

行政院國家科學委員會專題研究計畫 成果報告

最佳管理作業(BMPs)最佳化配置之研究(2/2) 研究成果報告(完整版)

計畫類別：個別型
計畫編號：NSC 95-2221-E-002-253-
執行期間：95年08月01日至96年07月31日
執行單位：國立臺灣大學土木工程學系暨研究所

計畫主持人：郭振泰

計畫參與人員：博士班研究生-兼任助理：仇士愷

報告附件：國外研究心得報告

處理方式：本計畫可公開查詢

中華民國 96 年 12 月 20 日

最佳管理作業(BMPs)最佳化配置之研究(2/2)

Optimal Best Management Practices (BMPs) Placement
Strategies(2/2)

期末報告

計畫編號：： NSC 95-2221-E-002 -253

執行期限：95年8月1日至96年7月31日

主持人：郭振泰 國立台灣大學土木系教授

計畫參與人員：仇士愷 國立台灣大學土木所博士班研究生

摘要

近年來台灣地區已開始重視非點源污染之管制，對於非點源污染之控制方法，即最佳管理作業（Best Management Practices, 以下簡稱 BMPs），亦有不少相關研究。雖然現行之水土保持法規已提供吾人建置相關之水利設施以滯留暴雨時期所產生之逕流量和泥砂量；然而，這些水利設施之設置通常僅針對局部小區域來考慮，並未針對整個廣泛集水區域以系統方法加以考量。本研究之目的即以整個集水區、河道及水庫為研究範圍，建立一優選模式以決定集水區內最佳管理作業之最佳化配置。本模式包括 3 個重要部份：集水區模擬模式（採用 HSPF 模式）；水庫水質模式（採用 CE-QUAL-W2 模式）及優選模式（採用遺傳演算法 GAs）。

本研究以翡翠水庫為例，利用遺傳演算法進行求解，採用總年計成本最小為優選模式之目標函數，限制式則為污染物濃度須達標準，包括總磷（Total Phosphorus, TP）、總懸浮固體（Total Suspended Solid, TSS）等水質項目須達到水質標準。研究中模擬民國 91 至 92 年共 2 年之流量及污染量及水庫水質模式，以模擬逕流量在河道及水庫中之實際情形，所獲致之結果可提供水庫集水區未來實施非點源污染管制時之參考。

Abstract

The nonpoint source pollution control is in the beginning stage in Taiwan. The techniques of nonpoint source pollution control, that is Best Management Practices (BMPs), already have several related research. Although the soil and water conservation law provides regulations that the land developer should capture the exceeding stormwater runoff and sediment due to any significant development in the watershed. Most of stormwater controls have been designed at the local, or on-site level, but not at the regional or watershed level in a comprehensive and systematic manner. The purpose of this study is to establish an optimization model for the optimal placement of structural Best Management Practices (BMPs) at the watershed scale. The complete model consists of three interacting components, i.e. a watershed water quality simulation model (HSPF model), a reservoir water quality model (adopted CE-QUAL-W2 model) and an optimization model base on the Genetic Algorithms (GAs).

This research takes Fei-Tsui Reservoir for example. In the optimization model, the objective function is to minimize the total annual cost of BMPs and constraints consider water quality standards for the concentrations on total phosphorus (TP) and total suspended solid (TSS), etc. This study simulates the discharge and pollutant loading in 2002-2003. Also, the reservoir water quality model is embedded to simulate the pollutant concentration variation after the pollutant flow into Fei-Tsui Reservoir. The result can provide the decision makers with a clear and useful way for nonpoint pollution control and management at the watershed scale.

目錄

摘要.....	I
Abstract.....	II
表目錄	V
圖目錄	VI
第一章 緒論	1-1
1.1 研究緣起與目的.....	1-1
1.1.2 研究方法與步驟.....	1-1
1.3 章節介紹.....	1-3
第二章 文獻回顧	2-1
2.1 非點源污染之研究.....	2-2
2.2 水庫水質之研究.....	2-5
2.3 最佳管理作業之研究.....	2-7
第三章 第一年成果概述	3-1
3.1 擇定研究區域.....	3-1
3.2 集水區分區.....	3-3
3.3 模式模擬結果.....	3-3
3.3.1 水文模擬.....	3-4
3.3.2 懸浮固體物模擬.....	3-5
3.3.3 水質模擬.....	3-13
第四章 水庫水質模式	4-1
4.1 W2 模式介紹.....	4-1
4.2 W2 模式與 BASINS 串聯模擬.....	4-10
4.3 模式模擬結果.....	4-11
4.3.1 水理部份.....	4-11
4.3.2 水質部份.....	4-16
第五章 模式建立	5-1
5.1 最佳化模式之建立.....	5-1
5.1.1 目標函數.....	5-1

5.1.2 限制式.....	5-2
5.2 最佳管理作業擇定.....	5-3
5.2.1 最佳管理作業類型.....	5-3
5.2.2 BMPs 成本函數.....	5-3
5.2.3 BMPs 設置條件.....	5-4
5.2.4 BMPs 特性.....	5-5
5.3 最佳管理作業可能位址.....	5-6
5.4 模式求解.....	5-12
5.4.1 求解演算流程.....	5-13
5.4.2 最佳解.....	5-20
第六章 結論與建議	6-1
6.1 結論.....	6-1
6.2 建議.....	6-2
參考文獻	參-1

表目錄

表 2.2-1 常用於評估湖泊及水庫的優養化情形模式	2-8
表 3.3-1 各集水區面積及其所佔比例	3-5
表 3.3-2 PWATER 透水區水文參數表(北勢溪集水區).....	3-6
表 3.3-3 各集水區年流量結果比較表	3-8
表 3.3-4 SEDMNT 模組水文參數表(北勢溪集水區).....	3-10
表 3.3-5 SEDTRN 模組水文參數表(北勢溪集水區).....	3-10
表 3.3-6 各集水區懸浮固體量結果比較表	3-12
表 3.3-7 PQUAL 透水區正磷酸鹽水質參數表(北勢溪集水區).....	3-14
表 3.3-8 PQUAL 透水區氨氮水質參數表(北勢溪集水區).....	3-15
表 3.3-9 PQUAL 透水區硝酸氮及亞硝酸氮水質參數表(北勢溪集水區).....	3-16
表 3.3-10 PQUAL 透水區生化需氧量水質參數表(北勢溪集水區).....	3-17
表 3.3-11 翡翠水庫集水區總磷推估結果比較表	3-22
表 5.2-1 3 種 BMPs 去除效率表	5-5
表 5.2-2 BMPs 經濟壽命	5-6
表 5.2-3 BMPs 操作及維護成本	5-6
表 5.2-4 各 BMPs 之年計成本	5-6
表 5.3-1 各子集水區 BMPs 可能設置個數	5-10
表 5.3-2 各 BMPs 容許排水面積	5-10
表 5.3-3 各子集水區 BMPs 設置個數	5-11
表 5.3-4 各子集水區 BMPs 設置個數	5-12
表 5.4-1 遺傳演算法採用方式	5-17
表 5.4-2 遺傳演算法各參數設定值	5-17
表 5.4-3 GALib 各選取元件	5-18
表 5.4-4 各水質項目及其限制條件	5-20
表 5.4-5 較佳解 BMPs 配置情形	5-21
表 5.4-6 較佳解水庫取水口濃度情形	5-22

圖目錄

圖 1.2-1 研究流程圖	1-2
圖 3.1-1 翡翠水庫水質採樣點位置圖	3-2
圖 3.2-1 集水區分區圖	3-3
圖 3.3-1 北勢溪集水區 2002 年水文模擬曲線(檢定).....	3-7
圖 3.3-2 北勢溪集水區 2003 年水文模擬曲線(驗證).....	3-7
圖 3.3-3 實測流量與懸浮固體物迴歸分析圖	3-9
圖 3.3-4 北勢溪集水區 2002 年懸浮固體模擬曲線(檢定)	3-11
圖 3.3-5 北勢溪集水區 2003 年懸浮固體模擬曲線(驗證)	3-11
圖 3.3-6 北勢溪集水區 2002 年正磷酸鹽模擬曲線(檢定)	3-13
圖 3.3-7 北勢溪集水區 2003 年正磷酸鹽模擬曲線(驗證)	3-18
圖 3.3-8 北勢溪集水區 2002 年氨氮模擬曲線(檢定).....	3-18
圖 3.3-9 北勢溪集水區 2003 年氨氮模擬曲線(驗證).....	3-19
圖 3.3-10 北勢溪集水區 2002 年硝酸氮及亞硝酸氮模擬曲線(檢定).....	3-19
圖 3.3-11 北勢溪集水區 2003 年硝酸氮及亞硝酸氮模擬曲線(驗證).....	3-20
圖 3.3-12 北勢溪集水區 2002 年生化需氧量模擬曲線(檢定)	3-20
圖 3.3-13 北勢溪集水區 2003 年生化需氧量模擬曲線(驗證)	3-21
圖 3.3-14 北勢溪集水區 2002 年溶氧模擬曲線(檢定).....	3-21
圖 3.3-15 北勢溪集水區 2003 年溶氧模擬曲線(驗證).....	3-22
圖 4.1-1 水庫年溫度分佈概略圖	4-8
圖 4.1-2 藻類生化反應系統	4-9
圖 4.1-3 氮生化循環系統	4-9
圖 4.1-4 磷生化循環系統	4-9
圖 4.1-5 溶氧系統	4-10
圖 4.2-1 翡翠水庫二維水理模擬網格分割圖	4-12
圖 4.3-1 水位比較圖(2002)	4-13
圖 4.3-2 水位比較圖(2003)	4-13
圖 4.3-3 大壩站分層水溫模擬與實測結果(2002)	4-14
圖 4.3-4 大壩站分層水溫模擬與實測結果(2003)	4-15
圖 4.3-5 大壩站上層總懸浮固體模擬與實測結果	4-16
圖 4.3-6 大壩站上層葉綠素 a 模擬與實測結果	4-17
圖 4.3-7 大壩站上層磷酸鹽模擬與實測結果	4-17
圖 4.3-8 大壩站上層氨氮模擬與實測結果	4-18
圖 4.3-9 大壩站上層硝酸鹽氮模擬與實測結果	4-18
圖 4.3-10 大壩站上層生化需氧量模擬與實測結果	4-19

圖 4.3-11 大壩站上層溶氧模擬與實測結果	4-19
圖 5.3-1 翡翠水庫集水區土地使用情形	5-7
圖 5.3-2 翡翠水庫集水區坡度分佈情形	5-8
圖 5.3-3 各集水區可能滯留池設置位址	5-8
圖 5.3-4 各集水區可能草溝設置位址	5-9
圖 5.3-5 各集水區可能入滲溝設置位址	5-9
圖 5.4-1 演算流程圖	5-14
圖 5.4-2 遺傳演算法演算流程圖	5-15
圖 5.4-3 子集水區與 BMPs 物件導向示意圖	5-19

第一章 緒論

1.1 研究緣起與目的

近年來隨著工業化、都市化及人口迅速成長的影響，山坡地過度的開發、土地的超限利用造成水庫集水區、河川及湖泊的優養化與淤積的問題已相當嚴重，水質日益惡化，影響水庫之營運效益與水資源的利用，然而國人知識水準已普遍提高，不僅在水量與水質方面的要求日增，對於自然生態環境的保育及生活品質也逐漸受到重視；根據國內外許多研究報告顯示，非點源污染的比重佔河川總污染量的50%~70%之間，所以河川中的非點源污染往往比點源污染來的重要，因此集水區污染源(包含點源及非點源)的有效控制，方能達成水資源的永續經營。

不同於以往研究大多僅針對集水區之非點源污染進行探討，本研究連接集水區與下游水庫進行非點源污染之分析，以有效控制集水區之非點源污染。本研究邀集國內外集水區與水庫水理、水質模式專家共同參與研究，俾利深入探討其間水理、水質之變化。同時在非點源污染之控制技術方面，本研究將利用不同類型與大小之最佳管理作業(BMPs)以系統分析之觀點尋求最佳之管理策略。

1.1.2 研究方法與步驟

湖泊、水庫污染的來源，主要由集水區之開發及其他人為的活動所引起，一般分為「點源」及「非點源」兩大類。點源係指家庭、社區及工業區等之廢污水經污水下水道收集，經處理後由排放管在一定之地點進入承受水體。集水區之非點源污染之主要來源為森林之樹葉分解、農業活動、道路污染物累積晴天堆積於地表之污染物，當降雨形成地表逕流後即隨之流入河川或水以「分散」之形式進入承受水體，因為這一類污染發生的頻率不規則，通常又不在一定「點」進入水體，故以「非點源」稱之。

為有效控制非點源污染，最佳的方法是採取「源頭控制」(source control)之策略，也就是在污染物在進入承受水體之前就加以減少或消除，控制非點源污染(NPS)的方法以及其他被認為有效的一些措施，即為「最佳管理作業」(Best Management Practices, BMPs)。因此，「最佳管理作業」包括非結構性(non-structural)及結構性(structural)兩種，結構性的BMPs是指建造的某種控制非點源污染的設施，如滯留池、草溝、緩衝帶等；非結構性的BMPs則是指一些管理上的措施如肥料使用管制、土地使用規劃等。

本研究之目的在探討分析在滿足水庫水質條件下，如何在集水區內以最佳的方式規劃結構性的BMPs，藉以有效地控制非點源污染，並透過集水區模式與水

庫水質模式之輔助與 BMPs 研究互相結合，以有效掌握水庫集水區非點源污染控制之技術。所獲致之結果可提供水庫集水區未來實施非點源污染管制時之參考。本研究之研究流程圖如圖 1.2-1 所示。

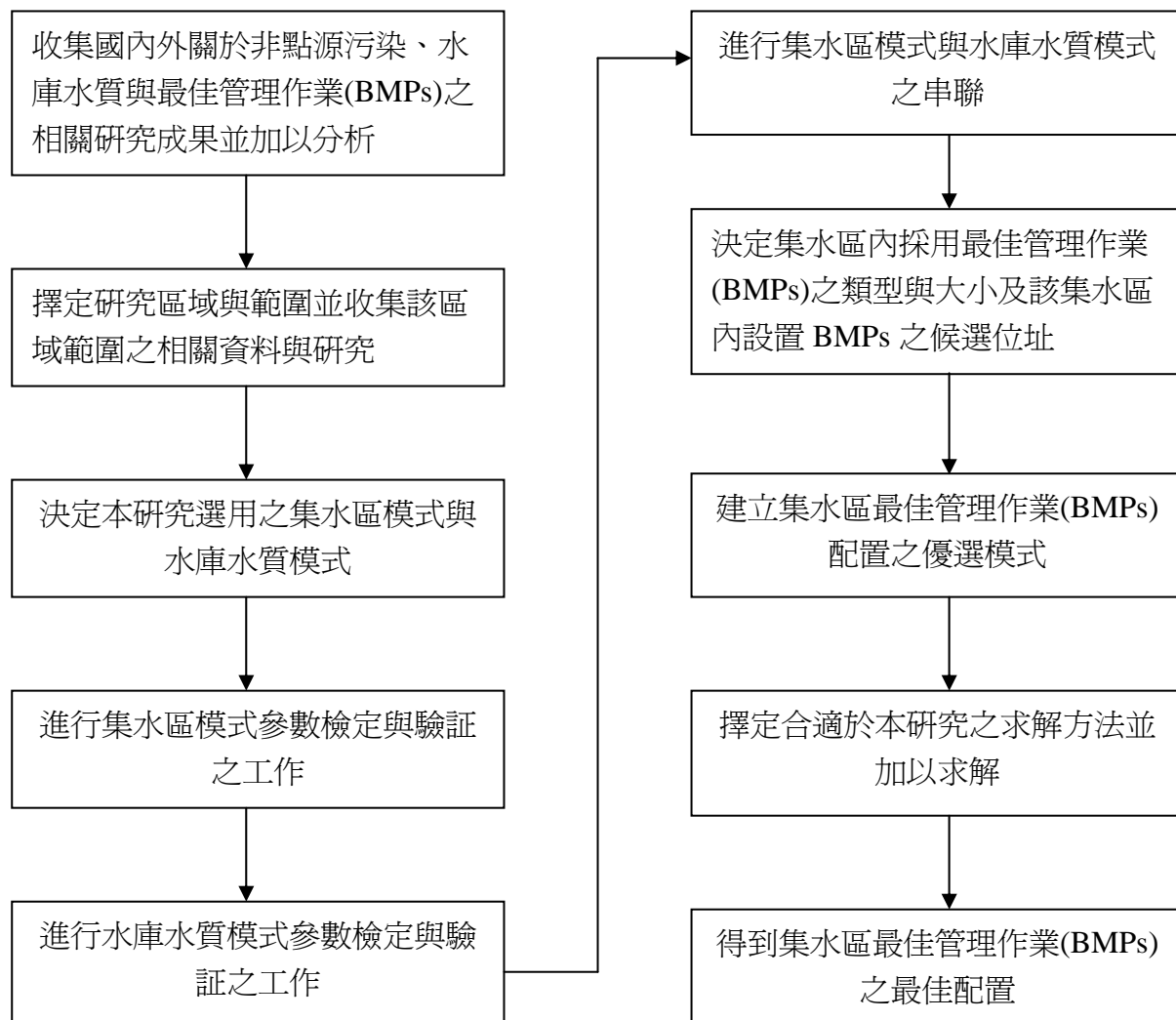


圖 1.2-1 研究流程圖

1.3 章節介紹

本研究計畫為 2 年期計畫「最佳管理作業(BMPs)最佳化配置之研究」之第 2 年度計畫，本報告書內容包括：第 1 章之研究緣起與目的；第 2 章為集水區模式、水庫水質模式及最佳管理作業之相關文獻回顧；第 3 章則簡述第 1 年度之研究成果，主要為集水區模式之檢定驗證；第 4 章為集水區結果結合水庫水質模式加以模擬，並對於水庫模式進行參數之校驗證；第 5 章為優選模式之建立，擇定優選方法加以求解，及其優選結果；第 6 章為本研究之結論與建議。

第二章 文獻回顧

非點源污染(nonpoint source pollution)，有別於點源污染，又稱為面污染源(areal source pollution)或擴散污染源(diffuse source pollution)，它的來源分散在各地；而不像點源污染，乃源自某一固定點。非點源污染源包括農業的活動(施肥、噴灑農藥等)，水源區遊客的活動、施工的污染、都市街道的污染(人類、車輛、落塵所造成)等。這些污染物平時累積在地面，但遇到足夠強度的雨量時，由於地面逕流或地下水的攜帶，將污染物輸送至河川或水體，造成河川或水體的污染。

非點源污染對河川水質的影響，需視降雨強度、上次降雨距離此次降雨之間隔(晴天數)及季節等因素而定。若發生一場大的暴雨，下雨之前的晴天數頗長，地面上已累積了許多污染物，則大量的逕流將攜帶可觀的污染量進入河川，尤其暴雨前期的沖刷(first flush)，污染情形最為嚴重，對河川的影響也最為明顯。

台灣的水庫，根據環保署的資料顯示，至少有一半是屬於優養狀況(卡爾森指數大於 50)，而水庫優養的主要污染源(N 及 P)，根據郭振泰等(2003)之研究，大部分由非點源污染源造成。台灣的水庫提供大部分的自來水源，故非點源污染的控制十分重要。

都市活動造成的污染量可觀，落塵(平時及降雨期，dry deposition and wet deposition)中所含的各種污染量也不少。都市的非點源污染包含各種重金屬及毒性物質，如何減少這些污染量值得吾人重視。流經都市的河川也常常因為大量非點源污染的排入，而造成水質惡化，使水生生態受到影響。

先進國家的水污染防治工作，在點源污染方面，大多已有良好的控制，故非點源污染的重要性相對地增加。因為非點源污染的控制十分不易，尤其農業非點源污染的控制更是困難，所以非點源污染的控制及雨水管理(stormwater management)，對先進國家而言，可說是未來的一大挑戰工作。美國已於 1990 年頒佈了雨水逕流排放管理方法，其中一項要求大都市及工業區必須使用「最佳管理作業」(Best Management Practices, BMPs)來控制雨水所造成的污染量(余嘯雷等，1993)。

因為暴雨的變化性大，欲實施非點源污染水質、水量的調查不是一件容易的事，比點源污染的調查還困難。另外，非點源污染量的推估在準確度上也相對地較低。以數學模式模擬非點源污染物的傳輸及流動也不容易，往往需同時考慮降雨—逕流過程(水文模式)、集水區污染物傳輸模式、河川水力模式(變量流)及河川水質模式(物質平衡)，模式的參數多，模式的檢定、驗證均不容易。

國內在非點源污染的研究工作，起步較晚，近年來由於各界的努力，已有一些不錯的成果，希望這方面的工作能受到更多的重視，使本土化的成果能更豐碩，提供國內作為水污染管理的良好依據。

2.1 非點源污染之研究

國外進行過不少非點源污染之研究，新近之研究成果敘述如下：

自 1996 年起，ASCE(American Society of Civil Engineers)與 USEPA(U.S. Environmental Protection Agency)著手建立 International Stormwater Best Management Practices(BMP) Database 網站，該網站收錄過去 10 多年來非點源污染研究之成果、相關之科技報告、相關軟體與資料庫，其累積相當豐富而完整的研究成果供各方參考。

Tetra Tech, Inc. (2005)受美國環保署(USEPA)之委託，比較分析超過 65 個非點源污染模式，依其輸入條件、適用範圍、模擬項目…等加以分類整理，並建議非點源污染模式未來將能夠提供廣泛的決策支援，如污染量削減，最佳管理作業方案研擬，以利往後集水區水質管理決策上之應用。

Zhai (2004)將原有的非點源污染模式 VAST 更新為新版之 WINVAST，該模式可使用於視窗介面下，較原 VAST 增加其使用上之便利性。另以經濟觀點研擬最佳管理作業之方案。

國外相關的模式應用也非常多，如美國農部所發展以網格 (cell) 為單位模擬集水區之單場暴雨事件中之非點源污染的 AGNPS (Agricultural Nonpoint Source Pollution Model)、主要用於農地為主的 ANSWERS (Aerial Nonpoint Source Watershed Environment Response Simulation Model)、模擬都市排水的 SWMM (Storm Water Management Model)、模擬都市暴雨逕流流量、水質或合流制下水道溢流的 STORM (Storage, Treatment, Overflow, and Runoff Model) 及考慮相當複雜的 HSPF (Hydrocomp Simulation Program Fortran Model) 等，Tony et al. (1989) 探討集水區的非點源污染類別中，以農業區的地表逕流為主要來源，就美國而言，約有 46 % 的泥砂、47 % 的總磷 (TP) 和 52 % 的總氮 (TN) 從農業區的污染源排放至水體；Wu (1993) 以 ANSWERS、AGNPS 及 CREAMS 在三個集水區對三十場降雨事件之逕流量及沈積量進行模擬。Chew et al. (1991) 將 HSPF 加以修改和校正應用於 North Reelfoot Creek 流域，對污染控制策略前後之水質變化進行分析。Moore et al. (1992) 使用經由 Chew 等修改之模式於美國 North Reelfoot Creek 集水區模擬、評估可執行之最佳管理作業。而美國環保署更於 1996 年發展了 BASINS 模式 (Best Assessment Science Intergrating Point and Nonpoint Source)，該模式結合 GIS 地理資訊系統、河川污染模式 QUAL2E 及非點源污染模式 NPSM，可用於集水區之非點源污染與河川水質數學模擬，能同時對點源與非點源污染執行模擬，並以圖表方式簡化資料輸入及操作。

Pionke et al. (1996) 發現在農地的非點源污染約有 60% 的硝酸鹽於非暴雨期時傳輸，而約有 70% 的溶解磷隨暴雨期之降雨逕流輸出。Tsihrintzis et al. (1996) 利用 HSPF 模擬美國佛羅里達南部的一保護區，其地表逕流、營養鹽、地下水傳輸的現象，並探討農地都市化後對當地造成的影響。Saget et al. (1996) 收集 7 個分

離式下水道都市的 80 次暴雨資料與 7 個合流式下水道都市的 117 次暴雨資料，探討暴雨初期初始沖刷的現象。Adema (1999)應用 BASINS/NPSM 於美國 Muddy Creek 集水區，分析不同程度都市化之土地利用對集水區的衝擊；Brun et al. (2000)應用 BASINS/HSPF 模式探討美國 Gwynns Falls 集水區土地利用改變，對集水區水文過程及水質的明顯衝擊；Eisele et al. (2001)應用 BASINS/HSPF 模式對德國西南邊之 Brugga 集水區進行逕流量和氮之模擬，探討到逕流過程的水量分配，說明參數設定的正確性與率定 (Calibration)、驗證 (Verification) 過程對模式模擬的重要性。Dorn et al. (2001)以美國 West Branch 集水區為案例，探討城市發展面積與水質改變之關係，說明 BASINS 在集水區水質管理決策上之應用。

我國早期的非點源污染研究由省環保處、環保署支助(蔣本基等，1987；李鴻源等，1990)。之後在 1996-1997 年期間；環保署委託成大編訂非點源污染控制規範(溫清光等，1995)。水資源局也委託台大編訂了水庫集水區非點源污染控制手冊(郭振泰等，1997)。

非點源污染數學模式方面，最常使用的有 AGNPS、HSPF、VAST 及 BASINS 等。AGNPS 是一較簡化的模式，可用來推估年污染量，VAST 適用於單場降雨 (single event)情形，而 HSPF、BASINS 為連續模擬模式，為一複雜模式，參數多，也需足夠的戶外資料來檢定、驗證模式。

國外進行非點源污染之相關研究甚多，而國內之相關研究，也已積極展開，以下就較常被運用之模式加以簡要說明 (廖述良等，1994)。

1. AGNPS 模式

AGNPS(Agricultural Nonpoint Source Pollution Model)為美國農業部在 1987 年所發展，用於模擬單場暴雨事件中之非點源污染，以網格為單位模擬集水區之土壤流失及總磷、總氮等水質參數。基本原理為暴雨產生沖蝕及逕流，引起流失 (loss) 及運移 (transport) 作用，經由分析此二作用之機制，以及集水區之水質、水文相關參數，估算非點源之污染負荷量，並且可與 GIS 相連，顯示排起源及污染潛勢之分佈情形。

AGNPS 為一甚易使用之模式，如能有足夠本土化之資料，將模式中重要參數如土壤可蝕性因子、地表作物、水土保持、施肥等因子加以檢定，則將更具應用之價值。另一方面，AGNPS 對水文、河川水理方面處理較粗糙，對 BMP 之模擬能力亦僅限於草溝或草帶之簡易計算，是其缺點。

國內之應用有林俐玲 (1991) 結合 AGNPS 與 GIS 推估集水區之土壤沖蝕潛能，許銘熙等 (1991) 模擬三峽地區之暴雨水質，蔡政賢等 (1993) 將模式應用於寶山水庫之總磷總量管制，另外有魏敏裕與張尊國 (1993) 與李炎任、邱金火 (1991) 等之相關研究。

2. SWMM 模式

SWMM(Storm Water Management Model)適合都市排水系統之水流及水質模擬。根據變量流運動波理論，將模式分為地表逕流和管線輸水兩部份，地表逕流之模擬演算在人孔處匯入排水幹線之水流歷線，管線輸水部份為演算排水幹線中

各斷面之流量、水位及各人孔之溢流量。模擬的污染物參數有生化需氧量、化學需氧量、凱氏氮、總磷，以及懸浮固體物濃度、重金屬含量等。

楊德良、郭振泰等(1985,1987)應用 SWMM 研究探討台北市雨水下水道系統之功能及設計模式，李鴻源等(1990)模擬台北縣三峽鎮都市區及農業區之非點源污染流出負荷。

3. ANSWERS 模式

ANSWERS(Aerial Nonpoint Source Watershed Environment Response Simulation Model)主要用於以農業為主之集水區，以分散式參數進行模擬，屬於網格型模式，適合與 GIS 相連接。模式由水文模式、泥沙傳輸模式以及水流移動之描述模式所組成，可進行集水區規劃及水質推估，進一步評估土地利用及農業經營對集水區之水質影響。

吳瑞賢等(1991)將 ANSWERS 與 GIS 連接，模擬石門水庫之暴雨逕流及沖刷量。

4. VAST 模式

VAST(Virginia STorm Model)模式適用於都市或農業區多子集水區之模擬，是由美國維吉尼亞大學土木系於 1987 年所發展。由計算降雨損失，產生地表逕流歷線，能夠預測和計算各子集水區的水文歷線和污染物負荷歷線，可對於滯留池、草溝及草帶等 BMP 結構物進行模擬。本計畫即使用 VAST 模式進行石門水庫之非點源污染研究。

郭振泰等(1995)應用此模式於翡翠水庫集水區，進行非點源污染模式之探討研究。張尊國等(1995)應用 VAST 模式於台北水源特定區，進行水質管理模式之建立，而溫清光等(1996)亦曾使用 VAST 模擬南部某農場暴雨逕流量水質之變化。

5. HSPF 模式

HSPF(Hydrocomp Simulation Program Fortran Model)為一個甚完整的模擬模式，其根據降水、溫度等水文參數以及土地利用型態、土壤類型、農業經營等為基本資料，可模擬水質水量及各類有機及無機污染物，可分析連續性水平衡、污染物之產生量、轉換及傳輸，可得逕流、沈積物及使用者指定污染物之時間序列結果以及河川水質之變化及傳輸。由於模式相當龐大，可能在工作站以上的電腦中執行較佳。

李鴻源等(1990-1992)利用 HSPF 模式模擬大漢河流域都市區、農業區及山區暴雨逕流所產生之水質衝擊，並率定適用於大漢河流域之參數值，對率定參數進行敏感度分析(Sensitivity Analysis)，建立完整的水文、水理與水質模式；李建忠(1996)利用現場調查及文獻資料所得之水質、水量資料，率定 HSPF 模式中之參數，應用 HSPF 模式推估瑪家水庫懸浮固體(Suspended Solids, SS)及總磷負荷量，再以零維模式(Zero-order Model)分析總磷濃度及評估其優養潛勢(Eutrophic Potential)；林鎮洋等(2001)應用 BASINS 中的 NPSM 模式(HSPF 視窗版)，對翡翠水庫集水區之魚溪和北勢溪二個子集水區進行連續性模擬，推估

集水區內之總磷污染負荷，並進行污染總量管制 (TMDL)，對污染源作削減分配策略，推行 BMP 最佳管理作業；王智益(2000)結合 NPSM 模式及 CE-QUAL-RIV1 模式，對北勢溪集水區進行水質模擬與分析，考慮不同暴雨型式之非點源污染傳輸情形，以及污染物進入河川後對河川水質所造成的影響；黃鈺真(2001)利用 BASINS/HSPF 模式推估曾文水庫集水區之懸浮固體物、總氮、總磷及生化需氧量 (Biochemical Oxygen Demand, BOD) 之負荷量，並比較 HSPF 模式與輸出係數法估計結果之差異；葉宗育(2001)以偵測濁度的光學方法，發展可即時監測懸浮固體濃度的儀器，應用於逮魚溪集水區，並以儀器監測結果作為 NPSM 模式之參數率定驗證，模擬集水區之總輸砂量。

同時，近年來 BASINS(Lahlou, et al., 1998)模式已被使用於翡翠水庫、曾文水庫、霧社水庫、牡丹水庫集水區(溫清光等，2003；郭振泰等，2003；林鎮洋等，2001)。BASINS 模式最近版本為 4.0 版，改進並增加許多模擬功能。因為 BASINS 模式需要詳細的戶外採樣資料加以檢定、驗證，故現場採樣也作了不少。國內有較多非點源污染資料的水庫集水區；包括德基水庫、曾文水庫、翡翠水庫等。

2.2 水庫水質之研究

在國外，三維水理模擬模式約始於 1970 年代。1970 年代初期，Simons(1973)發展湖泊的三維水理模式。之後，Oey 等人(1985)發展了河口的三維水理模式，Blumberg 等人(1987)發展了近海的三維水理模式，Nihoul 等人(1987)也發展河口的三維水理模式，Galperin 等人(1987)發展港灣以及河川系統的三維水理模式，Hamrick(1992)發展 EFDC 模式，Johnson(1993)等人驗證港灣的三維水理模式，Cercio 等人(1994)為了研究優養而發展了 CE-QUAL-ICM 模式，Sinha 等人(1998)發展自然河川中水流的三維水理模式，Di Toro 等人(2000)發展泥砂在淺灣中傳輸的三維水理模式。

在國內，早期的發展多半為二維或擬三維的水理、水質模擬模式，俞維昇(1987)研究水庫沈澱運動之特性；曾鈞敏等(1996)研究水庫二維的水理、水質模式；施上粟(1997)研究垂直二維傳輸模式。直到 1980 年代末期，三維水理、水質模擬模式才開始有相關的研究，但多為特例，並無深入之探討與應用。孫清誠(1987)以原始變數有限元素法研究二、三維粘性流場；王藝峰(1993)研究三維淺水流場；何柏鏘(1995)發展三維密度層變河口污染物擴散模式；權順忠(1996)發展河川彎道三維水理模擬模式；吳聖堂(1996)發展港區污染擴散問題之三維數值模式；朱國棟(1997)密閉圓筒中三維流場之數值模擬；劉英宏(1997)利用速度-渦度法解析三維黏性不可壓縮流場；蒲子超(1998)發展三維淡水河口傳輸擴散模式；楊敦凱(2000)以速度-渦度與有限元素法解析三維奈維爾-史托克斯方程式。國內在三維水理、水質模擬模式雖有相關之研究，但多為特例之應用，在大型河川、河口與水庫實際的應用上，較少作廣泛且深入之探討。

藻類在水體中的生長、死亡是一個複雜的過程，受自然環境(例如：陽光、風速)、水理、水文、生物化學反應等各種因素的影響。湖沼學家、海洋生物學家一直對浮游植物的消長作各種研究，由於這些研究的基礎，才有一些統計分析方法，對藻類濃度與影響其生長的因素(如總磷濃度)作相關性分析，供工程師作簡易的水質(優養程度)預測。之後，有 Vollenweider(1975)模式之發展，視水體為一黑盒子(black box)，分析湖泊、水庫優養與磷及水庫特性(如水深、水面積)之關係，一般為零維(zero-dimensional)模式，此種方法，將簡易的統計方法更提昇一步，具有實用價值。1970 年代初期，Chen(1970)及 Di Toro(1971)等人將以前的各種研究，更有系統加以整合，考慮水文、水理、生化反應現象，利用數學模式的方法，可以模擬或預測優養情形及水體中各污染物質的變化，在工程應用上算是一種突破性的創舉，此種機制性(mechanistic)的考慮，對藻類生長的物理、生化過程作完整的考慮，若有足夠野外資料配合，此種模式的結果將最精確，對水質預測分析及污染整治最有幫助。

水庫水理與水質之變化息息相關，故結合水理模式與水質模式為改善水質模擬結果精度之重要步驟。在國外，水庫、湖泊之水質問題早受到注意，對於其生態反應模擬則開始於 Steel(1965)，探討浮游植物與養分之間的關係。Markofsky(1973)等人，則考慮水庫有分層下之水質預測。之後 Vollenweider(1975)，Chapra(1977)，Larsen (1977) 等人及 Orlob(1978)等都整理分析複雜之優養及生態環境問題。而 Kuo 與 Thomann(1983)，曾發展出三維水理及優養模式應用於美國五大湖(The Great Lakes)。

在台灣，使用水庫優養一維水質模式始於郭振泰(1984)其應用水質數學模式(WQRRS)來研究德基水庫之一維水質優養模擬；隔年，郭振泰(1985、1987)等人，再利用 WASP 模式發展德基水庫二維水質模擬，以分析水庫在垂直與縱向之水質分佈情形。吳建鎡(1987)及 Kuo 等人(1994)，更進一步結合二維水理模式 LARM-2 及二維水質模式 WASP3 來模擬德基水庫之水質。郭振泰(1998-2000)等人(郭振泰，1998-2000)分別利用 Vollenweider 零維模式、W2 二維水理水質模式及 WASP5 模擬翡翠水庫水質。有關水庫水質、水理模式之發展及應用可詳見 Kuo 與 Yang(2002)，另水質模擬之發展及理論可詳見 Thomann and Muller(1987)及 Lung(2001)。表 2.2-1 列出了現今應用於湖泊與水庫優養化的主要模式：前三項屬於穩態模式，其他則屬於時變模式。

Vollenweider 模式 (Vollenweider, 1975) 及其負荷曲線圖主要是以零維及穩態的方式分析湖泊優養化程度。因為此模式的穩態與完全混合的假設，所以不適用於許多在湖泊實際觀測到的情形，較適用於初步規劃分析。EUTROMOD 是個簡要的集水區及湖泊模擬程序，僅適用於預測成長季節的平均變化。BATHTUB 則在空間的水力網格系統中，採用穩態的水與營養鹽平衡計算，並考慮對流、擴散傳輸以及營養鹽沉降的現象。BATHTUB 為經驗模式，並不能將水庫中負荷與水質反應的因果關係加以量化。

PHOSMOD 為總磷收支平衡模式，只考慮垂直水柱與沈澱，不適合進行縱向變化的計算。水中泥砂作用模式 (Lung, Sediment-Water Interaction Model, 1976)，是可隨時間變化的一維磷的變化模式，能模擬水層中泥砂微粒及磷的濃度。然而，此模式並不考慮藻類生物量或其他營養鹽的計算，如氮。

CE-QUAL-W2 模式前身為 LARM-2 (laterally averaged reservoir model) 二維水理模式，由 Buchak and Edinger (1982) 所發展，之後，Zou and Bai (2000) 修正 CE-QUAL-W2 模式。CE-QUAL-W2 模式為考慮橫向及縱向的二維模式，包含專為水庫設想的關於水動力與水質的程式。在台灣，CE-QUAL-W2 已成功地為許多大型水庫建立了模式，如翡翠、德基以及曾文水庫等。

美國環保署所使用的 WASP/EUTRO5 模式則是在模擬污染物的分配(WLA)與總量管制 (TMDLs) 最廣泛的模式(Ambrose et al., 1991)。WASP (Water Quality Analysis Simulation Program, 簡稱 WASP) 模式首先由美國曼哈頓學院發展，再經美國環保署加以修正。從 1970 年開始發展至今，中間經過多次的修改，曾用於不同水體 (包括河川、河口、湖泊及污水處理單元) 之水質規劃上，模擬對象由水體之生化需氧量 (BOD)、溶氧量 (OD)、保存性追縱劑 (conservative tracer) 如氯化物、浮游植物、養分，到複雜的毒性物質反應皆有，是一相當完備的模式。此模式已經被應用在台灣翡翠水庫。但此模式不足之處在於沒有獨立的水動力模式去計算每一層水體間的水流傳輸。

至於 CE-QUAL-ICM 模式 (Cerco, 1994) 與 EFDC 模式 (Hamrick, 1992) 都屬於三維模式，因此需要大量資料才能夠模擬。

2.3 最佳管理作業之研究

目前許多先進國家對於非點源污染的控制較為重視，BMPs 的研究也相當多，美國土木工程師學會 (ASCE) Urban Water Resources Research Council (UWRRC) 已著手建立 BMPs 資料庫，許多先進的研究成果亦發表於期刊文獻中 (Strecker et al, 2001; Yu et al, 2001; Harrell and Ranjithan, 2003)。

最佳管理作業在其他先進國家以漸漸成為集水區治理的主流，在國內亦已開始在慢慢的推廣，相關的研究報告如余嘯雷等(1992)、余嘯雷等(1993)、郭明杰(1995)、美商傑明公司(2000)、林鎮洋、余嘯雷(2000、2001)；郭振泰等(1995)曾探討分析各種集水區內非點源污染控制之最佳管理作業(BMPs)本土化功能及其比較，選定翡翠水庫集水區作為研究區域，利用 VANTU 模式進行非點源污染分析之模擬，並編定成手冊。環保署自民國八十三年起即著手非點源污染控制之研究，目前已完成施工活動、遊憩區、工業區、社區及農業區等非點源污染防治最佳管理作業手冊，並由網站上提供相關單位、公司及民眾參考。

表 2.2-1 常用於評估湖泊及水庫的優養化情形模式

模式	簡介	所需資料
Vollenweider	根據總磷 vs. 平均深度繪圖	總磷負荷量與平均深度
EUTROMOD	DO 與 TP 之回歸模式	天氣、流域與湖泊形態
BATHTUB	計算 DO、氮、磷與葉綠素之經驗模式	流域性質，逕流與營養鹽負荷量，與水庫形態
PHOSMOD	水層中總磷的時變模擬	分層時間間距，湖中磷與下層 DO 的起始狀況
Sediment-Water Interaction Model	水層沉降物中泥砂與磷的時變模擬	相似於 PHOSMOD 中所需資料與沉降物資料
CE-QUAL-W2	水庫中二維，橫向及垂直向的水質優養模式	水利幾何學，流體動力學，與水質資料
WASP/EUTRO 5	河流、湖泊與河口的三維優養模式	與 CE-QUAL-W2 所需的資料相似
CE-QUAL-IC M	河流、湖泊與河口的三維水質模式	與 WASP/EUTRO5 所需的資料相似
EFDC	三維之流體動力學與水質模式	需要相當廣泛完整之資料

龍梧生，2002 年，自行討論

在污染防治規劃管理方面，Peters(1973)研究河川流域養分總量計算，探討流域管理控制養份的排入。Chapra and Tarapchak(1976)考慮磷的改善，提出不同的方案以總磷做水質標準，考量經濟層面及選最佳方案。歐洲學者 Somlyody and Wets(1988)以磷的處理程度為目標函數，進行湖泊區域最佳管理。其他學者如 Thomann and Mueller (1987)對於優養規劃管理之理論均有介紹。應用優選法推求集水區滯洪池之最佳配置及土地利用管理上之研究有：Yeh and Labadie (1997); Zhen et al. (2004); Harrell and Ranjithan (2003)。在國內，周維興(1992)使用動態規劃及牛頓疊代法，考慮各污水處理廠養分去除率之結果，隨著養分在河川衰減後排入湖泊水體，在合乎標準水質條件限制下，以經濟考量為目標尋求各站應去除之最佳養分量。仇士愷(2004)則以動態規劃應用於翡翠水庫，在目標函數為總成本最低，總懸浮固體、總磷為限制濃度之情況下，得到翡翠水庫集水區之最佳管理作業(BMPs)之最佳化配置。

第三章 第一年成果概述

3.1 擇定研究區域

翡翠水庫為大臺北地區最重要的水源，根據歷年翡翠水庫操作年報資料顯示，其水質介於中養至優養程度。水庫優養化的原因乃由於水庫承受過量的磷(P)、氮(N)等營養鹽，使得藻類有足夠的養份，因而大量繁殖。而這些營養鹽的主要來源乃由於集水區內的農業(例如果園、茶園、檳榔樹之種植)、社區及居民活動(例如家庭污水及街道累積之污染物)、觀光遊憩(例如露營區廢水、垃圾)等各種污染。以上這些污染源，大部份屬於非點源污染物(Nonpoint Source Pollution, NPS)，平日累積於集水區，遇到暴雨期由於沖刷及水流攜帶而進入水體。最顯著的非點源污染負荷，乃為暴雨初期的沖刷。水庫優養現象將使水中溶氧之變動範圍增大(藻類行呼吸及光合作用之結果)，在低溶氧時，可能影響水生態，並使水質惡化。藻類死亡腐敗，也將消耗水中溶氧，使水中有異味及臭味，影響水之品質。另外，藻類使自來水處理設備堵塞，且增加水處理成本。尤其，水中有機物增加，加氯消毒後形成三鹵甲烷(THMs)，在高濃度時為有毒物質。因此如何控制翡翠水庫之優養及水質污染，實為當前重要之課題，故本研究選定翡翠水庫及其集水區為應用區域。翡翠水庫管理局於主要支流設有五處水質採樣點，於水庫水域內設有八處水質採樣點，其相關位置如圖 3.1-1。

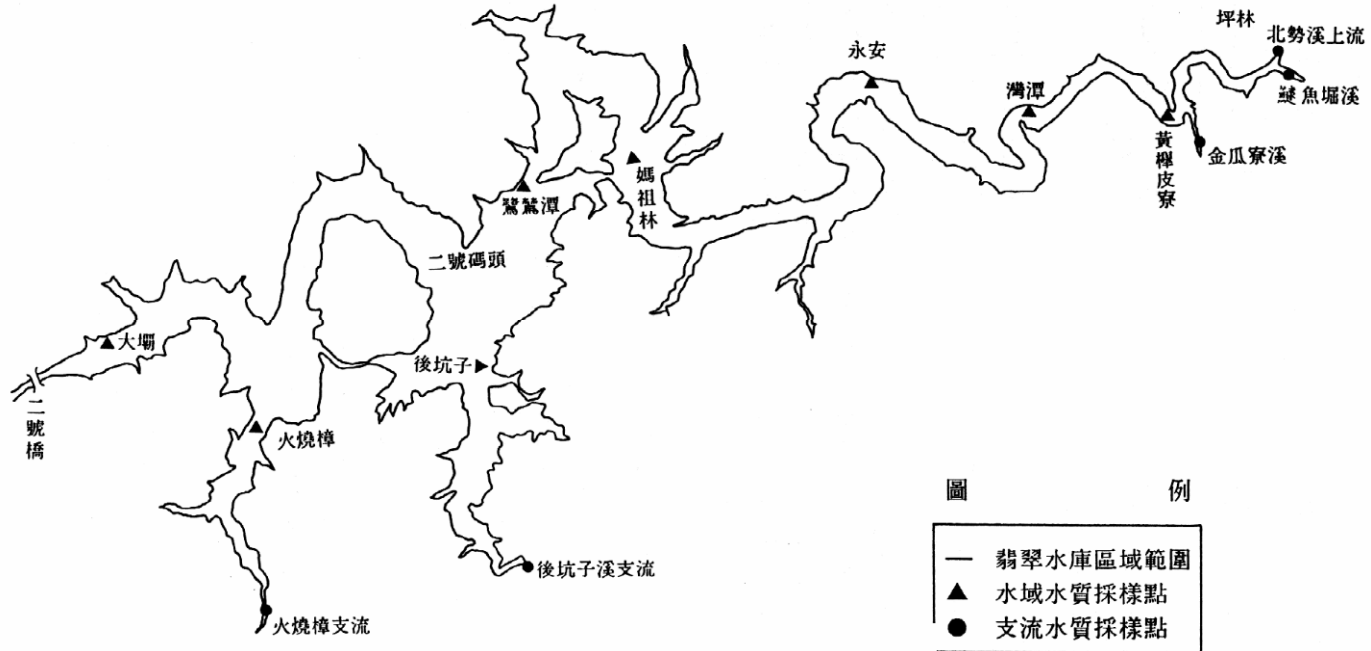


圖 3.1-1 翡翠水庫水質採樣點位置圖

3.2 集水區分區

本研究採用 BASINS 模式中的非點源污染模式 NPSM(Nonpoint Source Model)進行模擬，模擬時間為 2002 年 1 月 1 日至 2003 年 12 月 31 日共計 2 年。

為考慮河川水理特性與支流之影響，將翡翠水庫集水區分為以下 5 區：北勢溪集水區與逮魚溪集水區、金瓜寮溪集水區、後坑子溪集水區及火燒樟溪集水區，如圖 3.2-1 所示。並將 5 個集水區進一步劃分成 22 個子集水區，其中佔整個集水區一半以上的北勢溪與逮魚溪集水區有 15 個子集水區，金瓜寮溪集水區有 2 個子集水區，後坑子溪子集水區包含 2 個子集水區，而火燒樟溪集水區則有 3 個子集水區。

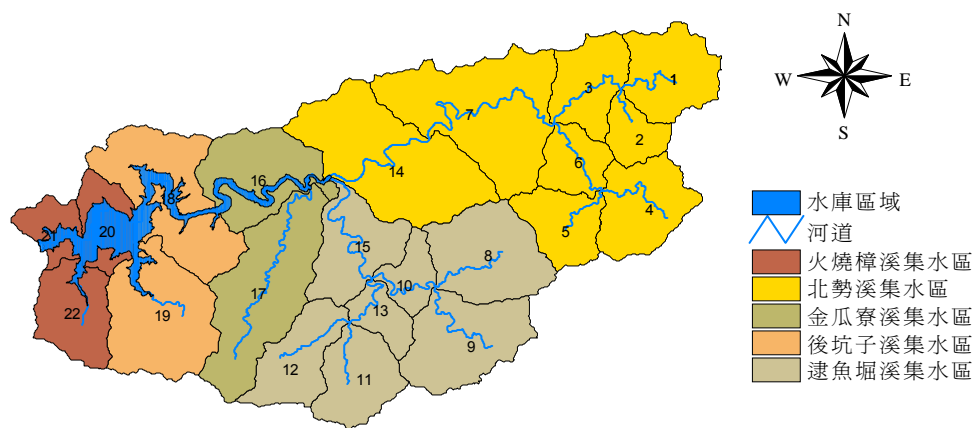


圖 3.2-1 集水區分區圖

3.3 模式模擬結果

在任何數學模式使用之前，一定要經過謹慎的檢定 (calibration) 與驗證 (verification) 過程，藉由模式中參數的調整，使模擬值和實際值之差異達到最小，如此才能使模式中之參數適切地表達當地的地文、水文與水質狀況。經過檢定和驗證的模式，可用來模擬現況或推估未來可能發生的情形，而且經由模式的模擬結果具有一定的可靠度。

3.3.1 水文模擬

水文模擬方面水文模擬主要依據集水區物理特性如氣象資料、地文資料、水文資料模擬水文反應，不同集水區有不同之水文情況，透過 NPSM 中集水區模擬 PERLND 之子模式 PWATER 進行集水區演算，配合河道模擬 REACHES 之子模式 HYDR 分別連結單一集水區進行演算。NPSM 模式為視窗化之 HSPF 模式，而參數定義的單位固定採用英制，不可由使用者任意決定，故此模式參數之輸入，均考慮英制單位。首先進行水理計算程式—PWATER 之檢定和驗證，而參數初步之選定參考美國環保署之「BASINS Technical Note 6—Estimating Hydrology Parameters for NPSM/HSPF」，再依當地地文狀況及水理的特性予以修正。

下層土壤名義含水量 (LZSN) 根據 Technical Note 6 中之建議：潮濕氣候地區，LZSN 約等於年降雨量之八分之一，再加上 4 英吋；而上層土壤名義含水量 (UZSN) 約等於 LZSN 之 0.14 倍。

入滲參數則依地表覆蓋物來決定，而不同土地利用截留量 (CEPSC) 參數值之選定，參考 Donigian and Davis (1978)，再做調整。因為曼寧 n 值對於尖峰流量與水量體積的影響很小，通常不作為率定的參數，依照土地利用的特性來給定即可；不同土地利用所對應的 n 值，參考 Donigian and Davis (1978) 和 Donigian et al (1983)。

中間流入流參數 (INTFW) 為決定地表滯留水量進入地表下成為中間流的重要參數。增加 INTFW，表示進入地表下的水量增多，使退水段部分緩慢降低，同時亦減低尖峰流量；且調整 INTFW 會影響逕流歷線的形狀，將尖峰流量的時間提前或延後。可利用 INTFW 數值之改變，來增加或降低尖峰流量，讓模擬出來的逕流歷線可與觀測值相符。

中間流退水率 (IRC) 會影響逕流歷線退水段之下降速率，若使用較低的值，會有較快的退水速率，即退水段斜率較陡；反之，則有較緩的退水曲線。IRC 值的選用，可以先使用模式之預設值為 0.5，再根據實際之流量歷線退水段部分予以校正。INTFW 參數影響的是中間流的水量，而 IRC 則為決定地表逕流成為中間流的速率，二者有所不同。起始狀況參數之決定，則利用觀測之流量歷線的初始值，來作為率定的參考。當集水區模組計算所得之集水區出流量，隨即流入河道，利用河道相連匯流，至於河道模組部分，僅調整 KS 河道之權重參數，依照 HSPF 手冊中質量守恆方程式與該流量站之率定曲線之解即為率定流量，主要因為 KS 可影響時間間隔內初始與終了之出流之權重比例。

本研究中，降雨資料採用大壩站之小時降雨資料為輸入資料；利用 2002 年年翡翠水庫之日入流量作為基準，利用面積比例法其決定各集水區之流量，本研究劃分之 4 個集水區之面積比例如表所示。並以 2003 年之入流量做驗證。為簡化內容，報告書僅列北勢溪集水區之結果，本研究所使用的集水區水文參數整理

如表 3.3-1、表 3.3-2 所示；集水區流量之檢定與驗證結果如圖 3.3-1、圖 3.3-2 所示。各集水區流量模擬值與觀測值之結果則整理如表 3.3-3 所示。

3.3.2 懸浮固體物模擬

集水區之總懸浮固體的檢定與驗證，在透水區部分，操作管理參數 (SMPF) 代表防止土壤沖刷措施之好壞，值介於 0 與 1 之間，參數值愈接近 0 表示地表管理愈佳，產生的懸浮物愈少；反之，若參數值愈接近 1，表示此土地利用產生的懸浮物多。土壤分離係數 (KRER) 依照土壤特性給定。土壤分離指數 (JRER) 描述因為降雨強度不同造成土壤分離之指數關係。地表覆蓋參數 (COVER) 代表地面被覆的程度，其值介於 0 與 1 之間，若參數值愈接近 1，表示地面覆蓋佳，產生懸浮物少。運移係數 (KSER)、運移指數 (JSER) 用於計算地表水具有之運移能力。沖蝕係數 (KGER)、沖蝕指數 (JGER) 可計算地表水所具有之沖刷土壤能力，運移指數 (JSER) 和沖蝕指數 (JGER) 和懸浮物有反比的關係存在。此外，泥沙沖蝕模組之模擬結果亦受到降雨逕流模組之影響，懸浮固體量之多寡與逕流模擬之出流量成正相關，因此必須先檢定驗證降雨逕流模組之參數，確定無誤之後再調整輸砂模組之參數才可以獲得正確的結果。在河道輸砂演算方面，模式中將懸浮載分為砂、粉砂、以及黏土三種成分分別計算，而主要影響模擬結果為 Sandload power function 之係數 (KSAND) 與指數參數 (EXPSND) 影響最大，參數值越高模擬輸出量也會提高。

首先進行總懸浮固體的檢定與驗證。其中操作管理參數 (SMPF) 代表防止土壤沖刷措施之好壞，值介於 0 與 1 之間，參數值愈接近 0 表示地表管理愈佳，產生的懸浮物愈少；反之，若參數值愈接近 1，表示此土地利用產生的懸浮物多。地表覆蓋參數 (COVER) 代表地面被覆的程度，值介於 0 與 1 之間，若參數值愈接近 1，表示地面覆蓋佳，產生懸浮物少。運移指數 (JSER) 和沖蝕指數 (JGER) 和懸浮物有反比的關係存在。

表 3.3-1 各集水區面積及其所佔比例

集水區	北勢溪	逮魚堀溪	金瓜寮溪	後坑子溪	火燒樟溪
面積(m ²)	112,219,908	77,340,747	37,329,930	41,665,917	24,407,709
比例(%)	38.4	26.4	12.7	14.2	8.3

表 3.3-2 PWATER 透水區水文參數表(北勢溪集水區)

參數	預設值	最小值	最大值	建地	荒地	林地	農地	草地
森林覆蓋比例-FOREST	0.0	0.0	1.0	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00
下層土壤名義含水量-LZSN(in)	14.1	0.01	100.0	15.00	15.00	15.00	15.00	15.00
入滲能力指標-INFILT(in/hr)	0.16	0.0001	100.0	0.16	0.16	0.16	0.16	0.16
漫地流長度-LSUR(ft)	300.0	1.0	-	300.0	300.0	300.0	300.0	300.0
漫地流坡度-SLSUR	0.035	1E-07	10.0	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
地下水出流參數-KVARY(1/in)	0.0	0.0	-	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
地下水退水率-AGWRC(1/day)	0.98	0.001	0.999	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9
入滲公式指數-INFEXP	2.0	0.0	10.0	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00
最大與平均入滲量之比值-INFILD	2.0	1.0	2.0	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00
地下水入流參數-DEEPER	0.1	0.0	1.0	0.18	0.18	0.18	0.18	0.18
基流蒸發散參數-BASETP	0.02	0.0	1.0	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10
地下水流蒸發散參數-AGWETP	0.0	0.0	1.0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
截留量-CEPSC(in)	0.1	0.0	10.0	0.02	0.03	0.03	0.05	0.01
上層土壤名義含水量-UZSN(in)	1.128	0.01	10.0	1.128	1.128	1.128	1.128	1.128
曼寧 n 值-NSUR	0.2	0.001	1.0	0.10	0.15	0.45	0.35	0.35
中間流入流參數-INTFW	0.75	0.0	-	0.70	0.70	0.70	0.70	0.70
中間流退水率-IRC(1/day)	0.5	1.00E-30	0.999	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50
下層土壤蒸發散參數-LZETP	0.1	0.0	0.999	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10

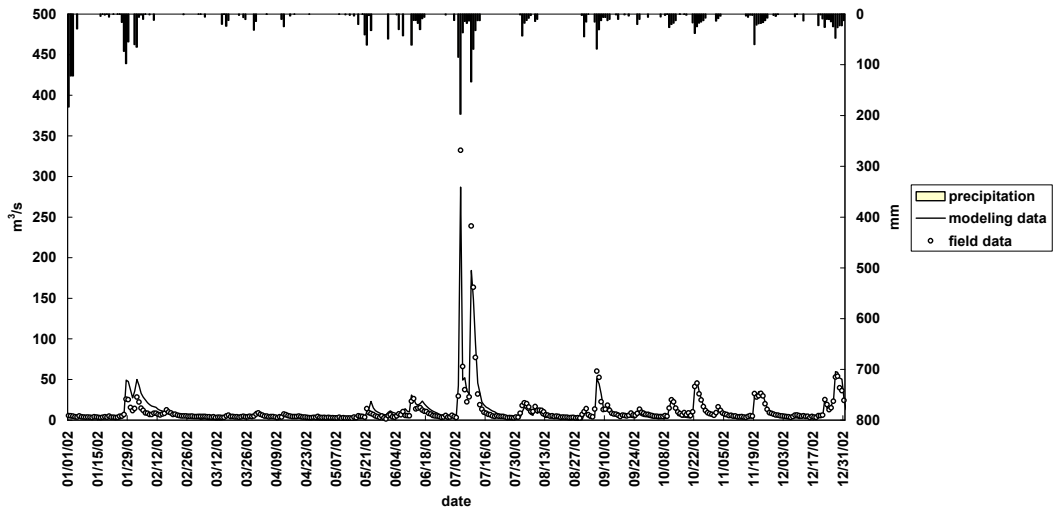


圖 3.3-1 北勢溪集水區 2002 年水文模擬曲線(檢定)

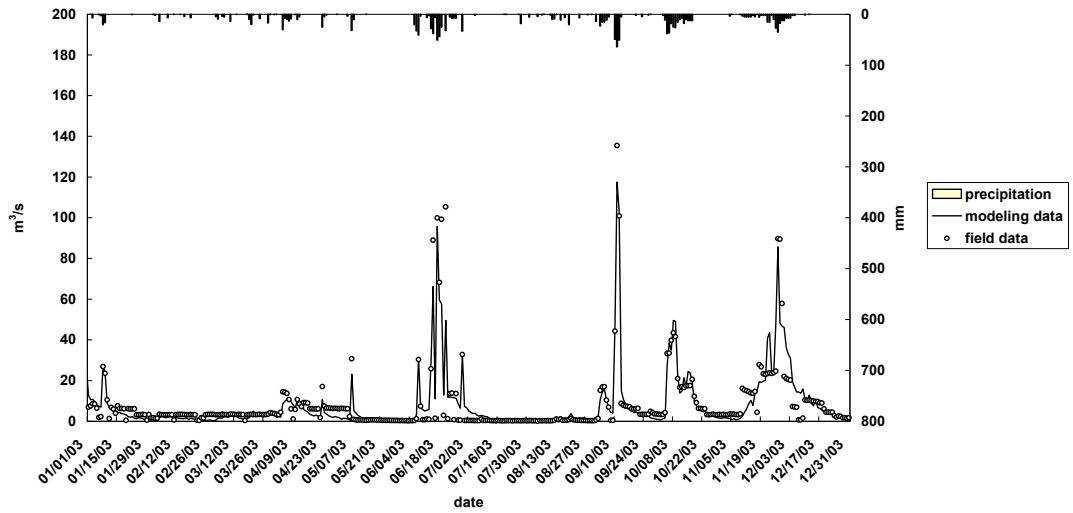


圖 3.3-2 北勢溪集水區 2003 年水文模擬曲線(驗證)

表 3.3-3 各集水區年流量結果比較表

集水區	北勢溪				逮魚溪			
	模擬流量(m ³)	實際流量(m ³)	誤差百分率(%)	相關係數	模擬流量(m ³)	實際流量(m ³)	誤差百分率(%)	相關係數
2002(檢定)	212,513,159	205,073,020	3.63	0.95	143,008,050	141,334,109	1.18	0.96
2003(驗證)	151,965,634	153,511,486	-1.01	0.94	102,030,759	105,798,457	-3.56	0.93
總和	364,478,792	358,584,507	1.64	0.95	245,038,809	247,132,565	-0.85	0.95

集水區	金瓜寮溪				後坑子溪			
	模擬流量(m ³)	實際流量(m ³)	誤差百分率(%)	相關係數	模擬流量(m ³)	實際流量(m ³)	誤差百分率(%)	相關係數
2002(檢定)	61,915,387	68,217,501	-9.24	0.95	69,539,757	76,141,174	-8.67	0.97
2003(驗證)	46,734,250	41,983,620	11.32	0.91	50,488,930	46,860,144	7.74	0.94
總和	108,649,637	110,201,121	-1.41	0.94	120,028,687	123,001,318	-2.42	0.96

集水區	火燒樟溪			
	模擬流量(m ³)	實際流量(m ³)	誤差百分率(%)	相關係數
2002(檢定)	49,337,865	49,808,748	-0.95	0.90
2003(驗證)	32,369,633	30,744,520	5.29	0.92
總和	81,707,498	80,553,268	1.43	0.90

本研究收集水庫年報中於水庫上游北勢溪、支流逮魚溪施測之流量及懸浮固體物量資料，2002 年至 2003 年共計 48 次，將兩年實測資料迴歸分析如圖 3.3-3 所示，可得流量與懸浮固體物量之關係式如下：

$$Q_s = 2.7511Q^{1.2743} \quad (3.3-1)$$

其中， Q_s ：懸浮固體物量(ton/day)， Q ：日平均流量(m³/s)

依上式可得每日懸浮固體物量。本研究所使用的輸砂模組參數 SEDMNT 與 SEDTRN 分別整理如表 3.3-4、表 3.3-5；並將懸浮固體物之檢定驗證結果如圖 3.3-4、圖 3.3-5，並列於表 3.3-6，由模擬結果得到在雨季泥沙會大量進入水庫，對淤積造成嚴重影響。

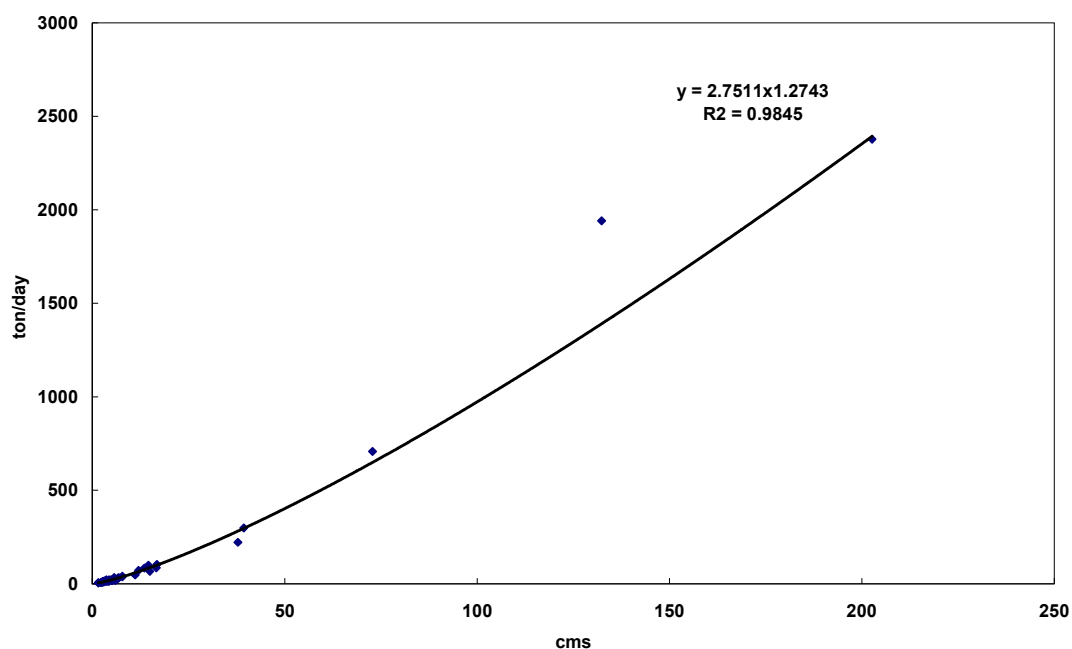


圖 3.3-3 實測流量與懸浮固體物迴歸分析圖

表 3.3-4 SEDMNT 模組水文參數表(北勢溪集水區)

參數	預設值	最小值	最大值	建地	荒地	林地	農地	草地
操作管理參數-SMPF	1.0	0.0001	1.0	0.5	0.6	0.8	0.7	0.7
土壤分離係數-KRER	0.14	0.0	-	0.14	0.14	0.14	0.14	0.14
土壤分離指數-JRER	2.0	-	-	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0
土壤再壓密率-AFFIX(1/day)	0.03	0.0	1.0	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03
地表覆蓋率-COVER	0.88	0.0	1.0	0.3	0.1	0.9	0.6	0.6
大氣分離砂量進入率 -NVTI(lb/ac.day)	0.00	-	-	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
運移係數-KSER	0.1	0.0	-	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02
運移指數-JSER	2.0	-	-	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0
沖蝕係數-KGER	0.01	0.0	-	0.012	0.012	0.012	0.012	0.012
沖蝕指數-JGER	1.0	-	-	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0

表 3.3-5 SEDTRN 模組水文參數表(北勢溪集水區)

參數	預設值	最小值	最大值	河道
河床泥沙深度-BEDWID(ft)	16.0	1.0	-	16.0
河床孔隙率-POR	0.5	0.1	0.9	0.5
河床泥沙顆粒直徑之中位數-DB50(in)	0.01	0.0001	100	0.01
泥沙特性		砂土	砂土	黏土
砂傳輸有效粒徑-D(in)	-	0.04	0.001	0.05
砂沉降速度-W(in/sec)	-	0.1	0.05	0.05
砂密度-RHO-(gm/cm ³)	-	2.65	2.65	2.65
Sandload power function 係數-KSAND	-	1.0	-	-
Sandload power function 指數-EXPSND	-	3.0	-	-
泥沙沖蝕係數-M(lb/ft ² /day)	-	-	1.0	1.0
底床之沈澱臨界剪應力-TAUCD(lb/ft ²)	-	-	0.1	0.1
底床之沖蝕臨界剪應力-TAUCs(lb/ft ²)	-	-	0.1	0.1

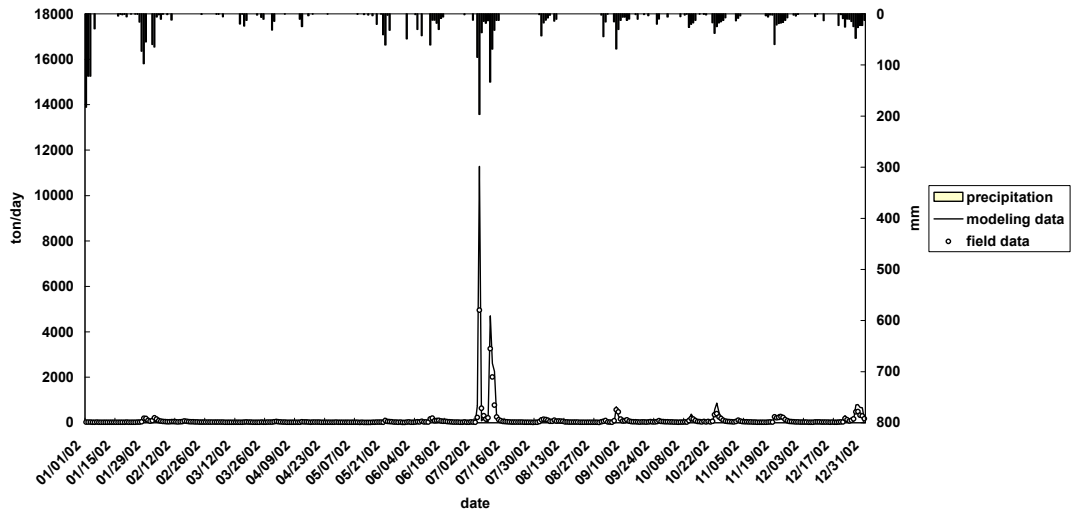


圖 3.3-4 北勢溪集水區 2002 年懸浮固體模擬曲線(檢定)

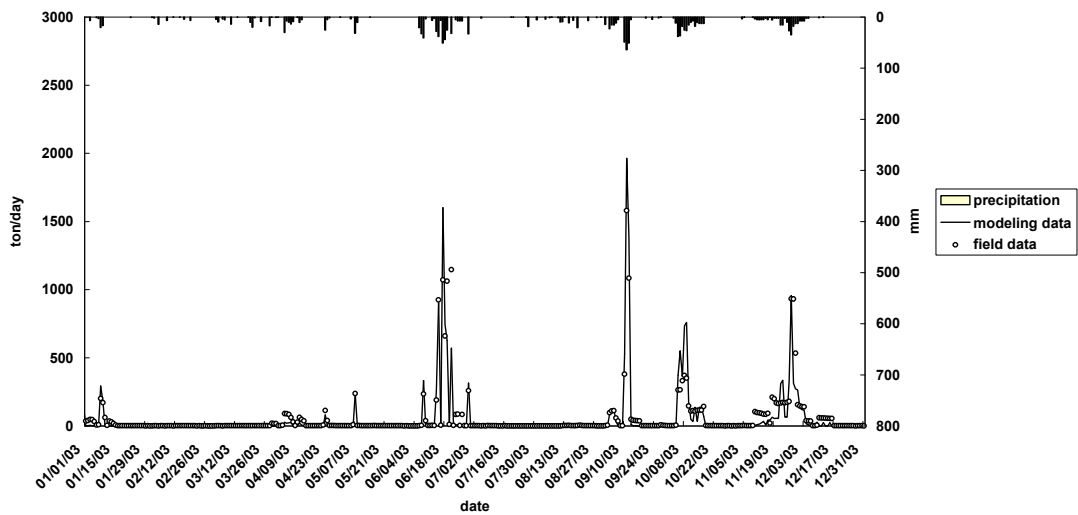


圖 3.3-5 北勢溪集水區 2003 年懸浮固體模擬曲線(驗證)

表 3.3-6 各集水區懸浮固體量結果比較表

集水區	北勢溪				逮魚堀溪			
	模擬總量(ton)	實際總量(ton)	誤差百分率(%)	相關係數	模擬總量(ton)	實際總量(ton)	誤差百分率(%)	相關係數
2002(檢定)	13524	18367	-26.37	0.95	6614	12659	-47.75	0.95
2003(驗證)	12059	11764	2.51	0.91	5881	8108	-27.47	0.90
總和	25583	30131	-15.10	0.93	12495	20766	-39.83	0.92

集水區	金瓜寮溪				後坑子溪			
	模擬總量(ton)	實際總量(ton)	誤差百分率(%)	相關係數	模擬總量(ton)	實際總量(ton)	誤差百分率(%)	相關係數
2002(檢定)	4064	3913	3.87	0.93	3792	4501	-15.75	0.96
2003(驗證)	2787	2506	11.22	0.86	3374	2883	17.06	0.93
總和	6851	6419	6.74	0.86	7166	7383	-2.94	0.94

火燒樟溪			
模擬總量(ton)	實際總量(ton)	誤差百分率(%)	相關係數
2551	2277	12.04	0.90
1731	1458	18.68	0.90
4282	3735	14.63	0.90

3.3.3 水質模擬

水質部分，利用 NPSM 之集水區水質子模組 PQUAL 及河川水質子模組 RQUAL 模組與底下三個水質項目模組 OXRX、NUTRX。OXRX 模組模擬溶氧及生化需氧量；NUTRX 模組模擬氨氮、正磷酸鹽、硝酸氮及亞硝酸氮；選擇以上數種對水庫優養影響較大的水質項目，以 2002 年做檢定，2003 年作驗證後，推估全年非點源污染量。

各水質項目所模擬之水質參數如表 3.3-7 至表 3.3-10 所示，各水質項目模擬結果如圖 3.3-6 至圖 3.3-15 所示，實測與模擬結果趨勢大致符合，唯值仍有差異。由模擬結果可推估北勢溪集水區之 2002 與 2003 年正磷酸鹽總量。分別為 7958 與 7916 kg/yr，依以往研究一般正磷酸鹽含量佔總磷之約 70% 換算，可得 2002 與 2003 年總磷總量分別為 11368 與 10737 kg/yr，與林鎮洋等人於 2001 年(台北科大水環中心)之研究結果 9120kg/yr 相近。由表 3.3-11 可知模式所推估之總磷與國內相關研究調查推估比較。

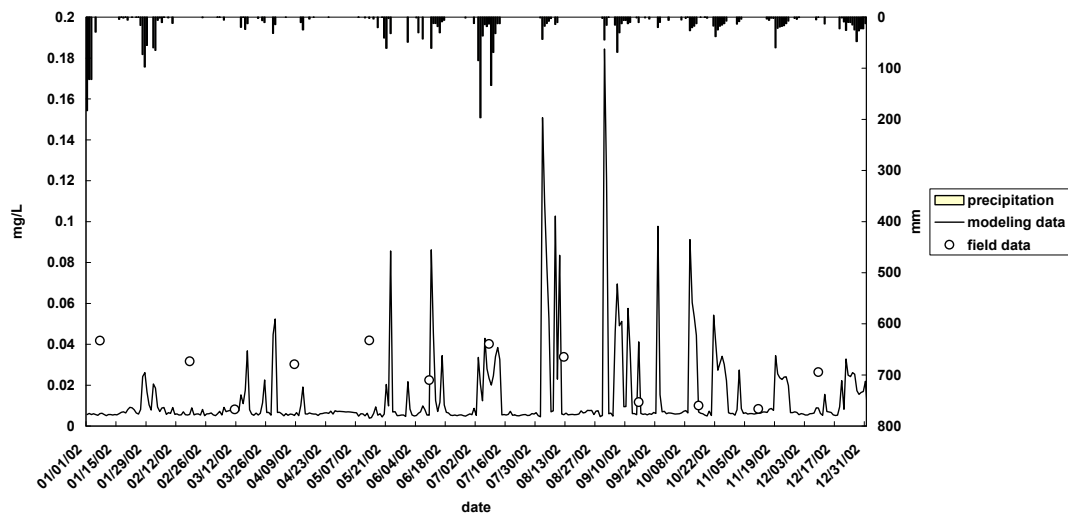


圖 3.3-6 北勢溪集水區 2002 年正磷酸鹽模擬曲線(檢定)

表 3.3-7 PQUAL 透水區正磷酸鹽水質參數表(北勢溪集水區)

參數	預設值	最小值	最大值	建地	荒地	林地	農地	草地
起始儲存量-SQO(lb/acre)	0.0	0.0	-	0.04	0.18	0.017	0.28	0.18
土壤沖刷因子-POTFW(lb/ton)	0.0	0.0	-	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001
土壤沖蝕因子-POTFS(lb/ton)	0.0	0.0	-	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001
模擬物質累積速率-ACQOP(lb/acre/day)	0.0	0.0	-	0.018	0.004833	0.004833	0.004833	0.004833
模擬物質最大貯存量-SQOLIM(lb/acre)	1E-06	1E-06	-	0.036833	0.016083	0.00625	0.016083	0.016083
地表逕流沖刷-WSQOP(in/hr)	1.64	0.01	-	0.5	0.5	0.7	0.5	0.5
中間流模擬物質濃度-IOQC(lb/ft3)	0.0	0.0	-	0.05	0.1	0.009	0.1	0.1
地下水模擬物質濃度-AOQC(lb/ft3)	0.0	0.0	-	0.03	0.05	0.005	0.05	0.05

表 3.3-8 PQUAL 透水區氮氮水質參數表(北勢溪集水區)

參數	預設值	最小值	最大值	建地	荒地	林地	農地	草地
起始儲存量-SQO(lb/acre)	0.0	0.0	-	0.365	0.03	0.033	0.03	0.03
土壤沖刷因子-POTFW(lb/ton)	0.0	0.0	-	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001
土壤沖蝕因子-POTFS(lb/ton)	0.0	0.0	-	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001
模擬物質累積速率-ACQOP(lb/acre/day)	0.0	0.0	-	0.03	0.007167	0.008308	0.007167	0.007167
模擬物質最大貯存量-SQOLIM(lb/acre)	1E-06	1E-06	-	0.0061667	0.026417	0.0105	0.026417	0.026417
地表逕流沖刷-WSQOP(in/hr)	1.64	0.01	-	0.5	0.5	0.7	0.5	0.5
中間流模擬物質濃度-IOQC(lb/ft3)	0.0	0.0	-	0.27	0.32	0.08167	0.32	0.32
地下水模擬物質濃度-AOQC(lb/ft3)	0.0	0.0	-	0.18	0.23	0.06	0.23	0.23

表 3.3-9 PQUAL 透水區硝酸氮及亞硝酸氮水質參數表(北勢溪集水區)

參數	預設值	最小值	最大值	建地	荒地	林地	農地	草地
起始儲存量-SQO(lb/acre)	0.0	0.0	-	0.45	1.4	0.25	1.4	1.4
土壤沖刷因子-POTFW(lb/ton)	0.0	0.0	-	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001
土壤沖蝕因子-POTFS(lb/ton)	0.0	0.0	-	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001
模擬物質累積速率-ACQOP(lb/acre/day)	0.0	0.0	-	0.15	0.6575	0.016333	0.6575	0.6575
模擬物質最大貯存量-SQOLIM(lb/acre)	1E-06	1E-06	-	0.6	1.979167	0.12667	1.979167	1.979167
地表逕流沖刷-WSQOP(in/hr)	1.64	0.01	-	0.5	0.5	0.7	0.5	0.5
中間流模擬物質濃度-IOQC(lb/ft3)	0.0	0.0	-	1	4.79167	0.275	4.79167	4.79167
地下水模擬物質濃度-AOQC(lb/ft3)	0.0	0.0	-	1	4.79167	0.275	4.79167	4.79167

表 3.3-10 PQUAL 透水區生化需氧量水質參數表(北勢溪集水區)

參數	預設值	最小值	最大值	建地	荒地	林地	農地	草地
起始儲存量-SQO(lb/acre)	0.0	0.0	-	3.0	5.0	1.0	5.0	5.0
土壤沖刷因子-POTFW(lb/ton)	0.0	0.0	-	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001
土壤沖蝕因子-POTFS(lb/ton)	0.0	0.0	-	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001
模擬物質累積速率-ACQOP(lb/acre/day)	0.0	0.0	-	0.7	0.53	0.22833	0.53	0.53
模擬物質最大貯存量-SQOLIM(lb/acre)	1E-06	1E-06	-	10.5	8.56667	1.96667	8.56667	8.56667
地表逕流沖刷-WSQOP(in/hr)	1.64	0.01	-	0.5	0.5	0.7	0.5	0.5
中間流模擬物質濃度-IOQC(lb/ft3)	0.0	0.0	-	12	13.35	1.45833	13.35	13.35
地下水模擬物質濃度-AOQC(lb/ft3)	0.0	0.0	-	12	10.6	1.375	10.6	10.6

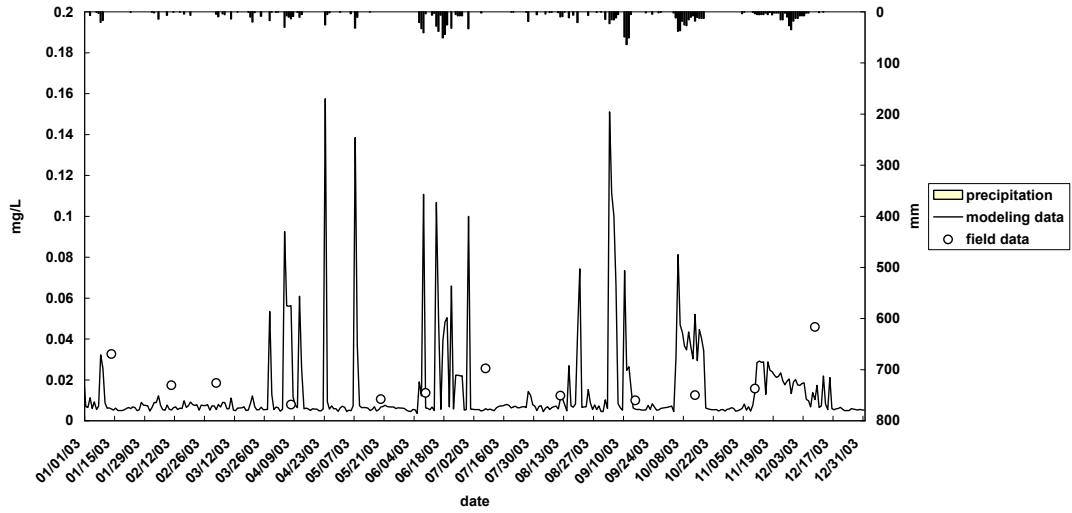


圖 3.3-7 北勢溪集水區 2003 年正磷酸鹽模擬曲線(驗證)

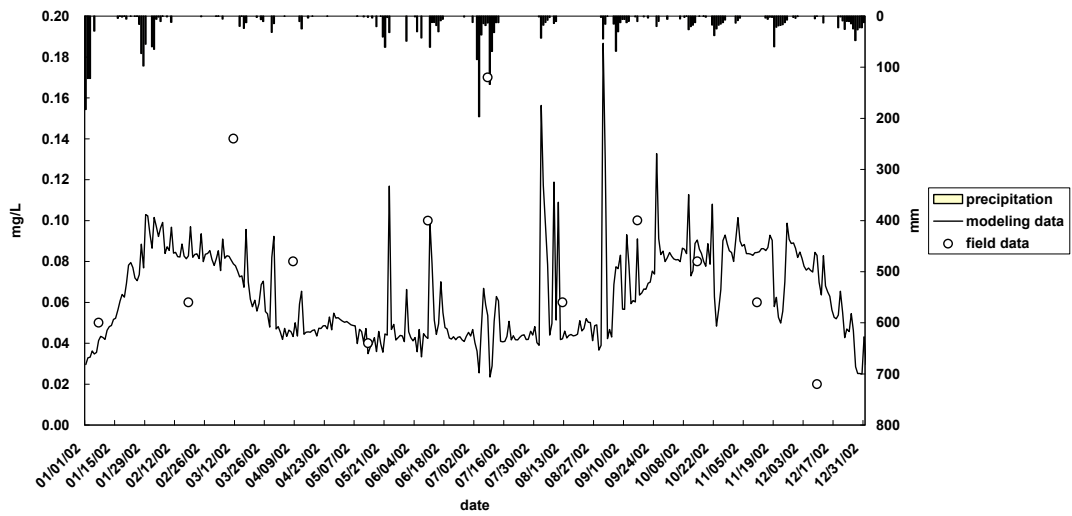


圖 3.3-8 北勢溪集水區 2002 年氨氮模擬曲線(檢定)

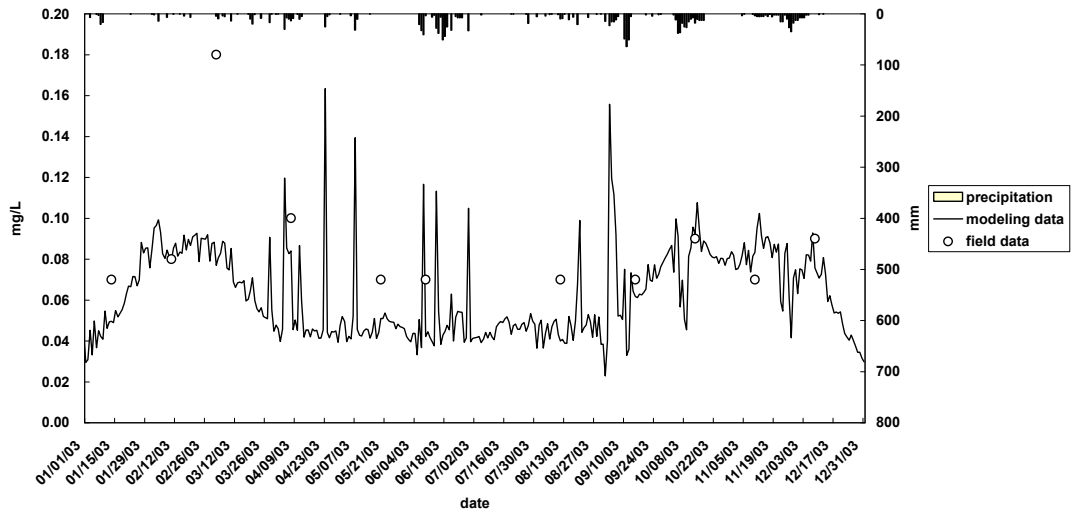


圖 3.3-9 北勢溪集水區 2003 年氨氮模擬曲線(驗證)

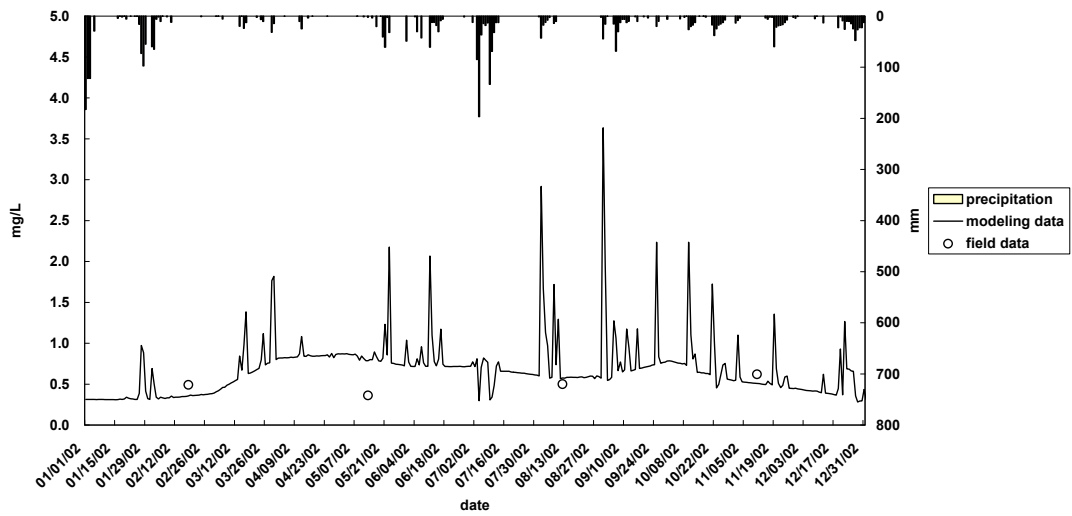


圖 3.3-10 北勢溪集水區 2002 年硝酸氮及亞硝酸氮模擬曲線(檢定)

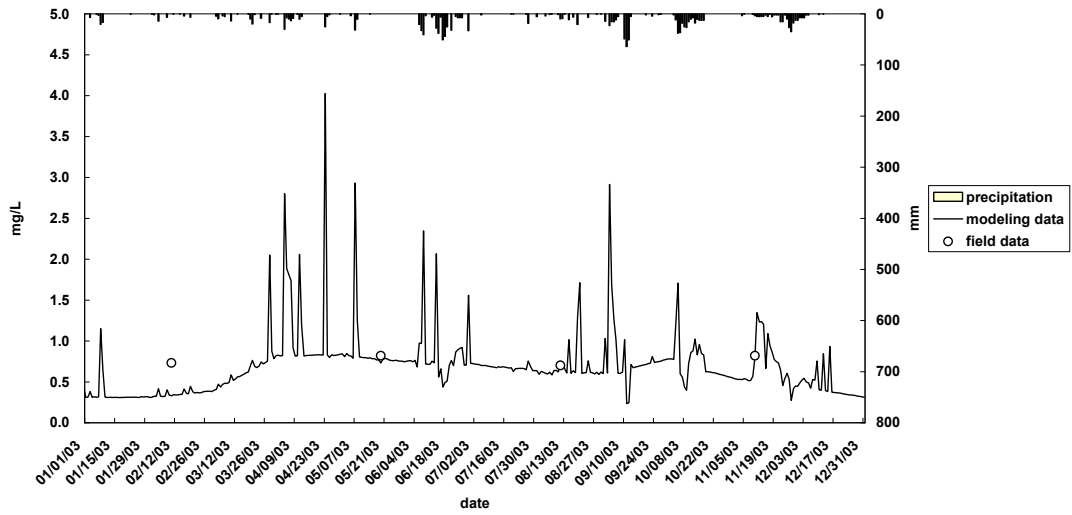


圖 3.3-11 北勢溪集水區 2003 年硝酸氮及亞硝酸氮模擬曲線(驗證)

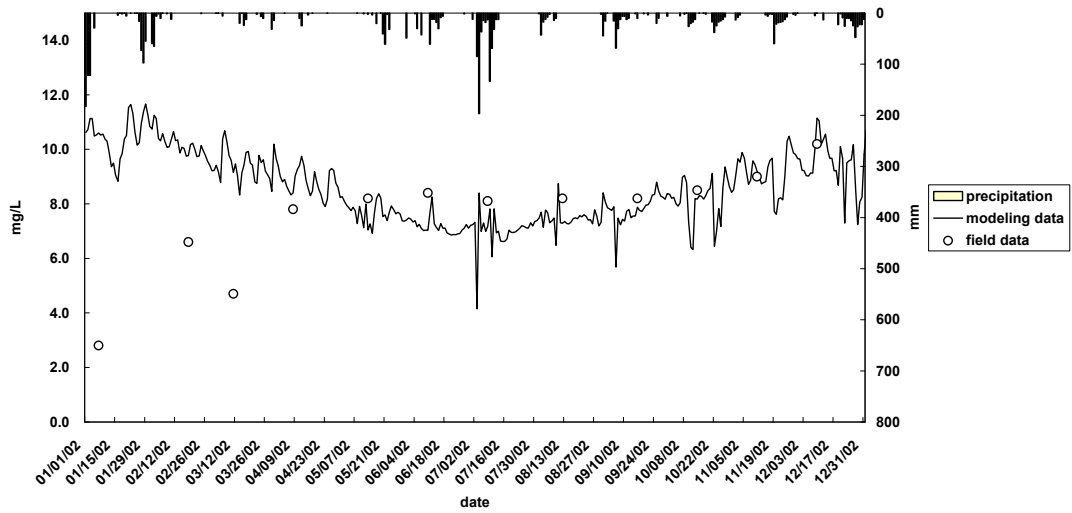


圖 3.3-12 北勢溪集水區 2002 年生化需氧量模擬曲線(檢定)

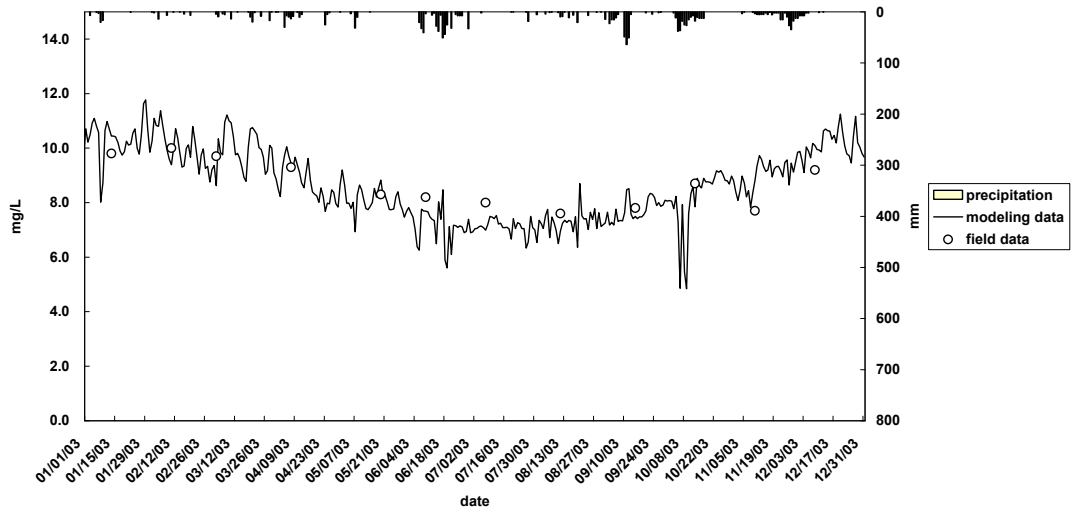


圖 3.3-13 北勢溪集水區 2003 年生化需氧量模擬曲線(驗證)

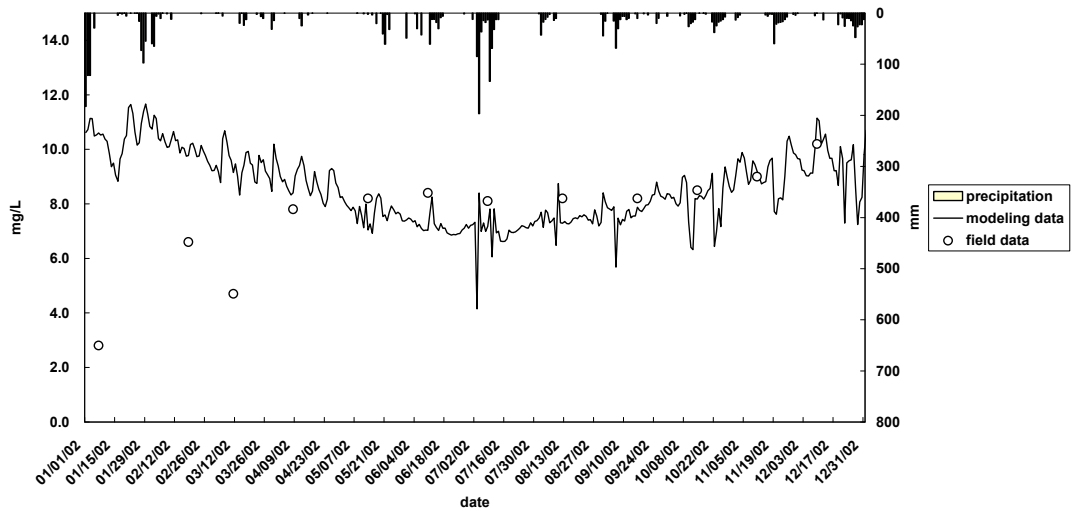


圖 3.3-14 北勢溪集水區 2002 年溶氧模擬曲線(檢定)

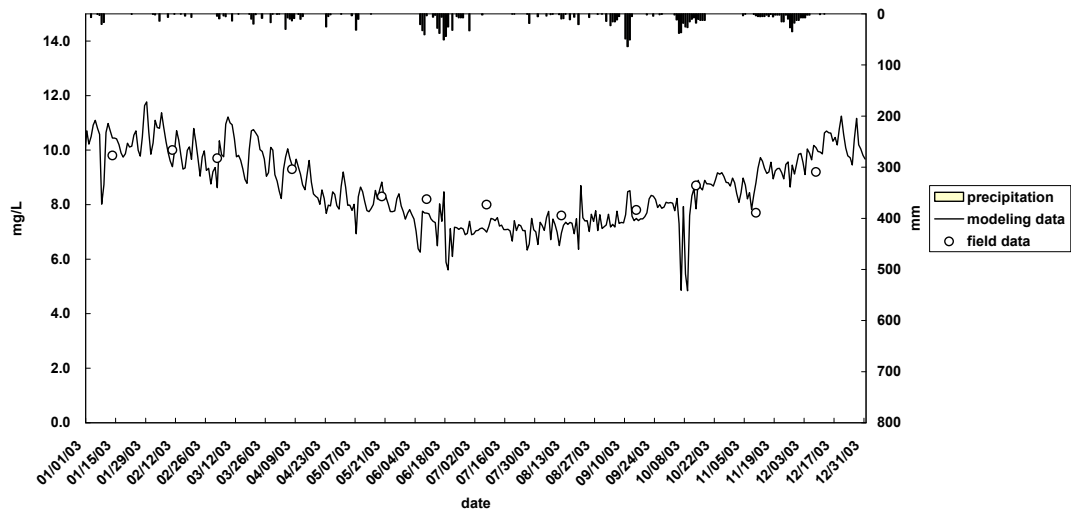


圖 3.3-15 北勢溪集水區 2003 年溶氧模擬曲線(驗證)

表 3.3-11 翡翠水庫集水區總磷推估結果比較表

估算法	估算單位	集水區範圍	總磷污染量 (kg/yr)
流量推估法	台北自來水事業處(1992 年)	翡翠水庫集水區	12017
VANTU	台大土木系(1995 年)	翡翠水庫集水區	18629
單位面積法	環保署(1999 年)	翡翠水庫集水區	16136
單位面積法	美商傑明公司(2000 年)	翡翠水庫集水區	25917
單位面積法	台北科大土木系(2000 年)	逮魚溪集水區	9892
BASINS 模式	台北科大土木系(2000 年)	逮魚溪集水區	3550
BASINS 模式	台北科大水環中心(2001 年)	北勢溪和逮魚溪集水區	9120
BASINS 模式	本研究(2002 年)	北勢溪和逮魚溪集水區	11368
BASINS 模式	本研究(2003 年)	北勢溪和逮魚溪集水區	10737
BASINS 模式	本研究(2002 年)	翡翠水庫集水區	18055
BASINS 模式	本研究(2003 年)	翡翠水庫集水區	16849

第四章 水庫水質模式

4.1 W2 模式介紹

CE-QUAL-W2 (簡稱 W2) 為二維 (縱向/垂直) 的水理、水質模式，其假設側向 (Y 方向) 均勻，故適合模擬於狹長型且水質濃度在縱向 (X 方向) 和垂直 (Z 方向) 之分佈不均勻的水體。W2 模式的前身是由 Edinger 和 Buchak 在 1975 年所發展的 LARM(Laterally Averaged Reservoir Model)，一開始 LARM 模式只能應用於無主支流的水庫，後續修改成可允許在多主支流條件下模擬，是為 GLVHT(Generalized Longitudinal-Vertical Hydrodynamics and Transport Model)，直至 1986 年由美國陸軍工程師團水道試驗所(US Army Engineer Waterways Experiment Station)加入水質演算模組而發展成 W2 模式 (Version 1.0)。模式水理與水質之理論簡述如下：

1. 水理部份

描述水庫內水理現象的基本控制方程式分別為動量方程式、不可壓縮流之連續方程式與熱平衡方程式，以數學式表示如下：

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial(uu)}{\partial x} + \frac{\partial(uw)}{\partial z} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} - \left(\frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} \right) = 0 \quad (4.1-1)$$

$$\frac{\partial P}{\partial z} - \rho g = 0 \quad (4.1-2)$$

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (4.1-3)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \frac{\partial uT}{\partial x} + \frac{\partial wT}{\partial z} - \frac{\partial}{\partial x} \left(D_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) - \frac{\partial}{\partial z} \left(D_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) = \frac{H_n}{V} \quad (4.1-4)$$

式中，
 u, w = 流速 [L/T]
 t = 時間 [T]
 P = 壓力 [M/LT²]
 ρ = 流體密度 [M/L³]

$$\begin{aligned}\tau_{xx}, \tau_{xz} &= \text{紊流剪應力 [L}^2\text{/T}^2\text{]} \\ T &= \text{流體溫度 [}^\circ\text{C]} \\ D_x, D_z &= \text{擴散係數 [L}^2\text{/T]} \\ H_n &= \text{進出水面之熱量 [L}^3\text{}^\circ\text{C/T]} \\ V &= \text{體積 [L}^3\text{]}\end{aligned}$$

(4.1-1)式為 X 方向(縱向)的動量方程式，(4.1-2)式為 Z 方向(垂直方向)的動量方程式，此處以靜壓力分佈(hydro-static)假設之，(4.1-3)式為不可壓縮流之連續方程式，(4.1-4)式為熱平衡方程式。

另外，水之密度為溫度的函數，密度影響了水溫的分佈，亦造成了分層效應，以數學式表示如下：

$$\begin{aligned}\rho_T &= 999.8452594 + 6.793952 \times 10^{-2} T - 9.09529 \times 10^{-3} T^2 + \\ &1.001685 \times 10^{-4} T^3 - 1.120083 \times 10^{-6} T^4 + 6.536332 \times 10^{-9} T^5\end{aligned}\quad (4.1-5)$$

式中， T = 水體溫度 [$^\circ\text{C}$]

ρ_T = 水體密度 [M/L^3]。

水庫中水體之紊流黏滯性(eddy viscosity)係數與紊流擴散性(eddy diffusivity)係數，受水庫溫度分層(thermal stratification)之影響。而水庫中分層現象之形成，主要是受氣象條件之影響所致。夏季時，由於太陽輻射強，表層水吸收之後溫度逐漸升高，比重減小而與水庫下層比重較大之水形成穩定現象，是為分層效應。然而在某一深度時其溫降劇烈，稱為變溫層(metalimnion)，此層所表現之特性十分穩定，紊流效應微乎其微，因而減少了物質在此層之傳遞，遂將水庫分成上下兩層，變溫層以上稱湖上層(epilimnion)，以下稱湖下層(hypolimnion)。於秋、冬季時，由於太陽輻射量減少，表水層受冷卻，遂與下層水形成對流混合(convective mixing)此現象稱之為翻滾(overtum)。翻滾現象之形成可使水庫上下層均勻混合，增加上下層物質之傳遞。

2. 水質模式理論

水質因子在水庫中之傳送，擴散與生化消長之過程可以應用垂直之二維質量傳輸方程式來描述，將三維空間之質量傳輸方程式在橫向上平均後，垂直之二維質量傳輸方程式為：

$$\frac{\partial C}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial x}(U_x C) - \frac{\partial}{\partial z}(U_z C) + \frac{\partial}{\partial x}(E_x \frac{\partial C}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial z}(E_z \frac{\partial C}{\partial z}) \pm S(x, z, t) \quad (4.1-6)$$

式中， C = 水質濃度 [M/L^3]

t = 時間 [T]

U_i = 流速 [L/T]

E_i = 擴散係數 [L²/T]

S = 生成或消失項 [M/L³/T]

(4.1-6)式中右邊前二項代表傳流項，為水流對物質產生的傳送。三、四項為擴散項，代表物質在水中受擴散，紊流等所產生的傳送。最後一項則代表該物質本身的生化反應現象，此項隨模擬物質的不同而異。

W2 模式以有限差分法來解(4.1-6)式，其有限差分的形式如下：

$$\frac{\partial}{\partial t}(V_j C_j) = -Q_{j,j+1} \cdot C_{j,j+1} + Q_{j-1,j} \cdot C_{j-1,j} + R_{j,j+1} \cdot (C_{j+1} - C_{j-1}) + R_{j-1,j} \cdot (C_j - C_{j-1}) + V_j \cdot S_j \quad (4.1-7)$$

式中， C_j = 第 j 個單元之濃度 [M/L³]

V_j = 第 j 個單元之體積 [L³]

$Q_{j,j+1}$ = j 單元與 $j+1$ 單元之間之淨流量 [L³/T]

$C_{j,j+1}$ = j 單元與 $j+1$ 單元之間之濃度 [M/L³]

$$R_{j,j+1} = \frac{E_{j,j+1} \cdot A_{j,j+1}}{L_{j,j+1}} = j \text{ 單元與 } j+1 \text{ 單元之間之交換係數 [M/L}^3]$$

$E_{j,j+1}$ 表延散係數， $A_{j,j+1}$ 為截面積， $L_{j,j+1}$ 表特性長度 = $\frac{L_j + L_{j+1}}{2}$

S_j = j 單元內之生化反應項

(4.1-7)式中進出各單元之流量與各單元之體積需當作已知項處理，在流量資料方面可由水理求得，而模式即可以連續性公式來求得各時段之體積變化。

3. 生化反應模式

水庫中由於各種營養物質經由點源或非點源之方式流入水庫中，使水生植物大量繁殖，造成優養問題，危害水之正常用途。所謂優養係指當營養物質排入水庫時，造成水質濃度漸漸升高，使得藻類獲得充分的養分，進而大量繁殖的過程。此結果使原本清澈的水體，由於藻類大量的生長變成綠色甚至黃色或赤色水體。如此藻類數目增多，其死亡後分解又消耗水中大量溶氧，而且產生大量的有機物，所釋出之有機碳、氮、磷又成為養分，造成養分循環。

為探討上述複雜水質之循環現象，本模式所採用之生化反應系統即是以藻類為中心之優養模擬，所模擬之水質項目水庫包括葉綠素 a、氨氮、硝酸氮、總磷與溶氧等共五項，其生化系統示意圖如下圖所示。

為了進行水質模擬，所有的生化反應現象均以數學式分別描述如下：

1. 葉綠素 a

$$\frac{d(AV)}{dt} = V(G - D)A - VK_{sa}A + Q_{in}A_{in} - Q_{out}A \quad (4.1-8)$$

式中， A = 葉綠素 a 濃度 [M/L³]

A_{in} = 入流之葉綠素 a 濃度 [M/L³]

G = 葉綠素 **a** 生長率 [1/T]

D = 葉綠素 **a** 死亡率 [1/T]

K_{sa} = 葉綠素 **a** 沈降率 [1/T]

Q_{out} = 水庫湖泊出流量 [L³/T]

Q_{in} = 水庫湖泊入流量(Inflow) [L³/T]

V = 水庫、湖泊水體體積 [L³]

針對葉綠素 **a** 的水質參數： G (葉綠素 **a** 生長率)， D (葉綠素 **a** 死亡率)及 K_{sa} (葉綠素 **a** 沈降率)作進一步的介紹：

(1)生長率

浮游植物生長因子主要受水體溫度、日照與養分三種影響，Di Toro *et al.*(1971)建議如下表示：

$$G = G(T) \cdot G(I) \cdot G(N) \quad (4.1-9)$$

式中， $G(T)$ = 水體溫度影響因子 [1/T]

$G(I)$ = 日照影響因子，無維度。

$G(N)$ = 養分影響因子，無維度。

各項影響因子分述如下：

(a)水溫影響因子

當日照適當和養分充足時，藻類生長受水溫的影響最大，Eppley(1972)曾採用下式：

$$G(T) = G_{max} (1.066)^{T-20} \quad (4.1-10)$$

式中， G_{max} = 水溫 20°C 時藻類最大生長率 [1/T]

T = 水體溫度 [°C]

G_{max} 隨藻類不同，而有差異。一般的範圍介於 1.5~2.5 (1/day)。

(b)日照影響因子

依據 Di Toro *et al.*(1971)研究得知，其日照因子可以表成通式：

$$G(I) = \frac{2.718f}{K_e H} [\exp(-\alpha_1) - \exp(-\alpha_0)] \quad (4.1-11)$$

式中， f = 每日之陽光佔有比例，無維度。

K_e = 光線之消散係數 [1/L]

H = 水體水深 [L]

$\alpha_0 = \frac{I_s}{I_a}$ ，無維度。

$\alpha_1 = \alpha_0 \exp(-K_e H)$ ，無維度。

I_s = 飽和日光強度 [ly/T]

I_a = 平均日光強度 [ly/T]

f 為一天中從日出到日落所佔一天時間的比例。 I_s 一般在 100-400 ly/day， I_a 在 500-1000 ly/day。

(c) 養分影響因子

對藻類所吸取之養分，可分為磷系統與氮系統，根據 Michaelis-Menton 之表示法：

$$G(N) = \text{Min} \left[\frac{DIN}{K_{MN} + DIN}, \frac{DIP}{K_{MP} + DIP} \right] \quad (4.1-12)$$

式中， $DIN = \text{無機氮濃度} = \text{NO}_3 + \text{NH}_3$ [M/L³]

$DIP = \text{無機磷濃度} = \text{PO}_4$ [M/L³]

$K_{MN} = \text{無機氮半飽和常數}$ [M/L³]

$K_{MP} = \text{無機磷半飽和常數}$ [M/L³]

(2) 死亡率

一般考量藻類的死亡，包括因本身代謝之死亡與其他原因之死亡二種，其數學式表示成：

$$D = D_{p1}(T) + D_z \quad (4.1-13)$$

式中， $D_{p1}(T) = \text{藻類代謝死亡率}$ [1/T]

$D_z = \text{其他原因之死亡率(如浮游生物掠食、微生物影響等)}$ [1/T]

(3) 沉降率

一般沉降速率可表示成：

$$K_{sa} = \frac{V_{sa}}{H} \quad (4.1-14)$$

式中， $V_{sa} = \text{葉綠素沉降速度}$ [L/T]

$H = \text{水庫、湖泊平均水深}$ [L]

2. 氮系統(nitrogen cycle)

水體中氮可分為有機氮和無機氮兩種，其中無機氮包括氨氮(NH₃)、硝酸氮(NO₃)與亞硝酸氮(NO₂)。對藻類而言，無機氮會被藻類吸收做養分利用，藻類死亡後又產生有機氮，有機氮本身會分解成氨氮，氨氮又會進一步硝化成亞硝酸氮與硝酸氮，此兩種無機氮又供藻類生長使用。由於亞硝酸氮在水中會迅速轉變成硝酸氮，因此一併納入硝酸氮考慮，其數學式表示如下：

$$\frac{d(N_1V)}{dt} = VDC_n A - VK_{n1}N_1 - VK_S N_1 - QN_1 + W_{N1} \quad (4.1-15)$$

$$\frac{d(N_2V)}{dt} = VK_{n1}N_1 - VGC_n A \frac{N_2}{(N_2 + N_3)} - VK_{n2}N_2 - QN_2 + W_{N2} \quad (4.1-16)$$

$$\frac{d(N_3V)}{dt} = VK_{n2}N_2 - VGC_n A \frac{N_3}{(N_2 + N_3)} - QN_3 + W_{N3} \quad (4.1-17)$$

式中， $N_1 = \text{有機氮濃度}$ [M/L³]

$N_2 = \text{氨氮濃度}$ [M/L³]

$N_3 = \text{硝酸氮濃度}$ [M/L³]

W_{N1} = 外界有機氮進入水體的負荷量 [M/T]

W_{N2} = 外界氨氮進入水體的負荷量 [M/T]

W_{N3} = 外界硝酸氮進入水體的負荷量 [M/T]

C_n = 藻類含氮百分比，無維度。

K_{n1} = 有機氮分解成氨氮之分解率 [1/T]

K_{n2} = 氨氮硝化成硝酸氮之硝化率 [1/T]

K_s = 有機氮沉降率 [1/T]

3. 磷系統(phosphorus cycle)

磷系統包括無機磷與有機磷兩項，無機磷為藻類吸收之養分，經過藻類的代謝死亡產生有機磷，有機磷除了本身沈降以外，又會分解為無機磷被藻類再吸收，如此形成磷系統。其數學式表示如下：

$$\frac{d(P_1V)}{dt} = VDC_pA - VK_pP_1 - VK_sP_1 - QP_1 + W_{P1} \quad (4.1-18)$$

$$\frac{d(P_2V)}{dt} = VK_pP_1 - VGC_pA - QP_2 + W_{P2} \quad (4.1-19)$$

式中， P_1 = 有機磷濃度 [M/L³]

P_2 = 無機磷濃度 [M/L³]

C_p = 藻類含磷百分比，無維度。

K_p = 有機磷分解成無機磷分解率 [1/T]

K_s = 有機磷沈降率 [1/T]

W_{P1} = 外界有機磷進入水體的負荷量 [M/T]

W_{P2} = 外界無機磷進入水體的負荷量 [M/T]

4. 溶氧(dissolved oxygen)

水中植物之光合作用可使溶解之氧增加，而呼吸作用則使氧減少，所以氧之產生率與藻類之生長率成正比。在氮缺乏之環境下，藻類依靠硝酸成長時亦會製造氧。水中氧氣未飽和時，可經由空氣溶解而入。空氣溶氧之係數是水流速度、水深、風速和溫度之函數。氧之消耗主要有 CBOD 之作用、硝酸化作用和沉積物內之需求。有關於氧消長之公式歸納如下：

$$\begin{aligned} \frac{dC_{DO}}{dt} = & K_L(C_{DOS} - C_{DOS}) - \alpha \cdot K_{n2} \cdot \frac{C_{DO}}{C_{DO} + K_{nit}} - OCB \cdot RESP \\ & + G \cdot C_A \cdot \frac{N_2}{N_2 + N_3} \cdot \beta + G \cdot C_A \cdot \frac{N_3}{N_2 + N_3} \cdot \gamma \end{aligned} \quad (4.1-20)$$

式中， C_{DO} = 溶氧濃度 [M/L³]

C_{DOS} = 飽和溶氧 [M/L³]

C_A = 藻類濃度 [M/L³]

K_A = 介面氧交換係數 [1/T]

K_{nit} = 溶氧半飽和常數 [M/L³]

$$\alpha = \frac{64}{14} = \text{氮氮氧化耗氧率 (NH}_3 + 2\text{O}_2 \rightarrow \text{NO}_3 + \text{H}_2\text{O} + \text{H)}$$

$$\beta = \frac{32}{12} = \text{藻類光合作用吸收 CO}_2 + \text{NH}_3 \text{之釋氧率}$$

$$\gamma = \frac{32}{12} + \frac{48C_n}{14} = \text{藻類光合作用吸收 CO}_2 + \text{NO}_3 \text{之釋氧率}$$

$OCRB$ = 藻類含氧百分比，無維度。

$RESP$ = 藻類呼吸耗氧率 $[\text{M}/\text{L}^3/\text{T}]$

水中飽和溶氧 C_{DOS} 是以 Mortimer(1981)之研究所得的經驗公式：

$$C_{DOS} = e^{(7.7117 - 1.31403 \ln(T_s + 45.93))} \quad (4.1-21)$$

式中， T_s = 水表溫度 $[\text{°C}]$

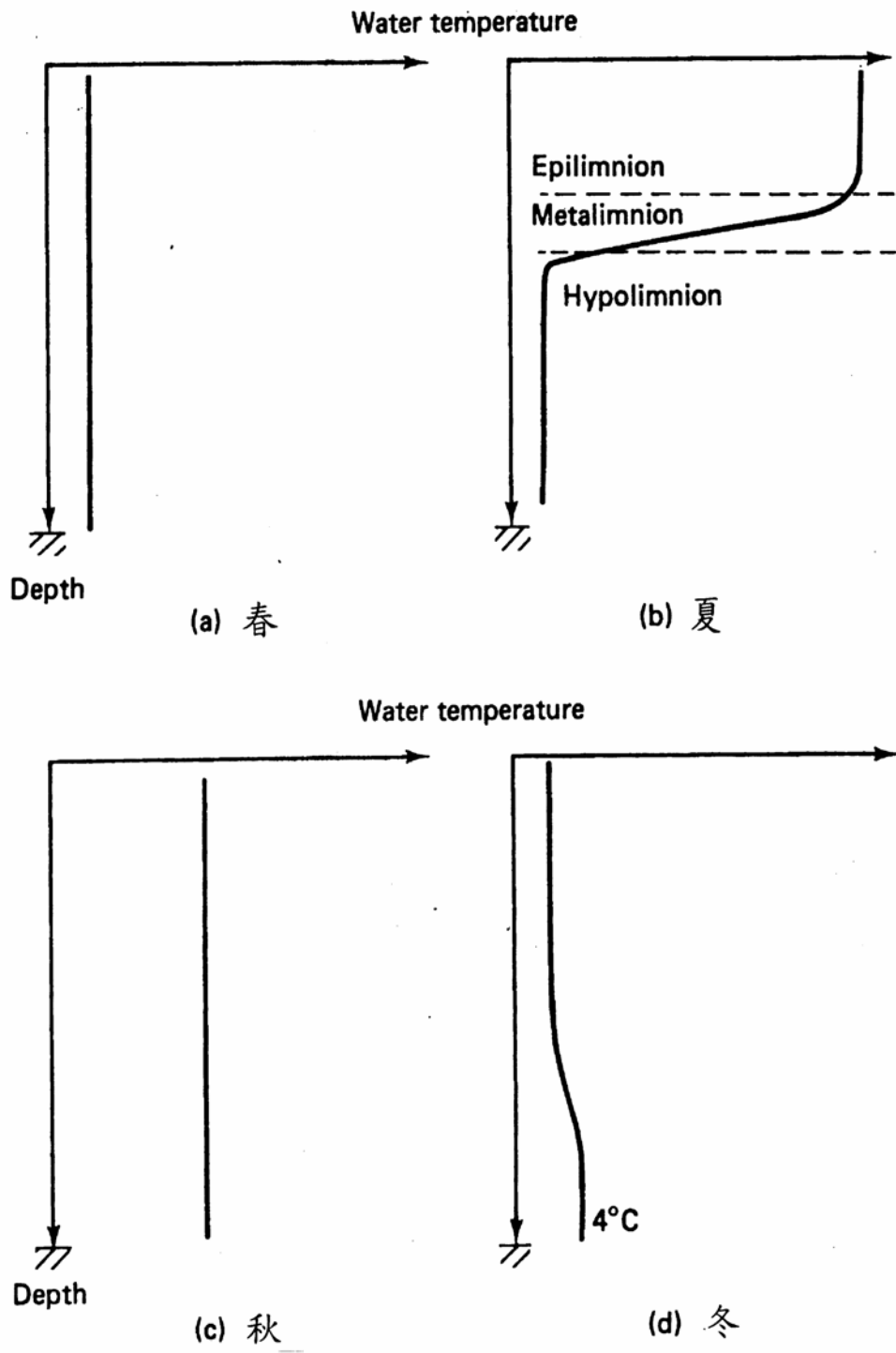


圖 4.1-1 水庫年溫度分佈概略圖

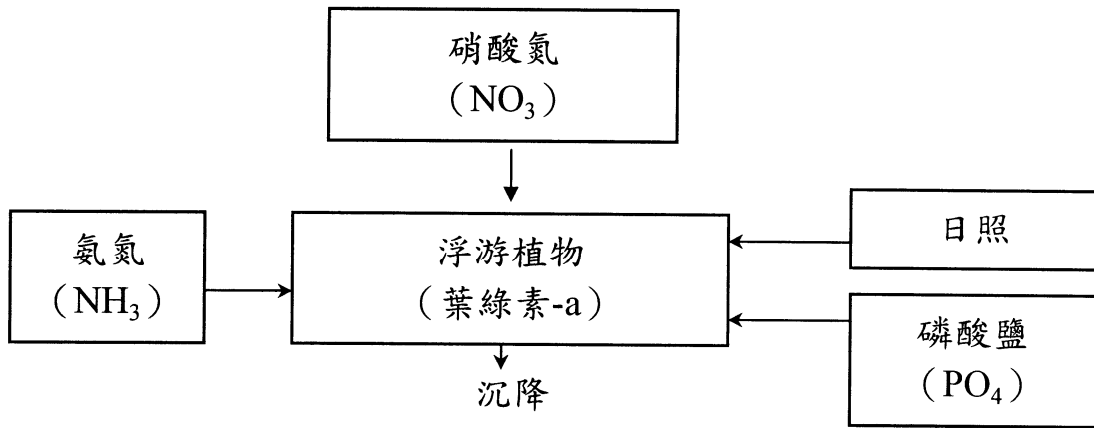


圖 4.1-2 藻類生化反應系統

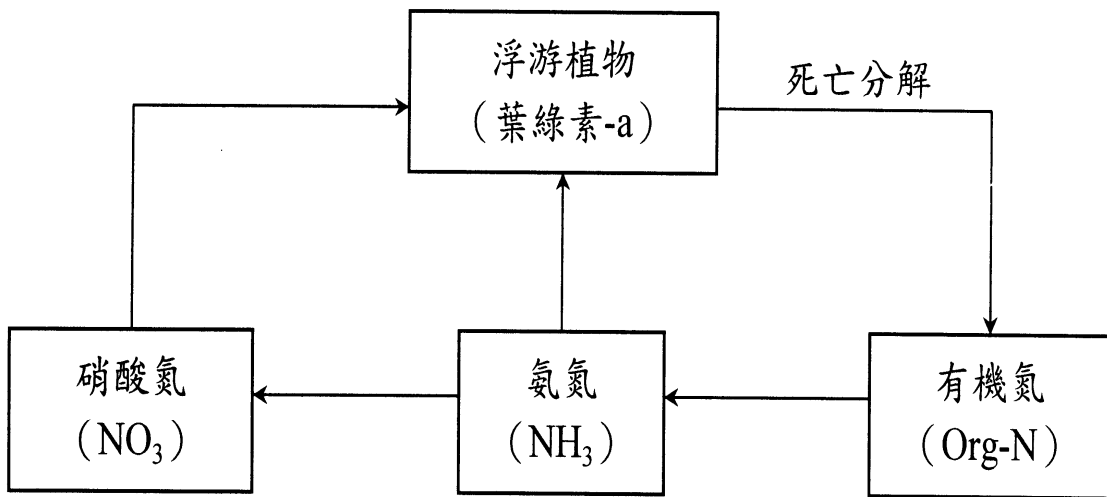


圖 4.1-3 氮生化循環系統

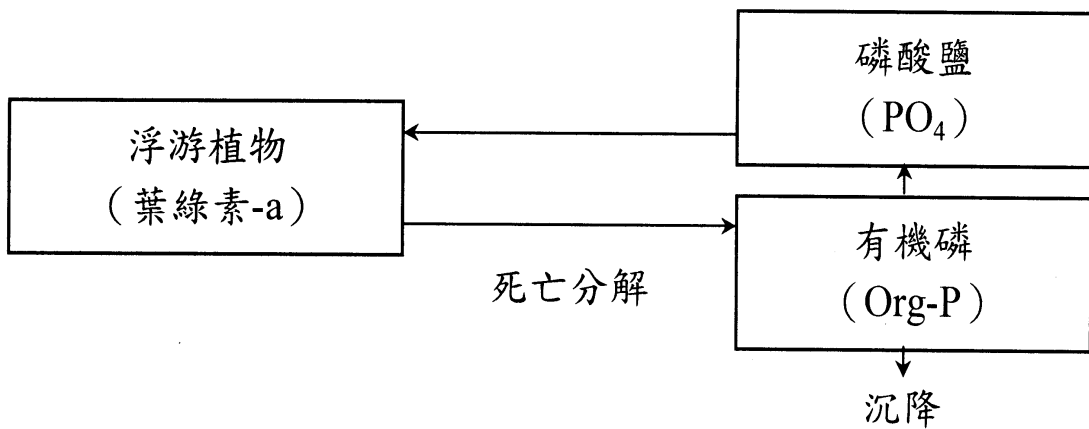


圖 4.1-4 磷生化循環系統

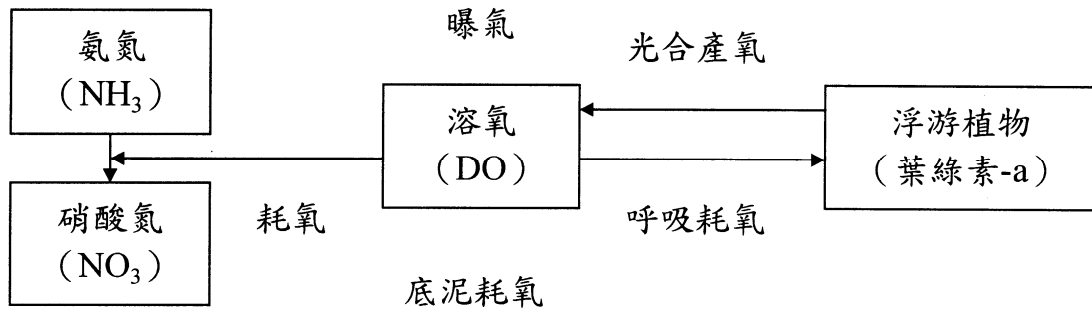


圖 4.1-5 溶氧系統

4.2 W2 模式與 BASINS 串聯模擬

本研究第 1 年針對研究區域-翡翠水庫集水區，將整個集水區分為 5 區，分別為：北勢溪集水區與逮魚溪集水區、金瓜寮溪集水區、後坑子溪集水區及火燒樟溪集水區共 4 區，首先模擬水文，即各區之流量，並模擬水質項目包括：總懸浮固體(Total suspended solids)、葉綠素 *a*(Chlorophyll-*a*)、磷酸鹽(Phosphorus)、氨氮(Ammonium)、硝酸鹽氮(Nitrate-nitrite)、生化需氧量(Biochemical oxygen demand)及溶氧(Dissolved oxygen)。底下為本研究選用之水庫水質模擬串聯模擬步驟。

本研究以 CE-QAUL-W2 水庫水質模式建立之翡翠水庫二維水質模式(郭振泰、龍梧生等，民國 89 年)，並由翡翠水庫管理局收集民國 91、92 年 2 年之水理、水質採樣資料，對此 2 年之水庫水理與水質進行分析，並檢定驗證模式之參數參數。

1. 水庫之分段與分層

翡翠水庫之迴水長達 21 公里，且最大水深 113.5 公尺。故在本研究中，將翡翠水庫分成 19 個分段，第二個分段沿河道等長約 600 公尺，其餘向下游每個分段沿河道等長約 1200 公尺；然後再依水庫實際分段面深度的不同，分成上游 6 個分層遞增至水庫壩體附近的 54 個分層，除了表面分層隨水位升降而改變其厚度外，每個分層皆高 2 公尺。水庫主流(branch inflow)為北勢溪及逮魚堀溪(Beishih Creek and Daiyujyue Creek)之流量加總，第一分段被視為上游邊界，第 19 分段被視為下游邊界，各分段之第 1 分層被視為水表與空氣之邊界，最深之分層被視為水體與底泥之邊界，均不列入有效的計算 (non-active cell) 之內。另外，水庫在迴水長度內有支流 1(tributary1)--金瓜寮溪(Jingualiao Creek)、支流 2(tributary2)--後坑子溪(Huoshaojhang Creek)及火燒樟溪--(Houkengzih Creek)三條支流，分別位於第 3、14 及 17 河段。其水理二維模擬網格分割圖如圖 4.2-1 所示。

2. 模式之輸入資料

本研究模式中所需輸入資料概可分為：水理資料，水文資料，水質資料及控制資料等四部份。

- (1) 水理資料：包括水庫及支流之實測入流量、出流量，集水區模式 BASINS 模擬之各區流量結果為輸入資料。
- (2) 水文資料：包括各分段單元之體積、表面積、單元長度、深度、降雨、實測溫度、以及風、陽光強度等氣象資料。
- (3) 水質資料：各單元之起始水質濃度，支流水質負荷，集水區模式 BASINS 模擬之各區水質結果為輸入資料。
- (4) 控制資料：模擬時間間距之設定，資料格式選擇、模擬項目選擇、起始及終止日期、輸出資料項目控制等。

4.3 模式模擬結果

4.3.1 水理部份

由於優養模擬是架構在水理模擬之上，所以必須先對翡翠水庫之水理現象進行模擬，待水理模擬之後，在進一步做水質的模擬。本文以民國 91、92 年翡翠水庫之水文資料作為模式之輸入資料，檢定驗證模式之水理參數。

在水理模擬方面，主要是模擬水庫水位以及溫度的垂直分佈情形，由圖 4.3-1、圖 4.3-2 可以看出水位變化，圖中實線為實測資料，虛線為模擬資料，由圖我們可以發現模擬值有震盪現象，但仍然可以掌握水位變化之趨勢，推究其原因，可能是由於實測之流量資料以及給定之控制體積不夠準確，造成模式無法將水位之變化模擬得完全一樣，但模擬結果與實測值比較之結果仍在合理的誤差範圍內，可以說明 W2 模式適用於翡翠水庫之水理模擬。

由於翡翠水庫在大壩站的垂直資料比較詳盡，故以大壩站的資料來說明模擬溫度的情形。由下圖實測結果顯示，水庫在夏、秋兩季時會有明顯的分層現象，變溫層約在水面下 10 到 60 公尺之間，而且上、下層水溫約有攝氏 10 度的差距，分層現象一直到冬季之後才在垂直溫度分佈逐漸趨向均勻消失，此刻水庫處於翻滾後之垂直混合狀態。

一般而言，溫度之模擬結果大致良好。2 年實測值與模擬結果之比較如圖 4.3-3、圖 4.3-4，1 到 3 月之水溫垂直分佈十分均勻，到 4、5 月時上、下溫差開始明顯，由圖中可以看出水體表層有分層現象出現，模式也反應出此一現象。到了 6 到 10 月份時，分層現象越來越明顯，而模式亦可反應出來。需注意第 1 及第 19 河段為上游及下游之邊界層，而大壩站則位於第 18 河段。由模擬結果顯示水溫的變化導致水的密度產生不均勻現象，密度不均勻造成流體動量上的變化，進而影響到流場之垂直分佈；整個水庫的流場瞬時間有明顯的環流現象 (circulation)。於 11、12 月份時，翻滾現象發生，水庫水體整個進入了混和狀態，這時溫度分層被打破，溫度開始變得均勻，可以發現這時整個水庫流場變得很混亂，主要是由於主流入流量很大以及明顯的環流現象所造成，使得垂直溫度變化有較不明顯的分層作用。

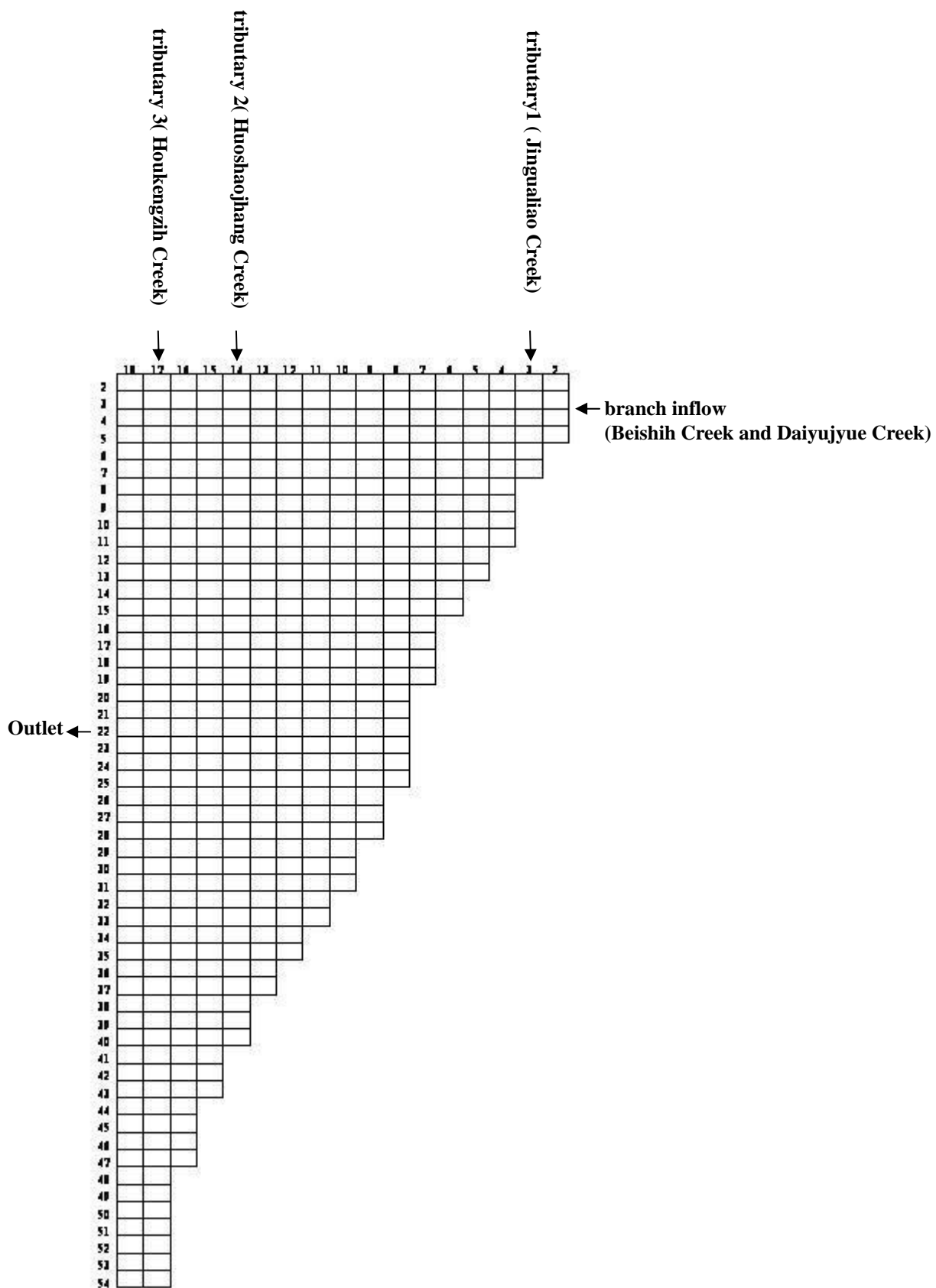


圖 4.2-1 翡翠水庫二維水理模擬網格分割圖

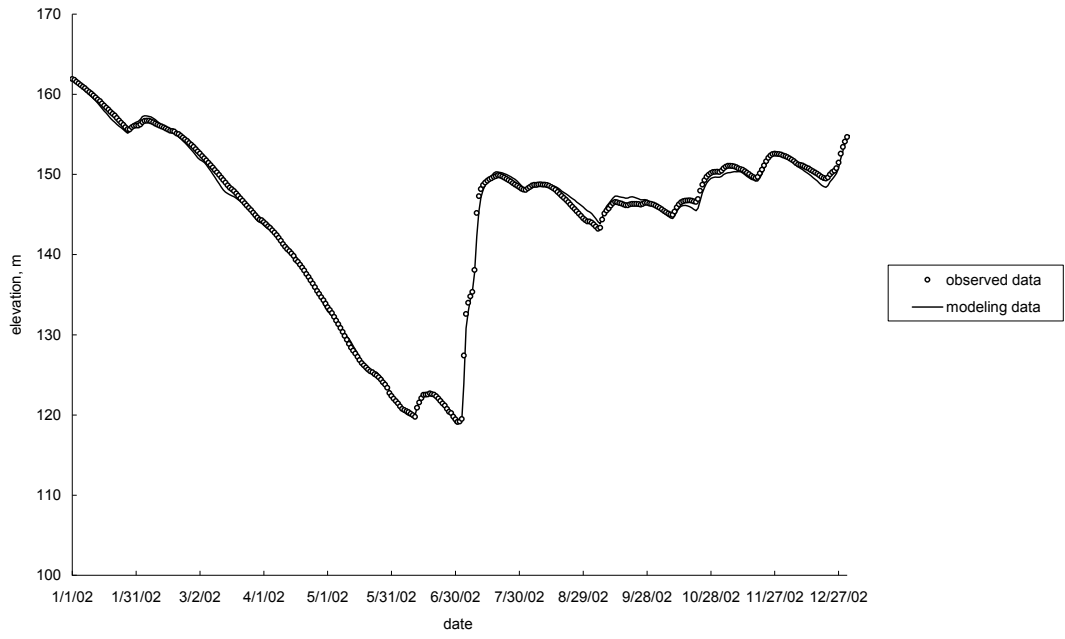


圖 4.3-1 水位比較圖(2002)

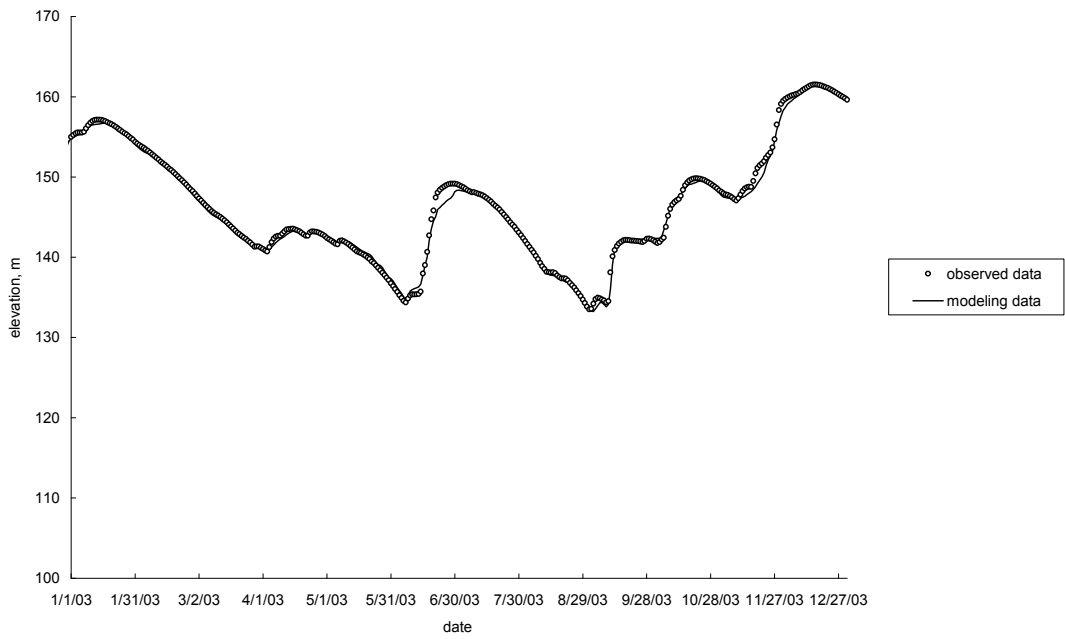


圖 4.3-2 水位比較圖(2003)

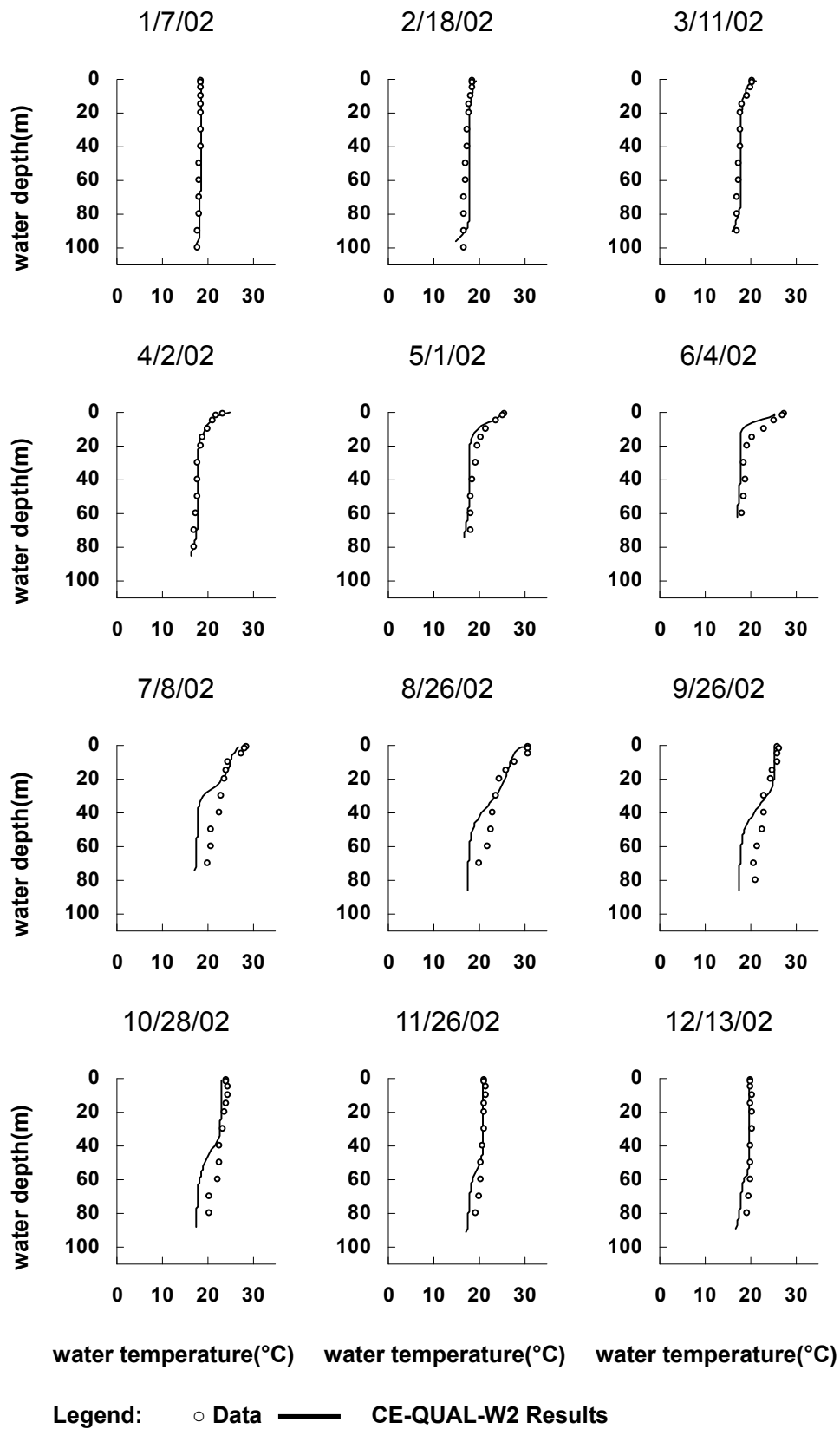


圖 4.3-3 大壩站分層水溫模擬與實測結果(2002)

4.3.2 水質部份

以民國 91、92 年共 2 年翡翠水庫集水區之模擬結果作為模式水質初始條件與邊界條件。本模式之優養模擬以藻類為中心，並以葉綠素 *a* 代表藻類濃度作為優養指標。模擬之水質項目包括：總懸浮固體(Total suspended solids)、葉綠素 *a*(Chlorophyll-*a*)、磷酸鹽 (Phosphorus)、氨氮 (Ammonium)、硝酸鹽氮 (Nitrate-nitrite)、生化需氧量(Biochemical oxygen demand)及溶氧(Dissolved oxygen)並以此模擬結果於水庫操作年報之採樣資料來比對。翡翠水庫水域之採樣，包括大壩、火燒樟、後坑子、鷺鷥潭、媽祖林、永安、灣潭和匯流口等八處，並於大壩及灣潭二站加做垂直分層(上、中、下層)採樣監測，圖 4.3-5 至圖 4.3-11 為翡翠水庫大壩站上層 2 年各水質項目模擬與實測結果。由圖中實測結果得知，夏季時葉綠素 *a* 濃度較高，此乃受到日照及水溫之影響。且藻類濃度在水庫表水之分佈以上游較高，由上游往下游遞減，顯示水庫上游水質較差。而比較各水質項目之模擬與實測結果，兩者有相似的分佈趨勢。其他採樣點之比較結果亦有相同之趨勢分佈。

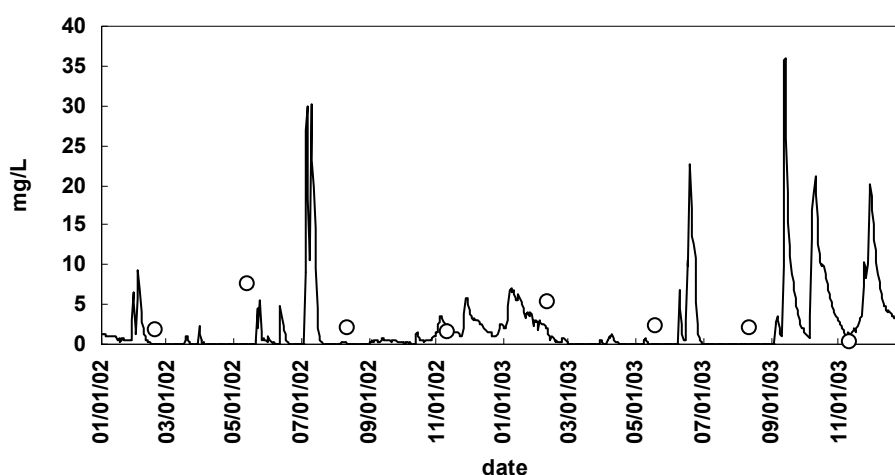


圖 4.3-5 大壩站上層總懸浮固體模擬與實測結果

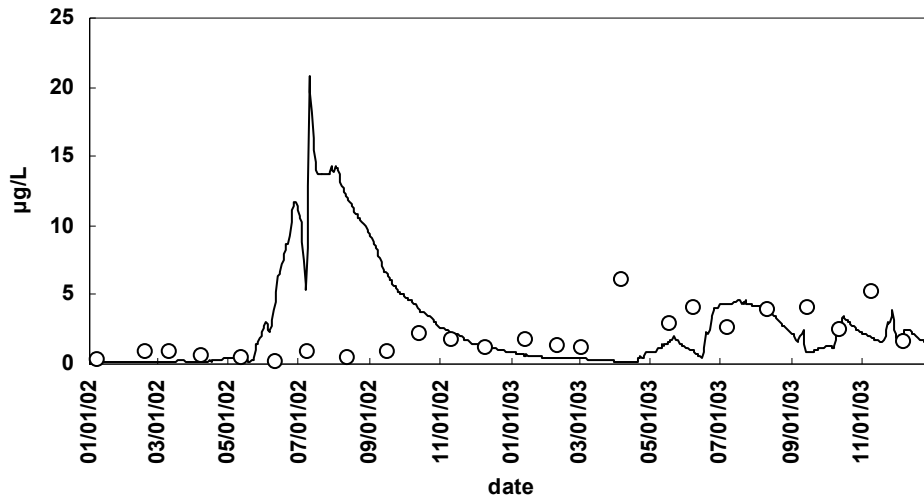


圖 4.3-6 大壩站上層葉綠素 a 模擬與實測結果

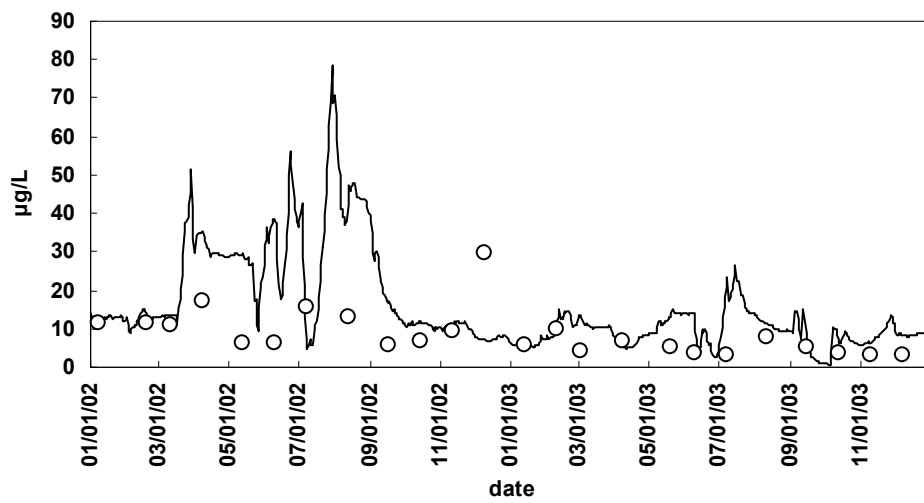


圖 4.3-7 大壩站上層磷酸鹽模擬與實測結果

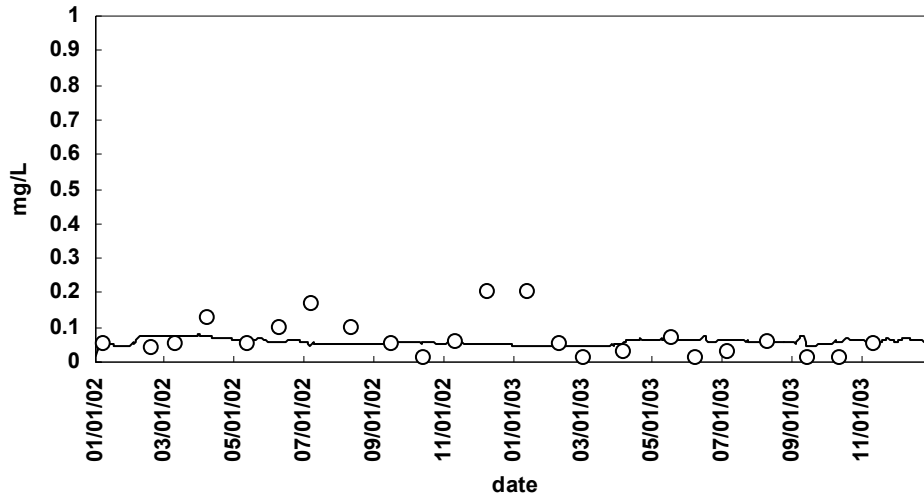


圖 4.3-8 大壩站上層氨氮模擬與實測結果

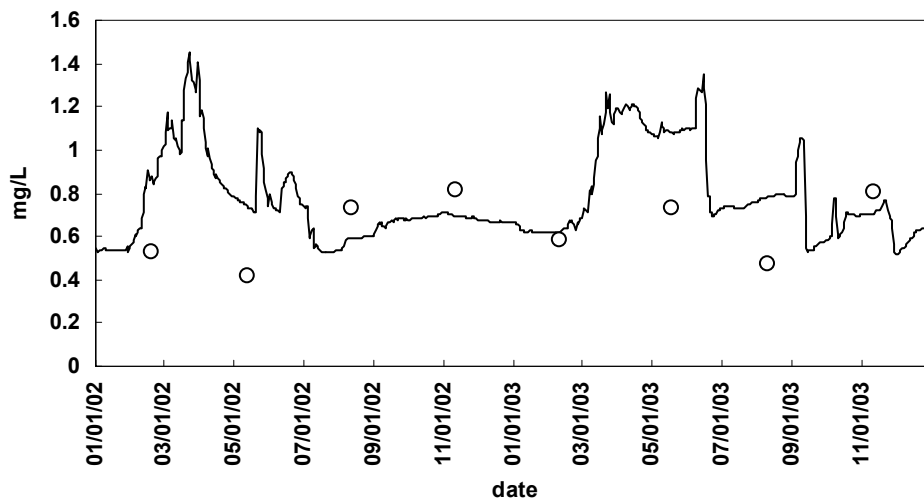


圖 4.3-9 大壩站上層硝酸鹽氮模擬與實測結果

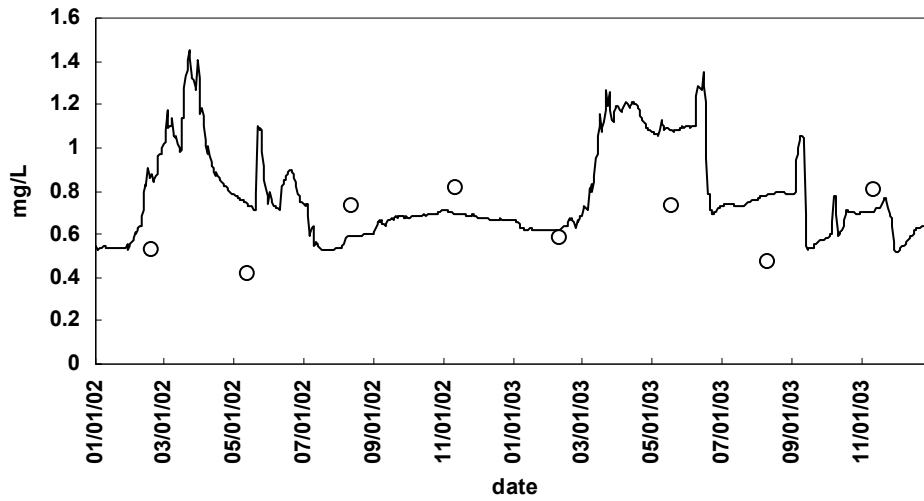


圖 4.3-10 大壩站上層生化需氧量模擬與實測結果

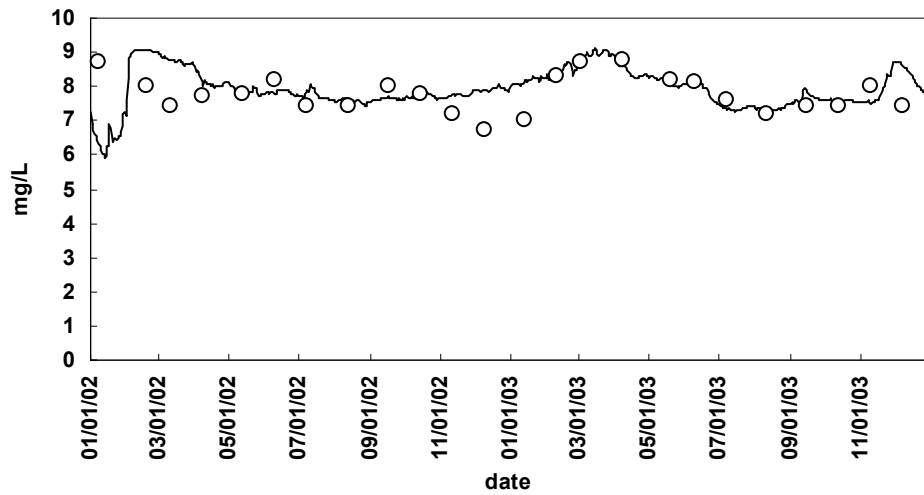


圖 4.3-11 大壩站上層溶氧模擬與實測結果

第五章 模式建立

5.1 最佳化模式之建立

5.1.1 目標函數

本研究為建立一涵蓋整個集水區與水庫水質之優選模式，於集水區設置最佳管理作業(BMPs)以有效減低非點源污染之情形，首先擇定翡翠水庫及其集水區範圍做為研究區域，利用集水區模式 BASINS 模擬集水區中污染物之傳輸情形，集水區之模擬結果則結合水庫水理、水質模式(CE-QUAL-W2 模式)，以探究污染物進入水庫以後物理與生化反應對污染物之影響，於集水區內設置不同類型且不同大小(因地制宜)之最佳管理作業(BMPs)，利用優選法中之遺傳演算法、模擬退火法等求解以得到集水區最佳管理作業(BMPs)之最佳配置。

本研究之目的在於求得集水區內最佳管理作業(BMPs)之最佳配置，優選模式之目標函數即為整個集水區內設置 BMPs 之年計成本為最低，其表示式如下：

$$\min_{X_i} T = \sum_{i=1}^M N(X_i)C_A(X_i) \quad (5.1-1)$$

上式中，

T ：整個集水區之 BMPs 總年計成本；

i ：第 i 個子集水區；

M ：整個集水區劃分子集水區個數；

$N(X_i)$ ：第 i 個子集水區容許設置 BMPs 種類 X_i 之數量；

$C_A(X_i)$ ：BMPs 種類為 X_i 之年計成本函數；

X_i ：決策變數，即第 i 個子集水區設置 BMPs 種類，

$X_i \in \{P, S, T, N\}$ 。

本研究假設整個集水區可劃分為 M 個子集水區，考慮若干種 BMPs 可供設置，每個子集水區僅可設置單一種類之 BMPs，又各種類之 BMPs 其大小、型式為均為固定。 X_i 為本最佳化模式之決策變數，代表第 i 個子集水區設置 BMPs 種類；本研究考慮 3 種 BMPs：濕式滯留池(wet detention pond)、草溝(grass swale)、入滲溝(Infiltration trenches)與不加以設置(none)共 4 種情況，分別以 P 、 S 、 T 與 N 來代表，即 $X_i \in \{P, S, T, N\}$ 。

5.1.2 限制式

最佳化模式之限制式為水庫取水口位置之各水質項目需達到要求之限制濃度。在此考慮多種水質項目包括：總磷(Total Phosphorus, TP)、氨氮(Ammonium)、總懸浮固體(Total suspended Solid, TSS)、硝酸鹽氮(Nitrate-nitrite, NO_x)、葉綠素 a (Chlorophyll a)、生化需氧量(Biochemical oxygen demand)與溶氧(Dissolve Oxygen, DO)等 J 個水庫水質項目之濃度。限制式可分為 2 種型式。第 1 型為模擬時間內取水口位置之水質項目 j 之平均濃度 \bar{S}_j 需滿足其限制濃度 S_{c_j} ，即 $j=1,2,\dots,J-1$ ：

$$f(S_j) = \bar{S}_j \leq S_{c_j} \quad (5.1-2)$$

上式中： \bar{S}_j 為模擬時間內水庫取水口水質項目 j 之平均濃度； S_{c_j} 則為水質項目 j 之限制濃度。 $j=1,2,\dots,J-1$ ：為第 j 個水質項目(1: 總磷; 2: 氨氮, ...，生化需氧量)。

同時， $j=J$ ：

$$f(S_J) = \bar{S}_J \leq S_{c_J} \quad (5.1-3)$$

上式中： \bar{S}_J 為模擬時間內水庫取水口水質項目 J 之平均濃度； S_{c_J} 則為水質項目 J 之限制濃度。 J ：為第 J 個水質項目(J : 溶氧)。

另考慮第 2 型之限制條件為模擬時間內取水口位置之水質項目 j 之濃度 S_j 滿足其限制濃度 S_{c_j} 需達一限制比例 r_j ，即 $j=1,2,\dots,J-1$ ：

$$f(S_j) = p(S_j \leq S_{c_j}) \geq r_j \quad (5.1-4)$$

上式中： S_j 為模擬時間內每日水庫取水口水質項目 j 濃度； S_{c_j} 則為水質項目 j 之限制濃度， $p(S_j \leq S_{c_j})$ 為模擬時間內水庫取水口 $S_j \leq S_{c_j}$ 之比例， r_j 為水質項目 j 之限制比例。 $j=1,2,\dots,J-1$ ：為第 j 個水質項目(1: 總磷; 2: 氨氮, ...，生化需氧量)。

同時， $j=J$ ：

$$f(S_J) = p(S_J \geq S_{c_J}) \geq r_J \quad (5.1-5)$$

上式中： S_J 為模擬時間內每日水庫取水口水質項目 J 濃度； S_{c_J} 則為水質項目 J 之

限制濃度， $p(S_j \geq S_{c_j})$ 為模擬時間內水庫取水口 $S_j \geq S_{c_j}$ 之比例， r_j 為水質項目 J 之限制比例。 J ：為第 J 個水質項目 (J ：溶氧)。

5.2 最佳管理作業擇定

5.2.1 最佳管理作業類型

集水區非點源污染由於傳輸的過程較為複雜，其控制方式也與點源污染不同，近年來在歐美及日本、澳洲等地區都在大力推動，並使用「最佳管理作業」(Best Management Practices, BMPs)。BMPs 之主要功能在於減少污染源，減緩逕流量以及利用重力沈降或植物攝取等機制來去除污染物控制方法包括建造硬體設施 (即結構性, Structural) 如入滲、滯留設施，或透過管理性措施 (即非結構性, Non-structural) 如肥料使用管制、土地使用規劃等，以控制或削減非點源污染。目前在集水區內最常用的 BMPs 有滯留池、植物緩衝帶、人造溼地等。

本研究則考慮 3 種結構性 BMPs：濕式滯留池(wet detention pond)、草溝(grass swale)、入滲溝(Infiltration trenches)和不加以設置(None)共 4 種情況，建立其成本函數、適合設置之條件、與去除效率之關係，以了解設置上述 BMPs 後，翡翠水庫集水區非點源污染削減的情形及其造成水庫水質之變化。

5.2.2 BMPs 成本函數

1. 濕式滯留池(wet detention pond)

濕式滯留池之成本函數一般可表示成總體積之函數，由 Brown and Schuler(1997)之研究，濕式滯留池之建造成本可表示如下式所示：

$$C_c(X_i = P) = 24.5V_p^{0.71} \quad (5.2-1)$$

此處， $C_c(X_i = P)$ 為濕式滯留池之建造成本(construction cost)(美金，US\$)； V_p 為濕式滯留池之總體積(立方呎，ft³)。將上式轉換成公制單位-立方公尺(m³)與新台幣(NT\$)，NT\$: US\$ = 33:1(台灣銀行利率匯率公告網頁，2007)，可表為下式：

$$C_c(X_i = P) = 64.37V_p^{0.71} \quad (5.2-2)$$

此處， $C_c(X_i = P)$ 為濕式滯留池之建造成本(新台幣，NT\$)； V_p 為濕式滯留池之總體積(立方公尺，m³)。

2. 草溝(grass swale)

草溝之成本一般為設置長度之函數，可表示如下式(Young et al., 1996)：

$$C_c(X_i = S) = KL_s \quad (5.2-3)$$

此處， $C_c(X_i = S)$ 為草溝之建造成本(美金，US\$)； L_s 為草溝之總長度(英尺，ft)； $K=5-14$ 為草溝之成本因子。將上式轉換成公制單位-公尺(meter)與新台幣(NT\$)，可表為下式：

$$C_c(X_i = S) = K_s L_s \quad (5.2-4)$$

此處， $C_c(X_i = S)$ 為草溝之建造成本(新台幣，NT\$)； L_s 為草溝之總長度(公尺，meter)； $K_s=40.23-150.88$ 為草溝之成本因子，為簡化設計， K_s 在本研究設定為 80。

3. 入滲溝(Infiltration trenches)

入滲溝之成本函數一般可表示成總體積之函數，由 Young et al.(1996)之研究，入滲溝之建造成本可表示如下式所示：

$$C_c(X_i = T) = 16.9V_t^{0.69} \quad (5.2-5)$$

此處， $C_c(X_i = T)$ 為入滲溝之建造成本(美金，US\$)； V_t 為入滲溝之總體積(立方英尺，ft³)。將上式轉換成公制單位-立方公尺(m³)與新台幣(NT\$)，可表為下式：

$$C_c(X_i = T) = 47.68V_t^{0.69} \quad (5.2-6)$$

此處， $C_c(X_i = T)$ 為入滲溝之建造成本(新台幣，NT\$)； V_t 為入滲溝總體積(立方公尺，m³)。

4. 不加以設置

不加以設置其建造成本為 0，即 $C_c(X_i = N) = 0$ 。

5.2.3 BMPs 設置條件

前述 3 種 BMPs：濕式滯留池(wet detention pond)、草溝(grass swale)與入滲溝(Infiltration trenches)，根據所需面積、限制坡度、及其土地使用訂定其設置條件。

1. 濕式滯留池

(1) 所需面積：大於 8,100 m² (長 = 90 m, 寬 = 90 m, and 深度 = 3 m)；(Kuo et al., 1997; Hartigan et al., 1989)；

(2) 限制坡度：小於 30% (Kuo et al., 1997)；

(3) 土地使用：荒地或草生地。

2. 草溝

(1) 所需面積：大於 180 m² (90 m × 2 m)(Young et al., 1996)；

(2) 限制坡度：小於 30 % (Kuo et al., 1997)；

(3) 土地使用：荒地或草生地。

3. 緩衝帶(入滲溝)

(1) 所需面積：大於 900 m²(長 = 30 m, 寬 = 30 m, and 深度 = 1.5 m)；

(2) 限制坡度：小於 15 % (U. S. Environmental Protection Agency, 2004)；

(3) 土地使用：荒地或草生地。

5.2.4 BMPs 特性

本研究考慮之 3 種 BMPs(濕式滯留池(wet detention pond)、入滲溝(Infiltration trenches)，對各污染物之去除效率可整理如下表所示：

表 5.2-1 3 種 BMPs 去除效率表

BMPs \ 污染物項目	(單位：%)			
	總懸浮固體	正磷酸鹽	硝酸氮	氨氮
濕式滯留池	80	66	43	33
草溝	81	38	31	84
入滲溝	87	85	82	51

(資料來源：Winer, 2000)

本研究考慮結構性 BMPs 之經濟壽命：將 3 種結構性 BMPs：濕式滯留池(wet detention pond)、草溝(grass swale)與入滲溝(Infiltration trenches)之經濟壽命設定如表 5.2-2 所示。另年操作及維護成本(Annual maintenance cost)方面：將 3 種結構性 BMPs 之年操作及維護成本(Annual maintenance cost)率 $B(X_i)$ 設定如表 5.2-3 所示，年操作及維護成本 C_M 則如下式所示。

$$C_M(X_i) = C_c(X_i) \times B(X_i) \quad (5.2-7)$$

依下式可計算，並假設在年利率為 5%，得到本研究考慮之 3 種結構性 BMPs 之年計成本(Annual Costs) C_A ，年計成本如表 5.2-4 所示。

$$C_A(X_i) = C_c(X_i) \times \left(\frac{b(1+b)^n}{(1+b)^n - 1} \right) + C_M(X_i) \quad (5.2-7)$$

上式中， C_A 為年計成本(annual cost)； b 為年利率，與 n 為其經濟壽命。

表 5.2-2 BMPs 經濟壽命

BMPs (X_i)	經濟壽命(年)	參考資料
濕式	50	Wiegand et al., 1986;
滯留池 [D]		Schueler, 1987; SWRPC, 1991
草溝 [G]	10	Schueler, 1987; SWRPC, 1991
入滲溝 [T]	10	Wiegand et al., 1986; SWRPC, 1991

表 5.2-3 BMPs 操作及維護成本

BMPs (X_i)	年操作及維護成本(% 建造成本，不包含土地成本) $R(X_i)$	參考資料
濕式	3%	Brown and Schueler, 1997;
滯留池 [D]		SWRPC, 1991
草溝 [G]	7%	SWRPC, 1991
入滲溝 [T]	20%	Wiegand et al., 1986; Schueler, 1987; SWRPC, 1991

表 5.2-4 各 BMPs 之年計成本

BMPs	建造成本 (C_c) (NT\$)	年操作及維護 成本(C_M) (NT\$)	年計成本 (C_A) (NT\$)
濕式			
滯留池 [D]	83,650	2,509	7,092
草溝 [G]	7,200	504	1,436
入滲溝 [T]	6,891	1,378	2,271

5.3 最佳管理作業可能位址

由前章節整理可知，本研究考慮 3 種結構性 BMPs：濕式滯留池(wet detention pond)、草溝(grass swale)與入滲溝(Infiltration trenches)，並依其特性訂定設置條

件。基於上述，本研究收集翡翠水庫集水區地理資訊系統圖層(逢甲，2004)，圖 5.3-1 為集水區之土地使用分佈情形，由圖觀之，林地仍為主要之土地使用，其次則為果園及茶園；圖 5.3-2 則為集水區之坡度分佈情形。集水區坡度超過 55 % 的區域佔相當高的比例，並利用地理資訊系統軟體 ArcView 3.3(ESRI, 1992) 圖層套疊分析工具，分析土地使用與坡度分佈之圖層(陳錦媽，2003)，可得兩圖層套疊分析之結果。經套疊分析工具和資料篩選工具，輸入 3 種 BMPs 之設置條件，可得濕式滯留池(wet detention pond)、草溝(grass swale)與入滲溝(Infiltration trenches)於 22 個子集水區內可能之設置位址，如圖 5.3-3 至圖 5.3-5 所示，另整理第 i 個集水區 BMPs 種類為 X_i 之可能設置個數 $N_p(X_i)$ 之可能設置個數如表 5.3-1 所示。且由前人研究可知：濕式滯留池(wet detention pond)、草溝(grass swale)與入滲溝(Infiltration trenches)之平均設計排水區域如表 5.3-2 所列。由各子集水區之面積與 BMPs 之平均設計排水區域可得第 i 個子集水區 BMPs 種類為 X_i 之容許設置個數 $N_a(X_i)$ 如表 5.3-3 所示。

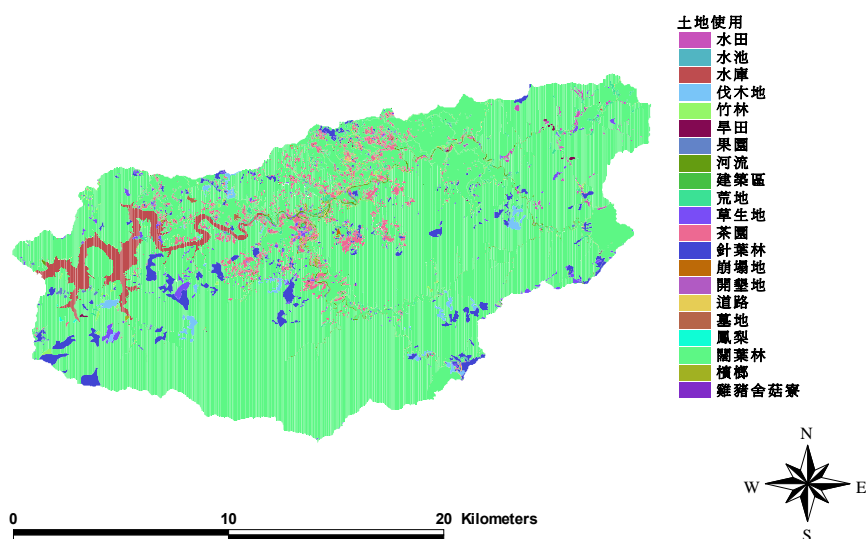


圖 5.3-1 翡翠水庫集水區土地使用情形

資料來源：(逢甲地理資訊系統中心，2004)

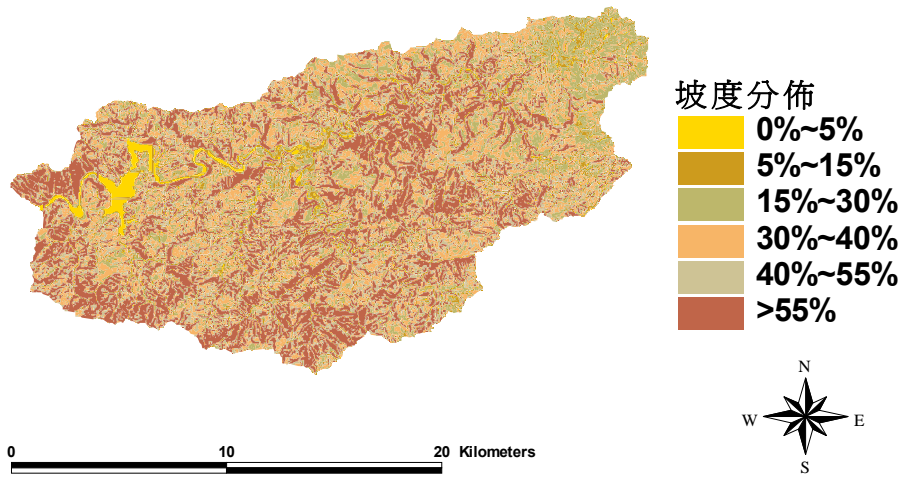


圖 5.3-2 翡翠水庫集水區坡度分佈情形

資料來源：(逢甲地理資訊系統中心，2004)

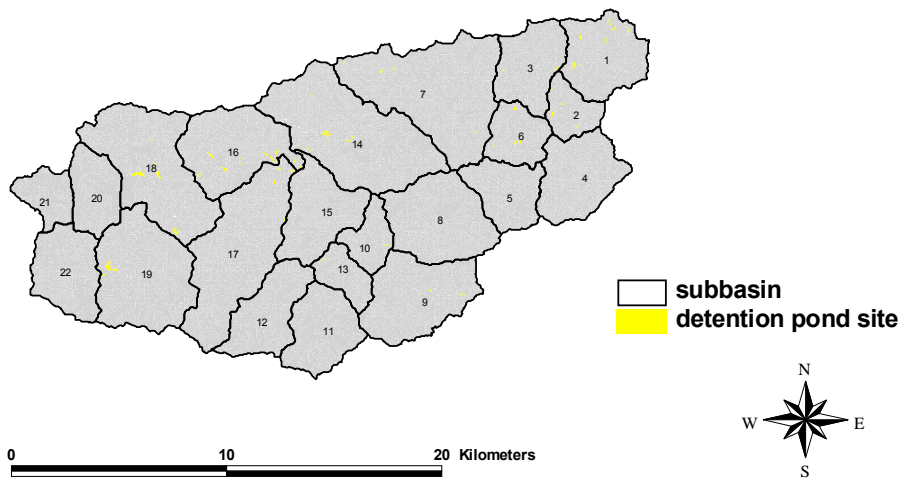


圖 5.3-3 各集水區可能滯留池設置位址

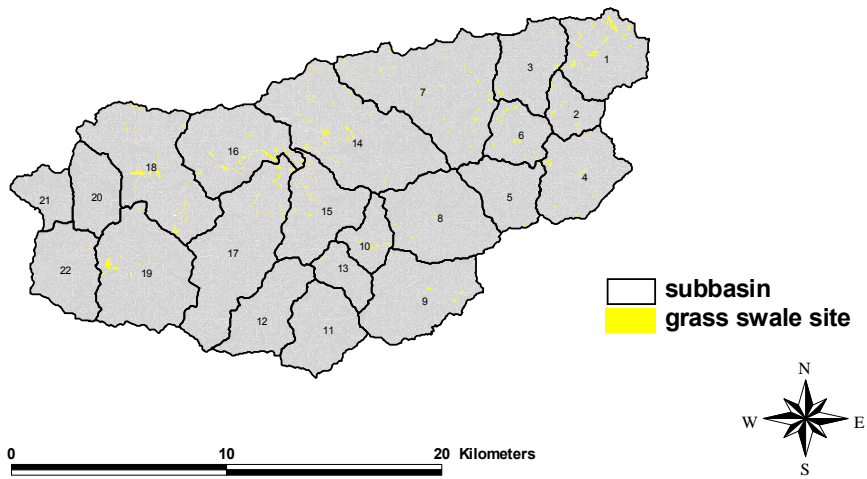


圖 5.3-4 各集水區可能草溝設置位址

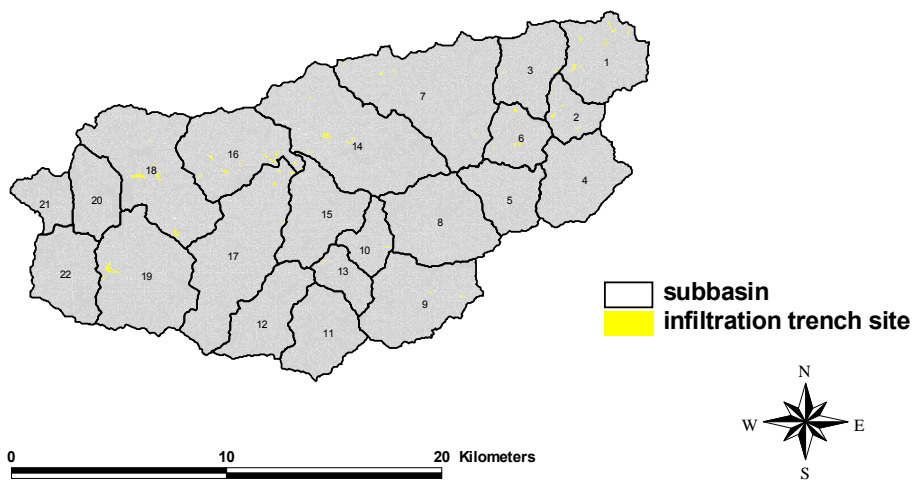


圖 5.3-5 各集水區可能入滲溝設置位址

表 5.3-1 各子集水區 BMPs 可能設置個數

Subbasin i	Possible No. $N_p(X_i)$		
	Wet detention pond	Grass swale	Infiltration trench
1	16	2,512	279
2	7	481	23
3	5	624	56
4	-	722	46
5	-	161	5
6	7	755	35
7	6	1,501	44
8	-	235	9
9	2	481	45
10	1	351	19
11	-	15	2
12	-	-	-
13	1	73	4
14	15	2,945	292
15	-	936	65
16	21	2,380	206
17	8	1,131	107
18	22	2,263	120
19	17	1,203	43
20	-	30	-
21	-	63	2
22	-	97	4
Total	128	18,958	1,405

註：'- ' 表該子集區容許設置個數為 0

表 5.3-2 各 BMPs 容許排水面積

BMPs type	Drainage area (ha.)
Wet detention pond	120
Grass swale	4
Infiltration trench	4

(資料來源：Hartigan et al., 1989; U. S. Environmental Protection Agency, 2004a; 2004b)

由上述分析，得到表 5.3-1 與表 5.3-3 分別為 $N_p(X_i)$ 與 $N_a(X_i)$ ，則式 5.1-1 中 $N(X_i)$ 可由式 5.3-1 計算而得。

$$N(X_i) = \begin{cases} N_a(X_i) & , N_a(X_i) \leq N_p(X_i) \\ N_p(X_i) & , otherwise \end{cases} \quad (5.3-1)$$

表 5.3-3 各子集水區 BMPs 設置個數

Subbasin	Allowable No. $N_a(X_i)$	
i	Wet detention Pond	Grass swale and Infiltration trench
1	10	311
2	4	133
3	9	265
4	11	323
5	8	225
6	6	175
7	23	700
8	14	418
9	14	409
10	4	131
11	9	278
12	9	277
13	4	125
14	24	708
15	11	318
16	13	395
17	20	606
18	19	563
19	17	517
20	7	200
21	4	134
22	9	280
Total	250	7,492

$N(X_i)$ 則整理如表 5.2-4 所示。結合 3 種 BMPs 對於各水質項目之去除效率 $R(X_i, j)$ 如表 5.2-1 所示，可得各子集水區採用 BMPs 種類為 X_i 之設計去除效率

$r(X_i, j)$ 可表示為下式：

$$r(X_i, j) = R(X_i, j) \frac{N(X_i)}{N_a(X_i)} \quad (5.3-2)$$

表 5.3-4 各子集水區 BMPs 設置個數

Subbasin i	No. of BMPs, $N(X_i)$		
	Wet detention pond	Grass swale	Infiltration trench
1	10	311	279
2	4	133	23
3	5	265	56
4	-	323	46
5	-	161	5
6	6	175	35
7	6	700	44
8	-	235	9
9	2	409	45
10	1	131	19
11	-	15	2
12	-	-	-
13	1	73	4
14	15	708	292
15	-	318	65
16	13	395	206
17	8	606	107
18	19	563	120
19	17	517	43
20	-	30	-
21	-	63	2
22	-	97	4
Total	108	6,228	1,405

註：'- ' 表該子集區設置個數為 0

5.4 模式求解

如前所述，本研究所建立之最佳化模式為一非線性之模式，其決策變數為

X_i ，其中 $X_i \in \{P, S, T, N\}$ ， $i = 1, 2, \dots, 22$ ，即整個集水區共劃分為 22 個子集水區，故本模式之解空間(solution space) = $4^{22} = 2 \times 10^{13}$ ，其範圍相當大，故本研究採用啟發式演算法(heuristic algorithms)中的遺傳演算法(Genetic Algorithms, GAs)做為求解之工具。

本研究採用麻省理工學院機械工程學系所開發的 GALib 軟體(Wall, 1996)，GALib 為一 C++ 撰寫之程式，利用物件導向(Object-Oriented Programming, OOP)之概念設計而成，本研究可透過編修其元件加以有效求解。

5.4.1 求解演算流程

本研究使用遺傳演算法求解最佳化模式，模擬部份：集水區模式(BASINS)與水庫水質模式(W2)，演算流程如圖 5.4-1 所示。演算之目的為求得整個集水區 BMPs 之最佳配置，各集水區之 BMPs 即為本最佳化模式之決策變數。首先利用 GALib 產生染色體，染色體之基因即為各集水區所採用之 BMPs，再將染色體轉換成 BASINS 之 BMPs 模組輸入資料；接著進行集水區(BASINS model)與水庫(W2 model)之連續模擬，模擬結果首先需滿足水質限制條件，如未能滿足上述條件，則重新產生新的一組染色體；如滿足上述條件，則記錄該組染色體資料。最後，演算可得滿足水質限制條件且成本為最小之各集水區 BMPs 配置方案，此方案即為集水區 BMPs 最佳配置策略。

利用遺傳演算法求解本研究優選模式之流程可繪如圖 5.4-2 所示，圖中之工作流程包括進行染色體編碼、產生初始世代、計算目標函數、檢查是否達到最大世代數、產生下一世代以及演算終止等步驟，而在產生下一世代之步驟中又包含計算適合度、進行複製繁殖、進行交配繁殖以及進行突變繁殖等子步驟。茲將各步驟之內容說明如后。

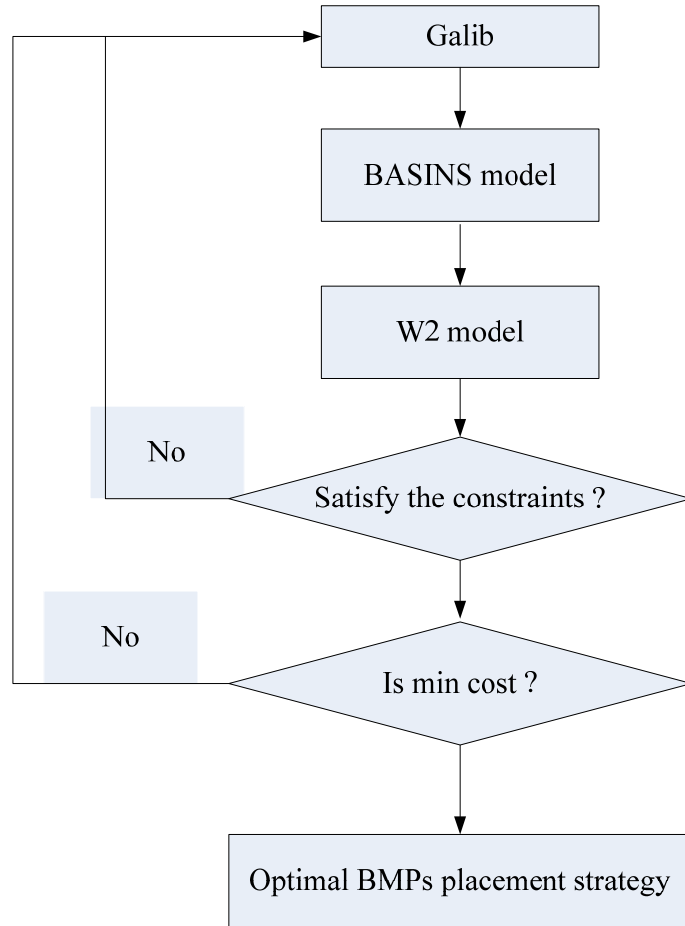


圖 5.4-1 演算流程圖

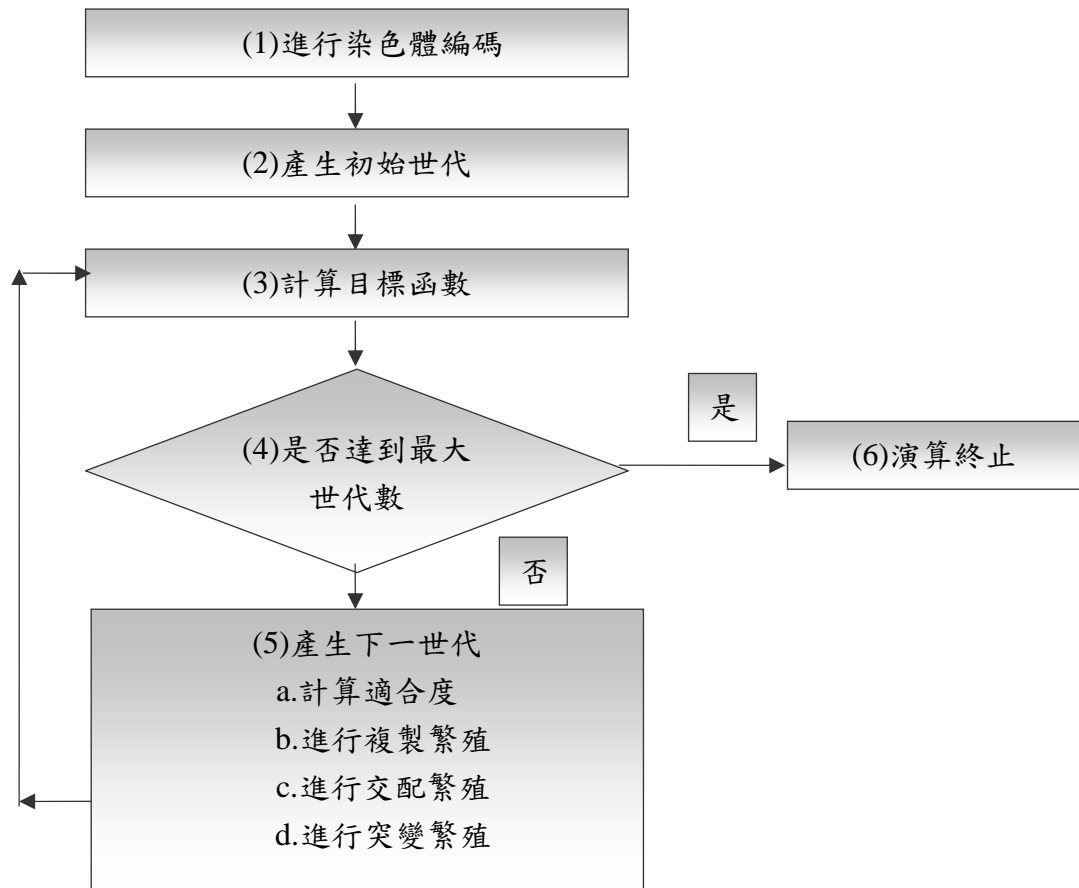


圖 5.4-2 遺傳演算法演算流程圖

(1) 進行染色體編碼

本研究將本優選模式之 22 個子集水區採用 BMPs 種類，即決策變數視為染色體的 22 個基因，並選用 GALib 中之整數對偶(integer allele)基因方式進行編碼，即編碼之可能產生基因(決策變數, X_i)為下列 4 種可能, $X_i \in \{P, S, T, N\}$, $i = 1, 2, \dots, 22$ 。

(2) 產生初始世代

本研究以隨機方式產生 200 條染色體作為初始世代，每一條染色體代表一個可行解(feasible solution)。

(3) 計算目標函數

本研究將 200 條染色體所代表之決策變數代入目標函數式以計算各染色

體之目標函數。

(4) 檢查是否達到最大世代數

本研究設定之最大世代數為 100，若達到最大世代數即停止演算。若產生之世代數尚未達到最大世代數，則需繼續產生下一世代。

(5) 產生下一世代

在產生下一世代之步驟中，需包含下列子步驟：

a. 計算適合度

適合度之計算包括目標函數值(objective function)及懲罰函數(penalty function)，目標函數值即公式 5.1-1 所提之 T ，懲罰函數則為各限制式如發生未滿足之情況，則乘上懲罰因子(penalty factor)， $P_j = 1 \times 10^9$ $j=1,2,\dots,J$ ，計算前一代各染色體適合度 t 為目標函數值及懲罰函數總和之倒數，如下式所示：

$$t = \left[T + \sum_{j=1}^J P_j f(S_j) \right]^{-1} \quad (5.4-1)$$

又上式中

$$f(S_j) = \begin{cases} 0 & , f(S_j) \text{ is true} \\ 1 & , f(S_j) \text{ is false} \end{cases} \quad (5.4-2)$$

然後計算各染色體之適合度比例 n_k ，即：

$$n_k = \frac{t_k}{\sum t_k} \quad (5.4-3)$$

各染色體之適合度比例 n_k 即為其與下一世代被選取為交配母代之機率，此即為輪盤法(RouletteWheel method)之概念。

b. 進行複製繁殖

本研究選取每世代中適合度最大的染色體，將其複製繁殖到下一世代，即為菁英策略(elitism)。

c. 進行交配繁殖

本研究每次依輪盤法選取兩條染色體為交配母代，進行交配繁殖，交配機率設定為 0.8；每次交配後產生 1 個子代染色體，子代染色體則為隨機選取兩母代染色體中之基因組合而生成，如此重覆隨機選取交配母代染色體並進行交配繁殖，直到產生至 200 個子代染色體。

輪盤法就是依適合度的優劣分配其機率大小，適合度越優者機率分配越大，反之越小，將解集中之染色體依適合度分配機率大小，其機率大小如同輪盤之分隔大小，如此而行，機率大者被選取的機會就高，機率小者就容易在演算過程中被淘汰。

d. 進行突變繁殖

突變繁殖為隨機產生一個全新之子代染色體，本研究將突變機率設為 0.05，即在 200 個子代染色體中隨機選取 10 個染色體進行突變繁殖。

(6) 演算終止

當演算終止時，即可搜尋到最大世代時之最佳解。

表 5.4-1 遺傳演算法採用方式

演算步驟	採用方式
染色體編碼	整數對偶(integer allele)編碼
適合度函數	目標函數加懲罰函數(penalty function)之倒數
交配繁殖	交換交配
突變繁殖	隨機產生一個全新之子代染色體

表 5.4-2 遺傳演算法各參數設定值

演算參數	設定值
初始世代數	200
最大世代數	100
交配率	0.8
突變率	0.05

另本研究選用 GAlib 之元件如表 5.4-3 所示。另將各子集水區及各 BMPs 依物件導向之語法撰寫，其物件導向示意圖如圖 5.4-3 所示。

表 5.4-3 GAlib 各選取元件

Galib	Adopted operator
Algorithm	GASimpleGA
Gene	GAAlleleSet<int>
Chromosome	GA1DArrayGenome<int>
Crossover	TwoPointCrossover
Mutation	SwapMutator

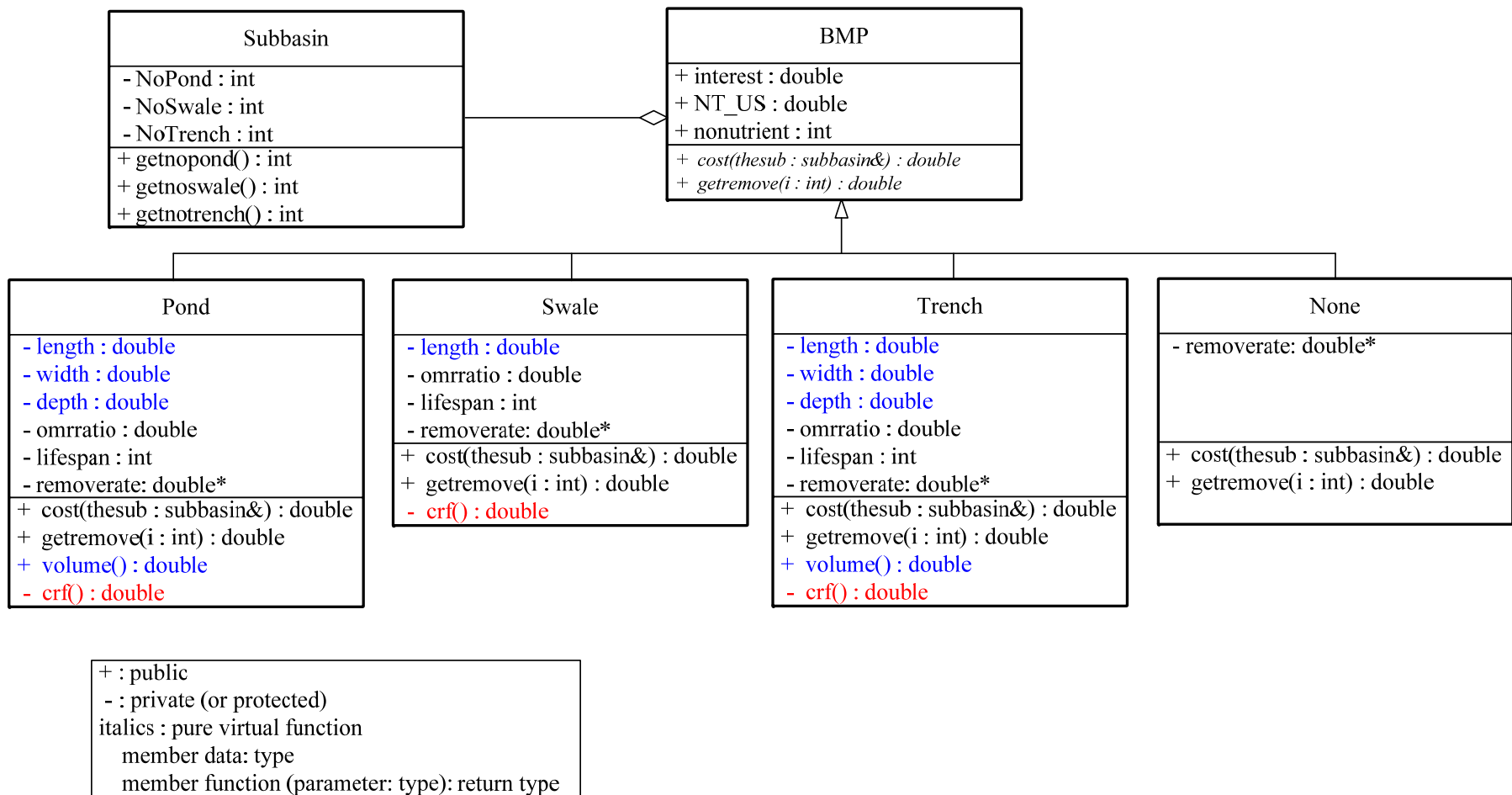


圖 5.4-3 子集水區與 BMPs 物件導向示意圖

5.4.2 最佳解

本研究建立之優選模式，考慮以下幾種水質項目：總懸浮固體(Total suspended solids)、葉綠素 *a*(Chlorophyll-*a*)、磷酸鹽(Phosphorus)、氨氮(Ammonium)、硝酸鹽氮(Nitrate-nitrite)、生化需氧量(Biochemical oxygen demand)及溶氧(Dissolved oxygen)，其限制式採用模擬時間內取水口位置之水質項目 *j* 之濃度 S_j 滿足其限制濃度 S_{cj} 需達一限制比例 r_j ，其設定值如表 5.4-4 所示。

表 5.4-4 各水質項目及其限制條件

<i>j</i>	水質項目	限制濃度 S_{cj} (mg/L)	限制比例 r_j
1	總懸浮固體，Total suspended solids	1	0.5
2	葉綠素 <i>a</i> ，Chlorophyll- <i>a</i>	3×10^{-5}	0.5
3	磷酸鹽，Phosphorus	0.005	0.5
4	氨氮，Ammonium	0.04	0.5
5	硝酸鹽氮，Nitrate-nitrite	0.5	0.5
6	生化需氧量，Biochemical oxygen demand	0.001	0.5
7	溶氧，Dissolved oxygen	6.5	0.5

由本研究所發展之優選模式可找出較佳解，其適合度為 9.99×10^{-11} ，經上述公式計算可得較佳解之總年計成本約為新台幣 200 萬元，各子集水區之最佳管理作業種類與個數可整理如表 5.4-5 所示，另水庫取水口之濃度情形則整理如表 5.4-6 所示，可有效減緩非點源污染對水庫水質所造成之影響。

表 5.4-5 較佳解 BMPs 配置情形

子集水區	BMPs 種類	BMPs 個數
i	X_i	$N(X_i)$
1	N	--
2	T	23
3	D	5
4	T	46
5	T	5
6	N	--
7	T	44
8	T	9
9	D	
10	N	--
11	N	--
12	N	--
13	D	1
14	N	--
15	N	--
16	D	13
17	D	8
18	D	19
19	G	517
20	N	--
21	G	63
22	G	97

表 5.4-6 較佳解水庫取水口濃度情形

水質項目	低於限制濃度 天數	低於限制濃度天數佔 總模擬天數之比例	懲罰函數
總懸浮固體，Total suspended solids	488	0.668493	0
葉綠素 <i>a</i> ，Chlorophyll- <i>a</i>	651	0.891781	0
磷酸鹽，Phosphorus	475	0.650685	0
氨氮，Ammonium	528	0.723288	0
硝酸鹽氮，Nitrate-nitrite	637	0.872603	0
生化需氧量，Biochemical oxygen demand	355	0.486301	1.00E+10
溶氧，Dissolved oxygen	296	0.405479	0

第六章 結論與建議

本研究主要目的為連結集水區與二維水庫模式，並應用優選法尋求集水區最佳管理作業之最佳配置方案。

6.1 結論

1. 本研究第一年為應用集水區非點源污染模式 BASINS 模式針對整個翡翠水庫集水區之進行模式之檢定與驗證，推估其範圍之非點源污染量，由模式檢定與驗證之結果觀之，成果頗佳。
2. 本研究收集集水區地文資料、集水區氣象資料與河川流量資料後，以 BASINS 非點源污染模式模擬翡翠水庫 2002-2003 年之總入流量，其檢定及驗證結果大致良好，僅有颱風暴雨出現時，流量有較大之誤差，在其餘時間中模擬與實測結果吻合，此說明 BASINS 模式可應用於水庫集水區水理模擬。
3. 在懸浮固體物模擬方面，模擬暴雨時集水區濃度，以集水區實測資料建立之率定關係檢核，模擬結果大致吻合。由模擬結果顯示，暴雨期間懸浮固體物負荷量偏高，此為暴雨沖刷上游集水區後，攜帶大量泥沙所造成，對水庫造成極大之衝擊。
4. 由非點源污染之歷線圖中可以發現，各污染項目於暴雨期間濃度均顯著增加；仔細觀之，污染濃度大多於暴雨初期達到最大值，此即為暴雨之初期沖刷現象(first flush)。
5. 本研究第 2 年為結合集水區模式 BASINS 與二維水庫水質模式 CE-QUAL-W2，模擬 2002-2003 年 2 年之集水區與水庫水質之現象，由結果觀之，水質之整體趨勢可有效掌握，然少數濃度偏差部份應為量測之誤差所致。
6. 本研究並選用於集水區選用 3 種結構性 BMPs：濕式滯留池、草溝、入滲帶，並考慮不加以設置共 4 種情形，找尋集水區設置 BMPs 之較佳方案。
7. 本研究以遺傳演算法求解可得集水區配置 BMPs 之較佳方案，其適合度為 9.99×10^{-11} ，總年計成本約為 200 萬元，由水庫取水口之濃度情形可知，該 BMPs 配置方案可有效減緩非點源污染對水庫水質所造成之影響

6.2 建議

1. 本研究僅使用 BASINS 模式中之非點源污染模式 NPSM，並利用 GIS 作為模式輸入之工具，由於 BASINS 內之分析工具所需格式特殊，建議可以針對 BASINS 模式內所需之 GIS 資料進行調查並轉換為 BASINS 格式，建立 GIS 資料庫，減少處理資料之時間及增加模式可靠度。
2. 由於在暴雨期間，翡翠水庫上游集水區大量沖刷所攜帶之污染物造成水庫水質惡化，因此建議在暴雨時期於翡翠水庫主、支流部分加強採集水質資料。
3. 為增加模式可靠度及減少參數檢定之不確定性，未來可針對地文因子參數進行現場採樣，建立本土化參數，增加 BASINS 非點源污染模式精度。
4. 執行檢定與驗證模式參數之合理性時，建議先對集水區之不確定參數作敏感度分析，了解每個參數之特性，觀察參數對模擬結果之變化，以縮短模擬次數。
5. 水庫水質模式之參數亦有賴大量之水庫水質檢測資料佐證之，今後宜加強國內各重點水庫之水質定期檢測工作，以利國內水質分析研究之需。

參考文獻

1. Adema, J. E., *Application of the BASINS Model to Examine the Impacts of Urbanization on Watershed Hydrology*, Master Thesis, School of Engineering and Applied Science, University of Virginia, 1999.
2. Akam, A. O. and Houghtalen, R. J. , *Urban Hydrology, Hydraulics and Stormwater Quality*, John Wiley & Sons, Inc. , Hoboken, N. J. , 2003.
3. Ambrose, R. B., Wool, T. A., Martin, J.L., Connoll, J.P. y, and Schanz, R.W., WASP5, A Hydrodynamic and Water Quality Model-Model Theory, User's Manual, and Programmer's Guide, Environmental Research Lab., U.S. EPA, Athens, Georgia, 1991.
4. Bank Of Taiwan, "Bank Of Taiwan Webpage.
<http://www.bot.com.tw/default.htm>.", 1996.
5. Brown, W. and T. Schueler., *The Economics of Storm Water BMPs in the Mid-Atlantic Region*. Center for Watershed Protection. Elliot City, MD, 41 pp. 1997.
6. Brun, S. E., and Band, L. E., "Simulating Runoff Behavior in an Urbanizing Watershed," *Computer, Environment and Urban Systems*, Vol. 24, pp. 5-22, 2000.
7. Buchak, E. M., and Edinger, J. E., User Guide for LARM2 , U. S. Army Engineer Waterways Experiment Station, Hydraulics Laboratory, Instruction Report E-82-3, 1982
8. Cerco, C. and Cole, T., Three-dimensional eutrophication model of Chesapeake Bay(CE-QUAL-ICM), Technical Report EL-94-4, US Army Engineer Waterways Experiment Station, Vicksburg, MS, 1994.
9. Chapra, S. C., Total Phosphorous Model for Great Lakes, J. Envir. Eng. Div., ASCE, Vol. 103, April 1977.
10. Chapra, S.C., and Tarapchak, S. J., "A Chlorophyll-a Model and Its Relationship to Phosphorus Loading Plots for Lakes", *Water Resources Research*, Vol.12, NO.6, pp.1260-1264, 1976.
11. Chen, C. W., Concepts and Utilities of Ecologic Model, J. Sanitary Eng. Div., ASCE, pp.1085-1097, Oct., 1970.
12. Chew, C. Y., and Haith, D. A., "Hydrological Simulation of Tennessee North Reelfoot Creek Watershed," *J. Water Pollut. Control Fed.*, Vol. 63, pp. 10-25, 1991.
13. Di Toro, D. M., O'Connor, D. J. and Thomann, R. V., A Dynamic Model of the Phytoplankton Population in the Sacramento-San Jaquin Delta, Adv. in Chemistry Series, No. 106, Amer. Chem. Soc., pp.131-180, 1971.
14. Donigian, A. S. and W. C. Huber, "Modeling of Nonpoint Source Water Quality in Urban and Non-urban Areas", EPA/600/3-91/039, Environmental Research Laboratory, Office of Research and Development, U. S. EPA, Athens, GA, June 1991.

15. Donigian, A.S., J.C. Imhoff, and R.B. Ambrose, "Modeling Watershed Water Quality, Chapter II " In: *Environmental Hydrology*, V.P. Singh(editor), Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, the Netherlands, 1995.
16. Dorn, J., Kuterdam, C., Chetan, K., Murray, T., Parandekar, A., Whangbo, A., and Ranjithan, S. R., "BASINS-STAR: An Evolutionary Algorithm-Based Decision Support Framework for Watershed Water Quality Management," *Proc. of the World Water and Environmental Resources Congress*, Orlando, Florida. CD-ROM, 2001.
17. Eisele, M., Kiese, R., Krämer, A., and Leibundgut, C., "Application of a Catchment Water Quality Model for Assessment and Prediction of Nitrogen Budgets," *Phys. Chem. Earth (B)*, Vol. 26, No. 7-8, pp. 547-551, 2001.
18. Environmental System Research Institute, Inc., ArcView GIS 3.3, 1992.
19. Field, R. and D. Sullivan(editors), *Wet-weather Flow in the Urban Watershed : Technology and Management*, Lewis Publishers, CRC Press, 2003.
20. Hamrick, J. M., A Three-Dimensional Environmental Fluid Dynamics Computer Code: Theoretical and Computational Aspects. The College of William and Mary, Virginia Institute of Marine Science. Special Report 317, 63 pp., 1992.
21. Harrell, L. J. and Ranjithan, S. R., "Detention pond design and land use planning for watershed management", *Journal of Water Resource Planning and Management*, Vol. 129, No. 2, pp. 98-106, 2003.
22. Hartigan, J. P., *Basis for Wet Detention Basis BMPs. Proceedings of an Engineering Foundation Conference on Current Practice and Design Criteria for Urban Quality Control*, Potosi, MO. L. Roesner, B. Urbonas and M. Sonnen (Ed.), ASCE, New York, NY, 1988.
23. International Stormwater Best Management Practices (BMP) Database project web site, <http://www.bmpdatabase.org/>, 2006.
24. Kuo, J. T. and Thomann, R. V., Phytoplankton Modeling in the Embayments of Lakes, *Journal of Environmental Engineering*, ASCE, Vol. 109, No.6, pp.1311-1332. , 1983
25. Kuo, J. T. and Yang, M. D., *Water Quality Modeling in Reservoirs*, Environmental Fluid Mechanics, Published by ASCE, 2002.
26. Kuo, J. T., Wu, J. H. and Chu, W. S., *Water Quality Simulation of Te-chi Reservoir Using Two-Dimensional Models*, *Water Science and Technology*, Vol. 30, No.2, pp.63-72, 1994.
27. Kuo, J., T., Cheng, W. C., and Chen, L., "Multiobjective water resources systems analysis using genetic algorithms—application to Chou-Shui River Basin, Taiwan." *Water Science and Technology*, 48(10), 71-77, 2003.
28. Kuo, J.T., Chiu, S. K. Hsieh, C.D., *Optimal Best Management Practices (BMPs) Placement strategies—Application to Fei-Tsui Reservoir Watershed in Taiwan*", in *Proceedings of World Water & Environmental Resources Congress*, ASCE, Salt Lake City, June 27-July 1, 2004.
29. Kuo, J.T., Yu, S.L., Lin, J. Y., *Development of a BMP manual for nonpoint source pollution control and a management strategy for reservoir watersheds*.

- Water Resources Agency, Taipei, Taiwan (in Chinese), 1997.
30. Lahlou, M. L. Shoemaker, S. Choudhury, R. Elmer, A. Hu, H. Manguerra and A. Parker, Better Assessment Science Integrating Point and Nonpoint Source(BASINS) : User's Manual for Version 2.0, U.S. EPA, Office of Water, EPA-823-B-98-006, 1998.
 31. Larsen, D. P., Sickle, J. V., Malueng, K. W., and P.D. Smith, The Effect of Wastewater Phosphorous Removal on Shagawa Lake, Minnesoda : Phosphorous Supplies, Lake Phosphorous and Chlorophyll-a, Water Research, Vol. 13, May, 1979.
 32. Lung, W.S., Water Quality Modeling for Wasteload Allocations and TMDLs, John Wiley & Sons, Inc., New York, 2001.
 33. Markofsky, M. and Harlelmn, D. R. P., Prediction of Water Quality in a Stratified Reservoir, J. Hydr. Div., ASCE, May, 1973.
 34. Moore, L. W., and Loucks, D. P., "Modeling of Best Management Practices on North Reelfoot Creek, Tennessee," *Water Environment Research*, Vol. 64, No. 3, pp. 242-256, 1992.
 35. Peters, R. H., "Nutrient Balances for the Evaluation of Nutrient Sources in Water Quality Management", *Water Resources Bulletin*, Vol. 9, NO. 1, pp. 49-53, 1973.
 36. Pionke, H. B., Gburek, W. J., Sharpley, A. N. and Schabel, R. R., "Flow and Nutrient Export Patterns for an Agricultural Hill-Land Watershed", *Water Resources Research*, 1996.
 37. Saget, A., Chebbo, G. and Bertland, J. L., "The First Flush in Sewer Systems", *Water Science and Technology*, 1996.
 38. Schueler, T.R., Controlling Urban Runoff: A Practical Manual for Planning and Designing Urban BMPs. Metropolitan Washington Council of Governments, Washington, DC, 1987.
 39. Somlyody, L. and Wets, R. J-B., "Stochastic Optimization Models for Lake Eutrophication Management", *Operation Research*, Vol.36, NO.5 pp. 660-681, 1988.
 40. Southeastern Wisconsin Regional Planning Commission (SWRPC), "*Costs of Urban Nonpoint Source Water Pollution Control Measures*". Technical Report No. 31 Waukesha, WI, 107, 1991.
 41. Steel, J. H., Primary Production in Aquatic Environments, Notes on Some Theoretical Problem in Production Ecology, C.R. Goldmen (ed.), Mem. Inst. Idrobiol., pp.383-398, 18 suppl., Univ. of California Press. Berkeley, California, 1965.
 42. Strecker, E. W., Quigley, M. M., Urbonas, B. R., Jones, J. E. and Clary, J. K., "Determining urban storm water BMP effectiveness", *Journal of Water Resource Planning and Management*, Vol. 127, No. 3, pp. 144-149, 2001.
 43. Taipei Feitsui Reservoir Administration, "*Taipei Feitsui Reservoir Administration Homepage*. <http://english.taipei.gov.tw/feitsui/index.jsp>", 2007.
 44. Tetra Tech, Inc., *TMDL Model Evaluation and Research Needs*, National Risk Management Research Laboratory Office Of Research And Development U.S. Environmental Protection Agency Cincinnati, Ohio 45268, USEPA, 2005.

45. Thomann, R. V. and Mueller, J. A., Principles of Surface Water Quality Modeling and Control, Harper & Row, Publishers. New York, 1987.
46. Tisdale, T. S., Kaighn, R. J. and Yu, S. L., *The Virginia Storm (VAST) Model for Stormwater Management - Urban's Guide*, University of Virginia, Charlottesville, Virginia, USA, May 1994.
47. Tony, P., Ron, S. H. R., and Merlyn, B., "Soil Erosion and Nonpoint Sources Pollution Control in an Idaho Watershed," *Journal of Soil and Water Conservation*, Vol. 24, pp. 323-328, 1989.
48. Tsihrintzis, V. A., Fuentes, H. R. and Gadipudi, R. K., "Modeling Prevention Alternatives for Nonpoint Source Pollution at a Well-field in Florida", *Water Resources Bulletin*, 1996.
49. Tsihrintzis, V. A., Fuentes, H. R. and Gadipudi, R. K., "Modeling Prevention Alternatives for Nonpoint Source Pollution at a Well-field in Florida", *Water Resources Bulletin*, 1996.
50. U.S. Environmental Protection Agency *Stormwater Best Management Practice Design Guide: Volume 2 Vegetative Biofilter*, EPA/600/R-04/121a, Office of Research and Development, Washington DC, USA, 2004a.
51. U.S. Environmental Protection Agency, *Stormwater Best Management Practice Design Guide: Volume 3 Basin Best Management Practices*, EPA/600/R-04/121b, Office of Research and Development, Washington DC, USA, 2004b.
52. U.S. Environmental Protection Agency., "Guidance Specifying Management Measures For Sources Of Nonpoint Pollution In Coastal Waters", 1990.
53. Urbonas, B. and P. Stahre, *Stormwater Best Management Practices and Detention for Water Quality, Drainage, and CSO Management*, PTR Prentice-Hall, Englewood Cliffs, N. J. , 1993.
54. Vollenweider, R. A., Input-Output Models with Special Reference to the Phosphorous Loading Concept in Limnology, Hydrol. (Schweiz), 1975.
55. Wall, M, GALib: A C++ Library of Genetic Algorithm,Components. <http://lancet.mit.edu/ga/>, 1996.
56. Wanielista, M. P. and Y. A. Yousef, *Stormwater Management*, John Wiley & Sons, Inc. , New York, 1993.
57. Wiegand, C., T. Schueler, W. Chittenden, and D. Jellick., Cost of Urban Runoff Quality Controls. pp. 366-380. In: Urban Runoff Quality. Engineering Foundation Conference. ASCE, Henniker, NH. June 23-27, 1986.
58. Winer, R., National Pollutant Removal Performance Database for Stormwater Treatment Practices, Center for Watershed Protection Ellicott City, Maryland, 2000.
59. Wu, T. H. , "Evaluation of Runoff and Erosion Model", *J. of Irrigation and Drainage Div.*, ASCE, Vol. No. 1-3, pp.364, 1993.
60. Yeh C. H., and Labadie J. W., Multi-objective watershed-level planning of storm water detention systems, *Journal of Water Resource Planning and Management* 123, 336-343. 1997.

61. Young, G. K., Stein, S., Cole, P., Kammer, T., Graziano, F., and Bank, F., *Evaluation and Management of Highway Runoff Water Quality*, Publication No. FHWA-PD-96-032, U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration, Office of Environment and Planning, 1996.
62. Yu, S. L., Kuo, J. T., Fassman, E. A. and Pan, H. "Field test of grassed-swale performance in removing runoff pollution", *Journal of Water Resource Planning and Management*, Vol. 127, No. 3, pp. 168-171, 2001.
63. Zhai, Y., Applying the WinVAST model for Best Management Practice (BMP) Placement Optimization, In Partial Fulfillment of The requirement for the degree Master of Science in Civil Engineering , Engineering and Applied Science University of Virginia, 2004.
64. Zhen X. Y., Yu S. L., Lin J. Y., Optimal Location and Sizing of Stormwater Basins at Watershed Scale, *Journal of Water Resource Planning and Management* 130, 339-347. 2004.
65. Zou and Bai, Personal Communication, Dept. of Civil Engineering, Univ. of Virginia., 2000.
66. 工研院能源與資源研究所，「石門水庫水區崩塌地及土地利用航測調查計劃整體報告書」，台灣省北區水資源局，1998。
67. 仇士愷，最佳管理作業(BMPs)最佳化配置之研究—應用於翡翠水庫集水區，國立臺灣大學土木工程學研究所碩士論文，2004。
68. 王智益，「BASINS 及 CE-QUAL-RIV1 應用於非點源污染傳輸設計流量之研究」，碩士論文，國立台灣大學土木研究所，民國 89 年。
69. 台北翡翠水庫管理局，「翡翠水庫操作年報」，2002。
70. 台北翡翠水庫管理局，「翡翠水庫操作年報」，2003。
71. 台灣省林務局農林航空測量隊，「石門水庫水區崩坍地航測調查報告」，台灣省石門水庫管理局，1976。
72. 余嘯雷、駱尚廉、郭振泰，「湖泊水庫集水區非點源污染之控制」，第二屆海峽兩岸環境保護學術研討會，台灣大學，1993
73. 余嘯雷、駱尚廉、郭振泰，台灣地區水庫集水區非點源污染控制技術及策略之研究，國科會補助，NSC82-0410-E-002-332，台大環工所執行，1993。
74. 余嘯雷、駱尚廉、郭振泰等，台灣地區水庫集水區非點源污染控制技術及策略之研究，台大環工所研究報告第 354 號，NSC-82-041-E002-332，pp. 36-39，1993。
75. 吳建鎰，德基水庫二維水理與水質模式之模擬，國立台灣大學土木工程研究所碩士論文，1987
76. 吳瑞賢、賴逸少、周育德，『建立分佈式集水區逕流及沖刷模式』，流域暴雨逕流經理論文集，中國農業工程學會，1991。
77. 李炎任、邱金火，『地理資訊系統推估石門水庫集水區土壤流失』，流域暴雨逕流經理論文集，中國農業工程學會，1991。
78. 李建忠，HSPF 模式應用於瑪家水庫優養潛勢分析之研究，成功大學水利及海洋工程學系碩士論文，1996。

79. 李珮璇,「暴雨初期沖刷對水源水質衝擊之評估」,碩士論文,國立台北科技大學環境規劃與管理研究所,2002。
80. 李鴻源、高正忠、許銘熙、楊錦釗,水質保護綱要計畫—非點源污染防治計畫研究(三),行政院環保署委託,台灣大學土木系執行,1992。
81. 李鴻源、郭振泰、許銘熙、楊錦釗等,『水質保護綱要計畫—非點源污染防治計畫研究(一)』,臺大慶齡工業研究中心,行政院環保署,1990。
82. 李鴻源、郭振泰、許銘熙、楊錦釗等,『水質保護綱要計畫—非點源污染防治計畫研究(二)』,執行單位:臺大慶齡工業研究中心,委託單位:行政院環保署(EPA80-E3G1-09-15),1991。
83. 李鴻源、郭振泰、許銘熙、楊錦釗等,『水質保護綱要計畫—非點源污染防治計畫研究(三)』,臺大慶齡工業研究中心,行政院環保署,1992。
84. 李鴻源、黃良雄、郭振泰、許銘熙、楊錦釗等,水質保護綱要計畫—非點源污染防治計畫研究(一)~(二),行政院環保署委託,台大慶齡工業研究中心執行,1990-1991。
85. 李鴻源,「大漢溪上游石門水庫集水區特性探討之研究」,經濟部水利處北區水資源局,2000。
86. 周維興,「湖泊優養化最佳規劃模式之研究」,國立臺灣大學土木工程學研究所碩士論文,1992。
87. 林俐玲,『應用農業非點源污染模式與地理資訊系統推估土壤沖蝕潛能』,流域暴雨逕流經理論文集,中國農業工程學會,1991。
88. 林雍富,「應用 BASINS 模式於非點源污染傳輸之模擬—以霧社水庫為例」,碩士論文,國立台灣大學土木工程研究所,2002。
89. 林鎮洋、余嘯雷,「翡翠水庫集水區管理規劃之研究(一)」,台北翡翠水庫管理局,2000。
90. 林鎮洋、余嘯雷,「翡翠水庫集水區管理規劃之研究(二)」,台北翡翠水庫管理局,2001。
91. 林鎮洋、余嘯雷、黃丕陵,翡翠水庫集水區管理規劃之研究(二),台北翡翠水庫管理局委託,台北科技大學水環境研究中心執行,2001。
92. 林鎮洋、余嘯雷、黃丕陵,翡翠水庫集水區管理規劃之研究,台北翡翠水庫管理局委託,台北科技大學土木系執行,pp. 56,2000。
93. 林雍富,「應用 BASINS 模式於非點源污染傳輸之模擬—以霧社水庫為例」,台灣大學土木工程學研究所碩士論文,2002。
94. 邱昱嘉,「應用 HSPF 模式與鈾-137 技術於集水區產砂量推估之研究」,國立台灣大學土木工程研究所碩士論文,2003。
95. 美商傑明公司,「淡水河流域大漢溪、新店溪非點源污染分析調查及整治規劃-板新水源區、翡翠水庫水源區氮磷污染分析、調查及整治規劃」,行政院環保署委託,2000。
96. 范正成等,翡翠水庫集水區污染源削減計畫服務建議書,2005。
97. 張尊國、余嘯雷、范正成、張斐章、鄭克聲、蘇明道,『環境敏感地帶調查-台北水源特定區水質管理系統之建立』,第一~四部份,行政院環境保護

- 署，臺大農工所，1995。
98. 許銘熙、連上堯、徐必杰，『農業區非點源汙染模擬』，流域暴雨逕流經理論文集，中國農業工程學會，1991。
 99. 郭明杰，「非點源汙染模式水文模擬之探討」，國立臺灣大學土木工程學研究所碩士論文，1995。
 100. 郭振泰、余嘯雷、林鎮洋等，水庫集水區非點源汙染控制手冊及分組分區管理措施之研訂，經濟部水資源局委託，台大慶齡研究中心執行，1997。
 101. 郭振泰、余嘯雷等，『水庫湖泊非點性汙染研究(二)』，台大土木工程研究所執行，經濟部水資會委託，1995。
 102. 郭振泰、郭文健、張穗蘋等，牡丹水庫水質調查及改善計畫，水利署南區水資源局委託，新環境基金會執行，2003。
 103. 郭振泰、游以德、黃宏斌等，「石門水庫國有林班地土砂災害對水質之影響及治理對策之研究」，台灣大學水工試驗所執行，行政院農委會林務局委託，2005。
 104. 郭振泰、楊德良、何政儒，「德基水庫水質模擬與探討(第一年研究報告)」，水資會/臺大土木工程研究所，1984。
 105. 郭振泰、楊德良、何政儒，「德基水庫水質模擬與探討(第二年研究報告)」，水資會/臺大土木工程研究所，1985。
 106. 郭振泰、楊德良、何政儒，「德基水庫水質模擬與探討(第三年研究報告)」，水資會/臺大土木工程研究所，1987。
 107. 郭振泰、龍梧生等，「翡翠水庫水質模擬與應用(一)」，台北翡翠管理局委託，台大土木工程研究所執行，1998。
 108. 郭振泰、龍梧生等，「翡翠水庫水質模擬與應用(二)」，台北翡翠管理局委託，台大土木工程研究所執行，1999。
 109. 郭振泰、龍梧生等，「翡翠水庫水質模擬與應用(三)」，台北翡翠管理局委託，台大土木工程研究所執行，2000。
 110. 郭振泰等，「翡翠水庫水質模擬與應用(一)~(三)」，台北翡翠水庫管理局，1997~2000。
 111. 陳有祺、陳筱華等，「石門水庫水質監測、水域生態環境及非點源汙染之調查研究(二)」，經濟部水利署北區水資源局委託，中華大學水域生態環境研究中心執行，2004。
 112. 陳孟威，「類神經網路應用於石門水庫集水區暴雨產砂量推估之研究」，台灣大學土木工程學研究所碩士論文，2000。
 113. 陳錦媽，GIS 技術與實務應用- ArcView 3.x & 8.x，新文京開發出版股份有限公司，2006。
 114. 陳鴻傑，「曾文水庫即屬區汙染物傳輸及水庫水質模擬」，國立台灣大學土木工程所碩士論文，2003。
 115. 黃鈺真，HSPF模式應用於曾文水庫集水區非點源汙染負荷之推估，成功大學環工所碩士論文，2001。

116. 楊德良、林國峰、王如意、郭振泰、顏清連，「德基水庫集水區治理規劃研究報告第三冊—逕流、沖蝕及泥砂運移模式操作手冊」，台灣大學水工試驗所研究報告，1990。
117. 楊德良、郭振泰等，『臺北市錦州地區雨水下水道系統功能之探討』，台灣大學土木系執行，臺北市政府研究發展考核委員會，1985。
118. 溫清光、郭振泰等，曾文水庫水質調查及改善後計畫，水利署南區水資源局委託，成大研究發展基金會執行，2003。
119. 溫清光、余嘯雷、黃家勤、詹明勇、顏有利等，「非點源污染研究調查及最佳管理作業功能研究(一)、不同類型非點源污染最佳管理控制(BMP)規範(一)；遊憩活動及施工活動非點源污染調查及管制手冊編訂」，環保署委託，國立成功大學環境工程系執行，1995。
120. 溫清光、余嘯雷、黃家勤等，「不同類型非點源污染之最佳管理控制(BMP)規範(一) 遊憩活動及施工活動非點源污染之調查及管制手冊編訂(一)」，行政院環境保護署委託，成功大學環工系執行，1995。
121. 溫清光等，『不同類型非點源污染之最佳管理控制(BMP)規範(二)；遊憩活動及施工活動非點源污染之調查及管制手冊編訂(一)』，行政院環境保護署，成大環工系，1996。
122. 葉宗育，懸浮固體濃度即時監測暨集水區水質模式 NPSM 應用於翡翠水庫，台灣大學環工所碩士論文，2001。
123. 廖述良、許中杰、吳瑞賢，『非點源污染對河川影響及改善研究』，中央大學環境工程研究所，行政院環境保護署，1994。
124. 劉柏廷，「牡丹水庫集水區非點源污染模擬及風險分析」，國立台灣大學土木工程所碩士論文，2004。
125. 歐陽元淳，「水庫集水區土壤沖蝕之研究—以石門、翡翠水庫為例」，台灣大學地理環境資源研究所碩士論文，2003。
126. 蔣本基、郭振泰、顏有利、王福基，「非點源之都市及農業區逕流對河川污染負荷影響之研究」，台大環工所研究報告 145 號，台灣省政府環保局委託，1987。
127. 蔡政賢，『多目標非點源污染總量管制策略分析-以寶山水庫的總磷管制為案例』，碩士論文，交通大學環工所，1993。
128. 賴益成，「集水區泥砂遞移率推估之研究」，國立中興大學水土保持學系碩士論文，1998。
129. 謝斌暉，暴雨期間河川水質模式設計流量之研究，國立臺灣大學土木工程學研究所碩士論文，1999。
130. 魏敏裕、張尊國，『集水區非點源污染之水質模擬』，第二屆水源水質水量保護區環境管理研討會論文集，1993。

填報人：郭振泰

出國時間：民國 96 年 5 月 11 日至 5 月 21 日

經過：此次出國乃走美國維吉尼亞大學(University of Virginia)與龍梧生教授(Prof. Wu-Seng Lung)討論國科會支助之計畫：最佳管理作業(BMPs)最優化配置之研究(2年計畫)合作事宜，主要討論到模式所選用之方法、電腦運算時間、集水區模式與水庫模式互相連結的問題等。另外也討論了投稿期刊所接受的論文修正事宜，接受的論文將登於下列期刊：Journal of Environmental Management 另外有此將投稿 ASCE 之 Journal of Water Resources Planning and Management。最後也討論了目前申請中之國科會研究計畫：「石門水庫集水區泥砂控制最佳化模式之研究」之內容及細節。此行之工作內容有數種，對於研究方法及細節作了完整的切磋，成果豐碩。