

國立臺灣師範大學文學院地理學系

碩士論文

Department of Geography

College of Liberal Arts

National Taiwan Normal University

Master's Thesis

氣候變遷下的水資源供應與產業發展

— 以新竹科學園區為例

Water Resources Supply and Industrial Development

Under Climate Change: A Case Study of

Hsinchu Science Park

鐘藝方

Chung, Yi-Fang

指導教授：郭乃文 博士

Advisor：Kuo, Nae-Wen, Ph.D.

中華民國 113 年 6 月

June 2024

謝辭

兩年的碩士生涯終於要告一個段落了，這段期間承蒙許多人給我的幫助，實在是感激不盡。首先謝謝指導教授郭乃文老師四年的悉心教導，還記得第一次遇見老師是在老師開設的環境地學，老師上課拋了一個議題讓大家發想，不知為何上課時就有了好多想法，下課後隨即找老師討論可行性，沒想到老師說：「你的想法可以做一篇文章。」於是從大三開啟了能向老師學習的緣分和機會。也謝謝李宗祐老師和陳起鳳老師願意擔任我的口試委員，並在口試時給予了許多寶貴建議讓論文能更趨完整。

有關這篇論文中，特別謝謝李宗祐老師提供 SWAT 流量資料讓我進行使用。謝謝宗琳在我們一起做計畫時總是提供了許多見解與方向，為這篇論文奠定了基礎。更謝謝繼成學長在流量資料交接時的詳細說明，之後在做氣候變遷研究的部分，我總是一直多次請教學長，學長也不厭其煩的教導我，說明許多操作方向並給予意見與回饋，後續也提供盒鬚圖的繪圖程式讓我使用，有你才有漂亮的盒鬚圖！謝謝耘盼提供水庫出水量公式，讓模擬資料呈現上更趨於實際。

謝謝同屆乃文研究室的彥程與巧潔，兩年期間一同共患難的聰明好朋友，很開心我們能一起入學、一起畢業！謝謝十樓研究室的崇恩、品閑、雅媛、芷仟、語濡、品歡、紹予、政宏，平時一起聊天、吃飯、喝茶，讓枯燥的讀書生活不無聊。謝謝斗六高中的地理科教師們，恩師光佑老師，還有英敬、茜文、孟茵、文凱老師以及季樺主任給予我對地理的啟發。謝謝射擊協會的巫大哥、唐教練、冠文讓我平時能去比賽幫忙，讓我在沉重的論文壓力下還能夠做自己喜歡的事，也謝謝平常與許多教練、裁判教官、物理治療師及選手的對話交流中，總是給予我許多射擊上的知識，讓我對從小喜歡且投入的射擊運動有了更深入的了解，待在協會的時光總是過得很開心。

最後感謝媽媽和姐姐對我的呵護與關懷，從小就支持我做自己喜歡的事情，在求學時給予我許多鼓勵，也在低潮時陪伴我，有你們在我的背後，我才能無後顧之憂地完成研究所學業，謹此將碩士學位獻給我最愛的家人。

國立臺灣師範大學地理學系碩士論文摘要

研究所別：地理學系研究所碩士班

論文名稱：氣候變遷下的水資源供應與產業發展－以新竹科學園區為例

指導教授：郭乃文

論文內容：全一冊，文約七萬餘字，分五章十九節，以六百餘字簡要說明

摘要

隨著全球受到氣候變遷的影響，各地乾旱事件發生的頻率逐漸增加，水資源的供給產生壓力，產業未來將面臨到缺水風險。其中半導體產業需要使用大量的水，以目前高階製程晶片持續發展並擴大設廠的速度，未來半導體產業用水量勢必大幅增加。臺灣新竹科學園區為全球重要的半導體供應區，若未來面臨缺水導致晶片無法及時生產，將使全球晶片供應鏈受到衝擊，因此分析未來竹科可能會面臨到的缺水風險，將能夠幫助政府或是廠商能更好的調配水資源，以降低晶片供應不足的風險與減少產值損失。

供應新竹科學園區的用水主要以寶山水庫及寶山第二水庫為主，因此本研究利用物質流分析計算在不同氣候變遷模式及兩種用水情境下寶山水庫及寶二水庫 2025-2100 年的模擬蓄水量，並分析 2025-2040、2041-2060、2061-2080 與 2081-2100 等四個時期及 4 個 RCP (Representative Concentration Pathway) 情境下，各月份寶山水庫及寶二水庫的缺水與減供風險，並量化寶二水庫擴容工程能夠為竹科減少的產值損失。

研究結果發現，整體趨勢下工業優先情境比起農業優先情境的缺水與減供比例要降低很多。在這兩種用水情境下，RCP6.0 在缺水與減供比例的表現均是最嚴重的情境，RCP8.5 並非為最嚴重情境。農業優先情境下的缺水高峰月份落在 12-2 月，減供高峰月份是 11-2 月；工業優先情境下的缺水高峰月份落在 2-4 月，減供高峰月份是 12-2 月。寶二水庫擴容工程未來可有效減少缺水天數，經評估後在工業優先情境的 2061-2080 年最高可以減少每年約 665 億 8195 萬 6500 元的產值損失。本研究之結果可提供

政府及新竹科學園區廠商針對未來缺水及減供的風險示警，並建議調適措施之預備時間做為參考。

關鍵字：缺水風險、半導體產業、新竹科學園區、寶山水庫、寶山第二水庫、物質流分析、氣候變遷



Abstract

As the world is affected by climate change, the frequency of droughts is gradually increasing across various regions, putting pressure on water resources supply. This poses a future risk of water shortage for industries. The semiconductor industry, which particularly requires large amounts of water. With the ongoing development and rapid expansion of advanced chip manufacturing processes, the water consumption in the semiconductor industry is expected to rise significantly. Hsinchu Science Park in Taiwan is a crucial hub for global semiconductor supply region. If chips can't be produced in time because of future water shortages, the global chip supply chain will be impacted. Therefore, analyzing the potential water shortage risks that the Hsinchu Science Park might face can assist the government and manufacturers better manage water resources, thereby reducing the risk of insufficient chip supply and minimizing economic value damage.

The water supply for the Hsinchu Science Park primarily relies on Baoshan Reservoir and Second Baoshan Reservoir. This study uses material flow analysis to calculate the simulated water capacity of Baoshan Reservoir and Second Baoshan Reservoir from 2025-2100 under different climate change models and two water usage scenarios. It analyzes the water shortage and supply reduction risks for Baoshan Reservoir and Second Baoshan Reservoir across four periods: 2025-2040, 2041-2060, 2061-2080, and 2081-2100, also under four RCPs (Representative Concentration Pathway) scenarios. It assesses the risks of water shortages and supply reduction for each month in Baoshan Reservoir and Second Baoshan Reservoir. Additionally, the study quantifies the potential reduction in economic value damage for Hsinchu Science Park resulting from the capacity expansion construction of Second Baoshan Reservoir.

This study results indicate that, overall, the ratio of water shortage days and water supply reduction days of the industrial-priority scenario is significantly lower compared to the

agricultural-priority scenario. Among these two water usage scenarios, RCP6.0 exhibits the most severe scenario of the ratio of water shortage days and water supply reduction days, whereas RCP8.5 is not the most severe one. In the agriculture-priority scenario, the peak months of water shortage is from December to February, and the peak months of water supply reduction is from November to February. For the industrial-priority scenario, the peak months of water shortage is from February to April, and the peak months of water supply reduction is from December to February. The capacity expansion construction of Second Baoshan Reservoir is expected to effectively reduce the number of water shortage days in the future, and it might potentially decrease the annual economic value damage by approximately NT\$66.581965 billion in 2061-2080 under the industrial-priority scenario. The results of this study can provide the government and manufacturers in Hsinchu Science Park with early warnings of future risks of water shortage and water supply reduction, as well as serve as a reference for the timing of adaptive measures.

Keywords: Water Shortage Risk, Semiconductor Industry, Hsinchu Science Park, Baoshan Reservoir, Second Baoshan Reservoir, Material Flow Analysis, Climate Change

目次

謝辭.....	i
摘要.....	ii
Abstract.....	iv
目次.....	vi
表次.....	viii
圖次.....	ix
附表次.....	xi
附圖次.....	xiii
第一章 前言.....	1
第一節 研究背景與動機.....	1
第二節 研究目的.....	4
第二章 文獻回顧.....	5
第一節 晶片生產與水資源耗用.....	5
第二節 全球晶片短缺.....	10
第三節 物質流分析.....	15
第四節 氣候變遷對水資源的影響.....	20
第三章 研究設計與方法.....	24
第一節 研究區.....	24
第二節 資料蒐集.....	29
第三節 分析方法.....	38
第四章 研究結果與討論.....	45
第一節 流量資料分析.....	45
第二節 用水情境驗證分析.....	49
第三節 缺水天數比例.....	53

第四節 減供天數比例	67
第五節 未來模擬情境與基期之比較	81
第六節 上坪溪流量對寶二水庫缺水之影響	89
第七節 寶二水庫擴容工程效益	95
第五章 結論與建議	106
第一節 結論	106
第二節 建議	109
第三節 研究限制	111
參考文獻	112
附錄	122



表次

表 2-1 世界半導體貿易統計預測摘要.....	9
表 2-2 全球半導體晶片短缺相關研究.....	13
表 2-3 物質流分析方法類型.....	16
表 2-4 臺灣水資源供需議題說明.....	21
表 3-1 李宗祐（2022）選用之 GCM/ESM 模式	31
表 4-1 RCP 情境下各時期月份模擬流量	47
表 4-2 RCP 情境下各時期月份模擬流量變化率	48
表 4-3 2012-2018 年 AB 用水情境下水庫歷史與模擬蓄水量之線性迴歸分析.....	50
表 4-4 農業優先情境總保留水量.....	93
表 4-5 工業優先情境總保留水量.....	94
表 4-6 新竹科學園區新竹園區 2023 年平均單位用水量產值.....	101
表 4-7 寶山第二水庫溢流堰加高開發成本估算.....	101
表 4-8 農業優先情境寶二水庫擴容前後缺水天數差值表.....	102
表 4-9 工業優先情境寶二水庫擴容前後缺水天數差值表.....	103
表 4-10 農業優先情境寶二水庫擴容前後減供天數差值表.....	104
表 4-11 工業優先情境寶二水庫擴容前後減供天數差值表.....	105

圖次

圖 2-1 半導體企業 2017-2021 年每年晶片單位面積用水量(L/cm ²).....	6
圖 2-2 新竹科學園區新竹園區各年度月份每日用水量.....	8
圖 2-3 新竹科學園區新竹園區年度每日用水量.....	8
圖 2-4 物質流分析步驟流程.....	17
圖 3-1 大新竹供水系統.....	25
圖 3-2 研究範圍圖.....	28
圖 3-3 農業優先情境.....	34
圖 3-4 工業優先情境.....	37
圖 3-5 寶山水庫與寶山第二水庫聯合運用規線.....	40
圖 3-6 盒鬚圖要素與其定義.....	42
圖 3-7 研究流程圖.....	44
圖 4-1 2012-2018 年寶山水庫歷史蓄水量與 AB 用水情境模擬蓄水量.....	51
圖 4-2 2012-2018 年寶二水庫歷史蓄水量與 AB 用水情境模擬蓄水量.....	51
圖 4-3 農業優先情境寶二水庫擴容前基期缺水比例盒鬚圖.....	53
圖 4-4 農業優先情境寶二水庫擴容前缺水比例複合盒鬚圖.....	58
圖 4-5 工業優先情境寶二水庫擴容前基期缺水比例盒鬚圖.....	60
圖 4-6 工業優先情境寶二水庫擴容前缺水比例複合盒鬚圖.....	64
圖 4-7 農業優先情境寶二水庫擴容前基期減供比例盒鬚圖.....	67
圖 4-8 農業優先情境寶二水庫擴容前減供比例複合盒鬚圖.....	72
圖 4-9 工業優先情境寶二水庫擴容前基期減供比例盒鬚圖.....	74
圖 4-10 工業優先情境寶二水庫擴容前減供比例複合盒鬚圖.....	79
圖 4-11 農業優先情境寶二水庫擴容前缺水天數長條圖.....	82
圖 4-12 農業優先情境寶二水庫擴容前缺水天數與基期相比差值長條圖.....	83
圖 4-13 工業優先情境寶二水庫擴容前缺水天數長條圖.....	84

圖 4-14 工業優先情境寶二水庫擴容前缺水天數與基期相比差值長條圖.....	85
圖 4-15 農業優先情境寶二水庫擴容前減供天數長條圖.....	86
圖 4-16 農業優先情境寶二水庫擴容前減供天數與基期相比差值長條圖.....	87
圖 4-17 工業優先情境寶二水庫擴容前減供天數長條圖.....	88
圖 4-18 工業優先情境寶二水庫擴容前減供天數與基期相比差值長條圖.....	89
圖 4-19 農業優先情境細部用水量.....	92
圖 4-20 工業優先情境細部用水量.....	94
圖 4-21 農業優先情境寶二水庫擴容後缺水比例複合盒鬚圖.....	96
圖 4-22 工業優先情境寶二水庫擴容後缺水比例複合盒鬚圖.....	97
圖 4-23 農業優先情境寶二水庫擴容後減供比例複合盒鬚圖.....	98
圖 4-24 工業優先情境寶二水庫擴容後減供比例複合盒鬚圖.....	99



附表次

附表 1 頭前溪農業計畫用水量(含竹東圳)	122
附表 2 寶山水庫與寶二水庫聯合運用規線旬蓄水量標準	122
附表 3 農業優先情境寶二水庫擴容前缺水天數表	127
附表 4 農業優先情境寶二水庫擴容前缺水天數與基期相比差值表	128
附表 5 工業優先情境寶二水庫擴容前缺水天數表	129
附表 6 工業優先情境寶二水庫擴容前缺水天數與基期相比差值表	130
附表 7 農業優先情境寶二水庫擴容前減供天數表	131
附表 8 農業優先情境寶二水庫擴容前減供天數與基期相比差值表	132
附表 9 工業優先情境寶二水庫擴容前減供天數表	133
附表 10 工業優先情境寶二水庫擴容前減供天數與基期相比差值表	134
附表 11 農業優先情境寶二水庫擴容後缺水天數表	135
附表 12 農業優先情境寶二水庫擴容後缺水天數與基期相比差值表	136
附表 13 工業優先情境寶二水庫擴容後缺水天數表	137
附表 14 工業優先情境寶二水庫擴容後缺水天數與基期相比差值表	138
附表 15 農業優先情境寶二水庫擴容後減供天數表	139
附表 16 農業優先情境寶二水庫擴容後減供天數與基期相比差值表	140
附表 17 工業優先情境寶二水庫擴容後減供天數表	141
附表 18 工業優先情境寶二水庫擴容後減供天數與基期相比差值表	142
附表 19 RCP2.6 各 GCM/ESM 短期 2021-2040(S)月平均流量變化率	149
附表 20 RCP2.6 各 GCM/ESM 中短期 2041-2060(M1)月平均流量變化率	149
附表 21 RCP2.6 各 GCM/ESM 中長期 2061-2080(M2)月平均流量變化率	150
附表 22 RCP2.6 各 GCM/ESM 長期 2081-2100(L)月平均流量變化率	150
附表 23 RCP4.5 各 GCM/ESM 短期 2021-2040(S)月平均流量變化率	151
附表 24 RCP4.5 各 GCM/ESM 中短期 2041-2060(M1)月平均流量變化率	152

附表 25 RCP4.5 各 GCM/ESM 中長期 2061-2080(M2)月平均流量變化率	153
附表 26 RCP4.5 各 GCM/ESM 長期 2081-2100(L)月平均流量變化率	154
附表 27 RCP6.0 各 GCM/ESM 短期 2021-2040(S)月平均流量變化率	155
附表 28 RCP6.0 各 GCM/ESM 中短期 2041-2060(M1)月平均流量變化率	155
附表 29 RCP6.0 各 GCM/ESM 中長期 2061-2080(M2)月平均流量變化率	156
附表 30 RCP6.0 各 GCM/ESM 長期 2081-2100(L)月平均流量變化率	156
附表 31 RCP8.5 各 GCM/ESM 短期 2021-2040(S)月平均流量變化率	157
附表 32 RCP8.5 各 GCM/ESM 中短期 2041-2060(M1)月平均流量變化率	158
附表 33 RCP8.5 各 GCM/ESM 中長期 2061-2080(M2)月平均流量變化率	159
附表 34 RCP8.5 各 GCM/ESM 長期 2081-2100(L)月平均流量變化率	160



附圖次

附圖 1 AB 情境寶二水庫擴容前缺水比例複合盒鬚圖.....	123
附圖 2 AB 情境寶二水庫擴容後缺水比例複合盒鬚圖.....	124
附圖 3 AB 情境寶二水庫擴容前減供比例複合盒鬚圖.....	125
附圖 4 AB 情境寶二水庫擴容後減供比例複合盒鬚圖.....	126
附圖 5 農業優先情境寶二水庫擴容後缺水天數長條圖	143
附圖 6 農業優先情境寶二水庫擴容後缺水天數與基期相比差值長條圖	143
附圖 7 工業優先情境寶二水庫擴容後缺水天數長條圖	144
附圖 8 工業優先情境寶二水庫擴容後缺水天數與基期相比差值長條圖	144
附圖 9 農業優先情境寶二水庫擴容後減供天數長條圖	145
附圖 10 農業優先情境寶二水庫擴容後減供天數與基期相比差值長條圖	145
附圖 11 工業優先情境寶二水庫擴容後減供天數長條圖	146
附圖 12 工業優先情境寶二水庫擴容後減供天數與基期相比差值長條圖	146
附圖 13 寶二水庫農業優先情境擴容前後缺水天數差值長條圖	147
附圖 14 寶二水庫工業優先情境擴容前後缺水天數差值長條圖	147
附圖 15 寶二水庫農業優先情境擴容前後減供天數差值長條圖	148
附圖 16 寶二水庫工業優先情境擴容前後減供天數差值長條圖	148

第一章 前言

第一節 研究背景與動機

自 18 世紀後期工業革命以來，人類建造工廠而排放大量的溫室氣體。時至今日，過量的二氧化碳、甲烷等氣體排放至大氣中，導致溫室氣體濃度逐漸增加、地球溫度持續上升。針對氣候變遷研究，聯合國政府間氣候變化專門委員會 IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) 於 2023 年 3 月 20 日發布氣候變遷第六次評估報告 (Sixth Assessment Report, AR6)，內容說明人為氣候變遷影響已擴散至更多地區，全球增溫速度加快，各地開始發生極端天氣如乾旱、暴雨、洪水、熱浪等，未來可能導致水資源不足、海平面上升、糧食危機、生物多樣性減少等問題，這些衝擊會使自然環境、社會經濟、人類生命財產安全等領域面臨重大危機。

水資源在日常生活中扮演重要的角色。因為水資源對於人類世界的重要性，在聯合國發布的永續發展指標 SDGs (Sustainable Development Goals) 即提到目標 6：「潔淨水與衛生—確保全民水和衛生的可利用性和永續性管理」(教育部，2020)，內容提到水是一種珍貴且有限的資源，需要以永續的觀點去進行管理。從歷史發展來看，自 20 世紀後期許多新興工業開始發展，社會對於水資源的需求量越來越大，多數國家大約經過 15 年，用水量即成長一倍，因此未來必定會有供水無法滿足需水的情況出現(袁子恭，1995)。除此之外受到氣候變遷影響，未來的氣候型態將發生重大變化，極端氣候如長期乾旱、熱浪、暴雨、洪水等發生頻率越來越高，其中與水資源相關的乾旱或是暴雨事件，將造成水資源管理越來越困難，也增加未來水資源供應不足之風險(經濟部，2023)，因此永續發展目標中也提到目標 13：「氣候行動—採取緊急行動應對氣候變遷及其影響」，說明未來有極大的可能受氣候變遷影響而面臨到水資源不足的威脅。林妤蓁(2016)也提到現今人口和經濟成長已經對各國的水資源造成壓力，又因為氣候變遷關係，全球水文現象強度上升且趨於極端，災害發生之範圍和程度比起過往還要嚴重，導致缺水風險影響經濟價值，威脅國家永續發展。

臺灣位於亞熱帶季風區，乾、濕季分明，降雨時空分布不均。每年的 5 月至 10 月為雨季，或稱為豐水期，降水較多，豐水期的主要降雨來源是 5、6 月梅雨以及夏秋的颱風雨；每年的 11 月至隔年 4 月為乾季，或稱為枯水期，降水較少。根據「臺灣氣候變遷科學報告 2017—衝擊與調適面向(總摘要)」指出，氣候變遷下臺灣未來可能會面臨到多種水資源問題，其中包含乾旱發生頻率逐漸增加；枯水期流量減少，且有豐水期縮短、枯水期延長之趨勢；枯水期不下雨天數增加，乾旱時間拉長；降雨模式發生改變，極端降水將會增加，導致乾季越乾、濕季越濕；未來目標年之生活與工業需水量增加，而使供水能力不足以滿足所需用水等等（童慶斌等人，2017）。

隨著全球受到氣候變遷的影響，使得水資源的供給產生壓力，各項產業未來將面臨到缺水風險。臺灣的氣候也受到氣候變遷影響而變得極端，乾旱的時長與頻率有增加的趨勢，高科技產業中的半導體產業將會受到很大的影響，這是因為晶片生產需倚賴大量的純淨水，奈米製程越先進，用水量越多。臺灣的半導體產業發展聞名全球，在全球晶圓代工市場中，臺灣的市占率超過五成，其中高精密度製程的半導體企業大多設廠在新竹科學園區，近年世界晶片代工龍頭台積電積極邁向三奈米、二奈米先進製程，竹科管理局因而提出寶山二期擴建計畫，以因應未來高精密度製程半導體工廠進駐（科技部新竹科學園區管理局，2021），由此可知未來新竹科學園區用水量勢必會大幅增加，一旦新竹科學園區面臨缺水危機，晶片生產必定會受到影響，又因為世界上的高階半導體有 92%都是由新竹科學園區生產(BCG & SIA, 2021)，更可能導致全球半導體晶片供應鏈出現短缺危機。

事實上新竹科學園區歷經多次缺水危機，根據過去四十多年的乾旱事件統計（氣候變遷災害風險調適平台，2024），1971-2017 年的歷史乾旱事件就有多達 13 次，1971-2000 年共 30 年間發生 6 次，分別在 1973、1977、1980、1983、1993 及 1995 年；2000-2017 年共 17 年間則發生 7 次，分別發生在 2002、2003、2004、2006、2010、2014 及 2017 年，其中可觀察到近期平均約 2-3 年就會經歷一場乾旱事件，週期有縮短且次數增加的趨勢（經濟部，2023）。另外乾旱發生季節通常在春季，偶爾會持

續 4、5 個月，嚴重的話甚至會延長至 7、8 個月以上，像是在 2002-2004 年間就發生連續 3 年平均將近 7 個月的嚴重乾旱事件，以及 2014、2017 年的乾旱時間各長達 9 個月及 8 個月。最為人知的莫過於發生自 2020 年 6 月至 2021 年 5 月共 12 個月，達到 1910 年有紀錄以來最少雨量的臺灣百年大旱（李明營等人，2023），嚴重衝擊供水穩定性，在當時農業用地被迫停灌或休耕，甚至衝擊新竹科學園區，主要供應用水的寶山水庫及寶山第二水庫蓄水量一度面臨見底，使廠商紛紛四處購買水車以支援晶片生產。

對於半導體產業而言，水資源即為其產業命脈，所以能否穩定供應其用水是支撐晶片能否穩定生產的重要關鍵，因此在眾多工業區中，尤其需要確保新竹科學園區能獲得穩定的供水。若能從現在模擬未來流量，計算出未來水庫模擬蓄水量，並分析缺水風險，從而建議大新竹供水系統適合的水資源調適措施，例如向政府或竹科廠商針對未來可能會缺水或是需要減供的月份提出示警，亦或是建議未來提升再生水或海淡水的水量等，將可提前因應新竹科學園區缺水的危機，更能間接穩定臺灣的晶片對全球市場的供應。

因新竹科學園區的用水來源主要來自位於新竹的寶山水庫及寶山第二水庫，隸屬於大新竹供水系統，兩水庫水會送往寶山淨水場處理後再供應下游使用，而水庫的蓄水量多寡即代表了新竹科學園區供水是否無虞，因此在未來氣候狀況趨向極端，且半導體用水量加速上升的趨勢下，本研究希望以水庫的蓄水量為核心，用物質流分析模擬寶山水庫及寶山第二水庫之水庫未來蓄水狀況，並加以分析兩水庫缺水和減供風險及未來的變化趨勢，及時提出示警並給予適當的水資源調適建議和策略，將能幫助政府或竹科廠商能夠更及時的預備相關備援措施，以降低晶片供應不足的風險與減少產值損失。

第二節 研究目的

因新竹科學園區內駐有大量半導體晶片研發、製造、封裝廠商，且近年製程精細程度逐漸提升，晶圓越精細，需水量越多，導致廠區用水量逐年增加，同時受到氣候變遷的影響，每逢枯水期甚至是乾旱期間容易出現供水吃緊的情況，使得新竹科學園區未來缺水壓力逐漸增加。因此本研究欲在氣候變遷情境下模擬未來供應新竹科學園區用水之寶山水庫及寶山第二水庫的蓄水量，並嘗試考慮不同的用水情境，以分析未來新竹科學園區缺水風險並給予廠商與決策者示警及合適的調適建議。據此擬定以下三點研究目的：

- 一、分析探討不同用水情境下之未來水庫缺水與減供情形
- 二、分析探討不同氣候變遷情境下之未來水庫缺水與減供情形
- 三、評估寶山第二水庫擴容工程對減少缺水之效益



第二章 文獻回顧

本研究了解到臺灣半導體產業在全球半導體供應鏈中扮演著相當有影響力的角色，尤其是被譽為全球科技重鎮的新竹科學園區。如果臺灣受到氣候變遷的影響，未來頻繁出現乾旱事件的話，可能會導致竹科的供水出現不穩定的狀況而使晶片供應有短缺風險，因此本研究欲透過物質流分析模擬未來氣候變遷情境下不同用水情境的寶山水庫及寶山第二水庫蓄水量，並分析缺水風險。以下分成四個部分進行文獻回顧，分別為「晶片生產與水資源耗用」、「全球晶片短缺」、「物質流分析」及「氣候變遷對水資源的影響」。

第一節 晶片生產與水資源耗用

半導體是一個相當耗水的產業(Cooper et al., 2011; Frost & Hua, 2019; Wang & Chiu, 2014; Wang, Huang, Cai, et al., 2023; Wang, Huang, Chen, et al., 2023)。晶圓廠製造積體電路，製程包含光罩、蝕刻、薄膜沉積…等，包含了上百甚至上千道的程序，經過這些程序後，才能製造出完整的一片或是一批晶圓。除此之外，晶圓從研磨、曝光、顯影、蝕刻到後續的封裝，都需要非常純淨的水來沖洗(Frost & Hua, 2019)，才能進入到下一個工序，這種非常純淨的水又被稱為「超純水」，其定義為「經離子交換樹脂、活性碳、濾膜法去除水中的主要不純物質，而其比阻抗值達到 18.2 MΩ.cm 的水」

(Lasers Technology Co., Ltd., 2024)，這是因為如果使用一般的水，多少都會含有一些微量雜質，這會使半導體電路內部出現短路的現象，因此必須使用超純水來進行清洗 (Taiwan Pure Water Technology Co., Ltd., 2024)。

半導體產業中隨著製程精密度越來越高，時至今日已經發展出三奈米、二奈米晶片，為了增強清洗效果，清洗的步驟也會相對應的增加，先進製程的耗電量及耗水量也會不斷提高。近年來隨著全球半導體製造業的擴張，半導體製造業的產能和用水量逐年持續快速成長，如台積電每日用水量超過 15 萬噸，相當於 80 個標準游泳池的用

水量，2015-2019 年台積電總用水量增加了 70%，占工業總用水量的 3.4%(Barbiroglio, 2021)。

有關於晶片耗水量的相關數據，Wang, Huang, Chen, et al. (2023)整理了六家半導體企業 2017-2021 年每年的晶片單位面積用水量(圖 2-1)，單位為每平方公分表面積使用多少公升的水。從整體趨勢來看，六家企業平均單位面積用水量大致呈現逐年上升，大致落在每平方公分 8-9 公升，其中六間半導體企業的用水量由高至低的順序分別為 NXP (恩智浦)、DB HiTek、HUAHONG (華虹)、UMC (聯華電子)、VIS (世界先進)、PSMC (力積電)，範圍大約落在每平方公分 5-20 公升，另外不只這六家企業的平均單位面積用水量，各企業晶片單位面積用水量也是呈現逐年上升的情形。

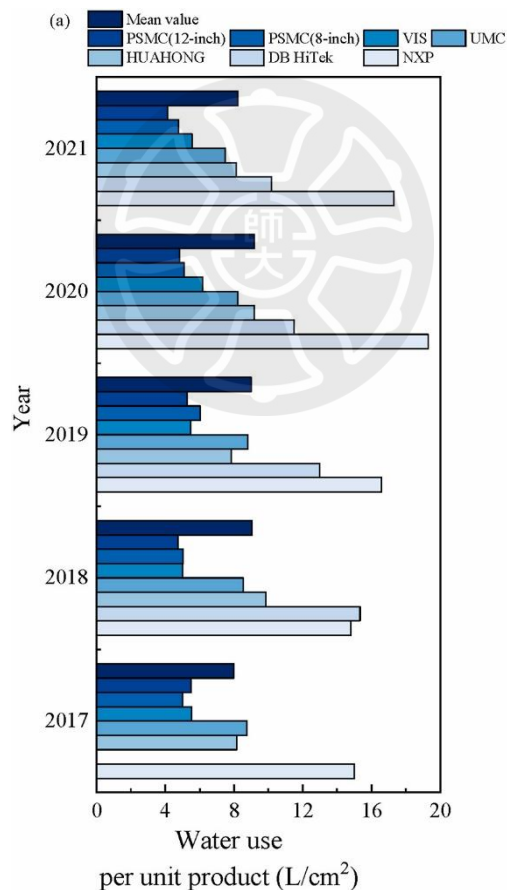


圖 2-1 半導體企業 2017-2021 年每年晶片單位面積用水量(L/cm²)

資料來源：Wang, Huang, Chen, et al. (2023)。

水對於半導體生產是一個不可或缺的因子，為因應未來氣候變遷可能帶來的衝擊，各家公司努力評估自身供應鏈中的原料、運輸、用電，或是營運、使用和報廢所帶來與水相關的風險，並致力於減少生產中的用水量(Frost & Hua, 2019)。全球各國的半導體產業中，臺灣半導體相較其他國家展現較高的節水效率：根據台積電統計，臺灣半導體業者晶圓單位面積用水量約為每平方公分 5.74 公升，為美國的三分之一，也是日本的二分之一，其中台積電晶圓單位面積用水量為每平方公分 5.66 公升，此數據低於臺灣半導體業者之平均（Taiwan Stock Exchange，2015）。但無論如何，半導體產業對於水的需求量還是遙遙領先其他產業，未來隨著製程精密度越高，或是擴廠增加生產線，耗水量都會越來越多，因此需水量多的特點還是一個不爭的事實。

檢視新竹科學園區用水量，根據國家科學及技術委員會統計資料庫 (2024c)數據指出，若從新竹科學園區新竹園區各月份單日用水量(圖 2-2)檢視，可以發現各月份用水量有所差別，其中可分成兩部分，6-12 月用水量比 1-5 月還要多，因為枯水期時水庫蓄水量不足，水資源供給上可能會不穩定，因此園區內企業多會自主節水。若檢視竹科新竹園區 2013-2023 年年度單日用水量(圖 2-3)，可觀察到用水量是呈現逐年上升的趨勢，2023 年已經達到每日用水量 15 萬立方公尺以上，預計未來會持續增加。而半導體企業用水又占了其中相當大的比重，以全球半導體代表企業台積電 (TSMC)為例，其 2022 年企業永續責任報告指出，台積電企業在三大科學園區的用水量，新竹科學園區每日使用 6.8 萬立方公尺，中部科學園區每日使用 5.9 萬立方公尺，南部科學園區每日使用 13.8 萬立方公尺 (Taiwan Semiconductor Manufacturing Co., Ltd., 2023a)。另外為因應未來永續發展，企業都會在其 CSR 報告中明訂隔年的用水目標，以期望能夠低於指定的基準年用水量，但隨著晶片需求越來越高，廠區逐漸擴張的狀況下，目標越來越難達成，像是台積電在 2022 年的 CSR 報告中提到自來水總用量逐年上升，2022 年晶圓單位產品用水量為 137.3 公升／十二吋晶圓當量—光罩數，相較於基準年 2010 年的 140.9 公升／十二吋晶圓當量—光罩數下降了 2.6%，並未達 2022 年設定的年度目標(單位產品用水量需要比基準年降低 16%)。

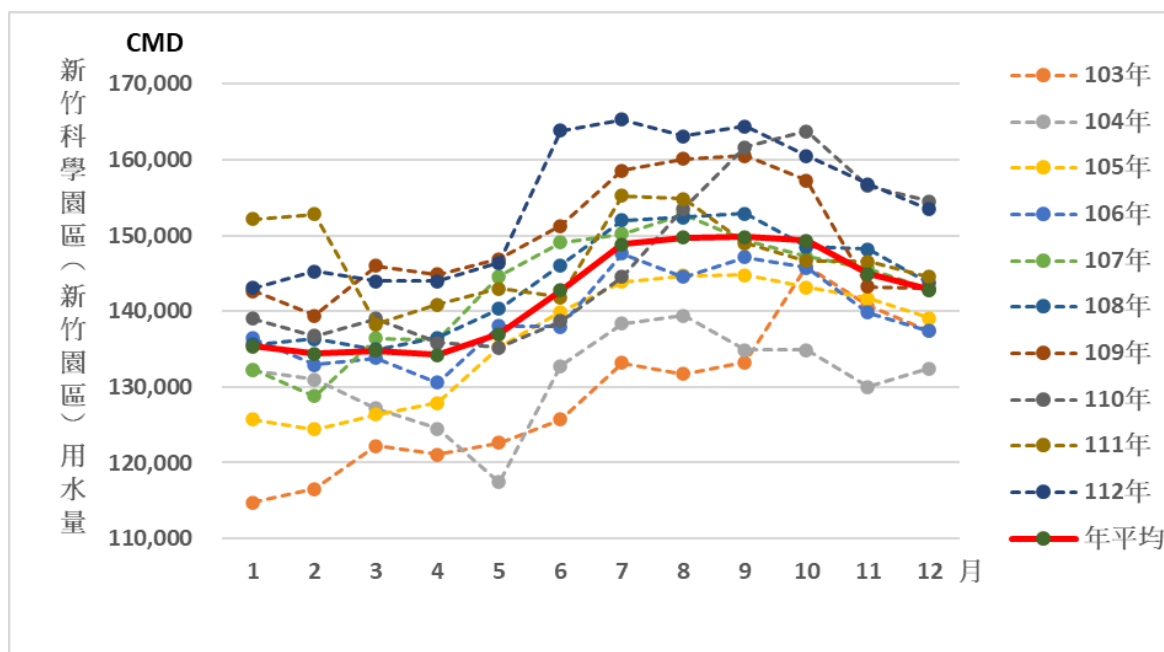


圖 2-2 新竹科學園區新竹園區各年度月份每日用水量

資料來源：國家科學及技術委員會統計資料庫（2024c）。

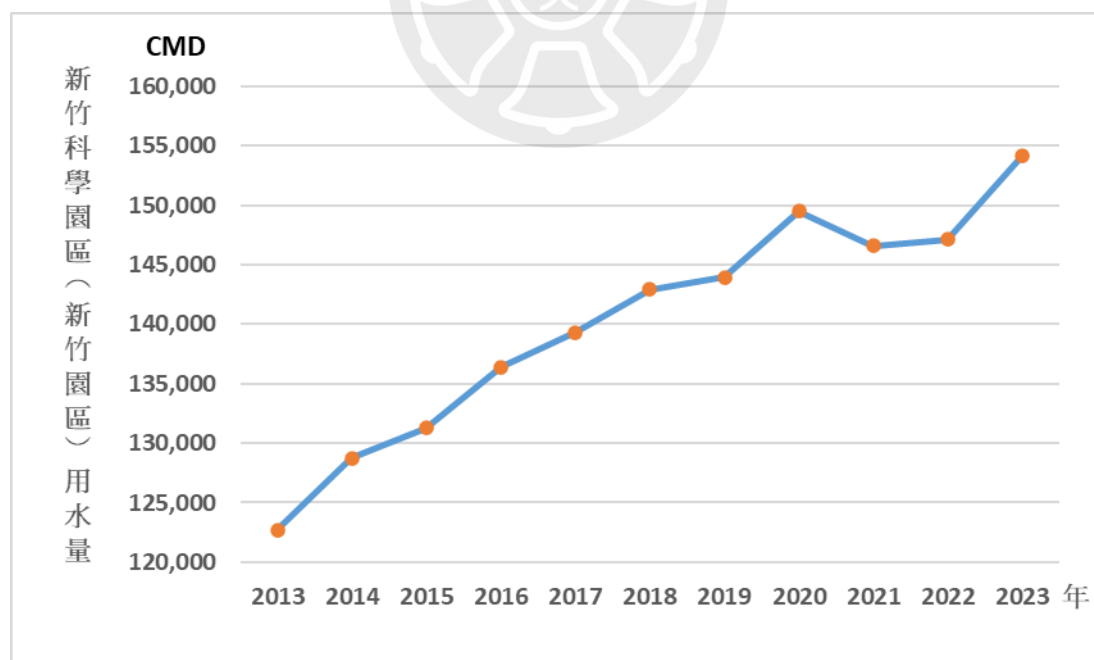


圖 2-3 新竹科學園區新竹園區年度每日用水量

資料來源：國家科學及技術委員會統計資料庫（2024c）。

半導體產業容易受到國際事件影響，例如新冠肺炎 (Covid-19)就對全球半導體市場產生了相當大且深遠的影響。隨著遠距辦公、在家購物、數位學習或使用串流媒體服務等新常態出現，對於支援這些活動的雲端伺服器或電子設備需求量開始成長，如筆記型電腦、智慧電視或是智慧型手機的銷量上升(Knight, 2021)，間接導致了晶片需求量也隨之增加。除了疫情因素之外，隨著 5G 的推出、人工智慧、電動車、物聯網感測器等數位科技設備的日益普及，全球半導體銷售額在 2020 年將達到 4,500 億美元，預計在 2021 年內將突破 5,000 億美元(KPMG, 2021)。美國半導體產業協會統計 2024 年 2 月全球半導體產業銷售總額為 462 億美元，比起 2023 年 2 月的 397 億美元還要成長 16.3%(Semiconductor Industry Association, 2024)，另外根據世界半導體貿易數據也預測 2024 年全球半導體市場相較 2023 年預估會成長 11.8%(World Semiconductor Trade Statistics, 2023)，達到 5,760 億美元(表 2-1)，產值相當可觀。

表 2-1 世界半導體貿易統計預測摘要

Spring 2023	Amounts in USSM			Year on Year Growth in %		
	2022	2023	2024	2022	2023	2024
Americas	141,136	128,236	150,989	16.2	-9.1	17.7
Europe	53,853	57,253	61,637	12.8	6.3	7.7
Japan	48,158	48,724	52,534	10.2	1.2	7.8
Asia Pacific	330,937	280,881	310,838	-3.5	-15.1	10.7
Total World - \$M	574,084	515,095	575,997	3.3	-10.3	11.8
Discrete Semiconductor	33,993	35,904	38,192	12.0	5.6	6.4
Optoelectronics	43,908	45,949	45,881	1.2	4.6	-0.1
Sensors	21,782	20,410	21,575	13.7	-6.3	5.7
Integrated Circuits	474,402	412,832	470,349	2.5	-13.0	13.9
Analog	88,983	83,907	88,902	20.1	-5.7	6.0
Micro	79,073	71,470	75,855	-1.4	-9.6	6.1
Logic	176,578	173,413	185,266	14.0	-1.8	6.8
Memory	129,767	84,041	120,326	-15.6	-35.2	43.2
Total Products - \$M	574,084	515,095	575,997	3.3	-10.3	11.8

資料來源：World Semiconductor Trade Statistics (2023)。

註：數字四捨五入為百萬美元，可能會導致按地區或產品類別劃分的總數稍有不同。

因半導體產業的產值相當高，因此全球各企業順應世界市場對晶片龐大的需求，頻頻擴廠增加產線，或是發展出更高階的技術將晶片越做越細緻，這將導致未來用水需求只會越來越高，未來新竹科學園區將會擴大寶山用地的都市計畫範圍，並引進積體電路上下游產業，並以高階製程量產需求為主，如台積電二奈米廠未來將規劃進駐此地。另外根據新竹科學園區寶山用地第2期擴建計畫環評報告書指出，若未來開始量產的話，每天會再需要9.8萬噸用水量（科技部新竹科學園區管理局，2021），由此可知未來如果半導體產業聚集的新竹科學園區遇到缺水狀況的話，損失的產值將會難以估計。

第二節 全球晶片短缺

自1988年記憶體晶片短缺事件以來，全球也在2020年面臨到半導體產業鏈供應危機，此事件由Mohammad et al. (2022)稱為「全球半導體晶片短缺」(Global Semiconductor Chip Shortage)，被許多學者認為是現代版的70年代石油危機，在當時有無數的產品被迫延後生產，價格也急遽上升，導致許多行業受到嚴重影響(Mohammad et al., 2022)。由於幾乎所有的電子設備都離不開晶片的運作，如手機、電腦、汽車、顯示卡、電視、冷氣機、洗衣機等家電產品，幾乎可被稱為是所有現代電子產品的大腦。一旦半導體晶片出現供不應求的狀況，將導致晶片價格大幅上漲，甚至可能會對全球電子企業的運作及生產造成影響。造成全球半導體晶片短缺有多個因素，包含新冠肺炎、中美貿易戰、臺灣缺水…等原因。

造成全球半導體晶片短缺有許多因素，其中大致可以區分為三大類型，分別為疫情、人為事件與自然災害，以下就此三大類型進行詳述：

一、疫情

2020年初後新冠肺炎肆虐期間，實體活動大多暫停，生活型態逐漸轉為居家辦公或是遠距教學，造成3C產品如筆記型電腦、螢幕、電視、平板的需求上升(Knight,

2021)，間接導致晶片需求量也隨之增加；從供給端檢視，疫情期間多數國家實施人流管制措施，造成許多半導體工廠關閉，無法及時供應市場所需晶片，讓全球許多企業面臨晶片庫存見底，產品無法及時送達至消費者，貨物供應時間大大延遲。

二、人為事件

（一）中美貿易戰

長期的美中貿易順差導致美中關係惡化。2018 年 6 月，美國政府以智慧財產權和不公平貿易行為為由，宣布對價值總共 500 億美元的中國進口產品徵收 25% 的關稅，後續中國也對相同數量的美國商品徵收關稅做為回應，使貿易戰的號角響起(Chen et al., 2023)。到了 2020 年 9 月，美國商務部宣布制裁中國最大的半導體代工廠中芯國際 (SMIC)，並宣布晶片出口管制措施，未來美國企業若沒有獲得政府的許可，不得出口先進晶片和製造設備至中國 (The News Lens, 2022)。進而導致美國公司必須向其他晶片製造商下訂單，如台積電、三星等。然而這些製造商的產能已經達到極限，難以在短期擴大其生產線產能。

（二）日韓貿易戰

韓國要求日本針對第二次世界大戰在朝鮮殖民地強徵的一百多萬名勞工之事件做出賠償，此舉引發日本政府不滿。2019 年 8 月日本決議將南韓自可享有出口優惠的「白色國家名單」中移除，在韓國法院對部分日本企業做出裁決後，進而限制對韓國出口部分貨物，包含氟化氫 (Hydrogen Fluoride)、含氟聚醯亞胺 (Fluorine Polyimide) 和光阻劑 (Photoresist)，而韓國半導體製造所需的上述三種關鍵原料主要從日本進口 (BCG & SIA, 2021)，因此對韓國半導體產業供應鏈造成了相當程度的影響，韓國之後也相繼將日本移出貿易白名單。直到 2023 年 4 月 28 日，日本經濟產業省宣布將韓國重新納入出口白名單，耗時 3 年 9 個月的日韓貿易戰終於結束。

（三）日本工廠火災

2020 年 10 月，類比數位轉換器 ADC 及 DAC 之生產商旭化成公司 (Asahi Kasei Corporation) 旗下生產半導體的工廠發生火災，導致無塵室等廠房嚴重受損；2021 年 3 月，生產全球 30% 車用微控制器單元的生產商日本瑞薩電子 (Renesas Electronics) 位於茨城縣的半導體工廠發生火災，廠房及設備損害程度相當嚴重（日經中文網，2022）。

三、自然災害

（一）德州冬季風暴

2021 年 2 月美國德州受暴風雪天氣影響，電力需求急遽上升，導致電力供不應求，迫使德州電網實施短期輪流停電，迫使當地的半導體供應商三星電子、恩智浦、英飛凌、德州儀器等半導體製造廠停止生產，突然的暫停生產也毀壞了部分晶圓，且即使恢復供電後，也需要一定的時間才能重新開始生產，2 月中旬受到停電影響的三星電子，直到 3 月 17 日仍未恢復生產 (Taylor, 2021)。在當時全球晶片嚴重短缺的狀況下，又受到德州工廠停電而暫時停產，使原本就很緊繃的晶片供應鏈雪上加霜 (TechNews, 2021)。

（二）2021 年臺灣旱災缺水危機

臺灣的降水來源主要來自於夏季的颱風季，但 2020 年因為受到梅雨季過短、無颱風登陸或接近臺灣…等複合性因素（李明營等人，2023），導致水庫在枯水期時面臨蓄水量不足，間接造成 2021 上半年發生百年以來最嚴重的旱災，而半導體製造需要大量的超純水來清洗工廠和晶圓，面臨如此嚴重的乾旱，使得半導體供應鏈面臨極大的困境，當時竹科企業甚至四處購買水車以應付產能所需用水，所幸在 2021 年 6 月的梅雨鋒面、7 月底的煙花颱風外圍環流及西南氣流、8 月初的熱帶性低氣壓接連為臺灣帶來降雨，在 2021 年 8 月 5 號，所有縣市的水情燈號均轉為藍燈，缺水危機解除。

國外學者、企業與媒體相當重視臺灣缺水危機，甚至為此發布相當多的文獻和報導來談論此議題，相關文獻整理如表 2-2 所示。臺灣在 2001-2023 期間已經發生過多次缺水危機，較嚴重的事件發生在諸如 2011、2015、2021 年，根據未來氣候變遷推估，臺灣的乾旱週期將會越來越短，連續不降雨天數變多，發生頻率甚至可能會逐漸增加，因此未來的缺水風險將會上升。

表 2-2 全球半導體晶片短缺相關研究

全球半導體晶片短缺原因		相關文獻
疫情	新冠肺炎	Cayas et al. (2021); Fusion Worldwide (2021); Kamasa (2021); KPMG (2021); Mohammad et al. (2022); Ning et al. (2023); Nordin and Stünkel (2022); Ramani et al. (2022); Taylor (2021); Tech Xplore (2021); Zhang and Zhu (2023)
人為事件	中美貿易戰	Cayas et al. (2021); Fusion Worldwide (2021); Kamasa (2021); Mohammad et al. (2022); Ramani et al. (2022); Taylor (2021); Zhang and Zhu (2023)
	日韓貿易戰	Fusion Worldwide (2021); Mohammad et al. (2022)
	日本工廠火災	Cayas et al. (2021); Fusion Worldwide (2021); KPMG (2021); Nordin and Stünkel (2022); Ramani et al. (2022)
自然災害	德州冬季風暴	Cayas et al. (2021); Fusion Worldwide (2021); KPMG (2021); Ramani et al. (2022); Taylor (2021)
	臺灣缺水	AIT (2017); Aviso et al. (2021); Barbiroglio (2021); Cayas et al. (2021); Fusion Worldwide (2021); Kamasa (2021); KPMG (2021); LI (2023); Narvaez et al. (2022); Nordin and Stünkel (2022); Ramani et al. (2022); Tech Xplore (2021)

資料來源：本研究整理。

臺灣半導體產業在世界半導體供應鏈中持續領先全球，全球企業製造的許多產品多數倚賴臺灣製造的晶片，同時也為臺灣帶來了巨額的利潤。Tech Xplore (2021)提到臺灣擁有世界上最大、最先進的高科技晶片代工廠，全球擁有最先進製程的高階半導體製造能力企業(10 奈米以下)有 92%位於臺灣(BCG & SIA, 2021)。世界半導體貿易協會也統計 2020 全球半導體產業產值高達 4,404 億美元，臺灣即占了 26%，相當於 3.2 兆元新臺幣，占臺灣 GDP 比重達 15%，在經濟方面擁有很重要的地位（財團法人中技

社，2021)，其中大部分的半導體企業坐落在新竹科學園區，未來受氣候變遷，水資源的供給越來越不穩定，但晶片需求端卻持續成長，若供應竹科的寶山水庫及寶山第二水庫面臨乾涸，將會對全球電子產業不利（BBC News，2021）。另外近年來乾旱頻率增加，多數企業也察覺到了危機，因此紛紛針對自家企業分析極端氣候事件可能帶來的衝擊，如台積電即在 2022 年氣候相關財務揭露報告中，在 TCFD 風險影響分析的實體氣候風險部分即提到水、旱災可能會使未來營運和生產受到衝擊，且有財務損失、營收下降之潛在財務影響，因此台積電將持續關注與因應上述災害風險，確保企業能穩定營運，同時強化供應商氣候韌性（Taiwan Semiconductor Manufacturing Co., Ltd.，2023b）。

乾旱事件在產業及經濟上造成的損失是相當劇烈的。有關乾旱及缺水之相關數據，緊急事件資料庫 (Emergency Events Database, EM-DAT)指出 2021 年美國西部遭遇持續乾旱事件，造成總經濟損失達到 90 億美元(CRED, 2022)。UNCCD (2022)統計 1900-2022 年的重大乾旱事件導致超過千萬人死亡，造成全球數千億美元的鉅額損失；1998-2017 年，乾旱造成全球經濟損失約 1,240 億美元。針對缺水對半導體產業或企業造成的影響，根據 Morrison et al. (2009)的研究估計，英特爾或德州儀器營運的製造廠若因為水資源問題而關閉的話，可能導致一個季度收入會損失 1-2 億美元，具體金額取決於生產的產品。

林裕彬（2013）指出若氣候變遷未獲得緩解，2030 年臺灣各縣市將面臨到嚴重的缺水問題，其中新竹縣市擁有產業運營收入最高的新竹科學園區，其單位產值受到的衝擊最大，未來新竹縣市到 2030 年每日可能不足 20 萬噸的水，針對受竹科缺水影響所折損的產值金額，換算後大約每日會損失 57.1 億元新臺幣（環境資訊中心，2021）。經濟部（2020）在評估桃園-新竹備援管線工程計畫時計算其間接效益，竹科單位用水影響產值以每噸水約 138 萬元新臺幣估算，若缺乏備援供水水量約 462 萬噸下，將會造成年產值約 6.8 億元以上之損失(每四年一次)。

另外有關竹科用水的單位用水量對應產值量化部分，李崇恩等人（2023）利用區域性水資源耗用衝擊特徵模式換算出新竹科學園區新竹園區在遭逢乾旱時因水資源供給不足而造成的經濟損失。考慮到上游的上坪溪有其他用水部門取水，經計算後結果顯示，當其餘用戶在頭前溪—上坪溪上游集水區額外取用 1 立方公尺的水且不排除回原流域時，新竹園區將會損失 7,696 至 14,658 元新臺幣，且時間序列資料也顯示出產值上的損失將呈現逐年增加的趨勢。

第三節 物質流分析

本研究欲利用物質流分析模擬寶山水庫及寶山第二水庫未來蓄水量，物質流分析 (Material Flow Analysis, MFA) 是一種在廢物和廢水、農業養分、水質等管理問題，還有資源保護、環境管理決策等許多領域中被廣泛使用的方法 (Brunner & Rechberger, 2003)。根據台灣循環經濟與創新轉型協會（2018）將物質流分析定義為「一種系統性的評估方法，透過質量守恆定律，分析在特定時間、空間下，系統中物質流動的狀況。」另外也有較詳細的說法，Yiougo et al. (2011) 將物質流分析定義為是針對流經系統 (城市、國家…) 的物質流量 (水、食物、排泄物、廢水…) 或污染物質流量 (氮、磷、碳…) 的評估。此外物質流分析的特點是可以通過簡單的能量守恆概念來檢視過程中物質的源頭輸入、去向、中間轉換和最終流向。

OECD (2000) 將物質流分析歸納成兩大類型 (表 2-3)，分別為 I 型和 II 型。I 型通常從技術工程的角度進行，而 II 型為社會經濟關係。兩類型下又各自分出三種類別 a、b、c，總共有六種不同面向的分析方法，Ia 屬於特定元素之物質流分析 (Substance Flow Analysis, SFA)；Ib 屬於針對物質的塊材物質流分析 (Bulk Material flow Analysis, BMFA)，本研究針對水為目標進行分析，較接近此分析方法；Ic 屬於針對產品的生命週期評估分析 (Life Cycle Assessment, LCA)。II 型主要都是針對社會或部門的貨物吞吐量相關經濟問題，有關一般常使用的物質流分析，通常是指 Ia、Ib、IIb 與 IIc 這四種分析面向。

表 2-3 物質流分析方法類型

Type of analysis	I			II		
	a	b	c	a	b	c
Objects of primary interest	Specific environmental problems related to certain impacts per unit of flow of			Problems of environmental concern related to the throughput of		
	Substances	Materials	Products	Firms	Sectors	Regions
	e.g. Cd, Cl, Pb, Zn, Hg, N, P, C, CO ₂ , CFC	e.g. wooden, products, energy, carriers, excavation, biomass, plastics	e.g. diapers, batteries, cars	e.g. singles plants, medium and big companies	e.g. production sectors, chemical industry, construction	e.g. total or main throughput, mass flow balance, total material requirement
	within certain firms, sectors, regions			associated with substances, materials, products		

資料來源：OECD (2000)。

物質流分析是一個迭代的過程，整個流程必須根據調查的目標物質去檢查相關環節，根據 Brunner and Rechberger (2016)和 Montangero (2007)描述的物質流分析方法與流程(圖 2-4)，大致可以歸納成以下三個步驟：

一、確定問題及系統界定

正式進入物質流分析前，需要先確定研究問題，接下來就要定義系統。系統的定義包含了決定系統邊界 (Boundaries)、目標物質 (Substances)或貨物 (Goods)、目標物質程序 (Processes)，其中前兩個步驟決定的先後順序會依據研究目的而有所不同，決定好系統邊界和目標物質後，再檢視目標物質程序。

二、目標物質量化分析

定義好系統之後，接下來就要進行目標物質流向 (flow)相關數據的蒐集與盤查，為了提高研究系統的完整度及可信度，可利用國內外的官方網站、研究報告、期刊、

論文等蒐集文獻資料，需要特別注意數據的來源與合理性，再根據質量守恆原理，以同進同出的概念建立物質平衡系統模型，將不同情境的數據帶入模型計算，並進行相關分析與推估（陳郁慈與闕蓓德，2022），若有窒礙難行的地方隨時可回到前面的步驟進行調整。

三、解釋結果

將研究系統內的目標物質流向與數據進行結果闡述並加以解釋，提出相關改善建議與策略。若針對最後結果持有疑慮，可立即回頭重新決定貨物、調整系統內參數或是重新定義研究問題。

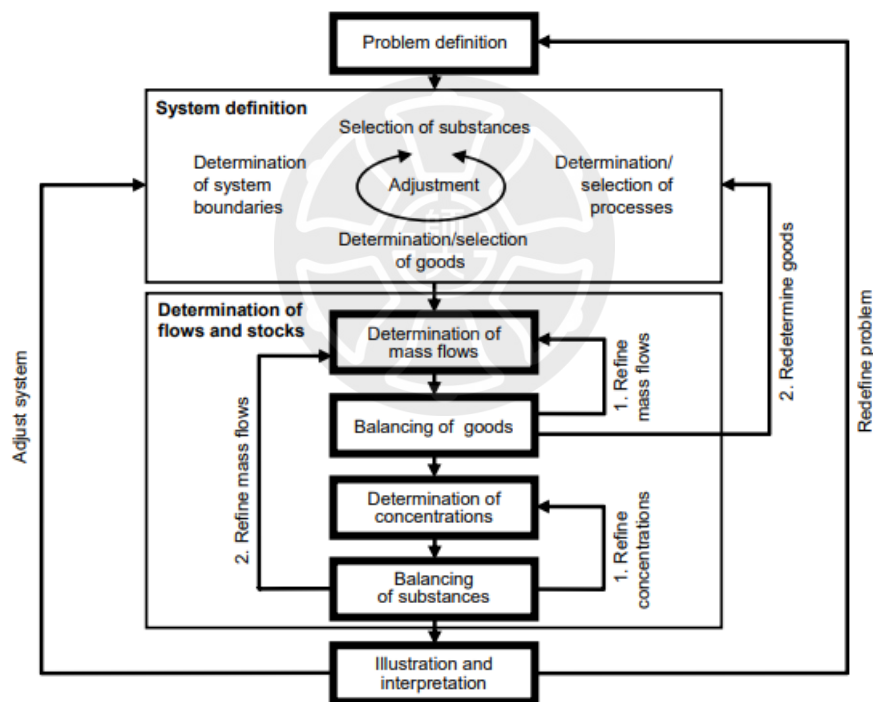


圖 2-4 物質流分析步驟流程

資料來源：Brunner and Rechberger (2003)。

直到現今物質流分析已被廣泛使用於不同的研究領域，且發展出了不同的規模和應用，其中以水資源為目標物質的研究在國內外都相當普遍。Liu (2014)以中國鋼鐵公司位於高雄小港的工廠為範疇，利用物質流分析探討諸如水、二氧化碳和氧化鈣…等目標物質的流向，並討論了水和二氧化碳的強度以及煉鋼渣的產量。甘偉文（2008）

以物質流分析調查五股工業區內水資源的流布狀況，進一步利用盒鬚圖和相關統計方法探討廢水及雨水的水質穩定度；Tong et al. (2019)針對中國遼寧省某鋼鐵企業，計算取水、耗水、廢水在生命週期中的排放量，確定影響鋼鐵生產用水和廢水排放的主要因素，並發現間接用水是最主要的貢獻來源；Ushijima et al. (2012)針對印尼貧民窟計算並繪製了水、氮和磷的物質流。Broemme et al. (2018)應用物質流分析了解越南廣寧省鴻基半島煤礦區礦井水流量、處理和再利用方面與水相關的元素和過程的複雜關聯。

另外因各研究範疇和尺度的不同，研究範圍甚至能大到城市和國家，如 Arora et al. (2022)結合資源循環和物質流分析的概念，為新加坡開發水循環評估框架，並應用該框架評估 2015 年至 2019 年的水循環狀況；Ghani and Mahmood (2023)建立馬來西亞家庭系統的物質流分析模型，並用於馬來西亞城鄉規模的廢水管理。

針對水資源供應問題，部分研究以河流流域或是鄉鎮市為範疇進行探討，姚凱富（2008）分析淡水河流域水資源供需物質流布情形；林宗岳（2009）分析臺北縣(現為臺北市與新北市)29 個鄉鎮市(現為區)的自來水流布，以了解臺北縣自來水實際供需情況，並研擬可行的減量與永續建議。另外也有研究將範疇縮小到水庫進行分析，如童慶斌（2008）利用系統動力模式 VENSIM 分析大臺北地區在未來水資源使用量改變下的狀況，並建議桃園、基隆地區因應氣候變遷衝擊考慮多元化的水資源調適方案。

事實上在研究範疇的角度上，物質流分析會因為系統在時空間尺度的不同，而使分析的過程和結果有所不同，童慶斌（2008）將物質流的概念引進流域水源的管理中，將流域視為主要系統，並以水庫為系統的核心，探討水資源永續利用與管理問題。因此在執行面上，不只是整個流域，也可以僅針對特定供水系統及設施(如水庫)設定為物質流分析時的系統邊界，水即為唯一進出的目標物質，就能建立供水系統模型，分析其水資源物質流概況，並量化水庫蓄水量。流域水資源系統研究在時間尺度除了可以年作為單位之外，亦可以季節、月、旬，甚至日等時間尺度進行分析。

針對未來水庫供水狀況或是缺水風險的評估與分析，過往研究上有開發出許多不同的水資源通用模擬模型(Sulis & Sechi, 2013; 周乃昉與吳嘉文，2010)，像是由美國科

羅拉多州立大學開發的 MODSIM 模型、瑞典斯德哥爾摩環境研究所開發的 WEAP 模型、西班牙瓦倫西亞理工大學開發的 AQUATOOL，另外也有適用於臺灣的模型，像是由周乃昉與吳嘉文（2010）開發之通用性廣域水資源供需模擬模式（WRASIM），用以評估廣域水資源之聯合運用，目前多由經濟部水利署水利規劃試驗所採用。各模型都有自己的演算法與特點，可視各地區水資源供給系統複雜度做使用，而針對水資源的研究，有些則是利用系統動力模式來建立用水架構模式（陳明業，2002；童慶斌，2008；楊朝仲等人，2007；劉子明，2010；劉子明與鄧澤宇等人，2023），但也有部分研究是利用物質流分析或是相似概念的水平衡方式的傳統模擬法（王業睿，2014；林宗岳，2009；姚凱富，2008；陳柏廷，2015；陳潔，2012），雖然使用上有不同的方式，但是可以發現到這些方法都是在建立模仿實體供水系統的模式，處理水量分配時需使用許多的邏輯分析與迭代運算，且都含有「物質平衡」的概念，也就是物質在節點上需要有同進同出的原則，而水資源通用模擬模型或是系統動力模式這種模組化軟體介面與傳統模擬法的差別是在於模擬程式方面，模組化圖形介面可供使用者彈性調整水資源系統模組，以達到模式通用或是簡易模擬其他供水系統之目標。但傳統模擬法是針對特定系統建立，且在處理大型供水系統，包含跨區供水或是堰、水庫、淨水廠聯合運用的狀況下，在分析上比較難以確保水資源分配方式與相關節點運用規則相符（周乃昉與吳嘉文，2010）。但若是研究目標是比較單純的架構或對象的話，利用傳統模擬法如物質流分析也是一種方法，只要維持好供水系統的節點和架構的正確性即可，因此在模擬水庫蓄水量上這些方法上都是可行的。

第四節 氣候變遷對水資源的影響

受到氣候變遷之影響，全球的氣候與先前相比發生了明顯的變化。近年世界各地發生了許多極端氣候事件，如乾旱、暴雨、暴風雪、熱浪等等。頻繁發生的災害不僅會造成生命財產的損失，更可能對未來的社會經濟與產業發展帶來威脅與風險。

IPCC 是負責集結全球氣候變遷相關科學研究之組織，每 5 到 7 年會發布一次評估報告，以提供當前的全球研究成果與未來趨勢給予各國決策者參考。IPCC 已於 1990 年、1995 年、2001 年、2007 年、2014 年分別發布第一次至第五次評估報告，目前最新版本為 2021 年發布的第六次評估報告。

科技部等人（2021）整理並摘錄了 IPCC 氣候變遷第六次評估報告重點，針對報告中提到的氣候現況，發現人類活動確實造成會造成全球暖化，人為引發的氣候變遷已經讓各地陸續發生極端氣候事件。自 IPCC 第五次評估報告發布以來，極端事件受人為影響的證據越來越多，而對於未來可能發生的氣候變化，IPCC 也使用了許多模型去預估，但無論在哪種排放情境，因世界無法立刻放棄石化燃料，因此預測地球將持續增溫至少到本世紀中，除非在未來的幾十年內大幅實施減緩措施，盡量減少溫室氣體的排放，否則全球增溫幅度將在本世紀超過 1.5°C 甚至是 2.0°C，除此之外像是強烈颱風、熱浪、暴雨、乾旱的發生頻率與強度增在未來也會隨之增加。

針對臺灣未來的氣候趨勢推估，在氣溫方面預測未來將會持續增溫，極端高溫事件也會隨之增加；季節變遷部分，未來夏季時間變長，冬季時間變短；降水相關部分，未來的年總降雨量、年最大一日暴雨強度、年最大連續不降雨日數均有增加的趨勢（科技部等人，2021）。由此可知未來氣候趨於極端，乾旱事件的發生機率將會大幅增加。

IPCC 在 AR5 的評估報告已經指出氣候變遷將會增加水資源供應負擔，針對臺灣未來的水情變化，Lee et al. (2023) 也分析未來氣候變遷下全臺 107 個流域在 Budyko 架構下的流量、雨量、蒸發散量變化趨勢，發現在所有 RCP 中，多數流域都顯示未來將會面臨水資源嚴重不足的問題。而臺灣過去研究針對北區之供需能力評估結果，發現

桃園、新竹地區供水能力不足，在未來氣候變遷可能出現供需缺口，所受衝擊較大，將影響到未來高科技產業發展（科技部等人，2021）。因此需要去仔細評估水資源現況與未來氣候變遷下所面臨的水資源供需問題與衝擊，並提出適當的水資源調適策略與建議。在水資源需求部分，目前臺灣水資源現況與未來可能面臨的供水風險議題本研究整理如表 2-4 所示。

表 2-4 臺灣水資源供需議題說明

水資源之供需議題	說明
降雨異常	1.歷年發生過多次乾旱事件，使水資源供給出現危機。 2.全臺枯水期流量減少，北部及東部地區有豐水期縮短、枯水期延長的趨勢。 3.若是遇到極端降雨或颱風降水，容易使水庫原水濁度快速升高，而無法被使用。
供水設施問題	1.臺灣水庫整體的有效庫容大多不足以應付全年所需。 2.水庫淤積呈現增加的趨勢。
用水需求上升	1.未來氣候變遷影響下，將可能因為溫度的上升和經濟水平的快速發展而導致用水需求增加。 2.乾旱時往往無法滿足所有產業用水，像是農業需停灌以供應民生及工業用水。

資料來源：整理自童慶斌等人（2017）。

各地區水資源缺水風險是受供水系統之供水能力及需水量所影響，水資源衝擊增加，並非代表缺水風險也隨之增加，必須要進行水資源缺水風險之氣候變遷模擬，並輔以不確定性分析才能評估，以此模擬結果來制定適當的調適策略與建議（劉子明與林祺恒等人，2023）。國內外已經有許多研究針對氣候變遷下的流域、水庫集水區供水能力的探討，並且發現將水庫運行與流域水文模擬結合可以有效提高模型預測洪水和乾旱特徵的能力(Giudici et al., 2021; Sun et al., 2023)。首先是國外針對未來氣候變遷下流域的水文變化相關研究(Tang et al., 2023; Yang et al., 2022; Zhang et al., 2023; 王苗等人，2016)，像是王苗等人（2016）利用 SWAT 模型模擬氣候變遷下在未來 RCP2.6、RCP4.5、RCP8.5 對中國洪湖流域水資源的影響，發現洪湖流域未來發生乾旱和洪水的可能性增大；Yang et al. (2022)探討中國西北乾旱區阿克蘇河流域在 2010、2020 和

2030 年水資源短缺的風險。而針對臺灣的流域或水庫集水區的研究（林旭信等人，2012；財團法人成大研究發展基金會，2022；陳憲宗等人，2011；劉子明與林祺恒等人，2023），像是財團法人成大研究發展基金會（2022）利用 AR6 資料針對氣候變遷下臺灣的 10 條水系進行雨量與流量之分析；劉子明與林祺恒等人（2023）利用 AR6 統計降尺度日資料，分析未來全臺供水相關集水區的衝擊。

另外針對水庫的集水區分析未來水文變化以探討對下游供水能力的影響，國外已經有非常多的相關研究(Ahmadi et al., 2014; Bhadoriya et al., 2020; Ji et al., 2023; Rong et al., 2024; Sang et al., 2023; Worku et al., 2023; Zhang et al., 2022)，分析步驟基本上是先利用水文模型模擬不同氣候變遷情境下的流量、降水量等水文數字，並設計不同用水情境或方案規劃，接著再根據流域或水庫的運行規則建立模型或用水架構，計算出水庫蓄水量、入流量、發電量等，以分析供水系統的有效利用與缺水風險，如 Worku et al. (2023)評估氣候變遷對衣索比亞 Shumbrite 流域用水需求和河流流量的影響，並採用可靠度、復原力和脆弱性三個指標來評估 Shumbrite 水庫滿足目標需求的效能；Ahmadi et al. (2014)在氣候變遷情境下模擬 21 世紀初期、中期與後期的溫度和降水量，並計算伊朗 Karoon 4 水庫的入流量，以最佳化水庫動態運作規則，研究結果發現有效的水庫運作管理可降低其脆弱度。

在臺灣同樣也有許多研究對於許多主要水庫進行分析（張哲瑋，2021；連宛渝，2013；陳明業，2002；陳潔，2012；戴嘉慧，2010），劉子明（2010）利用氣候變遷衝擊整合評估系統來探討高屏河流域的供水承载力；陳明業（2002）模擬未來淡水河流域流量與降雨，並在未來不同水資源規劃方案下針對新店溪和大漢溪供水系統的操作評估；戴嘉慧（2010）推估新店溪流域翡翠水庫未來水庫流量並根據水庫運轉規則分析水庫蓄水量及發電量變化；陳潔（2012）分析氣候變遷下曾文水庫系統可供水量並探討未來缺水趨勢。而這些研究大致上的研究結果都呈現未來的供水會是一個不樂觀的狀況，因為未來的流量會趨向極端變化，因此未來水庫調度、用水分配或是調適措施需要更適當規劃，以減少乾旱對產業或是環境的影響。

回顧過去研究，基本上探討未來流域或水庫供水風險都會假設不同的用水情境，並評估各種水資源規劃下的供水或缺水風險狀況，在呈現上多以年為時間單位，分析不同的年需水量下的年供水及年缺水量，並利用相關指標進行缺水風險評估，或是計算未來水庫的入流量進行分析，但較少以水庫蓄水量的角度換算缺水指標來呈現未來缺水風險，過去研究比較接近的做法是直接呈現未來時期的水庫蓄水量逐月變化 (Nohara et al., 2018)。另外在分析對象方面，大多都是針對整個供水系統，也就是分析給所有供水用戶的供水能力及缺水風險，較少是針對單一用水對象，如科學園區或是特定工業區等。

隨著氣候變遷對人類生活的衝擊越來越大，世界各國均發展出不同的減緩及調適策略，以確保未來環境的永續發展。減緩 (Mitigation)指的是以人為干預的方式，減少溫室氣體排放量或是增加溫室氣體儲存量，以降低氣候變遷發生的速度或程度；調適 (Adaptation)指的是以自然或人類系統為對象做出調整，以因應現況及未來可能之氣候變遷衝擊或影響，藉此降低危害或發展有利機會（行政院經濟建設委員會，2012），但目前在世界無法放棄高碳排相關產業以達成減緩的狀況下，大多朝向調適的做法為優先。針對調適部分，科技部氣候變遷調適科技整合研究計畫 (Taiwan integrated research program on Climate Change Adaptation Technology, TaiCCAT)以 IPCC 第五版評估報告針對風險的定義為基礎，並參考國際氣候變遷調適步驟，如聯合國、歐洲、英國等版本，在 2016 年訂定氣候變遷調適能力建構六大步驟，分別為界定問題與設定目標、評估與分析現況風險、評估與分析未來風險、界定與評估調適選項、規劃與執行調適路徑、監測與修正調適路徑（童慶斌等人，2015）。事實上回顧過往有關氣候變遷下針對水資源供應風險的研究，幾乎都是以一個區域或是供水系統做為案例及研究對象，分析過程遵循上述調適步驟的方向，再選擇合適的評估方法進行風險評估，並提出適當的建議，因此本研究將參考 TaiCCAT 支援調適決策六步驟的精神進行新竹科學園區未來供水風險評估。

第三章 研究設計與方法

第一節 研究區

一、新竹科學園區

臺灣的高科技產業在世界占有重要的一席之地，尤其半導體產業的發展領先全球，其中臺灣半導體企業大多集中在新竹科學園區，如台積電、聯發科、日月光、聯電等。新竹科學園區 (Hsinchu Science Park)位於臺灣新竹市，設立於 1980 年，為臺灣第一個設立的科學園區，範圍在新竹縣市交界，自新竹市東區至新竹縣寶山鄉。設立背景為 1980 年代後，臺灣已經歷過兩階段的進口替代及出口擴張，使得資金快速積累，促使臺灣工業結構有能力轉型成為附加價值高且技術密集的產業，帶動了高科技產業的成長，新竹科學園區即是在這個強調科技熱潮的時期被催生出來（李怡璇，2004），且附近有國立陽明交通大學、國立清華大學及工業技術研究院等學術研究機構，因地利之便可培育相關高科技人才，吸引許多高科技廠商至新竹科學園區投資設廠。除此之外在新竹科學園區塑造的產業群聚中，半導體產業的群聚效應最為顯著，除了能形成緊密的關係網絡，更能促進交流與創新，成功地帶動了臺灣資訊與電子產業的發展，讓竹科具備了全球半導體相當強大、專業、完整的產業供應鏈（林可凡等人，2012）。截至 2024 年 5 月 13 日，核准廠商家數已超過 600 家（國家科學及技術委員會統計資料庫，2024a），近年平均營業額突破兆元（國家科學及技術委員會統計資料庫，2024b）。

新竹科學園區目前用水來源來自寶山水庫、寶山第二水庫、頭前溪隆恩堰以及永和山水庫（國家科學及技術委員會，2015），寶山水庫和寶山第二水庫的水會送至寶山淨水場處理，隆恩堰則是送至新竹第一和第二淨水場，永和山水庫則是送至東興淨水場，三個淨水場皆有專管連接至園區內水池，以供應竹科之用水。目前竹科常態用水主要是以寶山水庫和寶山第二水庫供應為主，而負責上述兩水庫水處理的寶山淨水場

用水也大多集中於新竹科學園區，並隸屬於大新竹供水系統（經濟部水利署北區水資源局，2013），因此本研究會在大新竹供水系統下模擬並分析寶山水庫及寶山第二水庫未來的蓄水狀況，這會直接的反映新竹科學園區未來的缺水風險。

二、大新竹供水系統

本研究根據經濟部水利署北區水資源局（2013）所繪製的頭前溪水資源系統架構，加上現今實際狀況，重新建立了大新竹供水系統架構圖(圖 3-1)，後續分析的用水架構即根據此架構設定參數，模擬寶山水庫和寶山第二水庫之蓄水量，研究範圍如圖 3-2 所示。新竹地區供水來源為大新竹供水系統，其主要來源為頭前溪(包含其上游支流油羅溪與上坪溪)，由隆恩堰、寶山水庫及寶山第二水庫三者聯合運用供應，必要時可由桃園的石門水庫及苗栗永和山水庫支援。

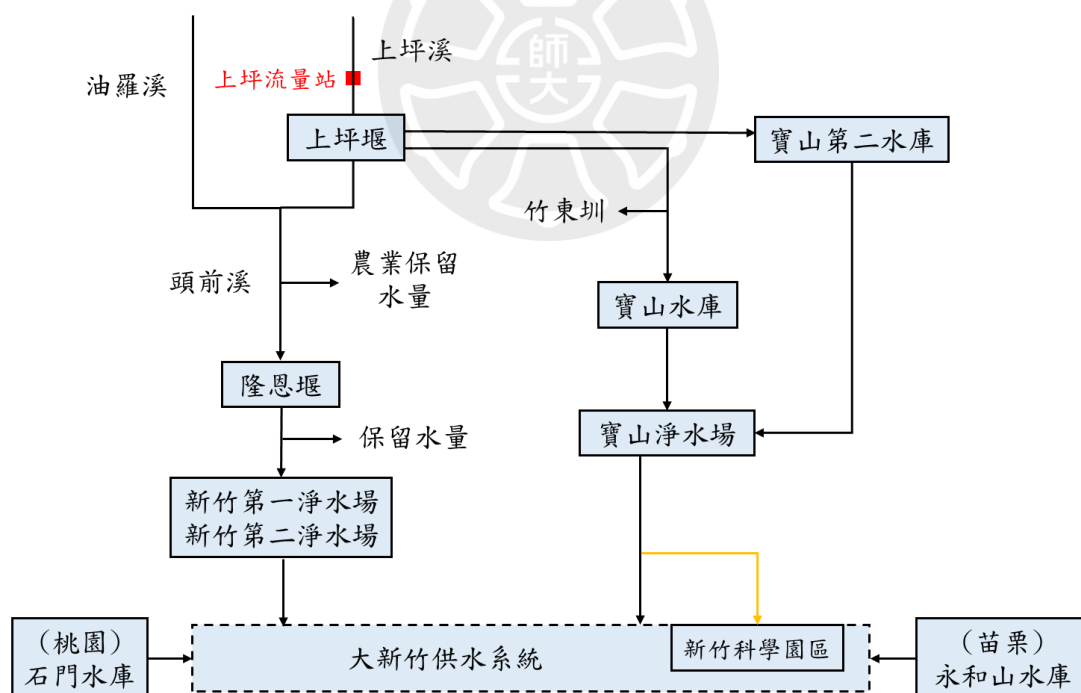


圖 3-1 大新竹供水系統

資料來源：改繪自經濟部水利署北區水資源局（2013）。

（一）上坪溪

上坪溪為頭前溪上游的其中一條支流(另一支流為油羅溪)，河川長度約為 44 公里，流域面積約 253 平方公里，分佈於新竹縣竹東鎮、橫山鄉及五峰鄉。上坪溪向北流經五峰、上坪，於新竹縣竹東鎮下公館附近與油羅溪會合後，改稱為頭前溪（經濟部水利署北區水資源局，2013）。

（二）上坪堰

上坪堰位於頭前溪之支流上坪溪，引取上坪溪水源，集水區面積約 233 平方公里，除了供應位於上坪堰與寶山水庫之間的竹東圳灌區灌溉用水外，主要引水至寶山水庫及寶山第二水庫進行調蓄利用，為新竹地區最重要的公共給水水源（經濟部水利署北區水資源分署，2023；寶二水庫專網，2023a）。

（三）頭前溪

頭前溪發源地位於雪山山脈鹿場大山，流域面積約 566 平方公里，主流長度約 63 公里，出海口位於新竹縣竹北市，主要支流為油羅溪與上坪溪，流經地有新竹縣五峰鄉、橫山鄉、尖石鄉、竹東鎮、芎林鄉、竹北市及新竹市（經濟部水利署第二河川分署，2018）。

（四）隆恩堰

隆恩堰位於新竹縣頭前溪下游距離出海口約 12 公里之竹東鎮與竹北市交界處，除了引取頭前溪水源供應農業灌溉用水外，主要功能為與寶山水庫及寶山第二水庫聯合運用（寶二水庫專網，2023b）。

（五）新竹第一淨水場

新竹第一淨水場隸屬於台灣自來水公司第三區管理處，原水主要由隆恩堰設置攔

河堰取水至新竹第二淨水場(平均可取水量約為 22~24 萬 CMD)，再由新竹第二淨水場原水井以馬達抽取約 9 萬 CMD 送至新竹第一淨水場處理。目前設計出水量 8 萬 9000 CMD，最大淨水處理量為 10 萬 CMD，主要供應下游新竹地區民生及工業用水（台灣自來水公司第三區管理處，2023）。

（六）新竹第二淨水場

新竹第二淨水場隸屬於台灣自來水公司第三區管理處，原水主要由隆恩堰設置攔河堰取水(平均可取水量約為 22~24 萬 CMD)，其中約 9 萬 CMD 以馬達抽送新竹第一淨水場，設計出水量為 16 萬 CMD，最大淨水處理量為 20 萬 CMD，主要供應下游新竹地區民生及工業用水（台灣自來水公司第三區管理處，2024a）。

（七）寶山水庫

寶山水庫隸屬於台灣自來水公司第三區管理處，為一離槽式水庫，位於新竹縣寶山鄉山湖村頭前溪支流柴梳溪，由位在頭前溪支流上坪溪的上坪堰引入上坪溪水源，越域引水至寶山水庫蓄存，集水區面積約為 3.2 平方公里，規模不算大，主要供應大新竹地區民生用水及新竹科學園區工業用水，並與隆恩堰及寶山第二水庫聯合運用（經濟部水利署，2024a）。

（八）寶山第二水庫

寶山第二水庫隸屬於台灣自來水公司第三區管理處，為一離槽式水庫，以下簡稱為「寶二水庫」，位於新竹縣寶山鄉山湖村中港溪支流峨眉溪支流石井溪上游，為因應新竹地區快速發展及新竹科學園區用水需求而興建，由位在頭前溪支流上坪溪的上坪堰引入上坪溪水源，越域引水至寶二水庫蓄存，集水區面積約為 2.88 平方公里，主要供應大新竹地區民生用水及新竹科學園區工業用水，並與隆恩堰及寶山水庫聯合運用（經濟部水利署，2024b）。

(九) 寶山淨水場

寶山淨水場隸屬於台灣自來水公司第三區管理處，有設置水源聯通管連接寶山水庫與寶二水庫，並負責處理兩水庫之水，第三期擴建工程完工後總出水量為 34 萬 CMD，未來第四期擴建工程完工後預計總出水量可達到 45 萬 CMD，主要供應下游新竹市關東橋一帶、竹東鎮二重地區及寶山鄉之民生用水及竹科用水（台灣自來水公司第三區管理處，2024b）。根據寶山淨水場自來水供水統計資料，以 112 年為例，年總供水量 10293 萬噸除以 365 天為平均每日 28.2 萬噸（經濟部水利署北區水資源分署，2024），竹科目前以每日供給 15 萬噸計算，另外 13.2 萬噸供給新竹與竹東地區用水。

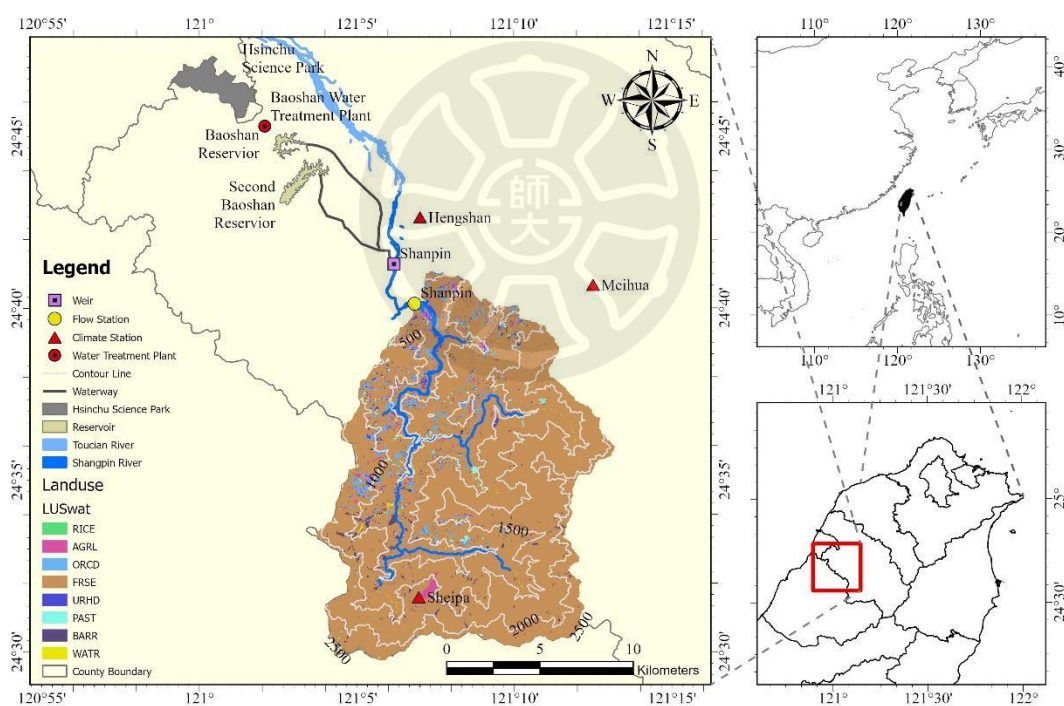


圖 3-2 研究範圍圖

第二節 資料蒐集

一、上坪流量站模擬流量

本研究採用由國立臺灣師範大學地理學系於 2022 年執行之科技部計畫，名稱為「前瞻的淺山生態系統服務治理：以新竹縣上坪溪流域為例(2/4)」之子計畫二：「上坪溪流域水文及非點源污染模式建置以評估氣候變遷與人為活動對河川水量及水質之影響」所提供之 SWAT 水文模式模擬上坪流量站流量資料（李宗祐，2022）。SWAT 模式為半分布式 (Semi-distributed) 水文模式，次集水區的劃分則是透過河流交會點來繪製，透過土地利用、土壤與數值地形等環境條件，劃分次集水區以及每一個水文反應單元 (Hydrological Response Unit, HRU)，並模擬各水文反應單元流量、輸砂、非點源污染等輸出量，最後將流域內所有水文單元加總量化該流域流量與非點源污染輸出量（林冠州，2022）。SWAT 模式輸入資料有主要四個部分，分別為氣象資料、數值高程模型、土壤分類資料及土地利用資料。

李宗祐（2022）提供 SWAT 流量資料之氣象資料中使用的雨量與溫度資料有兩種來源，一為交通部中央氣象署設置位於新竹縣的新竹、梅花及雪霸測站 2012-2018 年之氣象資料，二為使用 TCCIP 所產製之空間解析度為 5km*5km 之網格降雨及溫度資料，包含 1960-2017 年歷史觀測網格月資料及 AR5 推估模式網格月資料，後者分為模式產製 1960-2005 年的基期資料與 2005-2100 年的氣候變遷情境推估資料，數值高程模型資料來源為美國 ASTER (Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflect Radiometer) 網站下載之空間解析度為 30m*30m 資料，土壤分類資料來自政府公開平台網站開放之農試所與水保局建置的全國土壤測繪圖層，土地利用資料來自內政部國土測繪中心發佈 2005 年調查之圖層，觀測流量資料來自水利署年報，流量資料應用於 SWAT 流量參數檢定時間段為 2012-2018 年，經檢定後顯示模擬結果良好。日流量模擬部分，檢定時間段為 2012-2014 年，NSE 值 (Nash-Sutcliffe efficiency coefficient) 為 0.84， R^2 值為 0.84，驗證時間段為 2015-2017 年，NSE 值為 0.69， R^2 值為 0.71。

二、氣候變遷 RCP 情境及 GCM/ESM 選擇

IPCC 的 AR5 報告中，利用「代表濃度途徑」(Representative Concentration Pathways, RCPs) 定義四個氣候變遷情境，分別為 RCP2.6、RCP4.5、RCP6.0、RCP8.5，RCP2.6 情境代表每平方公尺的輻射強迫力在 2100 年增加 2.6 瓦，為暖化減緩的情境；RCP4.5 情境增加 4.5 瓦、RCP6.0 情境增加 6.0 瓦，兩者屬於穩定的情境；RCP8.5 則增加 8.5 瓦，為溫室氣體高度排放的情境（童慶斌等人，2015）。

IPCC 提供 40 多個全球環流模式 (General Circulation Models, GCMs)及地球系統模式 (Earth System Models, ESMs)，但是並非所有的 GCM/ESM 對於臺灣氣候特性之模擬都有好的模擬結果，臺灣氣候變遷推估資訊與調適知識平台（2021）提到應用端若關注的是「雨量」(如水文分析)，模式之間的差異就可能遠大於不同暖化情境所造成的差異，如果使用不合適之 GCM/ESM 容易增加評估結果之不確定性，因此必須選擇適合該地區模擬表現較好的模式來進行氣候變遷模擬運算，選定的方式可參考國內先前與相關研究挑選的模式進行分析（童慶斌等人，2015）。根據 Lin and Tung (2017)提到在臺灣的各區域建議使用不同的模式，其中適合北部地區的前五名，依序為 HadGEM2-AO、NorESM1-ME、CSIRO-Mk3-6-0、CCSM4、bcc-csm1.1m，另外根據 Teng et al. (2021)提出 GCM/ESM 資料的兩階段偏差校正方法，建立從網格資料到測站資料的轉換機制，並根據臺灣基期的模擬降雨表現進行排名，從 33 個模式中選出了排名前五名的 GCM/ESM，依序為 CanESM2、MPI-ESM-LR、CMCC-CM、MIROC5、MPI-ESM-MR，

李宗祐（2022）即選用上述共 10 種 GCM/ESM 模式(表 3-1)，輸入到 SWAT 水文模式模擬出在 AR5 的 4 種 RCP 情境下共 34 種氣候變遷情境(RCP2.6 共 8 種、RCP4.5 共 10 種、RCP6.0 共 6 種、RCP8.5 共 10 種)下上坪流量站 2021-2100 年共 80 年的逐日流量資料。另外說明這份資料的不確定性並不是在模擬出的流量數字本身，其不確定性源頭是來自於降雨量及選擇之 GCM/ESM 模式。

表 3-1 李宗祐（2022）選用之 GCM/ESM 模式

Reference	Model Name	Country	GCM/ESM Center	RCP2.6	RCP4.5	RCP6.0	RCP8.5
Lin and Tung (2017)	HadGEM2-AO	South Korea	NIMR-KMA	V	V	V	V
	NorESM1-ME	Norway	NCC		V	V	V
	CSIRO-Mk3-6-0	Australia	CSIRO-QCCCE	V	V	V	V
	CCSM4	America	NCAR	V	V	V	V
	bcc-csm1.1m	China	BCC	V	V	V	V
Teng et al. (2021)	CanESM2	Canada	CCCMA	V	V		V
	MPI-ESM-LR	France	MPI-M	V	V		V
	CMCC-CM	Italy	CMCC		V		V
	MIROC5	Japan	MIROC	V	V	V	V
	MPI-ESM-MR	France	MPI-M	V	V		V

三、用水情境假設與各節點參數

本次用水情境模擬參數來源主要來自兩份資料，分別是「新竹縣寶山第二水庫環境影響評估報告書第三次環境影響差異分析報告(定稿)」(經濟部水利署北區水資源局，2022)以及「寶山、寶山第二水庫及隆恩堰聯合運用檢討暨新竹地區性水源潛能評估研究」(經濟部水利署北區水資源局，2013)，蒐集完相關參數後即可計算 2025-2100 年的寶山水庫及寶二水庫的逐日蓄水量，分析未來新竹科學園區缺水與減供風險，並做出合理解釋。

用水情境模擬初衷在於呈現不同的用水趨勢，而非執著於把蓄水量模擬得有多接近真實蓄水量，因為水庫的操作及農業用水配給是彈性調度，會視當時水庫的蓄水狀況而做調整，並無法得知未來的真實操作，因此在節點上的基本進出水操作以法規或現況來設定，依照本研究假設的兩種不同水資源分配情境，分別設定參數如下：

(一) 農業優先情境(Scenario A)

上坪堰水源先扣除下游保留水量，包含生態基流量、工業及民生保留量，其中全額滿足下游農業水權保留量之使用，剩餘水量若大於寶山、竹東圳管徑之最大取水量 2.4 CMS，則盡量取水；若未達 2.4 CMS，則先扣掉竹東圳灌區計畫用水量，若扣除後的水量大於寶山水庫剩餘庫容，則寶山水庫滿水位後停止取水，多餘水量引入寶二水庫；若扣除後的水量小於寶山水庫剩餘庫容，再以 1:3 的比例分別進入寶山水庫及寶二水庫，用水情境架構如圖 3-3 所示。分別設定參數如下：

1. 上坪流量站(F)：以 SWAT 分析模擬上坪流量站的每日模擬流量，資料單位為 CMS
2. 上坪堰入流量推估(Festimate)：利用面積比例法推估，上坪流量站流量乘以 1.051 即為上坪堰推估入流量（經濟部水利署北區水資源局，2013，2022）

$$F_{estimate} = F * 1.051 \quad (3-1)$$

3. 生態基流量(E)：為保護下游生態，因此須保留流量 $Q_{95}=2.1$ CMS 給予下游（經濟部水利署北區水資源局，2022）

$$E = 2.1 \text{ CMS} \quad (3-2)$$

4. 農業計畫用水量($S_{Agriculture}$)：採用 106-108 年頭前溪流域計畫用水量平均值（經濟部水利署北區水資源局，2022），相關數據參考附表 1

5. 工業及民生用水($S_{Indusrt\&domestic}$)：新竹第一、第二淨水廠最大引水量為 22 萬 CMD（經濟部水利署北區水資源局，2013），因新竹第一、第二淨水場原水來自頭前溪，上游又包含了油羅溪與上坪溪，需考量油羅溪匯入，故合流點至隆恩堰分攤 53.37%，隆恩堰至出海口分攤 47.56%（經濟部水利署北區水資源局，2022）

$$S_{Indusrt\&domestic} = 22 \text{ CMD} * 47.56\% \quad (3-3)$$

6. 下游保留水量(RW)：「農業+工業與民生保留水量」與生態基流量取最大值

$$RW = \text{Max}(S_{Agriculture} + S_{Indusrt\&domestic}, E) \quad (3-4)$$

7. 上坪堰引水條件：臺灣岩層岩性脆弱，每逢暴雨使集水區降水過多，河流挾帶大量泥沙至下游，導致水質濁度上升，這些濁度太高的水不能被利用，否則容易造成堰體或

水庫有泥沙淤積，為保護堰體，根據寶山第二水庫運用要點第二章引水利用運轉之第七點：「上坪堰取水口濁度達 3000 NTU 以上時，得視寶山水庫及本水庫蓄水量需求，適時關閉取水口停止引水」（經濟部主管法規查詢系統，2024b）。而濁度 3000 NTU 經計算大致對應流量為 60 CMS，因此訂定若上坪堰所測流量超過 60 CMS，上坪堰即停止引水（經濟部水利署北區水資源局，2013）

8. 水庫入流量：

(1) 管徑限制：寶山與竹東圳管徑(P_{BR})最大為 2.4 CMS、寶二管徑(P_{SBR})最大為 15 CMS

$$P_{BR} = 2.4 \text{ CMS} \quad (3-5)$$

$$P_{SBR} = 15 \text{ CMS} \quad (3-6)$$

(2) 運輸損失：水運輸時假設散失 10%，A 情境不考慮寶山水庫流失的水

本研究因寶山水庫及寶二水庫均為離槽式水庫，且水庫集水區面積小，因此不考慮水庫集水區降雨量及蒸發量。

9. 水庫庫容資料(致電台灣自來水股份有限公司第三區管理處寶山水庫及北區水資源局寶山第二水庫管理中心取得)：

(1) 寶山水庫可引水量(502.85 萬)：有效總蓄水量 503 萬減去呆水位容量 0.15 萬

(2) 寶二水庫可引水量(2253.13 萬)：有效總蓄水量 3147.18 萬減去呆水位容量 894.05 萬

起始計算日為 2021 年 1 月 1 日，根據台灣地區主要水庫蓄水量報告表（經濟部水利署防災資訊網，2024），當天寶山和寶二水庫之蓄水量分別為 150.52 萬及 1031.87 萬，此數字本研究假設為當日尚未進出水的狀態。

10. 寶山水庫及寶二水庫進水條件：經致電寶山淨水場詢問，平時基本上以 1:2 至 1:3 的比例做為從寶山水庫及寶二水庫的取水量，因此本研究假設扣掉下游保留量及竹東圳的水量低於寶山水庫和竹東圳的最大管徑限制，則以 1:3 比例分別流入寶山水庫及寶二水庫

11. 寶山水庫及寶二水庫出水量：引用賴耘盼等人（2024）利用寶山水庫及寶二水庫的歷史蓄水量及出水量資料以線性迴歸分析出的出水規則：

(1)寶山水庫及寶二水庫聯合出水量(萬噸/旬)=9.535 乘以竹科平均每日用水(14.6768 萬噸)加上 0.04 乘以(上旬聯合蓄水量)加上 54.31

$$Q_{out, BR \& SBR, t} = 9.535 \times \text{Average daily HSP water usage} + 0.04 \times V_{SBR, t-1} + 54.31 \quad (3-7)$$

(2)寶山水庫出水量(萬噸/旬)= 0.178 乘以上旬寶山蓄水量加上 1.637，假如上旬寶山蓄水量已滿，出水量為進水量與 0.178 乘以上旬寶山蓄水量加上 1.637 取最大值

$$Q_{out, BR, t} = 0.178 \times V_{BR, t-1} + 1.637 \quad (3-8)$$

(3)寶二水庫出水量(萬噸/旬)=聯合出水量減掉寶山出水量，假如上旬寶山蓄水量小於 50 萬噸，則出水量為聯合出水量

$$Q_{out, SBR, t} = 9.535 \times \text{Average daily HSP water usage} + 0.04 \times V_{SBR, t-1} + 54.31 - Q_{out, BR, t} \quad (3-9)$$

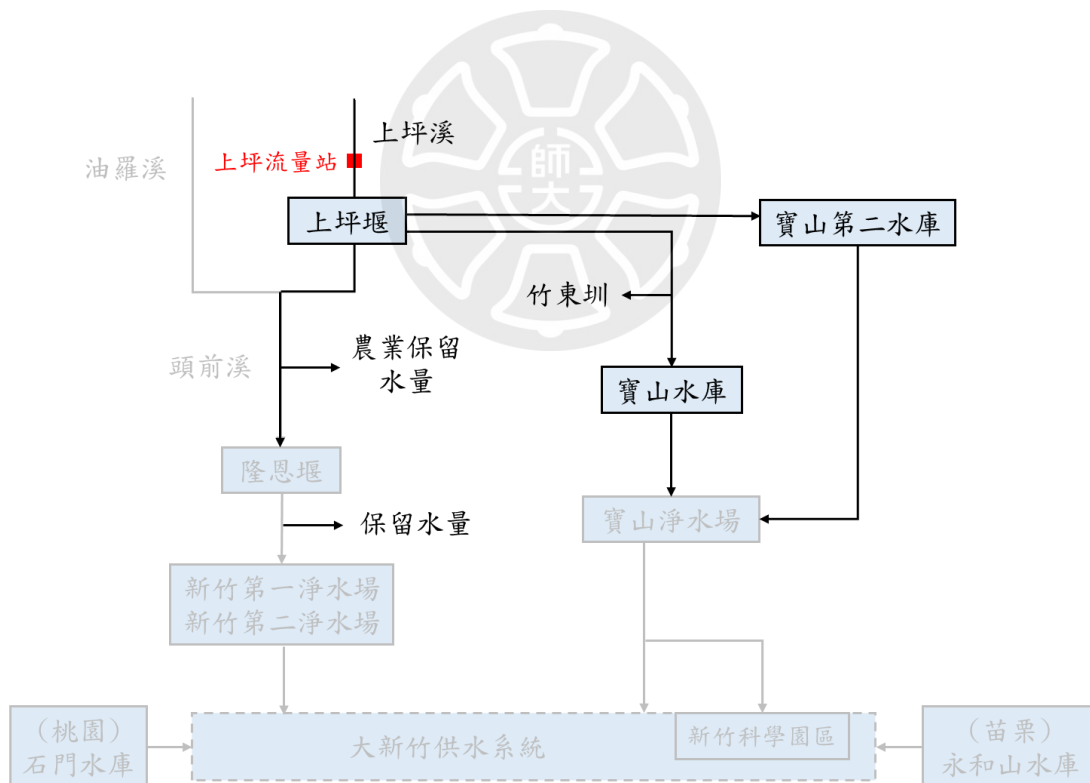


圖 3-3 農業優先情境

(二) 工業優先情境(Scenario B)

上坪堰水源先扣除下游保留水量，包含生態基流量、工業及民生保留量，接著剩餘水量分成兩部分，一部分先引入寶山水庫及寶二水庫蓄存，讓水庫盡量蓄滿水量為主，若還有剩餘，則另一部分再流至下游匯流為頭前溪並給予農業使用；引入水庫的水若大於寶山、竹東圳管徑之最大取水量 2.4 CMS，則盡量取水，若未達 2.4 CMS 且大於寶山水庫剩餘庫容，則寶山水庫滿水位後停止取水，多餘水量引入寶二水庫；若水量小於寶山水庫剩餘庫容，再以 1:3 的比例分別進入寶山水庫及寶二水庫，用水情境架構如圖 3-4 所示。分別設定參數如下：

1.上坪流量站(F)：以 SWAT 分析模擬上坪流量站的每日模擬流量，資料單位為 CMS

2.上坪堰入流量推估($F_{estimate}$)：利用面積比例法推估，上坪流量站流量乘以 1.051 即為上坪堰推估入流量（經濟部水利署北區水資源局，2013，2022）

$$F_{estimate} = F * 1.051 \quad (3-10)$$

3.生態基流量(E)：依「台灣地區水資源開發綱領計畫」內對於生態保留量之規劃，每 100 平方公里集水區需保留 0.135 CMS 之生態基流量，故於上坪堰需保留 0.3 CMS（經濟部水利署北區水資源局，2022）

$$E = 0.3 \text{ CMS} \quad (3-11)$$

4.工業及民生用水($S_{Industry\&domestic}$)：新竹第一、第二淨水廠最大引水量 22CMD（經濟部水利署北區水資源局，2013），因新竹第一、第二淨水場原水來自頭前溪，上游又包含了油羅溪與上坪溪，需考量油羅溪匯入，故合流點至隆恩堰分攤 53.37%，隆恩堰至出海口分攤 47.56%（經濟部水利署北區水資源局，2022），另外假設未來供水吃緊，優先把水供應至水庫，且可針對下游用水採取減供措施，根據水情燈號橙燈進入到減量供水時，基本上會以減供 20%為主，因此設定頭前溪下游之工業及民生保留水量未來減供 20%，這 20%由鄰近縣市水庫支援

$$S_{Industry\&domestic} = 22 \text{ CMD} * 47.56\% * 0.8 \quad (3-12)$$

5.下游保留水量(RW)：「工業與民生保留水量」與生態基流量取最大值

$$RW = \text{Max}(S_{\text{Indusrty\&domestic}}, E) \quad (3-13)$$

6.上坪堰引水條件：臺灣岩層岩性脆弱，每逢暴雨使集水區降水過多，河流挾帶大量泥沙至下游，導致水質濁度上升，這些濁度太高的水不能被利用，否則容易造成堰體或水庫有泥沙淤積，為保護堰體，根據寶山第二水庫運用要點第二章引水利用運轉之第七點：「上坪堰取水口濁度達 3000 NTU 以上時，得視寶山水庫及本水庫蓄水量需求，適時關閉取水口停止引水」(經濟部主管法規查詢系統，2024b)。而濁度 3000 NTU 經計算大致對應流量為 60 CMS，因此訂定若上坪堰所測流量超過 60 CMS，上坪堰即停止引水(經濟部水利署北區水資源局，2013)

7.水庫入流量：

(1)管徑限制：寶山與竹東圳管徑(P_{BR})最大為 2.4 CMS、寶二管徑(P_{SBR})最大為 15 CMS

$$P_{BR} = 2.4 \text{ CMS} \quad (3-14)$$

$$P_{SBR} = 15 \text{ CMS} \quad (3-15)$$

(2)運輸損失：水運輸時假設散失 10%，工業優先情境兩水庫均考慮

本研究因寶山水庫及寶二水庫均為離槽式水庫，且水庫集水區面積小，因此不考慮水庫集水區降雨量及蒸發量。

8.水庫庫容資料(致電台灣自來水股份有限公司第三區管理處寶山水庫及北區水資源局寶山第二水庫管理中心取得)：

(1)寶山水庫可引水量(502.85 萬)：有效總蓄水量 503 萬減去呆水位容量 0.15 萬

(2)寶二水庫可引水量(2253.13 萬)：有效總蓄水量 3147.18 萬減去呆水位容量 894.05 萬

起始計算日為 2021 年 1 月 1 日，根據台灣地區主要水庫蓄水量報告表(經濟部水利署防災資訊網, 2024)，當天寶山和寶二水庫之蓄水量分別為 150.52 萬及 1031.87 萬，此數字本研究假設為當日尚未進出水的狀態。

9.寶山水庫及寶二水庫出水量：引用賴耘盼等人(2024)利用寶山水庫及寶二水庫的歷史蓄水量及出水量資料以線性迴歸分析出的出水規則：

(1)寶山水庫及寶二水庫聯合出水量(萬噸/旬)= 9.535 乘以竹科平均每日用水(14.6768 萬

噸)加上 0.04 乘以(上旬聯合蓄水量)加上 54.31

$$Q_{\text{out,BR\&SBR,t}} = 9.535 \times \text{Average daily HSP water usage} + 0.04 \times V_{\text{SBR,t-1}} + 5.431 \quad (3-16)$$

(2)寶山水庫出水量(萬噸/旬)= 0.178 乘以上旬寶山蓄水量加上 1.637，假如上旬寶山蓄水量已滿，出水量為進水量與 0.178 乘以上旬寶山蓄水量加上 1.637 取最大值

$$Q_{\text{out,BR,t}} = 0.178 \times V_{\text{BR,t-1}} + 1.637 \quad (3-17)$$

(3)寶二水庫出水量(萬噸/旬)=聯合出水量減掉寶山出水量，假如上旬寶山蓄水量小於 50 萬噸，則出水量為聯合出水量

$$Q_{\text{out,SBR,t}} = 9.535 \times \text{Average daily HSP water usage} + 0.04 \times V_{\text{SBR,t-1}} + 54.31 - Q_{\text{out,BR,t}} \quad (3-18)$$

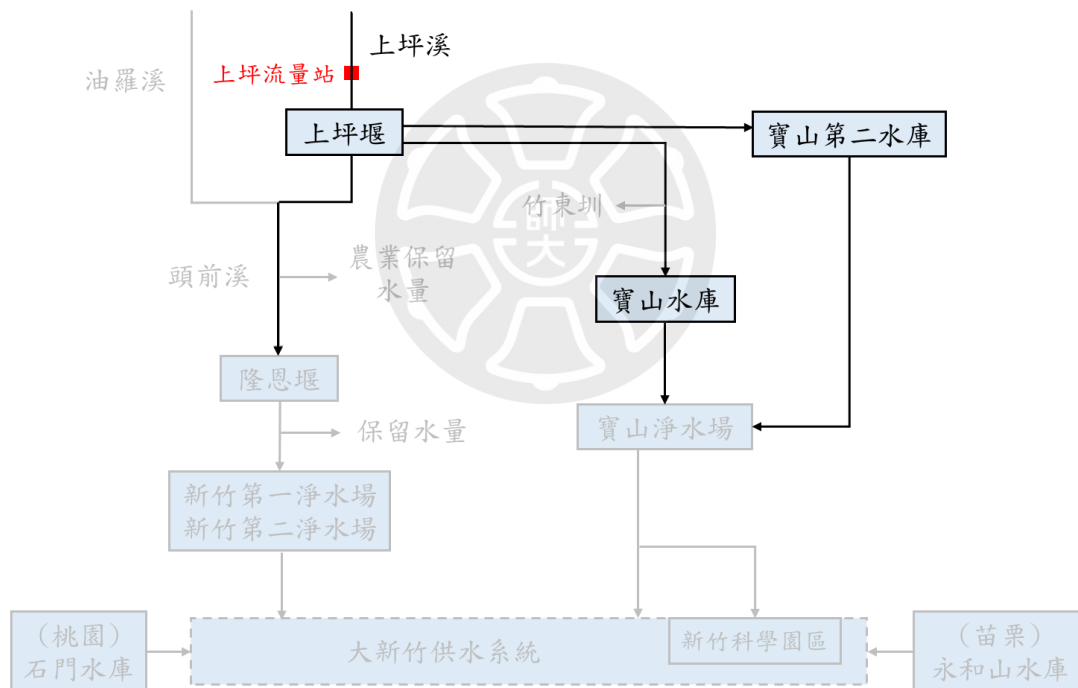


圖 3-4 工業優先情境

第三節 分析方法

一、物質流分析

本研究利用物質流分析方法，將目標物質為水，起點為上坪流量站，終點為寶山水庫及寶二水庫，最後計算出兩水庫蓄水量。設定以上的目的後，確定頭尾之間經過的所有節點，如攔河堰、圳、管線等設施位置，並將水流路線繪製成水的物質流分布圖。再來是蒐集各節點之間水的取用和損失參數，如生態基流量、圳的每旬農業取水量、頭前溪下游的工業及民生用水量、輸水管線損失比例等，將農業優先情境(A)及工業優先情境(B)的物質流分布圖上各節點用水參數整理出來後，即可建立兩用水情境的水流架構。將 SWAT 水文模式模擬出 2021-2100 年上坪流量測站之流量輸入兩用水情境的水流架構，即可獲得兩用水情境未來 RCP 下各 GCM/ESM 下的寶山水庫及寶二水庫模擬蓄水量。

二、缺水天數與比例

在定義缺水時，考量到水庫設計有所謂的呆水位，為水庫供水的「最低取水位」，當水庫出現水位低於呆水位，也就是低於放水口，代表水庫蓄水量極低，而無法使用重力的方式排水，因此將兩水庫蓄水量減去各自目前呆水位對應的呆水量，才是真正能被利用的水量，稱為「可引水量」。本研究將缺水定義為「當日進水工作和出水工作均完畢後之可引水量為 0」，缺水天數即為某時間段內符合上述定義的總天數。

本研究的水庫蓄水量計算自 2021-2100 年，其中將 2021-2024 年資料當作 Warm-up，讓蓄水量模擬資料趨於穩定，因此本研究採用 2025-2100 年的模擬資料進行分析。除此之外針對 21 世紀氣候變遷的推估，為了使模擬資料可以漸進看出未來的趨勢，本研究將 2025-2100 年區分成四個推估時期，分別為 2025-2040 年共 16 年，稱為短期(S)；2041-2060 年共 20 年，稱為中短期(M1)；2061-2080 年共 20 年，稱為中長期(M2)；2081-2100 年共 20 年，稱為長期(L)，以這四個推估時期來檢視未來的模擬缺水

情況，時期命名的部分因為 IPCC 或是 TCCIP 在時期上的命名都使用近未來、中未來、遠未來、世紀末稱呼，以本研究分期對應來說，短期為近未來，中短期為中未來，中長期為遠未來，長期則為世紀末。

三、減供天數與比例

為了檢視寶山水庫及寶二水庫之蓄水狀態，相關法規有規定其判定方式。根據寶山水庫運用要點（經濟部主管法規查詢系統，2024a）第一章總則第四點之本要點用詞第四款，及寶山第二水庫運用要點（經濟部主管法規查詢系統，2024b）第一章總則第五點之本要點用詞第四款，說明水庫運用規線之定義：「依寶山水庫與寶山第二水庫合計蓄水量劃定界線，以表示水庫蓄水量之豐枯情形。」其界線標準之訂定根據寶山水庫運用要點（經濟部主管法規查詢系統，2024a）第二章蓄水利用運轉之第八點，及寶山第二水庫運用要點（經濟部主管法規查詢系統，2024b）第三章蓄水利用運轉之第十一點定義：「依據寶山水庫與寶山第二水庫聯合運用規線(圖 3-5)執行，當合計蓄水量低於運用規線時，台水公司三區處得減量供水，北水局得依據區域水資源供需情況協商調整之。」

根據兩水庫聯合運用規線圖(圖 3-5)，若在某時間下兩水庫蓄水量低於其界限以下，即可能需要採取減量供水相關措施。因此本研究將減供定義為「當日進水工作和出水工作均完畢後，寶山水庫與寶山第二水庫的聯合蓄水量低於該日所對應之聯合運用規線蓄水量標準」，減供天數即為某時間段內符合上述定義的總天數。逐旬的聯合蓄水量規線值利用線性內插方式計算，詳細每旬聯合蓄水量規線數據可參考附表 2。

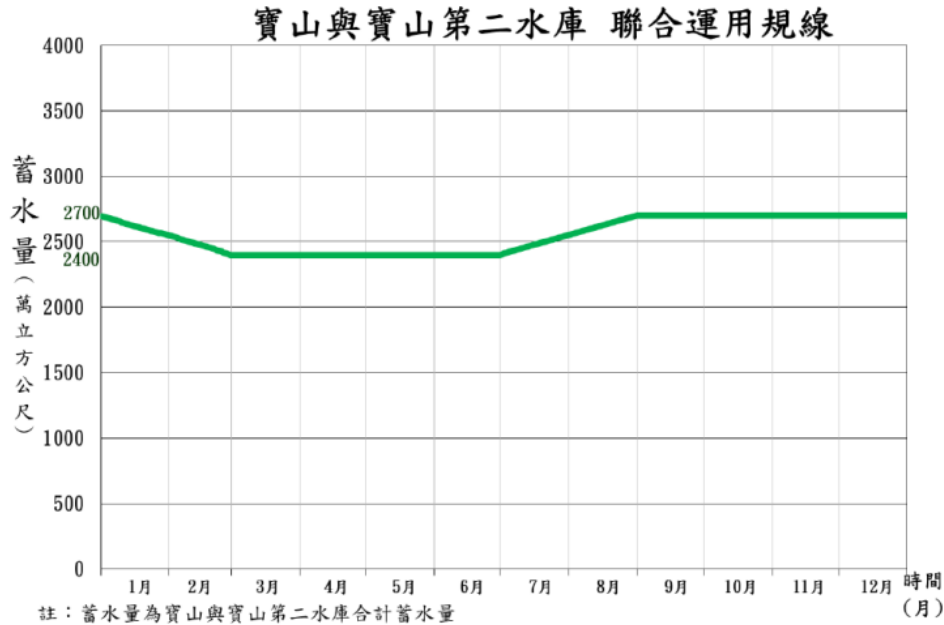


圖 3-5 寶山水庫與寶山第二水庫聯合運用規線

資料來源：寶山水庫運用要點（經濟部主管法規查詢系統，2024a）。

四、盒鬚圖

若是想在不同的 RCP 下分析上述四個時間段各月份未來缺水趨勢及變化，繪製盒鬚圖會是一個非常好的視覺化方式，因為模擬資料選用之 GCM/ESM 數量在四個 RCP 下總數就達到 34 個，資料量相當龐大，而盒鬚圖除了可組織大量離散型資料之外，又能用於比較數值資料的分布與範圍，若想要呈現更多維度下的變化，則可組織多個盒鬚圖製成複合盒鬚圖，因此為了能夠表現兩供水情境下各 RCP、各月份在四個未來時期的缺水天數比例變化趨勢，本研究將利用複合盒鬚圖來進行呈現。

盒鬚圖 (Box-and-whisker Plot) 是一種可以呈現一組資料內某變項分布與統計特徵的統計圖示或圖表，最初是由美國統計學家 John Tukey 提出的概念，根據圖 3-6 所示。盒鬚圖圖形包含了長方形(盒子)、兩側的線段(鬚鬚)以及線段外的點，其中代表了許多統計數據(Massart et al., 2005; 甘偉文，2008)：

1. 四分位數(Quartiles)：將資料中所有數值由小到大排列，並劃分成四等分，每一等分的分割點即稱為一個四分位數，因為有三個分割點，所以一共會有三個四分位數。

- 2.第一四分位數(Lower Quartile, Q1)：資料中所有數值由小到大排列位在第 25 百分位數的數字，位於盒子的下邊。
- 3.第二四分位數(Q2)：資料中所有數值由小到大排列位在第 50 百分位數的數字，又稱為中位數(Median)，位於盒子內的直線。
- 4.第三四分位數(Upper Quartile, Q3)：資料中所有數值由小到大排列位在第 75 百分位數的數字，位於盒子的上邊。
- 5.四分位數差距(Interquartile Range, IQR)：第三四分位數與第一四分位數的差距，又稱為四分位距，也就是盒子的長度，計算方式為 $Q3 - Q1$ ，用於評估資料的變異性或離散程度。
- 6.最小值(Minimum)：用於區分異常值的最小值，並不是該組資料的最大值，計算方式為 $Q3 + 1.5 * IQR$ ，為盒子下邊延伸出去的線段終點。
- 7.最大值(Maximum)：用於區分異常值的最大值，並不是該組資料的最大值，計算方式為 $Q1 - 1.5 * IQR$ ，為盒子上邊延伸出去的線段終點。
- 8.適度離群值(Mild Outliers)：資料內介於自第一四分位數往下和第三四分位數往上算起 1.5 倍 IQR 至 3 倍 IQR 的數值。
- 9.極端離群值(Extreme Outliers)：資料內超過自第一四分位數往下和第三四分位數往上算起 3 倍 IQR 的數值。
- 10.離群值(Outliers)：包含適度離群值與極端離群值。

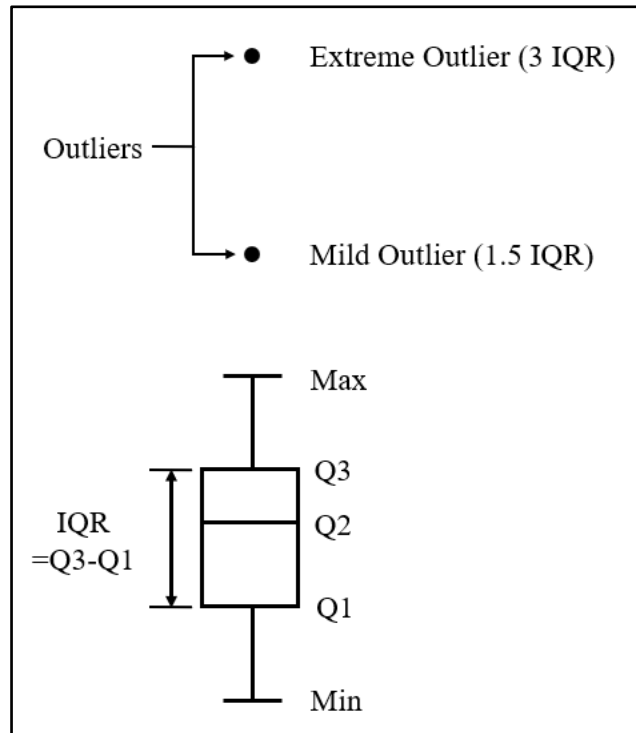


圖 3-6 盒鬚圖要素與其定義

在模擬出各模式下的水庫可引水量之後，即可利用函數算出各 GCM/ESM 的逐年逐月的缺水天數，然後區分成本研究劃分之四個時間段，並將各時期各 GCM/ESM 下逐月份缺水天數計算其平均數，即可計算出四個時間段的各 GCM/ESM 下 1-12 月份的缺水天數平均值。以 2041-2060 年的 RCP2.6 為例，在 1 月份的模擬缺水天數資料就有 20 年乘以 8 個 GCM/ESM 模式，共 160 筆資料，接下來 20 年再取平均數，也就是除以 20 後，即剩下每個月份各 8 個 GCM/ESM 的缺水天數資料，以此類推。

在複合盒鬚圖製作部分，設計成可同時呈現某一供水情境各 RCP、各時期、各月份共三個維度的缺水天數分布狀況，來檢視模擬未來缺水狀況的變化和趨勢。而在缺水天數部分，因為各月份天數不一致，為了在同一範圍內比較，因此把當月缺水天數除以當月天數，將其轉換成百分比比例，稱為缺水天數比例，以下簡稱為「缺水比例」，例如六月份有 30 天，在某 GCM/ESM 下的缺水天數為 3 天，該缺水比例即為 0.1，以此類推。整理完缺水比例資料後，利用 Python 繪製出各供水情境的缺水比例複合盒鬚圖。以圖 4-4 為例，在農業優先情境下的複合盒鬚圖上方標示區分成四個

RCP，側邊則區分成四個時期，因此共有 16 個盒鬚圖組成，而每個盒鬚圖的橫軸為月份，縱軸為缺水比例，範圍為 0-1，其中每個盒子有各自 RCP 下的各月份的 GCM/ESM 缺水資料，並可顯示各月份資料中的最小值、第一四分位數、中位數、第三四分位數、最大值、離群值(溫和離群值與極端離群值)。

減供天數的部分同樣以比例的方式用複合盒鬚圖呈現，步驟與產製缺水天數的過程相同，將 2021-2024 年資料當作 Warm-up，實際分析時間段為 2025-2100 年，將寶山及寶二水庫的每日蓄水量加總，挑選出各月份低於聯合運用規線值的天數，再根據各月份的天數計算出其減供天數比例，以下簡稱「減供比例」。而推估時期的劃分同缺水比例做法，分別為 2025-2040 年共 16 年，稱為短期(S)；2041-2060 年共 20 年，稱為中短期(M1)；2061-2080 年共 20 年，稱為中長期(M2)；2081-2100 年共 20 年，稱為長期(L)；最後即可利用這些條件產製出在兩供水情境各 RCP、各時期、各月份下的減供比例，並針對趨勢變化及分布狀況進行分析。

五、寶二水庫擴容工程

經濟部水利署北區水資源局（2022）針對新竹地區用水量進行檢討，發現寶二水庫在豐水期有滿庫溢流之情形，年中滿庫期間最長達到 4.5 個月，代表上坪溪還有剩餘水量可利用，但受限於水庫容量有限而未能充分運用。近年新竹地區需水量逐年增加，受到氣候變遷及降雨不均影響，幾乎年年需抗旱，且枯水期連續不降雨天數有增加的趨勢，易出現供水吃緊狀況，若能利用開源的概念，將既有水庫擴大蓄水量，將會是利用頭前溪剩餘水量最有效且衝擊最小之方案。此工程經致電寶二水庫管理中心詢問得知預計完工日期大約在 2024 年 6 月底，屆時寶二水庫溢洪道堰頂預計加高 1.35 公尺，總庫容增加 192 萬立方公尺，雖然此項變更為小工程，但未來遭遇乾旱事件時，可提供更彈性的水資源調配空間，增加新竹地區水資源的調蓄及供給能力（經濟部水利署北區水資源局，2021），因此本研究在情境設定上會考慮擴容後的水庫蓄水量進行模擬，設定擴容後寶二水庫蓄水量增加 192 萬噸，自 2024 年 7 月 1 日放入估算。

六、研究流程

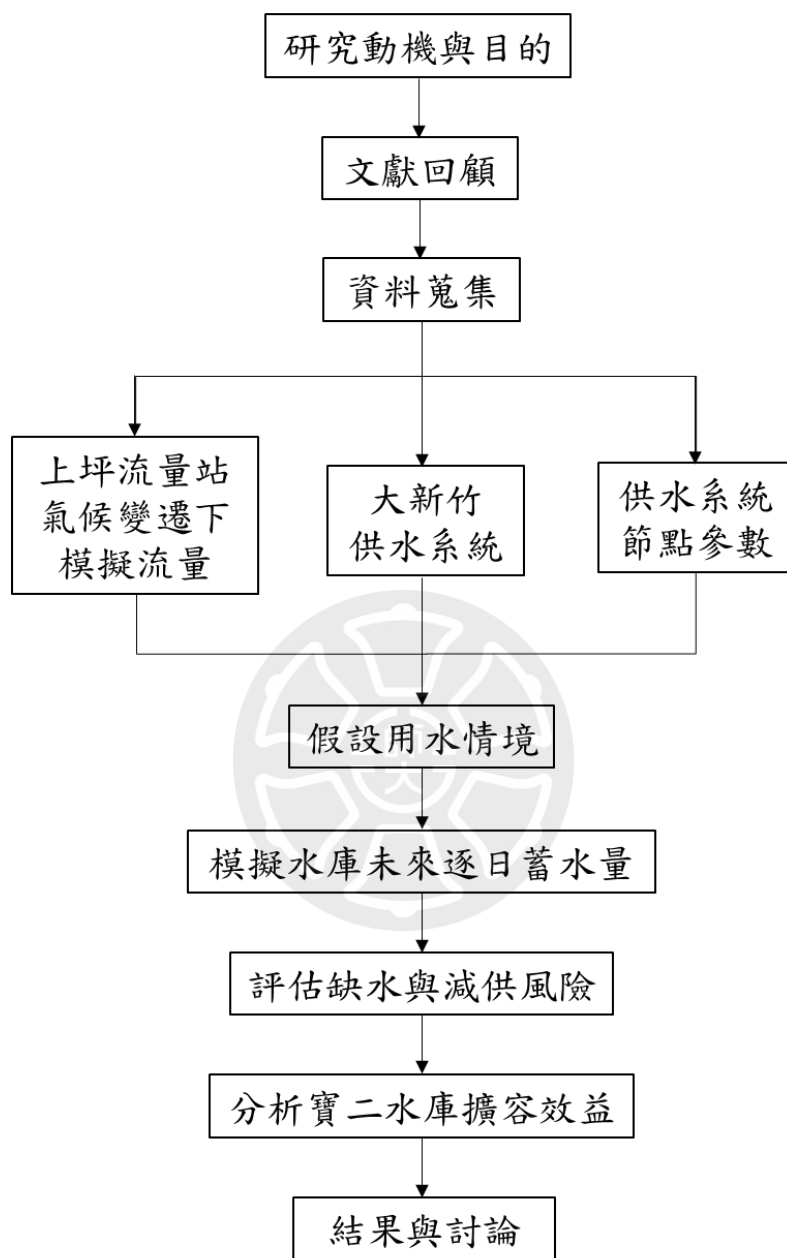


圖 3-7 研究流程圖

第四章 研究結果與討論

第一節 流量資料分析

一、流量數值分析

本研究使用李宗祐（2022）利用 SWAT 水文模式模擬 AR5 下 4 種 RCP 情境共 34 種 GCM/ESM 情境(RCP2.6 共 8 種、RCP4.5 共 10 種、RCP6.0 共 6 種、RCP8.5 共 10 種)上坪流量站 2021-2100 年共 80 年的逐日流量資料。有關於分析流量資料特性的方式，首先須劃分基期及未來各時期的時間段，基期為 1987-2005 年共 19 年，未來時期以 20 年劃分，短期為 2021-2040 年，中短期為 2041-2060 年，中長期為 2061-2080 年，長期為 2081-2100 年。而流量數值的計算方式，以 RCP2.6 短期(S)的 1 月為例，計算 RCP2.6 下的 8 個 GCM/ESM 的短期共 20 年之 1 月平均流量取 20 年的平均數，再取其中位數作為代表，以此類推。

從流量表(表 4-1)的基期檢視，上坪流量站在夏季 6 月至 9 月非常濕潤，流量可達到 14 CMS 以上，而到了 10 月，可發現流量比起 9 月要迅速下降至 6 CMS，整整相差了 10 CMS，冬季 11 月至 1 月為最乾的月份，流量大致為 3 CMS，接下來 2 月春雨來臨，流量開始上升至 3 月，4 月些微下降，5 月梅雨季到來，流量開始一路上升至 6 月，因此上坪溪的乾季大致為 10 月至 4 月，濕季為 5 至 9 月，以下乾季及濕季月份即照此定義說明。

二、流量變化率分析

若想要與基期相比未來的流量變化程度，可以利用變化率表示，有關於製作流量變率表的方式，首先須劃分基期及未來各時期的時間段，未來時期劃分同流量數值表(表 4-1)。而變化率(表 4-2)的計算方式，以 RCP2.6 的短期(S)1 月為例，是將 RCP2.6 的 8 個 GCM/ESM 的短期(2021-2040)共 20 年之 1 月平均流量取 20 年平均後減去各自

GCM/ESM 的基期(1987-2005)1 月平均流量，再除以各自 GCM/ESM 的基期 1 月平均流量並乘以 100%，所得到的 8 個 GCM/ESM 之變化率取其中位數為代表，以此類推。

根據此變化率表(表 4-2)，可了解未來 RCP 下各月份不同時期與基期相比的變化，而根據臺灣雨量的氣候特徵，可將全年劃分為冬季(12 月至隔年 1 月)、春雨(2 至 4 月)、梅雨(5 至 6 月)、夏季(7 月至 9 月)及秋季(10 至 11 月)等五個時期（交通部中央氣象署，2024），以下即利用此劃分方式說明。從濕季可以觀察到，6-9 月為梅雨季末期和夏季，未來的整體變化率幾乎是增加的，尤以 8 月的變化率增加幅度最高。到了秋季，可觀察到變化率開始有負值出現，另外也發現變化率正值增加的幅度也比 6-9 月來的小，其中 10 月的變化率負值在各時期分布的比 11 月還要多，到了冬季 12 月和 1 月的狀況有很大的不同，12 月是類似秋季的呈現，而 1 月則是在各時期呈現變化率正值的分布。最後談到 2-5 月，也就是春雨和梅雨初期，流量大致比基期要來的少，就算變化率正值，幅度也不高，其中若從 RCP 角度觀察，可將 2-5 月的變化趨勢分為兩類，RCP2.6 及 RCP4.5 下大致為變化率增加，而 RCP6.0 及 RCP8.5 下流量大致與基期相比要來的少，變化率減少幅度又以 3 月和 4 月最嚴重。總體而言 6-9 月及 1 月相較現況流量大致呈現增加的趨勢，而 10-12 月及 2-5 月的流量相較現況來說，大致呈現減少的趨勢，因此從整年的變化來看，可發現未來會呈現乾季越乾，濕季越濕的趨勢。

各月份未來流量變化率中可觀察到有些較為極端的變化，流量減少變化率超過 20%有五種狀況，分別為 10 月 RCP4.5 下中長期的-25.2%，10 月 RCP6.0 下中短期的-34.1%、5 月 RCP8.5 下長期的-26.9%、4 月 RCP6.0 下中短期-23.2%及中長期的-27.9%。流量增加變化率超過 60%則有四種狀況，全部都是在 8 月，分別為 RCP2.6 下中短期的 65.3%、RCP4.5 下中短期 67.8%和中長期的 63.4%，以及 RCP8.5 下長期的 65.0%。

表 4-1 RCP 情境下各時期月份模擬流量

0~5 CMS	5~10 CMS	10~15 CMS	15~20 CMS	20~25 CMS	25~30 CMS
---------	----------	-----------	-----------	-----------	-----------

單位：Baseline 基期流量及 RCP 情境下各時期流量單位為 CMS

		Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
Baseline		3.90	5.31	9.00	8.44	11.89	18.54	14.30	17.22	16.01	6.02	2.99	3.01
RCP 2.6	S	3.89	5.95	8.67	7.93	10.59	19.58	17.24	23.67	17.67	6.76	4.07	2.90
	M1	4.22	5.37	8.23	8.31	13.53	21.48	15.91	28.61	20.76	6.74	3.42	3.12
	M2	4.42	5.31	8.38	10.48	12.76	19.73	16.75	29.33	20.93	7.63	3.50	3.26
	L	4.51	6.42	9.01	9.37	12.68	21.60	14.02	23.17	19.24	5.82	3.90	2.91
RCP 4.5	S	4.98	6.40	10.47	9.70	14.29	20.82	15.95	29.03	15.36	6.81	2.82	3.14
	M1	5.02	6.36	9.99	7.88	14.06	21.24	15.98	29.27	16.94	5.12	3.29	3.20
	M2	5.27	5.52	10.10	8.54	14.01	24.19	17.85	29.61	21.04	5.00	3.03	3.00
	L	3.98	5.95	9.29	10.19	16.27	23.19	19.00	27.16	20.45	4.76	3.06	3.40
RCP 6.0	S	4.71	5.99	10.21	8.63	12.43	18.60	16.97	24.46	16.68	5.52	3.16	2.77
	M1	4.23	5.01	7.60	6.65	10.67	22.81	20.70	28.29	22.50	3.97	3.17	3.25
	M2	4.34	5.30	8.85	7.02	11.76	18.73	19.55	29.77	23.82	6.93	3.30	2.74
	L	4.28	5.37	9.19	7.19	11.38	21.83	18.12	25.97	20.99	6.41	3.65	2.72
RCP 8.5	S	4.62	5.75	8.85	8.53	12.29	22.00	16.82	25.95	20.75	6.10	3.71	3.27
	M1	4.10	4.57	7.51	6.69	11.52	23.25	14.84	22.15	18.93	6.24	3.30	2.92
	M2	4.26	5.25	8.03	7.87	14.06	20.64	17.99	26.60	25.04	6.05	3.75	3.44
	L	4.64	5.35	7.17	7.40	14.24	26.80	19.59	29.14	19.14	7.06	2.95	3.18

表 4-2 RCP 情境下各時期月份模擬流量變化率

-40%~-20%	-20%~0%	0%	0%~20%	20%~40%	40%~60%	60%~80%
-----------	---------	----	--------	---------	---------	---------

單位：RCP 情境下各時期變化率單位為%

		Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
RCP 2.6	S	31.3%	11.7%	-0.1%	7.1%	-10.2%	5.7%	20.7%	34.1%	9.4%	18.4%	34.3%	3.4%
	M1	8.7%	1.7%	-12.7%	0.8%	7.2%	18.5%	23.5%	65.3%	20.7%	3.0%	15.5%	7.2%
	M2	16.2%	2.4%	-1.3%	25.2%	3.5%	0.3%	45.9%	34.5%	25.0%	29.0%	9.2%	14.4%
	L	8.6%	20.6%	2.2%	1.7%	7.2%	32.7%	-2.4%	15.0%	35.7%	-3.2%	27.7%	-1.0%
RCP 4.5	S	29.8%	12.1%	16.0%	16.7%	13.3%	6.5%	21.0%	54.5%	-10.5%	7.0%	-10.5%	8.7%
	M1	25.9%	23.7%	8.9%	-3.5%	4.5%	30.5%	37.4%	67.8%	17.3%	-11.9%	23.6%	0.1%
	M2	34.4%	6.0%	16.5%	13.3%	16.0%	41.5%	24.3%	63.4%	31.0%	-25.2%	1.8%	8.3%
	L	11.2%	13.4%	1.8%	29.8%	20.5%	39.9%	54.4%	38.7%	12.0%	-6.4%	1.8%	14.4%
RCP 6.0	S	20.3%	12.1%	6.3%	-5.1%	-2.0%	1.0%	16.4%	30.0%	-9.4%	-16.1%	3.1%	-5.3%
	M1	6.1%	-8.8%	-17.0%	-23.2%	-9.4%	17.4%	44.4%	36.5%	26.6%	-34.1%	-0.9%	9.6%
	M2	10.2%	-6.1%	-2.5%	-27.9%	-3.9%	13.4%	36.8%	55.0%	31.7%	24.7%	5.2%	-6.5%
	L	7.0%	-2.3%	-3.8%	-19.2%	-15.3%	28.3%	31.2%	46.5%	19.7%	16.7%	20.7%	-9.7%
RCP 8.5	S	24.6%	6.8%	-5.6%	3.0%	-1.3%	31.5%	22.7%	54.9%	35.3%	2.4%	12.7%	15.3%
	M1	0.4%	-14.0%	-19.7%	-19.2%	-3.1%	32.2%	21.0%	35.9%	26.8%	-3.8%	2.5%	-1.4%
	M2	16.7%	-1.5%	-17.7%	-9.8%	17.0%	13.9%	35.6%	48.5%	33.5%	-0.4%	20.5%	5.6%
	L	14.6%	1.0%	-26.9%	-17.1%	19.8%	51.2%	35.7%	65.0%	14.3%	0.5%	0.2%	4.1%

第二節 用水情境驗證分析

本研究針對水庫用水架構進行驗證分析，以此來檢視農業優先及工業優先用水架構是否符合歷史水庫操作趨勢，因用水架構最後產製出的是水庫的蓄水量，因此將利用水庫歷史蓄水量與用水架構模擬蓄水量進行比較，以檢視兩者趨勢是否相似。

本研究利用 2008-2018 年上坪流量站歷史逐日流量，輸入至農業優先及工業優先用水架構中，即可得到兩架構模擬蓄水量，對應時間的歷史蓄水量資料來自台灣地區主要水庫蓄水量報告表（經濟部水利署防災資訊網，2024），其中 2008-2011 年共 4 年時間做為資料 Warm-up，真正分析的時間段為 2012-2018 年，資料單位為 1 天 1 筆。分析方式除了繪製歷史及模擬蓄水量的折線圖(圖 4-1、圖 4-2)之外，也使用決定係數及均方根誤差來度量(表 4-3)，決定係數 (Coefficient of determination, R^2)在統計學中用於計算應變數的變異中可以被自變數解釋的部分所占之比例，以此來判斷迴歸模型的解釋力，決定係數 R^2 數字介於 0-1 之間，若數字越接近 1，即代表此迴歸模型的適配性越高、越好。均方根誤差 (Root Mean Square Error, RMSE)是一種用來衡量模型預測值與觀測值間差異(殘差)程度的相對性指標，必須與其他模型比較，才能判斷出模型的好壞程度，RMSE 值越小表示模型誤差越小、越準確。

在線性迴歸分析(表 4-3)中，設定自變數 x 為用水情境下水庫模擬蓄水量，應變數 y 為水庫歷史蓄水量。首先檢視在農業優先情境下，寶山水庫模擬蓄水量與其歷史蓄水量的線性迴歸分析， R^2 值為 0.3443，RMSE 值是 162.69；寶二水庫的 R^2 值為 0.4799，RMSE 值是 1008.09；工業優先情境下，寶山水庫模擬蓄水量與其歷史蓄水量的線性迴歸分析， R^2 值為 0.3246，RMSE 值為 55.54；寶二水庫的 R^2 值為 0.8077，RMSE 值為 319.57。由分析結果可見兩用水情境下的寶二水庫 R^2 值均大於寶山水庫，RMSE 值兩水庫在工業優先情境均比農業優先情境低，總結來說工業情境下的寶二水庫用水架構在針對寶二水庫歷史蓄水量的表現較佳，有較好的解釋力，因此本研究在缺水天數比例中選擇以寶二水庫進行呈現。

表 4-3 2012-2018 年 AB 用水情境下水庫歷史與模擬蓄水量之線性迴歸分析

	指標	農業優先情境(A)	工業優先情境(B)
寶山水庫	迴歸式	$y = 0.2554x + 379.48$	$y = 0.6255x + 170.52$
	R^2	0.3443	0.3246
	RMSE	162.69	55.54
寶二水庫	迴歸式	$y = 0.37x + 1940.7$	$y = 1.1365x - 571.97$
	R^2	0.4799	0.8077
	RMSE	1008.09	319.57

註：x 代表用水情境下水庫模擬蓄水量，y 代表水庫歷史蓄水量。

若根據兩水庫的歷史蓄水量與兩用水情境模擬蓄水量折線圖(圖 4-1、圖 4-2)來檢視趨勢變化狀態，可發現三個重點。第一是在整體趨勢下，歷史的蓄水量在豐水期時蓄水量為最高，到枯水期後期則逐漸降低，而農業優先架構及工業優先架構的模擬蓄水量的變化趨勢大致與實際狀況相同，而上升及下降幅度則會因為架構設定參數的不同而有所差異，農業優先架構因為是農業水權優先，因此蓄水量下降較快，而工業優先架構是水庫優先蓄水，因此蓄水量下降幅度較慢。第二是在同一時間下，以整體表現來說，若排除三者均為滿庫時，工業優先情境的蓄水量最高，歷史蓄水量次之，農業優先情境的蓄水量則是最低，因為農業優先情境與工業優先情境都是極端的用水情境，前者農業全年給水，後者以水庫蓄水為優先，而現況的用水則是相對較彈性的操作，例如在豐水期時農業優先取水，若遇到缺水期或是嚴重乾旱的話，耕地部分就會有計畫性的停灌，或是在上坪堰到寶山水庫及寶二水庫的管線輸水，管徑有雖然最大限制，也會根據上坪堰的引水量狀況而採取不同的管徑流速等等。總體而言堰的引水與水庫的進水及出水操作事實上為彈性調度，會根據實際現況而有調整的空間，並非隨時都以定值參數進行操作。而兩用水架構本來就是以最為極端的配水方式進行模擬，蓄水量自然會是最高和最低，而歷史蓄水量則會夾在兩者之間，若以本研究架構來說，未來實際蓄水量的變化可能會是在兩架構折線之間的範圍。第三是歷史蓄水量分別與兩用水架構蓄水量互相比較，工業優先架構比起農業優先架構，趨勢更接近實際的水庫操作，也就是說過去水庫操作上較偏向工業優先情境。

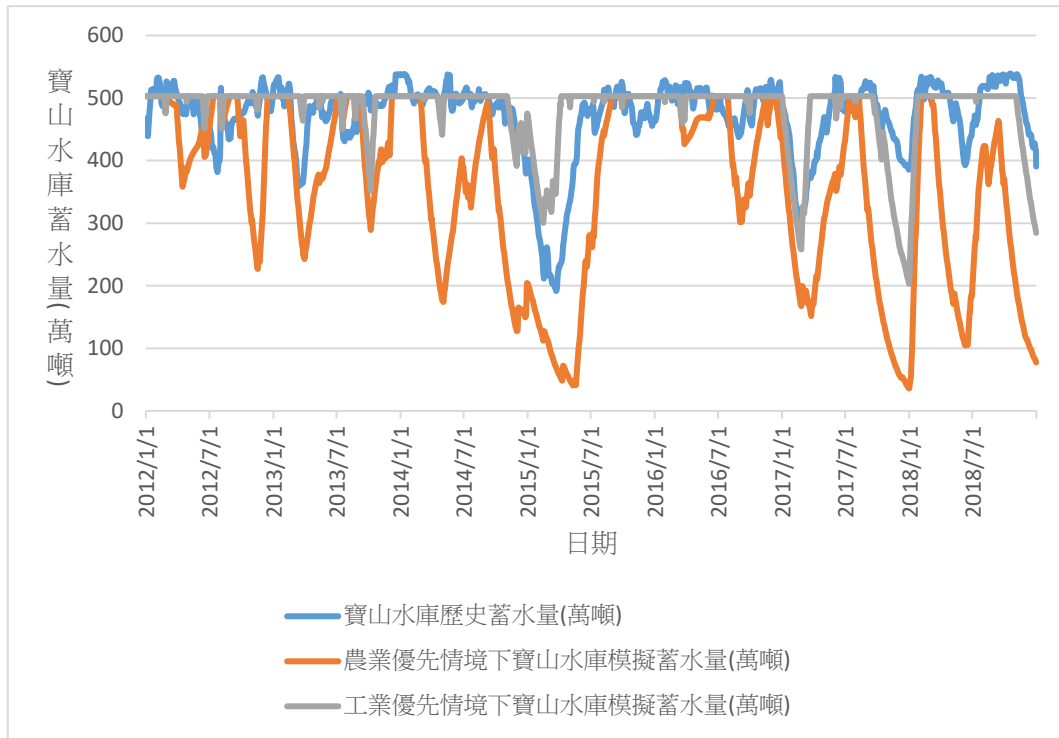


圖 4-1 2012-2018 年寶山水庫歷史蓄水量與 AB 用水情境模擬蓄水量

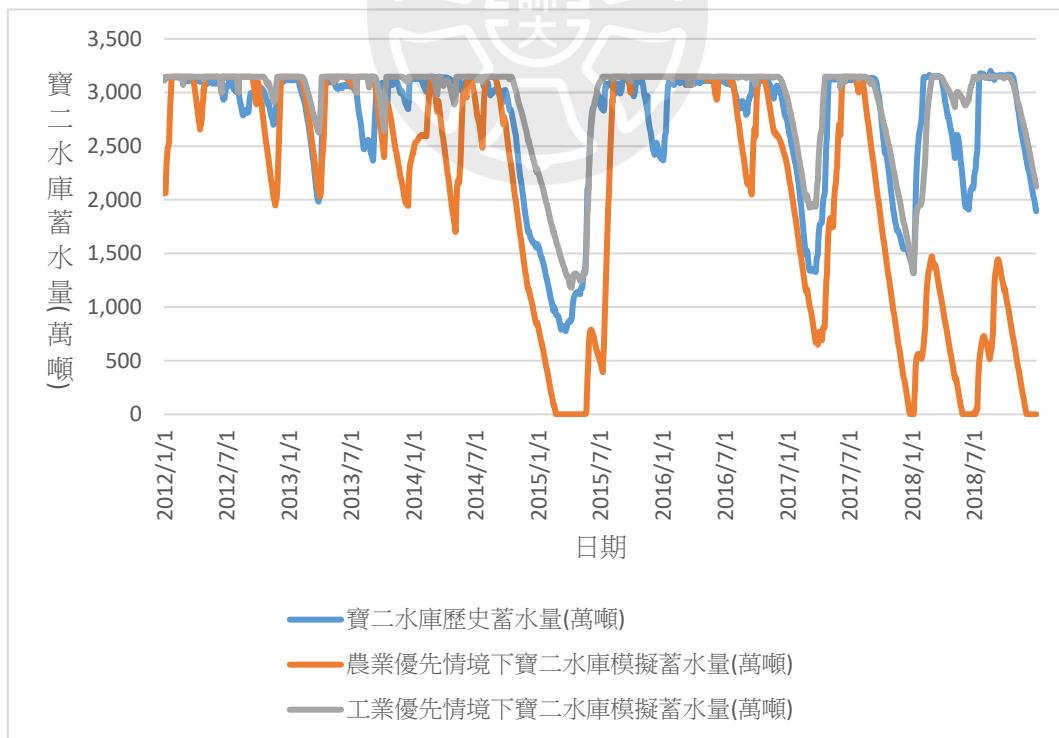


圖 4-2 2012-2018 年寶二水庫歷史蓄水量與 AB 用水情境模擬蓄水量

兩種用水情境互相比較，寶二水庫的解釋力均高於寶山水庫，其中又以工業優先情境下的寶二水庫 R^2 值最高，解釋力高達八成，且 RMSE 值最低，誤差最小，因此本研究以寶二水庫為目標進行缺水比例與減供比例之分析，較能表現出未來的缺水與減供狀況。

除此之外，目前新竹科學園區持續有擴廠計畫，其中進駐廠商為製造 2 奈米晶片的半導體企業，未來用水量勢必大幅攀升，再加上氣候變遷下乾旱頻率逐漸增加，未來的用水分配狀況可能會趨向工業優先情境的設定，因此新竹科學園區廠商可以主要參考本研究針對工業優先情境下的缺水及減供示警月份與建議策略。

新竹地區因為擁有高科技產業重鎮之稱的新竹科學園區，政府考量到目前企業投資持續大量注入、用水量快速成長以及氣候變遷帶來的缺水風險與衝擊，因此規劃了一系列的水資源備援工程，如海淡廠、再生水、雙向備援管線等，以強化新竹地區的水資源供應穩定性與備援率。經濟部（2020）推動桃園—新竹備援管線工程計畫，工程執行期程為 107 年至 110 年 6 月底，於 2021 年 2 月提前完工，使桃園水資源可跨區支援新竹地區，目前備援能力為每日最大 20 萬噸。經濟部水利署（2023）目前推動新竹海水淡化廠工程計畫，自 2027 年開始試運轉，未來依據水情豐枯情形，每日最大可供應 10 萬立方公尺的海淡水。經濟部水利署（2022）推動石門水庫至新竹聯通管工程計畫，以石門水庫原水支援新竹寶二水庫及竹東圳，工程執行期程自 111 年 1 月至 115 年 12 月，自 2027 年開始供應，未來目標為提高石門水庫原水支援至新竹地區每日最大 30 萬噸。科技部新竹科學園區管理局（2021）在竹科寶山用地第 2 期擴建計畫中，規劃於廠區供應再生水，自 114 年起每日供應 3 萬噸，另外竹北水資中心與客雅水資中心也會聯合供應新竹科學園區，前者自 116 年每日供應 2.5 萬噸，後者自 117 年與 119 年起分別可供應 3 萬及 4.5 萬噸，因此總計 2030 年將可達到每日供應 10 萬噸再生水。未來若想要分析這些非常態調適及備援措施對新竹科學園區帶來的效益，可待詳細的運用及調度規則釋出後，再分析這些措施的實際收益及評估能夠減少的缺水與減供風險。

第三節 缺水天數比例

一、農業優先情境(A)

若執行寶二水庫擴容前的農業優先情境(A)，模擬基期寶二水庫缺水狀況，從盒鬚圖(圖 4-3)中可以發現：

在基期的缺水比例中位數表現，在 2 月時缺水比例最高，9 月則是缺水比例最低，月份缺水比例變化趨勢自 9 月最低開始逐月提高，到 2 月最高峰後比例開始下降至 9 月最低點。在各月份的中位數缺水比例部分，1-2 月的缺水比例介於 0.8-1.0，12、3 月的缺水比例介於 0.6-0.8，4-5 月及 11 月的缺水比例介於 0.4-0.6，6-10 月的缺水比例介於 0.2-0.4。而各月份盒子的 IQR 表現較一致，各月份均不超過 0.2 的範圍；5、7、10 月有離群值出現。

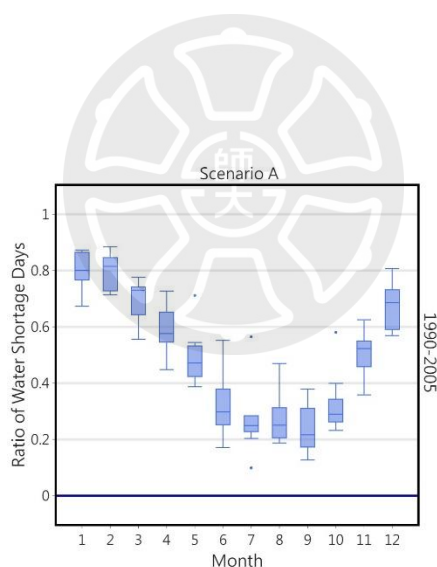


圖 4-3 農業優先情境寶二水庫擴容前基期缺水比例盒鬚圖

若執行寶二水庫擴容前的農業優先情境(A)，模擬未來氣候變遷下寶二水庫缺水狀況，從複合盒鬚圖(圖 4-4)中可以發現：

(一) 2025-2040 短期(S)：

在 RCP2.6 情境下，缺水比例的中位數表現，在 2 月時缺水比例最高，9 月則是缺水比例最低，月份缺水比例變化趨勢自 9 月最低開始逐月提高，到 2 月最高峰後比例開始下降至 9 月最低點。在各月份的中位數缺水比例部分，12-3 月的缺水比例介於 0.6-0.8，4-6 月及 11 月的缺水比例介於 0.4-0.6，7-10 月的缺水比例介於 0.2-0.4。而各月份盒子的 IQR 表現較一致，各月份均不超過 0.2 的範圍；無離群值出現。

在 RCP4.5 情境下，缺水比例的中位數表現，在 1 月時缺水比例最高，7 月則是缺水比例最低，月份缺水比例變化趨勢自 7 月最低開始逐月提高，到 1 月最高峰後比例開始下降至 7 月最低點。在各月份的中位數缺水比例部分，11-2 月的缺水比例介於 0.8-1.0，3 月及 10 月的缺水比例介於 0.6-0.8，4-9 月的缺水比例介於 0.4-0.6。而各月份盒子的 IQR 表現較一致，各月份均不超過 0.2 的範圍；2、6、9、11 月有離群值出現。

在 RCP6.0 情境下，缺水比例的中位數表現，在 12 月時缺水比例最高，6 月則是缺水比例最低，月份缺水比例變化趨勢自 6 月最低開始逐月提高到 8 月，9 月些微下降，10 月開始上升至到 12 月達最高峰後，比例再逐月下降至 6 月最低點。在各月份的中位數缺水比例部分，11-2 月的缺水比例介於 0.8-1.0，3-5 月、8 月及 10 月的缺水比例介於 0.6-0.8，6-7 月及 9 月的缺水比例介於 0.4-0.6。而各月份盒子的 IQR 表現較一致，各月份均不超過 0.2 的範圍；2、5-6、8-12 月有離群值出現。

在 RCP8.5 情境下，缺水比例的中位數表現，在 1 月時缺水比例最高，9 月則是缺水比例最低，月份缺水比例變化趨勢自 9 月最低開始逐月提高，到 1 月最高峰後比例開始下降至 9 月最低點。在各月份的中位數缺水比例部分，1-2 月的缺水比例介於 0.6-0.8，3-5 月及 12 月的缺水比例介於 0.4-0.6，6-7 月、10-11 月的缺水比例介於 0.2-0.4，9 月則是 0-0.2。而各月份盒子的 IQR 表現可分成兩類，2-4 月 IQR 超過 0.2 的範圍，其餘月份皆不超過 0.2；無離群值出現。

(二) 2041-2060 中短期(M1)：

在 RCP2.6 情境下，缺水比例的中位數表現，在 1 月時缺水比例最高，9 月則是缺水比例最低，月份缺水比例變化趨勢自 9 月最低開始逐月提高，到 1 月最高峰後比例開始下降至 9 月最低點。在各月份的中位數缺水比例部分，1-4 月的缺水比例介於 0.6-0.8，5 月及 12 月的缺水比例介於 0.4-0.6，6-8 月及 10-11 月的缺水比例介於 0.2-0.4，9 月則是 0-0.2。而各月份盒子的 IQR 表現可分成兩類，2-5 月 IQR 超過 0.2 的範圍，其餘月份皆不超過 0.2；3、12 月有離群值出現。

在 RCP4.5 情境下，缺水比例的中位數表現，在 1 月時缺水比例最高，6 月則是缺水比例最低，月份缺水比例變化趨勢自 6 月最低開始提高至 7 月，8 月下降，9 月開始上升至 1 月最高峰後再開始下降至 6 月最低點。在各月份的中位數缺水比例部分，12-2 月的缺水比例介於 0.8-1.0，3、4、11 月的缺水比例介於 0.6-0.8，5-10 月的缺水比例介於 0.4-0.6。而各月份盒子的 IQR 表現，可發現除了 12 月不超過 0.2 的範圍之外，其餘月份均超過 0.2；無離群值出現。

在 RCP6.0 情境下，缺水比例的中位數表現，在 12 月時缺水比例最高，7 月則是缺水比例最低，月份缺水比例變化趨勢自 7 月最低開始提高至 8 月，9 月下降，10 月開始上升至 1 月最高峰後再開始下降至 7 月最低點。在各月份的中位數缺水比例部分，11-4 月的缺水比例介於 0.8-1.0，3-5 月、5 月及 10 月的缺水比例介於 0.6-0.8，6-9 月的缺水比例介於 0.4-0.6。而各月份盒子的 IQR 表現較一致，均不超過 0.2 的範圍；1-2、8-12 月有離群值出現。

在 RCP8.5 情境下，缺水比例的中位數表現，在 2 月時缺水比例最高，9 月則是缺水比例最低，月份缺水比例變化趨勢自 9 月最低開始提高至 2 月最高峰，再開始逐月下降至 7 月，8 月上升，再下降至 9 月最低點。在各月份的中位數缺水比例部分，12-5 月的缺水比例介於 0.6-0.8，11 月的缺水比例介於 0.4-0.6，6-8 月及 10 月的缺水比例介於 0.2-0.4，9 月則是 0-0.2。而各月份盒子的 IQR 表現可發現除了 3 月不超過 0.2 的範圍之外，其餘月份均超過 0.2；但 3 月有離群值出現。

(三) 2061-2080 中長期(M2)：

在 RCP2.6 情境下，缺水比例的中位數表現，在 1 月時缺水比例最高，9 月則是缺水比例最低，月份缺水比例變化趨勢自 9 月最低開始逐月提高，到 1 月最高峰後比例開始下降至 9 月最低點。在各月份的中位數缺水比例部分，1-3 月的缺水比例介於 0.6-0.8，4-5 月及 12 月的缺水比例介於 0.4-0.6，6-8 月及 10-11 月的缺水比例介於 0.2-0.4，9 月則是 0-0.2。而各月份盒子的 IQR 表現可分成兩類，1-3、7-9 月 IQR 超過 0.2 的範圍，其餘月份皆不超過 0.2；5、12 月有離群值出現。

在 RCP4.5 情境下，缺水比例的中位數表現，在 1 月時缺水比例最高，9 月則是缺水比例最低，月份缺水比例變化趨勢自 9 月最低開始逐月提高，到 1 月最高峰後比例開始下降至 9 月最低點。在各月份的中位數缺水比例部分，12-2 月的缺水比例介於 0.8-1.0，3、4、11 月的缺水比例介於 0.6-0.8，5 月和 10 月的缺水比例介於 0.4-0.6，6-9 月的缺水比例介於 0.2-0.4。而各月份盒子的 IQR 表現可分成兩類，3、6-8、11 月 IQR 超過 0.2 的範圍，其餘月份皆不超過 0.2；9 月有離群值出現。

在 RCP6.0 情境下，缺水比例的中位數表現，在 12 月時缺水比例最高，7 月則是缺水比例最低，月份缺水比例變化趨勢自 8 月最低開始提高至 1 月最高峰，之後開始下降至 6 月，7 月上升後再下降至 8 月最低點。在各月份的中位數缺水比例部分，11-4 月的缺水比例介於 0.8-1.0，3-5 月、5 月及 10 月的缺水比例介於 0.6-0.8，6-9 月的缺水比例介於 0.4-0.6。而各月份盒子的 IQR 表現可發現除了 7 月大於 0.2 的範圍之外，其餘月份均不超過 0.2；2、4、9-11 月有離群值出現。

在 RCP8.5 情境下，缺水比例的中位數表現在 1 月時缺水比例最高，9 月則是缺水比例最低，月份缺水比例變化趨勢自 9 月最低開始逐月提高，到 1 月最高峰後比例開始下降至 9 月最低點。在各月份的中位數缺水比例部分，1-2 月的缺水比例介於 0.8-1.0，3-5 月及 12 月的缺水比例介於 0.6-0.8，6-8 月及 10-11 月的缺水比例介於 0.2-0.4，9 月則是 0-0.2。而各月份盒子的 IQR 表現可發現所有月份均超過 0.2 的範圍；無離群值出現。

(四) 2081-21000 長期(L)：

在 RCP2.6 情境下，缺水比例的中位數表現，在 1 月時缺水比例最高，7 月則是缺水比例最低，月份缺水比例變化趨勢自 7 月最低開始提高至 8 月，9 月些微下降，接著 10 月開始上升至 1 月最高峰後，再一路下降至 7 月最低點。在各月份的中位數缺水比例部分，1-3 月及 12 月的缺水比例介於 0.6-0.8，4-5 月及 11 月的缺水比例介於 0.4-0.6，6 月及 8-10 月的缺水比例介於 0.2-0.4，7 月則是 0-0.2。而各月份盒子的 IQR 表現可分成兩類，2-5 月 IQR 超過 0.2 的範圍，其餘月份皆不超過 0.2；1、12 月有離群值出現。

在 RCP4.5 情境下，缺水比例的中位數表現，在 1 月時缺水比例最高，7 月和 9 月則是缺水比例最低，月份缺水比例變化趨勢自 9 月最低開始逐月提高，到 1 月最高峰後比例開始下降至 7 月最低點，接著 8 月微幅上升後再下降至 9 月最低點。在各月份的中位數缺水比例部分，12-2 月的缺水比例介於 0.8-1.0，3、4、11 月的缺水比例介於 0.6-0.8，5-6 月和 10 月的缺水比例介於 0.4-0.6，7-9 月的缺水比例介於 0.2-0.4。而各月份盒子的 IQR 表現可分成兩類，5-8 月 IQR 超過 0.2 的範圍，其餘月份皆不超過 0.2；無離群值出現。

在 RCP6.0 情境下，缺水比例的中位數表現，在 1 月時缺水比例最高，6 月則是缺水比例最低，月份缺水比例變化趨勢自 6 月最低開始逐月提高，到 1 月最高峰後比例開始下降至 6 月最低點。在各月份的中位數缺水比例部分，11-4 月的缺水比例介於 0.8-1.0，3-5 月、5 月及 10 月的缺水比例介於 0.6-0.8，6-9 月的缺水比例介於 0.4-0.6。而各月份盒子的 IQR 表現可分成兩類，5-9 月 IQR 超過 0.2 的範圍，其餘月份皆不超過 0.2；1、10-12 月有離群值出現。

在 RCP8.5 情境下，缺水比例的中位數表現在 2 月時缺水比例最高，8 月則是缺水比例最低，月份缺水比例變化趨勢自 8 月最低開始逐月提高，到 2 月最高峰後比例開始下降至 8 月最低點。在各月份的中位數缺水比例部分，1-4 月的缺水比例介於 0.6-0.8，5 月及 12 月的缺水比例介於 0.4-0.6，6、10、11 月的缺水比例介於 0.2-0.4，8-9

月則是 0-0.2。而各月份盒子的 IQR 表現可發現除了 12-2 月不超過 0.2 的範圍之外，其餘月份均超過 0.2；1、2、12 月有離群值出現。

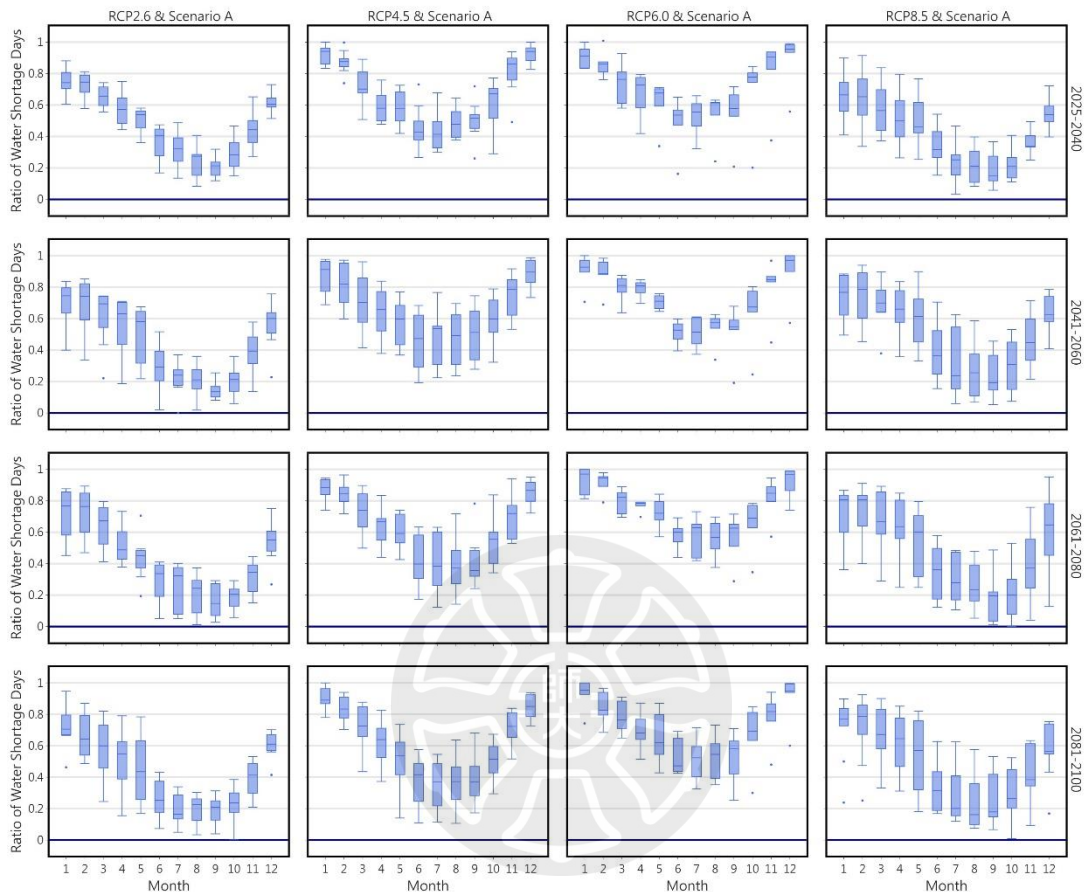


圖 4-4 農業優先情境寶二水庫擴容前缺水比例複合盒鬚圖

若從同一時期不同 RCP 下的中位數觀察，在缺水比例部分，不論在哪一時期，RCP6.0 均為缺水比例最高的情境，RCP2.6 為最低的情境，RCP4.5 則介於兩者之間，值得注意的是 RCP8.5 雖然是碳排放濃度最高的模擬情境，但整體缺水比例卻並不是最高的，而是大致介於 RCP2.6 至 RCP4.5 之間，整體缺水比例由低至高排序分別為 RCP2.6、RCP8.5、RCP4.5、RCP6.0。在缺水月份高峰和低谷部分，不論在哪一時期，RCP2.6 與 RCP8.5 較相似，高峰落在 1-3 月，低谷落在 8-10 月，而 RCP4.5 和 RCP6.0 則是有提前至 11 或 12 月的現象，會落在 11-1 月或 12-2 月，低谷則是在 6-8 月。而不確定性的部分，可藉由盒鬚圖四分位距的變化程度來檢視，以下均簡稱「IQR」，無論

在哪個時期，RCP8.5 均為整體 IQR 最大的情境，不確定性最高，RCP6.0 則為 IQR 最小的情境，但 RCP6.0 中有多數月份有離群值出現。

若從同一 RCP 不同時期下的中位數觀察，在最缺水月份中，每個 RCP 下在各時期的缺水比例程度上表現各有不同，RCP4.5 和 RCP6.0 在中長期最嚴重，RCP2.6 在短期最嚴重，RCP8.5 在中短期最嚴重。在缺水月份高峰和低谷部分，在該 RCP 下的各時期基本上都是一致的。

IQR 部分，RCP4.5 短期最小，中短期最大，而 RCP6.0 在短期、中短期及中長期變化程度較小且一致，長期則為最大，RCP8.5 則是在任何時期的變化程度都很大。另外從水文年乾濕季角度來對 IQR 劃分的話，在 RCP2.6 下的短期及中長期全年較一致，而中短期及長期則是乾季大於濕季，RCP4.5 和 RCP6.0 則是在短期和中短期較一致，到了中長期及長期反而濕季大於乾季，RCP8.5 則是在哪個時期都是乾季大於濕季。總體來說，乾季變化程度大於濕季，整體大致可看出從短期一路至長期的變化是有變大的。

而趨勢為何會如上述表現的原因，若從研究設計中分析，進入水庫的水流只有從上坪堰攔截的水，並沒有任何其他來源，而水流進入水庫前會被扣除並保留給河流之生態基流量、農業計畫用水量或是頭前溪下游民生與工業用水等保留水量的部份，則與用水情境的假設有關係，其中兩個情境用水參數各有不同，這可能會影響缺水比例在各月份的高峰、低谷及趨勢分布，基本上可推論形成這樣的缺水趨勢，主要因素是在於 SWAT 流量資料及用水情境架構兩部分，而關於月份趨勢的討論，詳見第六節上坪溪流量對寶二水庫缺水之影響再行說明。

二、工業優先情境(B)

若執行寶二水庫擴容前的工業優先情境(B)，模擬基期寶二水庫缺水狀況，從盒鬚圖(圖 4-5)中可以發現：

在基期的缺水比例中位數表現，在 2 月時缺水比例最高，10 月則是缺水比例最低，月份缺水比例變化趨勢自 10 月最低開始逐月提高，到 2 月最高峰後比例開始下降至 10 月最低點。在各月份的中位數缺水比例部分，2-4 月的缺水比例介於 0.2-0.4，1、5-12 月的缺水比例介於 0-0.2。而各月份盒子的 IQR 表現較一致，各月份均不超過 0.2 的範圍；6-8 月有離群值出現。

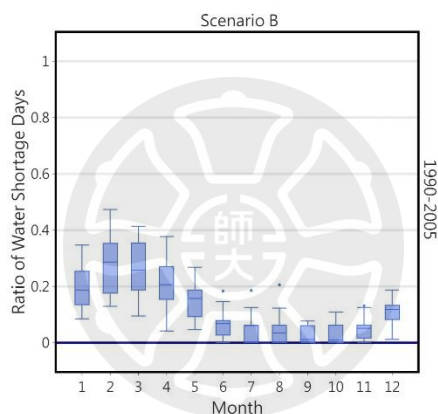


圖 4-5 工業優先情境寶二水庫擴容前基期缺水比例盒鬚圖

若執行寶二水庫擴容前的工業優先情境(B)，模擬未來氣候變遷下寶二水庫缺水狀況，從複合盒鬚圖(圖 4-6)中可以發現：

(一) 2025-2040 短期(S)：

在 RCP2.6 情境下，缺水比例的中位數表現，在 3 月時缺水比例最高，9 月則是缺水比例最低，月份缺水比例變化趨勢自 9 月最低開始逐月提高，到 3 月最高峰後比例開始下降至 9 月最低點。在各月份的中位數缺水比例部分，2-4 月的缺水比例介於 0.2-0.4，1 月和 5-12 月的缺水比例介於 0-0.2。而各月份盒子的 IQR 表現較一致，各月份

均不超過 0.2 的範圍；5 月有離群值出現。

在 RCP4.5 情境下，缺水比例的中位數表現，在 2 月時缺水比例最高，9 月則是缺水比例最低，月份缺水比例變化趨勢自 9 月最低開始逐月提高，到 2 月最高峰後比例開始下降至 9 月最低點。在各月份的中位數缺水比例部分，2 月的缺水比例介於 0.4-0.6，1 月、3-5 月的缺水比例介於 0.2-0.4，6-12 月的缺水比例介於 0-0.2。而各月份盒子的 IQR 表現可發現除了 2-3、6 月超過 0.2 的範圍之外，其餘月份均不超過 0.2；9、10、12 月有離群值出現。

在 RCP6.0 情境下，缺水比例的中位數表現，在 2 月時缺水比例最高，10 月則是缺水比例最低，月份缺水比例變化趨勢自 10 月最低開始逐月提高，到 2 月最高峰後比例開始下降至 10 月最低點。在各月份的中位數缺水比例部分，1-3 月的缺水比例介於 0.4-0.6，4-5 月及 12 月的缺水比例介於 0.2-0.4，6-11 月的缺水比例介於 0-0.2。而各月份盒子的 IQR 表現可發現除了 12、1-2 月超過 0.2 的範圍之外，其餘月份均不超過 0.2；3-4、6-8、11 月有離群值出現。

在 RCP8.5 情境下，缺水比例的中位數表現，在 2 月時缺水比例最高，10 月則是缺水比例最低，月份缺水比例變化趨勢自 10 月最低開始逐月提高，到 2 月最高峰後比例開始下降至 7 月，8 月微幅上升，再下降至 9 月最低點。在各月份的中位數缺水比例部分，所有月份均介於 0-0.2。而各月份盒子的 IQR 表現可發現除了 3 月超過 0.2 的範圍之外，其餘月份均不超過 0.2；8-12 月有離群值出現。

(二) 2041-2060 中短期(M1)：

在 RCP2.6 情境下，缺水比例的中位數表現，在 3 月時缺水比例最高，10 月則是缺水比例最低，月份缺水比例變化趨勢自 10 月最低開始逐月提高，到 3 月最高峰後比例開始下降至 10 月最低點。在各月份的中位數缺水比例部分，除了 3 月的缺水比例介於 0.2-0.4，其餘月份的缺水比例則是 0-0.2。而各月份盒子的 IQR 表現可發現除了 3-5 月超過 0.2 的範圍之外，其餘月份均不超過 0.2；8、10 月有離群值出現。

在 RCP4.5 情境下，缺水比例的中位數表現，在 2 月時缺水比例最高，9 月則是缺水比例最低，月份缺水比例變化趨勢自 9 月最低開始逐月提高，到 2 月最高峰後比例開始下降至 9 月最低點。在各月份的中位數缺水比例部分，1-4 月的缺水比例介於 0.2-0.4，5-12 月的缺水比例介於 0-0.2。而各月份盒子的 IQR 表現可發現除了 3 月超過 0.2 的範圍之外，其餘月份均不超過 0.2；1-2、4、6、8 月有離群值出現。

在 RCP6.0 情境下，缺水比例的中位數表現，在 2 月時缺水比例最高，9 月則是缺水比例最低，月份缺水比例變化趨勢自 9 月最低開始逐月提高，到 2 月最高峰後比例開始下降至 9 月最低點。在各月份的中位數缺水比例部分，2-3 月的缺水比例介於 0.4-0.6，1、4-5、12 月的缺水比例介於 0.2-0.4，6-11 月的缺水比例介於 0-0.2。而各月份盒子的 IQR 表現可發現除了 1-2 月超過 0.2 的範圍之外，其餘月份均不超過 0.2；5、8 月有離群值出現。

在 RCP8.5 情境下，缺水比例的中位數表現，在 3 月時缺水比例最高，10 月則是缺水比例最低，月份缺水比例變化趨勢自 10 月最低開始逐月提高，到 3 月最高峰後比例開始下降至 10 月最低點。在各月份的中位數缺水比例部分，2-4 月的缺水比例介於 0.2-0.4，1 月及 5-12 月則是 0-0.2。而各月份盒子的 IQR 表現可發現除了 5 月超過 0.2 的範圍之外，其餘月份均不超過 0.2；1-3、7、10 月有離群值出現。

(三) 2061-2080 中長期(M2)：

在 RCP2.6 情境下，缺水比例的中位數表現，在 4 月時缺水比例最高，9 月則是缺水比例最低，月份缺水比例變化趨勢自 9 月最低開始逐月提高，到 4 月最高峰後比例開始下降至 9 月最低點。在各月份的中位數缺水比例部分，所有月份均為 0-0.2。而各月份盒子 IQR 表現可發現較一致，所有月份均不超過 0.2 的範圍；9 月有離群值出現。

在 RCP4.5 情境下，缺水比例的中位數表現，在 2 月時缺水比例最高，8、9 月則是缺水比例最低，月份缺水比例變化趨勢自 9 月最低開始逐月提高，到 2 月最高峰後比例開始下降至 8、9 月最低點。在各月份的中位數缺水比例部分，1-4 月的缺水比例

介於 0.2-0.4，5-12 月則是介於 0-0.2。而各月份盒子的 IQR 表現可發現除了 1-3 月超過 0.2 的範圍之外，其餘月份均不超過 0.2；6、9、12 月有離群值出現。

在 RCP6.0 情境下，缺水比例的中位數表現，在 2 月時缺水比例最高，9 月則是缺水比例最低，月份缺水比例變化趨勢自 9 月最低開始逐月提高，到 2 月最高峰後比例開始下降至 9 月最低點。在各月份的中位數缺水比例部分，1-5 月及 12 月的缺水比例介於 0.2-0.4，6-11 月則是介於 0-0.2。而各月份盒子的 IQR 表現可發現較一致，所有月份均不超過 0.2 的範圍；無離群值出現。

在 RCP8.5 情境下，缺水比例的中位數表現在 4 月時缺水比例最高，9、10 月則是缺水比例最低，月份缺水比例變化趨勢自 9、10 月最低開始逐月提高，到 4 月最高峰後比例開始下降至 9、10 月最低點。在各月份的中位數缺水比例部分，2-5 月的缺水比例介於 0.2-0.4，1 月及 6-12 月則是 0-0.2。而各月份盒子的 IQR 表現可發現除了 3、5 月超過 0.2 的範圍之外，其餘月份均不超過 0.2；9、12 月有離群值出現。

(四) 2081-21000 長期(L)：

在 RCP2.6 情境下，缺水比例的中位數表現，在 2 月時缺水比例最高，9 月則是缺水比例最低，月份缺水比例變化趨勢自 9 月最低開始提高至 2 月，一路下降至 6 月後，7 月微幅上升，再下降至 9 月最低點。在各月份的中位數缺水比例部分，所有月份均介於 0-0.2。而各月份盒子的 IQR 表現可發現較一致，所有月份均不超過 0.2 的範圍；9、10 月有離群值出現。

在 RCP4.5 情境下，缺水比例的中位數表現，在 2 月時缺水比例最高，8 月則是缺水比例最低，月份缺水比例變化趨勢自 8 月最低開始逐月提高，到 2 月最高峰後比例開始下降至 8 月最低點。在各月份的中位數缺水比例部分，1-4 月的缺水比例介於 0.2-0.4，5-12 月的缺水比例介於 0-0.2。而各月份盒子的 IQR 表現可發現較一致，所有月份均不超過 0.2 的範圍；2、11 月有離群值出現。

在 RCP6.0 情境下，缺水比例的中位數表現，在 2 月時缺水比例最高，7 月則是缺

水比例最低，月份缺水比例變化趨勢自 7 月最低開始提高至 8 月，再下降至 10 月，接著開始一路上升至到 2 月最高峰後比例開始下降至 7 月最低點。在各月份的中位數缺水比例部分，1-4 月及 12 月的缺水比例介於 0.2-0.4，5-11 月的缺水比例介於 0-0.2。而各月份盒子的 IQR 表現可發現除了 4-5、12 月超過 0.2 的範圍之外，其餘月份均不超過 0.2；1、2 月有離群值出現。

在 RCP8.5 情境下，缺水比例的中位數表現在 4 月時缺水比例最高，8、9 月則是缺水比例最低，月份缺水比例變化趨勢自 8、9 月最低開始逐月提高，到 4 月最高峰後比例開始下降至 8、9 月最低點。在各月份的中位數缺水比例部分，2-4 月的缺水比例介於 0.2-0.4，1 月及 5-12 月則是 0-0.2。而各月份盒子的 IQR 表現可發現除了 4-5 月超過 0.2 的範圍之外，其餘月份均不超過 0.2；1、2、8-12 月有離群值出現。

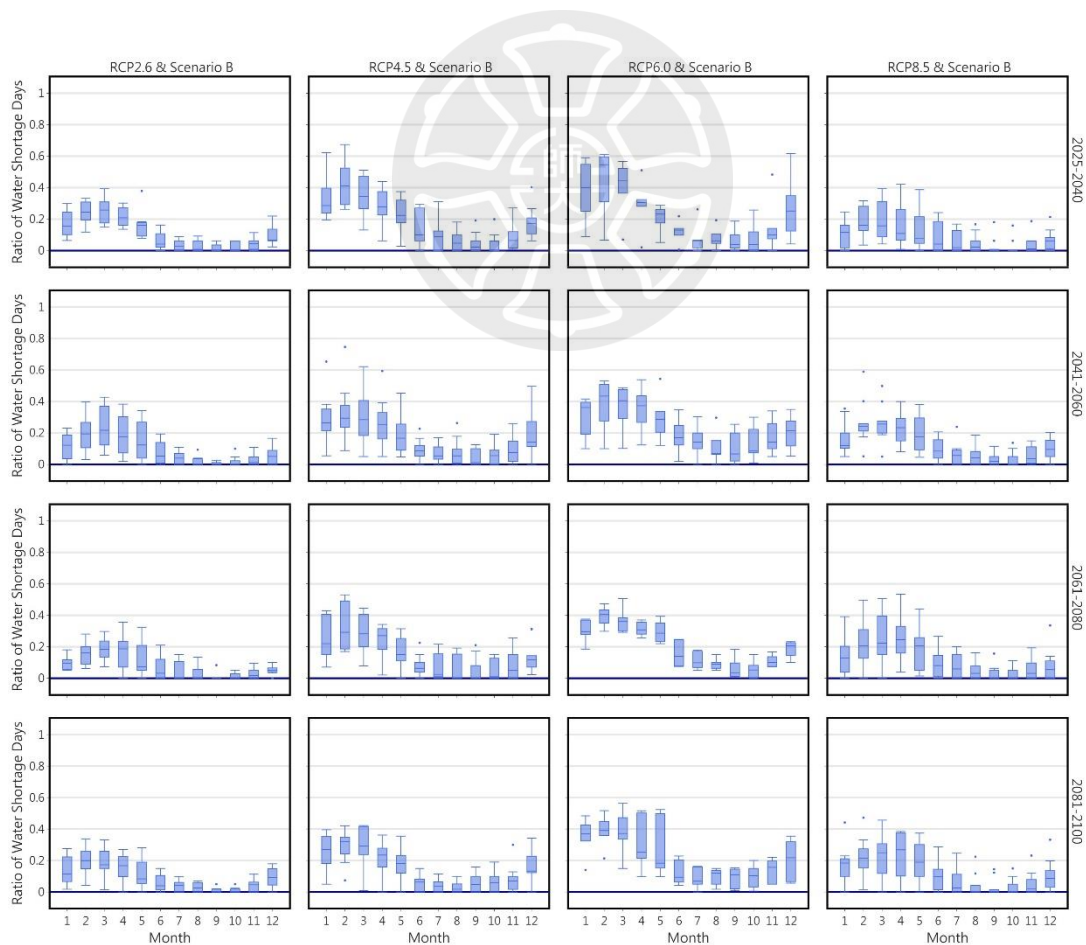


圖 4-6 工業優先情境寶二水庫擴容前缺水比例複合盒鬚圖

若從同一時期不同 RCP 下的中位數觀察，在缺水比例部分，所有時期的 RCP6.0 均為缺水比例最高的情境，RCP2.6 為最低的情境，RCP4.5 則介於兩者之間。值得注意的是 RCP8.5 雖然是碳排放濃度最高的模擬情境，但整體缺水比例卻並不是最高的，而是大致介於 RCP2.6 至 RCP4.5 之間，這是因為 RCP8.5 碳排放濃度最高情境下，會呈現出嚴重極端降雨，也就是乾季越乾，濕季越濕，而乾季的流量因數字非常小，而濕季的流量數字非常大，在變化率相同的狀況下，乾季的流量數字變動會遠遠小於濕季，這樣就會造成 RCP8.5 的總體雨量變多，相比 RCP6.0 的總體雨量會上升，缺水比例會減緩，詳細討論於第一節說明。整體缺水比例由低至高排序分別為 RCP2.6、RCP8.5、RCP4.5、RCP6.0。在缺水月份高峰和低谷部分，不論在哪一時期，RCP2.6 與 RCP8.5 較相似，高峰落在 1-3 月，可注意的是 RCP8.5 的中長期和長期最缺水的月份是 4 月，這可能是這兩個時期 2-4 月的春雨會有減少或延後的狀況，而低谷部分落在 8-10 月，而 RCP4.5 和 RCP6.0 的高峰則是有延後 1 個月的現象，會落在 1-3 月或 2-4 月，低谷則是在 8-10 月。而不確定性的部分，無論在哪個時期，RCP2.6 均為 IQR 最小的情境，另外 RCP8.5 中有多數月份有離群值出現。

若從同一 RCP 不同時期下的中位數觀察，在最缺水月份中，每個 RCP 下在各時期的缺水比例程度上表現各有不同，RCP2.6、RCP4.5 和 RCP6.0 在短期最嚴重，RCP8.5 在長期最嚴重。在缺水月份高峰和低谷部分，在該 RCP 下的各時期基本上都是一致的。RCP2.6 的 IQR 則是在任何時期的變化程度都較小且一致，RCP4.5 的長期最小，RCP6.0 的中長期為最小，RCP8.5 則是中短期最小。另外從水文年乾濕季角度來對 IQR 劃分的話，總體來看所有 RCP 下乾季的不確定大於濕季，而在時期上的變化沒有一定的趨勢。

三、兩用水情境趨勢比較

首先與農業優先情境互相比較整體趨勢，可發現工業優先情境比起前者的缺水比例要降低很多，甚至在某些月份的模擬幾乎是不缺水的，在缺水高峰與低谷上，都與農業優先情境有很大的不同。同一時期不同 RCP 下來檢視的話，無論是在短期、中短期、中長期或是長期，缺水比例的嚴重程度均為 RCP2.6 最低，接著 RCP4.5 上升，最嚴重的情境為 RCP6.0，而 RCP8.5 的缺水比例會比 RCP6.0 再下降一點。RCP8.5 的缺水比例程度在短期及中短期時較接近 RCP2.6，在中長期及長期時則較接近 RCP4.5。而在 IQR 部分，兩個用水情境下整體均為乾季的缺水比例變化程度大於濕季，而關於月份趨勢的討論，詳見第六節上坪溪流量對寶二水庫缺水之影響再行說明。

從 RCP2.6 至 RCP6.0 情境，流量呈現越來越極端化的趨勢，出現乾季越乾，濕季越濕的狀況，濕季的流量雖然越來越高，但並不是都能被引進上坪堰，這是為了保護堰體和水庫，用水架構均有設定流量若超過 60CMS，也就是濁度太高的水，不會被引入上坪堰，以減少淤積。因此在越嚴重的 RCP 情境下，雖然濕季越濕，但多數的流量太高而無法被使用，所以缺水狀況會比較嚴重。

缺水比例的用意是要呈現出水庫能否供水給予下游使用，事實上若真的可引水量為 0，那已經是非常危急的情況，代表新竹科學園區沒有水來讓生產線生產晶片，因此在缺水比例方面主要用意是要針對竹科廠商示警與警告缺水高峰月份，並建議政府或廠商可根據在各時期的缺水高峰來臨之前就要規劃及準備好預防性的措施，例如農業預防性輪灌或停灌計畫、石門水庫支援寶二水庫用水、提前購買水車及規劃調度、與海淡廠提高製水比例等等。

第四節 減供天數比例

一、農業優先情境(A)

若執行寶二水庫擴容前的農業優先情境(A)，模擬基期寶二水庫減供狀況，從盒鬚圖(圖 4-7)中可以發現：

在基期的減供比例中位數表現，在 12 月時減供比例最高，7 月則是減供比例最低，月份減供比例變化趨勢自 7 月最低開始逐月提高，到 12 月最高峰後比例開始下降至 7 月最低點。在各月份的中位數減供比例部分，1-4、10-12 月的減供比例介於 0.8-1.0，5-9 月的減供比例介於 0.6-0.8。而各月份盒子的 IQR 表現較一致，除 7 月外的其他月份均不超過 0.2 的範圍；6 月有離群值出現。

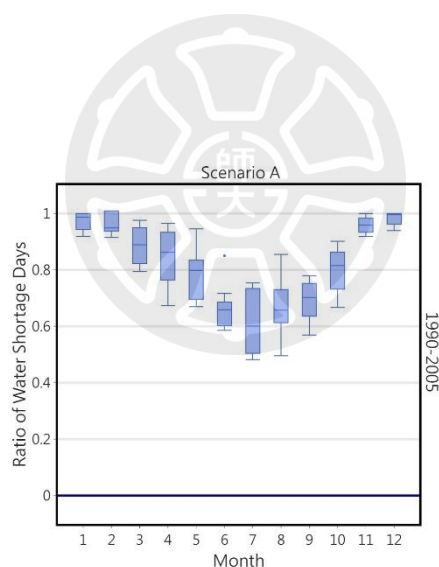


圖 4-7 農業優先情境寶二水庫擴容前基期減供比例盒鬚圖

若執行寶二水庫擴容前的農業優先情境(A)，模擬未來氣候變遷下寶二水庫減供狀況，從複合盒鬚圖(圖 4-8)中可以發現：

(一) 2025-2040 短期(S)：

在 RCP2.6 情境下，減供比例的中位數表現，在 12 月及 1 月時減供比例最高，7 月則是減供比例最低，月份減供比例變化趨勢自 7 月最低開始逐月提高，到 12 月及 1 月最高峰後比例開始下降至 4 月，5 月上升，再下降至 7 月最低點。在各月份的中位數減供比例部分，1-5 月和 10-12 月的減供比例介於 0.8-1.0，6-9 月的減供比例介於 0.6-0.8。而各月份盒子的 IQR 表現可發現除了 9 月些微超過 0.2 的範圍之外，其餘月份均不超過 0.2；4-6 月有離群值出現。

在 RCP4.5 情境下，減供比例的中位數表現，在 12 月及 1 月時減供比例最高，6 月則是減供比例最低，月份減供比例變化趨勢自 6 月最低開始逐月提高，到 12 月及 1 月最高峰後比例開始下降至 6 月最低點。在各月份的中位數減供比例部分，全部月份的減供比例均介於 0.8-1.0。而各月份盒子的 IQR 表現較一致，所有月份均不超過 0.2 的範圍；1-2、9、11-12 月有離群值出現。

在 RCP6.0 情境下，減供比例的中位數表現，在 12 月及 1 月時減供比例最高，6 月則是減供比例最低，月份減供比例變化趨勢自 6 月最低開始提高至 8 月，9 月些微下降，10 月開始上升到 12 月及 1 月最高峰後，比例再一路下降至 6 月最低點。在各月份的中位數減供比例部分，全部月份的減供比例均介於 0.8-1.0。而各月份盒子的 IQR 表現可發現除了 6 月些微超過 0.2 的範圍之外，其餘月份均不超過 0.2；1、9-11 月有離群值出現。

在 RCP8.5 情境下，減供比例的中位數表現，在 12 月時減供比例最高，8 月則是減供比例最低，月份減供比例變化趨勢自 8 月最低開始逐月提高，到 12 月最高峰後比例開始下降至 8 月最低點。在各月份的中位數減供比例部分，1-3 月及 12 月的減供比例介於 0.8-1.0，4-6 月及 11 月的減供比例介於 0.6-0.8，6、7-9 月的減供比例介於 0.4-0.6。而各月份盒子的 IQR 表現可發現除了 3 月超過 0.2 的範圍之外，其餘月份均不超過 0.2；9 月有離群值出現。

(二) 2041-2060 中短期(M1)：

在 RCP2.6 情境下，減供比例的中位數表現，在 12 月時減供比例最高，7 月則是減供比例最低，月份減供比例變化趨勢自 7 月最低開始逐月提高，到 12 月最高峰後比例開始下降至 3 月，4 月微幅上升，5 月再一路下降至 7 月最低點。在各月份的中位數減供比例部分，1-5 月及 11-12 月的減供比例介於 0.8-1.0，6-10 月的減供比例介於 0.6-0.8。而各月份盒子的 IQR 表現可分成兩類，6-10 月 IQR 超過 0.2 的範圍，其餘月份皆不超過 0.2；1-4、12 月有離群值出現。

在 RCP4.5 情境下，減供比例的中位數表現，在 12、1、2 月時減供比例最高，6 月則是減供比例最低，月份減供比例變化趨勢自 6 月最低開始逐月提高，到 12、1、2 月最高峰後比例開始下降至 6 月最低點。在各月份的中位數減供比例部分，除了 6 月的減供比例介於 0.6-0.8 之外，其餘月份的減供比例均介於 0.8-1.0。而各月份盒子的 IQR 表現可發現除了 7 月超過 0.2 的範圍之外，其餘月份均不超過 0.2；1-2、6、11-12 月有離群值出現。

在 RCP6.0 情境下，減供比例的中位數表現，在 2 月時減供比例最高，7 月則是減供比例最低，月份減供比例變化趨勢自 7 月最低開始逐月提高，至 10 月持平至 1 月，再上升至 2 月最高峰後，之後一路開始下降至 7 月最低點。在各月份的中位數減供比例部分，所有月份的減供比例介於 0.8-1.0。而各月份盒子的 IQR 表現較一致，各月份均不超過 0.2 的範圍；9-10 月有離群值出現。

在 RCP8.5 情境下，減供比例的中位數表現，在 1 月時減供比例最高，7 月則是減供比例最低，月份減供比例變化趨勢自 7 月最低開始逐月提高，到 1 月最高峰後比例開始下降至 7 月最低點。在各月份的中位數減供比例部分，1-5 月及 10-12 月的減供比例介於 0.8-1.0，6-9 月的減供比例介於 0.6-0.8。而各月份盒子的 IQR 表現可分成兩類，6-9 月 IQR 超過 0.2 的範圍，其餘月份皆不超過 0.2；無離群值出現。

(三) 2061-2080 中長期(M2)：

在 RCP2.6 情境下，減供比例的中位數表現，在 12 月時減供比例最高，6 月則是減供比例最低，月份減供比例變化趨勢自 6 月最低開始提高至 7 月，8 月持平，9 月些微下降再上升至 12 月最高峰後開始下降至 2 月，3 月微幅上升，再一路下降至 6 月最低點。在各月份的中位數減供比例部分，1-4 月及 11-12 月的減供比例介於 0.8-1.0，5 月及 10 月的減供比例介於 0.6-0.8，6-9 月的減供比例介於 0.4-0.6。而各月份盒子的 IQR 表現可分成兩類，6-9 月 IQR 超過 0.2 的範圍，其餘月份皆不超過 0.2；無離群值出現。

在 RCP4.5 情境下，減供比例的中位數表現，在 11 及 12 月時減供比例最高，7 月則是減供比例最低，月份減供比例變化趨勢自 7 月最低開始逐月提高，到 11 及 12 月最高峰後，再一路下降至 7 月最低點。在各月份的中位數減供比例部分，所有月份的減供比例均介於 0.8-1.0。而各月份盒子的 IQR 表現較一致，各月份均不超過 0.2 的範圍；1、4、11-12 月有離群值。

在 RCP6.0 情境下，減供比例的中位數表現，在 2 月時減供比例最高，6 月則是減供比例最低，月份減供比例變化趨勢自 6 月最低開始提高至 10 月，然後持平至 1 月，再微幅上升至 2 月最高峰，之後開始一路下降至 6 月最低點。在各月份的中位數減供比例部分，所有月份的減供比例均介於 0.8-1.0。而各月份盒子的 IQR 表現較一致，各月份均不超過 0.2 的範圍；2-4、9-11 月有離群值出現。

在 RCP8.5 情境下，減供比例的中位數表現在 12 月時缺水比例最高，7 月則是減供比例最低，月份減供比例變化趨勢自 7 月最低開始逐月提高，到 12 月最高峰後比例開始下降至 4 月，5 月微幅上升後再下降至 7 月最低點。在各月份的中位數減供比例部分，1-3 月及 10-12 月的減供比例介於 0.8-1.0，4-6 月及 9-10 月的減供比例介於 0.6-0.8，7-8 月的減供比例介於 0.4-0.6。而各月份盒子的 IQR 表現可分成兩類，4、6-9 月 IQR 超過 0.2 的範圍，其餘月份皆不超過 0.2；2-3、9 月有離群值出現。

(四) 2081-21000 長期(L)：

在 RCP2.6 情境下，減供比例的中位數表現，在 1 月時減供比例最高，7 月則是減供比例最低，月份減供比例變化趨勢自 7 月最低開始逐月提高，到 1 月最高峰後比例開始下降至 7 月最低點。在各月份的中位數減供比例部分，1-3 月及 10-12 月的減供比例介於 0.8-1.0，4-6 月及 8-10 月的減供比例介於 0.6-0.8，7 月則是 0.4-0.6。而各月份盒子的 IQR 表現可分成兩類，4-9 月 IQR 超過 0.2 的範圍，其餘月份皆不超過 0.2；無離群值出現。

在 RCP4.5 情境下，減供比例的中位數表現，在 11、12、1 月時缺水比例最高，6 月則是減供比例最低，月份減供比例變化趨勢自 6 月最低開始逐月提高，到 11、12、1 月最高峰後，再開始下降至 6 月最低點。在各月份的中位數減供比例部分，除了 6-7 月的減供比例介於 0.6-0.8 之外，其餘月份的減供比例均介於 0.8-1.0。而各月份盒子的 IQR 表現可發現除了 6 月超過 0.2 的範圍之外，其餘月份均不超過 0.2；1-2、7、10 月有離群值出現。

在 RCP6.0 情境下，減供比例的中位數表現，在 11、12、1 月時減供比例最高，6 月則是減供比例最低，月份減供比例變化趨勢自 6 月最低開始逐月提高，到 11、12、1 月最高峰後比例下降至 2 月，3 月微幅上升後，再一路下降至 6 月最低點。在各月份的中位數減供比例部分，所有月份的減供比例均介於 0.8-1.0。而各月份盒子的 IQR 表現較一致，各月份均不超過 0.2 的範圍；4-5、10-12 月有離群值出現。

在 RCP8.5 情境下，減供比例的中位數表現在 12 月時缺水比例最高，9 月則是減供比例最低，月份減供比例變化趨勢自 9 月最低開始逐月提高，到 2 月最高峰後比例開始下降至 7 月，8 月上升後再下降至 7 月最低點。在各月份的中位數減供比例部分，1-5 月及 11-12 月的減供比例介於 0.8-1.0，6 月及 10 月的減供比例介於 0.6-0.8，7-9 月的減供比例介於 0.4-0.6。而各月份盒子的 IQR 表現可分成兩類，5-9 月 IQR 超過 0.2 的範圍，其餘月份皆不超過 0.2；1-4、10-12 月有離群值出現。



圖 4-8 農業優先情境寶二水庫擴容前減供比例複合盒鬚圖

若從同一時期不同 RCP 下的中位數觀察，在減供比例部分，所有時期的 RCP6.0 均為減供比例最高的情境，最低的情境就各有不同，短期和中長期則是 RCP2.6，長期是 RCP8.5，而中短期的 RCP2.6 和 RCP8.5 差不多。值得注意的是 RCP8.5 雖然是碳排放濃度最高的模擬情境，但整體減供比例卻不是最高的，而且趨勢上很接近 RCP2.6，整體減供比例由低至高排序分別為 RCP2.6 及 RCP8.5、RCP4.5、RCP6.0。在缺水月份高峰和低谷部分，不論在哪一時期，所有的 RCP 情境的高峰都落在 11 月到隔年 2 月，而低谷部分在所有時期，RCP2.6 是落在 6-8 月，RCP4.5 和 RCP6.0 是 5-8 月，RCP8.5 則是往後延了一個月為 7-9 月。而不確定性的部分，無論在哪個時期，RCP6.0 均為 IQR 最小的情境，IQR 最大的模式在短期和中長期是 RCP8.5，中短期和長期的 IQR 為 RCP2.6 與 RCP8.5 最大，且兩者趨勢相似。

若從同一 RCP 不同時期下的中位數觀察，每個 RCP 下在各時期的減供比例程度上表現各有不同，RCP2.6 和 RCP6.0 在短期最嚴重，RCP4.5 和 RCP8.5 則是在各時期的表現程度較一致。在減供月份高峰和低谷部分，在所有 RCP 下的各時期基本上都是一致的，另外可發現到 RCP2.6 和 RCP8.5 在 6 月的減供比例比起 5 月有較明顯的下降，到了 11 月則比起 10 月有明顯的上升。

RCP4.5 和 RCP6.0 在整體 IQR 大小方面比較沒有特別在哪個時期最大或最小，RCP2.6 和 RCP8.5 在短期是最小。另外從水文年乾濕季角度來對 IQR 劃分的話，所有 RCP 下各時期的濕季不確定性均大於乾季，這是因為在這兩個 RCP 下的所有模式的乾季減供比例已經非常靠近最高比例 1，而且各月天數都是固定有上限的，導致乾季缺水比例都擠到很靠近最大的 1，其中細微差別在於 RCP4.5 和 RCP6.0 的 IQR 變化範圍較小，而 RCP2.6 和 RCP8.5 的 IQR 變化範圍則較大。

二、工業優先情境(B)

若執行寶二水庫擴容前的工業優先情境(B)，模擬基期寶二水庫減供狀況，從盒鬚圖(圖 4-9)中可以發現：

在基期的減供比例中位數表現，在 1 月時減供比例最高，7 月則是減供比例最低，月份減供比例變化趨勢自 7 月最低開始逐月提高，到 1 月最高峰後比例開始下降至 7 月最低點。在各月份的中位數減供比例部分，1 月的減供比例介於 0.8-1.0，2、12 月的減供比例介於 0.6-0.8，3-4、11 月的減供比例介於 0.4-0.6，5 月的減供比例介於 0.2-0.4，6-10 月的減供比例介於 0-0.2。而各月份盒子的 IQR 表現較一致，各月份均不超過 0.2 的範圍；10、11 月有離群值出現。

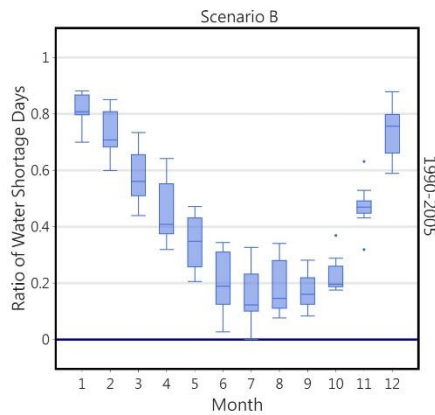


圖 4-9 工業優先情境寶二水庫擴容前基期減供比例盒鬚圖

若執行寶二水庫擴容前的工業優先情境(B)，模擬未來氣候變遷下寶二水庫減供狀況，從複合盒鬚圖(圖 4-10)中可以發現：

(一) 2025-2040 短期(S)：

在 RCP2.6 情境下，減供比例的中位數表現，在 1 月時減供比例最高，9 月則是減供比例最低，月份減供比例變化趨勢自 9 月最低開始逐月提高，到 1 月最高峰後比例開始下降至 9 月最低點。在各月份的中位數減供比例部分，1-2 月和 12 月的減供比例介於 0.6-0.8，3 月和 11 月的減供比例介於 0.4-0.6，4-5 月的減供比例介於 0.2-0.4，6-10 月的減供比例介於 0-0.2。而各月份盒子的 IQR 表現較一致，各月份均不超過 0.2 的範圍；8-9 月有離群值出現。

在 RCP4.5 情境下，減供比例的中位數表現，在 1 月時減供比例最高，7 月則是減供比例最低，月份減供比例變化趨勢自 7 月最低開始逐月提高，到 1 月最高峰後比例開始下降至 7 月最低點。在各月份的中位數減供比例部分，1 月和 12 月的減供比例介於 0.8-1.0，2-3 月和 11 月的減供比例介於 0.6-0.8，4-5 月的減供比例介於 0.4-0.6，6-10 月的減供比例介於 0.2-0.4。而各月份盒子的 IQR 表現可分成兩類，6-9 月 IQR 超過 0.2 的範圍，其餘月份皆不超過 0.2；無離群值出現。

在 RCP6.0 情境下，減供比例的中位數表現，在 1 月時減供比例最高，9 月則是減

供比例最低，月份減供比例變化趨勢自 9 月最低開始逐月提高，到 1 月最高峰後比例開始下降至 9 月最低點。在各月份的中位數減供比例部分，1 月和 12 月的減供比例介於 0.8-1.0，2-5 月和 11 月的減供比例介於 0.6-0.8，6-8 月及 11 月的減供比例介於 0.4-0.6，9 月的減供比例介於 0.2-0.4，而各月份盒子的 IQR 表現可分成兩類，4-5、8-9 月 IQR 超過 0.2 的範圍，其餘月份皆不超過 0.2；2-3、6-7、11-12 月則有離群值出現。

在 RCP8.5 情境下，減供比例的中位數表現，在 1 月時減供比例最高，9 月則是減供比例最低，月份減供比例變化趨勢自 9 月最低開始逐月提高，到 1 月最高峰後比例開始下降至 7 月，8 月微幅上升再下降至 9 月最低點。在各月份的中位數減供比例部分，1 月和 12 月的減供比例介於 0.6-0.8，2-3 月的減供比例介於 0.4-0.6，4-5 月及 11 月的減供比例介於 0.2-0.4，6-10 月的減供比例介於 0-0.2。而各月份盒子的 IQR 表現可分成兩類，1-2、9-12 月 IQR 不超過 0.2 的範圍，其餘月份皆超過 0.2；1、10 月有離群值出現。

(二) 2041-2060 中短期(M1)：

在 RCP2.6 情境下，減供比例的中位數表現，在 1 月時減供比例最高，9 月則是減供比例最低，月份減供比例變化趨勢自 9 月最低開始逐月提高，到 1 月最高峰後比例開始下降至 7 月，8 月微幅上升後再降至 7 月最低點。在各月份的中位數減供比例部分，1-2 月及 12 月的減供比例介於 0.6-0.8，3-4 月的減供比例介於 0.4-0.6，5 月及 11 月的減供比例介於 0.2-0.4，6-10 月的減供比例介於 0-0.2。而各月份盒子的 IQR 表現可分成兩類，3-6 月 IQR 超過 0.2 的範圍，其餘月份皆不超過 0.2；9、12 月有離群值出現。

在 RCP4.5 情境下，減供比例的中位數表現，在 1 月時減供比例最高，7、8 月則是減供比例最低，月份減供比例變化趨勢自 7、8 月最低開始逐月提高，到 1 月最高峰後比例開始下降至 7、8 月最低點。在各月份的中位數減供比例部分，1 月及 12 月的減供比例介於 0.8-1.0，2-3 月及 11 月的減供比例介於 0.6-0.8，4-5 月的減供比例介於 0.4-

0.6，6-10 月的減供比例介於 0.2-0.4。而各月份盒子的 IQR 表現可分成兩類，3、5、7-10 月 IQR 超過 0.2 的範圍，其餘月份皆不超過 0.2；1-3、6、12 月有離群值出現。

在 RCP6.0 情境下，減供比例的中位數表現，在 1、2 月時減供比例最高，9 月則是減供比例最低，月份減供比例變化趨勢自 9 月最低開始逐月提高，至 1、2 月最高峰後，之後一路開始下降至 7 月，8 月持平，再降至 9 月最低點。在各月份的中位數缺水比例部分，1-2 月及 12 月的減供比例介於 0.8-1.0，3-4 月及 11 月的減供比例介於 0.6-0.8，5 月及 10 月的減供比例介於 0.4-0.6，6-9 月的減供比例介於 0.2-0.4。而各月份盒子的 IQR 表現可發現除了 8-9 月超過 0.2 的範圍之外，其餘月份均不超過 0.2；4-7、10-12 月有離群值出現。

在 RCP8.5 情境下，減供比例的中位數表現，在 1 月時缺水比例最高，9 月則是減供比例最低，月份減供比例變化趨勢自 9 月最低開始逐月提高，到 1 月最高峰後比例開始下降至 9 月最低點。在各月份的中位數減供比例部分，1-5 月及 10-12 月的減供比例介於 0.2-0.4，12-5 月的減供比例介於 0.6-0.8，11 月的減供比例介於 0.8-1.0，6-9 月的減供比例介於 0.6-0.8。而各月份盒子的 IQR 表現可分成兩類，2、5、7-10 月 IQR 超過 0.2 的範圍，其餘月份皆不超過 0.2；3-4、11-12 月有離群值出現。

(三) 2061-2080 中長期(M2)：

在 RCP2.6 情境下，減供比例的中位數表現，在 1 月時減供比例最高，7 月和 9 月則是減供比例最低，月份減供比例變化趨勢自 9 月最低開始提高至 7 月最低點，8 月上升後再下降至 9 最低點。在各月份的中位數減供比例部分，1-2 月的減供比例介於 0.6-0.8，3 月的減供比例介於 0.4-0.6，4-5 月及 11 月的減供比例介於 0.2-0.4，6-10 月的減供比例介於 0-0.2。而各月份盒子的 IQR 表現可發現除了 2-3、5 月超過 0.2 的範圍之外，其餘月份均不超過 0.2；12 月有離群值出現。

在 RCP4.5 情境下，減供比例的中位數表現，在 1 月時減供比例最高，9 月則是減供比例最低，月份減供比例變化趨勢自 9 月最低開始逐月提高，到 1 月最高峰後比例

開始下降至 7 月，8 月微幅上升後再下降至 9 月最低點。在各月份的中位數減供比例部分，1 月的減供比例介於 0.8-1.0，2-3 月及 12 月的減供比例介於 0.6-0.8，4-5 月及 11 月的減供比例介於 0.4-0.6，6-8 月及 10 月的減供比例介於 0.2-0.4，9 月的減供比例介於 0-0.2。而各月份盒子的 IQR 表現可發現除了 2-3、11-12 月不超過 0.2 的範圍之外，其餘月份均超過 0.2；11 月有離群值出現。

在 RCP6.0 情境下，減供比例的中位數表現，在 1 月時減供比例最高，9 月則是減供比例最低，月份減供比例變化趨勢自 9 月最低開始逐月提高，到 1 月最高峰後比例開始下降至 9 月最低點。在各月份的中位數減供比例部分，1-2 月及 12 月的減供比例介於 0.8-1.0，3-4 月及 11 月的減供比例介於 0.6-0.8，5-6 月的減供比例介於 0.4-0.6，7-10 月的減供比例介於 0.2-0.4。而各月份盒子的 IQR 表現較一致，所有月份均不超過 0.2 的範圍；6、10-11 月有離群值出現。

在 RCP8.5 情境下，減供比例的中位數表現在 1 月時缺水比例最高，9 月則是減供比例最低，月份減供比例變化趨勢自 9 月最低開始逐月提高，到 1 月最高峰後比例開始下降至 9 月最低點。在各月份的中位數減供比例部分，1-2 月及 12 月的減供比例介於 0.6-0.8，3-5 月的減供比例介於 0.4-0.6，6 月及 11 月的減供比例介於 0.2-0.4，7-10 月的減供比例介於 0-0.2。而各月份盒子的 IQR 表現可發現除了 9 月不超過 0.2 的範圍之外，其餘月份均超過 0.2；12 月有離群值出現。

(四) 2081-21000 長期(L)：

在 RCP2.6 情境下，減供比例的中位數表現，在 1 月時減供比例最高，8 月則是減供比例最低，月份減供比例變化趨勢自 8 月最低開始逐月提高，到 1 月最高峰後比例開始下降至 8 月最低點。在各月份的中位數減供比例部分，1-2 月及 12 月的減供比例介於 0.6-0.8，3 月的減供比例介於 0.4-0.6，4-5 月及 11 月的減供比例介於 0.2-0.4，6-10 月的減供比例介於 0-0.2。而各月份盒子的 IQR 表現可發現除了 2-5 月超過 0.2 的範圍之外，其餘月份均不超過 0.2；12 月有離群值出現。

在 RCP4.5 情境下，減供比例的中位數表現，在 1 月時缺水比例最高，7 月則是減供比例最低，月份減供比例變化趨勢自 7 月最低提高到 8 月，9 月些微下降後，開始逐月上升到 1 月最高峰後，再開始下降至 7 月最低點。在各月份的中位數減供比例部分，1-2 月及 11-12 月的減供比例介於 0.6-0.8，4-5 月及 12 月的減供比例介於 0.4-0.6，6-10 月的減供比例介於 0.2-0.4。而各月份盒子的 IQR 表現可發現除了 3-5 月超過 0.2 的範圍之外，其餘月份均不超過 0.2；12 月有離群值出現。

在 RCP6.0 情境下，減供比例的中位數表現，在 1 月時減供比例最高，9 月則是減供比例最低，月份減供比例變化趨勢自 9 月最低開始逐月提高，到 1 月最高峰後比例接著下降至 6 月，7 月上升至 8 月後，再下降至 9 月最低點。在各月份的中位數減供比例部分，1-2 月及 12 月的減供比例介於 0.8-1.0，3-4 月及 11 月的減供比例介於 0.6-0.8，5 月及 7-8 月的減供比例介於 0.4-0.6，6 月及 9-10 月的減供比例介於 0.2-0.4。而各月份盒子的 IQR 表現可分成兩類，2-6、9-10 月 IQR 超過 0.2 的範圍，其餘月份皆不超過 0.2；12 月有離群值出現。

在 RCP8.5 情境下，減供比例的中位數表現在 1 月時缺水比例最高，8 月則是減供比例最低，月份減供比例變化趨勢自 8 月最低開始逐月提高，到 1 月最高峰後比例開始下降至 8 月最低點。在各月份的中位數減供比例部分，1-3 月及 12 月的減供比例介於 0.6-0.8，4-5 月的減供比例介於 0.4-0.6，6 月及 11 月的減供比例介於 0.2-0.4，7-10 月的減供比例介於 0-0.2。而各月份盒子的 IQR 表現可分成兩類，3-9 月 IQR 超過 0.2 的範圍，其餘月份皆不超過 0.2；1-2、10、12 月有離群值出現。

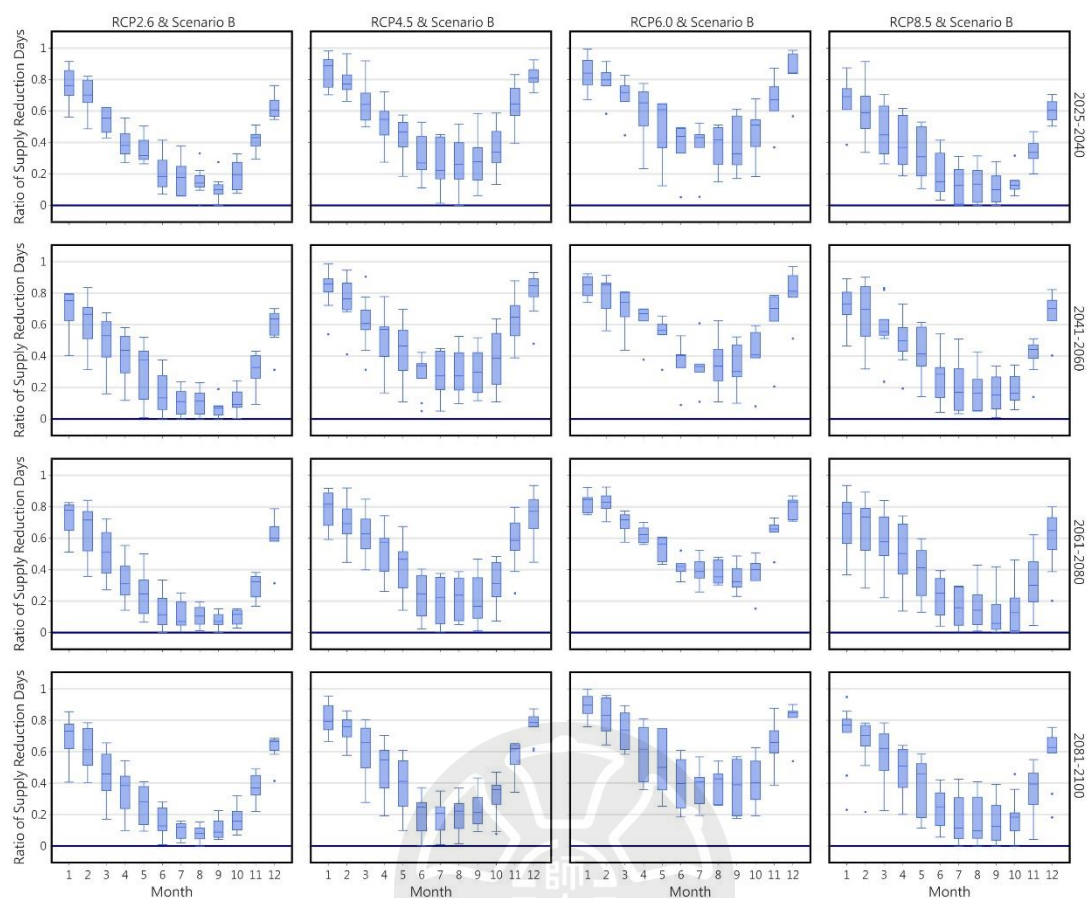


圖 4-10 工業優先情境寶二水庫擴容前減供比例複合盒鬚圖

若從同一時期不同 RCP 下的中位數觀察，在減供比例部分，所有時期的 RCP6.0 均為減供比例最高的情境，最低的情境就各有不同，中長期和長期是 RCP2.6，短期是 RCP8.5，而中短期的 RCP2.6 和 RCP8.5 差不多。值得注意的是 RCP8.5 雖然是碳排放濃度最高的模擬情境，但整體減供比例卻不是最高的，而且趨勢上很接近 RCP2.6，整體減供比例由低至高排序分別為 RCP2.6 及 RCP8.5、RCP4.5、RCP6.0。在減供月份高峰和低谷部分，不論在哪一時期，所有的 RCP 情境的高峰都落在 12 月到隔年 2 月，而低谷部分在所有時期，RCP2.6、RCP4.5 和 RCP6.0 是 6-10 月，RCP8.5 則是往後延了一個月為 7-10 月。而不確定性的部分，中短期和中長期 RCP6.0 的 IQR 最小，短期和長期則為 RCP2.6，IQR 在所有時期中最大為 RCP8.5。

若從同一 RCP 不同時期下的中位數觀察，在減供月份中，每個 RCP 下在各時期的減供比例程度上表現各有不同，RCP6.0 在長期最嚴重，其餘 RCP 下則是在各時期的表

現程度較一致。在減供月份高峰和低谷部分，所有 RCP 下的各時期的表現都是一致的，另外可發現到所有 RCP 在 6 月的減供比例比起 5 月有較明顯的下降，到了 11 月則比起 10 月有明顯的上升。

RCP4.5 和 RCP8.5 在整體 IQR 大小方面比較沒有特別在哪個時期最大或最小，RCP2.6 則是在任何時期的變化程度都較小且一致，RCP6.0 的中長期為最小，RCP8.5 則是中短期最小，但有較大的離群值出現。另外從水文年乾濕季角度來對 IQR 劃分的話，所有 RCP 下各時期的乾季和濕季表現上差不多，其中細微差別在於 RCP2.6 和 RCP6.0 的 IQR 變化範圍較小，而 RCP4.5 和 RCP8.5 的 IQR 變化範圍則較大。

三、兩用水情境趨勢比較

首先與農業優先情境互相比較整體趨勢，可發現工業優先情境比起前者的減供比例要降低很多，農業優先情境下的減供狀況在乾季月份幾乎是整個月都是低於規線值，而且縱使是濕季月份也都是整個月裡也占了半個月，在減供高峰與低谷上，則與農業優先情境大致相同。同一時期不同 RCP 下來檢視的話，任何時期的減供比例的嚴重程度從 RCP2.6 上升，接著為 RCP4.5，最嚴重的情境為 RCP6.0，而 RCP8.5 的減供比例會比 RCP6.0 再下降。RCP8.5 的減供比例程度在所有時期都接近 RCP2.6。而在 IQR 部分，因為農業優先情境中進入水庫前的保留量較多，所以蓄水量上就會比較少，尤其在乾季很容易低於規線值，造成農業優先情境所有模式很多月分都高到很接近 1，使乾季 IQR 很小；反觀工業優先情境的設定是扣除少許必要保留量後先蓄滿水庫，自然減供比例下降很多，而呈現出乾濕季 IQR 趨勢較一致的表現，而關於月份趨勢的討論，詳見第六節上坪溪流量對寶二水庫缺水之影響再行說明。

水利署設立水庫運用規線的用意是要初步提醒水情的狀況需要注意，並留意與評估未來幾個月是否會有缺水的風險，若水庫蓄水量低於規線時，台灣自來水公司第三區管理處會視狀況得減量供水。事實上減供比例的意義是表示出現供水不足的狀況而需預警情形，並不是像缺水比例定義的無水可用，因此新竹科學園區廠商可視減供比

例為一個預警訊號，留意後續水情變化並可提前預備如廠區內減少或停供非生產性用水如澆灌、外牆清洗、消防訓練等調適措施。

第五節 未來模擬情境與基期之比較

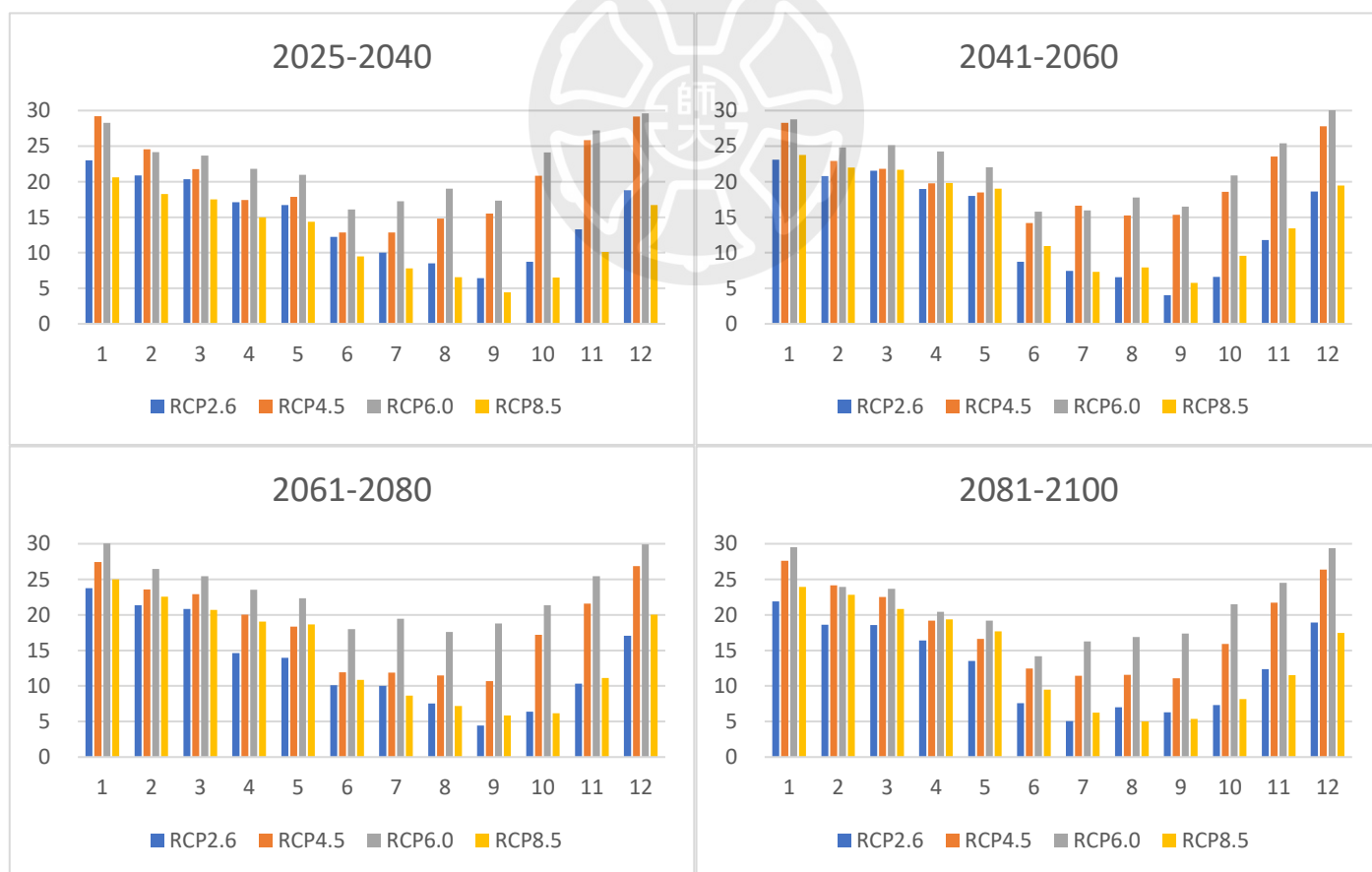
除了利用盒鬚圖來檢視未來缺水狀況的趨勢之外，在氣候變遷研究中也需要去分析未來與基期缺水狀況相比的變化程度，通常會使用變化率呈現。計算方式為針對某一氣候指標，以各推估時期之平均值減去基期之平均值，得出各時期之變化量，其數值除以基期之平均值再乘以 100%，以得出變化率百分比，需要注意這裡的基期是指模擬出的現況，而非實際現況。因此本研究利用 SWAT 模擬出的基期上坪流量站日流量資料，時間為 1987-2005 年，輸入兩供水情境之水流架構，即得到逐日水庫蓄水量，但為求架構內蓄水量模擬能趨於穩定，因此將 1987-1989 共三年的資料作為 Warm-up，而作為基期採用的時間段則為 1990-2005 年共 16 年，因此本研究基期的時間段定義為 1990-2005 年。基期為一個階段，因此同樣利用函數算出各 GCM/ESM 的逐年逐月的缺水天數，然後計算各 GCM/ESM 下逐月份缺水天數平均數，即可得出基期各 GCM/ESM 下 1-12 月的缺水天數平均值。

在氣候變遷研究中，通常會使用變化率百分比的形式來檢視未來各時期推估之某指標與基期相比之變化程度。在本研究中所採用的指標為缺水天數，各 RCP 及各時期的每個月份包含各自採用的 GCM/ESM 的缺水天數資料，例如在 RCP2.6 下本研究採用 8 個 GCM/ESM，即代表每個月份會有 8 個 GCM/ESM 的缺水天數資料，以此類推。為了取出一個在該月份中具有代表性的數字，本研究選擇使用中位數為呈現，而在檢視所有時期各月份所萃取出的中位數時，發現基期的 9 月和 10 月的缺水天數中位數為 0，若要計算未來各時期之變化百分比的話，就會不符合數學規則，因為分母不得為 0，因此本研究中不以變化率呈現，改以減去基期的差值並利用長條圖呈現。

一、缺水天數

在農業優先情境下，從缺水天數(圖 4-11)來看可發現在各時期的 RCP4.5 與 RCP6.0 表現較 RCP2.6 與 RCP8.5 嚴重，而整體變化趨勢大致是自 9 月缺水天數最低開始上升，到 1 月最高後再下降至 9 月。月份在各時期間的變化趨勢則較不一致。計算各月份缺水天數與基期相比之差值(圖 4-12)，可發現 RCP4.5 與 RCP6.0 在未來幾乎都比基期要嚴重，其中 RCP6.0 天數增加最多，而兩者從 4 月開始天數變化持續上升至 10 月最多，再下降至 3 月；RCP2.6 在短期的 5-8 月、中短期的 4-5 月，及中長期的 6-7 月缺水天數差值增加之外，其餘則是比基期少，其中可發現天數差值增加的月份都是在豐水期；RCP8.5 的部分則是在中短期的 4-6 及 10 月、中長期的 4-7 月、長期的 4-6 月差值增加之外，其餘則比基期少，其中可發現增加的月份同樣也是在豐水期前期。

圖 4-11 農業優先情境寶二水庫擴容前缺水天數長條圖



註：橫軸代表月份、縱軸代表缺水天數

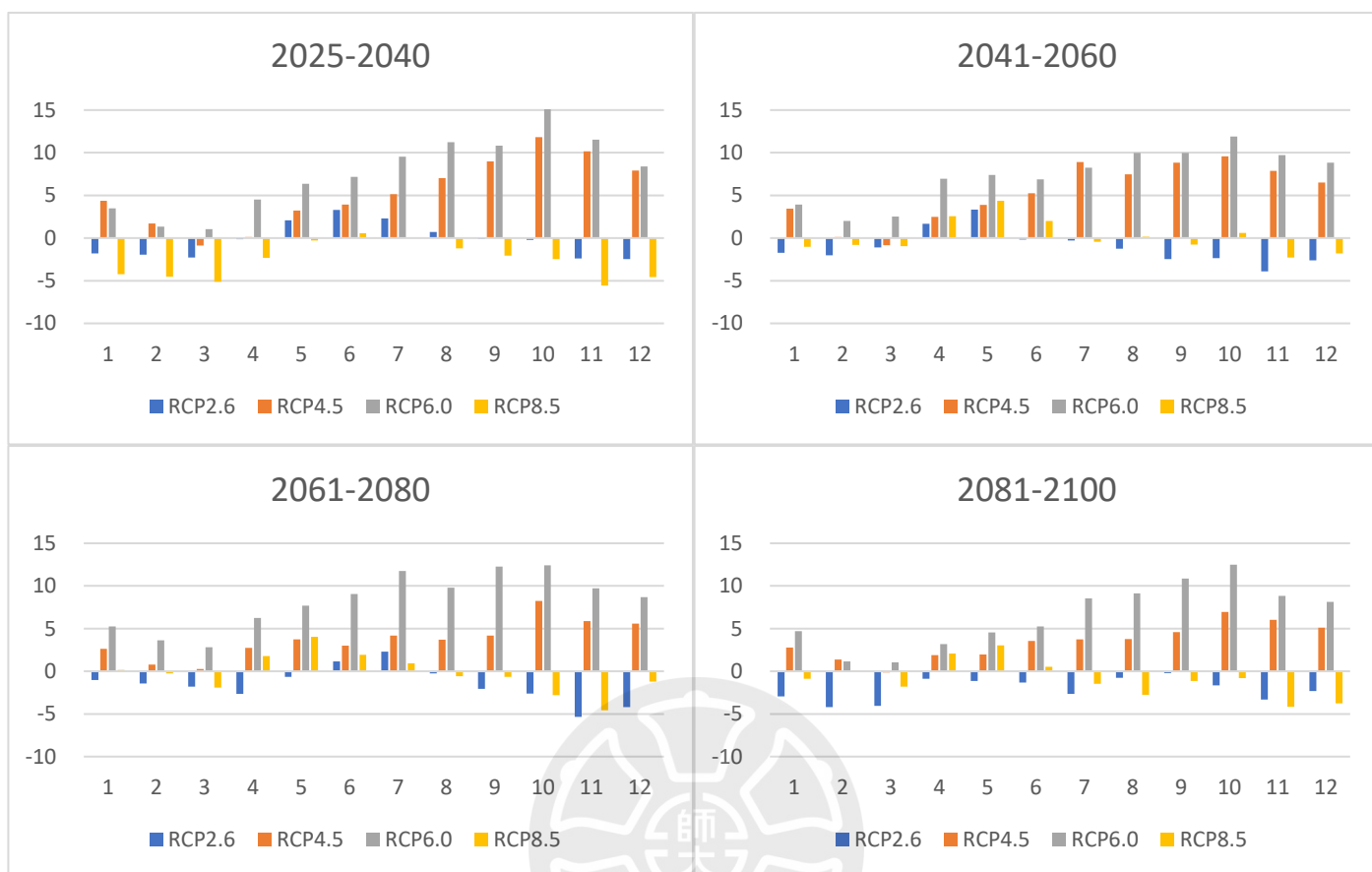


圖 4-12 農業優先情境寶二水庫擴容前缺水天數與基期相比差值長條圖

註：橫軸代表月份、縱軸代表缺水天數與基期之差值

在工業優先情境下，從缺水天數(圖 4-13)來看可發現在各時期的 RCP4.5 與 RCP6.0 表現較 RCP2.6 與 RCP8.5 嚴重，而整體變化趨勢大致是自 9 月缺水天數最低開始上升，到 1 月最高後再下降至 9 月。月份在各時期間的變化趨勢則較不一致。計算各月份缺水天數與基期相比之差值(圖 4-14)，可發現 RCP4.5 與 RCP6.0 在未來幾乎都比基期還要嚴重，其中 RCP6.0 天數增加最多，但增加程度明顯比農業優先情境降低許多，而兩者差值天數增加的月份變化各時期較不一致，但還是可以大致分成豐水期增加較少，枯水期增加較多；RCP2.6 在未來的缺水天數變化均比基期少；RCP8.5 的部分則是在中短期的 4-6 及 8-9 月、中長期的 4-6 月、長期的 4-6 月差值增加之外，其餘則是比基期少，其中可發現增加的月份在豐水期前期。

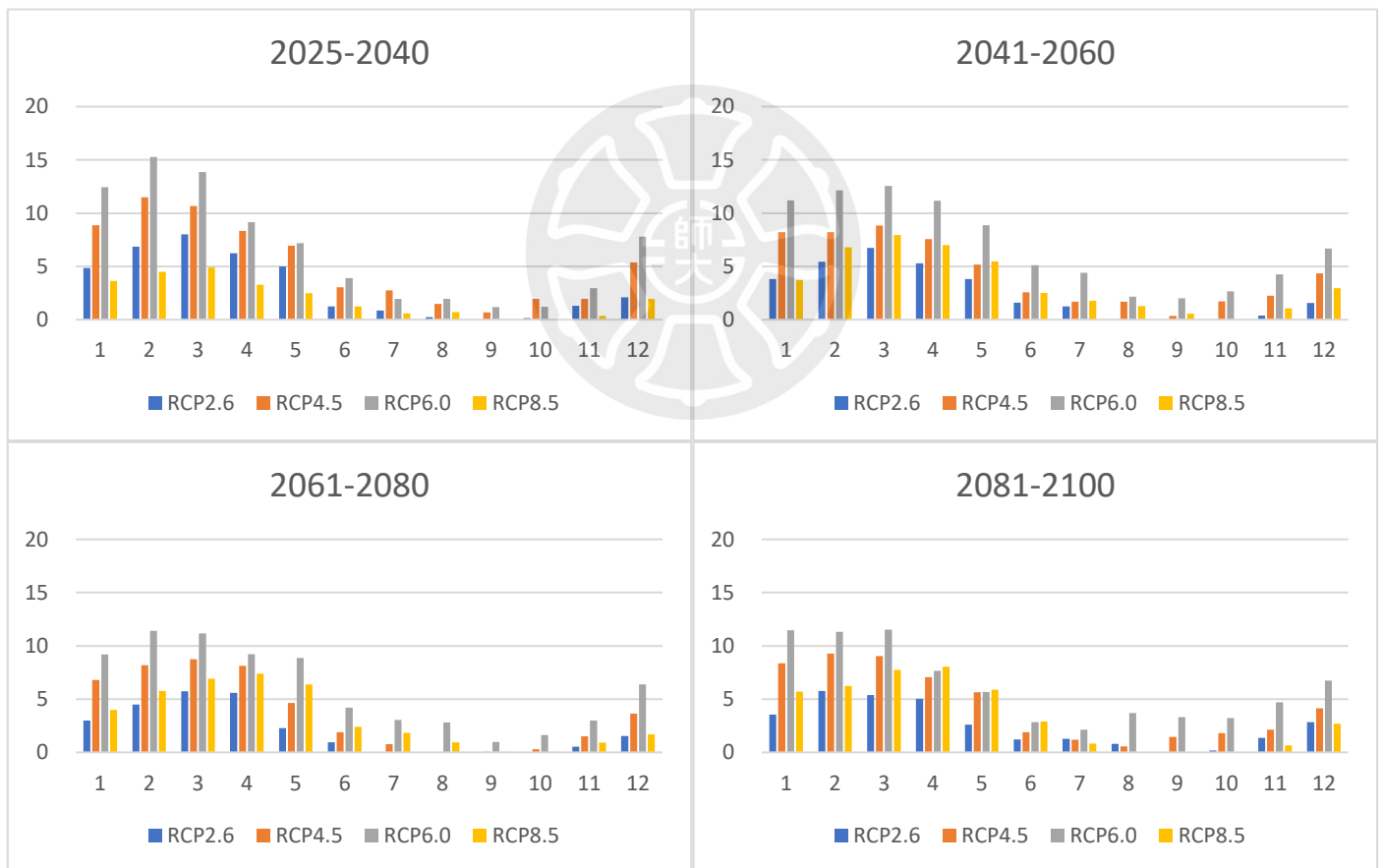


圖 4-13 工業優先情境寶二水庫擴容前缺水天數長條圖

註：橫軸代表月份、縱軸代表缺水天數

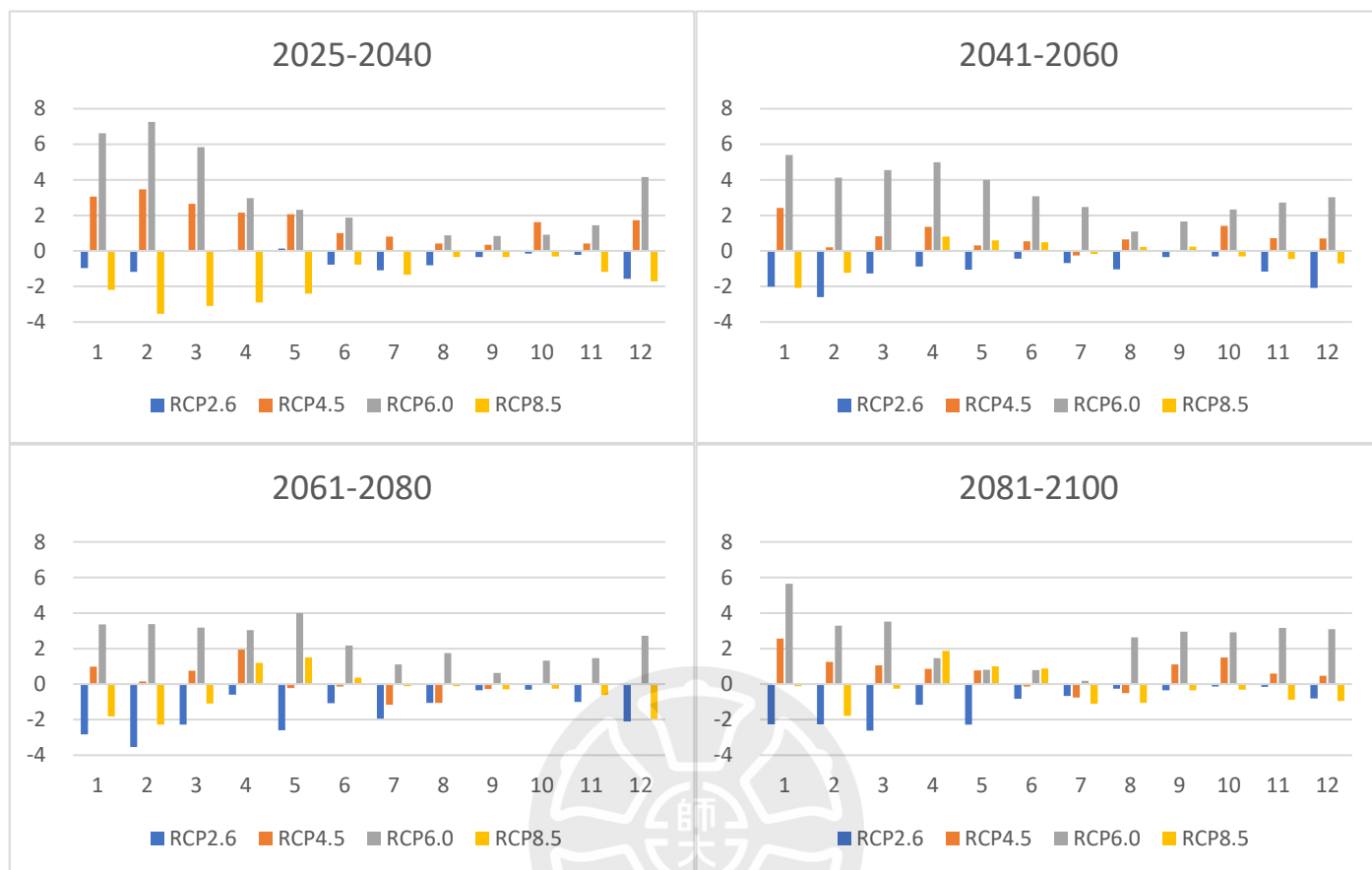


圖 4-14 工業優先情境寶二水庫擴容前缺水天數與基期相比差值長條圖

註：橫軸代表月份、縱軸代表缺水天數與基期之差值

二、減供天數

在農業優先情境下，從減供天數(圖 4-15)來看可發現在各時期的 RCP4.5 與 RCP6.0 表現較 RCP2.6 與 RCP8.5 嚴重，但在濕季只是很細微的差別，乾季時 4 個 RCP 表現都很嚴重且增加幅度一致，月份變化 10 月至隔年 5 月比起 6-9 月的增加天數多，月份在各時期間的變化趨勢則較不一致。計算各月份減供天數與基期相比之差值(圖 4-16)，可發現 RCP4.5 與 RCP6.0 在未來幾乎都比基期還要嚴重，其中 RCP6.0 天數增加最多，造成 12 月和 1 月的各時期差值最低是因為基期和未來幾乎整個月都缺水，因此幾乎沒有變化；RCP2.6 在短期大致呈現月份天數差值增加，中短期變化不明顯，中長期和長期缺水天數差值反而大致減少，其中可發現增加的月份都是在豐水期；RCP8.5 則是在短期月份差值均為減少，中短期大致增加、中長期大致減少、長期的 2-6 月差值增加之外，其餘則是比基期少。

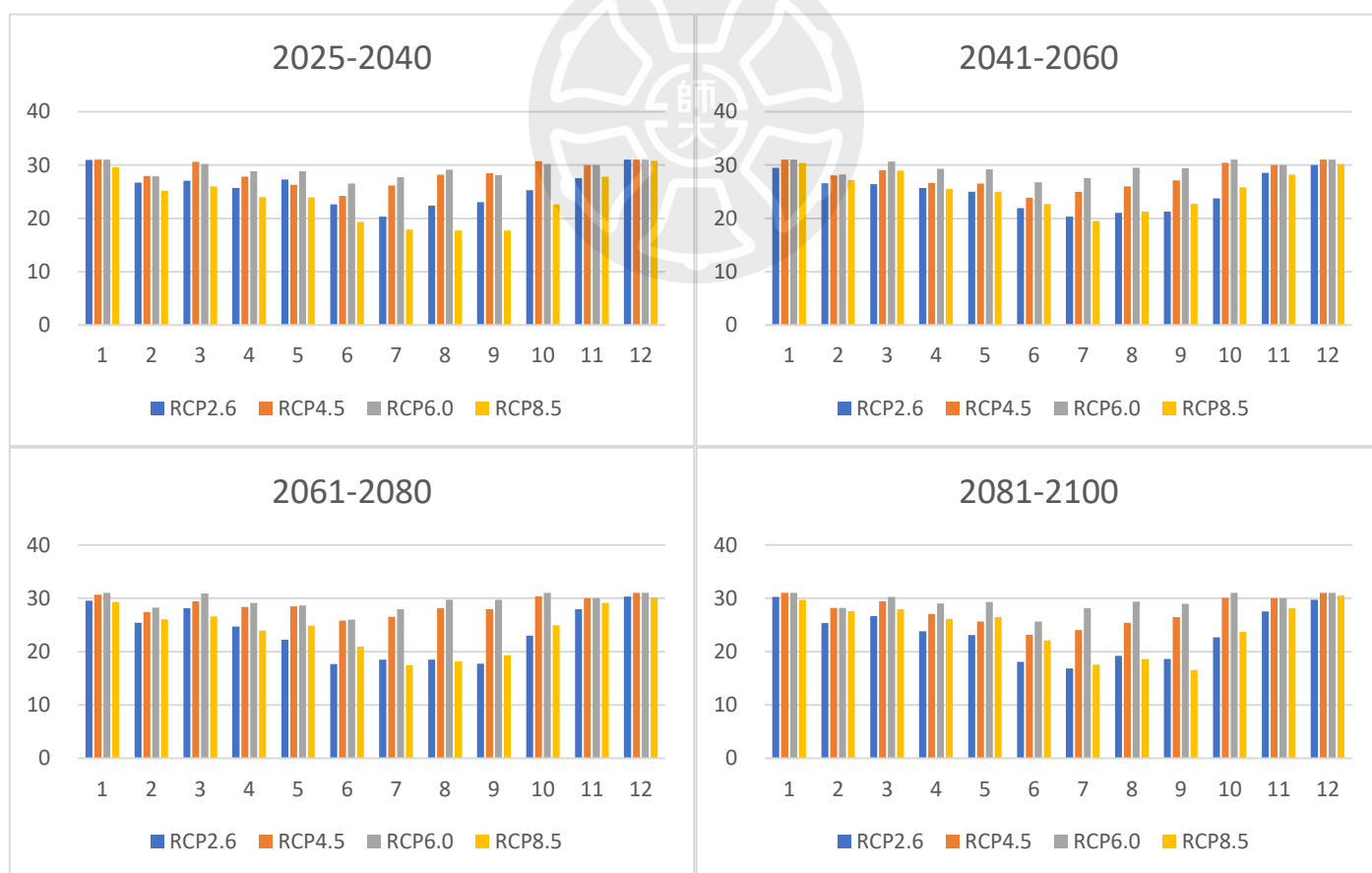


圖 4-15 農業優先情境寶二水庫擴容前減供天數長條圖

註：橫軸代表月份、縱軸代表缺水天數

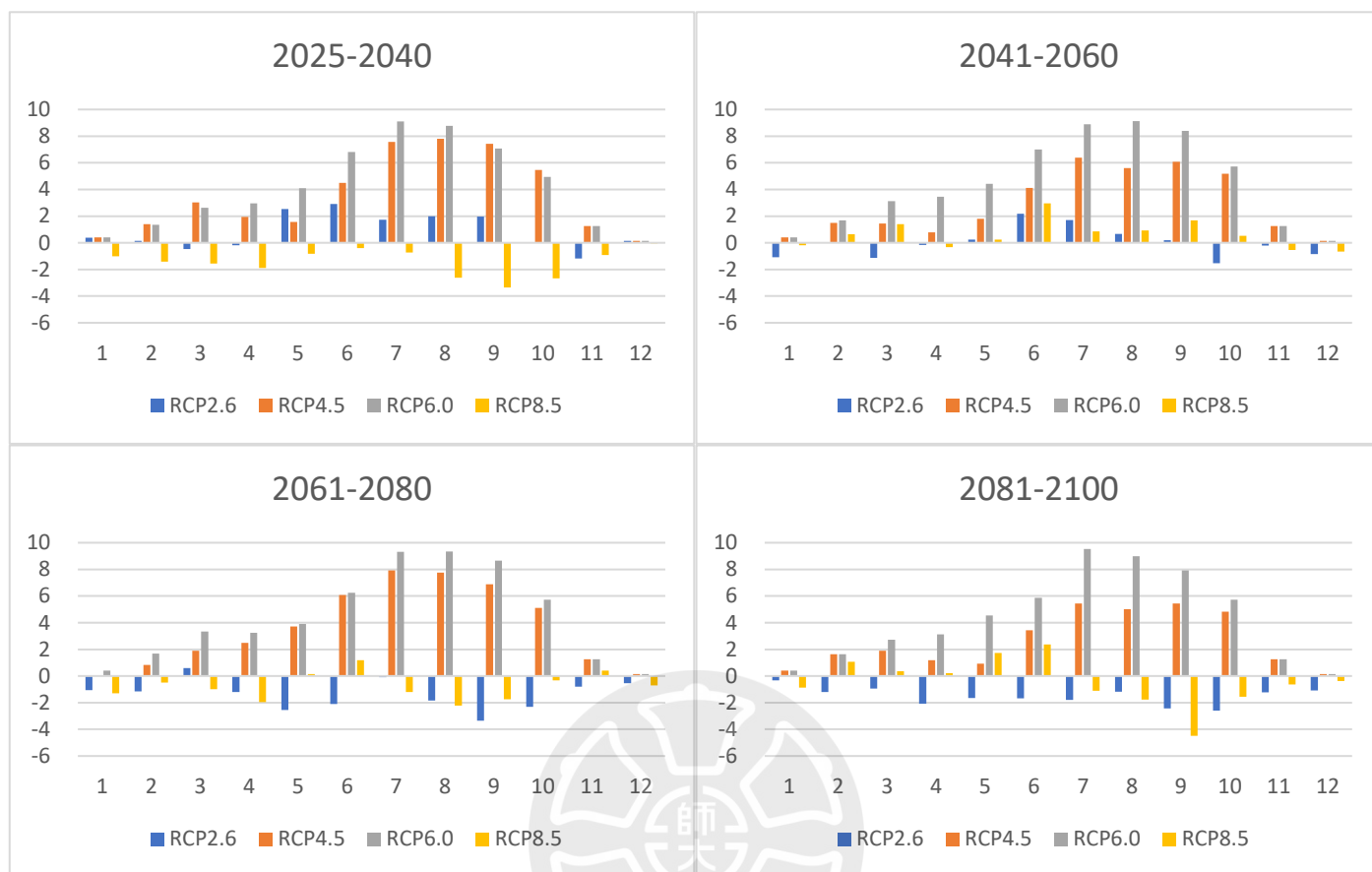


圖 4-16 農業優先情境寶二水庫擴容前減供天數與基期相比差值長條圖

註：橫軸代表月份、縱軸代表缺水天數與基期之差值

在工業優先情境下，從減供天數(圖 4-17)來看可發現在各時期的 RCP4.5 與 RCP6.0 表現較 RCP2.6 與 RCP8.5 嚴重，而整體變化趨勢大致是自 9 月缺水天數最低開始上升，到 1 月最高後再下降至 9 月。月份在各時期間的變化趨勢則較不一致。計算各月份減供天數與基期相比之差值(圖 4-18)，可發現 RCP4.5 與 RCP6.0 在未來幾乎都比基期還要嚴重，其中 RCP6.0 天數增加最多，兩者在 4-11 月差值增加程度比 12 月至隔年 3 月多；RCP2.6 在未來的缺水天數變化均比基期少；RCP8.5 的部分則是在短期月份差值均為減少，中短期 4-7 月差值增加，9 月至隔年 3 月減少、中長期 2-7 月差值增加，8 月至隔年 1 月減少、長期的 2-6 月差值增加，7 月至隔年 1 月減少。

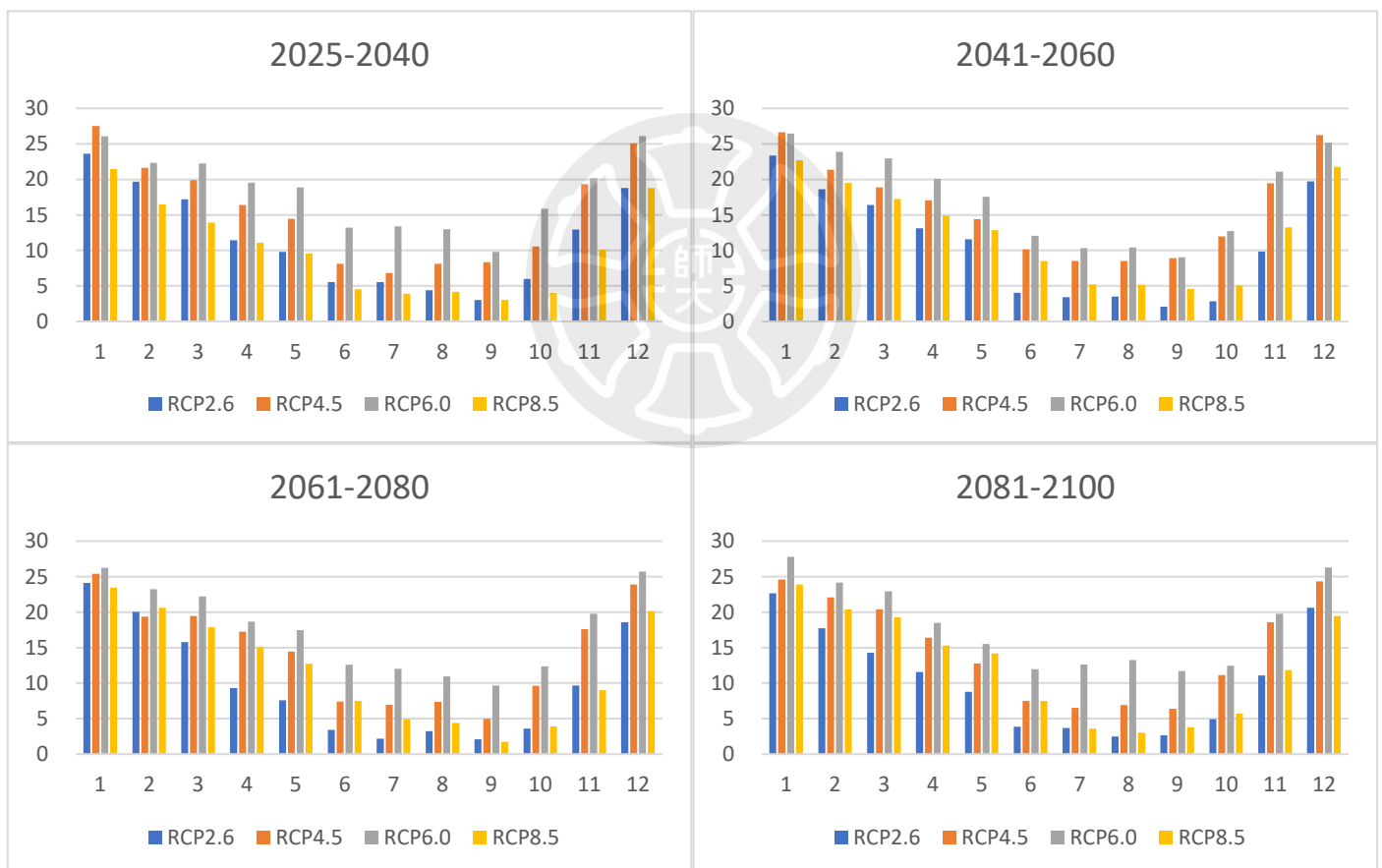


圖 4-17 工業優先情境寶二水庫擴容前減供天數長條圖

註：橫軸代表月份、縱軸代表缺水天數

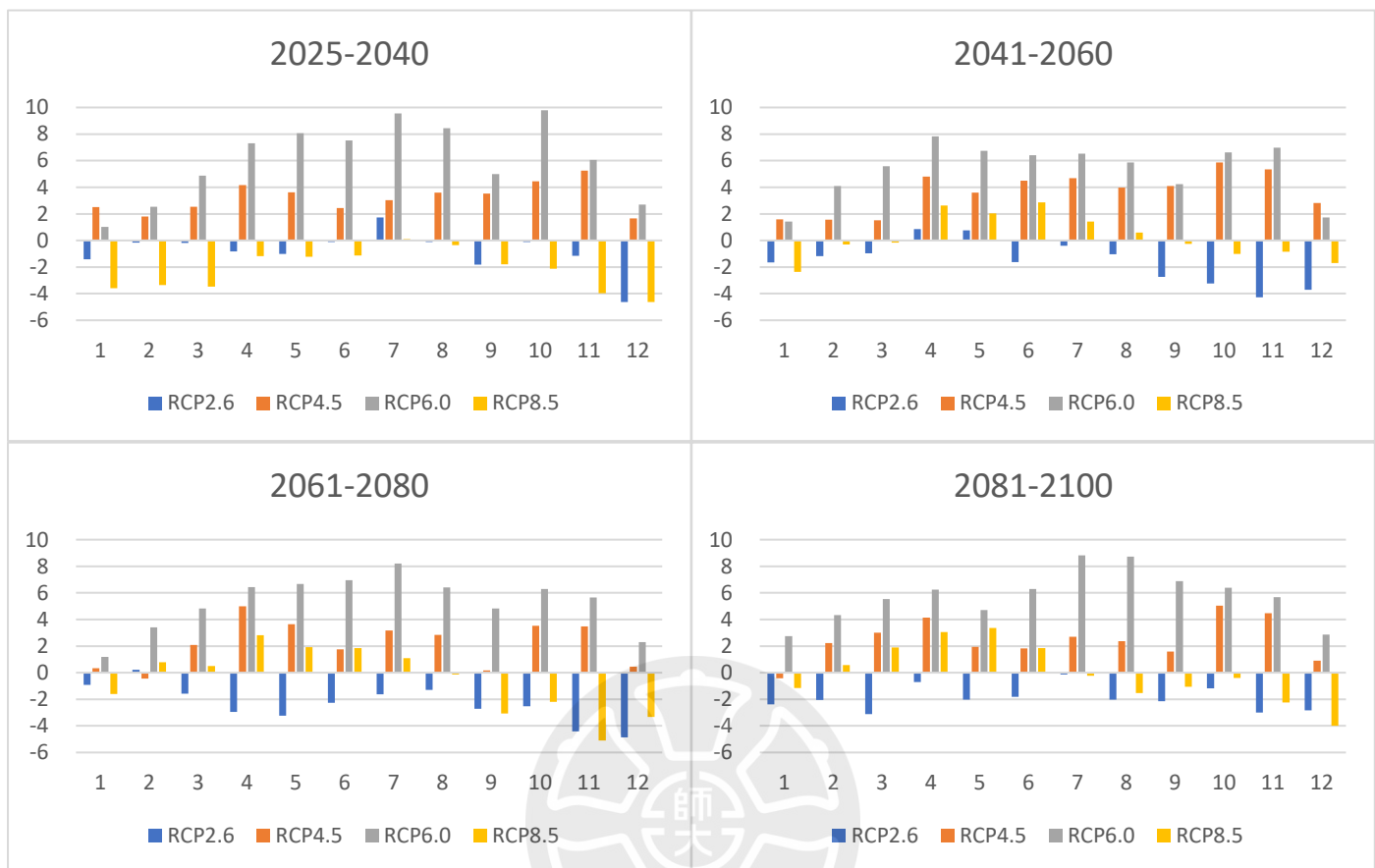


圖 4-18 工業優先情境寶二水庫擴容前減供天數與基期相比差值長條圖

註：橫軸代表月份、縱軸代表缺水天數與基期之差值

第六節 上坪溪流量對寶二水庫缺水之影響

造成兩種用水情境的未來各 RCP 下水庫不同的缺水趨勢變化主要原因推測是河川流量的多寡以及用水架構設定，因此需回頭檢視 SWAT 流量資料，若要解釋在兩種不同用水情境下的水庫缺水比例和減供比例變化趨勢的話，利用變率表解釋可能不是一個合適的方式，這是因為變化率的意義主要是跟各自月份的基期流量來比較變化程度，也就是說比較的基準是自身月份的現況流量，若以基期 8 月流量 17.22 CMS 與 12 月流量 3.01 CMS 舉例，假設在未來某時期各增加了 50%，那 8 月流量就會為 25.83 CMS，12 月則為 4.52 CMS，由此可觀察到 8 月增加了 8.61 CMS，而 12 月卻只增加了

1.51 CMS，實際上增加的流量相差很大，所以變化率是無法與其他月份比較實際流量增加或減少的量，因為基期流量在各月份表現上就有很大的差異，而影響水庫蓄水量多寡的主要因素還是以上游流量數字為主，因此要解釋水庫缺水和減供在各月份的變化趨勢的話，還是要以實際流量數字說明為佳。

一、缺水比例月份趨勢

在第三節缺水比例部分觀察到在農業優先情境架構下寶二水庫的缺水高峰落在 12 月至 2 月，會造成這樣的情況主要是因為流量本身的數字變化，上坪溪流量資料特性分析可參考第一節。在 6-9 月的濕潤程度來說，縱使上坪堰的水於 6-9 月每旬需要扣掉 8-10 CMS 的保留量，基本上還是可以讓水庫有一定的入流量，是水庫缺水低谷，但是從 10 月開始至 12 月，現況及未來流量數字均低於總保留量(圖 4-19、表 4-4)，也就是說在這三個月水庫是無法儲水的，只能靠著 9 月的水庫蓄水量撐著，這樣就會造成在農業優先情境下的水庫在豐水期的儲水很快就會被消耗掉，缺水比例會急速上升。根據第三節缺水比例中農業優先情境下的缺水高峰為 12-2 月，在 10 月沒有入流量的狀況下，可推算水庫可延緩缺水時間大致為 2-4 個月。

而在工業優先情境設定以水庫的供水為優先，總保留量只包含生態基流量與下游工業民生用水量(圖 4-20、表 4-5)，全年各旬均為 1.27 CMS，觀察流量表就可以發現到各個月的流量均高於 1.27 CMS，因此水庫在 10 月流量急速下降之後，甚至是 12 月到隔年 1 月流量只有大概 3 CMS 的狀態下也會有一定或少許的入流量，因此水庫可以充分發揮豐水期儲水的功能，蓄水量不會像農業優先情境一樣掉得那麼快，同時缺水的情形也沒有比農業優先情境要來得劇烈，因此缺水比例呈現緩坡上升，一直到乾季末期，水庫儲存之水量吃緊才到達缺水高峰，而此種趨勢也和現行缺水多半發生在春季的實際情況有相似之處。根據第三節缺水比例中工業優先情境下的缺水高峰為 2-4 月，在 10 月流量開始大幅減少的狀態下，可推算水庫可延緩缺水時間大致為 4-6 個月。另外針對工業優先情境下的缺水比例高峰，本研究的模擬未來是落在 2-4 月，這

是 20 年平均下來後的結果，若之後某幾年遇到乾旱，原因可能是颱風沒來造成豐水期降雨過少，或是春雨減少等，就有可能會讓缺水高峰延後至 5 月的情況發生。

整體趨勢在同時期下，RCP2.6 至 RCP6.0 缺水比例愈來愈高，到 RCP8.5 會呈現下降的趨勢，造成最極端的 RCP8.5 卻非最為乾旱之情境之可能原因，為最源頭的 SWAT 模擬流量趨勢，這是因為根據 TCCIP 模擬資料，未來最嚴重的 RCP8.5 情境下，21 世紀末臺灣不論是多雨日數、豪雨日數等極端降雨指標，推估結果皆有增加的趨勢（國家災害防救科技中心，2018），也就是乾季越乾、濕季越濕，降雨特性趨向兩極化，而這在流量模擬結果(表 4-1)中也可以看到此趨勢，進而導致 RCP8.5 的整體流量上升，降雨總量比起 RCP6.0 是變多的情況，因此 RCP8.5 不是最缺水的情境。

另外上述提到從 RCP2.6 到 RCP8.5，流量的模擬呈現乾季越乾、濕季越濕的趨勢，照理說濕季越濕的 RCP 情境可以有更多的流量，乾季缺水比例應該要比較低，但是在乾季缺水比例呈現上 RCP2.6 至 RCP6.0 則是越來越高的情況，原因是因為在用水情境設計上有考慮到濁度的關係，會導致有些天數因為上游集水區降雨過大，導致河川水質濁度過高，為保護水庫而無法進行取水。

各時期各月的缺水比例與減供比例 GCM/ESM 資料散佈程度，是藉由盒鬚圖的 IQR 判斷，兩用水情境下的缺水比例整體趨勢大致上是呈現乾季不確定性較大，濕季較小。而在減供比例的整體趨勢上，卻與前者不同，反而是濕季不確定較大，乾季較小。造成這樣表現的原因除了乾濕季本身變化率差異上之外，還有名詞上定義，也就是界線訂定的問題。缺水的定義是當天水庫進出水後的可引水量為 0 即為缺水，在濕季時因流量多，多到足夠負擔下游總保留量還能讓水庫有一定的入流量，縱使有某幾個模式在濕季月份流量減少變化率大，但因濕季流量本來就大，流量自然也不會太少，再怎麼樣都比乾季流量多，因此幾乎所有模式下水庫可引水量基本上離 0 還有很大的距離，缺水天數上的變化程度就會比較小；而雖然乾季流量數字變化上不比濕季來的大，但因為乾季的流量太少導致水庫蓄水量降低，就會逼近可引水量為 0 的界線，流量數字高低的變化就會很大的影響到當天是否缺水，缺水天數就會變化很大。

二、減供比例月份趨勢

另一方面，減供天數的定義上是水庫聯合蓄水量低於規線以下的天數，也就是說月份趨勢會跟著各個月規線訂定的數值變動。首先自 9-12 月說明，在這四個月的規線數值每日均為 2700 萬立方公尺，流量驟減的 10 月，因為還能使用在 9 月流量高時讓水庫還有接近滿庫的水，減供比例會與 9 月差不多但稍微增加一點，但到了 10-12 月，流量迅速減少，會使的水庫蓄水量迅速下降，在相同規線標準下，9-12 月的減供比例會逐漸上升，接下來是 1-2 月，造成 1 月減供比例會是最後，之後 2 月下降的原因有兩個，第一是因為 2 月流量比起上個月增加大概 1-2 CMS。第二是規線值是自 1/1 為 2700 萬立方公尺線性下降至 2/28 或 2/29 的 2400 萬立方公尺，也就是說在 1 月蓄水量要低於規線值比 2 月要來的容易，因此綜合上述兩點，2 月在流量些微增加且規線標準下降的影響，減供比例會比 1 月來的低一點，最後 3-8 月因為規線都是持平在 2400 萬立方公尺，標準是一致的，且流量開始逐漸上升致使蓄水量也持續增加，因此減供比例就會開始逐月下降至 8 月。

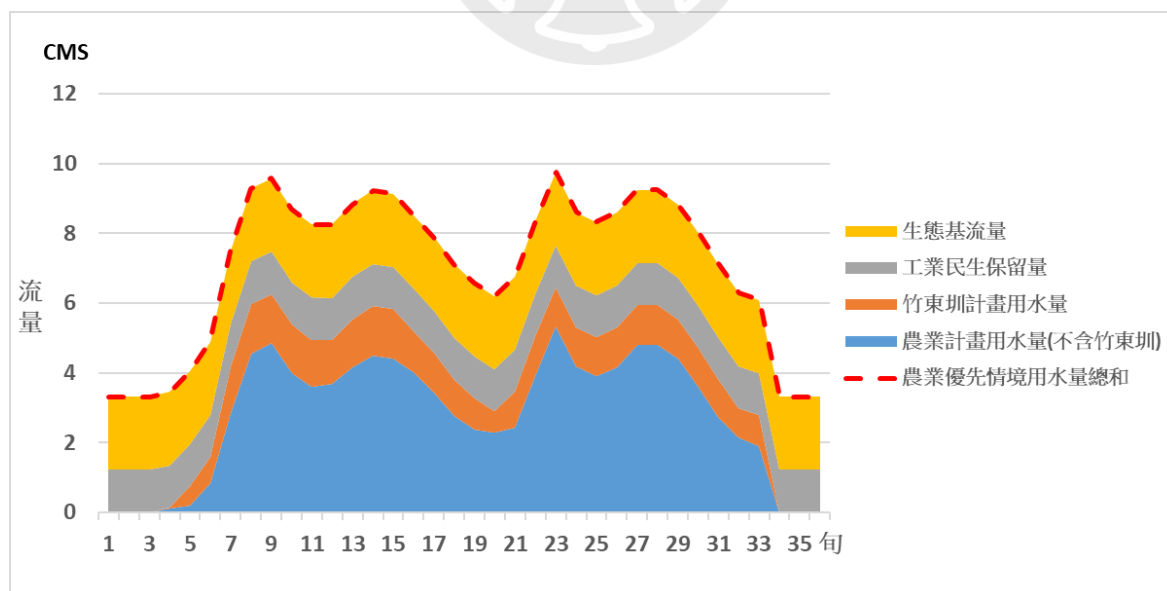


圖 4-19 農業優先情境細部用水量

表 4-4 農業優先情境總保留水量

單位：CMS

月	1			2			3			4			5			6		
旬	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
農業計畫用水量	0.00	0.00	0.00	0.10	0.20	0.82	2.84	4.56	4.87	3.98	3.61	3.68	4.16	4.50	4.40	4.01	3.44	2.77
竹東圳計畫用水量	0.00	0.00	0.00	0.03	0.54	0.76	1.34	1.42	1.39	1.40	1.34	1.26	1.37	1.42	1.42	1.19	1.13	1.02
工業民生保留量	1.21																	
生態基流量	2.1																	
總保留水量	3.31	3.31	3.31	3.45	4.05	4.89	7.50	9.29	9.57	8.69	8.26	8.25	8.84	9.23	9.13	8.51	7.89	7.10
月	7			8			9			10			11			12		
旬	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36
農業計畫用水量	2.38	2.29	2.43	3.92	5.32	4.17	3.89	4.17	4.81	4.81	4.40	3.61	2.73	2.15	1.90	0.00	0.00	0.00
竹東圳計畫用水量	0.88	0.60	1.02	1.12	1.12	1.12	1.12	1.12	1.12	1.12	1.12	1.12	1.08	0.84	0.88	0.00	0.00	0.00
工業民生保留量	1.21																	
生態基流量	2.1																	
總保留水量	6.57	6.20	6.76	8.35	9.75	8.60	8.33	8.60	9.24	9.24	8.83	8.04	7.12	6.30	6.09	3.31	3.31	3.31

註：表格中數字四捨五入取到小數點第二位

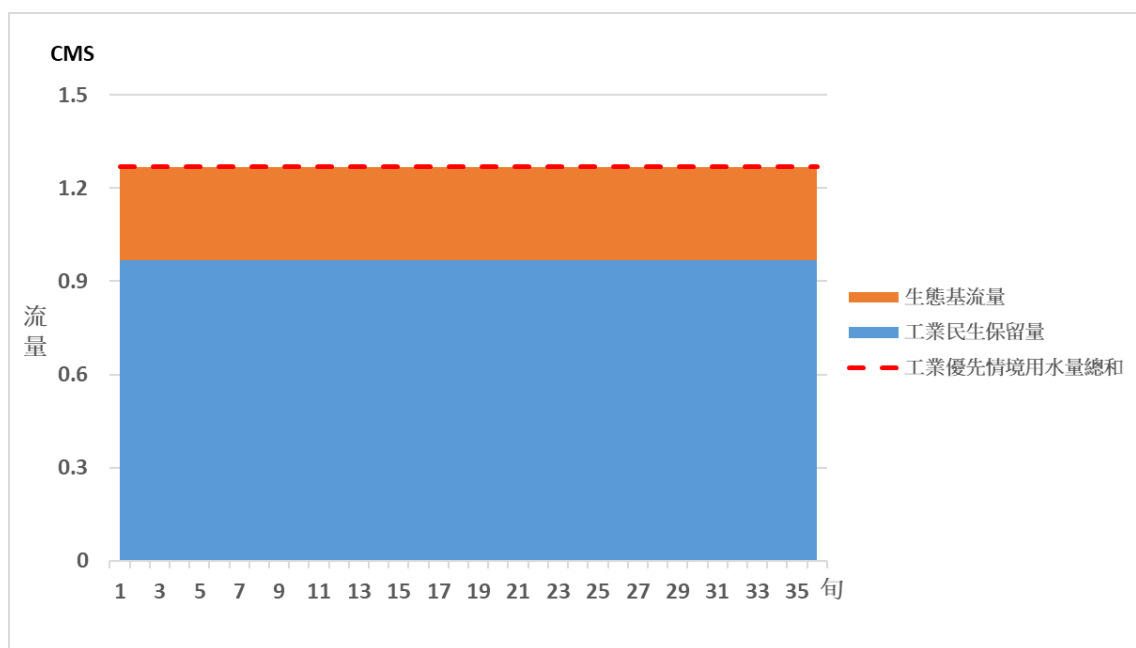


圖 4-20 工業優先情境細部用水量

表 4-5 工業優先情境總保留水量

單位：CMS

月	1			2			3			4			5			6		
旬	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
工業民生保留量	0.97																	
生態基流量	0.3																	
總保留水量	1.27																	
月	7			8			9			10			11			12		
旬	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36
工業民生保留量	0.97																	
生態基流量	0.3																	
總保留水量	1.27																	

註：表格中數字四捨五入取到小數點第二位

第七節 寶二水庫擴容工程效益

近年新竹地區經濟發展程度逐年上升，公共給水需水量逐年增加，但受到降雨時間分布不均的影響，枯水期時供水狀況吃緊，且又到氣候變遷影響，每逢 2-3 年就會遇到乾旱，甚至枯水期連續不降雨天數有增加的趨勢，因此水利署評估若能將現有水庫擴大其蓄水量，即可在豐水期時多儲存一些水量供枯水期時利用，是對環境影響最小的方案（經濟部水利署北區水資源局，2022）。擴容工程預計於 2024 年 6 月底完工，總庫容將增加 192 萬立方公尺，在本研究假設之用水情境上，考慮擴容後增加的蓄水量進行模擬，以檢視擴容工程對於缺水風險降低的影響及效益。

從兩情境擴容前後共四張複合盒鬚圖檢視(圖 4-21 至圖 4-24)，基本上不論是缺水比例與減供比例，整體月份間的趨勢兩者幾乎沒有什麼變化，因為增加的蓄容量不多，不太能發揮出水庫能延後缺水的功能，反而真正變化的部分是在缺水比例與減供比例上，擴容後的各個盒子幾乎是比擴容前的各個盒子微幅下降一點，也就是說擴容後的缺水比例與減供比例相較擴容前其實是有降低的，若要細究擴容其後的差別的話，從複合盒鬚圖或是比例上來分析比較看不出其中之差異，因此需要將每個盒子中的各月份中位數以天數的方式呈現，來檢視擴容前後相差的天數。計算結果如表 4-8 至表 4-11 所示。

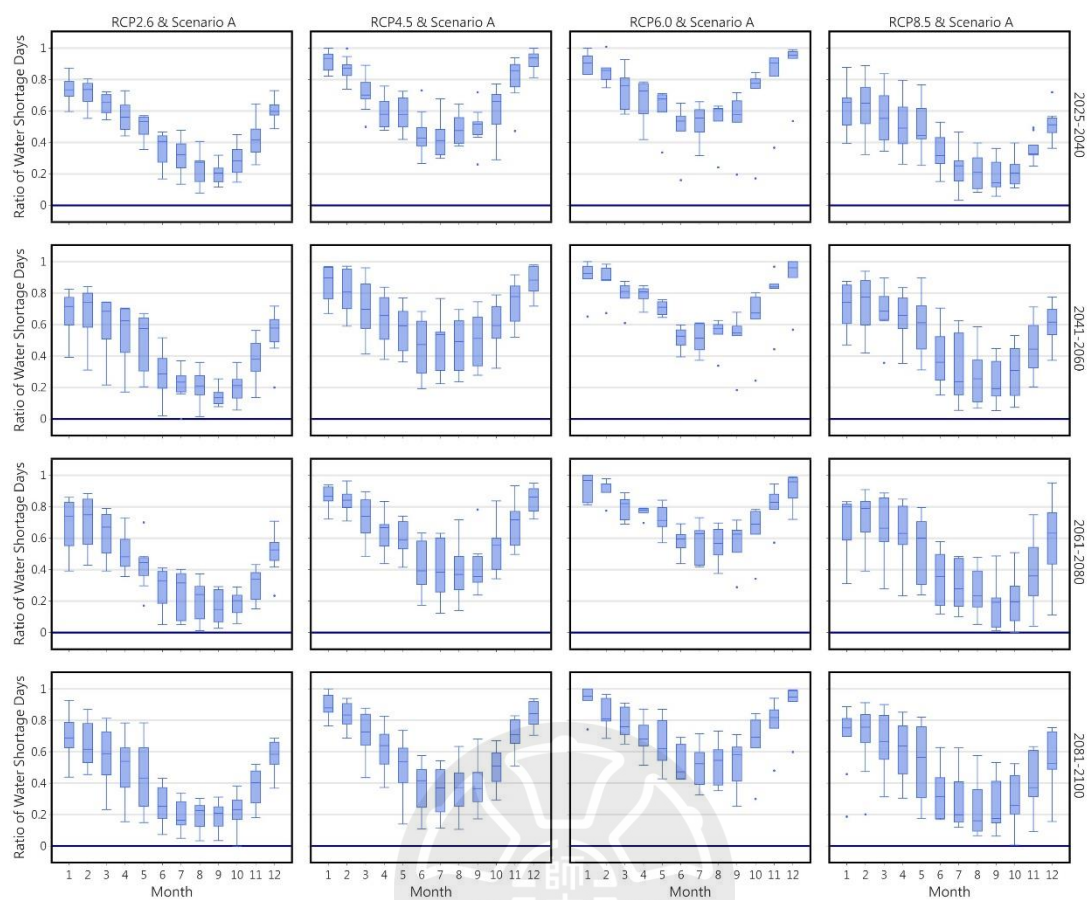


圖 4-21 農業優先情境寶二水庫擴容後缺水比例複合盒鬚圖

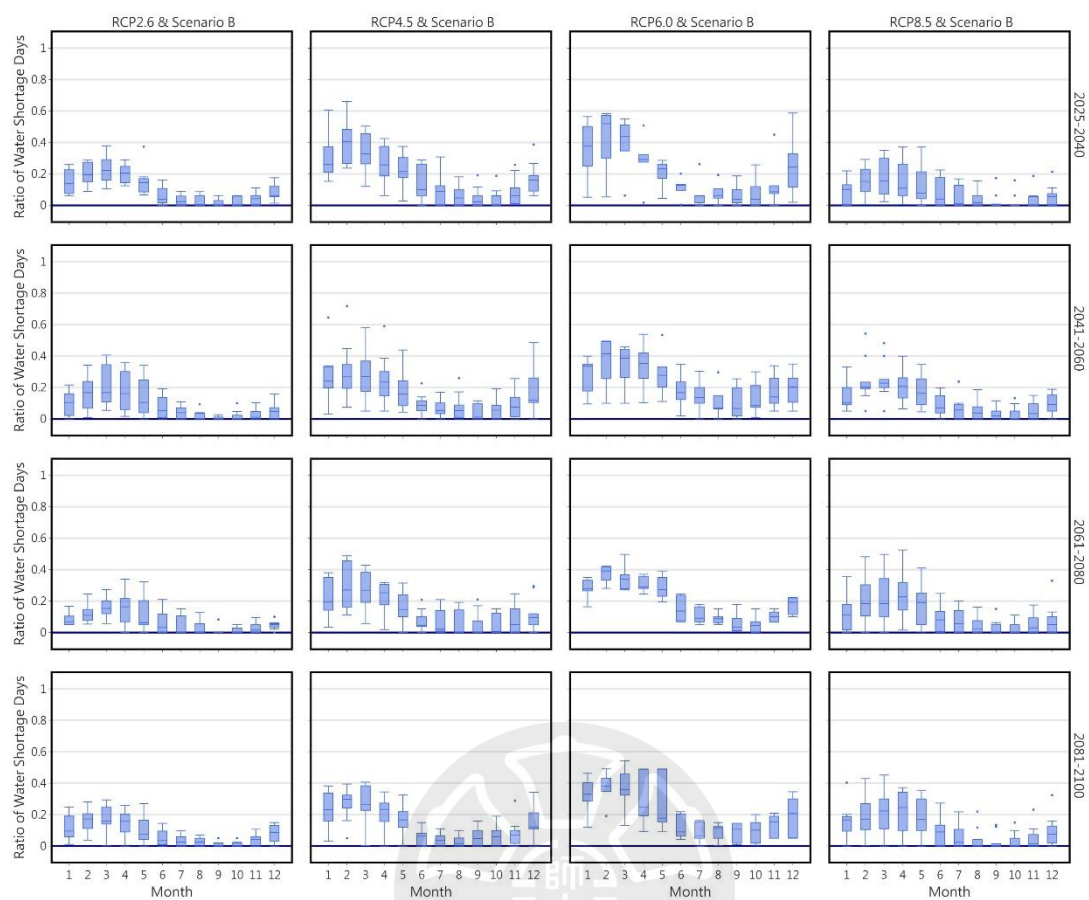


圖 4-22 工業優先情境寶二水庫擴容後缺水比例複合盒鬚圖

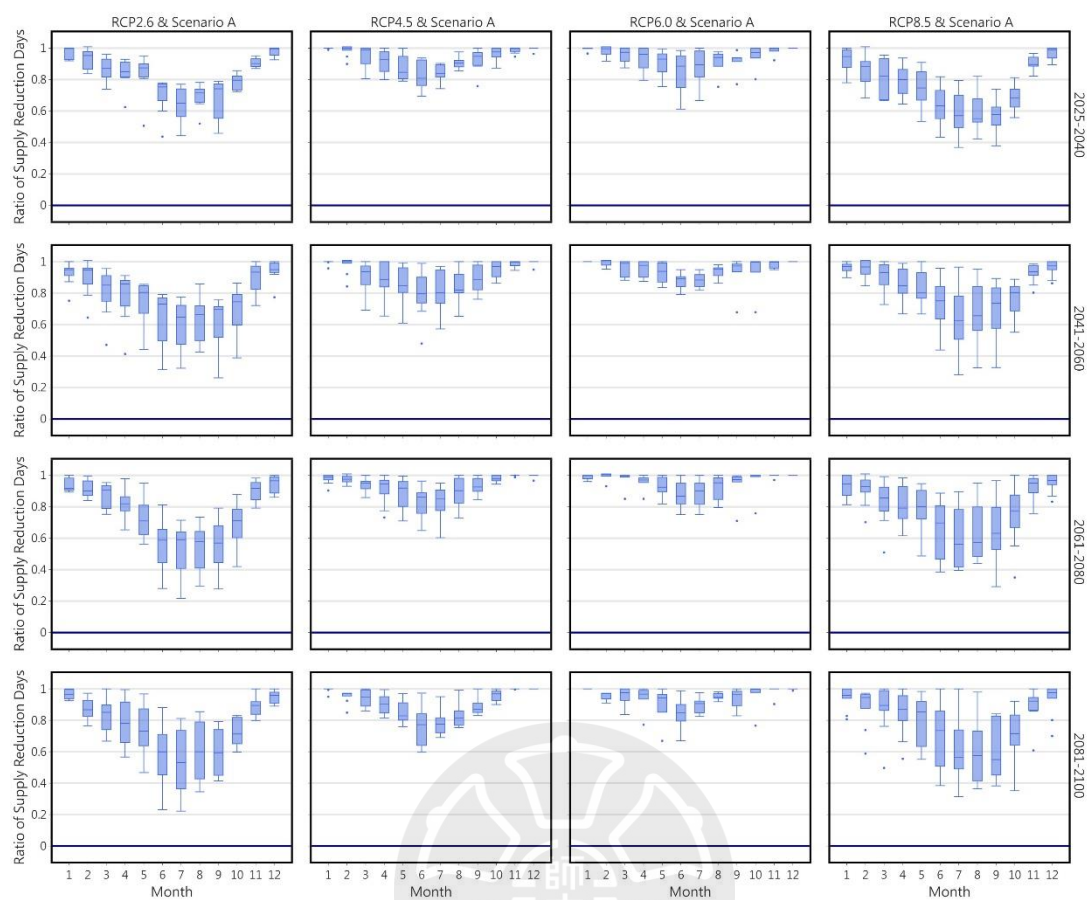


圖 4-23 農業優先情境寶二水庫擴容後減供比例複合盒鬚圖

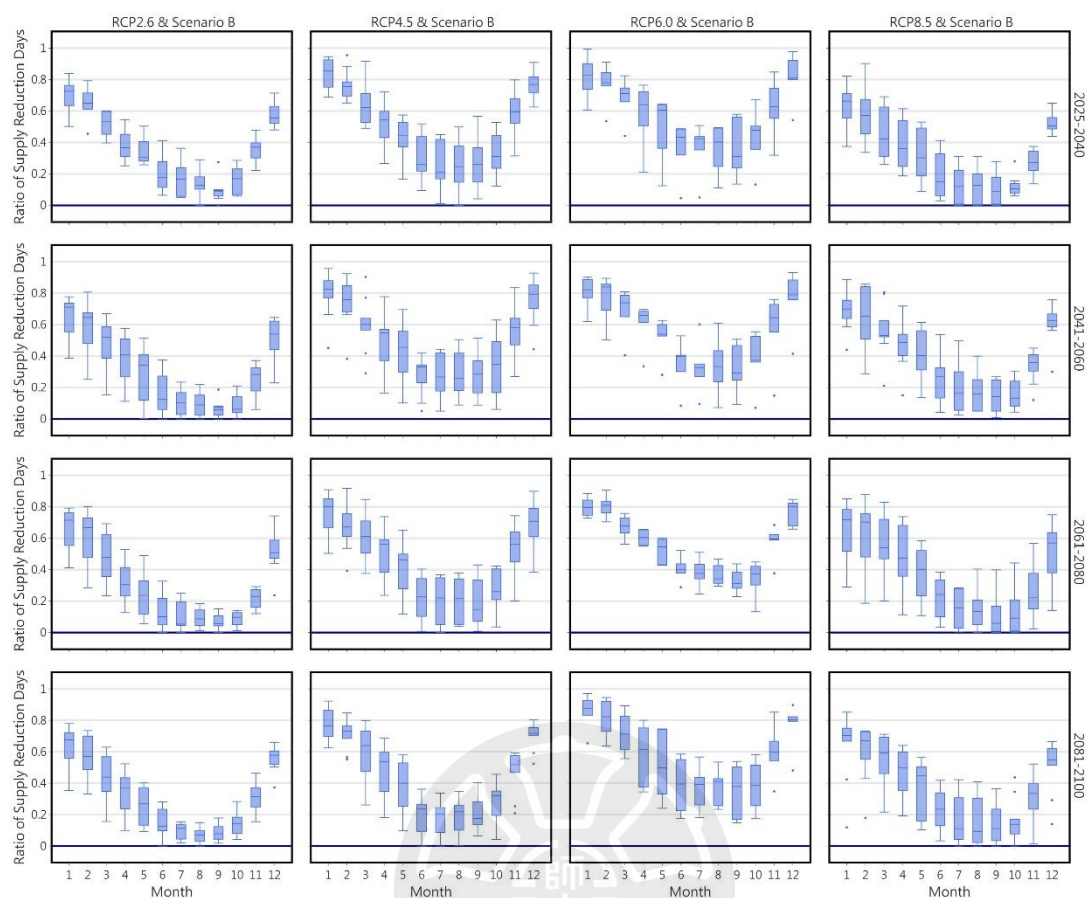


圖 4-24 工業優先情境寶二水庫擴容後減供比例複合盒鬚圖

從缺水天數層面檢視，針對農業優先情境擴容前後變化(表 4-8)，除了短期 RCP6.0 下的 11 月差值為 0 沒有改變外，其餘各情境及時期下的缺水天數均有減少，其中以長期 RCP8.5 下的 2 月差值為 5 天最大，其他月份的天數則為 1-3 天。另外將每個 RCP 下各時期的月份缺水差值加總，得出年份缺水差值，在短期的 RCP2.6、RCP4.5、RCP6.0、RCP8.5 分別為減少了 22、23、24、18 天，中短期分別為減少了 19、22、23、19 天，中長期分別為減少了 26、26、24、22 天，長期則分別為減少了 19、23、19、19 天，其中可觀察到任何 RCP 在中長期的擴容天數差值都是最多的。

另外針對工業優先情境擴容前後變化(表 4-9)，12-7 月的減少天數比 8-11 月還要來的多。年份缺水差值，在短期的 RCP2.6、RCP4.5、RCP6.0、RCP8.5 的缺水差值分別為減少了 14、19、29、15 天，中短期分別為減少了 12、19、29、15 天，中長期分

別為減少了 11、17、22、12 天，長期則分別為減少了 12、19、22、14 天，可觀察到與農業優先情境表現一樣，在任何 RCP 在中長期的擴容天數差值都是最高的。

從減供天數層面檢視，擴容後讓水庫蓄水量低於運用規線的天數比起缺水天數更少，在農業優先情境下(表 4-10)減少示警的天數大多為 0 天，少部分為 1-2 天，基本上大多集中在 8-11 月有減少，年份缺水差值在短期的 RCP2.6、RCP4.5、RCP6.0、RCP8.5 分別為減少了 3、1、0、5 天，中短期分別為減少了 4、2、0、3 天，中長期分別為減少了 4、0、1、2 天，長期則分別為減少了 4、0、0、3 天，其中短期和長期減少天數較多，另外四個時期平均皆減少 2 天。

工業優先情境下(表 4-11)減少示警的天數比起農業優先情境有稍微增加，減少天數介於 0-3 天，在 4-9 月大多為 0 天，而 10-1 月減少的較為明顯，年份缺水差值在短期的 RCP2.6、RCP4.5、RCP6.0、RCP8.5 分別為減少了 8、9、5、8 天，中短期分別為減少了 10、7、6、9 天，中長期分別為減少了 13、11、11、9 天，長期則分別為減少了 10、10、5、9 天，其中短期和中短期減少天數較多，另外四個時期平均分別減少 8、8、11、9 天。

總結來說，雖然從缺水天數來看各時期整年只下降了 20 幾天，但真正可以體現擴容的意義事實上是在於產值的部分，單位產值計算方式為營業額除以用水量，並用該比值表示一單位的水資源可換算成多少單位的營業額。本研究利用 2023 年新竹科學園區新竹園區各月份的營業額（新竹科學園管理局，2024）分別除以各月份的用水量（國家科學及技術委員會統計資料庫，2024c），就會是各月單位用水量產值，再將 12 個月數值取平均值後即可獲得平均單位用水量產值，為每立方公尺 23362.09 元新臺幣(表 4-6)，貨幣金額相當巨大，對於新竹科學園區的產值衝擊是難以想像的劇烈，而寶二水庫擴容工程雖然只是一個小型變更工程，只有增加 192 萬噸的蓄水量，計算出擴容前後的缺水天數差值平均一年只有 20 幾天，但這幾天因為能供應用水，相比擴容前所能彌補回來的產值，金額可以達到上億元，若以單日竹科用水為 15 萬立方公尺來計算的話，一天穩定供水可以減少損失的產值約為 35 億 431 萬 3500 元新臺幣，另一方

面若從溢流堰加高工程成本評估（經濟部水利署北區水資源局，2021），以完工後啟用第一年的成本計算，為建造成本 5331 萬元加上年計水庫維護成本 243 萬元(表 4-7)，總成本為 5574 萬元，對比擴容後各時期每年平均可減少的產值損失，完工後一年內就可以回本，由此可見擴容對新竹科學園區供水及產值的影響具有正面效益。

表 4-6 新竹科學園區新竹園區 2023 年平均單位用水量產值

		新竹科學園區新竹園區			
		營業額 ^a (新臺幣億元/月)	用水量 ^b (CMD)	單位用水量產值 (新臺幣元/立方公尺)	平均單位用水量產值 (新臺幣元/立方公尺)
2023 年	1 月	956.59	143,031	21,574.16	23362.09
	2 月	967.26	145,284	23,777.57	
	3 月	1,129.47	143,993	25,302.98	
	4 月	1,004.00	143,994	23,241.71	
	5 月	1,043.53	146,358	22,999.94	
	6 月	1,091.00	163,858	22,194.01	
	7 月	1,069.94	165,314	20,877.96	
	8 月	1,179.51	163,097	23,328.88	
	9 月	1,156.85	164,418	23,453.43	
	10 月	1,107.83	160,528	22,261.82	
	11 月	1,201.38	156,759	25,546.22	
	12 月	1,226.40	153,419	25,786.43	

資料來源：^a新竹科學園管理局（2024）；

^b國家科學及技術委員會統計資料庫（2024c）。

表 4-7 寶山第二水庫溢流堰加高開發成本估算

成本估算項目	估算費用
建造成本(萬元)	5,331
年計成本(萬元)	243
單位蓄水造價(元/立方公尺)	28
單位供水造價(元/立方公尺)	28
單位原水開發成本(元/立方公尺)	1.27

資料來源：寶山第二水庫溢洪道加高規劃與評估

（經濟部水利署北區水資源局，2021）。

有關各時期的缺水情境年平均天數減少損失產值，計算方式為各時期的四種 RCP 情境取平均數後，並以單日竹科用水為 15 萬立方公尺計算，將平均天數乘以 15 萬後再各乘上 23362.09，以得出損失產值(表 4-8、表 4-9)。

表 4-8 農業優先情境寶二水庫擴容前後缺水天數差值表

Scenario A	Period	Month												SUM ^a	AVG ^b	Economic Value Damage ^c
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12			
		Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec			
RCP2.6	2025-2040	-1	-3	-2	-2	-2	-2	-2	-2	-2	-1	-1	-2	-22	-22	770 億 9489 萬 7000 元
RCP4.5		-2	-3	-3	-1	-1	-1	-3	-3	-2	-2	-1	-1	-23		
RCP6.0		-2	-2	-1	-2	-3	-2	-3	-3	-3	-2	0	-1	-24		
RCP8.5		-1	-2	-2	-2	-2	-1	-2	-2	-1	-1	-1	-1	-18		
RCP2.6	2041-2060	-2	-2	-2	-1	-1	-2	-2	-1	-1	-1	-2	-2	-19	-21	735 億 9058 萬 3500 元
RCP4.5		-3	-3	-3	-1	-1	-2	-3	-1	-2	-1	-1	-1	-22		
RCP6.0		-2	-2	-3	-2	-2	-2	-2	-2	-1	-2	-1	-2	-23		
RCP8.5		-3	-3	-2	-1	-1	-2	-1	-1	-1	-1	-1	-2	-19		
RCP2.6	2061-2080	-3	-2	-3	-3	-2	-2	-3	-1	-2	-2	-2	-1	-26	-25	876 億 783 萬 7500 元
RCP4.5		-3	-3	-3	-3	-1	-3	-2	-2	-1	-2	-1	-2	-26		
RCP6.0		-2	-2	-3	-3	-2	-2	-3	-2	-2	-1	-1	-1	-24		
RCP8.5		-1	-3	-3	-2	-2	-2	-2	-1	-1	-1	-1	-3	-22		
RCP2.6	2081-2100	-1	-3	-3	-2	-1	-1	-1	-2	-1	-1	-1	-2	-19	-20	700 億 8627 萬 元
RCP4.5		-2	-2	-2	-2	-1	-3	-2	-2	-2	-2	-1	-2	-23		
RCP6.0		-2	-2	-1	-2	-2	-1	-2	-1	-2	-2	-1	-1	-19		
RCP8.5		-2	-5	-2	-1	-1	-1	-2	-1	-1	-1	-1	-1	-19		

註：^a 整年總缺水差值天數。^b 四個 RCP 情境下整年總缺水差值天數之平均數。^c 新竹科學園區在該時期對應之平均年減少缺水天數下可減少損失的產值。

表 4-9 工業優先情境寶二水庫擴容前後缺水天數差值表

Scenario B	Period	Month												SUM ^a	AVG ^b	Economic Value Damage ^c
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12			
		Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec			
RCP2.6	2025-2040	-1	-3	-3	-2	-3	-1	-1	0	0	0	0	0	-14	-18	630 億 7764 萬 3000 元
RCP4.5		-3	-2	-3	-2	-2	-1	-1	-1	-1	-1	0	-2	-19		
RCP6.0		-3	-4	-5	-3	-3	-2	-2	-1	-1	0	-2	-3	-29		
RCP8.5		-1	-2	-1	0	-1	-1	-1	-1	0	0	0	-1	-9		
RCP2.6	2041-2060	-1	-2	-3	-2	-2	-1	-1	0	0	0	0	0	-12	-19	665 億 8195 萬 6500 元
RCP4.5		-3	-3	-3	-3	-1	-1	0	-2	0	-1	-1	-1	-19		
RCP6.0		-2	-3	-4	-4	-4	-3	-2	-1	-2	-1	-1	-2	-29		
RCP8.5		-1	-2	-2	-2	-2	-2	-1	-1	-1	0	0	-1	-15		
RCP2.6	2061-2080	-1	-2	-2	-3	-1	-1	0	0	0	0	0	-1	-11	-16	560 億 6901 萬 6000 元
RCP4.5		-2	-2	-3	-4	-1	-2	-1	0	0	0	-1	-1	-17		
RCP6.0		-2	-3	-2	-2	-3	-2	-2	-2	0	-1	-1	-2	-22		
RCP8.5		-1	-2	-2	-2	-2	-1	-1	-1	0	0	0	0	-12		
RCP2.6	2081-2100	-1	-2	-2	-2	-1	-1	-1	-1	0	0	-1	0	-12	-17	595 億 7332 萬 9500 元
RCP4.5		-3	-3	-2	-2	-3	-1	-1	-1	-1	-1	0	-1	-19		
RCP6.0		-4	-1	-3	-2	-1	-1	-1	-2	-2	-1	-2	-2	-22		
RCP8.5		-2	-2	-3	-3	-2	-1	0	0	0	0	0	-1	-14		

註：^a 整年總缺水差值天數。^b 四個 RCP 情境下整年總缺水差值天數之平均數。^c 新竹

科學園區在該時期對應之平均年減少缺水天數下可減少損失的產值。

表 4-10 農業優先情境寶二水庫擴容前後減供天數差值表

Scenario A	Period	Month												SUM ^a	AVG ^b
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12		
		Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec		
RCP2.6	2025-2040	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	-1	-1	0	-3	-2
RCP4.5		0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	0	0	-1	
RCP6.0		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
RCP8.5		0	0	-1	0	-1	0	0	-1	0	-1	-1	0	-5	
RCP2.6	2041-2060	0	0	0	0	0	0	0	-1	0	-1	-1	-1	-4	-2
RCP4.5		0	0	0	0	0	0	0	-1	-1	0	0	0	-2	
RCP6.0		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
RCP8.5		0	0	0	0	0	0	0	-1	-1	-1	0	0	-3	
RCP2.6	2061-2080	-1	0	0	0	0	0	0	-1	-1	-1	0	0	-4	-2
RCP4.5		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
RCP6.0		0	0	0	0	0	0	0	0	-1	0	0	0	-1	
RCP8.5		0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	-1	0	-2	
RCP2.6	2081-2100	0	0	0	0	0	0	0	-1	-1	-1	-1	0	-4	-2
RCP4.5		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
RCP6.0		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
RCP8.5		0	0	0	0	0	0	0	-1	0	-2	0	0	-3	

註：^a 整年總減供差值天數。^b 四個 RCP 情境下整年總減供差值天數之平均數。

表 4-11 工業優先情境寶二水庫擴容前後減供天數差值表

Scenario B	Period	Month												SUM ^a	AVG ^b
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12		
		Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec		
RCP2.6	2025-2040	-1	-1	-1	0	0	0	0	0	0	-1	-2	-2	-8	-8
RCP4.5		-1	-1	-1	0	-1	0	0	0	-1	-1	-2	-1	-9	
RCP6.0		0	-1	0	0	0	0	0	0	-1	-1	-1	-1	-5	
RCP8.5		-1	0	-1	0	0	0	0	0	0	-1	-2	-3	-8	
RCP2.6	2041-2060	-1	-1	0	-1	-1	0	0	-1	0	-1	-1	-3	-10	-8
RCP4.5		-1	0	0	-1	0	0	0	0	0	-1	-2	-2	-7	
RCP6.0		-1	0	0	0	-1	0	0	0	0	-1	-2	-1	-6	
RCP8.5		-1	-1	-1	0	0	0	0	0	0	-1	-3	-2	-9	
RCP2.6	2061-2080	-2	-1	-1	0	0	0	-1	-1	0	-1	-3	-3	-13	-11
RCP4.5		-1	-1	-1	0	0	-1	0	-1	-1	-2	-1	-2	-11	
RCP6.0		-2	-1	-1	-1	-1	-1	0	0	0	-1	-2	-1	-11	
RCP8.5		-1	-1	-1	-1	0	0	0	0	0	-1	-2	-2	-9	
RCP2.6	2081-2100	-2	-1	-1	-1	0	0	0	0	0	0	-2	-3	-10	-9
RCP4.5		-1	-1	-1	0	0	0	0	0	-1	-1	-3	-2	-10	
RCP6.0		-1	0	-1	0	0	0	0	0	0	0	-2	-1	-5	
RCP8.5		-2	-1	-1	0	0	0	0	0	0	-1	-2	-2	-9	

註：^a 整年總減供差值天數。^b 四個 RCP 情境下整年總減供差值天數之平均數。

第五章 結論與建議

臺灣的半導體產業領先全球，擁有國際上少見的群聚效應優勢，多數大型半導體廠商如台積電、聯發科、聯電等企業坐落於新竹科學園區。因為半導體產業耗水量多而需要大量的用水來支持生產，若竹科面臨乾旱導致主要供應竹科用水的寶山水庫及寶二水庫面臨缺水困境，將會衝擊世界半導體晶片的供應鏈。因此本研究探討不同用水情境及未來氣候變遷情境下可能會面臨到的缺水與減供風險，並分析寶二水庫擴容工程能夠減少損失的產值與效益。根據研究結果與討論，提出以下結論、建議與研究限制。

第一節 結論

一、未來上坪溪流量變化率與流量數值趨勢

基本上水庫的缺水天數比例表現趨勢主要是受到流量的影響，上坪流量站在夏季 6 月至 9 月非常濕潤，流量可達到 14 CMS 以上，而到了 10 月，可發現流量比起 9 月要迅速下降至 6 CMS，冬季 11 月至隔年 1 月為最乾的月份，流量大致為 3 CMS，接下來 2 月春雨來臨，流量開始上升至 3 月，4 月些微下降，5 月梅雨季到來，流量開始一路上升至 6 月。6-9 月及 1 月相較現況流量，大致呈現增加，而 10-12 月及 2-5 月的流量相較現況來說，大致呈現減少，檢視整年及未來四個時期的變化，可發現未來會呈現乾季越乾、濕季越濕的趨勢。

二、用水情境驗證分析

本研究利用 SWAT 流量資料與用水架構模擬水庫蓄水量，但模擬流量資料已經過驗證並通過檢定，因此本研究針對水庫用水架構進行驗證分析，主要探討架構模擬蓄水量對於水庫歷史蓄水量與變化趨勢是否相同，選擇檢驗時間段為 2012-2018 年，分

析方式是利用逐日歷史蓄水量分別與兩用水架構模擬逐日蓄水量資料進行線性迴歸分析，並利用 R^2 值及 RMSE 值作為衡量架構表現之指標。經過計算，工業優先情境下寶二水庫 R^2 值最大，RMSE 值較小，因此分析寶二水庫缺水與減供比例較能體現出水庫實際操作趨勢。

三、農業優先情境與工業優先情境缺水風險

在兩用水情境下，不論在哪一時期，RCP6.0 的缺水比例均為最高，RCP2.6 則為最低，且不確定性部分乾季變化程度大於濕季。比較整體趨勢，可發現工業優先情境比起農業優先情境的缺水比例要降低很多。在缺水月份高峰和低谷部分，農業優先情境下不論哪一時期，RCP2.6 與 RCP8.5 的高峰落在 1-3 月，低谷為 8-10 月；而 RCP4.5 和 RCP6.0 的高峰落在 11-1 月或 12-2 月，低谷則是 6-8 月；工業優先情境下不論哪一時期，RCP2.6 與 RCP8.5 的高峰落在 1-3 月，而 RCP4.5 和 RCP6.0 的高峰落在 1-3 月或 2-4 月，低谷則是 6-8 月。另外水庫的缺水比例表現主要是受到流量與用水架構的影響，造成工業優先情境缺水高峰月份比起農業要來的晚的主要原因，是因為後者保留水量多，在豐水期儲存在水庫的水很快就會被用完，而前者保留水量少，可充分發揮水庫延遲缺水的功能。

四、農業優先情境與工業優先情境減供風險

在兩用水情境下，不論在哪一時期，RCP6.0 的減供比例均為最高，RCP2.6 則為最低，比較整體趨勢，可發現工業優先情境比起農業優先情境的減供比例要降低很多。在減供月份高峰和低谷部分，農業優先情境下四個時期所有 RCP 高峰均落在 11 到隔年 2 月，低谷部分 RCP2.6 落在 6-8 月，RCP4.5 和 RCP6.0 落在 5-8 月，RCP8.5 則是 7-9 月，不確定性部分濕季變化程度大於乾季；工業優先情境下四個時期所有 RCP 高峰均落在 12 到隔年 2 月，低谷部分 RCP2.6、RCP4.5 和 RCP6.0 落在 6-10 月，RCP8.5 則是 7-10 月。不確定性部分乾濕季變化程度較一致。另外水庫的減供比例表現主要是

受到流量、用水架構及運用規線的影響，其中造成兩用水情境的減供高峰月份相同的主要原因，是因為月份趨勢的變化與各月訂定的規線數值有關，9-12 月的規線標準相同，減供比例會逐漸上升至 12 月或 1 月，2 月下降是因為流量有開始增加且規線標準降低。

五、RCP 情境缺水與減供比例趨勢

兩用水情境下缺水天數與基期的比較中，兩用水情境在 RCP2.6 及 RC8.5 大致較基期緩和；RCP4.5 及 RCP6.0 大致較基期嚴重。農業優先情境在 RCP4.5 及 RCP6.0 下未來濕季缺水天數與基期之差值比乾季還要多。工業優先情境則是在 RCP4.5 及 RCP6.0 下未來乾季缺水天數與基期之差值比濕季還要多。

兩用水情境下減供天數與基期的比較，兩用水情境在 RCP2.6 及 RC8.5 大致較基期緩和；RCP4.5 及 RCP6.0 較基期嚴重，農業優先情境未來濕季的各月缺水天數與基期之差值比乾季還要多，造成乾季差值較低的原因是基期與未來的模擬幾乎是整個月都缺水，因此幾乎沒有變化。工業優先情境則是在 RCP4.5 及 RCP6.0 下未來整年減供天數比基期還要多。

造成輻射強迫力最大的 RCP8.5 情境在缺水比例與減供比例呈現上不是最嚴重的原因，是因為上游的 SWAT 模擬流量趨勢，其中資料顯示 RCP8.5 的流量變化相比基期的降雨特性更趨向兩極化，也就是乾季流量越少、濕季流量越多，而濕季變化率和乾季變化率在流量數值增減的幅度上，前者數字被放大的效應較大，導致 RCP8.5 的整體流量上升，降雨總量會比 RCP6.0 還要多。

六、寶二水庫擴容後可有效減少竹科產值損失

本研究針對寶二水庫擴容前後的缺水與減供天數差值進行計算，發現在農業優先情境下，擴容後的缺水天數在四個時期下比起擴容前平均每年可分別減少 22、21、25、20 天，工業優先情境下則為 18、19、16、17 天；擴容後的減供天數在農業優先情

境下四個時期比起擴容前平均每年均可減少 2 天，工業優先情境下則為 8、8、11、9 天。缺水減少天數換算成產值的部分，利用 2023 年新竹科學園區新竹園區年平均單位用水量產值，為每立方公尺 23362.09 元新臺幣，並以單日竹科用水為 15 萬立方公尺計算，農業優先情境下四個時期可分別減少損失約 770 億 9489 萬 7000 元、735 億 9058 萬 3500 元、876 億 783 萬 7500 元、700 億 8627 萬元新臺幣；工業優先情境下四個時期則可分別減少損失約 630 億 7764 萬 3000 元、665 億 8195 萬 6500 元、560 億 6901 萬 6000 元、595 億 7332 萬 9500 元新臺幣。

第二節 建議

一、針對缺水比例分析結果

缺水比例主要是呈現水庫是否還有水可以供給下游，若可引水量為 0，代表這是非常嚴重的警訊，也就是新竹科學園區的晶片生產線可能會受到供水嚴重不足的困境，影響層面不只是臺灣，更會讓全球半導體供應鏈陷入危機，因此缺水比例方面主要用意是要針對竹科廠商示警與警告缺水高峰月份，並建議政府或廠商可根據在各時期的月份高峰來臨之前就要規劃及準備好預防性的措施，根據缺水比例研究結果，在農業優先情境下，建議 12 月之前準備；工業優先情境下，建議 2 月之前準備。相關措施如農業預防性輪灌或停灌、石門水庫支援寶二水庫用水、提前購買水車及規劃水車調度、海淡廠提高製水比例等等。

二、針對減供比例分析結果

水庫運用規線是用來檢視水庫豐缺的指標，若水庫蓄水量低於規線時，台水公司三區管理處會視狀況得減量供水。事實上減供比例的意義是表示供水可能有不足之情形，並不是如同缺水比例定義的無水可用，因此水利單位或是新竹科學園區廠商可視減供比例為一個初步的提醒，暗示水情的狀況需要注意，可留意後續水情變化並可提

前預備如廠區內減少或停供非生產性用水等調適措施。根據減供比例研究結果，兩用水情境下高峰都是落在 11 或 12 月至隔年 2 月，因此直到 2 月之前，建議部分非常態調適支援措施都還是需要預備。

三、針對工業優先情境制定調適策略

在新竹科學園區未來用水量越來越高，且乾旱頻率逐漸增加的趨勢下，未來用水分配可能會趨向工業優先情境的設定，因此水利相關單位可以參考工業優先情境的模擬結果發展相關調適措施，以減少未來可能的產值損失，竹科廠商也可主要留意工業優先情境下缺水及減供之提前示警月份與建議策略，並著手規劃預防性的調適措施及實踐。另外在農業部分在遇到缺水年時，停灌範圍內的農民可向農田水利署申報停灌補償，未來在工業優先情境下，寶二水庫擴容工程可以減少竹科將近上百億的損失，因此建議竹科企業未來可以針對農業進行相關補貼與回饋措施，達成企業社會責任。

四、針對未來非常態調適措施效益分析

針對調適措施效益分析，本研究探討寶二水庫擴容工程是否有效減少缺水及減供風險，此為常態性調適措施，因為是直接開源增加蓄水量；而非常態性調適則是新竹地區在枯早期的時候才會實施的措施，若想要探討未來相關非常態性調適工程完工後的水庫供水狀況，例如石門水庫聯通管支援寶二水庫工程，此計畫的績效目標為提升石門水庫原水備援新竹地區每日最大 30 萬噸（經濟部水利署，2022），可待後續更細部的引水規則發布後，再針對水庫的缺水狀況做出分析，以檢視調適措施的實際效益及評估能夠減少的缺水與減供風險。

第三節 研究限制

一、氣候變遷情境資料

本研究採用之 SWAT 未來流量模擬是利用 IPCC 於 2014 年發布之 AR5 報告中的代表濃度路徑 (Representative Concentration Pathways, RCP) 做為情境假設，分析在不同的暖化路徑下的人為溫室氣體排放量對未來環境的影響，此情境並沒有考慮社會發展因素，而 IPCC 在 2022 年發布的 AR6 報告中，除了比 AR5 再新增部分 RCP 之外，另外也新增一個假設減碳情境，稱之為共享社會經濟途徑 (Shared Socioeconomic Pathways, SSP)，此情境則是將人類活動與社會經濟趨勢考慮進去，因此未來可嘗試在 AR6 的情境下做流量模擬，並可針對氣候變遷在未來不同社經發展的條件下之模擬做更細緻的分析。

二、兩情境用水架構參數選擇

本研究在兩種用水架構中所使用的各節點參數，一部分是參考現行法規決定，另一部分則是自行假設，若未來可以得到更明確的參數值資料，就可依照所得數據進行微調。

參考文獻

一、中文文獻

- Taiwan Semiconductor Manufacturing Co., Ltd. (2023a)。台積公司 111 年度永續報告書。
- Taiwan Semiconductor Manufacturing Co., Ltd. (2023b)。台積公司 111 年度氣候相關財務揭露報告。
- 王苗、刘敏、夏智宏、王凯、向华、秦鹏程、任永建 (2016)。基于 SWAT 模型模拟的未来气候变化对洪湖流域水资源影响研究。气象与环境学报，32(4)，39-47。 <https://doi.org/10.3969/j.issn.1673-503X.2016.04.005>。
- 王業睿 (2014)。氣候變遷對新竹地區水資源供需之衝擊評估。國立臺灣海洋大學河海工程學系碩士論文。
- 甘偉文 (2008)。工業區區內水物質流之調查及其應用課題初探—以五股工業區為案例。國立臺灣大學環境工程學研究所碩士論文。
- 行政院經濟建設委員會 (2012)。國家氣候變遷調適政策綱領。
- 李宗祐 (2022)。上坪溪流域水文及非點源污染模式建置以評估氣候變遷與人為活動對河川水量及水質之影響。前瞻的淺山生態系統服務治理：以新竹縣上坪溪流域為例(2/4)。
- 李怡璇 (2004)。公共投資對製造業、生產者服務業發展之關聯性研究。國立政治大學地政研究所碩士論文。
- 李明營、洪浩哲、許晃雄、王品翔 (2023)。2020—2021 臺灣百年大旱原因分析。[Causes of the Record-breaking Drought in Taiwan in 2020-2021]。大氣科學，51(1)，30-57。 <https://doi.org/10.53106/025400022023015101002>。
- 李崇恩、林子羿、董玟慧、郭乃文、闕蓓德 (2023)。從生態系統供給服務的角度評估供水短缺對新竹地區工業產值的影響。[Evaluating the Impact of Water Scarcity on Industrial Output Value in Hsinchu Area from the Perspective of Ecosystem Provisioning Services]。科技管理學刊，28(2)，101-132。
- 周乃昉、吳嘉文 (2010)。通用性廣域水資源運用模擬模式。[A Generalized Simulation Model for Regional Water Allocation]。農業工程學報，56(1)，1-21。 <https://doi.org/10.29974/jtae.201003.0001>。
- 林可凡、胡太山、解鴻年、賈秉靜 (2012)。地方產業群聚之演化—以新竹地區為例。[Industrial Cluster Formation and Evolution-The Case of Hsinchu Area]。建築與規劃學報，13(1)，45-73。 <https://doi.org/10.30054/jap.201206.0003>。
- 林旭信、陳立偉、甘秉玄 (2012)。氣候變遷對水資源之衝擊評估—以牡丹水庫

- 為例。[Impact and Assessment on Climate Change to Water Resources in Watershed of Mudan Reservoir]。先進工程學刊，7(2)，71-79。
<https://doi.org/10.29948/jae.201204.0003>。
- 林好蓁 (2016)。水資源與產業經濟。科學發展，(520)，28-31。
- 林宗岳 (2009)。區域性自來水供需流布之研究-以臺北縣之鄉鎮市為例。國立臺灣大學環境工程學研究所碩士論文。
- 林冠州 (2022)。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]。農業工程學報，68(4)，63-79。
[https://doi.org/10.29974/jtae.202212_68\(4\).0004](https://doi.org/10.29974/jtae.202212_68(4).0004)。
- 林裕彬 (2013)。台灣地區各水資源分區因應氣候變遷水資源管理調適能力綜合研究。經濟部水利署水利規劃試驗所。
- 姚凱富 (2008)。物質流分析於河川流域水資源供需及管理之研究—以淡水河流域為例。國立臺北科技大學環境工程與管理研究所碩士論文。
- 科技部、中央研究院環境變遷研究中心、交通部中央氣象局、臺灣師範大學地球科學系、國家災害防救科技中心 (2021)。IPCC 氣候變遷第六次評估報告之科學重點摘錄與臺灣氣候變遷評析更新報告。
- 科技部新竹科學園區管理局 (2021)。新竹科學園區(寶山用地)第2期擴建計畫環境影響說明書(定稿本)。
- 袁子恭 (1995)。我国城市缺水问题及其缓解途径。自然资源学报，10(4)，315-321。
<https://doi.org/10.11849/zrzyxb.1995.04.002>。
- 財團法人中技社 (2021)。台灣半導體產業面對國際政經環境變動的挑戰與因應。
- 財團法人成大研究發展基金會 (2022)。氣候變遷對重要供水水系水源水量影響分析。經濟部水利署水利規劃試驗所。
- 國家災害防救科技中心 (2018)。臺灣氣候的過去與未來《臺灣氣候變遷科學報告 2017—物理現象與機制》重點摘錄。
- 張哲瑋 (2021)。大新竹地區水資源調度之研究。國立臺灣海洋大學河海工程學系碩士論文。
- 教育部 (2020)。永續發展目標 (SDGs) 教育手冊：臺灣指南。
- 連宛渝 (2013)。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。國立臺灣大學生物環境系統工程學研究所博士論文。
- 陳明業 (2002)。淡水河水資源系統動力模式與永續管理策略之研究。國立臺灣大學生物環境系統工程學系暨研究所碩士論文。
- 陳柏廷 (2015)。氣候變遷對大台北地區水資源供需之衝擊評估。國立臺灣海洋大學河海工程學系碩士論文。
- 陳郁慈、闕蓓德 (2022)。以物質流分析鋼鐵業製程之回顧。中華民國環境工程

- 學會。2022 環境資訊與規劃管理研討會，國立臺灣大學。
- 陳潔 (2012)。氣候變遷對曾文水庫缺水風險之衝擊。國立成功大學水利及海洋工程學系碩博士班碩士論文。
- 陳憲宗、曾宏偉、林錦源、楊道昌、游保杉 (2011)。氣候變遷情境下曾文水庫集水區水文乾旱特性推估。[Hydrological Drought in Tseng-Wen Reservoir Basin under Climate Change Scenarios]。農業工程學報，57(3)，44-60。
<https://doi.org/10.29974/jtae.201109.0004>。
- 童慶斌 (2008)。物質流及系統動力模式分析淡水河流域水資源供需情勢。財團法人中技社。
- 童慶斌、國家災害防救科技中心、李培芬、林幸助、李明旭、盧虎生、蘇慧貞、張靜貞、詹士樑、許泰文、李河清 (2017)。臺灣氣候變遷科學報告 2017—衝擊與調適面向(總摘要)。國家災害防救科技中心。
- 童慶斌、劉子明、林嘉佑、曹榮軒、李明旭 (2015)。氣候變遷水資源風險評估與調適決策之探討。土木水利，42(4)，30-45。
[https://doi.org/10.6653/MoCICHE.201508_42\(4\).0006](https://doi.org/10.6653/MoCICHE.201508_42(4).0006)。
- 楊朝仲、張良正、陳昶憲、李漢鏗、葉昭憲、周嫦娥、葉欣誠、何智超 (2007)。水資源永續管理系統動力決策支援系統。2007 台灣環境資源永續發展之研討會。
- 經濟部 (2020)。前瞻基礎建設計畫—水環境建設。桃園-新竹備援管線工程計畫 (第 1 次修正) (核定本)。
- 經濟部 (2023)。水資源領域氣候變遷調適行動方案 (112-115 年) (初稿)。
- 經濟部水利署 (2022)。石門水庫至新竹聯通管工程計畫核定本。
- 經濟部水利署 (2023)。新竹海水淡化廠工程計畫(核定本)。
- 經濟部水利署北區水資源局 (2013)。寶山、寶山第二水庫及隆恩堰聯合運用檢討暨新竹地區性水源潛能評估研究。
- 經濟部水利署北區水資源局 (2021)。寶山第二水庫溢洪道加高規劃與評估。
- 經濟部水利署北區水資源局 (2022)。新竹縣寶山第二水庫環境影響評估報告書第三次環境影響差異分析報告(定稿)。
- 臺灣氣候變遷推估資訊與調適知識平台 (2021)。網格化觀測資料與統計降尺度不確定性分析說明。
- 劉子明 (2010)。氣候變遷對區域水資源衝擊評估整合系統之研究。國立臺灣大學生物環境系統工程學研究所博士論文。
- 劉子明、林祺恒、童裕翔、陳正達 (2023)。以 TCCIP AR6 統計降尺度日資料探討臺灣未來水資源衝擊。土木水利，50(3)，34-42。
[https://doi.org/10.6653/MoCICHE.202306_50\(3\).0006](https://doi.org/10.6653/MoCICHE.202306_50(3).0006)。
- 劉子明、鄧澤宇、許晃雄 (2023)。以高解析度大氣環流模式資料推估氣候變遷下北部水資源之衝擊。土木水利，50(1)，10-15。
[https://doi.org/10.6653/MoCICHE.202302_50\(1\).0003](https://doi.org/10.6653/MoCICHE.202302_50(1).0003)。

賴耘盼、李宗祐、邱繼成 (2024)。氣候變遷對寶山及寶山第二水庫蓄供水之影響。The 28th International Geographical Conference of Taiwan，國立臺灣師範大學。

戴嘉慧 (2010)。氣候變遷對翡翠水庫供水、發電與防洪功能之衝擊評估。國立臺灣大學生物環境系統工程學研究所碩士論文。

二、英文文獻

- Ahmadi, M., Bozorg-Haddad, O., & Loaiciga, H. (2014). Adaptive Reservoir Operation Rules Under Climatic Change. *Water Resources Management*, 29. <https://doi.org/10.1007/s11269-014-0871-0>
- AIT. (2017). *Water Technology Industry in Southern Taiwan*.
- Arora, M., Yeow, L. W., Cheah, L., & Derrible, S. (2022). Assessing water circularity in cities: Methodological framework with a case study. *Resources, Conservation and Recycling*, 178, 106042. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.106042>
- Aviso, K., Chien, C.-F., Lim, M. K., Tan, R., & Tseng, M.-L. (2021). Taiwan Drought was a Microcosm of Climate Change Adaptation Challenges in Complex Island Economies. *Process Integration and Optimization for Sustainability*, 5. <https://doi.org/10.1007/s41660-021-00188-1>
- BCG, & SIA. (2021). *Strengthening the Global Semiconductor Supply Chain in an Uncertain Era*. Boston Consulting Group & Semiconductor Industry Association.
- Bhadoriya, U. P. S., Mishra, A., Singh, R., & Chatterjee, C. (2020). Implications of climate change on water storage and filling time of a multipurpose reservoir in India. *Journal of Hydrology*, 590, 125542. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.125542>
- Broemme, K., Trinh, V. Q., Greassidis, S., & Stolpe, H. (2018). Material flow analysis for spatiotemporal mine water management in Hon Gai, Vietnam. *Risk to Opportunity*, 1, 97-103.
- Brunner, P., & Rechberger, H. (2016). *Handbook of Material Flow Analysis: For Environmental, Resource, and Waste Engineers*. <https://doi.org/10.1201/9781315313450>
- Brunner, P.H., & Rechberger, H. (2003). *Practical Handbook of Material Flow Analysis* (1st ed.). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9780203507209>
- Cayas, A. M., Grepo, C., & Lachica, D. (2021). *The Philippines: Your Ally in the Global Chip Race*.
- Chen, Y., Zhang, S., & Miao, J. (2023). The negative effects of the US-China trade

- war on innovation: Evidence from the Chinese ICT industry. *Technovation*, 123, 102734.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.technovation.2023.102734>
- Cooper, T., Fallender, S., Pafumi, J., Dettling, J., Humbert, S., & Lessard, L. (2011, 16-18 May 2011). A semiconductor company's examination of its water footprint approach. Proceedings of the 2011 IEEE International Symposium on Sustainable Systems and Technology,
- CRED. (2022). *2021 Disasters in numbers*. Brussels: CRED; 2022.
- Frost, K., & Hua, I. (2019). “Quantifying spatiotemporal impacts of the interaction of water scarcity and water use by the global semiconductor manufacturing industry”. *Water Resources and Industry*, 22, 100115.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.wri.2019.100115>
- Ghani, L. A., & Mahmood, N. Z. (2023). Modeling domestic wastewater pathways on household system using the socio-MFA techniques. *Ecological Modelling*, 480, 110328. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2023.110328>
- Giudici, F., Anghileri, D., Castelletti, A., & Burlando, P. (2021). Descriptive or normative: How does reservoir operations modeling influence hydrological simulations under climate change? *Journal of Hydrology*, 595, 125996.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.125996>
- Ji, P., Yuan, X., & Jiao, Y. (2023). Future hydrological drought changes over the upper Yellow River basin: The role of climate change, land cover change and reservoir operation. *Journal of Hydrology*, 617, 129128.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2023.129128>
- Kamasa, J. (2021). Microchips: Small and Demanded. In F. Merz (Ed.), (Vol. 295): Center for Security Studies (CSS), ETH Zürich.
- KPMG. (2021). *Surviving the Silicon Storm*.
- Lee, T.-Y., Chiu, C.-C., Chen, C.-J., Lin, C.-Y., & Shiah, F.-K. (2023). Assessing future availability of water resources in Taiwan based on the Budyko framework. *Ecological Indicators*, 146, 109808.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2022.109808>
- Lin, C.-Y., & Tung, C.-p. (2017). Procedure for selecting GCM datasets for climate risk assessment. *Terrestrial, Atmospheric and Oceanic Sciences*, 28, 043.
[https://doi.org/10.3319/TAO.2016.06.14.01\(CCA\)](https://doi.org/10.3319/TAO.2016.06.14.01(CCA))
- Liu, K.-C. (2014). Examples in Material Flow Analysis. *China Steel Technical Report*(27), 1-5.
- Massart, D., Smeyers-Verbeke, J., Capron, X., & Schlesier, K. (2005). Visual presentation of data by means of box plots. *LC-GC Europe*, 18, 215-218.
- Mohammad, W., Elomri, A., & Kerbache, L. (2022). The Global Semiconductor Chip

- Shortage: Causes, Implications, and Potential Remedies. *IFAC-PapersOnLine*, 55(10), 476-483. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2022.09.439>
- Montangero, A. (2007). *Material Flow Analysis A Tool to Assess Material Flows for Environmental Sanitation Planning in Developing Countries*.
- Morrison, J., Morikawa, M., Murph, M., & Schulte, P. (2009). *Water Scarcity & Climate Change: Growing Risks for Businesses & Investors*. Ceres & The Pacific Institute.
- Narvaez, L., Janzen, S., Eberle, C., & Sebesvari, Z. (2022). *Taiwan drought*.
- Ning, A., Tziantzioulis, G., & Wentzlaff, D. (2023). *Supply Chain Aware Computer Architecture* Proceedings of the 50th Annual International Symposium on Computer Architecture, Orlando, FL, USA.
<https://doi.org/10.1145/3579371.3589052>
- Nohara, D., Suzuki, S., & Sato, Y. (2018). *Impact assessment of climate change on operation of reservoir systems for water use in Japan*.
- Nordin, J., & Stünkel, L. (2022). *EU-Taiwan Semiconductor Cooperation: Lopsided Priorities?*
- OECD. (2000). *Special Session on Material Flow Accounting - Papers and Presentations* The 29th meeting of the OECD Working Group on Environmental Information and Outlooks (WGEIO).
- Ramani, V., Ghosh, D., & Sodhi, M. S. (2022). Understanding systemic disruption from the Covid-19-induced semiconductor shortage for the auto industry. *Omega*, 113, 102720.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.omega.2022.102720>
- Rong, Q., Zhu, S., Yue, W., Su, M., & Cai, Y. (2024). Predictive simulation and optimal allocation of surface water resources in reservoir basins under climate change. *International Soil and Water Conservation Research*, 12(2), 467-480.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.iswcr.2023.08.003>
- Sang, J., Hou, B., Wang, H., & Ding, X. (2023). Prediction of water resources change trend in the Three Gorges Reservoir Area under future climate change. *Journal of Hydrology*, 617, 128881.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2022.128881>
- Sulis, A., & Sechi, G. M. (2013). Comparison of generic simulation models for water resource systems. *Environmental Modelling & Software*, 40, 214-225.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2012.09.012>
- Sun, J., Chen, W., Hu, B., Xu, Y. J., Zhang, G., Wu, Y., Hu, B., & Song, Z. (2023). Roles of reservoirs in regulating basin flood and droughts risks under climate change: Historical assessment and future projection. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 48, 101453.

- <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2023.101453>
- Tang, J., Song, P., Hu, X., Chen, C., Wei, B., & Zhao, S. (2023). Coupled effects of land use and climate change on water supply in SSP–RCP scenarios: A case study of the Ganjiang River Basin, China. *Ecological Indicators*, 154, 110745. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2023.110745>
- Teng, T.-Y., Liu, T.-M., Tung, Y.-S., & Cheng, K.-S. (2021). Converting Climate Change Gridded Daily Rainfall to Station Daily Rainfall—A Case Study at Zengwen Reservoir. *Water*, 13(11), 1516. <https://www.mdpi.com/2073-4441/13/11/1516>
- Tong, Y., Cai, J., Zhang, Q., Gao, C., Wang, L., Li, P., Hu, S., Liu, C., He, Z., & Yang, J. (2019). Life cycle water use and wastewater discharge of steel production based on material-energy-water flows: A case study in China. *Journal of Cleaner Production*, 241, 118410. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118410>
- UNCCD. (2022). *Drought in numbers 2022 - Restoration for readiness and resilience*.
- Ushijima, K., Irie, M., Sintawardani, N., Triastuti, J., Hamidah, U., Ishikawa, T., & Funamizu, N. (2012). Sustainable design of sanitation system based on material and value flow analysis for urban slum in Indonesia. *Frontiers of Environmental Science & Engineering*, 7. <https://doi.org/10.1007/s11783-012-0460-5>
- Wang, C.-T., & Chiu, C.-S. (2014). Competitive strategies for Taiwan's semiconductor industry in a new world economy. *Technology in Society*, 36, 60-73. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.techsoc.2013.12.002>
- Wang, Q., Huang, N., Cai, H., Chen, X., & Wu, Y. (2023). Water strategies and practices for sustainable development in the semiconductor industry. *Water Cycle*, 4, 12-16. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.watcyc.2022.12.001>
- Wang, Q., Huang, N., Chen, Z., Chen, X., Cai, H., & Wu, Y. (2023). Environmental data and facts in the semiconductor manufacturing industry: An unexpected high water and energy consumption situation. *Water Cycle*, 4, 47-54. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.watcyc.2023.01.004>
- Worku, T. A., Aman, T. F., Wubneh, M. A., & Kiflelew, M. S. (2023). Assessment of reservoir performance under climate change: A case study in Shumbrite reservoir, South Gojjam sub-basin, Ethiopia. *Scientific African*, 19, e01484. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.sciaf.2022.e01484>
- Yang, P., Zhang, S., Xia, J., Chen, Y., Zhang, Y., Cai, W., Wang, W., Wang, H., Luo, X., & Chen, X. (2022). Risk assessment of water resource shortages in the Aksu River basin of northwest China under climate change. *Journal of Environmental Management*, 305, 114394.

- <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.114394>
- Yiougo, L., Koanda, H., Wethe, J., Luthi, C., Yapo, O., & Da, E. (2011). *The method of material flow analysis, a tool for selecting sustainable sanitation technology options: The case of Pouytenga (Burkina Faso)* (Vol. 145). <https://doi.org/10.2495/WRM110601>
- Zhang, X., Tian, Y., Dong, N., Wu, H., & Li, S. (2023). The projected futures of water resources vulnerability under climate and socioeconomic change in the Yangtze River Basin, China. *Ecological Indicators*, 147, 109933. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2023.109933>
- Zhang, X., Yang, H., Zhang, W., Fenicia, F., Peng, H., & Xu, G. (2022). Hydrologic impacts of cascading reservoirs in the middle and lower Hanjiang River basin under climate variability and land use change. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 44, 101253. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2022.101253>
- Zhang, Y., & Zhu, X. (2023). Analysis of the global trade network of the chip industry chain: Does the U.S.-China tech war matter? *Heliyon*, 9(6), e17092. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e17092>

三、中文網站資料

- 日經中文網 (2022)。瑞薩火災 1 年後，全球半導體採購仍存課題。
<https://zh.cn.nikkei.com/industry/itelectric-appliance/47993-2022-03-21-11-12-07.html>
- 台灣自來水公司第三區管理處 (2023)。新竹第一淨水場。
<https://www.water.gov.tw/dist3/Culture/Detail/18988?nodeId=6254>
- 台灣自來水公司第三區管理處 (2024a)。新竹二場。
<https://www.water.gov.tw/dist3/Culture/Detail/19855?nodeId=6254>
- 台灣自來水公司第三區管理處 (2024b)。寶山淨水場。
<https://www.water.gov.tw/dist3/Culture/Detail/19856?nodeId=6254#accesskeyL>
- 台灣循環經濟與創新轉型協會 (2018)。物質流分析。
<https://www.ceita.org.tw/%E7%89%A9%E8%B3%AA%E6%B5%81%E5%88%86%E6%9E%90/>
- 氣候變遷災害風險調適平台 (2024)。臺灣乾旱災害特性。
<https://dra.ncdr.nat.gov.tw/Frontend/Disaster/RiskDetail/BAL0000022>
- 國家科學及技術委員會 (2015)。有關媒體報導竹科缺水問題，科管局之說明。
<https://www.nstc.gov.tw/folksonomy/detail/53c84d76-968a-4aff-b586-236449357041?l=ch>
- 國家科學及技術委員會統計資料庫 (2024a)。C — 1 產業類別及家數統計。

<https://wsts.nstc.gov.tw/stsweb/sciencepark/ScienceParkReport.aspx?language=C&quyid=tqindustry01>
國家科學及技術委員會統計資料庫 (2024b)。C－3 產業營業額成長情形比較表。

<https://wsts.nstc.gov.tw/stsweb/sciencepark/ScienceParkReport.aspx?language=C&quyid=tqindustry03>
國家科學及技術委員會統計資料庫 (2024c)。G－1 用水量。

<https://wsts.nstc.gov.tw/STSWeb/sciencepark/ScienceParkReport.aspx?language=C&quyid=tqwater01>
新竹科學園管理局 (2024)。園區產業營業額統計表。

https://www.sipa.gov.tw/home.jsp?serno=201006180001&mserno=201001210113&menudata=ChineseMenu&contlink=ap/staticm_view.jsp&level2=Y&ym=202311
經濟部水利署 (2024a)。寶山水庫基本資料。

https://www.wra.gov.tw/News_Content.aspx?n=3254&s=19370
經濟部水利署 (2024b)。寶山第二水庫簡介。

https://www.wra.gov.tw/News_Content.aspx?n=3254&s=19371
經濟部水利署北區水資源分署 (2023)。上坪溪。

<https://www.wranb.gov.tw/cp.aspx?n=36730>
經濟部水利署北區水資源分署 (2024)。自來水供水統計。

<https://www.wranb.gov.tw/cp.aspx?n=36744>
經濟部水利署防災資訊網 (2024)。台灣地區主要水庫蓄水量報告表。

https://fhy.wra.gov.tw/ReservoirPage_2011/StorageCapacity.aspx
經濟部水利署第二河川分署 (2018)。頭前溪流域。

<https://www.wra02.gov.tw/cp.aspx?n=9905>
經濟部主管法規查詢系統 (2024a)。寶山水庫運用要點。

<https://law.moea.gov.tw/LawContent.aspx?id=FL085258>
經濟部主管法規查詢系統 (2024b)。寶山第二水庫運用要點。

<https://law.moea.gov.tw/LawContent.aspx?id=FL038844>
環境資訊中心 (2021)。水利署研究指 2030 年缺水更嚴重 綠色和平：地方政府早知風險卻無行動。 <https://e-info.org.tw/node/230790>

寶二水庫專網 (2023a)。上坪堰。 <https://web.wra.gov.tw/bao2/cp.aspx?n=7494>
寶二水庫專網 (2023b)。隆恩堰。 <https://web.wra.gov.tw/bao2/cp.aspx?n=7492>
BBC News (2021)。台灣缺水為何吸引了全世界關注，這次到底有多嚴重？
<https://www.bbc.com/zhongwen/trad/chinese-news-56814382>

Lasers Technology Co., Ltd. (2024)。純水與超純水有哪些差異？
<https://www.lasers.com.tw/knowledge-detail/135/>
Taiwan Pure Water Technology Co., Ltd. (2024)。半導體相關產業。

<https://www.taipure.com.tw/tw/service/1/1>
Taiwan Stock Exchange (2015)。台積電一滴水用 3.5 次 回收率逾 87%。
<https://cgc.twse.com.tw/latestNews/promoteNewsArticleCh/353>
TechNews (2021)。全球晶片荒加劇！三星電子、恩智浦因斷電被迫停產，馬斯克也發飆。<https://technews.tw/2021/02/22/power-outage-in-texas-musk-also-criticized-ercot/>
The News Lens (2022)。看懂美國晶片禁令衝擊：供應商人才技術撤離中國、海歸高管紛紛離職，影響估遍及全球。
[https://www.thenewslens.com/article/174779Barbiroglio, E. \(2021\). No Water No Microchips: What Is Happening In Taiwan? Forbes.](https://www.thenewslens.com/article/174779Barbiroglio, E. (2021). No Water No Microchips: What Is Happening In Taiwan? Forbes.)
<https://www.forbes.com/sites/emanuelabarbiroglio/2021/05/31/no-water-no-microchips-what-is-happening-in-taiwan/?sh=1b6f2d9722af>

四、英文網站資料

Fusion Worldwide. (2021). *The Global Chip Shortage: A Timeline of Unfortunate Events*. <https://info.fusionww.com/blog/the-global-chip-shortage-a-timeline-of-unfortunate-events>
Knight, W. (2021). *The Chip Shortage Is Driving Up Tech Prices—Starting With TVs*. WIRED. <https://www.wired.com/story/chip-shortage-electronics-prices-tvs-displays/>
LI, L. (2023). *Taiwan braces for drought in key chip hubs again*. <https://asia.nikkei.com/Business/Business-Spotlight/Taiwan-braces-for-drought-in-key-chip-hubs-again>
Semiconductor Industry Association. (2024). *Global Semiconductor Sales Increase 16.3% Year-to-Year in February*. <https://www.semiconductors.org/global-semiconductor-sales-increase-16-3-year-to-year-in-february/>
Taylor, E. (2021). *How COVID, Climate Change and Trump Created a Global Chip Shortage*. <https://www.worldpoliticsreview.com/how-covid-climate-change-and-trump-created-a-global-chip-shortage/>
Tech Xplore. (2021). *Drought hits Taiwan drive to plug global chip shortage*. <https://techxplore.com/news/2021-02-drought-taiwan-global-chip-shortage.html>
World Semiconductor Trade Statistics. (2023). *WSTS Semiconductor Market Forecast Fall 2023*. <https://www.wsts.org/76/Recent-News-Release>

附錄

附表 1 頭前溪農業計畫用水量(含竹東圳)

單位：CMS

月	1			2			3			4			5			6		
旬	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
農業計畫用水量	0.00	0.00	0.00	0.10	0.20	0.82	2.84	4.56	4.87	3.98	3.61	3.68	4.16	4.50	4.40	4.01	3.44	2.77
竹東圳計畫用水量	0.00	0.00	0.00	0.03	0.54	0.76	1.34	1.42	1.39	1.40	1.34	1.26	1.37	1.42	1.42	1.19	1.13	1.02
月	7			8			9			10			11			12		
旬	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36
農業計畫用水量	2.38	2.29	2.43	3.92	5.32	4.17	3.89	4.17	4.81	4.81	4.40	3.61	2.73	2.15	1.90	0.00	0.00	0.00
竹東圳計畫用水量	0.88	0.60	1.02	1.12	1.12	1.12	1.12	1.12	1.12	1.12	1.12	1.12	1.08	0.84	0.88	0.00	0.00	0.00

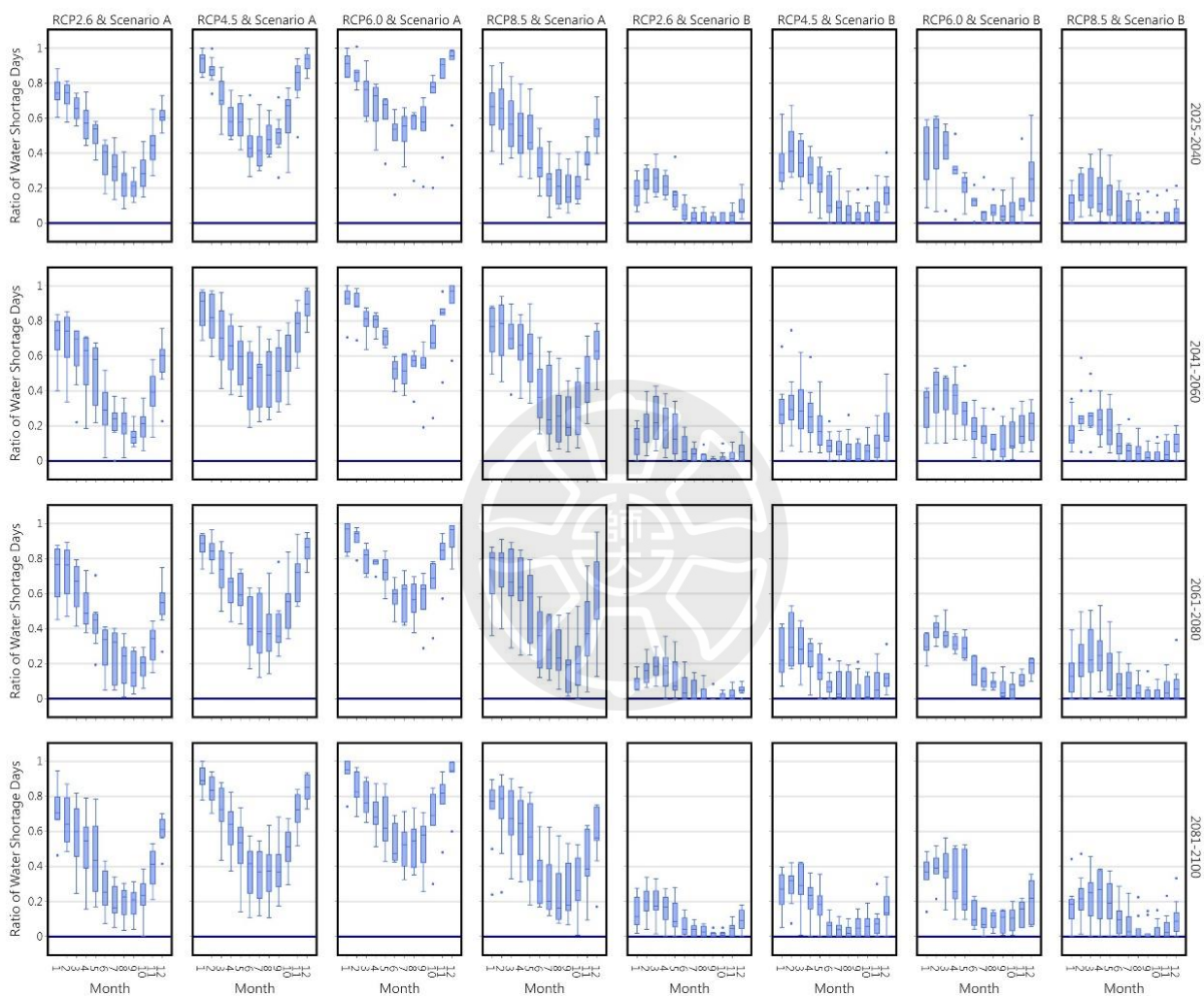
資料來源：整理自經濟部水利署北區水資源局（2022），農業用水採用106-108年計畫用水量平均值

附表 2 寶山水庫與寶二水庫聯合運用規線旬蓄水量標準

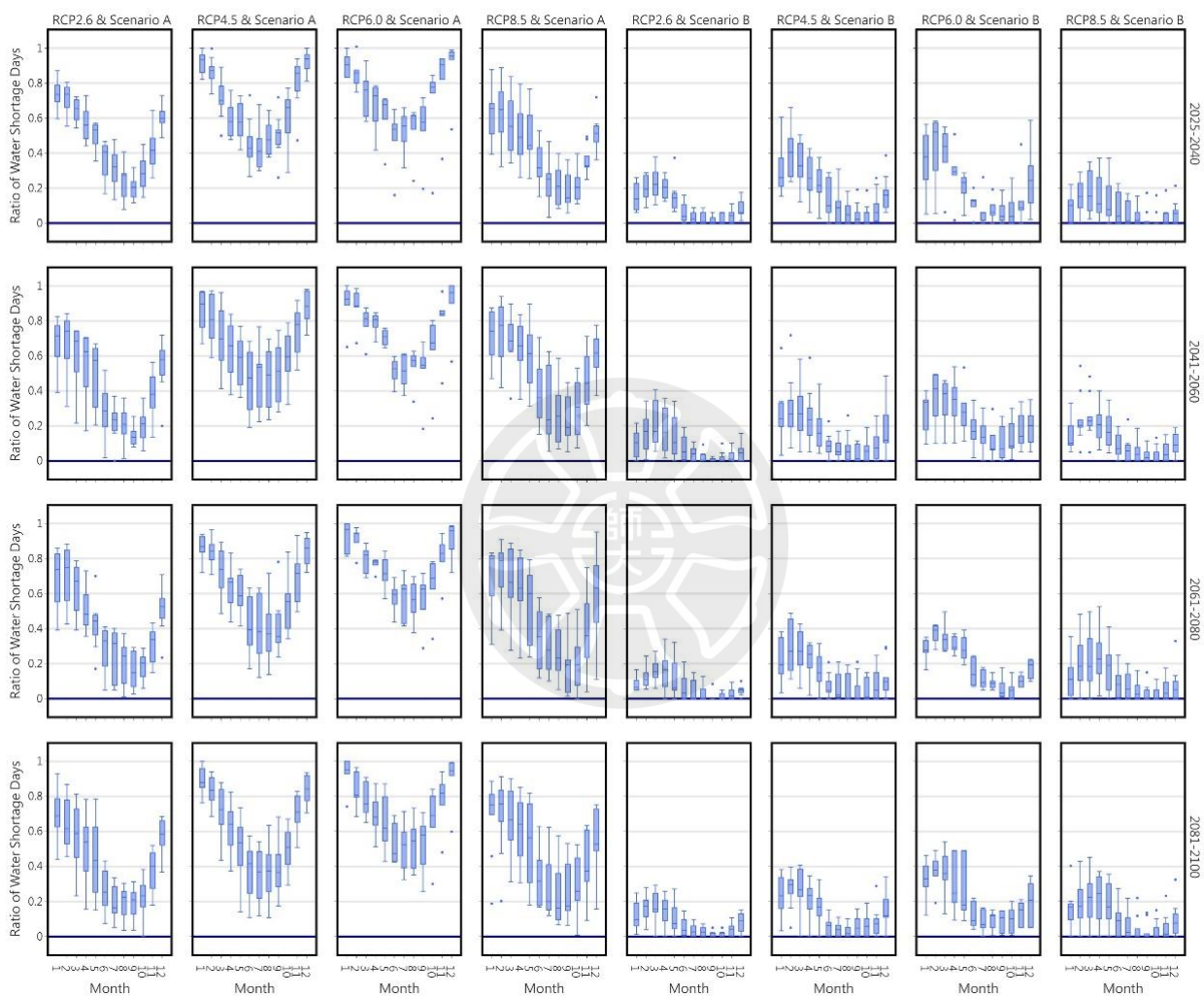
單位：萬立方公尺

月份	1			2			3		
旬數	1	2	3	4	5	6	7	8	9
規線值	2700	2650	2600	2550	2500	2450	2400	2400	2400
月份	4			5			6		
旬數	10	11	12	13	14	15	16	17	18
規線值	2400	2400	2400	2400	2400	2400	2400	2400	2400
月份	7			8			9		
旬數	19	20	21	22	23	24	25	26	27
規線值	2450	2500	2550	2600	2650	2700	2700	2700	2700
月份	10			11			12		
旬數	28	29	30	31	32	33	34	35	36
規線值	2700	2700	2700	2700	2700	2700	2700	2700	2700

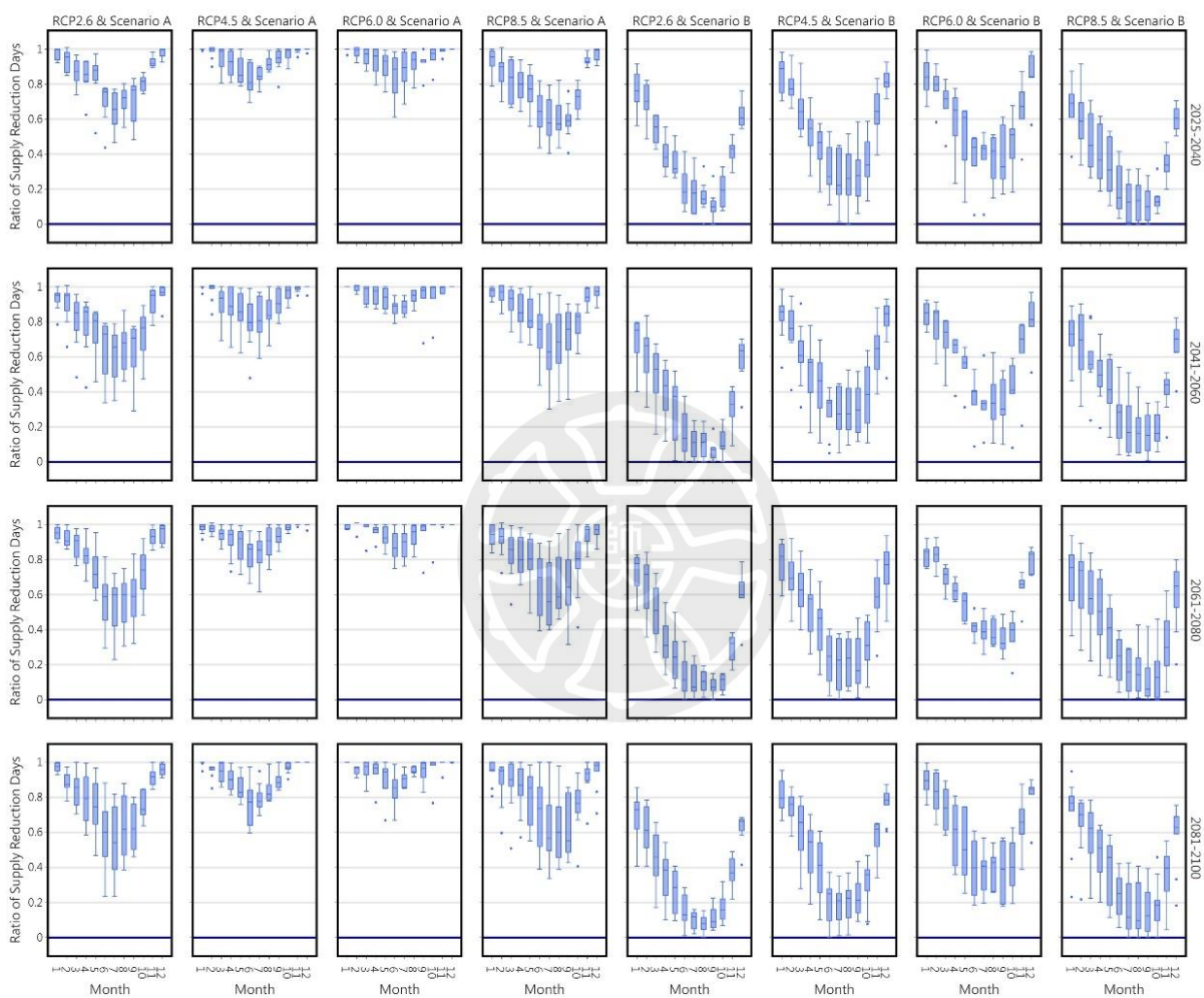
資料來源：整理自經濟部主管法規查詢系統（2024a），寶山水庫與寶二水庫聯合運用規線圖



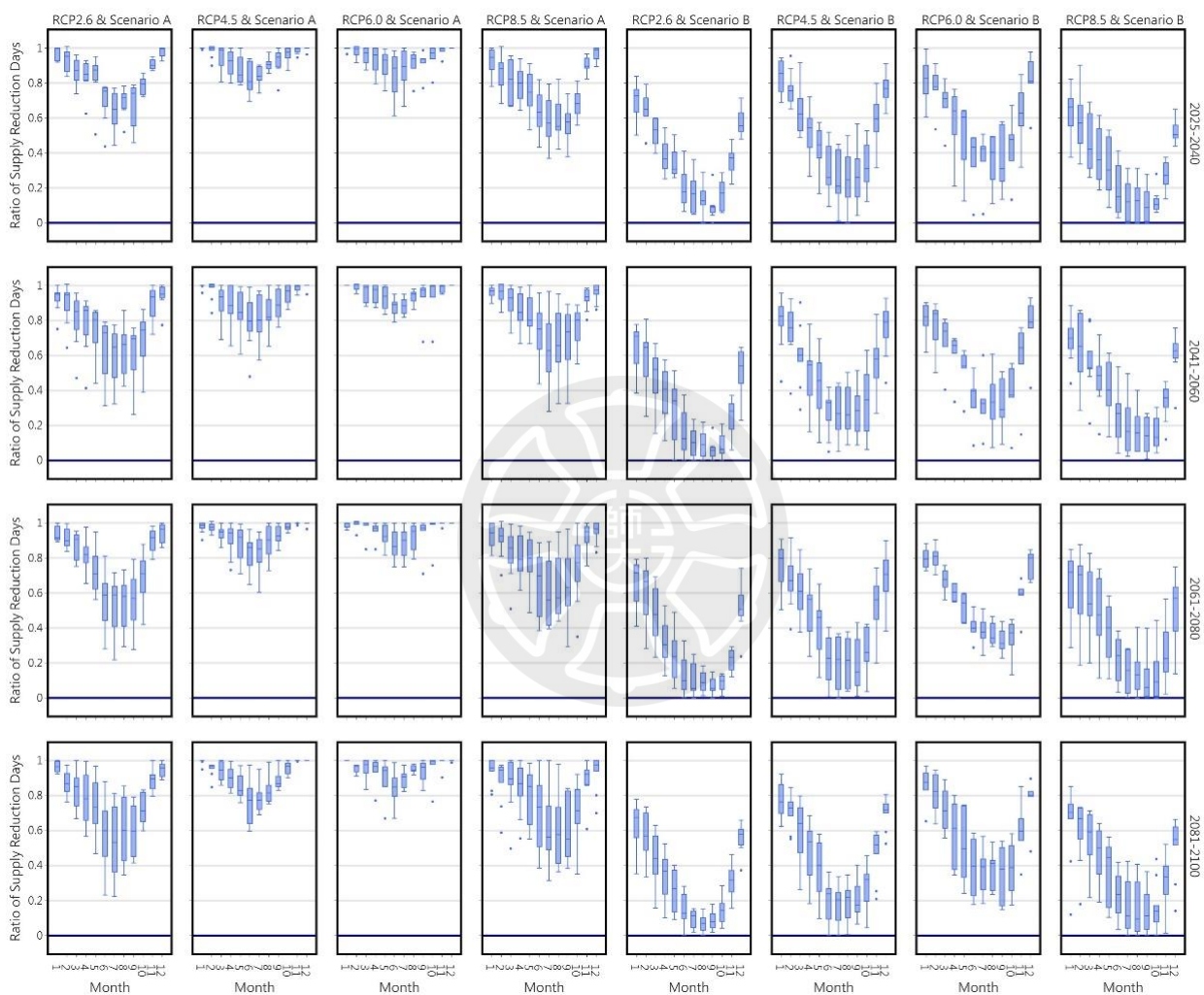
附圖 1 AB 情境寶二水庫擴容前缺水比例複合盒鬚圖



附圖 2 AB 情境寶二水庫擴容後缺水比例複合盒鬚圖



附圖 3 AB 情境寶二水庫擴容前減供比例複合盒鬚圖



附圖 4 AB 情境寶二水庫擴容後減供比例複合盒鬚圖

附表 3 農業優先情境寶二水庫擴容前缺水天數表

Scenario A	Period	Month											
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
		Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
Baseline	1990-2005	25	23	23	17	15	9	8	8	7	9	16	21
RCP2.6	2025-2040	23	21	20	17	17	12	10	9	6	9	13	19
RCP4.5		29	25	22	17	18	13	13	15	16	21	26	29
RCP6.0		28	24	24	22	21	16	17	19	17	24	27	30
RCP8.5		21	18	18	15	14	10	8	7	4	7	10	17
RCP2.6	2041-2060	23	21	22	19	18	9	7	7	4	7	12	19
RCP4.5		28	23	22	20	19	14	17	15	15	19	24	28
RCP6.0		29	25	25	24	22	16	16	18	16	21	25	30
RCP8.5		24	22	22	20	19	11	7	8	6	10	13	19
RCP2.6	2061-2080	24	21	21	15	14	10	10	8	4	6	10	17
RCP4.5		27	24	23	20	18	12	12	12	11	17	22	27
RCP6.0		30	26	25	24	22	18	19	18	19	21	25	30
RCP8.5		25	23	21	19	19	11	9	7	6	6	11	20
RCP2.6	2081-2100	22	19	19	16	14	8	5	7	6	7	12	19
RCP4.5		28	24	23	19	17	12	11	12	11	16	22	26
RCP6.0		30	24	24	20	19	14	16	17	17	21	25	29
RCP8.5		24	23	21	19	18	9	6	5	5	8	12	17

附表 4 農業優先情境寶二水庫擴容前缺水天數與基期相比差值表

Scenario A	Period	Month											
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
		Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
Baseline	1990-2005	25	23	23	17	15	9	8	8	7	9	16	21
RCP2.6	2025-2040	-2	-2	-2	0	2	3	2	1	0	0	-2	-2
RCP4.5		4	2	-1	0	3	4	5	7	9	12	10	8
RCP6.0		3	1	1	5	6	7	10	11	11	15	12	8
RCP8.5		-4	-5	-5	-2	0	1	0	-1	-2	-2	-6	-5
RCP2.6	2041-2060	-2	-2	-1	2	3	0	0	-1	-2	-2	-4	-3
RCP4.5		3	0	-1	2	4	5	9	7	9	10	8	7
RCP6.0		4	2	3	7	7	7	8	10	10	12	10	9
RCP8.5		-1	-1	-1	3	4	2	0	0	-1	1	-2	-2
RCP2.6	2061-2080	-1	-1	-2	-3	-1	1	2	0	-2	-3	-5	-4
RCP4.5		3	1	0	3	4	3	4	4	4	8	6	6
RCP6.0		5	4	3	6	8	9	12	10	12	12	10	9
RCP8.5		0	0	-2	2	4	2	1	-1	-1	-3	-5	-1
RCP2.6	2081-2100	-3	-4	-4	-1	-1	-1	-3	-1	0	-2	-3	-2
RCP4.5		3	1	0	2	2	4	4	4	5	7	6	5
RCP6.0		5	1	1	3	5	5	9	9	11	13	9	8
RCP8.5		-1	0	-2	2	3	1	-1	-3	-1	-1	-4	-4

附表 5 工業優先情境寶二水庫擴容前缺水天數表

Scenario B	Period	Month											
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
		Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
Baseline	1990-2005	6	8	8	6	5	2	2	1	0	0	2	4
RCP2.6	2025-2040	5	7	8	6	5	1	1	0	0	0	1	2
RCP4.5		9	12	11	8	7	3	3	1	1	2	2	5
RCP6.0		12	15	14	9	7	4	2	2	1	1	3	8
RCP8.5		4	5	5	3	2	1	1	1	0	0	0	2
RCP2.6	2041-2060	4	5	7	5	4	2	1	0	0	0	0	2
RCP4.5		8	8	9	8	5	3	2	2	0	2	2	4
RCP6.0		11	12	13	11	9	5	4	2	2	3	4	7
RCP8.5		4	7	8	7	5	3	2	1	1	0	1	3
RCP2.6	2061-2080	3	5	6	6	2	1	0	0	0	0	1	2
RCP4.5		7	8	9	8	5	2	1	0	0	0	2	4
RCP6.0		9	11	11	9	9	4	3	3	1	2	3	6
RCP8.5		4	6	7	7	6	2	2	1	0	0	1	2
RCP2.6	2081-2100	4	6	5	5	3	1	1	1	0	0	1	3
RCP4.5		8	9	9	7	6	2	1	1	1	2	2	4
RCP6.0		11	11	12	8	6	3	2	4	3	3	5	7
RCP8.5		6	6	8	8	6	3	1	0	0	0	1	3

附表 6 工業優先情境寶二水庫擴容前缺水天數與基期相比差值表

Scenario B	Period	Month											
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
		Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
Baseline	1990-2005	6	8	8	6	5	2	2	1	0	0	2	4
RCP2.6	2025-2040	-1	-1	0	0	0	-1	-1	-1	0	0	0	-2
RCP4.5		3	3	3	2	2	1	1	0	0	2	0	2
RCP6.0		7	7	6	3	2	2	0	1	1	1	1	4
RCP8.5		-2	-4	-3	-3	-2	-1	-1	0	0	0	-1	-2
RCP2.6	2041-2060	-2	-3	-1	-1	-1	0	-1	-1	0	0	-1	-2
RCP4.5		2	0	1	1	0	1	0	1	0	1	1	1
RCP6.0		5	4	5	5	4	3	2	1	2	2	3	3
RCP8.5		-2	-1	0	1	1	0	0	0	0	0	0	-1
RCP2.6	2061-2080	-3	-4	-2	-1	-3	-1	-2	-1	0	0	-1	-2
RCP4.5		1	0	1	2	0	0	-1	-1	0	0	0	0
RCP6.0		3	3	3	3	4	2	1	2	1	1	1	3
RCP8.5		-2	-2	-1	1	2	0	0	0	0	0	-1	-2
RCP2.6	2081-2100	-2	-2	-3	-1	-2	-1	-1	0	0	0	0	-1
RCP4.5		3	1	1	1	1	0	-1	-1	1	1	1	0
RCP6.0		6	3	4	1	1	1	0	3	3	3	3	3
RCP8.5		0	-2	0	2	1	1	-1	-1	0	0	-1	-1

附表 7 農業優先情境寶二水庫擴容前減供天數表

Scenario A	Period	Month											
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
		Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
Baseline	1990-2005	31	27	28	26	25	20	19	20	21	25	29	31
RCP2.6	2025-2040	31	27	27	26	27	23	20	22	23	25	28	31
RCP4.5		31	28	31	28	26	24	26	28	29	31	30	31
RCP6.0		31	28	30	29	29	27	28	29	28	30	30	31
RCP8.5		30	25	26	24	24	19	18	18	18	23	28	31
RCP2.6	2041-2060	30	27	26	26	25	22	20	21	21	24	29	30
RCP4.5		31	28	29	27	27	24	25	26	27	30	30	31
RCP6.0		31	28	31	29	29	27	28	30	29	31	30	31
RCP8.5		30	27	29	26	25	23	19	21	23	26	28	30
RCP2.6	2061-2080	30	25	28	25	22	18	19	19	18	23	28	30
RCP4.5		31	27	29	28	28	26	27	28	28	30	30	31
RCP6.0		31	28	31	29	29	26	28	30	30	31	30	31
RCP8.5		29	26	27	24	25	21	17	18	19	25	29	30
RCP2.6	2081-2100	30	25	27	24	23	18	17	19	19	23	28	30
RCP4.5		31	28	29	27	26	23	24	25	27	30	30	31
RCP6.0		31	28	30	29	29	26	28	29	29	31	30	31
RCP8.5		30	28	28	26	26	22	18	19	17	24	28	30

附表 8 農業優先情境寶二水庫擴容前減供天數與基期相比差值表

Scenario A	Period	Month											
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
		Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
Baseline	1990-2005	31	27	28	26	25	20	19	20	21	25	29	31
RCP2.6	2025-2040	0	0	0	0	3	3	2	2	2	0	-1	0
RCP4.5		0	1	3	2	2	5	8	8	7	5	1	0
RCP6.0		0	1	3	3	4	7	9	9	7	5	1	0
RCP8.5		-1	-1	-2	-2	-1	0	-1	-3	-3	-3	-1	0
RCP2.6	2041-2060	-1	0	-1	0	0	2	2	1	0	-2	0	-1
RCP4.5		0	1	1	1	2	4	6	6	6	5	1	0
RCP6.0		0	2	3	3	4	7	9	9	8	6	1	0
RCP8.5		0	1	1	0	0	3	1	1	2	1	-1	-1
RCP2.6	2061-2080	-1	-1	1	-1	-3	-2	0	-2	-3	-2	-1	-1
RCP4.5		0	1	2	2	4	6	8	8	7	5	1	0
RCP6.0		0	2	3	3	4	6	9	9	9	6	1	0
RCP8.5		-1	0	-1	-2	0	1	-1	-2	-2	0	0	-1
RCP2.6	2081-2100	0	-1	-1	-2	-2	-2	-2	-1	-2	-3	-1	-1
RCP4.5		0	2	2	1	1	3	5	5	5	5	1	0
RCP6.0		0	2	3	3	5	6	10	9	8	6	1	0
RCP8.5		-1	1	0	0	2	2	-1	-2	-4	-2	-1	0

附表 9 工業優先情境寶二水庫擴容前減供天數表

Scenario A	Period	Month											
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
		Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
Baseline	1990-2005	25	20	17	12	11	6	4	5	5	6	14	23
RCP2.6	2025-2040	24	20	17	11	10	6	6	4	3	6	13	19
RCP4.5		28	22	20	16	14	8	7	8	8	11	19	25
RCP6.0		26	22	22	20	19	13	13	13	10	16	20	26
RCP8.5		21	16	14	11	10	5	4	4	3	4	10	19
RCP2.6		23	19	16	13	12	4	3	4	2	3	10	20
RCP4.5	2041-2060	27	21	19	17	14	10	9	9	9	12	19	26
RCP6.0		26	24	23	20	18	12	10	10	9	13	21	25
RCP8.5		23	20	17	15	13	9	5	5	5	5	13	22
RCP2.6		24	20	16	9	8	3	2	3	2	4	10	19
RCP4.5	2061-2080	25	19	19	17	14	7	7	7	5	10	18	24
RCP6.0		26	23	22	19	17	13	12	11	10	12	20	26
RCP8.5		23	21	18	15	13	8	5	4	2	4	9	20
RCP2.6		23	18	14	12	9	4	4	3	3	5	11	21
RCP4.5	2081-2100	25	22	20	16	13	7	7	7	6	11	19	24
RCP6.0		28	24	23	19	16	12	13	13	12	12	20	26
RCP8.5		24	20	19	15	14	8	4	3	4	6	12	19

附表 10 工業優先情境寶二水庫擴容前減供天數與基期相比差值表

Scenario A	Period	Month											
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
		Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
Baseline	1990-2005	25	20	17	12	11	6	4	5	5	6	14	23
RCP2.6	2025-2040	-1	0	0	-1	-1	0	2	0	-2	0	-1	-5
RCP4.5		3	2	3	4	4	2	3	4	4	4	5	2
RCP6.0		1	3	5	7	8	8	10	8	5	10	6	3
RCP8.5		-4	-3	-3	-1	-1	-1	0	0	-2	-2	-4	-5
RCP2.6	2041-2060	-2	-1	-1	1	1	-2	0	-1	-3	-3	-4	-4
RCP4.5		2	2	2	5	4	4	5	4	4	6	5	3
RCP6.0		1	4	6	8	7	6	7	6	4	7	7	2
RCP8.5		-2	0	0	3	2	3	1	1	0	-1	-1	-2
RCP2.6	2061-2080	-1	0	-2	-3	-3	-2	-2	-1	-3	-3	-4	-5
RCP4.5		0	0	2	5	4	2	3	3	0	4	3	0
RCP6.0		1	3	5	6	7	7	8	6	5	6	6	2
RCP8.5		-2	1	1	3	2	2	1	0	-3	-2	-5	-3
RCP2.6	2081-2100	-2	-2	-3	-1	-2	-2	0	-2	-2	-1	-3	-3
RCP4.5		0	2	3	4	2	2	3	2	2	5	4	1
RCP6.0		3	4	6	6	5	6	9	9	7	6	6	3
RCP8.5		-1	1	2	3	3	2	0	-2	-1	0	-2	-4

附表 11 農業優先情境寶二水庫擴容後缺水天數表

Scenario A	Period	Month											
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
		Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
Baseline	1990-2005	25	23	23	17	15	9	8	8	7	9	16	21
RCP2.6	2025-2040	22	18	18	15	15	10	8	7	5	8	12	17
RCP4.5		27	21	19	16	17	12	10	12	13	19	25	28
RCP6.0		26	22	22	19	18	14	14	16	15	23	27	29
RCP8.5		20	16	15	13	13	8	6	4	3	5	10	16
RCP2.6	2041-2060	21	19	19	18	17	7	6	5	3	5	10	17
RCP4.5		26	20	19	19	17	12	13	14	13	18	23	27
RCP6.0		27	23	23	23	20	14	14	15	15	19	25	28
RCP8.5		21	19	19	19	18	9	6	7	5	8	13	18
RCP2.6	2061-2080	21	19	18	12	12	8	8	6	3	5	9	16
RCP4.5		25	20	20	17	17	9	10	10	9	15	20	25
RCP6.0		28	24	23	20	21	16	17	16	16	20	24	29
RCP8.5		24	20	18	17	17	9	7	6	5	5	10	17
RCP2.6	2081-2100	21	16	16	14	12	7	4	5	6	6	11	17
RCP4.5		26	22	20	17	15	10	9	9	9	14	21	25
RCP6.0		28	22	22	18	17	13	15	16	16	20	23	28
RCP8.5		22	18	19	18	16	8	4	4	4	7	10	16

附表 12 農業優先情境寶二水庫擴容後缺水天數與基期相比差值表

Scenario A	Period	Month											
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
		Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
Baseline	1990-2005	25	23	23	17	15	9	8	8	7	9	16	21
RCP2.6	2025-2040	-3	-4	-4	-2	0	1	0	-1	-2	-1	-4	-4
RCP4.5		3	-2	-4	-1	2	3	2	4	7	10	9	7
RCP6.0		2	-1	0	2	3	5	6	9	8	14	11	7
RCP8.5		-5	-7	-8	-4	-2	-1	-2	-3	-3	-4	-6	-6
RCP2.6	2041-2060	-4	-4	-3	0	2	-2	-2	-3	-3	-4	-5	-5
RCP4.5		1	-3	-4	1	3	3	6	6	7	9	7	5
RCP6.0		2	0	0	5	6	5	7	8	9	10	9	7
RCP8.5		-4	-4	-3	1	4	0	-2	-1	-1	-1	-3	-4
RCP2.6	2061-2080	-4	-4	-5	-5	-3	-1	0	-2	-4	-4	-7	-5
RCP4.5		0	-3	-3	0	2	0	2	2	3	6	5	4
RCP6.0		3	1	0	3	6	7	9	8	10	11	9	8
RCP8.5		-1	-3	-5	0	2	0	-1	-2	-2	-4	-6	-4
RCP2.6	2081-2100	-4	-7	-7	-3	-3	-2	-3	-3	-1	-3	-5	-4
RCP4.5		1	-1	-2	0	1	1	2	1	3	5	5	3
RCP6.0		3	-1	0	1	3	4	7	8	9	11	8	7
RCP8.5		-3	-5	-4	1	2	-1	-3	-4	-3	-2	-5	-5

附表 13 工業優先情境寶二水庫擴容後缺水天數表

Scenario B	Period	Month											
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
		Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
Baseline	1990-2005	6	8	8	6	5	2	2	1	0	0	2	4
RCP2.6	2025-2040	4	4	5	5	2	0	0	0	0	0	1	2
RCP4.5		6	10	8	6	5	2	1	0	0	1	2	4
RCP6.0		9	11	9	6	4	2	0	1	0	1	1	5
RCP8.5		3	3	4	3	1	1	0	0	0	0	0	1
RCP2.6	2041-2060	3	3	4	3	2	1	1	0	0	0	0	1
RCP4.5		6	6	6	5	4	2	1	0	0	1	2	3
RCP6.0		9	10	9	8	5	2	3	1	0	2	3	5
RCP8.5		3	5	6	5	4	1	1	0	0	0	1	2
RCP2.6	2061-2080	2	3	4	3	2	0	0	0	0	0	0	1
RCP4.5		4	6	6	4	4	0	0	0	0	0	1	3
RCP6.0		7	8	9	7	6	2	1	1	1	1	2	4
RCP8.5		3	4	5	5	4	1	1	0	0	0	1	2
RCP2.6	2081-2100	3	4	4	3	1	0	1	0	0	0	1	2
RCP4.5		5	6	7	5	3	1	0	0	0	1	2	3
RCP6.0		8	10	8	6	4	2	1	2	1	2	3	5
RCP8.5		4	4	5	5	4	2	0	0	0	0	0	2

附表 14 工業優先情境寶二水庫擴容後缺水天數與基期相比差值表

Scenario B	Period	Month											
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
		Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
Baseline	1990-2005	6	8	8	6	5	2	2	1	0	0	2	4
RCP2.6	2025-2040	-2	-4	-3	-2	-3	-2	-2	-1	0	0	-1	-2
RCP4.5		0	2	0	0	0	0	-1	-1	0	0	0	0
RCP6.0		4	3	1	0	-1	-1	-2	0	0	1	0	2
RCP8.5		-3	-5	-4	-3	-4	-1	-2	-1	0	0	-2	-3
RCP2.6	2041-2060	-3	-5	-4	-3	-3	-1	-1	-1	0	0	-1	-2
RCP4.5		0	-2	-2	-2	-1	-1	-1	-1	0	0	0	0
RCP6.0		3	2	1	1	0	0	1	0	0	1	2	1
RCP8.5		-3	-3	-2	-2	-1	-1	-1	-1	0	0	-1	-1
RCP2.6	2061-2080	-4	-6	-4	-3	-3	-2	-2	-1	0	0	-1	-3
RCP4.5		-1	-2	-2	-2	-1	-2	-2	-1	0	0	-1	-1
RCP6.0		1	0	1	1	1	0	-1	0	0	1	0	1
RCP8.5		-3	-4	-3	-1	-1	-1	-1	-1	0	0	-1	-2
RCP2.6	2081-2100	-3	-4	-4	-3	-3	-2	-1	-1	0	0	-1	-1
RCP4.5		-1	-2	-1	-1	-2	-1	-2	-1	0	0	0	-1
RCP6.0		2	2	0	-1	-1	0	-1	1	1	2	1	1
RCP8.5		-2	-4	-3	-1	-1	0	-2	-1	0	0	-1	-2

附表 15 農業優先情境寶二水庫擴容後減供天數表

Scenario A	Period	Month											
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
		Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
Baseline	1990-2005	31	27	28	26	25	20	19	20	21	25	29	31
RCP2.6	2025-2040	31	27	27	26	27	23	20	22	22	25	27	31
RCP4.5		31	28	31	28	26	24	26	28	28	30	30	31
RCP6.0		31	28	30	29	29	27	28	29	28	30	30	31
RCP8.5		29	25	25	24	23	19	18	17	17	21	27	31
RCP2.6	2041-2060	29	27	26	26	25	22	20	21	21	23	28	29
RCP4.5		31	28	29	27	26	24	25	25	27	30	30	31
RCP6.0		31	28	31	29	29	27	27	30	29	31	30	31
RCP8.5		30	27	29	25	25	23	19	20	22	25	28	30
RCP2.6	2061-2080	28	25	28	25	22	18	18	18	17	22	28	30
RCP4.5		31	27	29	28	28	26	26	28	28	30	30	31
RCP6.0		31	28	31	29	29	26	28	30	29	31	30	31
RCP8.5		29	26	27	24	25	21	17	18	19	24	29	30
RCP2.6	2081-2100	30	25	26	23	23	18	17	19	18	22	27	30
RCP4.5		31	28	29	27	26	23	24	25	26	30	30	31
RCP6.0		31	28	30	29	29	25	28	29	29	31	30	31
RCP8.5		30	27	28	26	26	22	17	18	17	22	28	30

附表 16 農業優先情境寶二水庫擴容後減供天數與基期相比差值表

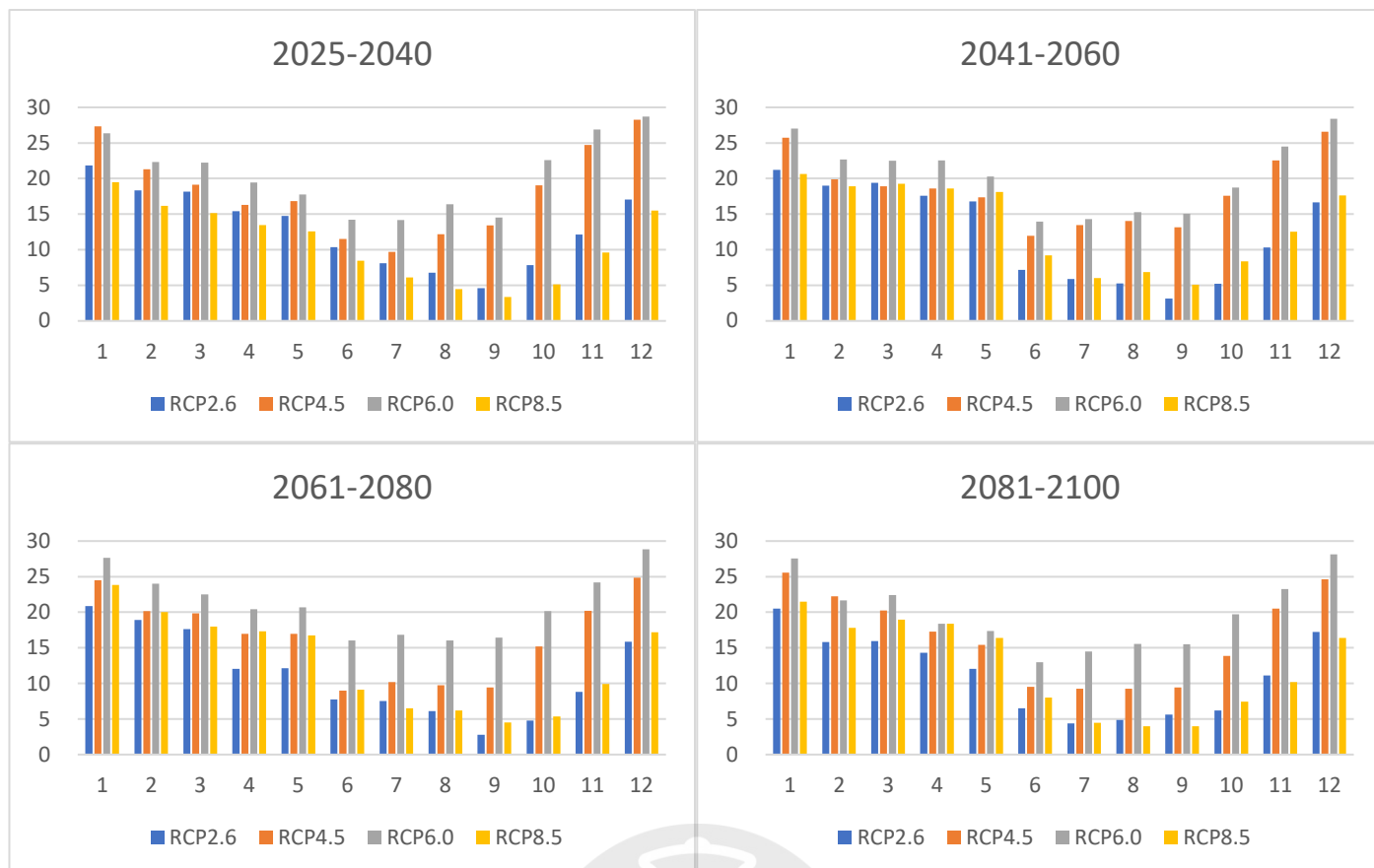
Scenario A	Period	Month											
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
		Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
Baseline	1990-2005	31	27	28	26	25	20	19	20	21	25	29	31
RCP2.6	2025-2040	0	0	-1	0	2	3	2	2	1	-1	-2	0
RCP4.5		0	1	3	2	2	5	7	8	7	5	1	0
RCP6.0		0	1	3	3	4	7	9	9	7	5	1	0
RCP8.5		-1	-2	-2	-2	-2	-1	-1	-3	-4	-4	-2	0
RCP2.6	2041-2060	-1	0	-1	0	0	2	1	0	0	-2	-1	-1
RCP4.5		0	1	1	1	1	4	6	5	6	5	1	0
RCP6.0		0	2	3	3	4	7	9	9	8	6	1	0
RCP8.5		-1	1	1	0	0	3	1	0	1	0	-1	-1
RCP2.6	2061-2080	-2	-1	1	-1	-3	-2	0	-2	-4	-3	-1	-1
RCP4.5		0	1	2	2	4	6	8	8	7	5	1	0
RCP6.0		0	2	3	3	4	6	9	9	8	6	1	0
RCP8.5		-1	-1	-1	-2	0	1	-1	-3	-2	-1	0	-1
RCP2.6	2081-2100	-1	-1	-1	-2	-2	-2	-2	-2	-3	-3	-2	-1
RCP4.5		0	2	2	1	1	3	5	5	5	5	1	0
RCP6.0		0	2	3	3	5	6	9	9	8	6	1	0
RCP8.5		-1	1	0	0	2	2	-1	-3	-5	-3	-1	-1

附表 17 工業優先情境寶二水庫擴容後減供天數表

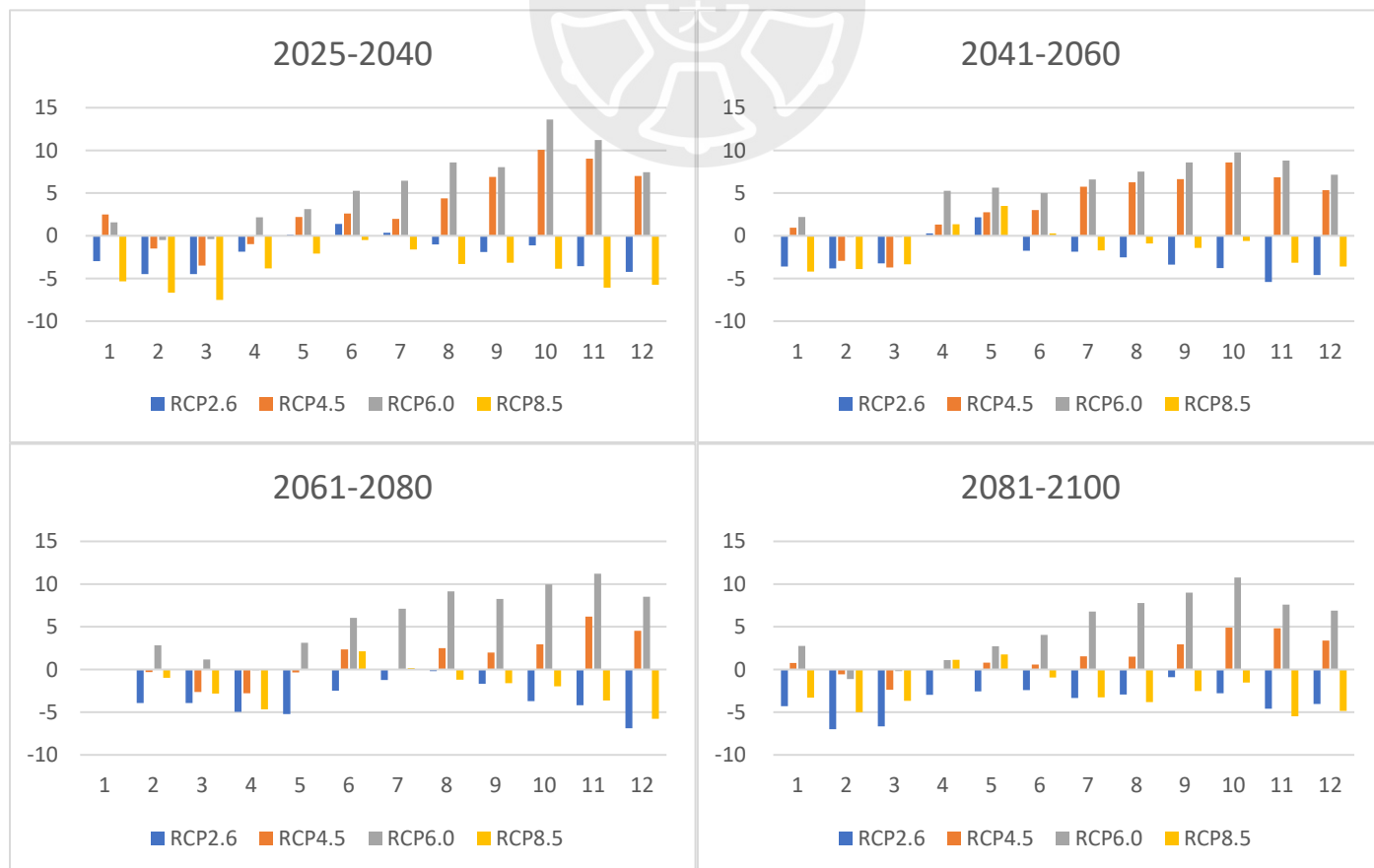
Scenario B	Period	Month											
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
		Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
Baseline	1990-2005	25	20	17	12	11	6	4	5	5	6	14	23
RCP2.6	2025-2040	23	18	16	11	10	5	5	4	3	5	11	17
RCP4.5		27	21	19	16	14	8	7	8	8	10	18	24
RCP6.0		26	22	22	19	19	13	13	13	9	15	19	25
RCP8.5		21	16	13	11	9	4	4	4	3	3	8	16
RCP2.6	2041-2060	22	18	16	12	11	4	3	3	2	2	8	17
RCP4.5		26	21	19	16	14	10	8	8	9	11	17	25
RCP6.0		25	24	23	20	17	12	10	10	9	12	19	24
RCP8.5		22	18	16	15	13	8	5	5	4	4	11	19
RCP2.6	2061-2080	22	19	15	9	7	3	2	3	2	3	7	16
RCP4.5		25	19	19	17	14	7	7	7	4	8	17	22
RCP6.0		25	23	21	18	17	12	12	11	9	12	18	25
RCP8.5		22	20	17	14	12	7	5	4	2	3	7	18
RCP2.6	2081-2100	21	17	14	11	8	4	4	2	2	4	9	18
RCP4.5		24	21	20	16	12	7	6	7	5	10	16	22
RCP6.0		27	24	22	18	15	12	12	13	11	12	18	25
RCP8.5		22	19	18	15	14	7	3	3	3	4	10	17

附表 18 工業優先情境寶二水庫擴容後減供天數與基期相比差值表

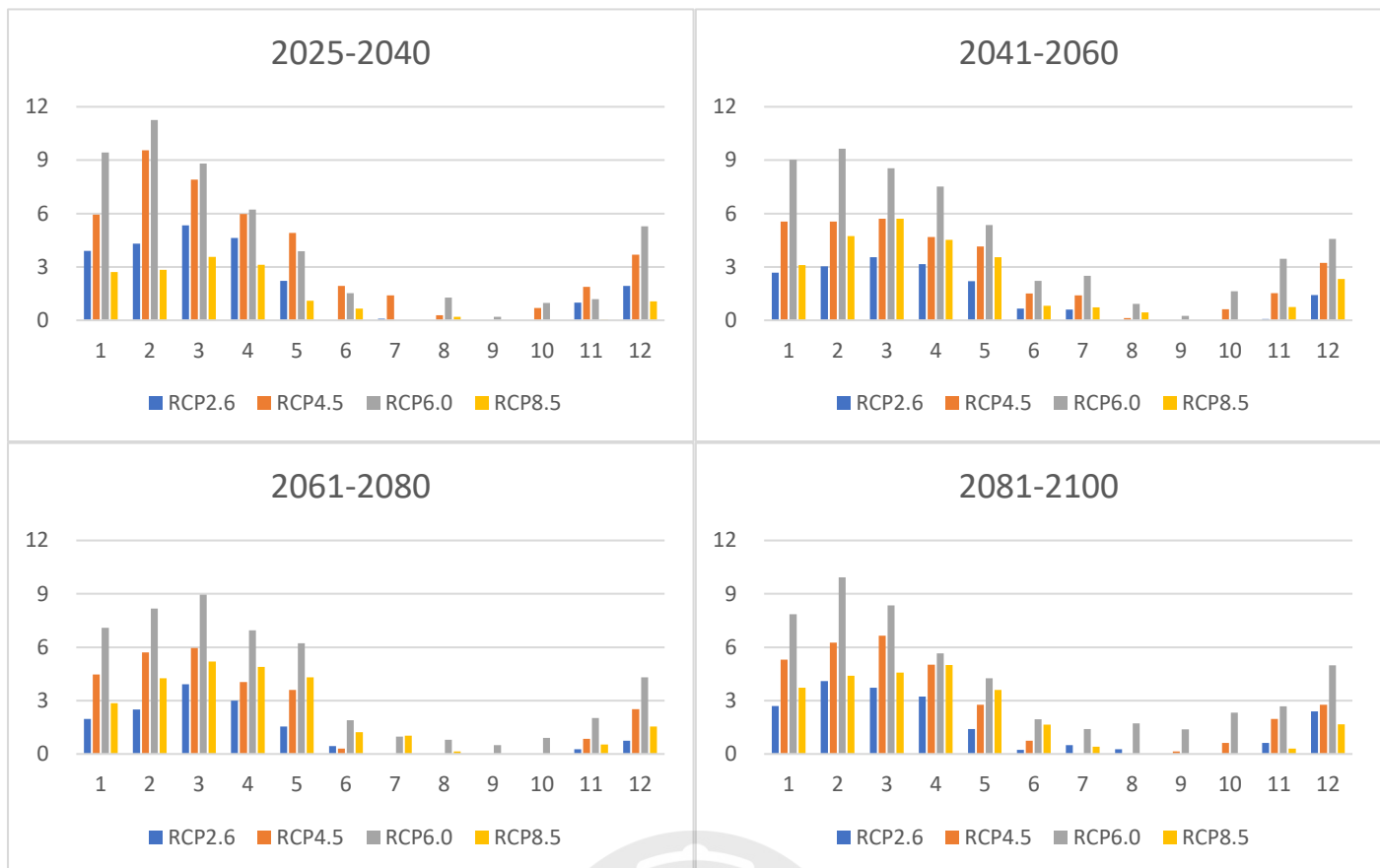
Scenario B	Period	Month											
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
		Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
Baseline	1990-2005	25	20	17	12	11	6	4	5	5	6	14	23
RCP2.6	2025-2040	-3	-2	-1	-1	-1	0	1	-1	-2	-1	-3	-6
RCP4.5		1	1	2	4	3	2	3	3	3	4	4	0
RCP6.0		1	2	5	7	8	7	9	8	5	9	5	2
RCP8.5		-4	-4	-4	-1	-1	-1	0	-1	-2	-3	-6	-8
RCP2.6	2041-2060	-3	-2	-1	0	0	-2	-1	-2	-3	-4	-6	-7
RCP4.5		1	1	1	4	3	4	4	4	4	5	3	1
RCP6.0		0	4	6	8	6	6	6	6	4	5	5	1
RCP8.5		-3	-2	-1	2	2	2	1	0	-1	-2	-3	-4
RCP2.6	2061-2080	-3	-1	-3	-3	-3	-3	-2	-2	-3	-3	-7	-8
RCP4.5		0	-1	2	5	3	1	3	2	0	2	3	-2
RCP6.0		0	3	4	6	6	6	8	6	5	5	4	1
RCP8.5		-3	0	-1	2	2	2	1	0	-3	-3	-7	-6
RCP2.6	2081-2100	-4	-3	-4	-1	-2	-2	0	-2	-2	-2	-5	-6
RCP4.5		-1	1	2	4	2	1	3	2	0	4	1	-1
RCP6.0		2	4	5	6	5	6	8	8	7	6	4	1
RCP8.5		-3	0	1	3	3	1	0	-2	-1	-2	-4	-6



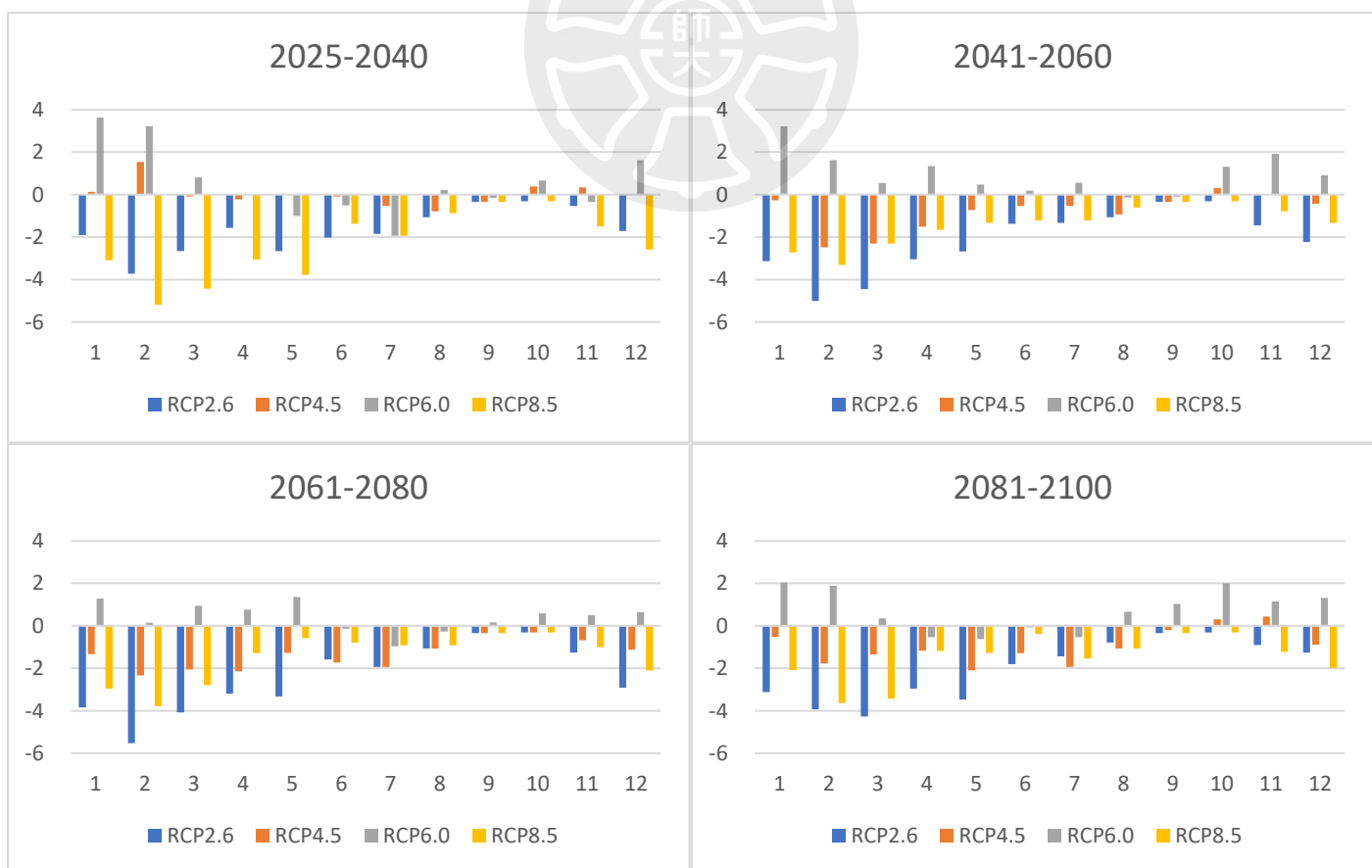
附圖 5 農業優先情境寶二水庫擴容後缺水天數長條圖



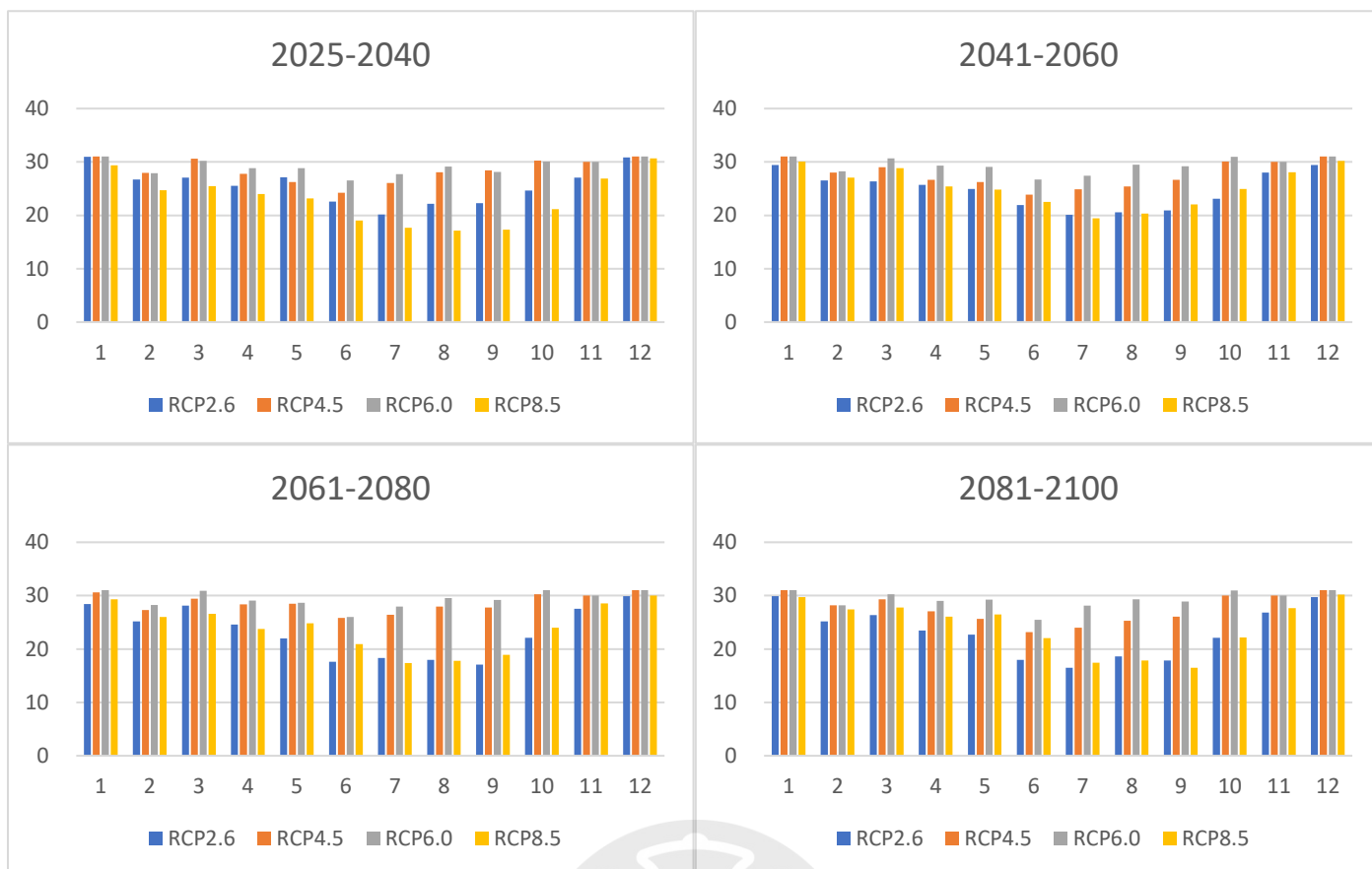
附圖 6 農業優先情境寶二水庫擴容後缺水天數與基期相比差值長條圖



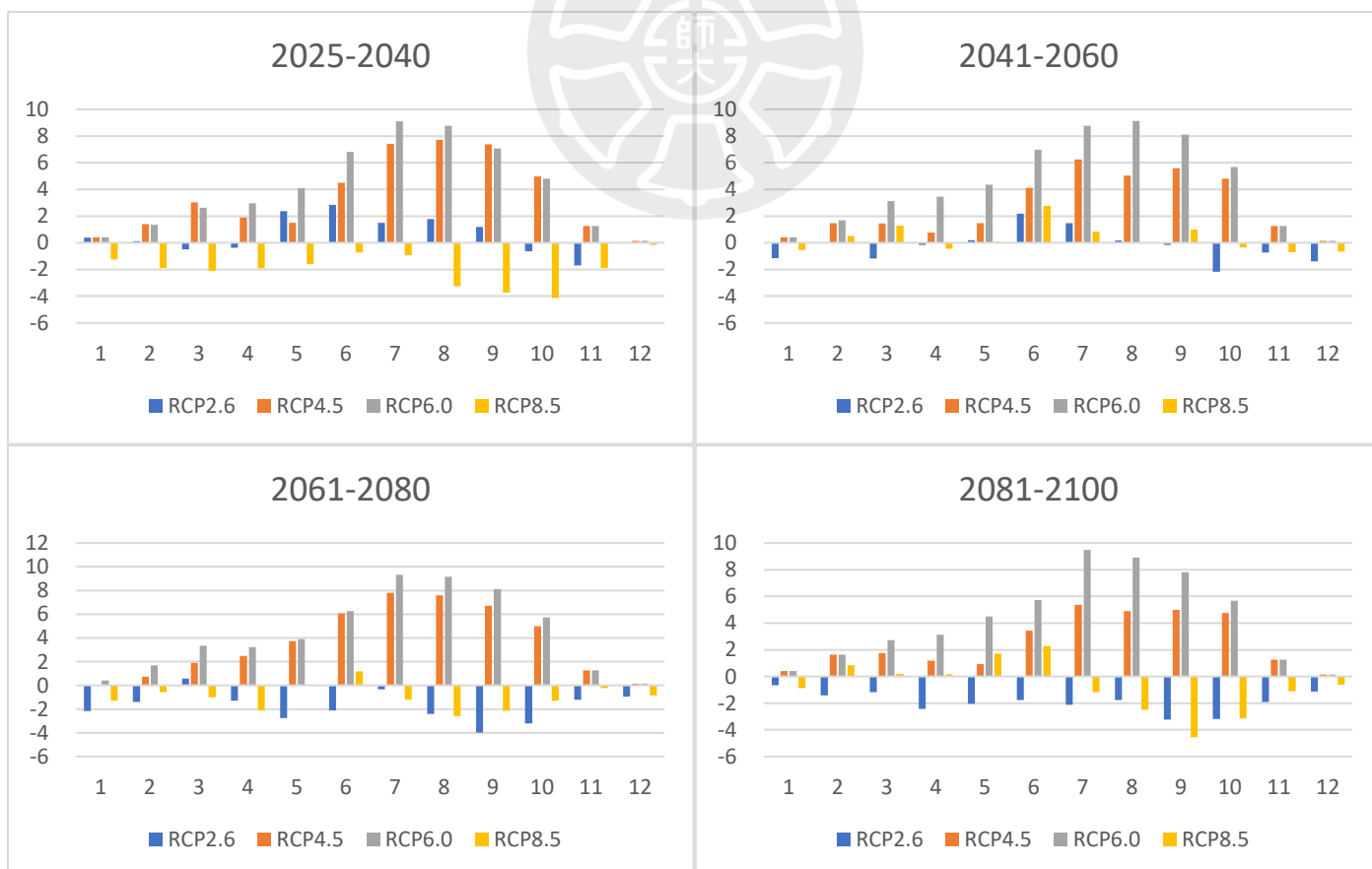
附圖 7 工業優先情境寶二水庫擴容後缺水天數長條圖



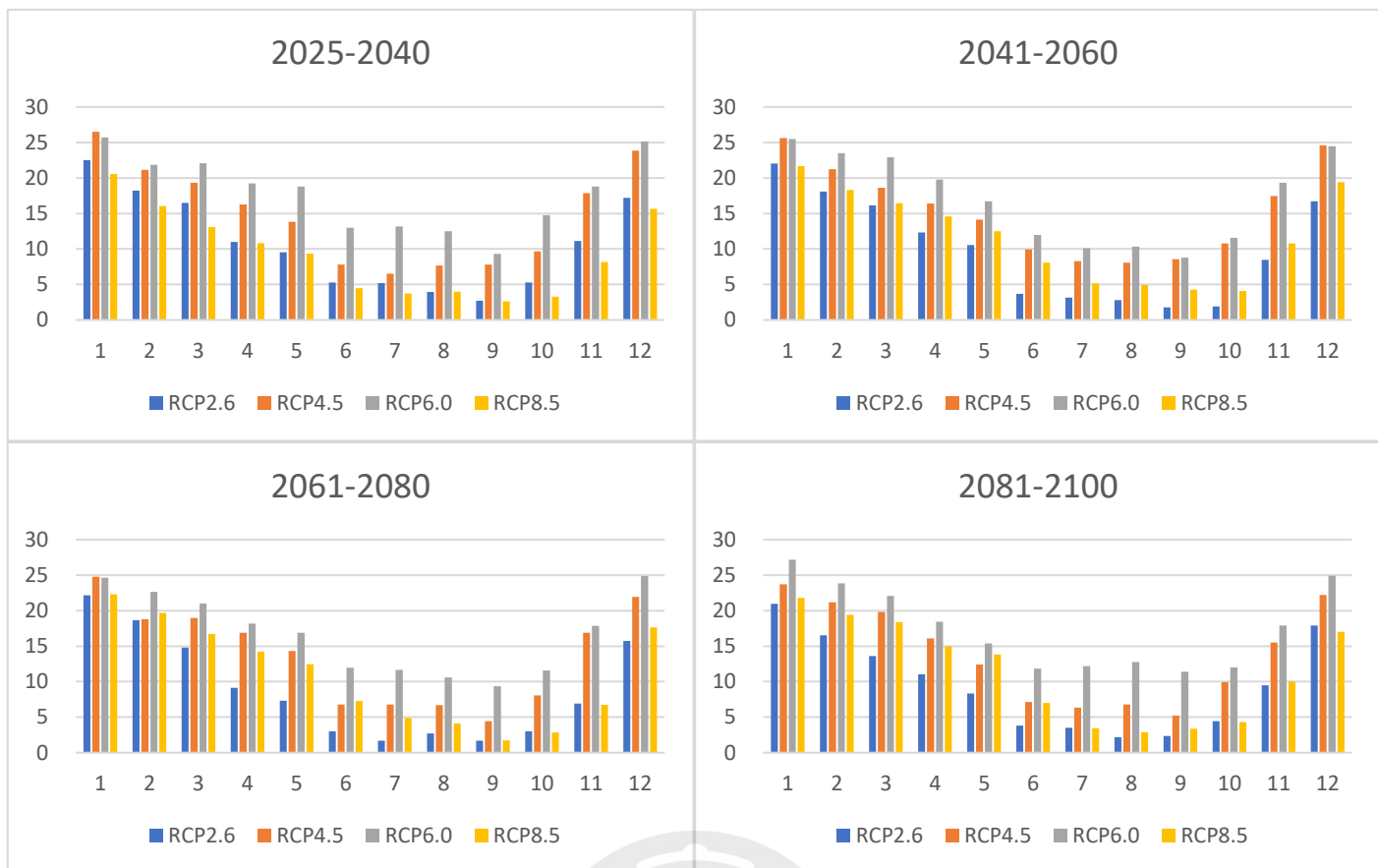
附圖 8 工業優先情境寶二水庫擴容後缺水天數與基期相比差值長條圖



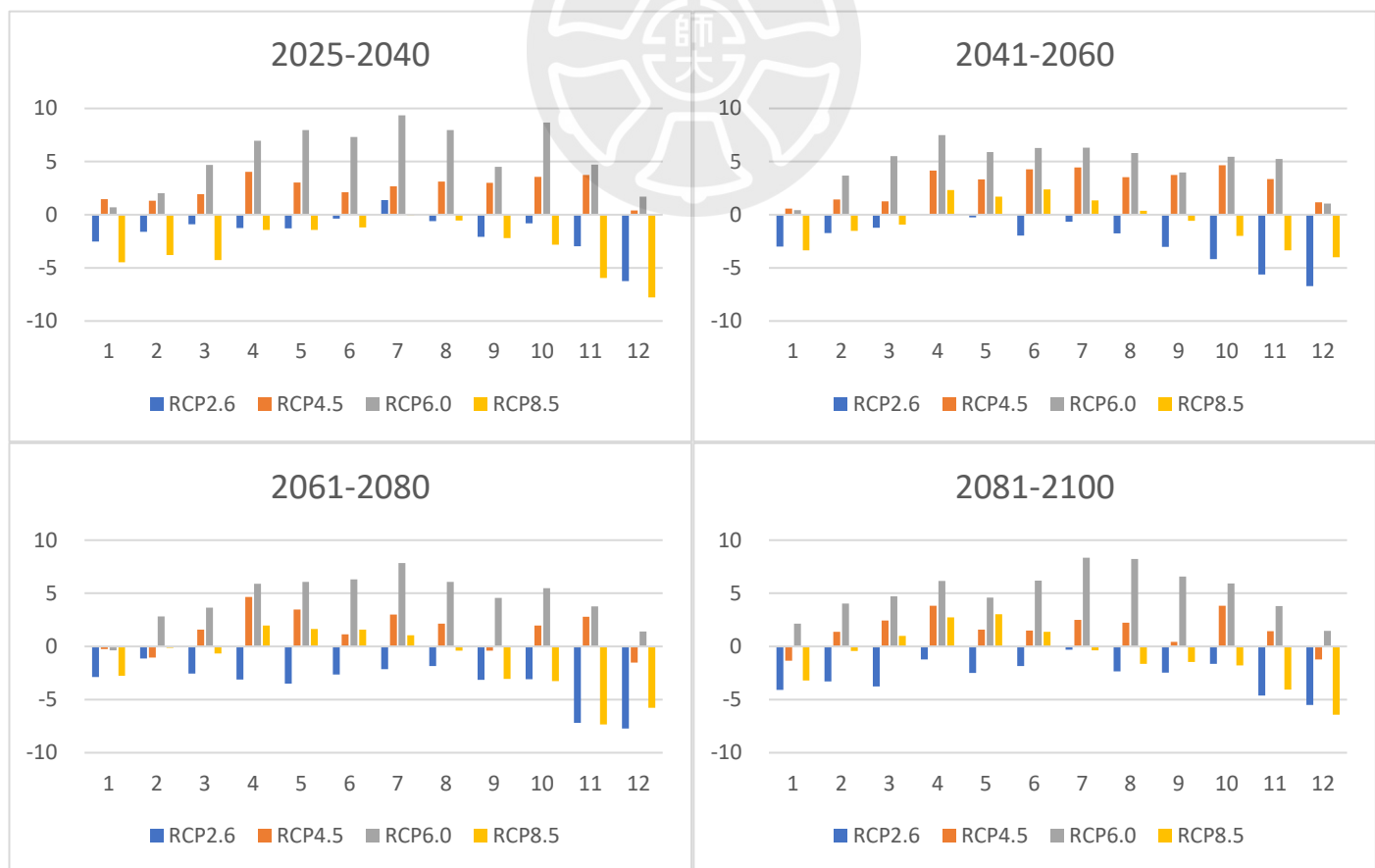
附圖 9 農業優先情境寶二水庫擴容後減供天數長條圖



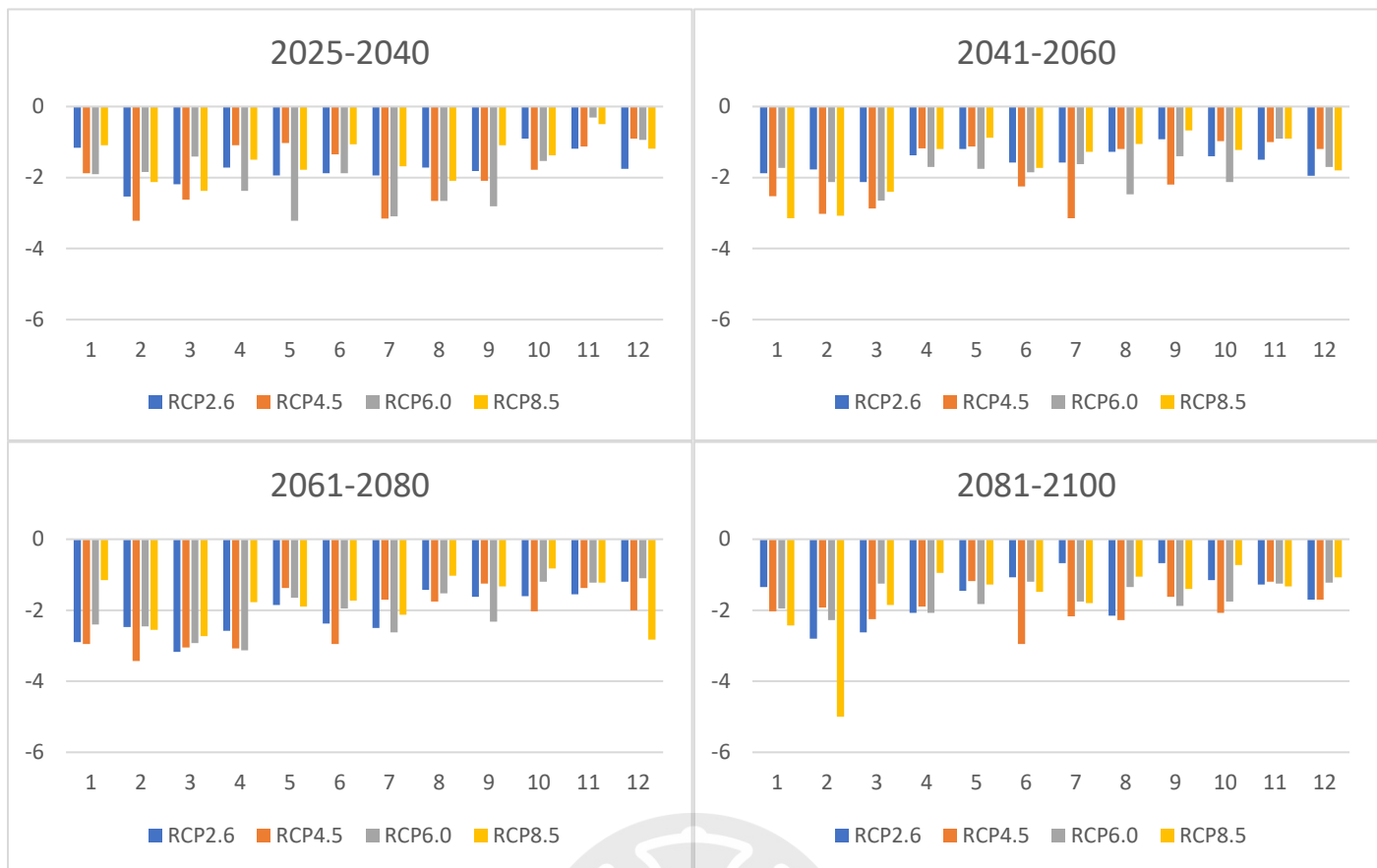
附圖 10 農業優先情境寶二水庫擴容後減供天數與基期相比差值長條圖



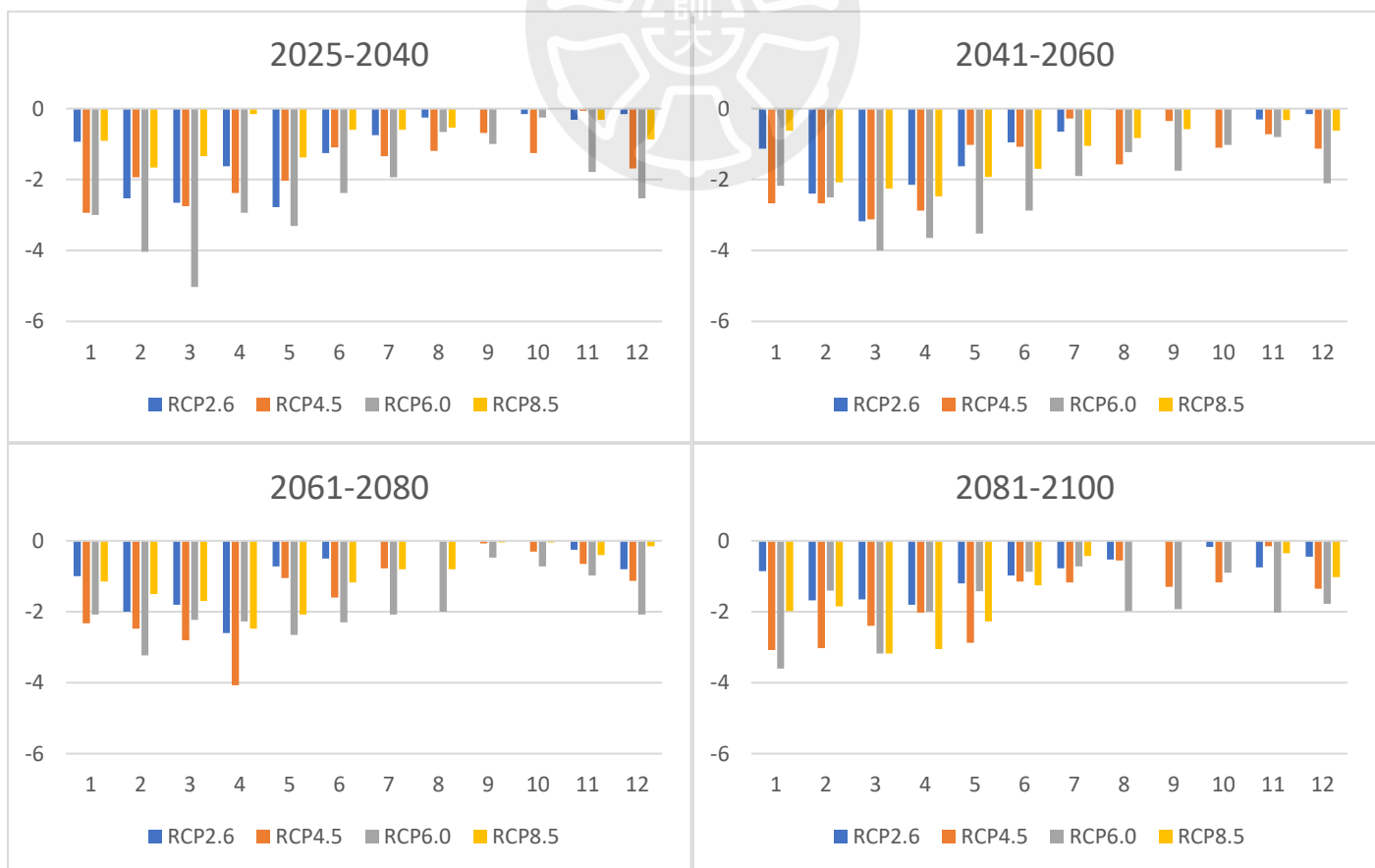
附圖 11 工業優先情境寶二水庫擴容後減供天數長條圖



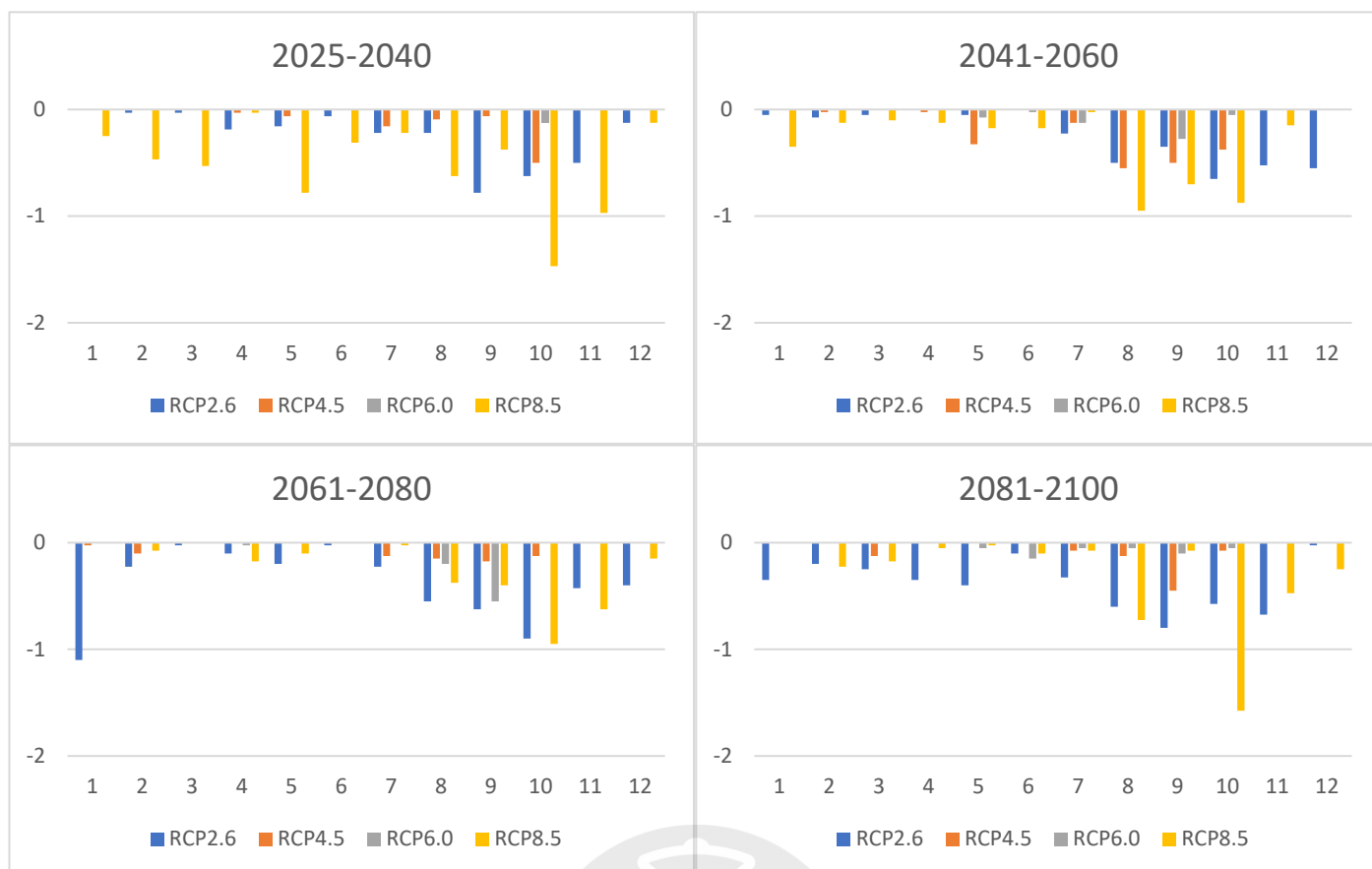
附圖 12 工業優先情境寶二水庫擴容後減供天數與基期相比差值長條圖



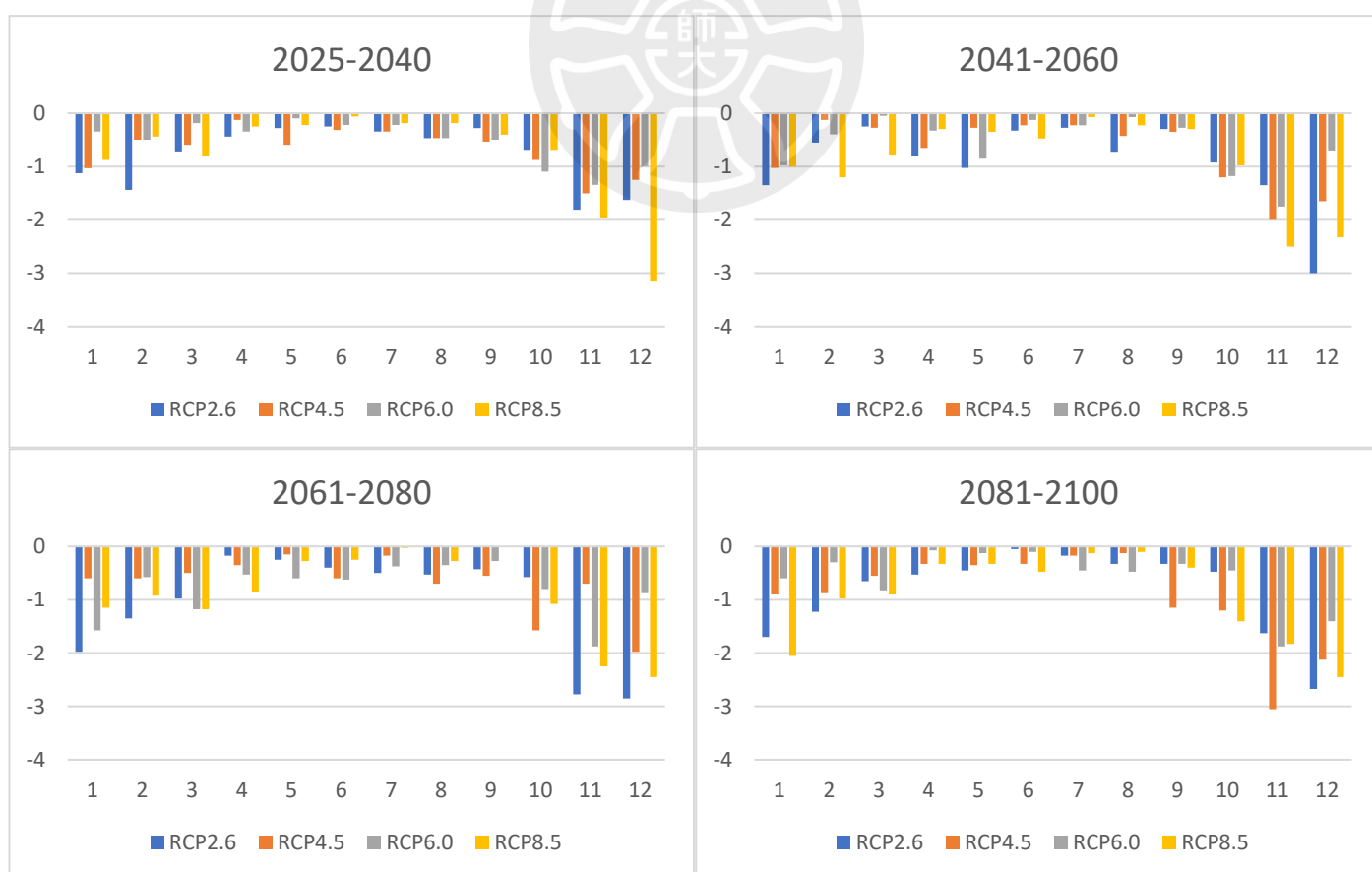
附圖 13 寶二水庫農業優先情境擴容前後缺水天數差值長條圖



附圖 14 寶二水庫工業優先情境擴容前後缺水天數差值長條圖



附圖 15 寶二水庫農業優先情境擴容前後減供天數差值長條圖



附圖 16 寶二水庫工業優先情境擴容前後減供天數差值長條圖

附表 19 RCP2.6 各 GCM/ESM 短期 2021-2040(S)月平均流量變化率

-40.4% 160.5%

單位：%

	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
bcc-csm1-1-m	-4.2	3.6	19.7	-23.3	-21.2	-7.6	-4.9	18.5	-23.2	-6.9	45.4	-27.6
CanESM2	66.8	23.7	18.3	12.8	31.3	31.3	-7.4	37.2	160.5	27.0	73.2	25.8
CCSM4	-28.2	-15.5	7.2	-27.3	-10.9	0.3	32.9	58.4	-12.4	18.8	43.4	-3.6
CSIRO-Mk3-6-0	-10.7	-6.8	-17.3	1.8	-9.6	-1.6	24.3	106.7	57.5	106.5	13.5	2.0
HadGEM2-AO	-7.2	19.6	-12.4	12.4	-27.8	-26.1	44.4	3.3	-28.5	36.0	25.2	4.8
MIROC5	79.5	3.7	-7.3	-29.0	-27.4	11.1	17.0	70.9	17.6	17.9	10.8	26.0
MPI-ESM-LR	95.7	36.2	-30.4	22.0	-0.8	35.2	-40.4	30.9	1.3	-39.8	85.6	-6.4
MPI-ESM-MR	88.1	57.2	45.5	12.6	35.3	32.3	59.9	20.1	25.0	-8.8	11.7	18.1

附表 20 RCP2.6 各 GCM/ESM 中短期 2041-2060(M1)月平均流量變化率

-40.5% 342.3%

單位：%

	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
bcc-csm1-1-m	-23.5	-34.2	-10.0	-26.5	-25.9	-1.5	-40.5	3.4	-18.4	-31.5	2.5	-4.8
CanESM2	177.1	127.4	98.5	51.6	68.4	26.8	15.9	193.4	342.3	65.0	99.3	108.3
CCSM4	0.7	-19.8	-29.7	-33.6	1.6	2.1	57.8	72.9	24.5	-0.3	-0.7	-1.7
CSIRO-Mk3-6-0	-10.9	-3.6	10.9	28.1	29.2	22.5	31.0	124.6	16.8	224.0	17.4	15.1
HadGEM2-AO	-0.1	7.1	-18.4	-28.2	-3.8	3.5	5.7	57.7	1.2	72.9	13.6	-0.7
MIROC5	22.3	-7.3	-15.4	-31.4	-15.4	41.7	-12.4	84.8	68.7	6.4	-27.4	-9.5
MPI-ESM-LR	16.7	50.1	-28.6	35.6	12.9	26.0	34.2	17.7	10.6	-24.3	34.5	17.5
MPI-ESM-MR	48.5	32.9	41.4	87.6	56.2	14.4	47.6	24.0	64.7	-0.9	19.5	15.7

附表 21 RCP2.6 各 GCM/ESM 中長期 2061-2080(M2)月平均流量變化率

-46.9% 595.9%

單位：%

	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
bcc-csm1-1-m	10.4	-37.6	46.4	9.0	-12.5	-4.4	-27.2	51.2	2.2	-1.5	9.8	-11.8
CanESM2	109.3	52.1	22.8	78.2	78.4	68.1	56.1	112.3	595.9	144.8	80.5	51.0
CCSM4	5.2	-0.9	9.9	-23.6	-13.1	-10.4	103.1	33.6	29.2	-33.1	55.0	-7.2
CSIRO-Mk3-6-0	0.3	-13.4	-12.5	36.0	10.7	-16.4	76.2	130.2	10.4	43.5	-6.3	-5.0
HadGEM2-AO	22.0	-4.1	-20.7	18.6	-5.0	-17.7	64.6	35.5	14.1	61.1	1.2	28.2
MIROC5	27.0	5.6	-23.2	-46.9	27.4	4.9	-6.0	29.4	24.7	15.5	8.6	29.2
MPI-ESM-LR	10.2	11.0	-29.4	36.4	-3.7	59.1	-1.4	20.8	35.9	-40.7	79.3	7.3
MPI-ESM-MR	29.5	51.8	19.1	31.8	82.8	68.6	35.6	32.2	25.3	42.4	-5.5	21.5

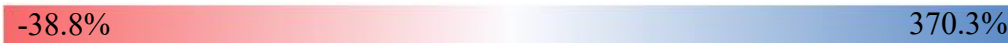
附表 22 RCP2.6 各 GCM/ESM 長期 2081-2100(L)月平均流量變化率

-42.2% 263.8%

單位：%

	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
bcc-csm1-1-m	-3.1	-26.0	2.9	-29.7	-8.0	29.6	2.5	26.1	0.0	-36.4	3.1	-12.1
CanESM2	111.9	103.6	45.3	99.9	133.2	38.2	16.7	77.5	263.8	54.7	78.2	47.0
CCSM4	9.4	4.8	-27.4	-42.2	5.5	-16.2	-15.8	51.4	-19.9	-35.5	27.6	-6.5
CSIRO-Mk3-6-0	12.0	36.4	1.5	67.9	29.5	32.1	45.1	191.1	34.6	124.8	31.2	-1.3
HadGEM2-AO	-4.3	-2.0	-19.3	-14.7	9.4	-3.6	-9.3	-6.6	-11.9	116.8	23.0	7.0
MIROC5	3.5	-8.2	7.2	-13.2	9.0	33.2	-7.2	-26.5	61.4	-13.5	27.9	-2.7
MPI-ESM-LR	82.1	63.6	-18.0	23.1	-11.1	47.3	8.7	-16.6	36.8	-33.5	29.8	-0.7
MPI-ESM-MR	7.7	37.8	15.8	16.6	-2.6	61.0	-8.6	4.0	42.0	7.2	-2.7	45.5

附表 23 RCP4.5 各 GCM/ESM 短期 2021-2040(S)月平均流量變化率



單位：%

	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
bcc-csm1-1-m	26.0	-10.3	37.3	-14.4	-3.7	42.9	-19.9	22.7	-28.5	-22.1	0.6	-19.3
CanESM2	105.9	102.3	63.7	54.3	109.7	-12.2	15.9	117.7	370.3	235.4	62.8	59.1
CCSM4	-26.2	-10.8	10.0	-4.6	-17.4	-7.9	26.1	81.6	-1.9	-36.2	-21.5	-29.7
CMCC-CM	-10.9	20.1	5.7	18.9	13.2	-1.6	110.4	107.4	21.5	26.1	-21.8	56.1
CSIRO-Mk3-6-0	33.6	4.1	16.5	14.4	34.6	9.1	41.4	152.6	53.6	215.3	-10.3	-23.7
HadGEM2-AO	-20.3	-17.7	-23.7	-20.1	0.5	-21.5	-19.8	34.6	-12.6	33.0	-21.7	-7.8
MIROC5	46.8	57.4	14.4	-19.4	31.1	30.2	-22.7	63.2	-19.8	17.4	-18.9	-4.1
MPI-ESM-LR	64.3	81.7	15.4	19.8	13.5	38.8	10.8	44.2	-9.6	-7.5	27.1	30.4
MPI-ESM-MR	0.3	2.6	32.1	62.8	25.9	3.9	49.6	45.7	-11.4	-3.3	-10.8	21.4
NorESM1-M	72.4	66.4	18.0	84.6	-31.4	71.8	36.2	-7.3	-38.8	-18.5	71.9	66.8

附表 24 RCP4.5 各 GCM/ESM 中短期 2041-2060(M1)月平均流量變化率



單位：%

	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
bcc-csm1-1-m	-11.5	-32.3	-2.4	-27.8	-8.1	29.1	-31.3	42.5	-45.8	-16.6	25.7	-33.1
CanESM2	154.0	128.0	61.4	43.8	155.1	31.9	51.6	151.6	325.9	30.2	136.3	78.1
CCSM4	24.2	32.7	-10.0	-51.0	-12.9	-1.6	158.0	70.7	-4.6	-33.0	22.8	-7.8
CMCC-CM	27.6	-1.9	-14.7	-23.4	-4.2	-4.9	61.6	64.9	20.5	-14.4	-18.6	45.7
CSIRO-Mk3-6-0	7.3	5.5	24.2	67.2	41.2	24.5	71.6	124.0	14.2	44.9	-17.5	-18.6
HadGEM2-AO	-14.5	-3.3	-38.7	-26.9	-3.7	-43.0	-19.9	36.1	-28.2	48.9	52.0	-12.8
MIROC5	67.3	21.9	12.5	-36.5	24.2	51.0	-17.9	72.6	51.0	-38.4	-38.3	33.3
MPI-ESM-LR	44.5	25.4	5.8	42.6	12.7	54.6	-9.0	72.6	54.4	-9.3	27.5	20.2
MPI-ESM-MR	89.1	54.3	35.7	16.5	42.1	57.2	26.5	62.9	25.6	-33.9	-17.4	8.0
NorESM1-M	24.0	60.4	12.0	71.7	-7.8	119.7	48.3	-37.1	-16.3	-2.7	24.4	-37.3

附表 25 RCP4.5 各 GCM/ESM 中長期 2061-2080(M2)月平均流量變化率



單位：%

	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
bcc-csm1-1-m	-4.9	-35.9	14.2	-23.7	4.6	54.5	-29.1	61.6	-41.9	-37.9	-17.9	-11.0
CanESM2	114.3	46.4	27.5	33.8	82.9	50.2	52.4	257.4	386.6	65.4	105.8	15.3
CCSM4	0.9	-18.3	-0.9	-45.5	2.1	12.4	-3.9	65.3	20.4	-37.5	38.3	12.6
CMCC-CM	59.7	-33.1	18.7	6.5	27.5	15.8	30.1	80.2	42.5	-41.4	-8.9	17.8
CSIRO-Mk3-6-0	28.9	20.4	64.5	43.6	74.0	33.2	104.8	200.9	62.4	122.4	-21.6	-12.8
HadGEM2-AO	-15.0	-14.6	-32.5	-21.4	-23.2	-34.1	18.5	16.6	19.3	102.0	25.3	-4.0
MIROC5	21.6	-8.3	-23.3	-30.8	37.5	49.7	-16.5	2.9	-20.6	-33.6	-35.5	-6.4
MPI-ESM-LR	39.9	48.7	4.7	20.0	-8.9	29.8	7.2	20.9	41.7	-36.9	9.3	3.9
MPI-ESM-MR	71.8	28.8	64.4	69.0	93.5	92.3	65.8	19.8	43.2	-16.9	-5.7	13.3
NorESM1-M	95.8	24.8	32.0	112.5	-44.3	71.8	130.4	84.5	-14.0	-5.1	32.8	68.4

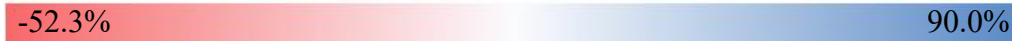
附表 26 RCP4.5 各 GCM/ESM 長期 2081-2100(L)月平均流量變化率



單位：%

	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
bcc-csm1-1-m	-13.9	-35.9	4.0	16.7	6.1	38.0	59.6	91.5	0.5	-42.8	74.7	39.6
CanESM2	51.0	163.5	91.8	51.1	113.1	47.3	8.4	118.2	318.3	11.8	80.1	175.5
CCSM4	-34.0	-17.6	-2.5	-31.4	26.3	-1.4	101.1	22.6	19.3	37.9	37.8	-24.9
CMCC-CM	8.2	33.9	-24.0	5.4	13.9	14.2	104.5	52.4	4.7	9.2	-39.4	36.2
CSIRO-Mk3-6-0	-8.1	56.3	65.3	82.2	54.3	41.7	49.2	168.0	59.2	39.6	-13.8	-14.8
HadGEM2-AO	-28.2	-2.2	-38.5	-18.4	-7.0	-11.0	-49.0	17.6	2.4	18.8	-8.7	-21.5
MIROC5	26.8	6.6	-0.3	-33.2	52.5	20.2	-4.2	-19.6	23.2	-28.2	-17.4	-19.4
MPI-ESM-LR	88.7	63.3	-23.1	42.9	-8.2	55.4	0.6	14.8	54.5	-42.1	-12.1	-6.1
MPI-ESM-MR	82.7	14.7	52.2	61.1	50.5	59.2	60.6	24.9	4.6	-22.0	12.3	34.9
NorESM1-M	14.2	12.2	30.7	141.3	14.7	43.3	129.7	80.4	4.4	-22.2	16.6	39.5

附表 27 RCP6.0 各 GCM/ESM 短期 2021-2040(S)月平均流量變化率



單位：%

	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
bcc-csm1-1-m	-7.9	-21.4	9.7	-22.6	-15.3	-3.3	14.9	-8.3	-33.7	-23.1	-1.8	-22.6
CCSM4	19.5	-35.9	-13.4	-20.1	-35.9	-19.9	64.9	89.8	-0.3	-17.8	36.9	-32.2
CSIRO-Mk3-6-0	0.1	0.9	26.3	9.8	10.1	5.3	5.7	90.0	24.4	69.1	0.0	-14.2
HadGEM2-AO	31.1	26.5	3.0	20.6	21.0	-10.5	17.9	-0.6	-18.5	56.2	6.1	3.6
MIROC5	46.0	23.2	18.9	-36.9	29.4	37.4	14.3	53.4	49.7	-14.5	-12.2	43.8
NorESM1-M	21.0	41.0	-25.1	35.3	-14.1	14.4	20.8	6.7	-31.8	-52.3	34.8	5.0

附表 28 RCP6.0 各 GCM/ESM 中短期 2041-2060(M1)月平均流量變化率



單位：%

	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
bcc-csm1-1-m	-18.4	-39.4	-5.0	-28.6	-6.6	48.0	15.2	9.4	0.3	-65.1	4.6	-2.1
CCSM4	4.7	-29.3	-2.1	-41.3	-22.1	4.7	104.2	114.9	-0.3	-48.3	-6.4	28.3
CSIRO-Mk3-6-0	-15.7	-2.4	-15.3	-16.0	7.8	-13.3	55.4	156.8	92.5	28.9	5.0	-14.4
HadGEM2-AO	7.6	3.4	-26.4	-17.9	-12.1	-22.7	33.3	32.9	55.7	59.3	-7.0	14.9
MIROC5	36.1	-15.2	-27.1	-34.5	-6.4	30.1	-35.0	40.0	52.8	-37.5	-11.6	4.2
NorESM1-M	47.3	46.6	-18.6	49.1	-29.1	46.5	107.8	6.1	-4.3	-30.7	16.2	26.7

附表 29 RCP6.0 各 GCM/ESM 中長期 2061-2080(M2)月平均流量變化率

-46.3% 162.1%

單位：%

	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
bcc-csm1-1-m	13.0	-13.9	7.1	-30.6	-6.3	19.9	28.4	68.7	28.0	-15.0	25.8	-7.6
CCSM4	-11.3	-12.9	3.0	-29.5	-29.3	-17.2	51.7	162.1	77.5	61.2	18.6	-23.0
CSIRO-Mk3-6-0	7.5	0.7	8.1	28.3	-1.6	14.3	45.3	72.1	74.1	22.1	-8.2	-18.8
HadGEM2-AO	-26.8	-13.2	-21.2	-26.4	9.4	-22.2	27.3	13.4	17.8	33.4	-11.2	-5.5
MIROC5	28.7	21.6	-17.9	-46.3	27.7	12.6	-25.7	14.2	35.5	27.2	-26.1	21.4
NorESM1-M	34.8	25.8	-8.1	110.5	-11.5	63.6	98.7	41.4	19.5	-38.4	53.1	7.1

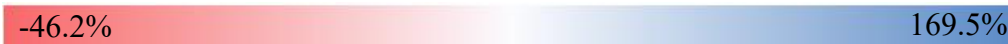
附表 30 RCP6.0 各 GCM/ESM 長期 2081-2100(L)月平均流量變化率

-50.9% 137.6%

單位：%

	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
bcc-csm1-1-m	-39.0	-14.1	-21.1	-45.1	-21.4	30.6	3.4	15.7	30.8	-44.7	7.5	-32.0
CCSM4	-30.0	-18.2	-28.7	-50.9	-24.2	-8.1	91.0	137.6	17.9	37.0	33.9	-12.0
CSIRO-Mk3-6-0	25.4	59.9	33.5	29.1	48.6	40.2	48.9	69.8	65.4	84.9	-9.0	-15.5
HadGEM2-AO	-11.4	-5.9	-16.3	-6.0	-26.7	-9.3	62.1	23.2	21.5	37.7	36.5	-7.3
MIROC5	47.8	1.3	8.7	-32.5	35.9	26.0	-1.2	20.5	5.4	-3.7	-23.0	29.2
NorESM1-M	42.2	52.8	51.6	26.1	-9.1	34.6	13.5	76.1	-16.8	-25.4	66.4	16.7

附表 31 RCP8.5 各 GCM/ESM 短期 2021-2040(S)月平均流量變化率



單位：%

	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
bcc-csm1-1-m	0.6	-46.2	3.9	-24.4	-23.5	29.7	-11.9	21.8	-15.1	-25.0	30.5	-8.6
CanESM2	114.2	99.5	37.6	56.3	96.7	56.1	-5.4	169.5	132.1	30.1	35.8	48.5
CCSM4	-19.1	-5.8	3.5	-36.7	-1.5	-19.3	51.5	53.0	78.6	85.4	15.1	-0.3
CMCC-CM	16.8	17.6	-24.3	-4.4	-7.5	0.3	96.7	56.9	33.0	-13.0	8.0	25.7
CSIRO-Mk3-6-0	5.8	-8.0	-18.3	17.8	32.9	50.9	1.8	57.0	29.5	128.4	4.4	2.9
HadGEM2-AO	-2.1	-7.2	-25.8	-17.8	-6.2	-31.9	13.7	25.6	26.1	53.1	-9.5	-8.8
MIROC5	32.4	6.5	-14.7	-43.2	-1.2	63.8	31.7	94.4	98.6	2.3	-18.3	12.6
MPI-ESM-LR	166.6	80.7	-15.1	10.4	-10.1	33.4	-8.1	57.3	0.8	-27.7	63.2	18.0
MPI-ESM-MR	62.3	7.0	36.5	55.3	5.5	20.9	53.3	-20.7	48.3	2.6	10.3	106.0
NorESM1-M	60.4	35.1	12.2	78.2	8.7	98.4	64.8	19.4	37.5	-34.8	31.6	27.0

附表 32 RCP8.5 各 GCM/ESM 中短期 2041-2060(M1)月平均流量變化率



單位：%

	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
bcc-csm1-1-m	-19.9	-39.4	-20.4	-31.7	-0.9	-19.5	-32.4	22.0	1.9	-37.0	0.2	-12.8
CanESM2	110.2	102.1	46.0	17.4	108.2	71.1	43.7	273.4	582.3	108.2	72.6	83.1
CCSM4	0.0	-31.2	-19.0	-54.3	-56.7	-26.8	39.1	136.3	3.9	-9.0	9.6	-17.9
CMCC-CM	-21.4	-43.0	-50.2	-16.6	-17.2	31.2	84.3	117.6	-14.0	-40.6	-23.0	10.0
CSIRO-Mk3-6-0	-31.6	-20.3	26.3	44.3	45.0	46.2	51.2	49.7	29.2	95.6	-5.8	-14.0
HadGEM2-AO	6.2	-23.3	-25.8	-26.9	-3.1	-45.2	-25.2	-3.9	24.7	65.5	-10.2	-6.6
MIROC5	49.6	18.2	-25.1	-39.2	-3.1	17.6	-28.0	-42.3	46.0	37.8	4.8	3.9
MPI-ESM-LR	34.6	18.5	-34.5	-21.7	-3.4	41.3	-27.1	51.1	30.1	-17.2	82.5	-8.1
MPI-ESM-MR	0.2	-7.7	4.6	42.0	6.3	33.1	26.5	-10.3	-3.6	-12.5	-10.8	43.5
NorESM1-M	0.7	11.5	-1.7	66.9	-31.8	59.4	15.5	-21.1	28.8	1.4	100.3	12.2

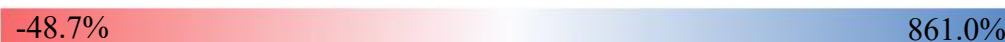
附表 33 RCP8.5 各 GCM/ESM 中長期 2061-2080(M2)月平均流量變化率



單位：%

	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
bcc-csm1-1-m	-20.8	-48.8	-31.0	-35.5	-15.1	18.8	20.3	23.2	35.9	1.8	48.6	-4.8
CanESM2	152.1	106.0	33.2	27.3	90.5	45.7	40.8	317.2	453.0	86.2	118.4	89.1
CCSM4	-10.4	-30.7	-33.6	-50.0	33.6	-17.1	8.5	48.4	52.0	-9.6	17.1	-15.0
CMCC-CM	-1.5	-40.5	-58.0	-26.6	-3.9	-2.7	53.9	24.8	-43.3	-44.0	-0.4	18.6
CSIRO-Mk3-6-0	20.4	33.1	62.6	45.3	71.1	41.6	34.8	81.0	137.9	119.2	23.9	44.3
HadGEM2-AO	-13.8	1.2	-10.1	-15.2	-16.9	-29.8	-16.3	56.9	31.0	13.4	-9.8	-18.8
MIROC5	18.0	-4.4	-31.1	-23.6	21.0	9.1	-30.4	35.3	20.5	-15.6	-19.3	-2.6
MPI-ESM-LR	34.9	22.7	-25.3	-4.4	-6.9	7.9	36.5	16.4	13.5	-38.1	38.7	5.7
MPI-ESM-MR	30.4	-4.2	41.6	13.0	12.9	37.0	74.6	48.6	25.9	-2.6	-0.6	67.4
NorESM1-M	15.4	18.0	8.7	130.7	52.6	121.3	179.9	53.8	61.2	22.3	53.8	5.5

附表 34 RCP8.5 各 GCM/ESM 長期 2081-2100(L)月平均流量變化率



單位：%

	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
bcc-csm1-1-m	-22.9	-47.9	-30.5	-48.7	-27.8	-1.3	-3.4	64.7	3.3	-0.5	116.4	-8.9
CanESM2	169.8	124.5	50.4	31.3	80.7	87.5	74.8	311.2	861.0	279.2	139.6	75.2
CCSM4	-32.6	-14.6	-27.5	-34.4	-5.4	61.7	25.6	193.0	15.8	-20.2	7.0	-19.7
CMCC-CM	-30.4	-48.2	-35.5	-29.7	14.6	23.9	118.4	65.3	-3.3	-19.3	-18.2	11.4
CSIRO-Mk3-6-0	9.0	8.0	40.3	103.8	106.7	133.9	30.6	150.6	45.3	119.2	-19.8	-9.7
HadGEM2-AO	20.1	-20.0	-39.6	-26.9	-20.2	-30.8	67.8	63.6	54.0	96.4	-14.7	-9.1
MIROC5	55.4	-6.1	-26.4	-40.3	25.1	1.0	-29.6	14.3	-18.3	-12.7	-20.5	18.3
MPI-ESM-LR	53.1	16.7	-43.2	-7.3	-4.1	55.8	4.5	79.3	12.7	1.5	25.1	-3.1
MPI-ESM-MR	-5.1	17.7	14.6	0.2	28.6	46.6	98.5	34.9	41.1	-3.5	-6.6	13.9
NorESM1-M	70.8	15.2	-0.7	137.8	34.4	97.9	40.8	-2.9	-11.8	16.6	143.1	74.3