

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 System Engineering

College of Bioresources and Agriculture

National Taiwan University

Master's Thesis

投資組合理論之水資源系統管理

Portfolio Theory Analysis of Water Resource

System Management

王力寬

Li-Kuan Wang

指導教授：胡明哲 博士

Advisor: Ming-Che Hu, Ph.D.

中華民國 113 年 7 月

July, 2024





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

投資組合理論之水資源系統管理

Portfolio Theory Analysis of Water Resource
System Management

本論文係王力寬 R10622019 在國立臺灣大學生物環境系統工程學系研究所完成之碩士學位論文，於民國_113_年_6_月_21_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 System Engineering on 2024/06/21 have examined a Master's thesis entitled above presented by Li-Kuan Wang R10622019 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)

王力寬

楊豐年

蔣政安

鄭光輝

系主任/所長 Director:

李心龍

致謝



謹以此篇論文獻給我最愛的外祖母林寶猜小姐。阿嬤！你的金孫台大研究所讀畢業了，你有金歡喜沒？

一路走來發生了很多意料之外的事情，人生的規劃也因此產生偏折。所幸有爸爸、媽媽永遠不變的支持我，以及瑜柔時時刻刻給予我奮鬥下去的勇氣，讓我能走到這一步；過程中很感謝胡明哲老師的指導，總是為我指出明確的前進方向；感謝潘潘對我進行的訓練及栽培；也感謝力得協助論文排版，替我省下了大量的寶貴時間；以及感謝蛋頭學長的歷史資料；謝謝欣樺在我最低潮的時候把我拽出深淵，也謝謝朱朱陪著我重拾信心；謝謝羽初、師大及永和的大家，讓我能維持運動的習慣。

有著這些貴人們相伴，即便繞了點遠路，我還是抵達了終點。懷著感恩的心，我要啟程前往下一段旅程了。祈望在未來，我能越挫越勇、莫忘初衷！

摘要



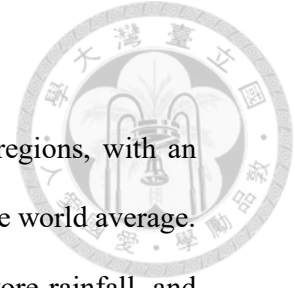
台灣位於熱帶及亞熱帶的交界，年平均降水量約為 2500 毫米，為世界平均的 2.6 倍，但由於地形陡峭和土地狹小，降水難以儲存，僅有 18% 的降水量可利用。台灣的降水在時間和空間上分布不均，豐水期集中在每年 5 至 10 月，枯水期則在 11 月至次年 4 月。北、中、南部地區的降水量分布亦存在顯著差異，導致中、南部地區在枯水期經常面臨用水不足的問題。

現有的水資源管理面臨諸多挑戰，如水庫蓄水能力不足、管道漏水率高、農業灌溉效率低等，難以應對季節性和地區性的用水需求波動。現代投資組合理論（MPT）在資源分配和風險管理中展示了潛力，能夠通過平均數—變異數的概念分析平衡風險和回報，成為優化水資源分配的理想工具。

本研究旨在應用 MPT 優化台灣的水資源管理策略，以應對降水分布不均的挑戰，提高水資源利用效率。研究目標包括建立水資源分配模型、分析現有管理策略效能、優化分配策略，特別針對中、南部枯水期用水需求，並提供具體的政策建議。期望通過這些目標的實現，為台灣提供科學、有效的水資源管理解決方案，促進可持續發展。

關鍵字：投資組合、水資源、最佳化、乾旱、缺水風險

ABSTRACT



Taiwan is located at the intersection of tropical and subtropical regions, with an average annual rainfall of about 2,500 millimeters, which is 2.6 times the world average. However, due to steep terrain and limited land area, it is difficult to store rainfall, and only 18% of it is utilizable. The distribution of rainfall in Taiwan is uneven in terms of both time and space, with the wet season concentrated from May to October and the dry season from November to April. There are also significant differences in rainfall distribution across northern, central, and southern regions, leading to frequent water shortages in central and southern regions during the dry season.

Current water resource management faces numerous challenges, such as insufficient reservoir storage capacity, high pipeline leakage rates, and low agricultural irrigation efficiency, making it difficult to cope with seasonal and regional fluctuations in water demand. Modern Portfolio Theory (MPT) has shown potential in resource allocation and risk management. By applying the mean-variance concept, it can balance risk and return, making it an ideal tool for optimizing water resource allocation.

This study aims to apply MPT to optimize Taiwan's water resource management strategy, addressing the challenges of uneven rainfall distribution and improving water resource utilization efficiency. The research objectives include establishing a water resource allocation model, analyzing the effectiveness of current management strategies, optimizing allocation strategies, particularly targeting water demand during the dry season in central and southern regions, and providing specific policy recommendations. By achieving these objectives, this study hopes to provide a scientific and effective solution for water resource management in Taiwan, promoting sustainable development.

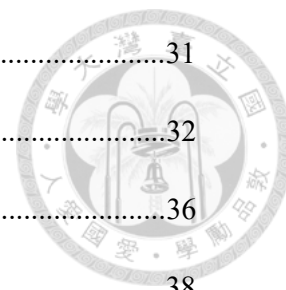
Keywords: Portfolio, Water resource, Optimization, Drought, Water shortage risk

目次



致謝	i
摘要	ii
ABSTRACT	iii
目次	iv
圖次	vi
表次	vii
第一章、緒論.....	1
1.1 研究動機	1
1.2 研究目的	2
1.3 研究框架	3
第二章、文獻回顧.....	5
2.1 投資組合理論	5
2.2 投資組合理論應用於環境問題	11
第三章、研究方法.....	13
3.1 數學模型建構	13
3.2 建立南區水資源管理模型	17
3.2.1 南區用水概況.....	18
3.2.2 南部水資源跨系統調度.....	21
3.2.3 水庫操作.....	24
3.3 輸入資料處理	26
第四章、結果與討論	31

4.1	輸入資料	31
4.2	模型結果－時間變化對權重的影響	32
4.3	模型結果－特定時間區間對權重的影響	36
4.4	敏感度分析	38
第五章、 結論與建議		51
5.1	結論	51
5.2	建議	51
第六章、 參考文獻.....		53



圖次



圖一 、研究架構圖	4
圖二 、模型三維示意圖	16
圖三 、模型二維示意圖	17
圖四 、台灣分區各標的用水概況	21
圖五 、南區水資源系統供需示意圖	22
圖六 、曾文南化聯通管路線示意圖	23
圖七 、曾文—烏山頭水庫串聯運用規線	25
圖八 、(左)台灣南區清淤面量圖;(右)台灣南區水庫近五年清淤量統計圖。	26
圖九 、農業用水資料處理流程圖	28
圖十 、全台耕地面積(公頃)統計面量圖。	29
圖十一 、高屏攔河堰歷史流量資料	31
圖十二 、子系統歷史需水量	32
圖十三 、歷史資料不分段進行最佳化結果。	33
圖十四 、歷史資料分多段(68)進行最佳化之結果。	34
圖十五 、依灌溉季節分段輸入模式之風險圖。	36

表次



表一、數學模式參數意涵表	15
表二、各業別年工作日數表	20
表三、不同分段數 n 對應風險及權重（第一切分）之變化	35
表四、不同分段數 n 對應權重之變化	35
表五、不同分段數 n 對應風險及權重（第一切分）之變化	37
表六、不同分段數 n 對應權重之變化（灌溉）	37
表七、不同分段數 n 對應權重之變化（休耕）	38
表八、時間無變化（ $n = 1$ ）下權重－風險變化表	39
表九、時間變化下（ $n = 2$ ，第一部分）下權重－風險變化表	40
表十、時間變化下（ $n = 2$ ，第二部分）下權重－風險變化表	41
表十一、時間變化下（ $n = 3$ ，第一部分）下權重－風險變化表	41
表十二、時間變化下（ $n = 3$ ，第二部分）下權重－風險變化表	42
表十三、時間變化下（ $n = 3$ ，第三部分）下權重－風險變化表	42
表十四、特定時間區間（ $n = 1$ 灌溉）下權重－風險變化表	44
表十五、特定時間區間（ $n = 1$ 休耕）下權重－風險變化表	44
表十六、特定時間區間（ $n = 2$ 灌溉，第一部份）下權重－風險變化表	45
表十七、特定時間區間（ $n = 2$ 灌溉，第二部份）下權重－風險變化表	45
表十八、特定時間區間（ $n = 2$ 休耕，第一部份）下權重－風險變化表	46
表十九、特定時間區間（ $n = 2$ 休耕，第二部份）下權重－風險變化表	46
表二十、特定時間區間（ $n = 3$ 灌溉，第一部份）下權重－風險變化表	47



表二十一 、特定時間區間 ($n = 3$ 灌溉, 第二部份) 下權重－風險變化表 .47

表二十二 、特定時間區間 ($n = 3$ 灌溉, 第三部份) 下權重－風險變化表 .48

表二十三 、特定時間區間 ($n = 3$ 休耕, 第一部份) 下權重－風險變化表 .48

表二十四 、特定時間區間 ($n = 3$ 休耕, 第二部份) 下權重－風險變化表 .49

表二十五 、特定時間區間 ($n = 3$ 休耕, 第三部份) 下權重－風險變化表 .49

第一章、緒論



1.1 研究動機

台灣位處熱帶及亞熱帶的交界，降水主要來自夏季的季風及颱風，以及冬季的東北季風，年平均降水量約為 2500 毫米，為世界平均降水量的 2.6 倍。然而，由於台灣地形陡峭、土地狹小，降水不易儲存利用，而是透過逕流迅速流入大海，使得可利用水量僅佔總降雨量的 18%(台灣環境部和國家科學及技術委員會, 2024)。因此，每人每年可分配雨量少於世界平均值的五分之一(楊偉甫, 2010)。

此外，台灣地區的降水在時和空間上分布不均。在時間分布上，豐水期主要為每年 5 至 10 月，受西南季風、梅雨和颱風影響，降水量佔全年的 80%(陳永森、陳章波, 1999)。而枯水期則從每年 11 月延續至次年 4 月，主要受到地形影響，降雨量顯著減少。在空間分布上，北部、中部和南部地區的枯、豐水期降水量比分別為 4:6、2:8 和 1:9(中央氣象署, 2020)，中、南部地區的差距尤為明顯，這導致中、南部地區在枯水期經常無法滿足用水需求(楊偉甫, 2010)。

目前台灣在水資源管理上面臨諸多挑戰，例如水庫蓄水能力不足、管道漏水率高、農業灌溉效率低等，現有管理策略難以應對季節性和地區性的用水需求波動。因此，有必要尋求更加科學和精確的方法來優化水資源的分配。

現代投資組合理論 (MPT) 在資源分配和風險管理中展示了極大的潛力。MPT 通過平均數—變異數分析，能夠在不同選擇間平衡風險和回報，使其成為優化水資源分配的理想工具。運用 MPT，可以建立數學模型，根據不同地區和季節的水需求與供應情況，實現水資源的最佳配置。



台灣未來的經濟發展和人口增長將進一步增加對水資源的需求。有效管理水資源對於支持台灣經濟可持續發展和提高居民生活質量至關重要。此外，其他國家或地區在水資源管理中的成功經驗，也證明了科學管理和技術創新對於解決水資源問題的重要性。

因此，本研究旨在通過現代投資組合理論，探索和優化台灣的水資源管理策略，以期提供一個可行的解決方案，不僅對台灣有益，還可以為其他面臨類似問題的地區提供參考。

1.2 研究目的

本研究的主要目的是應用現代投資組合理論(MPT)的蓋念來優化台灣的水資源管理策略，以應對降水時間和空間分布不均的挑戰，並提高水資源的利用效率。

具體目標如下：

1. 建立水資源分配模型：

應用 MPT 概念建立一個適用於台灣水資源分配的數學模型，旨在平衡各地區和各季節的用水需求和供應，從而實現水資源的最佳配置。

2. 分析現有水資源管理策略的效能：

對現有的水資源管理策略進行評估，確定其在不同時間和空間條件下的效能和不足之處，為改進現有策略提供依據。

3. 優化水資源分配策略：

基於所建立的模型，提出優化的水資源分配策略，特別針對中、南部地區在枯水期的用水需求，減少水資源浪費，提高用水效率。

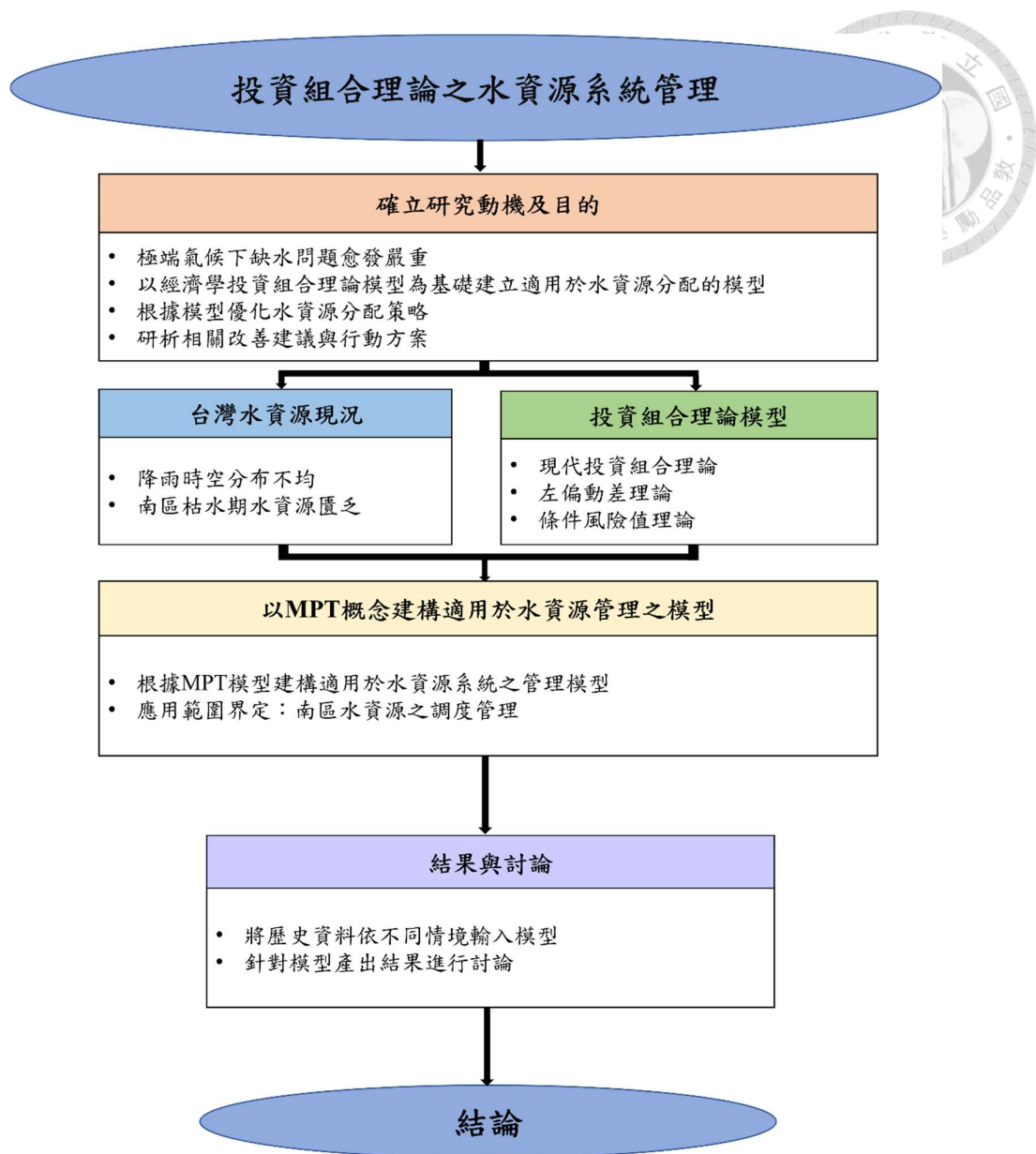
4. 提供政策建議：

根據研究結果，為政府和相關部門提供具體的政策建議，幫助制定更科學和有效的水資源管理政策，促進台灣的可持續發展。

本研究期望通過這些目標的實現，為台灣水資源管理提供一個科學、有效的解決方案，不僅能解決目前的水資源管理困境，還能夠為未來的水資源規劃提供有價值的參考。

1.3 研究框架

本研究之架構如圖一，分成五個章節。第一章為緒論，說明研究動機、研究目的及研究框架。第二章為文獻回顧，探討現代投資組合理論的基本概念，以及基於其上的其他投資理論模型，對於風險迴避所採取的手段。第三章為研究方法，根據現代投資組合理論對於風險規避的概念，建構適用於水資源系統管理的數學模型。接著界定南區水資源管理模型之範疇及特性。最後詳細介紹輸入數學模型之歷史資料的處理過程、篩選條件及假設。第四章為討論資料輸入模型後的產出結果，包括時間長度變化對供水權重的影響、依特定時間區間對供水權重造成的影響，以及對權重進行的敏感度分析。最後根據結果找出較好的資料輸入方式及模型適用範圍。第五章為結論及建議，根據本研究總結研究內容及提供後續建議。



圖一、研究架構圖

第二章、文獻回顧



本研究探討如何將投資組合理論應用於水資源串接系統之管理，以降低缺水風險。因此本章節將介紹經濟學上不同類型的投資組合理論，其原理與所適用的情況。

2.1 投資組合理論

「投資組合」此一基本概念最早由 Markowitz 於 1952 年所提出(Markowitz, 1952)，旨在藉由多樣化的投資來規避風險，現代投資組合理論也因此奠定了基礎。依循此脈絡，後人發展出了各種基於投資組合概念的模型，像是進一步解釋了資產回報與市場風險關係的資本資產定價模型，結合資本資產定價模型及多因子架構的套利定價理論，注重損失風險的風險價值模型、條件風險價值模型及左偏動差模型等。本節將探討上述相關理論模型。

Markowitz 所提出的現代投資組合理論 (MPT)，是一種將數學計算運用到投資學的理論，主要以平均數—變異數分析的方式來進行選擇及優化，藉此找出在特定風險之下，可以得到最高期望回報的投資組合，或是說在選定特定期望回報的條件下，能最小化風險的投資組合。此外，MPT 還包含了資本市場線 (Capital Market Line, CML)、有效邊界 (Efficient Frontier) 以及資本資產定價模型 (Capital Asset Pricing Model, CAPM) 等概念。其數學形式如下所示：

$$E(R_p) = \sum_i w_i E(R_i) \quad (1)$$

其中投資組合的期望回報 $E(R_p)$ 可由組合中各標的 $i, i = 1, 2, \dots, n$ 的期望回報率 $E(R_i)$ ，乘以該標的所占資金權重 w_i 算得。在此 $\sum_i w_i = 1$ ，表示投資人可以自由運用資金分配至各投資標的。

MPT 中的風險被認為是投資組合回報的變異數或標準差，其數學形式如下所示：

$$\sigma_p^2 = \sum_i \sum_j w_i w_j \sigma_i \sigma_j \rho_{ij} \quad (2)$$

其中 σ_p^2 為投資組合回報的變異數； w_i 、 w_j 為組合中第 i 、 j 個標的所占總資金的權重； σ_i 、 σ_j 為組合中第 i 、 j 個標的標準差； ρ_{ij} 為組合中第 i 、 j 個標的間的相關係數（Correlation Coefficient）。

於此基礎上，MPT 提出了有效邊界的概念。在投資組合的期望回報 $E(R_p)$ 和風險（即投資組合回報的標準差 σ_p ）的平面上，有效邊界是一條拋物線。每個位於這條曲線上的點都代表了一個最優投資組合，即在同一風險水平下擁有最高的期望回報，以及在同一期望回報水平下擁有最低的風險。因此，投資者可以根據自身的風險承受能力和投資目標，選擇位於有效邊界上的某個點進行投資。例如，風險厭惡型投資者可能會選擇低風險、低回報的投資組合，而風險承受能力較強的投資者則可能會選擇高風險、高回報的投資組合。

資本資產定價模型（Capital Asset Pricing Model, CAPM）是金融經濟學中用來描述資產定價與風險之間關係的理論工具。CAPM 由 William Sharpe(Sharpe, 1964)、John Lintner(Lintner, 1965)和 Jan Mossin(Mossin, 1966)於 1960 年代獨立發展，成為

現代金融理論的基石之一。該模型旨在解釋資產回報如何受到市場風險的影響，並提供了一種衡量個別資產風險的方式，其核心假設為：

- (1) **市場均衡**：所有投資者都是風險規避者，且都在追求最大化效用，擁有相同的投資期望和信息。
- (2) **單一系統風險**：市場上所有資產的回報都受到一個共同因子，即市場風險的影響，其他風險被認為是不可分散的系統風險。
- (3) **無風險利率**：投資者可以以無風險利率借貸資金。
CAPM 的核心公式可由下式表示：

$$E(R_i) = R_f + \beta_i(E(R_m) - R_f) \quad (3)$$

$$\beta_i = \frac{Cov(R_i, R_m)}{Var(R_m)} \quad (4)$$

其中 R_i 為投資組合報酬率； R_f 為無風險利率； β_i 為市場風險係數，作為衡量個別資產相對於整理市場風險的指標； R_m 為市場預期報酬率。

β 表示投資組合回報對於市場整理回報的敏感度。當 $\beta > 1$ 時表示該投資組合比市場波動更大；當 $\beta < 1$ 時表示該投資組合波動較小；當 $\beta = 1$ 時表示該投資組合與市場同步波動。

CAPM 在實務中能幫助投資者和公司評估資產的合理價格、計算公司的股權資本成本以影響資本預算決策，以及協助投資者構建最優投資組合和進行風險管理。然而，CAPM 的局限性在於 (1) CAPM 的市場假設過於理想，假設所有投資者擁有相同的預期和信息，而這在現實中難以成立(Roll, 1977)。(2) CAPM 僅考慮市場風險，忽略了其他可能影響資產回報的因素，如流動性風險和公司特有風險(McGrattan, 1995)。(3) 實證研究顯示資產的 Beta 值可能隨時間變化，這對 CAPM

的預測能力構成挑戰(Jensen, 1972)。

套利定價理論 (Arbitrage Pricing Theory, APT) 是由 Stephen Ross(Ross, 1976) 提出的一種資產定價模型。APT 旨在克服 CAPM 的某些局限性，透過提供一種多因子框架來解釋投資組合預期回報，不僅考慮市場風險，還引入多個經濟因素作為驅動投資組合回報的變量。APT 認為投資組合預期回報可以表示為多個經濟因子的線性組合，且共同影響著組合的回報。其數學形式如下表示：

$$E(R_i) = R_f + \beta_{i1}F_1 + \beta_{i2}F_2 + \cdots + \beta_{ik}F_k \quad (5)$$

其中 R_i 為投資組合報酬率； R_f 為無風險利率； β_{ij} 為組合 i 對因子 j 的敏感度，通常由歷史數據進行迴歸分析估算得； F_j 為第 j 個因子的風險溢酬，表示該因素對組合回報影響的額外回報。

相較於 CAPM 依賴於單一市場指數，APT 允許投資者選擇多個因子來構建模型。這使得 APT 在解釋資產回報時更加靈活和精確。因子模型通常通過統計方法，如主成分分析或因子分析來識別和選擇。儘管 APT 透過多因子框架來解釋並優化投資組合回報，使其有更好的應用價值(Chen et al., 1986)，但其侷限性在於 (1) 因子選擇困難，如何確定哪些經濟因素要納入模型中，以及準確測量其風險溢酬(Connor & Korajczyk, 1995)。(2) 較高的數據需求，有鑑於該模型利用大量歷史數據來判別與估計輸入因子，APT 會更加仰賴高品質的數據進行分析(Renault et al., 2022)。

風險價值 (Value at Risk, VaR) 模型是一種廣泛使用的風險度量工具，用來估計在給定置信水平和持有期內，投資組合可能遭受的最大損失。VaR 模型由 J.P.

Morgan(Jorion, 2000)在 1990 年代初提出，隨後迅速成為金融機構衡量市場風險的重要方法。VaR 模型的基礎想法是想找出在特定的一段時間內（數天或數周等），在給定的信心水準之下，該投資組合的最大可能損失。其數學定義如下：

$$VaR_{\alpha}(L) = \inf\{l \mid P(L \leq l) \geq \alpha\} \quad (6)$$

其中 α 為信心水準； L 為損失變數，用來表示可能發生損失的隨機變數； $VaR_{\alpha}(L)$ 則表示在信心水準 α 下的最大損失。

VaR 通常透過三種方法來計算：（1）歷史模擬法，利用市場的歷史數據來模擬在未來，選定的投資組合模型可能的損失情形。（2）變異數-共變異數法，根據投資組合的平均數及變異數來計算 VaR，通常假設投資組合報酬率為常態分佈，具有計算快速的特點。（3）蒙地卡羅法，利用產生隨機變數來模擬大量市場情形並估計 VaR。

VaR 透過設置 α 值來得到可能的最大損失，成功將風險量化，簡單卻有效地提供了直觀的風險測量，有助於投資組合的風險評估。然而，VaR 也具有其侷限性：

（1）忽略尾部風險，VaR 僅關注給定信心水準下的最大損失。意即假設我們給定的信心水準為 95%，則 VaR 告訴了我們在 95%的情形下，我們的損失不會超過 VaR 給定的數值，卻忽略了極端情況（另外 5%）發生時的潛在損失，則當投資組合報酬率呈現豐尾情形時（尾部數值較平常來的大），可能使投資組合損失超出預期 (Danielsson & De Vries, 2000; McNeil et al., 2005)。（2）依賴假設情形，變異數—共變異數法依賴數據常態分佈的假設，以及歷史模擬法依賴過去情形和未來具有類似的表現之假設，可能皆不同於實際情況(Pan, Spring 1997)。（3）VaR 不完全滿足

一致性風險度量的條件，尤其是在次可加性（sub additivity）方面，當兩個擁有各自風險的資產合併後，兩者的 VaR 加總可能會小於合併後的 VaR，與投資組合中多樣化資產配置以降低風險的原則不符(Artzner et al., 1999)。

條件風險價值（Conditional Value at Risk, CVaR）模型也被稱為平均超額損失（Expected Shortfall, ES），旨在克服 VaR 在捕捉極端損失風險方面所存在的侷限性。CVaR 不僅關注特定置信水準下的最大損失，還量化超過該置信水準的平均損失，以提供更全面的風險評估。其數學定義如下所示：

$$CVaR_{\alpha}(L) = E[L \mid L \geq VaR_{\alpha}(L)] \quad (7)$$

和 VaR 中所用定義相同， α 為信心水準； L 為損失變數； $VaR_{\alpha}(L)$ 則表示在信心水準 α 下的最大損失； $CVaR_{\alpha}(L)$ 則為損失超過 VaR 下的損失期望值。

由於 CVaR 計算了損失期望值，因此相較於 VaR 模型更能應對極端情況下的可能風險。鑒於 CVaR 的風險函數為一凸函數，使其在進行投資組合優化時容易獲得最佳解(Rockafellar & Uryasev, 2000; 黃金波, 2014)。此外，CVaR 滿足一致性風險度量的四個條件，包括了單調性、次可加性、齊次性及轉移不變性，使其在實際應用中更加穩健可靠(Acerbi & Tasche, 2002; Artzner et al., 1999)。

MPT 模型用變異數作為風險評估的指標，某種程度上是認為投資組合的波動性即是該投資組合所需承擔的風險，並認為正收益的波動風險和負收益的波動風險具有相同的地位。然而，投資人所在意的投資風險，概念上應由投資所可能造成的損失來定義。以此為基礎，Bawa(Bawa, 1975)與 Fishburn(Fishburn, 1977)提出了左偏動差（Lower Partial Moment, LPM）的理論模型，以 n 階左偏動差來做為風險

的度量，其數學形式如下所示：

$$LPM_n(\tau, R_i) = \int_{-\infty}^{\tau} (\tau - R_i)^n dF(R_i), i = 1, \dots, K \quad (8)$$

其中 τ 為目標報酬率， R_i 為投資組合報酬率， $F(R_i)$ 則為投資組合報酬率的機率分配函數。

左偏動差投資組合模型是一種以平均和左偏動差為目標的投資組合模型。相較於投資組合的上漲風險，投資者更在意其損失風險，因此該模型旨在追求最大收益的同時，盡量降低投資可能造成的損失。

左偏動差為描述數據分布偏左的一種度量方式，在投資組合管理中用以衡量可能出現的損失風險。相較於 MPT 模型的變異數，左偏動差能夠更精確地反映投資者對於負收益的擔憂，因為它專注於那些低於目標報酬率的部分。這使得 LPM 在捕捉極端損失風險時比變異數更為有效。

2.2 投資組合理論應用於環境問題

前人的研究中亦有應用 MPT 於水資源管理的例子。Beuhler(Beuhler, 2006)透過列舉不同的水資源來源（地下水、地表水、再生水……等），來定性的應用 MPT 於水資源管理中。該文獻透過給定不同水資源之佔用水百分比、花費、風險（水文標準差）及和水文現象週期的相關係數，作為參數來訂定和 MPT 的關係。最後 Beuhler 認為，應用 MPT 於水資源管理有助於在各種資源間訂定合適的組合，而在實際使用 MPT 於水資源管理時，需要確立（1）個別水資源自身的風險。（2）水資源間彼此的相關性。

無獨有偶，Aerts 等人(Aerts et al., 2015)也將 MPT 應用於統合水資源管理系統

(Integrated Water Resources Management, IWRM)。該研究認為 MPT 有助於當地洪患災害管理，並定義了自己的 MPT 參數。由於不同洪患預防的投資（資產）之間不完全相關，因此可以透過這些投資組合以及可能減少的損失，來找到 IWRM 的效率前緣、進行災害管理。Aerts 所定義適用於 IWRM 之 MPT 參數如下：

- (1) 資產：各種有助於降低洪患的投資。
- (2) 投資組合：由個人或組織擁有的資產組合。
- (3) 相關係數：資產間彼此的相關性。
- (4) 多樣性：將資產區分成數種不相關（部分相關）的資產。
- (5) 報酬：由投資組合導致的收入或損失減少。
- (6) 風險：投資可能導致的未知後果。可分成特定風險及非特定風險。前者可由適當的投資組合進行規避，後者則影響整個市場。
- (7) 效率前緣：在效率前緣上的投資組合在給定風險的情況下，具有最好的報酬；或是說在相同報酬的情形下風險最小

第三章、 研究方法



本研究先於 3.1 節根據現代投資組合理論，建構可應用於水資源管理的數學模型。然後在 3.2 節定義出所要探討的水資源管理範圍，並在 3.3 節詳細解釋輸入之資料來源及處理方式。

3.1 數學模型建構

整體水資源流量 $\mathbf{Q}$ 包含了 p 個水資源供給量 Q_i ，且該水資源供給為長度 m 的時間序列資料，其中 i 表示第 i 個水資源之流量，如下所示。水資源來源可能是河川，如高屏溪；也可能是水庫，如曾文水庫、南化水庫。

$$\mathbf{Q} = (Q_1, Q_2, \dots, Q_p)^T, \quad i = 1, 2, \dots, p \quad (9)$$

整體需水量 $\mathbf{D}$ 包含了 q 個需水量為 D_i 的子系統，且該子系統的需水量為長度 m 的時間序列資料，其中 i 表示第 i 個子系統需水量，如下所示。子系統可能是不同地區與標的，如台南農業用水及高雄公共用水等。

$$\mathbf{D} = (D_1, D_2, \dots, D_q)^T, \quad i = 1, 2, \dots, q \quad (10)$$

合併 $\mathbf{Q}$ 及 $\mathbf{D}$ 之列向量 $\mathbf{X}$ ，為一 $(p + q) \times m$ 的矩陣，以下式表示：

$$\mathbf{X} = (Q_1, Q_2, \dots, Q_p, D_1, D_2, \dots, D_q)^T \quad (11)$$

則根據目標需求可將 $\mathbf{X}$ 分割成任一時間長度的 $\mathbf{X}_n$ ，且：

$$\mathbf{X}_n \in \mathbf{X}, \quad n = 1, 2, \dots, l$$

整體權重 $\mathbf{W}$ 為一分配 $\mathbf{X}$ 流量與需求量的 $(p + q) \times q$ 矩陣，矩陣內元素 w_{jk} 表示



第 j 個流量分配至第 k 個子系統需水量的權重，其中

$$\mathbf{W} = \begin{bmatrix} w_{11} & w_{12} & \cdots & w_{1q} \\ w_{21} & w_{22} & & w_{2q} \\ \vdots & \ddots & & \vdots \\ w_{p1} & & & \\ w_{p+1,1} & & & \\ \vdots & & & \\ w_{p+q,1} & w_{p+q,2} & \cdots & w_{p+q,q} \end{bmatrix}_{(p+q) \times q}$$

整個權重 $\mathbf{W}$ 以 j 來劃分，可分為 $j = 1, 2, \dots, p$ 以及 $j = p + 1, \dots, p + q$ 兩個部分。

第一部分代表水資源流量分配至子系統需水量之權重，相同的水資源流量來源，其分配權重的總和為1，且介於0跟1之間，如下所示：

$$\begin{aligned} \sum_k w_{jk} &= 1, \quad \forall 1 \leq j \leq p \\ 0 \leq w_{jk} &\leq 1, \quad \forall 1 \leq j \leq p, k \end{aligned}$$

第二部分代表子系統本身的需水量權重。當 $j = k + p$ 時， $w_{j=k+p,k}$ 表示子系統需水量時間序列對應到該子系統本身需水量的權重，該權重數值則為-1，意即該時間序列對於對應子系統造成的影響為負，有別於第一部分 ≥ 0 的影響，如下表示：

$$w_{jk} = \begin{cases} -1, & \text{if } j = k + p \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases}$$

對於每一段的 $\mathbf{X}_n$ ，皆可以獲得對應該時間段的 $\mathbf{W}_n$ ，如下表示

$$\mathbf{W}_n \in \mathbf{W}, n = 1, 2, \dots, l$$

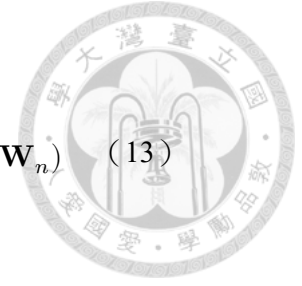
則目標目標函數為：

$$\min \sum_{n=1}^k \left(\sum \left(\text{diag}(\mathbf{W}_n^T (\mathbf{X}_n \mathbf{X}_n^T) \mathbf{W}_n) \right) \right) \quad (12)$$

$$s. t. \mathbf{W}_n \in R, \quad R \text{ is the feasible region}$$

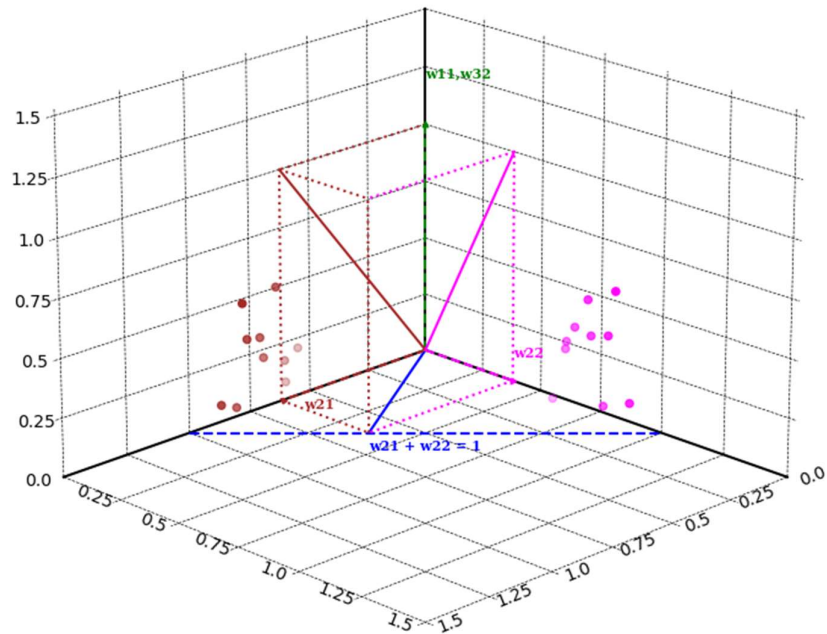
本研究定義風險為：

$$Risk \equiv \sum_{n=1}^k \left(\sum \left(diag(\mathbf{A}^T \mathbf{A}) \right) \right), \text{ where } \mathbf{A} = \min(0, \mathbf{X}_n^T \mathbf{W}_n) \quad (13)$$



表一、數學模式參數意涵表

參數	意涵
i	Q跟D的index。
$\mathbf{Q}$	為整體水資源流量，包含了 p 個水資源流量的集合，且每一個皆為長度 m 的時間序列資料。
$\mathbf{D}$	為整體需水量，包含了 q 個子系統需水量的集合，且每一個皆為長度 m 的時間序列資料。
$\mathbf{X}$	為合併 $\mathbf{Q}$ 及 $\mathbf{D}$ ，且大小為 $(p+q) \times m$ 的矩陣。
$\mathbf{X}_n$	為根據需求從 $\mathbf{X}$ 切分出來的任意時段，且 $\mathbf{X}_n \in \mathbf{X}$, $n = 1, 2, \dots, l$ 。
j	權重 $\mathbf{W}$ 中的row index。
k	權重 $\mathbf{W}$ 中的column index。
$\mathbf{W}$	為分配 $\mathbf{X}$ 流量與需水量的權重矩陣，其大小為 $(p+q) \times q$ 。
w_{jk}	為矩陣 $\mathbf{W}$ 中的元素，可根據 $j = 1, 2, \dots, p$ 及 $j = p+1, \dots, p+q$ 分為兩個部分；第一部份具有同一個row index，元素總和為1的特性，第二部分則類似於對角元素為-1，其餘元素為0的矩陣。
$\mathbf{W}_n$	為對應 $\mathbf{X}_n$ 的分配權重。
$\mathbf{A}$	只針對低於0的下方風險進行取值， $\mathbf{A} = \min(0, \mathbf{X}_n^T \mathbf{W}_n)$ 。



圖二、模型三維示意圖

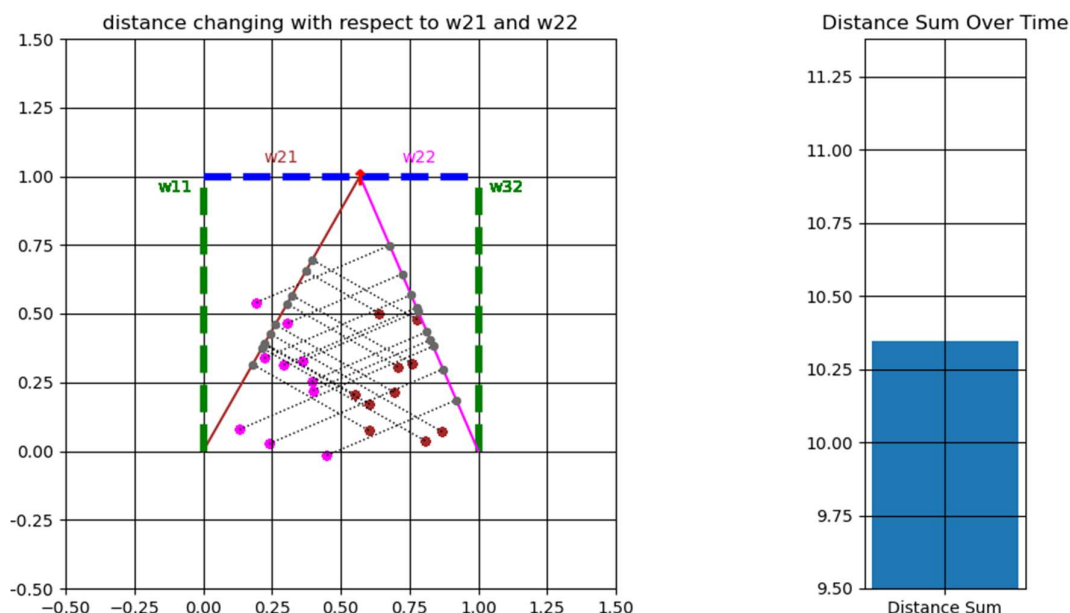
舉例來說，以一個擁有三條河川及二個需水子系統的系统，其中綠線 w_{11} 及 w_{11} 代表其中兩條河川，以 1.0 的權重分別供水至第 1 個與第 2 個需水子系統，而藍色實線則分別代表第三條河川同時供水至兩個子系統的權重，棕色、桃紅色的點代表流量資料，藍色虛線代表第三條河川的兩個供水權重和為 1。其中藍線投影到座標軸上的棕色線及桃紅色線，各自代表該河川供水至兩個子系統之權重。藍線在藍色虛線上移動，表示第三條河川供水權重間的競合關係。以圖二中範例來說，藍線更接近某一邊的座標軸，顯示該河川以更高的權重供水至其中一個子系統，且該比例為藍線在該軸上的投影量，也就是棕色線的大小。

將投影量與兩條河川的供水權重一同考量，則棕色點所在平面包含了供水至其中一個子系統的權重組合及流量資料，該權重組合決定了供水至子系統的水量。

另一側的平面上也是同理，投影量與 1.0 的權重組合成一個新的供水權重，決定了

供給至另一個子系統的供水量。

若是將兩個平面的權重以二維形式表達，如圖三所示。則藍色虛線上的不同位置代表了供水至兩個子系統的權重競合，且該權重和權重大小為 1.0 的 w_{11} 及 w_{32} 組成的供水權重組合，決定了供應兩個子系統的供水比例。並且若是將流量資料考量進來，則最佳的權重組合其實就是要找出流量資料在該組合上的最小投影距離。



圖三、模型二維示意圖

3.2 建立南區水資源管理模型

受限於其氣候條件的特殊性，臺灣降水具有空間及時間分布不均的特性。特別是在枯水期時，台灣降水集中度和緯度呈現高度負相關，顯示越接近北部及東部地區降水量隨著時間的變化越小，而在中、南部地區則出現了明顯的乾、濕季降雨量集中度的變化(黃嘉琦 et al., 2023)。

面對氣候變遷所帶來的衝擊，政府部門近年來透過開源、節流、調度、備援等

策略，辦理各項水資源建設計畫與管理工作。其中「開源」係指開發多元的水資源管道以提高供水能力，尤其著重於再生水的開發，並透過水庫清淤提升儲水能力；「節流」為推動節約用水及提高用水效率，包含了辦理自來水減漏、工業用水回收及加強農業節水等；「調度」為透過不同區域間的輸水管道，實現風枯水期水源的調度支援，進而增強各區域的水資源調度能力；「備援」則透過連接水庫的原水管、地下水備援水井等措施增加備援水源，以提升各區域水資源之備援能力。

本研究中的南區水資源管理模型共有三種類型的單元，分別為水庫上游流量、聯接管及用水需求（子系統）。其中水上游河川為曾文溪、後堀溪及高屏溪等三條河川做為水源供給；用水需求則為台南及高雄各自的用水量。

3.2.1 南區用水概況

111 年全台總用水量為 158.7 億萬立方公尺，其中北部、中部、南部、東部及離島地區所用水量分別為總用水量的 23.49%、37.47%、23.68%、14.59%、0.14%。

南區用水主要分為公共用水、工業用水及農業用水三類，各自所占比例約為 21%、15%、64%，以農業用水為主要用水需求。農業用水又可分为灌溉用水、畜牧用水及養殖用水。根據水利署政府開放平台的資料，灌溉用水依照作物類別又可細分成一期雜作、一期水稻、二期雜作與二期水稻。一期作定義為該年 2 月 1 日至同年 5 月 31 日所種植之作物，二期作定義為該年 7 月 1 日至同年 10 月 31 日種植之作物(行政院農業委員會農糧署企劃組, 2022)；按照用水單位分，則可分为嘉南、高雄及屏東等不同的農田水利單位管轄，再依據各縣市灌溉面積等比例統計灌溉用水量。

畜牧用水則依照畜牧種類可分为水牛及黃雜牛、乳牛、豬、綿羊及山羊、乳羊、

雞及鴨；依照縣市分成嘉義市、台南市、高雄市、嘉義縣、屏東縣及高雄縣。養殖用水依照養殖種類可分為吳郭魚、鰻魚……等共 17 種類別，依照縣市分成嘉義市、台南市、高雄市、嘉義縣、屏東縣及高雄縣。

地下水使用占農業總用水量的 17%，其中畜牧用水均使用地下水，所占比例為 100%；養殖用水使用地下水比例占養殖用水的 87.9%；而灌溉用水使用比例最小，僅占自身用水量的 6%(黃建勳, 2005)，因此後續在進行農業用水估算時，將以灌溉用水作為主要農業用水。

工業用水的計算使用面積推估法，計算方式如下(逢甲大學, 2023)：

$$\begin{aligned} \text{各業別年用水量} &= \text{工業用地面積} \times \text{年工作日數} \\ &\times \text{單位面積日用水量} \end{aligned} \quad (14)$$

其中工業用地面積為工廠登記場地面積；年工作天數為各業別月平均工作時數換算得；單位面積用水量為各年研商之結果。

透過上式可知，工業年用水量和年工作日數緊密掛鉤，且觀察各業別年工作日數表可知，年工作日數與整年天數之間的比例約等於 5/7，意即周休二日的概念適用於工業用水計算中。

表二、各業別年工作日數表

行業代碼與名稱	年工作日數(日)
08 食品及飼品製造業	264
09 飲料製造業	265
10 菸草製造業	265
11 紡織業	253
12 成衣及服飾品製造業	250
13 皮革、毛皮及其製品製造業	252
14 木竹製品製造業	269
15 紙漿、紙及紙製品製造業	265
16 印刷及資料儲存媒體複製業	254
17 石油及煤製品製造業	267
18 化學材料及肥料製造業	264
19 其他化學製品製造業	255
20 藥品及醫用化學製品製造業	261
21 橡膠製品製造業	271
22 塑膠製品製造業	265
23 非金屬礦物製品製造業	263
24 基本金屬製造業	270
25 金屬製品製造業	254
26 電子零組件製造業	274
27 電腦、電子產品及光學製品製造業	258
28 電力設備及配備製造業	263
29 機械設備製造業	252
30 汽車及其零件製造業	258
31 其他運輸工具及其零件製造業	261
32 家具製造業	248
33 其他製造業	256



台灣南部地區的水資源分配顯示了農業在當地的重要性。根據《2015 年農業灌溉白皮書》，南部地區的年總用水量達到 42 億噸，其中農業用水占據了絕大部分，達到 68%。這一數據突顯了農業生產對於當地經濟和民生的影響，同時也說明了農業灌溉在水資源管理中的關鍵角色。

此外，生活用水占總用水量的 19%，反映了日常生活和居民需求的穩定性。工業用水則占 13%，儘管比例相對較小，但依然是當地經濟活動中不可或缺的一部分。這種用水結構揭示了南部地區在發展經濟、滿足民生需求和維持農業生產

之間的微妙平衡。

臺灣分區各標的用水概況



資料來源：行政院農業委員會，2015，農業灌溉白皮書。

圖四、台灣分區各標的用水概況

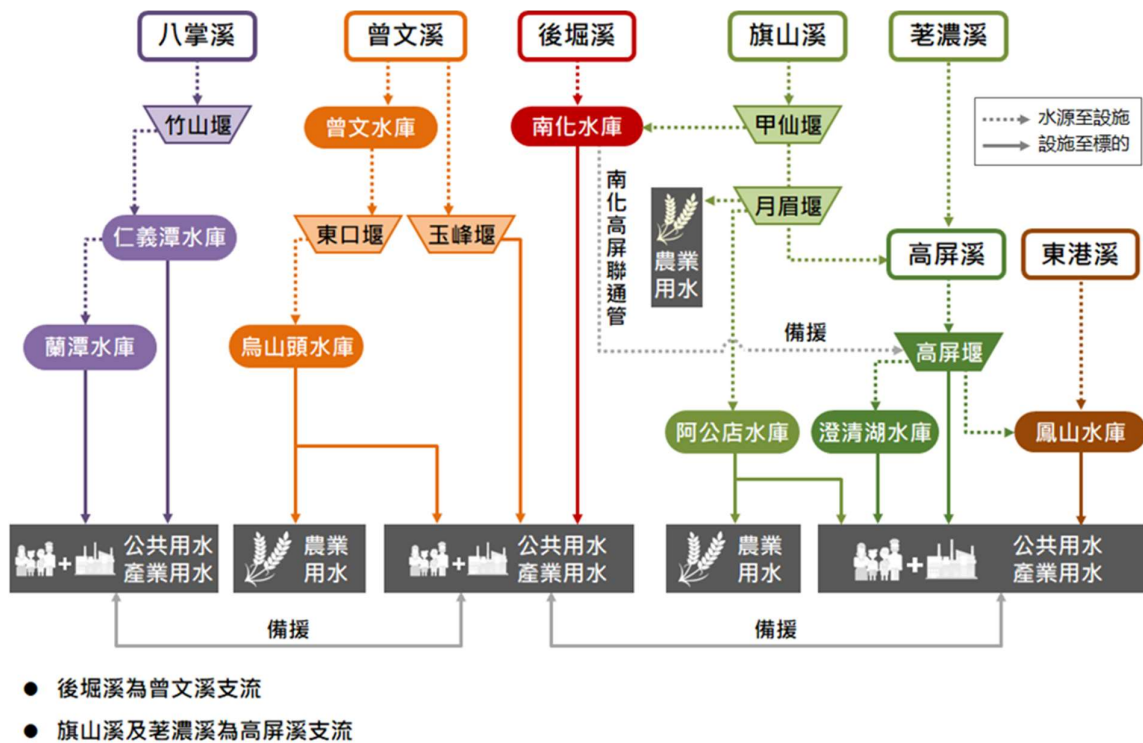
3.2.2 南部水資源跨系統調度

由於近年氣候變遷加劇，政府部門積極推動的珍珠串計畫，即是透過不同供水區域間彼此相通的聯接管，企圖達成跨域間水資源的調度及備援，降低枯水期間供水不足的狀況。

台灣各地的地理環境、氣候條件和水資源供給狀況各不相同。為此，水利署將水資源管理分成北、中、南、東區，以便根據不同地區的特性和需求，制定更具針對性和有效的水資源管理策略，以縮短反災害發生時的反應時間，減少災害對水資源所造成的影響。

本研究探討的對象為南部地區的水資源管理，涵蓋的範圍有嘉義縣（市）、台

南市、高雄市及屏東縣，如下圖五所示。範圍內的主要河流有八掌溪、曾文溪、後堀溪及高屏溪，分別連接仁義潭水庫、曾文—烏山頭水庫及南化水庫等重要蓄水設施，對水資源進行調節供給，如圖六所示。並且透過水庫間的聯通管線，實現穩定的供水網絡。

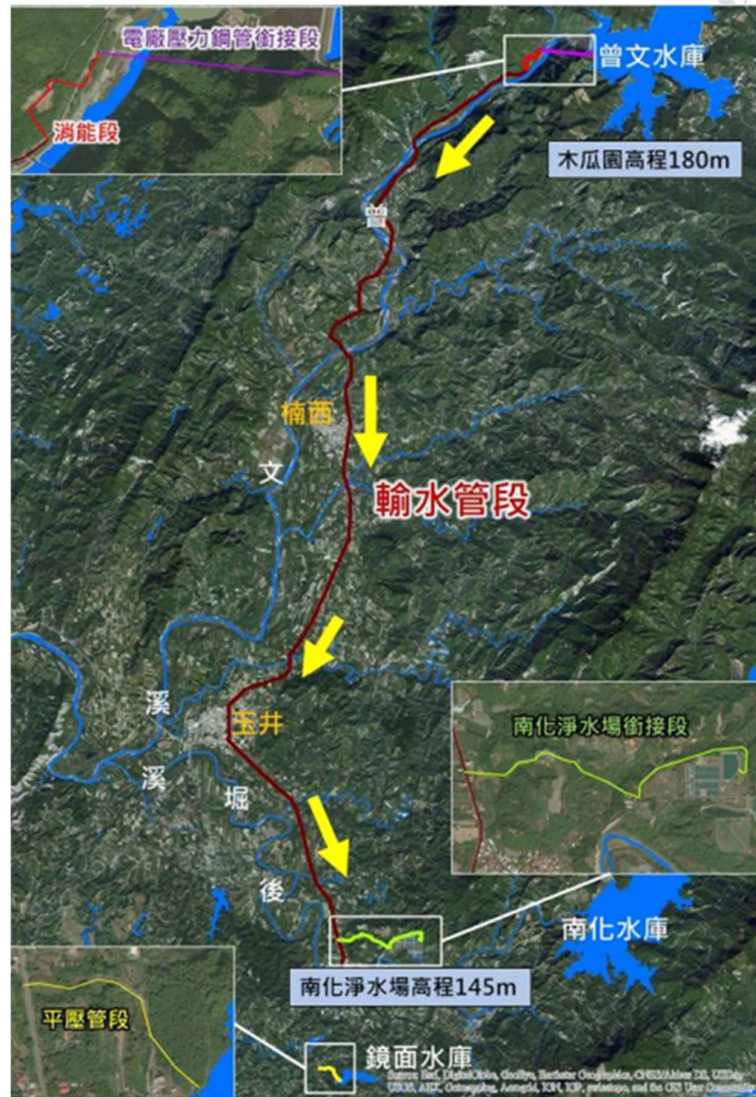


資料來源：水利署南區水資源分署。

圖五、南區水資源系統供需示意圖

其中，曾文南化聯通管串聯曾文水庫及南化淨水場，使台南地區得以在乾旱時期、南化水庫原水混濁時期供應高雄地區穩定用水(經濟部水利署南區水資源分署, 2018)，並在後續增加了 530 公尺的雙向備援管路，使南化水庫亦可經此管線支援曾文—烏山頭水庫(經濟部水利署南區水資源分署, 2022)，如下圖六所示；南

化高屏聯通管則連接南化水庫與高屏攔河堰，在枯水期及原水混濁時能從南化水庫調度水源供給高屏攔河堰。



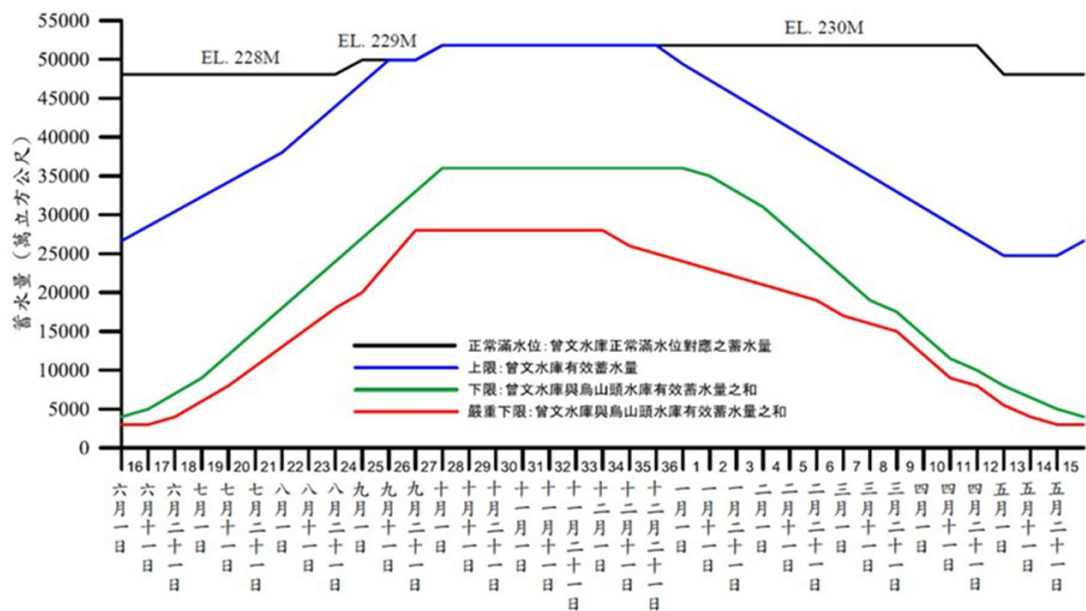
圖六、曾文南化聯通管路線示意圖

現行情況為嘉義地區用水需求全部由曾文水庫負責；台南地區用水需求 40% 由曾文水庫負責，60%由南化水庫負責；高雄地區用水需求則主要由高屏攔河堰負責，當面臨枯水期時則由南化水庫，透過南化高屏聯通管進行備援。

3.2.3 水庫操作

由於降雨季節分布不均，台灣中、南部地區多屬於荒溪型河川，導致時常面臨缺水的風險，因此多仰賴水庫調節，以提供穩定的水源。然而，當出現極端乾旱事件時，為避免嚴重缺水所可能造成的負面影響，水庫管理單位通常會採取限水措施，預先以一定的比例降低供水量，此一操作則仰賴水庫運用規線之制定。

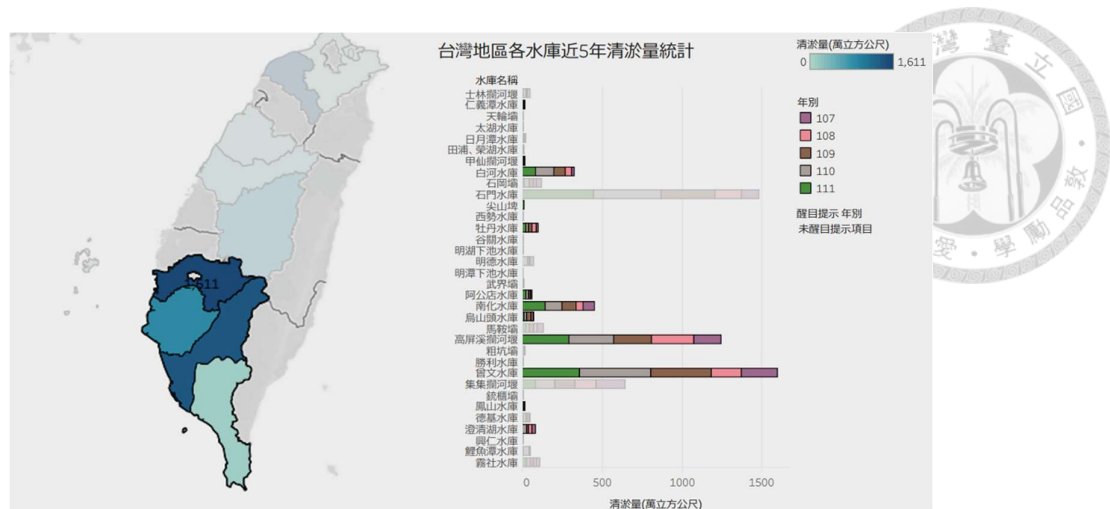
臺灣水庫運用規線多代表一年中不同時期，水庫蓄水量之豐枯情況，乃水庫進行蓄水、供水及防洪時的操作原則。水庫運用規線將蓄水量分成數個區間，當水庫蓄水量位於個別區間時則會採用不同的供水係數。以曾文—烏山頭水庫為例，其水庫串聯運用規線共有三條曲線，分別為上限、下限與嚴重下限，並將水庫蓄水量分為四個區間。當蓄水量超過上限時，依據用水標的需求超量供應；蓄水量位於上、下限之間時，依據用水標之基準量供水；蓄水量位於下限、嚴重下限之間時，家用及公共給水依據基準供水量供應，農業與工業用水則按照基準供水量之 75%供應；蓄水量位於嚴重下限之下時，家用及公共給水依據基準供水量之 80%供應，農業與工業用水則按照基準供水量之 50%供應。



圖七、曾文－烏山頭水庫串聯運用規線

由於台灣地形、氣候、土地利用形式及水土保持措施不足……等的原因，當遭遇強降雨或颱風時，大量泥沙容易隨著地表逕流沖入水庫，導致水庫淤積。水庫淤積帶來的負面影響主要有：(1) 降低有效庫容，進而減少水庫蓄水量、影響供水穩定。(2) 降低水庫的防洪能力，庫容降低意味著強降雨發生時，水庫的緩衝能力也一併降低，增加下游地區的洪患風險。(3) 增加水庫維護成本。

為了應對水庫淤積問題，政府採取了一系列的措施。近五年，政府辦理了 34 座水庫的清淤工作，累積清淤量達到 6,736 萬立方公尺，希望透過水庫清淤計畫，提升有效庫容的同時，確保供水穩定及防洪安全。清淤工作中，以曾文水庫的清淤量 1611 萬立方公尺最高，占總清淤量的 23.7%，其次是石門水庫的 1412 萬立方公尺及烏山頭水庫的 1481 萬立方公尺。



資料來源：水利署，互動式統計圖表。

圖八、(左) 台灣南區清淤面量圖；(右) 台灣南區水庫近五年清淤量統計圖。

總結來說，水庫淤積是由多種自然和人為因素共同作用的結果，其後果不僅影響供水和防洪，還增加了水庫維護成本。透過一系列的清淤措施和水土保持手段，可以有效減緩淤積問題，提升水庫的功能和安全性。

3.3 輸入資料處理

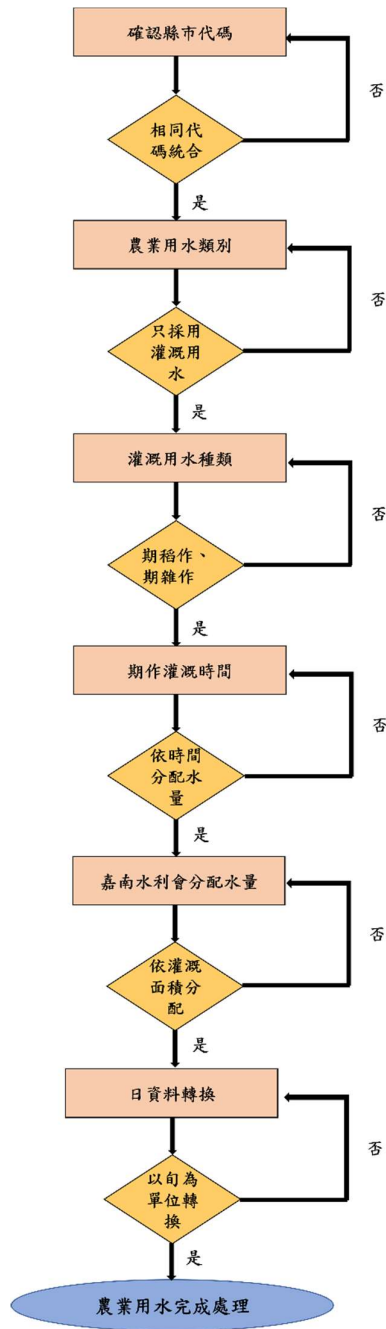
本節將詳細敘述輸入模型資料的處理過程。值得注意的是，由南區水庫供水之水量占了農業、公共及工業用水 31.93%、52.20%及 5.63%(水利署, 2023)。並且本研究旨在找出水庫水資源調配的最佳權重，因此本節之三種用水量都要以相應的比例進行調整。此外，歷史資料的時間範圍取自彼此相互重疊的部分，為民國 93 年至民國 109 年共 17 年的資料。

本研究所使用的流量歷史資料，採用自水利署防災資訊服務網(水利署, 2024)提供之水庫入流量。由於入流量為日資料，因此在對 Nan 及異常值進行補值後，

仍須轉換成以旬為單位的流量資料。

三種主要用水中，農業用水主要由灌溉用水、畜牧用水及養殖用水組成。其中畜牧用水及養殖用水大多使用地下水源，因此不列入本研究之農業用水類別。而灌溉用水分成一期及二期作，所對應的時間分別為 2/1~5/31 及 7/1~10/31。因此在計算用水量時，將一期雜作用水與一期稻作用水相加，並把相加後的用水量平均分配到已旬為單位的對應時間內；對於二期雜作與二期稻作也採用相同的方式，相加後將用水量平均分配到二期農作時間。並假設其餘時間內皆無灌溉用水需求，具體的資料處理流程如圖九所示。

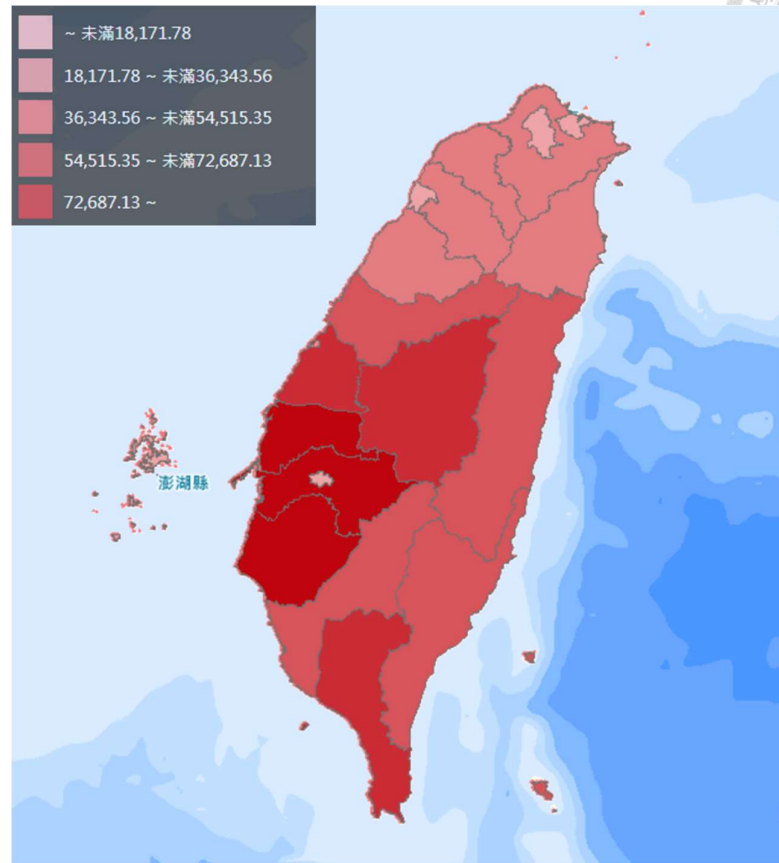




圖九、農業用水資料處理流程圖

此外，灌溉用水由於分配水資源組織的特性，分成了嘉南、高雄及屏東。為符合本研究所設定之子系統：台南、高雄，因此將嘉南地區用水量以嘉義及台南之歷

年灌溉面積比例進行分配，以此算得台南地區農業用水量。



資料來源：社會經濟資料統計地圖圖台

圖十、全台耕地面積（公頃）統計面量圖。

公共用水資料以水利署生活用水量統計資料中，自來水年用水量作為主要用水，再將年用水量資料轉換成以旬為單位的用水量資料。區域欄位中，台南市用水以台南市、台南縣（民國 99 年以前）以及台南市（民國 99 年以後）合併作為台南子系統用水；高雄市用水則合併高雄市及高雄縣作為高雄子系統用水。

工業用水量在區域合併上同公共用水量所用之方法。然而，由於工業用水採用面積估算法，和年工作日數緊密掛鉤，因此參考各業別年工作日數表（表二）後，

以週工作五天為基準，將工業年用水量平均分配至該年的工作天，並假設假日無任何用水量。完成此步驟後，再將日用水量轉換成以旬為單位的工業用水量。



第四章、結果與討論

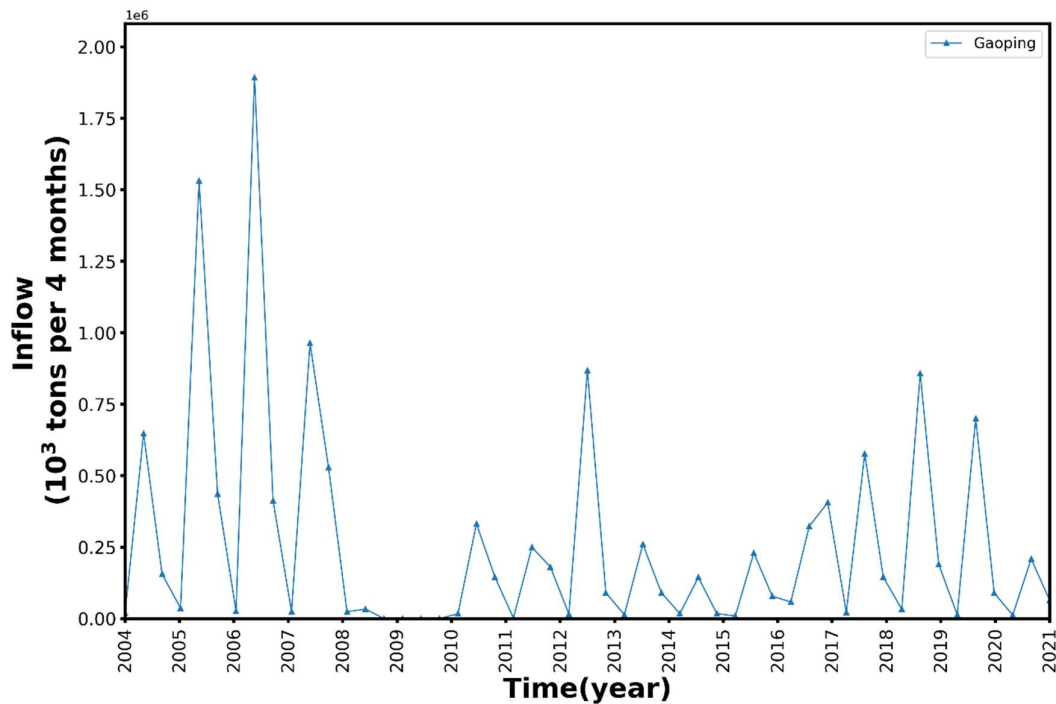


4.1 輸入資料

由於曾文南化聯通管及南化高屏聯通管的存在，使得本研究所界定的曾文—烏山頭水庫入流量、南化水庫入流量及高屏攔河堰流量得以供給至台南、高雄子系統，而對應分配水資源至子系統的權重為：

$$[w_{11}, w_{21}, w_{31}, w_{12}, w_{22}, w_{32}]$$

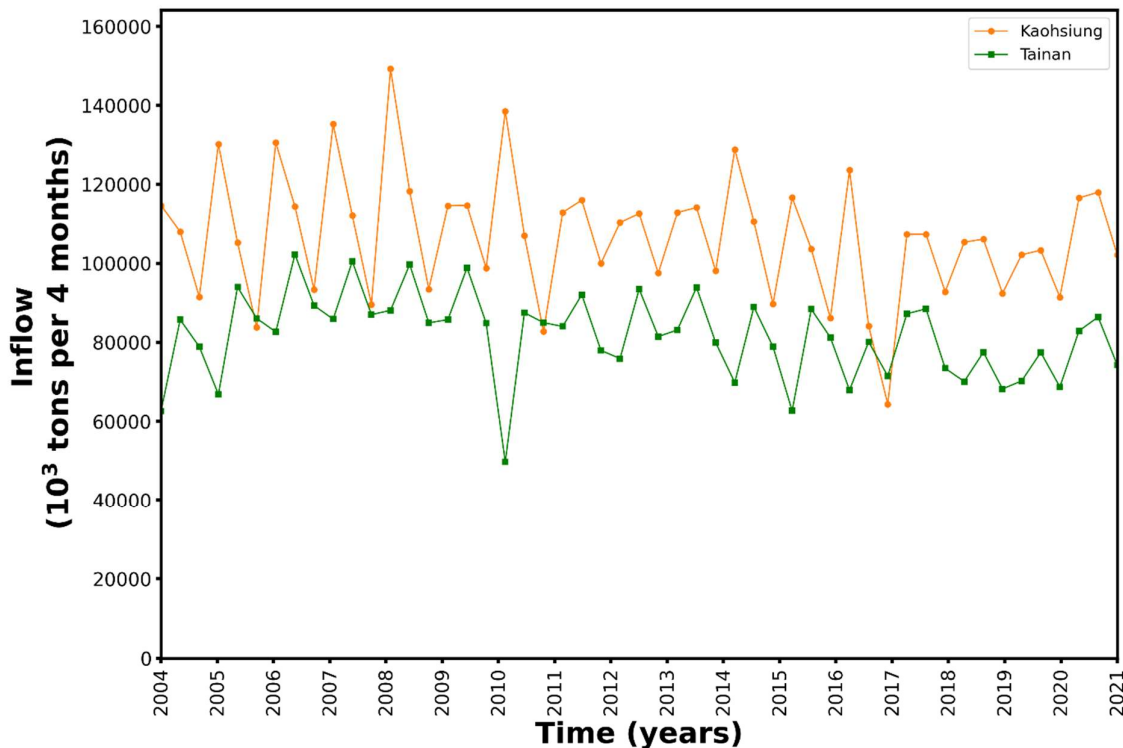
分別表示曾文、南化、高屏供水至台南及高雄。圖十一為本研究所使用之高屏攔河堰歷史資料，具有豐枯時期流量變化大的特性。



圖十一、高屏攔河堰歷史流量資料

圖十二為本研究中子系統的歷史需水量，包括了三種類型的用水，並以每四個

月為單位計算需水量。其中灌溉用水為主要影響子系統需水量上下起伏的因素。值得注意的是，台南於 2010、2015 年一至四月的用水量較同期更低的原因，為前一年度遭逢乾旱，一期農作停耕所致(農委會, 2021)。

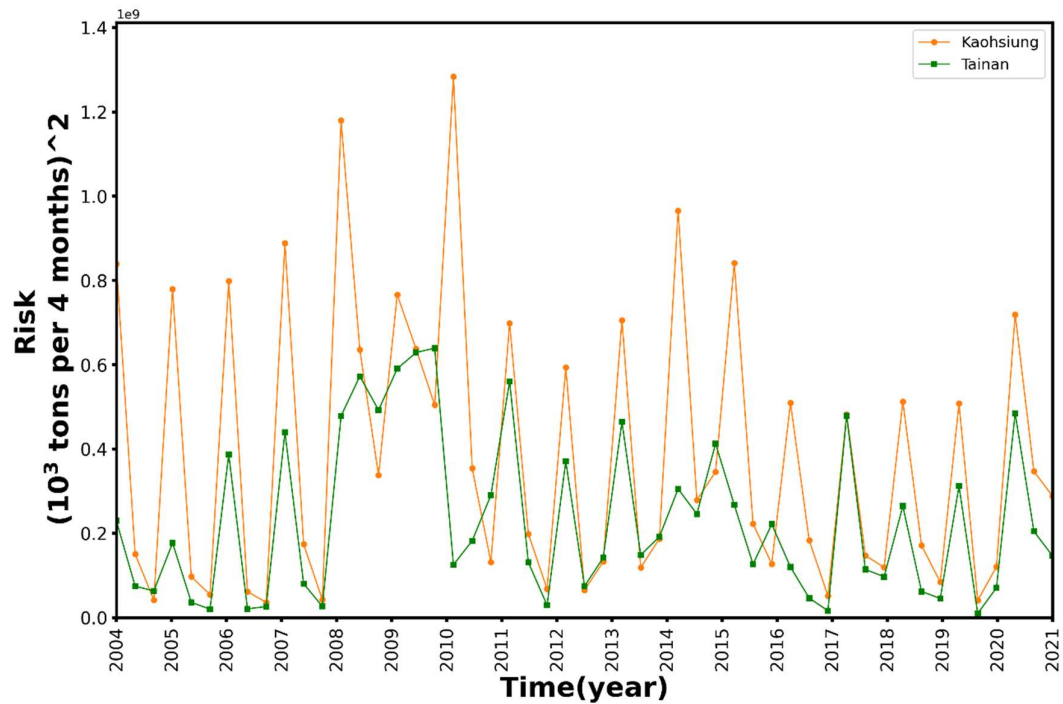


圖十二、子系統歷史需水量

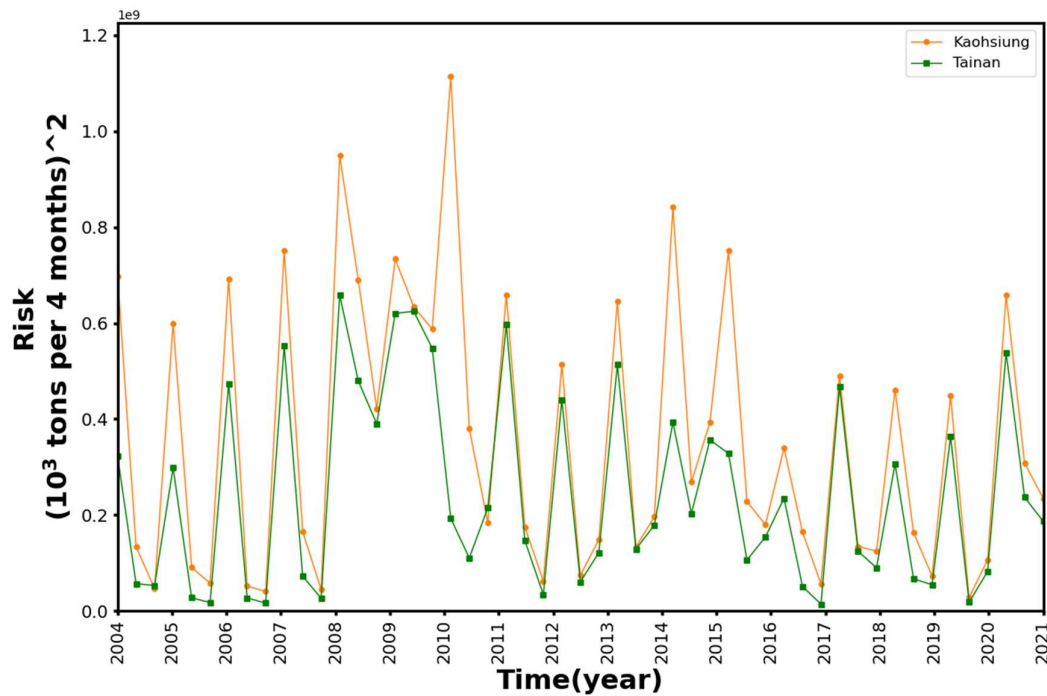
4.2 模型結果—時間變化對權重的影響

不分段之歷史資料最佳分配的權重 w_{11} , w_{21} , w_{31} , w_{12} , w_{22} , w_{32} 分別為 0.15, 0.60, 0.50, 0.85, 0.40, 0.50，表示最佳化的分配下，曾文水庫上游入流量分配給台南及高雄子系統的比例分別為 0.15 及 0.85；南化水庫分配給台南及高雄子系統的比例為 0.60 及 0.40，而高屏攔河堰分配給台南及高雄子系統的比例則各為 0.50，如表三所示。

下圖十三為不分段資料模擬之缺水風險圖，缺水峰值大部分落在年尾至隔年年初，和南部地區枯水期時間吻合。且相較於台南子系統，高雄子系統擁有更高的缺水風險，可能和其更不穩定的流量有關。



圖十三、歷史資料不分段進行最佳化結果。



圖十四、歷史資料分多段（68）進行最佳化之結果。

為探討分段數量 n 對風險造成的影響，本研究將 $X_n, n = 1, 2, \dots, 68$ 進行模式運算，所得結果如下表所示。表中，Risk 表示風險，權重 w_{11} 到 w_{32} 顯示最佳分配方式，在此只列出 X_n 中 n 個分段的第一段歷史資料，其最佳權重的變化。可以發現隨著分段數增加，風險有些微的下降直到 $n = 68$ 。當 $n = 18$ 時表示歷史資料是以每兩年進行分組；當 $n = 36$ 時則表示以一年為單位進行分組；當 $n = 68$ 時表示將 17 年的歷史資料分為 9 個組別。可能是因為該分組方式使得資料過於破碎，導致風險的上升。

表三可以更清楚地觀察權重變化趨勢，觀察權重 w_{11} 到 w_{32} 可以發現，儘管 w_{11} 隨著 n 的提升而有增加，但數值上仍是六個權重中最底的；與之互補的是 w_{12} 有一定程度的升高。 w_{11} 較底的數值代表著曾文水庫上游的流量，更適合分配給高雄子

系統以降低風險；或是換句話說， w_{12} 明顯較高的數值代表著曾文水庫上游流量和高雄子系統之需水量有更好的互補性，也因此較高的權重分配能使風險降低。



表三、不同分段數 n 對應風險及權重（第一切分）之變化

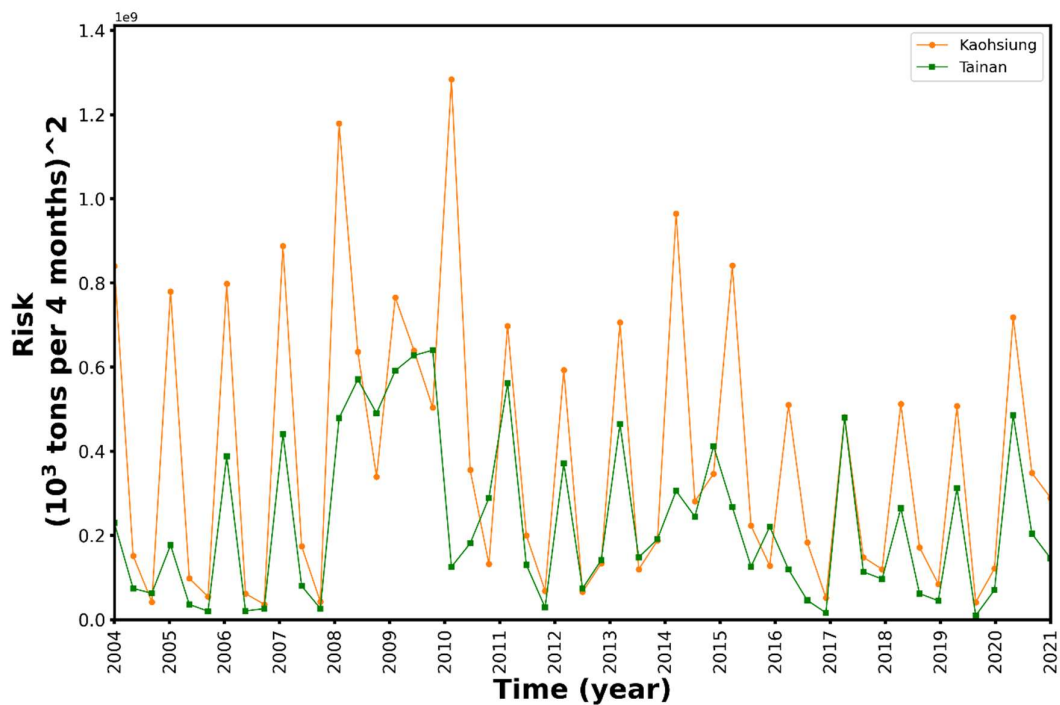
n 值	1	2	3	4	6	12	18	36	68
Risk	3.138×10^{10}	3.138×10^{10}	3.139×10^{10}	3.134×10^{10}	3.128×10^{10}	3.128×10^{10}	3.128×10^{10}	3.081×10^{10}	4.640×10^{10}
w_{11}	.15	.17	.19	.19	.27	.02	.28	0	0
w_{21}	.60	.62	.61	.51	.39	.51	.39	1	0
w_{31}	.50	.50	.50	.50	.51	.50	.50	.25	0
w_{12}	.85	.83	.81	.81	.73	.98	.72	1	1
w_{22}	.40	.38	.39	.49	.61	.49	.61	0	1
w_{32}	.50	.50	.50	.50	.49	.50	.50	.75	1

表四、不同分段數 n 對應權重之變化

n 值	1	2		3			4			
w_{11}	.15	.17	.14	.19	.13	.14	.19	.14	.17	.10
w_{21}	.60	.62	.56	.61	.67	.58	.51	.66	.54	.43
w_{31}	.50	.50	.50	.50	.50	.50	.50	.50	.51	.50

4.3 模型結果－特定時間區間對權重的影響

為探討不同時間段等容易對水文產生影響的因素，本研究將 X_n 以灌溉及休耕兩個時間段來進行分段，依序分別為每年的 2 至 5 月、7 至 10 月，以及 1 月、6 月與 11 至 12 月，則模擬出的風險如下圖所示。其中 $n = 1$ 時的最佳分配的權重 w_{11} , w_{21} , w_{31} , w_{12} , w_{22} , w_{32} 分別為 0.15, 0.61, 0.50, 0.85, 0.39, 0.50，和不分段歷史資料最佳化之權重相差不大，且同樣具有隨分段數量增加而上升的趨勢。但總體來說較小的 w_{11} 值依然表示，由曾文水庫入流的水量分配給高雄子系統，更有助於降低整體的風險。



圖十五、依灌溉季節分段輸入模式之風險圖。

在風險方面，和不分段歷史資料相比，依灌溉與休耕時間分段可以降低風險，



但在繼續針對 X_n 進行分段對於整體風險僅有小幅的減少，可能是因為依灌溉季節分段的水資源分配方式，使上游流量和子系統在模式中更容易達成水資源的互補，並有效降低風險。

w_{21} 在權重中有較為特殊的表現：在灌溉期與休耕期的表現相反。灌溉期的 w_{21} 幾乎都 > 0.5 ，表示在需水量大的時候南化水庫也有較高的入流量，能給台南子系統提供水源；反觀休耕期的 w_{21} 幾乎都 < 0.5 ，顯示在需水量較小的一般時期，南化水庫的最佳化分配會以更高的比例支援高雄子系統。

表五、不同分段數 n 對應風險及權重（第一切分）之變化

n 值	1	2	3	4	6	12
Risk	3.136×10^{10}	3.136×10^{10}	3.137×10^{10}	3.134×10^{10}	3.132×10^{10}	3.122×10^{10}
w_{11}	.15	.17	.19	.18	.25	0
w_{21}	.61	.63	.62	.45	.25	.66
w_{31}	.50	.50	.50	.51	.51	.50
w_{12}	.85	.83	.81	.82	.75	1
w_{22}	.39	.37	.38	.55	.75	.34
w_{32}	.50	.50	.50	.49	.49	.50

表六、不同分段數 n 對應權重之變化（灌溉）

n 值	1	2	3	4
-----	---	---	---	---

w_{11}	.15	.17	.14	.19	.13	.13	.18	.15	.17	.09
w_{21}	.61	.63	.57	.62	.61	.61	.45	.67	.55	.53
w_{31}	.50	.50	.50	.50	.50	.50	.50	.50	.50	.50

表七、不同分段數 n 對應權重之變化（休耕）

n 值	1	2		3			4			
w_{11}	.13	.15	.13	.16	.10	.14	.17	.12	.13	.13
w_{21}	.36	.42	.19	.44	.23	.24	.54	.30	.03	.25
w_{31}	.50	.50	.50	.50	.50	.50	.50	.50	.51	.50

4.4 敏感度分析

為了了解供水至各子系統的分配權重對風險的影響，本研究將針對各權重進行敏感度分析。具體流程如下：

(1) 時間變化對權重影響分析：

根據前節結果，找出時間變化下的最佳化權重。然後，針對這些最佳化權重，逐一進行數值增減。

(2) 單一權重調整：

在調整某一權重數值的同時，保持其他權重不變，以確保變化僅來自該單一權重的變動。

(3) 觀察風險變化：

觀察和記錄權重變化對風險的影響程度。記錄每次調整後的風險變化情況，找出權重變動對風險影響最大的因素。

(4) 特定時間區間分析：

針對特定的時間區間重複上述步驟。通過對特定時間區間的敏感度分析，了解在不同時間段內權重變化對風險的影響是否存在差異。

首先時間無變化 ($n = 1$) 下的最佳化權重 w_{11} , w_{21} , w_{31} , w_{12} , w_{22} , w_{32} 為 0.154, 0.602, 0.502, 0.846, 0.398, 0.498。接著針對特定權重增加或減少 0.08，並觀察風險變化百分比，如表八所示。由於每個權重都會有對應加總為 1 的權重，因此為了使表格能更簡潔，表八中僅列出前三個權重。

表中權重欄位表示該權重增減後的數值，一旁的風險欄則為對應的風險變化百分比。表中文字說明當某一個權重變化時，其餘權重(除了對應權重)皆為定值，以利比較風險變化。在 $n = 1$ 時 w_{11} 從最佳的權重值 0.154 變化到 0.954，並使風險增加了 12%； w_{21} 從最佳權重值 0.602 變化到 0.122，使風險增加了 1%； w_{31} 則從最佳權重值 0.502 變化到 0.022，使風險增加了 23%。以變化程度來說，相較於 w_{11} , w_{31} 以更小的變化量造成了更大的風險增幅，因此該情境下 w_{31} 對風險的變化更加敏感。

表八、時間無變化 ($n = 1$) 下權重－風險變化表

Fix The Other Two Parameters					
w_{11}	Risk	w_{21}	Risk	w_{31}	Risk
0.154	100%	0.602	100%	0.502	100%
0.074	100%	0.522	100%	0.422	100%
0.154	100%	0.442	100%	0.342	101%
0.234	100%	0.362	100%	0.262	102%
0.314	101%	0.282	100%	0.182	105%
0.394	102%	0.202	100%	0.102	111%
0.474	103%	0.122	101%	0.022	123%
0.554	104%	0.042	101%	0.502	100%
0.634	105%	0.602	100%	0.582	101%
0.714	107%	0.682	100%	0.662	103%
0.794	108%	0.762	100%	0.742	105%

0.874	110%	0.842	100%	0.822	109%
0.954	112%	0.922	100%	0.902	115%



時間變化下($n = 2$, 第一部分)下的最佳化權重 w_{11} , w_{21} , w_{31} , w_{12} , w_{22} , w_{32} 為0.171, 0.619, 0.502, 0.829, 0.381, 0.498, 同樣對權重進行增減變化, 相應的風險變化結果如表九所示。其中 w_{11} 從 0.171 變化到 0.971, 風險增加了 12%; w_{21} 從 0.619 變化到 0.059, 風險增加了 2%; w_{31} 從 0.502 變化到 0.902, 風險增加了 13%。以變化程度來說, w_{31} 以較小的變化造成了更大的風險變化, 因此 w_{31} 在該時間段對風險變化更敏感。

表九、時間變化下 ($n = 2$, 第一部分) 下權重—風險變化表

Fix The Other Two Parameters					
w_{11}	Risk	w_{21}	Risk	w_{31}	Risk
0.171	100%	0.619	100%	0.502	100%
0.091	100%	0.539	100%	0.422	100%
0.171	100%	0.459	100%	0.342	100%
0.251	100%	0.379	100%	0.262	101%
0.331	101%	0.299	101%	0.182	104%
0.411	102%	0.219	101%	0.102	109%
0.491	103%	0.139	101%	0.022	120%
0.571	104%	0.059	102%	0.502	100%
0.651	105%	0.619	100%	0.582	101%
0.731	106%	0.699	100%	0.662	102%
0.811	108%	0.779	100%	0.742	105%
0.891	110%	0.859	100%	0.822	108%
0.971	112%	0.939	100%	0.902	113%

時間變化下($n = 2$, 第二部分)下的最佳化權重 w_{11} , w_{21} , w_{31} , w_{12} , w_{22} , w_{32} 為0.144, 0.560, 0.502, 0.856, 0.440, 0.498, 同樣對權重進行增減變化, 相應的風險變化結果如表十所示。其中 w_{11} 從 0.144 變化到 0.944, 風險增加了 13%; w_{21} 從 0.560

變化到 0.960，風險增加了 1%； w_{31} 從 0.502 變化到 0.902，風險增加了 18%。以變化程度來說， w_{31} 以較小的變化造成了更大的風險變化，因此 w_{31} 在該時間段同樣對風險變化更敏感。



表十、時間變化下 ($n = 2$ ，第二部分) 下權重－風險變化表

Fix The Other Two Parameters					
w_{11}	Risk	w_{21}	Risk	w_{31}	Risk
0.144	100%	0.560	100%	0.502	100%
0.064	100%	0.480	100%	0.422	100%
0.144	100%	0.400	100%	0.342	101%
0.224	100%	0.320	100%	0.262	104%
0.304	101%	0.240	100%	0.182	108%
0.384	102%	0.160	100%	0.102	115%
0.464	103%	0.080	100%	0.022	127%
0.544	104%	0.560	100%	0.502	100%
0.624	105%	0.640	100%	0.582	101%
0.704	107%	0.720	100%	0.662	103%
0.784	109%	0.800	100%	0.742	107%
0.864	111%	0.880	100%	0.822	111%
0.944	113%	0.960	101%	0.902	118%

時間變化下 ($n = 3$) 三部分的權重－風險變化如表十一至表十三所示。可以觀察到三個部分中 w_{11} 造成的風險變化為 7%~15%； w_{21} 造成的風險變化為 0%~2%； w_{31} 造成的風險變化為 14%~39%，且最具有風險變化敏感度。

時間無變化、兩種時間變化下 ($n = 2, 3$) 皆顯示 w_{31} 具有最大的風險變化敏感度，且最大可能造成 39% 的風險增加； w_{11} 具有中等程度的風險變化敏感度，且最大可能造成 15% 的風險增加；相較之下 w_{21} 則幾乎沒有風險變化敏感度，改變其數值對於風險影響不大。

表十一、時間變化下 ($n = 3$ ，第一部分) 下權重－風險變化表



Fix The Other Two Parameters					
w_{11}	Risk	w_{21}	Risk	w_{31}	Risk
0.191	100%	0.609	100%	0.503	100%
0.111	100%	0.529	100%	0.423	100%
0.031	100%	0.449	100%	0.343	100%
0.191	100%	0.369	100%	0.263	101%
0.271	100%	0.289	101%	0.183	104%
0.351	101%	0.209	101%	0.103	109%
0.431	102%	0.129	102%	0.023	121%
0.511	103%	0.049	102%	0.503	100%
0.591	104%	0.609	100%	0.583	101%
0.671	106%	0.689	100%	0.663	103%
0.751	107%	0.769	100%	0.743	105%
0.831	109%	0.849	100%	0.823	108%
0.911	111%	0.929	100%	0.903	114%

表十二、時間變化下 ($n = 3$ ，第二部分) 下權重－風險變化表

Fix The Other Two Parameters					
w_{11}	Risk	w_{21}	Risk	w_{31}	Risk
0.125	100%	0.673	100%	0.497	100%
0.045	100%	0.593	100%	0.417	100%
0.125	100%	0.513	100%	0.337	101%
0.205	100%	0.433	100%	0.257	103%
0.285	101%	0.353	100%	0.177	106%
0.365	101%	0.273	100%	0.097	110%
0.445	102%	0.193	100%	0.497	100%
0.525	103%	0.113	100%	0.577	101%
0.605	104%	0.033	100%	0.657	102%
0.685	105%	0.673	100%	0.737	104%
0.765	107%	0.753	100%	0.817	107%
0.845	108%	0.833	100%	0.897	112%
0.925	110%	0.913	100%	0.977	122%

表十三、時間變化下 ($n = 3$ ，第三部分) 下權重－風險變化表

Fix The Other Two Parameters					
w_{11}	Risk	w_{21}	Risk	w_{31}	Risk
0.143	100%	0.583	100%	0.500	100%
0.063	100%	0.503	100%	0.420	100%
0.143	100%	0.423	100%	0.340	101%

0.223	100%	0.343	100%	0.260	104%
0.303	101%	0.263	100%	0.180	109%
0.383	102%	0.183	100%	0.100	116%
0.463	103%	0.103	100%	0.500	100%
0.543	105%	0.023	100%	0.580	102%
0.623	106%	0.583	100%	0.660	104%
0.703	108%	0.663	100%	0.740	109%
0.783	110%	0.743	100%	0.820	114%
0.863	112%	0.823	100%	0.900	123%
0.943	115%	0.903	100%	0.980	139%



接下來將探討特定時間區間下，權重的敏感度分析。在此選擇的時間段依然是灌溉時期 2 至 5 月及 7 至 10 月，此時間段以外的時間段視為休耕。則將歷史資料區分成灌溉期與休耕期後，不額外進行時期切分，即 $n = 1$ 的情形下作敏感度分析。

灌溉時期且無額外進行時間切割情況的最佳化權重 w_{11} , w_{21} , w_{31} , w_{12} , w_{22} , w_{32} 為 0.151, 0.615, 0.504, 0.849, 0.385, 0.496。如同前面的做法，依然對個別權重進行大小為 0.08 的加減，同時固定其餘權重，再計算該組權重下的風險值，迭代進行上述步驟後比較權重與風險變化量，以此進行權重對風險的敏感度分析。結果如表十四及表十五所示。

在灌溉時期， w_{11} 的數值從 0.151 變化到 0.951，對應的使風險增加了 11%； w_{12} 的數值從 0.615 變化到 0.055，使對應風險略增 1%； w_{31} 從 0.504 變化到 0.024，對應的使風險增加了 23%。

在休耕時期， w_{11} 的數值從 0.135 變化到 0.935，使風險增加了 24%； w_{21} 的數值從 0.362 變化到 0.922，使得相應風險增加了 2%； w_{31} 的數值從 0.503 變化到 0.903，使相應風險增加了 28%。在此情形下， w_{11} 及 w_{31} 皆具備一定的風險敏感度。出現權重的改變即有可能導致風險大幅提升。



表十四、特定時間區間（ $n = 1$ 灌溉）下權重－風險變化表

Fix The Other Two Parameters					
w_{11}	Risk	w_{21}	Risk	w_{31}	Risk
0.151	100%	0.615	100%	0.504	100%
0.071	100%	0.535	100%	0.424	100%
0.151	100%	0.455	100%	0.344	101%
0.231	100%	0.375	100%	0.264	103%
0.311	101%	0.295	100%	0.184	106%
0.391	101%	0.215	101%	0.104	111%
0.471	102%	0.135	101%	0.024	123%
0.551	103%	0.055	101%	0.504	100%
0.631	105%	0.615	100%	0.584	101%
0.711	106%	0.695	100%	0.664	102%
0.791	108%	0.775	100%	0.744	105%
0.871	109%	0.855	100%	0.824	108%
0.951	111%	0.935	100%	0.904	114%

表十五、特定時間區間（ $n = 1$ 休耕）下權重－風險變化表

Fix The Other Two Parameters					
w_{11}	Risk	w_{21}	Risk	w_{31}	Risk
0.135	100%	0.362	100%	0.503	100%
0.055	100%	0.282	100%	0.423	100%
0.135	100%	0.202	100%	0.343	100%
0.215	100%	0.122	100%	0.263	100%
0.295	101%	0.042	100%	0.183	102%
0.375	102%	0.362	100%	0.103	106%
0.455	104%	0.442	100%	0.023	114%
0.535	106%	0.522	100%	0.503	100%
0.615	109%	0.602	101%	0.583	103%
0.695	112%	0.682	101%	0.663	107%
0.775	116%	0.762	101%	0.743	112%
0.855	120%	0.842	101%	0.823	119%
0.935	124%	0.922	102%	0.903	128%

接著討論以灌溉及休耕作為特定時期、 $n = 2$ 的權重－風險敏感度分析。將資料以灌溉期與否區分成兩部份後，再將資料進一步細分成兩個部分。灌溉時期的第一部份及第二部份， w_{31} 隨著數值變化呈現較為明顯的風險敏感度，且最多可能增

加 20% 的風險； w_{11} 依然呈現一定程度的風險敏感度，但相較於 w_{31} 要小的多；而 w_{21} 呈現最弱的風險敏感度，數值的增減對於風險的影響不大。



表十六、特定時間區間（ $n = 2$ 灌溉，第一部份）下權重－風險變化表

Fix The Other Two Parameters					
w_{11}	Risk	w_{21}	Risk	w_{31}	Risk
0.168	100%	0.634	100%	0.504	100%
0.088	100%	0.554	100%	0.424	100%
0.168	100%	0.474	100%	0.344	100%
0.248	100%	0.394	100%	0.264	102%
0.328	101%	0.314	101%	0.184	104%
0.408	102%	0.234	101%	0.104	109%
0.488	102%	0.154	101%	0.024	120%
0.568	103%	0.074	102%	0.504	100%
0.648	104%	0.634	100%	0.584	101%
0.728	106%	0.714	100%	0.664	102%
0.808	107%	0.794	100%	0.744	104%
0.888	109%	0.874	100%	0.824	107%
0.968	111%	0.954	100%	0.904	112%

表十七、特定時間區間（ $n = 2$ 灌溉，第二部份）下權重－風險變化表

Fix The Other Two Parameters					
w_{11}	Risk	w_{21}	Risk	w_{31}	Risk
0.143	100%	0.575	100%	0.503	100%
0.063	100%	0.495	100%	0.423	100%
0.143	100%	0.415	100%	0.343	102%
0.223	100%	0.335	100%	0.263	104%
0.303	101%	0.255	100%	0.183	109%
0.383	102%	0.175	100%	0.103	115%
0.463	102%	0.095	100%	0.023	128%
0.543	104%	0.575	100%	0.503	100%
0.623	105%	0.655	100%	0.583	101%
0.703	106%	0.735	100%	0.663	103%
0.783	108%	0.815	100%	0.743	106%
0.863	110%	0.895	100%	0.823	110%
0.943	112%	0.975	101%	0.903	117%



到了休耕時期的兩個部份， w_{11} 及 w_{31} 皆呈現了一定程度的風險敏感度。隨著兩者數值的變化，風險的變化幅度最大可能到 24% 及 32%。反觀 w_{21} 仍然呈現較為若的風險敏感度，

表十八、特定時間區間（ $n = 2$ 休耕，第一部份）下權重－風險變化表

Fix The Other Two Parameters					
w_{11}	Risk	w_{21}	Risk	w_{31}	Risk
0.147	100%	0.423	100%	0.502	100%
0.067	100%	0.343	100%	0.422	99%
0.147	100%	0.263	100%	0.342	99%
0.227	100%	0.183	100%	0.262	100%
0.307	101%	0.103	100%	0.182	102%
0.387	102%	0.023	100%	0.102	105%
0.467	104%	0.423	100%	0.022	112%
0.547	107%	0.503	100%	0.502	100%
0.627	109%	0.583	100%	0.582	102%
0.707	112%	0.663	101%	0.662	106%
0.787	116%	0.743	101%	0.742	110%
0.867	120%	0.823	101%	0.822	115%
0.947	124%	0.903	102%	0.902	123%

表十九、特定時間區間（ $n = 2$ 休耕，第二部份）下權重－風險變化表

Fix The Other Two Parameters					
w_{11}	Risk	w_{21}	Risk	w_{31}	Risk
0.127	100%	0.188	100%	0.505	100%
0.047	100%	0.108	100%	0.425	98%
0.127	100%	0.028	100%	0.345	99%
0.207	100%	0.188	100%	0.265	100%
0.287	101%	0.268	100%	0.185	103%
0.367	102%	0.348	100%	0.105	109%
0.447	104%	0.428	101%	0.025	118%
0.527	106%	0.508	101%	0.505	100%
0.607	109%	0.588	101%	0.585	103%
0.687	112%	0.668	101%	0.665	108%
0.767	116%	0.748	101%	0.745	114%
0.847	119%	0.828	102%	0.825	121%
0.927	124%	0.908	102%	0.905	132%



最後討論將灌溉及休耕兩個時期，各自再分成 3 份時間的權重變化與風險關係。灌溉時間段的三個部份中， w_{31} 隨著其自身數值變化，可能增加的風險為 22%、20% 及 32% 屬於三者中最為風險敏感的權重； w_{11} 亦呈現一定的風險敏感度，隨著數值變化，可能增加的風險分別為 10%、9% 及 13%。 w_{21} 依然作為風險不敏感的權重，可能增加的風險介於 0%~2%。

表二十、特定時間區間（ $n = 3$ 灌溉，第一部份）下權重－風險變化表

Fix The Other Two Parameters					
w_{11}	Risk	w_{21}	Risk	w_{31}	Risk
0.191	100%	0.622	100%	0.505	100%
0.111	100%	0.542	100%	0.425	100%
0.031	100%	0.462	100%	0.345	100%
0.191	100%	0.382	100%	0.265	101%
0.271	100%	0.302	101%	0.185	104%
0.351	101%	0.222	101%	0.105	109%
0.431	102%	0.142	102%	0.025	122%
0.511	103%	0.062	102%	0.505	100%
0.591	104%	0.622	100%	0.585	101%
0.671	105%	0.702	100%	0.665	102%
0.751	107%	0.782	100%	0.745	104%
0.831	109%	0.862	100%	0.825	107%
0.911	110%	0.942	100%	0.905	113%

表二十一、特定時間區間（ $n = 3$ 灌溉，第二部份）下權重－風險變化表

Fix The Other Two Parameters					
w_{11}	Risk	w_{21}	Risk	w_{31}	Risk
0.129	100%	0.608	100%	0.505	100%
0.049	100%	0.528	100%	0.425	100%
0.129	100%	0.448	100%	0.345	101%
0.209	100%	0.368	100%	0.265	103%
0.289	100%	0.288	100%	0.185	106%
0.369	101%	0.208	100%	0.105	111%
0.449	101%	0.128	100%	0.025	120%

0.529	102%	0.048	101%	0.505	100%
0.609	103%	0.608	100%	0.585	100%
0.689	104%	0.688	100%	0.665	102%
0.769	106%	0.768	100%	0.745	104%
0.849	107%	0.848	100%	0.825	107%
0.929	109%	0.928	100%	0.905	112%



表二十二、特定時間區間（ $n = 3$ 灌溉，第三部份）下權重－風險變化表

Fix The Other Two Parameters					
w_{11}	Risk	w_{21}	Risk	w_{31}	Risk
0.134	100%	0.609	100%	0.501	100%
0.054	100%	0.529	100%	0.421	100%
0.134	100%	0.449	100%	0.341	102%
0.214	100%	0.369	100%	0.261	105%
0.294	101%	0.289	100%	0.181	109%
0.374	102%	0.209	100%	0.101	116%
0.454	103%	0.129	100%	0.021	132%
0.534	104%	0.049	100%	0.501	100%
0.614	106%	0.609	100%	0.581	101%
0.694	107%	0.689	100%	0.661	104%
0.774	109%	0.769	100%	0.741	107%
0.854	111%	0.849	100%	0.821	112%
0.934	113%	0.929	100%	0.901	120%

休耕時期的三個時間段中， w_{11} 及 w_{31} 呈現非常高的風險敏感度。這點和休耕時期 $n = 1, 2$ 的情形十分類似，表示在水資源相對匱乏的休耕期間，水資源間的調度支援具有很高的風險敏感度。意即，水資源調配偏離最佳分配權重時，所遭遇到的風險增幅將會比平時來得大的多。與之對比，相同的權重變化幅度，舉灌溉第一部份作為例子，從 0.5 左右增長到 0.665，所面臨的風險增幅僅僅只有 2%。而休耕第一部份的權重，從 0.5 增長到 0.662，所面臨的風險增幅就有 8%。

表二十三、特定時間區間（ $n = 3$ 休耕，第一部份）下權重－風險變化表

Fix The Other Two Parameters					
w_{11}	Risk	w_{21}	Risk	w_{31}	Risk



0.164	100%	0.438	100%	0.502	100%
0.084	100%	0.358	100%	0.422	98%
0.164	100%	0.278	100%	0.342	98%
0.244	100%	0.198	100%	0.262	99%
0.324	101%	0.118	100%	0.182	102%
0.404	103%	0.038	100%	0.102	107%
0.484	105%	0.438	100%	0.022	116%
0.564	108%	0.518	100%	0.502	100%
0.644	111%	0.598	101%	0.582	103%
0.724	115%	0.678	101%	0.662	108%
0.804	119%	0.758	101%	0.742	113%
0.884	124%	0.838	102%	0.822	121%
0.964	129%	0.918	103%	0.902	131%

表二十四、特定時間區間（ $n = 3$ 休耕，第二部份）下權重－風險變化表

Fix The Other Two Parameters					
w_{11}	Risk	w_{21}	Risk	w_{31}	Risk
0.097	100%	0.233	100%	0.505	100%
0.177	100%	0.153	100%	0.425	99%
0.257	101%	0.073	100%	0.345	99%
0.337	102%	0.233	100%	0.265	100%
0.417	103%	0.313	100%	0.185	101%
0.497	105%	0.393	100%	0.105	104%
0.577	107%	0.473	100%	0.025	109%
0.657	110%	0.553	100%	0.505	100%
0.737	112%	0.633	101%	0.585	101%
0.817	115%	0.713	101%	0.665	103%
0.897	119%	0.793	101%	0.745	106%
0.977	122%	0.873	101%	0.825	110%
0.097	100%	0.953	101%	0.905	115%

表二十五、特定時間區間（ $n = 3$ 休耕，第三部份）下權重－風險變化表

Fix The Other Two Parameters					
w_{11}	Risk	w_{21}	Risk	w_{31}	Risk
0.144	100%	0.237	100%	0.504	100%
0.064	100%	0.157	100%	0.424	98%
0.144	100%	0.077	100%	0.344	98%
0.224	100%	0.237	100%	0.264	100%
0.304	101%	0.317	100%	0.184	105%
0.384	103%	0.397	100%	0.104	112%

0.464	104%	0.477	101%	0.024	123%
0.544	107%	0.557	101%	0.504	100%
0.624	109%	0.637	101%	0.584	104%
0.704	113%	0.717	102%	0.664	110%
0.784	116%	0.797	102%	0.744	118%
0.864	120%	0.877	102%	0.824	127%
0.944	125%	0.957	103%	0.904	140%



透過敏感度分析這樣的分析流程可以幫助我們更準確地了解各子系統的供水分配權重對整體風險的影響，從而為供水系統的風險管理和決策提供依據。

第五章、 結論與建議



本研究採用了現代投資組合理論對於風險的概念，結合水資源系統管理問題，發展出了一套可以解決水資源調度分配的數學模型。並透過建立南區水資源系統模型，嘗試以此數學模型解決實務問題。以下為應用模型於實際資料所得結論。

5.1 結論

本研究開發了一種數學模型，用於處理具有串接特性的水資源調度問題，並能根據歷史資料和不同情境提供相應的調度權重。透過選定不同時間區間的流量資料，能產出調度權重及風險，因此能依據目的定義不同的氣候情境，並找出對應的條件下的流量資料，再透過輸入模型找到該情境下的水資源供給策略。此外，通過縮短模擬資料或按時期區分資料，模型能夠生成更精細的水資源調度權重，從而降低風險。進一步的敏感度分析顯示了特定權重對於高風險情境的敏感程度，因此可以針對這些高風險高敏感的子系統進行預防和補救。在應用本模型時，需要注意模擬資料應根據實際情況進行合理縮短和區分，而不是盲目地縮短資料，以免脫離現實情況，增加額外風險。

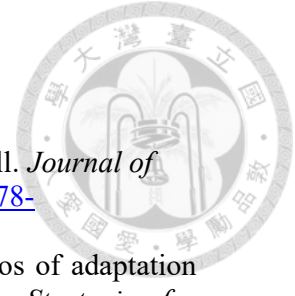
5.2 建議

本研究在資料處理蒐集階段，受限於部份資料取得不易，以及時間尺度對不上，因此只能進行一些合理的假設來模擬真實資料。然而假設未必符合真實情況，因此未來有機會能獲得更細緻的資料，可以再提升數學模型與實務的關聯性。並且使用之數學模型主要輸入資料為時間序列，對於利用水庫進行水資源調配的應用有限。

然而，若是以經濟學中的下方風險作為目標函數，就有可能在進行水庫操作的同時進行某種最佳化模式。本模型亦可處理極端乾旱的情況。透過定義極端乾旱情境之流量資料，將其輸入模型即可得知風險，再透過該資訊進行後續的供水政策制定。

前人應用 MPT 於洪患問題時，將金錢的損失與獲得納入考量。或許本研究中的數學模型，能透過類似的概念，賦予水資源經濟上的價值，以及風險迴避所節省下的金錢，略為調整成能應用於水資源經濟的數學模型。

第六章、參考文獻



- Acerbi, C., & Tasche, D. (2002). On the Coherence of Expected Shortfall. *Journal of Banking & Finance*, 26, 1487-1503. [https://doi.org/10.1016/S0378-4266\(02\)00283-2](https://doi.org/10.1016/S0378-4266(02)00283-2)
- Aerts, J. C. J. H., Botzen, W. J. W., & Werners, S. E. (2015). Portfolios of adaptation investments in water management. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 20(8), 1247-1265. <https://doi.org/10.1007/s11027-014-9540-0>
- Artzner, P., Delbaen, F., Eber, J. M., & Heath, D. (1999). Coherent Measures of Risk. *Mathematical Finance*, 9(3), 203-228. <https://doi.org/10.1111/1467-9965.00068>
- Bawa, V. S. (1975). Optimal rules for ordering uncertain prospects. *Journal of Financial Economics*, 2(1), 95-121. <https://EconPapers.repec.org/RePEc:eee:jfinec:v:2:y:1975:i:1:p:95-121>
- Beuhler, M. (2006). Application of modern financial portfolio theory to water resource portfolios. *Water Supply*, 6(5), 35-41. <https://doi.org/10.2166/ws.2006.828>
- Chen, N.-F., Roll, R., & Ross, S. (1986). Economic Forces and the Stock Market. *The Journal of Business*, 59(3), 383-403. <https://EconPapers.repec.org/RePEc:ucp:jnlbus:v:59:y:1986:i:3:p:383-403>
- Connor, G., & Korajczyk, R. A. (1995). Chapter 4 The arbitrage pricing theory and multifactor models of asset returns. In *Handbooks in Operations Research and Management Science* (Vol. 9, pp. 87-144). Elsevier. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0927-0507\(05\)80048-9](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0927-0507(05)80048-9)
- Danielsson, J., & De Vries, C. G. (2000). Value-at-Risk and Extreme Returns. *Annales d'Economie et de Statistique*(60), 239-270. <https://doi.org/10.2307/20076262>
- Fishburn, P. C. (1977). Mean-Risk Analysis with Risk Associated with Below-Target Returns. *The American Economic Review*, 67(2), 116-126. <http://www.jstor.org/stable/1807225>
- Jensen, M. C., Black, Fischer, Scholes, Myron S. (1972). *The Capital Asset Pricing Model: Some Empirical Tests*. Praeger Publishers Inc. <https://www.jstor.org/stable/1807225>
- Jorion, P. (2000). Value at Risk: The New Benchmark for Managing Financial Risk.
- Lintner, J. (1965). The Valuation of Risk Assets and the Selection of Risky Investments in Stock Portfolios and Capital Budgets. *The Review of Economics and Statistics*, 47(1), 13-37. <https://doi.org/10.2307/1924119>
- Markowitz, H. (1952). Portfolio Selection. *The Journal of Finance*, 7(1), 77-91. <https://doi.org/10.2307/2975974>
- McGrattan, E. R., & Jagannathan, R. (1995). The CAPM Debate. *Federal Reserve Bank of Minneapolis Quarterly Review*, 19(4), 2-17.
- McNeil, A., Frey, R., & Embrechts, P. (2005). *Quantitative Risk Management: Concepts, Techniques, and Tools* (Vol. 101).
- Mossin, J. (1966). Equilibrium in a Capital Asset Market. *Econometrica*, 34(4), 768-783. <https://doi.org/10.2307/1910098>
- Pan, D. D. (Spring 1997). An Overview of Value at Risk. *The Journal of Derivatives*, 4(3), 7-49. <https://doi.org/10.3905/jod.1997.407971>
- Renault, E., Van Der Heijden, T., & Werker, B. J. M. (2022). Arbitrage Pricing Theory for Idiosyncratic Variance Factors*. *Journal of Financial Econometrics*, 21(5), 1403-

1442. <https://doi.org/10.1093/jfinec/nbac008>
- Rockafellar, R., & Uryasev, S. (2000). Optimization of Conditional Value-At-Risk. *Journal of risk*, 2, 21-42.
- Roll, R. (1977). A critique of the asset pricing theory's tests Part I: On past and potential testability of the theory. *Journal of Financial Economics*, 4(2), 129-176. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0304-405X\(77\)90009-5](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0304-405X(77)90009-5)
- Ross, S. A. (1976). The arbitrage theory of capital asset pricing. *Journal of Economic Theory*, 13(3), 341-360. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0022-0531\(76\)90046-6](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0022-0531(76)90046-6)
- Sharpe, W. F. (1964). Capital Asset Prices: A Theory of Market Equilibrium under Conditions of Risk. *The Journal of Finance*, 19(3), 425-442. <https://doi.org/10.2307/2977928>
- 中央氣象署. (2020). 氣候月平均，降水量（平均）。
<https://www.cwa.gov.tw/V8/C/C/Statistics/monthlymean.html>
- 水利署. (2023). 現有公告水庫分布及營運概況。
https://www.wra.gov.tw/News_Content.aspx?n=2868&s=7002
- 水利署. (2024). 台灣地區主要水庫蓄水量報告表。
https://fhy.wra.gov.tw/ReservoirPage_2011/StorageCapacity.aspx
- 台灣環境部和國家科學及技術委員會. (2024). 國家氣候變遷科學報告 2024：現象、衝擊與調適。
- 行政院農業委員會農糧署企劃組. (2022). 農業統計年報。
- 逢甲大學. (2023). 111 年用水統計年報彙編. 經濟部水利署。
lib.wra.gov.tw/WraLib/wSite/books_95498
- 陳永森、陳章波. (1999). 臺灣水資源環境空間永續利用。
- 黃金波, 李., 周先波. (2014). VaR 与 CVaR 的敏感性凸性及其核估计. *中国管理科学*, 22(8), 1-9. http://www.zggkx.com/CN/abstract/article_15015.shtml
- 黃建勳. (2005). 水資源管理與自治制度：以嘉義縣沿海養殖漁業發展與地下水管制為例。〔碩士論文。國立中正大學〕臺灣博碩士論文知識加值系統。
<https://hdl.handle.net/11296/cht8kk>
- 黃嘉琦, 陳信宇, & 葉信富. (2023). 臺灣多時間尺度降雨集中型態之時空變化分析 [Spatiotemporal Variability of Precipitation Concentration Patterns at Multi-Time Scale in Taiwan]. *農業工程學報*, 69(3), 30-44. [https://doi.org/10.29974/jtae.202309_69\(3\).0003](https://doi.org/10.29974/jtae.202309_69(3).0003)
- 楊偉甫. (2010). 台灣地區水資源利用現況與未來發展問題。
- 經濟部水利署南區水資源分署. (2018). 曾文南化聯通管工程計畫（核定本）。
- 經濟部水利署南區水資源分署. (2022). 曾文南化聯通管工程計畫第 1 次修正（核定本）。
- 農委會. (2021). 於乾早期調度農業用水予工業。
https://www.ly.gov.tw/Pages/ashx/File.ashx?FilePath=~/File/Attach/211619/File_19729337.pdf