

氣候變遷下水資源長期調配與高濁度短期操作風險分析

研究生：何智超

指導教授：張良正 教授

國立交通大學土木工程學系博士班

摘要

在全球氣候變遷影響下，台灣地區發生乾旱和洪水等極端水文事件機率較以往大幅增加，加上因地震頻繁造成多數集水區上游土石鬆軟，汛期時易發生高濁度供水問題，然而以往水資源供水分析多將枯水期供水問題和高濁度供水問題個別考量，且工程實務上多採用定率分析。但實際上在臺灣地區，因上述水文及地質之特殊情況，必需同時考量枯水期水源不足及汛期高濁度水質不良等所引起之缺水問題。除此之外，降雨量本身具有高度之不確定性，而氣候變遷影響將更增加此不確性，因此缺水問題本質上必須考量因此不確定所帶來的風險問題。故本研究以蒙地卡羅分析方法為基礎，發展考量包括區域水資源長期調配與高濁度缺水緊急應變之整體供水風險分析方法，並以石門水庫供水區為應用實例。

蒙地卡羅分析需要大量資料進行重複模擬，本研究以自行發展之條件氣候繁衍降尺度模式合成多組長期雨量，再以設計降雨概念配合拉丁超立方取樣法(LHS)合成多組高濁度雨量事件，接著透過降雨逕流模式計算各組雨量對應之逕流量，經供水調配模式分析後求得各組流量下之缺水率，並以韋伯點繪法統計缺水風險。高濁度供水調配部分，本研究發展單位特性歷線濁度推估模式，配合波爾斯法進行洪水操作，建立考量濁度及水庫防洪操作之供水調配模式。

本研究分析結果乃基於 ECHAM5 大氣環流模式之預測雨量，根據石門水庫地區缺水風險分析結果顯示，枯水期缺水風險在氣候變遷影響下有降低之趨勢，但氣候變遷卻造成高濁度缺水風險提高，在綜合考量下，石門水庫整年度缺水風險在氣候變遷影響下有稍為降低之趨勢。此外，由模式驗證結果顯示，氣候繁衍降尺度模式能透過大尺度氣候因子有效反映石門水庫集水區降雨量長期變化趨勢，單位特性曲線法可透過水庫入流量與出流量有效預測暴雨事件之濁度變化，顯示本研究提出之風險分析架構與評估方法，除兼顧整體供水考量外，模式預測亦有一定之可靠度，可推廣應用於其他地區。



The Risk Analysis of Long-Term and Short-Term Water Supply Considering Climate Change

Student: Chih-Chao Ho

Advisor: Dr. Liang-Cheng Chang

Department of Civil Engineering

National Chiao Tung University

Abstract

Under global climate changes, extreme hydrological events, such as drought and flood, occurred more frequently in Taiwan, which both events can induce water supply problems. During flood events, a flood carries loose stones to a reservoir and increase water turbidity. The high turbidity then reduces the water treatment efficiency and causes water deficit problems. Moreover, the uncertainties of hydrological conditions make water allocation more difficult. It is essentially a stochastic problem and both the drought and flood conditions should be considered simultaneously. However, most of the previous studies investigate the water deficit problems caused by those two conditions separately by applying deterministic analysis only. Hence, this study uses the Monte Carlo Simulation to analyze water deficit problem considering both the drought and flood situations. The proposed method was applied to Shihmen Reservoir to demonstrate its feasibility.

Monte Carlo Simulation requires large number of data for repeated analysis. This study proposes Conditional Weather Generation Downscaling Model (CWGDM) to synthesize long-term rainfall data and uses Latin Hypercube Sampling (LHS) to generate short-term (flood event) rainfall data. The rainfall data are transformed into runoff data by

rainfall-runoff model, those runoff data are the input of long-term and short-term water allocation models. The short-term water allocation model must consider the high water turbidity treatment and reservoir flood mitigation operation simultaneously. The study proposes Unit Characteristic Hydrograph (UCH) to predict reservoir turbidity and uses Puls Mehtod to estimate the reservoir overflow. Through simulation of water allocation models, we can obtain serial water shortage data that can be used to estimate the water deficit risk by Weibull Plotting Method.

The simulation results are based on the predictive rainfall data by ECHAM5. The risk analysis results indicate that climate changes decrease the water deficit risk caused by drought condition but increase the risk caused by high turbidity. In summary, the annual water deficit risk has decreased slightly under climate change. The rainfall synthesis results demonstrate the proposed CWGDM model can well predict the long-term rainfall. The turbidity simulation results demonstrate that the UCH well predict reservoir turbidity based on reservoir inflow and outflow. Although the study is applied to Shihmen Reservoir, the proposed concepts and procedure can be easily applied to other areas.

謝 誌

感謝吾師張良正教授對於本論文的細心指導及求學階段中對學生的待人處事與學問研究的啟發，使得學生有如醍醐灌頂。承蒙口試委員海洋大學黃文政教授、交通大學葉克家教授、逢甲大學陳昶憲教授及楊朝仲博士、成功大學游保杉教授細心認真指正拙文，並於口試期間提出相當寶貴的意見，使本文更加完備，在此謹致衷心謝意。

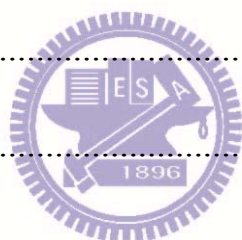
在研究室方面，感謝陳宇文程式寫作上提供諮詢，葉明生學長值得效法的實事求是態度，蔡瑞彬帶有顏色的幽默、陳鴻輝學長令人稱羨的廣大人脈，還有各位可愛又可憐的學、弟妹：佑誠、阿海、阜峻、雲直、冠宇、小瑜、阿布、阿卡、深惠、阿牛、韋圻、瀚聖、浚瑋、君儀、小蘇、婉茹、怡釧等，除了趕計畫時被我奴隸般地使喚，魔獸還被我慘電，不然就是要陪我籃球體能訓練，經過如此鍛鍊後，相信你們個個都可以一擋百。

另外感謝我的球伴大為、浚緯，中華的學弟妹阿泰、國矩、裕宗、阿文、惠儀、佑竹以及室友阿光、阿利、阿發你們的陪伴，為我冗長又艱辛的博士生涯增添樂趣。

最後非常感謝我的家人對我的全力支持，在這漫長的八年時光內，替我加油打氣，僅將此研究獻給我最愛的家人及週遭支持、關心我的人。

目錄

摘要.....	I
Abstract.....	III
謝誌.....	V
目錄.....	VI
表目錄.....	IX
圖目錄.....	XI
符號說明.....	XV
第一章 緒論.....	1
1.1 研究動機與目的.....	1
1.2 研究流程.....	2
第二章 文獻回顧.....	5
2.1 水資源調配分析相關文獻.....	5
2.2 降尺度分析文獻回顧.....	14
2.3 降雨逕流文獻回顧.....	16
2.4 濁度預測文獻回顧.....	18
第三章 研究方法.....	21
3.1 氣候變遷模式及情勢分析介紹.....	21
3.2 條件氣候繁衍降尺度模式.....	24



3.3 事件型雨量繁衍.....	30
3.4 降雨逕流分析.....	37
3.5 水資源供水調配系統動力模式	48
3.6 濁度預測模式.....	52
3.7 蒙地卡羅分析與拉丁超立方取樣法	55
第四章 研究區域概述	59
4.1 石門水庫區域概述.....	59
4.2 石門水庫水文現況.....	67
第五章 石門水庫長期調配風險分析	70
5.1 石門水庫統計降尺度分析.....	70
5.1.1 氣象水文資料蒐集.....	70
5.1.2 預測因子選取.....	73
5.1.3 降尺度分析.....	74
5.2 石門水庫降雨逕流模式建立	78
5.3 石門水庫水資源長期供水調配模式建立	82
5.3.1 石門水庫水資源調配系統架構.....	82
5.3.2 水資源運用原則.....	84
5.3.3 水資源調配模式建立.....	85
5.4 石門水庫長期調配風險分析	92

第六章 石門水庫短期應變風險分析	96
6.1 石門水庫事件型雨量繁衍.....	96
6.1.1 降雨量與降雨延時之機率分佈.....	96
6.1.2 石門水庫設計雨型.....	108
6.1.3 石門水庫事件型雨量繁衍.....	111
6.2 石門水庫事件型降雨逕流分析	112
6.3 石門水庫濁度預測模式建立	113
6.4 石門水庫高濁度調配模式建立	119
6.5 石門水庫短期應變風險分析	122
第七章 石門水庫長期調配與短期應變綜合風險分析	124
7.1 石門水庫現況綜合風險分析.....	124
7.2 石門水庫調適策略綜合風險分析	126
第八章 結論與建議	130
8.1 結論.....	130
8.2 建議.....	131
參考文獻.....	133
附錄一 遺傳演算法理論介紹	
附錄二 類神經網路理論介紹	

表目錄

表 2.1-1 定率優選法相關文獻說明	7
表 2.1-2 序率優選法相關文獻說明	10
表 2.4-1 Einstein 懸移質濃度經驗公式相關文獻說明	20
表 3.1 IPCC AR4 提供之 GCM 模式說明	23
表 3.3-1 常用兩型設計方法之優缺點	34
表 3.4- 1 土壤分類對照表	41
表 3.4- 2 不同土壤分類與土地利用情況下之 CN2 建議值	42
表 3.4-3 AM1 與 AM2 值	42
表 3.4- 4 各緯度每月日照時數	46
表 4.1-1 石門水庫庫容估算表	63
表 4.1- 2 大漢河流域之淨水場說明	67
表 4.2-1 石門水庫集水區各雨量站之詳細資料	68
表 5.1.1-1 GCM 模式資料網格點選取說明	72
表 5.1.1-2 GCM 模式與石門水庫月平均雨量相關性分析	73
表 5.2- 1 不同土壤種類之最大土壤水分容量(單位 cm/day)	79
表 5.2-2 不同植物之覆蓋係數	80
表 5.2-3 GWLF 模式參數合理範圍	80
表 4.2-3 GWLF 模式參數檢定結果	82

表 5.3.3-1 大漢河流域控制點集水面積	88
表 5.3.3-2 各河系之生態基流保留量	88
表 5.3.3-3 桃園地區各灌區之農業需水用量 (單位：cms/d).....	91
表 5.4-1 各種供水需求不同缺水忍受度下之缺水風險	94
表 6.1.1-1 石門水庫民國 89~97 年各颱風降雨延時統計表	97
表 6.3-1 各颱風事件單位特性歷線預測值之評估指標	117
表 6.3-2 各颱風事件類神經模式預測值之評估指標	118
表 6.4-1 桃園用水區主要淨水場現況處理能力與濁度之關係	120
表 7.1-1 石門水庫現況整年度綜合風險分析結果表	126
表 7.2 調適策略枯水期風險分析結果(缺水忍受度為 5%)	128
表 7.1-2 調適策略整年度綜合風險分析結果表	129



圖目錄

圖 2.1-1 水資源調配分析模式之分類	6
圖 2.1-2 隱式序率優選法(ISO)與顯式序率優選法(ESO)流程圖	9
圖 3.1-1 各種 SRES 情境之不同溫室氣體排放情境	24
圖 3.2-1 石門集水區日降雨量與平均海平面壓力散佈圖	25
圖 3.2-2 條件氣候繁衍統計降尺度模式流程圖	26
圖 3.2-3 各區間資料數量矩陣	28
圖 3.2-4 無母數條件機率分佈矩陣	28
圖 3.2-5 無母數累積條件機率分佈矩陣	29
圖 3.3-1 頻率分析流程	31
圖 3.4-1 GWLF 模式水平衡關係示意圖	38
圖 3.5-1 典型水資源供需系統示意圖	51
圖 3.5-2 典型水資源供需因果回饋圖	52
圖 3.7-1 拉丁超立方取樣法簡例流程示意圖	58
圖 4.1-1 石門水庫上游集水區示意圖	60
圖 4.1-2 大漢河流域水工結構物地理位置	61
圖 4.1-3 石門水庫運用規線圖	62
圖 4.2-1 石門水庫集水區各雨量站徐昇面積權重圖	68
圖 4.2-2 石門水庫集水區各月日平均雨量	69

圖 5.1.1-1 本研究區域選用格點位置圖	70
圖 5.1.3-1 訓練案例各月日平均降雨量模擬值與歷史觀測值比較....	75
圖 5.1.3-2 訓練案例各月日降雨量標準偏差模擬值與歷史觀測值比較	76
圖 5.1.3-3 訓練案例各月日降雨機率模擬值與歷史觀測值比較.....	76
圖 5.1.3-4 2046~2065 年各月日平均降雨量模擬值與歷史觀測值比較	77
圖 5.1.3-5 2046~2065 年各月日降雨量標準偏差模擬值與歷史觀測值 比較.....	77
圖 5.1.3-6 2046~2065 年各月日降雨量機率模擬值與歷史觀測值比較	78
圖 5.2-1 石門水庫訓練案例(1973~1998)分析結果	81
圖 5.2-2 石門水庫驗證案例(1999~2004)分析結果	82
圖 5.3.1-1 石門水庫供水系統圖(零方案)	84
圖 5.3.3-1 石門水庫水資源調配系統動力流圖	87
圖 5.3.3-2 板新地區公共給水目標年需求量	89
圖 5.3.3-3 桃園地區公共給水目標年需求量	90
圖 5.4-1 南桃園公共用水缺水風險曲線圖	93
圖 5.4-2 北桃園公共用水缺水風險曲線圖	93
圖 5.4-3 板新公共用水缺水風險曲線圖	94
圖 5.4-4 農業公共用水缺水風險曲線圖	94

圖 6.1.1-1 石門水庫民國 89~97 年颱風降雨延時組體圖.....	98
圖 6.1.1-2 歷史合成雨量一日暴雨檢定結果.....	100
圖 6.1.1-3 歷史合成雨量二日暴雨檢定結果.....	101
圖 6.1.1-4 歷史合成雨量三日暴雨檢定結果.....	102
圖 6.1.1-5 歷史合成雨量四日暴雨檢定結果.....	103
圖 6.1.1-6 GCM 合成雨量一日暴雨檢定結果.....	104
圖 6.1.1-7 GCM 合成雨量二日暴雨檢定結果.....	105
圖 6.1.1-8 GCM 合成雨量三日暴雨檢定結果.....	106
圖 6.1.1-9 GCM 合成雨量四日暴雨檢定結果.....	107
圖 6.1.2-1 最大一日暴雨設計雨型.....	108
圖 6.1.2-2 最大二日暴雨設計雨型.....	109
圖 6.1.2-3 最大三日暴雨設計雨型.....	109
圖 6.1.2-4 最大四日暴雨設計雨型.....	110
圖 6.1.3-1 事件型降雨強度組體圖.....	111
圖 6.2-1 石門水庫集水區高程圖.....	112
圖 6.2-2 事件型尖峰流量組體圖.....	113
圖 6.3-1 韋帕颱風單位特性歷線預測值與觀測濁度比較.....	115
圖 6.3-2 柯羅莎颱風單位特性歷線預測值與觀測濁度比較.....	116
圖 6.3-3 辛樂克颱風單位特性歷線預測值與觀測濁度比較.....	116

圖 6.3-4 入流與出流濁度單位特性歷線.....	117
圖 6.4-1 石門水庫性能曲線.....	120
圖 6.4-2 石門水庫洪水操作下暴雨事件最大排洪量組體圖.....	121
圖 6.5-1 高濁度短期應變缺水風險曲線.....	123
圖 7.1-1 近百年(1897~1996)颱風侵台次數統計.....	125



符號說明

符號	對照說明	符號	對照說明
R_t	集水區河川流量	$OB_{k,t}$	t時刻蓄存節點k之河川放水量
Q_t	地表逕流	$I_{i,t}$	t時刻蓄存節點k的入流量
SF_t	集水區河川流量	$S_{k,t}$	t時刻蓄存節點k的蓄水量
CN	逕流係數	$R_{k,t}$	蓄存節點k在t時刻之下游保留量
U_t	未飽和層高於凋萎點之土壤水分含量	$DR_{i,t}$	下游優先水權量
ET_t	蒸發散量	$B_{k,t}$	蓄存節點k在t時刻的生態保留水量
PC_t	滲漏量	$OD_{k,t}$	從蓄存節點k在t時刻之需求供水量
U^*	最大土壤水分容量	$D_{j,t}$	t時刻於K點取水之目標需求量
K_{ct}	覆蓋係數	P_{max_k}	K點取水之淨水場處理能力的管線最大輸送容量
K_{st}	土壤水分因子	$ON_{k,t}$	蓄存節點k在t時刻的未控制流量
H_t	第t天的日照時間	$S_{max_{k,t}}$	蓄存節點k在t時刻的最大庫容體積
T_t	日平均溫度 (°C)	$O_{i,t}$	蓄存節點k在t時刻的出流量
e_{0t}	飽和蒸氣壓	$TS_{T \times 1}$	t+1時刻水庫分層濁度歷線矩陣
PC_t	未飽和含水層滲漏至淺層飽和含水層之水量，	ts_t	t時刻水庫分層濁度
G_t	淺層飽和含水層滲漏至河川之水量	$MI_{T \times tb1}$	水庫分層泥砂入流量構成的下三角矩陣
D_t	入滲至深層飽和含水層之水量	mi_t	t時刻水庫分層泥砂入流量
r	退水係數	$MO_{T \times tb2}$	水庫分層泥砂出流量構成的下三角矩陣
T_b	歷線基期	mo_t	t時刻水庫分層泥砂出流量

接續下頁

符號	對照說明	符號	對照說明
T_p	歷線洪峰時間	$UI_{tb1 \times 1}$	水庫分層泥砂入流單位特性歷線矩陣
T_c	集流時間	ui_t	水庫分層泥砂入流單位歷線 t 時刻泥沙量
A	集水面積	$UO_{tb2 \times 1}$	水庫分層泥砂出流單位特性歷線矩陣
Re	超滲降雨	uo_t	水庫分層泥砂出流單位歷線 t 時刻泥沙量
Q_p	洪峰流量	T	整場暴雨的基期
Tr	單位降雨延時	tb1	水庫分層泥砂入流單位歷線的基期，
L	集水區河道長度	tb2	水庫分層泥砂出流單位歷線的基期。
S	集水區平均坡度		



第一章 緒論

1.1 研究動機與目的

由於全世界工業化及過度使用石油使溫室氣體排放大幅增加，因而增強大氣溫室效應，造成全球氣候變遷加劇。在氣候變遷影響下，極端水文事件的發生不但更為頻繁，且在時、空分布上更為不均。國際氣候變遷協會 (Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC) 是國際社會開始重視全球環境問題的先趨，自 1990 年來共發表了四次評估報告，根據第四次評估報告(AR4)，在北緯 30°N 以上之區域，自 1900 至 2005 間，年雨量有明顯提高，但於熱帶區域，自 1970 後，年雨量則有減少的趨勢，整體而言，各區發生豪大雨的次數提高，但熱帶和亞熱帶國家降雨天數有逐年遞減之趨勢，顯示氣候變遷對於降水分布確實造成空間與時間分布極不均勻。

近年來台灣地區亦發生許多極端水文事件，如民國 98 年莫拉克颱風重創南台灣、民國 93 年艾利颱風癱瘓石門水庫供水以及民國 92 年全台大旱災等等，顯示氣候變遷亦對台灣造成影響。加上台灣因地質結構較脆弱、地震頻繁，而使多數集水區上游土石鬆軟，且河川坡陡流急，豪雨時易將泥砂帶入水庫而造成高濁度供水問題。這些水文條件受氣候變遷影響下，變得更加不穩定且難以預測，進而影響區域供水系統的穩定性，然而社會經濟發展必須仰賴可靠之水資源供給，故如何將氣候變遷影響納入考量以強化現有水資源規劃與風險管理決策是迫切之課題。

前述供水問題多發生於枯水期水源不足或汛期高濁度水質不良，然以往水資源供水分析多將枯水期供水問題和高濁度供水問題個

別考量，且多採用定率分析，但整體而言，供水風險應同時考量上述兩種情況。除此之外，降雨量原本即具有高度不確定性，而氣候變遷影響更增加此不確性，因此如何針對區域水資源提供一套客觀且完整的風險分析乃是重要之課題。

有鑒於此，本研究提出一套以蒙地卡羅分析為基礎的整體供水分析架構，可同時考量長期調配與高濁度供水問題，並以風險的角度評估各調適策略是否足以因應氣候變遷造成的衝擊，以做為決策分析之參考。

1.2 研究流程

本研究流程如圖 1.2-1 所示，首先蒐集研究所需之氣象水文及地文資料，接著根據傳統風險管理分析步驟進行區域水資源整體供水風險分析，傳統風險管理分析第一步驟為風險辨識，即界定出影響系統之不確定性因子，然影響水資源調配系統之不確定性因子很多，如水文因子、地文因子、人類活動、觀測儀器及模式推估不確定性等等，本研究僅針對影響供水調配之顯著水文因子進行探討，即探討降雨量與降雨延時不確定性因子對系統之影響。

風險管理分析第二步驟為風險評量，即建立風險評量模式以評估不確定性因子對系統的反應。本研究以蒙地卡羅分析為理論基礎建立風險評量模式，其包含四大區塊，各區塊說明如下：

一、氣候變遷統計降尺度分析

本研究以 ECHAM5 大氣環流模式所提供之 A2 情境模擬數據進行降尺度分析，並參考相關降尺度分析文獻，選取平均海平面壓力作為預測因子，透過本研究發展之條件氣候繁衍降尺度模式，合成氣候

變遷長期雨量資料。

二、枯水期缺水風險分析

本研究以長期水資源調配模擬結果探討枯水期之缺水風險，根據氣候變遷長期合成雨量結果，利用 GWLF (Generalized Watershed Loading Functions) 模式估算石門水庫入流量，並透過以 Vensim 軟體為基礎建立之水資源調配模式，分析調配後枯水期缺水量，最後以韋伯點繪法(Weibull Plotting Method)評估枯水期不同缺水忍受度下之缺水風險。

三、高濁度缺水風險分析

本研究以事件型水資源調配模擬結果探討高濁度之缺水風險。以氣候變遷長期合成雨量為基礎，透過頻率分析決定暴雨量機率分佈，再根據歷史颱風資料求得暴雨延時機率分佈，配合拉丁超立方取樣法(LHS)合成多場設計降雨(事件型雨量)，接著利用三角型單位歷線法估算石門水庫多場設計降雨下所產生之多場入流歷線，再以本研究發展之單位特性歷線濁度預測模式模擬出多場濁度歷線，接著配合事件型水資源調配模式(含洪水操作規則)，計算各高濁度事件下之缺水量，最後以韋伯點繪法(Weibull Plotting Method)評估高濁度事件下不同缺水忍受度下之缺水風險。

四、缺水風險綜合分析

根據枯水期水資源風險分析與高濁度水資源風險分析結果，評估整年度之缺水風險。

風險管理分析第三步驟為風險回應計畫，即制訂調適策略以降低系統風險。本研究參考”北部區域水資源經理基本計畫”提出石門水庫調適策略，包含板新供水改善計畫二期工程與中庄調整池興建，各

項調適策略將以前述建立之風險評量模式評估其風險，分析結果可做為未來決策之參考。

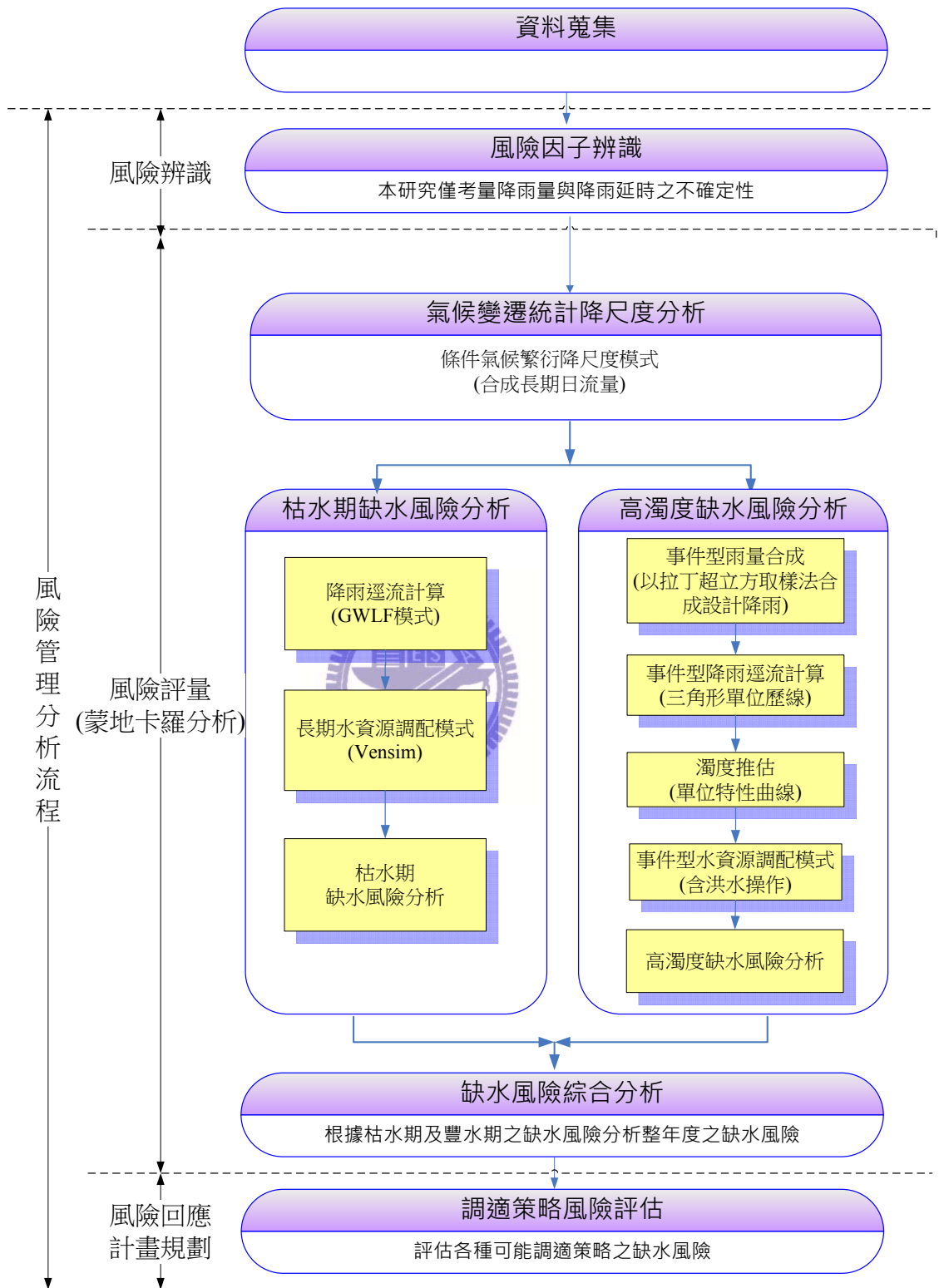


圖 1.2-1 研究流程圖

第二章 文獻回顧

2.1 水資源調配分析相關文獻

水資源調配分析模式眾多，目前已有許多文章針對水資源調配分析模式進行分類與探討(Yeh 1985; Wurbs 1993; Labadie 2004, Rani and Moreira 2010)，本研究參考相關文獻，將水資源調配分析模式進行分類並表示如圖 2.1-1。Yeh(1985)指出水資源調配分析模式可分為模擬法(Simulation Model)與優選法(Optimization Model)。模擬法係應用於已知系統操作規則下，以數學或數值方法來模擬系統的反應(如放水量和蓄水量變化等)，多應用於長期規劃模擬。優選法係應用於系統操作規則不明朗下，以尋優技術(如線性規劃、動態規劃、非線性規劃或啟發式演算法等)，找出系統的最佳放水規則，常應用於多目標水庫操作問題。

其中優選法可再依水文參數(如入流量)是否考量隨機特性而區分為定率優選法(Deterministic Optimization Model)和序率優選法(Stochastic Optimization Model)，定率優選法常應用於短期操作(如洪水操作)問題，如 Trezos(1991)、Needham 等人 (2000)和 Vedula 等人 (2005)以線性規劃為基礎探討水庫發電規則、防洪規則或地表地下聯合營運問題；Hall(1968)等人及 Yakowitz (1982)以動態規劃探討多目標水庫操作問題；Tu(2008)等人以混合整數二次規劃分析台灣南部水庫最佳限水策略；各文獻之說明詳見表 2.1-1。

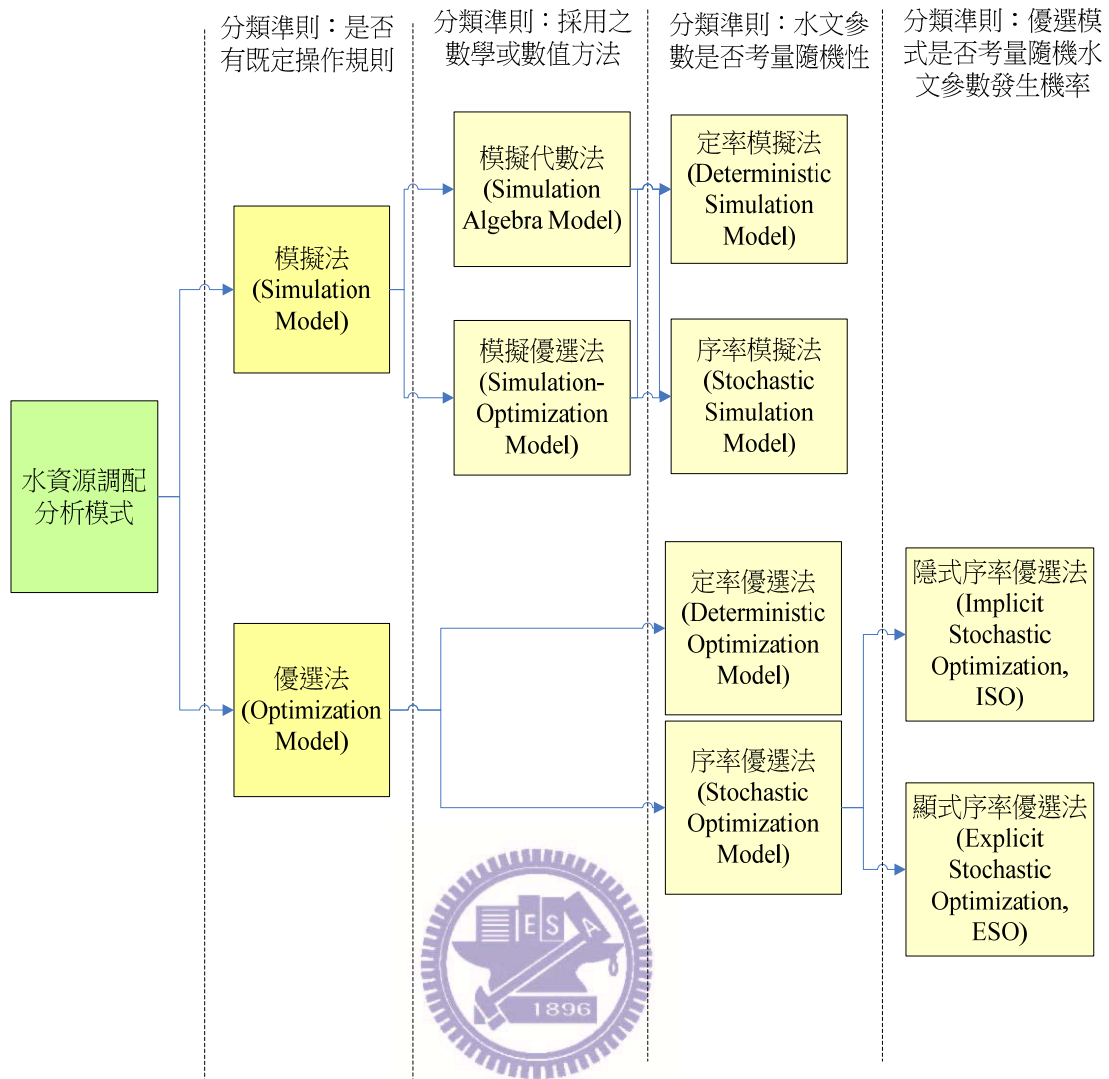


圖 2.1-1 水資源調配分析模式之分類

表 2.1-1 定率優選法相關文獻說明

優選技術	說明
線性規劃 為基礎	Trezos(1991)以混合整數線性規劃優選美國加州 Edison's Big Creek 水力發電規則，其目標函數為最大發電量，決策變數為月變化之發電規線值。
	Needham 等人 (2000)以混合整數線性規劃優選美國愛荷華州的 Des Moines Rivers 的三水庫洪水操作規則，其目標函數為最小洪水損害。
	Vedula 等人(2005)以線性規劃分析地表地下聯合營運問題，其中地下水考量等向均質的非侷限含水層，以有限元素法計算地下水反應。
動態規劃 為基礎	Hall(1967)是最先將動態規劃應用於多目標水庫最佳操作問題，考量洪水控制、發電、生態等用水目標。
	Yakowitz (1982)評論動態規劃應用於水資源調配之文章，包含橋梁設計，灌溉系統控制，水質維持及水庫操作等問題

Philbrick 和 Kitanidis(1999)指出因為水文參數往往都具有不確定性，因此以定率優選法分析短期極端水文狀態(如洪水或乾旱)之衝擊時，如何選取具代表性的水文事件，將影響整體分析效率，因此建議應以序率優選法進行分析。Labadie(2004)將序率優選法分為兩大類：隱式序率優選法(Implicit Stochastic Optimization, ISO)及顯式序率優選法(Explicit Stochastic Optimization, ESO)，各方法之分析流程詳見圖 2.1-2。

隱式序率優選法(ISO) 係以長期入流量觀測資料或合成資料，代入定率優選模式進行分析，然後根據分析數據，利用統計方法或啟發式演算法歸納出水庫最佳操作規則，如 Hiew 等人 (1989)以隱式序率線性規劃探討水庫最佳操作規則，Bhaskar 和 Whitlatch (1980)以隱式序率動態規劃優選美國俄亥俄州的 Hoover 水庫最佳操作，二篇文章皆根據優選模式分析結果再以回歸方式找出水庫操作規線；Oliveira 和 Loucks (1997)、Sharif 和 Wardlaw (2000)、Ahmed 和 Sarma

(2005) 、Chen 和 Chang(2007) 、Shiau (2009)及 Yang 等人(2009)以長期觀測流量或合成流量，配合遺傳演算法和定率優選模式，以找出最佳水庫操作規線。

顯式序率優選法(ESO)係將長期入流量觀測資料或合成資料經由統計方法建立入流量機率模式如一階馬可夫鍊或單純的入流量機率分佈，以此為基礎再以序率優選模式得到水庫最佳操作規則，如 Loucks 和 Dorfman (1975)和 Simonovic 和 Marino (1982)以顯式序率線性規劃，探討水庫最佳操作規則；Stedinger 等人(1984)、Huang 等人(1991)、Vasiliadis 和 Karamouz (1994)、Brage 等人(1991)和 Philbrick 和 Kitanidis (1999)以顯式序率動態規劃探討水庫最佳操作規則；Ko 等人(1992)以顯式序率多目標優選法探討多目標水庫操作問題。序率優選法相關文獻詳細說明詳見表 2.1-2。



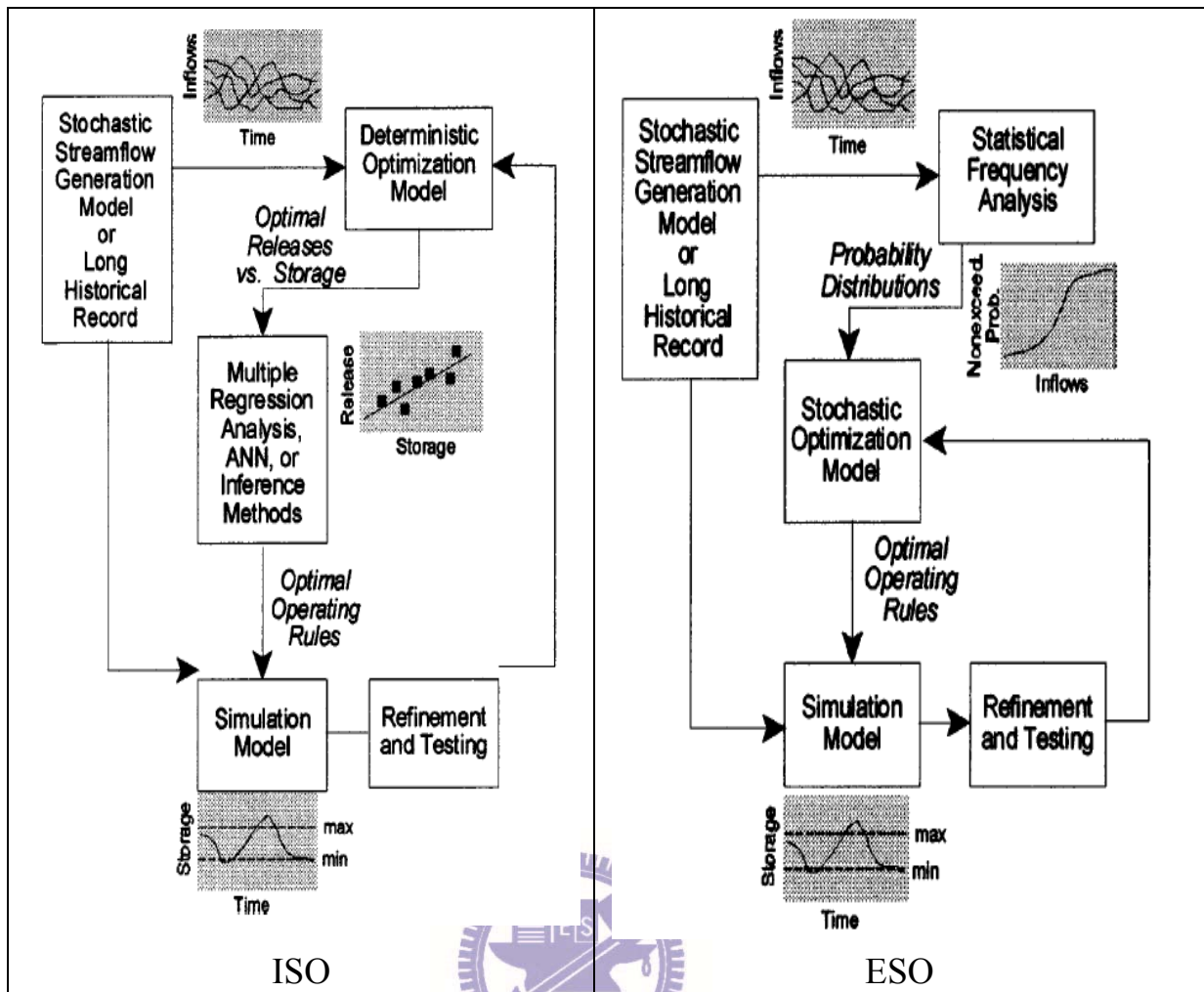


圖 2.1-2 隱式序率優選法(ISO)與顯式序率優選法(ESO)流程圖

資料來源：Labadie JW (2004), "Optimal operation of multi-reservoir systems: state-of-the-art review.", J Water Resour Plan Manage—ASCE 130(2)

表 2.1-2 序率優選法相關文獻說明

優選技術	說明
線性規劃 為基礎	Trezos(1991)以混合整數線性規劃優選美國加州 Edison's Big Creek 水力發電規則，其目標函數為最大發電量，決策變數為月變化之發電規線值。
	Needham 等人 (2000)以混合整數線性規劃優選美國愛荷華州的 Des Moines Rivers 的三水庫洪水操作規則，其目標函數為最小洪水損害。
	Vedula 等人(2005)以線性規劃分析地表地下聯合營運問題，其中地下水考量等向均質的非侷限含水層，以有限元素法計算地下水反應。
	Tu(2008)等人以混合整數二次規劃優選台灣南部水庫最佳限水策略
動態規劃 為基礎	Hall(1967)是最先將動態規劃應用於多目標水庫最佳操作問題，考量洪水控制、發電、生態等用水目標。
	Yakowitz (1982)評論動態規劃應用於水資源調配之文章，包含橋梁設計，灌溉系統控制，水質維持及水庫操作等問題
遺傳演算 法為基礎	Yang 等人(2009)以多目標遺傳演算法(MOGA)結合限制型微分動態規劃(CDDP)探討台灣南部地區地表與地下水聯合營運問題，其目標函數為最小固定成本和操作成本。
	Chen 和 Chang(2007)以實數編碼的超立方分佈遺傳演算法(Hypercubic Distributed Genetic Algorithm, HDGA)優選水庫操作規則。
	Oliveira 和 Loucks (1997)以遺傳演算法優選多水庫供水與發電操作策略
	Sharif 和 Wardlaw (2000)比較遺傳演算法和離散微分動態規劃(discrete differential dynamic programming)對於多水庫操作規則優選的優劣。
	Shiau (2009)以多目標遺傳演算法探討台灣南化水庫用水分配問題，其目標函數為最小長期總缺水率和最小短期缺水率(最大月缺水率)，兩目標互相衝突
	Ahmed 和 Sarma (2005)以遺傳演算法優選多目標水庫，並與序率動態規劃(stochastic dynamic programming,SDP)模擬結果比較。

然而無論定率或序率優選法其目的都是在尋找系統的最佳操作規則，但在工程實務上，往往面對的水資源調配問題是在已知各種方案的操作規則下，分析方案的效益，此時應以模擬法進行分析。模擬法通常可分為兩大類(請參照圖 2.1-1)，模擬優選法

(Simulation-Optimization Model)為以逐時刻最佳放水為目標函數，利用尋優技術計算水庫各時刻的放水量，模擬代數法(Simulation-Algebra Model)為以代數基礎計算水庫各時刻的放水規則。

模擬優選法的代表性通用化模式為由科羅拉多州州立大學(Colorado State University)和太平洋西北區墾務(Bureau of Reclamation's Pacific North West Region)共同開發的 MODSIM 模式，為基於網流法之模擬模式，可同時計算水量及水質問題，目前已被廣泛應用於水庫操作模擬(Dai and Labadie 2001; Campbell et al. 2001; Srdjevic et al. 2004)。另一代表性通用化模式為由台灣前水資會與荷蘭戴伏特水工所(Delft Hydraulics)合作發展的 RIBASIM，可處理大區域供水系統之用水需求、水量分配、水質分析、經濟評價等分析工作。目前國內學者也積極發展通用化模擬優選模式，如蔡嘉訓(2003)以混合型整數規劃為基礎，建立多水庫系統聯合操作模擬模式；李志鵬(2004)提出以線性規劃為基礎，配合「指標平衡」之原則及「對等水庫」之觀念，建構水庫聯合調配營運模式；周乃昉(2006)於經濟部水利署水利規劃試驗所計畫中，提出以網流法為基礎，並考量高濁度之供水影響下，建立 GWRASIM 模式，除可做為模擬模式外，尚可做為優選模式找出最佳操作規則。

模擬代數法的代表性模式為美國陸軍工程師團水利工程中心(U.S. Army Corps of Engineers, Hydrologic Engineering Centre)所開發的通用化模式 HEC-5，其以水庫操作規線(rule curve)、指標平衡及對等水庫為基礎，模擬串並聯多水庫水資源系統聯合營運。之後又進一步改良 HEC-5 模式，加入使用者圖像介面、資料庫管理、下游河道演算及後端影像輸出的功能，稱之為 Hec-ResSim 模式。此外，模擬

代數法尚有依據地區特性而量身訂做的水資源調配模式，如以系統動力學為理論基礎、物件導向為技術所開發軟體(如 VENSIM 和 STELLA 等)建立的水資源調配模擬模式，目前已被廣泛應用於水資源管理問題，如 Simonovic 和 Fahmy (1999)利用系統動力學概念建立水資源供需模型並應用在埃及地區，以做為水資源策略評估之用；Xu 等人(2002)以 STELLA 建立黃河水資源永續利用模式，其主要水源可以來自地表水、地下水或廢水再生；Simonovic 和 Li(2003)以 STELLA 軟體探討氣候變遷對於加拿大紅河流域(Red River basin)防洪系統的影響；Stave et al.(2003)以 VENSIM 軟體建立拉斯維加斯水資源模型，且提出透過系統動力學的因果循環圖(Casual Loop)可有效幫助一般大眾了解並參與決策。Sehlke 和 Jacobson J (2005)以 VENSIM 軟體建立地表地下聯合營運模式，以探討美國愛達荷州、猶他州和懷俄明州 Bear River 流域跨州界的水資源調配。Yang 等人(2008)以 Vensim 軟體建立水資源調配模式，探討多元化水源方案對於台灣中部地區之缺水和經濟財務影響。國內研究有張婉如(2006)以 Vensim 軟體建立台中地區水資源調配模式，探討供給面與需求面策略對台中地區水資源之影響；蘇昱維(2008)以 Vensim 軟體建立台中地區水資源調配模式，並將經濟財務分析以動態連結函式庫(Dynamic Link Library, DLL)加入調配系統中，分析各項策略之缺水和經濟財務影響；牛敏威(2009)以 Vensim 軟體建立台中地區水資源調配模式，以蒙地卡羅法為基礎，探討氣候變遷對台中地區缺水風險之影響。

模擬法亦可依水文參數(如入流量)是否考量隨機特性而區分為定率模擬法(Deterministic Simulation Model)和序率模擬法(Stochastic Simulation Model)，定率模擬法通常應用於評估特定水文事件對於水工結構物之影響，如 Merzi 和 Aktas(2000)以地理資訊系統(GIS)配合

SCS 法(Soil Conservation Service Method)推估洪水量，再根據波爾斯法計算土耳其 Mogan 湖的洪水操作，以繪出下游淹水區域範圍；經濟部水利署水利規劃試驗所(2009)探討莫拉克颱風對中庄調整池防洪安全之影響；中興工程顧問股份有限公司(2009)分析莫拉克颱風對石門水庫排洪安全之影響。

序率模擬法則多應用於水資源長期規劃模擬，如前述模擬代數法和模擬優選法所提及之文獻都屬於序率模擬法，惟一般序率模擬法所採用的流量資料多假設未來流量為歷史流量的重現，然後經模擬分析後，以評估指標表達系統反應的序率特性，一般常用的評估指標如美國陸軍工程師團(1975)提出缺水指數(Shortage Index, SI)，可顯示長期之缺水狀況，其包含缺水程度、發生頻率，其將缺水程度對經濟之影響視為缺水率的平方，可作為水資源經濟效益(或成本)之替代性指標；徐享崑(1995)提出一般化缺水指數(Generalized Shortage Index, GSI)，結合缺水指數(SI)與缺水百分率日數(Deficit Percent Day, DPD)特性，對缺水強度及缺水延時更為敏感，可反應年度內連續缺水訊息，亦可用於評估短期操作的影響。

但實際上未來流量具有高度不確定性，氣候變遷影響將更增加此不確性，因此若以歷史重現資料進行模擬將有失偏頗，因此本研究將蒙地卡羅法 (Monte Carlo Simulation Method) 引入模擬模式中，進行供水系統的風險分析，即以隨機方式產生多組氣候變遷後之流量資料，經模擬模式分析後得到多組系統反應(如供水量或缺水量)，再將這些數據以統計方法求得系統反應(供水量或缺水量)之風險。

此外，由於本研究目的主要在評估氣候變遷對於石門水庫水資源調配的衝擊，即考量在既有的水資源調配規則中，評估各項調適策略於氣候變遷下遭遇之缺水風險，因此適合以模擬法進行分析。由前

述文獻回顧中發現以系統動力學為基礎所發展的軟體 VENSIM 已被廣泛應用於水資源管理問題上，其以物件導向為建構原理，有助於將各項調適策略系統模型嵌入於原石門水庫調配系統模型，且其提供動態連結函式庫(Dynamic Link Library, DLL)，有助於結合不同程式語言所建立的程式，形成耦合型系統動力模型。故本研究以 VENSIM 軟體做為建模工具，進行氣候變遷下石門水庫水資源風險分析。

2.2 降尺度分析文獻回顧

大氣環流模式(GCM)雖提供不同氣候排放氣體情境之模擬結果，然其解析度較低(約為 100~300 公里)，對於區域氣候特徵很難作合理的預測，因此必須有更高解析度數據來進氣候行預測，因此必須透過降尺度分析以求得高解析度氣候資料。

通常降尺度分析可分為兩大類：動力降尺度(dynamic downscaling)和統計降尺度(Statistical Downscaling) (Salathe 等人，2007;Fowler 等人，2007； Anandhi 等人，2008, Chu 等人，2010)，動力降尺度乃是以 GCM 模擬輸出結果作為區域邊界條件，再以高解析度的區域氣候模式，模擬區域之氣候，通常又稱為區域氣候模式(Regional Climate Models)，然而動力降尺度需要龐大的計算量，且邊界條件強烈受到 GCM 模擬結果影響，因此目前許多研究都較傾向統計降尺度，因其相對而言不需要龐大計算量且較容易使用(Wilby 等人，2002)。

統計降尺度可再細分為三大類—迴歸模式(Regression Models)、氣候分類(Weather Typing Schemes 或 Weather Pattern Approach)及氣候繁衍(Weather Generators) (Fowler 等人，2007; Anandhi 等人，2008； Hessami 等人，2008)等。迴歸模式乃是以統計方法找出小尺度因子

(Predictand)和大尺度因子(Predictor)之轉換函數；氣候分類係以數學或統計方法找出大尺度因子氣候類型(Weather Pattern)與小尺度因子氣候類型之對應關係；氣候繁衍係以小尺度氣候因子機率分佈及馬可夫鍊(Markov Chain)隨機產生氣候資料，一般馬可夫鍊是以因子自相關特性計算轉移矩陣，如一階馬可夫鍊，故通常需與回歸模式或氣候分類模式搭配進行降尺度分析，但亦有研究以大尺度氣候因子(如風速、蒸氣壓力或溫度等)建立小尺度氣候因子之轉移矩陣進行降尺度分析(Watts 等人，2004)。

回歸模式與氣候繁衍模式整合之代表為 Wilby 等人(2002)以多變數線性迴歸為基礎所開發 SDSM 模式，目前已有多篇文獻利用 SDSM 模式進行降尺度分析(Harpham 和 Wilby, 2005; Dibike 和 Coulibaly, 2005; Wetterhall 等人, 2006; Scibek 和 Allen, 2006; Wilby 等人, 2006); 此外，Hewitson 和 Crane(2006)結合迴歸模式與氣候繁衍模式，以自組織映射圖(Self-Organizing map, SOM)及機率密度函數(probability density function, PDF)進行降尺度分析；Hessami(2008)以多變數線性迴歸結合氣候繁衍，建立自迴歸統計降尺度模型(Automated regression-based statistical downscaling)；魏綺瑪(2009)結合迴歸模式及氣候分類模式，以支援向量機(Support Vector Machine, SVM)及線性迴歸進行降尺度分析；Chen 等人(2010)以支援向量機配合氣候繁衍進行降尺度分析。

由上述文獻發現，近年來降尺度相關研究皆偏向整合序率氣候繁衍模式，因為大、小尺度因子間關係通常呈非定率關係，因此本研究以氣候繁衍為基礎，建立條件氣候繁衍降尺度模式，以確實反映大、小尺度之非定率關係。

2.3 降雨逕流文獻回顧

降雨逕流模式之發展，可分為集塊型模式(Lumped Model)與分布型模式(Distributed Model)兩大類。集塊型模式係將整個流域視為一集塊系統，僅考慮系統之輸入與輸出關係，而忽略了集水區中各空間分區單元之差異性；分布型模式考慮空間的差異性，將集水區劃分為多個集水次區，考慮各集水次區的相互影響以計算各集水次區之實際流量。由於本研究主要目的為發展一套能考量長期調配與短期高濁度問題的水資源整體風險分析評估模式，因此在降雨逕流演算時，以計算量較低之集塊模式進行分析，以下將針對集塊模式之相關文獻進行說明。

Sherman(1932)所發展的單位歷線法(Unit Hydrograph)為最常見之集塊模式理論，後續以單位歷線為基礎的方法陸續被發展出來，如Carthy(1938)以統計分析方式分析三角型單位歷線與集水區地文參數(集水面積、主流坡度及主流長度)之統計相關性；Synder(1938)提出合成單位歷線(Synthetic Unit Hydrograph)，將歷線正規化以做為無水文資料之河川做為推估洪水歷線之用；美國水土保持局(U. S. Soil conservation Service, SCS)於 1957 發展出 SCS 無因次單位歷線；美國陸軍工程師團水文工程中心(U.S. Army Corps of Engineering, Hydrologic Engineering Center, HEC)整理各種單位歷線法發展 HEC-1 集水區降雨逕流模式，之後又加入使用者介面改版為 HEC-HMS 水文模式(2005)，可做為集塊型模式或分布型模式推估逕流量，其降雨逕流推估方法包含動力波法(Kinematic Wave Method)、單位歷線法、Clark 單位歷線法、無因次單位歷線法、合成單位歷線法等。目前台灣於區域排水整治規劃時，多採用三角形單位歷法推估洪峰流量(經

濟部水利署水利規劃試驗所，2006)，故本研究於高濁度事件流量推估時，將以三角形單位歷法進行推估。

前述以單位歷線為基礎的推估方法，由於僅考量截留、窪蓄、蒸發散及入滲等降雨損失，而忽略了地下水出流量，因此僅適用於推估事件型(短期)洪水歷線，若要進行長期流量推估，則應將地下水之出流納入考量，目前常見之長期降雨逕流模式有水筒模式(Tank Model)、HBV(Hydrologiska Byrans Vattenbalansavdelning)與 GWLF (Generalized Watershed Loading Function)等。

水筒模式法(Tank Model)為日本科學技術廳菅原正己氏於 1971 年所發展之通用水文模式。主要是將集水區的逕流系統，以數個儲存模型容器所組成，各模型代表不同的逕流分量如地表逕流、中間流、基流量等等。陳榮松(2009)將水筒模式應用國內數個流域之降雨逕流推估，同時修正水筒模式法以改善其效率。

HBV 模式為 Bergström(1976)年所發展的模式，並將其應用於瑞典北部之流域。目前 HBV 模式已成為北歐地區降雨-逕流模擬之標準工具，而且廣泛應用在全球 30 幾個國家。楊道昌與游保杉(1997)曾進行適當修正，並首度將其應用於台灣南部地區，研究中發現其以日為時間單位模擬年流量歷線具有良好能力。Akthar et al.(2008)應用 HBV 模式探討在不同冰河覆蓋情形下分析對流量的影響。

GWLF 模式為 Haith 與 Shoemaker 教授於 1987 年所發展，其理論基礎為依據土壤沖蝕萬用公式 (Universal Soil Loss Equation，簡稱 USLE) 與 SCS 曲線值法 (SCS Curve Number)，分析集水區在不同土地利用下之營養鹽濃度，其中之水平衡模式近年來常被引用進行集水區河川流量之模擬分析 (謝明昇，2004；王世為，2006；陳瑋茹，2008；張廷暉，2008)。GWLF 水平衡模式與其他模式相比所需之參

數相對較少，且在操作上相當容易，故本研究採用 GWLF 模式進行長期流量推估。

2.4 濁度預測文獻回顧

台灣地區因地震頻繁造成多數集水區上游土石鬆軟，汛期時易發生高濁度供水問題，而濁度與懸浮載泥砂濃度相關程度很高，因此本研究蒐集國內外濁度預測或泥砂濃度預測之相關文獻進行探討，經本研究彙整後，將濁度(或泥砂濃度)預測分為三大類，即數值預測模式、經驗/統計預測方法及實驗方法。

數值預測模式乃是以泥砂運移物理機制為控制方程式，建立數值模式進行泥砂運移量計算，如 Toniolo(2007)建立濁度流(turbidity)水平一維數值模式，以探討水庫因砂率之變化，主要將水庫分為上、中、下游三段進行模擬分析，並與實驗結果比較。Chou(2010)探討洪水操作對於水庫濁度之影響，根據 Kynch 的批次沉降(Batch Settling)定理，建立考量垂向一維濁度變化之 GWASIM 模式，濁度主要受水平進、出流量、垂向對流及泥沙沉降影響。

經驗/統計預測方法乃是以現地觀測數據，利用統計方法求得濁度(或泥砂濃度)與預測因子間的轉換函數，由於入流量與濁度(或泥砂濃度)息息相關，因此常以入流量作為濁度預測因子，最常見之經驗公式為 Einstein (1950) 根據力學與統計學所提出之挾砂力公式，即含砂量與流量關係呈指數關係($Q_s = kQ^n$ ，式中 Q 為流量， Q_s 為含砂量， k 與 n 為迴歸係數)，Colby 和 Hembree (1955)、Toffaletti (1969)、Fleming (1969) 及 Sun 等人 (2001) 皆應用 Einstein 經驗公式進行河川濁度(或泥砂濃度)推估，國內研究如趙信嘉 (1990)、楊錦釗 (1997)、經濟部水利署水利規劃試驗所 (2002) 及程勝璟 (2003)

亦利用 Einstein 經驗公式進行河川濁度(或泥砂濃度,各文獻之詳細說明詳見表 2.4-1 所示。另外類神經模式也常被廣泛被應用於河川濁度預測,國外研究有 Nagy 等人(2002)以類神經網路進行美國多條河川含砂量預測,模式以剪應力、坡度、水深比、福祿數、雷諾數等 8 個輸入參數反映河川泥砂濃度之變化。Sarangi 和 Bhattacharya(2005)以類神經模式應用於印度 Banha 集水區之河川泥砂濃度預測,模式中影響河川泥砂濃度因子包含流量與地文因子。國內研究有王英銘(2005)以自組性類神經網路架構 GMDH (Group Method of Data Handling) 演算法為基本架構,利用每日暴雨量及入流量建立攔河堰濁度預測模式。李念勳(2007)利用類神經網路對八掌溪觸口橋之水位、濁度及硝酸鹽濃度進行預測,其中影響 t 時刻濁度之因子包含 t-1 時刻日雨量、t-1 時刻流量與 t-1 時刻濁度。由前述文獻發現,大部分經驗/統計預測模式多應用於河川或攔河堰濁度(或含砂濃度)預測,鮮少應用於水庫濁度預測。

實驗方法乃以水工試驗求得相關數據,再利用統計方法歸納濁度與實驗數據之關係。相關文獻有 Meyer 和 Muller (1948) 以獨立因素的經驗分析方法進行一系列的推移質水槽試驗,並依此試驗結果建立推移質輸砂公式。黃振傑(2007)利用現場砂樣於試驗室調配標準濃度渾水樣,量測濁度值,並以庫區現地水樣的濃濁度觀測資料,迴歸出現地水樣之濃度與濁度關係率定曲線。經濟部水利署(2005 及 2006)以沉降筒試驗探討清水清渾水交界面受入、出流量之影響,並提出石門水庫防渾操作原則。

由於數值預測模式多以複雜泥砂運移機制作為控制方程式,有許多參數待定,本研究嘗試以簡單水文機制(單位特性歷線)取代複雜泥砂運移機置,以較少的參數建立計算量較低之水庫濁度數值預測模

式，並同時建立類神經水庫濁度預測模式以作為比較對照。

表 2.4-1 Einstein 懸移質濃度經驗公式相關文獻說明

分類	說明
國外 文獻	Colby and Hembree (1955) 修正 Einstein 懸移質濃度經驗公式，並應用於內布拉斯加州(Nebraska)之 Nio-brara 河之懸移質濃度推估。
	Toffaleti (1969) 修正 Einstein 懸移質濃度經驗公式，並應用於美國地區之各中、大型河川懸移質濃度推估。
	Fleming (1969) 利用 Einstein 經驗公式分析世界 250 條河川懸移質濃度，發現不同水文及地質環境下，所得到的 k 和 n 值差異頗大，因此， k 和 n 值應視每條河川的特性而定。
	Sun et al. (2001) 以 Einstein 懸移質濃度經驗公式分析澳洲南部之集水區河川懸移質濃度，並與多項式迴歸預測結果進行比較。
國內 文線	趙信嘉 (1990) 以 Einstein 懸移質濃度經驗公式分析東港溪港西抽水站及荖濃溪新發大橋上游流量與含砂濃度關係，相關係數達 0.92 以上。
	楊錦釗 (1997) 以 Einstein 懸移質濃度經驗公式分析旗山溪上游流量與含砂濃度關係，其相關係數達 0.99。
	程勝璟 (2003) 以 Einstein 懸移質濃度經驗公式分析旗山溪甲仙攔河堰上游流量與含砂濃度關係。
	經濟部水利署水利規劃試驗所 (2002) 以 Einstein 懸移質輸砂率公式分析濁水溪自強大橋與彰雲橋實測流量與懸移輸砂量之關係，相關係數達 0.8 以上。

第三章 研究方法

3.1 氣候變遷模式及情勢分析介紹

地球氣候演化的資訊涵蓋廣泛包含氣圈、水圈、冰圈、地圈和生物圈。由於複雜的環流和交互作用過程，無法以高解析度進行長時間模擬，所以當前一般所採用的氣候變遷評估為使用大氣環流模式（General Circulation Models, GCM）進行較低解析度的模擬。國際氣候變遷協會(IPCC)提供多個 GCM 模擬數據，以預估未來百年逐月的平均氣候特徵改變情形，各 GCM 模式說明詳見表 3.1。其中包含數種可能溫室氣體排放情境模擬，各情境主要是根據全球未來可能之經濟、人口、工業與環境的發展所訂定，根據 SRES(Special Report on Emissions Scenarios)報告，主要分為 A1、A2、B1、B2 等 4 個情節(圖 3.1-1)，說明如下：



一、 A1 情節

代表快速的經濟成長，全球人口在 21 世紀中時期達到尖峰，之後便開始下降。並且擁有有效的科技技術。主要的主題在於實際人口的減少、地區的聚合、建築物的容積、教育的增進與社會的影響。A1 情境進一步細分為 3 個情境，分別描述了能源系統中技術變化的不同方向

A1FI：人類仍大幅使用化石燃料，為化石燃料密集型情境。

A1T：科技進步，再生能源發展迅速進而取代化石燃料，人類不再使用化石燃料。

A1B：化石燃料與再生能源之使用達到平衡，假設在各種能源供應及其利用技術平行發展的情況下，人類並不特別依

賴於某種特定能源。且土地使用變遷速度適中。

二、 A2 情節

描述一個非常多變異性組成的世界，主要在於各國自力更生，與維持地方發展，而全球人口不斷地增加。經濟成長主要為區域性成長，而每人經濟成長率及技術的改進較其他情節破碎且緩慢。

三、 B1 情節

如同 A1 情節，全球人口在 21 世紀中時期達到尖峰，之後開始下降，但經濟結構卻朝向一個服務與資訊的經濟結構。能源使用減少，並引用較乾淨且有效率之技術。注重經濟、社會與環境的永續性，卻不考慮額外的起始氣候條件。

四、 B2 情節

主要描述地方性經濟、社會與環境永續性的結果。全球人口持續增加，卻比 A2 情節慢。經濟發展中等，而科技的改變比 B1，A1 較緩且更多相異性。而情節主要也以社會平等與環境的保護為目標，且發展為區域性發展。

表 3.1 IPCC AR4 提供之 GCM 模式說明

模式發展機構	簡稱	模式	A2	A1B	B1
Bjerknes Centre for Climate Research Norway	BCCR	BCM2.0	1	1	1
Canadian Center for Climate Modeling and Analysis Canada	CCCma	CGCM3 (T47 res)	5	5	5
		CGCM3 (T63 res)	-	1	1
Centre National de Recherches Meteorologiques France	CNRM	CM3	1	1	1
Australia's Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization Australia	CSIRO	Mk3.0 Mk3.5	1 1	1 1	1 1
Max-Planck-Institut for Meteorology Germany	MPI-M	ECHAM5-OM	4	3	3
Meteorological Institute, University of Bonn, Germany Meteorological Research Institute of KMA, Korea Model and Data Groupe at MPI-M, Germany	MIUB METRI M&D	ECHO-G	3	3	3
Institute of Atmospheric Physics China	LASG	FGOALS-g1.0	-	1	1
Geophysical Fluid Dynamics Laboratory USA	GFDL	CM2.0	1	1	1
		CM2.1	1	1	1
Goddard Institute for Space Studies USA	GISS	AOM	-	2	2
		E-H	-	2	-
		E-R	-	2	1
Institute for Numerical Mathematics Russia	INM	CM3.0	1	1	1
Institute Pierre Simon Laplace France	IPSL	CM4	1	1	1
Meteorological Research Institute Japan	MRI	CGCM2.3.2	5	5	5
National Centre for Atmospheric Research USA	NCAR	PCM	4	4	4
		CCSM3	7	5	8
UK Met. Office UK	UKMO	HadCM3	1	1	1
		HadGEM1	1	1	-

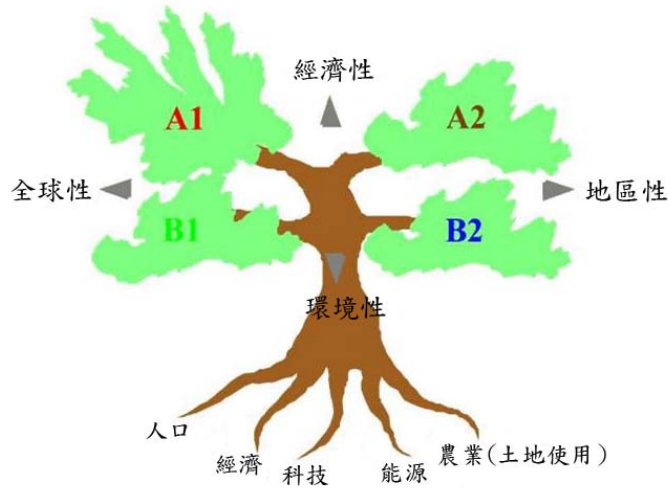


圖 3.1-1 各種 SRES 情境之不同溫室氣體排放情境

3.2 條件氣候繁衍降尺度模式

通常大、小尺度氣候因子間之相關性並不顯著(如圖 3.2-1 所示)，因此進行統計降尺度分析時，一般會先把大、小尺度氣候因子資料依時間區分為季模式或月模式，以求提高資料間的相關程度與降低資料間的變異程度，然即使透過季模式或月模式，資料變異程度仍大，因子間之數值仍有一對多之情況，若以迴歸統計降尺度(Regression statistical downscaling)這種一對一函數型模式去描述，不易表達出變數間的變異程度，因此本研究有別以往定率型的統計降尺度方式，以氣候繁衍降尺度(Weather Generation Downscaling)之序率概念，發展條件氣候繁衍降尺度模式(Conditional Weather Generation Downscaling Model, CWGDM)。

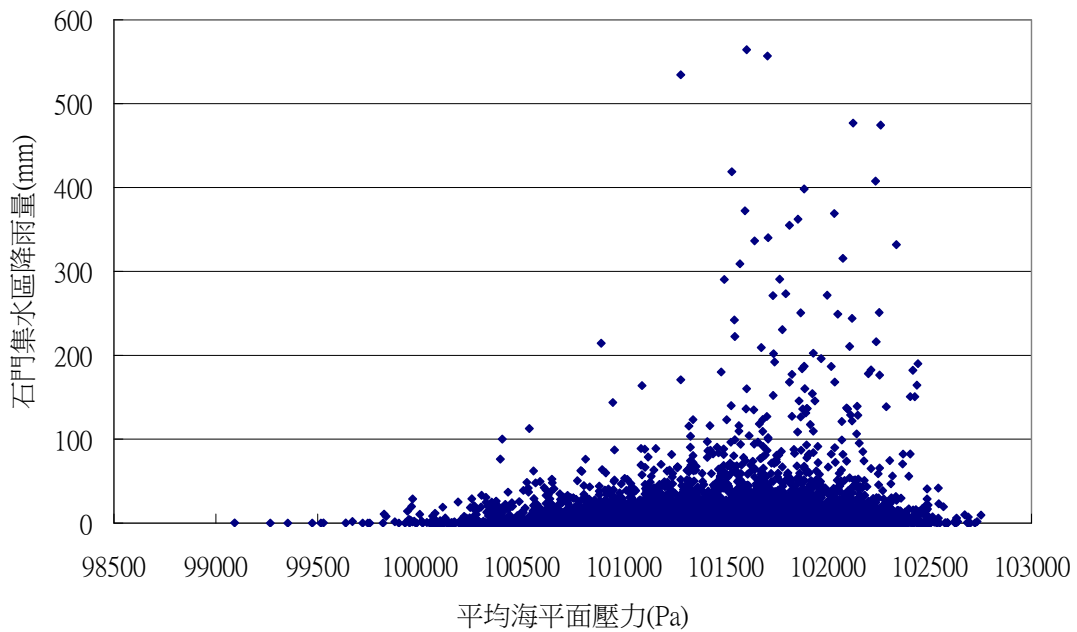


圖 3.2-1 石門集水區日降雨量與平均海平面壓力散佈圖

一般氣候繁衍降尺度模式為對大、小尺度氣候因子資料依時間區分為季模式或月模式後，依據各月份或各季節之降雨機率與資料之機率分佈型態進行繁衍，降雨機率之估算通常採用一階馬可夫鍊 (First Order Markov Chain)，降雨機率分佈常以指數分佈近似之。但此方法必須假設降雨機率分佈型態，因此本研究引入無母數統計方法加以改良，即在季模式或月模式分類下，將大、小尺度依其數值再細分為多個區間，並計算大尺度氣候因子(Predictor)落於某個區間條件下集水區降雨量(Predictand)各區間之條件機率，再以此條件機率進行降雨量繁衍，稱之為「條件氣候繁衍降尺度模式」，其模式流程圖如圖 3.2-2 所示，各步驟說明如下：

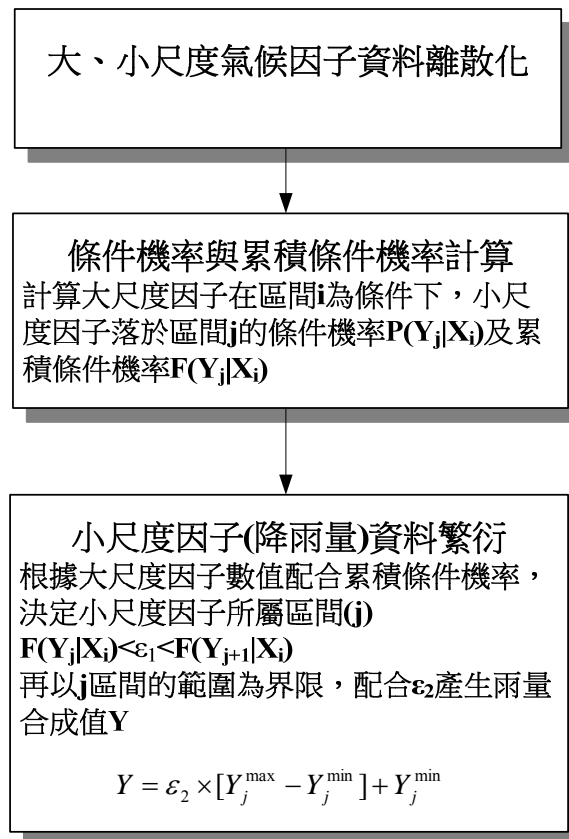


圖 3.2-2 條件氣候繁衍統計降尺度模式流程圖

1. 大、小尺度氣候因子資料離散化

由於原始大、小尺度氣候因子相關性並不顯著(如圖 3.2-1 所示)，因此本研究將大、小尺度氣候因子資料依月份區分為月模式資料，以初步提高資料間的相關程度與降低資料間的變異程度。接著針對各月模式依大、小尺度氣候因子之數值大小進行切割，以作為條件機率計算之基礎。一般常採用的切割方式有等距切割、等量切割及等比切割，等距切割為切割後的每個區間具有相等的間距；等量切割為切割後的每個區間具有相同數量的資料；等比切割為切割後的區間間距，是前一個區間間距的 n 倍。通常當資料分布較為均勻時，可採用等距切割，但當資料分布不甚均勻時，則建議採用等量切割或等比切割。

由於氣候因子資料分布多不均勻，尤以雨量資料分布極為不均，發生小雨量的次數較多，不降雨(即降雨量為零)的次數可能佔了很大比例，以台灣地區為例，不降雨的機率約 1/2，因此不降雨需要規劃切分為一個區間，故等距切割和等量切割(很難達到每個區間資料數目相同)不適用於小尺度雨量因子，本研究建議小尺度雨量因子切割採用等比切割。大尺度氣候因子則建議採用等量切割進行分析。

2. 條件機率與累積條件機率計算

大、小尺度氣候因子離散化後，即可進行各區間之條件機率與累積條件機率計算，圖 3.2-3 為各區間資料數量矩陣，橫軸為選定之大尺度氣候因子(X)區間，其中包含 $x_1^{\min} \sim x_1^{\max}$ 、 $x_2^{\min} \sim x_2^{\max}$ 、 $x_3^{\min} \sim x_3^{\max}$ 、...、 $x_M^{\min} \sim x_M^{\max}$ ，合計共 M 個區間；縱軸為小尺度降雨量因子(Y)區間，其中包含 $y_1^{\min} \sim y_1^{\max}$ 、 $y_2^{\min} \sim y_2^{\max}$ 、 $y_3^{\min} \sim y_3^{\max}$ 、...、 $y_N^{\min} \sim y_N^{\max}$ ，合計共 N 個區間。矩陣中之數值代表位於該區間之資料數量。

因此大尺度氣候因子位於區間 $i(x_i^{\min} \sim x_i^{\max})$ 為條件下，小尺度因子落於區間 $j(y_j^{\min} \sim y_j^{\max})$ 的條件機率 $P(Y_j|X_i)$ 可定義為：

$$P(Y_j | X_i) = \frac{Num(i, j)}{\sum_{j=1}^N Num(i, j)} \quad j = 1, 2, 3, \dots, N \dots\dots\dots (3.2-1式)$$

大尺度氣候因子位於區間 $i(x_i^{\min} \sim x_i^{\max})$ 為條件下，小尺度因子落於區間 $j(y_j^{\min} \sim y_j^{\max})$ 的累積條件機率 $F(Y_j=m|X_i)$ 可定義為：

$$F(Y_{j=m} | X_i) = \frac{\sum_{j=1}^m Num(i, j)}{\sum_{j=1}^N Num(i, j)} \dots\dots\dots (3.2-2式)$$

根據 3.2-1 式和 3.2-2 式，可將各區間表示為無母數條件機率分佈矩陣與無母數累積條件機率分佈矩陣，如圖 3.2-4 與圖 3.2-5 所示。

小尺度因子
(降雨量)
第j區間

j=1	Num(1, 1)	Num(2, 1)	...	Num(M, 1)
j=2	Num(1, 2)	Num(2, 2)	...	Num(M, 2)
⋮	⋮	⋮	...	⋮
j=N	Num(1, N)	Num(2, N)	...	Num(M, N)

i=1 i=2 ... i=M

大尺度因子
第i區間

圖 3.2-3 各區間資料數量矩陣

小尺度因子
(降雨量)
第j區間

j=1	$\frac{Num(1, 1)}{\sum_{j=1}^N Num(1, j)}$	$\frac{Num(2, 1)}{\sum_{j=1}^N Num(2, j)}$	...	$\frac{Num(M, 1)}{\sum_{j=1}^N Num(M, j)}$
j=2	$\frac{Num(1, 2)}{\sum_{j=1}^N Num(1, j)}$	$\frac{Num(2, 2)}{\sum_{j=1}^N Num(2, j)}$	...	$\frac{Num(M, 2)}{\sum_{j=1}^N Num(M, j)}$
⋮	⋮	⋮	...	⋮
j=N	$\frac{Num(1, N)}{\sum_{j=1}^N Num(1, j)}$	$\frac{Num(2, N)}{\sum_{j=1}^N Num(2, j)}$	...	$\frac{Num(M, N)}{\sum_{j=1}^N Num(M, j)}$

i=1 i=2 ... i=M

大尺度因子
第i區間

圖 3.2-4 無母數條件機率分佈矩陣

小尺度因子
(降雨量)
第j區間

j=1	$\frac{\sum_{j=1}^1 Num(1, j)}{\sum_{j=1}^N Num(1, j)}$	$\frac{\sum_{j=1}^1 Num(2, j)}{\sum_{j=1}^N Num(2, j)}$	...	$\frac{\sum_{j=1}^1 Num(M, j)}{\sum_{j=1}^N Num(M, j)}$
j=2	$\frac{\sum_{j=1}^2 Num(1, j)}{\sum_{j=1}^N Num(1, j)}$	$\frac{\sum_{j=1}^2 Num(2, j)}{\sum_{j=1}^N Num(2, j)}$	...	$\frac{\sum_{j=1}^2 Num(M, j)}{\sum_{j=1}^N Num(M, j)}$
⋮	⋮	⋮	...	⋮
j=N	$\frac{\sum_{j=1}^N Num(1, j)}{\sum_{j=1}^N Num(1, j)}$	$\frac{\sum_{j=1}^N Num(2, j)}{\sum_{j=1}^N Num(2, j)}$	...	$\frac{\sum_{j=1}^N Num(M, j)}{\sum_{j=1}^N Num(M, j)}$
	i=1	i=2	...	i=M

大尺度因子
第i區間

圖 3.2-5 無母數累積條件機率分佈矩陣

3. 小尺度因子(降雨量)資料繁衍

利用大、小尺度因子歷史資料求得累積條件機率後，即可根據大尺度因子資料來判斷小尺度因子可能所在的區間，然後在從其區間中合成小尺度因子(雨量)之數值，其分析步驟如下：

1. 依據大尺度因子(X)數值，來選擇所在之區間 $i(x_i^{\min} \sim x_i^{\max})$ 。
2. 取出區間*i*對應之累積條件機率。
3. 隨機產生一個0至1間之均勻分佈亂數 ε_1 ，代入(3.2-3式)找尋對應之小尺度因子(雨量)區間*j*。

if $[F(Y_j | X_i) < \varepsilon_1 \leq F(Y_{j+1} | X_i)]$ then select *j*-th zone

..... (3.2-3式)

4. 在決定之降雨量區間 j 內，以均勻分佈隨機亂數 ε_2 決定降雨合成量(y_t)，以得到氣候變遷後之合成雨量。如(3.2-4式)所示。

$$y_t = \varepsilon_2 \times [Y_j^{\max} - Y_j^{\min}] + Y_j^{\min} \dots\dots\dots (3.2-4式)$$

3.3 事件型雨量繁衍

經條件氣候繁衍統計降尺度分析可得到長期合成雨量，然長期雨量的時間精度為日，精度不足以用來分析高濁度事件，因此必須產生時間精度為小時的事件型雨量，以作為高濁度事件分析之用。本研究參考一般工程設計常用的設計降雨來產生事件型降雨。其基本假設為氣候變遷後降雨延時機率分佈型態及設計雨型型態不變，設計降雨代表某種重現期距與設計延時狀況下之虛擬降雨，是由設計降雨深度(Design Depth)與設計雨型(Design Hyetograph)兩部分所組成，前者降雨深度可經由頻率分析所求得，接著配合時間分配函數得到降雨量在時間上之分布，此分布函數即為設計雨型。以下將分別介紹頻率分析及雨型設計之理論基礎。

一、頻率分析

頻率分析流程如圖 3.3-1 所示，其步驟說明如下：

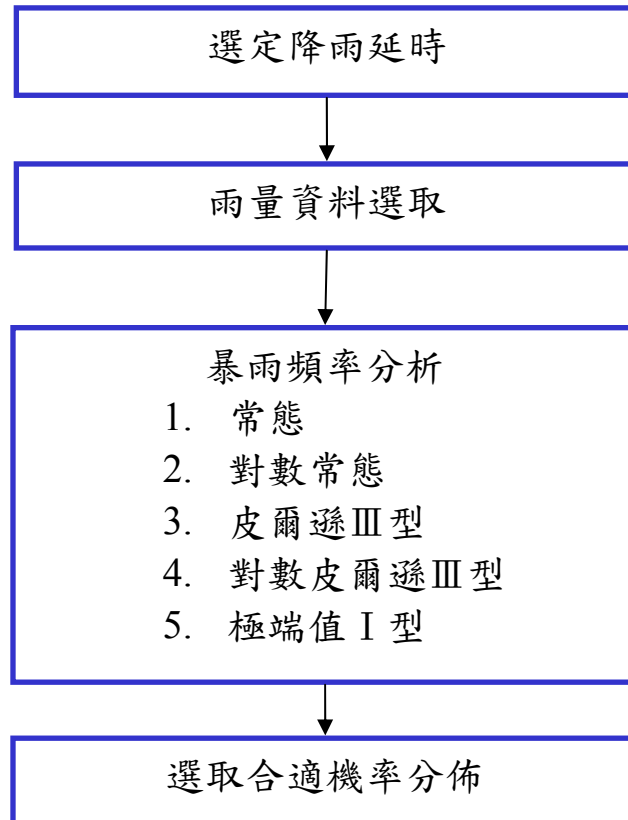


圖 3.3-1 頻率分析流程

(一)選定降雨延時

頻率分析的第一步驟為決定該暴雨的降雨延時，主要依據集水區水文、地文特性來選定，一般河川治理工程設計，通常採用一日或二日暴雨，若為都市排水工程設計，通常採用 12 小時或 6 小時暴雨，惟本研究主要目的為探討高濁度事件的供水情況，需合成多組不同颱風事件，故降雨延時乃以統計歷史颱風事件延時為基礎，利用拉丁超立方取樣法(LHS)決定之，拉丁超立方取樣法之說明詳見 3-7 節。

(二)雨量資料選取

若採用全部量測的雨量資料進行分析，該資料稱為完全延時序列(Complete Duration Series)，若祇選擇數量大於某一門檻值的

資料序列，稱之為部份延時序列(Partial Duration Series)。

一般頻率分析通常採用部分延時序列進行分析，部分延時序列可由年超過值序列法(Annual Exceedence Series)和極端值序列法(Extreme Value Series)法求得，一般較常採用的為極端值序列法，故本研究以極端值序列法中的年最大值序列法作為水文資料選取之標準。兩種序列選取法之說明如下：

1. 年超過值序列法(Annual Exceedence Series)

若選定特殊的門檻值，使得序列中超過此門檻值之資料數目恰等於紀錄中之年數，則稱此序列為年超過值序列。

2. 極端值序列法(Extreme Value Series)

選取紀錄中，固定時距內所發生的最大或最小值；如採用每年紀錄之最大值，則此種序列稱為年最大值序列(Annual Maximum Series)。



(三)暴雨頻率分析

本研究以常態(Normal)、對數常態(Log Normal)、皮爾遜Ⅲ型(Pearson Ⅲ)、對數皮爾遜Ⅲ型(Log Pearson Ⅲ)及極端值Ⅰ型(Extreme Ⅰ)等5種分佈進行不同降雨延時之暴雨頻率分析。各機率分佈說明詳見附錄一。

(四)選取合適機率分佈

本研究以誤差平方和 (Error Sum of Squares, SSE) 及標準誤差 (Standard Error, SE) 作為評估指標。SSE 與 SE 之定義如 3-6 式和 3-7 式所示：

$$SSE = \sum_{i=1}^n (X_i - R_i)^2 \dots\dots\dots (3.3-1 \text{ 式})$$

$$SE = \sqrt{\frac{SSE}{(n-r)}} \dots\dots\dots (3.3-2 \text{ 式})$$

式中 n 為樣本數，r 為自由度， X_i 和 R_i 為相同發生機率下之雨量模擬值與雨量理論值。雨量模擬值為在某機率分佈下，特定發生機率之雨量模擬值，雨量理論值則以韋伯點繪法計算之，將歷史暴雨量資料由大至小排列，計算雨量所對應之超越機率 P，此雨量即為特定發生機率下之雨量理論值，超越機率 P 之計算如下：

$$P\% = \frac{m}{n+1} \times 100\% \dots\dots\dots (3.3-3 \text{ 式})$$

式中 m 為資料筆數之排序名次，n 為樣本數

二、雨型設計

雨型設計目的在於設計暴雨總降雨深度之時間分配關係，一般常用評估方法有：暴雨資料分析法、降雨強度公式法、實際降雨雨型及序率馬可夫 (SSGM) 雨型，各方法的優缺點整理如表 3.3-1，各方法介紹如下：



表 3.3-1 常用雨型設計方法之優缺點

雨型設計方法	優缺點說明
暴雨資料分析法	適用於集流時間長者，對於集流時間短者，無法反應短時間之降雨強度，
降雨強度公式法	依集流時間之長短決定雨型之時間間距，較能反應短時間之降雨強度，較適用於集流時間短者
實際降雨雨型	為颱風暴雨實際之降雨分布，未經過人為之排列組合較符合自然狀況，惟如何選定代表性場次是較為爭議的部份
序率馬可夫雨型 (SSGM)	SSGM 雨型將適當尺度轉換後，雨型可用於不同延時之設計暴雨，適合應用於集流時間長者及短者，但計算步驟較為複雜

(一) 暴雨資料分析法

暴雨資料分析法是統計多場歷史降雨事件時間分佈型態以作為設計雨型，其基本假設為假設歷史降雨事件之時間分佈型態為相似，分析步驟說明如下：

1. 選取歷史降雨事件

自歷史雨量事件中，配合選定之降雨延時，以年最大值選取法找出各年連續最大 N 小時之雨量時間分佈，再以各場暴雨事件之雨量累積曲線來判定各場降雨時間分佈型態是否相似，若差異太大者，則不納入分析。

2. 計算無因次雨型

計算每場暴雨每一小時雨量佔該場暴雨總雨量之百分比，並依大小順序重新排列，以計算數場暴雨排序後之雨量百分比之平均值。

3. 以位序法決定降雨時間分配型態

依前述雨量百分比平均值配置成所需之降雨分配型態，其配置方法通常採用位序法。一般常用中央位序法進行配置，即假設尖峰流量發生於 1/2 降雨延時，故將降雨百分比之最大值放置在中間，再依右大左小(或左大右小)順序排列，以得到降雨時間分配型態。但往往實際降雨尖峰流量多呈現偏態，因此本研究將以偏態位序法進行配置，即由選取數場暴雨事件，分析各場次之降雨延時 T_d 、尖峰降雨時間 T_a ，計算出該場暴雨前進係數 $\gamma = T_a/T_d$ ，將各場暴雨之前進係數取平均做為該水文站之平均前進係數 γ 。由降雨延時 n 小時乘以平均前進係數 γ 值，可計算出降雨百分比第一順位所落之區間位置，再依右大左小(或左大右小)順序排列，當一邊已排滿時，將剩餘之順位由大而小排在未滿之另一邊，即可求出該站之降雨時間分配型態，此即為設計雨型。

(二) 降雨強度公式法

降雨強度公式分析步驟如下：

1. 決定雨型之單位時間間距

由集流時間 T_c 來決定雨型之單位時間間距 T_r 。

$$6\text{hr} < T_c \quad \text{則} \quad T_r = 1.0\text{hr} \quad \dots\dots\dots (3.3-4\text{式})$$

$$3\text{hr} < T_c \leq 6\text{hr} \quad \text{則} \quad T_r = 0.8\text{hr} \quad \dots\dots\dots (3.3-5\text{式})$$

$$1\text{hr} < T_c \leq 3\text{hr} \quad \text{則} \quad T_r = 0.4\text{hr} \quad \dots\dots\dots (3.3-6\text{式})$$

$$T_c \leq 1\text{hr} \quad \text{則} \quad T_r = 0.15\text{hr} \quad \dots\dots\dots (3.3-7\text{式})$$

2. 計算無因次雨型

以 Horner 雨量強度公式或物部公式計算各延時($T_r, 2T_r, 3T_r, \dots, nT_r$)之降雨強度，其該延時對應之降雨量為降雨強度與延時的乘積，再將每相鄰延時的降雨量相減，即可得每一單位時間的降雨量。再將每個單位時間的降雨量除以總降雨量，可得各個單位時間的降雨百分比。

3. 以位序法決定降雨時間分配型態

步驟同暴雨資料分析法。

(三) 實際降雨雨型

選取某一場實際颱風場次之降雨分佈直接作為設計雨型，未經過人為之排列組合較符合自然狀況，惟如何選定代表性場次是較為爭議的部份。

(四) 序率馬可夫 (SSGM) 雨型

簡單尺度不變性高斯馬可夫雨型 (Simple Scaling Gauss-Markov, 簡稱 SSGM), 為一符合隨機碎形特性與高斯馬可夫歷程的無因次雨型。此雨型以非定常性一階高斯馬可夫歷程描述無因次最大值事件, 具備馬可夫歷程特性, 滿足尖峰降雨量統計特性, 且具有最大概似度。惟其計算步驟較為複雜, 故詳細理論不在本研究贅述。

由於石門水庫集水區範圍較大, 集流時間較長, 加上本研究目的為提出一綜合考量長期調配與高濁度時之供水風險分析步驟, 因此選擇計算較為容易且適用於集流時間較長的分析方法—暴雨資料分析法進行雨型設計之估算。

3.4 降雨逕流分析



一般降雨逕流模式可分為適用於事件型流量或長期流量, 前者多僅考量入滲和蒸發損失, 忽略地下水補注基流量, 後者則須綜合考量入滲、蒸發和地下水補注基流量。由於本研究需同時考量長期流量與事件型流量, 因此在長期流量推估時, 本研究以 Haith 與 Shoemaker 所發展之 GWLF 模式進行估算, 在事件型流量推估時, 則以三角形單位歷線法進行估算。各方法說明如下:

一、GWLF 降雨逕流模式

對地球而言水循環可視為封閉系統, 然地球存在許多次系統, 其雖不是封閉系統, 但在此系統中可藉由水之收支平衡計算水文中各項單元。集水區主要水收支平衡之輸入為降雨; 當雨水降落下來部份會被樹、草地、地表植被等截留, 此部份水分最後以蒸發回到大氣中;

到達地表之水，有部份會填滿窪蓄容量、有部份入滲於土壤中、有部份形成地表逕流。入滲之水分可補充土壤水分，土壤水分可繼續往下移動以補注地下水，或由蒸發散將水分帶入大氣中。集水區之總輸入水量可由落在其範圍內所有降雨所求得，總輸入水量藉由蒸發散或河川流量帶離集水區，河川流量包括地表逕流、與地下水流。此模式將集水區的水平衡模式分為地表、未飽和層及淺層飽和含水層三個主要部分，其系統水平衡收支關係如圖 3.4-1。

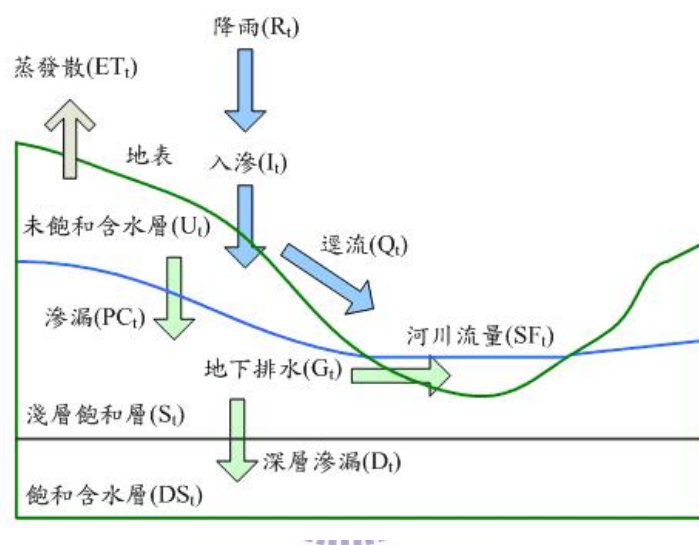


圖 3.4-1 GWLF 模式水平衡關係示意圖

(一) 地表逕流

集水區系統中的入流為降水，當降水 (R_t) 至地面後，一部份的水經由入滲量 (I_t) 至未飽和含水層中，然而另一部份則成為地表逕流 (Q_t)，集水區河川流量 (SF_t) 來源，主要為地表逕流 (Q_t) 及地下水排出所形成基流 (G_t)，可由下式 (3.4-1) 表示：

$$SF_t = Q_t + G_t \quad (3.4-1 \text{ 式})$$

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

$$Q_t = \frac{(R_t - 0.2W_t)^2}{(R_t + 0.8W_t)} \quad (3.4-2 \text{ 式})$$

$$W_t = \frac{2540}{CN_t} - 25.4 \quad (3.4-3 \text{ 式})$$

$$R_t \geq 0.2W_t \quad (3.4-4 \text{ 式})$$

$$CN \leq 100 \quad (3.4-5 \text{ 式})$$



其中, R_t 為每日降雨量 (cm); CN 為逕流係數, 逕流係數反應各土地利用、土壤質地或排水特性、及臨前土壤水分的不同, 其值需由臨前五天土壤水份所對應之值求得, CN 值較大表示臨前土壤水份越高入滲量則越少, 即較多水份可成為逕流, CN 值較小表示臨前水份較少, 則入滲較大, 逕流較小。模式之逕流係數(CN)依臨前土壤水份分為三類, 分別為 CN3 (溼潤情況)、CN2 (平均情況)、CN1 (乾燥情況), 其中 CN2 值則依照土壤分類與土地利用決定, 美國水土保持局土壤類別分為 A、B、C、D 四類別, 其分類與台灣水土保持局土壤質地分類之對照說明如表 3.4-1 所示, 各土壤類別不同土地利用下之 CN2 建議值如表 3.4-2 所示。CN1 與 CN3 之值則是根據 Chow et al. (1988),

計算方式如下。

$$CN1 = \frac{4.2CN2}{10 - 0.058CN2} \quad (3.4-6 \text{ 式})$$

$$CN3 = \frac{23CN2}{10 + 0.13CN2} \quad (3.4-7 \text{ 式})$$

模式將臨前五天土壤水分 (A_t) 分為高、中、低三個區間，以 $AM1$ 和 $AM2$ 為界， $AM1$ 、 $AM2$ 會隨季節不同如表 3.4-3 所示，逕流係數 (CN) 由 $CN1$ 、 $CN2$ 、 $CN3$ 並根據臨前五天土壤水分求得，臨前五天土壤水分小於 $AM1$ 時， CN 由 $CN1$ 、 $CN2$ 內差求得，臨前五天土壤水分大於 $AM1$ 並小於 $AM2$ 時， CN 由 $CN2$ 、 $CN3$ 內差求得，臨前五天土壤水分大於 $AM2$ 時， CN 等於 $CN3$ ，計算方式如下。

$$CN = CN1 + \frac{(CN2 - CN1)}{AM1} (A_t) \quad (3.4-8 \text{ 式})$$

$$\text{if } A_t \leq AM1$$

$$CN = CN2 + \frac{(CN3 - CN2)}{AM2 - AM1} (A_t - AM1) \quad (3.4-9 \text{ 式})$$

$$\text{if } AM1 < A_t \leq AM2$$

$$CN = CN3 \quad (3.4-10 \text{ 式})$$

$$\text{if } AM2 < A_t$$

表 3.4-1 土壤分類對照表

本省分類代碼	表土質地分類	美國水土保持局分類
0	粗砂土、砂土	A
1	細砂土、壤質砂土、壤質粗砂土	A
2	壤質細砂土、粗砂質壤土、砂質壤土、細砂質壤土	B
3	極細砂土、壤質極細砂土、極細砂質壤土	A
4	粉質壤土、粉土	B
5	壤土	B
6	砂質粘壤土	C
7	粘質壤土、粉質粘壤土	C
8	粉質壤土、砂質黏土	D
9	黏土	D

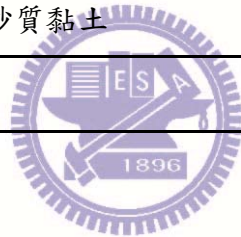


表 3.4-2 不同土壤分類與土地利用情況下之 CN2 建議值

土地利用情形	土壤分類			
	A	B	C	D
耕地：				
無保護措施	72	81	88	91
有保護措施	62	78	78	81
牧草地或放牧地：				
不良情況	68	79	86	89
良好情況	39	61	74	80
草地：良好情況	30	58	71	58
森林：				
稀疏、覆蓋少、無覆蓋物	45	66	77	83
良好覆蓋	25	55	70	77
空地、林間空地、公園、高爾夫球場、墓地等：				
良好情況：草地護蓋超過 75%之面積	39	61	74	80
稍好情況：草地護蓋 50~75%之面積	49	69	79	84
商業區(85%面積不透水)	89	92	94	95
工業區(72%面積不透水)	81	88	91	93
住宅：				
≤ 1/8 英畝(506m ²) 65%	77	85	90	92
1/4 英畝(1012m ²) 38%	61	75	83	87
1/3 英畝(1349m ²) 30%	57	72	81	86
1/2 英畝(2024m ²) 25%	54	70	80	85
1 英畝(4047m ²) 20%	51	68	79	84
鋪石(混凝土或柏油)、停車場、屋頂、道路等	98	98	98	98
街道	98	98	98	98
鋪石(混凝土或柏油)道路及雨水下水道	76	85	89	91
碎石道路 泥土道路	72	82	87	89

表 3.4-3 AM1 與 AM2 值

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

資料來源：永續性水質管理系統受氣候變遷影響之脆弱度評估，2006

降水經由入滲由地表至未飽和含水層，入滲量 (I_t) 計算方式為降水 (R_t) 扣除地表逕流 (Q_t)，可由下式 (3.4-11) 表示：

$$I_t = R_t - Q_t \quad (3.4-11 \text{ 式})$$

(二) 未飽和含水層

經由入滲之水量將先行補充未飽和層之土壤水分，當未飽和層之土壤水分超過土壤最大含水量時，其部分水分將滲漏至淺層飽和含水層。另外，未飽和層之土壤水分亦可能因蒸發散而被帶離土壤，未飽和層之水平衡式可由下式 (3.4-12) 表示：

$$U_{t+1} = U_t + I_t - ET_t - PC_t \quad (3.4-12 \text{ 式})$$

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

未飽和含水層滲漏至淺層飽和含水層之水量 (PC_t)，物理機制在於未飽和含水層土壤水分大於田間含水量，即是指高於田間含水量經由重力向下排出至淺層飽和層之水分，可由 (3.4-13) 式計算：

$$PC_t = \text{Max}[0, U_t + I_t - ET_t - U^*] \quad (3.4-13 \text{ 式})$$

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

蒸發散量 (ET_t) 則受大氣、地表覆蓋特性及土壤水分之影

響，可由下式決定：

$$ET_t = \text{Min}[k_{st} \times k_{ct} \times PET_t, U_t + I_t] \quad (3.4-14 \text{ 式})$$

蒸發散量 (ET_t) 估算的方法為以潛勢能蒸發散量 (PET_t) 乘上一個覆蓋係數 (Kc_t) 和一個土壤水分因子 (Ks_t) 計算，但其易受限於未飽和層之可利用之水分，因此取蒸發散量與未飽和層水分之較小值，為估算之蒸發散量，其中覆蓋係數 (Kc_t) 決定於土地利用方式。

在 3.4-14 式中之土壤水分因子 (Ks_t) 則採用 Boonyatharokol and Walker (1979) 之公式進行計算，可由下式 (3.4-15) 表示：

$$k_{st} = \begin{cases} 1 & \text{if } U_t \geq 0.5U^* \\ \frac{U_t}{0.5U^*} & \text{if } U_t < 0.5U^* \end{cases} \quad (3.4-15 \text{ 式})$$

在 GWLF 模式中潛勢能蒸發散量由 Hamon 公式進行計算：

$$PET_t = \frac{0.021H_t^2 e_{0t}}{T_t + 273} \quad (3.4-16 \text{ 式})$$

其中 PET_t 是第 t 天潛勢能蒸發散量， H_t 是在第 t 天的日照時間 (時)，其值如表 3.4-4 所示， e_{0t} 是飽和蒸氣壓， T_t 是日平均溫度 ($^{\circ}\text{C}$)，飽和蒸氣壓 (e_{0t}) 是溫度之函數，由下列方程式決定：

$$e_{0t} = 33.8639[(0.00738 \times T_t + 0.8072)^8 - 0.000019 \times |1.8 \times T_t + 4.8| + 0.00136] \quad (3.4-17 \text{ 式})$$

(三) 淺層飽和含水層

淺層飽和含水層之水平衡關係可由下列方程式表示：

$$S_{t+1} = S_t + PC_t - G_t - D_t \quad (3.4-18 \text{ 式})$$

其中 S_t 是淺層飽和含水層之土壤水分含量， PC_t 是由未飽和含水層滲漏至淺層飽和含水層之水量， G_t 是由淺層飽和含水層滲漏至河川之水量，而 D_t 是入滲至深層飽和含水層之水量，在本研究中因入滲至深層飽和含水層之水量 (D_t) 量很小，將其值假設為零，式中所用的單位為 cm/day。

G_t 之計算係考慮淺層飽和含水層為一線性水庫，計算方式可由下式 (3.4-19) 表示：

$$G_t = r \times S_t \quad (3.4-19 \text{ 式})$$

其中 r 為退水係數，一般介於 0.01 至 0.2 之間。



表 3.4-4 各緯度每月日照時數

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

資料來源：永續性水質管理系統受氣候變遷影響之脆弱度評估，2006

二、 三角形單位歷線法

三角形單位歷線法係假設單位時間有效降雨量所形成之流量歷線呈三角形，其形狀依美國水土保持局 (U.S. Soil Conservation Service) 之經驗公式推定。經驗公式如下：

$$T_p = 2.67T_r \quad (3.4-20 \text{ 式})$$

$$T_p = T_r^{1.2} + 0.6T_r \quad (3.4-21 \text{ 式})$$

$$Q_p = 0.208AR_r / T_p \quad (3.4-22 \text{ 式})$$

式中 T_b : 歷線基期(hr)

T_p : 歷線洪峰時間(hr)

T_c : 集流時間(hr)

A : 集水面積(km²)

R_e : 超滲降雨量(mm)

Q_p : 洪峰流量(cms)

T_r : 單位降雨延時(hr)

其中超滲降雨量 R_e 則可採用 SCS 曲線推估，其說明詳見 GWLF 之地表逕流理論，集流時間則可以以下公式推估之：

(一) Kirpich 公式

Kirpich (1940)利用美國田納西州六個農業集水區之水文紀錄，推導集流時間公式如下：

$$t_c = 0.02 \frac{L^{0.77}}{S^{0.385}} \quad (\text{hr}) \quad (3.4-23 \text{ 式})$$

式中 L 為集水區河道長度(m)； S 為集水區平均坡度(m/m)。

(二) Rziha 公式

本省及日本常用公式，與合理化公式流達之時間公式相同，其公式如下：

$$t_c = \frac{L}{72 \cdot S^{0.6}} \quad (\text{hr}) \quad (3.4-24 \text{ 式})$$

式中 L 為集水區河道長度(m)； S 為集水區平均坡度(m/m)。

(三) 美國加州公路及公共工程局公式

$$t_c = \left(\frac{11.9L^2}{H} \right)^{0.085} \quad (\text{hr}) \quad (3.4-25 \text{ 式})$$

式中 L 為集水區河道長度(m)；W 為集水區最高與最低高程差(m/m)。

3.5 水資源供水調配系統動力模式

本研究以 VEMSIM 軟體建立水資源供水調配模式，其以系統動力學為理論基礎，利用系統動力學的四大物件—存量 (Stock)、流量 (Flow)、箭線 (Connector) 以及輔助變數 (Converter) 建構供水系統動力模型，系統動力學之四個物件定義如下：

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

水資源供水調配系統動力模式之建構首要工作為確認水資源調配系統配置圖，以釐清水工結構物的相對地理位置，水工結構物以節點表示，河川或供、引水管線則以線段表示之，圖 3.5-1 為一典型水資源供需系統示意圖，包含了入流量、河川放水量、需求供水量及未控制流量等。接著根據系統圖配合各流量的因果關係繪製因果循環圖（如圖 3.5-2 所示），因果循環圖之變數區分為外部變數和內部變數，內部變數是指在回饋上的變數，其數值會隨著回饋環屬性而變化；外部變數是指回饋環外的其他變數，其數值不受回饋環屬性改變。以圖 3.5-2 為例，外部變數包含入流量、水庫庫容量、淨水場處理能力、管線限制及需求量，這些數值可由觀測資料或其他相關報告蒐集而得；內部變數則包含河川放水量，需求供水量、未控制流量以及水庫蓄水量等，其量化關係須依序計算求得。接著進一步整合系統圖和因果循環圖，配合系統動力學的四大元件-存量、流量、輔助變數跟箭線建立系統動力流圖。最後輸入各變數間之量化數學式，即可完成水源調配系統動力模型之建置(如圖 3.5-3 所示)。

模式的計算程序與變數間之量化關係皆參考因果循環圖而得。首先計算下游河川放水量，其量化數學式可表示如下 3.5-1 式：

$$OB_{k,t} = \min\left(\sum_{i \in L} I_{i,t} + S_{k,t}, R_{k,t}\right) \dots\dots\dots 3.5-1 \text{ 式}$$

變數下標第一個字母代表節點符號，第二個字母代表時間狀態， $OB_{k,t}$ 是指在 t 時刻蓄存節點 k 之河川放水量， $I_{i,t}$ 是指 t 時刻蓄存節點 k 的入流量， $S_{k,t}$ 是 t 時刻蓄存節點 k 的蓄水量，若節點 k 為非蓄水節點，則 $S_{k,t}$ 為 0，L 是指所有流入蓄存節點 k 的入流線段集合， $R_{k,t}$ 表示蓄存節點 k 在 t 時刻之下游保留量，其涵蓋了生態保留水量以及下游優先水權保留量， $R_{k,t}$ 可由 3.5-2 式表示

$$R_{k,t} = \sum_{i \in M} DR_{i,t} + B_{k,t} \dots\dots\dots 3.5-2 \text{ 式}$$

DR_{i,t}是下游優先水權量，B_{k,t}表示是蓄存節點 k 在 t 時刻的生態保留水量，M 是指所有下游優先於 K 點取水之需求量(D_{j,t})的需求節點集合，生態基流量 B_{k,t}則依照經濟部民國 92 年 6 月「台灣地區水資源開發綱領計畫」建議之每 100 平方公里須有 0.135 CMS 之保育用水量為保留目標。

需求供水量可由 3.5-3 式來計算

$$OD_{K,t} = \min \left[\sum_{i \in L} (I_{i,t}) + S_{k,t} - OB_{k,t}, \sum_{j \in N} (D_{j,t}), Cmax_k, Pmax_k \right] \dots\dots\dots 3.5-3 \text{ 式}$$

OD_{k,t}是指從蓄存節點 k 在 t 時刻之需求供水量，D_{j,t}是指 t 時刻於 K 點取水之目標需求量，N 是指於 K 點取水之需求節點集合，Cmax_k是指於 K 點取水之淨水場處理能力，Pmax_k是於 K 點取水之淨水場處理能力的管線最大輸送容量，若 K 點為非蓄水節點，則未控制流量可由 3.5-4 式推估。

$$ON_{k,t} = \sum_{K < L} I_{k,t} - OB_{K,t} - OD_{K,t} \dots\dots\dots 3.5-4 \text{ 式}$$

若為蓄水節點，則未控制流量可由 3.5-5 式推估

$$ON_{k,t} = \sum_{K < L} I_{k,t} + S_{k,t} - OD_{k,t} - OB_{B,t} - Smax_{k,t}, \text{ if } \sum_{K < L} I_{k,t} + S_{k,t} - OD_{k,t} - OB_{k,t} > Smax_{k,t}$$

$$= 0, \text{ if } \sum_{K < L} I_{k,t} + S_{k,t} - OD_{k,t} - OB_{k,t} \leq Smax_{k,t}$$

\dots\dots\dots 3.5-5 式

其中 ON_{k,t}是指蓄存節點 k 在 t 時刻的未控制流量，Smax_{k,t}是指蓄存節點 k 在 t 時刻的最大庫容體積。

蓄存節點 k 在下一時刻 t+1 的體積則由質量平衡來決定，可以 3.5-6 式來表示：

$$S_{k,t+1} = S_{k,t} + \sum_{i \in L} I_{i,t} - \sum_{j \in W} O_{j,t} \quad \dots\dots\dots 3.5-6 \text{ 式}$$

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

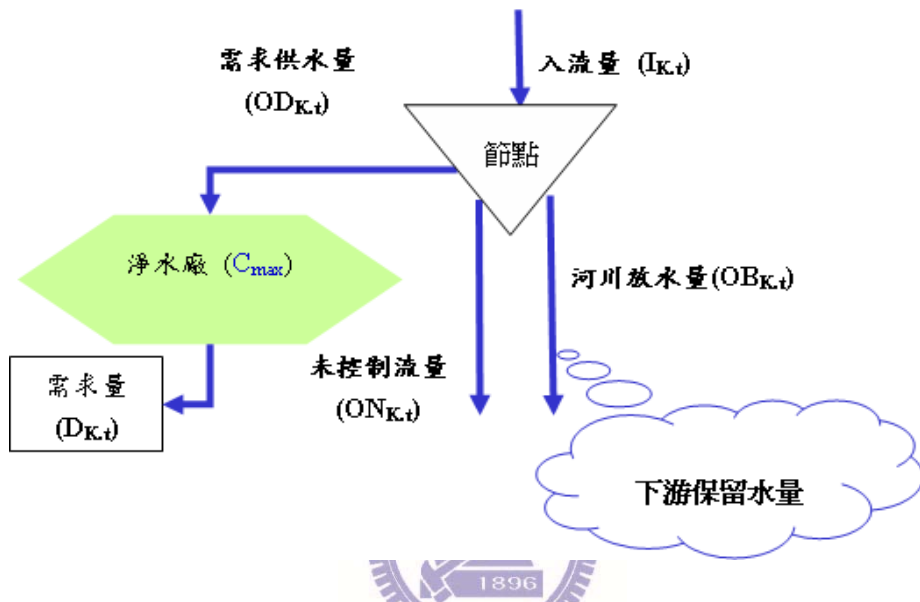


圖 3.5-1 典型水資源供需系統示意圖

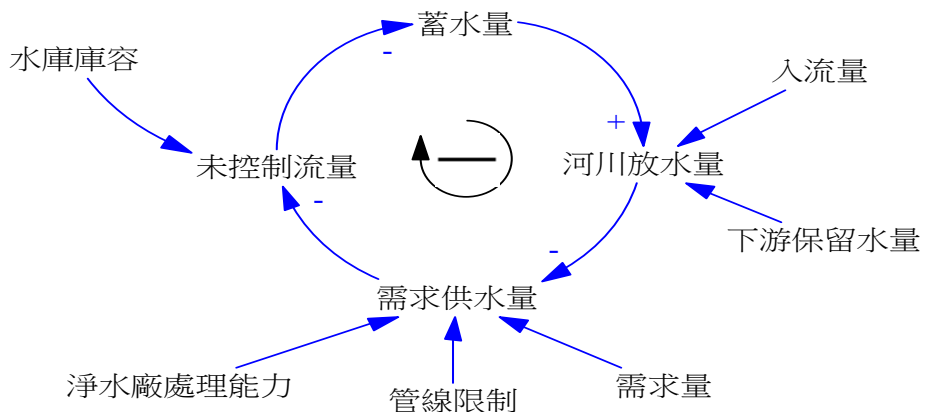


圖 3.5-2 典型水資源供需因果回饋圖

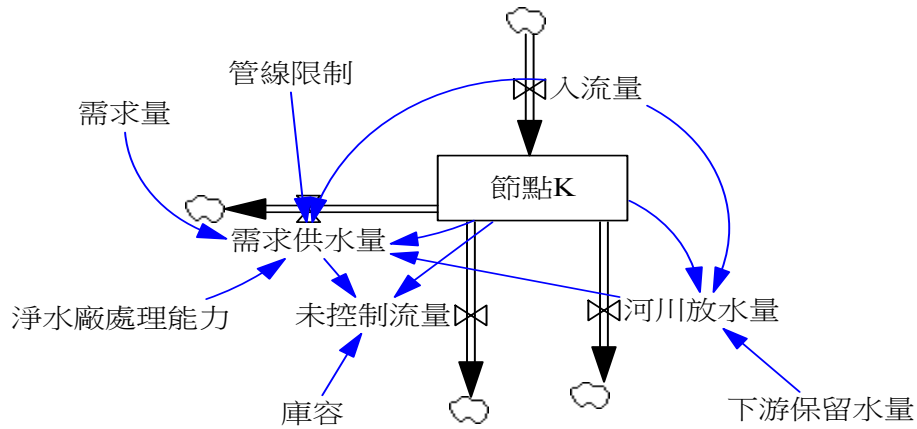


圖 3.5-3 典型水資源供需系統動力模型

3.6 濁度預測模式

Kynch 批次沉降理論(Batch Settling)將水庫分為多層，各分層之水庫泥沙濃度(濁度)與水庫入、出流泥砂量、泥砂沉降及水庫上下對流有關，屬垂向一維模式，其示意圖如 3.6-1 所示。由於泥沙沉降受泥砂顆粒形狀與泥砂絮團能力影響，水庫上下對流受季節轉換(溫度變化)影響，兩者缺乏實測資料且不易估算，故本研究僅以水庫入、出流泥砂量資料，配合單位特性歷線法 (Unit Characteristic Hydrograph Method) 進行水庫取水口濁度預測。

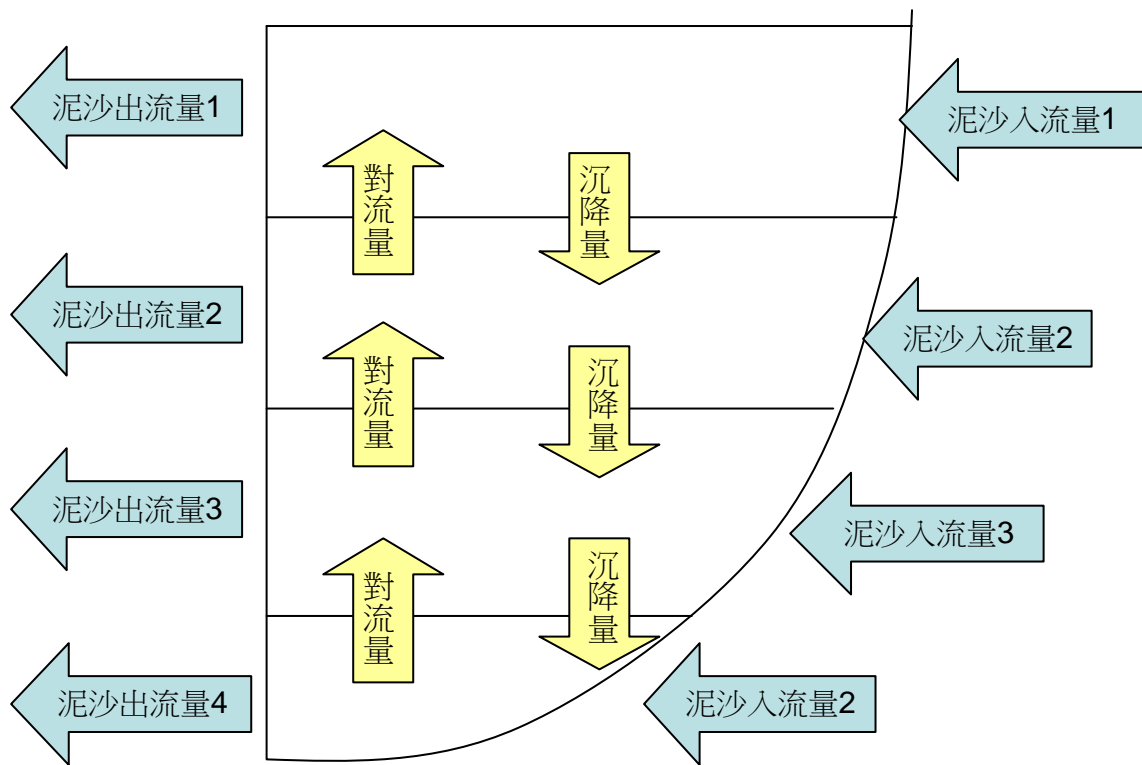


圖 3.6-1 垂向一維泥沙平衡示意圖

單位特性歷線法乃模仿自單位歷線(Unit Hydrograph)理論。單位歷線為薛爾曼氏(L.K. Sherman)於1932年所發展之理論。其定義為：在某一特定延時T內，對時間、空間而言，皆均勻落於一集水區之單位有效降雨所形成之直接逕流歷線。本研究將其定義延伸為單位特性歷線，即在某單位時距內，水庫分層單位泥砂入(出)流量，造成水庫取水分層濁度變化歷線。由於本研究考量水庫分層濁度變化乃受水庫分層泥砂入、出流量之綜合影響，故水庫分層濁度歷線可表示為：

$$TS_{T \times tb} = MI_{T \times tb1} \times UI_{tb1 \times 1} - MO_{T \times tb2} \times UO_{tb2 \times 1} \dots\dots\dots 3.6-1 \text{ 式}$$

$$\begin{bmatrix} ts_2 \\ ts_3 \\ ts_4 \\ \vdots \\ \vdots \\ ts_{T+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} mi_1 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ mi_2 & mi_1 & 0 & \dots & 0 \\ mi_3 & mi_2 & mi_1 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ mi_T & mi_{T-1} & mi_{T-2} & \dots & mi_{T-tb1+1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} ui_1 \\ ui_2 \\ ui_3 \\ \vdots \\ \vdots \\ ui_{tb1} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} mo_1 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ mo_2 & mo_1 & 0 & \dots & 0 \\ mo_3 & mo_2 & mo_1 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ mo_T & mo_{T-1} & mo_{T-2} & \dots & mo_{T-tb2+1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} uo_1 \\ uo_2 \\ uo_3 \\ \vdots \\ \vdots \\ uo_{tb2} \end{bmatrix} \tag{3.6-2 式}$$

其中 $TS_{T \times 1}$ 為 t+1 時刻水庫分層濁度歷線矩陣， ts_t 為 t 時刻水庫分層濁度， $MI_{T \times tb1}$ 為水庫分層泥砂入流量構成的下三角矩陣， mi_t 為 t 時刻水庫分層泥砂入流量， $MO_{T \times tb2}$ 為水庫分層泥砂出流量構成的下三角矩陣， mo_t 為 t 時刻水庫分層泥砂出流量， $UI_{tb1 \times 1}$ 為水庫分層泥砂入流單位特性歷線矩陣， ui_t 為水庫分層泥砂入流單位歷線 t 時刻泥沙量， $UO_{tb2 \times 1}$ 為水庫分層泥砂出流單位特性歷線矩陣， uo_t 為水庫分層泥砂出流單位歷線 t 時刻泥沙量， T 為整場暴雨的基期， $tb1$ 為水庫分層泥砂入流單位歷線的基期， $tb2$ 為水庫分層泥砂出流單位歷線的基期。

本研究假設水庫分層泥砂入、出流量與水庫分層入、出流量呈正比，因此水庫分層 t 時刻泥砂入流量 mi_t 可表示為：

$$mi_t = A_1 \times I_t \tag{3.6-3 式}$$

水庫分層 t 時刻泥砂出流量 mo_t 可表示為：

$$mo_t = A_2 \times O_t \tag{3.6-4 式}$$

3.6-3 和 3.6-4 式之 A_1 及 A_2 為常數。令新泥砂入、出流單位特性歷線 (ui'_t 及 uo'_t) 分別為：

$$ui'_t = A_1 \times ui_t \tag{3.6-5 式}$$

$$uo'_t = A_2 \times uo_t \tag{3.6-6 式}$$

故 3.6-2 式可改寫為

$$\begin{bmatrix} ts_2 \\ ts_3 \\ ts_4 \\ \vdots \\ ts_{T+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_1 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ I_2 & I_1 & 0 & \dots & 0 \\ I_3 & I_2 & I_1 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ I_T & I_{T-1} & I_{T-2} & \dots & I_{T-tb1+1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} ui'_1 \\ ui'_2 \\ ui'_3 \\ \vdots \\ ui'_{tb1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} O_1 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ O_2 & O_1 & 0 & \dots & 0 \\ O_3 & O_2 & O_1 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ O_T & O_{T-1} & O_{T-2} & \dots & O_{T-tb2+1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} uo'_1 \\ uo'_2 \\ uo'_3 \\ \vdots \\ uo'_{tb2} \end{bmatrix}$$

.....3.6-7 式

3.6-7 式中，新泥砂入、出流單位特性歷線(ui'_i 及 uo'_i)待定，本研究假設單位特性歷線為三角形，故每個單位特性歷線有三個參數待定，即尖峰泥砂量，到達尖峰泥砂量時間以及泥砂歷線基期，本研究以遺傳演算法進行參數率定，其目標函數設定為觀測濁度與預測濁度之誤差平方和最小，遺傳演算法較傳統最陡坡降演算法容易跳出局部最佳解，且對於變數的變化範圍限制較為彈性，其詳細理論介紹詳見附錄一。



另外為探討單位特性歷線法之預測效率，本研究以類神經建立濁度預測模式作為對照組，探討兩者預測效率之優劣，比較分析詳見 5.3 節，類神經理論介紹詳見附錄二。

3.7 蒙地卡羅分析與拉丁超立方取樣法

蒙地卡羅法 (Monte Carlo simulation method) 有別於定率方法，乃隨機產生大量資料進行模擬，模擬後之數據再透過統計分析計算可能之風險(發生機率)，此方法最早是由美國 Los Alamos 科學實驗室兩位科學家 Ulam 與 von Neumann 所創的。當初是為了要設計核子防護罩，必須知道中子穿透各種材質的程度，但因為這個問題太困難而無法有分析解，又因為十分危險無法由實驗得知，因此他們利用高

速電子計算機以隨機數去模擬這個實驗，將這種模擬法命名為蒙地卡羅。

與蒙地卡羅模擬法息息相關的兩個理論，是所謂的大數法則與中央極限定理。由於每次的模擬，都可以視為從相同而獨立的機率分布中抽樣，因此模擬出來的樣本平均數的變異數，就和母體分布的變異數成正比，和抽樣的數目，也就是模擬的次數成反比，並不用考慮到不同模擬結果之間的共變數，因此在執行很多次的模擬以後，將所得的每個數值予以平均，所得到的樣本平均數，不但在大數法則下，是估計母體平均數的不偏估計式，也因為樣本平均數的抽樣分配，在中央極限定理之下，具有常態分配的本質，也可以很容易的進行統計推論和區間估計的工作。

蒙地卡羅分析步驟可參考圖 1.2-1，利用條件氣候繁衍降尺度模式合成多組雨量資料，經降雨逕流模式與水資源供水調配模式模擬分析後，利用韋伯法統計缺水風險。其中事件型雨量合成乃參考設計雨量概念，設計降雨由設計降雨深度(design depth)與設計雨型(design hyetograph)兩隨機變數組成，然當蒙地卡羅法之隨機變數較多時，選取樣本數 n 需夠大，才足以反映母體特性，因此為在有限的樣本數內合理的描述輸入參數對模式輸出之統計動差，本研究採用拉丁超立方取樣法 (Latin Hypercube Sampling, LHS) 進行隨機參數取樣，其基本概念乃依據各輸入參數之統計特性 (分佈型態及定義域範圍)，採分組 (每組之機率相同) 取樣方法來產生各參數之隨機樣本，其步驟說明如下：

- 一、 根據每一隨機參數 X_i 之統計分佈型態，於隨機參數 X_i 之定義域範圍內劃分為 K 組，並使得每一組被取得的機率均為 $1/K$ 。

- 二、 於隨機參數 X_i 各組區間內，以亂數選取參數值，各隨機參數 X_i 共選取 K 個參數值。
- 三、 將各隨機參數 X_i 之 K 個參數值隨機配對，使取樣點均勻分布於整體求解空間。

圖 3.7-1 為 LHS 分析流程之簡例，假設有兩個隨機參數 X 和 Y ，其皆屬於常態分佈，於隨機參數 X 和 Y 之定義域範圍內劃分為 4 組，利用累積機率密度函數作為劃分依據，使各組區間的被選取的機率均相等，然後分別從 X 和 Y 之區間內，隨機選取變數值，然後再隨機配對，構成取樣樣本。



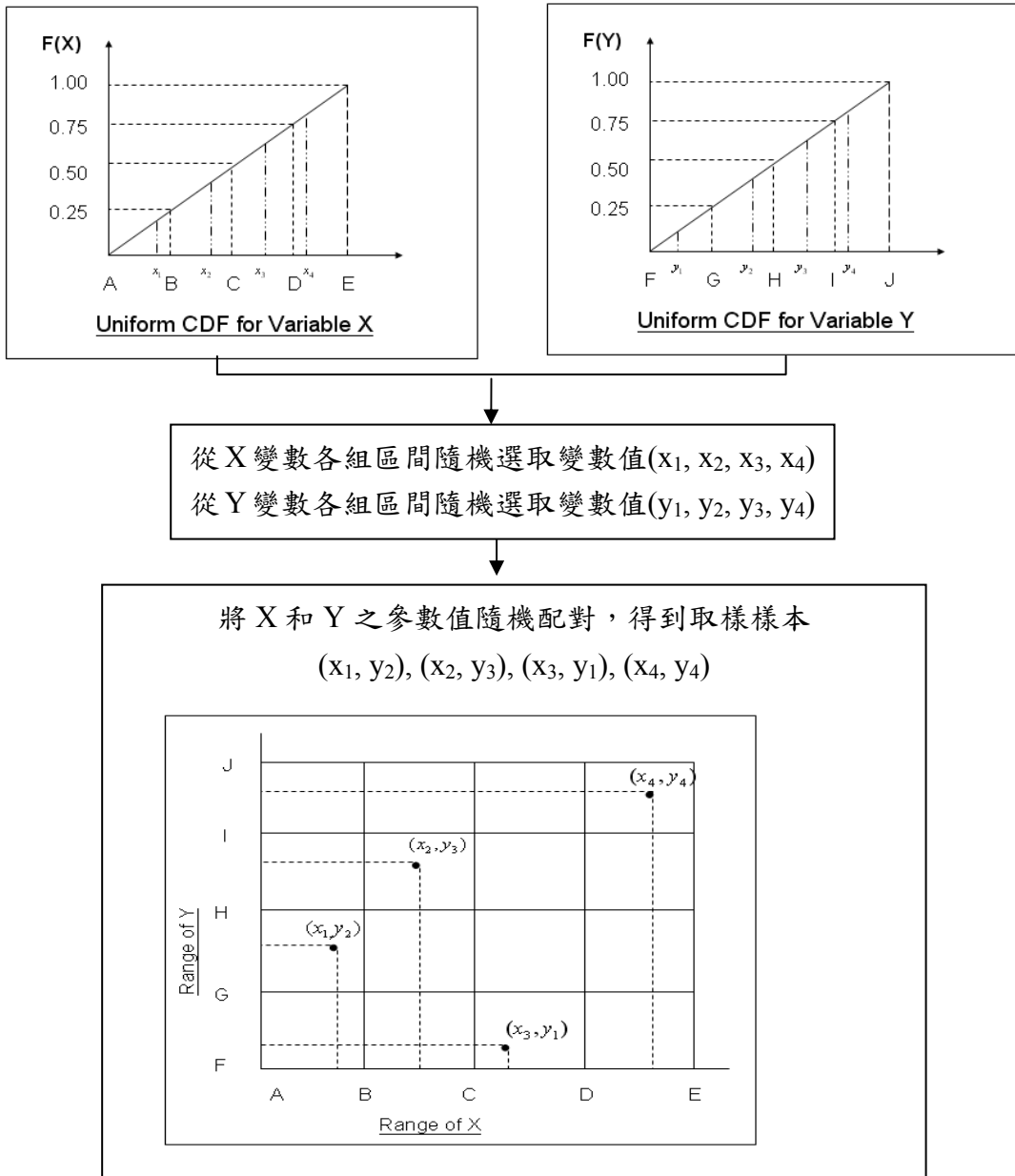


圖 3.7-1 拉丁超立方取樣法簡例流程示意圖

第四章 研究區域概述

4.1 石門水庫區域概述

本研究以石門水庫為研究區域，其集水區位於大漢溪中上游段，其庫區位於桃園縣境內，橫跨龍潭、大溪及復興等 3 鄉鎮，集水區面積為 763.4 平方公里，滿水位標高為 245 公尺，溢洪道最大排洪量為 11,400 秒立方公尺，民國 73 年增建洩洪容量各為 1,200 立方公尺之排洪隧道二條，因此石門水庫最大排洪量為 14,500 秒立方公尺，民國 96 年所量測到的水庫總容量為 2.014 億立方公尺，其集水區示意圖如圖 4.1-1 所示。

目前大漢溪水資源利用情形係以石門水庫調蓄利用，主要供應桃園台地及水庫下游農地計畫灌溉面積約 3 萬餘公頃之灌溉用水，及供給台灣省自來水公司石門、龍潭供水區及板新供水區之公共給水，石門水庫除直接供應石門、桃園大圳之用水外，經下游河道沿途分配與各農田水利會所需用水剩餘水量及其間側流量之水量被攔蓄於鳶山堰，鳶山堰之蓄存水除供應板新淨水場及大湳淨水場所需公共給水水量外，並放流供應鳶山堰下游各灌區農業所需用水，其多餘水量經後村堰提高水位後，再沿著後村堰灌溉渠道輸送水量至新莊、樹林各灌區，然目前後村堰已被沖毀，已失去原引水功能。

三峽河抽水站位於中下游之三峽灣潭地區設計最大取水量每日 50 萬立方公尺，抽水站前築有攔河堰以利抽取三峽河水源，並以 6.6 公里長之重力專管引入板新淨水場處理。三峽河下游為大安圳取水口，供應 145 公頃之灌溉用水，故自三峽堰取三峽河水源需保留下游大安圳之水權，大漢溪流域系統圖如圖 4.1-2 所示。流域內重要水工

結構物說明如下

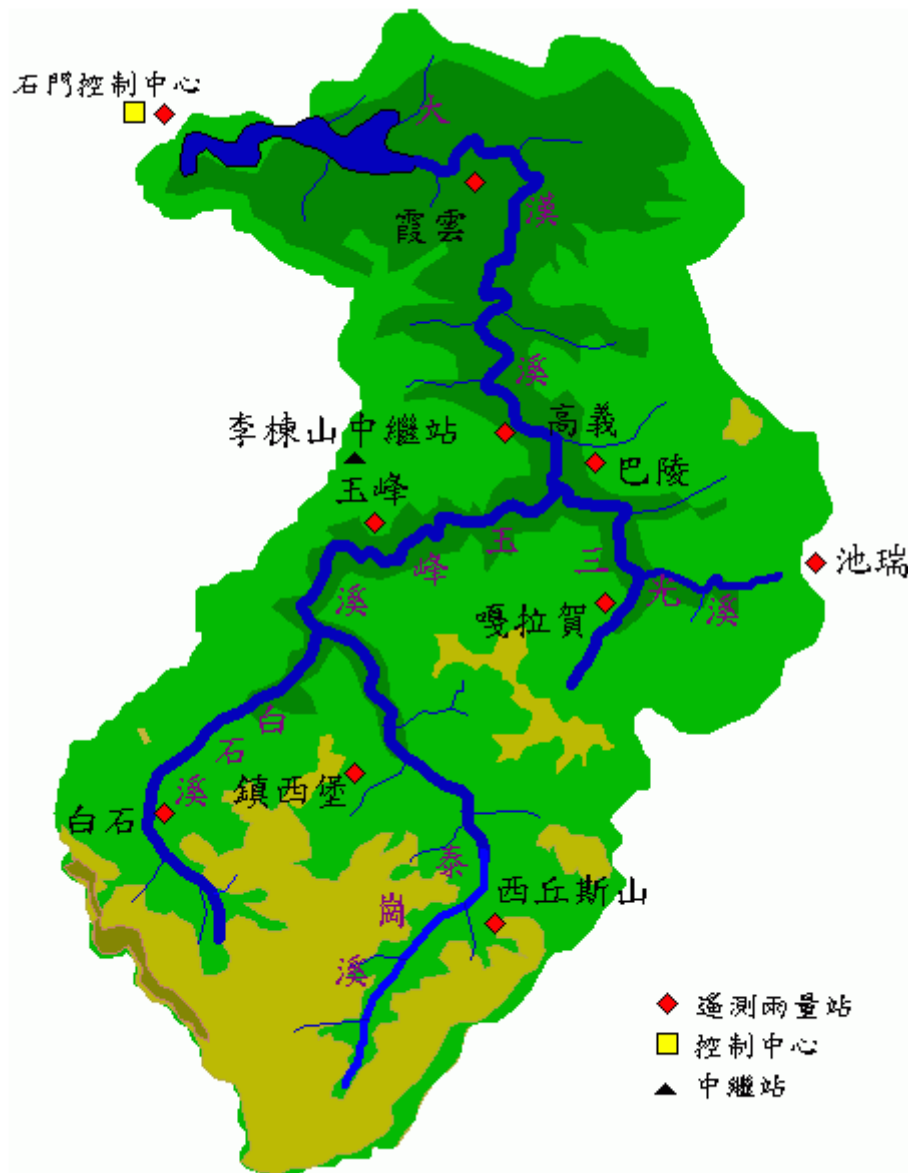


圖 4.1-1 石門水庫上游集水區示意圖

資料來源：經濟部水利署北部水資源局

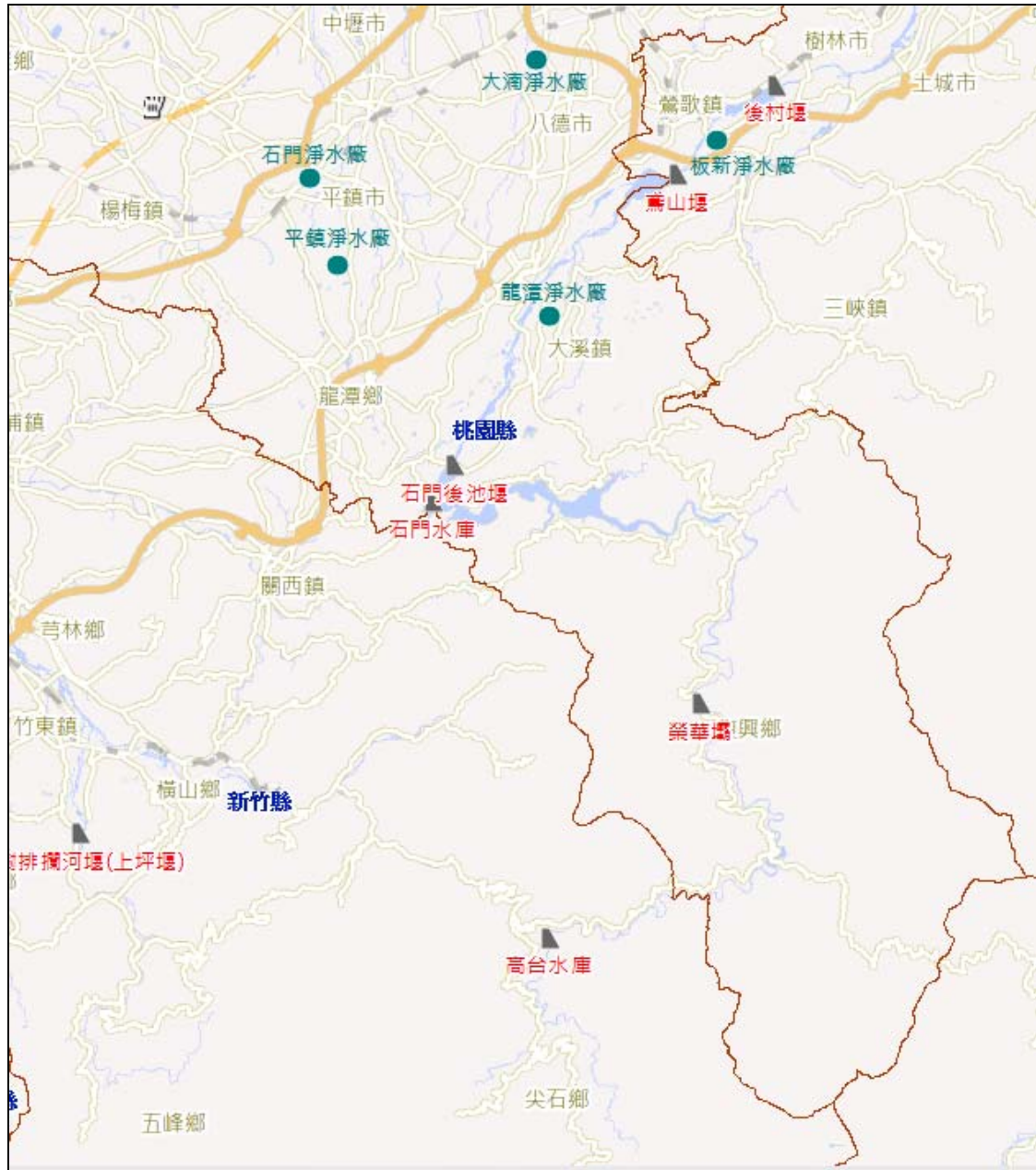


圖 4.1-2 大漢溪流域水工結構物地理位置

資料來源：經濟部水利署水文水資源資料管理供應系統

(一) 石門水庫

石門水庫主要依照其運用規線進行調配，其運用規線如圖 4.1-3 所示，當水庫水位標高在上限以上時，依據計畫配水量供水，並得視各標的用水需求增加調配之；當水庫水位標高在上限與下限之間時，依據計畫配水量供水；當水庫水位標高在下限與嚴重下限之間時，依

據計畫配水量供水為原則，為因應可能之持續乾旱，北水局得邀集相關單位預先協商配水量減供措施；當水庫水位標高在嚴重下限以下時，農業用水依據計畫配水量百分之五十供水為原則，家用及公共給水、工業用水依據計畫配水量百分之八十供水為原則，其實際減供水由北水局邀集相關單位協商之。

由於石門水庫庫容量受水庫泥砂入流量而逐年減少，本研究以水利署「石門水庫及其集水區整治計畫之經濟效益評估」(民國 97 年)報告之石門水庫庫容量推估資料進行後續調配分析，庫容量推估值詳列於如表 4.1-1 所示。

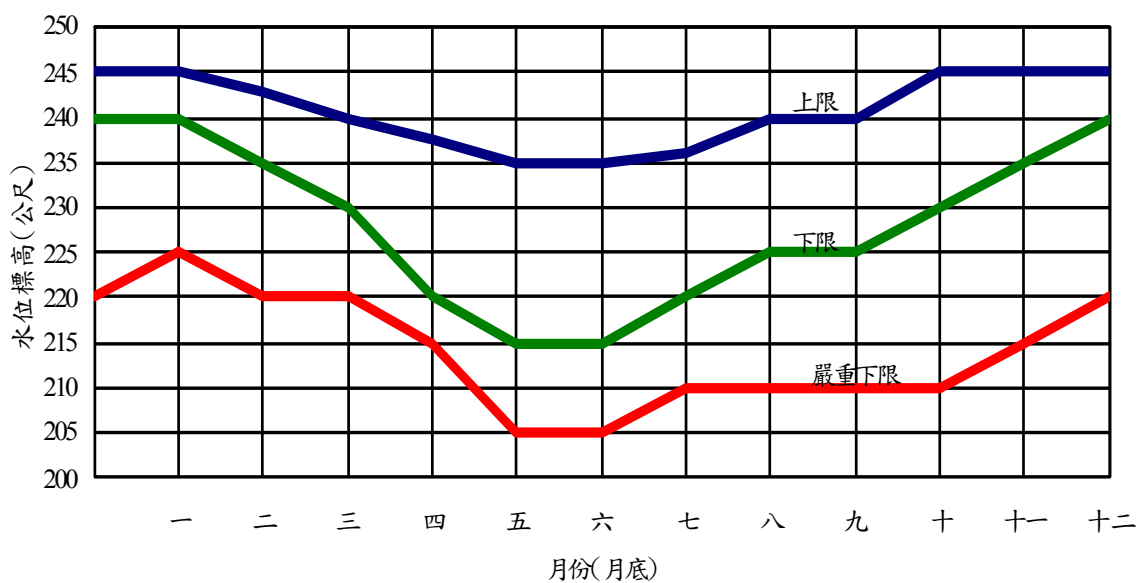


圖 4.1-3 石門水庫運用規線圖

表 4.1-1 石門水庫庫容估算表

單位：萬立方公尺

民國 (年)	泥砂入流量			排砂量			清淤量			水庫累積淤砂量			有效容量		
	無治理 工程	集水區 保育治理	入砂減少量	無治 理 工程	排砂功 能改善	排砂 增加量	無治理 工程	水庫清疏	清淤 增加量	無治理工程 ^{註1}	全實施 ^{註2}	淤砂減少量	無治理 工程	全實施	有效容量 增加量
	(1)	(2)	(3) =(1)-(2)	(4)	(5)	(6) =(5)-(4)	(7)	(8)	(9) =(8)-(7)	(10) =(10) _{t-1} +(1)-(4)-(7)	(11) =(2)-(5)-(8)	(12) =(10)-(11)	(13)	(14)	(15) =(14)-(13)
97	12.00	0.20	11.80	17.38	86.68	69.30	0.00	25.00	25.00	9492.22	9386.12	106.10	21419.78	21526	197.10
98	203.71	1.20	202.51	17.57	86.87	69.30	0.00	25.00	25.00	9678.35	9275.45	402.91	21233.65	21637	106.10
99	10.00	0.13	9.87	17.77	87.07	69.30	0.00	25.00	25.00	9670.59	9163.51	507.08	21241.41	21748	402.91
100	189.09	12.00	177.09	17.98	87.28	69.30	0.00	25.00	25.00	9841.70	9063.23	778.46	21070.30	21849	507.08
101	5.00	0.11	4.89	18.19	87.49	69.30	0.00	0.00	0.00	9828.51	8975.85	852.65	21083.49	21936	778.46
102	14.49	1.10	13.39	18.40	87.70	69.30	0.00	0.00	0.00	9824.59	8889.25	935.34	21087.41	22023	852.65
103	237.99	194.29	43.70	18.61	87.91	69.30	0.00	0.00	0.00	10043.96	8995.62	1048.34	20868.04	21916	935.34
104	233.49	208.29	25.20	18.83	88.13	69.30	0.00	0.00	0.00	10258.63	9115.78	1142.84	20653.37	21796	1048.34
105	243.17	225.27	17.90	19.06	88.36	69.30	0.00	0.00	0.00	10482.74	9252.69	1230.04	20429.26	21659	1142.84
106	9.60	0.05	9.55	19.06	88.36	69.30	0.00	0.00	0.00	10473.28	9164.38	1308.89	20438.72	21748	1230.04
107	3.50	0.02	3.48	19.06	88.36	69.30	0.00	0.00	0.00	10457.72	9076.05	1381.67	20454.28	21836	1308.89
108	237.20	223.90	13.30	19.06	88.36	69.30	0.00	0.00	0.00	10675.86	9211.59	1464.27	20236.14	21700	1381.67
109	263.30	250.30	13.00	19.06	88.36	69.30	0.00	0.00	0.00	10920.10	9373.53	1546.57	19991.90	21538	1464.27
110	4.60	0.03	4.57	19.06	88.36	69.30	0.00	0.00	0.00	10905.64	9285.20	1620.44	20006.36	21627	1546.57
111	237.20	224.20	13.00	19.06	88.36	69.30	0.00	0.00	0.00	11123.78	9421.04	1702.74	19788.22	21491	1620.44

民國 (年)	泥砂入流量			排砂量			清淤量			水庫累積淤砂量			有效容量		
	無治理 工程	集水區 保育治理	入砂減少量	無治 理 工程	排砂功 能改善	排砂 增加量	無治理 工程	水庫清疏	清淤 增加量	無治理工程 ^{註1}	全實施 ^{註2}	淤砂減少量	無治理 工程	全實施	有效容量 增加量
	(1)	(2)	(3) =(1)-(2)	(4)	(5)	(6) =(5)-(4)	(7)	(8)	(9) =(8)-(7)	(10)	(11)	(12) =(10)-(11)	(13)	(14)	(15) =(14)-(13)
112	3.60	0.01	3.59	19.06	88.36	69.30	0.00	0.00	0.00	11108.33	9332.69	1775.63	19803.67	21579	1702.74
113	659.70	462.10	197.60	19.06	88.36	69.30	0.00	0.00	0.00	11748.97	9706.43	2042.53	19163.03	21206	1775.63
114	6.40	0.02	6.38	19.06	88.36	69.30	0.00	0.00	0.00	11736.31	9618.10	2118.21	19175.69	21294	2042.53
115	375.37	257.17	118.20	19.29	88.59	69.30	0.00	0.00	0.00	12092.39	9786.67	2305.71	18819.61	21125	2118.21
116	330.90	313.00	17.90	19.29	88.59	69.30	0.00	0.00	0.00	12404.00	10011.08	2392.91	18508.00	20901	2305.71
117	357.30	339.30	18.00	19.29	88.59	69.30	0.00	0.00	0.00	12742.01	10261.79	2480.21	18169.99	20650	2392.91
118	8.30	0.04	8.26	19.29	88.59	69.30	0.00	0.00	0.00	12731.02	10173.24	2557.77	18180.98	20739	2480.21
119	319.10	301.10	18.00	19.29	88.59	69.30	0.00	0.00	0.00	13030.83	10385.75	2645.07	17881.17	20526	2557.77
120	781.70	763.80	17.90	19.29	88.59	69.30	0.00	0.00	0.00	13793.24	11060.96	2732.27	17118.76	19851	2645.07
121	304.50	286.50	18.00	19.29	88.59	69.30	0.00	0.00	0.00	14078.45	11258.87	2819.57	16833.55	19653	2732.27
122	13.30	0.05	13.25	19.29	88.59	69.30	0.00	0.00	0.00	14072.46	11170.33	2902.12	16839.54	19742	2819.57
123	657.50	639.50	18.00	19.29	88.59	69.30	0.00	0.00	0.00	14710.67	11721.24	2989.42	16201.33	19191	2902.12
124	870.40	852.40	18.00	19.29	88.59	69.30	0.00	0.00	0.00	15561.78	12485.05	3076.72	15350.22	18427	2989.42
125	10.25	0.07	10.18	19.54	88.84	69.30	0.00	0.00	0.00	15552.49	12396.28	3156.20	15359.51	18516	3076.72

資料來源：經濟部水利署，石門水庫及其集水區整治計畫之經濟效益評估，民國 97 年

(二) 後池堰

石門水庫於下游另建有後池堰，主要之功能係調節發電與灌溉之用水，因發電之時間與灌溉及公共用水之時間並未完全契合，故建有後池堰，將發電之水量蓄積，俾使尖峰發電的水量得全日平均供給桃園大圳及下游灌區等引用。桃園大圳及溪州圳取水口分別位於左岸及右岸，取水口位置分別為 129.5 公尺及 131.85 公尺。

(三) 鳶山堰

鳶山堰位於大漢溪上，距石門水庫下游 19 公里，距三鶯大橋上游約 2 公里處，滿水位標高約 51.5 公尺，最低取水標高 45.5 公尺，其調節池原有容量為 126 萬立方公尺，目前因上游河道開採河床砂石材料之影響，有效庫容已增加至約 520 萬立方公尺(民國 86 年測量結果)。鳶山堰屬為一以公共給水為標的之堰壩，以大漢溪為水源，用以攔截水庫放水、灌溉回歸水及水庫下游流域之側流量。鳶山堰體南端設重力導水箱涵直接取水供應板新淨水場，其輸水容量為 100 萬 CMD，動力導水箱涵其輸水容量為 60 萬 CMD；另於堰體北端設第二取水口，以加壓方式倒送至大湳淨水場，其輸水容量為 35 萬 CMD。

(四) 三峽堰

位於大漢溪支流三峽河上，為一混凝土堰，其主要功能為攔蓄三峽河河水，供應板新淨水場所需之原水。設計最大取水量為 60 萬 CMD，年平均可引用水量約為 6700 萬立方公尺，於民國八十八年四月開始輸送水量，平均每日取水量為 18.4 萬 CMD。

(五) 淨水場

大漢河流域淨水場相關資料整理如表 4.1-2 所示，其說明如下：

1. 石門淨水場

於石門大圳設置取水口取水，原水取自石門水庫，淨水場設計處理容量為每日 12 萬立方公尺。

2. 平鎮淨水場

先前由石門大圳設置取水口取水，現平鎮第二原水抽水站工程完工，亦可於後池堰設置加壓抽水設備取水，並由專管送至淨水場，原水取自石門水庫，淨水場設計處理容量為每日 60 萬立方公尺。

3. 龍潭淨水場

於石門大圳設置取水口取水，原水取自石門水庫，淨水場原設計處理容量為每日 5 萬立方公尺。「石門水庫及其集水區整治計畫」完成後，處理能力將提升至每日 19 萬立方公尺。

4. 大湳淨水場

優先使用桃園大圳取水口取水(取用桃園水利會加強灌溉管理節省水量)，進水口設置在桃園大圳北岸，不足量再由鳶山堰取水，以管路加壓輸送(上限每日 35 萬立方公尺)。當桃園大圳歲修或其農業用水量不足時，則大湳水場需求水量全自鳶山堰取水。淨水場設計處理容量為每日 30 萬立方公尺，「石門水庫及其集水區整治計畫」完成後，處理能力將提升至每日 45 萬立方公尺。

5. 板新淨水場

板新水場有二種取水方式：1.為自三峽堰抽取水量，以專管送至淨水場處理，最大抽水量為每日 60 萬立方公尺；2.從鳶山堰

設置取水口取水，亦由專管送至淨水場，最大輸水量為每日 100 萬立方公尺，淨水場設計處理容量為每日 120 萬立方公尺。

表 4.1-2 大漢河流域之淨水場說明

供水區域	供水淨水場	設計最大供水能力	供水區域	備註
南桃園	石門淨水場	12 萬 CMD	與平鎮淨水場同供水範圍	支援平鎮淨水場供水
	平鎮淨水場	60 萬 CMD	平鎮、中壢、新屋、大園、觀音、楊梅、八德高地地區與新竹縣(湖口、新豐)	提供南桃園所有工業區用水
	龍潭淨水場	5 萬 CMD 提升至 19 萬 CMD	龍潭、大溪與復興部分地區	考量龍潭淨水場擴建
北桃園	大湳淨水場	30 萬 CMD 提升至 45 萬 CMD	桃園、龜山、蘆竹、大園(中正機場一帶)、八德低地地區與台北縣(林口)	提供北桃園所有工業區用水
	板新淨水場	120 萬 CMD	包括蘆洲、泰山、五股、八里、樹林、新莊、土城、鶯歌、三峽、板橋等	經尖山加壓站加壓後支援北桃園 10 萬 CMD

4.2 石門水庫水文現況

石門水庫集水區內主要有 10 個雨量站，分別為石門、巴陵、高義、長興、三光、白石、玉峰、嘎拉賀、鎮西堡，各雨量的觀測年數與詳細資訊詳見表 4.2-1。本研究以徐昇式多邊形法計算石門水庫集水區的平均雨量，各雨量站之面積劃分與權重比詳見圖 4.2-1 與表 4.2-1。石門集水區年平均降雨量約為 2,350 毫米，各月雨量日平均資料如圖 4.2-2 所示，降雨主要集中於 5~10 月，以八月的雨量最高，而 11 月~隔年 1 月雨量偏少。

表 4.2-1 石門水庫集水區各雨量站之詳細資料

站號	站名	所屬單位	資料年限	TM 2 度分帶 X 座標	TM 2 度分帶 Y 座標	標高 (m)	面積雨量 權重
21C050	石門	水利署	1941~2008	273451	2745097	255	0.018
21C070	巴陵	水利署	1954~2008	289171	2731177	1220	0.075
21C080	高義	水利署	1954~2008	285756	2734043	620	0.127
21C090	嘎拉賀	水利署	1956~2008	289655	2726339	1260	0.123
21C110	長興	水利署	1964~2008	280209	2743888	350	0.151
21C150	三光	水利署	1954~2008 (缺 1986,2003)	286273	2729607	630	0.038
21D140	秀巒	水利署	1951~2008	278034	2723777	840	0.045
21D150	玉峰	水利署	1954~2008	279650	2728315	780	0.049
21D160	白石	水利署	1940~2008	275537	2720438	1620	0.115
21D170	鎮西堡	水利署	1954~2008	280235	2718811	630	0.259

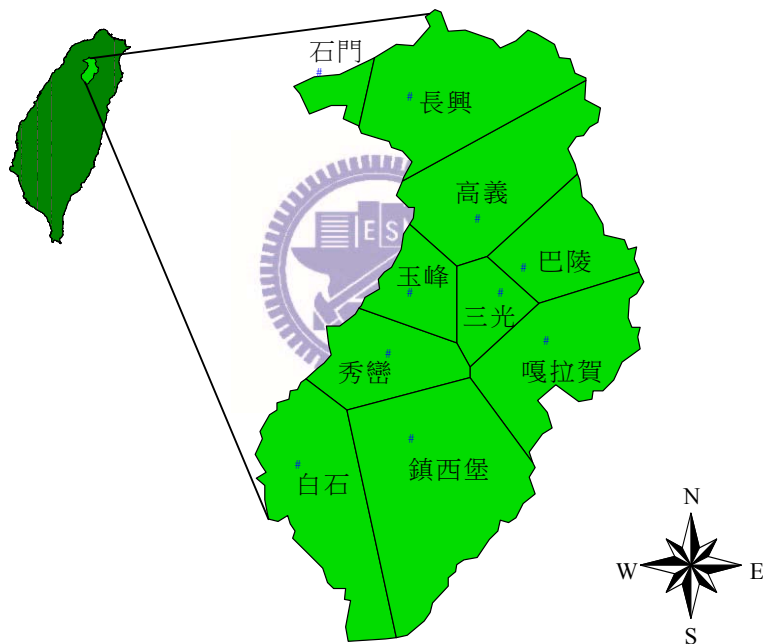


圖 4.2-1 石門水庫集水區各雨量站徐昇面積權重圖

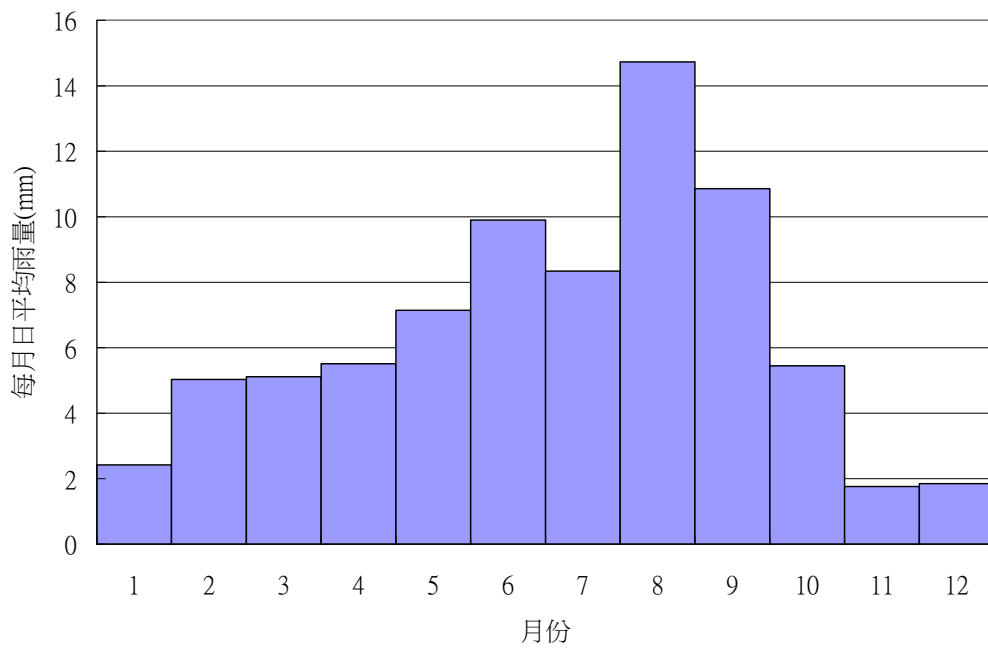


圖 4.2-2 石門水庫集水區各月日平均雨量



第五章 石門水庫長期調配風險分析

5.1 石門水庫統計降尺度分析

5.1.1 氣象水文資料蒐集

(一)石門水庫歷史雨量觀測資料

根據集水區內十個主要雨量站，以徐昇式多邊形法計算之平均雨量做為石門水庫集水區歷史雨量觀測值。相關說明詳見 4.2 節。

(二)大尺度氣候歷史觀測資料與未來預測資料

本研究大尺度氣候歷史觀測資料取自美國大氣海洋研究院 (National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA) 的環境預測中心 (National Centers for Environmental Prediction, NCEP) 所提供之再分析資料 (<http://www.esrl.noaa.gov/psd/data/gridded/reanalysis/>)，其網格大小為 $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$ ，本研究選取最鄰近石門集水區之格點 (東經 120 度以及北緯 25 度) 做為大尺度氣候因子之觀測資料，圖 5.1.1-1 為選取之網格點位置圖。

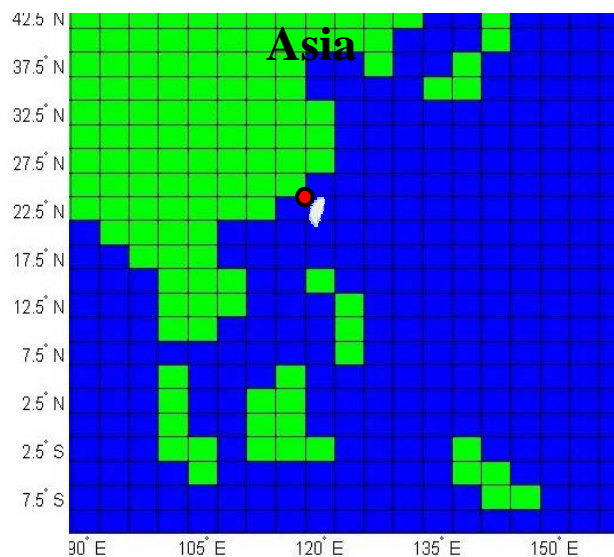


圖 5.1.1-1 本研究區域選用格點位置圖

大尺度未來氣候預測資料則以大氣環流模式(General Circulation Model, GCM)所提供數據為依據，惟目前全世界有數十種 GCM 模式，且各模式提供不同溫室氣體排放情境之模擬數據，因此需決定欲以何種大氣環流模式及氣體排放情境之資料做為大尺度未來氣候預測。目前 IPCC 網站提供各 GCM 不同排放情境之月模擬資料，然本研究降尺度分析所需資料為日模擬資料，日模擬資料取自台灣大學全球變遷研究中心網頁 (<http://www.gcrc.ntu.edu.tw/GCRCWEBDDC/Download.aspx>)，該網站提供兩種排放情境之模擬數據(A2 和 B1 情境)，本研究選擇 A2 情境作為未來氣候預測之情境。

大氣環流模式的選取以模式降雨豐枯變化趨勢與台灣相似程度較高者為選取原則。本研究自 IPCC Data Distribution Centre (http://www.ipcc-data.org/ar4/gcm_data.html) 下載各模式之月平均降雨量數據(1961~1990 之平均)，各模式選用的網格點整理如表 5.1.1-1 所示，並與石門水庫集水區之月平均降雨量進行相關性分析，分析結果如表 5.1.1-2 所示，顯示 ECHAM5 模式之豐枯變化與台灣氣候最為相似，故以此模式之 A2 情境作為大尺度未來氣候資料。

表 5.1.1-1 GCM 模式資料網格點選取說明

模式名稱	緯度網格大小	經度網格大小	選取點緯度	選取點經度
BCCR:BCM2	2.81	2.813	25.313	120.94
CCCMA:CGCM3_1-T47	3.75	3.750	26.250	120.00
CCCMA:CGCM3_1-T63	2.81	2.813	25.313	120.94
CNRM:CM3	2.81	2.813	25.313	120.94
CONS:ECHO-G	3.75	3.750	26.250	120.00
CSIRO:MK3	1.88	1.875	24.375	120.00
GFDL:CM2	2.00	2.500	26.000	120.00
GFDL:CM2_1	2.00	2.500	26.000	120.00
INM:CM3	4.00	5.000	26.000	120.00
IPSL:CM4	2.50	3.750	25.000	120.00
LASG:FGOALS-G1_0	3.00	2.813	24.000	120.94
MPIM:ECHAM5	1.88	1.875	24.375	120.00
MRI:CGCM2_3_2	2.81	2.813	25.313	120.94
NASA:GISS-AOM	3.00	4.000	24.000	120.00
NASA:GISS-EH	3.91	5.000	23.478	120.00
NASA:GISS-ER	3.91	5.000	23.478	120.00
NCAR:CCSM3	1.41	1.406	25.313	120.94
NCAR:PCM	2.81	2.813	25.313	120.94
NIES:MIROC3_2-HI	1.13	1.125	25.875	120.38
NIES:MIROC3_2-MED	2.81	2.813	25.313	120.94
UKMO:HADCM3	2.47	3.750	25.890	120.00
UKMO:HADGEM1	1.24	1.875	25.448	120.00

表 5.1.1-2 GCM 模式與石門水庫月平均雨量相關性分析

模式名稱	相關係數
BCCR:BCM2	0.632
CCCMA:CGCM3_1-T47	0.686
CCCMA:CGCM3_1-T63	0.681
CNRM:CM3	0.741
CONS:ECHO-G	0.776
CSIRO:MK3	0.473
GFDL:CM2	0.402
GFDL:CM2_1	0.675
INM:CM3	0.683
IPSL:CM4	0.595
LASG:FGOALS-G1_0	-0.193
MPIM:ECHAM5	<u>0.797</u>
MRI:CGCM2_3_2	0.777
NASA:GISS-AOM	0.720
NASA:GISS-EH	0.564
NASA:GISS-ER	0.623
NCAR:CCSM3	0.722
NCAR:PCM	0.298
NIES:MIROC3_2-HI	0.493
NIES:MIROC3_2-MED	0.185
UKMO:HADCM3	0.642
UKMO:HADGEM1	0.208

5.1.2 預測因子選取

預測因子選取在建立降尺度模式中是很重要的一環，Giorgi 等人 (2001)指出預測因子的選取應滿足下列原則：

1. 預測因子要能夠反應預報變量之主要變化特性
2. 預測因子與預報變量間要有時間上之定常性
3. 以預測因子推估預報變量時，推估值應具有重現性。
4. 預測因子需能反應氣候變遷警訊。

根據 Aavudai(2008)、Hanssen-Bauer 等人(2005)及 Enke 等人(2005)之文獻，與降雨量較相關之預測因子有平均海平面壓力，水平風速、垂直風速、溫度、渦度及濕度等，其中平均海平面壓力是最常被用來做降尺度分析之預測因子，如 Barrow 和 Semenov(1995)、Zorita 等人(1995)、Kilsby 等人(1998)、Conway 和 Jones(1998)、Stehlik 和 Bardossy(2003)及 Wetterhall 等人(2006)，皆以平均海平面壓力做為預測因子進行降尺度分析，故本研究亦選定平均海平面壓力進行後續降尺度分析之預測因子。

5.1.3 降尺度分析

本研究以自行發展之條件氣候繁衍模式進行降尺度分析，首先將大尺度平均海平面壓力依等量切割分為 10 群，小尺度降雨量依等比切割(比率採用 1.4)分為 10 群，故共有 $10*10=100$ 種分類，本研究以 1973~2007 年共 35 年資料求得在某平均海平面壓力分群下，降雨量落於各分群之發生條件機率，並以此條件機率進行氣候繁衍。

由於該模式屬於統計繁衍模式，合成降雨量會隨每次合成而略有異動，因此本研究統計 100 組合成雨量平均值，並計算出 90%信賴區間與歷史觀測值進行比較，圖 5.1.3-1 為訓練案例各月日平均降雨量觀測值與模擬值比較圖，結果顯示各月日平均降雨量觀測值皆落於模擬值 90%信賴區間內，顯示本模式確實可有效推估日平均降雨量；圖 5.1.3-2 為訓練案例各月日降雨量標準偏差觀測值與模擬值比較圖，其中 1、2、3、4、7、8 及 11 月之標準偏差觀測值略高於模擬值 90%信賴區間，顯示本模式對於標準偏差略有低估，但低估值頗低($\leq 1.32\text{mm}$)，仍符合可接受範圍；圖 5.1.3-3 為訓練案例各月日降雨機率觀測值與模擬值比較圖，結果顯示各月日降雨機率觀測值皆落於模擬值 90%信賴區間內，顯示本模式確實可有效反應日降雨機率。透過平

均降雨量、降雨量標準偏差與降雨機率之分析，顯示本模式對於降雨量的推估確實有不錯的精度，故以此模式進行未來氣候之預測。

本研究以 2046~2065 年 ECHAM5 模式之平均海平面壓力進行未來氣候變遷之預測。圖 5.1.3-4 為 2046~2065 年各月日平均降雨量模擬值與歷史觀測值比較圖，結果顯示 2、5 及 7 月之降雨量有增加的趨勢(模擬值 90%信賴區間高於歷史觀測值)，6 及 9 月降雨量有減少的趨勢(模擬值 90%信賴區間低於歷史觀測值)；圖 5.1.3-5 為 2046~2065 年各月日降雨量標準偏差模擬值與歷史觀測值比較圖，結果顯示 1、6、7、9、11 及 12 月之標準偏差有減少之趨勢(模擬值 90%信賴區間低於歷史觀測值)，顯示該月份之降雨量變化波動變小，2 月及 5 月之標準偏差有減少之趨勢(模擬值 90%信賴區間高於歷史觀測值)，顯示該月份之降雨量變化波動變大；圖 5.1.3-6 為 2046~2065 年各月日降雨機率模擬值與歷史觀測值比較圖，結果顯示 1、7 及 8 月之降雨機率有提高之趨勢，9、11 及 12 月之降雨機率則有降低之趨勢。

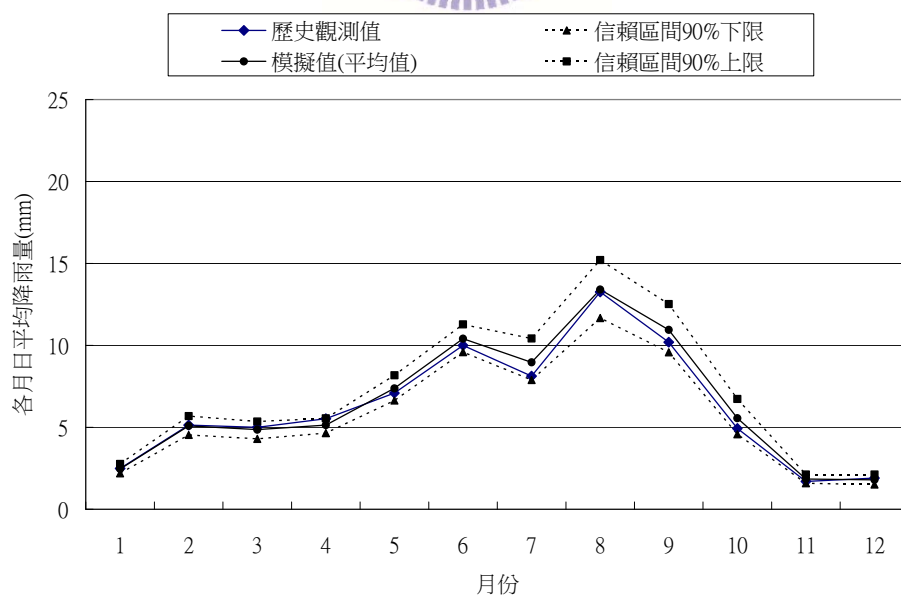


圖 5.1.3-1 訓練案例各月日平均降雨量模擬值與歷史觀測值比較

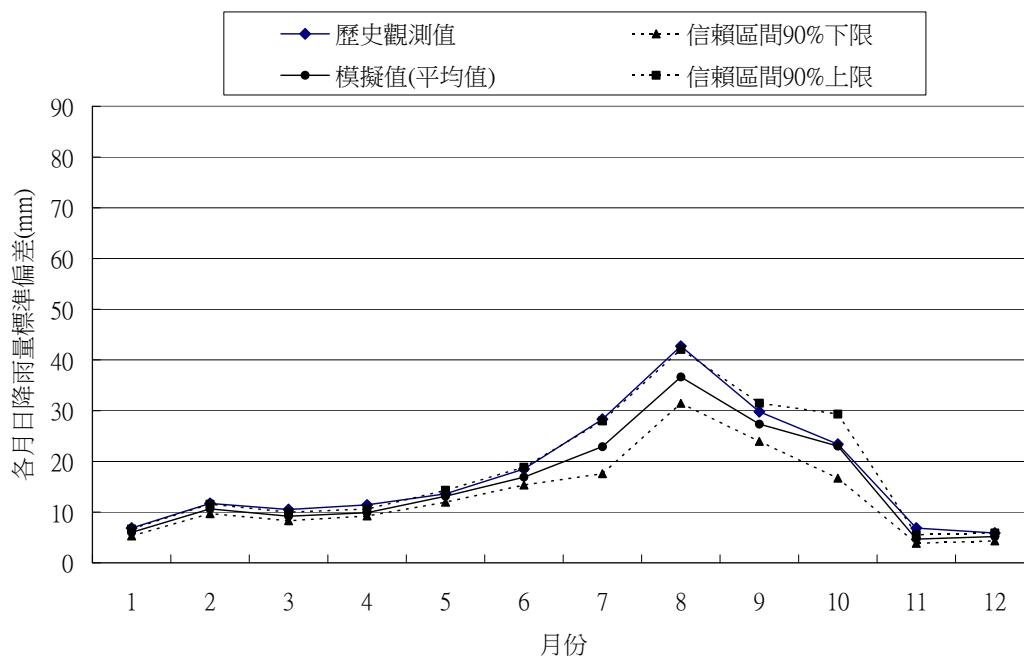


圖 5.1.3-2 訓練案例各月日降雨量標準偏差模擬值與歷史觀測值比較

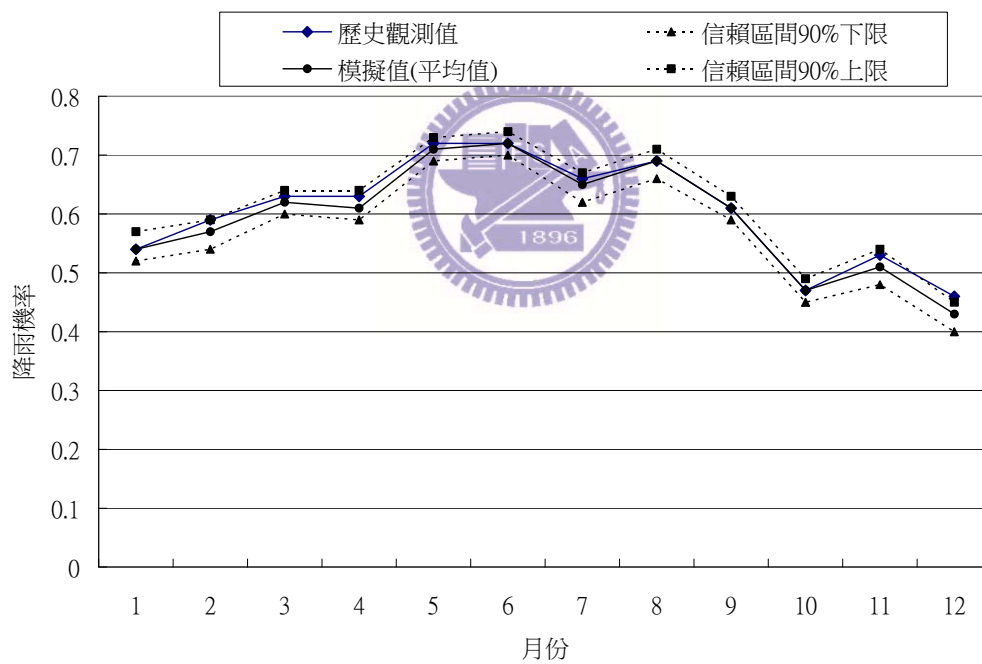


圖 5.1.3-3 訓練案例各月日降雨機率模擬值與歷史觀測值比較

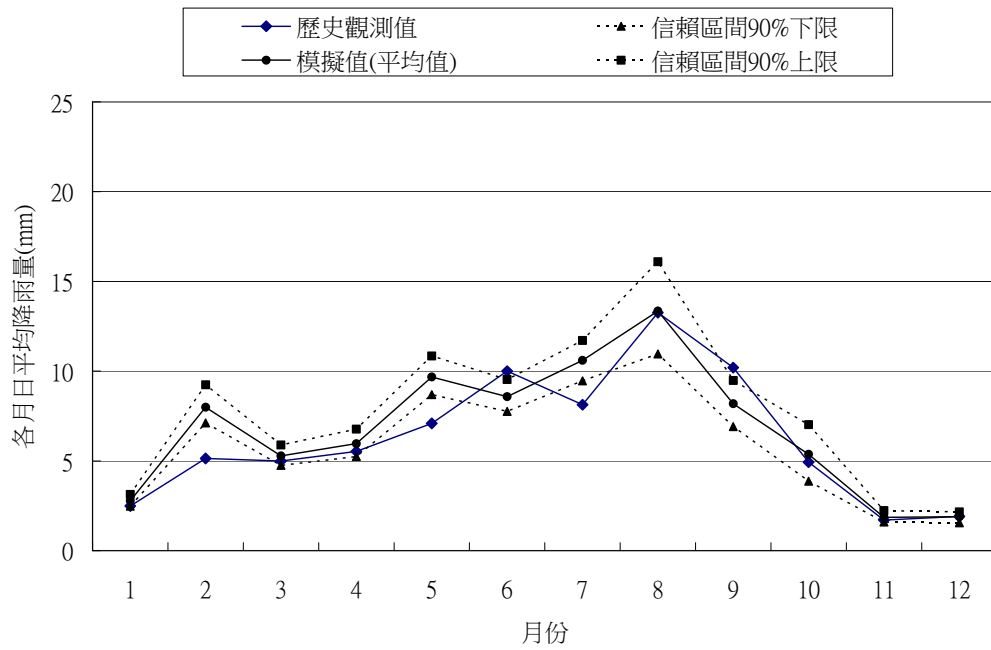


圖 5.1.3-4 2046~2065 年各月日平均降雨量模擬值與歷史觀測值比較

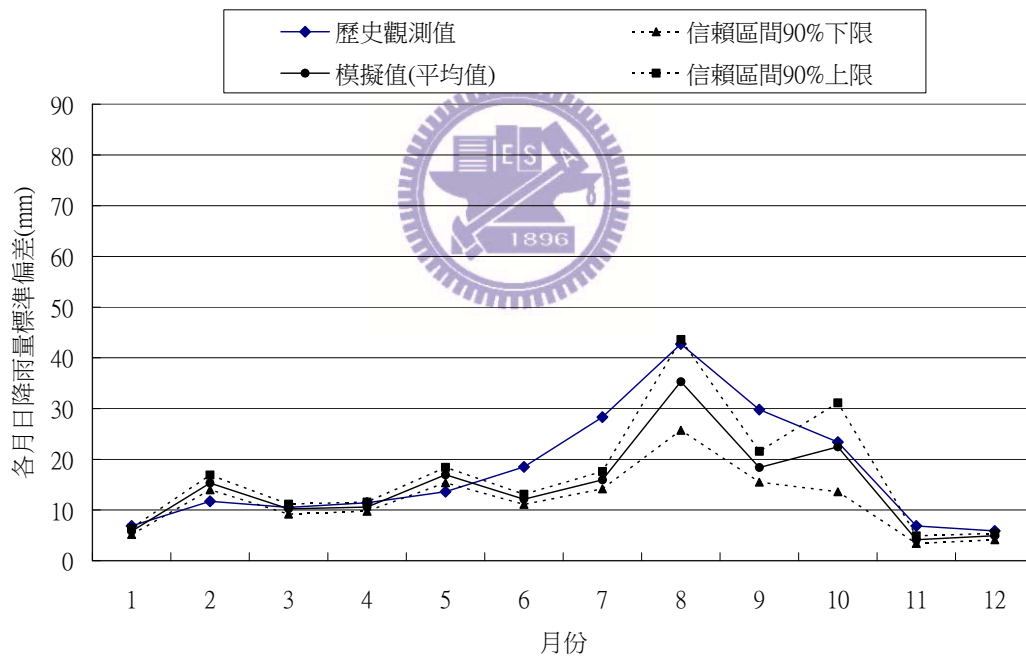


圖 5.1.3-5 2046~2065 年各月日降雨量標準偏差模擬值與歷史觀測值比較

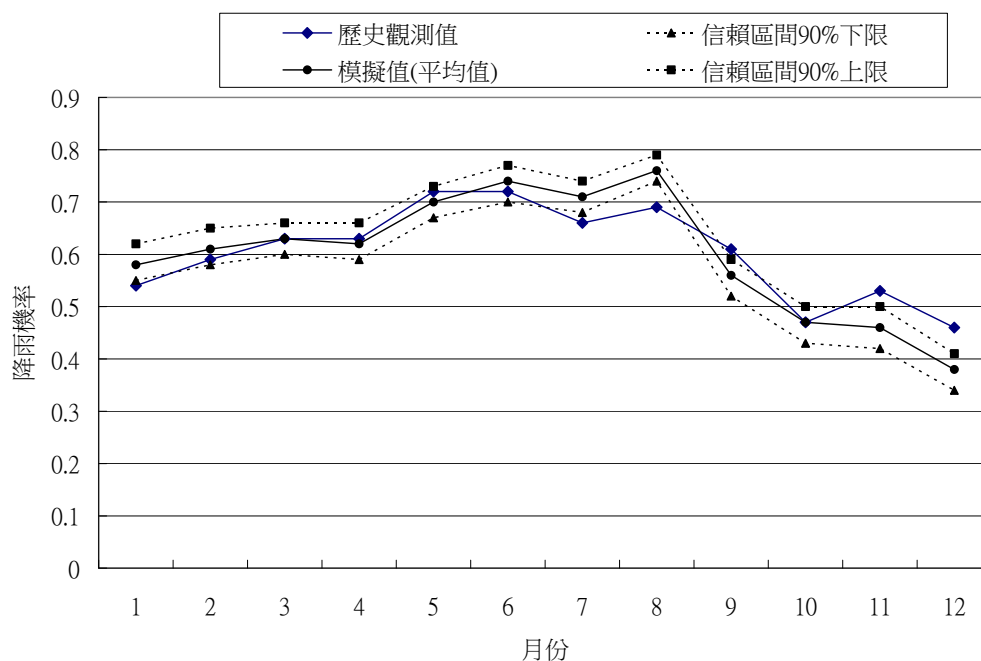


圖 5.1.3-6 2046~2065 年各月日降雨量機率模擬值與歷史觀測值比較

5.2 石門水庫降雨逕流模式建立

本研究長期降雨逕流推估採用 GWLF 模式進行演算，由於模式中有多項參數待定，如逕流係數 CN 值、最大土壤水分容量、覆蓋係數、退水係數等，本研究假設氣候變遷並不影響這些參數值，故氣候變遷前後參數值不變，各參數值可透過參數檢定求得。模式參數值的合理範圍乃參考 GWLF 使用手冊與相關水文書籍並配合研究區域實際地理特性訂定之，各參數範圍訂定說明如下：

一、逕流係數 CN 值

模式之逕流係數 (CN) 依臨前土壤水份分為三類，分別為 CN3 (溼潤情況)、CN2 (平均情況)、CN1 (乾燥情況)，其中 CN2 值則依照土壤分類與土地利用決定，美國水土保持局土壤類別分為 A、B、C、D 四類別，台灣水土保持局土壤質地分類之對照說明詳見表 3.4-1，各土壤類別不同土地利用下之 CN2 建議值詳見表 3.4-2。

石門水庫集水區主要土壤分類有黃棕色紅壤、紅黃色準灰壤、黑色基性岩土、沖積土、灰化紅黃壤及石質土，分別屬於 A、B、C 土壤類別。根據民國 82 年環保署委託省糧食局土地利用調查資料顯示，目前石門水庫集水區土地利用狀況大致可劃分為農墾地(包括稻作、旱作、果園)面積共 2,023 公頃，佔總面積 2.66%；林地(包括針葉林、闊葉林、竹林、針闊竹混合林、灌木林)所佔面積最廣，共 71,019 公頃，佔總面積 93.43%；開發地(公園、遊樂區、工礦用地、建地、墓地、道路)面積共 449 公頃，佔總面積 0.58%；水面用地(包括魚池、水系、其他水面)面積共 1,349 公頃，佔總面積 1.78%；其他用地(包括草生地、荒地、崩塌地、其他)面積共 1,174 公頃，佔總面積 1.55%。故本研究參考表 3.4-2，配合土壤類別及土地利用訂定石門水庫集水區之 CN2 參數範圍為 45~88。

二、最大土壤水分容量

最大土壤水分容量隨不同土壤種類而異，本研究參考易任、王如意之應用水文學（詳見表 5.2-1），將研究區域最大土壤水分容量之合理範圍訂定為 3~9 cm/day。

表 5.2-1 不同土壤種類之最大土壤水分容量(單位 cm/day)

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

資料來源：易任、王如意著應用水文學

三、 覆蓋係數

覆蓋係數因子隨不同土地利用、不同植物種類、不同季節而不同。本研究將覆蓋係數之合理範圍訂定為 0.1~1。

表 5.2-2 不同植物之覆蓋係數

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

資料來源：氣候變遷與環境生態上課講義，童慶斌

四、 退水係數

退水係數參考 GWLF 使用手冊，設定其合理範圍為 0.01~0.2。

各參數之合理範圍設定整理如表 5.2-3 所示。

表 5.2-3 GWLF 模式參數合理範圍

參數	合理範圍	單位
CN2	45~88	無
覆蓋係數	0.1~1	無
退水係數	0.01~0.2	無
最大土壤水分容量	3~9	cm/day

本研究以 1973~1998 年共 26 年作為訓練案例，1999~2004 年作

為驗證案例，以試誤法進行參數檢定，訓練結果如圖 5.2-1 所示，結果顯示歷年各月日平均流量模擬值與觀測值非常接近，模擬日平均流量與觀測日平均流量非常接近，相關係數高達 0.92，驗證結果如圖 5.2-2 所示，歷年各月日平均流量模擬值與觀測值之相關係數高達 0.94，顯示 GWLF 確可有效推估流量變化趨勢，各參數之檢定結果整理如表 5.2-4 所示。

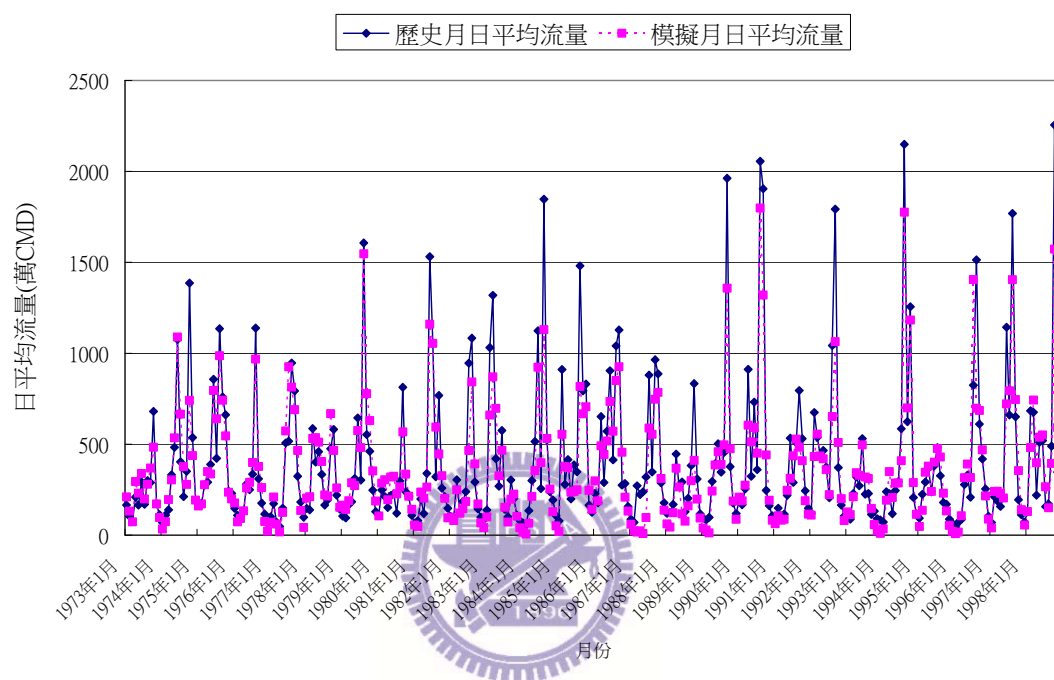


圖 5.2-1 石門水庫訓練案例(1973~1998)分析結果

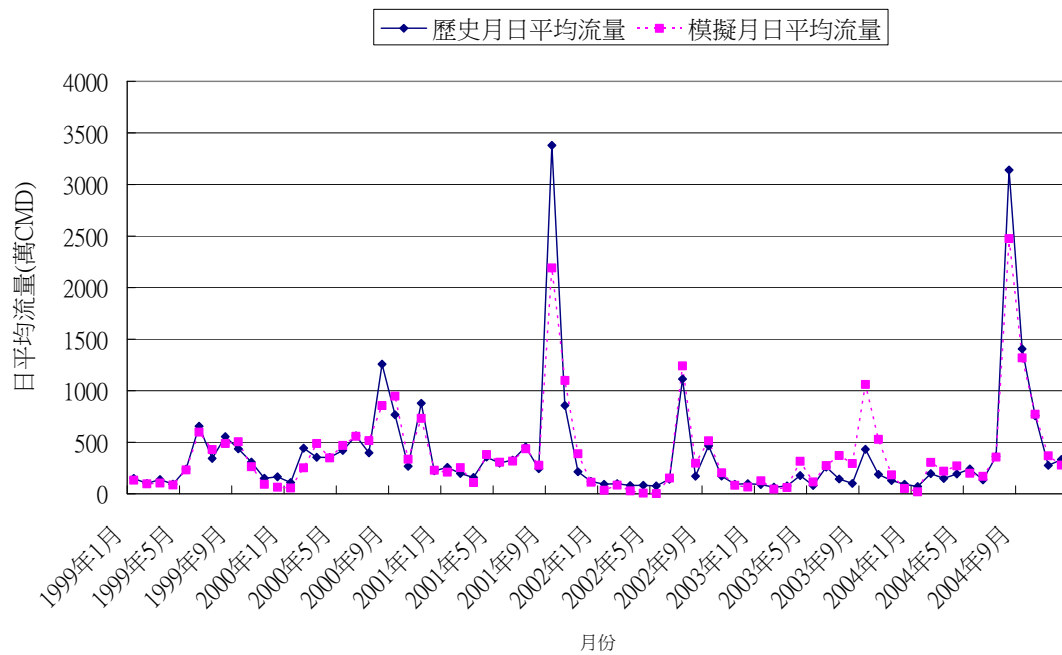


圖 5.2-2 石門水庫驗證案例(1999~2004)分析結果

表 4.2-3 GWLF 模式參數檢定結果

參數	石門水庫參數檢定結果	單位
CN2	50	無
覆蓋係數*土壤水分因子	0.8	無
退水係數	0.04	無
最大土壤水分容量	5	cm/day
起始未飽和層含水量	3	cm/day
起始飽和層含水量	6	cm/day
深層滲漏率	0	cm/day

5.3 石門水庫水資源長期供水調配模式建立

5.3.1 石門水庫水資源調配系統架構

大漢溪水源主要由石門水庫調蓄運用，除供應桃園台地及水庫下游灌溉用水外，並供給水公司石門、龍潭及板新、平鎮、大湳供水區之公共給水(板新供水改善計畫 2 期工程完工後，板新地區之公共

用水需求改由新店溪水源供應)。另外三峽河抽水站位於中下游之三峽灣潭地區設計最大取水量每日 60 萬立方公尺，抽水站前築有攔河堰以利抽取三峽河水源，並以 6.6 公里長之加壓專管引入板新淨水場處理。三峽河下游為大安圳取水口，供應 145 公頃之灌溉用水，故自三峽堰取三峽河水源需保流下游大安圳之水權。

此外目前政府正推動「石門水庫及其集水區整治計畫」，以確保石門水庫營運功能、上游集水區水域環境之保育及有效提升其供水能力，保障民眾用水權益。因此本研究把該計畫目前已在施作(包含完工與未完工)之工程納入考量，故本研究石門水庫零方案水資源調配系統架構可整理如圖 5.3.1-1 所示。以下分別針對納入之工程進行說明。

- 一、改善尖山中繼加壓站：北桃園現有大湳淨水場之導水管線設置中繼加壓站由原 25 萬 CMD 原水供應量增加至 35 萬 CMD，其工程效益，即增加原水量 10 萬 CMD 至大湳淨水場，以減緩北桃缺水壓力。
- 二、龍潭淨水場擴建：預計於民國 99 年完工，其工程效益為將原龍潭淨水場的處理能力 5 萬 CMD 提升至 19 萬 CMD，以增加南桃園地區之供水能力。
- 三、板新大漢溪水源南調桃園(含南北桃連通計畫)：預計於民國 100 年底完工，其工程效益為 1.使南桃支援北桃 17 萬 CMD 之水量。2.並增加頂山腳加壓站，由板新淨水場取水 40 萬 CMD 經頂山腳加壓站至北桃地區。3.大湳淨水場擴建，增加整體供水效益。
- 四、桃竹雙向供水改善計畫：本計畫完成後桃園及新竹地區可相互支援供水能力均提高至 10 萬 CMD，於枯水時期或原水高濁度

期間可相互支援供水，進一步確保桃園及新竹地區供水穩定。

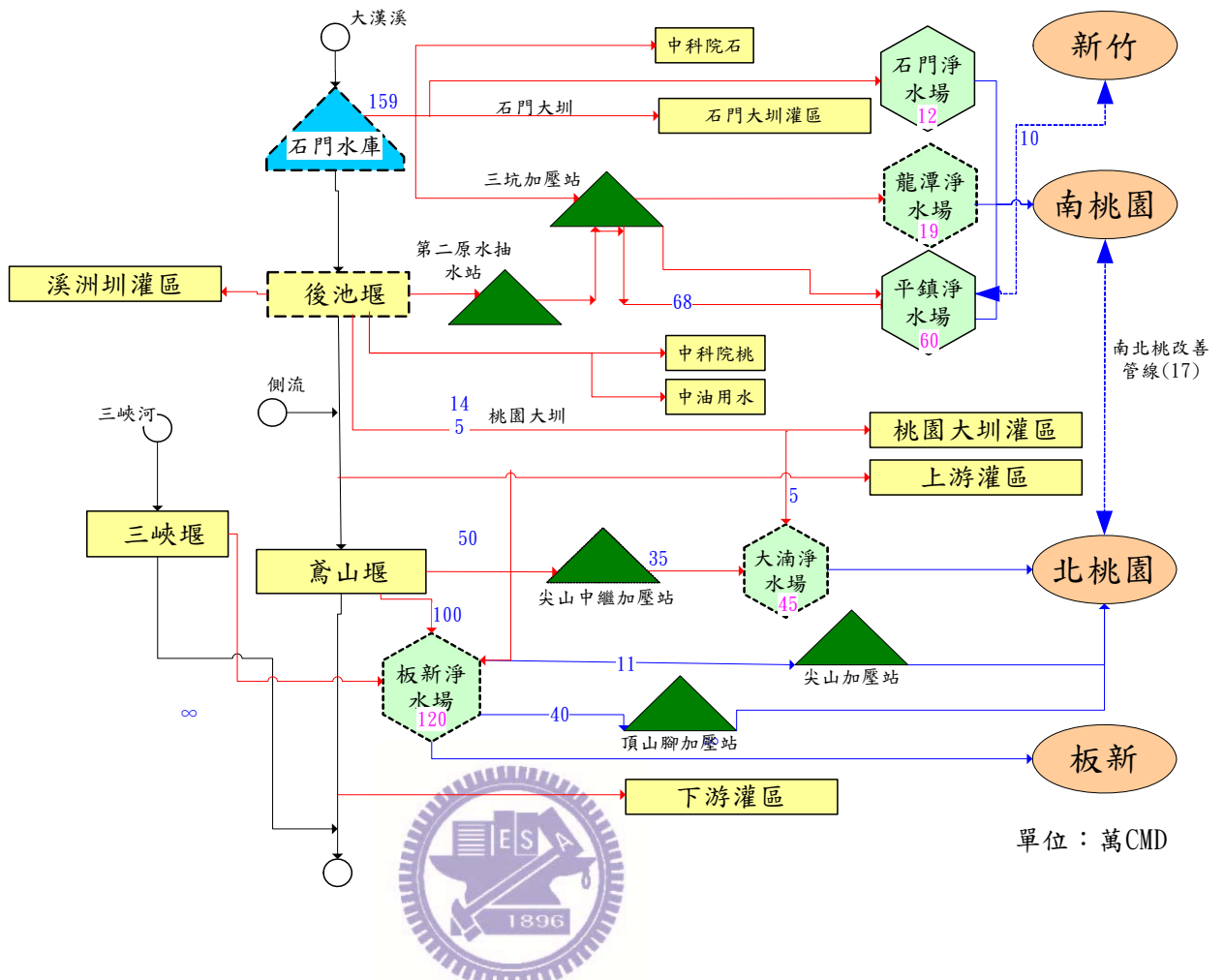


圖 5.3.1-1 石門水庫供水系統圖(零方案)

5.3.2 水資源運用原則

石門水庫主要依照其運用規線進行調配，其操作規則詳見 4.1 節，此外供水量亦受管線限制與淨水場處理能力，大漢溪流域之管線限制與淨水場處理能力已標示於圖 5.3.1-1，各淨水廠之細部說明詳見表 4.1-2。

5.3.3 水資源調配模式建立

以圖 5.3.1-1 石門水庫水資源調配系統圖，配合各水工結構物之操作原則與淨水場的處理能力，利用系統動力學的四個基本物件：存量(Stock)、流量(Flow)、箭線(Connector)以及輔助變數(Auxiliary)，建構出石門水庫水資源調配系統動力模型如圖 5.3.3-1 所示，模式分析結果詳見 4.4 節。

模式中主要的輸入資料包含入流量、需求量、管線限制及淨水場處理能力等，其中管線限制與淨水場處理能力已標示於圖 5.3.1-1。其餘模式輸入資料說明如下

一、天然入流量

石門水庫調配系統之天然入流量包含石門水庫入流量、鳶山堰側流量與三峽堰入流量，其中石門水庫歷史流量以 NCEP 之平均海平面壓力歷史觀測值配合條件氣候繁衍降尺度進行合成，氣候變遷後流量以 ECHAM5 模式 A2 情境 2046~2065 之平均海平面壓力模擬值配合條件氣候繁衍降尺度進行合成。三峽堰入流量及鳶山堰側流量則以石門水庫入流量利用面積比推估之，石門水庫、鳶山堰與三峽(2)流量站之集水面積如表 5.3.3-1 所示。

二、標的需求量

石門水庫所需滿足的標的需求量有生態基流量，公共用水需求量(含民生與工業用水)及農業用水需求量，各需求量之目標量說明如下：

(1)生態基流量

生態基流量為維持河川生態及景觀維護所需之最小水量，此放流量之大小，目前尚無法令規章之規定值，僅能視當地河川特

性、重要性及自淨能力而定。本研究依照行政院民國 91 年「台灣地區水資源開發綱領計畫」報告書中建議之每 100 平方公里須有 0.135 CMS 之保育用水量為保留目標，大漢溪、鳶山堰側流、大漢溪匯流口及三峽河入流量其各控制點之生態基流保留量如表 5.3.3-2 所示。

(2) 公共用水需求量

石門水庫主要公共用水供應區域為南桃園，北桃園及板新地區，本研究以水利署民國 97 年「區域水資源經理策略擬定之研究」報告中民國 120 年之中成長需水量作為公共用水目標需求量（詳見圖 5.3.3-2、5.3.3-3），由於報告中僅列出桃園之需求量，故南桃園與北桃園公共目標用水量乃根據桃園地區民國 120 年中成長需水量依南、北桃現況需求量的比例進行推估。

(3) 農業用水需求量

石門水庫主要供應之農業用水區域包含石門大圳、桃園大圳和大漢溪中下游灌區，其中大漢溪中游灌區包含包含土銀圳、順時埔圳、月眉圳、十三張圳、二甲九圳、石頭溪圳、公館后圳、隆恩埔圳，大漢溪下游灌區為后村圳，惟後村堰因艾利颱風而毀壞，故目前后村圳並無引水灌溉。其他灌區需水量則依據石門水庫多目標運用統計表(民國 82 年～民國 97 年)之實際供給農業用水量的資料，剔除離群值(本研究以超過 1.3 倍標準偏差為離群值)後，以各旬平均值作為農業用水需求量，各圳路之農業用水量整理如表 5.3.3-3 所示。



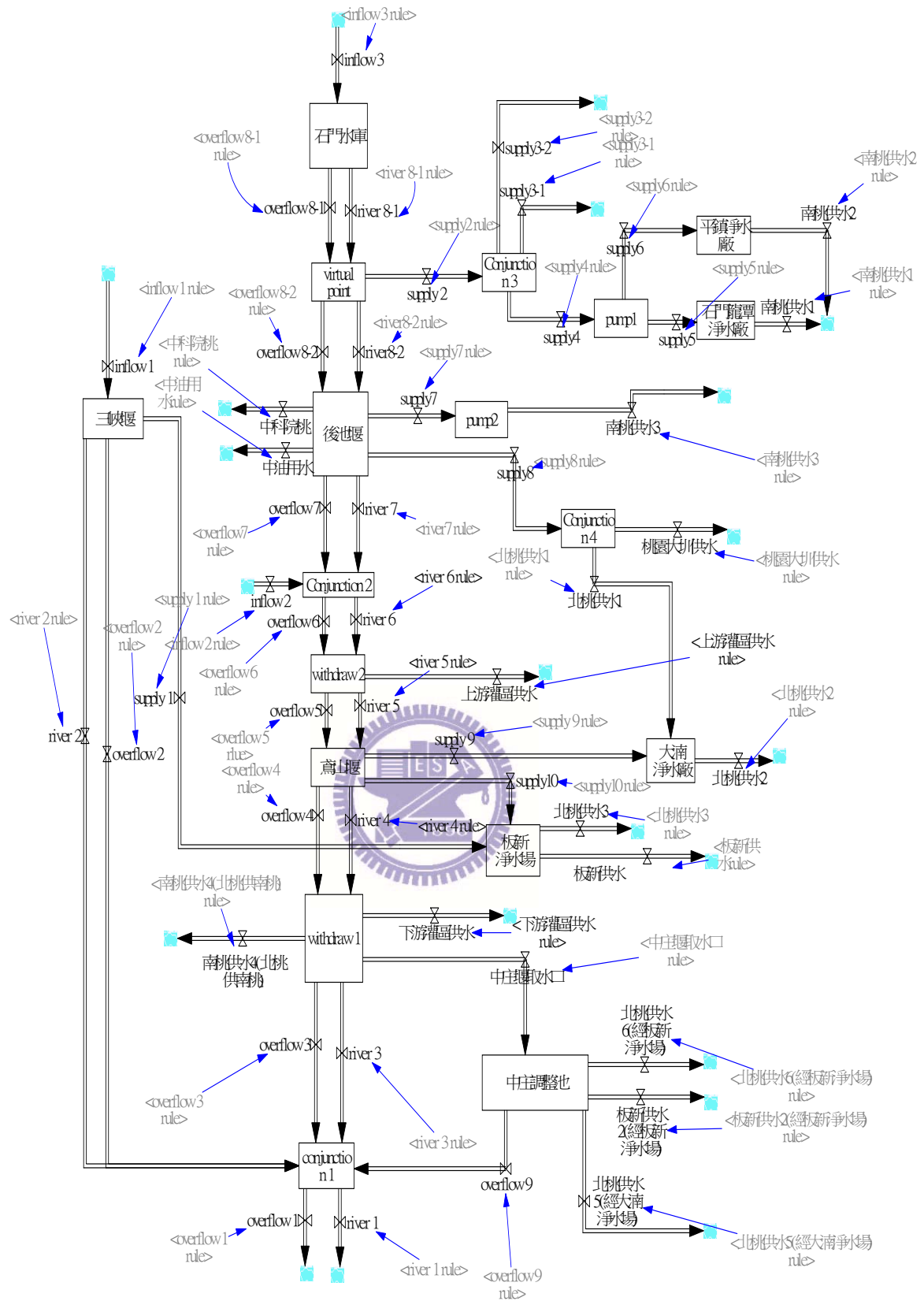


圖 5.3.3-1 石門水庫水資源調配系統動力流圖

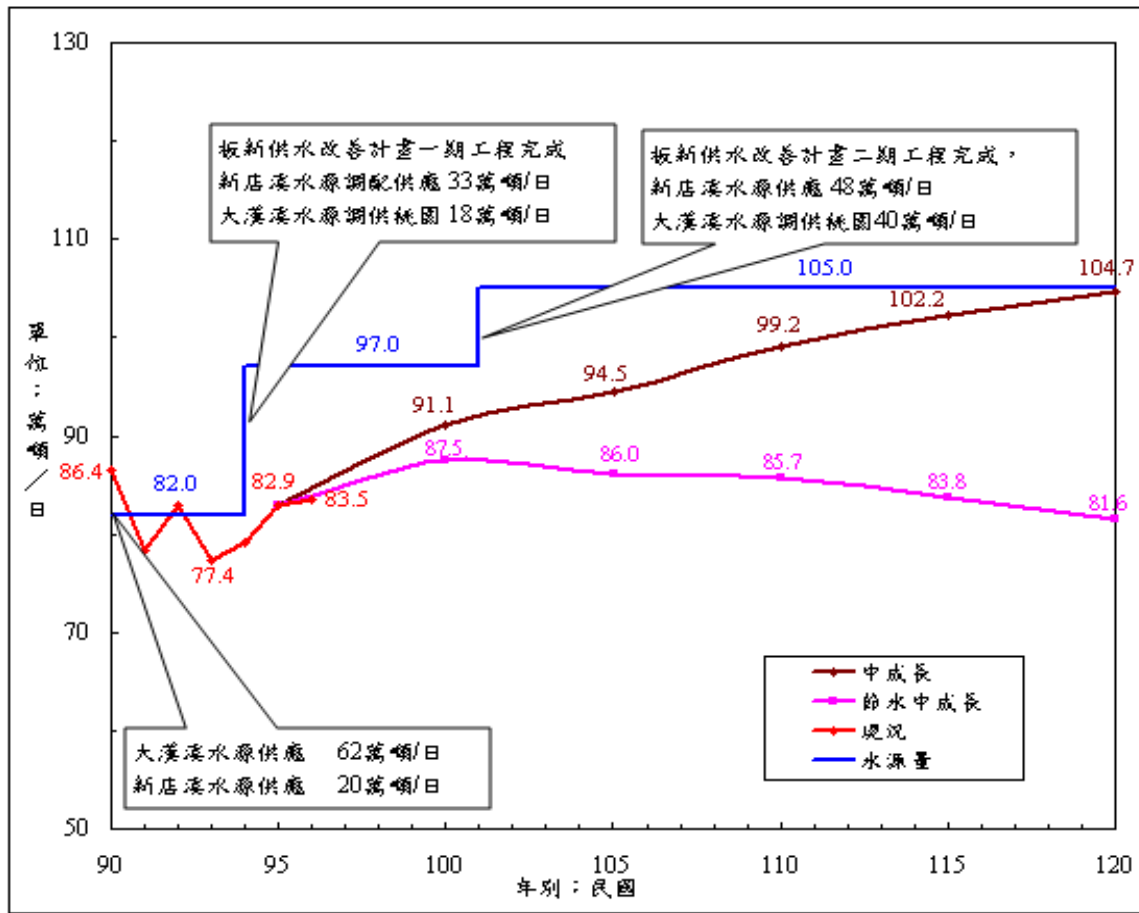
表 5.3.3-1 大漢溪流域控制點集水面積

控制點	控制點集水區面積(平方公里)	各控制點所屬河系
石門水庫	763.40	大漢溪
鳶山堰	869.00	大漢溪
三峽(2)流量站	112.60	大漢溪

表 5.3.3-2 各河系之生態基流保留量

地區	控制點	控制點集水區面積 (平方公里)	生態基流保留量 (萬CMD)
桃園	石門水庫	763.40	8.904
	鳶山堰	869.00	10.136
	大漢溪匯流口	1163	13.565
	三峽流量站	112.60	1.313





120年

人口221.4萬人(較95年成長22.4萬人)

自來水系統普及率99.8%(較95年成長0.9%)

自來水系統抄見率77.5%(較95年成長2.5%)

每人每日用水量330公升(較95年成長44公升)

單位：萬噸/日

目標年	95	100	105	110	115	120
低成長	82.9	90.9	94.2	98.5	101.5	104.0
中成長	82.9	91.1	94.5	99.2	102.2	104.7
高成長	82.9	91.1	94.5	99.2	102.2	104.7
節水中成長	82.9	87.5	86.0	85.7	83.8	81.6

高成長：中成長+規劃及研議中之新增工業區

中成長：低成長+編定及擬編中之工業區

遠東通訊數位園區 台北港電廠#1-#5(火力)

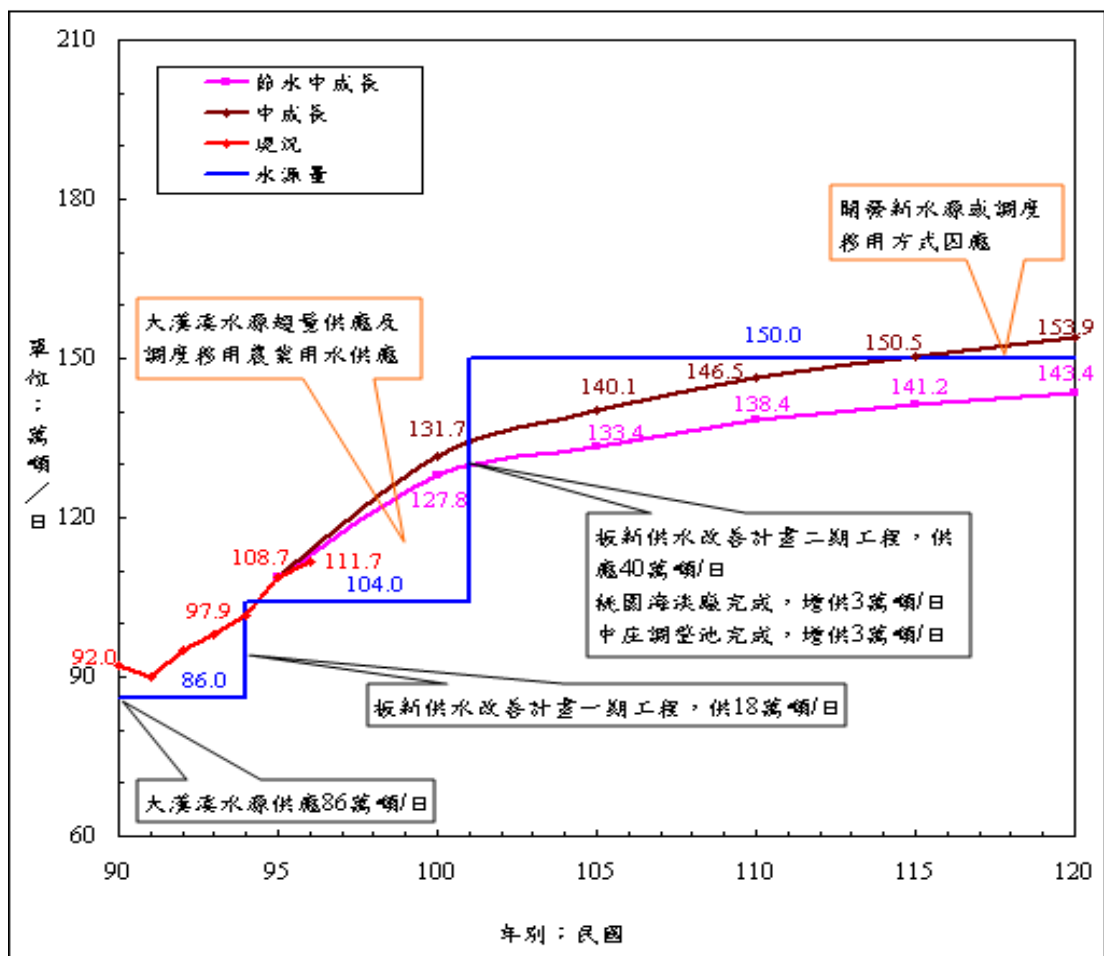
低成長：民生及現有工業成長+開發中工業區

台北港(第二期工程)



圖 5.3.3-2 板新地區公共給水目標年需求量

資料來源：經濟部水利署，區域水資源經理策略擬定之研究，民國 97 年



120年
 人口237.9萬人(較95年成長35.6萬人)
 自來水系統普及率99.8%(較95年成長6.1%)
 自來水系統抄見率76.8%(較90年成長5.0%)
 每人每日用水量280公升(較95年成長13公升)

單位：萬噸/日

目標年	95	100	105	110	115	120
低成長	108.7	122.6	128.1	134.5	138.5	141.9
中成長	108.7	131.7	140.1	146.5	150.5	153.9
高成長	108.7	164.3	174.9	182.8	186.8	190.2
節水中成長	108.7	127.8	133.4	138.4	141.2	143.4

高成長：中成長+規劃及研議中之新增工業區

東和鋼鐵公司 濱海地區整體開發建設計畫

楊梅秀才科技園區

中成長：低成長+編定及報編中之工業區

桃園觀塘工業區 龍潭工業區 桃園科技工業區

華映桃園八德廠 桃園煉油廠

低成長：民生及現有工業成長+開發中工業區

展茂光電公司 華通電腦 華映桃園龍潭光電園區

龍潭渴望智慧園區 林口電廠(火力) 竹料龍潭基地

華亞科技園區(擴廠) 大潭濱海特定工業區開發工程



圖 5.3.3-3 桃園地區公共給水目標年需求量

資料來源：經濟部水利署，區域水資源經理策略擬定之研究，民國 97 年

表 5.3.3-3 桃園地區各灌區之農業需水用量 (單位：cms/d)

旬	石門大圳	桃園大圳	中游灌區	下游灌區
1	0	0.14	0.02	0
2	0	0.24	0.02	0
3	0	0.27	0.02	0
4	1.48	7.81	0.22	0
5	2.84	10.79	0.35	0
6	4.07	11.83	0.86	0
7	3.99	11.28	0.84	0
8	3.19	10.42	0.65	0
9	3.14	9.96	0.61	0
10	3.10	9.53	0.51	0
11	3.74	10.23	0.52	0
12	2.95	9.97	0.51	0
13	4.02	8.40	0.36	0
14	4.19	9.13	0.36	0
15	4.08	9.82	0.35	0
16	3.53	10.40	0.40	0
17	3.91	11.21	0.37	0
18	4.69	11.23	0.38	0
19	5.92	12.92	0.65	0
20	5.51	13.19	0.84	0
21	6.95	14.22	1.26	0
22	6.64	13.08	1.24	0
23	5.79	12.71	1.21	0
24	5.41	11.62	1.09	0
25	4.53	11.11	0.72	0
26	4.85	11.16	0.73	0
27	5.50	10.89	0.71	0
28	5.40	11.01	0.84	0
29	5.92	11.83	0.78	0
30	5.88	11.43	0.78	0
31	5.72	10.56	0.96	0
32	4.42	9.95	0.78	0
33	3.35	7.82	0.20	0
34	0.07	0.31	0.02	0
35	0	0.23	0.02	0
36	0	0.25	0.02	0

5.4 石門水庫長期調配風險分析

本研究長期調配風險分析主要探討在長期模擬下，枯水期缺水率變化，故枯水期缺水風險可定義為系統缺水率大於使用者缺水忍受度的機率，即

$$Risk = \Pr(SH > SH_R)$$

其中 Risk 代表風險，SH 為系統缺水率， SH_R 為使用者缺水忍受度。亦即枯水期缺水風險可表示為 SH 超越 SH_R 的機率。

以圖 5 水在歷史資料模擬下，顯示約有 6 成枯水期並不缺水，在 GCM 資料模擬下，顯示約有 7 成 2 枯水期並不缺水。

通常缺水忍受度與該地區之社會經濟結構有關，且一般而言農業較民生與工業有較高的缺水忍受度，因此本研究假設南、北桃園及板新地區公共用水之缺水忍受度為 5%，8% 及 10% 下，以及大漢溪農業灌區缺水忍受度為 20%，25% 及 30% 下探討其可能遭遇的缺水風險，其結果整理如表 5.4-1 所示。結果顯示，北桃園的缺水風險最高，即使以 10% 作為缺水忍受度之標準，缺水風險仍高達 88.66% (歷史資料模擬結果) 和 77% (GCM 資料模擬結果)；南桃園之缺水風險為次高，在歷史資料模擬下，缺水風險都在 20% 以上，在 GCM 資料模擬下，若缺水忍受度較嚴格時 (5% 和 8%)，缺水風險仍然在 20% 以上，若缺水忍受度較寬鬆時 (10%)，則缺水風險可降至 8.95%；板新地區因有翡翠水庫每日支援 53 萬噸用水，其缺水風險較小，除在歷史資料模擬下且缺水忍受度為 5% 有較高缺水風險外 (15.4%)，其於缺水風險皆小於 5%；農業用水除在歷史資料模擬且缺水忍受度為 20% 下有較高缺水風險外 (11.14%)，其餘缺水風險則皆小於 10%。整體而言，不論是否考量氣候變遷情況下，石門水庫供水區域仍存有高度之

缺水風險，因此有必要提出適當之調適策略以改善石門水庫供水區域枯水期缺水風險。

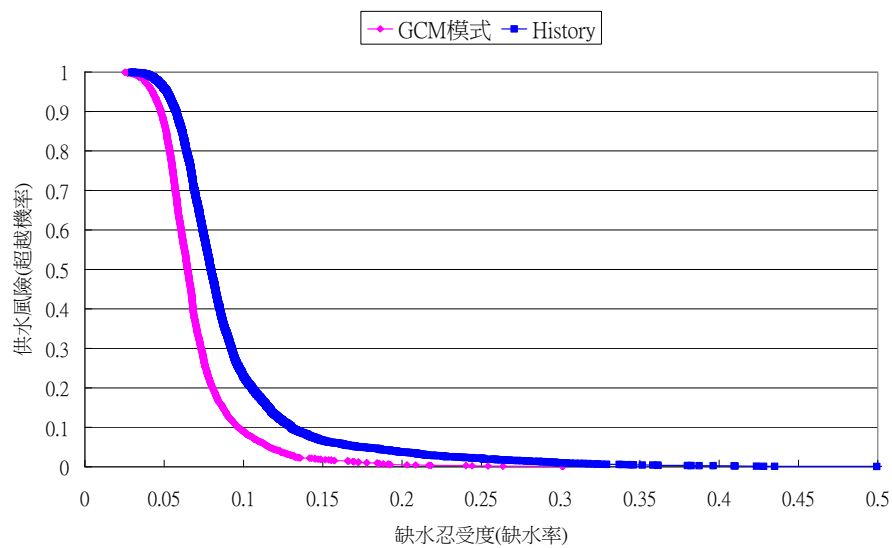


圖 5.4-1 南桃園公共用水缺水風險曲線圖

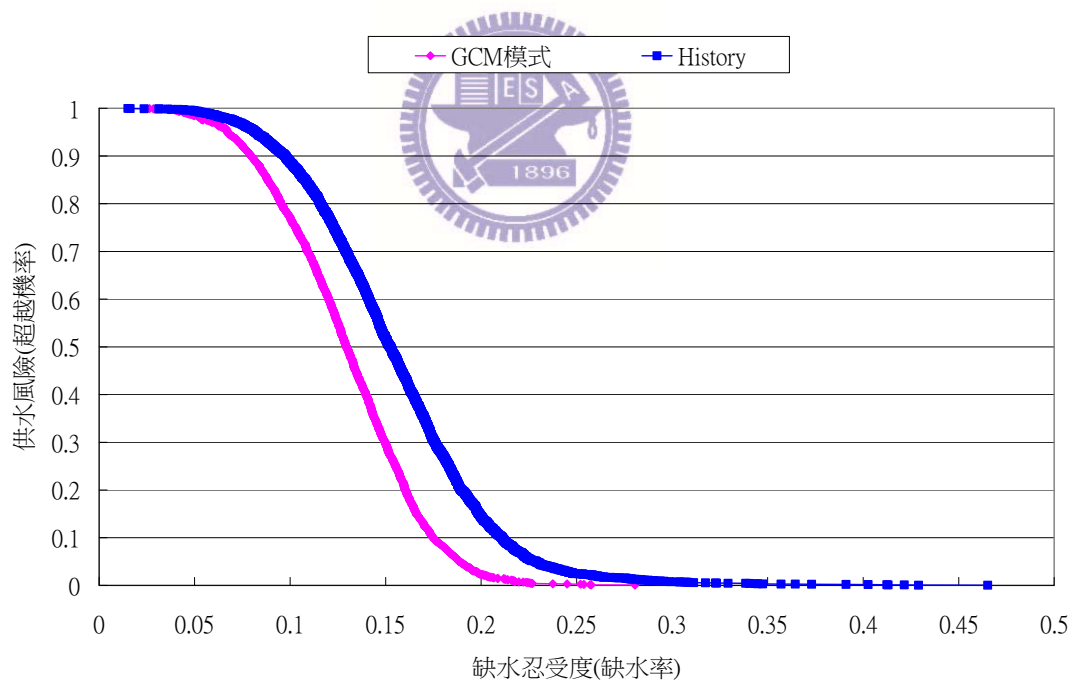


圖 5.4-2 北桃園公共用水缺水風險曲線圖

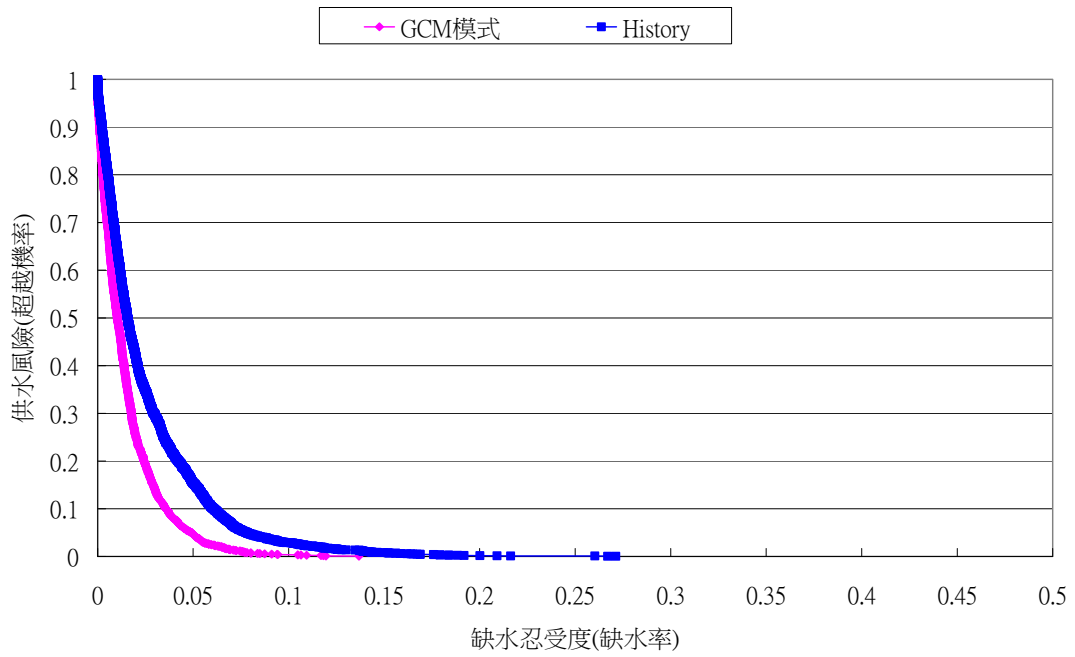


圖 5.4-3 板新公共用水缺水風險曲線圖

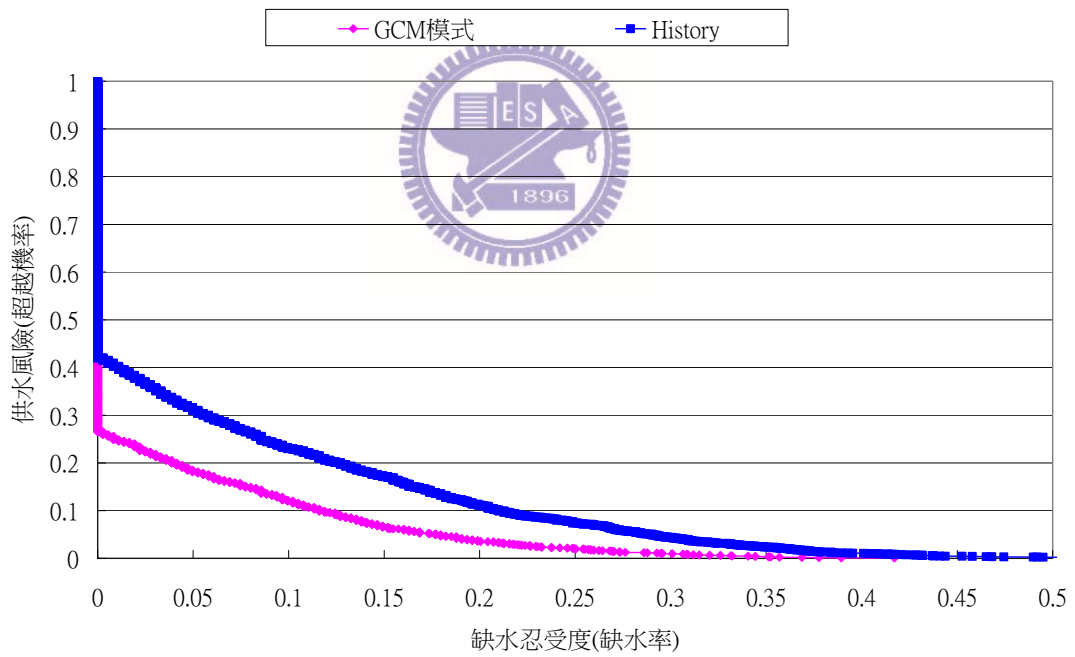


圖 5.4-4 農業公共用水缺水風險曲線圖

表 5.4-1 各種供水需求不同缺水忍受度下之缺水風險

	缺水忍受度	缺水風險 (歷史資料)	缺水風險 (GCM 模式)
南桃園 公共用水	5%	95.89%	87.11%
	8%	49.01%	20.36%
	10%	22.94%	8.95%
北桃園 公共用水	5%	99.43%	98.45%
	8%	95.57%	89.72%
	10%	88.66%	77.00%
板新 公共用水	5%	15.40%	4.65%
	8%	4.68%	0.74%
	10%	2.88%	0.35%
農業用水	20%	11.14%	6.55%
	25%	7.40%	2.00%
	30%	4.40%	0.95%



第六章 石門水庫短期應變風險分析

6.1 石門水庫事件型雨量繁衍

6.1.1 降雨量與降雨延時之機率分佈

本研究探討高濁度事件所造成之短期缺水風險，故需產生事件型合成雨量以進行後續分析。本研究採用設計降雨概念配合拉丁超立方取樣法進行事件型雨量繁衍，並假設氣候變遷並不影響降雨延時之機率分佈型態及設計雨型型態。設計降雨主要由設計總降雨量與設計雨型兩部分所組成，總降雨量及設計雨型皆與降雨延時有關，故進行事件型雨量繁衍時，有兩個隨機變數(總降雨量與降雨延時)待定，欲以拉丁超立方取樣法進行合成，需先求得各隨機變數之機率分佈，其中降雨延時之機率分佈乃參考歷史颱風事件決定之，歷史颱風事件降雨延時統計如表 6.1.1-1 所示，降雨延時平均值為 2.131 天，標準偏差為 1.077 天，歷史颱風事件降雨延時組體圖如圖 6.1.1-1 所示，本研究降雨延時機率分布以常態分佈近似之，此外由於設計雨型屬於單場暴雨雨型，若降雨延時過長，則涵蓋數場暴雨，故設計雨型不適用長降雨延時，因此本研究僅分析一日、二日、三日及四日等不同延時，故當合成降雨延時不足一日者視為一日，合成降雨大於四日者視為四日，其餘合成降雨延時四捨五入為整數日。

表 6.1.1-1 石門水庫民國 89~97 年各颱風降雨延時統計表

民國	颱風	降雨延時(小時)	民國	颱風	降雨延時(小時)
89 年	啟德	55	93 年	納坦	72
	碧利斯	47		南瑪都	46
	巴比倫	48	94 年	海棠	74
	寶發	35		馬莎	55
	雅吉	25		珊瑚	27
	象神	67		泰利	34
90 年	西馬龍	36		卡努	20
	奇比	16		丹瑞	34
	尤特	41	龍王	23	
	桃芝	40	95 年	珍珠	51
	納莉	93		碧利斯	96
	利奇馬	141		凱米	57
	海燕	33		桑美	40
91 年	雷馬遜	60		寶發	59
	娜克莉	48	帕布	39	
	辛樂克	68	梧提	31	
92 年	蘇迪勒	26	96 年	聖帕	91
	莫拉克	17		韋帕	59
	梵高	30		柯羅莎	84
	杜鵑	38		米塔	48
93 年	敏督利	52	97 年	卡玫基	33
	蘭寧	38		鳳凰	60
	艾利	63		辛樂克	122
	海馬	53		哈格比	19
	米雷	40		薔蜜	73
降雨延時之平均值： 2.131 日(51.14 小時)，標準偏差： 1.077 日(25.84 小時)					

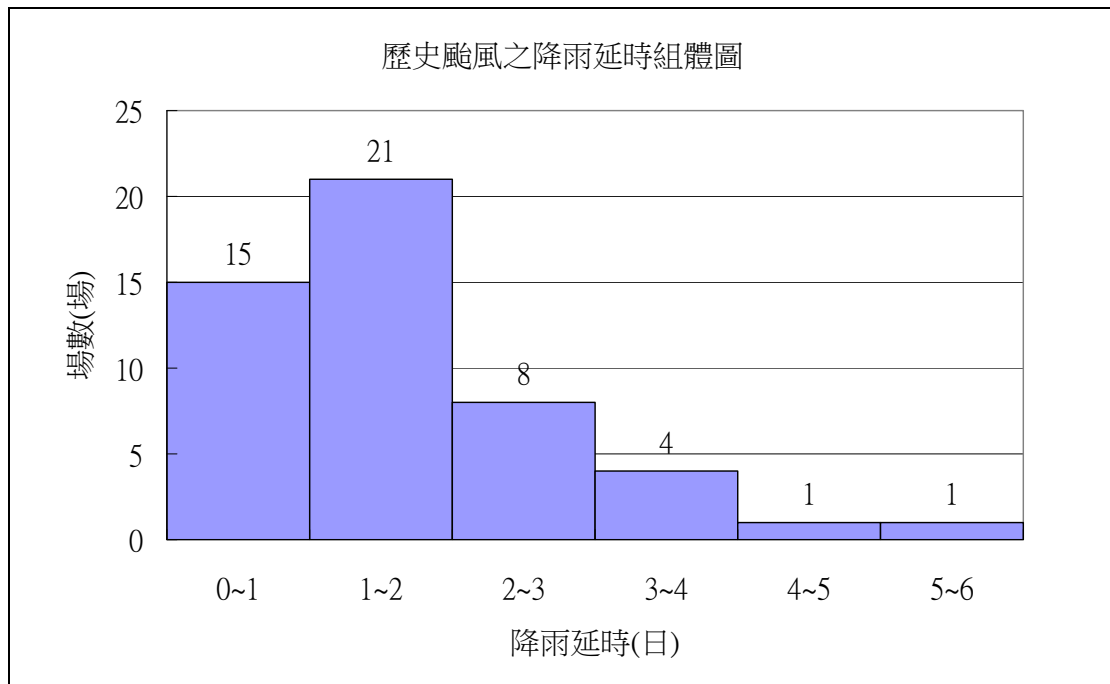


圖 6.1.1-1 石門水庫民國 89~97 年颱風降雨延時組體圖

總降雨量之機率分佈根據水文頻率分析選定，然總降雨量機率分佈隨降雨延時而異，根據歷史颱風事件顯示，暴雨發生延時介於 10~141 小時，本研究設計雨型為單場暴雨雨型，若降雨延時過長，則涵蓋數場暴雨，故設計雨型不適用長降雨延時，因此本研究僅分析一日、二日、三日及四日等不同延時之降雨量機率分佈型態。

本研究以條件氣候繁衍降尺度模式產生 100 年歷史合成雨量與 100 年 GCM 合成雨量，作為頻率分析之資料，並以年最大值序列法選取不同降雨延時之暴雨，再分別以常態(Normal)、對數常態(Log Normal)、皮爾遜 III 型(Pearson III)、對數皮爾遜 III 型(Log Pearson III)及極端值 I 型(Extreme I)等五種分佈探討石門水庫不同降雨延時之暴雨量機率分佈，本研究以誤差平方和 (Error Sum of Squares, SSE) 及標準誤差 (Standard Error, SE) 作為機率分佈判斷標準，當 SSE 或 SE 數值越小，表示該機率分佈模擬值與理論值越趨接近，故 SSE

或 SE 數值最小者即為最佳機率分佈，其中雨量理論值乃以韋伯點繪法估算。歷史合成雨量最佳機率分佈結果如圖 6.1.1-2~6.1.1-5，結果顯示，最大一日及二日暴雨以皮爾遜 III 型分佈為最佳統計分佈，最大三日及四日暴雨以對數皮爾遜 III 型分佈為最佳統計分佈，。GCM 合成雨量最佳機率分佈結果如圖 6.1.1-6~6.1.1-9，結果顯示，最大一日、二日、三日及四日暴雨皆以皮爾遜 III 型分佈為最佳統計分佈。



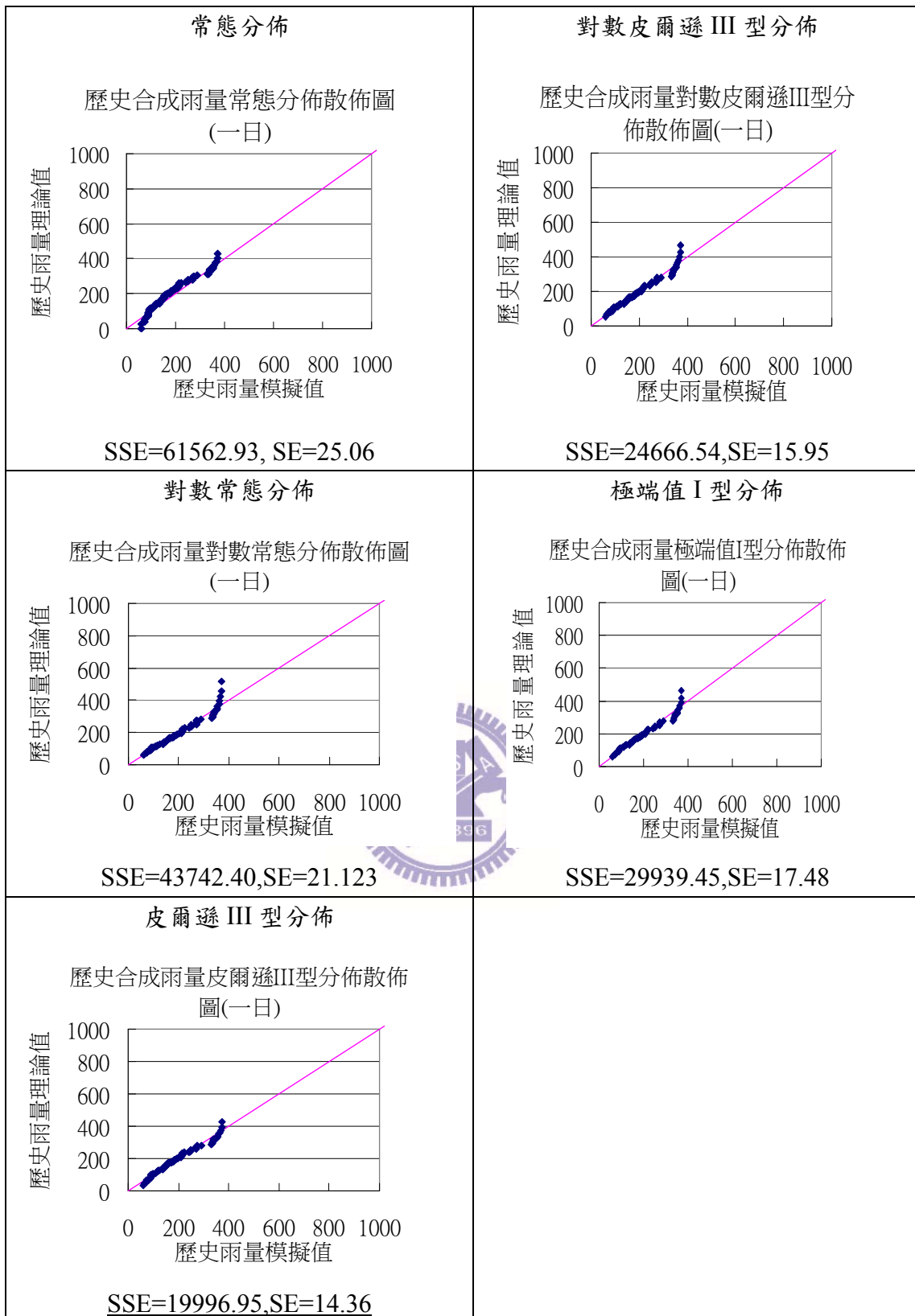


圖 6.1.1-2 歷史合成雨量一日暴雨檢定結果

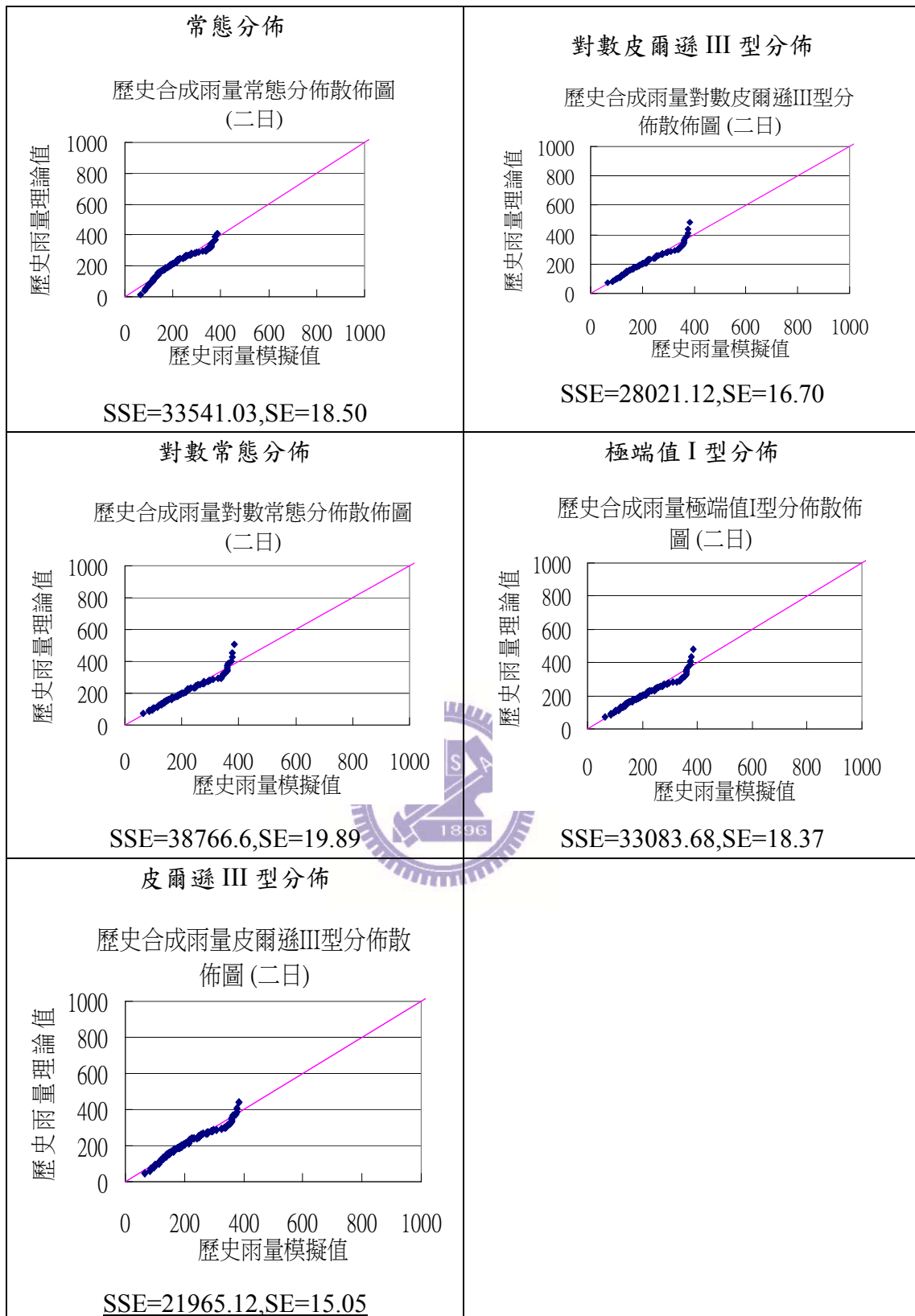


圖 6.1.1-3 歷史合成雨量二日暴雨檢定結果

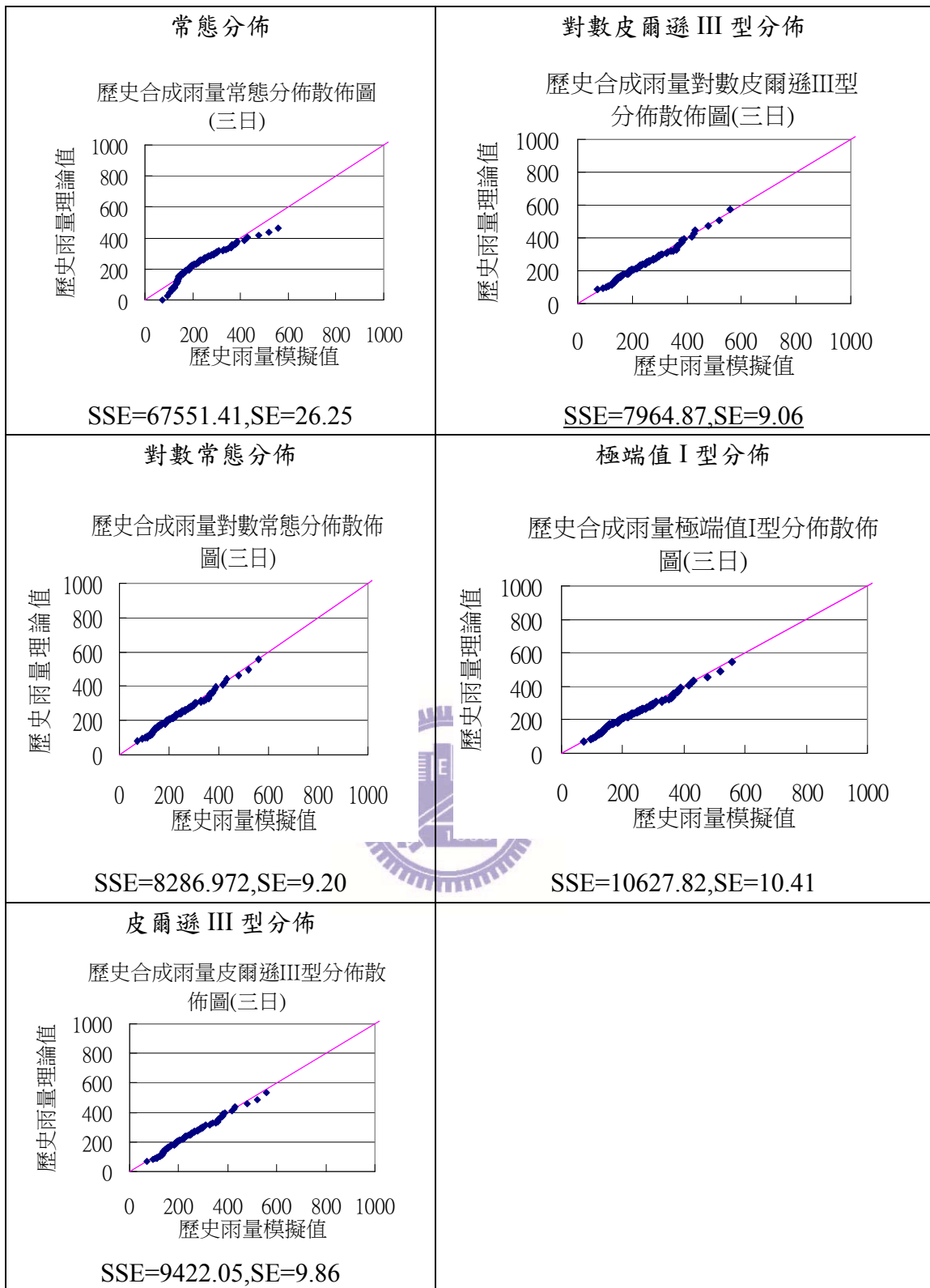


圖 6.1.1-4 歷史合成雨量三日暴雨檢定結果

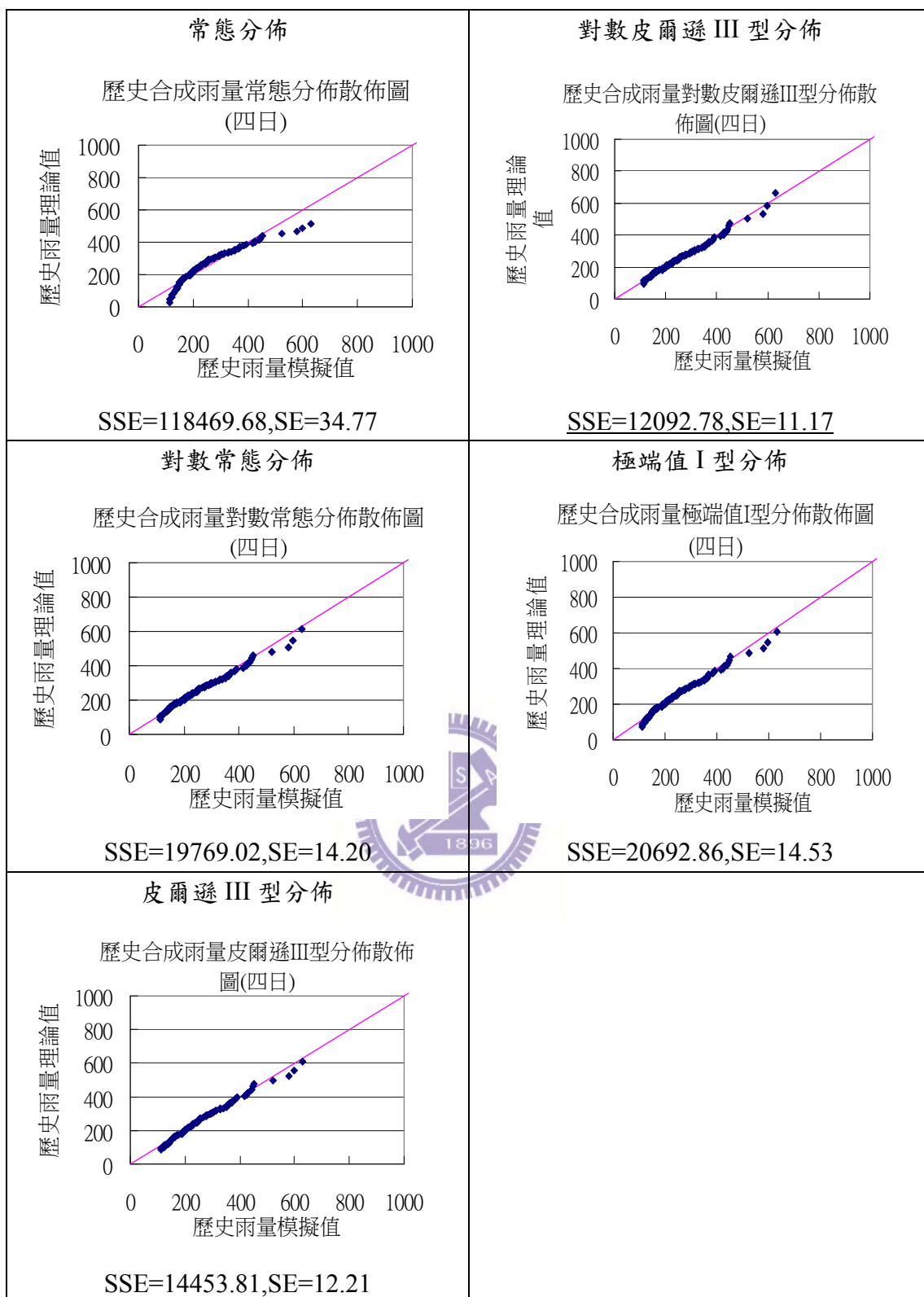


圖 6.1.1-5 歷史合成雨量四日暴雨檢定結果

常態分佈	對數皮爾遜 III 型分佈
------	---------------

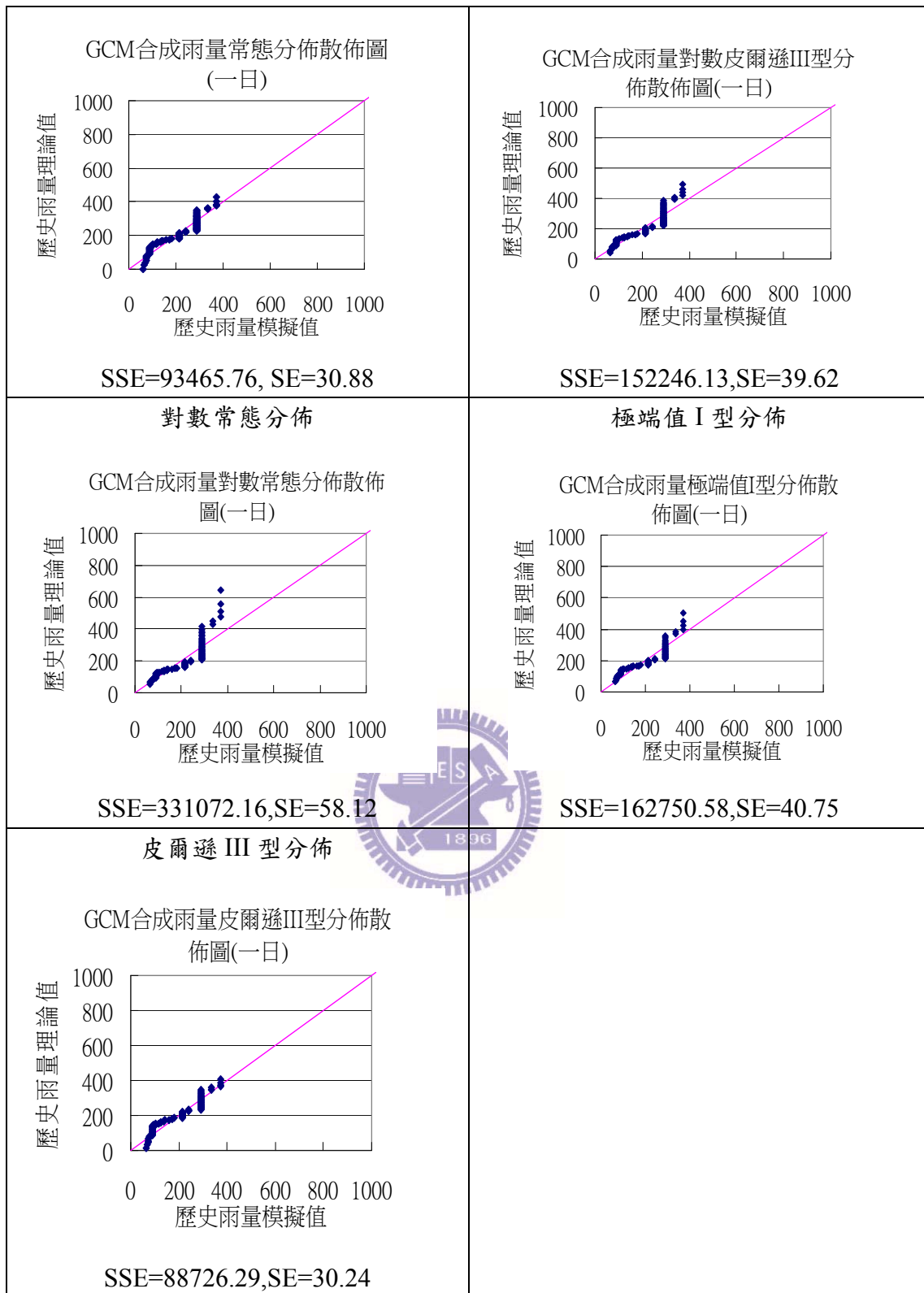


圖 6.1.1-6 GCM 合成雨量一日暴雨檢定結果

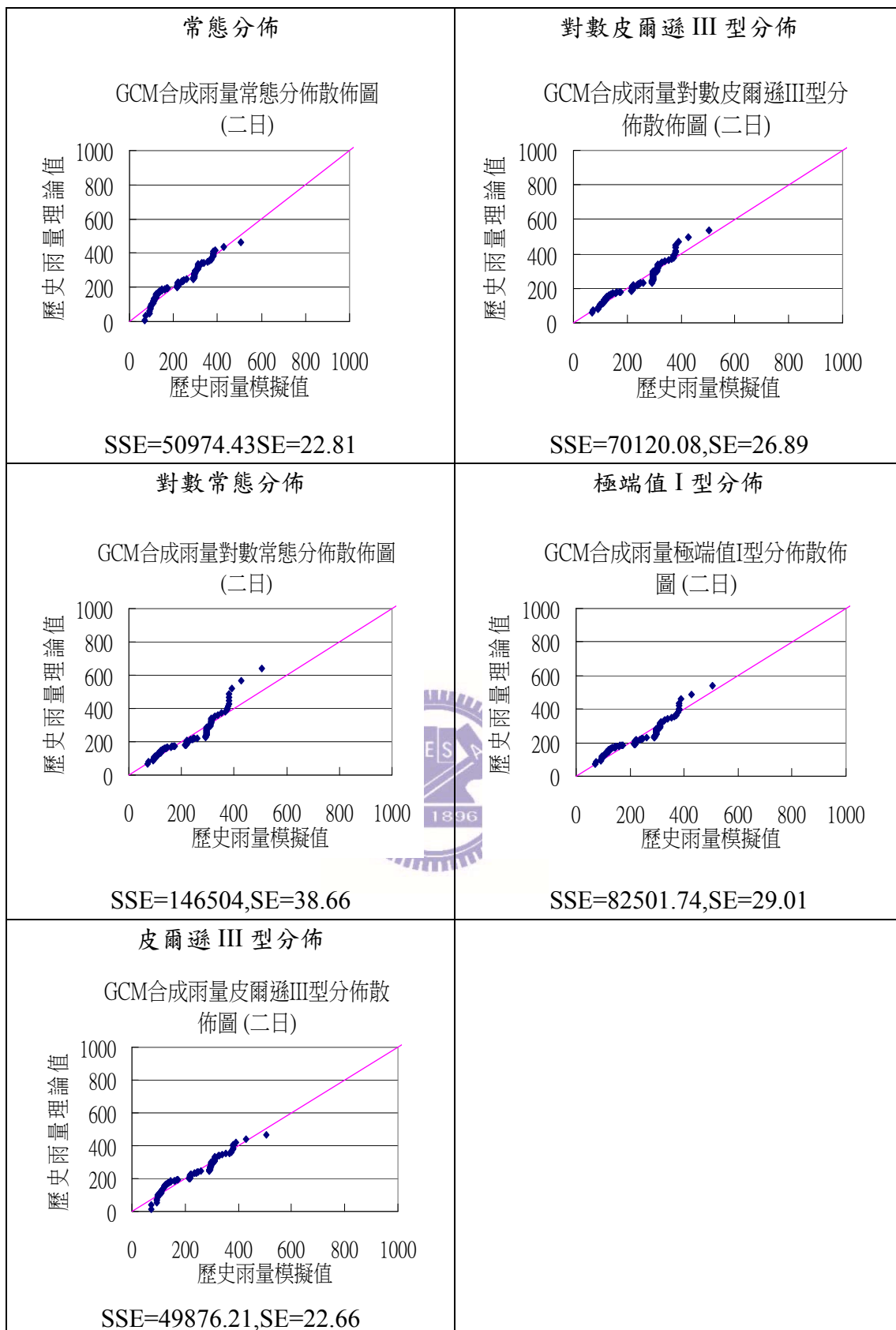


圖 6.1.1-7 GCM 合成雨量二日暴雨檢定結果

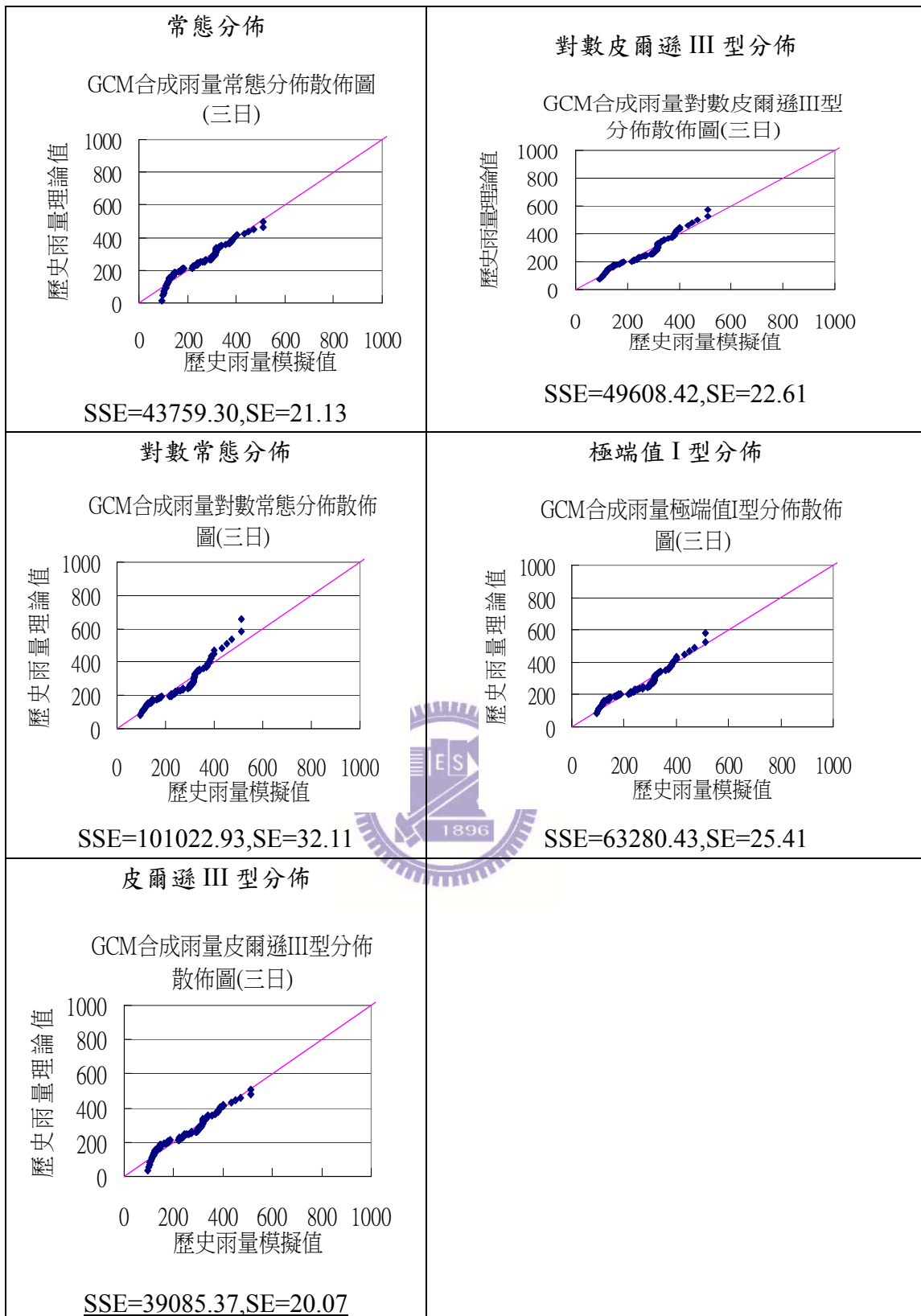


圖 6.1.1-8 GCM 合成雨量三日暴雨檢定結果

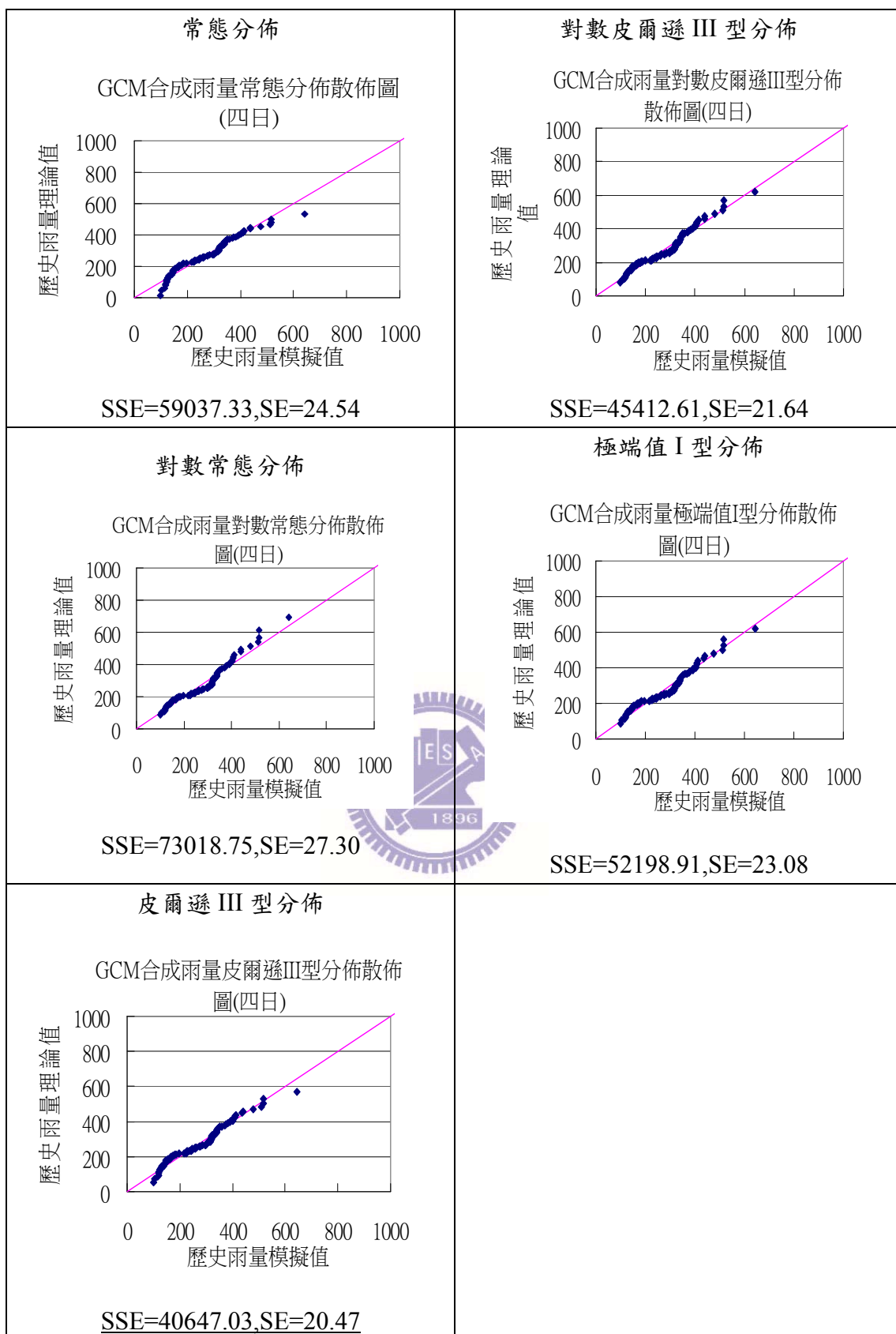


圖 6.1.1-9 GCM 合成雨量四日暴雨檢定結果

6.1.2 石門水庫設計雨型

本研究假設氣候變遷不影響設計雨型型態，故以 1975 ~ 2008 歷史時雨量，利用暴雨資料分析法估算石門水庫設計雨型，以年最大值選取法選取不同延時之暴雨進行分析，不同延時之設計雨型如圖 6.1.2-1~圖 6.1.2~4，結果顯示最大一日、二日及三日暴雨設計雨型尖峰雨量發生在中央略為右偏，最大四日暴雨設計雨型尖峰雨量發生在中央略為左偏。

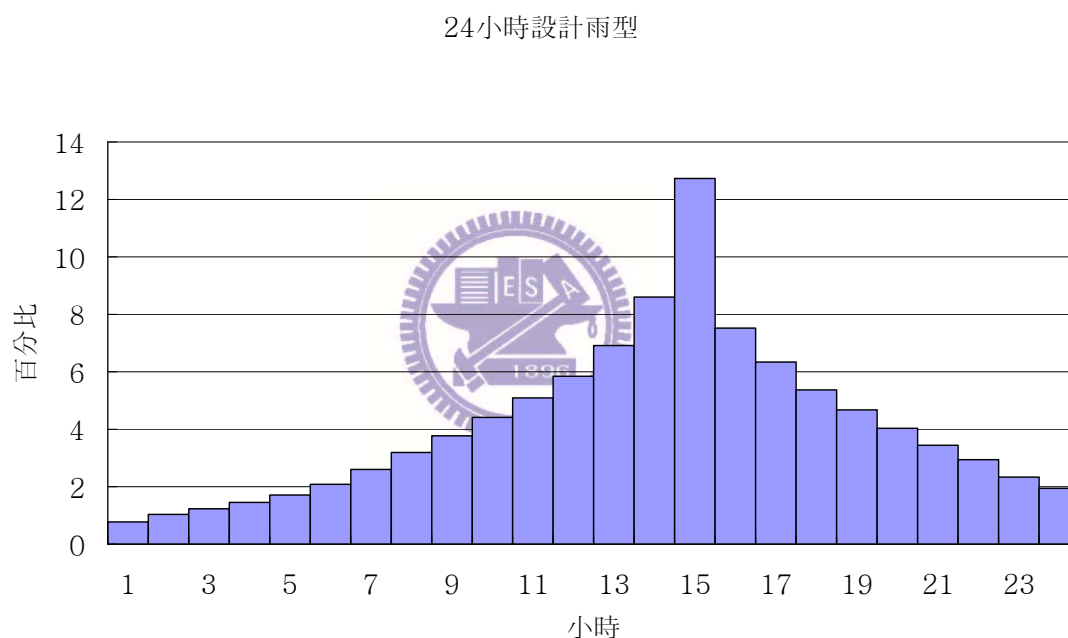


圖 6.1.2-1 最大一日暴雨設計雨型

48小時設計雨型

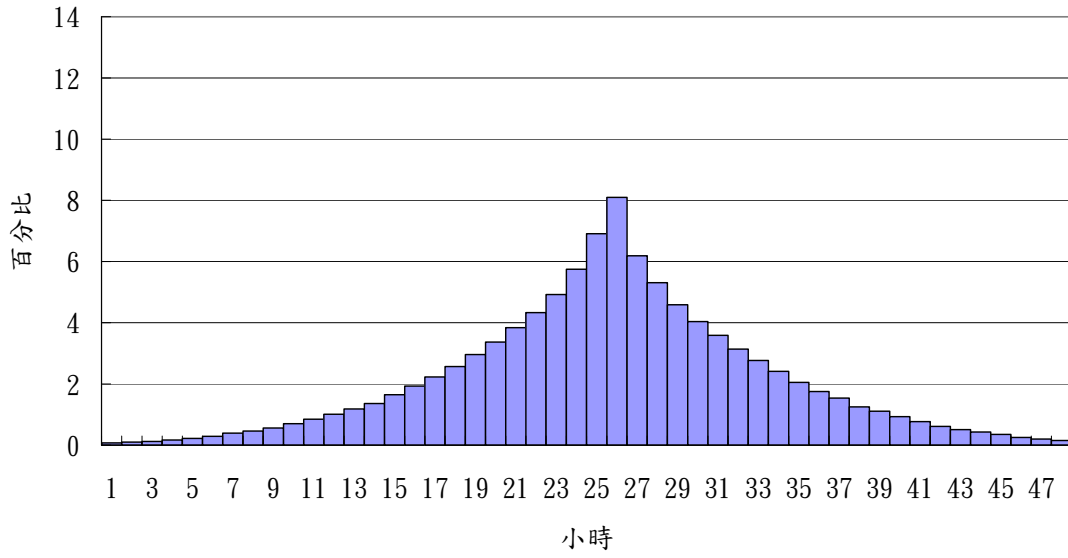


圖 6.1.2-2 最大二日暴雨設計雨型

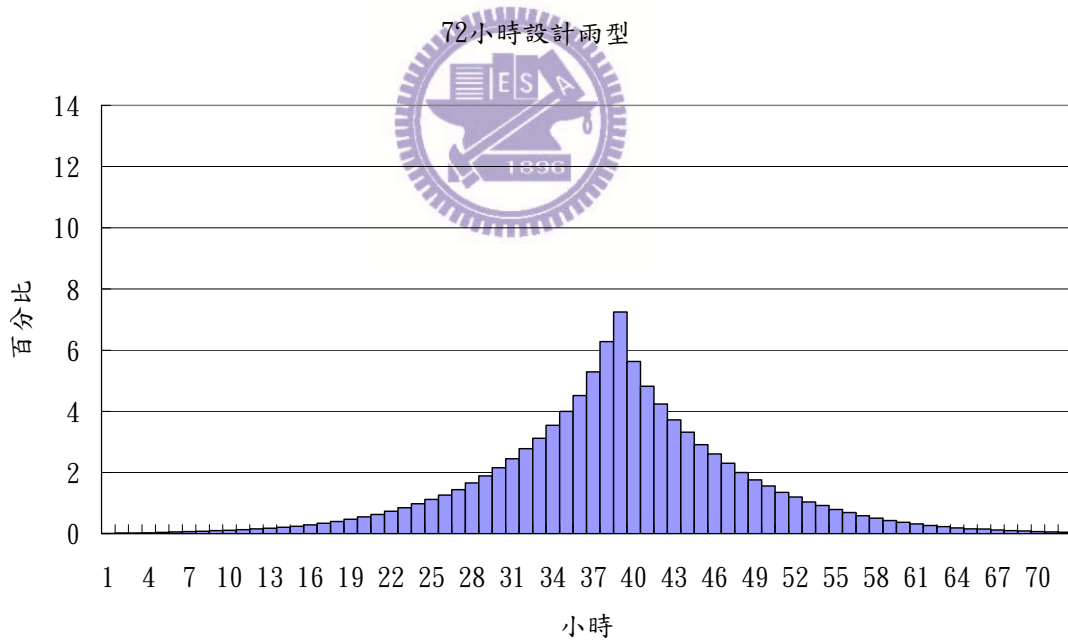


圖 6.1.2-3 最大三日暴雨設計雨型

96小時設計雨型

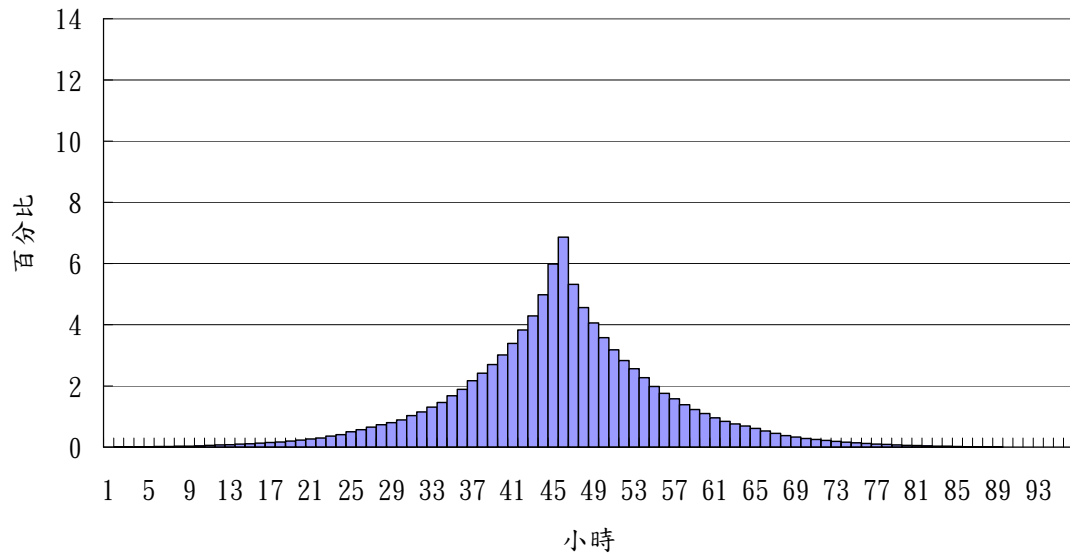


圖 6.1.2-4 最大四日暴雨設計雨型



6.1.3 石門水庫事件型雨量繁衍

本研究以拉丁超立方取樣法合成事件型雨量，將總降雨量與降雨延時依其機率分佈劃分為 100 組，使各組被選取之機率為 1/100，利用亂數決定各組區間內之選取值，然後再將降雨量與降雨延時之各組選取值進行隨機配對，以進行事件型雨量繁衍。惟本研究降雨延時採用日為單位，原選取之降雨延時為小時單位，故需四捨五入為日單位，本研究將繁衍後降雨延時與總降雨量以降雨強度呈現，其組體圖如 6.1.3-1 所示，結果顯示氣候變遷後高降雨強度之發生機率有增加的趨勢。

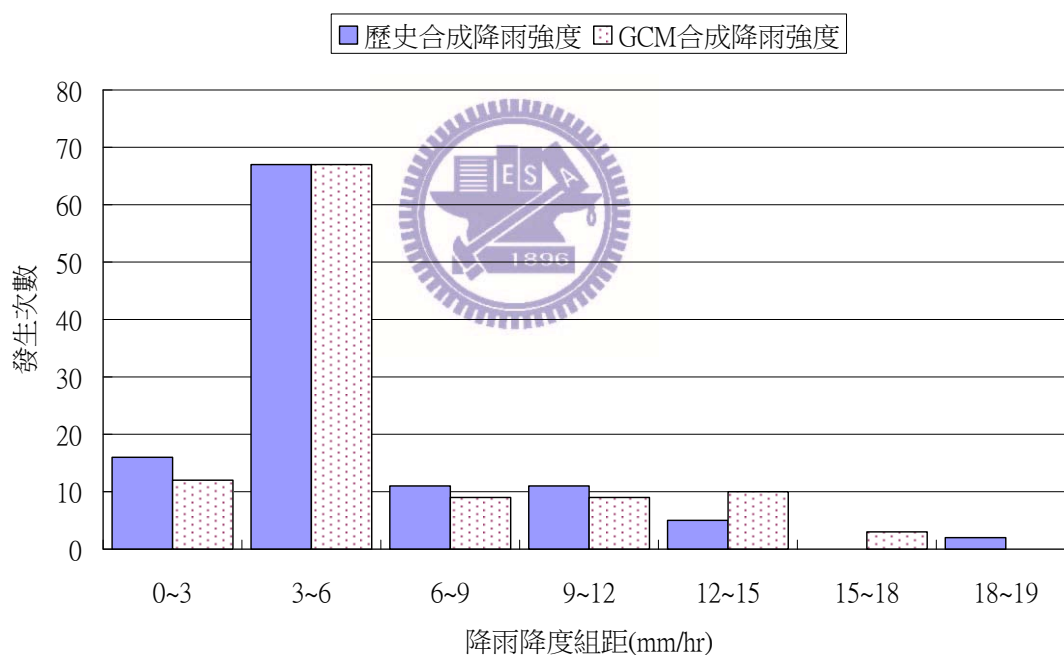


圖 6.1.3-1 事件型降雨強度組體圖

6.2 石門水庫事件型降雨逕流分析

本研究以三角型單位歷線法針對多組石門水庫事件型雨量進行逕流量推估，其中集流時間採用美國加州公路及公共工程局公式進行推估，其參數設定為石門水庫集水區面積 763.4 平方公里，集水區主要流路長度 90 公里，集水區高程差 3300 公尺(集水區高程圖詳見 6.2-1)，入滲係數設定為 2mm/hr，另外亦將河川基流量納入考量，河川基流量乃統計多場颱風事件降雨前之河川流量，其平均值為 34.4 cms。事件型合成流量之尖峰流量組體圖如圖 6.2-2，結果顯示氣候變遷後高尖峰流量之發生次數有增加的趨勢。

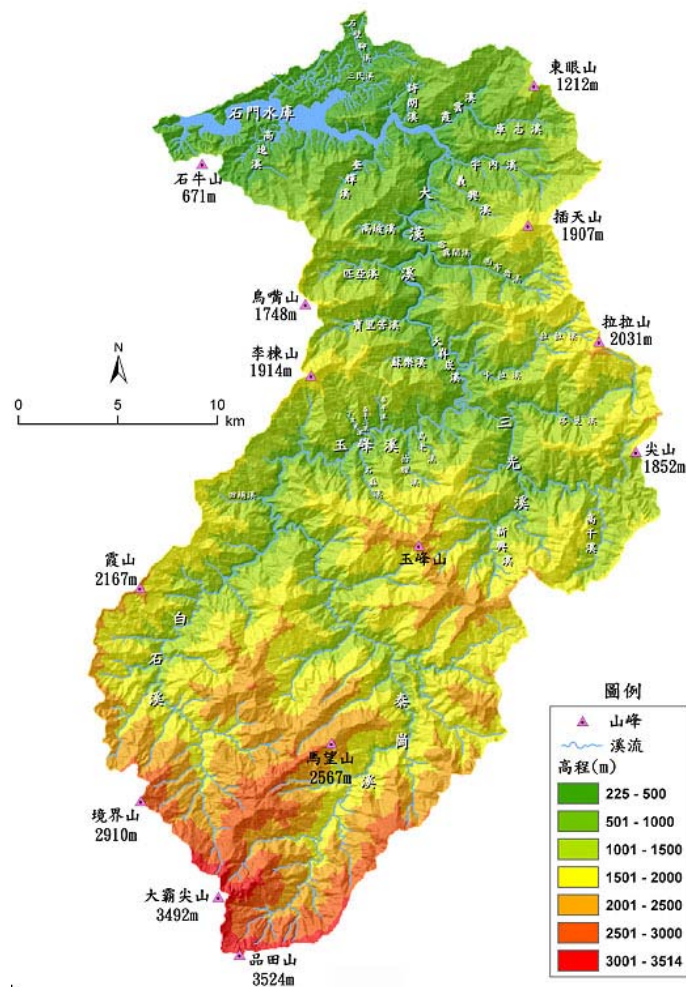


圖 6.2-1 石門水庫集水區高程圖

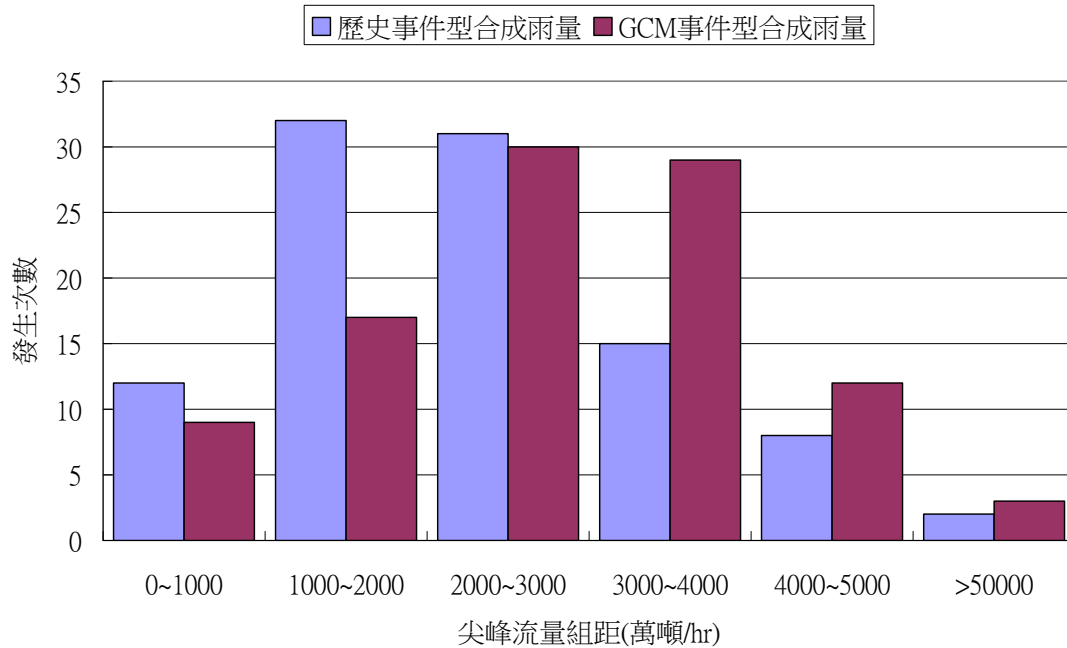


圖 6.2-2 事件型尖峰流量組體圖

6.3 石門水庫濁度預測模式建立

本研究以單位特性歷線法進行石門水庫取水口濁度預測，由於預測後濁度需配合洪水演算進行放水，因此當下時刻 t 之水庫放水量由水庫取水口濁度與洪水演算決定之，故本研究濁度預測乃以 $t-1$ 時刻水庫入流量和 $t-1$ 時刻水庫放流量作為預測因子。此外，本研究主要分析石門水庫上層取水口濁度，故分析時所採用的颱風資料乃依據石門水庫壩頂緊急抽水工程完工後(94 年)之取水濁度，由於濁度資料乃經採樣後於實驗室分析所得，若採樣濁度過高，需加水稀釋後分析，因此原始濁度資料可能存有實驗之人為誤差，且部分颱風場次濁度資料不甚完整或者濁度過低，因此本研究僅採用韋帕、柯羅莎及辛樂克三場颱風並刪除不合理之奇異點進行分析。

本研究假設濁度單位特性歷線為三角形歷線，故每個濁度單位特性歷線有三個參數待定，入流量和出流量濁度單位特性歷線共有六

個參數待定，即入流量尖峰濁度，入流量到達尖峰濁度時間、入流量濁度歷線基期、出流量尖峰濁度，出流量到達尖峰濁度時間及出流量濁度歷線基期，本研究以遺傳演算法進行參數優選，優選目標函數為觀測濁度與預測濁度誤差平方和最小，初始群集設為 2500 條染色體，突變率為 0.01，交配率為 0.6，保留菁英數目為 4 條，收斂條件為至少疊代 200 代，且連續 20 次最佳值不變。

單位特性歷線法模擬結果如圖 6.3-1~6.3-3，本研究以相關係數與均方根誤差(RMSE)作為評估指標(結果詳見表 6.3-1)；結果顯示各場颱風之相關係數皆在 0.87 以上，顯示單位歷線法有不錯之預測精度，若以相關係數排序，以柯羅莎預測結果最佳，辛樂克次之，韋帕最後；若以均方根誤差排序，以韋帕預測結果最佳，柯羅莎次之，辛樂克最後。優選後之入流量與出流量單位濁度特性歷線如圖 6.3-4 所示。

本研究另以類神經進行濁度連續預測，以作為單位特性歷線法之對照比較。類神經輸入層變數除考量前一時刻水庫入、出流量(I_{t-1} 及 O_{t-1})外，亦將前時刻水庫取水口濁度納入考量，惟濁度資料為每兩小時一筆數據，故本研究以前一時刻水庫入、出流量(I_{t-1} 及 O_{t-1})及前二時刻水庫取水口濁度(C_{t-2})預測當下時刻濁度(C_t)。

本研究隱藏層設為 1 層，隱藏層節點數為 3，輸入層到隱藏層之轉換函數為雙彎曲正切函數(tansig)、隱藏層到輸出層之轉換函數為線性函數(purelin)，收斂條件為正規化後之誤差平均和小於 0.0001 或最大疊代次數 2000 代。

為測試類神經模式的強健性(robust)，本研究進行十次訓練，並統計每次預測結果之評估指標，結果整理如表 6.3-2 所示。結果顯示

類神經模式對於韋帕颱風濁度的預測較差(相關係數最高僅 0.66)，柯羅莎和辛樂克颱風則有不錯的預測精度(相關係數最高達 0.955 和 0.947)，但十次試驗中，每次預測結果差異頗大，柯羅莎颱風相關係數介於 0.685~0.955，辛樂克颱風相關係數介於 0.691~0.943，韋帕颱風相關係數介於 0.273~0.66，顯示類神經預測濁度非線性關係時，易落入局部最佳解，顯示其強健性仍不佳，故後續高濁度風險分析採用本研究提出之單位特性歷線法之濁度預測結果。

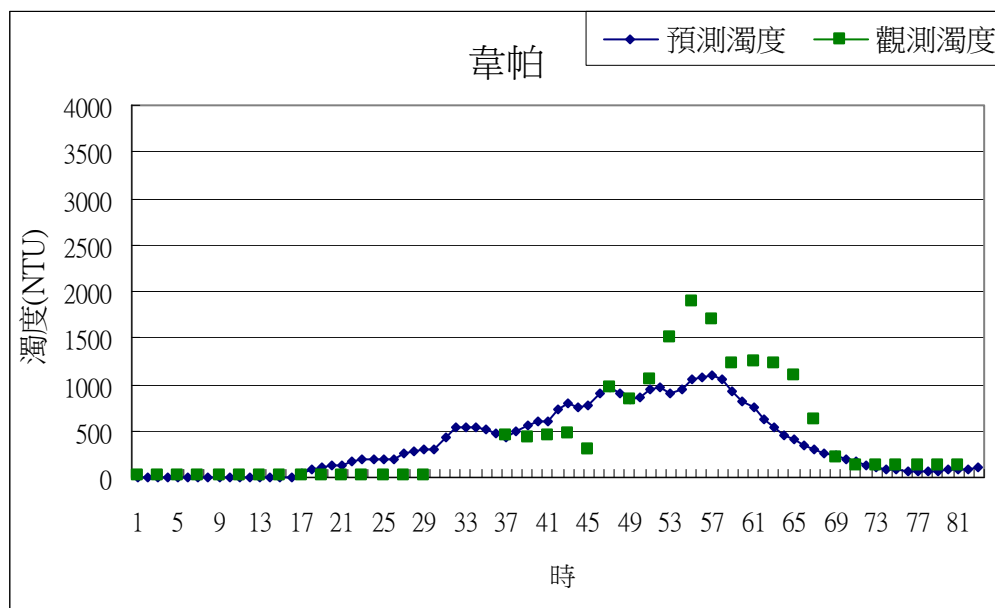


圖 6.3-1 韋帕颱風單位特性歷線預測值與觀測濁度比較

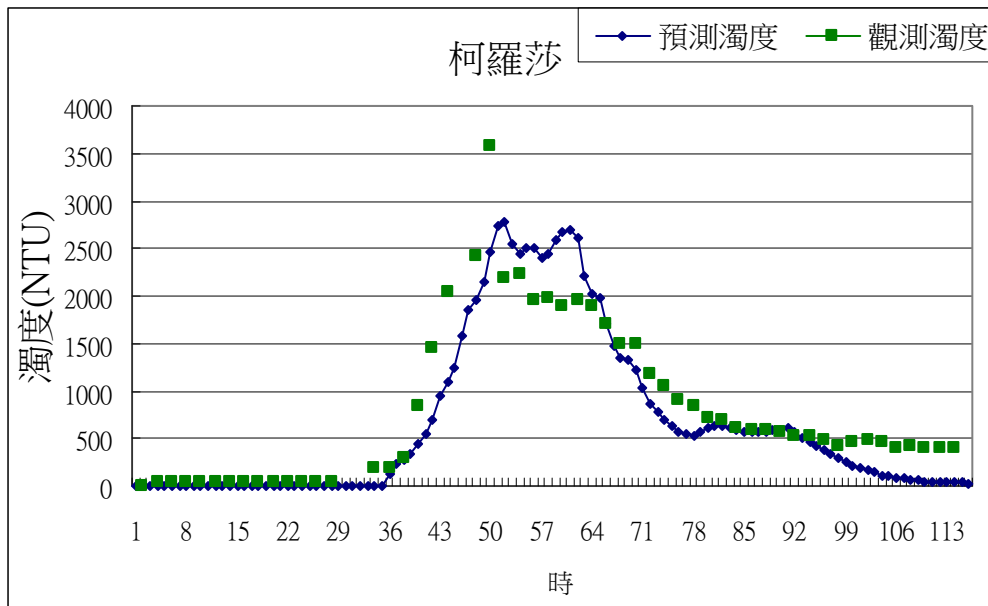


圖 6.3-2 柯羅莎颱風單位特性歷線預測值與觀測濁度比較



圖 6.3-3 辛樂克颱風單位特性歷線預測值與觀測濁度比較

表 6.3-1 各颱風事件單位特性歷線預測值之評估指標

颱風事件 \ 指標值	相關係數	RMSE
韋帕	0.870	301
柯羅莎	0.925	348
辛樂克	0.883	359

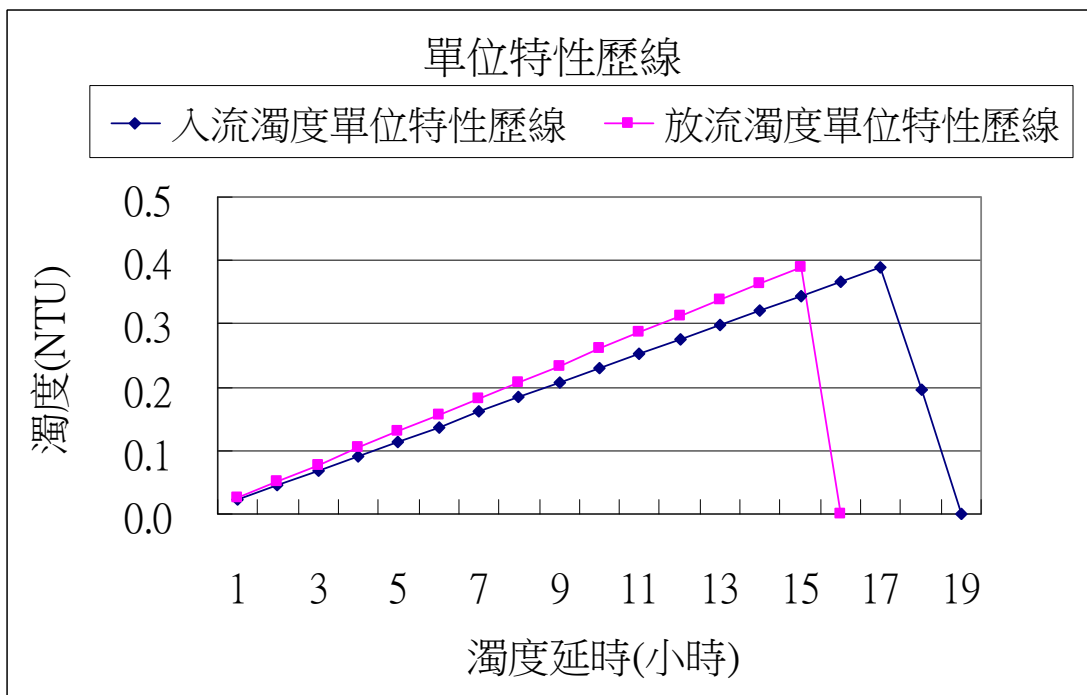


圖 6.3-4 入流與出流濁度單位特性歷線

表 6.3-2 各颱風事件類神經模式預測值之評估指標

指標值 訓練次數	韋帕		柯羅莎		辛樂克	
	觀測與預測濁 度之相關係數	RMSE	觀測與預測濁 度之相關係數	RMSE	觀測與預測濁 度之相關係數	RMSE
test1	0.555	714	0.874	418	0.878	545
test2	0.592	540	0.685	650	0.789	577
test3	0.446	529	0.801	570	0.927	258
test4	0.273	779	0.955	256	0.691	716
test5	0.660	493	0.765	567	0.909	363
test6	0.461	648	0.834	453	0.917	437
test7	0.332	649	0.767	555	0.708	726
test8	0.436	806	0.865	433	0.914	680
test9	0.486	548	0.810	496	0.947	357
test10	0.537	683	0.809	484	0.893	467



6.4 石門水庫高濁度調配模式建立

由於鳶山堰及三峽堰之濁度資料不足以進行高濁度供水分析，故本研究高濁度分析範圍僅考量石門水庫供應南、北桃園之供水情況。通常高濁度多發生在汛期，此時水庫的蓄水量就量而言應足以供應下游需求量，惟因高濁度影響下游淨水場之處理能力，進而造成缺水發生，因此此時水資源調配問題乃控制於淨水場的處理能力，而非水庫的蓄水量變化，故可將高濁度調配模式簡化至僅考量淨水場之進出流量，再配合原有之管線限制進行供水量模擬。此外水庫於汛期時進行洪水操作，而此放水量將影響下一時刻之水庫濁度，因此高濁度調配模式需納入石門水庫洪水操作。

本研究以波爾斯法進行水庫洪水演算，其基於質量守恆方程式

$$\frac{1}{2}(I_t + I_{t+\Delta t}) + \left(\frac{S_t}{\Delta t} - \frac{O_t}{2}\right) = \left(\frac{S_{t+\Delta t}}{\Delta t} + \frac{O_{t+\Delta t}}{2}\right)$$

其中 I_t 、 $I_{t+\Delta t}$ 、 S_t 及 O_t 為已知， $O_{t+\Delta t}$ 及 $S_{t+\Delta t}$ 可根據水庫性能曲線

$\left(\frac{S_{t+\Delta t}}{\Delta t} + \frac{O_{t+\Delta t}}{2}\right)$ 與放水量 $O_{t+\Delta t}$ 之關係曲線)決定之，石門水庫性能曲線如圖 6.4-1 所示。經洪水操作演算後，可求得石門水庫洪水操作下暴雨事件最大排洪量組體圖(如圖 6.4-2 所示)，結果顯示，無論氣候變遷與否，事件型合成雨量之最大排洪量大部分落於 2000~3000cms，但氣候變遷後，發生大於 3000cms 之排洪量事件次數明顯增加。各場暴雨事件所造成的缺水風險分析請詳見 6.5 節。

表 6.4-1 桃園用水區主要淨水場現況處理能力與濁度之關係

單位：CMD

處理能力濁度(NTU)	大湳淨水場	平鎮淨水場	石門淨水場	龍潭淨水場	備註
NTU ≤ 1000	300,000	600,000	120,000	55,000	正常供水
1000 < NTU ≤ 2000	250,000	420,000	96,000	40,000	減量供水
2000 < NTU ≤ 5000	150,000	360,000	90,000	37,500	減量供水
5000 < NTU ≤ 10000	70,000	240,000	60,000	25,000	減量供水
10000 < NTU	0	0	0	0	停止供水

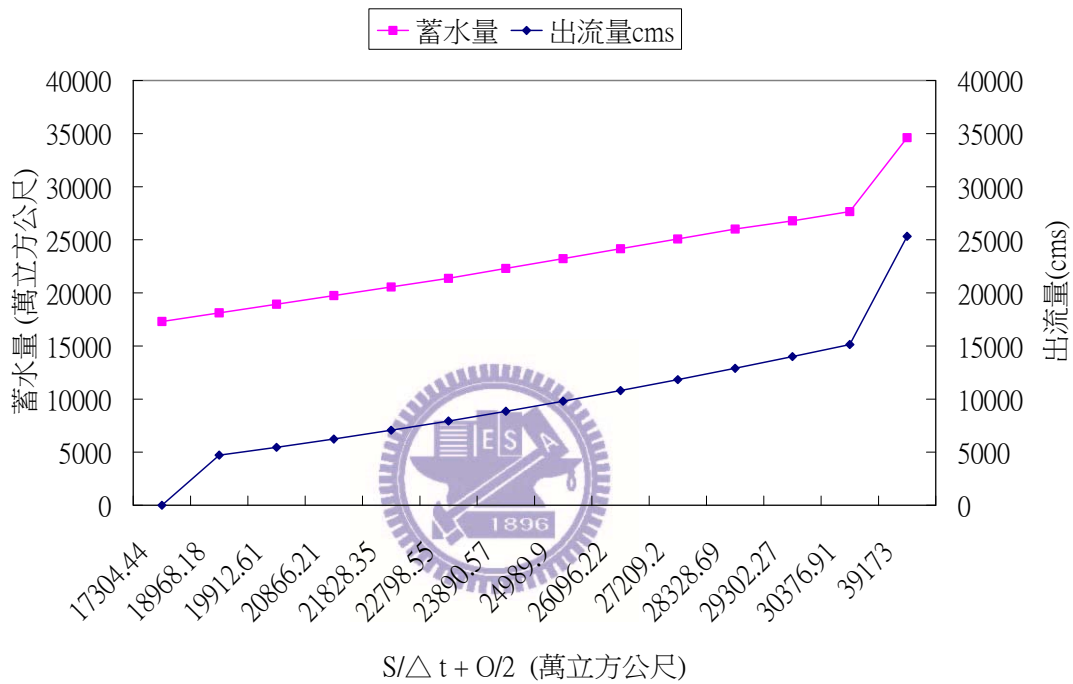


圖 6.4-1 石門水庫性能曲線

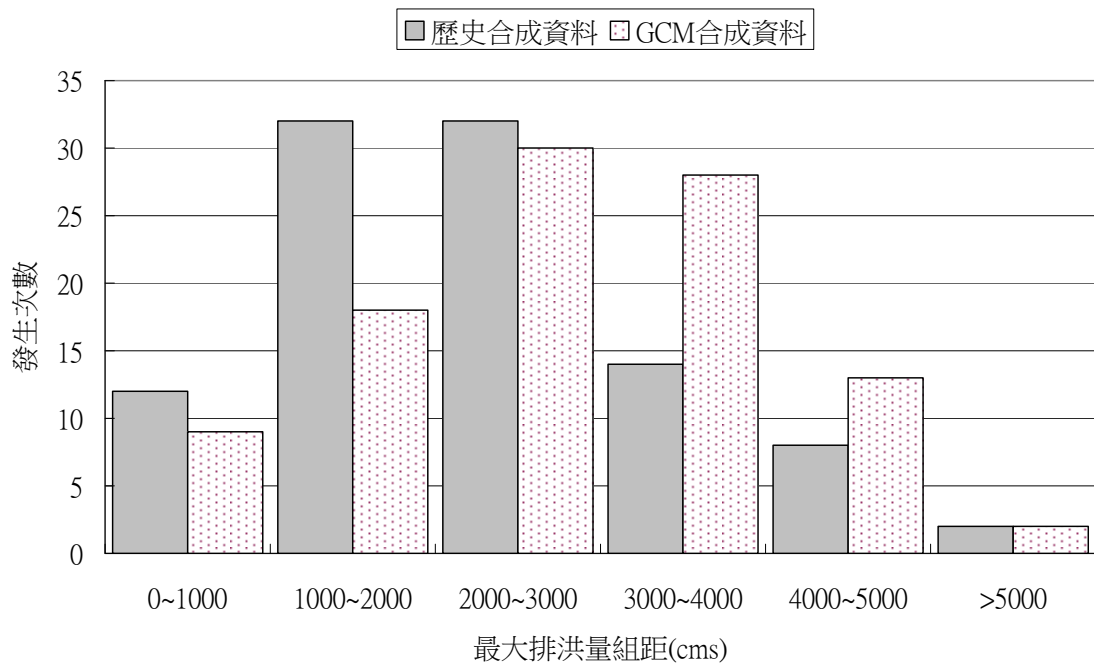


圖 6.4-2 石門水庫洪水操作下暴雨事件最大排洪量組體圖



6.5 石門水庫短期應變風險分析

本研究石門水庫短期應變風險分析主要探討在高濁度事件下，各暴雨事件之缺水率變化，由於農業用水不受高濁度影響，故本研究僅針對公共用水進行高濁度風險分析，高濁度缺水風險可定義為事件缺水率大於使用者缺水忍受度的機率，即

$$Risk = \Pr(HSH > SH_R)$$

其中 Risk 代表風險，HSH 為高濁度事件缺水率，SHR 為使用者缺水忍受度。亦即高濁度缺水風險可表示 HSD 超越 SHR 機率。

由於鳶山堰和三峽堰僅有日濁度資料，而本研究所需之精度為小時，故鳶山堰和三峽堰之供水不納入考量。因此本研究以庫區供水所到達之淨水廠處理能力(包含石門、龍潭、平鎮及大湳淨水廠)總和作為系統之供水需求量，經高濁度調配模式(含洪水操作)模擬後，求得各事件高濁度下之缺水率，並以韋伯法繪製事件缺水率超越機率曲線，此超越機率曲線即為缺水風險曲線，透過缺水風險曲線可獲得不同缺水忍受度下之缺水風險。

歷史合成事件資料與 GCM 合成事件資料模擬之缺水風險曲線如圖 6.5-1 所示，結果顯示歷史合成事件下，發生高濁度缺水事件(即事件缺水率>0)的風險為 22%，氣候變遷後(GCM 合成事件)發生高濁度缺水事件的風險提高至 36%，若假設公共用水缺水忍受度為 5%，歷史合成事件之缺水風險 8%，氣候變遷後缺水風險提升到 11%，顯示氣候變遷後，發生高濁度缺水事件的頻率明顯增加，因此有必要提出適當之調適策略以改善石門水庫高濁度缺水風險。

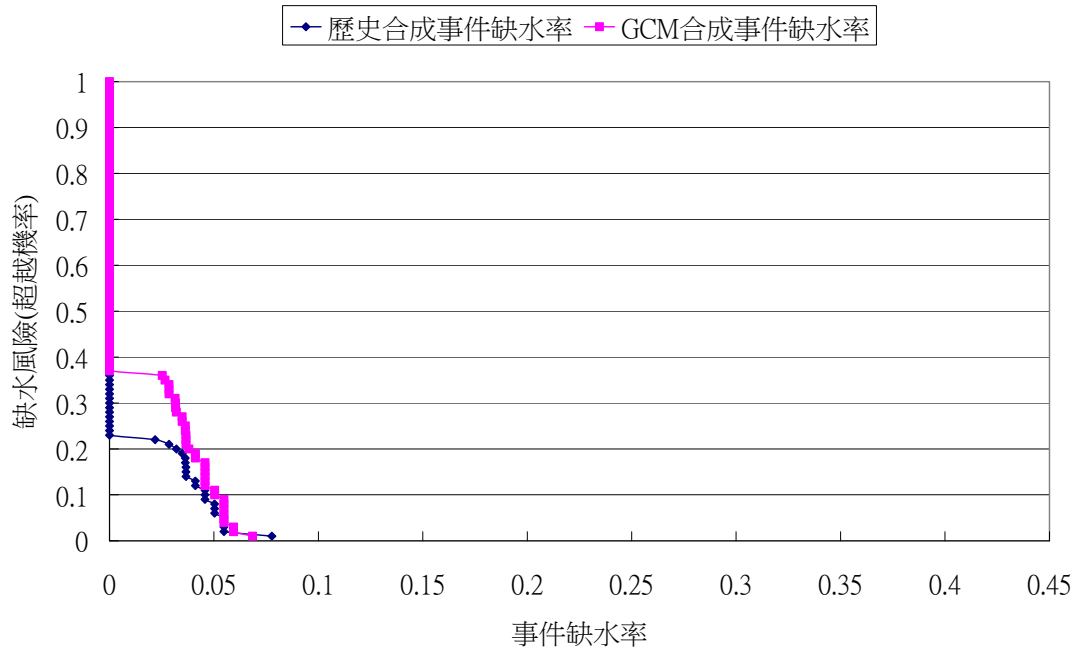
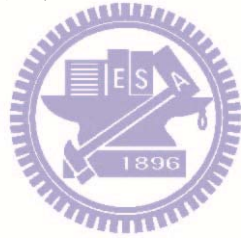


圖 6.5-1 高濁度短期應變缺水風險曲線



第七章 石門水庫長期調配與短期應變綜合風險分析

7.1 石門水庫現況綜合風險分析

石門水庫整年度之缺水風險可利用第四章枯水期風險分析結果與第五章高濁度風險分析結果進行綜合風險分析。其基本假設有三：

- 一、由於石門水庫年運轉次數偏高(約 4~5 次)，因此颱風帶來的雨量最多影響供水不到三個月，因此本研究假設高濁度事件與枯水期事件為獨立事件。
- 二、本研究高濁度風險分析僅分析石門水庫庫區供水(不含鳶山堰和三峽堰)，故假設高濁度僅影響南、北桃園供水，板新地區因有三峽堰和翡翠水庫供應，故假設供水不受高濁度影響，此外，農業用水亦不受高濁度影響。
- 三、高濁度風險分析為探討每場暴雨可能造成的缺水風險，因此需配合每年暴雨侵台次數以計算每年發生高濁度事件之機率，本研究根據中央氣象局百年侵台颱風次數統計(詳見圖 7.1-1)，以每年發生四次颱風進行分析。

因此每年至少發生一次缺水高於缺水忍受度之高濁度事件風險 (PTY) 為：

$$PTY=1-(1-PT)^4 \dots\dots\dots(7-1 \text{ 式})$$

其中 PT 為每場暴雨發生缺水高於缺水忍受度之風險。

由於高濁度缺水事件與枯水期缺水事件互為獨立事件，故整年發生缺水大於缺水忍受度之風險 PY 為：

$$PY=1-(1-PTY)*(1-PD) \quad \dots\dots\dots(7-2 \text{ 式})$$

其中 PD 為枯水期缺水高於缺水忍受度之風險，

若假設缺水忍受度為 5%，根據 5.4 節和 5.5 節可得知各供水區域枯水缺水風險 PT 和每場暴雨高濁度缺水風險 PD，由 7-1 式和 7-2 式可計算未考量氣候變遷與考量氣候變遷下整年度發生缺水大於缺水忍受度之風險 PY，其結果整理如表 7.1-1 所示。結果顯示，氣候變遷後整年度之缺水風險有降低的趨勢，但不論氣候變遷與否，整年度發生缺水大於缺水忍受度之風險仍高，有必要提出適當之調適策略以改善石門水庫高濁度缺水風險

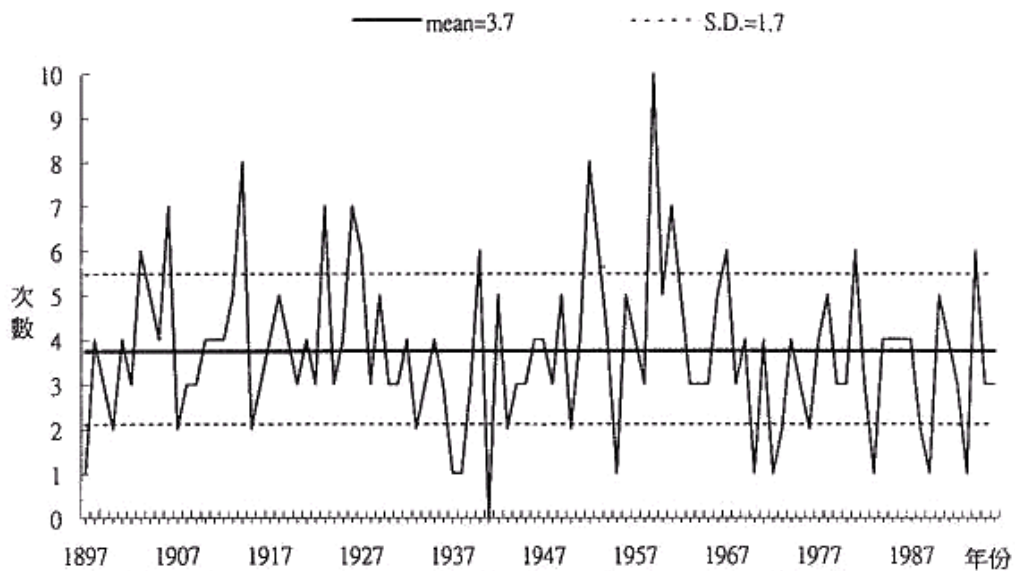


圖 5 過去一百年來(1897-1996)每年侵台颱風次數、平均值及其標準偏差(斷線)分布圖。

圖 7.1-1 近百年(1897~1996)颱風侵台次數統計

資料來源：中央氣象局

表 7.1-1 石門水庫現況整年度綜合風險分析結果表

		南桃園公共用水	北桃園公共用水	板新地區公共用水
未 考 量 候 變 遷	枯水缺水風險(PD)	95.89%	99.43%	15.40%
	高濁度缺水風險(PD)	8.00%	8.00%	0.00%
	每年至少發生一次缺水高於缺水忍受度之高濁度事件風險(PTY)	28.36%	28.36%	0.00%
	整年發生缺水大於缺水忍受度之風險(PY)	97.06%	99.59%	15.40%
考 量 候 變 遷	枯水缺水風險(PD)	87.11%	98.45%	4.65%
	高濁度缺水風險(PD)	11%	11%	0.00%
	每年至少發生一次缺水高於缺水忍受度之高濁度事件風險(PTY)	37.26%	37.26%	0.00%
	整年發生缺水大於缺水忍受度之風險(PY)	91.91%	99.03%	4.65%

7.2 石門水庫調適策略綜合風險分析

由於石門水庫各供水區域仍存有高缺水風險，因此本研究參考水利署民國 98 年「北部區域水資源經理基本計畫」提出石門水庫調適策略，包含板新供水改善計畫二期工程與興建中庄調整池，其中板新供水改善計畫二期工程可改善石門水庫枯水期缺水風險，中庄調整池則可改善石門水庫高濁度缺水風險，各調適策略內容說明如下：

1. 板新供水改善計畫二期工程

板新供水改善計畫二期工程已於 95 年奉行政院核定。主要工程內容為新建清水調度幹管、加壓站及送配水工程，新店溪水源供應板新地區最大 100 萬噸/日，並透過新店溪與大漢溪共同調度供水機制，靈活調度新店溪及大漢溪水源，惟工程涉及不同事業單位之經營管理，現正溝通研議，預計於民國 101 年完成整合工作。本研究假設工程完工後，板新地區供水可由翡翠水庫穩定供應 100 萬噸/日。

2. 中庄調整池

中庄調整池主要目的為在大漢溪水源濁度抬升時，提供約 689.7 萬 CMD 的備用水量，大湳淨水場 30 萬 CMD、板新淨水場為 50 萬 CMD，高濁度時期水源備援天數約為 8.6 天。由於本研究高濁度分析未納入考量板新淨水廠，故中庄調整池之供水效率設定為每天供應 30 萬 CMD，最多可供應 8.6 天。

調適策略枯水期風險評估結果如表 7.2-1 所示，若缺水忍受度為 5% 之基礎下，在未考量氣候變遷下南桃園枯水期缺水風險由 95.89% 降至 42.45%，北桃園枯水期缺水風險由 99.43% 降至 3.57%，板新地區缺水風險由 15.40% 降至 0%；考量氣候變遷下南桃園枯水期缺水風險由 87.11% 降至 17.74%，北桃園枯水期缺水風險由 98.45% 降至 1%，板新地區缺水風險由 4.65% 降至 0%，顯示調適策略(板新供水改善二期工程)可有效降低北桃園和板新地區之缺水風險，南桃園缺水風險雖有降低但仍偏高，其主要因素乃因為南桃園之民國 120 年需求量大於石門、龍潭和平鎮淨水廠處理能力，因此除了開發新水源外，擴增淨水廠處理能力才能有效降低南桃園之供水風險。

調適策略高濁度風險評估結果顯示，在中庄調整池完成後，無論是否考量氣候變遷情況下，高濁度缺水風險降為零，主要乃因為本研究考量之現況系統乃假設水庫分層取水工已完成，故石門水庫現況下高濁度事件下缺水率就偏低(100 組合成資料中，最大缺水率為 7.78%)，當中庄調整池完工後，於高濁度時可支援每天 30 萬噸之供水，約佔石門、龍潭、平鎮及大湳淨水廠總處理量的 28%，因此足以補足水庫高濁度供水後仍不足之供水量，故高濁度缺水風險降為零。

在缺水忍受度為 5%，根據前述調適策略之枯水期缺水風險分析結果和高濁度缺水風險分析結果，由 7-1 式和 7-2 式可計算未考量氣

候變遷與考量氣候變遷下整年度不發生缺水大於缺水忍受度之風險，其結果整理如表 7.2-1 所示。由於高濁度缺水風險降為零，故整年度之缺水風險等於枯水期缺水風險。結果顯示氣候變遷後，整年度之缺水風險有降低之趨勢。

表 7.2 調適策略枯水期風險分析結果(缺水忍受度為 5%)

	缺水忍受度	缺水風險 (未考量氣候變遷)	缺水風險 (考量氣候變遷)
南桃園公共用水	5%	42.45%	17.74%
北桃園公共用水	5%	3.57%	1.00%
板新公共用水	5%	0.00%	0.00%

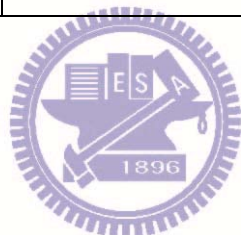


表 7.1-2 調適策略整年度綜合風險分析結果表

		南桃園公共用水	北桃園公共用水	板新地區公共用水
歷史合成 資料	枯水缺水風險 (PD)	42.45%	3.57%	0.00%
	高濁度缺水風險 (PD)	0.00%	0.00%	0.00%
	每年至少發生一次 缺水高於缺水忍受度之 高濁度事件風險(PTY)	0.00%	0.00%	0.00%
	整年發生缺水大於 缺水忍受度之風險(PY)	42.45%	3.57%	0.00%
GCM 合 成資料	枯水缺水風險 (PD)	17.74%	1.00%	0%
	高濁度缺水風險 (PD)	0.00%	0.00%	0.00%
	每年至少發生一次 缺水高於缺水忍受度之 高濁度事件風險(PTY)	0.00%	0.00%	0.00%
	整年發生缺水大於 缺水忍受度之風險(PY)	17.74%	1.00%	4.65%

第八章 結論與建議

8.1 結論

1. 本研究根據風險管理分析步驟，以 ECHAM5 大氣環流模式模擬結果進行降尺度分析，探討氣候變遷下石門水庫供水系統枯水期與高濁度可能遭遇之缺水風險，並提出適當之調適策略。模擬結果顯示石門水庫現況供水系統枯水期缺水風險在氣候變遷影響下有降低之趨勢，但卻造成高濁度缺水風險提高，在綜合考量下，整年度缺水風險在氣候變遷影響下有略為降低之趨勢。
2. 本研究提出之條件氣候繁衍降尺度模式，以條件機率之序率方式決定集水區降雨量，可有效率的反應出資料間的變異性，由模擬結果顯示，各月日平均降雨量與降雨機率觀測值皆落於模擬值 90%信賴區間內，且各月日降雨量標準偏差觀測值與模擬值 90%信賴區間之誤差亦小於 1.32mm，顯示條件氣候繁衍降尺度模式對於降雨量的推估確實有不錯的精度。
3. 傳統降尺度分析僅分析至精度為日之雨量資料，對於時雨量資料則受限於大氣環流模式所提供之大尺度氣候因子精度，為克服大尺度因子精度之限制，本研究參考工程設計常用之設計降雨概念，以氣候變遷日雨量降尺度分析結果進行頻率分析，配合不同延時之設計雨型，以拉丁超立方取樣法進行氣候變遷時雨量繁衍。
4. 本研究以單位特性歷線法及倒傳遞類神經進行濁度預測，採用韋帕、柯羅莎及辛樂克三場颱風並刪除奇異點進行訓練分析，模擬結果顯示，單位特性歷線法於各場颱風事件濁度預測值與觀測值之相關係數皆在 0.87 以上，而倒傳遞類神經對辛樂克與柯羅莎颱風

風預測濁度相關係數雖高，但韋帕颱風預測相關係數則偏低，結果顯示本研究提出之單位特性歷線法對於濁度預測有不錯之精度。

5. 本研究以 VEMSIM 軟體建立水資源長期調配模式，其以系統動力學為理論基礎，模式建置乃基於物件導向原理，且軟體提供動態連結函式庫(DLL)，有助於模式整合。高濁度水資源調配模式除考量淨水廠處理能力受濁度影響外，亦將防洪操作對於水庫濁度之影響納入考量，以確實反映水庫實際操作影響。
6. 本研究以 ECHAM5 大氣環流模式分析結果進行降尺度分析，以做為石門水庫水文氣候變遷之依據，並以此進行後續枯水期與高濁度缺水風險分析。本研究提出以板新供水改善二期工程改善枯水期缺水風險及以中庄調整池改善高濁度缺水風險，枯水期模擬結果顯示，板新供水改善二期工程可有效降低北桃園和板新地區枯水期缺水風險，但南桃園缺水風險雖有降低但仍偏高，主要原因為南桃園民國 120 年需求量大於石門、龍潭和平鎮淨水廠處理能力，因此除了開發新水源外，擴增淨水廠處理能力才能有效降低南桃園之供水風險。高濁度分析結果顯示，在本研究考量之不確定性因素下，中庄調整池可將高濁度風險降為零。

8.2 建議

1. 本研究降尺度分析所採用之預測因子僅考量平均海平面壓力，建議可多增加其他預測因子(如比濕度、水平風速及垂直風速等)來增加模式之精度。
2. 本研究提出之條件氣候繁衍降尺度模式雖在各月降雨機率、日平

均雨量與日雨量標準偏差有不錯的精度，但對於連續降雨之預測則不甚理想，因此進行不同延時頻率分析時，常有低估的現象發生，建議未來可將連續降雨因素納入考量。

3. 本研究降尺度分析以 NCEP 觀測值與石門水庫集水區降雨量建立條件機率轉移矩陣，再以 ECHAM5 未來模擬值預測石門水庫集水區未來降雨量，然本研究未考量 ECHAM5 模擬值與 NCEP 觀測值所存在的模式誤差，建議未來可將此誤差納入考量。
4. 本研究採用集塊型降雨逕流模式進行流量推估，建議未來可以分布型降雨逕流模式取代，以提高模式精度。
5. 本研究僅考量雨量之不確定性，然實際上水資源調配不確定性因子除了水文資料外，尚有觀測資料之不確定性、模式推估之不確定性及人類社經活動之不確定性，建議後續研究可探討其它不確定因子之影響。
6. 本研究高濁度風險分析假設每場暴雨事件為獨立事件，分析結果代表每場暴雨發生高濁度缺水事件之風險，因此推估整年度發生高濁度事件風險時，採用歷史颱風每年侵颱次數的平均值進行推估，然實際上除了受侵颱次數影響外，尚與每場颱風之相隔時間有關，若為連續兩場颱風，其缺水程度將更為嚴重，建議未來可將颱風發生間隔那入考量分析。



參考文獻

1. Ahmed JA, Sarma AK, “Genetic algorithm for optimal operating policy of a multipurpose reservoir.” Water Resources Management, 19(2), 145–161, 2005.
2. Akthar, M., Ahmad, N., Booij, M. J., “The impact of climate change on the water resources of Hindukush-Karakorum-Himalaya region under different glacier coverage scenarios.” Journal of Hydrology. 355(1-4), 148-163, 2008.
3. Anandhi A, Srinivas VV, Nanjundiah RS, Kumar DN , “Downscaling precipitation to river basin in India for IPCCSRES scenarios using support vector machine,” International Journal of climatology, 28(3), : 401-420, 2008.
4. Bhaskar NR, Whitlatch EE Jr, “Derivation of monthly reservoir release policies.” Water Resources Research, 16(6), 987–993, 1980.
5. Braga, B., Yeh, W., and Barros, M. “Stochastic optimization of multiple-reservoir-system operation.” Journal of Water Resources Planning and Management-ASCE, 117(4), 471–481, 1991.
6. Busuioc A., Tomozeiub R., Cacciamani C., “Statistical downscaling model based on canonical correlation analysis for winter extreme precipitation events in the Emilia-Romagna region.” International Journal of Climatology, 28(4), 449–464, 2008.
7. Chen L, Chang FJ, “Applying a real-coded multi-population genetic algorithm to multireservoir operation.” Hydrological Process, 21(5), 688–698, 2007.
8. Chen H, Guo J, Xiong W, Guo SL, Xu CY, “Downscaling GCMs

- using the Smooth Support Vector Machine method to predict daily precipitation in the Hanjiang Basin” , Advances in Atmospheric Sciences, 27(2), 274-284, 2010.
9. Chou F.N.F., Wu C.W., ” Reducing the impacts of flood-induced reservoir turbidity on a regional water supply system”, Advance in Water Resources, 33(2), 146-157, 2010.
 10. Chu JT, Xia J, Xu CY, Singh VP, “Statistical downscaling of daily mean temperature, pan evaporation and precipitation for climate change scenarios in Haihe River, China”, Theoretic and applied climatology, 99(1-2), 149-161, 2010.
 11. Dai T, Labadie JW, “River basin network model for integrated water quantity/quality management.” J Journal of Water Resources Planning and Management-ASCE, 127(5), 295–305, 2001.
 12. Dibike YB, Coulibaly P. “Hydrologic impact of climate change in the Saguenay watershed: comparison of downscaling methods and hydrologic models.” Journal of Hydrology, 307,145–163. 2005.
 13. Einstein H., The Bed-Load Function for Sediment Transportation in Open Channel Flow, U.S. Department of Agriculture, Soil Conservation Service, Technical Bulletin 71, Washington, D.C.,1950.
 14. Fleming G., ”Suspended Solids Monitoring : A Comparison Between Three Instruments”, Water and Water Engineering, 73(883), 377-382,1969.
 15. Fowler HJ, Blenkinsop S, Tebaldi C, “Linking climate change modelling to impacts studies: recent advances in downscaling techniques for hydrological modelling,” International Journal of Climatology, 27(12), 1547-1578, 2007.

16. Giorgi, F., Mearns, L.O., “Approaches to the simulation of regional climate change: A review”, Reviews of Geophysics, 29(2), 191–216, 1991.
17. Hall WA, Butcher WS, Esogbue A, “Optimization of operation of a multiple-purpose reservoir by dynamic programming.” Water Resources Research, 4(3), 471–477, 1968.
18. Harpham C, Wilby RL, Multi-site downscaling of heavy daily precipitation occurrence and amounts,” Journal of Hydrology, 312(1-4), 235-255, 2005.
19. Haylock MR, Cawley GC, Harpham C, Wilby RL, Goodess C. , “Downscaling heavy precipitation over the United Kingdom: a comparison of dynamical and statistical methods and their future scenarios”, International Journal of Climatology, 26(10), 1397–1415, 2006.
20. Hewitson BC, Crane RG. “Consensus between GCM climate change projections with empirical downscaling: precipitation downscaling over South Africa”, International Journal of Climatology, 26(10), 1315–1337, 2006.
21. Hiew, K., Labadie, J., and Scott, J., “Optimal operational analysis of the Colorado-Big Thompson project”, Computerized Decision Support Systems for Water Managers-ASCE, 632–646, 1989.
22. Huang, W., Harboe, R., and Bogardi, J. “Testing stochastic dynamic programming models conditioned on observed or forecasted inflows.” Journal of Water Resources Planning and Management-ASCE, 117(1), 28–36, 1991.
23. Ko, S.-K., Fontane, D., and Labadie, J. “Multiobjective optimization

- of reservoir systems operations.” Water Resources Bulletin, 28(1), 111–127, 1992.
24. Kynch G.J., ”Theory of sedimentation”, Transactions of the Faraday Society, 48, 166-175, 1952.
 25. Labadie, J.W., “Optimal operation of multireservoir systems: State-of-the-art review.” Journal of Water Resources Planning and Management-ASCE, 130 (2), 93–111, 2004.
 26. Loucks, D., and Dorfman, P. “An evaluation of some linear decision rules in chance-constrained models for reservoir planning and operation.” Water Resources Research, 11(6), 777–782, 1975.
 27. Merzi N, Aktas MT, “Geographic information systems (GIS) for the determination of inundation maps of Lake Mogan, Turkey.” Water International, 25(3), 474-480, 2000.
 28. Meyer-Peter E. and Muller R., ”Formulas for Bed-Load Transport”, Proceedings on Second Meeting of International Association for Hydraulic Research, Stockholm, 39-64, Sweden, 1948.
 29. Metropolis N. and Ulam S., “The Monte Carlo Method”, Journal of the American Statistical Association, 44(247), 335-341, 1949.
 30. Nagy H.M., Watanabe K., and Hirano M., ”Prediction of Sediment Load Concentration in Rivers Using Artificial Neural Network Model”, Journal of Hydraulic Engineering-ASCE, 128(6), 588-595, 2002.
 31. Needham, J., Watkins, D., Lund, J., and Nanda, K., “Linear programming for flood control in the Iowa and Des Moines rivers” , Journal of Water Resources Planning and Management-ASCE, 126(3), 118–127, 2000.

32. Oliveira R, Loucks DP, "Operating rules for multireservoir systems", Water Resources Research, 33(4), 839–852, 1997.
33. Philbrick CR Jr, Kitanidis PK, "Limitations of deterministic optimization applied to reservoir operations." Journal of Water Resources Planning and Management-ASCE, 125(3), 135–142, 1999.
34. Rani, D., Moreira M.M., "Simulation-Optimization Modeling: A Survey and Potential Application in Reservoir Systems Operation." Water Resources Management, 24(6), 1107-1138, 2010.
35. Salathe EP, Mote PW, Wiley MW, "Review of scenario selection and downscaling methods for the assessment of climate change impacts on hydrology in the United States pacific northwest", International Journal of Climatology, 27(12), 1611-1621, 2007.
36. Sarangi A. and Bhattacharya A.K., "Comparison of Artificial Neural Network And Regression Models for Sediment Loss Prediction from Banha Watershed in India", Agricultural Water Management, 78(3), 195-208, 2005.
37. Scibek J, Allen DM, "Modeled impacts of predicted climate change on recharge and groundwater levels", Water Resources Research, 42(11), 2006.
38. Sehlke, G., and Jacobson, J. "System Dynamics Modeling of Transboundary Systems: The Bear River Basin Model." Ground Water, 43(5), 722-730, 2005.
39. Simonovic, S., and Marino, M. "Reliability programming in reservoir management 3: Systems of multi-purpose reservoirs", Water Resources Research, 18(4), 735–743, 1982.
40. Simonovic, S. P., and Fahmy, H. "A New Modeling Approach for

- Water Resources Policy Analysis", Water Resources Research, 35(1), 295-304, 1999.
41. Simonovic, S. P., and Li, L. H. "Methodology for Assessment of Climate Change Impacts on Large-Scale Flood Protection System", Journal of Water Resources Planning and Management-ASCE, 129(5), 361-371, 2003.
 42. Sharif M, Wardlaw R, "Multireservoir systems optimization using genetic algorithms: case study", Journal of Computing in Civil Engineering, 14(4), 255–263, 2000.
 43. Srdjevic B, Medeiros YDP, Faria AS, "An objective multi-criteria evaluation of water management scenarios." Water Resources Management, 18(1), 35–54, 2004.
 44. Stave, K. A. "A System Dynamics Model to Facilitate Public Understanding of Water Management Options in Las Vegas, Nevada", Journal of Environmental Management, 67(4), 303-313, 2003.
 45. Stedinger, J., Sule, B., and Loucks, D. "Stochastic dynamic programming models for reservoir operation optimization." Water Resources Research, 20(11), 1499–1505, 1984.
 46. Sun H., Cornish P.S. and Daniell T.M., "Turbidity-Based Erosion Estimation in A Catchment in South Australia", Journal of Hydrology, 253(1-4), 227-238, 2001.
 47. Trezos, T., "Integer programming application for planning of hydropower production." Journal of Water Resources Planning and Management-ASCE, 117(3), 340–351, 1991.
 48. Tolika K, Maheras P, Flocas HA, Papadimitriou AA. "An evaluation of a general circulation model (GCM) and the NCEP–NCAR

- reanalysis data for winter precipitation in Greece”, International Journal of Climatology, 26(7), 935–955, 2006.
49. Toniolo H., Parker G. and Voller V., “Role of Pondered Turbidity Current in Reservoir Trap Efficiency”, Journal of Hydrology Engineering, 133(6), 579-595, 2007.
50. Vasiliadis, H., and Karamouz, M. “Demand-driven operation of reservoirs using uncertainty-based optimal operating policies.” Journal of Water Resources Planning and Management-ASCE, 120(1), 101–114, ~1994!.
51. Vedula S, Mujumdar PP, Sekhar GC, “Conjunctive use modeling for multicrop irrigation”, Agricultural Water Management, 73(3), 193–221, 2005.
52. Vonstorch, H., Zorita, E., Cubasch, U., “Downscaling of global climate change estimates to regional scales: an application to Iberian rainfall in wintertime”, Journal of Climate, 6(6), 1161–1171, 1993.
53. Wetterhall F, Bardossy A, Chen DL, Halldin S, Xu CY, “Daily precipitation-downscaling techniques in three Chinese regions”, Water Resources Research, 42(11), 2006.
54. Wilby, R.L., Wigley, T.M.L., “Downscaling general circulation model output: a review of methods and limitations”, Progress in Physical Geography, 21(4), 530–548, 1997.
55. Wilby RL, Whitehead PG, Wade AJ, Butterfield D, Davis RJ, Watts G, “Integrated modelling of climate change impacts on water resources and quality in a lowland catchment: River Kennet, UK”, Journal of Hydrology, 330(1-2), 204-220, 2006.
56. Wurbs, R., “Reservoir-system simulation and optimization models.”

- Journal of Water Resources Planning and Management-ASCE, 119(4), 455–472, 1993.
57. Xoplaki E, Gonzalez-Rouco JF, Luterbacher J, Wanner H. “Wet season Mediterranean precipitation variability: influence of largescale dynamics and trends”, Climate Dynamics. 23(1), 63–78. 2004.
58. Xu, Z. X., Takeuchi, K., Ishidaira, H., Zhang, X. W. "Sustainability Analysis for Yellow River Water Resources using the System Dynamics Approach." Water Resources Management, 16(3), 239-261, 2002.
59. Yakowitz SJ, “Dynamic programming applications in water resources. “, Water Resources Research, 18(4), 673–696, 1982.
60. Yang CC, Chang LC, Chen CS, Yeh MS, “Multi-Objective Planning for Conjunctive Use of Surface and Subsurface Water Using Genetic Algorithm and Dynamics Programming.” Water Resources Management, 23(3), 417-437, 2009.
61. Yang, C., Chang, L., Ho, C. "Application of System Dynamics with Impact Analysis to Solve the Problem of Water Shortages in Taiwan." Water Resources Managment, 22(11), 1561-1577, 2008.
62. Yeh, W.W.G., “Reservoir management and operations models: A stateof- of-the-art review.” Water Resources Research, 21(12), 1797–1818, 1985.
63. Tu MY, Hsu NS, Yeh WWG, “Optimization of reservoir management and operation withhedging rules.” Journal of Water Resources Planning and Management-ASCE, 129(2), 86–97, 2003.
64. Philbrick CR Jr, Kitanidis PK, “Limitations of deterministic

- optimization applied to reservoir operations.” Journal of Water Resources Planning and Management-ASCE, 125(3), 135–142, 1999.
65. 王英銘，「自組非線性系統應用於濁度預測」，國立成功大學水利及海洋工程學系土木工程系，碩士論文，民國 94 年。
 66. 王世為，「永續性水質管理系統受氣候變遷影響之脆弱度評估」，國立臺灣大學生物環境系統工程系，碩士論文，民國 95 年。
 67. 牛敏威，「氣候變遷對台中地區缺水風險之影響評估」，國立交通大學土木工程學系，碩士論文，民國 98 年。
 68. 李念勳，「應用類神經網路於非點源污染預測模式及預測採樣之研究」，國立成功大學環境工程學系，碩士論文，民國 96 年。
 69. 李志鵬，「新型態多水庫聯合營運最佳操作規線之探討」，國立交通大學土木工程學系，碩士論文，民國 93 年。
 70. 柯建州，「直線型高分子線性鬆弛之蒙地卡羅模擬」，國立中正大學化學工程系，碩士論文，民國 90 年。
 71. 周乃昉、吳嘉文，「通用性廣域水資源運用模擬模式」，農業工程學報，第 56 卷，第 1 期，1-21 頁，民國 90 年。
 72. 程勝璟，「甲仙攔河堰懸移質輸運率研究」，國立屏東科技大學土木工程系，碩士論文，民國 92 年。
 73. 黃振傑，「沉砂池泥砂沉降特性之研究」，逢甲大學水利工程學系，碩士論文，民國 96 年。
 74. 趙信嘉，「沉砂池對離槽水庫營養負荷之研究」，國立成功大學環境工程系，碩士論文，民國 89 年。
 75. 楊朝仲，張良正，葉欣誠，陳昶憲，葉昭憲編著，系統動力學-思維與應用，五南圖書出版股份有限公司，台灣，民國 96 年。

76. 楊道昌、游保杉，「目標函數對連續型降雨-逕流模式率定之影響」，台灣水利季刊，第四十五卷，第四期，66-73 頁，民國 86 年。
77. 經濟部水利署水利規劃試驗所，濁水溪河槽水庫可行性規劃(一)河道水理及輸砂分析，經濟部水利署水利規劃試驗所，5-17 頁，民國 91 年。
78. 逢甲大學，渾水水庫沉降特性與排渾減淤操作研究，經濟部水利署，民國 94 年。
79. 逢甲大學，渾水水庫沉降渾水水庫沉降特性與排渾減淤操作研究(2/2)，經濟部水利署，民國 95 年。
80. 財團法人成大水利海洋研究發展文教基金會，通用性區域水資源調度與供需分析模式建立(3/3)，經濟部水利署水利規劃試驗所，民國 95 年。
81. 元裕工程技術顧問有限公司，高屏溪攔河堰水質(濁度)及泥砂監測計畫，經濟部水利署南區水資源局，民國 96 年。
82. 周乃昉、葉克家、謝發清、李皓志、廖仲達、陳柏蒼、蔡家民、林政浩，高屏溪攔河堰高濁度缺水分析及改善策略檢討計畫，經濟部水利署南區水資源局，民國 96 年。
83. 易任、王如意，應用水文學，國立編譯館，台灣，民國 81 年。
84. 陳榮松、王國樑、楊國賢、張順竹，改良式水筒模式於坡地旱田之降雨-逕流研究，中華水土保持學報，第四十卷，第二期，147-157 頁，民國 98 年。
85. 蔡嘉訓，「多水庫系統聯合操作模擬模式與逐時段優選求解方法之建立與應用」，國立臺灣大學土木工程學系，博士論文，民國 92 年。

86. 蘇昱維，「多元化水資源策略模擬與經濟財務分析」，國立交通大學土木工程系，碩士論文，民國 96 年。
87. 張婉茹，「應用系統動力學於多元化水資源策略模擬與分析-以台中地區為例」，國立交通大學土木工程系，碩士論文，民國 95 年。





附錄一 暴雨頻率分析

水文紀錄資料因受集水區水文與地文環境之影響，有其特殊之統計性質。某特定重現期水文量之大小，可以頻率分析通式表示之：

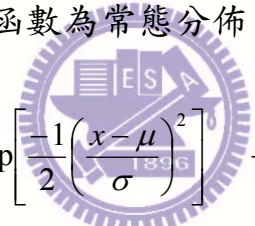
$$x_T = \mu + \sigma \cdot K_T \dots\dots\dots (附1-1式)$$

式中 x_T 為重現期 T 之水文量； μ 為水文資料之平均值； σ 為水文資料之標準偏差； K_T 稱為頻率因子(frequency factor)。

K_T 頻率因子通常跟不同機率分布型態來決定之，常見之雨量統計分佈型態有常態、對數常態、皮爾遜Ⅲ型、對數皮爾遜Ⅲ型及極端值Ⅰ型等五種分佈，各分布說明如下

1. 常態分佈(normal distribution)

最常見的機率密度函數為常態分佈，其機率密度函數可表示為：


$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2\right] \quad -\infty < x < \infty \dots\dots\dots (附1-2式)$$

定義標準常態變數 z (standard normal variable) 為：

$$z = \frac{x-\mu}{\sigma} \dots\dots\dots (附1-3式)$$

故標準常態機率密度函數可整理為附 1-4 式

$$f(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\frac{-z^2}{2} \quad -\infty < z < \infty \dots\dots\dots (附1-4式)$$

標準常態累積分佈函數可表示為附 1-5 式

$$F(z) = \int_{-\infty}^z \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\frac{-u^2}{2} du \dots\dots\dots (附1-5式)$$

而常態機率分佈所對應之頻率因子 K_T 可表示標準常態變數 z ，

即：

$$K_T = z = \frac{x - \mu}{\sigma} \dots\dots\dots (附1-6式)$$

2. 對數常態分佈(lognormal distribution)

常態分佈之範圍介於 $-\infty \sim \infty$ 之間，但是水文量皆為正值，因此若水文量符合常態分佈，其分佈應對稱於平均值。一般情況而言，水文量常呈向右偏斜之分佈，此時可考慮採用對數常態分佈；即定義 $y = \log x$ ，再代入常態分佈，則其機率密度函數為

$$f(y) = \frac{1}{x\sigma_y\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{y - \mu_y}{\sigma_y}\right)^2\right] \quad 0 < y < \infty \quad -\infty < x < \infty \dots (附1-7式)$$

式中 μ_y 為隨機變數 y 之期望值； σ_y 為隨機變數 y 之標準偏差。因對數常態分佈之下邊界為 0，故較之常態分佈更適於表示水文量之分佈；且當水文量取對數之後，其向右偏斜之現象將會降低。其對應之頻率因子 K_T 可表示為附 1-8 式：

$$K_T = \frac{y - \mu_y}{\sigma_y} \dots\dots\dots (附1-8式)$$

3. 極端值分佈(extreme value distribution)

極端值是從資料中選取最大值或最小值的集合；工程水文分析中，暴雨與洪峰流量常以極端值 I 型分佈近似之，極端值 I 型分佈又稱為甘保氏分佈(Gumbel distribution)。極端值 I 型分佈之累積機率分佈函數可表示為

$$F(x) = P(X \leq x) = e^{-e^{-x}} \quad -\infty < x < \infty \dots\dots\dots (附1-9式)$$

其中

$$y = \alpha(x - \beta)$$

$$\alpha = \frac{\pi}{\sqrt{6}\sigma}$$

$$\beta = \mu - \frac{0.5772}{\alpha}$$

因為 $P(X \leq x) = 1 - \frac{1}{T}$ ，帶入附 1-9 式，兩邊取兩次 ln 可得：

$$y = -\ln(-\ln(1 - \frac{1}{T})) \dots\dots\dots (附1-10式)$$

且 $x_T = \mu + \sigma \frac{\sqrt{6}}{\pi}(y - 0.5772) \dots\dots\dots (附1-11式)$

所以可得極端值 I 型分佈之頻率因子 K_T 為：

$$K_T = \frac{\sqrt{6}}{\pi}(y - 0.5772) = \frac{\sqrt{6}}{\pi}(-\ln(-\ln(1 - \frac{1}{T})) - 0.5772) \dots\dots(12式)$$

由 11 式可知，當 $x_T = \mu$ 時，得 $K_T = 0$ 。故可知若水文紀錄符合極端值 I 型分佈時，平均水文量所代表的重現期 T 等於 2.33 年。

4. 皮爾遜 III 型分佈(Pearson type III distribution)

皮爾遜 III 型分布的機率密度函數與累積機率密度函數分別如附 1-13 和附 1-14 式所示：

$$f(x) = \frac{1}{\theta\Gamma(\beta)} \left(\frac{x-\gamma}{\theta}\right)^{\beta-1} e^{-\left(\frac{x-\gamma}{\theta}\right)} \quad -\infty < x < \infty \dots\dots\dots (附1-13式)$$

$$F(x) = \frac{1}{\theta\Gamma(\beta)} \int_0^{x_0} e^{-\left(\frac{x-\gamma}{\theta}\right)} \left(\frac{x-\gamma}{\theta}\right)^{\beta-1} dx \quad -\infty < x < \infty \dots\dots\dots (附1-14式)$$

若偏態係數 C_s 為正值，則 $\theta = \sigma/\sqrt{\beta}$ ， $\beta = (2/C_s)^2$ ， $\gamma = \mu - \sigma\sqrt{\beta}$

若偏態係數 C_s 為負值，則 $\theta = -\sigma/\sqrt{\beta}$ ， $\beta = (2/C_s)^2$ ， $\gamma = \mu + \sigma\sqrt{\beta}$

其中偏態係數為描述觀測樣本之對稱特性，其定義為

$$C_s = \frac{n}{(n-1)(n-2)} \times \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \mu)^3}{\sigma^3} \dots\dots\dots (\text{附1-15式})$$

式中 n 為資料樣本數。

皮爾遜 III 型分佈之頻率因子 K_T 可以附 1-16 式近似之。

$$K_T = t + (t^2 - 1)\frac{C_s}{6} + \frac{1}{3}(t^3 - 6t)\left(\frac{C_s}{6}\right)^2 - (t^2 - 1)\left(\frac{C_s}{6}\right)^3 + t\left(\frac{C_s}{6}\right)^4 + \frac{1}{3}\left(\frac{C_s}{6}\right)^5 \dots\dots\dots$$

..... (附1-16式)

式中 t 為標準常態值，其定義如附 1-17 式所示：

$$t \approx W - \frac{C_0 + C_1W + C_2W^2}{1 + d_0W + d_1W^2 + d_2W^3} \quad W = \sqrt{\ln\left(\frac{1}{P^2}\right)} \quad 0 < P \leq 0.5$$

$$t \approx -\left(W - \frac{C_0 + C_1W + C_2W^2}{1 + d_0W + d_1W^2 + d_2W^3}\right) \quad W = \sqrt{\ln\left[\frac{1}{(1-P)^2}\right]} \quad P > 0.5$$

..... (附1-17式)

其中 P 為超越機率，即 $1 - \frac{1}{T}$ ， $C_0=2.515517$ ， $C_1=0.802853$ ，
 $C_2=0.010328$ ， $d_0=1.432788$ ， $d_1=0.189269$ ， $d_2=0.001308$ 。

5. 對數皮爾遜 III 型分佈(logPearson type III distribution)

若定義 $y = \log x$ ，則對數皮爾遜 III 型分佈機率密度函數如 3-23 式所示：

$$f(x) = \frac{1}{\theta_y x \Gamma(\beta_y)} \left(\frac{\ln x - \gamma_y}{\theta_y} \right)^{\beta_y - 1} e^{-\left(\frac{\ln x - \gamma_y}{\theta_y} \right)} \quad 0 < y < \infty \quad -\infty < x < \infty \dots\dots$$

..... (附1-18式)

對數皮爾遜 III 型分佈之頻率因子 K_T 可以附 1-19 式近似之。

$$K_T = t + (t^2 - 1) \frac{C_{s,y}}{6} + \frac{1}{3} (t^3 - 6t) \left(\frac{C_{s,y}}{6} \right)^2 - (t^2 - 1) \left(\frac{C_{s,y}}{6} \right)^3 + t \left(\frac{C_{s,y,s}}{6} \right)^4 + \frac{1}{3} \left(\frac{C_{s,y}}{6} \right)^5$$

..... (附1-19式)

標準常態值 t 同皮爾遜 III 型分佈(見附 1-17 式)。



附錄二 遺傳演算法理論介紹

一、 傳統搜尋法的介紹

所謂搜尋，係指在一既定之問題條件下，於有限的可行解中找出一特定的答案，此答案可滿足所定之目標函數。而由可行解所構成的集合，稱為解答空間(Solution Space)。目標函數的訂定，則可能為搜尋最大或最小值(Davidor,1991)。

常見之搜尋方法可分為三大類，分別為微分(Calculus)、列舉(Enumerative)與隨機(Random)(Goldberg,1989;Davidor,1991；張斐章、陳莉,1993)，各方法說明如下：

(一)微分方法：

大致上，此法可分為間接與直接兩種方法，間接法是藉由目標函數之導數為零，解出區域極值(Local Extrema)，通常必須給定一平滑且無限制式的目標函數，在任一方向搜尋斜率為0的點，以發現可能的峰值(Peak)。而直接法是利用目標函數搜尋局部最佳值，且依局部的坡降(Gradient)來指引所搜尋的方向，亦即利用登山(Hill-Climbing)的簡單觀念，在最陡的允許方向向上攀登函數，以找出局部最佳值。

整體而言，微積分方法之主要缺點有二：(1)僅能搜尋某一局部的範圍，初始值影響結果甚鉅，易被區域最佳值(Local Optimum)所誤導。(2)微積分法依賴導數之存在，然而自然界中情況充滿著不連續多峰與擾動的空間，不易以傳統的微分方法求解。

(二)列舉法：

此法之理念極為簡易直接，即在有限空間內逐點搜尋其目標函數值，然其主要缺點為缺乏效率。甚至於動態規劃(Dynamic

Programming)，也有此種維度的困擾(Curse of Dimensionality)。(Bellman,1961)

(三)隨機(Random)搜尋

此法無固定模式，僅於空間中任意選取座標點並求其目標函數值，缺點亦為缺乏效率，然其表現較列舉法略佳。故可知傳統的搜尋法不易求得問題之整體最佳解，否則即是缺乏效率，而遺傳演算法(Genetic Algorithms)則可克服以上的缺點，對於多峰函數的最佳化問題，遺傳演算法一次搜尋多點的群集，具同時平行攀登許多個峰值及逐次改良搜尋結果的能力，可避免被區域最佳值(Local Optimum)誤導，並且具有不錯之效率(蔡威平，1999)。

二、遺傳演算法概述

遺傳演算法的理論基礎可回溯自 1859 年達爾文(Charles Darwin)的「物種演化」(On the Origin of Species by Means of Nature Selection)書中的「物競天擇，適者生存」的演化及淘汰觀念。在這種由自然選擇的演化機制中，生物界中的每個個體會把它們的特徵傳遞到下一代，而生物的特徵是由生物細胞內的染色體來決定的(染色體即是由基因所組成的基因鏈)，由於每個個體的特徵都不大相同，因此不同特徵的個體對環境的適應力也不大一樣，同時生物的突變及交配也會使得上下代個體之特徵不相同，而適應力較高的個體，即它們的特徵較適合於目前的環境，在後代的數目上由於競爭的緣故，適應力較高的個體的後代數目會比適應力較低的後代數目多，因此這會把整個族群的特徵引導向更適合生存於自然環境的方向發展，在長時間中，這種引導所發生的變異會越來越累積，最後演變至產生一整個特徵能適應於特別生態環境下的種族。

將這種自然界的選擇方法系統化並發展一可用之模式最早是由密西根大學的 John Holland 教授在 1975 年於 Adaption in Natural and Artificial System 文中所提出，發展出遺傳演算法搜尋技術的基本架構，並且由其學生 David Goldberg 成功地運用在工程問題上。之後，有許多研究亦證實了遺傳演算法在最佳化問題的求解上是十分有效率的，其有以下幾個優點：

- 甲、 可優選連續(continuous)及不連續(discrete)的參數。
- 乙、 在優選的過程中，無須求得目標函數的導數。
- 丙、 搜尋的方式不同於以往的單點搜尋方式，而是採用多點搜尋，因此不易掉入局部最佳解(local optimum)。
- 丁、 可以處理多參數的優選問題。
- 戊、 具有隱平行運算的能力，若在平行電腦中，可大量解省運算的時間。
- 己、 在優選複雜非線性的問題中，其演算機制可跳脫局部最佳解(local optimum)。
- 庚、 演算優選的結果，可提供一組最佳解，而非只有單一最佳解。
- 辛、 參數優選需經由解碼的過程，而整個演算的機制是在解碼後的參數集合中進行，不是在參數集合本身，因此演算的機制不受函數型能的影響。

以上的優點，使得我們發現當傳統的最佳化方法無法解決一個問題或得到令人滿意的優選結果時，遺傳演算法便是一個很有趣且擁有很大潛力去替代傳統的優選法。

對所有的問題而言，遺傳演算法並非都是一個最佳的方法，例

如當在處理一具有凸函數型態，且僅有少量變數之問題時，一般傳統以微積分為基礎的搜尋法，即可比遺傳演算法快速的找到最佳解，別外一些簡單優選的問題，傳統的演算法亦都能很快的解決，然而當我們在處理實際的問題時，經常會遇見的是非凸函數且多變數型態或更複雜的問題，這是一般演算法不易解決的，而遺傳演算法就有解決此類問題的能力，且可得到近以全域最佳解。

三、 遺傳演算法的架構

遺傳演算法將欲求解的問題變數或參數以一種類似染色體的資料結構(Chromosome-Like Data Structure)來編碼，並應用一些遺傳運算元(Operators)如交換(Crossover)、突變(Mutation)對大量的染色體作運算，運算後產生的子代除了保存親代中具優勢的特質外，也有可能因為基因的交換與突變而比親代的表現更佳。基本的遺傳演算法包含下列幾個步驟（如附圖 2-1 所示）：

1. 將問題的變數編碼：

例如可以二進位字串(Binary String)的形式來表示變數，其間的轉換為二進位與十進位的對應，如將二進位字串 1001 解碼，則可對應於十進位的變數值 9，而 1100 對應於 12，1001 與 1100 可看作是兩條染色體。

2. 產生初始群集(Initial Population)

以隨機的方式產生多條染色體作為初始解。

3. 計算目標函數值(Evaluation)

將初始群集大量的染色體解碼後對應的變數值一一代入問題模式中，計算函數或目標函數值。



4. 計算適合度

適合度愈高表示該染色體具有較優的特質，將來被複製(Reproduction)的機會也較大。

5. 步驟五：複製(Reproduction)或選取(Selection)

為演化出更優良的個體，必須從原來族群中篩選出較佳的個體，組成下一代的族群，這就是複製。因此，擁有較高適應值的染色體，便有較高的機率被選擇出來進行複製。一般而言，有下列兩種方式：

(一)輪盤法(Roulette wheel):

所謂輪盤法是假設一個可轉動的輪盤，在輪盤上劃分許多扇形區塊，區塊的面積大小正比於個體被複製的機率。因此，個體的適應值越高，適應值佔有族群適應值總和的比例也越高，在輪盤上所佔的面積也越大，而被選上的機率也越大。輪盤法的示意圖參考附圖 2-2 所示。

(二)比較選取法(Tournament selection):

比較選取法，即是模仿自然界的生物彼此競爭情形，當某一個體的適應值愈高，其經由比較選取後，存活下來而被複製的機會愈高，此選取法有一好處，即是染色體被複製下來的機率與染色體間適合度的相對值大小無關而是取決於相對大小，因此較適合於個體間適合度值相對變化很大之問題。

6. 基因交配(Crossover)或重組(Recombination)

進行完複製的步驟之後，便接著要進行交配的程序。在基因演算法運作的過程中，程式運用輪盤法或比較選取法等方法挑選兩條染

色體，將其基因排列作重新的組合，以產生新的兩個染色體，這就是交配的過程。基本上，交配的方式有三種，分別是單點交配、雙點交配和均一化交配。下面分別對這三種方式作介紹：

i. 單點交配：

在進行單點交配時，程式會先依亂數決定一個切斷點，利用這個切斷點，將原先挑選出欲進行交配兩個的染色體切成兩部分，再將切開的部分重新組合成一對新的染色體。

ii. 雙點交配：

雙點交配的步驟與單點交配類似，唯一的不同處是在進行雙點交配時，程式會先依亂數決定兩個切斷點，利用這兩個切斷點，將原先挑選出欲進行交配的染色體切成三部分，再將切開的部分重新組合成新的染色體。



iii. 均一化交配：

使用均一化方式進行交配時，首先會產生一個和染色體長度相等的二進位陣列，在這個二進位陣列中，每一個位元均會依亂數決定此位元的值為 0 或 1，如此一個完整的二進位陣列稱之為面具(mask)。利用這個面具，可以決定染色體交配的位置。若是在面具中的位元值為 1 時，就進行染色體在此位元的互換；反之面具中的位元值為 0 時，則不進行互換。和單點交配、雙點交配不同處是，利用單雙點交配時，每次交配切斷點的位置不是固定的，而均一化交配則是利用面具的方式，使得同一世代之所有個體在固定的位置交配。三種交配方式的示意圖如附圖 2-3~2-5 所示。

7. 突變

演化過程最後一個步驟是突變。在遺傳演算法的運作過程中，

程式會隨機產生一個突變的機率值，若是此值低於事先所定義的突變率，染色體便會進行突變的程序。所謂突變，是隨機選定染色體的某些位元，將此些位元的值作 0 與 1 的互換，此步驟對染色體上的每個位元皆存在有突變的機率，可對染色體上各分段所代表的參數進行突變，將染色體的體質作一立即的改變，使搜尋的點更為零散，以防止過早收斂於局部最佳值，而無法獲得整體最佳解。突變示意圖則如附圖 2-6 所示。

四、 模板理論及隱平行性質

在理論上遺傳演算法通常以處理模板(schema)的觀點來進行分析，所謂模板代表了染色體空間上的次集合。在一個模板中，某些基因是沒有限制的，而其他的基因則包括特定的值。以二位元編碼而言，模板的定義是由字母{0,1,*}所形成的字串(string)，其中*表示在字串中相對應的位置上並無限制，即為 1 或為 0 均可，舉例，字串 01*1*0 所描述的模板為： $\{010100,010110,011100,011110\}$ 。模板理論解釋了遺傳演算法的高效率，因為較短的，表現較好的(適合度較高的)一些次字串(substring)將呈指數次方型式的快速成長。在推導模板理論(Schema Theorem)及隱平行性質(Implicit Parallelism)之前，須先介紹一些基本觀念：

當我們在表現一個字串內的二位元址時，通常包含了二種表示法：即(0,1)。現在再加入一種新的符號(*)，其意義為二位元址可能為 0 或 1 任意一種。舉例說明如下：如有一字串為{11*0*}，則此字串有四種可能的組合狀態" $\{11000,11001,11100,11101\}$ 。由這些觀念我們可以清楚地知道，模版{01*0*10}比{0*****}更明確地被定義；而模板{1****0*}比{1**1****}跨越(span)更多的字串部份。為了明確定義以上這些觀念，便導入兩個性質，模板的階(Schema Order),及定義長度

(Defining Length)。

所謂模板的階，係指模板已經被固定的位址數目，以 $O(H)$ 代表之 (H 為某一模板)。如 $10*1*1*$ ，其階為 4，而 $**1**1*$ ，其階為 2。而定義長度，則為模板內第一個定址至最後一個定址間之距離，記為 $\delta(H)$ ，如： $\{0**1*1*\}$ ，其定義長度為 $7-2=5$ ，而 $\{1*****\}$ ，其定義長度為 $7-7=0$ 。

設在時刻 t ，有模板 H 的範例 m 個，記為 $m(H, t)$ 。母群體 $A(t)$ ，其中一字串 A_i 的表現值為 f_i ，則存活機率定義如下：

$$p_i = \frac{f_i}{\sum f_i}$$

則於時刻 $t+1$ ，當選取 n 個子代，模板 H 的出現個數之期望值為：

$$m(H, t+1) = m(H, t) \cdot \frac{f(H)}{\sum f_i} \cdot n = m(H, t) \cdot \frac{f(H)}{\bar{f}} \dots\dots\dots (\text{附2-1式})$$

上式之 \bar{f} 表示模板的平均表現值。由此式得到一個觀念，當一個模板的表現值 (f_i) 越好，則在次一代時出現的個數會增加；反之，則會減少。亦即，較平均值高的模板，較容易繼續存活，而低於平均值的模板則會逐漸減少而被淘汰。

若將上式中之 f_i 改定為 $\bar{f} + c\bar{f} = (1+c) \cdot \bar{f}$ ，則附 2-1 式可改為：

$$m(H, t+1) = m(H, t) \cdot \frac{(\bar{f} + c\bar{f})}{\bar{f}} = m(H, t) \cdot (1+c) \dots\dots\dots (\text{附2-2式})$$

假設 t 由 0 時刻開始，則可得：

$$m(H, t+1) = m(H, 0) \cdot (1+c)^t \dots\dots\dots (\text{附2-3式})$$

上式在數學上的意義為，當模板複製時，其數目會隨著某一比例，而呈指數的增加(或減少)。

然而，如果只是不斷地複製字串或模板，則只會在原有的範圍內不停地搜尋而已，並不會對搜尋的結果有所助益，因為並沒有新的點產生，這也就是為什麼要運用遺傳演算元的原因。

當我們在使用交換(Crossover)的時候，假定一字串長為 L ，定義長度為 $\delta(H)$ ，而交換的位置為隨機選取，則對一個模板造成破壞的機率 P_d 為：

$$P_d = \frac{\delta(H)}{L-1} \dots\dots\dots (附2-4式)$$

再加上對交換過程 P_c 發生的機率的考量，則模板 H 存活的機率，至少有 $1 - P_c \cdot P_d$ ，也就是：

$$P_s \geq 1 - P_c \cdot \frac{\delta(H)}{L-1} \dots\dots\dots (附2-5式)$$

若假設複製和交換為獨立事件，彼此並無互相影響，則模板 H 在第 $t+1$ 時刻的個數期望值為：

$$m(H, t+1) = m(H, t) \cdot \frac{f(H)}{\bar{f}} \cdot [1 - P_c \cdot \frac{\delta(H)}{L-1}] \dots\dots\dots (附2-6式)$$

接下來再考慮突變，假設一個字元(Bit)突變的機率為 P_m ，而模板 H 的階次(Schema Order)為 $O(H)$ ，則模板 H 經過突變程序後，不被破壞的機率，應為： $(1 - P_m)^{O(H)}$ ，假設 P_m 的值遠小於 1，則以泰勒展開式展開後，二階(含)以上的項皆可被忽略，故可簡化成： $1 - O(H) \cdot P_m$ ，最後，我們可以認定一個模板 H ，在經過複製交換，及

突變的程序後，由第 t 代(時刻)至第 $t+1$ (時刻)的期望出現個數 m ，會有如下之關係：

$$m(H, t+1) = m(H, t) \cdot \frac{f(H)}{\bar{f}} \cdot \left[1 - P_c \cdot \frac{\delta(H)}{L-1} - O(H) \cdot P_m \right]$$

..... (附2-7式)

從這個式子，我們得到一個很重要的結論：定義長度較短的，階次較低的，以及對目標函數 f 表現較好的模板，存活的机会越大。此一結論甚為重要，故我們給予一特別的名稱"模板理論"(Schema Theorem)。

"模板理論"證明遺傳演算法確實能夠自主性地選擇較好的模板，從而增進模擬的精度，接著討論此一演算法的效率問題。

遺傳演算法何以是一有效率的優選方法，這由 Holland 所提出的隱平行性質(Implicit Parallelism)可以得到理解(Goldberg,1985)。其中思想，在於假設一代若有 n 個字串，則此一演算法不只搜尋此 n 個字串而已，其總共的模板搜尋數共有 n^3 個，且並沒有利用到額外的記憶體，現將此一性質推導如下：

假設一群體(Population)由 n 個字串長度為 L 的字串所構成，定模板的存活機率必須大於 P_s 始能存活下來，且假定只運用簡易交換及突變二運算元。則最後存活下來之字串或模板，其誤差率(Error Rate) ϵ 會低於 $1 - P_s$ 。這些模板長度 L_s ，則會小於 $\epsilon(L-1) + 1$ 。假設模板中有一位址為固定，其他的位置可為固定或不定的情形，再考量在字串中模板位置的可能種類共有 $L - L_s + 1$ ，則一代內所搜尋的模板數目 n_s 為：

$$n_s = 2^{(L_s-1)} \cdot (L - L_s + 1) \cdot n \dots\dots\dots (附2-8式)$$

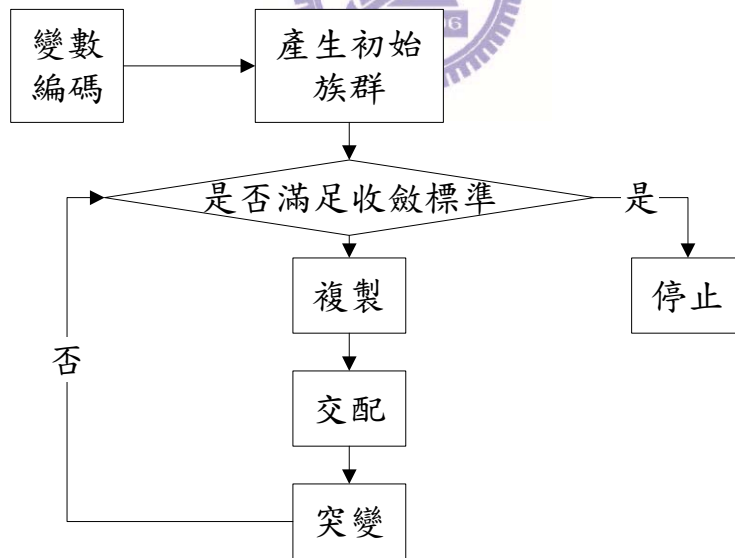
再假設群體規模(Size)為 $2^{L_s/2}$ ，模板的二位元址分布係二項式分布(Binomial Distribution)，則會有一半的模板屬於較低階(Smaller Order)的存活率較高的模板，故得出一低限值：

$$n_s \geq 2^{(L_s-2)} \cdot (L - L_s + 1) \cdot n \dots\dots\dots (附2-9式)$$

再將 n 值代入($2^{L_s} = n^2$)便得：

$$n_s = \frac{(L - L_s + 1) \cdot n^3}{4} \dots\dots\dots (附2-10式)$$

由此式可知，在遺傳演算法中，一代內所搜尋的模板數目，至少為其群體規模 n 的三次方倍。所以我們可以清楚地知道，遺傳演算法確實為一非常有效率的優選方法。



附圖2-1 遺傳演算法流程圖



附錄三 類神經網路理論介紹

類神經網路是一個可計算之多層網路，它使用大量簡單而具有平行處理能力之人工神經元來模擬人類學習行為，因此本章節將針對生物及人工神經元的構造、類神經網路的組成架構和基本理論，以及類神經網路中之倒傳遞網路(Backpropagation Network, BP)詳加介紹。

一、 類神經網路簡介

(一) 生物神經元模型

生物神經網路是由巨量的神經細胞(neuron，又稱神經元)所組成，形成一個高度連結網狀的神經網路，資訊的處理工作即透過上述之連結來進行。以人腦而言，人腦大約由 10¹¹ 個神經元所組成，而每一個神經元約有 10³ 根連結與其他神經元相連，所以人腦中約有 10¹⁴ 根連結，因此人腦可以儲存大量而複雜的知識。神經元構造如附圖 3-1 所示，其主要構造如下：

1. 神經核(soma):神經細胞的核心，為一呈核狀的處理機構。
2. 神經軸(axon):神經細胞呈軸索狀的輸送機構。
3. 神經樹(dendrites):神經細胞呈樹枝狀的輸出入機構。
4. 神經節(synapse):神經細胞神經樹上呈點狀的連結機構。

當神經細胞透過神經節與神經樹從其它神經元輸入脈波訊號後，經神經核處理，產生一個新的脈波訊號，這個訊號再經過神經軸傳送到神經樹，再透過神經節與神經樹成為其它神經元的輸入脈波訊號，如果脈波訊號是經過興奮神經節(excitatory synapse)，則會增加脈波訊號的速率(pulse rate)，如果脈波訊號是經過抑制神經節(inhibitory synapse)，則會減少脈波訊號的速率。因此，脈波訊號的速率是同時

取決於輸入脈波訊號的速率，以及神經節的強度。而神經節的強度可視為神經網路儲存資訊之所在，神經網路的學習即在調整神經節的強度(葉怡成，1994)。

(二)人工神經元模型

根據神經細胞的結構與功能，從 40 年代開始，先後提出的神經元模型有數百種之多，其中對於腦模型、自動機、人工智慧有重大影響的是 1943 年由美國心理學家 McCulloch 和數學家 Pitts 共同提出的形式神經元模型，同常稱之為 MP 模型。(謝明富，1999)

此一模型(見附圖 3-2 所示)具有將輸入變數與輸出變數間，複雜的內在對映關係充份呈現的功能，其為解決非線性動態問題的最佳工具之一。此模型由許多人工神經元所組成，神經元又稱為節點(node)或臨界值元件(threshold element)，其輸入端輸入各自之訊息，藉由各自權重加權總和後傳入節點，透過閾值的過濾，繼而經由轉換函數轉換後輸出，其數學表示式如下：

$$Y_j = f(\text{net}_j), \quad \text{net}_j = \sum_i W_{ij} X_i - b_j, i = 1, 2, \dots, n \quad \dots\dots\dots \text{(附3-1式)}$$

其中： Y_j ：為模仿生物神經元模型的輸出訊號； f ：為模仿生物神經元模型的轉換函數(transfer function)，將輸入值之加權乘積和轉換成處理單元輸出值； W_{ij} ：為模仿生物神經元模型的神經節強度，又稱連結加權值； X_i ：為模仿生物神經元模型的輸入訊號； b_j ：為模仿生物神經元模型的閾值(bias)； net_j ：為輸入值之加權乘積和； n ：為輸入訊號個數。

類神經網路常用之轉換函數有下列四種(見附圖 2-3~附 2-7)：

1. 位階臨界轉換函數(Step Threshold Transfer Function)：臨界函數的輸出只隨輸入值的正副號所改變。

2. 線性轉換函數(Linear Transfer Function)：函數輸入值與輸出值呈線性關係。
3. 非線性轉換函數(Nonlinear Transfer Function)：函數輸出的最大值與最小值限制在一個特定的範圍內。
4. 臨界 S 型轉換函數(Sigmoid Threshold Transfer Function)：是最常被應用之函數，因為此種函數型態具有可微分且連續等性質，此特質使網路可以應用到非線性的學習領域中。常用函數有雙彎曲函數(附 3-2 式)與雙曲線正切函數(附 3-3 式)兩種。

$$f(x) = \frac{1}{1 + e^{-x}} \dots\dots\dots (附3-2式)$$

$$f(x) = \frac{e^x - e^{-x}}{e^x + e^{-x}} \dots\dots\dots (附3-3式)$$



二、類神經網路基本理論

類神經網路的架構乃仿照人類腦部神經網路的模型而發展出來的，一個類神經網路是由許多個人工神經元連結組成，並可以組成各種網路模式。(葉怡成，1994)

類神經網路的總體運作模式有兩種：(1)學習過程(Learning)－網路依學習演算法，從範例中學習，以調整網路權重值的過程，與(2)回想過程(Recalling)－網路依學習演算法，以輸入資料決定網路輸出資料的過程。

此外，學習過程的學習演算法又可分為三類：

(一)監督式學習

從問題領域中取得訓練範例(有輸入變數值，也有輸出變數)，並

從中學習輸入變數與輸出變數的內在對映規則，以應用於新的案例(只有輸入變數值，而需推論輸出變數值的應用)。感知機網路、倒傳遞網路、機率神經網路、學習向量量化網路與反傳遞網路等五種類神經網路皆屬監督式學習。

(二)無監督式學習

從問題領域中取得訓練範例(只有輸入變數值)，並從中學習範例的內在集群規則，以應用於新的案例(有輸入變數值，而需推論它與那些訓練範例屬同一集群的應用)。自組織映射圖網路、自適應共振理論網路等兩種類神經網路皆屬無監督式學習。

(三)聯想式學習

從問題領域中取得訓練範例(狀態變數值)，並從中學習範例的內在記憶規則，以應用於新的案例(只有不完整的狀態變數值，而需推論其完整的狀態變數值的應用)。霍普菲爾網路、雙向聯想記憶網路等兩種類神經網路皆屬聯想式學習。

三、 倒傳遞神經網路 (BP)

在監督式學習模式中，由 Rumelhart 等學者於 1986 年所發展的誤差向後推導或稱倒傳遞學習演算法(簡稱 BP)是被廣泛使用的一種學習演算法，因為其具有學習及回想的功能，故可進行定率預測。一般倒傳遞網路可分為三部份(如附圖 3-8 所示)，輸入層用以接受外在環境的訊息，其神經元數目則依問題而定；輸出層用以輸出訊息給外在環境，其神經元數目同樣依問題而定；隱藏層將輸入與輸出層各處理單元間的相互關係充份地表現出來，其神經元數目並無標準可決定。倒傳遞網路模式學習訓練方式由所探討問題中取得相當數量之訓練樣本，並從樣本中應用向前餽入與誤差向後推導兩步驟推求輸入變

數與輸出變數的內在對映規則，再應用回想功能，進行新案例之輸出變數值推估。下列為倒傳遞網路 (Bp) 之學習與回想過程建立步驟：

1. 倒傳遞網路學習過程的建立：

(1) 令輸入層、隱藏層與輸出層節點分別以 i 、 j 、 k 為下標符號，建立一輸入層、隱藏層與輸出層節點數分別為 m 、 n 、 o 個，以均勻分佈隨機亂數設定加權值矩陣 W_{ij} 、 W_{jk} 與閾值 b_j 、 b_k 的初始值。

(2) 輸入一個訓練案例的輸入向量 $\vec{X} = [x_i] \quad i=1,2,\dots,m$ 與目標輸出向量 $\vec{T} = [T_k] \quad k=1,2,\dots,o$ 。

(3) 計算推估輸出向量 \vec{O} 。

A. 輸入層向量

$$\vec{X} = [x_i] \quad i=1,2,\dots,m$$

B. 計算隱藏層輸出向量 \vec{H}

$$H_j = f_h(\text{net}_j) , \text{net}_j = \sum_{i=1}^m x_i w_{ij} - b_j, j=1,2,\dots,n \dots\dots\dots (\text{附3-4式})$$

其中 $f_h(x)$ 為隱藏層轉換函數，可依問題型態挑選適當轉換函數。

C. 計算輸出層輸出向量 \vec{O}

$$O_k = f_o(\text{net}_k) , \text{net}_k = \sum_{j=1}^n H_j w_{jk} - b_k, k=1,2,\dots,o \dots\dots\dots (\text{附3-5式})$$

其中 $f_o(x)$ 為輸出層轉換函數，可依問題型態挑選適當轉換函數。

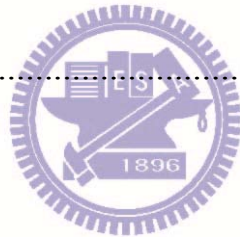
(4) 計算加權值矩陣修正量 Δw ，及閾值修正量 Δb 。

因為監督式學習的目的在降低網路輸出單元目標輸出值與推論輸出值之差距，所以一般以能量函數（又稱誤差函數）表示學習的品質：

$$E = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^o (O_k - T_k)^2 \dots\dots\dots (附3-6式)$$

因此網路的學習過程即為使能量函數最小化的過程，通常以最陡坡降法來使能量函數最小化，即每輸入一個訓練案例，網路即小幅調整加權值的大小，調整的幅度和誤差函數對該加權值的敏感程度成正比，即與誤差函數對加權值的偏微分值大小成正比：

$$\Delta w = -\eta \frac{\partial E}{\partial w} \dots\dots\dots (附3-7式)$$



式中：

Δw :加權值調整的幅度。

η :學習速率(learning rate)，控制每次以最陡坡降法最小化誤差函數的步幅，其範圍為 $0 \leq \eta \leq 1$ ，可視所需狀況自行設定範圍容許內之值。

經由一連串的代入及演算可推得以下各值：

A. 輸出層

$$\Delta w_{jk} = \eta(T_k - O_k) \cdot df_o(net_k) \cdot H_j \dots\dots\dots (附3-8式)$$

$$\Delta b_k = -\eta(T_k - O_k) \cdot df_o(net_k) \dots\dots\dots (附3-9式)$$

其中 $df_o(x)$ 為輸出層轉換函數之一階導函數，舉例說

明：若以雙彎曲函數 $f_o(x) = \frac{1}{1+e^{-x}}$ 為輸出層之轉換函數，其

一階導函數則為 $df_o(x) = \frac{e^{-x}}{(1+e^{-x})^2}$ 。

B. 隱藏層

$$\Delta w_{ij} = \eta(T_k - O_k) \cdot df_o(net_k) \cdot w_{jk} \cdot df_h(net_j) \cdot x_i \dots\dots\dots \text{(附3-10式)}$$

$$\Delta b_j = -\eta(T_k - O_k) \cdot df_o(net_k) \cdot w_{jk} \cdot df_h(net_j) \dots\dots\dots \text{(附3-11式)}$$

其中 $df_h(x)$ 為隱藏層轉換函數之一階導函數。

(5) 更新加權值矩陣與閾值

$$w_{new} = w_{old} + \Delta w \dots\dots\dots \text{(附3-12式)}$$

$$b_{new} = b_{old} + \Delta b \dots\dots\dots \text{(附3-13式)}$$

(6) 重覆步驟 2 至步驟 6，直至收斂，即誤差不再有明顯變化且符合所要求的精度。

2. 倒傳遞網路回想過程的建立:

- (1) 讀入加權值矩陣與閾值矩陣。
- (2) 輸入一個欲作檢定或驗證的案例之輸入向量 $\vec{X} = [x_i] \quad i=1,2,\dots,m$ 。
- (3) 計算推估輸出向量 \vec{O} 。

A. 輸入層向量

$$\vec{X} = [x_i] \quad i=1,2,\dots,m$$

B. 計算隱藏層輸出向量 \bar{H}

$$H_j = f_h(\text{net}_j), \text{net}_j = \sum_{i=1}^m x_i w_{ij} - b_j \quad j=1,2,3,\dots,n \dots \text{(附3-14式)}$$

其中 $f_h(x)$ 為隱藏層轉換函數，可依問題型態挑選適當轉換函數。

C. 計算輸出層輸出向量 \bar{O}

$$O_k = f_o(\text{net}_k), \text{net}_k = \sum_{j=1}^n H_j w_{jk} - b_k \quad k=1,2,3,\dots,o \dots \text{(附3-15式)}$$

其中 $f_o(x)$ 為輸出層轉換函數，可依問題型態挑選適當轉換函數。

四、 敏感度分析

對任一模式之敏感度可定義為：模式輸出值受輸入變數變化影響程度。舉例說明：若模式對某一輸入變數極為敏感，則表示當此一變數有些微改變時，將導致模式輸出值產生巨幅變化。

以數學說明表示某輸入變數之敏感度，即為模式輸出變數對該輸入變數之一階偏微分值。舉例說明，假設輸入變數為維度 n 之向量 \bar{x} ，模式輸出值為維度 m 之向量 \bar{y} ，輸入變數與輸出值之函數關係為 $\bar{y} = f(\bar{x})$ ，若想知道各輸入變數對第 k 個輸出值之敏感程度，我們可以計算第 k 個模式輸出值對各輸入變數之維度 n 一階偏微分值向量

($\bar{y}'_k = \left[\left[\frac{\partial y_k}{\partial x_i} \right] \right]_{i=1,2,3,\dots,n}$)，對微分值向量之任一分量而言，正值代表

輸出值隨該輸入變數增大而增大，負值則反向變化，其絕對值越大則代表該輸入變數對模式輸出值之影響程度越大，越趨近於零則表示模式輸出值對該變數變化並不敏感。因此，吾人可藉由模式之一階偏微

分值向量，瞭解任一變數對模式之影響程度。

可是許多時候難以得到輸入變數對模式輸出值之微分解析式，通常都以差分式近似之。而類神經網路之倒傳遞神經網路由人工神經元所組成，其組成函數為可微分函數，因此可推導得倒傳遞神經網路輸出值對各輸入變數之一階偏微分解析式。

由前節倒傳遞神經網路(BP)的介紹可知，一單隱藏層之倒傳遞神經網路之輸出值 O_k 可表示如下：

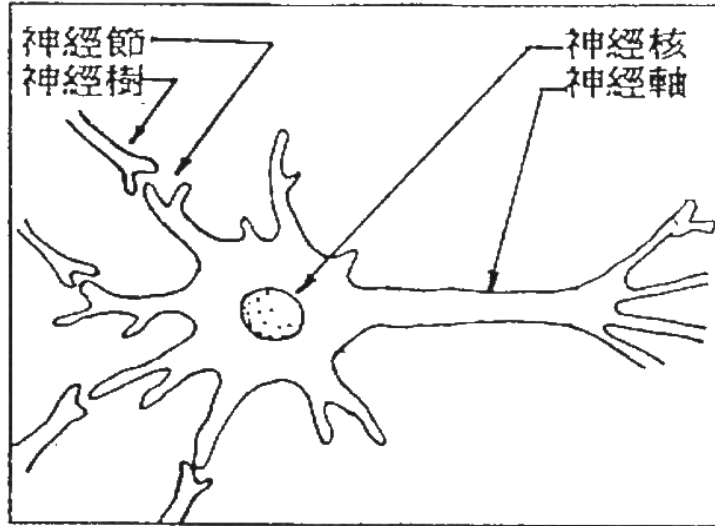
$$O_k = f_o(net_k) , \quad net_k = \sum_{j=1}^n H_j w_{jk} - b_k \quad k = 1, 2, 3, \dots, o \quad . \text{(附3-16式)}$$

$$H_j = f_h(net_j) , \quad net_j = \sum_{i=1}^m x_i w_{ij} - b_j \quad j = 1, 2, 3, \dots, n \quad \dots \text{(附3-17式)}$$

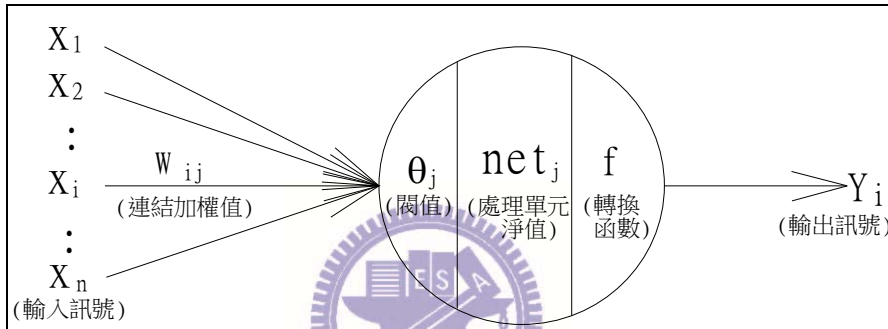
其中， O_k 、 H_j 分別為輸出層、隱藏層之輸出單元， x_i 則為輸入層之輸入單元。此外， W 為權重值， b 為閾值， $f_o(x)$ 、 $f_h(x)$ 分別為輸出層與隱藏層之轉換函數。因此各輸入變數對輸出層輸出單元之一階偏微分解析式如下：

$$\frac{\partial O_k}{\partial x_i} = \sum_{k=1}^n df_o(net_k) \cdot w_{jk} \cdot df_h(net_j) \cdot w_{ij} \dots \dots \dots \text{(附3-18式)}$$

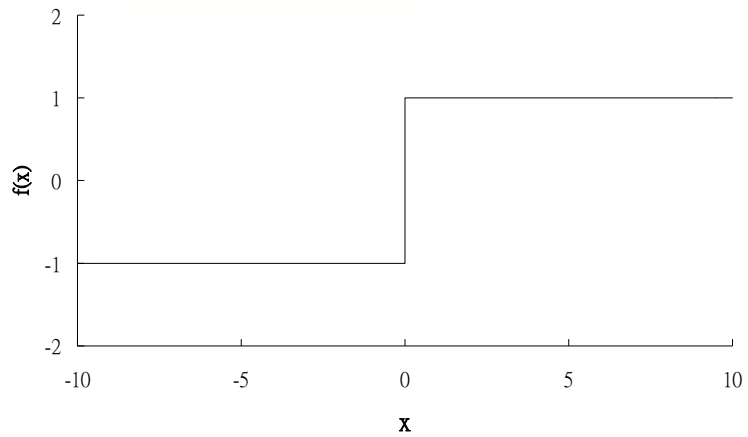
其中： $df_o(x) = \frac{\partial f_o(x)}{\partial x}$ 、 $df_h(x) = \frac{\partial f_h(x)}{\partial x}$



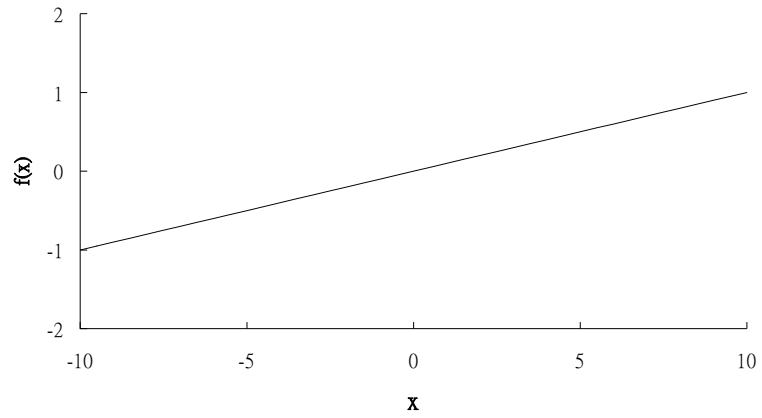
附圖 3-1 物神經元模型 (葉怡成, 1993)



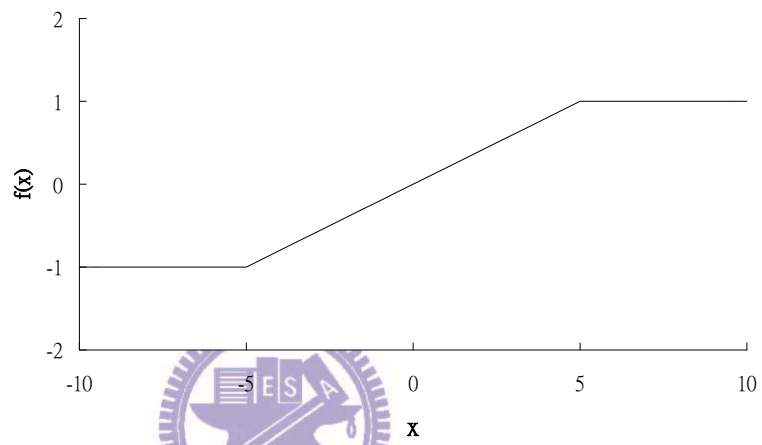
附圖 3-2 人工神經元模型



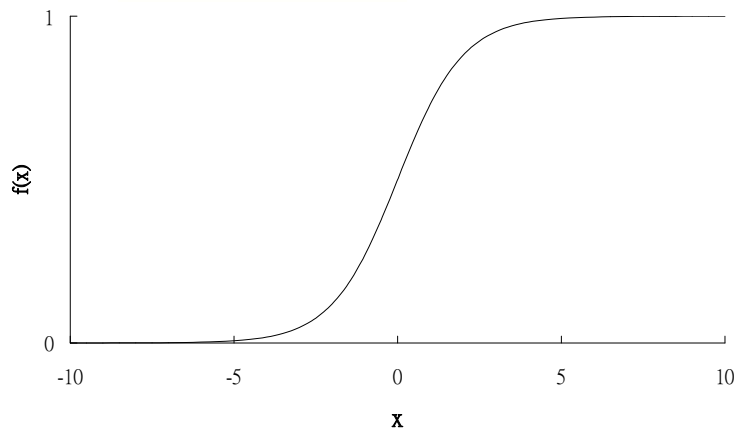
附圖 3-3 位階臨界轉換函數圖



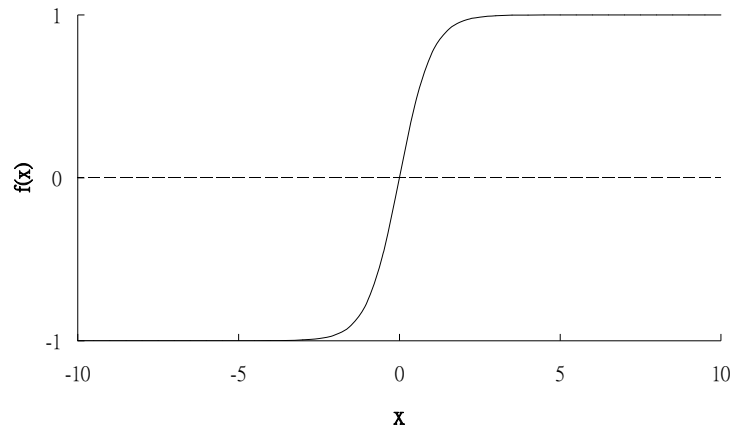
附圖 3-4 線性轉換函數圖



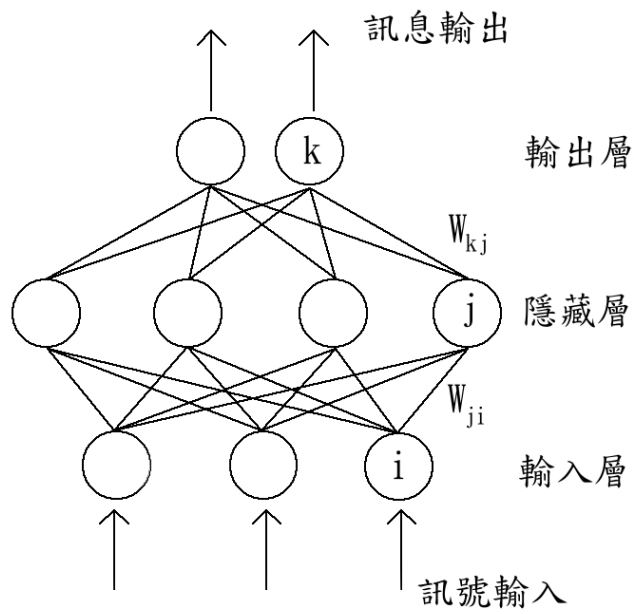
附圖 3-5 非線性轉換函數圖



附圖 3-6 雙彎曲轉換函數圖



附圖 3-7 雙曲線正切轉換函數圖



附圖 3-8 倒傳遞網路模型