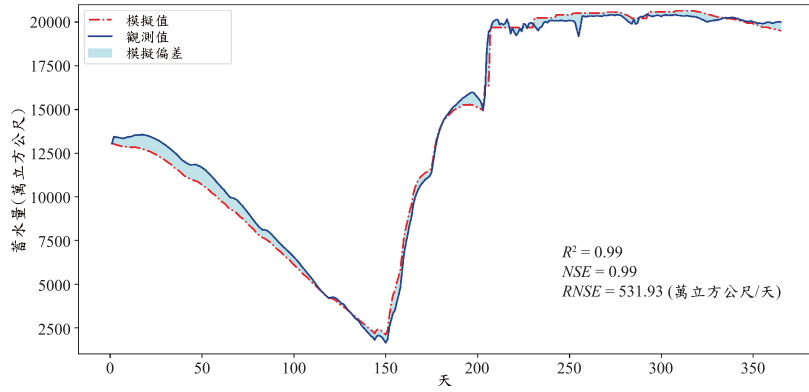


圖 4 2021 年石門水庫蓄水量檢定

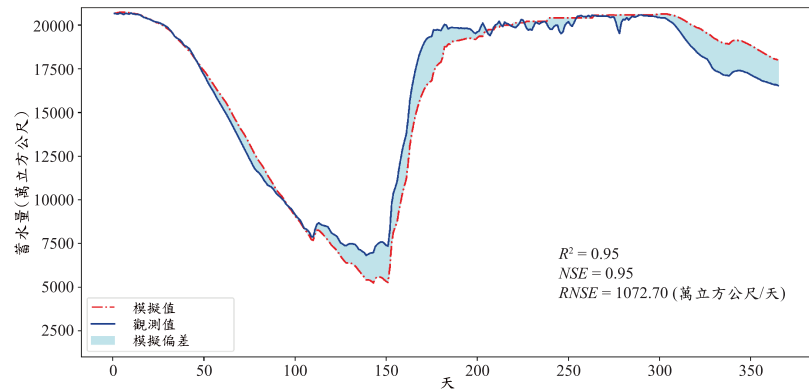


圖 5 2023 年石門水庫蓄水量驗證

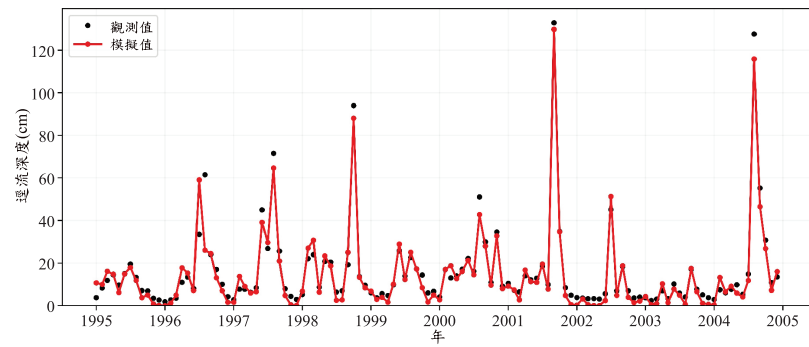


圖 6 1995-2004 年石門水庫逕流量模擬檢定

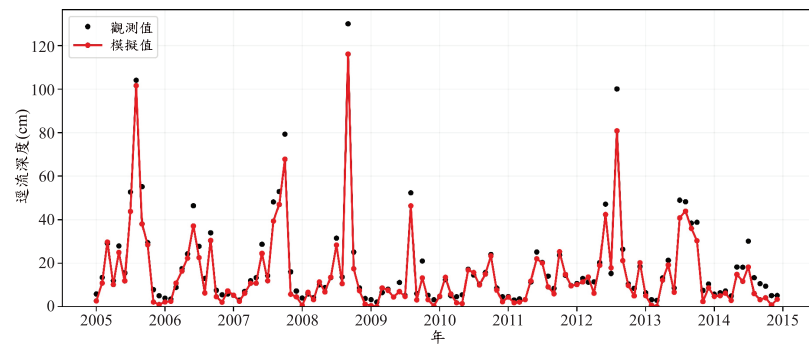


圖 7 2005-2014 年石門水庫逕流量模擬驗證

## 4.2 氣候變遷水資源衝擊評估

石門水庫集水區於中期 SSP5-8.5 情境下，多數月份之月平均降雨量皆低於基期(如圖 8)，進而導致本研究區月平均逕流量下降 (如圖 9)，增加供水系統之供水風險。根據供水系統模擬輸出值之指標量化結果(如表 2)，中期 SSP5-8.5 情境相較於基期，公共用水之回復力指標 1 由 24 (days) 上升至 36 (days)、回復力指標 2 從 133 (days) 增加至 145 (days)、可靠度指標由 90.19 (%) 下降至 82.34 (%)、脆弱度指標 1 自

1,330 (%-day) 上升至 1,630 (%-day)、脆弱度指標 2 不變。顯示 SSP5-8.5 情境下之中期，將降低供水系統之供水穩定性並增加供水缺口。就農業用水而言，於中期 SSP5-8.5 情境下，五大分區一期作停灌次數由 1 次上升至 8 次，農業用水之供水風險將顯著增加。且「一期作」為本研究區水稻主要耕作期，停灌次數的增加將使未來之農業用水及糧食生產更具挑戰。以五大分區來討論，基期之一二期作在各項指標結果顯示裡，桃 1 灌區具有最佳表現。結果顯示在氣候變遷的影響下，桃 1 灌區相較於其他灌區有最佳農業供水狀態。

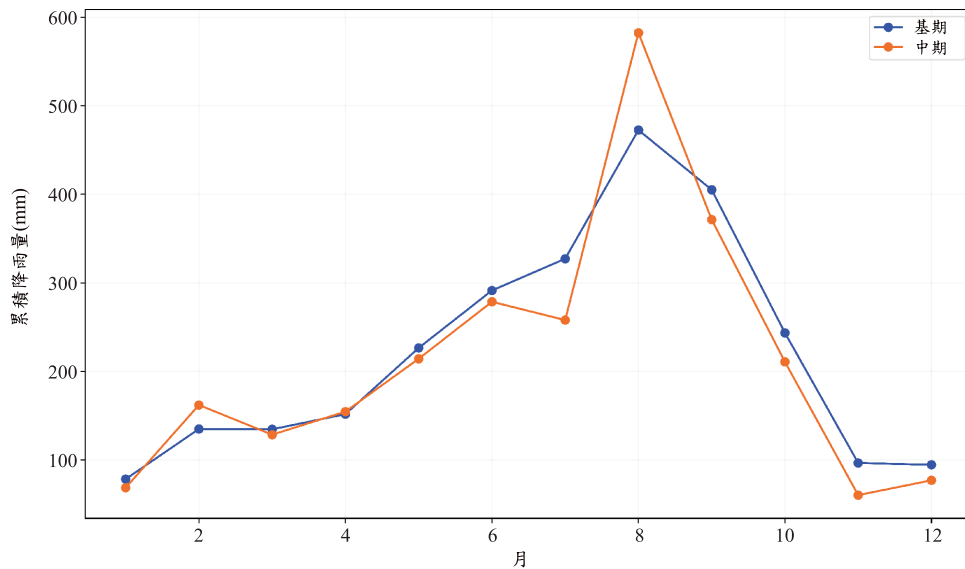


圖 8 石門水庫集水區基期與中期 SSP5-8.5 情境下月平均降雨量

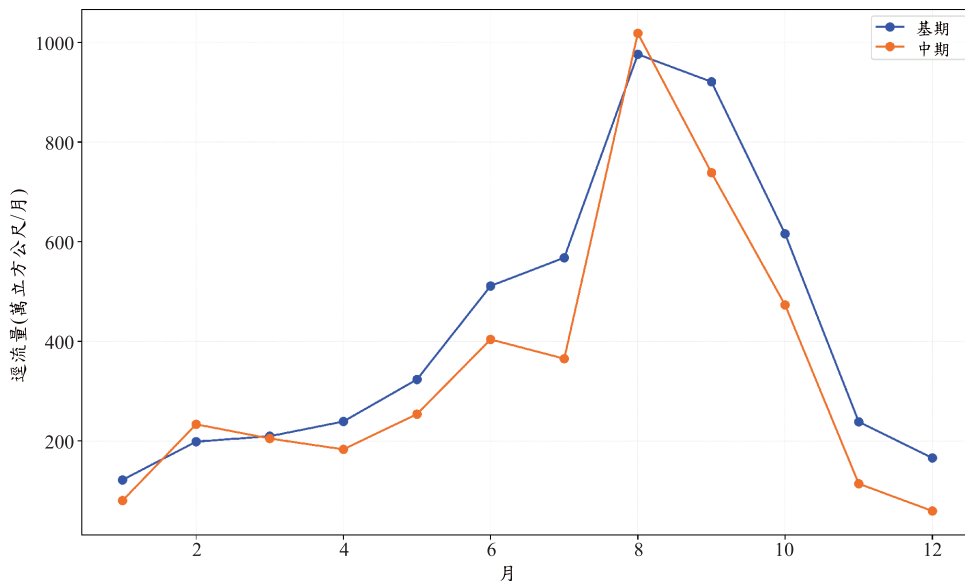


圖 9 石門水庫集水區基期與中期 SSP5-8.5 情境下月平均逕流量

表 2 基期與中期 SSP5-8.5 情境下各項指標分析

指標		回復力 1	回復力 2	可靠度	脆弱度 1	脆弱度 2	停灌次數
石 1 一期作	基期	8	54	79.67	14.09	50	1
	中期	4	43	89.72	4.79	50	8
石 1 二期作	基期	8	44	85.28	22.64	58	4
	中期	5	33	80.79	12.77	58	2
石 2 一期作	基期	6	34	80.07	14.24	43	1
	中期	3	30	89.49	7.23	43	8
石 2 二期作	基期	9	51	81.63	19.9	51	4
	中期	6	52	78.9	11.52	51	2
桃 1 一期作	基期	5	28	86.93	23.48	49	1
	中期	2	14	95.1	8.55	49	8
桃 1 二期作	基期	6	45	91.69	28.54	42	4
	中期	4	33	84.04	16.19	42	2
桃 2 一期作	基期	7	56	75.65	27.2	46	1
	中期	3	30	87.68	13.92	46	8
桃 2 二期作	基期	8	44	82.5	29.41	40	4
	中期	4	37	82.28	18.9	40	2
桃 3 一期作	基期	8	74	71.74	28.88	46	1
	中期	3	30	87.64	15.04	46	8
桃 3 二期作	基期	8	46	82.16	29.47	40	4
	中期	4	40	82.05	19.23	40	2
公共 用水	基期	24	133	90.19	1330	20	
	中期	36	145	82.34	1630	20	

### 4.3 氣候變遷之水資源調適策略評估

桃園臺地於中期 SSP5-8.5 情境下，供水系統將面臨更加嚴峻的供水挑戰，本研究評估各項調適策略效益，分別以停灌次數、供水穩定性以及供水缺口進行討論，以供決策單位多面向之科學數據參考。各量化指標結果如表 3 與表 4 所示。

調適策略評估若以停灌次數為首要考量，複合型調適策略 E (A+B+C+D) 在農業用水及公共用水中均有最佳的表現，一期作停灌次數由 8 次降至 1 次，二期作停灌次數由 2 次降至 1 次，而單一型調適策略則以調適策略 C (水庫浚漂) 較佳，具有較低的停灌次數。於此兩項調適策略中，桃 1 最具供水穩定性。

若以供水穩定性作為挑選調適策略之優先考量，為評估回復力指標 1、回復力指標 2 及可靠度指標。根據分析結果顯示，複合型調適策略 E (A+B+C+D) 於公共用水上具有最佳的供水穩定性，而單一型調適策略則以調適策略 C (水庫浚漂) 為佳。石門灌區與桃園灌區之一二期作分別於調適策略 B (埤塘支援公共用水) 與調適策略 A (埤塘疏浚) 下，具有較佳的供水穩定性，且以桃 1 的供水穩定性為佳，而石 1 與石 2

之供水缺口較小。

若以降低供水缺口作為調適策略之首要考量，則以脆弱度指標 1 與脆弱度指標 2 作為評估。公共用水為施行複合型調適選項 E (A+B+C+D)，將使供水缺口大幅降低，單一型調適策略則以調適策略 B (埤塘支援公共用水) 及調適策略 C (水庫浚漂) 為佳。石門灌區與桃園灌區行調適策略 A (埤塘疏浚) 後，將具有較小的供水缺口，並且桃 1 之供水穩定性仍為最佳。

綜上所述，桃園臺地於中期 SSP5-8.5 情境下，複合型調適策略 E (A+B+C+D) 為最佳調適策略，公共用水之脆弱度指標 1 可由 1,630 %-day 降低至 701 %-day；回復力指標 1 能由 36 days 減緩至 20 days；可靠度指標將由 82.34 % 提高至 91.8%。並可使一期作停灌次數由 8 次降低至 1 次，二期作停灌次數由 2 次降至 1 次；其次，單一型調適策略 A (埤塘疏浚) 為次佳調適策略，透過分散式蓄水調適，能有效提高農業用水之供水穩定性，並且降低農業用水之供水缺口；再其次，為單一型調適策略 C (水庫浚漂)，透過集中式調適策略將降低停灌次數以及提高公共用水之供水穩定性以及降低供水缺口；第 4 為調適策略 B (埤塘支援公共用水)，能提高農業用水之供水穩定性以及降低公

表 3 中期 SSP5-8.5 情境下不同調適策略指標變化(石門灌區暨公共用水)

指標		回復力 1	回復力 2	可靠度	脆弱度 1	脆弱度 2	停灌次數
石 1 一期作	中期	4	43	89.72	4.79	50	8
	A	4	43	88.15	4.79	50	6
	B	4	43	89.72	4.79	50	8
	C	4	43	83.28	5.05	50	1
	D	4	43	84.78	5.07	50	6
	E	4	43	77.58	5.63	50	1
石 1 二期作	中期	5	33	80.79	12.77	58	2
	A	5	33	83.06	9.08	58	3
	B	5	33	80.89	13.25	58	2
	C	5	33	80.41	12.82	58	2
	D	5	33	81.7	12.87	58	3
	E	5	42	79.01	9.36	58	1
石 2 一期作	中期	3	30	89.49	7.23	43	8
	A	3	30	87.85	7.23	43	6
	B	3	30	89.49	7.23	43	8
	C	3	30	83.36	7.83	43	1
	D	3	32	85.22	7.49	43	6
	E	3	30	78.22	8.42	43	1
石 2 二期作	中期	6	52	78.9	11.52	51	2
	A	6	52	79.95	10.41	51	3
	B	6	52	78.89	11.52	51	2
	C	6	52	78.19	11.47	51	2
	D	6	52	79.97	11.07	51	3
	E	6	52	75.64	10.71	51	1
公共用水	中期	36	145	82.34	1630	20	
	A	32	145	82.96	1570	20	
	B	36	145	82.34	1008	12.3	
	C	21	115	91.4	1150	10.01	
	D	35	147	81.86	1860	20.01	
	E	20	114	91.8	701	6.16	

表 4 中期 SSP5-8.5 情境下不同調適策略之指標(桃園灌區)

指標		回復力 1	回復力 2	可靠度	脆弱度 1	脆弱度 2	停灌次數
桃 1 一期作	中期	2	14	95.1	8.55	49	8
	A	2	14	94.69	4.81	49	6
	B	2	14	94.96	9.78	49	8
	C	2	16	92.41	8.64	49	1
	D	2	14	94.62	7.77	49	6
	E	2	16	92.71	4.81	49	1
桃 1 二期作	中期	4	33	84.04	16.19	42	2
	A	3	26	83.97	10.44	42	3
	B	4	38	84.82	19.09	42	2
	C	4	26	83.56	15.19	42	2
	D	4	35	84.94	15.46	42	3
	E	3	35	83.69	10.69	42	1
桃 2 一期作	中期	3	30	87.68	13.92	46	8
	A	3	30	85.75	8.59	46	6
	B	3	30	87.71	13.92	46	8

指標	回復力 1	回復力 2	可靠度	脆弱度 1	脆弱度 2	停灌次數	
C	3	30	80.59	12.85	46	1	
D	3	30	86.04	13.15	46	6	
E	3	30	80.38	8.59	46	1	
桃 2 二期作	中期	4	37	82.28	18.9	40	2
A	3	37	83	12.34	40	3	
B	4	37	82.28	18.9	40	2	
C	4	37	82.07	17.72	40	2	
D	5	41	81.07	17.98	40	3	
E	4	40	78.02	12.64	40	1	
桃 3 一期作	中期	3	30	87.64	15.04	46	8
A	3	30	85.77	9.4	46	6	
B	3	30	87.71	15.04	46	8	
C	3	30	79.87	13.82	46	1	
D	3	32	85.79	14.41	46	6	
E	3	30	80	9.4	46	1	
桃 3 二期作	中期	4	40	82.05	19.23	40	2
A	3	40	83.07	12.7	40	3	
B	5	41	78.95	19.23	40	2	
C	4	40	82.04	18.42	40	2	
D	5	40	80.17	18.7	40	3	
E	4	40	78.23	12.99	40	1	

共用水之供水缺口；最後，為調適策略 D(分區輪灌)，該策略能些微提升農業用水之供水穩定性。而五大分區在任一調適策略下，桃 1 皆為最具供水穩定性的灌區，未來可著重考慮桃 1 之農業灌溉潛力。

## 結論

石門水庫水源每年供應桃園臺地 68.4%的用水需求。平均每年的循環利用率達四次，也就是大約三個月須蓄滿一次，平均利用率高達 81%。石門水庫集水區逕流量豐枯水期差異明顯，氣候變遷將加劇水資源短缺風險。本研究使用 Vensim 軟體建置桃園臺地水資源系統動力模型，用以模擬基期及中期之供水系統的水資源調配情形，並透過停灌次數、回復力指標 1、回復力指標 2、可靠度指標、脆弱度指標 1 及脆弱度指標 2 等指標，評估供水系統於不同調適策略之供水穩定性以及供水缺口。研究成果的科學數據可協助相關單位因應未來更嚴峻的乾旱所帶來的水資源風險，擬定最佳調適路徑，主要結論如下：

桃園臺地水資源系統動力模型經檢定與驗證後，檢定年之  $R^2$ 、NSE 及 RMSE 分別為 0.99、0.99、531.93 萬立方公尺/天，驗證年之  $R^2$ 、NSE 及 RMSE 分別為 0.95、0.95、1072.70 萬立方公尺/天。石門水庫集水區

之逕流量模擬檢定與驗證，檢定年  $R^2$ 、NSE 及 RMSE 分別為 0.93、0.94、5.23cm，驗證年  $R^2$ 、NSE 及 RMSE 分別為 0.94、0.95、4.71 cm。皆顯示模型之模擬結果良好，適用於各項情境模擬。

根據模擬結果顯示，停灌次數、可靠度指標與脆弱度指標 1 的量化成果，較能反映出各項調適策略降低氣候變遷缺水風險之效益。

本研究使用 Vensim 軟體建置桃園臺地水資源系統動力模型，模擬並使用多項指標以量化評估中期 SSP5-8.5 情境下相較於基期所帶來的水資源衝擊。根據分析結果顯示，中期 SSP5-8.5 情境下農業用水一期作之停灌次數相較於基期，停灌次數由 1 次上升至 8 次，該供水風險將顯著增加。公共用水之可靠度將由 90.19%下降至 82.34%，且脆弱度指標 1 將由 1,330%-day 上升至 1,630%-day，將增加 300%-day 之供水缺口。顯示公共用水之供水穩定性將於中期 SSP5-8.5 情境中下降，並且加劇供水缺口。

根據模擬結果顯示，透過複合型調適策略 E (A+B+C+D)，能有效降低桃園臺地於中期 SSP5-8.5 情境下，農業用水的停灌次數、提高公共用水之供水穩定性以及降低公共用水之供水缺口，為最佳策略。調適策略 A(埤塘疏浚) 為單一型調適策略最佳選擇，將能有效提高中期 SSP5-8.5 情境下農業用水之供水穩定性，並且降低農業用水之供水缺口。

從支援氣候變遷調適決策角度，未來尚需評估各項單一或複合型調適策略所需之成本及社會接受度，以使各項調適策略符合最大社會共識。

## 致謝

感謝「臺灣氣候變遷推估資訊與調適知識平台計畫」提供氣候變遷推估資料。感謝國家科學及技術委員會經費補助：「桃園臺地與海岸帶關鍵區永續發展跨域研究-桃園臺地與海岸帶關鍵區永續發展跨域研究 (總計畫)(3/3)(計畫編號:114-2621-M-008-002-)」。

## 參考文獻

1. Chien, W.H., Ho, C.C., Chiu, W.C., Wang, T.S., and Tsai, Y.-C., "A Study on the Benefits of Water Resources Utilization for Connecting Farm Ponds in Taoyuan," 台灣水利, 69(4), pp.1-11, 2021.
2. Fang, W.T., Chien, C.P., and Chen, S.C., "Study on Agricultural Benefits by Increasing Capacity of Water Ponds: A Case Study at Taoyuan Paddy Fields," *Paddy and Water Environment*, 410(3), pp.231-250, 2012.
3. Holling, C.S. and Meffe, G.K., "Command and Control and the Pathology of Natural Resource Management," *Conservation Biology*, 10(2), pp.328-337, 1996.
4. Lee, J.Y., J. Marotzke, G., Bala, L., Cao, S., Corti, J.P., Dunne, F., Engelbrecht, E., Fischer, J.C., Fyfe, C., Jones, A., Maycock, J., Mutemi, O., Ndiaye, S., Panickal., and Zhou, T., *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, 2021: Future Global Climate: Scenario-Based Projections and Near-Term Information*, pp.553-672, Cambridge University Press., Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA., June, 2023.
5. Li, M.H., Tseng, K.J., Tung, C.P., Shih, D.S., and Liu, T.M., "Assessing Water Resources Vulnerability and Resilience of Southern Taiwan to Climate Change. Terrestrial," *Atmospheric and Oceanic Sciences*, 28(1), pp.67-81, 2017.
6. 行政院經濟部水利署，「臺灣各區水資源經理基本計畫-核定本」，2021。
7. 行政院農業委員會農田水利署，「2022 年行政院農業委員會農田水利署 Annual Report」，2023。
8. 李明旭，桃園臺地與海岸帶關鍵區永續發展跨域研究-桃園臺地與海岸帶關鍵區永續發展跨域研究:總計畫 (1/3)，國家科學及技術委員會補助專題研究計畫報告，計畫編號: NSTC 112-2621-M-008-003-，2024。
9. 林永禎，「桃園地區缺水之影響與經濟損失」，水利會訊，第 10 期，68-79 頁，2007。
10. 連宛淪，「氣象合成與水文模式之發展及因應氣候變遷之供水系統調適能力建構」，2013。
11. 沈志修，「自然樂活海好有你:桃園海岸生態保護白皮書.2017」，桃園市政府出版，桃園市，2017。
12. 許晃雄、王嘉琪、陳正達、李明旭、詹士樑，「國家氣候變遷科學報告 2024：現象、衝擊與調適」，國家科學及技術委員會與環境部聯合出版，2024。
13. 經濟部水利署北區水資源分署，「104 年北部地區抗旱應變報告」，經濟部水利署北區水資源分署出版，2015。
14. 經濟部水利署北區水資源分署，石門水庫主題網，2025，<https://web.wra.gov.tw/shihmen/>。
15. 簡傳彬，「利用桃園地區埤塘輔助民生及工業用水之可行性評估」，經濟部水利署北區水資源分署出版，桃園市，2006。
16. 鄭文燦，「286 天迎戰百年大旱」，桃園市政府經濟發展局出版，桃園市，2022。

收稿日期：民國 114 年 12 月 12 日

修改日期：民國 115 年 01 月 01 日

接受日期：民國 115 年 01 月 18 日