

國立交通大學

土木工程研究所

碩士論文

應用系統動力學於高屏溪流域水量水質
改善策略之模擬分析



**Application of System Dynamics on
Assessing the Remedying Strategies
of Water Quantity and Quality in
Kaopin River**

研究生：李任馥

指導教授：張良正 博士

中華民國九十六年八月

應用系統動力學於高屏溪流域水量水質改善策略之
模擬分析

Application of System Dynamics on Accessing the Remedying
Strategies of Water Quantity and Quality in Kaopin River

研 究 生：李任馥

Student : Jen-Fu Li

指 導 教 授：張良正

Advisor : Liang-Cheng Chang

國立交通大學
土木工程學系碩士班
碩士論文



A Thesis

Submitted to Institute of Civil Engineering
National Chiao Tung University
in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of
Master of Science
in
Civil Engineering
August 2007
Hsinchu, Taiwan, Republic of China

中華民國九十六年八月

應用系統動力學於高屏溪流域水量水質改善策略之 模擬分析

學生：李任馥

指導教授：張良正 博士

國立交通大學土木工程研究所

摘要

工業發展和生活水準的提升，常使得用水需求及污染排放量不斷地增加，因而造成缺水及水質污染等問題，高屏溪流域即為一典型的例子。惟河川水質水量問題機制複雜，需要一個能綜和描述相關機制的模式，始可進行較完善的整體評估。因此，本研究以高屏溪流域為研究區域，應用系統動力學建立一個水量水質改善策略的綜合評估模式，並以 VENSIM 為系統開發之軟體環境，模式的建立應用了系統動力學的五大步驟即：問題的定義、系統的描述、因果回饋圖、模型的建置及情境模擬等。研究結果顯示，只施行單一種水量或水質之方案皆不能同時滿足水量和水質標準，而同時施行多種方案則可有多種組合能同時滿足水量和水質標準，對此可行之組合，本研究進一步計算其淨收益，以提供決策者更多的資訊做參考。研究發現若將改善策略實施的時間點延後五年，則同時滿足水量水質標準的組合數就會減少至兩種，此顯示高屏溪水量及水質問題之解決乃是刻不容緩。本研究成果除了可作為高屏溪水量水質問題之改善參考外，並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。

Application of System Dynamics on Assessing the Remedying Strategies of Water Quantity and Quality in Kaopin River

Student : Jen-Fu Li Advisor : Dr. Liang-Cheng Chang

Department of Civil Engineering
National Chiao Tung University

Abstract

The water demand and usage in Kaopin area has increased significantly in recent years due to industrial growth and increased living standards. The increased water demand has raised the risk of water deficit. The raising water usage has also increased the amount of waste water disposal and thus causing the pollution of Kaopin river. Because water quality and water quantity are closely related, this study uses the System Dynamic Method (SD) to develop an integrated simulation model for strategically combining water quality and water quantity in the Kaopin river. System dynamic software, VENSIM, has been used to construct a simulation model. The model was developed through the procedures of problem definition, system description, causal loop feedback drawing, model implementation and scenario analysis. Investigation results demonstrate that a single strategy for remedying the water quality and quantity can not satisfy the water quality and quantity standard simultaneously, yet compound strategies can. Compound strategies have nine feasible combinations. The study calculates its net income in order to offer policymakers more options to make decision. If compound strategies are implemented until fifth year, the feasible strategies will be

reduced to two. The results show that effective planning and management of water quality and quantity in the Kaopin river should be a priority for government. This study also demonstrated the practice of applying SD to access the remedying policies of water quality and quantity in the Kaopin river.



謝誌

時光飛逝，似乎就在轉眼間，就要告別了這所美麗的校園，背起滿滿的行囊，踏上人生另一段旅程。來這裡遇到了各個優秀的老師及學長、同窗及學弟妹，以及那系館外那開的火紅的鳳凰花，交織成我在交大土木所的一片片美好回憶……

能夠有如此多有形無形的收穫，首先我要感謝在學業上啟蒙我良多的張良正教授，指引出個人這次的研究方針，也成就了這本拙作；以及逢甲大學的李漢鏗教授在水質領域上的教導；還要感謝楊朝仲學長及何智超學長在研究計畫以及論文寫作上的指導，攜手帶我一起突破各式各樣難關，陳宇文、葉明生、朱宏杰、蔡瑞彬學長不時提供專業的建議；再來要感謝時常在研究室一起打拼到半夜的同窗好友昀柏、君儀、浚瑋、全佑、嘉晉以及瘋狂阿給的戰友們，每回合的討論都發出燦爛的火花令人難忘，回味再三；也感謝學弟妹婉如、怡釗、正偉、玟豪、柏成、為善、昱維、敏威、韋圻及瀚聖一聲聲親切的問候，讓研究室倍感溫馨。

最後，不能免俗的，要感謝最偉大的父母親和親愛的手足，以及時常在身邊陪伴的女友僑耘，有了他們的加油打氣，才能在每回腸思枯竭之時，產生新的信心與靈感。這次的研究不是結束而是一個新的開始，我會帶著這樣的研究精神繼續面對未來的人生，再次由衷的感謝以上的所有人。

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..... | VII |
| 圖目錄..... | VIII |
| 第一章 緒論..... | 1 |
| 1.1 前言 | 1 |
| 1.2 文獻回顧 | 2 |
| 第二章 研究方法論 | 5 |
| 2.1 系統動力學之角色 | 5 |
| 2.2 系統動力學之原理 | 6 |
| 2.3 建模步驟 | 8 |
| 2.4 因果回饋分析 | 9 |
| 2.4.1 問題解決導向的因果回饋圖..... | 10 |
| 2.4.2 水庫操作原則的因果回饋圖..... | 11 |
| 第三章 研究範疇之界定 | 13 |
| 3.1 高屏溪水資源現況 | 13 |
| 3.2 高屏溪水質現況 | 14 |
| 3.3 問題與策略 | 17 |
| 3.3.1 水量改善的策略擬定 | 17 |
| 3.3.2 水質改善的策略擬定 | 18 |
| 第四章 系統的描述 | 19 |

| | |
|---------------------|----|
| 4.1 高屏河流域基本資料 | 19 |
| 4.2 高屏溪水量系統 | 21 |
| 4.3 高屏溪水質系統 | 27 |
| 第五章 因果回饋分析 | 28 |
| 第六章 系統動力模型建置 | 31 |
| 6.1 流圖及模型建置 | 31 |
| 6.2 模型檢定 | 44 |
| 第七章 情境模擬與分析 | 48 |
| 7.1 單一型策略模擬結果 | 48 |
| 7.2 複合型策略模擬結果 | 68 |
| 第八章 結論與建議 | 82 |
| 8.1 結論..... | 82 |
| 8.2 建議..... | 83 |
| 參考文獻..... | 84 |



表 目 錄

| | |
|--------------------------------------|----|
| 表 3.2-1 高屏溪現行水體用途分類一覽表 | 16 |
| 表 3.2-2 地面水體分類及水質標準 | 16 |
| 表 3.2-3 陸上水體分類及用途 | 17 |
| 表 4.1-1 高屏溪各主支流基本資料 | 21 |
| 表 4.1-2 高屏溪流域水系資料表 | 21 |
| 表 4.2-1 自來水系統各水廠使用水資源與出水概況 | 25 |
| 表 4.2-2 高屏溪流域水質監測站與各主支流取水口關係表 | 26 |
| 表 6.1-1 臺灣各地區污水量與用水量之比值表 | 34 |
| 表 6.1-2 高雄縣民國 81~90 年人口各年成長率 | 34 |
| 表 6.1-3 BOD 一般流達率建議值 | 35 |
| 表 6.1-4 畜牧業放流水標準 | 38 |
| 表 6.1-5 高屏溪流域各種污染源比重表 | 39 |
| 表 6.1-6 高屏溪流域各種污染源排放表 | 40 |
| 表 7.1 單一型策略模擬結果 | 49 |
| 表 7.2-1 策略調整之範圍 | 68 |
| 表 7.2-2 複合型策略模擬結果表(時刻初即加入改善策略) | 69 |
| 表 7.2-3 複合型策略模擬結果表(第五年才加入改善策略) | 70 |

圖目錄

| | |
|---------------------------------|----|
| 圖 2.1 系統動力學與決策支援系統建構流程圖 | 5 |
| 圖 2.2 系統動力模式元件關係示意圖 | 7 |
| 圖 2.3 系統動力學建模與策略分析流程 | 9 |
| 圖 2.4-1 正向因果鍵 | 10 |
| 圖 2.4-2 負向因果鍵 | 10 |
| 圖 2.4-3 正向因果回饋環路 | 10 |
| 圖 2.4-4 負向因果回饋環路 | 10 |
| 圖 2.4.1 問題解決的因果回饋圖 | 11 |
| 圖 2.4.2 水庫操作原則的因果回饋圖 | 11 |
| 圖 2.4.3 水量隨時間變化圖 | 12 |
| 圖 4.1 高屏溪流域水系圖 | 20 |
| 圖 4.2-1 水量系統圖 | 22 |
| 圖 4.2-2 甲仙堰位置圖 | 23 |
| 圖 4.2-3 高屏溪攔河堰位置圖 | 24 |
| 圖 4.3 水量及水質系統圖 | 27 |
| 圖 5 高屏溪流域因果回饋圖 | 30 |
| 圖 6.1-1 高屏溪流域水量流圖 | 32 |
| 圖 6.1-2 廢水處理流程 | 36 |
| 圖 6.1-3 高屏溪流域水質流圖 | 42 |
| 圖 6.1-4 高屏溪流域水量水質流圖 | 43 |
| 圖 6.2-1 水質實測值，水質平均±一倍標準偏差 | 45 |
| 圖 6.2-2 水質檢定結果圖 | 45 |
| 圖 6.2-3 水質驗證結果圖 | 46 |

| | |
|--------------------------------------------|----|
| 圖 6.2-4 高屏溪流域水質測站圖 | 46 |
| 圖 6.2-5 高屏大橋水質測站資料 | 47 |
| 圖 7.1-1 單一型策略模擬結果圖(現況) | 50 |
| 圖 7.1-2 單一型策略模擬結果圖(Q95) | 51 |
| 圖 7.1-3 單一型策略模擬結果圖(SI=1) | 52 |
| 圖 7.1-4 單一型策略模擬結果圖(Q85) | 53 |
| 圖 7.1-5 單一型策略模擬結果圖(Q65) | 54 |
| 圖 7.1-6 單一型策略模擬結果圖(Q55) | 55 |
| 圖 7.1-7 單一型策略模擬結果圖(接管速率 5%/年) | 56 |
| 圖 7.1-8 單一型策略模擬結果圖(豬隻削減 100%) | 57 |
| 圖 7.1-9 單一型策略模擬結果圖(豬隻削減 80%) | 58 |
| 圖 7.1-10 單一型策略模擬結果圖(豬隻削減 70%) | 59 |
| 圖 7.1-11 單一型策略模擬結果圖(抽取地下水 500 萬噸/月) | 60 |
| 圖 7.1-12 單一型策略模擬結果圖(抽取地下水 800 萬噸/月) | 61 |
| 圖 7.1-13 單一型策略模擬結果圖(抽取地下水 1000 萬噸/月) | 62 |
| 圖 7.1-14 單一型策略模擬結果圖(抽取地下水 1200 萬噸/月) | 63 |
| 圖 7.1-15 單一型策略模擬結果圖(坪頂淨水廠 30 萬噸/天) | 64 |
| 圖 7.1-16 單一型策略模擬結果圖(坪頂淨水廠 60 萬噸/天) | 65 |
| 圖 7.1-17 單一型策略模擬結果圖(南化淨水廠 30 萬噸/天) | 66 |
| 圖 7.1-18 單一型策略模擬結果圖(南化淨水廠 60 萬噸/天) | 67 |
| 圖 7.2-1 複合型策略模擬結果圖(時刻初即加入改善策略)(1) | 71 |
| 圖 7.2-2 複合型策略模擬結果圖(時刻初即加入改善策略)(2) | 72 |
| 圖 7.2-3 複合型策略模擬結果圖(時刻初即加入改善策略)(3) | 73 |
| 圖 7.2-4 複合型策略模擬結果圖(時刻初即加入改善策略)(4) | 74 |
| 圖 7.2-5 複合型策略模擬結果圖(時刻初即加入改善策略)(5) | 75 |

圖 7.2-6 複合型策略模擬結果圖(時刻初即加入改善策略)(6)..... 76
圖 7.2-7 複合型策略模擬結果圖(時刻初即加入改善策略)(7)..... 77
圖 7.2-8 複合型策略模擬結果圖(時刻初即加入改善策略)(8)..... 78
圖 7.2-9 複合型策略模擬結果圖(時刻初即加入改善策略)(9)..... 79
圖 7.2-10 複合型策略模擬結果圖(第五年才加入改善策略)(10)... 80
圖 7.2-11 複合型策略模擬結果圖(第五年才加入改善策略)(11)... 81



第一章 緒論

1.1 前言

近年來台灣地區因為經濟的快速發展，導致用水需求不斷地成長，使水資源的調度面臨比以往更嚴峻的考驗，因此，水資源的永續利用對於台灣未來的經濟與社會發展有非常重大的影響，因為缺水會影響產業的投資意願，而水的污染則會衝擊生態環境。所以，水質與水量有效的規劃與管理應是刻不容緩的工作。此外，水質和水量的互動關係非常密切，例如：若為了提供日漸成長的公共用水需求，而增加攔河堰的引水量，將嚴重的影響河川的流量，而河川流量的減少則會降低河川的涵容能力，河川涵容能力的降低，將會提高河川水污染的程度，尤其在枯水期特別明顯。

基於前述，在規劃任何解決缺水問題的策略時，不僅必須同時考量其對水質面的影響，也要提供其他預防或改善河川水質的配套措施。很不幸地，在台灣水質和水量的問題通常是被分開考量，並且水量的滿足與否比水質的好壞更被重視，進而間接忽視了環境生態的維護，使環境及生活居住的品質不斷地惡化，此乃重水量而輕水質之策略所導致。以高屏溪為例，高屏溪為台灣流量最大的河川亦為南部地區最重要的河川，惟高屏地區水質不佳是長期以來的問題，而且由於水資源有限，限制了高屏地區的經濟發展，水質問題與水資源的供給是高屏地區急迫需要解決的問題。

有鑑於此，本研究將以水量水質整體考量的觀點，分析高屏地區所面臨的水質水量問題，並試圖以系統思考的角度，研擬出可行而有效的水質水量改善策略，藉以協助達成區域水資源之永續經營管理。

1.2 文獻回顧

有效的永續水資源規劃與管理，水量和水質的同時考量是必要的，此一議題國內外相關研究如下：L. Gabriel et al. (2000) 架構出一個同時結合了水量模式 (MOSIM) 和水質模式 (QUAL2E-UNCAS) 的水資源管理決策支援系統，並將其運用在 Piracicaba 流域；Sharon et al. (2001) 整合水量模式 (MODSIM) 和水質模式 (HEC-5Q)，並將其運用在 Klamath 流域，藉由此一整合模式的模擬結果，篩選出能改善水質並滿足水量要求的策略。李魁裕 (2001) 同時進行高屏溪水量改善和水質改善方案的成本效益分析，特色為使用排放轉換函數結合水質改善方案的成本效益分析，排放轉換函數是以 QUAL2E 水質模式模擬。

上述研究均為水量模式與水質模式的搭配模擬，彼此間的連接與整合純為資料的相互傳遞，亦非水量與水質各單元變數因果連接的方式，因此不易瞭解水量與水質系統實際互動影響的方式，僅能就模擬結果進行參數敏感度分析來解釋其變化趨勢。為了解決這樣的問題，本研究將採用系統動力學來建置水質水量整合模擬模型。

傳統上進行嚴謹的水資源系統分析時，一般皆會針對問題繪製系統圖與流程圖，以釐清問題的解決方式與處理邏輯。系統圖是將系統本身以圖形表達，定義了問題的結構與範圍；流程圖是為達成特定目的而實行的一連串邏輯相關的工作以圖形表現，表達了問題處理步驟。系統圖與流程圖各自表達了解題所需的部份資訊，例如：水資源調配的系統圖可以展現各供水與需水節點的空間相對位置及節點間水源流動的順序，但是各節點放水原則及計算方式就得從流程圖才能得知。同樣地，只單看流程圖雖然可以瞭解水源運用操作及演算的順

序，但是無法得知流程圖各變數於實體系統的相對位置與連接型態。

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 1960 年代所發展的一門科學，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)等理論成為管理的新方法、新工具和新概念。系統動力學為描述、探索和分析複雜系統內部流程與訊息、組織範圍與策略的一種嚴謹的研究方法，其可透過量化的系統模擬分析來進行系統結構與行為之設計。系統動力學是處理訊息回饋系統之動態行為的一種方法論，它提供一種實驗的、定量分析的方法，因此對於極複雜的動態、回饋且具時間滯延(Time Delay)的問題，能提供整體、長期且較週延的解決方法。非常適合於應用在與時間演進有密切關係之課題研究。現今水質和水量的互動的問題，已具備了複雜的時間隨動態變化的特性，因此適合利用系統動力學來解決此類問題。除了強調探討系統隨時間變化，系統動力學另一重要之基礎為因果之關連性，該意義有三：(1) 藉由因果關係的確認來說明系統之問題；(2) 藉由因果關係的確認將複雜之問題作簡潔而系統化之表示；(3) 藉由變數間之因果關係來說明系統之範圍。其中，因果關係之表示旨在說明兩個變數間之關係為正向或負向，而無數量上之意義，意即數量之大小並不會影響到因果關係鍵之存在與否。進而若將一系列之因果鍵串接成因果回饋關係環路，則可將因果關係發展為正向之因果回饋關係環路或負向之因果回饋關係環路；正向之因果回饋關係環路，係表示環路上任何變數的變動，會使系統在下一週期朝同方向加強其變動幅度，造成自我之強化，而負向之因果回饋關係環路，則表示任何變數的變動，會使系統在下一週期朝反方向變動幅

度，變數產生抑制變動之效果，造成自我之規律。

系統動力學應用於水資源及水質的國內外文獻如下，Simonovic (1997)將系統動力學應用於埃及的水資源策略分析上，Stave(2003) 將系統動力學應用於拉斯維加斯的水資源管理上，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，H.C.Guo(2001) 將系統動力學應用於中國大陸洱海(Erhai)湖流域的水質規劃與管理。李孟璉(2002) 以高雄愛河為研究對象，利用河川水質模式，配合上游集水區的人口變化、土地使用以及降雨型態的差異，並使用系統動力學的軟體 STELLA 來建構模式模擬現況。黃鈺珊(2001)建構高屏溪流域水資源使用與都市系統動力模型，並以情境分析，針對當前高屏溪流域之水資源與都市發展政策進行政策試驗，檢視其是否達到永續發展之理念。李明益(2001)建立河川流域系統與水管理決策的系統動力學模式。童智偉(2000)則依據驅力-狀態-反應之永續指標架構，探討流域性環境水質之永續力。以濁水溪流域為例，配合 VENSIM 系統動力學軟體建立環境管理決策支援系統，進行水質評量系統及動態模擬分析。詹麗梅(2001)利用系統動力學學理論及 STELLA 系統動力學軟體建立區域供水系統之模擬模式，並以大基隆供水區為例，探討不同供水策略對供水系統永續性之影響。

上述系統動力學應用於水資源領域的文章並無同時考量水質和水量的互動影響，因此本研究將以系統動力學五大步驟-問題的定義、系統的描述、因果回饋圖、模型的建置、情境模擬，來架構水質水量互動的問題，並利用 VENSIM 來建置系統動力模型，最後透過情境模擬來找出能同時解決水質水量問題的策略組合。本研究的應用區域為高屏溪流域。

第二章 研究方法論

2.1 系統動力學之角色

系統動力學建構在整個支援平台過程所扮演的角色如圖 2.1 所示。首先針對欲研究之議題進行相關水文、地文與人文資料的蒐集，接著藉由資料礦掘、模擬模式或優選模式等技術對相關資料進行資訊擷取的工作。將各領域所獲得的資訊與知識，透過系統動力學進行相互間的組織與串接。建構一個決策支援平台，最後將可進行即時的情境模擬，模擬所產生的分析結果與相支援相關決策者如單位主管或透過委員會進行溝通、協調與可行性之研究後，將能產生一兼具公眾利益與環境品質的決策。

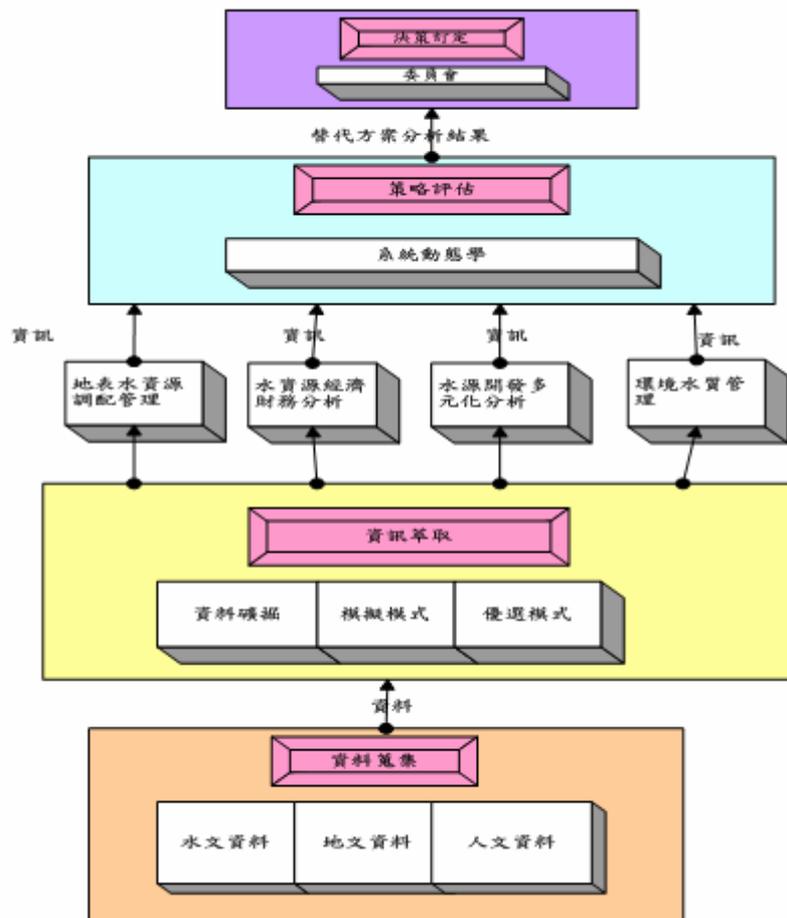


圖 2.1 系統動力學與決策支援系統建構流程圖

2.2 系統動力學之原理

一、系統動力學之概念

系統動力學 (System Dynamics) 是由美國麻省理工史隆管理學院 (MIT) 的 J.W Forrester 教授於 1960 年代所發展的一門科學，結合了控制 (Cybernetics)、系統理論 (System Theory)、資訊理論 (Information Theory)、決策論 (Decision Theory)、電腦模擬 (Computer Simulation) 等理論成為一體的管理新方法、新工具和新概念，用以研究具資訊回饋、決策與行動之間存在時間滯延現象等多種因素間互動關係所形成之複雜動態行為，適用於解決非線性關係、因果循環、資訊回饋、時間滯延等動態性複雜之問題解決上，且與其他應用於解決一般問題的靜態、線性的工具有所不同。

根據 Jay W. Forrester 教授指出系統動力學的特性如下：

- 藉由變數間因果關係的確認以說明問題與問題內部系統的結構，並將複雜的管理問題予以系統化的表示。
- 以因果關係為基礎，透過定義存量變數 (Stock Variable) 與流量變數 (Flow Variable) 及其交互影響關係形成決策回饋環路。
- 導入訊息回饋的系統概念，在模式建構中將決策過程所運之訊息、訊息延遲及行為延誤的現象予以具體表達，並可模擬真實系統的運作狀況。
- 可動態模擬一真實系統之訊息放大及干擾、時間延遲等現象，建立系統的發展歷程，提供給系統分析者改變模式中之參數組合以觀察系統行為的變化，提供管理決策之參考。

(河川流域水管理系統動力模式之發展與建立，2002)

系統動力學是處理訊息回饋系統之動態行為的一種方法論，它提

供一種實驗的、定量分析的方法，因此對於極複雜的動態、回饋且具時間滯延(Time Delay)的問題，能提供整體、長期且較週延的解決方法。近年來系統動力學應用日益廣泛，應用之課題包括了模擬地表水污染、模擬水庫供水系統、生態系統族群變化、大氣化學與污染傳輸、溫室氣體與全球暖化和現金流量的問題。由於系統動力學與時間演進具有密切的連動關係，因此非常適合於應用在與時間演進有密切關係之課題研究。現今流域永續經營管理的問題，已具備了所謂時間動態複雜的特性，因此適合利用系統動力學來解決此類問題。因為系統動力學模擬使用帶有滯延的微分方程組，能夠方便地處理非線性與時間變化的關係，能夠做長期的、動態的分析與研究，適合大尺度、大範圍的系統模擬。

二、系統動力學的基本元素

系統動力模式在構成回饋系統各部門之相互關係及系統之回饋環路結構時，一定包含兩種基本之變數，而這兩種變數是構成決策回饋環路之必要與充分條件，其中第一種變數具有儲存之觀念，第二種具有流動之觀念，再加上輔助其關係變化之第三種變數，構成三類主要之系統組成變數元件，其分別為：(1) 儲存 (Level & Stock)、(2) 流動 (Rate & Flow)、(3) 助動 (Auxiliary & Converter)，另外，再以箭頭連結表示各元件彼此間交互影響之關係，如圖 2.1 所示，其中圖左為系統動力模式軟體 VENSIM 之示意圖，圖右則為 STELLA 之示意圖。

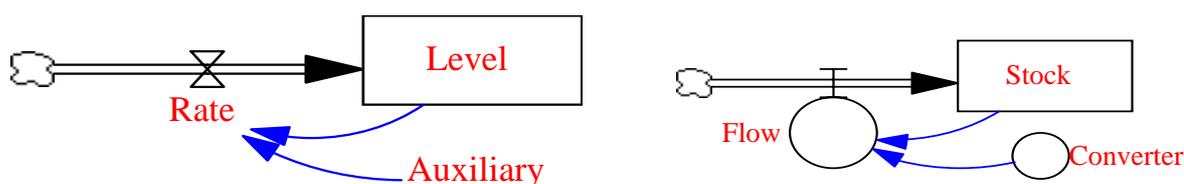


圖 2.2 系統動力模式元件關係示意圖

積量 (Stock) 係表示某一系統變數在某一特定時刻的狀態，其數值大小是累加了流入率 (Inflow rate) 與流出率 (Outflow rate) 的淨差額所產生之結果，可說是系統過去活動結果之累積，如同水庫中儲水量即屬於一儲存之概念；流量 (Flow) 則表示某種儲存變數變化之快慢，代表著一種瞬間之行為，其數值多由儲存變數與助動變數之交互關係來決定，如同水庫之放水量即屬於一流動之概念；輔助變數 (Auxiliary & Converter) 則用來針對前兩種變數進行各變數間交互關係之補充說明，類似一般計算方程式中之參數，如水庫中之放水規則即屬於助動之概念。

三、系統動力學之優點

系統動力學基於組成元件之因果關係建立系統架構，因此可透過樹狀搜尋找到某變數之所有影響因數，有助於分析問題成因，以作為未來解決問題之參考。

由於系統動力學將系統之組成元件與因果關係以積量、流量、輔助變數和箭線四個元件表達，因此不同領域議題在基於四個共同組合元件下，可容易進行整合分析。策略模擬結果與策略評估可即時以圖形化呈現。

2.3 建模步驟

模型建置模擬與策略分析流程如圖 2.3 所示。首先藉由「問題定義」、「系統描述」、「因果回饋圖」以及「可能策略研擬」等建模步驟來建置系統動力模型。在模型檢定無誤後，即可進行策略之情境模擬，所有研擬策略的模擬結果透過「各問題代表性指標衝突分析」，來初步篩選出可行策略。然而指標無法反映出策略施行時時間滯延的問題，故於可行策略集合形成後，再進行策略之時間滯延效應分析，分析的結果將提供決策者於協商過程時之重要參考。

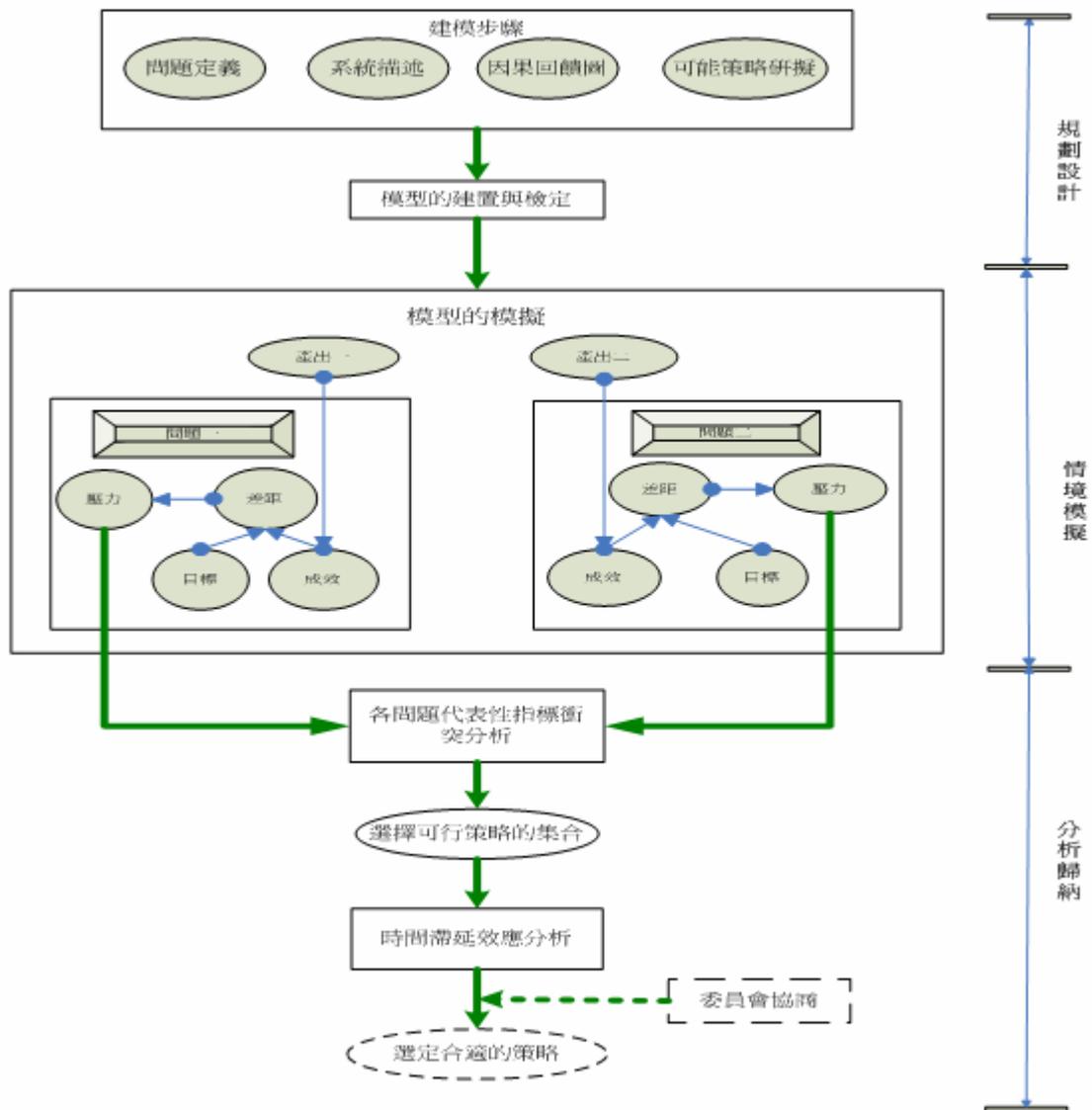


圖 2.3 系統動力學建模與策略分析流程

建模步驟的主要目的為設計模型建置之參考藍圖，其主要工作項目包含了「問題定義」、「系統描述」、「因果回饋圖」以及「可能策略研擬」。

2.4 因果回饋分析

系統動力學重要基礎之一為因果之關連性，其意義有三：(1) 藉由因果關係的確認來說明系統之問題；(2) 藉由因果關係的確認將複雜之問題作簡潔而系統化之表示；(3) 藉由變數間之因果關係來說明系統之範圍。其中，因果關係之表示在說明兩個變數間之關係為正向

或負向，如圖 2.4-1 及圖 2.4-2 所示，並而無數量上之意義，意即數量之大小並不會影響到因果鍵之存在與否。進而若將一系列之因果鍵串接成因果回饋關係環路，則可將因果關係發展為正向之因果回饋關係環路或負向之因果回饋關係環路；正向之因果回饋關係環路，係表示任何變數的變動，會使系統在下一週期朝同方向加強其變動幅度，造成自我之強化，如圖 2.4-3 所示，而負向之因果回饋關係環路，則表示任何變數的變動，會使系統在下一週期朝反方向變動幅度，變數產生抑制變動之效果，造成自我之規律，如圖 2.4-4 所示。

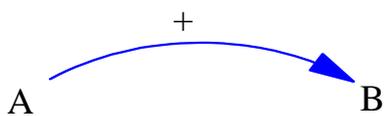


圖 2.4-1 正向因果鍵

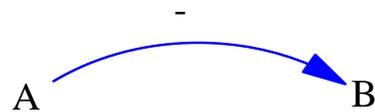


圖 2.4-2 負向因果鍵

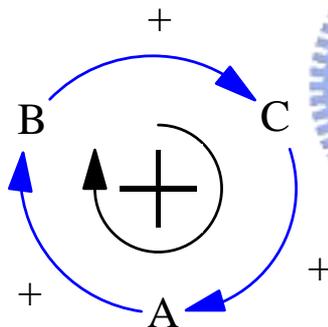


圖 2.4-3 正向因果回饋環路

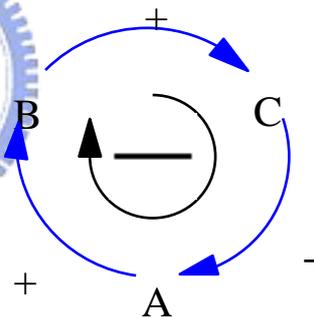
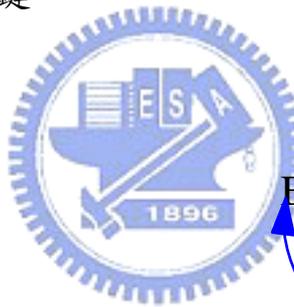


圖 2.4-4 負向因果回饋環路

藉由因果回饋圖的繪製，我們可以清楚了解各變數的因果關係與作用方向，並瞭解結構的基本特性。

2.4.1 問題解決導向的因果回饋圖

問題解決導向的因果回饋圖可以圖 2.4.1 為例說明，當供水量和需水量產生差距時，表示供水不足而產生缺水量，可由缺水量計算出年缺水指標 (SI)，策略的實施則根據實際之年 SI 和標準年 SI (=1) 之差異。

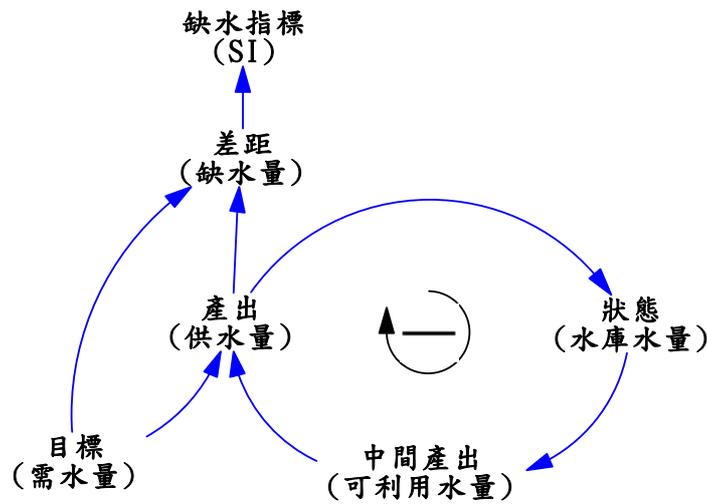


圖 2.4.1 問題解決的因果回饋圖

2.4.2 水庫操作原則的因果回饋圖

水庫操作原則的因果回饋圖如圖 2.4.2 所示，其表示水庫蓄水量越多則可利用水量(入流量+水庫蓄水量)越多，當可利用水量越多時水庫供水量就可以越多，但供水量越多的結果亦會導致水庫蓄水量的減少，如此即構成了一個封閉的負向因果回饋關係環路，這表示水庫蓄水量（累積變數）會隨著時間的前進，而趨近於某一個平衡水位。

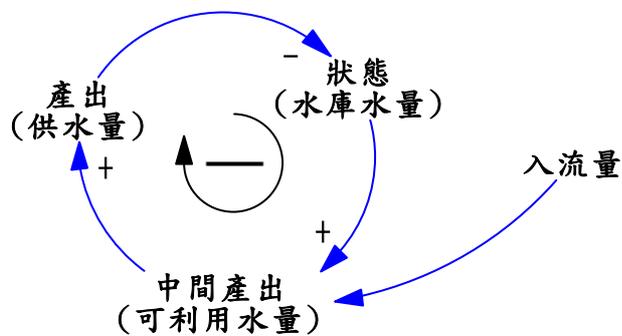
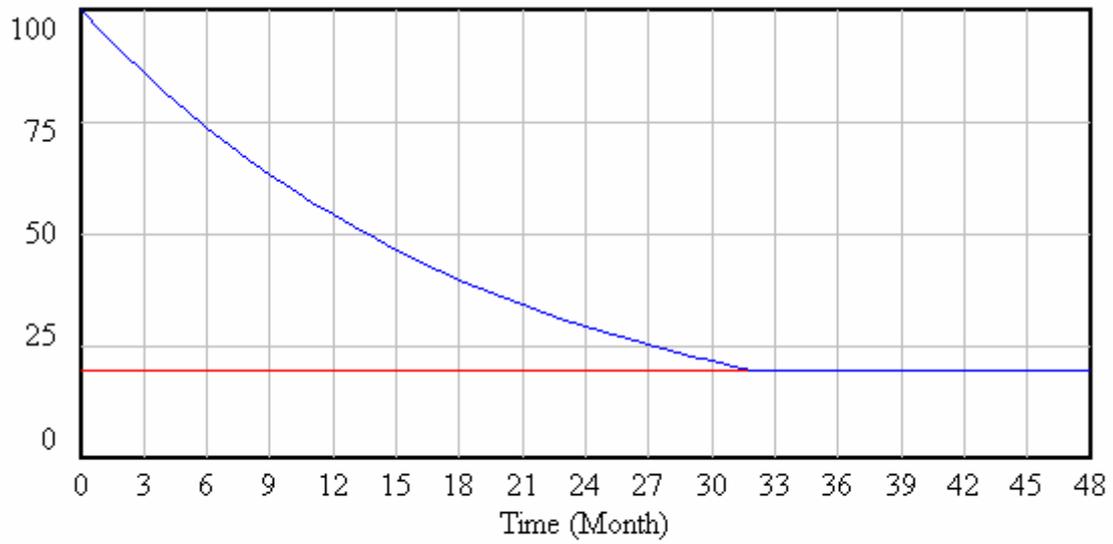


圖 2.4.2 水庫操作原則的因果回饋圖



水庫水量 —————
 下限水量 —————

圖 2.4.3 水量隨時間變化圖



第三章 研究範疇之界定

高屏地區水質不佳是長期以來的問題，而且由於水資源有限，限制了高屏地區的經濟發展，水質問題與水資源的供給是高屏地區急迫需要解決的問題。

3.1 高屏溪水資源現況

在水資源方面，以年逕流量來看，高屏溪是臺灣水資源最豐沛之河川流域，但是由於雨量集中在豐水期（5~10月），豐水期的流量為枯水期之 8~10 倍，而高屏溪河川流短坡陡加上流域內又無大型水庫，使得豐水期的水資源，有將近九成直接流入台灣海峽。目前高屏溪流域內的地面水資源貯蓄設施僅澄清湖、中正湖、鳳山水庫三座，以及以引水為主的高屏溪攔河堰，這些貯蓄設施的容量非常有限，僅能蓄存豐水期的少部份逕流量，若要有效地貯蓄豐水期的逕流量，需要有更多的蓄水設施。

為了因應高屏地區不斷成長的用水需求及增加南部地區的水資源，經濟部水資源局在民國 78 年完成美濃水庫的可行性規劃，但受到民眾及環保團體強烈的反彈及抗議，所以希望能以其他替代方案解決高屏地區的水資源問題，例如興建瑪家水庫、南化水庫壩體加高、曾文水庫越域引水以及開挖高屏大湖等。

3.2 高屏溪水質現況

高屏溪流域的水質問題，主要造成水質污染的原因是流域內養豬戶排放大量未經由處理的畜牧廢水及高屏溪下游沿岸居民所排放的家庭污水，而高屏溪的流量在乾季與濕季差異十分懸殊，在濕季豐水期時，豐沛的水量可以稀釋排入河川中污染物的濃度，因此河川水質尚可達到河川水體水質標準，但是在乾季枯水期時，河川流量減小，無法稀釋大量的污染物質，而造成河川水質惡化。高屏溪的污染源主要來自生活污水、工業廢水、畜牧廢水、垃圾滲出水及非點源污染，以下針對各種污染源敘述如下：

一、生活污水

高屏溪流域之人口分佈不均，人口主要集中在流域下游，如屏東市、旗山、美濃、大樹、高樹等地，而目前流域內人口密集之地區已完成污水下水道之規劃且有部分已開始建置但目前接管率仍很低，所以生活污水大多未經由下水道接管至污水廠處理而直接排放入河川中，嚴重影響高屏溪之水質。目前流域內已規劃之污水下水道系統有4個，分別為屏東市系統、旗美系統、高樹系統、大樹系統及杉林系統，預計將對流域內污染削減有所幫助。

二、工業廢水

高屏溪流域內之工業區主要分佈於河川下游，主要之工業區為屏東、林園、內埔、大發、永安，高屏溪流域內之工業區，排放廢水之工廠列管共有 867 家，其中大發及林園工業區的廢水並未排入高屏溪，故實際將廢水直接排入高屏溪者只有 229 家，而金屬工業比例最多，所以未來應以重金屬監測為主要工作目標。

三、畜牧廢水

高屏溪流域的畜牧業相當發達，其中以養豬業最多，高屏溪流域養豬頭數在民國 85 年約有 200 萬頭，行政院於民國 88 年起實施養豬離牧法，優先削減高屏堰上游養豬戶，而至目前為止，豬隻數約為 100 萬頭，雖然已削減一半的豬隻數，但因養豬廢水大多未經處理即排入高屏溪中和養豬廢水之 BOD 為家庭污水之 BOD 的好幾十倍，所以養豬廢水目前對高屏溪水質影響很大。

四、垃圾滲出水

台灣地區由於垃圾廠址取得不易，故多將垃圾棄置場或掩埋場設置於河川兩岸高灘地，由於掩埋場滲出水處理不易，其滲出之污水造成土壤、地下水及河川之污染。高屏溪流域之 24 個鄉鎮中，除了旗山鎮及長治鄉的掩埋場距離河川比較遠外，其他地區的垃圾廠大都在河川附近，而且都未做好滲出水的處理，故將來必須加強垃圾場滲出水處理即遷移至行水區外。

五、非點源污染

水體污染的來源可分為點源污染與非點源污染，以高屏溪流域而言，流域內主要非點源污染以林地及農地之農業迴歸水為主（高屏溪涵容能力之評估，2001）。

高屏溪水體用途分類如表 3.2-1 所示，高屏溪流域各河段的水體水質分類為旗山溪自發源地至甲仙淨水場取水口，隘寮溪發源地至三地門橋，荖濃溪發源地至濁口溪河口、濁口溪自發源地至荖濃溪交會口為甲類水體，荖濃溪自濁水溪交會口至旗山溪交會口、隘寮溪自三地門橋至荖濃溪交會口及高屏溪主流自旗山溪和荖濃溪交會口為乙類水體，高屏溪主流自牛稠溪交會口至河口為丙類水體；一般而言河川水體分類和其用途之關係為：用於一級公共給水之河川為甲類水

體，用於二級公共給水之河川為乙類水體，而用於三級公共給水之河川為丙類水體，用於灌溉用水之河川為丁類水體，各類水體水質分類標準及陸上水體分類及用途如表 3.2-2 及 3.2-3 所示。

表 3.2-1 高屏溪現行水體用途分類一覽表

| 水體名稱 | | 河 段 | 用途分類 | 公告等級 |
|-------------|-----|---------------|-----------------------|------|
| 高 屏 溪 | 主流 | 荖濃溪交會口至牛稠溪交會口 | 農業、工業用水及公共給水 | 乙 |
| | | 牛稠溪交會口至河口 | 農業、工業用水及公共給水 | 丙 |
| | 旗山溪 | 發源地至甲仙進水廠出水口 | 農業用水及公共給水 | 甲 |
| | | 甲仙進水廠取水口至月眉橋 | 農業用水 | 甲 |
| | | 月眉橋至荖濃溪交會口 | 農業用水 | 甲 |
| | 美濃溪 | 發源地至美濃水庫壩址 | 農業用水及公共給水 | — |
| | | 美濃水庫壩址至旗山溪交會口 | 農業用水 | — |
| | 濁口溪 | 發源地至荖濃溪交會口 | 農業用水及公共給水 | 甲 |
| | 荖濃溪 | 發源地至濁口溪交會口 | 農業、工業用水及公共給水 及其它用水 | 甲 |
| | | 濁口溪交會口至旗山溪交會口 | 農業用水 | 乙 |
| | 隘寮溪 | 發源地至山地門橋 | 農業用水 | 甲 |
| | | 三地門橋至荖濃溪交會口 | 農業用水 | 乙 |

資料來源：水污染防治法

表 3.2-2 地面水體分類及水質標準(BOD)

| 水質項目\ 水體分類 | 甲 | 乙 | 丙 | 丁 | 戊 |
|---------------|------|------|------|------|------|
| 溶氧量(mg/L) | ≥6.5 | ≥5.5 | ≥4.5 | ≥2.0 | ≥2.0 |
| 生化需氧量(mg/L) | 1 | 2 | 4 | / | / |
| 氨氮(mg/L) | 0.1 | 0.3 | 0.3 | / | / |
| 硝酸鹽氮(mg/L) | 10 | / | / | / | / |
| 總磷(mg/L) | 0.02 | 0.05 | / | / | / |

資料來源：水污染防治法

表 3.2-3 陸上水體分類及用途

| 水體分類 | 適用之用途 |
|------|------------------------------|
| 甲類 | 適用於一級公共用水、游泳及乙、丙、丁及戊類 |
| 乙類 | 適用於二級公共用水、一級水產用水及丙、丁、戊類 |
| 丙類 | 適用於三級公共用水、二級水產用水、一級工業用水及丁、戊類 |
| 丁類 | 適用於灌溉用水、二級工業用水及戊類 |
| 戊類 | 適用於環境保護 |

資料來源:水污染防治法

- 一、一級公共用水：指經消毒處理即可供公共給水之水源。
- 二、二級公共用水：指需經混凝、沈澱、過濾、消毒等一般通用之淨水方法處理可供公共給水之水源。
- 三、三級公共用水：指經活性碳吸附、離子交換、逆滲透等特殊或高度處理可供公共給水之水源。
- 四、一級水產用水：在陸域地面水體，指可供鱒魚、香魚及鱸魚培養用水之水源；在海域水體，指可供嘉臘魚及紫菜類培養用水之水源。
- 五、二級水產用水：在陸域地面水體，指可供鱧魚、草魚及貝類培養用水之水源；在海域水體，指虱目魚、烏魚及龍鬚菜培養用水之水源。
- 六、一級工業用水：指可供製造用水之水源。
- 七、二級工業用水：指可供冷卻用水之水源。

3.3 問題與策略

水質和水量的互動關係是非常密切的，舉例來說，若為了提供日漸成長的用水需求，而增加攔河堰的引水量，將嚴重的影響河川的流量，而河川流量的減少則會降低河川涵容能力，提高水污染的程度，因此本研究同時討論水量改善及水質改善之方案；水量改善策略包括了興建淨水廠與抽取地下水兩方案，水質改善策略包括了養豬離牧與興建污水下水道系統兩方案。

3.3.1 水量改善的策略擬定

水量改善的策略擬定有興建淨水廠、抽取地下水兩方案

1.興建淨水廠

本研究興建淨水廠有兩處，一是坪頂淨水廠，在坪頂淨水廠附近再興建一個新的淨水廠來處理高屏溪豐水期的水量，而目前坪頂淨水廠之處理水量為 130 萬噸/日，二是南化淨水廠，在南化淨水廠附近再興建一個新的淨水廠來處理南化水庫水量以增加枯水期高雄台南地區的供給量，而目前南化淨水廠之處理水量為 80 萬噸/日。

2.抽取地下水

本研究假定屏東平原尚有多餘地下水資源，抽取地下水以滿足各個時期的需求量。

3.3.2 水質改善的策略擬定

目前政府所規劃的高屏溪水質改善策略主要為興建污水下水道系統、養豬離牧政策、課徵水污染防治費、遷移行水區內的垃圾場、興建聚落小型污水處理廠等，以下僅就養豬離牧政策及興建污水下水道系統此二方案進行策略分析。

1.養豬離牧政策

行政院已於 87 年施行養豬離牧政策以去除流域內養豬廢水的排放，優先削減高屏溪攔河堰上游約 51 萬頭豬隻，而至目前豬隻數尚有 100 萬頭，所以本研究之策略將削減高屏溪之豬隻數。

2.興建污水下水道系統

高屏河流域內人口主要集中在下游，如屏東市、旗山、美濃、大樹、高樹等地，而本研究之研究範圍未包含屏東市，因此策略分為興建旗美、大樹及高樹等地之污水下水道系統。

第四章 系統的描述

4.1 高屏溪流域基本資料

高屏溪流域水系圖如圖 4.1，發源於中央山脈玉山附近，向南流經高雄、屏東兩縣，於新園鄉注入台灣海峽，東以知本溪、卑南溪及秀姑巒溪為鄰，北以濁水溪為鄰，西以曾文溪為鄰，南接東港溪與林邊溪，流域面積為 3,256.85 平方公里，集水面積為 812.03 平方公里，是全台灣流域面積最大的河川。高屏溪全長 170.9 公里，主要支流為荖濃溪呈東北西南流向，匯流於隘寮溪，之後繼續流至嶺口匯入旗山溪後合稱為高屏溪，高屏溪有武洛溪和牛稠溪匯入，於屏東新園鄉匯入臺灣海峽。高屏溪流經過高雄縣及屏東縣 24 個鄉鎮市，流域內人口約為 60 萬人，提供了大高雄地區農業、工業及公共用水的水源。高屏溪之主要支流為旗山溪、荖濃溪、隘寮溪、濁口溪及美濃溪，各支流發源地、流域面積、長度，與高屏溪流域平均坡度及流經區域之基本資料如表 4.1-1 及表 4.1-2 所示。

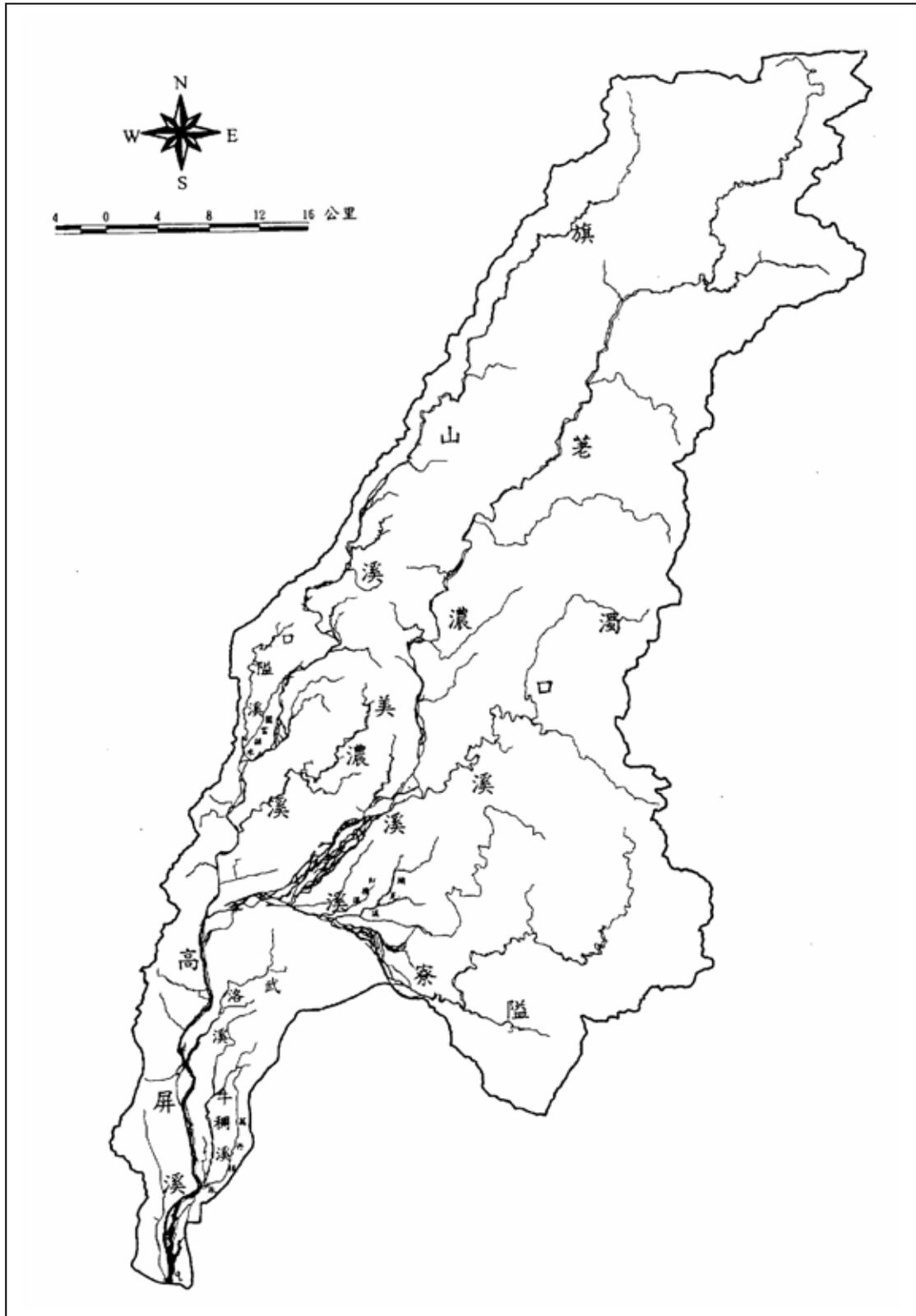


圖4.1 高屏溪流域水系圖
 資料來源：行政院環保署網站

表4.1-1 高屏溪各主支流基本資料

| 項目 | | 發源地 | 流域面積 (平方公里) | 長度 (公里) |
|-------|-----|----------|----------------|------------|
| 河流別 | | | | |
| 主流 | 高屏溪 | 玉山東山東麓 | 3257 | 171 |
| 幹流 | 荖濃溪 | 玉山西南麓 | 1372 | 136 |
| 支流 | 旗山溪 | 玉山西南麓 | 842 | 117 |
| | 隘寮溪 | 歡喜山、北大武山 | 642 | 68.5 |
| | 濁口溪 | 卑南山西麓 | 375 | 59 |
| 旗山溪支流 | 美濃溪 | 大貢占山 | 114 | 28.5 |

資料來源：行政院環保署網站

表4.1-2 高屏河流域水系資料表

| | |
|------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 發源地 | 中央山脈之玉山 |
| 主要支流 | 旗山溪，隘寮溪，濁口溪，荖濃溪，美濃溪，武洛溪 |
| 流域面積 3,257 平方公里，幹流長度 170.90 公里 計畫洪水量 22,000 秒立方公尺 | |
| 平均坡度 | 幹流段 1：150 |
| 流經區域 | 高雄縣：桃源鄉，三民鄉，甲仙鄉，六龜鄉，杉林鄉，內門鄉，茂林鄉，美濃鎮，旗山鎮，大樹鄉，大寮鄉，林園鄉 屏東縣：霧台鄉，三地鄉，高樹鄉，里港鄉，鹽埔鄉，九如鄉，瑪家鄉，內埔鄉，長治鄉，屏東市，萬丹鄉，新園鄉，泰武鄉 |

資料來源：經濟部水利署網站

4.2 高屏溪水量系統

本研究考量之高屏河流域水源調配系統主要是供應台南和高雄地區之需求，然其主要水源除來自高屏攔河堰外南化水庫亦是重要供水來源，因此水源調配所考量之系統必須包含高屏溪和南化水庫才算

完整，如圖 4.2-1。

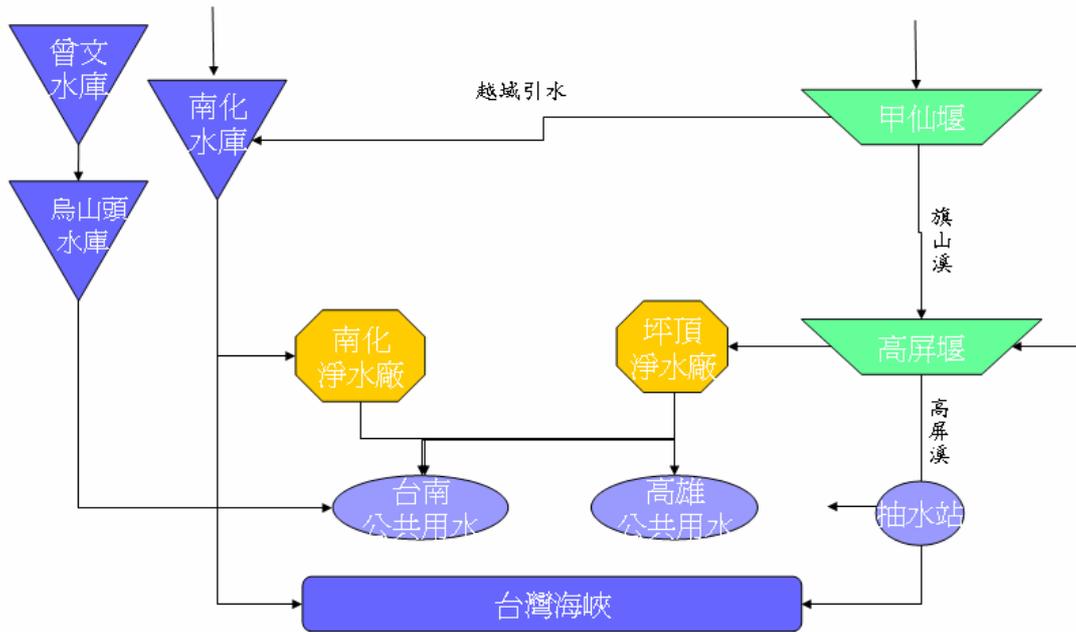


圖 4.2-1 水量系統圖

高屏溪流流域上實體的水工結構物分述如下：

一、南化水庫

南化水庫位於台南縣南化鄉曾文溪之支流後堀溪上（如圖 4.2-2），水庫相關設施完成於民國 82 年，於民國 83 年 7 月開始出水，目前正進行旗山溪越域引水工程，水庫集水區面積 104 平方公里，水庫容量 158.05 百萬立方公尺，水庫主要功能為蓄水供給嘉義台南高雄等地區民生用水，是擔負台南高雄地區公共給水之重要水庫。

二、南化水庫旗山溪越域引水工程

南化水庫越域引水工程係在旗山溪甲仙橋上游約 500 公尺處（如圖 4.2-2），興建甲仙攔河堰引旗山溪豐水期（每年 6 月至 10 月）之水量至南化水庫，引水地點集水區面積 407.89 平方公里，型式為混凝土垂直跌落式堰長 120 公尺，隧道長 3,054 公尺，導水引入南化水庫，隧道最大輸水量為 30cms。甲仙堰工程已於民國 88 年 4 月完工，南化水庫越域引水工程完工後，可增加南化水庫供水量每日約 30 萬

噸，提高南化水庫使用率，並可有效改善台南、高雄之缺水及水質不佳問題。南化水庫若與高屏溪攔河堰聯合運用，其供水量可由 80 萬 CMD 提高至 130 萬 CMD，於豐水期時，高屏溪攔河堰計畫出水 100 萬 CMD，南化水庫出水 30 萬 CMD，枯水期時，南化水庫計畫出水 130 萬 CMD，而高屏溪攔河堰則不出水。

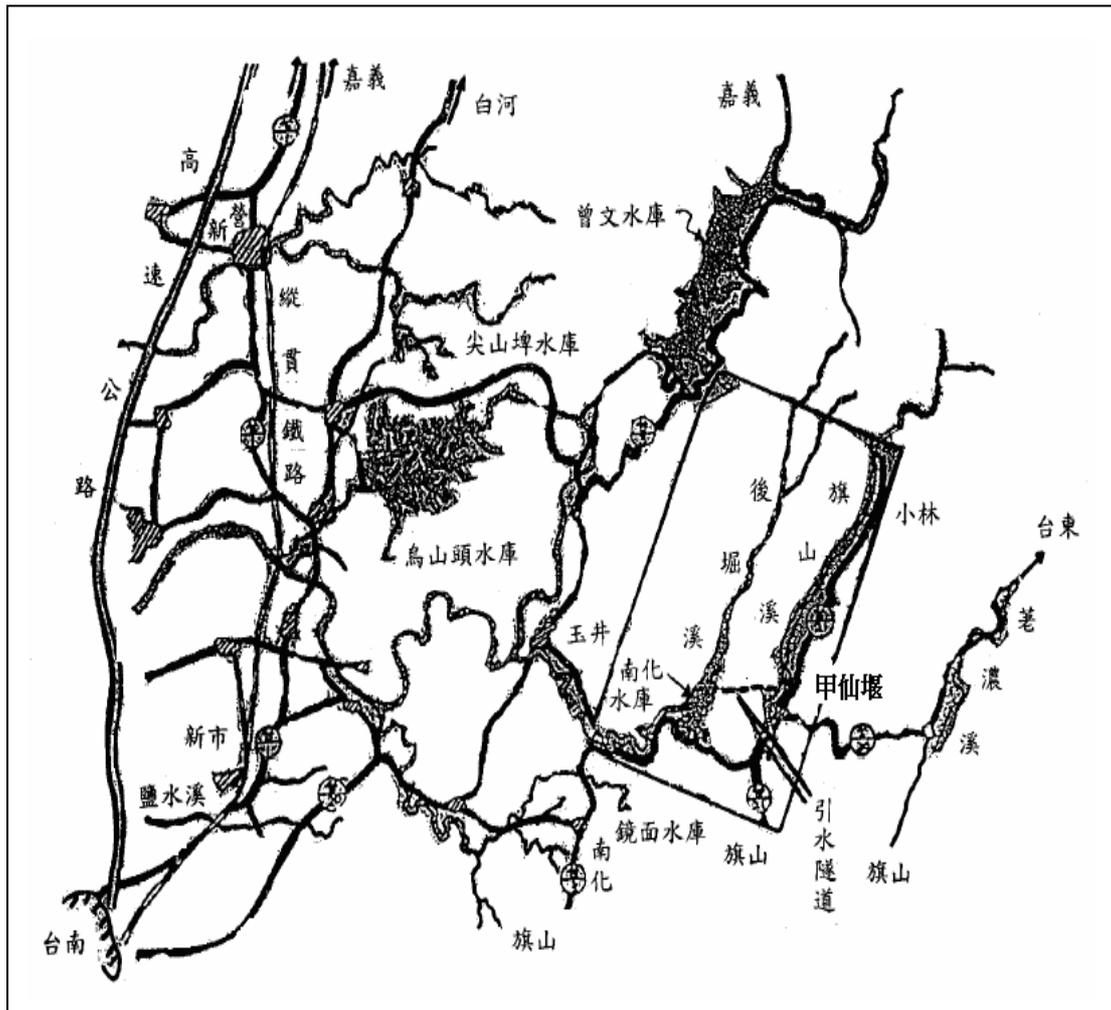


圖 4.2-2 甲仙堰位置圖

資料來源：台灣南部地區跨流域水資源統籌調配
動態模式建立之研究，2001

三、高屏溪攔河堰

高屏堰之堰址位於高雄縣大樹鄉高屏鐵路橋上游 2 公里處(如圖 4.2-3)，為一長 674 公尺固定堰用以抬高水位，可利用豐水期之水量。高屏堰與南化水庫聯合運用，豐水期可出水 130 萬 CMD 供應台南及

高雄地區。

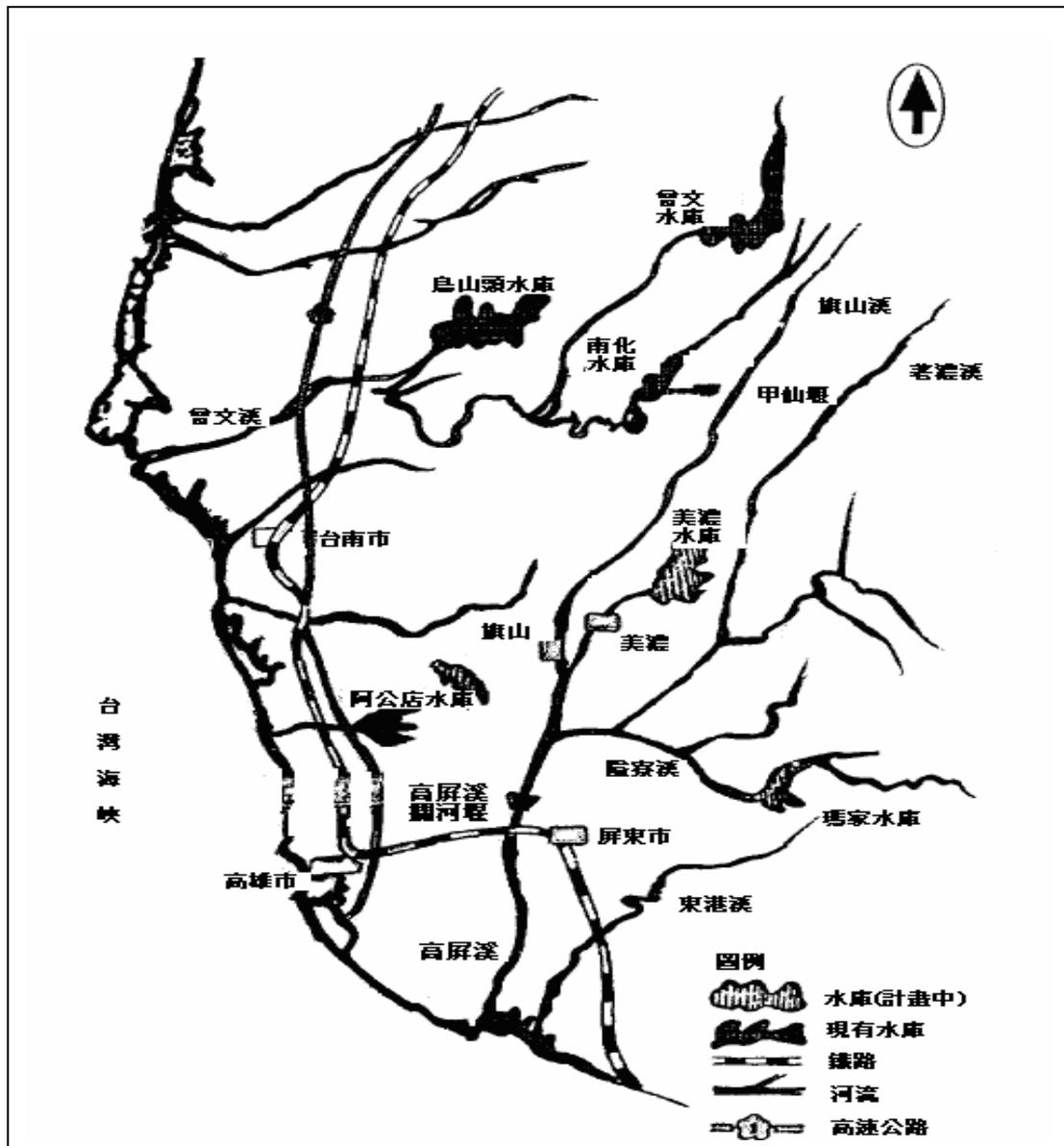


圖 4.2-3 高屏溪攔河堰位置圖

資料來源：台灣南部地區跨流域水資源統籌調配
動態模式建立之研究，2001

四、淨水廠

高屏地區之自來水飲用水源包含高屏溪、東港溪及地下水三部份，其中以高屏流域為水資源的自來水廠，包括坪頂、翁公園、澄清湖及拷潭淨水廠等，表 4.2-1 為高雄自來水系統各水場使用水資源與出水概況，表 4.2-2 則為高屏河流域水質監測站與主支流去水口關係表。

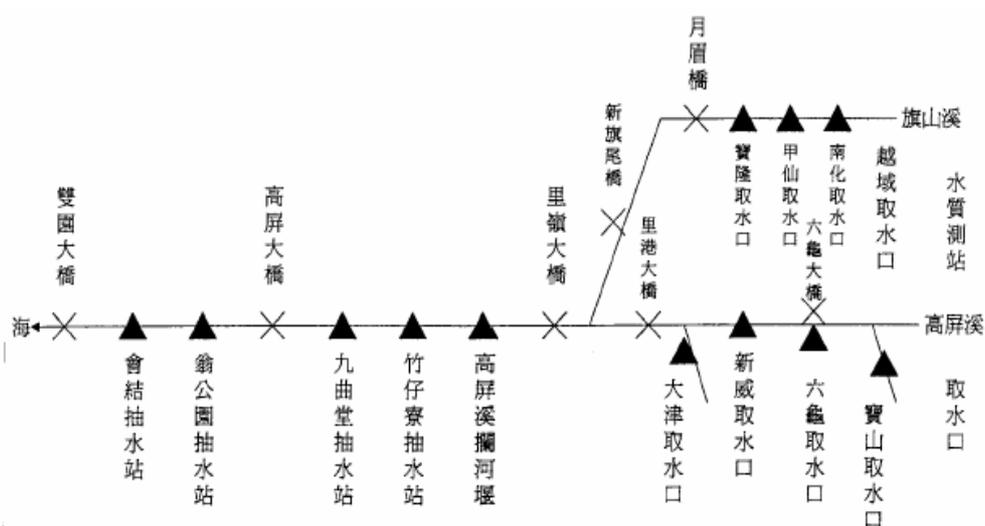
表 4.2-1 自來水系統各水廠使用水資源與出水概況

| 淨水廠 | 設計出水能力 (CMD) | 平均出水量 (CMD) | 水源別 |
|------|-----------------|----------------|------------------|
| 鳳山 | 700,000 | 450,000 | 東港溪地面水 |
| 澄清湖 | 450,000 | 400,000 | 高屏溪伏流水 |
| 拷潭 | 250,000 | 290,000 | 高屏溪伏流水與大 寮地下水 |
| 翁公園 | 40,000 | | |
| 大岡山 | 180,000 | 80,000 | 里港、手中寮地下水 |
| 坪頂 | 500,000 | 120,000 | 高屏溪伏流水與大 樹地下水 |
| 南化水庫 | 800,000 | 260,000 | 越域引水 |

資料來源：高屏溪涵容能力之評估，2001

表 4.2-2 高屏河流域水質監測站與各主支流取水口關係表

| 流域別 | 取水口 | | 淨水廠 | 設計供水量 (GMD) | 水質測站 |
|-----|---------------|-------|--------|----------------|---------------------|
| | 主流取水口 | 支流取水口 | | | |
| 高屏溪 | 六龜取水口 | 寶來取水口 | 寶來淨水廠 | 700 | 六龜大橋 |
| | 新威取水口 | 大津取水口 | 六龜淨水廠 | 2,000 | |
| | | | 新威淨水廠 | 600 | |
| | | | 高樹淨水廠 | 800 | 大津橋 里港大橋 |
| | 南化水庫越域 取水口 | | 南化淨水廠 | 800,000 | |
| | 甲仙取水口 | | 甲仙淨水廠 | 980 | |
| | 寶隆取水口 | | 寶隆淨水廠 | 215 | 月眉橋 新旗尾橋 里嶺大橋 |
| | 高屏溪攔河堰 | | 坪頂淨水廠 | 500,000 | |
| | 竹仔寮抽水站 | | 小坪淨水廠 | 150,000 | |
| | 九區堂抽水站 | | 澄清湖淨水廠 | 320,000 | 高屏大橋 |
| | 翁公園抽水站 | | 翁公園淨水廠 | 40,000 | |
| | 會結抽水站 | | 拷潭淨水廠 | 250,000 | 雙園大橋 |



資料來源：高屏溪涵容能力之評估，2001

4.3 高屏溪水質系統

本研究考量之水質系統為高屏溪流域上游至高屏大橋，如圖 4.3 虛線部分。

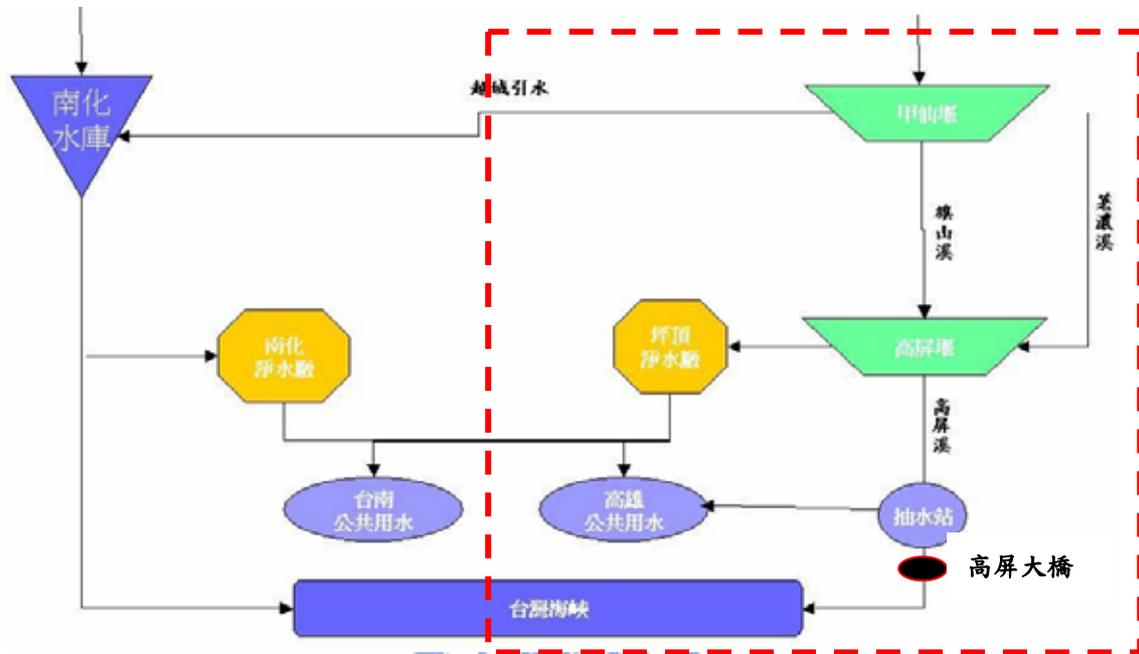


圖 4.3 水量及水質系統圖

第五章 因果回饋分析

本研究考量之高屏溪水量及水質問題的因果回饋圖如圖 5 所示，其可進一步說明如下：

一、水量面

圖 5 中藍色線為高屏溪流域水量面因果回饋圖，本研究考量之高屏溪流域水源調配系統主要是供應台南和高雄地區之需求，然其主要水源來自高屏堰和南化水庫，因此高屏溪流域水量面因果回饋圖以高屏堰和南化水庫為主說明；高屏堰—高屏堰供水量受到兩個變數的影響，高屏堰入流量和民生用水需求，民生用水需求先由高屏堰引水至坪頂淨水廠處理後供給（高屏堰供水），高屏堰供水量亦受到上游入流量（高屏堰入流量）大小的影響，豐水期可引較多的水量來滿足需求，而高屏堰供水量越多則高屏溪剩餘水量（高屏溪流量）就會越少，高屏堰入流量為甲仙堰入流量加上側流量，也就是旗山溪之流量扣除甲仙堰越域引水量後再加上荖濃溪之流量，民生用水需求和高屏堰供水量之不足量為高屏堰供水量不足量；南化水庫—高屏堰供水量不足量再由南化水庫放水至南化淨水廠處理後供給（南化水庫供水量），南化水庫供水量受到水庫可利用水量影響，水庫可利用水量越多則南化水庫供水量越多，水庫可利用水量受到三個變數的影響分別為南化水庫上游入流量，甲仙堰越域引水量和水庫水量，而水庫操作原則的因果回饋環路於南化水庫供水量
南化水庫供水量→水庫水量→可利用水量，其關係為南化水庫供水量越多則水庫水量越少，為負向因果鍵，水庫水量越少則水庫可利用水量越少，為正向因果鍵，水庫可利用水量越少則南化水庫供水量越少，為正向因果鍵，此因果回饋環路中有一個負向因果鍵和兩個正向因果鍵，所以此為一個負向因果回饋環路，則表示任何變數的變動，會使系統在下一週期朝反方向變動幅

度，變數產生抑制變動之效果，造成自我之規律；而民生用水需求由高屏堰供水和南化水庫供水後仍不足則由地下水抽水供給，地下水抽水量受到地下水可用水量影響；所以水量面之總供水量為高屏堰供水量、南化水庫供水量和地下水抽水量之總和，若民生需求由高屏堰供水、南化水庫供水和地下水抽水仍然不足則產生總缺水量，再由總缺水量計算出年 SI，總缺水量到年 SI 之箭頭上多了兩條直線表示年 SI 為總模擬時刻之最終值。

二、水質面

圖 5 中橘色線為高屏河流域水質面因果回饋圖，河川水質(BOD)計算為排入高屏溪總流達量(上游)加上排入高屏溪總流達量(下游)除上高屏溪流量後得出，高屏溪總流達量(上游)包含了旗山溪、荖濃溪和隘寮溪之污染量，排入高屏溪總流達量(下游)為高屏溪主流，排入高屏溪總流達量(下游)為高屏溪污染排放量乘上流達率，高屏溪污染排放量為污染產生量扣除總處理量(現況處理量+溼地處理量)，污染產生量為家庭污水、畜牧廢水和工業廢水之總和，現況處理量為流域上現有之污水處理廠之處理量，溼地處理量為武洛溪溼地之處理量，年平均 BOD 為總模擬時刻之各月平均值。

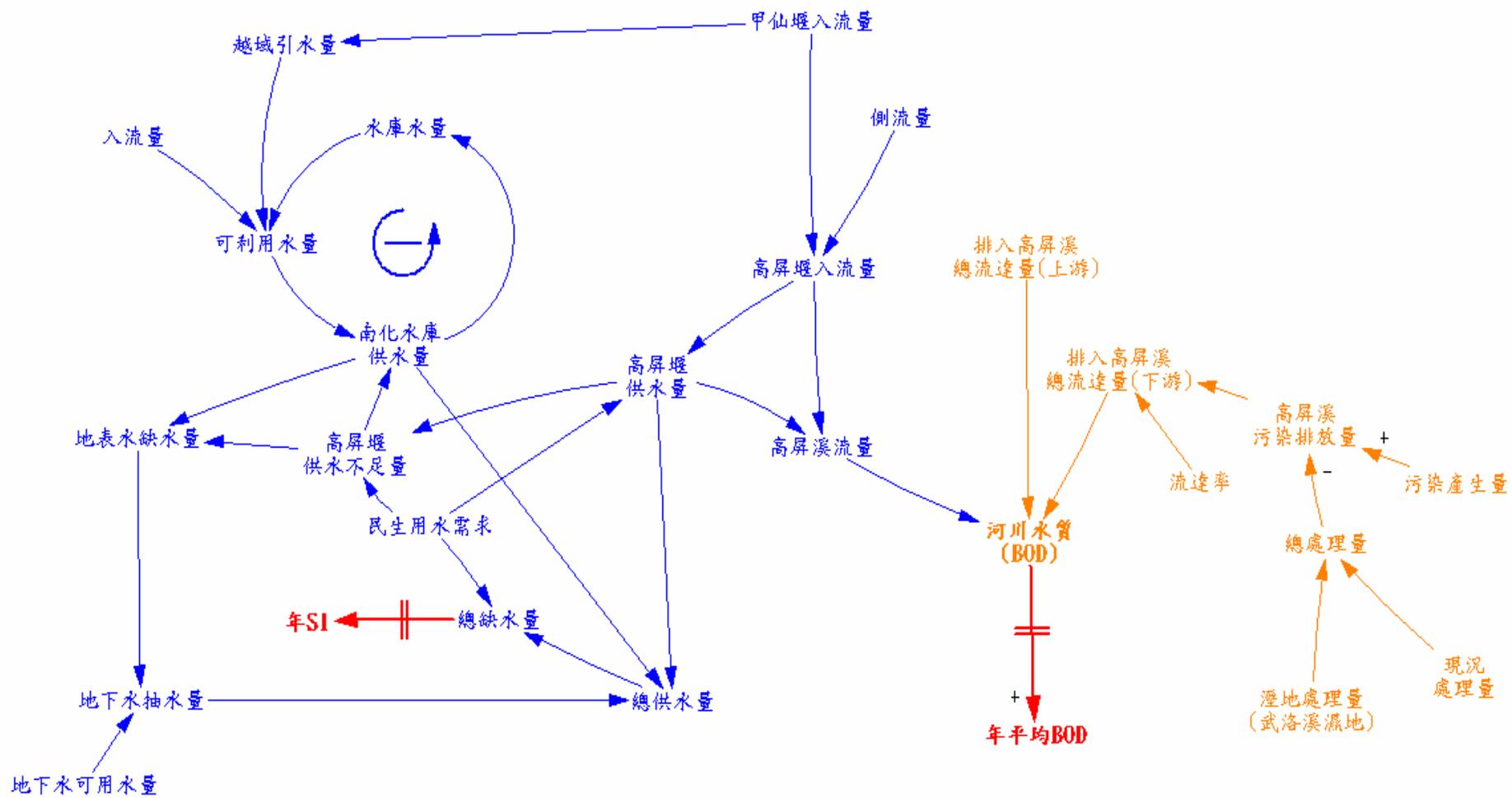


圖 5 高屏河流域因果回饋圖

第六章 系統動力模型建置

6.1 流圖及模型建置

根據第三章、第四章及第五章所述之問題的定義、系統的描述及因果回饋圖，本章節將就高屏溪流域水量和水質系統利用 venism 的四個基本元素進行流圖與模型建置。

高屏溪流域水量流圖建置，首先必須了解高屏溪流域上有哪些實體的水工結構物須被考量，這些實體的水工結構物將用 venism 的基本元素「積量」(Level)來表示，例如水庫與攔河堰，而水的流動則用「率量」(Flow)來表示，例如攔河堰引水入水庫之流量，高屏溪流域水量系統包含高屏溪和南化水庫才算完整，高屏溪流域水質系統包含高屏溪流域整體，相關說明分述如下：

高屏溪流域水量流圖建置如圖 6.1-1，流圖右半邊入流量 1（高屏溪支流旗山溪）由甲仙堰越域引水至南化水庫，越域引水後之剩餘水量和入流量 2（高屏溪支流隘寮溪）匯流為高屏堰入流量，高屏堰入流量 = 入流量 1（高屏溪支流旗山溪） - 越域引水 + 入流量 2（高屏溪支流隘寮溪），高屏堰在豐水期時引水至坪頂淨水廠，引水至坪頂淨水廠之剩餘水量再扣除至澄清湖淨水廠之抽水量為高屏大橋之流量，高屏溪流量 = 高屏堰入流量 - 引水量，高屏大橋流量 = 高屏溪流量 - 至淨水廠；流圖左半邊之可利用水量為入流量 3（南化水庫上游入流量）加上越域引水量和南化水庫之水量，可利用水量 = 入流量 3 + 越域引水 + 南化水庫，南化水庫供水量由高屏堰供水不足量（民生用水需求和高屏堰供水量之差距）所決定，高屏堰供水不足量 = 民生用水需求 - 高屏堰供水量，若南化水庫供水後仍不足則由地下水抽水量供水，地表水缺水量 = 高屏堰供水不足量 - 南化水庫供水量，總供水量（高屏堰供水量 + 南化水庫供水量 + 地下水抽水量）和民生用水

需求之差距為總缺水量，總缺水量＝民生用水需求－總供水量，再由總缺水量計算出年 SI。

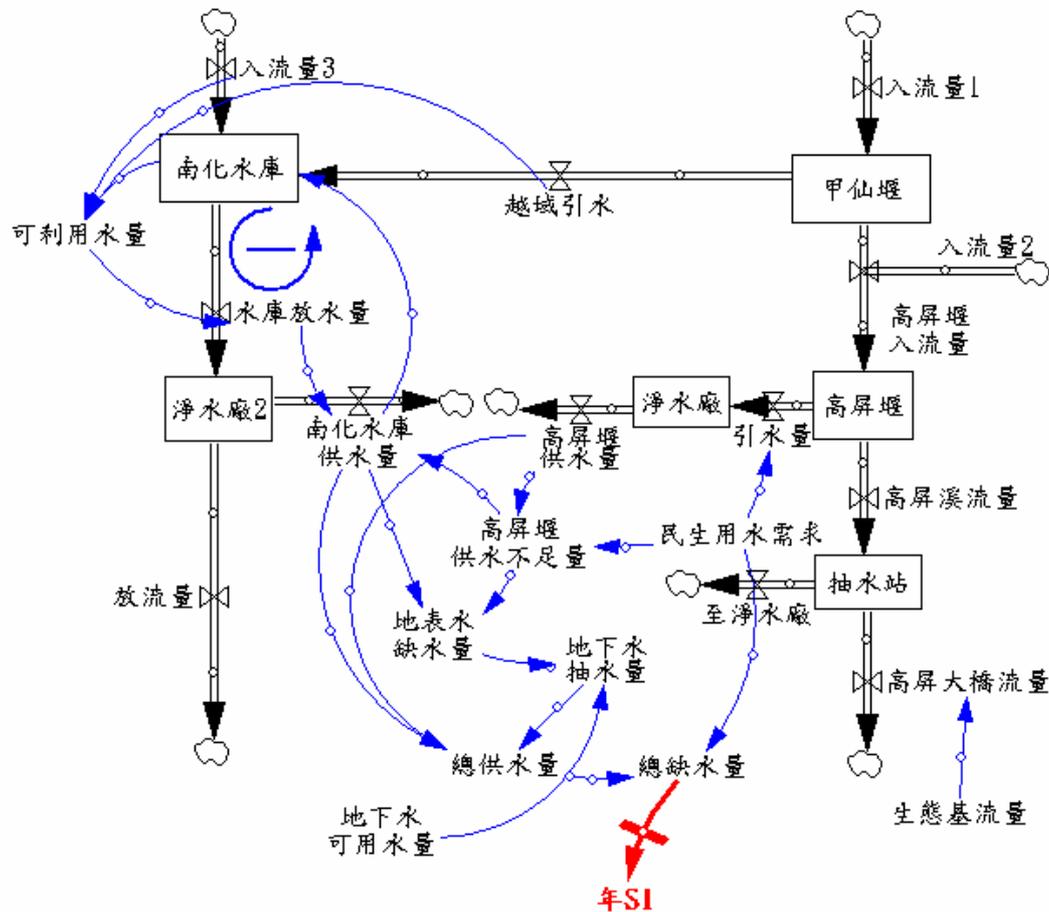


圖 6.1-1 高屏溪流域水量流圖

高屏溪流域水質系統流圖及模型建置所需相關資訊-

一、 污染量之分析及推估

以八十七年生化需氧量(BOD₅)每天流達污染量約 30.2 公噸為高屏溪涵容能力 9.2 公噸/天之 3.3 倍，而依生化需氧量每天流達污染量所佔比例計，家庭污水佔 49% 為最大，其次以畜牧廢水佔全流域 41%，足見本流域水體之主要污染來源為與家庭污水畜牧廢水（高屏溪河川水污染防治計劃可行性之檢討，1991），本研究中之污染量推估與輸入，以家庭污水、工業廢水和畜牧廢水三類污染源為主。本研究

對污染物推估之主要項目為 BOD。

1. 家庭污水

(1) 推估資料收集分析

家庭污染量推估為家庭污水量乘上家庭污水之 BOD 濃度；家庭污水量之計算是參考每人每日之用水量，由於每人每日污水產生量與每人每日用水量成正比關係，一般而言，污水量之估計是以用水量乘上一適當之係數，可推估出每人每日之污水產生量。表 6.1-1 係台灣各地區採用之用水量與污水量之比值表，比值介於 0.68~0.9，然而台灣大部分地區採用污水量與用水量之比值為 0.8 來推估每人每日污水量，故本研究將採用平均值 0.8 作為推估係數；此外，根據「臺灣省自來水公司第七區管理處」資料顯示，民國 90 年高雄區自來水每人每日平均配水量為 342 公升，而用水量成長分析則根據經濟部水資會「台南、高雄、屏東等區自來水需水量估計」的報告，90 年至 100 年每人每日需水量年增加值為 3.5 公升/年；根據「高雄市污水下水道系統檢討規劃」，每人每日平均用水量在民國 120 年為 360 至 400 公升；一般家庭污水之 BOD 濃度約介於 150-250mg/L 間，估計於民國 90 年時，排放污水之 BOD 濃度約為 200 mg/L (河川流域管理-WASP 水質模式評估愛河之整治方案，2003)，在配合化糞池處理效率或下水道接管率及污水處理廠處理效率的因子考量後，可推得最終之家庭污染排放量，排放量再乘上合理之流達率，即為流達量，化糞池處理效率一般約為 30%。

人口成長推估來源為高雄縣統計資料庫，高雄縣民國 81~90 年人口各年成長率如表 6.1-2，10 年內人口成長率平均為 0.837%。

表 6.1-1 臺灣各地區污水量與用水量之比值表

| 地區 | 比值 | 參考書籍或報告 |
|--------------|----------|----------------------|
| 臺南市 | 0.8 | 臺南市污水下水道系統規劃報告 |
| 臺南市民國 66 年實測 | 0.68 | 臺南市污水下水道系統規劃報告 |
| 臺中港 | 0.8 | 臺南市污水下水道系統規劃報告 |
| 中興新村內轆 | 0.8 | 內轆污水處理廠擴建工程設計報告 |
| 豐原鎮 | 0.8 | 豐原鎮雨水污水道系統規劃 |
| 高雄市 | 0.8 | 高雄區域污水下水道系統初步規劃報告 |
| 高雄市 | 0.8 | 高雄市污水下水道系統規劃 |
| 林口析市鎮 | 0.8 | 林口新市鎮自來水及下水道系統規劃報告 |
| 馬公鎮 | 0.8 | 馬公鎮雨水及污水道系統規劃報告 |
| 大臺北區 | 0.9 | CDM 臺北區衛生下水道規劃綱要 |
| 民生東路 | 0.7 | 都市污水處理後再利用可行性研究(I) |
| 中興新村中正路 | 0.7-0.74 | 都市污水處理後再利用可行性研究(II) |
| 中興新村內轆 | 0.7 | 都市污水處理後再利用可行性研究(III) |
| 臺灣地區 | 0.7-0.8 | 工業廢水處理之研究(IV) |

資料來源：河川流域管理-WASP 水質模式評估愛河之整治方案，2003

表 6.1-2 高雄縣民國 81~90 年人口各年成長率

查詢結果

| 縣市/鄉鎮市 | 統計項目(細項) | 90 | 89 | 88 | 87 | 86 | 85 | 84 | 83 | 82 | 81 | 資料來源 |
|--------|-------------|-------|------|------|-------|------|------|-----|------|------|------|-------------|
| 高雄縣 | 人口成長(總增加率%) | -0.29 | 0.35 | 0.27 | -0.01 | 1.56 | 1.18 | 1.2 | 1.09 | 1.75 | 1.27 | 都市及區域發展統計彙編 |

資料來源：高雄縣政府網站

(2) 污染流達率

一般而言，污染排放量從源頭到河川時污染量會有一定比例上的減少，所以實際到達河川之污染量為污染流達量，而污染流達量與污染排放量的比值即為流達率，流達率可以實測之方式獲得，其步驟如下：

- 現地測量排水幹線排入河川前的水質和流量，推算污染流達量。
- 估算該集污區內各類污染源之污染排放量。
- 再由污染流達量除以污染排放量為集污區之流達率。(河川流域管理- WASP水質模式評估愛河之整治方案，2003)

由於實測流達率非常浪費時間及人力，所以一般多參考文獻，而本研究參考資料如表 6.1-3，最後流達率的值再經由模式的檢定來修正。

表 6.1-3 BOD 一般流達率建議值

| 地區分別 | 流達率 |
|-------|---------|
| 農村地區 | 0.0-0.2 |
| 都市地區 | 0.2-0.6 |
| 郊區 | 0.1-0.6 |
| 都市中心區 | 0.6-1.0 |
| 公共下水道 | 1.0 |

資料來源：河川流域管理- WASP 水質模式評估愛河之整治方案，2003

2. 畜牧廢水

(1) 推估資料收集分析

畜牧廢水的污染種類包括豬、牛、雞、鴨，其中就污染產生量來說，豬所產生的污染量最多，所以畜牧廢水的推估主要以豬為主。一般豬場所產生的豬糞尿廢水，主要是由豬糞尿、豬舍清洗用水、飼料殘渣與豬隻飲用水所組成，而豬糞尿的排泄量也會因飼養方式、豬舍地面形式與豬隻體重的變化而有所不同(豬場廢水處理規劃線上諮詢系統，2003)，除了豬隻所排放的糞水外，每清掃豬舍之沖洗水量，亦為計算養豬廢水之重要指標；由於每一種處理設備在設計時各有不

同之淨化功能，因此在要求的污水濃度也就不盡相同，為了發揮已有的處理設備功能，因此於每日沖洗水量上必須把握正確，台灣之養豬戶習慣以水沖洗地面，夏季並為豬隻沖涼，廢污之稀釋率約在 5~15 倍之間，每頭豬所排放的廢水量約為 30 L/day (河川流域管理- WASP 水質模式評估愛河之整治方案，2003)，在水質方面，其生化需氧量為 6700mg/L，由於農政單位的推廣與補助，稍具規模之養豬場皆有設置污水處理設備，其設備型式以農政單位所推廣之「三段式豬廢水處理設備」為主，此三段式為依序進行固液分離、厭氣發酵及活性污泥處理，在 BOD 處理上，經過三階段處理後，去除率已達 90%。

(2) 三段式養豬廢水處理系統

目前國內豬糞尿廢水的處理一般都採用三段式豬糞尿處理系統，其主要處理步驟包括固液分離、厭氣發酵及好氣處理，再加入計量槽、調整池、初沉池、污泥回流及污泥處理，其過程簡示如圖 6.1-2 (豬場廢水處理規劃線上諮詢系統，2003)：

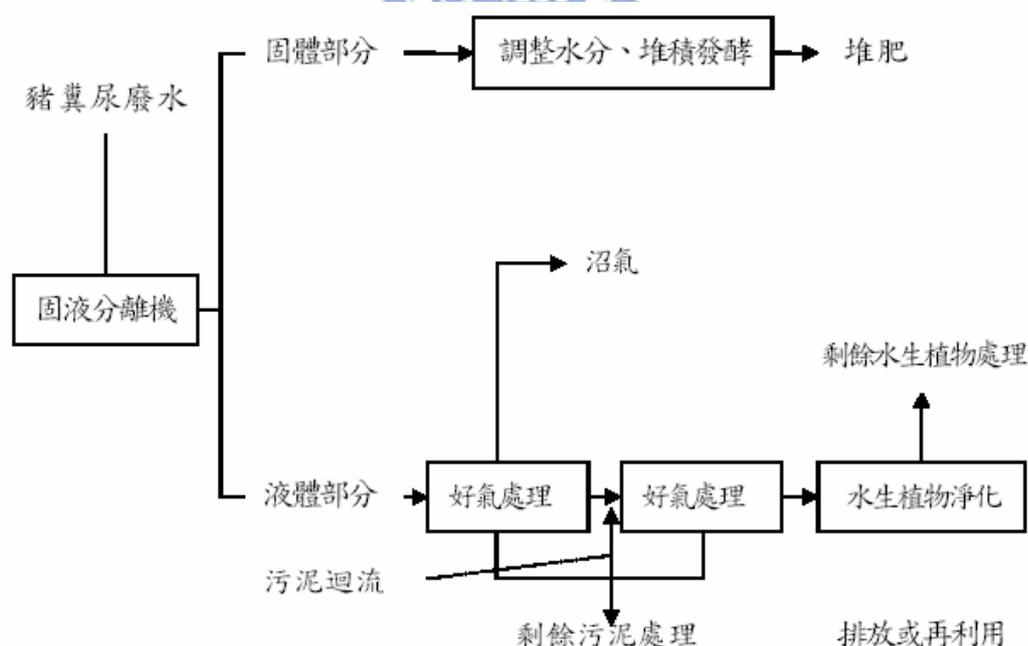


圖 6.1-2 廢水處理流程

資料來源：豬場廢水處理規劃線上諮詢系統，2003

- 固液分離：利用固液分離機將原廢水分離成固體與液體部分，其中固體部分可發酵做成堆肥，而液體部分則進行第二步驟之厭氣發酵。BOD 與 SS 在此步驟分別可去除 20% 及 40%。（豬場廢水處理規劃線上諮詢系統，2003）
- 厭氣發酵：利用厭氣微生物可分解有機物質之原理，以紅泥膠皮做成厭氣發酵槽，處理固液分離後之廢水。此步驟之 BOD 與 SS 去除率都可達到 80%，此階段產生的沼氣可以作為能源。（豬場廢水處理規劃線上諮詢系統，2003）
- 好氣處理：利用曝氣機曝氣、增加溶氧，以好氣性微生物處理經厭氣發酵後之廢水，在經沉澱後即可放流。養豬廢水之 BOD 與 SS 去除率都超過 90% 以上（豬場廢水處理規劃線上諮詢系統，2003）。

(3) 放流水標準



豬隻所產生之畜牧廢水，雖然廢水量沒有工業廢水量多，但因為有機物濃度高，另外在有機物質、懸浮固體物、重金屬等水質項目都有很高的濃度，如不將其作妥善的處理會嚴重的污染河川水質，行政院環境保護署為解決畜牧廢水對河川水質之衝擊於水污染防治法規中規範畜牧業廢水之排放標準，台灣地區畜牧業放流水標準於表 6.1-4，可以看得出放流水標準日趨嚴格，例如在民國 76~81 年間畜牧業放流水標準在大規模養豬場之生物需氧量（BOD）為 200 mg/L，小規模養豬場為 400 mg/L，懸浮固體物（SS）分別為 300 mg/L 和 400 mg/L，而在民國 76~81 年間生物需氧量和懸浮固體物分別提高為 100mg/L 和 200mg/L 外，另外再增加化學需氧量（chemical oxygen demand, COD）為 400 mg/L；畜牧廢水以三段式豬糞尿處理法，即好

氣處理、固液分離、厭氣發酵及三部份以達到畜牧業放流水標準。而到民國 92 年，中華民國養豬協會與各地方協會及代表連署提案，要求環保署修訂畜牧放流水標準，環保署評估養豬戶處理技術，修正化學需氧量，亦即由現行的 250 mg/L 調整為 600 mg/L，而生化需氧量及懸浮固體物，仍維持 80 及 150 mg/L（豬場廢水處理規劃線上諮詢系統，2003）。

表6.1-4 畜牧業放流水標準

| 實施期間 | BOD | COD | SS |
|-------------|--------------------|-----|-----|
| | ----- (mg/L) ----- | | |
| 76~81 年 | | | |
| 200~999 頭規模 | 400 | --- | 400 |
| 1000 頭以上規模 | 200 | --- | 300 |
| 82~86 年 | 100 | 400 | 200 |
| 87~91 年 | 80 | 250 | 150 |
| 92 年 | 80 | 600 | 150 |

資料來源：豬場廢水處理規劃線上諮詢系統，2003

3. 工業廢水

高屏河流域內之工業區主要分佈於河川下游，主要之工業區為屏東、林園、內埔、大發、永安，高屏河流域內之工業區，排放廢水之工廠列管共有 867 家，其中大發及林園工業區的廢水並未排入高屏溪，故實際將廢水直接排入高屏溪者只有 229 家，高屏河流域各種污染源比重如表 6.1-5，由表可知本研究區域內集污分區屬溪埔寮排水至大樹、姑婆寮排水，其工業廢水比例甚小，故本研究以家庭污水和畜牧廢水推估為主，工業廢水污染排放量 (kgBOD/day) 則參考表 6.1-6(行政院環保署網站)作為實際輸入值。

表 6.1-5 高屏溪流域各種污染源比重表

| 集污分區 | 家庭污水 | 工業廢水 | 畜牧廢水 | 垃圾滲出水 | 合計 (kg BOD/day) |
|---------------------------|---------------------|---------------------|---------------------|--------------------|--------------------|
| 口隘溪排水 | 257.3 (20.38%) | 42 (3.33%) | 953.82 (75.56%) | 0 | 1262.4 |
| 旗山排水 | 212.87 (43.00%) | 4.12 (0.83%) | 154.16 (31.14%) | 123.76 (25.00%) | 495.08 |
| 美濃溪排水 | 780.14 (18.75%) | 25.9(0.62%) | 3283.97 (78.91%) | 0 | 4161.57 |
| 手巾寮吉洋排水外 六寮排水 | 119.59 (16.86%) | 5.73 (0.81%) | 584.19 (82.34%) | 0 | 709.51 |
| 溪洲土庫排水 | 193.68 (16.34%) | 3.32 (0.28%) | 981.1 (82.76%) | 0 | 1185.49 |
| 三張廍排水 | 43.19 (8.25%) | 5.63 (1.07%) | 473.06 (90.32%) | 0 | 523.78 |
| 三地門橋至荖濃溪 | 720.08 (15.10%) | 17.79 (0.37%) | 3929.77 (82.40%) | 29.12 (0.61%) | 4769.3 |
| 溪埔寮排水 | 28.5 (33.51%) | 0.46 (0.54%) | 55.89 (65.72%) | 0 | 85.04 |
| 大坑排水 隘寮溪匯流口至荖 濃溪匯流口 | 236.1 (15.17%) | 0.08 (0.01%) | 1296.76 (83.32%) | 12.48 (0.80%) | 1556.34 |
| 武洛溪排水 | 978.19 (9.24%) | 133.65 (1.26%) | 9257.05 (87.41%) | 174.4 (1.65%) | 10590.51 |
| 大樹、姑婆寮排水 | 118.82 (54.42%) | 12.62 (5.78%) | 68.73 (31.48%) | 16.32 (7.47%) | 218.35 |
| 牛稠溪排水 | 5292.22 (48.72%) | 2097.21 (19.14%) | 3440.94 (31.67%) | 0 | 10863.57 |
| 萬丹排水 | 1144.83 (14.06%) | 134.31 (1.65%) | 6690.93 (82.20%) | 88.8 (1.09%) | 8139.82 |

資料來源：高屏溪涵容能力之評估，2001

表6.1-6 高屏溪流域各種污染源排放表

| 集污區名稱 | 排放量(單位:公斤/天) | | | | | | |
|---------------|----------------|-----------------|-----------------|---------------|----------|---------------|-----------------|
| | 事業廢水 | 畜牧廢水 | 生活污水 | 垃圾滲出水 | 非點源廢水 | 遊憩廢水 | 總計 |
| 林園排水 | 765.8 | 2330.25 | 7215.42 | 52.21 | | 0 | 10363.68 |
| 萬丹排水 | 19.98 | 7796.72 | 2669.2 | 0 | | 0 | 10485.9 |
| 牛稠溪排水 | 156.19 | 7852.65 | 9098.62 | 0 | | 0 | 17107.46 |
| 翁公園地區排水 | 389.14 | 169.81 | 1307.06 | 0 | | 0 | 1866.01 |
| 武洛溪排水 | 33.94 | 23605.4 | 3138.91 | 8.63 | | 0 | 26786.88 |
| 大樹排水 | 26.99 | 76.34 | 663.43 | 0 | | 0 | 766.76 |
| 大坑排水 | 0.14 | 50.09 | 335.29 | 4.54 | | 0 | 390.06 |
| 溪埔寮排水 | 2.1 | 27.42 | 261.99 | 0 | | 97.4 | 388.91 |
| 三張寮排水 | 0 | 522.38 | 187.41 | 0 | | 0 | 709.79 |
| 溪州、土庫排水 | 0 | 369.04 | 403.12 | 0 | | 0 | 772.16 |
| 外六寮排水 | 0 | 90.86 | 45.15 | 0 | | 1.43 | 137.44 |
| 手巾寮、吉洋排水 | 0 | 19.42 | 172.36 | 0 | | 0 | 191.78 |
| 美濃溪排水 | 0.9 | 226.36 | 1957.8 | 0 | | 0 | 2185.06 |
| 旗山排水 | 2.34 | 10.69 | 796.01 | 22.7 | | 0 | 831.74 |
| 奎柚、內寮溪排水 | 0 | 1.19 | 277.09 | 0 | | 0 | 278.28 |
| 口隘溪排水 | 0 | 1062.61 | 335.25 | 0 | | 0 | 1397.86 |
| 甲仙堰至月眉橋 | 0 | 0.07 | 540.75 | 27.24 | | 0 | 568.06 |
| 民權大橋至甲仙堰 | 0 | 0 | 141.38 | 1.82 | | 0 | 143.2 |
| 旗山溪發源地至民權大橋 | 0 | 0 | 158.39 | 0 | | 0 | 158.39 |
| 隘寮溪匯流口至荖濃溪匯流口 | 0 | 37.97 | 16.94 | 0 | | 0 | 54.91 |
| 濁口溪匯流口至隘寮溪匯流口 | 0 | 0.05 | 97.39 | 9.08 | | 11.58 | 118.1 |
| 濁口溪 | 0 | 0 | 67.84 | 2.27 | | 24.1 | 94.21 |
| 新發大橋至濁口溪匯流口 | 0 | 0 | 391.76 | 5.22 | | 18.35 | 415.33 |
| 荖濃溪發源地至新發大橋 | 0.31 | 0 | 384.15 | 4.54 | | 81.53 | 470.53 |
| 三地門橋至荖濃溪匯流口 | 11.62 | 53.71 | 1288.09 | 0 | | 0 | 1353.42 |
| 隘寮溪發源地至三地門橋 | 0 | 47.84 | 396.11 | 0 | | 30 | 473.95 |
| 合計 | 1409.45 | 44350.87 | 32346.91 | 138.25 | 0 | 264.39 | 78509.87 |

資料來源：行政院環保署網頁

高屏河流域水質流圖建置如圖 6.1-3，河川水質 (BOD) = 排入高屏溪總流達量 (下游) + 排入高屏溪總流達量 (上游) / 高屏大橋流量；排入高屏溪總流達量 (下游) = 總流達量 - 溼地處理量 (武洛溪溼地)，武洛溪溼地基地位置以南側堤防外水利用地，第一期面積約 2 公頃，第二期面積約 18 公頃，分階段進行水質淨化處理程序，第一階段處理採自然疊落、礫間接觸、生物接觸氧化及自然沈澱等方式，以去除水中砂粒及部分懸浮固體，增加水中溶氧量，能初步削減武洛溪水中的懸浮固體達五成，生化需氧量 (BOD) 去除率也可達三成，第二階段則以人工渠道方式，將溪水引流入三座自由水流系統的人工溼地，經由溼地植物的過濾、淨化及吸附氮、磷後，進一步達到淨化水質的目的，處理過後的水中懸浮固體及生化需氧量去除率，也可分別大幅提升到六至七成以上；

水質流圖中各項目計算式如下：

總流達量 = 家庭污水流達量 (kg) + 畜牧廢水流達量 (kg) + 工業廢水流達量 (kg)

各污染源之流達量 (kg) = 各污染源之排放量 (kg) × 流達率

家庭污水流達量 (kg) = 家庭污水排放量#1 (kg) × 流達率 C + 家庭污水排放量#2 (kg) × 流達率 D

家庭污水產生量 A = 每人每日之用水量 × 0.8

家庭污水產生量 B = 家庭污水產生量 A - 化糞池處理

家庭污水產生量#1 (kg) = 家庭污水排放量 (未處理) × 家庭污水 BOD 濃度 × (1 - 化糞池處理效率)

家庭污水排放量 (未處理) = 家庭污水產生量 B - 流入污水廠

家庭污水排放量#2 (kg) = 污水廠排放 (已處理) × 放流水標準#污水
 下水道系統

畜牧廢水排放量 (kg) = (畜牧廢水產生量 - 三階段式養豬廢水處理
 系統) × 放流水標準#畜牧

工業廢水排放量參考表 6.1-6(行政院環保署網站)作為實際輸入
 值；高屏溪流域水量水質系統流圖如圖 6.1-4 所示。

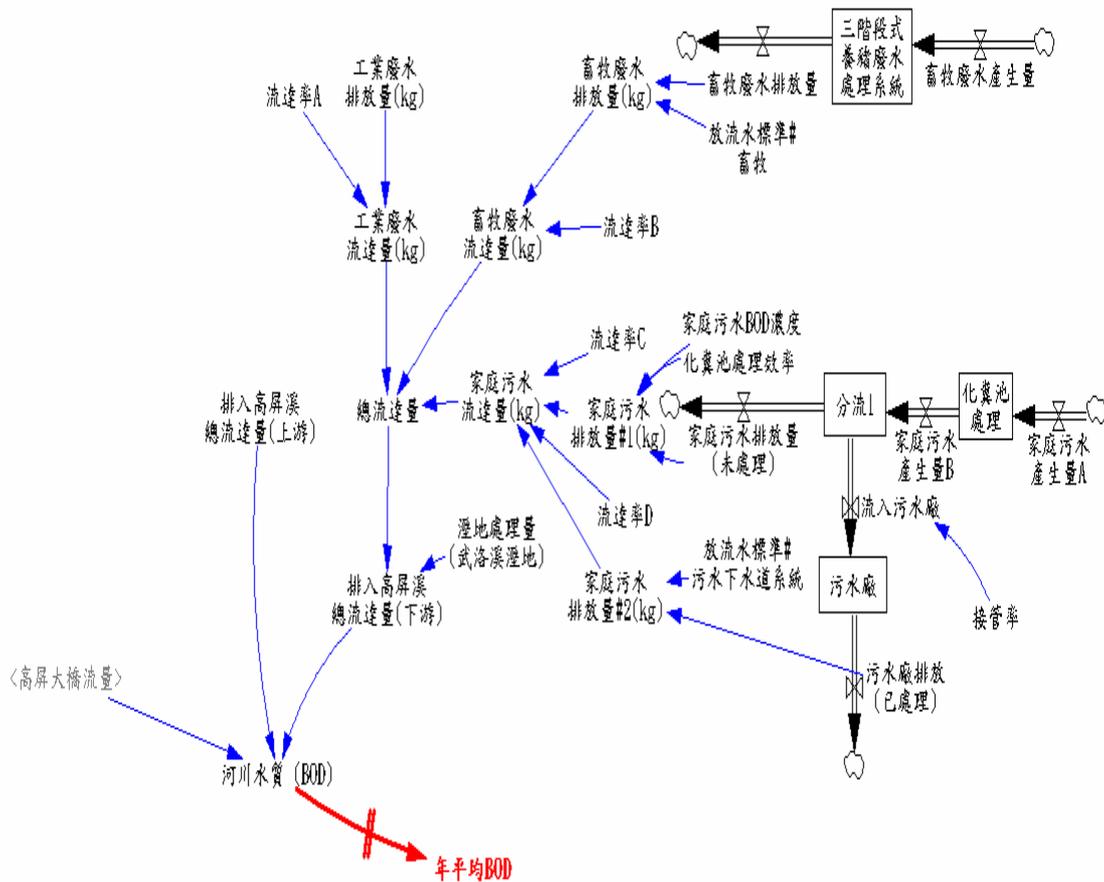


圖 6.1-3 高屏溪流域水質流圖

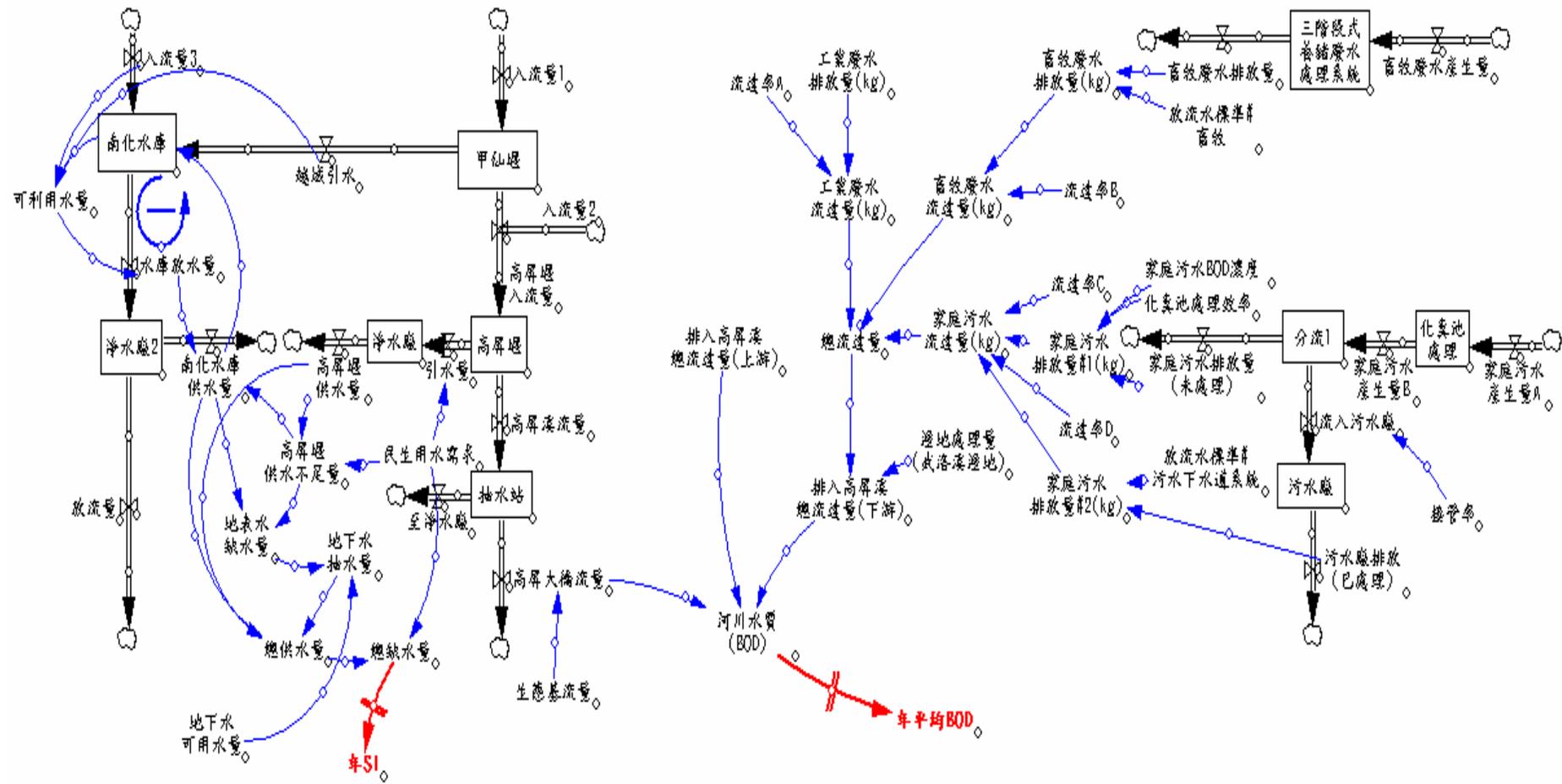


圖 6.1-4 高屏溪流域水量水質流圖

6.2 模型檢定

高屏溪水量水質系統動力模型建置完成後，必須經由模型檢定驗證後才可實地應用，模型檢定指調整水量和水質的參數和係數，使實測水質資料與模擬結果比較，兩者差異最小而模擬結果可以被接受之過程；本研究水質測站選定為高屏大橋，高屏大橋位於高屏溪主流(如圖 6.2-4)，測站地址為高雄縣大樹鄉 1 號公路，高屏大橋水質測站資料如圖 6.2-5，而在高屏溪流域最下游的水質測站為雙園大橋(如圖 6.2-4)，測站地址為高雄縣大樹鄉 17 號公路，本研究未選定其為水質檢定測站，原因為雙園大橋位置靠近出海口為感潮河段，會造成水質模擬上的不準確；河川水質檢定的項目為生化需氧量(BOD_5)，首先，選定 5 年(1997、1998、2002、2003、2004)水質實測資料，計算這 5 年各月水質之平均值與一倍標準偏差如圖 6.2-1；選定與 5 年水質平均值較接近之年份進行水質檢定，選定之年份為 2002 年，再來對 2002 年進行水量和水質的參數和係數調整，結果如圖 6.2-2，待模型檢定完成後，為確認模型之可靠性需進一步驗證，驗證的年份為 1997、1998、2004，結果如圖 6.2-3，驗證的標準為平均值正負一個標準偏差，結果顯示大致上符合這個標準，所以此模式是可以被接受的。

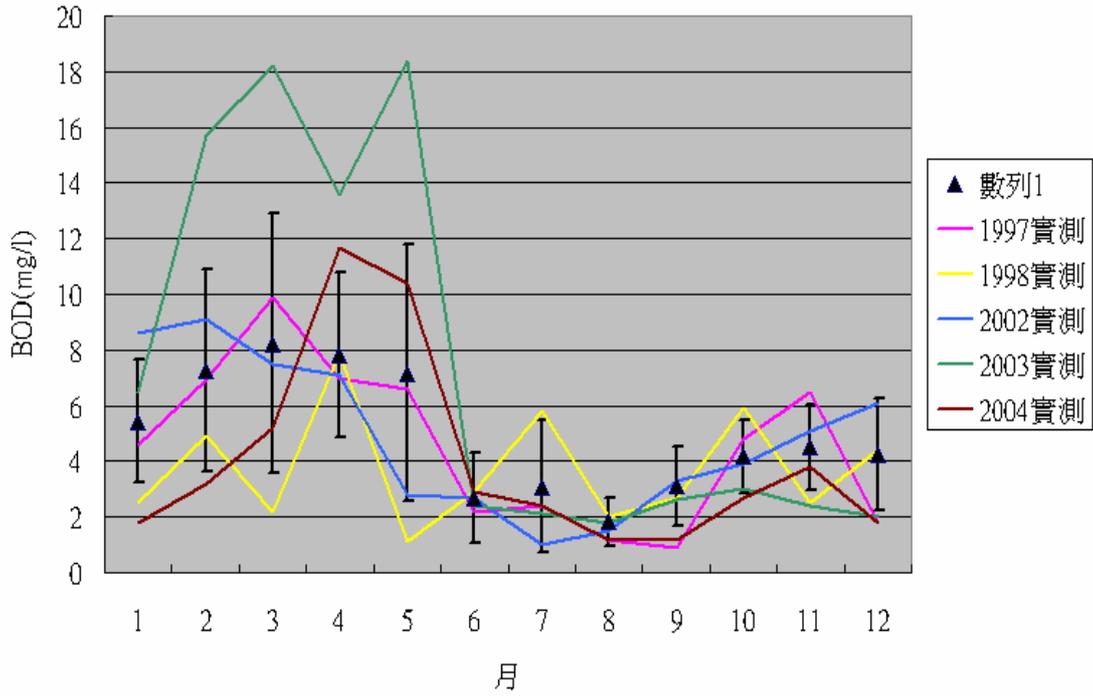


圖 6.2-1 水質實測值，水質平均±一倍標準偏差

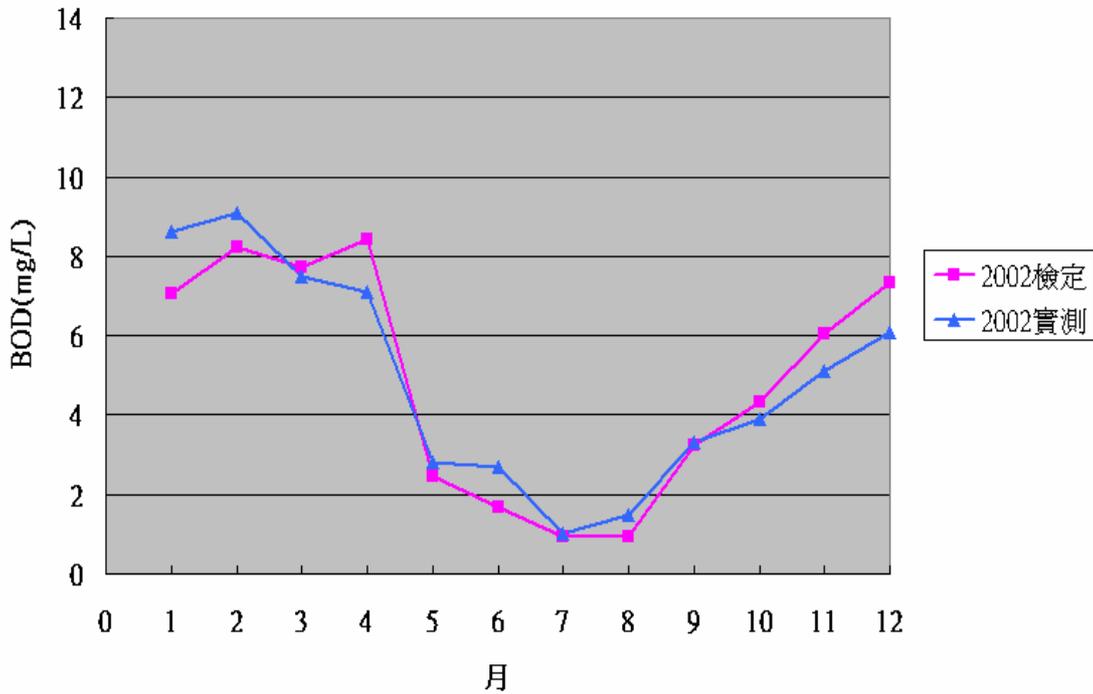


圖 6.2-2 水質檢定結果圖

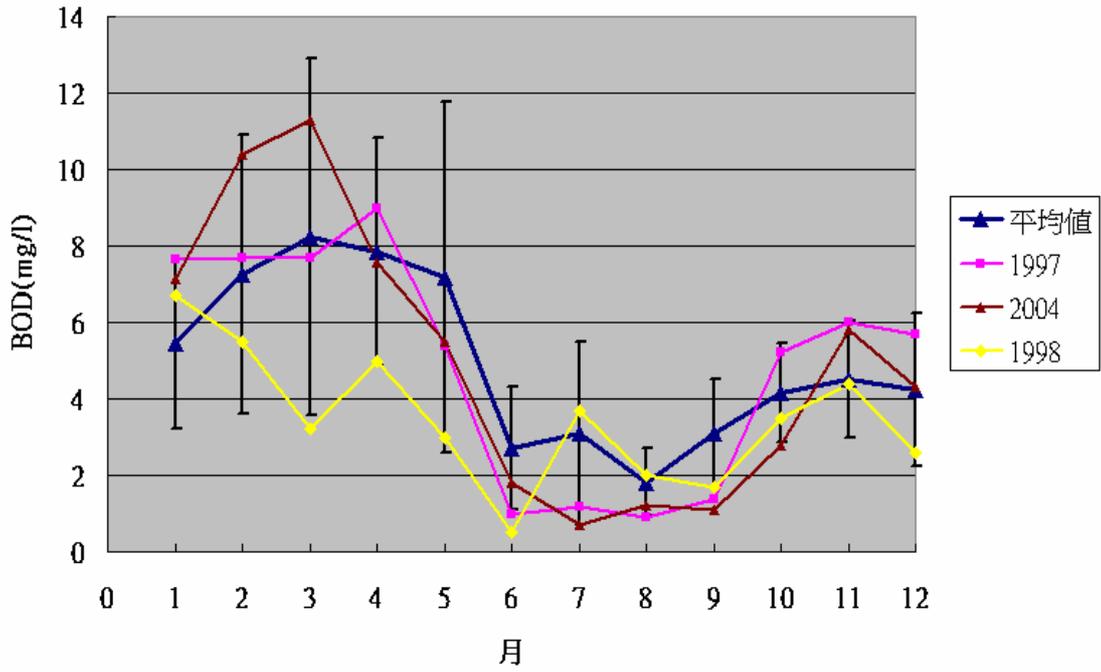


圖 6.2-3 水質驗證結果圖



圖 6.2-4 高屏溪流域水質測站圖

資料來源：行政院環保署網頁

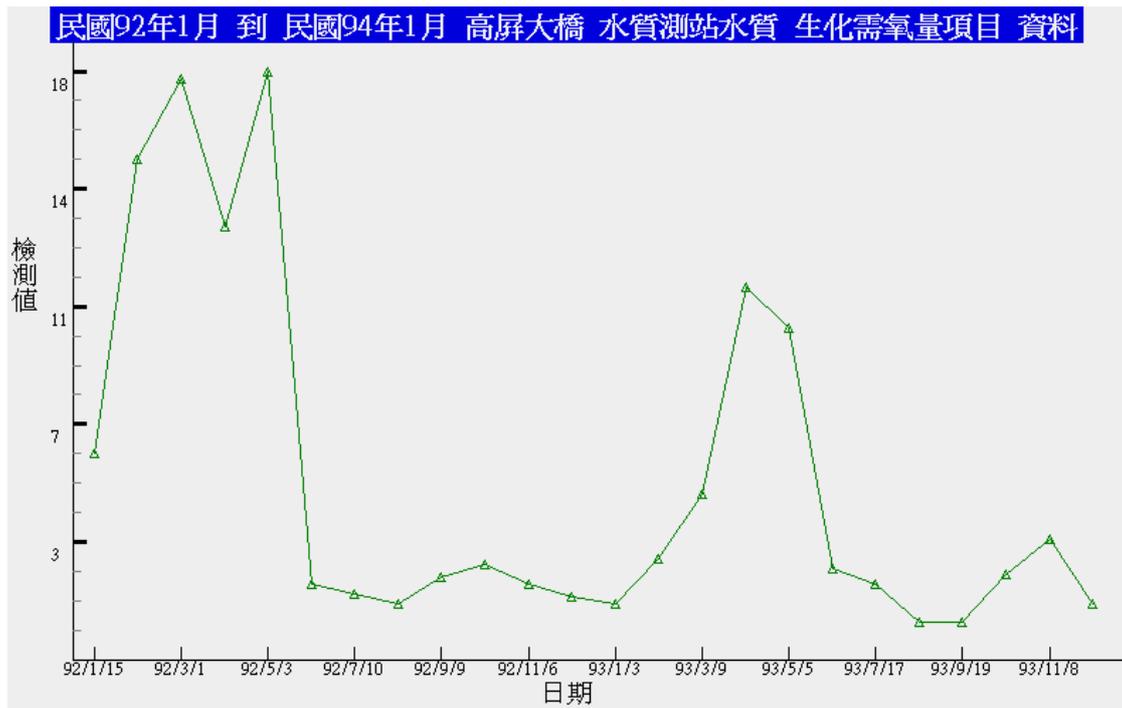


圖 6.2-5 高屏大橋水質測站資料

資料來源：行政院環保署網頁



第七章 情境模擬與分析

本章節即利用第六章節所建置完成之高屏溪水量水質系統動力模型進行策略模擬分析，其包含興建淨水廠、抽取地下水、養豬離牧政策、興建污水下水道系統與生態基流量等單一型策略及複合型策略，透過衝擊分析以評估其效益。本研究之策略評比標準為缺水程度年 $SI \leq 1$ ，生化需氧量平均 $BOD \leq 2 \text{ mg/l}$ ，同時滿足兩個標準方為可接受之模擬方案，而淨成本這個項目是供決策者選出可接受之模擬方案後之另一項參考項目。

7.1 單一型策略模擬結果

表 7.1 為單一型策略模擬結果，目標年為民國 110 年，分別對興建淨水廠、抽取地下水、養豬離牧政策、興建污水下水道系統與生態基流量等進行單一策略之模擬，表格最上方為模擬時刻初（民國 91 年）之情況即在模擬時刻初的供水能力（坪頂淨水廠 110 萬噸/天，南化淨水廠 80 萬噸/天）及污水處理情況下不做任何策略模擬至目標年，相關模擬結果如圖 7.1-1~7.1-18，模擬結果發現年 SI 和平均 BOD 皆超出標準，各項水量及水質之單一型策略模擬結果顯示皆不能同時滿足水量和水質標準，所以必須考量複合型策略來同時解決水量和水質問題。

表 7.1 單一型策略模擬結果

| 策略 | | 年 SI | 平均 BOD | 水質不合格月數 | 收入 | 成本 | 淨收益 單位： 億元 |
|------------------|----------------------|------|--------|---------|------|------|------------------|
| 現況 (目標:民國110) | Q75(26.18cms) | 3.8 | 4.38 | 128 | 4.96 | 0 | 4.96 |
| 生態基流量 | Q95(9.61cms)(-63%) | 0.7 | 6.4 | 128 | 5.61 | 0 | 5.61 |
| | 3150cms(-41%) | 1 | 5.7 | 128 | 5.51 | 0 | 5.51 |
| | Q85(16.57cms)(-37%) | 1.7 | 5 | 128 | 5.35 | 0 | 5.35 |
| | Q65(35.71cms)(+36%) | 5.2 | 4.2 | 128 | 4.72 | 0 | 4.72 |
| | Q55(55.72cms)(+113%) | 7.8 | 4.1 | 128 | 4.42 | 0 | 4.42 |
| 污水下水道 | 接管速率 5%/年 | 3.8 | 4.36 | 128 | 4.96 | 22.3 | -17.37 |
| 豬隻削減 | 100% | 3.8 | 1.1 | 42 | 4.96 | 46 | -41.04 |
| | 80% | 3.8 | 1.7 | 100 | 4.96 | 36.8 | -31.84 |
| | 70% | 3.8 | 2.0 | 105 | 4.96 | 32.2 | -27.24 |
| 抽取地下水 | 500(萬噸/月) | 2.3 | 4.38 | 128 | 5.2 | 4.91 | 0.3 |
| | 800 | 1.9 | 4.38 | 128 | 5.28 | 6.48 | -1.2 |
| | 1000 | 1.5 | 4.38 | 128 | 5.36 | 8 | -2.65 |
| | 1200 | 1.2 | 4.38 | 128 | 5.43 | 9.48 | -4.05 |
| 興建淨水廠 (坪頂) | 30(萬噸/天) | 3.1 | 4.4 | 128 | 5.06 | 8.7 | -3.64 |
| | 60 | 2.9 | 4.4 | 128 | 5.08 | 17.4 | -12.31 |
| 興建淨水廠 (南化) | 30 | 3.68 | 4.38 | 128 | 4.99 | 8.7 | -3.71 |
| | 60 | 3.66 | 4.38 | 128 | 4.99 | 17.4 | -12.40 |

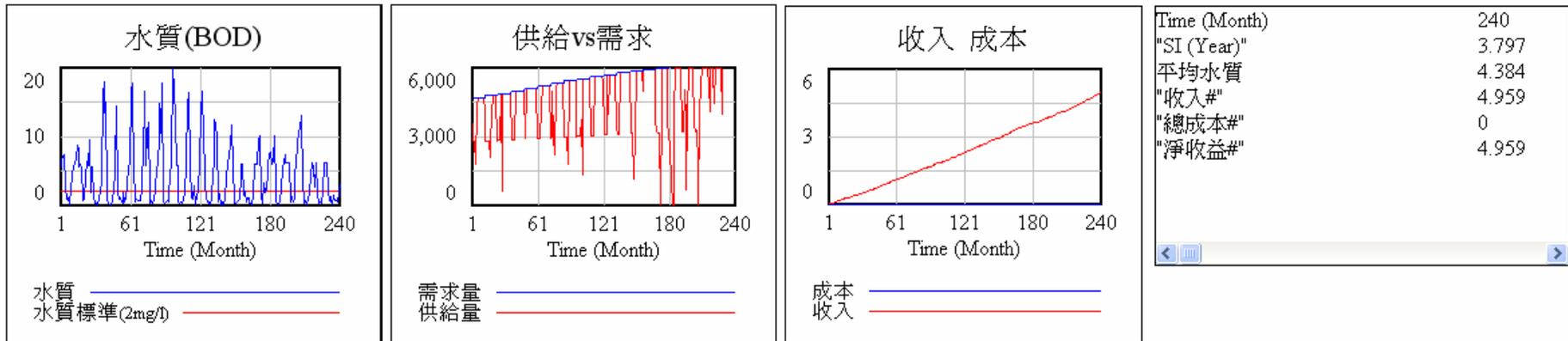
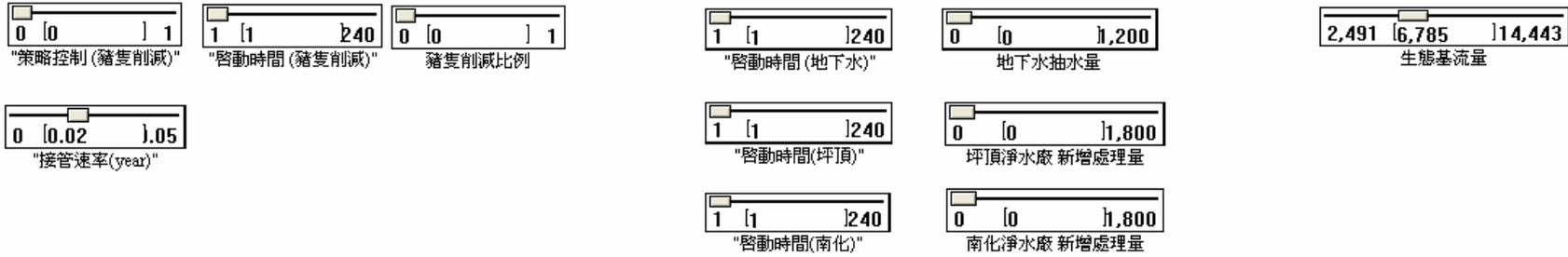


圖 7.1-1 單一型策略模擬結果圖(現況)

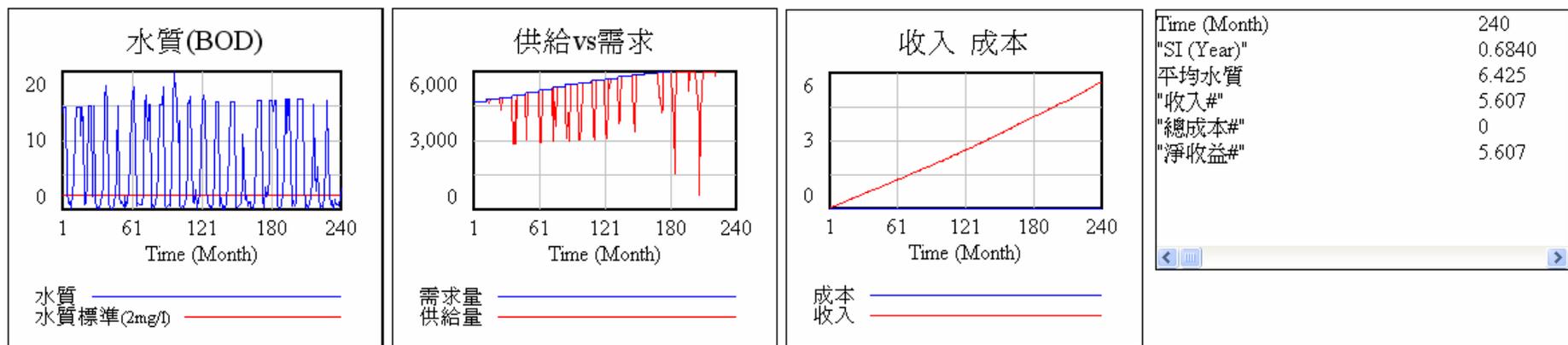
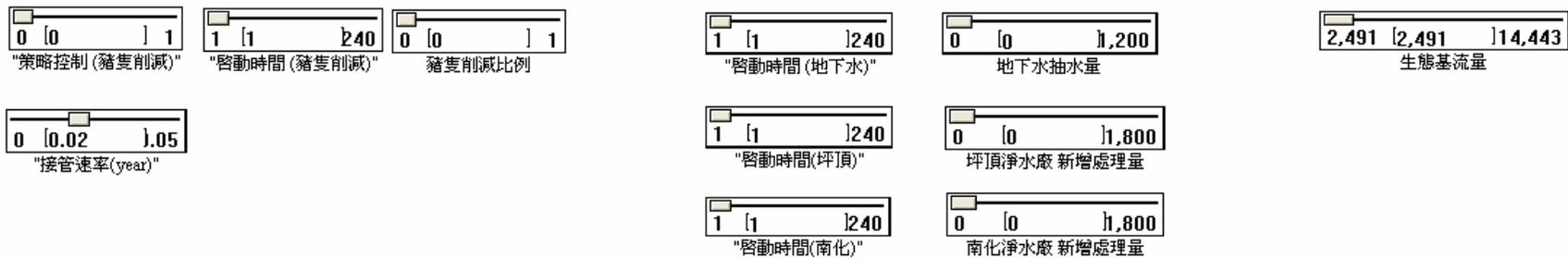
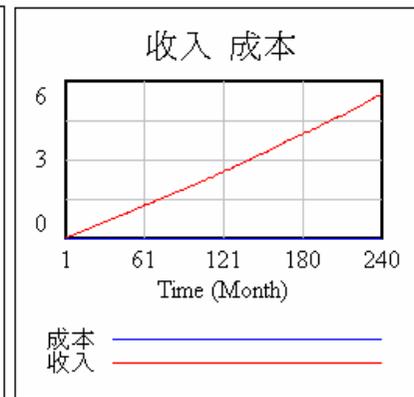
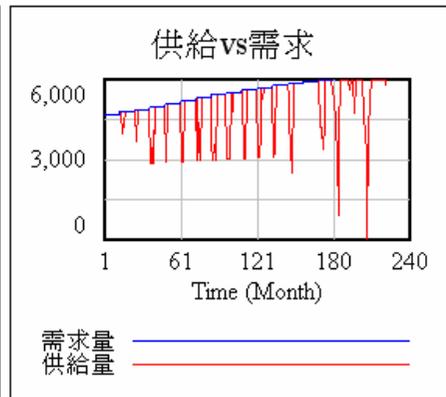
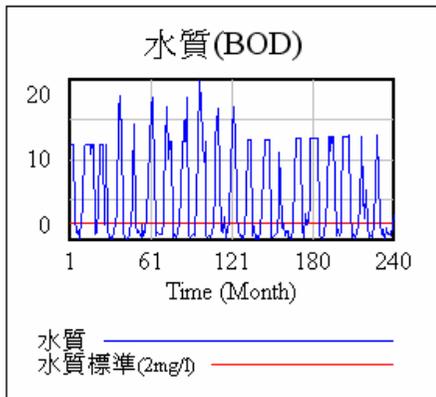
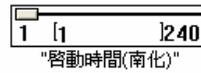
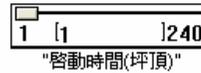
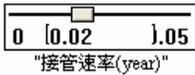
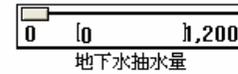
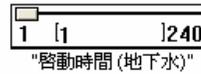
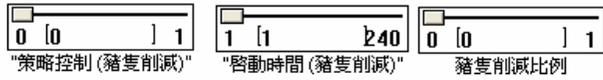


圖 7.1-2 單一型策略模擬結果圖(Q95)



| | |
|--------------|-------|
| Time (Month) | 240 |
| "SI (Year)" | 1.000 |
| 平均水質 | 5.693 |
| "收入#" | 5.514 |
| "總成本#" | 0 |
| "淨收益#" | 5.514 |

圖 7.1-3 單一型策略模擬結果圖(SI=1)

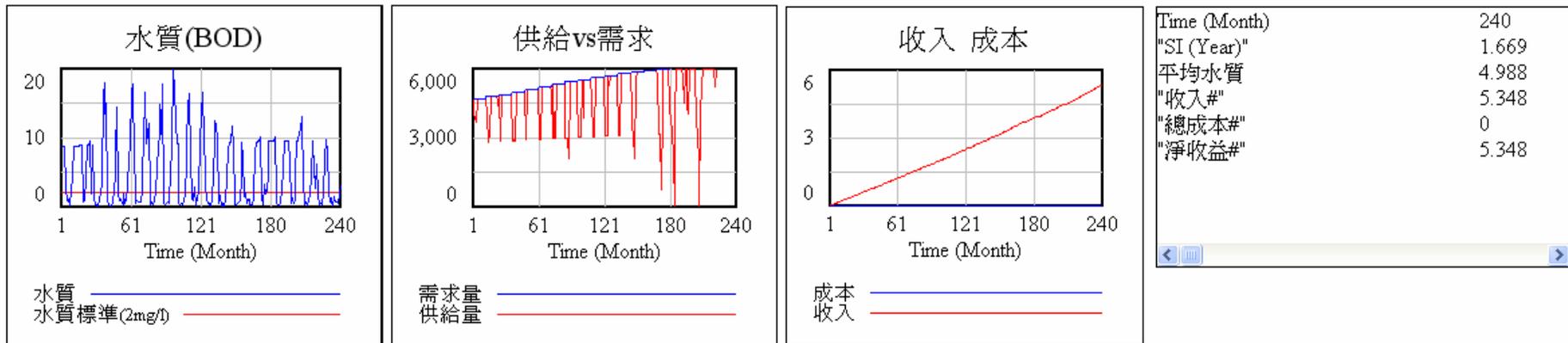
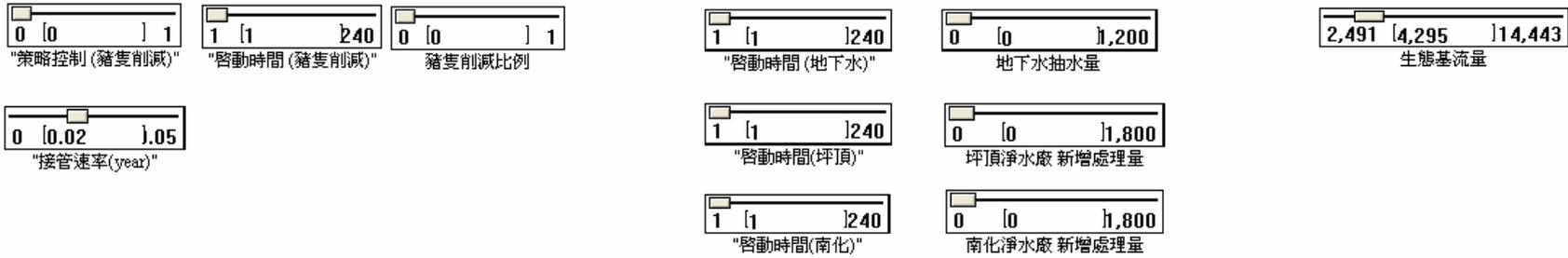
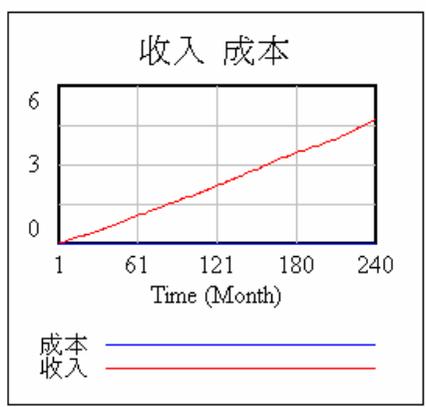
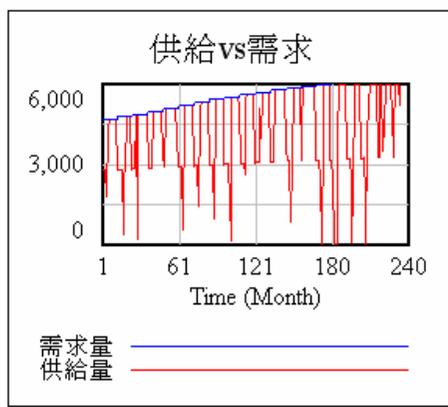
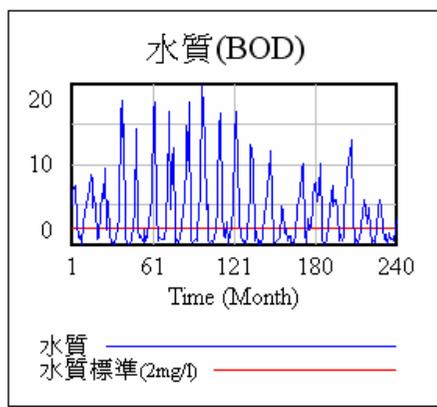
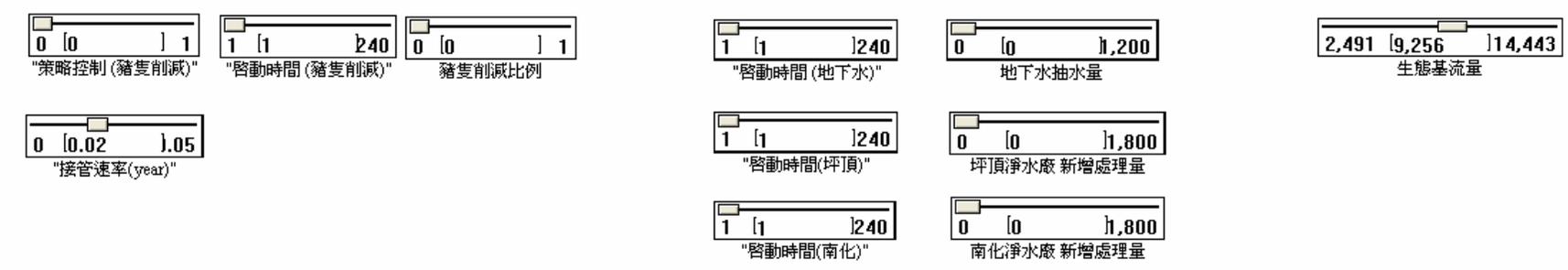
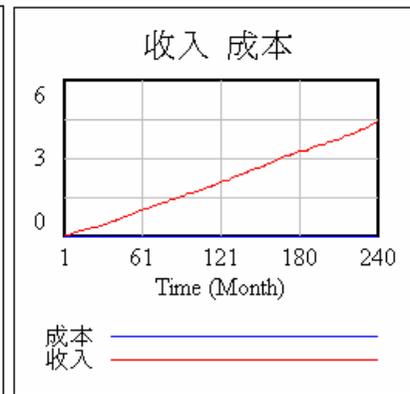
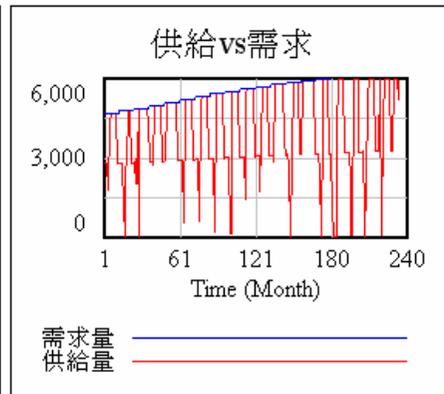
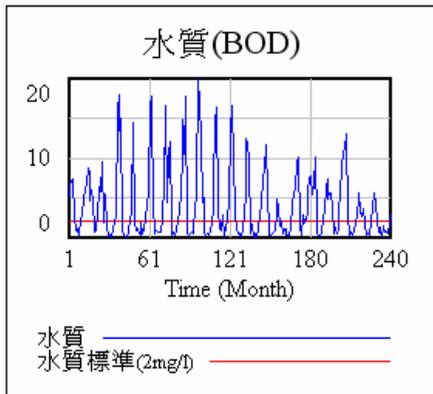
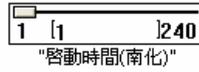
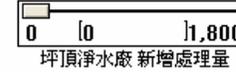
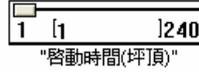
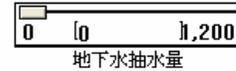
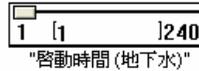
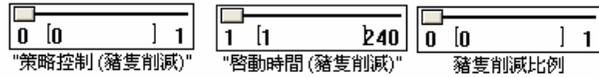


圖 7.1-4 單一型策略模擬結果圖(Q85)



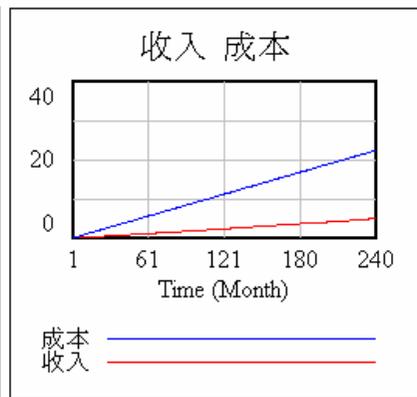
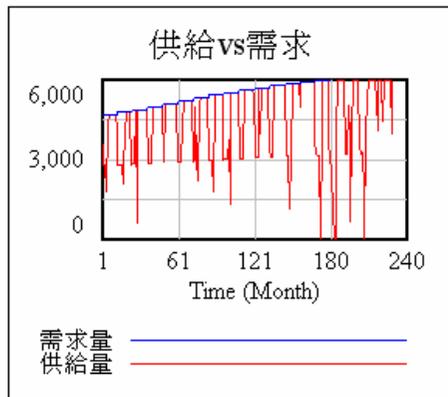
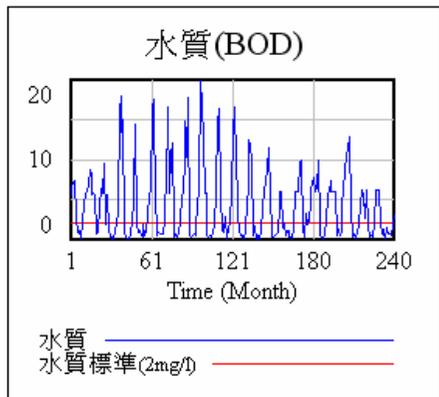
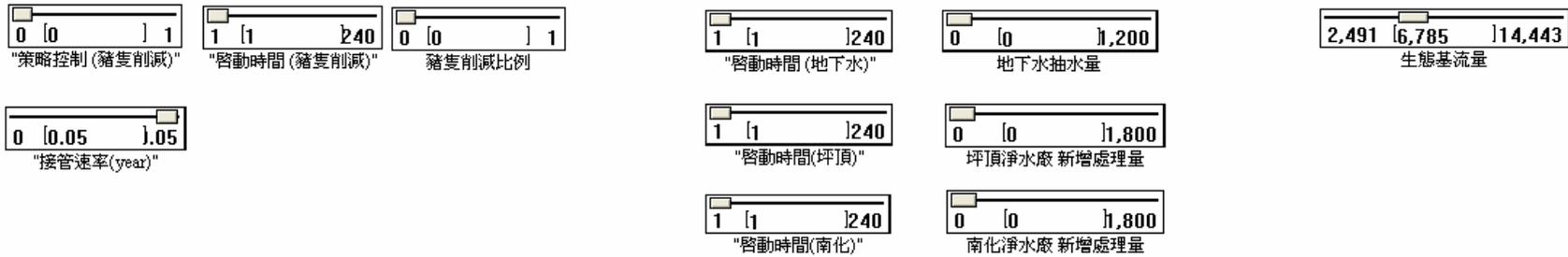
| | |
|--------------|-------|
| Time (Month) | 240 |
| "SI (Year)" | 5.196 |
| 平均水質 | 4.210 |
| "收入#" | 4.723 |
| "總成本#" | 0 |
| "淨收益#" | 4.723 |

圖 7.1-5 單一型策略模擬結果圖(Q65)



| | |
|--------------|-------|
| Time (Month) | 240 |
| "SI (Year)" | 7.772 |
| 平均水質 | 4.093 |
| "收入#" | 4.416 |
| "總成本#" | 0 |
| "淨收益#" | 4.416 |

圖 7.1-6 單一型策略模擬結果圖(Q55)



| | |
|--------------|--------|
| Time (Month) | 240 |
| "SI (Year)" | 3.797 |
| 平均水質 | 4.364 |
| 水質不合格月數 | 128 |
| "收入#" | 4.959 |
| "總成本#" | 22.33 |
| "淨收益#" | -17.37 |

圖 7.1-7 單一型策略模擬結果圖(接管速率 5%/年)

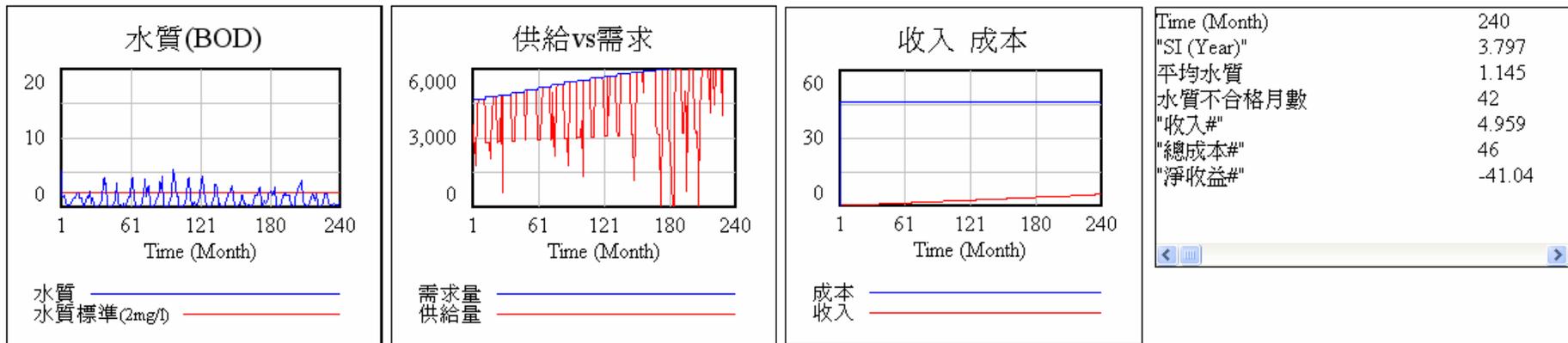
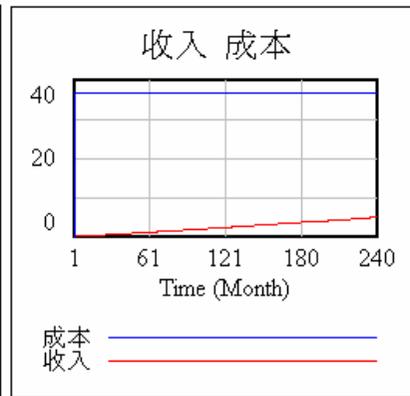
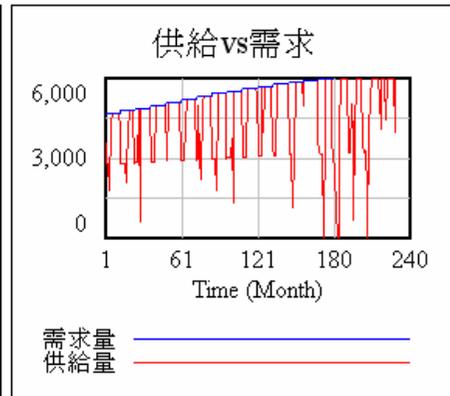
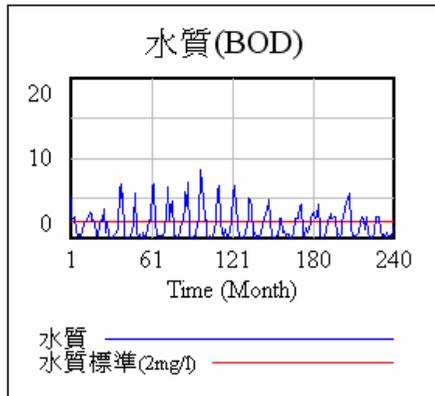
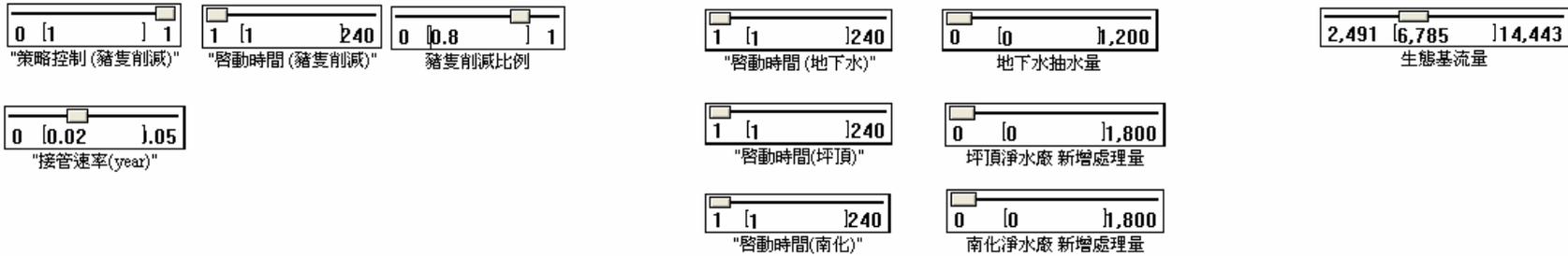


圖 7.1-8 單一型策略模擬結果圖(豬隻削減 100%)



| | |
|--------------|--------|
| Time (Month) | 240 |
| "SI (Year)" | 3.797 |
| 平均水質 | 1.748 |
| 水質不合格月數 | 100 |
| "收入#" | 4.959 |
| "總成本#" | 36.8 |
| "淨收益#" | -31.84 |

圖 7.1-9 單一型策略模擬結果圖(猪隻削減 80%)

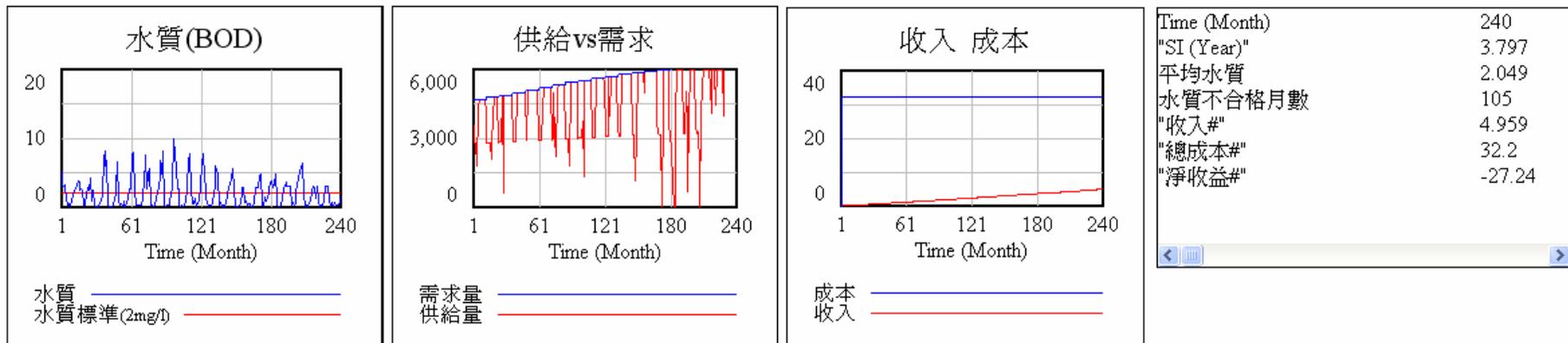
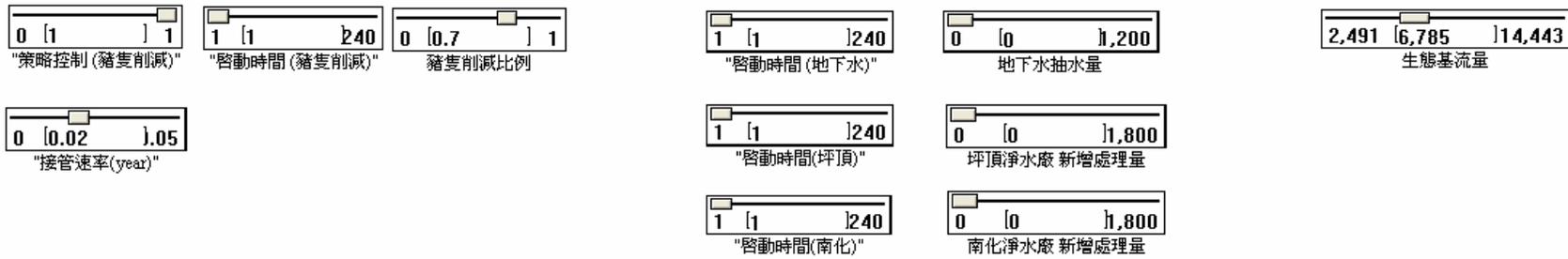
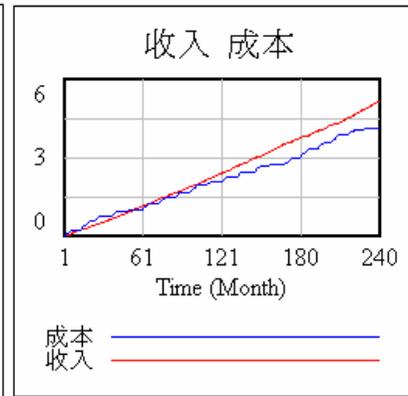
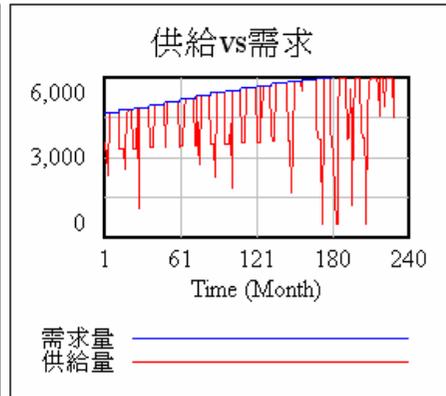
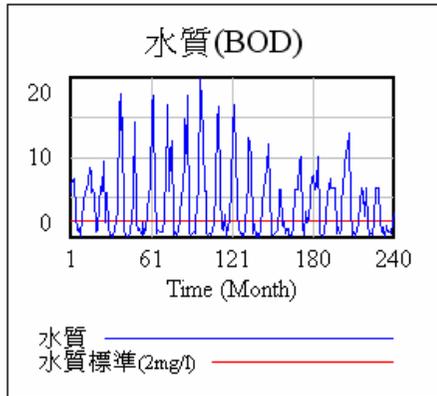
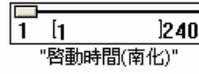
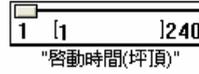
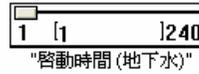
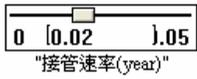
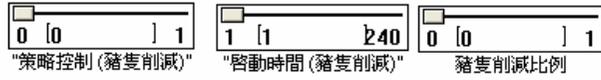
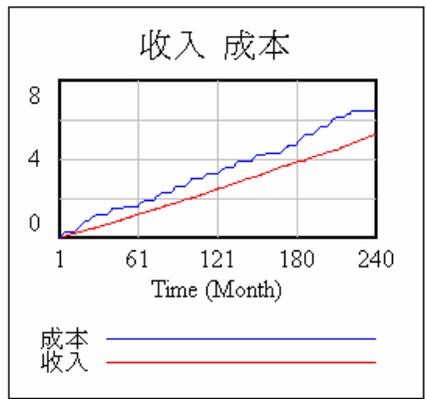
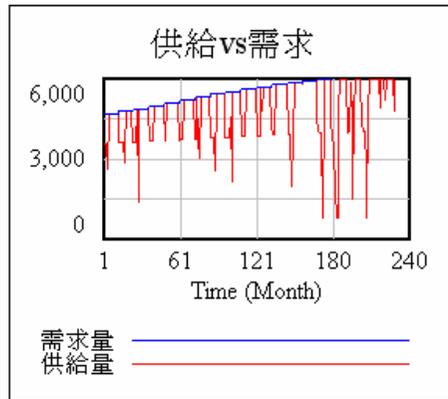
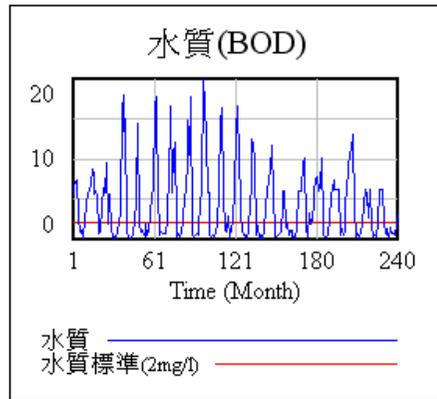
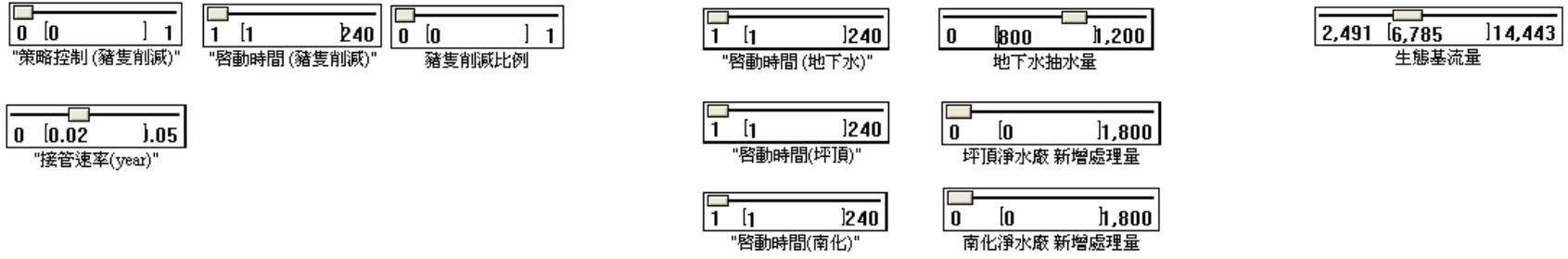


圖 7.1-10 單一型策略模擬結果圖(豬隻削減 70%)



| | |
|--------------|-------|
| Time (Month) | 240 |
| "SI (Year)" | 2.509 |
| 平均水質 | 4.384 |
| 水質不合格月數 | 128 |
| "收入#" | 5.164 |
| "總成本#" | 4.117 |
| "淨收益#" | 1.046 |

圖 7.1-11 單一型策略模擬結果圖(抽取地下水 500 萬噸/月)



| | |
|--------------|--------|
| Time (Month) | 240 |
| "SI (Year)" | 1.897 |
| 平均水質 | 4.384 |
| 水質不合格月數 | 128 |
| "收入#" | 5.281 |
| "總成本#" | 6.476 |
| "淨收益#" | -1.195 |

圖 7.1-12 單一型策略模擬結果圖(抽取地下水 800 萬噸/月)

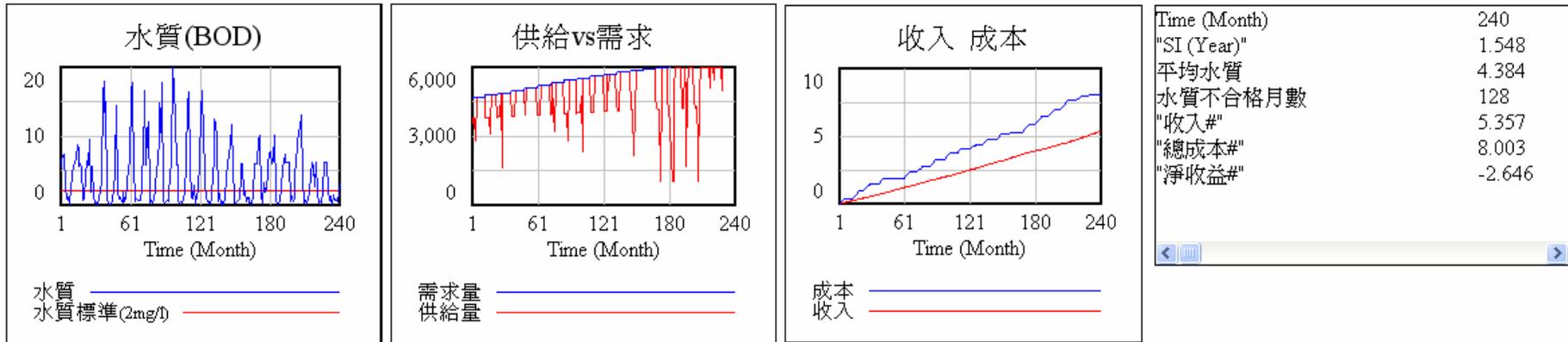
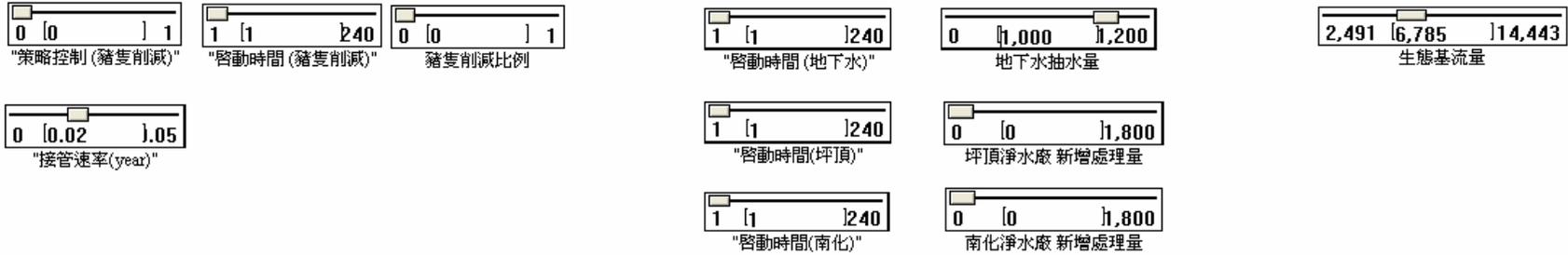
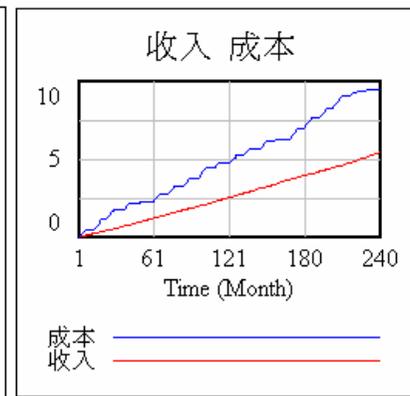
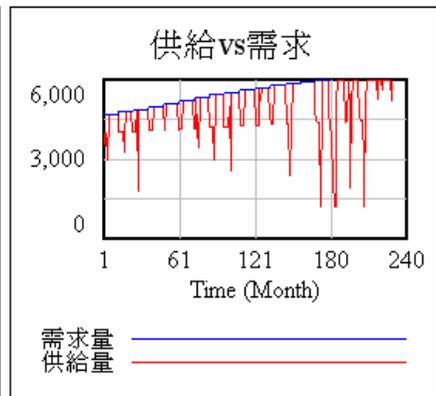
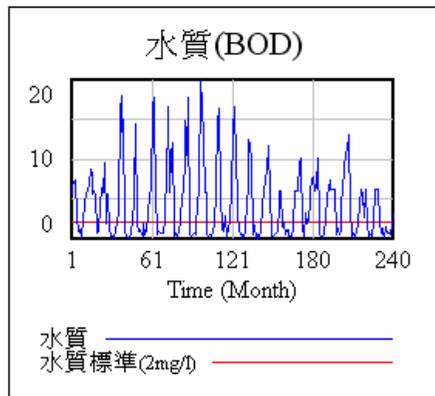
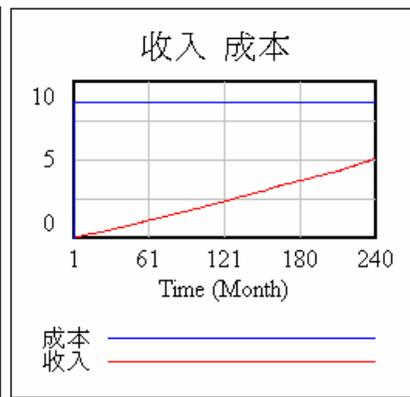
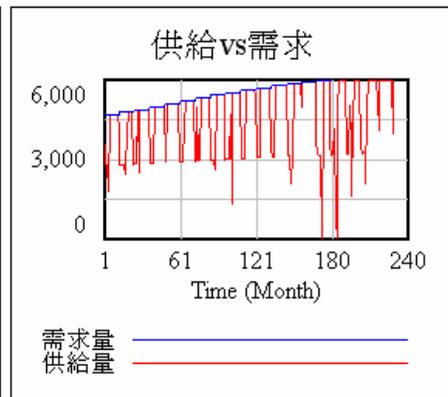
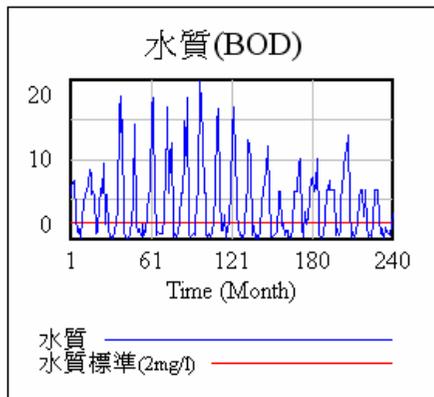
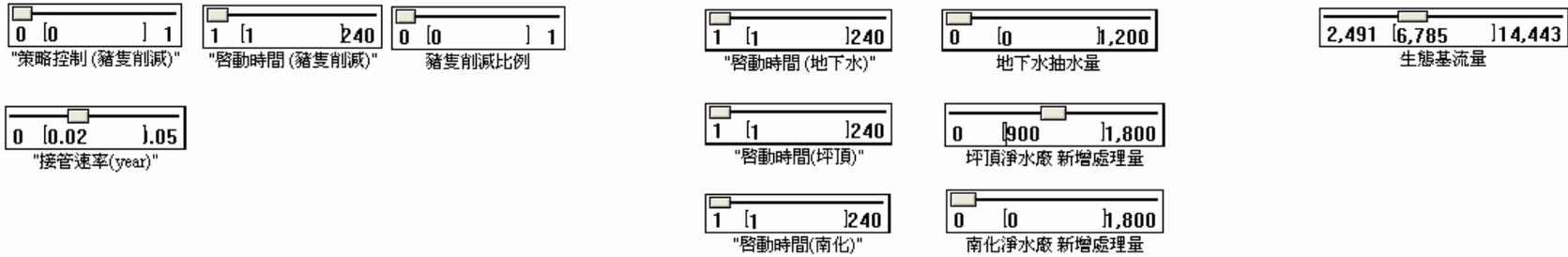


圖 7.1-13 單一型策略模擬結果圖(抽取地下水 1000 萬噸/月)



| | |
|--------------|--------|
| Time (Month) | 240 |
| "SI (Year)" | 1.244 |
| 平均水質 | 4.384 |
| 水質不合格月數 | 128 |
| "收入#" | 5.430 |
| "總成本#" | 9.477 |
| "淨收益#" | -4.047 |

圖 7.1-14 單一型策略模擬結果圖(抽取地下水 1200 萬噸/月)



| | |
|--------------|--------|
| Time (Month) | 240 |
| "SI (Year)" | 3.081 |
| 平均水質 | 4.430 |
| 水質不合格月數 | 129 |
| "收入#" | 5.063 |
| "總成本#" | 8.7 |
| "淨收益#" | -3.636 |

圖 7.1-15 單一型策略模擬結果圖(坪頂淨水廠 30 萬噸/天)

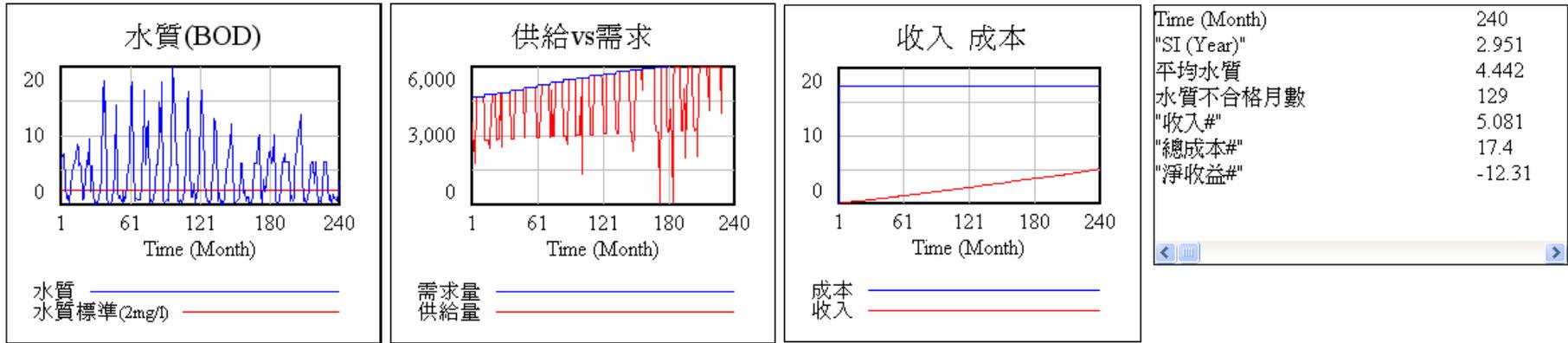
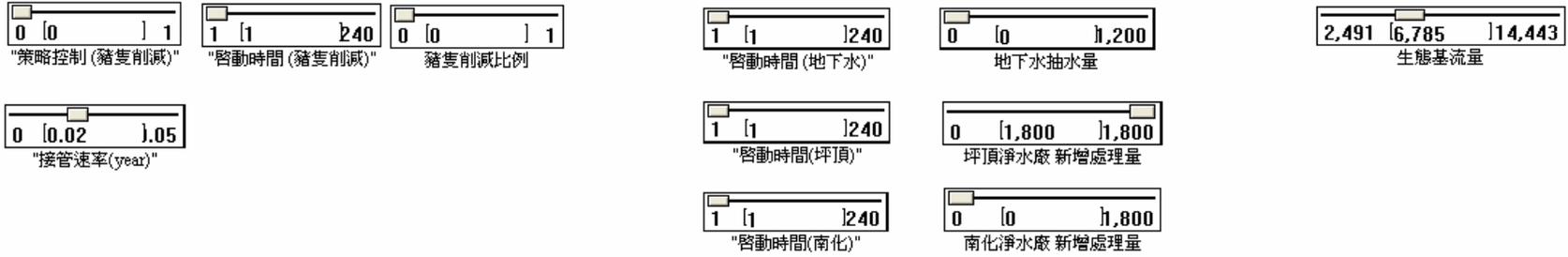
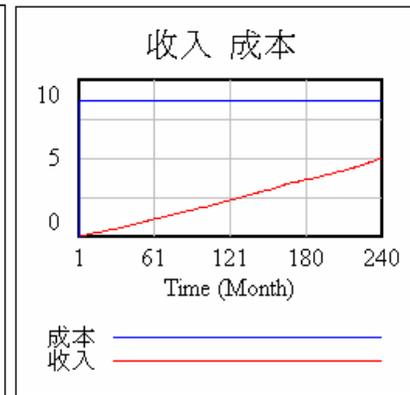
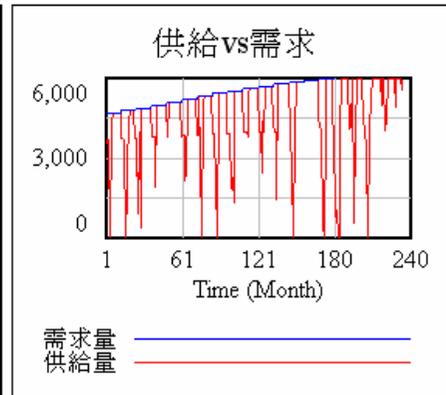
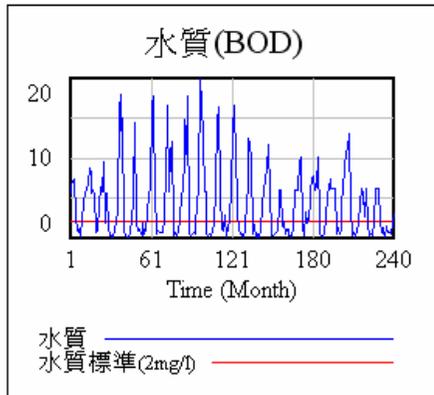
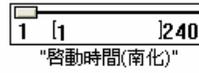
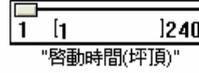
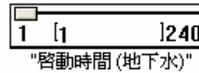
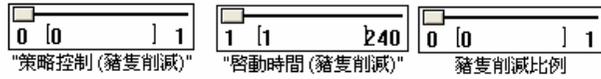
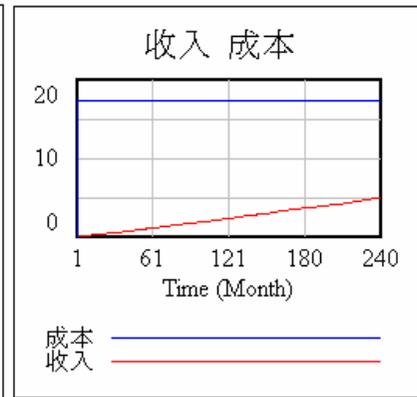
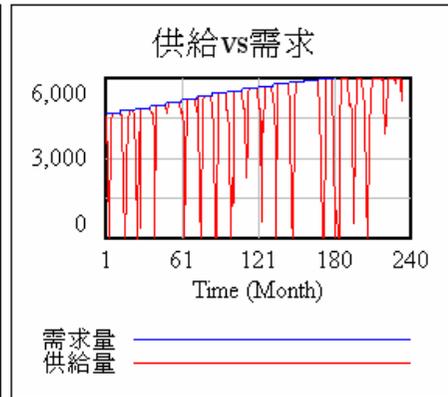
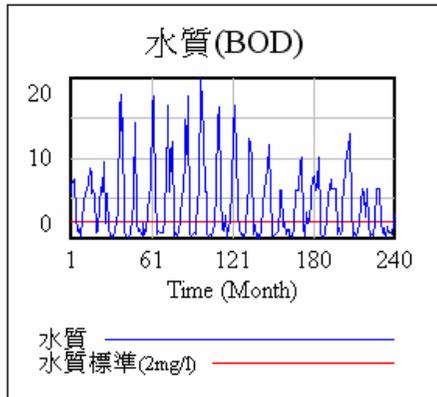
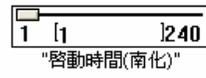
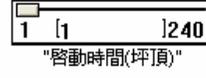
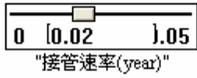
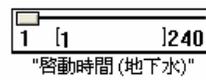
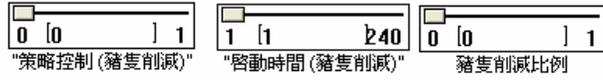


圖 7.1-16 單一型策略模擬結果圖(坪頂淨水廠 60 萬噸/天)



| | |
|--------------|--------|
| Time (Month) | 240 |
| "SI (Year)" | 3.688 |
| 平均水質 | 4.384 |
| 水質不合格月數 | 128 |
| "收入#" | 4.987 |
| "總成本#" | 8.7 |
| "淨收益#" | -3.712 |

圖 7.1-17 單一型策略模擬結果圖(南化淨水廠 30 萬噸/天)



| | |
|--------------|--------|
| Time (Month) | 240 |
| "SI (Year)" | 3.668 |
| 平均水質 | 4.384 |
| 水質不合格月數 | 128 |
| "收入#" | 4.995 |
| "總成本#" | 17.4 |
| "淨收益#" | -12.40 |

圖 7.1-18 單一型策略模擬結果圖(南化淨水廠 60 萬噸/天)

7.2 複合型策略模擬結果

複合型策略模擬策略施行時間點分為兩種，第一種為在時刻初，即加入改善策略，第二種為在第五年才加入改善策略，藉由 vensim 進行情境模擬包含策略施行之大小調整，策略調整之大小如表 7.2-1，在此範圍內調整策略規模大小至同時滿足水量和水質標準，第一種情況模擬結果於表 7.2-2，表中列出多種可行性策略組合，及列出各種可行性策略組合之淨收益，淨收益計算為收入減去成本，相關的成本係數有自來水水價：7 元~11.5 元/噸（自來水公司），淨水廠處理單位水成本：10.955 元/噸，地下水抽水固定成本：0.48 元/噸，地下水抽水操作成本：0.9 元/噸（工研院能源資源所「地下水抽用成本之研究」），淨水廠建造成本：17.4 億元/60 萬噸（中部地區水資源利用整體檢討規劃）；決策者可根據其需要去選定策略，第二種情況模擬結果於表 7.2-3，表中列出兩種可行性策略組合，第二種情況因為策略施行的時間點較晚，而在既有的範圍內可供選擇的組合數就會減少，表示解決高屏溪之水量及水質問題是刻不容緩的，相關模擬結果如圖 7.2-1~7.2-11。

表 7.2-1 策略調整之範圍

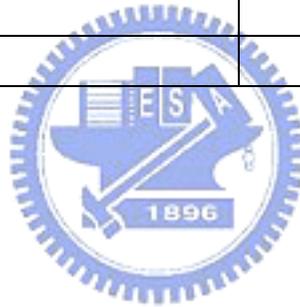
| | MAX | MIN |
|----------|-----------|-----|
| 生態基流量 | Q55 | Q95 |
| 豬隻削減 | 100% | 0% |
| 抽取地下水 | 1200 萬噸/月 | 0 |
| 增加淨水廠處理量 | 60 萬噸/天 | 0 |
| 接管速率 | 5% | 0 |

表 7.2-2 複合型策略模擬結果表(時刻初即加入改善策略)

| | 策略組合 | 年 SI | 平均 BOD | 水質不合 格月數 | 收入 | 成本 | 淨收益 單位： 億元 |
|----|---------------------------------------------------------------|------|-----------|-------------|------|-------|------------------|
| 1. | 抽取地下水(1200) + 坪頂淨水廠(10) + 豬隻削減(71%) | 1.0 | 2.0 | 105 | 5.47 | 44.85 | -39.38 |
| 2. | 抽取地下水(1100) + 坪頂淨水廠(20) + 豬隻削減(71%) | 1.0 | 2.0 | 106 | 5.46 | 46.85 | -41.39 |
| 3. | 抽取地下水(1000) + 坪頂淨水廠(40) + 豬隻削減(71%) | 1.0 | 2.0 | 108 | 5.45 | 51.82 | -46.37 |
| 4. | 抽取地下水(1000) + 坪頂淨水廠(30) + 坪頂淨水廠(30) + 豬隻削減(72%) | 1.0 | 2.0 | 108 | 5.49 | 57.95 | -52.45 |
| 5. | 抽取地下水(1200) + 豬隻削減(71%) + 生態基流量(23.80cms) | 1.0 | 2.0 | 105 | 5.50 | 41.74 | -36.24 |
| 6. | 坪頂淨水廠(60) + 坪頂淨水廠(60) + 豬隻削減(79%) + 生態基流量(18.02cms) | 1.0 | 2.0 | 105 | 5.50 | 71.14 | -65.63 |
| 7. | 坪頂淨水廠(30) + 南化淨水廠(30) + 豬隻削減(75%) + 生態基流量(21.76cms) | 1.0 | 2.0 | 105 | 5.50 | 56.02 | -50.52 |
| 8. | 坪頂淨水廠(20) + 豬隻削減(73%) + 生態基流量(23.56cms)(-10%) | 1.0 | 2.0 | 105 | 5.46 | 45.89 | -40.43 |
| 9. | 抽取地下水(800) + 坪頂淨水廠(40) + 豬隻削減(74%) + 生態基流量(23.56cms)(-10%) | 1.0 | 2.0 | 106 | 5.46 | 51.35 | -45.90 |
| | | | | | | | |

表 7.2-3 複合型策略模擬結果表(第五年才加入改善策略)

| | 策略組合 | 年 SI | 平均 BOD | 水質不合格月數 | 收入 | 成本 | 淨收益 單位： 億元 |
|----|-----------------------------------------------------------------------|------|--------|---------|------|-------|------------------|
| 1. | 抽取地下水(1200)+坪頂淨水廠(40)+南化淨水廠(20) +豬隻削減(97%)+生態基流量(23.98cms) | 1.0 | 2.0 | 83 | 5.52 | 68.33 | -62.81 |
| 2. | 抽取地下水(1200) +坪頂淨水廠(30) +南化淨水廠(10) +豬隻削減(97%)+生態基流量(23.56cms)(-10%) | 1.0 | 2.0 | 85 | 5.51 | 62.67 | -57.16 |
| | | | | | | | |



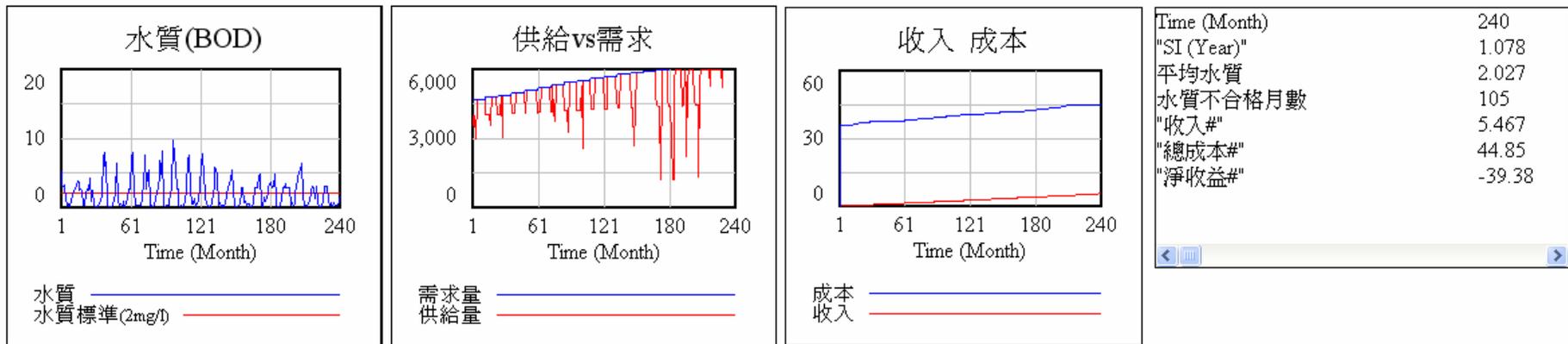
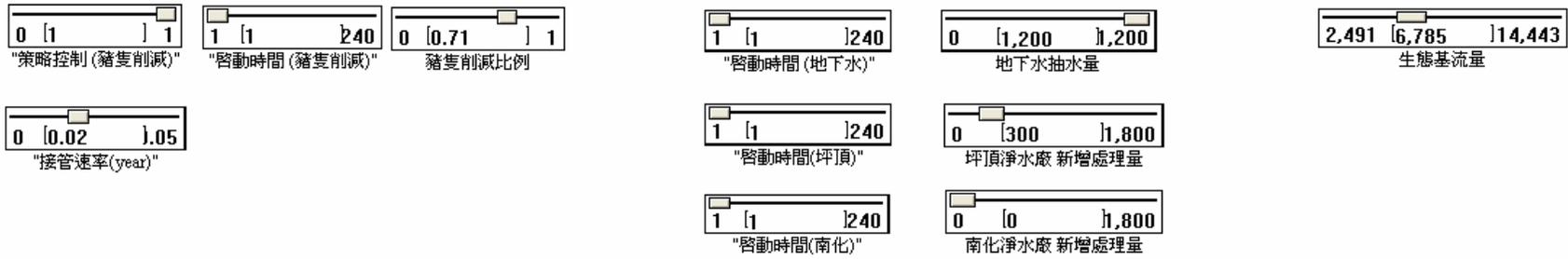
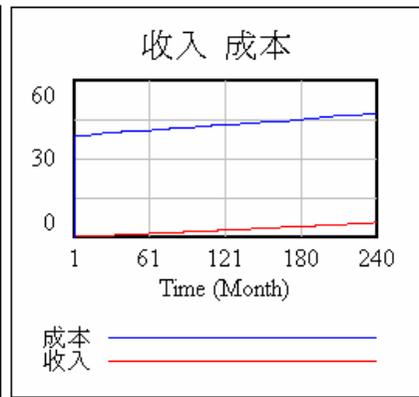
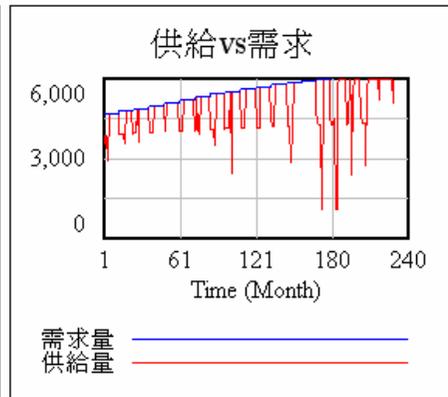
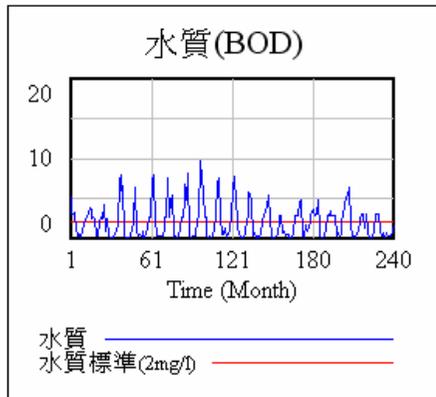
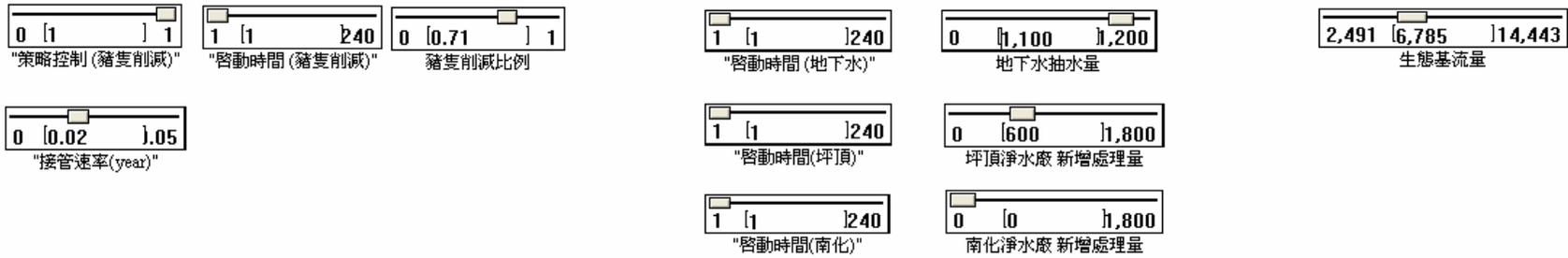


圖 7.2-1 複合型策略模擬結果圖(時刻初即加入改善策略)(1)



| | |
|--------------|--------|
| Time (Month) | 240 |
| "SI (Year)" | 1.079 |
| 平均水質 | 2.035 |
| 水質不合格月數 | 106 |
| "收入#" | 5.460 |
| "總成本#" | 46.85 |
| "淨收益#" | -41.39 |

圖 7.2-2 複合型策略模擬結果圖(時刻初即加入改善策略)(2)

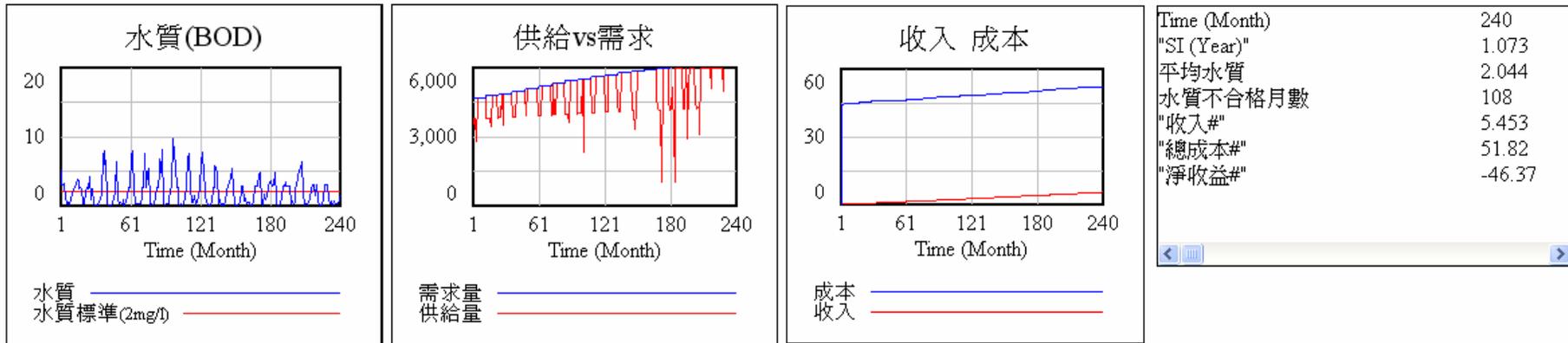
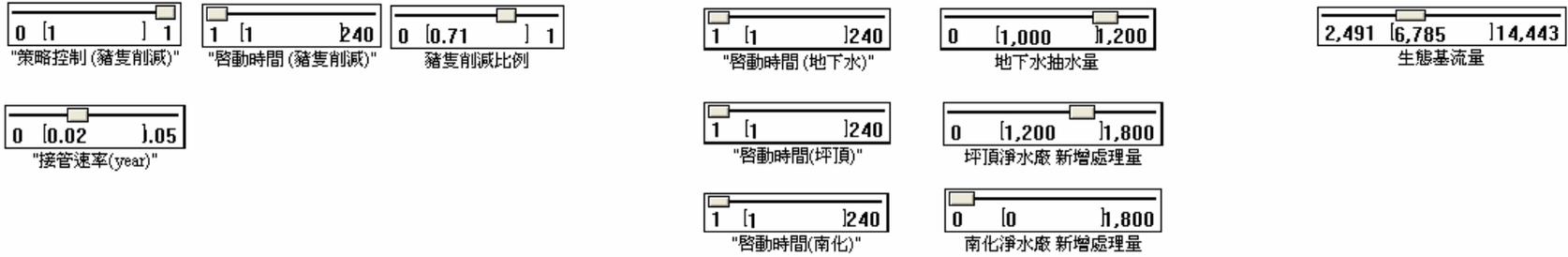


圖 7.2-3 複合型策略模擬結果圖(時刻初即加入改善策略)(3)

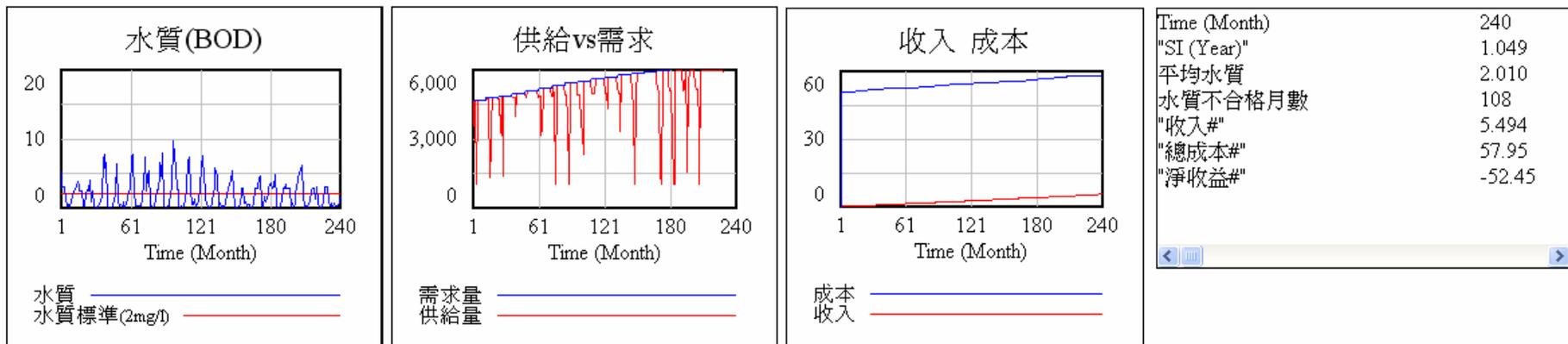
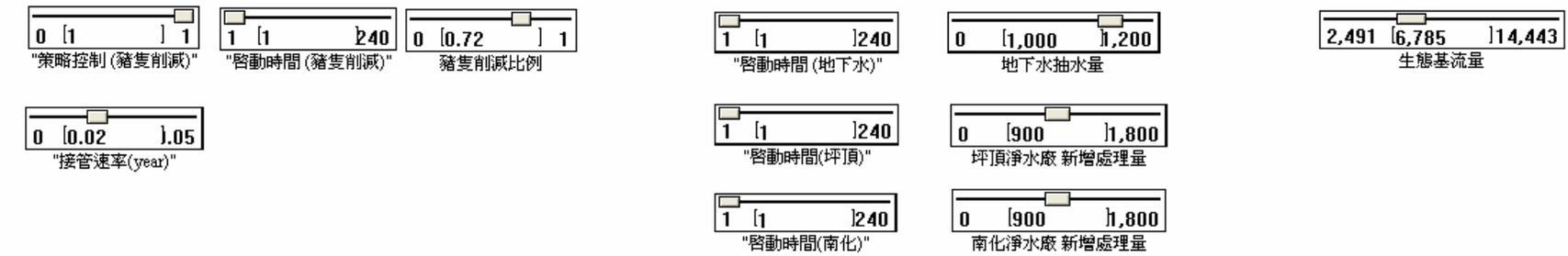


圖 7.2-4 複合型策略模擬結果圖(時刻初即加入改善策略)(4)

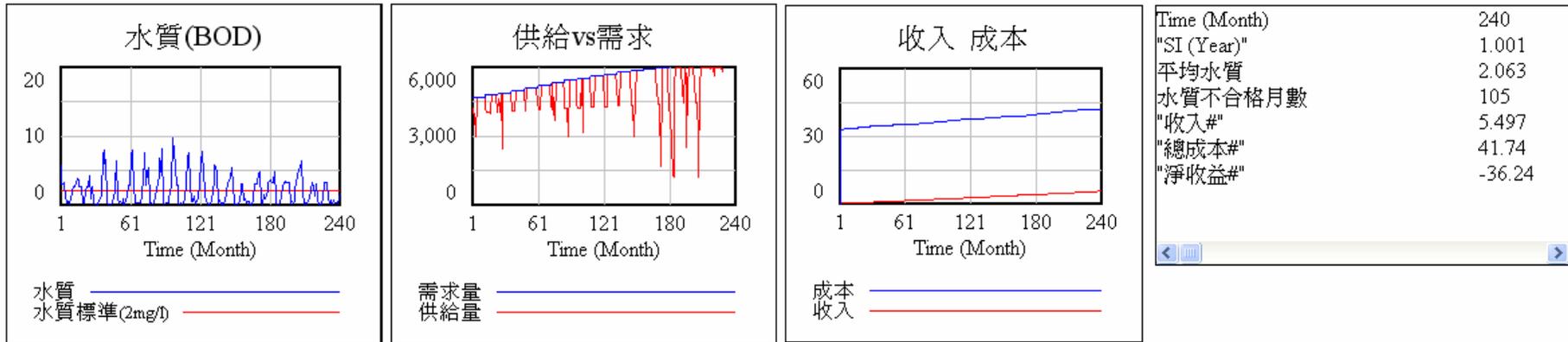
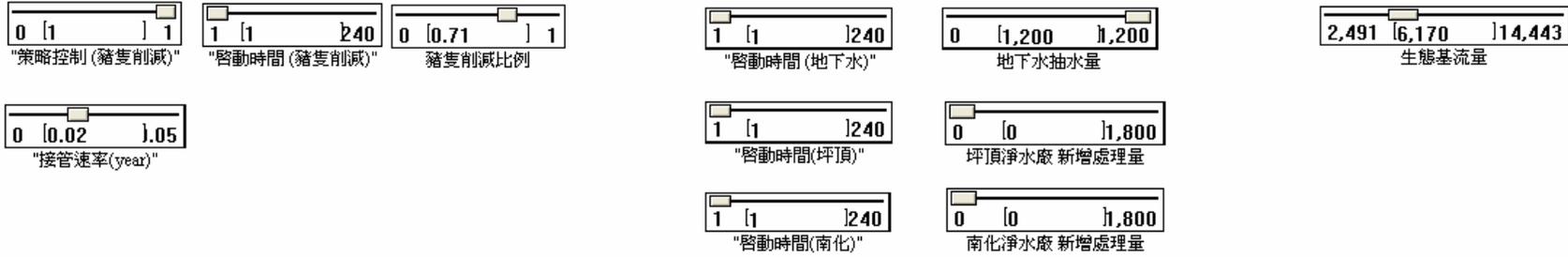


圖 7.2-5 複合型策略模擬結果圖(時刻初即加入改善策略)(5)

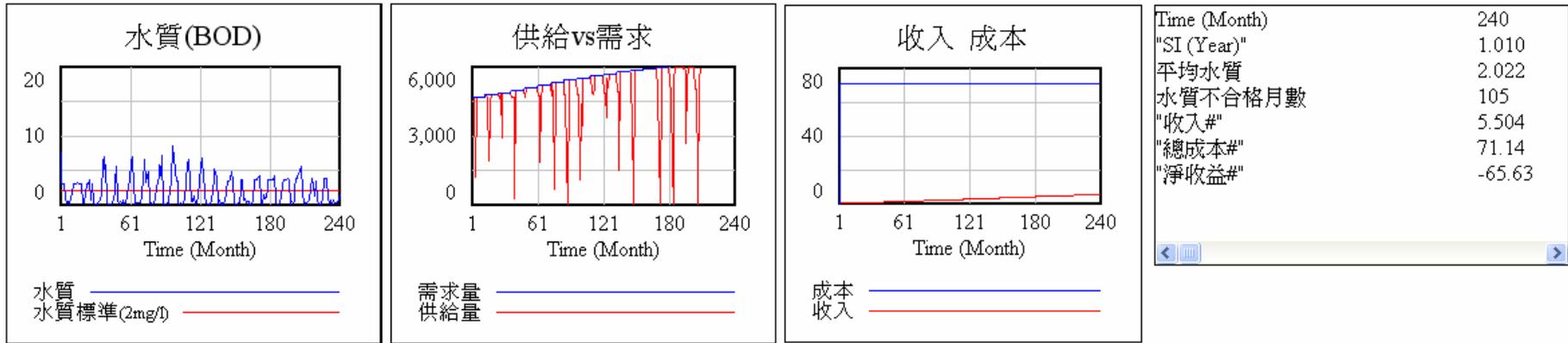
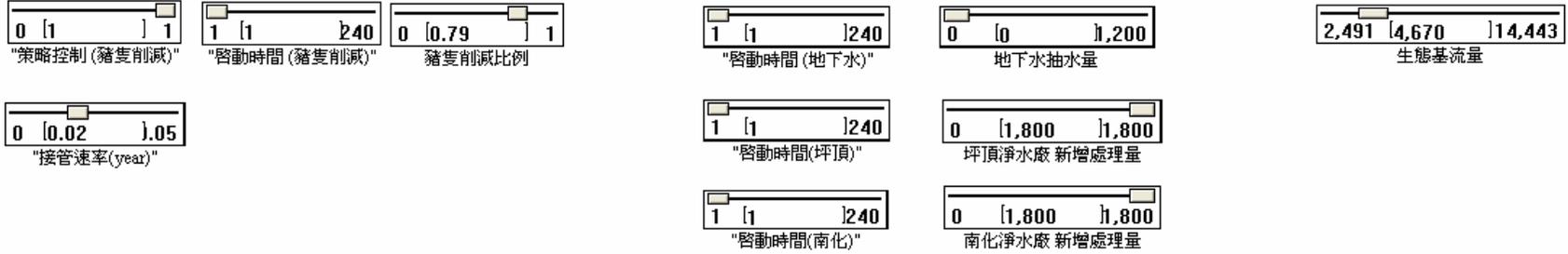


圖 7.2-6 複合型策略模擬結果圖(時刻初即加入改善策略)(6)

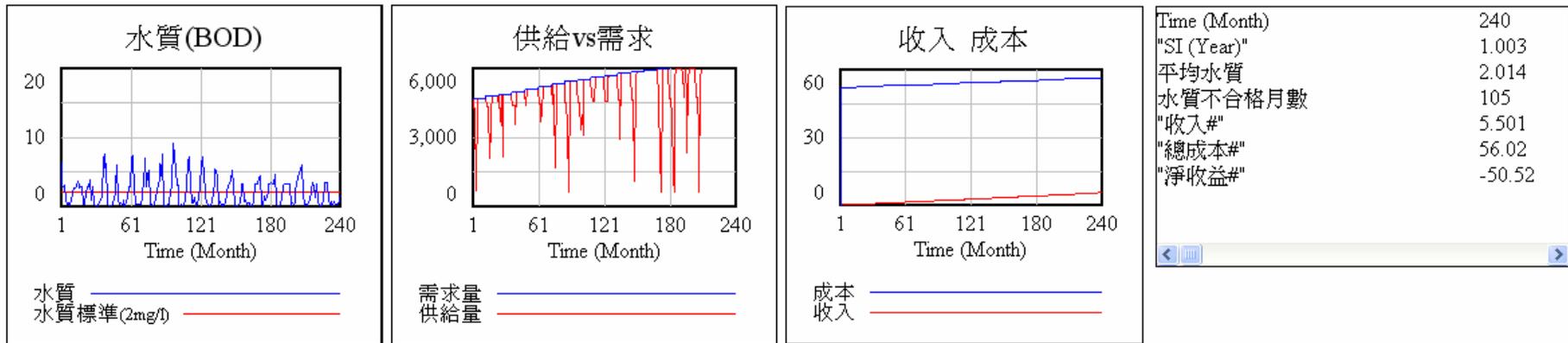
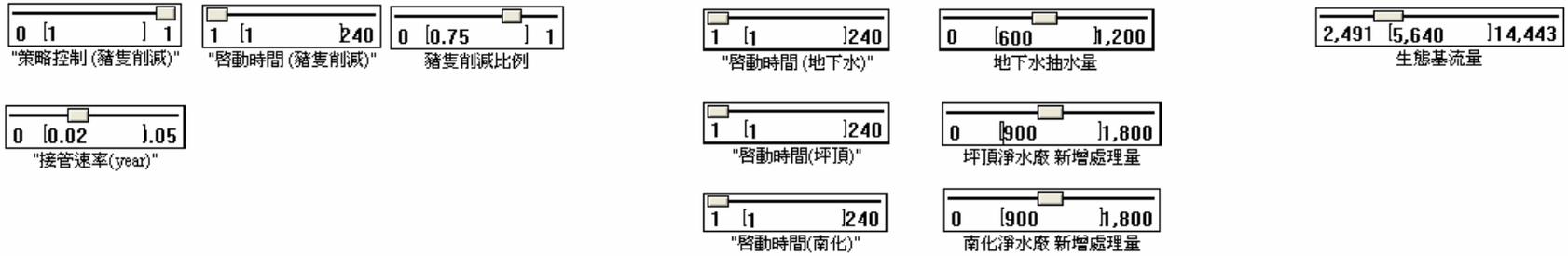


圖 7.2-7 複合型策略模擬結果圖(時刻初即加入改善策略)(7)

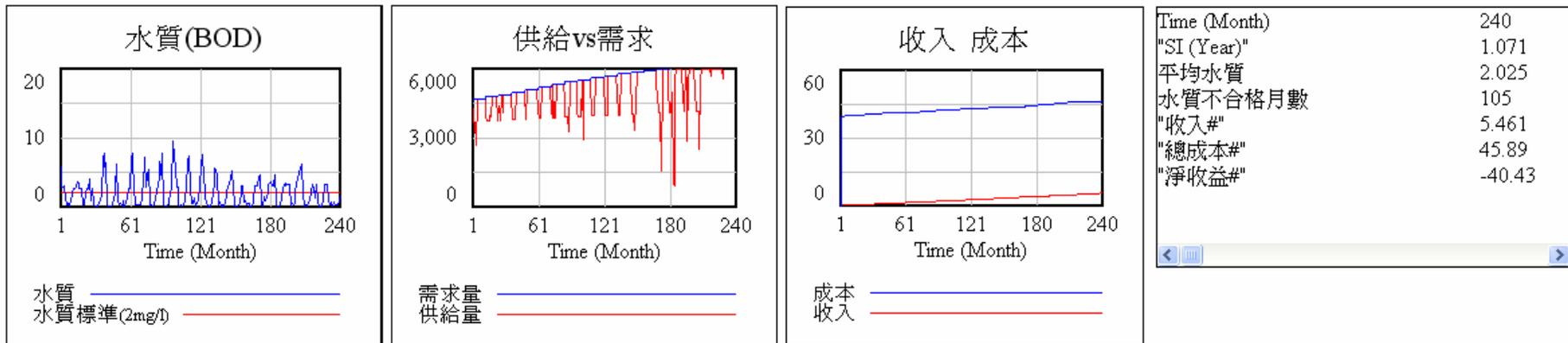


圖 7.2-8 複合型策略模擬結果圖(時刻初即加入改善策略)(8)

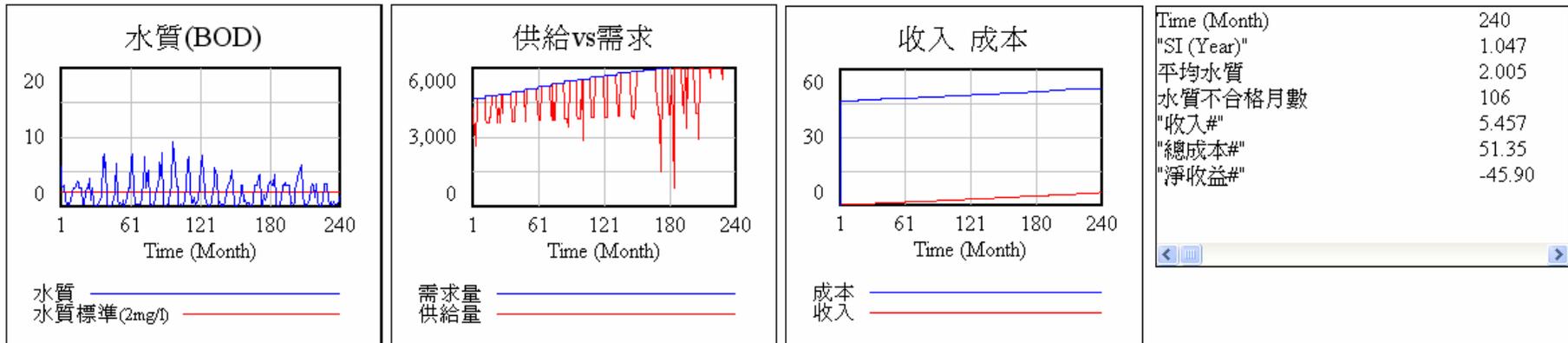
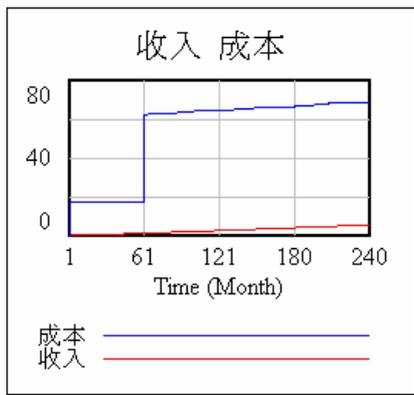
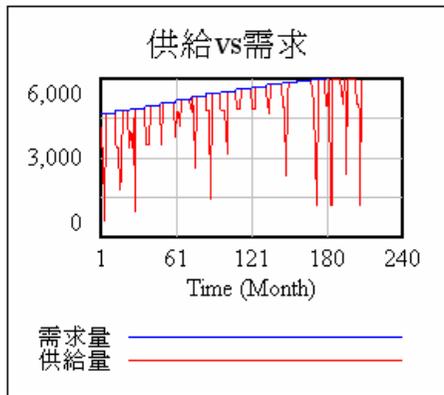
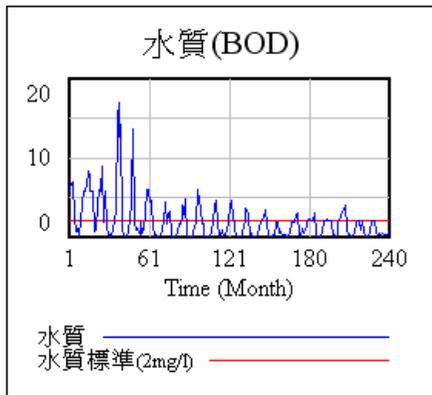
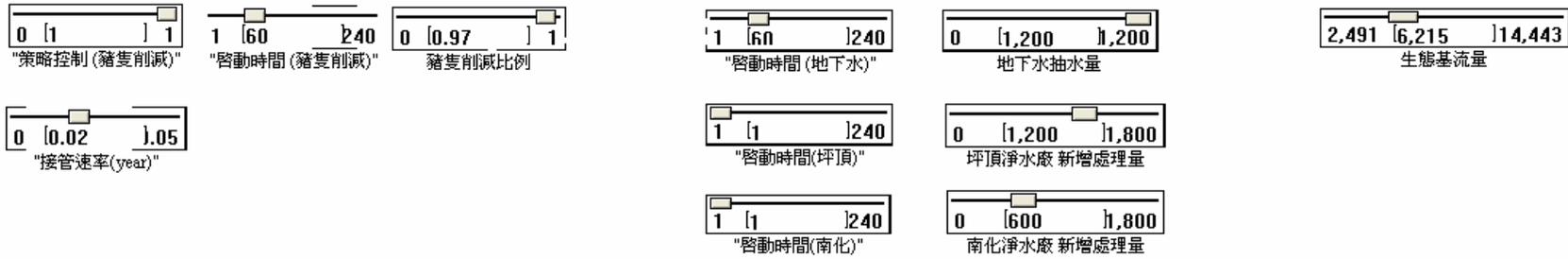


圖 7.2-9 複合型策略模擬結果圖(時刻初即加入改善策略)(9)



| | |
|--------------|--------|
| Time (Month) | 240 |
| "SI (Year)" | 1.000 |
| 平均水質 | 2.005 |
| 水質不合格月數 | 83 |
| "收入#" | 5.522 |
| "總成本#" | 68.33 |
| "淨收益#" | -62.81 |

圖 7.2-10 複合型策略模擬結果圖(第五年才加入改善策略)(1)

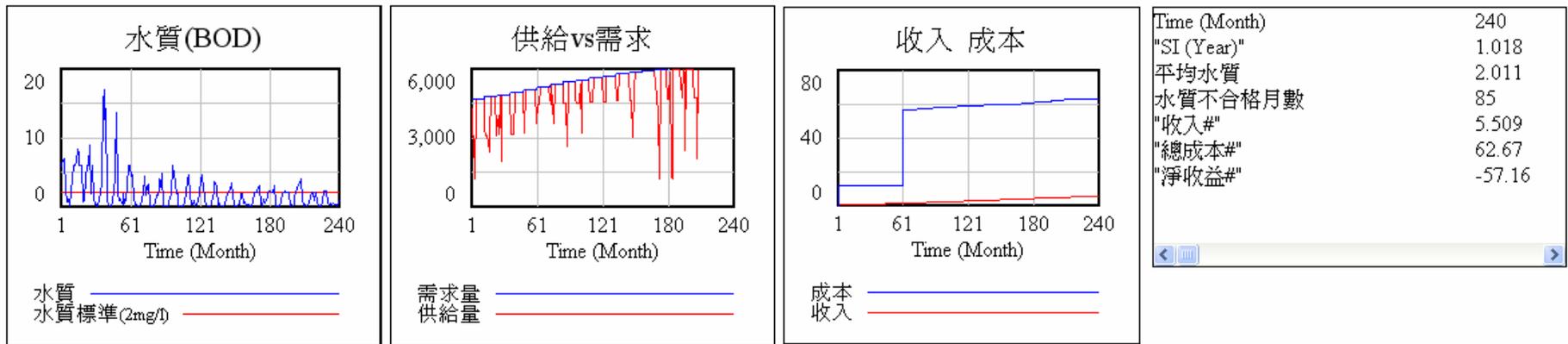
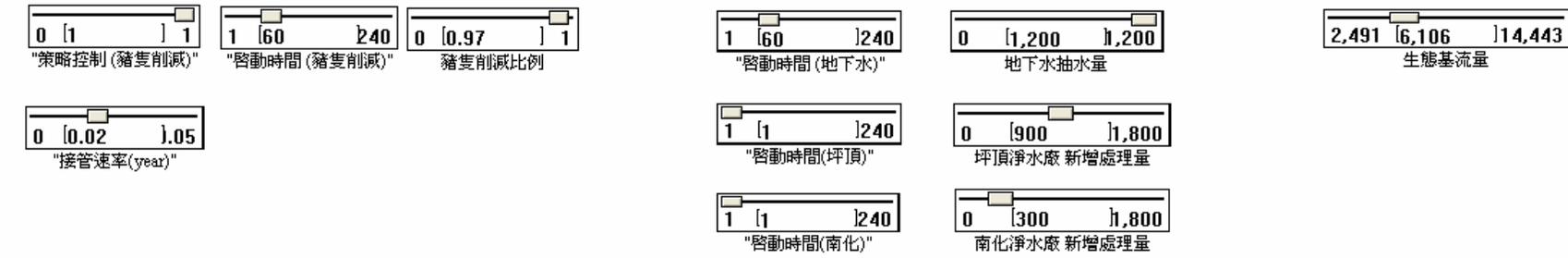


圖 7.2-11 複合型策略模擬結果圖(第五年才加入改善策略)(2)

第八章 結論與建議

8.1 結論

1. 本研究以系統動力學建立了一個高屏溪流域水量水質的綜合評估模式，其中水質模擬範圍上起高屏溪流域上游下至高屏大橋，水質計算假設模擬河段為單一河段 BOD 之質量守衡，並未隨著時間和距離而衰減，且尚未考慮屏東市之點污染。
2. 由模擬結果得知，對只考量水量或水質單一方案之單一型策略，其模擬結果顯示皆不能同時滿足水量和水質標準，所以必須以同時考量水量及水質多種方案之複合型策略，來解決水量和水質問題。
3. 本研究對各種策略組合皆計算其淨成本，複合型策略模擬結果顯示有 9 種以上之策略組合能同時滿足水量和水質標準，其中又以抽取地下水加上豬隻削減的策略組合之淨成本最低。
4. 若將各可行之複合型策略實施時間延後至第五年，則在給定的限制條件下，可同時滿足水量水質要求的策略組合數將會大幅減少至兩種，表示解決高屏溪水量及水質問題乃是刻不容緩。

8.2 建議

1. 本研究模擬之河川水質項目為生化需氧量 (BOD)，建議未來加入其他水質項目的模擬，例如氨氮 ($\text{NH}_3\text{-N}$) 及溶氧 (DO) 等，才能更全面的了解河川水質狀況，其中氨氮為造成河川優養化之重要營養鹽，同時也會增加淨水廠的處理成本，而高屏溪地勢陡峭，河床坡度大，再曝氣作用強，所以全流域之溶氧均能符合水體水質標準，但部份過飽合之河段則可能有優養化之現象；而模擬上述兩項水質項目可藉由 QUAL2E 水質模式模擬。
2. 本研究僅考慮高屏河流域上之點源污染，若未來點源污染逐步被控制後，則非點源污染對河川的影響將慢慢顯現出來，建議未來解決高屏河流域水質問題時也將非點源污染一併納入；水體污染之來源除了點源污染外，非點源污染亦是主要來源之一，暴雨所產生之逕流通過農地、林地、營建工地、都市或工業區，沖刷下來之污染物含有泥沙、營養鹽和少量重金屬，隨著地表坡度或排水設施流入承受水體，對受水體之環境造成影響，主要有對水庫水質之影響、對魚類生存之影響、遊樂區水質惡化、加重河川水質之淨化處理成本、阻塞河川及輸水渠道、港灣、河道及沿海地區淤積作用；而非點源污染評估所需模式可藉由 AGNPS 模式或 GWLF 模式模擬。
3. 本研究僅針對水量和水質的成本進行探討，未考慮各種水量和水質策略對社會、經濟和環境等所帶來的附加效益，建議未來加入策略的「成本效益評估」，衡量建設中之所有成本項目、效益項目，再加以比較總成本與總效益之相對差異，藉以決定是否投資興建。

參考文獻

1. Simonovic, Slobodan P., Hussam Fahmy and Amin El-Shorbagy “The Use of Object-Oriented Modeling for Water Resources Planning in Egypt.”, *Water Resources Management*, 11, 243-261, 1997.
2. Wood, Timothy S. and Michael L. Shelley, “A Dynamic Model of Bioavailability of Metals in Constructed Wetland Sediments”, *Ecological Engineering* 12, 231–252, 1999.
3. Azevedo, L. Gabriel T. de, Timothy K. Gates, Darrell G. Fontane, John W. Labadie and Rubem L. Porto, “Integration of Water Quantity and Quality in Strategic River Basin Planning”, *Journal of Water Resources Planning and Management*, ASCE, 85-97, 2000.
4. Campbell, Sharon G., R. Blair Hanna, Marshall Flug and John F. Scott, “Modeling Klamath River System Operations for Quantity and Quality”, *Journal of Water Resources Planning and Management*, ASCE, 284-294, 2001.
5. Guo, H.C., L.Liu, G.H.Huang, G.A.Fuller, R.Zou and Y.Y.Yin, “A System Dynamics Approach for Regional Environmental Planning and Management: A Study for the Lake Erhai Basin”, *Journal of Environmental Management*, 61, 93-111, 2001.
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, 239-261, 2002.
7. Jamu, D.M. and R.H. Piedrahita, “An Organic Matter and Nitrogen

- Dynamics Model for the Ecological Analysis of Integrated Aquaculture/Agriculture Systems: I. Model Development and Calibration”, *Environmental Modelling & Software* 17, 571–582, 2002.
8. Biois, C.J.de, H.G.Wind, J.L.de Kok and Koppeschaar, “Robustness of River Basin Water Quality Models”, *Journal of Water Resources Planning and Management*, ASCE, 189-199, 2003.
 9. Burak, Güneralp and Yaman Barlas, “Dynamic Modelling of a Shallow Freshwater Lake for Ecological and Economic Sustainability”, *Ecological Modelling* 167, 115–138, 2003.
 10. Stave, Krystyna A., “A System Dynamics Model to Facilitate Public Understanding of Water Management Options in Las Vegas.”, *Journal of Environmental Management*, 67, 303-313, 2003.
 11. Yeh, Shin Cheng, Chao An Wang, Hui Ching Yu, “Simulation of Soil Erosion and Nutrient Impact Using An Integrated System Dynamics Model in A Watershed in Taiwan”, *Environmental Modelling & Software* 21, 937–948, 2005.
 12. 溫清光，「高屏溪流域河川水質規劃」，經濟部水資源統一規劃委員會，國立成功大學環境工程研究所，1989。
 13. 溫清光，「高屏溪河川水污染防治計劃可行性之檢討」，台灣省政府環境保護處，國立成功大學環境工程研究所，1991。
 14. 「高屏溪流域污染整治規劃」，行政院環境保護處，巨廷工程顧問股份有限公司，1993。
 15. 李漢鏗，「河川污染防治策略研究-水庫操作及跨域引水對河川水質之影響」，行政院環境保護署，逢甲大學水利工程學系，1994。

16. 高訓澎，「河川設計流量風險設計及烏溪個案研究」，逢甲大學土木及水利工程研究所碩士論文，1994。
17. 陳奎麟，「河川流域水質管理之研究：總量管制管理系統之發展與建立」，國立中央大學環境工程研究所碩士論文，1996。
18. 李漢鏗，「河川水質及水量關係之探討」，台灣省政府環境保護處，逢甲大學水利工程學系，1997。
19. 郭振泰，「高屏溪、東港溪污染量調查及整治規劃之高屏溪總量管制」，行政院環境保護署，國立臺灣大學土木工程研究所，1998。
20. 陳亭玉，「河川流域水土資源承载力與永續力評量模式之發展」，國立中央大學環境工程研究所碩士論文，1999。
21. 張乃斌，「事業廢水管理制度研究-流域污染源削減最佳化策略與管理制度之研究」，行政院環境保護署，成大研究發展基金會，2000。
22. 李賢明，「南化水庫與高屏溪攔河堰聯合運用研究」，國立台灣海洋大學碩士論文，2000。
23. 藍文俊，「淡水河流域水質模式應用於污水廠佈置研究」，淡江大學水資源及環境工程學系碩士班碩士論文，2000。
24. 黃聖授，「高屏溪涵容能力之評估」，國立中山大學環境工程研究所碩士論文，2001。
25. 李魁裕，「高屏溪水質水量改善之成本效益分析」，國立臺北大學資源管理研究所碩士論文，2001。
26. 顏榮祥，「台灣南部地區跨流域水資源統籌調配動態模式建立之研究」，國立成功大學資源研究所博士論文，2001。

27. 黃鈺珊，「高屏溪流域永續發展水資源政策規劃之系統動力學研究」，國立中山大學公共事務管理研究所碩士論文，2001。
28. 李明益，「河川流域水管理系統動力模式之發展與建立」，國立中央大學環境工程研究所碩士論文，2002。
29. 陳明業，「淡水河水資源系統動力模式與永續管理策略之研究」，國立台灣大學生物環境系統工程學研究所碩士論文，2002。
30. 李孟璵，「高雄地區愛河水環境生態復育及水污染防治策略分析」，國立中山大學海洋環境及工程研究所碩士論文，2002。
31. 藍國禎，「質量平衡方法在水資源開發政策環境影響評估之應用」，逢甲大學水利工程學系碩士班碩士論文，2002。
32. 韓釗，「系統動力學—探索動態複雜之鑰」，2002。
33. 周克強，「甲仙攔河堰引水量可靠度之研究」，國立屏東科技大學土木工程系碩士班碩士論文，2003。
34. 鄭詩音，「我國水污染防治制度之比較研究—高屏溪流域之應用」，國立中山大學經濟學研究所碩士論文，2003。
35. 張鴻斌，「高雄市都市發展與市中心區水污染之系統動力學研究」，國立中山大學公共事務管理研究所碩士論文，2003。
36. 吳芳池，「河川流域管理-WASP 水質模式評估愛河之整治方案」，國立中山大學環境工程研究所碩士論文，2003。
37. 張原志，「豬場廢水處理規劃線上諮詢系統」，國立中興大學畜產學系碩士論文，2003。
38. 阮威堯，「系統動態方法在水資源開發政策環境影響評估之應用」，逢甲大學水利工程研究所碩士論文，2003。
39. 溫清光，「武洛溪排水（高屏溪流域）污染整治施政計畫」，行政

院環境保護署，財團法人成大研究發展基金會，2003。

40. 歐嘉維，「橫向構造物對河川自淨能力影響之研究」，逢甲大學水利工程學系碩士班碩士論文，2004。
41. 邱智慧，「水污染防治費對河川水質之影響」，臺灣大學環境工程學系碩士班碩士論文，2005。
42. 于嘉順，「以系統動力學為決策基礎應用於感潮流域水質管理」，國立中山大學海洋環境及工程學系碩士論文，2005。
43. 朱博文，「高屏溪右岸舊鐵橋人工濕地淨化水質之評估」，屏東科技大學環境工程與科學系碩士論文，2005。
44. 張婉茹，「應用系統動力學於水資源策略模擬與分析-以台中地區為例」，交通大學土木工程學系碩士班碩士論文，2006。

