

國立臺灣大學生物資源暨農學院生物環境系統工程學系

碩士論文

Department of Bioenvironmental Systems Engineering

College of Bioresources and Agriculture

National Taiwan University

Master's Thesis

系統動力學與分岔理論之跨流域水資源調度-

以濁幹線與北幹線串接為例

Inter-basin Water Resource Allocation Based on System Dynamics and
Bifurcation Theory : A Case Study on the Interconnection of the
Cho and North Main Canals

吳宗燁

Zong-Ye Wu

指導教授：胡明哲 博士

Advisor: Ming-Che Hu, Ph.D.

中華民國 115 年 6 月

June, 2026



國立臺灣大學碩士學位論文
口試委員會審定書
MASTER'S THESIS ACCEPTANCE CERTIFICATE
NATIONAL TAIWAN UNIVERSITY

系統動力學與分岔理論之跨流域水資源調度-

以濁幹線與北幹線串接為例

Inter-basin Water Resource Allocation Based on System Dynamics and
Bifurcation Theory : A Case Study on the Interconnection of the Cho and North
Main Canals

本論文係吳宗燁 (R13622038) 在國立臺灣大學生物環境系統工程研究所完成之碩士學位論文，於民國115年6月26日承下列考試委員審查通過及口試及格，特此證明。

The undersigned, appointed by the Department of Bioenvironmental Systems Engineering on 26 June 2026 have examined a Master's Thesis entitled above presented by Zong-Ye Wu (R13622038) candidate and hereby certify that it is worthy of acceptance.

口試委員 Oral examination committee:

胡明哲	(指導教授 Advisor)	
陳世楷	王如海	陳豐文
呂恆堂		

系(所、學位學程)主管 Director:

詹國偉

誌謝



本論文得以順利完成，首先必須感謝胡明哲老師的指導與提攜。老師在我整個研究生涯中，總是給予我鼓勵與肯定，並且都秉持著溫柔敦厚的教育理念，引導我在挫折中建立信心。最令我感激的是，在我奶奶生病期間，給予我鼓勵、包容與體諒，讓我能有充足的期間陪伴家人，並寬慰我無須為進度擔憂。胡明哲老師，再在感謝你，你的仁厚與溫暖，學生將永銘於心。

同儕的陪伴，也是我這生涯中難忘的記憶。感謝我的同窗摯友許勝峰與陳品翔，我們於研究中同甘共苦、打拼奮鬥，也謝謝兩位摯友能在我陷入低潮時，給予我鼓勵與幫助。其中，最令我難忘的是遠赴日本參加 JpGU 的回憶，兩位摯友帶我快樂開心遊日本，助我走出陰霾。許勝峰，大學同窗 4 年、研究所 2 年，我很開心能夠與你成為同學與朋友；陳品翔，雖然在短短時間與你當夥伴，但是我們也建立了革命情感。能夠認識兩位，我深感榮幸。

最後，謹將此論文獻給我最摯愛的家人，特別是我生命中最重要，卻在 115 年 3 月與世長辭的奶奶—張台忠女士。奶奶，謝謝您從小到大對我的拉拔與無微不至的關愛，您的離開，讓我經歷了前所未有的心碎與極度的難過。我心中最大的遺憾，就是您沒能親眼看見我完成學業、見證我畢業的這一刻。這份成果，交織著我對您的感謝與思念，希望您於在天之靈能帶著慈愛目光看顧著我，我會帶著您給我的愛與教誨，繼續向前邁進。

奶奶，我畢業了，對您的思念，永無止盡。這份榮耀，與您共享。

中文摘要



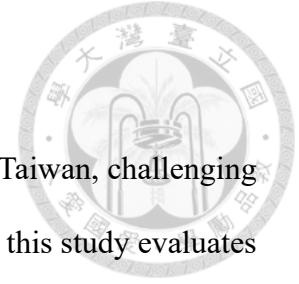
近年來受全球氣候變遷加劇影響，臺灣降雨時空分佈越發極端，加劇了區域水情旱澇不均的現象，使得既單一水資源系統之水資源面臨嚴峻考驗。為突破天然水文條件限制並提升區域調度性，本研究以「濁幹線與北幹線串接工程」為探討標的，評估集集攔河堰與曾文—烏山頭水庫兩大水資源系統跨流域調度之效益。

本研究運用系統動力學模式，使用 2010 年至 2019 年之水文資料進行模式建置。研究設定三大模擬情境：現況情境、濁幹線與北幹線串接情境，以及濁幹線與北幹線串接且增設帶狀調蓄池情境，探討不同情境下對雲林地區與嘉南地區之水資源供需影響。結果顯示，在現況情境下，嘉南地區於枯旱期面臨缺水風險，需啟動停灌機制。導入濁幹線與北幹線串接後，建立之雙向調度機制具備非對稱性互補效益：「北水南引」呈現常態穩定性，十年年平均可南引約 1,156 萬噸水量，有效降低嘉南地區農業缺水量；「南水北調」則受限於水庫溢流條件，屬機會型機制，十年年平均調度量約 200 萬噸。若進一步增設帶狀調蓄池，可提高約 800 萬噸，使「北水南引」平均水量提近至 1,964 萬噸。

此外，本研究引入分岔理論，將供需比例視為狀態變數，以評估系統的穩定性。結果表明，濁幹線與北幹線串接工程不僅未破壞原灌區之供需平衡，更將缺水區原本震盪的供需比例，收斂至趨近供需平衡點。總結而言，跨流域調度能強化整體水資源系統之抗旱韌性。

關鍵詞：水資源系統、系統動力學、分岔理論、跨流域水資源調度

ABSTRACT



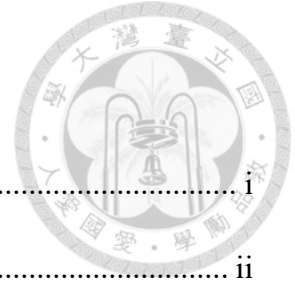
Climate change has exacerbated uneven rainfall distribution in Taiwan, challenging independent water resource systems. To enhance regional flexibility, this study evaluates the inter-basin water allocation benefits of the "Cho and North Irrigation Canals Interconnection " between the Jiji Weir and the Tsengwen-Wushantou Reservoir.

Using a System Dynamics model validated with 2010–2019 hydrological data, three scenarios were simulated: current status, canal interconnection, and interconnection with a linear detention pond. Results show that under the current status, the Jianan region faces severe drought risks. The interconnection establishes an asymmetric bidirectional allocation: the stable "North-to-South Transfer" provides 11.56 million tons annually to mitigate agricultural losses, while the opportunistic "South-to-North Transfer" supplies 2 million tons. Adding a detention pond significantly boosts the North-to-South transfer to 19.64 million tons.

Additionally, applying Bifurcation Theory reveals that the project preserves the original areas water balance while converging the water-scarce areas fluctuating supply-demand ratios toward equilibrium. In conclusion, inter-basin allocation, coupled with detention facilities, effectively strengthens the overall drought resilience of regional water networks.

Keywords: Water Resources System, System Dynamics, Bifurcation Theory, Inter-basin Water Allocation

目次



口試委員會審定書	i
誌謝	ii
中文摘要	iii
ABSTRACT	iv
目次	v
圖次	vii
表次	ix
第一章 緒論	1
1.1 研究背景	1
1.2 研究目的	3
1.3 研究架構	3
第二章 文獻回顧	5
2.1 水資源系統規劃	5
2.1.1 模擬法	5
2.1.2 最佳化	6
2.2 分岔理論	7
第三章 研究方法	8
3.1 系統動力學	8
3.1.1 Vensim	9
3.2 模式建置	11
3.3 研究區域	12

3.4	集集攔河堰系統	15
3.5	曾文－烏山頭系統	20
3.6	北港溪渡槽	31
3.7	分岔理論	32
第四章	研究成果.....	33
4.1	情境一：現況情境	33
4.1.1	集集攔河堰系統	33
4.1.2	曾文－烏山頭系統	34
4.2	情境二：濁幹線與北幹線串接	38
4.3	情境三：濁幹線與北幹線串接且增設帶狀調蓄池	46
4.4	分岔理論分析	48
第五章	結論與建議	51
5.1	結論	51
5.2	建議	52
第六章	參考文獻.....	53

圖次



圖 1-1 西部供水廊道建設計畫	2
圖 1-2 研究流程圖	4
圖 3-1 系統動力模式物件交互關係	10
圖 3-2 濁幹線與北幹線串接工程示意圖	14
圖 3-3 集集攔河堰系統動力學模式架構圖	19
圖 3-4 曾文水庫與烏山頭水庫串聯運用規線	24
圖 3-5 曾文水庫民國 101 年標高一面積－容積曲線	28
圖 3-6 烏山頭水庫民國 101 年標高一面積－容積曲線	29
圖 3-7 曾文－烏山頭系統動力學模式架構圖	30
圖 4-1 集集攔河堰農業用水比較	34
圖 4-2 曾文水庫有效蓄水量比較	36
圖 4-3 烏山頭水庫有效蓄水量比較	36
圖 4-4 曾文－烏山頭系統之農業用水比較	37
圖 4-5 曾文－烏山頭系統之農業用水缺水量	38
圖 4-6 濁幹線與北幹線串接系統動力學模式架構圖	39
圖 4-7 集集攔河堰之登記水權量與進水量比較	40
圖 4-8 集集攔河堰之灌溉用水登記水權量與灌溉用水量比較	41
圖 4-9 濁幹線調度量	42
圖 4-10 曾文-烏山頭水庫之灌溉嘉南地區缺水量比較	43
圖 4-11 烏山頭水庫之溢流量	44

圖 4-12 北幹線調度量.....	44
圖 4-13 集集攔河堰 灌溉雲林地區缺水量比較.....	45
圖 4-14 帶狀調蓄池.....	47
圖 4-15 嘉南地區原供需比例與濁幹線與北幹線串接後比較.....	50
圖 4-16 雲林地區原供需比例與濁幹線與北幹線串接後比較.....	50



表次



表 3-1 系統動力模式物件圖示名稱及定義	11
表 3-2 集集攔河堰各標的用水登記水權量	16
表 3-3 集集攔河堰水權量分配比例取水一覽表	17
表 3-4 集集攔河堰各給水種類與上限限制	18
表 3-5 曾文水庫與烏山頭水庫各標的用水登記水權量	21
表 3-6 曾文水庫與烏山頭水庫水權量分配比例取水一覽表	23
表 3-7 曾文水庫與烏山頭水庫串聯運用規線	25
表 3-8 曾文水庫與烏山頭水庫串聯水情情境與供水量供應折減	26
表 3-9 濁幹線與北幹線串接調度與啟動機制	31
表 4-1 曾文水庫與烏山頭水庫有效蓄水量檢定指標	35
表 4-2 濁幹線與北幹線調度量	46
表 4-3 北水南引水量調度量與加調蓄池調度量比較	48

第一章 緒論



1.1 研究背景

臺灣地形山高谷深、河川短促陡急。儘管年降雨量豐沛，然受限於地形條件，水資源不易留存於地表，高度仰賴水庫進行蓄水調度。近年來，受全球氣候變遷加劇影響，降雨之時空分佈益發極端，降雨強度增加而降水日數減少，加劇了北豐南枯及早滯不均的現象。此外，既有水庫隨營運年限增長而面臨泥沙淤積與蓄水量縮減的困境，使得整體水資源系統之承載能力面臨嚴峻考驗，強化供水系統之韌性已成不容忽視之課題。

為突破天然地形與水文條件的限制，並提升區域間的水資源調度彈性，經濟部水利署推動珍珠串計畫以建構西部供水廊道。透過各類輸水管線與越域引水工程，將原本受地形阻隔的獨立水系予以串接，例如北部區域有石門水庫串接新竹原水管，提升新竹每日 30 萬噸運用水量；中部區域有台中至雲林管線連通改善，增加台中彰化每日 20 萬噸以及雲林彰化 12 萬噸調度能力等。珍珠串計畫以建構西部供水廊道能夠強化西半部水網的調配能力，消弭南北水情之差異。



資料來源：經濟部水利署，110 年 8 月「臺灣各區水資源經理基本計畫」

圖 1-1 西部供水廊道建設計畫

在整體西部水網中，嘉南大圳系統扮演著農業與民生供水之樞紐。早期，濁水溪與曾文溪流域曾仰賴建於 1930 年的「北港溪倒虹吸工」進行枯水期的跨流域支援，該設施曾多次成功執行南北水源雙向調度。然而，受北港溪河道嚴重沖刷毀損所致，此跨流域調度機制與便隨之停擺，導致現況無法有效進行水資源調度。

為因應氣候變遷加劇枯旱風險增加，推動濁幹線與北幹線串接工程具備其必要性，其目標是恢復濁幹線與北幹線的雙向調度機制。並於豐水期將濁水溪餘水經由北港溪渡槽南引至嘉南地區；枯早期則由曾文—烏山頭系統北調支援雲林地區。此雙向調度配機制不僅能穩定雲嘉地區的農業用水、降低農田停灌機會，更能減輕曾文—烏山頭系統的農業供水壓力，並將釋出之蓄水空間用於穩定民生及工業供水，進而達成區域水資源運用效益之最大化。



1.2 研究目的

西部供水廊道與濁幹線與北幹線串接工程的推動，不僅是實體管線的修復，更需配合科學化的動態模擬，才能在複雜的攔河堰與水庫運用要點、渠道之物理限制及水文變化等制定配水方案。歷史水情顯示，每年豐水期（第 18 至 33 旬）的濁水溪具備餘水調度潛能，透過北水南引可將餘水南引支援嘉南地區灌溉，藉此減輕曾文—烏山頭系統的農業供水負擔，並將釋出之水資源轉供民生與工業使用。

研究目的在於濁幹線與北幹線串接工程下對嘉南地區與雲林地區之影響，並使用系統動力學模式，將水資源網路轉化為系統動力學模式架構圖。透過模擬不同水資源調度情境，並計算水資源跨流域調度之效益。此外，本研究進一步導入分岔理論將灌區供需比例定義為系統狀態變數，藉由跨流域調度機制，使系統結構由原本週期性震盪，收斂至供需平衡狀態。透過結合系統動力學與分岔理論，探討嘉南地區與雲林地區之供需情形。

1.3 研究架構

本研究選定集集攔河堰系統與曾文—烏山頭水庫系統作為探討標的，運用系統動力學（System Dynamics）方法，並藉由 Vensim 軟體建構跨流域調度之系統動力學模式。本模型包含濁幹線與北幹線串接工程以及增設調蓄設施之水資源調度，研究使用 2010 至 2019 年之水文資料模擬供水情況，並透過情境設定，模擬兩大水資源系統在「現況」、「濁幹線與北幹線串接」及「增設帶狀調蓄池」等不同情境下，嘉南地區與雲林地區之農業用水供給與需求情形，以應對枯水期之缺水需求並探討其影響。本研究流程如圖 1-2，

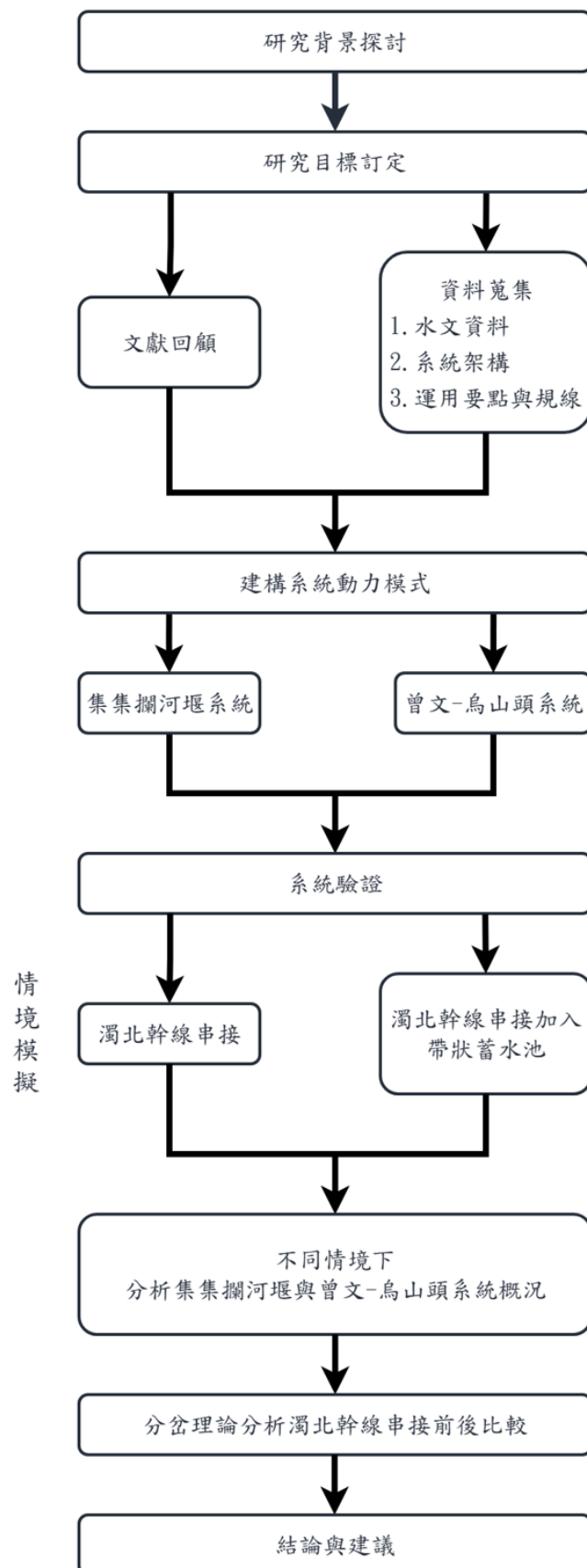


圖 1-2 研究流程圖

第二章 文獻回顧



2.1 水資源系統規劃

水資源系統規劃之核心目標，在於面對水文條件極端化與降雨時空分布不均之挑戰下，確保整體供水網絡之穩定性與韌性。在學術發展與工程實務上，水資源規劃之評估工具已歷經長期的演進。水資源研究多仰賴「模擬法 (Simulation)」來推演特定水文條件下系統的動態行為，或是運用「最佳化 (Optimization)」藉由嚴謹的數學模型，尋求缺水量最小化或供水量最大化下的最佳水資源配置。

2.1.1 模擬法

模擬法為水資源系統規劃，發展最早且應用最為廣泛的分析法。其核心概念在於將實體水資源網絡，如水庫、河川及輸水渠道之物理特性與水文行為，轉化為數學模型並進行數值演算。透過模擬實際系統的動態行為，模擬法能有效探討在各種水文、物理以及氣候條件下，長期水資源調度的運行狀況。吳瑞賢、鄭安成及吳幸娟 (2022)，「嘉南地區加強灌溉管理實務探討」，藉由建構田間水平衡模式，評估嘉南地區實施加強灌溉管理之成效。並提出依據動態水情適時啟動部分停灌機制，為有限水資源下之最佳化配水提供實務決策參考。黃群展、許少瑜、夏復國、童慶斌、李宗祐及林冠州 (2023)，「南勢溪跨域引水對翡翠水庫供水系統影響」，運用系統動力學，模擬南勢溪引水至石門水庫之跨流域調度情境，並評估其對既有供水系統的潛在衝擊。童慶斌及陳韻如 (2001)，「大台中地區水資源系統動力模式建立與應用」，使用系統動力學建構大甲溪與大安溪水資源系統，模擬 921 地震前後石岡壩容量改變對民生用水之衝擊，並評估未來用水成長情境下，水資源聯合運用探討。建構氣候變遷衝擊評估整合系統，結合氣候降尺度、GWLF 水文模式與 Vensim

系統動力學，模擬高屏溪流域之水資源系統，並指出在氣候變遷與需水量成長雙重壓力下，系統供水承载力將下降且缺水風險顯著提高。劉子明（2010），「氣候變遷對區域水資源衝擊評估整合系統之研究」，建構氣候變遷衝擊評估系統，結合氣候降尺度、GWLF 水文模式與系統動力學，模擬高屏溪與曾文溪之水資源系統，分析現況之供水能力，以應對未來需水量的成長以及氣候變遷造成供水能力下降。

2.1.2 最佳化

最佳化為水資源系統規劃中，尋求「最佳決策」的分析工具。其核心概念在於將複雜的水資源分配問題，轉化為嚴謹的數學規劃模型，並藉由設定明確的目標函數，如供水量最大化、缺水最小化等以及實體的限制函數，如水庫蓄水容量、河川生態基流量等。透過線性規劃、動態規劃或遺傳演算法等數學演算，最佳化可計算出符合目標函數下的最佳水資源系統規劃策略。洪彥甯及蕭政宗（2017），「南化水庫最佳化與模糊化營運規線對缺水影響探討」，該研究結合多準則決策與遺傳演算法，結果顯示相較於傳統既定之水庫營運規線，將多重缺水指標設定為目標函數，能尋得更具彈性之操作模式，能夠顯著降低水庫系統發生嚴重缺水之機率與風險。張力仁、郭振民、曾宏偉及游保杉（2019），「應用多目標遺傳演算法於 DHSVM 之參數最佳化-以石門水庫集水區為例」，利用多目標遺傳演算法針對石門水庫集水區之 DHSVM 模式進行最佳化。透過演算法尋求最佳參數，能有效解決數據資料不足之誤差，進而顯著提升長時間與極端水文流量模擬之準確度。李兆庭（2022），「水資源系統串接之頻譜網路最佳化分析」，運用傅立葉級數轉換水文時間序列，並結合最佳化模型進行跨流域水資源調度，並且配合用水需求管理，可大幅提升系統應對極端枯旱事件之供水韌性。陳宇文、朱宏杰、張良正及傅怡釗（2009），「多湖區系統地表地下聯合操作之最佳化研究」，研究整合地下水數值模式

(MODFLOW)、類神經網路與遺傳演算法，尋求高屏大湖之最佳操作規線，透過地表地下聯合操作營運與規線，能顯著降低旬缺水風險並提升供水效益。



2.2 分岔理論

分岔理論發源於系統動力學，目的在於探討一個動態系統中，當系統參數持續發生連續變化時，系統的結構是否會產生改變，在連續時間系統中，系統狀態可由一階常微分方程式表示：

$$\frac{dy}{dt} = f(y, \alpha) \quad (2-1)$$

其中 y 為狀態變數， α 為控制參數。當控制參數改變時，系統之平衡點數量、穩定性或其系統結構會發生連續變化，此過程定義為分岔。

當系統受制於規則限制或外部影響時，其狀態常表現為無法收斂之週期性震盪，反映出系統處於不平衡之狀態。然後，透過引入外部控制變數，其週期性震盪可能會發生新的變化或趨向收斂平衡。此由震盪走向收斂之分岔過程，為評估系統是否具備長期穩定理論依據。

X. Yang, Y. Chen 和 H. L. Shu (2010)，「Stability analysis of AC/DC power transmission system based on bifurcation theories」，該研究運用分岔理論，探討高壓直流輸電之交流電與直流電的系統特性。研究中結合特徵值分析與時域模擬，探討不同控制模式的穩定性。Y. Ma, S. Lv, X. Zhou, Z. Gao, X. Zhang 和 J. Zhang (2018)，「Analysis of Voltage Stability of Power Systems Using the Bifurcation Theory」，該研究基於分岔理論的基本概念，探討由微分方程式建構之電力系統電壓穩定性之動態行為，研究分析了導致電壓不穩定的兩種分岔，並指出多參數問題在電壓穩定性分析中極具重要性。

第三章 研究方法



3.1 系統動力學

系統動力學 (System Dynamics) 為一門專精於解析複雜動態行為之學科，最初由美國麻省理工學院 (MIT) 的 Jay W. Forrester 教授於 1950 年代創立。該理論初期多數應用於企業營運與政策評估，隨後跨足各類科學領域。

在學術定義上，「系統」意指多個相異元件透過彼此交互作用所交織而成的集合體；而「動力」則是該集合體之行為會隨時間推移而產生狀態演變。在建構此類依循時間軸推進的模型時，條件為確立系統之初始狀態。其系統動力模型主要由三種不同的變數所構成：表示系統累積量的「存量變數 (Stock)」，決定狀態變化速率的「流量變數 (Rate)」，以及協助數值運算與因果關係的「輔助變數 (Auxiliary)」。

這些變數透過實體與資訊的流動相互以「箭線 (Connector)」串接，具體而微地反映出系統內部的因果反饋機制。

在實務操作上，系統動力學之涵蓋五個流程：首先為「定義問題」，釐清探討問題並廣泛蒐集各式數據，以掌握各項影響因子間的關係；其次是「問題與系統描述」，描述衍生該問題之系統，包含其內部物件與物件間的因果關係以及其交互作用；第三「建立系統動力圖」，利用系統動力學所設計的各式變數物件，如存量變數、流量變數等來繪製其系統動力圖；下一流程為「建置模型與模擬情境」將所得之資訊、數據及規則等化為數學方程式與邏輯架構，並藉助系統動力學軟體，如 Anylogic、Vensim 等，解決其複雜、連續或離散等的系統互動；最後為「模型結果分析」，比對程式模擬所產出的數據與真實情況或預期目標之兩者差距，並且比較其結果。

水資源系統規劃與農業灌溉系統具備非線性數學關係、時間與空間特性。靜態分析工具難以設定其內部複查動態交互作用，如水庫運用規線、蓄水利用運轉、水利設施用水需求、各旬農業用水需求等。系統動力學擅長處理複雜邏輯問題，並且可透過系統動力學軟體之數值運算功能，為水資源系統規劃與農業灌溉系統之用水模擬及跨流域水資源調度，提供其決策支援。

3.1.1 Vensim

本研究選用之系統動力學分析工具為 Vensim 軟體。Vensim 操作介面直觀且使用者僅需透過圖形化的符號與資訊箭頭，即可在工作區內建構各項變數。將變數間的因果關係透過內建之方程式 (Equation) 功能寫入模型後，系統便能記錄並執行複雜的數學運算。此外，在建模與除錯過程中，Vensim 擁有追蹤功能，可檢視變數之輸入、輸出以及與之相關影響或被影響之變數，協助使用者了解系統動力學模型架構並進行修正、除錯等。

系統動力學與 Vensim 軟體建置的基礎，在於透過視覺化的圖形物件來建置並解析繁雜的資料、限制規則以及數學邏輯等。根據模式設定原則，一個完整的系統動力圖主要由四項核心物件所組成：

1. 存量物件 (Stock)：存量代表系統內物質或資源量在某個時間點的累積狀態，在數學定義上與具備積分的意涵。它的數值是由前一時刻的狀態，加上該時間段內所有流入量與流出量的淨差額所決定。

$$\text{Stock}(t) = \int_{t_0}^t [\text{Inflow}(s) - \text{Outflow}(s)]ds + \text{Stock}(t_0) \quad (3-1)$$

在水資源系統規劃中，具備蓄存能力之水利相關設施可以此物件表示，例如水庫、埤塘及灌區蓄水量等。

2. 流量物件 (Flow)：流量用以描述存量發生增減變化的速率及方向，具備數學上微分的特性。它反映了物質或資源量在單位時間內進出系統的行為。

$$\frac{d(\text{Stock})}{dt} = \text{Inflow}(t) - \text{Outflow}(t) \quad (3-2)$$

常見的水資源應用範疇包含河川入流量、水庫放水量或明渠、管線之輸水量等。

3. 輔助變數 (Auxiliary)：主要作為系統動力學模式中的常數、獨立變數或是參數等。其目的在於輔助存量物件、流量物件以及複雜方程式的運算。
4. 箭線 (Connector)：以方向性的箭頭線段表示，負責在各個存量物件、流量物件以及輔助變數之間連接數據與資訊。

系統動力學模式之架構，基於系統內部各項物件之連接所組成。藉由模式建置，使用者可以建構現實複雜系統之動態行為，並假設情境進行模擬與結果分析。關於系統動力學模式，各物件交互關係如圖 3-1，其圖示以及物件定義以及物件說明如表 3-1。

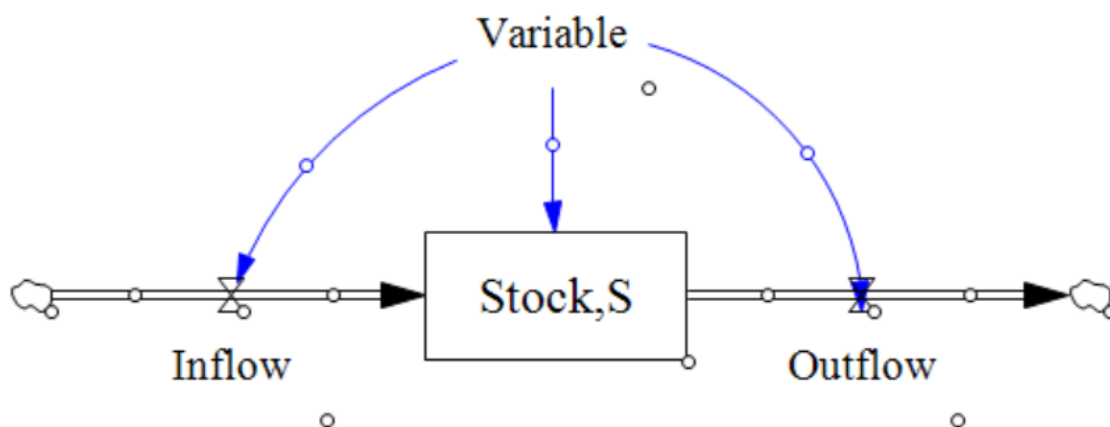
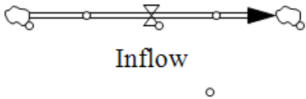
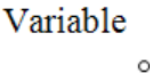


圖 3-1 系統動力模式物件交互關係

表 3-1 系統動力模式物件圖示名稱及定義

圖示	物件名稱	物件定義
	存量	物質或資源量在某個時間點的累積狀態
	流量	存量發生增減變化的速率及方向
	變數	輔助存量物件、流量物件與方程式的運算
	連接	傳遞在各物件之間數據與資訊

3.2 模式建置

本研究之系統動力模式模擬臺灣南部兩大水資源系統「集集攔河堰」與「曾文—烏山頭系統」。集集攔河堰之南岸聯絡渠道主要負責濁幹線以及其雲林地區之農業灌溉用水；曾文—烏山頭水庫系統之農業灌溉用水包含嘉南地區。

本模式建置，在於量化兩系統跨流域之雙向調度串接後之效益。在系統動力模式的設計上，主要分為三大情境：

1. 情境一，現況情境：模擬北港溪渡槽尚未建置、兩大水資源系統維持獨立運作之現況情境。此情境作為本研究之控制組，反映在豐枯水期差異下，雲林地區與嘉南地區所面臨之缺水情形。
2. 情境二，濁幹線與北幹線串接：模擬新建北港溪渡槽將濁幹線與北幹線串接後進行水資源調度之效益。此情境涵蓋兩大操作機制：其一為「北水南引」，於豐水期將濁水溪水源往南支援嘉南地區；其二為「南水北調」，當濁水溪水源不足面臨特殊事件或枯旱情形時，由曾文—烏山頭系統反向支援雲林地區。

3. 情境三，濁幹線與北幹線串接且增設帶狀調蓄池：建於情境二之雙向調度基礎上，進一步模擬於濁幹線沿線增設「帶狀調蓄池」之情境。透過調蓄池的增加調蓄空間，於豐水期將多餘、溢流的水量蓄存，提高水資源利用效率。

此跨流域水資源調度以及多情境之系統動力模式，透過系統動力模式之整合模擬並分析，評估水資源效益。

3.3 研究區域

本研究選定臺灣雲林地區之農田灌溉系統為研究區域。該區域內主要河川如清水溪、虎尾溪及北港溪等皆發源於東部山區；其中，濁水溪不僅為臺灣流域面積最廣、年逕流量極大之水系，更是雲林縣最核心之農業灌溉水源。然而，受先天地形與氣候條件影響，雲林地區之降雨時空分布呈現極度不均：全年降雨高度集中於七至九月之西南季風與颱風期間，而十月至翌年一月則為顯著之旱期。此旱雨季分明的水文特徵，使得該地區之水資源蓄存與穩定供水面臨嚴峻挑戰，高度仰賴完善的農田水利工程進行調配。

為有效運用濁水溪水源並整合區域灌溉網絡，1920 年即建置「濁幹線」作為雲林農田水利之主要幹線水路並且與集集攔河堰一同進行取水調度。其中，雲林地區為本研究之探討核心。該灌區位於濁水溪系統之末端，面對日益增長的農業需求與極端氣候之衝擊，單一水系之逕流量難以支撐常態性的農業發展，進而突顯出跨流域水資源調度之急迫性。

本研究探討另一區域為臺灣嘉義地區之農田灌溉系統。嘉義地區地處廣闊，其農業灌溉仰賴曾文—烏山頭水庫系統之聯合供水。與雲林地區相似，嘉義地區受地形與氣候影響，降雨時空分布呈現顯著之豐枯異勢，全年降雨集中於颱風與西南季風期間，而秋冬季則為枯旱期。

為有效分配曾文與烏山頭水庫之水源，並建置「北幹線」作為區域主要幹線水路。其中，嘉南地區為本研究跨流域調度探討之核心。面對極端氣候與農業需求，曾文－烏山頭系統之供水量，面臨龐大的用水與調度壓力，難以確保農業供水，從而彰顯出建構跨流域水資源調度機制之刻不容緩。

嘉南平原受限於地理環境與水文條件，各區域之水資源分配極不均衡。1930年由八田與一技師規劃建置「北港溪倒虹吸工」，將濁幹線與北幹線串接。北港溪倒虹吸工於枯旱時期曾多次跨流域水資源調度，根據 1997 年以前的通水記錄，顯示北水南引達 28 次，南水北調 9 次。

北港溪河道受沖刷作用、天災等影響，導致倒虹吸工結構嚴重受損，最終仍在 2009 年因設施沖毀而全面毀損。近年來，隨著極端氣候加劇、農業用水需求提升，南部地區面臨嚴峻之供水危機，需重啟跨流域水資源調度能力。

農業部於 2023 年推動「濁幹線與北幹線串接工程」，即為新建「北港溪渡槽」，串聯濁水溪與曾文溪水源。該工程在恢復濁幹線與北幹線之雙向調度能力：於豐水期利用濁水溪剩餘水量，經由北港溪渡槽「北水南引」至嘉南地區供灌；枯水期則可視水情，由曾文－烏山頭系統「南水北調」支援雲林地區。此雙向調度設施之重建，不僅能降低農田停灌之機率，且能減輕曾文－烏山頭系統之農業供水負擔。



資料來源：國家發展委員會，2022

圖 3-2 濁幹線與北幹線串接工程示意圖

3.4 集集攔河堰系統



本研究水資源系統其一為集集攔河堰，地理位置位於南投縣集集鎮之濁水溪中游河段。該水資源系統涵蓋了攔河堰、溢洪設施、南北岸取水工等。在水資源調度上，集集攔河堰為多目標供水之水利設施，其供水範圍不僅包括濁水溪北岸農業部農田水利署彰化管理處與南岸雲林管理處之農業用水，也支援八卦山旱灌，以及雲林地區家用及公共給水與雲林離島工業區之工業用水。

集集攔河堰系統操作水量分析，採用 2010 至 2019 年經濟部水利署之每日進水量、出水量（單位：萬噸）等資料。

集集攔河堰系統規則依據經濟部水利署「集集攔河堰水庫運用要點」，第二章引水利用運轉第八點，本研究假設水權量為集集攔河堰系統之需水量，如表 3-2；運轉第九點，假設水權比例本研究集集攔河堰系統之分配水量，如表 3-3。

表 3-2 集集攔河堰各標的用水登記水權量



月	一			二			三			四			五			六		
旬	上	中	下	上	中	下	上	中	下	上	中	下	上	中	下	上	中	下
農水署彰管處	31.5300	31.5300	31.5300	31.3970	31.3970	31.3970	41.5810	41.5810	41.5810	43.1610	43.1610	43.1610	50.7630	50.7630	50.7630	58.1410	58.1410	58.1410
農水署雲管處	21.3960	21.3960	21.3960	18.5350	18.5350	18.5350	20.1340	20.1340	20.1340	20.7850	20.7850	20.7850	34.7510	34.7510	34.7510	78.5320	78.5320	78.5320
農水署雲管處(斗六堰)	1.2350	1.2350	1.2350	1.5820	1.5820	1.5820	3.7800	3.7800	3.7800	4.5800	4.5800	4.5800	6.6700	6.6700	6.6700	13.3530	13.3530	13.3530
家用及公共給水	2.3150	2.3150	2.3150	1.1570	1.1570	1.1570	1.1570	1.1570	1.1570	1.1570	1.1570	1.1570	1.1570	1.1570	1.1570	2.3150	2.3150	2.3150
工業用水	9.9530	9.9530	9.9530	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	9.9530	9.9530	9.9530
八卦山旱灌	0.5198	0.5198	0.5198	0.2090	0.2090	0.2090	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0503	0.0503	0.0503
水力用水	29.893	29.893	29.893	30.056	30.056	30.056	39.736	39.736	39.736	41.316	41.316	41.316	48.745	48.745	48.745	56.169	56.169	56.169
水力用水(臨時水權)	31.107	31.107	31.107	30.944	30.944	30.944	21.264	21.264	21.264	19.684	19.684	19.684	12.255	12.255	12.255	4.831	4.831	4.831

月	七			八			九			十			十一			十二		
旬	上	中	下	上	中	下	上	中	下	上	中	下	上	中	下	上	中	下
農水署彰管處	63.8960	63.8960	63.8960	65.5250	65.5250	65.5250	63.3740	63.3740	63.3740	42.3290	42.3290	42.3290	36.7770	36.7770	36.7770	35.7630	35.7630	35.7630
農水署雲管處	79.6820	79.6820	79.6820	79.4420	79.4420	79.4420	82.1380	82.1380	82.1380	65.0900	65.0900	65.0900	32.3680	32.3680	32.3680	29.5210	29.5210	29.5210
農水署雲管處(斗六堰)	15.6530	15.6530	15.6530	15.6530	15.6530	15.6530	14.2460	14.2460	14.2460	4.7210	4.7210	4.7210	3.1100	3.1100	3.1100	2.5000	2.5000	2.5000
家用及公共給水	2.3150	2.3150	2.3150	2.3150	2.3150	2.3150	2.3150	2.3150	2.3150	2.3150	2.3150	2.3150	2.3150	2.3150	2.3150	2.3150	2.3150	2.3150
工業用水	9.9530	9.9530	9.9530	9.9530	9.9530	9.9530	9.9530	9.9530	9.9530	9.9530	9.9530	9.9530	9.9530	9.9530	9.9530	9.9530	9.9530	9.9530
八卦山旱灌	0.1879	0.1879	0.1879	0.1201	0.1201	0.1201	0.3948	0.3948	0.3948	0.8087	0.8087	0.8087	0.7772	0.7772	0.7772	0.6027	0.6027	0.6027
水力用水	61	61	61	61	61	61	60.856	60.856	60.856	40.396	40.396	40.396	34.398	34.398	34.398	33.815	33.815	33.815
水力用水(臨時水權)	0	0	0	0	0	0	0.144	0.144	0.144	20.604	20.604	20.604	26.602	26.602	26.602	27.185	27.185	27.185



表 3-3 集集攔河堰水權量分配比例取水一覽表

月	一			二			三			四			五			六		
旬	上	中	下	上	中	下	上	中	下	上	中	下	上	中	下	上	中	下
農業用水	0.80899	0.80899	0.80899	0.97417	0.97417	0.97417	0.98264	0.98264	0.98264	0.98340	0.98340	0.98340	0.98760	0.98760	0.98760	0.92412	0.92412	0.92412
公共給水	0.03458	0.03458	0.03458	0.02188	0.02188	0.02188	0.01736	0.01736	0.01736	0.01660	0.01660	0.01660	0.01240	0.01240	0.01240	0.01426	0.01426	0.01426
工業用水	0.14867	0.14867	0.14867	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.06131	0.06131	0.06131
八卦山旱灌	0.00776	0.00776	0.00776	0.00395	0.00395	0.00395	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00031	0.00031	0.00031
水力用水	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000

月	七			八			九			十			十一			十二		
旬	上	中	下	上	中	下	上	中	下	上	中	下	上	中	下	上	中	下
農業用水	0.92745	0.92745	0.92745	0.92840	0.92840	0.92840	0.92655	0.92655	0.92655	0.89556	0.89556	0.89556	0.84707	0.84707	0.84707	0.84042	0.84042	0.84042
公共給水	0.01348	0.01348	0.01348	0.01338	0.01338	0.01338	0.01343	0.01343	0.01343	0.01849	0.01849	0.01849	0.02714	0.02714	0.02714	0.02870	0.02870	0.02870
工業用水	0.05797	0.05797	0.05797	0.05753	0.05753	0.05753	0.05773	0.05773	0.05773	0.07949	0.07949	0.07949	0.11668	0.11668	0.11668	0.12340	0.12340	0.12340
八卦山旱灌	0.00110	0.00110	0.00110	0.00069	0.00069	0.00069	0.00229	0.00229	0.00229	0.00646	0.00646	0.00646	0.00911	0.00911	0.00911	0.00748	0.00748	0.00748
水力用水	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000

集集攔河堰系統給水分為四大類，其北岸取水口為彰化管理處；南岸取水口為雲林管理處，兩者皆為農業用水。各給水種類以及其上限限制如表 3-4，皆依照集集攔河堰水庫運用要點所規定。



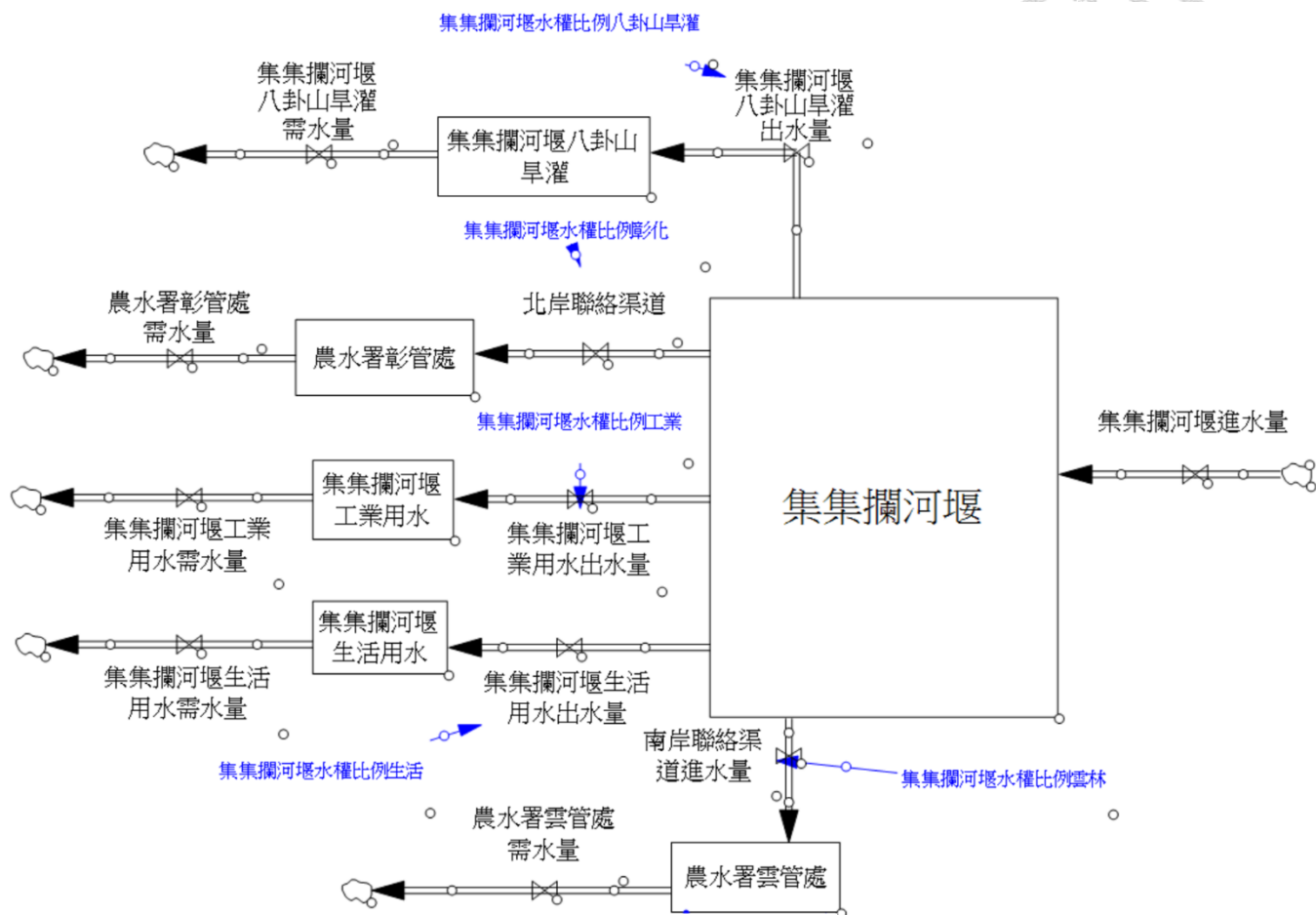
表 3-4 集集攔河堰各給水種類與上限限制

系統	給水種類	給水上限限制	資料來源
集集攔河堰系統	家用及公共給水	二月至五月：10 萬噸/日 六月至十二月：20 萬噸/日	集集攔河堰水庫運用要點 第二章第八點
	工業用水	86 萬噸/日	
	八灌山旱灌用水	2.65 萬噸/日	
	北岸取水口	665.28 萬噸/日	集集攔河堰水庫運用要點 第二章第五點
	南岸取水口	933.12 萬噸/日	

集集攔河堰系統於系統動力學 Vensim 軟體中，以工業用水為例，其給水上限限制數學方程式如下，

$$\text{Outflow}(t) = \text{Min}[86, \text{inflow}(t)] \quad (3-3)$$

最後，根據上述進水量、出水量、水權量（需水量）、水權比例（分配水量）以及各給水種類其上限限制等資料，進行系統動力學模式建置，如圖 3-3 所示。



19

3.5 曾文－烏山頭系統

本研究水資源系統其二為曾文－烏山頭系統，曾文水庫位於嘉義縣大埔鄉，橫跨嘉義、臺南與高雄三縣市。在水資源系統運作機制上，曾文水庫並非單獨供水，而是透過烏山嶺引水隧道以及東口堰與下游烏山頭水庫串聯運用。曾文水庫與烏山頭水庫串聯操作系統提供嘉義、臺南地區多目標供水，其給水包含農業灌溉用水、公共給水、工業用水等。曾文－烏山頭系統之最主要供水標的為農田水利署嘉南管理處，所轄之灌溉面積計有 72,897 公頃，其灌溉範圍不僅限於嘉南平原，橫跨嘉義縣、嘉義市與臺南市。

本研究曾文－烏山頭系統使用經濟部水利署曾文水庫以及烏山頭水庫 2010 至 2019 年之水文資料，其資料涵蓋出水量、進水量（單位：萬噸）等。此外，針對烏山頭水庫自身集水區之入流量，本研究使用經濟部水利署水利規劃試驗所民國 101 年「台南大湖水資源規劃檢討」中之水源控制點流量推估公式。根據該研究之方法，烏山頭水庫之入流量推估方程式如下：

$$Q_{\text{烏山頭}} = 0.09668 \times Q_{\text{曾文溪日流量}} \quad (3-4)$$

本研究假設曾文－烏山頭系統之需水量為經濟部水利署南區水資源分署所提供之現行曾文水庫與烏山頭水庫各標的年基準分配水量。該系統全年總計之基準分配水量為 10.47 億立方公尺，各用水標的分別為：灌溉用水量 9.0 億立方公尺、公共給水量 1.2 億立方公尺以及工業用水量 0.27 億立方公尺。上述總量分配至各旬如表 3-5 所示。

表 3-5 曾文水庫與烏山頭水庫各標的用水登記水權量



單位：萬立方公尺

月	旬	灌溉用水量	工業用水量	公共給水量	合 計
1	上	—	85.8	354.83	440.63
	中	171	85.8	354.83	611.63
	下	2,560	94.3	390.43	3,044.73
2	上	3,597	85.8	392.85	4,075.65
	中	3,845	85.8	392.85	4,323.65
	下	4,046	68.6	314.30	4,428.90
3	上	3,038	85.8	322.58	3,446.38
	中	2,721	85.8	322.58	3,129.38
	下	2,723	94.3	354.84	3,712.14
4	上	4,137	83.0	333.33	4,553.33
	中	3,990	83.0	333.33	4,406.33
	下	2,457	83.0	333.34	2,873.34
5	上	2,457	78.4	322.58	2,857.98
	中	2,457	78.4	322.58	2,857.98
	下	1,228	86.2	354.75	1,668.95
6	上	2,036	64.3	333.33	2,433.63
	中	2,747	64.3	333.33	3,144.63
	下	3,538	64.3	333.34	3,935.64
7	上	2,923	64.8	290.32	3,278.12
	中	3,434	64.8	290.32	3,789.12
	下	4,220	71.2	319.36	4,610.56
8	上	2,574	65.3	258.06	2,897.36
	中	2,574	65.3	258.06	2,897.36
	下	2,831	71.8	283.88	3,186.68
9	上	3,521	65.2	266.66	3,852.86
	中	2,883	65.2	266.66	3,214.86
	下	2,243	65.3	266.68	2,574.98
10	上	3,311	65.3	354.83	3,731.13
	中	2,825	65.3	354.83	3,245.13
	下	1,813	71.8	390.34	2,275.14
11	上	1,344	64.0	366.66	1,774.66
	中	672	64.0	366.66	1,102.66
	下	1,271	64.0	366.68	1,701.68
12	上	2,542	80.6	354.83	2,977.43
	中	1,271	80.6	354.83	1,706.43
	下	—	88.6	390.34	478.94
合計		90,000	2,700	12,000	104,700

資料來源：水利署南區水資源局提供。

為使系統動力模式模擬曾文－烏山頭系統豐水期與枯早期之供水情境，本研究依據前述基準分配水量，建構水權分配比例作為水資源調度之權重參數。其水權分配比例計算以單一用水標的之需水量除以曾文－烏山頭系統總需水量。以 1 月中旬為例，灌溉用水量為 171 萬立方公尺、工業用水量為 85.8 萬立方公尺、公共給水量為 354.83 萬立方公尺，合計為 611.63 萬立方公尺。其灌溉用水比例為 0.28、工業比例為 0.14 以及公共給水比例為 0.58。各標的給水比例各旬如表 3-6 所示。

透過導入水權比例，並搭配經濟部水利署所提供之水庫出水量，即可於系統動力模式模擬中，能依水權比例分配水量，藉此反映實務上之水資源調度與配水邏輯。

表 3-6 曾文水庫與烏山頭水庫水權量分配比例取水一覽表

月	旬	灌溉用水比例	工業用水比例	公共給水比例	總比例
1	上	—	0.19	0.80	1
	中	0.28	0.14	0.58	1
	下	0.84	0.03	0.13	1
2	上	0.88	0.02	0.10	1
	中	0.89	0.02	0.09	1
	下	0.91	0.02	0.07	1
3	上	0.88	0.02	0.10	1
	中	0.87	0.03	0.10	1
	下	0.86	0.03	0.11	1
4	上	0.91	0.02	0.07	1
	中	0.91	0.02	0.07	1
	下	0.86	0.03	0.11	1
5	上	0.86	0.03	0.11	1
	中	0.86	0.03	0.11	1
	下	0.74	0.05	0.21	1
6	上	0.84	0.03	0.13	1
	中	0.87	0.02	0.11	1
	下	0.90	0.02	0.08	1
7	上	0.89	0.02	0.09	1
	中	0.90	0.02	0.08	1
	下	0.92	0.01	0.07	1
8	上	0.89	0.02	0.09	1
	中	0.89	0.02	0.09	1
	下	0.89	0.02	0.09	1
9	上	0.91	0.02	0.07	1
	中	0.90	0.02	0.08	1
	下	0.87	0.03	0.10	1
10	上	0.89	0.01	0.10	1
	中	0.87	0.02	0.11	1
	下	0.80	0.03	0.17	1
11	上	0.76	0.04	0.20	1
	中	0.61	0.06	0.33	1
	下	0.75	0.04	0.21	1
12	上	0.85	0.03	0.12	1
	中	0.74	0.05	0.21	1
	下	—	0.18	0.82	1

本研究曾文—烏山頭系統操作規則遵守其經濟部水利署「曾文水庫運用要點」以及「烏山頭水庫運用要點」。正常滿水位為曾文水庫對應之蓄水量、上限為曾文水庫有效蓄水量、下限以及嚴重下限為曾文水庫與烏山頭蓄水量之和。曾文—烏山頭水庫串聯運用規線如圖 3-4 所示、各旬如表 3-7 所示。

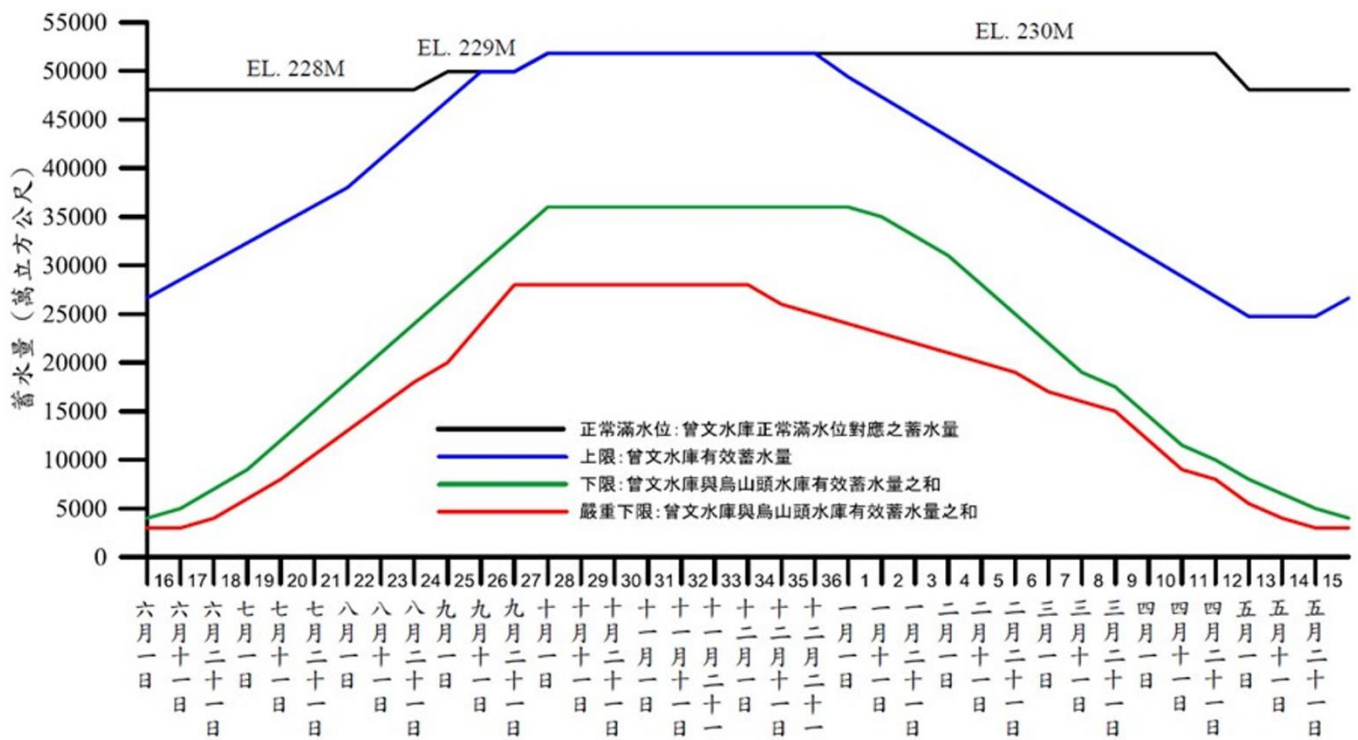


圖 3-4 曾文水庫與烏山頭水庫串聯運用規線

表 3-7 曾文水庫與烏山頭水庫串聯運用規線



單位：萬立方公尺

月	旬	上限	下限	嚴重下限
6	上	26,644	4,000	3,000
	中	28,538	5,000	3,000
	下	30,431	7,000	4,000
7	上	32,324	9,000	6,000
	中	34,217	12,000	8,000
	下	36,111	15,000	10,500
8	上	38,004	18,000	13,000
	中	40,984	21,000	15,500
	下	43,964	24,000	18,000
9	上	46,943	27,000	20,000
	中	48,965	30,000	24,000
	下	48,965	33,000	28,000
10	上	50,849	36,000	28,000
	中	50,849	36,000	28,000
	下	50,849	36,000	28,000
11	上	50,849	36,000	28,000
	中	50,849	36,000	28,000
	下	50,849	36,000	28,000
12	上	50,849	36,000	28,000
	中	50,849	36,000	26,000
	下	50,849	36,000	25,000
1	上	49,382	36,000	24,000
	中	47,330	35,000	23,000
	下	45,277	33,000	22,000
2	上	43,224	31,000	21,000
	中	41,172	28,000	20,000
	下	39,119	25,000	19,000
3	上	37,067	22,000	17,000
	中	35,014	19,000	16,000
	下	32,962	17,500	15,000
4	上	30,909	14,500	12,000
	中	28,856	11,500	9,000
	下	26,804	10,000	8,000
5	上	24,751	8,000	5,500
	中	24,751	6,500	4,000
	下	24,751	5,000	3,000

說明 1：各旬水量為旬初水量。

說明 2：上限為曾文水庫有效蓄水量，下限與嚴重下限為曾文水庫與烏山頭水庫有效蓄水量之和。

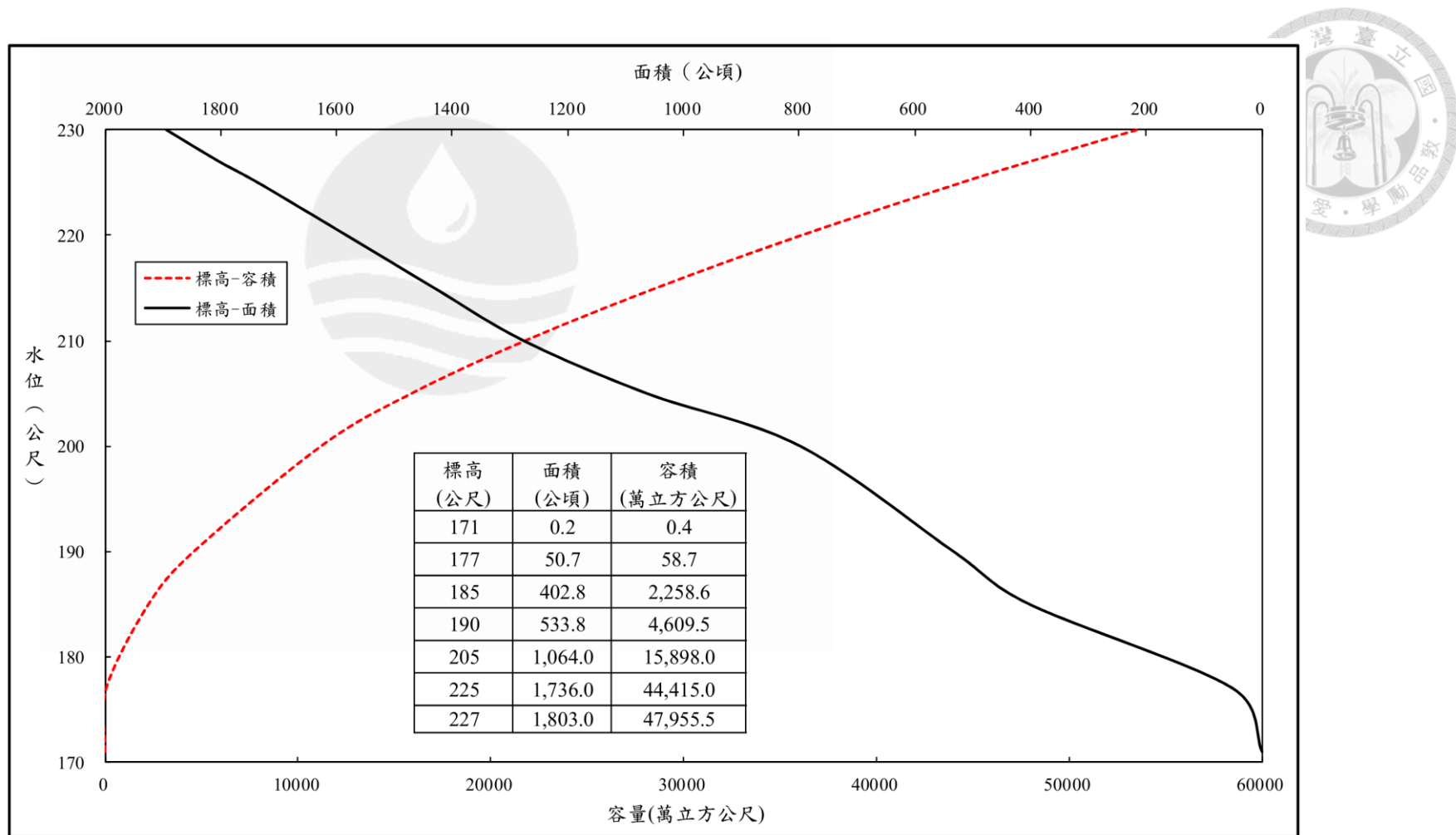
本研究之供水量供應折減根據經濟部水利署「曾文水庫運用要點」，如表 3-8 所示。系統動力模式會依據當下之曾文水庫與烏山頭蓄水量落於上限、下限或嚴重下限，並啟動對應之限水策略。該運用要點之供水量供應折重點於民生優先與分段限水：當水情初步限水或嚴重枯旱階段時，系統動力模式將優先確保家用及公共給水，農業與工業用水則承擔較大比例之供水量供應折減。此供應折減機制，轉化為本研究系統動力模式之條件判斷，作為各情境運算時之結論比較。

表 3-8 曾文水庫與烏山頭水庫串聯水情情境與供水量供應折減

水情情境	蓄水量區間	家用及公共給水	灌溉與工業用水	備註
豐水狀態	蓄水量 > 上限	超量供應	超量供應	得視各標的需要超量供應
正常供水	上限 $\geq$ 蓄水量 $\geq$ 下限	100%	100%	按各標的基準供水量供應
初步限水	下限 > 蓄水量 $\geq$ 嚴重下限	100%	75%	優先確保家用及公共給水
嚴重枯旱	蓄水量 < 嚴重下限	80%	50%	啟動防旱機制

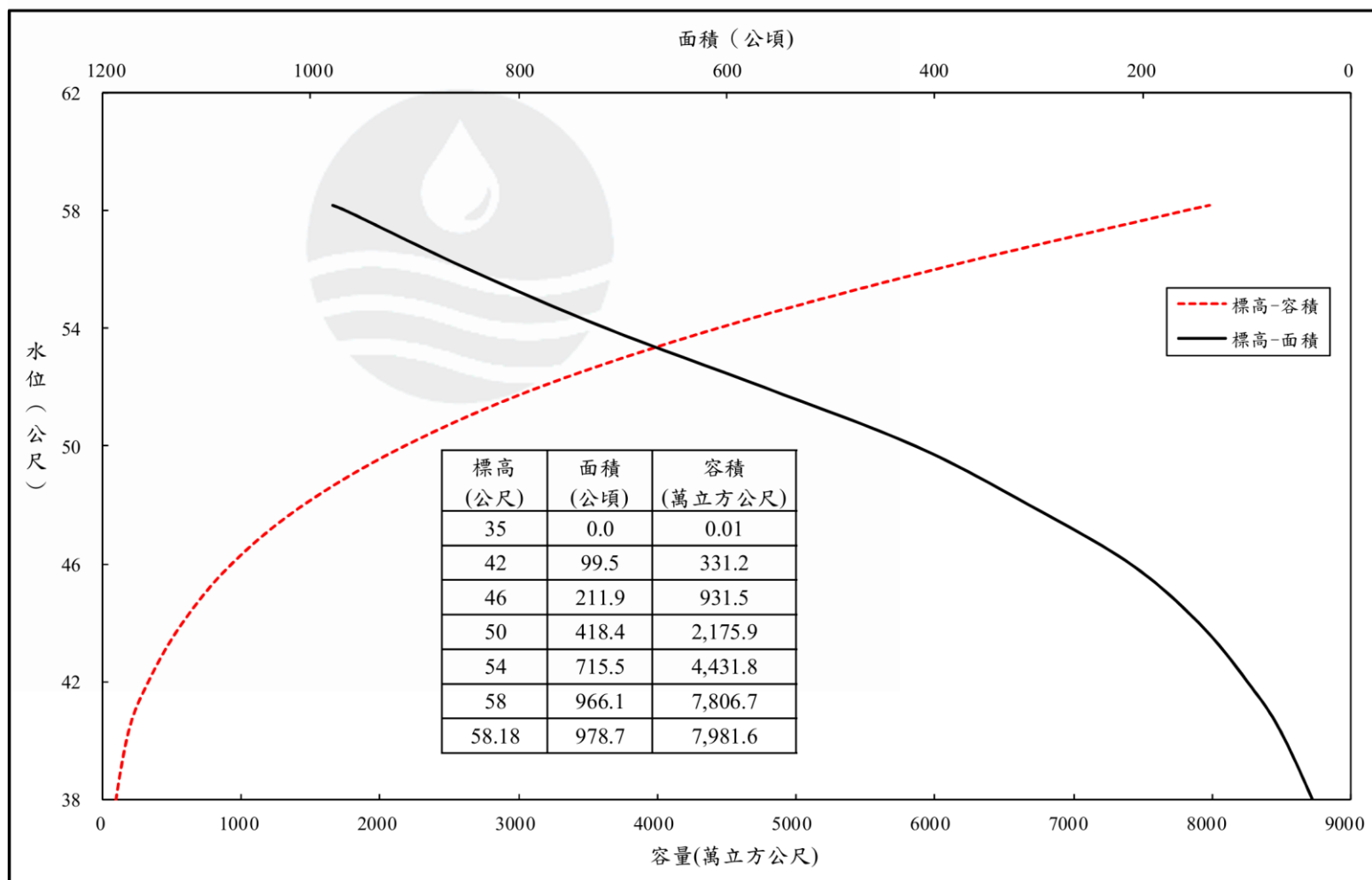
本研究系統動力模式為反映水庫防洪規範，依據水庫運用要點，針對曾文水庫與烏山頭水庫設定溢流機制。在曾文水庫設定上，依據經濟部水利署「曾文水庫運用要點」，當水庫水位標高超過 226 公尺時，啟動防洪運轉進行放水；在烏山頭水庫方面，依據「烏山頭水庫運用要點」，當其水位標高 58.18 公尺時自由溢流洩洪。

在系統動力模式上，由於模式之核心存量 (Stock) 為蓄水容積而非水位標高，因此本研究建立兩者的轉換關係，使用民國 100 年測量之「曾文水庫標高—面積—容積曲線」與「烏山頭水庫標高—面積—容積曲線」如圖 3-5 和圖 3-6 所示，若系統動力模式運算得出之水位高於上述 226 公尺或 58.18 公尺之法規閾值，曾文與烏山頭水庫將會啟動溢流機制。此機制確保水庫蓄水量符合其運作機制與規線之安全限制。



資料來源：「曾文南化水庫聯通管輸水工程可行性分析」，經濟部水利署水利規劃試驗所，民國 102 年 12 月

圖 3-5 曾文水庫民國 101 年標高—面積—容積曲線



資料來源：「烏山頭水庫第四次安全評估-淤積測量成果報告」，嘉南水利會，民國100年5月。

圖 3-6 烏山頭水庫民國 101 年標高—面積—容積曲線

本研究針對曾文－烏山頭水庫之系統動力學模型建置，囊括進出水量、各標的需水量與水權分配比例。實務上整合曾文－烏山頭水庫串聯運用規線、蓄水量供應折減機制與防洪溢流操作規範。最後，透過 Vensim 系統動力學軟體將前述基本資料、物理限制與管理決策轉化為數學方程式，建置系統動力學模式圖，詳如圖 3-7 所示。

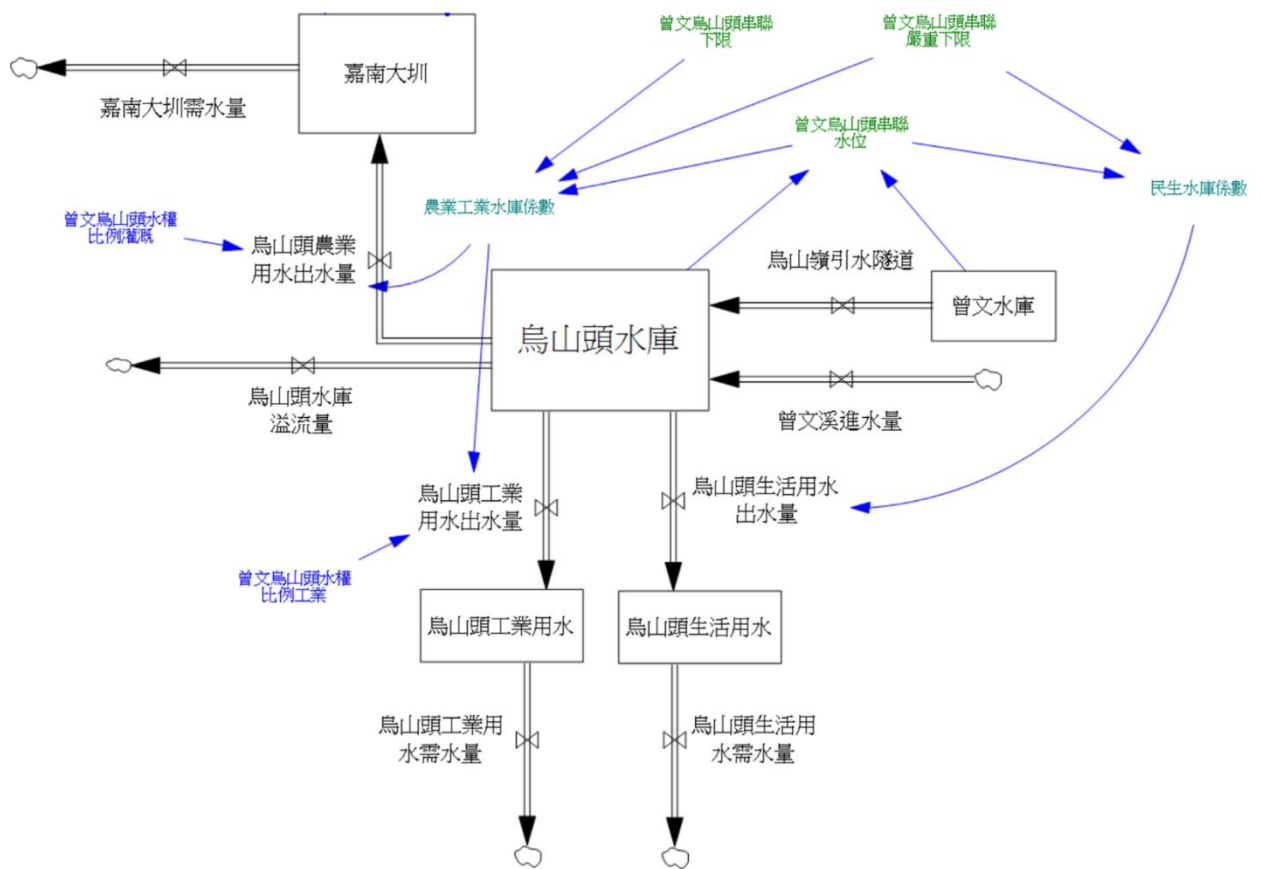


圖 3-7 曾文－烏山頭系統動力學模式架構圖



3.6 北港溪渡槽

本研究在於探討北港溪渡槽作為水資源調度串接的重要性。透過重建北港溪渡槽，使得濁幹線與北幹線得以連通，並恢復集集攔河堰系統與曾文—烏山頭系統水資源調度之功能。將依據 110 年經濟部水利署「濁幹線與嘉南大圳農業用水聯合調度可行評估」，針對北港溪渡槽串接濁幹線與北幹線後所啟動的雙向水資源調度機制，北水南引與南水北調，進行情境分析與評估水資源效益。

在北港溪渡槽串接濁幹線與北幹線上，本研究將調度機制分為兩種模式，其啟動機制、啟動時機以及幹線最大輸水量等，整理如表 3-9 並說明。

表 3-9 濁幹線與北幹線串接調度與啟動機制

調度機制	啟動機制	啟動時機	輸水上限	供應灌區
北水南引	集集攔河堰系統有剩餘水量 烏山頭水庫未滿庫 供應灌區缺水	常態支援	27.5 萬噸/日	嘉南地區
南水北調	烏山頭水庫溢流 供應灌區缺水	特殊情形	約 14.34 萬噸/日	雲林地區

3.7 分岔理論

本研究將分岔理論應用於供需平衡狀態之探討。首先，定義灌區之供需比例為狀態變數 $y(t)$ ，並將 $y = 1$ 設為理想供需平衡點。灌區系統如下方程式表示：

$$\frac{dy(t)}{dt} = W(t) + U(y, \alpha) \quad (3-5)$$

其中 $W(t)$ 為未調度前，單純供水與用水需求所產生供需比例， α 為本研究之分岔理論參數，即調度支援量； $U(y, \alpha)$ 為調度函數。其整體方程式為缺水即調度、平衡即停止調度之設計，其調度函數方程式如下表示：

$$U(y, \alpha) = \begin{cases} \alpha & \text{if } y < 1 \\ 0, & \text{if } y \geq 1 \end{cases} \quad (3-6)$$

$W(t)$ 在未調度前，其受限於豐水期與枯早期影響，供需變化會呈現週期性之震盪，代表供需處於不平衡狀態。然而，當加上 $U(y, \alpha)$ 調度函數，原本的週期性之震盪逐漸收斂 $y = 1$ 上。此由週期性之震盪走向收斂的分岔現象，不僅使系統達到平衡，更確立了跨流域調度能進行有效的水資源分配並解決單一系統的不穩定性。

第四章 研究成果



本研究主要分為三大情境做模式分析，為情境一，現況情境；情境二，濁幹線與北幹線串接；情境三，濁幹線與北幹線串接且增設帶狀調蓄池。集集攔河堰系統與曾文－烏山頭系統兩者系統動力學模擬時間採用 2010 至 2019 年共 10 年。探討建設北港溪渡槽以串接濁幹線與北幹線，其農田水利署雲林管理處所負責之雲林地區與嘉南管理處所管轄嘉南地區，兩地區串接前後的供需情形。

4.1 情境一：現況情境

首先，針對情境一，現況情境進行系統動力學模式之建置與驗證。為確保後續濁幹線串接北幹線以及增設帶狀調蓄池之情境比較的正确性與準確度，本研究以旬為時間單位進行系統動力學模擬運算，並透過比對系統動力學模式演算結果與真實資料，檢視本研究所建置之系統動力模式是否真實反映集集攔河堰系統與曾文－烏山頭系統之動態供需行為。

4.1.1 集集攔河堰系統

在集集攔河堰系統方面，模式驗證的重點在於農業用水的供水情形。將 2010 至 2019 年各旬的模擬農業用水並統整為年資料，並且與經濟部水利署所提供水庫營運概況之集集攔河堰農業用水紀錄進行比較，如圖 4-1 所示。

結果顯示，系統動力學模式之模擬農業用水量與水庫營運概況之資料，在豐水年與枯旱年間變化與起伏趨勢上有高度的相似性。這顯示本研究所建置的集集攔河堰系統之操作規則、給水上限、水權比例等，能有效且真實地反映現狀。

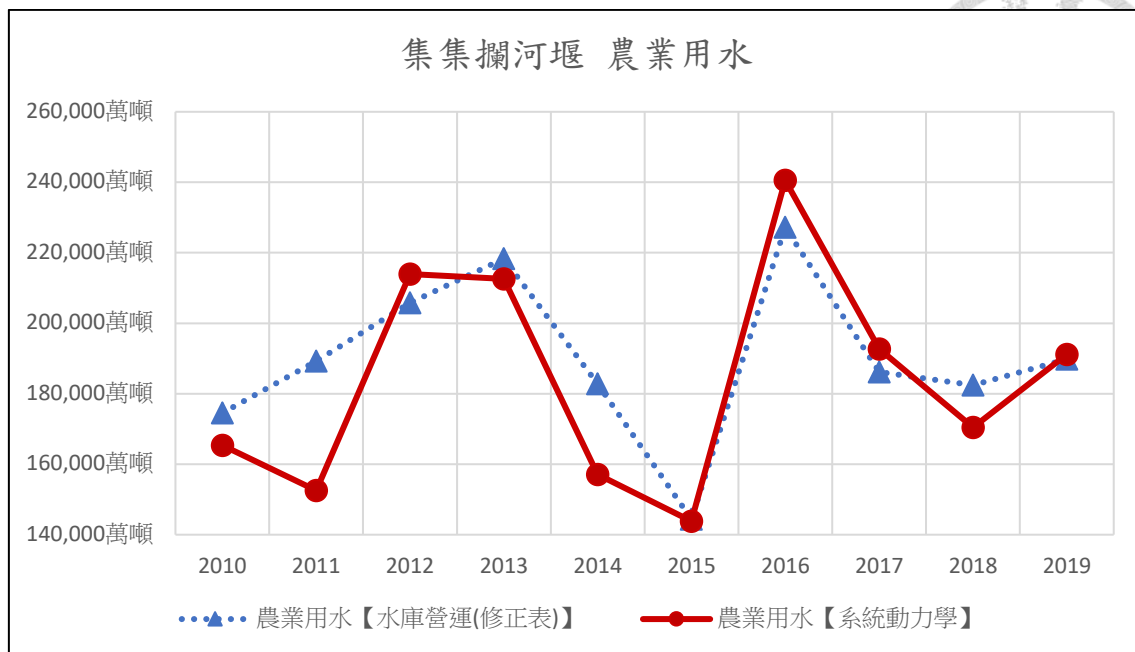


圖 4-1 集集攔河堰農業用水比較

4.1.2 曾文—烏山頭系統

本研究於系統動力學模式中，設定了曾文水庫與烏山頭水庫之間的聯合操作規則。採用 2010 至 2019 年之進水量、出水量等相關資料，進行模擬。為驗證該系統之正確性，本節分別針對曾文水庫與烏山頭水庫之有效蓄水量與曾文—烏山頭系統之農業用水量模擬結果與經濟部水利署水庫營運概況之資料進行比對。如圖 4-2、圖 4-3 以及圖 4-4。

為進一步量化模式之模擬精準度，本研究導入判定係數 (R^2)、納許效率係數 (Nash Sutcliffe efficiency, NSE)、平均絕對百分比誤差 (Mean Absolute Percentage Error, MAPE) 與均方根誤差 (Root Mean Square Error, RMSE) 進行檢定，結果如表 4-1 所示。曾文水庫有效蓄水量模擬結果與現實情況高度吻合，整體結果走勢也高度相同；其指標表現優異， R^2 達 0.94，NSE 達 0.88，MAPE 為 0.20，且 RMSE 為 4567.01，證明系統模式結果良好；在烏山頭水庫有效蓄水量方面，系

統動力模式模擬結果與經濟部水利署歷史資料在波峰與波谷的發生時間與震幅上具有高度重疊。受限於烏山頭水庫在系統中頻繁蓄水與放水之特性，導致其指標 R^2 與 NSE 分別為 0.50 與 0.12；MAPE 為 0.19、RMSE 僅 1097.65 可知誤差皆被有效控制於合理範圍。最後，在曾文－烏山頭系統農業用水方面，其模擬結果變化趨勢與實際歷史資料相同。根據模擬結果，曾文－烏山頭系統能夠穩定且反映真實趨勢。

表 4-1 曾文水庫與烏山頭水庫有效蓄水量檢定指標

	曾文水庫 有效蓄水量	烏山頭水庫 有效蓄水量
R^2	0.94	0.50
NSE	0.88	0.12
MAPE	0.20	0.19
RMSE	4567.01	1097.65

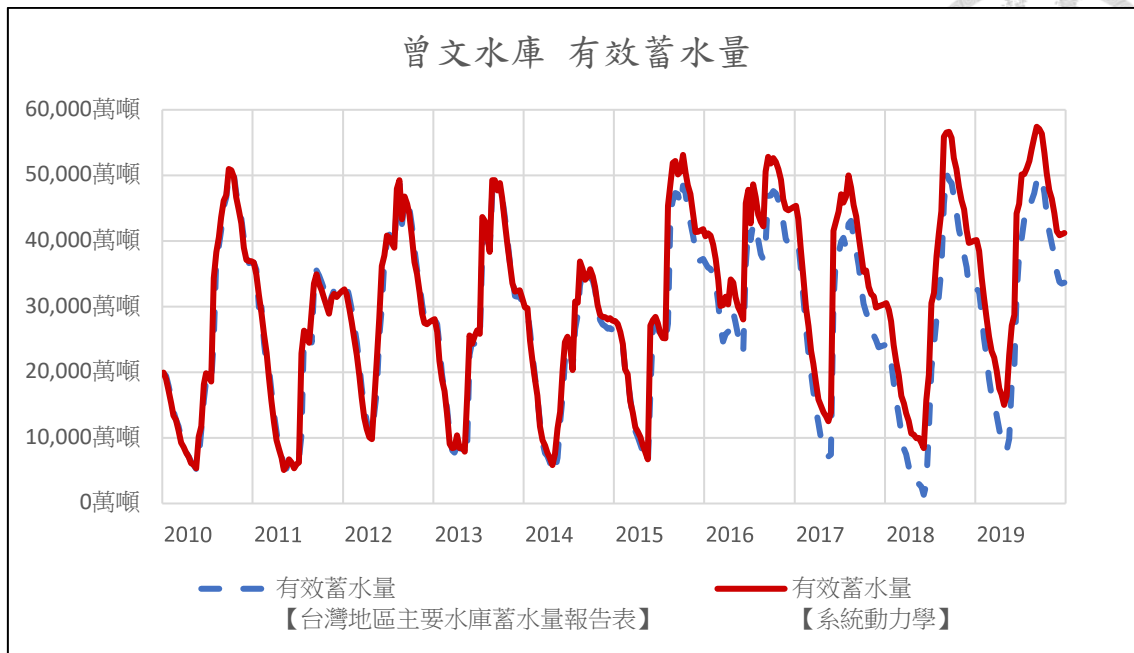


圖 4-2 曾文水庫有效蓄水量比較

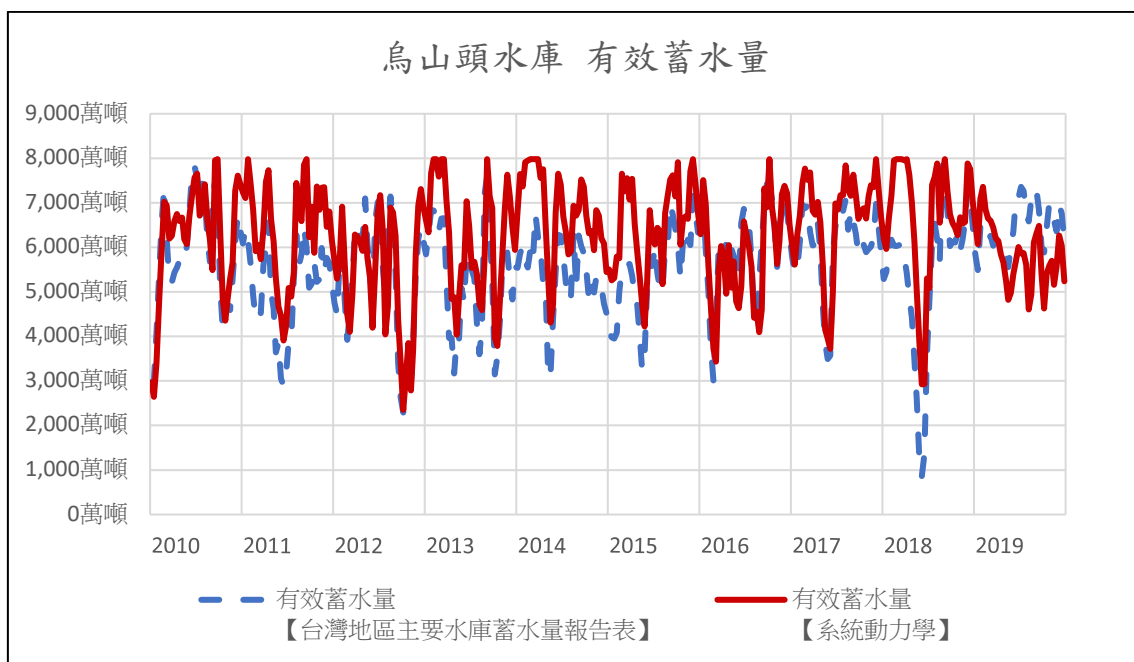


圖 4-3 烏山頭水庫有效蓄水量比較

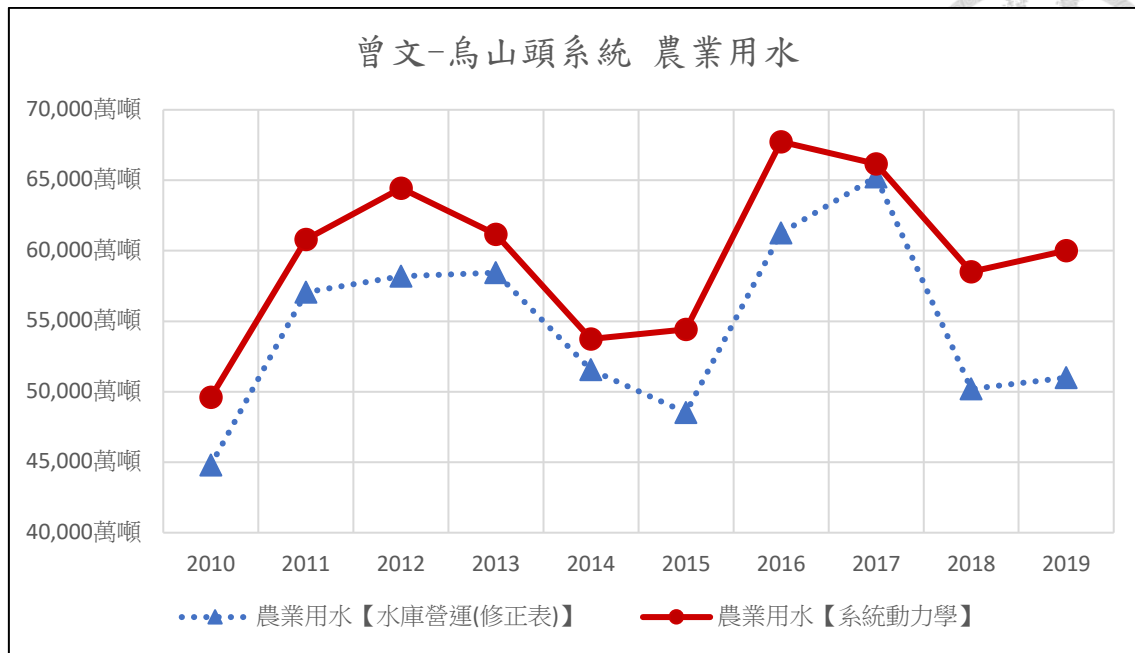


圖 4-4 曾文－烏山頭系統之農業用水比較

圖 4-5 呈現曾文－烏山頭系統於情境一，現況情境下，2010 年至 2019 年間共 360 旬，農業用水之缺水情況。透過系統動力學模式之演算，曾文－烏山頭系統在十年的模擬期間內呈現劇烈的豐枯波動。多數時期雖能滿足農業用水需求，但在枯早期或遭遇極端旱象時，缺水量會急遽攀升，形成顯著的缺水峰值。此結果凸顯出現況情境的韌性不足，

十年年平均缺水量約在 1,000 萬噸。然而，實際發生缺水時，單旬的缺水高峰達平均值的數倍之多。在實務上，這代表長期的平均水情無法反應短期極端缺水之衝擊，會迫使啟動停灌等緊急應變機制，進而造成農業損失。

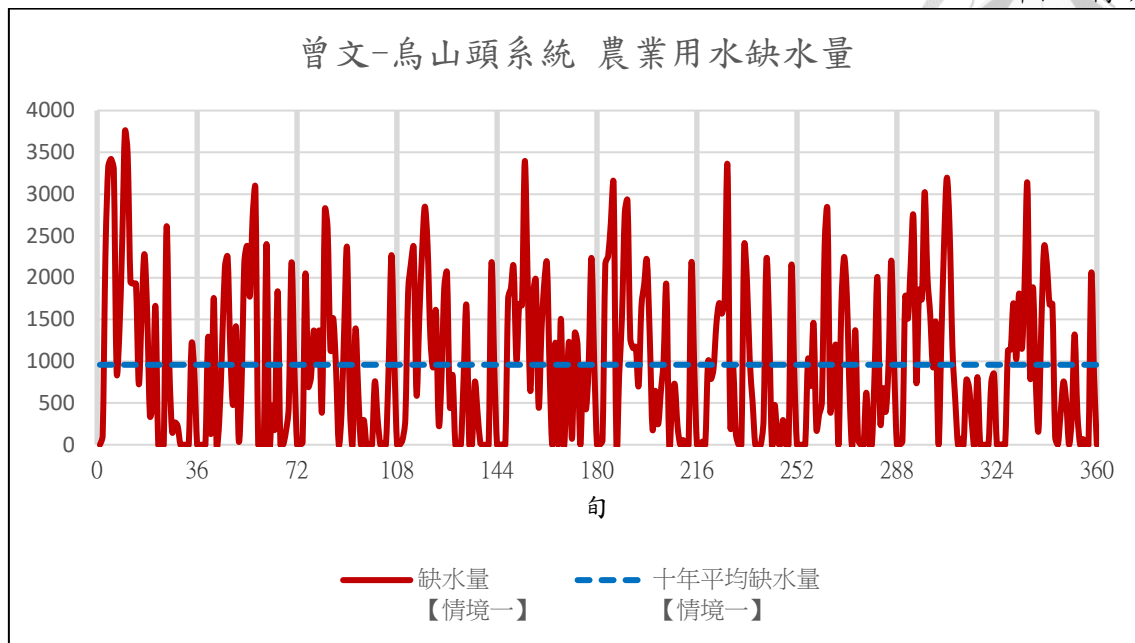


圖 4-5 曾文－烏山頭系統之農業用水缺水量

4.2 情境二：濁幹線與北幹線串接

承接現況情境之分析，本節將在系統動力模式中，模擬重建北港溪渡槽讓濁幹線與北幹線得以串接，使集集攔河堰系統與曾文－烏山頭系統原本各自獨立運作，進而建立跨流域之水資源調度機制。

根據「濁幹線與嘉南大圳農業用水聯合調度可行評估」，於系統動力學模式中建置了串接後的水資源系統，如圖 4-6 所示。濁水溪水源可經由濁幹線匯入北港溪渡槽，再向南連結至北並注入嘉南地區；反之，烏山頭水庫之水源亦可由北幹線向雲林地區。

「北水南引」為濁幹線匯入北港溪渡槽，並支援嘉南地區。當集集攔河堰系統有剩餘水量、烏山頭水庫未達滿庫，且嘉南地區缺水時，系統即啟動北水南引，每日輸水上限設定為 27.5 萬噸。此機制首要確認集集攔河堰系統是否具備餘裕水量，系統動力模式結果如圖 4-7，可明確發現豐水期（第 16 旬至第 28 旬間），系統動力學所模擬之十年年平均進水量穩定超越了各標的用水登記水權量，證明了集集攔河堰系統具備充沛的剩餘水量以利水資源跨流域調度。本研究進一步檢視集集攔河堰系統之灌溉用水比較，如圖 4-8，以釐清北水南引是否會影響集集攔河堰系統之農業用水。結果顯示，系統動力學模擬灌溉用水量，於多數旬別皆能在灌溉用水登記權量內，對於北水南引而言，有豐沛的餘裕。

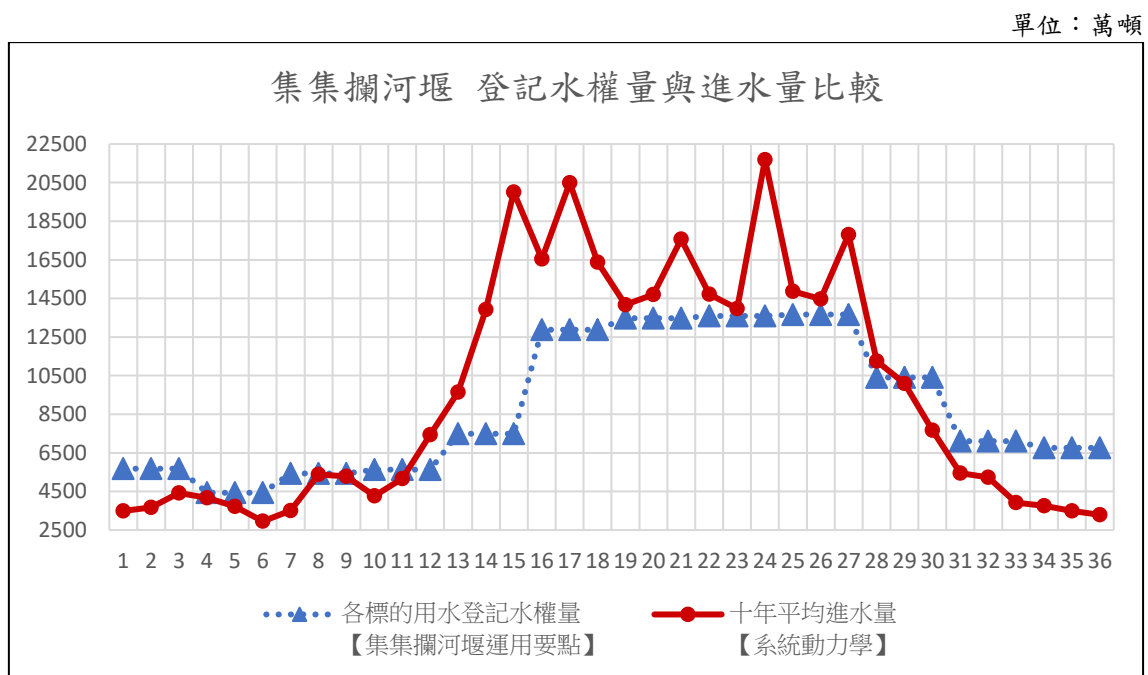


圖 4-7 集集攔河堰之登記水權量與進水量比較

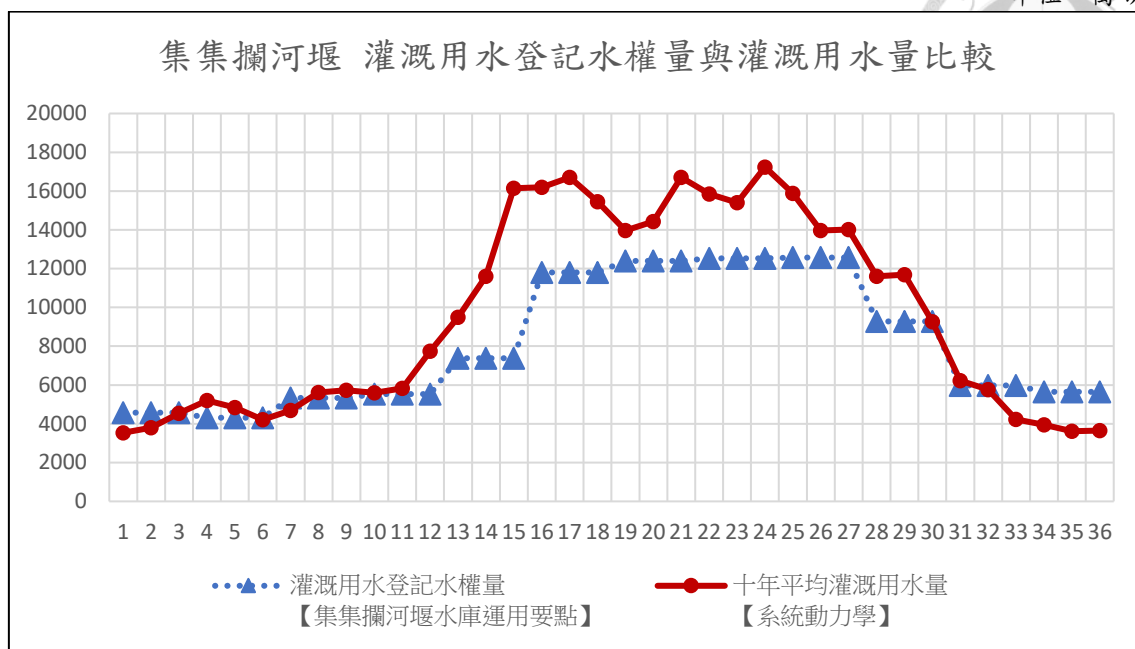


圖 4-8 集集攔河堰之灌溉用水登記水權量與灌溉用水量比較

在確認集集攔河堰具備支援之水源餘裕後，本研究進一步透過系統動力學模式，模擬 2010 年至 2019 年間啟動北港溪渡槽北水南引機制之實際運作情形，並量化其對嘉南地區農業缺水之改善效益。

如圖 4-9，系統動力模式依據啟動機制進行模擬，濁幹線向南調度之水量呈現有顯著的效果，平均值約在 1156 萬噸。在豐水年（如 2016 年），因水量充沛，所以北水南引水量大幅攀升；在 2011（100 年乾旱）以及 2014 乾旱等調度量也相應減少，可證明本研究所建構之雙向調度機制並採用靜態的定額供水模式，而是與自然水文情形相關。

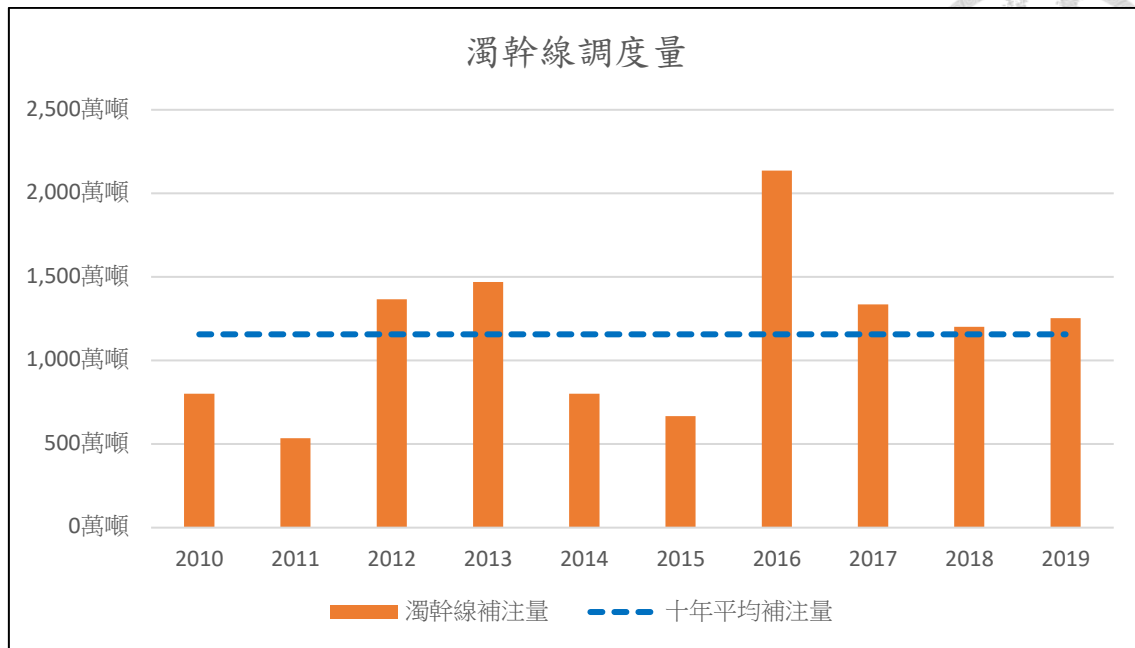


圖 4-9 濁幹線調度量

如圖 4-10，於十年的模擬期間內，串接濁幹線之嘉南地區缺水量（情境二）於每一個年份都低於未串接濁幹線之缺水量（情境一），這明確指出，無論是在豐水年或是枯旱年，北水南引機制皆能有效發揮跨流域調度之作用，實質降低嘉南地區的農業缺水量，這部分所減少的缺水量，在實務上等同於減少了農田因缺水而被迫停灌的時間，進而降低了農業損失。

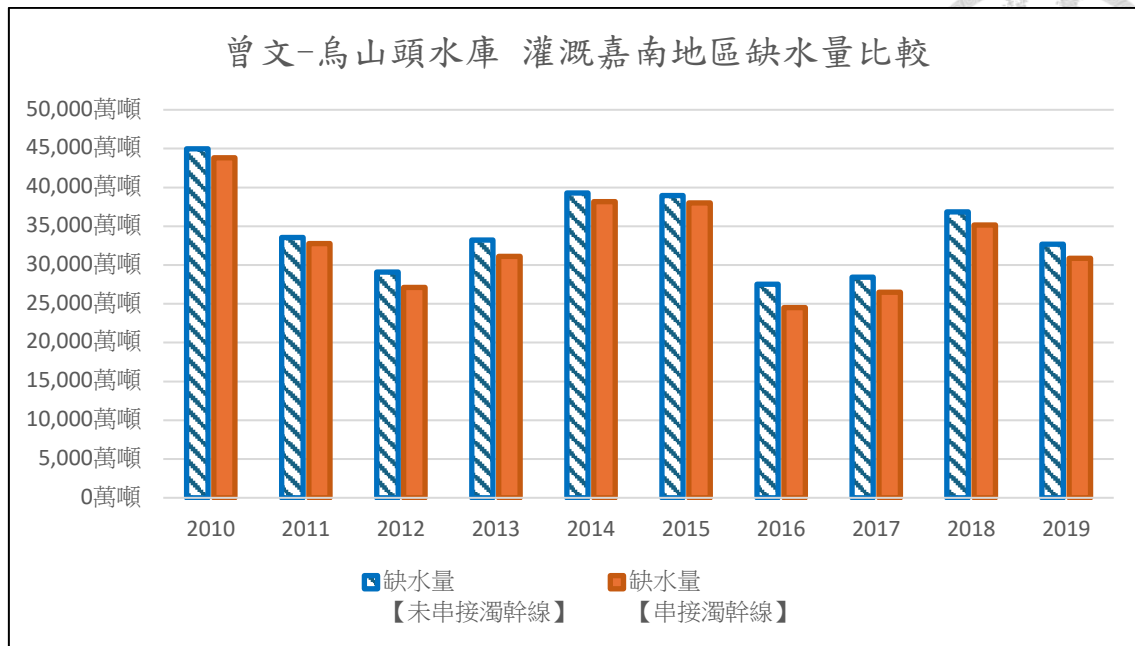


圖 4-10 曾文-烏山頭水庫之灌溉嘉南地區缺水量比較

相對於常態性的北水南引，本研究依據調度機制，南水北調定位為特殊情形下之應變機制。其啟動條件須同時滿足烏山頭水庫產生溢流且供應灌區發生缺水情形，並受限於每日約 14.34 萬噸之輸水上限。

欲啟動南水北調，首要條件需有溢流量。如圖 4-11，系統動力學模式模擬之十年年平均顯示，系統確實存在溢流潛力，為南水北調機制提供了補助水量。

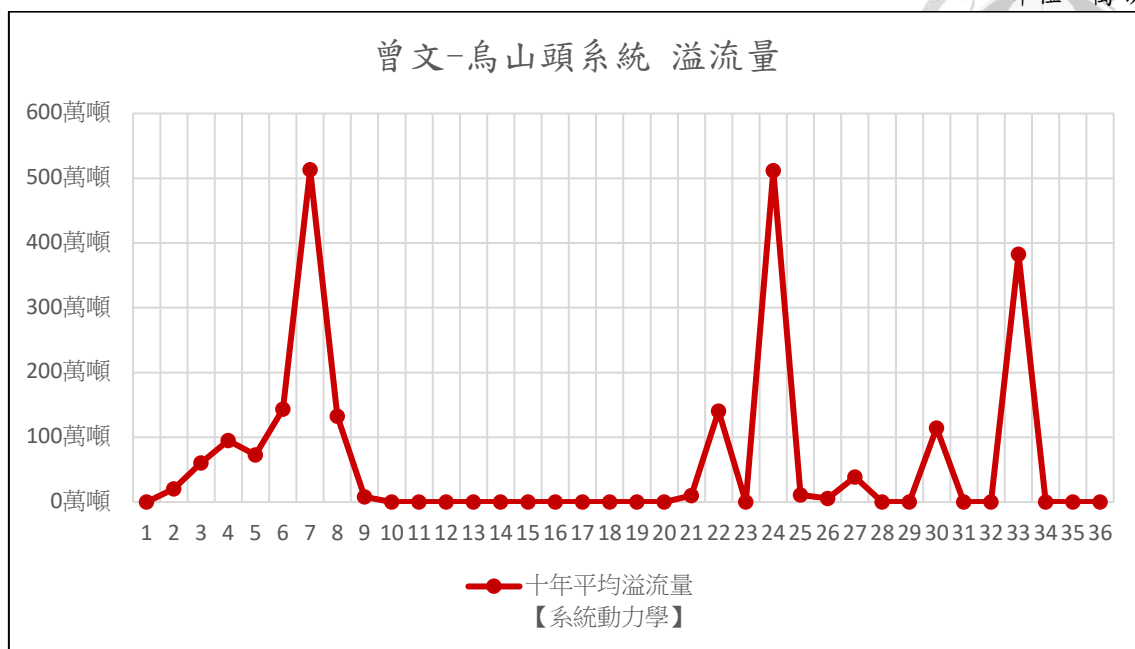


圖 4-11 烏山頭水庫之溢流量

結果如圖 4-12，受限於須同時滿足水庫溢流與缺水之啟動門檻，南水北調並非常態發生。在十年的模擬期間內，僅於特定年份成功觸發調度機制，這顯示該機制在運作上屬機會型之調度，必須依賴特定水文事件。

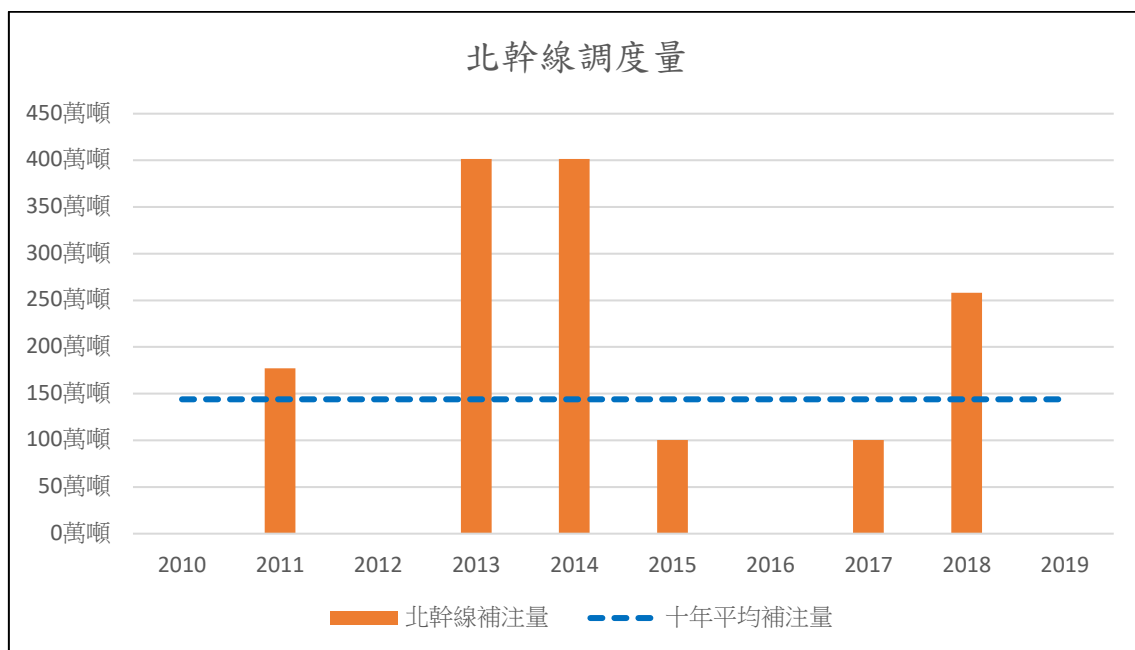


圖 4-12 北幹線調度量

在確認溢流水源後，本研究模擬北幹線向北支援之情形。從圖 4-13 中可發現，在成功啟動南水北調的年份，情境二串接北幹線之缺水量確實略低於未串接，其代表南水北調水源對於雲林地區缺水量著實有限。因此，從水資源效益考量，南水北調在實務上只能做為特殊時期的方案；以常態效益來說，並不適合做為的雲林地區的缺水量解方。

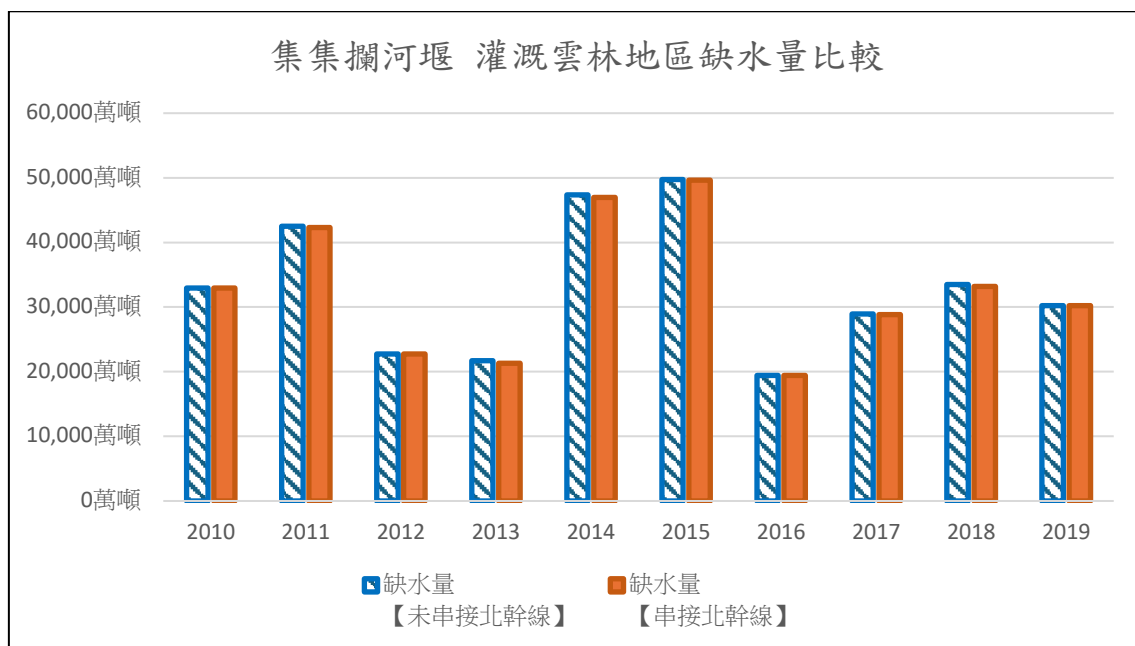


圖 4-13 集集攔河堰 灌溉雲林地區缺水量比較

綜合上述各項結果與模式分析，觀察十年之模擬數據可發現，此雙向調度機制在實務上呈現出的非對稱性，如表 4-2。在北水南引部分，濁幹線往南支援嘉南地區之調度具備常態性與穩定性，於十年模擬期間內年年皆能啟動調度功能，其年平均調度量約 1150 萬噸，可作為南部抗旱之潛力來源。相對而言，南水北調機制則受限於烏山頭水庫溢流條件限制，十年期間僅一半有成功啟動，年平均調度水量約為 200 萬噸。

情境二之北港溪渡槽串接濁幹線與北幹線能有效將兩獨立系統進行水資源調度，其中以北水南引為主要效益呈現，而南水北調則提供了系統在遭遇特定水文事件時的應變彈性，證明了此濁幹線與北幹線串接能有效提升區域水資源之整體調度韌性與防旱效益。

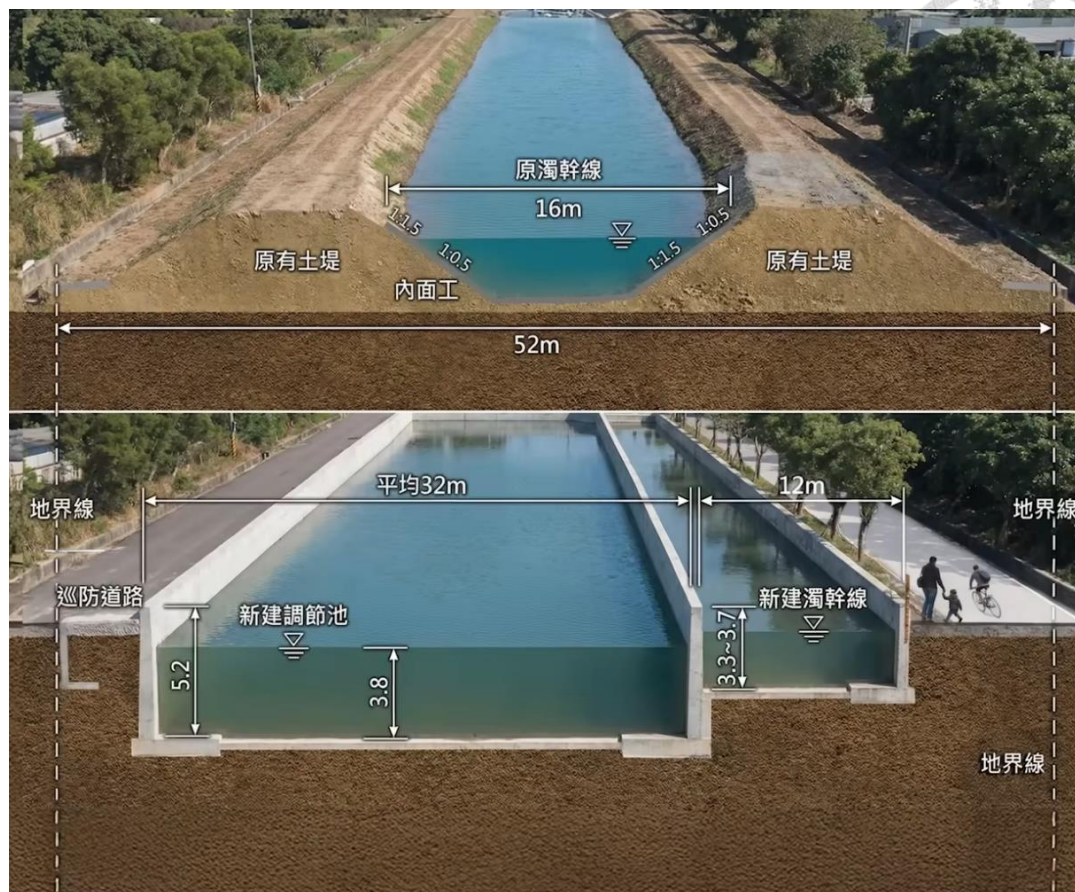
表 4-2 濁幹線與北幹線調度量

單位：萬噸

	濁幹線 北水南引水量	北幹線 南水北調水量
2010	801.15	0
2011	534.1	253.31
2012	1365.5824	0
2013	1468.775	573.60
2014	801.15	573.60
2015	667.625	143.40
2016	2136.4	0
2017	1335.25	143.40
2018	1201.725	368.92
2019	1253.2219	0
平均	1156.49793	205.62

4.3 情境三：濁幹線與北幹線串接且增設帶狀調蓄池

接續情境二之北港溪渡槽串接濁幹線與北幹線，由於集集攔河堰屬攔水構造物，其主要功能並非儲存大量水源，豐水期之水量只能任其溢流，無法有效保留，造成水資源的浪費，所以本情境中進一步中增設帶狀調蓄池之實體蓄水設施，如圖 4-14，以探討增加緩衝空間對水資源跨流域調度效益之影響。



資料來源：農業部，2026

圖 4-14 帶狀調蓄池

依據濁幹線多功能調蓄池工程之規劃設計，於原有的濁幹線上增設有效容量約 43.68 萬噸之帶狀調蓄池。此調蓄池之機制在於提供系統跨時間的調度彈性，藉由集集攔河堰系統有多餘水量時，引入調蓄池內蓄存，並於嘉南地區缺水時釋放，進而將多餘的水量轉化為可供調度之有效水資源。

為具體量化增設調蓄池後之效益，本研究將系統動力學模式模擬之「濁幹線北水南引水量（情境二）」與「濁幹線北水南引水量加調蓄池（情境三）」數據比對分析，如表 4-3 所示。由結果可知，調蓄池的加入對北水南引水量產生了顯著的提升。在增設 43.68 萬噸之調蓄池後，十年年平均北水南引水量提升至約 1,900 萬噸，整體常態提升近七成。

表 4-3 北水南引水量調度量與加調蓄池調度量比較

單位：萬噸

	濁幹線 北水南引水量	濁幹線 北水南引水量加調蓄池【43.68 萬噸】
2010	801.15	1165.91
2011	534.1	923.12
2012	1365.5824	2766.7
2013	1468.775	2585.41
2014	801.15	1395.59
2015	667.625	1172.15
2016	2136.4	3460.81
2017	1335.25	1946.41
2018	1201.725	1819.87
2019	1253.2219	2405.24
平均	1156.49793	1964.121

4.4 分岔理論分析

本研究將分岔理論概念加入分析。在非線性系統動力模式中，當系統參數發生微小變化時，可能會導致系統結構或行為改變，此現象即為分岔。若將水資源之供需比例視為系統之狀態變數 $y(t)$ ，而濁幹線與北幹線串接調度量則是導致系統結構改變之控制參數 $U(y, \alpha)$ ，理想供需平衡點 $y = 1$ 。

在嘉南地區原供需比例與濁幹線與北幹線串接後比較圖 4-15 中，在未串接之嘉南地區供需比例（深藍色實線），頻繁且大幅向下跌破平衡點；當加入濁幹線與北幹線串接控制參數後，其供需比例（橘色實線）的軌跡向上趨向平衡點，此週期性遠離平衡點的供需比例，藉由濁幹線與北幹線串接逐漸趨向平衡點，證明了跨流域水資源調度能改變供需比例的分佈，降低了嘉南地區面臨枯旱時的缺水風險。

同理，在雲林地區原供需比例與濁幹線與北幹線串接後比較圖 4-16 中，在啟動濁幹線與北幹線串接後，雲林地區供需比例並未因北水南引的參數而發生遠離

平衡點的結果，而是使整體波峰更趨向 $y = 1$ 的平衡點。此外，根據南水北調的調度量，在供需比例（橘色實線）也有從波谷向上抬升的情形。

綜合這兩張圖的結果，濁幹線與北幹線串接的效益，不僅使豐水期的水更有效的使用，並且縮小了枯旱期的波動，讓其更趨向理想供需平衡。



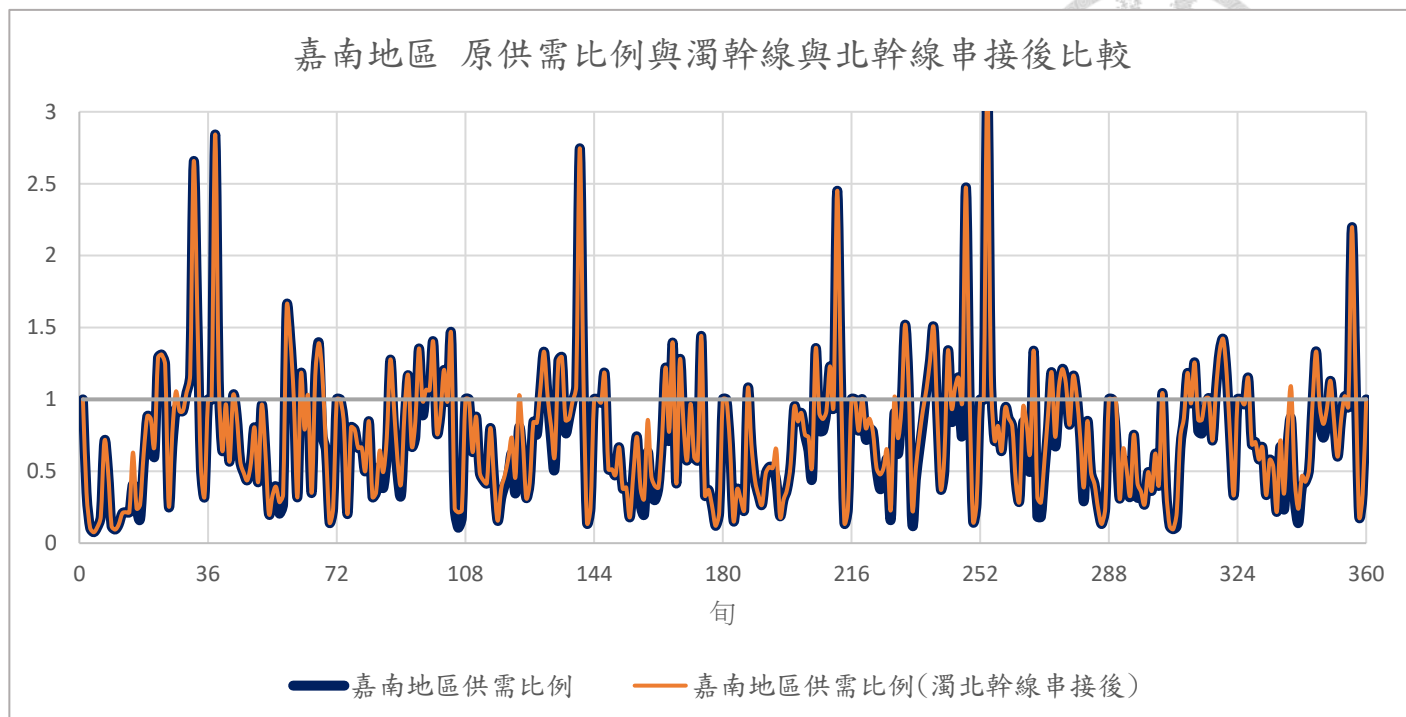


圖 4-15 嘉南地區原供需比例與濁幹線與北幹線串接後比較

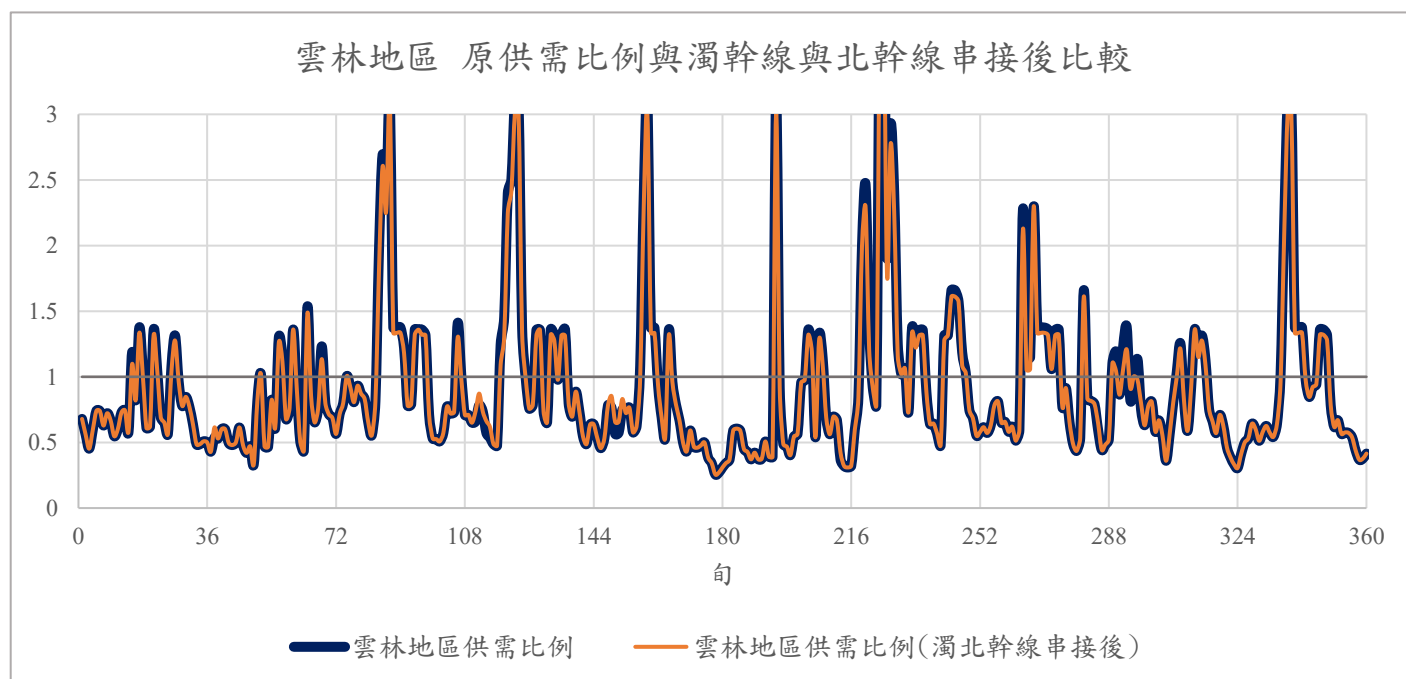


圖 4-16 雲林地區原供需比例與濁幹線與北幹線串接後比較

第五章 結論與建議



本研究使用系統動力學方法，針對集集攔河堰與曾文—烏山頭水庫兩大水資源系統，建構濁幹線與北幹線串接跨流域調度模型，並以 2010 年至 2019 年之水文資料進行模擬。透過比對現況、濁幹線與北幹線串接與增設帶狀調蓄池三大情境，以及加入分岔理論討論系統穩定性。

5.1 結論

在現況情境下，兩大系統獨立運作，模擬結果顯示：枯早期時，嘉南地區缺水量常提升至平均值的數倍，迫使必須啟動停灌等機制，凸顯了未串接前系統面對枯早期的脆弱性。

藉由重建北港溪渡槽使濁幹線與北幹線串接，「北水南引」機制具備常態性與穩定性，在豐水期能將集集攔河堰系統餘水南引（十年年平均約 1,156 萬噸），降低嘉南地區之農業缺水量。相對而言，「南水北調」受限於水庫必須溢流等嚴格限制，十年年平均調度量僅約 200 萬噸，在實務上屬機會型之特殊機制，兩者展現出互補但非對稱的調度效益。

本研究模擬於濁幹線增設 43.68 萬噸之帶狀調蓄池。結果顯示，蓄水設施給予系統跨時間的調度彈性，使得十年年平均「北水南引」水量提升至約 1,964 萬噸，調蓄池效益提升近七成，強化了系統對枯早期的韌性。

本研究加入分岔理論，將供需比例視為狀態變數，並將調度量作為控制參數。分析證明，濁幹線與北幹線串接不僅未破壞原地區的穩定性，更將原本震盪的缺水情形，收斂至趨近理想平衡的狀態，此結果代表跨流域調度水資源能有效降低缺水情形並確保地區用水穩定性。

5.2 建議

本研究依據 2010 年至 2019 年之歷史數據進行模擬。面對全球氣候變遷加劇，未來降雨之時空分佈將呈現更為極端趨勢。因此，建議後續研究可進一步使用氣候降尺度資料，將長期的氣候預測變數結合本研究建置之系統動力模式。透過模擬未來中長期極端旱澇頻率增加之水文情境，探討未來極端氣候對濁幹線與北幹線串接系統之衝擊。此極端氣候情境，有助於檢視現況水資源跨流域調度機制在面對氣候衝擊時的供水狀況，進而提早擬定氣候調適策略。

另外，本研究在水資源分配上基於現行法規與輸水上限，後續研究建議可進一步將最佳化納入，與系統動力學模式發展為最佳化決策模型。在此模型中，可將帶狀調蓄池之工程成本，進行成本效益分析。透過多目標操作，尋找效益產出最大化的最佳水庫運用要點以及帶狀調蓄池最具經濟價值與可行性之庫容大小，進而促成對跨流域水資源調度之最佳化配置。

第六章 參考文獻



- [1] X. Yang, Y. Chen and H. L. Shu ,「Stability analysis of AC/DC power transmission system based on bifurcation theories」, International Conference on Sustainable Power Generation and Supply , 2009
- [2] Y. Ma, S. Lv, X. Zhou, Z. Gao, X. Zhang and J. Zhang ,「Analysis of Voltage Stability of Power Systems Using the Bifurcation Theory」, Chinese Control And Decision Conference , 2018
- [3] 吳瑞賢、鄭安成、吳幸娟 ,「嘉南地區加強灌溉管理實務探討」, 農業工程學報, 第 68 卷, 第 1 期, 頁 39-55, 2022。
- [4] 李兆庭 ,「水資源系統串接之頻譜網路最佳化分析」, 國立臺灣大學生物環境系統工程學系暨研究所, 碩士論文, 2022。
- [5] 洪彥甯、蕭政宗 ,「南化水庫最佳化與模糊化營運規線對缺水影響探討」, 農業工程學報, 第 63 卷, 第 2 期, 頁 67-77, 2017。
- [6] 張力仁、郭振民、曾宏偉、游保杉 ,「應用多目標遺傳演算法於 DHSVM 之參數最佳化—以石門水庫集水區為例」, 農業工程學報, 第 65 卷, 第 1 期, 頁 18-35, 2019。
- [7] 陳宇文、朱宏杰、張良正、傅怡釗 ,「多湖區系統地表地下聯合操作之最佳化研究」, 中國土木水利工程學刊, 第 21 卷, 第 3 期, 頁 295-305, 2009)。
- [8] 陳伯豪 ,「石門水庫供水系統風險分析」, 國立中央大學土木工程學系暨研究所, 碩士論文, 2010。
- [9] 童慶斌、陳韻如 ,「大台中地區水資源系統動力模式建立與應用」, 第三屆台灣環境資源永續發展研討會, 2010。
- [10] 黃群展、許少瑜、夏復國、童慶斌、李宗祐、林冠州 ,「南勢溪跨域引水對翡翠水庫供水系統影響」, 台灣水利, 第 71 卷, 第 1 期, 頁 67-84, 2023。
- [11] 經濟部水利署 ,「108 年中部區域水資源經理計畫滾動檢討」, 2019
- [12] 經濟部水利署 ,「烏山頭水庫運用要點」, 2024。
- [13] 經濟部水利署 ,「曾文水庫運用要點」, 2024。

- [14] 經濟部水利署，「集集攔河堰水庫運用要點」，2024。
- [15] 經濟部水利署，「臺灣各區水資源經理基本計畫」，2021。
- [16] 經濟部水利署，「濁幹線與北幹線串接工程計畫」，2022。
- [17] 經濟部水利署公務統計報表，
https://www.wra.gov.tw/News_Content.aspx?n=2945&s=7396。
- [18] 經濟部水利署水利規劃試驗所，「曾文南化水庫聯通管輸水工程可行性分析」，2013
- [19] 經濟部水利署水庫統計表，
https://fhy.wra.gov.tw/ReservoirPage_2011/Statistics.aspx。
- [20] 嘉南農田水利會，「烏山頭水庫第四次安全評估-淤積測量成果報告」，2011
- [21] 劉子明，「氣候變遷對區域水資源衝擊評估整合系統之研究」，國立臺灣大學生物環境系統工程學系暨研究所，博士論文，2010。

