

大臺中地區大甲大安聯通管完工前後水資源缺水風險評估研究

Assessment of Water Shortage Risk in the Taichung Area Before and After the Completion of the Dajia-Daan Interconnection Pipeline

逢甲大學 水利工程與資源保育學系暨營建及防災研究中心

專題研究學生

專題研究學生

專題研究學生

助理教授

陳達緯

林俊佑

黃瑋程

陳柏蒼

Da-Wei Chen

Chun-Yu Lin

Wei-Cheng Huang

Boris P.-T. Chen

摘要

隨著大臺中地區人口的快速增長、工業化進程的加速以及生活品質的顯著提升，區域內的用水需求量持續增加，對水資源供給系統帶來了前所未有的壓力。本研究旨在評估臺中地區現有水資源供水系統是否能夠滿足未來的需求，包含大甲、大安聯通管運轉前後對臺中地區水資源缺水風險的影響。研究通過現況水文資料、供水需求在歷史流量記錄下以年用型水庫供水操作原則評估各月份供水至水文年結束可能存在之供水風險。風險描述係以馬可夫鏈(Markov Chain)為基礎，在繁衍萬倍的河川歷史流量資料後以陳(2024)發展的序率水資源供水系統風險評估模式，模擬供水系統大甲、大安串聯前後供水運轉操作下的潛在供水風險，包含整合各標的用水需求下的缺水等級及發生機率，做為臺中地區未來供水利用整體政策的參考。

關鍵詞：馬可夫鏈，序率過程，缺水風險

Abstract

With the rapid population growth, accelerated industrialization, and significant improvement in the quality of life in the Greater Taichung area, the demand for water has been continuously increasing, putting unprecedented pressure on the water supply system. This study aims to assess whether the existing water resources supply system in the Taichung area can meet future demands, including the impact of the Dajia and Daan interconnection pipeline operations on the region's water scarcity risk. The study evaluates the potential supply risks for each month until the end of the hydrological year based on current hydrological data and water supply demand using historical flow records and reservoir operation principles for annual water supply. The risk assessment is described using a Markov Chain, which, after proliferating the

historical river flow data tens of thousands of times, utilizes the stochastic water resources supply system risk assessment model developed by Chen (2022) to simulate the potential supply risks under the operation of the interconnected Dajia and Daan water supply systems. This includes integrating the water demand for various targets and assessing the levels of water shortage and their probabilities. The results serve as a reference for future comprehensive water supply policies in the Taichung area.

Keywords: Markov chain, stochastic process, water shortage risk

一、前言

2021年4月6號，臺中在2021年這個台灣的百年一見的大旱紀錄中，喻等(2021)啟動了臺灣的第一波、以及50年來首次乾旱停水。因臺灣中部區域水資源需求持續增加，但新水源開發有限，如何在乾旱時期有效應用並分配各標的水源，成了大台中地區的重要課題，必須詳加評估以提出客觀的管理措施，且在2016年12月的經濟部水利署105年全國水論壇，做成了「研提水資源風險管理計畫並據以施行」短期行動方案結論，顯示出水資源風險管理的刻不容緩。臺中地區用水量主要是由大甲溪德基水庫及大安溪鯉魚潭水庫供應，由於科學園區產業持續成長、工業發展迅速及臺中人口數持續攀升導致人民用水量增加，對於臺中地區供給系統帶來前所未有的壓力；根據行政院110年版的「臺灣各區水資源經理基本計畫」資料顯示，大臺中地區目標年125年每日用水需求量为157.8萬噸，而現況供給量已無法滿足未來需求。

水資源供給系統的穩定性不僅僅關係到人民的生活日常，也會影響產業發展的持續性。尤其半導體產業是臺灣的經濟命脈，在世界上也是數一數二重要的產業，而此產業又屬於高耗能產業（包含耗電、耗水），然而，臺灣年降雨量雖豐沛，但時空上的分佈卻非常不均，豐水期與枯水期區分明顯，使得水資源供應常常面臨到困境，此時，水資源如何調度便成為國家重要的課題，水庫之間之配合顯得格外重要，解決了水資源問題才能使企業安定發展，使國家經濟穩定成長。為了因應大臺中地區公共用水量每年持續增加，更為有效運用大甲溪與大安溪之水量，同時建立一套供水系統，經濟部水利署規劃「大安大甲溪聯通管工程計畫」，利用「大甲溪輸水管工程」及「鯉魚潭水庫第二原水管工程」把兩水庫之水源做連結，並改善豐原淨水場、鯉魚潭淨水場處理能力及興建后里淨水廠，可使每日供水量增加25.5萬噸，有效聯合利用兩流域水源，這不僅提升大甲大安溪水源地之調度彈性，也解決備援能力不足等問題。

本研究目的在於評估臺中地區現有水資源供應系統在面對未來需求成長時的韌性，包含大安、大甲聯通管運轉前後對於區域內水資源缺水風險的影響。將通過分析現有的水文資料和供水需求並結合歷史流量記錄，以年用型水庫供水操作原則來評估各月份供水至水文年結束時可能存在的供水風險。為了達成上述目標，本研究將以馬可夫鏈作為基礎，能夠模擬系統在不同狀態之間的轉移概率，從而預估未來的系統狀態，並且將歷史流量資料進行萬倍的繁衍，以此評估供水系統在大甲、大安串聯前後的運轉操作下，可能面臨到的供水風險。

為使供水策略表示更明確，利用陳(2024)發展的序率水資源供水系統風險評估模式

之缺水燈號設定做為本研究之缺水判斷依據；模擬供水系統大甲、大安串聯前後供水運轉操作下的潛在供水風險，包含整合各標的用水需求下的缺水等級及發生機率，做為臺中地區未來供水利用整體政策的參考。

二、文獻回顧

臺中地區水資源供給主要依賴水庫的蓄水和調節功能，但隨著用水需求快速增長，現有水庫的供應能力面臨巨大壓力，這使大甲大安聯通管工程的建設成為提升供水穩定性的關鍵舉措。為更好理解該工程對水資源管理的影響，必須深入探討當前水資源供給的挑戰。同時，馬可夫鏈模型因其在隨機過程和不確定性處理方面的優勢，已廣泛應用於水資源風險評估。透過該模型，我們可以模擬大甲大安聯通管工程完工前後水庫蓄水狀況及供水系統的動態變化，進一步預測可能面臨的缺水風險。供水系統的缺水風險評估對區域發展規劃至關重要，當地水資源管理政策應根據評估結果調整，以確保在乾旱或極端氣候下系統能有效運行，避免水資源短缺帶來的經濟損失。本研究結合臺中地區的水資源現況、馬可夫鏈模型應用及風險評估，為未來水資源管理提供綜合建議。

2.1 臺中水資源供給

臺灣因降雨時空分布不均，需要透過水庫進行「蓄豐濟枯」，提升水資源利用並穩定供水。根據經濟部水利署採用聯合國政府間氣候變遷專門委員會(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)發布之第五次評估報告(AR5)，模擬 125 至 154 年臺灣地區降雨情境分析顯示指出，未來降雨將呈現「豐越豐、枯越枯」趨勢。

為使我國整體發展持續向上，行政院 106 年核定通過前瞻基礎建設計畫，其中關於水資源部分，提出了「水與發展」、「水與安全」、「水與環境」三大建設主軸。創造水源、資源永續、穩定供水是「水與發展」之目標，如大安大甲溪聯合運用工程、石門水庫阿姆坪防淤隧道計畫、備援調度工程計畫。防洪治水、韌性國土、國土安全是「水與安全」之課題，如「縣市管河川及區域排水整體改善計畫」、「中央管河川、區域排水及一般性海堤整體改善計畫」。水岸融合、環境優化、營造水資源是「水與環境」之方向，如全國水環境改善計畫。水資源成國家發展之重要基礎，以臺中地區為例，隨著全球產業轉型，為加速國家產業發展，政府力推「歡迎臺商回臺投資行動發展」、「根留臺灣企業家數投資行動方案」、「中小企業加數投資行動方案」等政策，使科學園區及在地企業持續壯大，加上工業發展迅速、地區人口數成長，以致於公共用水需求量持續攀升，根據資料顯示，大臺中地區目標年 125 年每日用水需求量為 157.8 萬噸，以現況供水能力已無法負荷未來需求量。(行政院，2021)

臺中地區用水量主要來源於大甲溪德基水庫及大安溪鯉魚潭水庫，為使供給量提升，透過鯉魚潭水庫二原管、大甲溪輸水路串聯兩水庫，並改善鯉魚潭淨水廠及豐原淨水廠，興建后里淨水廠。在缺水指數 $SI=1$ 的情境下，公共用水計畫供水能力由計畫前 151.0 萬噸/日，計畫後提高至 176.5 萬噸/日，增加 25.5 萬噸/日。(經濟部水利署，2021)

2.2 馬可夫鏈(Markov chain)

馬可夫鏈是由俄國數學家安德烈·馬可夫提出，為狀態空間中從一個狀態到另一狀態

轉換的隨機過程，該過程具有「無記憶」的性質，意旨下一狀態的機率分布只能由當前狀態決定，而與過去狀態毫無相關。此性質適合用於模擬和預測不確定性強的系統。馬可夫鏈模型發展至今已 100 多年，應用其模型的相關領域非常的多且廣泛，例如在金融、健康醫療、水資源、生物科學與天氣預測等，水資源方面，如紀証耀(2008)為了因應高屏溪因越域引水工程導致下游河川水質出現惡化現象，利用馬可夫鏈蒙地卡羅法，結合 QUAL2LK 水質模式，對河川進行整合性評估，並判斷在不同設計引水量下，各月份河川水質之達成率。顏君凌(2003)以翡翠水庫為例，將未來水庫進水量視為具有某特定發生機率之變量，利用移轉機率矩陣來呈現自然界水文現象的不確定性，同時使用多變量 ARMA 模式來繁衍數萬年流量資料，並探討水庫未來進水量再不同條件下的發生機率，進而估算未來水庫的蓄水機率分布。

在金融方面，如馮書瑜(2023)利用馬可夫鏈對所有帳戶及灰色帳戶在登入、交易、小額交易、大額交易、警示狀態等階段之轉移機率以及停留時間進行研究分析，透過分析帳戶在交易所的行為模式並探討正常帳戶與灰色帳戶之間的差異。健康醫療方面，于昕(2022)針對疾病復發時事件的混合模型進行探討，因應復發狀態會隨時間改變，利用馬可夫鏈轉移機率矩陣求出不同時段下復發與否之機率，再使用 Cox 比例風險模型與韋伯分配對復發與未復發之存活機率進行建模，並計算患者的存活機率。

總結來說，馬可夫鏈模型在風險評估中具有重要應用，如洪水風險、乾旱風險等。通過建立不同水文狀態的轉移矩陣，將可以評估特定事件發生的概率，從而制定更有針對性的防災措施。在水資源缺水評估方面，其應用前景廣闊，無論是在乾旱地區的風險評估還是城市水資源的管理，都展現出獨特的優勢。隨著模型的不斷改進及新技術的融入，馬可夫鏈模型在水利工程中的應用將變得更加廣泛和深入。

2.3 供水系統之缺水風險

由於臺灣特殊地理和氣候環境，大部分用水需求都依賴水庫系統進行蓄水和調節，以應對不同季節的變化。然而，由於地區快速發展，各種用水需求大幅上升，使得乾旱和缺水問題逐漸浮現。在供水系統方面，如果現有的水庫蓄水量經評估後可能不足以滿足需求，應提早評估操作期內可能出現的缺水總量，並透過調配讓系統在剩餘的操作期內共同承擔缺水風險，以避免乾旱加劇，造成嚴重的社會和經濟損失。

歷史文獻中有關水庫供水系統缺水量機率分布及缺水機率的研究相對較少，其中以理論推導的研究更為罕見。如：Huang 和 Yuan(2004)以臺灣北部區域的翡翠與石門水庫系統為研究地區，考量過去的水文流量、目前的水庫蓄水量以及未來之需水量，使用乾旱預警指數發展出一套彩色編碼預警系統，使決策者能就潛在的乾旱嚴重程度做出相應的處理。Yu 等(2014)應用序率模式，結合季節性長期天氣預報、降雨-逕流模式和水源供需系統動力模式，預測臺灣中部區域各縣市未來三個月的缺水機率，結果可預測未來一至三個月月度缺水情況，並可用於區域性乾旱預警。Romano 等(2017)則將多元線性回歸模型與標準化降雨指數(SPI)的自回歸模式結合，應用於義大利中部的 Ridracoli 水庫，量化以地表水為主的供水系統的缺水風險。

缺水風險的評估對於都市發展與規劃具有重要意義，透過了解這些風險，可以更系統化地制定水資源管理政策，有效降低社會成本損失。然而，針對單一供水水庫未來缺

水的研究相對較少，更多研究是以區域為範圍，探討區域內供水不足的缺水風險。Qian 等(2014)則以威脅、敏感性及脆弱度為風險評估標準，利用最大熵原理與判別分析，建立了北京地區的風險評估模式。Shiau 及 Hsiao(2012)提出了一種綜合評估乾旱頻率、持續時間、嚴重程度及脆弱度的指數方法，以建立臺灣地區現況與未來供水情境下的都市乾旱風險。這種方法透過量化乾旱風險的空間分布，為未來的水資源規劃與經濟發展提供了基礎。Zhang 等(2016)使用 MIKE BASIN 模式對吉林市的水資源開發進行評估，並採用五種指標來進行缺水風險的評估。為使供水策略表示更明確，將利用陳(2024)發展的序率水資源供水系統風險評估模式之缺水燈號設定做為本研究之缺水判斷依據。

三、研究方法與操作模擬概述

3.1 研究方法

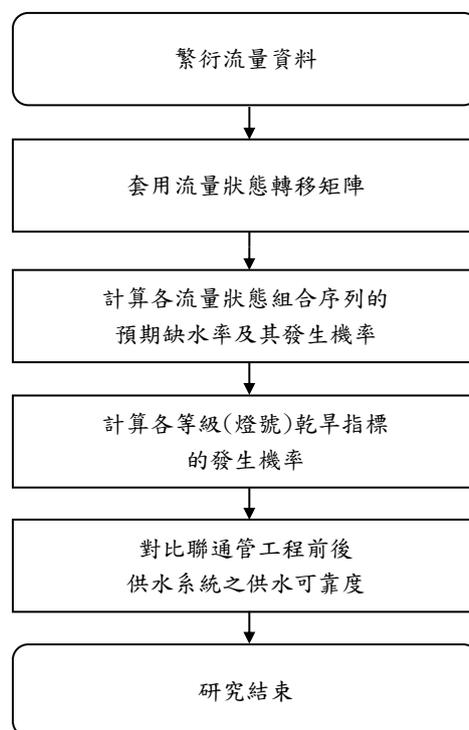


圖 1 研究流程圖

1. 繁衍流量資料

流量繁衍採用時間序列模式，通常透過符合標準常態分佈的隨機數列進行合成，需先構建能夠描述流量隨機特性的 ARMA (Auto Regressive Moving Average model) 模型。由於單純的 ARMA 模型僅適用於定常性數列(stationary series)的描述，因此在進行流量繁衍前，須先去除數列中的週期性和趨勢性特徵，使其滿足定常性數列的要求。一般的方法是將已有的數列進行標準化處理(徐享崑與尚新民，1985)，在這個過程中，可能還會結合變數轉換，使數列在轉換後符合標準常態分佈，從而進行隨機亂數合成。本研究首先使用傅立葉級數(Fourier series)去除流量數列的週期性特徵，然後進行變數轉換使其符合標準常態分佈，接著構建 ARMA 模型。最後，透過該 ARMA 模型，以符合標準常態分佈的隨機數列進行流量繁衍的合成(陳柏蒼，2024)。

2. 套用流量狀態轉移矩陣

在蓄水機率模擬的運算中，由於各時間單位的入流量具有不同的發生機率，為了賦予每個流量對應的發生機率，必須將入流量狀態進行離散化(discretization)，並劃分成若干個區間(class interval)，為每個區間指定代表流量值及其發生機率。設離散區間(class interval)個數為 m 個，每一區間代表的發生機率為 $P_1、P_2、\dots、P_m$ ，而各區間的機率總和為 1，可表示為：

$$\sum_{m=1}^m P_m = 1 \quad (1)$$

將各月份流量依流量大小順序排列後以 Weibull 法賦予累積機率。並確定各區間的上、下限值(class limit)，然後計算每個區間的平均流量，並以該平均流量作為該區間的代表流量值(class mark)。利用生成的長期流量數據，根據這些流量區間及其特徵流量，可以統計並建立不同流量組合在相鄰月份之間的一階馬可夫轉移機率矩陣。

3. 計算各流量狀態組合序列的預期缺水率及其發生機率

考量評估時間的下個月開始到水文年結束，期程間所有可能的流量的狀態組合可表示為：

$$I^C = [I_{t+1,j}^C, I_{t+2,j}^C, \dots, I_{t_{end},j}^C] \quad (2)$$

式中， I_c 為特徵值數列矩陣，為預警期程間各時段所有區間的入流量特徵值所組成；如各月份流量區分為 10 個狀態區間，則月與月間所需評估的狀態組合數為 10×10 個，而如預警時段需評估的月數有 n 個， I_c 則為一 10^n 的矩陣。而預警期程間可能發生的預期缺水率，可根據水平衡方程式 $S_{(t+1)} = S_t + I_t - D_t$ 依評估時間水庫蓄水及各取水點流量狀態、流量特徵值組合矩陣 I_c 及預警期程間的需求水量組合 D ，進行模擬估算，其可表示為：

$$ESR = ESR(S, D, I^C) \quad (3)$$

式中， $ESR(\cdot)$ 為預期缺水率運算單元； ESR 為預警期程間可能發生的預期缺水率集合，為一 $k \times n$ 矩陣，而 k 為 10^n 。各預警期程間各可能發生的預期缺水率事件 ESR_k 的對應發生機率可以表示為：

$$P(ESR_k) = \prod_{t=1}^{end} \hat{r}_{i,j}^t \quad (4)$$

式中， $\hat{r}_{i,j}^t$ 為預警期程內月份 t 各特徵入流量值相對的轉移機率，而預警期程前三個月，該值可根據修正後氣象預報結果進行修正（陳柏蒼，2024）。

5. 計算各等級乾旱指標的發生機率

在各評估時間的預警期程對式(4)及式(5)計算完成後，各水資源乾旱等級（燈號）的發生機率，可由下列各式計算獲得：

$$P^L = \sum P(ESR_k | L^{Low Bond} < ESR_k < L^{Up Bond}) \quad (5)$$

式中： P^L 為評估時間對預警期程 L 燈號（藍、綠、黃、橙、紅）的發生機率； $L^{Low Bond}$ 為各燈號 ESR 的下界值； $L^{Up Bond}$ 為各燈號 ESR 的上界值（陳柏蒼，2024）。其中各燈號的切分原則，可以計畫供水標的需求組成，合併考量經濟部頒布的「旱災災害防救業

務計畫旱災等級區分表」進行切分，茲以大甲溪供水系統為例，各燈號切分結果如表 1 所示。

表 1 大甲溪德基水庫供水系統各標的用水供水標準燈號/等級區分建議表

缺水等級	公共及工業用水 (年計畫量 3.29 億噸)		灌溉用水 (年計畫量 6.93 億噸)		實際供水情形 (總計畫供水 10.22 億噸)		
	1.0	分界值	1.0~0.9	分界值	實供 (億噸)	分界值	
1.0		0.9		供水率		缺水率	
藍燈 (無缺水)	1.0	1.0	1.0~0.9	0.9	9.53	93.22	6.78
綠燈 (常態缺水)	1.0~0.99	0.99	0.9~0.8	0.8	8.80	86.12	13.88
黃燈 (三級缺水)	0.99~0.98	0.98	0.8~0.7	0.7	8.08	79.01	20.99
橙燈 (二級缺水)	0.98~0.95	0.95	0.7~0.6	0.6	7.28	71.27	28.73
紅燈 (一級缺水)	0.95 以下		0.6 以下				
備註	本表以供水可靠度表示：供水可靠度=實際供水量/計畫供水量。						

3. 對比聯通管工程前後供水系統之供水可靠度

在評估水資源缺水與乾旱風險時，目的是分析供水系統的整體水資源利用情況。在目前科技下，對未來水文年入流量的準確預測尚不可行，因此「缺水潛勢」的評估與精確配水操作的「供水可靠度」評估有所不同。本研究根據現有技術，以「月」為時間單位進行水資源操作評估。根據每月流量區間的代表值及次月流量狀態轉移的機率矩陣，列出所有可能的入流量狀態組合並計算其發生機率式(3)。在預警期內，針對每個可能的流量狀態組合，利用各時間單位對應的流量區間特徵值，透過水庫蓄水模擬計算預期缺水率式(4)，而各預期缺水率的發生機率則可以透過狀態轉移機率矩陣來描述(陳柏蒼，2024)。

3.2 大甲大安水資源操作模擬概述

1. 鯉魚潭水庫及士林堰水源運用原則

本研究在大安溪水源運用模擬原則操作上，為模擬實際供水上可能產生的供水缺口，除不計發電及供水運用的水庫操作規線外，餘水源運用依據各標的引水位置及計畫供水量進行操作。自來水公共用水(含工業用水)係自士林堰引入大安溪原水至鯉魚潭淨水場處理後供應，計每日提供供水區 70 萬噸(cubic meter per day, CMD)水量；農業用水各圳路引水位置如圖 2 所示。下游保留水量與生態基流量等控制原則簡要說明如下：

(1) 下游保留水量

大安溪士林堰下游保留量為士林堰下游至三罐圳(苑裡圳、日南圳、九張犁圳)上游應保留之灌溉水量與河川基流量。有關引水供水之內容如下：

- (一) 當士林堰天然進流量大於下游保留量與三灌圳之和時，士林堰最大引水量為 35cms，其餘剩水量乃放至士林堰下游，供其他做使用，三灌圳優先由大安溪取水，不足水量由鯉魚潭水庫供應。
- (二) 當士林堰天然進流量小於下游保留量與三灌圳之和時，士林堰排放下游保留量及三灌圳用水量由鯉魚潭供應。

在生態基流量保留原則部分，參考經濟部水利署中區水資源局 2021 年，「大安大甲溪聯通管工程－設計原則審議成果報告」報告所列，鯉魚潭水庫保留水量為 0.14 CMS，士林堰以下河段則需保留 2.7 CMS。鯉魚潭圳依其計畫用水量放水，但已該旬景山溪天然流量和該圳水權量取小者為限。

表 2 大安溪農業用水保留水量表(百萬立方公尺)

河段	水文月 取水點	Jan	Feb	Mar	Apr.	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
		士林 攔河 堰 ~ 景山 溪匯 流	卓蘭圳	10.55	9.61	10.55	10.21	10.55	10.21	10.55	10.55	10.21	10.55
石壁坑圳	4.44		4.05	4.44	4.30	4.44	4.30	4.44	4.44	4.30	4.44	4.30	4.44
埔尾橫圳	1.59		1.46	1.64	1.58	1.62	1.56	1.65	1.70	1.62	1.67	1.57	1.61
后里圳	14.95		14.68	46.90	54.91	50.58	47.74	46.23	60.37	50.21	48.38	15.74	14.84
口潭圳	0.00		0.31	1.79	1.80	1.68	1.47	0.85	2.02	1.67	1.63	0.42	0.33
新店圳	1.51		1.46	3.55	4.04	3.69	3.47	3.12	4.47	3.65	3.55	1.24	1.51
頂店圳	13.82		15.39	34.04	31.39	30.49	25.79	20.67	34.29	29.78	29.28	13.02	13.82
小計	46.86		46.97	102.91	108.23	103.05	94.54	87.51	117.85	101.45	99.50	46.50	47.10
景山 溪~ 大安 溪河 口	鯉魚潭圳	0.00	0.22	1.15	1.16	1.09	0.95	0.57	1.30	1.09	1.06	0.29	0.23
	苑裡圳	0.00	9.38	49.47	51.50	47.91	43.19	32.11	57.47	47.32	36.31	9.52	10.78
	日南圳	7.51	7.42	23.48	22.81	21.42	19.12	11.70	26.42	21.43	21.12	8.85	7.51
	九張犁圳	2.81	2.77	8.43	8.19	7.68	6.87	4.20	9.48	7.68	7.57	3.25	2.81
	小計	10.33	19.79	82.53	83.66	78.11	70.13	48.59	94.68	77.52	66.06	21.90	21.33

資料來源：經濟部水利署，2005，大安溪大甲溪水資源聯合運用正式報告。

2. 德基水庫及石岡壩水源運用原則

本研究在大甲溪水源運用模擬原則操作上，為模擬實際供水上可能產生的供水缺口，除不計發電及供水運用的水庫操作規線外，餘水源運用依據各標的引水位置及計畫供水量進行操作。自來水公共用水（含工業用水）係自石岡壩引入大甲溪原水至豐原淨水場處理後供應，計每日提供大臺中地區 90 萬噸(cubic meter per day, CMD)水量；農業用水各圳路引水位置如圖 2 所示。下游保留水量與生態基流量等控制原則簡要說明如下：

(1) 下游保留水量

大甲溪各灌區之保留量採登記水權量與計畫用水量較少者，經水利署統計如表 2 所示。攔河堰與水庫皆須優先放流下游各項保留水量，若有剩餘流量時才可引取。前述各項保留水量包括水權保留量與維持河川水質、生態及景觀之生態基流量。由於水權保留量在河道內流動時，亦有維持河川水質之功能，故在估算保留水量時，係採用水權保留

量與生態基流量兩者之中數值較大者，作為保留水量之放流依據。在公共用水部分，其取水之順序為優先利用大甲溪之未控制流量及剩餘流量，若不足的部分，由德基水庫放水補足，但其放水量以不超過每日90萬噸為限。

表 3 大甲溪農業用水保留水量表(百萬立方公尺)

河段	日曆月	Jan	Feb	Mar	Apr.	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
	水文月 取水點	8月	9月	10月	11月	12月	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月
德基 水庫 ~石 岡壩	白冷圳	4.90	4.47	4.90	4.75	4.90	4.75	4.90	4.90	4.75	4.90	4.75	4.90
	大茅埔圳	0.32	0.30	0.32	0.31	0.32	0.31	0.32	0.32	0.31	0.32	0.31	0.32
	老圳	0.64	0.59	0.64	0.62	0.64	0.62	0.64	0.64	0.64	0.62	0.64	0.64
	東勢本圳	2.04	1.86	2.04	1.98	2.04	1.98	2.04	2.04	1.98	2.04	1.98	2.03
	八寶圳上游	0.87	0.97	1.27	1.19	1.27	1.04	1.20	1.28	1.23	1.24	0.89	0.89
	小計	8.79	8.18	9.18	8.85	9.18	8.70	9.11	9.19	8.89	9.15	8.55	8.79
石岡 壩	八寶圳中下游	0.83	1.02	2.38	2.13	2.17	1.90	1.53	2.35	2.10	1.96	0.79	0.84
	葫蘆墩圳	10.84	14.90	41.34	37.71	35.62	28.85	32.53	40.67	34.56	31.04	8.94	10.62
	小計	11.67	15.92	43.72	39.85	37.79	30.74	34.06	43.02	36.66	33.00	9.73	11.46
石岡 壩~ 大甲 溪河 口	埤頭山圳	0.12	0.11	0.12	0.12	0.12	0.12	0.12	0.12	0.12	0.12	0.12	0.12
	內埔圳	0.66	0.69	3.23	3.25	3.01	2.82	2.78	3.58	2.95	2.86	0.78	0.66
	五福圳	2.90	2.94	10.19	13.05	11.99	11.20	8.77	13.33	10.80	10.52	3.10	2.64
	虎眼一圳	0.81	1.38	3.56	2.99	3.02	2.13	2.24	4.98	4.17	4.02	1.02	0.84
	高美圳	1.37	1.37	3.82	5.14	5.24	5.07	3.76	7.19	6.09	5.94	1.70	1.21
	虎眼二圳	0.87	1.39	2.93	2.42	2.18	1.74	2.34	5.26	4.39	4.24	1.01	0.81
	小計	6.72	7.89	23.85	26.97	25.56	23.07	20.01	34.47	28.52	27.70	7.73	6.28

資料來源：經濟部水利署，2005，大安溪大甲溪水資源聯合運用正式報告。

在生態基流量保留原則部分，參考經濟部水利署中區水資源局2010年，「大安大甲溪水源聯合運用輸水工程可行性規劃」報告所列，德基水庫至石岡壩之保留水量為6.11 CMS，石岡壩以下河段則需保留6.44 CMS，大甲溪出海口河段則需保留3.00 CMS。

3.大安大甲輸水系統運轉規則

大安大甲輸水系統如下圖所示，大臺中地區供水量絕大部分時間是由大甲溪水源所供應，由石岡壩取水從大甲溪輸水管輸送至豐原淨水廠及后里淨水廠，在此前必須先確保石岡壩下游保留量才能引水，而鯉魚潭淨水廠由鯉魚潭水庫供應，使總體水量可滿足大臺中地區需求量；若石岡壩供應後有剩餘水量，可輸水至大安溪后里圳作灌溉使用，原后里圳灌溉水量輸送到鯉魚潭水庫蓄存。

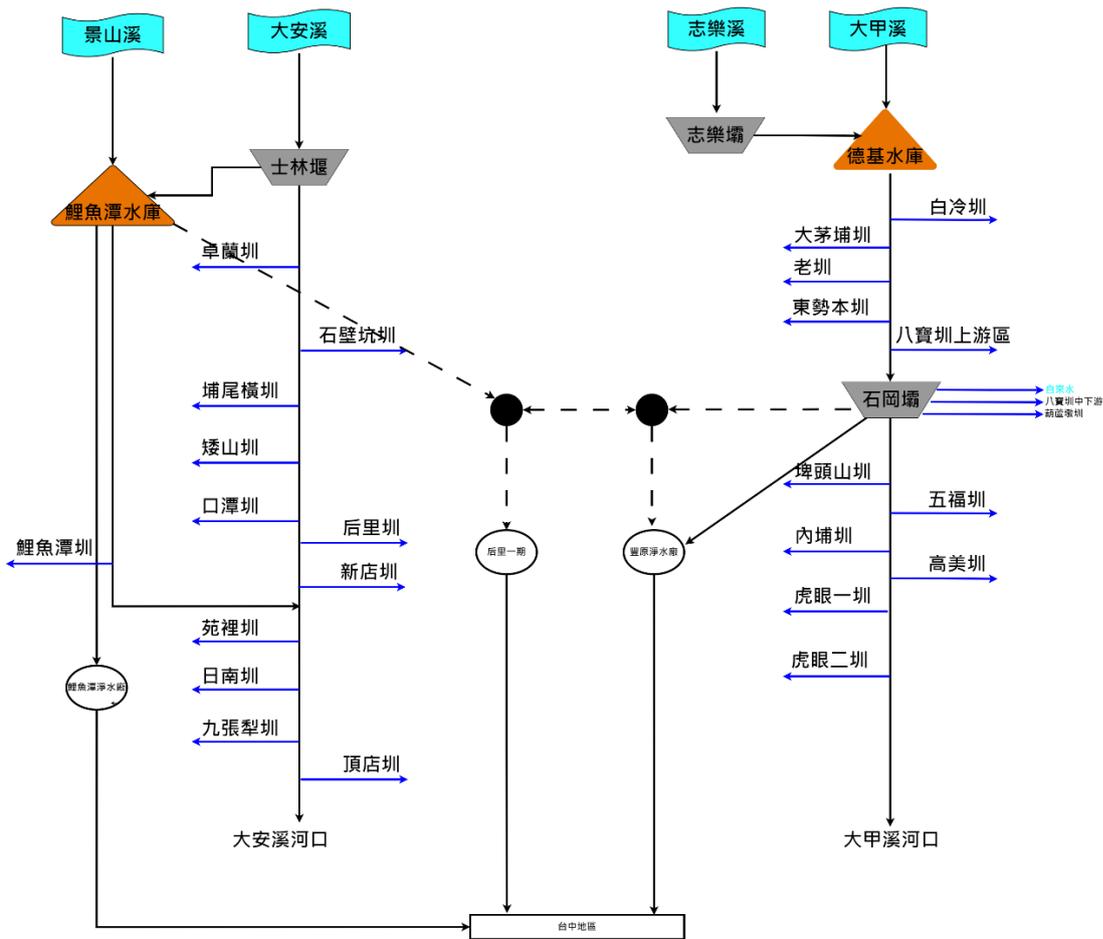


圖 2 大甲大安聯合運用系統圖

4.使用資料說明與資料前處理

(1)大甲溪主要控制點天然流量之推估

本研究標的一大甲溪供水系統，主要水源控制點為德基水庫及石岡壩，因水資源乾旱推論模式主要是以馬可夫歷程進行供水模擬，故控制點天然流量資料為模式建立之基礎，而此兩個控制點需要志樂壩、德基水庫及石岡壩三個位置的天然流量進行分析，但除了水源點未必設有長期的流量觀測站問題外，尚有石岡壩址自民國63年德基水庫開始蓄水營運後，流量受到德基水庫影響無法完全反映石岡壩址天然流量特性問題存在。此外，由於本研究在蓄水模擬條件設定上，需要模擬起始時間的水庫蓄水狀態，而水庫起始蓄水狀態在經濟部水利署「台灣地區主要水庫蓄水量報告表」網頁中，僅記錄2003後之資料，且有資料缺漏情形。

基於前述條件，本研究在天然流量推估議題上，主要參考經濟部水利署2000年「鯉魚潭水庫與石岡壩水源運用檢討報告」所列流量推估式並根據經濟部水利署「臺灣水文年報」流量站記錄情形進行推估時期調整，考量紀錄的完整性，本研究將德基水庫、志樂壩與石岡壩三個位置1959~2000年間的紀錄進行日流量紀錄的推估操作，各站使用推估式如表3所示，其中石岡壩推估流量所指，係德基水庫以下至石岡壩之間未受控制集水區入流量，而此流量資料包含志樂壩集水區在內。

表 3 德基水庫、志樂壩與石岡壩流量推估式

水利構造物(水源控制點)名稱	時間	流量推估計算式
德基水庫	1959.01~1968.06	$Q_{TCR}=Q_{TCS}$
	1968.07~1973.06	$Q_{TCR}=1.046 \times Q_{TPS}$
	1973.01~2000.12	$Q_{TCR}=1.232 \times Q_{SMS}$
志樂壩	1959.01~1963.10	$Q_{CLD}=0.686 \times Q_{HSJS0.8}$
石岡壩	1959.01~1973.12	$Q_{SKD}=3.217 \times Q_{HSJS1.05}$
推估流量 QTCR：德基水庫推估流量 QSKD：石岡壩推估流量 QCLD：志樂壩推估流量	流量站觀測流量 QTCS：達見站觀測流量 QHSJS：環山合流點站觀測流量 QSMS：松茂站觀測流量 QCLDS：志樂壩站觀測流量 QTPS：達盤站觀測流量	

資料來源：經濟部水利署 2000 年「鯉魚潭水庫與石岡壩水源運用檢討報告」。

(2)大安溪主要控制點天然流量之推估

本研究於大安溪系統，以鯉魚潭水庫與士林攔河堰之流量為主要控制點，研究之大安溪鯉魚潭水庫及士林攔河堰之流量推估式是參考「鯉魚潭水庫與石岡壩水源運用檢討報告」(中水局，89 年)並根據經濟部水利署「臺灣水文年報」流量站記錄進行各期間之流量推估，其各期間之流量推估式如下表 4。

民國 64 年至民國 92 年之鯉魚潭水庫及士林攔河堰流量推估式是沿用「鯉魚潭水庫與石岡壩水源運用檢討報告」之流量推估式，民國 96 年及民國 98 年至民國 112 年以後之流量推估式是沿用「象鼻站」推估式。而民國 93 年至 97 年(96 年外)，由於流量資料有缺漏，該各期程使用較完整流量資料之觀測流量站並以比面積法求出觀測流量站之係數。

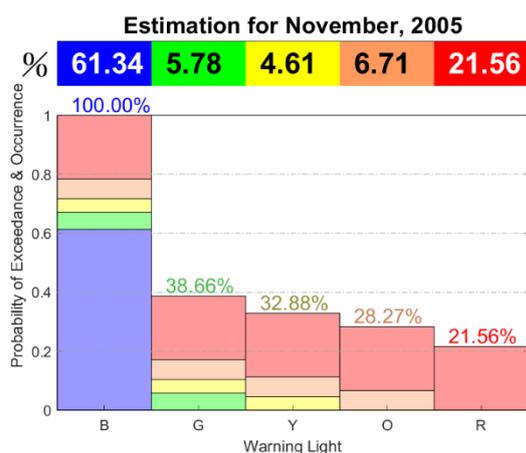
表 4 鯉魚潭水庫與士林攔河堰流量推估式

支流名稱	控制站名稱	流量計算期間	流量推估計算式
景山溪	鯉魚潭水庫	64.01~77.12	$Q_{\text{鯉魚潭水庫}}=Q_{\text{鯉魚潭站}}$
		78.01~91.12	$Q_{\text{鯉魚潭水庫}}=0.098 * Q_{\text{義里站}}$
		92.01~92.12、96.01~96.12、98.01~112.12	$Q_{\text{鯉魚潭水庫}}=0.112 * Q_{\text{象鼻站}}$
		93.01~93.12、94.05	$Q_{\text{鯉魚潭水庫}}=0.089 * Q_{\text{卓蘭站}}$
		94.01~94.04、97.01~97.12	$Q_{\text{鯉魚潭水庫}}=1.18 * Q_{\text{雪山坑站}}$
		94.06~94.12	$Q_{\text{鯉魚潭水庫}}=0.084 * Q_{\text{義里站}}$
		95.01~95.12	$Q_{\text{鯉魚潭水庫}}=0.132 Q_{\text{天狗站}}$
大安溪	士林攔河堰	64.01~79.12	$Q_{\text{士林攔河堰}}=2.855+0.814 * Q_{\text{卓蘭站}}$
		80.01~92.12、96.01~96.12、98.01~112.12	$Q_{\text{士林攔河堰}}=Q_{\text{象鼻站}}$
		93.01~93.12、94.05	$Q_{\text{士林攔河堰}}=0.751 * Q_{\text{卓蘭站}}$
		94.01~94.04、97.01~97.12	$Q_{\text{士林攔河堰}}=9.93 * Q_{\text{雪山坑站}}$
		94.06~94.12	$Q_{\text{士林攔河堰}}=0.711 * Q_{\text{義里站}}$
		95.01~95.12	$Q_{\text{士林攔河堰}}=1.108 * Q_{\text{天狗站}}$
推估流量		流量站觀測流量	
$Q_{\text{鯉魚潭水庫}}=\text{鯉魚潭水庫入流量}$ $Q_{\text{士林攔河堰}}=\text{士林攔河堰入流量}$		$Q_{\text{鯉魚潭站}}=\text{鯉魚潭站流量}$ $Q_{\text{義里站}}=\text{義里站流量}$ $Q_{\text{卓蘭站}}=\text{卓蘭站流量}$ $Q_{\text{雪山坑站}}=\text{雪山坑站流量}$ $Q_{\text{象鼻站}}=\text{象鼻站流量}$ $Q_{\text{天狗站}}=\text{天狗站流量}$	

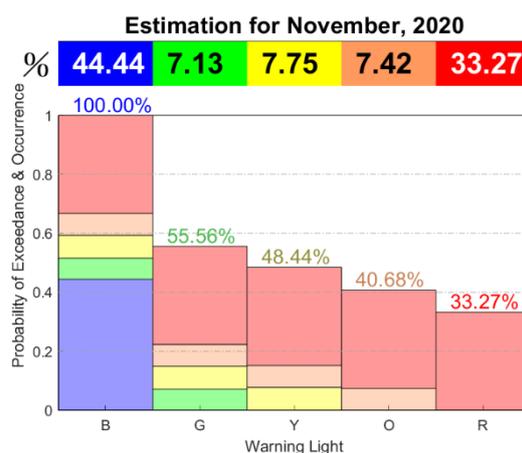
四、結果與討論

本文以大甲溪供水系統為評估基礎，主要評估大甲溪供水系統在大安供水系統每日最多可增供 25 萬噸水量目標下，基於於原大安溪系統的營運下，評估實際能為大甲溪供水系統，降低多少供水風險。由於兩個水系存在座落位置上的空間差異，因此除了大甲系統與大安系統分別需就水源進水量轉移上的變化，也同時需要考量空間上存在的空間上差異，因此本文沿用陳等 2000 年提出的風險方法，主要以流量資料繁衍以及水量的供需模擬，瞭解特定時刻至翌年水文年結束時，在正常供水情況下，可能出現的乾旱潛勢；由於本研究涉及兩個供水系統，故在不同流域時間上連續上的描述需考量外，另應考慮空間可能造成的供水影響，例如，吾人若欲判斷特定供水系統 11 月至翌年水文年結束期間可能產生的乾旱缺水潛勢，如將每個月的流量分布劃為五個狀態區間，則蓄水模擬次數將達 5^7 次，若續考量兩個空間上的時間連續，則所有評估作業將達 $(5^7)^2$ 也就是所有模擬作業將高達 5^{14} 次。基於篇幅考量，本文僅將 11 月與 12 月的成果提出作討論。

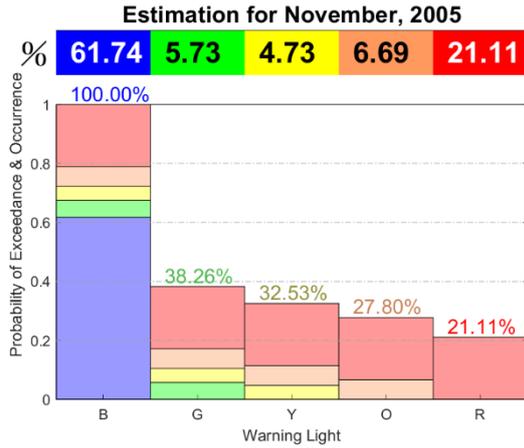
豐、枯水年 11 月，大甲系統獨立運轉與大甲大安聯合運轉至翌年水文年結束所呈現各缺水燈號發生風險如圖 3 所示；豐、枯水年 12 月，大甲系統獨立運轉與大甲大安聯合運轉至翌年水文年結束所呈現各缺水燈號發生風險如圖 4 所示。由圖 3 及圖 4 顯示，如果大甲大安的聯合運轉，僅建立在大甲系統缺水、由大安系統以不超過 25 萬噸補助的情況下，在豐水年幾乎不影響，而在枯水年的情況下，也因大安系統也有原有供水標的，在不影響大安系統供水的情況下，可降低的風險不多。因此，未來要在大甲大安兩系統聯運、並互相支援的情況下，空間上的調水操作變得更為重要。而此議題涉及的層面甚廣，宜再以整合操作的方式重新思考與討論如何在空間的調度上發揮其更理想的作用



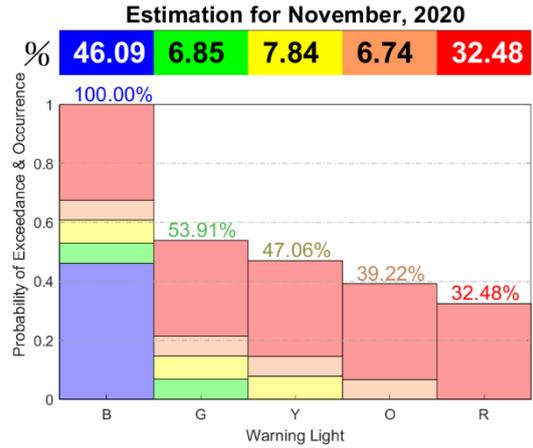
(A1) 2005 年(豐水年)大甲大安聯運前



(A2) 2020 年(枯水年)大甲大安聯運前

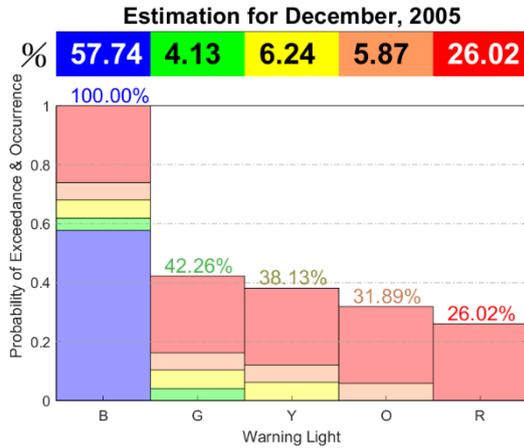


(B1) 2005 年(豐水年)大甲大安聯運後

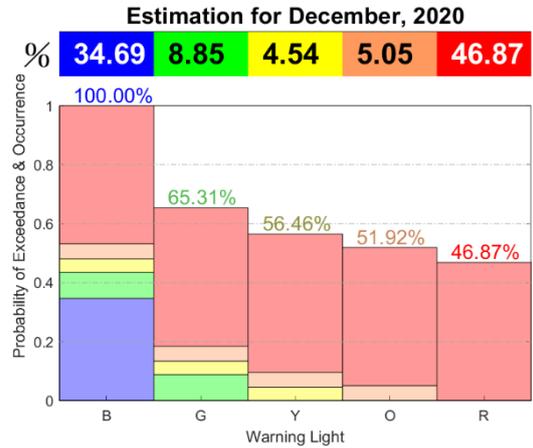


(B2) 2020 年(枯水年) 大甲大安聯運後

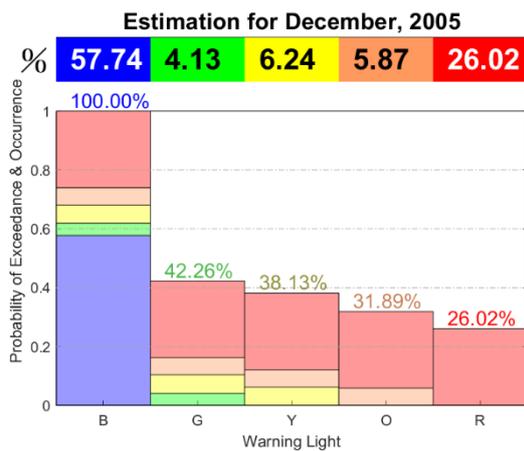
圖 3 豐、枯水年 11 月，大甲系統獨立運轉與大甲大安聯合運轉至翌年水文年結束所呈現各缺水燈號發生風險



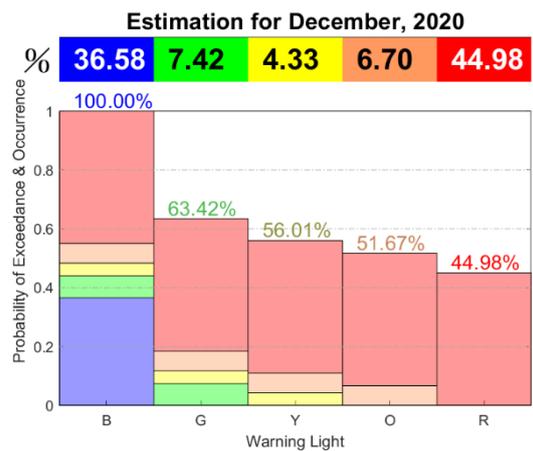
(A1) 2005 年(豐水年)大甲大安聯運前



(B1) 2020 年(枯水年)大甲大安聯運前



(A2) 2005 年(豐水年)大甲大安聯運後



(B2) 2020 年(枯水年) 大甲大安聯運後

圖 4 豐、枯水年 12 月，大甲系統獨立運轉與大甲大安聯合運轉至翌年水文年結束所呈現各缺水燈號發生風險

五、結論與建議

5.1 結論

1. 供水的可靠度主要取決於未來枯水期的水文情況，因此即便水庫水位降至臨界低限，未來的缺水量仍可能因入流水量的隨機變化而呈現不同的缺水概率。若能建立更精確的流量序列模型，對極端值的取樣進行檢討和修正，水庫管理單位即可通過合理的供水特性圖，提前評估適合的減供標準，為決策者在乾旱限水時期提供更具參考價值的決策依據。

5.2 建議

1. 本研究旨在探討大臺中地區大甲大安聯通管完工後能改善多少水資源缺水風險，但多了大甲大安聯通管後，在需求增加、供給不變的情況下，鯉魚潭水庫可能會有無法負荷的狀況出現，所以應該要更詳細評估鯉魚潭系統實際運作規則，避免造成鯉魚潭原本的供水標的出現缺水。
2. 儘管本研究能提供相對有價值的量化風險資料，但未來的應變措施仍需依賴開源節流政策的提前規劃，內容包括跨區水資源調度協調、自來水設施瓶頸的擴充改善、增進用水效率（如節水設備、高效灌溉）、提升供水效能（如減少漏水率）以及多元化水資源應用方案等。
3. 由於取樣的影響，在流量模擬時會產生極端水文現象，導致低流量時出現負值，高流量時則產生過大的洪水現象。因此，建議未來進一步研究這些極端值的現象，以深入探討其對流量模擬結果的影響。
4. 本研究尚未考量限水相關措施，在未來研究可以結合水庫限水策略，進而更精確推估在限水策略運作下供水水庫之缺水機率。
5. 建議未來研究可將極端氣候狀況納入分析，評估水庫在連續長時間面臨低流量進水時的缺水風險及缺水量的分布情況。

參考文獻

1. Huang, W.C., Yuan, L.C., "A drought early warning system on real-time multireservoir operations", *Water Resources Research*, 40(6), W06401, 2004
2. Qian, L., Wang, H., Zhang, K., "Evaluation criteria and model for risk between water supply and water demand and its application in Beijing", *Water Resources Management*, 28(13), 4433-4447, 2014
3. Romano, E., Guyennon, N., Del Bon, A., Petrangeli, A.B., Preziosi, E., "Robust method to quantify the risk of shortage for water supply systems", *Journal of Hydrologic Engineering*, 22(8), 04017021, 2017
4. Shiau, J.T., Hsiao, Y.Y., "Water-deficit-based drought risk assessment in Taiwan", *Natural Hazards*, 64(1), 237-253, 2012
5. Zhang, Q., Liang, X., Fang, Z., Jiang, T., Wang, Y., Wang, L., "Urban water resources allocation and shortage risk mapping with support vector machine method", *Natural Hazards*, 81(2), 1209-1228, 2016
6. 于昕, 「結合馬可夫鏈之混合復發模型」, 國立成功大學統計學研究所碩士論文, 2022。
7. 行政院, 「台灣各區水資源經理基本計畫」, 2021。
8. 紀証耀, 「以馬可夫鏈蒙地卡羅法探討水資源利用之不確定性分析」, 2008。
9. 徐享崑、尚新民, 「水文週期特徵與趨勢分析」, 中央氣象局, 1985。
10. 陳柏蒼、陳昶憲、羅偉誠、巫孟璇, 水資源供水系統長短期操作合併考量水庫水力排砂及地下水可用水量補注下之缺水風險評估研究, *中國土木水利工程學刊*, 2000。
11. 陳柏蒼, 「多目標、多取水點供水系統序率水資源乾旱系統之建置與應用」, 2024。
(投稿審查中)
12. 喻文玟、范榮達、游振昇、趙容萱, 「50年來首次乾旱停水 台中居民搶買水桶:彷彿回到 921 地震」, 聯合新聞網新聞, 網址:<https://udn.com/news/story/122025/5341827>, 2021。
12. 經濟部水利處, 「鯉魚潭水庫與石岡壩水源運用檢討報告」, 2000。
13. 經濟部水利署中區水資源局, 「大安大甲溪水源聯合運用輸水工程可行性規劃—總報告」, 2010。
14. 經濟部水利署中區水資源局, 「鯉魚潭水庫保留新灌區供水量之替代方案評估—大安溪下游河段伏流水取水調查研究及規劃」, 2018
15. 經濟部水利署, 「大安大甲聯通管工程-設計原則審議成果報告」, 2021。
16. 顏君凌, 「翡翠水庫不同乾旱限水標準之評比」, 國立成功大學水利及海洋工程學系碩士論文, 2003。
17. 馮書瑜, 「加密貨幣用戶詐欺行為使用馬可夫鏈模型之實證分析:BitO 交易所實證研究」, 中國文化大學商學院財務金融學系碩士論文, 2023。