

國立臺灣大學理學院
氣候變遷與永續發展國際學位學程
碩士論文



International Degree Program in Climate Change and Sustainable Development

College of Science

National Taiwan University

Master Thesis

建立企業廠區水風險評估框架與應用於缺水風險評估
Establishment of Water Risk Assessment Framework for
Enterprises and Application to Water Shortage Risk Assessment

張慈純

Tzu-Chun Chang

指導教授：童慶斌 博士

Advisor: Ching-Pin Tung, Ph.D.

中華民國 111 年 7 月

July 2022

國立臺灣大學碩士學位論文
口試委員會審定書

National Taiwan University Master Thesis
Oral Examination Committee Approval

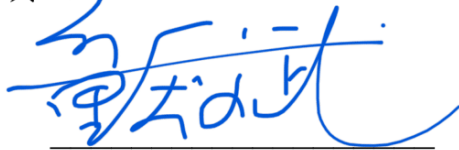
建立企業水風險評估框架與應用於缺水風險評估

Establishment of Water Risk Assessment Framework for Enterprises and
Application to Water Shortage Risk Assessment

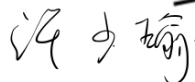
本論文係張慈純（R09247004）在國立臺灣大學氣候變遷與永續發展
國際學位學程完成之碩士學位論文，於民國111年7月18日承下列
考試委員審查通過及口試及格，特此證明。

This master thesis is finished by Tzu Chun, Chang (R09247004) at International Degree Program
in Climate Change and Sustainable Development on _18_ (date) _7_ (month), _2022_ (year) of the
Republic of China, passed the oral examination by the following examination committees.

口試委員 Oral examination committee :



(指導教授 Advisor)



(共同指導 co-Advisor)


誌謝

終於取得撰寫誌謝的門票了!很慶幸自己在兩年前加入了 SDLab 這個大家庭，兩年的時間說長不長說短不短，讓我跳脫了原本的大氣專業與考試取向的思維。計畫、專案、實習與論文的接踵而至，豐富了我的碩士生涯，也讓我在學習中成長。學習的過程中，不一樣的環境、不一樣的領域，我的內心迷茫了一次又一次，當挫折感襲來眼淚卡在眼眶我也再次吞了下去，我不斷地告訴自己：我選的，咬著牙也要堅持下去。

一路走來，謝謝童老師的耐心指導與方向提供；謝謝研究室優秀的學長姐與同學們的陪伴與研究資源上的幫助；謝謝 IPCS 同學們的鼓勵，成為我的精神糧食；謝謝家人給了我最有力的支持；謝謝男友蔡先生一直以來的陪伴，為我原本應該最痛苦的論文閉關歲月帶來一盞明燈；謝謝所有在研究、在生活路上的貴人，因為有你們，我才能是我。

2022 年 9 月，我畢業了!願往後的的日子裡，我能永遠熱情、保持初衷、勇敢追夢。人生很短，容不得苟且，張慈純請謹記。

摘要

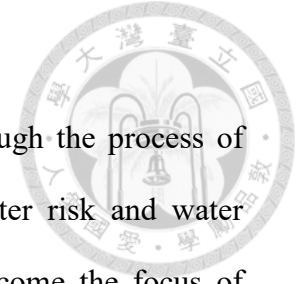


水資源是企業的根本，貫穿於生產與營運的過程中。隨著近年來對於水風險與水管理的意識提升，水資源逐漸成為企業與投資人關注的焦點，並且在氣候變遷的壓力下，氣候相關風險的評估與揭露已經成為趨勢。然而企業在面對水相關風險的評估時，仍面臨著缺乏正確且適合的資訊或方法等挑戰，導致企業在進行水相關風險評估時躊躇不前。現今企業實務上普遍使用水風險相關工具，如世界資源研究所（WRI）開發的 Aqueduct，也僅限於水風險的識別，無法實現風險量化，亦不足以作為企業管理的基礎。因此，為使企業能夠全面評估水相關風險，本研究建立完整的企業水風險評估框架，配合不同時間尺度的設計，協助企業掃描與量化水風險，作為企業的參考指引。

此企業水風險評估框架通過四個步驟：價值鏈重大性評估、辨識水相關風險與機會、評估量化水相關風險以及最後的企業回應完善企業水管理流程。其中第三步驟因涉及風險量化對於企業最具困難度，本研究選用企業間關注度較高的缺水風險，以高產值且高耗水的半導體製造業作為案例研析應用於步驟三並將評估結果延伸至步驟四協助企業回應。缺水風險量化使用中央氣象局季長期天氣展望與氣候情境相關資料，透過全球氣候模型降尺度、氣象合成模式、GWLFL 水文模式與水資源系統動力模式實現一至三個月季長期缺水風險預警與氣候變遷下缺水風險評估，做為區域供水對於廠區的影響，並以水情燈號鏈結廠區缺水風險。廠區的部分利用本研究建置之廠房水資源系統動力模式並採用回復力、可靠度、脆弱度等三項風險指標探討供水系統的供水能力與調適選項的選擇。整體評估方法具有合理性，評估結果對於廠區具有參考價值，透過此框架使企業的布局能因應現況水風險並避開氣候變遷可能帶來的水風險，進而在 CDP、DJSI 等國際評級中獲得優良表現。

關鍵詞：乾旱、缺水風險、廠房、企業、氣候變遷、水資源

ABSTRACT



Water resource is the foundation of enterprise, running through the process of production and operation. With the increasing awareness of water risk and water management in recent years, water resources have gradually become the focus of enterprises and investors. Under climate change, assessing and disclosing climate-related risks have become a trend. However, the challenges faced by enterprises in water-related risk assessment include the lack of correct and appropriate information or methods, which leads to the hesitation of enterprises in water-related risk assessment. Aqueduct, developed by the World Resources Institute (WRI), is a widely used water risk assessment tool for enterprises, limited to identifying water risks. It cannot achieve quantifying and is insufficient to serve as a basis for enterprises to respond. Therefore, to enable enterprises to capture water-related risks fully, this study established a water risk assessment framework with different time scales.

This water risk assessment framework improves enterprises' water management through four steps: Value chain water materiality assessment, Identifying water-related risks and opportunities, Evaluating and quantifying water-related risks, and Enterprise response. The third step involves risk quantification, which is the most difficult part. This study selected water shortage risk and took the semiconductor manufacturing industry with high output value and high water consumption for a case study, and extended results to the fourth step. Water shortage quantification used seasonal weather outlook and climate scenarios data, downscaling, weather generation, GWLF hydrological model and water resource system dynamic model to realize seasonal early warning and water risk assessment under climate change. The water supply of plant would be directly affected by regional water supply monitoring index. For the plant part,

this study built a water resource system dynamic model of plant and used three risk indicators, namely resilience, reliability and vulnerability to assess water supply capacity and sort adaptations. In conclusion, the assessment is reasonable and the result has reference value for plant. With this framework, enterprises can perfectly respond to current water risks and avoid the water risks caused by climate change, thus achieving good performance in international ratings such as CDP and DJSI.

Keywords: Drought, Water shortage risk, Plant, Enterprise, Climate change,
Water resource

目錄

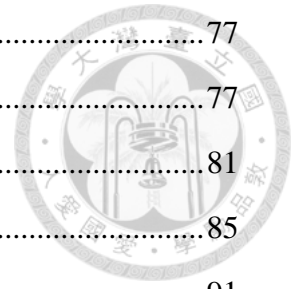


誌謝.....	i
摘要.....	ii
ABSTRACT.....	iii
圖目錄.....	viii
表目錄.....	xi
第一章 緒論.....	1
1.1 研究動機.....	1
1.2 研究目的.....	2
1.3 論文框架.....	3
第二章 文獻回顧.....	5
2.1 氣候變遷對區域水資源的影響.....	5
2.1.1 氣候變遷風險定義.....	5
2.1.2 台灣水資源現況.....	7
2.1.3 氣候變遷對台灣水資源的衝擊與評估方法回顧.....	8
2.2 企業水風險管理.....	10
2.2.1 企業水風險.....	11
2.2.2 水風險管理、評估流程與範疇界定.....	12
2.3 半導體廠房水資源系統.....	14
2.3.1 工業用水分類.....	14
2.3.2 半導體廠房用水特性.....	16
2.3.3 半導體廠房用水流程.....	17
2.3.4 工廠水平衡.....	18
2.3.5 用水效率指標.....	21
第三章 研究方法.....	22
3.1 水風險評估框架與相關工具.....	22
3.1.1 企業水風險評估框架.....	22
3.1.2 企業實施水風險管理的參考依據.....	24

3.2	辨識水相關風險與機會.....	27
3.2.1	標準化降雨指標.....	27
3.2.2	水情燈號.....	28
3.2.3	乾旱脆弱度.....	31
3.2.4	台灣地區未來情境下水情地圖.....	32
3.3	評估量化水相關風險.....	33
3.3.1	中央氣象局季長期天氣展望.....	35
3.3.2	氣候情境.....	36
3.3.3	全球氣候模型降尺度.....	38
3.3.4	氣象合成模式.....	39
3.3.5	GWLF 水文模式.....	40
3.3.6	水資源系統動力模式.....	44
3.3.7	缺水風險指標.....	47
第四章	應用案例研析.....	48
4.1	應用案例設計.....	48
4.1.1	案例廠房水平衡圖.....	48
4.1.2	廠房水資源系統動力模式.....	49
4.2	一至三個月季長期缺水風險預警.....	54
4.2.1	歷史氣象資料選用.....	54
4.2.2	基於完美預報之水情燈號推估.....	56
4.2.3	實際燈號與蓄水量燈號比對校正.....	60
4.2.4	缺水風險預警.....	62
4.2.5	GWLF 模式與桃園水資源系統動力模式驗證.....	64
4.3	氣候變遷下缺水風險評估.....	67
4.3.1	情境設定與模式選擇.....	67
4.3.2	氣候變遷情境下之水情燈號推估.....	69
4.3.3	氣候變遷對於桃園地區的供水影響.....	72
4.3.4	氣候變遷下廠區缺水風險評估.....	74



4.4	企業回應.....	77
4.4.1	廠區缺水應變.....	77
4.4.2	辨識與評估調適選項.....	81
4.4.3	水風險評估框架與國際評級的回應.....	85
第五章	結論與建議.....	91
5.1	結論.....	91
5.2	建議.....	95
第六章	參考文獻.....	97



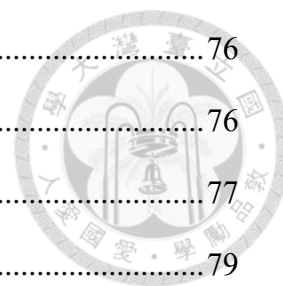
圖目錄



圖 1：研究架構圖.....	4
圖 2：IPCC AR5 對於風險、脆弱度、暴露與危害之核心概念	6
圖 3：ISO 14091 對於風險的定義	7
圖 4：四大水資源分區春季流量未來變化趨勢.....	9
圖 5：企業水風險框架（資料來源：CEO Water Mandate）	11
圖 6：企業水管理的五個步驟.....	13
圖 7：企業缺水風險回應與決策框架.....	13
圖 8：工業用水分類項目	15
圖 9：電子零組件製造業用水結構分析.....	16
圖 10：半導體廠內用水流程（資料來源：江世雄，2011）	18
圖 11：廠房用水平衡示意圖.....	20
圖 12：企業水風險評估框架.....	24
圖 13：水風險管理的參考依據整體架構圖.....	25
圖 14：水情燈號與其對應限水措施說明.....	31
圖 15：脆弱度補值方法示意圖.....	32
圖 16：不同時間與情境下水情燈號與取水額外成本地圖.....	33
圖 17：企業缺水風險評估量化流程.....	34
圖 18：季長期天氣展望預報溫度結果呈現（擷取時間：2022/4/30）	36
圖 19：季長期天氣展望預報降雨結果呈現（擷取時間：2022/4/30）	36
圖 20：GWLF 模式水平衡示意圖	41
圖 21：CN 值與臨前土壤水分關係圖	42
圖 22：桃園水資源系統動力模式.....	46
圖 23：案例廠房之水平衡圖.....	49
圖 24：案例廠房之水資源系統架構圖.....	50

圖 25：案例廠房之水資源系統動力模式.....	52
圖 26：石門水庫集水區及本研究選用之雨量站（綠點部分）.....	55
圖 27：石門水庫限水警戒值曲線.....	57
圖 28：2021 年桃園地區各月份推估燈號分布情況.....	59
圖 29：實際燈號與蓄水量燈號比較.....	61
圖 30：實際燈號與校正後之蓄水量燈號比較.....	61
圖 31：石門水庫四月至六月蓄水量推估.....	63
圖 32：石門水庫五月至七月蓄水量推估.....	63
圖 33：石門水庫四月至六月推估燈號分布.....	63
圖 34：石門水庫五月至七月推估燈號分布.....	63
圖 35：GWLF 月尺度石門水庫 2008 年至 2012 年入流量模擬結果.....	65
圖 36：2016 年石門水庫蓄水量模擬結果（豐水年）.....	66
圖 37：2019 年石門水庫蓄水量模擬結果（正常年）.....	66
圖 38：2021 年石門水庫蓄水量模擬結果（乾旱年）.....	66
圖 39：2030 年各情境紅燈發生狀況.....	70
圖 40：2050 年各情境紅燈發生狀況.....	70
圖 41：2030 年各情境水情異常發生狀況.....	70
圖 42：2050 年各情境水情異常發生狀況.....	70
圖 43：各情境紅燈發生情況變化趨勢.....	71
圖 44：各情境水情異常發生情況變化趨勢.....	71
圖 45：各年份紅燈發生情況變化趨勢.....	71
圖 46：各年份水情異常發生情況變化趨勢.....	71
圖 47：各測試紅燈發生情況.....	73
圖 48：各測試水情異常發生情況.....	74
圖 49：2030 及 2050 年各情境回復力變化.....	76

圖 50：2030 及 2050 年各情境可靠度變化.....	76
圖 51：2030 及 2050 年各情境脆弱度變化.....	76
圖 52：決策流程圖.....	77
圖 53：2021 年 4 月至 6 月缺水事件特徵.....	79
圖 54：應變路徑一.....	80
圖 55：應變路徑二.....	80
圖 56：加入調適選項後回復力在 2030 年變化趨勢.....	84
圖 57：加入調適選項後可靠度在 2030 年變化趨勢.....	84
圖 58：加入調適選項後脆弱度在 2030 年變化趨勢.....	84
圖 59：加入調適選項後回復力在 2050 年變化趨勢.....	84
圖 60：加入調適選項後可靠度在 2050 年變化趨勢.....	84
圖 61：加入調適選項後脆弱度在 2050 年變化趨勢.....	84
圖 62：TCFD 資訊揭露的建議和補充建議.....	88

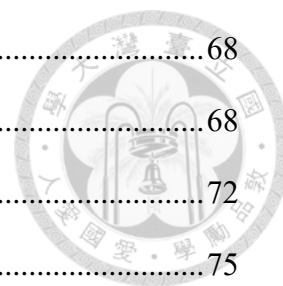


表目錄



表 1：近二十年的歷史乾旱事件列表.....	8
表 2：企業所面臨水風險類型列表.....	12
表 3：國內外常用之檢覈工業用水效能指標.....	21
表 4：SPI 值對應之乾旱程度表.....	28
表 5：歷年水情燈號轉變統計表.....	29
表 6：歷年水情燈號轉變統計表（接續上表）.....	30
表 7：各燈號限水比例與單位水車成本.....	32
表 8：SSPs 情境說明與其對應之 RCPs 列表.....	37
表 9：各種情境於短、中、長期之預測升溫情形（單位：°C）.....	37
表 10：AM1 與 AM2 之值.....	42
表 11：GWLF 參數設定.....	44
表 12：Vensim 模式主要參數設定.....	53
表 13：石門水庫集水區雨量站資料.....	55
表 14：雨量與溫度的各月份正常區間上、下限.....	56
表 15：石門水庫限水警戒值.....	58
表 16：在未來一個月完美預報的情況下 2021 年桃園地區的水情燈號推估結果	60
表 17：實際燈號與校正前後蓄水量燈號之相關係數與 RMSE.....	61
表 18：校正後之 2021 年桃園地區的水情燈號推估結果.....	62
表 19：台灣北部地區四至六月季長期預報（資料發布日期 2022/3/31）.....	62
表 20：台灣北部地區五至七月季長期預報（資料發布日期 2022/4/30）.....	62
表 21：石門水庫四月至六月水情燈號推估結果.....	64
表 22：石門水庫五月至七月水情燈號推估結果.....	64
表 23：GWLF 驗證結果.....	65

表 24：候選模式各指標排名列表.....	68
表 25：本研究使用之模式及其對應氣候情境列表.....	68
表 26：五組測試之月平均降雨改變設定列表.....	72
表 27：桃園地區工業用水在各水情燈號下的限水比例.....	75
表 28：兩種應變路徑之比較.....	80
表 29：案例廠房候選調適選項以及其對應風險因子.....	81
表 30：2030 年候選調適選項之效用與排名.....	83
表 31：2050 年候選調適選項之效用與排名.....	83
表 32：2021 年版水安全問卷與水風險評估框架對應及說明.....	86
表 33：四大要素及其建議揭露事項與水風險評估框架對應及說明.....	89
表 34：SASB 半導體產業水管理議題說明.....	90



第一章 緒論



1.1 研究動機

水是人類與地球上所有生命賴以維生的重要元素，並且被聯合國認可為人權要項之一。然而，水是有限的資源，並非取之不盡、用之不竭，不同的需求者共享或爭奪水資源來滿足需求與目的。世界經濟論壇(World Economic Forum, WEF) 2022 年發佈的《全球風險報告》指出未來十年影響全球最大及次大的風險分別為氣候行動失敗與極端天氣，此二項與缺水皆有密切關聯。

水資源是企業的根本，貫穿於生產與營運過程，並且可應用於多種用途 (Dupont and Renzetti, 2001)。隨著對於水資源的擔憂加劇，健全的水資源管理與水資源相關資訊的揭露成為企業永續發展的基礎 (Botha, 2015)。根據乾旱壓力測試的結果，若暴露於中等程度缺水的乾旱情境下，絕大多數企業的信用等級會被下調 (RMS, GIZ & NFCA, 2017)。因此，理解與應對水風險是企業與投資者應採取的關鍵步驟，以確保維護股東價值，同時回應利害關係人的關切 (WWF & WBCSD, 2020)。Carbon Disclosure Project (CDP)《2020 年全球水資源報告》顯示，水風險的潛在財務影響遠大於解決的成本，也就是不作為的代價是採取行動的五倍以上。並且，2020 年在疫情的影響下，企業水相關資訊揭露仍增加了 20%，說明企業意識到水資源的潛在影響，以及資訊揭露對於扭轉局面的力量 (CDP, 2020)。

風險計量是指在風險識別的基礎上將風險量化分析，建立風險管理的科學基礎，為後續策略制定及調適選項的選擇提供更可靠的依據 (Deng et al., 2020)。現今國際組織已發展各種工具協助企業了解與應對與水相關的挑戰與風險，然而多數工具僅能協助風險識別，無法實現風險量化。例如在 CDP 水安全問卷中最廣泛使用的工具為由世界資源研究所 (WRI) 開發的 Aqueduct，也僅限於地理水風險的識別，無法進行風險量化，亦無法作為後續企業回應的基礎 (Shiao et al., 2012)。也就是說，企業在面對水相關風險的評估時，仍面臨著缺乏正確且適

合的資訊或方法等挑戰。

儘管水風險因不同產業部門和地理位置有所差異，但企業與投資者面臨的水風險可以被歸類為實體風險、法規風險及聲譽風險，並且面臨水風險的程度取決於企業內部運作表現已及外部的環境和社會條件（CEO Water Mandate, 2014）。因此，區域或流域的水風險無法真實代表企業的水風險。既使區域具有高度水風險，如果企業做好應變措施來提高韌性與信賴度，亦可降低企業廠區本身之水風險。

1.2 研究目的

水資源逐漸成為企業與投資人關注的焦點，為了使企業可以全面捕捉水風險，需透過完整且涵蓋風險計量的水風險評估框架，配合不同時間與區域尺度的資料，使企業的布局能因應現況水風險，並避開未來氣候變遷可能帶來的水風險，進而在 CDP 與 DJSI 等國際評級中獲得優良表現。然而目前企業在實務工作上，尚未有一個完善的評估框架可以供企業遵循，並且企業間普遍使用的水風險相關工具，如世界資源研究所（WRI）開發的 Aqueduct，也僅限於水風險的識別，無法進行風險量化，亦無法作為後續企業回應的基礎（Shiao et al., 2012）。本研究主要宗旨為協助企業進行水風險相關評估的改善，讓企業在水風險的決策中，避免因資訊或方法不足而造成錯誤決策，主要研究目的有以下三項：

1. 提出企業水風險評估框架與建議工具指引；
2. 建置廠房水資源系統動力模式，將區域缺水風險鏈結廠區水風險，作為後續企業缺水風險量化評估與管理的基礎；
3. 以產值高且十分仰賴水資源的半導體製造業為應用案例研析對象，為後續企業的應用提供範例。

1.3 論文框架

本論文之架構如圖 1，主要分為五個章節。第一章為緒論，說明研究動機、目的與論文架構。第二章為文獻回顧，探討氣候變遷對區域水資源的影響以及釐清目前企業水管理和半導體廠房水資源系統的相關資訊。第三章為研究方法，首先通過文獻回顧建置企業水風險評估框架，並選定缺水風險進行分析。針對框架中的第二步辨識水相關風險與機會為位於台灣的廠區提供更細緻的缺水熱點辨識圖資。框架中的第三部分評估量化水相關風險為企業普遍完成度較低的部分，本研究以應用案例研析的形式為後續企業的應用提供範例，此部分先說明所使用的研究方法與流程，包括中央氣象局季長期天氣展望、氣候情境、全球氣候模型降尺度、氣象合成模式、Generalized Watershed Loading Function (GWLF) 水文模式、水資源系統動力模式及缺水風險指標。第四章為應用案例研析，首先說明應用案例設計細節，並說明應用於季長期缺水風險預警與氣候變遷下缺水風險評估的結果，最後根據結果提出企業適合的回應方式，包括內部管理回應與外部評比回應。第五章為結論與建議，針對本研究總結研究成果與提供後續研究建議。

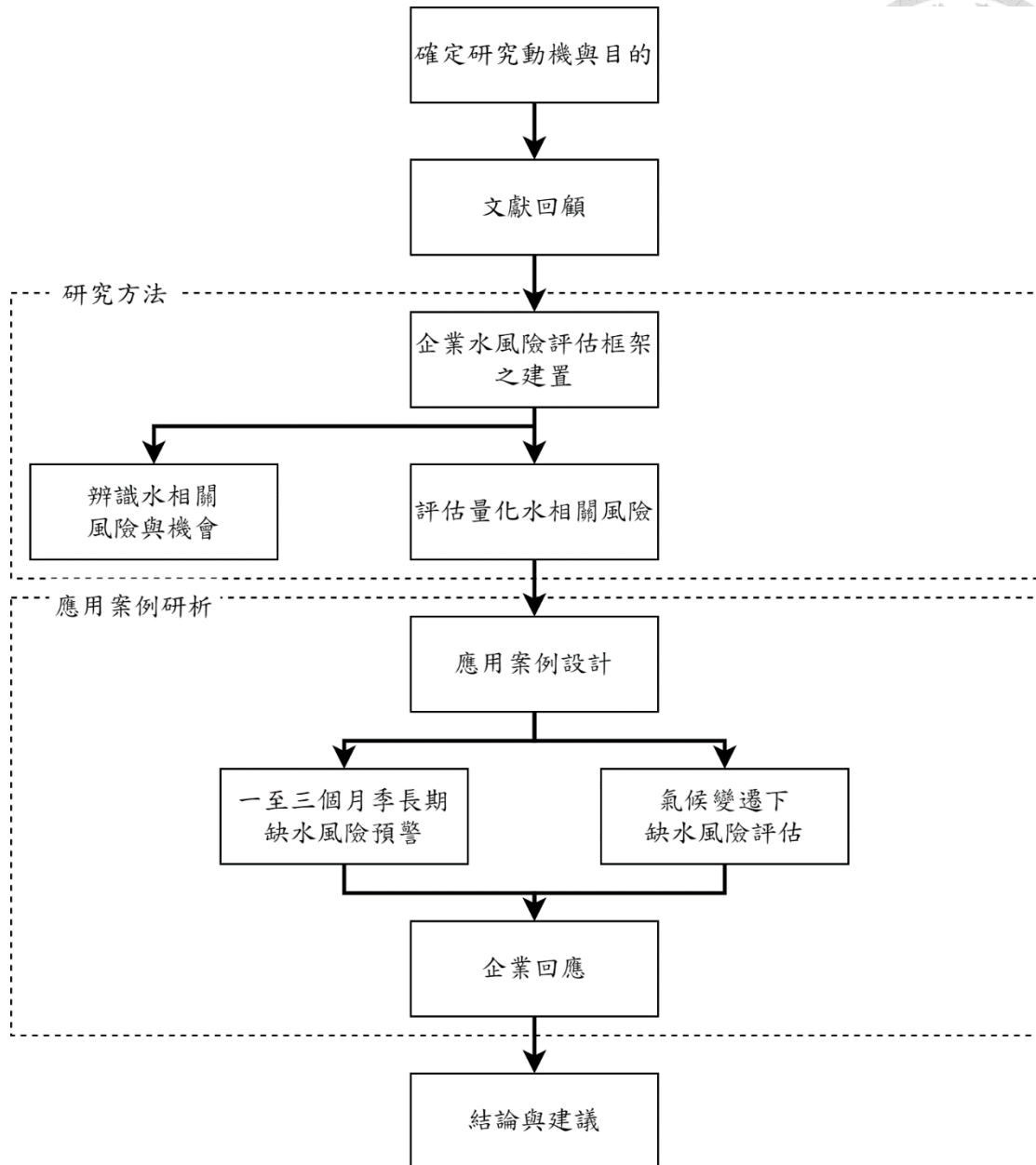


圖 1：研究架構圖

第二章 文獻回顧



本研究探討企業廠區缺水風險，並且涵蓋氣候變遷時間尺度。因此本章節先聚焦於氣候變遷對於區域水資源的影響，釐清氣候變遷風險定義以及對氣候變遷對台灣水資源的衝擊與評估方法進行回顧。為了有效鏈結區域水資源對於廠區的衝擊，接著回顧企業水風險組成以及企業水風險管理、評估流程。本研究後續亦以產值高且十分仰賴水資源的半導體製造業作為企業水風險評估框架的應用案例研析對象，故此章節的最後針對半導體廠房水資源系統進行回顧與討論。

2.1 氣候變遷對區域水資源的影響

氣候變遷下，降雨模式的改變將對於水資源造成最直接的衝擊，水資源短缺也成為了當今世界所面臨的重大課題，因此氣候變遷下的水資源風險評估的相關方法也隨之蓬勃發展。本章節首先會先釐清目前國際上對於氣候變遷風險的定義，以便後續的分析與討論。接著討論台灣目前的水資源現況，以及未來氣候變遷下的可能影響，並且回顧前人於氣候變遷下區域供水系統的風險評估流程。

2.1.1 氣候變遷風險定義

國際間對於氣候風險的定義與發展，通常以政府間氣候變化專門委員會 (Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC) 評估報告中的定義作為依歸，並且會隨著報告的更新有不同的轉變。在第五次評估報告 (AR5) 中，以風險 (Risk) 為核心，由危害 (Hazard)、暴露 (Exposure)、以及脆弱度 (Vulnerability) 的相互作用產生，也就是說風險 = $f(\text{危害}, \text{暴露}, \text{脆弱度})$ ，其核心概念如圖 2 所示。其中危害是指潛在的氣候事件或趨勢，可能會造成生命、財產、基礎設施或環境生態等的破壞或損失。暴露為目標系統易受到危害的程度，通常與地理位置或時間等因素相關。脆弱度表示易受到不利影響的傾向與本質，其包含敏感度與調適能力兩項因子，即脆弱度 = $f(\text{敏感度}, \text{調適能力})$ 。其中敏感度為系統暴露於危害時，直接受到負面影響的程度。調適能力則表示面對實際或預期的危害時所採

取的減緩措施或手段，以協助系統面對相關危害。風險亦可定義為發生機率乘上危害事件發生後的後果（UKCIP；UNFCCC）。

在 ISO 14091 中，將氣候刺激（Climate stimuli，亦可說明為氣候危害）、暴露、敏感度定義為氣候衝擊（Climate impact），其中危害、暴露、敏感度與 IPCC AR5 的定義一致。但 ISO 14091 認為脆弱度可能有歧異，修改脆弱度的定義為整合氣候衝擊與系統調適能力後的整體影響，風險的整體關聯如圖 3 所示。

IPCC 第六次評估報告（AR6）於 2021 年底陸續公佈，依據目前釋出的部分報告，IPCC AR6 將延用 AR5 中定義的風險概念，並且考慮風險的複雜性加入各風險因子與減緩措施或手段間的相互作用，如複合（compound）、級聯（cascade）與聚合（aggregate），風險因子定義並無修改。因此本研究仍採用 IPCC AR5 中對於風險的定義進行後續分析與討論。

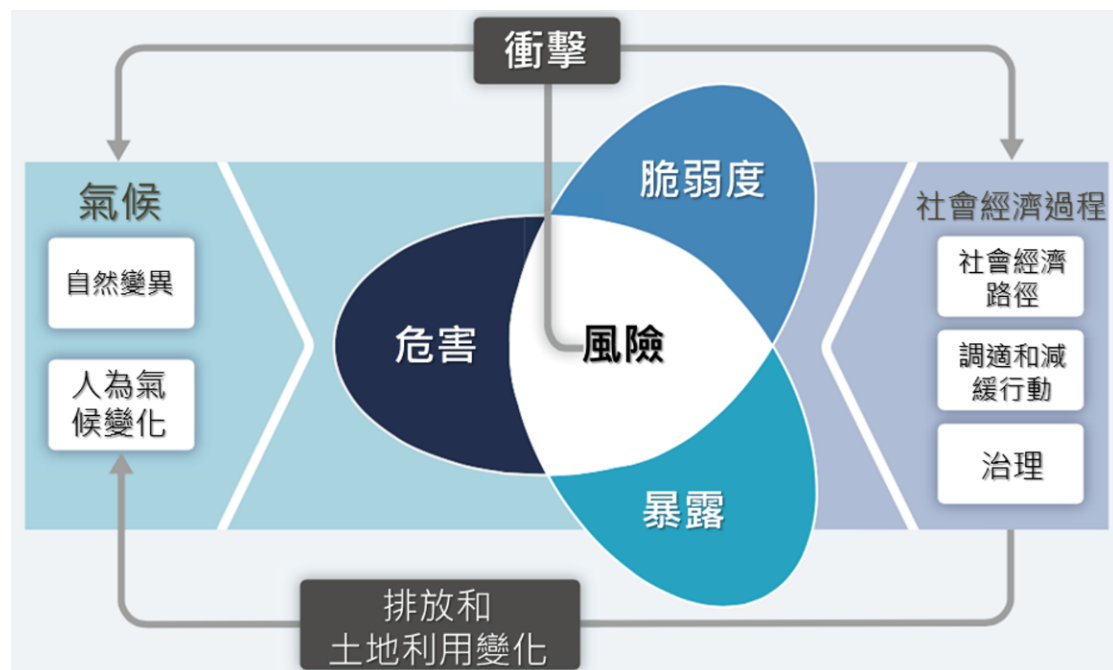


圖 2：IPCC AR5 對於風險、脆弱度、暴露與危害之核心概念

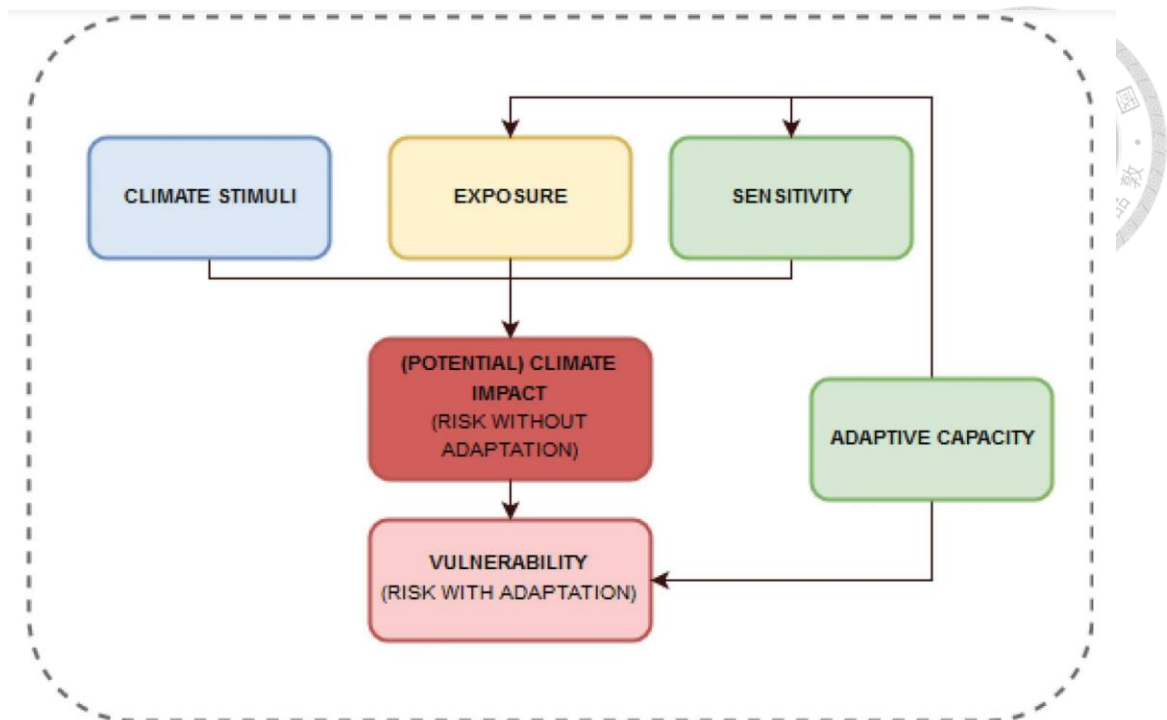


圖 3：ISO 14091 對於風險的定義

2.1.2 台灣水資源現況

台灣年平均雨量約 2500 公釐，雖然降雨豐沛，但因地狹人稠加上降雨時空分佈不均，導致水資源的調配具有極大挑戰。現有之水資源設施若在豐水期蓄水不足，加上次年的梅雨季降雨不夠豐沛時，則容易發生乾旱事件。回顧台灣歷年降雨量的改變，雖然每年的降雨量互有增減，但豐枯水年的降雨量差距逐漸拉大，且枯水年的發生有增加的跡象。統計近二十年的歷史乾旱事件，如表 1，可以發現，台灣的乾旱通常發生於春季，且近十年的乾旱均為跨年乾旱的形式，持續時間較長。

表 1：近二十年的歷史乾旱事件列表

(資料來源：氣候變遷災害調適平台，本研究整理後再製)

年份	發生時期	經歷時間	季節
2002	2 月上旬～7 月上旬	6 個月	春季至夏季
2003	1 月中旬～9 月上旬	8 個月	冬季至夏季
2004	1 月～6 月	6 個月	春季至夏季
2006	1 月～3 月	3 個月	春季
2010	1 月～4 月	4 個月	春季
2014	9 月～次年 5 月	9 個月	秋季至隔年春季
2017	10 月～次年 6 月	9 個月	秋季至隔年春季
2020	9 月～次年 4 月	8 個月	秋季至隔年春季

此外，在水資源需求方面，台灣每人每日自來水生活用水量近 10 年平均用水量為 276 公升，整體走勢大致呈現逐年上升趨勢，逐年用水量呈現增加，2020 年每人每日用水量達 289 公升。隨著未來工業的持續發展以及工業園區的新建，工業用水的需求量也將增加。三大用水標中，一向以農業用水為最大宗，農業用水、生活用水及工業用水的占比分別約為 70%、20%及 10%。隨著生活與工業需求用水日益增加，占水資源大宗的農業用水也將成為競用之標的。此外，台灣水權量有超額核發的狀況，可能使擁有水權者無法取得核發的所有水量，或上游水權人取得核發的水量後可能使下游水權人無水可取。此種狀況在缺水時將更為嚴重，加上水利法對用水標的有優先順序的規定，增加乾旱時水資源調配的困難(周嫦娥，2015)。

2.1.3 氣候變遷對台灣水資源的衝擊與評估方法回顧

根據 IPCC 氣候變遷第六次評估報告 (AR6) 第一工作小組 (WGI) 以及第二工作小組 (WGII) 報告，科技部於 2021 年八月以及 2022 年三月同步提出臺灣氣候變遷評析與氣候變遷衝擊的初步推估結果。氣候變遷下，濕季雨量增多，乾季雨量減少，集水區的河川流量豐枯差異變大，世紀中春季 (2 月至 4 月) 流量大致呈現減少趨勢，世紀末變化更為顯著，可能增加枯旱的風險，如圖 4 所

示，增加水資源調度的困難性。此外，因台灣水庫庫容限制，濕季的雨量無法有效儲存，反而可能因為豪雨期間所帶入水庫的淤積物使得水庫庫容下降且水濁度高。

氣候變遷對台灣水資源的衝擊具有重要性，區域供水系統於氣候變遷下的風險評估流程已日漸成熟。在前人的研究中，黃柏勛（2013）藉由脆弱度之空間分布及回復力變化分析，探討氣候變遷對水資源系統造成之衝擊。林嘉佑（2016）發展出氣候變遷下供水系統的調適能力建構與監測修正調適路徑流程。田育全（2017）採用氣候調適六步驟評估新竹地區在未來氣候變遷的影響下，供水承載力的變化，並且建立乾旱預警與支援系統作為調適選項，評估此決策系統的效益。林宗毅（2019）在保有物理性的基礎下建立氣候、水資源與糧食調適整合評估模式（AgriHydro），透過四個子模式進行氣候情境降尺度、流量模擬、水庫操作模擬與產量及田間需水量的產製。本研究後續亦引用 AgriHydro 子模式分別應用於繁衍未來氣候資料、評估水庫入流量以及評估區域水資源系統狀況。

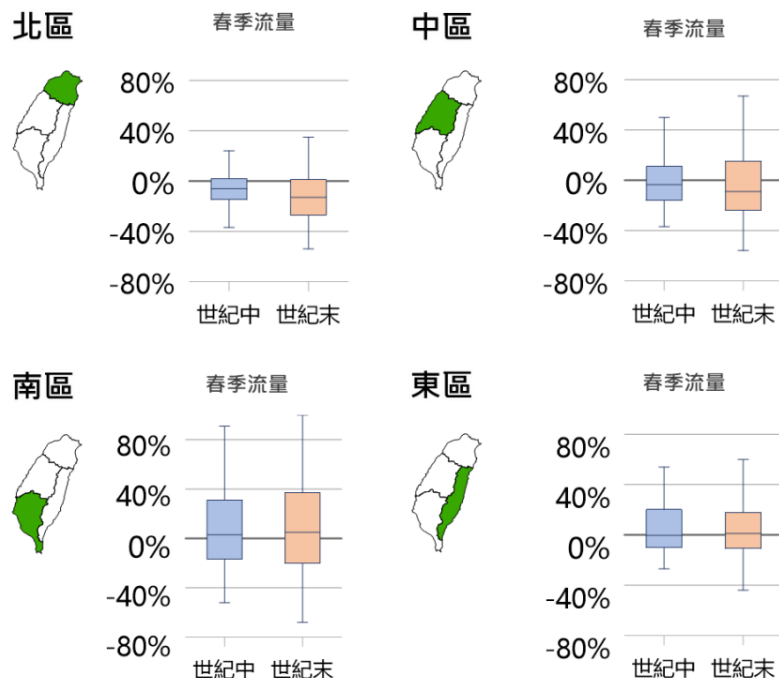


圖 4：四大水資源分區春季流量未來變化趨勢

（資料來源：科技部，IPCC 氣候變遷第六次評估報告「衝擊、調適與脆弱

度」之科學重點摘錄與臺灣氣候變遷衝擊評析更新報告，2022）

2.2 企業水風險管理

水是世界各地工業與經濟的重要投入，被用於冷卻過程、稀釋汙染物、作為溶劑或產品的關鍵原料以及其他用途。而工業具備缺水容忍度低的特性，當水資源不足的情況下，可能出現供水危機，導致工業停擺，進而衝擊經濟造成損失。以中部科學園區為例，當缺水率達 20%時，將停止 50%的製程生產，造成每日產值損失約 2.7 億元；另以高雄臨海工業區為例，區內廠商中國鋼鐵需補充水量約為 13.5~14.5 萬噸/日，其缺水量達 50%亦即 7 萬噸/日左右時，造成之產值損失約為每日 7000 萬元（內政部，2018）。此外，過度取水或任意排放可能會對附近社區或是生態系統產生不利的影響。

水資源的真實價值是被低估的（WBCSD, 2018），如果持續低估水資源的價值將損失潛在的利益，在這樣的擔憂下，越來越多的企業開始加入水風險管理的行業。對環境與社會負責的水資源管理不僅是企業的道德責任，而是逐漸成為確保企業生存能力和降低企業風險的一部份。企業主動採取水管理的策略主要由以下五個因子驅動（Gleick et al., 2011）：

1. 確保公司營運地點符合當地法規與社會許可。
2. 預防或應對因水量或水質或對水資源過度依賴而造成營運危機。
3. 通過確保營運和供應鏈的水供應，確保目前和潛在的投資者與市場在未來的營運中能持續營利。
4. 堅持以永續和公平原則為基礎的企業價值與道德觀，為流域、生態系統和社區的福祉做出貢獻。
5. 由於利害相關人與消費者認為公司負責任地使用自然資源，減少對社區或生態系統的影響，從而獲得競爭優勢。



2.2.1 企業水風險

上述因子促使企業更密切地關注與水量與水質相關的不確定性，根據世界資源所（World Resources Institute, WRI）、世界自然基金會（World Wide Fund for Nature, WWF）及聯合國全球盟約（UN Global Compact） CEO Water Mandate，儘管水風險因不同產業部門和地理位置有所差異，但企業與投資者面臨的水風險可以被分為三類：實體風險、法規風險及聲譽風險，此外實體風險可再細分為水質風險與水量風險，如下表 2 所示。此實體風險、法規風險及聲譽風險的水風險框架已相對完善，並且在企業水管理中被接受（WWF&WBCSD, 2020）。企業面臨水風險的程度取決於許多不同因素，一些與企業內部表現相關，一些則與外部的環境和社會條件有關，整體的企業水風險框架如圖 5 所示。

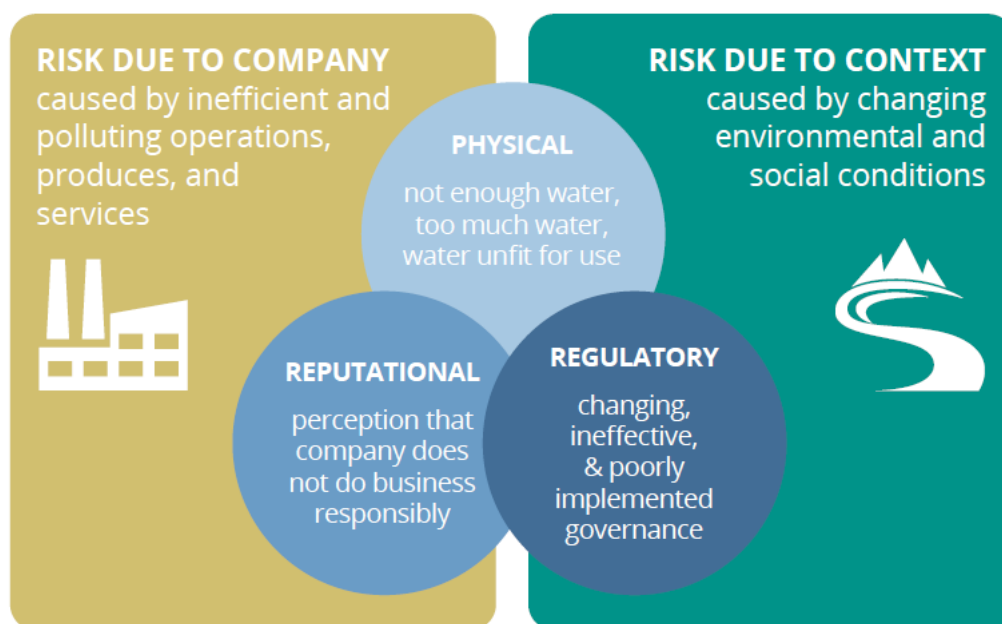


圖 5：企業水風險框架（資料來源：CEO Water Mandate）

表 2：企業所面臨水風險類型列表

風險類型		風險描述	企業營運影響
實體風險	水量風險	現行和/或預期水量的改變可能影響公司的直接營運、供應鏈或是運輸	<ol style="list-style-type: none"> 1. 因無法取得足夠的水資源而導致營運中斷 2. 增加與替代水源有關的費用或增加水處理費用
	水質風險	現行和/或預期水質的改變可能影響公司的直接營運、供應鏈或是運輸	
聲譽風險		現行和/或預期可能產生的水相關衝突，並可能損失公司的品牌形象，嚴重時可能導致喪失營運許可	<ol style="list-style-type: none"> 1. 因公司對於水資源的影響不符合期待導致顧客或投資者流失 2. 因喪失營運許可導致營運中斷
法規風險		現行和/或預期的水相關法規對公司造成的影響，嚴重時可能導致喪失營運許可	<ol style="list-style-type: none"> 1. 由於更嚴格的規定或更高的水價使營運成本增加 2. 因喪失營運許可導致營運中斷

2.2.2 水風險管理、評估流程與範疇界定

雖然每個公司水管理的方法各有差異，世界企業永續發展委員會(WBCSD)在報告中將企業水管理定義為一個複雜且反覆的過程，要求公司須評估且不斷修正水相關情勢與影響，並在永續的基礎上確定最佳行動方案。根據 WBCSD 的定義，企業水管理應包含五個步驟 (WBCSD, 2012)，(1) 營運範圍遍布全球的企業可以從思考全球水資源情況開始，然後關注於價值鏈中的關鍵部位，(2) 計算水資源的使用並了解對於當地水資源的影響，(3) 接著透過解釋第一步及第二步的結果，確定水相關風險與機會，(4) 並且決定行動方案和設定目標，(5) 最後須持續監控並與內部與外部利害關係人溝通績效。完成以上五個步驟後，公司應重新審視水相關策略，並重新評估持續改善的機會，如下圖 6 所示。

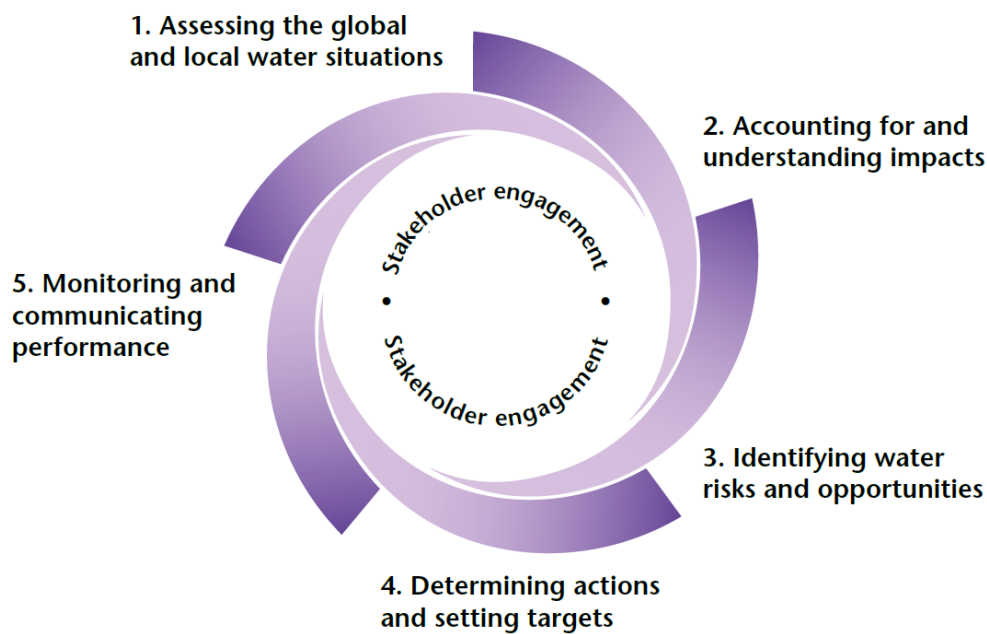


圖 6：企業水管理的五個步驟

在水管理的架構下，後續有許多文獻針對水風險評估或水風險回應提出流程建議。Larson et al. (2012) 提出企業缺水風險回應與決策框架，如圖 7 所示。首先須辨識水風險種類並確定重大性，接下來通過風險的發生機率與衝擊程度量化風險，最後將成本、效用、可行性及時間做為選擇回應與決策的標準。

	Identify	Evaluate	Respond
Objective	Identify water-scarcity risks	Determine the value at risk	Select a strategic risk-mitigation response
Criteria	<ul style="list-style-type: none"> • Physical risk water use in operations • Regulatory risk local water pricing policy • Reputational risk impact of water use on the local community 	<ul style="list-style-type: none"> • Likelihood of risk based on watershed data, climate trends and other indicators • Magnitude of impact economic loss suffered 	<ul style="list-style-type: none"> • Cost of implementation • Effectiveness how much risk is negated • Feasibility (difficulty) • Time implementation timeline for response

圖 7：企業缺水風險回應與決策框架

在考慮水風險評估的範疇時，地理位置與價值鏈為兩大重要面向。價值鏈的部分，謹慎的作法為專注於價值鏈中對於公司業務具有重大性（高價值或高重要性）的部分，以及對水資源有高度依賴或影響（高水足跡）的部分（WWF&WBCSD, 2020）。Reig et al.（2021）提出制定企業水相關目標的三個步驟，第一步即為確定價值鏈中水資源具有重大性的部分，後續第二步才能辨識水風險的種類與熱點並評估風險，最後設定及揭露企業水相關目標。

隨著水風險的關注度提高，企業與投資者不僅考慮現況風險也開始思考未來可能的風險。水是一動態資源，由於氣候變遷與社會經濟因素，未來氣候變遷下水風險的影響程度及發生時間具有高度不確定性，評估此類風險影響程度的一種方法為採用氣候相關財務揭露（Task Force on Climate-related Financial Disclosures，TCFD）工作小組與歐盟的非財務報告指令（NFRD）所建議的情境分析。目前對於企業水風險的情境分析相對較新，僅限於區域水壓力的預測，使企業水風險無法充分量化分析，以至於無法有效回應未來的水風險（WWF, 2020）。

總結水風險管理流程與相關框架或步驟，水風險的量化評估為後續目標設定或制定調適行動的基礎，在企業風險管理中具有其重要性。

2.3 半導體廠房水資源系統

2.3.1 工業用水分類

工業用水一般指在生產過程中用來製造、加工、冷卻、空調、洗滌、鍋爐及其他用水之總稱。若依工業用水之用途及功能特性，在工業生產中之大略包括十四種，並可歸納為冷卻用水、製程用水、鍋爐用水、生活用水及其他用水等五大類（許家榮，2008），如圖 8 所示，各項目用水說明如下。

1. 冷卻用水：工業產品生產過程中吸收或轉移生產設備、製品多餘熱量，或維持正常溫度下工作所用之水。依據冷卻方式的不同可以區分為直接冷卻用水與間接冷卻用水，前者係指被冷卻物表面直接與水接觸達到冷

卻效果；後者係指經過熱交換器而間接達到冷卻效果。此外空調用水係指工作場所或製程中所需溫、濕度控制調節之用水，亦歸類為間接冷卻用水的一種。

2. 製程用水：係指作為原料的水或製造過程中原料或半成品進行化學反應或物理作用所需的水。同時亦包括作為原料、半成品與成品、機具、設備等與生產有關之清洗用水等，均可歸納為製程用水。為確保生產品質，工業製程中需使用到高純度的用水，且可能因產品類型或規格要求，在用水水質的需求上會有不同的標準。
3. 鍋爐用水：係指提供生產、加熱或發電所需蒸氣，在鍋爐內進行汽化所使用的水，包括鍋爐給水與鍋爐水處理用水等。
4. 生活用水：係指員工及工作環境所需飲用、衛生等用水。此部分用水與工廠生產較無直接關係。
5. 其他用水：包括景觀用水、防火用水等，其他用水與生產或生活均無較直接關係，使用之時間也較不固定。

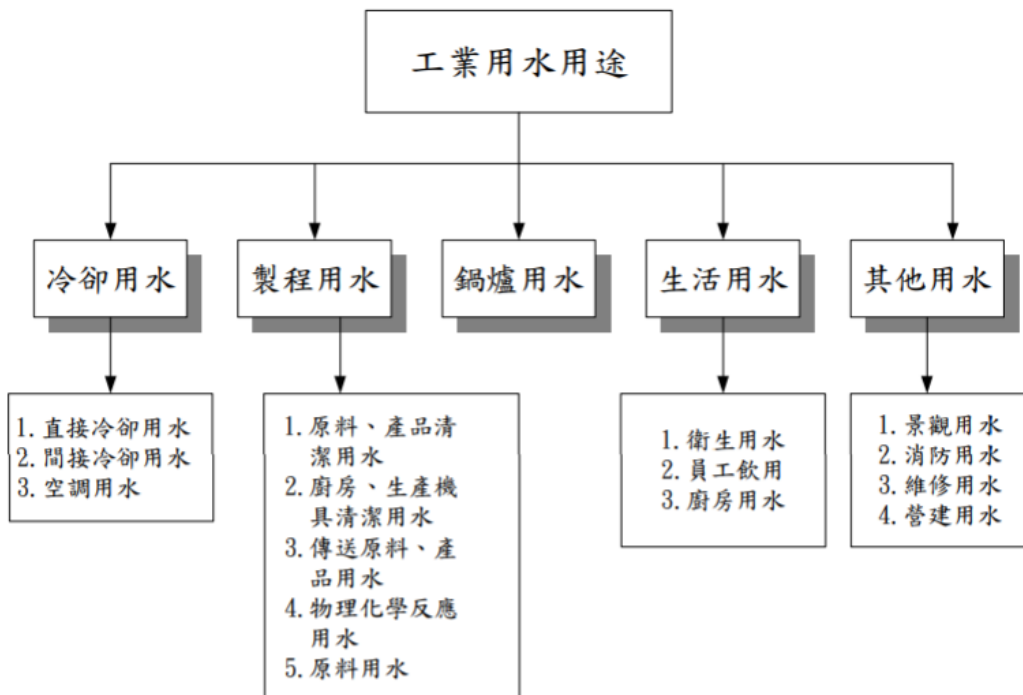


圖 8：工業用水分類項目
(資料來源：許家榮，2008)

2.3.2 半導體廠房用水特性

半導體製造流程是一項廣泛應用機械、光學、物理及化學各工程知識領域的產業。在歷經數百道的製程程序後，費時約數十天，將數億個電晶體的功能微縮在每一平方毫米的積體電路上。在如此複雜的且精密的生產流程中，水扮演了多重腳色，包括直接作為化學反應物的媒介載體或用以洗淨；間接的方面，水亦可作為冷卻熱交換的媒介控制單元溫度，或是做為洗淨氣相污染物的用途。一家半導體製造工廠若因缺水事件而短暫停工，可能會影響整個季度所生產的材料。此外半導體製造業在製程中需要大量超純水進行晶圓的清洗，並且對於水質有較高的要求，避免影響晶元良率，故其用水特性與其他產業有相當大的差異。考量半導體製造業對於水量與水質皆有較高的需求，因此位於缺水地區的工廠往往將水安全視為影響公司永續的主要風險因素之一（Den, 2018）。根據中華民國行業標準分類半導體製造業屬於電子零組件製造業，其 2020 年用水量高達 99.41 百萬立方公尺（政府開放資料平台，水利署工業用水量與工業面積），其用水結構如圖 9 所示，以製程用水佔最大比例，其次為冷卻用水（經濟部工業局，電子零組件製造業產業用水最適化及節水技術指引，民 108）。

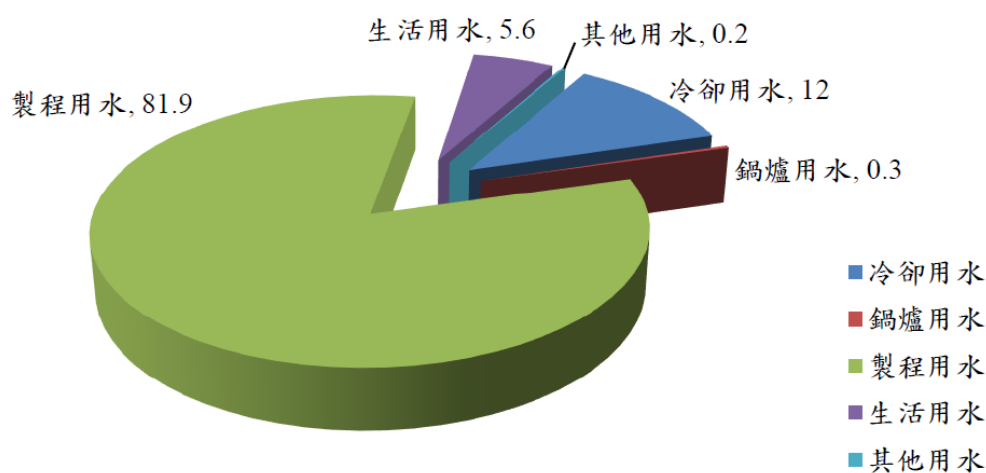


圖 9：電子零組件製造業用水結構分析
（資料來源：經濟部，電子零組件製造業產業用水最適化及節水技術指引，民 108）

許家榮 (2008) 指出，影響半導體廠房總用水量的因素包含製程產品規格要求與製程技術發展，也與各廠產品產量與產能利用率相關。英特爾公司的創始人 Gordon Moore 曾提出摩爾定律 (Moore, 1975)，每隔 18 至 24 個月，每單位面積的晶片所包含的電子元件數量會增加一倍。未來隨著產品規格的持續發展與製程技術的快速演進，加上全球經濟成長，半導體廠房在用水需求上會有不斷增加的趨勢。

2.3.3 半導體廠房用水流程

半導體廠內用水流程如圖 10 所示，依廠房內流動路徑分為五段：水源儲存與分配、用戶、廢水分流收集、廢水處理及廢水回收。園區使用之原水進入廠房內後儲存於水源儲存及分配系統之原水儲槽及民生用水儲槽，原水儲槽主要供應系統製造超純水供製程機台使用，亦為回收再利用儲槽之補充水源，供次級系統用戶使用。次級用水系統用戶將優先使用來自廢水回收處理系統的回收水，只有在回收水不足或回收處理系統異常時，才會補充原水。民生用水儲槽供飲用、廚房、洗手等民生用水。而雨水儲留儲槽則收集廠區的雨水主要供灌溉使用。製程用水系統起始於超純水處理回收系統，超純水於製程機台使用完畢後將進入廢水收集分流系統，分流系統依據水質分流，隨著不同管路排入製程排放直接回收系統直接回收使用或廢水處理系統進行初級處理，再視水質與處理狀況選擇進入廢水回收處理系統或外排系統 (江世雄，2011)。

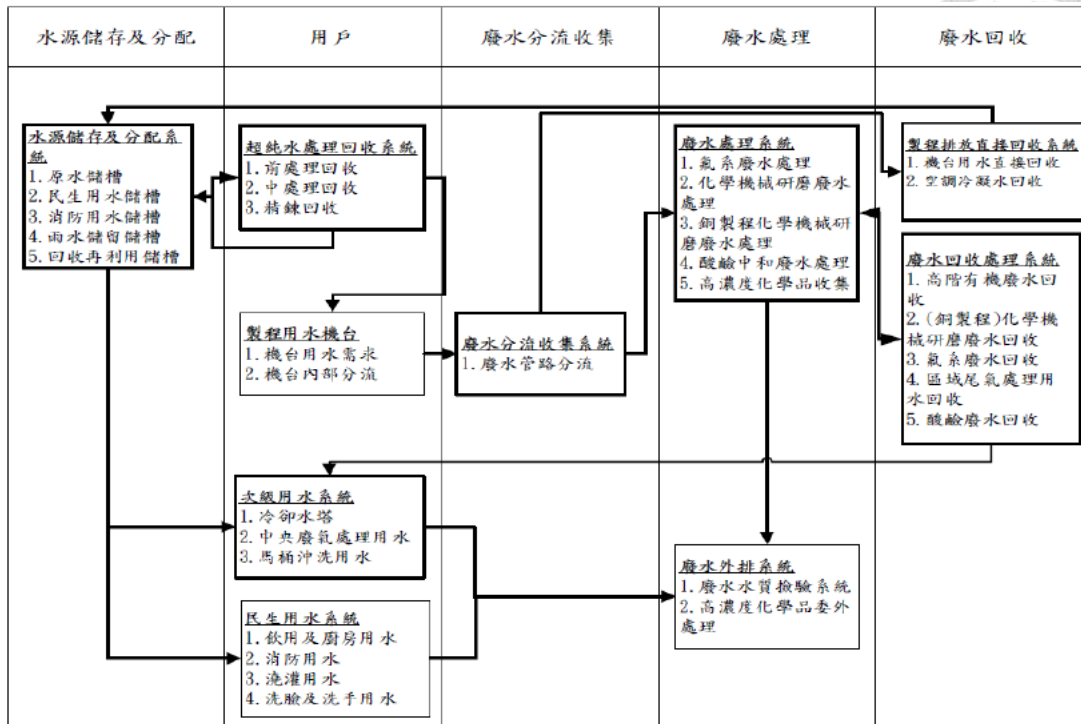


圖 10：半導體廠內用水流程（資料來源：江世雄，2011）

2.3.4 工廠水平衡

水平衡最基礎的概念為，經界定的某用水邊界的範圍內，其輸入水量的總和等於輸出水量的總和。用水邊界的範圍可以是一個製程單元、一個工廠、一個城市、甚至到一個國家，若用水邊界的範圍為一個廠房，則可稱之為廠房水平衡，其概念如圖 11 所示(陳仁仲等，2001)。圖 11 將廠房視為一個獨立的系統，在同一時段，系統輸入水量與輸出水量達到平衡狀態，依照水平衡原理，其中：


$$\begin{aligned} \text{輸入總和} &= \text{總用水量 (GW)} \\ &= \text{原始取水量 (IW)} + \text{重複利用水量 (RW)} \end{aligned} \quad (2-1)$$

$$\begin{aligned} \text{輸出總和} &= \text{總用水量 (GW)} \\ &= \text{排放水量 (DW)} + \text{消耗水量 (CW)} + \text{產水量 (PW)} \end{aligned} \quad (2-2)$$

其中，產水量 (PW) = 串聯水量 (Cascade) + 循環水量 (RCW) + 回用水量 (RUW) = 重複利用水量 (RW)，水平衡的情況下：

$$\text{原始取水量 (IW)} = \text{排放水量 (DW)} + \text{消耗水量 (CW)} \quad (2-3)$$

以下針對水平衡圖中的相關名詞說明解釋：

- 
- (1) 總用水量 (GW, Gross Water)：乃指工廠生產過程中所需之用水量，為原始取水量與重複利用水量之總和。
 - (2) 原始取水量 (IW, Intake Water)：乃指取自工廠內外任何一水源被第一次利用之取水量。一般包括自來水(民生系統或契約供給系統)、地下水、地面水、海水、雨水、臨時購入之水源...等。
 - (3) 重複利用水量 (RW, Return Water)：經過處理或未經過處理繼續在工廠中使用的水量，包括串聯、循環與回用。
 - I. 串聯使用水量 (Cascade)：在某個用途單元使用的水，再度使用於其他用途，亦稱逐級利用水量。
 - II. 循環使用水量 (RCW, Recycling Water)：在一定期間內用於特定一個用途單元(系統)中的循環水量，一般無經過處理，如冷卻循環用水。
 - III. 回用水量 (RUW, Reuse Water)：係指在一定期間內被用過的水，不論有沒有經過處理，再利用於前製程用水單元的水量，一般屬於跨用途單元水的再利用。
 - (4) 產水量 (PW, Produce Water)：產水單元輸出可重複利用水量到產水單元或其他用水單元。
 - (5) 消耗水量 (CW, Consumption Water)：生產過程中因蒸發、飛散或投入到產品、生活飲用、烹調、衛生...等消耗之水量。
 - (6) 排放水量 (DW, Discharge Water)：指最後排出工廠之廢水。

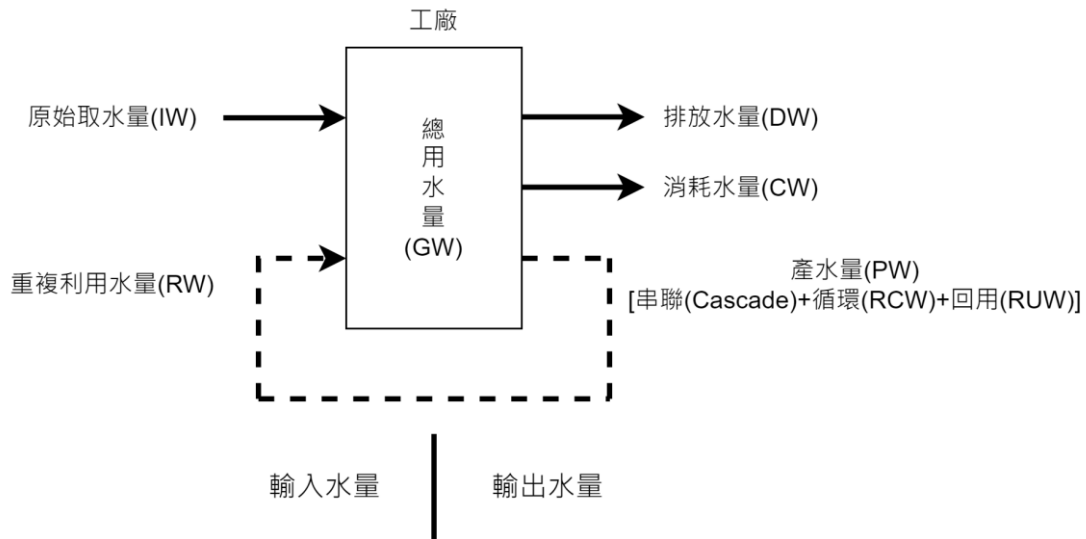


圖 11：廠房用水平衡示意圖

為掌握用水流向、流量與回收再利用情形，應依各用水單元用水情形，以水平衡原理繪製用水平衡圖，作為計算用水量及回收率之依據，釐清工廠用水現況並找出用水潛力點。依據經濟部水利署「用水計畫審核管理辦法」，如開發行為之興辦或變更，每日用水量達 300 立方公尺，則需提送用水計畫予水利署或各區水資源局審查，而開發行為包括工廠、產業園區、科學園區、科技產業園區、觀光旅館...等之設置。而用水計畫中應記載事項規定於「用水計畫書件內容及格式」中，包括開發單位基本資料、計畫概述、計畫用水量、水源供應規劃、缺水應變措施等，其中水平衡圖即被涵蓋至計畫用水量下。此外，如工廠所屬工業區為科技部轄下科學工業園區，則需另依科技部「科學工業園區水電輔導管制辦法」規定，定期提送用水計畫書給管理局審核，並使用園區發布之水平衡圖格式作為內部管控基礎（李晨瑜等，2018）。



2.3.5 用水效率指標

藉由水平衡分析與各項績效指標的建立，掌握全廠用水的現況並審視策略的實施成效為工廠效率用水管理的目的。用水回收率是一項反應工廠用水的綜合指標，為目前半導體廠最常使用的節水指標，主要原因為科學園區有制定製程回收率、全廠回收率等指標要求廠商遵守，並且也為經濟部水利署「用水計畫書件內容及格式」中需記載的指標。根據民國 106 年 1 月 20 日召開之「工業區環評開發案廢水及用水回收率查核作業檢討會議」中，提出目前台灣針對回收率之查核及計算方式並無一致性且明確之方法可供參循（李晨瑜等，2018）。除了回收率以外，排放率指標也列為「用水計畫書件內容及格式」中需記載的指標。國內外常用之檢覈工業用水效能指標可大致依照目標分類為全廠用水、製程用水、冷卻用水與全廠排放，整理於下表 3。

表 3：國內外常用之檢覈工業用水效能指標

指標		說明	公式
全廠用水	全廠回收率	一定時間於生產過程中，所使用的重複利用的回收水量與總用水量之比值	$\frac{\text{總循環水量} + \text{總回用水量}}{\text{總用水量}}$
	全廠回收率 (不含冷卻水塔循環水量)	將冷卻水循環量自重複利用的回收水量扣除後，總回收水量與總用水量之比值	$\frac{\text{總循環水量} + \text{總回用水量} - \text{總冷卻水循環量}}{\text{總用水量} - \text{總冷卻水循環量}}$
製程用水	製程回收率	製程用水之回收量與製程總用水量之比值	$\frac{\text{製程用水總重複利用水量}}{\text{製程用水總用水量}}$
冷卻用水	冷卻水濃縮倍數	冷卻循環水被排放前，於冷卻水塔中被循環利用的次數	$\frac{\text{冷卻水總補充水量}}{\text{冷卻水總排放水量}}$
全廠排放	排放率（排水率）	一定時間內工廠排水量與原始取水量之比值	$\frac{\text{總排水量}}{\text{總原始取水量}}$

第三章 研究方法



3.1 水風險評估框架與相關工具

為了使企業未來的布局能趨避現況與氣候變遷帶來的水風險，進而在相關評比中展現領導做法，就必須仰賴完善且系統化的水風險評估框架。3.1.1 節將說明根據文獻回顧所建立的企業水風險評估框架，3.2.1 節則提出依據準則與倡議、標準、評比以及評估工具分類的水風險管理的參考依據，協助企業了解水風險管理的更多面向，提升對於水風險的認知。

3.1.1 企業水風險評估框架

根據文獻回顧，本研究通過梳理企業水風險管理與目標設定流程、參考水風險相關回應與決策框架，並且考量不同時間尺度下的風險，建立企業水風險評估框架，如圖 12 所示。企業水風險評估框架通過四個步驟：價值鏈重大性評估、辨識水相關風險與機會、評估量化水相關風險以及最後的企業回應完善企業水管理流程，以下就此四個步驟分別說明。

1. 價值鏈重大性評估：價值鏈為產品增加或價值形成的一系列活動，包括直接運營以及上游（例如原材料供應商、製造商）和下游（例如分銷商、最終用戶）。水相關風險在價值鏈中並不具有同等重要性（Mueller, 2015），須優先確定價值鏈中具有水風險的重大性部位。重大性的評估主要考量價值鏈對於水資源包含水質、水量的影響與依賴（Reig et al., 2021）。可使用的資料來源包含公司公開報告資料或是採用以水足跡或生命週期評估計算商品或服務的估計值。
2. 辨識水相關風險與機會：此步驟需依據實體風險、聲譽風險、法規風險評估價值鏈中重大性部位，確定重大水風險種類與潛在機會。此外亦須根據水風險地圖或危害潛勢圖等辨識熱點。可使用的工具包括世界資源研究所（World Resources Institute, WRI）的 Aqueduct 以及世界自然基金

會 (World Wide Fund for Nature, WWF) 的 Water Risk Filter, 其他可以參考的資料來源如政府或是國際間的公開資料圖集, 以及公司的公開報告。

3. 評估量化水相關風險：步驟二僅限於地理水風險的識別, 若後續需要制定具體的風險降低策略和調適路徑, 應充分評估量化不同時間尺度的水相關風險的影響, 包含季長期與氣候變遷情境下。以缺水風險為例, 季長期時間尺度可以通過推估未來一至三個月的水情燈號進行水情預警, 模擬廠區缺水事件特徵; 氣候變遷情境下則可採取回復力、可靠度、脆弱度等三項風險指標量化廠區缺水的影響。以科學為基礎的評估量化結果亦可以作為後續與財務數據鏈接的基底。需要的資料來源可能為中央氣象局季長期天氣展望、氣候情境資料以及公司的公開報告。
4. 企業回應：企業回應依據風險評估的目的可分為對內及對外。對內的主要目的為強化內部調適與應變機制與企業水資源相關目標設定; 對外則可做為公開報告書填答或回應外部國際評級的基礎。

目前企業通過使用國際組織所提供的水風險分析工具, 在辨識水相關風險與機會的部分已取得不錯的進展, 如利用水壓力辨識高水風險的地區。但由於國際組織提供的工具並未涵蓋台灣地區的資料, 以至於位於台灣的企業無法有效辨識水風險, 須針對此步驟提出資訊補足。對於評估量化水相關風險的部分普遍完成度較低, 以至於後續無法有效地回應水風險。本研究針對水風險中因水量不足而造成的缺水風險進行方法補足, 實際將企業水風險評估框架的第三部分及第四部份應用於案例研析, 此部分於第四章更詳盡說明。



圖 12：企業水風險評估框架

3.1.2 企業實施水風險管理的參考依據


碳風險管理在企業間的導入相對成熟，本研究借鏡實施碳風險管理的參考依據，將水風險管理的參考依據分類為準則與倡議、標準、評比以及評估工具，其中準則與倡議為其他參考依據的基準，整體的架構圖如圖 13 所示。

準則與倡議		
<ul style="list-style-type: none"> • WBCSD Water for Business • CDSB Application guidance for water-related disclosures • GRI 303 • CEO Water Mandate • Water Positive • TCFD • SASB 		
標準	評比	評估工具
<ul style="list-style-type: none"> • AWS International Water Stewardship Standard (AWS Standard) • ISO 14001 : 2015-Environmental Management System • ISO 14046 : 2014-Water Footprint Standard • ISO 14090 : 2019, ISO14091 : 2021, ISO 14092 : 2020-Adaptation to climate change • ISO 46001 : 2019-Water efficiency management systems 	<ul style="list-style-type: none"> • CDP Water Disclosure • Alliance for Water Stewardship Standard 	<ul style="list-style-type: none"> • Water Footprint Assessment tool • WULCA AWARE • WRI Aqueduct • WWF Water risk filter • ECOLAB Water Risk Monetizer

圖 13：水風險管理的參考依據整體架構圖

在準則與倡議中，氣候相關財務揭露 (TCFD)、氣候揭露標準委員會 (CDSB)、永續會計準則委員會 (SASB)、全球報告倡議組織 (GRI) 等為國際四大永續機構。WBCSD Water for Business 為世界企業永續發展委員會 (WBCSD) 於 2012 年所發表的文件，提出企業水管理的五個步驟。CEO Water Mandate 為聯合國全球盟約 (UN Global Compact) 的倡議，目的為促使企業進行有關水資源最佳共享、相關行動的實踐、供應鏈管理、流域的保護、資訊透明化、公共政策、社會責任承擔以及集體行動等。Water Positive 為水資源正效益，很可能成為淨零排放後企業下一個競逐的目標，其主要的概念為企業復育的水資源需多於從環境中獲取的水資源。

標準中主要為國際標準化組織 (ISO) 所制定的標準，包含 ISO 14001 : 2015 環境管理系統，提供組織有環保的知識工具與技術來管理環境風險。ISO 14046 : 2014 水足跡，詳述以 ISO 14044 的生命週期評估為依據，評估產品、過程和機構水足跡的原則、要求和指引。ISO 14090 : 2019 氣候變遷調適，提供相關原則、需求與指引，將調適概念整合進組織，了解衝擊與不確定性，並運用相關資訊於決策過程。隨著 ISO 14090 的脈絡，ISO 也續提出 ISO 14091 : 2021，規範脆弱



度、衝擊及風險評估指引，以及 ISO 14092：2020，針對地方政府及社區的調適工作提出規範及指引。ISO 46001：2019 水資源效率管理系統，可幫助各種規模和產業類型的組織進行用水審查、績效評估、實施及優化重大用水設備日常管理，以提高用水資源效率、減少消耗和降低用水成本。AWS International Water Stewardship Standard（AWS Standard）為國際水管理聯盟發布的國際可持續水管理標準，主要目標為使用水戶可以了解其用量和影響，並在集水區範圍內透明地進行協作以實現可持續的水管理。此標準中提出實現可持續水管理的五個步驟，標準的每個步驟都包含若干基本項目和進階項目，每個項目又對應一系列具體指標，用於衡量項目的具體完成情況。

相對於碳管理，企業較常參與的水資源管理相關的評比較少，除了國際可持續水管理標準用水者可以認證、黃金、白金三個級別進行評估審核，碳揭露組織（CDP）水安全問卷揭露專案（Water Disclosure）是目前企業間影響力較大的評比。該評比基於企業對於水安全問卷的回應，透過治理、策略、風險管理以及指標與目標等面向評估企業在水資源管理的努力，採取階梯式計分法，區分為揭露、認知、管理與領導四階段得分，並細分為 A/A-、B/B-、C/C-與 D/D-，共八個等級。

評估工具主要列舉企業可以選用來進行水風險評估的工具或圖集。Water Footprint Assessment Tool 為水足跡網絡組織（WFN）開發的水風險評估工具，協助計算與繪製水足跡，評估水資源永續性並提供改善策略。WULCA AWARE 為水資源使用 LCA 倡議組織（WULCA）發展出來一種新的水足跡評估方法，提供各區域間的水資源稀缺性的特徵化因子，促使水足跡盤查分析進入水足跡衝擊評估之中，讓水足跡評估更趨於完整。WRI Aqueduct 與 WWF Water Risk Filter 分別為世界資源研究所（WRI）與世界自然基金會（WWF）所發展的水資源風險評估工具，兩項工具皆將水風險分類為實體風險、聲譽風險、法規風險，以各個不同權重的子指標探討水風險大小。其中 WRI Aqueduct 常用於 CDP 水安全問卷揭

露專案填報之中，且為 GRI 揭露指引與 TCFD 官方技術文件中建議使用之水風險辨識工具。Ecolab Water Risk Monetizer 為 Ecolab 與 Microsoft 和標準普爾全球公司（S&P Global）旗下的 Trucost 合作開發的水風險貨幣化工具，加深企業對與水資源風險相關的財務影響的理解。

3.2 辨識水相關風險與機會

企業可以善用國際組織提供的水風險工具辨識水相關風險與機會，如通過水壓力等指標鑑別缺水風險可能發生的熱點廠區。然而在全球水風險資料庫中台灣地區的資料內容通常是缺失或是由其他地區內插產生，評估設廠於台灣的企業的缺水風險並不一定適合。因此，本研究利用 SPI3 分析乾旱情況並且與水利署發布之水情燈號建立關聯，將歷史 SPI3 正常或偏低時水情燈號的轉變情形視為脆弱度，未來氣候變遷情境下一年中各縣市 SPI3 屬於正常或偏低時的月份個數視為危害與暴露。風險為危害、暴露以及脆弱度的函數，通過此方式可以取得各縣市未來各水情燈號的發生次數，並且藉由政策中限水比例推估企業為取得水資源所需要額外付出的成本，為台灣地區的缺水熱點辨識提供解方並且鏈結財務風險。

3.2.1 標準化降雨指標

標準化降雨指標（SPI）是由 McKee et al.（1993）發展的乾旱指標，可以較好地呈現乾旱強度與持續時間，並且為世界氣象組織（WMO）建議採用以監測乾旱。其建立方法如下：

1. 利用統計分布之檢定方法確定降雨型態之最適機率分布，並且建立該分布之累積機率曲線。
2. 將此累積機率曲線對應標準化常態分布之 Z 值，即為 SPI。

McKee et al.（1993）亦依照 SPI 的大小來定義不同的乾旱程度如表 4。一般而言，SPI 偏向正值代表降雨量偏多，SPI 偏向負值則代表降雨量偏少，當 SPI 小於負二則表示極端乾旱。

在不同時間尺度上計算 SPI 可有利於多種用途。台灣地區的乾旱發生情況往往都不是基於單月降雨量不足所造成，而乾旱之結束往往是單月降雨量足夠則結束。此外台灣地區的豐枯水期明顯，若選取較大的時間尺度如 SPI6 以上，則可能無法有效反應乾旱的始末。本研究考量短中期的降雨量對於台灣地區乾旱的影響較為顯著，因此選取連續三個月的時間尺度（SPI3）用以分析台灣各縣市歷史乾旱情況並與水利署發布之水情燈號建立關聯。

表 4：SPI 值對應之乾旱程度表

SPI 值	乾旱程度
$-1.0 < \text{SPI} < 1.0$	正常
$-1.5 < \text{SPI} < -1.0$	中度乾旱
$-2.0 < \text{SPI} < -1.5$	嚴重乾旱
$\text{SPI} < -2.0$	極端乾旱

3.2.2 水情燈號

水利署在決定水情燈號的過程中，會先依據各地區的標的水源進行警戒值的設立。一旦標的水源蓄水量接近或達各階段研訂之警戒值時，即依程序邀請各供水及用水單位召開水源調度協調會議，並參考未來氣象展望後，決定所需採取的措施及是否需要轉變燈號，並滾動檢討因應措施與燈號，歷年水情燈號轉變統計表如表 5 與表 6 所示。

表 5：歷年水情燈號轉變統計表



民國100年起歷年水情燈號轉變統計表						
年度	地區	燈號	實施期間		備註	
100~101	基隆市(含新北市汐止區)	綠燈	100/8/23	100/10/2		
	新竹縣市及苗栗縣	綠燈	100/11/8	100/11/16		
	基隆市(含新北市汐止區)	綠燈	101/7/18	101/8/5		
	新北市板新地區及桃園縣(含新北市林口區)	綠燈	101/11/12	101/12/3		
	臺南市	綠燈	101/11/19	102/5/22	跨年度	
	高雄市		綠燈	101/11/19	102/3/21	跨年度
			黃燈	102/3/22	102/5/7	
		綠燈	102/5/8	102/5/28		
	新北市板新地區	綠燈	102/2/18	102/5/9		
	桃園縣(含新北市林口區)		綠燈	102/2/18	102/3/14	
			黃燈	102/3/15	102/4/25	
			綠燈	102/4/26	102/5/9	
	新竹縣市	綠燈	102/3/13	102/4/15		
嘉義縣市	綠燈	102/3/15	102/5/7			
苗栗縣、臺中市、彰化縣、南投縣及雲林縣	綠燈	102/3/19	102/4/15			
102~103	基隆市(含新北市汐止區)	綠燈	102/8/12	102/8/25		
	桃園縣(含新北市林口區)	綠燈	102/12/2	102/12/25		
	臺南市		綠燈	102/12/9	103/3/19	跨年度
			黃燈	103/3/20	103/5/19	
		綠燈	103/5/20	103/6/5		
	嘉義縣市	綠燈	103/3/20	103/5/19		
新北市板新地區及桃園縣(含新北市林口區)	綠燈	103/4/14	103/5/19			
103~104	基隆市(含新北市汐止區)	綠燈	103/9/10	103/10/14		
	臺南市	綠燈	103/10/8	103/11/30		
	新北市板新	綠燈	103/11/4	103/12/7		
	桃園縣(含新北市林口區)	綠燈	103/11/4	103/11/26		
	新竹縣市	綠燈	103/11/4	103/11/30		
	苗栗縣、臺中市(含北彰化)	綠燈	103/11/4	103/11/30		
	高雄市	綠燈	103/11/4	103/12/7		
	澎湖縣	綠燈	103/11/4	104/6/7	跨年度	
	桃園縣(含新北市林口區)	黃燈	103/11/27	104/2/25	跨年度	
	南投縣	綠燈	103/12/1	104/6/7	跨年度	
	彰化縣南部、雲林縣、嘉義縣市	綠燈	103/12/1	104/2/25	跨年度	
	新竹縣市、苗栗縣、臺中市(含北彰化)、臺南市	黃燈	103/12/1	104/2/25	跨年度	
	新北市板新地區及高雄市	黃燈	103/12/8	104/2/25	跨年度	
	彰化縣南部、雲林縣	黃燈	104/2/26	104/5/21		
	連江縣	綠燈	104/1/14	104/12/24		
	嘉義縣市	黃燈	104/2/26	104/6/7		
	新北市板新、桃園縣(含新北市林口區)	橙燈	104/2/26	104/4/7		
	高雄市	橙燈	104/2/26	104/5/3		
	新竹縣市、苗栗縣、臺中市(含北彰化)	橙燈	104/2/26	104/5/21		
	臺南市	橙燈	104/2/26	104/5/24		
	金門縣	綠燈	104/4/8	104/8/14		
	新北市板新及林口地區、桃園市	紅燈	104/4/8	104/5/11		
	高雄市	紅燈	104/5/4	104/5/24		
	新北市板新及林口地區、桃園市	橙燈	104/5/12	104/5/21		
	新北市板新及林口地區、桃園市、苗栗縣、臺中市(含北彰化)	黃燈	104/5/22	104/6/7		
	新竹縣市、彰化縣南部、雲林縣	綠燈	104/5/22	104/6/7		
	臺南市	黃燈	104/5/25	104/6/7		
	高雄市	綠燈	104/5/25	104/6/7		
	新北市板新及林口地區、桃園市	綠燈	104/6/8	104/7/12		
	105~106	基隆市(含新北市汐止區)	綠燈	105/9/1	105/9/13	
新北市板新及林口地區、桃園市		綠燈	106/2/3	106/2/28		
		黃燈	106/3/1	106/4/28		
新竹縣市		綠燈	106/4/28	106/5/31		
		黃燈	106/2/13	106/2/28		
苗栗縣、臺中市(含北彰化)		綠燈	106/3/1	106/4/28		
		綠燈	106/4/28	106/5/5		
嘉義縣市		綠燈	106/2/23	106/4/28		
		綠燈	106/2/23	106/4/4		
臺南市		黃燈	106/4/5	106/6/2	直接轉藍燈	
		綠燈	106/2/23	106/4/4		
高雄市		黃燈	106/4/5	106/6/2		
		綠燈	106/6/2	106/6/3		
	綠燈	106/2/13	106/3/19			
	黃燈	106/3/20	106/6/2	直接轉藍燈		

表 6：歷年水情燈號轉變統計表（接續上表）



年度	地區	燈號	實施期間		備註	
106~107	基隆市(含新北市汐止區)	綠燈	106/9/1	106/10/13		
	桃園縣(含新北市林口區)	綠燈	106/10/1	106/10/14		
	新竹縣市		綠燈	106/12/4	106/12/26	
			黃燈	106/12/27	107/1/25	
			綠燈	107/1/26	107/2/13	
	苗栗縣		綠燈	106/12/4	106/12/26	
			黃燈	106/12/27	107/4/30	
			綠燈	107/5/1	107/5/23	藍燈
	臺南市		綠燈	106/10/1	107/5/23	
			黃燈	107/5/24	107/6/22	
	高雄市		綠燈	107/6/23	107/7/6	藍燈
			綠燈	107/4/16	107/6/22	藍燈
	澎湖縣		綠燈	107/1/26	107/5/23	
		黃燈	107/5/24	107/6/22		
		綠燈	107/6/23	107/7/27	藍燈	
桃園縣		綠燈	107/6/8	107/7/11	藍燈	
		綠燈	108/2/15	108/3/4		
108	新竹縣市	黃燈	108/3/4	108/3/14		
		綠燈	108/3/14	108/4/19	水情正常	
		綠燈	108/3/4	108/5/6	水情正常	
109	臺南市	綠燈	109/4/1	109/5/6		
	高雄市	黃燈	109/5/7	109/5/21		
109~110	桃園	綠燈	109/4/1	109/5/6		
		黃燈	109/5/7	109/5/21		
		綠燈	109/4/1	109/5/6		
		黃燈	109/5/7	109/5/21		
		綠燈	109/9/16	109/10/13		
		黃燈	109/10/14	110/5/20		
	新竹	橙燈	110/5/21	110/6/21		
		黃燈	110/6/22	110/6/29		
		綠燈	110/6/30	110/7/26	7/27水情正常	
		綠燈	109/9/16	109/10/13		
		黃燈	109/10/14	110/1/5		
		橙燈	110/1/6	110/6/21		
	苗栗	黃燈	110/6/22	110/6/29	6/30水情正常	
		綠燈	109/9/16	109/10/13		
		黃燈	109/10/14	110/1/5		
		橙燈	110/1/6	110/4/5		
		紅燈	110/4/6	110/6/5		
		橙燈	110/6/6	110/6/21		
	臺中	黃燈	110/6/22	110/7/26	7/27水情正常	
		綠燈	109/9/16	109/10/13		
		黃燈	109/10/14	110/1/5		
		橙燈	110/1/6	110/4/5		
		紅燈	110/4/6	110/6/5		
		橙燈	110/6/6	110/7/27		
	南投	黃燈	110/7/28	110/8/4	8/5水情正常	
		綠燈	109/10/26	110/2/24		
		黃燈	110/2/25	110/6/6	6/7水情正常	
		綠燈	109/10/26	110/2/24		
		黃燈	110/2/25	110/6/6		
		綠燈	110/6/7	110/6/21	6/22水情正常	
	彰化、雲林	綠燈	109/10/26	110/2/24		
		黃燈	110/2/25	110/6/6		
		綠燈	109/10/26	110/2/24		
黃燈		110/2/25	110/3/31			
橙燈		110/4/1	110/5/28			
黃燈		110/5/29	110/6/6	6/7水情正常		
高雄	綠燈	109/10/26	109/11/17			
	黃燈	109/11/18	110/2/24			
	橙燈	110/2/25	110/6/21			
	綠燈	110/6/22	110/6/29	6/30水情正常		
	綠燈	109/12/9	110/8/4	8/5水情正常		
	綠燈	109/12/9	110/3/31			
嘉義、臺南	黃燈	110/4/1	110/8/4	8/5水情正常		
	綠燈	109/12/9	110/3/31			
澎湖縣	綠燈	109/12/9	110/8/4	8/5水情正常		
連江縣	黃燈	110/4/1	110/8/4	8/5水情正常		

不同水情燈號的發布將伴隨各階段的限水措施。若無燈號代表水情正常；綠燈代表水情稍緊，需加強水資源調度及研擬措施；當黃燈、橙燈、紅燈發布時，將會實施對應的限水措施，詳細的限水措施說明如圖 14 所示。

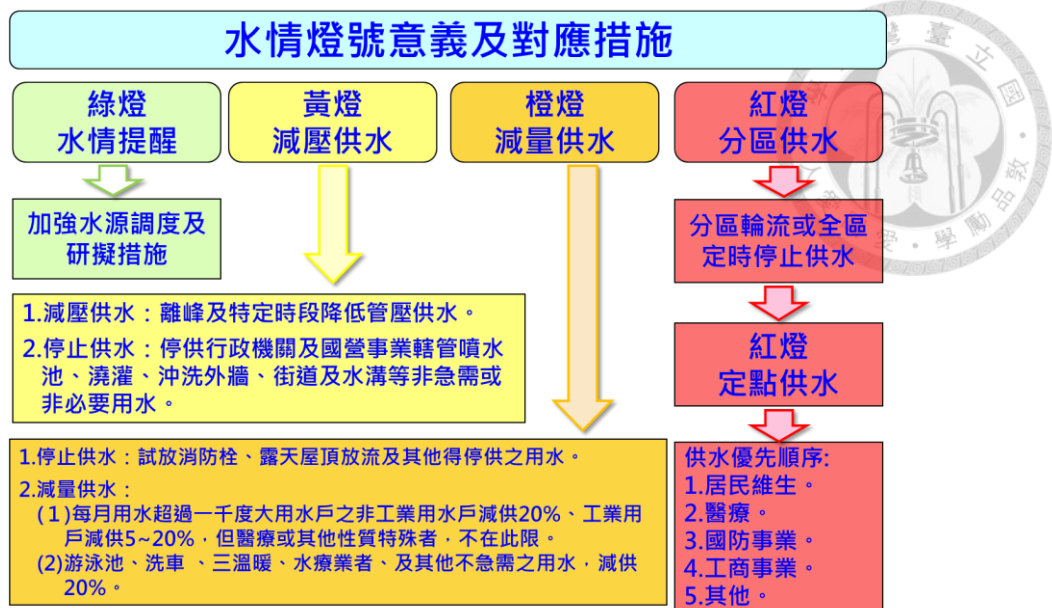


圖 14：水情燈號與其對應限水措施說明

3.2.3 乾旱脆弱度

脆弱度為系統易受到負面影響的傾向與本質，可以用以描述不同地區之基礎設施與乾旱應變能力不盡相同對於乾旱的可能受影響程度。因此將乾旱脆弱度定義為 SPI3 介於不同分級區間時（1 至-1、-1 至-1.5 及大於-1.5）轉變為各水情燈號之機率。考量綠燈僅加強水資源調度及研擬措施，此處僅採計會實施限水措施的水情燈號，包括黃燈、橙燈以及紅燈。作法為採用全台各縣市於 1986 年至 2020 年之月尺度之降雨量轉換為 SPI3，並且比對自 2011 年水情燈號實施以來各縣市水情燈號的發布情況計算各縣市乾旱脆弱度。例如：桃園市自 2011 年以來在 SPI3 介於 1 與-1 時總共發生八十六次，其中有十三次發生黃燈，三次發生橙燈，三次發生紅燈，因此在 SPI3 介於 1 與-1 時發生黃燈、橙燈和紅燈的乾旱脆弱度分別為 13/86、3/86、3/86。當同一縣市歷史事件中乾旱較輕微（SPI3 較高）時有發生水情燈號，而乾旱較嚴重（SPI3 較低）時因之前降雨量尚足夠或預計未來降雨量充足的情況下並未發生水情水燈，則使用乾旱較輕微時之乾旱脆弱度直接向下帶入，如圖 15 所示。當一縣市因其具備良好的礎設施與乾旱應變能力在歷史期間完全未發布任何水情燈號，乾旱脆弱度則為零。

桃園市	黃燈	橙燈	紅燈
-1<SPI≤1	0.151163	0.034884	0.034884
-1.5<SPI≤-1	↓ 0.30	↓ 0.1	↓↓ 0
a) SPI≤-1.5	↓ 0	↓ 0	↓ 0

桃園市	黃燈	橙燈	紅燈
-1<SPI≤1	0.151163	0.034884	0.034884
-1.5<SPI≤-1	0.30	0.1	0.034884
b) SPI≤-1.5	0.30	0.1	0.034884

圖 15：脆弱度補值方法示意圖

3.2.4 台灣地區未來情境下水情地圖

為對應使用歷史期間之 SPI3 計算之乾旱脆弱度，本研究計算在 RCP2.6 和 RCP8.5 兩種情境下全台各縣市在 2030 年與 2050 年時，一年中 SPI3 介於不同分級區間時（1 至-1、-1 至-1.5 及大於-1.5）的平均月數。將乾旱脆弱度，也就是 SPI3 介於不同分級時水情燈號的發生機率與未來氣候變遷情境下 SPI3 介於不同分級時的平均月數相乘即可得到未來氣候變遷情境下水情燈號的發生情況。假設企業面臨缺水，皆會先以叫水車補足的情況下，依據水情燈號與其對應限水措施統整各燈號限水比例並且參考經濟部工業局抗旱專區所提供的民間水車調查資料，可以推估未來各縣市企業使用一噸水所需要額外付出的成本。並且，隨著不同階段水情燈號的發布，限水比例越高、限水範圍越廣的情況下，因水車數量有限，單位水車成本也隨之增加。本研究採用之各燈號限水比例與單位水車成本整理於表 7，未來氣候變遷情境下水情燈號的發生情況與各縣市企業使用一噸水所需要額外付出的成本地圖如圖 16 所示，方便在各縣市間進行比較。

表 7：各燈號限水比例與單位水車成本

水情燈號	限水比例	單位水車成本
黃燈	3%	500 元/噸
橙燈	20%	750 元/噸
紅燈	29%	1000 元/噸

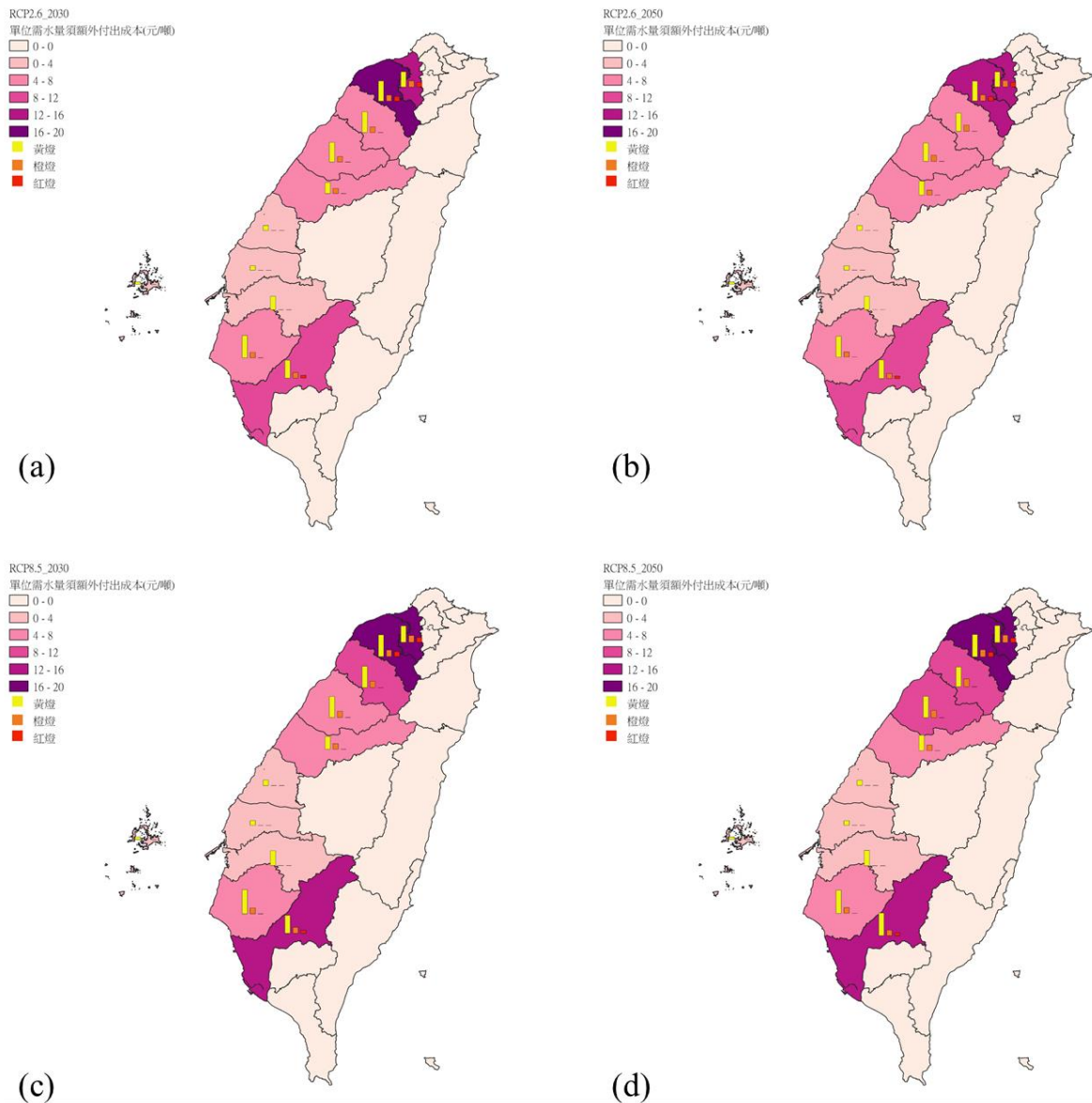


圖 16：不同時間與情境下水情燈號與取水額外成本地圖

(由 a 至 d 分別代表 2030 年 RCP2.6、2050 年 RCP2.6、2030 年 RCP8.5、2050 年 RCP8.5)

3.3 評估量化水相關風險

評估量化過程包含未來季長期尺度以及氣候變遷情境尺度，並結合區域尺度與廠區尺度的水風險，整體的評估量化流程如圖 17 所示。區域尺度與廠區尺度的水風險主要由水情燈號鏈結，通過水情燈號影響廠區的供水。兩種時間尺度在評估的前置步驟時，都先需取得集水區的歷史降雨資料，並根據季長期天氣展望資料或氣候情境資料，利用氣象合成模式產製未來季長期尺度及氣候變遷情境尺

度的日降雨量，對於未來季長期尺度會額外產製日溫度用以推估廠區用水相關資訊。接著經由水文模式利用日雨量推估水庫入流量，後續再透過區域水資源系統動力模式推估水庫未來蓄水量變化。水庫蓄水量可根據水利署 2012 年《北區水源調配作法、警戒方式》中所發布之各地區限水警戒值訂定成果轉換為水情燈號。廠區尺度則先根據廠房用水平衡圖建製廠房水資源系統動力模式，後續再利用缺水風險指標量化缺水風險並完成廠區乾旱預警與調適，廠區尺度的作法將於 4.1 節說明。

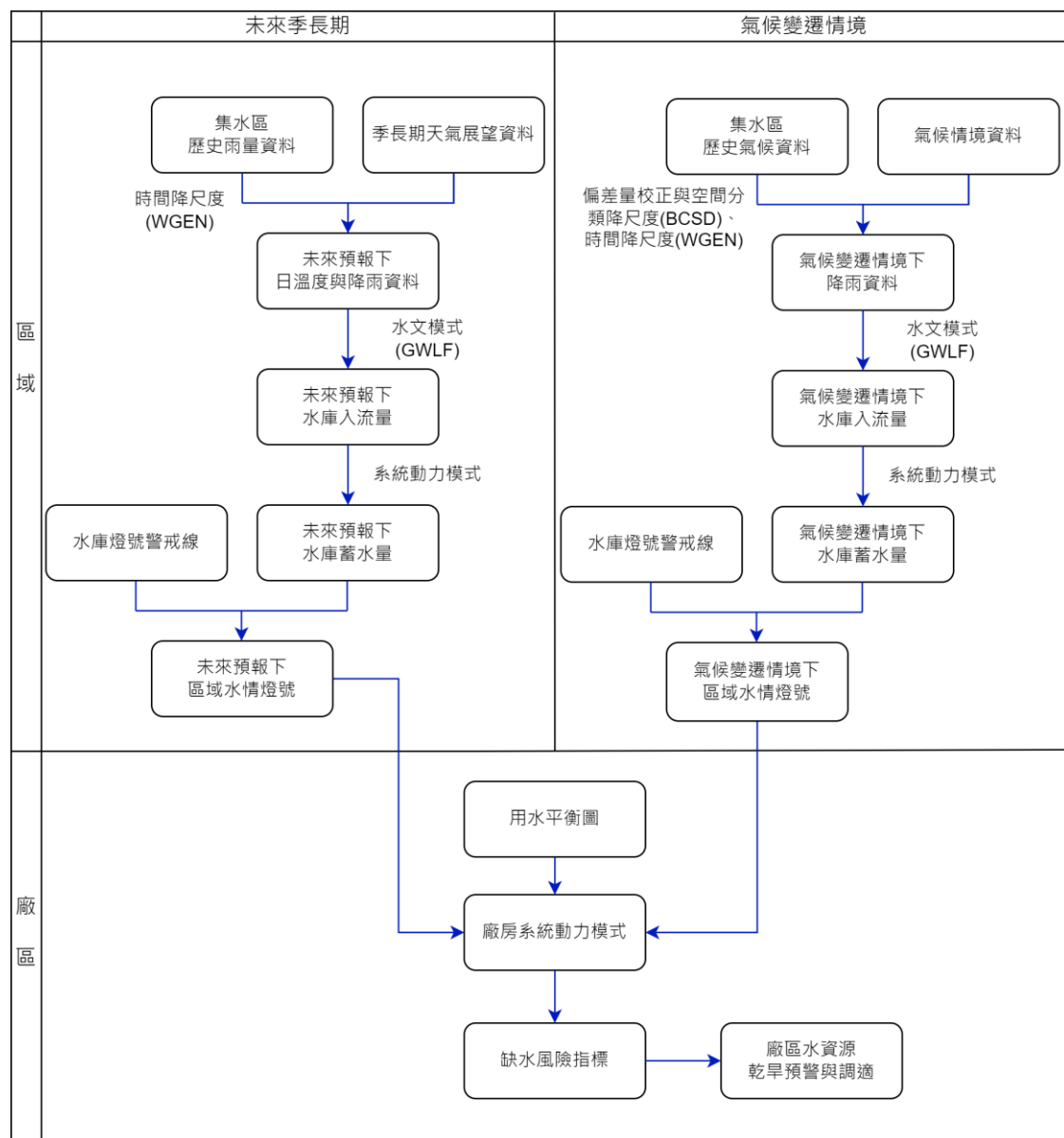


圖 17：企業缺水風險評估量化流程

3.3.1 中央氣象局季長期天氣展望

中央氣象局二步法短期氣候預報系統第二版 (TCWB2T2) 為旬、月、季預報系統，並且於 2016 開始作業。二步法的架構為首先用統計或動力模式預報海表面溫度的變化，再使用大氣環流模式將所預報的海表面溫度做為下邊界條件進行大氣狀態預報。預報所選用的大氣模式為氣象局全球數值天氣預報模式 (CWBGAM) 與德國馬普研究院 ECHAM5 模式；海溫預測資料則來自氣象局第二版全球海溫最佳化預報系統產品 (OPGv2-SST) 和從美國環境監測中心 (NCEP) 取得之全球海溫預測資料 (CFSv2-SST)。兩組大氣模式與兩組海溫資料交錯搭配出四種組合，每一組合每月產製出 30 組 280 天的預測結果，也就是說每個月有 120 組長達 280 天的預測結果，可作為加工產出月與季預測產品的原料 (李思瑩、盧孟明，2018)。於台灣，將季長期天氣預報投入乾旱事件的因應決策考慮已有一定成果 (曾馨儀，2015；田育全，2017)，因此本研究亦採用季長期預報進行後續區域缺水風險評估。

長期天氣展望於每月月底發布一次，預報內容為未來三個月逐月的天氣趨勢，以及逐月台灣北、中、南、東四區的氣溫與雨量趨勢，其中四個地區分別以台北、台中、高雄以及花蓮測站作為參考氣象站，由參考測站歷史 (1991 年至 2020 年) 該月觀測資料的排序，依序取 30%、40%、30% 的範圍定義為少於氣候正常 (偏少)、在正常範圍 (正常)、多於氣候正常 (偏多)。目前中央氣象局依據此三分類發生之機率呈現季長期預報結果，如圖 18、圖 19 所示。後續將沿用此三分類之歷史統計特性，作為氣象合成模式的輸入，用以合成預報下之日氣象參數。

氣溫機率預報 (單位：%)

地區 \ 月份	5月			6月			7月		
	偏低	正常	偏高	偏低	正常	偏高	偏低	正常	偏高
北部	20	50	30	20	50	30	20	50	30
中部	20	50	30	20	50	30	20	50	30
南部	20	50	30	20	50	30	20	50	30
東部	20	50	30	20	50	30	20	50	30

圖 18：季長期天氣展望預報溫度結果呈現 (擷取時間：2022/4/30)

雨量機率預報 (單位：%)

地區 \ 月份	5月			6月			7月		
	偏少	正常	偏多	偏少	正常	偏多	偏少	正常	偏多
北部	30	50	20	30	50	20	20	60	20
中部	30	50	20	30	50	20	20	60	20
南部	30	50	20	30	50	20	20	60	20
東部	30	50	20	30	50	20	20	60	20

圖 19：季長期天氣展望預報降雨結果呈現 (擷取時間：2022/4/30)

3.3.2 氣候情境

基於不同情境的氣候預測是歷次 IPCC 科學評估報告的核心內容之一，其結果可以顯現不同政策選擇所帶來之氣候影響，是政府採取決策的重要科學依據。為了更好地衡量不同社會經濟發展方式與氣候變遷風險的關係，IPCC 先後發展了多次氣候情境，近年來較為使用的溫室氣體排放情境，主要為 IPCC 所訂定的 SRES (Special Report on Emissions Scenarios) 情境，以及 RCPs (Representative Concentration Pathways) 情境。目前在 IPCC 最新發布的第六次評估報告中，所採用的情境為同時考量共享社會經濟路徑 (Shared Socioeconomic Pathways, SSPs) 與代表濃度路徑(RCPs)的組合，並相較於第五次評估報告增加 RCP1.9、RCP3.4、RCP7 等三個情境，其中 SSPs 情境包含 SSP1 至 SSP5 共五種社會經濟發展情境項目。各個情境說明與其所對應之 RCPs 整理於下表 8，且各種情境於短、中、長期之預測升溫情形如表 9。

表 8：SSPs 情境說明與其對應之 RCPs 列表
 (整理自台灣永續棧趙家緯於 2021 所發布的文章)



SSPs	SSP1	SSP2	SSP3	SSP4	SSP5
情境名稱	永續性	中間路線	區域對抗	不平等	仰賴化石燃料
生活型態	適度服務需求 低物質密集度	中度服務需求 中物質密集度	中度服務需求 高物質密集度	高與中收入國 屬高度服務需求，低收入國 為低服務需求	高度服務需求 非常高物質密集度
環境意識	高	中	低	高與中收入國 屬高，低收入 國仍低	中
工業能源密集度	低	中	高	高與中收入國 屬低，低收入 國仍高	中
建築能源密集度	低	中	高	高與中收入國 屬低至中，低 收入國屬中	中
運輸能源密集度	低	中	高與中收入國 屬高，低收入 國屬中等	高與中收入國 屬低，低收入 國屬低至中	高
對應之 RCPs	1.9/2.6	4.5	7.0	3.4/6.0	3.4/8.5

表 9：各種情境於短、中、長期之預測升溫情形 (單位：°C)

情境	短期 (2021 年-2040 年)		中期 (2041 年-2060 年)		長期 (2081 年-2100 年)	
	最佳預測	高機率 範圍	最佳預測	高機率 範圍	最佳預測	高機率 範圍
SSP1-1.9	1.5	1.2-1.7	1.6	1.2-2.0	1.4	1.0-1.8
SSP1-2.6	1.5	1.2-1.8	1.7	1.3-2.2	1.8	1.3-2.4
SSP2-4.5	1.5	1.2-1.8	2.0	1.6-2.5	2.7	2.1-3.5
SSP3-7.0	1.5	1.2-1.8	2.1	1.7-2.6	3.6	2.8-4.6
SSP5-8.5	1.6	1.3-1.9	2.4	1.9-3.0	4.4	3.3-5.7

綜合各情境說明，可以發現所有情境中如果世紀末要控制升溫在 1.5 攝氏度，則未來經濟社會發展與溫室氣體排放需沿 SSP1-1.9 的情境所勾勒的發展路徑；要控制在 2 攝氏度則為 SSP1-1.9 或 SSP1-2.6。



3.3.3 全球氣候模型降尺度

由於全球氣候模型不論是大氣環流模型（General Circulation Model, GCM）或地球系統模型（Earth System Model, ESM）的網格解析度較低，需要經過降尺度才能使用。本研究採用統計降尺度，利用全球氣候模式資料，計算出空間上測站鄰近網格點於各月份之日溫度與降雨量的統計修正值，如計算式（3-1）到（3-4）所示。

$$\text{Ratio}_{\text{Stno},m}^{P,Avg} = \frac{E[P_{\text{Future},\text{Stno},m}]}{E[P_{\text{Baseline},\text{Stno},m}]} \quad (3-1)$$

$$\text{Ratio}_{\text{Stno},m}^{P,Std} = \frac{\text{Std}[P_{\text{Future},\text{Stno},m}]}{\text{Std}[P_{\text{Baseline},\text{Stno},m}]} \quad (3-2)$$

$$\text{Delta}_{\text{Stno},m}^{T,Avg} = E[T_{\text{Future},\text{Stno},m}] - E[T_{\text{Baseline},\text{Stno},m}] \quad (3-3)$$

$$\text{Ratio}_{\text{Stno},m}^{T,Std} = \frac{\text{Std}(T_{\text{Future},\text{Stno},m})}{\text{Std}(T_{\text{Baseline},\text{Stno},m})} \quad (3-4)$$

其中， $\text{Ratio}_{\text{Stno},m}^{P,Avg}$ 和 $\text{Ratio}_{\text{Stno},m}^{P,Std}$ 為 Stno 測站第 m 月雨量之平均值與標準差修正值； $\text{Ratio}_{\text{Stno},m}^{T,Avg}$ 和 $\text{Ratio}_{\text{Stno},m}^{T,Std}$ 為 Stno 測站第 m 月溫度之平均值與標準差修正值；下標 Future 與 Baseline 為全球氣候模式在某情境設定下之未來與基期的氣象日資料；下標 Stno 與 m 則代表鄰近測站 Stno 的網格點與第 m 月份於設定時段之氣象日資料。後續為產製氣候情境下日氣象資料，需針對各氣象參數之平均值與標準差進行修正，雨量方面為採用觀測資料之各月份平均值與標準差乘以各月之變化比率；溫度方面則為採用觀測資料之各月份平均值加上各月之變化差值，各月份標準差乘以各月之變化比率值，其計算式分別為（3-5）至（3-8）所示。

$$E[P_{Adj,Stno,m}] = E[P_{Obv,Stno,m}] \times Ratio_{Stno,m}^{P,Avg} \quad (3-5)$$

$$Std(P_{Adj,Stno,m}) = Std(P_{Obv,Stno,m}) \times Ratio_{Stno,m}^{P,Std} \quad (3-6)$$

$$E[T_{Adj,Stno,m}] = E[T_{Obv,Stno,m}] + Delta_{Stno,m}^{T,Avg} \quad (3-7)$$

$$Std(T_{Adj,Stno,m}) = Std(T_{Obv,Stno,m}) \times Ratio_{Stno,m}^{T,Std} \quad (3-8)$$

其中 Adj 為調整後數值，Obv 為歷史觀測資料。

3.3.4 氣象合成模式

本研究採用由 (Pickering et al, 1998) 為基礎發展出之氣象合成模式，此模式利用歷史溫度及降雨資料之統計特性，加入未來季長期或氣候變遷情境資訊可繁衍未來季長期與氣候變遷情境下日溫度及日降雨資料，日溫度與日降雨的模擬分別說明如下：

(1) 日溫度模擬

在日溫度的模擬中，假設連續兩日的溫度值為常態分佈和一階自回歸模式 AR (1)，在未來條件下之日溫度值可由月平均溫度透過一階馬可夫鏈模擬 (Pickering et al, 1998 ; Tung & Haith, 1995)，其方程式如計算式 (3-9) 所示：

$$T_i = \mu_{Tm}^k + \rho_{Tm}^k(T_{i-1} - \mu_{Tm}^k) + v_i \sigma_{Tm}^k \sqrt{1 - (\rho_{Tm}^k)^2} \quad (3-9)$$

其中 T_i 為第 i 天之溫度； μ_{Tm}^k 為第 m 月第 k 類歷史月平均溫度， k 值 1、2、3 分別對應於偏低、正常、偏高三個區間； ρ_{Tm}^k 為第 m 月第 k 類之一階自相關係數，即 T_i 與其前一個時間 T_{i-1} 之自相關係數； v_i 屬於標準常態分布 $N(0,1)$ 產生之隨機變數； σ_{Tm}^k 則是第 m 月第 k 類之歷史月溫度之標準差。再進行日溫度模擬前，需先判定模擬月份屬於偏高、正常、偏低哪一區間，並假設模擬的第一天的溫度為該區間的月均溫。

(2) 日降雨模擬

日降雨模擬則分為兩個部分，第一部分需要判斷該日是否為降雨日，判斷方式與 (Richardson, 1981) 提出的方法相同。以歷史各月份日降雨資料統計各分類區間降雨發生之機率 $P(W)$ ，第 $i-1$ 天降雨且第 i 天也降雨的機率表示為 $P(W | W)$ ，第 $i-1$ 天不降雨但第 i 天降雨的機率則表示為 $P(W | D)$ 。每月第一天的降雨狀態是以連續均勻分布 $U(0,1)$ 產生之隨機變數 RN 決定，若該隨機變數小於等於 $P(W)$ 則表示該天為降雨日；其後日子則由前一日降雨與否和 $P(W | W)$ 、 $P(W | D)$ 的條件機率來判定是否為降雨日。

第二部分為模擬降雨量，降雨量是透過假設並經過檢定之降雨量分布之累積機率函數 (CDF) 求得。石門水庫集水區之降雨根據前人研究適合採用雙參數韋伯分布 (曾馨儀, 2015)，其機率分布函數為計算式 (3-10) 所示。

$$x = 1 - e^{-(P/\beta_{mk})^{\alpha_{mk}}} \quad (3-10)$$

其中 P 為日降雨量， x 為零至一間的均勻隨機變數， α_{mk} 為第 m 月第 k 類的形狀參數， β_{mk} 為第 m 月第 k 類的尺度參數。

3.3.5 GWLF 水文模式

GWLF (Generalized Watershed Loading Function) 是由 Haith 及 Shoemaker 等人於 1987 年發展的非點源污染傳輸模式，該模式藉由集水區中各水文變數在地表和地下含水層間之平衡關係模擬流量，為一種水平衡模式。此模式之特性為能反映氣象因子、土地利用對於流量的影響，其參數之決定可以依據集水區的土地利用與土壤特性決定，並不需要檢定過程，可以降低結果之不確定性。該模式將集水區由上而下分為地表、未飽和含水層和飽和含水層三個主要部分，模式的觀念如圖 20 所示。水平衡計算始於降雨落至地表，部分降雨入滲到土壤中，另一部份降雨即形成地表逕流，直接流入河川，而過程中受到日照的影響會有蒸發散產生，使得部分水分會回到大氣中。當未飽和含水層之含水量大於田間含水量時，

過剩的水分會受重力影響滲漏至淺層飽和含水層，最終以地下水出流量形成從淺層飽和含水層排出至形成河川基流或以深層滲漏的方式至深層飽和含水層。

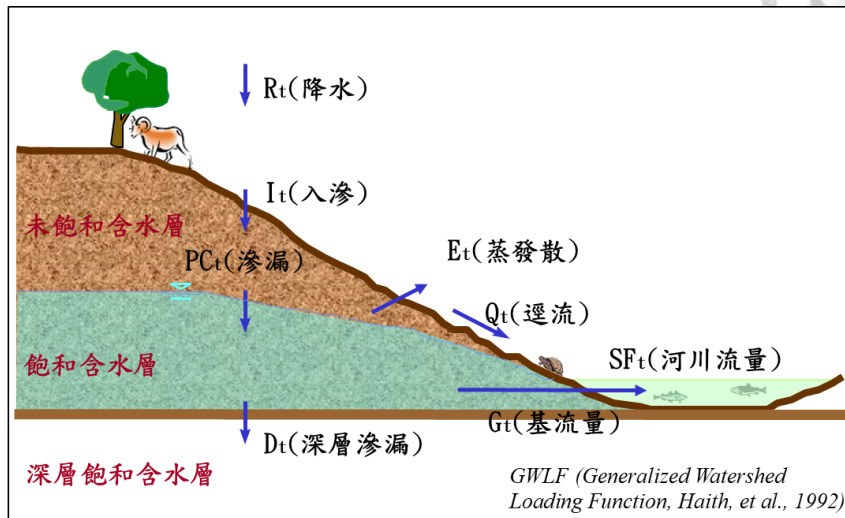


圖 20：GWLF 模式水平衡示意圖

(1) 地表

當降雨 (R_t) 至地面後，一部分的水經由入滲至未飽和含水層中，另一部分形成地表逕流 (Q_t)。入滲量 (I_t) 的計算為降雨量扣除地表逕流，如式 (3-11) 所示，其中三個參數的單位皆為 cm/day。

$$I_t = R_t - Q_t \quad (3-11)$$

在 GWLF 模式中估算地表逕流時，採用美國水土保持局 (SCS, Ogrosky and Mockus, 1964) 之 Curve Number 方法。此方法可合理考量土地利用、土壤特性與臨前土壤水分以決定集水區最大蓄積深度 (W_t)，進而估算地表逕流，如式 (3-12 與 3-13) 所示。

$$Q_t = \frac{(R_t - 0.2W_t)^2}{(R_t + 0.2W_t)} \quad \text{if } R_t < 0.2W_t, Q_t = 0 \quad (3-12)$$

$$W_t = \frac{2540}{CN_t} - 25.4 \quad CN \leq 100 \quad (3-13)$$

其中，CN 為 Curve Number，其值將根據土地利用、土壤質地或排水特性及臨前土壤水分而有所不同 (Tung & Haith, 1995)。美國農業部自然資源保護局 (Natural Resources Conservation Service, NRCS) 將 CN 值根據臨前土壤水分分

為三類，分別為 CN3（濕潤情況）、CN2（平均情況）及 CN1（乾燥情況），其中 CN2 隨著土壤特性與土地利用有所不同，可由 NRCS 提供之 CN2 值對照表中取得。CN1 與 CN3 值則依據 Chow et al. (1988) 之計算方法求得，其計算式如 (3-14) 與 (3-15)。

$$CN1 = \frac{4.2CN2}{10 - 0.058CN2} \quad (3-14)$$

$$CN3 = \frac{23CN2}{10 + 0.13CN2} \quad (3-15)$$

最終之 CN 值將由 CN1、CN2、CN3 並根據圖 21 CN 值與臨前土壤水分關係圖內插取得。其中臨前土壤水分在作物生長期與非生長期不同，對應關係如表 10 所示。

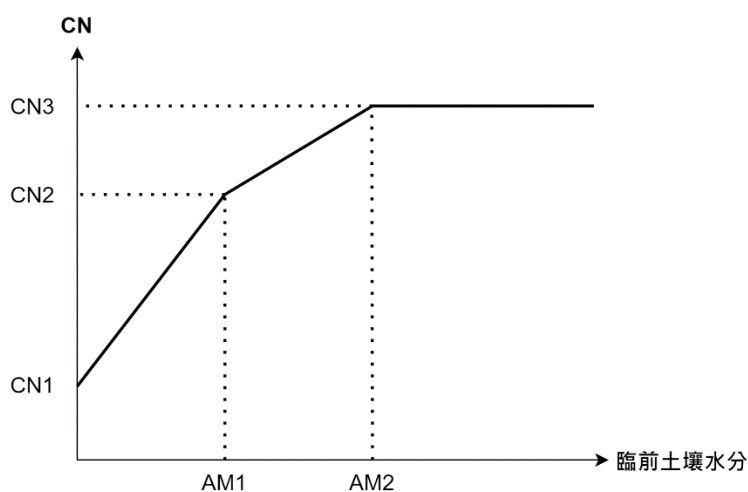
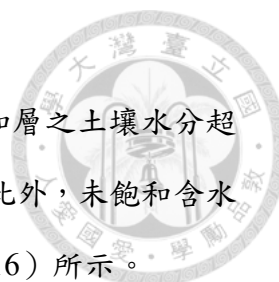


圖 21：CN 值與臨前土壤水分關係圖

表 10：AM1 與 AM2 之值

	非生長期	生長期
AM1	1.3cm	3.6cm
AM2	2.8cm	5.3cm



(2) 未飽和含水層

由地表入滲之水將優先補充未飽和層之土壤水分，當未飽和層之土壤水分超過土壤最大含水量，部分水分將開始滲漏至淺層飽和含水層。此外，未飽和含水層之土壤水分亦可經由蒸發散而離開土壤，其水平衡如式 (3-16) 所示。

$$U_{t+1} = U_t + I_t - ET_t - PC_t \quad (3-16)$$

其中 U_t 為未飽和含水層高於凋萎點之土壤水分含量， ET_t 為蒸發散量， PC_t 為滲漏量，式中所用單位均為 cm/day。蒸發散量受大氣、地表覆蓋特性及土壤含水量之影響，估算方式為以潛能蒸發散 (PET_t) 乘上土壤水分壓力係數 (k_{st}) 與土壤覆蓋係數 (k_{ct})，但考慮其受限於未飽和含水層可利用之水分，故取兩者中較小的數值為蒸發散量，計算式如式 (3-17)。

$$ET_t = \text{Min}[k_{st} \times k_{ct} \times PET_t, U_t + I_t] \quad (3-17)$$

其中土壤覆蓋係數 (k_{ct}) 取決於土地利用方式，土壤水分壓力係數 (k_{st}) 則採用 Boonyatharokol & Walker (1979) 之公式計算，可由式 (3-18) 與 (3-19) 表示。

$$k_{st} = 1 \quad \text{if } U_t \geq 0.5U^* \quad (3-18)$$

$$k_{st} = \frac{U_t}{0.5U^*} \quad \text{if } U_t < 0.5U^* \quad (3-19)$$

而潛能蒸發散 (PET_t) 的計算採用 Hamon (1961) 之公式計算，可由式 (3-20) 與式 (3-21) 表示。

$$PET_t = \frac{0.021H_t^2 e_{0t}}{T_t + 273} \quad (3-20)$$

$$e_{0t} = 33.8639 \times [(0.00738T_t + 0.8072)^8 - 0.000019 \times |1.8T_t + 4.8| + 0.00136] \quad (3-21)$$

其中， H_t 為第 t 天的日照時數 (小時)， T_t 為日平均溫度 ($^{\circ}\text{C}$)， e_{0t} 為 T_t 下之飽和蒸汽壓 (kPa)。

當未飽和含水層中高於凋萎點之土壤水分含量 (U_t) 加上入滲量大於蒸發散量與最大土壤水分容量 (U^*) 時，則會產生滲漏。因受重力影響，滲漏值應為

零或正值，計算時與零取最大值作為滲漏量，其計算如式 (3-22) 所示。

$$PC_t = \text{Max}[0, U_t + I_t - ET_t - U^*] \quad (3-22)$$

(3) 淺層飽和含水層

淺層飽和含水層之水平衡關係可以由方程式 (3-23) 表示：

$$S_{t+1} = S_t + PC_t - G_t - D_t \quad (3-23)$$

其中， S_t 為淺層飽和含水層之土壤水分含量， D_t 為入滲至深層飽和含水層之水量，因其值很小，在此假設為零。 G_t 則為由淺層飽和含水層所滲出之河川基流量，計算建立在淺層飽和含水層為一線性的假設上，計算方式如式 (3-24) 表示，其中 r 為退水係數。

$$G_t = r \times S_t \quad (3-24)$$

本研究使用 GWLF 模式模擬石門水庫入流量，模式參數設定引用吳阜峻於 2011 年同樣模擬石門水庫入流量時通過參數檢定後的參數值 (吳阜峻，2011)，如表 11。

表 11：GWLF 參數設定

參數名稱	最大土壤水分容量 (cm/day)	退水係數	覆蓋係數	初始飽和層含水量 (cm/day)	初始未飽和層含水量 (cm/day)	CN2	面積 (ha)
設定值	5	0.04	0.8	3	6	50	76340

3.3.6 水資源系統動力模式

系統動力學的概念由美國麻省理工史隆管理學院 Forrester 於 1961 年提出，其主要之概念為以宏觀的角度來思考與解決問題，並且通過模擬的方式來觀察不同情境之結果變化。系統動力學與其他分析工具最大的不同點在於系統動力學具備處理非線性問題 (Non-linearity)、資訊回饋 (Information feedback)、時間滯延 (Time delay)、動態性複雜 (Dynamic complexity) 的能力。目前系統動力學已廣泛應用於各個領域，也有許多研究應用系統動力模式在水資源領域進行水資源相關評估。

系統動力模式中主要有四個基本元件分別為儲存 (Stock)、流量 (Rate)、助動 (Connector) 以及輔助變數 (Auxiliary) 來建構系統，元件間以箭頭連接表示元件的因果關係。儲存 (Stock) 係表示某一系統在某一特定時刻的狀態，其流入率 (Inflow rate) 與流出率 (Outflow rate) 之淨變化量所產生的結果，如同水庫儲蓄量。流量 (Rate) 則表示某種儲存變數之變化，代表著某一瞬間的行為，其單位時間流入 (Inflow rate) 或流出 (Outflow rate) 儲存量之物質，如水庫入流量與灌溉水量。助動 (Connector) 與輔助變數 (Auxiliary) 則用來針對前兩種變數進行各變數間交互關係之補充說明，類似一般計算方程式中之參考資料表或參數，如水庫操作規線或渠道輸水損失。

本研究使用之桃園水資源系統動力模式，其供水系統架構如圖 22 所示，並更新其取水規則與農業公共需水量。另外，由於石門水庫會部分供給新北地區用水，與新北地區鳶山堰、三峽河上游之入流量有關，因受資料限制，本研究以歷史平均值假設此二處的入流量進行模擬。

為更好地探討區域乾旱對於廠區的影響，本研究亦建立廠房的水資源系統動力模式，詳細的系統則於 4.1 節中說明。

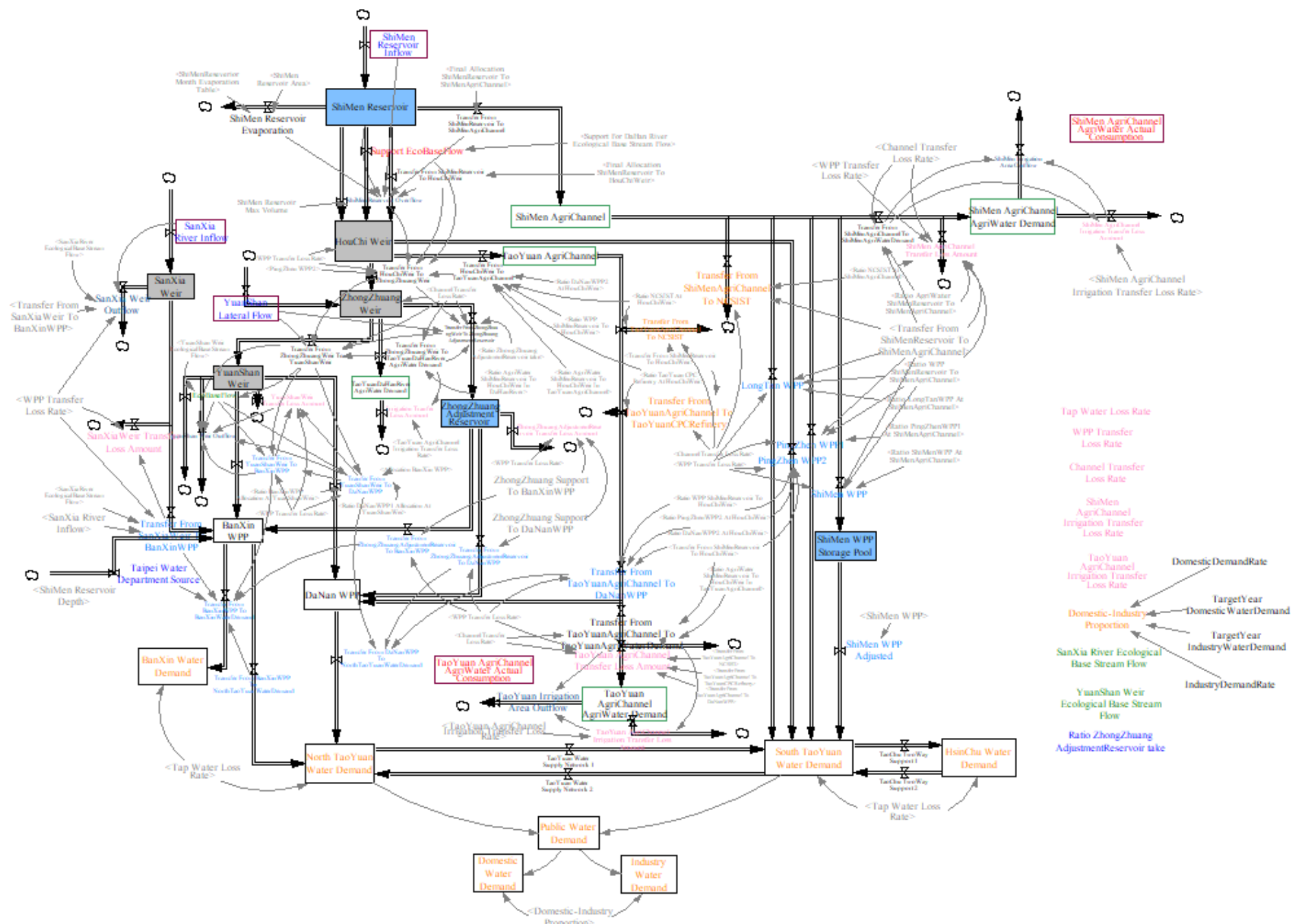


圖 22：桃園水資源系統動力模式

3.3.7 缺水風險指標

近年來風險分析在評估供水系統上有相當廣泛的應用，依據 Hashimoto et al. (1982); Knutson et. al. (1998) 可以利用回復力、可靠度、脆弱度等三項風險指標探討供水系統的供水能力。

(1) 回復力

回復力為系統處於失敗後再恢復正常運作的能力，本研究定義系統處於失敗後再恢復至正常運作的平均時間 (Mean Time to Repair, MTTR) 作為回復力的指標。

(2) 可靠度

可靠度為系統維持正常運作之機率，計算方式如式 (3-25) 所示。

$$\text{Rel} = \frac{MTTF}{(MTTR + MTTF)} \quad (3-25)$$

其中，Rel 代表可靠度指標，MTTF 為系統處於正常運作後到失敗的平均時間 (Mean Time to Failure, MTTF)。

(3) 脆弱度

脆弱度可以用以表示系統一旦失敗後可能受到的損害程度，因此本研究定義分析年間發生缺水事件時的^{最大總缺水量}為脆弱度指標。

第四章 應用案例研析



4.1 應用案例設計

本研究以產值高且十分仰賴水資源的半導體製造業為應用案例研析對象，由於涉及公司的保密資訊，本研究所使用的部分廠房數據及用水數據為參考個案之真實數據並根據文獻做合理假設。此假設案例廠房位於桃園市，主要提供半導體封裝與測試服務，員工人數為 14000 人。

4.1.1 案例廠房水平衡圖

案例廠房之水平衡圖如圖 23，主要用水相關單元包含民生、純水系統、製程、製程水循環回收系統、廢水處理設備、氣體洗滌塔、冷卻水塔及廠務公共用水。其中純水系統、製程及製程水循環回收利用系統合稱為製程系統；而氣體洗滌塔、冷卻水塔及廠務公共用水合稱為次級用水系統。廠房所使用之原水為自來水 (W)，取用自台灣自來水公司，進入廠房後可分為製程用水 (W1)、次級用自來水 (W2) 與民生用自來水 (W3)。製程系統中，純水系統製造超純水供製程使用，過程中依據水質及對水質的要求，純水系統的排水可以經過處理再回到純水系統 (c1)，或是提供給次級用水系統使用 (c2)，不能回收之廢水則排放至廢水處理設備 (d3)。製程排水通過製程循環回收利用系統，也可依據水質及對水質的要求分別回到純水系統 (c3) 或次級用水系統 (c4)，不能回收之廢水則排放至廢水處理設備 (d4)。除了自來水外，廠房亦準備空調冷凝水 (A1) 和雨水 (A2) 供次級用水使用，次級系統之排水水質較好的將重新回收再利用 (R1)，較差的則排放至廢水處理設備 (d5)。民生用水供使用後不予回收將直接排放，其他廢水經由廢水處理設備後，一部分可以回收再利用 (r4)，一部分則予以對外排放 (D2)。

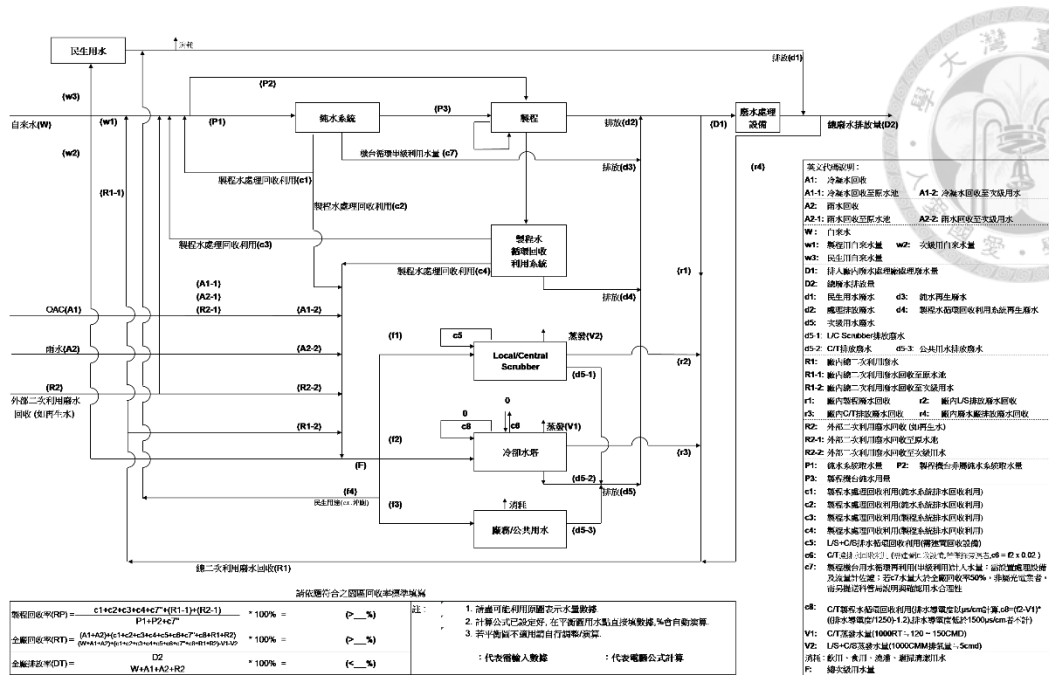


圖 23：案例廠房之水平衡圖

4.1.2 廠房水資源系統動力模式

根據廠房水平衡圖中供需水相關單元的相互關聯與儲水槽的設計容量，即可建立廠房水資源系統動力模式。當自來水進入廠房後儲存於原水儲槽與民生用水儲槽，如有其他原水來源如自行登記水權取水、契約供水等也可儲存於此。原水儲槽主要供超純水製造使用，亦為回收再利用儲槽的補充水源，而次級用水系統優先使用來自廢水回收處理系統之回收水，只有在回收水不足或回收處理系統異常時，才會補充自來水。民生用水儲槽供飲用、洗手、廚房等民生用途。雨水儲留儲槽與冷凝水儲槽則分別儲存雨水及空調冷凝水，二者皆用以供應次級用水系統。回收水依據製程複雜程度與廢水處理程度可分別儲存於不同之回收再利用儲槽，但可根據其是否可再進入純水系統大致可歸類為回收再利用儲槽（一）、回收再利用儲槽（二）。其中回收再利用儲槽（一）為儲存可回收至純水系統再使用者，回收再利用儲槽（二）為儲存供應次級用水系統者，因廢水回收需要運作時間，在此設計案例假設為一天的時間。此外，雖然儲水槽有一定容量限制，

但民生用水儲槽、回收再利用儲槽、冷凝水儲槽在一開始廠房建置時就有先經過設計評估，故假設在正常營運下不會受容量限制效能，在廠房水資源系統建置時僅考量原水儲槽與雨水儲留儲槽的大小。案例廠房包含水源及儲水槽的廠房水資源系統架構圖如圖 24 所示。

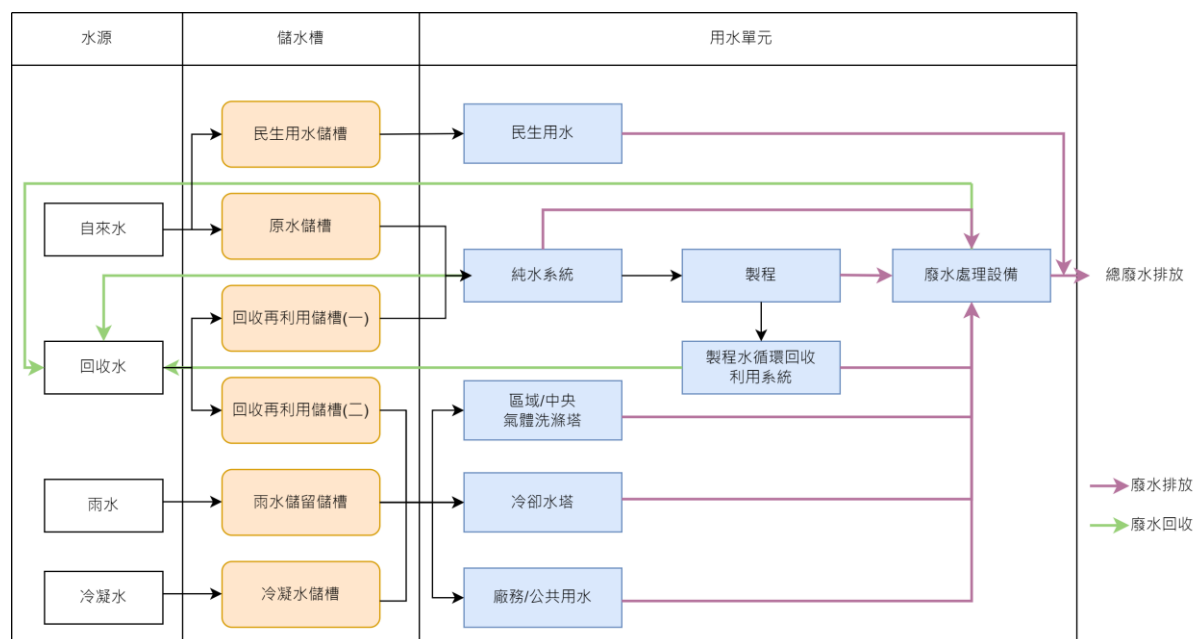


圖 24：案例廠房之水資源系統架構圖

為建立廠房水資源系統動力模式，須了解廠房內水資源系統及各個用水單元需水量及水源可供水量。考量製程水循環回收利用系統、廢水處理設備並不會有需水量的要求，故不納入計算。根據新竹科學工業園區用水計畫書範本以及本研究整理，各個用水單元需水量及水源可供水量計算方式說明如下：

- (1) 民生用水：一般以每人 0.03CMD 計算，如有廚房用水則以每人 0.06CMD 計算。
- (2) 製程用水：依據計算公式，製程耗水量 = 製程機台數 × 製程機台耗水量 × 產能利用率，而產能利用率則是指工廠實際總產出佔總產能的比率。
- (3) 純水系統：依據計算公式，純水系統耗水量 = $\frac{\text{製程耗水量}}{\text{純水系統造水率}}$ 。
- (4) 氣體洗滌塔：氣體洗滌塔之需水量包含了蒸發水量與排放水量，蒸發水

量若以 1000CMM 之排氣量為例，合理蒸發水量為 5CMD。排放水量之計算為洗滌液流量乘以操作時間。氣體洗滌塔需水量占廠房總體用水量比例極低，考量模擬資料可取得性與可操作性，模擬時本研究使用歷史月平均資料作為氣體洗滌塔需水量的輸入。

- (5) 冷卻水塔：冷卻水塔之需水量包含了蒸發水量與排放水量，根據計算公式，蒸發水量 = 循環水量 × 運作時間，其中循環水量又與冷凍噸有關。排放水量則依據冷卻水塔濃縮倍數調整。考量模擬資料可取得性與可操作性，在設備與系統操作流程不變的情況下，大部分廠房之冷卻水塔架設於屋頂，其耗水量主要影響因子為溫度。在未來季長期尺度冷卻水塔用水量的推估，本研究使用迴歸分析了解溫度與冷卻水塔之關係並建立冷卻水塔耗水量預測公式；在氣候變遷情境尺度，考量受較大不確定性影響，模擬時本研究使用歷史月平均資料作為冷卻水塔需水量的輸入。
- (6) 廠務/公共用水：以廠區每公頃面積 20CMD 計算。
- (7) 冷凝水：依據計算公式，冷凝水儲留量 = (空調箱入風絕對溼度 - 空調箱出風絕對溼度) × 單位空氣之重量 × 風量，考量模擬資料可取得性與可操作性，模擬時以歷史月平均資料作為冷凝水儲留量的輸入。
- (8) 雨水儲留：依據計算公式，雨水儲留量 = 日降雨量 × 集雨面積，且總雨水儲留量不可超過雨水儲留槽容量。
- (9) 回收再利用水量：水資源議題愈來愈重要，國內許多高科技廠都希望提高水資源使用效率例如提高水回收率，減少對自來水的依賴。而目前科學園區也有將製程回收率、全廠回收率、全廠排放率三個水量指標納入規定，在設備及操作沒有改變的情況下，回收率及排放率改變不大，許多廠內人員也會根據這三個指標的改變量判斷系統是否有異常情況發生。本研究沿用製程回收率的概念，不考量製程循環再利用水量，但考量廢水處理廠汙水處理所需的時間，以回收水回到純水系統和次級用水

系統的百分比分別計算回收再利用儲槽（一）、回收再利用儲槽（二）的可供水量。



本研究根據圖 24 案例廠房之水資源系統架構圖，加上各個用水單元需水量及水源可供水量計算規則，使用美國 Ventana 系統公司研發之系統動力學應用軟體 Vensim 進行案例廠房之水資源系統動力模式建構，圖 25 為 Vensim 建構之案例廠房之水資源系統動力模式，表 12 為統整模式主要的參數設定，其中性質欄主要目的為區分內外部參數，外部參數會受到區域影響，而內部參數主要受廠區運作的影響。

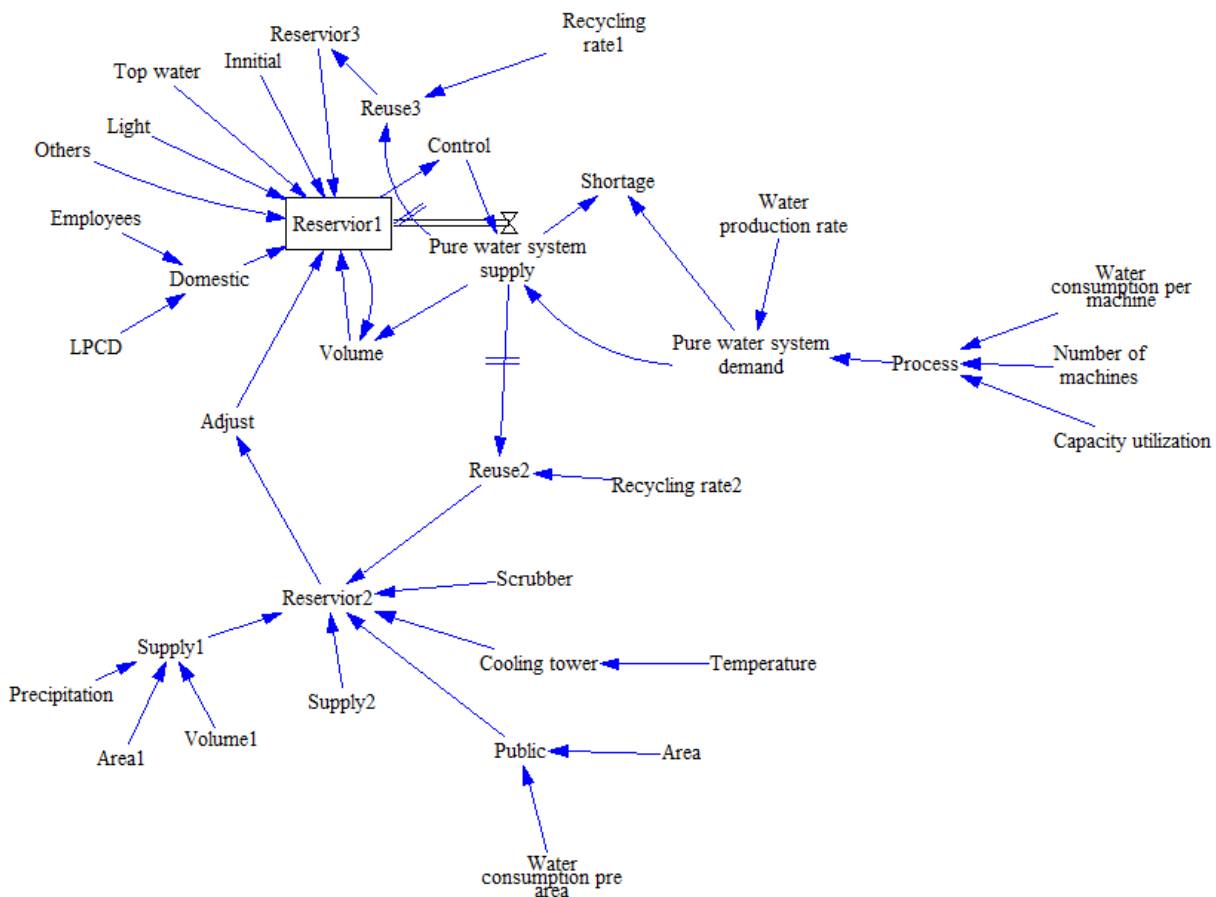


圖 25：案例廠房之水資源系統動力模式

表 12：Vensim 模式主要參數設定

參數	性質	數值	單位
製程 (Process)			
各製程機台用水量 (Water consumption per machine)	內部	20	CMD
機台數 (Number of machines)	內部	140	台
產能利用率 (Capacity utilization)	內部	0.88	%
純水系統 (Pure water system)			
純水系統造水率 (Water production rate)	內部	0.672	%
民生用水 (Domestic)			
每人每日月水量 (LPCD)	內部	0.03	CMD
員工數 (Employees)	內部	14000	人
氣體洗滌塔			
氣體洗滌塔需水量 (Scrubber)	內部	歷史月資料	CMD
冷卻水塔			
冷卻水塔需水量 (Cooling tower)	內部	利用溫度回歸/ 歷史月資料	CMD
溫度 (Temperature)	外部	氣象資料合成	°C
廠務/公共用水 (Public)			
廠區面積 (Area)	內部	108	公頃
每公頃面積用水量 (Water consumption per area)	內部	20	CMD
冷凝水			
冷凝水供給水量 (Supply2)	內部	歷史月資料	CMD
雨水儲留 (Supply1)			
降雨量 (Precipitation)	外部	氣象資料合成	mm
集雨面積 (Area1)	內部	200	m ²
雨水儲留槽容量 (Volume1)	內部	4000	m ³
原水儲槽 (Reservior1)			
自來水 (Top water)	外部	7700	CMD
其他水源 (Others)	外部	0	CMD
水情燈號 (Light)	外部	本研究推估	無
初始水量 (Initial)	內部	18000	m ³
蓄水設施容量 (Volume)	內部	18000	m ³

回收再利用儲槽（一）（Reservior3）			
回收再利用率 1 (Recycling rate1)	內部	0.7	%
回收再利用儲槽（二）（Reservior2）			
回收再利用率 2 (Recycling rate2)	內部	0.1	%

4.2 一至三個月季長期缺水風險預警

一至三個月季長期缺水風險預警需先取得案例廠房附近測站的歷史溫度資料與水庫集水區的歷史降雨資料，並根據季長期天氣展望資料，利用氣象合成模式產製未來一至三個月日溫度及雨量資料。雨量資料輸入 GWLF 水文模式推估水庫入流量，後續再透過區域水資源系統動力模式推估水庫未來蓄水量變化。最後經由石門水庫限水警戒值訂定成果轉換為水情燈號，提供給廠房以實現未來一至三個月缺水風險預警。

4.2.1 歷史氣象資料選用

設計案例廠房位於桃園市，因溫度資料用以推估廠區用水相關資訊，選用的測站為與廠房最近之中壢測站（C0C700）；雨量資料選用石門水庫集水區的八個雨量站，分別為鎮西堡、白石、玉峰、巴陵、高義、石門、嘎拉賀以及霞雲站，並且運用徐昇式法對雨量站建立權重進行加權平均，各雨量站位置如圖 26 所示，其相關資料如表 13 所示。因要結合季長期天氣展望的評估結果，後續氣象資料合成模式需使用的參數，則需要依照三分類完的歷史資料進行其參數的計算，雨量與溫度的各月份正常區間上、下限資料列於表 14。



圖 26：石門水庫集水區及本研究選用之雨量站（綠點部分）

表 13：石門水庫集水區雨量站資料

氣象局站號	站名	經度	緯度	高程	徐昇式權重
石門	21C050	121.240173	24.811242	255	0.04
霞雲	21C140	121.364941	24.792346	350	0.17
高義	21C080	121.361601	24.711187	620	0.09
巴陵	21C070	121.395272	24.685226	1220	0.08
玉峰	21D150	121.301136	24.659613	780	0.08
鎮西堡	21D170	121.306707	24.573784	630	0.26
嘎拉賀	21C090	121.399925	24.641542	1260	0.15
白石	21D160	121.260344	24.588561	1620	0.13

表 14：雨量與溫度的各月份正常區間上、下限

氣象因子 月份	累積月雨量 (mm)		平均月溫度 (°C)	
	下限	上限	下限	上限
一月	41.72	92.05	14.90	15.12
二月	43.71	111.14	14.38	15.63
三月	96.56	147.70	16.89	18.01
四月	97.11	179.27	19.90	21.43
五月	180.86	268.06	24.09	24.80
六月	217.00	345.38	26.80	27.60
七月	186.38	288.80	28.79	29.20
八月	138.68	536.58	28.20	28.80
九月	186.40	342.69	26.49	26.93
十月	57.49	162.39	22.90	23.82
十一月	26.12	49.92	20.10	21.11
十二月	34.16	75.34	15.60	16.63

4.2.2 基於完美預報之水情燈號推估

本研究基於未來一個月完美預報的假設，去除季長期天氣展望本身的預測不確定性，推估桃園地區 2021 年水情燈號，協助檢視推估未來水情燈號作為廠區乾旱預警的可行性。完美預報即將實際雨量區間作為預報結果，例如實際月雨量屬於偏低區間，則完美預報下月雨量偏低的機率為 100%。此外，因季長期天氣展望之預報為機率預報，為呈現其特性避免誤判，本研究在進行燈號推估時以兩百組系集為單位作為推估結果。此外水庫燈號警戒線僅適用於紅燈、橙燈、黃燈和水情正常，也就是無水情燈號，綠燈並無警戒線的制定，石門水庫限水警戒值如表 15，警戒值曲線如圖 27。面臨實際燈號綠燈的情況並不須要實施限水措施，故實際燈號的綠燈在蓄水量比對燈號與推估燈號都被歸類於無燈號。圖 28 為各月份推估燈號的分布情況，取兩百組系集中出現次數最多的燈號做為該月的水情燈號，表 16 為水情燈號的推估結果，第一列為水利署發布之實際燈號，第二列為蓄水量比對水庫限水警戒線之燈號，第三列則為本研究推估的燈號。從水情燈

號推估結果可以發現，因開會延遲或加入人為決策因素，水利署發布之實際水情燈號可能較蓄水量燈號變化更為緩慢。水情正常(無燈號)與水情異常(有燈號)以及水情化趨勢可以完全預測正確，有助於廠區對於未來水情的判斷。由於 2021 年初發生台灣近 56 年來最大的乾旱，桃園地區於 2020 年十月已開始發布水情燈號黃燈，期間政府陸續採取不同的乾旱備援措施，如停灌或優先取用埤塘及河川水供灌或新增備援水井等，因政府採取之備援措施無法提前被模式考量，故推估燈號在面臨長時間乾旱，政府發動乾旱備援時可能較實際燈號和蓄水量燈號略為嚴重。

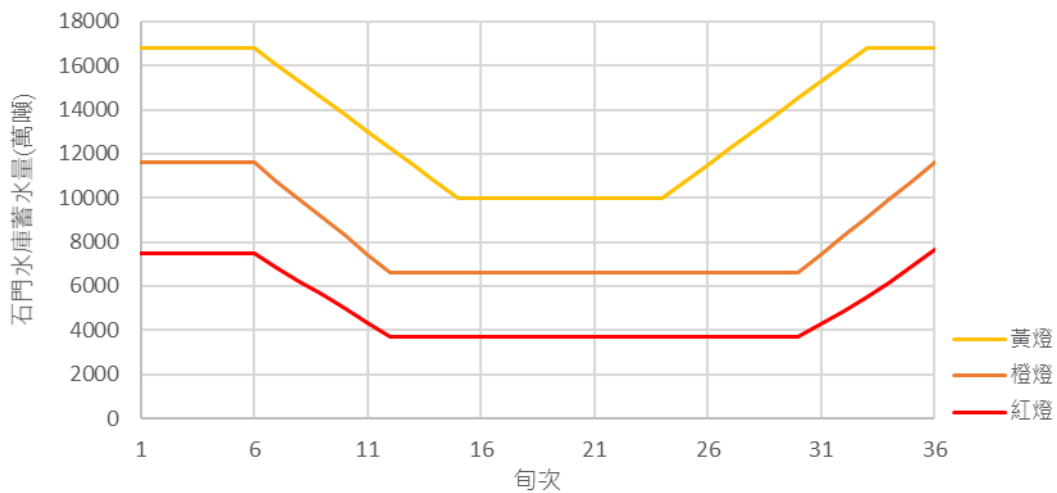


圖 27：石門水庫限水警戒值曲線

表 15：石門水庫限水警戒值

各警戒值之有效蓄水量 (萬噸)	1 月			2 月			3 月		
	上旬	中旬	下旬	上旬	中旬	下旬	上旬	中旬	下旬
黃燈	16803	16803	16803	16803	16803	16803	16047	15291	14535
橙燈	11600	11600	11600	11600	11600	11600	10767	9933	9100
紅燈	7481	7481	7481	7481	7481	7481	6851	6221	5591
各警戒值之有效蓄水量 (萬噸)	4 月			5 月			6 月		
	上旬	中旬	下旬	上旬	中旬	下旬	上旬	中旬	下旬
黃燈	13779	13024	12268	11512	10756	10000	10000	10000	10000
橙燈	8267	7433	6600	6600	6600	6600	6600	6600	6600
紅燈	4960	4330	3700	3700	3700	3700	3700	3700	3700
各警戒值之有效蓄水量 (萬噸)	7 月			8 月			9 月		
	上旬	中旬	下旬	上旬	中旬	下旬	上旬	中旬	下旬
黃燈	10000	10000	10000	10000	10000	10000	10756	11512	12268
橙燈	6600	6600	6600	6600	6600	6600	6600	6600	6600
紅燈	3700	3700	3700	3700	3700	3700	3700	3700	3700
各警戒值之有效蓄水量 (萬噸)	10 月			11 月			12 月		
	上旬	中旬	下旬	上旬	中旬	下旬	上旬	中旬	下旬
黃燈	13024	13779	14535	15291	16047	16803	16803	16803	16803
橙燈	6600	6600	6600	7433	8267	9100	9933	10767	11600
紅燈	3700	3700	3700	4297	4878	5502	6166	6879	7640

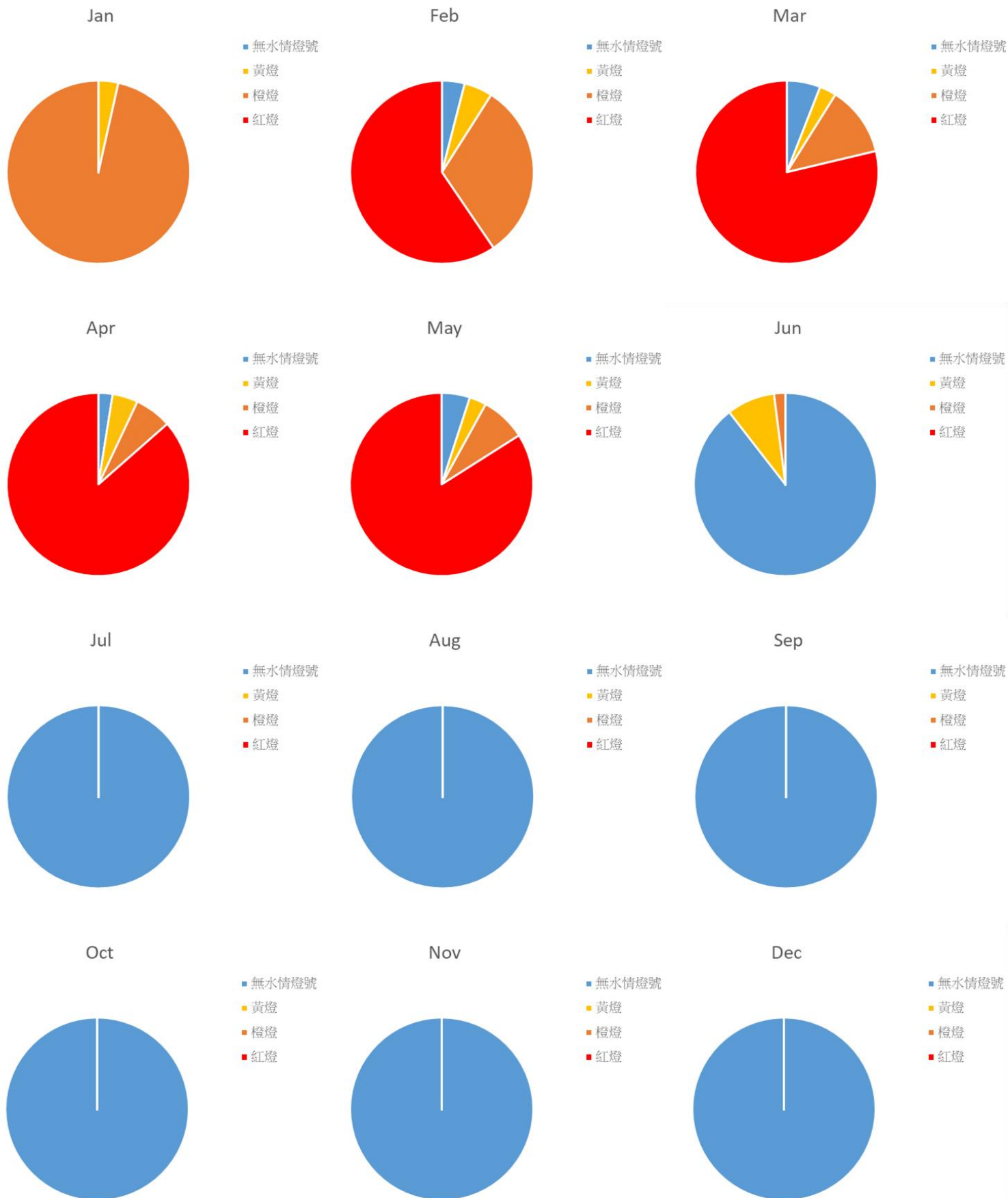


圖 28：2021 年桃園地區各月份推估燈號分布情況

表 16：在未來一個月完美預報的情況下 2021 年桃園地區的水情燈號推估結果

月份	一月	二月	三月	四月	五月	六月	七月	八月	九月	十月	十一月	十二月
實際燈號	黃燈	黃燈	黃燈	黃燈	橙燈	綠燈 (無)	無	無	無	無	無	無
蓄水量燈號	黃燈	橙燈	橙燈	橙燈	紅燈	無	無	無	無	無	無	無
推估燈號	橙燈	紅燈	紅燈	紅燈	紅燈	無	無	無	無	無	無	無

4.2.3 實際燈號與蓄水量燈號比對校正

因水情燈號的決定涉及人為開會決策，會議的不確定因素與開會的時間延遲可能會造成直接以警戒值判斷水情燈號的誤差。因此本研究假設水利署決定水情燈號的模式會與歷史一致，利用歷史上自 2011 年起實際發布之水情燈號與蓄水量比對警戒值之水情燈號的統計關係進行推估的水情燈號校正。實際燈號與蓄水量燈號比較如圖 29 所示，縱軸的部分 0 至-3 分別代表水情正常、黃燈、橙燈及紅燈，方便後續相關係數及 RMSE 之計算。蓄水量比對發生燈號但實際並未發布燈號十一年內僅發生五次，原因可能為當時推測未來並不會持續缺水；排除蓄水量燈號異常但實際無燈號的事件後，蓄水量燈號為黃燈時，實際燈號可能為黃燈或無燈號，當蓄水量燈號橙燈以上，水庫蓄水量減少時實際燈號通常較蓄水量燈號輕微一個燈號，水庫蓄水量增加時實際燈號通常較蓄水量燈號嚴重一個燈號。通過上述資訊建立以下校正規則，校正後之蓄水量燈號與實際燈號比較如圖 30 所示，表 17 為實際燈號與校正前後蓄水量燈號之相關係數與 RMSE，可以發現校正後的相關係數與 RMSE 皆較未校正時表現更好。利用此校正規則將修正後的蓄水量燈號代換為推估燈號即可修正 2021 年桃園地區的水情燈號推估結果如表 18 所示。

1. 當蓄水量燈號並未出現橙燈或僅出現短暫黃燈（三個內），蓄水量燈號將修正為無燈號作為校正後燈號。

2. 當蓄水量燈號為黃燈或無燈號時，將不做修正；當蓄水量燈號為橙燈以上且相較於上個月更為嚴重時，將蓄水量燈號減輕一級作為校正後燈號；當蓄水量燈號為橙燈以上且相較於上個月較不嚴重時，將蓄水量燈號增加一級作為校正後燈號；當蓄水量燈號為橙燈以上且與上個月維持一致時，將不做修正。

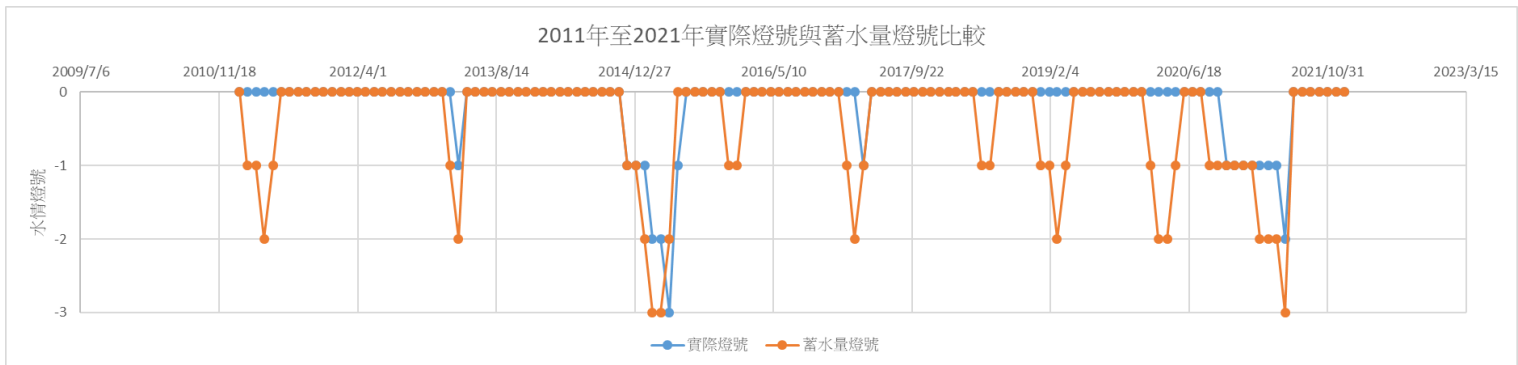


圖 29：實際燈號與蓄水量燈號比較

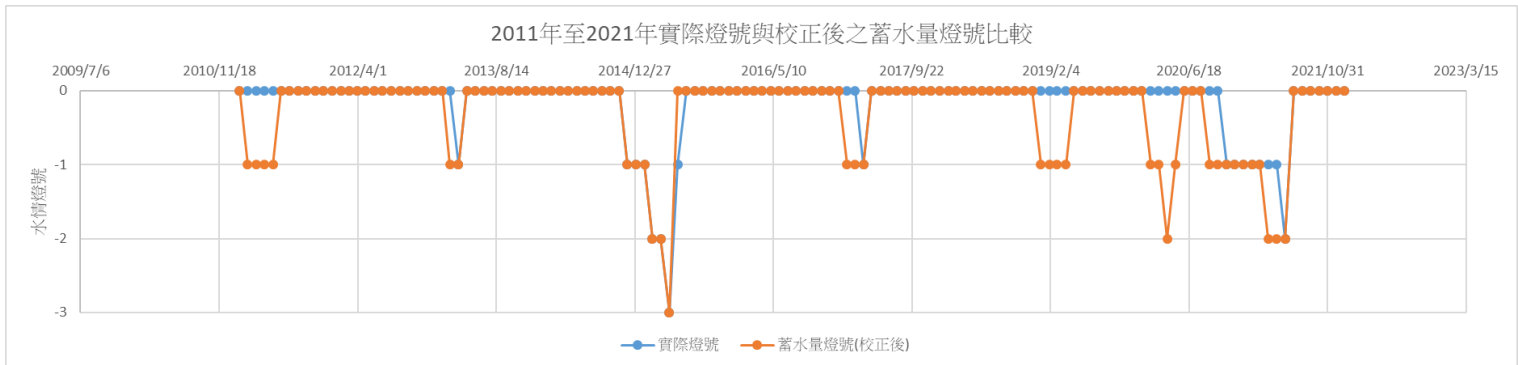


圖 30：實際燈號與校正後之蓄水量燈號比較

表 17：實際燈號與校正前後蓄水量燈號之相關係數與 RMSE

指標	r	RMSE
校正前	0.69	0.6
校正後	0.75	0.42

表 18：校正後之 2021 年桃園地區的水情燈號推估結果

月份	一月	二月	三月	四月	五月	六月	七月	八月	九月	十月	十一月	十二月
實際燈號	黃燈	黃燈	黃燈	黃燈	橙燈	綠燈/ 無	無	無	無	無	無	無
蓄水量燈號	黃燈	橙燈	橙燈	橙燈	紅燈	無	無	無	無	無	無	無
推估燈號	橙燈	紅燈	紅燈	紅燈	紅燈	無	無	無	無	無	無	無
推估燈號 (校正後)	黃燈	橙燈	紅燈	紅燈	紅燈	無	無	無	無	無	無	無

4.2.4 缺水風險預警

此章節實際擷取 2022 年 3 月 31 日與 2022 年 4 月 30 日實際發布之季長期天氣展望進行水情燈號的推估，並討論缺水風險預警之成效。兩次季長期天氣展望台灣北部的預報結果如表 19 與表 20。採用此三分類機率，並利用輪盤法進行兩百組系集的模擬。

表 19：台灣北部地區四至六月季長期預報（資料發布日期 2022/3/31）

月份	四月			五月			六月		
	偏低	正常	偏高	偏低	正常	偏高	偏低	正常	偏高
雨量預報 機率 (%)	30	50	20	30	50	20	30	50	20

表 20：台灣北部地區五至七月季長期預報（資料發布日期 2022/4/30）

月份	五月			六月			七月		
	偏低	正常	偏高	偏低	正常	偏高	偏低	正常	偏高
雨量預報 機率 (%)	30	50	20	30	50	20	20	60	20

圖 31 與圖 32 為依據 2022 年 3 月 31 日與 2022 年 4 月 30 日實際發布之季長期天氣展望進行石門水庫蓄水量模擬的結果，黑色實線為截至六月石門水庫實際蓄水量變化，藍色實線為兩百組系集的模擬結果；圖 33 與圖 34 為推估燈號的分布情況，取兩百組系集中出現次數最多的燈號做為該月的水情燈號；表 21

與表 22 為水情燈號推估結果，第一列為水利署發布之實際燈號，第二列為蓄水量比對水庫限水警戒線之燈號，第三列為本研究推估的燈號，第四列則為校正後的推估燈號，空格處為目前截至六月尚未有完整數據。

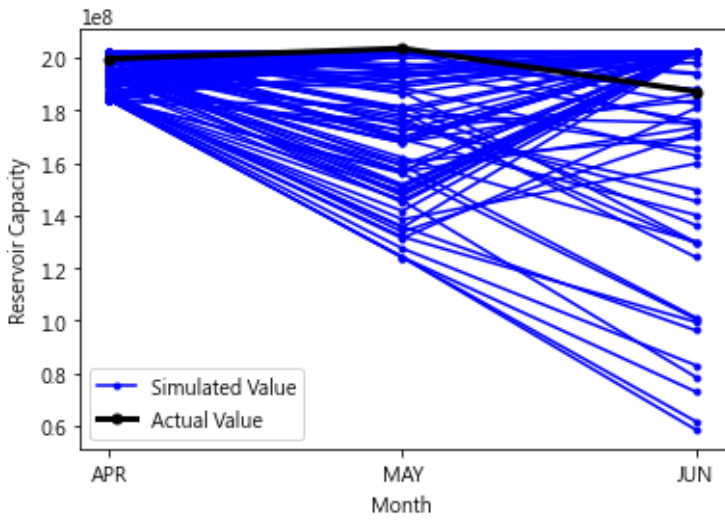


圖 31：石門水庫四月至六月蓄水量推估

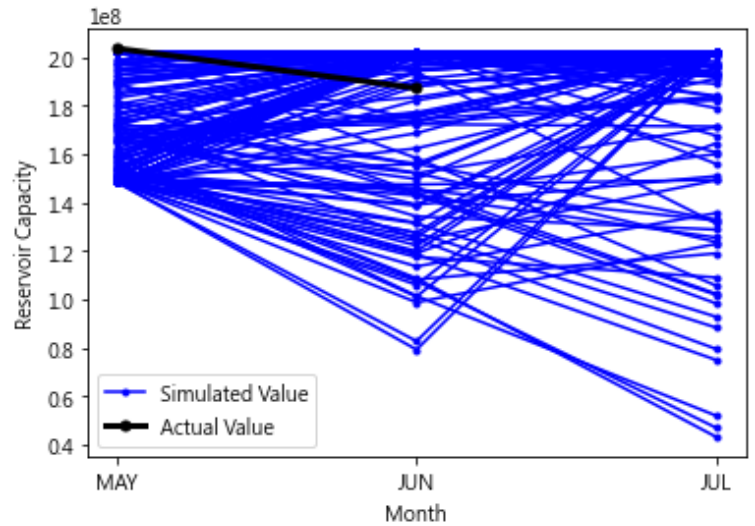


圖 32：石門水庫五月至七月蓄水量推估

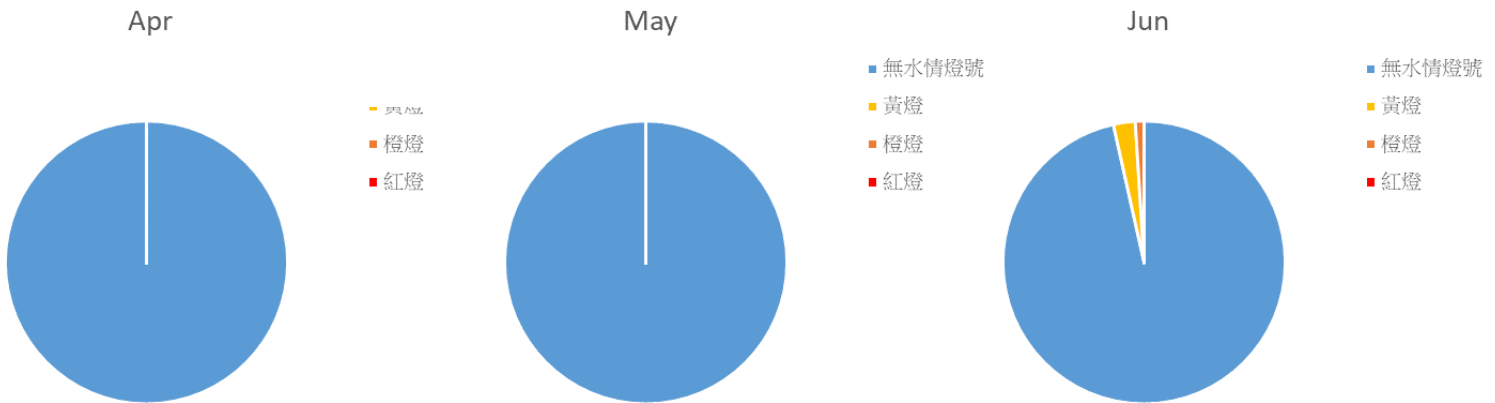


圖 33：石門水庫四月至六月推估燈號分布

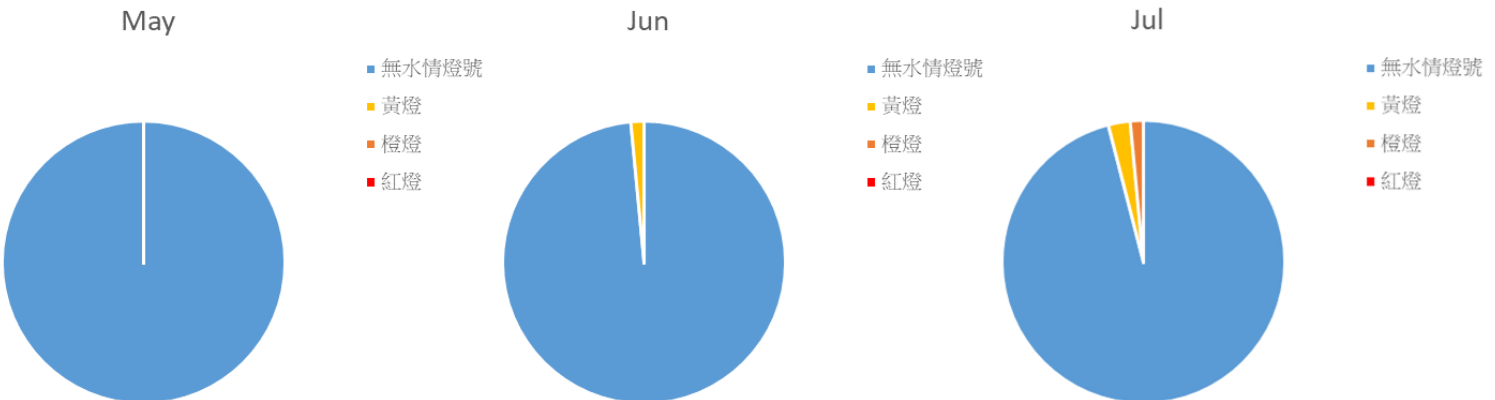


圖 34：石門水庫五月至七月推估燈號分布

表 21：石門水庫四月至六月
水情燈號推估結果

月份	四月	五月	六月
實際燈號	無	無	無
蓄水量燈號	無	無	無
推估燈號	無	無	無
推估燈號 (校正後)	無	無	無

表 22：石門水庫五月至七月
水情燈號推估結果

月份	五月	六月	七月
實際燈號	無	無	無
蓄水量燈號	無	無	無
推估燈號	無	無	無
推估燈號 (校正後)	無	無	無

依據 2022 年 3 月 31 日與 2022 年 4 月 30 日實際發布之季長期天氣展望進行未來三個月水情燈號推估的結果顯示，截至目前（六月底）實際燈號、蓄水量燈號與推估燈號皆十分一致，有無燈號可以完全預測正確。另外，季長期的水情燈號預測的準確度直接受限於季長期天氣展望的準確度，若檢視三月底實際發布的季長期天氣展望，四、五、六月皆以正常的機率最高，為 50%，但觀察實際的降雨情形僅有六月預報正確，四月與五月的真實降雨量各屬於偏低與偏高區間，四月底實際發布的季長期天氣展望也有類似情況。因多數推估月份位於豐水期，對於預報誤差的容忍度較高、敏感度較低，在預報具有些微誤差的情況下水情燈號仍能推估正確，但枯水期時，降雨量的多寡將直接反應在燈號的轉變，故對於預報誤差的容忍度較低、敏感度較高，季長期天氣展望的準確度對於水情燈號的預測至關重要。整體而言，利用此方法能合理推估未來一至三個月的水情燈號變化，對於廠區具有一定參考性，推估燈號不確定性的主要來源為季長期天氣展望的預報誤差。

4.2.5 GWLF 模式與桃園水資源系統動力模式驗證

本研究使用 2008 年至 2012 年石門水庫入流量驗證 GWLF 模式，驗證指標採用相關係數 (r)、效率係數 (CE) 以及持續係數 (CP)，由於後續推估均為月時間尺度，因此同樣選用月時間尺度進行驗證，驗證結果表 23，模擬流量與實

際流量的趨勢比較如圖 35。CE 代表相較於用平均值預測，模式提供之預測能力；CP 則代表相較於用前一個時刻之實際流量作預測下，模式提供之預測能力，兩者皆為越接近 1 模擬表現越好。從驗證結果可以看出，模擬在各個指標上都有很好的表現，並且流量在趨勢上相當一致。

表 23：GWLF 驗證結果

指標	r	CE	CP
數值	0.98	0.94	0.97

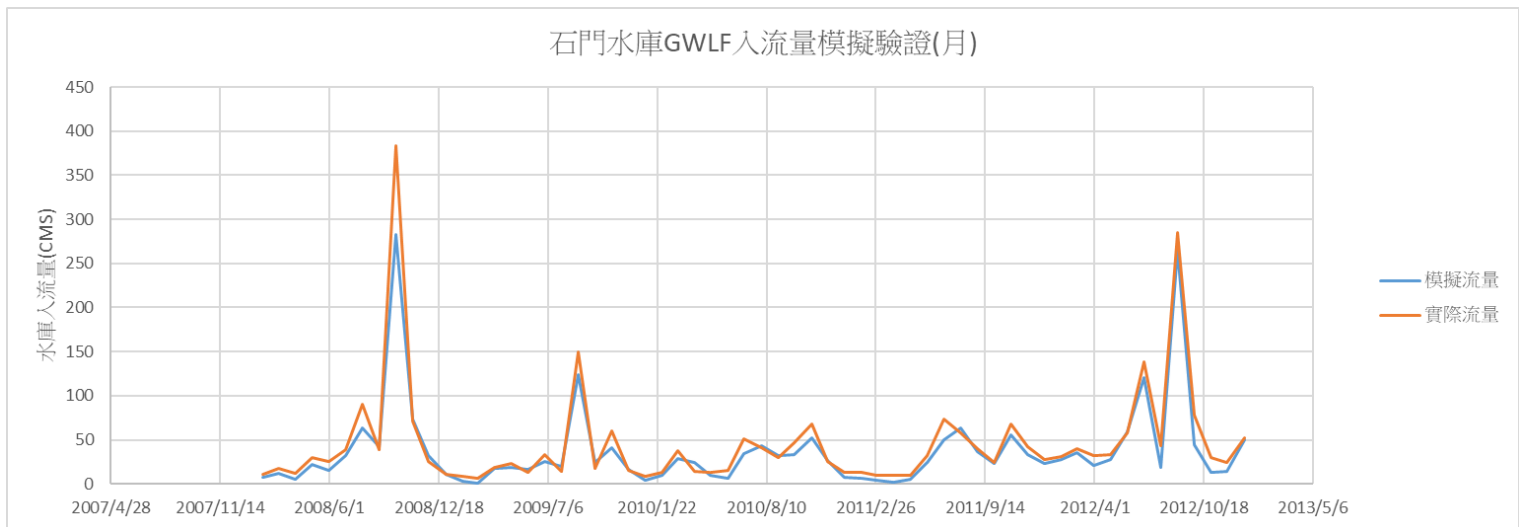


圖 35：GWLF 月尺度石門水庫 2008 年至 2012 年入流量模擬結果

本研究使用桃園地區水資源系統動力模式模擬石門水庫 2016 年、2019 年及 2021 年的蓄水量變化，分別代表豐水年、平常年及乾早年，水庫模擬蓄水量與實際蓄水量的比較如圖 36、圖 37 及圖 38。2021 年乾早年模擬流量相對於實際流量的缺水情形更嚴重，因為模式不考慮休耕或優先取用埤塘及河川水供灌等非規定於水庫操作歸線中的人為調動，導致水庫蓄水量下降較快並且有回升延遲的現象。當水庫回復至正常供水時，模擬流量與實際流量則逐漸趨於一致。2016 年豐水年與 2019 年正常年，在供水正常，無人為調動的情況下模擬結果良好。整體而言，桃園地區水資源系統動力模式能有效反映水庫蓄水量的變化，有助於後續的水情燈號推估。

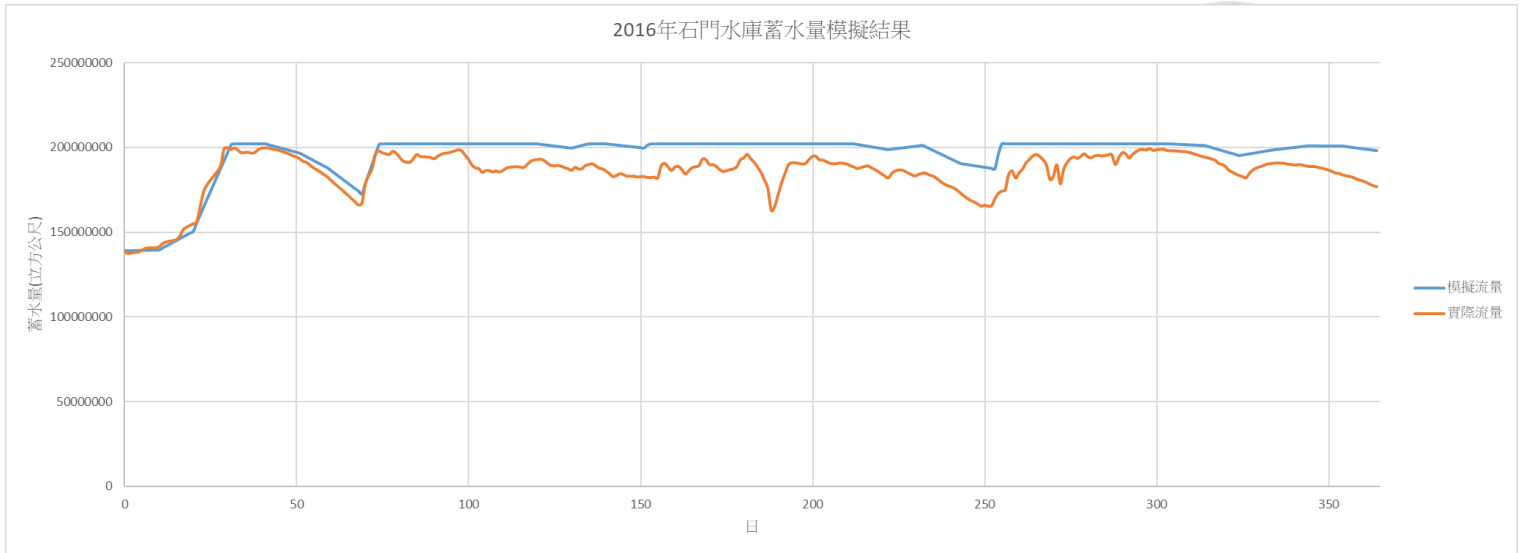


圖 36：2016 年石門水庫蓄水量模擬結果（豐水年）

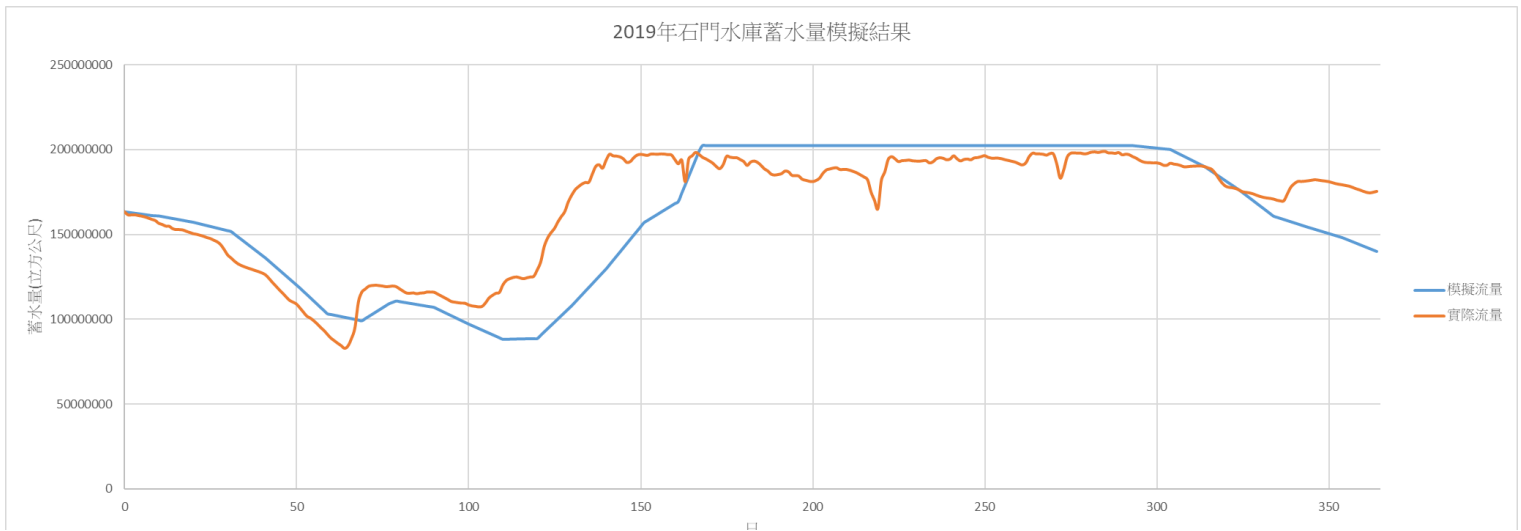


圖 37：2019 年石門水庫蓄水量模擬結果（正常年）

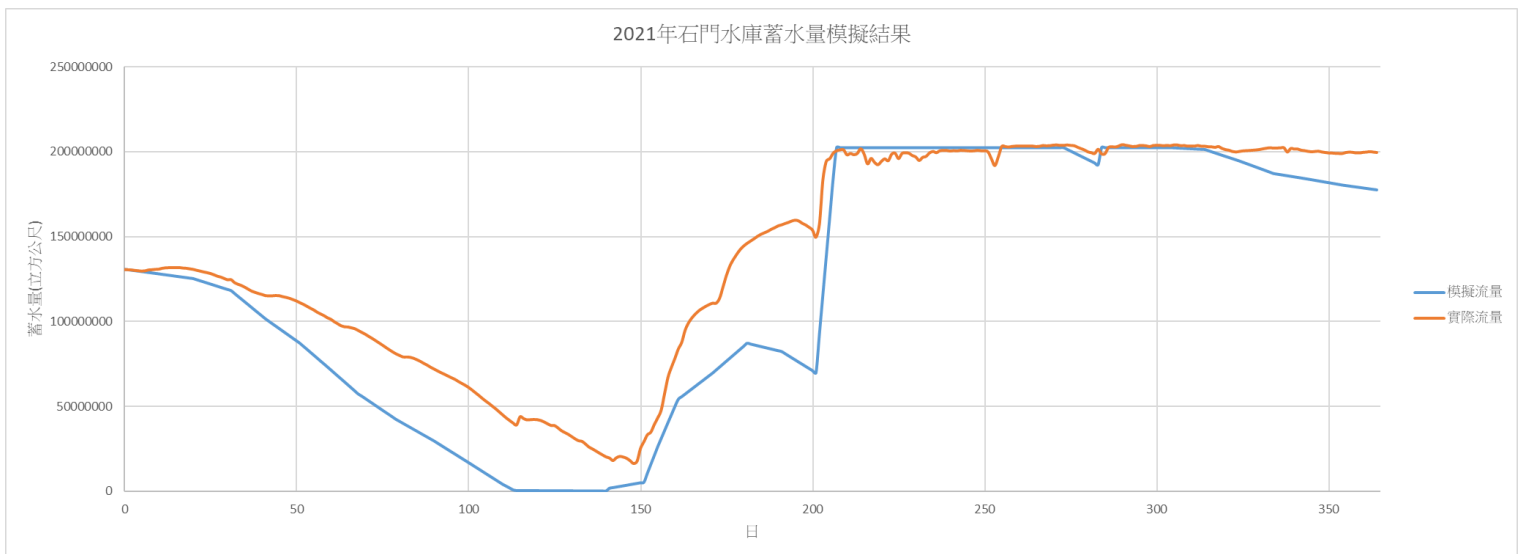


圖 38：2021 年石門水庫蓄水量模擬結果（乾旱年）



4.3 氣候變遷下缺水風險評估

在評估未來氣候變遷時間尺度的缺水風險時，需考量不同溫室氣體排放情境的氣候預測結果。本研究使用 Muti-WG 模式（林宗毅，2019）配合歷史雨量資料產製不同情境與時間組合下各 10 組 20 年之日降雨資料，以供後續分析使用。將產製之降雨資料輸入 GWLF 水文模式推估水庫入流量，後續再透過區域水資源系統動力模式推估水庫未來蓄水量變化。最後經由石門水庫限水警戒值訂定成果轉換為水情燈號，做為區域供水對於廠區的影響，以此鏈結廠區缺水風險。廠區的部分利用本研究建置之廠房水資源系統動力模式並採用回復力、可靠度、脆弱度等三項風險指標探討供水系統的供水能力。

4.3.1 情境設定與模式選擇

本研究同樣採用 IPCC AR6 報告中的情境設定，並且選用 CMIP6 中的多種模式進行分析。為回應氣候變遷下不同時間尺度的風險，同時考量企業的時間特性，選用短期（2021-2040 年）與中期（2041-2060 年）兩種時間尺度，其中短期代表 2030 年的情況，中期則代表 2050 年的情況。情境的選用包含 SSP1-1.9、SSP1-2.6、SSP2-4.5 與 SSP5-8.5 四種情境。2015 年巴黎協定目標推動希望在 2050 年達成淨零碳排，則只有限制溫度上升在 1.5 攝氏度的 SSP1-1.9 情境符合此條件，因此優先將有 SSP1-1.9 情境的模式納入候選名單。候選名單中，除了有 SSP1-1.9 情境的模式，本研究亦將過去研究中台灣區域表現良好的模式及中研院團隊自主建置之台灣地球系統模式納入。

雖然每個模式都有經過驗證，對於台灣氣候特性的模擬，並非所有模式都具有優良表現。因此，本研究採用林嘉佑於 2016 年挑選適合台灣 GCM 之方法，通過計算各模式基期（1995-2014 年）與歷史資料的年相關係數、乾季（11-4 月）之正規化均方根誤差（RMSE）與溼季（5-10 月）之正規化均方根誤差（RMSE）等指標將各模式排名，並且剔除各項指標中排名最後的模式後將三項排名加總，

挑選總名次較少的模式作為優先選取的模式，各個模式的排名結果如下表 24。本研究最後選用之模式及其對應之氣候情境整理於表 25。其中，除了 HadGEM3-GC31-LL 與 TaiESM1 尚無 SSP1-1.9 的情境外，其他模式都具有所選四個情境的資料。


表 24：候選模式各指標排名列表

模式	年相關係數 排名	乾季 RMSE 排名	濕季 RMSE 排名	剔除與否	總名次	是否選用
CAMS-CSM1-0	4	2	12	否	18	是
IPSL-CM6A-LR	11	1	13	是		否
MIROC6	12	8	3	否	23	否
MIROC-ES2L	8	4	8	否	20	是
MRI-ESM2-0	6	6	10	否	22	否
CanESM5	13	5	5	是		否
CNRM-ESM2-1	1	13	2	是		否
EC-Earth3-Veg-LR	3	7	7	否	17	是
FGOALS-g3	7	12	6	否	25	否
GFDL-ESM4	9	3	9	否	21	是
UKESM1-0-LL	2	11	11	否	24	否
HadGEM3-GC31-LL	10	10	1	否	21	是
TaiESM1	5	9	4	否	18	是

表 25：本研究使用之模式及其對應氣候情境列表

模式	SSP1-1.9	SSP1-2.6	SSP2-4.5	SSP5-585
CAMS-CSM1-0 (中國)	✓	✓	✓	✓
MIROC-ES2L (日本)	✓	✓	✓	✓
EC-Earth3-Veg-LR (歐洲)	✓	✓	✓	✓
GFDL-ESM4 (美國)	✓	✓	✓	✓
HadGEM3-GC31-LL (英國)	-	✓	✓	✓
TaiESM1 (台灣)	-	✓	✓	✓

4.3.2 氣候變遷情境下之水情燈號推估



本研究推估桃園地區在氣候變遷情境下水情燈號的變化，後續將用以廠區缺水風險的評估。黃燈及橙燈次數的增減可能伴隨限水比例更多的燈號發生，若單純觀察黃燈或橙燈的變化並不能呈現區域水情的全貌。因此，水情燈號會著重於限水比例最高的紅燈以及水情異常的部分，其中水情異常為黃燈、橙燈、紅燈等任一可能實施限水措施的燈號加總。水情燈號的推估結果不同模式與情境以年份的呈現結果如圖 39 至圖 42，圖中縱軸皆為一年中平均發生月數，紅色參考線用以方便與基期比較。推估結果中可以發現各模式間存在誤差，不論 2030 年或 2050 年，皆以 HadGEM3-GC31-LL 模式的推估結果最為嚴峻。為綜合考量所有模式的結果且方便比較，後續以模式平均值並加入誤差線呈現各情境及年份紅燈及水情異常發生情況的變化趨勢，如下圖 43 至下圖 46，圖中紅色參考線同樣用以與基期比較。由各情境紅燈及水情異常發生情況變化趨勢可以發現，在 2050 年以前除了 SSP1-1.9 情境可以持平或略微下降，其他情境的水情燈號相較於基期都有更加嚴峻的趨勢。比較年份與情境，平均值最嚴重之情況發生在 2030 年 SSP5-8.5 的情境，但至 2050 年與 SSP1-2.6 及 SSP2-4.5 兩個情境相似。加入模式誤差考量，從 SSP1-1.9 情境、SSP1-2.6 情境、SSP2-4.5 情境至 SSP5-8.5 情境，正誤差呈現逐步上升趨勢，代表極端事件的發生也呈現上升趨勢。



2030年紅燈發生情況

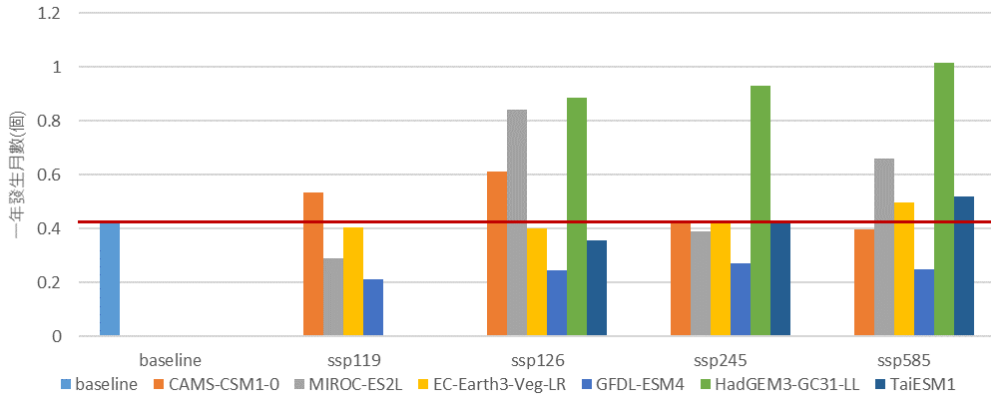


圖 39：2030 年各情境紅燈發生狀況

2050年紅燈發生情況

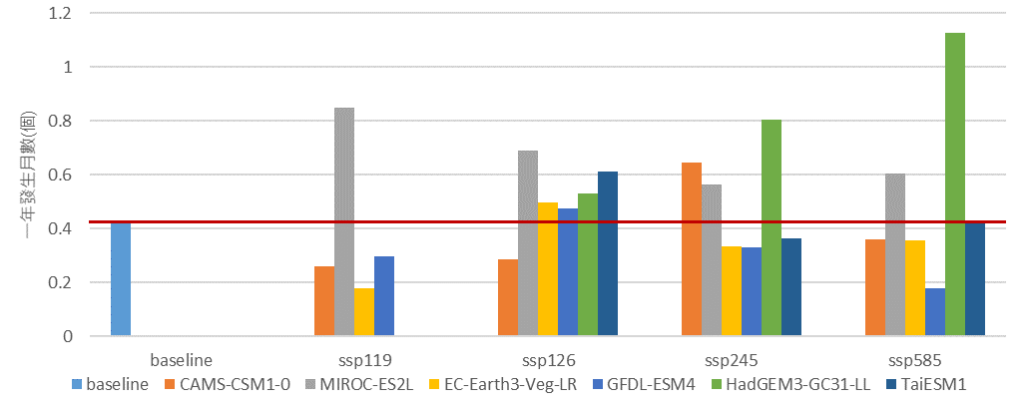


圖 40：2050 年各情境紅燈發生狀況

2030年水情燈號異常發生情況

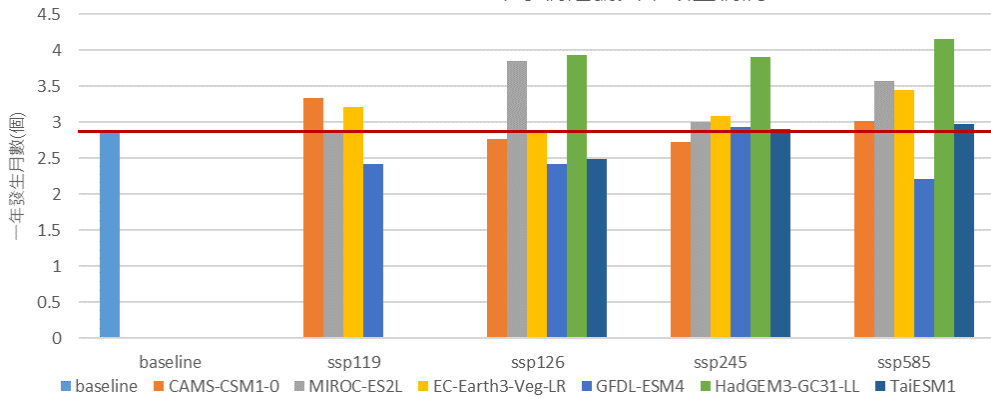


圖 41：2030 年各情境水情異常發生狀況

2050年水情燈號異常發生情況

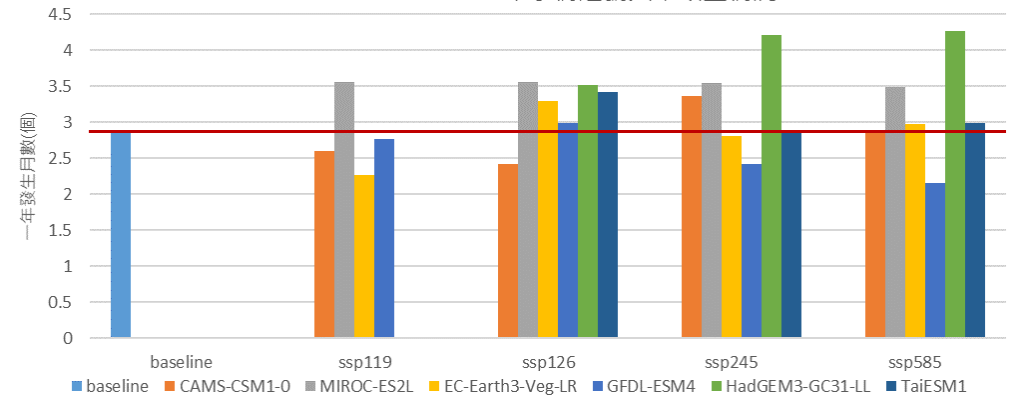


圖 42：2050 年各情境水情異常發生狀況



各情境紅燈發生情況變化趨勢

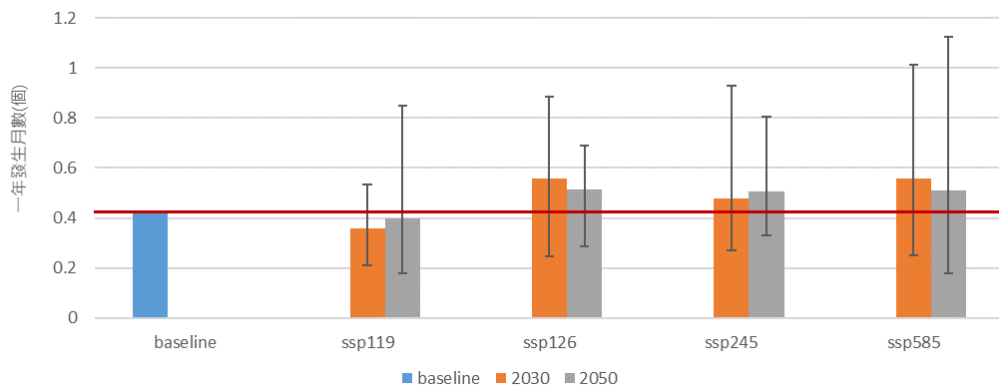


圖 43：各情境紅燈發生情況變化趨勢

各情境水情異常發生情況變化趨勢

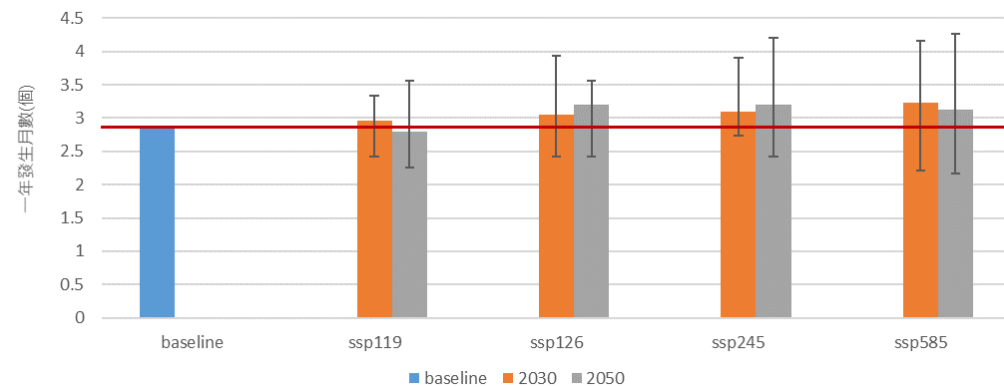


圖 44：各情境水情異常發生情況變化趨勢

各年份紅燈發生情況變化趨勢

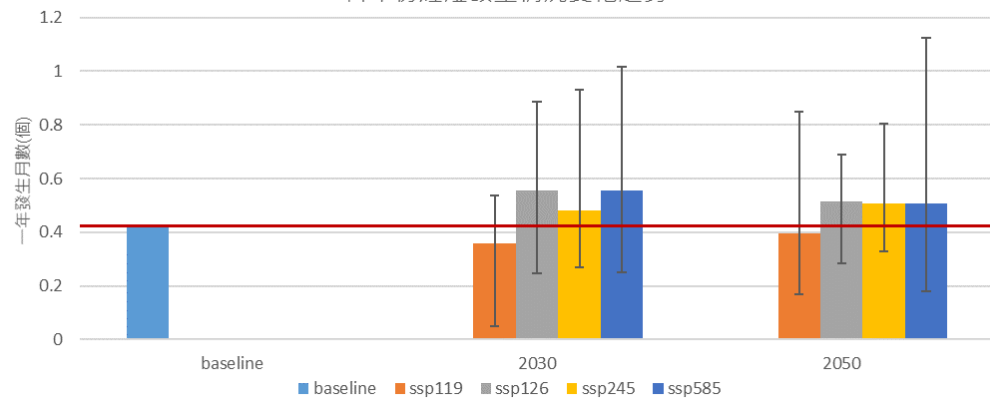


圖 45：各年份紅燈發生情況變化趨勢

各年份水情異常發生情況變化趨勢

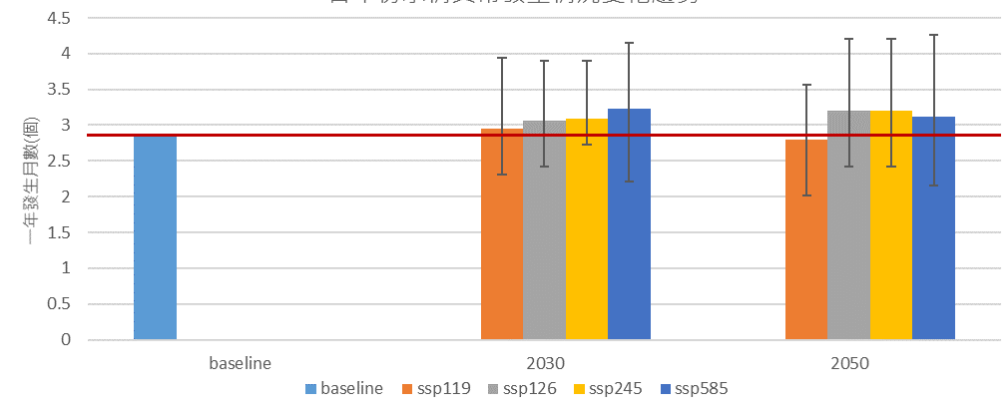


圖 46：各年份水情異常發生情況變化趨勢



4.3.3 氣候變遷對於桃園地區的供水影響

從上一節中推估桃園地區在氣候變遷情境下水情燈號的結果可以發現，在 2050 年仰賴化石燃料的 SSP5-8.5 情境相較於 2030 年水情相對減緩，並且與同年除 SSP1-1.9 情境外之情境大致相同。台灣的乾季為十一月至隔年四月，溼季則為五月至十月，為更深入探討氣候變遷下降雨模式改變對於桃園地區的供水影響，本研究利用五組測試透過改變特定月平均降雨，比較乾濕季改變後桃園地區水情燈號的變化，五組測試的設定如下表 26。測試一至三的目的為觀察在溼季轉變為乾季時，分別以不同的改變程度探討乾季越乾溼季越溼對於供水的影響；測試四為觀察在乾季轉變為溼季時，乾季越乾溼季越溼對於供水的影響；測試五則為討論農業大宗供水前後降雨改變，包含供水前的蓄水月份雨量增加，供水期間的月份雨量減少對於供水的影響。

表 26：五組測試之月平均降雨改變設定列表

測試	目的	月份											
		一	二	三	四	五	六	七	八	九	十	十一	十二
測試一	溼季轉變為乾季時，乾季越乾溼季越溼	1	1	1	1	1	1	1	1	1.2	1.2	0.8	0.8
測試二		1	1	1	1	1	1	1	1	1.1	1.1	0.9	0.9
測試三		1	1	1	1	1	1	1	1	1.2	1.2	0.9	0.9
測試四	乾季轉變為溼季時，乾季越乾溼季越溼	1	1	0.9	0.9	1.1	1.1	1	1	1	1	1	1
測試五	農業大宗供水前後降雨改變	0.9	0.9	0.9	0.9	1	1	1	1	1.1	1.1	1.1	1.1

考量黃燈及橙燈次數的增減可能伴隨限水比例更多的燈號發生，若單純觀察黃燈或橙燈的變化並不能呈現區域水情的全貌。因此，水情燈號的討論同樣會著重於限水比例最高的紅燈以及水情異常的部分。測試結果紅燈的發生情況如圖 47，水情異常的發生情況如圖 48，紅色參考線用以方便與基期比較。觀察溼季

轉變為乾季時，乾季越乾濕季越溼的三組測試，測試一在九月十月極溼(1.2 倍)，十一月十二月極乾(0.8 倍)的情況下紅燈與水情異常的發生情況都較基期更為嚴峻，但在測試二時，雖然同時維持乾季越乾溼季越溼的特徵，九月十月降雨增加較少(1.1 倍)，十一月十二月降雨量減少亦較少(0.9 倍)時，紅燈的發生情況會出現減緩的情形，在測試三時，十一月十二月降雨量減少較少(0.9 倍)，但九月十月一樣維持極溼(1.2 倍)時，紅燈與水情異常的發生情形都較基期下降。觀察乾季轉變為溼季時，乾季越乾濕季越溼的測試四，三月四月的降雨量減少(0.9 倍)，五月六月降雨量增加(1.1 倍)時，因乾季時農業灌溉的大宗用水使水庫來不及補充，紅燈與水情異常的發生情況都較基期增加。觀察測試五，若農業灌溉的大宗供水前蓄水月份雨量增加，供水期間的月份雨量減少，雖然因水庫有機會補足，紅燈發生情況較基期減少但同樣因為乾季末期水庫來不及補充，水情異常的發生情況較基期增加。總結上述測試，氣候變遷下乾季越乾溼季越溼的特徵不完全會使桃園地區的水情趨於嚴峻，在溼季水庫有得到補足且乾季略為變乾的情況下，水情甚至可能有趨緩的情形。

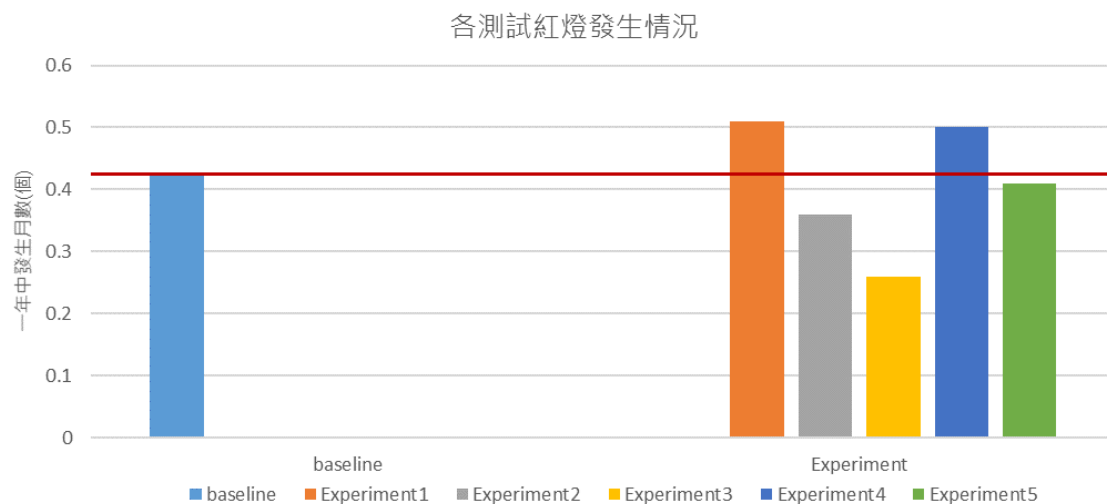


圖 47：各測試紅燈發生情況

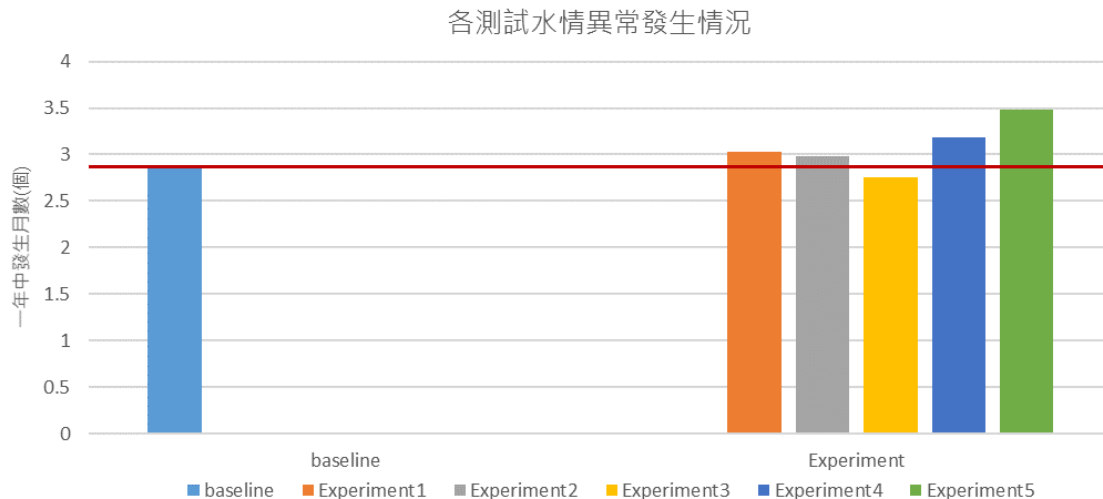


圖 48：各測試水情異常發生情況

4.3.4 氣候變遷下廠區缺水風險評估

案例廠房位於桃園地區，主要水源為自來水，故桃園地區的水情燈號將直接影響廠區供水。本研究透過水情燈號的限水比例鏈結廠房水資源系統動力模式，並使用回復力、可靠度、脆弱度等三項風險指標探討廠房供水系統的供水能力，以此評估缺水風險。為使限水比例更貼近實際情況，本研究經過彙整旱災中央災害應變中心歷次工作會報估算桃園地區在各水情燈號下的限水比例，如表 27 所示。時間尺度沿用 2030 年與 2050 年，情境的部分因 2050 年以前在 SSP1-1.9 情境下，水情狀況可以持平或略微減緩，故廠區的缺水風險評估僅針對 SSP1-2.6、SSP2-4.5 與 SSP5-8.5 三種情境。此外因廠房水資源系統動力模式未納入人為決策影響，風險指標的計算不考慮廠區面臨乾旱時可能採取的任何應變措施，如叫水車或調整製程。本研究後續會參考災害防治的概念，通過計算十年回歸週期的缺水事件來評估不同的調適選項，故此處亦採用十年回歸週期的缺水情況評估不同情境及年份的風險指標變化，為綜合考量所有模式的結果且方便比較，以模式平均值並加入誤差線呈現，如圖 49 至圖 51，紅色參考線用以方便與基期比較。

回復力為系統處於失敗後再恢復正常運作的能力，本研究定義系統處於失敗後再恢復至正常運作的平均時間（Mean Time to Repair, MTTR）作為回復力的指

標，故 MTTR 值越小，系統的回復力越佳。可靠度為系統維持正常運作之機率，故 Rel 值越接近一即越大，系統的可靠度較佳。本研究定義以一次事件的最大總缺水量為脆弱度，故一次事件的最大總缺水量越多，系統的脆弱度越高。整體來說，一系統之回復力越高，可靠度越高，脆弱度越低，則系統的缺水風險較低。基期顯示，十年回歸週期的缺水事件的 MTTR 為 84.8 天，Rel 為 52%，一次事件的最大總缺水量為 278527.8 噸。比較不同年份與情境各指標之平均值，最嚴重的缺水風險發生於 2030 年 SSP5-8.5 的情境，此情境相較於其他情境，MTTR 增加最多，Rel 下降最多且一次事件最大總缺水量增加最多。但至 2050 年 SSP5-8.5 相較於 2030 年此三項風險指標皆顯示缺水風險較為下降，可靠度甚至超過基期。綜合來看，除了 2050 年 SSP5-8.5 情境的可靠度指標，其他年份與情境的三個指標都顯示相較於基期缺水風險增加（MTTR 增加、Rel 下降、一次事件最大總缺水量增加），指標的變化與 4.3.2 節中氣候變遷情境下之水情燈號推估的變化趨勢相符合。

表 27：桃園地區工業用水在各水情燈號下的限水比例

燈號	限水比例
綠燈	無
黃燈	7%
橙燈	12%
紅燈	16%

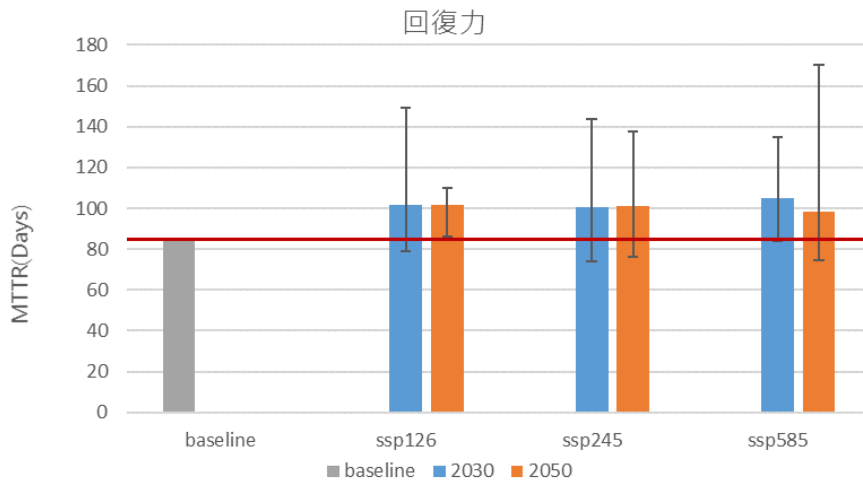


圖 49：2030 及 2050 年各情境回復力變化

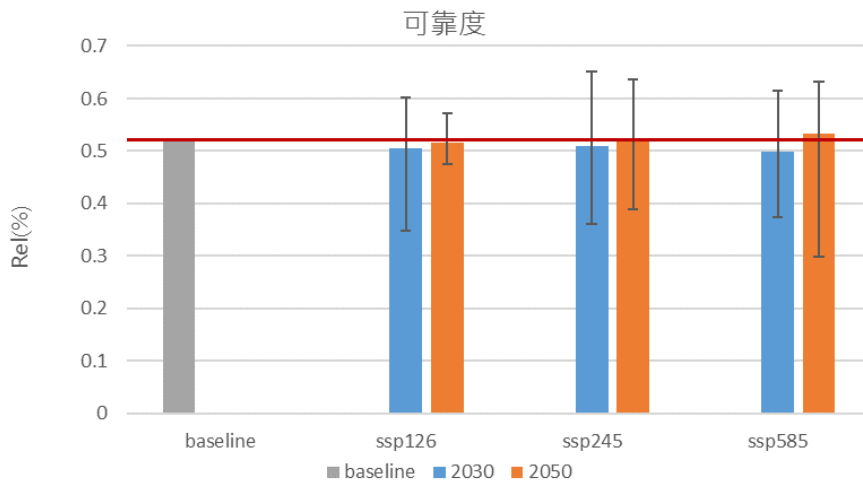


圖 50：2030 及 2050 年各情境可靠度變化

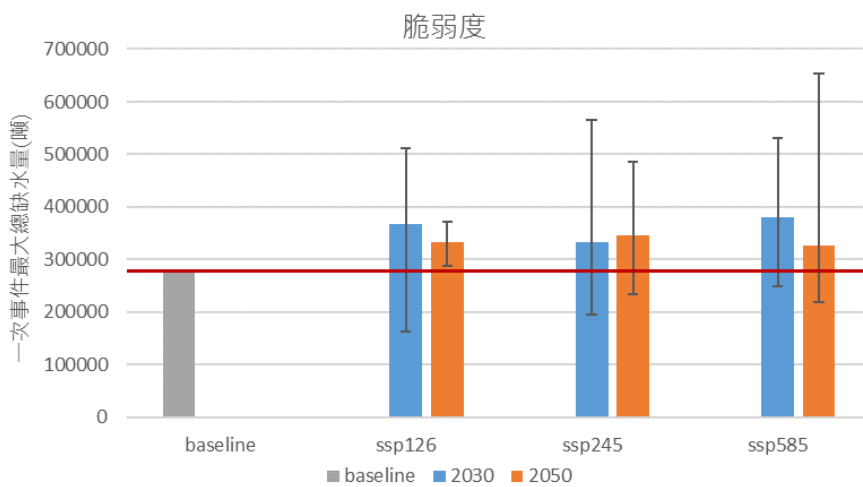


圖 51：2030 及 2050 年各情境脆弱度變化



4.4 企業回應

企業回應依據風險評估的目的可分為對內及對外。對內的主要目的為強化內部調適機制與企業水資源相關目標設定；對外則可做為公開報告書填答或回應外部國際評級的基礎。以下 4.4.1 節屬對內回應，針對季長期缺水風險預警提出廠區缺水應變；4.4.2 節亦屬對內回應，針對氣候變遷下缺水風險評估的結果辨識與評估調適選項；4.4.3 節屬於對外回應，盤點本研究建立之水風險評估框架如何回應 CDP 水安全問卷揭露專案、TCFD 與 SASB 等國際評級。

4.4.1 廠區缺水應變

在持續乾旱的情況下，經濟部將發布水情燈號並啟動限水措施。廠區為滿足政府各階段的節水目標，同時維持生產的正常運作，勢必需要思考應變路徑包含節水措施與尋找替代水源的可能性。根據季長期缺水風險預警結果，廠區可以參考決策流程圖提前規劃應變路徑如圖 52 所示。

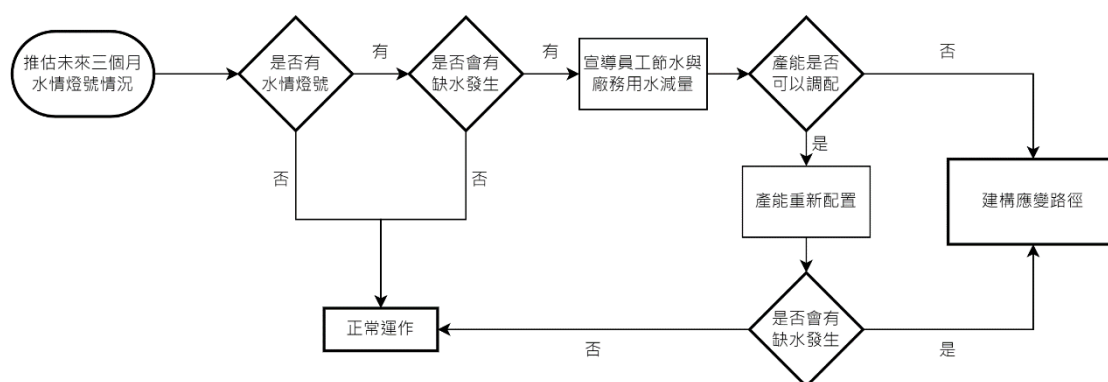


圖 52：決策流程圖

當未來三個月並不會發布水情燈號時廠區可以維持正常運作，一但有黃燈以上的水情燈號出現，可以優先判斷是否會發生缺水事件以及缺水事件的特徵。如果未來三個月有缺水事件，廠區可以宣導員工節水與廠務用水減量，調查供貨能力在合理的情況下根據缺水事件的特徵重新配置產能，並且盤點全廠用水量提前建構應變路徑以補足供水缺口。除了尋找備用水源，對於電子零組件製造業，製

程用水約占全廠用水的八成，故提升製程回收率及降低製程用水需求為節水潛力點，而提升製程回收率的關鍵包括增加純水系統及製程排水回收量和提升純水系統之造水率等。短期內在不投資新設備的情況下廠區可通過管理操作改善與提高膜等耗材的更換頻率使回收率略為增加，但是在提高回收率的處理技術上會遇到主要困難如下（曾淨如，2015）：

1. 超純水水質的穩定：當高科技產業進入奈米製程時，水中的超微量雜質對於產品良率有極大關聯。如果將水中有機物濃度為 1 ppm 的水純化，當去除效率分別為 98%及 99%時，雖然看似差別不大，但對於晶圓所遭受的有機污染度有兩倍差異，進而影響良率與品質穩定度。
2. 濃縮廢水處理及排放問題：當回收率提升後，雖然廢水排放量減少但排放水質下降，過程中產生的濃鹽水處理為一大難題。
3. 提升回收率所造成的高耗能：高科技產業在廢水處理時也產生了大量污泥，主要的污泥乾燥技術都是通過消耗大量能源以去除水分，且提升廢水回收的處理過程會增加用電、柴油、溫室氣體等排放，與企業的減碳目標產生衝突。

以利用 2021 年 3 月季長期天氣展望並且有準確推估 4 月至 6 月的水情燈號為例，4 月至 6 月的水情燈號依序為黃燈、橙燈以及水情正常。各水情燈號的限水比例與 4.3.4 節中表 27 桃園地區工業用水在各水情燈號下的限水比例維持一致。並且根據台灣自來水股份有限公司乾旱時期供水措施作業要點，節水量之計算基準以各大用水戶於該供水區水情燈號轉為綠燈（水情稍緊）前六個月自來水收費單據資料計算之月用水量平均值為準，另訂有給水契約者依契約辦理。此次乾旱事件桃園地區自 2020 年 9 月水情燈號轉變為綠燈，故使用 2020 年 3 月至 8 月之月用水量平均值為基準。利用限水情況，通過廠房水資源系統動力模式判斷案例廠房是否會發生缺水事件以及缺水事件的特徵。假設四月至六月屬於案例廠

房的產業旺季，根據產能規劃，其產能利用率預計分別達到 88%、89%、90%。圖 53 為 2021 年 4 月至 6 月缺水事件之特徵，橫軸為日期，左邊的縱軸為供/需水量，右邊的縱軸為缺水量。此次事件由 5/21 開始發生缺水的情況，缺水總共持續十六天，至 6/6 才完全解除，總共水量達 26624.07 噸，其中最大一天的缺水量為 3167.04 噸，發生於 5/31。

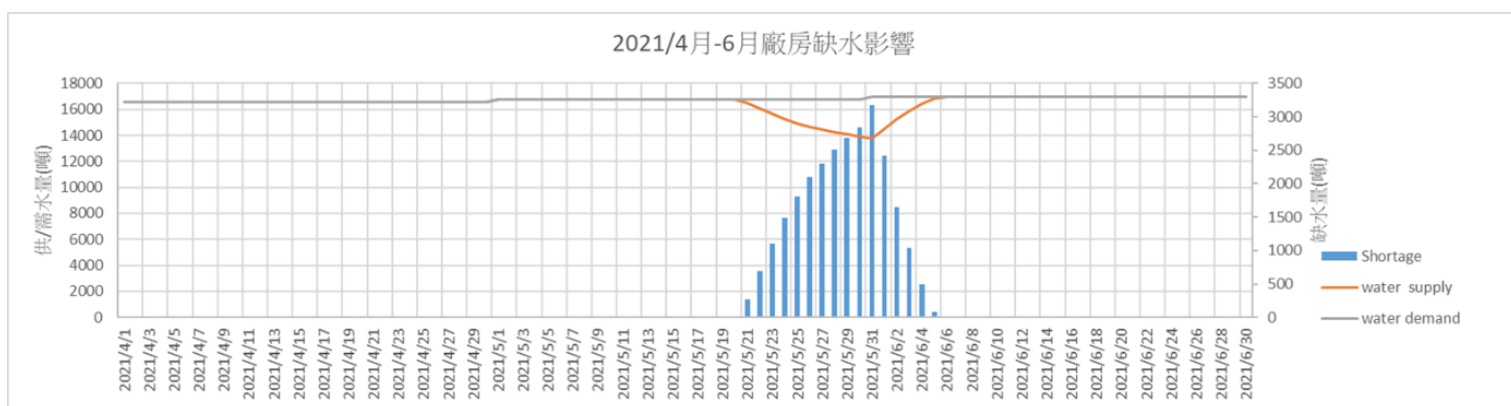


圖 53：2021 年 4 月至 6 月缺水事件特徵

為維持營運正常運作，短時間內的作法包含增加回收率和尋找備用水源。此案例廠房目前已有不錯的製程回收率（80%），因此本研究探討在通過管理操作改善與提高膜等耗材的更換頻率使回收率略為增加以及提前備妥水車做為備用水源對於廠房缺水的改善。因水車供水能力有限，在案例廠房優先思考自主增加回收率再向外部叫水車的情況下，提前建構應變路徑。以下探討兩種應變路徑對於廠區缺水的改善與影響，應變路徑一與應變路徑二如圖 54 與圖 55 所示。應變路徑一為在缺水事件發生前提早一週將回收率提高 1%，不足的水量由提前預備水車補足；應變路徑二為缺水事件發生前提早一週將回收率提高 1.5%，不足的水量由提前預備水車補足。

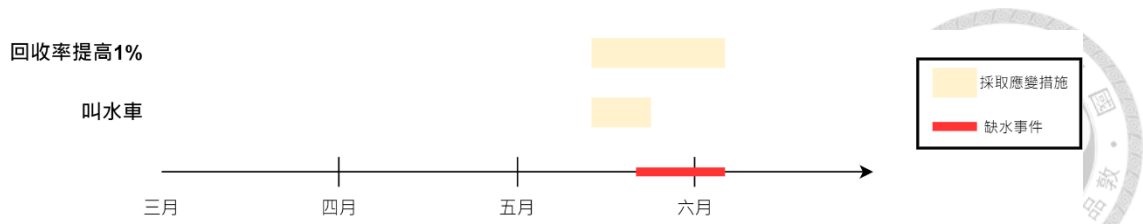


圖 54：應變路徑一

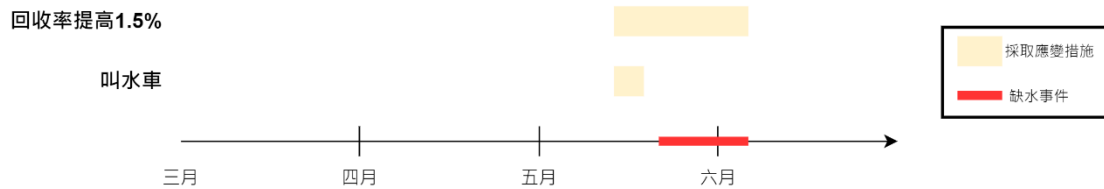


圖 55：應變路徑二

以上兩種應變路徑皆可完全解決此次缺水問題。根據經濟部工業局抗旱專區所提供的民間水車調查資料，叫水車一噸水的成本介於 500 元至 1000 元不等，而提高回收率所需要多產製回收水的成本雖然相對較低，但短時間快速提高回收率可能影響晶圓良率與穩定度，並且因為產製回收水需要大量耗能而導致產生過多二氧化碳，影響企業減碳相關目標。水回收是耗錢又耗電的細功夫，企業需要在缺水與排碳之間做選擇（經濟部，2016）。因此，本研究除了比較兩種應變路徑的叫水車成本（750 元/噸），也提供額外耗電量並通過台灣能源局公告之電力排碳係數（0.502 公斤 CO₂e/度）轉換為碳排放量提供企業參考，比較結果統整於表 28。計算額外耗電量中，假設使用的技術組合為 CAS、UF、NF、RO 相組合，每噸水的耗能為 5.19 kWh/m³（林憲璋，2019）。

表 28：兩種應變路徑之比較

	應變路徑一	應變路徑二
叫水車補足水量（噸）	2460	1050
叫水車成本（元）	1845000	787500
額外產製再生水量（噸）	17557.74	24422.41
額外耗電量（度）	91124.67	126752.31
碳排放量（噸）	45.74	64.52




4.4.2 辨識與評估調適選項

氣候變遷下調適選項的界定主要依循該案例企業之企業社會責任報告書水資源管理章節所羅列的目標與願景，並且考量廠房所在地區政府的未來規劃設施。增加回收率的部分為參考案例廠房歷史回收率增加情況，並且考慮未來回收率的提升可能會面臨技術瓶頸，至 2030 年回收率增加 2%，至 2050 年回收率增加 4%。新建海水淡化廠的評估對象為桃園海水淡化廠，此海水淡化廠尚屬於規劃中，目前預計規模為十萬 CMD，預計使案例廠房增加供水 500CMD。增加用水效率的部分為參考案例廠房歷史用水效率增加情況，此調適選項預計使單位產品用水量減少 10%。調適選項中大多數可以由廠區自行達成，少數需要與政府積極合作，本研究進一步整理各調適選項以及其對應危害、脆弱度與暴露的關係如表 29。

表 29：案例廠房候選調適選項以及其對應風險因子

編號	候選調適選項	方案內容		對應風險因子
		2030 年	2050 年	
1	增加回收率	參考案例廠房歷史回收率增加情況，至 2030 年回收率增加 2%	考慮未來回收率的提升可能會面臨技術瓶頸，2030 年後至 2050 年回收率再增加 2%	提升系統回收水能力，減少脆弱度
2	新建海水淡化廠	參考桃園海水淡化廠規劃，預計規模為十萬 CMD，假設案例廠房可以通過與政府合作增加供水 500CMD		藉由尋求新水源以獲得額外水資源，減少脆弱度
3	增加用水效率	參考案例廠房歷史用水效率增加情況，單位產品用水量減少 10%		藉由節約用水減少暴露

本研究利用廠房水資源系統動力模式，並且參考災害防治的概念，通過計算十年回歸週期的缺水情況來評估不同的調適選項。風險評估能使企業考量潛在事項影響其風險管理目標達成之程度，一般而言，皆以發生的可能性及後果評估之。回歸週期的選擇主要依據企業的風險胃納（Risk appetite）亦稱風險偏好，即企業可以接受的風險發生可能性及後果。目前企業在發生可能性的檢核並無一致標



準，主要基於管理者的經驗與客觀機率估計，根據企業社會責任報告書，多數企業在風險管理中皆以一至十年的風險的發生頻率作為考量，如一年發生十次，十年發生一次等。此外 Chen et al. (2017) 亦採用十年回歸週期的缺水情況評估採取不同調適選項後，區域供水風險對於企業的影響。故本研究亦選用十年回歸週期的缺水事件，根據三個風險指標在 2030 年與 2050 年各個情境相較於無採取調適選項的變化評估以上三個調適選項的效用，其中三個風險指標之權重採取均等的形式。加入調適選項後，回復力、可靠度及脆弱度在 2030 年與 2050 年，不同情境下的變化如下圖 56 至圖 61。此外，一缺水風險較低的系統應處於回復力較高，可靠度較高，脆弱度較低的狀態，因此所對應到的數值表現應為 MTTR 減少，Rel 增加，一次事件最大總缺水量減少。為比較各調適選項的效用，以相較於無實施調適選項各指標的改善比例做為各調適選項的效用排名依據，即 MTTR 相較於無調適措施的減少比例，Rel 相較於無調適措施的增加比例及一次事件最大總缺水量的減少比例，2030 年與 2050 年的候選調適選項之效用與排名整理於下表 30 與表 31。2030 年，三個調適選項中三個指標的效用排名皆以新建海水淡化廠為第一，其次為增加用水效率，最後為增加回收率；2050 年，當回收率增加至一定程度以上，三個調適選項中三個指標的效用排名改變為皆以新增回收率為第一，其次為新建海水淡化廠，最後為增加用水效率。雖然新建海水淡化廠在 2030 年時為效用最佳之調適選項，但因桃園地區的海水淡化廠仍在評估階段，是否能在 2030 年前開始運轉具有很大的不確定性，且至 2050 年其轉變為次之的調適選項。此外，2050 年時增加回收率為效用最佳之調適選項，雖然在 2030 年時為效用最低的調適選項，但相較於效用第二的增加用水效率在各風險指標的表現相差不大，故建議案例廠房可以採取持續增加回收率作為優先的調適選項。除了調適選項的評估，企業亦可針對調適選項的評估結果進行相關目標設定，如設定於 2050 年增加回收率 4%。

表 30：2030 年候選調適選項之效用與排名

風險指標	候選調適選項	效用 (%)				候選調適選項排名
		SSP1-2.6	SSP2-4.5	SSP5-8.5	情境平均	
回復力	增加回收率	0.410	0.409	0.345	0.388	3
	新建海水淡化廠	0.678	0.692	0.611	0.660	1
	增加用水效率	0.424	0.435	0.361	0.407	2
可靠度	增加回收率	0.410	0.427	0.370	0.402	3
	新建海水淡化廠	0.667	0.671	0.608	0.649	1
	增加用水效率	0.421	0.449	0.388	0.420	2
脆弱度	增加回收率	0.566	0.578	0.559	0.568	3
	新建海水淡化廠	0.833	0.854	0.842	0.843	1
	增加用水效率	0.611	0.621	0.618	0.617	2

表 31：2050 年候選調適選項之效用與排名

風險指標	候選調適選項	效用 (%)				候選調適選項排名
		SSP1-2.6	SSP2-4.5	SSP5-8.5	情境平均	
回復力	增加回收率	1	0.942	0.907	0.950	1
	新建海水淡化廠	0.633	0.653	0.752	0.680	2
	增加用水效率	0.445	0.419	0.439	0.434	3
可靠度	增加回收率	0.941	0.862	0.796	0.866	1
	新建海水淡化廠	0.592	0.592	0.664	0.616	2
	增加用水效率	0.432	0.391	0.389	0.404	3
脆弱度	增加回收率	1	0.982	0.930	0.97	1
	新建海水淡化廠	0.852	0.843	0.839	0.845	2
	增加用水效率	0.661	0.606	0.640	0.636	3

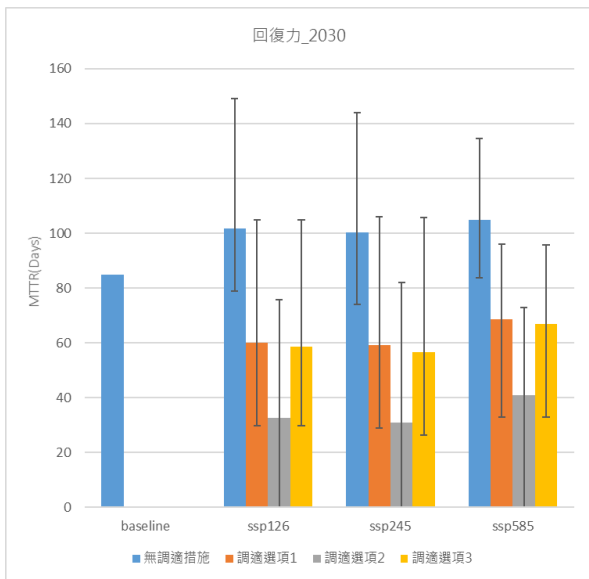


圖 56：加入調適選項後回復力在 2030 年變化趨勢

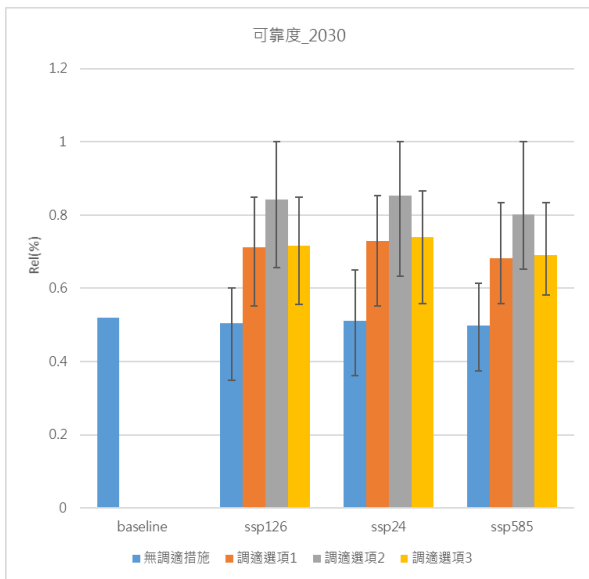


圖 57：加入調適選項後可靠性在 2030 年變化趨勢

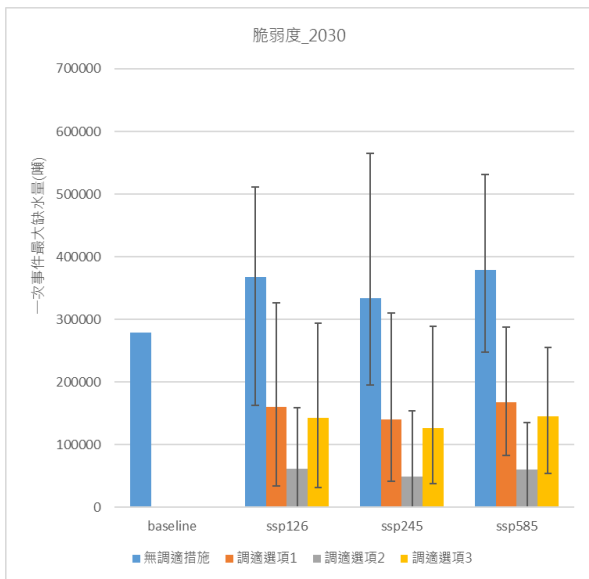


圖 58：加入調適選項後脆弱度在 2030 年變化趨勢

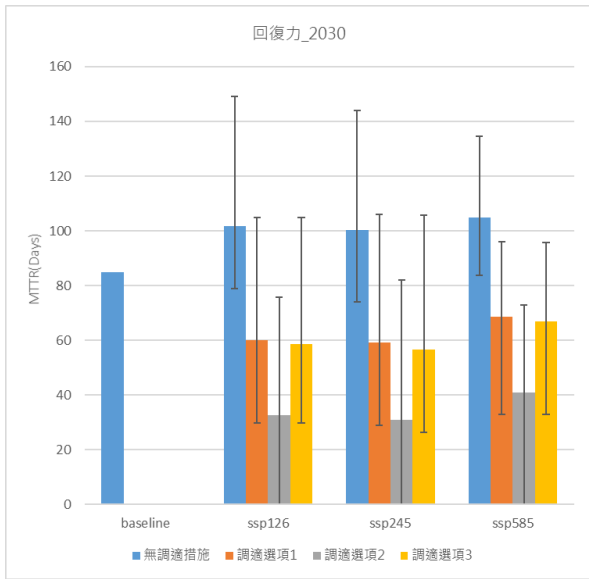


圖 59：加入調適選項後回復力在 2050 年變化趨勢

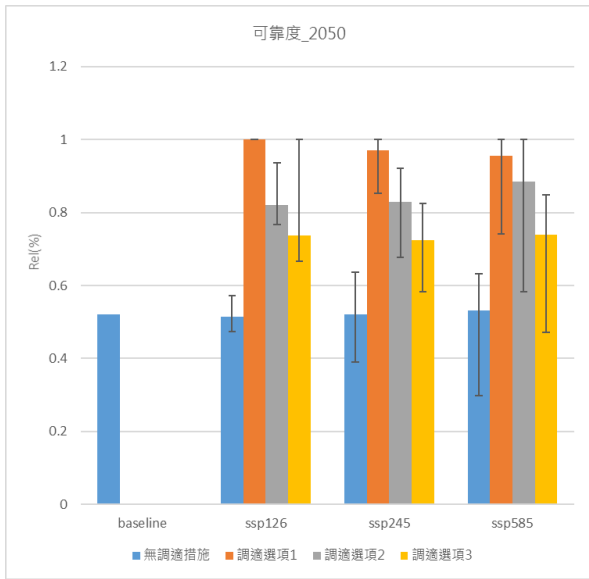


圖 60：加入調適選項後可靠性在 2050 年變化趨勢

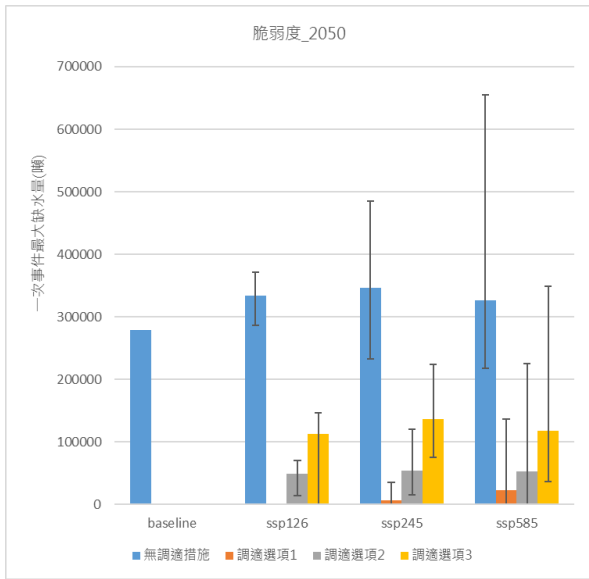


圖 61：加入調適選項後脆弱度在 2050 年變化趨勢



4.4.3 水風險評估框架與國際評級的回應

投資人與政府日益重視企業永續，不再僅停止於要求企業發行企業社會責任報告書或企業永續報告書，更建立相關揭露標準。此外氣候變遷所帶來的風險和機會不僅是各國政府努力希望掌控的資訊，更是利害關係人日趨關注的議題。企業為了滿足利害關係人的需求，更為了掌握商機，必須瞭解並揭露氣候變遷可能帶來的風險和機會，以及它們所造成的影響。應用此水風險評估框架進行風險評估後可實際回應於碳揭露專案（CDP）水安全問卷揭露專案、氣候相關財務揭露（TCFD）與永續會計委員會（SASB）等國際標準或評級。以下針對 CDP 水安全問卷揭露專案、TCFD 與 SASB 各自可回應項目分別說明。

1. 碳揭露專案（CDP）水安全問卷揭露專案

CDP 為一國際非營利組織，致力於推動企業與政府減少溫室氣體排放，保護水及森林資源。CDP 建立標準化資訊揭露流程，其揭露的主題包含「氣候變遷」、「水資源」與「森林」，以問卷的形式蒐集企業相關資訊後進行分析與評比。透過評級資訊，可以協助投資者將相關議題作為投資策略的參考，同時資訊的揭露亦鼓勵企業重視相關議題，改善水資源管理並將其整合至組織決策。CDP 水安全問卷一般包括以下內容：水依賴性與水核算指標、價值鏈參與活動、業務影響、風險評估流程、風險與機會及其應對措施、工廠用水核算、水資源管理與企業策略，表 32 提供 2021 年版水安全問卷模塊中序號與水風險評估框架對應及說明。



表 32：2021 年版水安全問卷與水風險評估框架對應及說明

水安全問卷模塊	水安全問卷序號	水風險評估框架步驟	說明
W1 目前狀況	(W1.1) 請為水質和水量對於貴公司成功的重要性(目前與未來)進行等級評定	步驟一 價值鏈重大性評估	價值鏈重大性評估考慮企業價值鏈中包含企業營運對於水資源如水質、水量的影響與依賴
W1 目前狀況	(W1.2d) 請說明是否有從水資源壓力地區取水，並提供比例	步驟二 辨識水相關風險與機會	根據國際組織所發展的工具如 WRI Aqueduct 與 WWF Water Risk Filter 通過水壓力指標辨識熱點，協助後續分析
W1 目前狀況	(W1.4) 是否就水相關水問題進行價值鏈合作?	步驟一 價值鏈重大性評估	通過價值鏈重大性評估確定價值鏈中具有水風險的重大性部位，以作為後續行動的基礎
W3 程序	(W3.3d) 請描述貴公司在直接營運和其他價值鏈階段中識別、評估和應對水風險的流程	步驟一 價值鏈重大性評估 步驟二 辨識水相關風險與機會 步驟三 評估量化水相關風險 步驟四 企業回應	通過價值鏈重大性評估確定價值鏈中具有水風險的重大性部位，並且根據國際組織所發展的工具如 WRI Aqueduct 與 WWF Water Risk Filter 通過實體風險、聲譽風險及法規風險等相關指標辨識水相關風險與機會，缺水風險的部分亦考慮未來季長期尺度以及氣候變遷情境尺度，並結合區域尺度與廠區尺度的水風險建立企業缺水風險評估量化流程，最後根據評估結果提供適合的調適措施建議
W4 風險與機會	(W4.2) 請詳述貴公司直接營運中可能帶來的實質性經濟或策略影響的風險，以及貴公司的應對	步驟二 辨識水相關風險與機會	根據國際組織所發展的工具如 WRI Aqueduct 與 WWF Water Risk Filter 通過實體風險、聲譽風險及法規風險等相關指標辨識水相關風險與機會
W4 風險與機會	(W4.2a) 請詳述貴公司價值鏈中可能帶來的實質性經濟或策略影響的風險，以及貴公司的應對	步驟一 價值鏈重大性評估 步驟二 辨識水相關風險與機會	通過價值鏈重大性評估確定價值鏈中具有水風險的重大性部位，並且根據國際組織所發展的工具如 WRI Aqueduct 與 WWF Water Risk Filter 通過實體風險、聲譽風險及法規風險等相關指標辨識水相關風險與機會



W7 業務策略	(W7.3) 貴公司是否使用氣候相關的方案分析，以便採取對應的業務策略。	步驟三 評估量化水相關風險	評估量化過程考量不同時間不同氣候情境的缺水風險
W7 業務策略	(W7.3b) 從環境相關的方案分析中得出了甚麼水相關後果?貴公司的回應是甚麼?	步驟三 評估量化水相關風險 步驟四 企業回應	評估量化過程考量不同時間不同氣候情境的缺水風險，最後根據評估結果提供適合的調適措施建議
W8 目標	(W8.1) 請描述設定和監測水相關定量與定性目標的方法。	步驟四 企業回應	除了調適選項的評估，企業亦可針對調適選項的評估結果進行相關指標與目標的設定

2. 氣候相關財務揭露 (TCFD)

氣候風險的衡量對於現代企業的永續經營已產生關鍵影響。金融穩定委員會 (Financial Stability Board, FSB) 於 2015 年 12 月成立氣候相關財務揭露工作小組 (TCFD)，並於 2017 年 6 月正式發佈「氣候相關財務揭露建議」。其框架依據組織營運核心包含四大要素，分別為「治理」、「策略」、「風險管理」、「指標與目標」，每一項要素亦包含二至三個建議揭露事項，共有十一個建議揭露事項，如圖 62，提供企業明確、一致性及可比較性的氣候相關財務揭露建議。表 33 針對四大要素及其建議揭露事項與水風險評估框架對應及說明。

治理	策略	風險管理	指標和目標
揭露組織與氣候相關風險與機會的治理情況	針對組織業務、策略和財務規劃，揭露實際及潛在與氣候相關的衝擊	揭露組織如何鑑別、評估和管理氣候相關風險	針對重大性的資訊，揭露用於評估和管理氣候相關議題的指標和目標
建議揭露事項	建議揭露事項	建議揭露事項	建議揭露事項
a) 描述董事會對氣候相關風險與機會的監督情況。	a) 描述組織所鑑別的短、中、長期氣候相關風險與機會。	a) 描述組織在氣候相關風險的鑑別和評估流程。	a) 揭露組織依循策略和風險管理流程進行評估氣候相關風險與機會所使用的指標。
b) 描述管理階層在評估和管理氣候相關風險與機會的角色。	b) 描述組織在業務、策略和財務規劃上與氣候相關風險與機會的衝擊。	b) 描述組織在氣候相關風險的管理流程。	b) 揭露範疇 1、範疇 2 和範疇 3 (如適用) 溫室氣體排放和相關風險。
	c) 描述組織在策略上的韌性，並考慮不同氣候相關情境 (包括 2°C 或更嚴苛的情境)。	c) 描述氣候相關風險的鑑別、評估和管理流程如何整合在組織的整體風險管理制度。	c) 描述組織在管理氣候相關風險與機會所使用的目標，以及落實該目標的表現。

圖 62：TCFD 資訊揭露的建議和補充建議



表 33：四大要素及其建議揭露事項與水風險評估框架對應及說明

要素	建議揭露事項	水風險評估框架步驟	說明
策略	a.描述組織所鑑別的短、中、長期氣候相關風險與機會	步驟二 辨識水相關風險與機會	根據國際組織所發展的工具如 WRI Aqueduct 與 WWF Water Risk Filter 通過實體風險、聲譽風險及法規風險等相關指標辨識氣候變遷下不同時間尺度水相關風險與機會
策略	b.組織在業務、策略和財務規劃上氣候風險與機會的衝擊	步驟二 辨識水相關風險與機會 步驟三 評估量化水相關風險	台灣地區的廠區可利用未來氣候變遷情境下水情燈號的發生情況與各縣市企業使用一噸水所需要額外付出的成本地圖鏈結財務風險，缺水風險的部分亦考慮未來季長期尺度以及氣候變遷情境尺度，並結合區域尺度與廠區尺度的水風險建立企業缺水風險評估量化流程
策略	c.描述組織在策略上的韌性，並考慮不同氣候相關情境	步驟三 評估量化水相關風險 步驟四 企業回應	評估量化過程考量不同時間不同氣候情境的缺水風險，最後根據評估結果提供適合的調適措施建議
風險管理	a.描述組織在氣候相關風險的鑑別和評估流程	步驟二 辨識水相關風險與機會 步驟三 評估量化水相關風險	根據國際組織所發展的工具如 WRI Aqueduct 與 WWF Water Risk Filter 通過實體風險、聲譽風險及法規風險等相關指標辨識水相關風險與機會，缺水風險的部分亦考慮未來季長期尺度以及氣候變遷情境尺度，並結合區域尺度與廠區尺度的水風險建立企業缺水風險評估量化流程
指標與目標	a.揭露組織評估氣候相關風險與機會所使用的指標	步驟四 企業回應	除了調適選項的評估，企業亦可針對調適選項的評估結果進行相關指標與目標的設定



3. 永續會計委員會 (SASB)

永續會計準則委員會 (Sustainability Accounting Standards Board, SASB)，於 2011 年成立，是一個非營利永續會計準則機構，目的在制定並推廣以 ESG 為核心的永續會計準則，讓企業藉以改善相關績效時有跡可循，並著重於重點的永續議題。對於投資人而言，滿足相關資訊需求，協助將 ESG 與永續相關議題納入決策。SASB 於 2018 年制定了涵蓋環境、社會資本、人力資本、商業模式與創新、領導力與公司治理等五大面向、26 項通用 ESG 議題、77 項行業別的特定標準，以重大性地圖 (Materiality Map) 的方式呈現，且每個行業皆有一份架構包含「揭露主題」、「會計指標」、「技術協議」與「活動指標」的永續會計準則 (Sustainability Accounting Standards)。

半導體產業在 SASB 中屬於技術與通訊業的子產業，需揭露溫室氣體排放、製造能源管理、水資源管理、廢棄物管理、職業健康安全、招聘和管理全球的勞動力、產品生命週期管理、物料採購與智慧財產權保護與競爭行為等九大具有重大性的議題。水資源管理的議題說明如表 34 所示，根據水風險評估框架的步驟二-辨識水相關風險與機會，採用國際組織所發展的工具如 WRI Aqueduct 與 WWF Water Risk Filter 通過水壓力指標辨識熱點可以協助回應水資源管理議題中第二項會計指標-總用水量取自基線水壓力高或極高地區所占的百分比。

表 34：SASB 半導體產業水管理議題說明

議題	會計指標	類型	單位	代碼
水資源管理	(1) 總取水量 (2) 總用水量取自基線水壓力高或極高地區所占的百分比	定量	噸 (t) / 百分比 (%)	TC-SC-140a.1

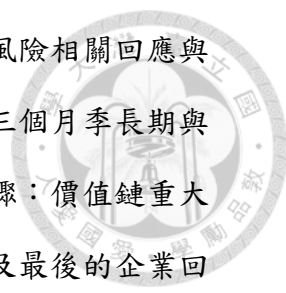
第五章 結論與建議




本研究建立企業水風險評估框架協助企業完善水風險評估流程，並且找到區域水資源與廠區缺水風險的鏈結要素。通過本研究發展之廠房水資源系統動力模式將區域水風險降尺度於廠區尺度，強化量化水風險的能力。水風險的量化評估為後續目標設定或制定調適行動的基礎，在企業風險管理中具有其重要性。搭配以產值高且十分仰賴水資源的半導體製造業進行案例研析，解析水風險評估流程，作為後續應用範例。以下為本研究從文獻回顧、研究方法至案例研析，所歸納之結論與未來研究建議，說明如下。

5.1 結論

1. 氣候變遷下，因濕季雨量增多，乾季雨量減少，集水區的河川流量豐枯差異變大，可能對區域水資源造成更嚴重的衝擊。
2. 工業具備缺水容忍度低的特性，當水資源不足的情況下，可能出現供水危機，導致產能降低或營運中斷，進而衝擊經濟造成損失。因此，對環境與社會負責的水資源管理不僅是企業的道德責任，而是逐漸成為確保企業生存能力和降低企業風險的一部份。水風險因不同產業部門和地理位置有所差異，但企業與投資者面臨的水風險可以被分為三類：實體風險、法規風險及聲譽風險，且面臨水風險的程度取決於許多不同因素，包括企業內部的表現或外部的環境和社會條件。
3. 半導體廠內用水流程依廠房內流動路徑分為五段：水源儲存與分配、用戶、廢水分流收集、廢水處理及廢水回收。利用水平衡的概念，若將用水邊界的範圍設定為一個廠房，即為廠房用水平衡，可作為計算用水量及回收率之依據，並釐清工廠用水全貌。此外，水平衡圖被規定於經濟部水利署「用水計畫書件內容及格式」與科技部「科學工業園區水電輔導管制辦法」中的應記載事項，具有重要性。


- 
4. 本研究經由梳理企業水風險管理與目標設定流程、參考水風險相關回應與決策框架，並且考量不同時間尺度下的風險包括未來一至三個月季長期與氣候變遷情境下，建立企業水風險評估框架，通過四個步驟：價值鏈重大性評估、辨識水相關風險與機會、評估量化水相關風險以及最後的企業回應完善企業水管理流程，並且提供企業實施水風險管理的參考依據。
 5. 企業可以善用國際組織提供的水風險工具辨識水相關風險與機會，然而在全球水風險資料庫中台灣地區的資料內容通常是缺失或是由其他地區內插產生，評估設廠於台灣的企業的缺水風險並不一定適合。本研究利用標準化降雨指標與水情燈號歷史資料產製在 RCP2.6 和 RCP8.5 兩種情境下全台各縣市在 2030 年與 2050 年時，各水情燈號的發生次數和企業取得水資源所需要額外付出的成本地圖，為台灣地區的缺水熱點辨識提供解方並嘗試鏈結財務風險。
 6. 以廠房用水平衡圖為基底，同時考量廠房內供需水相關單元的相互關聯與儲水槽的設計容量，即可建立廠房水資源系統動力模式。利用此模式可以將區域水風險降尺度於廠區尺度，強化水風險的量化能力，作為後續應變路徑或調適選項建立的參考基礎。
 7. 一至三個月季長期缺水風險預警需先取得案例廠房附近測站的歷史溫度資料與水庫集水區的歷史降雨資料，並根據季長期天氣展望資料，利用氣象合成模式產製未來一至三個月日溫度及雨量資料。溫度資料用以推估廠區用水相關資訊，雨量資料輸入 GWLF 水文模式推估水庫入流量，後續再透過區域水資源系統動力模式推估水庫未來蓄水量變化。最後經由水庫限水警戒值訂定成果轉換為水情燈號，提供給廠房以實現未來一至三個月缺水風險預警。整體而言，利用此方法能合理推估未來一至三個月的水情燈號變化，對於廠區具有一定參考性，推估燈號不確定性的主要來源為季長期天氣展望的預測誤差。

8. 評估未來氣候變遷時間尺度的缺水風險時，需考量不同溫室氣體排放情境的氣候預測結果，配合歷史雨量資料產製不同情境與時間組合下各 10 組 20 年之日降雨資料，以供後續分析使用。將產製之降雨資料輸入 GWLF 水文模式推估水庫入流量，後續再透過區域水資源系統動力模式推估水庫未來蓄水量變化。最後經由水庫限水警戒值訂定成果轉換為水情燈號，做為區域供水對於廠區的影響，以此鏈結廠區缺水風險。在 2050 年以前除了 SSP1-1.9 情境水情燈號的發生情況可以持平或略微下降，其他情境的水情燈號相較於基期都有更加嚴峻的趨勢。比較年份與情境，平均值最嚴重之情況發生在 2030 年 SSP5-8.5 的情境，但至 2050 年與 SSP1-2.6 及 SSP2-4.5 兩個情境相似。加入模式誤差考量，從 SSP1-1.9 情境、SSP1-2.6 情境、SSP2-4.5 情境至 SSP5-8.5 情境，正誤差呈現逐步上升趨勢，代表極端事件的發生也呈現上升趨勢。
9. 為更深入探討氣候變遷下降雨模式改變對於桃園地區的供水影響，本研究利用五組測試透過改變特定月平均降雨，比較乾濕季改變後水情燈號的變化。總結測試結果，氣候變遷下乾季越乾溼季越溼的特徵不完全會使桃園地區的水情趨於嚴峻，在溼季水庫有得到補足且乾季略為變乾的情況下，水情甚至可能有趨緩的情形。
10. 利用回復力、可靠度、脆弱度等三項風險指標探討氣候變遷下廠房供水系統的供水能力，以此評估缺水風險。基期顯示，十年迴歸週期的缺水事件的 MTTR 為 84.8 天，Rel 為 52%，一次事件的最大總缺水量為 278528 噸。情境的部分因 2050 年以前在 SSP1-1.9 情境下，水情狀況可以持平或略為減緩，故廠區的缺水風險評估僅針對 SSP1-2.6、SSP2-4.5 與 SSP5-8.5 三種情境。綜合來看，除了 2050 年 SSP5-8.5 情境的可靠度指標，其他年份與情境的三個指標都顯示相較於基期缺水風險增加（MTTR 增加、Rel 下降、一次事件最大總缺水量增加），指標的變化與氣候變遷情境下之水情燈號推估的變化趨勢相符合。

- 
11. 根據季長期缺水風險預警結果，廠房可以利用廠房水資源系統動力模式並參考決策流程圖提前規劃應變路徑，有助於廠區建構缺水應變能力。
 12. 氣候變遷下調適選項的界定主要依循該案例企業之企業社會責任報告書水資源管理章節所羅列的目標與願景，並且考量廠房所在地區政府的未來規劃設施。2030年，三個調適選項中三個風險指標的效用排名皆以新建海水淡化廠為第一，其次為增加用水效率，最後為增加回收率；2050年，當回收率增加至一定程度以上，三個調適選項中三個指標的效用排名改變為皆以新增回收率為第一，其次為新建海水淡化廠，最後為增加用水效率。雖然新建海水淡化廠在2030年時為效用最佳之調適選項，但因桃園地區的海水淡化廠仍在評估階段，是否能在2030年前開始運轉具有很大的不確定性，且至2050年其轉變為次之的調適選項。此外，2050年時增加回收率為效用最佳之調適選項，雖然在2030年時為效用最低的調適選項，但相較於效用第二的增加用水效率在各風險指標的表現相差不大，故建議案例廠房可以採取持續增加回收率作為優先的調適選項。
 13. 應用此水風險評估框架進行風險評估後可實際回應於碳揭露專案（CDP）水安全問卷揭露專案、氣候相關財務揭露（TCFD）與永續會計委員會（SASB）等國際標準或評級，本研究亦針對此三項標準或評級提供與水風險評估框架對應的步驟及詳細說明。

5.2 建議

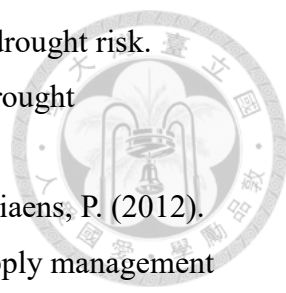
1. 本研究通過眾多文獻回顧建構水風險評估框架，目前採用設計案例作為水風險評估框架的使用範例，建議後續與更多廠區實務溝通，滾動式修正框架，以符合更多案例使用。
2. 受限於歷史水情燈號資料長度，有些縣市供水區並未有燈號異常的紀錄，乾旱脆弱度為零，因氣候變遷下極端事件的發生，目前尚未有燈號異常紀錄的縣市供水區可能也會發佈限水燈號，造成後續推估氣候變遷下水情燈號發生情況的誤差，但現有的水情燈號與取水額外成本地圖在呈現時間趨勢與縣市差異具有實質效益。後續建議持續蒐集水情燈號資料以更新乾旱脆弱度數據，提升精準度。
3. 廠房水資源系統動力模式中，在氣候變遷情境尺度，考量受較大不確定性影響，模擬時本研究使用歷史月平均資料作為冷卻水塔需水量的輸入，建議未來可以使用更長期且以日為尺度的資料，建立溫度或其他相關操作參數與冷卻水塔需水量更精確的關聯。
4. 連續乾旱時政府可能召開抗旱會議並採取乾旱備援措施作為應對手段，因人為操作並無法提前被區域水資源系統動力模式考量，建議統計歷史上連續乾旱時政府所採取的備援措施加入區域水資源系統動力模式做為控制機制或新增相關修正係數，以避免推估燈號在面臨長時間乾旱，政府發動乾旱備援時較實際燈號和蓄水量燈號略為嚴重的情形發生。
5. 在豐水期時水情燈號的推估對於預報誤差的容忍度較高、敏感度較低，在預報具有些微誤差的情況下水情燈號仍能推估正確，但枯水期時，降雨量的多寡將直接反應在燈號的轉變，故對於預報誤差的容忍度較低、敏感度較高，季長期天氣展望的準確度對於水情燈號的預測至關重要。若未來想要提升一至三個月季長期缺水風險預警的能力，增加季長期天氣展望的準確度會是非常重要的環。

- 
6. 本研究採用回復力、可靠度、脆弱度等三個指標實際應用於缺水風險的評估中，協助解析風險特徵與調適選項的選擇。後續可與企業風險管理系統對接，確認企業風險偏好，強化企業決策流程。
 7. 本研究氣候變遷下調適選項的界定主要依循該案例企業之企業社會責任報告書水資源管理章節所羅列的目標與願景，並且考量廠房所在地區政府的未來規劃設施，但實際企業可執行的調適選項有非常多種組合，建議後續在評估調適選項時可以通過與企業的溝通建置更客製化的調適選項再放入廠房水資源系統動力模式進行評估。

第六章 參考文獻



1. Botha, M. J. (2015). *An Analysis of Water-related Sustainability Disclosure of Socially Responsible Investment-indexed JSE-listed Companies*. North-West University, Illinois.
2. CDP. (2020). *CDP Global Water Report 2020*. Retrieved from <https://www.cdp.net/en/research/global-reports/global-water-report-2020>
3. Chen, P. Y., Huang, S. J., Yu, C. Y., Chiang, P. C., Liu, T. M., & Tung, C.-P. Study on the Climate Adaption Planning for an Industrial Company with Regional Risk of the Water Supply System - A Case in Taiwan. *Water* 2017, 9, 682.
4. CEO Water Mandate. (2014). *Driving Harmonization of Water-Related Terminology*. Retrieved from <https://ceowatermandate.org/wp-content/uploads/2019/11/terminology.pdf>
5. Lin, C. Y. (2021). MultiWG: Multi-site stochastic Weather Generator (MultiWG) (v1.0.0). Zenodo. <https://doi.org/10.5281/zenodo.5147575>
6. Dupont, D. P., & Renzetti, S. (2001). The role of water in manufacturing. *Environ Resour Econ*, 18, 411–432.
7. Den, W., Chen, C. H., & Luo, Y. C. (2018). Revisiting the water-use efficiency performance for microelectronics manufacturing facilities: Using Taiwan's Science Parks as a case study. *Water-Energy Nexus*, Volume 1, Issue 2:116-133, ISSN 2588-9125, <https://doi.org/10.1016/j.wen.2018.12.002>.
8. Deng, Y., Liu, H., Xie, X., & Xu, L. (2021). Review on the Development of Enterprise Risk Management. In: Xu, J., Duca, G., Ahmed, S., García Márquez, F., Hajiyev, A. (eds) *Proceedings of the Fourteenth International Conference on Management Science and Engineering Management. ICMSEM 2020. Advances in Intelligent Systems and Computing*, vol 1191. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-49889-4_14
9. Gleick, P. H., Allen, L., Christian-Smith, J., Cohen, M. J., Cooley, H., Heberger, M., Morrison, J., Palaniappan, M., & Schulte, P. (2011). Corporate Water Management. In *The world's water*(23-43).
10. Hashimoto, T., Stedinger, J. R., & Loucks, D. P. (1982). Reliability, Resiliency, and Vulnerability Criteria For Water Resource System Performance Evaluation. *Water Resources Research*, 18(1), 14-20.

- 
11. Knutson, C., Hayes, M., & Phillips, T. (1998). How to reduce drought risk. Preparedness and Mitigation Working Group of the Western Drought Coordination Council, Lincoln, Neb.
 12. Larson, W.M., Freedman, P.L., Passinsky, V., Grubb, E., & Adriaens, P. (2012). Mitigating corporate water risk: Financial market tools and supply management strategies. *Water Alternatives* 5(3):582-602.
 13. Mueller, S. A., Carlile, A., Bras, B., Niemann, T. A., Rokosz, S. M., McKenzie, H. L., Kim, H. C., & Wallington, T. J. (2015). Requirements for water assessment tools: An automotive industry perspective. *Water Resources and Industry*, Volume 9, 30-44, ISSN 2212-3717, <https://doi.org/10.1016/j.wri.2014.12.001>.
 14. McKee, T. B., Doesken, N. J., & Kleist, J. (1993). The relationship of drought frequency and duration of time scales. Eighth Conference on Applied Climatology, American Meteorological Society, Jan17-23, 1993, Anaheim CA, 179-186.
 15. Moore, G.E. (1975). Progress in Digital Integrated Electronics. International Electron Devices Meeting, IEEE, 11-13. http://www.eng.auburn.edu/~agrawvd/COURSE/E7770_Spr07/READ/Gordon_Moore_1975_Speech.pdf
 16. Pickering, N.B., Stedinger, J. R., & Haith, D. A. (1988). Weather input for nonpoint-source pollution models. *Journal of irrigation and drainage engineering*, 114(4), 674-690.
 17. RMS, GIZ & NFCA. (2017). Drought Stress Testing - Making Financial Institutions More Resilient to Environmental Risks. Retrieved from <https://naturalcapital.finance/wp-content/uploads/2018/11/Drought-Stress-Testing-Tool-FULL-REPORT.pdf>
 18. Reig, P., T. Shiao, K. Vigerstol, C. Copeland, A. Morgan, C. Strong, R. Hamilton, R. Dobson, & S. Walker. (2021). Setting Enterprise Water Targets: A Guide for Companies. UN Global Compact CEO Water Mandate, Pacific Institute, CDP, The Nature Conservancy, World Resources Institute, and WWF. Retrieved from www.ceowatermandate.org/enterprise-water-targets
 19. Shiao, T., Reig, P., Gassert, F., & Liao, K. (2012). Case Study: Aqueduct Informs AU Optronics Corporate Water Strategy. Retrieved from

<https://www.wri.org/research/case-study-aqueduct-informs-au-optronics-corporate-water-strategy>

20. Tung, C. P., & Haith, D. A. (1995). Global-Warming Effects on New York Streamflows. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 121(2), 216-225.
21. WWF & WBCSD. (2020). RIGHT TOOL FOR THE JOB : Tools and Approaches for Companies and Investors to Assess Water Risks and Shared Water Challenges.
22. WBCSD. (2018). CEO Guide to Water. Retrieved from <https://www.wbcsd.org/Programs/Food-and-Nature/Water/Resources/CEO-Guide-to-Water-building-resilient-business>
23. WBCSD. (2012). Water for Business - Initiatives guiding sustainable water management in the private sector.
24. WWF. (2020). WWF Water Risk Filter Brief.
25. 內政部(2018)。前瞻基礎建設計畫-水環境建設(水與發展)再生水工程推動計畫(第 1 次修正)。
26. 田育全(2017)。結合季長期天氣展望發展乾旱預警與支援決策系統。臺灣大學生物環境系統工程學研究所學位論文。
27. 江世雄(2011)。半導體廠房水回收系統設計。國立成功大學工學院工程管理碩士在職專班學位論文。
28. 李晨瑜、黃欣栩、黃育德與鍾裕仁(2018)。我國現行用水平衡圖之分析與探討。中興工程，第 140 期，33-40。
29. 吳阜峻(2011)。通用型水資源調配模式之發展與應用-枯水期石門水庫缺水風隲分析。交通大學土木工程學研究所學位論文。
30. 李思瑩與盧孟明(2018)。臺灣冬季溫度季節預報的預報因子挑選及可預報度來源分析。大氣科學，46 卷 2 期，125-148。
31. 林憲瑋(2019)。工業用水壓力下工業廢水再生之最佳配置。臺灣大學環境工程學研究所學位論文。
32. 林宗毅(2019)。發展氣候、水資源和糧食跨領域整合模式與結合氣候智慧調適演算法之應用-以桃園為例。臺灣大學生物環境系統工程學研究所學位論文。
33. 林嘉佑(2016)。因應氣候變遷之供水系統調適能力建構與監測修正調適路徑之研究。臺灣大學生物環境系統工程學研究所學位論文。

34. 周嫦娥(2015)。台灣水資源需求現況與管理策略工具。土木水利，第四十二卷，第四期，19-29。
35. 科技部(2022)。IPCC 氣候變遷第六次評估報告「衝擊、調適與脆弱度」之科學重點摘錄與臺灣氣候變遷衝擊評析更新報告。檢自：
https://tccip.ncdr.nat.gov.tw/km_abstract_one.aspx?kid=20220301094534
36. 科技部(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。檢自：
https://tccip.ncdr.nat.gov.tw/km_abstract_one.aspx?kid=20210810134743
37. 陳仁仲、盧文俊與李士哇(2001)。工業用水效率與回收率的內涵討論。工業污染防治季刊第 77 期，122-159。
38. 許家榮(2018)。高科技廠房水資源管理研究－提昇製程用水回收率影響因素探討。國立臺灣大學土木工程學研究所學位論文。
39. 曾馨儀(2015)。結合季節性氣候預報發展新型水庫運用規線-以石門水庫為例。臺灣大學生物環境系統工程學研究所學位論文。
40. 曾淨如(2015)。半導體廠房製程用水回收量變化原因探討。成功大學土木工程學研究所學位論文。
41. 黃柏勛(2013)。氣候變遷對水資源系統脆弱度與回復力之影響評估。臺灣大學生物環境系統工程學研究所學位論文。
42. 新竹科學園區，用水計畫書範本(含製程用水)，摘自：
https://www.sipa.gov.tw/home.jsp?mserno=201604180001&serno=201001210016&menudata=chinesemenu&contlink=ap/download_view.jsp&dataserno=1575
43. 臺灣永續棧 IPCC 第六次評估報告 (物理科學基礎報告) 重點整理。擷取日期 Jun 2, 2022。檢自：
https://tccip.ncdr.nat.gov.tw/km_abstract_one.aspx?kid=20210907170053
44. 經濟部工業局(2019)。電子零組件製造業產業用水最適化及節水技術指引。檢自：
<https://www.edf.org.tw/Documents/26%E9%9B%BB%E5%AD%90%E9%9B%B6%E7%B5%84%E4%BB%B6%E8%A3%BD%E9%80%A0%E6%A5%AD.PDF>
45. 經濟部(2016)。企業的水管理策略-台積電的水風險管理經驗，兼論政府如何協助產業面對未來挑戰。永續發展季刊，76，50-56。