

國立臺灣大學生物資源暨農學院

生物環境系統工程學研究所

碩士論文



Department of Bioenvironmental Systems Engineering

College of Bioresources and Agriculture

National Taiwan University

Master Thesis

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

Development of Interdisciplinary AgriHydro Model and
Application with Climate Smart Adaptation Algorithm - A Case
Study in Taoyuan

林宗毅

Chung-Yi Lin

指導教授：童慶斌 博士

Advisor : Ching-Pin Tung, Ph.D.

中華民國 108 年 2 月

February 2019



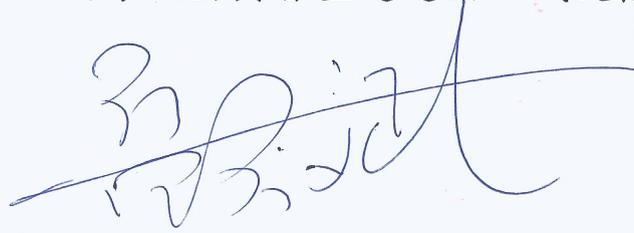
國立臺灣大學碩士學位論文
口試委員會審定書

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

Development of Interdisciplinary AgriHydro Model and
Application with Climate Smart Adaptation Algorithm - A
Case Study in Taoyuan

本論文係 林宗毅 君 (R06622001) 在國立臺灣大學生物
環境系統工程學研究所完成之碩士學位論文，於民國 108 年
1 月 18 日承下列考試委員審查通過及口試及格，特此證明。

口試委員：



(指導教授)

李明旭

胡明哲

沈少瑜

系主任、所長

蔡啟豪

謝誌



感謝童老師在碩士期間耐心的指導與給予的機會，幫助我一路從研究問題的形塑到現在有完整的研究架構與思維邏輯，謝謝老師這段時間的栽培。同時，要特別感謝鍾博士與黃蓉學姊，不管任何疑難雜症都願意與我一同討論。另外，謝謝陳沛芄學姊、李苑華學姊與曹榮軒學長，在學術上、國外生活上與國際研討會上，都提供我很大的協助，幫助我踏入國際學術圈。當然也要謝謝我的好同學們，統計百科、島中人、區塊練小達人、高水好夥伴和國術社 02 團與氣候行動社元老團等。最後，謝謝爸爸媽媽全力的支持，希望在人生下一段旅程中，能繼續帶著你們的支持去冒險。另外，謝謝農試所姚博士、中央水海所李老師與國家災害防救科技中心的資料提供。



摘要

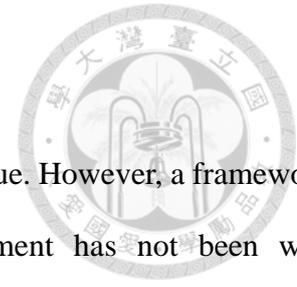


氣候變遷調適風險評估日益受到重視。然而，具體之跨領域及跨治理部門合作框架與量化調適及風險的評估工具尚未被完整提出。因此，本研究在保有物理性的基礎下建立氣候、水資源與糧食調適整合評估模式 (Agriculture and Hydrology Integrated Assessment Model, AgriHydro)，結合氣候智慧調適演算法 (Climate Smart Adaptation Algorithm, CSAA)，提供一套跨領域合作之標準流程與量化分析之框架與工具。AgriHydro 包含四個主要的子模式，分別為 (1) 多測站氣象合成模式 (MultiSiteWthGen)、(2) GWLF 水文模式 (Generalized Watershed Loading Function, GWLF)、(3) 石門水庫供水系統之系統動力模式與 (4) AquaCrop 作物模式，分別用於氣候情境降尺度、流量模擬、水庫操作模擬與產量及田間需水量的產製，各子模式驗證結果良好。本研究以桃園為研究區，示範發展架構的操作流程。根據 CSAA，第一步驟，使用風險模板 (Risk Template) 解構水資源缺水風險與糧食減產風險之組成因子，並依跨領域之連結因子，建構作物產量-計畫灌溉用水量-石門水庫於各標的給水量的回饋機制。在二、三步驟中，以 AgriHydro 分析未來變化趨勢，發現缺水指標 (Shortage Index, SI) 與減產率指標 (Yield Reduction Ratio, YRR) 於未來趨於嚴重，唯二期稻作 YRR 有改善之趨勢。第四步驟中，根據未來短期 (2021 年至 2040 年) 糧食生產風險，制定轉作大豆之調適選項，並分析其在跨領域風險中的改善效用。結果發現轉作大豆於一期稻作能協同改善水資源及糧食生產風險；於二期作則為競爭關係，YRR 略微增加。然而，相同 SI 改善程度下，二期作僅須轉作低於 40% 之一期作轉作面積。在考量農民偏好種植產量較高的一期稻作與政府希望區域供水穩定下，本研究建議於二期作實施大豆轉作。此結論呼應自民國 104 年二期大豆收穫面積在政府政策之推動下，漸增的趨勢。藉由桃園案例的演示，本研究發展的 AgriHydro 與 CSAA 聯合操作之跨領域氣候調適與風險評估框架，能有效量化風險，並支持跨領域決策。希望未來研究能納入決策過程與監測資訊的回饋機制，形成動態調適路徑，完整呈現 CSAA。

關鍵詞：AgriHydro、氣候智慧調適演算法、多測站氣象合成模式、風險模板、跨領域



Abstract



Climate adaptation and risk assessment have become a significant issue. However, a framework for interdisciplinary collaboration and quantitative adaptation assessment has not been well developed. Therefore, this study proposes a standard climate adaptation risk assessment framework. To demonstrate the proposed framework, the Agriculture and Hydrology Integrated Assessment Model (AgriHydro) is developed and operates with Climate Smart Adaptation Algorithm (CSAA) as a tool. AgriHydro consists of four sub-models, which are (1) Multi-Site Weather Generator (MultiSiteWthGen), (2) the hydrological model of Generalized Watershed Loading Function (GWLF), (3) a system dynamic model for the Shimen reservoir water distribution system and (4) AquaCrop crop model. The AgriHydro and CSAA are applied to Taoyuan area in Taiwan. In the first step of CSAA, Risk Template is adopted to factorize risk components among water and agriculture disciplines. In the second and third steps, future trend of risks is simulated by AgriHydro. During the fourth step, adaptation options of substituting soybean for rice are tested. Consequently, synergies and trade-offs between SI and YRR were quantitatively displayed. In the short-term future, substitution in 2nd growing period revealed 2.5 times more efficient in reducing Shortage Index (SI) than in 1st growing period while it slightly increased Yield Reduction Ratio (YRR). However, the yield reduction risk caused by climate change was lower than the difference of actual yield between 1st and 2nd growing periods. Therefore, according to the result, the study suggests altering rice to soybean in 2nd growing period. This conclusion is parallel to the current agriculture policy promoted by the government. Overall, the Taoyuan case study successfully indicates our proposed framework is valuable in interdisciplinary climate adaptation assessment.

Key words : AgriHydro, Climate Smart Adaptation Algorithm, Multi-Site Weather Generator, Risk Template, Interdisciplinary



目錄



謝誌.....	I
摘要.....	III
Abstract.....	V
目錄.....	VII
圖目錄.....	XI
表目錄.....	XV
第一章、緒論.....	1
1.1 研究動機.....	1
1.2 研究目的.....	3
1.3 論文架構.....	3
第二章、文獻回顧.....	5
2.1 跨領域調適整合評估架構與模式.....	5
2.1.1 調適步驟與跨領域合作框架.....	6
2.1.2 模式整合類別與方法.....	7
2.2 水資源與糧食生產評估.....	9
2.3 氣象合成模式.....	11
2.4 作物模式.....	12
第三章、AgriHydro 各模組使用模式之理論介紹.....	15
3.1 氣候智慧調適演算法與指標.....	15
3.1.1 氣候智慧調適演算法.....	15
3.1.2 風險指標.....	20
3.2 情境設定模組.....	20
3.2.1 GCMs 挑選與 GCMs 資料降尺度.....	21



3.2.2	多測站氣象合成模式.....	23
3.2.3	社會經濟情境設定.....	27
3.3	水資源模組.....	28
3.3.1	GWLF 流量模式.....	28
3.3.2	系統動力模式.....	32
3.4	作物模組.....	34
3.4.1	AquaCrop 作物模式.....	34
3.4.2	水稻整田用水與湛水深不足之減產機制.....	37
第四章、 AgriHydro 氣候變遷調適整合評估模式.....		39
4.1	回饋機制.....	39
4.1.1	評估模式中的回饋機制.....	40
4.1.2	決策流程上的回饋機制.....	41
4.2	AgriHydro 整合架構.....	41
4.2.1	AgriHydro 農業灌溉計畫用水量與實際供水量之回饋與更新機制.....	42
4.2.2	其他水源之實際供水比率變動假設說明.....	44
4.3	AgriHydro 與氣候智慧調適演算法之聯合操作流程.....	46
第五章、 研究區域介紹與使用資料說明.....		51
5.1	研究區域介紹.....	51
5.1.1	研究區背景介紹.....	51
5.1.2	桃園糧食生產系統與 AgriHydro 農業分區.....	52
5.2	情境模組之資料使用.....	54
5.2.1	多測站氣象合成模式資料使用及處理.....	55
5.2.2	社經情境資料使用及處理.....	59
5.3	水資源模組之資料使用.....	60
5.3.1	GWLF 模式之資料使用與參數設定.....	60



5.3.2	桃園水資源系統之使用資料.....	61
5.4	作物模組之資料使用.....	65
第六章、研究區域 AgriHydro 子模式驗證與合理性說明.....		73
6.1	情境設定模組.....	73
6.1.1	多測站氣象合成模式驗證：空間統計特性驗證.....	73
6.1.2	多測站氣象合成模式驗證：單測站統計特性驗證.....	77
6.2	水資源模組.....	82
6.2.1	GWLF 流量模式驗證.....	82
6.2.2	石門水庫系統動力模式驗證.....	86
6.3	作物模組.....	88
6.3.1	AquaCrop 作物模式合理性說明：水稻.....	88
6.3.2	AquaCrop 作物模式合理性說明：大豆.....	94
6.3.3	小結.....	96
第七章、AgriHydro 模擬結果與討論.....		99
7.1	未來風險變化趨勢.....	99
7.1.1	氣候變遷.....	99
7.1.2	水庫水源量與 SI 指標變化.....	105
7.1.3	水稻減產風險變化.....	112
7.1.1	小結.....	113
7.2	調適選項的制定與模擬的結果與討論.....	115
7.2.1	調適選項的制定.....	115
7.2.2	調適選項的模擬的結果與討論.....	118
7.3	小結.....	121
第八章、結論與建議.....		123
8.1	結論.....	123



8.2 建議.....	126
參考文獻.....	127
附件一、民國 107 年石門水庫灌溉及給水計畫配水量（106 年 11 月 24 日審定版）.....	133
附件二、臺灣桃園農田水利會民國 106 年灌溉計畫表.....	135
附件三、未來氣候情境平均值修正值變化趨勢.....	136
附件四、未來各分區氣候情境修正值.....	138



圖目錄

圖 2-1、不同程度之跨領域名詞示意圖 (Jensenius, 2012)	6
圖 2-2、TaiCCAT 氣候調適六步驟 (科技部, 2015)	7
圖 3-1、IPCC 對於風險、脆弱度、暴露與危害之核心概念	16
圖 3-2、氣候智慧調適演算法之風險模板示意圖	17
圖 3-3、氣候智慧調適演算法之風險模板操作第一步驟	18
圖 3-4、氣候智慧調適演算法之風險模板操作第二、三步驟	19
圖 3-5、氣候智慧調適演算法之風險模板操作第四步驟	19
圖 3-6、代表濃度路徑 (RCPs) 之輻射強迫力定義示意圖	21
圖 3-7、GCMs 挑選與 GCMs 資料降尺度之流程圖	21
圖 3-8、二階傅立葉函數迴歸平均值與標準差	25
圖 3-9、模擬值之不連續性	26
圖 3-10、GWLF 模式水平衡關係示意圖 (林軒德, 2017)	28
圖 3-11、CN 值與臨前水分內插關係圖	30
圖 3-12、石門水庫供水系統架構圖	33
圖 3-13、Vensim 桃園供水系統動力模式	33
圖 3-14、AquaCrop 計算流程圖	35
圖 4-1、氣候變遷風險及調適評估研究之整合概念架構圖	39
圖 4-2、整合之回饋機制三維要素示意圖	40
圖 4-3、AgriHydro 整合架構圖	42
圖 4-4、AgriHydro 回饋機制農業用水量計算流程	44
圖 4-5、石門供水區河川概況	45
圖 4-6、AgriHydro 與氣候智慧調適演算法之聯合操作流程圖	47
圖 4-7、水資源風險模板操作	48



圖 4-8、糧食生產之風險模板操作	49
圖 4-9、風險地圖示意圖	50
圖 4-10、三類調適選項於跨領域效用示意圖	50
圖 5-1、近年大規模停灌事件示意圖	52
圖 5-2、研究區域與分區示意圖	53
圖 5-3、桃園氣象站分布圖	57
圖 5-4、溫度相關之氣象變數補遺流程圖	58
圖 5-5、雨量補遺流程圖	58
圖 5-6、石門水庫水位高程-面積-容積.....	63
圖 5-7、石門水庫運用規線圖	64
圖 5-8、大豆田間作業示意圖	71
圖 6-1、降雨量與降雨事件空間自相關性 SDI 指標模擬驗證結果.....	74
圖 6-2、溫度空間自相關性 SDI 指標模擬驗證結果.....	74
圖 6-3、降雨量與降雨事件站間相關性模擬驗證結果	75
圖 6-4、 γ 與 SDI 對應曲線與修正方法示意圖.....	76
圖 6-5、溫度站間相關性模擬驗證結果	76
圖 6-6、一階馬可夫鍊參數模擬驗證結果	77
圖 6-7、GWLF 旬尺度石門水庫 2008 年到 2017 年入流量模擬結果.....	84
圖 6-8、GWLF 旬尺度三峽河 2008 年到 2017 年河川流量模擬結果.....	85
圖 6-9、2014 年石門水庫水位高程模擬結果（平常年）	87
圖 6-10、2015 年石門水庫水位高程模擬結果（乾旱年）	87
圖 6-11、2016 年石門水庫水位高程模擬結果（豐水年）	88
圖 6-12、民國 97 年到民國 106 年一期水稻驗證結果	89
圖 6-13、民國 97 年到民國 106 年二期水稻驗證結果	90
圖 6-14、一期稻作用水量相關模擬資訊	92



圖 6-15、二期稻作用水量相關模擬資訊	92
圖 6-16、民國 105 年到民國 106 年一期大豆驗證結果	94
圖 6-17、民國 104 年到民國 106 年二期大豆驗證結果	94
圖 6-18、一期大豆用水量相關模擬資訊	95
圖 6-19、二期大豆用水量相關模擬資訊	96
圖 7-1、未來各 GCM 與 RCP 組合下的各月溫度平均值參數修正值 (Delta)	101
圖 7-2、未來各 GCM 與 RCP 組合下的各月雨量平均值參數修正值 (Ratio)	102
圖 7-3、未來各 GCM 與 RCP 組合下的各月溫度標準差參數修正值 (Ratio)	103
圖 7-4、未來各 GCM 與 RCP 組合下的各月雨量標準差參數修正值 (Ratio)	104
圖 7-5、石門水庫旬入流量變化趨勢	106
圖 7-6、三峽河旬流量變化趨勢	107
圖 7-7、公共給水 SI 值未來趨勢變化	109
圖 7-8、桃園灌區灌溉給水 SI 值未來趨勢變化	110
圖 7-9、石門灌區灌溉給水 SI 值未來趨勢變化	111
圖 7-10、桃園區第一期稻作 YRR 未來趨勢變化	114
圖 7-11、桃園區第二期稻作 YRR 未來趨勢變化	114
圖 7-12、一期糧食生產風險地圖 (基期)	116
圖 7-13、一期糧食生產風險地圖 (短期 RCP2.6 保守情境)	116
圖 7-14、不同比例之大豆種植面積於一期作與二期作之調適選項效用比較	120



表目錄



表 2-1、以模式觀點定義不同程度之跨領域名詞	6
表 2-2、各國政府或組織於起始階段所提出之調適步驟彙整比較	8
表 3-1、AM1 與 AM2 之值	30
表 3-2、農業常用水量名詞定義	35
表 3-3、AquaCrop 於本研究之必要輸入參數.....	36
表 5-1、桃園及石門農田水利會灌區面積與 AgriHydro 農業分區	54
表 5-2、石門水庫入流量模擬雨量站與氣象站資料	56
表 5-3、三峽河入流量模擬雨量站與氣象站資料	56
表 5-4、短期未來公共給水社經情境設定	59
表 5-5、GWLF 模式參數設定	60
表 5-6、淨水場供水能力與區域	62
表 5-7、石門水庫各月份日蒸發量	63
表 5-8、民國 97 年至民國 106 年桃園地區水稻產量與收穫面積統計資訊	65
表 5-9、民國 97 年至民國 106 年桃園地區大豆產量與收穫面積統計資訊	66
表 5-10、民國 97 年至民國 106 年桃園地區水稻災害事件統計資訊	66
表 5-11、桃園農作時期	67
表 5-12、水稻在不同生長階段的臨界溫度需求範圍	68
表 5-13、桃園水稻參數參考值與 AquaCrop 模式設定值.....	68
表 5-14、桃園大豆參數參考值與 AquaCrop 模式設定值.....	69
表 5-15、水稻各時期湛水深	70
表 5-16、AquaCrop 大豆灌溉檔設定.....	71
表 6-1、多測站氣象合成模式雨量分佈挑選 KS 檢定與模擬結果測試 K-W 檢定結果	79
表 6-2、多測站氣象合成模式氣溫月平均值雙尾 T 檢定結果.....	80



表 6-3、多測站氣象合成模式氣溫月標準差雙尾 F 檢定結果.....	81
表 6-4、GWLF 不同時間尺度下的驗證結果.....	83
表 6-5、水稻單位面積產量驗證結果.....	91
表 6-6、水稻生育日數、需水量與雨量模擬結果.....	93
表 6-7、大豆單位面積產量驗證結果.....	95
表 6-8、大豆生育日數、需水量與雨量模擬結果.....	97
表 7-1、各月份與各測站雨量及溫度在不同未來時段與 RCP 的平均值修正值.....	100
表 7-2、各水庫用水標的之 SI 指標未來變化趨勢.....	112
表 7-3、水稻一、二期作之 YRR 指標未來變化趨勢.....	113
表 7-4、各農業分區基期與短期未來（2021 年至 2040 年）作物減產率 YRR 比較.....	117
表 7-5、不同調適選項於作物產量減產率與公共給水缺水指標之風險改變.....	121



第一章、緒論

1.1 研究動機

根據 2015 年 6 月 15 日通過之「溫室氣體減量及管理法」(簡稱溫管法或溫減法)，環保署於 2017 年 2 月 23 日正式核定「國家因應氣候變遷行動綱領」，明列我國因應氣候變遷的十大基本原則，其中要求各相關部會針對能源、製造、運輸、住商、農業及環境等六大部門與災害、維生基礎設施、水資源、土地使用、海岸、能源供給及產業、農業生產及生物多樣性、健康等八大領域，分別提出「所屬部門溫室氣體排放管制行動方案」與調適後續執行的推動或行動方案，以達到減緩與調適兼籌並顧的精神與國家永續發展之目標。然而，因為具體的跨領域及跨治理部門合作框架與機制尚未被完整提出，以至目前仍無法達成實務上的跨領域與跨治理部門合作。

在學術研究方面，氣候變遷於各領域的相關研究日益增長，風險評估也逐漸從單領域的衝擊 (Impact) 分析到跨領域的減緩 (Mitigation) 與調適 (Adaptation) 評估。跨領域研究中，不同質化與量化的方法被發展使用，其中量化方法大致可分為兩類，一類是資料導向 (Data-driven) 之建模方式，包含統計迴歸與機器學習等；另一類是以物理機制為基礎的建模方法，包含物理模式和機制模式等。其中，資料導向的建模方法，雖然可透過訓練的方式抓取物理模式中可能被忽略或被簡化的因子間關係，進而增加短期預測或現況推估結果的準確度，但在長期變遷的跨領域模擬中可能較不具優勢，原因包括，第一，統計特性與現行因子間的線性或非線性關係於未來變遷下可能改變，如天氣型態、作物品種、管理方式、土地利用變遷等；第二，於長期規劃與可調適的目的下，所建構之模式需要具有可操作性；換句話說，須保留相應可操作的參數，使之能配合調適選項更動，例如作物品種、種植時間、供水設施等，而這是資料導向型模式較難達成的功能。歐盟計畫 CLIMSAVE 與 IMPRESSIONS (P. Harrison, Holman, & Berry, 2015; P. A. Harrison et al., 2018) 在考量複雜物理模式的計算成本與整合複雜



度下，透過詮釋模式 (Surrogate Model) 與資訊流的方式，提供網頁版的即時模擬資訊；然而該類模式依然犧牲了部分操作性與未來變遷的統計特性變化。因此，物理性整合模式於長期調適規劃中較佔優勢。

建構具回饋機制之整合評估模式相對困難，但卻是必要的。然而，以物理模式建構跨領域的整合評估模式，多以建立模式間資訊流作為連結，在模擬決策的時間尺度下，建立即時回饋的整合評估模式是相對較少的，困難原因主要在於複雜性，包括 (1) 物理模式本身的複雜度與 (2) 既有模擬程式所使用的程式語言的不一致性與開放性，許多程式是以執行檔方式提供，不公開原始碼。這些阻礙使得建構具回饋機制的整合評估模式相對困難。然而在跨領域的風險評估與調適規劃中，即時回饋的整合評估機制更能即時反應不同領域中相互影響之過程，進而反映出各領域風險間的競合關係，藉此，能較合理地制定適當的調適方案，以因應未來變遷。綜合上述觀點，本研究試建立具回饋機制之強跨領域物理性整合模式，搭配氣候智慧調適演算法 (Climate Smart Adaptation Algorithm, CSAA)，提供一套跨領域合作之流程與量化分析之框架。

本研究擇以桃園為施作範例。根據水利署民國 101 年《強化北部水資源分區因應氣候變遷報告》，因為人口的增加與工業的發展，使桃園整體需水量大增；其中又以工商業增幅最大，尤其桃園航空城的規劃可能導致未來用水需求大增，影響此區域水資源供給的平衡。在農業部分，氣候變遷下因雨量及溫度的改變，導致農業需水量及產量發生變化，而農業用水量的變化則會回饋石門水庫供水系統，影響公共給水的缺水風險。此外，傳統休耕的節水補助政策可以減少農業用水量，但同時也會降低糧食產量，連續性休耕更會衍生出其他的社會問題。根據以上評估，2013 年至 2016 年政府實施「調整耕作制度活化農地計畫」，試圖改善連續休耕問題，並於 2016 年二期作時，開始試辦並推廣「對地綠色環境給付」之補助政策，鼓勵復耕並獎勵具競爭力的轉作作物。基於上述理由，本研究配合「對地綠色環境給付」之補助政策，以桃園作為研究區，針對水資源及糧食生產兩領域做為本研究發展框架的案例示範，探

討如何以 CSAA 解析桃園複雜的水資源與農業中糧食生產的跨領域問題，並以本研究發展之氣後、水資源與糧食整合評估模式（Agriculture and Hydrology Integrated Assessment Model, AgriHydro）量化跨領域風險的競合關係與轉作大豆之調適方案的效用。



1.2 研究目的

為提供標準分析流程與量化資訊支持跨領域、跨尺度之調適計畫的制定與決策，同時迎合「國家因應氣候變遷行動綱領」之需求，本研究目的為：

- 一、建構強跨領域的調適整合評估模式：AgriHydro
- 二、演示 AgriHydro 與氣候智調適演算法的聯合操作流程
- 三、討論並分析大豆轉作對於桃園水資源與農業跨領域風險的影響

藉此，提供一套跨領域合作之流程與量化分析之框架。同時，以桃園為研究區，示範本發展架構之實際操作流程，探討轉作大豆之調適方案與檢視「對地綠色環境給付」之補助政策可帶來之潛在效益與水資源缺水風險及糧食生產減產風險之競合關係。

1.3 論文架構

本論文架構共分為八章，一、二章為緒論與文獻回顧，形塑出本研究之動機、目的與價值。第三、四章為本研究之方法，第三章著重於介紹 CSAA 和 AgriHydro 中三個模組所使用的模式與其理論說明，三個模組分別為情境設定模組、水資源模組與作物模組；第四章則介紹 AgroHydro 的整合過程與方法，並說明其與 CSAA 的聯合操作流程。由於本研究使用的資料眾多，因此獨立出第五章，介紹桃園研究區的背景、三個模組中所使用到的資料以及各子模式的參數設定，並於第六章針對三個模組使用到的子模式作驗證與合理性說明。第七章則為本研究示範案例的結果呈現與說明，其中敘述與分析流程是依照第四章中的聯合操作流程之步驟進行，用以演示本研究發展之框架的操作流程。最後於第八章提出結論與建議。



第二章、文獻回顧



本研究欲針對跨領域調適規劃發展一套跨領域合作之流程與量化分析之框架。因此，本章藉由收集國內外文獻，了解整合框架、國外與桃園地區水資源與糧食生產的現行研究和 AgriHydro 子模式之選擇，協助本研究能較全面的提出一套氣候變遷調適跨領域合作之操作流程與量化分析之框架。首先回顧跨領域調適整合評估架構與模式，針對整合框架與模式建構方法收集文獻，並定義不同程度的跨領域名詞。同時，彙整國內外針對水資源與糧食生產的相關研究，用以定位本研究之價值與動機。而後，回顧氣象合成模式與作物模式的類型、應用性與發展演進，說明本研究模式挑選之原因。

2.1 跨領域調適整合評估架構與模式

跨領域泛指整合各領域之資訊，然而跨領域可以再依整合程度進一步細分，Jensenius (2012) 提五種不同程度之跨領域分級，由連結程度低到高分別為單領域 (Intradisciplinary)、多領域 (Multidisciplinary)、弱跨領域 (Crossdisciplinary)、強跨領域 (Interdisciplinary) 與超領域 (Transdisciplinary) (圖 2-1)，作者從團體合作的角度說明 Intra 為相同領域之工作者處理該領域的問題，Cross 為從單領域工作者的角度去參考並了解其他領域的觀點，Multi 為不同領域的工作者一起合作，以各自專業共同處理問題，Inter 為將各領域方法整合並合成新方法，Trans 則為重新定義一個全新之整合框架，使領域間不再有領域之分。而本研究延續此概念，定義不同模式之整合程度，如表 2-1 所示。根據此分類，本研究發展之 AgriHydro 屬於強跨領域，以決策時距 (年) 回饋水庫農業灌溉用水資訊。

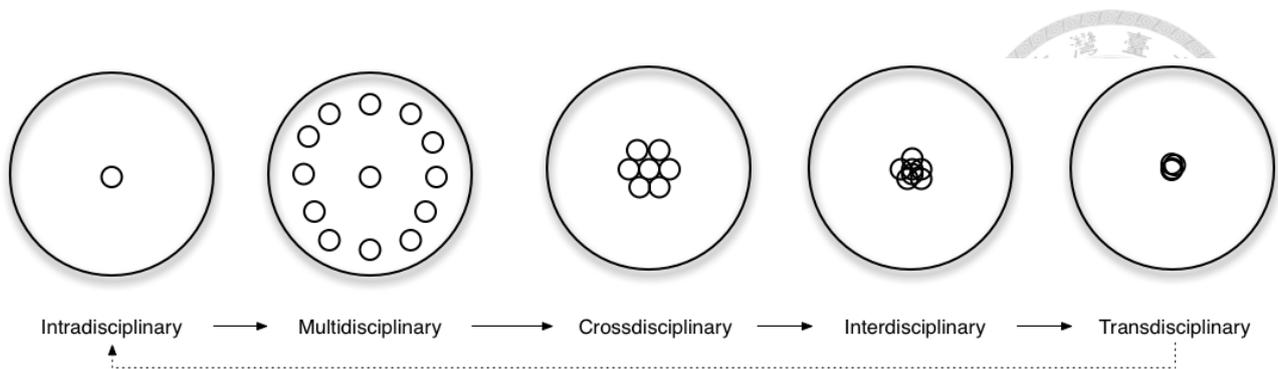


圖 2-1、不同程度之跨領域名詞示意圖 (Jensenius, 2012)

表 2-1、以模式觀點定義不同程度之跨領域名詞

中文名詞	英文名詞	定義 (以模式觀點)
單領域	Intradisciplinary	只適用於特定單一領域，資訊無法與其他模式交流。
多領域	Multidisciplinary	模式間無實質資料上的交流，僅參考其他模式之結果設定相應模式參數。
弱跨領域	Crossdisciplinary	模式間存在資訊流，資料格式統一且能互相傳遞，然而並非即時溝通。
強跨領域	Interdisciplinary	模式間，資料可在小於等於模擬時距或小於等於決策時距即時合成並傳遞，多數該類模式具有領域間良好的回饋機制。
超領域	Transdisciplinary	模式間不再有明確邊界，所有資訊為同步更新產出，可視為全新領域之單一模式。

2.1.1 調適步驟與跨領域合作框架

本研究除了跨領域模式之建立外，欲提供一套跨領域調適規劃之評估流程。藉由回顧各國之調適步驟與框架，以制定或融合出適用本研究之流程框架。調適評估流程於發展初期階段，各國政府或組織所提出的調適步驟整理如表 2-2，各國的分析流程雖然名詞或步驟數目上各異，然而內涵極為相似。於 2015 年科技部 TaiCCAT 計畫中，台灣也提出 TaiCCAT 氣候調適六步驟 (圖 2-2)，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及監測與修正調適路徑。然而，Preston, Westaway, and Yuen (2011) 透過回顧 57 篇調適規劃報告與 19 個調適規劃流程，指出多數回顧的研究報告中，並未清楚考量非氣候因子；也缺乏經濟上的考量與跨層級及跨治理部門的概

念來討論調適力。本研究整體調適評估流程框架可以分成三個維度，分別為調適步驟(縱向)、跨領域(橫向)與跨層級(治理維度)，於縱向部分採用 TaiCCAT 氣候調適六步驟，並以國立臺灣大學生工所永續發展研究室所發展之氣候智慧調適演算法 (Climate Smart Adaptation Algorithm, CSAA) 中的風險模板，將跨領域與跨層級的概念融入調適評估流程中，並完整納入非氣候因子 (見 3.1.1 節)，補足先前框架的不足。

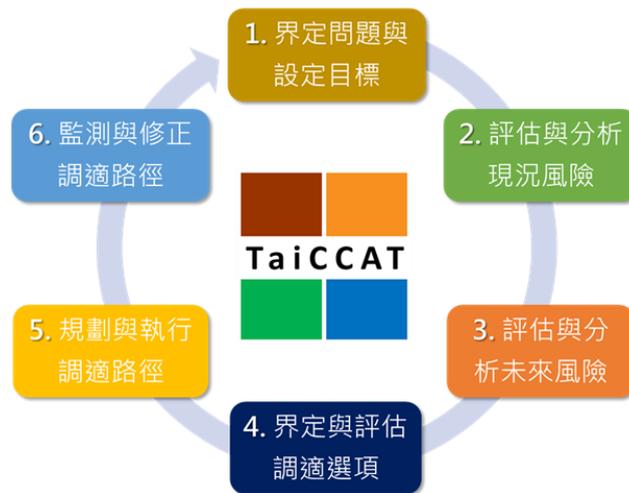


圖 2-2、TaiCCAT 氣候調適六步驟 (科技部，2015)

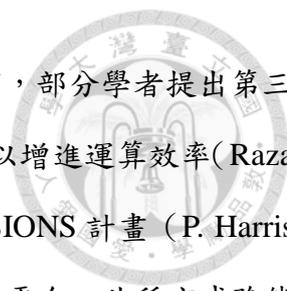
2.1.2 模式整合類別與方法

整合模式在氣候變遷研究中逐漸受到重視，而整合方式有二 (1) 直接將其他領域的物理機制直接納入自己的模式主體中，例如 Soil and Water Assessment Tool (SWAT) 將 Erosion-Productivity Impact Calculator (EPIC) 作物模式經過些微修改後寫入其主程序中，成為 SWAT 中的一部份 (Krysanova & Arnold, 2008)，此類作法的整合效果最好，能達到強跨領域的跨領域程度，使資料可在小於等於模擬時距即時傳遞；另一種是 (2) 將既有獨立的各領域模式以資訊流方式結合至同一個系統中，例如 Bithell and Brasington (2009) 以此方式結合三個既有模式，分別為自給農業代理模式、動力森林代理模式與能夠產製流域空間中土壤濕度與水文資訊的水文模式，分析人口成長對於森林面積遭砍伐後的生態衝擊與可用水量變化，此種結合方式相對來說整合複雜度沒有前者高，也是大部分研究所採取之方式。



表 2-2、各國政府或組織於起始階段所提出之調適步驟彙整比較

單位	TaiCCAT 氣候調適六 步驟 Adaptation 6 Steps	英國氣候調適計畫 UKCIP	聯合國氣候變化綱要 公約 UNFCCC	聯合國發展規劃署 UNDP-APF	歐盟氣候調適平台 The Adaptation Support Tool
年份	2013 年	1997 年	--	2003 年	2009 年
平台 連結	http : //taiccat.ncu.edu.tw/intro/super_pages.php?ID=intro0	http : //www.ukcip.org.uk/wizard/	http : //unfccc.int/focus/adaptation/items/6999.php	--	http : //climate-adapt.eea.europa.eu/adaptation-support-tool
步 驟	1 界定問題與設定目標	開始	觀察	調適計畫的範圍界定 與設計	準備調適基礎
	2 評估與分析現況風險	評估現況脆弱度	評估	現況脆弱度之評估	評估未來風險與脆弱度
	3 評估與分析未來風險	評估未來脆弱度		評估未來氣候風險	
	4 界定與評估調適選項	評估調適選項		建構調適策略	界定調適選項
	5 規劃與執行調適路徑		規劃	持續調適過程	執行
	6 監測與修正調適路徑	監測與回顧	執行		監測與修正



有別於以上兩種結合方式，在考量複雜模式所需的計算時間之下，部分學者提出第三種方式：詮釋模式，這種簡化模式可以有效降低使用者的操作門檻，也可以增進運算效率(Razavi, Tolson, & Burn, 2012)。在氣候變遷研究中，CLIMSAVE 與 IMPRESSIONS 計畫 (P. Harrison et al., 2015; P. A. Harrison et al., 2018) 應用此方法建構網頁版整合分析平台。此種方式雖然可以客製化子模式間的接口，使該整合模式具有一定程度的操作性，同時做到以拖拉控制鈕的方式即時生成結果，然而使用上，會非常大程度的受設計者的建制方式限制其可調控的範圍及結果可變化的範圍，這部分可能限制使用者的探索空間。因此本研究試著以第二種整合方式為基礎，建置第一種整合方式的整合模式，維持其物理性與可操作性。

2.2 水資源與糧食生產評估

在水資源及糧食生產整合評估相關研究中，有些研究單純以氣候變化分析該變化對於產量的影響，例如氣候變遷下，季風帶來的降雨頻率降低，造成水稻產量受到影響 (Auffhammer, Ramanathan, & Vincent, 2012)；有些則進一步以作物模式模擬最佳化作物種類配置，同時提供產量與灌溉需水量的資訊 (Davis, Rulli, Seveso, & D' Odorico, 2017)，然而尚未真正將作物模式連結到水資源模式，考慮水資源風險變化對於糧食產量的影響；McNider et al. (2015) 以網格化 DSSAT 作物模式 (GriDSSAT) 結合區域水文模式 WaSSI，使由 GriDSSAT 產製的灌溉需水量能即時提供給 WaSSI 模式，同時分析各分區作物端造成自然水文可供水量的供水壓力，與水文端依當時天氣狀況和各用水標的之需求量反應出灌溉可供水量，探討缺水逆境如何影響作物產量，並將該資訊用於區域管理的決策上。該篇研究以更新時距小於等於決策時距達到強跨領的整合程度，而本研究基於此水資源與糧食生產的整合基礎上，進一步增加水庫元件 (系統動力模式) 與情境模組，將水庫操作與氣候變遷等因子納入到整合系統中，評估未來風險。有研究指出，承接結合既有作物模式與水資源模式之想法，整合簡單的作物模式與水文模式，容易因過度簡化，限制使用上的精確度，然而整合複雜模式，因為需要的大量資料以校驗與執行模式，會提高使用整合模式的門檻。因此提出結合機制型模式 AquaCrop



作物模式與概念式（或分布式）水文模式，在維持一定的推估能力下（產量與水資源），降低資料的需求量（Van Gaelen, Vanuytrecht, Willems, Diels, & Raes, 2017），並指出 Matlab 開源版 AquaCrop-OS（Foster et al., 2017）的釋出可以使整合程度提高，提供更具自由度的操作性。本研究考慮此觀點，同樣採用較簡易的分布式水文模式 GWLF 模擬流量。GWLF 在與複雜模式 SWAT 於月尺度下的驗證表現並無顯著差異（Qi et al., 2017），於作物模式則使用 AquaCrop，這點將於 2.4 節中進一步回顧說明。

國內相關研究中，尚未以強跨領域之整合方式同時分析桃園缺水風險與農業糧食減產風險。科技部民國 104 年《氣候變遷調適科技整合研究計畫 TaiCCAT》糧食生產部分以 DSSAT 模擬 HadGEM2-AO GCM 情境下台南市烏山頭水庫灌區水稻田的水稻產量與田間需水量，模擬結果顯示田間需水量於一、二期稻作中，在一期稻作插秧日提前 10 至 20 天的情況下，有顯著的下降，二期作差異不大；水稻產量也無明顯差異。於此計畫中雖然依照氣候調適六步驟，進行水資源及糧食生產跨領域之問題界定，然而其所使用之模式與結果中，並未真正將水資源模式與 DSSAT 整合，整合程度比較偏向多領域與弱跨領域，僅參考其他領域之結果變化，並將 DSSAT 模式輸出結果提供給其他領域使用。於桃園市中，有許多關於埤塘（劉振宇，2004；洪佳瑩，2006）、灌溉系統（蔡欣妤，2008；林喬莉，2010；許良偉，2011）、糧食產量（陳亭羽，2012）與石門水庫供水系統（水利署，2015）的相關研究。然而真正結合作物模式與水資源模式做跨領域分析的研究較少，其中有結合 CropWAT 與未來水庫入流量超越機率分析，探討調整耕期、灌溉期距、錯開日數等不同灌溉管理模式對於枯水期農業用水的影響（馬家齊，2015），但其並沒有針對產量做風險評估。因此，本研究希望以此做為切入點，探討農業糧食減產風險與石門水庫各用水標的缺水風險相互影響的競合關係。



2.3 氣象合成模式

氣象合成模式被廣泛運用於產製長時間氣象資料，其中 Richardson Type 氣象合成模式 WGEN (Richardson, 1981; Richardson & Wright, 1984) 被廣泛應用於美國地區，其他較常見的氣象合成模式如 ClimGen (Stöckle, Nelson, Donatelli, & Castellvi, 2001)、WeaGETs (Chen, Brissette, & Leconte, 2012) 等，多以 WGEN 為原型被發展出來。其中，ClimGen 將 WGEN 中被固定的參數 A 矩陣變成可依地區動態計算，見式(3.14)，並以樣條函數 (Spline Function) 替換傅立葉函數 (Fourier Function) 用於迴歸年週期函數，結果上各自有優缺點，並沒有 ClimGen 較 WGEN 表現較好之定論 (Castellvi & Stöckle, 2001)。WeaGETs 則針對日雨量與日最高、最低溫，在 WGEN 之基礎上，提供更多的模擬功能供使用者選擇，其中包含提供最高至三階馬可夫鍊的降雨事件參數估計。然而該研究指出在大部分情況下，一階馬可夫鍊已經足夠維持其統計特性；在溫度模擬方面，WeaGETs 提供以條件機率方式模擬日最高、最低溫，避免序率模擬時，最高溫低於最低溫之情形發生。此外，WeaGETs 還以 Spectral Correction Approach 成功捕捉低頻週期變化；在參數估計上有別於 WGEN 與 ClimGen 以月尺度估計，WeaGETs 是以兩星期做為參數估計時間單位。本研究根據上述回顧，根據氣象合成與氣候情境降尺度之需求，選擇維持月統計的時間尺度，並增加對數常態與韋伯雨量分布於單測站氣象合成的步驟中。

為產製具空間相關之多測站氣象合成資料，透過文獻回顧，模擬方法大致可分為 (1) 將雨量連結至大氣環流的變動中，並以條件機率與空間共變矩陣模擬；(2) 非均勻隱藏馬可夫鍊模式 (Nonhomogeneous Hidden Markov Model) (Bellone, Hughes, & Guttorp, 2000)；(3) 最近臨法 (Nearest-neighbor Resampling)，然而最近臨法可能無法模擬氣候變遷下的天氣變化，因為其樣本庫皆為歷史觀測資料 (Khalili, Leconte, & Brissette, 2007)；(4) 產製具空間相關且時間上獨立的隨機變數，Wilks (1998) 以建立兩兩測站間各月的經驗對應曲線達到此目的。然而在維持站間空間相關性的同時，其需要大量的運算時間來模擬各對應曲線。因此，有研

究進一步提出以空間自相關性 (Spatial Autocorrelation) 建立各月對應曲線，如此僅需模擬 12 條曲線即可產製具空間相關之隨機變數 (Khalili, Brissette, & Leconte, 2009; Khalili et al., 2007)。根據本研究現有的測站資料與氣候情境降尺之需求，以空間自相關性之模擬方法產製具空間相關之隨機變數，做為本研究多測站氣象合成之理論依據。

2.4 作物模式

作物模式可依天氣與生長環境模擬如作物產量與作物需水量等資訊。其中，作物模式可以分為 (1) 經驗模式，利用統計建模的方式建立各因子對於產量的關係，(2) 機制模式 (物理模式)，建立在已知的作物生理機制之上，反映作物在不同環境中生理現象的累積結果。本處依可調適之需求回顧第二類模式。根據 1985 年到 2010 年 221 篇論文的統計分析結果，最常用的作物模式為 APSIM、CERES 與 EPIC (White, Hoogenboom, Kimball, & Wall, 2011)。然而，於水稻產量之模擬，在國內較受歡迎的則為 DSSAT (包含 CERES) (Jones et al., 2003)、ORYZA2000 (Bouman, 2001)，而近期興起的作物模式為美國 FAO 發展的 AquaCrop (Raes, Steduto, Hsiao, & Fereres, 2009; Steduto, Hsiao, Raes, & Fereres, 2009)。DSSAT 與 ORYZA2000 皆屬於光驅動類型的作物模式，利用輻射利用效率 (Radiation Using Efficiency, RUE)，將光能轉換成生物量；AquaCrop 則為水驅動模式，以水分產量係數 (Water Productivity Coefficient, WP) 將每日蒸散比例轉換成生物量。三個模式在水稻產量於不同灌溉期距與含氮量的模擬表現上，CERES-Rice (DSSAT 中模擬水稻之模組) 在產量上有較好的表現 ($rRMSE = 16$)，而 AquaCrop 則是在生物量的模擬上勝過 CERES-Rice ($rRMSE = 15$)，ORYZA2000 則在兩部分表現皆不好 (Amiri, Rezaei, Rezaei, & Bannayan, 2014)，因此本研究暫不考慮 ORYZA2000。在參數數量的比較上，AquaCrop 較 DSSAT 少，且該模式有標準化部分參數 (見 3.4.1 節)，因此實質需要校正的參數並不多，同時相對於 DSSAT 使用葉面積指數 LAI (Leaf Area Index, LAI)，AquaCrop 使用直接從衛星影像換算而得的冠層覆蓋度 (Canopy Cover, CC) 做為生長曲線的參數。因此，基於氣候變遷相關研究未來可以直接利用衛星資料做資料同化 (Data

Assimilation) 的考量，本研究選擇以 AquaCrop 做為 AgriHydro 作物模組中的作物模式，以達到未來監測與修正等相關應用之目的。





第三章、AgriHydro 各模組使用模式之理論介紹

AgriHydro 為本研究所發展的整合調適評估模式，該整合模式包含三個模組，分別為情境模組、水資源模組與作物模組。情境模組包含社會經濟情境與氣候情境的設定，其中利用多測站氣象合成模式，將氣候情境降尺度到各測站的日氣象資料，供其他模組使用；水資源模組則包含 GWLF 模式與系統動力模式，分別產製供水系統的入流量與模擬水庫操作及各用水標的的實際給水量；於作物模組，本研究採用 AquaCrop 作物模式模擬作物產量與田間需水量，並進一步產製灌溉時程，以年為時間尺度回饋水庫各旬之灌溉給水量。本章著重介紹氣候調適六步驟中各步驟與 AgriHydro 中各子模式的理論方法。首先，本章於 3.1 節說明氣候智慧調適演算法與本章所使用之風險指標；並於 3.2 到 3.4 節說明 AgriHydro 中三個模組與四個主要子模式的理論架構。AgriHydro 與氣候智慧調適演算法之聯合操作流程及整合機制將於第四章介紹。

3.1 氣候智慧調適演算法與指標

3.1.1 氣候智慧調適演算法

本研究採用國立臺灣大學生工所永續發展研究室所發展之氣候智慧調適演算法（Climate Smart Adaptation Algorithm, CSAA），作為本研究之氣候變遷跨領域調適之流程框架。其中以科技部 TaiCCAT 計畫中的氣候調適六步驟（Climate Adaptation 6 Steps）作為縱向分析架構、風險模板（Risk Template）作為橫向跨領域分析之工具，並配合氣候調適六步驟中的第五、第六步驟形成動態調適路徑（Dynamic Adatation Pathway），共三個部份組成 CSAA。本研究使用風險模板與 AgriHydro 實際操作氣候調適六步驟中的一到四步驟的跨領域量化分析。本節將針對 CSAA 中的風險模板設計意涵作說明，並於 4.3 節進一步闡明 AgriHydro 與 CSAA 的聯合操作流程。

風險 (Risk) 是 IPCC AR5 報告書中的核心因子，為氣候變遷造成有價值之某項事物處於險境且結果尚不確定的可能性，IPCC 定義風險組成爲脆弱度 (Vulnerability)、暴露 (Exposure) 以及危害 (Hazard) (圖 3-1)，關係式可表示爲風險 = f(危害、脆弱度、暴露)。而風險模板在此基礎上，將三個風險組成更進一步拆解成各項因子，如圖 3-2 所示。危害在模板中，由氣候因子與非氣候因子所組成；暴露為保全對象之空間分布；而保全對象依關鍵議題可為人、物或任何試圖維護之對象；脆弱度則由調適力與敏感度所組成，其中調適力為可以調適更動，並迎合變化之能力，在不同步驟中，可再細分成治理層級的調適行動與保全對象的自我調適能力，治理層級的調適行動於第四步驟加入風險模板中，相較於保全對象的自我調適能力，調適行動在風險模板中會回饋並影響危害，而敏感度則為系統在遭遇危害時的反應程度，敏感度越高表示遭遇危害時受災情形也越嚴重。以水稻受高溫造成米質下降之關鍵議題為例，保全對象為稻米；危害中的氣候因子與非氣候因子為氣溫與湛水深管理；暴露為水稻分布的位置；脆弱度中的敏感度可為水稻品種，因為不同品種可能有不同的耐高溫能力，調適能力在該議題下不考慮 (歸類於敏感度中)，而調適行動可為湛水深規則的更換或耕期的調動等。

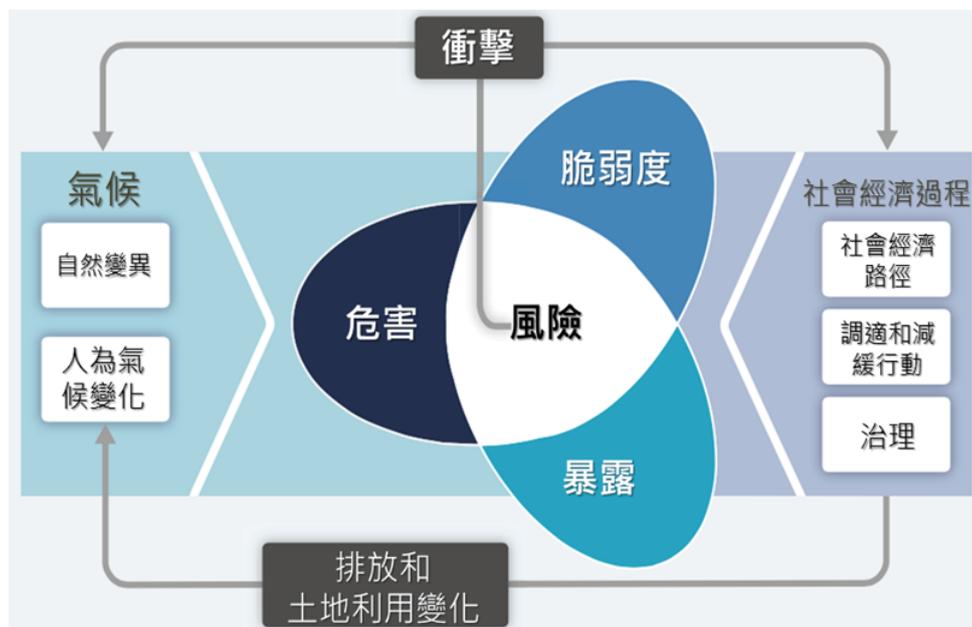


圖 3-1、IPCC 對於風險、脆弱度、暴露與危害之核心概念 (IPCC, WGII, 2014；科技部，2015)

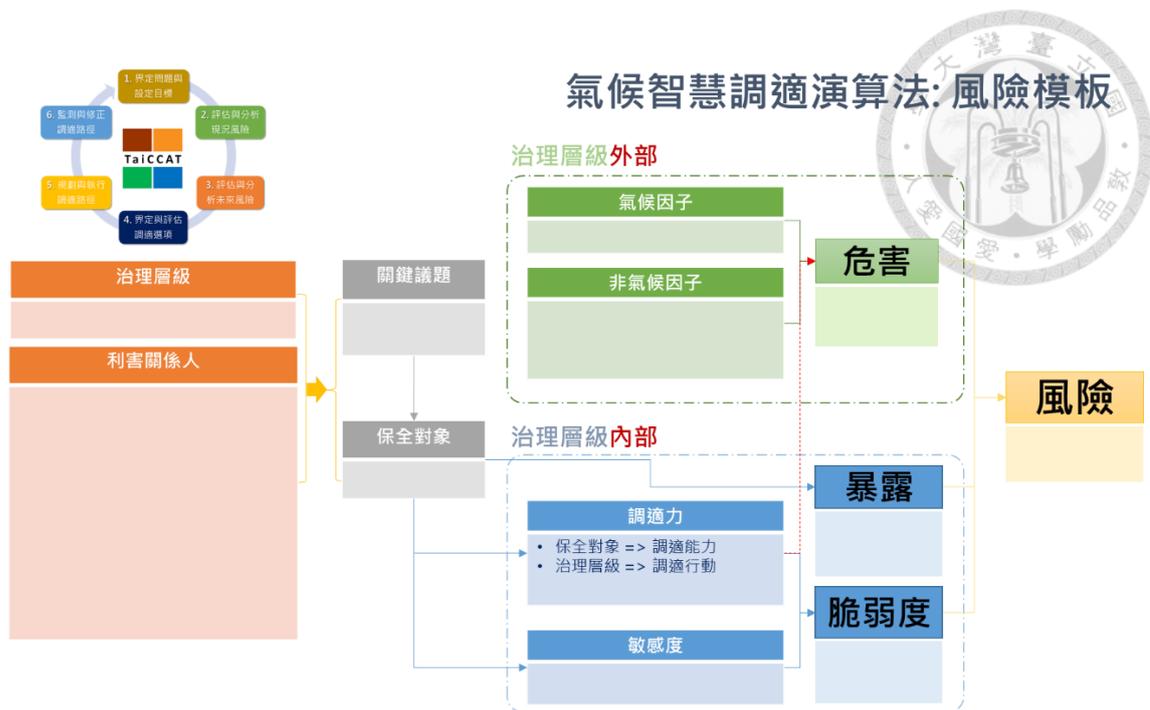


圖 3-2、氣候智慧調適演算法之風險模板示意圖

氣候調適六步驟是本研究之縱向架構。透過風險模板，各領域可在氣候調適六步驟之基礎上作橫向跨領域之串接，並且可以藉由解構模板中的因子，設計調適選項並以共同因子連結各子模式作量化分析。風險模板依據氣候調適六步驟之操作流程如圖 3-3 到圖 3-5 所示。首先，決定治理層級（中央、地方或社區），應用物質流與資訊流確定利害關係人，並分類成（1）與治理層級相關（2）與保全對象相關（3）與議題相關單位，討論關鍵詞與文獻蒐集後，由利害關係人決定出關鍵議題與保全對象。第二、第三步驟，請各專業之利害關係人與專家填寫各風險組成之因子，由因子選擇或建構模式，並經由模式（可為個別模式或整合模式）產製現況與未來危害、暴露與脆弱度地圖，進而疊加合成風險地圖；其中，脆弱度由保全對象針對危害的調適能力與敏感度組成。第四步驟，根據風險與三個風險組成的未來變化趨勢，針對各因子制定調適選項，評估各調適選項之效用（重新經由模式產製風險地圖）。此時的調適力會包含調適能力與調適行動兩個層面。藉由此程序在不同情境與時間段之討論可完成第五步驟，形成調適路徑。最後，可透過現實中即時的監測及修正，完成第六步驟監測及修正調適路徑的目的，進而形成 CSAA 中動態調適路徑。本研究之案例示範包含上述的一至四步驟，然而關鍵議題是由本研究透過文獻回顧訂定，並未與利害關係人討論。

由風險模板解構後的各領域因子，為跨領域之關鍵。藉由因子分析，可以找出領域間共同或獨立的因子，從模式角度，可以幫助使用者了解領域間的資訊流，以便建構弱跨領域或強跨領域之整合量化評估模式；在調適選項的設計上，各領域間的共同因子能提醒利害關係人，在考慮這些具跨領域共同因子的調適選項成效時，不能僅關注單領域的風險變化，因為在降低某領域之未來風險時，可能會加劇其他領域之未來風險，此類現象稱之為「取捨效應」(Trade-offs)；相反的，某些調適選項則可以同時幫助到不同領域，而此種現象稱之為「協同效應」(Synergies)。本研究為了更精準量化跨領域間風險之競合關係，建構強跨領域之整合模式於第七章呈現分析結果。

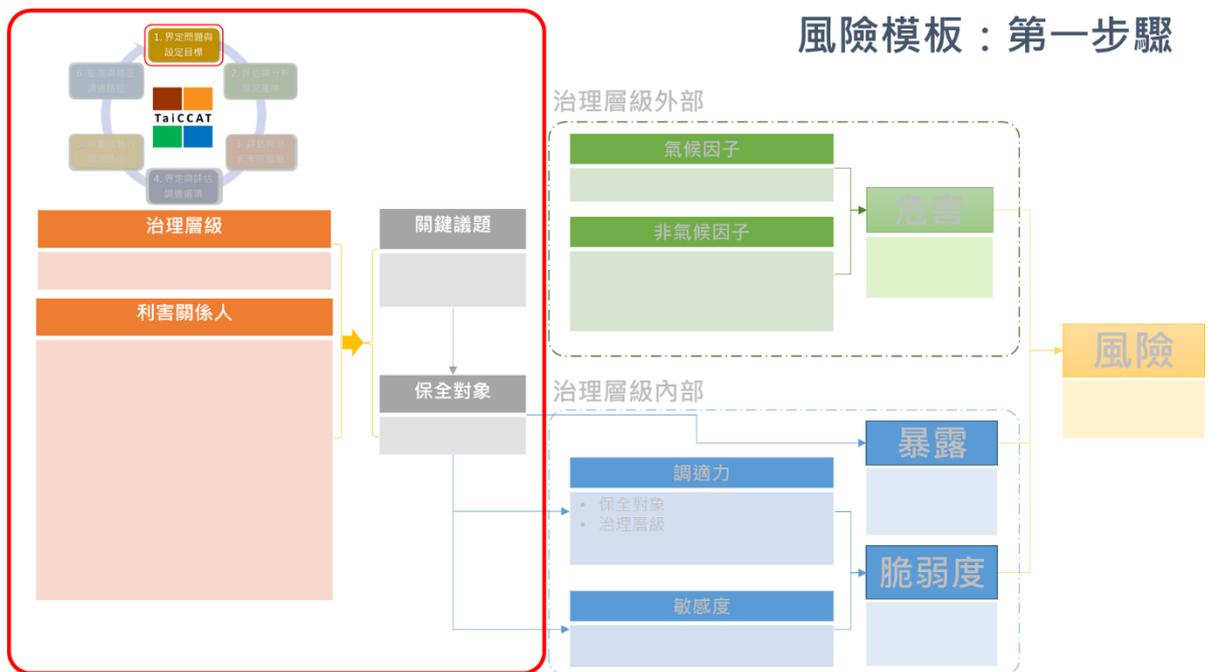


圖 3-3、氣候智慧調適演算法之風險模板操作第一步驟

定義治理層級（中央、地方或社區），應用物質流與資訊流確定利害關係人，並分類成（1）與治理層級相關（2）與保全對象相關（3）與議題相關單位，討論關鍵詞與文獻蒐集後，由利害關係人決定出關鍵議題與保全對象。

風險模板：第二、三步驟

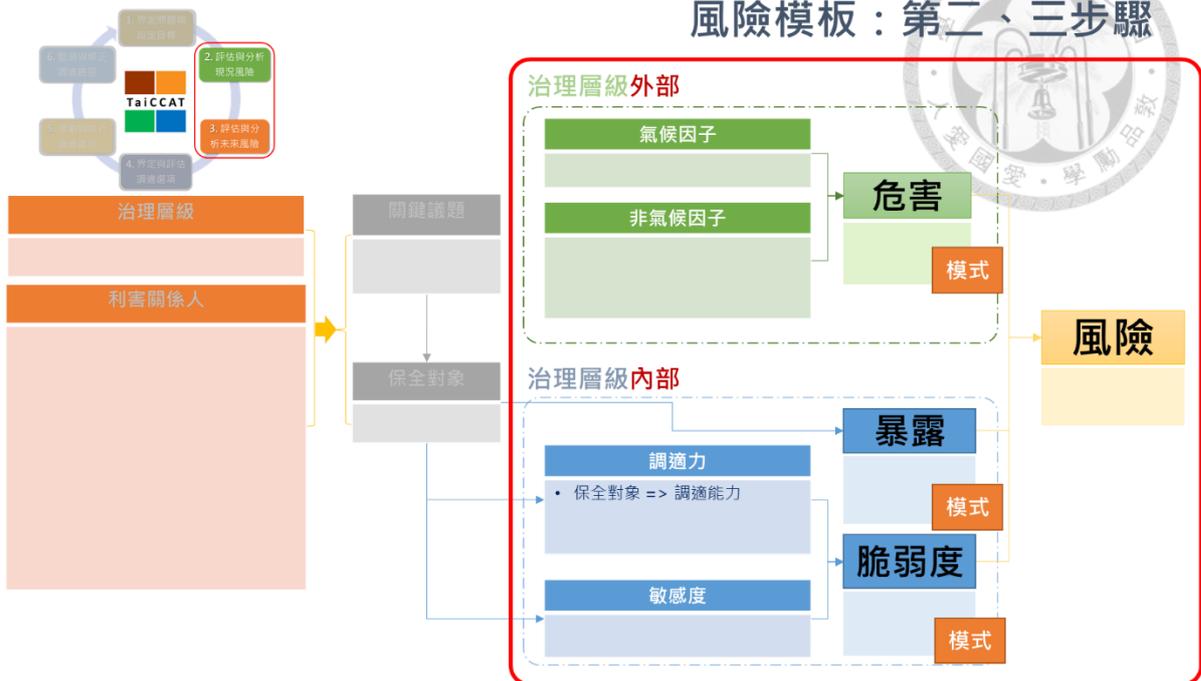


圖 3-4、氣候智慧調適演算法之風險模板操作第二、三步驟

請各專業之利害關係人與專家填寫各風險組成因子，經由模式（可為個別模式或整合模式）產製現況與未來危害、暴露與脆弱度地圖，進而疊加合成風險地圖，其中脆弱度由保全對象針對危害的自主調適能力與敏感度組成。

風險模板：第四步驟

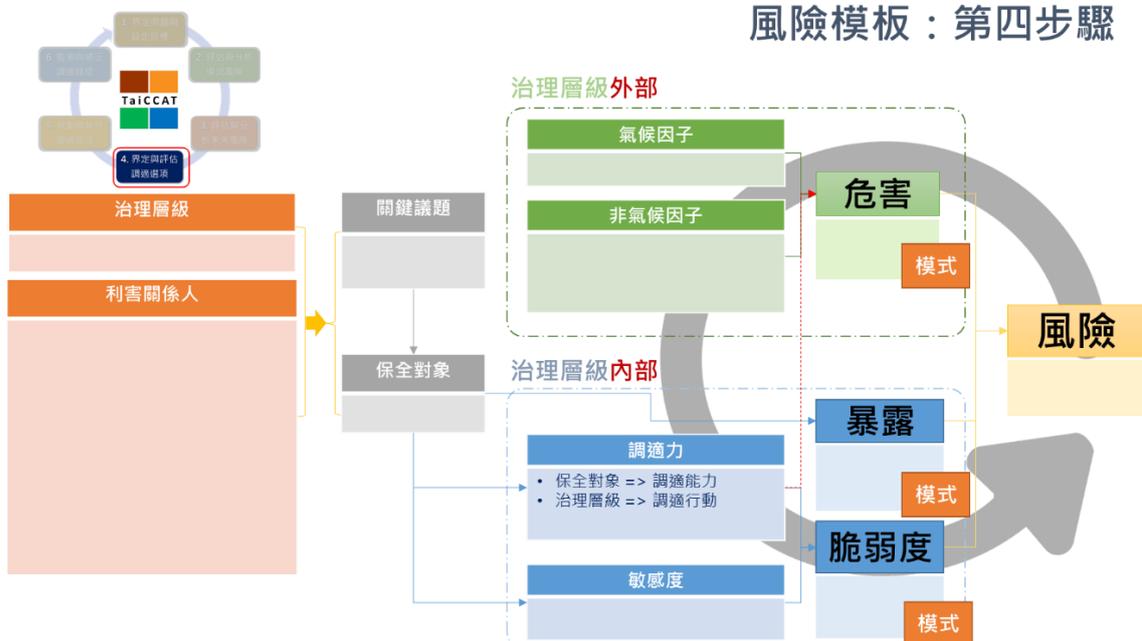


圖 3-5、氣候智慧調適演算法之風險模板操作第四步驟

根據風險與三個風險組成的未來變化趨勢，針對各風險組成因子制定調適選項，並經由模式評估各調適選項之效用（再一次產製風險地圖）。此時的調適力會包含保全對象與治理層級兩個層面，其中治理層級的調適行動可能會影響危害之未來變化程度。



3.1.2 風險指標

根據本研究之示範案例，制定以下兩個風險指標，分別為代表水資源供水系統於公共供水（生活用水與工業用水）之缺水風險的缺水指標（Shortage Index, SI）與農業糧食減產風險的減產率指標（Yield Reduction Ratio, YRR），用以探討水資源供水系統與糧食生產的風險競合關係，其計算方式如式(3.1)與(3.2)：

$$\begin{cases} SI = \frac{100}{N_{total\ year}} \sum_{n=1}^{N_{total\ year}} \left[\sum_{d=1}^{N_{day\ in\ year}} \left(\frac{Deficit_{n,d}}{Demand_{n,d}} \right) \right]^2 \\ Deficit_{n,d} = (Demand_{n,d} - Supply_{n,d}) \end{cases} \quad (3.1)$$

其中， $N_{total\ year}$ 為資料總年數，本研究以 20 年為一組， $N_{total\ year} = 20$ ； $N_{day\ in\ year}$ 為該年天數； $Demand_{n,d}$ 、 $Supply_{n,d}$ 與 $Deficit_{n,d}$ 為第 n 年 d 日的需水量、供水量與差值。

$$YRR = \sum_c^{crop\ type} \sum_t^{plant\ date} \left(\frac{Potential_{c,t} - Actual_{c,t}}{Potential_{c,t}} \right) \quad (3.2)$$

其中， $Potential_{c,t}$ 與 $Actual_{c,t}$ 分別為 c 作物於 t 時間插秧或播種的潛能產量與實際產量，潛能產量在本研究中只考慮溫度之影響，不考慮缺水逆境，實際產量則包含溫度與缺水逆境。

3.2 情境設定模組

情境設定分為兩部分，第一部分為氣候情境，氣候情境是由不同的大氣環流模式（General Circulation Models, GCMs）在四個不同代表濃度途徑（Representative Concentration Pathways, RCPs）（圖 3-6）下所模擬出的氣象資料。由於 GCMs 的網格解析度較低，依本研究需求，氣候情境需要經多測站氣象合成模式作時間與空間降尺度，方能產製氣象資料供其他模式使用，該方法於 3.2.1 與 3.2.2 節中介紹。第二部分為社會經濟情境（Socio-Economic Scenarios），目前尚未有統一的制定方式，本研究根據桃園示範案例，參照相關機構之報告書，自行設定未來短期（2021 年至 2040 年）之社會經濟情境，詳細推估方法見 3.2.3 節。

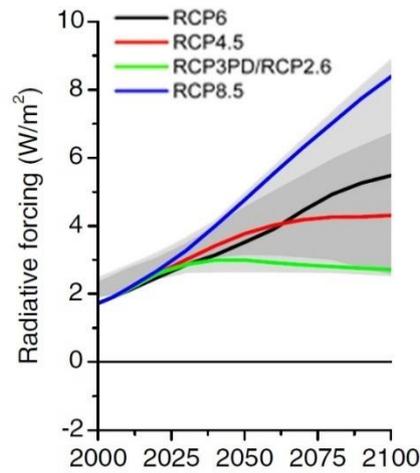


圖 3-6、代表濃度路徑 (RCPs) 之輻射強迫力定義示意圖

淺灰色區域代表原先整合評估模式 (IAM, Integrated Assessment Model) 情境 98% 的範圍, 深灰色代表 90% 的範圍。資料來源: (Van Vuuren et al., 2011)。

3.2.1 GCMs 挑選與 GCMs 資料降尺度

GCMs 挑選與 GCMs 資料降尺度整體流程如圖 3-7 所示。首先決定 GCM、RCP 與未來時段區間; 進行第一階段偏差量校正和空間分類 (Bias Correction Spatial Disaggregation, BCSD) 降尺度, 產製 5km × 5km 網格化氣象資料; 再由該資料計算第二階段多測站氣象合成模式降尺度之各月份統計參數修正值, 包含平均值與標準差, 以下分別對 GCMs 挑選與 GCMs 資料降尺度進行說明。



圖 3-7、GCMs 挑選與 GCMs 資料降尺度之流程圖

GCMs 挑選

根據 IPCC AR5 的報告, "No model scores high or low in all performance metrics, but some

models perform substantially better than others for specific climate variables or phenomena."，沒有特定的 GCM 模式能在全球都有良好的表現，因此建議，於氣候變遷風險評估時，應採用系集 (Ensemble) 的方式。然而，考慮到計算的時間成本與過多的未來變動可能性，本研究認為應挑選部分於台灣與本研究區桃園表現較好的 GCMs 作為氣候情境之設定，因此本研究採用北區最適的五個 GCMs (Lin & Tung, 2017) 中的四個作為本研究挑選的 GCMs (註：其中 HadGEM2-AO 資料格式不一致，故暫不使用)，分別為 NorESM1-ME、CSIRO-Mk3-6-0、CCSM4 與 bcc-csm1.1-m，並搭配最高與最低輻射強迫力之對應 RCPs，分別為 RCP8.5 與 RCP2.6，共八種 GCMs 與 RCPs 組合的氣候情境設定，於未來時段上可進一步分為四個代表區間，分別為 2021 年至 2040 年、2041 年至 2060 年、2061 年至 2081 年與 2081 年至 2100 年。

GCMs 資料降尺度

由於 GCMs 的網格解析度較低，需經過降尺度後才能使用，本研究採用兩階段降尺度(圖 3-7)。第一階段為使用 TCCIP 產製經 BCSD 的 5km × 5km 日降雨量與日均溫網格資料，計算得出空間上各測站鄰近網格點於各月份之日均溫與日降雨量的平均值與標準差修正值，如計算式(3.3)到(3.6)所示：

$$Ratio_{Smo,m}^{P,Avg} = \frac{E[P_{Future,Smo,m}]}{E[P_{Baseline,Smo,m}]} \quad (3.3)$$

$$Ratio_{Smo,m}^{P,Std} = \frac{Std(P_{Future,Smo,m})}{Std(P_{Baseline,Smo,m})} \quad (3.4)$$

$$Delta_{Smo,m}^{T,Avg} = E[T_{Future,Smo,m}] - E[T_{Baseline,Smo,m}] \quad (3.5)$$

$$Ratio_{Smo,m}^{T,Std} = \frac{Std(T_{Future,Smo,m})}{Std(T_{Baseline,Smo,m})} \quad (3.6)$$

其中， $Ratio_{Smo,m}^{P,Avg}$ 與 $Ratio_{Smo,m}^{P,Std}$ 為 Smo 測站第 m 月雨量之平均值與標準差修正值； $Delta_{Smo,m}^{T,Avg}$ 與 $Ratio_{Smo,m}^{T,Std}$ 為 Smo 測站第 m 月溫度之平均值與標準差修正值；下標 $Future$ 與 $Baseline$ 為 GCM



在某 RCP 設定下模擬之未來與基期的氣象日模擬資料，下標 $Stno$ 與 m 代表鄰近測站 $Stno$ 的網格點與第 m 月份於該時段（20 年）的氣象日資料。

第二階段降尺度則是由多測站氣象合成模式（於 3.2.2 節介紹）降尺度到各測站，將氣候情境修正值轉化為水資源及糧食生產評估可以使用的日氣象資料，其中需包含日降雨量、日均溫、日最高溫與日最低溫。繁衍未來氣象資料時，本研究假設發生降雨事件的機率不變，僅針對各氣象變數的平均值與標準差進行修正。雨量方面為各月平均值與標準差乘上各月的變化比率值 (Ratio)；溫度方面，根據歷史資料分析，日均溫與日最高、最低溫具高度相關性，且於不同時段區間上並無明顯相關性程度的改變。因此，本處假設其適用於同一個溫度修正值，日均溫、日最高溫、日最低溫的修正方式皆為各月平均值加上各月變化差值 (Delta)，各月標準差乘上各月變化比率值 (Ratio)，如計算式(3.7)與(3.8)所示：

$$\begin{cases} E[P_{Adj, Stno, m}] = E[P_{Obv, Stno, m}] \times Ratio_{Stno, m}^{P, Avg} \\ Std(P_{Adj, Stno, m}) = Std(P_{Obv, Stno, m}) \times Ratio_{Stno, m}^{P, Std} \end{cases} \quad (3.7)$$

$$\begin{cases} E[T_{Adj, Stno, m}] = E[T_{Obv, Stno, m}] + Delta_{Stno, m}^{T, Avg} \\ Std(T_{Adj, Stno, m}) = Std(T_{Obv, Stno, m}) \times Ratio_{Stno, m}^{T, Std} \end{cases} \quad (3.8)$$

其中，下標 Adj 與 Obv 代表經修正與歷史觀測資料。

3.2.2 多測站氣象合成模式

為產製空間上多測站的未來氣象日資料，本研究以 Python 撰寫具未來情境校正模組的多測站氣象合成模式 (MultiSiteWthGen)。首先，本研究以 Richardson Type (Richardson, 1981) 為主要單測站模擬架構，在發生降雨（濕天）與沒發生降雨（乾天）的情況下，分別模擬各類氣象變數，其中降雨事件是以一階馬可夫鍊產製，於每個月計算 $P(W)$ 、 $P(W/W)$ 與 $P(W/D)$ ，如式(3.9)到(3.12)所示。

$$P(W)_i = \frac{\text{Number of wet days in month } i}{\text{Total days in month } i} \quad (3.9)$$

$$P(W|W)_i = \frac{\text{Number of two consecutive wet days in month } i}{\text{Number of wet days in month } i} \quad (3.10)$$

$$P(D|W)_i = 1 - P(W|W)_i \quad (3.11)$$

$$P(W|D)_i = 1 - P(D|D)_i \quad (3.12)$$

雨量則以單參數或雙參數之機率分布的反函數產生（Inverse Cumulative Distribution Function, Inverse CDF），如式(3.13)，其中參數估計採用最大似然估計（Maximum Likelihood Estimation, MLE）估計，而如果要使用更多參數的雨量分布，需要提供更高階的動差修正值。

$$P_{amount} = F(RN)^{-1} \quad RN \in U(0,1) \quad (3.13)$$

其中， P_{amount} 為雨量（mm）， $F(x)$ 為選用分布的累積機率函數， RN 為 0 到 1 之間的均勻分布（Uniform Distribution）隨機值。

溫度及其它氣象變數則以一階自迴歸模型條件在濕天與乾天下進行模擬，如式(3.14)，並以共變異矩陣維持變數間的關係。模擬過程中會先以二階傅立葉函數，以最小平方法迴歸出日的平均值與日標準差週期項，計算殘差（Residuals）（圖 3-8），如式(3.15)與(3.16)，再以 Cholesky 分解（Cholesky Decomposition）的方式計算式(3.14)中的參數 B ，如式(3.17)到(3.20)所示，產生具變數間相關性的隨機變數。

$$\chi_{y,i}(j) = A\chi_{y,i-1}(j) + B\varepsilon_{y,i}(j) \quad (3.14)$$

$\chi_{y,i}(j)$ 為 $j \times 1$ 的殘差向量； y 與 i 分別代表 y 年中的第 i 天； j 代表除雨量外的氣象變數； $\varepsilon_{y,i}(j)$ 為 $j \times 1$ 的標準常態分佈隨機值向量。

$$\chi_{y,i} = \frac{(X_{y,i} - \mu_{x,i})}{\sigma_{x,i}} \quad (3.15)$$

$X_{y,i}$ 為 y 年第 i 天的歷史觀測值； $\mu_{x,i}$ 與 $\sigma_{x,i}$ 為式(3.16)迴歸出變數 x 第 i 天的平均值與標準差，



i 屬於 1 到 365 天。

$$\begin{cases} Y = C_0 + C_1 \sin\left(\frac{t}{T+D_1}\right) + C_2 \sin\left(\frac{2t}{T+D_2}\right) \\ T = \frac{365}{2\pi} \end{cases} \quad (3.16)$$

Y 為傅立葉迴歸值； T 為週期； t 為 1 到 365 天； C_0, C_1, C_2, D_1, D_2 為迴歸係數。

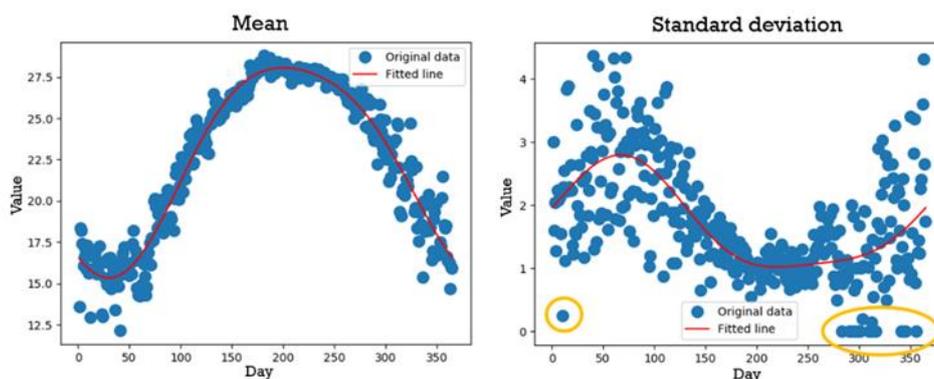


圖 3-8、二階傅立葉函數迴歸平均值與標準差

其中黃色圈圈為標準差的離群值，原因為資料筆數在該天過少導致，因此本研究在 MultiWthGen 利用前後十天資料點的平均值替代該點資料後再進行迴歸，降低偏誤。

$$A = M_1 M_0^{-1} \quad (3.17)$$

$$BB^T = M_0 - M_1 M_0^{-1} M_1^T \quad (3.18)$$

$$M_0 = \begin{pmatrix} 1 & \cdots & \rho_0(1, j) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \rho_0(j, 1) & \cdots & 1 \end{pmatrix} \quad (3.19)$$

$$M_1 = \begin{pmatrix} \rho_1(1, 1) & \cdots & \rho_1(1, j) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \rho_1(j, 1) & \cdots & \rho_1(j, j) \end{pmatrix} \quad (3.20)$$

M_0 與 M_1 分別為 lag-0 與 lag-1 的殘差共變異矩陣（此處同共相關矩陣）； $\rho_0(m, n)$ 為在 t 時變數 m 與 n 之間的相關係數； $\rho_1(m, n)$ 為變數 m 在 t 時與 n 在 $t-1$ 時的相關係數。



最後再透過各月的平均值與標準差，將產製的殘差轉換回變數值，如式(3.21)，其中本研究利用三次樣條插值（Cubic Spline Interpolation）平滑月平均統計值成日尺度，以去除模擬值之不連續性，如圖 3-9 所示。

$$X_{y,i}(j) = \mu_{dorm}(j) + \sigma_{dorm}(j) \cdot \chi_{y,i}(j) \quad (3.21)$$

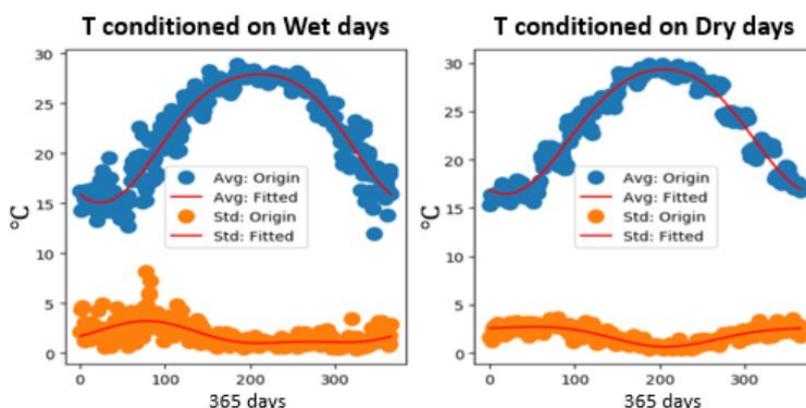


圖 3-9、模擬值之不連續性

左邊為濕天的氣溫模擬值，由於變異程度較大不連續性較不明顯，右邊為乾天的氣溫模擬值，不連續性可以明顯地看出；而藍點是平均值，不連續性可較清楚從乾天模擬中看出，橘色點為標準差，不連續性沒有那麼明顯；紅色線是二階傅立葉函數迴歸出的週期項。

在產生氣象資料的時候，除了重現該站的統計特性外，空間上的統計特性也希望被維持。Khalili et al. (2007) 提出純統計的方式延伸單站 Richardson 類型的氣象合成模式至多站氣象合成模式。本研究應用並調適其方法，建立桃園地區的多站氣象合成模型。該方法主要利用式(3.22)與(3.23)產製具空間相關的隨機變數，再將各隨機變數放入原單站氣象合成模式中進行模擬，其中各月的權重矩陣在本研究中是以相關性矩陣經經驗次方加權與列標準化後而得，本研究設溫度相關參數、雨量與降雨事件的權重經驗次方數，分別為 1、3 與 2 (Khalili et al., 2007)，目的在於定義該區域的空間自相關性 (Spatial Autocorrelation) 的方向，而式(3.22)中的 γ 是移動平均係數 (Moving Average Coefficient)，目的在於定義整體空間的空間自相關程度，空間自相關性於本研究中採用空間相依指標 (Spatial Dependence Indicator, SDI) (Khalili,

Brissette, & Leconte, 2009), 如式(3.24)。在決定 γ 的過程中, 溫度相關參數因各站間高度相關, 且 SDI 多趨近於 1, 所以直接採用各月中 γ 的最大值進行模擬, 雨量及降雨事件則必須先透過多次模擬建立各月 γ 與 SDI 的三階多項式迴歸曲線, 再以共同歷史觀測年中 365 天各天的各年平均 SDI 值對應出 365 個 γ 值進行模擬。

$$V = \gamma_d \times W_m \times u + u \quad (3.22)$$

$$\gamma_d \in \left(\frac{-1}{\text{eig}(W_m)_{\max}}, \frac{-1}{\text{eig}(W_m)_{\min}} \right), d \in m \quad (3.23)$$

V 為 $s \times 1$ 的具空間相關隨機變數向量, s 為測站數; γ 為 d 天的移動平均參數; W_m 為第 m 月的 $s \times s$ 權重矩陣; u 為 $s \times 1$ 的隨機變數向量, 雨量與降雨天模擬時 $u \in U(0, 1)$, 其它氣象變數時 $u \in N(0, 1)$ 。

$$SDI = \frac{\sum_{i=1}^n x_i \sum_{j=1}^n w_{ij} x_j / \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij}}{\sum_{i=1}^n x_i^2 / n} \quad (3.24)$$

SDI 為空間自相關性指標; n 為測站數; $w_{i,j}$ 為 i 測站對於 j 測站的權重值; x_i 與 x_j 為測站 i 與測站 j 的觀測值。

3.2.3 社會經濟情境設定

根據 IPCC AR5, 社會經濟情境 (Socio-Economic Scenarios) 為對未來整體社會與經濟質化或量化的描述, 且在描述之過程需維持不同空間尺度間的一致性, 如全球到地方。台灣目前尚未有國家或地方統一針對氣候變遷研究之社會經濟情境設定, 因此本研究將依需求參考相關單位之報告書, 自行設定未來社會經濟情境。本研究以水資源與農業中的糧食生產作為跨領域探討對象, 其中糧食生產部分為本研究之調適方, 工業與民生用水之變化量為本研究主要的社會經濟情境設定。工業用水部分, 由政府經未來工業區開發面積與產業類別推估未來工業用水量, 生活用水則會依照未來可能的人口、每人每日用水量、普及率、抄見率與漏水率等項目進行推估。考量既有報告的推估並不一致, 為講求可信度, 參考水利署民國 106 年



《臺灣北部區域水資源經理基本計畫》提供之預測資訊作為情境制定依據，並參考民國 110 年與民國 120 年自來水漏水率假設短期未來（2021 年至 2040 年）保守與節水類別的公共給水民國 105 年到民國 120 年的需水量成長率，詳見 5.2 節。

3.3 水資源模組

3.3.1 GWLF 流量模式

Generalized Watershed Loading Function (GWLF) 是由 Haith 及 Shoemaker 等人，於 1987 年發展的非點源污染傳輸水文物理模式模式 (Haith & Shoemaker, 1987)，該模式主要是藉由集水區中各水文變數在地表和含水層間之平衡關係來模擬流量，GWLF 模式能反映出氣象因子，如溫度與雨量、土地利用和土壤特性改變對於流量的影響。模式結構上，GWLF 模式將集水區的水平衡模式由上至下分為地表、未飽和含水層、飽和含水層和深層飽和含水層四層，模式之水平衡概念如圖 3-10 所示。

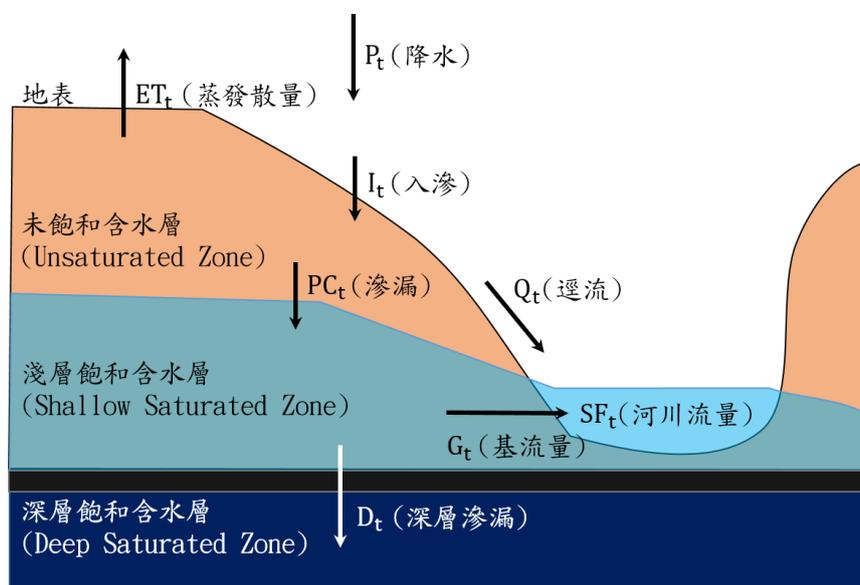


圖 3-10、GWLF 模式水平衡關係示意圖 (林軒德，2017)



河川流量於 GWLF 中是由地表逕流與淺層飽和含水層形成的基流量所加總而成，如式 (3.25)：

$$SF_t = Q_t + G_t \quad (3.25)$$

其中， SF_t 為河川流量 (cm/day)； Q_t 為地表逕流量 (cm/day)； G_t 為基流量 (cm/day)。

地表逕流

估算地表逕流時，GWLF 採用美國水土保持局 (SCS, Ogrosky and Mockus, 1964) 之曲線值法 (Curve Number Method) (Chow, 1964)，如式(3.26)與(3.27)所示。

$$Q_t = \frac{(P_t - 0.2w_t)^2}{(P_t + 0.8w_t)} \quad P_t > 0.2w_t \quad (3.26)$$

$$w_t = \frac{2540}{CN_t} - 25.4 \quad CN \leq 100 \quad (3.27)$$

其中， w_t 為集水區最大蓄積深度，其為初始降雨量扣掉初始降雨扣除量 (Detention Capacity)，包含窪蓄、截流與初始入滲之後的深度 (cm/day)； P_t 為降雨量 (cm/day)； CN 即表示 Curve Number，其值因土地利用、土壤質地或排水特性及臨前土壤水分 (Antecedent Soil Moisture, AM) 而不同 (Tung & Haith, 1995)。

根據美國農業部自然資源保護局 (Natural Resources Conservation Service, NRCS。原名為水土保持局 Soil Conservation Service, SCS)， CN 值依臨前土壤水份不同 (因臨前土壤水分觀測不易，故採用臨前五天累積雨量替代臨前土壤水分)，可分為三類，分別為 $CN3$ (溼潤情況)、 $CN2$ (平均情況)、 $CN1$ (乾燥情況)，其中 $CN2$ 值則依照土壤類別與土地利用而有所不同，可由 NRCS 提供之 $CN2$ 值對照表中查得。 $CN1$ 與 $CN3$ 之值則是根據 V. Chow, Maidment, and Mays (1988) 提出之方法計算而得，如式(3.28)與(3.29)所示：

$$CN1 = \frac{4.2CN2}{10 - 0.058CN2} \quad (3.28)$$



$$CN3 = \frac{23CN2}{10 + 0.13CN2} \quad (3.29)$$

而最終 CN 值會參照臨前五日累積降雨量對應表 3-1 與圖 3-11 內差而得，其中臨前累積降雨量參考點根據月均溫分為休耕期與生長期，大於 10°C 為生長期，反之為休耕。

表 3-1、AM1 與 AM2 之值

	休耕	生長期
AM1	1.3 cm	3.6 cm
AM2	2.8 cm	5.3 cm
月均溫大於 10°C 為生長期，反之為休耕。		

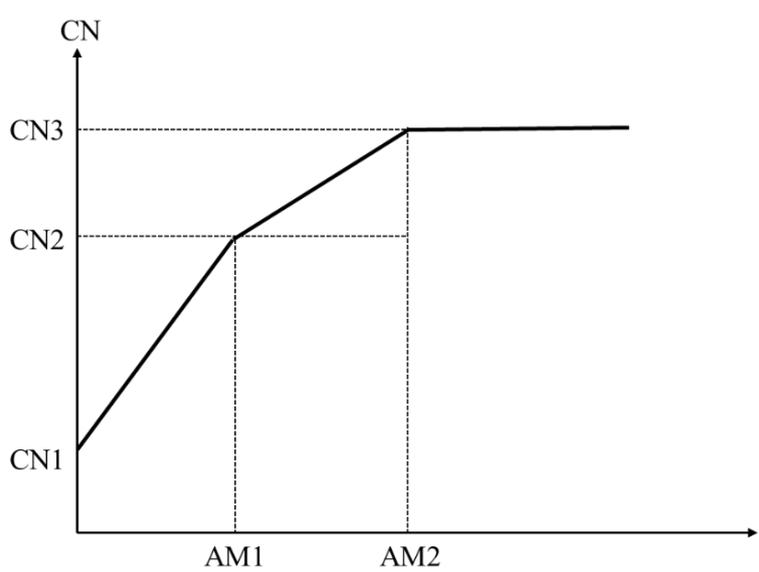


圖 3-11、CN 值與臨前水分內插關係圖

未飽和含水層

GWLF 模式先計算地表逕流再計算入滲量，如式(3.30)：

$$I_t = P_t - Q_t \quad (3.30)$$

而入滲量會先進入未飽和含水層，只有當其土壤水分含量大於該土壤層最大含水量時才會滲漏至淺層飽和含水層。另外，未飽和層之土壤水分亦可能因蒸發散而離開土壤層，未飽和層



之水平衡式可由式(3.31)表示：

$$U_{t+1} = U_t + I_t - ET_t - PC_t \quad (3.31)$$

其中 U_t 為未飽和含水層高於凋萎點之土壤水分含量 (cm/day)； ET_t 為蒸發散量 (cm/day)； PC_t 為滲漏量 (cm/day)；而 I_t 為入滲量 (cm/day)。其中蒸發散量 (ET_t) 會受土壤水分、地表覆蓋特性影響，可由式(3.32)決定：

$$ET_t = \text{Min}[K_{st} \times K_{ct} \times PET_t, U_t + I_t] \quad (3.32)$$

PET_t 為潛勢能蒸發散量 (cm/day)， K_{ct} 與 K_{st} 分別為覆蓋係數與土壤水分壓力係數，蒸發散量會受未飽和含水層該時刻總含水量所限制。其中覆蓋係數 (K_{ct}) 決定於土地利用方式；土壤水分因子 (K_{st}) 則採用 Boonyatharokol and Walker (1979) 之公式進行計算，如式(3.33)。

$$\begin{cases} K_{st} = 1 & \text{if } U_t \geq 0.5U^* \\ K_{st} = \frac{U_t}{0.5U^*} & \text{if } U_t < 0.5U^* \end{cases} \quad (3.33)$$

其中， U^* 為未飽和含水層的最大可含水量 (cm)。

潛能蒸發散量的值會受白天的長短、飽和水氣蒸氣壓和日均溫影響，在此模式中潛勢能蒸發散量由 Hamon 公式 (Lee & Huang, 2014; Shaw & Riha, 2011) 估算，如式(3.34)與(3.35)所示：

$$PET_t = 2.98 \times \frac{H_t e_{s,t}}{T_t + 273.2} \quad (3.34)$$

$$e_{s,t} = 0.6108 \times \exp\left(\frac{17.27T}{T + 237.3}\right) \quad (3.35)$$

其中， H_t 為每日平均日照時數 (hour)； $e_{s,t}$ 為 T_t 下之飽和蒸汽壓 (kPa)； T_t 為日均溫 ($^{\circ}\text{C}$)。當土壤水分超過田間含水量 (土壤最大可含水量) 時，則會產生滲漏 PC_t (cm/day)，滲漏量的計算方法如式(3.36)。

$$PC_t = \text{Max}\left[0, U_t + I_t - ET_t - U^*\right] \quad (3.36)$$



淺層飽和含水層

淺層飽和含水層之水平衡關係可由式(3.37)表示，而由淺層飽和含水層所滲出供給河川流量的基流量可由式(3.38)表示。

$$S_{t+1} = S_t + PC_t - G_t - D_t \quad (3.37)$$

$$G_t = r \times S_t \quad (3.38)$$

其中， S_t 是淺層飽和含水層之土壤水分含量 (cm)； PC_t 是由未飽和含水層滲漏至淺層飽和含水層之水量 (cm/day)； G_t 是由淺層飽和含水層滲漏至河川之水量 (cm/day)；而 D_t 是入滲至深層飽和含水層之水量 (cm/day)，本研究假設為零。

3.3.2 系統動力模式

系統動力學由 Forrester 於 1961 提出，被廣泛應用於處理系統內變數隨著時間動態變化的相互關係及回饋關係較複雜的系統。在系統動力模式中，最重要的三個元件分別為儲存 (Stock or Level)、流量 (Flow or Rate) 與助動 (Converter or Auxiliary) 元件，元件間的因果關係以箭頭做連結表示。儲存元件描述系統中資源量隨時間變化的關係，如水庫蓄水量與淨水廠儲水與淨水容量；流量元件說明資源量的流向與取用規則，如灌溉水圳每日從水庫的取水量、攔河堰入流量與淨水廠放水量等；助動元件則用於輔助儲存元件或流量元件的計算與規則設計需求，如水庫運用規線、渠道最大傳輸容量、淨水廠最大處理容量與基流量等。本研究使用美國 Ventana 系統公司研發之系統動力學應用軟體 Vensim 進行桃園水資源系統動力之模式建構，詳細建模資料與設定於 5.3 節中介紹，其優點為易操作的圖形介面，可以以拖拉之方式組合上述三種元件，建構系統架構圖，對於本研究建構桃園地區水資源供水系統 (圖 3-12) 有相當的助益，圖 3-13 為 Vensim 建構之桃園供水系統動力模式，本處使用王尊麟 (2019) 所建之 Vensim 桃園系統動力模式。

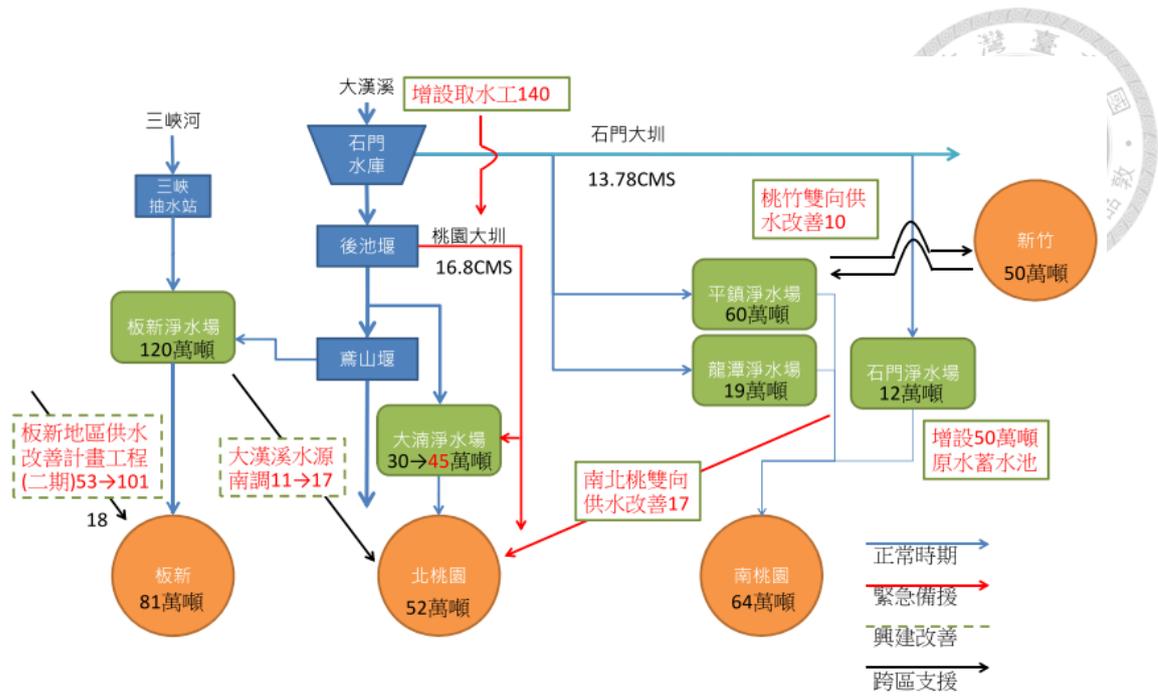


圖 3-12、石門水庫供水系統架構圖

(資料來源：水利署民國 103 年《石門水庫供水區水資源活化計畫》)

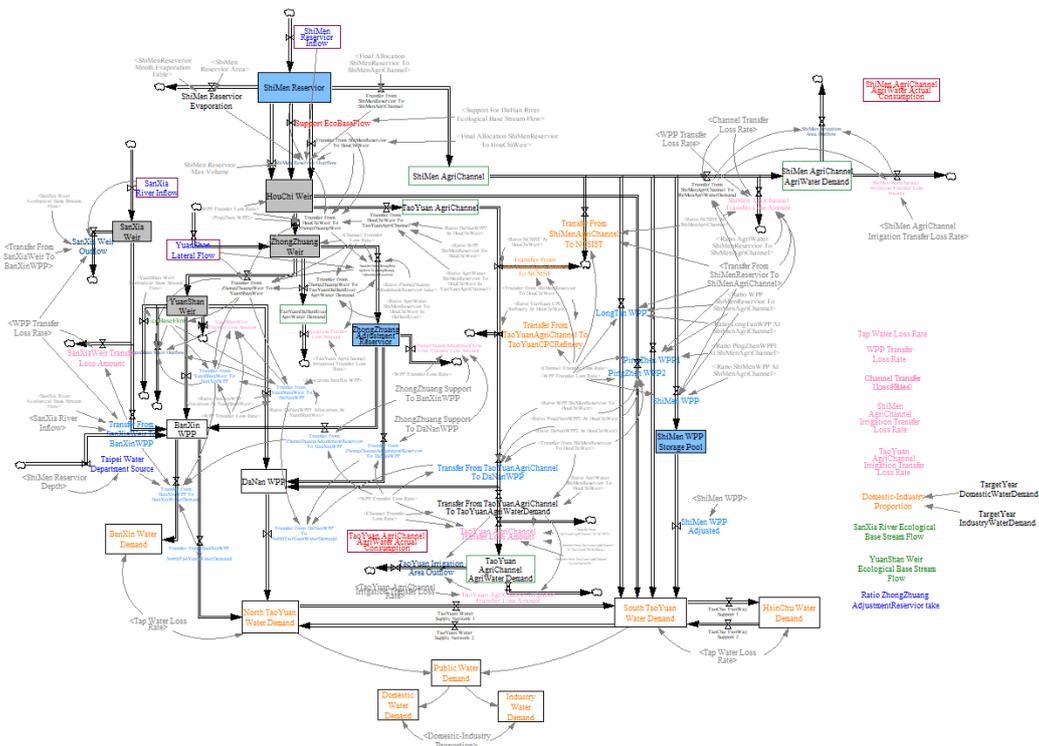


圖 3-13、Vensim 桃園供水系統動力模式



此外，本研究為建構強跨領域之氣候、水資源與糧食整合模式，需要更好的串接性與模式修正上的彈性，這部分是圖形化介面軟體無法達成的。因此，本研究進一步將 Vensim 建構之水資源系統動力模式以 PySD Python 套件 (Houghton & Siegel, 2015) 轉換成純 Python 語法之.py 檔，如此將該模式融合到 AgriHydro 中。轉換後的系統檔是以尤拉法 (Euler's method) 解微分方程，無法選用龍格-庫塔法 (Runge-Kutta methods) 等其他方法，然而該限制對於本水資源系統之模擬，並不會造成影響，因為本桃園供水系統動力模式只有三個儲存元件，且關係皆為單純日尺度下的進出流，不影響模擬精度。

3.4 作物模組

3.4.1 AquaCrop 作物模式

AquaCrop 為美國國際農糧組織 FAO 所開發的免費作物模式 (Raes et al., 2009; Steduto et al., 2009)，自 2009 發布後，逐漸受研究者重視。本研究使用該模式估計糧食產量與作物需水量，其中作物需水量會再考慮灌溉效率、輸水損失與水源配比後 (詳見 4.2.1 節)，產製區域計畫灌溉用水量，藉此評估糧食生產的風險。農業相關用水量定義於表 3-2。AquaCrop 為水驅動類型的作物模式，其模擬流程如圖 3-14 所示，於本研究設定下，AquaCrop 會先參照累積生育度數 (Growing Degree Day, GDD) 推估冠層覆蓋度 (Canopy Cover)，再經過各生長階段的壓力系數 (Stress Coefficient, K_s)、作物係數 (Crop Coefficient, K_c)、蒸散比率 ($\sum (Tr/ET_o)$ ，其中 Tr 為蒸散量， ET_o 為潛能蒸發散量) 與水分產量系數 (Water Productivity Coefficient, WP) 計算出地表生物量 (Above-ground Biomass, B)，最後透過收穫指數 (Harvest Index) 的轉換，計算出作物產量 (Crop Yield, Y)。

表 3-2、農業常用水量名詞定義

名詞	定義
作物需水量	作物蒸發散量
田間需水量	作物蒸發散量+滲漏量，並考慮灌溉效率
田間灌溉用水量	田間需水量-有效雨量
區域計畫灌溉用水量	田間灌溉用水量+輸水損失量
區域實際灌溉用水量	水源實際供給灌溉的給水量

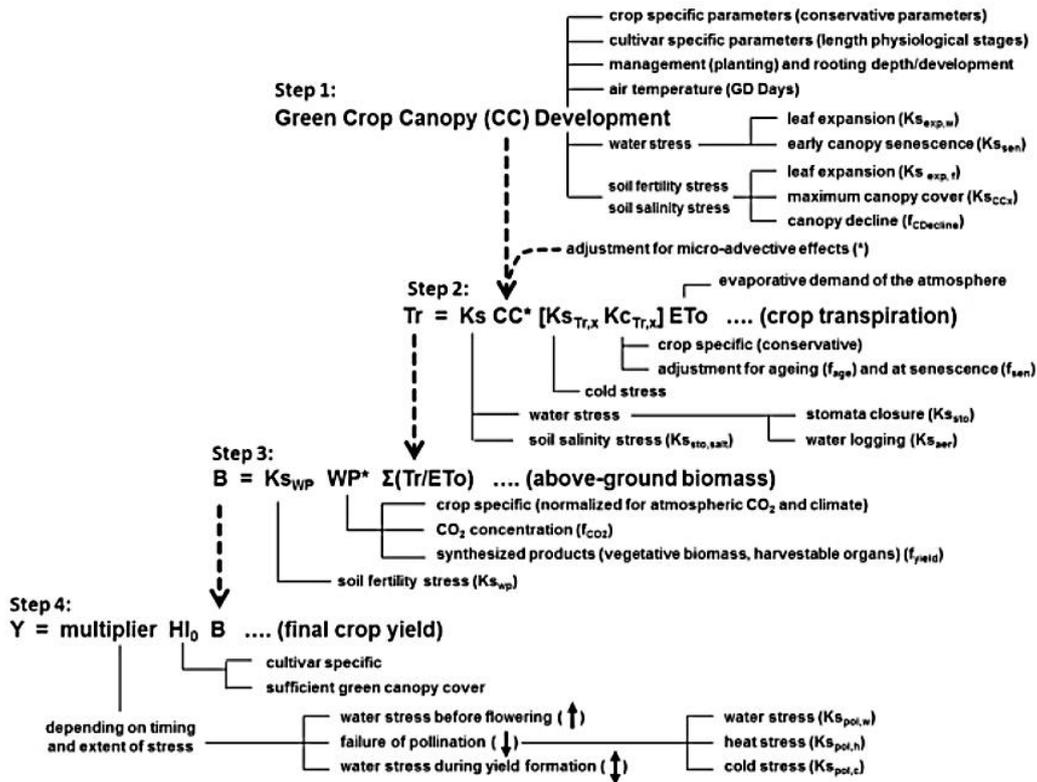


圖 3-14、AquaCrop 計算流程圖

AquaCrop 有以下六個環境設定檔：.CLI、.CRO、.IRR、.MAN、.SOL、.GWT，分別為天氣、作物、灌溉、田間管理、土壤與地下水的設定檔。在作物設定檔中可將參數分為兩類，分別為保守參數（Conservative Parameters）與非保守參數（Unconservative Parameters），保守參數在 AquaCrop 中，已經通過不同作物與不同地區氣象標準化，受作物與地區影響較小，不需要特別校正，同時 AquaCrop 提供多種土壤的參數檔，在資料不足的情況下選擇相應的土壤類型使用。表 3-3 說明本研究須提供 AquaCrop 之模擬資訊，其中氣象資料須包含日最低溫、

日最高溫、日雨量與日潛能蒸發散量，日潛能蒸發散量以 Hamon Equation 計算而得，如式(3.34) 所示；作物參數包含每公頃中的植株數、生長各階段之累積生育度數、開花期期長、最大冠層覆蓋度、最長根深與收穫指數；灌溉設定檔，可設為固定時間或時距灌溉，或設定閾值讓 AquaCrop 依照模擬狀況自動產生灌溉時程，其中閾值可為土壤含水量或湛水深；田間管理包含施肥與田埂高度等設定；土壤部分可依土壤結構需求設定多層土壤，土壤種類除了可選用 AquaCrop 所提供之範例檔，也可以自行輸入土壤資訊，包含土壤厚度、土壤最大可含水量、凋萎點、田間含水量、飽和含水量與水利傳導係數等，另外還有地下水設定檔。

表 3-3、Aquacrop 於本研究之必要輸入參數

參數名稱	單位	註解
每公頃中的植株數	株/公頃	種植密度
移植到開花期長 Transplanting to flowering	GDD/日期	作物品種特性
移植到衰老期長 Transplanting to senescence	GDD/日期	作物品種特性
移植到成熟/採收 Transplanting to mature/harvast	GDD/日期	作物品種特性
開花期期長 Duration of flowering	GDD/日期	作物品種特性
最大冠層覆蓋度 Maximum canopy cover	%	作物品種特性
收穫指數 Reference harvest index (HI)	--	作物品種特性
最大根深與對應日期	mm、GDD/日期	作物品種特性
土壤類別	--	土壤資訊，或直接提供參數
CN 值	--	水稻因湛水管理，因此不需設定
飽和水利傳導係數	mm/day	--
灌溉方式與規則	--	水稻為漫灌、大豆為溝灌
田間管理方式	--	在本章假設為最佳管理，不考慮土壤養分不足，只設定田埂高。
日最低溫、日最高溫、雨量、潛能蒸發散量	°C、°C、mm/day、mm/day	氣象資料



為了能使其整合至 AgriHydro 中，本研究透過 Python 系統操作指令，結合 AquaCrop Plugin 批次處理程式讀寫檔案，建立資訊流，藉此與其它子模式整合，此部分可視為弱跨領域。此外，本研究不考慮田間施肥管理與病蟲害所造成的減產情形，也不考慮地下水之影響，故於模式中，假設最佳施肥管理，並忽略地下水之模式設定。

3.4.2 水稻整田用水與湛水深不足之減產機制

由於本研究並無設定水稻生育期前的田區水平衡模擬，也就是 AquaCrop 模擬並不受整田用水之影響，然而整田用水的多寡會實際上會造成不同的 AquaCrop 初始湛水深（或土壤水分含量），同時也會影響水稻生長。此外，在 AquaCrop 中水稻在缺水方面的減產量估計上，僅考慮土壤含水量所產生的缺水逆境，並沒有將湛水深不足而造成減產之因素考慮進去，如此可能會造成產量模擬上的高估。湛水深的不足雖然不會直接使水稻發生缺水逆境，然而卻會間接影響水稻在溫度上的調控與病蟲害的管理等，進而影響水稻之分蘗數與生長發育。自 2001 年起，菲律賓的國際稻米研究所（International Rice Research Institute, IRRI）進行通氣式的水稻栽培模式研究，該研究嘗試將水稻栽培於非灌溉及非事先進行水田整地的土壤中，並以輔助式的灌溉（維持土層 15 cm 深之水分張力於 30 kPa）提供稻株水分（IRRI, 2001）。研究顯示，相較於淹灌式栽培之水稻，前者產量下降 14% 至 40%（Castaneda, Bouman, Peng, & Visperas, 2002）。因此，本研究根據插秧前水庫實際供水比例，設定不同土壤水分初始值，當水庫完全供水時，初始值為 3 公分湛水深；水庫供水打 75 折時，初始值為 90% 的飽和含水容量；打 5 折時，僅為 50% 飽和含水容量；如低於五折，則為田間含水容量，同時，參照 14% 至 40% 減產數值設計水稻在整田用水與湛水深不足之減產機制，如式(3.39)：

$$\begin{cases} Yield_{Final} = Yield_{AquaCrop} \times SSRatio \\ SSRatio = a \left(\frac{1}{N - N_{base}} \right) \end{cases} \quad (3.39)$$

其中， $Yield_{Final}$ 為考慮整田用水與湛水深不足後的產量 (ton/ha)； $Yield_{AquaCrop}$ 為 AquaCrop 模擬之產量 (ton/ha)；SSRatio 為剩餘產量比例 (%)；N 為不滿足設計湛水深之總天數 (day)；



N_{base} 為模擬湛水深不滿足設計湛水深差值小於容忍值之總天數 (day)，此處假設容忍值 5 (mm)； a 為減產程度參數，其會據插秧前水庫實際供水比例變動，反映整田不完全之影響，設定如式(3.40)：

$$\begin{cases} a = 0.86 & \text{if } Ratio_{reservoir} \geq 0.99 \\ a = 0.75 & \text{if } 0.99 > Ratio_{reservoir} \geq 0.75 \\ a = 0.65 & \text{if } 0.75 > Ratio_{reservoir} \geq 0.5 \\ a = 0.6 & \text{if } 0.5 < Ratio_{reservoir} \end{cases} \quad (3.40)$$

其中， $Ratio_{reservoir}$ 為插秧前水庫實際供水比例。

第四章、 AgriHydro 氣候變遷調適整合評估模式

本章著重解釋氣候變遷風險及調適評估研究之整合概念，如圖 4-1。整合概念是以 (1) 社會經濟 (Social-economic) 與生物物理 (Biophysical) 因子、(2) 空間尺度 (Spatial Scale) 與 (3) 時間尺度 (Time Scale) 組成整合的三維空間，並闡述兩類回饋機制：整合模式中各子模式間的資訊回饋以及決策對於風險評估的回饋影響。依此架構，進一步說明 AgriHydro 的模擬流程與整合架構。整體而言，4.1 節首先介紹整合概念與回饋機制，其中包含強跨領域整合模式之回饋機制與決策流程之回饋機制；於 4.2 節中，定位 AgriHydro 在整合框架下的位置，同時細節說明其整合方式。最後於 4.3 節中引入氣候智慧調適演算法，描述其聯合操作流程，並用於第七章的案例示範。

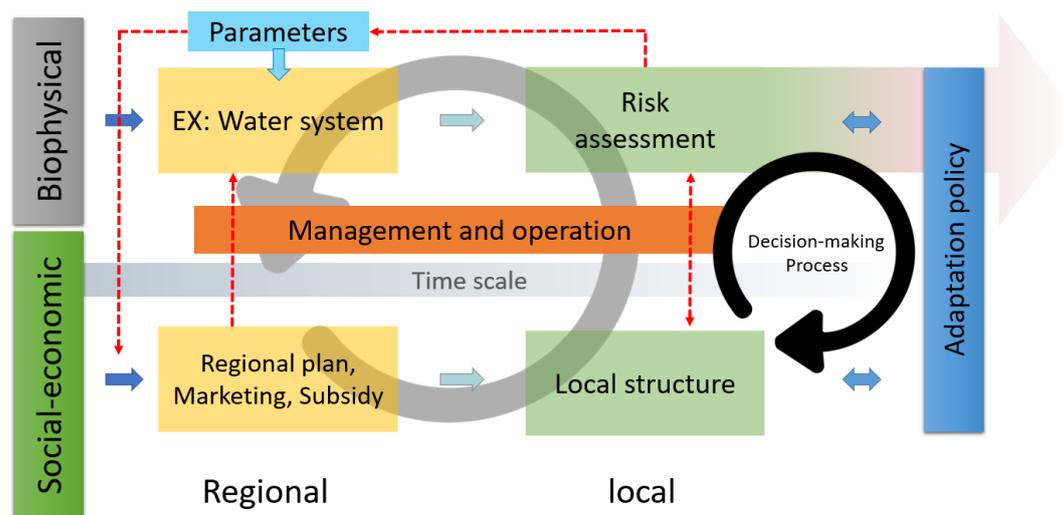


圖 4-1、氣候變遷風險及調適評估研究之整合概念架構圖

4.1 回饋機制

氣候變遷風險及調適評估之研究中，本研究將回饋機制分成兩種類別，第一種（圖 4-1 中淺灰色迴圈）為整合評估模式中的回饋機制，第二種（圖 4-1 黑色迴圈）為決策流程上的回饋機制，本節於下分別說明。



4.1.1 評估模式中的回饋機制

整合評估模式，其整合項目可分為三個維度，分別是(1)社會經濟與生物物理因子、(2)空間尺度與(3)時間尺度。這三個要素能組成整合模式中的任何節點(節點泛指資料或模式交匯之處)，而任兩個以上的節點便可建置回饋機制，如圖 4-2 所示。換句話說，這三個項目所展開之三維空間即為該整合模式可以建構回饋機制的空間範圍。社會經濟與生物物理因子的軸上，AquaHydro 整合了自然科學與社會經濟的資訊，首先，水資源供水系統與作物模式為自然科學部分；而當時時空背景下，糧食耕種面積、作物種類、水資源供水之基礎建設、工業用水需求與民生用水需求，則為社會經濟的部分。再者，空間尺度通常可被劃分成全球(Global)、國家(National)、區域(Regional)、地方(Local)/社區(Community)等尺度大小，本研究為整合區域(石門水庫供水區)與地方尺度(農田各分區)。最後，時間尺度可再被分成兩部分：模擬時間尺度與回饋時間尺度。模擬時間尺度指的是模式的計算頻率，而回饋時間尺度則為資訊傳遞更新之時距，如圖 4-2 中的藍色箭頭與黃色箭頭，分別都代表著資訊傳遞方向與更新頻率，以黃箭頭為例，系統動力模式與 AquaCrop 分別以日做為模擬時距，而回饋時間尺度則為旬。

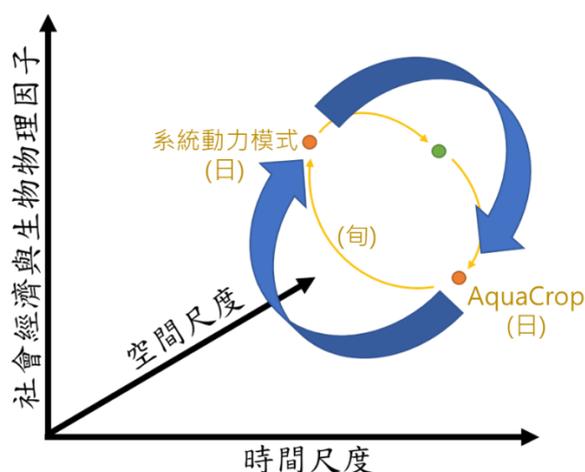


圖 4-2、整合之回饋機制三維要素示意圖



4.1.2 決策流程上的回饋機制

第二種回饋機制為決策流程回饋，在此機制中，時間尺度是決定整合程度之關鍵。因此進一步細分強弱，以捕捉時間尺度的細緻變化，在本研究的定義中，若模式回饋時間尺度大於決策之時間尺度，則該模式僅能定義為弱跨領域模式，相反則為強跨領域。以台灣國家調適政策來說，五年為一決策時距（五年規劃一次），則模擬回饋時距間尺度必須小於五年以反映出該決策所帶來之影響，例如回饋五年內各區域土地利用變化對於水資源運用之影響。本研究因尚未涉足決策流程之模擬，因此以年假設為本研究之決策時間尺度，以符合現行每一年提交下一年度的計畫用水量之實際操作時距，而 AgriHydro 中農業需水量也是以年做為回饋頻率向水庫提交需求，故本研究屬於強跨領域。

4.2 AgriHydro 整合架構

AgriHydro 為本研究發展之跨領域調適評估模式，其中包含三個模組，分別為情境模組、水資源模組與作物模組，其整合架構圖如圖 4-3 所示。情境模組包含社會經濟情境與氣候情境之設定，以 20 年為未來時段的設定間距，如短期未來為 2021 年至 2040 年（見 3.2 節）。氣候情境進一步透過多測站氣象合成模式產製 10 組 20 年之日氣象資料，以維持氣象統計特性，供後續河川流量與作物模式模擬使用。而社會經濟情境則使用 IPCC AR5 之共享社會經濟路徑（Shared Socioeconomic Pathways, SSPs）設定，以 20 年為時距修正各單位之需水量。水資源模組中包含 GWLF 流量模式與桃園系統動力模式，基於 GWLF 於日尺度模擬不精準與現行計畫配水量是以旬作為提報單位，本研究以日作為單項模式內部的模擬時間尺度，然而以旬作為其資訊傳遞更新之頻率。作物模組則由 AquaCrop 組成，以日尺度作模擬，以年（或作物生長期）作為與水庫間（或作物模式）資訊傳遞之頻率。

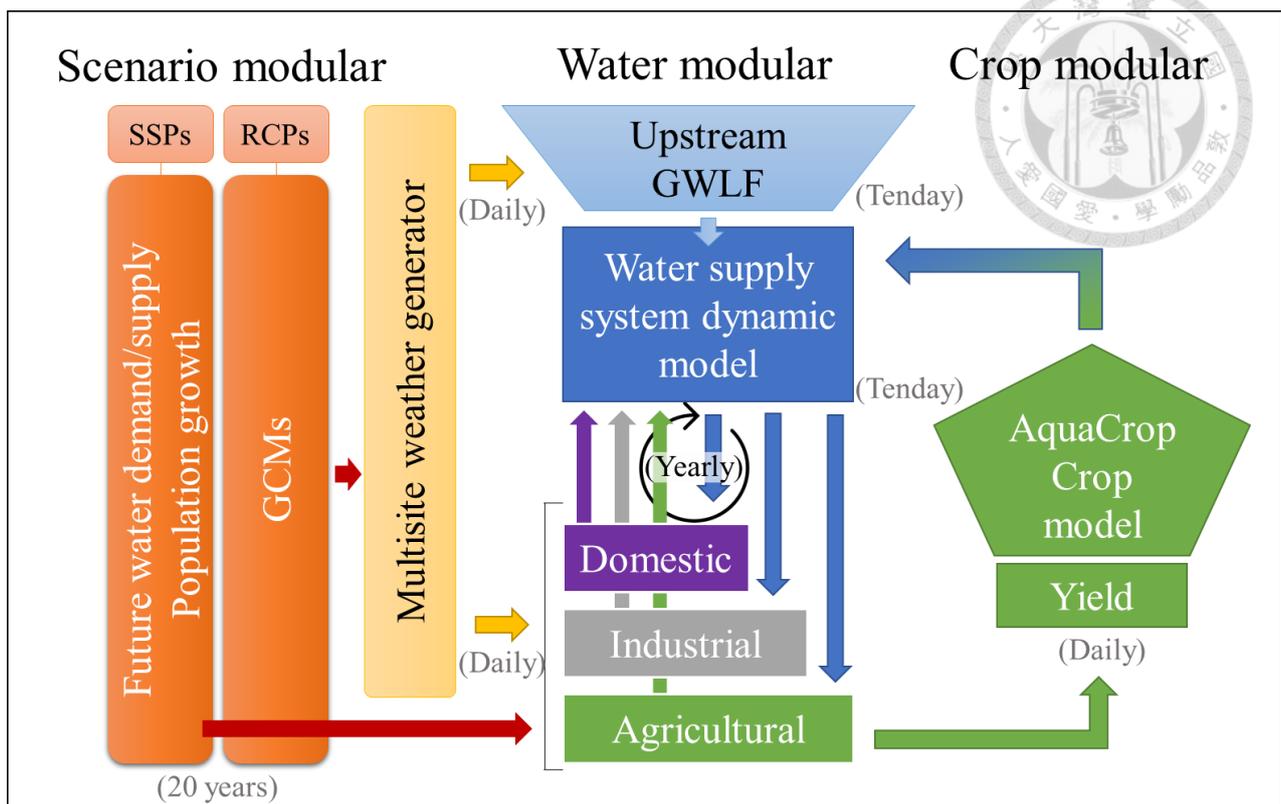


圖 4-3、AgriHydro 整合架構圖

4.2.1 AgriHydro 農業灌溉計畫用水量與實際供水量之回饋與更新機制

在 AgriHydro 中，灌溉計畫用水量與實際供水量為主要的跨領域回饋機制，以年為時間尺度向水庫提報合理的灌溉計畫用水量，並不是先評估水庫缺水風險後，以重現期距的方式將缺水風險累計至作物生長模擬，評估作物在不同缺水風險下的減產風險。強跨領域整合模式 AgriHydro 中，水資源與糧食生產領域的風險是在單次模擬中同時產出。在更新機制上，水利署民國 94 年《桃園地區農地耕作調整促進水資源利用研究》中，桃園農田水利會灌區內之灌溉需水量，石門水庫配水量佔 54.9%，有效降雨量佔 17.6%，其餘由市管河川、野溪、埤塘、灌溉迴歸水、地下水或大漢溪未控管流量等其他來源，佔 27.5%，由於本研究沒有模式動態模擬其他水源之實際可用水量，如埤塘模式，故需要以此灌溉用水水源佔比推估農業灌溉計畫用水量。

AgriHydro 中從生成農業灌溉計畫到實際農業每日灌溉水量之回饋機制（由農業灌溉需水量之變化回饋至水資源供水系統之農業配水量）可見圖 4-4 所示。AgriHydro 在利用 AquaCrop 模擬作物需水量時，考慮了作物分布空間及種植時間上的異質性，可以自行設置空間上每個分區（灌區）內不同作物之種植比例與不同種植時間之比例，此功能可以以輪作機制避免尖峰用水量之產生。

以下說明從生成農業灌溉計畫旬用水量到實際農業每日灌溉水量之計算。首先，在不考慮降雨與滿足設計湛水深與灌溉規則（5.4 節）之情況下透過 AquaCrop 產生出田間需水量之灌溉計畫日程，將不同時間與空間之田間需水量之灌溉日程之模擬結果加總，如式(4.1)：

$$\sum_{r \in \text{Field}} \sum_{c \in \text{Type}} \sum_{t \in \text{Time}} A_r \times \text{Ratio}_{r,c,t} \times D_{r,c,t} \quad (4.1)$$

其中 A_r 、 $\text{Ratio}_{r,c,t}$ 與 $D_{r,c,t}$ 分別為該農業分區的種植面積、特定種植時間及作物種類之種植比例與其田間需水量，下標 r 、 c 、 t 分別代表不同農業分區、作物種類與種植時間。加總後的每日田間需水量會依照 17.6%、54.9% 與 27.5% 的比例向有效雨量、水庫與其他水源取水，其中 54.9% 之水庫佔比會進一步除上田間損失率與輸水損失率，轉換成旬計畫灌溉用水量，並向水庫提報，其中本研究參考《107 年農田水利處之數字看板》設桃園及石門灌區總損失率為 17% 與 16%。水庫於隔年會依據運用規線與每旬水位放水。然而本研究不直接使用旬放水量，而是計算每旬的實際放水估計畫配水的比率，原因有兩點：(1) 需要將旬的實際水庫灌溉放水量，做時間與空間上的降尺度，轉換成各農業分區、作物種類與種植時間之每日灌溉水量；(2) 由於在生成計畫灌溉用水量時，有效雨量是根據水利會過去經驗而計算出的佔比估計，並非真實有效雨量，鑒於實際田間灌溉用水量可能會與計畫時不同，本研究使用比率的方式，消除田區與供水系統間的不一致性。此流程與現實灌溉計畫書向水庫提報灌溉用水量的方式相似。在最後生成實際灌溉水量日程的步驟中，本研究透過 AquaCrop 模擬考慮實際降雨後的每日田間灌溉用水量，乘上每旬之配水比率，得到實際灌溉水量日程，將其用於模擬實際產



量。此處本研究假設其他水源之變動與水庫實際供水情形同步，其合理性於下小節（4.2.2）說明。

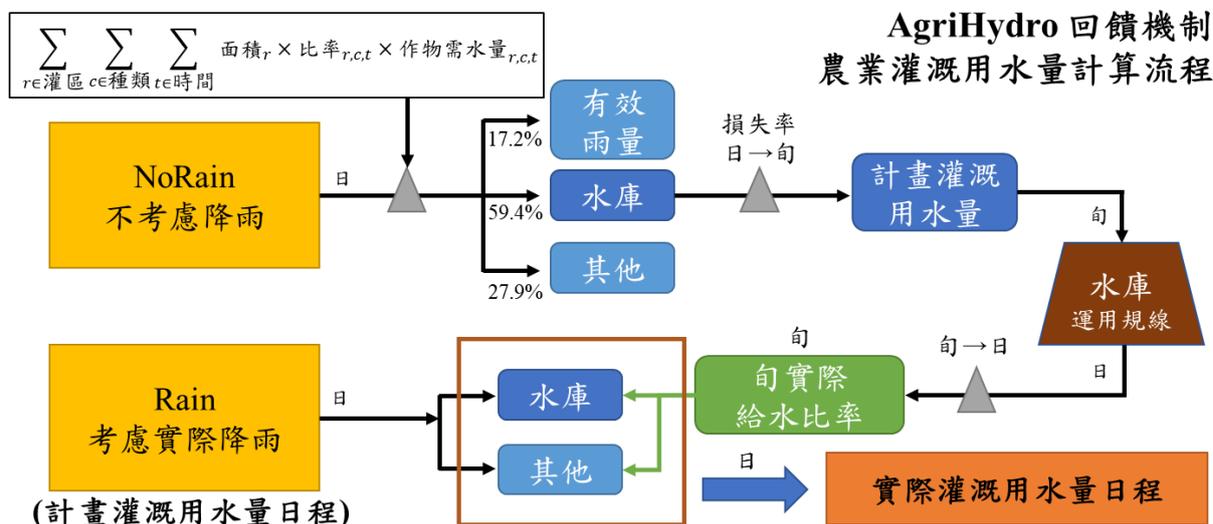


圖 4-4、AgriHydro 回饋機制農業用水量計算流程

4.2.2 其他水源之實際供水比率變動假設說明

本處針對其他水源分為「市管河川與野溪引水」、「埤塘供水」、「灌溉回歸水」與「地下水」四個之組成部分進行說明。

(1) 市管河川與野溪引水

根據水利署民國 103 年《石門水庫供水區水資源活化計畫》，桃園及石門灌區內除了大漢溪與三峽河為中央管河川外，還有共十條市管河川，包含打鐵坑溪、南崁溪、老街溪、新街溪、埔心溪、大堀溪、觀音溪、新屋溪、社子溪與德盛溪，如圖 4-5 所示。農民與埤塘掌水工可自行引水用於田區灌溉或存入埤塘，然而，由於市管河川短小，其豐枯季情形明顯，在乾早期間能供給之水量也會隨之下降，而在該水利署民國 103 年《石門水庫供水區水資源活化計畫》中，市管河川之流量推估採用三峽（2）流量站資料作降雨量與集水面積的比例轉換，如式(4.2)：



$$Q_{\text{推估溪流}} = Q_{\text{三峽(2)}} \times \frac{P_{\text{year推估溪流}}}{P_{\text{year三峽(2)}}} \times \frac{A_{\text{推估溪流}}}{A_{\text{三峽(2)}}} \quad (4.2)$$

其中， Q 為流量， P_{year} 為平均雨量資料， A 為集水面積。因此本研究將市管河川與野溪引水之可引水灌溉或使用量與中央管河川視為連動之關係。



圖 4-5、石門供水區河川概況

(資料來源：水利署民國 103 年《石門水庫供水區水資源活化計畫》)

(2) 埤塘供水

根據《107 年農田水利處之數字看板》，桃園水利會共管理 276 口埤塘，而石門水利會則有 398 口，石門水庫供水區中，共有約 647 口水利會管理可用於灌溉之埤塘，共可蓄存約 5,500 萬立方公尺。埤塘之水源多用於調配豐枯供水期使用，其補充水源有河川與灌溉渠道，故其供水能力與蓄存量會受水庫供水量與河川流量的影響。



(3) 灌溉回歸水

農田水利會所定義之回歸水 (Return Flow) 為「上游之一部份灌溉水回流出現在下游水溝而可加攔截利用者，即包括由地表面流入於下游水溝及滲入地下在下游湧出流入水溝之上游灌溉水」，回歸水在各區域形式不盡相同，且尚未有統一的量測方式。然而，根據水利署民國 96 年《多元化水資源開發—桃園及新竹地區農業迴歸水調查與可行性評估》以水平衡方式估計回歸水量，可以知道回歸水量與當時水庫供水量、湛水深與雨量等有關；換句話說，與當時水資源豐沛程度有關。因此，本研究視灌溉回歸水與石門水庫供水情形有連動關係。

(4) 地下水

地下水相對其他水源在乾旱期間也能較穩定的供水，然而，桃園地區農田灌溉水主要仰賴桃園大圳、石門大圳、河川與埤塘之水源供給，鮮少使用地下水。《107 年農田水利處之數字看板》統計顯示，北部地區灌溉用水量引自地下水約 0.07 億噸，佔北部灌溉用水量 0.4%，其中桃園及石門農田水利會分別有 1 口與 7 口之公有水井，而宜蘭水利會則有 114 口，由此可推斷於桃園地區幾乎不使用地下水做為灌溉水源，故本研究中不考慮地下水。

綜合上述，佔 27.5% 之其他水源中的多由市管河川與野溪引水、埤塘供水與灌溉回歸水等易隨著乾旱與降雨情形變動之水源組成，而石門水庫之實際供水比例間接反映出當時水文氣象之情況，故於本研究中，假設此 27.5% 之水源與石門水庫之實際供水比例有相同變動關係，也就是說當水庫打八折供水時，這 27.5% 之灌溉水量也會以八折的比率供水。

4.3 AgriHydro 與氣候智慧調適演算法之聯合操作流程

本節示範如何以 AgriHydro 作為跨領域之量化分析工具，結合氣候智慧調適演算法中氣



候調適六步驟與風險模板聯合操作，本節針對風險模板在本研究水資源與糧食生產跨領域之因子分析與整體操作流程作說明，聯合操作流程圖如圖 4-6 所示，而 AgriHydro 量化結果部分則於第七章呈現。

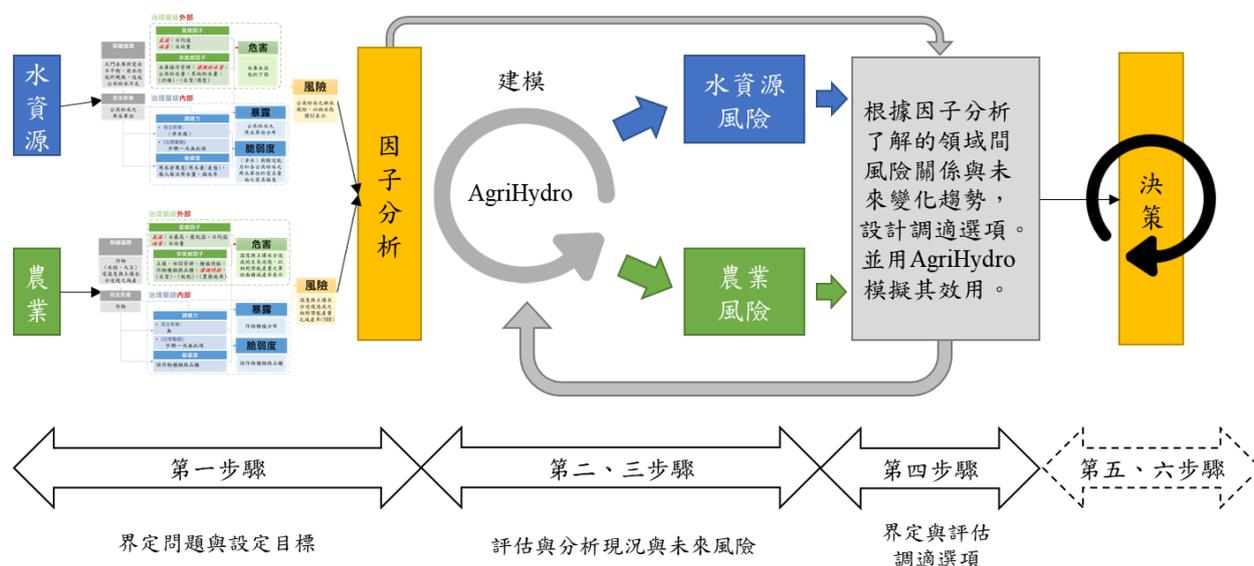


圖 4-6、AgriHydro 與氣候智慧調適演算法之聯合操作流程圖

第一步驟：

利用風險模板，對水資源與糧食生產之關鍵議題作因子拆解，並定義各自風險組成：危害、暴露與脆弱度的內容，於後分析其關聯因子與共同因子。於水資源部分，如圖 4-8 所示，本研究定義其關鍵議題為石門水庫供需水不平衡，使水位低於下限，造成公共給水與灌溉給水不足，其保全對象為公共給水的用水單位。危害定義為水庫水位低於下限，其氣候因子包含日均溫與日雨量，而非氣候因子則為水庫操作管理，包括灌溉給水量、公共給水量與其他給水量，但本研究不考慮水庫淤積與因水質濁度問題造成的減供；暴露與脆弱度構成公共給水的需求層面，其中暴露為公共給水之用水單位分布；脆弱度則為淨水與輸送能力和各公共給水之用水單位於需求層面之要求程度。其中保全對象調適能力為淨水廠的淨水能力，本研究於模式中保留參數，但不考慮其限制，故脆弱度只由敏感度組成，包含用水密集度（用水量/產值）、每人每日用水量與漏水率，分別代表工業、生活用水單位與區域輸水系統的需求程

度。集合三個風險組成後，構成水資源公共給水之缺水風險，並以缺水指標（SI）表示。

於糧食生產部分，如圖 4-8 所示，本研究定義其關鍵議題為作物（水稻、大豆）受溫度與土壤水分逆境之減產。其危害為溫度與土壤水分造成的生長逆境，以相對潛能產量之單位面積減產率表示，其影響因子包含氣溫（日最高、最低溫與日均溫）、雨量等，而非氣候因子則有土壤、田間管理、種植時程、作物種類、品種與灌溉時程等；暴露為作物種植分布；而脆弱度在此處由敏感度構成，即該作物種類與品種，描述該作物對於危害之容忍度。而這部分以模式角度來看，敏感度因子會與危害中的非氣候因子重複，然而這並不會影響本風險模板之定義與使用，進一步說，正因該因子在風險的不同組成中皆有影響，更可推測其於糧食生產風險的重要性；最後，定義風險為溫度與土壤水分逆境造成之相對潛能產量之減產率（YRR）。

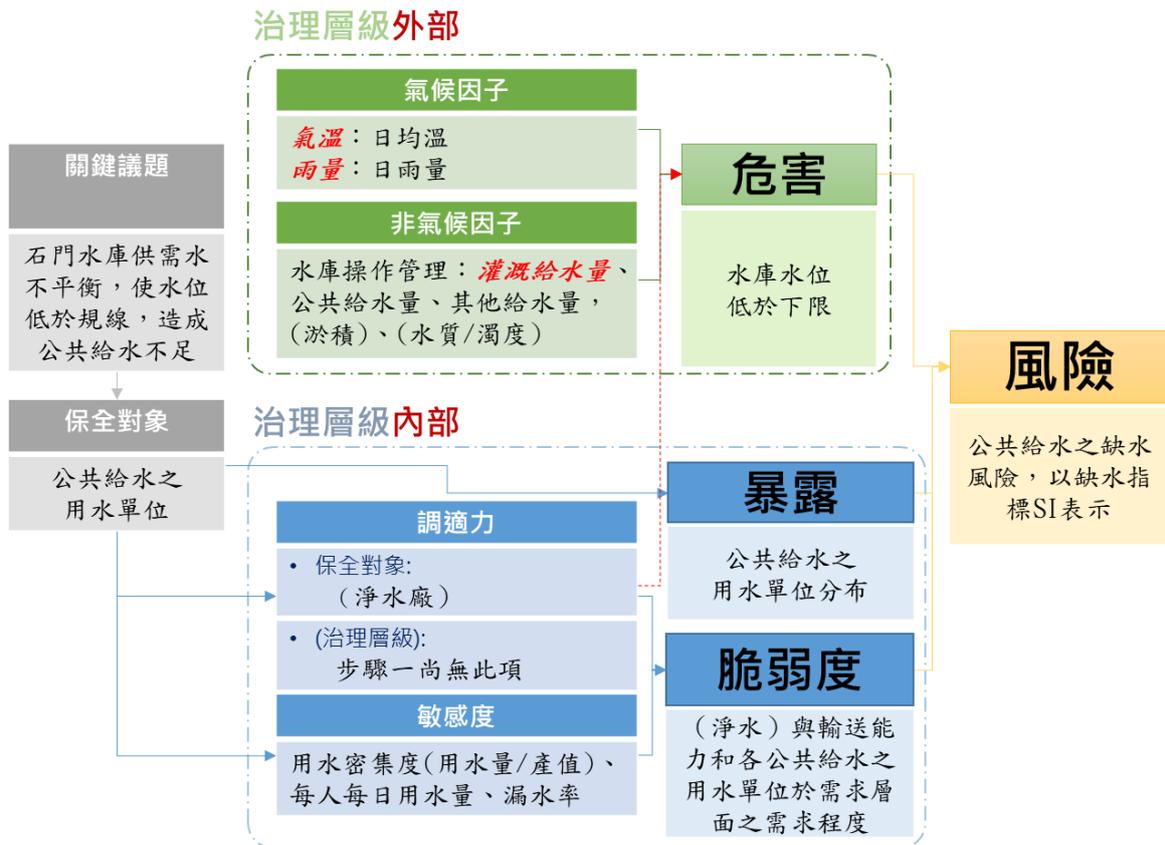


圖 4-7、水資源風險模板操作

() 部分為本研究不考慮之因子；(治理層級) 於第四步驟制定調適選項時才會加入。

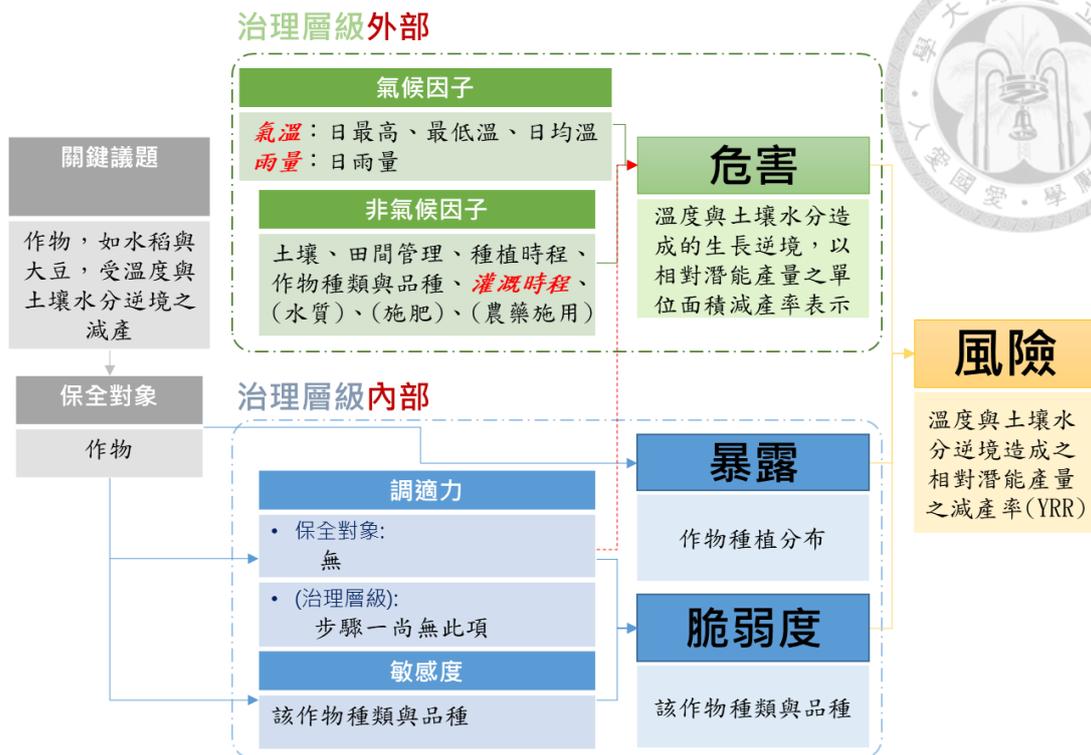


圖 4-8、糧食生產之風險模板操作

() 部分為本研究不考慮之因子；(治理層級) 於第四步驟制定調適選項時才會加入。

由水資源與糧食生產個別因子分析後，進一步整理其風險互動之關係。圖 4-8 與圖 4-8 中的斜體紅字為關聯/共同因子。第一個共同部分為氣象因子，皆需日溫度與日雨量，其中日最高、最低溫與日均溫高度相關，所以也是關聯因子；另一個共同部分為灌溉時程與灌溉給水量，其中，灌溉時程受土壤、田間管理、種植時程、作物種類與品種等因子影響。藉由此兩部分，可以將兩領域之風險串接在一起，建立 AgriHydro 風險評估工具。

第二、三步驟：

第二、三步驟首先參考風險模板之因子分析，根據共同/關聯因子作為模式串接的依據，建立整合模式，用以同時分析現況與未來之水資源與糧食生產風險，產製風險圖（圖 4-9），以擬定適方案。本研究透過多測站氣象合成模式於 AgriHydro 中連結氣象因子，而第 4.2.1 節中，則是針對農業灌溉用水量建置回饋機制。由二、三步驟結果，可以透過風險地圖（如圖 4-9）了解風險之變化，並於下一步驟制定調適方案。

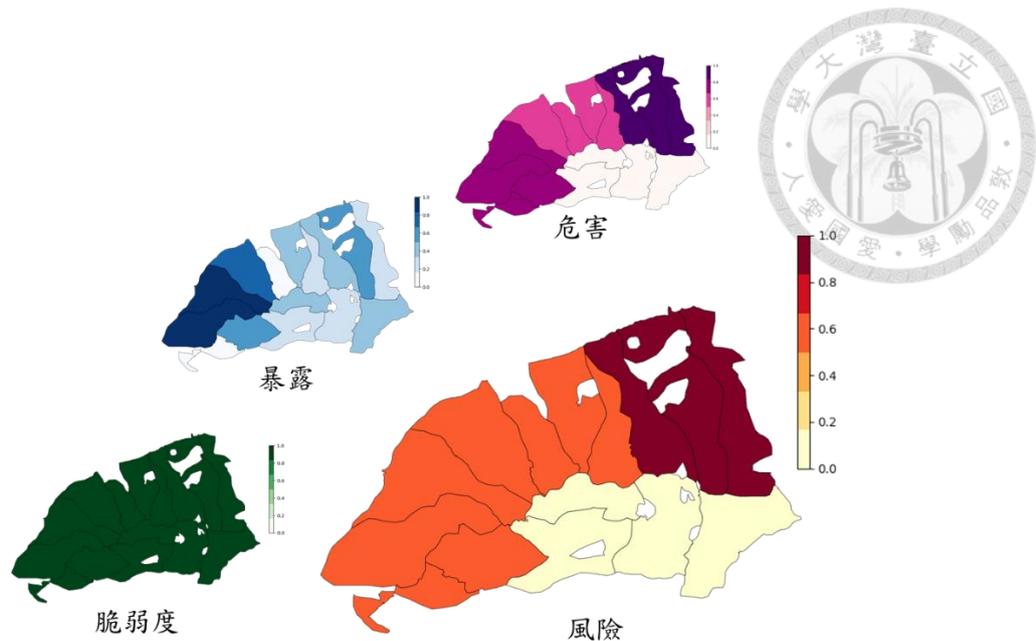


圖 4-9、風險地圖示意圖

第四步驟：

此步驟根據前三步驟的資訊制定相關調適選項，並再一次透過 AgriHydro 模擬分析該方案於水資源及糧食生產領域的風險改變，藉由兩領域的變化，可以將調適選項的效用分成三類（圖 4-10），第一類為獨立類型，該調適選項只會影響單一風險，不需考慮其他領域之風險變化；第二類為競爭（取捨）類型，兩領域的變動方向相反；第三類為協同類型，兩領域的變動方向相同，針對目前設定之風險標的，此類調適選項為最佳調適選項，可以同時降低兩領域的未來風險。

第四步驟分析當下對於未來調適選項的評估，第五、六步驟根據這些調適選項進一步分析不同未來時段各調適選項的效用，形成調適路徑，並結合修正規則達到動態調適之目標，於本研究中不深入探討第五、六步驟。

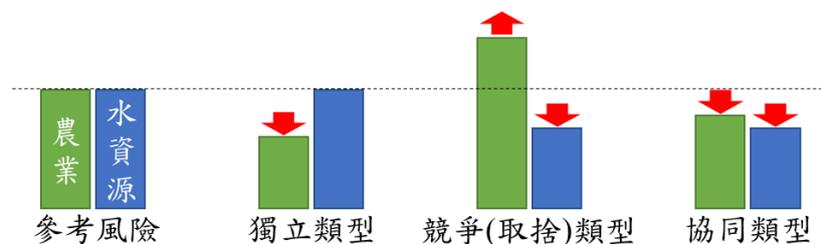


圖 4-10、三類調適選項於跨領域效用示意圖

第五章、研究區域介紹與使用資料說明



本章將介紹本研究之示範案例研究區，其中包含背景說明與模式使用資料之描述。5.1 節中，針對石門供水區做初步的背景做說明，5.2 節到 5.4 節將本研究所使用的資料，分為情境模組、水資源模組與作物模組作整理與介紹，以利說明第六章模式設定與合理性。

5.1 研究區域介紹

5.1.1 研究區背景介紹

石門水庫供水區為本研究之研究區，涵蓋範圍包含板新地區、桃園市與部分新竹地區（新豐鄉與湖口鄉），其中桃園市為台灣六都之一面積共約 1,220.95 平方公里，近年來隨著航空城的開發與工業的發展，工業用水與人口數在短期未來有上升的趨勢。根據水利署民國 106 年《臺灣北部區域水資源經理基本計畫》評估指出現況水源供給能力為每日 102 萬噸，未來配合中庄調整池及板新二期計畫完成後，水源供給能力可上修為每日 136.4 萬噸。目前桃園地區常態供水為每日 116.4 萬噸，顯示該區至民國 120 年尚無供水缺口（民國 110、120 年中成長用水需求預估為每日 126.1、135.1 萬噸）。但是該計畫也指出「不足水量採調度農業用水供應」，該方案雖然可暫紓桃園供水區之民生與工業的供水缺口，卻壓縮了農業的發展空間；換句話說，該調度方案是將公共缺水風險轉嫁至農業方。根據桃園農田水利會民國 106 年《灌溉計畫書》與水利署民國 103 年《石門水庫供水區水資源活化計畫》，桃園及石門水利會之灌溉計畫書是以總面積 33,278 公頃去計算農業計畫灌溉用水量；然而表 5-8 的民國 97 年至民國 105 年平均收穫面積於一期稻作只有 7,662 公頃，而二期稻作更只有 3,979 公頃，將位於石門灌區與桃園灌區的新竹湖口灌區面積（共 4,895 公頃）從總面積中扣除，實際耕種面積仍只佔計畫的 14% 至 26%，可以推測有一大部分的農業用水被調撥為其他用途。此外，圖 5-1 為過去乾旱時，農業休耕與調用水情形，可以看到民國 91、92、93、95、104 年桃園地區皆有大規模的休耕面積。本研究希望在農業量食耕地不被犧牲的情況下，評估供水風險與農業糧食減產風險，並以更換成大豆等旱作之調適選項，探討其降低風險之效用性。

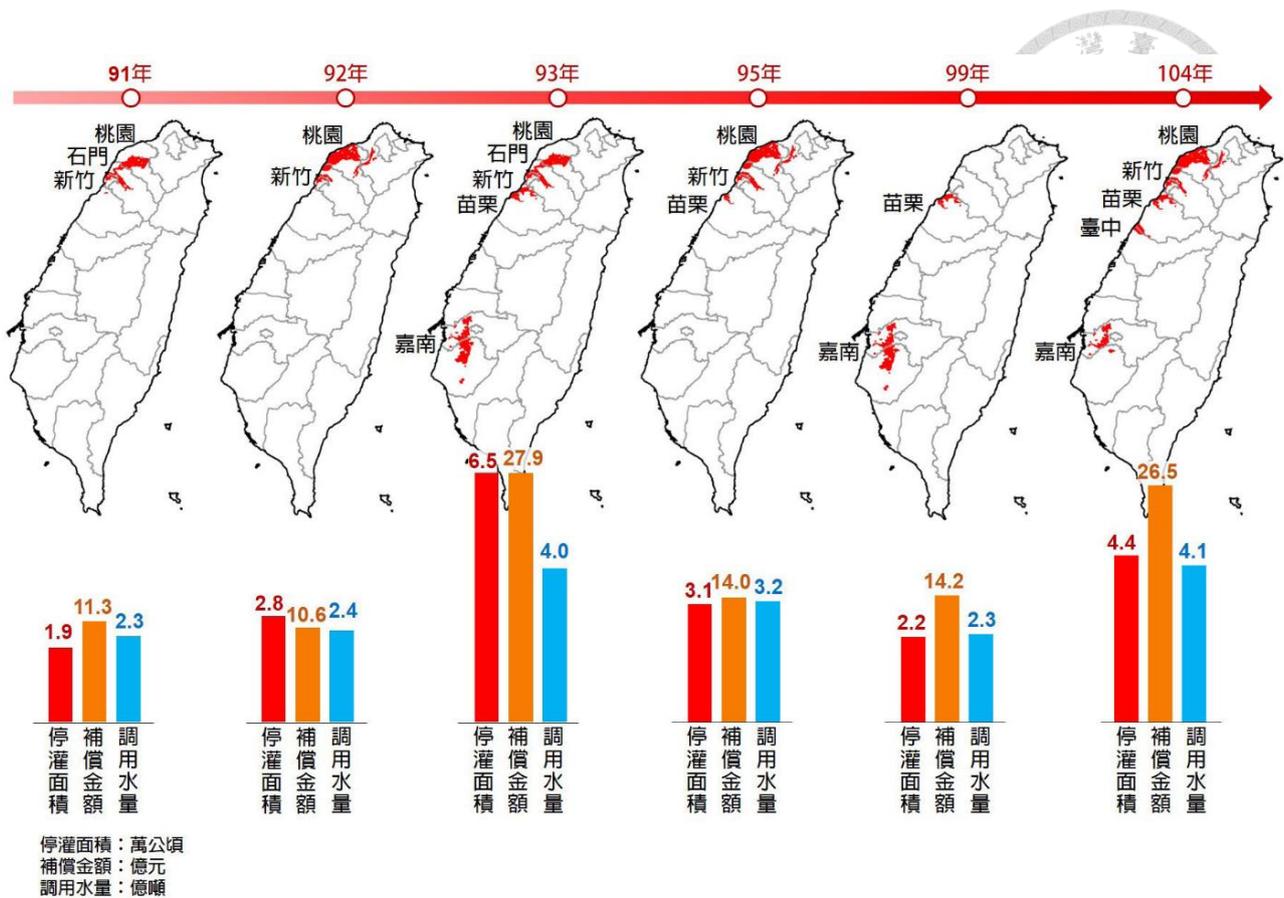


圖 5-1、近年大規模停灌事件示意圖

(資料來源：農委會民國 104 年《2015 農田灌溉白皮書》)

5.1.2 桃園糧食生產系統與 AgriHydro 農業分區

桃園農業主要由桃園及石門農田水利會管理，田區分別由桃園大圳與石門大圳灌溉 21,072 公頃（湖口灌區由光復圳灌溉）與 12,206 公頃之耕地¹。桃園大圳灌區內可進一步分為桃園、大竹、大園、大崙、草漯、新坡、觀音、新屋及湖口（光復圳）；石門大圳灌區內則包含八德、中壢、過嶺、楊梅、富岡及湖口工作站灌區。桃園灌區內以二期稻作為主，種植少量玉米與大豆等旱作；而石門灌區則為純稻作。本研究以多測站氣象合成模式模擬未來天氣資訊，為了維持統計上的穩定性，需要一定期長的歷史觀測資料。此外，本研究為減少計算量，並沒有進一步作網格化之空間內插，故本研究依據桃園市中各氣象站的觀測長度與地理

¹ 本處不討論大溪、新莊與海山之桃園水利會管理於大漢溪附近之灌區。



位置，挑選了其中五站，分別為大園、觀音、水尾、大溪與平鎮站，並將各工作站灌區重新分區，桃園灌區分成 T1、T2 與 T3 三區，石門灌區則分成 S1、S2 與 S3 三區，共六區，如圖 5-2 與表 5-3 所示。

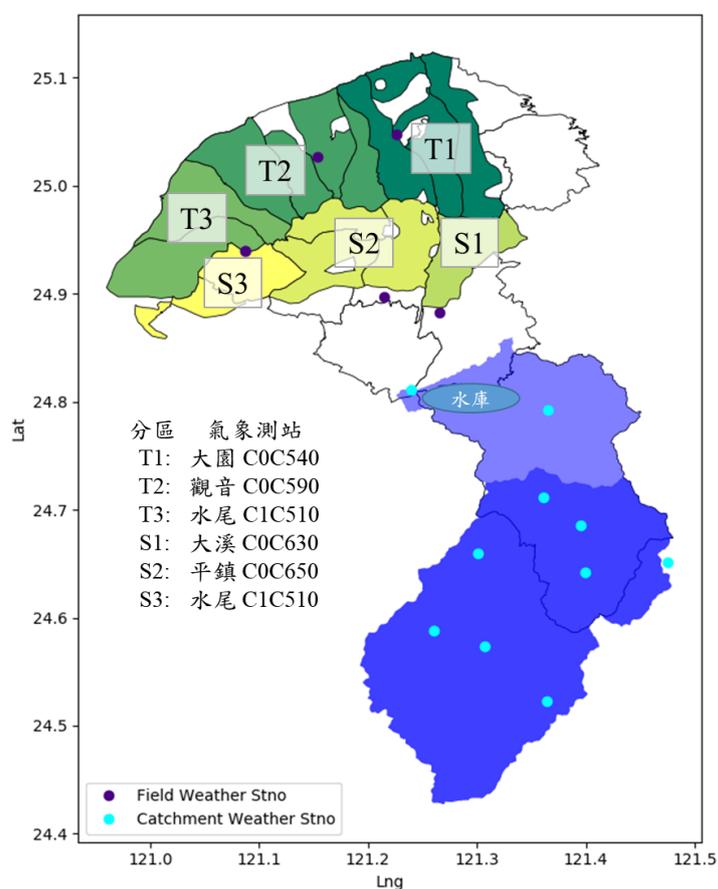


圖 5-2、研究區域與分區示意圖

深綠色之 T1、T2 與 T3 區域為桃園灌區，由桃園大圳灌溉（T3 中最末端湖口灌區由光復圳灌溉）；淺綠色 S1、S2 與 S3 區域為石門灌區，由石門大圳灌溉；石門水庫位於圖中水庫之藍色橢圓位置；紫色點為各分區對應之氣象測站；淺藍色的點為石門水庫集水區範圍中（藍色區域）的雨量站。

表 5-1、桃園及石門農田水利會灌區面積與 AgriHydro 農業分區

農田水利會灌區	桃園農田水利會* (桃園大圳、光復圳)								
AgriHydro 分區	T1			T2				T3	
氣象站	大園 C0C540			觀音 C0C590				水尾 C1C510	
經緯度	121.2259, 25.0477			121.1533, 25.027				121.0871, 24.94	
工作站灌區	桃園	大竹	大園	大崙	草漯	新坡	觀音	新屋	湖口
可耕種面積 (公頃)	1,197	2,509	2,236	1,617	2,147	1,240	2,967	3,392	3,795
分區面積 (公頃)	5,942			7,971				7,159	
農田水利會灌區	石門農田水利會** (石門大圳)								
AgriHydro 分區	S1			S2			S3		
氣象站	大溪 C0C630			平鎮 C0C650			水尾 C1C510		
經緯度	121.2655, 24.8828			121.2146, 24.8975			121.0871, 24.94		
工作站灌區	八德			中壢	過嶺	楊梅	富岡	湖口	
可耕種面積 (公頃)	2,385			1,818	2,297	2,385	2,708	1,100	
分區面積 (公頃)	2,385			6,013			3,808		
資料來源：桃園農田水利會民國 106 年《灌溉計畫書》*；水利署民國 103 年《石門水庫供水區水資源活化計畫兩水利會之灌溉計畫》**									

5.2 情境模組之資料使用

本研究於氣候情境部分，使用科技部 TCCIPAR5 日降尺度之 GCM 資料，計算各月份溫度及雨量之平均值與標準差的修正值。本研究使用四種 GCMs：NorESM1-ME、CSIRO-Mk3-6-0、CCSM4 與 bcc-csm1.1-m 與兩種 RCPs：RCP8.5 與 RCP2.6，共八種組合構成未來氣候情境設定 (3.2.1 節)，並模擬未來三個時間段：2021 年至 2041 年、2041 年至 2060 年與 2061 年至 2080 年的風險變化，因此本研究於氣候情境設定中共有 24 種配置。以下說明多測站氣象合成模式與社經情境的資料使用及處理作。



5.2.1 多測站氣象合成模式資料使用及處理

AgriHydro 中需要用到氣象資料的部分為 GWLF 流量模式與 AquaCrop 作物模式，以下將分別說明這兩部分之氣象資料使用情形與資料前處理之方法。

GWLF 氣象資料

流量模擬中，GWLF 需模擬石門水庫入流量與三峽河流量，用於計算整體桃園供水系統之入流量（三峽河入流量與鳶山堰側流量為推估，於 5.3 節中說明），而雨量站資料是取水利署地理倉儲中心所提供之已處理過錯誤值之資料，故除了確保時間段連續外，無須再作校正處理。其中石門水庫上游有十個水利署雨量站（表 5-2），分別為石門、霞雲、高義、巴陵、玉峰、池端、鎮西堡、嘎拉賀、白石、西丘斯山，本研究以 2008 年到 2017 年經徐昇式加權平均後的平均日雨量資料作為 GWLF 與氣象合成模式模擬之使用，如式(5.1)：

$$\begin{cases} \bar{P}_d = \sum_{i=1}^N W_i \times P_{i,d} \\ \sum_{i=1}^N W_i = 1 \end{cases} \quad (5.1)$$

其中， \bar{P}_d 為加權平均後的日雨量， W_i 為各站之徐昇式權重， $P_{i,d}$ 為第 i 站第 d 天的日雨量， N 為測站總數。並使用鄰近的復興測站（C0C460）的高程（482 公尺）、日均溫與日最高、最低溫等資訊。本研究使用平均後之雨量資料進行氣象合成模擬，雖然將十點之雨量加權平均至一點可能會降低氣象合成之精度，因為無法確保十個雨量站的變化趨勢是一致的，然而這樣的作法可以很大程度的降低多測站氣象合成所需的計算時間。同樣的方法，也用於三峽河流量模擬的氣象資料備製，其測站資訊如表 5-3 所示。

表 5-2、石門水庫入流量模擬雨量站與氣象站資料

測站	石門	霞雲	高義	巴陵	玉峰
氣象局站號	21C050	21C140	21C080	21C070	21D150
徐昇式權重	0.04	0.17	0.09	0.07	0.09
取得年分	1946~2017	1968~2017	1954~2017	1964~2017	1954~2017
經緯度	121.240173, 24.811242	121.364941, 24.792346	121.361601, 24.711187	121.395272, 24.685226	121.301136, 24.659613
高程 (m)	255	350	620	1,220	780
測站	池端	鎮西堡	嘎拉賀	白石	西丘斯山
氣象局站號	21U110	21D170	21C090	21D160	21D350
徐昇式權重	0.04	0.13	0.1	0.12	0.14
取得年分	1964~2017	1954~2017	1956~2017	1954~2017	1986~2017
經緯度	121.474829, 24.651310	121.306707, 24.573784	121.399925, 24.641542	121.260344, 24.588561	121.363704, 24.522590
高程 (m)	1,150	630	1,260	1,620	2,000
附註	1. 徐昇式權重參考水利署民國 102 年《流域防災資訊整合之研究成果報告》。 2. 徐昇式權重計算平均高程為 309.48 (m)，本研究使用復興 (C0C460) 測站的高程 482 (m)、日均溫與日最高、最低溫。				

表 5-3、三峽河入流量模擬雨量站與氣象站資料

測站	三峽	大豹	復興
氣象局站號	01A220	01A210	21C060
徐昇式權重	0.18	0.65	0.17
取得年分	1903~2017	1974~2017	1987~2002、2004~2017
經緯度	121.355549, 24.938855	121.421379, 24.887240	121.351415, 24.818335
高程 (m)	33	600	470
附註	徐昇式權重計算平均高程為 475.84 (m)，本研究使用山佳 (C0A520) 測站的高程 48 (m)、日均溫與日最高、最低溫。		

AquaCrop 氣象資料

中央氣象局 (Central Weather Bureau, CWB) 於桃園地區的氣象站如圖 5-3 所示，然而許多站可取得之觀測期長不足以滿足氣象合成之需求，故根據氣象站的觀測長度與地理位置，本研究選用其中五站作為各分區代表 (T3 與 S3 分區使用同一測站資訊)，分別為大園、觀音、



水尾、大溪與平鎮(圖 5-2)。因部分觀測資料缺漏情形較嚴重，故本研究先以空間線性內插完成資料補遺，才能適用於氣象合成模式。以下針對各資料補遺方式分項說明。



圖 5-3、桃園氣象站分布圖

(1) 溫度氣象資料(日均溫、日最高溫與日最低溫)補遺

本研究採用各測站間的共變異數作為內插溫度相關氣象資料之權重，其計算流程如圖 5-4 所示。首先，取出各站補遺時間段資料(2008 年至 2017 年)；接著，在不考慮缺值的情況下計算各月各氣溫相關氣象變數之共變異矩陣，並根據各缺值可用的內差測站，取出相應的共變異數，經標準化到 0 至 1 間數值後作為權重，相乘後得其補遺值。然而，如該測站於該月份皆缺值，則無法計算其與其他站之共變異數，因此改採用全部可用測站之平均值作為補遺值。唯補遺完成後，還須確認日最高溫 \geq 日均溫 \geq 日最低溫之關係維持，否則須經額外處理(本研究中無此情形)。

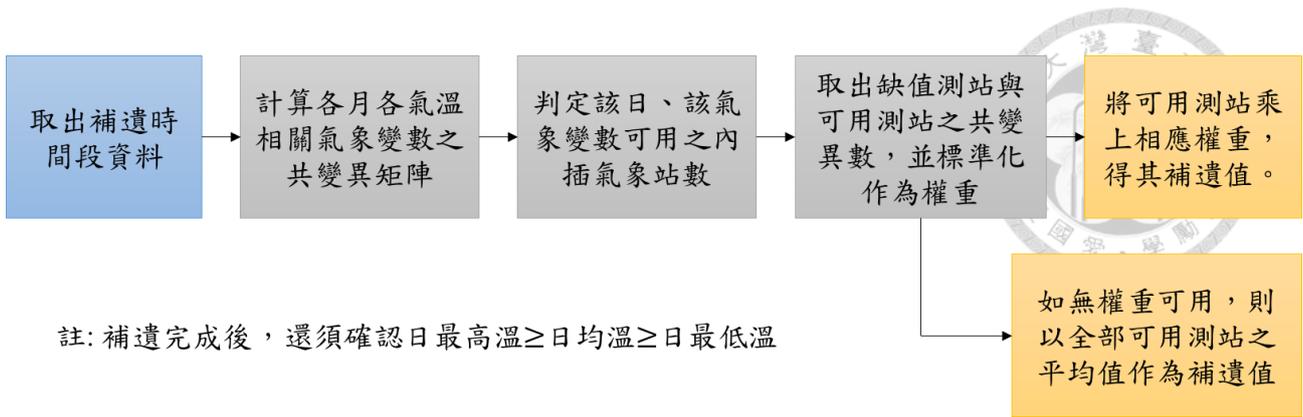


圖 5-4、溫度相關之氣象變數補遺流程圖

(2) 雨量氣象資料補遺

在雨量氣象資料補遺的部分，本研究採用距離倒數平方（Square Inverse Distance, SID）作為權重做空間線性內插，其補遺流程如圖 5-5 所示。首先，取出各站補遺時間段資料（2008 年至 2017 年），並以站與站之間的 SID 作為權重依據，如式(5.2)：

$$SID_{i,j} = \frac{1}{d_{i,j}^2} \quad (5.2)$$

其中 $d_{i,j}$ 為第 i 站與第 j 站的距離。再者，根據各缺值可用的內差測站，取出相應的 SID，經標準化到 0-1 間數值後作為權重，相乘後得其補遺值。然而，如果最近之可用測站為無降雨則補遺值為零。

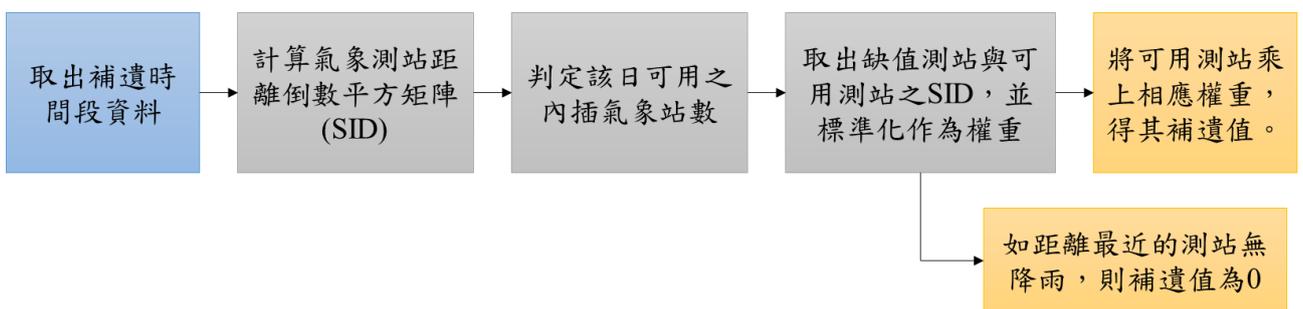


圖 5-5、雨量補遺流程圖

經過上述的資料處理，本研究使用農業分區的五個氣象站、三峽河上游平均氣象資訊與石門水庫上游平均氣象資訊，共七個測站作為多測站氣象合成模式中，歷史統計值與統計特

性的計算之依據。



5.2.2 社經情境資料使用及處理

社會經濟情境假設部分，本研究參考水利署民國 106 年《臺灣北部區域水資源經理基本計畫》提供之預測資訊作為情境制定依據，由於國家報告書對於未來需水量的推估為五年間距，且只推估到民國 120 年，故本研究對於未來社經情境設定僅到短期未來（2021 年至 2040 年），調適方案也只探討到短期未來。唯分析未來變化趨勢時，假設中期（2041 年至 2060 年）及長期（2061 年至 2080 年）未來社經情境維持在民國 120 年的情況作模擬呈現。此外，由於沒有細節資料能夠支持本研究作社會經濟情境之空間降尺度，加上水資源系統中各淨水廠相互連接，多能互相支援，故本研究以民國 105 年（西元 2016 年）與民國 120 年（西元 2031 年）生活與工業用水之成長率（表 5-4）修正 2018 年石門水庫公共給水計畫配水量（見附件一），反映本研究未來生活與工業用水之需求量變化；其中從水庫給水角度，生活與工業用水皆使用自來水管線，故統稱公共給水。

表 5-4、短期未來公共給水社經情境設定

類別	用水項目	103 年	105 年	110 年	115 年	120 年	成長率 (%) (民國 105 到 120 年)	漏水率 (%)
保守	生活	--	72.2	--	--	80.3	11.16%	15%
	工業	--	48.4	--	--	67.8	40.03%	15%
	公共給水	--	120.6	--	--	148.0	22.74%	15%
節水	生活	73.4	72.2	71.6	72.7	73.3	1.52%	13.70%
	工業	47.5	48.4	54.5	58.8	61.9	27.89%	13.70%
	公共給水	--	120.6	--	--	135.2	12.11%	13.70%

(1) 公共給水 = 生活用水+工業用水

(2) 節水類別為水利署民國 106 年《臺灣北部區域水資源經理基本計畫》依民國 110 年自來水漏水率 15%與 120 年自來水漏水率 13.7%估計出的成長值。

(3) 保守類別為基於節水類別之資訊，假設民國 110 年到民國 120 年漏水率沒有改善的估計值。

在報告書中，自來水漏水率於民國 110 年與民國 120 年分別為 15%及 13.7%，本研究將



13.7%設為節水類別之短期未來公共給水之社經情境，而保守類別則是以民國 110 年 15%之漏水率替換民國 120 年為 13.7%之漏水率經計算得出。因此，保守類別之公共給水需求成長率為 22.74%，而節水類別之公共給水需求成長率為 12.11%。

5.3 水資源模組之資料使用

水資源模組中包含 GWLF 與石門水庫供水系統，本處將針對這兩部分，介紹模式中使用參數的推估與假設方式，同時彙整模式建置時所使用到的資料，其中包含水庫運用規線等。

5.3.1 GWLF 模式之資料使用與參數設定

GWLF 模式中石門水庫與三峽河的流量設定如表 5-5 所示，其中石門水庫 CN 值是經由 GIS 分析上游集水區土地利用，並平均計算各土地利用之 CN 值而得（張德鑫, 蔡西銘, & 鄭力嘉, 2009），三峽河部分因資料缺乏，以土地利用資訊概估，再透過模式驗證方式微調；根層土壤含水層水深、初始飽和層含水層水深與初始未飽和層含水層水深為假設值；退水係數則是根據水利署民國 101《強化北部水資源分區因應氣候變遷報告》透過連續不降雨日的平均流量計算而得的估計值作為參考，搭配本研究驗證情形作部分微調而得；覆蓋係數，因上游集水區多為森林，加上驗證資訊，以 0.95 作為本研究之模擬值。

表 5-5、GWLF 模式參數設定

流域	根層土壤含水層水深 (cm/day)	退水係數	覆蓋係數	初始飽和層含水層水深 (cm/day)	初始未飽和層含水層水深 (cm/day)	CN2	面積 (ha)	流量站
石門水庫	10	0.33**	0.95	3	6	52.61*	76340	石門水庫入流量
三峽河	10	0.108**	0.95	3	6	76	12534	三峽 (2)

資料來源：(張德鑫 et al., 2009) *、水利署民國 101《強化北部水資源分區因應氣候變遷報告》**。



5.3.2 桃園水資源系統之使用資料

本研究所使用之桃園水資源系統動力模式，除了根據桃園水資源架構圖 3-12 建構連結關係與設計容量外，還需要根據平日各系統單位的操作規則，編寫水資源在系統中的流向與取水順序，此部分資料取得方式包含相關報告書與電話詢問慣例操作方式(參考王尊麟(2019))。以下說明該模式和本研究假設的相關資料使用以及其他較重要的元件。

系統水源

桃園水資源系統動力模式中包含三個主要水源，分別為石門水庫入流量、鳶山堰側流量與三峽河入流量，其中，石門水庫入流量與三峽河流量的實際觀測資料分別採台灣地區主要水庫蓄水量報告表²公布之石門水庫入流量與水利署地理倉儲中心提供之三峽(2)流量站之流量紀錄，作為 AgriHydro 中 GWLF 流量模擬結果的驗證資料。最終三峽河入流量(經三峽堰取水)與鳶山堰側流量則採水利署民國 103 年《石門水庫供水區水資源活化計畫》中間接推估之方式，如式(5.3)與(5.4)：

$$Q_{\text{三峽堰}} = Q_{\text{三峽(2)}} \times \frac{A_{\text{三峽堰}}}{A_{\text{三峽(2)}}} = Q_{\text{三峽(2)}} \times \frac{112.6}{125.3} \quad (5.3)$$

$$Q_{\text{鳶山堰側流量}} = Q_{\text{三峽(2)}} \times \frac{P_{\text{year}}_{\text{石門}}}{P_{\text{year}}_{\text{三峽河}}} \times \left(\frac{A_{\text{鳶山堰}} - A_{\text{石門水庫}}}{A_{\text{三峽(2)}}} \right) = Q_{\text{三峽(2)}} \times \frac{2363}{3206} \times \left(\frac{869.4 - 764.3}{125.3} \right) \quad (5.4)$$

其中， Q 為流量， P_{year} 為平均雨量資料， A 為集水面積。

淨水廠

桃園水資源系統中，除了農業灌溉用水與部分工業用水(中科院與中油煉油廠直接由石門水庫供水)，其他包含生活與工業用水，皆須經由淨水場處理後由自來水管線配送，因此淨水廠之處理能力會影響未來自來水淨水量是否能滿足未來需求。系統中包含大滿、龍潭、平

² 資料來源：https://fhy.wra.gov.tw/ReservoirPage_2011/StorageCapacity.aspx

鎮、石門與板新五個淨水廠，其供水能力與供水區域整理如表 5-6 所示。然而，於本研究中旨在探討轉作旱作（本研究以大豆為例）在水資源與糧食生產間的風險競合關係，本處假設先不考慮淨水場出水容量的限制，各淨水廠可根據各自的分配比例，在水庫正常供水之情況下，滿足未來生活、工業用水量與各用水單位之需求變化。建議未來研究中，可以納入此限制，分析討論設施容量對於供水風險之影響與擴建設施之調適能力與效用。

表 5-6、淨水場供水能力與區域

淨水場	淨水場出水容量 (萬立方公尺/日)		供水區域
	設計	實際	
大湳	30 (45)	28~35	桃園縣桃園、龜山、林口、蘆竹、大園
龍潭	19	16~19	桃園縣龍潭、大溪
平鎮	60	54~56	桃園縣中壢、八德、楊梅、新屋、觀音
石門	12	10~12	桃園縣楊梅、新屋、觀音、中壢
板新	120	75~95	新北市板橋、新莊、蘆洲、八里、樹林、三峽、鶯歌、土城、泰山等區全區，以及中和、三重、五股、林口部份地區、桃園縣八德及龜山部份地區

1. 資料來源：水利署民國 103 年《石門水庫供水區水資源活化計畫》，() 表示擴建中。
2. 大湳淨水場實際出水量經本研究修正。

生態基流量

生態基流量為維護河川生態系統的穩定與平衡的流量 (Jowett, 1997)。本處依水利署民國 94 年《板新地區供水改善計畫二期工程檢討評估暨新店溪水源開發計畫檢討—水源專題報告》中，參照日本生態基流量每 100 平方公里放流 0.1 至 0.3 秒立方公尺，並考量下游側入流及灌溉回歸水，設定石門水庫至鳶山堰間保留 1.8 (cms)、鳶山堰下游保留 2.3 (cms) 與三峽堰下游保留 0.503 (cms) 的生態基流量。

石門水庫水位高程-面積-容積

本研究中石門水庫水位高程、面積與容積間是參照民國 103 年 02 月水位-蓄水量統計表



作為換算依據，系統動力模式模擬水庫容積變化，透過圖 5-6 轉換成水位高程與面積，用於運用規線的對照與水庫蒸發量的估計。

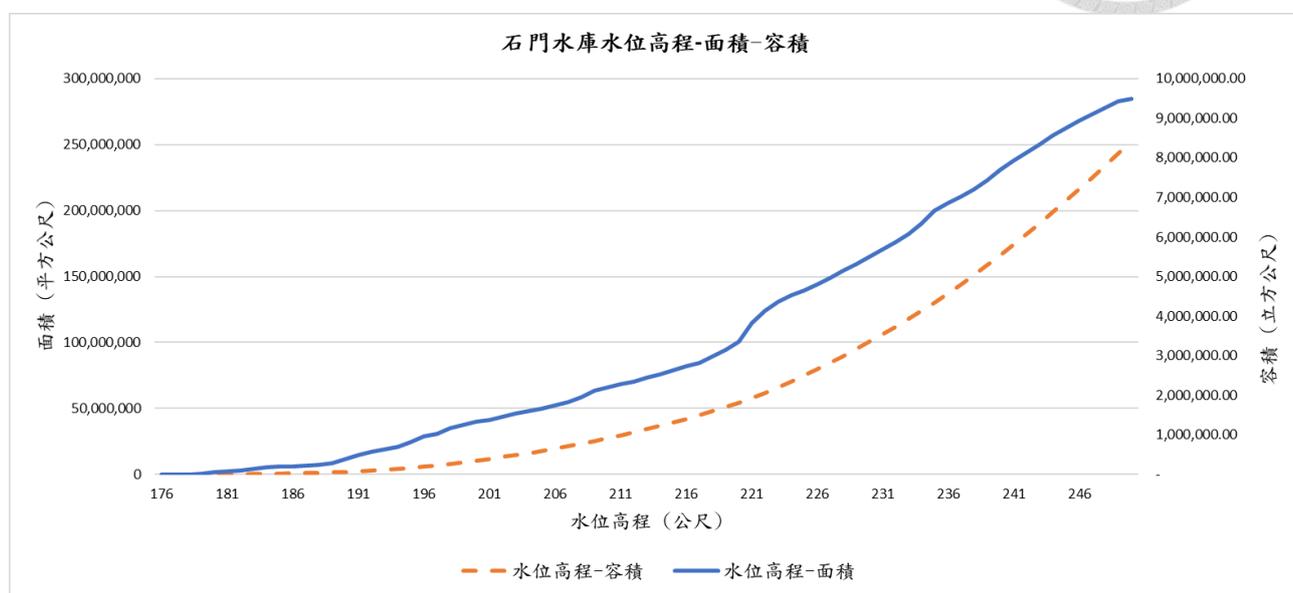


圖 5-6、石門水庫水位高程-面積-容積
(資料來源：民國 103 年 2 月測量資料)

石門水庫蒸發量

本處參考水利署民國 99 年《石門水庫供水區整體水源利用規劃》所列之石門水庫蒸發量 (表 5-7)，並搭配圖 5-6 由水庫庫容經水庫水位轉成水庫水面面積，相乘後得到每日水庫蒸發量的估計值。本處為了降低模式中的結構複雜度，並沒有使用即時的氣溫估計蒸發量，但為了增加模式間的連結性與一致性，建議未來研究可以更新成動態計算。

表 5-7、石門水庫各月份日蒸發量

月份	1 月	2 月	3 月	4 月	5 月	6 月
蒸發量 (mm/day)	1.348	1.292	1.415	1.720	2.168	2.694
月份	7 月	8 月	9 月	10 月	11 月	12 月
蒸發量 (mm/day)	3.611	3.383	2.871	3.151	2.097	1.875
資料來源：水利署民國 99 年《石門水庫供水區整體水源利用規劃》						



水庫用水標的給水順序與運用規線

現行水利法定於民國 31 年，該法第 18 條規定用水標的之順序為 (1) 家用及公共給水、(2) 農業用水、(3) 水力用水、(4) 工業用水、(5) 水運及 (6) 其他。從本研究區之水資源系統架構可知，家用及公共給水與工業用水共同使用自來水管線，實務上，只能使工業方自主減少用水量。此外，如本章開頭所述，實際狀況多為調用農業用水。因此，水利法有很大的改善空間以符合現況。根據水利署民國 107 年《石門水庫運用要點》，石門水庫運用規線如圖 5-7 所示，水庫蓄水利用運轉原則如下：

- 一、水庫水位標高在上限以上時，依據計畫配水量供水，並得視各標的用水需求增加調配之。
- 二、水庫水位標高在上限與下限之間時，最高依據計畫配水量供水。
- 三、水庫水位標高在下限與嚴重下限之間時，農業用水依據計畫配水量百分之七十五供水為原則，家用及公共給水、工業用水依據計畫配水量百分之九十供水為原則。
- 四、水庫水位標高在嚴重下限以下時，農業用水依據計畫配水量百分之五十供水為原則，家用及公共給水、工業用水依據計畫配水量百分之八十供水為原則。

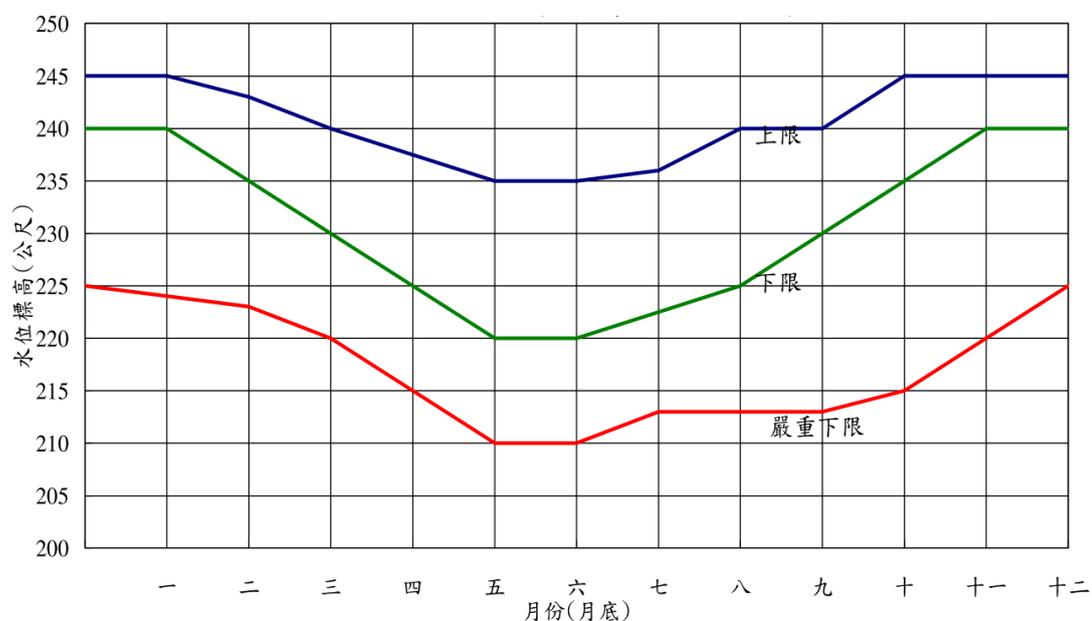


圖 5-7、石門水庫運用規線圖

(資料來源：水利署民國 107 年《石門水庫運用要點》)



5.4 作物模組之資料使用

本研究使用到的作物，包含桃園與石門灌區現在的主要作物水稻，以及旱作轉作調適所用的大豆。民國 97 年至民國 106 年桃園地區水稻與大豆產量與收穫面積統計資訊呈現於表 5-8 與表 5-9，水稻方面，從表中可以知道，現行水稻於桃園第一期作的收穫面積與單位面積產量高於二期作，其中，無災損的單位面積產量是由行政院農業委員會農糧署的災損統計資料校正而得（將災損的產量與面積加回原始的產量與收穫面積，重新計算單位面積產量）（表 5-8）。大豆方面則是近三年政府推廣後才漸漸擴大種植面積，多分布於觀音地區，其次為新屋與中壢地區（石門灌區內為純水稻）。其中，單位面積產量與稻作相同，為一期作大於二期作，然而種植面積為二期作大於一期作。本研究除了將該資料用於 6.3 節說明 AquaCrop 模擬產量之合理性外，也是作物模式中參數設定的依據之一。本處將作物模組中的資料使用依 AquaCrop 輸入檔分為作物參數、灌溉資料、土壤資料與田間管理四個部分作說明。

表 5-8、民國 97 年至民國 106 年桃園地區水稻產量與收穫面積統計資訊

年分	一期稻作				二期稻作			
	產量 (kg)	收穫面積 (ha)	單位面積產量 (kg/ha)		產量 (ka)	收穫 面積 (ha)	單位面積產量 (kg/ha)	
			實際	無災損			實際	無災損
97 年	33,164,280	6,123	5,416	5,417	14,497,286	3,897	3,720	3,740
98 年	39,201,909	6,812	5,755	5,755	17,343,852	4,158	4,171	4,171
99 年	37,042,665	6,834	5,420	5,420	15,877,896	4,251	3,735	3,735
100 年	40,593,072	6,935	5,853	5,858	17,233,250	3,972	4,339	4,339
101 年	36,927,999	6,671	5,536	5,761	18,789,485	3,933	4,778	4,779
102 年	43,354,349	9,021	4,806	5,152	17,519,420	4,148	4,224	4,224
103 年	55,614,181	10,376	5,360	5,361	18,980,446	4,101	4,628	4,628
104 年	22,920,926	4,157	5,514	5,514	14,747,810	3,783	3,898	3,936
105 年	66,277,917	12,029	5,510	5,510	11,285,767	3,567	3,164	3,164
106 年	70,874,141	13,093	5,413	5,419	14,591,543	4,245.43	3,437	3,437
平均	44,597,144	8,205	5,458	5,517	16,086,676	4,006	4,009	4,015

資料來源：行政院農業統計資料，經本研究彙整。

表 5-9、民國 97 年至民國 106 年桃園地區大豆產量與收穫面積統計資訊

年分	一期大豆			二期大豆		
	產量 (公斤)	收穫面積 (公頃)	單位面積產量 (公斤/公頃)	產量 (公斤)	收穫面積 (公頃)	單位面積產量 (公斤/公頃)
97 年	--	--	--	--	--	--
98 年	200	0.1	2,000	200	0.1	2,000
99 年	--	--	--	--	--	--
100 年	--	--	--	--	--	--
101 年	--	--	--	--	--	--
102 年	400	0.2	2,000	--	--	--
103 年	--	--	--	--	--	--
104 年	--	--	--	67,730	58.6	1,156
105 年	1,750	1.31	1,336	113,250	114.18	992
106 年	8,830	10.79	818	287,360	261.57	1,099
平均	2,795	3.10	1,539	117,135	108.61	1,312

資料來源：行政院農業統計資料，經本研究彙整。

表 5-10、民國 97 年至民國 106 年桃園地區水稻災害事件統計資訊

年分	發生日期	被害作物	被害面積 (公頃)	被害程度 (減收%)	換算被害面積 (公頃)	數量 (公噸)	價值 (新台幣千元)	災害事件
106 年	7-8 月	水稻	73.9	20.76	15.34	89.63	2063.87	尼莎暨海棠颱風
	6 月	水稻	0.29	10.34	0.03	0.17	3.96	6/13 豪雨
105 年	--	--	--	--	--	--	--	--
104 年	9 月	水稻	511.43	6.35	32.47	144.86	3200.89	杜鵑颱風
103 年	2 月	秧苗	2	3.00	0.06	2.7	81	低溫
	7 月	水稻	22	5.00	1.1	6.27	144.10	麥德姆颱風
102 年	7 月	水稻	1848.43	29.43	543.98	3118.62	71084.43	蘇力颱風
101 年	6 月	水稻	1838.3	13.42	246.67	1502.82	35090.97	豪雨及泰利颱風
	8 月	水稻	20	5.00	1	4.2	96.6	蘇拉颱風
100 年	3 月	水稻	60.54	9.99	6.05	33.10	740.18	3 月低溫
99 年	--	--	--	--	--	--	--	--
98 年	--	--	--	--	--	--	--	--
97 年	2 月	秧苗	2.47	10.12	0.25	8.13	274.95	低溫
97 年	9 月	水稻	135	15.00	20.25	79.8	1755.6	蕃蜜颱風

資料來源：行政院農業委員會農糧署，經本研究彙整。



作物參數

(1) 水稻

水稻作物模式參數設定部分，本研究經過大量文獻回顧後而得。其中行株距與種植密度是參考插秧桃園區農業改良場民國 99 年《水稻專輯》而定；插秧時間為根據桃園農田水利會民國 106 年《灌溉計畫書》中的建議時程（表 5-11）而定，並設立三個種植時間，反映輪灌制度，目的是降低農業灌溉尖峰用水值的產生，然而表 5-11 中，錯開日數隱含的實質意思是，將特定灌區分成若干小組，每日依組別與特定農作項目水深輪流施灌。以第一期作為例，錯開 25 天，即為將該灌區分成 25 個小組，每日分別灌溉各組。而由於本研究是以旬向水庫提出灌溉用水計畫，同時為降低模式複雜度，故直接以十日錯開插秧時間以達到相同效果；最大根深則參考牛踏層之位置（洪毓謙，1999）設定為 30 公分；最高、最低生長溫度則參考表 5-12 設定為 30°C 與 8°C；參考收穫指數則為本研究利用 1993 年到 2017 年臺中農試所豐歉試驗資料推估，同時參考臺灣大學作物模式課程講義，而設為 0.4；最後，各時期累積生育度數是由本研究使用 2008 年到 2016 年 C1C510 測站氣象資料於假設固定各生長期天數後，經 AquaCrop 換算，並平均後而得，相關參數設定彙整於表 5-13。

表 5-11、桃園農作時期

期作別 農作別	第一期作		第二期作	
	日期	錯開日數	日期	錯開日數
播種	2/1~2/25	25	7/9~7/28	20
浸田	2/26~3/22	25	7/12~7/31	20
整田	2/28~3/24	25	7/23~8/11	20
插秧	3/1~3/25	25	7/24~8/12	20
本田期間	3/1~7/23	25	7/24~11/30	20
收穫	7/5~7/29	25	11/21~12/10	20
本田灌溉日數	120 天（錯開天日數 145 天）		110 天（錯開天日數 130 天）	
資料來源：桃園農田水利會民國 106 年《灌溉計畫書》				



表 5-12、水稻在不同生長階段的臨界溫度需求範圍

生長階段	臨界溫度		
	低	高	最適
秧苗期	8-12	40	28-32
成活期	15	38	25-30
分蘗期	15	38-40	30-32
幼穗形成期	19-21	35	25-29
孕穗期	22	35	30-33
開花期	20-22	38	26-30
充實期	18	32	22-28

資料來源：吳信郁等人，2011

表 5-13、桃園水稻參數參考值與 AquaCrop 模式設定值

項目	參考資料建議值		AquaCrop 採用值	
	一期稻作	二期稻作	一期稻作	二期稻作
行株距 ¹	行距：30 cm、株距：15~20 cm		15×30 cm	
種植密度（株/公頃） ¹	166,666 - 222,222 叢/公頃； 每叢 5-7 支苗。		1,000,000	
插秧時間 ²	3/1-3/25	7/24-8/12	3/1、3/11、3/21	7/25、8/5、8/15
最大作物係數（Kc） ³	1.13	1.23	1.13	1.23
最大根深 ⁴	牛踏層約為於地表下 20-40cm，植物根不易穿透。		30 cm	
最高生長溫度 ⁵	30-45°C（表 5-12）		30°C	
最低生長溫度 ⁵	7-15°C（表 5-12）		8°C	
參考收穫指數（HIo） ⁶	0.35-0.5		0.4	
各時期 累積生 育度數 （°C） ^{4,7}	插秧到最大根深	由本研究使用 2008 到 2016 年 C1C510 氣象資料於假設固定各生長期天數後，經 AquaCrop 換算，並平均後而得。（一期作為準）		157
	插秧到開始衰老			1163
	插秧到成熟			1702
	插秧到開花			816
	開花期長			430

資料來源：桃園區農業改良場民國 99 年《水稻專輯》¹；桃園農田水利會民國 106 年《灌溉計畫書》²；（陳述，姚銘輝，& 陳守泓，2008）³；（洪毓謙，1999）⁴；台東區農業專訊-溫度對水稻生產之影響（2001）⁵；臺灣大學作物模式課程講義⁶；本研究計算彙整⁷。



(2) 大豆

根據桃園區農業專訊 96 期《北部地區大豆栽培要領》，本研究將大豆株距設為 6 公分，每公頃 33 萬株的種植密度，種植時程為方便模式計算同稻作設定，與北部種植建議時程有些微不同；最大作物係則參考 FAO 建議值；最大根深同水稻設定；最高、最低生長溫度採 AquaCrop 預設值；參考收穫指數由臺灣大學作物模式課程講義建議值而設為 0.3；各時期累積生育度數採用與水稻相同的概估方法，然而由於資料限制，故僅採用兩年平均。整體大豆作物參數設定彙整於表 5-14。

表 5-14、桃園大豆參數參考值與 AquaCrop 模式設定值

項目	參考資料建議值		AquaCrop 採用值	
	春作	秋作	春作	秋作
行株距 ¹	株距：6cm、行距見圖 5-8		--	
種植密度（株/公頃） ¹	330,000		330,000	
播種時間 ¹	2 月下旬至 3 月上旬	8 月中、下旬	3/1、3/11、 3/21	7/25、8/5、 8/15
最大作物係數（Kc） ²	1.15		1.15	
最大根深 ³	牛踏層約為於地表下 20-40cm，植物根不易穿透。		30 cm	
最高生長溫度	--		30°C	
最低生長溫度	--		10°C	
參考收穫指數（HIo） ⁴	0.25 - 0.35		0.3	
各時期 累積生 育度數 （°C） ⁵	播種到最大根深	由本研究使用 2016 到 2017 年 C1C510 氣象資料於假設固定各生長期天數後，經 AquaCrop 換算，並平均後而得。（一期作為準）	850	
	播種到開始衰老		1390	
	播種到成熟		1708	
	播種到開花		687	
	開花期長		250	

資料來源：桃改場桃園區農業專訊 96 期《北部地區大豆栽培要領》¹；FAO²；(洪毓謙，1999)³；臺灣大學作物模式課程講義⁴；本研究計算彙整⁵

灌溉資料

(1) 水稻

本研究依據表 5-15 設定水稻各生長時期的灌溉規則，每當湛水深低於湛水深下界時，則進行灌溉，灌溉的量為最大湛水深與最小湛水深之差值。其中生育階段的停滯期與孕穗期應該要自然排水至部分泥土龜裂，並適時灌溉以防缺水逆境的發生，然而，由於 AquaCrop 模式之限制，無法於同一模擬中設置兩種灌溉方式，此部分本研究設定當湛水深小於 0 時，給予 5 (mm) 之灌溉水。生育階段 90 天後，以濕潤灌溉，待稻米黃熟後收成，本模式設定每五天灌 10 (mm) 以維持基本生長需求。於整田與浸田部分，本研究參考附件二「臺灣桃園農田水利會民國 106 年灌溉計畫表」固定 180 (mm) 用水量，並乘上水庫水源配比於本田期間開始前一旬向水庫取水。桃園因除了水庫供水外，還會透過埤塘調節每旬的水庫給水量，於本研究中不考慮埤塘，此假設會影響部分風險值，整體而言，不會影響本研究想傳達之風險評估概念。

表 5-15、水稻各時期湛水深

生育天數	生育階段	湛水深度 (mm)	水稻生理用水特徵
--	整地/浸田期	(180)	為第一次浸田、第二次浸田與整田用水之加總 $100 + 50 + 30 = 180$
1~5	插秧	30~50	保持 3 至 5 公分湛水深以利秧苗存活
6~15	成活期		
16~30	分蘗開始	20~30	避免湛水過深與不適水溫而影響分蘗
	有效分蘗期		
31~39	最大分蘗期		
40~45	停滯期	0	排水以利土壤通氣、促進根系發展
46~60	幼穗形成開始	50~100	缺水將抑制幼穗形成，對產量影響甚大
	幼穗形成期		
61~65	孕穗期	0	土壤氧氣消耗達高峰，耐旱性較強
66~75	抽穗期開花期	50~100	水稻需水量達高峰
76~90	乳熟期	20~30	齊穗後逐漸降低湛水深至 2 至 3 公分
91~105	糊熟期	0	行濕潤灌溉
106~120	黃熟期	0	穗上穀粒一半變黃時停止灌溉
121~	完熟期	0	如無法適期收穫，視田面乾燥程度行濕潤灌溉

資料來源：(高振程，2003)；本研究整理。



(2) 大豆

大豆部分則是採畦溝灌溉的方式(圖 5-8)，每次注水至 6 至 8 分滿，藉由毛細作用擴散至畦面讓期濕潤即可。根據桃園區農業專訊 96 期《北部地區大豆栽培要領》，大豆生育初期土壤適宜含水量為 40% 至 60%，如過高會限制根部生長，嚴重則缺氧死亡；開花期及莢果充實期則需補充水分以提高產量，通常開花前灌溉 1 次，開花後灌溉 2 到 3 次，此時為大豆最需要水分之階段，以確保高種子產量，實務操作上要盡量作好排水雨避免積水。根據以上資訊，本研究設定 AquaCrop 中的大豆灌溉檔為畦溝灌溉，並以土壤含水量為依據產生灌溉時程，彙整如表 5-16 所示。此外，大豆整地前需浸水 2 至 3 日，殺死地下害蟲，本處假設其用水量同稻米浸田加整田共用水 180mm。

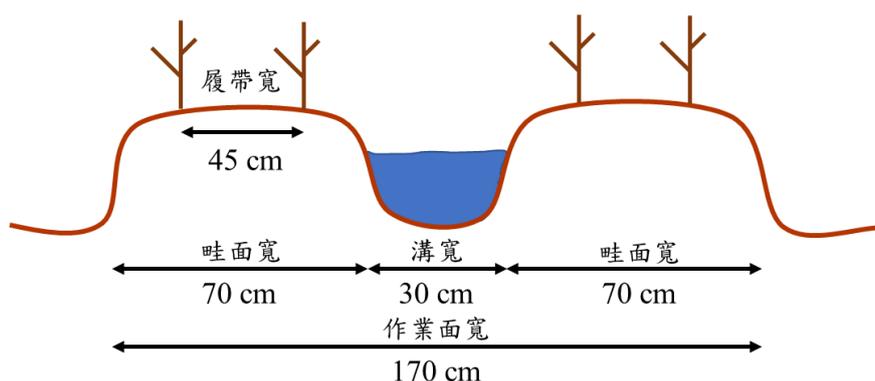


圖 5-8、大豆田間作業示意圖

表 5-16、AquaCrop 大豆灌溉檔設定

生育天數	根層土壤可用含水量閾值 (不足量%)	灌溉回田間含水量 (+/- mm)
1~14	50	0
15~39	60	0
41~55	10	0
56~90	60	0
90~	80	-20



土壤資料

桃園農田水利會 106 年《灌溉計畫書》，灌區土壤被分為輕黏土、黏質壤土、砂質黏壤土與砂質壤土，各佔比例為 16.6%、41.6%、19.1%與 22.8%；石門農田水利會 97 年《灌溉計畫書》則將土壤分為黏土、黏壤土/植壤土與砂壤土三種，各佔比例 21.3%、63.3%與 15.5%。因此，本研究選用兩水利會佔比最高的黏質壤土作為 AquaCrop 模擬時的土壤類別。此均質假設在旱作模擬時可能會帶來較大的誤差；但對水稻的模擬結果影響較小，主要是因為稻作土壤多為飽和之狀態，蒸發散較不易受土壤類別影響，而滲漏率則由牛踏層限制。牛踏層約於田區地表下 20 至 40 公分處，厚約 15 至 20 公分（洪毓謙，1999）。本研究假設田區土壤表層 40 公分為黏質壤土，細節土壤參數設定參照 AquaCrop 中預設值，第二層為 15 公分厚的牛踏層，飽和滲漏率為 4 (mm/day)，其中，大豆因是種植在稻田區，所以有相同設定，且溝深通常為 15 至 20 公分深，不會破壞牛踏層。

田間管理

田間管理在本研究中水稻部分只考慮田埂高之設定，大豆方面則為 50%面積蒸發量（大豆溝灌水面設定為總面積之一半）。田埂高度會影響水的蓄存量，也會影響有效雨量，越高的田埂可以在有雨時，儲存較多的水，進而減少灌溉水量。雖然在實務上，農民會依不同生育時期調整田埂高度，以控制湛水深。然而，AquaCrop 中並無法動態調整田埂高，在考慮插秧初期，如湛水深過高，淹過苗頂會造成秧苗死亡，本研究設定田埂高為 10 公分。

第六章、研究區域 AgriHydro 子模式驗證與合理性說明



6.1 情境設定模組

6.1.1 多測站氣象合成模式驗證：空間統計特性驗證

本研究以多測站氣象合成模式同時模擬七個測站，模擬長度為 200 年（10 組 20 年）的日均溫、日最高、最低溫與日雨量。七個測站包含田區的五個測站（圖 5-2 中的紫色點）與用於三峽河流量及石門水庫入流量模擬的兩個代表測站點（雨量經徐昇式加權平均，溫度採鄰近測站資訊），而產制 200 年氣象資料是為了維持其統計特性。在空間模擬中，雨量與降雨事件空間自相關性的模擬結果呈現於圖 6-1，日尺度下，每一個點位為該日 10 年（2008 年至 2017 年）的平均值，模擬資料則為 200 年的平均值，共 365 個點（天）， r^2 分別為 0.699 與 0.551；月尺度下，每一個點位為該月 10 年（模擬資料則為 200 年）的平均值，共 12 個點， r^2 則分別為 0.896 與 0.886，整體而言，雨量模擬結果能夠維持七個站的空間自相關性。

然而，可以發現日尺度下，於圖中左下與右上分別有部分點位脫離 45 度角線，可能原因為觀測資料不足。在無資料缺值下，每日的 SDI 值僅由 10 個歷史觀測值計算而得，因此，易造成極值（0、1）的產生，而非其真實常態的平均趨勢。溫度結果呈現於圖 6-2，從左到右分別為日均溫、日最高溫與日最低溫的模擬結果。相較於雨量，溫度相關氣象變數在決定係數（ r^2 ）的表現上皆較差，原因出自於本研究區溫度於空間上的變異性較小，且彼此間相關性大，SDI 值也多趨近於 1，於模擬設定時，是以各月中 γ 的最大值進行模擬。因此，該結果是合理且可以供使用的。

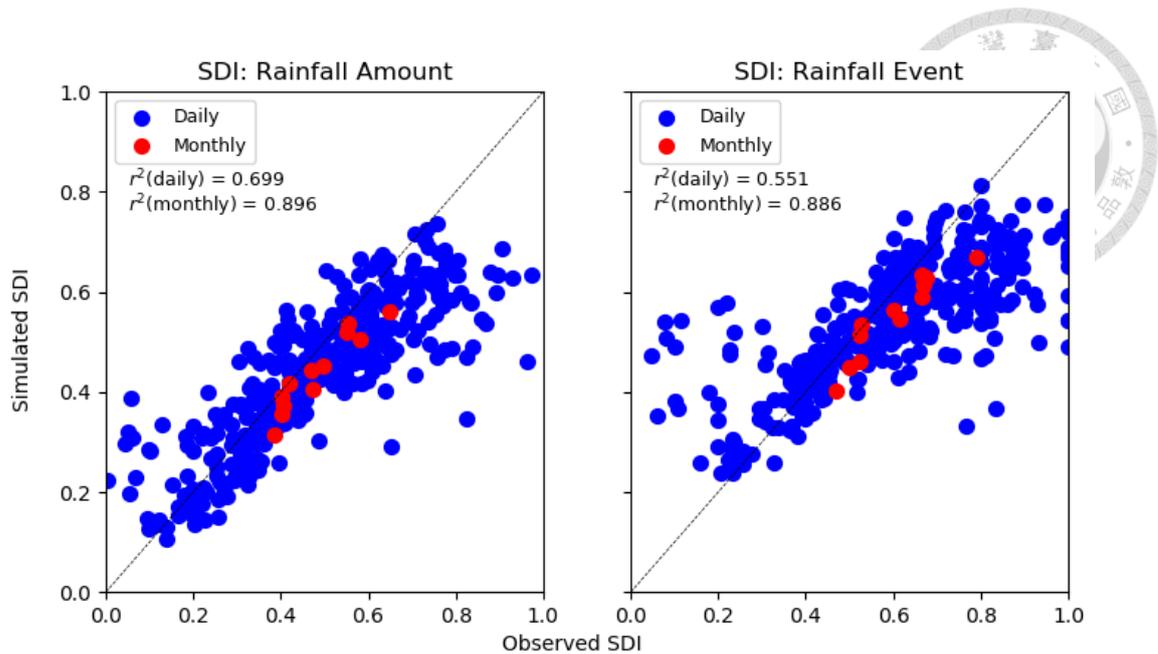


圖 6-1、降雨量與降雨事件空間自相關性 SDI 指標模擬驗證結果

左圖與右圖分別為雨量及降雨事件的模擬驗證結果；日尺度驗證結果資料點（藍點）在觀測資料中為各日 10 年（2008 年至 2017 年）的平均結果，模擬資料為各日 200 年的平均結果；月尺度驗證結果資料點（紅點）在觀測資料中為各月 10 年（2008 年至 2017 年）的平均結果，模擬資料為各月 200 年的平均結果。

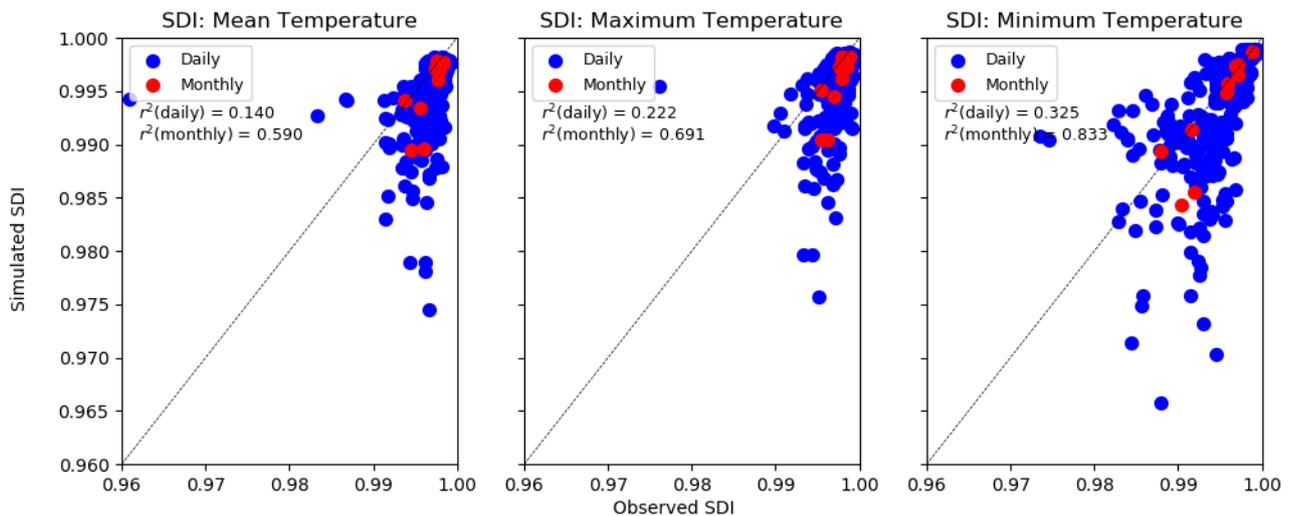


圖 6-2、溫度空間自相關性 SDI 指標模擬驗證結果

從左到右分別為日均溫、日最高溫與日最低溫的模擬驗證結果；日尺度驗證結果資料點（藍點）在觀測資料中為各日 10 年（2008 年至 2017 年）的平均結果，模擬資料為各日 200 年的平均結果；月尺度驗證結果資料點（紅點）在觀測資料中為各月 10 年（2008 年至 2017 年）的平均結果，模擬資料為各月 200 年的平均結果。

除了 SDI 外，本研究也檢視該方法是否能有效維持兩兩站間的相關性（Interstation Correlation）。然而，結果發現，在雨量與降雨事件中，雖然 r^2 表現良好，分別為 0.680 與 0.757，但有整體性低估之情形發生。其主要原因為 γ 的範圍限制（式(3.23)）與觀測資料長度不足所造成，其中利用觀測值計算出的 SDI 值，對應由多次模擬而建立的 γ 與 SDI 對應曲線所找出的模擬用 γ ，會發生其超過 γ 限制範圍的情形。於此情形，本研究以 γ 限制範圍的端點代之（圖 6-4）。造成該狀況的原因除了權重設定外，更主要的原因是觀測資料計算出的 SDI（日尺度：各日 10 年的平均，共 365 天）偏誤與其極值。同上段落，SDI 極值的產生是因為觀測資料期長不足所致，這部分需要待日後有更長年限之資料時，方可改善。於溫度部分，同圖 6-2，結果雖有較低的 r^2 ，然而變化範圍小，該結果是合理且適用的。

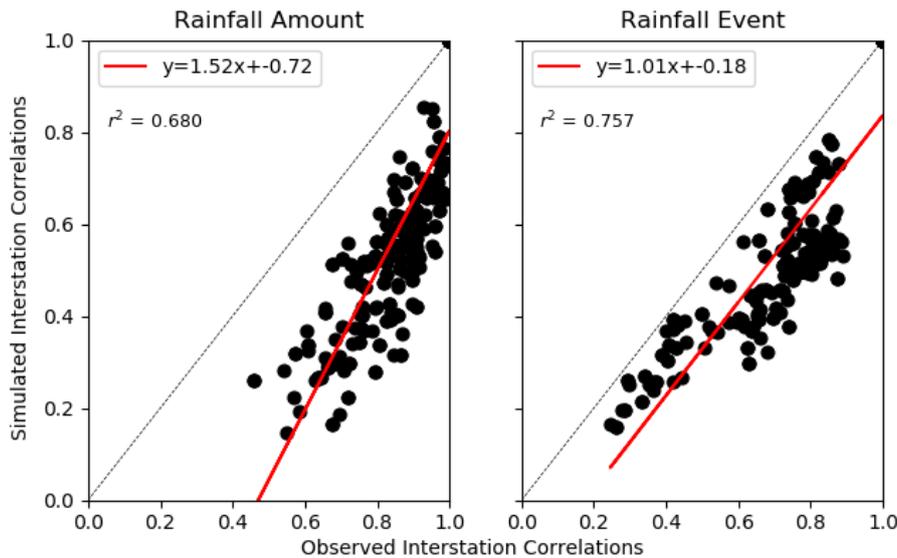


圖 6-3、降雨量與降雨事件站間相關性模擬驗證結果

左圖與右圖分別為雨量及降雨事件的模擬驗證結果；驗證結果資料點為兩兩測站於各月間的相關性的模擬與觀測值對應點，觀測值是由 10 年（2008 年至 2017 年）資料計算而得，模擬則為 200 年資料。

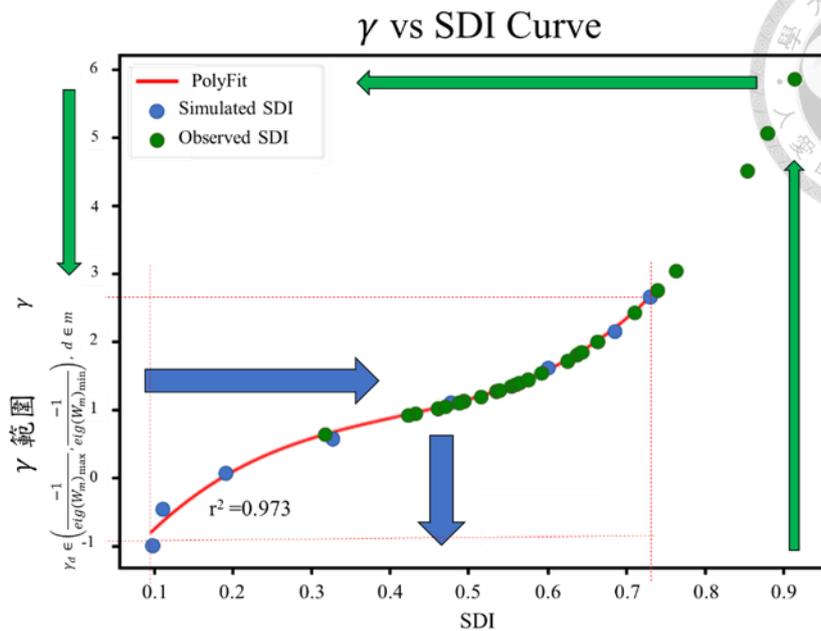


圖 6-4、 γ 與 SDI 對應曲線與修正方法示意圖

藍色資料點是由 γ 限制範圍選取參數 γ 模擬資料，並由模擬資料計算 SDI 所繪製的點；紅色曲線則為藍色資料點經三階多項式迴歸後的 γ 與 SDI 對應曲線；綠色箭頭部分為由觀測資料所計算而得的 SDI 對應 γ 值的校正過程，超過 γ 限制範圍則由 γ 限制範圍（紅色水平虛線）的端點代之。

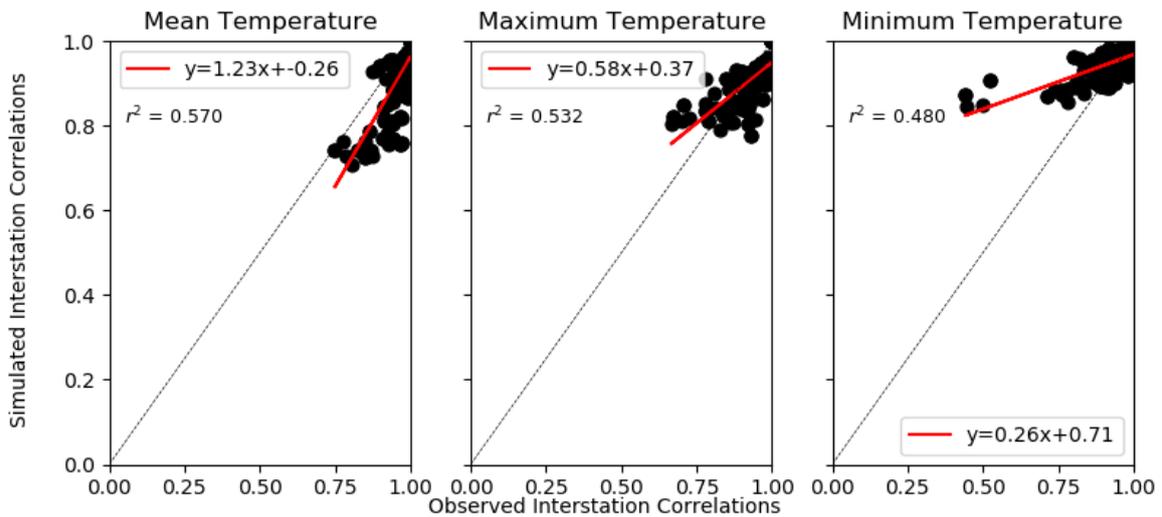


圖 6-5、溫度站間相關性模擬驗證結果

從左到右分別為日均溫、日最高溫與日最低溫的模擬驗證結果；驗證結果資料點為兩測站各月間的相關性模擬與觀測值對應點，觀測值是由 10 年（2008 年至 2017 年）資料計算而得，模擬則為 200 年資料。



6.1.2 多測站氣象合成模式驗證：單測站統計特性驗證

驗證完空間統計特性後，本研究進一步檢視，多測站氣象合成模式於個別測站的模擬情形與統計特性維持狀況，其中包含一階馬可夫鍊參數（降雨事件）、雨量機率分布的統計檢定與溫度相關氣象參數平均值與標準差統計檢定。圖 6-6 為各測站與各月份一階馬可夫鍊參數 200 年模擬資料與 10 年觀測資料的線性迴歸結果，從左到右分別為 $P(W)$ 、 $P(W|D)$ 與 $P(W|W)$ ，其中 r^2 皆大於 0.99，而迴歸斜率也維持在 45 度線上，表現良好。

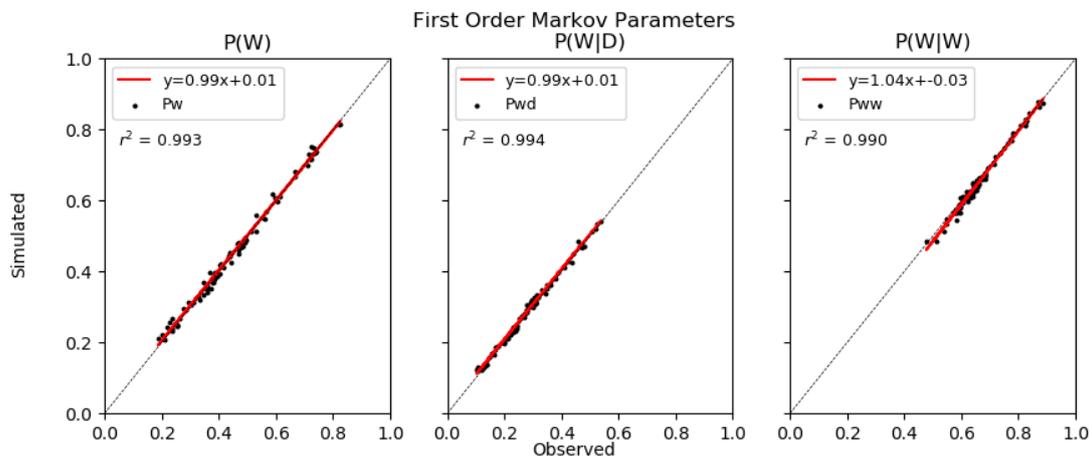


圖 6-6、一階馬可夫鍊參數模擬驗證結果

從左到右分別為 $P(W)$ 、 $P(W|D)$ 與 $P(W|W)$ 的模擬驗證結果；驗證結果資料點為七個測站用各月模擬與觀測資料計算出的馬可夫鍊參數的對應點。

在日雨量模擬上，本研究先以 Kolmogorov-Smirnov 統計測試法 (KS Test) 決定分佈，結果發現，在指數分佈、伽瑪分佈、韋伯分佈與指數常態分佈中，韋伯分佈與指數常態分佈於整體表現較好，故選用韋伯分佈作為本研究的雨量統計分佈。未來應用上應針對各測站與各月的降雨資料，選用各自適合的雨量分佈，並將極端降雨事件分開產生，以降低參數估計時所帶來的偏誤，本研究採 MLE 的方式估計參數，相較於動差法 (Moment Method)，有低估平均值之偏誤 (Bias)，原因出自極端降雨事件提高整體平均值，但因本研究不探討極端降雨事件所帶來的風險，故採 MLE 估計參數，使分佈曲線能夠最大化，擬合觀測資料點，降低極端降雨事件對於參數估計之影響。產製資料後，本研究以無母數 Kruskal Wallis 統計檢定 (K-



W Test) 檢測模擬過程中，其統計特性在 95% 信心水準下 ($\alpha = 0.05$) 統計分布的維持性，結果顯示，在 200 年的模擬資料下，各測站於各月份皆通過檢定。本研究選用之韋伯分佈的 KS Test 與 K-W Test 呈現於表 6-1。

多測站氣象合成 200 年之氣溫相關氣象變數的雙尾 T 檢定與雙尾 F 檢定結果呈現於表 6-2 與表 6-3，於 95% 信心水準 ($\alpha = 0.05$) 下，在平均值部分，只有 C0C590 測站於 9 月月均溫與三峽代表測站日最低溫之月平均於 10、11 月被拒絕，其餘部分皆為通過。然而，在標準差部分，僅日最高溫之月標準差能有效被維持 (C0C590 測站於 9 月被拒絕)，日均溫之月標準差與日最低溫之月標準差無法被有效維持，其中又以日最低溫之月標準差被拒絕總數較多，如以月份檢視，則 3 到 5 月與 9 月到 12 月為主要被拒絕月份，而被拒絕之參數皆為高估。這個部分可能為空間模擬中低估空間相關性或殘差計算方式所導致，期待未來研究進一步探討與修正。



表 6-1、多測站氣象合成模式雨量分佈挑選 KS 檢定與模擬結果測試 K-W 檢定結果

月份	韋伯分布 KS 檢定 ($\alpha = 0.05$)							K-W 檢定 ($\alpha = 0.05$)						
	C0C540	C0C590	C0C630	C0C650	C1C510	石門	三峽	C0C540	C0C590	C0C630	C0C650	C1C510	石門	三峽
1	Pass	Reject	Pass	Pass	Reject	Reject	Pass	Pass	Pass	Pass	Pass	Pass	Pass	Pass
2	Reject	Reject	Reject	Reject	Reject	Reject	Pass	Pass	Pass	Pass	Pass	Pass	Pass	Pass
3	Pass	Pass	Pass	Pass	Pass	Reject	Pass	Pass	Pass	Pass	Pass	Pass	Pass	Pass
4	Pass	Pass	Pass	Pass	Pass	Pass	Pass	Pass	Pass	Pass	Pass	Pass	Pass	Pass
5	Pass	Pass	Pass	Pass	Pass	Pass	Pass	Pass	Pass	Pass	Pass	Pass	Pass	Pass
6	Reject	Pass	Pass	Pass	Pass	Pass	Pass	Pass	Pass	Pass	Pass	Pass	Pass	Pass
7	Pass	Pass	Pass	Pass	Pass	Pass	Pass	Pass	Pass	Pass	Pass	Pass	Pass	Pass
8	Pass	Pass	Pass	Pass	Pass	Pass	Pass	Pass	Pass	Pass	Pass	Pass	Pass	Pass
9	Pass	Pass	Pass	Pass	Pass	Pass	Pass	Pass	Pass	Pass	Pass	Pass	Pass	Pass
10	Pass	Pass	Pass	Pass	Pass	Reject	Pass	Pass	Pass	Pass	Pass	Pass	Pass	Pass
11	Pass	Pass	Reject	Reject	Pass	Reject	Pass	Pass	Pass	Pass	Pass	Pass	Pass	Pass
12	Pass	Pass	Reject	Pass	Reject	Reject	Pass	Pass	Pass	Pass	Pass	Pass	Pass	Pass
拒絕 總數	2	2	3	2	3	6	0	0	0	0	0	0	0	0



表 6-2、多測站氣象合成模式氣溫月平均值雙尾 T 檢定結果

月份	雙尾 T 檢定 ($\alpha = 0.05$)																				
	月均溫							日最高溫之月平均							日最低溫之月平均						
	C0C540	C0C590	C0C630	C0C650	C1C510	石門	三峽	C0C540	C0C590	C0C630	C0C650	C1C510	石門	三峽	C0C540	C0C590	C0C630	C0C650	C1C510	石門	三峽
1	Pass	Pass	Pass	Pass	Pass	Pass	Pass	Pass	Pass	Pass	Pass	Pass	Pass	Pass	Pass	Pass	Pass	Pass	Pass	Pass	Pass
2	Pass	Pass	Pass	Pass	Pass	Pass	Pass	Pass	Pass	Pass	Pass	Pass	Pass	Pass	Pass	Pass	Pass	Pass	Pass	Pass	Pass
3	Pass	Pass	Pass	Pass	Pass	Pass	Pass	Pass	Pass	Pass	Pass	Pass	Pass	Pass	Pass	Pass	Pass	Pass	Pass	Pass	Pass
4	Pass	Pass	Pass	Pass	Pass	Pass	Pass	Pass	Pass	Pass	Pass	Pass	Pass	Pass	Pass	Pass	Pass	Pass	Pass	Pass	Pass
5	Pass	Pass	Pass	Pass	Pass	Pass	Pass	Pass	Pass	Pass	Pass	Pass	Pass	Pass	Pass	Pass	Pass	Pass	Pass	Pass	Pass
6	Pass	Pass	Pass	Pass	Pass	Pass	Pass	Pass	Pass	Pass	Pass	Pass	Pass	Pass	Pass	Pass	Pass	Pass	Pass	Pass	Pass
7	Pass	Pass	Pass	Pass	Pass	Pass	Pass	Pass	Pass	Pass	Pass	Pass	Pass	Pass	Pass	Pass	Pass	Pass	Pass	Pass	Pass
8	Pass	Pass	Pass	Pass	Pass	Pass	Pass	Pass	Pass	Pass	Pass	Pass	Pass	Pass	Pass	Pass	Pass	Pass	Pass	Pass	Pass
9	Pass	Reject	Pass	Pass	Pass	Pass	Pass	Pass	Pass	Pass	Pass	Pass	Pass	Pass	Pass	Pass	Pass	Pass	Pass	Pass	Pass
10	Pass	Pass	Pass	Pass	Pass	Pass	Pass	Pass	Pass	Pass	Pass	Pass	Pass	Pass	Pass	Pass	Pass	Pass	Pass	Pass	Reject
11	Pass	Pass	Pass	Pass	Pass	Pass	Pass	Pass	Pass	Pass	Pass	Pass	Pass	Pass	Pass	Pass	Pass	Pass	Pass	Pass	Reject
12	Pass	Pass	Pass	Pass	Pass	Pass	Pass	Pass	Pass	Pass	Pass	Pass	Pass	Pass	Pass	Pass	Pass	Pass	Pass	Pass	Pass
拒絕 總數	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2



表 6-3、多測站氣象合成模式氣溫月標準差雙尾 F 檢定結果

月份	雙尾 F 檢定 ($\alpha = 0.05$)																					
	日均溫之月標準差							日最高溫之月標準差							日最低溫之月標準差							
	C0C540	C0C590	C0C630	C0C650	C1C510	石門	三峽	C0C540	C0C590	C0C630	C0C650	C1C510	石門	三峽	C0C540	C0C590	C0C630	C0C650	C1C510	石門	三峽	
1	Pass	Pass	Pass	Pass	Pass	Pass	Reject	Pass	Pass	Pass	Pass	Pass	Pass	Pass	Pass	Pass	Reject	Pass	Pass	Pass	Reject	
2	Pass	Pass	Pass	Pass	Pass	Pass	Pass	Pass	Pass	Pass	Pass	Pass	Pass	Pass	Pass	Pass	Reject	Reject	Reject	Reject	Reject	Pass
3	Reject	Reject	Reject	Reject	Reject	Pass	Reject	Pass	Pass	Pass	Pass	Pass	Pass	Pass	Pass	Reject	Reject	Reject	Reject	Reject	Reject	
4	Reject	Reject	Reject	Reject	Reject	Reject	Reject	Pass	Pass	Pass	Pass	Pass	Pass	Pass	Pass	Reject	Reject	Reject	Reject	Reject	Reject	
5	Reject	Reject	Reject	Reject	Reject	Reject	Reject	Pass	Pass	Pass	Pass	Pass	Pass	Pass	Pass	Reject	Reject	Reject	Reject	Reject	Reject	
6	Pass	Pass	Pass	Pass	Pass	Pass	Pass	Pass	Pass	Pass	Pass	Pass	Pass	Pass	Pass	Reject	Reject	Reject	Reject	Reject	Reject	
7	Pass	Pass	Pass	Pass	Pass	Pass	Pass	Pass	Pass	Pass	Pass	Pass	Pass	Pass	Pass	Pass	Pass	Pass	Pass	Pass	Pass	
8	Pass	Pass	Pass	Pass	Pass	Pass	Pass	Pass	Pass	Pass	Pass	Pass	Pass	Pass	Pass	Pass	Pass	Pass	Pass	Pass	Pass	
9	Reject	Reject	Reject	Reject	Reject	Pass	Reject	Pass	Reject	Pass	Pass	Pass	Pass	Pass	Pass	Reject	Reject	Reject	Reject	Reject	Pass	
10	Reject	Reject	Pass	Pass	Pass	Pass	Reject	Pass	Pass	Pass	Pass	Pass	Pass	Pass	Pass	Pass	Pass	Reject	Reject	Pass	Pass	
11	Reject	Reject	Reject	Reject	Reject	Pass	Reject	Pass	Pass	Pass	Pass	Pass	Pass	Pass	Pass	Reject	Reject	Reject	Reject	Reject	Pass	
12	Reject	Reject	Reject	Reject	Reject	Reject	Reject	Pass	Pass	Pass	Pass	Pass	Pass	Pass	Pass	Reject	Reject	Reject	Reject	Reject	Reject	
拒絕 總數	7	7	6	6	6	3	8	0	1	0	0	0	0	0	7	8	10	9	8	6	9	



6.2 水資源模組

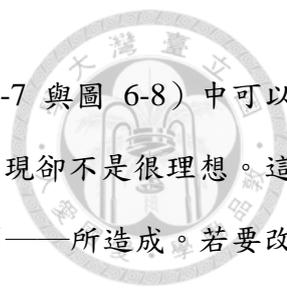
6.2.1 GWLF 流量模式驗證

根據 5.3.1 節之參數設定，本研究以 2008 年到 2017 年之石門集水區和三峽氣象資料與石門水庫入流量與三峽（2）流量資料，驗證 GWLF 中的流量模式於三峽河流量與石門水庫入流量模擬之適用性。本處所使用的指標包含方均根誤差（Root Mean Square Error, RMSE）、相關係數（ r ）、效率係數（Coefficient of Efficiency, CE）與堅持係數（Coefficient of Persistence, CP），其中 CE 與 CP 之計算方式如式(5.5)與式(5.6)：

$$CE = 1 - \frac{\sum_{t=1}^N (O_t - S_t)^2}{\sum_{t=1}^N (O_t - \bar{O})^2} \quad (5.5)$$

$$CP = 1 - \frac{\sum_{t=2}^N (O_t - S_t)^2}{\sum_{t=2}^N (O_t - O_{t-1})^2} \quad (5.6)$$

其中， O_t 與 S_t 為該時間尺度下，時間 t 的觀測與模擬資料； \bar{O} 為觀測資料之平均值； N 為總資料長。 CE 代表相較於用平均值預測，模式提供之預測力效用； CP 則代表相較於用前一時刻之觀測值作預測，模式提供之預測力效用，兩者皆為越接近 1 越好。從 GWLF 在不同時間尺度下的石門及三峽流量的驗證結果（表 6-4），可以發現日尺度與旬尺度在四種指標下，模式表現具有相當大的差異，旬尺度表現較好，原因為 GWLF 假設從非飽和含水層入滲到飽和含水層之傳輸時間為 1 天，然而現實中可能需要更長時間，因此經過旬平均後，可以有效消除該假設所帶來之偏誤。旬與月尺度的差異，相對來說不顯著，除了 RMSE 有下降外，其餘指標皆未有明顯改進，反而有部分指標表現下降，故本研究選用旬尺度是相對合理且適用的時間尺度。



從石門水庫入流量與三峽河流量於旬尺度下的時間序列圖（圖 6-7 與圖 6-8）中可以發現，雖然趨勢上 GWLF 表現良好，然而捕捉低流量與尖峰流量的表現卻不是很理想。這是 GWLF 模式本身結構上的限制——簡化許多水傳輸過程中的物理細節——所造成。若要改進此部分可能需要細化整體模式結構，以額外機制計算淺層飽和含水層的出流量，或使用更複雜的水文模式如 SWAT 等。然而，考量水庫本身有緩衝調節之功能，此差異對於整體供水系統不會帶來過大的影響，故判斷 GWLF 適用於本研究之流量模擬。

表 6-4、GWLF 不同時間尺度下的驗證結果

輸出時間尺度	石門水庫入流量 (cms)				三峽河河川流量 (cms)			
	RMSE	r	CE	CP	RMSE	r	CE	CP
日尺度	88.07	0.78	0.52	0.44	12.78	0.85	0.64	0.68
旬尺度	21.12	0.97	0.92	0.94	5.46	0.87	0.73	0.81
月尺度	16.62	0.97	0.90	0.93	3.93	0.85	0.74	0.82

石門水庫GWLF入流量模擬驗證 (旬)

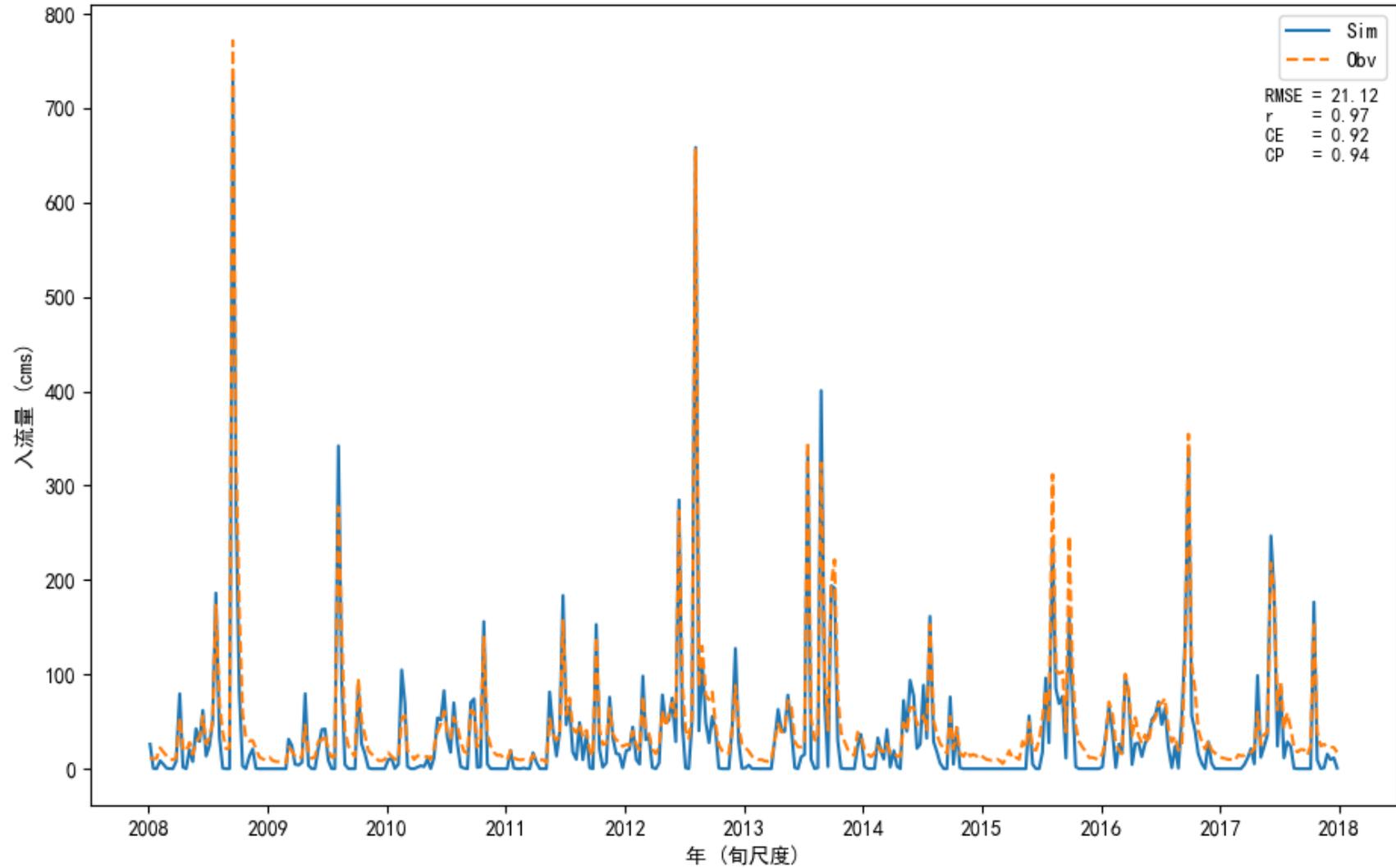


圖 6-7、GWLF 旬尺度石門水庫 2008 年到 2017 年入流量模擬結果

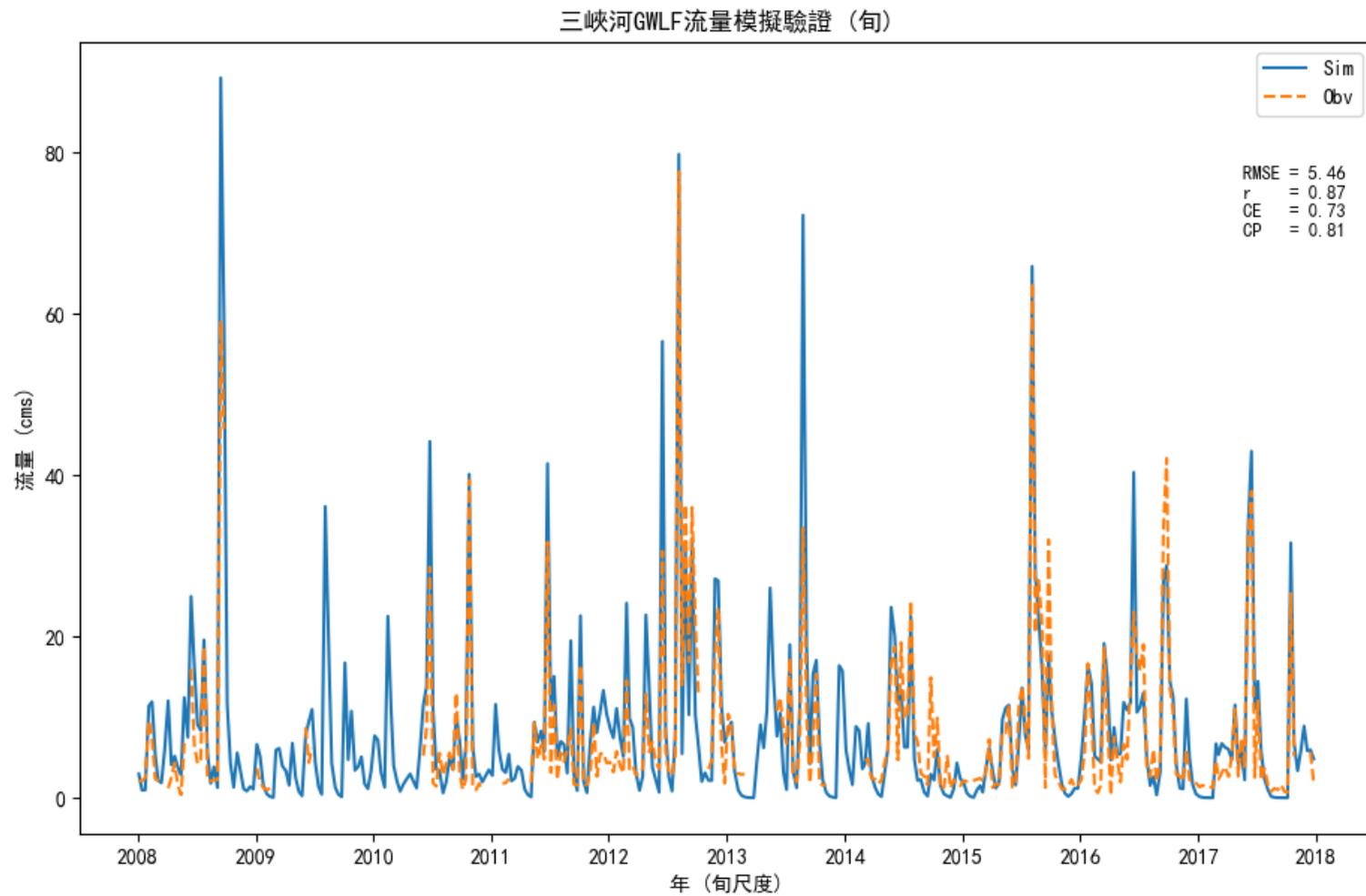


圖 6-8、GWLF 旬尺度三峽河 2008 年到 2017 年河川流量模擬結果

註：觀測資料（橘色虛線）之不連續的空值部分為缺值，不納入模式驗證指標的計算中。



6.2.2 石門水庫系統動力模式驗證

本研究以系統動力模式模擬石門水庫 2014 年到 2016 年的水庫水位高程變化，分別代表平常年、乾早年與豐水年之模擬情形，其中入流量資料包含石門水庫入流量、三峽堰入流量與鳶山堰側流量。然而經比對，三峽河流量資料換算三峽堰入流量與鳶山堰側流量因資料品質較差，誤差過大，故本研究採用 1993 年至 2012 年平均旬入流量代替。其中，鳶山堰側流量小僅影響石門水庫額外支援的生態基流量，對於水位影響不大；三峽河入流量於模式中，僅影響板新淨水廠可取用之水量，不影響石門水庫水位變化，故此作法不影響驗證之結果。

在 2014 平常年的模擬結果中（圖 6-9），11 月 27 日前皆為正常水位高程，可以看出五月開始進入豐水期水庫水位逐漸滿庫。與此同時，模擬值逐漸出現誤差，於後半年雖然變化趨勢一致，但是水位高程約有 2 公尺至 4 公尺的差距，推測原因可能為夏季水庫接近滿水位（245 公尺）時，為避免遭逢大雨或颱風時水庫溢流，石門水庫管理中心依氣象預報進行預防性放流。此外當水庫水位高程大於水庫運用規線上限時，得視各標的用水需求而增加調配量，使得實際水位高程較模擬值低。

於民國 103 年 11 月 27 日，因水位高程低於下限，石門水庫桃園供水區實施一階限水，而板新供水區則於民國 103 年 12 月 8 日跟進，實施夜間減壓供水。此缺水現象延伸至 2015 年，於民國 104 年 2 月 26 日石門水庫實施二階限水，4 月 8 日起更實施「供五停二」的三階限水措施，至 6 月 8 日才解除一階限水。圖 6-10 呈現 2015 乾早年的模擬結果，相對實際值，模擬值的缺水情形更為嚴重，因為模式不考慮休耕等非規定於運用規線中的人為調動，故造成該現象，當水庫回復至正常供水時，模擬值與實際值逐漸趨於一致。此一現象可以在 2016 豐水年中的驗證結果中再一次證實（圖 6-11），於正常供水且無人為調動之情況下，本研究所使用之系統動力模式能夠良好的反應水庫水位高程之變動趨勢。因此，總結上述三年之驗證結果，本系統動力模式能於平常年、乾早年與豐水年合理的反映水庫水位高程之變動。

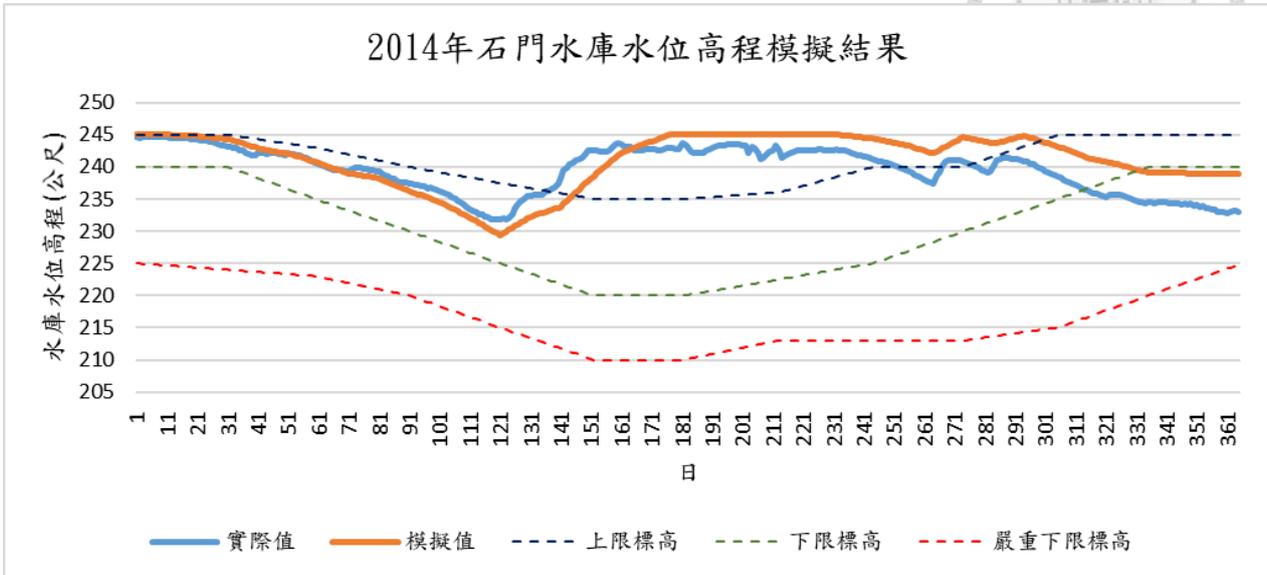


圖 6-9、2014 年石門水庫水位高程模擬結果（平常年）

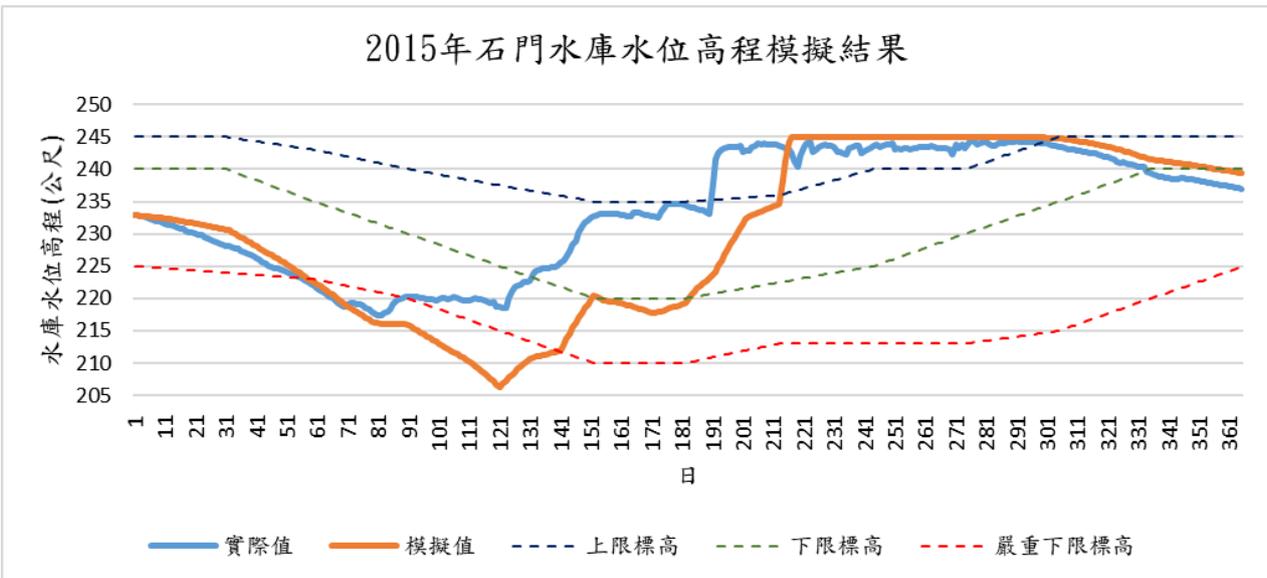


圖 6-10、2015 年石門水庫水位高程模擬結果（乾早年）

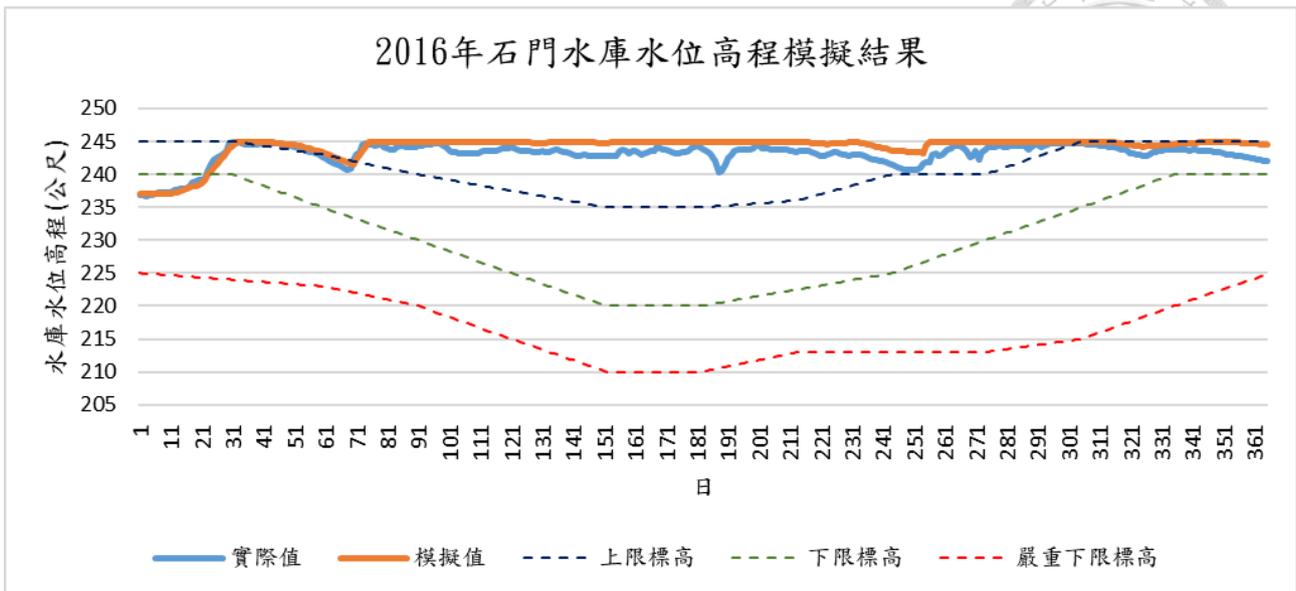


圖 6-11、2016 年石門水庫水位高程模擬結果（豐水年）

6.3 作物模組

6.3.1 AquaCrop 作物模式合理性說明：水稻

本研究使用民國 97 年到民國 106 年之桃園區水稻農業統計資料作為 AquaCrop 於水稻部分的模式驗證資料。由於本研究模擬的產量為潛能產量，不包含缺水逆境、病蟲害與施肥等其他非溫度之變因，故模擬的產量值皆會大於實際統計值，因此本研究只以趨勢（相關係數 r ）作為驗證指標。根據本研究農業分區，桃園單位面積產量，是經各農業分區各自模擬後，依種植面積比例加權平均後得到，其中各分區採表 5-13 中 AquaCrop 模式設定的三個插秧時間分別模擬，並計算平均值作為該分區的模擬結果。一期稻作與二期稻作的產量變化趨勢驗證結果呈現於圖 6-12 與圖 6-13，可以發現 AquaCrop 模擬值於一期稻作為負相關，無法有效反映產量的變化趨勢，二期稻作則有較好的表現， r 為 0.594。本研究試以災害損失統計量（表 5-10）修正原觀測產量統計值，使之能接近潛能產量，然而效果不顯著。因此本研究進一步從趨勢結果中去除 3 到 4 年較為反常之觀測資料，結果發現，模式表現有大幅度的改進， r 於第一期作與第二期作分別為 0.302 與 0.764（含災害損失）（表 6-5），其中，病蟲害與其他自然或人為因素都有可能造成模擬值與觀測統計值之間的偏誤，需要相關資料才能進一步探討。

此外，一期稻作之相關性，雖然經處理後有所改進，但相對二期作而言，模式表現仍不符期待，而這有可能是一期作本身外在影響因子較多，包含缺水、插秧時期的低溫（低溫災害雖有統計災損資料，但該資料無法反應該低溫對於存活之作物的影響）等，於 7.1.3 節的分析結果中，也可以發現一期稻作具有較大之減產風險，而這些因素皆會使本處單位產量驗證所使用之觀測統計資料具有很大的不確定性。因此，本研究認為 AquaCrop 在相對減產風險較小的第二期稻作驗證結果良好，故採用該模式。如要更精確的校驗水稻模擬的參數與模式表現，需搭配田間試驗，取得相應觀測紀錄，如地表生物量乾重與冠層覆蓋度等，其量測之產量會較接近潛能產量，如此能更精準驗證 AquaCrop 於水稻產量的模擬結果。

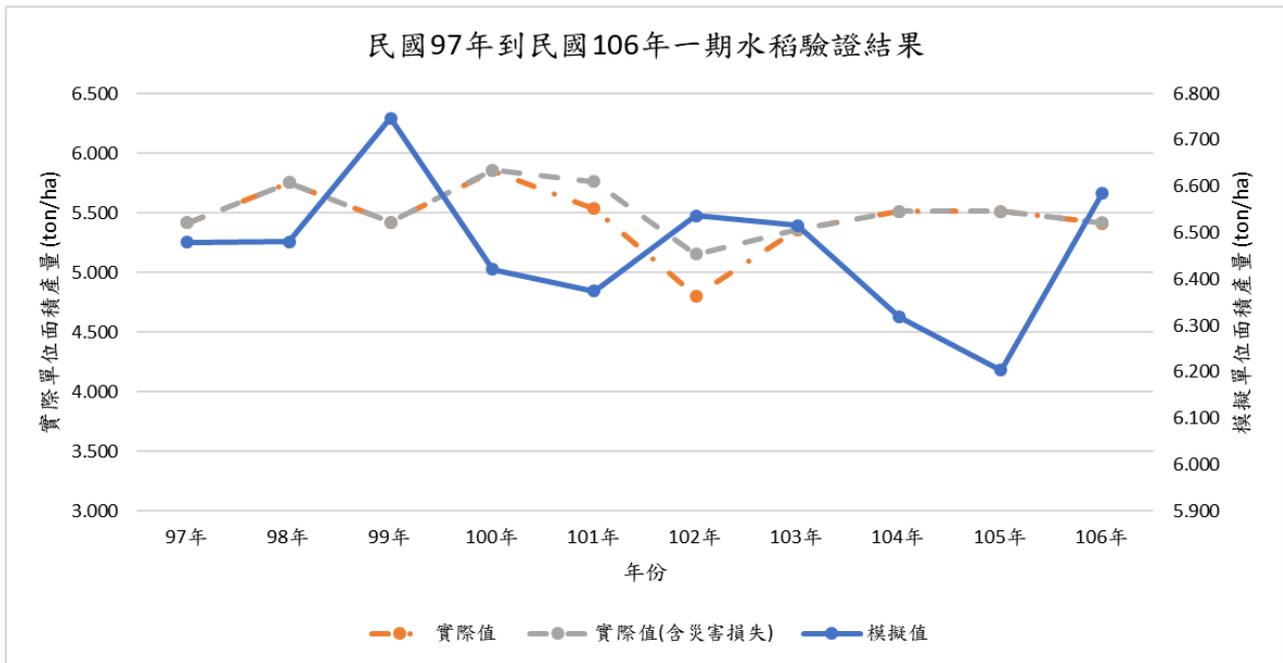


圖 6-12、民國 97 年到民國 106 年一期水稻驗證結果

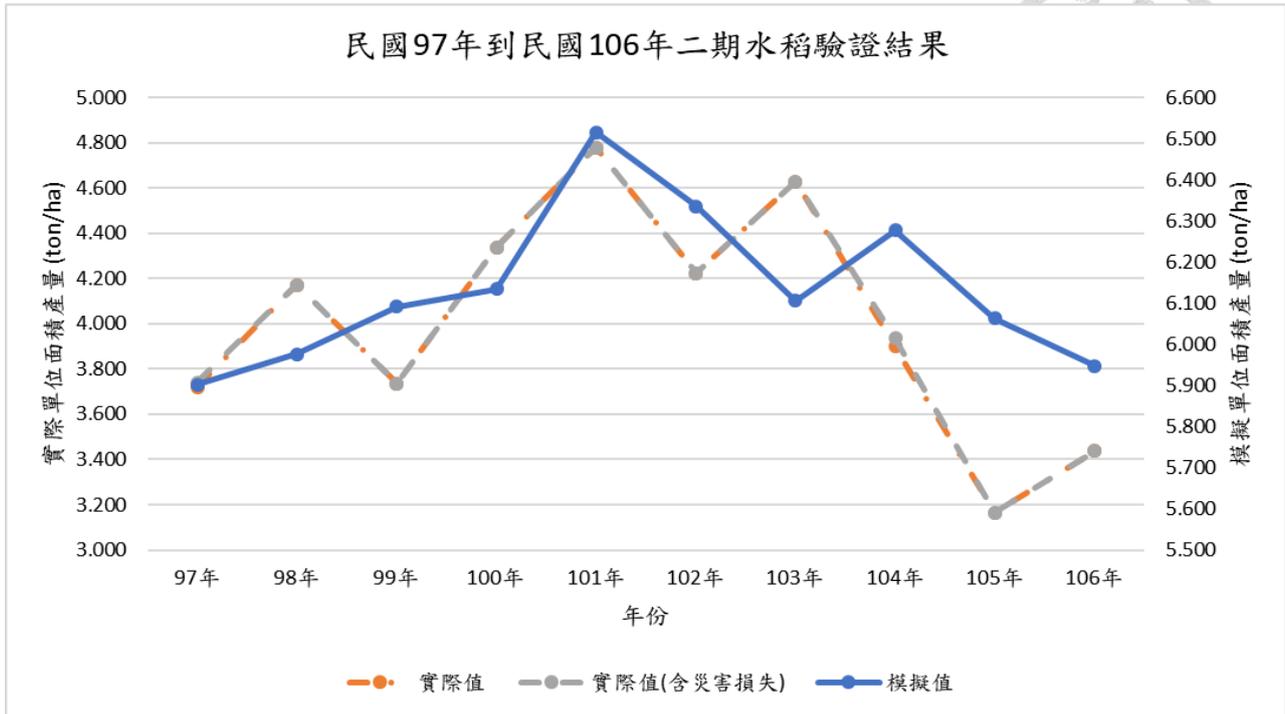


圖 6-13、民國 97 年到民國 106 年二期水稻驗證結果

一期作與二期作水稻用水量相關模擬資訊呈現於圖 6-14、圖 6-15 與表 6-6，由一、二期作的比較可以知道一期作的田間需水量較二期高，然而因總雨量與有效雨量較二期作多，所以實質上所需的田間灌溉用水量，反而較二期作低。實際操作上農田水利會會以田間需水量依固定的水源佔比，向水庫提報計畫灌溉用水量，故在滿足二期作之需求的同時，一期作則獲得大量多餘的灌溉水。從此角度切入，一期作之缺水風險應相對二期作小，然而於第七章之分析結果中，一期作有較高的缺水風險，其原因出自於在乾早年冬季降雨量的不足，使得隔年一期作時，水庫實施限水或休耕，二期作時，則經過夏季降雨與颱風，水庫通常處於充盈之狀態，故具有較小因缺水而導致的減產風險。根據臺灣桃園農田水利會民國 106 年《灌溉計畫書》，黏質壤土於本田期間所需之田間需水量於第一期作與第二期作分別為 804 mm 與 779 mm，而本研究十年（2008 年至 2017 年）之模擬平均為 842 mm 與 767.7 mm 為合理之結果。於生育日數部分，本研究驗證之十年平均結果為 113.8 天與 96.8 天，與灌溉計畫書之 120 天與 110 相比較短，但仍落於正常變動範圍中，故模擬結果為合理。



表 6-5、水稻單位面積產量驗證結果

年份	一期稻作					二期稻作				
	模擬值	原始		扣除趨勢異常年份		模擬值	原始		扣除趨勢異常年份	
		實際值	實際值 (含災害損失)	實際值	實際值 (含災害損失)		實際值	實際值 (含災害損失)	實際值	實際值 (含災害損失)
97年	6.479	5.416	5.417	5.416	5.417	5.902	3.720	3.740	3.720	3.740
98年	6.481	5.755	5.755	5.755	5.755	5.976	4.171	4.171	4.171	4.171
99年	6.747	5.420	5.420	--	--	6.092	3.735	3.735	--	--
100年	6.421	5.853	5.858	5.853	5.858	6.134	4.339	4.339	4.339	4.339
101年	6.374	5.536	5.761	5.536	5.761	6.516	4.778	4.779	4.778	4.779
102年	6.537	4.806	5.152	--	--	6.336	4.224	4.224	4.224	4.224
103年	6.515	5.360	5.361	--	--	6.106	4.628	4.628	--	--
104年	6.318	5.514	5.514	5.514	5.514	6.277	3.898	3.936	3.898	3.936
105年	6.204	5.510	5.510	5.510	5.510	6.063	3.164	3.164	--	--
106年	6.586	5.413	5.419	--	--	5.948	3.437	3.437	3.437	3.437
相關係數		-0.2936	-0.3633	0.3290	0.3024		0.594	0.597	0.756	0.764

單位：ton/ha

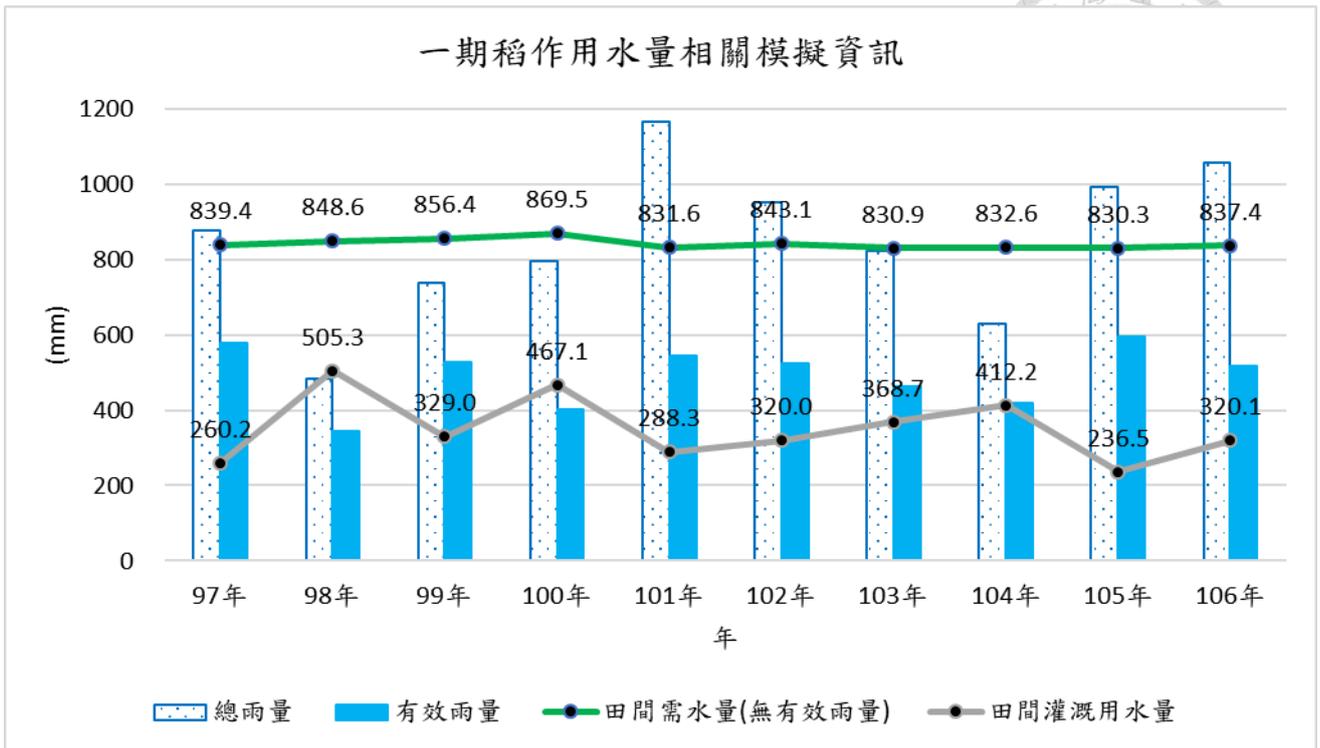


圖 6-14、一期稻作用水量相關模擬資訊

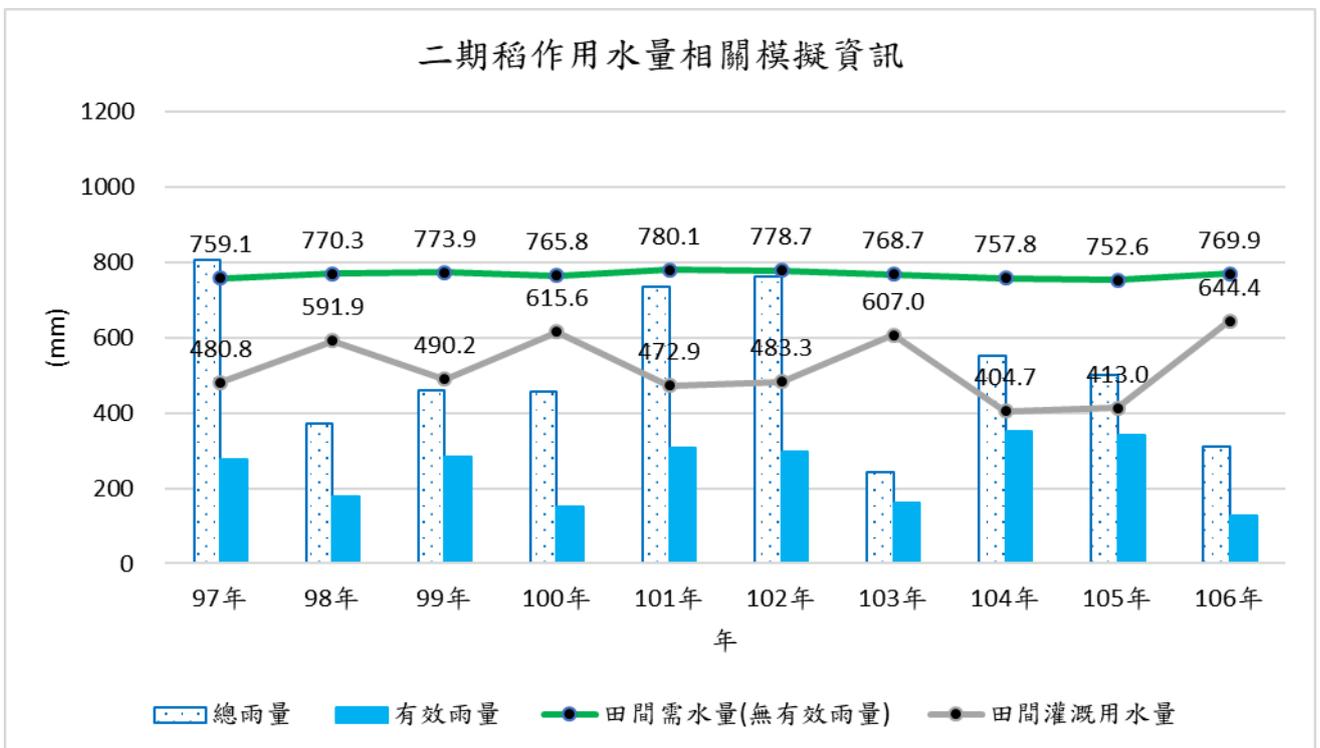


圖 6-15、二期稻作用水量相關模擬資訊



表 6-6、水稻生育日數、需水量與雨量模擬結果

年份	一期稻作					二期稻作				
	生育日數 (日)	田間需水量 (mm)	田間灌溉用水量 (mm)	雨量 (mm)	有效雨量 (mm)	生育日數 (日)	田間需水量 (mm)	田間灌溉用水量 (mm)	雨量 (mm)	有效雨量 (mm)
97 年	113.7	839.4	260.2	877.3	579.1	93.9	759.1	480.8	805.6	278.3
98 年	115.9	848.6	505.3	484.9	343.3	96.6	770.3	591.9	372.0	178.3
99 年	118.2	856.4	329.0	738.6	527.4	98.3	773.9	490.2	459.9	283.7
100 年	119.2	869.5	467.1	796.4	402.5	97.7	765.8	615.6	456.1	150.2
101 年	112.5	831.6	288.3	1166.3	543.2	103.1	780.1	472.9	735.0	307.3
102 年	112.7	843.1	320.0	953.1	523.1	100.3	778.7	483.3	762.6	295.4
103 年	111.9	830.9	368.7	821.9	462.2	95.7	768.7	607.0	242.5	161.7
104 年	110.2	832.6	412.2	630.0	420.4	96.7	757.8	404.7	552.9	353.1
105 年	110.5	830.3	236.5	991.4	593.8	92.6	752.6	413.0	500.8	339.6
106 年	113.1	837.4	320.1	1057.9	517.2	93.1	769.9	644.4	311.1	125.5
平均	113.8	842.0	350.8	851.8	491.2	96.8	767.7	520.4	519.9	247.3
標準差	2.9	12.2	83.1	193.0	77.2	3.1	8.5	82.5	183.9	80.2



6.3.2 AquaCrop 作物模式合理性說明：大豆

由於政府於民國 104 年才開始大力推動轉作大豆，因此相關之驗證資料較少，於一期作僅民國 105 與 106 年兩年資料，二期作則有民國 104 到 106 年觀測統計資料。除此之外，由於還在推廣時期，種植面積小，大部分分布於觀音地區，固本處僅採用 C0C590 測站於三個播種時期（表 5-14）的平均模擬結果進行驗證。大豆單位面積產量於一、二期作的驗證結果呈現於圖 6-16 與圖 6-17，相關係數分別為 1 與 0.869，同時將結果整理於表 6-7，較能合理反映趨勢變化。

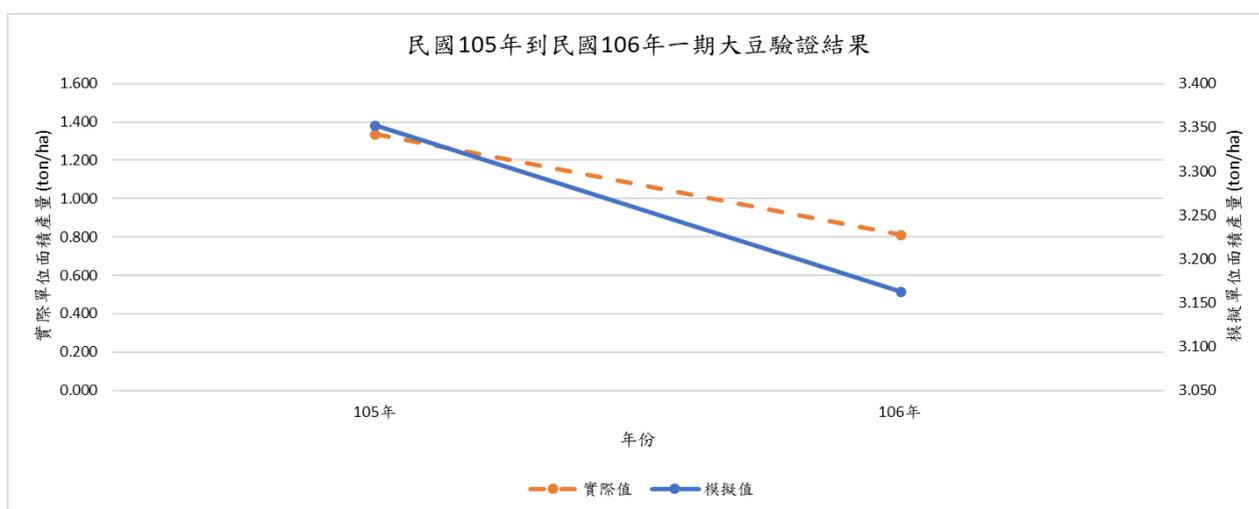


圖 6-16、民國 105 年到民國 106 年一期大豆驗證結果

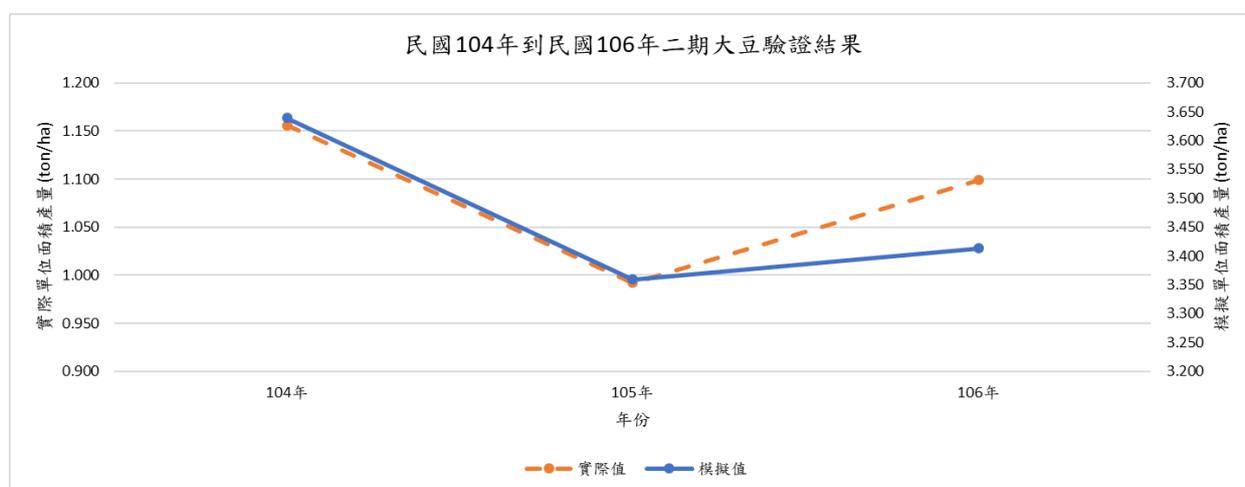


圖 6-17、民國 104 年到民國 106 年二期大豆驗證結果



表 6-7、大豆單位面積產量驗證結果

年份	一期大豆		二期大豆	
	模擬值	實際值	模擬值	實際值
104 年	3.300	--	3.639	1.156
105 年	3.352	1.336	3.360	0.992
106 年	3.163	0.810	3.413	1.099
相關係數	1.000		0.869	

單位：ton/ha

大豆一、二期作用水量相關模擬資訊呈現於圖 6-18、圖 6-19 與表 6-8。同稻作，田間需水量、總雨量與有效雨量一期作皆大於二期作。然而田間灌溉用水量在民國 104 年有別於稻作是二期作小於一期作，原因可能為相近的有效雨量所導致。此處應缺乏資料並無法進行需水量的合理性驗證，此外旱作灌溉波動性本身較水稻大，只要土壤含水量在一定範圍內皆不需灌溉，本處僅提供相應資訊待未來有觀測資料時，驗證說明。表 6-8 中的平均生育日數，於一期作與二期作分別為 105.9 日與 103.2 日，相較於民國 104 年北部地區大豆生育日數調查各品種生育日數 90~99 天略長（二期作），但仍為合理可接受之模擬結果。

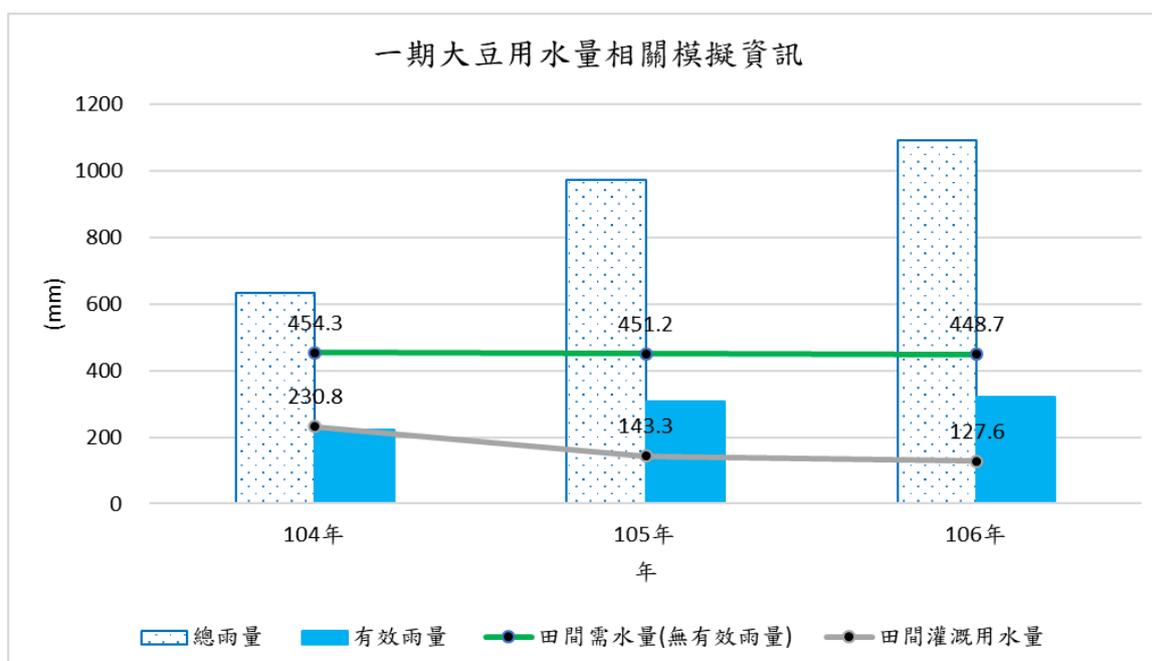


圖 6-18、一期大豆用水量相關模擬資訊

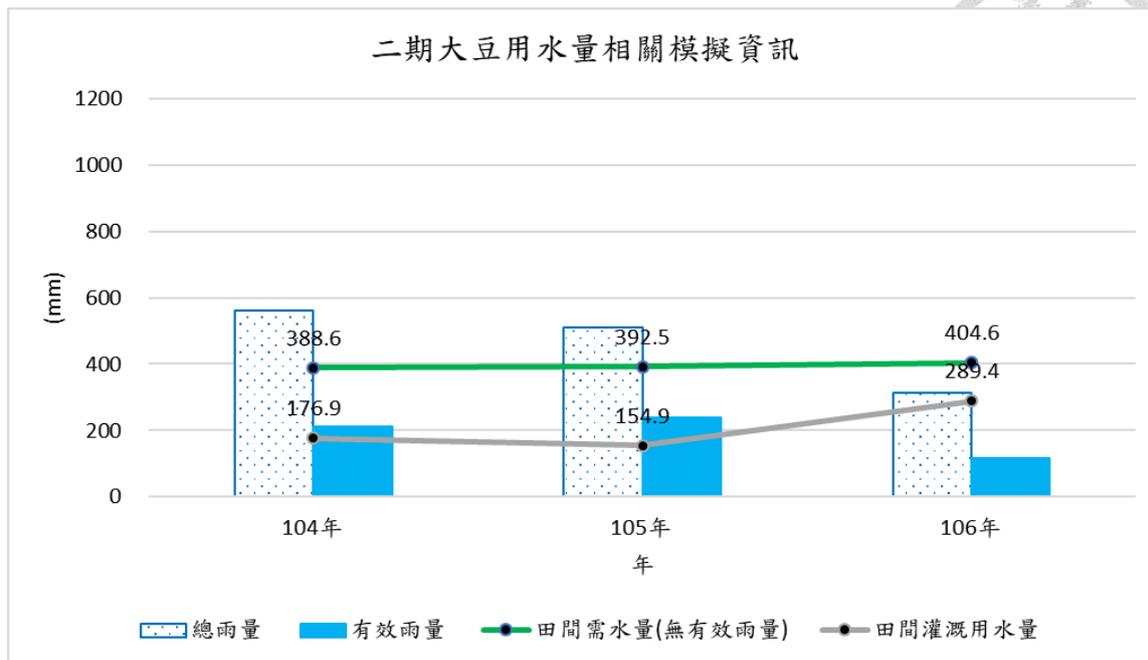


圖 6-19、二期大豆用水量相關模擬資訊

6.3.3 小結

透過上述之驗證結果，AquaCrop 在水稻及大豆的田間需水量與生育日數模擬上，表現良好，唯在一期稻作單位面積產量部分，尚無法透過本研究之驗證結果呈現其合理之潛能單位面積產量，此部分需有更精確之田間試驗資料進一步驗證。整體而言，AquaCrop 能提供足夠之資訊供本研究 AgriHydro 整合模式使用。



表 6-8、大豆生育日數、需水量與雨量模擬結果

年份	一期大豆					二期大豆				
	生育日數 (日)	田間需水量 (mm)	田間灌溉用水量 (mm)	雨量 (mm)	有效雨量 (mm)	生育日數 (日)	田間需水量 (mm)	田間灌溉用水量 (mm)	雨量 (mm)	有效雨量 (mm)
104 年	107.0	454.3	230.8	634.3	223.5	105.7	388.6	176.9	562.7	211.6
105 年	103.0	451.2	143.3	973.3	307.9	101.0	392.5	154.9	510.3	237.6
106 年	107.7	448.7	127.6	1090.3	321.1	103.0	404.6	289.4	314.3	115.3
平均	105.9	451.4	167.2	899.3	284.2	103.2	395.2	207.1	462.4	188.2
標準差	2.1	2.3	45.4	193.4	43.2	1.9	6.8	58.9	106.9	52.6



第七章、AgriHydro 模擬結果與討論



7.1 未來風險變化趨勢

7.1.1 氣候變遷

氣候風險變化是根據各測站位置，抓取第一階段降尺度 TCCIP 5km × 5km GCMs 網格資料中的鄰近網格，所計算出的各月雨量與溫度統計參數修正值。各月份與各測站雨量及溫度在不同未來時段與 RCP 的平均值修正值呈現於表 7-1。其中，藍色越深，表示該月日雨量平均值增大越多；紅色越深，表示月溫度平均值增高越多。在 RCP2.6 與 RCP8.5 平均值之修正值的比較中，溫度在 RCP2.6 呈現先遞增、趨緩，後遞減的趨勢，於 RCP8.5 則呈現持續遞增，在未來時段 2081 年至 2100 年其修正值 Delta 皆有 3 度以上；其中，各 GCM 的變化相對一致（圖 7-1）；雨量部分，豐水期 6 月至 8 月具有較顯著之雨量增加趨勢，而 12 月至 2 月則多數呈現雨量下降或維持基期狀態。然而，於 RCP2.6 與 RCP8.5 和各未來時段之間的比較，雨量並沒有明顯變化趨勢上的差異，且於各 GCM 之間也無一致性（圖 7-2）。在標準差的變化上，由圖 7-3 與圖 7-4 可以看出氣溫與雨量之標準差修正值於各 GCM 與 RCP 之氣候情境組合趨勢不一致。然而其分布範圍，在溫度部分，夏季 6 月至 9 月較其他月份大；而雨量部分為豐水期 6 月至 8 月較其他月份大的分布範圍（除四月之外）。經由平均值與標準差之間的比較，可以看出平均值越高的溫度與雨量月份，其不確定性（標準差）越大。此外，溫度修正值在各分區並無明顯差異，而雨量部分則於豐水期（6 月至 8 月）明顯呈現鄰近海岸的測站（C0C540、C0C590 與 C1C510）平均值增幅較內陸測站高，其中又以靠山之石門與三峽代表測站平均值增幅最低（見附件四）。藉由以上對氣候情境變化的了解，下節本研究針對水資源與糧食生產部分，分析其未來變化趨勢。



表 7-1、各月份與各測站雨量及溫度在不同未來時段與 RCP 的平均值修正值

月份		1 月				2 月				3 月			
未來時段		2030s	2050s	2070s	2090s	2030s	2050s	2070s	2090s	2030s	2050s	2070s	2090s
雨量	RCP2.6	0.90	0.96	1.12	1.07	0.85	0.87	0.84	1.09	1.03	1.01	1.14	1.08
Ratio	RCP8.5	1.08	0.94	0.99	1.05	0.83	0.83	0.93	0.92	1.01	1.06	0.98	1.03
溫度	RCP2.6	0.71	1.20	1.45	1.23	1.53	1.71	1.77	1.75	1.55	1.80	1.82	1.70
Delta	RCP8.5	0.95	1.75	2.62	3.31	0.86	2.11	2.69	3.64	0.86	1.90	2.60	3.47
月份		4 月				5 月				6 月			
未來時段		2030s	2050s	2070s	2090s	2030s	2050s	2070s	2090s	2030s	2050s	2070s	2090s
雨量	RCP2.6	0.95	1.12	1.23	1.13	0.85	1.03	0.86	1.01	1.00	1.27	1.14	1.30
Ratio	RCP8.5	1.08	1.10	1.33	1.44	1.00	0.93	1.25	1.29	1.42	1.19	1.36	1.68
溫度	RCP2.6	1.34	1.89	1.62	1.80	1.48	1.87	1.89	1.52	1.45	1.79	1.71	1.45
Delta	RCP8.5	0.83	1.77	2.84	3.63	1.04	1.99	2.88	3.71	1.03	2.02	2.79	3.65
月份		7 月				8 月				9 月			
未來時段		2030s	2050s	2070s	2090s	2030s	2050s	2070s	2090s	2030s	2050s	2070s	2090s
雨量	RCP2.6	1.28	1.21	1.44	1.39	1.46	1.47	1.28	1.29	0.93	0.88	1.10	0.96
Ratio	RCP8.5	1.26	1.20	1.60	1.22	1.14	1.29	1.26	1.58	1.20	1.02	1.48	0.95
溫度	RCP2.6	1.06	1.44	1.35	1.24	0.89	1.36	1.22	1.11	0.99	1.45	1.33	1.17
Delta	RCP8.5	0.90	1.82	2.56	3.52	0.73	1.71	2.31	3.43	0.96	1.69	2.55	3.64
月份		10 月				11 月				12 月			
未來時段		2030s	2050s	2070s	2090s	2030s	2050s	2070s	2090s	2030s	2050s	2070s	2090s
雨量	RCP2.6	1.26	1.52	0.96	1.02	1.61	1.16	1.29	1.34	0.83	1.10	0.86	0.93
Ratio	RCP8.5	1.12	0.97	1.02	1.32	1.20	1.16	1.16	1.51	0.91	0.77	0.90	0.82
溫度	RCP2.6	1.11	1.68	1.27	1.15	1.18	1.49	1.48	1.26	1.06	1.37	1.44	1.50
Delta	RCP8.5	0.95	1.40	2.20	3.29	0.85	1.36	2.26	3.06	0.76	1.72	2.43	3.25



Future Change of Monthly Mean Temperature

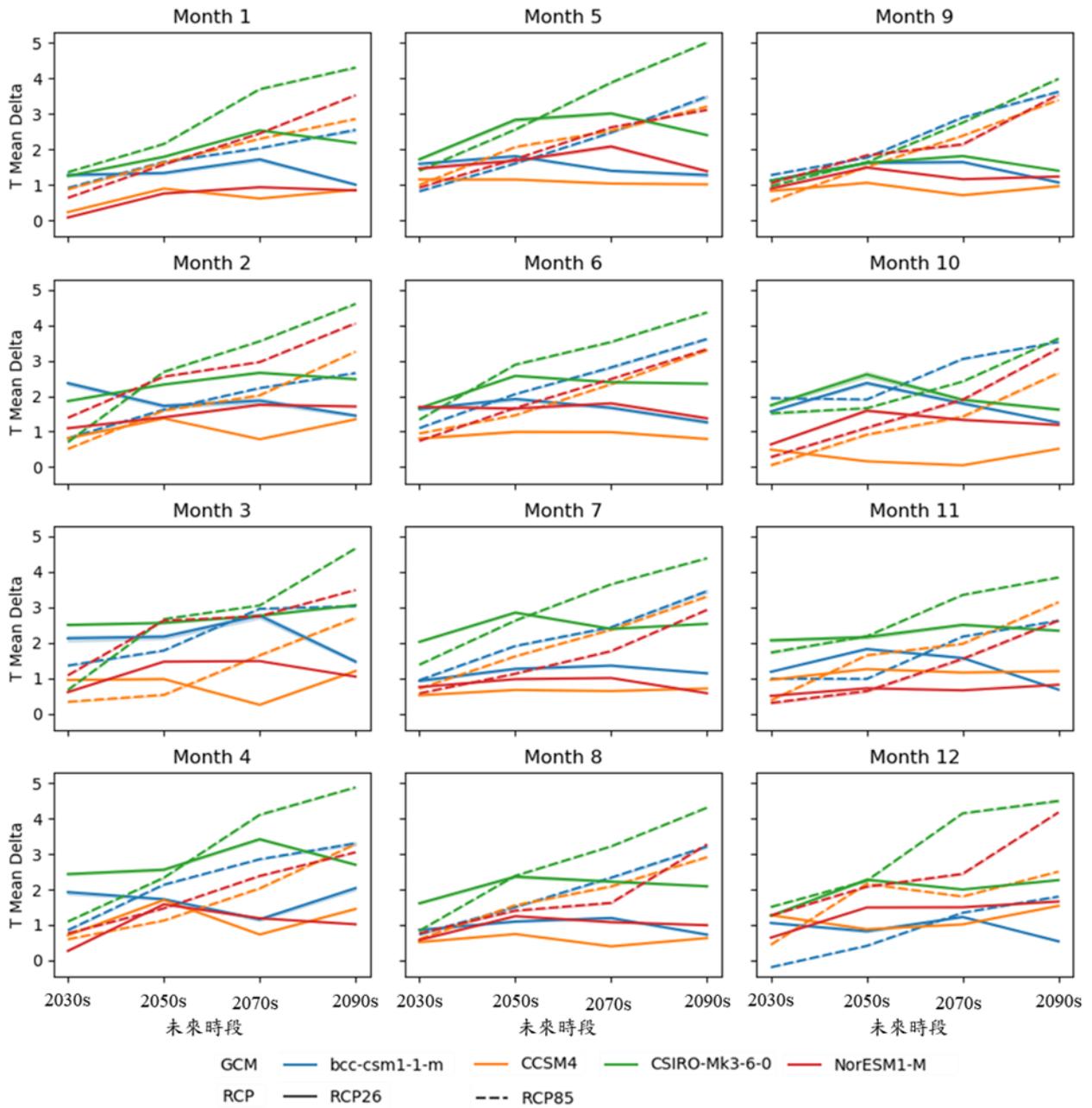


圖 7-1、未來各 GCM 與 RCP 組合下的各月溫度平均值參數修正值 (Delta)

橫坐標為各未來時段區間，如 2030s 代表為時段 2021 年至 2040 年；各線之著色區域為各測站之差異 95% 信心區間；實現為 RCP2.6、虛線為 RCP8.5。



Future Change of Monthly Mean Precipitation

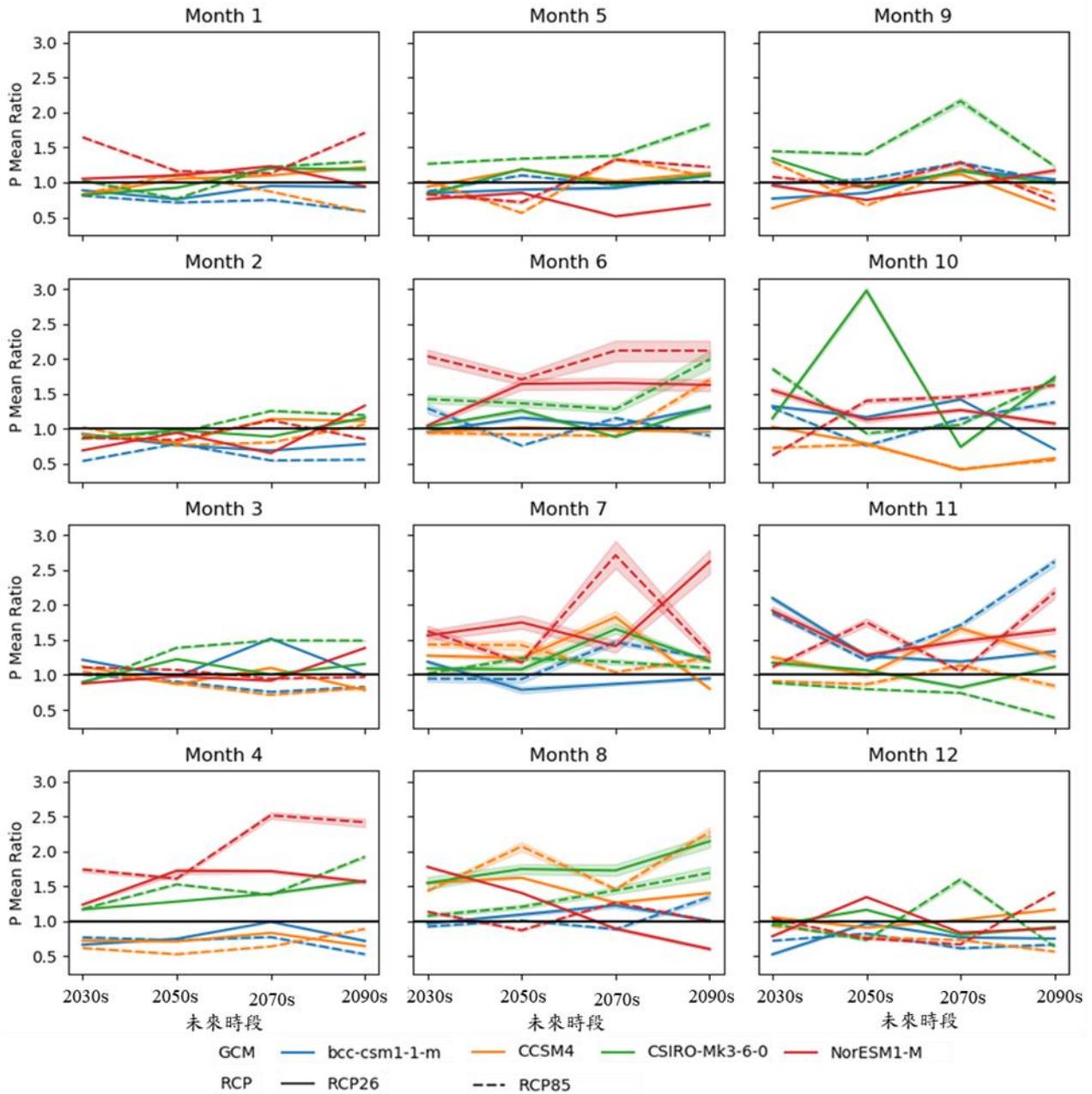


圖 7-2、未來各 GCM 與 RCP 組合下的各月雨量平均值參數修正值 (Ratio)

橫坐標為各未來時段區間，如 2030s 代表為時段 2021 年至 2040 年；各線之著色區域為各測站之差異 95% 信心區間；實線為 RCP2.6、虛線為 RCP8.5。



Future Change of Monthly Standard Deviation of Temperature

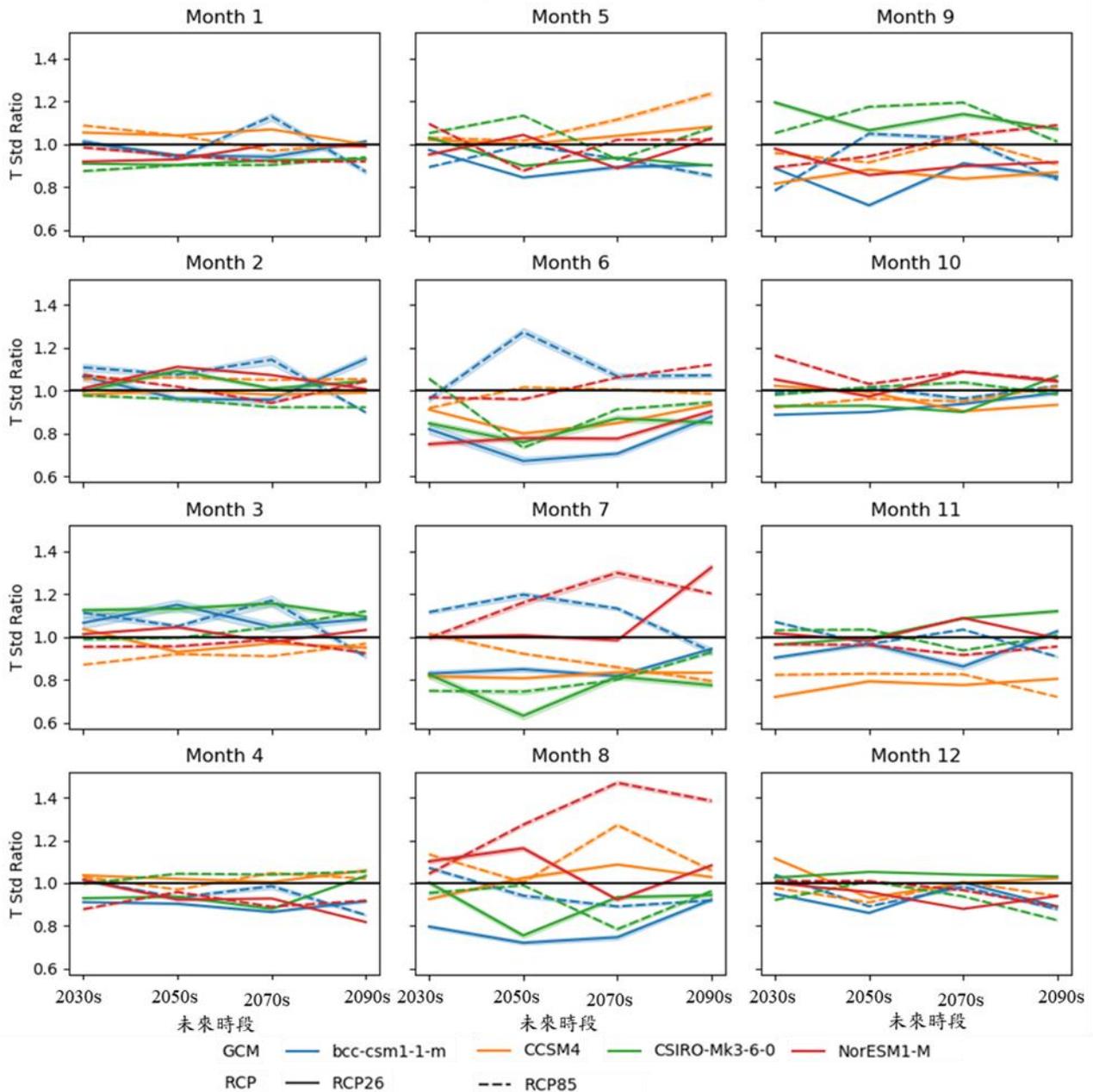


圖 7-3、未來各 GCM 與 RCP 組合下的各月溫度標準差參數修正值 (Ratio)

橫坐標為各未來時段區間，如 2030s 代表為時段 2021 年至 2040 年；各線之著色區域為各測站之差異 95% 信心區間；實線為 RCP2.6、虛線為 RCP8.5。



Future Change of Monthly Standard Deviation of Precipitation

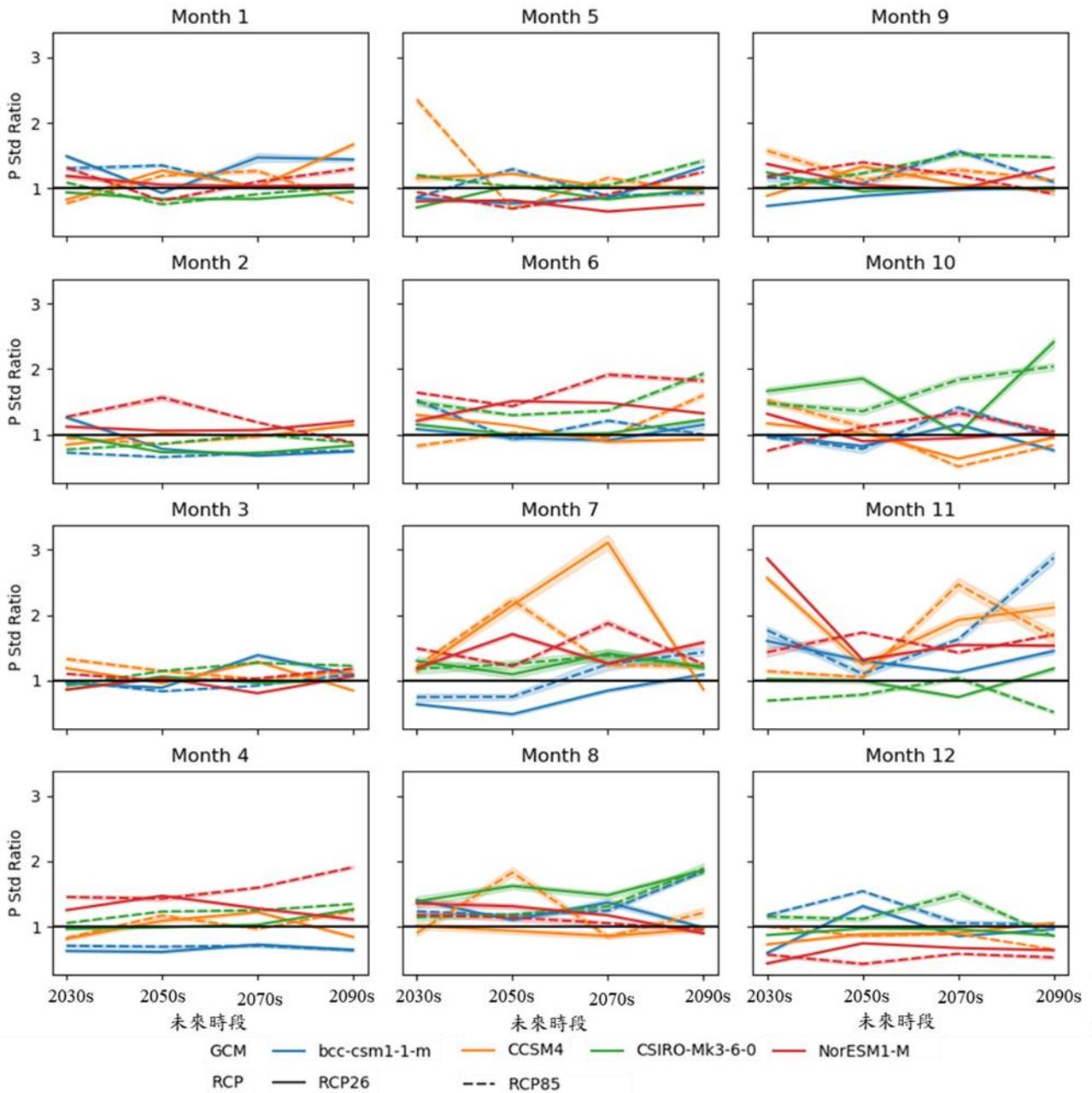


圖 7-4、未來各 GCM 與 RCP 組合下的各月雨量標準差參數修正值 (Ratio)

橫坐標為各未來時段區間，如 2030s 代表為時段 2021 年至 2040 年；各線之著色區域為各測站之差異 95% 信心區間；實線為 RCP2.6、虛線為 RCP8.5。



7.1.2 水庫水源量與 SI 指標變化

根據 7.1.1 節之氣候情境變化分析結果，本研究進一步利用 AgriHydro，探討其對於既有水資源系統之衝擊影響，此部分對照氣候調適六步驟中的第二、三步驟，其中包含 AgriHydro 之子模式：(1) GWLF 模擬水庫入流量與三峽河的流量變化與 (2) 系統動力模式模擬的公共給水與灌溉 SI 缺水指標。於模擬階段，本研究使用完整之 AgriHydro 進行模擬，本處為了更清楚討論結果，將模擬結果分開呈現並各自說明。

(1) GWLF 模擬流量變化

流量是在本研究中，受氣候因子直接影響最大的變數，氣候因子中的雨量變化會直接反映在流量的變化上。圖 7-5 為石門水庫旬入流量於未來各時段之流量變化趨勢，藍色與橘色線條，分別代表 RCP2.6 與 RCP8.5，綠色為基期模擬結果，著色範圍為 95% 信心區間，而線條樣式則代表未來不同時間段之模擬結果；其中每個資料點為不同 GCM 於 200 年的模擬結果的平均值。依照其未來變化趨勢，本研究將 36 旬模擬結果分類成五段，分別為 35 旬至 10 旬、11 旬至 16 旬、17 旬至 28 旬、29 旬至 30 旬與 31 旬至 34 旬，依次為未來流量較基期小、漸增段、未來流量較基期大、遞減段與未來流量較基期大。此外，95% 信心區間也會隨著豐枯水期變寬與變窄，基本上繼承了圖 7-2 與圖 7-4 中的雨量修正值於各月的變化。而未來各時間段的比較上，流量也反映出了修正值之趨勢不一致的現象，此部分之未來時間段不一致之變化趨勢也間接地影響 7.1.3 節中的作物減產風險變化趨勢。三峽河旬流量模擬結果(圖 7-6) 與石門水庫入流量變化大致相同，皆受到未來雨量修正值的直接影響。

石門水庫旬入流量變化趨勢

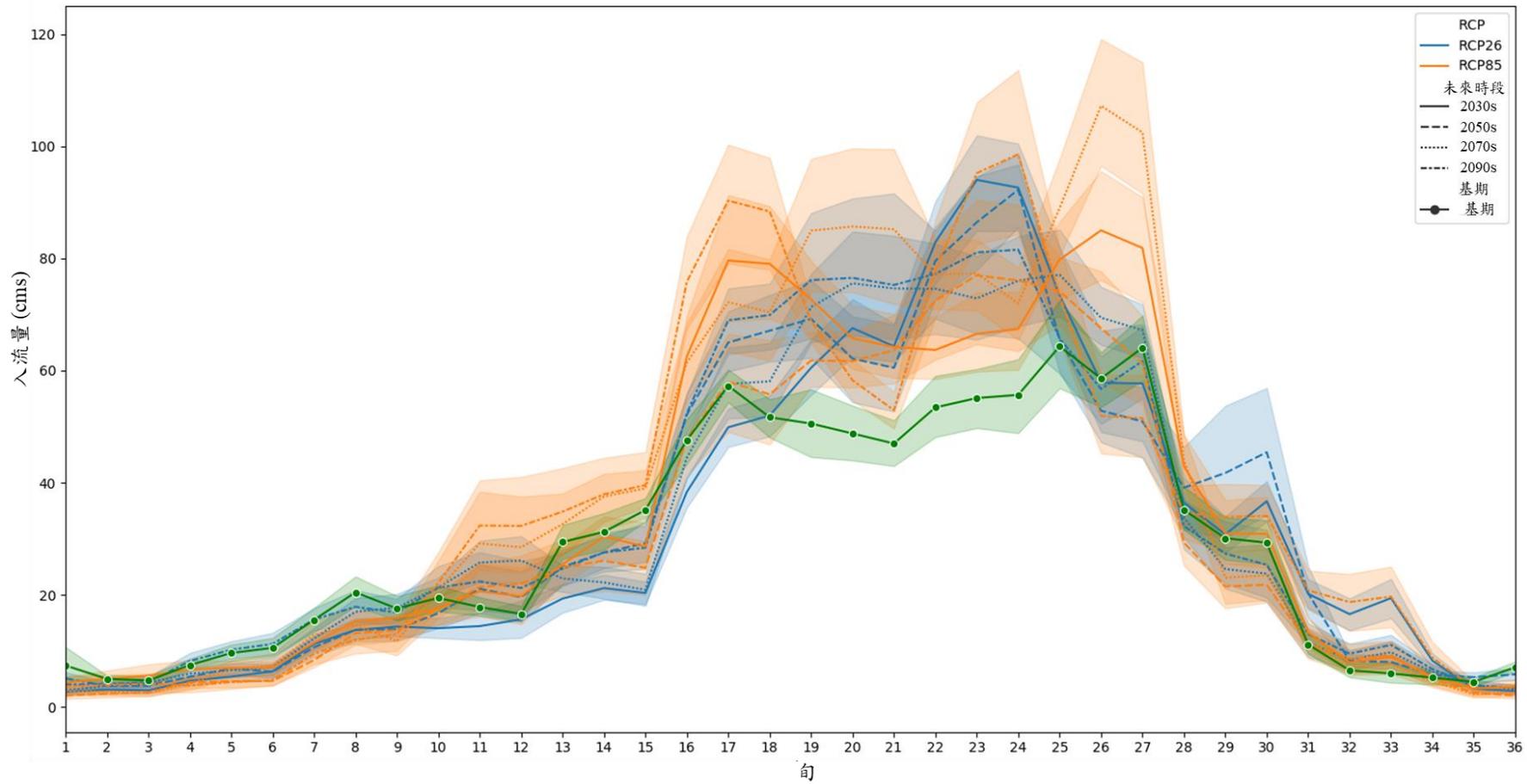


圖 7-5、石門水庫旬入流量變化趨勢

藍色與橘色線條，分別代表 RCP2.6 與 RCP8.5，綠色為基期模擬結果，其使用 2008 年至 2017 年觀測資料估計參數，而著色範圍為 95% 信心區間；線條樣式則代表未來不同時間段之模擬結果（2030s 代表短期未來時段，2021 年至 2040 年）；其中每個資料點為不同 GCM 於 200 年的模擬結果平均值。整體變化與雨量修正值之變化一致。

三峽河旬流量變化趨勢

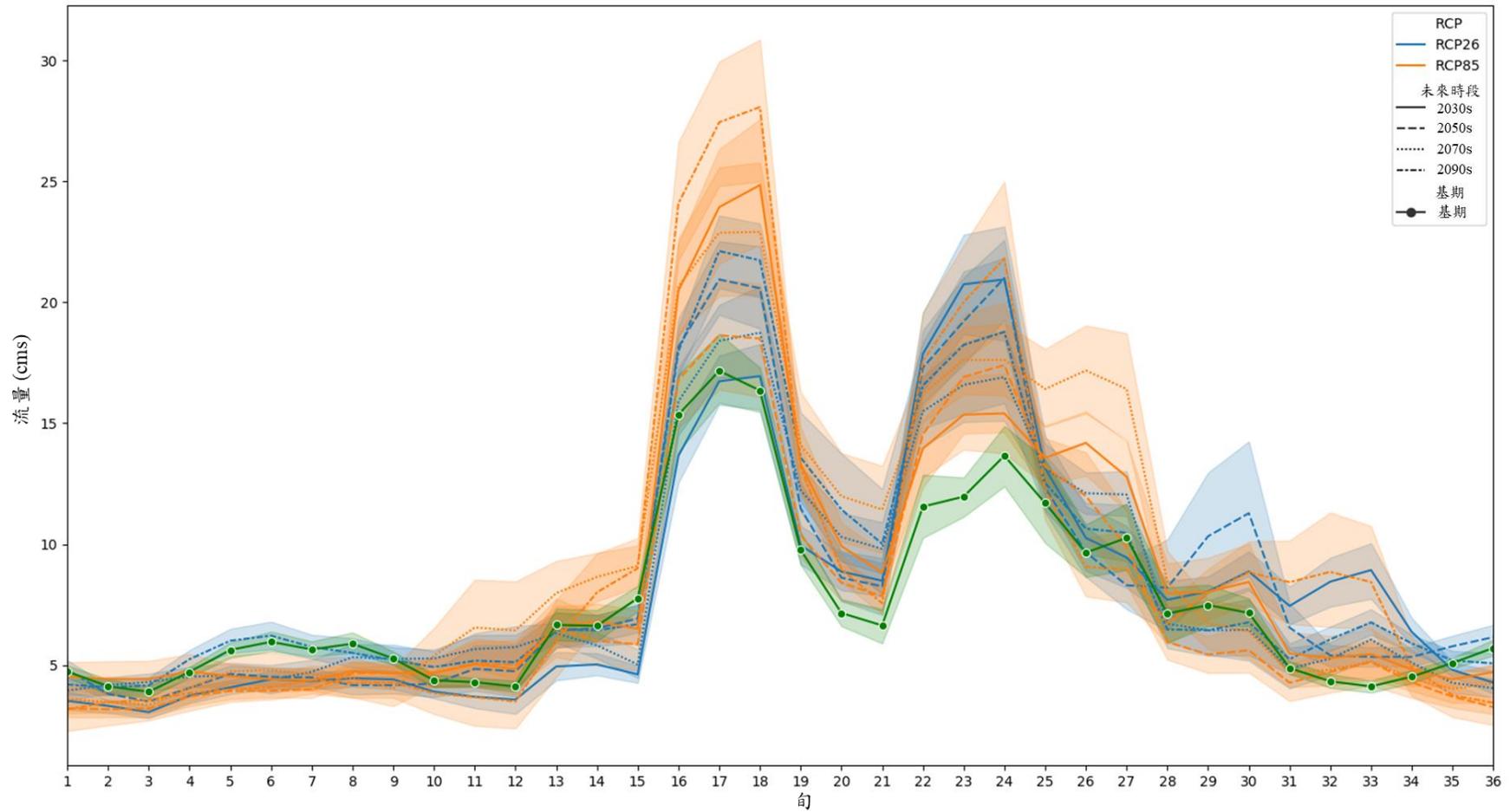


圖 7-6、三峽河旬流量變化趨勢

藍色與橘色線條，分別代表 RCP2.6 與 RCP8.5，綠色為基期模擬結果，其使用 2008 年至 2017 年觀測資料估計參數，而著色範圍為 95% 信心區間；線條樣式則代表未來不同時間段之模擬結果（2030s 代表短期未來時段，2021 年至 2040 年）；其中每個資料點為不同 GCM 於 200 年的模擬結果平均值。整體變化與雨量修正值之變化一致。



(2) 系統動力模式模擬結果於各用水標的之 SI 缺水指標變化

第二部分為各水庫用水標的之 SI 缺水指標變化分析，由於供水不足多出自於水庫水位高程低於下限，而打折供水所造成。農業用水打折數較公共用水高，所以 SI 值也相較於公共用水高。公共給水與灌溉用水的 SI 值變化趨勢大致相同，於未來短期（2030s）風險增高，至中期（2050s）時為最嚴重，於長期（2070s）下降，如圖 7-7 至圖 7-9 所示，藍色與橘色部分別為 RCP2.6 與 RCP8.5 之結果，其中著色範圍為 95% 信心區間；實線與虛線則分別代表保守與節水社經情境；此處的資料點代表四個 GCM 於 200 年平均後的結果；底部的長條圖代表各未來時段，六個分區於不同未來時段的雨量修正值之平均值。未來各時段變化趨勢可以從雨量修正值的變化上大致推測，以 RCP8.5 平均之雨量平均值之修正值三時段之比較，中期雨量修正值較小，雨量相對短期與長期少，故 SI 大；然而於 RCP2.6 無法完全由此推斷，其中還需要考慮豐枯水期之變化所帶來的影響。此處雨量平均值之修正值皆大於基期，而缺水風險也大於基期，故可推測降雨時間上的不平均可能是造成缺水風險提高主要的原因之一。豐水期於未來越豐水、枯水期於未來越缺水的變化趨勢，進一步導致一期作因缺水而提高減產風險，此部分於下節呈現。這樣的變化趨勢，使我們討論長期調適時，需要考慮是否為了中期之 SI 缺水風險峰值而大量投資基礎建設的建置，或者，應採取其他替代方案度過該風險期，雖然此問題不在本研究的討論範圍內，然而對於未來動態調適路徑的發展上，是一個關鍵的問題，值得進一步探究。本研究將平均值結果整理於表 7-2，其中，紅色越深代表越高的 SI 值。



公共給水 SI 值未來趨勢變化

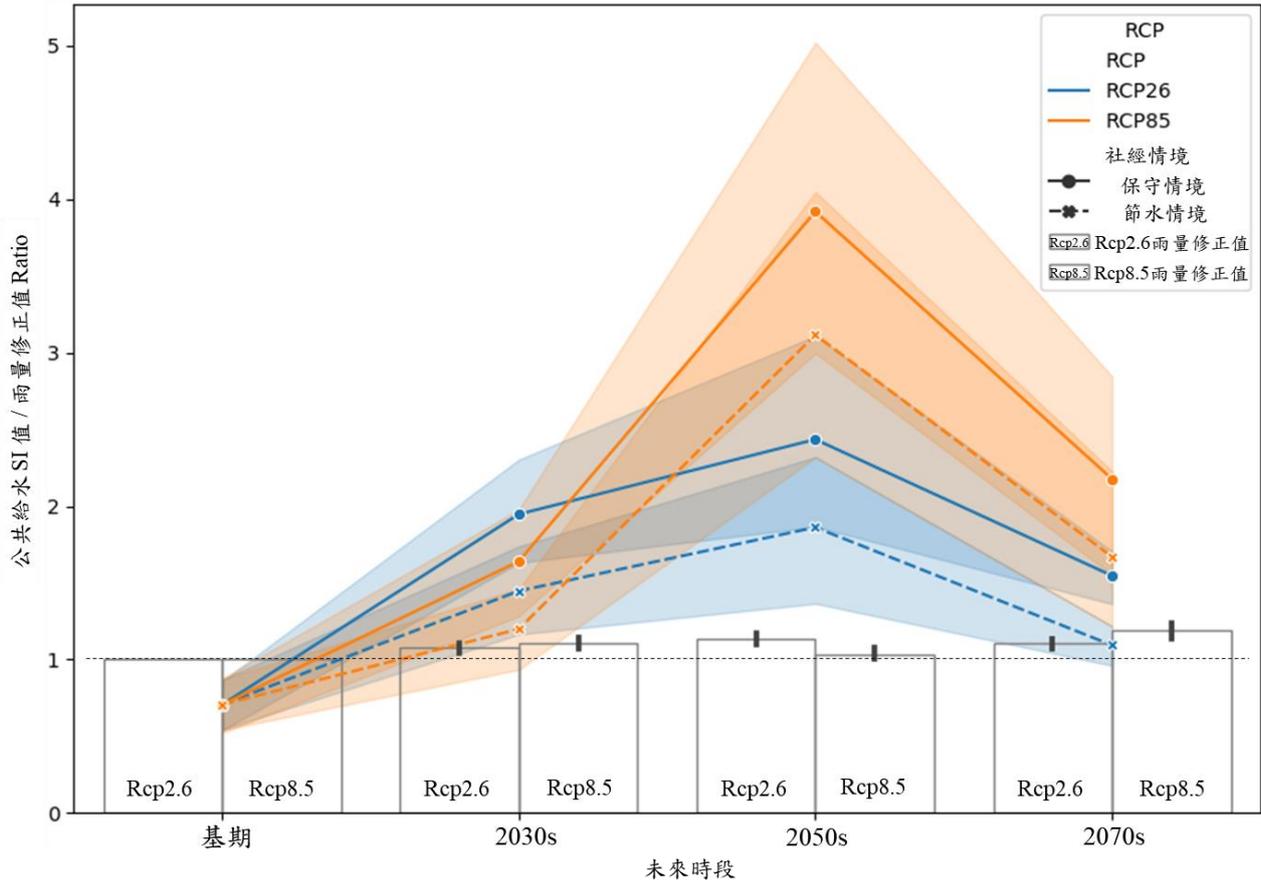


圖 7-7、公共給水 SI 值未來趨勢變化

橫坐標為各時間段，如 2030s 代表未來區間 2021 年至 2040 年；藍色與橘色部分別為 RCP2.6 與 RCP8.5 之結果，其中著色範圍為 95% 信心區間；實線與虛線則分別代表保守與節水社經情境；此處的資料點代表四個 GCM 於 200 年平均後的結果。底部的長條圖代表各未來時段，六個分區於不同未來時段的雨量修正值之平均值。



桃園灌區灌溉給水SI值未來趨勢變化

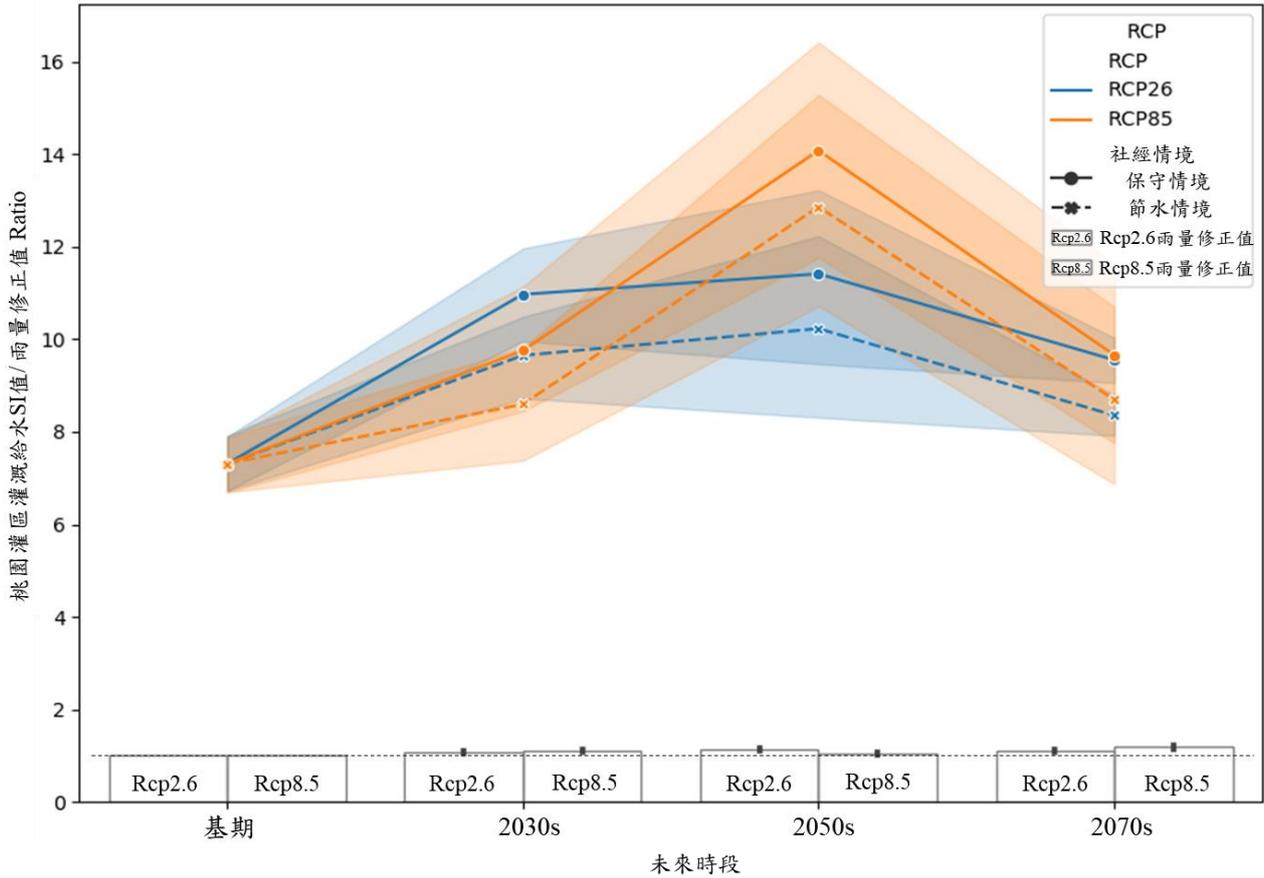


圖 7-8、桃園灌區灌溉給水 SI 值未來趨勢變化

橫坐標為各時間段，如 2030s 代表未來區間 2021 年至 2040 年；藍色與橘色部分別為 RCP2.6 與 RCP8.5 之結果，其中著色範圍為 95% 信心區間；實線與虛線則分別代表保守與節水社經情境；此處的資料點代表四個 GCM 於 200 年平均後的結果。底部的長條圖代表各未來時段，六個分區於不同未來時段的雨量修正值之平均值。



石門灌區灌溉給水SI值未來趨勢變化

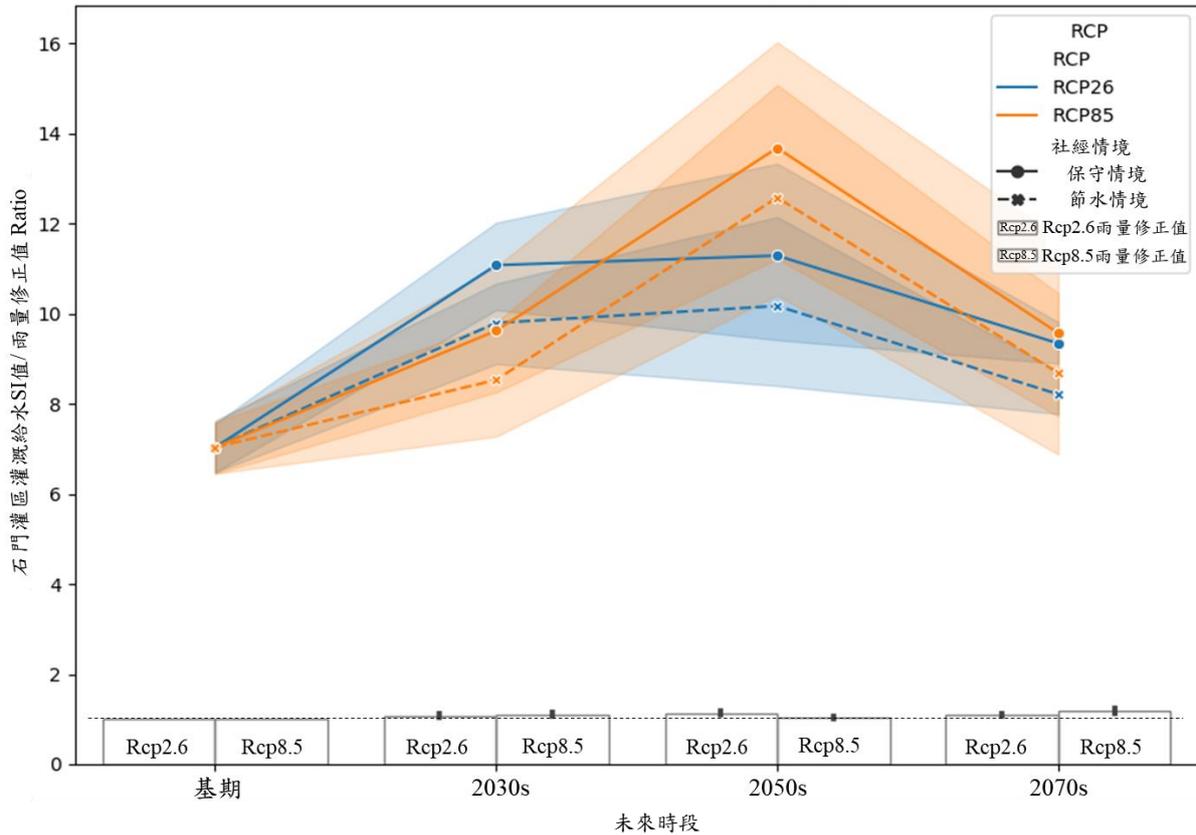


圖 7-9、石門灌區灌溉給水 SI 值未來趨勢變化

橫坐標為各時間段，如 2030s 代表未來區間 2021 年至 2040 年；藍色與橘色部分別為 RCP2.6 與 RCP8.5 之結果，其中著色範圍為 95%信心區間；實線與虛線則分別代表保守與節水社經情境；此處的資料點代表四個 GCM 於 200 年平均後的結果。底部的長條圖代表各未來時段，六個分區於不同未來時段的雨量修正值之平均值。

表 7-2、各水庫用水標的之 SI 指標未來變化趨勢

用水標的	公共給水				桃園灌區灌溉給水				石門灌區灌溉給水			
	RCP2.6		RCP8.5		RCP2.6		RCP8.5		RCP2.6		RCP8.5	
社經情境	保守	節水	保守	節水	保守	節水	保守	節水	保守	節水	保守	節水
基期	0.71				7.31				7.03			
2030s	1.95	1.45	1.64	1.20	10.97	9.65	9.75	8.60	11.08	9.80	9.62	8.53
2050s	2.43	1.86	3.92	3.11	11.41	10.23	14.08	12.86	11.29	10.18	13.68	12.58
2070s	1.55	1.09	2.18	1.67	9.55	8.35	9.66	8.70	9.34	8.21	9.57	8.68

7.1.3 水稻減產風險變化

根據 AgriHydro 模式所包含的因子關係，說明如下。影響水稻生長因素眾多且彼此環環相扣，如溫度的增高使作物生育速度加速，生長期縮短，灌溉期長因此跟著減少，然而溫度的增高也會造成蒸發散量的增加，使作物需水量增加，使得最終計畫灌溉用水量可能因此大於基期。產量部分，於氣候變遷下，受惠於增加的 CO₂ 濃度，水分產量系數增加，使產量跟著上升；然而，生育日數受增高之溫度影響縮短，使得模式沒有足夠的時間使生物量轉化為產量，於現實中則為結穗充實時間不足，導致產量下降。分蘗時期如遇高溫，而未經妥善管理，則分蘗數可能大增，使產量下降；同時，水庫供水之打折情形，也會影響作物缺水的逆境程度。本處僅以最終作物減產率 YRR 作呈現，著重在本研究方法框架操作流程上的演示。綜合上述之因素，分析後的桃園區一期作與二期作作物（本處為水稻）產量減產率（YRR）呈現於圖 7-10、圖 7-11 與表 7-3。藍色與橘色部分別為 RCP2.6 與 RCP8.5 之結果，其中著色範圍為 95% 信心區間；實線與虛線則分別代表保守與節水社經情境；此處的資料點代表四個 GCM、六個農業分區與三個插秧時間的 200 年資料，依種植面積加權平均後的結果。

一期作部分，不同 RCP 之未來變化趨勢不一致，然而皆呈現相較於基期更為嚴重的減產情形。其中，短期之 RCP2.6 為減產最為嚴重的情境，於保守社經情境下，減產率可達 29.8%，而於中期時段，其減產率下降低於 RCP8.5；長期時段些微增加，然而因 RCP8.5 之減產風險下降再度交錯，其中，模式的不確定性約落在 2% 至 3.5%（95% 信心水準區間）。二期作部分，

於未來風險呈現下降之趨勢，唯中期減產率略高於基期；而 RCP2.6 與 RCP8.5 於中期前，變化一致，僅於長期時段 RCP8.5 之風險明顯較 RCP2.6 低。於第一期作與第二期作的比較中，可以明顯看出一期作風險較高（22.8%至 29.8%之減產率），且未來有增高之趨勢，而二期作與之相反，且無明顯減產風險（5.4%至 8.3%之減產率）。該風險值上的差異可歸因於灌溉用水是否正常供給，第一期作因受 12 月至隔年 1 月之枯水期之影響，相較二期作，有較高之水庫供水不足之風險，因此，使減產風險（YRR 值）也相對高。此變化趨勢主要受供水量於未來變化影響，因未來枯水期雨量與水庫入流量皆下降，故使其減產風險提升；第二期作，因耕種前水庫剛過豐水期，多處於滿水位狀態，故較無缺水風險，加上未來豐水期呈現雨量增多之趨勢，其缺水風險下降，使未來二期作 YRR 值也呈現下降趨勢，其產量多受田區本身的氣候變化之影響。

表 7-3、水稻一、二期作之 YRR 指標未來變化趨勢

項目	第一期作水稻 YRR				第二期作水稻 YRR			
	RCP2.6		RCP8.5		RCP2.6		RCP8.5	
社經情境	保守	節水	保守	節水	保守	節水	保守	節水
基期	20.9%				8.0%			
2030s	29.8%	28.4%	25.6%	25.0%	6.7%	6.5%	6.8%	6.6%
2050s	24.8%	23.7%	26.3%	26.6%	8.3%	8.0%	8.3%	8.0%
2070s	24.9%	24.3%	22.8%	23.1%	6.9%	6.6%	5.5%	5.4%

7.1.1 小結

經由 7.1 節對於基期與未來風險變化趨勢的風險分析（氣候調適六步驟中，第二、三步驟），得知從未來情境至各領域之風險的傳遞關係，其中也包含水資源之缺水風險與農業糧食減產風險之關係說明。GWLF 流量模擬結果直接反映氣候情境之未來變化趨勢；SI 指標上，於未來各時段之缺水風險皆有增高之情形；產量上，一期作呈現較高之減產風險，且未來趨於嚴重，二期作減產風險較低，且於未來有進一步改善之趨勢。



桃園區第一期稻作YRR未來趨勢變化

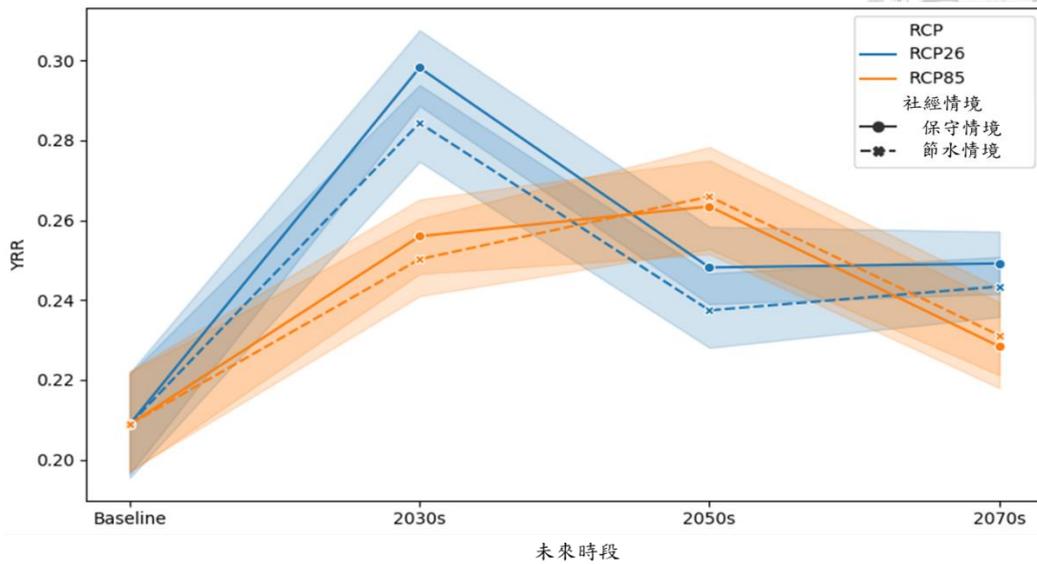


圖 7-10、桃園區第一期稻作 YRR 未來趨勢變化

橫坐標為未來各時間段，如 2030s 代表時段 2021 年至 2040 年。使用的參數校正歷史觀測資料為 2008 年至 2017 年；藍色與橘色部分別為 RCP2.6 與 RCP8.5 之結果，其中著色範圍為 95% 信心區間；實線與虛線則分別代表保守與節水社經情境；此處的資料點代表四個 GCM、六個農業分區與三個插秧時間的 200 年資料，依種植面積加權平均後的結果。

桃園區第二期稻作YRR未來趨勢變化

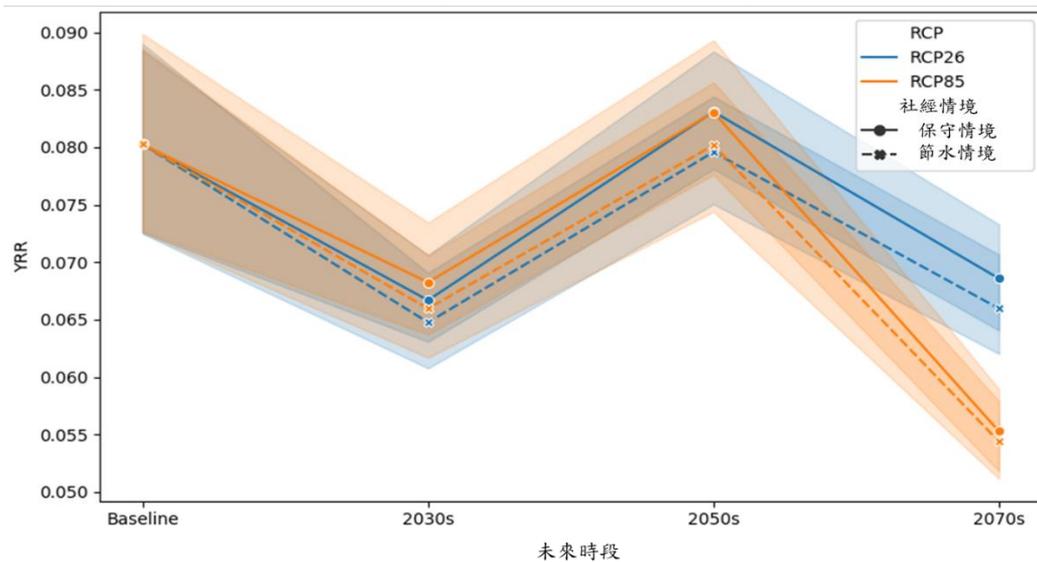


圖 7-11、桃園區第二期稻作 YRR 未來趨勢變化

橫坐標為未來各時間段，如 2030s 代表時段 2021 年至 2040 年。使用的參數校正歷史觀測資料為 2008 年至 2017 年；藍色與橘色部分別為 RCP2.6 與 RCP8.5 之結果，其中著色範圍為 95% 信心區間；實線與虛線則分別代表保守與節水社經情境；此處的資料點代表四個 GCM、六個農業分區與三個插秧時間的 200 年資料，依種植面積加權平均後的結果。



7.2 調適選項的制定與模擬的結果與討論

此節之分析對應於氣候調適六步驟中的第四步驟。本研究利用 AgriHydro 模擬各調適選項於水資源及糧食生產未來風險的影響變化，以下分為調適選項的制定與調適選項模擬的結果及討論作呈現與說明。

7.2.1 調適選項的制定

根據 7.1 節之分析，本節針對短期（2021 年至 2040 年）之風險變化進一步討論其空間上的風險差異，並制定調適選項。本研究不探討擴建基礎設施之調適，僅依照 4.3 節之氣候因子分析與配合「對地綠色環境給付」之補助政策，本處以大豆轉作作為主要的調適方向，希望在維持種植面積與稻作耕種面積的基礎下，制定選項。本研究將各農業分區於短期各情境下之減產率整理於表 7-4，並針對減產風險較嚴重的一期稻作，以四個 GCM 之 200 年平均值繪製風險地圖，至於圖 7-12 與圖 7-13 分別代表基期與短期未來在 RCP2.6 保守情境下一期稻作的平均減產風險（最大減產風險）的風險組成地圖。由圖中得知，T2 與 T3 分區風險最大，T1 與 S2 次之，故本研究針對這四個農業分區，共 27,085 公頃之種植面積，討論不同大豆種植比例下的水資源與糧食生產風險變化。而圖 7-12 與圖 7-13 所呈現之各分區風險差異，主要是由危害與暴露兩個風險組成構成。由於調適之前作物皆為水稻，故脆弱度於各農業分區間無差異。此處轉作大豆的調適方向是針對危害與脆弱度作調整，從石門供水區的視角來看，暴露是維持不變的，然而，如以水稻減產風險為視角，轉作使水稻種植面積減少，故是以降低暴露作為調適因子。本處以石門供水區之視角作為敘事觀點，下面以不同大豆種植比例（20%、40%、60%、80%與 100%）作為調適選項，說明其於水資源及糧食生產風險之競合關係。同時，本研究也分析以同樣調適選項用於第二期作之風險變化差異。

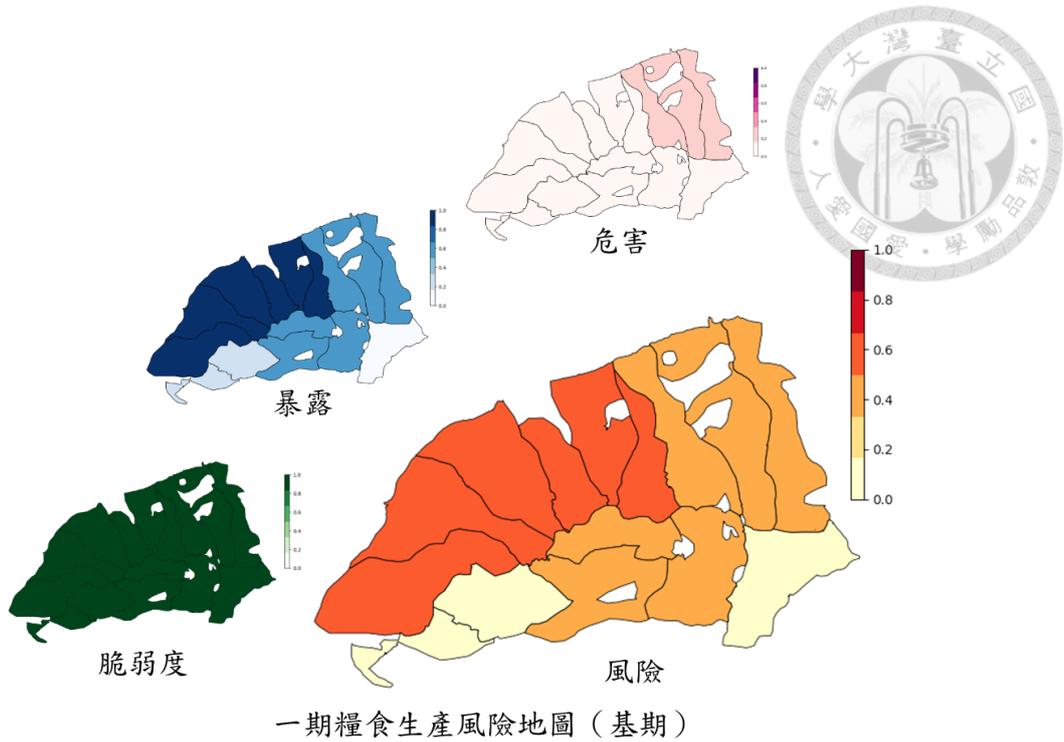


圖 7-12、一期糧食生產風險地圖（基期）

危害資料為表 7-4 第一期稻作之單位面積減產率；暴露為本研究各農業分區種植面積；脆弱度因皆為水稻，故於空間上無差異。

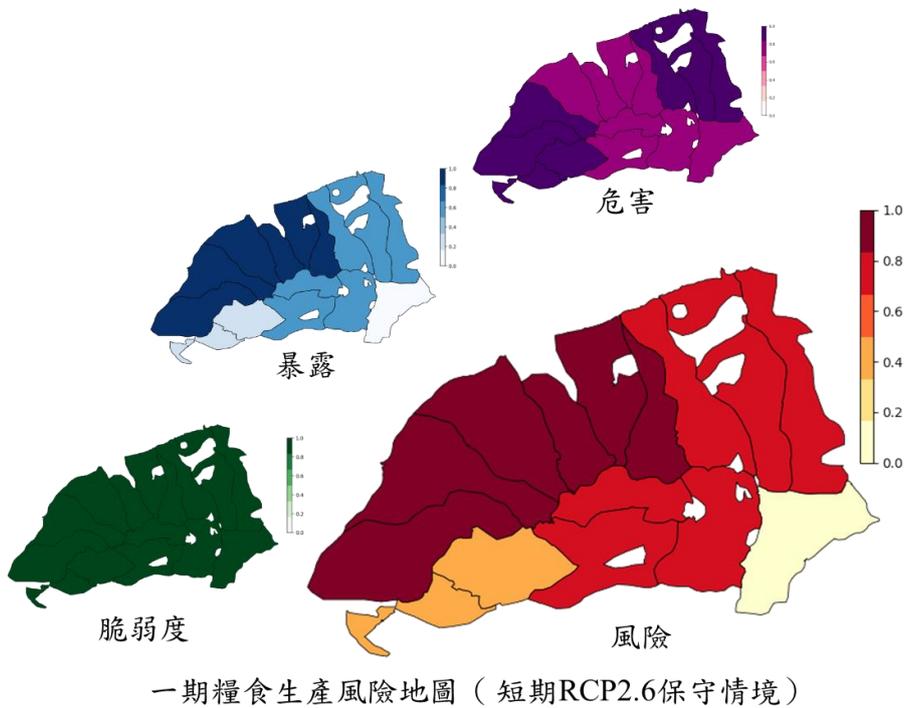


圖 7-13、一期糧食生產風險地圖（短期 RCP2.6 保守情境）

危害資料為表 7-4 第一期稻作之單位面積減產率；暴露為本研究各農業分區種植面積；脆弱度因皆為水稻，故於空間上無差異。



表 7-4、各農業分區基期與短期未來（2021 年至 2040 年）作物減產率 YRR 比較

農業分區	基期		保守				節水			
	第一期作	第二期作	第一期作		第二期作		第一期作		第二期作	
			RCP26	RCP85	RCP26	RCP85	RCP26	RCP85	RCP26	RCP85
	平均值									
T1	23.03%	9.37%	34.28%	29.51%	8.04%	8.21%	32.07%	28.36%	7.88%	7.87%
T2	20.69%	8.69%	30.47%	26.41%	7.45%	7.44%	28.56%	25.05%	7.27%	7.16%
T3	22.07%	8.22%	32.46%	27.76%	6.83%	7.28%	30.43%	26.47%	6.64%	7.09%
S1	21.63%	5.61%	31.23%	27.28%	4.43%	4.68%	29.74%	26.43%	4.27%	4.49%
S2	21.15%	6.39%	30.15%	27.28%	5.11%	4.84%	28.47%	26.26%	4.83%	4.66%
S3	21.74%	8.28%	32.21%	27.54%	6.82%	7.30%	30.34%	26.39%	6.63%	7.12%
	標準差									
T1	10.35%	5.65%	16.64%	15.27%	6.54%	7.79%	16.19%	15.43%	6.41%	7.04%
T2	8.96%	6.47%	14.98%	13.90%	7.84%	8.47%	14.29%	13.66%	7.65%	7.94%
T3	9.77%	6.55%	14.82%	14.00%	6.96%	9.22%	14.18%	13.83%	6.64%	8.78%
S1	9.14%	5.64%	13.33%	13.39%	6.00%	7.30%	13.42%	13.60%	5.77%	6.89%
S2	8.87%	7.64%	12.85%	14.46%	6.74%	6.79%	12.61%	14.46%	5.97%	6.49%
S3	9.61%	6.65%	14.84%	14.02%	6.89%	9.20%	14.20%	13.83%	6.63%	8.82%

說明：每格之資料為 200 年於 4 個 GCM 下的平均值。



7.2.2 調適選項的模擬的結果與討論

本節將不同比例之大豆種植面積於一期作與二期作種植之調適選項模擬結果分為(1)一期作、(2)二期作調適後水資源及糧食生產之風險競合關係和(3)一、二期作調適之間的比較來說明，如圖 7-14 所示。橫軸為調適選項，以 G1_0.2 為例，G1 代表第一期作，0.2 代表 20% 的 T1、T2、T3 與 S1 分區面積轉作成大豆；左半邊為一期作轉作的分析結果，右半邊為二期作轉作的分析結果；縱軸上半部為公共給水 SI 值，下半部為 YRR 值；藍色與橘色部分分別為 RCP2.6 與 RCP8.5 之結果，其中著色範圍為 95% 信心區間；實線與虛線則分別代表保守與節水之社經情境，此處的資料點代表四個 GCM、六個農業分區與六個種植時間（含一、二期作）的 200 年資料，依種植面積加權平均後的結果。各風險的平均值整理於表 7-5 中，並以顏色之深淺代表風險程度，越深代表風險越高。

(1) 一期作調適

大豆轉作於一期作之跨領域風險分析結果(圖 7-14 左半部)屬於協同類型(圖 4-10)，在降低公共給水 SI 值的同時，對整年桃園地區的糧食減產風險也有顯著的改善，每增加 20% 之大豆於一期作 T1、T2、T3 與 S1 分區，其 SI 與 YRR 之風險改善率分別為 0.040 與 1.25% (RCP2.6 與 RCP8.5 保守情境下的平均結果)。因大豆屬於旱作，灌溉用水量較低，對於水庫可以降低灌溉給水，進而回饋於公共給水，將低其缺水風險；於產量部份，因種植大豆，降低其供水不足量，進而降低缺水逆境，因此相較於一期純稻作，減產率較低。

(2) 二期作調適

大豆轉作於二期作之調適屬於跨領域風險分析中的競爭類型，如圖 7-14 右半部所示。在降低公共給水 SI 值的同時，卻使作物減產風險略為增加，每增加 20% 之大豆於二期作 T1、T2、T3 與 S1 分區，其 YRR 與 SI 之風險改善率分別為 -0.38% 與 0.085 (RCP2.6 與 RCP8.5 於保守情境下的平均結果)。同樣因為大豆灌溉用水量較低，所以可改善公共給水



之缺水風險。由於本研究模式設定中，農業灌溉用水量是以合理灌溉用水，每一年即時向水庫申報，故水庫所放之灌溉水量於非乾旱情況下，一期作因有效雨量較二期作多，會有剩餘情形，而於二期作，有效雨量較一期作少，大部分時間為剛好滿足或略多一些。因此在這種情況下，水庫如於二期作打折供水，則會造成較大之缺水逆境。於生理上，大豆較耐乾旱，然而在模式設定上，向水庫申報之灌溉水量為其必要之灌溉水量，水稻有湛水深之水量做為緩衝區，大豆則無，故模式中大豆對於缺水的敏感程度較水稻大。因此，轉作大豆於二期作，使其減產風險模擬值（YRR）略微提升。

(3) 一、二期作調適比較

分析一、二期作轉作大豆之結果可知水資源與糧食生產的風險關係不同，因此在考量決策時，除了大豆種植比例的制定，還需考慮不同種植時期的影響。於公共給水 SI 值部分，一、二期作之調適選項皆有改善其缺水風險。然而，二期作僅需轉作 40% 以下的水稻面積，就可以達到 100% 轉作大豆於一期稻作可以帶來的 SI 值改善量，其原因出自於一期作於調適前已處於缺水情形，故即使降低灌溉用水量，能回饋於水庫作為其他用途之水量也有限；反之，二期稻作原本灌溉需求較一期作大，又通常處於不缺水之狀態，轉作成大豆後，大豆與水稻計畫灌溉用水量之差值能最大程度的回饋於石門水庫供水系統，降低其用水標的之缺水風險。減產率之差異，如同二期作調適結果分析中所述，模式中大豆對水庫打折供水，具有較高之敏感度，故造成一期作減產風險下降，二期作減產風險卻增加的差異。

如進一步考量實質產量，一期稻作產量約為二期稻作的 1.36 倍，於氣候減產風險下仍有較高的產量，因此農民可能偏好種植一期稻作。而政府希望區域供水系統能穩定。因此根據本研究之分析結果，於第二期作轉作適當比例的大豆為較合適，且能滿足農民及政府期待之調適方向。此結論呼應了近年來，政府積極於第二期作推行大豆種植示範區，使得民國 104 年至 106 年大豆收穫面積逐年增長（表 5-9）。由此可說明，AgriHydro 能有效量化跨領域調適風險，幫助決策。



不同比例之大豆種植面積於一期作與二期作之調適選項效用比較

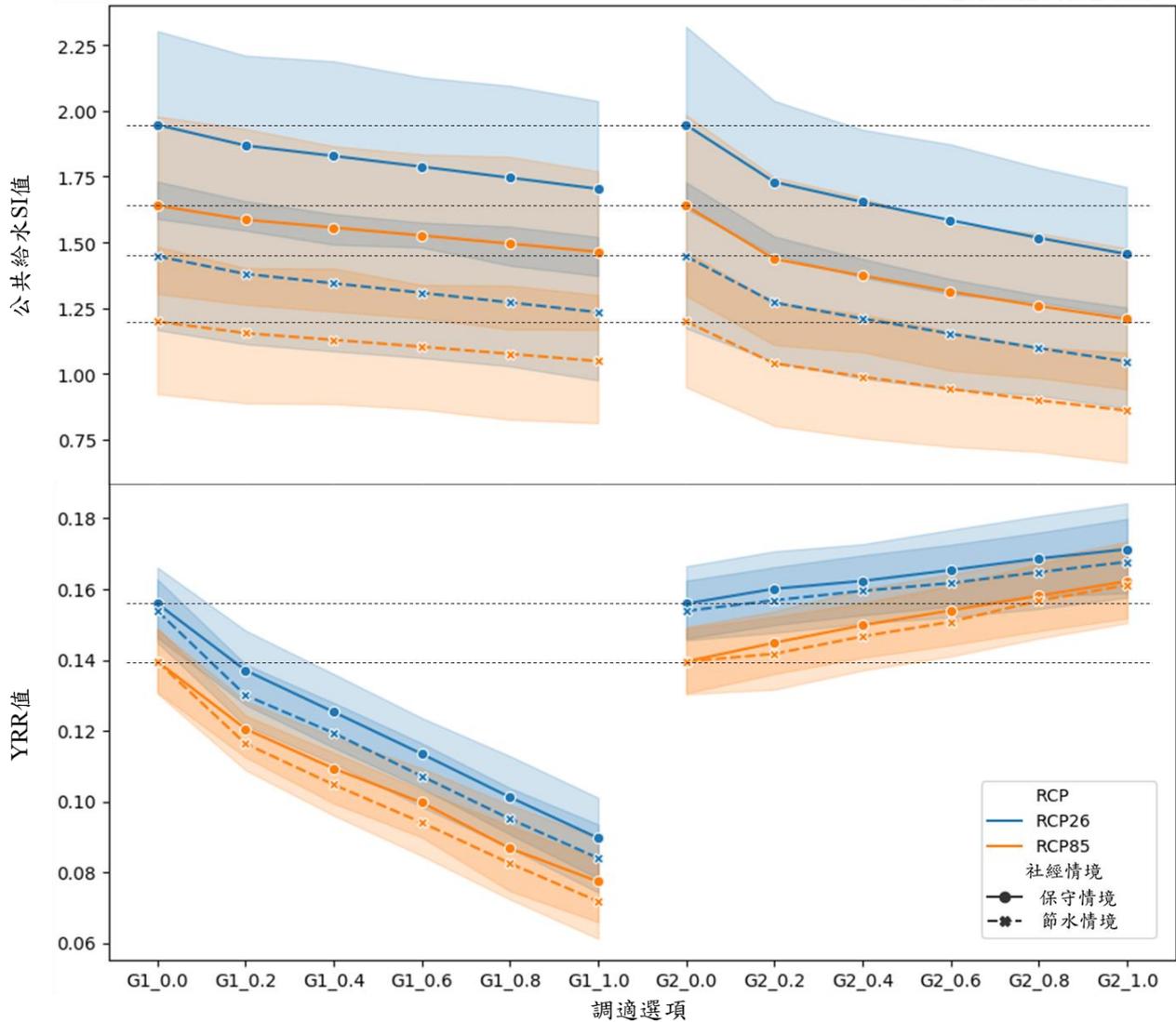


圖 7-14、不同比例之大豆種植面積於一期作與二期作之調適選項效用比較

橫軸為調適選項，以 G1_0.2 為例，G1 代表第一期作，0.2 代表 20% 的 T1、T2、T3 與 S1 分區面積由水稻轉作成大豆；左半邊為一期稻作轉作結果，右邊為二期稻作轉作結果；縱軸上半部為公共給水 SI 值，下半部為 YRR 值；藍色與橘色部分別為 RCP2.6 與 RCP8.5 之結果，其中著色範圍為 95% 信心區間；實線與虛線則分別代表保守與節水社經情境；此處的資料點代表四個 GCM、六個農業分區與六個種植時間（含一、二期作的種植時間）的 200 年資料，依種植面積加權平均後的結果。

表 7-5、不同調適選項於作物產量減產率與公共給水缺水指標之風險改變

大豆於 T1、T2、T3 與 S2 的種植面積比例	保守情境				節水情境			
	第一期作		第二期作		第一期作		第二期作	
	RCP26	RCP85	RCP26	RCP85	RCP26	RCP85	RCP26	RCP85
項目	作物產量減產率 YRR							
0%	15.59%	13.96%	15.59%	13.96%	15.38%	13.95%	15.38%	13.95%
20%	13.71%	12.05%	16.01%	14.49%	13.00%	11.64%	15.69%	14.17%
40%	12.53%	10.93%	16.23%	14.98%	11.94%	10.48%	15.95%	14.66%
60%	11.35%	9.97%	16.54%	15.40%	10.72%	9.41%	16.17%	15.08%
80%	10.12%	8.68%	16.87%	15.81%	9.51%	8.25%	16.48%	15.67%
100%	8.97%	7.74%	17.13%	16.23%	8.40%	7.18%	16.77%	16.12%
平均每 20% 之風險改善率	1.29%	1.20%	-0.30%	-0.45%	1.33%	1.29%	-0.27%	-0.45%
項目	公共給水缺水指標 SI							
0%	1.95	1.64	1.95	1.64	1.45	1.20	1.45	1.20
20%	1.87	1.59	1.73	1.44	1.38	1.15	1.27	1.04
40%	1.83	1.56	1.65	1.37	1.34	1.13	1.21	0.99
60%	1.79	1.53	1.58	1.31	1.31	1.10	1.15	0.94
80%	1.75	1.50	1.52	1.26	1.27	1.08	1.10	0.90
100%	1.70	1.46	1.46	1.21	1.23	1.05	1.05	0.86
平均每 20% 之風險改善率	0.046	0.034	0.090	0.079	0.041	0.029	0.074	0.062

7.3 小結

7.2 節對照氣候調適六步驟中的第四步驟，根據 7.1 節未來變化趨勢，制定調適選項，並利用整合模式 AgriHydro 進行調適選項效用分析，得出於一期作 T1、T2、T3 與 S2 分區轉作大豆能同時改善水資源及糧食生產於桃園的風險，然而於缺水風險 SI 其效果不如二期作來的好，於相同 SI 改善程度，二期作僅須轉作低於 40% 以下的一期作轉作面積，即可達到同樣效果。然而受模式設計機制之影響，大豆對於水庫打折供水下，對於缺水敏感度較高，於二期作實施轉作調適，減產風險略為提升。最後在考量農民與政府偏好與期待後，建議於二期作轉作大豆。結論呼應自民國 104 年二期大豆收穫面積漸增的變化趨勢與政府政策推動之方向。

而由本案例操作，成功演示 CSAA 與 AgriHydro 如何幫助量化分析跨領域的調適風險評估，希望於後續研究中能納入決策流程與監測修正的回饋機制，以形成動態調適路徑，完整呈現 CSAA 之氣候調適與風險評估流程。



第八章、結論與建議



本研究建立強跨領域的氣候、水資源與糧食調適整合評估模式 AgriHydro，並搭配氣候智慧調適演算法，演示聯合操作流程，藉此達到量化評估跨領域未來氣候風險與調適方案之效用，以期此跨領域分析框架能滿足「國家因應氣候變遷行動綱領」之跨治理部門合作與跨領域調適計畫擬定的需求。透過本研究於桃園水資源與糧食生產調適評估的示範案例，說明轉作大豆有助於未來水資源與糧食生產風險的控管。根據分析結果，建議於二期作轉作適當比例的大豆，此建議符合政府近年推動二期作轉作大豆之政策推動方向，並間接反映出「對地綠色環境給付」之補助政策具有潛在效益。同時，透過本研究案例的演示，證明本研究方法之框架能有效解析複雜之跨領域問題，並在考慮各領域風險互動關係下，有效量化氣候變遷調適選項於各領域風險所造成的變化與效用，下面以列點方式整理本研究的結論與建議。

8.1 結論

1. 透過文獻回顧與台灣現行「溫室氣體減量及管理法」與「國家因應氣候變遷行動綱領」對氣候變遷調適計畫擬定之需求，確認標準的跨領域氣候調適評估流程與量化工具之缺口。因此，建立 AquaHydro 強跨領域整合評估模式，並以桃園水資源與糧食生產領域作為分析案例，說明本研究框架（AgriHydro 與氣候智慧調適演算法）如何滿足上述需求。
2. 本研究於氣候調適六步驟中的第一步驟，利用風險模板解構桃園水資源與糧食生產風險的組成因子，從中找出跨領域風險間的關聯性。在水資源與糧食生產領域中，主要是透過石門水庫供水系統作為連結。水庫入流量的未來變化直接影響其供水之穩定性，進而改變各用水標的的風險，如公共給水 SI 值；而水庫灌溉給水之需求性會依作物生育日數與有效雨量等而變動。本研究建構整合評估工具 AgriHydro，以年作為回饋之時間尺度，考慮領域間的互動關係與不同調適選項於水資源與糧食生產領域中的影響。
3. 本研究建立之多測站氣象合成模式，能有效維持桃園七個測站間的空間自相關性(SDI)，於日尺度下，雨量與降雨事件的決定係數 (r^2) 分別為 0.699 與 0.551；月尺度下，可達



0.896 與 0.886；溫度部分（日均溫、日最高與最低溫），日尺度決定係數落於 0.14 至 0.325 之間，月尺度之間則落於 0.590 至 0.833 之間，而其值的變動範圍皆落於 0.96 至 1 之間，可視為良好之驗證果。站間相關性的驗證結果部分，雨量與降雨事件的決定係數分別為 0.686 與 0.757，但因歷史資料不足而呈現低估之情形；溫度部分決定係數則落於 0.48 至 0.57，但因其高度相關不影響模式表現。

4. 多測站氣象合成模式中，單測站統計驗證上，一階馬可夫鍊參數模擬值與實際值之決定係數皆大於 0.99，而迴歸斜率也維持在 1（45 度線上）；雨量於 K-W 檢定（ $\alpha = 0.05$ ）中皆通過；日均溫、日最高與最低溫各月份之平均於雙尾 T 檢定（ $\alpha = 0.05$ ）中僅 3 個（共 36 個）遭拒絕；然而，於雙尾 F 檢定（ $\alpha = 0.05$ ）中，僅日最高溫有較高之通過率，其餘被拒絕之標準差多屬於高估之情形。
5. 水資源模組 GWLF 中的流量模式驗證上，石門入流量及三峽河流量於旬尺度十年資料（2008 年至 2017 年）之驗證結果良好，RMSE 分別為 21.12 與 5.46（cms/旬）；相關係數則為 0.97 與 0.87；CE 為 0.92 與 0.73；CP 為 0.94 與 0.81。
6. 石門水庫供水系統動力模式在水庫水位高程之驗證上，於正常年（2014 年）、乾早年（2015 年）與豐水年（2016 年）皆能合理反應水位高程的變化，唯不考慮乾旱時的休耕與滿水位時的預警放水等人為調度。
7. AquaCrop 作物模擬驗證部分，水稻產量上，無法有效反映一期作變化趨勢（去除趨勢偏誤年後，相關係數為 0.3），二期稻作去除趨勢偏誤年的相關係數（ r ）可達 0.764（原始資料為 0.597）。然而本研究所使用的驗證資料為區域統計資料，亦受其他外在因素影響。因此，未來需要更精確之田間試驗資料進行校驗；田間需水量與生育日數部分，AquaCrop 能有效反映出現實中一、二期稻作之差異。大豆模擬驗證資料較少（一期作 2 年、二期作 3 年），產量上，相關係數分別為 1 與 0.869，生育日數可合理反映，唯田間需水量部分無資料對照。
8. AgriHydro 未來趨勢評估中（氣候調適六步驟中，第二、三步驟），石門水庫入流量與三峽河流量充分反映雨量修正值之未來變化，各氣候情境與未來時段間無明顯差異。然而



在五個旬區間（35 旬至 10 旬、11 旬至 16 旬、17 旬至 28 旬、29 旬至 30 旬與 31 旬至 34 旬）中，其變化依次為未來流量較基期小、漸增段、未來流量較基期大、遞減段與未來流量較基期大。模擬流量的 95% 信心區間則隨著豐枯水期增大與縮小。整體而言，反映出豐水期越來越豐水，枯水期越來越缺水之變化趨勢。

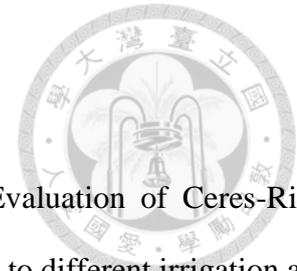
9. SI 缺水指標上，公共給水部分，相較於基期 0.71 的 SI 值，未來變化範圍落於 1.09 至 3.92 之間，其中以 RCP8.5 於中期保守類別最為嚴重（SI 值為 3.92）。於短期未來，其變化範圍落於 1.20 至 1.95，保守與節水情境約相差 0.5；農業灌溉給水部分，因在水庫水位高程低於下限時，打折數較高，故 SI 值較公共給水高，SI 值變化範圍為 8.21 至 14.08。結果呈現未來 SI 值皆為上升，相對應的調適是必須的。
10. 水稻減產風險的未來變化趨勢中，一期稻作受水庫供水不足影響，呈現較高之減產風險，且未來趨於嚴重，二期稻作因水庫於二期作時，多處於正常供水之水位，且未來受豐水期入流量增高影響，供水情形更為穩定，減產風險因此較一期稻作低，未來有改善趨勢。
11. 根據短期（2021 年至 2040 年）RCP8.5 保守類別下，一期稻作減產的風險在空間上的變化，T2 與 T3 分區風險最大，T1 與 S2 次之，故本研究針對這四個農業分區，共 27,085 公頃之種植面積，以 AgriHydro 分析一、二期作在不同大豆種植比例下，水資源與糧食生產風險的變化。
12. 調適選項分析結果發現於一期作轉作大豆能協同改善水資源及糧食生產風險，唯缺水風險（SI 值）的改善效果不如二期作之轉作。於相同 SI 改善程度，二期作僅須轉作低於 40% 的一期作之轉作面積，即可達到同樣效果。然而，受模式設計機制之影響，大豆對於水庫打折供水的減產敏感度較高，因此，於二期作實施大豆轉作調適，減產風險呈現略微提升（每增加 20% 大豆種植面積，減產風險增高 0.27% 至 0.45%）。
13. 根據案例分析結果，桃園一期稻作受氣候變遷的減產風險小於一、二期稻作的產量差異。在考量農民偏好種植產量較高的一期稻作與政府希望區域供水穩定下，建議於第二期作轉作適當比例的大豆，此結論呼應自民國 104 年二期作大豆收穫面積漸增的變化趨勢與政府政策推動之方向。



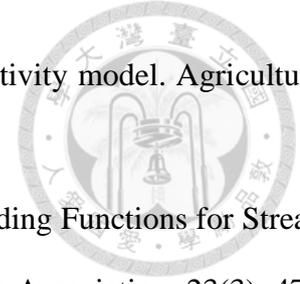
8.2 建議

1. 本研究演示 CSAA 中，氣候調適六步驟的一至四步驟與風險模板的操作，未來可針對動態社經情境（本研究僅計畫灌溉用水量為動態更新）、監測與修正及調適選項決策過程建立回饋機制，形成動態調適路徑，完成 CSAA 中剩餘項目之實際操作。
2. 風險指標中，除了本研究所使用的 SI 與 YRR 指標，可以進一步分析石門水庫供水系統的回復力，藉此量化可容忍風險的門檻值，有效幫助調適選項之決策。
3. AgriHydro 情境模組中，多測站氣象合成模式能良好維持空間自相關性 (SDI)，但兩兩站間相關性有低估之情形，此部分可待未來有較長可取得的資料後，再次驗證。同時，針對雨量部分，建議 (1) 增加雨量分布選擇的自由度，依照各月分布檢定之結果，選用各月與各測站適合的分布產製雨量資料；(2) 將極端降雨事件獨立出來分別產生，或以混合分布的方式，建立具有雙峰值的機率密度函數，用以避免因為極端降雨事件，使最大似然估計法相較於動差法所估計出的參數發生明顯偏估。
4. AgriHydro 水資源模組中，建議 GWLF 中的流量模式，退水係數與 CN 值可以在未來有現地觀測值後，更新模式設定參數。同時，建議石門水庫供水系統動力模式中的蒸發量可以更改為動態估計，增加模式間的連結性。下游部分，在未來有縣管河川流量資訊時，可進一步建立模式，動態估計糧食生產於河川可取得的水量，並建置埤塘灌溉系統，將埤塘水資源的調度能力納入考量。
5. AgriHydro 作物模組中，AquaCrop 需要配合更精確的田間試驗資料，校正作物參數，並再次驗證其適用性。
6. 最後，建議未來能將能源領域納入整合評估模式中，更完整評估三大基本資源於未來氣候變遷下的風險競合關係，並增加擴建供水、淨水設施、海水淡化廠、其他適合的轉作作物等調適選項，同時納入經濟效益的計算，最佳化調適選項的選擇與管理。

參考文獻



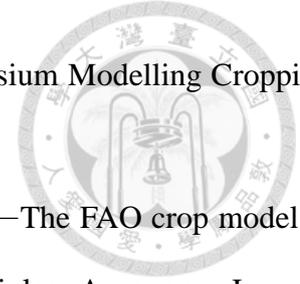
1. Amiri, E., Rezaei, M., Rezaei, E. E., & Bannayan, M. (2014). Evaluation of Ceres-Rice, Aquacrop and Oryza2000 models in simulation of rice yield response to different irrigation and nitrogen management strategies. *Journal of plant nutrition*, 37(11), 1749-1769.
2. Auffhammer, M., Ramanathan, V., & Vincent, J. R. (2012). Climate change, the monsoon, and rice yield in India. *Climatic change*, 111(2), 411-424.
3. Bellone, E., Hughes, J. P., & Guttorp, P. (2000). A hidden Markov model for downscaling synoptic atmospheric patterns to precipitation amounts. *Climate Research*, 15(1), 1-12.
4. Bithell, M., & Brasington, J. (2009). Coupling agent-based models of subsistence farming with individual-based forest models and dynamic models of water distribution. *Environmental Modelling & Software*, 24(2), 173-190.
5. Bouman, B. (2001). *ORYZA2000: modeling lowland rice* (Vol. 1): IRRI.
6. Castaneda, A., Bouman, B., Peng, S., & Visperas, R. (2002). The potential of aerobic rice to reduce water use in water-scarce irrigated lowlands in the tropics. *Water-wise rice production*, 8-11.
7. Castellvi, F., & Stöckle, C. (2001). Comparing the performance of WGEN and ClimGen in the generation of temperature and solar radiation. *Transactions of the ASAE*, 44(6), 1683.
8. Chen, J., Brissette, F., & Leconte, R. (2012). WeaGETS – a Matlab-based daily scale weather generator for generating precipitation and temperature. *Procedia Environmental Sciences*, 13, 2222-2235.
9. Chow, V. T. (1964). *Handbook of applied hydrology*.
10. Davis, K. F., Rulli, M. C., Seveso, A., & D' Odorico, P. (2017). Increased food production and reduced water use through optimized crop distribution. *Nature Geoscience*, 10(12), 919.
11. Foster, T., Brozović, N., Butler, A., Neale, C., Raes, D., Steduto, P., . . . Hsiao, T. C. (2017).



- AquaCrop-OS: An open source version of FAO's crop water productivity model. *Agricultural water management*, 181, 18-22.
12. Haith, D. A., & Shoemaker, L. L. (1987). Generalized Watershed Loading Functions for Stream Flow Nutrients 1. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, 23(3), 471-478.
 13. Harrison, P., Holman, I., & Berry, P. (2015). Assessing cross-sectoral climate change impacts, vulnerability and adaptation: an introduction to the CLIMSAVE project. In: Springer.
 14. Harrison, P. A., Dunford, R. W., Holman, I. P., Cojocar, G., Madsen, M. S., Chen, P.-Y., . . . Sandars, D. (2018). Differences between low-end and high-end climate change impacts in Europe across multiple sectors. *Regional Environmental Change*, 1-15.
 15. Houghton, J., & Siegel, M. (2015). Advanced data analytics for system dynamics models using PySD. *revolution*, 3, 4.
 16. IRRI, International Rice Research Institute. (2001). Annual report 2000-2001. Rice research : the way forward. IRRI. Los Baños, Philippines. 71pp.
 17. Jensenius, A. R. (2012). Disciplinarity: intra, cross, multi, inter, trans. Retrieved from.
 18. Jones, J. W., Hoogenboom, G., Porter, C. H., Boote, K. J., Batchelor, W. D., Hunt, L., . . . Ritchie, J. T. (2003). The DSSAT cropping system model. *European journal of agronomy*, 18(3-4), 235-265.
 19. Jowett, I. (1997). Instream flow methods: a comparison of approaches. *Regulated Rivers: Research & Management*, 13(2), 115-127.
 20. Khalili, M., Brissette, F., & Leconte, R. (2009). Stochastic multi-site generation of daily weather data. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 23(6), 837-849.
 21. Khalili, M., Leconte, R., & Brissette, F. (2007). Stochastic multisite generation of daily precipitation data using spatial autocorrelation. *Journal of hydrometeorology*, 8(3), 396-412.
 22. Krysanova, V., & Arnold, J. G. (2008). Advances in ecohydrological modelling with SWAT—a



- review. *Hydrological Sciences Journal*, 53(5), 939-947.
23. Lee, J.-L., & Huang, W.-C. (2014). Impact of climate change on the irrigation water requirement in Northern Taiwan. *Water*, 6(11), 3339-3361.
 24. Lin, C.-Y., & Tung, C.-P. (2017). Procedure for selecting GCM datasets for climate risk assessment. *Terrestrial, Atmospheric & Oceanic Sciences*, 28(1).
 25. McNider, R. T., Handyside, C., Doty, K., Ellenburg, W. L., Cruise, J. F., Christy, J. R., . . . Caldwell, P. (2015). An integrated crop and hydrologic modeling system to estimate hydrologic impacts of crop irrigation demands. *Environmental Modelling & Software*, 72, 341-355.
 26. Preston, B. L., Westaway, R. M., & Yuen, E. J. (2011). Climate adaptation planning in practice: an evaluation of adaptation plans from three developed nations. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 16(4), 407-438.
 27. Qi, Z., Kang, G., Chu, C., Qiu, Y., Xu, Z., & Wang, Y. (2017). Comparison of SWAT and GWLF Model Simulation Performance in Humid South and Semi-Arid North of China. *Water*, 9(8), 567.
 28. Raes, D., Steduto, P., Hsiao, T. C., & Fereres, E. (2009). AquaCrop—the FAO crop model to simulate yield response to water: II. Main algorithms and software description. *Agronomy Journal*, 101(3), 438-447.
 29. Razavi, S., Tolson, B. A., & Burn, D. H. (2012). Review of surrogate modeling in water resources. *Water resources research*, 48(7).
 30. Richardson, C. W. (1981). Stochastic simulation of daily precipitation, temperature, and solar radiation. *Water resources research*, 17(1), 182-190.
 31. Richardson, C. W., & Wright, D. A. (1984). WGEN: A model for generating daily weather variables.
 32. Shaw, S. B., & Riha, S. J. (2011). Assessing temperature-based PET equations under a changing climate in temperate, deciduous forests. *Hydrological Processes*, 25(9), 1466-1478.
 33. Stöckle, C., Nelson, R., Donatelli, M., & Castellvì, F. (2001). ClimGen: a flexible weather



generation program. Paper presented at the 2nd International Symposium Modelling Cropping Systems. Florence, Italy.

34. Steduto, P., Hsiao, T. C., Raes, D., & Fereres, E. (2009). AquaCrop—The FAO crop model to simulate yield response to water: I. Concepts and underlying principles. *Agronomy Journal*, 101(3), 426-437.
35. Van Gaelen, H., Vanuytrecht, E., Willems, P., Diels, J., & Raes, D. (2017). Bridging rigorous assessment of water availability from field to catchment scale with a parsimonious agro-hydrological model. *Environmental Modelling & Software*, 94, 140-156.
36. Van Vuuren, D. P., Edmonds, J., Kainuma, M., Riahi, K., Thomson, A., Hibbard, K., . . . Lamarque, J.-F. (2011). The representative concentration pathways: an overview. *Climatic change*, 109(1-2), 5.
37. White, J. W., Hoogenboom, G., Kimball, B. A., & Wall, G. W. (2011). Methodologies for simulating impacts of climate change on crop production. *Field Crops Research*, 124(3), 357-368.
38. Wilks, D. (1998). Multisite generalization of a daily stochastic precipitation generation model. *Journal of Hydrology*, 210(1-4), 178-191.
39. 張德鑫, 蔡西銘, & 鄭力嘉. (2009). 地理資訊系統應用於石門水庫上游集水區. *農業工程學報*, 55(4), 35-46.
40. 陳述, 姚銘輝, & 陳守泓. (2008). 利用潛熱通量資料驗證水稻田蒸發散模式. *作物, 環境與生物資訊*, 5 (1):, 29-39.
41. 科技部氣候變遷調適科技整合研究計畫 TaiCCAT. (2015). 「氣候變遷調適行動建構指引」.
42. 劉振宇、簡傳彬、方文村. (2004). 桃園大圳灌區埤塘蓄水功能之探討. *桃園大圳水資源季營運管理學術研討會論文集*, 191-199.
43. 林軒德. (2017). 「經驗動態建模於季長期天氣展望與乾旱預警系統之應用-以濁水溪流域為例」. 國立台灣大學生物環境系統工程學研究所碩士論文.



44. 洪毓謙.(1999). 「以砂箱實驗探討現地複合土層之滲漏機制」. 國立中央大學土木工程研究所碩士論文.
45. 王尊麟.(2019). 「以遊戲模擬方式探討乾旱時期水市場機制對水資源再分配之可行性：以桃園地區為例」(初稿). 國立台灣大學生物環境系統工程學研究所碩士論文.
46. 高振程.(2003). 「水田坵塊系統之回歸水量推估」. 國立中央大學土木工程研究所碩士論文.
47. 林喬莉.(2010). 以系統動力模式評估水田埤塘灌溉系統. 國立中央大學土木工程研究所碩士論文.
48. 洪佳瑩.(2006). 桃園人工埤池對水資源輔助之分析研究. 國立中央大學土木工程研究所碩士論文.
49. 許良瑋.(2011). 桃園埤塘輪灌系統之模擬分析. 國立中央大學土木工程研究所碩士論文.
50. 陳亭羽.(2012). 氣候變遷對桃園地區水稻產量及灌溉需水量之影響. 國立中央大學土木工程研究所碩士論文.
51. 蔡欣妤.(2008). 以系統動力模型評估農業灌溉系統之研究. 國立中央大學土木工程研究所碩士論文.
52. 馬家齊.(2015). 氣候變遷下因應枯旱之水庫供灌區農業用水管理. 國立中央大學土木工程研究所博士論文.
53. 經濟部水利署.(2001). 石門水庫供水區整體水源利用規劃.
54. 經濟部水利署.(2005). 桃園地區農地耕作調整促進水資源利用研究.
55. 經濟部水利署.(2005). 板新地區供水改善計畫二期工程檢討評估暨新店溪水源開發計畫檢討—水源專題報告
56. 經濟部水利署.(2007). 多元化水資源開發—桃園及新竹地區農業迴歸水調查與可行性評估.
57. 經濟部水利署.(2012). 強化北部水資源分區因應氣候變遷報告.
58. 經濟部水利署.(2013). 流域防災資訊整合之研究成果報告.



59. 經濟部水利署.(2014). 石門水庫供水區水資源活化計畫.
60. 經濟部水利署.(2017). 臺灣北部區域水資源經理基本計畫.
61. 經濟部水利署.(2018). 石門水庫運用要點.
62. 臺東區農業改良場.(2001). 台東區農業專訊-溫度對水稻生產之影響.
63. 桃園區農業改良場.(2010). 水稻專輯. 桃園區農業技術專輯.
64. 桃園區農業改良場.(2016). 北部地區大豆栽培要領. 農業專訊 96 期.
65. 桃園農田水利會.(2017). 灌溉計畫書.
66. 行政院農業委員會.(2015). 2015 農田灌溉白皮書.
67. 行政院農業委員會.(2018). 107 年農田水利處之數字看板.

附件一、民國 107 年石門水庫灌溉及給水計畫配水量 (106 年 11 月 24 日審定版)

月別	旬別	灌 溉								公 共 給 水										總計 (日)	旬 總計		
		石門 大圳	桃園水利會					合計 (日)	旬計	後池	經石門大圳				經桃園大圳			下游				合計 (日)	旬計
			桃園光 復	下游各圳			合計				平鎮 第二抽水站	石門水廠 龍潭水廠	平鎮 水廠	中山 用水	中山 用水	中油 用水	大湳 水廠	板新 水廠	大湳 水廠				
				下游	溪洲	小計																	
1	上	0.00	1.80	0.04	0.04	0.08	1.88	1.88	18.80	2.00	1.70	4.40	0.07	0.07	0.19	1.20	4.05	1.80	15.48	154.80	17.36	173.60	
	中	0.00	1.80	0.04	0.04	0.08	1.88	1.88	18.80	2.00	1.70	4.40	0.07	0.07	0.19	1.20	4.05	1.80	15.48	154.80	17.36	173.60	
	下	0.00	1.80	0.04	0.04	0.08	1.88	1.88	20.68	2.00	1.70	4.40	0.07	0.07	0.19	1.20	4.05	1.80	15.48	170.28	17.36	190.96	
2	上	5.12	12.57	0.38	0.10	0.48	13.05	18.17	181.70	2.00	1.70	3.80	0.07	0.07	0.25	0.00	3.47	1.80	13.16	131.60	31.33	313.30	
	中	5.12	12.57	0.66	0.18	0.84	13.41	18.53	185.30	2.00	1.70	3.80	0.07	0.07	0.25	0.00	3.47	1.80	13.16	131.60	31.69	316.90	
	下	5.12	12.57	0.88	0.23	1.11	13.68	18.80	150.40	2.00	1.70	3.80	0.07	0.07	0.25	0.00	3.47	1.80	13.16	105.28	31.96	255.68	
3	上	6.08	13.24	0.88	0.23	1.11	14.35	20.43	204.30	2.00	1.70	3.80	0.07	0.07	0.24	0.00	3.13	1.80	12.81	128.10	33.24	332.40	
	中	6.08	13.24	0.72	0.19	0.91	14.15	20.23	202.30	2.00	1.70	3.80	0.07	0.07	0.24	0.00	3.13	1.80	12.81	128.10	33.04	330.40	
	下	4.92	13.24	0.85	0.23	1.08	14.32	19.24	211.64	2.00	1.70	3.80	0.07	0.07	0.24	0.00	3.13	1.80	12.81	140.91	32.05	352.55	
4	上	4.92	12.21	0.57	0.15	0.72	12.93	17.85	178.50	2.00	1.70	3.80	0.07	0.07	0.22	0.00	3.13	1.80	12.79	127.90	30.64	306.40	
	中	4.92	12.21	0.57	0.15	0.72	12.93	17.85	178.50	2.00	1.70	3.80	0.07	0.07	0.22	0.00	3.13	1.80	12.79	127.90	30.64	306.40	
	下	4.92	12.21	0.66	0.18	0.84	13.05	17.97	179.70	2.00	1.70	3.80	0.07	0.07	0.22	0.00	3.13	1.80	12.79	127.90	30.76	307.60	
5	上	5.05	11.70	0.46	0.12	0.58	12.28	17.33	173.30	2.00	1.70	3.80	0.07	0.07	0.18	0.00	2.66	1.80	12.28	122.80	29.61	296.10	
	中	5.05	11.70	0.46	0.12	0.58	12.28	17.33	173.30	2.00	1.70	3.80	0.07	0.07	0.18	0.00	2.66	1.80	12.28	122.80	29.61	296.10	
	下	5.05	11.70	0.43	0.12	0.55	12.25	17.30	190.30	2.00	1.70	3.80	0.07	0.07	0.18	0.00	2.66	1.80	12.28	135.08	29.58	325.38	
6	上	5.48	11.19	0.47	0.13	0.60	11.79	17.27	172.70	2.00	1.70	3.80	0.07	0.07	0.23	0.00	2.66	1.80	12.33	123.30	29.60	296.00	
	中	6.02	11.19	0.47	0.13	0.60	11.79	17.81	178.10	2.00	1.70	3.80	0.07	0.07	0.23	0.00	2.66	1.80	12.33	123.30	30.14	301.40	

	下	6.88	11.19	0.47	0.13	0.60	11.79	18.67	186.70	2.00	1.70	3.80	0.07	0.07	0.23	0.00	2.66	1.80	12.33	123.30	31.00	310.00
7	上	6.12	13.17	0.57	0.15	0.72	13.89	20.01	200.10	2.00	1.70	3.80	0.07	0.07	0.25	0.00	1.66	1.80	11.35	113.50	31.36	313.60
	中	6.12	13.17	0.66	0.18	0.84	14.01	20.13	201.30	2.00	1.70	3.80	0.07	0.07	0.25	0.00	1.66	1.80	11.35	113.50	31.48	314.80
	下	7.06	13.20	0.95	0.25	1.20	14.40	21.46	236.06	2.00	1.70	3.80	0.07	0.07	0.25	0.00	1.66	1.80	11.35	124.85	32.81	360.91
	上	7.06	12.36	0.91	0.24	1.15	13.51	20.57	205.70	2.00	1.70	3.80	0.07	0.07	0.26	0.00	1.66	1.80	11.36	113.60	31.93	319.30
8	中	6.12	12.36	0.85	0.23	1.08	13.44	19.56	195.60	2.00	1.70	3.80	0.07	0.07	0.26	0.00	1.66	1.80	11.36	113.60	30.92	309.20
	下	6.12	12.36	0.74	0.20	0.94	13.30	19.42	213.62	2.00	1.70	3.80	0.07	0.07	0.26	0.00	1.66	1.80	11.36	124.96	30.78	338.58
9	上	5.81	11.19	0.57	0.15	0.72	11.91	17.72	177.20	2.00	1.70	3.80	0.07	0.07	0.26	0.00	1.89	1.80	11.59	115.90	29.31	293.10
	中	5.03	11.19	0.57	0.15	0.72	11.91	16.94	169.40	2.00	1.70	3.80	0.07	0.07	0.26	0.00	1.89	1.80	11.59	115.90	28.53	285.30
	下	5.81	11.19	0.57	0.15	0.72	11.91	17.72	177.20	2.00	1.70	3.80	0.07	0.07	0.26	0.00	1.89	1.80	11.59	115.90	29.31	293.10
10	上	6.12	11.19	0.65	0.17	0.82	12.01	18.13	181.30	2.00	1.70	3.80	0.07	0.07	0.25	0.00	1.89	1.80	11.58	115.80	29.71	297.10
	中	7.06	11.19	0.65	0.17	0.82	12.01	19.07	190.70	2.00	1.70	3.80	0.07	0.07	0.25	0.00	1.89	1.80	11.58	115.80	30.65	306.50
	下	6.02	11.19	0.65	0.17	0.82	12.01	18.03	198.33	2.00	1.70	3.80	0.07	0.07	0.25	0.00	1.89	1.80	11.58	127.38	29.61	325.71
11	上	6.02	10.20	0.85	0.23	1.08	11.28	17.30	173.00	2.00	1.70	3.80	0.07	0.07	0.25	0.00	2.39	1.80	12.08	120.80	29.38	293.80
	中	4.48	10.17	0.65	0.17	0.82	10.99	15.47	154.70	2.00	1.70	3.80	0.07	0.07	0.25	0.00	2.39	1.80	12.08	120.80	27.55	275.50
	下	3.10	10.14	0.21	0.06	0.27	10.41	13.51	135.10	2.00	1.70	3.80	0.07	0.07	0.25	0.00	2.39	1.80	12.08	120.80	25.59	255.90
12	上	0.00	1.80	0.04	0.04	0.08	1.88	1.88	18.80	2.00	1.70	4.40	0.07	0.07	0.20	1.20	3.55	1.80	14.99	149.90	16.87	168.70
	中	0.00	1.80	0.04	0.04	0.08	1.88	1.88	18.80	2.00	1.70	4.40	0.07	0.07	0.20	1.20	3.55	1.80	14.99	149.90	16.87	168.70
	下	0.00	1.80	0.04	0.04	0.08	1.88	1.88	20.68	2.00	1.70	4.40	0.07	0.07	0.20	1.20	3.55	1.80	14.99	164.89	16.87	185.57
全年配水 (CMSD)	1,706. 73					247. 73	3,965.8 8		5,672.6 1			1,424. 20					975.8 6	657.0 0		4,617.5 3		10,290 .14
全年配水 (萬噸)	14,746 .15						34,265. 2			30,292.70				441.5 0	729.8 2		8,431. 43					88,906 .81

附件二、臺灣桃園農田水利會民國 106 年灌溉計畫表

期作別/土壤別		第一期作				第二期作				
		輕黏土	黏質壤土	砂質黏壤土	砂質壤土	輕黏土	黏質壤土	砂質黏壤土	砂質壤土	
秧田	折合本田面積比率	1/25	1/25	1/25	1/25	1/25	1/25	1/25	1/25	
	秧田整地(供給一次)	200	200	200	200	200	200	200	200	
	秧田補給水	日供水深	15	15	15	15	15	15	15	15
		期距	4天	4天	4天	4天	4天	4天	4天	4天
		灌溉日數	40天	40天	40天	40天	15天	15天	15天	15天
	折合本田之秧田水深(D1)		32	32	32	32	17	17	17	17
浸田	一次(D2)	100	100	100		100	100	100		
	二次(D3)	50	50	50		50	50	50		
整田(D4)		30	30	30	180	30	30	30	180	
本田	每日水深	自插秧完30天內	7.2	7.6	8.1	10.1	7.6	8.1	8.4	10.8
		自插秧完31天起	6.0	6.4	6.7	8.4	6.4	6.7	7.0	9.0
	灌溉期距	自插秧完30天內	3天	3天	3天	3天	3天	3天	3天	3天
		自插秧完31天起	6天	6天	6天	6天	6天	6天	6天	6天
	本田期間總水深(D5)		756	804	846	1059	740	779	812	1044
該期作折合本田面積總水深		968	1016	1058	1271	937	976	1009	1241	
<p>本田期間總水深第一期作以 120 天計算，第二期作以 110 天計算。</p> <p>折合本田面積之秧田水深(D1) = (秧田整地水深+秧田補給日供水深×灌溉日數) × 折合本田面積比率。</p> <p>本田期間總水深</p> <p>一期作 = (插秧完 30 天內之每日水深×30 天) + (插秧完 31 天起之每日水深×90 天)</p> <p>二期作 = (插秧完 30 天內之每日水深×30 天) + (插秧完 31 天起之每日水深×80 天)</p> <p>折合本田總水深 = D1+D2+D3+D4+D5</p>										

附件三、未來氣候情境平均值修正值變化趨勢

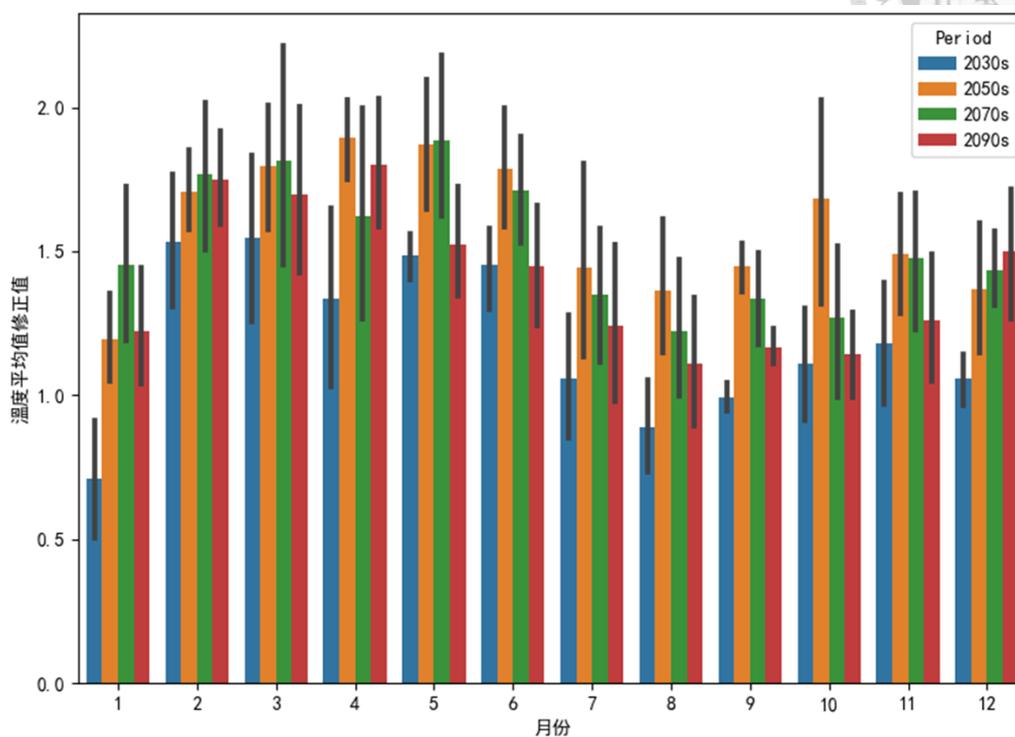


圖 A-1、各月不同未來時段的溫度平均值修正值 (RCP2.6)

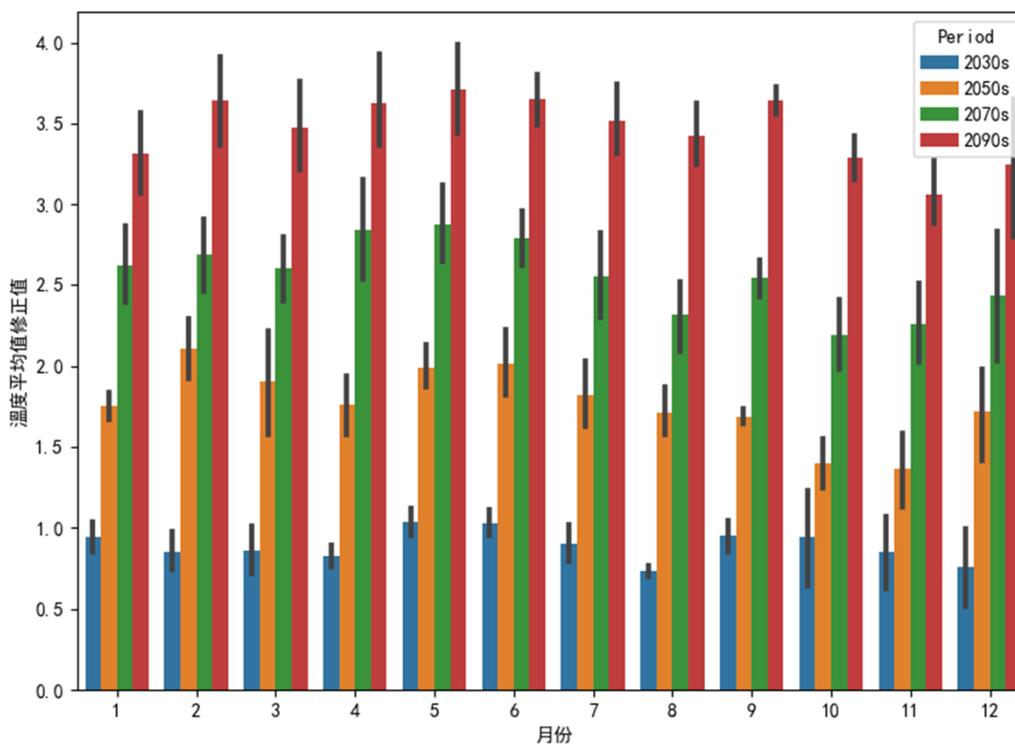


圖 A-2、各月不同未來時段的溫度平均值修正值 (RCP8.5)

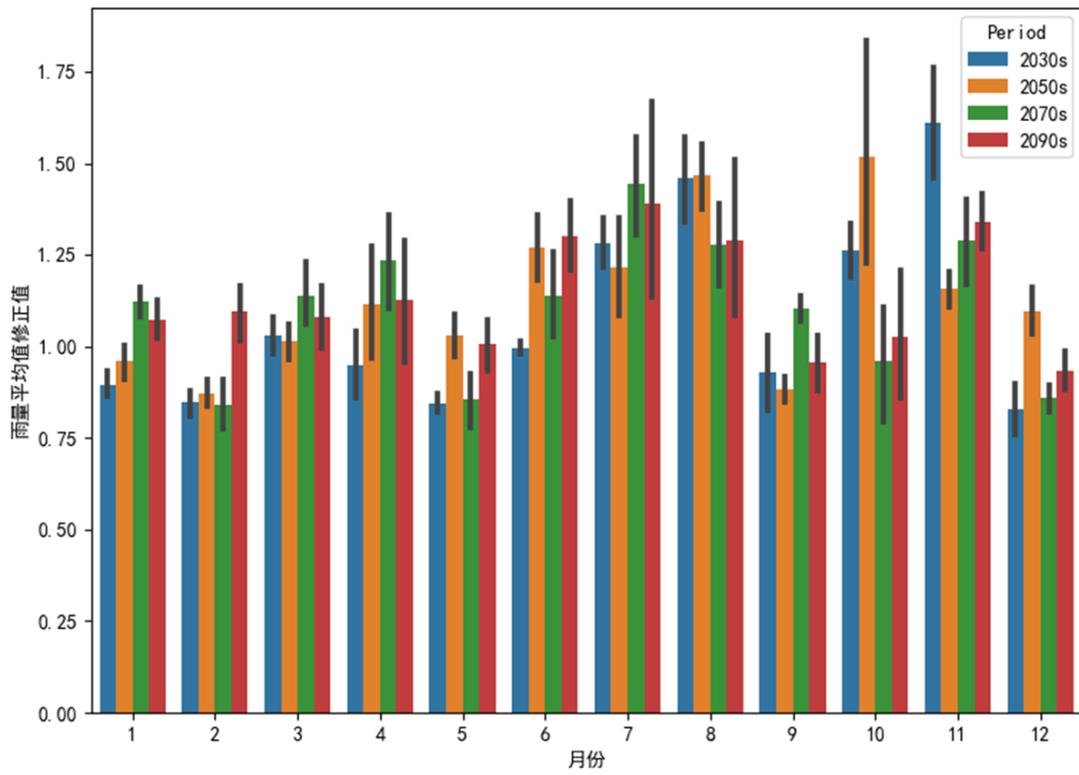
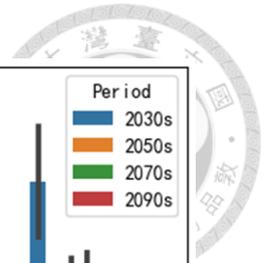


圖 A-3、各月不同未來時段的雨量平均值修正值 (RCP2.6)

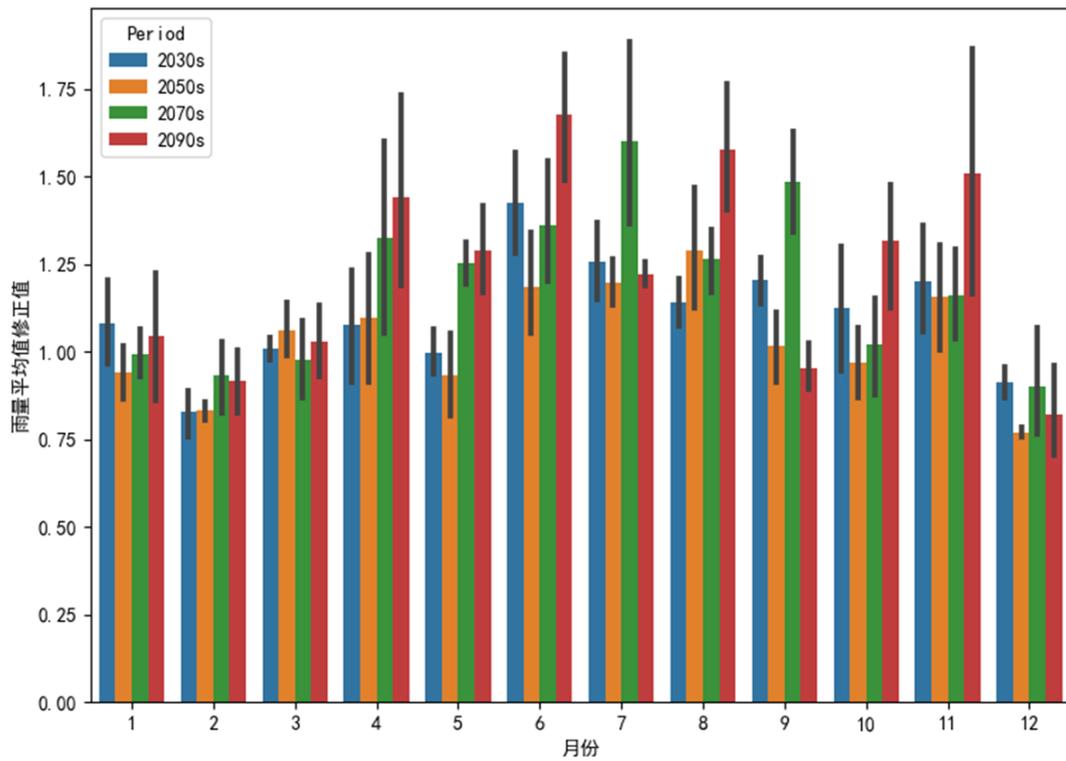
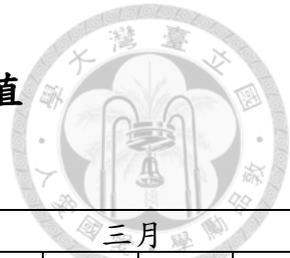


圖 A-4、各月不同未來時段的雨量平均值修正值 (RCP8.5)

附件四、未來各分區氣候情境修正值

表 A-1、RCP2.6 各分區之溫度平均值修正值



月份	一月				二月				三月			
	未來時段	2030s	2050s	2070s	2090s	2030s	2050s	2070s	2090s	2030s	2050s	2070s
C0C540	0.72	1.20	1.46	1.23	1.52	1.69	1.77	1.73	1.54	1.78	1.82	1.69
C0C590	0.72	1.20	1.46	1.23	1.54	1.71	1.78	1.74	1.57	1.81	1.85	1.71
C0C630	0.71	1.19	1.45	1.22	1.54	1.71	1.77	1.75	1.55	1.80	1.82	1.70
C0C650	0.72	1.19	1.45	1.22	1.54	1.72	1.77	1.76	1.57	1.82	1.84	1.71
C1C510	0.71	1.19	1.45	1.23	1.54	1.72	1.78	1.75	1.58	1.82	1.85	1.72
Sansia	0.72	1.22	1.47	1.22	1.55	1.72	1.78	1.76	1.55	1.80	1.81	1.69
Shimen	0.71	1.20	1.44	1.21	1.52	1.69	1.74	1.74	1.49	1.74	1.75	1.66
月份	四月				五月				六月			
	未來時段	2030s	2050s	2070s	2090s	2030s	2050s	2070s	2090s	2030s	2050s	2070s
C0C540	1.33	1.88	1.62	1.80	1.49	1.88	1.90	1.53	1.46	1.80	1.73	1.46
C0C590	1.34	1.88	1.62	1.80	1.48	1.86	1.87	1.53	1.47	1.81	1.74	1.47
C0C630	1.35	1.91	1.64	1.81	1.50	1.89	1.90	1.53	1.45	1.78	1.71	1.45
C0C650	1.35	1.91	1.64	1.82	1.49	1.88	1.89	1.53	1.44	1.78	1.70	1.45
C1C510	1.35	1.89	1.63	1.81	1.49	1.86	1.88	1.54	1.47	1.81	1.73	1.47
Sansia	1.35	1.93	1.63	1.82	1.53	1.94	1.94	1.53	1.48	1.82	1.74	1.46
Shimen	1.29	1.86	1.59	1.76	1.42	1.80	1.82	1.46	1.38	1.70	1.64	1.39
月份	七月				八月				九月			
	未來時段	2030s	2050s	2070s	2090s	2030s	2050s	2070s	2090s	2030s	2050s	2070s
C0C540	1.06	1.44	1.35	1.24	0.90	1.37	1.23	1.12	1.01	1.47	1.35	1.18
C0C590	1.06	1.44	1.35	1.25	0.88	1.35	1.22	1.11	0.99	1.45	1.34	1.18
C0C630	1.06	1.44	1.35	1.25	0.90	1.38	1.24	1.12	0.99	1.45	1.33	1.16
C0C650	1.04	1.42	1.33	1.24	0.89	1.35	1.22	1.11	0.97	1.42	1.31	1.15
C1C510	1.07	1.46	1.36	1.26	0.89	1.36	1.22	1.12	0.97	1.43	1.32	1.16
Sansia	1.07	1.46	1.36	1.24	0.91	1.39	1.24	1.12	1.04	1.50	1.37	1.19
Shimen	1.05	1.44	1.35	1.23	0.88	1.35	1.21	1.10	0.99	1.44	1.32	1.15
月份	十月				十一月				十二月			
	未來時段	2030s	2050s	2070s	2090s	2030s	2050s	2070s	2090s	2030s	2050s	2070s
C0C540	1.12	1.69	1.28	1.15	1.19	1.49	1.48	1.27	1.06	1.37	1.43	1.51
C0C590	1.09	1.65	1.25	1.14	1.16	1.46	1.46	1.25	1.06	1.37	1.44	1.51
C0C630	1.11	1.68	1.27	1.14	1.18	1.50	1.48	1.27	1.06	1.37	1.44	1.50
C0C650	1.09	1.64	1.25	1.13	1.17	1.48	1.46	1.26	1.06	1.37	1.43	1.50
C1C510	1.08	1.62	1.24	1.13	1.16	1.45	1.44	1.25	1.06	1.36	1.44	1.50
Sansia	1.18	1.79	1.33	1.19	1.22	1.56	1.53	1.29	1.08	1.39	1.45	1.52
Shimen	1.11	1.70	1.27	1.14	1.18	1.50	1.48	1.26	1.06	1.36	1.43	1.48

表 A-2、RCP8.5 各分區之溫度平均值修正值

月份	一月				二月				三月			
未來時段	2030s	2050s	2070s	2090s	2030s	2050s	2070s	2090s	2030s	2050s	2070s	2090s
C0C540	0.95	1.77	2.64	3.33	0.86	2.12	2.69	3.65	0.87	1.89	2.60	3.48
C0C590	0.94	1.77	2.62	3.32	0.87	2.12	2.69	3.64	0.87	1.90	2.61	3.48
C0C630	0.95	1.75	2.62	3.31	0.86	2.11	2.70	3.64	0.86	1.91	2.60	3.47
C0C650	0.94	1.75	2.61	3.31	0.85	2.11	2.70	3.64	0.86	1.91	2.61	3.47
C1C510	0.94	1.75	2.61	3.30	0.87	2.11	2.68	3.63	0.87	1.90	2.61	3.48
Sansia	0.96	1.75	2.63	3.32	0.85	2.12	2.69	3.65	0.86	1.90	2.59	3.47
Shimen	0.95	1.74	2.62	3.31	0.83	2.10	2.69	3.63	0.85	1.91	2.59	3.45
月份	四月				五月				六月			
未來時段	2030s	2050s	2070s	2090s	2030s	2050s	2070s	2090s	2030s	2050s	2070s	2090s
C0C540	0.83	1.77	2.84	3.64	1.05	1.99	2.87	3.72	1.04	2.02	2.80	3.66
C0C590	0.84	1.77	2.84	3.64	1.04	1.98	2.86	3.71	1.04	2.02	2.80	3.66
C0C630	0.83	1.77	2.86	3.63	1.04	2.00	2.89	3.72	1.03	2.02	2.79	3.65
C0C650	0.83	1.77	2.85	3.63	1.04	2.00	2.89	3.72	1.03	2.02	2.79	3.65
C1C510	0.83	1.76	2.84	3.63	1.03	1.98	2.87	3.71	1.04	2.01	2.80	3.66
Sansia	0.82	1.76	2.84	3.62	1.05	2.00	2.89	3.72	1.03	2.03	2.78	3.64
Shimen	0.82	1.76	2.84	3.61	1.02	1.99	2.88	3.68	1.02	2.00	2.76	3.61
月份	七月				八月				九月			
未來時段	2030s	2050s	2070s	2090s	2030s	2050s	2070s	2090s	2030s	2050s	2070s	2090s
C0C540	0.91	1.82	2.56	3.53	0.74	1.71	2.32	3.43	0.96	1.69	2.56	3.66
C0C590	0.90	1.82	2.56	3.54	0.74	1.71	2.33	3.44	0.95	1.70	2.57	3.66
C0C630	0.90	1.83	2.56	3.52	0.73	1.72	2.32	3.43	0.96	1.69	2.55	3.64
C0C650	0.91	1.83	2.56	3.52	0.74	1.72	2.32	3.43	0.96	1.69	2.56	3.64
C1C510	0.91	1.83	2.57	3.53	0.75	1.72	2.33	3.45	0.96	1.70	2.57	3.65
Sansia	0.89	1.82	2.53	3.50	0.71	1.70	2.29	3.40	0.96	1.67	2.53	3.64
Shimen	0.90	1.82	2.55	3.49	0.73	1.70	2.30	3.40	0.96	1.68	2.51	3.61
月份	十月				十一月				十二月			
未來時段	2030s	2050s	2070s	2090s	2030s	2050s	2070s	2090s	2030s	2050s	2070s	2090s
C0C540	0.95	1.39	2.20	3.29	0.85	1.37	2.27	3.06	0.76	1.73	2.44	3.26
C0C590	0.94	1.40	2.21	3.29	0.85	1.38	2.27	3.06	0.76	1.73	2.44	3.26
C0C630	0.95	1.40	2.20	3.28	0.86	1.37	2.26	3.07	0.76	1.72	2.43	3.24
C0C650	0.95	1.41	2.21	3.29	0.85	1.37	2.27	3.06	0.76	1.72	2.43	3.24
C1C510	0.94	1.41	2.22	3.29	0.85	1.38	2.28	3.07	0.75	1.72	2.44	3.25
Sansia	0.95	1.37	2.16	3.28	0.85	1.34	2.24	3.04	0.76	1.72	2.43	3.24
Shimen	0.96	1.40	2.18	3.29	0.85	1.36	2.25	3.07	0.76	1.72	2.42	3.23

表 A-3、RCP2.6 各分區之雨量平均值修正值

月份	一月				二月				三月			
未來時段	2030s	2050s	2070s	2090s	2030s	2050s	2070s	2090s	2030s	2050s	2070s	2090s
C0C540	0.90	0.96	1.13	1.08	0.85	0.87	0.85	1.09	1.03	1.02	1.14	1.08
C0C590	0.90	0.96	1.13	1.08	0.85	0.87	0.84	1.09	1.03	1.02	1.14	1.08
C0C630	0.90	0.96	1.12	1.07	0.85	0.87	0.84	1.09	1.03	1.01	1.14	1.08
C0C650	0.90	0.96	1.12	1.08	0.85	0.88	0.84	1.09	1.03	1.01	1.13	1.08
C1C510	0.89	0.96	1.14	1.08	0.84	0.87	0.84	1.09	1.03	1.02	1.14	1.08
Sansia	0.89	0.95	1.12	1.06	0.85	0.87	0.85	1.10	1.04	1.01	1.15	1.08
Shimen	0.90	0.96	1.12	1.06	0.86	0.88	0.85	1.12	1.03	1.01	1.14	1.08
月份	四月				五月				六月			
未來時段	2030s	2050s	2070s	2090s	2030s	2050s	2070s	2090s	2030s	2050s	2070s	2090s
C0C540	0.95	1.12	1.23	1.13	0.84	1.04	0.86	1.01	1.00	1.31	1.17	1.33
C0C590	0.95	1.13	1.24	1.13	0.84	1.03	0.85	1.01	1.02	1.33	1.19	1.36
C0C630	0.95	1.12	1.24	1.13	0.85	1.04	0.86	1.01	0.99	1.26	1.13	1.29
C0C650	0.95	1.11	1.24	1.13	0.84	1.03	0.85	1.01	0.99	1.27	1.13	1.31
C1C510	0.95	1.12	1.24	1.13	0.82	1.02	0.83	1.00	1.01	1.31	1.17	1.36
Sansia	0.95	1.12	1.24	1.13	0.86	1.05	0.88	1.02	0.97	1.23	1.11	1.25
Shimen	0.95	1.09	1.21	1.11	0.87	1.02	0.88	1.01	0.98	1.18	1.08	1.21
月份	七月				八月				九月			
未來時段	2030s	2050s	2070s	2090s	2030s	2050s	2070s	2090s	2030s	2050s	2070s	2090s
C0C540	1.30	1.22	1.46	1.42	1.48	1.49	1.28	1.29	0.92	0.88	1.13	0.98
C0C590	1.32	1.27	1.55	1.47	1.52	1.52	1.33	1.33	0.92	0.87	1.11	0.99
C0C630	1.26	1.17	1.36	1.34	1.42	1.43	1.24	1.25	0.93	0.89	1.10	0.95
C0C650	1.27	1.20	1.42	1.38	1.44	1.45	1.26	1.28	0.93	0.88	1.09	0.95
C1C510	1.31	1.24	1.53	1.44	1.49	1.51	1.31	1.32	0.93	0.88	1.10	0.98
Sansia	1.27	1.19	1.37	1.35	1.43	1.44	1.24	1.26	0.93	0.89	1.11	0.94
Shimen	1.25	1.22	1.40	1.35	1.45	1.44	1.28	1.30	0.94	0.88	1.09	0.93
月份	十月				十一月				十二月			
未來時段	2030s	2050s	2070s	2090s	2030s	2050s	2070s	2090s	2030s	2050s	2070s	2090s
C0C540	1.28	1.55	0.97	1.06	1.54	1.14	1.26	1.29	0.84	1.10	0.86	0.94
C0C590	1.30	1.55	0.97	1.06	1.59	1.17	1.30	1.33	0.83	1.08	0.86	0.93
C0C630	1.25	1.52	0.95	1.02	1.65	1.17	1.31	1.37	0.84	1.10	0.86	0.94
C0C650	1.25	1.49	0.94	1.01	1.66	1.17	1.32	1.38	0.83	1.10	0.86	0.93
C1C510	1.27	1.52	0.96	1.04	1.67	1.21	1.34	1.38	0.80	1.08	0.85	0.92
Sansia	1.24	1.49	0.96	1.00	1.57	1.12	1.25	1.32	0.84	1.12	0.86	0.94
Shimen	1.24	1.50	0.97	1.00	1.60	1.13	1.26	1.32	0.83	1.10	0.86	0.93

表 A-4、RCP8.5 各分區之雨量平均值修正值

月份	一月				二月				三月			
未來時段	2030s	2050s	2070s	2090s	2030s	2050s	2070s	2090s	2030s	2050s	2070s	2090s
C0C540	1.09	0.96	1.00	1.04	0.83	0.84	0.93	0.91	1.01	1.07	0.98	1.03
C0C590	1.09	0.96	1.01	1.05	0.83	0.84	0.93	0.92	1.01	1.07	0.98	1.04
C0C630	1.08	0.94	0.99	1.05	0.83	0.83	0.93	0.92	1.01	1.06	0.98	1.02
C0C650	1.08	0.93	0.99	1.05	0.83	0.83	0.93	0.92	1.01	1.06	0.98	1.02
C1C510	1.09	0.95	1.00	1.06	0.82	0.83	0.93	0.92	1.02	1.06	0.98	1.03
Sansia	1.07	0.93	0.99	1.04	0.83	0.84	0.93	0.92	1.01	1.07	0.98	1.04
Shimen	1.08	0.93	0.98	1.04	0.83	0.84	0.94	0.92	1.00	1.05	0.97	1.01
月份	四月				五月				六月			
未來時段	2030s	2050s	2070s	2090s	2030s	2050s	2070s	2090s	2030s	2050s	2070s	2090s
C0C540	1.08	1.10	1.33	1.44	1.01	0.93	1.27	1.30	1.46	1.22	1.40	1.74
C0C590	1.08	1.10	1.34	1.47	1.01	0.92	1.26	1.31	1.51	1.25	1.45	1.82
C0C630	1.08	1.10	1.33	1.44	1.00	0.93	1.26	1.29	1.41	1.18	1.35	1.66
C0C650	1.08	1.10	1.32	1.42	1.00	0.93	1.25	1.28	1.42	1.18	1.36	1.68
C1C510	1.08	1.10	1.34	1.46	1.01	0.92	1.25	1.31	1.50	1.25	1.46	1.83
Sansia	1.08	1.11	1.34	1.46	0.99	0.94	1.26	1.29	1.36	1.13	1.28	1.55
Shimen	1.05	1.08	1.29	1.39	0.98	0.95	1.23	1.26	1.31	1.10	1.23	1.47
月份	七月				八月				九月			
未來時段	2030s	2050s	2070s	2090s	2030s	2050s	2070s	2090s	2030s	2050s	2070s	2090s
C0C540	1.27	1.19	1.63	1.26	1.14	1.31	1.28	1.61	1.22	1.03	1.50	0.96
C0C590	1.30	1.23	1.71	1.28	1.16	1.34	1.30	1.67	1.20	1.03	1.51	0.96
C0C630	1.22	1.16	1.52	1.18	1.13	1.25	1.23	1.49	1.20	1.01	1.48	0.95
C0C650	1.24	1.18	1.58	1.20	1.14	1.27	1.25	1.55	1.20	1.02	1.49	0.95
C1C510	1.29	1.20	1.69	1.26	1.15	1.32	1.29	1.64	1.21	1.03	1.53	0.96
Sansia	1.24	1.18	1.52	1.19	1.13	1.25	1.24	1.52	1.20	0.99	1.45	0.95
Shimen	1.24	1.22	1.57	1.18	1.15	1.28	1.26	1.58	1.19	1.00	1.44	0.95
月份	十月				十一月				十二月			
未來時段	2030s	2050s	2070s	2090s	2030s	2050s	2070s	2090s	2030s	2050s	2070s	2090s
C0C540	1.15	0.98	1.03	1.33	1.19	1.12	1.11	1.43	0.91	0.78	0.91	0.82
C0C590	1.15	1.00	1.04	1.35	1.21	1.14	1.13	1.48	0.91	0.77	0.91	0.81
C0C630	1.11	0.95	1.01	1.31	1.21	1.19	1.19	1.55	0.92	0.76	0.90	0.83
C0C650	1.11	0.95	1.01	1.30	1.21	1.19	1.19	1.55	0.92	0.77	0.90	0.83
C1C510	1.11	0.99	1.03	1.33	1.23	1.19	1.18	1.56	0.91	0.75	0.91	0.80
Sansia	1.12	0.95	1.01	1.28	1.17	1.12	1.15	1.48	0.92	0.78	0.91	0.82
Shimen	1.12	0.95	1.01	1.31	1.17	1.16	1.16	1.51	0.91	0.77	0.89	0.83

表 B-1、RCP2.6 各分區之溫度標準差修正值

月份	一月				二月				三月			
未來時段	2030s	2050s	2070s	2090s	2030s	2050s	2070s	2090s	2030s	2050s	2070s	2090s
C0C540	0.98	0.96	0.99	0.99	1.02	1.04	1.01	1.05	1.07	1.07	1.04	1.04
C0C590	0.98	0.96	0.99	0.99	1.03	1.06	1.02	1.06	1.08	1.08	1.05	1.05
C0C630	0.97	0.96	0.98	0.98	1.01	1.04	1.00	1.05	1.06	1.07	1.04	1.04
C0C650	0.98	0.96	0.99	0.98	1.02	1.04	1.01	1.05	1.06	1.07	1.04	1.04
C1C510	0.98	0.97	0.99	0.99	1.03	1.06	1.02	1.06	1.08	1.08	1.05	1.05
Sansia	0.97	0.96	0.98	0.99	1.01	1.04	1.00	1.04	1.05	1.06	1.03	1.04
Shimen	0.97	0.95	0.98	0.98	0.99	1.02	0.99	1.03	1.03	1.03	1.01	1.02
月份	四月				五月				六月			
未來時段	2030s	2050s	2070s	2090s	2030s	2050s	2070s	2090s	2030s	2050s	2070s	2090s
C0C540	0.97	0.95	0.92	0.96	1.00	0.95	0.94	0.98	0.82	0.74	0.79	0.89
C0C590	0.98	0.95	0.92	0.96	1.00	0.94	0.94	0.98	0.84	0.76	0.80	0.90
C0C630	0.98	0.95	0.92	0.96	0.99	0.95	0.94	0.98	0.82	0.74	0.79	0.88
C0C650	0.98	0.95	0.92	0.96	0.99	0.95	0.94	0.98	0.83	0.75	0.80	0.88
C1C510	0.98	0.95	0.92	0.96	1.00	0.95	0.94	0.98	0.85	0.77	0.81	0.90
Sansia	0.97	0.95	0.93	0.96	1.00	0.95	0.95	0.98	0.82	0.75	0.79	0.89
Shimen	0.97	0.94	0.92	0.95	0.99	0.95	0.95	0.98	0.85	0.77	0.82	0.90
月份	七月				八月				九月			
未來時段	2030s	2050s	2070s	2090s	2030s	2050s	2070s	2090s	2030s	2050s	2070s	2090s
C0C540	0.86	0.82	0.86	0.97	0.96	0.92	0.93	1.00	0.97	0.88	0.95	0.93
C0C590	0.87	0.83	0.87	0.97	0.95	0.91	0.92	0.99	0.97	0.89	0.95	0.93
C0C630	0.86	0.82	0.86	0.97	0.96	0.91	0.92	1.00	0.98	0.89	0.95	0.93
C0C650	0.85	0.81	0.86	0.96	0.95	0.90	0.92	0.99	0.97	0.88	0.95	0.93
C1C510	0.88	0.83	0.87	0.97	0.95	0.91	0.92	1.00	0.98	0.89	0.96	0.93
Sansia	0.87	0.83	0.87	0.98	0.97	0.94	0.94	1.00	0.96	0.86	0.93	0.92
Shimen	0.88	0.83	0.87	0.97	0.97	0.92	0.93	1.00	0.97	0.88	0.95	0.92
月份	十月				十一月				十二月			
未來時段	2030s	2050s	2070s	2090s	2030s	2050s	2070s	2090s	2030s	2050s	2070s	2090s
C0C540	0.98	0.95	0.96	1.01	0.90	0.94	0.96	0.99	1.02	0.95	0.98	0.97
C0C590	0.98	0.95	0.96	1.01	0.90	0.93	0.95	0.98	1.02	0.95	0.98	0.97
C0C630	0.98	0.95	0.96	1.01	0.90	0.93	0.96	0.99	1.02	0.95	0.98	0.97
C0C650	0.97	0.95	0.96	1.01	0.90	0.93	0.95	0.98	1.02	0.95	0.98	0.97
C1C510	0.98	0.95	0.96	1.01	0.90	0.93	0.94	0.98	1.03	0.95	0.99	0.97
Sansia	0.97	0.95	0.96	1.01	0.92	0.95	0.97	1.00	1.03	0.96	0.98	0.98
Shimen	0.97	0.95	0.95	1.00	0.90	0.94	0.96	0.99	1.03	0.95	0.98	0.97

表 B-2、RCP8.5 各分區之溫度標準差修正值

月份	一月				二月				三月			
未來時段	2030s	2050s	2070s	2090s	2030s	2050s	2070s	2090s	2030s	2050s	2070s	2090s
C0C540	1.00	0.96	0.99	0.94	1.06	1.03	1.02	0.98	0.99	0.98	1.03	0.98
C0C590	1.00	0.96	0.99	0.94	1.06	1.03	1.03	0.99	0.99	0.98	1.04	0.99
C0C630	0.99	0.96	0.98	0.94	1.05	1.03	1.01	0.98	0.98	0.98	1.03	0.98
C0C650	0.99	0.96	0.98	0.94	1.05	1.03	1.02	0.98	0.98	0.98	1.03	0.98
C1C510	0.99	0.96	0.99	0.94	1.06	1.04	1.02	0.98	0.99	0.99	1.04	0.99
Sansia	0.99	0.96	0.98	0.93	1.05	1.03	1.01	0.98	0.97	0.98	1.02	0.98
Shimen	0.99	0.96	0.98	0.93	1.05	1.02	1.01	0.98	0.97	0.97	1.01	0.97
月份	四月				五月				六月			
未來時段	2030s	2050s	2070s	2090s	2030s	2050s	2070s	2090s	2030s	2050s	2070s	2090s
C0C540	0.98	0.98	1.00	0.96	1.01	1.01	1.00	1.05	0.98	1.00	1.02	1.03
C0C590	0.98	0.98	1.00	0.96	1.01	1.00	1.00	1.04	0.98	1.00	1.02	1.03
C0C630	0.98	0.98	0.99	0.97	1.02	1.01	1.00	1.05	0.97	0.99	1.01	1.03
C0C650	0.98	0.98	0.99	0.96	1.02	1.00	1.00	1.05	0.98	1.00	1.01	1.03
C1C510	0.98	0.98	0.99	0.96	1.01	1.00	1.00	1.04	0.98	1.01	1.02	1.03
Sansia	0.98	0.97	0.99	0.96	1.02	1.01	1.01	1.06	0.97	0.99	1.01	1.03
Shimen	0.98	0.98	0.99	0.96	1.03	1.01	1.00	1.06	0.98	0.99	1.01	1.04
月份	七月				八月				九月			
未來時段	2030s	2050s	2070s	2090s	2030s	2050s	2070s	2090s	2030s	2050s	2070s	2090s
C0C540	0.96	1.01	1.03	0.96	1.05	1.06	1.12	1.09	0.92	1.03	1.08	0.97
C0C590	0.96	1.01	1.02	0.95	1.05	1.06	1.11	1.08	0.92	1.03	1.08	0.96
C0C630	0.98	1.01	1.03	0.97	1.06	1.05	1.10	1.08	0.92	1.02	1.08	0.96
C0C650	0.97	1.01	1.02	0.97	1.05	1.05	1.10	1.08	0.93	1.02	1.08	0.96
C1C510	0.96	1.01	1.01	0.96	1.05	1.05	1.11	1.08	0.92	1.03	1.08	0.96
Sansia	0.98	1.00	1.03	0.97	1.05	1.05	1.10	1.09	0.92	1.02	1.07	0.96
Shimen	0.98	0.99	1.02	0.98	1.06	1.05	1.10	1.08	0.93	1.02	1.07	0.97
月份	十月				十一月				十二月			
未來時段	2030s	2050s	2070s	2090s	2030s	2050s	2070s	2090s	2030s	2050s	2070s	2090s
C0C540	1.01	1.01	1.01	1.02	0.97	0.94	0.93	0.90	0.99	0.96	0.98	0.89
C0C590	1.02	1.01	1.01	1.02	0.97	0.95	0.93	0.89	0.99	0.96	0.98	0.88
C0C630	1.01	1.01	1.01	1.02	0.97	0.95	0.93	0.90	0.99	0.96	0.97	0.89
C0C650	1.02	1.01	1.01	1.02	0.98	0.95	0.93	0.90	0.99	0.96	0.98	0.89
C1C510	1.02	1.01	1.01	1.03	0.97	0.95	0.93	0.90	0.99	0.96	0.98	0.88
Sansia	1.01	1.00	1.01	1.02	0.97	0.95	0.93	0.90	0.98	0.96	0.97	0.89
Shimen	1.02	1.00	1.01	1.01	0.98	0.95	0.93	0.90	0.99	0.96	0.97	0.89

表 B-3、RCP2.6 各分區之雨量標準差修正值

月份	一月				二月				三月			
未來時段	2030s	2050s	2070s	2090s	2030s	2050s	2070s	2090s	2030s	2050s	2070s	2090s
C0C540	1.11	1.04	1.12	1.28	1.05	0.90	0.85	0.98	0.96	0.99	1.10	0.99
C0C590	1.13	1.04	1.12	1.29	1.06	0.90	0.86	0.99	0.96	0.99	1.10	1.00
C0C630	1.12	1.02	1.08	1.29	1.05	0.90	0.86	0.98	0.97	0.99	1.11	1.01
C0C650	1.11	1.02	1.08	1.29	1.02	0.90	0.85	0.98	0.97	0.99	1.12	1.00
C1C510	1.11	1.03	1.12	1.27	1.05	0.89	0.86	0.98	0.97	0.99	1.11	0.99
Sansia	1.09	1.01	1.07	1.24	1.06	0.90	0.87	0.96	0.98	0.98	1.11	1.00
Shimen	1.12	1.00	1.06	1.27	1.08	0.90	0.86	1.00	0.97	0.99	1.13	1.03
月份	四月				五月				六月			
未來時段	2030s	2050s	2070s	2090s	2030s	2050s	2070s	2090s	2030s	2050s	2070s	2090s
C0C540	0.91	1.03	1.07	0.97	0.85	0.96	0.86	1.01	1.19	1.16	1.09	1.13
C0C590	0.90	1.01	1.04	0.95	0.85	0.95	0.83	1.01	1.20	1.16	1.08	1.12
C0C630	0.92	1.06	1.08	0.97	0.88	0.97	0.84	1.03	1.19	1.15	1.08	1.17
C0C650	0.94	1.08	1.10	1.00	0.88	0.96	0.83	1.02	1.18	1.14	1.07	1.16
C1C510	0.90	1.03	1.06	0.95	0.85	0.94	0.81	1.02	1.19	1.13	1.07	1.13
Sansia	0.91	1.02	1.05	0.94	0.90	0.98	0.87	1.04	1.18	1.16	1.09	1.18
Shimen	0.93	1.07	1.07	0.99	0.93	0.98	0.85	1.05	1.16	1.15	1.06	1.21
月份	七月				八月				九月			
未來時段	2030s	2050s	2070s	2090s	2030s	2050s	2070s	2090s	2030s	2050s	2070s	2090s
C0C540	1.09	1.37	1.65	1.17	1.27	1.23	1.21	1.14	1.06	1.05	1.02	1.09
C0C590	1.09	1.43	1.68	1.20	1.28	1.23	1.24	1.15	1.07	1.05	1.02	1.10
C0C630	1.05	1.29	1.60	1.14	1.29	1.22	1.19	1.18	1.06	1.07	1.02	1.06
C0C650	1.05	1.32	1.66	1.16	1.29	1.25	1.21	1.20	1.06	1.05	1.00	1.06
C1C510	1.09	1.38	1.66	1.17	1.27	1.23	1.23	1.16	1.08	1.06	1.01	1.10
Sansia	1.06	1.32	1.59	1.18	1.31	1.24	1.19	1.18	1.05	1.07	1.00	1.05
Shimen	1.07	1.41	1.77	1.27	1.33	1.29	1.26	1.23	1.05	1.04	1.01	1.04
月份	十月				十一月				十二月			
未來時段	2030s	2050s	2070s	2090s	2030s	2050s	2070s	2090s	2030s	2050s	2070s	2090s
C0C540	1.30	1.17	0.94	1.32	2.04	1.25	1.36	1.58	0.65	0.99	0.85	0.89
C0C590	1.29	1.15	0.94	1.30	2.04	1.26	1.37	1.61	0.64	0.96	0.85	0.88
C0C630	1.30	1.16	0.94	1.30	2.02	1.21	1.34	1.56	0.66	0.98	0.85	0.88
C0C650	1.28	1.15	0.91	1.29	2.04	1.22	1.34	1.58	0.67	0.98	0.85	0.90
C1C510	1.28	1.11	0.93	1.30	2.02	1.25	1.37	1.58	0.63	0.94	0.86	0.86
Sansia	1.24	1.14	0.92	1.24	2.00	1.16	1.31	1.57	0.68	1.01	0.84	0.89
Shimen	1.31	1.17	0.95	1.28	1.95	1.15	1.27	1.51	0.68	0.99	0.85	0.87

表 B-4、RCP8.5 各分區之雨量標準差修正值

月份	一月				二月				三月			
未來時段	2030s	2050s	2070s	2090s	2030s	2050s	2070s	2090s	2030s	2050s	2070s	2090s
C0C540	1.14	1.03	1.11	1.05	0.93	0.98	0.97	0.92	1.09	1.04	1.07	1.17
C0C590	1.15	1.04	1.11	1.06	0.93	1.01	0.99	0.92	1.10	1.05	1.07	1.17
C0C630	1.11	1.03	1.05	1.04	0.93	0.98	0.96	0.91	1.08	1.03	1.06	1.15
C0C650	1.11	1.02	1.05	1.04	0.91	0.96	0.96	0.91	1.08	1.04	1.06	1.17
C1C510	1.13	1.04	1.09	1.05	0.92	0.99	0.97	0.91	1.09	1.03	1.07	1.17
Sansia	1.11	1.02	1.07	1.02	0.94	0.97	0.96	0.91	1.07	1.02	1.06	1.15
Shimen	1.10	1.02	1.03	1.03	0.94	0.98	0.96	0.92	1.08	1.02	1.05	1.14
月份	四月				五月				六月			
未來時段	2030s	2050s	2070s	2090s	2030s	2050s	2070s	2090s	2030s	2050s	2070s	2090s
C0C540	1.00	1.14	1.13	1.30	1.34	0.91	1.00	1.12	1.37	1.18	1.36	1.56
C0C590	0.98	1.12	1.12	1.28	1.32	0.91	0.98	1.12	1.40	1.20	1.38	1.58
C0C630	1.03	1.14	1.13	1.29	1.36	0.93	1.00	1.14	1.37	1.18	1.37	1.60
C0C650	1.05	1.15	1.14	1.30	1.35	0.93	1.00	1.14	1.36	1.17	1.36	1.59
C1C510	1.00	1.12	1.13	1.27	1.36	0.93	0.97	1.13	1.40	1.20	1.38	1.59
Sansia	1.00	1.13	1.12	1.26	1.35	0.91	1.01	1.14	1.34	1.15	1.34	1.57
Shimen	1.02	1.12	1.14	1.29	1.32	0.95	1.05	1.19	1.34	1.14	1.34	1.61
月份	七月				八月				九月			
未來時段	2030s	2050s	2070s	2090s	2030s	2050s	2070s	2090s	2030s	2050s	2070s	2090s
C0C540	1.15	1.37	1.41	1.26	1.11	1.31	1.10	1.45	1.25	1.22	1.37	1.17
C0C590	1.14	1.42	1.44	1.25	1.13	1.30	1.12	1.46	1.23	1.24	1.36	1.18
C0C630	1.15	1.30	1.39	1.25	1.11	1.35	1.11	1.45	1.23	1.20	1.40	1.15
C0C650	1.15	1.33	1.41	1.27	1.11	1.35	1.12	1.48	1.23	1.21	1.40	1.14
C1C510	1.16	1.37	1.44	1.24	1.12	1.32	1.12	1.44	1.21	1.24	1.37	1.18
Sansia	1.17	1.33	1.40	1.30	1.11	1.34	1.10	1.47	1.25	1.18	1.41	1.14
Shimen	1.19	1.43	1.56	1.39	1.14	1.36	1.14	1.56	1.26	1.17	1.45	1.12
月份	十月				十一月				十二月			
未來時段	2030s	2050s	2070s	2090s	2030s	2050s	2070s	2090s	2030s	2050s	2070s	2090s
C0C540	1.20	1.12	1.31	1.23	1.32	1.18	1.63	1.77	0.99	1.00	1.02	0.75
C0C590	1.19	1.14	1.30	1.23	1.32	1.18	1.60	1.78	0.99	0.99	1.02	0.76
C0C630	1.17	1.08	1.26	1.24	1.26	1.17	1.65	1.66	0.97	0.99	1.00	0.77
C0C650	1.17	1.07	1.25	1.23	1.28	1.19	1.65	1.69	0.98	0.98	0.99	0.78
C1C510	1.13	1.15	1.29	1.23	1.28	1.17	1.58	1.73	0.99	0.99	1.01	0.75
Sansia	1.19	1.02	1.23	1.18	1.21	1.13	1.70	1.64	0.97	1.00	1.02	0.78
Shimen	1.19	1.06	1.26	1.23	1.16	1.15	1.66	1.57	0.95	0.97	0.99	0.79