

國立交通大學

土木工程研究所

碩士論文

氣候變遷對台中地區缺水風險之影響評估

**Risk Assessment for the Impact of
Climate Change on the Water Shortage
in the Taichung Area**

研究生：牛敏威

指導教授：張良正 博士

中華民國九十八年五月

氣候變遷對台中地區缺水風險之影響評估

Risk Assessment for the Impact of Climate Change on the Water Shortage in the Taichung Area

研 究 生：牛敏威

Student : Min W. Niu

指導教授：張良正

Advisor : Liang C. Chang



**Submitted to Department of Civil Engineering
National Chiao Tung University
in Partial Fulfillment of Requirements
for the Degree of
Master of Science
in
Civil Engineering
May 2009
Hsinchu, Taiwan, Republic of China**

中華民國九十八年五月

氣候變遷對台中地區缺水風險之影響評估

學生：牛敏威

指導教授：張良正

國立交通大學土木工程研究所

摘要

全球經濟之快速發展使溫室氣體之排放大幅增加，因而造成全球氣候變遷。而全球氣候變遷亦使區域之河川流量豐枯水期差異有擴大之趨勢，進而影響區域水資源之調配，因此探討氣候變遷對水資源之衝擊乃是目前重要課題。

本研究以蒙地卡羅法為基礎，整合氣象資料合成模式、地表逕流模式與地表水資源調配模式等，探討氣候變遷對台中地區缺水風險之影響，並以其評估氣候變遷對人工湖和越域引水工程等水資源調適策略效益之衝擊。其中氣象資料合成乃以一階馬可夫鏈配合雨量機率分佈模式進行，地表逕流模式則採用 GWLF 模式，地表水資源調配模式則以系統動力學為核心理論進行建置。

案例模擬結果顯示，氣候變遷將造成大甲溪與大安溪流域河川總流量增加，以及豐水期與枯水期流量之差異更為劇烈。台中地區在現有供水系統下，氣候變遷將使農業用水缺水情況更為嚴重，公共用水缺水情況則略有降低。若加入人工湖或越域引水工程等水資源調適策略，則可大幅改善台中地區無氣候變遷下之缺水情況，惟若再考量氣候變遷之影響，則農業與公共用水缺水情況皆會變差。本研究之分析方法與結果可做為因應氣候變遷，進行水資源調適策略評估選定之參考。

Risk Assessment for the Impact of Climate Change on Water Shortage in the Taichung Area

Student : Ming-Wei Niu Advisor : Dr. Liang-Cheng Chang

Department of Civil Engineering
National Chiao Tung University

Abstract

Rapid economic development has caused a worldwide greenhouse effect and induced global climate change. Climate change has also increased the fluctuation of regional river flow between wet and dry seasons, seriously impacting regional water resource management. The impact of climate change has thus become an important issue in regional water resource management.

This study uses the Monte Carlo simulation method to evaluate the impact of climate change on water supply shortage in the Taichung area. The proposed model integrates weather generator, surface runoff, and water distribution models. This study uses this model to evaluate the impact of climate change on water shortage risk for existing water supply systems and the efficiency of adding two water supply measures, “artificial lakes” and “cross-basin water transport.” The weather data generator applies the first order Markov Chain and two probability distribution models including exponential distribution and normal distribution. The Generalized Watershed Loading Function (GWLF) model serves as a surface runoff model to simulate basin outflow. The water distribution model in this study was developed based on System Dynamics.

Simulation results indicate that climate change has increased the

annual river flow for both Ta-chia River and Da-an River basins. However, it has also increased temporal variations in river flow between wet and dry seasons. For existing water supply systems, this threatens the agricultural water supply but slightly improves the public water supply. Two additional water supply measures, “artificial lakes” and “cross-basin water transport,” can greatly reduce the risk of regional water shortage irrespective of climate change. As expected, the climate change will again increase the water shortage risk for both agriculture and public water uses. The results of this study are a valuable reference for the risk assessment of the impact of climate change on regional water supply.



謝 誌

感謝吾師張良正教授對於本論文的細心指導及求學階段中對學生的待人處事與學問研究的啟發，使得學生受益匪淺。承蒙口試委員台灣大學童慶斌教授、中央大學吳瑞賢教授及楊朝仲博士細心認真審閱，並於口試期間提出相當寶貴的意見，使本文更加完備，在此謹致衷心謝意。

在研究所求學過程中必須先感謝何智超學長耐心的指導，此外感謝陳宇文學長給予的寶貴意見，葉明生學長、蔡瑞彬學長、蔡瑞彬學長、陳鴻輝學長、朱宏杰學長對我的照顧。另外我要特別感謝台灣大學劉子明學長、林嘉佑學長、連宛渝學姊的建議及協助。有幸認識各位學長姊，助我跨過種種障礙，永遠感激在心。

接著我要感謝碩士班的學長蘇哥、全哥、任馥、君儀、浚瑋、豪哥、詹兄、正偉、程翔、茹姐、怡釗、柏成、為善、昱維經驗的傳承，以及同窗好友韋圻、瀚聖、阿爆的勉勵與幫助，還有學弟阿海、冠宇、雲直、阜峻的陪伴，因為有你們讓我在研究所的這段時間度過無數個歡笑日子，有你們真好，謝謝大家。

最後要感謝我的家人及女友毓瑄，因為有你們的全力支持，我才能順利完成碩士學位，僅將此喜悅分享給我最愛的家人、女友及週遭支持我的人。

章節目錄

中文摘要.....	I
英文摘要.....	II
謝 誌.....	IV
章節目錄.....	V
表目錄.....	VIII
圖目錄.....	XI
圖目錄.....	XI
第一章 緒論.....	1
1.1 研究緣起.....	1
1.2 研究目的.....	1
1.3 研究架構.....	2
第二章 文獻回顧.....	3
2.1 氣候變遷.....	3
2.2 系統動力模式於水資源調配模擬之應用	4
第三章 研究方法.....	7
3.1 氣象資料合成模式.....	8
3.2 氣候變遷簡易降尺度.....	12
3.3 地表逕流模式.....	18

3.4 地表水資源調配模式.....	25
3.5 蒙地卡羅分析.....	29
第四章 台中地區水資源調配風險分析	31
4.1 研究區域概述.....	31
4.1.1 流域概況.....	31
4.1.2 水文資料.....	35
4.1.3 需求推估.....	41
4.2 氣象資料合成驗證.....	54
4.3 地表逕流模式檢定與驗證.....	56
4.4 地表水資源調配模式.....	61
4.4.1 地表水源調配之系統架構.....	61
4.4.2 現況地表水源調配之運用原則.....	64
4.4.3 地表水資源調配模式建立與驗證.....	68
4.5 水資源調適策略.....	71
4.6 水資源調配風險分析.....	76
第五章氣候變遷對台中地區水資源利用衝擊之風險評估	81
5.1 氣候變遷對河川流量衝擊評估	81
5.2 氣候變遷下之水資源調配風險分析	84
5.2.1 現況系統衝擊分析.....	84

5.2.2 水資源調適策略衝擊分析.....	86
5.2.3 綜合分析.....	91
第六章 結論與建議	94
6.1 結論.....	94
6.2 建議.....	97
參考文獻.....	98



表目錄

表 3.2-1 GCM模式相關資料總整.....	14
表 3.2-2 GCM模式所輸出之SRES-A2 短、中、長期預設情境.....	15
表 3.2-3 GCM模式所輸出之SRES-A1B短、中、長期預設情境.....	16
表 3.2-4 GCM模式所輸出之SRES-B1 短、中、長期預設情境.....	17
表 3.3-1 AM1 與AM2 值.....	24
表 3.3-2 各緯度每月日照時數.....	24
表 4.1.2-1 使用溫度站基本資料.....	36
表 4.1.2-2 使用雨量站基本資料.....	37
表 4.1.2-3 使用雨量站基本資料.....	37
表 4.1.2-4 大甲溪流域側流量推估方式表.....	38
表 4.1.2-5 大安溪流域側流量推估方式表.....	39
表 4.1.3-1 台中地區之目標年人口推估表.....	42
表 4.1.3-2 台中地區之目標年普及率.....	42
表 4.1.3-3 台中地區之目標年抄見率.....	42
表 4.1.3-4 台中地區之目標年每人每日用水量(節約用水).....	43
表 4.1.3-5 台中地區之目標年每人每日用水量(趨勢成長).....	43
表 4.1.3-6 台中地區之目標年生活用水需求量推估(節約成長).....	44
表 4.1.3-7 台中地區之目標年生活用水需求量推估(趨勢成長).....	44

表 4.1.3-8 台中地區現有工業用地之目標年需水量.....	46
表 4.1.3-9 台灣電力公司電廠營運用水統計及新建或擴增機組需水計畫表.....	46
表 4.1.3-10 台中地區開發中工業區之目標年需水量表.....	46
表 4.1.3-11 已編定(編定中) 工業區之目標年需水量表	47
表 4.1.3-12 規劃(研議中)工業區之目標年需水量表	47
表 4.1.3-13 台中地區之目標年工業用水需水量	48
表 4.1.3-14 大甲溪目標年農業用水量表(1/2)	50
表 4.1.3-14 大甲溪目標年農業用水量表(2/2)	51
表 4.1.3-15 大安溪目標年農業用水量表(1/2)	52
表 4.1.3-15 大安溪目標年農業用水量表(2/2)	53
表 4.2-1 觀測資料與合成資料相關係數表.....	54
表 4.3-1 各土地利用類型在不同土壤類別下之CN值	57
表 4.3-2 不同土壤，不同土壤種類之最大土壤水分容量	58
表 4.3-3 不同植物之覆蓋係數.....	58
表 4.3-4 GWLF模式參數合理範圍.....	59
表 4.3-5 GWLF模式參數檢定結果.....	59
表 4.3-6 GWLF模式檢定與驗證相關係數表.....	59
表 4.4.2-1 德基水庫發電運轉規線表.....	67

表 4.6-1 各種方案下不同信賴度之農業缺水指數變化表	78
表 4.6-2 水資源調適方案	79
表 5.1-1 氣候變遷對河川流量增減比例變化表	83
表 5.2.1-1 現況系統各種情境下不同信賴度之農業缺水指數變化表	85
表 5.2.1-2 現況系統各種情境下不同信賴度之公共缺水指數變化表	85
表 5.2.2-1 方案一各種情境下不同信賴度之農業缺水指數變化表	87
表 5.2.2-2 方案一各種情境下不同信賴度之公共缺水指數變化表 ...	88
表 5.2.2-3 方案二各種情境下不同信賴度之農業缺水指數變化表	88
表 5.2.2-4 方案二各種情境下不同信賴度之公共缺水指數變化表 ...	88
表 5.2.2-5 方案三各種情境下不同信賴度之農業缺水指數變化表	89
表 5.2.2-6 方案三各種情境下不同信賴度之公共缺水指數變化表 ...	89
表 5.2.3-1 各情境於各方案信賴度 95% 的農業SI	92
表 5.2.3-2 各情境於各方案信賴度 95% 的公共SI	93

圖目錄

圖 1.3 研究流程圖	2
圖 3.1 氣候變遷對水資源衝擊評估之蒙地卡羅分析流程圖	8
圖 3.1-1 氣候資料合成流程圖	11
圖 3.3-1 GWLF模式水平衡關係示意圖	23
圖 3.4-1 系統動力流圖示意圖	28
圖 3.4-2 典型水資源供需示意圖	28
圖 3.4-3 典型水資源供需系統動力流圖	29
圖 4.1-1 大安溪、大甲溪流域圖	34
圖 4.1.2-1 水文資料站位置圖	40
圖 4.2-1 大甲溪流域合成雨量驗證圖	55
圖 4.2-2 大安溪流域合成雨量驗證圖	55
圖 4.2-3 大甲溪流域合成溫度驗證圖	55
圖 4.2-4 大安溪流域合成溫度驗證圖	56
圖 4.3-1 松茂流量站平均旬流量檢定與驗證	59
圖 4.3-2 松茂流量站平均旬標準差檢定與驗證圖	60
圖 4.3-3 松茂流量站逐旬流量檢定與驗證圖	60
圖 4.3-4 卓蘭流量站平均旬流量檢定與驗證圖	60
圖 4.3-5 卓蘭流量站平均旬標準差檢定與驗證圖	61

圖 4.3-6 卓蘭流量站逐旬流量檢定與驗證圖	61
圖 4.4.2-1 德基水庫發電運轉規線圖	67
圖 4.4.2-2 德基水庫高程-面積-容量曲線圖	68
圖 4.4.3-1 大甲大安聯合營運之水源調配系統動力模型示意圖	69
圖 4.4.3-2 石岡壩歷史與模擬逐旬入流量之驗證結果	70
圖 4.4.3-3 石岡壩歷史與模擬逐旬放流量之驗證結果	70
圖 4.5-1 大安溪及大甲溪水源聯合運用輸水工程	72
圖 4.5-3 台中地區考量人工湖、越域引水及淨水場擴增之水源調配系統圖	74
圖 4.5-4 台中地區水資源系統圖	76
圖 4.6-1 水資源調適策略對旬平均缺水量之影響	79
圖 4.6-2 水資源調適策略於未變遷情境下之影響	80
圖 5.1-1 CGCM2 模式松茂流量站現況模擬與情境流量歷線圖	82
圖 5.1-2 CGCM2 模式卓蘭流量站現況模擬與情境流量歷線圖	82
圖 5.1-3 INM模式松茂流量站現況模擬與情境流量歷線圖	82
圖 5.1-4 INM模式卓蘭流量站現況模擬與情境流量歷線圖	83
圖 5.2.1-1 CGCM2 模式現況系統缺水量分佈圖	86
圖 5.2.1-2 INM模式現況系統缺水量分佈圖	86
圖 5.2.2-1 方案一CGCM2 模式缺水量分佈圖	89

圖 5.2.2-2 方案一INM模式缺水量分佈圖	90
圖 5.2.2-3 方案二CGCM2 模式缺水量分佈圖	90
圖 5.2.2-4 方案二INM模式缺水量分佈圖	90
圖 5.2.2-5 方案三CGCM2 模式缺水量分佈圖	91
圖 5.2.2-6 方案三INM模式缺水量分佈圖	91



第一章 緒論

1.1 研究緣起

水資源是人類不可或缺的重要資源，過去數十年來由於工商業發展與人口的成長，造成用水需求日益增加，水資源之供應充足與否對未來經濟發展有重大影響。自工業革命以來，因為全球經濟之快速發展而使溫室氣體之排放大幅增加，因而強化大氣溫室效應造成全球氣候變遷，全球氣候變遷更進而衝擊水資源，根據國內外文獻指出，受到溫室效應的影響，全球氣溫上升，河川流量豐枯水期有極端化之趨勢，枯水期雨量減少，豐水期暴雨增加，大幅提升水資源供應滿足需求之困難性。以臺灣地區而言，由於降水分佈空間與時間極不均勻，每年 5 月～10 月雨季期間，與 11 月～4 月旱季期間，同年間降雨量差異性可達 3 倍之多，豐水年與枯水年之年總降雨量差異可達 2 倍多，以致大多降雨都形成地表逕流流入海洋，因此現有供水系統的有效利用與調適水源開發的工作已是刻不容緩。

1.2 研究目的

本研究應用系統動力學建立台中地區水資源策略分析模型，分析其在氣候變遷影響下之水資源調配情形及不同改善策略的效益。將根據 IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) 對世界未來經濟社會發展之不同預設情況下的研究溫室氣體排放情境 (Special Report on Emissions Scenarios, 簡稱 SRES)，考慮多種永續評估指標，透過蒙地卡羅模擬法 (Monte Carlo simulation method) 並配合簡單降尺度方式，在考量不確定性下，探討台中地區在不同 SRES 之氣候變遷情境下對河川流量之影響，及其進一步對水資源供水能力之衝擊。

除此之外，並將分析不同水資源調適策略在氣候變遷下之效益。

1.3 研究架構

本研究流程如圖 1.3 所示，首先收集台中地區之歷史雨量、溫度、流量與水工結構物放水量資料，分別建立氣象資料合成模式、地表逕流模式、地表水資源調配模式，以歷史資料驗證模式之適用性，確定模式合理性，最後透過蒙地卡羅模擬法分析以探討氣候變遷與否對於各項調適策略之衝擊。

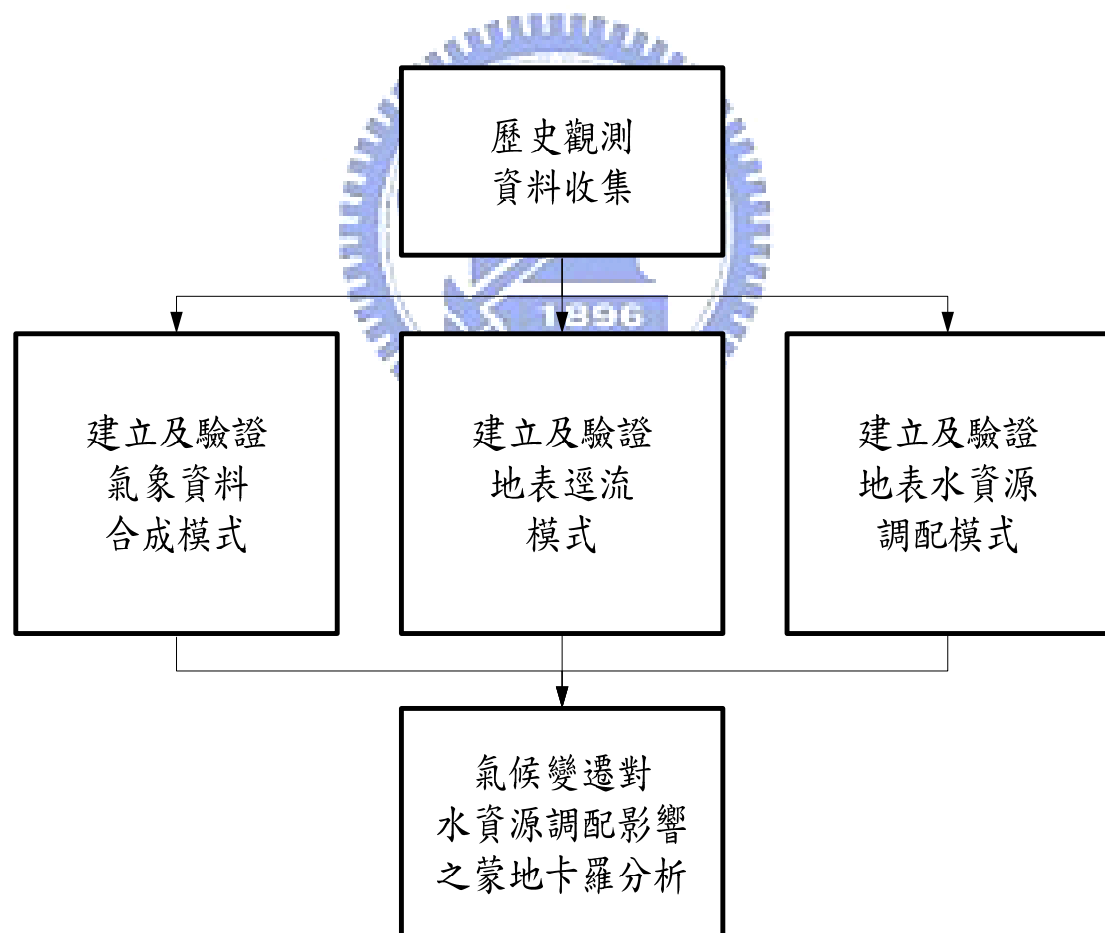


圖 1.3 研究流程圖

第二章 文獻回顧

2.1 氣候變遷

氣候變遷問題於 1988 年首次成為聯合國大會討論議題，同年聯合國世界氣象組織（World Meteorological Organization，WMO）與聯合國環境規劃署（United Nations Environmental Program，UNEP）合作成立政府間氣候變遷專題小組（Intergovernmental Panel on Climate Change，IPCC），該會會員限於世界氣象組織及聯合國環境署之會員國，專責研究由人類活動所造成的氣候變遷。IPCC 組織每隔幾年會發表評估報告，至今已經發表四次評估報告，最早於 1990 年發表第一次評估報告，1995 年完成第 2 次評估報告，2001 年完成第 3 次評估報告，於 2007 年發表第 4 次評估報告，並提出最新的氣候變遷情境分析結果，每次評估報告均受到世界氣象組織（WMO）與聯合國環境規劃署（UNEP）認可。

針對氣候變遷對水資源系統所帶來的衝擊，國內外學者已有許多成果可供參考。Ayers et al. (1994) 針對美國 Delaware River 流域水資源受氣候變遷衝擊之相關問題進行評估，結果顯示水資源深受氣候變遷之影響。Tung and Haith (1995) 等亦曾經就氣候變遷對紐約州之水資源衝擊進行評估，並說明氣候變遷可能改變河川流量與可供應水量。Xu ZX (2004) 研究中國西部 Tarim River 流域受氣候變遷之衝擊，氣候變遷將衝擊研究區域降雨與溫度。針對台灣地區之研究，黃任伯 (2002) 研究氣候變遷對森林植群之影響，利用蒙地卡羅方法，給予氣候變數不同的相對標準差，以探討氣候因子預測不確定性對 Box 模式預測結果之影響，Box 模式是以各種植物型來定義氣候極限，結果顯示氣候變遷將衝擊台灣中部高岳地區所有的植物類型，將

造成某些植物型與其他植物型間的消長。宋嘉文（2003）研究氣候變遷對台灣西半部地區降雨及乾旱之影響，結果顯示氣候變遷下中南部地區的氣象乾旱次數有增加之現象，因此加強抗旱及救旱之工作是不可忽略的。王世為（2006）利用IPCC所提供數個全球環流模式，利用IPCC評估報告研究因氣候變遷對台灣地區水資源所帶來的衝擊，根據不同溫室氣體排放情境分析氣候變遷對河川水質之衝擊，結果顯示頭前溪會因氣候變遷導致水溫上升、枯水期流量減少及河川水質BOD5濃度上升趨勢。蘇竹君（2008）研究氣候變遷與土地利用改變對石門水庫集水區之流量與泥砂產量影響，研究內容包含土地利用改變與氣候變遷兩個部份，氣候變遷方面，使用歷史氣象資料，與SRES（Special Report on Emissions Scenarios）預設情境氣象資料輸入GWLF（Generalized Watershed Loading Function）模式所模擬出未來短、中、長期之流量與泥砂產量，結果顯示氣候變遷下降雨分布不均的情況更為嚴重，易發生嚴重乾旱。本研究將採用IPCC最新2007年發表的第4次評估報告，做為考量氣候變遷之依據。

2.2 系統動力模式於水資源調配模擬之應用

系統動力學是由美國麻省理工史隆管理學院的J.W Forrester教授於1956年在福特基金會(Ford Foundation)與史隆基金會(Alfred P. Sloan Foundation)贊助下所發展的一門科學，結合了控制(Cybernetics)、系統論(System Theory)、資訊理論(Information Theory)、決策論(Decision Theory)、電腦模擬(Computer Simulation)等理論用以分析企業政策的制定，後來此方法進而被擴展到複雜的物理，生物學，社會學、經濟等領域。

國內外已有許多應用系統動力學研究水資源議題的相關文獻。

Ahmad et al. (2000) 利用系統動力學建立水庫操作模型應用於加拿大 Shellmouth 流域上的 Assiniboine 水庫，除了針對現有溢洪道進行洪水影響的研究外，另優選出另一個溢洪道，且曾針對水庫初始水位進行洪水季節溢流和水庫溢流進行敏感度分析。XU et al. (2002) 應用水資源系統動力學 (WRSD) 分析中國大陸黃河流域的永續性，結果顯示長期使用地下水將面臨環境與生態的挑戰。Stave et al. (2003) 利用系統動力學方法與水管理的概念建立拉斯維加斯水資源模型，藉由模型闡述水資源保育的重要性。Sehlke and Jacobson (2005) 採用系統動力學觀念模擬 Bear River 流域之地表水與地下水相互影響關係。

詹麗梅 (2001) 利用系統動力學理論建立大基隆供水區域之模擬模式，其中包含需水量預測與用水調配模擬模式，並建立永續性評價指標體系與評價方法，以探討不同供水策略對供水系統永續性之影響。李孟璵 (2002) 以高雄愛河地區為研究對象，利用河川水質模式，考慮上游集水區的人口變化、土地使用以及降雨型態的差異，建構閘門操控模以及污水處理策略模式，評估不同的閘門操控策略以及污水處理策略方案對愛河水環境與生態環境的衝擊。張婉茹 (2006) 應用系統動力學建立多元化水資源策略分析模型，以台中地區大甲溪與大安溪流域作為研究區域，分析各種供水策略並探討缺水量與成本之間相互影響。陳禹志 (2007) 以大甲溪流域為研究對象，利用系統動力學理論建立模擬模式，針對各項污染源模擬評估增加河川生態基流量、養豬離牧、風景區遊憩污染防治及鄉鎮污水下水道系統等相關防治方案之成效。李任馥 (2007) 以高屏溪流域為研究對象，利用系統動力學理論建立河川水量水質模擬模式，展示了應用系統動力學於河川水量水質管理策略評估的可行性。蘇昀柏 (2007) 以水資源調配模

擬案例，提出一整合系統圖與流程圖成為系統動力流圖的新方法。蘇昱維（2008）以台中地區為研究對象，利用系統動力學理論建立整合性區域水資源分析平台，進行各種水資源改善策略之評估，並透過動態連結函式庫的方式嵌入經濟財務分析模組，評估經濟財務量化分析。

Simonovic and Li（2003）利用系統動力學理論，模擬氣候變遷下降水與溫度變化之河流流量，進一步分析流量變化對加拿大紅河流域（Red River）之防洪系統之衝擊。陳思瑋（2005）利用系統動力學理論，建立淡水河水資源系統模式，並考慮氣候變遷之預設情境，評估流域水資源利用之永續性，結果顯示氣候變遷下環境承载力是呈現下降的情形。本研究利用系統動力學理論，建立台中地區水資源系統模式，考量未來可行策略包含新建與擴建淨水廠、人工湖及越域引水，依據 IPCC 第 4 次評估報告考量氣候變遷，並考量氣候變遷之不確定性，透過蒙地卡羅模擬法分析以探討氣候變遷與否對於各項調適策略之衝擊。

第三章 研究方法

本研究方法架構圖如圖 3.1 所示，藉由蒐集到之台中地區歷史雨量與溫度資料，配合氣象資料合成模式產生多組氣象合成資料，以提供氣候變遷發生與否之模擬分析。以下將分別對氣候變遷與否之研究流程進行說明。

就未發生氣候變遷之蒙地卡羅分析而言，先將各組合成雨量與合成溫度資料，經由降雨逕流模式（GWLF）估算其流量，再將各組流量資料輸入以系統動力學為基礎之水資源調配系統動力模式，計算各水資源評估指標，最後利用韋伯超越機率法（Weibull）評估各項可調適性方案之風險。

就發生氣候變遷下之蒙地卡羅分析而言，其分析步驟與未發生氣候變遷之分析步驟相似，惟需將合成之雨量及溫度資料，作進一步處理，本研究參考大氣環流模式（GCMs）之分析結果，以簡易降尺度方式估算台中地區在 SRES-A1B、A2、B1 氣候變遷情境下之雨量和流量資料。

最後分析兩者之模擬結果，以探討氣候變遷與否對於各項調適策略之衝擊。以下各章節將進一步說明各方法步驟之作法。

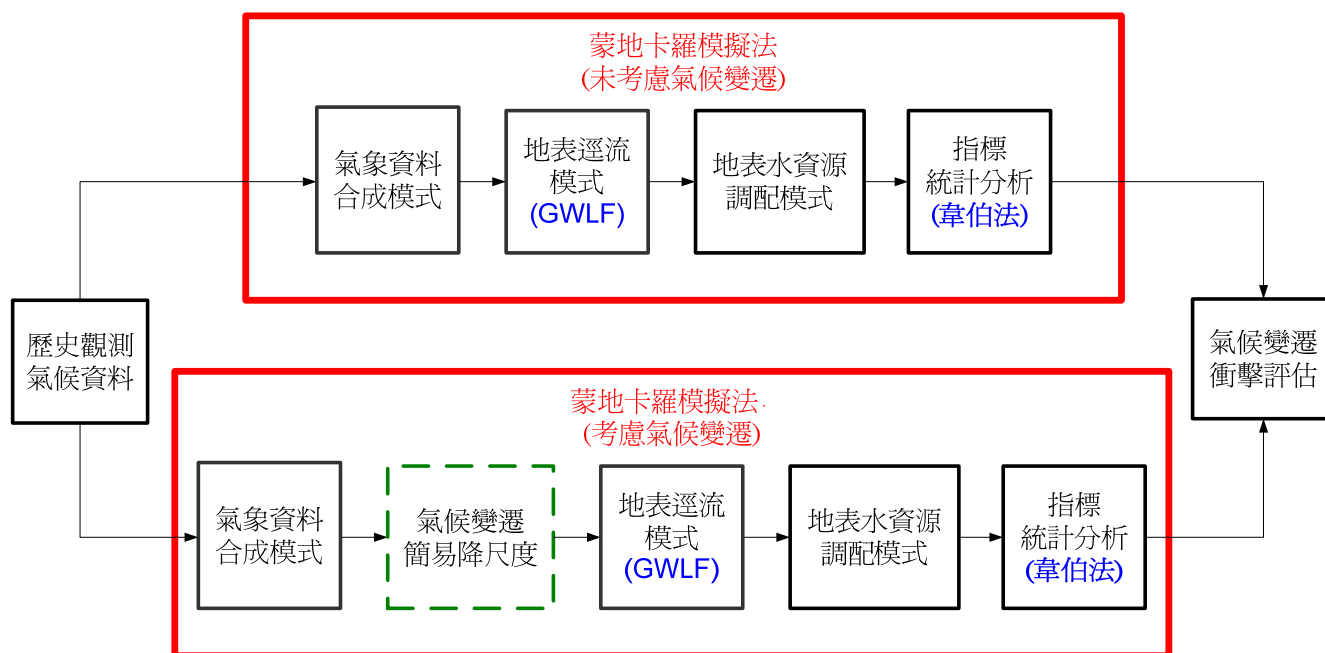


圖 3.1 氣候變遷對水資源衝擊評估之蒙地卡羅分析流程圖

3.1 氣象資料合成模式

為產生多組氣象資料以進行台中地區水資源調配風險分析，本研究在考量各氣象資料之統計分佈下，建立氣象資料合成模式，其流程如圖 3.1-1 所示，首先透過統計方法檢定日雨量和日溫度之統計分佈，由相關文獻（洪念民，1997）得知台灣地區日雨量資料大都呈現指數分佈，日溫度資料則呈現常態分布，因此本研究將透過這些統計分佈型態進行氣象資料之合成。以下將分別針對溫度與雨量之合成方法進行說明。

1. 溫度合成

由於溫度資料對於本研究之河川流量敏感度甚小，因此簡化其合成方法，依據歷史觀測資料統計每月溫度平均值與標準差，透過常態分佈合成溫度資料，其方程式可由下式（3-1）表示：

$$R = \mu_R(I) + [\sigma_R(I) \times RN] \quad (3-1)$$

R 為日溫度， $\mu_R(I)$ 為對應第 I 月份雨天之平均降雨量， $\sigma_R(I)$ 為對應第 I 月份溫度之標準偏差， RN 為介於 $(0, 1)$ 間的隨機亂數。

2. 雨量合成

雨量合成除需考量統計分佈外，亦與降雨與否有密切的關係，因此本研究以一階馬可夫鍊分析台中地區之降雨機率。馬可夫鍊 (Markov Chain) 是一種模擬隨機行為的機率模式。由於它可以衡量持續發生、具有前後因果相循的、又屬於隨機性的動態過程，在數學上稱這種描述一連串隨機實驗組成的機率模式為隨機過程。馬可夫鍊的基本概念是利用機率與矩陣如 (3-2) 表示：

$$P = \begin{bmatrix} p_{11} & p_{12} & \cdots & p_{1n} \\ p_{21} & p_{22} & \cdots & p_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ p_{n1} & p_{n2} & \cdots & p_{nn} \end{bmatrix}, \text{ where } \sum_{j=1}^n p_{ij} = 1 \forall i. \quad (3-2)$$

矩陣內的元素均為機率值，因此矩陣內每一列元素的加總值必須正好為 1。機率 p_{ij} 的意義表示在這一特定的過程中，由情況 i 移動到情況 j 的機率。由於移動的每一個可能標的即其移動過程都要考慮到，因此所有可能標的機率值之加總必須為 1。這一個矩陣即稱之為轉移矩陣 (transition matrix)。

由歷史雨量資料分析得到降雨機率之轉移矩陣後，因機率值之加總必須為 1，可藉由均勻分布於 0 至 1 的隨機變數序列產生雨量合成資料，若隨機變數大於轉移矩陣之降雨機率，該日合成雨量為零；若隨機變數小於轉移矩陣之降雨機率，該日合成雨量則透過指數分佈

產生雨量合成資料，其分佈方程式可由下式 (3-3) 表示：

$$P = \mu_p(I) \times [-\ln(1 - RN)] \quad (3-3)$$

P 為日降雨量， $\mu_p(I)$ 為對應第 I 月份雨天之平均降雨量，RN 為介於 (0, 1) 間的隨機亂數。惟經指數分佈產生之合成雨量資料與歷史雨量資料仍有偏斜現象發生，此偏斜差值並分固定常數，因此本研究再利用二階回歸公式進行修正，使其與歷史資料之統計特性更為接近，其回歸修正通式可表示為式 (3-4)：

$$y(I) = a[x(I)]^2 + b[x(I)] + c \quad (3-4)$$

$y(I)$ 為對應第 I 月觀測雨量， $x(I)$ 為對應第 I 月指數分佈方程式雨量，a、b 與 c 為二階回歸係數。



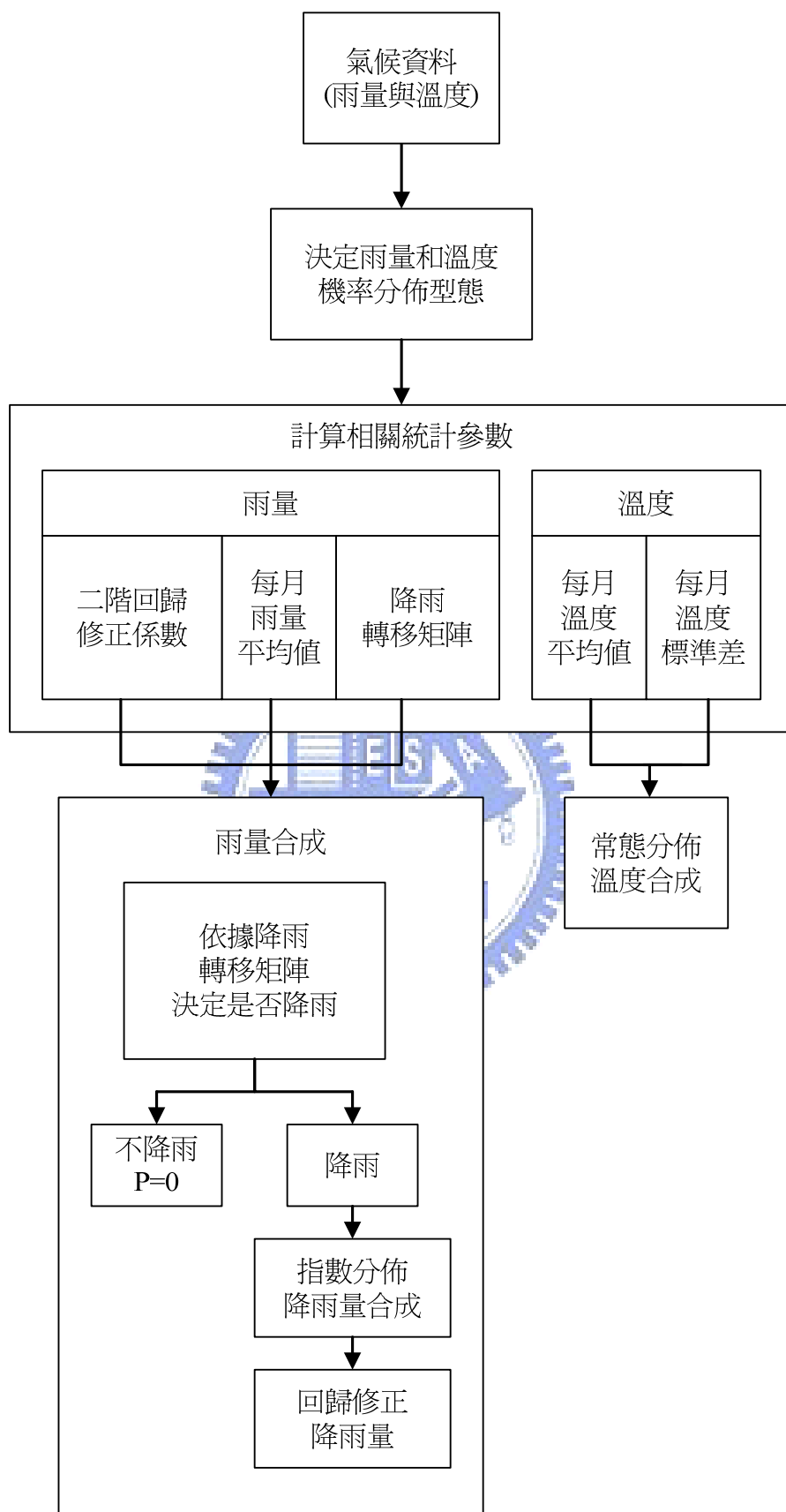


圖 3.1-1 氣候資料合成流程圖

3.2 氣候變遷簡易降尺度

本研究之氣候變遷預設情境採用 IPCC Data Distribution Center (IPCC DDC) 所提供之 SRES 資料，以 A1B、A2 與 B1 情境為主；依照 SRES 排放情境，訂定溫室氣體隨時間變化而逐年模擬的漸變試驗 (Transition Experiment)，以模擬基期 (1961~1990 年) 與未來短期 (2010~2039 年)、中期 (2040~2069 年) 及長期 (2070~2099 年) 之氣候變遷趨勢。

由於大氣環流模式以全球尺度 (以 CGCM2 模式為例，緯度 0° 網格大小約為 300×300 公里) 進行分析，因此對於小區域氣候模擬預測之解析度不夠，必須透過降尺度分析以適用於小區域之氣候變遷預測。一般降尺度分析方式包含簡易降尺度、統計降尺度、動力降尺度等三種方式，其中簡易降尺度方法是以離研究區域最近之大氣環流模式網格資料，直接代表研究區域氣候改變量；統計降尺度方法是將研究區域觀測資料與大區域氣候型態建立統計關係，再將大氣環流模式之網格資料利用前述建立之統計關係進行小區域之降尺度分析；動力降尺度方法是以大氣環流模式模擬大區域資料為邊界條件，然後利用區域模式考量研究區域之地形地貌等因素進行降尺度。

目前 IPCC 共提供多個 GCM 模式之情境資料，其中有 10 個模式完整提供 A1B、A2 與 B1 三種情境之輸出資料，參照「強化區域水資源永續利用與因應氣候變遷之調適能力」報告依據氣候資料之相關係數分析選出相關性較高的 6 個模式，各模式之基本介紹詳見表 3.2-1。本研究採用簡易降尺度分析，為取得較接近本研究區域之大氣環流模式網格資料，因此本研究選擇亞洲所發展之大氣環流模式，其中以日本所發展的 MRI-CGCM2_3_2(以下簡稱 CGCM2)及俄羅斯所

發展的 INM-CM3(以下簡稱 INM)模式之網格資料離本研究區域最近，故之後之研究將採用該兩大模式之模擬結果進行分析，CGCM2 模式所使用網格為經度 121 度、緯度 23.7 度，INM 模式為經度 120 度、緯度 24 度。

簡易降尺度便是將短期、中期與長期的雨量分別除以基期雨量得到雨量變化比值；將短期、中期與長期的溫度減去基期的溫度得到溫度變化差值，表 3.2-2～表 3.2-4 為本研究所採用之 GCM 模式中 CGCM2 與 INM 模式所對應 SRES-A2、A1B、B1 情境的雨量比值及溫度差值。

假設研究區域氣候變遷等同於 GCM 最鄰近網格點之預測，考量方式可由下式 (3-5) 與 (3-6) 表示：

$$CT_{t,m} = T_{t,m} + \Delta T_m, \quad m=1 \text{ to } 12 \quad (3-5)$$

$$CP_{t,m} = P_{t,m} \times RP_m, \quad m=1 \text{ to } 12 \quad (3-6)$$

其中 $CT_{t,m}$ 為修正後第 m 月第 t 天之溫度； $CP_{t,m}$ 為修正後第 m 月第 t 天之雨量； $T_{t,m}$ 與 $P_{t,m}$ 為歷史資料第 m 月第 t 天之溫度與降雨； ΔT_m 為 GCM 模式情境之溫度差值； RP_m 為 GCM 模式情境之雨量比值。

表3.2-1 GCM模式相關資料總整

研究單位	單位簡稱	所屬國家	模式名稱
Meteorological Research Institute	MRI	日本	CGCM2_3_2
Institute for Numerical Mathematics	INM	俄羅斯	CM3.0
Max-Planck-Institut for Meteorology	MPI-M	德國	ECHAM5-OM
Geophysical Fluid Dynamics Laboratory	GFDL	美國	CM2.1
National Centre for Atmospheric Research	NCAR	美國	CCSM3
UK Met. Office	UKMO	英國	HadCM3

資料來源：強化區域水資源永續利用與因應氣候變遷之調適能力(2008)



表3.2-2 GCM模式所輸出之SRES-A2短、中、長期預設情境

	雨量比值						氣溫差值					
模式	CGCM2			INM			CGCM2			INM		
月份	短期	中期	長期	短期	中期	長期	短期	中期	長期	短期	中期	長期
1	0.75	0.78	0.83	0.81	0.61	0.57	0.21	1.01	1.96	0.79	1.69	2.96
2	0.63	0.76	0.93	0.85	0.99	0.85	0.32	1.05	2.04	1.63	2.09	3.48
3	0.86	0.92	0.96	0.95	0.88	0.75	0.56	1.12	2.11	1.46	2	3.23
4	1.03	0.97	1.1	0.7	0.73	0.67	0.69	1.4	2.53	1.15	1.38	2.59
5	1.09	1.03	1.15	0.89	1.25	1.12	0.7	1.39	2.66	0.92	1.63	2.7
6	1.07	1.17	1.1	1.08	1.02	1.09	0.77	1.7	2.65	0.84	1.65	2.6
7	1.01	1.06	1.05	1.14	1.11	1.1	0.72	1.38	2.54	0.87	1.76	2.46
8	1.17	1.17	1.44	1.12	1.22	1.28	0.53	1.34	2.45	0.76	1.45	2.48
9	1.04	1.02	1.15	1.46	1.63	1.71	0.72	1.52	2.58	1.03	1.79	2.56
10	0.79	0.69	0.75	1.2	0.88	1.19	0.7	1.69	2.74	0.89	1.17	2.26
11	1.07	0.77	0.75	1.03	0.81	0.67	0.29	1.18	2.42	1.06	2.06	2.77
12	0.97	1.01	0.9	1.07	0.81	0.73	0.08	1.35	2.04	2.12	2.37	3.43

資料來源：強化區域水資源永續利用與因應氣候變遷之調適能力(2008)

表3.2-3 GCM模式所輸出之SRES-A1B短、中、長期預設情境

	雨量比值						氣溫差值					
模式	CGCM2			INM			CGCM2			INM		
月份	短期	中期	長期	短期	中期	長期	短期	中期	長期	短期	中期	長期
1	1.14	0.9	1.01	0.72	0.85	0.71	0.25	1.33	1.93	0.91	1.15	2.34
2	0.71	0.68	0.65	1.06	0.95	0.81	0.73	1.39	2.23	1.26	2.14	2.59
3	0.68	0.72	0.71	0.85	0.73	0.83	0.64	1.47	2.29	1.22	1.48	2.75
4	0.94	0.98	1.12	0.58	0.97	1.01	0.81	1.72	2.2	0.85	1.66	2.29
5	1.16	1.23	1.15	1	1.12	1.33	0.99	1.92	2.58	1.13	1.7	2.17
6	1.06	1.22	1.47	0.88	1.13	1.11	0.94	1.92	2.55	0.99	1.77	2.14
7	1.17	1.1	1.08	1.02	1.19	1.08	0.75	1.74	2.43	1.21	1.69	2.11
8	1.05	1.13	1.15	1.11	1.14	1.1	0.58	1.53	2.26	1.01	1.41	1.93
9	1.11	1.27	1.46	1.51	1.32	1.36	0.7	1.8	2.39	1.03	1.72	2.23
10	1.02	1.56	1.59	1.11	1.26	1.04	0.71	1.71	2.63	0.8	1.72	2.13
11	0.74	0.75	0.94	1.05	0.91	0.86	0.52	1.48	2.01	1.4	1.94	2.74
12	0.79	0.98	0.81	0.99	0.79	0.81	0.3	1.43	2.16	1.63	2.13	2.58

資料來源：強化區域水資源永續利用與因應氣候變遷之調適能力(2008)

表3.2-4 GCM模式所輸出之SRES-B1短、中、長期預設情境

模式 月份	雨量比值						氣溫差值					
	CGCM2			INM			CGCM2			INM		
	短期	中期	長期	短期	中期	長期	短期	中期	長期	短期	中期	長期
1	1.05	0.92	1.08	0.87	0.82	0.76	0.22	1.21	1.46	0.83	1.31	2.18
2	0.78	0.79	0.82	1.08	0.81	0.98	0.57	1.15	1.56	1.39	1.56	1.95
3	0.7	0.63	0.84	1.09	0.98	0.92	0.74	1.18	1.75	0.99	1.59	1.94
4	0.94	0.93	1.36	1.13	0.95	0.85	0.78	1.11	1.79	0.82	1.37	1.75
5	0.99	1	1.31	1.29	1.07	1.13	0.79	1.17	1.86	0.99	1.21	1.66
6	1.1	0.97	1.18	0.95	1.12	1.08	0.95	1.44	1.97	0.88	1.22	1.68
7	1.06	1.12	1.12	0.87	1.16	0.98	0.64	1.26	1.76	1.05	1.34	1.69
8	1.05	1.05	1.14	1.13	1.25	1.1	0.54	0.98	1.49	0.93	1.09	1.59
9	1.16	1.29	1.71	1.87	1.48	1.44	0.71	1.26	1.61	1.05	1.18	1.78
10	1.04	1.36	1.17	1.06	0.94	1.01	0.82	1.32	1.68	0.68	1.19	1.38
11	0.82	0.7	0.76	1.07	1.04	1.3	0.58	1.03	1.65	1.12	1.7	2.31
12	0.89	0.83	0.88	0.92	0.81	0.83	0.62	1.12	1.76	1.47	1.91	2.38

資料來源：強化區域水資源永續利用與因應氣候變遷之調適能力(2008)

3.3 地表逕流模式

本研究採用GWLF (Generalized Watershed Loading Functions) 中之流量分析模式作為推估流量之工具，GWLF模式為Haith與Shoemaker於1987年所發展，其理論基礎為依據土壤沖蝕萬用公式 (Universal Soil Loss Equation，簡稱USLE) 與SCS曲線值法 (SCS Curve Number)，分析集水區在不同土地利用下之營養鹽濃度，其中之水平衡模式近年來常被引用進行集水區河川流量之模擬分析(謝明昇，2004；王世為2006)。以下將針對GWLF之水平衡模式之理論進行說明。

對地球而言水循環可視為封閉系統，然地球存在許多次系統，其雖不是封閉系統，但在此系統中可藉由水之收支平衡計算水文中各項單元。集水區主要水收支平衡之輸入為降雨；當雨水降落下來部份會被樹、草地、地表植被等截留，此部份水分最後以蒸發回到大氣中；到達地表之水，有部份會填滿窪蓄容量、有部份入滲於土壤中、有部份形成地表逕流。入滲之水分可補充土壤水分，土壤水分可繼續往下移動以補注地下水，或由蒸發散將水分帶入大氣中。集水區之總輸入水量可由落在其範圍內所有降雨所求得，總輸入水量藉由蒸發散或河川流量帶離集水區，河川流量包括地表逕流、與地下水流。此模式將集水區的水平衡模式分為地表、未飽和層及淺層飽和含水層三個主要部分，其系統水平衡收支關係如圖 3.3-1。

一、地表

一集水區系統中的入流為降水，當降水 (R_t) 至地面後，一部份的水經由入滲量 (I_t) 至未飽和含水層中，然而另一部份則成為地表逕流 (Q_t)，集水區河川流量 (SF_t) 來源，主要為地表逕流 (Q_t) 及

地下水排出所形成基流 (G_t)，可由下式 (3-7) 表示：

$$SF_t = Q_t + G_t \quad (3-7)$$

在 GWLF 模式中估算地表逕流(Q_t)採用美國水土保持局(SCS, Ogrosky and Mockus, 1964)之曲線值法 (Curve Number Method)，此種方法在計算地表逕流時可合理的反應土地利用方式及土壤水分含量。地表逕流計算方式如下：

$$Q_t = \frac{(R_t - 0.2W_t)^2}{(R_t + 0.8W_t)} \quad (3-8)$$

$$W_t = \frac{2540}{CN_t} - 25.4 \quad (3-9)$$

$$R_t \geq 0.2W_t \quad (3-10)$$

$$CN \leq 100 \quad (3-11)$$



其中， R_t 為每日降雨量 (cm)；CN 為逕流係數，逕流係數反應各土地利用、土壤質地或排水特性、及臨前土壤水分的不同，其值需由臨前五天土壤水份所對應之值求得，CN 值較大表示臨前土壤水份越高入滲量則越少，即較多水份可成為逕流，CN 值較小表示臨前水份較少，則入滲較大，逕流較小。本模式之逕流係數 (CN) 依臨前土壤水份分為三類，分別為 CN3 (溼潤情況)、CN2 (平均情況)、CN1 (乾燥情況)，其中 CN2 值則依照土壤分類與土地利用決定 (美國水土保持局)，土壤類別分為 A、B、C、D 四類別，A 類別為可造成較小逕流量之砂、礫石層土壤，D 類別為可造成較大逕流量之不

透水層、黏土。CN1 與 CN3 之值則是根據 Chow et al. (1988)，計算方式如下。

$$CN1 = \frac{4.2CN2}{10 - 0.058CN2} \quad (3-12)$$

$$CN3 = \frac{23CN2}{10 + 0.13CN2} \quad (3-13)$$

本模式將臨前五天土壤水分 (A_t) 分為高、中、低三個區間，以 AM1 和 AM2 為界，AM1、AM2 會隨季節不同如表 3.3-1 所示，逕流係數 (CN) 由 CN1、CN2、CN3 並根據臨前五天土壤水分求得，臨前五天土壤水分小於 AM1 時，CN 由 CN1、CN2 內差求得，臨前五天土壤水分大於 AM1 並小於 AM2 時，CN 由 CN2、CN3 內差求得，臨前五天土壤水分大於 AM2 時，CN 等於 CN3，計算方式如下。

$$CN = CN1 + \frac{(CN2 - CN1)}{AM1} (A_t) \quad \text{if } A_t \leq AM1 \quad (3-14)$$

$$CN = CN2 + \frac{(CN3 - CN2)}{AM2 - AM1} (A_t - AM1) \quad \text{if } AM1 < A_t \leq AM2 \quad (3-15)$$

$$CN = CN3 \quad \text{if } AM2 < A_t \quad (3-16)$$

降水經由入滲由地表至未飽和含水層，入滲量 (I_t) 計算方式為降水 (R_t) 扣除地表逕流 (Q_t)，可由下式 (3-17) 表示：

$$I_t = R_t - Q_t \quad (3-17)$$

二、未飽和含水層

經由入滲之水量將先行補充未飽和層之土壤水分，當未飽和層之土壤水分超過土壤最大含水量時，其部分水分將滲漏至淺層飽和含水層。另外，未飽和層之土壤水分亦可能因蒸發散而被帶離土壤，未飽和層之水平衡式可由下式（3-18）表示：

$$U_{t+1} = U_t + I_t - ET_t - PC_t \quad (3-18)$$

其中 U_t 是未飽和層高於凋萎點之土壤水分含量， ET_t 是蒸發散量，而 PC_t 是滲漏量，式中所用的單位為 cm/day。

未飽和含水層滲漏至淺層飽和含水層之水量（ PC_t ），物理機制在於未飽和含水層土壤水分大於田間含水量，即是指高於田間含水量經由重力向下排出至淺層飽和層之水分，可由（3-19）式計算：

$$PC_t = \text{Max}[0, U_t + I_t - ET_t - U^*] \quad (3-19)$$

其中 U^* 是最大土壤水分容量，即田間含水量減去凋萎點間之水分容量，單位為 cm/day。

蒸發散量（ ET_t ）則受大氣、地表覆蓋特性及土壤水分之影響，可由下式決定：

$$ET_t = \text{Min}[k_{st} \times k_{ct} \times PET_t, U_t + I_t] \quad (3-20)$$

蒸發散量（ ET_t ）估算的方法為以潛勢能蒸發散量（ PET_t ）乘上

一個覆蓋係數 (K_{ct}) 和一個土壤水分因子 (K_{st}) 計算，但其易受限於未飽和層之可利用之水分，因此取蒸發散量與未飽和層水分之較小值，為估算之蒸發散量，其中覆蓋係數 (K_{ct}) 決定於土地利用方式。

在 (3-20) 式中之土壤水分因子 (K_{st}) 則採用 Boonyatharokol and Walker (1979) 之公式進行計算，可由下式 (3-21) 表示：

$$k_{st} = 1 \quad \text{if } U_t \geq 0.5U^*$$

$$= \frac{U_t}{0.5U^*} \quad \text{if } U_t < 0.5U^*$$
(3-21)

在 GWLF 模式中潛勢能蒸發散量由 Hamon 公式進行計算：

$$PET_t = \frac{0.021H_t^2 e_{0t}}{T_t + 273}$$
(3-22)

其中 PET_t 是第 t 天潛勢能蒸發散量， H_t 是在第 t 天的日照時間 (時)，其值如表 3.3-2 所示， e_{0t} 是飽和蒸氣壓， T_t 是日平均溫度 ($^{\circ}\text{C}$)，飽和蒸氣壓 (e_{0t}) 是溫度之函數，由下列方程式決定：

$$e_{0t} = 33.8639[(0.00738 \times T_t + 0.8072)^8 - 0.000019 \times |1.8 \times T_t + 4.8| + 0.00136]$$
(3-23)

三、淺層飽和含水層

淺層飽和含水層之水平衡關係可由下列方程式表示：

$$S_{t+1} = S_t + PC_t - G_t - D_t$$
(3-24)

其中 S_t 是淺層飽和含水層之土壤水分含量， PC_t 是由未飽和含水層滲漏至淺層飽和含水層之水量， G_t 是由淺層飽和含水層滲漏至河

川之水量，而 D_t 是入滲至深層飽和含水層之水量，在本研究中因入滲至深層飽和含水層之水量 (D_t) 量很小，將其值假設為零，式中所用的單位為 cm/day。

G_t 之計算係考慮淺層飽和含水層為一線性水庫，計算方式可由下式 (3-25) 表示：

$$G_t = r \times S_t \quad (3-25)$$

其中 r 為退水係數，一般介於 0.01 至 0.2 之間

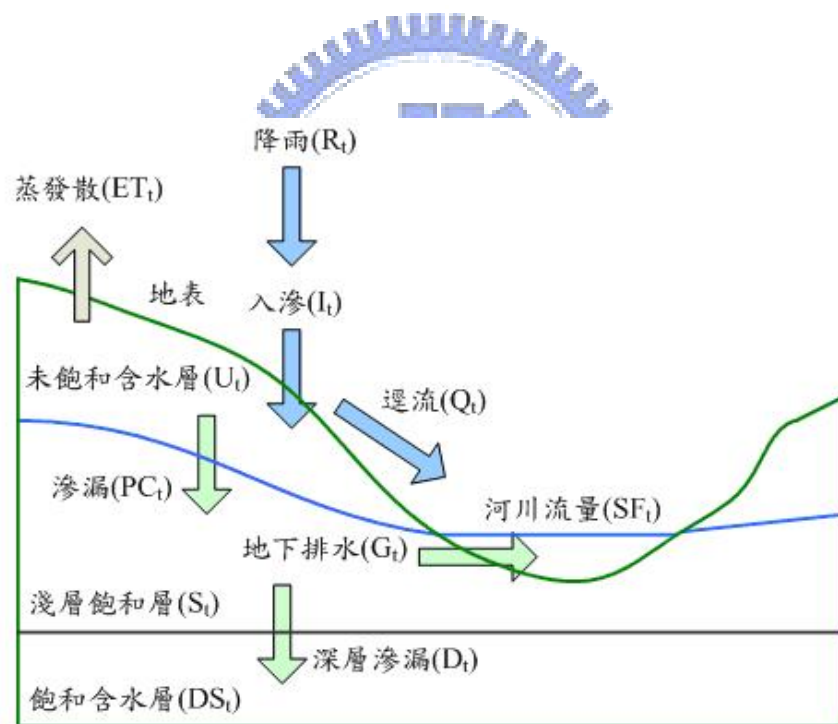


圖 3.3-1 GWLF 模式水平衡關係示意圖

資料來源：應用遺傳規劃法進行氣候預報降尺度分析於季節性河川流量預報，2004

表3.3-1 AM1 與AM2 值

臨前五天降雨量	生長季	非生長季
AM1	3.6 (公分)	1.3 (公分)
AM2	5.3 (公分)	2.8 (公分)

資料來源：永續性水質管理系統受氣候變遷影響之脆弱度評估，2006

表3.3-2 各緯度每月日照時數

月份	緯度 (北緯°)		
	28	26	24
	日照時數 (小時)		
1 月	10.5	10.6	10.7
2 月	11.1	11.1	11.2
3 月	11.8	11.8	11.9
4 月	12.7	12.6	12.6
5 月	13.4	13.2	13.1
6 月	13.7	13.6	13.4
7 月	13.5	13.4	13.3
8 月	13	12.9	12.8
9 月	12.1	12.1	12.1
10 月	11.3	11.4	11.4
11 月	10.6	10.7	10.9
12 月	10.3	10.4	10.6

資料來源：永續性水質管理系統受氣候變遷影響之脆弱度評估，2006

3.4 地表水資源調配模式

為探討台中地區水資源調配利用情況，本研究以系統動力學為基礎，建置地表水資源調配模式。系統動力學為 J.W Forrester 教授於 1960 年代所發展的一門科學，為描述、探索和分析複雜系統內流程、訊息、組織疆界與策略的一種嚴謹的研究方法，其可透過量化的系統模擬與分析來進行系統結構與行為之設計。其動力流圖不僅同時涵蓋了系統圖與流程圖的資訊以外，還可以進一步展現變數間的互動關係，以易於理解系統機制。

系統動力流圖一般可由四個物件建構出來：存量（Stock）、流量（Flow）、箭線（Connector）以及輔助變數（Converter），如圖 3.4-1 所示。

1. 存量（Stock）表示某一系統變數在某一特定時刻的狀態，可說是系統過去活動結果之累積，定量上即為其相關流入量與流出量差值的累積，如同水庫中儲水量即屬於一種存量。
2. 流量（Flows）表示某種變量流入或流出存量（Stock）的快慢，對某一存量（Stock）而言，所有流入與流出該存量之所有流量（Flow）的和決定了存量變化之快慢，流量數值的大小多由其所連結的存量與助動變數來決定，水庫之入流量及放水量即屬於一種流量。
3. 箭線（Connector）用來表示模式中變數間的因果關係。
4. 輔助變數（Converter）為除了流量與存量變數之外，其它會影響系統其它物件（變數）的常數或變數，如方程式中之參數，或是水庫操作中之需求量皆為輔助變數的例子。

圖 3.4-2 為一典型水資源供需示意圖，包含了入流量、河川放水量、需求供水量及未控制流量等。可以將變數區分為外部變數和內部變數，外部變數是指可由觀測資料或其他相關報告蒐集而得，包含入流量、水庫庫容量、淨水廠處理能力、管線限制及需求量，內部變數則包含河川放水量，需求供水量、未控制流量以及水庫蓄水量等，其量化關係必需依序計算求得。配合系統動力學的四大元件：存量、流量、輔助變數跟箭線建立系統動力流圖，如圖 3.4-3 所示。最後輸入各變數間之量化數學式，即可完成水資源調配模式。

內部變數其量化關係並需依序計算，首先計算下游河川放水量，其量化數學式可由下式（3-26）表示：

$$OB_{k,t} = \min\left(\sum_{i \in L_k} I_{i,t} + S_{k,t}, R_{k,t}\right) \quad (3-26)$$

變數下標的第一個字母代表節點符號，下標的第二個字母代表時間狀態， $OB_{k,t}$ 是指在 t 時刻節點 k 之河川放水量， $I_{i,t}$ 是指 t 時刻線段 i 的流量， $S_{k,t}$ 是 t 時刻節點 k 的蓄水量， L_k 是指所有流入節點 k 的入流線段集合， $R_{k,t}$ 表示節點 k 在 t 時刻之下游保留量，其涵蓋了生態保留水量以及下游優先水權保留量， $R_{k,t}$ 可由方程式（3-27）表示：

$$R_{k,t} = \sum_{i \in M} DR_{i,t} + B_{k,t} \quad (3-27)$$

$DR_{i,t}$ 是下游 t 時刻線段 i 之優先水權量， $B_{k,t}$ 表示節點 k 在 t 時刻的生態保留水量， M 是指所有下游優先於 K 點取水之需求量（ $D_{k,t}$ ）的需求節點集合，生態基流量 $B_{k,t}$ 通常則以河川流量超越機率 95% 的量來估算。

需求供水量可由方程式（3-28）表示：

$$OD_{K,t} = \min \left[\sum_{i \in L_k} (I_{i,t}) + S_{k,t} - OB_{k,t}, \sum_{j \in N_k} (D_{j,t}), Cmax_k, Pmax_k \right] \quad (3-28)$$

$OD_{k,t}$ 是指從節點 k 在 t 時刻之需求供水量， $D_{j,t}$ 是指 t 時刻取水節點 j 之目標需求量， N_K 是指取水來源取自節點於 k 之所有需求節點集合， $Cmax_k$ 是指於取水來源取自節點 k 之淨水場處理能力， $Pmax_k$ 是取水來源取自節點 k 之管線最大輸送容量。

若 K 點為非蓄水節點，則未控制流量可由 (3-29) 式推估，若為蓄水節點，則未控制流量可由 (3-30) 式推估。

$$ON_{k,t} = \sum_{i \in L_k} I_{i,t} + S_{k,t} - OD_{k,t} - OB_{k,t} - Smax_{k,t}$$

if $\sum_{i \in L_k} I_{i,t} + S_{k,t} - OD_{k,t} - OB_{k,t} > Smax_{k,t}$ (3-29)

$$ON_{k,t} = 0$$

if $\sum_{i \in L_k} I_{i,t} + S_{k,t} - OD_{k,t} - OB_{k,t} \leq Smax_{k,t}$

$$ON_{k,t} = \sum_{i \in L} (I_{i,t}) - OB_{K,t} - \sum OD_{k,t} \quad (3-30)$$

其中 $ON_{k,t}$ 是指節點 k 在 t 時刻的未控制流量， $Smax_{k,t}$ 是指節點 k 在 t 時刻的最大蓄存體積。

節點 k 在下一時刻($t+1$)的體積則由質量平衡來決定，可由(3-31)式來表示：

$$S_{k,t+1} = S_{k,t} + \sum_{i \in L_k} I_{i,t} - \sum_{j \in W_k} O_{j,t} \quad (3-31)$$

$S_{k,t+1}$ 是指節點 k 在 $t+1$ 時刻的體積， $O_{i,t}$ 是指節點 k 在 t 時刻的出流量，其包含河川放水量、需求水量、未控制流量， W_k 是指從節點 k 所有的出流量集合，若節點 k 為非蓄水節點，則 $S_{k,t}$ 和 $S_{k,t+1}$ 為 0。

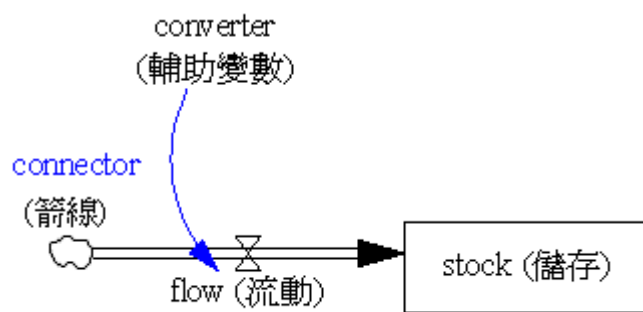


圖 3.4-1 系統動力流圖示意圖

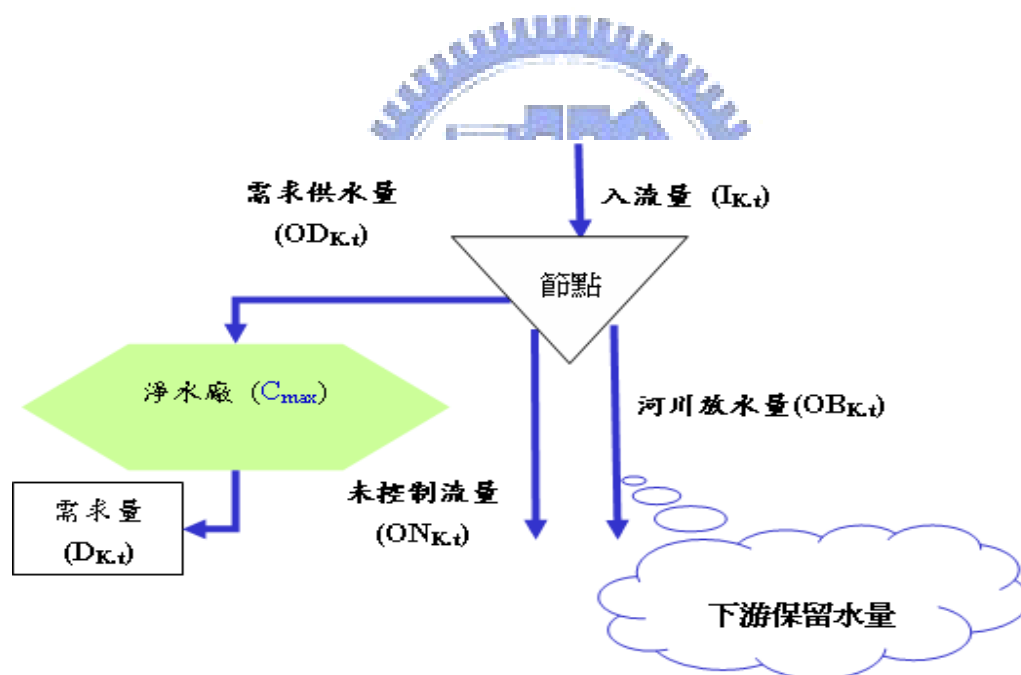


圖 3.4-2 典型水資源供需示意圖

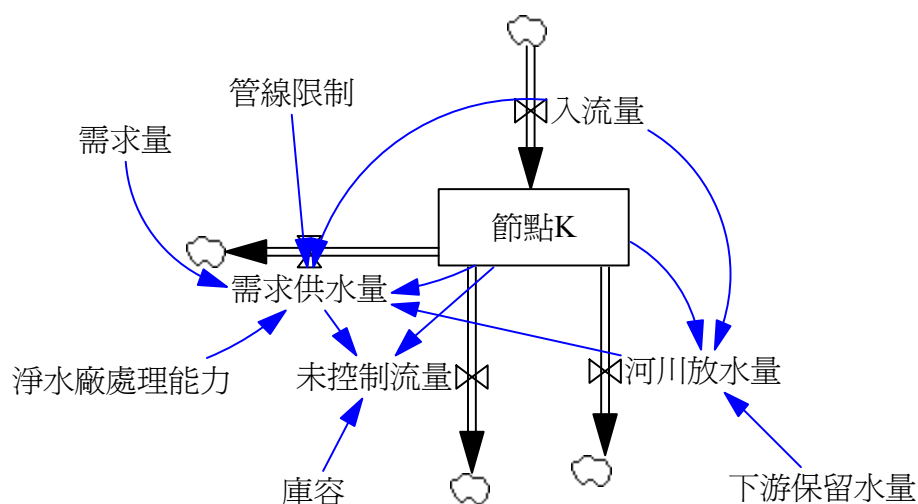


圖 3.4-3 典型水資源供需系統動力流圖

3.5 蒙地卡羅分析

依國內外據文獻（Metropolis, Ulam，1949；柯建州，2001）指出，蒙地卡羅法最早是由美國 Los Alamos 科學實驗室兩位科學家 Ulam 與 Metropolis 所創的。當初是為了要設計核子防護罩，必須知道中子穿透各種材質的程度，但因為這個問題太困難而無法有分析解，又因為十分危險無法由實驗得知，因此他們利用高速電子計算機以隨機數去模擬這個實驗，將這種模擬法命名為蒙地卡羅。

蒙地卡羅模擬法（Monte Carlo simulation method）息息相關的兩個理論，是所謂的大數法則與中央極限定理。由於每次的模擬，都可以視為從相同而獨立的分配中抽樣，因此模擬出來的樣本平均數的變異數，就和母體分配的變異數成正比，和抽樣的數目，也就是模擬的次數成反比，並不用考慮到不同模擬結果之間的共變數，因此在執行

很多次的模擬以後，將所得的每個數值予以平均，所得到的樣本平均數，不但在大數法則下，是估計母體平均數的不偏估計式，也因為樣本平均數的抽樣分配，在中央極限定理之下，具有常態分配的本質，也可以很容易的進行統計推論和區間估計的工作。

本研究透過蒙地卡羅模擬法進行氣候變遷的統計推論，以分析研究模式的不確定性，不確定性涵蓋的範圍相當廣泛，包括模式參數的不確定、氣候變遷降尺度的不確定等，以隨機變數產生多組資料進行模擬多組相互獨立的結果，利用韋伯超越機率法（Weibull）統計結果發生機率。



第四章 台中地區水資源調配風險分析

4.1 研究區域概述

本研究區域為台中地區，其供水來源包含大甲溪及大安溪流域，主要水利設施為大甲溪流域內之德基水庫、石岡壩與八寶堰以及大安溪流域內之士林攔河堰與鯉魚潭水庫，相關位置如圖 4.1-1 所示。以下分別就台中地區供水區域之流域概況及供水系統進行簡介。

4.1.1 流域概況

一、大甲溪流域

大甲溪本流發源於中央山脈之雪山及南湖大山，全長 124.2 公里，流域面積為 1,235.7 平方公里，年平均逕流量約 21 億立方公尺。上游地形群山環峙、河谷峭聳，源頭係由伊卡瓦溪及南湖溪匯流而成，其中以源出於劈亞南鞍部的伊卡瓦溪為本流，東側納入七家灣溪後向南流。至於南湖溪則發源於南湖大山，並有合歡溪及畢祿溪的匯流。伊卡瓦溪及南湖溪於太保久處匯流後始成為大甲溪幹流。

大甲溪上游左岸發源於南湖大山、中央尖山及合歡山良南湖溪、耳無溪及合歡溪等支流；右岸則發源於大壩尖山、次高山、大雪山之七家灣溪、四季朗溪、志樂溪及匹亞桑溪等支流。德基水庫至谷關間長 25 公里之河床，平均坡降 1/43，河床寬約 20 至 30 公尺，岸峻流急，岩盤外露，為大甲溪水力最豐之一段，兩岸重山峻嶺，稜線部份標高約為 2,500 至 3,000 公尺。自谷關以下至天輪電廠間兩岸較為開展，河床寬達百公尺，再西行至馬鞍寮以後，西出山嶺，約束頓減，河寬達 500 公尺以上。在天輪至石岡間大甲溪東側之山勢較高，約在 500 至 2,000 公尺之間；西側則山勢較緩，平均高度在 500 至 600 公尺左右。

而大甲溪中游地形起伏大，河床陡急，匯流後的大甲溪幹流至德

基以下呈帶狀分布，大約在德基下游 3 公里處匯入志樂溪，沿途再納入匹亞桑溪、小雪溪、馬崙溪、鞍馬溪、稍來溪、十文溪等數條溪，流經谷關、白冷、馬鞍寮等至東勢流入平原。下游地形開展寬闊、坡度平緩、坡降僅 1/90，過石岡後蜿蜒西流，而在清水鎮及大安鄉交界處附近流入台灣海峽。

在大甲溪下游將大肚溪台地與后里台地截開分離，呈網狀流路，迂迴於台中盆地北端，並堆積大量砂礫於河口，造成沖積扇，復與大安溪沖積扇相疊，成一合流沖積扇。

大甲溪流域分屬 3 縣之 13 鄉鎮其行政區域宜蘭縣是上游發源地與蘭陽溪流域鄰接，山地屬太平鄉；南投縣是上游合歡溪發源地屬仁愛鄉；上游山區為的台中縣和平鄉。中下游為東勢鎮、新社鄉、石岡鄉、豐原市、后里鄉、神岡鄉、外埔鄉、大甲鎮、清水鎮、大安鄉共 7 鄉 4 鎮。本流域交通發達，主要鐵路有縱貫鐵路山、海 2 線；主要公路除國道 1 號、3 號及 4 號高速公路外，尚有省道台 1 線、台 3 線、新竹豐原線（尖豐公路）及台 8 可通至其他各縣市，另外鄉、鎮公路更是四通八達。

二、大安溪流域

大安溪發源於苗栗、新竹縣界之大壩尖山與雪山北斜面。上源有二，北源為馬達拉溪，南源為雪山溪，兩溪匯流後稱大安溪，至象鼻溪流轉向南行，其間納入大雪溪、北坑溪及南坑溪等支流，至士林附近納匯雪山坑溪，繼納烏石坑溪，經過雙琦後轉向西行，至卓蘭納老莊溪，行至火炎山附近納景山溪，經火炎山山麓，由大甲鎮西勢附近注入台灣海峽。流路全長 95.8 公里，流經苗栗、台中兩縣，流域面積約 758 平方公里。本流域水源不穩，年平均逕流量約 13.3 億立方公尺，取水灌溉農田約 10,770 公頃。大安溪流域灌溉事業目前均由台中農田

水利會負責，營運績效卓著。但因河川豐枯水期流量差異極為懸殊，因此，本區域水資源蘊藏雖屬豐沛，但枯水期逕流量很低，水源不敷分配應用。鯉魚潭水庫位於大安溪支流景山溪之中上游，水庫容量 1.26 億立方公尺，壩址以上景山溪之集水面積 53.45 平方公里，年平均逕流量約 0.8 億立方公尺。整個流域在地勢上東部較為高峻，向西傾斜，自卓蘭起海拔 500 公尺以下之丘陵起伏其間，蜿蜒連綿。除濱海地區，平原殊不多見。

大安溪流域分屬 2 縣其行政區域為苗栗縣的泰安鄉、卓蘭鄉、三義鄉與苑裡鄉，台中縣為和平鄉、東勢鄉、后里鄉、外埔鄉、大甲鄉與大安鄉。其交通方面主要有台 3 線及苗 55 號線道，南北貫穿集水區，另外有 5 條產業道路及 12 條農路分佈其中。



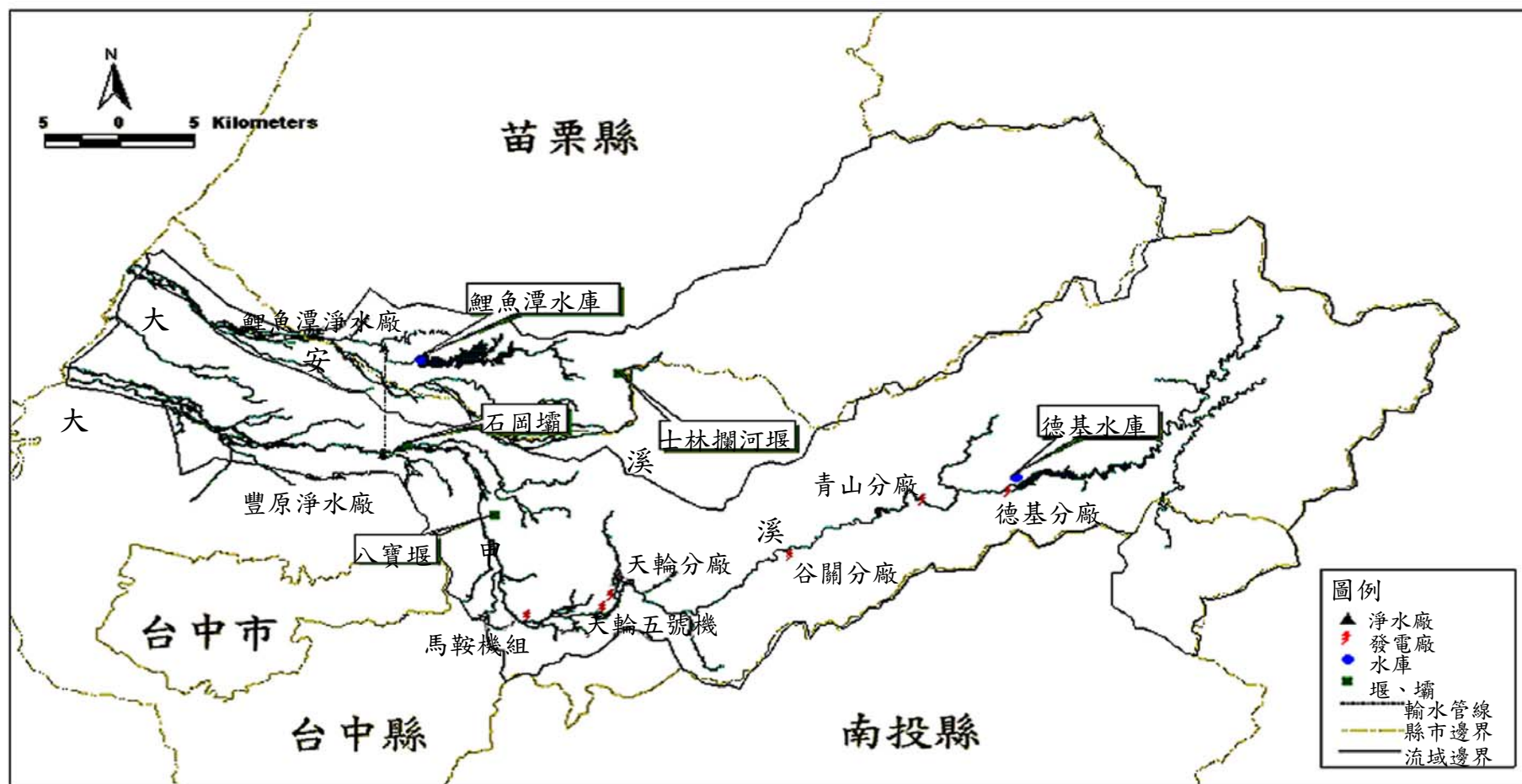


圖 4.1-1 大安溪、大甲河流域圖

4.1.2 水文資料

本區域位於中低緯度之交界，屬亞熱帶氣候區每年 10 月至翌年 4 月盛行東北季風，因中央山脈阻隔，故雨量較少。而每年 4 月至 9 月間盛行西南風、梅雨及颱風導致雨量豐沛。

一、氣溫

大甲溪流域上游梨山地區年均溫在 15°C 左右，中游達見至谷關、東勢鎮、新社鄉一帶約在 19°C 上下，下游沿海五鄉鎮，溫度在 $20^{\circ}\text{C}\sim 25^{\circ}\text{C}$ 之間。平地平均氣溫為 23.7°C 。而全年最高溫約高達 27°C ，最低溫度則 17°C 。大安溪流域之平均溫度以 1 月最低，7 月最高，全年平均溫度在 23°C 。

由於大甲大安溪流域上游集水區中，僅大甲溪流域集水區內有環山觀測站溫度資料，故大甲溪流域集水區平均溫度以環山觀測站資料代表，大安溪流域集水區平均溫度則參考環山觀測站溫度，依海拔每上升一百公尺下降 0.6 度進行推估。其中大安溪流域與大甲溪流域高程差以卓蘭流量站與大甲溪松茂流量站高程差代表。環山觀測站其位置如圖 4.1.2-1，其高程與 TM2 度座標如表 4.1.2-1。

二、雨量

大甲溪流域之降雨量以 4 至 9 月為最多，因流域此時處於迎風地帶，雨量頗豐，同時因天氣炎熱造成對流旺盛導致雷雨益增。而到了 7、8 月多颱風季節，更會受氣流影響挾帶大量颱風雨。每年 10 月至翌年 3 月則為乾早期，因地處東北季風背風地帶，雨量甚少。

本研究依據水利署與台電公司所提供之雨量測站資料，雨量站的選定必須考量時間與空間，時間上考慮 IPCC 通用的分析方式，觀測資料需包含未發生氣候變遷基期(1960 至 1990 年)之雨量站資料，

空間上需位於集水區上游之雨量站，因此大甲溪流域選定平岩山、桃山、松茂(2)雨量站，大安溪流域選定松安、雪嶺、象鼻(1)、雙崎(2)、卓蘭(2)雨量站，其雨量站位置如圖 4.1.2-1，高程與 TM2 度座標如表 4.1.2-2。

三、流量

本研究收集雨量及流量資料以作為地表逕流模式檢定與驗證之用，依據水利署與台電公司所提供之流量測站資料，大甲溪流域上游集水區選定松茂流量站，大安溪流域上游集水區選定卓蘭流量站，其流量站位置如圖 4.1.2-1，高程與 TM2 度座標如表 4.1.2-3。

然而除了上游集水區之入流外，中下游仍有多處側流量匯入，但由於各支流尚未設置流量站，需由鄰近流量站之觀測資料，以面積比例法推估該位址之流量。此法係假設集水區之逕流量與其集水面積具有某種程度之關聯，由堰壩址與欲引用流量站之觀測流量與集水面積關係式 $Q_1/Q_2 = (A_1/A_2)^n$ ，間接推估堰壩址流量。本研究面積法之係數(n 值)以(2007)「區域水資源永續利用之策略模擬與分析(總報告)」中所建議採用 1.04。大甲溪流各河段側流量之推估式列如表 4.1.2-4 所示。大安溪流各河段側流量之推估式列如表 4.1.2-5 所示。

表4.1.2-1使用溫度站基本資料

使用溫度站	標高(公尺)	TM2 度分 帶 X 座標	TM2 度分 帶 Y 座標	使用紀錄年份
環山	1444	279263.3	2690226	1971~1999

表4.1.2-2使用雨量站基本資料

使用雨量站	標高(公尺)	TM2 度分 帶 X 座標	TM2 度分 帶 Y 座標	使用紀錄年份	缺紀錄年份
雙崎(2)	553	240045	2687606	1973~1989 , 1992~1999	1990
象鼻(1)	760	243937	2695146	1973~1989 , 1992~1999	1990
松安	1400	247752	2699284	1973~1989 , 1992~1999	1991
卓蘭(2)	337	230211	2689025	1973~1989 , 1992~1999	2005
雪嶺	2520	251758	2686190	1973~1989 , 1992~1999	1977,2004,2005
松茂(2)	1457	276194	2688312	1971~1991 , 1993~1996	1970
桃山	2350	278737	2699362	1971~1991 , 1993~1996	1969,1992
平岩山	2800	285518	2691994	1971~1991 , 1993~1996	

表4.1.2-3使用雨量站基本資料

使用流量站	集水區面積 (平方公里)	標高(公尺)	TM2 度分 帶 X 座標	TM2 度分 帶 Y 座標	使用紀錄年份
卓蘭	599.32	325	230438	2689191	1973~1989 , 1992~1999
松茂	417.08	1434	275574	2687359	1971~1991 , 1993~1996

表4.1.2-4大甲溪流域側流量推估方式表

河段區分	側入流量推估方式
德基水庫 入流量	$\text{松茂站} \times \left(\frac{\text{德基水庫集水區面積}}{\text{松茂站集水區面積}} \right)^{1.04}$ <p>德基水庫集水區面積：514.00 平方公里</p>
德基水庫 至青山壩	$\text{松茂站} \times \left(\frac{\text{青山壩集水區面積}}{\text{松茂站集水區面積}} \right)^{1.04} - \text{松茂站} \times \left(\frac{\text{德基水庫集水區面積}}{\text{松茂站集水區面積}} \right)^{1.04}$ <p>青山壩集水區面積：517.80 平方公里</p>
青山壩 至谷關壩	$\text{松茂站} \times \left(\frac{\text{谷關壩集水區面積}}{\text{松茂站集水區面積}} \right)^{1.04} - \text{松茂站} \times \left(\frac{\text{青山壩集水區面積}}{\text{松茂站集水區面積}} \right)^{1.04}$ <p>谷關壩集水區面積：686.30 平方公里</p>
谷關壩 至天輪壩	<p>谷關壩至天輪壩側流量：</p> $\text{松茂站} \times \left(\frac{\text{天輪壩集水區面積}}{\text{松茂站集水區面積}} \right)^{1.04} - \text{松茂站} \times \left(\frac{\text{谷關壩集水區面積}}{\text{松茂站集水區面積}} \right)^{1.04}$ <p>側流量修正(志樂溪部分水量引入德基水庫)： 谷關壩至天輪壩側流量-志樂溪越域引水引水量</p> <p>天輪壩集水區面積：758.10 平方公里</p>
天輪壩 至馬鞍壩	$\text{松茂站} \times \left(\frac{\text{馬鞍壩集水區面積}}{\text{松茂站集水區面積}} \right)^{1.04} - \text{松茂站} \times \left(\frac{\text{天輪壩集水區面積}}{\text{松茂站集水區面積}} \right)^{1.04}$ <p>馬鞍壩集水區面積：963.25 平方公里</p>
馬鞍壩 至八寶堰	$\text{松茂站} \times \left(\frac{\text{大甲堰集水區面積}}{\text{松茂站集水區面積}} \right)^{1.04} - \text{松茂站} \times \left(\frac{\text{馬鞍壩集水區面積}}{\text{松茂站集水區面積}} \right)^{1.04}$ <p>八寶堰集水區面積：983.00 平方公里</p>
八寶堰 至石岡壩	$\text{松茂站} \times \left(\frac{\text{石岡壩集水區面積}}{\text{松茂站集水區面積}} \right)^{1.04} - \text{松茂站} \times \left(\frac{\text{大甲堰集水區面積}}{\text{松茂站集水區面積}} \right)^{1.04}$ <p>石岡壩集水區面積：1061.00 平方公里</p>
馬鞍壩 至石岡壩	$\text{松茂站} \times \left(\frac{\text{石岡壩集水區面積}}{\text{松茂站集水區面積}} \right)^{1.04} - \text{松茂站} \times \left(\frac{\text{馬鞍壩集水區面積}}{\text{松茂站集水區面積}} \right)^{1.04}$

表4.1.2-5大安溪流域側流量推估方式表

河段區分	側入流量推估方式
士林堰 入流量	$\text{卓蘭站} \times \left(\frac{\text{士林堰集水區面積}}{\text{卓蘭站集水區面積}} \right)^{1.04}$ <p>士林堰集水區面積：447.12 平方公里</p>
鯉魚潭水庫 入流量	$\text{卓蘭站} \times \left(\frac{\text{鯉魚潭水庫集水區面積}}{\text{卓蘭站集水區面積}} \right)^{1.04}$ <p>鯉魚潭水庫集水區面積：53.45 平方公里</p>
雪山坑溪 入流量	$\text{卓蘭站} \times \left(\frac{\text{雪山坑溪集水區面積}}{\text{卓蘭站集水區面積}} \right)^{1.04}$ <p>雪山坑溪集水區面積：45.32 平方公里</p>



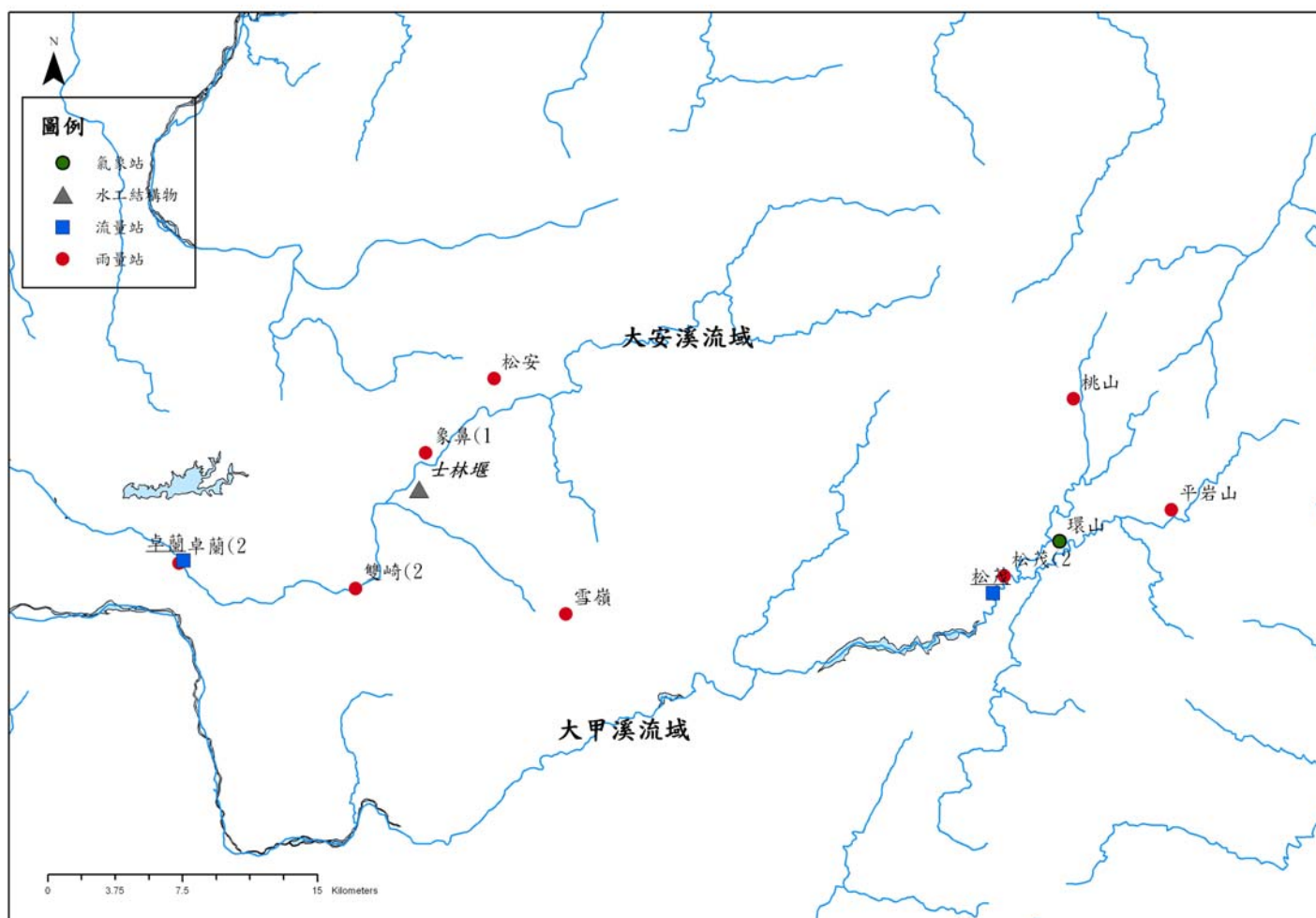


圖 4.1.2-1 水文資料站位置圖

4.1.3 需求推估

目前水利署所推估的未來需水量資料是到 2021 年為止，故本研究在未來需水量情境分析將以 2021 年作為代表。相關資料分如下述：

一、生活用水

本研究生活用水需求主要以中水局(2006)「中部地區水資源利用整體檢討規劃」及自來水公司(2007)「台灣自來水現代化經營管理綱要計畫」中所推估的資料，其推估節約用水與趨勢成長下之未來生活用水量。採用公式如下，各參數詳細資料見表 4.1.3-1～表 4.1.3-5；推估結果詳見表 4.1.3-6 及表 4.1.3-7。

自來水配水量＝人口數×普及率×每人每日用水量／抄見率

自行取水量＝人口數×(1－普及率)×每人每日用水量



表4.1.3-1台中地區之目標年人口推估表

單位：萬人

目標年	95 年	96 年	97 年	98 年	99 年	100 年	101 年	102 年	103 年	104 年	105 年	106 年	107 年	108 年	109 年	110 年
人口數	261.5	263.4	265.3	267.2	269.1	271	272.7	274.3	276	277.6	279.3	280	280.8	281.5	282.3	283

資料來源：中部地區水資源利用整體檢討規劃

表4.1.3-2台中地區之目標年普及率

單位：%

目標年	95 年	96 年	97 年	98 年	99 年	100 年	101 年	102 年	103 年	104 年	105 年	106 年	107 年	108 年	109 年	110 年
普及率	90.50	90.94	91.38	91.82	92.26	92.7	92.96	93.22	93.48	93.74	94.00	94.50	95.00	95.50	96.00	96.50

資料來源：中部地區水資源利用整體檢討規劃

表4.1.3-3台中地區之目標年抄見率

單位：%

目標年	95 年	96 年	97 年	98 年	99 年	100 年	101 年	102 年	103 年	104 年	105 年	106 年	107 年	108 年	109 年	110 年
抄見率	58.30	58.30	58.30	58.30	58.30	62.06	62.06	62.06	62.06	62.06	65.20	65.20	65.20	65.20	65.20	65.20

資料來源：台灣自來水現代化經營管理綱要計畫

表4.1.3-4台中地區之目標年每人每日用水量(節約用水)

單位：公升

目標年	95 年	96 年	97 年	98 年	99 年	100 年	101 年	102 年	103 年	104 年	105 年	106 年	107 年	108 年	109 年	110 年
每人每日用水量	286	285.4	284.8	284.2	283.6	283	281.8	280.6	279.4	278.2	277	276	275	274	273	272

資料來源：中部地區水資源利用整體檢討規劃

表4.1.3-5台中地區之目標年每人每日用水量(趨勢成長)

單位：公升

目標年	95 年	96 年	97 年	98 年	99 年	100 年	101 年	102 年	103 年	104 年	105 年	106 年	107 年	108 年	109 年	110 年
每人每日用水量	290	291	292	293	294	295	295.4	295.8	296.2	296.6	297	297.6	298.2	298.8	299.4	300

資料來源：中部地區水資源利用整體檢討規劃

表4.1.3-6台中地區之目標年生活用水需求量推估(節約成長)

單位：立方公尺/日

目標年	95	96	97	98	99	100	101	102
自來水系統	116106.00	117271.65	118439.55	119609.63	120781.86	114557.46	115109.23	115614.01
自行取水量	7104.96	6810.80	6513.05	6211.75	5906.92	5598.59	5410.02	5218.47
總需水量	123210.95	124082.45	124952.60	125821.38	126688.78	120156.05	120519.25	120832.48
目標年	103	104	105	106	107	108	109	110
自來水系統	116156.12	116651.26	111544.28	112012.80	112518.04	112979.87	113478.48	113933.49
自行取水量	5027.86	4834.49	4641.97	4250.40	3861.00	3470.90	3082.72	2694.16
總需水量	121183.98	121485.75	116186.25	116263.20	116379.04	116450.77	116561.20	116627.65

表4.1.3-7台中地區之目標年生活用水需求量推估(趨勢成長)

單位：立方公尺/日

自來水系統	117729.86	119572.71	121433.81	123313.24	125211.10	119415.02	120664.54	121876.78
自行取水量	7204.33	6944.44	6677.71	6404.09	6123.53	5835.99	5671.11	5501.15
總需水量	124934.18	126517.14	128111.51	129717.33	131334.63	125251.00	126335.65	127377.93
目標年	103	104	105	106	107	108	109	110
自來水系統	123140.45	124366.51	119598.02	120779.02	122010.47	123205.79	124452.22	125661.94
自行取水量	5330.18	5154.24	4977.13	4583.04	4186.73	3785.05	3380.82	2971.50
總需水量	128470.63	129520.76	124575.15	125362.06	126197.20	126990.84	127833.05	128633.44
自來水系統	117729.86	119572.71	121433.81	123313.24	125211.10	119415.02	120664.54	121876.78

二、工業用水

本研究工業用水需求主要以中水局(2006)「中部地區水資源利用整體檢討規劃」中所推估之低成長、中成長及高成長之工業用水資料，其中：

1.低成長係指既有工業區及開發中電力事業之用水成長加上目前開發中工業區完成後所需之用水。其詳細資料見表 4.1.3-8～表 4.1.3-10。

2.中成長係包括低成長加上報編及編定中工業區完成後所需之用水。台中地區已編定及(編定中) 工業區之目標年需水量見表 4.1.3-11。

3.高成長係包括中成長再加上規劃研議中工業區用水及規劃中電力事業用水後所需之用水。台中地區規劃研議中工業區用水量見表 4.1.3-12。

各不同目標年之工業用水之推估結果詳見表 4.1.3-13。



表4.1.3-8 台中地區現有工業用地之目標年需水量

單位：立方公尺/日

自來水系統										自行取水量
90 年用水量	年趨勢增加率	95 年	96 年	97 年	98 年	99 年	100 年	101 年	102 年	民國 90 年及各目標年
		23,058	22,939	22,825	22,716	22,612	22,512	22,888	23,263	
20,443	2.0%	103 年	104 年	105 年	106 年	107 年	108 年	109 年	110 年	318,583
		23,263	24,013	24,388	24,746	25,139	25,514	25,889	26,264	

資料來源：中部地區水資源利用整體檢討規劃

表4.1.3-9台灣電力公司電廠營運用水統計及新建或擴增機組需水計畫表

單位：立方公尺/日

電廠名稱	95 年	96 年	97 年	98 年	99 年	100 年	101 年	102 年	103 年	104 年	105 年	106 年	107 年	108 年	109 年	110 年
台中電廠	16500	16500	16500	16500	16500	16500	16500	16500	16500	16500	16500	16500	16500	16500	16500	16500

資料來源：中部地區水資源利用整體檢討規劃

表4.1.3-10台中地區開發中工業區之目標年需水量表

單位：千立方公尺/日

工業區名稱	95 年	96 年	97 年	98 年	99 年	100 年	101 年	102 年	103 年	104 年	105 年	106 年	107 年	108 年	109 年	110 年	備註
中部科學園區台中基地一、二期	65	85	105	125	140	145	145	145	145	145	145	145	145	145	145	145	含台中航太工業區用水
台中港臨海工業區	0.15	0.15	45.3	47.5	47.5	64.5	104.5	104.5	104.5	104.5	104.5	104.5	104.5	104.5	104.5	104.5	僅含中隆鋼鐵、台肥及中美和等公司新增用水

資料來源：中部地區水資源利用整體檢討規劃

表4.1.3-11已編定(編定中) 工業區之目標年需水量表

單位：立方公尺/日

工業區名稱	95 年	96 年	97 年	98 年	99 年	100 年	101 年	102 年	103 年	104 年	105 年	106 年	107 年	108 年	109 年	110 年
台中市精密機械科技園區	0	700	1,500	2,600	3,600	6,200	6,200	6,200	6,200	6,200	6,200	6,200	6,200	6,200	6,200	6,200
仁化工業區	230	900	1,300	1,700	2,100	2,220	2,220	2,220	2,220	2,220	2,220	2,220	2,220	2,220	2,220	2,220
聚興工業區	176	176	264	350	350	350	350	350	350	350	350	350	350	350	350	350
環隆科技工業園區	0	10	1,445	1,755	1,858	2,065	2,065	2,065	2,065	2,065	2,065	2,065	2,065	2,065	2,065	2,065
中科三期后里基地計畫	1,000	5,000	20,000	35,000	60,000	85,000	110,000	135,000	150,000	161,000	161,000	161,000	161,000	161,000	161,000	161,000

資料來源：中部地區水資源利用整體檢討規劃

表4.1.3-12規劃(研議中)工業區之目標年需水量表

單位：立方公尺/日

工業區名稱	95 年	96 年	97 年	98 年	99 年	100 年	101 年	102 年	103 年	104 年	105 年	106 年	107 年	108 年	109 年	110 年	備註
-	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	

資料來源：中部地區水資源利用整體檢討規劃

表4.1.3-13台中地區之目標年工業用水需水量

單位：立方公尺/日

項目	95 年	96 年	97 年	98 年	99 年	100 年	101 年	102 年	103 年	104 年	105 年	106 年	107 年	108 年	109 年	110 年
低成長 (含自行取水)	491,836	524,229	634,493	666,107	684,253	713,155	779,382	779,757	780,133	780,508	780,883	781,258	781,633	782,009	782,384	782,759
中成長 (含自行取水)	493,733	533,189	665,415	717,364	766,551	828,710	923,687	952,812	970,438	983,463	983,838	984,213	984,588	984,964	985,339	985,714
高成長 (含自行取水)	493,733	533,189	665,415	717,364	766,551	828,710	923,687	952,812	970,438	983,463	983,838	984,213	984,588	984,964	985,339	985,714
低成長 (不含自行取水)	173,256	205,636	315,895	347,510	365,661	394,572	460,800	460,175	460,550	461,925	462,300	462,676	463,051	463,426	463,801	464,176
中成長 (不含自行取水)	175,153	214,596	346,817	398,767	447,959	510,127	605,105	633,230	650,855	664,880	665,255	665,631	666,006	666,381	666,756	667,131
高成長 (不含自行取水)	175,153	214,596	346,817	398,767	447,959	510,127	605,105	633,230	650,855	664,880	665,255	665,631	666,006	666,381	666,756	667,131

資料來源：中部地區水資源利用整體檢討規劃

三、農業用水

農業用水推估假設未來零成長，其推估量以各灌區登記水權量與計畫用水量較小者推估之，各灌區乃依各圳路取水位置予以合併，其中大甲溪流域中區分為白冷圳、大甲溪上游灌區(大茅埔圳、老圳、東勢本圳、八寶圳)、石岡壩灌區(葫蘆墩圳、八寶堰中下游灌區)、大甲溪下游灌區(埤頭山圳、內埔圳、虎眼一圳、虎眼二圳、五福圳、高美圳)；大安溪流域中區分為士林堰下游灌區(卓蘭圳、石壁坑圳、埔尾橫圳、矮山圳、口潭圳、新店圳、頂店圳)、后里圳灌區(后里圳)、鯉魚潭灌區(鯉魚潭圳)、三灌圳(苑裡圳、日南圳、九張犁圳)。各推估結果詳見表 4.1.3-14 及表 4.1.3-15。



表4.1.3-14大甲溪目標年農業用水量表(1/2)

單位：cms

溪段	用水標的	1 月			2 月			3 月			4 月			5 月			6 月		
		上	中	下	上	中	下	上	中	下	上	中	下	上	中	下	上	中	下
德基水庫、石岡壩	白冷圳	1.831	1.831	1.831	1.831	1.831	1.831	1.831	1.831	1.831	1.831	1.831	1.831	1.831	1.831	1.831	1.831	1.831	1.831
	大茅埔圳	0.121	0.121	0.121	0.121	0.121	0.121	0.121	0.121	0.121	0.121	0.121	0.121	0.121	0.121	0.121	0.121	0.121	0.121
	老圳	0.240	0.240	0.240	0.240	0.240	0.240	0.240	0.240	0.240	0.240	0.240	0.240	0.240	0.240	0.240	0.240	0.240	0.240
	東勢本圳	0.763	0.763	0.763	0.763	0.763	0.763	0.763	0.763	0.763	0.763	0.763	0.763	0.763	0.763	0.763	0.763	0.763	0.763
	八寶圳上游	0.326	0.326	0.324	0.411	0.405	0.372	0.481	0.459	0.478	0.455	0.456	0.471	0.474	0.474	0.474	0.419	0.305	0.480
	小計	3.281	3.281	3.279	3.366	3.360	3.327	3.436	3.414	3.433	3.410	3.411	3.426	3.429	3.429	3.429	3.374	3.260	3.435
石岡壩	八寶圳中下游	0.309	0.309	0.311	0.406	0.412	0.445	0.881	0.903	0.884	0.829	0.828	0.813	0.810	0.810	0.810	0.714	0.828	0.653
	葫蘆墩圳	3.961	3.955	4.213	4.424	5.630	8.714	14.023	16.106	16.111	15.050	14.607	13.993	13.301	13.300	13.300	13.160	11.802	8.427
	小計	4.270	4.264	4.524	4.830	6.042	9.159	14.904	17.009	16.995	15.879	15.435	14.806	14.111	14.110	14.110	13.874	12.630	9.080
石岡壩、大甲溪河口	埤頭山圳	0.046	0.046	0.046	0.046	0.046	0.046	0.046	0.046	0.046	0.046	0.046	0.046	0.046	0.046	0.046	0.046	0.046	0.046
	內埔圳	0.247	0.247	0.247	0.255	0.288	0.309	0.813	1.323	1.456	1.266	1.266	1.224	1.125	1.125	1.125	1.125	1.125	1.011
	五福圳	1.081	1.081	1.081	1.116	1.220	1.287	2.850	4.257	4.257	5.075	5.075	4.958	4.475	4.475	4.475	4.475	4.475	4.017
	虎眼一圳	0.289	0.289	0.327	0.354	0.683	0.683	1.331	1.331	1.331	1.154	1.154	1.154	1.129	1.129	1.129	1.129	0.962	0.369
	高美圳	0.510	0.510	0.510	0.531	0.568	0.592	1.261	1.505	1.505	1.984	1.984	1.984	1.955	1.955	1.955	1.955	1.955	1.955
	虎眼二圳	0.310	0.310	0.350	0.379	0.677	0.677	1.093	1.093	1.093	0.934	0.934	0.934	0.814	0.814	0.814	0.814	0.814	0.386
	小計	2.483	2.483	2.561	2.681	3.482	3.594	7.394	9.555	9.688	10.459	10.459	10.300	9.544	9.544	9.544	9.544	9.377	7.784
合計		10.034	10.028	10.364	10.877	12.884	16.080	25.734	29.978	30.116	29.748	29.305	28.532	27.084	27.083	27.083	26.792	25.267	20.299

表4.1.3-14大甲溪目標年農業用水量表(2/2)

單位：cms

溪段	用水標的	7 月			8 月			9 月			10 月			11 月			12 月		
		上	中	下	上	中	下	上	中	下	上	中	下	上	中	下	上	中	下
德基水庫 石岡壩	白冷圳	1.831	1.831	1.831	1.831	1.831	1.831	1.831	1.831	1.831	1.831	1.831	1.831	1.831	1.831	1.831	1.831	1.831	1.831
	大茅埔圳	0.120	0.120	0.120	0.121	0.121	0.121	0.121	0.121	0.121	0.121	0.121	0.121	0.121	0.121	0.121	0.121	0.121	0.121
	老圳	0.240	0.240	0.240	0.240	0.240	0.240	0.240	0.240	0.240	0.240	0.240	0.240	0.240	0.240	0.240	0.240	0.240	0.240
	東勢本圳	0.763	0.763	0.763	0.763	0.763	0.763	0.763	0.763	0.763	0.763	0.763	0.763	0.763	0.763	0.763	0.759	0.759	0.759
	八寶圳上游	0.472	0.532	0.345	0.465	0.482	0.484	0.469	0.476	0.476	0.443	0.445	0.494	0.319	0.364	0.347	0.332	0.332	0.332
	小計	3.426	3.486	3.299	3.420	3.437	3.439	3.424	3.431	3.431	3.398	3.400	3.449	3.274	3.319	3.302	3.283	3.283	3.283
石岡壩	八寶圳中下游	0.546	0.486	0.673	0.890	0.873	0.871	0.815	0.808	0.808	0.752	0.750	0.701	0.328	0.283	0.300	0.315	0.315	0.315
	葫蘆墩圳	7.254	9.259	19.213	15.628	15.064	14.887	13.413	13.294	13.294	13.295	13.128	8.634	3.667	3.122	3.557	3.963	3.964	3.963
	小計	7.800	9.745	19.886	16.518	15.937	15.758	14.228	14.102	14.102	14.047	13.878	9.335	3.995	3.405	3.857	4.278	4.279	4.278
石岡壩 大甲溪河口	埤頭山圳	0.046	0.046	0.046	0.046	0.046	0.046	0.046	0.046	0.046	0.046	0.046	0.046	0.046	0.046	0.046	0.046	0.046	0.046
	內埔圳	0.882	0.545	1.633	1.482	1.266	1.266	1.167	1.125	1.125	1.125	1.125	0.959	0.413	0.247	0.247	0.247	0.247	0.247
	五福圳	3.337	1.922	4.442	5.761	4.605	4.605	4.379	4.061	4.061	4.061	4.061	3.684	1.840	0.869	0.877	0.946	1.004	1.004
	虎眼一圳	0.295	0.354	1.770	2.001	1.794	1.794	1.665	1.579	1.579	1.579	1.579	1.364	0.580	0.295	0.304	0.314	0.314	0.313
	高美圳	1.681	0.997	1.522	2.886	2.588	2.588	2.494	2.275	2.275	2.275	2.275	2.118	1.152	0.403	0.414	0.437	0.461	0.461
	虎眼二圳	0.293	0.356	1.869	2.116	1.894	1.894	1.756	1.664	1.664	1.664	1.664	1.434	0.586	0.287	0.294	0.301	0.301	0.301
	小計	6.534	4.220	11.282	14.292	12.193	12.193	11.507	10.750	10.750	10.750	10.750	9.605	4.617	2.147	2.182	2.291	2.373	2.372
合計		17.760	17.451	34.467	34.230	31.567	31.390	29.159	28.283	28.283	28.195	28.028	22.389	11.886	8.871	9.341	9.852	9.935	9.933

資料來源：大安溪及大甲溪水資源聯合運用初步規劃報告

表4.1.3-15大安溪目標年農業用水量表(1/2)

單位：cms

溪段	用水標的	1 月			2 月			3 月			4 月			5 月			6 月		
		上	中	下	上	中	下	上	中	下	上	中	下	上	中	下	上	中	下
士林 攔河堰 ~ 景山溪 匯流	卓蘭圳	0.025	0.025	0.025	0.519	0.519	0.519	1.313	1.313	1.313	1.313	1.313	1.313	1.313	1.313	1.313	1.313	1.313	1.313
	石壁坑圳	0.090	0.090	0.090	0.553	0.553	0.553	0.553	0.553	0.553	0.553	0.553	0.553	0.553	0.553	0.553	0.553	0.553	0.553
	埔尾橫圳	0.007	0.007	0.007	0.073	0.073	0.073	0.203	0.205	0.204	0.203	0.203	0.202	0.202	0.202	0.202	0.202	0.201	0.199
	矮山圳	0.007	0.007	0.007	0.052	0.052	0.052	0.118	0.118	0.118	0.130	0.130	0.130	0.129	0.129	0.129	0.128	0.128	0.128
	公共用水	0.024	0.024	0.024	0.024	0.024	0.024	0.024	0.024	0.024	0.024	0.024	0.024	0.024	0.024	0.024	0.024	0.024	0.024
	后里圳	1.860	1.860	1.861	1.870	2.020	2.126	3.017	6.004	6.004	7.122	7.057	7.007	6.324	6.280	6.279	6.280	6.280	5.859
	口潭圳	0.000	0.000	0.000	0.035	0.040	0.053	0.183	0.240	0.244	0.238	0.238	0.218	0.209	0.209	0.209	0.209	0.204	0.153
	新店圳	0.188	0.188	0.188	0.189	0.200	0.208	0.256	0.291	0.291	0.304	0.304	0.304	0.398	0.398	0.398	0.323	0.323	0.323
	頂店圳	1.342	1.342	1.342	1.469	1.469	1.469	3.253	3.253	3.253	2.621	2.621	2.621	3.058	3.058	3.058	2.945	2.945	2.588
	小計	3.543	3.543	3.544	4.784	4.950	5.077	8.920	12.001	12.004	12.508	12.443	12.372	12.210	12.166	12.165	11.977	11.971	11.140
鯉魚潭 水庫	鯉魚潭圳	0.000	0.000	0.000	0.025	0.028	0.036	0.084	0.084	0.084	0.109	0.109	0.109	0.112	0.112	0.112	0.113	0.113	0.099
景山溪 匯流點 ~ 大安溪 河口	苑裡圳	0.000	0.000	0.000	1.096	1.234	1.344	2.645	2.645	2.645	3.147	3.147	3.147	3.036	3.036	3.036	3.355	3.355	3.355
	日南圳	0.831	0.831	0.831	0.890	0.890	0.890	1.123	1.123	1.123	1.534	1.534	1.534	2.273	2.273	2.273	2.540	2.540	2.077
	九張犁圳	0.350	0.350	0.350	0.352	0.382	0.401	0.891	0.995	0.995	1.077	1.077	1.004	0.956	0.956	0.956	0.956	0.944	0.749
	小計	1.181	1.181	1.181	2.338	2.506	2.635	4.659	4.763	4.763	5.758	5.758	5.685	6.265	6.265	6.265	6.851	6.839	6.181
合計		4.724	4.724	4.725	7.147	7.484	7.748	13.663	16.848	16.851	18.375	18.310	18.166	18.587	18.543	18.542	18.941	18.923	17.420

表4.1.3-15大安溪目標年農業用水量表(2/2)

單位：cms

溪段	用水標的	7月			8月			9月			10月			11月			12月		
		上	中	下	上	中	下	上	中	下	上	中	下	上	中	下	上	中	下
士林攔河堰 ~ 景山溪 匯流	卓蘭圳	1.254	1.254	1.254	1.313	1.313	1.313	1.313	1.313	1.313	1.313	1.313	1.313	1.173	1.173	1.173	0.173	0.173	0.173
	石壁坑圳	0.553	0.553	0.553	0.553	0.553	0.553	0.553	0.553	0.553	0.553	0.553	0.553	0.309	0.309	0.309	0.098	0.098	0.098
	埔尾橫圳	0.189	0.189	0.189	0.213	0.210	0.210	0.210	0.208	0.208	0.208	0.208	0.207	0.008	0.008	0.008	0.008	0.008	0.008
	矮山圳	0.124	0.124	0.124	0.115	0.115	0.115	0.130	0.130	0.130	0.097	0.097	0.097	0.006	0.006	0.006	0.006	0.006	0.006
	公共用水	0.024	0.024	0.024	0.024	0.024	0.024	0.024	0.024	0.024	0.024	0.024	0.024	0.024	0.024	0.024	0.024	0.024	0.024
	后里圳	5.250	4.257	5.250	8.170	7.134	7.133	6.676	6.348	6.348	6.348	6.348	5.368	2.659	1.684	1.731	1.847	1.847	1.847
	口潭圳	0.080	0.042	0.196	0.278	0.238	0.238	0.227	0.209	0.209	0.209	0.209	0.190	0.091	0.035	0.037	0.039	0.042	0.042
	新店圳	0.380	0.265	0.380	0.343	0.343	0.343	0.490	0.459	0.459	0.459	0.459	0.406	0.186	0.132	0.160	0.188	0.188	0.188
	頂店圳	1.513	1.410	1.513	3.801	3.801	3.801	3.489	3.489	3.489	3.534	3.534	3.349	1.932	1.488	1.604	1.422	1.422	1.422
	小計	9.367	8.118	9.483	14.810	13.731	13.730	13.112	12.733	12.733	12.745	12.745	11.507	6.388	4.859	5.052	3.805	3.808	3.808
鯉魚潭水庫	鯉魚潭圳	0.056	0.029	0.109	0.116	0.116	0.116	0.110	0.110	0.110	0.096	0.096	0.096	0.059	0.025	0.026	0.028	0.029	0.029
景山溪 匯流點 ~ 大安溪 河口	苑裡圳	3.365	1.800	3.509	3.502	3.502	3.502	4.097	4.097	4.097	3.300	3.300	2.310	1.147	1.224	1.300	1.272	1.272	1.272
	日南圳	1.680	0.681	1.680	2.739	2.739	2.739	2.934	2.666	2.666	2.635	2.635	2.554	1.600	0.866	0.843	0.803	0.803	0.803
	九張犁圳	0.594	0.258	0.717	1.360	1.077	1.077	1.052	0.956	0.956	0.956	0.956	0.915	0.619	0.321	0.315	0.350	0.350	0.350
	小計	5.639	2.739	5.906	7.601	7.318	7.318	8.083	7.719	7.719	6.891	6.891	5.779	3.366	2.411	2.458	2.425	2.425	2.425
合計		15.062	10.886	15.498	22.527	21.165	21.164	21.305	20.562	20.562	19.732	19.732	17.382	9.813	7.295	7.536	6.258	6.262	6.262

資料來源：大安溪及大甲溪水資源聯合運用初步規劃報告

4.2 氣象資料合成驗證

本研究採用 3.1 節建立之氣象資料合成模式進行雨量與溫度資料合成，首先收集研究區域長期日溫度、日降雨量共 25 年紀錄資料，資料年份為大甲溪流域 1971 年~1991 年與 1993 年~1996 年，大安溪流域 1973 年~1989 年與 1992 年~1999 年，其中大甲溪上游集水區之降雨量以平岩山、桃山、松茂（2）雨量站歷史雨量資料之平均值代表；大安溪上游集水區之降雨量以松安、雪嶺、象鼻（1）、雙崎（2）、卓蘭（2）雨量站歷史雨量資料之平均值代表，溫度資料以環山氣象站依據高程差每上升 100 公尺下降 0.6 度計算。

雨量資料方面，大甲溪流域氣象合成資料與歷史觀測資料之平均月雨量相關係數可達 0.996，平均月標準差之相關係數可達 0.947，大安溪流域平均月雨量相關係數可達 0.993，平均月標準差相關係數可達 0.855；溫度資料方面，大甲溪流域平均月溫度相關係數可達 1，平均月標準差相關係數可達 1，大安溪流域平均月溫度相關係數可達 1，平均月標準差相關係數可達 1 如表 4.2-1 所示，合成資料之平均值與標準差和觀測資料之平均值與標準差隨時間之變化如圖 4.2-1 至 4.2-4 所示。

表4.2-1觀測資料與合成資料相關係數表

	雨量資料		溫度資料	
	大甲溪流域	大安溪流域	大甲溪流域	大安溪流域
平均值 相關係數	0.996	0.993	1	1
標準差 相關係數	0.947	0.855	1	1

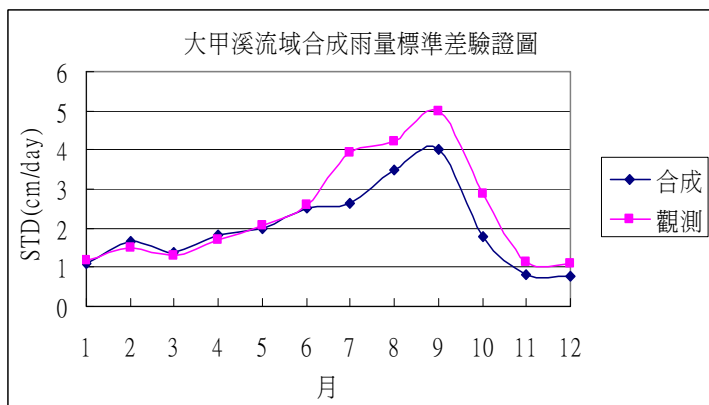
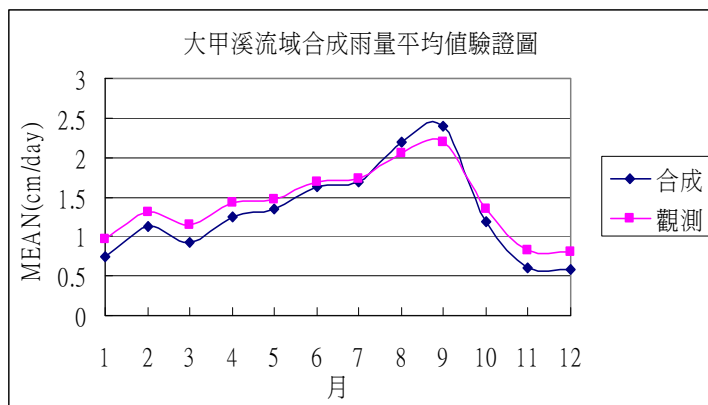


圖 4.2-1 大甲溪流域合成雨量驗證圖

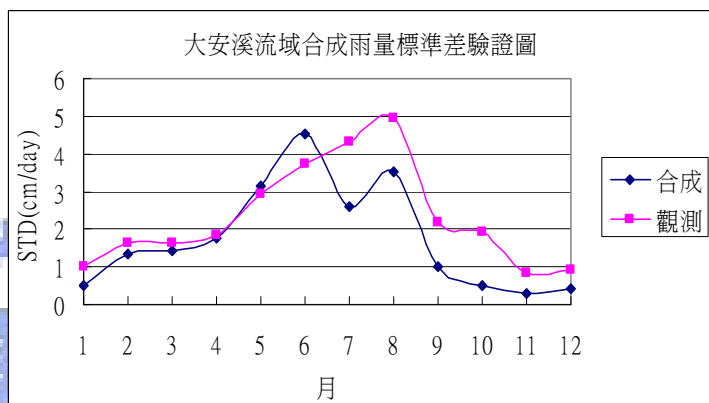
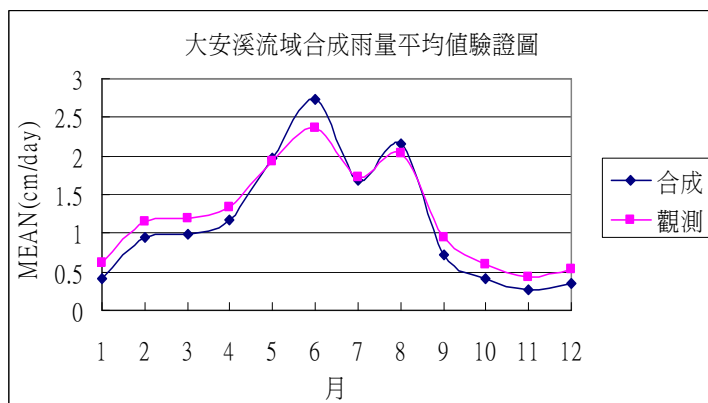


圖 4.2-2 大安溪流域合成雨量驗證圖

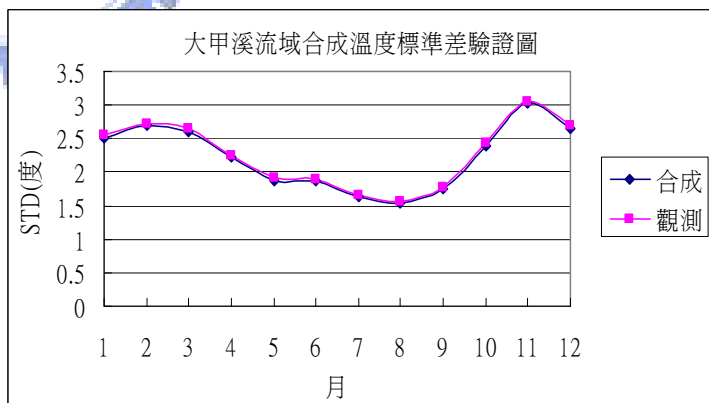
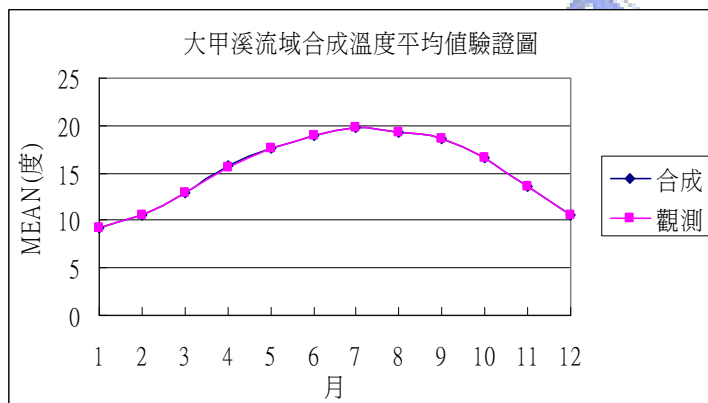


圖 4.2-3 大甲溪流域合成溫度驗證圖

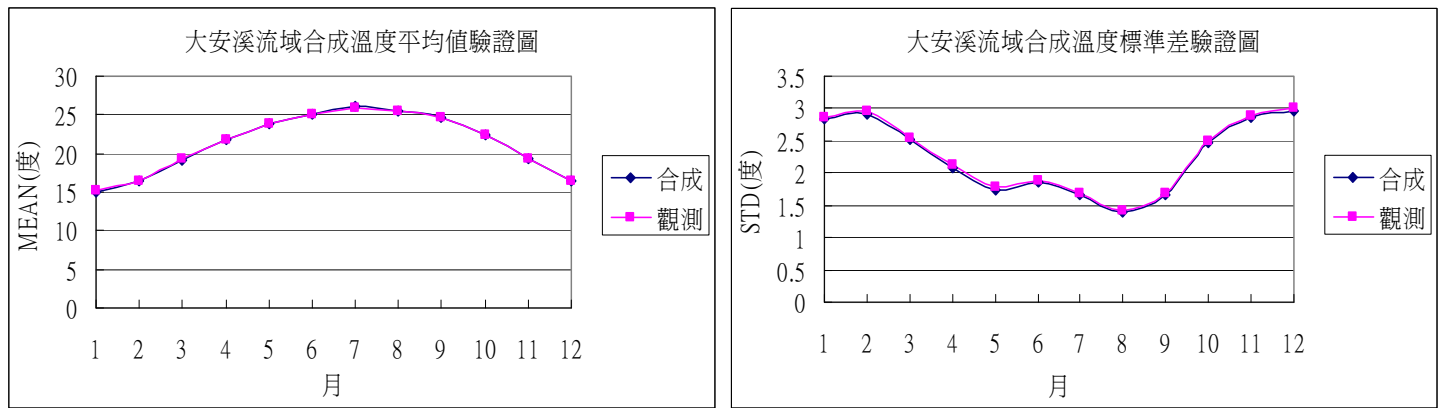


圖 4.2-4 大安溪流域合成溫度驗證圖

4.3 地表逕流模式檢定與驗證

本研究採用 GWLF 模式進行地表逕流演算，由於模式中有多項參數待定，如逕流係數 CN 值、最大土壤水分容量、覆蓋係數、退水係數等，其實際數值不易取得，因此透過參數檢定來求得各項參數值。首先收集研究區域長期日溫度、日降雨量與日流量共 25 年紀錄資料，資料年份為大甲溪流域 1971 年~1991 年與 1993 年~1996 年，大安溪流域 1973 年~1989 年與 1992 年~1999 年，以前 13 年資料進行檢定，後 12 年資料作為驗證，其中大甲溪上游集水區之降雨量以平岩山、桃山、松茂（2）雨量站歷史雨量資料之平均值代表，流量資料採用松茂流量站之觀測資料；大安溪上游集水區之降雨量以松安、雪嶺、象鼻（1）、雙崎（2）、卓蘭（2）雨量站歷史雨量資料之平均值代表，流量資料採用卓蘭流量站之觀測資料。

模式參數值的合理範圍乃參考 GWLF 使用手冊與相關水文書籍並配合研究區域實際地理特性訂定之。其中逕流係數 CN 值隨不同土地利用、耕作方式、水文條件、土壤種類而異，不同土壤種類對應之 CN 值如表 4.3-1 所示，故本研究將研究區域 CN 值之合理範圍訂定為 30~98；最大土壤水分容量亦隨不同土壤種類而異，本研究參考易任、

王如意之應用水文學（詳見表 4.3-2），將研究區域最大土壤水分容量之合理範圍訂定為 3~16；覆蓋係數隨不同土地利用、不同植物種類、不同季節而不同，不同植物其月份之覆蓋係數如表 4.3-3 所示，故將研究區域覆蓋係數之合理範圍訂定為 0.53~1.08；退水係數依據 GWLF 使用手冊建議的合理範圍，各參數之合理範圍整理如表 4.3-4 所示。最後透過試誤法來進行參數檢定，檢定完成與否依據模擬流量旬平均與觀測流量旬平均之相關係數，旬平均相關係數大於 0.9 可表示模式可準確模擬流量變化趨勢，各參數之檢定結果如表 4.3-5 所示，其中大甲溪流域松茂流量站平均旬流量相關係數檢定可達 0.96，驗證可達 0.94，平均旬標準差相關係數檢定可達 0.78，驗證可達 0.88，逐旬流量相關係數檢定可達 0.85，逐旬驗證可達 0.87，大安溪流域卓蘭流量站平均旬流量相關係數檢定可達 0.94，驗證可達 0.93，平均旬標準差相關係數檢定可達 0.81，驗證可達 0.81，逐旬流量相關係數檢定可達 0.75，逐旬驗證可達 0.74，檢定與驗證之平均月流量、平均月標準差與逐旬流量相關係數如表 4.3-6 所示，合成資料之平均值與標準差和觀測資料之平均值與標準差隨時間之變化如圖 4.3-1 至 4.3-6 所示，結果顯示本模式確可合理提供大甲溪和大安溪之流量模擬。

表4.3-1各土地利用類型在不同土壤類別下之CN值

土壤類別	農業用地	草地	林業用地	建築用地	裸露地
較粗的砂質及礫石	63	39	30	98	68
稍細粒的砂質	75	61	55	98	79
細粒的砂質及土壤	83	74	70	98	86
最細的黏土	87	80	77	98	89

資料來源：永續性水質管理系統受氣候變遷影響之脆弱度評估

表4.3-2不同土壤，不同土壤種類之最大土壤水分容量

土壤種類	土壤乾重之百分率(%)		
	田間含水量	凋萎點	最大土壤水分容量
砂	5	2	3
砂壤土	12	5	7
壤土	19	10	9
泥壤土	22	13	9
黏壤土	24	15	9
黏土	36	20	16

資料來源：易任、王如意著應用水文學

表4.3-3不同植物之覆蓋係數

多年生植物覆蓋係數			
月份	葡萄	甘蔗	落葉果林
1月	1.16	0.65	0.58
2月	1.23	0.5	0.53
3月	1.19	0.8	0.665
4月	1.09	1.17	0.74
5月	0.95	1.21	0.73
6月	0.83	1.22	0.7
7月	0.79	1.23	0.81
8月	0.8	1.24	0.96
9月	0.91	1.26	1.08
10月	0.91	1.27	1.03
11月	0.83	1.28	0.82
12月	0.69	0.8	0.65

資料來源：童慶斌氣候變遷與環境生態上課講義

表4.3-4 GWLF模式參數合理範圍

參數	合理範圍	單位
CN2	98~30	無
覆蓋係數	1.08~0.53	無
退水係數	0.2~0.01	無
最大土壤水分容量	16~3	cm/day

表4.3-5 GWLF模式參數檢定結果

參數	大甲溪 檢定結果	大安溪 檢定結果	單位
CN2	75	75	無
覆蓋係數	0.63	0.89	無
退水係數	0.07	0.02	無
最大土壤水分容量	7	7	cm/day

表4.3-6 GWLF模式檢定與驗證相關係數表

	松茂流量站			卓蘭流量站		
	平均值	標準差	逐旬流量	平均值	標準差	逐旬流量
檢定之 相關係數	0.96	0.78	0.85	0.94	0.81	0.75
驗證之 相關係數	0.94	0.88	0.87	0.92	0.81	0.74

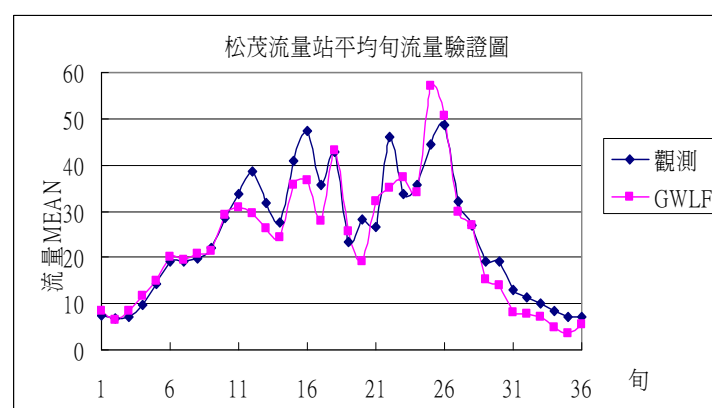
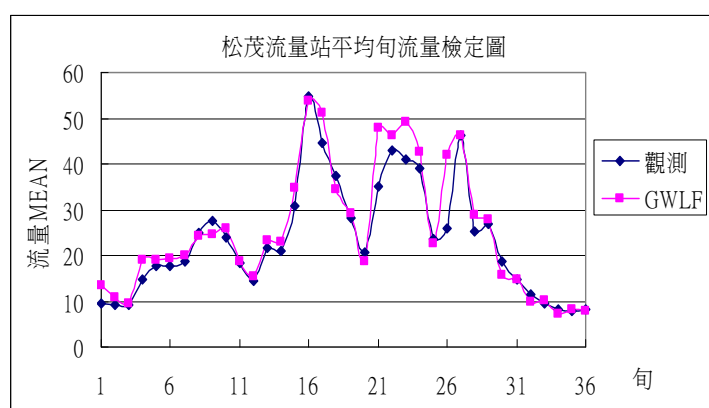


圖 4.3-1 松茂流量站平均旬流量檢定與驗證

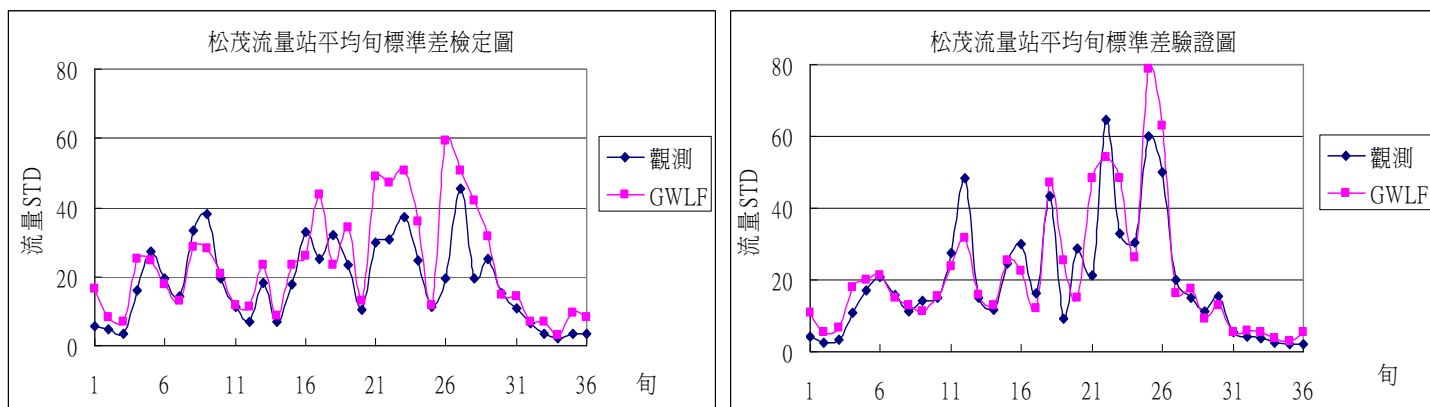


圖 4.3-2 松茂流量站平均旬標準差檢定與驗證圖

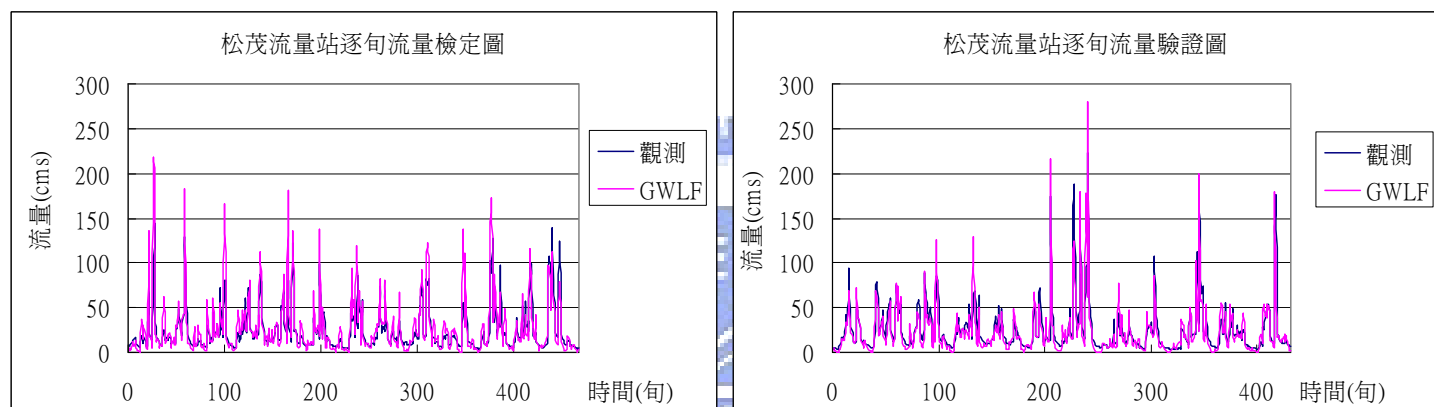


圖 4.3-3 松茂流量站逐旬流量檢定與驗證圖

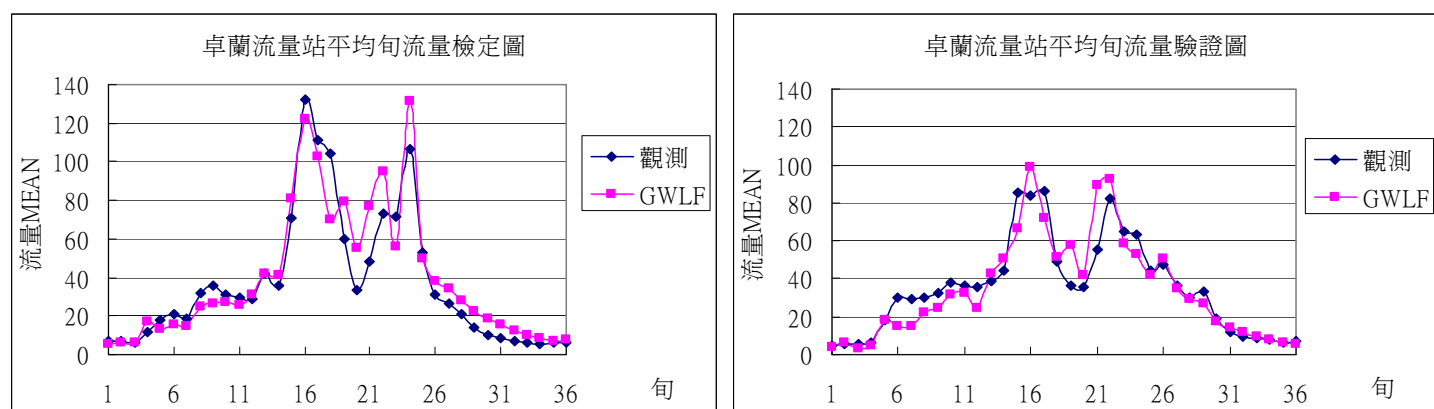


圖 4.3-4 卓蘭流量站平均旬流量檢定與驗證圖

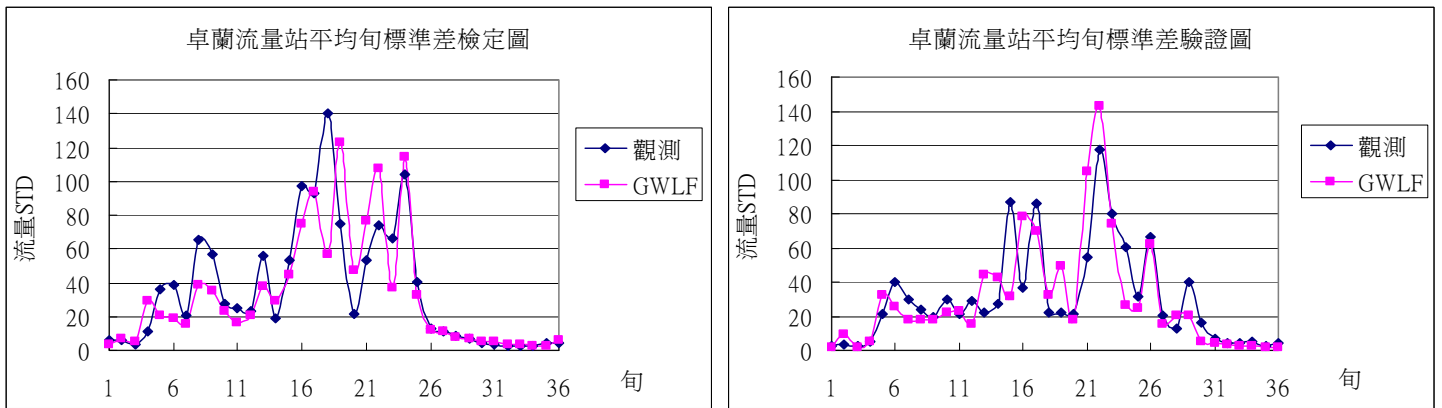


圖 4.3-5 卓蘭流量站平均旬標準差檢定與驗證圖

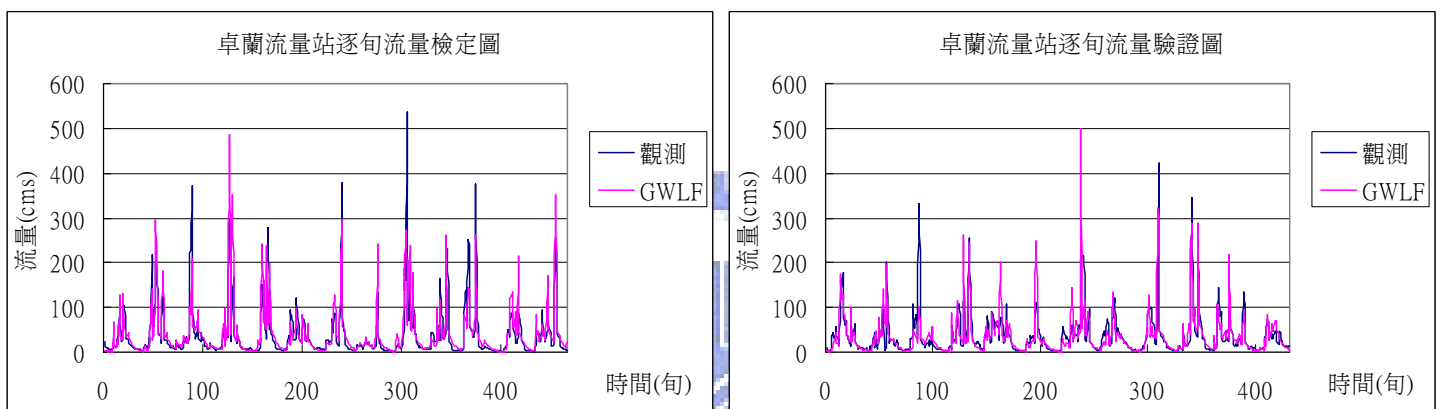


圖 4.3-6 卓蘭流量站逐旬流量檢定與驗證圖

4.4 地表水資源調配模式

4.4.1 地表水源調配之系統架構

台中地區水源調配系統圖如圖 4.4.1-1 所示，主要供給水源為大甲溪、大安溪兩大水源，其中大甲溪流域主要的水源調配結構物有德基水庫、石岡壩及豐原淨水場，德基水庫除引用大甲溪主流蓄存外，另自大甲溪支流志樂溪越域引水。另外大安溪流域主要的水源調配結構物有鯉魚潭水庫、士林攔河堰及鯉魚潭淨水場，其中鯉魚潭水庫位於大安溪支流景山溪，為一離槽水庫，為補充本身水源之不足，另自大安溪主流上之士林攔河堰越域引水。

大甲溪主要蓄水設施為德基水庫、石岡壩，農業用水依各圳路取水位置予以合併考慮用水需求，區分為大甲溪上游灌區(白冷圳、大茅埔圳、老圳、東勢本圳、八寶圳堰上游灌區)、石岡堰灌區(葫蘆墩圳、八寶堰中下游灌區)、大甲溪下游灌區(埤頭山圳、內埔圳、虎眼一圳、虎眼二圳、五福圳、高美圳)等三個農業需求予以計算，公共用水主要經由石岡壩進入豐原淨水場再配送至台中地區。

大安溪主要蓄水設施為士林攔河堰、鯉魚潭水庫、景山溪攔河堰等。農業用水則依特性區分為士林堰灌區(卓蘭圳、埔尾橫圳、矮山圳、口潭圳、石壁坑、新店圳、頂店圳、后里圳、七公圳、城圳)、鯉魚潭灌區(鯉魚潭圳)、三灌圳(苑裡圳、日南圳、九張犁圳)，公共用水則是由鯉魚潭水庫直接輸送至鯉魚潭淨水場再配送至台中地區。



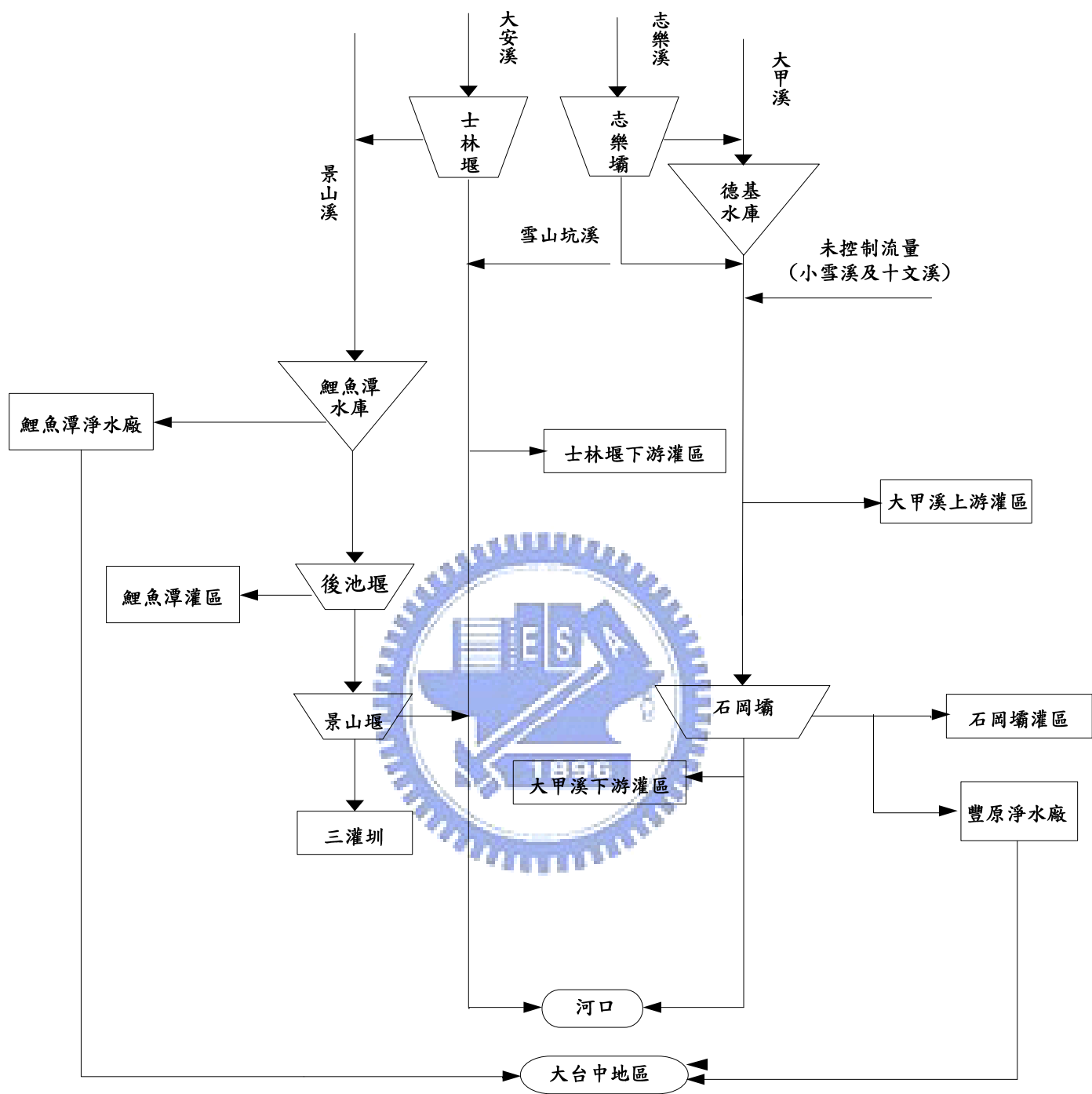


圖 4.4.1-1 台中地區現況水源調配系統圖

4.4.2 現況地表水源調配之運用原則

大甲溪和大安溪之土工結構物運用規則說明如下：

1、德基水庫運用要點規定

德基水庫現行發電規線乃以水位進行控制操作(其發電規線如表 4.4.2-1 及圖 4.4.2-1)，然本研究之水量模式以蓄水體積進行模擬演算，因此規線值必須根據水位—面積—容積曲線(如圖 4.4.2-2 所示)進行轉換，單位轉換後之發電規線列如表 4.4.2-1 所示。德基水庫運用原則說明如下：

(1)水庫水位高於運用規線時，以電力系統調度為主，並配合下游各標的用水需求放水。模擬時尖峰發電所需水量以天輪電廠發電水路設計量(138 秒立方公尺) 每日滿足尖峰發電 6 小時計算。

(2)水庫水位等於或低於運用規線時，除電力系統處於緊急狀況外，應配合下游各標的用水需求放水。下游公共用水標的放水量以目前豐原淨水場處理能力 85 萬 CMD 為限。

2、石岡壩運用原則

台中地區之公共用水係透過南幹渠向石岡壩取水，石岡壩水量之來源如下：

(1)上游德基水庫至石岡壩間之未控制流量。

(2)德基水庫配合供水計畫，為滿足需求所釋放之水量。

(3)德基水庫依照台電公司發電計畫而發電之尾水量。

3、豐原淨水場處理說明

豐原淨水場 921 震災前其設計處理能力為 130 萬 CMD，九二一震災後為穩定供水目前處理能力為 85 萬 CMD，因此本研究之模擬皆

以處理能力 85 萬 CMD 為其模擬條件。

4、士林攔河堰之操作原則

(1)天然進流量扣除下游保留流量後小於 35 cms 時，依台電公司調度處之調度作每日調節運用，配合發電引水。

(2)天然進流量小於 600 cms 並扣除下游保留流量後大於 35 cms 時，得視需要調節士林壩水位，以設計引水量 35 cms 引水。

(3)天然進流量大於 600 cms 時，應停止引水。

(4)鯉魚潭水庫進行檢查、維修時，應配合減少引水或停止引水；鯉魚潭水庫進行防洪運轉或緊急操作時，應停止引水。

(5)壩、引水隧道及相關設施，因維修、檢查、緊急事故或天災等，本壩得停止蓄水或引水。

5、鯉魚潭水庫營運操作原則

鯉魚潭水庫主要透過專管將水送至鯉魚潭淨水場以供應台中地區公共用水，以供給公共用水為主，不提供農業用水，其下游農業用水僅能引取天然流量。

鯉魚潭水庫水源來自景山溪及大安溪越域引水，但由於農業各圳路對於天然流量有優先使用之權力，因此鯉魚潭水庫僅可蓄存天然流量滿足農業需求後之剩餘流量。由於該系統之農業需求量在天然(水庫位於圳路取水口上游)或人為(未增加發電效益，將三灌圳之權益量以越域引水方式送進鯉魚潭水庫)條件影響下皆需經過鯉魚潭水庫，因此鯉魚潭水庫除每日供應台中公共用水外，亦須將農業需求之權益水量放出，其放水原則如下：

(1)每日供應景山溪各灌溉圳路需水量，惟依各圳計畫用水量供

應，但以該日景山溪之天然流量與各圳水權量兩者中較小者為限。

(2)水庫每日供給苑裡圳、日南圳、九張犁圳需水量，惟依各圳計畫用水量供應，但已由士林調整池引入該三圳之權益引水量與水權量兩者之小者為限。

6、鯉魚潭淨水場處理說明

鯉魚潭淨水場目前已完成二期擴充，因此現況處理能力為 110 萬 CMD。因此本研究之模擬皆以處理能力 110 萬 CMD 為其模擬條件。

7、水源運用順序

大甲大安溪聯合營運之水源運用順序是以大甲溪水源先提供，不足量再由大安溪水源提供。由於各淨水場之原水水源各有不同，故各淨水場引用水源順序為：豐原淨水場的原水來自石岡壩引水；鯉魚潭淨水場之原水水源先由石岡壩越域引水提供，最後才由鯉魚潭水庫提供；后里淨水場之原水水源首先由石岡壩之越域引水提供，人工湖水源次之，最後才由鯉魚潭水庫提供。

另外需求之滿足順序為先滿足民生用水、其次為農業用水、最後才滿足工業用水，其中民生用水和工業用水必須經過淨水場處理後供應，然各淨水場之原水水源各有不同，因此配合水源運用順序和需求滿足順序，台中民生用水和工業用水之引用水源順序為先由豐原淨水場提供，不足則由后里淨水場提供，最後才由鯉魚潭供應。

表4.4.2-1 德基水庫發電運轉規線表

月	旬		水位 (m)	容積 (10 ⁴ m ³)	月	旬		水位 (m)	容積 (10 ⁴ m ³)
1	上	1	1405.9	20120	7	上	19	1371.7	9457
	中	2	1405.5	19933		中	20	1377.4	10724
	下	3	1405.2	19793		下	21	1383.1	12268
2	上	4	1404.8	19620	8	上	22	1388.8	13940
	中	5	1404.5	19500		中	23	1394.5	15740
	下	6	1404.1	19340		下	24	1400.2	17780
3	上	7	1400.9	18060	9	上	25	1402.2	18580
	中	8	1397.8	16908		中	26	1404.1	19340
	下	9	1394.6	15772		下	27	1406.1	20213
4	上	10	1391.4	14748	10	上	28	1408	21100
	中	11	1388.2	13760		中	29	1407.7	20960
	下	12	1385.1	12830		下	30	1407.5	20867
5	上	13	1381.9	11932	11	上	31	1407.2	20727
	中	14	1378.7	11062		中	32	1407	20633
	下	15	1375.5	10230		下	33	1406.7	20493
6	上	16	1372.4	9593	12	上	34	1406.4	20353
	中	17	1369.2	8913		中	35	1406.2	20260
	下	18	1366	8065		下	36	1405.9	20120

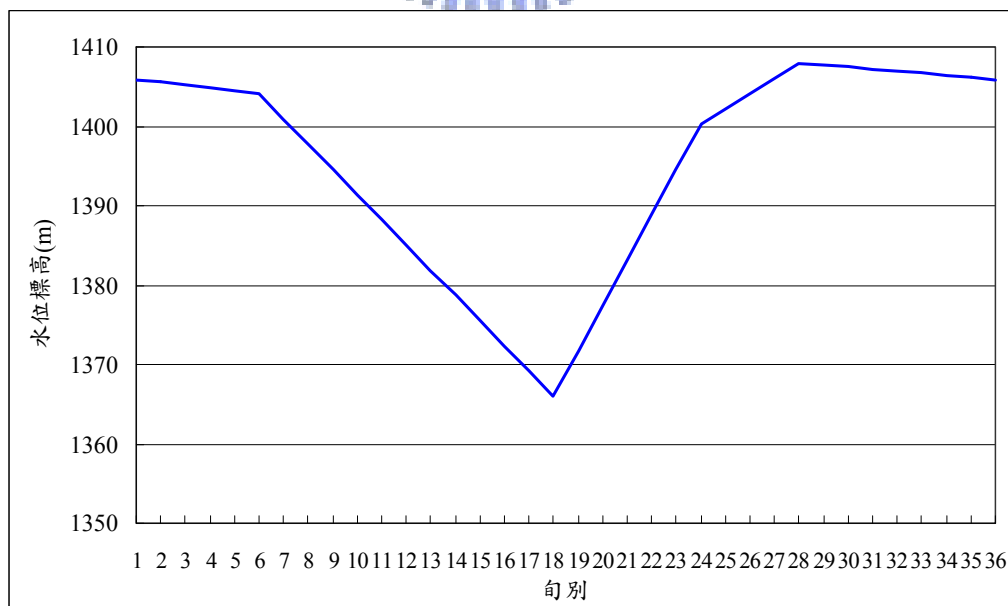


圖 4.4.2-1 德基水庫發電運轉規線圖

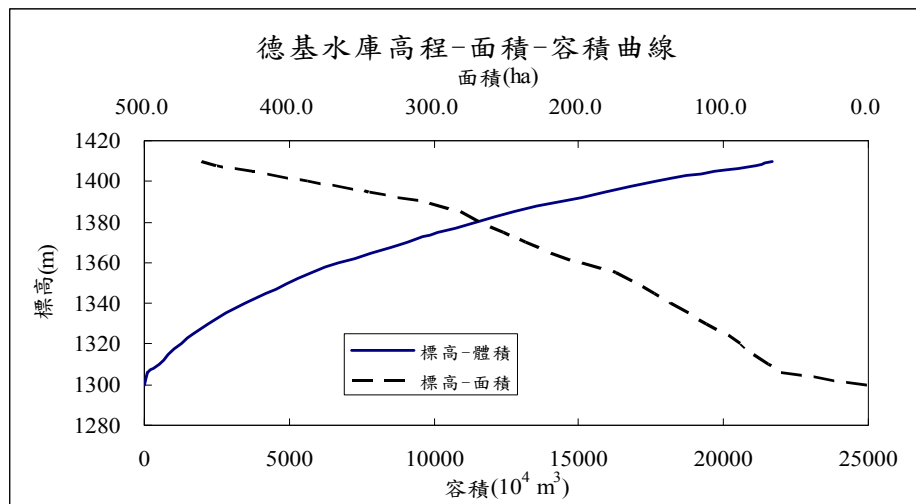


圖 4.4.2-2 德基水庫高程-面積-容量曲線圖

4.4.3 地表水資源調配模式建立與驗證

參考圖 4.4.1-1 之大甲大安溪水源調配系統圖，利用系統動力學的四個基本物件：存量（Stock）、流量（Flow）、箭線（Connector）以及輔助變數（Auxiliary），搭配 3.4 節各線段之量化數學關係式，並配合 4.4.2 節之各項水工結構物之水源調配之運用原則，建構出大甲大安聯合營運之水源調配系統動力模型如圖 4.4.3-1 所示。

為了驗證本模式是否能合理的反映出水資源系統之操作特性，本研究將針對取水行為後之下游流量進行驗證。然大甲溪自石岡壩以下並無流量測站，故本研究將以石岡壩之營運報表資料進行驗證。另外匯入大甲溪之側流量亦無觀測流量測站，故以松茂站之流量透過面積比推估之。本研究模擬將採用旬作為基準，驗證所採用之模擬時間為 86~90 年，並以石岡壩營運報表之公共取水量及灌溉用水分別作為公共用水及石岡壩灌區用水之用水標的。驗證結果以每年旬平均流量表示之，結果如圖 4.4.3-2 和 4.4.3-3 所示，其相關係數為 0.784 及 0.777，由結果得知本計畫所建立之模式確可合理的反映出中部地區水資源系統之操作特性。

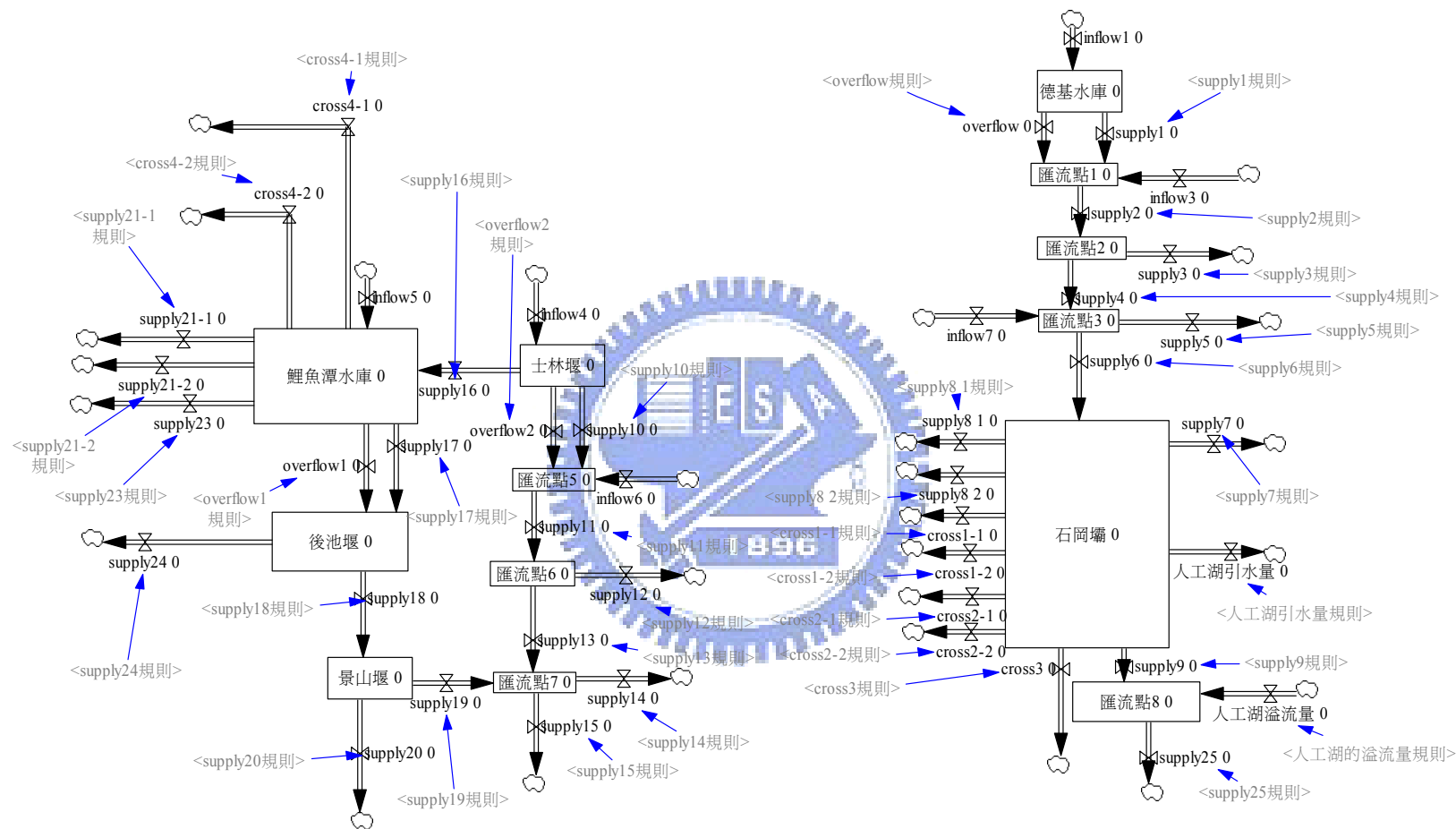


圖 4.4.3-1 大甲大安聯合營運之水源調配系統動力模型示意圖

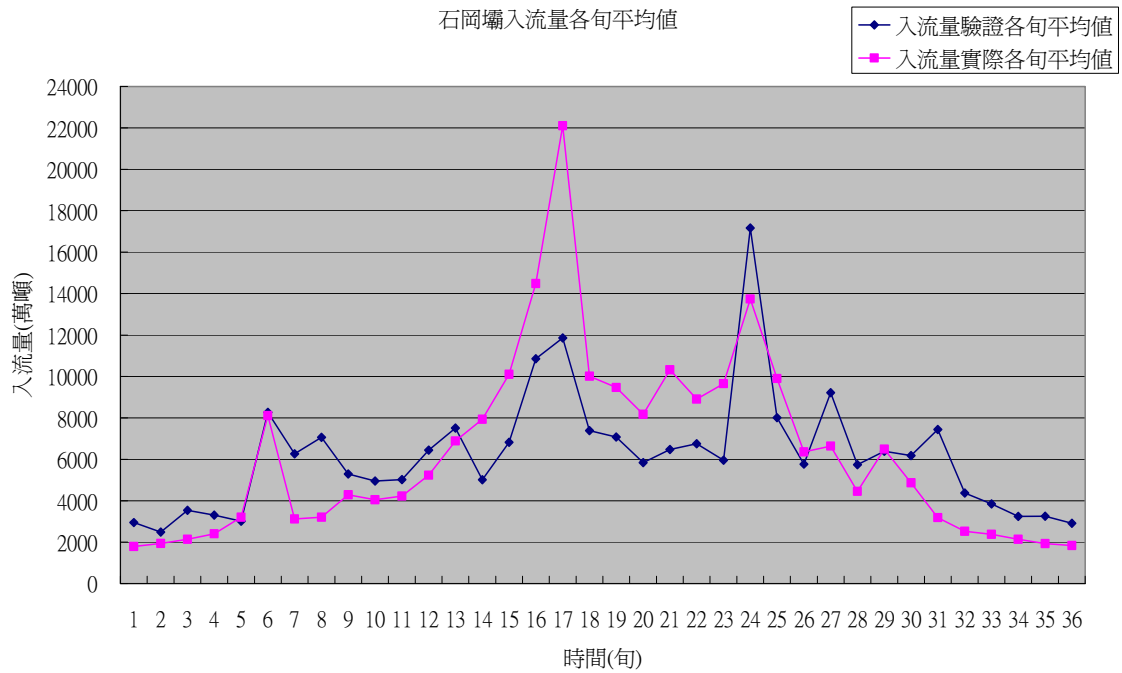


圖 4.4.3-2 石岡壩歷史與模擬逐旬入流量之驗證結果(相關係數=0.784)

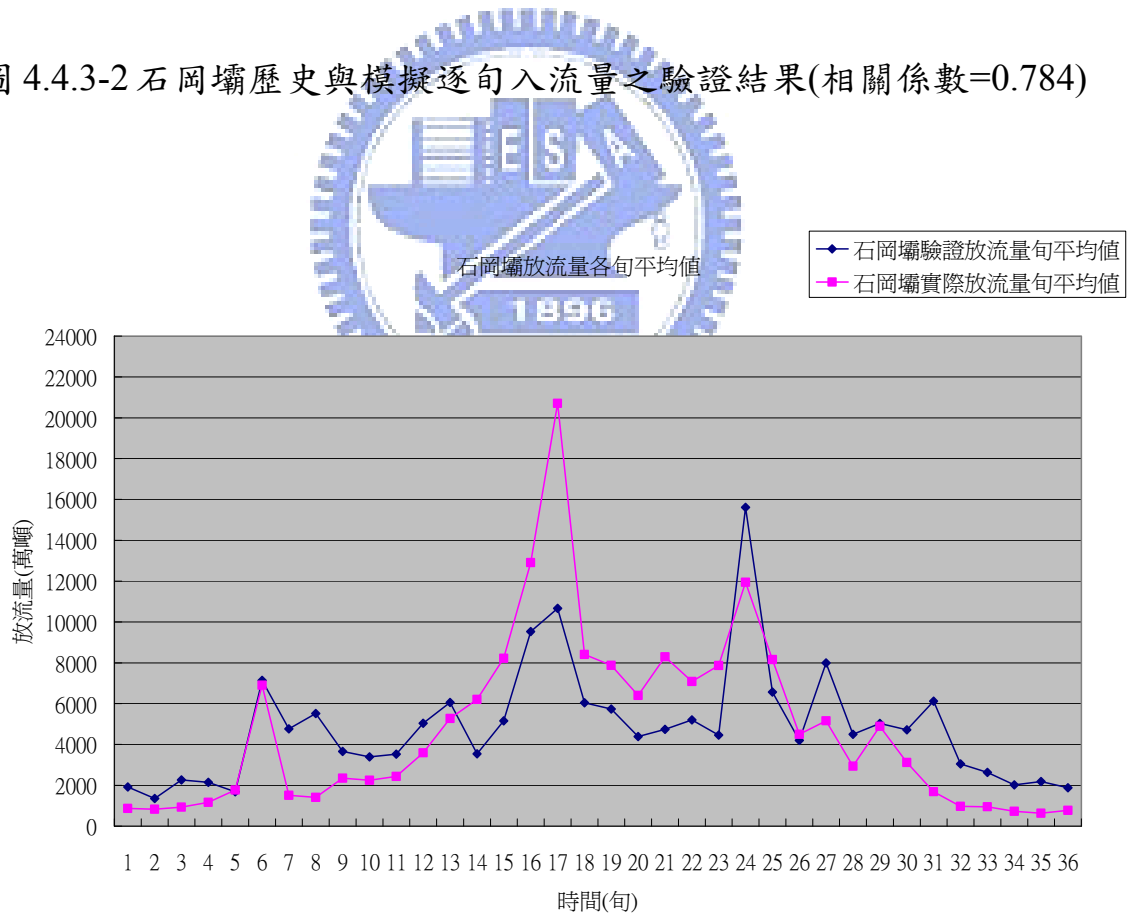


圖 4.4.3-3 石岡壩歷史與模擬逐旬放流量之驗證結果(相關係數=0.777)

4.5 水資源調適策略

本研究所研擬的水資源調適策略有三種，分別為越域引水、人工湖策略與淨水場新增系統，以下將分別詳細介紹各調適策略的相關資料。

一、越域引水

由於大甲溪系統無論在豐枯水期皆有剩餘流量，為提升大甲溪上游發電尾水之利用率，預計將大甲溪多餘的發電尾水，引入大安溪流域，除了供后里圳使用外，亦引水至鯉魚潭淨水場以供台中地區公共用水使用，將大甲溪剩餘流量以直接輸送或交換用水之方式，直接或間接的蓄存於鯉魚潭水庫，以增加系統之供水能力。另外配合后里淨水場的興建，其取水水源亦考量由越域引水渠道增設取水口取水，而其另一取水來源則來自鯉魚潭水庫。本研究參考「大安溪及大甲溪水源聯合運用輸水工程規劃」報告，將各管線之流量限制納入系統考量，此輸水管建議延伸至鯉魚潭淨水場及台中水利會后里圳，以大甲溪豐沛時，利用大甲溪川流水交換大安溪后里圳農業用水，並將原大安溪后里圳灌溉用水蓄存於鯉魚潭水庫。其工程示意圖如圖 4.5-1 所示。

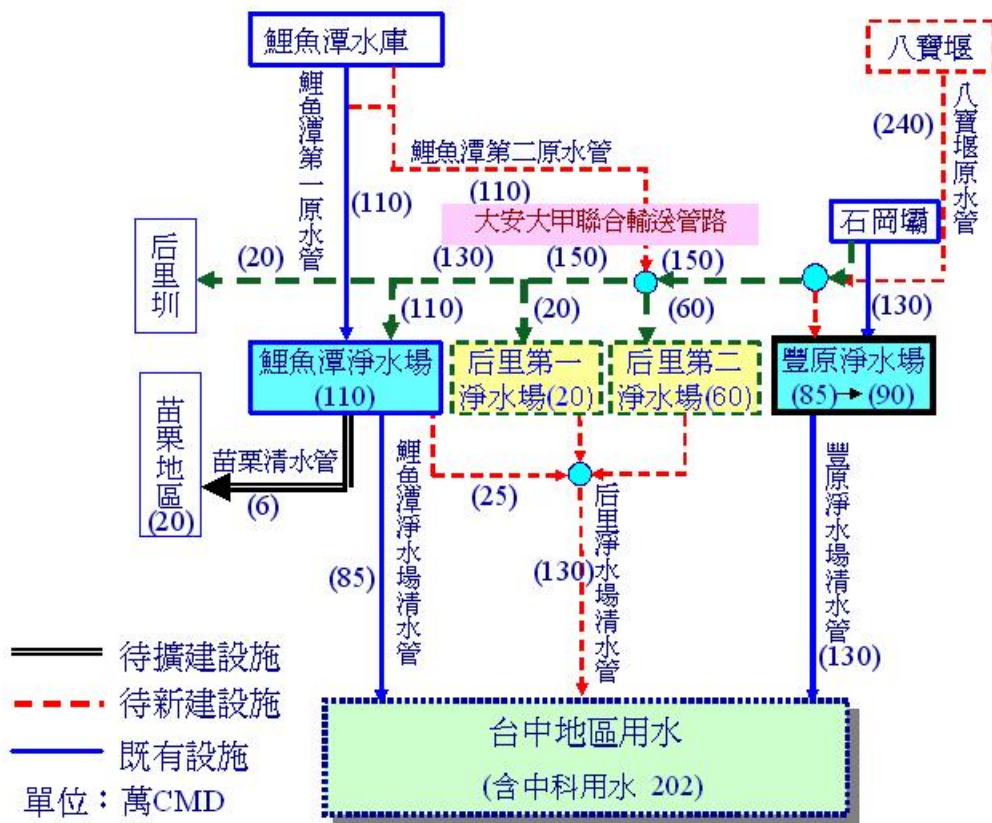


圖 4.5-1 大安溪及大甲溪水源聯合運用輸水工程

二、人工湖

人工湖係指在平原之地面上或地面下建造之人為蓄水設施，一般位於地勢較平坦之平原區，係以挖掘或挖掘與填築的方式興建，因其深度不如山區水庫需要廣大的面積，且兼具供水防洪、觀光與地下水補注的功能故為可行的水資源調適策略。為因應日後中科用水遽增，須另覓新水源供應。但因現階段水資源政策在考量環保意識高漲，及水庫推動不易情形下，水利署擬於大甲溪中下游利用休耕農地或公有地興建平地水庫(人工湖)，擬定台中人工湖策略與初步規劃方案，以因應台中地區未來之用水需求。其工作範圍為大甲溪流域中下游，主要行政區域包含台中縣石岡鄉、后里鄉及外埔鄉，初步設計的面積約

313.4 公頃，總蓄水體積約 2,800 萬立方公尺，保留蓄水體積 262 萬立方公尺，有效庫容 2,577 萬立方公尺，年供水量 7,300 萬立方公尺。台中人工湖水源演算模擬之系統架構如圖 4.5-3 所示。台中人工湖引水來源為石岡壩剩餘流量，配合大甲大安之水源運用，供應給台中地區生活用水和工業用水，其供水順序應在現有水源系統(大甲大安系統)之後。

在規劃開發之初須針對供水效益作為主要評估及考量之重點，其次才為附屬效益之考慮，如此方符合水源開發之意義。依照系統圖 4.5-3，設計模式承接石岡壩的剩餘流量，超過最大蓄水體積時則有溢流量流至下游進入台灣海峽。由於未有相關地下水交換量資料，目前暫以封底看待。



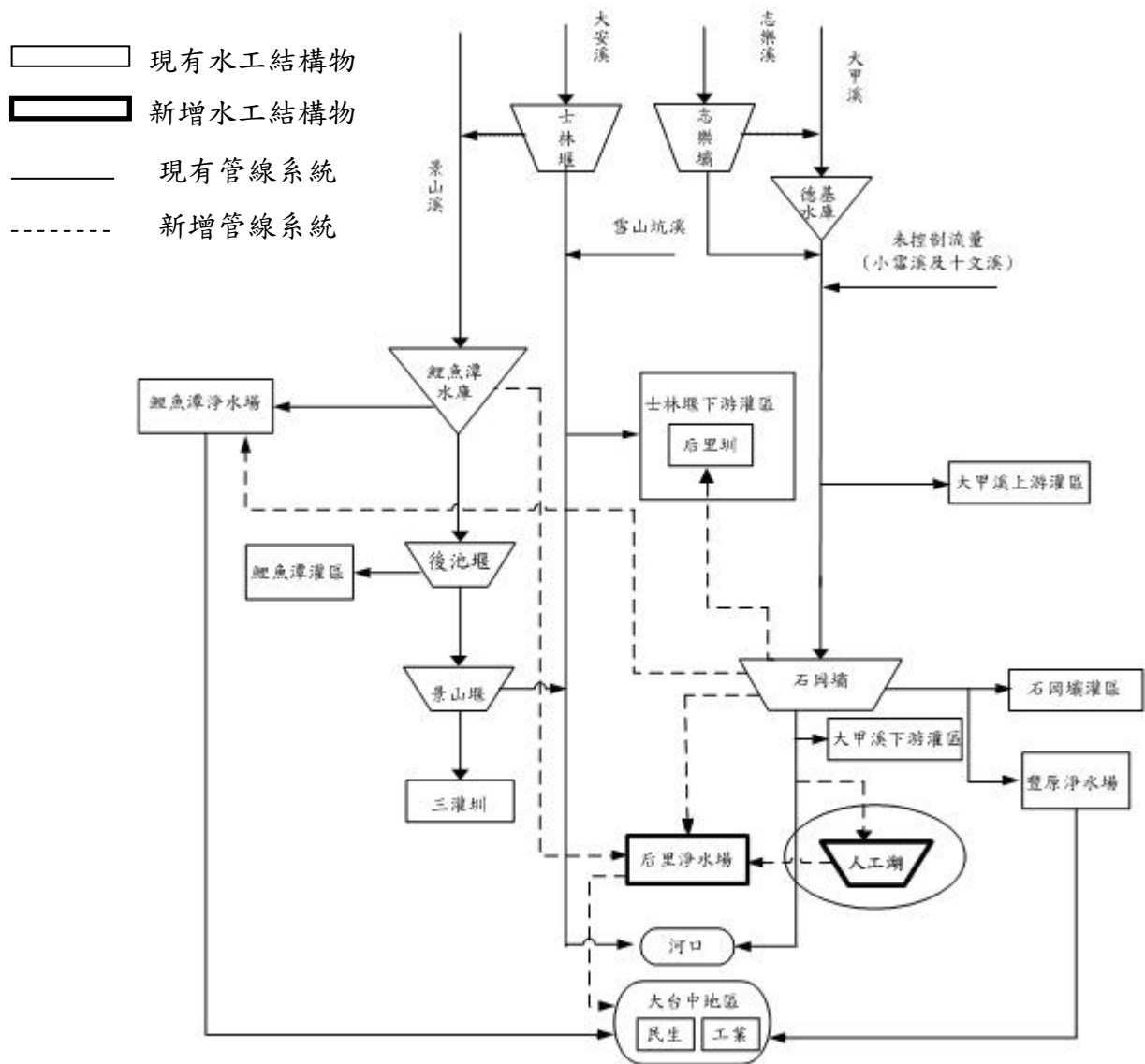


圖 4.5-3 台中地區考量人工湖、越域引水及淨水場擴增

之水源調配系統圖

三、淨水場擴增

台中地區目前用水需求量為每日 130 萬立方公尺，而主要自來水供水系統為鯉魚潭淨水場規模(每日 110 萬立方公尺)及豐原淨水場規模(每日 85 萬立方公尺)，在以目前運轉模式看來，兩淨水場似乎互為備援系統，但限於兩淨水場供水能力不相同，且不足以單獨滿足台中

用水需求，充其量僅能說是補助支援系統，一但豐原或鯉魚潭淨水場任一發生完全無法出水之情形時，僅能以減壓供水或分水供水進行應變處理，並無備援可言，圖 4.5-4 為台中地區水資源系統圖。

因此為了因應台中地區目標年民國 110 年每日 202 萬立方公尺用水需求量，加上保留供應苗栗地區每日 20 萬立方公尺，台中地區用水總需求為每日 222 萬立方公尺，「在大甲溪水源運用規劃報告」中得知，如以 25%備載估算，需擴(新)建淨水場處理能力約須達每日 278 萬立方公尺，因此興建處理高濁度之后里淨水場（每日 60~80 萬立方公尺），期以提高供給能力，並建構多系統與管網系統，確保分擔風險及備援能力，方能達穩定有效供水之目標。

后里淨水場工程分為兩處淨水場，「后里第一淨水場」需於民國 96 年開始規劃設計，98 年底施工完成民國 99 年運作後可增加處理原水規模約每日 20 萬立方公尺；「后里第二淨水場」需於民國 98 年規劃設計至民國 101 年底完成，民國 102 年運作後可增加處理原水規模約每日 60 萬立方公尺。



圖 4.5-4 台中地區水資源系統圖

註：()內數字係指設施能力，單位萬 CMD。

資料來源：大甲溪水源運用規劃

4.6 水資源調配風險分析

為評估台中地區之缺水情勢及影響程度，本研究以缺水指標評估指標來表示區域可能遭遇之缺水程度。缺水指數由美國陸軍工兵團 (U.S. Army Corps of Engineers) 所創，過去水利單位常用來分析水資源規劃問題，評量缺水情形是否在可容忍之合理範圍內，缺水指數簡單描述年缺水量與年計畫供水量間之關係，以缺水率(年缺水量/年計畫供水量)之平方表現年缺水之程度，並以全期各年缺水率平方之平均為代表，如下式 (4-1) 表示：

$$SI = \frac{100}{N} \sum_{i=1}^N \left(\frac{D_i}{S_i} \right)^2 \quad (4-1)$$

其中 SI 為缺水指數(shortage index)，N 為模擬總年數， D_i 為年缺水量， S_i 為年計畫供水量。

此外由於水文具不確定性，因此本研究基於蒙地卡羅模擬法，配合韋伯機率法進行指標風險分析，其分析步驟說明如下：

1. 根據 3.1 節建立之氣象資料合成模式，產生 100 組雨量與溫度資料。
2. 將各組雨量與溫度代入 3.3 節建立之 GWLF 地表逕流模式，以模擬出 100 組合成流量資料。
3. 將各組流量資料代入 4.2 及 4.3 節建立之台中地區地表水資源調配模式，以得到各組流量下之缺水指數值（或其他重要變數，如供水量與缺水量）。
4. 將各缺水指數（或重要變數）依值之大小由大至小排序。
5. 利用韋伯法（Weibull） $P\% = m/(n+1) \times 100\%$ 分析第 m 筆資料之超越機率。其中 n 為分析組數，就本研究而言為 $n=100$ ，m 為資料排序後之排名。
6. 由於風險之定義為 $\text{PROB}(SI > SI_p) = P$ ，其中 SI_p 所對應之超越機率（P）可是為系統缺水情況（指標）大於系統缺水情況（指標）恰為 SI_p 時之機率值，因此小於缺水指標（或重要變數）之信賴度（RP）為 $RP\% = 1 - P\%$ 。

根據上述步驟，即可得到不同信賴度下之缺水指數值（或重要變數值），台中地區現況系統下與不同調適策略下之風險分析結果整理如表 4.6-1 所示，其中調適策略包含新增淨水廠、人工湖與越域引

水工程，將策略組合成各種方案如表 4.6-2 所示。結果顯示水資源調適方案對現況供水系統可有效降低缺水情況與缺水指數，此現象乃因為水資源調適方案能更有效利用水資源，使枯水季缺水量大幅降低如圖 4.6-1 所示，又以越域引水策略（含淨水場）較人工湖策略（含淨水場）效果好，由於越域引水策略（含淨水場）可將大甲溪多餘的發電尾水，引入大安溪流域，除了供士林堰下游灌區后里圳使用外，亦引水至鯉魚潭淨水場以供台中地區公共用水使用，將大甲溪剩餘流量以直接輸送或交換用水之方式，直接或間接的蓄存於鯉魚潭水庫，可使信賴度 95%之公共 SI 由原始 4.59 大幅下降至 0.67，農業 SI 由原始 0.87 降至 0.79。人工湖策略（含淨水場）依供水順序將石岡壩剩餘流量供應給台中地區公共用水，可使信賴度 95%之公共 SI 由原始 4.59 下降至 2.17，但無法改善農業 SI，各方案於未變遷情境下之影響如圖 4.6-2 所示。

表4.6-1各種方案下不同信賴度之農業缺水指數變化表

		無方案		方案一		方案二		方案三	
		農業 SI	公共 SI	農業 SI	公共 SI	農業 SI	公共 SI	農業 SI	公共 SI
信 賴 度	95%	0.87	4.59	0.87	2.17	0.79	0.67	0.79	0.35
	90%	0.81	4.52	0.81	2.12	0.74	0.61	0.74	0.32
	85%	0.80	4.43	0.80	2.11	0.71	0.59	0.71	0.30
	80%	0.75	4.40	0.75	2.01	0.69	0.58	0.69	0.29
	75%	0.72	4.33	0.72	1.93	0.66	0.55	0.66	0.26

表4.6-2水資源調適方案

方案別	策略	越域引水	人工湖 (萬 m ³)	淨水場 (一期) (萬 m ³ /旬)	淨水場 (二期) (萬 m ³ /旬)
一	人工湖 (含淨水場)	無	2800	200	600
二	越域引水 (含淨水場)	有	0	200	600
三	越域引水 +人工湖 (含淨水場)	有	2800	200	600

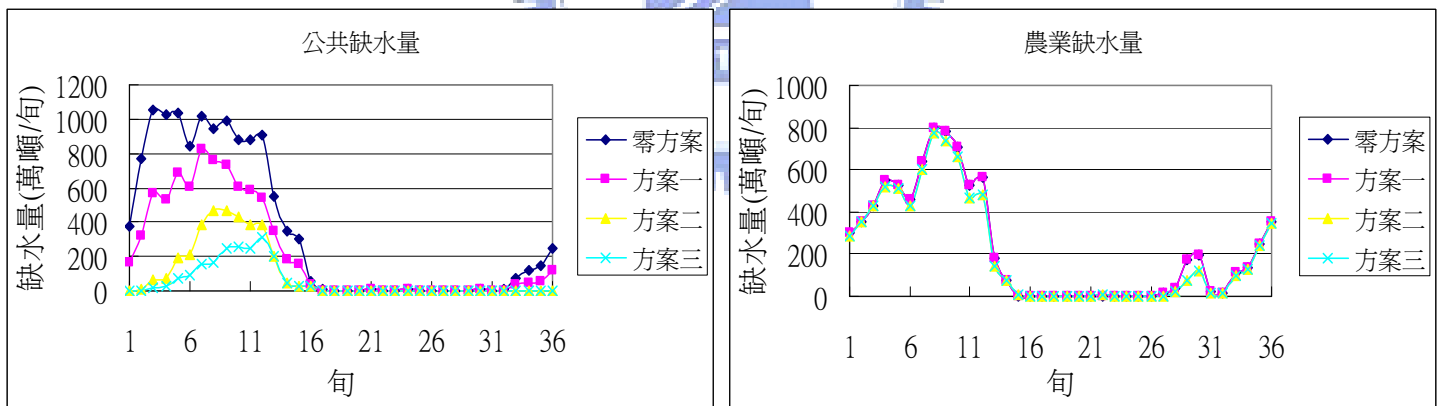


圖 4.6-1 水資源調適策略對旬平均缺水量之影響

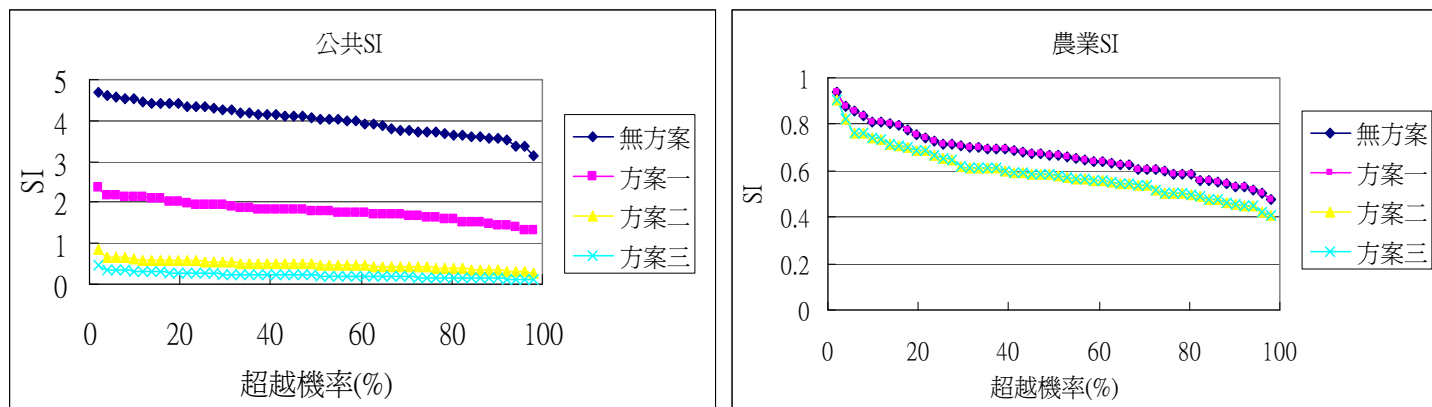


圖 4.6-2 水資源調適策略於未變遷情境下之影響



第五章

氣候變遷對台中地區水資源利用衝擊之風險評估

5.1 氣候變遷對河川流量衝擊評估

為瞭解未來不同氣候變遷情境下之流量趨勢變化，本研究根據第三章所述之降尺度分析方式，以大氣環流模式 MRI-CGCM2_3_2 及 INM-CM3 之 A1B、A2 與 B1 情境輸出結果，進行大安溪與大甲流域之降雨量分析。其推估方式可參照方程式 (3-5) 與 (3-6)，將上述雨量分析結果代入 GWLF 地表逕流模式，即可推求不同氣候變遷情境下之流量變化，其旬平均流量歷線分析結果如圖 5.1-1 至圖 5.1-4 所示，由圖得知 CGCM 及 INM 分析之各集水區之情境流量旬平均值與標準偏差於豐水期皆有增加之趨勢，枯水期則有減少之情形，顯示除了豐水期流量增加以及枯水期流量減少外，各年豐水期與枯水期流量之差異可能更為劇烈，意即未來豐枯水年之差異會越大，水資源調配將面臨更大的挑戰。

模擬結果中以 CGCM2 之 A1B 情境豐枯水期流量差異幅度最大，枯水期（11 月~隔年 4 月）旬平均流量約減少約 20%，豐水期（5 月~10 月）之旬平均流量約增加 10%。此外，以 INM 之 B1 情境年總流量增加幅度最大，松茂流量站枯水期旬平均流量約增加 13.57%，豐水期之旬平均流量約增加 26.56%，年總流量約增加 21.48%；卓蘭流量站枯水期旬平均流量約增加 24.02%，豐水期之旬平均流量約增加 6.99%，整年流量約增加 15.04%，各模式不同氣候變遷情境下之增減比率分析結果整理如表 5.1-1 所示。

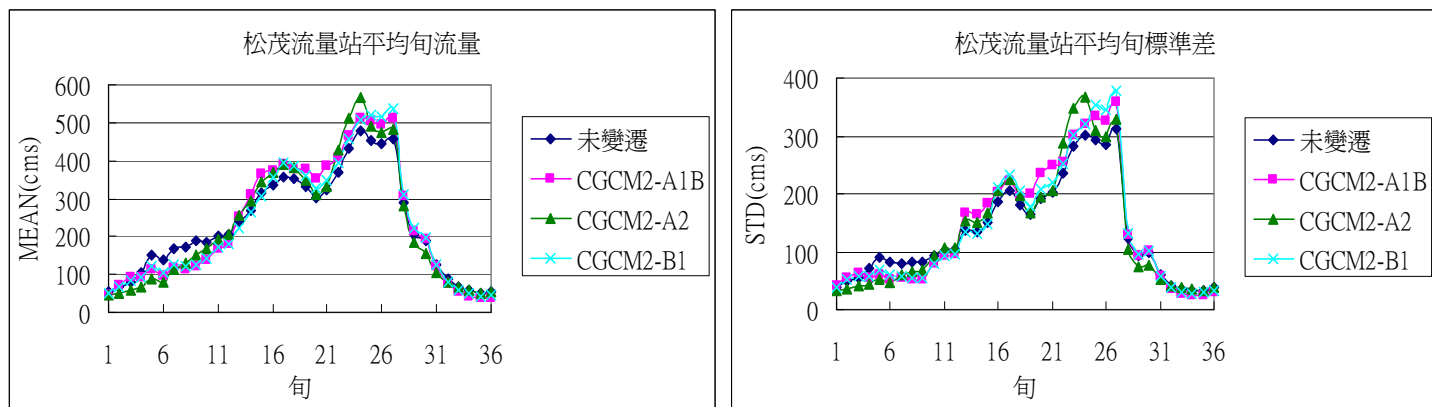


圖 5.1-1 CGCM2 模式松茂流量站現況模擬與情境流量歷線圖

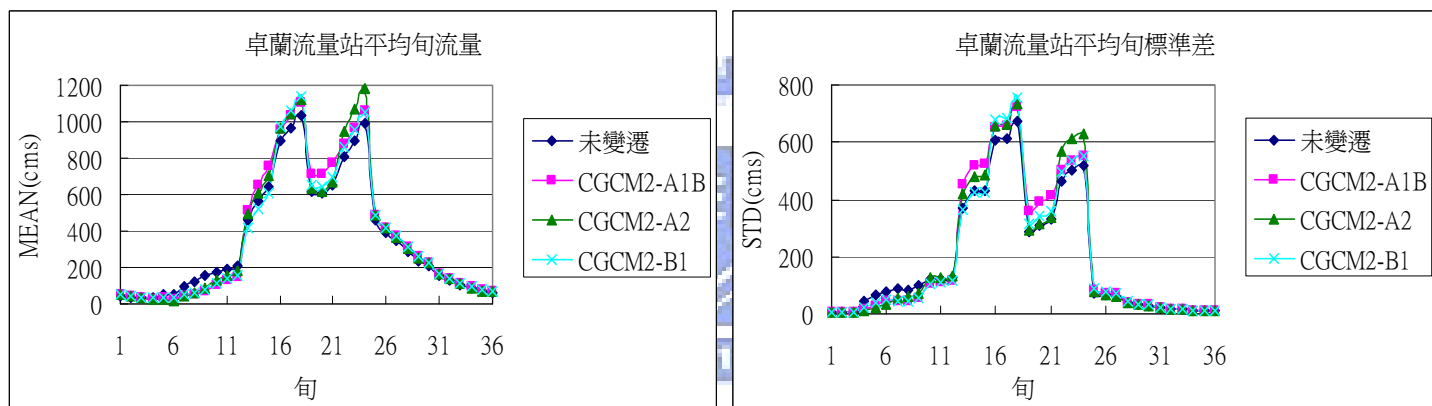


圖 5.1-2 CGCM2 模式卓蘭流量站現況模擬與情境流量歷線圖

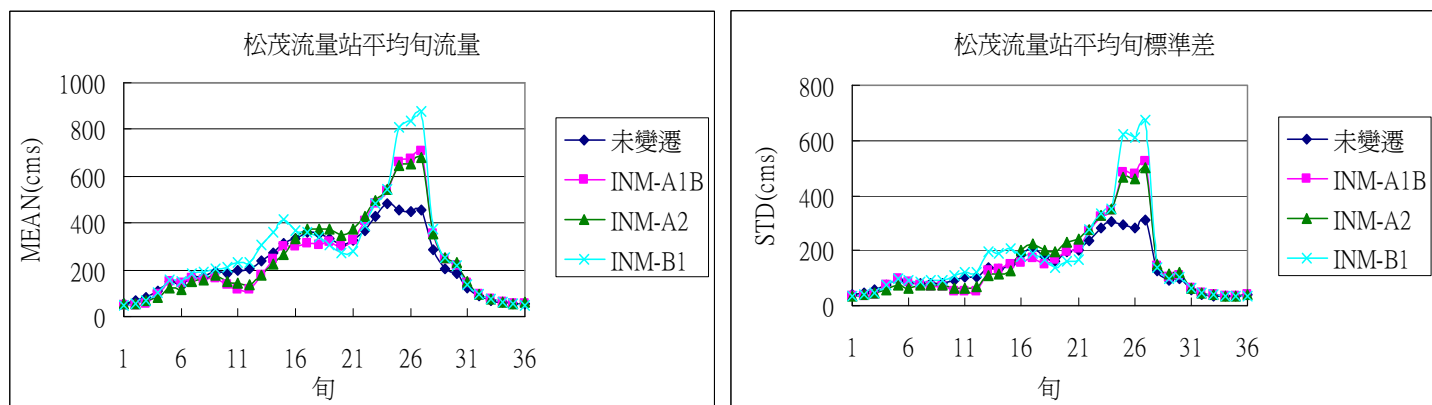


圖 5.1-3 INM 模式松茂流量站現況模擬與情境流量歷線圖

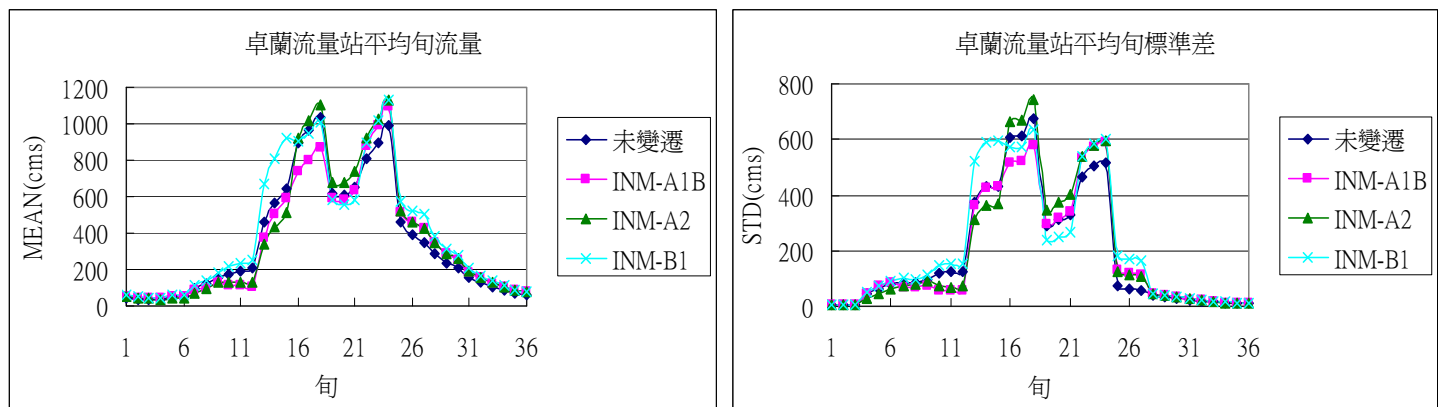


圖 5.1-4 INM 模式卓蘭流量站現況模擬與情境流量歷線圖

表5.1-1 氣候變遷對河川流量增減比例變化表

	年總流量增減比例(%)		豐水期流量增減比例(%) (5月~10月)		枯水期流量增減比例(%) (11月~隔年4月)	
	松茂流量站	卓蘭流量站	松茂流量站	卓蘭流量站	松茂流量站	卓蘭流量站
氣候變遷						
CGCM2-A1B	2.48	5.81	10.43	10.18	-20.19	-20.91
CGCM2-A2	0.72	5.69	7.17	9.52	-17.67	-17.75
CGCM2-B1	1.32	1.99	7.77	5.27	-17.05	-18.09
INM-A1B	5.05	-2.25	11.60	-1.26	-13.64	-8.25
INM-A2	8.79	4.88	15.93	6.80	-11.59	-6.87
INM-B1	21.48	15.04	26.56	13.57	6.99	24.02

5.2 氣候變遷下之水資源調配風險分析

5.2.1 現況系統衝擊分析

利用 4.4 節與 4.5 節建立之水資源調配系統模型，配合河川流量合成資料，探討氣候變遷對台中地區水資源調配之衝擊。不同信賴度下之模擬結果如表 5.2.1-1~5.2.1-2 所示，表 5.2.1-1 顯示農業缺水指數之變化趨勢與枯水期流量之變化趨勢相同，若枯水期流量減少，農業缺水指數隨之升高；枯水期流量增加，農業缺水指數隨之降低。故僅 INM 模式 B1 情境可降低農業缺水情況，其餘氣候變遷情境下，農業用水缺水情況皆有趨於嚴重之趨勢，其中以 CGCM2 模式之 A1B 情境最為嚴重，其信賴度 95%時，缺水指數 SI 由未變遷的 0.87 上升至 1.72。

由此可知枯水期流量對農業用水的供水情況有重大之影響，其原因為大安溪之農業灌區僅能引用天然入流量之水量，不能引用鯉魚潭水庫之蓄水（詳見 4.4.2 節之鯉魚潭水庫營運操作原則），因此豐水期原本就不太缺水情況下，即使氣候變遷下豐水期水量增加，對於豐水期之農業用水缺水改善並不明顯，但枯水期因不能引用鯉魚潭之蓄水，而氣候變遷下枯水期之河川流量又變小的情況下，造成整體農業用水之缺水情況在氣候變遷下更趨嚴重，缺水量於枯水季 3 至 4 月大幅提升如圖 5.2.1-1~5.2.1-2 所示。

表 5.2.1-2 結果顯示公共用水在氣候變遷下，與農業用水之結果卻有相反的情況發生，其缺水情況反而有降低的趨勢（SI 變小）。，為探究其原因，本研究從公共用水缺水量之時間分佈圖（圖 5.2.1-1~5.2.1-2）來進行探討。由於氣候變遷後，豐水期的水量增加，在德基水庫與鯉魚潭水庫有限的庫容調節下，氣候變遷下僅能小幅降低十

一月至隔年二月之枯水期缺水情形，但三月至四月之缺水量情形仍較未變遷來的嚴重，惟未氣候變遷時，三月前已有極端缺水量發生之情況，因此即使氣候變遷後，枯水期流量減少，但三、四月缺水量可增加之幅度已相對的小，因此氣候變遷下三、四月之缺水情況僅較未氣候變遷下之缺水情況略微提高，但氣候變遷下之十一月至隔年二月之缺水情況卻較未氣候變遷下之缺水情況改善較多，因此整體而言公共用水在大部分氣候變遷情境下缺水情況有降低的趨勢。但 INM 模式之 A1B 情境則例外，其成因為大安溪在氣候變遷條件下，不論豐水期或枯水期之流量皆有降低之趨勢（詳見表 5.1-1 之卓蘭流量站），故導至其公共用水缺水指數反而提高。

表5.2.1-1 現況系統各種情境下不同信賴度之農業缺水指數變化表

		無方案 - 農業 SI						
		未變遷	CGCM2-A1B	CGCM2-A2	CGCM2-B1	INM-A1B	INM-A2	INM-B1
信 賴 度	95%	0.87	1.72	1.64	1.55	1.36	1.24	0.46
	90%	0.81	1.69	1.57	1.52	1.28	1.12	0.43
	85%	0.80	1.65	1.55	1.50	1.24	1.12	0.38
	80%	0.75	1.63	1.52	1.49	1.22	1.09	0.36
	75%	0.72	1.61	1.47	1.46	1.18	1.08	0.35

表5.2.1-2 現況系統各種情境下不同信賴度之公共缺水指數變化表

		無方案 - 公共 SI						
		未變遷	CGCM2-A1B	CGCM2-A2	CGCM2-B1	INM-A1B	INM-A2	INM-B1
信 賴 度	95%	4.59	3.77	3.90	4.32	5.05	3.97	2.54
	90%	4.52	3.75	3.83	4.23	4.99	3.88	2.47
	85%	4.43	3.68	3.78	4.19	4.74	3.83	2.42
	80%	4.40	3.59	3.73	4.12	4.71	3.81	2.38
	75%	4.33	3.53	3.68	4.07	4.67	3.73	2.35

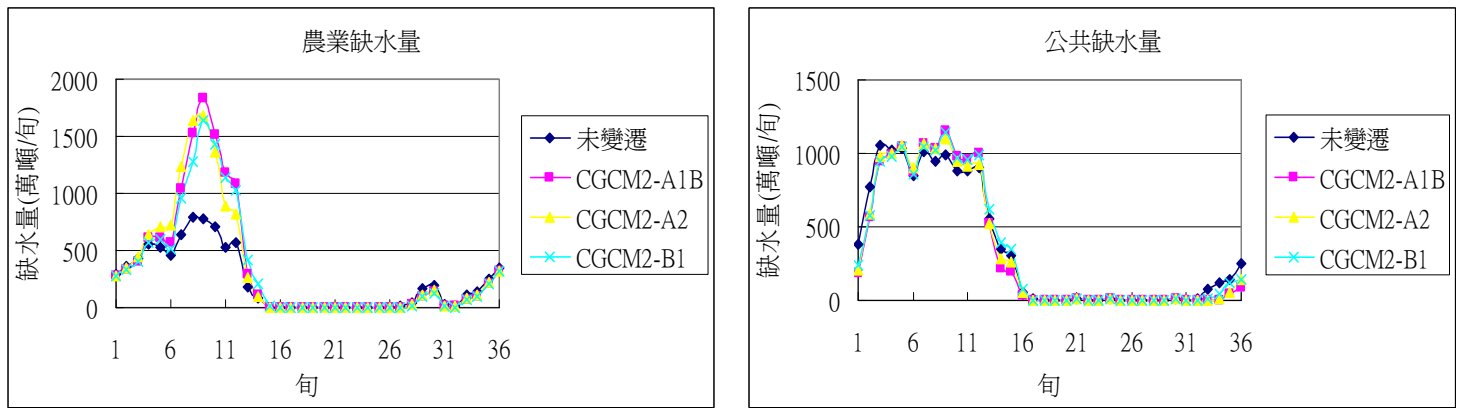


圖 5.2.1-1 CGCM2 模式現況系統缺水水量分佈圖

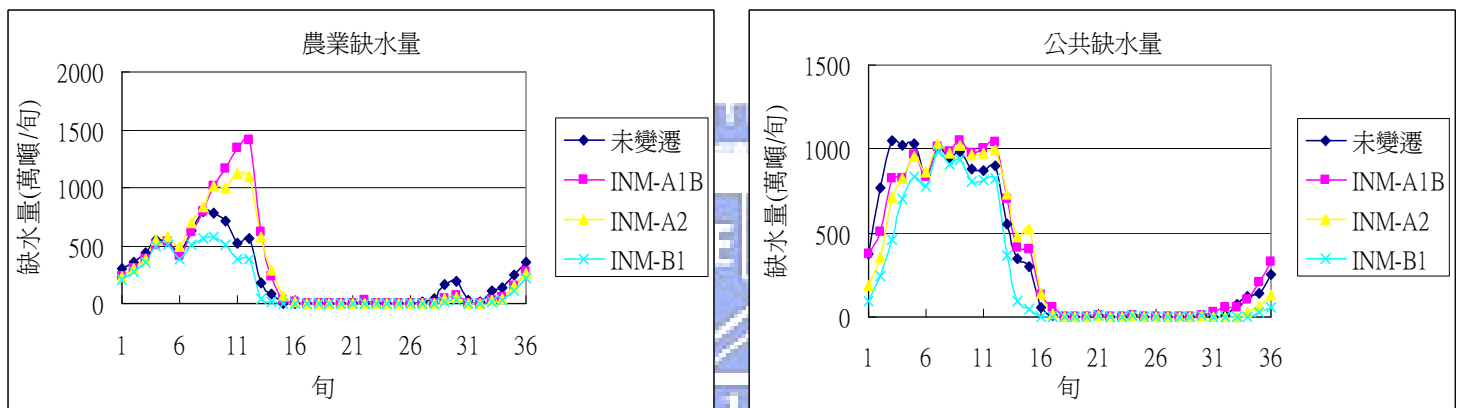


圖 5.2.1-2 INM 模式現況系統缺水水量分佈圖

5.2.2 水資源調適策略衝擊分析

本研究針對台中地區已奉院核可或規劃中之水資源改善計畫進行氣候變遷下之衝擊分析，分析之方案包含 1.台中人工湖工程。2.越域引水工程（大甲大安聯合運用輸水管線工程）。3.台中人工湖工程與越域引水工程並行。各方案不同信賴度下之模擬結果如表 5.2.2-1～5.2.2-6 所示，結果顯示各方案農業缺水指數在氣候變遷與否的條件下之變化趨勢與現況系統（零方案）之趨勢相同，其中台中人工湖工程（方案一）因僅將大甲溪剩餘水量提供給公共用水，因此對於農業

用水之缺水情況改善並無助益，故方案一之農業用水缺水情況（表 5.2.2-1）與零方案之農業用水缺水情況（表 5.2.1-1）相同。方案二及方案三氣候變遷對於農業用水的衝擊影響，以 CGCM2 模式之 A1B 情境最為嚴重，其信賴度 95%時，農業缺水指數由未變遷的 0.79 上升至 1.69。

各方案公共缺水指數在氣候變遷與否的條件下之變化趨勢則與與現況系統（零方案）之趨勢相反，為探究其原因，本研究從公共用水缺水量之時間分佈圖（圖 5.2.2-1～5.2.2-6）來進行探討。由於供水改善方案的加入，讓原本未變遷下枯水期之缺水降低許多（詳見圖 4.6-1），因此氣候變遷下，三、四月流量減少，缺水情況有大幅的惡化空間，故氣候變遷下三、四月之缺水情況較未氣候變遷下之之缺水情況惡化許多，雖氣候變遷下之十一月至隔年二月之缺水情況較未氣候變遷下之缺水情況仍有改善，但整體而言公共用水在氣候變遷情境下缺水情況仍有提升的情況發生。

表5.2.2-1 方案一各種情境下不同信賴度之農業缺水指數變化表

		方案一 - 農業 SI						
		未變遷	CGCM2-A1B	CGCM2-A2	CGCM2-B1	INM-A1B	INM-A2	INM-B1
信 賴 度	95%	0.87	1.72	1.64	1.55	1.36	1.24	0.46
	90%	0.81	1.69	1.57	1.52	1.28	1.12	0.43
	85%	0.80	1.65	1.55	1.50	1.24	1.12	0.38
	80%	0.75	1.63	1.52	1.49	1.22	1.09	0.36
	75%	0.72	1.61	1.47	1.46	1.18	1.08	0.35

表5.2.2-2 方案一各種情境下不同信賴度之公共缺水指數變化表

		方案一 - 公共 SI						
		未變遷	CGCM2-A1B	CGCM2-A2	CGCM2-B1	INM-A1B	INM-A2	INM-B1
信 賴 度	95%	2.17	2.18	2.22	2.45	2.64	2.22	1.03
	90%	2.12	2.10	2.14	2.31	2.54	2.10	0.98
	85%	2.11	2.06	2.12	2.29	2.47	2.08	0.97
	80%	2.01	2.01	2.10	2.27	2.42	2.04	0.91
	75%	1.93	1.98	2.08	2.23	2.37	2.04	0.90

表5.2.2-3 方案二各種情境下不同信賴度之農業缺水指數變化表

		方案二 - 農業 SI						
		未變遷	CGCM2-A1B	CGCM2-A2	CGCM2-B1	INM-A1B	INM-A2	INM-B1
信 賴 度	95%	0.79	1.69	1.61	1.53	1.34	1.21	0.42
	90%	0.74	1.66	1.55	1.48	1.25	1.11	0.39
	85%	0.71	1.61	1.51	1.46	1.22	1.09	0.35
	80%	0.69	1.59	1.47	1.45	1.18	1.07	0.33
	75%	0.66	1.56	1.45	1.39	1.16	1.06	0.31

表5.2.2-4 方案二各種情境下不同信賴度之公共缺水指數變化表

		方案二 - 公共 SI						
		未變遷	CGCM2-A1B	CGCM2-A2	CGCM2-B1	INM-A1B	INM-A2	INM-B1
信 賴 度	95%	0.67	0.89	0.97	0.89	0.70	0.69	0.23
	90%	0.61	0.87	0.95	0.85	0.67	0.63	0.18
	85%	0.59	0.82	0.93	0.83	0.64	0.61	0.17
	80%	0.58	0.82	0.91	0.83	0.62	0.59	0.16
	75%	0.55	0.80	0.91	0.79	0.61	0.58	0.16

表5.2.2-5方案三各種情境下不同信賴度之農業缺水指數變化表

		方案三 - 農業 SI						
		未變遷	CGCM2-A1B	CGCM2-A2	CGCM2-B1	INM-A1B	INM-A2	INM-B1
信 賴 度	95%	0.79	1.69	1.61	1.53	1.34	1.21	0.42
	90%	0.74	1.66	1.55	1.48	1.25	1.11	0.39
	85%	0.71	1.61	1.51	1.46	1.22	1.09	0.35
	80%	0.69	1.59	1.47	1.45	1.18	1.07	0.33
	75%	0.66	1.56	1.45	1.39	1.16	1.06	0.31

表5.2.2-6方案三各種情境下不同信賴度之公共缺水指數變化表

		方案三 - 公共 SI						
		未變遷	CGCM2-A1B	CGCM2-A2	CGCM2-B1	INM-A1B	INM-A2	INM-B1
信 賴 度	95%	0.35	0.45	0.51	0.45	0.34	0.34	0.09
	90%	0.32	0.42	0.48	0.42	0.32	0.30	0.08
	85%	0.30	0.41	0.46	0.42	0.30	0.28	0.06
	80%	0.29	0.40	0.46	0.41	0.28	0.26	0.06
	75%	0.26	0.38	0.44	0.39	0.26	0.24	0.05

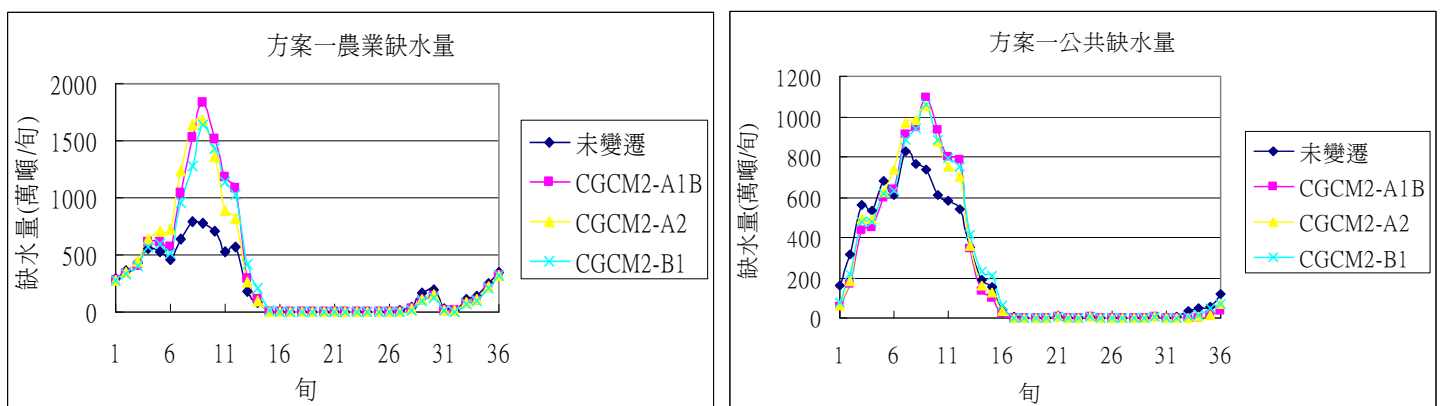


圖 5.2.2-1 方案一 CGCM2 模式缺水量分佈圖

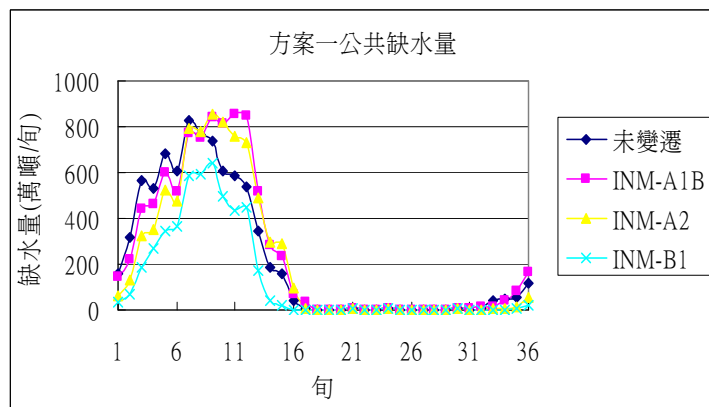
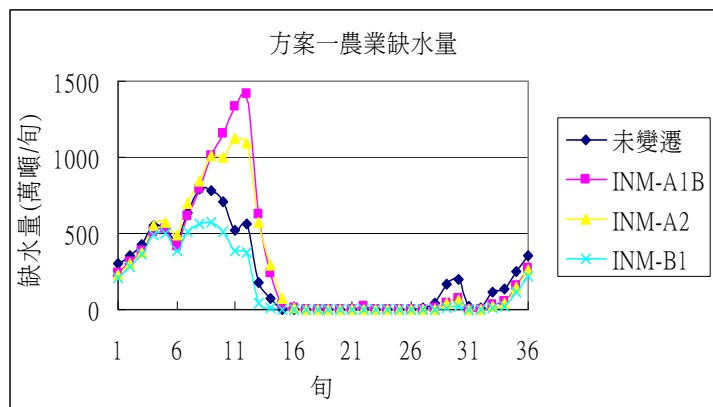


圖 5.2.2-2 方案一 INM 模式缺水分布圖

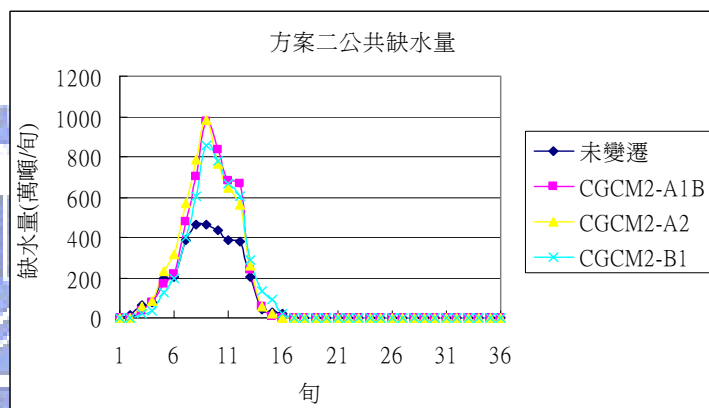
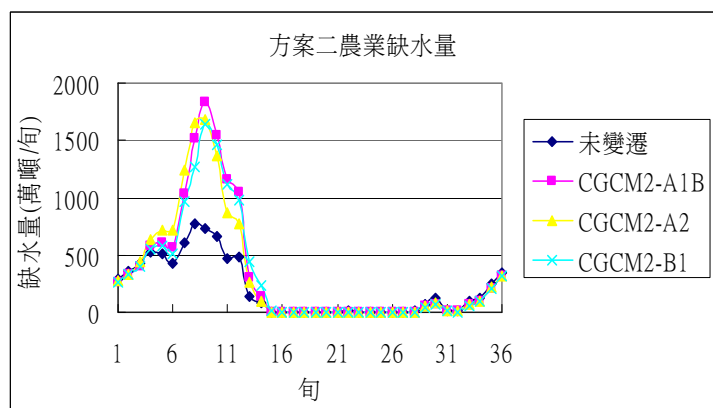


圖 5.2.2-3 方案二 CGCM2 模式缺水分布圖

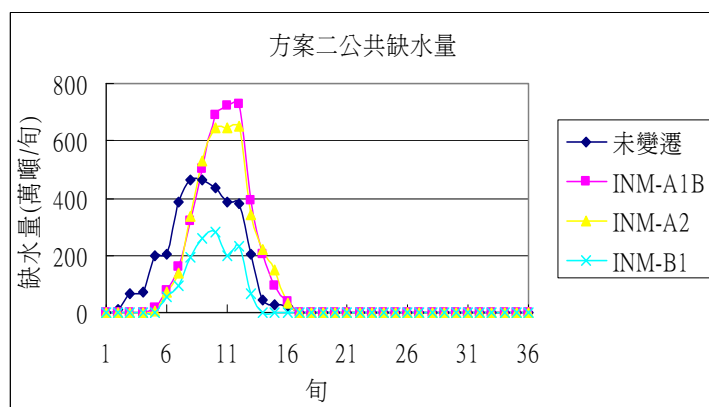
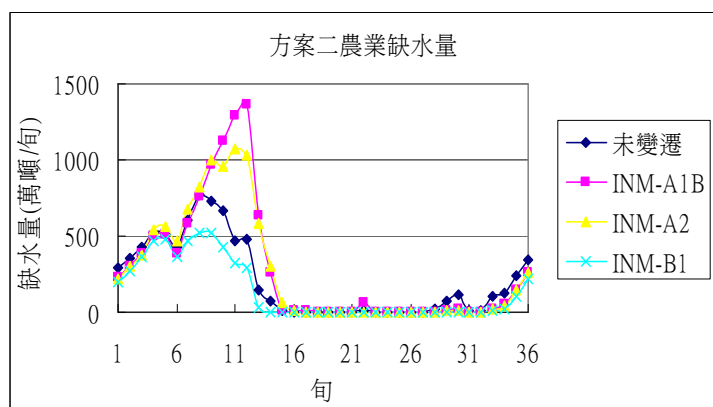


圖 5.2.2-4 方案二 INM 模式缺水分布圖

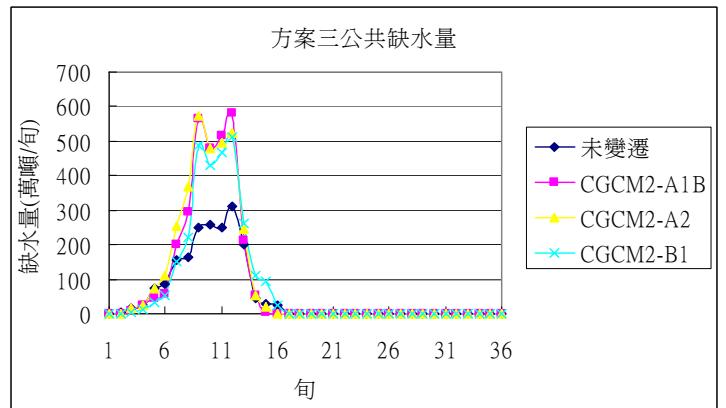
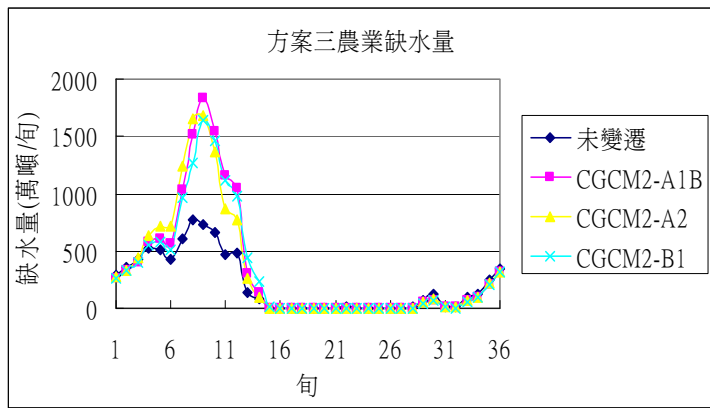


圖 5.2.2-5 方案三 CGCM2 模式缺水分布圖

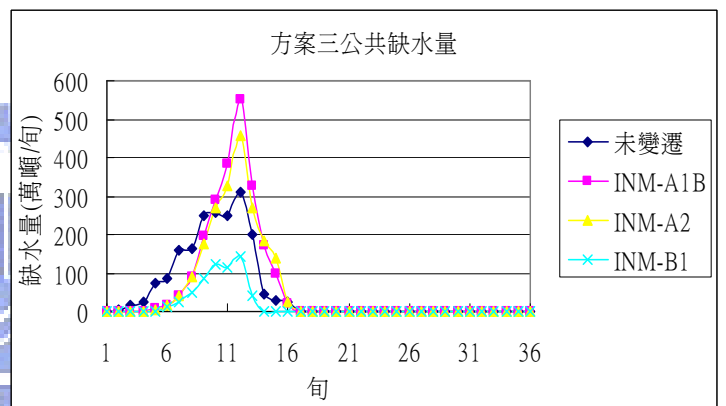
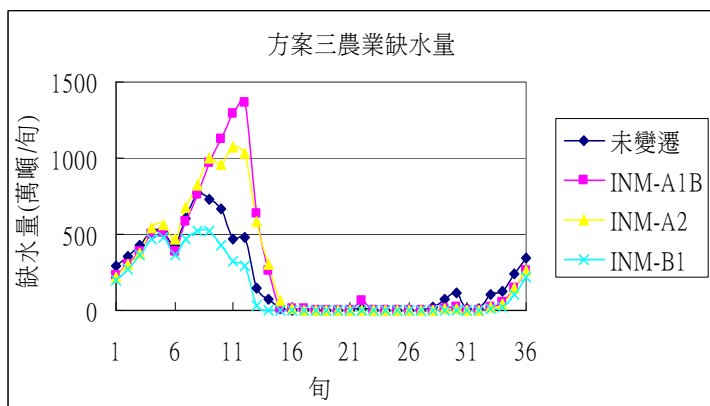


圖 5.2.2-6 方案三 INM 模式缺水分布圖

5.2.3 綜合分析

本研究基於蒙地卡羅模擬法，配合韋伯機率法進行指標風險分析，將前述不同水文條件與不同方案在信賴度 95% 下之農業缺水指數與公共缺水指數重新整理，其結果整理如表 5.2.3-1 與 5.2.3-2 所示，可做為決策者在考量氣候變遷風險下之決策參考。

氣候變遷對現況系統之衝擊，農業用水缺水情況皆有趨於嚴重之趨勢，僅 INM 模式之 B1 情境例外；公共用水缺水情況皆有趨於改

善之趨勢，僅 INM 模式之 A1B 情境例外，各現象之說明詳見 5.2.1 節。氣候變遷對各水資源調適策略之衝擊，農業用水與公共用水缺水情況皆有趨於嚴重之趨勢，僅 INM 模式之 B1 情境例外，各現象之說明詳見 5.2.2 節。結果顯示無論有無水資源調適策略，氣候變遷對農業用水缺水情況之衝擊呈現相同趨勢變化，至於公共用水缺水情況之衝擊則呈現相反趨勢變化，顯示公共用水缺水情況會因不同水資源調配系統而有不同結果。

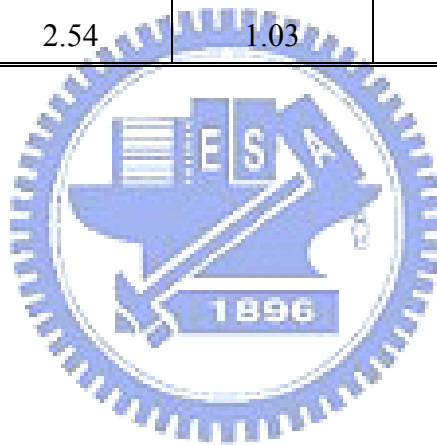
結果顯示無論氣候變遷發生與否，方案二對於降低缺水情況之效果皆優於方案一，假設公共缺水忍受度為 $SI < 1$ ，不論在任何水文條件下方案一皆未能有效滿足要求，方案二和方案三皆可滿足要求，假設農業缺水忍受度為 $SI < 1$ ，則水文狀況需在未氣候變遷條件下或在 INM 之 B1 情境下，各方案才可符合，顯示方案二（越域引水與淨水場擴增策略）之重要性。

表5.2.3-1各情境於各方案信賴度95%的農業SI

方案 水文情況	信賴度 95% 農業 SI			
	零方案	方案一	方案二	方案三
未變遷	0.87	0.87	0.79	0.79
CGCM2-A1B	1.72	1.72	1.69	1.69
CGCM2-A2	1.64	1.64	1.61	1.61
CGCM2-B1	1.55	1.55	1.53	1.53
INM-A1B	1.36	1.36	1.34	1.34
INM-A2	1.24	1.24	1.21	1.21
INM-B1	0.46	0.46	0.42	0.42

表5.2.3-2各情境於各方案信賴度95%的公共SI

	信賴度 95%公共 SI			
方案 水文情況	零方案	方案一	方案二	方案三
未變遷	4.59	2.17	0.67	0.35
CGCM2-A1B	3.77	2.18	0.89	0.45
CGCM2-A2	3.90	2.22	0.97	0.51
CGCM2-B1	4.32	2.45	0.89	0.45
INM-A1B	5.05	2.64	0.70	0.34
INM-A2	3.97	2.22	0.69	0.34
INM-B1	2.54	1.03	0.23	0.09



第六章 結論與建議

6.1 結論

1. 本研究以蒙地卡羅法探討氣候變遷對台中地區水資源缺水風險，建立涵蓋氣象資料合成模式、地表逕流模式與地表水資源調配模式之缺水風險分析平台，並以其評估氣候變遷對台中地區現況供水系統以及人工湖和越域引水工程等調適策略之衝擊。
2. 氣候變遷造成河川流量之衝擊
 - (1) 大部分的情境模擬結果顯示，氣候變遷造成豐枯差異變大，豐水期流量增加，枯水期流量減少，惟年總流量略微增加。
 - (2) 模擬結果中以 CGCM2 之 A1B 情境豐枯水期流量差異幅度最大，枯水期（11 月~隔年 4 月）旬平均流量約減少約 20%，豐水期（5 月~10 月）之旬平均流量約增加 10%。
 - (3) 模擬結果中以 INM 之 B1 情境年總流量增加幅度最大，松茂流量站枯水期旬平均流量約增加 13.57%，豐水期之旬平均流量約增加 26.56%，年總流量約增加 21.48%；卓蘭流量站枯水期旬平均流量約增加 24.02%，豐水期之旬平均流量約增加 6.99%，整年流量約增加 15.04%，
3. 氣候變遷對現況系統之衝擊
 - (1) 在氣候變遷的條件下，大部分的情境模擬結果顯示，農業用水缺水情況有趨於嚴重之趨勢（僅 INM 模式之 B1 情境例外），其乃因為大安溪之農業用水僅能取用天然河川流量，故氣候變遷下，枯水期河川流量的減少對農業用水缺水情勢有很大的衝擊。

(2)在氣候變遷的條件下，大部分的情境模擬結果顯示，公共用水缺水情況有略微降低的趨勢(僅 INM 模式之 A1B 情境例外)，其乃因為公共用水可引用德基與鯉魚潭水庫之水量，可蓄存氣候變遷下豐水期增加之水量，以彌補部分枯水期減少之水量，然仍有部分枯水期(三、四月)減少之水量無法彌補，惟在未氣候變遷條件下之現況系統，三、四月已易產生極端缺水量，故即使氣候變遷造成此時段流量之減少，缺水量已接近上限，故缺水量上升幅度有限，故整體而言，氣候變遷條件下，缺水量有略幅降低之趨勢。

4. 氣候變遷對各水資源調適策略之衝擊

(1)在氣候變遷的條件下，大部分的情境模擬結果顯示，農業用水缺水情況與現況系統之趨勢相同，有趨於嚴重之趨勢(僅 INM 模式之 B1 情境例外)。

(2)在氣候變遷的條件下，大部分的情境模擬結果顯示，公共用水缺水情況皆有趨於嚴重之趨勢(僅 INM 模式之 B1 情境例外)，與現況系統之缺水趨勢不同，其乃因為雖水庫可蓄存氣候變遷下豐水期增加之水量，以彌補部分枯水期減少之水量，然仍有部分枯水期(三、四月)減少之水量無法彌補，調適策略加入後，在未氣候變遷條件下，三、四月缺水量已較現況系統減少許多，故氣候變遷後造成三、四月之缺水量有大幅提高的空間，導致造成整體之缺水趨勢有提高之情況。

5. 水資源調適方案中，由於人工湖(含淨水場)策略設計規畫目的為降低台中地區公共缺水，故僅可改善公共用水之缺水情況，對於農業用水則無助益：越域引水(含淨水場)策略則可同時改善農業與公共用水之缺水情況，且其改善效率遠高於人工湖策略，

其原因為越域引水（含淨水場）策略除引用大甲溪剩餘水量供應台中地區公共用水外使用，亦引水至后里圳使用，使后里圳原供應量可間接蓄存於鯉魚潭水庫，增加其供水效益。

6. 本研究分析不同信賴度下，各氣候變遷情境條件下之農業與公共用水缺水指數，以提供客觀資料，做為決策者在考量氣候變遷風險下之決策參考。



6.2 建議

1. 本研究探討氣候變遷對各種單一與複合水資源調適策略之供水衝擊，考量之水源調適策略包含新建與擴建淨水廠、人工湖及越域引水等供給面策略，未來可新增需求面策略如水價調整、管線汰換、農移用水等。
2. 本研究利用系統動力學理論所建立的系統動力模式方便於多議題整合分析，未來可考量水質等其他議題，探討氣候變遷下對各種水資源議題之衝擊。
3. 本研究以簡易降尺度方法考量氣候變遷，未來可以統計降尺度與動力降尺度方法，探討不同方法氣候變遷衝擊之差異。
4. 本研究由 IPCC 所提供多個 GCM 模式中選出 MRI-CGCM2_3_2 與 INM-CM3 兩模式，未來隨 IPCC 提供越來越充分的資料，可考量更多 GCM 模式模擬氣候變遷之衝擊。
5. 由於本研究只選定兩個 GCM 模式並無法看出 A2、A1B 與 B1 各情境之間的差異，建議未來以多個 GCM 模式模擬再進行探討。
6. 本研究著重氣候變遷對於水資源規劃之影響，進行長期水資源調配模擬，固選用缺水指標來觀察長期水資源缺水情況，未來若要著重於短期之缺水與洪水事件，可依各研究方向或各用水標的不同，替換其他評估指標。

參考文獻

1. Metropolis, N. and Ulam, S., “The Monte Carlo Method”, Journal of the American Statistical Association, 44, 247, pp. 335-341, 1949.
2. Haith, D.A. and Shoemaker, L.L., “Generalized Watershed Loading Functions for Stream Flow Nutrients”, Water Resources Bulletin, 23(3),471–478, 1987.
3. Ayer, M. A., Wolock, D. M., McCabe, G. J., Hay, L. E., and Tasker, G. D., “Sensitivity of Water Resources in the Delaware River Basin to Climate Variability and Change”, U. S. Geological Survey water Supply Paper 2422, 1994.
4. Tung, C.P. and Haith, D.A., “Global Warming Effects on New York Streamflows”, Journal of Water Resources Planning and management, 121(2):216-225, 1995.
5. Ahmad, S. and Slobodan, P. S., “System Dynamics Modeling of Reservoir Operations for Flood Management”, Journal of Computing in Civil Engineering, pp.190-198, 2000.
6. XU, Z. X., K. Takeuchi, H. Ishidaira and X. W. Zhang, “Sustainability Analysis for Yellow River Water Resources Using the System Dynamics Approach”, Water Resources Management, 16, pp.239-261, 2002.
7. Simonovic, S.P. and Li, L. “Methodology for Assessment of Climate Change Impacts on Large-Scale Flood Protection System”, Journal of Water Resources Planning and Management-Asce, 129, 5, 361-371, 2003
8. Stave, Krystyna A., “A system dynamics model to facilitate public

- understanding of water management options in Las Vegas, Nevada”, *Journal of Environmental Management*, 67, pp.303-313, 2003.
9. XU, Z. X., “Impact of Climate Change on Water Resources in the Tarim River Basin”, *Water Resources Management*, 18, 439-458, 2004.
 10. Sehlke, G. and Jacobson, J., “System Dynamics Modeling of Transboundary Systems: The Bear River Basin Model”, *Ground Water*, 43, 5, pp.722–730, 2005.
 11. 經濟部水利署水利規劃試驗所，大甲溪攔河堰可行性規劃計畫，經濟部水利署，2002。
 12. 經濟部水利署水利規劃試驗所，多功能人工湖永續經營研究，經濟部水利署，2004。
 13. 經濟部水利署中區水資源局，大安溪及大甲溪水資源聯合運用初步規劃報告，經濟部水利署，2005。
 14. 經濟部水利署，多元化水源開發綱領計畫，2005。
 15. 經濟部水利署中區水資源局，大甲溪水源運用規則，經濟部水利署，2006。
 16. 經濟部水利署，區域水資源永續利用之策略模擬與分析(總報告)，2007。
 17. 經濟部水利署水利規劃試驗所，強化區域水資源永續利用與因應氣候變遷之調適能力(1/2)，2007。
 18. 經濟部水利署水利規劃試驗所，強化區域水資源永續利用與因應氣候變遷之調適能力(2/2)，2008。
 19. 洪念民，「氣候變遷對大安溪水資源營運之影響」，國立台灣大學農

- 業工程系碩士論文，1997。
20. 柯建州，「直線型高分子線性鬆弛之蒙地卡羅模擬」，國立中正大學化學工程系碩士論文，2001。
 21. 詹麗梅，「區域供水系統系統動力模型建立與策略評估-以大基隆供水區為例」，國立海洋大學河海工程系碩士論文，2001。
 22. 黃任伯，「以大氣候與植物型之關係模擬氣候變遷對」，國立臺灣大學森林學系碩士論文，2002。
 23. 李孟璵，「高雄地區愛河水環境生態復育與水污染防治策略分析」，國立中山大學海洋環境及工程系碩士論文，2002。
 24. 宋嘉文，「氣候變遷對台灣西半部地區降雨及乾旱影響之研究」，國立成功大學水利及海洋工程學系碩士論文，2003。
 25. 謝明昇，「應用遺傳規劃法進行氣候預報降尺度分析於季節性河川流量預報」，國立臺灣大學生物環境系統工程系碩士論文，2004。
 26. 陳思瑋，「淡水河流域水資源永續性評估暨管理之研究」，國立臺灣大學生物環境系統工程系碩士論文，2005。
 27. 王世為，「永續性水質管理系統受氣候變遷影響之脆弱度評估」，國立臺灣大學生物環境系統工程系碩士論文，2006。
 28. 張婉茹，「應用系統動力學於多元化水資源策略模擬與分析-以台中地區為例」，國立交通大學土木工程系碩士論文，2006。
 29. 李任馥，「應用系統動力學於高屏河流域水量水質改善策略之模擬分析」，國立交通大學土木工程系碩士論文，2007。
 30. 蘇昀柏，「系統流程轉換成動力流圖之研究—以水資源分析為例」，國立交通大學土木工程系碩士論文，2007。
 31. 陳禹志，「系統動力學應用於大甲溪水污染防治策略研擬之研究」，

逢甲大學水利工程系碩士論文，2007。

32. 蘇昱維，「多元化水資源策略模擬與經濟財務分析」，國立交通大學土木工程系碩士論文，2007。
33. 蘇竹君，「氣候變遷與土地利用改變對石門水庫集水區之流量與泥沙產量影響」，國立中央大學土木工程系碩士論文，2008。
34. 易任與王如意編著，應用水文學，國立編譯館，1979。
35. 楊朝仲等編著，系統動力學-思維與應用 System Dynamics，五南圖書出版股份有限公司，2007。

