

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

以遊戲模擬方法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

Investigating the Feasibility of Water Market in Water
Reallocation during Drought Periods by Simulation Gaming:
A Case Study of Taoyuan, Taiwan

王尊麟

Zun-Lin Wang


指導教授：童慶斌 博士

Advisor: Ching-Pin Tung, Ph.D.

中華民國 108 年 1 月

January 2019

謝誌



我想，沒有人有義務必須協助，也因此特別感謝一路走來幫忙的人。首先感謝指導教授童老師願意讓我研究探討水市場議題，並給予我諸多建議與方向，培訓我成為一位能獨立思考的研究生。感謝研究室黃蓉學姊不厭其煩地為我解答疑難雜症；感謝鍾博學長在 AGU 前夕的支援，讓我能順利前往參加會議；感謝宗毅開啟我的 Python 撰寫與學習之路；感謝沛芄學姊在論文初稿審潤上的幫忙。在資料蒐集上，感謝石門水庫管理中心林羿丞先生以及桃園農田水利會盧先生的協助。感謝郭錫瑠先生文教基金會提供獎學金，減輕我生活開銷的壓力。

非常謝謝家人一路走來的支持與陪伴，不成材的尊麟終於要畢業了！謝謝安仔在我困頓之際的打氣加油，讓我能繼續堅持下去走到今日。在此悼念逝去的阿弟，謝謝你的陪伴，也對不起最後那段日子我過於忙碌了。最後謝謝這三年來沒有輕易放棄的自己，熬過無數個沮喪挫敗的夜晚，辛苦了！來首《三個傻瓜》的《Give me some sunshine》，繼續前進吧！



摘要

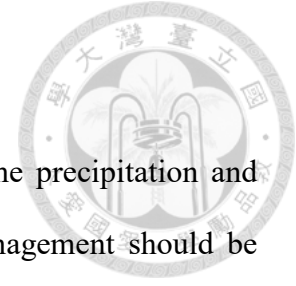
氣候變遷可能使得台灣面臨乾季極端乾旱風險增加，更具彈性與調適能力的水資源管理方式成為政策決策者必須思考的關鍵議題。現行制度在乾旱時期水資源調度上，乃透過政府協調農業停灌休耕，農民對於耕作與否並無決定權，「農水工用」情形在水資源調配上存在公平性爭議。在此背景下，水市場或可成為水資源再分配的調適選項，政府無需強制介入，透過市場交易機制消弭灌溉用水移用爭議，同時提高水資源運用效率，反映不同時間點水的價值差異。

遊戲模擬(simulation gaming)方法有助於政策決策者評估一項假設性政策的可行性，並了解利害關係人間的互動關係。本研究以桃園地區為例，分別建構石門水庫供水系統動力模式與水稻田水平衡模式，將兩者整合於一套水市場模擬遊戲(water market simulation game, WMSG)中，使遊戲模擬結果能貼近真實水資源分配情況，並招募受試者參與遊戲交易決策。

研究結果顯示，石門水庫供水系統動力模式經合理性驗證，能應用於模擬桃園地區水資源分配情況。應用水稻田水平衡模式推估而得之修正後農業計畫配水量，在總量上與現行實務之推估結果接近，但更能反映稻作不同生育階段之灌溉需水量差異，依旬別不同而有峰谷波動。遊戲模擬結果顯示，水市場機制讓工業方面臨乾旱缺水時必須支付農業方更高的購水費用，農業方保有耕種與否之決定權。水庫有效蓄水量相比無交易情境而言有所增加，唯其增額不多。主要影響水庫空庫與否之因子在於農業計畫配水量之多寡，因此如何訂定合適的農業計畫配水量成為政策決策者必須優先思考的問題。遊戲模擬過程中，除了資訊的公開性外，資訊的「易解讀性」對於玩家決策判斷影響甚大。本研究為探討水市場機制之可行性提出實際模擬方法及工具，但仍存在許多改善空間，後續研究建議進一步探討不同情境下玩家交易策略及水資源再分配結果，強化遊戲模擬與政策實務應用之連結。

關鍵詞：水市場、遊戲模擬、系統動力模式、水資源再分配

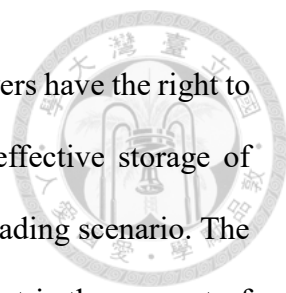
Abstract



Under the impact of climate change, the frequency of extreme precipitation and drought events has been increasing. Flexible water resources management should be considered by policy makers to increase adaptive capacity. In Taiwan, the government usually guides agricultural fallows to transfer water to meet the needs of domestic and industrial water demands during droughts. However, this situation causes that the cultivation rights of farmers are not guaranteed even though the priority of agricultural water demand is higher than that of industry by law.

Water market mechanism may be potential to solve this fairness dispute of water reallocation. To assess the feasibility of water market as an adaptation method of water reallocation, simulation gaming is an appropriate approach. It can help policy makers assess a hypothetical policy scenario and figure out the relationship and interaction between stakeholders. In this study, Taoyuan region is chosen as the study area and a water market simulation game (WMSG) is developed. WMSG integrates water supply system dynamics model and paddy field water balance model to reflect the water resource transmission and the hydrological mechanisms of the real world. The subjects are invited to play the game as an agricultural or industrial stakeholder and carry on the round-designed water trading.

Results show that Shimen Reservoir water supply system dynamics model can be applied to estimate the variation of reservoir water level under different hydrological scenarios. The rational agricultural planned allocation is calculated via paddy field water balance model. Total amount of the modified agricultural planned allocation is close to the practical method but more reasonably present the characteristics of irrigation water demand at different growing stages. The settlement of WMSG indicates that industrial players are willing to pay more costs on water purchase to prevent severe loss of



production line shutdown caused by water shortage. Agricultural players have the right to decide whether to sell water or to keep farming. The amount of effective storage of Shimen reservoir has slightly increased when compared to the non-trading scenario. The key factor that determines whether the reservoir will be empty or not is the amount of agricultural planned allocation. The author argues that how to formulate a rational agricultural planned allocation is the most important issue for policy makers while considering water reallocation adaptation in Taiwan. Besides transparency and accessibility, interpretability of market information affects player's decision-making significantly. This study provides practical application tools and models to assess the feasibility of water market mechanism despite still having room to improve. Further research is needed. To enhance the link between simulation game and policy applications, more games should be conducted to discuss the transaction strategies of players and the benefits of water reallocation under different simulation scenarios.

Keywords: water market, simulation gaming, system dynamic model, water reallocation

目錄



謝誌.....	I
摘要.....	II
Abstract.....	III
目錄.....	V
圖目錄.....	VII
表目錄.....	IX
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 乾旱.....	5
2.2 水資源再分配.....	6
2.3 水市場應用現況.....	7
2.4 遊戲模擬模式設計.....	10
2.5 研究區域介紹.....	11
2.5.1 行政區域.....	11
2.5.2 地形與氣候.....	12
2.5.3 河川.....	12
2.5.4 水利設施.....	13
2.5.5 農田水利會.....	18
2.5.6 水資源利用現況與未來推估.....	19
第三章、研究方法.....	21
3.1 水庫供水系統動力模式.....	21
3.1.1 模式架構概述.....	22
3.1.2 水源供給與損失.....	23
3.1.3 生態基流量.....	24
3.1.4 設施限制與參數.....	24
3.1.5 Vensim 建模.....	27

3.2 水稻田水平衡模式	31
3.2.1 架構說明	32
3.2.2 土壤含水特性	33
3.2.3 滲漏量(percolation, P)	37
3.2.4 田間蒸發散量(paddy field evapotranspiration, ET)	39
3.2.5 田間有效降雨量(paddy field effective rainfall, ER).....	43
3.2.6 灌溉需水量(irrigation water requirement, IWR)	44
3.2.7 實際灌溉用水量(actual irrigation volume, IR).....	45
3.2.8 入滲量(infiltration, Inf)	46
3.2.9 田間湛水面水平衡	47
3.2.10 土壤含水量水平衡	48
第四章、水市場模擬遊戲設計	49
4.1 情境設定	49
4.1.1 乾旱事件選擇	50
4.1.2 水源相關設定	51
4.1.3 農業相關設定	52
4.1.4 工業相關設定	57
4.2 交易機制與規則	60
4.2.1 整體說明	60
4.2.2 農業方	61
4.2.3 工業方	62
4.3 遊戲程式設計	63
第五章、研究結果與討論	67
5.1 供水系統動力模式合理性驗證	67
5.2 修正農業計畫配水量	69
5.3 遊戲結果	74
5.4 研究討論	80
第六章、結論與建議	83
6.1 結論	83
6.2 建議	85
參考文獻	87

圖目錄



圖 2-1、WMRA 框架	9
圖 2-2、遊戲模擬架構	10
圖 2-3、桃園市行政區域劃分	11
圖 2-4、桃園月平均雨量	12
圖 2-5、石門水庫運用規線（水位）	13
圖 2-6、石門水庫運用規線（有效蓄水量）	14
圖 2-7、石門水庫下游衛星空照圖	16
圖 3-1、研究架構圖	21
圖 3-2、桃園地區供水系統架構簡圖	22
圖 3-3、石門水庫系統動力模式-System Model View	29
圖 3-4、石門水庫系統動力模式-Allocation Rule View	30
圖 3-5、石門水庫系統動力模式-WPP Allocation Proportion View	30
圖 3-6、石門水庫系統動力模式-Transfer Ratio View	31
圖 3-7、水稻田水平衡示意圖	32
圖 3-8、水稻水分逆境係數圖	37
圖 3-9、桃園地區月平均蒸發散量 Penman-Hamon 比較	41
圖 4-1、WMSG 架構圖	49
圖 4-2、大規模停灌休耕事件	50
圖 4-3、遊戲回合流程說明	60
圖 4-4、回合結算後端運算流程	61
圖 4-5、遊戲使用者介面範例	65
圖 4-6、訂單分析助手之分析結果範例（工業方）	66
圖 5-1、供水系統動力模式合理性驗證(2014)	67
圖 5-2、供水系統動力模式合理性驗證(2015)	68

圖 5-3、供水系統動力模式合理性驗證(2016)	69
圖 5-4、農業各分組修正計畫配水量	71
圖 5-5、農田水利會計畫配水量比較	73
圖 5-6、農業計畫配水量比較	73
圖 5-7、遊戲模擬結果—水庫水位變化	78
圖 5-8、水市場模擬遊戲-第一次舉辦	79
圖 5-9、水市場模擬遊戲-第二次舉辦	80



表目錄



表 2-1、桃園地區各目標年用水需求資料.....	20
表 3-1、石門水庫各月份日蒸發量.....	23
表 3-2、水田土壤特性表.....	33
表 3-3、桃園地區水田土壤特性表-1.....	34
表 3-4、桃園地區水田土壤特性表-2.....	34
表 3-5、桃園地區水田滲漏率.....	39
表 4-1、水稻栽培彙整.....	54
表 4-2、農業方交易單位資料.....	55
表 4-3、稻作生產成本.....	56
表 4-4、生育天數-稻作生產成本.....	57
表 4-5、工業方各業別用水與經濟參數.....	58
表 4-6、工業分組用水與經濟參數.....	59
表 5-1、農業方交易單位資料（調整後）.....	70
表 5-2、農業修正計畫配水量.....	72
表 5-3、工業分組用水與經濟參數（舉辦時採用）.....	74
表 5-4、農業方遊戲結算表.....	77
表 5-5、工業方遊戲結算表.....	78

第一章、緒論



1.1 研究動機

近年來受到氣候變遷的影響，極端降雨和乾旱事件發生的頻率增加，根據臺灣氣候變遷推估與資訊平台建置計畫(TCCIP) 出版之《臺灣氣候變遷科學報告 2017-物理現象與機制》中所述，雖然台灣地區的年平均降雨量在氣候變遷的影響下並沒有明顯的增減趨勢，但卻有「濕季更濕、乾季更乾」的特徵，且 1990 年之後乾季的極端乾期發生頻率明顯地增多。這意味著決策者需準備更有彈性的水資源管理調度機制來面臨降水時間尺度上分布極端化的問題。

在水源調度方面，過去面臨嚴重乾旱缺水時，政府往往採取農業停灌休耕的方式，以便將水源挪用至民生與工業用水。然而此作法卻有違《水利法第 18 條》規定之農業用水順位優先於工業用水，政府雖提供農民相關補助與賠償，但實際上變相剝奪了農民自主決定是否耕種的工作權益，此舉並不符合水源分配的公平性與社會正義，亦加深農業與工業之間產業發展的對立。區域未來的人口成長與工業發展將與用水需求密切相關，人口正成長與工業區的核定開發均提高區域缺水風險。在務農人口老化且農業經濟價值不敵工業的情況下，可預期在乾旱時期，農民用水權益將更容易被犧牲。

現行台灣地區自來水事業乃政府獨占事業，由台北自來水事業處和台灣自來水股份有限公司掌理，由於非民營的緣故，兩事業在水價制定與水資源分配上動輒得咎。根據 2014 年國際水協會(IWA)每人每年取水量統計報告，台灣在 33 個國家（或地區）中，每人每年取水量排名第三，達 249.96 m³/capita/year。此外，IWA 2015 年統計報告「160 座城市、消耗 200 立方公尺的水所需支付之費用」排名中，台北排名第 151 名，高雄排名第 146 名。對照周國鼎《2012 國際水價現況解析》中所整理的統計資料，於 2011 年、44 個國家中，台灣平均水價排名第 40 名，以「水費負擔率=200 度之自來水費用÷人均 GDP」計算而得的水費負擔率，台灣則



排名第 44 名敬陪末座。由上述結果可知，台灣用水需求大，但水價卻相當低廉。便宜的水價導致人民和企業節水誘因不足，在面臨乾旱時，自主調適能力低，使得缺水風險增加。

進一步檢視現行水權制度可以發現，2015 年全國一般水權登記引用水量（地面水及地下水）約為 858.51 億立方公尺，扣除水力發電水權登記量後，約為 296.5 億立方公尺，對比該年實際用水量 165.46 億立方公尺，顯示出政府在水權分配上存在過度配發的問題。在農業水權上，過度配發的問題最為嚴重，水權登記量為 211.2 億立方公尺，實際用量僅 117.34 億立方公尺，但礙於複雜的利害關係和早年優先申請的權利保障，配發出去的水權在實務上不易收回。

影響水資源價值的因素，除了水量(quantity)多寡之外，還包括水質(quality)、可靠度(reliability)、時間點(timing)和地點(location)(Wheeler et. al., 2017)。根據《The Dublin Statement on Water and Sustainable Development》第四項所述：水在所有相互競爭的用途中具有經濟價值，應當被視為經濟商品(economic good)。在確保人民能以合理價格獲得基本生存飲水及衛生設備的前提下，將水資源作為經濟商品來管理，是達成有效使用與公平使用的重要途徑。而水市場的存在賦予水資源交易更大的彈性，基於不同的時間點、地點、水量等等因素，水資源對於不同用戶有不同的價值高低，特別是在乾旱時期，水資源再分配(water reallocation)之效益與公平性成為重要關鍵議題。現行制度由政府強制介入乾旱時期水資源調配，農業用水轉移工業使用備受爭議。倘若改以運行水市場交易機制，讓市場機制決定乾旱時期稀少的水資源該如何分配，或能使水資源再分配制度更具彈性、效益與公平性。

《水利法》用水優先順位和水權制度仍有檢視與修正的討論空間，若先撤除現行法規與制度上的限制，相較於其他學者所建議的「調整合理水價」方法來「以價制量」，筆者好奇是否能透過引入水市場交易機制的方式，作為未來面對極端乾旱時，一項兼顧公平性與合理性的彈性水資源管理方案，還給農民停灌休耕決定權，同時增加水資源利用效率。



1.2 研究目的

有鑑於氣候變遷在未來將造成乾旱風險的提高，彈性的水資源管理方案有助於增加對乾旱的調適能力，故本研究假設在法規與水權制度完善的情況下，參考澳洲水市場相關案例研究，嘗試引入水市場交易機制來增加乾旱時期的用水彈性，藉由市場機制提高水資源運用效率，讓不同時間點的水的價值得以表現在自由交易價格上，同時使農民能透過水資源買賣，重新掌握停灌休耕與否的決定權。在供水地區選擇方面，選擇桃園地區作為模擬案例，理由為該區域在未來二三十年間因工業區發展及桃園航空城區域計畫，推估有工業需水量正成長、總自來水需水量正成長之情境。該地區農業用水水源主要由石門水庫透過桃園大圳、石門大圳供應，並分別由桃園農田水利會和石門農田水利會管理，在既有設施上適合分區管理各個灌渠引水，且灌溉區域內超過 95%的面積種植稻米，適合假設農業方全為稻農以便簡化模擬模式。透過建立石門水庫供水系統動力模式以及水稻田水平衡模式，讓遊戲模擬模式在運作上能更貼近真實水資源分配情況。以水市場模擬遊戲為工具，分析農業方與工業方玩家在乾旱情境下之交易策略與收益，以及水資源再分配之結果，期望提供未來政策制定與乾旱調適策略參考，並啟發更多國內對於水市場交易制度之研究。

1.3 論文架構

本研究以桃園地區為例，透過建立遊戲模擬程式，招募玩家參與決策，探討水市場交易機制作為乾旱時期解決水資源再分配問題的可行性。全文共分為六個章節，本章介紹研究動機、目的及整體論文架構；第二章為相關文獻回顧，並介紹研究區域之人文地理環境、供水系統設施、水資源利用現況與未來推估等資訊，以利讀者了解接續之研究方法與模式設計；第三章為研究方法，包含石門水庫供水系統動力模式設計與水稻田水平衡模式架構，作為最終遊戲模擬時的背景運算程式；第四章為水市場模擬遊戲設計，介紹水市場模擬遊戲的情境設定、遊戲規則及執行方

式；第五章為結果與討論，說明石門水庫供水系統動力模式之合理性驗證，應用水稻田水平衡模式計算修正農業計畫配水量，以及招募受試者參與遊戲模擬之成果，並分主題討論之；第六章為結論與建議，總結本論文之研究成果，並提出後續研究之改善建議與發展。

第二章、文獻回顧

本章首先回顧乾旱定義，界定本研究欲探討之議題為乾旱情境下用水資源如何再分配，闡述水資源管理之重要性，並以水市場機制作為可能的解決方案，回顧水市場相關研究，嘗試建立一套遊戲模擬模式來評估桃園地區引入水市場交易的可行性。最後一節介紹研究區域之人文地理環境、供水系統設施、水資源利用現況與未來推估等資訊，作為讀者閱讀本研究後續模式設計內容的背景知識。

2.1 乾旱

乾旱是一種反覆出現的現象，在人類文明發展的歷史上帶來困擾，影響自然棲地、生態系統以及許多經濟與社會部門，影響層面從文明、農業、交通的基礎，到都市水源供給與現代化複雜產業(modern complex industries)等(Heim, 2002)。Mishra 與 Singh 於 2010 年整理乾旱概念相關文獻回顧，早於 1965 年，Palmer 便指出要找到一個完完全全適合用來定義乾旱的方式是很困難的，因為不同領域對乾旱的意義在認知上有所差異(Palmer, 1965)。1967 年 Subrahmanyam 提出六種乾旱類型(types)，包含氣象型(meteorological)、氣候型(climatological)、大氣型(atmospheric)、農業型(agricultural)、水文型(hydrologic)及水資源管理型(water-management)。此外，部分學者亦將經濟(economic)或社會經濟(socio-economic)因子納入定義乾旱的一環。雖然各乾旱類型在概念上容易劃分，但分界卻是模糊未定的。為了方便討論數以百計、不同的乾旱定義，Wilhite 與 Glantz 於 1985 年將各種乾旱定義劃分成四大類型，分別為氣象型(meteorological)、農業型(agricultural)、水文型(hydrologic)及社會經濟型(socio-economic)，此分類方式後來為美國氣象學會採用。

國內對於乾旱的定義，參考水利署 2009 年《旱災潛勢定義及其分析方法之建立》報告書中，定義乾旱為「長時期降雨量不足所造成之自然現象」，並定義旱災為「旱象持續惡化，無法有效控制，造成的災害」。本研究依乾旱類型分類，應屬「社會經濟型乾旱」，因桃園地區水資源主要由石門水庫供給發配，而水庫具蓄存



功能，能使氣象型、農業型、水文型乾旱與實際造成社會、經濟財產損失的時間間隔拉長。現行政策制度下，乾旱期間農民執行停灌休耕並非完全無水可用所致，而是行政調配農業用水轉移他用的結果。

2.2 水資源再分配

在氣候變遷的影響下，1990 年之後，台灣乾季的極端乾期發生頻率明顯地增多(TCCIP, 2017)。經濟與人口成長致使水資源缺乏，被視為對人類社會的一項重要威脅，並且限制了永續發展(UN-Water, 2008)。社會經濟情境的改變更使得氣候變遷下水資源管理受到更大的挑戰，因此在同時考慮到河流流域之環境面、技術面、經濟面、體制面和文化面特性下，必須致力於理解和管理如何從現行制度過渡到一個更具調適性的管理制度(Pahl-Wostl, 2007)。

水資源再分配(water reallocation)乃水資源供需管理組合中非常重要的部分，並已被證明可以提高水資源系統的成本效益、調適能力及可靠度(Kasprzyk et al., 2009; Zhu et al., 2014; Marston and Cai, 2016)，其方式包括：行政上再分配(administrative reallocation)、基於市場再分配(market-based reallocation)、集體協商(collective negotiation)、複合機制組合(combinations of mechanisms)，或採取非法手段轉移(illegal transfers) (Meinzen-Dick and Ringler, 2008)。台灣現況主要以行政上再分配與集體協商為主，由政府主導召開抗旱會議，視水庫水情推估結果協調農田水利會執行停灌休耕，再提供農民補助金。

行政上再分配之賠償金通常發生於權益收侵害對象能被明確界定，且其能對於政策決策者施加政治壓力(Molle and Berkoff, 2006)，然而賠償金額之訂定，若僅依耕作成本與收益進行評估的話，將忽略水田之生態功能與民眾遊憩體驗等額外價值(陳凱俐等，2006；蔡昇甫，2004；蔡明華 1994)。此外，強制停灌休耕使得農民喪失如何運用水資源之決定權，耕種權益不受保障。乾旱時期農業用水轉調工業使用的情況，更與《水利法第 18 條》規定農業用水優先順位優先於工業用水相違背，造成農民相對剝奪感，賠償金卻由全民買單，不合乎使用者付費原則。如

2015 年政府宣布部分地區一期稻作停灌休耕，便招致台灣農村陣線率桃園、新竹農民至行政院抗議陳情，要求政府還給農民水源與耕作權。



2.3 水市場應用現況

欲解決現行制度下於乾旱時期農業與工業用水調度的爭議，基於市場機制之水資源再分配(market-based water reallocation)或為另一可行方案。基於過去以來水市場運行的經驗，水市場機制具有作為氣候變遷調適策略的潛力(Kiem, 2013)，即便過去學者們對於水資源私有化(water privatization)有過諸多爭論(Harvey, 2003；Barlow and Clarke, 2002；Bakker, 2007)。對於如何建立好的水市場交易制度，Young(2014)提出水權交易制度六項設計原則(Unbundle, Certainty, Hydrological Integrity, Facilitate Trading, Efficient Investment, and Robustness)，認為水市場之建立，針對不同的標的應使用個別分開的方法工具(instrument)，當一項方法工具被用於一項標的時，則不該再使該項方法工具被用於追求其他標的。依據水資源如何被儲存及其流向分布，來決定所有的水權(entitlement)及水資源分配量(allocation)，使其合乎該地既有之水文條件，並盡可能地降低水權或水資源分配量之交易成本。關乎一水權或水資源分配量的所有風險應當全然分配於一實體(entity)，例如一用水戶應當全權負起管理供水風險的責任，如此一來，他的成功與否將由其是否妥善管理該風險來決定。最後，確保這些方法工具及行政安排(administrative arrangements)是足夠穩健(robust)、能經得起時間考驗的。

Grafton 等人(2016)認為水市場與社會、經濟、環境目標是可以兼容並進的，但需要有適當的財產權(property right)、水文資訊(hydrological information)、市場規則(market rules)與設計(design)。其研究提出三項基本條件為：

- (1) 詳細瞭解水文條件與總用水量限制，且此限制是被有效地監管與執行的。
- (2) 必要的話，限制跨地點和用途之交易或交易水量比率，以確保當水資源因交易而再分配後，不會侵犯關鍵環境目標(key environmental objectives)。
- (3) 透過許可協議清楚定義使用者責任與水的用途，以達有效監管。



以澳洲 Murray-Darling Basin (MDB)水市場運作經驗為例，2008 至 2009 年遭遇全面性乾旱時，平均交易水價每百萬公升超過澳幣 400 元（約每立方公尺 8.8 元台幣）；而在 2010 至 2011 年水量相對充沛時，平均交易水價每百萬公升下降至澳幣 20 元（約每立方公尺 0.44 元台幣），充分反映不同時空背景下的水資源價值差異(Grafton and Horne, 2014)。MDB 水市場制度對於提供更好的環境結果有所助益，讓灌溉需求戶具備對應氣候變遷影響的調適能力，同時增加農業的總增加值(gross value added)，在監督管理下可滿足各項社會目標，檢討過去經驗使現行制度更臻至完備(Grafton et al., 2016)。

MDB 水市場機制雖成功，但不代表該制度應用於其他地區能得到相同成果與收益。社會、經濟、環境、制度等背景條件將影響水市場運行的可行性，Wheeler 等人(2017)提出一套水市場準備評估框架(water market readiness assessment framework, WMRA framework)，並以美國(Nevada's Diamond Valley)、西班牙(Guadalquivir River Basin)、澳洲(Tasmania Island)案例作為框架應用示範。WMRA 框架包含三項主要步驟：

步驟一：評估水文環境條件、現有制度與計畫、財產權配屬等地區背景情境。

步驟二：市場價值評估，包括發展與實施。

步驟三：監控並持續回顧與評估。

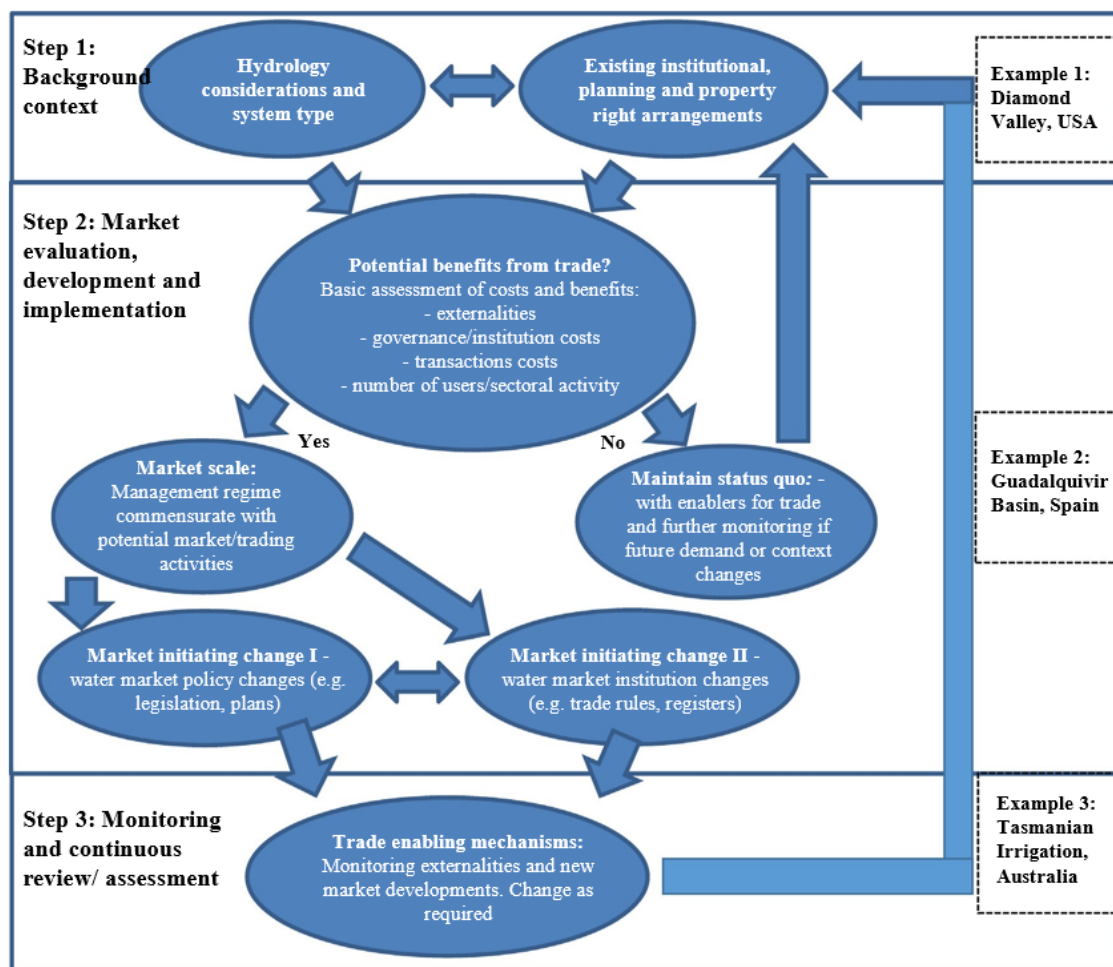


圖 2-1、WMRA 框架(Wheeler et al., 2017)

由於台灣現行制度規定水資源為國家所有，由政府統籌分配，並不存在水權自由交易機制，因此國內對於水市場交易相關研究相對較少。若以 WMRA 框架評估，應屬於第一步背景資料調查與評估的階段。闕雅文(2002)以高雄地區作個案研究，從經濟學角度探討水銀行作為仲介機構運行水資源交易之各項情境分析。其研究結果認為，基於市場的水資源再分配，適合用於水資源供給短缺時產業間用水再調配。運行方式乃透過水銀行統一配置地區水資源，在不涉及水權登記量變更的情況下，提供各用水事業單位短期水量交易。本研究則選擇桃園地區，同樣探討農業與工業間面臨乾旱時水資源交易情形，以石門水庫操作計畫配水量之交易轉移，透過遊戲模擬各利害關係人於市場機制下的決策結果。



2.4 遊戲模擬模式設計

欲探討桃園地區運行水市場之可行性，必須先對該地區水文條件、供水系統設施、各事業單位之用水需求等有所了解。系統動力學(system dynamics)為了解水資源系統結構提供實用的框架，以集成方式呈現各單元間的互動關係與回饋機制(Gohari et al., 2013)，建立系統動力模式的第一步，乃決定整個系統架構、正負回饋關係、組成元件間的傳遞機制(Sterman, 2000)。Vensim 為一套由 Ventana Systems 公司開發的模擬工具，提供圖形化建模介面，可用於系統動力模式模擬，被廣泛應用於水資源管理研究(Stave, 2003；Van Rooijen et al., 2005；Xi and Poh, 2013；Niazi et al., 2014)。

在具備供水系統動力模式的基礎下，透過遊戲模擬(simulation gaming)方法能探討假設情境下水市場運行成果。當一項政策涉及複雜的物理機制與社會政治因素時，透過遊戲模擬方法有助於政策決策者評估該項政策的可行性以及了解利害關係人間的互動關係(Mayer, 2009)。對於遊戲參與者而言，透過其他玩家互動、決策的過程，以及遊戲模擬結果，有助於其認識複雜系統之運作(Barreteau et al., 2007)。遊戲模擬程式的架構，通常包含玩家、玩家決策、情境設定、系統模式、遊戲表現指標、遊戲結果結算等部分，互動關係可以下圖 2-2 呈現。

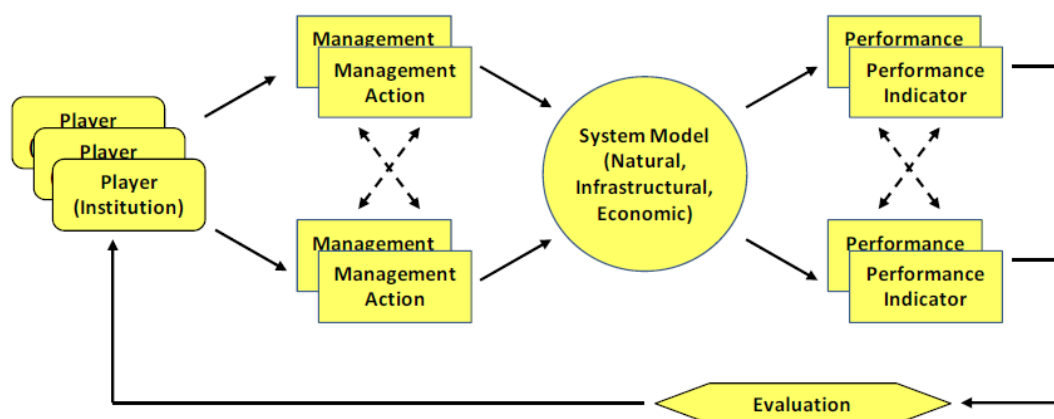


圖 2-2、遊戲模擬架構(Rusca et al., 2012)

Wang 和 Davies(2015)透過建立遊戲模擬程式的方式，讓參與者扮演政策決定者的角色，探討乾旱時期，玩家們所採取之調適策略為何，以及各種決策組合對於

民生、灌溉、工業、環境用水的影響。本研究嘗試將遊戲模擬理論應用於水市場可行性分析，建構一套水市場模擬遊戲(water market simulation game, WMSG)。



2.5 研究區域介紹

由於本研究以桃園地區作為遊戲模擬水市場交易機制之背景，因此於本節介紹當地人文、環境、設施等資訊，以利讀者理解後續研究中模式設計之考量。

2.5.1 行政區域

桃園市位於台灣西北部，是台灣六個直轄市之一，面積約 1,221 平方公里，人口約 222 萬人（2019 年統計資料），市內共分為 13 個區，包括：蘆竹區、大園區、觀音區、新屋區、龜山區、桃園區、中壢區、楊梅區、八德區、平鎮區、龍潭區、大溪區、復興區。在供水方面又可分為北桃園和南桃園，北桃園為桃園區、蘆竹區、龜山區及一部份的八德區，主要由大湳淨水廠供應，板新淨水廠支援供水缺口；南桃園則包括八德區、中壢區、平鎮區、大園區、大溪區、龍潭區、楊梅區、觀音區、新屋區及復興區，主要由龍潭、平鎮、石門三座淨水場供應。

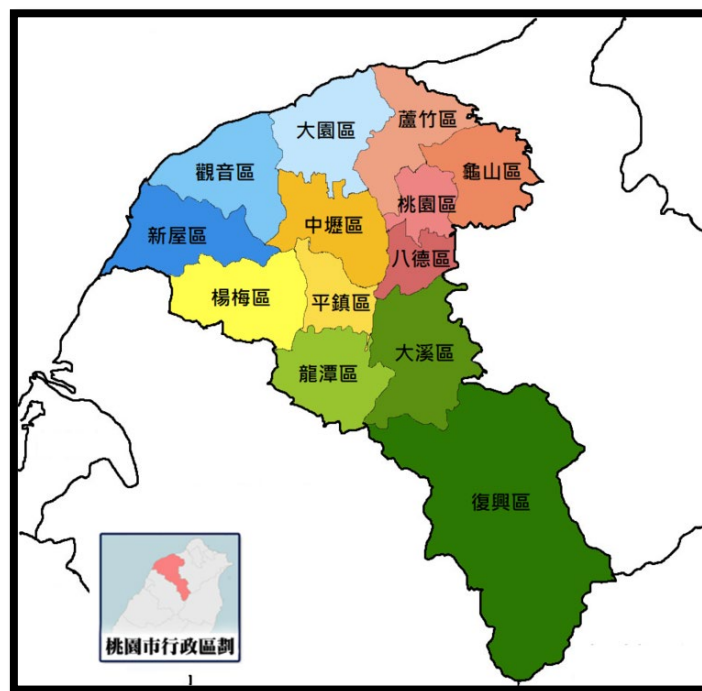


圖 2-3、桃園市行政區域劃分（圖片來源：Wikimedia Commons）



2.5.2 地形與氣候

該市地形呈現西北向東南之狹長形，區內河流大致與地形走向平行，坡陡流急且獨流入海，使得雨水儲留時間短，可用水資源有限。西北部以亞熱帶夏季濕潤炎熱氣候(Cfa)為主，東南部高山區則為山地亞熱帶夏季濕潤炎熱氣候(GCfa)與山地亞熱帶夏季濕潤涼爽氣候(GCfb)分布(邱祈榮等人，2004)。桃園市氣候受季風影響最大，西南季風始於五月至九月，風力較弱，天氣晴朗，多午後雷陣雨；東北季風始於十月下旬至隔年三月，風力強勁。颱風則好發於七到九月，但相比其他縣市，桃園市較不易因颱風而遭受嚴重災損。年平均溫度約攝氏 20.8 度，夏季平均溫度達攝氏 27.6 度，七、八月最熱；冬季平均溫度則為攝氏 13 度，一月最冷；年平均濕度約為 90%左右。2009 年到 2017 年平均年雨量約為 1863 毫米，全年有雨，夏季降雨較冬季多，以雷陣雨和颱風雨為主，在空間分布上，由沿海 1500 毫米往台地內陸 2000 毫米漸增，至東南部高山區降雨量最高。

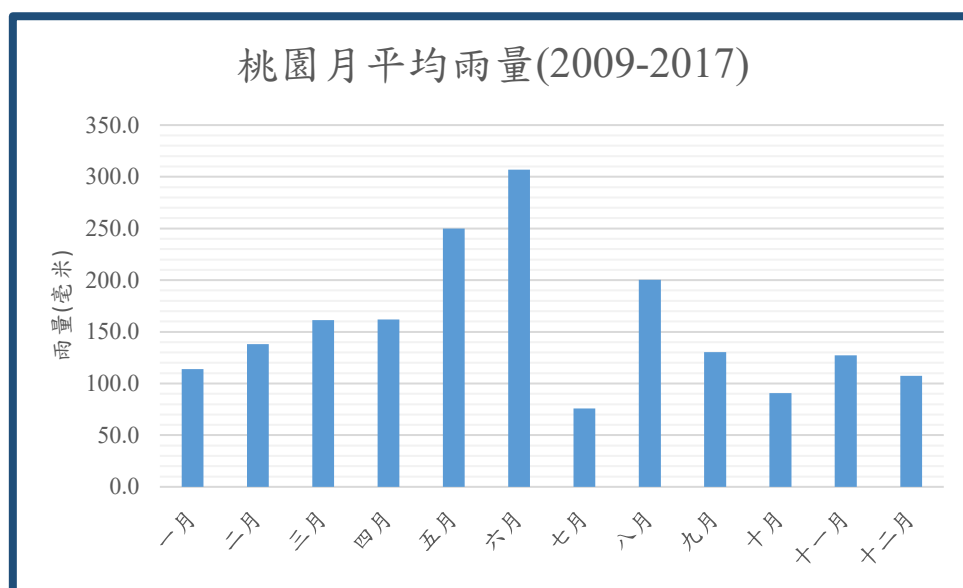


圖 2-4、桃園月平均雨量（資料來源：中央氣象局）

2.5.3 河川

桃園市境內共計 10 條主要河川，其中大漢溪屬中央管河川，其餘南崁溪、老街溪、社子溪、富林溪、大堀溪、觀音溪、新屋溪、坑子溪、茄苳溪屬桃園市市管



河川。大漢溪為淡水河系三大主要支流之一，發源於品田山，平均波降為 1：37，流經新竹縣尖石鄉、關西鎮、桃園市復興區、龍潭區、龜山區、大溪區、新北市三峽區、鶯歌區、樹林區、土城區、板橋區、新莊區及三重區，於江子翠匯入淡水河，主流長約 135 公里，流域面積約 1163 平方公里，上游建有石門水庫，集水區面積約 759 平方公里，為北部地區公共給水、灌溉用水、工業用水、發電用水的主要來源之一，水源量平均每年約 18.6 億立方公尺。

2.5.4 水利設施

石門水庫

民國 53 年建造完成，位於大漢溪上游，壩高 133.1 公尺，是台灣最高的土石壩，集水區面積約 763.4 平方公里，提供灌溉、給水、發電、防洪等多項功能。根據水利署民國 107 年 1 月 2 日記錄，其有效蓄水量為 198,256,400 立方公尺，最高滿水位為 245 公尺。在大壩上游左岸設有石門大圳進水口，接一直徑 2.5 公尺，長度約 300 公尺之壓力隧道。根據水利署民國 106 年《石門水庫運用要點》，石門水庫運用規線如下圖 2-5 所示：

月份 (月底)	一	二	三	四	五	六	七	八	九	十	十一	十二
上限標高 (公尺)	245	243	240	237.5	235	235	236	240	240	245	245	245
下限標高 (公尺)	240	235	230	225	220	220	222.5	225	230	235	240	240
嚴重下限 標高 (公尺)	224	223	220	215	210	210	213	213	213	215	220	225

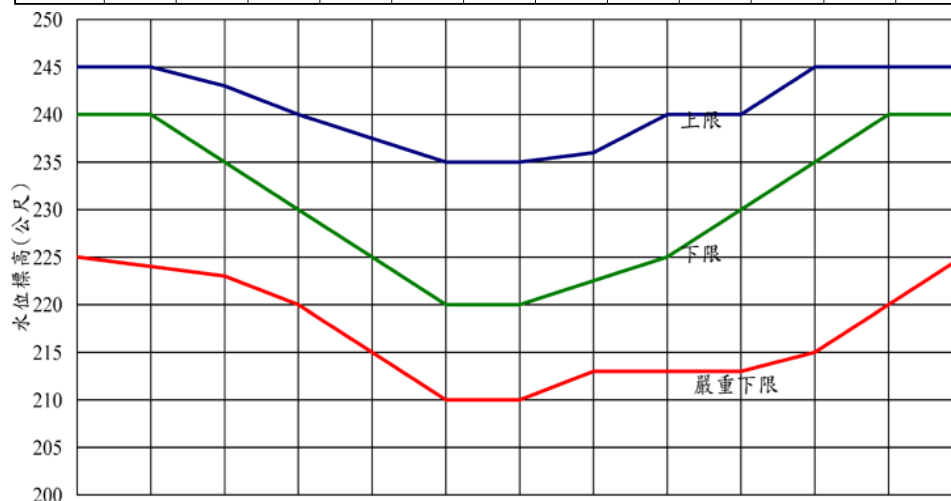


圖 2-5、石門水庫運用規線（水位）



而於民國 108 年 4 月 17 日，為使水庫操作能更直覺反映當前有效庫容量，在運用規線上改以「有效蓄水量」取代舊有之「水位」判定。新的石門水庫運用規線如下圖 2-6 所示：

月份(月底)	一	二	三	四	五	六	七	八	九	十	十一	十二
上限有效蓄水量(萬噸)	19000	18500	17000	16000	15000	15000	15000	16500	18000	19000	19000	19000
下限有效蓄水量(萬噸)	17500	15000	12500	10000	8000	8000	8000	10000	12500	15000	17500	17500
嚴重下限有效蓄水量(萬噸)	9000	7500	6000	5000	4000	4000	4000	5000	6000	7500	9000	9000

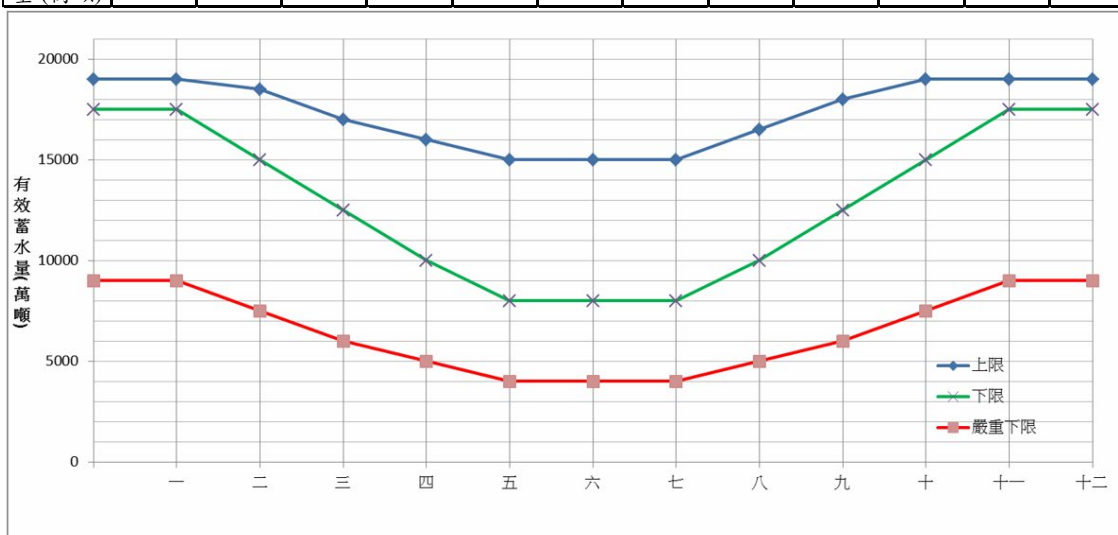


圖 2-6、石門水庫運用規線（有效蓄水量）

整理不同水位規線下的水庫蓄水利用運轉原則，水庫水位標高有以下四種區間：

- 上限以上：依據計畫配水量供水，並得視各標的用水需求增加調配之。
- 上限與下限之間：最高依據計畫配水量供水。
- 下限與嚴重下限之間：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。
- 嚴重下限以下：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。

發電用水的部分，根據不同區間所提供的供水量進行發電，但不包含供給石門大圳的供水量；在水庫水位標高為上限以上時，可依需求適當地增加發電用水供水

量，以利調節水庫水位。此外，臺灣桃園農田水利會、臺灣石門農田水利會、台灣自來水股份有限公司及工業用水單位，應於每年十一月底前，擬具次年給水、灌溉計畫配水量，送經濟部北區水資源局（北水局）協商同意後辦理。



後池堰

屬重力式混泥土壩，建於石門大壩下游，共有四個溢流道和一個排砂道，建物主要功能為調節發電用水和公共給水、灌溉用水間的用水時間差，可先蓄存尖峰發電的用水量，再分配給桃園大圳河下游公共給水使用。右岸設有溪洲圳取水口，取水口位置 131.85 公尺；左岸設有桃園大圳取水口，取水口位置 129.5 公尺，結構物長 25 公尺、寬 8 公尺、高 5 公尺，為桃園農田水利會之農業灌溉用水源頭。

鳶山堰

屬閘門控制溢流堰，位於大漢溪中游，距離石門水庫約 19 公里，滿水位標高約 51.5 公尺，最低取水標高 45.5 公尺，原調節池設計容量為 126 萬立方公尺，但因上游沖刷及河道疏濬，民國 107 年測得之有效容量約 439 萬立方公尺。主要功能為公共給水，攔引石門水庫放流水、灌溉回歸水以及水庫下游之側流量送板新淨水廠使用，於堰體東側設有重力導水箱涵與動力導水箱涵，輸水容量最大限制分別為每日 100 萬立方公尺與每日 60 萬立方公尺，當水位太低無法重力引水時，則啟動配置之六部抽水機進行動力引水；堰體西側設有第二取水口，以加壓方式將水倒送至大湳淨水廠，輸水容量最大限制為每日 35 萬立方公尺。

三峽堰

屬混泥土堰，位於大漢溪支流三峽河上，為台灣自來水股份有限公司興建之取水構造物，集水面積約 11,260 公頃，用於攔蓄三峽河河水，透過三峽抽水站供應板新淨水廠原水，距離板新淨水廠約 5 公里，最大取水量約每日 53 萬立方公尺。



中庄調整池

屬離槽水庫，建於原先大漢溪中庄廢河道，於民國 106 年完工運作，占地約 87 公頃，上游建有倒伏式的中庄攔河堰，並自該堰取大漢溪扣除保留水量後所剩下的水，至中庄調整池中蓄存，穩定提供板新和大湳進水廠每日 2.4 萬立方公尺用水，並於大漢溪汛期高濁度時提供最大每日 80 萬立方公尺原水，足以供應板新和桃園地區約 6.2 日用水需求。



圖 2-7、石門水庫下游衛星空照圖（資料來源：北水局）

龍潭淨水場

位於桃園市龍潭區，水源取自石門大圳或後池堰平鎮第二原水抽水站，供水人口約 18.5 萬人，計約 5 萬戶。自民國 63 年一月將佳安與龍潭供水系統互相連接，合併為龍潭供水系統以來，歷經多次擴建工程以滿足用水需求。最近一次為民國 101 年 10 月完工之第五期擴建工程，擴建後每日正常出水量 14 萬立方公尺，最大出水量 16.8 萬立方公尺。龍潭市區及銅鑼圈、三洽水等工業區用水主要以加壓方式輸送；大溪鎮及埔頂重劃區則以重力供水。



平鎮淨水廠

位於桃園市平鎮區平鎮工業區，水源取自石門大圳或後池堰平鎮第二原水抽水站，原設計處理容量為每日 60 萬立方公尺，目前處理容量約每日 58 萬立方公尺。供水區域包括桃園市中壢區、平鎮區、楊梅區、大園區、新屋區、觀音區，新竹縣湖口鄉、新豐鄉等行政區域，以及中壢、平鎮、大園、觀音四大工業區，亦支援新竹地區用水。

石門淨水廠


位於桃園市平鎮區，水源取自石門大圳環頂支渠，設計供水能力為每日 12 萬立方公尺，供水區域與平鎮淨水場聯合操作，包括桃園市中壢區、平鎮區、楊梅區、新屋區，新竹縣湖口鄉等行政區域，以及供應平鎮、幼獅工業區產業用水。

大湳淨水廠

位於桃園市桃園區，原水取自桃園大圳和鳶山堰，為因應桃園航空城與林口 A7 站開發之用水需求，現已辦理第三期擴建工程，並於民國 102 年年底完工，供水能力從原先二期擴建後的每日 30 萬立方公尺，上升至每日 45 萬立方公尺，供應桃園市桃園區、八德區、大園區、蘆竹區、龜山區、新北市林口區及龜山、林口工業區、桃園國際機場等地用水，供水人口達六十萬人。

板新淨水廠

位於新北市三峽區，有三種取水來源，一是自三峽堰抽水，以專管輸送至淨水場，最大抽水量為每日 53 萬立方公尺；第二種則是自鳶山堰抽水，設有重力式及動力式導水箱涵取水，並以專管輸送至淨水廠，重力式導水箱涵之最大抽水量為每日 100 萬立方公尺；動力式的則為每日 60 萬立方公尺。第三種則是依照石門水庫水位變化，以民國 107 年三月為例，當石門水庫水位高於 243 公尺時，必須向台北自來水事業處直接購買清水每日 30 萬立方公尺；水位低於 243 公尺時，則購買每



日 65 萬立方公尺。淨水廠設計處理容量為每日 120 萬立方公尺，不過實際處理容量僅約每日 72 萬立方公尺，供水地區涵蓋新北市板橋區、新莊區、蘆洲區、五股區、泰山區、八里區、樹林區、土城區、三峽區、鶯歌區等十個行政區，以及中和區、三重區的部份地區，供水人口約 200 萬人。配合板新大漢溪水源南調桃園計畫，現在每日供應約 16 到 17 萬立方公尺給北桃園使用。


2.5.5 農田水利會

桃園農田水利會

源於桃園大圳興工而創立，灌溉區域橫跨新北市、桃園市、新竹縣，依地勢和灌溉系統可分為桃園、湖口、大溪及新海四個灌區，灌溉區域內非乾早年時，農作物以兩期作水稻為主，占全區耕地面積約 95%，灌區內土壤占比約為：粘質土壤 39%，砂質土壤 26%，輕粘土 18.6%，砂質粘土 16.4%，坡降以 1：100 由東南方高山向西北方沿海延伸。隨著時代變遷，桃園市從過去農業社會至今已轉型成工商業重鎮，務農人口老化、農業萎縮使得耕地面積跟著減少，民國 73 年統計灌溉面積尚有 28,241 公頃，然而民國 106 年時僅剩 22,677 公頃。該會灌溉渠道以桃園大圳為主幹，依照灌區地形分區灌溉，設有桃園、大竹、大崙、大園、大溪、草漯、湖口、新坡、新屋、觀音、新莊及海山共 12 個工作站，負責灌溉排水設施之維護、水質監測、灌溉用水管理、氣象水文土壤等環境監測、水利政令及灌溉制度之推行等業務。灌區內共計 285 口埤塘，當中屬該會所有的有 161 口，總有效蓄水量達約 4,558 萬立方公尺，可灌溉面積約 19,228 公頃。該會對於學術研究資料索取與問題詢問非常友善，在學術資料取得上相較石門農田水利會容易許多。

石門農田水利會

灌溉區域橫跨新北市、桃園市、新竹縣，涵蓋鶯歌、八德、大溪、龍潭、觀音、中壢、新屋、楊梅、湖口及新豐等十二鄉鎮市區。地勢由東南向西北方向傾斜，坡度約介於 1：80 至 1：120 間，為扇型之沖積丘陵地帶，與桃園農田水利會灌區互



為毗鄰，灌區內土壤佔比約為：粘壤土 60%，粘土 20%，砂壤土 20%。灌區內有南崁溪、新街溪、老街溪、大堀溪、社子溪等河流，形成自然排水系統，灌區內農田均為兩期稻作，無其他雜糧或旱作，原規劃灌溉面積為 21,926 公頃，受到產業結構轉變的影響，於民國 104 年水利署統計資料中顯示，一期稻作僅有 7,258 公頃，二期稻作更只剩 6,963 公頃。該會灌溉渠道以石門大圳為主幹，主要水源取自石門水庫，不足部分仰賴有效雨量、攔河堰、埤塘蓄水、抽水站及地下水井調節管理，並依灌區地形分區灌溉，分別為八德、中壢、過嶺、楊梅、富岡、湖口共六個灌區分區，每區設有工作站，性質同桃園農田水利會之工作站。灌區內共計 398 口埤塘，當中屬該會所有的有 101 口，總有效蓄水量達約 1,037 萬立方公尺，可灌溉面積約 6,456 公頃。在研究資料索取方面，對外態度相對保守，不易取得灌區詳細數據。

2.5.6 水資源利用現況與未來推估

桃園地區人口在民國 115 年前呈現增加趨勢，民國 115 年後逐年緩慢減少，在假設每人每日用水量不變的條件下，生活用水需水量變化不大。然而在工業部分，由於產業群聚效應及高科技產業發展，加上未來桃園航空城區域計畫，致使工業自來水需水量大幅增加。自來水需水量由現況之每日 113.6 萬立方公尺增加至目標年 120 年每日 135.8 萬立方公尺，增加幅度達 16.3%。雖在板新供水改善計畫二期工程完工後，已可透過板新淨水廠南調大漢溪支流水源支援北桃園用水需求，但在未來氣候變遷影響下，如何增加乾旱調適能力以降低缺水風險成為政策決策者必須思考的重要議題。

表 2-1、桃園地區各目標年用水需求資料（水利署，2016）

項目		現況基值	110 年	115 年	120 年	125 年	130 年
人口推估(萬人)		219.50 ^a	224.77	226.00	224.57	223.22	220.43
每人每日用水量(公升/日)		259 ^c	259	259	259	259	259
生活用水需水量(立方公尺/日)		715,204 ^a	745,977	746,522	737,719	737,507	731,851
自來水系統 工業需水量 (立方公尺/日)	現有工業用地	389,660 ^b	404,238	419,691	435,743	457,970	481,331
	開發中工業用地	84,869 ^b	156,362	157,361	155,270	155,270	155,270
	已編定工業用地	0 ^b	17,675	22,702	29,457	38,392	47,087
	合計	474,529 ^b	578,275	599,754	620,471	651,632	683,689
自來水需水量(立方公尺/日)		1,136,637 ^a	1,324,253	1,346,276	1,358,190	1,389,139	1,415,540



第三章、研究方法

水市場模擬遊戲中的背景運算程式是否能反映現實情況，對於遊戲結果影響重大。為此，本研究在遊戲背景運算程式上，以供水系統動力模式反映實際供水傳輸情況，水稻田水平衡模式計算農業計畫配水量，並於水市場模擬遊戲中計算田間水平衡狀態。整體研究架構如下圖所示：

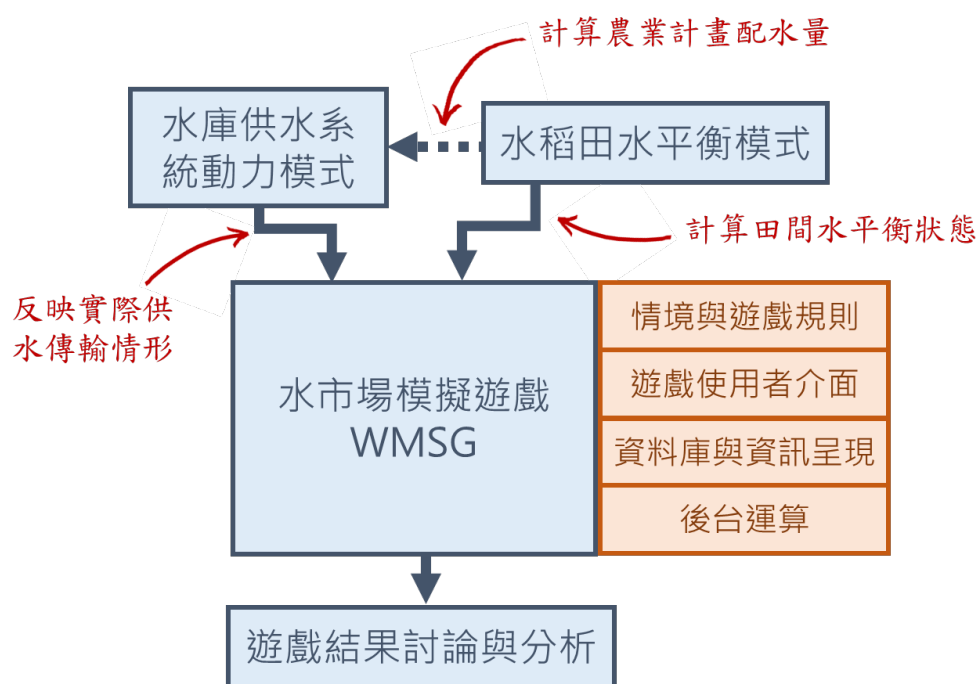


圖 3-1、研究架構圖

本章第一節以桃園地區為例，演示如何利用 Vensim 軟體建構一地區之供水系統動力模式；第二節則詳述涉及水稻田水平衡計算之水文物理機制。水市場模擬遊戲內容則於後續第四章中說明。

3.1 水庫供水系統動力模式

本節敘述以石門水庫為主體所建構之桃園地區供水系統動力模式，模式須輸入三項水源來源（石門水庫入流量、鳶山堰側流量、三峽河入流量），以及各用水事業的計畫配水量。建構完成後可用於模擬桃園地區日尺度的供水情況與水庫水情變化。



3.1.1 模式架構概述

供水系統參考水利署(2014; 2016)報告書，並以電話聯繫各事業單位(包括石門水庫管理中心、各淨水廠、農田水利會等)，加以確認設施及管線之設計與輸水限制，進行系統資訊校正、更新、統合。將桃園地區供水系統設施、灌渠、用水單位等依地理相對位置和水源傳輸方向繪製系統架構簡圖，如圖 3-2 所示。水滴符號表示河川入流量，乃整個供水系統動力模式中水源輸入來源；水源傳輸方向以箭號表示，傳輸過程須考量損失率；深藍色梯形為水庫，具蓄水功能；淺藍色橢圓形為淨水廠或淨水水源，供應生活與工業自來水用水；深灰色矩形為農業灌溉圳渠，屬明渠、非管線；淺灰色矩形為攔河堰，屬取水點，不具備蓄水功能；橘色潤角矩形為用水單位，包含農業用水、生活用水以及工業用水三種類型用水。

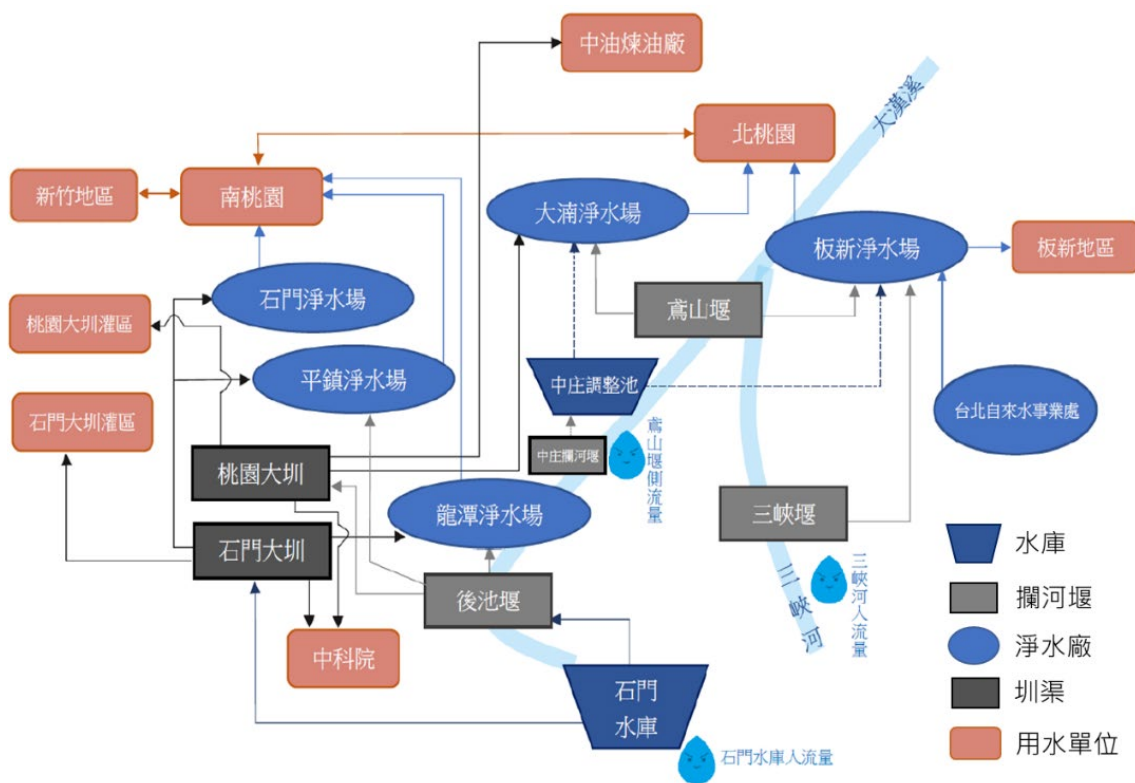


圖 3-2、桃園地區供水系統架構簡圖



3.1.2 水源供給與損失

水源供給部分，以石門水庫入流量、鳶山堰側流量、三峽河入流量作為供水系統的水源供給主要來源，流量資料取得上參考水利署(2014)歷史旬流量資料，再除以該旬日數換算為日流量資料。

水源損失方面，包括原水處理損失、灌溉渠道輸水損失、其他管線輸水損失、自來水漏水損失、水庫蒸發損失，共五個項目分點敘述。

- (1) 原水處理損失：係指淨水場在處理原水過程中所造成的水源損耗，以 6% 估計之（水利署，2014）。
- (2) 灌溉渠道輸水損失：桃園大圳與石門大圳水源分配至各支線灌區時，不同灌區有不同的輸水損失率，為簡化模式而不分別設定各支線輸水損失率值，此處參考《106 年農田水利處之數字看板》整理之「農田水利會圳路平均輸水損失率」，桃園農田水利會灌區整體以 17% 計；石門農田水利會灌區整體以 16% 計。
- (3) 其他管線輸水損失：原水輸送非屬(1)、(2)或河川段之水源，假設以 3% 反映其輸水損失，當中輸送至中科院與中油煉油廠的原水亦屬此項目適用對象。
- (4) 自來水漏水損失：在淨水廠供水至生活用水、工業用水單位時，會因漏水問題使得用水單位實際拿到的水量小於淨水場供應的水量。參考台灣自來水公司民國 105 年統計年報漏水率平均值，以 16.16% 估計之。
- (5) 水庫蒸發損失：參考水利署(2010)所列之石門水庫蒸發量，其值如下表所示。由於水庫蓄水面積會隨著水庫水位而有所變化，故配合民國 103 年石門水庫實測水位-容積-面積資料（由石門水庫管理中心提供），將水庫水位換算水庫蓄水面積後，再乘上表 3-1 對應月份之日蒸發量，即可得到每日水庫蒸發量的概估值。

表 3-1、石門水庫各月份日蒸發量

月份	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
每日蒸發量 (mm)	1.35	1.29	1.42	1.72	2.17	2.69	3.61	3.38	2.87	3.15	2.1	1.88



3.1.3 生態基流量


生態基流量的部分，採用水利署報告書中，參照日本生態基流量每 100 平方公里放流每秒 0.1~0.3 立方公尺，並考量下游側入流及灌溉回歸水，以石門水庫至鳶山堰間保留每秒 1.8 立方公尺，鳶山堰下游保留每秒 2.3 立方公尺，三峽堰下游保留每秒 0.503 立方公尺為原則（水利署，2005^b）。


3.1.4 設施限制與參數

本小節描述建立供水系統動力模式中各事業單位之設施限制，以及系統中所使用之相關參數，資料參考自水利署(2014;2016)報告書，以及電話聯繫詢問所得。

以下列點說明：

- (1) 石門水庫：滿水位 245 公尺；呆水位 195 公尺；滿水位實測有效庫容 202,278,000 立方公尺（石門水庫管理中心，2014）。生態基流量的部分，石門水庫至鳶山堰間保留每秒 1.8 立方公尺，由於至鳶山堰前，板新淨水廠及大湳淨水廠之計畫配水量額度超過每秒 1.8 立方公尺，而鳶山堰以降須保留每秒 2.3 立方公尺之生態基流量，故在程式設計上，倘若鳶山堰側流量不足以供應鳶山堰下游之生態基流量的話，石門水庫將須額外放流彌補生態基流量缺口，模式中以「Support EcoBaseFlow」變數表示之。超出水庫最大有效庫容量之水量，以「ShiMen Reservoir Overflow」變數表示之。由於本研究後續乃探討歷史乾旱事件，故水庫運用規線設計參照水利署 2017 年《石門水庫運用要點》之規定。
- (2) 後池堰：設有桃園大圳取水口，以及平鎮淨水場第二原水抽水站之取水設施。模式中僅放置元件，未設定限制參數。
- (3) 石門大圳：自石門水庫取水，管線輸水限制每秒 16.4 立方公尺，模式中未設定限制參數。經此圳渠輸水之事業單位包括中科院、龍潭淨水場、平鎮淨水廠、石門淨水場、石門農田水利會灌區。

- 
- (4) 桃園大圳：自後池堰取水，管線輸水限制約每日 145 萬立方公尺（每秒 16.8 立方公尺），模式中未設定限制參數。經此圳渠輸水之事業單位包括中科院、中油煉油廠、大湳淨水廠、桃園農田水利會灌區。
- (5) 龍潭淨水場：原水來源取自石門大圳，設計供水能力約每日 19 萬立方公尺，實際出水量約每日 13.4 萬立方公尺（2018 年電訪資料）。
- (6) 平鎮淨水廠：原水來源主要取自石門大圳，少部分由後池堰供應，設計供水能力約每日 60 萬立方公尺，實際出水量約每日 54 萬立方公尺（2018 年電訪資料）。
- (7) 石門淨水廠：原水來源取自石門大圳，引水管線限制約為每日 13 萬立方公尺，設計供水能力約每日 12 萬立方公尺，實際出水量約每日 10 萬立方公尺（2018 年電訪資料）。設有容量 50 萬立方公尺之原水蓄水池，但模式中未考慮其調度管理功能，僅放置元件，未設定參數。
- (8) 中庄攔河堰：設有中庄調整池取水口，但由於缺乏更多關於中庄調整池的數據資料，本研究暫不考慮中庄調整池於乾旱時期的水源管理調度，將模式中中庄調整池之引水水量設定為零。
- (9) 中庄調整池：於 2017 年 12 月正式啟用，引水自中庄攔河堰，最大庫容量 505 萬立方公尺，引水管線限制每秒 10 立方公尺，現下平均每日出水量 2.4 萬立方公尺，分別供應板新淨水廠和大湳淨水廠，輸水管線限制分別為每日 50 萬立方公尺和每日 30 萬立方公尺。
- (10) 三峽堰：最大取水量為每日 53 萬立方公尺，供應板新淨水廠原水。堰體下游保留每秒 0.503 立方公尺之生態基流量，其順位優先於板新淨水廠取水需求。
- (11) 鳶山堰：有效容量 439.7 萬立方公尺，但模式中未將此容量納入可操作範疇。堰體東側設有重力與動力導水箱涵，輸水管線限制分別為每日 100 萬及 60 萬立方公尺，輸送至板新淨水廠；堰體西側設第二取水口，以加壓方式反向輸水至大湳淨水廠，輸水管線限制為每日 35 萬立方公尺。堰體下游保留每秒 2.3 立方公尺之生態基流量，其順位優先於板新淨水廠及大湳淨水廠之取水需求。

- 
- (12) 大湳淨水廠：原水來源主要取自鳶山堰，少部分由桃園大圳及中庄調整池供應（由中庄調整池供應部分，於本研究中假設為零，該水量改取自鳶山堰），設計供水能力約每日 45 萬立方公尺，實際出水量約每日 40.7 萬立方公尺（2018 年電訪資料）。原水來源除了石門水庫核定放流之計畫配水量外，還須將鳶山堰側流量納入考量。故在模式設計上，扣除生態基流量、板新淨水廠應得之計畫配水量後，優先提供大湳淨水廠取水，至多每日 35 萬立方公尺（輸水管線限制）。
- (13) 板新淨水廠：原水來源優先取自三峽堰，其次取自鳶山堰，少部分由中庄調整池供應（由中庄調整池供應部分，於本研究中假設為零，該水量改取自鳶山堰）。鳶山堰剩餘可用之非計畫配水量之原水取水順位次於大湳淨水廠，由於重力與動力導水箱涵的管線限制不同，模式中以動力導水箱涵之每日 60 萬立方公尺管線限制作為取水之限制條件。除前述原水水源外，當石門水庫水位高於 243 公尺時，須向台北自來水事業處購買每日 30 萬立方公尺淨水；低於 243 公尺時，則須購買每日 65 萬立方公尺淨水。設計供水能力約每日 120 萬立方公尺，實際出水量約每日 72 萬立方公尺（2018 年電訪資料），供應北桃園用水及板新地區用水。
- (14) 南北桃園供水管網：用於南北桃園間自來水調度，管線限制為每日 17 萬立方公尺，模式中由於不考慮南北桃園自來水調度問題，故在數值上假設為零。
- (15) 桃竹雙向供水管網：管路設計流量為每日 10 萬立方公尺，目前最大約每日 9 萬立方公尺，乃桃園和新竹間水源調度管線。模式中不考慮跨縣市調度管理，僅放置元件，未設定參數。



3.1.5 Vensim 建模

使用 Vensim 軟體將上述水源傳輸關係、限制參數建構成石門水庫供水系統動力模式，設定時間單位為「日」，時間長度為 365，主要使用的元件為「Variable」、「Shadow Variable」、「Arrow」、「Rate」。「Variable」可以在創建後再進行更動，例如添加外框、更改顏色、更改變數類型，其中模式內使用之變數類型包括「Auxiliary」、「Constant」、「Level」、「Lookup」。「Auxiliary」變數可依其所連結的其他元件設定變數計算公式(Equations)，會隨著其他關連變數變動；「Constant」變數為一固定常數值，例如各項輸水損失係數。特別注意的是，由於後續會再將 Vensim 檔轉換為 Python 檔，透過 Python 語法進行資料匯入會較為簡單方便，故在 Vensim 這端，先暫時將須由外部匯入資料的變數設定為「Constant」變數（例如入流量資料），亦方便執行 Check Model 時不會跳出未匯入資料的錯誤；「Level」變數具有積分(INTEG)公式，可給定初始值(Initial Value)，適合作為水庫的變數類型；「Lookup」變數為「Auxiliary」變數的子類型(Sub-Type)，可參照一關聯變數的值，進行查表(Table)得值，使用於日期對應水庫運用規線變數設計，以及水庫有效庫容量對應水庫水位、面積之變數設計。「Shadow Variable」可視為「Variable」的分身元件，模式中該字體顏色以灰色表示，用於方便連結其他變數元件（例如連結不同的結構視圖時）、使結構視圖頁面簡潔。「Shadow Variable」僅能指向其他變數元件，不能作為被指向的對象，所有關聯的變動將與原「Variable」同步。「Arrow」元件乃連結變數關係的主要元件，模式中被大量使用，無法設定數值，僅建立變數間的關聯。「Rate」元件不同於「Arrow」元件，除了連結變數關係外，本身具變數特性，可設定值或公式，模式中用於表示水的傳輸，其關聯端若無元件，則會以「雲符號」代替。

整個模式內容共包含四個結構視圖(view)：System Model、Allocation Rule、WPP Allocation Proportion、Transfer Ratio，以下分點敘述。



System Model

System Model 結構視圖呈現各用水單位間的互動關係與水資源流向，當中所使用的配水量、限制參數則寫在其餘三個結構視圖中，以利版面整潔，見圖 3-3。由於最終執行交易實驗時，會涉及到農業與工業之間計畫配水量轉移問題，從水庫的角度來說，因買賣雙方交易的乃計畫配水量（詳細交易機制於 4.2 節說明），除了農業方賣剩的計畫配水量可被水庫收回外，其餘部分均按照《石門水庫運用要點》依水庫水位執行供水打折與配送。但下游接收端由於收到的實際水量需經過供水打折與輸水損失，對工業方而言，購買而得的計畫配水量原屬於農業方所擁有，在打折部分採用農業用水的打折規定，如此在終端計算實際獲得水量時將變得複雜，因為交易機制與計畫配水量並沒有一併寫在此模式中（為了維持模式的可擴充性）。基於上述原因，為使各單位的實際獲得水量容易計算，模式中暫且將輸水損失參數（包括管線輸水損失、灌溉渠道輸水損失、原水淨水損失）設為零，經過交易計算而得的水量再各自乘上輸水損失加以概估實際獲得水量。

中庄調整池於民國 106 年 12 月正式啟用，主要功能為颱風期間維持低濁度原水取水和平日石門水庫庫容調蓄。由於目前中庄調整池相關研究有限，且後續交易機制中初步僅探討農業與工業，並未將政府單位納入決策者中，是故在模式運作上，暫時不考慮將中庄調整池的調蓄能力納入計算或交易，涉及該部分的參數值暫時假設為零。

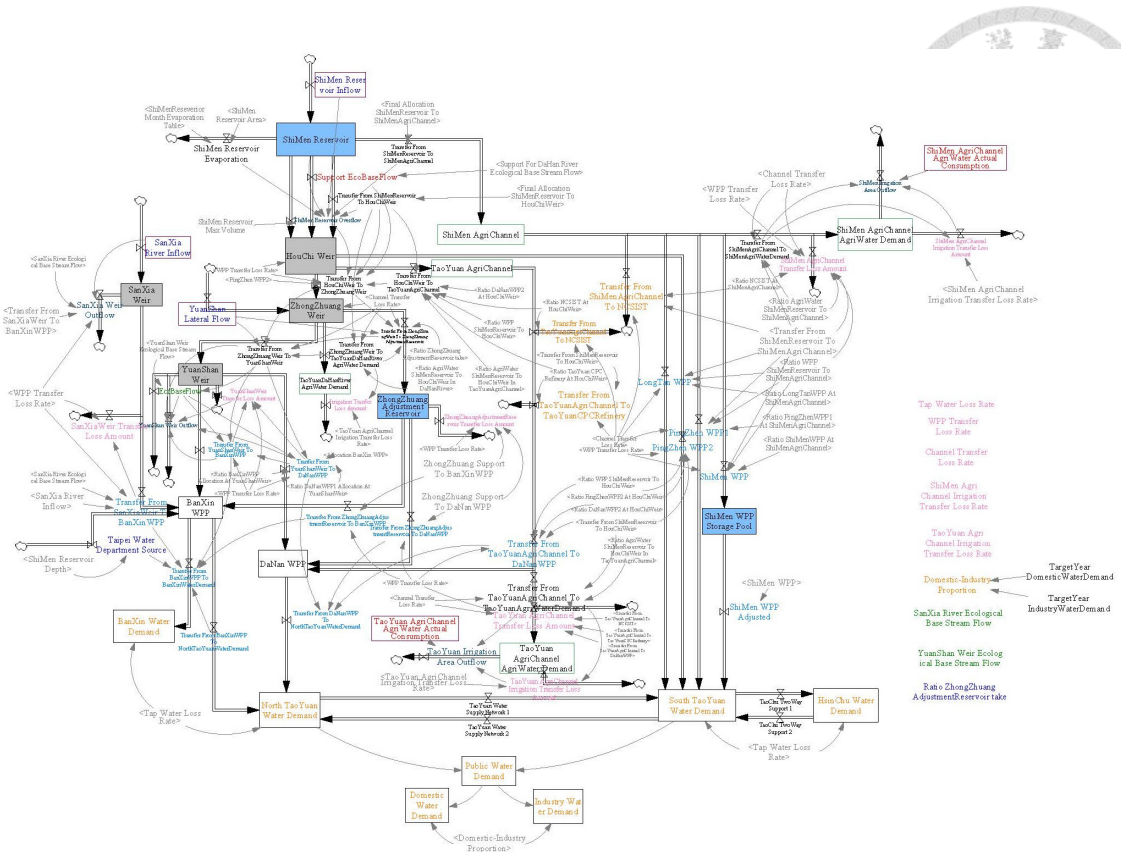


圖 3-3、石門水庫系統動力模式-System Model View

Allocation Rule

Allocation Rule 結構視圖中（見圖 3-4），主要撰寫石門水庫計畫配水的對象，包含：石門農田水利會（石門大圳）、桃園農田水利會、石門淨水廠、龍潭淨水場、平鎮淨水廠、板新淨水廠、大湳淨水廠、中山科學研究院（中科院）、桃園中油煉油廠（中油）。計畫配水量數值上在模式中使用「Constant」變數設定為零，後續須再由外部匯入資料。匯入的資料主要採用民國 105 年石門水庫灌溉及給水計畫配水量（104 年 11 月 20 日審定版）資料，而農業計畫配水量的部分於本研究中將被重新訂定。

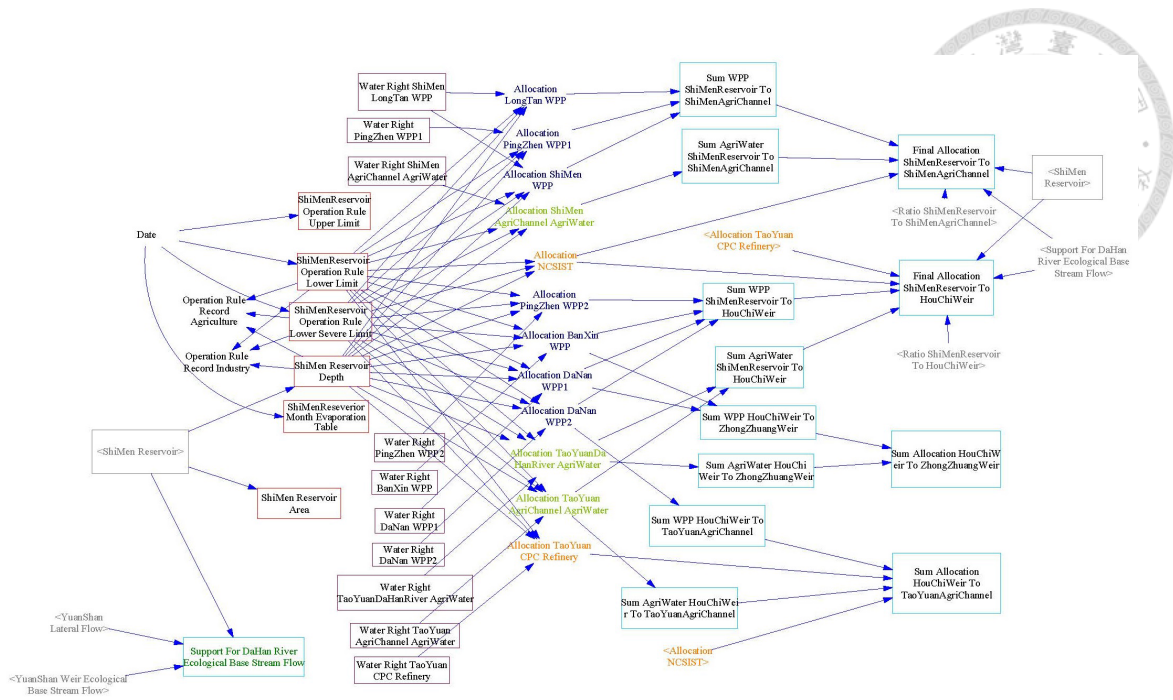


圖 3-4、石門水庫系統動力模式-Allocation Rule View

WPP Allocation Proportion

WPP Allocation Proportion 結構視圖中(見圖 3-5)，撰寫與淨水廠相關聯的配水比例關係，並不包含農業、中科院、中油用水，主要用於計算下游端子分支如何依比例關係分配來自上游端的水量。

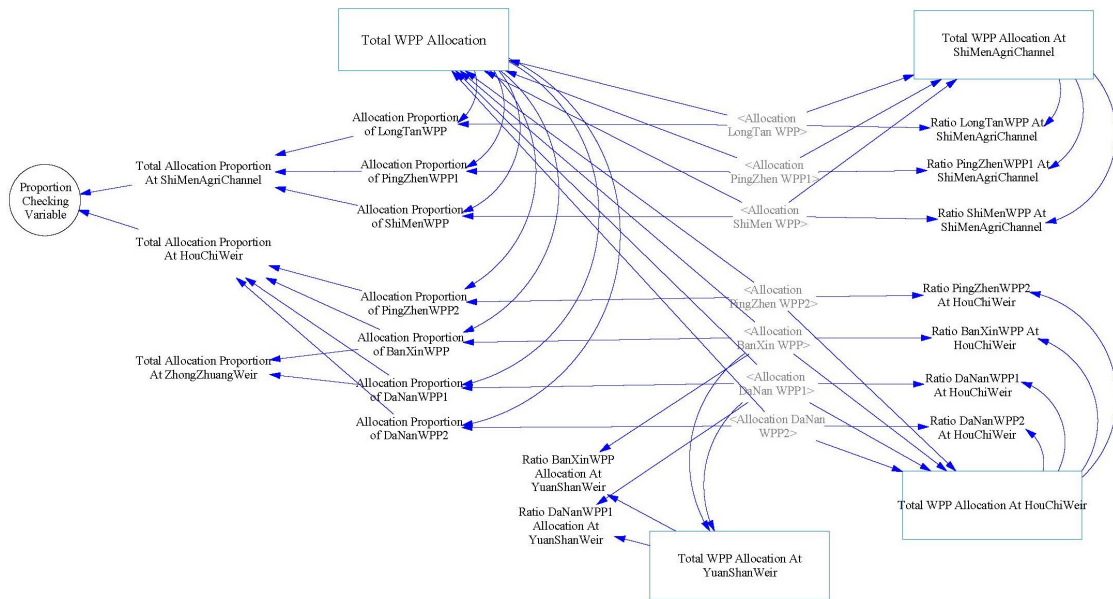


圖 3-5、石門水庫系統動力模式-WPP Allocation Proportion View



Transfer Ratio

Transfer Ratio 結構視圖中(見圖 3-6)，撰寫 System Model 結構視圖中幾個水量匯聚-分配點的水量分配比例，匯聚-分配點包含：石門水庫、後池堰、石門大圳、桃園大圳、中庄攔河堰。功能與 WPP Allocation Proportion 結構視圖相似，主要用於計算下游端子分支如何分配來自上游端的水量，但涵蓋所有用水類別。

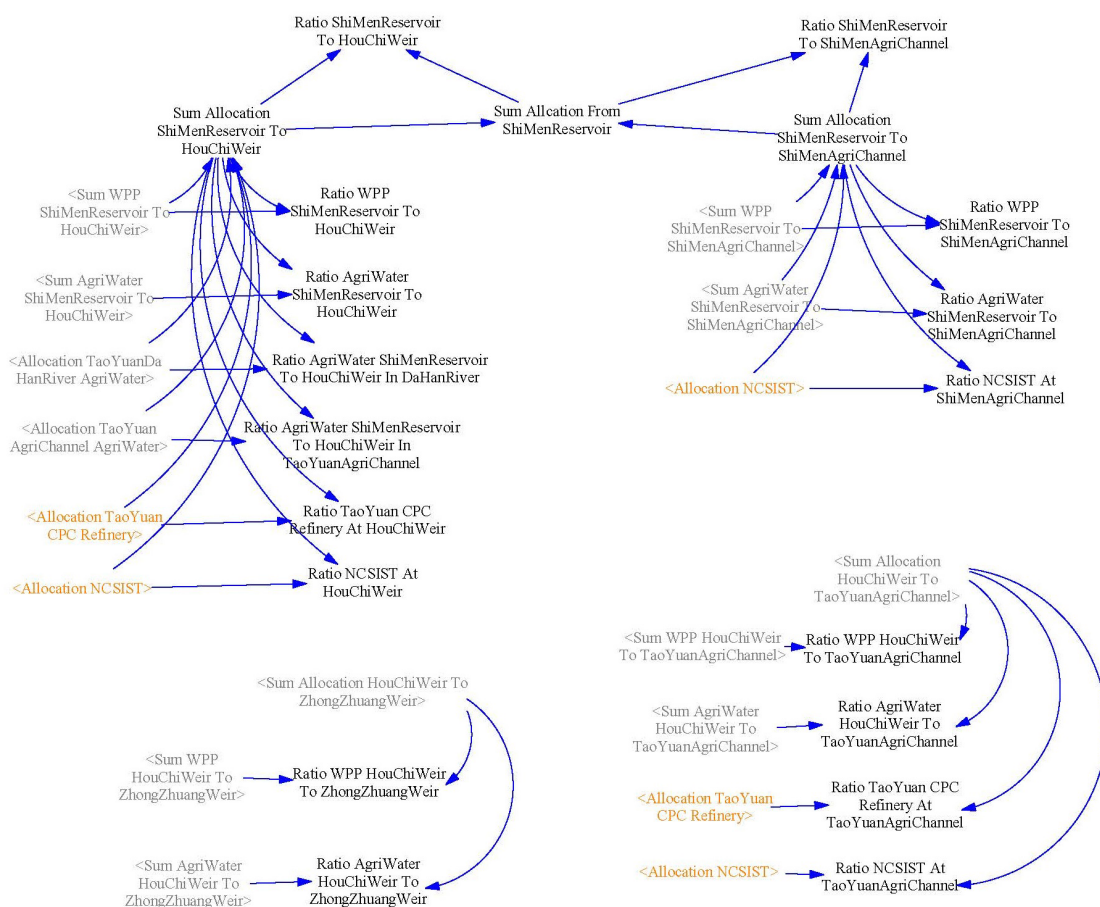


圖 3-6、石門水庫系統動力模式-Transfer Ratio View

3.2 水稻田水平衡模式

本節描述設計水稻田水平衡模式所使用之公式、假設、參考資料，由於本研究地區為桃園地區，故在引用參考文獻時，以現地資料為優先。此模式用於最終進行遊戲模擬時，計算農業方修正計畫配水量以及水稻收穫情況。



3.2.1 架構說明

參考李苑華(2018)水稻田水平衡模式設計方式，將水田分為土表以上之湛水層和土表以下之耕壤層（泥濘層），耕壤層底部接鄰硬盤層（牛踏層），硬盤層底下則為非耕層，配合本研究後續採用各項參數之特性，繪製水稻田水平衡示意圖如下：

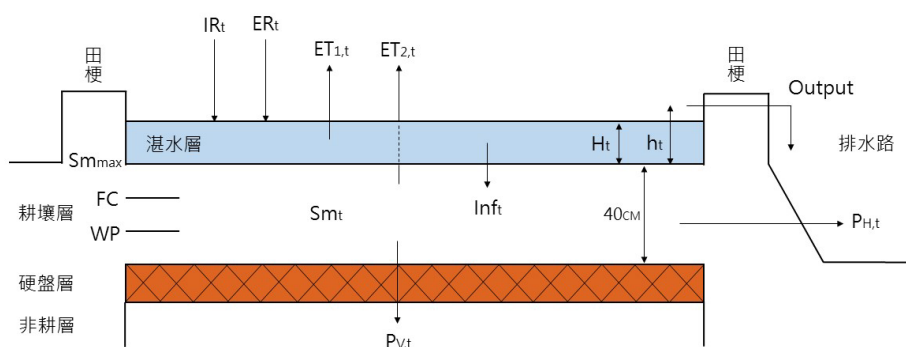


圖 3-7、水稻田水平衡示意圖

圖 3-7 中，下標 t 所指為日期（天數）； IR 為實際灌溉用水量； ER 為田間有效降雨量； ET_1 為湛水供應之田間蒸發散量； ET_2 為土壤供應之田間蒸發散量； Inf 為入滲量； H 為田間水面高度； h 為有效田埂高度； $Output$ 為降雨造成之溢流或斷水排乾之水量； Sm_{max} 為最大土壤含水量（飽和含水量）； Sm 為土壤含水量； FC 為田間容水量； WP 為凋萎點含水量； P_v 為垂直滲漏量； P_H 為水平滲漏量；耕壤層深度以 40 公分作為模式假設（洪毓謙，1999）。

計算上，先設定初始田間水面高度(H_t)和土壤含水量(Sm_t)，以及土壤含水特性參數、水稻灌溉湛水深(DP)、作物係數(K_c)、有效田埂高度(h)等參數，接著便可計算土壤可用水量(Sa)、土壤可用水量差額(ΔSa)和滲漏量(P)；配合輸入之水文、氣象參數，可計算田間蒸發散量(ET)，進而拆分成 ET_1 與 ET_2 ；由前述所得參數，可計算田間有效降雨量(ER)；算得 ER 後，配合既得參數資料可計算灌溉需水量(IWR)， IWR 以湛水與否分成兩種計算公式；算得 IWR 後，限制實際灌溉水量(IR)小於等於 IWR ，由現行所得參數與 IR 可計算入滲量(Inf)；至此，所有所需參數均計算完畢，可分別求得該日最終田間水面高度(H_{t+1})與土壤含水量(Sm_{t+1})。以下接續之各章節依此參數計算順序陳述。



3.2.2 土壤含水特性

桃園大圳灌區土壤組成占比約為：粘質土壤 39%，砂質土壤 26%，輕粘土 18.6%，砂質粘土 16.4%；石門大圳灌區則約為：粘壤土 60%，粘土 20%，砂壤土 20%。

「粘質土壤」、「粘壤土」對應「clay loam」；「砂質土壤」、「砂壤土」對應「Sandy loam」；「輕粘土」、「粘土」對應「clay」；「砂質粘土」對應「Sandy clay」。土壤特性參考 Saxton 和 Rawls (2006)，當土壤含水量低於凋萎點(wilting point, WP)時，植物便無法從土壤吸取水分，即使土壤含水量不為零。旱田在土壤含水量呈現飽和狀態(saturated condition)時，滲漏快速，使得土壤水分降至田間容水量(field capacity, FC)；但水田則因具有保水特性，滲漏速率慢，從飽和狀態降至田間容水量的過程是需要數天以上的，因此對水田而言，最大土壤可用水量(max total available water, TAW)並非田間容水量與凋萎點的差值，而是飽和狀態含水量(即孔隙率， \emptyset)與凋萎點(WP)的差值。土壤鹽度會影響植物根部吸收土壤水分的能力，但本研究中未將土壤鹽度納入考量並修正其誤差。計算適用於水田之最大土壤可用水量，與飽和含水量、田間容水量、凋萎點、飽和水力傳導度合併製成水田土壤特性表(表 3-2)，須注意表 3-2 中最大土壤可用水量乃針對水田特性設計，非一般土壤特性的計算方式。

表 3-2、水田土壤特性表

土壤性質	飽和含水量[%]	田間容水量[%]	凋萎點[%]	最大土壤可用水量[%]	飽和水力傳導度[mm/hour]
粘質土壤/ 粘壤土	48	36	22	26	4.3
砂質土壤/ 砂壤土	45	18	8	37	50.3
輕粘土/ 粘土	50	42	30	20	1.1
砂質粘土	44	36	25	19	1.4

資料來源：Saxton and Rawls(2006)，修正最大土壤可用水量



以前述灌溉區域內土壤組成占比作為權重，計算飽和含水量、田間容水量、凋萎點、最大土壤可用水量及飽和水力傳導度合併整理於表 3-3 中。

表 3-3、桃園地區水田土壤特性表-1

灌區	飽和含水量[%]	田間容水量[%]	凋萎點 [%]	最大土壤可用水量[%]	飽和水力傳導度 [mm/hour]
桃園大圳灌區	46.94	32.44	20.34	26.60	15.19
石門大圳灌區	47.80	33.60	20.80	27.00	12.86

土壤深度(SD)在本研究中假設為一定值，為 40 公分，下接 20 公分厚的硬盤層（牛踏層）。將百分比乘上土壤深度，可轉換成毫米單位，以利在單位上與後續方程式相接，整理如表 3-4。

表 3-4、桃園地區水田土壤特性表-2

灌區	飽和含水量[mm]	田間容水量[mm]	凋萎點 [mm]	最大土壤可用水量[mm]	飽和水力傳導度[mm/day]
桃園大圳灌區	187.74	129.74	81.36	106.38	364.54
石門大圳灌區	191.20	134.40	83.20	108.00	308.64

土壤可用水量(Sa)為土壤含水量與凋萎點間的差值，最小為零不為負值，方程式如下：

$$Sa_t = \max\{ 0, Sm_t - WP \} \quad (3-1)$$

Sa_t：第 t 天之土壤可用水量(available soil water content)[mm]

Sm_t：第 t 天之土壤含水量(soil moisture content)[mm]

WP：凋萎點含水量(Wilting point water content)[mm]

當土壤含水量(Sm)大於田間容水量(FC)時，則存在滲漏量 P (詳見 3.2.3 小節)；反之，當土壤含水量小於等於田間容水量時，滲漏量為零。在實際灌溉用水量(IR)加上田間有效降雨量(ER)仍小於田間蒸發散量(ET)的情況下，不足的作物需水差額可由土壤可用水量(Sa)提供，亦即土壤具有一定程度的水分儲存、調節供給的能力。



土壤可用水量與最大土壤可用水量間的缺額，以 ΔSa 表示，方程式如下：

$$\Delta Sa_t = TAW - Sa_t \quad (3-2)$$

ΔSa_t ：第 t 天之土壤可用水量缺額[mm]

TAW：最大土壤可用水量[mm]

Sa_t ：第 t 天之土壤可用水量[mm]

雖然理論上在凋萎點以上的水分屬於植物可利用的部分，但在土壤含水量下降至凋萎點的過程中，超過一臨界值時，植物根部吸收土壤水分的能力將受到限制。該臨界值以上至飽和含水量的水量，以易得可用水量(readily available water, RAW)稱之，將用於後續計算水分逆境係數(water stress coefficient, K_s)，其公式如下：

$$RAW = \max\{ 0, Sm_t - a_i \} \quad (3-3)$$

RAW：易得可用水量[mm]

Sm_t ：第 t 天之土壤含水量(soil moisture content)[mm]

a_i ：土壤水分逆境臨界含水量[mm]， $i=1$ 為湛水時期； $i=2$ 為非湛水時期

消耗係數(p)乃土壤水分逆境發生之前，植物根層從最大土壤可用水量(TAW)所消耗水分之比率，其值視不同植物而定，且受到該日作物蒸發散大小影響。此處參考 Allen 等人(1998)研究之稻米消耗係數，在土壤水分飽和、最大作物蒸發散量(ET_x)為每日 5 mm 時， p 值為 0.2，並配合下式進行修正：

$$p_a = p_i + 0.04 \times (5 - ET_x) \quad (3-4)$$

p_a ：調整後消耗係數[無因次]

p_i ：消耗係數[無因次]， $i=1$ 為湛水時期； $i=2$ 為非湛水時期

ET_x ：最大作物蒸發散量[mm/day]，詳見 3.2.4 小節



參考 Allen 等人(1998)研究，將土壤水分呈現飽和狀態下之 p_1 值設為 0.2，乃適用於水田湛水時期的水分逆境係數(K_s)計算，此時對應之土壤水分逆境臨界含水量 a_1 以下式計算而得：

$$a_1 = \emptyset - p_{a,1} \times TAW \quad (3-5)$$

a_1 ：湛水時期土壤水分逆境臨界含水量[mm]

\emptyset ：孔隙率，亦即飽和含水量[mm]

$p_{a,1}$ ：湛水時期調整後消耗係數[無因次]

TAW：最大土壤可用水量[mm]

然而，非湛水時期，倘若 p_2 仍使用 $p_1=0.2$ 之值，將使得在土壤水分尚未降至田間容水量(FC)，便發生水分逆境情況，導致須佐以灌溉來維持 $K_s=1$ ，這是不符合現實的。是故在非湛水時期，改採旱田條件來計算消耗係數 p_2 與土壤水分逆境臨界含水量 a_2 ，將 p_2 假設為 0.5(Boonyathorobol and Walker, 1979)， a_2 計算如下：

$$a_2 = FC - p_{a,2} \times (FC - WP) \quad (3-6)$$

a_2 ：非湛水時期土壤水分逆境臨界含水量[mm]

$p_{a,2}$ ：非湛水時期調整後消耗係數[無因次]

FC：田間容水量(field capacity)[mm]

WP：凋萎點含水量(Wilting point water content)[mm]

如此計算而得之 $p_{a,2}$ ，可使後續 3.2.6 小節計算非湛水時期灌溉需水量(IWR)時不致發生「土壤含水量仍大於田間容水量(FC)，卻必須加以灌溉」的情況。

計算水分逆境係數(K_s)的部分，以圖 3-8 進行說明，橫軸為土壤含水量(S_m)，縱軸為水分逆境係數(K_s)，分為湛水與非湛水兩時期。湛水時期，當土壤含水量低於 a_1 點時， K_s 值由 1 至 0 以線性遞減作為估算假設；非湛水時期，當土壤含水量低於 a_2 點時， K_s 值由 1 至 0 以線性遞減作為估算假設。

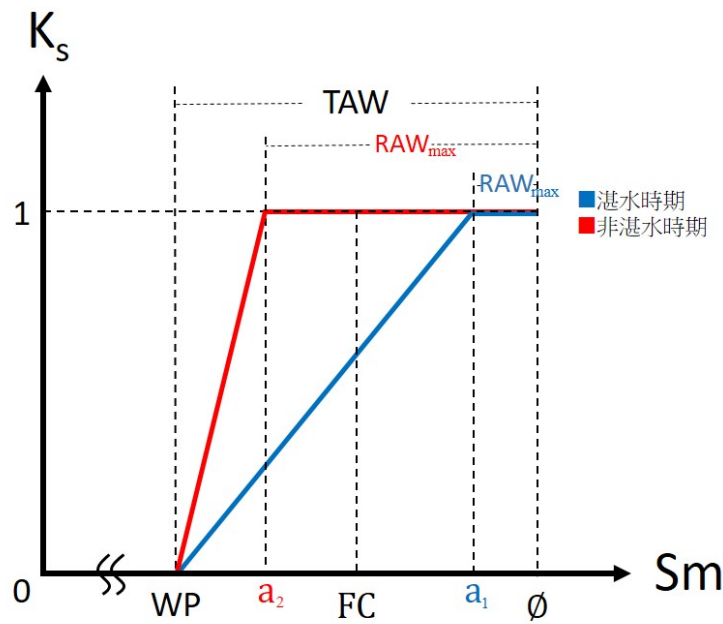


圖 3-8、水稻水分逆境係數圖

在生育天數第 91 天斷水排乾時，可將土壤水分視為飽和狀態，田間容水量(FC)以上至飽和間的水量，桃園大圳灌區為 58.0 mm，石門大圳灌區為 56.8 mm，此時滲漏量(P)為每日 4.0 mm，持續發生滲漏直到土壤含水量(Sm)小於田間容水量(FC)。期間之田間蒸發散量(ET)屬於土壤供應之田間蒸發散量(ET₂)，可由凋萎點以上的土壤含水量提供，當土壤含水量(Sm)低於非灌水時期土壤水分逆境臨界含水量(a₂)時，需佐以灌溉，以避免影響作物吸收水分的能力。而需要灌溉多少水，則必須考量降雨因素，降雨影響於 3.2.5 小節陳述，灌溉需水量於 3.2.6 小節陳述。

3.2.3 滲漏量(percolation, P)

入滲(infiltration)為水流由地面上經由土壤滲入地面下之過程，當水源不斷供應、使土壤水分含量超過田間容水量時，超過部分之水分便隨重力方向而流動，此一現象稱為滲漏(percolation) (國家教育研究院—力學名詞辭典，2002)。入滲與滲漏機制主要與土壤組成性質有關，然而水稻田因灌溉蓄水及存在硬盤層(或稱牛踏層)的特性，使入滲與滲漏機制變得更為複雜：灌溉蓄水使得土壤含水量處於飽和狀態；硬盤層則使得重力排水受到阻礙，水頭與含水量在該層呈現急遽變化之情況(吳富春、沈易徵，2001)。本節先敘述滲漏部分，入滲部分留至 3.2.8 節敘述。

滲漏量(P)依土壤含水量(Sm)是否大於田間容水量(FC)來決定，可細分為垂直滲漏(P_V)與水平滲漏(P_H)，本研究中，將垂直滲漏定義為「土壤水分滲透通過硬盤層之滲漏，視為深層地下水補注來源」；水平滲漏（或稱橫向滲漏）定義為「土壤中非垂直滲漏之水分，受毛細作用或重力梯度影響而水平、橫向滲透至接鄰土壤、排水路或河川，視為灌溉回歸水的來源之一（暗回歸水）」。滲漏量(P)、垂直滲漏量(P_V)和水平滲漏量(P_H)公式如下：

$$P_t = \min\{ \max\{ 0, S_{m_t} - FC \}, P_{\max} \} \quad (3-7)$$

$$P_{V,t} = \alpha \times P_t \quad (3-8)$$

$$P_{H,t} = (1 - \alpha) \times P_t \quad (3-9)$$

P_t：第 t 天之滲漏量[mm]

P_{V,t}：第 t 天之垂直滲漏量[mm]

P_{H,t}：第 t 天之水平滲漏量[mm]

α：垂直滲漏比例[無因次]

垂直滲漏比例(α)參考洪毓謙(1999)、陳豐文與劉振宇(2013)對於不同坡度下，垂直滲漏、水平滲漏之比例關係，以計算公式如下：

$$\alpha = -0.003S^2 - 0.0154S + 0.9 \quad (3-10)$$

α：垂直滲漏比例[無因次]

S：灌區坡度[%]

註：公式適用範圍介於坡度 0%~3.75%

模式中兩灌區坡度以 1：100 作為參數設定，將 S = 1 [%]代入(3-10)求得垂直滲漏比例 α = 0.8816；水平滲漏比例 1 - α = 0.1184。水田滲漏量因地區不同而差異甚大，水田保水能力與田地耕作歷史長短有很大的關係(Manon and Bernd, 2007)。為此，本研究採簡傳彬(2003)在桃園大圳第二支線灌區，以滲漏桶測定法測得之現地試驗結果，稻米生長前 40 天之平均滲漏量為每日 3.8 mm，第 41 以後之平均滲



漏量為每日 4.0 mm。以前述之 α 、 $(1-\alpha)$ 比例分別計算最大垂直滲漏率($P_{V,max}$)與最大水平滲漏率($P_{H,max}$)，結果如下表 3-5 所整理。

表 3-5、桃園地區水田滲漏率

生育階段	平均滲漏率(mm/day)	垂直滲漏(mm/day)	水平滲漏(mm/day)
前 40 天	3.8	3.35	0.45
第 41 天以後	4.0	3.53	0.47

資料來源：簡傳彬(2003)，經筆者整理

3.2.4 田間蒸發散量(paddy field evapotranspiration, ET)

欲計算田間蒸發散量(ET)，須先求得潛能蒸發散量(potential evapotranspiration, PET)，再乘上作物係數(Kc)以反映不同作物間差異。作物係數的部分將於後續第四章 4.1.3 小節農業情境設定中說明；潛能蒸發散量(PET)計算公式之選擇上，考慮所使用之桃園農改場氣象資料未包含足夠氣象參數供 Penman-Monteith 方程式(Allen et al., 1998)使用，故改採 Hamon Method(Hamon, 1961；Hamon, 1963)計算潛能蒸發散量，Hamon 法僅需輸入日平均溫度、飽和蒸氣壓及日照時數參數（實際計算上僅需準備日尺度溫度資料）。

修正後之 Hamon 公式(Shaw and Riha, 2011；Lee and Huang, 2014)如下：

$$PET = 29.8 \times N \times \frac{e_s}{T_{avg} + 273.2} \quad (3-11)$$

PET：潛能蒸發散量[mm/day]

N：日照時數[hour]

e_s ：平均飽和蒸氣壓[kPa]

T_{avg} ：日平均溫度[°C]



日照時數換算公式如下：

$$N = \left(\frac{24}{\pi}\right) \times \omega \quad (3-12)$$

$$\omega = \cos^{-1}[-\tan(\delta) \tan(\varphi)] \quad (3-13)$$

$$\delta = 0.409 \times \sin(0.0172 \times J - 1.39) \quad (3-14)$$

N：日照時數(daylight hours)[hour]

ω ：日落時角(sunset hour angle)[radian]

δ ：赤緯(declination)[radian]

φ ：緯度(latitude)[radian]，套用北緯 25 度，並乘上 π 除以 180 換算成弧度。

J：儒略日(Julian Day of the year)[介於 1 (January 1)至 365 或 366 (December 31)]

飽和蒸氣壓可由溫度資料進行推估，採用 Allen 等人(1998)飽和蒸氣壓與平均飽和蒸氣壓(e_s)推估公式，分別如下所示：

$$e(T) = 0.6108 \times \exp\left(\frac{17.27T}{T+237.3}\right) \quad (3-15)$$

$$e_s = \left(\frac{e(T_{\max})+e(T_{\min})}{2}\right) \quad (3-16)$$

$e(T)$ ：溫度 $T^{\circ}\text{C}$ 時之飽和蒸氣壓[kPa]

T：溫度 $^{\circ}\text{C}$

T_{\max} ：日最高氣溫 $^{\circ}\text{C}$

T_{\min} ：日最低氣溫 $^{\circ}\text{C}$

最後參考 Doorenbos 和 Pruitt(1977)、Steduto 等人(2012)對於最大作物蒸發散量(Maximum Crop Evapotranspiration, ET_x)之估公式，假設土壤水分能充分供給作物所需時，最大作物蒸發散量公式如下：



$$ET_x = K_c \times ET_0$$

ET_x ：最大作物蒸發散量[mm/day]

K_c ：作物係數[無因次]

ET_0 ：參考作物蒸發散量[mm/day]

此處之 ET_0 原應使用 Penman-Monteith 法求得，受限於氣象參數不足，本研究改採 Hamon 法計算。然而兩者前提假設不同，Penman-Monteith 法基於質量與能量傳輸之概念，考量較完整的蒸發散量影響因子；Hamon 法則僅以溫度作為輸入參數，水利署(2007)針對桃園地區月平均蒸發散量之兩法計算結果比較，如圖 3-9 所示：

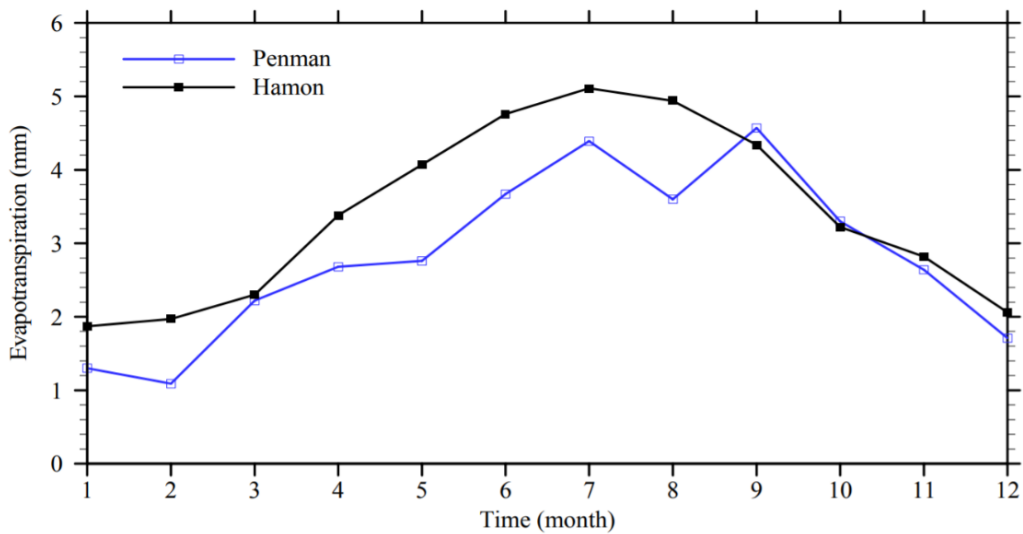


圖 3-9、桃園地區月平均蒸發散量 Penman-Hamon 比較（水利署，2007）

由上圖可發現，以桃園地區來說，Hamon 法求得之月平均蒸發散量普遍大於 Penman-Monteith 法所得。本研究未深入探討桃園地區兩方法間的轉換與校正，僅直接採用 Hamon 法所得之潛能蒸發散量(PET)替代 Hamon 法之 ET_0 ，此作法可能使最終田間蒸發散量(ET)之計算有高估的情況，特別是對於一期稻作 4 月至 7 月期間。



由於蒸發散量還受到土壤含水量多寡影響，當土壤水分低於一定程度時，蒸發散量將會受到打折，故須加入一水分逆境係數(water stress coefficient, K_s)修正（見 3.2.2 小節），修正後最大作物蒸發散量如下所示：

$$ET_{ax} = K_c \times K_s \times ET_0 \quad (3-18)$$

ET_{ax} ：修正後最大作物蒸發散量[mm/day]

K_c ：作物係數[無因次]

K_s ：水分逆境係數[無因次]

ET_0 ：參考作物蒸發散量[mm/day]

因實際作物蒸發散量(Actual Crop Evapotranspiration, ET_a)非常難以準確測量，模式中的每日田間蒸發散量(ET)改採修正後最大作物蒸發散量(ET_{ax})進行後續水平衡及用水推估。且因模式設計以日為計算單位，故這裡修正田間蒸發散量(ET)單位(mm/day)，改為(mm)以利後續公式整合。

考量水平衡模式中拆分為湛水層與耕壤層，田間蒸發散量(ET)亦須拆分為二：湛水供應之田間蒸發散量(ET_1)和土壤供應之田間蒸發散量(ET_2)，並在水平衡計算上假設田間蒸發散量優先由土壤供應，不足額才由湛水水量供應，計算公式如下：

$$ET_{2,t} = \min\{ET_t, Sa_t\} \quad (3-19)$$

$$ET_{1,t} = \min\{ET_t - ET_{2,t}, H_t\} \quad (3-20)$$

ET_t ：第 t 天之田間蒸發散量[mm]

$ET_{2,t}$ ：第 t 天之土壤供應之田間蒸發散量[mm]

$ET_{1,t}$ ：第 t 天之湛水供應之田間蒸發散量[mm]

Sa_t ：第 t 天之土壤可用水量[mm]

H_t ：第 t 天之田間水面高度[mm]，即第 t 天之初始田間水面高度

上述假設將使得實際運算中 ET_1 基本上為零，因為在有湛水的情況下，耕壤層呈現飽和狀態，不會發生土壤含水量不足以提供 ET_2 所需的情況；而無湛水時，勢必不存在由湛水供應之田間蒸發散量(ET_1)。湛水時期之田間蒸發散量(ET)應由湛水面蒸發加上水稻自土壤吸收水分後，經葉片蒸散作用之水量所構成，但由於本研究中未加以細分計算，僅將田間蒸發散量(ET)拆成湛水供應與土壤供應，並假設先由土壤供應之。

3.2.5 田間有效降雨量(paddy field effective rainfall, ER)

有效降雨量在定義上如同乾旱定義般多樣，從過去以來，學者根據不同使用情境，對其有不同的觀點解讀，陳豐文等人(2013)整理與釐清有效降雨量的諸多定義，由於本研究以水稻田作為農業灌溉主體，故將田間有效降雨量定義為「農地上任何形式之直接降雨使灌溉用水量得以減少之水量」。當日田間有效降雨量(ER_t)的最大值為該日田間蒸發散量(ET_t)加上該日滲漏量(P_t)和該日土壤可用水量缺額(ΔSa_t)，再加上該日田間可再蓄水高差($h_t - H_t$)。當田間湛水時，土壤含水量達飽和， ΔSa_t 為零；非湛水時期，($h_t - H_t$)則為零；該日降雨量(R_t)小於該日田間有效降雨量最大值時，所有降雨均視為有效降雨。田間有效降雨量方程式如下：

$$ER_t = \min\{R_t, ET_t + P_t + \Delta Sa_t + (h_t - H_t)\} \quad (3-21)$$

ER_t ：第 t 天之田間有效降雨量[mm]

R_t ：第 t 天之降雨量[mm]

ET_t ：第 t 天之田間蒸發散量[mm]，詳細內容請見 3.2.4 小節

P_t ：第 t 天之滲漏量[mm]，詳細內容請見 3.2.3 小節

ΔSa_t ：第 t 天之土壤可用水量缺額[mm]

h_t ：第 t 天之有效田埂高度[mm]

H_t ：第 t 天之田間水面高度[mm]



3.2.6 灌溉需水量(irrigation water requirement, IWR)

欲推估農民在不同灌溉期程、不同水文條件下，需要多少灌溉用水量，此處參考李苑華(2018)田間需水量計算方式，並加以修正。模式中考量乾旱缺水情況下，將以糊熟期前後劃分湛水和非湛水兩種灌溉期程（詳見 4.1.3 小節）。湛水與否將對應各自的灌溉需水量計算公式：湛水時期，土壤水分呈現飽和狀態，故不須考慮應補足多少土壤可用水量缺額(ΔSa)（若未湛水而使土壤水分呈現未飽和狀態，則直接假設為耕種失敗），考量因子包括田間蒸發散量(ET)、滲漏量(P)、有效降雨量(ER)，且由於假設灌溉需水量要能滿足湛水深度區間的最小值(DP_{min})，因此還須考量 DP_{min} 與田間水面高度(H)之間的差值；在進入糊熟期（生育天數 91 天）時，會執行斷水排乾，往後至收穫日屬於非湛水時期。期間，灌溉需水量不須考慮湛水缺額問題，除了考量田間蒸發散量(ET)、滲漏量(P)、有效降雨量(ER)之外，由於土壤可用水量(Sa)可供應田間蒸發散量(ET)和滲漏量(P)使用，亦即可以不用灌溉那麼多水，故在方程式中要扣掉土壤可用水量(Sa)之值；非耕作時期，則無灌溉需水量。兩種灌溉期程的灌溉需水量計算公式分別如下所示：

湛水時期（生育天數 1~90 天）

$$IWR_t = \max\{ 0, ET_t + P_t + (DP_{min,t} - H_t) - ER_t \} \quad (3-22)$$

非湛水時期（生育天數 91~120 天）

$$IWR_t = \max\{ 0, ET_t + P_t - ER_t - (Sm_t - a_2) \} \quad (3-23)$$

IWR_t ：第 t 天之灌溉需水量[mm]

ET_t ：第 t 天之田間蒸發散量[mm]

P_t ：第 t 天之滲漏量[mm]

$DP_{min,t}$ ：第 t 天之湛水深度區間最小值[mm]

H_t ：第 t 天之田間水面高度[mm]

ER_t ：第 t 天之田間有效降雨量[mm]

Sm_t ：第 t 天之土壤含水量[mm]



a_2 ：非湛水時期土壤水分逆境臨界含水量[mm]

3.2.7 實際灌溉用水量(actual irrigation volume, IR)

模式中農民決策灌溉多少水時，可能因為在某一時間點水量並不足以滿足最大湛水深度，僅能使田間水面高度滿足最小湛水深度或甚至不足，此時實際灌溉用水量(IR)小於等於灌溉需水量(IWR)。倘若乾旱情況嚴重，使得供水不足以滿足所有種植灌溉面積之最小湛水深度的話，稻作產量將會受到影響。現有常被使用的作物模式中，例如：AquaCrop、CropSyst、DDSAT、ORYZA2000、CERES-Rice，可計算不同水分情境下的稻米生產量(Steduto et al., 2009；Stöckle et al., 2003；Jones et al., 2003；Dias et al., 2016；Bouman et al., 2001；Akinbile, 2013)。不同生育時期，產量對於缺水逆境的敏感度並不相同，且除了土壤水分與湛水深外，還受到土壤含氮濃度、輻射量、溫度等環境因子影響。由於本研究在生育天數方面，並非採用累積生育度數法(accumulated growing degree days)計算(Gao et al., 1992；Rani and Maragatham, 2013)，而是簡化模式，假設生育天數固定(一、二期均假設 120 天)，並在產量部分以單位面積產量統計平均值作為定值參數假設。在這樣的簡化假設下，無法利用現有作物模式來細部計算產量變化。因此，本研究簡化作物產量模式，改以自訂一項收穫衰退係數 $D=0.99$ ，累計發生缺水逆境之天數，於計算最終產量時乘上一收穫衰退項 D^n (n 值為發生缺水逆境之天數)。缺水逆境分為湛水時期與非湛水時期做討論：湛水時期，以「田間水面高度低於最小湛水深度且不為零」視為遭遇缺水逆境，並假設若田間水面高度為零(亦即無湛水深)，則直接視為耕種失敗，該期作將無收穫；非湛水時期，以「土壤含水量低於土壤水分逆境臨界含水量 a_2 」視為遭遇缺水逆境。當土壤含水量低於凋萎點時，視為耕種失敗，該期作將無收穫。

特別注意於插秧前的整田作業用水，模式中設定必須嚴格滿足 180 mm 用水量需求，因為水田保水能力除了受硬盤層(牛踏層)不透水特性影響外，還來自於整田翻犁時，使細顆粒泥沙往下填滿粗孔隙之過程的影響(洪毓謙，1999)。



整旬配水量分配至每日實際灌溉用水量的部分，將優先滿足灌溉需水量額度，不超灌亦不減灌，直到剩餘可用之旬配水量不能滿足該日灌溉需水量時，才以剩餘可用之旬配水量計之。實際灌溉水量(IR)方程式如下所示：

$$IR_t = \min\{IWR_t, AW_t\} \quad (3-24)$$

IR_t ：第 t 天之灌溉用水量[mm]

IWR_t ：第 t 天之灌溉需水量[mm]

AW_t ：第 t 天之灌溉可用水量[mm]

3.2.8 入滲量(infiltration, Inf)

承接 3.2.3 節敘述，模式中入滲量多寡受三種因素影響：土壤可接收量、土表以上可供應水量、飽和入滲率限制。土壤可接收量由土壤供應之田間蒸發散量(ET_2)、滲漏量(P)、土壤可用水量缺額(ΔSa)決定；土表以上可供應水量由田間水面高度(H)、實際灌溉水量(IR)、田間有效降雨量(ER)、湛水供應之田間蒸發散量(ET_1)決定；隨著土壤含水量增加，入滲速率會逐漸減少，直至土壤水分呈現飽和狀態時，此時入滲率為飽和入滲率(Inf_{sat})，即飽和水力傳導度，由表 3-4 可知，桃園大圳灌區為 364.54[mm/day]；石門大圳灌區為 308.64[mm/day]。但在土壤水分非飽和的情況時，入滲速率是變動的。由於從飽和水力傳導度的數值大小，對比滲漏量、田間蒸發散量、土壤可接收量，可知道飽和入滲率已遠大於非飽和狀態下可能入滲的值。因此在土壤非飽和的情況下，本研究不另行探究入滲率數值，僅以飽和入滲率概估其限制。計算公式如下：

$$Inf_t = \min\{ ET_{2,t} + P_t + \Delta Sa_t, H_t + IR_t + ER_t - ET_{1,t}, Inf_{sat} \} \quad (3-25)$$

Inf_t ：第 t 天之入滲量[mm]

$ET_{2,t}$ ：第 t 天之土壤供應之田間蒸發散量[mm]

P_t ：第 t 天之滲漏量[mm]

ΔSa_t ：第 t 天之土壤可用水量缺額[mm]



H_t ：第 t 天之田間水面高度[mm]，即第 t 天之初始田間水面高度

IR_t ：第 t 天之實際灌溉用水量

ER_t ：第 t 天之田間有效降雨量[mm]

$ET_{1,t}$ ：第 t 天之湛水供應之田間蒸發散量[mm]

Inf_{sat} ：飽和入滲率[mm]，即飽和水力傳導度

3.2.9 田間湛水面水平衡

設計田間湛水面水平衡方程式，僅看湛水層之水平衡。令下一日田間水面高度(H_{t+1})等於當日田間水面高度(H_t)加當日田間有效降雨量(ER_t)和實際灌溉用水量(IR_t)，再減去當日湛水供應之田間蒸發散量($ET_{1,t}$)和損失之入滲量(Inf_t)可得之。超過有效田埂高度(h_t)之水量將會溢流而出田區，在前面小節計算田間有效降雨量(ER)和實際灌溉用水量(IR)時，已考慮過水量超過有效田埂高度(h)的情況，故此處方程式中不需要額外寫入有效田埂高度(h)之限制。此外，研究中未探討降雨、排水、超額灌溉所造成之溢流可供下游灌區使用之問題，故未將溢流量納入水量來源。計算方程式如下：

$$H_{t+1} = \max\{ 0, H_t + ER_t + IR_t - ET_{1,t} - Inf_t \} \quad (3-26)$$

H_{t+1} ：第 $t+1$ 天之田間水面高度[mm]，等同第 t 天最終田間水面高度

H_t ：第 t 天之田間水面高度[mm]，即第 t 天之初始田間水面高度

ER_t ：第 t 天之田間有效降雨量[mm]，詳細內容請見 3.2.5 小節

IR_t ：第 t 天之灌溉用水量[mm]，詳細內容請見 3.2.7 小節

$ET_{1,t}$ ：第 t 天之湛水供應之田間蒸發散量[mm]，詳細內容請見 3.2.4 小節

Inf_t ：第 t 天之入滲量 [mm]，詳細內容請見 3.2.8 小節

註：程式計算中， H_{t+1} 為每日田間湛水面水平衡計算的最終結果



3.2.10 土壤含水量水平衡

設計土壤含水量水平衡方程式，僅看耕壤層之水平衡。令下一日土壤含水量 ($S_{m,t+1}$) 等於當日土壤含水量 ($S_{m,t}$) 加上當日自土表以上得到之入滲量 (Inf_t)，減去當日土壤供應之田間蒸發散量 ($ET_{2,t}$) 與當日滲漏量 (P_t)，方程式如下：

$$S_{m,t+1} = S_{m,t} + Inf_t - ET_{2,t} - P_t \quad (3-27)$$

$S_{m,t+1}$ ：第 $t+1$ 天之初始土壤含水量[mm]，等同第 t 天最終土壤含水量

$S_{m,t}$ ：第 t 天之土壤含水量[mm]，即第 t 天之初始土壤含水量

Inf_t ：第 t 天之入滲量[mm]

$ET_{2,t}$ ：第 t 天之土壤供應之田間蒸發散量[mm]

P_t ：第 t 天之滲漏量[mm]，包含 $P_{v,t}$ 與 $P_{H,t}$

註：程式計算中， $S_{m,t+1}$ 為每日土壤含水量水平衡計算的最終結果

第四章、水市場模擬遊戲設計



本章描述水市場模擬遊戲(WMSG)的情境設定與遊戲規則，情境設定上包含歷史乾旱事件之選擇、供水系統模式的輸入水源、農業與工業的介紹與相關參數等；交易機制參考澳洲現行水市場之交易機制，將其簡化、轉換成回合制的遊戲模式；遊戲程式以 Python 語言撰寫，整合水庫供水系統動力模式與水稻田水平衡模式，並設計玩家進行遊戲時之使用者介面，將玩家操作與後台運算結果儲存於 Google 雲端硬碟中，透過 Google 表單將資訊呈現給玩家。整體架構如下圖 4-1 所示：

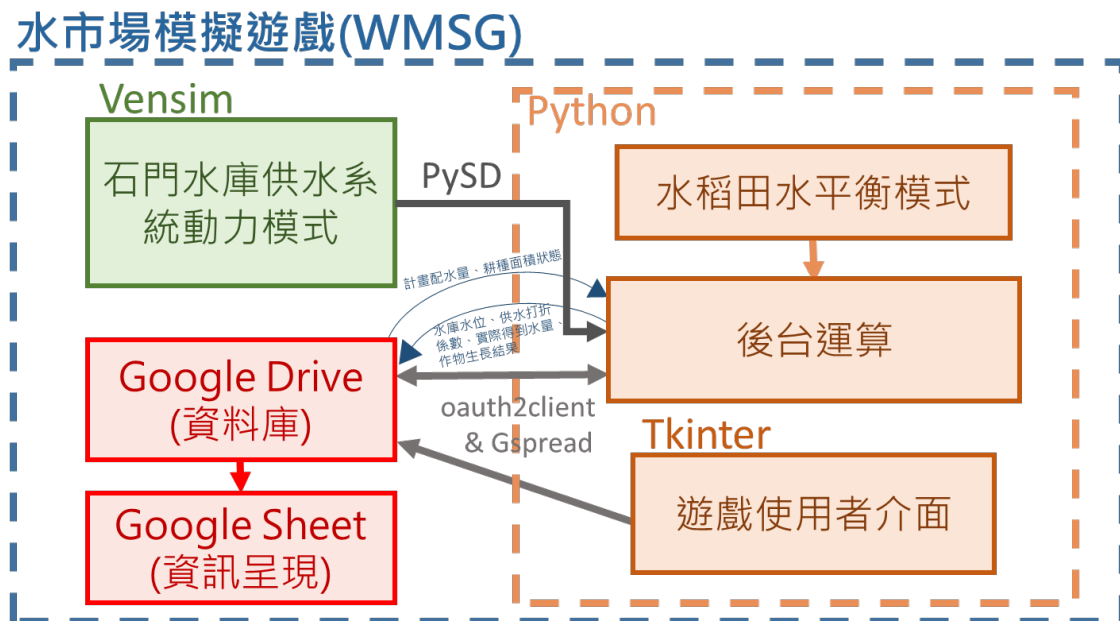


圖 4-1、WMSG 架構圖

4.1 情境設定

本節介紹本研究選擇乾旱情境之依據，說明石門水控供水系統動力模式與水稻田水平衡模式的參數設定與假設，並描述如何訂定水市場模擬遊戲(WMSG)中農業方與工業方之分組與各自角色的經濟參數。



4.1.1 乾旱事件選擇

欲選擇歷史中適合用來作為模式中氣象水文參數的年份，考量水資源交易主要於乾旱時期較為活絡，故回顧民國 91 年以來全台發生大規模停灌休耕事件，如圖 4-2 所示，共計六起，其中桃園地區有五起。參考農委會「臺灣地區稻作種植、收穫面積及產量」統計資料，以民國 93 年和 104 年一期稻作種植面積減少情況最為嚴重，分別僅有 2,459 公頃和 4,157 公頃。但由於在水文資料蒐集上，民國 104 年入流量資料無法取得，故模式中採用民國 93 年停灌事件作為背景主軸。由於當年度一期稻作是否有足夠的水得以整田插秧，很大程度仰賴前一年豐水期水量是否充沛，故在設定水文資料時間範圍時，應涵蓋民國 92 年為佳。

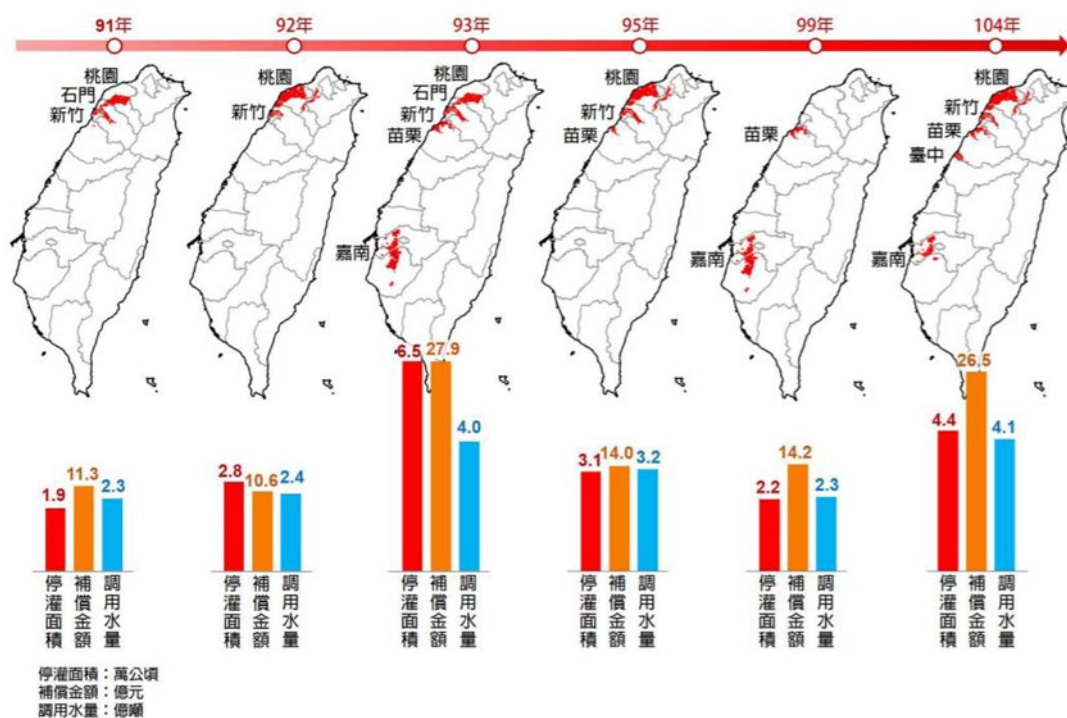


圖 4-2、大規模停灌休耕事件（資料來源：《2015 農田灌溉白皮書》）

註：民國 93 年桃園農田水利會灌區確實有執行一期稻作停灌休耕紀錄，圖中 93 年處桃園灌區乃應上色而未上色。



4.1.2 水源相關設定

水源供給方面，在石門水庫供水系統動力模式中，以石門水庫入流量、鳶山堰側流量、三峽河入流量作為供水系統的水源供給主要來源，流量資料取得上參考水利署(2014)。降雨的部分以影響農業用水為主，分為田間與非田間兩類型。田間降雨須換算成田間有效降雨，詳細內容請見 3.2.5 小節；非田間降雨的部分，則會影響市管河川、野溪之流量與埤塘額外入流水源，但由於模式精簡概估市管河川、野溪水與埤塘的水源供給，故此處非田間降雨所造成的水源供給影響，將一併反映於其他水源供應灌溉用水之概估占比中。參考水利署(2005^a)報告書中桃園農田水利會灌區內之灌溉需水量，石門水庫配水量占 54.9%，有效降雨量占 17.6%，其餘由市管河川、野溪、埤塘集水、灌溉回歸水或大漢溪未控流量等其他水源供應，占 27.5%。將此其他水源占比 27.5%劃分為「灌溉回歸水」、「埤塘額外支援水量」、「市管河川與野溪引水」、「地下水」四個部分做進一步敘述與假設。

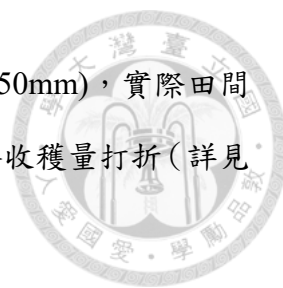
- (1) 灌溉回歸水：參考陳豐文、劉振宇(2013)，將灌溉回歸水定義為「灌溉期間，水田經引水灌溉後產生之回歸水量，包括由灌溉排水路和田間的地表水流流至下游（明回歸水）及地下水滲流水流至下游溝渠而湧出者（暗回歸水）」。明回歸水方面，由於部分排水路受到民生、工業汙水流入，使其在水質上有農藥、肥料、重金屬或其他有毒物質的問題，再次使用需要額外處理，否則會造成農地與作物污染。實務上仍有可以有效利用灌溉回歸水的案例，但多為水質狀況較好的小區域型灌溉管理。而超額降雨或超額灌溉使田間水面高度大於田埂缺口時，其所產生之溢流雖可被下游灌區使用，但本研究暫不考慮下游灌區擁有此不穩定水源來源；上游灌區斷水排乾時所放流的田水亦同，暫不納入考量。故模式中不考慮複雜的灌溉回歸水管理規劃，僅以一概估灌溉用水占比估算之。占比方面，參考簡傳彬等人(2000)以桃園大圳為試驗區域的試驗結果，當灌區入流量介於每單位面積 6.41~131.88[mm/day]時，可產生 3.35%~89.14%的回歸水比例。考量模式屬乾早年情境，降雨量與灌溉用水量相對較少，以及部分

灌溉區域存在回歸水汙染致使不可使用問題，模式中回歸水比例採最低的 3.35% 作為假設。

- (2) 市管河川與野溪引水：農民可自河川與野溪引水入埤塘蓄存或轉供灌溉，惟市管河川與野溪不如大漢溪流量可受石門水庫放水控制，在流量上隨乾、濕季不同而有所變動，非一穩定可供應定量之水源。考量模式中採乾早年水文情境，假設市管河川、野溪之水源僅占灌溉需水量的 20%。
- (3) 埤塘額外支援水量：埤塘為桃園地區農業蓄水的重要特色，具備乾旱時期農業灌溉用水供應、調度之功能，但由於不同埤塘所處位置、有效蓄水量大小、是否有魚介行為等因素均會影響該埤塘供應周遭農地灌溉用水的能力，雖有諸多研究談論埤塘調配水源之功能，為了避免增加農業方用水決策的複雜性，模式中不考慮複雜的埤塘水源調配問題。然而埤塘水源除了灌渠引水外，還包括河川與野溪引水、周圍未控逕流、降雨等等，河川與野溪引水於前述(2)中已考慮，故扣除水庫供給、河川與野溪引水後，將剩下的水源稱為埤塘額外支援水量，占灌溉需水量的 4.15%，視為農業方的灌溉用水調適能力。
- (4) 地下水：由於該區水稻田主要仰賴桃園大圳、石門大圳及河川、埤塘之水源供給，使用地下水的比例近乎沒有，故本研究中不考慮地下水部分。

4.1.3 農業相關設定

由於各地區依氣候條件、土壤特性、選植稻種等不同，在水稻栽培灌溉的時程、水稻生育天數、作物係數(K_c)、灌溉需水量等方面亦有所差異。本研究在作物係數(K_c)部分，參考姚銘輝、陳守泓(2005)試驗台灣本土水稻之結果；其餘灌溉排水操作與農藝特徵之描述，以高振程(2003)整理過去學者相關文獻研究之結果，當中修正部分參數值或描述內容，以合乎本研究之假設情境，整理如表 4-1。湛水深度(depth of ponding, DP)為水稻各生長階段，田中所需要蓄水之建議水深；有效田埂高度(effective ridge height, h)為田埂缺口高度，水深超過此高度時將會溢流排入排水道；實際田間水面高度則以 H 表示。湛水深度與實際田間水面高度均小於等於



有效田埂高度，但由於部分湛水深度屬於一區間值(例如：30~50mm)，實際田間水面高度在模式中限制必須滿足最小湛水深度區間值，否則最終收穫量打折(詳見3.2.7 小節中收穫衰退係數敘述)。

水田在插秧前一、兩日須進行整田作業，一般整田用水量介於 100 mm 至 200 mm 間，視土壤特性與翻耕深度而定。模式中假定整田作業時間為插秧前一日，參考桃園農田水利會灌溉計畫書，整田用水量以 180 mm 作為定值，該日蒸發量和入滲、滲漏量不另行計算，合併考量於「整田完後土壤水分呈現飽和狀態但無湛水」之假設。

一期稻作與二期稻作由於生長氣候不同，在生育天數上理當不同。通常一期稻作生育天數為 120 天，各生育階段所對應之生育天數合併整理於表 4-1 中；二期稻作生育天數則較一期稻作短，約 110 天左右。本研究模式中生育天數之期程設定，礙於文獻資料不足，並未能反映兩期稻作之差異性，僅以一期稻作之期程為主進行假設模擬，此假設將可能使二期稻作灌溉需水量被高估。然而回顧民國 92 年至民國 104 年一、二期稻作實際用水量，每公頃用水量二期稻作普遍大於一期稻作，其原因來自於二期稻作處於豐水期，水源供給相較一期稻作來的豐沛，故實際灌溉用水上不會十分精準與節省。最終模式中，二期稻作仍以一期稻作之生育天數數值作為推估，筆者認為是可接受的。倘若後人研究能取得更完整的生育資料，可再進行模式修正。

在水稻分蘗後期，為了控制氮素吸收、抑制無效分蘗，水田會施行曬田(斷水排乾)，通常排乾三至五天後，再重新蓄水兩到三天，如此反覆執行兩到三次。然而在乾旱時期水源不足的情況下，實務上寧可不曬田以節省灌溉用水，也不願發生無水可再湛水的窘境。本研究乃採乾旱年水文情境，農業用水面臨供水打折、灌溉用水吃緊的情況，故在分蘗後期假設不施行曬田，田區唯一斷水排乾情況發生於進入糊熟期之日。糊熟期以後保持土壤濕潤但不湛水，行五天一灌，期間滲漏量(P)依土壤含水量(S_m)是否大於田間容水量(FC)來決定。



表 4-1、水稻栽培彙整

生育天數	生育階段	一期稻作 K _c 值	二期稻作 K _c 值	湛水深度 DP(mm)	有效田埂高度 h(mm)	水稻生理用水特徵		
--	秧苗期/整地期	--	--	(150)	200	秧苗由代耕隊處理，農地灌溉不計入秧苗期		
1~5	插秧	0.92	1.01	30~50	60	保持 3~5 公分湛水深以利秧苗存活		
6~15	成活期							
16~30	分蘗開始	1	1.11	20~30	80	避免湛水過深與不適水溫而影響分蘗		
	有效分蘗期							
31~45	最大分蘗期			0	0	0	0	排水以利土壤通氣、促進根系發展
	停滯期							
46~60	幼穗形成開始	1.13	1.23	50~100	100	缺水將抑制幼穗形成，對產量影響甚大		
	幼穗形成期							
61~75	孕穗期			0	0	50~100	100	土壤氧氣消耗達高峰，耐旱性較強 水稻需水量達高峰
	抽穗期開花期							
76~90	乳熟期	0.89	0.93	20~30	60	齊穗後逐漸降低湛水深至 2~3 公分		
91~105	糊熟期			0	0	行濕潤灌溉		
106~120	黃熟期			0	0	穗上穀粒一半變黃時停止灌溉		
121~	完熟期	0.89	0.93	0	0	如無法適期收穫，視田面乾燥程度行濕潤灌溉		

資料來源：姚銘輝、陳守泓(2005)；高振程(2003)；筆者整理

遊戲模擬中，農業方分組參考水利署(2005^a)灌溉休耕分組建議進行交易單位劃分，並依桃園農田水利會與石門農田水利會 2005 年灌溉計畫書之各支線灌溉面積及田間需水量按組別加總，最終計算求得「灌區面積占比(%)」，作為後續計算各組別計畫配水量的分配權重，並自行訂定各自插秧時程，整理如表 4-2。

表 4-2、農業方交易單位資料

灌區	組別	工作站	灌溉面積	組內面積占比(%)	灌區面積占比(%)	插秧時程	
						一期稻作	二期稻作
桃園大圳灌區	上游組	桃園	1,686	0.199	0.376	2 月下旬 (2 月 21 日)	7 月上旬 (7 月 1 日)
		大竹	2,766	0.327			
		大園	2,209	0.261			
		大崙	1,797	0.212			
	中游組	草漯	2,293	0.334	0.305	3 月上旬 (3 月 1 日)	7 月中旬 (7 月 11 日)
		新坡	1,374	0.200			
		觀音	3,191	0.465			
	下游組	新屋	3,365	0.470	0.319	3 月中旬 (3 月 11 日)	7 月下旬 (7 月 21 日)
		湖口	3,795	0.530			
	石門大圳灌區	上游組	八德	2,385	0.367	0.533	2 月下旬 (2 月 21 日)
中壢			1,818	0.280			
過嶺			2,297	0.353			
下游組		楊梅	1,898	0.333	0.467	3 月上旬 (3 月 1 日)	7 月中旬 (7 月 11 日)
		富岡	2,708	0.475			
		湖口	1,100	0.193			

資料來源：桃園農田水利會(2005)、石門農田水利會(2005)

由於稻米依品種不同(例如：蓬萊、在來、秈稻、圓糯、長糯等)，種值面積、成本、產值也有所差異，為簡化模式複雜度，在單位面積產值與生產成本上，本研究僅採粗估平均，未提供農民可選種各種不同品種之選項，均以「稻米」稱之概括計算。計算一、二期稻作單位面積產值與生產成本時，資料參考自「農委會農業統計資料查詢」網站。稻米單位面積產值整理民國 93 年至 105 年之數據平均，得：一期稻作單位面積產值平均為 114,741 (元/公頃)；二期稻作單位面積產值平均為 88,175(元/公頃)。此值合乎二期稻作因氣象環境因子(颱風、日照時數、溫度等)的影響而每公頃產量普遍低於一期稻作之現況。耕地自有比率可用於後續計算單位面積生產成本時使用，資料整理民國 92 年至 104 年之數據平均，平均耕地自有占比為 97.78%，平均耕地非自有占比為 2.22%。單位面積生產成本整理民國 93 年

到民國 105 年之數據平均（當中扣除民國 100 年資料缺漏的部分），結果如下。

表 4-3、稻作生產成本

項 目	一期平均	二期平均
統 計 戶 數	526.25	514.08
總 生 產 費 (A)	115,867.38	108,615.77
直 接 成 本	94,118.24	92,744.23
種苗(籽)費	8,348.90	7,983.31
材 料 費	272.35	254.77
農藥及其他藥品費	8,800.08	9,864.00
肥 料 費	9,738.17	10,255.31
工 資	65,154.85	63,210.77
抽 水 費	1,804.06	1,176.38
間 接 成 本	21,749.30	15,871.23
農舍、農具費	657.21	688.31
設算地租或佃租 (D)	20,871.06	14,988.46
設算資金利息(E)	221.04	194.46
副 產 品 收 入 (B)	-	18.46
第一種生產費 (F=A-D-E-B)	94,770.45	93,414.31
第二種生產費 (S=A-B)	115,862.46	108,597.23
每公頃稻穀生產量(公斤)(C)	6,845.45	5,252.15
每百公斤稻穀生產成本		
第一種成本 (F/C×100)	1,385.00	1,806.62
第二種成本 (S/C×100)	1,692.96	2,101.27
平均每戶調查田面積 (公頃)	1.42	1.37

資料來源：農委會農業統計資料查詢；筆者整理

由於平均耕地非自有占比僅有 2.22%，為簡化後續棄耕成本計算，此處僅選用耕地自有的生產成本（第一種生產費）做接下來的計算。倘若將農業方可能耕種到某個時間點時，決定下一旬要棄耕、不繼續種植的情況納入考量的話，上述單位面積生產成本將會因棄耕時間點不同而有所不同。表 4-3 直接成本中，「種苗（籽）費」屬該期作一開始決定種植時便必須全部花費的成本；「工資」分成整田、插秧時期的代耕費用和收穫時期的人事費用，暫且假設 1:1 各半；其餘「材料費」、「農藥及其他藥品費」、「肥料費」、「抽水費」與「農舍、農具費」等，以均攤至全期耕種天數（120 天）方式計算；二期作之副產品收入則因其值過小，且收入時程

暫未釐清，故此處不納入拆分、省略之；計算整理結果如下表 4-4，模式中依此表數值進行計算。

表 4-4、生育天數-稻作生產成本

生育天數	一期稻作[元/(公頃×天)]	二期稻作[元/(公頃×天)]
1	41,104	39,774
2~119	177	185
120	32,755	31,791
總成本	94,776	93,433

總結來說，一期稻作單位面積產值為 114,741（元/公頃），單位面積成本為 94,776（元/公頃）。然而弔詭的是，二期稻作單位面積產值為 88,175（元/公頃），單位面積成本卻為 93,433（元/公頃），形成入不敷出的現象。推測可能原因有二：一是二期稻作在種植時面臨風災或寒害，產量減少致使單位面積產值下降，而農民仍有意願耕種乃基於政府會提供天然災害之現金救助（補貼金額為每公頃 18,000 元）；二是即使未受災損，二期稻作本身產量即小於一期稻作，但礙於一期稻作已休耕，為了維持地力且受到政府連續休耕不補助的政策影響，農民仍選擇耕種。為使遊戲模擬能順利進行，避免發生農業方玩家均不願選擇種植二期稻作（因為淨收益為負），此處假設二期稻作單位面積產值高於單位面積成本 10,000 元，即 103,433（元/公頃）。

4.1.4 工業相關設定

家用及公共給水，亦即生活用水，在《水利法第 18 條》規定中，其用水順位優於農業及工業，為了使初步模型在交易上不要太過複雜，在本研究中僅考量農業與工業兩大交易方，家用及公共給水部分不參與交易買賣，所得水量僅依計畫配水量經水庫供水規則、輸水系統傳輸而得。中科院與中油用水屬於專管輸送原水，非自來水廠之淨水，且兩者每旬配水量相比農業方而言數值很小，故在水源需求上直接依計畫配水量配合水庫供水規則、輸水管線進行配送，不作為交易部門。

由於自來水系統中，生活用水與工業用水共管，故模式中以淨水廠配水量乘上生活用水占比，作為生活用水的配水量。生活用水占比計算的部分，利用水利署各項用水統計資料庫查詢桃園市民國 105 年自來水年用水量，查得生活用水為 257,180,530 立方公尺，工業用水為 128,189,600 立方公尺，計算生活用水占比為

0.66736，工業用水占比為 0.33264。至於石門水庫對板新淨水廠配水量的部分，假設同樣地以前述占比進行估算，不另獨立推估其供水占比。

參考經濟部水利署各項用水統計資料庫之「工業用水統計—工業用水量與面積」，並選擇桃園市民國 104 年資料。以民國 104 年資料而非最新之民國 106 年資料在於為了配合工業產值資料僅更新至民國 104 年之故。現實情況中，各類型工業分散於各個區域，且可能屬多種類型產業共組一個決策單位，如工業區的整體用水需求。但礙於工業方面不易取得更精確的相關資料，模式中簡化工業方決策單位並減少參與決策的需要人數，在 25 種民國 104 年桃園市所具有的工業產業類別中，先取年用水量大於一千萬立方公尺之產業，依用水量由高至低分別為紡織業、紙漿、紙及紙製品、食品製造業、石油及煤製品製造業、化學材料製造業、電子零組件製造業、金屬製品製造業、塑膠製品製造業、化學製品製造業、電力機械器材及設備製造修配業，共計占總工業用水量的 82.13%。

接著給予此十種業別假設之毛利率（數值參考自台北市記帳士公會 105 年度營利事業各業所得額暨同業利潤標準），並參考經濟部統計處「歷年工廠校正及營運調查報告—各縣市」之 104 年桃園市統計報表，將營業額除以前述之工業用水量，得到單位水產值，再乘上假設之毛利率，得到單位水淨收益，整理如下表 4-5。

表 4-5、工業方各業別用水與經濟參數

業別	毛利率 假設	營業額 (千元)	用水量 (立方公尺)	自來水需水量 (立方公尺)	單位水產值 (元/立方公尺)	單位水淨收益 (元/立方公尺)
紡織業	0.28	129,775,479	49,800,000	29,696,432	2,606	730
紙漿、紙及紙製品	0.25	37,468,652	39,490,000	23,548,436	949	237
食品製造業	0.25	115,053,394	23,670,000	14,114,750	4,861	1,215
石油及煤製品製造業	0.19	128,016,899	21,880,000	13,047,348	5,851	1,112
化學材料製造業	0.29	133,919,600	17,830,000	10,632,277	7,511	2,178
電子零組件製造業	0.27	690,331,643	16,830,000	10,035,963	41,018	11,075
金屬製品製造業	0.235	165,203,020	13,290,000	7,925,012	12,431	2,921
塑膠製品製造業	0.221	63,463,985	11,280,000	6,726,421	5,626	1,243
化學製品製造業	0.24	109,975,938	10,850,000	6,470,006	10,136	2,433
電力機械器材及設備 製造修配業	0.2	166,297,801	10,050,000	5,992,955	16,547	3,309

資料來源：經濟部水利署各項用水統計資料庫；筆者整理

接著進一步將各業別合併為三大組，主要以單位水淨收益大小作為合併原則，同時考量合併後各大組間自來水需水量不會相差過大。A 組包含紡織業、紙漿、紙及紙製品 B 組包含食品製造業、石油及煤製品製造業、化學材料製造業、塑膠製品製造業；C 組包含電子零組件製造業、金屬製品製造業、化學製品製造業、電力機械器材及設備製造修配業。合併後大組之單位水淨收益採原先各業別之加權平均而得。此外，由於乾旱缺水對於工業影響甚大，倘若導致產線停擺、生產中斷，工業方會遭受巨大損失，故模式中假設一「缺水耐受度」係數，用以反映當缺水比例高於此數值時，將對該單位造成經濟生產損失，缺水損失程度則假設為收益減半，只要該回合中有任何一日發生低於缺水忍受度的狀態，則回合結算的收益將打對折。資料合併整理成表 4-6。

表 4-6、工業分組用水與經濟參數

工業分組	營業額 (千元)	用水量 (立方公尺)	單位水淨收益 (元/立方公尺)	自來水需水量 (立方公尺)	年計畫配水量 (立方公尺)	年計畫配 水量占比	缺水耐受 係數
A	167,244,131	89,290,000	512	53,244,869	62,826,560	0.4154	0.15
B	440,453,878	74,660,000	1,419	44,520,796	52,532,546	0.3473	0.10
C	1,131,808,402	51,020,000	5,583	30,423,935	35,898,881	0.2373	0.05
加總	1,739,506,411	214,970,000		128,189,600	151,257,987	1	

各業別在現實中理當有各自不同的需水曲線（不同產業主要用水時期不同），但由於資料取得困難，本研究中僅能假設所有業別的需水曲線相同，由石門水庫於各淨水場各旬計畫配水量之總和，乘以前述之工業用水占比 0.33264，再乘上各組年計畫配水量占比而得。由於進行遊戲模擬時，計畫配水量交易的最小單位為「萬噸」，故將前述計算結果無條件進位至萬以利後續操作。旬計畫需水量的部分，則將前述進位後的旬計畫配水量，乘以計畫需水量轉換比 0.8475（由自來水需水量加總除以年計畫配水量加總）而得。



4.2 交易機制與規則

4.2.1 整體說明

參考澳洲現行水資源交易網站 www.waterexchange.com.au，交易項目為彼此每旬之計畫配水量，以買賣雙方提交訂單(order)的方式進行交易，訂單內容包括：訂單編號（提交訂單時會自動產生編號）、旬別（屬於哪個回合的訂單）、水量、單位售價。交易採匿名制，不做價格媒合，亦無競標機制，買賣雙方須透過彼此提交的訂單內容進行旬別、水量或單位售價上的「溝通」。由於一開始雙方均不知彼此的需求情況，因此訂單水量與市場價格勢必需要歷經數個回合買賣雙方來回提交訂單後，才會漸趨於穩定、達成共識。每回合可交易的訂單旬別限定在包含下一回合、共 12 個回合範圍內，本回合交易結果已在上一回合結算，不屬於交易範圍內。

買賣分組的部分，由農業的五個分組（桃園上游、中游、下游組和石門上游、下游組）擔當賣方(Seller)，工業的三個分組擔當買方(Buyer)。其中桃園上游、中游、下游組三組為一大組，石門上游、下游組為一大組，大組內的小組成員可互相討論分享彼此的耕種/休耕面積、賣水量與水價等資訊；工業方三組間則不得互相討論與分享資訊。買方僅能買水，不能賣水；賣方反之亦然。每一旬視為一個遊戲回合，一輪遊戲共有 36 個回合，自一月上旬起到十二月下旬結束。實際運作上，由於農業方在前四個及後四個回合屬於非耕作時期，無可交易之計畫配水量，故這八個回合不列入交易回合，直接進行回合結算。回合流程說明如下圖所示：

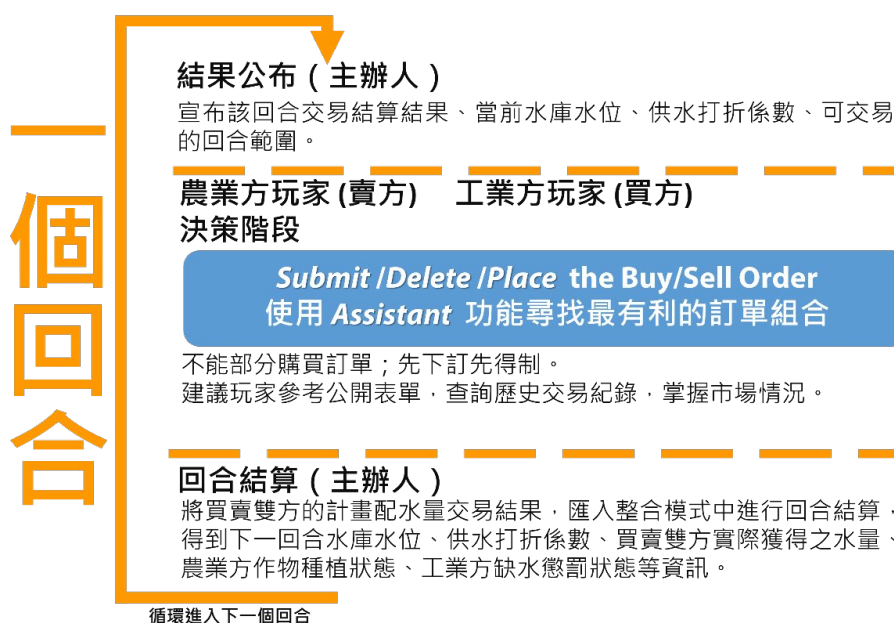


圖 4-3、遊戲回合流程說明



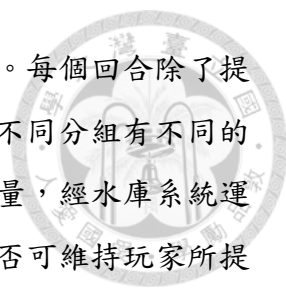
在回合結算階段，主辦人後端需處理的流程如下：



圖 4-4、回合結算後端運算流程

4.2.2 農業方

農業方分為桃園上游組、桃園中游組、桃園下游組、石門上游組、石門下游組，擔任賣方，各分組已知自己組內各個小灌區的耕地面積、單位面積種植成本與產量、各旬計畫配水量、已出售之計畫配水量及售水所得等資訊。在每回合買賣雙方決策階段時，可選擇提交出售單(sell order)出售某旬計畫配水量，出售單須填寫所屬旬別、水量、單位售價，並注意遵守主辦人宣布之可交易的回合範圍（含下一回合在內，共 12 個回合）。選擇認售買方欲購單(buy order)時，倘若欲認售的水量超過該單商品所屬回合所剩餘可出售之計畫配水量的話，則無法進行交易，避免發生超額販售的情況。下訂欲購單(buy order)採先提出者先得制(First come, first served.)，訂單不可部分出售。舉例來說，一筆水量為 100 萬噸的欲購單，賣方若欲下訂之，不能只出售 90 萬噸，必須出售恰為 100 萬噸的計畫配水量，否則交易不成立。進入回合結算時，若架上仍有該結算回合欲出售卻未售出之訂單，其訂單水量將被水庫收回。



每位農業玩家在一輪 36 個回合中，共包含兩次整田時間點。每個回合除了提交或修改出售單外，還須決定下一回合欲耕作/休耕的灌區（依不同分組有不同的灌區和耕地面積）。在整田旬時，玩家交易後所擁有的計畫配水量，經水庫系統運算後，會得到實際可用於整田之水量。該水量會經由程式判定是否可維持玩家所提交之欲耕作的面積大小，若能滿足，則依玩家規劃之面積執行該期作插秧；若否，則程式將自動判定該水量可滿足之最大灌區面積，以此面積作為玩家該期作耕種灌區面積。舉例來說：假設農業 A 組擁有三個灌區 a、b、c，灌區面積分別為 100、150、200 公頃，於某一整田旬實際獲得之灌溉水量經過程式換算後，僅可滿足 320 公頃稻田整田所需。此時即便 A 組選擇三個灌區均不休耕，系統在判定上仍然會自動將 b 灌區的 150 公頃劃為休耕狀態。反之，倘若 A 組所提交的欲耕作灌區面積已經小於程式計算後的可進行整田之面積，則不會進行額外面積修正。非整田旬的其他回合，倘若有從事耕作，程式僅確保該期作間已經進入休耕狀態之灌區不會復耕，亦即在該期作間，耕種面積只能減少，不能增加。倘若某旬實際可用於灌溉之水量未能滿足該耕種面積下的最小灌溉需水量值，將透過田間湛水高度或土壤含水量，配合減產公式反映缺水結果於期作收穫產量上。

4.2.3 工業方

工業方分為 A、B、C 三組，各分組已知自己組內每單位水價值、缺水耐受度係數、各旬計畫配水量與生產需水量、已購買之計畫配水量及花費等資訊，各組間數值不同且互不相知、無法討論與分享資訊。在每回合買賣雙方決策階段時，可選擇提交欲購單(buy order)，讓賣方知道自己有購買該旬計畫配水量的需求。欲購單須填寫所屬旬別、水量、單位售價，並注意遵守主辦人宣布之可交易的回合範圍(含下一回合在內，共 12 個回合)。下訂出售單(sell order)同樣採先提出者先得制(First come, first served.)，且出售單(sell order)不能被部分購買，例如：某出售單內容為「第十旬，21 萬噸，每噸 10 元」，買方在提出購買時，不能要求只購買 20 萬噸水，而僅能全額 21 萬噸買下。實際得到水量之計算為：購買之計畫配水量乘以農業供水打折係數，加上原先自己所擁有之計畫配水量乘以工業供水打折係數。每回合結算後，若發生該回合實際得到水量未能滿足生產所需的缺水耐受最低值，則將使該回合的生產收益減半。倘若工業方因購買而實際得到水量超過最大生產所需水量，

此時並不會超額生產，多買的水將被視為無效水量，亦即產能最高為 100%。

為了避免單一玩家壟斷市場的問題，工業方最大購買量不得超過該回合(旬)所擁有之計畫配水量的 40%。例如：假設工業 A 組在第四回合買方決策階段，選擇購買桃園上游組販售之第十回合的計畫配水量 100 萬噸，然而對工業 A 組而言，其於第十回合原先所擁有的計畫配水量為 200 萬噸，則最大購買上限為 80 萬噸 (200 萬噸×40%)，在單一訂單中之水量不可部分購買的前提下，工業 A 組所提的交易無法成立。40%的購買限制條件乃基於水庫水位低於嚴重下限時，農業用水打五折、工業用水打八折，因此工業方將有 20%用水缺口，且購買之農業計畫配水量將只能得到 50%，由此回推若欲滿足 20%用水缺口，最多須能購買 40%原先所擁有之計畫配水量。

4.3 遊戲程式設計

本節描述如何使用 Python 程式語言將石門水庫供水系統動力模式、水稻田水平衡模式、前述遊戲情境與規則等內容進行串接整合，完整程式碼請至以下連結下載：

https://drive.google.com/open?id=1GNgszRifQWIJ71ZjUk06b_kke6QQPntq

首先是石門水庫供水系統動力模式轉檔的部分，使用 James Houghton 開發之免費 Python 套件--PySD，PySD 可將 Vensim 模式檔轉換為 Python 語言，操作語法如下：

```
import pysd
model = pysd.read_vensim('TaoYuanSystem_SDLab_NoLossRate.mdl')
```

執行完畢後，會在所處位置建立一相同檔案名稱的 Python 檔。之後在運算時，可使用下述語法直接讀取已轉換好的供水系統動力模式，提升運算速度。

```
model = pysd.load("TaoYuanSystem_SDLab_NoLossRate.py")
```

匯入河川入流量與計畫配水量的部分，利用 Pandas 函式庫讀取 Excel 資料，存成 dictionary 類型，再於執行 PySD 「run」函式時，匯入至「params」欄位，並設定「Level」變數的初始值和模式欲回傳哪些項目。此處需注意依分析年份不同，石門水庫初始有效庫容量也須跟著調整。操作語法如下：

```
test_result = model.run(params = Input_Data,
                        initial_condition=(0, {'ShiMen Reservoir':1.86071e+008,
                                              'ZhongZhuang Adjustment Reservoir':5050000,
                                              'ShiMen WPP Storage Pool':600000}),
                        return_columns=['Date', 'ShiMen Reservoir', 'ShiMen Reservoir Depth',
                                       'Industry Water Demand', 'Domestic Water Demand',
                                       'ShiMen Irrigation Area Outflow', 'TaoYuan Irrigation Area Outflow',
                                       'Operation Rule Record Agriculture', 'Operation Rule Record Industry'])
```

水稻田水平衡模式本身即為 Python 語法撰寫而成，不須轉檔即可直接整合。設計邏輯上乃將農業分組的五個組別以「for」迴圈寫在一塊，自 Excel 檔案匯入該年氣象資料（溫度、降雨），以日為單位運算 365 天並輸出各組別田間水平衡之結果。

考量水市場交易必須可同步操作且匿名，以現場舉辦交易協商的方式並不可行，是故採取線上資料庫的形式，讓玩家透過遊戲使用者介面進行訂單(Order)的提交(Submit)、刪除>Delete)、下訂(Place)。線上資料庫使用 Google 雲端硬碟建立 Google Sheet，以下列點說明各項表單用途：

- Player PlayerName：供玩家查詢當前已提交及已下訂之訂單，同步更新玩家自身的決策操作（提交、刪除、下訂定單）。
- Irrigation Plan PlayerName：供農業方玩家查詢每回合交易資訊，包括原計畫配水量、預計出售量、已出售量、售水所得、調整後計畫配水量、實際得到水量、灌區耕作面積狀態。每回合玩家需填寫下一回合的灌區耕作面積狀態；實際得到水量將於回合開始時由主持人更新數據；原計畫配水量不受更動，其值可用於概估不同旬別種植全灌區面積時所需的水量；其餘項目依交易操作即時變動更新。「Information」子表單提供組內灌區面積資訊、生產成本與各期作單位面積產值。
- Production Plan PlayerName：供工業方玩家查詢每回合交易資訊，包括計畫配水量、計畫購買量、已購買量、購買量上限、最大生產需水量、臨界生產需水量、購水花費、最大旬收益、旬收益、實際得到水量、單位水價值、缺水耐受係數、總購水花費。計畫購買量、已購買量、購水花費、總購水花費依交易操作即時變動更新；實際得到水量與旬收益於回合開始時由主持人更新數據；其餘項目為固定數值，依工業角色不同而不同。
- 公開資訊-出售清單：可查閱架上出售訂單(Sell Order)內容，包括訂單編號、旬別、水量、單位水價、訂單總價；同步更新所有玩家的決策操作（提交、刪除、下訂定單）。

- 公開資訊-欲購清單：可查閱架上預購訂單(Buy Order)內容，包括訂單編號、旬別、水量、單位水價、訂單總價；同步更新所有玩家的決策操作（提交、刪除、下訂定單）。
- 公開資訊-成交清單：可查閱已成交之訂單內容，包括訂單編號、旬別、水量、單位水價、訂單總價、成交時間；同步更新所有玩家下訂訂單的交易結果。
- 公開資訊-回合結算：由主持人每回合結算後更新，提供水庫水位、農業及工業之供水打折係數、水庫運用規線等資訊。
- 主辦人-成交清單-Master：同「公開資訊-成交清單」，額外紀錄提交者與下訂者，可用於後續研究分析玩家的互動行為。
- 主辦人-Place Priority：記錄玩家提交下訂(Place)動作的先後順序，以利執行先提出者先得制。

表單建立完成後，接著透過 Google API 建立並管理各個角色的憑證，設定各個 Google Sheet 共享編輯功能給需要相關聯之使用者憑證。在 Python 語法的部分，使用 Gspread 和 oauth2client 函式庫進程式與 Google Sheet 的連結和存取。遊戲使用者介面則使用 Tkinter 函式庫進行建置，農業方（左）與工業方（右）的實際遊戲使用者介面如下圖所示：

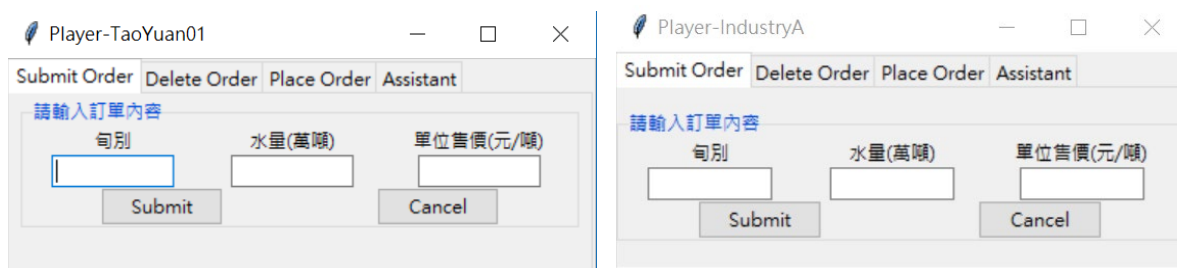


圖 4-5、遊戲使用者介面範例

不同玩家的遊戲使用者介面基本功能同樣具備提交訂單(Submit Order)、刪除訂單>Delete Order)、下訂訂單(Place Order)、訂單分析助手(Assistant)，差別在於農業方(買方)僅能提交或刪除己身之出售訂單(Sell Order)、下訂預購訂單(Buy Order)；工業方(賣方)則反之。訂單分析助手(Assistant)提供玩家分析特定旬別之架上訂單，程式會自動將架上訂單進行排列組合，並依各個使用者的出售(或購買)限制篩選組合水量，最後匯出成「訂單最佳化選擇_分析結果(PlayerName)_第 N 旬」

Excel 檔，呈現該旬別可出售（或購買）的所有可能訂單組合供玩家決策參考，範例如下圖所示：

	A	B	C	D	E
1	總水量(萬噸)	總購水費(萬元)	潛能最大淨收益(萬元)	平均購水成本(萬元)	組合內容
2	40	165	111155	4.12	S925829; S149851; S943194; S305950; S471313;
3	35	115	97290	3.29	S925829; S943194; S305950; S471313;
4	35	140	97265	4.00	S149851; S943194; S305950; S471313;
5	35	140	97265	4.00	S925829; S149851; S943194; S305950;
6	30	90	83400	3.00	S943194; S305950; S471313;
7	30	90	83400	3.00	S925829; S943194; S305950;
8	30	115	83375	3.83	S925829; S149851; S305950; S471313;
9	30	115	83375	3.83	S149851; S943194; S305950;
10	25	65	69510	2.60	S943194; S305950;
11	25	65	69510	2.60	S925829; S305950; S471313;
12	25	90	69485	3.60	S925829; S149851; S305950;
13	25	90	69485	3.60	S149851; S305950; S471313;
14	25	150	69425	6.00	S925829; S149851; S943194; S471313;
15	20	40	55620	2.00	S305950; S471313;
16	20	40	55620	2.00	S925829; S305950;
17	20	65	55595	3.25	S149851; S305950;
18	20	100	55560	5.00	S925829; S943194; S471313;
19	20	125	55535	6.25	S149851; S943194; S471313;
20	20	125	55535	6.25	S925829; S149851; S943194;
21	15	15	41730	1.00	S305950;
22	15	75	41670	5.00	S943194; S471313;
23	15	75	41670	5.00	S925829; S943194;

圖 4-6、訂單分析助手之分析結果範例（工業方）

第五章、研究結果與討論



本研究透過遊戲模擬的方式，以桃園地區作為研究區域，欲探討水市場交易機制在乾旱時期對於水資源再分配的影響。為此，必須先建立桃園地區供水系統動力模式，釐清各用水事業單位的需水量，並設計遊戲操作介面與後台程式。基於第四章的方法與工具，本章結果可分為三項：供水系統動力模式驗證、修正農業計畫配水量、遊戲結果，以下分節敘述。

5.1 供水系統動力模式合理性驗證

石門水庫供水系統動力模式使用 2014 年水庫實測水位-容積-面積資料，因此欲檢驗模式合理性，在河川入流量與計畫配水量輸入資料的部分，須採用 2014 年以後的資料。石門水庫入流量可由水利署網站查詢下載，然而鳶山堰側流量以及三峽河入流量因缺乏可靠資料，此處改以 1993 至 2012 年平均旬入流量代替。此代替方法對於水庫水位的唯一影響，僅在於鳶山堰側流量的多寡，會影響石門水庫是否需要額外支援生態基流量，此值影響水庫水位甚小；模式中，三峽河入流量多寡僅影響板新淨水廠可取用之水量，並不影響石門水庫放水，亦即不影響石門水庫水位之合理性驗證。分別驗證 2014 年、2015 年、2016 年石門水庫水位模擬結果之合理性，以下依年分說明分析結果：

2014 年

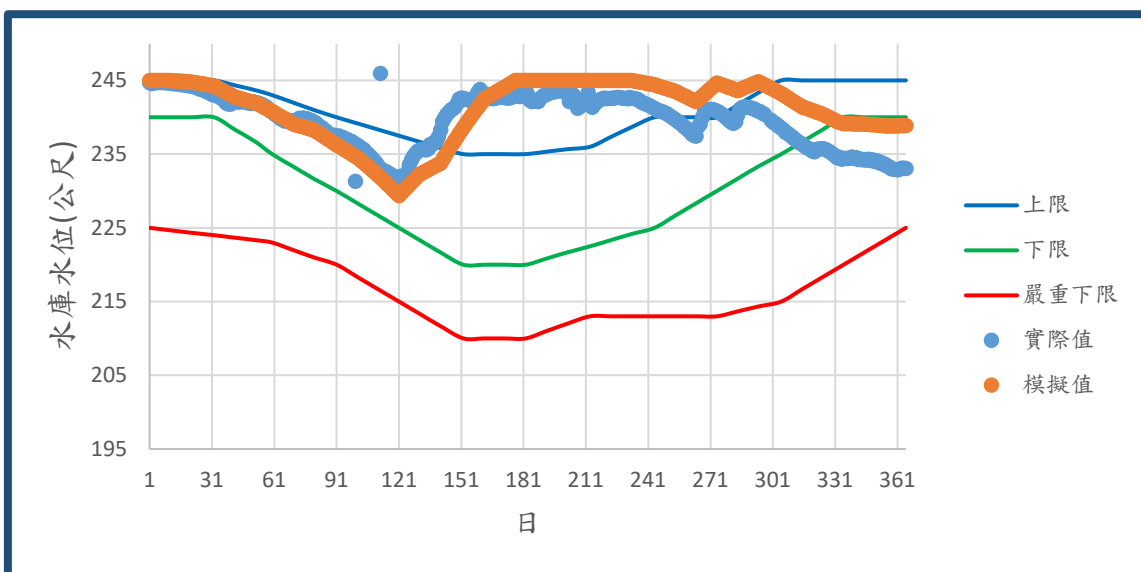


圖 5-1、供水系統動力模式合理性驗證(2014)

全年水庫水位實測值均大於 230 公尺，無供水打折情況發生。由圖 5-1 可看出模擬值與實測值變動趨勢一致，然而約從 151 天以後有所落差，其成因可合理推測有二：一為水庫接近滿水位（245 公尺）時，根據氣象預報，石門水庫管理中心可能進行預期性放流，避免遭逢大雨或颱風時水庫溢流；另一為當水庫水位大於水庫運用規線上限時，得視各標的用水需求增加調配量。

2015 年

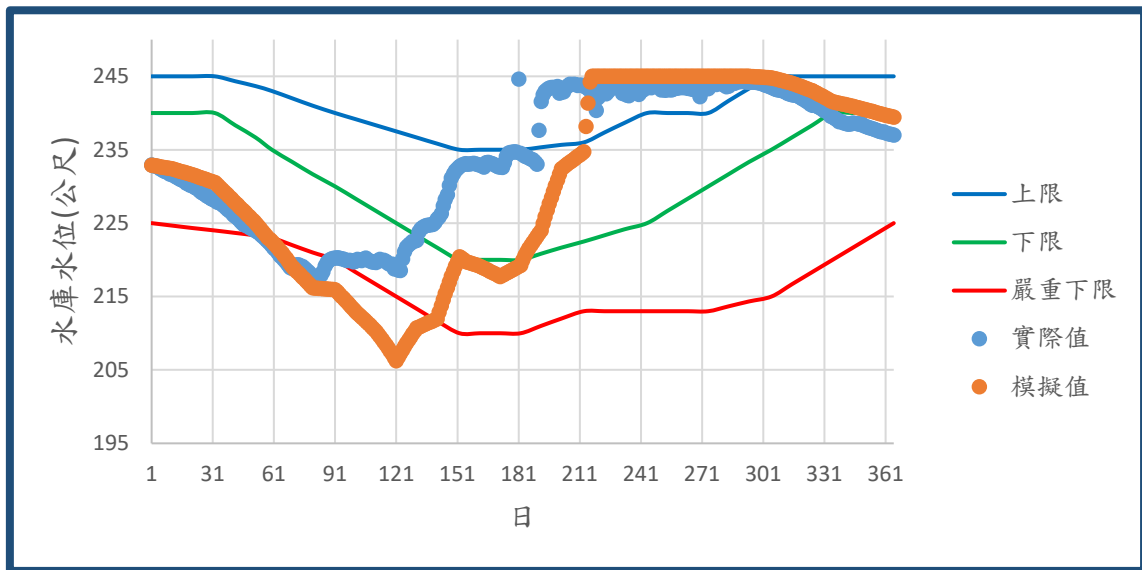


圖 5-2、供水系統動力模式合理性驗證(2015)

前 90 天模擬值與實測值變動趨勢一致，因 2014 年冬季水庫水位持續下降，致使 2015 年初始水位不到 233 公尺，再加上春季雨量不足，將導致一期稻作面臨乾旱問題，也確實桃園農田水利會於該年度有一期稻作停灌休耕紀錄（見圖 4-2）。由於模式中水庫乃依計畫配水量供水，沒有乾旱應變之設計，兩者間水量差距可從圖 5-2 中約 88 天以後看出。下半年因一期稻作停灌休耕及雨量充沛的緣故，水庫水位實際值較模擬值快回到 240~245 公尺區間。

2016 年

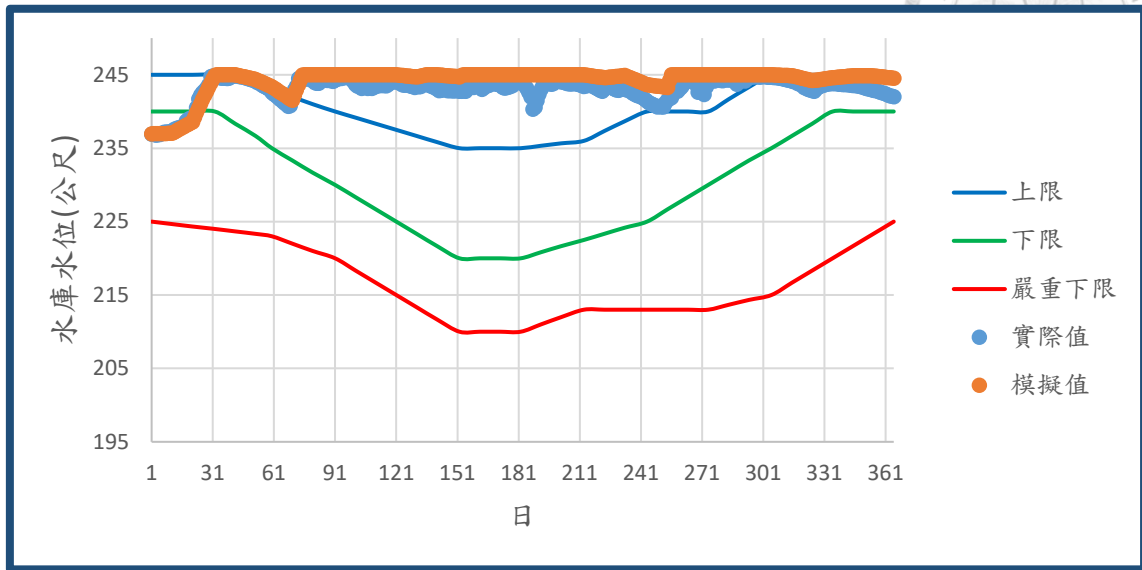


圖 5-3、供水系統動力模式合理性驗證(2016)

起始水庫水位約 237 公尺，因春季雨量豐沛，水庫水位於 31 天左右上升至滿水位。由圖 5-3 中 75 天以前結果，可看出實際值與模擬值變動趨勢一致。全年水庫蓄水量充沛，自二月以後，水庫水位均維持 240 公尺以上。

小結

當水庫接近滿水位 245 公尺時，模擬值與實際值會有所落差，其成因可能為石門水庫管理中心進行預期性放流，避免遭逢大雨或颱風時水庫溢流，或是該時期水庫水位大於水庫運用規線上限，水庫視各標的用水需求額外增加調配量。撇開接近滿水位之情況，由此三年的驗證結果，模擬值與實際值的變動趨勢近乎一致，模式是合理且可信的。

5.2 修正農業計畫配水量

回顧自民國 93 年至 105 年桃園地區一二期稻作實際耕作面積資料，一期稻作平均實際耕作（收穫）面積為 7,066 公頃；二期稻作平均實際耕作（收穫）面積為 4,127 公頃。此數值與兩水利會所提報之一二期計畫耕作面積 34,682 公頃相差甚遠。考量當中包含乾早年休耕情況，本研究選擇以歷史資料中的最大實際耕作面積值—民國 105 年一期稻作 12,029 公頃，作為模式中刪減超額申報計畫耕作面積的

參考基值。是故，在農業各灌區耕種面積的部分，將乘上 $12,029 \div 34,682 = 0.347$ 的面積修正比率，並進而調整最終之計畫配水量。

表 5-1、農業方交易單位資料 (調整後)

灌區	組別	工作站	灌溉面積	組內面積 占比(%)	灌區面積 占比(%)	插秧時程	
						一期稻作	二期稻作
桃園 大 圳 灌 區	上游組	桃園	585	0.199	0.376	2 月下旬 (2 月 21 日)	7 月上旬 (7 月 1 日)
		大竹	960	0.327			
		大園	767	0.261			
		大崙	624	0.212			
	中游組	草漯	796	0.334	0.305	3 月上旬 (3 月 1 日)	7 月中旬 (7 月 11 日)
		新坡	477	0.2			
		觀音	1,107	0.465			
	下游組	新屋	1,168	0.47	0.319	3 月中旬 (3 月 11 日)	7 月下旬 (7 月 21 日)
		湖口	1,317	0.53			
石 門 大 圳 灌 區	上游組	八德	828	0.367	0.533	2 月下旬 (2 月 21 日)	7 月上旬 (7 月 1 日)
		中壢	631	0.28			
		過嶺	797	0.353			
	下游組	楊梅	659	0.333	0.467	3 月上旬 (3 月 1 日)	7 月中旬 (7 月 11 日)
		富岡	940	0.475			
		湖口	382	0.193			

由表 5-1 調整後之耕種面積及原先的分組、插秧時程，搭配 3.2 節水稻田水平衡模式內容，以 Python 語法撰寫程式。其中灌溉需水量(IWR)的部分，在設計上與式 3-23 有所差異，改為五天一灌的形式，一期稻作一次灌溉 20mm 水深，二期稻作一次灌溉 15mm 水深，若當日有降雨大於 20mm (15mm)，則不灌溉。這麼做的原因在於，若以原先式 3-23 的方式灌溉，會發現斷水排乾後，將連續數天不需灌溉，直到土壤含水量低於非湛水時期土壤水分逆境臨界含水量(a_2)才灌溉，會造成灌溉用水需求集中收穫前那段時間，與其他組別的整田插秧時期重疊下，將產生更高的用水尖峰。現實情況農民乃視田面濕潤程度行五天或七天一灌，雖然這麼做將使土壤含水量超過田間含水量的時間拉長，產生更多的滲漏量，但能分散灌溉用水尖峰，灌溉操作上也比較方便。一次灌溉水量 20mm (15mm)之數值計算，乃透過匯入 1987~2016 年桃園農改場三十年氣溫平均資料，其中資料缺漏部分則以桃園茶改場數據補遺。考量降雨不連續的特性，在降雨量部分不以平均資料帶入，而是

直接假設為零，將降雨量的影響改於「灌溉需水量中自水庫取水的百分比」內表示，亦即此處計算修正農業計畫配水量時，「灌溉需水量中自水庫取水的百分比」為 54.9/100，而遊戲模擬時在運算上因為採該年度實際氣溫、降雨資料，降雨量不再被設為零，「灌溉需水量中自水庫取水的百分比」為 54.9/82.4，來自有效降雨量占灌溉用水量的 17.6% 被扣除。帶入三十年氣溫平均資料並將降雨量設為零，嘗試調整不同的一次灌溉水量數值，使最後各組輸出結果均不會發生土壤含水量低於非湛水時期土壤水分逆境臨界含水量(a_2)的情況，如此得到五天一灌一期稻作 20mm、二期稻作 15mm 的結果，最終計算修正計畫配水量時，須再除以 (1-輸水損失率)，結果如下：

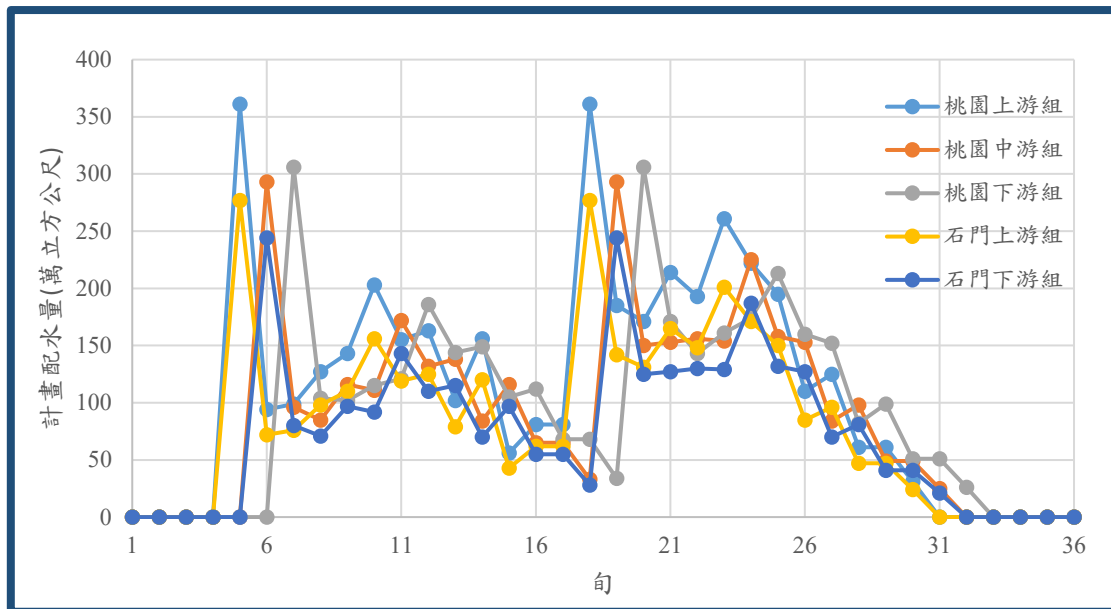
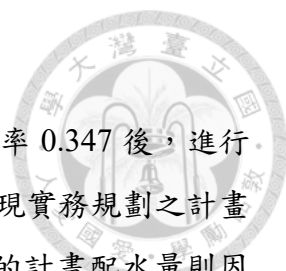


圖 5-4、農業各分組修正計畫配水量

表 5-2、農業修正計畫配水量

單位：萬立方公尺		桃園農田水利會				石門農田水會			農業計畫配 水量總計
月	旬	上游組	中游組	下游組	合計	上游組	下游組	合計	
1	上	0	0	0	0	0	0	0	0
	中	0	0	0	0	0	0	0	0
	下	0	0	0	0	0	0	0	0
2	上	0	0	0	0	0	0	0	0
	中	361	0	0	361	277	0	277	638
	下	94	293	0	387	72	244	316	703
3	上	99	96	306	501	76	80	156	657
	中	127	85	104	316	98	71	169	485
	下	143	116	102	361	110	97	207	568
4	上	203	111	115	429	156	92	248	677
	中	155	172	121	448	119	143	262	710
	下	163	132	186	481	125	110	235	716
5	上	102	138	144	384	79	115	194	578
	中	156	84	149	389	120	70	190	579
	下	56	116	105	277	43	97	140	417
6	上	81	65	112	258	62	55	117	375
	中	81	65	68	214	62	55	117	331
	下	361	33	68	462	277	28	305	767
7	上	185	293	34	512	142	244	386	898
	中	171	150	306	627	131	125	256	883
	下	214	153	171	538	165	127	292	830
8	上	193	156	143	492	148	130	278	770
	中	261	154	161	576	201	129	330	906
	下	222	225	174	621	171	187	358	979
9	上	195	158	213	566	150	132	282	848
	中	110	153	160	423	85	127	212	635
	下	125	84	152	361	96	70	166	527
10	上	61	98	82	241	47	81	128	369
	中	61	49	99	209	47	41	88	297
	下	31	49	51	131	24	41	65	196
11	上	0	25	51	76	0	21	21	97
	中	0	0	26	26	0	0	0	26
	下	0	0	0	0	0	0	0	0
12	上	0	0	0	0	0	0	0	0
	中	0	0	0	0	0	0	0	0
	下	0	0	0	0	0	0	0	0
合計		4,011	3,253	3,403	10,667	3,083	2,712	5,795	16,462



小結

將石門水庫 2016 年核定之農業計畫配水量乘以面積修正比率 0.347 後，進行實務與模式計算值的比較，依水利會區分，結果如圖 5-5，可發現實務規劃之計畫配水量在各旬間變化量較小，透過水稻田水平衡模式計算而得的計畫配水量則因稻作不同生育階段而有峰谷波動情況。將兩水利會計畫配水量加總後，與面積修正後之實務值相比較，如圖 5-6 所示。面積修正後之實務上計畫配水量總量為 16,264 萬立方公尺，模式計算之計畫配水量總量為 16,462 萬立方公尺，兩者相差約 1.2%。

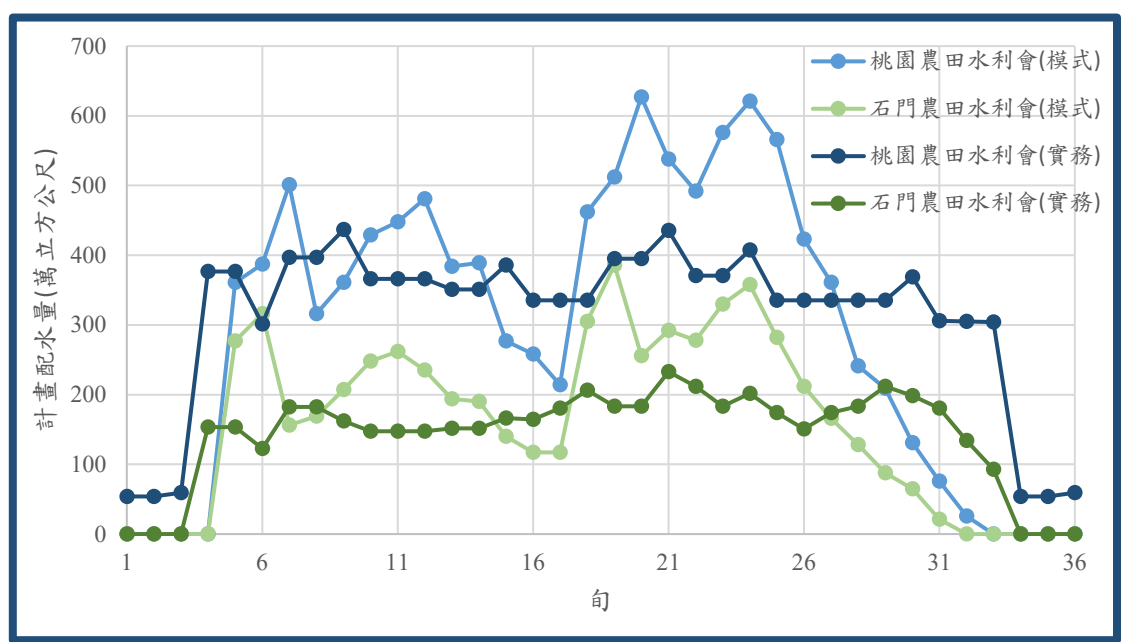


圖 5-5、農田水利會計畫配水量比較

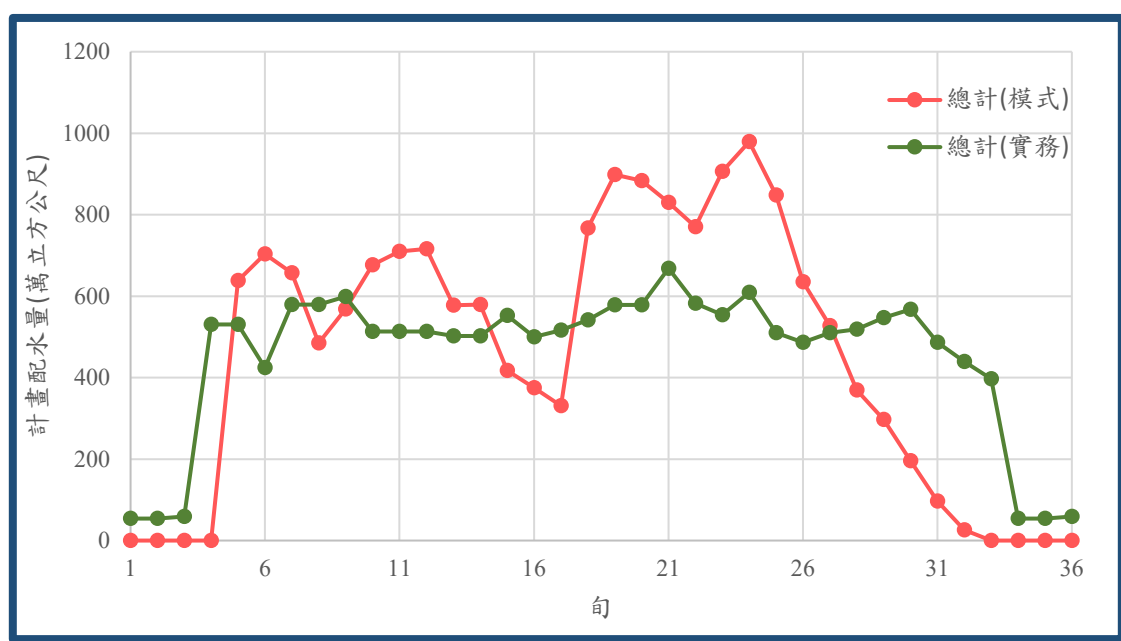


圖 5-6、農業計畫配水量比較



5.3 遊戲結果

本研究最終共招募九名玩家參與，分兩天舉辦遊戲。參與玩家為大學或碩士學歷，以時薪 200 元作為報酬，系所包括資訊網路與多媒體研究所、工業管理研究所、人類學研究所、政治學系、農藝學系、醫學系、森林環境暨資源學系、生物環境系統工程學系。原先計畫於一日內完成，但實際運行上發現耗時超乎預期，故不得不擇日再舉行一次；第二次招募時，僅尋回原先參與者中的七位，工業方角色「IndustryA」則另行招募新的參與者。此處須注意的是，在前述 4.1.4 小節工業相關設定中所計算之工業分組用水與經濟參數（表 4-6）乃舉辦後重新羅列計算之數值。本研究在實際舉辦遊戲模擬時，用水相關參數與 4.1.4 小節相同，然而經濟參數部分不同，採用之數據如下表 5-3。以下分項說明這兩天舉辦遊戲的成果與改進事項討論。

表 5-3、工業分組用水與經濟參數（舉辦時採用）


工業分組	營業額 (千元)	用水量 (立方公尺)	單位水淨收益 (元/立方公尺)	自來水需水量 (立方公尺)	年計畫配水量 (立方公尺)	年計畫配 水量占比	缺水耐受 係數
IndustryA	167,244,131	89,290,000	2,783	53,244,869	62,826,560	0.4154	0.05
IndustryB	440,453,878	74,660,000	718	44,520,796	52,532,546	0.3473	0.10
IndustryC	1,131,808,402	51,020,000	338	30,423,935	35,898,881	0.2373	0.15
加總	1,739,506,411	214,970,000		128,189,600	151,257,987	1	

註：紅字為與表 4-6 相異之參數數值。

第一次舉辦

於遊戲開始前分別以簡報向八位農業及工業玩家說明遊戲機制與規則，給予提問解惑時間，確認所有玩家的裝置（自備筆電）已下載各自所扮演角色的遊戲使用者介面，並且測試能正常啟動運作。接著介紹 Google 雲端硬碟上各項表單的意義與操作方法，以及如何閱讀自身角色的回合資訊。至此完成所有遊戲開始之前置動作約耗時一小時，緊接著進行遊戲試跑，以 2003 年氣象水文資料作為背景，重複運行兩輪（72 回合）遊戲，最終共耗時四個半小時完成。以下列點說明試跑重點結果：

- TaoYuan02 玩家不小心下訂了一筆在一期稻作插秧旬前一旬的訂單，實際上他在該旬別並沒有計畫配水量可供出售，導致在「調整後計畫配水量欄位」出現負值。

- 
- TaoYuan03 玩家忘記填入整田甸之灌區耕種狀態，使得第一期稻作直接進入休憩狀態（灌區耕種狀態預設值為 0，即不耕種）。
 - TaoYuan03 玩家誤看稻作單位面積產值位數，以致其認為種植稻作無利可圖，完全不需要耕作也可以。
 - 農業玩家不清楚該訂定多少的水量與價格，對於自身該回合種植多少面積需要多少灌溉用水缺乏認知，因此不確定賣了多少水會使稻作面臨缺水逆境。相較於農業玩家，工業玩家在操作上需要分析的因素簡單許多，因此幾乎沒有疑問。
 - 相同情境進行第二輪遊戲後，所有玩家均表示對自身角色與交易流程的熟悉和掌握程度有所增加。
 - 農業大組內共享資訊、討論的部分，玩家意見分歧。雖然討論、協商價格能提高整體單位水價，但當組內有人無田可種時，就會選擇賤賣水。
 - 農業方交易策略的部分，有人選擇種值面積較小的灌區，然後大膽賣水；有人選擇整田甸先不賣水，觀望程式自動判定可成功整田的灌區面積有多大，再決定接下來的出售量，以保作物存活為優先；有人則是不強求作物一定要滿足，只要確保不耕種失敗，即使受到減產懲罰也沒關係，只要能多賣水就能有更多的獲利。
 - 工業方交易策略部分，IndustryA 和 IndustryB 玩家認為遇到價格哄抬不輕易妥協；IndustryB 玩家會回顧第一輪的結果，分析哪些回合工業用水被打八折，在第二輪遊戲時，多買那幾個回合的水；IndustryC 選擇計算最低可能拿到的水，如果此數沒有達到最大生產需水量，則參考欲購清單，比較其他工業玩家所提出的價格，提交自己的欲購單。缺水時寧可多買一些水備用，避免低於臨界生產需水量使得收益大打折扣。

第二次舉辦

由於試跑時間超乎預期，故再舉行第二次遊戲實驗。原 IndustryA 玩家因不克參與，故另行招募新的參與人，並於事前先行向其說明遊戲機制、規則及程式操作。程式部分新增玩家提交與下訂訂單的防呆機制，避免超額販售或購買的情況出現。同時改善下訂功能，程式處理時間由 20 秒降至 16 秒，減少玩家的等待時間。情境

設定同樣以 2003 年氣象水文資料作為背景，進行一輪 36 個回合遊戲模擬，共耗時約一個半小時完成。以下列點說明重點結果：

- 農業方玩家不再出現超額售水的問題，但仍有兩名玩家發生忘記輸入下一回合灌區耕作面積狀態的情況。處理方式為請其重新輸入後，再執行一次回合結算。但由於 Google API 有每一百秒內查詢資料庫次數上限，因此每次執行回合結算時，必須等待一百秒的時間間隔，否則會查詢失敗。
- 除了 TaoYuan03 和 IndustryA 玩家表示「對於遊戲規則、機制的了解程度」持中立態度，其餘玩家則表示能夠理解與掌握。
- IndustryA 玩家認為自己對於所扮演之角色特性（例如：何時需要水？買賣限制為何？如何操作最有利？）掌握程度不足；其餘玩家均表示掌握度大於五成。
- 所有玩家一致認為再多玩幾輪遊戲，可以讓自己的決策與收益結果變得更好。
- 本次遊戲的決策時間平均每回合約 3 分鐘，確認所有玩家均決策、操作完畢才進入回合結算，其中 TaoYuan02、TaoYuan03、IndustryA 玩家認為回合決策時間不足；其餘玩家則認為決策時間充裕。
- 所有玩家均認為公開資訊-回合結算中，水庫水位及供水打折係數有助於自己的決策，並認為若能提供更多資訊，能有助於制定決策與改善收益。
- 農業方玩家希望提供更多資訊，包括：歷年交易紀錄、工業需水量、歷史降雨量資料、歷史打折係數、收穫減產的原因、稻米需水量的細節、如何評估缺水和稻米收穫量的關係。
- 工業方玩家希望提供更多資訊，包括：天氣資訊、未來水情推估、歷史打折係數。
- 所有玩家均認為若再執行更多輪遊戲，農業工業雙方對於水價高低會達成共識。
- 與第一次舉辦時的問卷回饋相同，本次遊戲中，農業方玩家對於「大組內策略討論與資訊分享是否有助於組內成員的決策判斷、最大化自己的收益呢？」的看法仍意見分歧。
- 對於其他工業方玩家單位水生產價值高低之判定，IndustryA 玩家認為均低於自己；IndustryB 認為均高於自己；IndustryC 認為一個高於自己，一個低於自己。然而實際情況是 IndustryA > IndustryB > IndustryC。

- 農業方交易策略的部分，玩家們的策略大抵上與試跑時相同。
- 工業方交易策略部分，IndustryA 玩家選擇盡量早點搶到後面回合比較便宜的水；IndustryB 玩家採取與試跑時相同的策略；IndustryC 玩家表示「詳細分析公開資訊，了解水的目前價值，並且敢於投資買水，稍微多買一些也比少賺好」。
- 遊戲結算如下表 5-4 及表 5-5，由於僅進行一輪完整遊戲，在結算數據資料上未能收集足夠資料以進行不同氣象水文情境下之比較及市場分析，故此處僅做簡單描述。本輪遊戲總交易計畫配水量為 3 億 3097 萬立方公尺，平均單位水價為每立方公尺 26.7 元。當中農業方 TaoYuan02 玩家二期稻作於 22 回合發生耕種失敗，進一步分析發現，假使其在該回合不出售任何計畫配水量，該回合能避免耕種失敗，但若不調整後續灌區耕種面積，到了第 23 回合，即使同樣不出售任何計畫配水量，仍然會發生耕種失敗的情況，造成莫大損失。水庫最終自農業方收回 176 萬立方公尺計畫配水量，水庫水位變化如圖 5-7 所示。

表 5-4、農業方遊戲結算表

遊戲結算	桃園上游組	桃園中游組	桃園下游組	石門上游組	石門下游組	
灌區總面積(公頃)	2,936	2,380	2,485	2,256	1,981	
一期稻作	耕種面積(公頃)	1,391	1,273	1,168	828	1,041
	收穫面積(公頃)	1,391	1,273	1,168	828	1,041
	收穫打折係數	0.98	0.98	1.00	1.00	1.00
	耕種成本(元)	131,833,416	120,649,848	110,698,368	78,474,528	98,661,816
	收穫所得(元)	156,412,636	143,143,987	134,017,488	95,005,548	119,445,381
	收穫淨收益(元)	24,579,220	22,494,139	23,319,120	16,531,020	20,783,565
	售水所得(元)	34,700,000	40,290,000	0	27,450,000	12,650,000
二期稻作	耕種面積(公頃)	1,391	1,273	1,168	828	659
	收穫面積(公頃)	1,391	0	1,168	828	659
	收穫打折係數	0.96	0	0.97	1.00	1.00
	耕種成本(元)	129,965,303	55,577,907	109,129,744	77,362,524	61,572,347
	收穫所得(元)	138,120,291	0	117,185,452	85,642,524	68,162,347
	收穫淨收益(元)	8,154,988	- 55,577,907	8,055,708	8,280,000	6,590,000
	售水所得(元)	36,450,000	63,090,000	33,090,000	44,250,000	39,000,000
年度淨收益(元)	103,884,208	70,296,232	64,464,828	96,511,020	79,023,565	

表 5-5、工業方遊戲結算表

遊戲結算(僅計5~32回合)	IndustryA	IndustryB	IndustryC
單位水價值(元/立方公尺)	2,783	718	338
缺水耐受係數	0.05	0.10	0.15
減產回合數	16	5	2
減產損失(萬元)	2,949,070	192,056	37,780
總購水花費(萬元)	8,402	11,450	13,245
最大生產收益(萬元)	11,215,107	2,424,284	781,736
總生產收益(萬元)	7,548,537	2,080,626	733,024
達成率	0.67	0.86	0.94

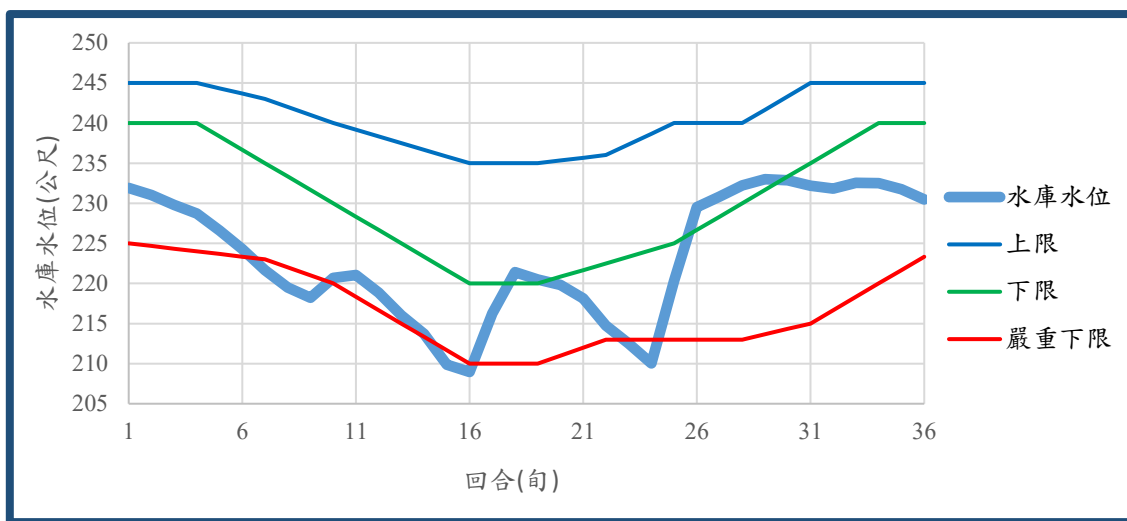


圖 5-7、遊戲模擬結果—水庫水位變化

➤ 玩家回饋建議：

- (1) 不要讓受試者能直接修改表單(關於填寫灌區耕種面積的部分)。
- (2) 已結算旬別之訂單可以刪掉，避免看錯購買；可依照訂單旬別排列，方便玩家找資訊。
- (3) 希望遊戲介面能不用反覆重啟，改善遊戲體驗。
- (4) 過多網站頁面需要確認資訊，希望能都合併在同一個網頁。



小結

遊戲前說明、問答解惑及遊戲試跑、讓玩家熟悉機制，整個流程順利執行預估需要約四個小時，而後進行完整一輪遊戲模擬的時間則需要約一個半小時至兩個小時。隨著遊戲次數增加，玩家對於遊戲的掌握度會提升，遊戲進程也會更為順暢。在提供交易資訊方面仍有改進空間，應考慮如何能使玩家更容易閱讀資訊。此外，原先為了降低農業方進行遊戲的複雜度，並未向其說明詳細的水田需水機制，僅向玩家說明原計畫配水量的多寡相當於該回合(旬)供水不被打折時，種植所有灌區面積所需的水量。但從玩家回饋來看，這麼做使他們不容易掌握或理解為何缺水減產或耕種失敗。由於程式設計上未將農業成本與收益即時換算並呈現於 Google 表單上，使得農業方玩家無法得知究竟是該種田收益高？抑或是賣水收益高？工業方玩家雖有意識到遭遇缺水減產懲罰將導致莫大損失，但由於表單上並未呈現累計損失，僅呈現總購水花費，所以玩家對於減產懲罰較無感，反而更著重在訂單水價的高低。IndustryA 玩家在結算結果上表現欠佳，一來該受試者缺乏試跑的遊戲經驗，對於自身所扮演的角色特性和遊戲機制掌握度不足；二來該玩家於遊戲結束後反應，因為交易機制的緣故，常發生「下單時訂單已被其他玩家搶走，買不到水」的情況。在 2003 年之乾旱情境下，水庫自農業方可收回的水量有限，水庫水位最低來到 208.87 公尺；倘若農業計畫配水量未經過面積刪減之修正的話，水庫水位將降至 195 公尺呆水位，呈現持續空庫狀態。



圖 5-8、水市場模擬遊戲-第一次舉辦



圖 5-9、水市場模擬遊戲-第二次舉辦

5.4 研究討論

石門水庫供水系統動力模式

- (1) 當水庫有效庫容量在考量供水打折下，仍無法滿足計畫配水量時，本模式採「可供應量按各事業單位之計畫配水量占比進行配送」的方式。這種設計方法隱含的缺陷乃無法使民生用水優先順位大於農業用水，且因民生與工業用水共管的關係，對於淨水廠的計畫配水量難以設計出農業用水優先順位大於工業用水卻小於民生用水的條件。
- (2) 生態基流量的部分，模式中石門水庫應提供多少補注量取決於鳶山堰側流量的多寡，非常態供應固定水量。雖然這麼做能有效減少水源浪費，但實務上必須取得鳶山堰側流量的日資料，並進行日尺度的操作管理。後續研究或能以歷史鳶山堰側流量分乾早年、平水年、豐水年規劃「生態基流量計畫配水量」，配合未來水情推估進行動態調整。
- (3) 中庄調整池、石門淨水場原水儲存池、南北桃園供水管網、桃竹雙向供水管網在本研究中被忽略，後續研究若需探討該設施之相關影響，必須再修改模式中相關參數。
- (4) 後續研究若欲增加部分事業單位之計畫配水量，必須注意該值是否會超過輸水管線限制或設施限制。




水稻田水平衡模式

- (1) 本研究對於水稻田滲漏量多寡的部分引用洪毓謙(1999)砂箱實驗結果，以垂直滲漏為主，約占 88%滲漏量，水平滲漏僅占 12%，意味著因滲漏而產生之灌溉回歸水有限，主要乃補注深層地下水。
- (2) 因簡化模式的緣故，本研究未考慮乾旱時期埤塘水源調度，以及田間排水所產生之灌溉回歸水之利用，然而此兩者均能增加農民面臨乾旱時期的調適能力。
- (3) 模式中以 Hamon 法計算作物蒸發散量，若欲執行更精準的農業用水推估，需針對現地資料進行公式校正，並比較不同計算公式的準確性（如：Penman-Monteith 法、Hargreaves 法、Priestly-Taylor 法等）。
- (4) 農業灌溉用水來源的部分，模式採用「石門水庫配水量占 54.9%，有效降雨量占 17.6%，灌溉回歸水占 3.35%，市管河川、野溪之水源占 20%，埤塘額外支援水量占 4.15%」之設定，各項水源來源的具體占比應被進一步研究計算。

水市場模擬遊戲

- (1) 農業方耕作失敗判定的假設仍有改進與討論空間，因湛水時期即使一兩天無湛水，作物也不一定立即死亡。對於產量減產的設定，模式中假設不論哪個生育階段遭遇缺水逆境，收穫衰退係數均為定值 0.99，但實際上稻作在成活、分蘗與抽穗這三個時期，水分供給充足與否將影響最終收穫量甚多，收穫衰退係數應隨著不同生育階段而有所變動。
- (2) 可交易之回合範圍限制為「包含下一回合在內、共 12 個回合」，主要是為了避免玩家一次需操作過多的旬別，因而感到無所適從。「12」數目的訂定考量自模式中一次稻作生育天數為 120 天，約相當於 12 旬，有利於農業方考量涵蓋整個期作的耕種及交易策略。
- (3) 遊戲最終結算的部分，農業方僅 TaoYuan02 玩家發生耕種失敗的情況，其餘農業方玩家均成功完成部分灌區的作物種植；工業方玩家的表現上不如預期，特別是 IndustryA 玩家理當擁有最高的購水誘因，但卻花費最少的購水成本，也使得遭蒙巨大的減產損失。這結果與該玩家未參與第一次遊戲試跑有很大關係，不熟悉角色特性與缺水減產損失的嚴重性，使得該玩家並未採取提出更高額水價之欲購單的方式，誘使農業方出售更多的水量。

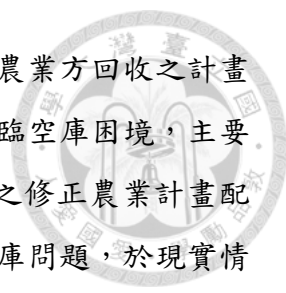
- 
- (4) 關於遊戲中以訂單形式、先下訂者先得的交易機制，買方存在著「即使願意支付更高價格，卻無法購得該筆訂單」的問題，賣方同樣可能願意以更低價格搶先比其他玩家出售，也不願回合結算時賣不出去。若改以拍賣競標的形式，則必須進一步探討不同拍賣競標方式（例如：升價拍賣、降價拍賣、一級價格密封式拍賣、二級價格密封式拍賣）對於買賣雙方的優劣利弊與公平性的考量。
- (5) 由於計畫配水量在遊戲中被視為玩家所擁有之「財產」，意味著假使農業玩家選擇休耕卻不出售任何計畫配水量，或是在回合結算前，將未售出的訂單全數撤銷，如此一來水庫變無法取回任何農業方「用不到」的計畫配水量。換言之，在遊戲內，水庫對於農業方浪費灌溉用水的部分，沒有可管理的辦法，只能依計畫配水量供應。如此一來，如何訂定合適的計畫配水量非常關鍵。本研究僅以實際耕種（收穫）面積概估修正，然而政府單位擁有公權力以及更詳細的資料數據，應當建立更完善的計畫配水量擬定與審查機制。

第六章、結論與建議

氣候變遷影響下，乾季的極端乾期發生頻率增加。當乾旱時期水資源匱乏時，現行制度乃由政府主導農業停灌休耕，衍生出農業與工業間用水公平性之爭議。在此制度下，乾旱時期水的價值無法被反映，農民耕種權亦不受保障。為使農民在遭遇乾旱時能擁有停灌休耕與否的決定權，藉由自由市場機制，政府無需強制介入產業間用水調配，本研究嘗試以桃園地區為例，建構一套水市場模擬遊戲(water market simulation game, WMSG)，透過遊戲模擬方式探討水市場交易機制對於乾旱時期水資源再分配的可行性。本研究最終建立一套石門水庫供水系統動力模式與水稻田水平衡模式，提出桃園地區修正之農業計畫配水量，並整合上述內容為水市場模擬遊戲，招募受試者實際執行交易決策。遊戲模擬之結果、討論及改善建議，有助於後續水市場相關研究之發展，提供政策決策者一項可能的水資源管理調適方案。

6.1 結論

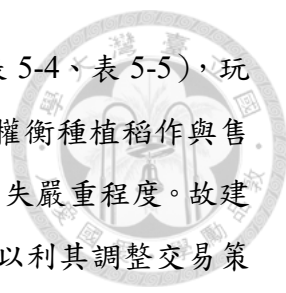
- (1) 本研究建構之石門水庫供水系統動力模式經合理性驗證，水庫水位模擬值與實際值之變動趨勢一致，唯水庫水位接近滿水位 245 公尺時，模擬值與實際值會有所落差，其成因推測有二：一為石門水庫管理中心進行預期性放流，避免遭逢大雨或颱風時水庫溢流；二為該時期水庫水位大於水庫運用規線上限，水庫視各標的用水需求額外增加調配量。模式匯入石門水庫計畫配水量與石門水庫入流量、鳶山堰側流量、三峽河入流量後，可用於模擬桃園地區全年供水情況，供後續學者從事桃園地區水資源管理相關研究使用。
- (2) 透過 Vensim 以圖形物件建立系統動力模式的方式，使用者能快速掌握整個系統結構；Vensim 檔經由 PySD 函式庫轉檔成 Python 語言後，模式的擴充性與操作性大幅提高，有利於發展多模式系統整合。
- (3) 本研究透過建立水稻田水平衡模式，計算稻作在不同生育階段之作物需水量，考慮圳渠輸水損失後，所得之年農業計畫配水總量與現行農田水利會所推估的數值相近，差別在於本研究所推估之農業計畫配水量依稻作生育階段不同，在不同旬之間有不同的灌溉需水量，呈現峰谷波動情況，較符合真實灌溉需求。

- 
- (4) 本研究中，在乾旱情境下的遊戲模擬結果顯示，水庫端能自農業方回收之計畫配水量有限（僅 176 萬立方公尺），實際上決定水庫是否面臨空庫困境，主要來自於農業計畫配水量設定的多寡。若非採用本研究提出之修正農業計畫配水量的話，在遭遇 2003 年乾旱情境時，水庫將面臨嚴重空庫問題，於現實情況中政府勢必得介入協商。農業計畫配水量又與灌溉面積成正比關係，因此準確審核各灌區實際種植面積大小將有助於政府未來制定合適的農業計畫配水量，提升水資源運用效率，並降低乾旱時期水庫空庫風險，減少後續水資源分配之公平性爭議。
- (5) 從玩家回饋意見中可發現，許多玩家對於水庫水位如何反映缺水風險是不容易掌握的。此外，即便成交訂單資訊公開透明且易取得，玩家必須花時間才能分析得到各旬訂單的平均水價。這意味著水市場機制除了資訊公開性及易取得性之外，資訊的「易解讀性」也非常重要，可透過提供額外資訊、說明文件、分析工具、資訊介面設計等方式，增加使用者對於資訊的「易解讀性」。
- (6) 本研究最終建立一套整合供水系統動力模式與田間水平衡模式之水市場模擬遊戲，其可用於探討假設情境下利害關係人之互動關係，並提供決策者評估該項政策的可行性。在此遊戲機制之設計下，乾旱時期水資源可透過交易方式被重新分配，工業方需支付農業方額外購水成本以因應缺水風險，農業方可自行決定耕種面積，政府無須介入輔導農業停灌休耕及提供補貼。然而必須注意的是，運用遊戲模擬(simulation gaming)方法時，遊戲機制如何設定在很大程度上影響或導致玩家的決策結果。若欲針對水市場機制在桃園地區的可行性下定論的話，仍需進行更多輪遊戲以分析結果，並在氣象水文情境、交易機制、利害關係人決策行為等方面作更廣泛的探討。



6.2 建議

- (1) 建立石門水庫供水系統動力模式時，在收集設施資料上遇到困難，乃因水利署報告書經常由不同單位執行計畫，在資料數據上常常彼此不一致，使得必須花費許多時間在確認正確數值上。建議應由政府統一更新供水系統內各項設施相關參數與現況，在資料索取上更友善提供學術研究使用。
- (2) 未來若欲探討涉及中庄調整池、板新地區供水管理調度、桃竹雙向管網等水資源管理相關之研究，必須再行修改石門水庫供水系統動力模式，或將其擴充為北區水資源供水系統動力模式。
- (3) 本研究由於研究區域農業灌溉用水特性，整合模式中未將地下水納入考量，若欲應用於其他地區，建議審視是否需要將地下水資源管理納入考量，並整合相關水文模式。
- (4) 水稻田水平衡模式若欲使用於其他研究上，建議修改湛水時期灌溉需水量計算公式，將無湛水深、土壤含水量未飽和的情況納入考量。本研究中未納入考量，乃因模式中假設「需湛水而未湛水將導致作物耕種失敗」以簡化模式。然而實際情況上，若水量充沛，農民於水稻分蘖期會執行曬田動作防止無效分蘖，此時水稻並不會死亡，反而有利結穗收穫。建議未來研究在稻作減產與收穫量的機制，做更進一步探討與設計。
- (5) 計算修正農業計畫配水量時，灌溉用水來源採用「石門水庫配水量占 54.9%，有效降雨量占 17.6%，灌溉回歸水占 3.35%，市管河川、野溪之水源占 20%，埤塘額外支援水量占 4.15%」之設定，建議進一步研究各項水源來源具體占比。
- (6) 本研究將工業方簡化為三組，乃依各產業別之單位水淨收益大小作為合併原則，並考量合併後各大組間自來水需水量不會相差過大。此假設方式無法反映桃園地區工業區分布特性，亦無法反映不同產業於不同時期的用水需求變化。若欲進行更精準之交易模擬，建議以工業區為分組依據，以反映實際自來水管網供水情況。
- (7) 資訊呈現的部分，訂單成交時間應改為回合（原先為系統當地時間），否則玩家無法辨識該訂單是哪個時候被下訂；將決定灌區耕種面積移至農業方玩家的遊戲使用者介面選單中，有助於玩家記得每回合輸入該欄位資料，並保護表單，避免玩家不小心更改到其他數據。

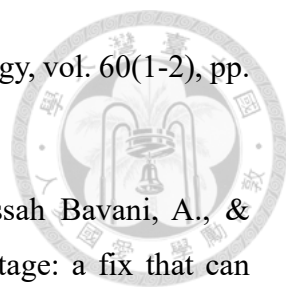
- 
- (8) 由於完整一輪遊戲結束後缺乏詳細經濟數據結算結果（如表 5-4、表 5-5），玩家難以掌握自身決策所帶來之效益成果，農業方玩家不易權衡種植稻作與售水間的收益差距，工業方玩家不易意識到缺水導致減產之損失嚴重程度。故建議於一輪遊戲結束後，立即提供完整結算結果供玩家參考，以利其調整交易策略。
- (9) 建議後續研究可從經濟學角度切入探討不同交易機制之利弊、社會公平性、市場機制失靈的可能性等。若欲進一步研究分析玩家間互動、交易策略、水價波動、成交水量等，必須再執行更多輪遊戲以取得足夠的分析數據。後續研究可嘗試探討「相同氣象水文情境重複執行」與「不同氣象水文情境重複執行」之間玩家決策、互動的差異，以及水資源再分配的效益。考量到進行一輪遊戲所需之時間，建議招募受試者前，先行規劃好舉辦時程與所需經費，分多日舉辦以避免受試者感到厭倦而不願積極參與，影響遊戲模擬結果。

參考文獻

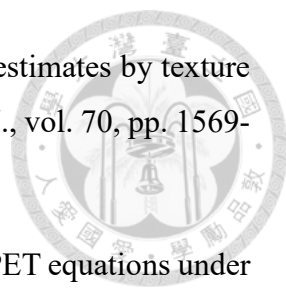


- [1] Akinbile, C.O. (2013). Assessment of the CERES-Rice model for rice production in Ibadan, Nigeria. *Agric. Eng. Int.: CIGR J.*, vol. 15, pp. 19-26.
- [2] Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., & Smith, M. (1998). *Crop evapotranspiration - Guidelines for computing crop water requirements - FAO Irrigation and drainage paper 56*. FAO, Rome.
- [3] Bakker, K. (2007). The "commons" versus the "commodity": alter-globalization, anti-privatization and the human right to water in the global south. *Antipode*, vol. 39, pp. 430–455.
- [4] Barlow, M., & Clarke, T. (2003). *Blue Gold: The Fight to Stop the Corporate Theft of the World's Water*. New York: Stoddart.
- [5] Barreteau, O., Le Page, C., & Perez, P. (2007). Contribution of simulation and gaming to natural resource management issues: An introduction. *Simulation & Gaming: An Interdisciplinary Journal*, vol. 38, pp. 185-194.
- [6] Boonyathorobol, W., Walker, & W.R. (1979). Evapotranspiration under depleting soil moisture. *Journal of the Irrigation and Drainage Division*, 1979, vol. 105, Issue 4, pp. 391-402.
- [7] Bouman, B.A.M., Kropff, M.J., Tuong, T.P., Wopereis, M.C.S., Ten Berge, H.F.M., & Van Laar, H.H. (2001). *ORYZA2000: Modeling Lowland Rice*. IRRI, Los Banos, Laguna.
- [8] Dias, M.P.N.M., Navaratne, C.M., Weerasinghe, K.D.N., & Hettiarachchi R.H.A.N. (2016). Application of DSSAT Crop Simulation Model to Identify the Changes of Rice Growth and Yield in Nilwala River Basin for Mid-centuries under Changing Climatic Conditions. *Procedia Food Science*, vol. 6, pp. 159-163.
- [9] Doorenbos, J., & Pruitt, W. O. (1977). *Irrigation and drainage paper no. 24*. FAO, Rome.
- [10] Gao, L., Jin, Z., Huang, Y., & Zhang, L. (1992). Rice clock model: a computer model

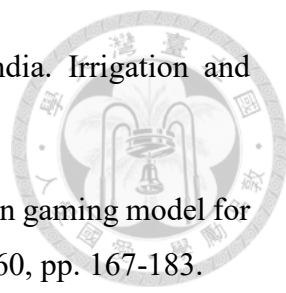
to simulate rice development. *Agricultural and Forest Meteorology*, vol. 60(1-2), pp. 1-16.

- 
- [11] Gohari, A., Eslamian, S., Mirchi, A., Abedi-Koupaei J., Massah Bavani, A., & Madani, K. (2013). Water transfer as a solution to water shortage: a fix that can Backfire. *Journal of Hydrology*, vol. 491, pp. 23-39.
- [12] Grafton, R. Q., & Horne J. (2014). Water Markets in the Murray-Darling Basin. *Agricultural Water Management*, vol. 145, pp. 61-71.
- [13] Grafton, R. Q., Horne, J., & Wheeler, S. A. (2016). On the marketisation of water: evidence from the Murray-Darling Basin, Australia. *Water Resources Management*, vol.30, pp. 913-926.
- [14] Hamon, W. R. (1961). Estimating potential evapotranspiration. *Journal of the Hydraulics*, vol. 87, pp. 107-120.
- [15] Hamon, W. R. (1963). Computation of direct runoff amounts from storm rainfall. *International Association of Science Hydrology Publishing*, vol. 63, pp. 52–62.
- [16] Harvey, D. (2003). The new imperialism: accumulation by dispossession. *The Socialist Register*, vol. 40.
- [17] Heim, R. R. (2002). A review of twentieth-century drought indices used in the United States. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, vol. 83, pp. 1149–1165.
- [18] IWA , 水資源統計網站 <http://waterstatistics.iwa-network.org/>
- [19] Jones, J. W., Hoogenboom, G., Porter, C. H., Boote K. J., Batchelor W. D., Hunt, L. A., Wilkens, P. W., Singh, U., Gijsman, A. J., & Ritchie, J. T. (2003). The DSSAT cropping system model. *European Journal of Agronomy*, vol. 18, pp. 235-265.
- [20] Kasprzyk, J. R., Reed, P. M., Kirsch, B. R., & Characklis, G. W. (2009). Managing population and drought risks using many-objective water portfolio planning under uncertainty, *Water Resour. Res.*, vol. 45, no.W12401.
- [21] Kiem, A. S. (2013). Drought and water policy in Australia: Challenges for the future illustrated by the issues associated with water trading and climate change adaptation

- in the Murray–Darling Basin. *Global Environmental Change*, vol. 23, pp. 1615-1626.
- [22] Lee, J. L., & Huang, W. C. (2014). Impact of Climate Change on the Irrigation Water Requirement in Northern Taiwan. *Water* 2014, vol. 6(11), pp. 3339-3361.
- [23] Manon, J., & Bernd, L. (2007). Horizontal and vertical water and solute fluxes in paddy rice fields. *Soil and Tillage Research*, vol. 94, pp. 133-141.
- [24] Marston, L., & Cai, X. (2016). An overview of water reallocation and the barriers to its implementation. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Water* Volume 3, Issue 5.
- [25] Mayer, I. S. (2009). The gaming of policy and the politics of gaming: a review. *Simulation & Gaming*, vol. 40(6), pp. 825–862.
- [26] Meinzen-Dick, R., & Ringler, C. (2008). Water reallocation: drivers, challenges, threats, and solutions for the poor. *J. Hum. Dev.*, vol. 9, pp. 47-64.
- [27] Mishra, A. K., & Singh, V. P. (2010). A review of drought concepts. *J. Hydrol*, vol. 391(1–2), pp. 202–216.
- [28] Molle, F., & Berkoff, J. (2006). Cities versus agriculture: revisiting intersectoral water transfers, potential gains and conflicts. IWMI, Sri Lanka.
- [29] Niazi, A., Prasher, S. O., Adamowski, J., & Gleeson, T. (2014). A system dynamics model to conserve arid region water resources through aquifer storage and recovery in conjunction with a dam. *Water* 2014, vol. 6(8), pp. 2300-2321.
- [30] Pahl-Wostl, C. (2007). Transitions towards adaptive management of water facing climate and global change. *Water Resources Management*, vol. 21, pp. 49–62.
- [31] Palmer, W. C. (1965). Meteorological drought. *Weather Bureau Res. Paper 45*, U.S. Department of Commerce, Washington, DC, pp. 58.
- [32] Rani, B.A., & Maragatham, N. (2013). Effect of elevated temperature on rice phenology and yield. *Indian J. Sci. Technol.*, vol. 6, pp. 5095-5097.
- [33] Rusca, M., Heun, J., & Schwartz, K. (2012). Water management simulation games and the construction of knowledge. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, vol. 16, pp. 2749-2757.

- 
- [34] Saxton, K. E., & Rawls, W. J. (2006). Soil water characteristic estimates by texture and organic matter for hydrologic solutions. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, vol. 70, pp. 1569-1578.
- [35] Shaw, S. B., & Riha, S. J. (2011). Assessing temperature-based PET equations under a changing climate in temperate, deciduous forests. *Hydrological Processes*, vol. 25(9).
- [36] Stave, K. A. (2003). A system dynamics model to facilitate public understanding of water management options in Las Vegas, Nevada. *J. Environ. Manag.*, vol. 67, pp. 303–313.
- [37] Steduto, P., Hsiao, T. C., Fereres, E., & Raes, D. (2012). Crop yield response to water. FAO, Rome.
- [38] 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. *Agron. J.*, vol. 101, pp. 426-437.
- [39] Sterman, J. D. (2000). *Business Dynamics, Systems Thinking and Modeling for A Complex World*. McGraw-Hill, Boston.
- [40] Stöckle, C. O., Donatelli, M. & Nelson, R. (2003). CropSyst, a cropping systems simulation model. *Eur. J. Agron.*, vol. 18, pp. 289-307.
- [41] Subrahmanyam, V. P. (1967). Incidence and spread of continental drought. WMO/IHD Report No. 2, Geneva.
- [42] TCCIP (2017), 《臺灣氣候變遷科學報告 2017-物理現象與機制》。
- [43] Tessenorff, H. (1992). Dublin statement on water and sustainable development. *Aqua AQUAAA*, vol. 41(3), pp. 129-135.
- [44] UN Water. (2008). Status report on integrated water resources management and water efficiency plans. New York. Prepared for the 16th session of the Commission on Sustainable Development in May 2008, New York.
- [45] Van Rooijen, D. J., Turrall, H., & Biggs, T. W. (2005). Sponge city: water balance of

a mega-city: water use and wastewater use in Hyderabad India. *Irrigation and Drainage*, vol. 54, pp. 1-11.

- 
- [46] Wang, K., & Davies, E.G.R. (2015). A water resources simulation gaming model for the Invitational Drought Tournament. *J. Environ. Manag.*, vol.160, pp. 167-183.
- [47] Wheeler, S. A., Loch, A., Crase, L., Young, M., & Grafton, R. Q. (2017). Developing a water market readiness assessment framework. *Journal of Hydrology*, vol. 552, pp. 807-820.
- [48] Wilhite, D.A., & Glantz, M.H. (1985). Understanding the drought phenomenon: the role of definitions. *Water Int.* vol. 10, pp. 111–120.
- [49] Xi, X., & Poh, K. L. (2013). Using system dynamics for sustainable water resources management in Singapore. *Procedia Computer Science*, vol. 16, pp. 157–166.
- [50] Young, M. D. (2014). Designing water abstraction regimes for an ever-changing and ever-varying future. *Agricultural Water Management*, vol. 145, pp. 32-38.
- [51] Zhu T, Marques GF, & Lund JR. (2015). Hydroeconomic optimization of integrated water management and transfers under stochastic surface water supply. *Water Resour Res.*
- [52] 台北市記帳士公會 (2016), 105 年度營利事業各業所得額暨同業利潤標準。
- [53] 石門水庫管理中心 (2014), 103 年水位容積資料彙整。
- [54] 石門農田水利會 (2005), 灌溉計畫書。
- [55] 吳富春、沈易徵 (2001), 水田蓄水對植生環境之衝擊分析。
- [56] 李苑華(2018), 韌性社區供水系統氣候風險評估與調適能力建構方法之發展, 國立台灣大學生物環境系統工程學研究所, 博士論文。
- [57] 周國鼎 (2013), 2012 國際水價現況解析, 自來水會訊第 32 卷第 2 期。
- [58] 邱祈榮、梁玉琦、賴彥任、黃名媛 (2004), 臺灣地區氣候分區與應用之研究,

臺灣地理資訊學刊，第 1 卷，第 41-62 頁。



- [59] 姚銘輝、陳守泓(2005)，利用渦流相關系統量測水稻田蒸發散量及作物係數，水稻田農業多樣性機能研討會，第 227-239 頁。
- [60] 洪毓謙 (1999)，以砂箱實驗探討現地複合土層之滲流機制，國立中央大學土木工程研究所，碩士論文。
- [61] 桃園農田水利會 (2005)，灌溉計畫書。
- [62] 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。
- [63] 國家教育研究院 (2002)，力學名詞辭典。
- [64] 陳凱俐、林雲雀、謝明修、陳婉琪、李家豪 (2006)，水田經濟效益評估，宜蘭大學生物資源學刊，第 3 卷第 1 期，第 1-14 頁。
- [65] 陳豐文、劉正宇 (2013)，水收支平衡應用於水田灌溉用水消耗特性之評估，農業工程學報，第 59 卷第 1 期，第 77-98 頁。
- [66] 陳豐文、劉振宇、蔡西銘 (2013)，連續型機率分配模式應用於台灣灌區有效雨量之推估，農業工程學報，第 59 卷第 2 期，第 1-28 頁。
- [67] 經濟部水利署 (2005^a)，《桃園地區農地耕作調整促進水資源利用研究》。
- [68] 經濟部水利署 (2005^b)，《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》。
- [69] 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》。
- [70] 經濟部水利署 (2009)，《旱災潛勢定義及其分析方法之建立》。
- [71] 經濟部水利署 (2010)，《石門水庫供水區整體水源利用規劃》。



- [72] 經濟部水利署 (2014),《石門水庫供水區水資源活化計畫》。
- [73] 經濟部水利署 (2016),《北北桃水源運用整體供水調度規劃》。
- [74] 經濟部水利署 (2017),《石門水庫運用要點》
- [75] 經濟部水利署, 各項用水統計資料庫 <http://wuss.wra.gov.tw/waterusage.aspx>
- [76] 農田水利入口網《106 年農田水利處之數字看板》
- [77] 農委會農業統計資料查詢
<http://agrstat.coa.gov.tw/sdweb/public/official/OfficialInformation.aspx>
- [78] 蔡昇甫 (2004), 水田之功能與效益評估, 農田水利會雜誌專題報導, 第 50 卷第 10 期, 第 10-17 頁。
- [79] 蔡明華 (1994), 水稻田生態環境保護對策之研究, 農田水利會雜誌, 第 41 卷第 9 期, 第 10-13 頁。
- [80] 澳洲水資源交易網站 www.waterexchange.com.au
- [81] 簡傳彬、李總集、李英正、吳瑞賢、溫志超、扭家慶 (2000), 水稻田迴歸水量量測及初步分析, 農業工程研討會論文集, 第 575-582 頁。
- [82] 闕雅文 (2002), 台灣的水市場及建立水銀行之經濟分析, 國立台灣大學農業經濟學研究所, 博士論文。