

國 立 交 通 大 學

土木工程研究所

碩 士 論 文

應用衛星影像辨識與河道水理演算於濁水溪沖積扇

地下水數值模擬

Applying Satellite Image Identification Technology  
and River Channel Routing Module to  
Groundwater Simulation of Chou-Shui River

研 究 生 : 楊 深 惠

指 導 教 授 : 張 良 正 博 士

中 華 民 國 一 百 零 一 年 六 月

應用衛星影像辨識與河道水理演算於濁水溪沖積扇  
地下水數值模擬

Applying Satellite Image Identification Technology  
and River Channel Routing Module to  
Groundwater Simulation of Chou-Shui River

研究生：楊深惠

指導教授：張良正 博士

Student : Shen H. Yang

Advisor : Dr. Liang C. Chang

國立交通大學  
土木工程學系碩士班  
碩士論文

A Thesis  
Submitted to Department of Civil Engineering  
National Chiao Tung University  
in Partial Fulfillment of Requirements  
for the Degree of  
Master of Science  
in  
Civil Engineering  
June 2012  
Hsinchu, Taiwan, Republic of China

中華民國一百零一年六月

# 應用衛星影像辨識與河道水理演算於濁水溪地下水 數值模擬

學生：楊深惠

指導教授：張良正 博士

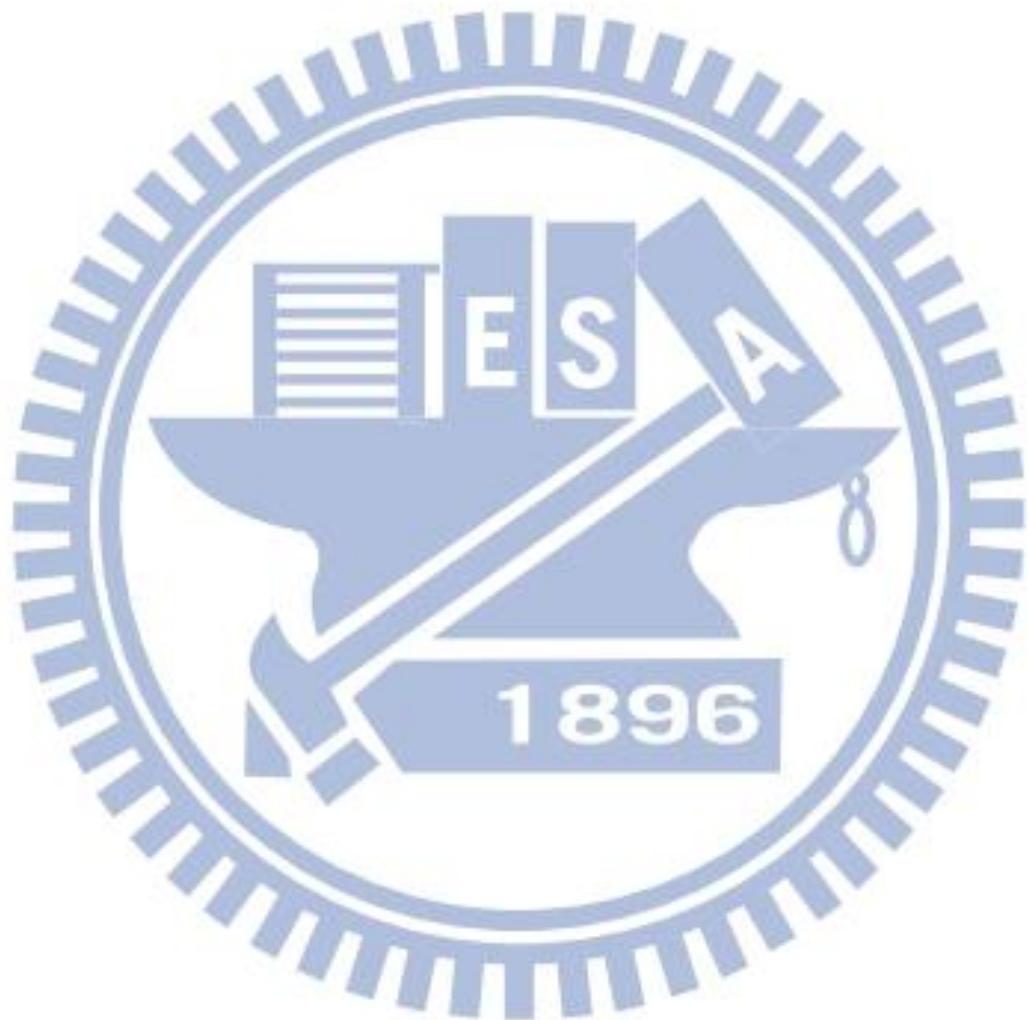
國立交通大學土木工程研究所

## 摘要

濁水溪沖積扇為台灣地區最重要的地下水區之一，因此以往已有不少濁水溪沖積扇相關地下水數值模擬之研究，惟多未對濁水溪本流與沖積扇地下水系統間之交換進行較深入之探討。因此，為了提昇對濁水溪本流對區域地下水影響之掌握，本研究以河道模擬演算及衛星影像辨識，分別估計濁水溪之河水位高程與河道水面範圍變化，以作為地下水數值模式中河道模組(RIV package)之關鍵參數，並以 RIV package 探討濁水溪本流與沖積扇地下水系統間之交換關係。在河道水理演算部分，本研究以 2008 年之彰雲大橋、西濱大橋、自強大橋及溪州大橋之月平均水位資料與月平均流量資料，及 2007 年 12 月之河川量測斷面進行河道水理模式之設定與檢定，並模擬全河道之水位。在影像辨識部分，分別以 2008 年一月、七月與十一月之福衛二號多光譜之衛星影像圖，並採其中之近紅外光波段作為辨識河道之依據。

研究結果顯示，在河道水理演算方面，濁水溪下游之西濱大橋，其水深於枯水期與豐水期時水深為 0.3 及 1.7 公尺，相差 1.4 公尺；而在濁水溪上游彰雲橋水深較深，其枯水期與豐水期時水深為 2.2 及 0.2 公尺，豐枯水期水深相差至 2 公尺。衛星影像辨識發現，濁水溪於 2008 年一月、七月與十一月之瓣狀河道面積分別為 18.95、31.08 與 17.51 平方公里，枯水期之

河道面積約僅佔豐水期面積之 60%，綜合前述，豐水期有較高之河水位與河道面積且與枯水期差距甚大。而地下水數值模式方面，則推估出濁水溪之河川入滲量為每年 5.26 億噸、河川出滲量為每年 1.12 億噸、整體沖積扇之補注量為每年 20.23 億噸，抽水量為每年 19.3 億噸，比較各種相關研究文獻，顯示此抽水量值應屬合理範圍。



# Applying Satellite Image Identification Technology and River Channel Routing Module to Groundwater Simulation of Chou-Shui River

Student : Shen-Hui Yang

Advisor : Dr. Liang-Cheng Chang

Department of Civil Engineering

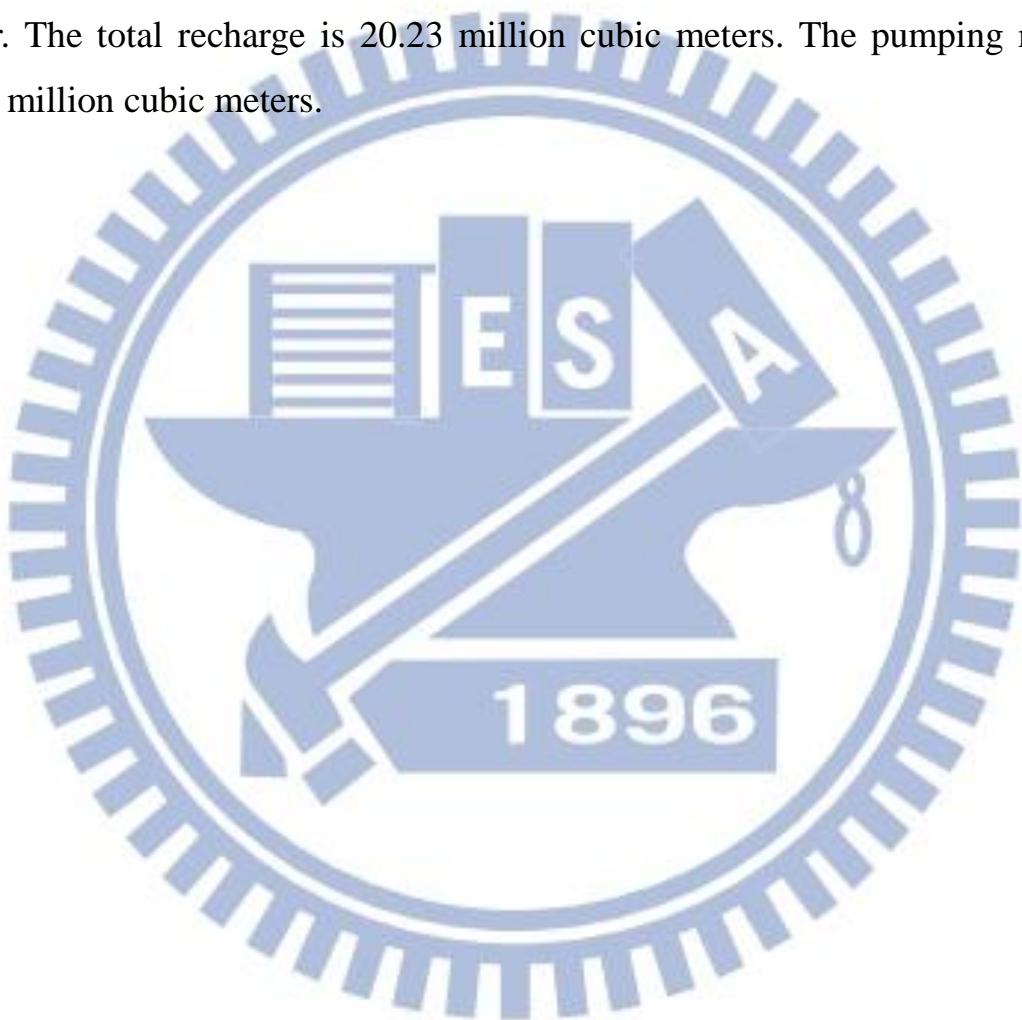
National Chiao Tung University

## Abstract

Many groundwater simulation models have been developed for Chou-Shui River alluvial fan, one of the most important groundwater area. However, the exchange between Chou-Shui River and the groundwater system of the alluvial fan is much less studied. This exchange is evaluated using a river package in the groundwater simulation model. Several critical parameters used in the river package are determined using the relationship between the river water level and the area of river flow surface. This relationship is evaluated by satellite image technology. The river package is calibrated using the monthly average water level data and the monthly average flow data of year 2008 at Chang-Yun Bridge, Xi-Bin Bridge, Chi-Chiang Bridge and Si-Jou Bridge. The field measurement of the cross-section in December 2007 is used in the river package. For calibration of satellite image technology, the FORMOSAT multispectral satellite images of January, July, and November in 2008 are used. The Infrared light is used to identify the river channel.

The results show that the water level differences between wet and dry periods are 1.4m and 2.0m for Xi-Bin Bridge station and Chang-Yun Bridge station respectively. Specifically, 0.3m during dry period and 1.7m during wet period at Xi-Bin Bridge station and 0.2m during dry period and 2.2m during

wet period at Chang-Yun Bridge station. The identified areas of the braided channel in Chou-Shui River using the satellite image technology are 18.95, 31.08, and 17.51 km<sup>2</sup> in January, July, and November of year 2008 respectively. The area during the dry periods is about 60% of the area during the wet periods. The exchange rates between the river and the groundwater system are 526 million cubic meters and 112 million cubic meters for flowing out and into the river. The total recharge is 20.23 million cubic meters. The pumping rates is 19.3 million cubic meters.



## 謝誌

感謝吾師張良正教授對於本論文之指導及研究生涯中對學生工作態度及學問研究之啟發，使學生受益匪淺。另承蒙口試委員 劉說安教授、江崇榮副所長、徐年盛教授及蕭金財副教授在口試前細心審閱學生的論文，並於口試期間給予保貴之意見，使得本文更趨於完備，在此謹致衷心謝意。

另外必須在此特別感謝陳宇文學長於研究期間全程參與及指導本論文之撰寫，也感謝蔡瑞彬學長的鼎力相助，還有張老師研究室所有成員的陪伴及互相幫助。

最後感謝家人在精神上的支持，讓我得以順利取得碩士學位。



# 目錄

|   |     |
|---|-----|
| 摘要.....                                   | I   |
| Abstract.....                             | III |
| 謝誌.....                                   | V   |
| 目錄.....                                   | VI  |
| 第一章 前言.....                               | 1   |
| 1.1 研究動機 .....                            | 1   |
| 1.2 研究目的 .....                            | 2   |
| 1.3 研究流程 .....                            | 2   |
| 第二章 文獻回顧 .....                            | 6   |
| 2.1 地下水數值模式 .....                         | 6   |
| 2.1.1 地下水數值模式 .....                       | 6   |
| 2.1.2 參數檢定 .....                          | 9   |
| 2.2 河道水理演算 .....                          | 11  |
| 2.3 衛星影像與衛星影像辨識 .....                     | 11  |
| 第三章 理論敘述 .....                            | 13  |
| 3.1 地下水數值模擬與參數檢定 .....                    | 13  |
| 3.1.1 MODFLOW 之河川套件(River package)簡述..... | 13  |
| 3.2 HEC-RAS 河道定量流演算 .....                 | 18  |
| 3.3 衛星影像河道辨識 .....                        | 24  |
| 3.3.1 遙測基本原理 .....                        | 24  |
| 3.3.2 遙測載具 .....                          | 25  |
| 3.3.3 衛星遙測資料之特性 .....                     | 28  |
| 第四章 濁水溪本流與區域地下水互動模式建置 .....               | 31  |

|                                |     |
|--------------------------------|-----|
| 4.1 研究區域 .....                 | 31  |
| 4.2 應用 HEC-RAS 於濁水溪河水位模擬 ..... | 35  |
| 4.2.1 HEC-RAS 模式說明與參數設定 .....  | 35  |
| 4.2.2 模式參數設定 .....             | 36  |
| 4.3 應用衛星影像辨識於濁水溪河道面積 .....     | 49  |
| 4.4 濁水溪沖積扇地下水數值模式建置 .....      | 55  |
| 4.4.1 地下水分層架構、邊界條件與格網劃分 .....  | 55  |
| 4.4.2 模式輸入資料 .....             | 62  |
| 4.5 參數檢定結果 .....               | 73  |
| 4.5.1 手動微幅調整水文地質架構 .....       | 74  |
| 4.5.2 專家系統參數檢定 .....           | 81  |
| 4.6 水平衡分析 .....                | 85  |
| 第五章 結論與建議 .....                | 100 |
| 5.1 結論 .....                   | 100 |
| 5.2 建議 .....                   | 101 |
| 參考文獻 .....                     | 102 |
| 附錄 A 各觀測井之水力傳導係數資料 .....       | 106 |
| 附錄 B 修正型水位歷線法 .....            | 108 |

## 表目錄

|   |    |
|---|----|
| 表 1.3-1 濁水溪沖積扇補注量相關研究比較(資料來源：經濟部水利署)... | 7  |
| 表 3.2-1 束縮與擴張係數表 .....                  | 22 |
| 表 3.3-1 電磁波波譜 .....                     | 24 |
| 表 3.3-2 福爾摩沙衛星二號之遙測酬載儀器規格 .....         | 27 |
| 表 3.3-3 福衛二號影像及相關參數 .....               | 28 |
| 表 4.2-1 濁水溪本流各河段曼寧 n 值計算成果表 .....       | 39 |
| 表 4.2-2 彰雲橋 2008 年月平均流量表 .....          | 41 |
| 表 4.2-3 芳苑站月平均潮位高程表 .....               | 42 |
| 表 4.3-1 各段河道濕潤區之面積及等效河寬 .....           | 54 |
| 表 4.4-1 各斷面及各月份之模擬水位 .....              | 69 |
| 表 4.4-2 濁水溪一月相對應之網格內面積 .....            | 72 |
| 表 4.6-1 濁水溪入滲與出滲量統計表 .....              | 87 |
| 表 4.6-2 各層抽水量統計表 .....                  | 93 |

## 圖目錄

|  |    |
|--|----|
| 圖 1.3-1 地下水系統水平衡關係圖 .....                    | 3  |
| 圖 1.3-2 研究流程圖 .....                          | 4  |
| 圖 1.3-3 數值模式參數檢定流程圖 .....                    | 5  |
| 圖 3.1-1 河川入滲機制示意圖 .....                      | 14 |
| 圖 3.1-2 參數檢定流程圖 .....                        | 15 |
| 圖 3.2-1 能量方程式示意圖 .....                       | 20 |
| 圖 3.2-2 河川上下游斷面間距之定義 .....                   | 21 |
| 圖 3.2-3 動量方程式示意圖 .....                       | 23 |
| 圖 3.3-1 植物、水及土壤在不同波長的輻射反應 .....              | 25 |
| 圖 4.1-1 濁水溪沖積扇水文地質剖面圖(海園至石榴) .....           | 32 |
| 圖 4.1-2 濁水溪沖積扇地下水觀測網站井分布圖 (繪製於民國 98 年) ..... | 34 |
| 圖 4.2-1 濁水溪流域系統圖 .....                       | 35 |
| 圖 4.2-2 HEC-RAS 模擬流程 .....                   | 36 |
| 圖 4.2-3 斷面 1 之河川斷面圖 .....                    | 37 |
| 圖 4.2-4 斷面 45 之河川斷面圖 .....                   | 37 |
| 圖 4.2-5 斷面 86 之河川斷面圖 .....                   | 38 |
| 圖 4.2-6 濁水溪底床剖面圖 .....                       | 38 |
| 圖 4.2-7 彰雲橋 2008 年月平均流量圖 .....               | 40 |
| 圖 4.2-8 斷面 86、斷面 87 及彰雲橋水位站位置關係圖 .....       | 43 |
| 圖 4.2-9 斷面 86 及斷面 87 剖面圖 .....               | 43 |
| 圖 4.2-10 濁水溪一月模擬水位與觀測水位 .....                | 45 |
| 圖 4.2-11 濁水溪四月模擬水位與觀測水位 .....                | 45 |
| 圖 4.2-12 濁水溪七月模擬水位與觀測水位 .....                | 46 |

|                                       |    |
|---------------------------------------|----|
| 圖 4.2-13 濁水溪十月模擬水位與觀測水位 .....         | 47 |
| 圖 4.2-14 彰雲橋觀測水位與模擬水位時序比較圖 .....      | 47 |
| 圖 4.2-15 溪州大橋觀測水位與模擬水位時序比較圖 .....     | 48 |
| 圖 4.2-16 自強大橋觀測水位與模擬水位時序比較圖 .....     | 48 |
| 圖 4.2-17 西濱大橋觀測水位與模擬水位時序比較圖 .....     | 49 |
| 圖 4.3-1 一月濁水溪上游衛星影像圖 .....            | 50 |
| 圖 4.3-2 四月濁水溪上游衛星影像圖 .....            | 50 |
| 圖 4.3-3 七月濁水溪上游衛星影像圖 .....            | 51 |
| 圖 4.3-4 十一月濁水溪上游衛星影像圖 .....           | 51 |
| 圖 4.3-5 四季河道行水濕潤區域重疊圖 .....           | 52 |
| 圖 4.3-6 四季之河道濕潤區面積 .....              | 53 |
| 圖 4.4-1 地層柱狀圖分部位置 .....               | 56 |
| 圖 4.4-2 濁水溪沖積扇水文地質架構概念分層 .....        | 56 |
| 圖 4.4-3 濁水溪沖積扇地下水邊界之概念圖 .....         | 57 |
| 圖 4.4-4 濁水溪沖積扇模式之格網劃分 .....           | 59 |
| 圖 4.4-5 濁水溪沖積扇模式第 1 分層格網劃分 .....      | 60 |
| 圖 4.4-6 濁水溪沖積扇模式第 2~5 分層格網劃分 .....    | 61 |
| 圖 4.4-7 濁水溪沖積扇模式第 49 列格網劃分剖面圖 .....   | 61 |
| 圖 4.4-8 濁水溪沖積扇模式第 1 分層徐昇氏網格分區 .....   | 63 |
| 圖 4.4-9 濁水溪沖積扇模式第 3 分層徐昇氏網格分區 .....   | 64 |
| 圖 4.4-10 濁水溪沖積扇模式第 5 分層徐昇氏網格分區 .....  | 65 |
| 圖 4.4-11 濁水溪沖積扇模式第 2 分層水力傳導係數分布 ..... | 66 |
| 圖 4.4-12 濁水溪沖積扇模式第 4 分層水力傳導係數分布 ..... | 67 |
| 圖 4.4-13 濁水溪沖積扇及其對應之斷面 .....          | 69 |

|  |    |
|--|----|
| 圖 4.5-1 扇頂區域地下水位站分布圖(第三分層) .....               | 75 |
| 圖 4.5-2 二水觀測井之地質剖面圖 .....                      | 76 |
| 圖 4.5-3 烏塗、六合觀測井之地質剖面圖 .....                   | 76 |
| 圖 4.5-4 烏塗岩心柱狀圖 .....                          | 77 |
| 圖 4.5-5 六合岩心柱狀圖 .....                          | 77 |
| 圖 4.5-6 烏塗、六合(2)及二水觀測水位圖 .....                 | 78 |
| 圖 4.5-7 濁水溪沖積扇模式第 2 分層水力傳導係數分布 .....           | 79 |
| 圖 4.5-8 海園(3)與鄰近水井之地下水位變化圖 .....               | 80 |
| 圖 4.5-9 模式定水頭邊界條件分布圖(第五分層) .....               | 81 |
| 圖 4.5-10 觀測水位與檢定水位之等值圖(第一分層 2006 年 6 月份) ..... | 82 |
| 圖 4.5-11 觀測水位與檢定水位之等值圖(第三分層 2006 年 6 月份) ..... | 83 |
| 圖 4.5-12 觀測水位與檢定水位之等值圖(第五分層 2006 年 6 月份) ..... | 84 |
| 圖 4.5-13 觀測水位與檢定水位檢定關係圖 .....                  | 85 |
| 圖 4.6-1 濁水溪各月入滲量變化圖 .....                      | 88 |
| 圖 4.6-2 濁水溪各月出滲量變化圖 .....                      | 88 |
| 圖 4.6-3 彰雲橋觀測水位 .....                          | 89 |
| 圖 4.6-4 二水觀測井之地下水位 .....                       | 89 |
| 圖 4.6-5 一月河川出滲與入滲量空間分布圖 .....                  | 90 |
| 圖 4.6-6 四月河川出滲與入滲量空間分布圖 .....                  | 90 |
| 圖 4.6-7 七月河川出滲與入滲量空間分布圖 .....                  | 91 |
| 圖 4.6-8 十一月河川出滲與入滲量空間分布圖 .....                 | 91 |
| 圖 4.6-9 第一層一月淨補注量分佈圖 .....                     | 94 |
| 圖 4.6-10 第一層四月淨補注量分佈圖 .....                    | 94 |
| 圖 4.6-11 第一層七月淨補注量分佈圖 .....                    | 95 |

|   |    |
|---|----|
| 圖 4.6-12 第一層十月淨補注量分佈圖 .....             | 95 |
| 圖 4.6-13 第三層一月淨補注量分佈圖 .....             | 96 |
| 圖 4.6-14 第三層四月淨補注量分佈圖 .....             | 96 |
| 圖 4.6-15 第三層七月淨補注量分佈圖 .....             | 96 |
| 圖 4.6-16 第三層十月淨補注量分佈圖 .....             | 96 |
| 圖 4.6-17 第五層一月淨補注量分佈圖 .....             | 97 |
| 圖 4.6-18 第五層四月淨補注量分佈圖 .....             | 97 |
| 圖 4.6-19 第五層七月淨補注量分佈圖 .....             | 97 |
| 圖 4.6-20 第五層十月淨補注量分佈圖 .....             | 97 |
| 圖 4.6-21 抽水較大區域與土地利用(左為第三層，右為第五層) ..... | 99 |
| 圖 4.6-22 抽水量較大之衛星地形圖(左為第三層，右為第五層) ..... | 99 |

# 第一章 前言

## 1.1 研究動機

台灣地區降雨量豐沛，平均降雨量約為世界平均降雨量之 2.6 倍，但由於地狹人稠，每人每年之可分配雨量卻僅為世界平均值之七分之一。此外，台灣地區降雨量在時間上及空間上之分佈極不均勻，全年約有 78% 之降雨量集中於豐水期(約五月至十月)，枯水期(其餘六個月) 之降雨量則僅佔 22%。此雨量時間上之分配不均，致使台灣地區必需有大型蓄水設施(水庫)以進行水資源時間上之調度，亦即一般所謂之「蓄豐濟枯」。惟近年來環境保護意識高漲，加上優良新壩址難尋，導致新的大型地表水工結構物難以興建且開發成本大增。因此，尋求其他對環境衝擊較少且成本較低的水資源，乃是當務之急。台灣地區蘊含豐富之地下水資源，如能妥善管理運用，應可為一環境衝擊小且成本低的水資源之一，惟過去由於缺乏適當的管理，許多地區過度使用地下水，導致環境災害發生，包括地層下陷或海水入侵等，如濁水溪沖積扇則飽受地層下陷之苦。然而地下水並非不能使用，其究竟是為一個可永續經營的水源或是在飲鳩止渴，端賴是否有適當的管理。而良好的管理策略皆需經嚴格的評估修正而得，其中地下水數值模擬則為最常見且有效的評估工具，管理者可以數值模擬檢驗地下水資源操作策略之優劣。

濁水溪沖積扇為台灣地區最重要的地下水區之一，過去已有許多地下水相關之研究，惟對於濁水溪本流對地下水之影響皆著墨不多。如劉聰桂(1996)利用熱核爆氣示蹤方法評估地下水補注量；能邦科技(2000)、巨廷工程和交通大學(2005)以一維垂向之溼地入滲係數和旱地降雨入滲率，評估地下水補注量；農業工程研究中心(1989)、葉文工(1999)、中興工程(1997、

1998)則利用二維多層地下水數值模式逆推地下水收支；江崇榮等人(2006)、地調所及交通大學(2009)則以水位歷線法推估地下水補注及抽取。惟前述研究對於濁水溪本流對地下水之影響皆著墨不多，若有數值模式之建立，亦鮮少加入河川因子之考量，其主要原因為河川參數(底泥厚度、底床水力傳導係數及河川水位高度及寬度等)極難取得。惟大型河川對地下水應有相當程度之影響，根據李振誥(2007)在新虎尾溪利用水位變化評估地下水補注量之研究中，其河川高度將影響其滲漏百分比。因此，大型河川在區域地下水模擬時仍應慎重考慮之。

有鑑於此，本研究乃以濁水溪沖積扇為研究區域，試圖克服資料之不足建立考量濁水溪本流之地下水數值模式，探討濁水溪對於整個沖積扇地下水之影響，以為未來濁水溪沖積扇地下水管理之基礎。

## 1.2 研究目的

本研究目的為結合影像辨識與河川水位模擬，建立考量濁水溪本流之濁水溪沖積扇地下水數值模式，以探討濁水溪水位與沖積扇區域地下水之互動關係。其中以河川水理演算模式(HEC-RAS)，決定濁水溪不同時期之河水位，再以影像辨識技術推估濁水溪不同時期之水面寬度，求得河道面積，以提供地下水數值模式中河川模組(River Package, RIV Package)之關鍵參數。

## 1.3 研究流程

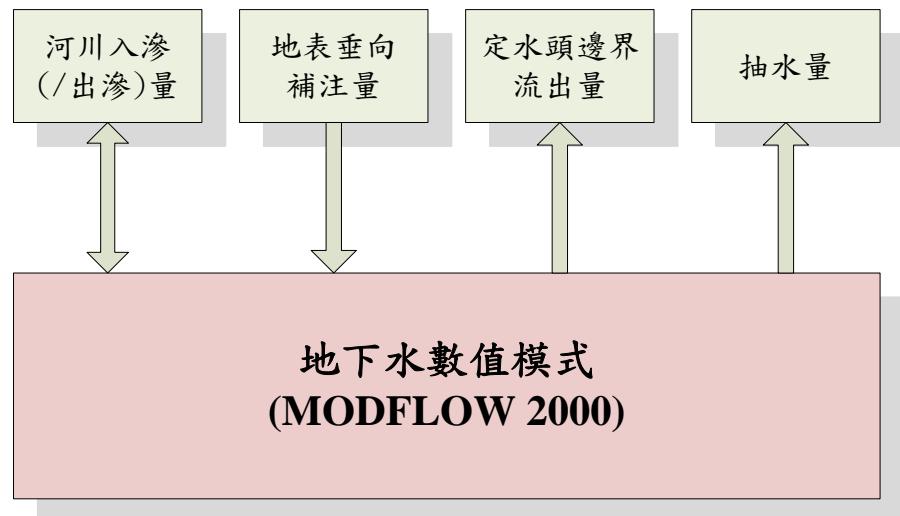


圖 1.3-1 地下水系統水平衡關係圖

圖 1.3-1 為地下水系統水平衡關係圖，其中河川入滲量、地表垂向補注量、定水頭邊界條件流出量與抽水量四者，為最常見之幾種進出水量。其中，抽水量為人為之使用量；定水頭邊界淨流出量往往設定於下游海邊等，其為系統向海邊外界流出之水量；地表垂向補注量則為非河川區域之補注量，其僅在降雨期間方有補注源；河川入滲(/出滲)量則為河川水位與地下水位高程間之相對關係，而有向河道出滲或向地下水系統入滲之差別；抽水量為人類活動造成之水量進出。根據圖 1.3-1 之基本理念，本研究之研究流程圖如圖 1.3-2 所示。

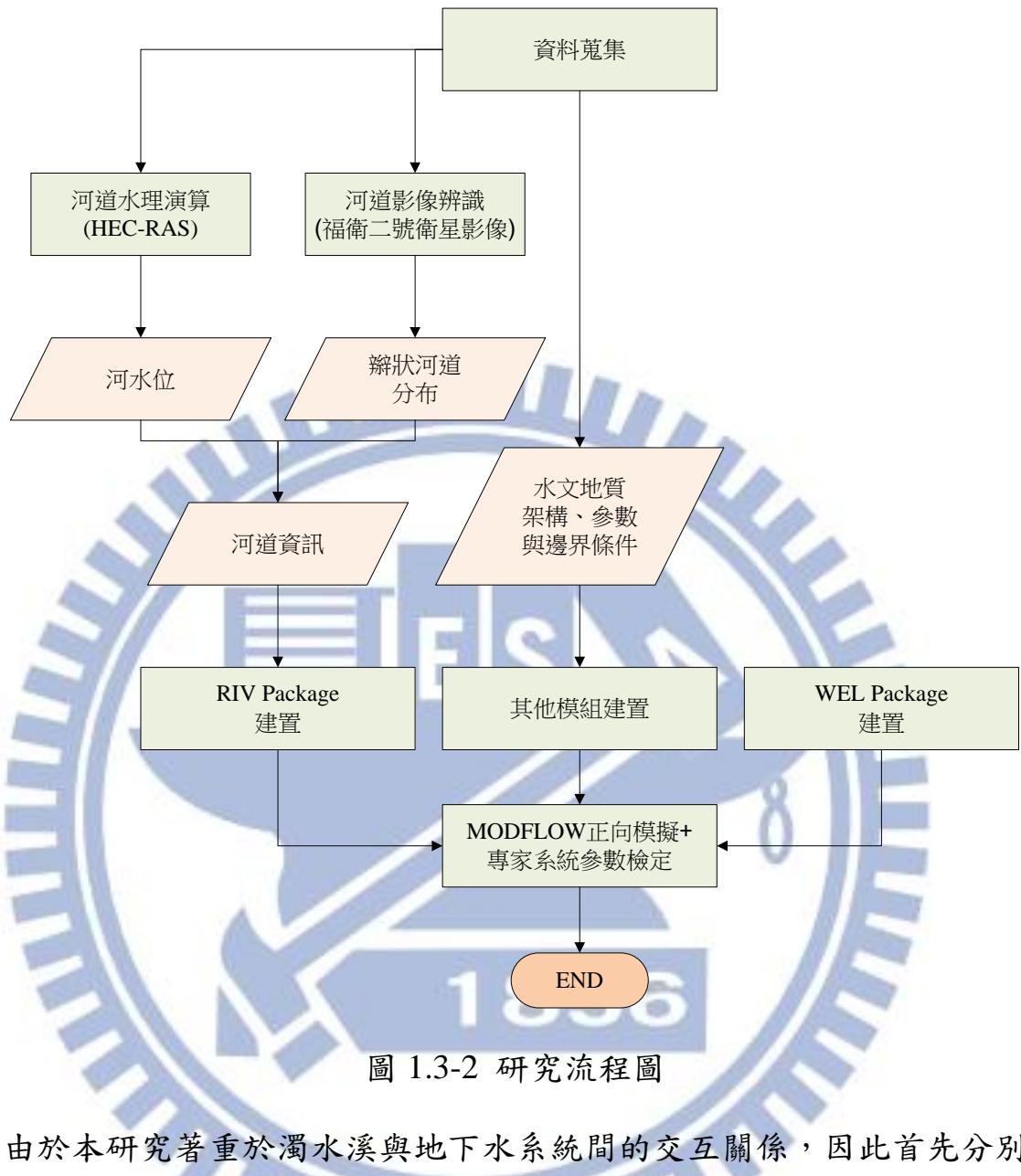


圖 1.3-2 研究流程圖

由於本研究著重於濁水溪與地下水系統間的交互關係，因此首先分別以河道水理演算模擬濁水溪水位，並藉由不同月份福衛二號所拍攝之濁水溪河道影像，辨識濁水溪瓣狀河道分布範圍。其次，以前述之河道資訊設定河道模組(RIV Package)，並將抽水量與垂向補注量等其他進出水量設定為水井模組(WEL Package)，以及搭配水文地質架構切割研究區域。接著，以觀測水位搭配專家系統檢定淨抽水量，以釐清除河川入滲(出滲)量以外之其他進出水量，淨抽水量等於抽水量減垂向補注量。

圖 1.3-3 為數值模式正向模擬與參數檢定的流程圖。由於水文地質架

構與參數，係採經濟部中央地質調查所繪製之水文地質架構圖與現地試驗值為基礎，藉由徐昇氏多邊形，直接正向給入與建置數值模式，由於鑽探資訊與抽水試驗之尺度與濁水溪沖積扇之尺度差異較大，故直接套用於濁水溪沖積扇尺度之地下水數值模式，則可能存在不確定性。

因此本研究首先以專家系統參數檢定系統，自動化檢定整體之淨抽水量，在深層無法直接補注之物理限制條件下，若無法滿足檢定標準，則針對未收斂之區域，以其他現地調查資料為輔助，視情況微幅調整水文地質參數與架構。

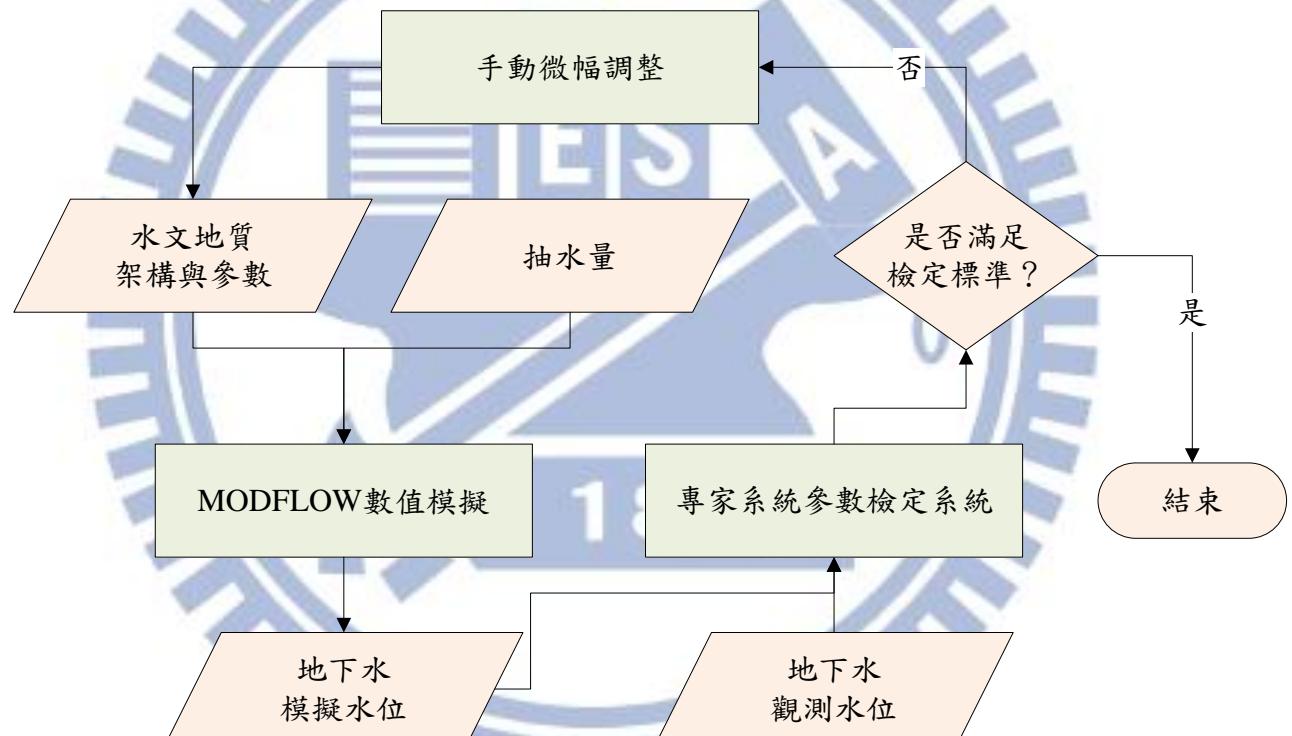


圖 1.3-3 數值模式參數檢定流程圖

## 第二章 文獻回顧

### 2.1 地下水數值模式

本研究將運用影像辨識技術，其適用於大地區的空間涵蓋特性，可累積詳實且長時間紀錄，該技術並具有極佳的觀察能力，可用於觀察各季河道面積之改變。此外，本研究亦應用河道水理演算，來補足河水位高程記錄在空間上之不足，結合兩者建立一個考量濁水溪本流之濁水溪沖積扇地下水數值模式，藉此以探討濁水溪河水與沖積扇區域地下水間之互動關係。以下小節將分別針對地下水數值模式、河道水理演算與衛星影像辨識之文獻回顧進一步說明。

#### 2.1.1 地下水數值模式

在濁水溪沖積扇現地研究方面，濁水溪沖積扇之相關研究甚多，如劉聰桂(1996)利用熱核爆氣示蹤方法評估地下水補注量；能邦科技(2000)以及巨廷工程和交通大學(2005)以一維垂向飽和入滲係數和降雨入滲率，評估地下水補注量；台灣大學土木工程研究所(1997)與台灣大學水工試驗所(1998)以一維未飽和垂向地下水水流模式評估地下水補注量；農業工程研究中心(1989)、葉文工(1999)與中興工程(1997、1998)則利用二維多層地下水水流數值模式，藉由參數檢定方式逆推地下水收支；江崇榮等人(2006)與經濟部中央地質調查所(2009)則以水位歷線法推估地下水補注及抽取；王雲直(2010)則以專家系統發展出自動化地下水參數檢定模式，並將檢定模式應用於濁水溪沖積扇，推估出民國 89 年至 98 年間之平均淨補注量；上述各種研究估得濁水溪沖積扇歷年來之地下水補注量在 8.1 億到 15.4 億之間，上述重要文獻數據整理至表 1.3-1。

表 1.3-1 濁水溪沖積扇補注量相關研究比較(資料來源：經濟部水利署)

| 方法                   | 估算人/委辦單位                     | 範圍/面積                | 抽水量        |
|----------------------|------------------------------|----------------------|------------|
| 水平衡法配合地下水數學模式(有限元素法) | 曹以松、劉佳明、徐年盛、鄭昌奇(1989)/台灣省水利局 | 濁水溪沖積扇/約 1800 平方公里   | 10.91 億噸/年 |
| 2DFEWA 數值模擬          | 李清水、林俊男(1994)/經濟部水資源局        | 濁水溪沖積扇/約 1800 平方公里   | 16.44 億噸/年 |
| 3DFEWA 數值模擬          | 張信誠、劉振宇(1996)/國科會            | 雲林/約 1120 平方公里       | 6.6 億噸/年   |
| MODFLOW 數值模擬         | 林再興(1998)/經濟部水資源局            | 彰化地區/約 830 平方公里      | 11.12 億噸/年 |
| MODFLOW 數值模擬         | 中興工程(1998)/水利處               | 濁水溪沖積扇/約 2000.5 平方公里 | 8~9 億噸/年   |
| MODFLOW 數值模擬         | 中興工程(2001)/水利署               | 濁水溪沖積扇/約 1800 平方公里   | 8.8 億噸/年   |
| MODFLOW 數值模擬         | 張良正、劉振宇(2002)/水利署            | 濁水溪沖積扇/約 1800 平方公里   | 23.1 億噸/年  |
| 水平衡法                 | 中興工程(1998)/經濟部水資源局           | 濁水溪沖積扇/約 1800 平方公里   | 7.44 億噸/年  |
| 水平衡法                 | 水利處(1997a)                   | 雲林/約 1120 平方公里       | 7.57 億噸/年  |
| 水平衡法                 | 水利處(1997a)                   | 濁水溪沖積扇/約             | 14.1 億噸/   |

|   |                    | 1800 平方公里             | 年              |
|---|--------------------|-----------------------|----------------|
| 現場調查                                    | 水資會(1992)          | 濁水溪沖積扇/約<br>1800 平方公里 | 21.02 億噸/<br>年 |
| 地下水歷線分<br>析法(未考慮旱<br>作抽水)               | 江崇榮等(2006)         | 濁水溪沖積扇<br>/2079 平方公里  | 13.32 億噸/<br>年 |
| 用電量分析                                   | 雲科大(2008) /水利<br>署 | 濁水溪沖積扇<br>/1800 平方公里  | 20.90 億噸/<br>年 |
| 地下水歷線分<br>析法(同時考慮<br>非灌溉、稻作和<br>旱作灌溉抽水) | 本計畫(2011) /水利<br>署 | 濁水溪沖積扇<br>/2562 平方公里  | 22.28 億噸/<br>年 |

惟前述研究僅著墨於沖積扇之地下水，較少針對濁水溪本流對地下水之影響進行探討。然大型河川與區域地下水系統應有相當程度之影響，對於河川入滲量與出滲量之推估應進一步考量。Sophocleous et al.(1995)以 MODFLOW 模擬美國堪薩斯州沖積平原，研究中考量河流與含水層之交互關係，結果顯示河床底泥透水性、河床貫穿含水層之程度與含水層之異向性為影響河道與地下水補注量之重要因素。Bulter et al.(2001)利用 MODFLOW 建立多層含水層之地下水系統，並推估在低水力透水係數下，河床之河道滲漏量。Chen and Chen(2003)以質點追蹤模式描述在異向性含水層中，河水移動至地下水井之過程。

在國內研究方面，李(2007)利用河道流量估計法(SF)與 MODFLOW (MF)推估新虎尾溪之河道滲漏量，其並以 Ferris (1962)之解析模式與 MF

法評估河道水位上升對河道滲漏量之影響，結果顯示 SF 與 MF 法推估河道年滲漏量分別為 264.2 與 170.9 萬噸。Ferris 與 MF 法推求當河道水位上升 2.5m 後，河道年滲漏增加量分別為 31.6 與 26.4 萬噸。由 SF、Ferris 與 MF 方法推估抬升河道水位對滲漏量可增加 10.0% 至 18.5% 效益。本研究將以 MODFLOW 2000 之河道模組(RIV Package)模擬濁水溪，藉此釐清濁水溪對濁水溪沖積扇水收支平衡之關係。

### 2.1.2 參數檢定

如前所述，地下水數值模式常應用在許多地下水管理問題中，惟地下水數值模式的建置需大量之水文地質參數，如透水係數(Hydraulic conductivity (K))或儲水係數(Storage coefficient (S))，以及其他抽水量、補注量與邊界條件等資料，這些參數常難以直接現地量測，或因成本之關係其資料密度常遠低於模式所需，因此模式建置過程中，常需以參數檢定方式，逆向推求部分參數數值，此一般稱為參數檢定(Yeh, 1985)。

參數檢定最常用的方式為藉由調整模式參數值而使模式模擬值接近觀測資料值，而參數調整又可分為人工調整或是藉由演算法由電腦程式調整。人工檢定最大的問題為費時費工，為了解決這個問題，許多研究利用優選法進行模式之自動參數檢定(Mazi et al., 2004; Mazi et al., 2000; Hill et al., 1992)。在電腦普及計算速度突飛猛進的現在，自動參數檢定妥善利用此優點，達到相較於人工率定省時省力的目的。然而，應用優選法於參數檢定需先確認並建立目標函數與限制式，亦即需先將如何調整參數的想法結構化成數學方程式，因此相較於人工參數檢定較缺乏彈性。傳統上，採梯度類型優選法之自動化參數檢定工具，如 Ucode 等，由於梯度類型之優選方法需以參數與水位之敏感度矩陣訂定搜尋方向，為使參數檢定模式通用化，在此常以差分方式建立敏感度矩陣。然差分化敏感度矩陣，需藉由反覆呼

叫模擬模式方可求得，故其計算量隨著參數維度大幅增加，對於高參數維度問題之計算量將大幅增加。且其梯度型演算法受到初始搜尋位置的影響極劇，若初始解不同常造成不收斂或不一致之結果。

人工參數檢定之優點為模式建立者可藉由參數檢定過程，增加對模式的了解，修正模式架構上可能的誤差。Boyle (2000)比較了水文模式之人工參數檢定及應用優選法之參數檢定，並且合併兩種參數檢定方法以改善兩者之缺點。他比較人工參數檢定與應用優選法之參數檢定所得到之結果，指出前者較能被水文學家所接受，因為人工參數檢定之過程不僅可以被檢視，而且能幫助水文學家進行結果分析。惟人工參數檢定之缺點為參數推估過程複雜而冗長，費時費力，且其經驗與知識多累積於人，因此如將模式知識傳承轉移給他人，也是應用人工參數檢定上的一大問題(Madsen et al., 2001; Chau and Chen, 2001; Chau, 2004; Chau, 2006)。

有鑑於人工參數檢定的專業知識轉移困難，以往有許多研究應用專家系統協助進行參數檢定(Abbott, 1991; Chau and Chen, 2001; Chau and Albermani, 2002, 2003; Chau, 2004; Kim, 2007)，以求兼顧知識透明度與檢定效率。專家系統是一個仿人類專家之智慧型電腦系統，使用者可以透過與專家系統的互動介面來描述問題，專家系統再藉由其內部已定義好的知識與推理來回答問題。因此專家系統的建置，即是在將專家的知識進行結構化及表達，亦即在將專家知識進行透明化。陳(2008)以專家系統應用於穩態及暫態地下水水流模式之參數檢定，其著重於檢定模式之水力傳導係數(K)及儲水係數(S<sub>s</sub> 與 S<sub>y</sub>)。王(2010)與張(2011)則延續陳(2008)之架構，分別應用專家系統於穩態與暫態淨補注量(net Recharge, Q)之檢定上，兩者除以設計案例驗證系統正確性外，均延伸應用於濁水溪沖積扇上。研究指出，以專家系統為基礎之參數檢定系統，除可克服因差分帶來之大量計算量外，

對不同初始解而言，均可有類似之檢定結果，顯現該參數檢定系統之強健性。本研究將延續張(2011)之成果，應用於濁水溪沖積扇之參數檢定上。

## 2.2 河道水理演算

河道水理演算已為蓬勃發展之學門，歷年來各研究單位均已研發大量數值模式，如：SOBEK 為荷蘭 WL | Delft Hydraulics 所發展，為一套整合了河川、都市排水與流域管理的套裝程式。模式包含降雨逕流、河道演算、水質模式、輸砂計算、鹽分入侵及即時控制等九套模式，各模式可相互銜接並整合地理資訊系統，便於資料之輸入及展示。SEC-HY21 為中興社許長安博士所研發完成之軟體，其能考量水理之情境如定床水理、輸砂與河床沖淤、污染質傳輸、颱風暴潮、海嘯、土石流、及風浪場等流況之模擬與應用。CCHE1D 為一水理模組，求解聖凡南(Saint-Venant)方程式，滿足流體為不可壓縮、靜水壓分佈、忽略風力、科氏力之假設，採普利司蒙(Preissmann)四點隱式有限差分法離散控制方程式，並針對離散之控制方程式發展一套線性疊代法，並利用雙掃法求解之。模式可計算變量流況下之複式斷面河川網路對水工結構物之影響。

就演算時間及經濟層面而言本研究採一維水理模式模擬河道水位，其中又以 HEC-RAS 最常見。HEC-RAS 為一免費軟體，且包含使用者圖形介面(Graphical User Interface，簡稱 GUI)使用者更能輕鬆上手，因此本研究採 HEC-RAS 模擬濁水溪河水位高程，作為後續地下水模式之資訊。

## 2.3 衛星影像與衛星影像辨識

由於遙測技術具有大地區的空間涵蓋特性，可以提供詳實且長時間的紀錄，並具有極佳的觀察能力，是快速獲取全面性最新國土資訊的調查及監測工具。尤其在民國 93 年我國自主之「福爾摩沙衛星二號」成功發射之

後，提供了台灣地區自主性高、影像解析度高、資料獲取週期短、價格較便宜等特性的福衛二號遙測影像，為地表改變狀況及監測河川區域的理想資料來源。

衛星影像辨識常應用於大區域土地利用的辨識，盧(2008)藉由福衛二號多時期的衛星影像，判釋農地的利用情形，其利用各種時期的衛星影像，搭配常態化植生指標(Normalized Difference Index, NDVI)，將農地區分為水稻、旱作、漁塭及休耕等四大分類。陳(2009)採物件導向式分類方法，以歸屬函數、半變異元紋理、GLCM 紋理及主成分分析等，建立香蕉作物之判釋。黃(2010)利用常態化植生指標(NDVI)，辨識水稻的插秧日期與稻作種植位置。顯現衛星影像辨識可應用於大區域之農地辨識。

在衛星影像應用於河道辨識方面，Lina Zhu(2006)利用遙測影像量測河道變遷，不僅可有效的濾掉雜訊也提高準確度。張(2008)以自強大橋下游至西濱大橋為試區，由衛星影像辨識技術，劃定河道潛在揚塵發生區位。而經濟部水利署在民國 95 年利用衛星遙測於河川區域監測管理，為了釐清土地使用概況，應用福衛二號遙測影像進行變異監測的準確度。黃(2008)憑藉航空照片影像，以影像處理技術發展一套”自動河道變遷分析系統”，此系統可以用來偵測航空照片中的河道影像，觀察 2001 年(桃芝颱風後)、2004 年(敏督利颱風後)以及 2006 年(艾莉颱風、海棠颱風後)的航空照片並分析經過這些天災肆虐之後，從德基壩至馬鞍壩之間大甲溪主要河道於不同時段的變遷情形。

## 第三章 理論敘述

本研究重點在應用衛星影像辨識以及河道模擬演算(HEC-RAS)與地下水模擬模式 MODFLOW 整合，建立地下水數值模式。以下 3.1 節將說明地下水數值模式，3.2 節與 3.3 節再分別介紹 HEC-RAS 河道定流量演算及衛星影像河道辨識。

### 3.1 地下水數值模擬與參數檢定

本研究應用 MODFLOW 對濁水溪沖積扇進行地下水數值模擬，其中參數檢定沿用張(2011)建立之自動化參數檢定專家系統，以下分別對地下水數值模擬及參數檢定專家系統進行說明。

#### 3.1.1 MODFLOW 之河川套件(River package)簡述

本研究所應用之 MODFLOW 模式係由數個套件(package)所組成，每個套件再由數個模組(module)所組成，使用者可依所需功能選擇使用之套件，未被使用的套件則不啟動以節省電腦計算資源。本研究之濁水溪沖積扇地下水數值模擬則使用了 Discretization file (DIS)、Zone array (ZONE)、Basic Package (BAS)、Output Control Option (OC)、Layer Property Flow package (LPF)、Well Package (WEL)、Preconditioned Conjugate-Gradient Package (PCG)及 River package(RIV)等八個套件。當 MODFLOW 執行時，MODFLOW 遂依據所啟用之套件，讀取所相對應之輸入檔。以下將針對 River Package 做更詳細之說明。

MODFLOW 內的 River package 主要用於模擬河川對於周遭含水層入滲之情況。如圖 3.1-1 所示， $h_{RIV}$  為河川水位高， $h_{i,j,k}$  為模式內的地下水水位， $RBOT$  為河床底泥高程。

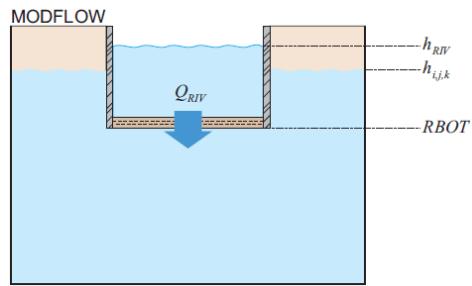


圖 3.1-1 河川入滲機制示意圖

此模組的設定概念為將河川斷面視為一矩形斷面。而垂直方向上，以河川底泥的底部(RBOT)為此矩形斷面的渠底交界面，使水流流向只能經由渠底底泥做一維方向的入滲。因此單位網格內的入滲能力，由底泥厚度與底泥的水力傳導係數主導外，亦受單位網格內的河川長度與寬度影響，如式 3.1-1。而入滲量的計算根據達西定律可由式 3.1-2 表示。

河川與區域地下水間之地下水水流方向則由河川水位與含水層地下水位兩者間之相對值所決定。其符號設定為流入含水層為正，流出則為負，也就是當河川水位高於地下水水位時，水由高水位流入較低水位的含水層，使之得到補注，故符號標記為正。反之，當河川水位因枯水期或其他人為影響時，導致水量變少，河水位下降至低於附近的含水層水位，此時的地下水則由含水層流出至河川，因此，此時的達西入滲公式須做修正如式 3.1-3，式 3.1-3 對於河水位面低於河床底泥高程時，提供了更合理的估算。

$$COND_{RIV} = \frac{L \cdot w \cdot K_{sed}}{b_{sed}} \quad (3.1-1)$$

$$Q_{RIV} = COND_{RIV} \cdot (h_{RIV} - h_{i,j,k}) \quad (3.1-2)$$

$$Q_{RIV} = COND_{RIV} \cdot (h_{RIV} - RBOT) \quad (3.1-3)$$

COND<sub>RIV</sub> 河寬底床傳導性 [L<sup>2</sup>T<sup>-1</sup>]

L 河川長度 [L]

W 河川寬度 [L]

$K_{seds}$  河川底床傳導係數[ $LT^{-1}$ ]

$b_{seds}$  河川底泥厚度[L]

### 3.1.2 參數檢定專家系統建置

本節將對於參數檢定專家系統建置做進一步說明，主要分為參數檢定流程、參數檢定系統資訊平台、參數檢定規則與推論及參數檢定初始設定等。

#### ● 參數檢定流程

本系統之參數檢定流程如圖 3.1-2 所示，在參數檢定開始後，系統首先初始化參數值，即淨補注量及抽水量，並讀入相關參數的設定資訊，如分區設定、觀測井位置、觀測水位等。

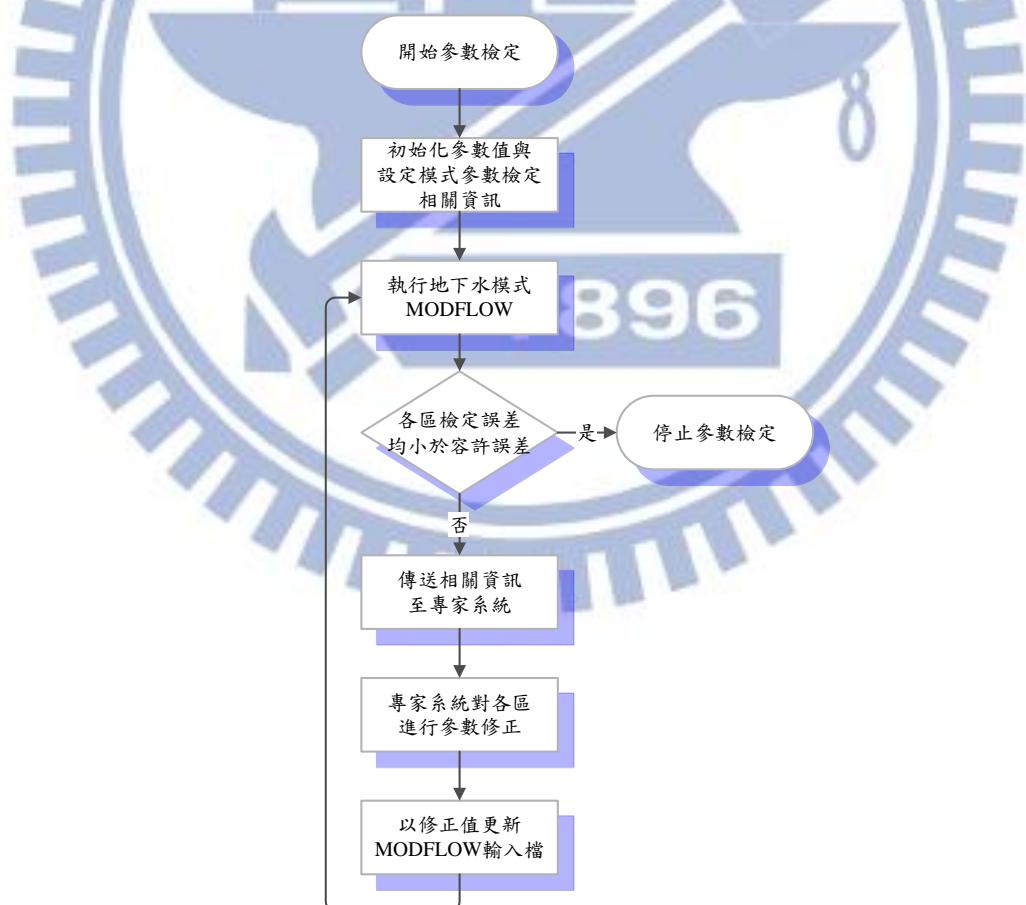


圖 3.1-2 參數檢定流程圖

在完成初始參數設定後，接著執行地下水模式 MODFLOW，MODFLOW 完成地下水流模擬後，將地下水位輸出成 ASCII 格式之檔案。

下一步則為專家系統前處理器判斷各分區之觀測水位與模擬水位之誤差(以下稱為檢定誤差)是否均小於容許誤差。當有一分區之檢定誤差超過容許誤差，專家系統前處理器則會取出各分區的相關資訊，包括水位高、淨補注量或抽水量、模擬水位與觀測水位誤差以及上次參數檢定所得參數修正量，然後傳入專家系統進行推論分析。

將所需資訊傳送至專家系統後，系統接下來會執行專家系統，專家系統依據知識庫中之規則集合(rules)，並搭配推理機(inference engine)之運作，而推論出各區的參數修正量。

當各區待檢定之參數，由專家系統分析出修正量後，專家系統後處理器再將各修正量依據 MODFLOW 輸入檔格式，對 MODFLOW 輸入檔進行更新。

接著再次執行 MODFLOW，計算出更新參數後的地下水位，再由專家系統前處理器判斷各分區檢定誤差是否均小於容許誤差，若是則停止參數檢定，若否則反覆執行上述步驟，直至所有分區檢定誤差均小於容許誤差。

### ● 參數檢定資訊系統平台

專家系統乃一模仿人類專家且具有決策能力的智慧型電腦系統，本研究採用 CLIPS(C Language Integrated Production System)建立地下水模式參數檢定專家系統，CLIPS 乃一方便採用物件導向概念，用以建立專家系統之工具。在本研究中，地下水模式以分區為概念進行參數檢定，一個分區即為一個物件，在 CLIPS 中則以建立實例(instance)的方式應用物件導向概念。在每個實例(物件)中，則有若干屬性(slot)代表各分區的特性，如 K 值、所在分層、淨補注量或抽水量、模擬水位與觀測水位誤差及各種參數調整

依據。研究所建立之專家系統，乃將熟悉地下水模式參數檢定之人類專家所具有之經驗及知識轉換成規則(Rule)並將之存放於知識庫(Knowledge Base)，當專家系統對地下水模式進行參數檢定時，專家系統依據所輸入之情況並透過推理機(Inference Engine)對知識庫內之規則進行規則推論(Rule Inference)，其推理結果即為所輸入問題之答案。

### ● 參數檢定規則與推論

在建立專家系統之前，必須先擷取參數檢定之經驗及知識。由於本研究室之研究團隊，在地下水檢定方面已有相當多研究，相關經驗豐富，因此與研究團隊之學長以及指導教授進行訪談及討論，之後再依據討論結果，歸納出以下幾點概念：

一般地下水水流模式中，由於受到流線的影響，使得上游進行調整時，會對下游影響較大；而下游進行調整時，對上游影響較小。因此模式大多會從上游開始往下游調整。

1. 在多層地下水模式檢定中，由於表層補注量的大小對於下層含水層抽水量有顯著的影響，因此進行人工檢定時，通常會先進行表層抽水/(補注)量檢定，再依序往下層進行抽水量檢定。
2. 在人工檢定地下水模式時，通常會以迭代方式來回調整各分區參數，使各區之檢定誤差逐漸縮小。

基於上述概念，本研究經由反覆測試，將其歸納成更具體的參數調整原則，詳細說明如下所示：

1. 在進行參數調整前，各分區應先設定初始修正量( $\Delta Q$ )，作為參數調整幅度之基準。
2. 開始調整時，需判別修正方向。當觀測水位大於模擬水位時，往正方向調整，即增加水量；當觀測水位小於模擬水位時，往負方向調整，此

時應減少水量。

3. 判別修正方向後，接著應判斷修正量，其判斷方法為比較本次檢定與上次檢定時之修正方向。若修正方向相同，表示參數修正持續向同方向進行，則修正量不變；若修正方向相反，表示參數調整震盪，則修正量減半。

4. 經多次調整後，參數修正量會逐漸縮小，然而因多分區同時進行調整，各分區會受相鄰分區影響，可能使得調整量縮小過快，造成檢定速度趨緩，因此當檢定速度過慢時，各分區調整量設定為同時放大一定倍數。

#### ● 參數檢定初始設定

首先，專家系統在進行初次檢定時，會先設定各分區參數調整量  $\Delta Q$ 。之後每次參數調整， $\Delta Q$  都會根據規則進行調整，並儲存起來作為下一次參數調整之參考。各分區均有自己的  $\Delta Q$ ，根據規則進行調整，不受其它分區影響。此外，每次進行推論會得出一個  $\Delta Q$  之外，還會獲得一個正號或負號。正號即代表該區的實際的水量應比現在要多，因此需增加水量，所以將現在的抽水量(或補注量) $Q^n$  加上所推論出的  $\Delta Q^n$ ，而獲得新的抽水量(或補注量) $Q^{n+1}$ ，如式 3.1-1。反之亦然，負號即代表該區的水量應比現在要少，因此需減少水量，所以將現在的抽水量或補注量  $Q^n$  減去所推論出的  $\Delta Q^n$ ，而獲得新的抽水量或補注量  $Q^{n+1}$ ，如式 3.1-2。

$$Q^{n+1} = Q^n + \Delta Q^n \quad (3.1-1)$$

$$Q^{n+1} = Q^n - \Delta Q^n \quad (3.1-2)$$

## 3.2 HEC-RAS 河道定量流演算

本研究以 HEC-RAS 模式(River Analysis System)進行河道水理演算，其為美國陸軍工兵團水文工程中心所發展，HEC-RAS 可進行一維變量流與

定量流之河道水理計算。演算步驟採用標準逐步推算法(Standard Step Method)求解能量方程式，而摩擦之能量損失則以曼寧公式(Manning Equation)計算。

HEC-RAS 模式之控制方程式包含連續方程式、能量方程式、動量方程式以及曼寧方程式等物理定律，分別介紹如下：

- 連續方程式(Continuity Equation)

$$Q = A \times V \quad (3.2-1)$$

其中  $Q$  代表流量(cms)

$A$  代表河川斷面積( $m^2$ )

$V$  代表平均流速( $m/sec$ )

- 能量方程式(Energy Equation)

對於亞臨界流、超臨界流及混合流況之水面剖線演算，其演算的基礎是以標準步推法(Standard Step Method)針對一維能量方程式做求解，如下式所示：

$$Y_2 + Z_2 + \frac{\alpha_2 V_2^2}{2g} = Y_1 + Z_1 + \frac{\alpha_1 V_1^2}{2g} + h_e \quad (3.2-2)$$

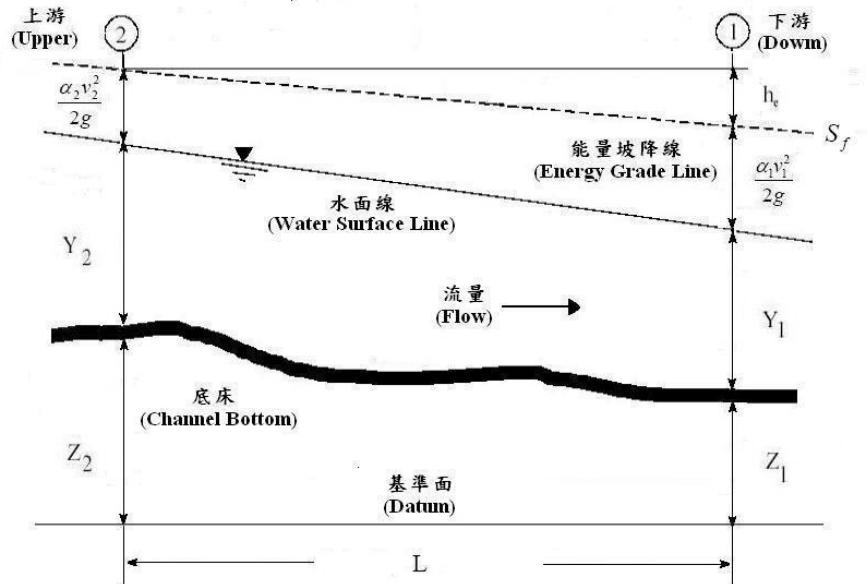


圖 3.2-1 能量方程式示意圖

其中， $Y$  代表河川上下游斷面之水深(m)

$Z$  代表河川上下游斷面之高程(m)

$V$  代表平均流速(m/s)

$\alpha$  代表能量校正係數

$g$  代表重力加速度(m/s<sup>2</sup>)

$h_e$  代表能量損失水頭(m)

而  $h_e$  能量損失水頭計算的公式表示如下：

$$h_e = LS_f + C \left| \frac{\alpha_2 V_2^2}{2g} - \frac{\alpha_1 V_1^2}{2g} \right| \quad (3.2-3)$$

其中， $L$  代表河川上下游斷面間之距離(m)，如圖 3.2-2 所示。

$S_f$  代表河川上下游斷面間之平均能量坡降。

$C$  代表束縮與擴張能量損失係數，如表 3.2-1 所示。

而  $L$  所表示的公式如下：

$$L = \frac{L_{LOB} \bar{Q}_{LOB} + L_{CH} \bar{Q}_{CH} + L_{ROB} \bar{Q}_{ROB}}{\bar{Q}_{LOB} + \bar{Q}_{CH} + \bar{Q}_{ROB}} \quad (3.2-4)$$

式中， $L_{LOB}$  代表左岸上下游兩斷面間的距離。

$\bar{Q}_{LOB}$  代表左岸上下游斷面間的流量。

$L_{CH}$  代表主槽上下游斷面間的距離。

$\bar{Q}_{CH}$  代表主槽上下游斷面間的流量。

$L_{ROB}$  代表右岸上下游兩斷面間的距離。

$\bar{Q}_{ROB}$  代表右岸上下游斷面間的流量。

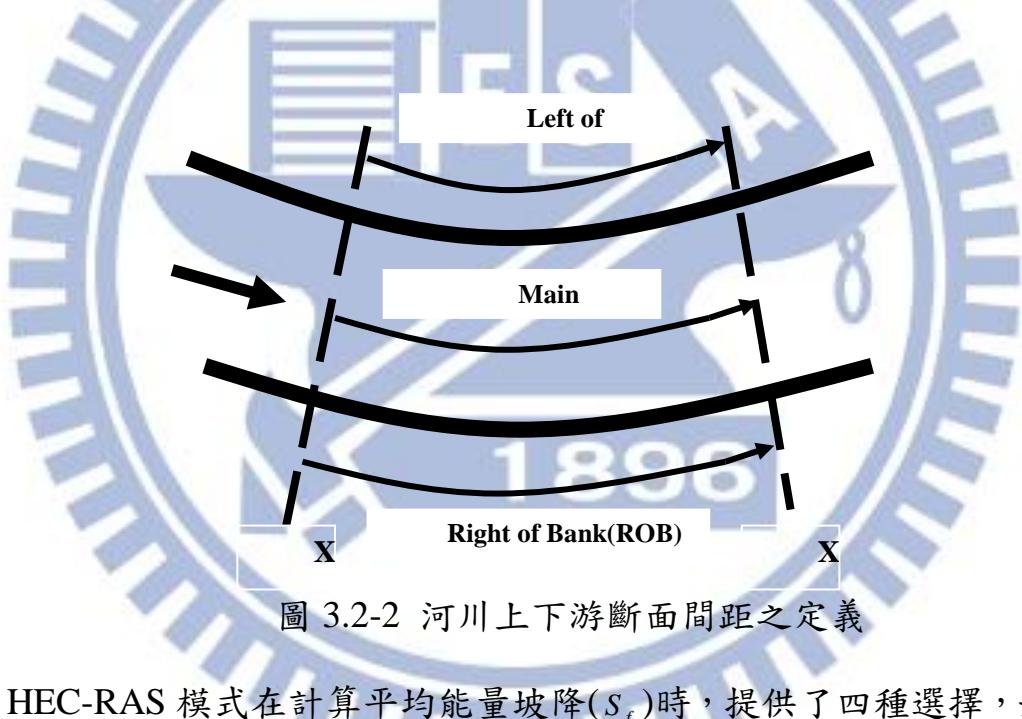


圖 3.2-2 河川上下游斷面間距之定義

HEC-RAS 模式在計算平均能量坡降( $S_f$ )時，提供了四種選擇，如下列表示：

(1) 平均輸水函數坡降法(Average Conveyance)

$$S_f = \left( \frac{Q_1 + Q_2}{K_1 + K_2} \right)^2 \quad (3.2-5)$$

(2) 算術平均坡降法(Average Friction Slope)

$$S_f = \frac{S_{f1} + S_{f2}}{2} \quad \dots \dots \dots \quad (3.2-6)$$

### (3) 幾何平均坡降法 (Geometric Mean Friction Slope)

$$S_f = \sqrt{S_{f1} \cdot S_{f2}} \quad \dots \quad (3.2-7)$$

#### (4) 調和平均坡降法(Harmonic Mean Friction Slope)

$$S_f = \frac{2S_{f1} \cdot S_{f2}}{S_{f1} + S_{f2}} \quad \text{.....(3.2-8)}$$

表 3.2-1 束縮與擴張係數表

| 項目                                  | 束縮<br>(Contraction) | 擴張<br>(Expansion) |
|-------------------------------------|---------------------|-------------------|
| 沒有漸變損失(No transition loss)          | 0.0                 | 0.0               |
| 漸變段(Gradual transition)             | 0.1                 | 0.3               |
| 典型有橋樑斷面<br>(Typical bridge section) | 0.3                 | 0.5               |
| 突變段(Abrupt transition)              | 0.6                 | 0.8               |

## ● 動量方程式(Momentum Equation)

在橋墩、箱涵、匯流口及跌水工等處，經常會產生亞臨界流轉換成超臨界流，或者超臨界流轉換成亞臨界流之突變流況的情形，為了有效解決突變流況的問題，HEC-RAS 模式於這些河段採用動量方程式進行演算。動量方程式是由牛頓第二運動定理(Newton's second law of motion)變化而來，表示如下：

$$P_2 - P_1 + W_X - F_f = Q\rho\Delta V_X \quad \dots \quad (3.2-9)$$

其中，

*P* 代表作用在該控制體積之壓力；

$W_x$  代表往  $X$  方向的流體重力；

$F_f$  代表流體流動所產生的反方向摩擦力；

$Q$  代表流量；

$\rho$  代表流體密度；

$\Delta V_x$  代表兩斷面於  $X$  方向之流速差。

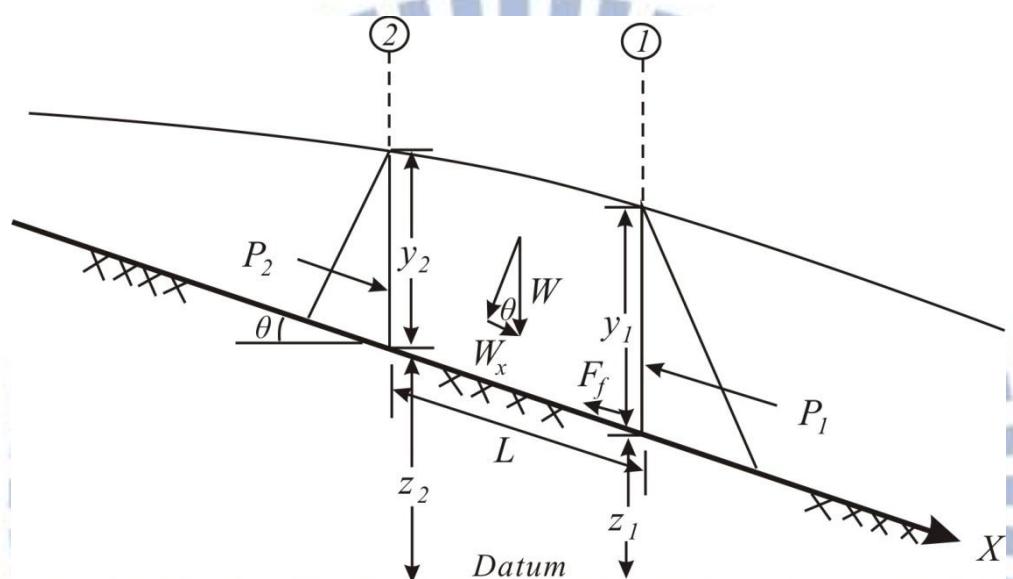


圖 3.2-3 動量方程式示意圖

● 曼寧方程式(Manning's Equation)

此方程式為河川在測定流量時最常使用的公式，將水體所受到的摩擦阻力，藉由曼寧  $n$  值所展現出來，此方程式如下所示：

$$V = \frac{k}{n} R^{\frac{2}{3}} S_f^{\frac{1}{2}} \quad \dots \dots \dots \quad (3.2-10)$$

其中， $k$  在公制時為 1，在英制時則為 1.486。

$n$  為曼寧阻力係數(Mannings roughness coefficient)，可依據表 4.2-1 加以決定；

$R$  代表水力半徑(Hydraulic radius)， $R = A$ (濕周斷面積)/ $P$ (濕周長)；

$S_f$  代表平均能量坡降， $S_f = h_e$ (能量損失水頭)/ $L$ (斷面距離)。

### 3.3 衛星影像河道辨識

遙測技術可提供大範圍、多時性及數位化的環境資料，因此藉由衛星遙測獲取資料已經成為目前的趨勢。

#### 3.3.1 遙測基本原理

在日常生活中，常見的量測行為大多都需要接觸到目標物，例如：使用尺測量長度，或站在體重計上顯示體重，前述之體重計即為感測器，這些感測器都需要和物體接觸才能得到資訊。相對於前述之量測方式，感測器無需與目標物接觸，就能獲得目標物的各項特性，即可稱為遙測。但遙測特別的地方在於不需要接觸物體，也能得知物體的一些特性。最常見到的遙測方式，就是透過眼睛看到東西，利用照相機拍攝映出圖像。

實質上，遙測技術可搭配各式特定的感測器，可接收不同波段之電磁波能量。所利用之電磁波波段範圍相當廣，從X光、可見光、紅外光至微波，構成一完整的波譜(見表 3.3-1)。

表 3.3-1 電磁波波譜

| 波譜  | 波長(單位: $\mu\text{m}$ ) |
|-----|------------------------|
| X光  | 0.03-3.0 $\mu\text{m}$ |
| 紫外線 | 0.03-0.4 $\mu\text{m}$ |
| 可見光 | 0.4-0.7 $\mu\text{m}$  |
| 近紅外 | 0.7-1.3 $\mu\text{m}$  |
| 中紅外 | 1.3-3.0 $\mu\text{m}$  |
| 熱紅外 | 3-5,8-14 $\mu\text{m}$ |
| 微波  | 0.1-30cm               |

由於不同物體都有獨特的輻射特性，不同的波段的電磁波，作用在不同物體上，會有不同反射能量反應，圖 3.3-1 是不同波段電磁波作用在土壤、植物及水等三種物體上的輻射反應值。以植物為例，由紫外線波段( $0.03\text{-}0.4\text{ }\mu\text{m}$ )至可見光綠色波段(約  $0.5\text{ }\mu\text{m}$ )雖其反射量有提昇，但在  $0.8\text{-}1.3\text{ }\mu\text{m}$  波段處(即近紅外波段)，其抬昇幅度最為明顯，此為植物獨特的特性。此外，對水而言，除了可見光外，其餘波段之電磁波均會完全被水所吸收。

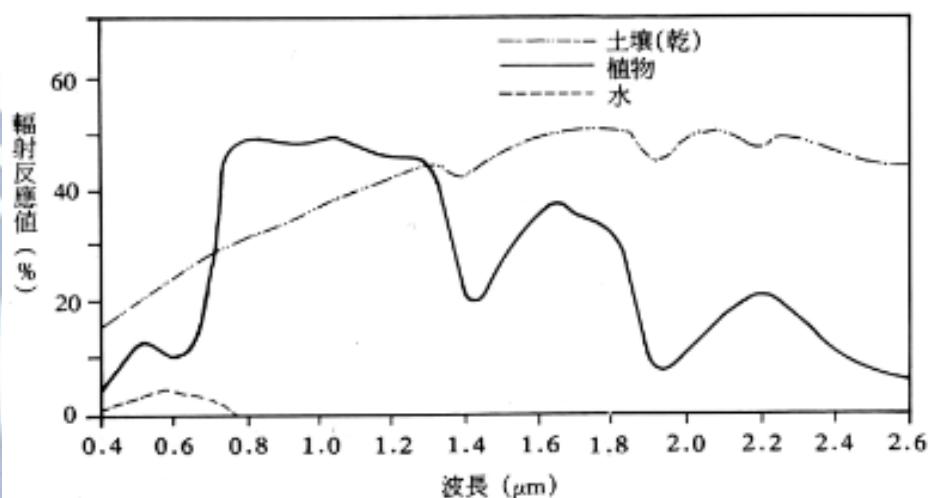


圖 3.3-1 植物、水及土壤在不同波長的輻射反應

人在可見光以外的光譜是看不到的，若僅藉由可見光光譜，有時候會發生誤判或無法分辨。如要分辨綠色建築物和自然草地，其實是有困難的，因為在可見光的範圍兩者有著相似的輻射能量。但是若搭配近紅外光，自然草地在近紅外波段有較大的輻射能量，而綠色建築物卻不會大量反射，因此搭配其他波段，有助於辨別出自然草地或綠色建物等。

### 3.3.2 遙測載具

裝載感測器的遙測平台相當多，但以飛機及衛星的使用較為普遍。飛機因為飛行高度，涵蓋範圍和不定週期的特性，對於大範圍環境變遷的持

續監測有實際應用的困難。衛星遙測因具有綜觀，動態及多時的特性，因而成了大範圍的環境監測的有效工具。本節將針對目前較為通用的環境遙測衛星及其感測器作一簡要的說明。

福爾摩沙衛星二號為地球遙測應用衛星，其重量約 764 公斤左右，其形狀為六角柱型，高 2.4 公尺，外徑約 1.6 公尺(太陽電能板未展開時)。軌道高度 891 公里，太陽同步軌道之設計。影像解析度為黑白影像 2 公尺，彩色影像 8 公尺，任務壽命預計可達五年以上，已於民國 93 年 5 月 21 日發射成功。

福爾摩沙衛星二號的主要任務是獲得台灣陸地及海域近即時(near real-time)的衛星影像資料，以做為土地利用、農林規劃、環境監控、災害評估、科學研究、科學教育等相關之民生及科學用途。福爾摩沙衛星二號除主要的遙測酬載外，同時也搭載一個科學酬載儀器，做為太空科技研究與科學實驗的運用。福爾摩沙衛星二號每日繞地球飛行 14 圈，地面軌跡(ground track)將通過澎湖與台灣本島中間。每天經過台灣二次。在天候許可的情況下，一次經過可拍攝四個緊鄰的影像條，以涵蓋台灣全島，得到相當完整的台灣本島影像。福爾摩沙衛星二號並可改變衛星的前後仰角，以進行立體攝影。

表 3.3-2 福爾摩沙衛星二號之遙測酬載儀器規格

|   |                             |                 |
|---|-----------------------------|-----------------|
| 軌道  | 891 公里高，太陽同步軌道，每日通過台灣海峽上空二次 |                 |
| 光譜分析  | 全色態<br>(PAN)                | 0.52~0.82μm     |
|   | 多頻譜<br>(MS)                 | 藍 0.45~0.52μm   |
|   |                             | 綠 0.52~0.60μm   |
|   |                             | 紅 0.63~0.69μm   |
|   |                             | 近紅外 0.76~0.90μm |
| 空間解析度   | 全色態(黑白)影像 2 公尺              |                 |
| (近地點)   | 多頻譜(彩色)影像 8 公尺              |                 |
| 像幅寬   | 24 公里                       |                 |
| 任務壽命  | 5 年                         |                 |
| 發射日期  | 民國 95 年 5 月 21 日            |                 |
| (取自國家太空中心網頁 <a href="http://www.nspo.gov.tw">http://www.nspo.gov.tw</a> , 2004/06/14) |                             |                 |

表 3.3-3 福衛二號影像及相關參數

| 感測器 | 光譜範圍(μm)        | 解析度(m) | 週期(天) | 涵蓋範圍(km <sup>2</sup> ) | 飛行高度(km) |
|-----|-----------------|--------|-------|------------------------|----------|
| 多光譜 | 1. 藍 0.45-0.52  | 8      | 每天    | 24×24                  | 891      |
|     | 2. 綠 0.52-0.6   | 8      |       |                        |          |
|     | 3. 紅 0.63-0.69  | 8      |       |                        |          |
|     | 4. 近紅外 0.76-0.9 | 8      |       |                        |          |
| 全色態 | 0.52-0.82       | 2      |       |                        |          |

### 3.3.3 衛星遙測資料之特性

衛星遙測資料具有下述四種主要特性：

#### 1. 多光譜

大部分資源衛星多光譜感測器的波段範圍都由大量的地物波譜特徵所決定，而一般來說衛星遙測的感測器主要利用多波段得到地表的輻射能量，並將地物波譜的微弱差異區分並記錄下來，供相關單位研究與應用。

表 3.3-3 為常見的波段與其對應之相關應用領域。

表 3.3-3 常見波段與相關應用領域

| 名稱    | 波長範圍<br>(單位: $\mu\text{m}$ ) | 波段和辨識的地物說明                       |
|-------|------------------------------|----------------------------------|
| 藍波段   | 0.45-0.52                    | 水體穿透力強，利於製作近海海圖。<br>可用在土壤及植物的判別。 |
| 綠波段   | 0.52-0.60                    | 對於茂密植物的綠色反射質敏感。                  |
| 紅波段   | 0.63-0.69                    | 葉綠素的主要吸收段，區分植物種類及覆蓋度。            |
| 近紅外波段 | 0.76-0.9                     | 用於區別植物類別、水體。                     |
| 中紅外波段 | 1.55-1.75                    | 反映土壤濕度，植物含水量，用於區分雲和雪。            |
| 中紅外波段 | 2.08-2.35                    | 可辨別岩石、地質種類，對於植物的含水量敏感。           |
| 熱紅外波段 | 10.4-12.5                    | 監測有關熱的特徵及相關應用。                   |

## 2. 空間性

早期的地表環境調查多以點或線為主，相對於前述的點或線，遙測技術則是以面的方式大範圍偵測，因此遙測技術提供了重新認識地表環境的機會。此外，一些衛星遙測能提供立體像，以供觀測立體地面、描繪等高線及建立數值地形模型(DTM)，增加衛星遙測從平面進入立體的可能性。而遙測影像一般以空間解析度來描述資料的空間清晰度，例如 2 公尺空間解析度的影像，代表資料能清楚顯示大於(2 公尺  $\times$  2 公尺)的物體，可進行辨識輪廓及形狀等。

## 3. 多時性

衛星遙測可提供歷史性和週期性的資料，對同一地區可進行動態變遷

的偵測。在台灣早期因遙測資料難以取得，但接受站成立後，累積相當多的遙測資料，而各種衛星的影像已應用各種環境的動態變遷監測上。週期性的遙測資料能提供地形圖的更新，和過去的地形圖進行比較能找出地表變化的地方，可加速地形圖的更新。

#### 4. 數位化

衛星遙測資料原形是以數位化的格式記錄，利於電腦處理和發展自動化的影像辨識方法。數位化的資料也能得到一定精度的定量分析結果。因想要提高遙測實際應用，所以衛星遙測資料之應用正走向資料整合、綜合分析和各種遙測及空間資料的彼此搭配。



## 第四章 濁水溪本流與區域地下水互動模式建置

如前所述，濁水溪本流對區域地下水之影響，本研究乃以 MODFLOW 中之河道模組(RIV Package)模擬，由於河道模組(RIV Package)之建置，需要設定河道水位、河寬與河長等相關資訊，然而濁水溪由觸口至出海口，僅有四個觀測水位站，相對於河道模組所需各河道網格之河水位高程，水位資訊在空間分布上嚴重不足。因此，本研究乃以 HEC-RAS 河道水理演算模式進行模擬，藉此計算整條河川各河段之水位高程，此將於 4.2 節詳述。另外，河川長度與寬度部分，則藉由各月份之福衛二號衛星影像照片，搭配衛星影像辨識技術，辨識出瓣狀河道之分布，藉此決定河道之等效長度與寬度，此將於 4.3 節詳述。

### 4.1 研究區域

濁水溪沖積扇為台灣地區最重要的地下水區之一，其位於臺灣西部海岸中段，北起烏溪，南至北港溪，東以八卦台地及斗六丘陵山麓為界，西臨臺灣海峽，面積約 2,080 平方公里。本沖積扇最主要之河川為濁水溪，主流發源自中央山脈西翼、合歡山以南與玉山山脈北側之間地區，向西切穿雪山—玉山帶、麓山帶與八卦—斗六丘陵區，在丘陵區西側形成沖積扇系統，主流流經沖積扇中央，向西注入臺灣海峽。其他位於沖積扇之河川，自北而南有舊濁水溪、新虎尾溪、舊虎尾溪及北港溪等。濁水溪沖積扇地勢平緩，高程約介於海拔 0~100 公尺間。

#### 1. 水文地質架構

經濟部中央地質調查所於 88 年，完成臺灣地區地下水觀測網第一期計畫，在濁水溪沖積扇水文地質調查研究報告中，以濁水溪沖積扇合計共 72 站之地層柱狀圖為基礎，完成水文地質剖面之繪製(剖面 1 至 12)，深度

約至 300 公尺左右，並以丘陵及河谷區，合計 8 站之地層柱狀圖為基礎，完成丘陵及河谷區之水文地質剖面之繪製(剖面 13 至 15)，深度約達 250 公尺左右。

水文地質剖面圖中，建立濁水溪沖積扇之概念分層，其中由上而下包括第一含水層(F1)、第一阻水層(T1)、第二含水層(F2)、第二阻水層(T2)、第三含水層(F3)、第三阻水層(T3)、第四含水層(F4)及第四阻水層(T4)。圖 4.1-1 為海園至石榴間之水文地質剖面圖。

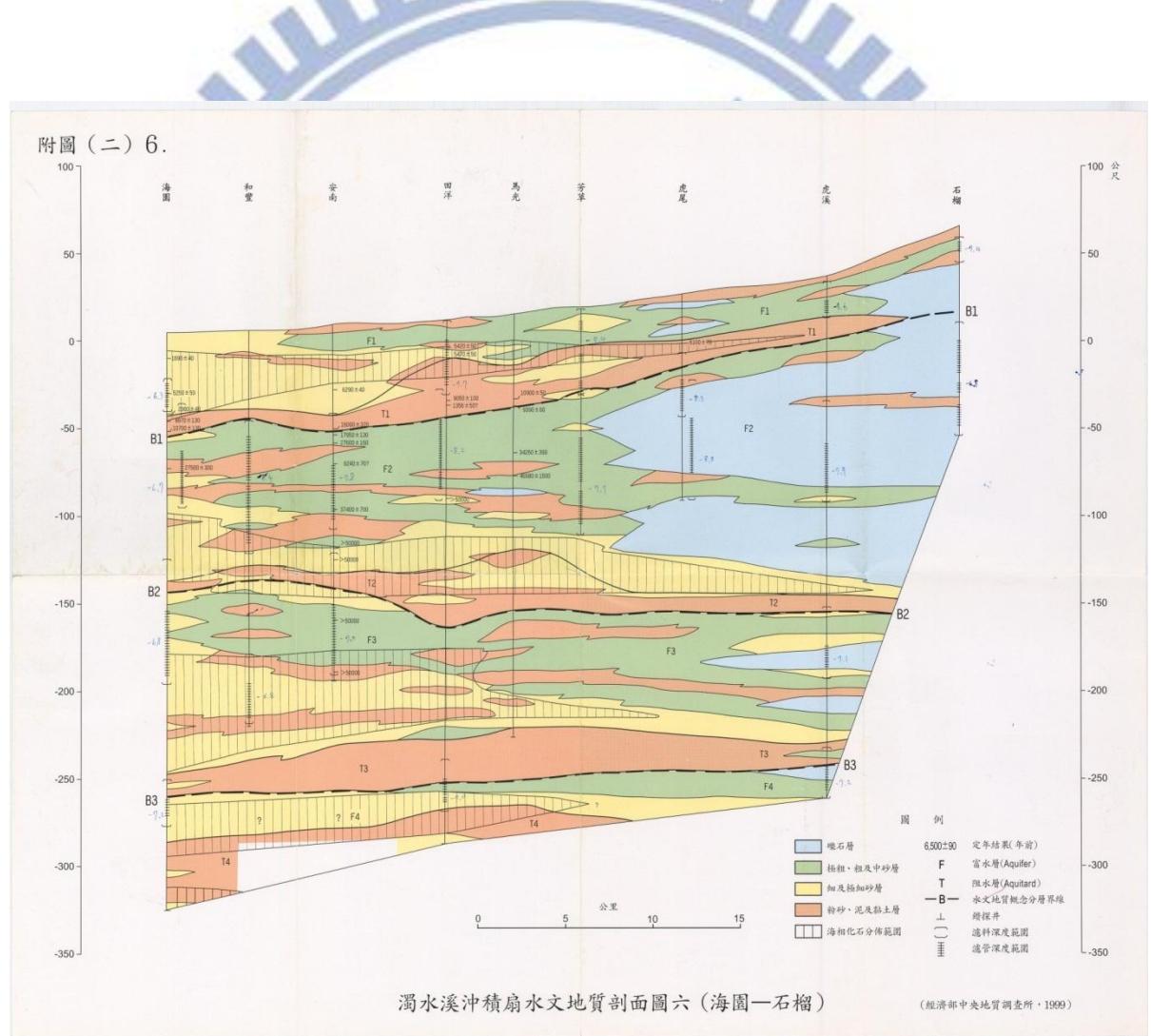


圖 4.1-1 濁水溪沖積扇水文地質剖面圖(海園至石榴)

## 2. 地下水觀測

由於濁水溪沖積扇水資源運用狀況，多半仰賴地下水水資源，所以地

下水觀測網之第一階段（81 年度至 87 年度）即選定濁水溪沖積扇作為首要觀測對象。目前計有地下水觀測站 82 站（203 口），抽水試驗站 28 站（55 口），水文地質調查站 88 站。圖 4.1-2 為濁水溪沖積扇地下水觀測網分布圖。

### 3. 水文地質參數

濁水溪沖積扇大致可區分為扇頂、扇央及扇尾區，扇頂區位於員林、溪州、西螺、虎溪、東和連線以東，各含水層間無明顯阻水層存在，亦即 T1、T2、T3 與 T4 尖滅不見，地面水可直接補注至深層，即所謂濁水溪沖積扇扇頂非受壓含水層區；扇央區位於扇頂層區以西，至好修、趙甲、潭墘、田洋、北港聯線以東，F1 上方存在一阻水層（在此通稱 T0）覆蓋，各含水層間有明顯之阻水層（即 T1、T2、T3 與 T4）存在，地面水無法直接補注各含水層，唯以地層材料而言，砂礫材料所佔之比例較大；扇尾區位於扇央區以西至沿海，F1 上方存在 T0 覆蓋，各含水層間亦如扇央區，皆有明顯阻水層存在。

扇央與扇尾地質結構相近，惟以地層材料而言，扇央之砂礫所佔之比例較扇尾大，相對地，扇央之粉砂、泥及粘土所佔之比例，則較扇尾大。區域之透水係數(K)約介於  $10^{-3} \sim 10^{-5}$  (公尺/秒)之間，導水係數(T)約介於 0.6 ~ 251.4 平方公尺/秒之間，比容量(Q/s)約介於 0.34~208.33 立方公尺/小時/公尺，含水層水力特性以扇頂最佳，扇央次之，扇尾最差。

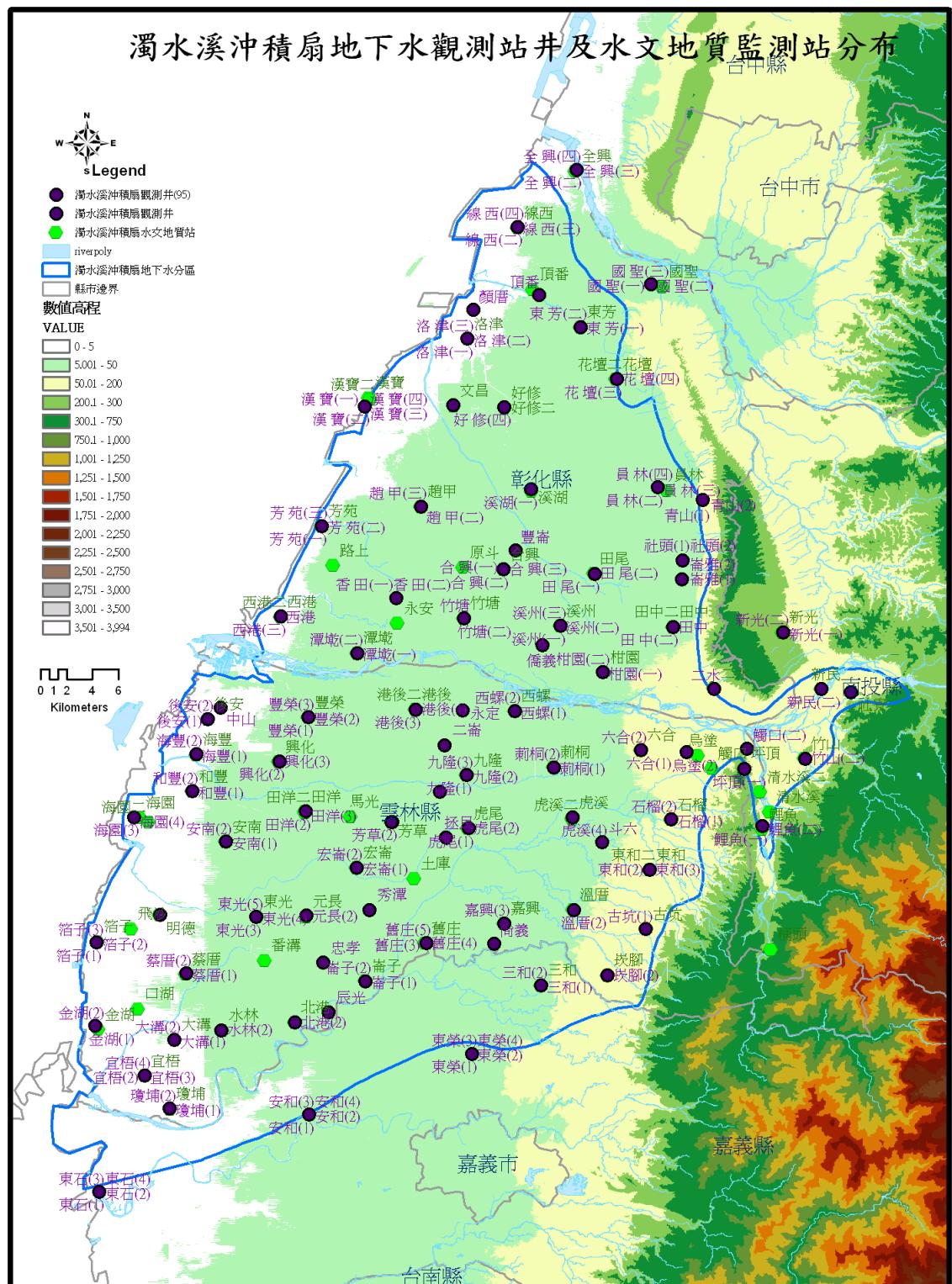


圖 4.1-2 濁水溪沖積扇地下水觀測網站井分布圖 (繪製於民國 98 年)

## 4.2 應用 HEC-RAS 於濁水溪河水位模擬

圖 4.2-1 為濁水溪之系統圖，濁水溪主流上共有四個水位流量站，分別為彰雲橋、溪洲大橋、自強大橋及西濱大橋，對應之河川斷面分別為 86、52、36 與 12 號斷面。1 號斷面即為出海口。



圖 4.2-1 濁水溪流域系統圖

### 4.2.1 HEC-RAS 模式說明與參數設定

HEC-RAS 為一視窗化整合型軟體，包括圖形使用者介面(graphical user interface, GUI)、水理分析程式集、資料儲存與管理、圖表製作等功能。在使用上，首先依據河川量測資料給定幾何特性資料，若有其它水工結構物如橋樑、涵洞、側流堰、溢洪道、閘門、蓄水池等，HEC-RAS 亦可處理上述之水工結構物對水流之影響；接著，選定欲模擬流況，設定問題邊界條件，其中邊界條件包括上游邊界、下游邊界、側入流邊界等；最後，即可模擬河道水位剖面線，HEC-RAS 操作流程如圖 4.2-2 所示。

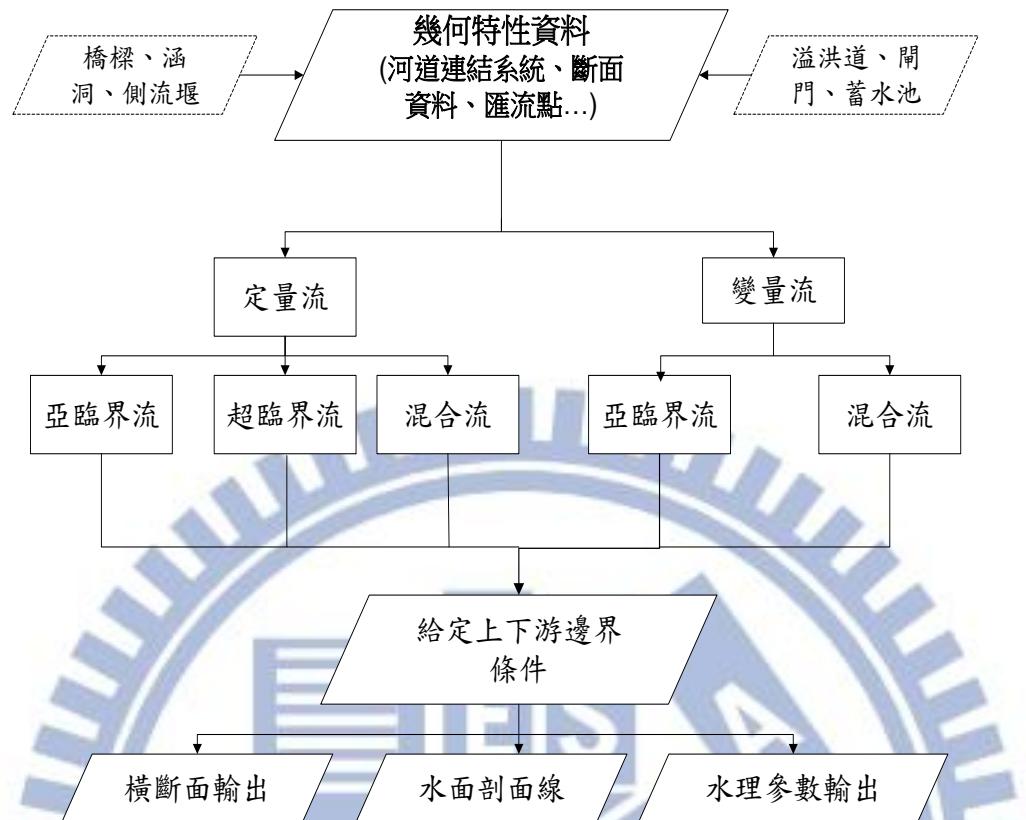


圖 4.2-2 HEC-RAS 模擬流程

本研究以 HEC-RAS 定量流模式模擬河川洪水位，所需要資料包含河川斷面幾何資料、曼寧  $n$  值，上游邊界條件、下游邊界條件、側向邊界條件等，以下將詳加說明：

#### 4.2.2 模式參數設定

##### 1. 河川斷面幾何資料

河川幾何斷面資料，係採民國 97 年量測之濁水溪斷面測量實測資料，由下游至上游共 152 個斷面，編號為斷面 1 至斷面 152。本模式採用其中之斷面 1 至斷面 86，圖 4.2.3、圖 4.2.4 及圖 4.2.5 分別為斷面 1、斷面 45 及斷面 86 之河川斷面剖面圖。觀察此三張圖可發現斷面 1 為出海口之斷面，斷面中最高點與最低點之高程差約為 7 公尺，而河寬約 6500 公尺；斷面 45 高程相差約為 12 公尺，而河寬約 2500 公尺，而斷面 86 高程相差約為

15 公尺，而河寬約 1200 公尺。

本研究以各斷面之最低點為深槽高，繪製濁水溪由彰雲橋至出海口之底床剖面圖，如圖 4.2.6。可觀察出在靠近扇頂時，濁水溪之底床坡度極陡，坡度約千分之 3.5；而在中下游扇尾區域其底床較為平緩，坡度約千分之 0.75。

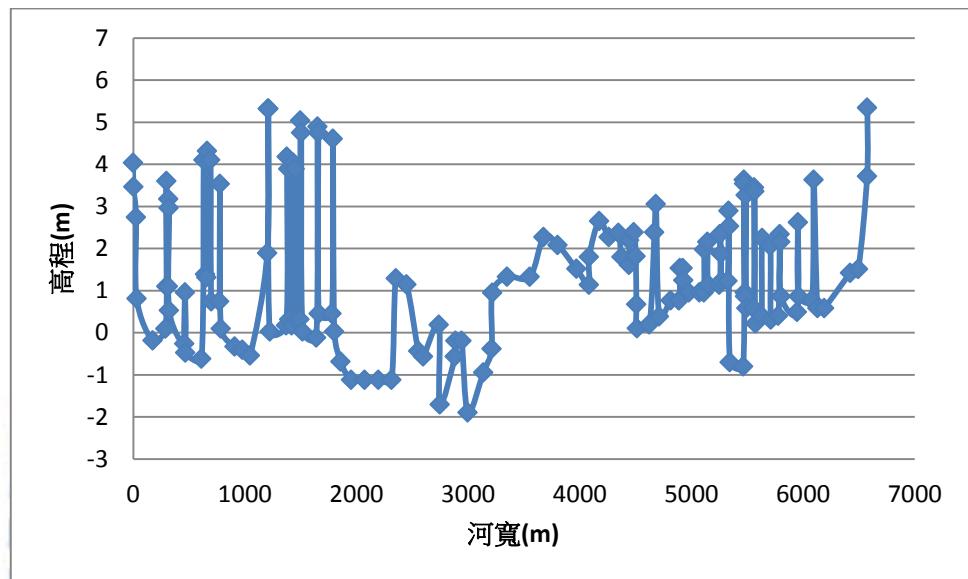


圖 4.2-3 斷面 1 之河川斷面圖

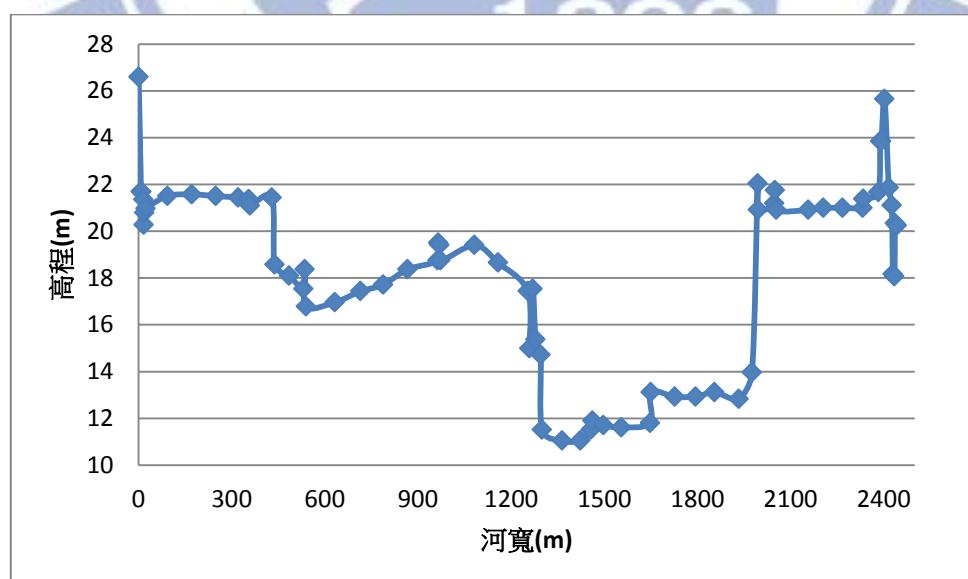


圖 4.2-4 斷面 45 之河川斷面圖

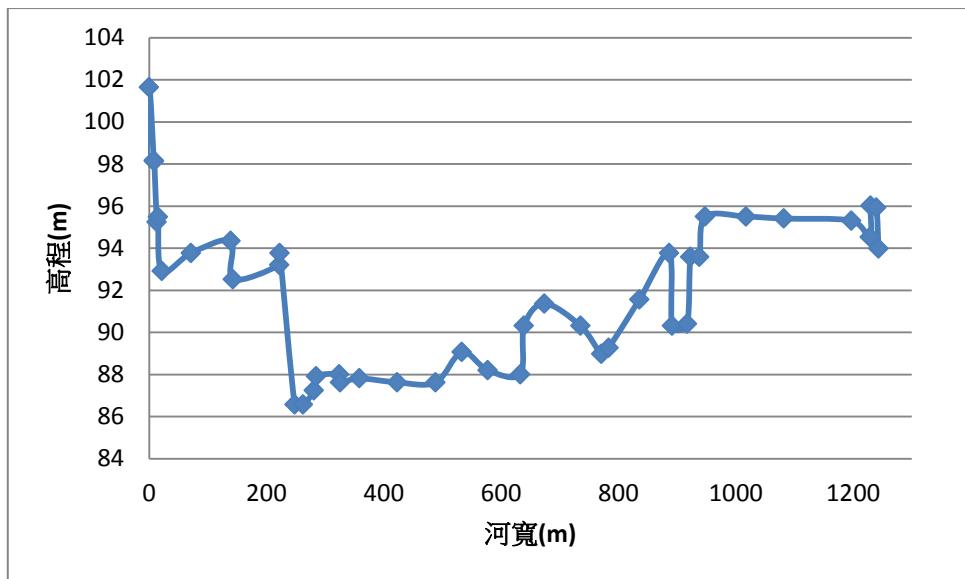


圖 4.2-5 斷面 86 之河川斷面圖

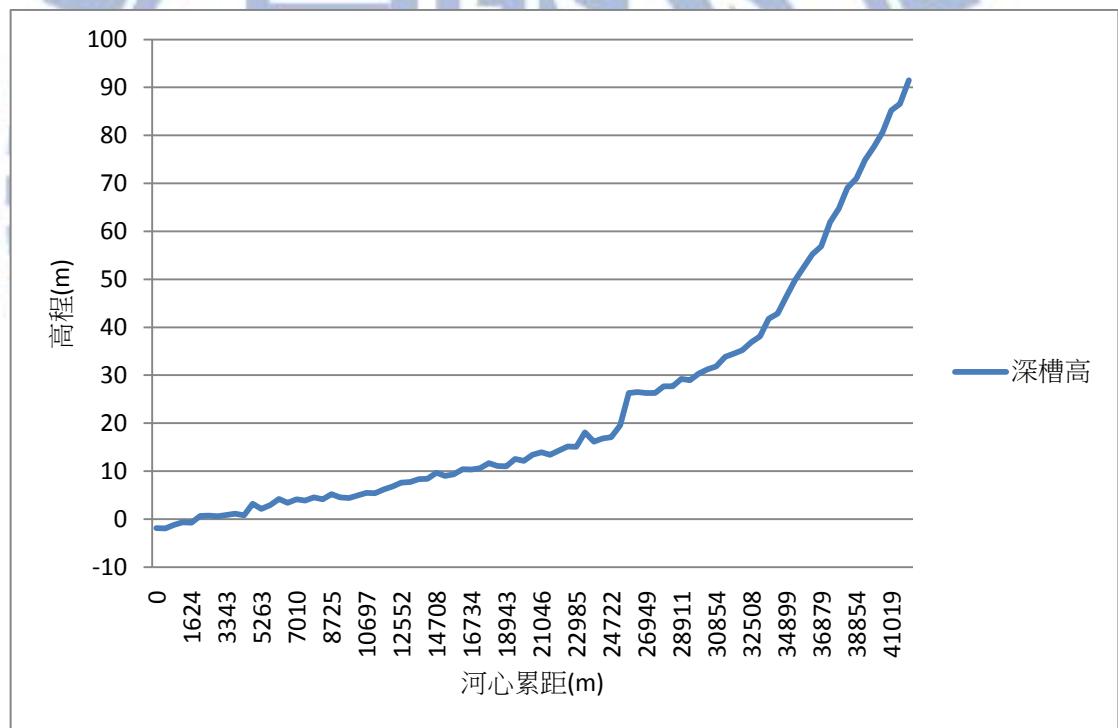


圖 4.2-6 濁水溪底床剖面圖

## 2. 曼寧 $n$ 值

根據水利署第四河川局提供資料，民國 93 年濁水溪主流之曼寧糙度值，成果如表 4.2-1 所示。

表 4.2-1 濁水溪本流各河段曼寧 n 值計算成果表

| 斷面號 | 理論公式   |          |       |          | Lane                            | Einstein                        | Strickler                       | 採用值   |
|-----|--|----------|-------|----------|---------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|-------|
|     | $n = R^{1/6} / (g \times \frac{v}{v^*})^{1/2}$ |          |       |          | 公式                              | 公式                              | 公式                              |       |
|     | R=1<br>m                                       | R=2<br>m | R=3m  | R=4<br>m | n<br>$= 0.015D75^{\frac{1}{6}}$ | n<br>$= 0.015D75^{\frac{1}{6}}$ | n<br>$= 0.015D75^{\frac{1}{6}}$ |       |
| 6   | 0.022  | 0.023    | 0.023 | 0.024    | 0.013                           | 0.012                           | 0.013                           | 0.027 |
| 12  | 0.023  | 0.024    | 0.024 | 0.025    | 0.014                           | 0.012                           | 0.014                           | 0.027 |
| 16  | 0.022  | 0.023    | 0.023 | 0.024    | 0.014                           | 0.012                           | 0.013                           | 0.027 |
| 29  | 0.024  | 0.025    | 0.025 | 0.025    | 0.014                           | 0.011                           | 0.015                           | 0.027 |
| 33  | 0.023  | 0.024    | 0.025 | 0.025    | 0.014                           | 0.012                           | 0.014                           | 0.027 |
| 35  | 0.027  | 0.027    | 0.027 | 0.028    | 0.017                           | 0.014                           | 0.017                           | 0.027 |
| 37  | 0.023  | 0.024    | 0.024 | 0.025    | 0.014                           | 0.012                           | 0.014                           | 0.027 |
| 39  | 0.025  | 0.025    | 0.026 | 0.027    | 0.015                           | 0.012                           | 0.016                           | 0.03  |
| 41  | 0.029  | 0.028    | 0.028 | 0.028    | 0.015                           | 0.013                           | 0.017                           | 0.03  |
| 43  | 0.032  | 0.03     | 0.03  | 0.03     | 0.015                           | 0.012                           | 0.018                           | 0.03  |
| 45  | 0.03   | 0.036    | 0.037 | 0.036    | 0.022                           | 0.015                           | 0.022                           | 0.03  |
| 47  | 0.022  | 0.023    | 0.024 | 0.024    | 0.013                           | 0.011                           | 0.014                           | 0.03  |
| 49  | 0.031  | 0.036    | 0.034 | 0.034    | 0.018                           | 0.014                           | 0.021                           | 0.035 |
| 51  | 0.032  | 0.031    | 0.031 | 0.031    | 0.025                           | 0.019                           | 0.023                           | 0.035 |
| 52  | 0.031  | 0.034    | 0.032 | 0.032    | 0.026                           | 0.02                            | 0.025                           | 0.035 |
| 53  | 0.032  | 0.03     | 0.03  | 0.03     | 0.024                           | 0.017                           | 0.023                           | 0.035 |
| 55  | 0.03   | 0.036    | 0.035 | 0.035    | 0.028                           | 0.023                           | 0.026                           | 0.035 |
| 57  | 0.03   | 0.036    | 0.038 | 0.036    | 0.029                           | 0.024                           | 0.027                           | 0.035 |
| 59  | 0.029  | 0.035    | 0.038 | 0.038    | 0.03                            | 0.025                           | 0.028                           | 0.035 |
| 61  | 0.03   | 0.036    | 0.035 | 0.034    | 0.026                           | 0.019                           | 0.026                           | 0.038 |

|    |       |       |       |       |       |       |       |       |
|----|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 63 | 0.03  | 0.036 | 0.036 | 0.035 | 0.028 | 0.022 | 0.026 | 0.038 |
| 65 | 0.028 | 0.035 | 0.038 | 0.039 | 0.03  | 0.025 | 0.028 | 0.038 |
| 67 | 0.021 | 0.033 | 0.037 | 0.04  | 0.033 | 0.027 | 0.03  | 0.038 |
| 69 | 0.021 | 0.034 | 0.037 | 0.04  | 0.032 | 0.027 | 0.03  | 0.038 |
| 71 | 0.022 | 0.033 | 0.037 | 0.04  | 0.033 | 0.028 | 0.031 | 0.04  |
| 73 | 0.022 | 0.032 | 0.037 | 0.039 | 0.034 | 0.028 | 0.031 | 0.04  |
| 75 | 0.022 | 0.033 | 0.037 | 0.04  | 0.033 | 0.028 | 0.031 | 0.04  |
| 77 | 0.022 | 0.032 | 0.036 | 0.039 | 0.034 | 0.029 | 0.032 | 0.04  |
| 79 | 0.023 | 0.023 | 0.036 | 0.039 | 0.035 | 0.029 | 0.032 | 0.04  |
| 81 | 0.022 | 0.032 | 0.036 | 0.039 | 0.034 | 0.028 | 0.032 | 0.04  |
| 83 | 0.022 | 0.032 | 0.037 | 0.039 | 0.029 | 0.028 | 0.031 | 0.04  |
| 85 | 0.022 | 0.032 | 0.037 | 0.039 | 0.032 | 0.028 | 0.031 | 0.04  |

### 3. 上游邊界條件

本研究上游邊界條件為流量邊界條件，在此以彰雲橋之觀測月平均流量給定，如表 4.2-2 與圖 4.2-7 所示。

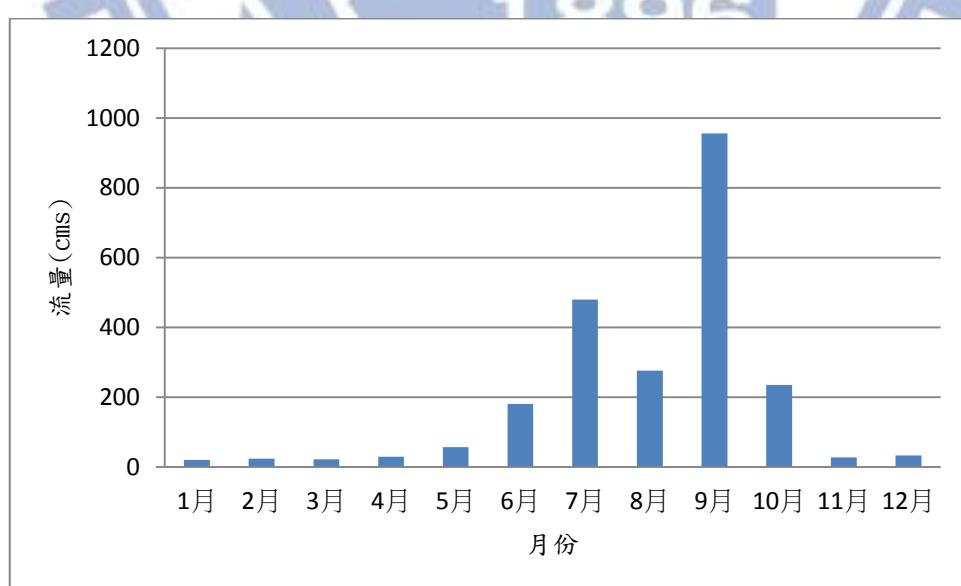


圖 4.2-7 彰雲橋 2008 年月平均流量圖

表 4.2-2 彰雲橋 2008 年月平均流量表

| 月份        | 1 月   | 2 月   | 3 月   | 4 月   | 5 月  | 6 月   |
|-----------|-------|-------|-------|-------|------|-------|
| 平均流量(cms) | 20.1  | 24.4  | 22.4  | 29.3  | 56.6 | 181.2 |
| 月份        | 7 月   | 8 月   | 9 月   | 10 月  | 11 月 | 12 月  |
| 平均流量(cms) | 480.1 | 276.0 | 955.2 | 234.6 | 27.5 | 33.6  |

#### 4. 下游邊界條件

本研究下游邊界條件為水位邊界條件，由於在濁水溪出海口並無水位觀測站，本研究以潮位資料作為下游邊界條件。由於芳苑潮位站距離出海口最近，在此以芳苑站之潮位資料給定，如表 4.2-3 所示。



表 4.2-3 芳苑站月平均潮位高程表

| 時間 | 平均潮位<br>(mm) | 最高高潮位<br>(mm) | 時間  | 平均潮位<br>(mm) | 最高高潮位<br>(mm) |
|----|--------------|---------------|-----|--------------|---------------|
| 一月 | 1865         | 2548          | 七月  | 1996         | 2538          |
| 二月 | 1809         | 2511          | 八月  | 2139         | 2894          |
| 三月 | 1945         | 2433          | 九月  | 2170         | 2738          |
| 四月 | 1928         | 2355          | 十月  | 2099         | 2580          |
| 五月 | 1921         | 2438          | 十一月 | 1978         | 2438          |
| 六月 | 2011         | 2637          | 十二月 | 1874         | 2380          |

### 5.模擬案例

本研究以 2008 年作為模擬案例。由於觀測水位站並非直接座落於量測斷面上，如圖 4.2-8 所示，例如彰雲橋位於斷面 86 及斷面 87 中間，兩斷面相距 643 公尺，深槽高則有 4.9 公尺之差異(如圖 4.2-9 所示)，坡度約千分之 7.6。在此較陡之坡度下，需針對量測位置需依據深槽坡度適時做校正。

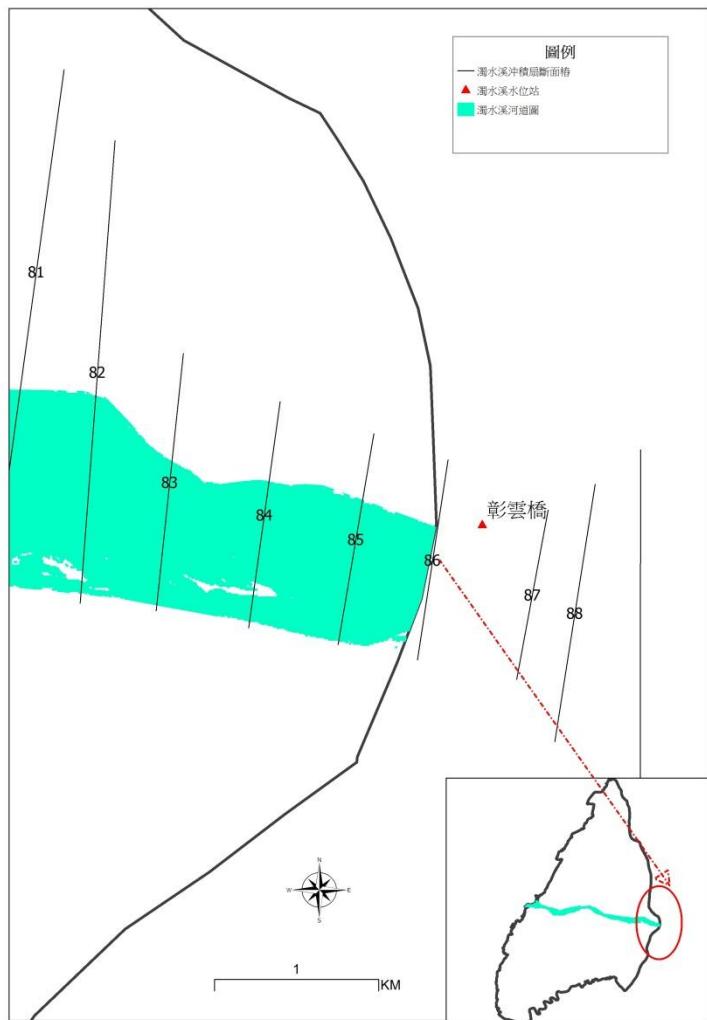


圖 4.2-8 斷面 86、斷面 87 及彰雲橋水位站位置關係圖

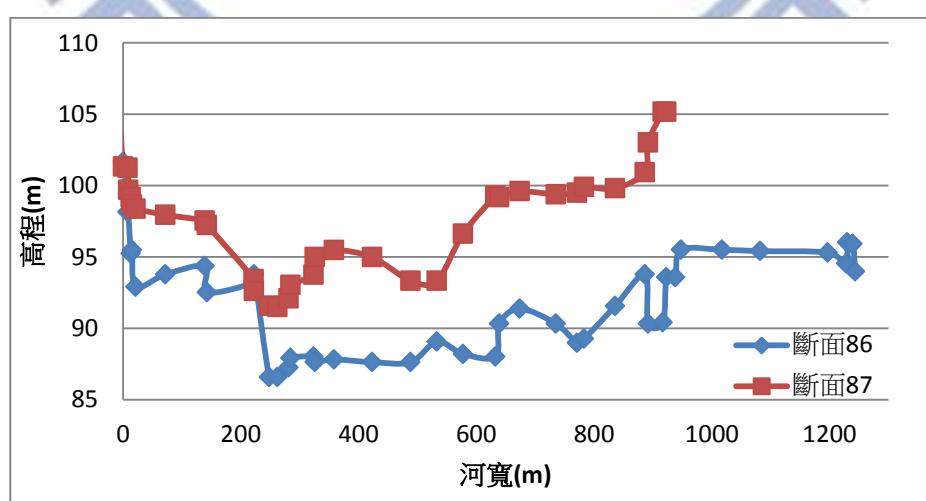
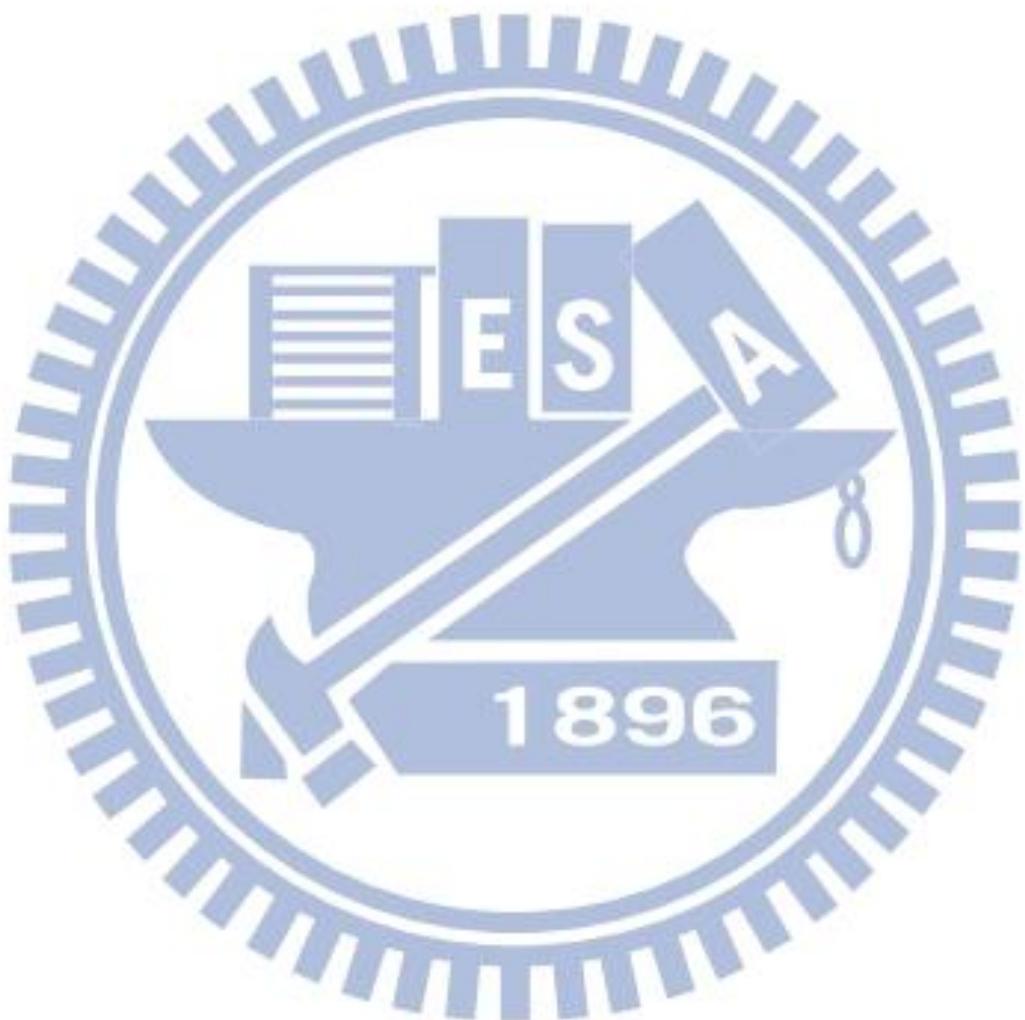


圖 4.2-9 斷面 86 及斷面 87 剖面圖

本研究以彰雲橋、西濱大橋、自強大橋及溪洲大橋四站作為評比對象，以下分別以一月、四月、七月與十月之模擬水位與觀測水位做比較，如圖 4.2-10 至圖 4.2-13 所示。圖 4.2-14 至圖 4.2-17 分別為四站之觀測水位及模擬水位。



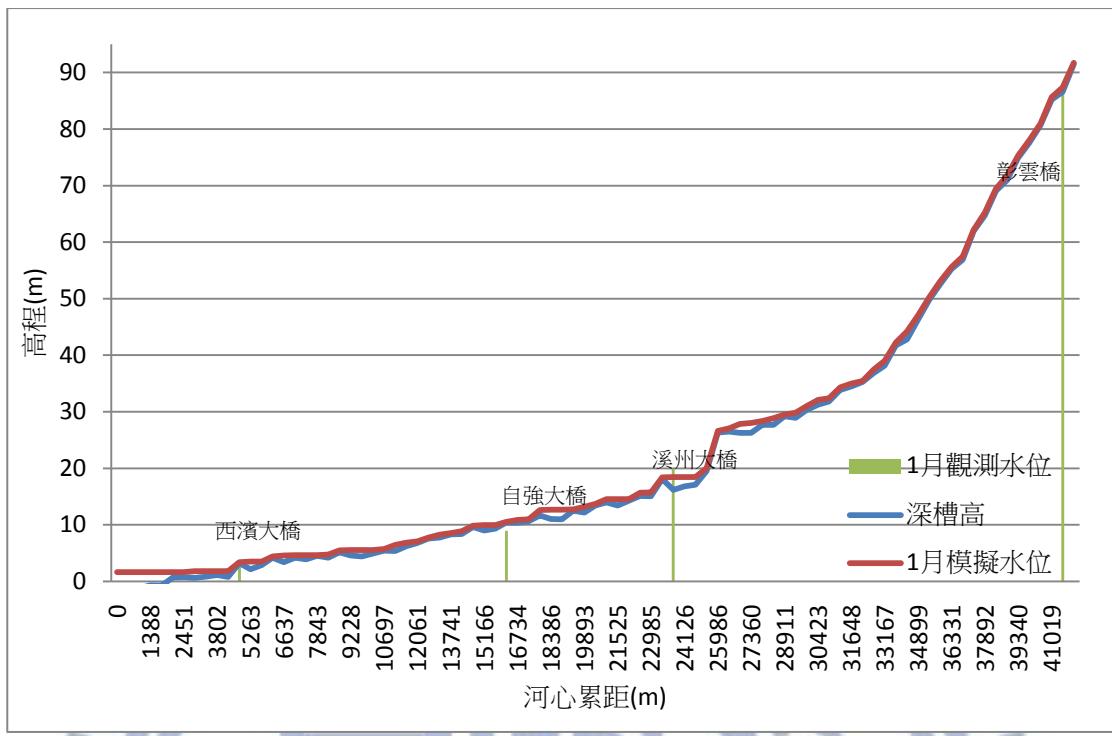


圖 4.2-10 濁水溪一月模擬水位與觀測水位

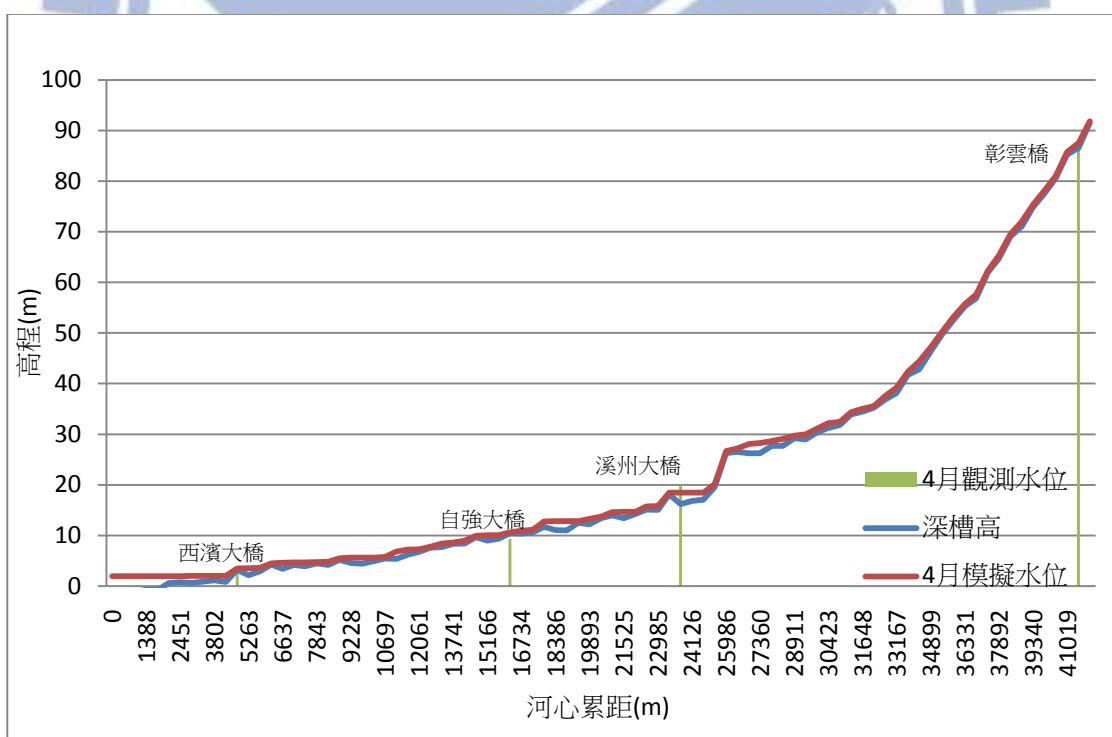


圖 4.2-11 濁水溪四月模擬水位與觀測水位

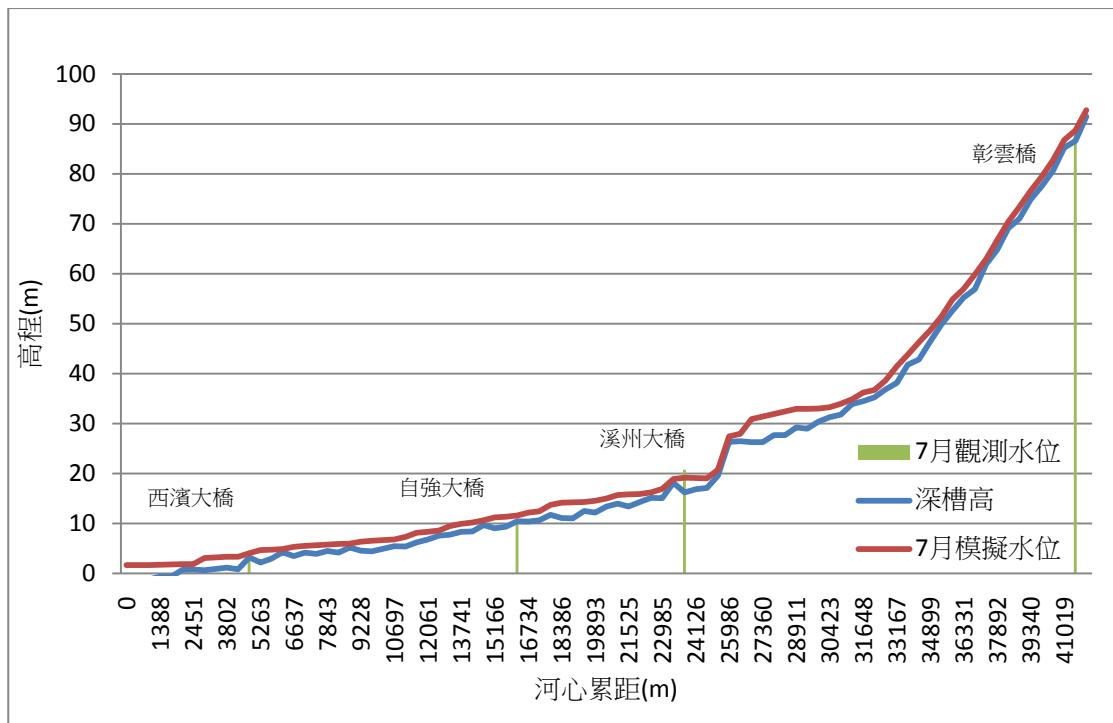


圖 4.2-12 濁水溪七月模擬水位與觀測水位

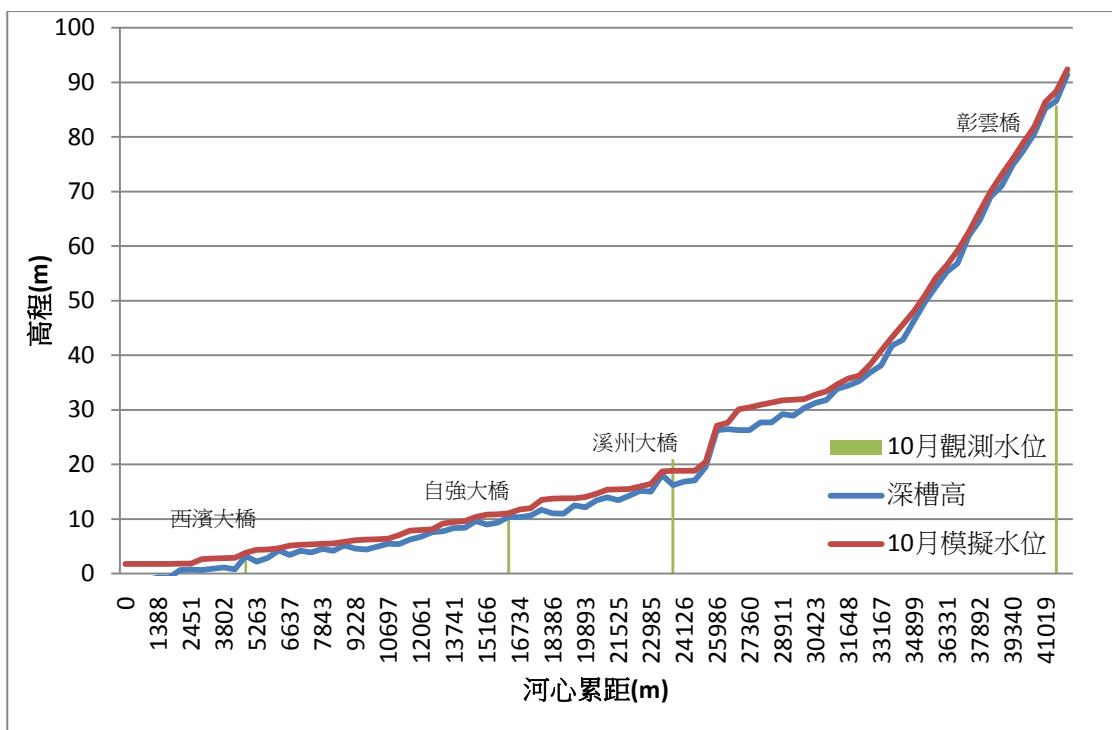


圖 4.2-13 濁水溪十月模擬水位與觀測水位

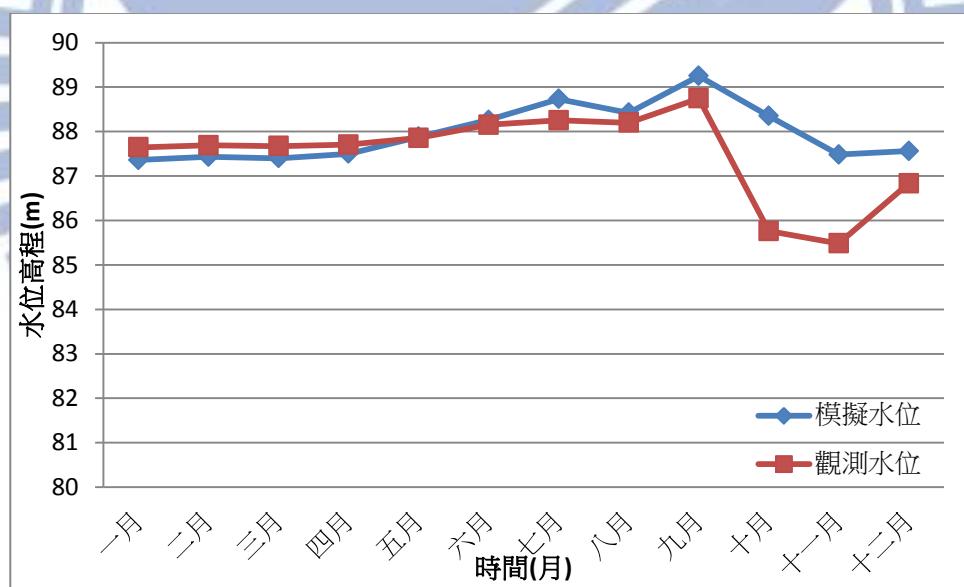


圖 4.2-14 彰雲橋觀測水位與模擬水位時序比較圖

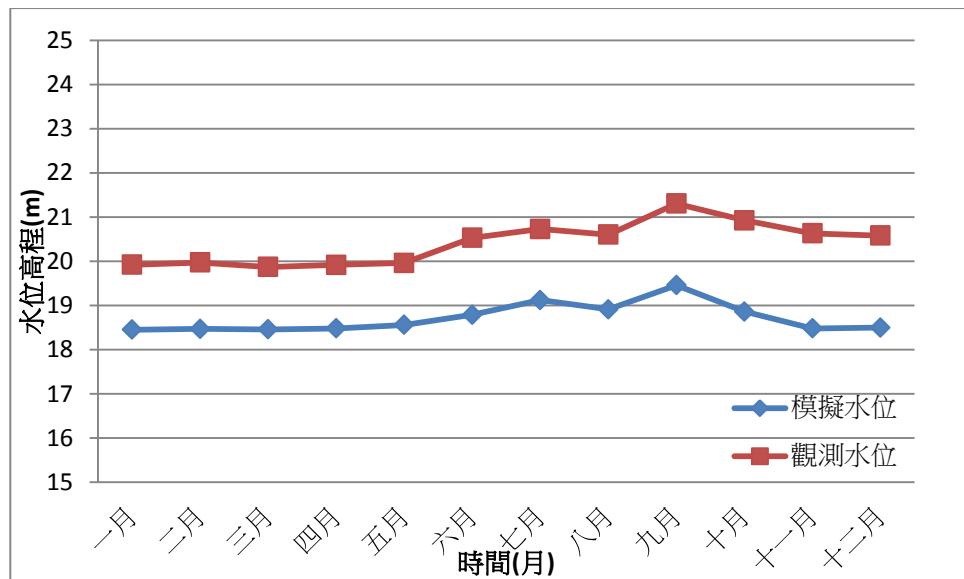


圖 4.2-15 溪州大橋觀測水位與模擬水位時序比較圖

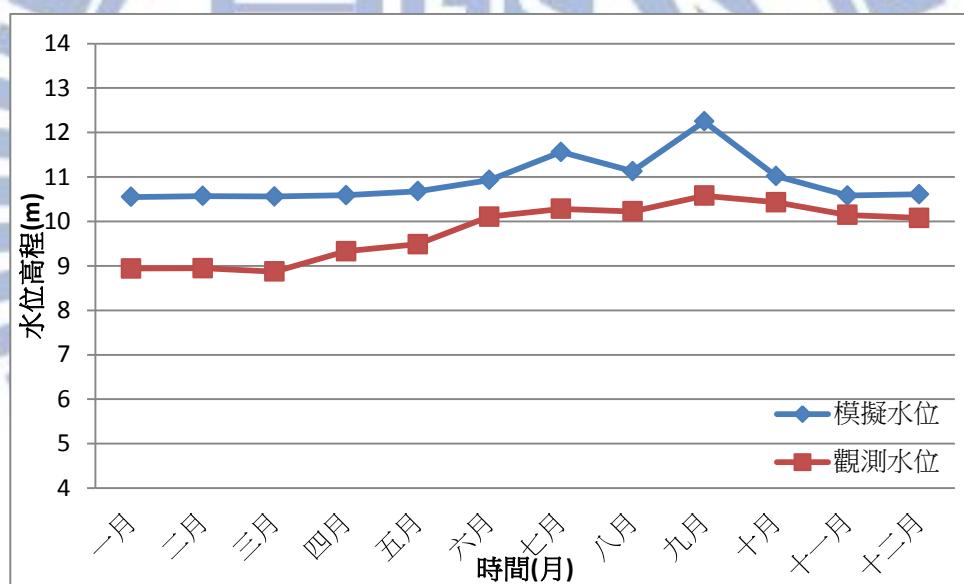


圖 4.2-16 自強大橋觀測水位與模擬水位時序比較圖

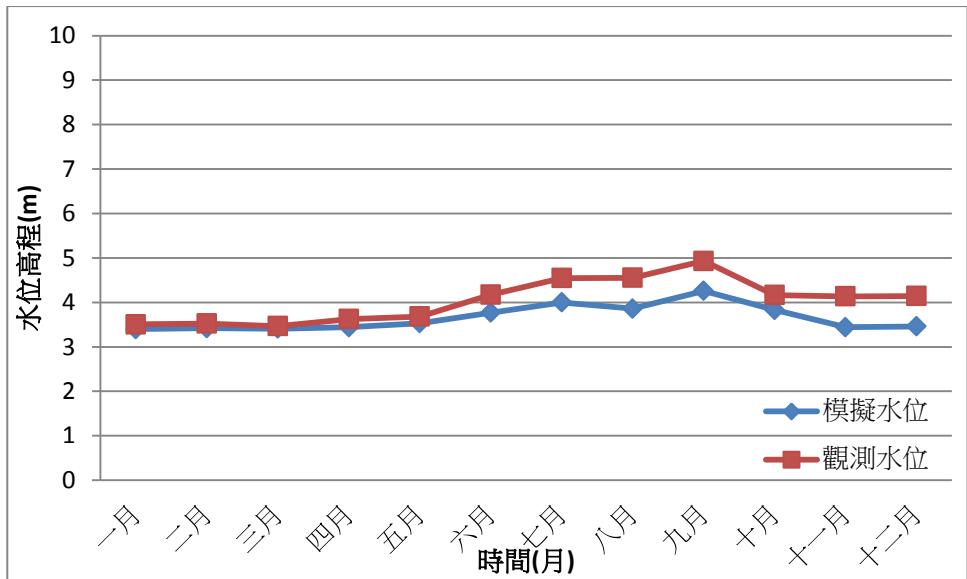


圖 4.2-17 西濱大橋觀測水位與模擬水位時序比較圖

### 4.3 應用衛星影像辨識於濁水溪河道面積

本研究利用福爾摩沙衛星二號之多光譜衛星影像圖，以近紅外線波段搭配可見光進行河道辨識。本案例採用之衛星影像分別為 2008 年 1/3 至 1/5、4/15、7/21、7/25、7/26、11/1、11/12 與 11/13 所拍攝之影像，可分別用於代表四個季節之河道變化，衛星影像與河道辨識結果如圖 4.3-1 至圖 4.3-4。

圖中紅色線為濁水溪沖積扇邊界，綠色線為河道斷面，淺藍色區域則為辨識出之河道行水濕潤區域。由圖中可發現濁水溪河道為瓣狀河川，各季瓣狀河道在堤防所限制的行水區域內，有極大之變動幅度。圖 4.3-5 為各季河道行水濕潤區域，不同顏色範圍即代表不同季節之行水濕潤區域，可發現各季之河道行水濕潤區域除面積相差極遠外，分布位置亦不斷擺盪，以上游最為明顯，直至自強大橋後，行水濕潤區域才開始重疊。

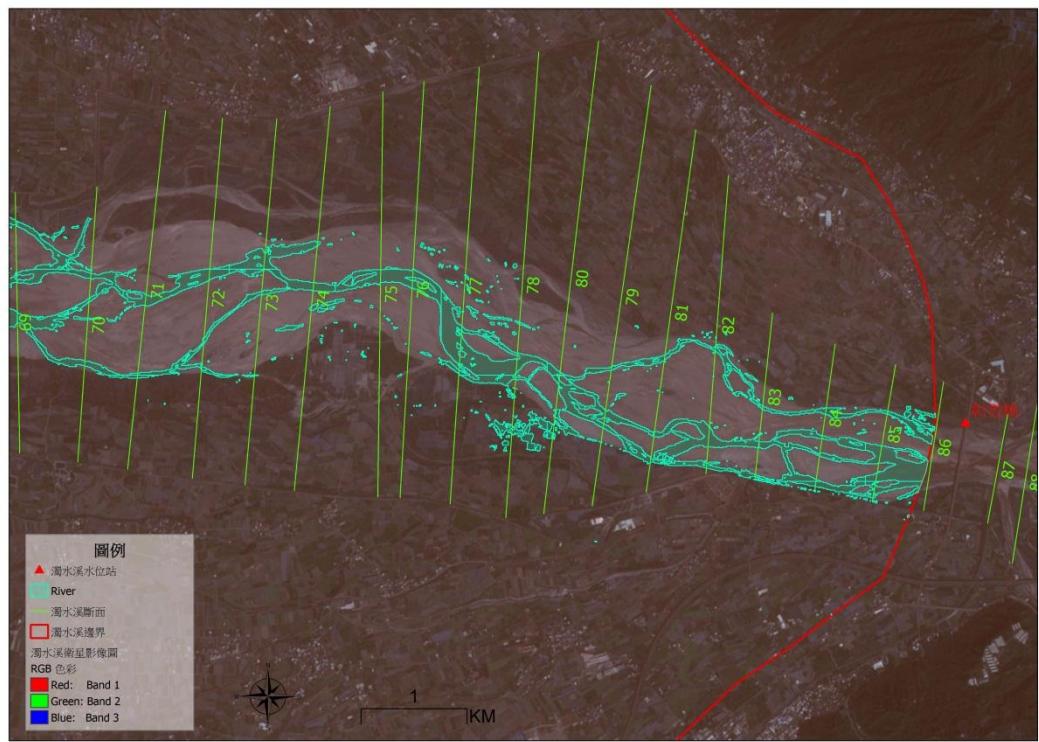


圖 4.3-1 一月濁水溪上游衛星影像圖

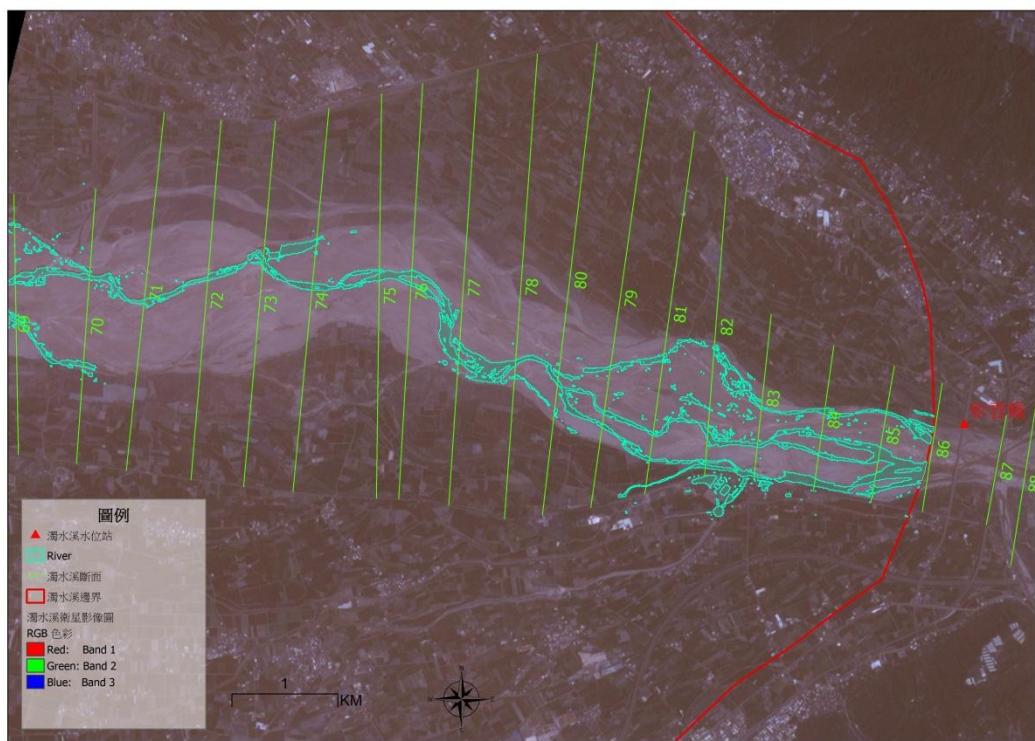


圖 4.3-2 四月濁水溪上游衛星影像圖

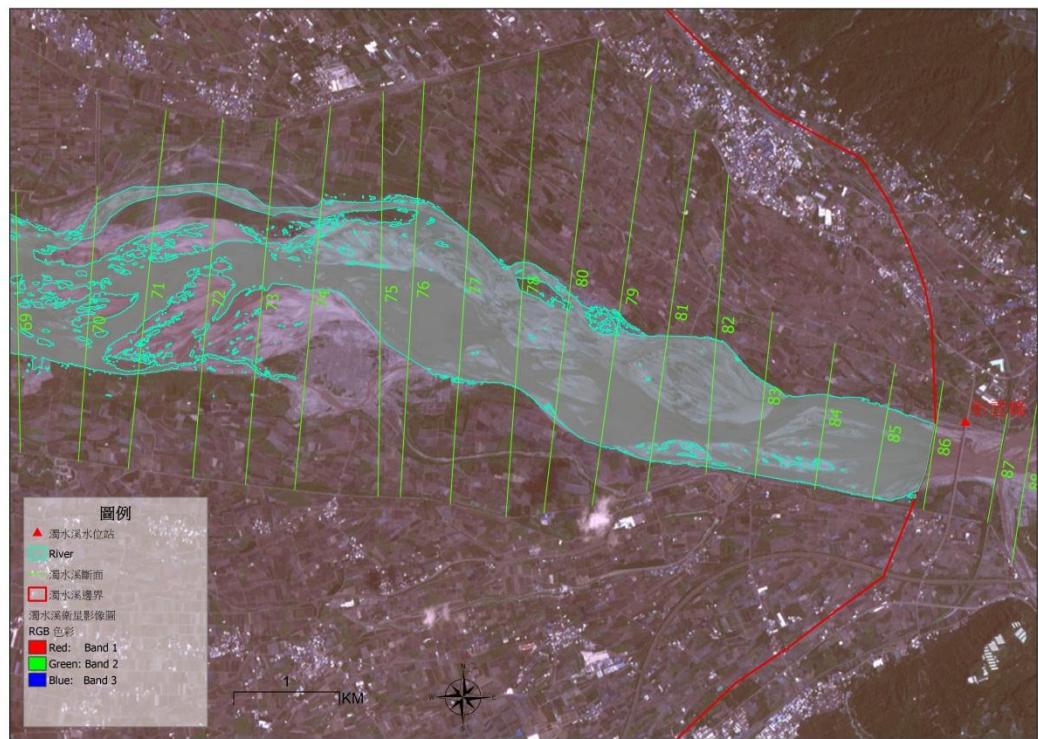


圖 4.3-3 七月濁水溪上游衛星影像圖

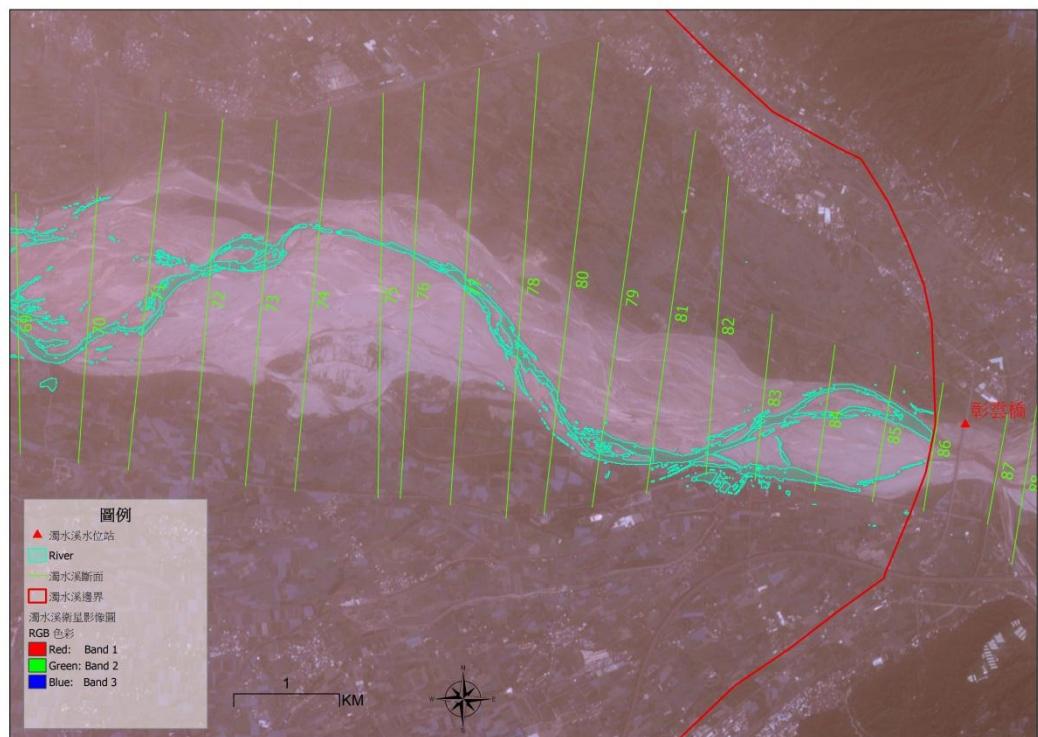


圖 4.3-4 十一月濁水溪上游衛星影像圖

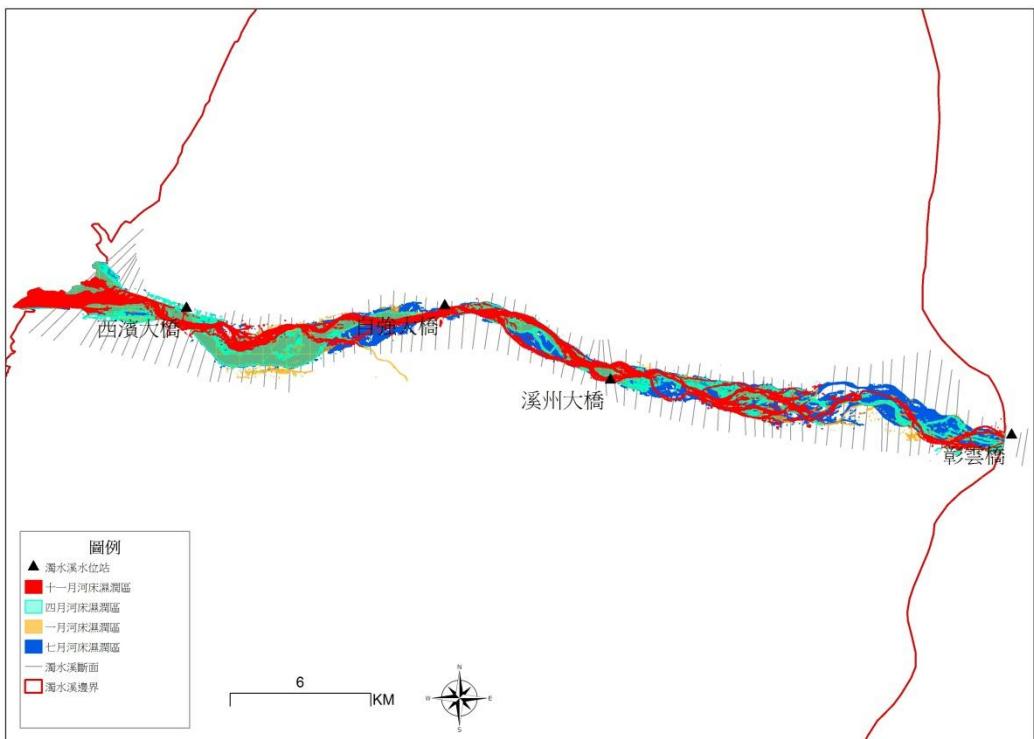


圖 4.3-5 四季河道行水濕潤區域重疊圖

濕潤區域面積以七月份最大，而以十一月濕潤區域面積最小。各季河道行水濕潤區域面積統計分析如圖 4.3-6 與表 4.3-1 所示，一月及四月之河道行水濕潤區域面積均大約為 24 平方公里，七月則擴張為 40 平方公里，而十一月則再降為 12 平方公里，因此七月之河床行水濕潤區域超過十一月的兩倍多。

本研究將以溪州大橋與自強大橋為界，彰雲橋至溪州大橋稱為上游，溪州大橋至自強大橋間則稱為中游，而自強大橋至出海口則稱為下游，表 4.3-1 展示不同區域之行水濕潤區域變化。由上游至下游河長分別為 17.74、7.62 與 16.14 公里，以上游為例，各季面積分別為 3.51、5.22、16.21 與 3.29 平方公里，以最大面積與最小面積約有五倍之差異，若以面積除以河長視為上游之等效河寬，各季之等效河寬分別為 0.217、0.324、1.005 與 0.204 公里寬。下游部分，各季面積分別為 14.62、15.07、18.57 與 6.70 平方公里，

以最大面積與最小面積約有 2.5 倍之差異，若以面積除以河長視為上游之等效河寬，各季之等效河寬分別為 0.906、0.934、1.151 與 0.415 公里寬。

比較上游與下游之瓣狀河道特性，可以發現上游瓣狀河道有明顯之豐枯差異，下游部分除十一月之衛星影像外，其他各季均無太大差異，其原因在於下游河道坡度較為平坦，河床斷面亦呈現寬而淺，較近似 U 型之河槽形狀，因此對於不同季節不同水文條件而言，濕潤區域無大幅改變，僅在水深上有深淺之差異；反之，上游區域河道坡度較陡，河床斷面則呈現窄而深，較近似 V 型之河槽形狀，因此濕潤區域則容易因水深之不同，而面積有大幅改變。

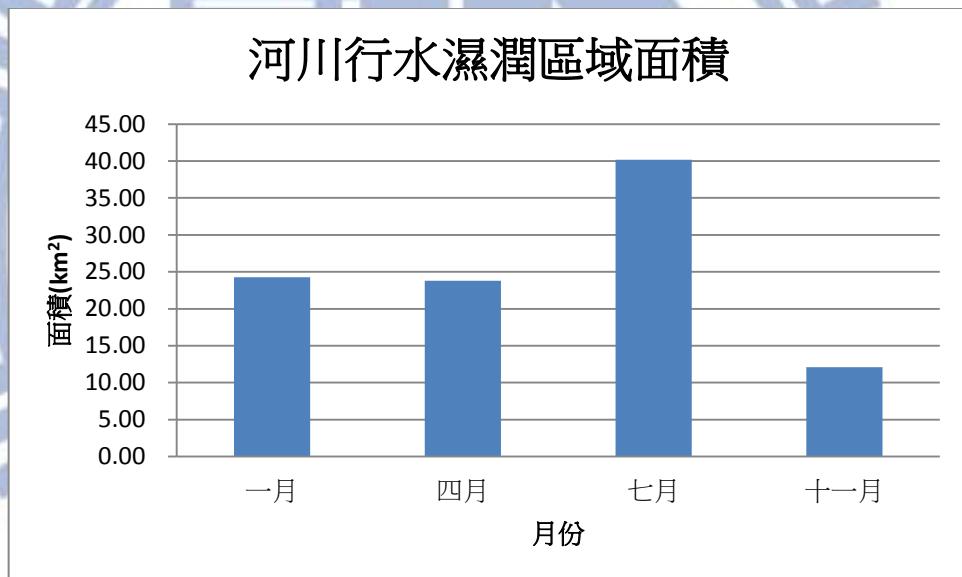


圖 4.3-6 四季之河道濕潤區面積

表 4.3-1 各段河道濕潤區之面積及等效河寬

|        |        | 自強大橋-出海口(下游) | 溪州大橋-自強大橋(中游) | 彰雲大橋-溪州大橋(上游) |
|--------|--------|--------------|---------------|---------------|
| 河川長度 a |        | 16.14        | 7.62          | 17.74         |
| 一月     | 面積 b   | 14.62        | 3.98          | 3.51          |
|        | 等效河寬 a | 0.906        | 0.523         | 0.217         |
| 四月     | 面積 b   | 15.07        | 3.51          | 5.22          |
|        | 等效河寬 a | 0.934        | 0.461         | 0.324         |
| 七月     | 面積 b   | 18.57        | 5.38          | 16.21         |
|        | 等效河寬 a | 1.151        | 0.706         | 1.005         |
| 十一月    | 面積 b   | 6.70         | 1.92          | 3.29          |
|        | 等效河寬 a | 0.415        | 0.252         | 0.204         |
| 平均     | 面積 b   | 13.74        | 3.70          | 7.06          |
|        | 等效河寬 a | 0.851        | 0.486         | 0.437         |

<sup>a</sup> 公里；<sup>b</sup> 平方公里

## 4.4 濁水溪沖積扇地下水數值模式建置

### 4.4.1 地下水分層架構、邊界條件與格網劃分

#### 1.地下分層架構

地下含水層可分為受壓或非受壓含水層兩者，MODFLOW 需依此設定地下分層特性，並輸入各分層頂部和底部高程位置。經濟部中央地質調查所於民國 88 年完成之「台灣地區地下水觀測網第一期計畫濁水溪沖積扇水文地質調查研究報告」，其中記錄位於濁水溪沖積扇 72 站之地層柱狀圖，其分布位置如圖 4.4-1 所示，並完成平原地區水文地質剖面一至十二（繪製深度至 300 公尺左右），並結合丘陵及河谷區之 8 站地層柱狀圖，繪製水文地質剖面十三至十五（繪製深度約達 250 公尺左右），劃分出濁水溪沖積扇概念分層，依深度分別為含水層一、阻水層一、含水層二、阻水層二、含水層三、阻水層三及含水層四，概念分層共分七層，如圖 4.4-2 所示。

然因為含水層四之觀測井極少，僅有十站，相關資訊不足以模擬該分層，且由於含水層四極深，不受到外界抽水或補注之影響，因此本研究將第六與第七層移除，僅模擬第一至第五層。

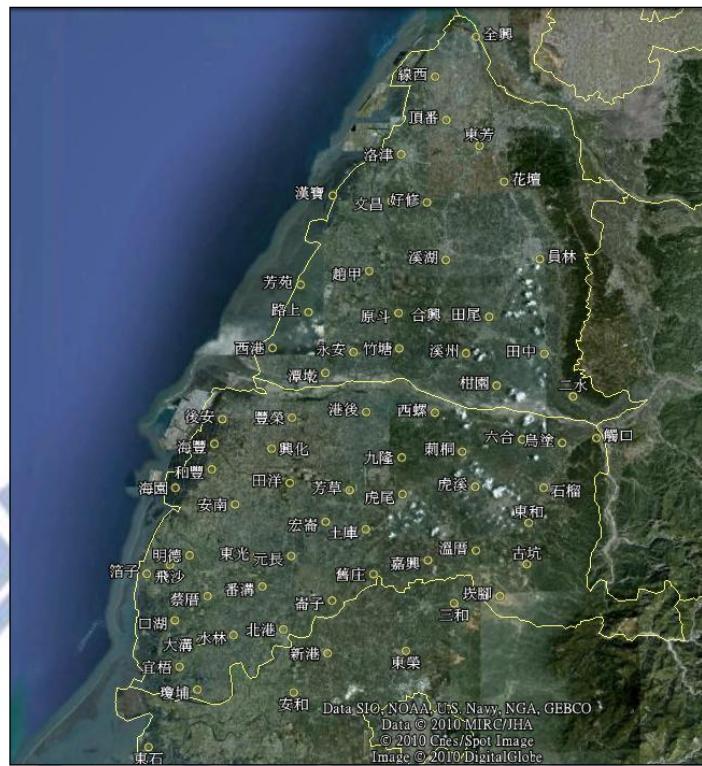


圖 4.4-1 地層柱狀圖分部位置



圖 4.4-2 濁水溪沖積扇水文地質架構概念分層

## 2. 模式邊界條件

根據中央地質調查所(1999)對於濁水溪沖積扇地下水邊界分析研判，提出概念性之邊界，如圖 4.4-3。

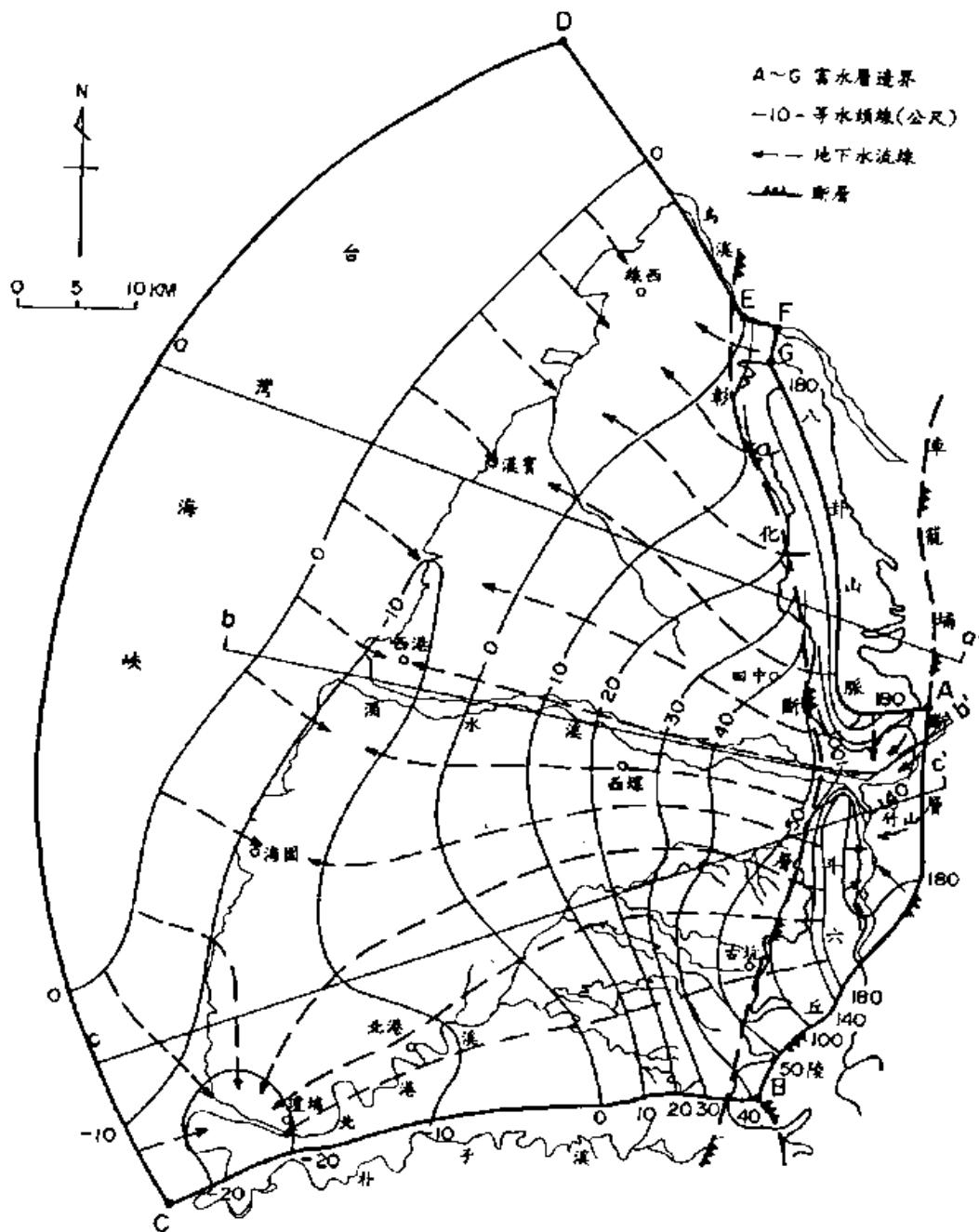


圖 4.4-3 濁水溪沖積扇地下水邊界之概念圖

● AB 段

位於車籠埔斷層上，斷層以東除河床表層厚約 10 公尺之河道沉積礫石層有地下水伏流以外，均為透水及含水不佳之砂頁岩，屬於零流邊界(No flow boundary)；惟位於此邊界上之濁水溪和清水溪河床伏流水量相當可觀，

為側向補注入地下水區之點源(Pointsource)。

- BC 段

本邊界位於濁水溪沖積扇之南側邊緣上，含水層沉積物粒徑及厚度均顯著變小，然而並未尖滅，因此無實體之阻隔為界，然而從地下水水流網分布型態，顯示 BC 段與地下水水流線大致平行，於本身即可認定為一條流線，故亦屬於零流邊界。海岸附近之洩降錐，其在邊界南北之形狀及大小若相當，則不影響零流邊界之假設。

- CD 段

此段為濁水溪沖積扇西側，緊鄰台灣海峽，屬於定水頭邊界。

- DEF 段

本段與 BC 段相似，含水層可向北延伸而與台中盆地地下水系統相接，缺乏實體之阻隔，惟與地下水水流方向大致平行，故認定為零流邊界。EF 段位於和美沖積扇頂上，河水可由河床入滲補注地下水。

- FG 段

本段邊界大致與地下水等水位線平行，隨時間之不同水位有昇降變化。

- GA 段

本段位於頭嵙山層之中，為八卦山台地之地下水分水線(Groundwater divide)。

### 3. 格網劃分

模式格網以 1 公里乘 1 公里之格網建構，所以每一層格網為南北方向 85 列與東西方向 75 行，共七層格網。如圖 4.4-4 所示，淺綠色區域為模擬範圍：

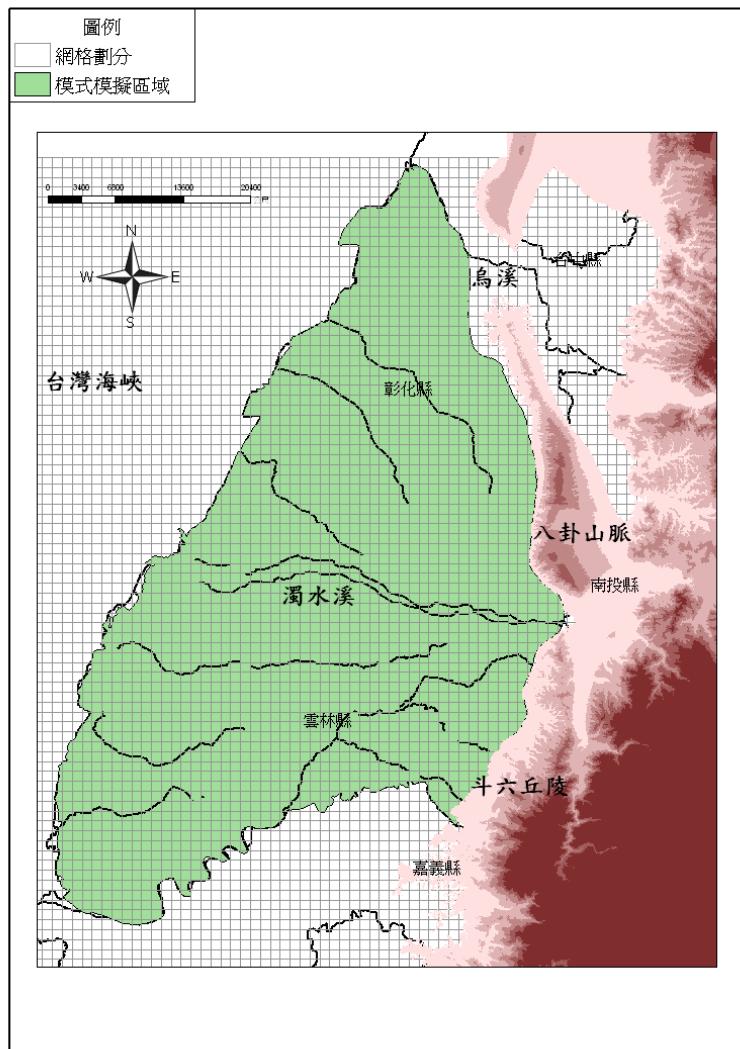


圖 4.4-4 濁水溪沖積扇模式之格網劃分

並且由上述邊界條件，在 MODFLOW 模式中設定，東部之八卦山地區有八卦山背斜，斗六丘陵有內林背斜及斷層經過，以此為東邊邊界，且設為零流量之邊界條件。北部邊界為烏溪，南部邊界為北港溪，各層皆為零流量之邊界。西邊含水層一以海岸線向外延伸 1 公里設為定水頭邊界(如圖 4.4-5 所示)，其餘含水層延伸 5 公里後尖滅，設為定水頭之邊界條件(如圖 4.4-6 所示)。圖中藍色網格為定水頭邊界，灰色網格為零流量。圖 4.4-7 所示為第 49 列剖面圖，水平向長度為垂向長度 30 倍。

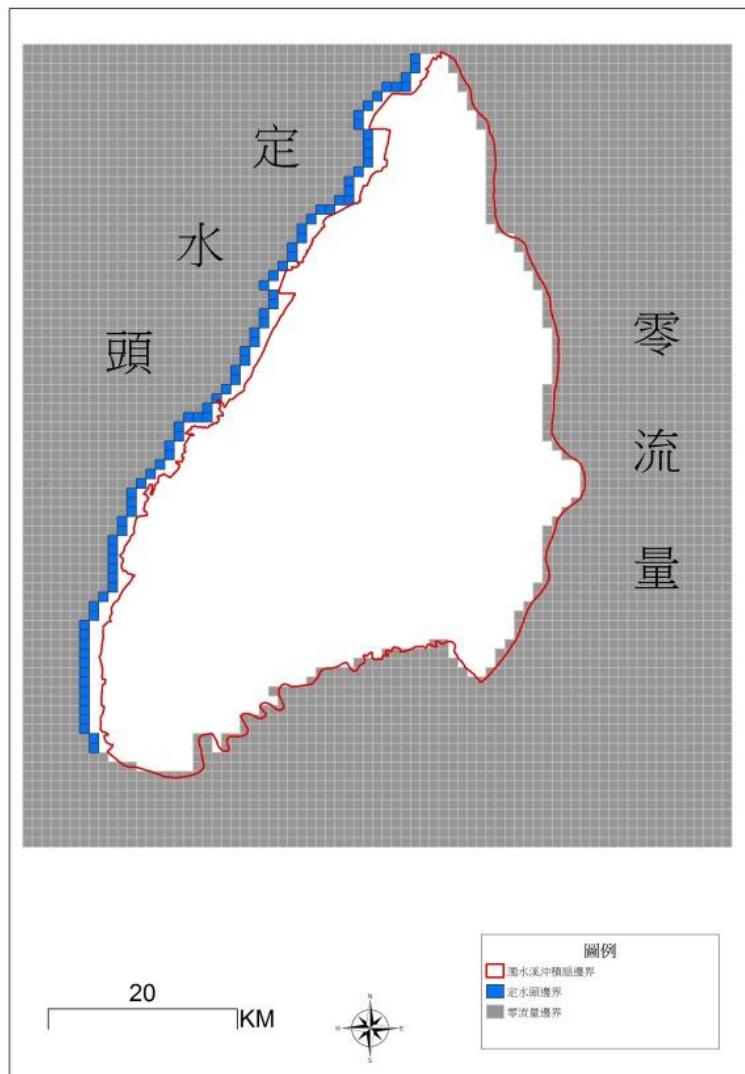


圖 4.4-5 濁水溪沖積扇模式第 1 分層格網劃分

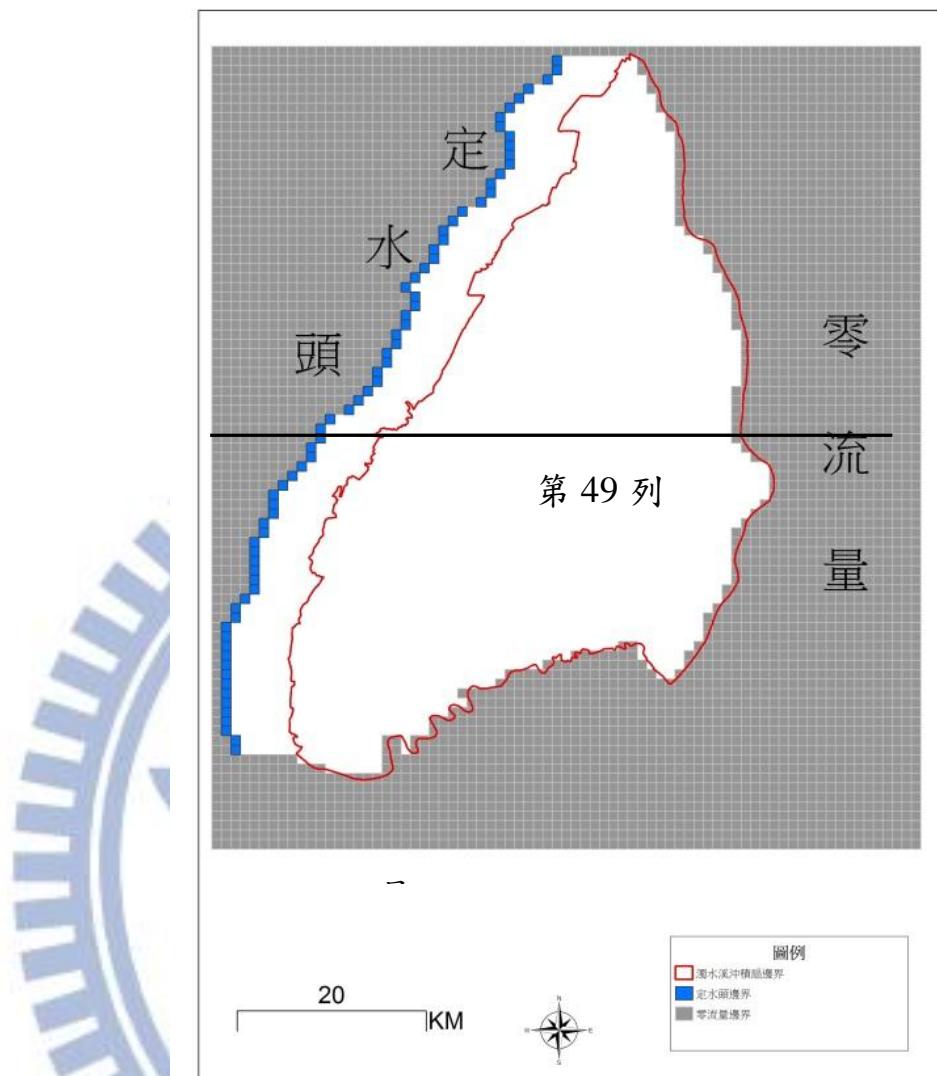


圖 4.4-6 濁水溪沖積扇模式第 2~5 分層格網劃分

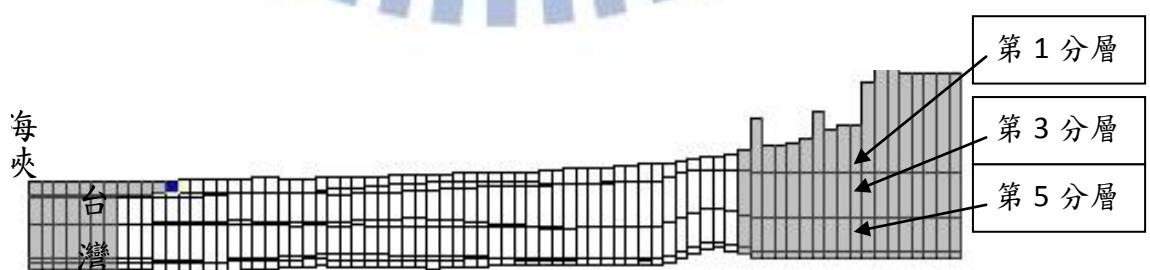


圖 4.4-7 濁水溪沖積扇模式第 49 列格網劃分剖面圖

#### 4.4.2 模式輸入資料

本研究將建置濁水溪沖積扇之地下水暫態模式，模擬濁水溪沖積扇地下水位隨著時間變化情形，模擬時間為西元 2006 年。模式之輸入資料除了包括水力傳導係數、垂向水力傳導係數、儲水係數、起始地下水水位、淨補注量、時間單位、模擬期數及長度等參數外，尚加入河道模組之河道相關資訊。以下將說明 MODFLOW 模式所需之各項參數，敘述如下：

##### 1. 時間參數設定

本暫態模式中，模擬時間單位為天，模擬期數為 12 期，分別代表 12 個月份，各期之模擬長度則設成相對應月份之天數，例如：第一期代表一月份，故其模擬長度為 31 天，第二期為 28 天。

##### 2. 水力傳導係數

觀測站網建置時，各觀測井建井完工必進行抽水試驗，因此各含水層之水力傳導係數現地試驗值相當多，故後續以實測資料為依據，以徐昇氏法分區給定，同一分區內給予該站之水力傳導係數實測值，圖 4.4-8~圖 4.4-10 分別為模式第 1、3 及 5 分層之水力傳導係數分區圖，有關各觀測站之水力傳導係數詳見附錄 A。

數值模式共分七層，第 2 與第 4 分層為阻水層，其分布範圍位於下游扇尾區域，模式於扇尾區域之水力傳導係數參考 Schwartz 與 Zhang (2003) 中建議之值域，在此設定為  $4 \times 10^3$  (公尺/天)，並且從中游開始，水力傳導係數逐漸變大，到上游部份，水力傳導係數則與含水層相當，其分布如圖 4.4-11、圖 4.4-12。此外，由於抽水試驗所得結果為水平向之水力傳導係數，垂向水力傳導係數在此假設為水平向之  $1/10$ 。

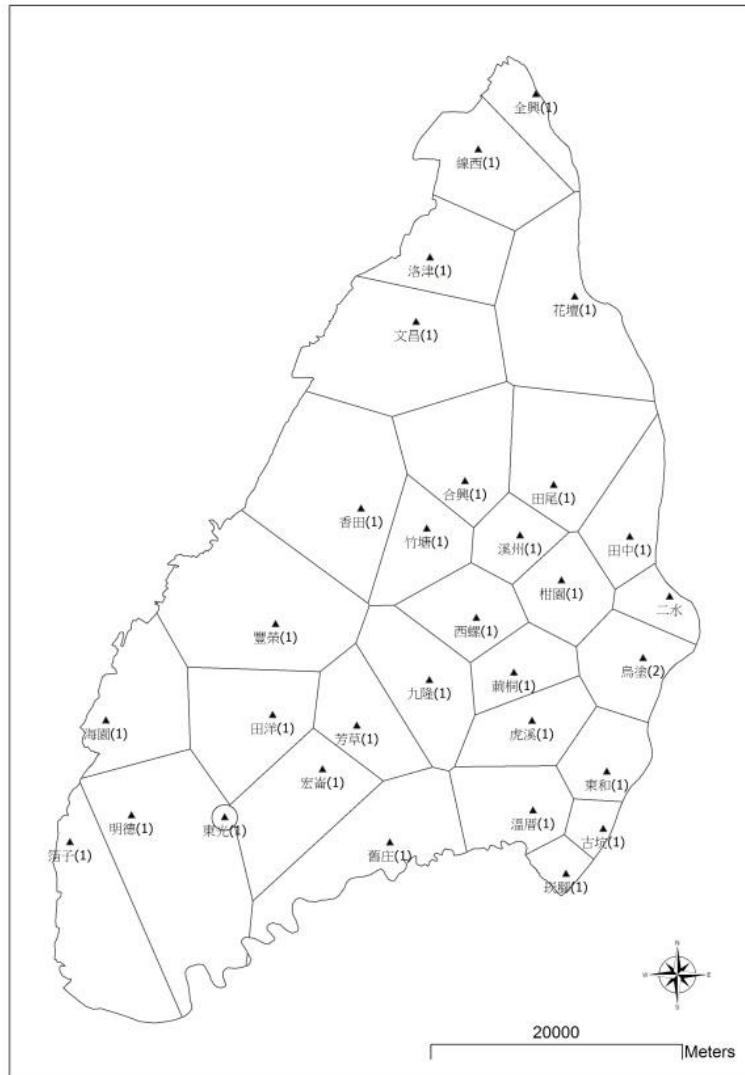


圖 4.4-8 濁水溪沖積扇模式第 1 分層徐昇氏網格分區

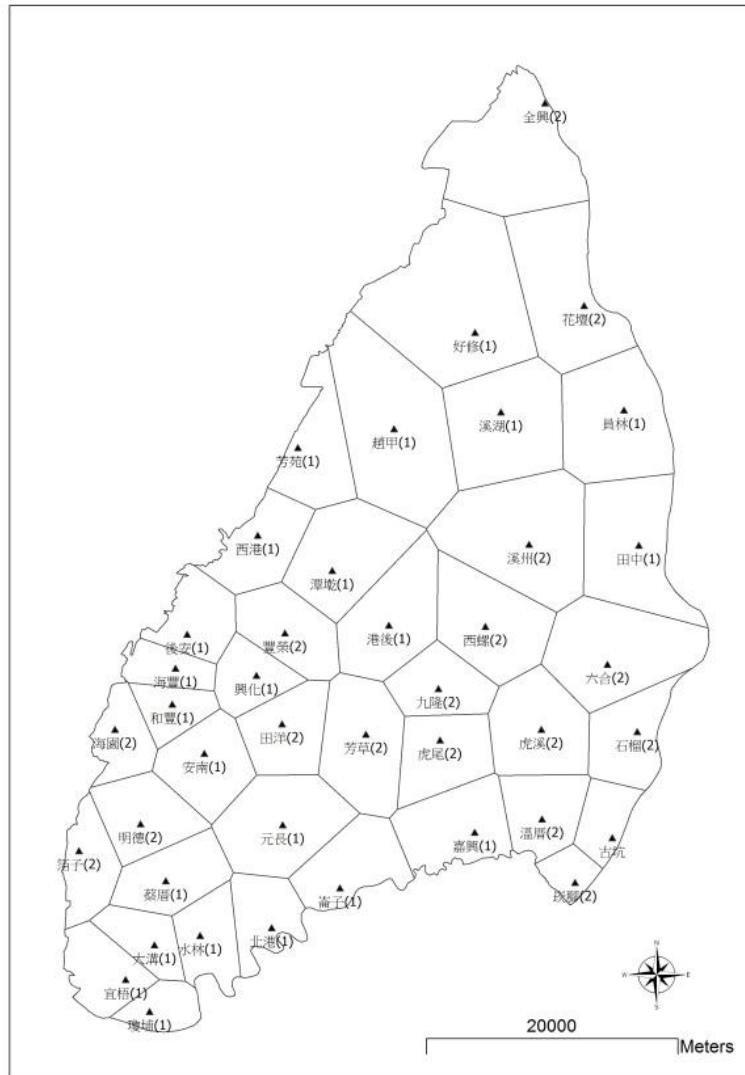


圖 4.4-9 濁水溪沖積扇模式第 3 分層徐昇氏網格分區

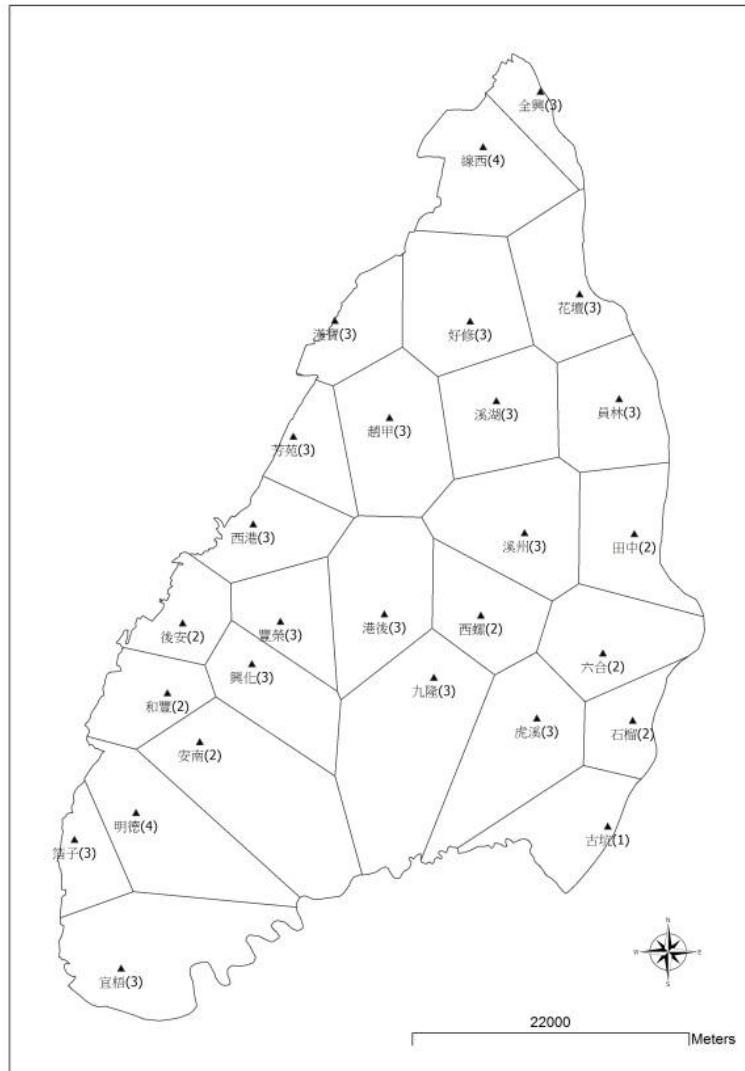


圖 4.4-10 濁水溪沖積扇模式第 5 分層徐昇氏網格分區

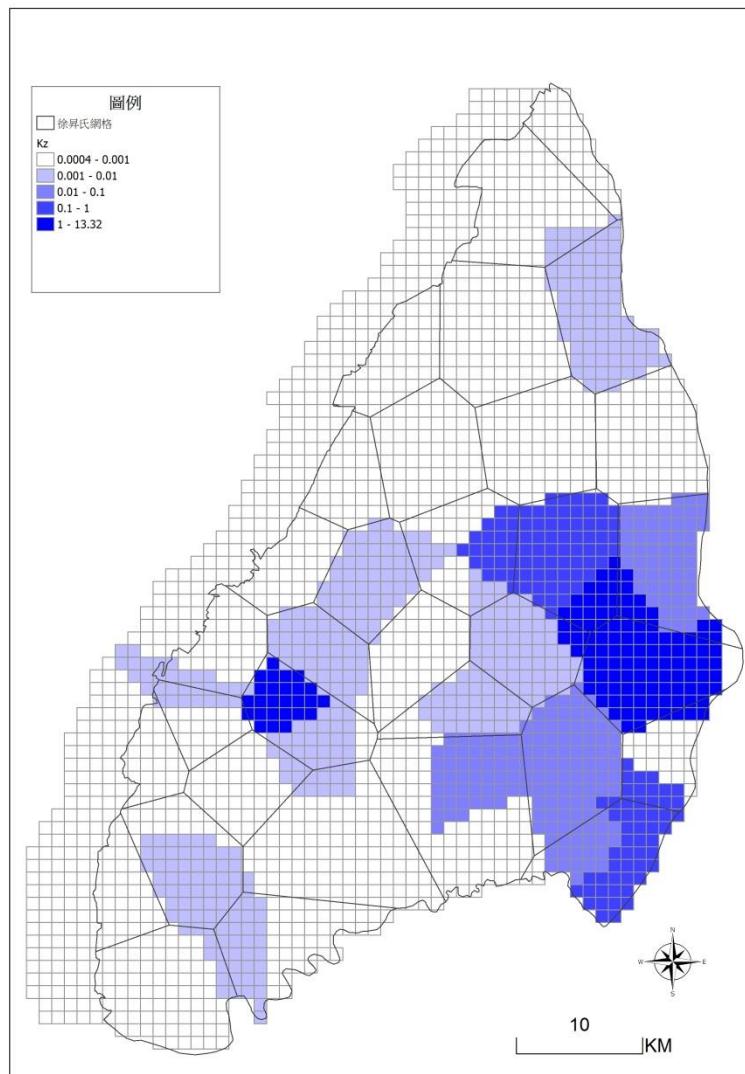


圖 4.4-11 濁水溪沖積扇模式第 2 分層水力傳導係數分布

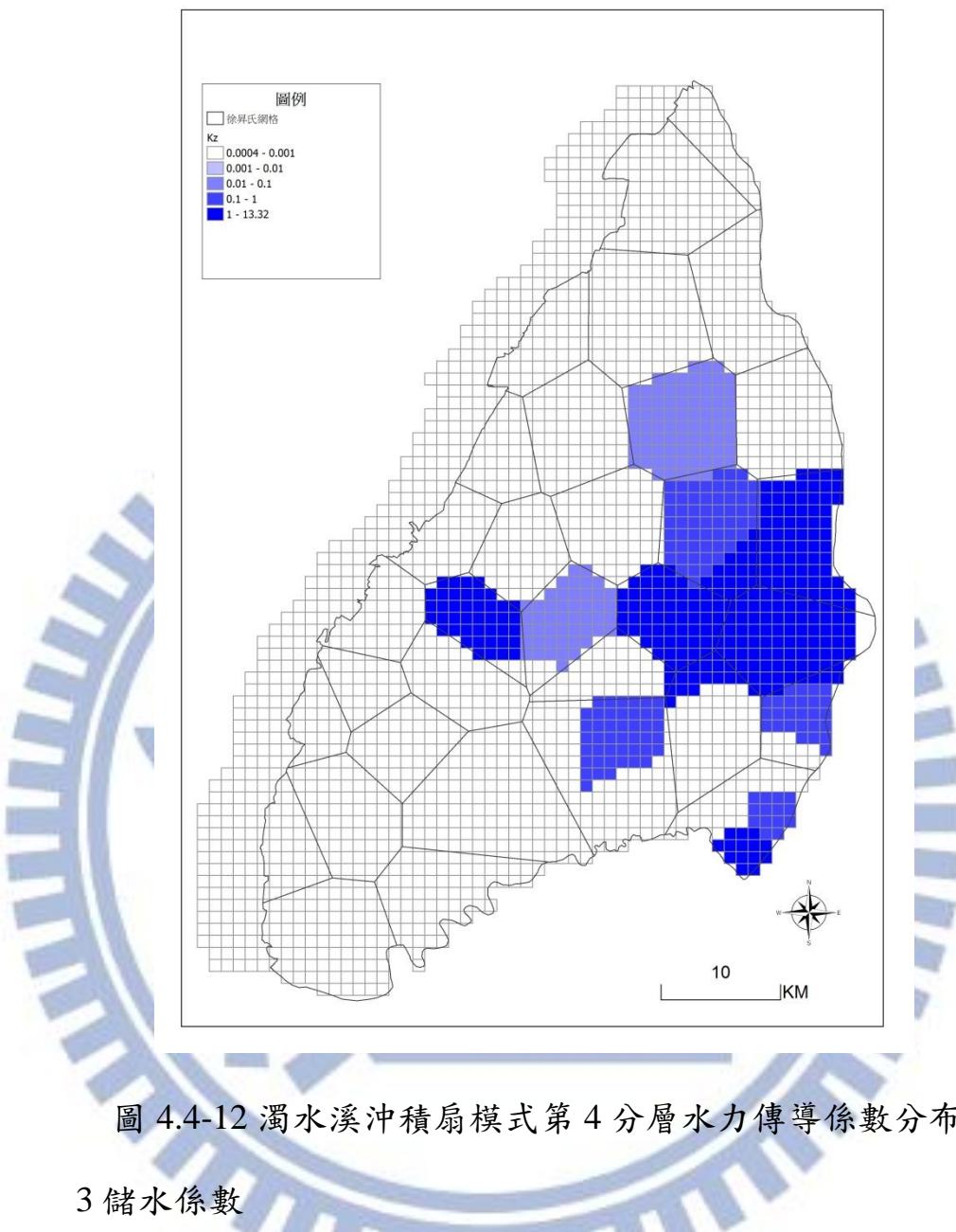


圖 4.4-12 濁水溪沖積扇模式第 4 分層水力傳導係數分布

### 3 儲水係數

由於儲水係數必須進行複井抽水試驗才能求得，因此儲水係數之現地試驗數量，遠低於透水係數之現地試驗數量，僅有 1/4 到 1/5 的觀測井有進行複井抽水試驗。

儲水係數輸入方式與水力傳導係數相同，皆採用徐昇氏網格分區，將點位型式之資料給定至整個沖積扇。在數值方面，有現地試驗值之徐昇氏網格則直接給予試驗值；其他無現地試驗值者，則給予下列的計算方式之

數值：

- 在受壓含水層方面：以濁水溪沖積扇之受壓含水層平均現地試驗值給定。
- 在非受壓含水層方面：由經濟部中央地質調查所提供之岩心資料庫，取得各水井之鑽探剖面，可得知各深度之岩性辨識資訊，依據經驗直接給予岩性對應之比流出率，例如礫石為 0.09，中粗砂為 0.12，細砂為 0.15，最後再以厚度加權的方式計算推估該站水井之比流出率，以此數值輸入相對應之分區。

#### 4 起始地下水水位

對於暫態模式而言，初始條件之給予極為重要，不同初始條件影響模擬結果極劇。本研究以西元 2006 年 1 月 1 日之水位當作起始地下水位，待模式完成第一時刻模擬後，所獲得之模擬水位值當作第二時刻之起始地下水位，繼續下一時刻之模式模擬。

#### 5 淨補注量

在暫態模式中，不同時刻之水位均不一樣，因此對應之各時刻淨補注量亦不同。本研究應用修正型地下水位歷線法(中央地質調查局, 2010)，將模式之表層淨補注量以修正型地下水位歷線法之結果給定(見附錄 B)。而深層之淨補注量則利用參數檢定模式進行推估。

#### 6 河川模組資訊

河川模組需給予下列資訊，河川水位高程、河道面積、河川底泥厚度與底泥之水力傳導係數。

##### ● 河川水位高程

河川水位高程則以前述 HEC-RAS 模式模擬，可得各月份各斷面之模擬水位。圖 4.4-13 為濁水溪沖積扇及其對應之斷面。其中黃色細框及模式

相對應之網格編號，綠色細線為相對應之斷面編號。以往格編號 3057 為例，其相對應之水位高取離網格中心最近之斷面為編號 84，查本研究利用 HEC-RAS 模擬之結果如表 4.4-1，其編號 84 之一月水位高為 80.98 公尺。

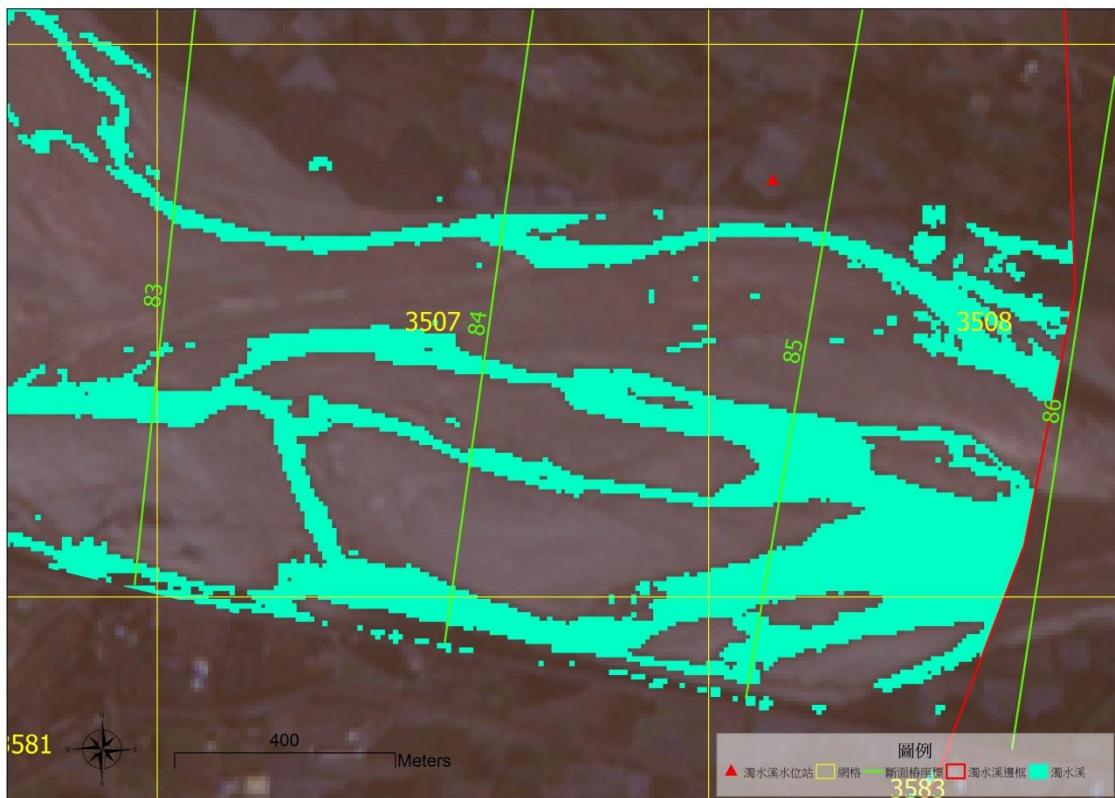


圖 4.4-13 濁水溪沖積扇及其對應之斷面

表 4.4-1 各斷面及各月份之模擬水位

| 斷面 | 里程數    | 深槽   | 1 月  | 2 月  | 3 月  | 4 月  | 5 月  | 6 月  | 7 月  | 8 月  | 9 月  | 10 月 | 11 月 | 12 月 |
|----|--------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 1  | 0.0    | -1.9 | 1.66 | 1.87 | 1.81 | 1.94 | 1.93 | 1.61 | 1.67 | 1.66 | 1.76 | 1.77 | 1.74 | 1.98 |
| 2  | 395.7  | -1.9 | 1.66 | 1.87 | 1.81 | 1.94 | 1.93 | 1.61 | 1.67 | 1.66 | 1.76 | 1.77 | 1.74 | 1.98 |
| 3  | 792.8  | -1.2 | 1.66 | 1.87 | 1.81 | 1.94 | 1.93 | 1.61 | 1.67 | 1.66 | 1.77 | 1.77 | 1.74 | 1.98 |
| 4  | 1387.5 | -0.7 | 1.66 | 1.87 | 1.81 | 1.94 | 1.93 | 1.61 | 1.69 | 1.67 | 1.82 | 1.77 | 1.74 | 1.98 |
| 5  | 1623.9 | -0.7 | 1.66 | 1.87 | 1.81 | 1.95 | 1.93 | 1.63 | 1.75 | 1.69 | 1.96 | 1.78 | 1.74 | 1.98 |
| 6  | 2003.9 | 0.7  | 1.66 | 1.87 | 1.81 | 1.95 | 1.93 | 1.64 | 1.86 | 1.73 | 2.18 | 1.8  | 1.74 | 1.98 |
| 7  | 2451.1 | 0.7  | 1.66 | 1.87 | 1.81 | 1.95 | 1.93 | 1.64 | 1.86 | 1.73 | 2.18 | 1.8  | 1.74 | 1.98 |
| 8  | 2919.0 | 0.6  | 1.78 | 1.91 | 1.86 | 1.99 | 2.1  | 2.56 | 3.03 | 2.74 | 3.47 | 2.65 | 1.85 | 2.04 |
| 9  | 3342.6 | 0.9  | 1.79 | 1.92 | 1.87 | 2    | 2.14 | 2.66 | 3.21 | 2.87 | 3.69 | 2.76 | 1.86 | 2.06 |

| 斷面 | 里程數     | 深槽   | 1 月   | 2 月   | 3 月   | 4 月   | 5 月   | 6 月   | 7 月   | 8 月   | 9 月   | 10 月  | 11 月  | 12 月  |
|----|---------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 10 | 3801.8  | 1.1  | 1.81  | 1.93  | 1.88  | 2.01  | 2.16  | 2.71  | 3.3   | 2.94  | 3.81  | 2.83  | 1.88  | 2.07  |
| 11 | 4308.6  | 0.8  | 1.81  | 1.94  | 1.89  | 2.02  | 2.17  | 2.73  | 3.33  | 2.96  | 3.84  | 2.85  | 1.89  | 2.07  |
| 12 | 4810.7  | 3.2  | 3.4   | 3.42  | 3.41  | 3.44  | 3.53  | 3.77  | 4     | 3.86  | 4.26  | 3.83  | 3.44  | 3.46  |
| 13 | 5263.0  | 2.2  | 3.49  | 3.53  | 3.51  | 3.56  | 3.73  | 4.19  | 4.63  | 4.39  | 5.05  | 4.32  | 3.55  | 3.59  |
| 14 | 5689.3  | 2.9  | 3.5   | 3.54  | 3.52  | 3.58  | 3.77  | 4.25  | 4.73  | 4.46  | 5.19  | 4.39  | 3.57  | 3.61  |
| 15 | 6123.2  | 4.2  | 4.43  | 4.45  | 4.44  | 4.45  | 4.51  | 4.61  | 4.87  | 4.66  | 5.32  | 4.65  | 4.46  | 4.47  |
| 16 | 6636.9  | 3.4  | 4.56  | 4.58  | 4.58  | 4.62  | 4.73  | 5.02  | 5.28  | 5.13  | 5.59  | 5.08  | 4.6   | 4.63  |
| 17 | 7010.3  | 4.2  | 4.61  | 4.64  | 4.63  | 4.68  | 4.83  | 5.18  | 5.5   | 5.31  | 5.82  | 5.26  | 4.66  | 4.7   |
| 18 | 7437.8  | 3.9  | 4.63  | 4.66  | 4.65  | 4.7   | 4.87  | 5.26  | 5.63  | 5.41  | 5.99  | 5.35  | 4.69  | 4.73  |
| 19 | 7842.8  | 4.5  | 4.63  | 4.68  | 4.66  | 4.72  | 4.9   | 5.33  | 5.75  | 5.5   | 6.15  | 5.43  | 4.71  | 4.75  |
| 20 | 8289.9  | 4.2  | 4.73  | 4.76  | 4.75  | 4.8   | 4.97  | 5.4   | 5.86  | 5.58  | 6.3   | 5.51  | 4.79  | 4.83  |
| 21 | 8724.5  | 5.2  | 5.47  | 5.49  | 5.48  | 5.5   | 5.61  | 5.74  | 5.94  | 5.8   | 6.44  | 5.78  | 5.49  | 5.54  |
| 22 | 9227.9  | 4.6  | 5.55  | 5.58  | 5.57  | 5.61  | 5.73  | 6.02  | 6.35  | 6.15  | 6.72  | 6.09  | 5.6   | 5.63  |
| 23 | 9748.1  | 4.4  | 5.56  | 5.59  | 5.57  | 5.62  | 5.76  | 6.11  | 6.5   | 6.26  | 6.92  | 6.2   | 5.61  | 5.64  |
| 24 | 10243.4 | 4.9  | 5.57  | 5.6   | 5.58  | 5.64  | 5.81  | 6.2   | 6.65  | 6.38  | 7.17  | 6.3   | 5.62  | 5.66  |
| 25 | 10696.7 | 5.4  | 5.74  | 5.76  | 5.75  | 5.77  | 5.86  | 6.27  | 6.78  | 6.47  | 7.32  | 6.39  | 5.76  | 5.78  |
| 26 | 11154.5 | 5.4  | 6.47  | 6.54  | 6.51  | 6.82  | 6.96  | 6.98  | 7.26  | 7.08  | 7.58  | 7.04  | 6.85  | 6.9   |
| 27 | 11633.8 | 6.2  | 6.84  | 6.92  | 6.89  | 7.19  | 7.33  | 7.72  | 8.15  | 7.91  | 8.6   | 7.85  | 7.19  | 7.22  |
| 28 | 12061.4 | 6.8  | 7.07  | 7.12  | 7.09  | 7.26  | 7.41  | 7.83  | 8.33  | 8.03  | 8.82  | 7.96  | 7.25  | 7.29  |
| 29 | 12551.5 | 7.6  | 7.76  | 7.77  | 7.77  | 7.8   | 7.83  | 7.99  | 8.54  | 8.2   | 9.02  | 8.12  | 7.79  | 7.79  |
| 30 | 13258.8 | 7.7  | 8.27  | 8.32  | 8.29  | 8.37  | 8.6   | 9.08  | 9.47  | 9.21  | 9.79  | 9.15  | 8.35  | 8.42  |
| 31 | 13740.7 | 8.3  | 8.52  | 8.57  | 8.55  | 8.62  | 8.83  | 9.32  | 9.93  | 9.53  | 10.43 | 9.44  | 8.61  | 8.66  |
| 32 | 14262.3 | 8.4  | 8.9   | 8.93  | 8.92  | 8.97  | 9.1   | 9.53  | 10.16 | 9.75  | 10.75 | 9.65  | 8.96  | 8.99  |
| 33 | 14707.8 | 9.6  | 9.86  | 9.88  | 9.87  | 9.9   | 10    | 10.31 | 10.64 | 10.43 | 11.03 | 10.38 | 9.89  | 9.92  |
| 34 | 15166.0 | 9.0  | 9.96  | 9.99  | 9.98  | 10.03 | 10.2  | 10.65 | 11.21 | 10.86 | 11.77 | 10.78 | 10.01 | 10.06 |
| 35 | 15588.7 | 9.3  | 9.96  | 10    | 9.98  | 10.04 | 10.22 | 10.7  | 11.3  | 10.93 | 11.91 | 10.84 | 10.02 | 10.07 |
| 36 | 16138.7 | 10.4 | 10.55 | 10.57 | 10.56 | 10.59 | 10.68 | 10.93 | 11.56 | 11.13 | 12.25 | 11.02 | 10.58 | 10.61 |
| 37 | 16734.1 | 10.4 | 10.85 | 10.89 | 10.87 | 10.93 | 11.1  | 11.59 | 12.16 | 11.8  | 12.83 | 11.72 | 10.91 | 10.96 |
| 38 | 17286.7 | 10.6 | 10.99 | 11.03 | 11.01 | 11.09 | 11.31 | 11.83 | 12.41 | 12.04 | 13.09 | 11.96 | 11.07 | 11.14 |
| 39 | 17816.4 | 11.7 | 12.6  | 12.66 | 12.64 | 12.76 | 12.95 | 13.4  | 13.72 | 13.53 | 14.08 | 13.47 | 12.72 | 12.83 |
| 40 | 18386.4 | 11.0 | 12.67 | 12.74 | 12.71 | 12.84 | 13.1  | 13.63 | 14.14 | 13.82 | 14.7  | 13.74 | 12.8  | 12.9  |
| 41 | 18943.1 | 11.0 | 12.67 | 12.74 | 12.71 | 12.84 | 13.1  | 13.64 | 14.18 | 13.84 | 14.75 | 13.76 | 12.8  | 12.9  |
| 42 | 19391.3 | 12.5 | 12.74 | 12.77 | 12.75 | 12.82 | 13.1  | 13.67 | 14.25 | 13.88 | 14.85 | 13.8  | 12.77 | 12.9  |
| 43 | 19892.7 | 12.2 | 13.17 | 13.21 | 13.2  | 13.25 | 13.39 | 13.87 | 14.55 | 14.15 | 15.14 | 14.03 | 13.25 | 13.27 |
| 44 | 20434.0 | 13.4 | 13.68 | 13.71 | 13.69 | 13.73 | 13.94 | 14.45 | 15    | 14.69 | 15.53 | 14.6  | 13.72 | 13.75 |

| 斷面 | 里程數     | 深槽   | 1 月   | 2 月   | 3 月   | 4 月   | 5 月   | 6 月   | 7 月   | 8 月   | 9 月   | 10 月  | 11 月  | 12 月  |
|----|---------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 45 | 21045.6 | 14.0 | 14.54 | 14.59 | 14.57 | 14.63 | 14.82 | 15.31 | 15.66 | 15.43 | 16.14 | 15.38 | 14.62 | 14.67 |
| 46 | 21525.1 | 13.4 | 14.55 | 14.6  | 14.58 | 14.65 | 14.85 | 15.36 | 15.82 | 15.52 | 16.37 | 15.45 | 14.63 | 14.69 |
| 47 | 22006.9 | 14.2 | 14.54 | 14.59 | 14.57 | 14.64 | 14.84 | 15.37 | 15.86 | 15.53 | 16.42 | 15.46 | 14.62 | 14.68 |
| 48 | 22498.2 | 15.1 | 15.7  | 15.71 | 15.71 | 15.71 | 15.7  | 15.89 | 16.21 | 15.98 | 16.72 | 15.95 | 15.71 | 15.71 |
| 49 | 22984.9 | 15.0 | 15.75 | 15.77 | 15.76 | 15.79 | 15.9  | 16.32 | 16.9  | 16.54 | 17.5  | 16.44 | 15.78 | 15.8  |
| 50 | 23432.8 | 18.1 | 18.41 | 18.42 | 18.41 | 18.43 | 18.48 | 18.65 | 18.89 | 18.74 | 19.16 | 18.7  | 18.43 | 18.44 |
| 51 | 23755.9 | 16.2 | 18.45 | 18.47 | 18.46 | 18.48 | 18.56 | 18.79 | 19.12 | 18.91 | 19.46 | 18.86 | 18.48 | 18.5  |
| 52 | 24126.3 | 16.8 | 18.45 | 18.47 | 18.46 | 18.48 | 18.56 | 18.78 | 19.06 | 18.89 | 19.34 | 18.84 | 18.48 | 18.5  |
| 53 | 24722.1 | 17.1 | 18.45 | 18.47 | 18.46 | 18.48 | 18.56 | 18.77 | 18.99 | 18.87 | 19.21 | 18.83 | 18.48 | 18.5  |
| 54 | 25312.4 | 19.6 | 20.05 | 20.05 | 20.05 | 20.08 | 20.17 | 20.39 | 20.72 | 20.51 | 21.09 | 20.46 | 20.07 | 20.1  |
| 55 | 25986.4 | 26.3 | 26.63 | 26.7  | 26.7  | 26.71 | 26.8  | 27.03 | 27.42 | 27.16 | 27.74 | 27.12 | 26.71 | 26.72 |
| 56 | 26451.0 | 26.5 | 27.08 | 27.11 | 27.06 | 27.16 | 27.19 | 27.52 | 27.94 | 27.72 | 28.32 | 27.62 | 27.13 | 27.2  |
| 57 | 26948.9 | 26.3 | 27.87 | 27.98 | 27.94 | 28.1  | 28.71 | 29.86 | 30.86 | 30.21 | 31.87 | 30.07 | 28.06 | 28.19 |
| 58 | 27360.2 | 26.3 | 28.02 | 28.14 | 28.09 | 28.28 | 28.94 | 30.19 | 31.36 | 30.6  | 32.51 | 30.44 | 28.23 | 28.38 |
| 59 | 27874.4 | 27.7 | 28.35 | 28.49 | 28.43 | 28.62 | 29.3  | 30.64 | 31.9  | 31.1  | 33.15 | 30.92 | 28.58 | 28.73 |
| 60 | 28392.8 | 27.7 | 28.86 | 28.97 | 28.92 | 29.06 | 29.62 | 31    | 32.43 | 31.54 | 33.79 | 31.35 | 29.03 | 29.15 |
| 61 | 28911.1 | 29.2 | 29.52 | 29.61 | 29.57 | 29.7  | 30.06 | 31.34 | 32.9  | 31.94 | 34.35 | 31.73 | 29.67 | 29.76 |
| 62 | 29422.0 | 28.9 | 29.81 | 29.9  | 29.86 | 29.99 | 30.48 | 31.47 | 32.94 | 32.04 | 34.37 | 31.85 | 29.95 | 30.05 |
| 63 | 30006.9 | 30.3 | 31.04 | 31.07 | 31.06 | 31.09 | 31.19 | 31.6  | 32.98 | 32.15 | 34.39 | 31.97 | 31.08 | 31.11 |
| 64 | 30423.4 | 31.3 | 32.1  | 32.15 | 32.13 | 32.2  | 32.39 | 32.85 | 33.23 | 32.8  | 34.46 | 32.77 | 32.18 | 32.23 |
| 65 | 30853.8 | 31.8 | 32.36 | 32.41 | 32.39 | 32.46 | 32.7  | 33.28 | 33.96 | 33.5  | 34.72 | 33.4  | 32.44 | 32.5  |
| 66 | 31212.0 | 33.9 | 34.31 | 34.33 | 34.33 | 34.36 | 34.44 | 34.61 | 34.87 | 34.71 | 35.16 | 34.67 | 34.35 | 34.37 |
| 67 | 31648.3 | 34.5 | 34.97 | 35.01 | 34.99 | 35.05 | 35.21 | 35.62 | 36.18 | 35.82 | 36.85 | 35.74 | 35.03 | 35.08 |
| 68 | 32027.7 | 35.2 | 35.46 | 35.48 | 35.47 | 35.52 | 35.69 | 36.11 | 36.74 | 36.34 | 37.44 | 36.25 | 35.51 | 35.55 |
| 69 | 32507.7 | 36.9 | 37.48 | 37.53 | 37.51 | 37.57 | 37.72 | 38.18 | 38.65 | 38.37 | 39.04 | 38.3  | 37.55 | 37.6  |
| 70 | 33166.7 | 38.1 | 39.01 | 39.1  | 39.06 | 39.21 | 39.93 | 40.71 | 41.46 | 41.01 | 42.06 | 40.86 | 39.17 | 39.29 |
| 71 | 33814.0 | 41.7 | 42.25 | 42.31 | 42.28 | 42.36 | 42.66 | 43.16 | 43.77 | 43.39 | 44.32 | 43.29 | 42.34 | 42.41 |
| 72 | 34393.7 | 42.8 | 44.21 | 44.3  | 44.26 | 44.39 | 44.65 | 45.35 | 46.24 | 45.76 | 46.98 | 45.67 | 44.36 | 44.45 |
| 73 | 34898.5 | 46.4 | 47.12 | 47.16 | 47.15 | 47.2  | 47.41 | 47.9  | 48.66 | 48.31 | 49.17 | 48.11 | 47.19 | 47.23 |
| 74 | 35385.6 | 49.8 | 50.2  | 50.24 | 50.22 | 50.28 | 50.42 | 50.87 | 51.38 | 51.07 | 51.96 | 50.97 | 50.26 | 50.31 |
| 75 | 36028.3 | 52.6 | 53.1  | 53.14 | 53.12 | 53.18 | 53.45 | 54.02 | 54.85 | 54.33 | 55.61 | 54.22 | 53.17 | 53.22 |
| 76 | 36330.9 | 55.3 | 55.59 | 55.64 | 55.62 | 55.68 | 55.81 | 56.38 | 56.95 | 56.58 | 57.45 | 56.48 | 55.66 | 55.71 |
| 77 | 36879.5 | 56.9 | 57.47 | 57.52 | 57.5  | 57.58 | 57.88 | 58.73 | 59.88 | 59.3  | 60.48 | 59.17 | 57.56 | 57.63 |
| 78 | 37456.2 | 61.9 | 62.17 | 62.19 | 62.18 | 62.21 | 62.33 | 62.52 | 62.93 | 62.63 | 63.4  | 62.59 | 62.21 | 62.23 |
| 79 | 37891.7 | 64.7 | 65.2  | 65.25 | 65.22 | 65.3  | 65.54 | 66.21 | 66.63 | 66.43 | 67    | 66.34 | 65.28 | 65.36 |

| 斷面 | 里程數     | 深槽   | 1月    | 2月    | 3月    | 4月    | 5月    | 6月    | 7月    | 8月    | 9月    | 10月   | 11月   | 12月   |
|----|---------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 80 | 38370.9 | 69.1 | 69.44 | 69.47 | 69.46 | 69.51 | 69.64 | 69.91 | 70.35 | 70.06 | 70.8  | 70    | 69.49 | 69.53 |
| 81 | 38854.0 | 71.0 | 71.76 | 71.84 | 71.8  | 71.95 | 72.39 | 72.91 | 73.38 | 73.13 | 73.99 | 73.04 | 71.92 | 72.01 |
| 82 | 39340.4 | 74.9 | 75.3  | 75.33 | 75.32 | 75.36 | 75.49 | 75.85 | 76.56 | 76.06 | 77.31 | 75.97 | 75.35 | 75.38 |
| 83 | 39831.9 | 77.6 | 78.01 | 78.05 | 78.03 | 78.09 | 78.28 | 78.84 | 79.44 | 79.12 | 80.08 | 79.01 | 78.08 | 78.13 |
| 84 | 40441.7 | 80.7 | 80.98 | 81.01 | 81    | 81.05 | 81.23 | 81.74 | 82.72 | 82.01 | 83.37 | 81.91 | 81.04 | 81.08 |
| 85 | 41019.3 | 85.2 | 85.67 | 85.7  | 85.69 | 85.74 | 85.89 | 86.28 | 86.81 | 86.47 | 87.23 | 86.39 | 85.73 | 85.77 |
| 86 | 41501.1 | 86.6 | 87.36 | 87.43 | 87.4  | 87.5  | 87.88 | 88.26 | 88.73 | 88.42 | 89.25 | 88.35 | 87.48 | 87.56 |

### ● 河道面積

河道面積則以前述之衛星影像，搭配影像辨識技術，推估四季之瓣狀河道分布與其面積，在分別給入相對應的網格中。如圖 4.4-13 中之網格 3507，可利用 GIS 求得網格內的面積為  $172336.1\text{m}^2$ 。

表 4.4-2 濁水溪一月相對應之網格內面積

| 編號   | 面積       |
|------|----------|------|----------|------|----------|------|----------|------|----------|
| 2945 | 196560.8 | 3106 | 424285   | 3252 | 522048   | 3348 | 393120.4 | 3504 | 1088     |
| 2946 | 242172.5 | 3107 | 346080   | 3253 | 552896   | 3349 | 459632   | 3505 | 96064    |
| 3017 | 55323    | 3108 | 479904   | 3254 | 517536   | 3350 | 228752   | 3506 | 153824   |
| 3018 | 538114   | 3109 | 296128   | 3255 | 78629.23 | 3351 | 68372.46 | 3507 | 172336.1 |
| 3019 | 597298.5 | 3110 | 278648.5 | 3257 | 4800     | 3352 | 3696     | 3508 | 147994   |
| 3020 | 972398.8 | 3111 | 255824   | 3258 | 18209.48 | 3353 | 88752    | 3509 | 182657.4 |
| 3021 | 964176   | 3112 | 440560   | 3259 | 1600     | 3354 | 5280     | 3581 | 155.4968 |
| 3022 | 542560   | 3113 | 652688   | 3265 | 82150.87 | 3355 | 3168     | 3583 | 40369.02 |
| 3023 | 205408   | 3114 | 452608   | 3266 | 414298.8 | 3421 | 240      | 3584 | 40076.09 |
| 3024 | 1616     | 3115 | 23504    | 3267 | 470242.7 | 3422 | 223888   | 3658 | 72.50097 |
| 3033 | 5968.738 | 3174 | 4720.005 | 3268 | 433933.6 | 3423 | 305312   |      |          |
| 3036 | 59696    | 3175 | 543776   | 3269 | 183237.1 | 3424 | 335824   |      |          |
| 3037 | 128976   | 3176 | 388034   | 3270 | 82544    | 3425 | 228981   |      |          |
| 3038 | 2976     | 3177 | 466976   | 3271 | 6640     | 3426 | 178156.5 |      |          |
| 3095 | 179547.6 | 3178 | 804528   | 3272 | 5.624926 | 3427 | 140623.9 |      |          |
| 3096 | 326187.2 | 3179 | 863040   | 3326 | 271.5138 | 3428 | 93376    |      |          |
| 3097 | 289504   | 3180 | 803503.1 | 3327 | 1432.489 | 3429 | 127168   |      |          |

|      |          |      |          |      |          |      |          |                     |  |
|------|----------|------|----------|------|----------|------|----------|---------------------|--|
| 3098 | 452176.7 | 3181 | 205648   | 3328 | 192      | 3430 | 248832   |                     |  |
| 3099 | 597750.6 | 3182 | 34656    | 3334 | 3158.494 | 3431 | 34912    |                     |  |
| 3100 | 196900.1 | 3188 | 48880    | 3342 | 38875.87 | 3432 | 42432    |                     |  |
| 3101 | 26719.53 | 3189 | 145376   | 3343 | 207040   | 3433 | 32       |                     |  |
| 3102 | 64       | 3190 | 416842.3 | 3344 | 70679.91 | 3500 | 64       |                     |  |
| 3103 | 36880.89 | 3191 | 69136    | 3345 | 100176   | 3501 | 2527.194 |                     |  |
| 3104 | 140128   | 3250 | 14736    | 3346 | 251200   | 3502 | 8255.276 |                     |  |
| 3105 | 229557.4 | 3251 | 445440.2 | 3347 | 272439.3 | 3503 | 1616     | 單位(m <sup>2</sup> ) |  |

### ● 河道底泥厚度

由於過去並無河道底泥厚度之相關調查資訊，本研究在此假設河道底泥厚度為 1 (m) 厚。

### ● 底泥之水力傳導係數

USDA(美國農務部)發展的三角圖型組織進行土壤分類，以新虎尾溪為研究對象，利用雙環試驗推估該河底泥之垂向入滲係數約為 2(m/day)。此外，參考濁水溪沖積扇鄰近濁水溪之水井抽水試驗結果，上游柑園(1)與二水(1)之水力傳導係數約為 100 (m/day)，下游香田(1)與豐榮(1)水力傳導係數約為 10 (m/day)，由於抽水試驗所得結果為水平水力傳導係數，基於沖積的關係，水平流通性應較垂直流通性為大，常見模式設定多設定為 1/10 至 1/100 之間，因此本研究假設全河段之底泥垂向水力傳導係數為 1 (m/day)。

## 4.5 參數檢定結果

本案例在參數檢定部分主要可分為專家系統與手動調整兩個部分，專家系統部分著重於淨補注量之檢定，而手動調整部分則用以針對水文地質架構與相關參數進行微調。首先，以專家系統參數檢定系統自動檢定整體之淨補注量，由於深層含水層與地表隔絕，在此物理限制下，不應有補注

行為，故專家系統在此物理條件限制下，若無法使模擬水位符合觀測水位，未收斂區域代表該區域過度缺水，此狀況多發生在扇尾區域，表示設定之水文地質架構與參數值可能不恰當，導致水流無法從扇頂補注區輸送至扇尾區域。此外，檢定出之淨補注量，若出現上層有大量之補注量，但因為水量過多之關係，導致下層含水層需施加大量抽水，以維持該區域之水平衡，此問題常出現於扇頂無阻水層之區域，顯示過高之垂向通透性，搭配該區域之水力梯度，使得系統需以上補下抽之情況來滿足。綜合前述問題，本研究將以現地鑽探資料為輔助，視情況微幅調整水文地質參數與架構。

#### 4.5.1 手動微幅調整水文地質架構

扇頂區域分別由二水、烏塗、柑園及莿桐等站所組成，其相對應之徐昇氏網格，如圖 4.5-1。搭配中央地質調查所之岩心柱狀圖及地質剖面圖(圖 4.5-2 至圖 4.5-5)可看出二水及六合幾乎完全無泥層，烏塗卻有一小層是有砂層。本研究初步判定此區全區為通透。然而其分層觀測水位如圖 4.5-6 所示，不同分層之觀測水位差約從 0 至 3 公尺不等，且震盪幅度不同步，由水位差即可顯示本區域存在一定程度之阻水效應。因此本研究調降本區域垂向水力傳導係數( $K_v$ )與水平向水力傳導係數( $K_h$ )之比值，從 1/10 調降至 1/100，如圖 4.5-7 濁水溪沖積扇模式第 2 分層水力傳導係數分布。

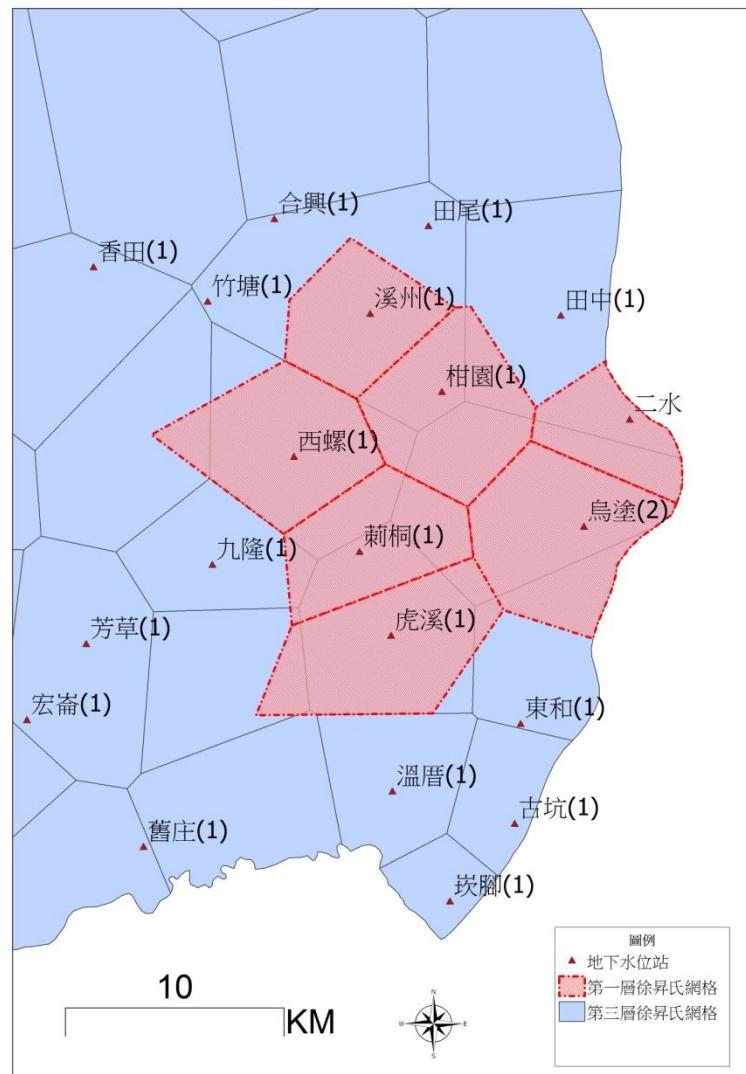
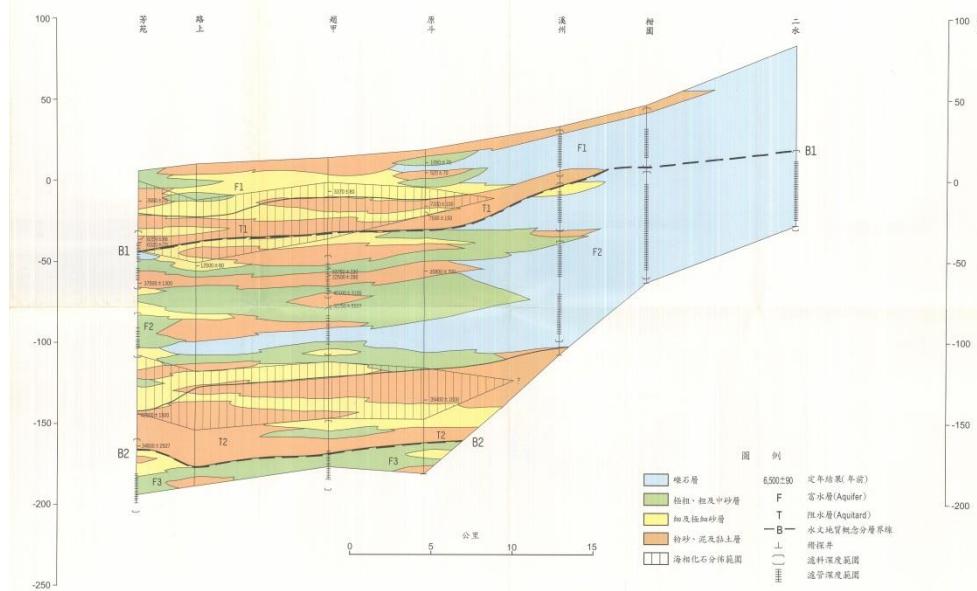


圖 4.5-1 扇頂區域地下水位站分布圖(第三分層)

附圖 (二) 3.

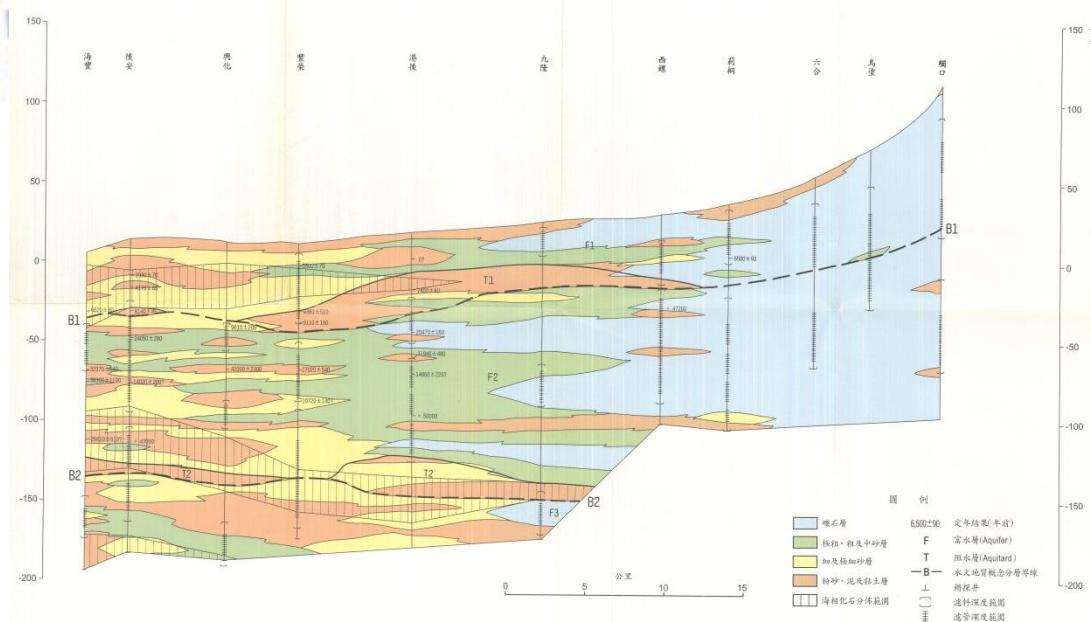


濁水溪沖積扇水文地質剖面圖三 (芳苑—二水)

(經濟部中央地質調查所, 1999)

圖 4.5-2 二水觀測井之地質剖面圖

附圖 (二) 5.



濁水溪沖積扇水文地質剖面圖五 (海豐—觸口)

(經濟部中央地質調查所, 1999)

圖 4.5-3 烏塗、六合觀測井之地質剖面圖

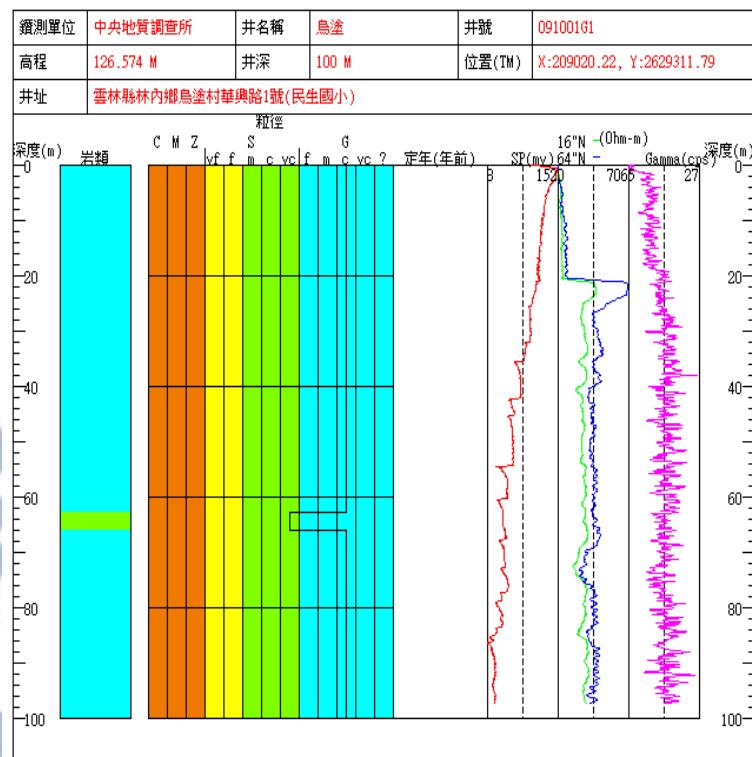


圖 4.5-4 烏塗岩心柱狀圖

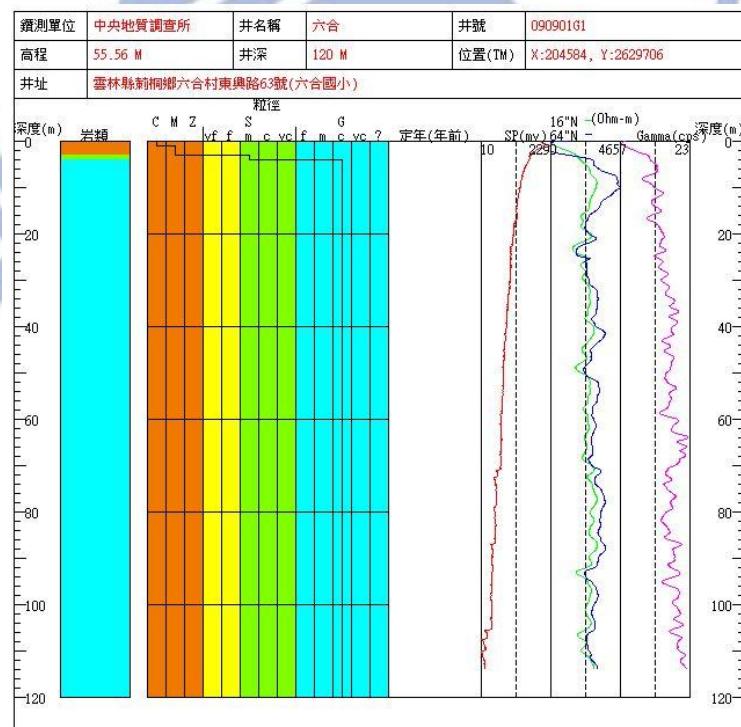


圖 4.5-5 六合岩心柱狀圖

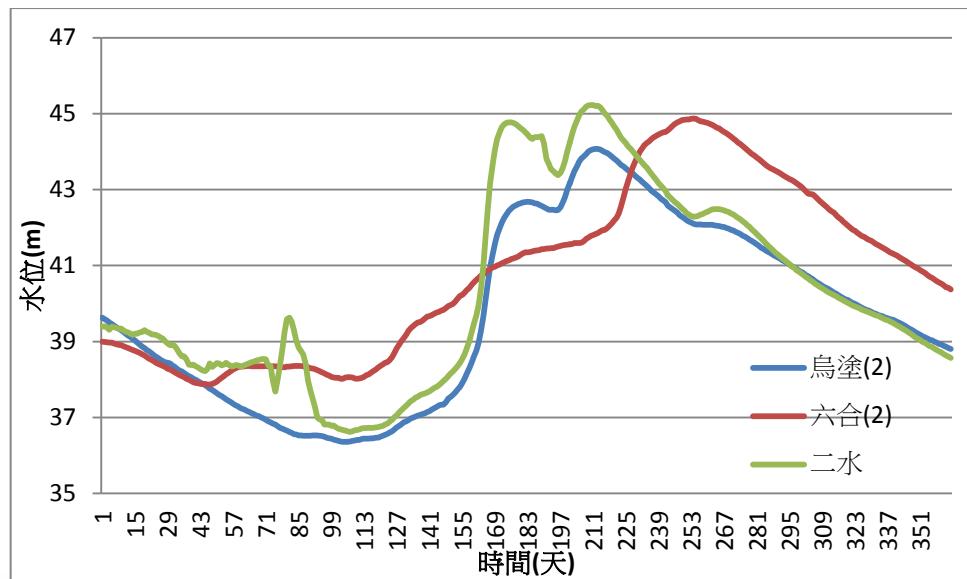


圖 4.5-6 烏塗、六合(2)及二水觀測水位圖



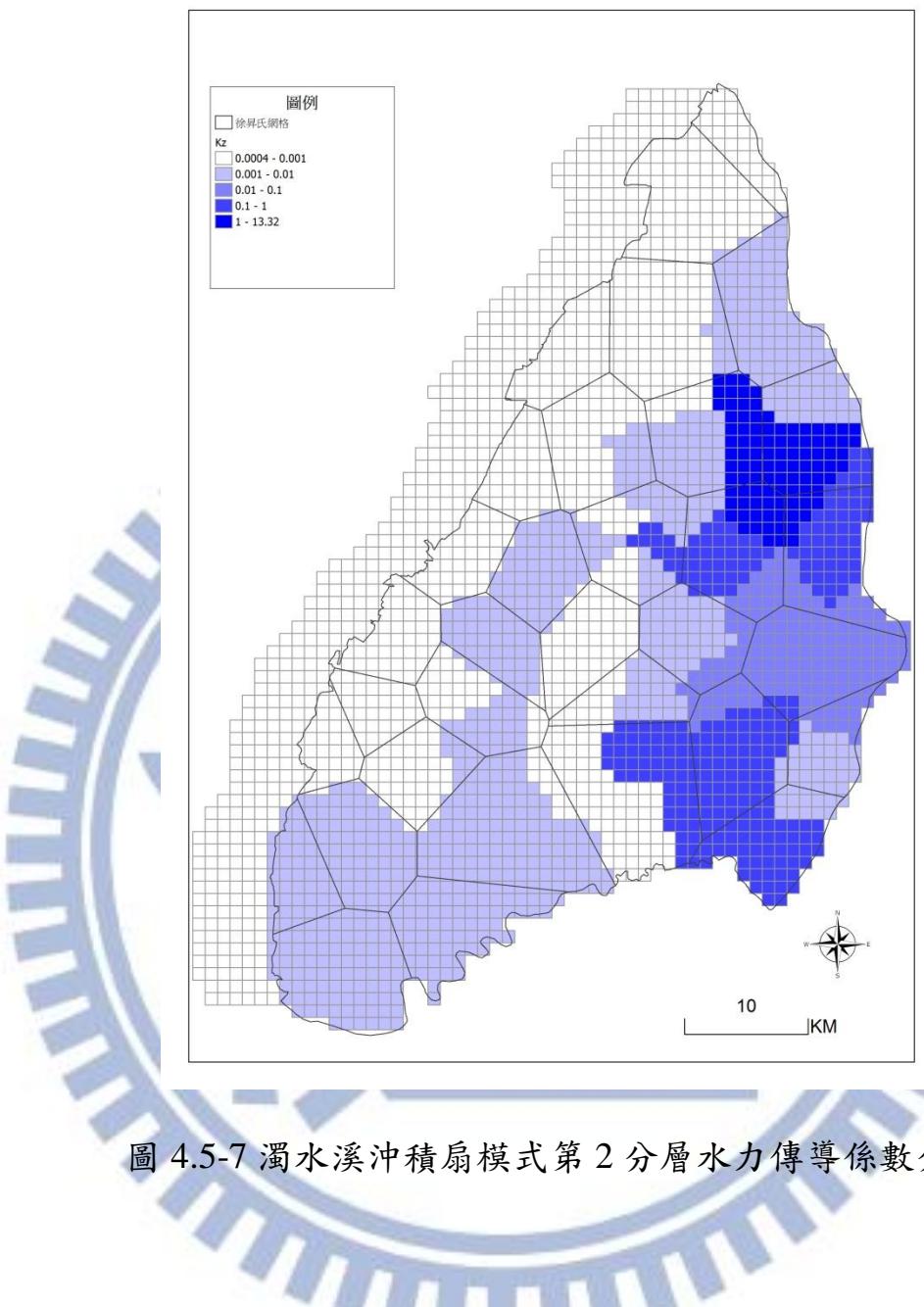


圖 4.5-7 濁水溪沖積扇模式第 2 分層水力傳導係數分布

圖 4.5-8 為海園(3)與其鄰近水井之水位變化圖，海園(3)之月平均水位變動幅度相當大，差距約為 10 公尺，其與鄰近水井之水位變化都不一致。枯水期時，海園(3)之觀測水位較鄰近水井低，亦即水流會流往海園(3)；然在豐水期時，其觀測水位則較鄰近水井高，意味著本時期則會有水流流往鄰近區域。

由於海園站位於海埔新生地之上，可能該區域因此有其局部而特殊之

流況，而與區域性特性不同。因此本研究不將此站納入檢定對象，並將該站改設為邊界，以觀測水位作為定水頭邊界條件，降低局部特性之影響，定水頭邊界條件範圍如圖 4.5-9。

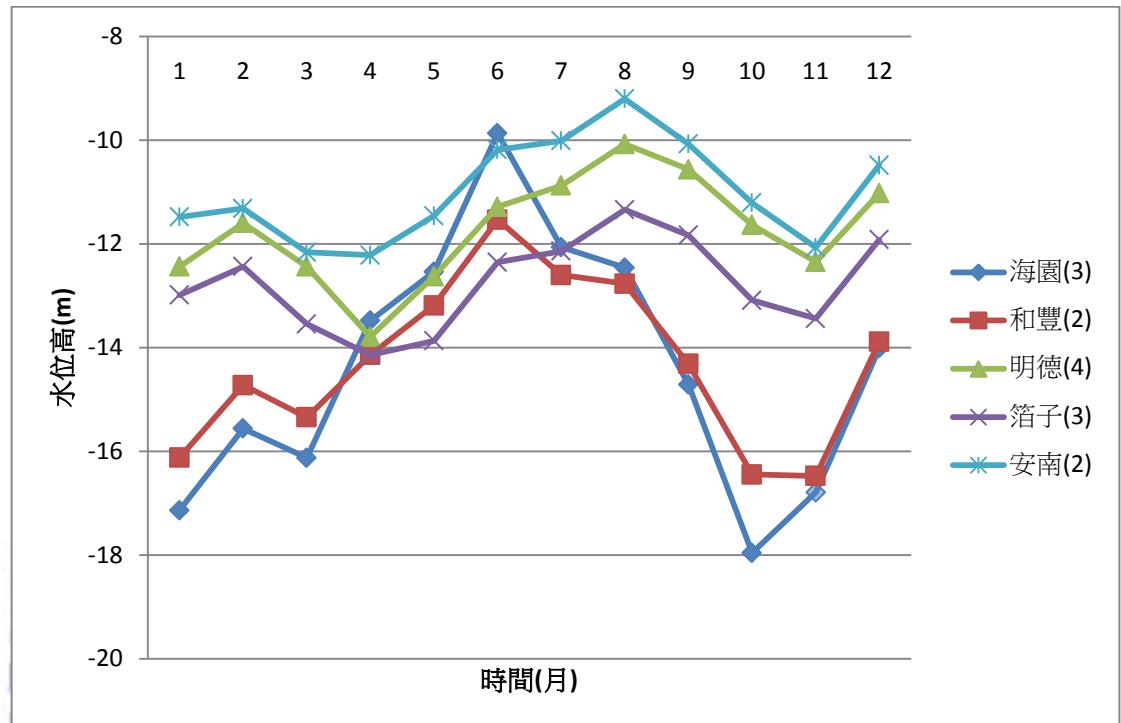


圖 4.5-8 海園(3)與鄰近水井之地下水位變化圖

1896

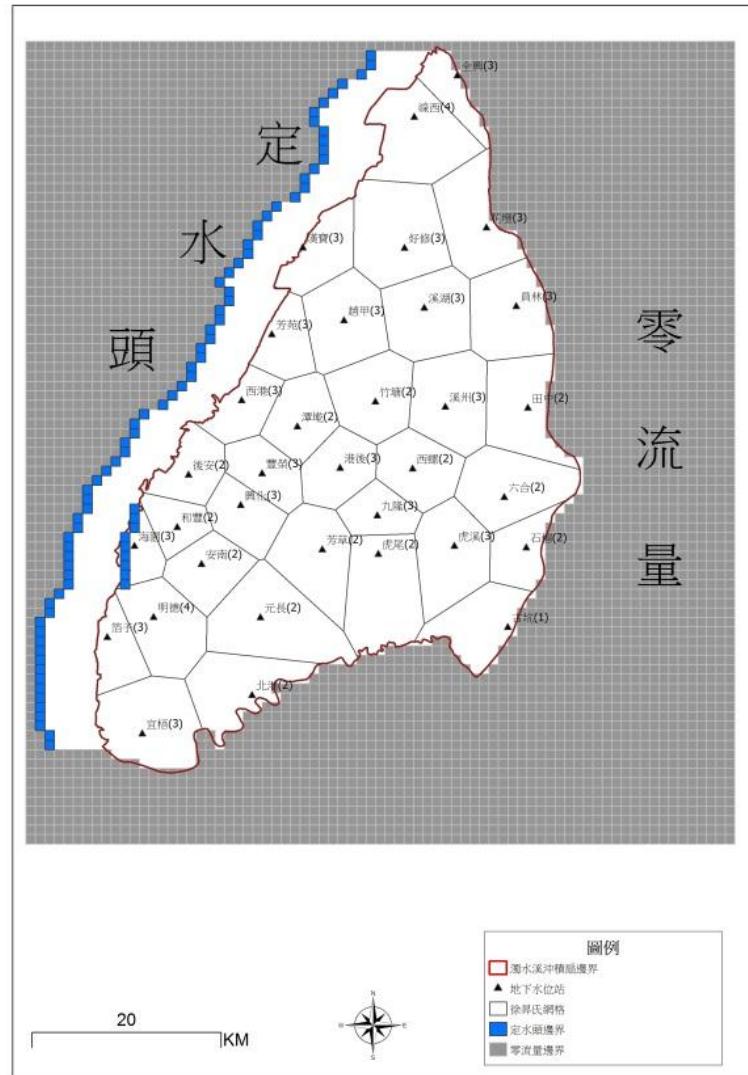


圖 4.5-9 模式定水頭邊界條件分布圖(第五分層)

#### 4.5.2 專家系統參數檢定

本案例之參數檢定誤差容忍值(Error Tolerance)為 3 公尺。圖 4.5-10、圖 4.5-11 與圖 4.5-12 分別為 2006 年 6 月濁水溪沖積扇第一分層、第三分層與第五分層觀測水位與檢定水位之水位等值圖，其中實線為觀測水位，虛線為檢定後之模擬水位，三角點為地下水位觀測站位置。

由圖上顯示，觀測水位與檢定水位等值線分布極為接近。此外，圖 4.5-13 為各觀測站觀測水位與檢定水位之檢定關係圖，橫座標為觀測水位，

縱座標為檢定水位，圖上各點均分布鄰近於 45 度線，且觀測水位與模擬水位之相關係數高達 0.9993，因此可證明本模式檢定結果良好。

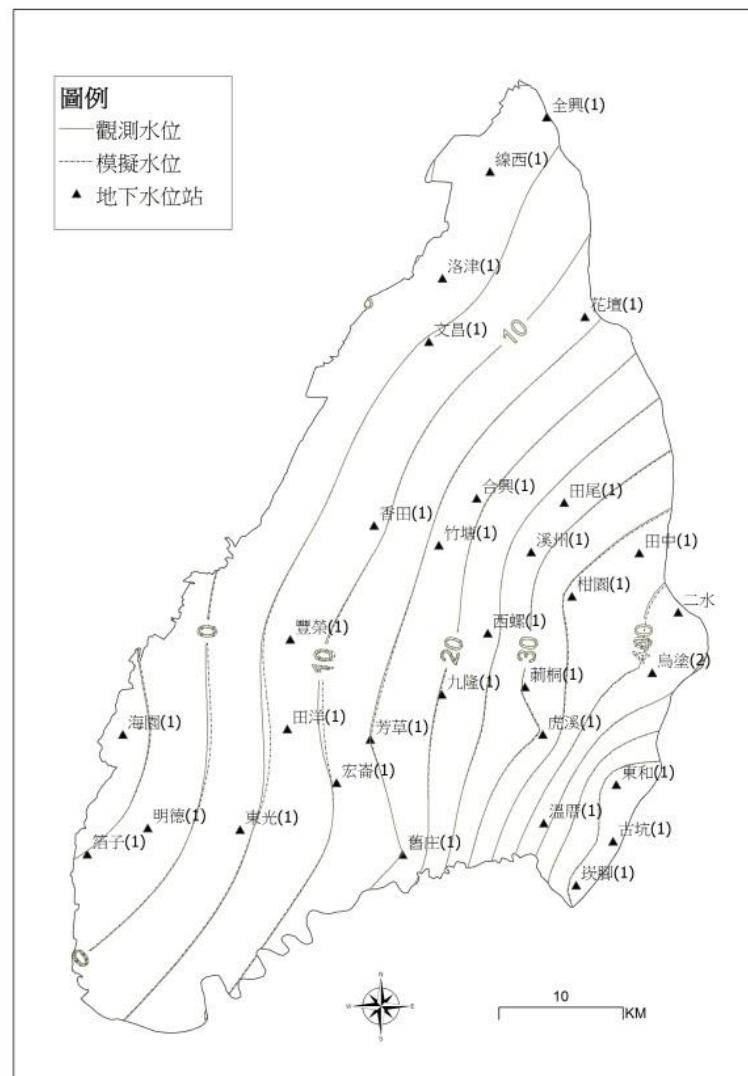


圖 4.5-10 觀測水位與檢定水位之等值圖(第一分層 2006 年 6 月份)

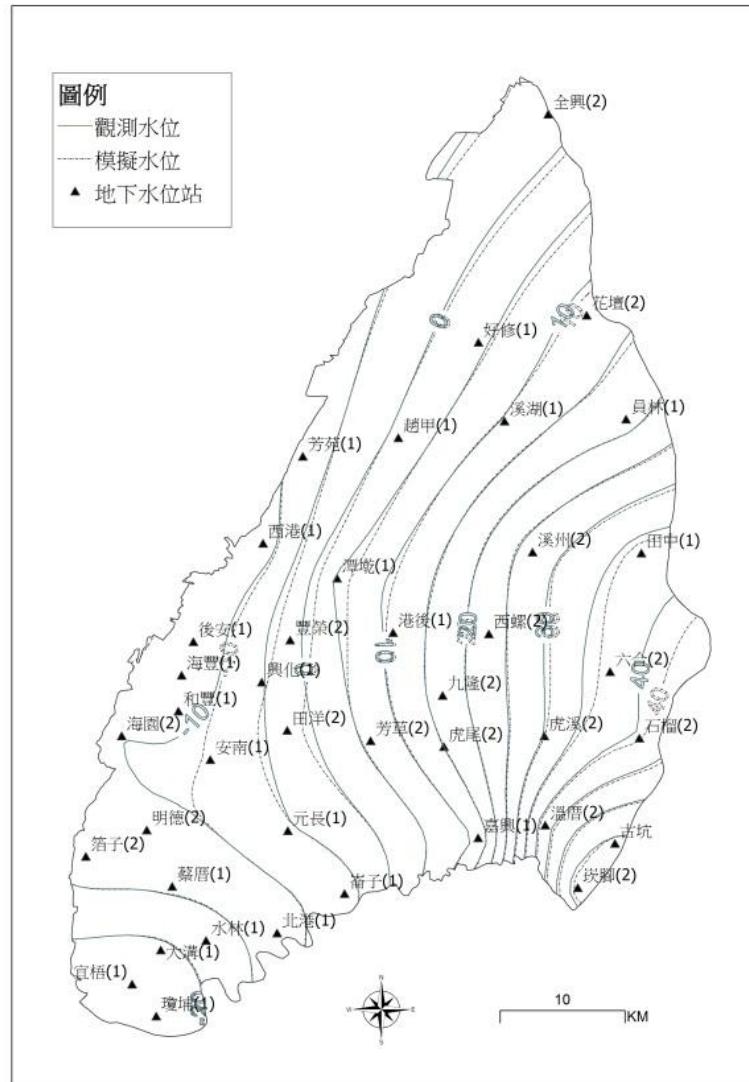


圖 4.5-11 觀測水位與檢定水位之等值圖(第三分層 2006 年 6 月份)

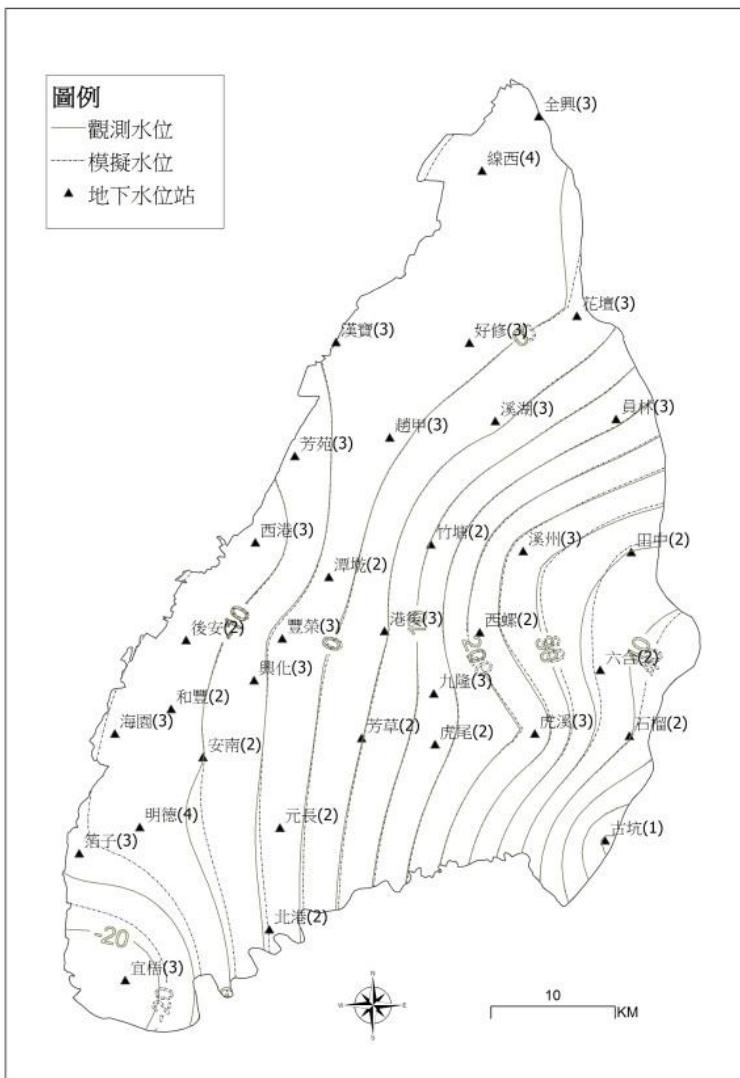


圖 4.5-12 觀測水位與檢定水位之等值圖(第五分層 2006 年 6 月份)

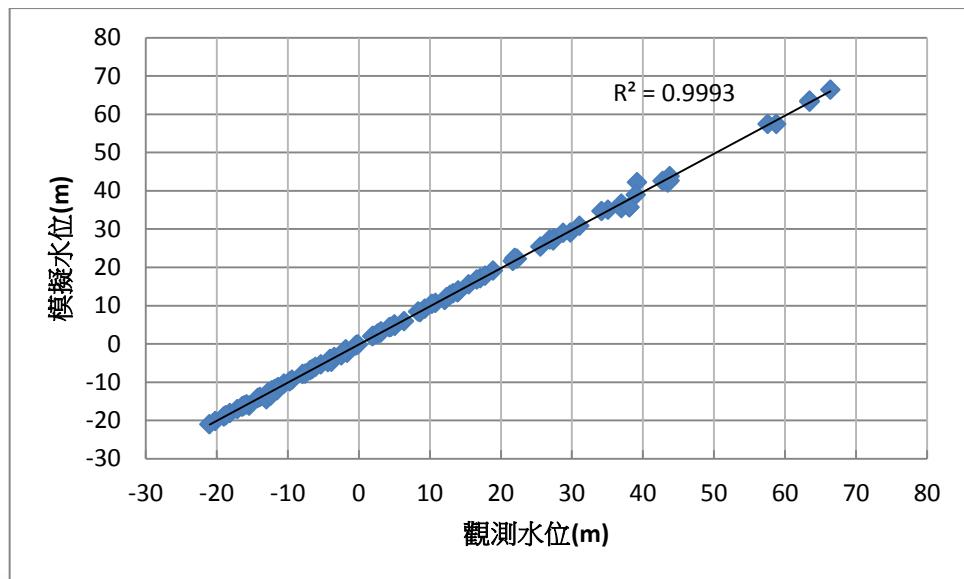


圖 4.5-13 觀測水位與檢定水位檢定關係圖

## 4.6 水平衡分析

檢定後之濁水溪沖積扇地下水數值模擬結果，如表 4.6-1、圖 4.6-1 與圖 4.6-2 所示，依列出濁水溪各月份入滲與出滲量資訊，以入滲量統計結果，一至九月份約維持每日 0.5 億噸，從十月份開始下降至每日 0.2 億噸；出滲量統計結果，最大量值為六月份之 0.13 億噸。

由圖 4.6-3 彰雲橋觀測水位可發現彰雲橋七月水位較一月與四月水位僅略高不足 1 公尺。而根據圖 4.6-4 為扇頂區域最鄰近彰雲橋之觀測井（二水觀測井）之水位分布，七月水位與一月或四月水位差約為 8.2 公尺，可得地下水位抬升幅度較河川水位抬升幅度大，故七月份扇頂區域之水力梯度應略小於一月或四月，導致九月之前的入滲量皆能維持每日五千萬噸左右。除 4.3 節之衛星影像辨識指出，十一月份濕潤面積最小，約為七月份面積之半；從圖 4.6-3 彰雲橋觀測水位圖所示，彰雲橋水位亦以十月與十一月水位最低，水力梯度亦最小，綜合兩者可解釋十一月入滲量最小之原

因。

圖 4.6-5 至 4.6-8 為四季之出滲量與入滲量分布圖，紅色網格為河道出滲區，藍色則為河道入滲區。圖中顯示在濁水溪上游扇頂區為主要河川入滲區，在濁水溪沖積扇扇央附近因地下水位高於河川水位，故改為出滲情況，到下游出海口扇尾處則又再轉為入滲。圖上以不同深淺之藍色區分入滲等級，分別為每日一百萬噸以下、一百萬噸至兩百萬噸之間與兩百萬噸至三百萬噸之間，分別代表高、中與低三個入滲等級，圖上顯現七月份多為中級與高級者，較少低級者，四月或十一月者，則大部分之入滲網格均為低級者。而比較各季之出滲分布面積，可發現濁水溪之河道出滲區面積以七月最小，而十一月則最大；相反地，入滲區域面積則以十一月份最小。



表 4.6-1 濁水溪入滲與出滲量統計表

| 月份   | 河川入滲量 | 河川出滲量 | 淨入滲總量 |
|------|-------|-------|-------|
| 1 月  | 0.55  | 0.11  | 0.43  |
| 2 月  | 0.47  | 0.07  | 0.40  |
| 3 月  | 0.53  | 0.07  | 0.45  |
| 4 月  | 0.59  | 0.09  | 0.50  |
| 5 月  | 0.53  | 0.08  | 0.45  |
| 6 月  | 0.41  | 0.13  | 0.28  |
| 7 月  | 0.56  | 0.11  | 0.45  |
| 8 月  | 0.46  | 0.11  | 0.35  |
| 9 月  | 0.52  | 0.06  | 0.46  |
| 10 月 | 0.32  | 0.10  | 0.21  |
| 11 月 | 0.16  | 0.10  | 0.06  |
| 12 月 | 0.18  | 0.09  | 0.09  |
| 總和   | 5.26  | 1.12  | 4.14  |

單位： $10^8 (m^3)$

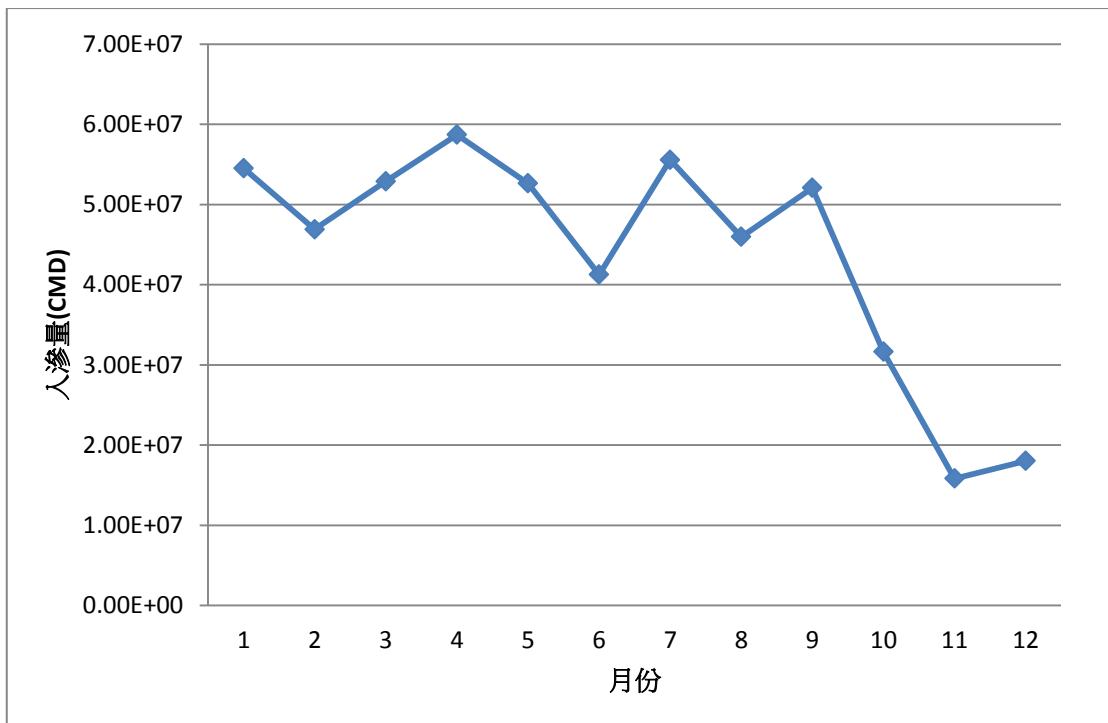


圖 4.6-1 濁水溪各月入滲量變化圖

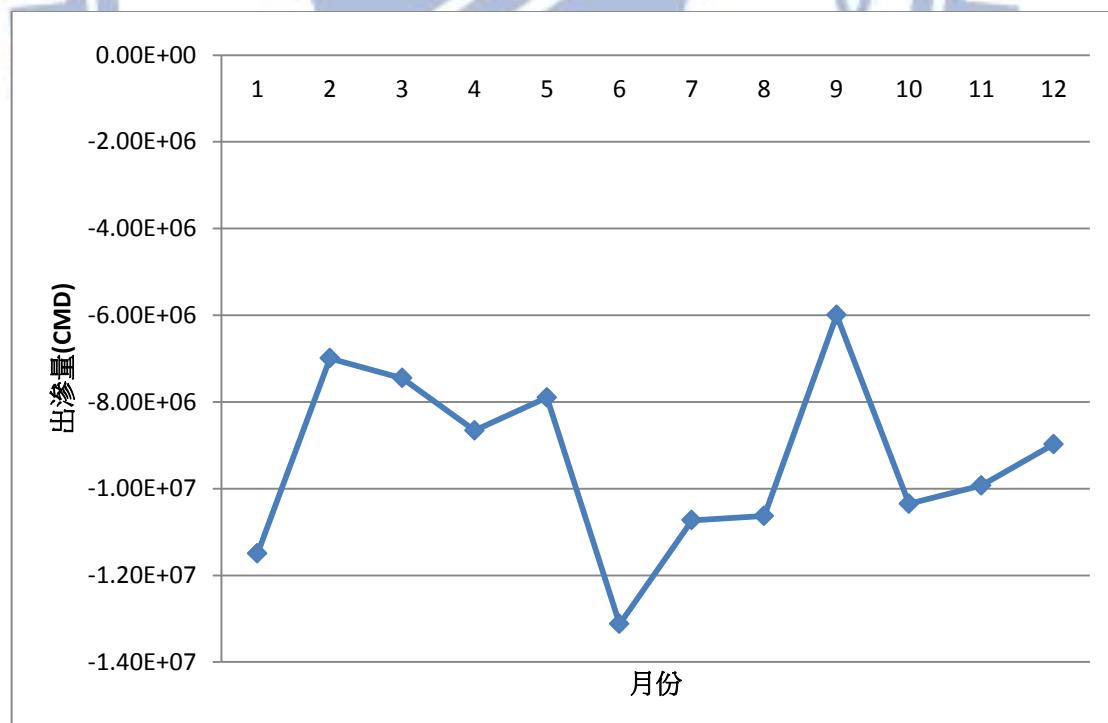


圖 4.6-2 濁水溪各月出滲量變化圖

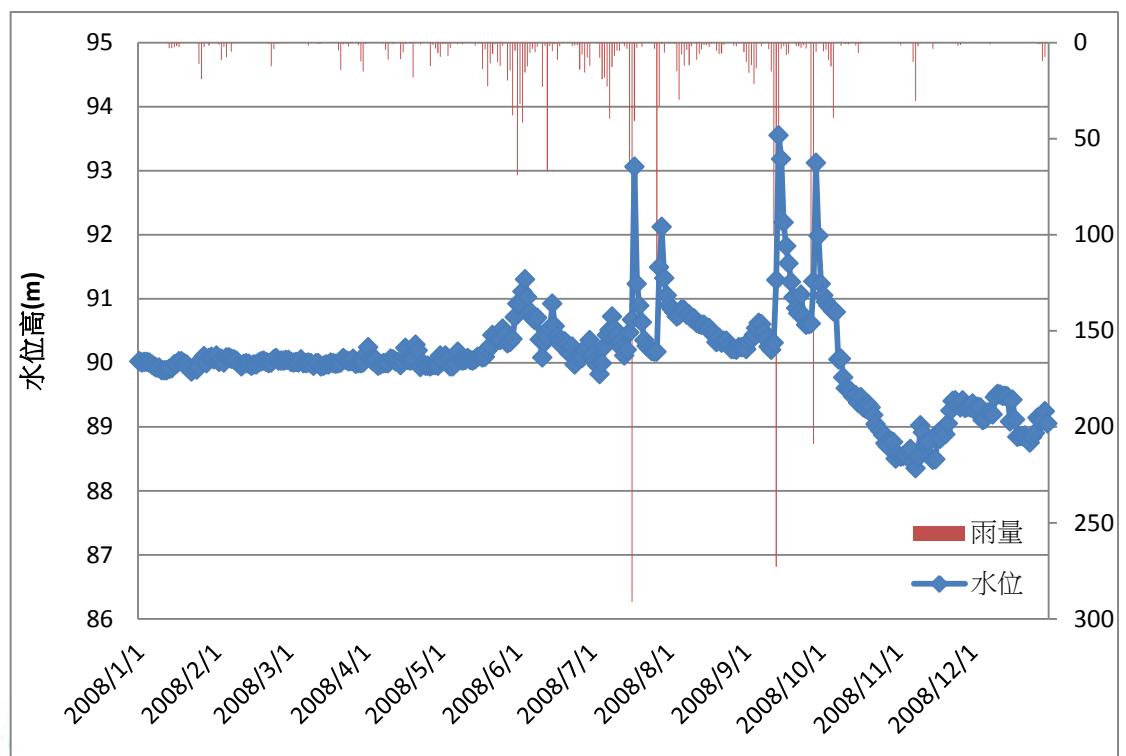


圖 4.6-3 彰雲橋觀測水位

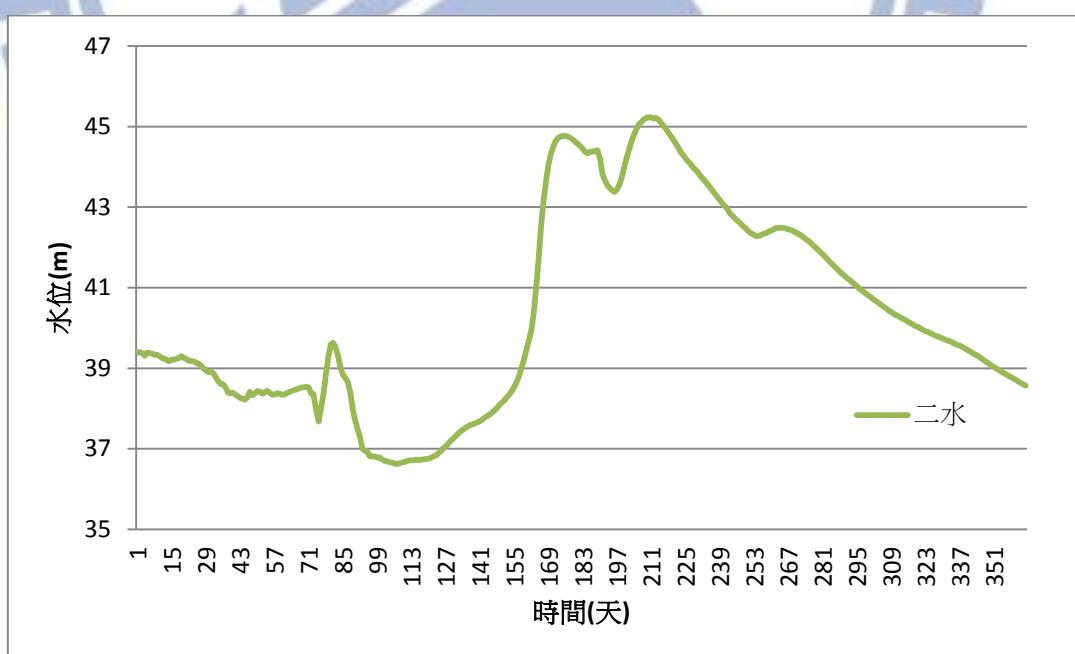


圖 4.6-4 二水觀測井之地下水位

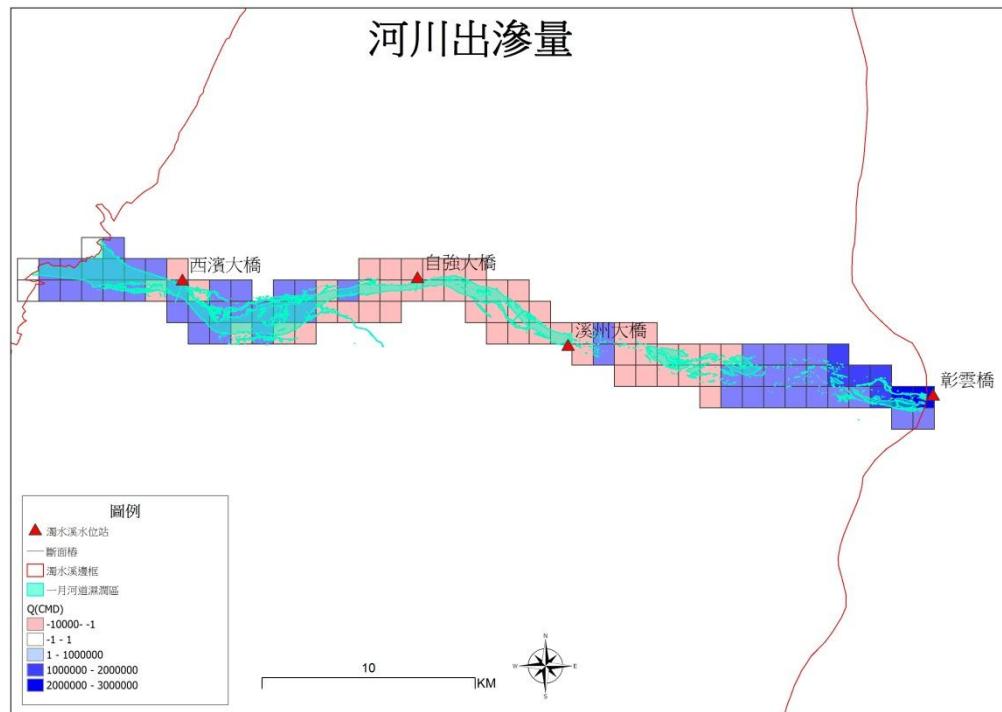


圖 4.6-5 一月河川出滲與入滲量空間分布圖

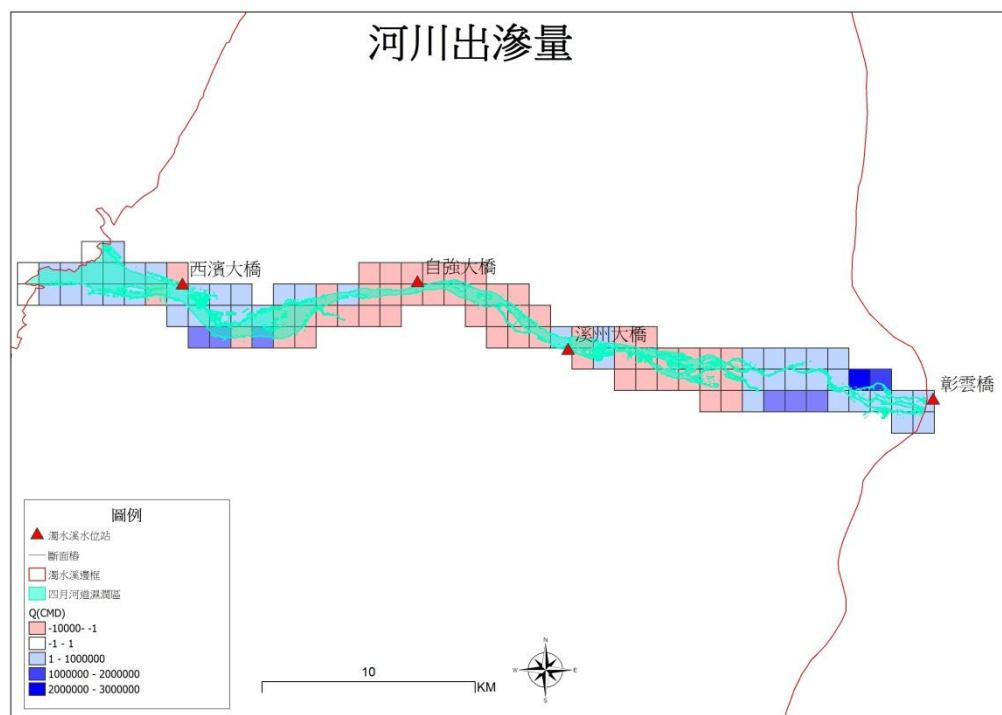


圖 4.6-6 四月河川出滲與入滲量空間分布圖

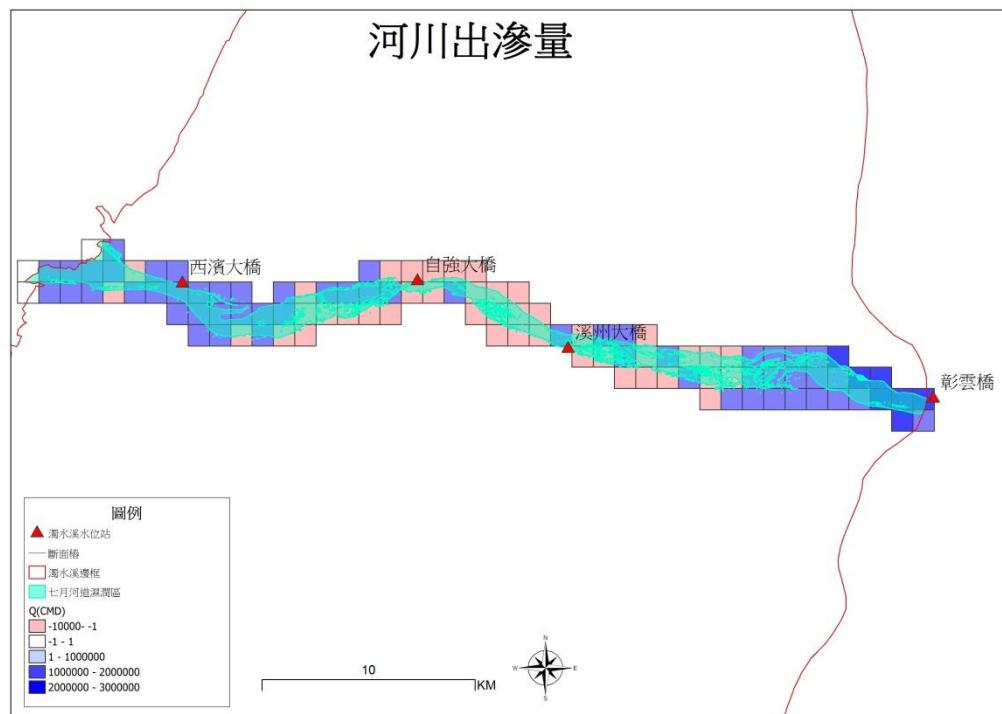


圖 4.6-7 七月河川出滲與入滲量空間分布圖

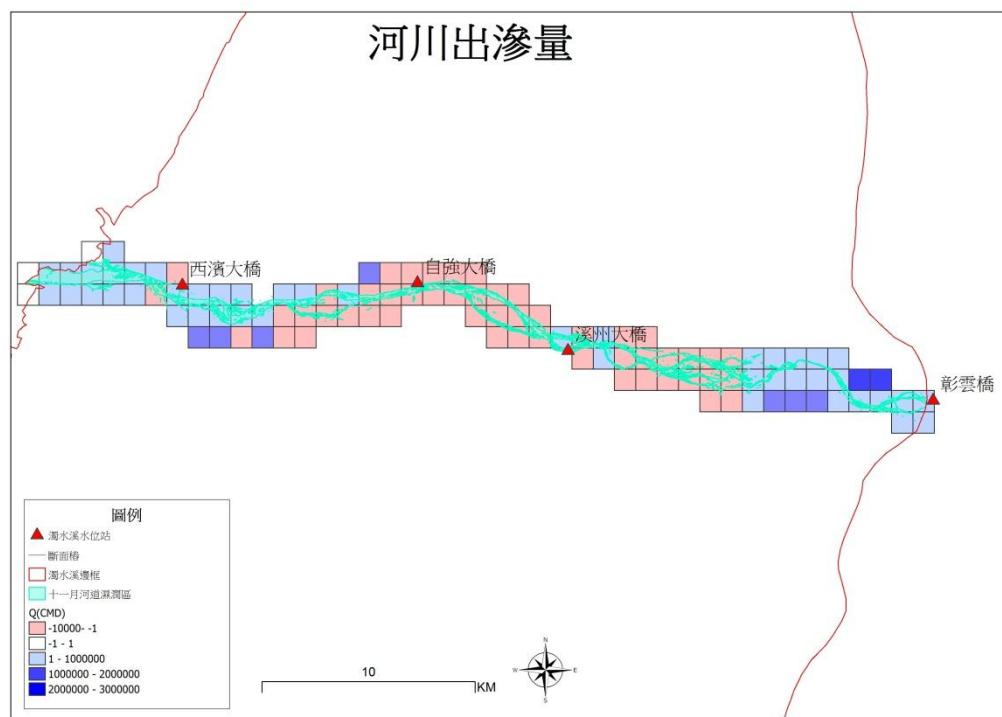


圖 4.6-8 十一月河川出滲與入滲量空間分布圖

本研究以專家系統檢定各層之淨補注量，由於淨補注量等於補注量扣除抽水量，因此在進行水平衡分析前，需分離出抽水量與補注量。此外，因為第三層與第五層不與地表連接，在此物理條件下，除非有補注井等人工設施，否則不應有補注，因此第三與第五層之淨補注量應等於負的抽水量，在此則無需分離。故本研究以中央地質調查所江崇榮等人(2011)之結果為基礎，進行補注量與抽水量之分離，其研究係以水位歷線法推估 2006 年之濁水溪沖積扇補注量與抽水量，結果顯示，該年度第一層之抽水量約為 5.35 億噸。而本次數值模式系統之補注量總和為 14.99 億，配合江崇榮(2011)之結果與前述河川入滲淨總量 5.26 億，得系統補注量年總和為 20.23(億噸)。綜合上述結果，本研究推估之濁水溪沖積扇第一層、第三層與第五層抽水量分別為 5.35、9.74 與 4.28(億噸)，合計 19.3(億噸)，如表 4.6-2 至表 4.6-4 所示。



表 4.6-2 各層抽水量統計表

| 月分     | 第一層  | 第三層  | 第五層  | 總抽水量  |
|--------|------|------|------|-------|
| 1 月    | 0.46 | 0.74 | 0.43 | 1.63  |
| 2 月    | 1.02 | 0.68 | 0.37 | 2.07  |
| 3 月    | 0.77 | 1.46 | 0.37 | 2.60  |
| 4 月    | 0.65 | 1.04 | 0.41 | 2.10  |
| 5 月    | 0.12 | 0.85 | 0.38 | 1.36  |
| 6 月    | 0.07 | 0.54 | 0.29 | 0.90  |
| 7 月    | 0.27 | 0.83 | 0.37 | 1.47  |
| 8 月    | 0.31 | 0.69 | 0.31 | 1.31  |
| 9 月    | 0.35 | 0.66 | 0.34 | 1.35  |
| 10 月   | 0.35 | 0.78 | 0.33 | 1.47  |
| 11 月   | 0.45 | 0.75 | 0.33 | 1.52  |
| 12 月   | 0.52 | 0.72 | 0.31 | 1.55  |
| 總和     | 5.35 | 9.74 | 4.25 | 19.34 |
| 單位(億噸) |      |      |      |       |

圖 4.6-9 至 4.6-12 為第一層檢定後各季之淨補注量分布圖、圖 4.6-13 至 4.6-16 與圖 4.6-17 至圖 4.6-20 則分別為第三層與第五層檢定後各季之淨補注量分布圖，由於深層含水層不存在補注量，因此淨補注量分布亦可視為抽水量分布。

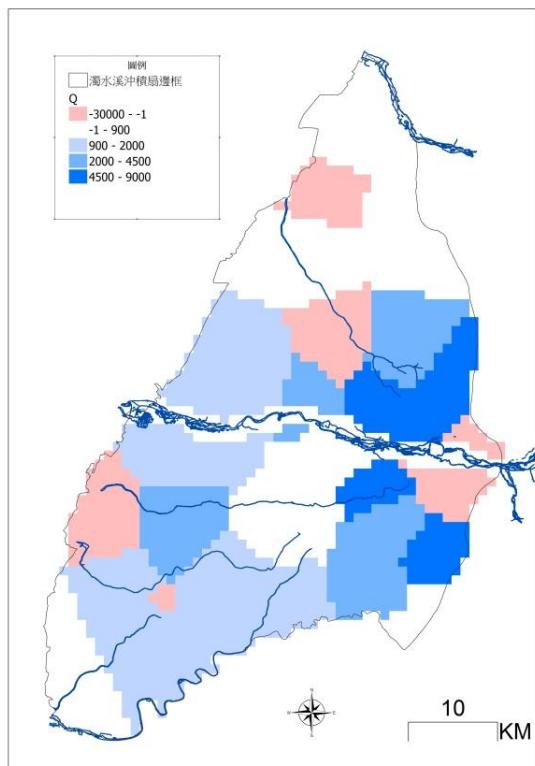


圖 4.6-9 第一層一月淨補注量分佈圖

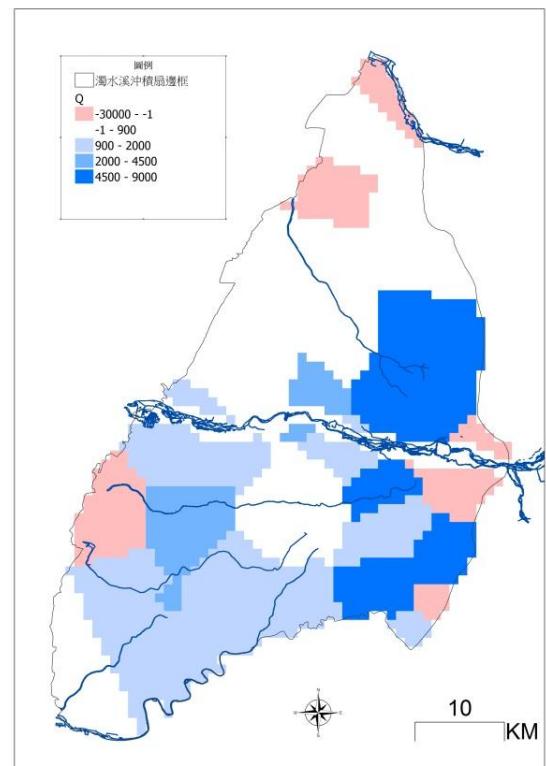


圖 4.6-10 第一層四月淨補注量分佈圖

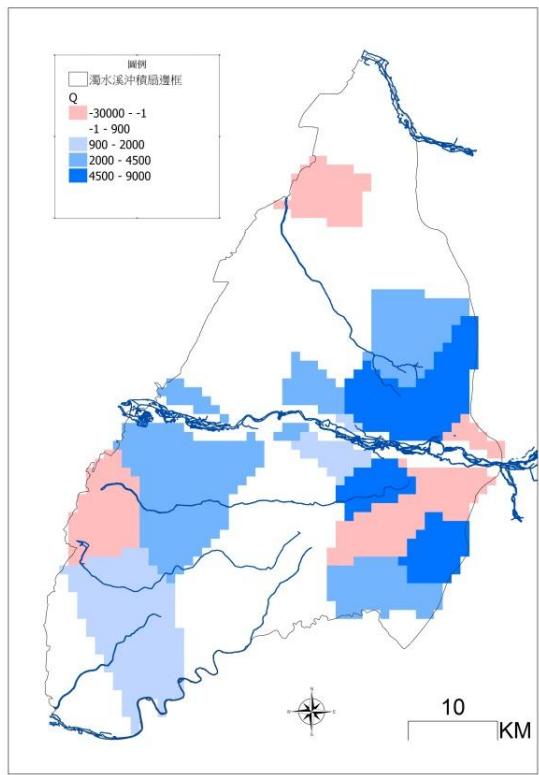


圖 4.6-11 第一層七月淨補注量分佈圖

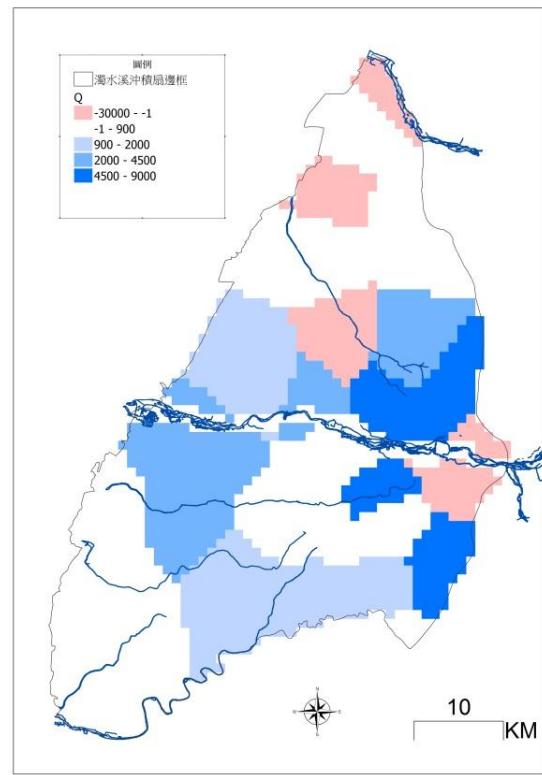


圖 4.6-12 第一層十月淨補注量分佈圖

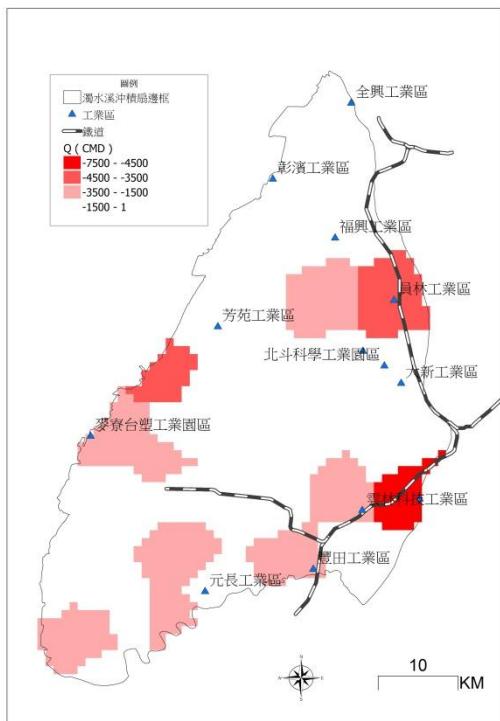


圖 4.6-13 第三層一月淨補注量分佈圖

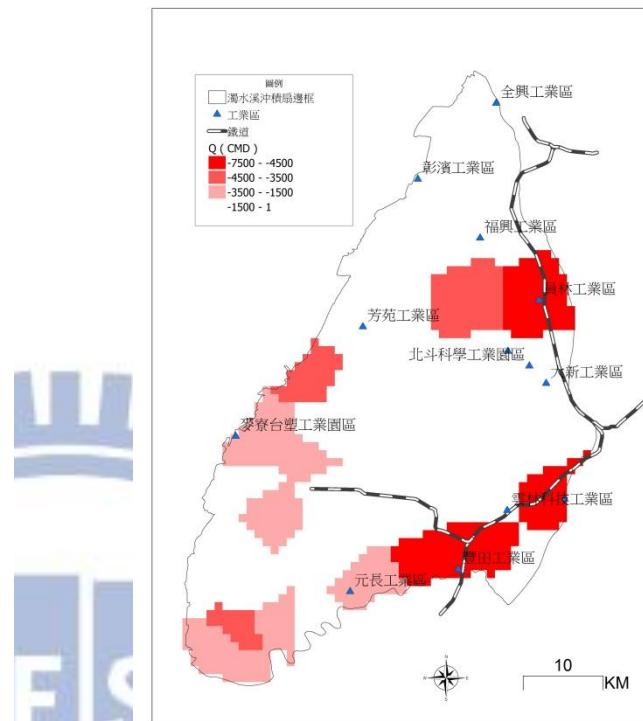


圖 4.6-14 第三層四月淨補注量分佈圖

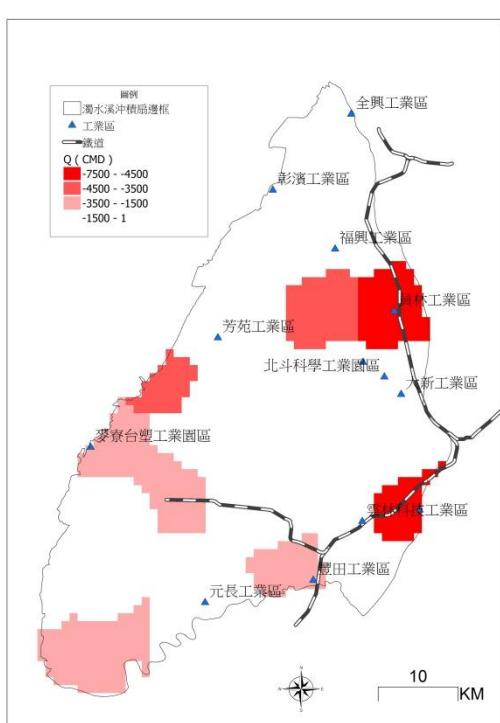


圖 4.6-15 第三層七月淨補注量分佈圖

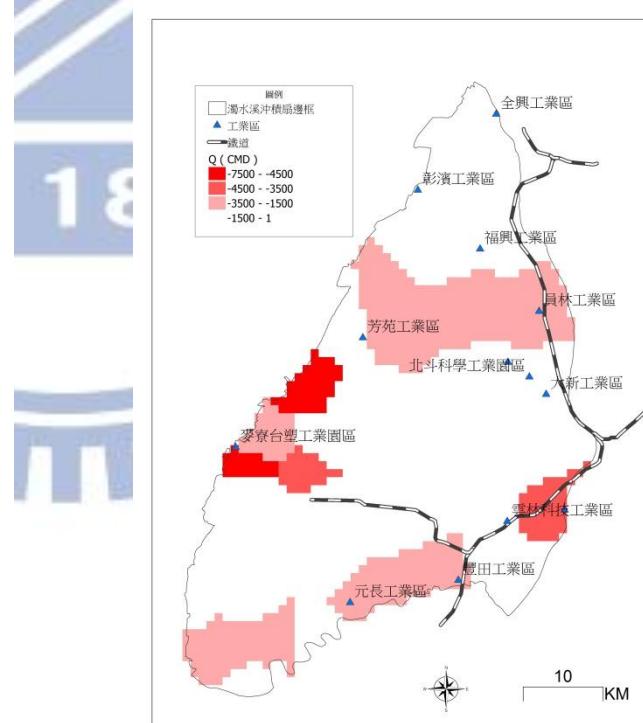


圖 4.6-16 第三層十月淨補注量分佈圖

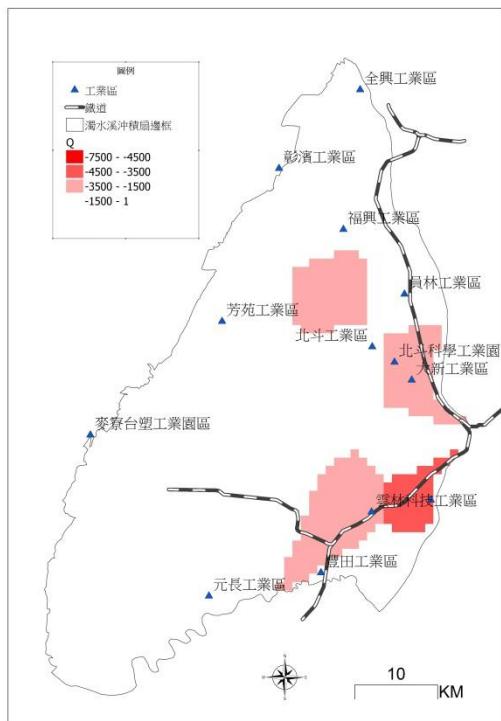


圖 4.6-17 第五層一月淨補注量分佈圖

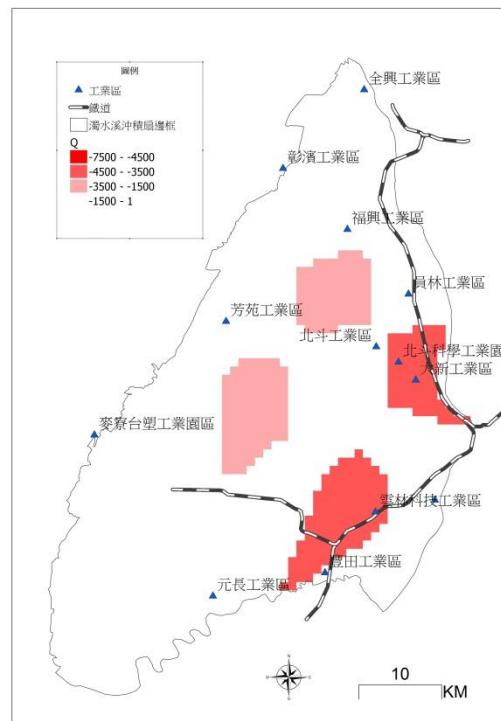


圖 4.6-18 第五層四月淨補注量分佈圖

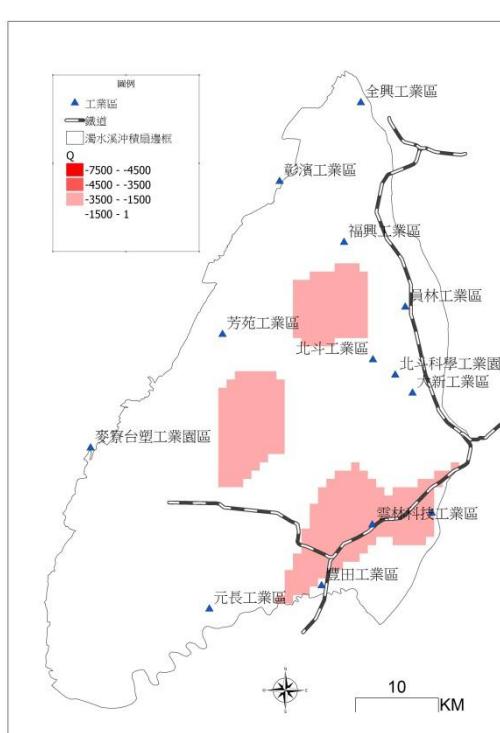


圖 4.6-19 第五層七月淨補注量分佈圖

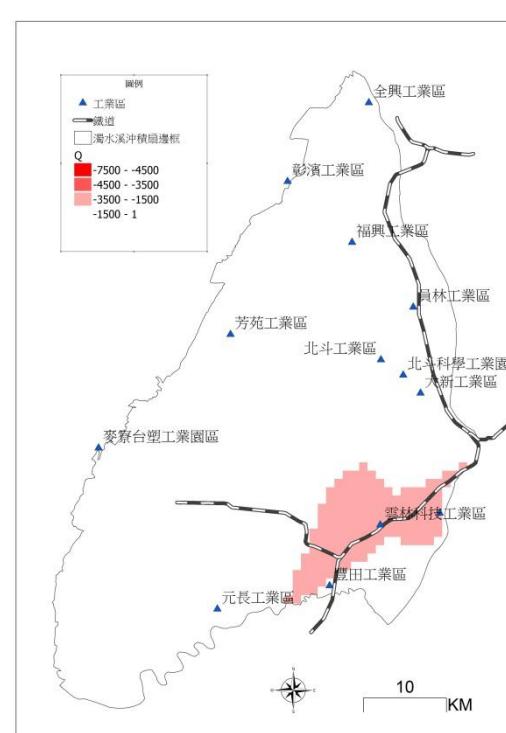


圖 4.6-20 第五層十月淨補注量分佈圖

由第一層補注量分布情形圖可知，濁水溪沖積扇補注量多集中在靠近山麓的地區，與山區雨量多且多為礫石層，入滲量大的情形相符。而在雲林地區接近濁水溪出海口的地方，則因該處土層水力傳導係數較大，且因第一層與第三層間無阻水層，所以補注量較其他地區稍大一些。

由第三層與第五層抽水量分布可知，抽水量較大的地區多分布在沿海及鐵路車站附近，由內政部土地使用資料(如圖 4.6-21)及 Google 衛星地形圖(如圖 4.6-22)進一步比對可發現，沿海地區有許多養殖漁業，魚池遍佈，因此地下水抽取量較多；而在鐵路車站附近，為都市的中心，工業區則位於都市外圍，形成一個人口密集，工業發達的區域，因此可推測這些區域為地下水使用量較大之區域。

經現地概況分析可發現，本研究檢定後之抽水量或淨補注量之分布與現地狀況近似，如此即可證明本研究設計之參數檢定規則應用在實際案例仍深具可信度，且具有實際應用之能力

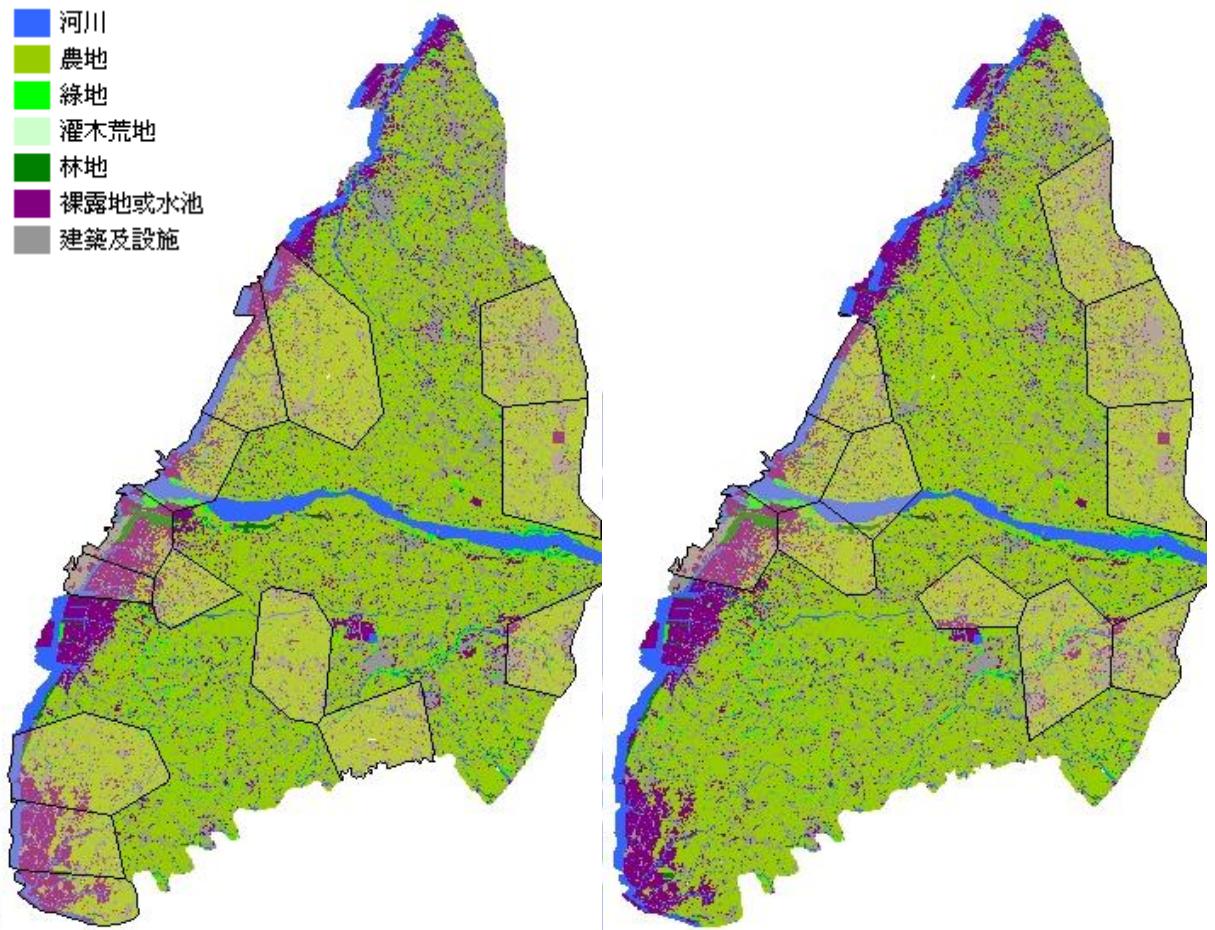


圖 4.6-21 抽水較大區域與土地利用(左為第三層，右為第五層)



圖 4.6-22 抽水量較大之衛星地形圖(左為第三層，右為第五層)

## 第五章 結論與建議

### 5.1 結論

1. 本研究成功結合衛星影像辨識於濁水溪之河床行水潤濕區域面積推估，並建立一維河道演算模擬，再將兩者之成果應用於地下水模式 MODFLOW 之河川模擬模組(River package)建置，接著進一步透過參數檢定方式，推估出濁水溪之河川入滲量為每年 5.26 億噸、河川出滲量為每年 1.12 億噸、整體沖積扇之第一含水層淨補注量為 13.48 億及，第二與第三含水層之抽水量則分別為 9.74 億噸及 4.25 億噸。而本次數值模式系統之補注量總和為 20.23 億噸，抽水量則為 19.3 億噸。
2. 本研究成功的應用濁水溪之衛星影像，辨識出其於 2008 年 1 月、4 月、7 月及 11 月之河道濕潤區域面積，其中 1 月及 4 月之河床行水濕潤區域面積均為 24 平方公里，七月則擴張為 40 平方公里，11 月則再縮小為 12 平方公里，而七月之河床行水濕潤區域面積則為 11 月的兩倍以上，乾濕季變化顯著。
3. 比較濁水溪沖積扇上游與下游之瓣狀河道特性，可發現上游瓣狀河道有明顯之豐枯差異，而下游部分則除了 11 月之衛星影像有明顯的變化外，其他各季均無太大差異。進一步分析此結果可發現，下游河道坡度較為平坦，河床斷面特性為寬而淺，較近似 U 型之河槽形狀，因此對於不同季節不同水文條件而言，濕潤區域無明顯的變化，僅反映於水深之變動上；反之，上游區域河道坡度較陡，河床斷面特性則為窄而深，近似 V 型之河槽形狀，因此濕潤區域則易因水深之改變而造成潤濕範圍顯著的變化。

4. 為驗證濁水溪沖積扇檢定後之抽水量合理性，本研究比較分析抽水分布與土地利用所反映之可能用水情形後，發現兩者的趨勢一致，可反應出本研究之參數檢定結果具相當的可信度。

## 5.2 建議

1. 在河道水理演算方面，可將模擬資料調整使用更精細之日資料或時資料以更精準之反映水位在時間上之變化。
2. 衛星影像部分可考慮增加各月份衛星影像圖幅，以連續探討河道面積在時序上之變化，並可推估各月之河道入滲量及出滲量，以評估濁水溪對濁水溪沖積扇之補注量影響。
3. 可利用本研究所建立之地下水數值模式加入情境模擬，如評估扇頂大量抽水後，對扇央與扇尾地下水位的影響程度，及對河川入滲量與出滲量之影響。

## 參考文獻

1. Abbott, M.B., 1991. *Hydroinformatics: Information Technology and the Aquatic Environment*. Avebury Technical, Aldershot
2. Butler, J. J., Jr., Zlotnik, V.A., and Tsou, M. S., 2001, Drawdown and stream depletion produced by pumping in the vicinity of a partially penetrating stream, *Ground Water*, vol.39, no.55, pp.651-659.
3. Chau, K.W., 2003. Manipulation of numerical coastal flow and water quality models. *Environmental Modelling and Software* 18 (2), 99 – 108.
4. Chau, K.W., Albermani, F., 2002. Expert system application on preliminary design of liquid retaining structures. *Expert Systems with Applications* 22 (2), 169 – 178.
5. Chau, K.W., Albermani, F., 2003. Knowledge-based system on optimum design of liquid retaining structures with genetic algorithms. *Journal of Structural Engineering, ASCE* 129 (10), 1312 – 1321.
6. Chau, K.W., Chen, W., 2001. An example of expert system on numerical modelling system in coastal processes. *Advances in Engineering Software* 32 (9), 695 – 703.
7. Ferris. J. G., Knowles. D. B., Brown. R. H., and R. W. Stallman., 1962, Theory of Aquifer Tests, *Geological Survey Water- Supply Paper* 1536-E, pp.126-131.
8. Henrik Madsen, Geoffery Wilson, Hans Christian Ammentorp, 2002, Comparison of different automated strategies for calibration of rainfall run-off models.
9. Hill, M.C., 1992. A computer program (MODFLOWP) for estimating parameters of a transient, three-dimensional, ground-water flow model using nonlinear regression. *US Geological Survey, Open File Report* 91-484, pp. 3–4 and 15.

10. K.W. Chau, "Intelligent manipulation of calibration parameters in numerical modeling", *Advances in Environmental Research*, 8, p. 467–476, 2004.
11. K.W. Chau, "Selection and calibration of numerical modeling in flow and water quality", *Environmental Modeling and Assessment*, 9, p. 169–178, 2004.
12. K.W. Chau, "A review on integration of artificial intelligence into water quality modeling", *Marine Pollution Bulletin*, 52, p. 726–733, 2006.
13. K.W. Chau, "A review on the integration of artificial intelligence into coastal modeling", *Journal of Environmental Management*, 80, p. 47–57, 2006.
14. Madsen, H., 2003. Parameter estimation in distributed hydrological catchment modelling using automatic calibration with multiple objectives.
15. Madsen, H., 2000. Automatic calibration of a conceptual rainfall-runoff model using multiple objectives. *J. Hydrol.* 235. p. 276–288.
16. Sang Min Kim, Brian L. Benham, Kevin M. Brannan, Rebecca W. Zeckoski, John Doherty, 2007, , Comparision of hydrologic calibration of HSPF using automatic and manual methods, *WATER RESOURCES RESEARCH*, VOL. 43, W01402, doi:10.1029/2006WR004883.
17. Schwartz, F.W., and Zhang, H., 2003, *Fundamentals of ground water*, John Wiley & Sons, New York.
18. Sophocleous, M.A., Koussis, A., Martin, J.L., 1995, Evaluation of simplified stream-aquigfer depletion models for water rights administration, *Ground Water*, vol.33, no.44 ,pp.579-588.
19. 中興工程顧問公司,濁水溪沖積扇地下水可開發潛能評估。台灣省政府水利處委託計畫報告,第 5-1 至 5-12 頁,第 6-1 至 6-28 頁,第 7-1 至 7-16 頁, 1997。
20. 中興工程顧問公司,濁水溪沖積扇地下水人工補注規劃。台灣省政府水利處

委託計畫報告，第 4-6 至 4-18 頁，1998。

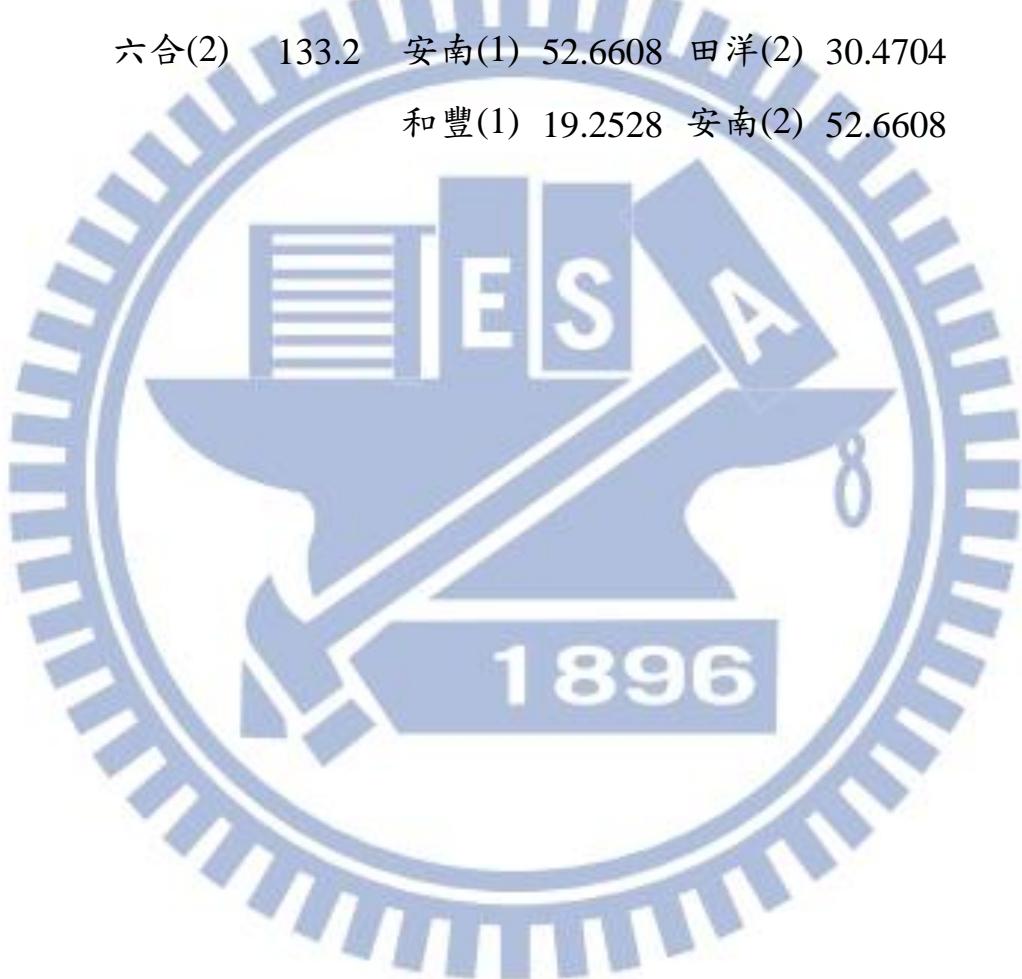
21. 巨廷工程顧問股份有限公司、國立交通大學，多元化水資源經營管理方案—地下水補注分析。經濟部水利署委託計畫成果報告第 2-1 至 2-24 頁，第 4-1 至 4-18 頁，2005。
22. 台灣大學水工試驗所，濁水溪沖積扇扇央扇尾平原區地表垂直到補注量評估。經濟部水資源局委託計畫報告，1998。
23. 台灣大學土木工程研究所，濁水溪沖積扇扇頂平原地區地表垂向補注量估計，經濟部委託計畫報告，1997。
24. 能邦科技股顧問股份有限公司，台灣地區地下水補注量估算。經濟部水資源局委託計畫報告，第 4-1 至 4-70 頁，第 5-1 至 5-140 頁，2000。
25. 農業工程研究中心，7C 濁水溪平原地下水數學模式之評估與應用。台灣省水利局委託計畫報告，1989。
26. 劉聰桂，濁水溪沖積扇之地下水資源—碳十四與氚定年/示蹤研究。濁水溪沖積扇地下水及水文地質研討會論文集，第 145-164 頁，1996。
27. 經濟部中央地質調查所，台灣地區地下水觀測網第一期計畫，濁水溪沖積扇水文地質調查研究總報告，1999。
28. 江崇榮、黃智昭、陳瑞娥，2002，屏東平原之地下水補注區，經濟部中央地質調查所彙刊，第十五號，第 17-47 頁。
29. 江崇榮、黃智昭、陳瑞娥，2002，屏東平原之地下水補注區，經濟部中央地質調查所彙刊，第十五號，第 17-47 頁。
30. 江崇榮、黃智昭、陳瑞娥，2004b，屏東平原地下水補注量及抽水量之評估，經濟部中央地質調查所彙刊，第十七號，第 21-51 頁。

31. 江崇榮、陳瑞娥、賴慈華、黃智昭，2005，濁水溪沖積扇地下水區之補注區與補注源探討，經濟部中央地質調所彙刊，第十八號，第 1-28 頁。
32. 江崇榮、黃智昭、陳瑞娥，以地下水歷線分析法評估濁水溪沖積扇之地下水收支，經濟部中央地質調查所彙刊第十九號，第 61-90 頁，2006。
33. 李振誥、葉信富、謝壠煌，應用河道水位變化評估新虎尾溪地下水補注量之研究，農業工程學報第 53 卷第 2 期，2007。
34. 經濟部中央地質調查所，台灣地區地下水區水文地質調查及地下水資源評估，地下水補注潛勢評估與地下水模式建置，2009。
35. 張誠信，1996，雲林地區地下水三維數值模擬，台灣大學農業工程研究所碩士論文。
36. 張良正、歐國隆、單信瑜，1999a，濁水溪沖積扇及屏東平原之地下水污染潛勢評估分析，八十八年度農業工程研討會，pp.369- 376。
37. 經濟部水利署，地下水資源整體營運規劃與綜合評估，2002。
38. 曾憲雄，人工智慧與專家系統：理論. 實務. 應用，初版，旗標出版社，台北市，2005。
39. 陳韋圻，應用專家系統於地下水模式自動化參數檢定之研究，國立交通大學，碩士論文，民國 97 年。
40. 王雲直，應用專家系統於地下水模式參數檢定之研究—以濁水溪沖積扇為例，國立交通大學，碩士論文，民國 99 年。
41. 張弼舜，應用專家系統於穩健型地下水參數檢定模式之發展，碩士論文，民國 100 年。

## 附錄 A 各觀測井之水力傳導係數資料

| 站井名<br>稱 | K(m/day) | 站井名<br>稱 | K(m/day) | 站井名<br>稱 | K(m/day) |
|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| 線西(1)    | 20.491   | 大溝(1)    | 84.8736  | 西港(3)    | 5.14512  |
| 九隆(1)    | 77.544   | 元長(1)    | 48.3696  | 線西(4)    | 60.912   |
| 溫厝(1)    | 8.70336  | 水林(1)    | 33.3792  | 花壇(3)    | 51.9264  |
| 溪州(1)    | 50.22    | 好修(1)    | 67.3776  | 好修(3)    | 62.4816  |
| 竹塘(1)    | 154.368  | 芳苑(1)    | 46.4112  | 漢寶(3)    | 50.508   |
| 石榴(1)    | 4.7995   | 花壇(2)    | 2.57184  | 員林(3)    | 42.6816  |
| 豐榮(1)    | 24.9984  | 員林(1)    | 25.3152  | 溪湖(3)    | 102.456  |
| 箔子(1)    | 17.9424  | 海豐(1)    | 74.0592  | 趙甲(3)    | 148.32   |
| 虎溪(1)    | 66.7088  | 崙子(1)    | 5.78448  | 芳苑(3)    | 101.189  |
| 芳草(1)    | 12.3912  | 港後(1)    | 39.4848  | 興化(3)    | 32.3424  |
| 田洋(1)    | 43.6608  | 溪州(2)    | 123.2784 | 元長(2)    | 40.9824  |
| 海園(1)    | 18.5184  | 溪湖(1)    | 89.4816  | 溪州(3)    | 42.696   |
| 崁腳(1)    | 3.89952  | 嘉興(1)    | 19.5552  | 竹塘(2)    | 44.9424  |
| 田中(1)    | 46.7856  | 趙甲(1)    | 53.9856  | 潭墘(2)    | 57.9168  |
| 古坑(1)    | 4.70592  | 潭墘(1)    | 15.3216  | 港後(3)    | 28.9296  |
| 西螺(1)    | 82.4832  | 蔡厝(1)    | 17.3088  | 田中(2)    | 46.7856  |
| 文昌(1)    | 17.856   | 興化(1)    | 58.3056  | 古坑(1)    | 4.70592  |
| 香田(1)    | 19.872   | 瓊埔(1)    | 28.404   | 六合(2)    | 133.2    |
| 田尾(1)    | 73.1376  | 崁腳(2)    | 16.38    | 西螺(2)    | 82.4832  |
| 合興(1)    | 189.936  | 溫厝(2)    | 3.93552  | 九隆(3)    | 80.5824  |
| 舊庄(1)    | 20.088   | 西港(1)    | 5.14512  | 豐榮(3)    | 50.7024  |

宏崙(1) 33.3504 六合(2) 133.2 後安(2) 16.992  
明德(1) 11.5445 古坑(1) 4.70592 和豐(2) 19.2528  
東光(1) 45.4176 田中(1) 46.7856 北港(2) 21.0816  
洛津(1) 5.6966 西螺(2) 82.4688 虎溪(3) 58.1904  
全興(1) 53.1936 北港(1) 21.0816 虎尾(2) 52.0848  
花壇(1) 49.356 田洋(2) 30.4704 芳草(3) 46.4112  
六合(2) 133.2 安南(1) 52.6608 田洋(2) 30.4704  
和豐(1) 19.2528 安南(2) 52.6608



## 附錄 B 修正型水位歷線法

江崇榮(2006)等人提出以地下水位歷線變動與地下水層儲水係數，直接進行抽水量、補注量、蓄水變化量和流失量之評估，該方法曾應用於屏東平原之地下水補注量推估，應用水位歷線法可以有效應用地下水觀測網累積多年之成果。圖 B-1 為地下水水位歷線法之計算流程圖，其流程主要可以分為五個步驟，首先利用水位歷線配合土壤儲水係數或比流出率計算系統之儲蓄水量歷線，其次利用枯水期之儲蓄水量變化推估平均抽水量，接著應用降雨後之水位變化方式決定系統流出量，再來是以年初年末儲蓄水量決定年度變化量，最後則是以連續方程式推估年補注量。以下將進一步詳細說明：



地下水層平時受到抽水與補注之影響，地下水位歷線隨時間高低起伏，然而分析地下水位歷線與降雨歷線之關係，可以發現地下水位歷線上升或是減緩下降是隨著降雨行為而產生(如圖 B-2 所示)，因此可藉由水位歷線與降雨歷線之關係，估算系統平均抽水量與入滲補注量。圖 B-3 為表層水層之概念模型示意圖，其中影響水位變化的項目包含抽水量、補注量、側向交換量與其他垂向交換量。地下水位歷線與降雨歷線由觀測水井與雨量站長期觀測儲存，然其在研究區域上為點位型式分佈，若欲將點位型式之資

料涵蓋至整個研究區域，常見處理方法是透過徐昇氏多邊形或擬徐昇氏多邊形之矩形網格來劃分各觀測水井與雨量站之代表範圍(如圖 B-4 所示)。徐昇氏多邊形最重要的特性為徐昇氏多邊形中任意點必與其對應之代表觀測水井或雨量站最接近。

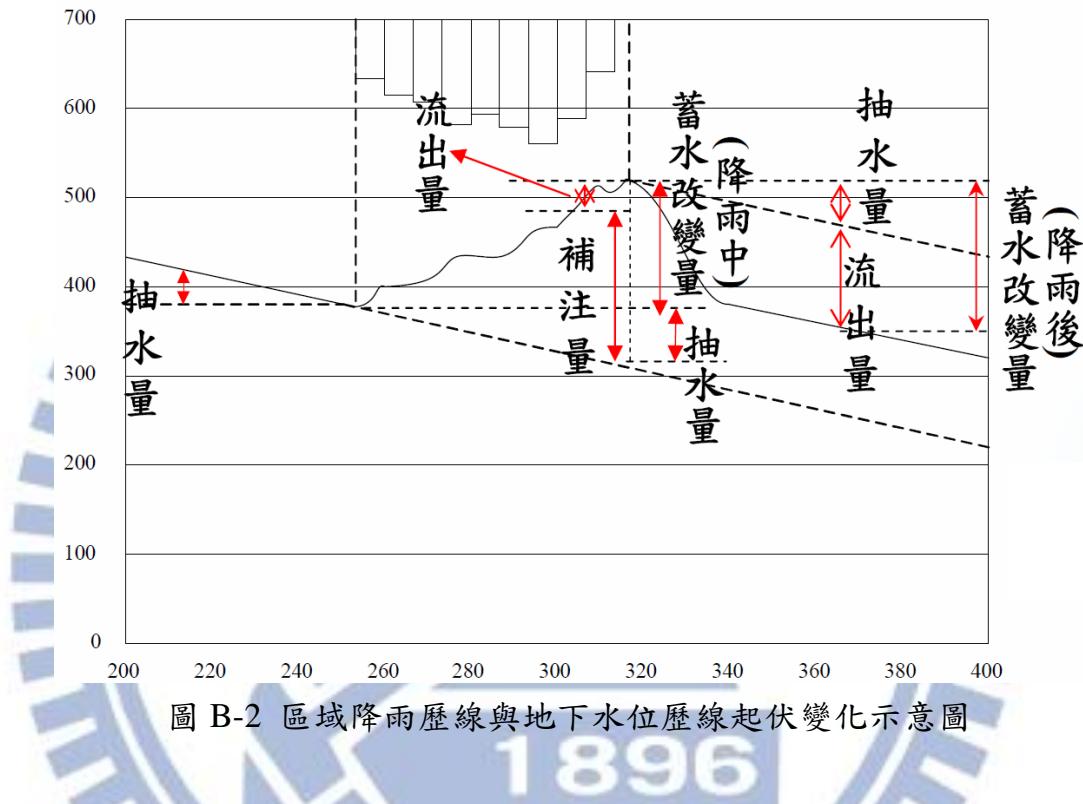


圖 B-2 區域降雨歷線與地下水位歷線起伏變化示意圖

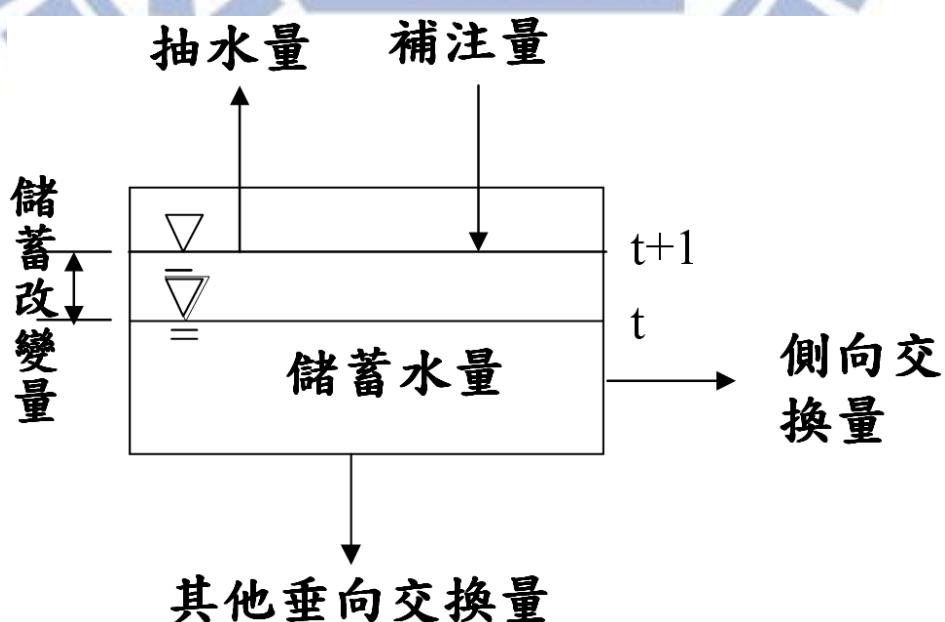


圖 B-3 表層水層之概念模型示意圖

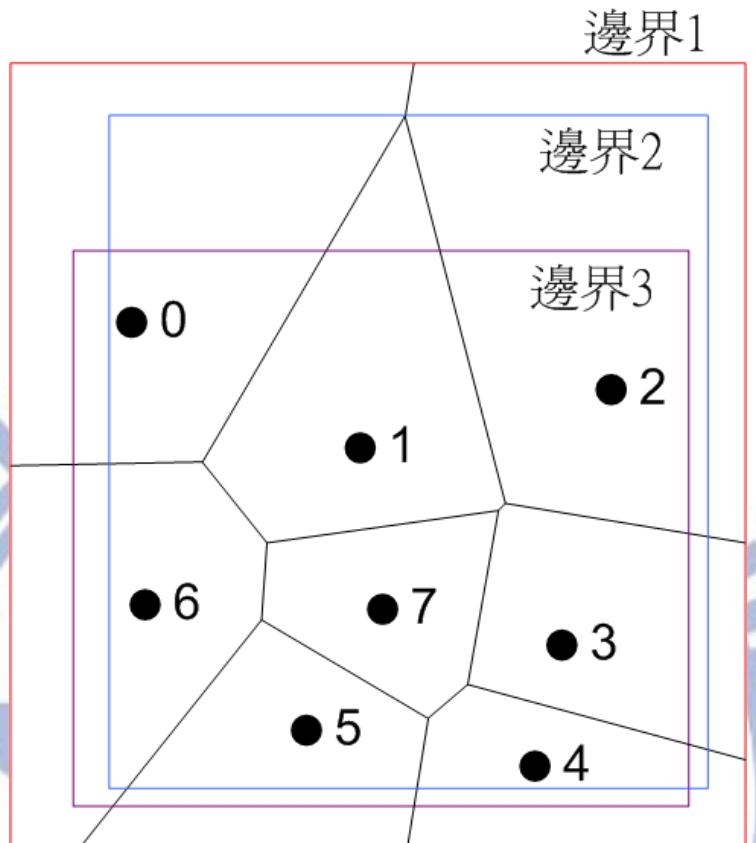


圖 B-4 徐昇氏多邊形

降雨行為使得地下水層蓄水量增加，地下水位亦隨之上升；然而地下水位之上升，並不全然代表地下水補注事件，潮汐、地潮、氣壓、地震及停止抽水等，均可造成地下水位之上升或減緩下降。因此，本方法將採用平均日水位進行計算，可以消除潮汐或地潮等引發之短週期水位起伏。基於此一原因，河川流量與降雨資料亦同時採用日平均資料。

觀察台灣地區降雨資料，可以發現從十一月起至次年四月間多為少雨之枯水期，尤其以南部地區最為明顯；從各地下水區地下水觀測資料顯示，在枯水期期間，地下水位歷線以趨近直線的方式下降，以濁水溪沖積扇地區之二水觀測井為例(如圖 B-5 所示)，綜觀 1997~1999 年三年，其地下水位退水線之斜率極為相近，直至雨季期間地下水位方止跌回升。

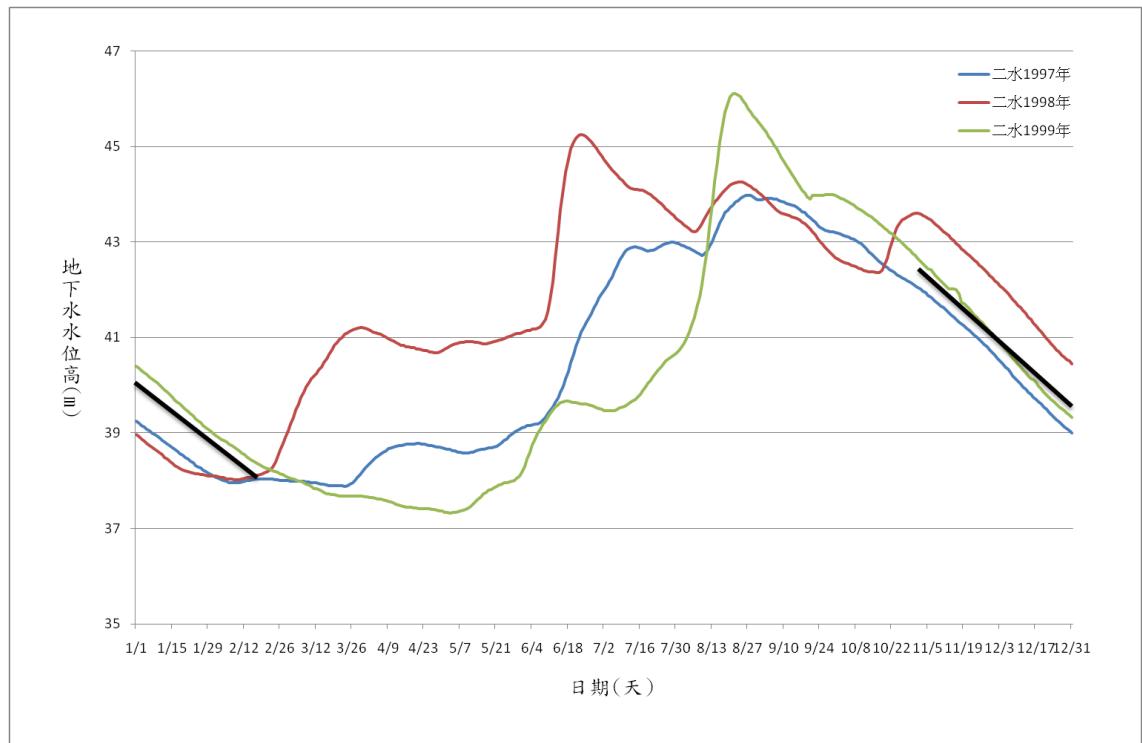


圖 B-5 二水站地下水層一(F1)1997~1999 年水位歷線和枯水期退水線表

其中

$S_i^t$ ：代表於時刻  $t$  於第  $i$  口水井蘊藏之地下水蘊藏量 ( $L^3$ )

$I_i^{t,t-1}$  : 代表於時刻  $t$  與  $t-1$  間的垂向地下水補注量( $L^3$ )

$W_i^{t,t-1}$ ：代表於時刻  $t$  與  $t-1$  間的地下水抽水量( $L^3$ )

$O_i^{t,t-1}$ ：代表於時刻  $t$  與  $t-1$  間的地下水流出量( $L^3$ )。

$$S_i^t = s_y A_i (h_i^t - b_i) \quad \dots \quad \text{(式 B-2a)}$$

$$S_i^t = n_i A_i (t_i - b_i) + s_s A_i h_i^t = s_s A_i h_i^t + \text{Const.} \quad \dots \quad (\text{式 B-2b})$$

式 B-2a 及式 B-2b 中

$s_y$  : 第  $i$  口觀測井之比流出率。

$S_s$  : 第  $i$  口觀測井之儲水係數。

$n_i$  : 第  $i$  口觀測井之孔隙率。

$h_i^t$ ：第  $i$  口觀測井於  $t$  時刻之水位。

$t_i$  與  $b_i$ ：第  $i$  口觀測井含水層頂部與底部高程。

$A_i$ ：第  $i$  口觀測井位代表範圍之面積，可利用徐昇氏多邊形劃分代表範圍。

式 B-1 為地下水系統之水平衡方程式，地下水蘊藏之改變量應等於地下水補注量、抽水量與流出量之綜合效應。式 B-2a 與 B-2b 分別為非拘限含水層與拘限含水層之地下水蘊藏量估算公式，非拘限含水層之公式為非拘限含水層之厚度、代表面積與比流出率之乘積，其中非拘限含水層厚度等於水位減含水層底部；拘限含水層之估算公式，可由兩項所組成，第二項為水位、代表面積與儲水係數之乘機，第一項則為充滿水層之水量，其量值不為水位之函數，亦即不隨時間改變。但是其數值於後續水位歷線之估算上，並不影響估算結果，因此於實際估算上可忽略不計。如搭配圖 B-3 之水平衡關係，式中之流出量( $O_i^{t,t-1}$ )即代表側向交換量與其他垂向交換量之和。

本方法以枯水期之退水曲線推估系統之單日平均抽水量，由於枯水期長期沒有下雨，因此可假設該段時期表層土壤並無多餘水源可供垂向補注或山邊側流量補注，因此式中的地下水補注量( $I_i^{t,t-1}$ )假設為零。

此外，由於長期無補注行為，且地下水位極低，因此亦無出滲之狀態，故式 B-1 中之地下水流出量( $O_i^{t,t-1}$ )亦可假設為零。因此原始地下水收支平衡式(式 B-1)可進一步簡化為式 B-3。因此，藉由枯水期之水位歷線變化可全然視為抽水造成之影響，前後兩時刻之地下水儲蓄量差值，即可代表該時段之地下水抽水量。

$$S_i^t - S_i^{t-1} = -W_i^{t,t-1} \quad \dots \dots \dots \quad (\text{式 B-3})$$

如果以單日作為時刻長度，因此計算前後兩日的蓄水儲蓄量差值，即代表當日之抽水量。在此首先計算枯水期各日之抽水量，可以取得一個枯

水期抽水量的數列。其次，計算該數列之平均值(如式 B-4 所示)，以此平均值作為系統全年之平均抽水量，該數值之含意亦為枯水期間的蓄水儲蓄量退水斜率。不局限於枯水期，可將此平均抽水量擴張應用於豐水期間。

$$\bar{W}_i = \frac{\sum_{t=1}^N W_i^{t,t-1}}{N-1} \quad \dots \dots \dots \quad (\text{式 B-4})$$

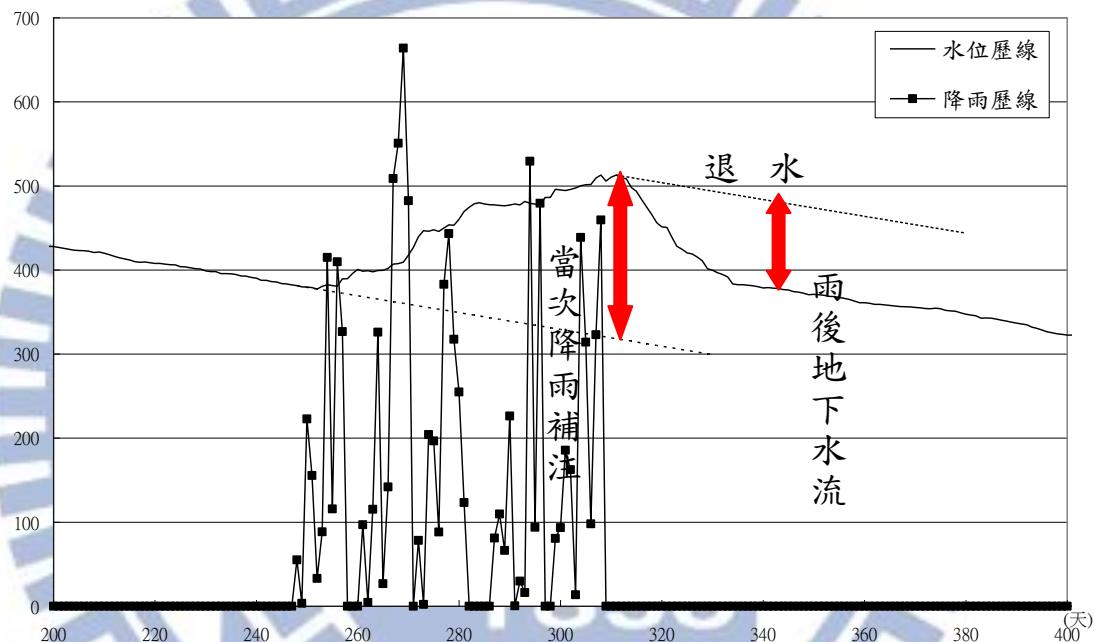


圖 B-6 降雨事件、補注量與流失量關係示意圖

如欲利用長期的日水位資料與日降雨資料，結合水位歷史線法估算各日補注量，可依據下列方式估算。首先，利用日降雨資料擷取出各降雨事件之發生時段，將所有時刻分成降雨期間、降雨後數天內與非降雨期間三種情況。其次，不同降雨時段，以不同方式分別估算補注量、流出量與抽水量三者。以抽水量而言，在降雨後數天內與非降雨期間之單日抽水量可直接以前述之平均抽水量( $\bar{W}_i$ )給定，但在降雨期間部分需水量可能直接以降雨量直接滿足，因此降低抽水比例，因此在降雨期間的抽水比例( $C_r$ )應在 0% 至 100% 之間，其數值可由最後之模擬結果進一步檢定。

$$W_i^{t,t-1} = \begin{cases} C_r \bar{W}_i & \text{raining} \\ \bar{W}_i & \text{dry} \end{cases} \quad \dots \dots \dots \quad (\text{式 B-5})$$

在補注量與流出量方面，由於單日抽水量與該日儲蓄改變量均已決定，故可將方程式改寫如式 B-6，已知數置放於等號右方，而等號左方則為未知的單日補注量與單日流出量。在降雨期間(如圖 B-6 所示)，地下水儲蓄量會隨降雨事件之發生而持續上漲，在此假設該段期間之反應皆是因為補注量之影響，故降雨期間的單日補注量與單日流出量可分別由式 B-7 與 B-8 估算。

$$I_i^{t,t-1} - O_i^{t,t-1} = S_i^t - S_i^{t-1} + W_i^{t,t-1} \quad \dots \dots \dots \quad (\text{式 B-6})$$

$$I_i^{t,t-1} = S_i^t - S_i^{t-1} + W_i^{t,t-1} \quad \dots \dots \dots \quad (\text{式 B-7})$$

$$O_i^{t,t-1} = 0 \quad \dots \dots \dots \quad (\text{式 B-8})$$

在降雨後數天內，觀察水位反應行為，部分場次之水位並未在雨停後即時下降，仍有少許上升情形，顯示雨後數天內仍有補注產生。因此，本研究則依據式 B-7 估算，如等號右方項次大於零，則將數值歸於補注部分，反之則歸於流出部分(如式 B-9 與 B-10 所示)。

$$I_i^{t,t-1} = \begin{cases} S_i^t - S_i^{t-1} + W_i^{t,t-1} & \text{if } S_i^t - S_i^{t-1} + W_i^{t,t-1} > 0 \\ 0 & \text{if } S_i^t - S_i^{t-1} + W_i^{t,t-1} < 0 \end{cases} \quad \dots \dots \dots \quad (\text{式 B-9})$$

$$O_i^{t,t-1} = \begin{cases} 0 & \text{if } S_i^t - S_i^{t-1} + W_i^{t,t-1} > 0 \\ -(S_i^t - S_i^{t-1} + W_i^{t,t-1}) & \text{if } S_i^t - S_i^{t-1} + W_i^{t,t-1} < 0 \end{cases} \quad \dots \dots \dots \quad (\text{式 B-10})$$

在非降雨期間，如水位與儲蓄水量有其他異常之升高或降低，由於並無明顯之補注源，因此直接將此改變量歸於流出量部分。

$$O_i^{t,t-1} = -(S_i^t - S_i^{t-1} + W_i^{t,t-1}) \quad \dots \dots \dots \text{ (式 B-11)}$$

由於如欲以年度為單位，估算特定年度之補注量等相關分析，則可依據前述所得之單日補注量、流出量與抽水量，進行累加即可求得年抽水量、年補注量與年流出量。同理，如欲計算以場次為單位之水平衡分析，亦可以相同之方式進行累加計算。前述估算方式均是以各地下水觀測站為主體，所得之補注量、抽水量與流出量僅代表該站之資訊。如欲評估整體系統之各項數據，則可在將各站資訊累加，即代表全區之補注量、抽水量與流出量。

另外，對於如僅欲求得全區之補注量，亦可預先將各站之水位歷線資訊，轉換並累加成全區之儲蓄水量(如式 B-12 所示)，其次再直接以全區之儲蓄水量計算各時刻之補注量、抽水量與流出量等資訊。比較前述之逐站計算方式與全區統一計算方式，逐站計算方式除了可以求得全區之資訊外，仍可明確得到各站之空間分佈。逐站計算方式因為直接以各站之儲蓄水量進行計算，因此對於各站水位或儲蓄水量歷線要求較高，各站水位歷線必須能明確找出枯水期之退水曲線。

$$S^t = \sum_{i=1}^N S_i^t \quad \dots \dots \dots \text{ (式 B-12)}$$

影響補注量推估之精確程度，多在於地下水位歷線與雨量歷線資料之收集，目前台灣地區之雨量站分佈涵蓋全台，其分佈稠密度已足夠提供補注量之估算；然而地下水觀測資料，則有賴地下水觀測井網方足以提供，台灣地區僅濁水溪沖積扇、屏東平原與蘭陽平原等地區能提供足夠之觀測密度，因此對於全台補注量之推估上則有不足。

## 修正型地下水位歷線法理論介紹

前述已經提及地下水位歷線法之基礎理論與概念，其以各地下水觀測

井資訊作為系統地下水儲蓄量之推估依據，藉由豐枯水期與降雨後之不同水位變化特性，藉此推估系統抽水量、補注量與流出量三者。也提及計算上可分為逐站計算與全區統一計算兩種方式，如欲以逐站計算方式計算特定水區之補注量與抽水量等，前述計算方式是以該站地下水儲蓄量進行計算，其變化同時受到側向交換量之影響，因此前述計算之流出量即為側向交換量與其他垂向交換量之綜合影響。

本章節將提出修正型地下水水位歷線法，側向交換量則以達西公式估算，藉以釐清其數值。地下水位歷線法需配合徐昇氏多邊形定義地下水觀測井之代表範圍，由於徐昇氏多邊形之特性，相鄰兩觀測井之連線必與多邊形邊線垂直，因此搭配達西公式(Darcy's Law)估算穿越邊線之穿越水量，式 B-13a 與 B-13b 為加入達西定律之連續方程式，其為顯示法型式之連續方程式。其中，式 4.2-1a 適用於非受壓含水層，穿越厚度為水位高程與含水層底床高程之差值，而式 4.2-1b 則適用於受壓含水層，其穿越厚度直接以含水層厚度計算。

$$S_i^t - S_i^{t-1} = \sum_{j=1}^M \left( -\bar{K}_{ij} \frac{h_j^t - h_i^t}{l_{ij}} L_{ij} (\bar{h}_{ij}^t - \bar{b}_{ij}^t) \right) + I_i^{t,t-1} - V_i^{t,t-1} - W_i^{t,t-1} \quad \dots \dots \dots \text{(式 B-13a)}$$

$$S_i^t - S_i^{t-1} = \sum_{j=1}^M \left( -\bar{K}_{ij} \frac{h_j^t - h_i^t}{l_{ij}} L_{ij} (\bar{t}_{ij}^t - \bar{b}_{ij}^t) \right) + I_i^{t,t-1} - V_i^{t,t-1} - W_i^{t,t-1} \quad \dots \dots \dots \text{(式 B-13b)}$$

式中

$S_i^t$ ：代表於時刻  $t$  於第  $i$  口水井蘊藏之地下水蘊藏量( $L^3$ )

$I_i^{t,t-1}$ ：代表於時刻  $t$  與  $t-1$  間的垂向地下水補注量( $L^3$ )

$W_i^{t,t-1}$ ：代表於時刻  $t$  與  $t-1$  間的地下水抽水量( $L^3$ )

$V_i^{t,t-1}$ ：代表於時刻  $t$  與  $t-1$  間的其他垂向交換量。

$\bar{K}_{ij}$ ：代表第  $i$  區塊與第  $j$  區塊之等效透水係數

$h_i^t$ ：代表第  $i$  觀測井於時刻  $t$  之水位

$l_{ij}$ ：代表第  $i$  觀測井與第  $j$  觀測井之距離

$L_{ij}$ ：代表第  $i$  區塊與第  $j$  區塊之邊線長度

$\bar{h}_{ij}^t$ ：第 i 區塊與第 j 區塊之平均水位

$\bar{t}_{ij}$ ：第 i 區塊與第 j 區塊之含水層平均頂部高程

$\bar{b}_{ij}$ ：第 i 區塊與第 j 區塊之含水層平均底部高程

在修正型之估算上，首先仍需由枯水期之退水曲線，進行平均抽水量之估算，在此假設枯水期因長期無降雨，因此並不存在補注量與其他垂向交換量等。此外，在側向交換量上，各站枯水期水位並不一致，依據水往低處流之特性，顯示枯水期中各站與相鄰站間存在側向之交換，從式 B-13a 與 B-13b 所示，平均抽水量可藉由儲蓄改變量扣除側向交換量後計算之。

在單日抽水量、補注量與流出量之估算上，在抽水量之估算上沿用前述之方式給定。而在補注量與流出量之估算公式，因為側向交換量之加入，應由式 B-5 修改為式 B-14a 或 B-14b，並依據不同之降雨情境來估算補注量與流出量。

$$I_i^{t,t-1} - V_i^{t,t-1} = S_i^t - S_i^{t-1} - \sum_{j=1}^M \left( -K_{ij} \frac{h_j^t - h_i^t}{l_{ij}} L_{ij} (\bar{h}_{ij}^t - \bar{b}_{ij}) \right) + W_i^{t,t-1} \quad \dots \dots \dots \text{(式 B-14a)}$$

$$I_i^{t,t-1} - V_i^{t,t-1} = S_i^t - S_i^{t-1} - \sum_{j=1}^M \left( -K_{ij} \frac{h_j^t - h_i^t}{l_{ij}} L_{ij} \bar{B}_{ij} \right) + W_i^{t,t-1} \quad \dots \dots \dots \text{(式 B-14b)}$$