

國立交通大學

土木工程學系

碩士論文

應用條件模擬與分佈型水平衡模式於濁水溪沖積扇地
下水抽水量推估不確定性之研究

**Study of The Estimation Uncertainty of Groundwater
Extraction for Choshuihsi Alluvial Fan Using
Conditional Simulation and Distributed Water
Balance Model**

研究生：蕭仲良

指導教授：張良正博士

中華民國一百零二年

應用條件模擬與分佈型水平衡模式於濁水溪沖積扇地
下水抽水量推估不確定性之研究

**Study of The Estimation Uncertainty of Groundwater
Extraction for Choshuihsi Alluvial Fan Using
Conditional Simulation and Distributed Water
Balance Model**

研究生：蕭仲良 Student : JhongL. Hsiao
指導教授：張良正博士 Advisor : Dr. Liang C. Chang

國立交通大學

土木工程學系

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 2013**

Hsinchu, Taiwan, Republic of China

中華民國一百零二年六月

應用條件模擬與分佈型水平衡模式於濁水溪沖積扇地

下水抽水量推估不確定性之研究

學生：蕭仲良

指導教授：張良正博士

國立交通大學土木工程學系

摘要

地下水抽水量為地下水管理之重要依據，而抽水量之推估一般多藉由數值模擬而得，惟實務上由於水文地質參數如透水係數之不確定，常使抽水量推估亦充滿高度不確定性，以往之相關研究亦已反應出這個問題，而這對相關管理措施的評估亦帶來相當的不便。因此，如何對抽水量推估之不確定，能有進一步的分析與瞭解，乃是地下水管理上重要的課題。

有鑑於此，本研究乃整合條件模擬與本研究自行發展之分佈型水平衡模式，應用蒙地卡羅模擬的理念，對抽水量推估之不確定性進行量化的分析。其中條件模擬乃以地質統計中的半變異元為基礎，合成多組透水係數網格值，並確保每組合成值皆能符合觀測資料之半變異元，而分佈型水平衡模式則可在給定水位及參數下，迅速模擬系統之抽水量。

本研究以濁水溪沖積扇為研究區域，整個模式共有 3 個含水層、2 個阻水層，其中半變異元模型為高斯模型，而相關參數從 F1 至 F3 的 Nugget 分別為 0.391、0、0；Range 則分別為 23778、6400 及 7478 公尺；Sill 則分別為 1.7、2.134 及 2.77。進一步蒙地卡羅模擬分析成果顯示，並將不確定性以 5% 及 95% 的信賴區間作表式，第一含水層之年淨補注量 5% 及 95% 信賴區間為 6.26 億噸與 4.22 億噸之間；第二含水層年抽水量 5% 及 95% 信賴區間為 5.60 億噸與 3.56 億噸；第

三含水層年抽水量 5% 及 95% 信賴區間為 2.68 億噸與 1.18 億噸。平均而言，第一層之淨補注量為 5.15 億噸，第二層及第三層之抽水量分別為 4.56 億噸及 2 億噸。由前述成果可看出將具有相同半變異元的透水係數場輸入至分佈型水平衡模式，確會為區域抽水量之推估帶來相當的不確定性，此可為後續相關管理決策之參考。



Study of The Estimation Uncertainty of Groundwater Extraction for Choshuihsi Alluvial Fan Using Conditional Simulation and Distributed Water Balance Model

Student: Jhong-Liang Hsiao
Chang

Advisor: Dr. Liang-Cheng

Department of Civil Engineering
National Chiao Tung University

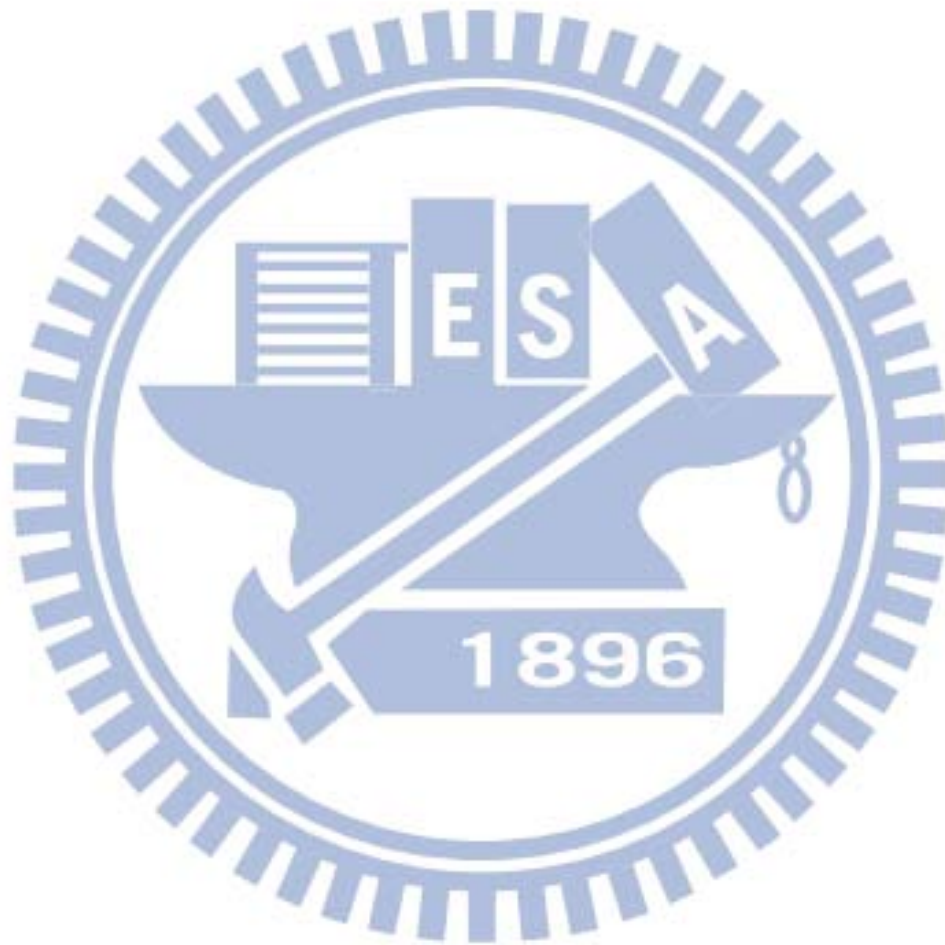
Abstract

Groundwater pumping information is very important information for groundwater management. However, practically, the estimated pumping information is highly uncertain due to uncertainty in hydrogeological parameters such as conductivity coefficient. This uncertainty leads to an important issue of groundwater management.

This study develops a distributed water balance model integrated with groundwater simulation model for simulating the groundwater flow. For the uncertainty of the of the estimated pumping, Monte-Carlo simulation is applied. Multiple grid sets are generated using semivariogram method. With given groundwater level and parameters, the groundwater pumping is estimated.

The proposed method is applied to Choshuihsi River alluvial fan. Three aquifers (F1 to F3) and two aquitards are included in the simulation model. Gaussian distribution is assumed in the semivariogram model. For three aquifers: the values of Nugget are 0.391, 0, and 0; the values of Range are 23778, 6400, and 7478; the values of Sill are 1.7, 2.134, and 2.77. The 5% and 95% confidence interval for three aquifers are: (1) net

recharge of 626 million and 422 million tons of water for F1; (2) net pumping of 560 million and 356 million tons of water for F2;(3) net pumping of 268 million and 118 million tons of water for F3. In average, F1 has net recharge of 515 million tons; F2 has net pumping of 456 million tons; and F3 has 200 million tons, respectively. These results could provide critical information for future groundwater management.



謝誌

感謝吾師張良正教授對於學生不厭其煩的教導學術上的研究及做人處事的道理，也謝謝老師帶我去美國舊金山參加演討會，讓學生大開眼界瞭解了世界是如此的大。謝謝口試委員張誠信教授、蕭金財副教授、葉明生研發工程師、陳宇文博士後研究員細心逐字的看學生寫的文章，並於口試時提供的意見使得論文更加完備，再次謝謝各位先進。

再來謝謝研究室通進同退的各位：第一位當然是從小小碩一就帶我到畢業的陳文哥，仔細的教我怎麼打木頭人直到我如何打倒 BOSS 都在我身旁指導；謝謝彬哥在百忙中，仍抽空指導我研究方法；再來謝謝在研究室的守護神祐誠哥哥，謝謝你陪我拉低賽、解決我在研究室生活的大小問題以及陪我到處去吃吃喝喝還帶我去見識魚缸的世界；也謝謝陪我把夢遺留在舊金山的弼舜、一起睡覺寫報告的小瑜及去過很多國家的天龍人深惠，雖然你們都先我一步畢業了，讓我不甚感傷…但也謝謝你們分享你們進入社會後的探險經驗，也讓還在溫室的我提前有了心理準備，使我覺得外面的社會充滿了挑戰。再來就是謝謝學弟妹們：已經有女兒的勺勺、常常陪我去健身房的呱呱、低調的國陞、熱情的鎧榮、愛裝可愛的小又、永遠遲到的海倫、很有想法的奕漳、LOL 王中之王的瀚文、超會記筆記的曉雲、愛打籃球的韋炫，謝謝你們陪我在研究室嘻嘻哈哈及殺殺的時光。另外謝謝地下水研究團隊的助理：人皇仁君、逸儒、雲直、逸美、怡萱幫我處理各種行政及計劃的問題。

最後謝謝我偉大的爸爸、媽媽不論是在金錢上的支持，並在孩兒苦悶的時候給予電話上的問候及加油打氣，讓我能完成這項偉大的工

程，再來感謝世界上與我相處時光最久的哥哥，儘管工作辛苦仍不忘與我相聚，在客廳裡跟我一起打屁、看電影及分享工作上的經驗，減輕我的壓力讓我得以順利取得碩士學位。



目錄

摘要.....	I
ABSTRACT	III
謝誌.....	V
目錄.....	VII
圖目錄.....	IX
表目錄.....	XII
第一章 前言.....	1
1.1 研究動機與目的.....	1
1.2 研究流程.....	2
第二章 文獻回顧.....	5
2.1 地質統計相關文獻.....	5
2.2 濁水溪補注量推估.....	6
第三章 理論方法與工具.....	10
3.1 地質統計理論.....	10
3.1.1 半變異元理論.....	10
3.1.2 條件模擬與 SASIM 模式.....	13
3.2 地下水分佈型水平衡模式.....	16
第四章 地下水分佈型水平衡模式案例驗證.....	22
4.1 案例概述.....	23
4.2 案例驗證.....	28

第五章 結合 SASIM 與地下水分佈型水平衡模式於濁水溪沖積扇抽水量推估之應用	31
5.1 研究區域概述	31
5.2 透水係數之半變異元分析與 SASIM 條件模擬	38
5.2.1 透水係數半變異元高斯模型建立	39
5.2.2 條件模擬結果分析	41
5.2.3 合成透水係數與其變異數空間分布	47
5.3 濁水溪沖積扇地下水分佈型水平衡模式建置與分析	53
5.3.1 抽水量與其變異數空間分佈	53
5.3.2 抽水量統計分析	58
第六章 結論與建議	61
6.1 結論	61
6.2 建議	62
參考文獻	63

圖目錄

圖 1.2-1 研究流程圖	4
圖 3.1-1 球形模型、指數模型與高斯模型示意圖	13
圖 3.1-2 波茲曼機率分布示意圖	16
圖 3.2-1 濁水溪沖積扇模式 F1 之格網與邊界條件.....	18
圖 3.2-2 濁水溪沖積扇模式 F2 及 F3 之格網與邊界條件	19
圖 3.2-3 地下水流系統控制體積	20
圖 3.2-4 MODFLOW 垂向體積流率示意圖	21
圖 3.2-5 分佈型水平衡模式垂向體積流率示意圖	21
圖 4.1 地下水水平衡模式驗證流程圖	22
圖 4.1-1 MODFLOW 概念分層	23
圖 4.1-2 第一分層分區與邊界及 K 值(公尺/每天)配置圖	24
圖 4.1-3 第二與第四分層分區與邊界及 K 值(公尺/每天)配置圖	25
圖 4.1-4 第三分層分區與邊界及 K 值(公尺/每天)配置圖	25
圖 4.1-5 第五分層分區與邊界及 K 值(公尺/每天)配置圖	26
圖 4.1-6 MODFLOW 之 F1 模擬水位(公尺)	27
圖 4.1-7 MODFLOW 之 F2 模擬水位(公尺)	27
圖 4.1-8 MODFLOW 之 F3 模擬水位(公尺)	28
圖 4.2-1 水平衡模式簡例之概念分層	29

圖 5.1-1 濁水溪海園-石榴水文地質剖面圖.....	33
圖 5.1-2 濁水溪沖積扇地下水觀測網站井分布圖.....	34
圖 5.2-1 F1 半變異元分析.....	39
圖 5.2-2 F2 半變異元分析.....	40
圖 5.2-3 F3 半變異元分析.....	40
圖 5.2-4 F1 模擬透水係數的半變異元圖形.....	43
圖 5.2-5 F2 模擬透水係數的半變異元圖形.....	43
圖 5.2-6 F3 模擬透水係數的半變異元圖形.....	44
圖 5.2-7 F1 模擬透水係數場之組體圖.....	44
圖 5.2-8 F2 模擬透水係數場之組體圖.....	45
圖 5.2-9 F3 模擬透水係數場之組體圖.....	45
圖 5.2-10 F1 模擬透水係數之濁水溪沖積扇區域組體圖.....	46
圖 5.2-11 F2 模擬透水係數之濁水溪沖積扇區域組體圖.....	46
圖 5.2-12 F3 模擬透水係數之濁水溪沖積扇區域組體圖.....	47
圖 5.2-13 F1 條件模擬透水係數標準偏差分布圖.....	49
圖 5.2-14 F2 條件模擬透水係數標準偏差分布圖.....	50
圖 5.2-15 F3 條件模擬透水係數標準偏差分布圖.....	50
圖 5.2-16 F1 模擬透水係數場 100 組平均空間分布.....	51
圖 5.2-17 F2 模擬透水係數場 100 組平均之空間分布.....	51
圖 5.2-18 F3 模擬透水係數場 100 組平均之空間分布.....	52
圖 5.3-1 淺層淨抽水量示意圖.....	53

圖 5.3-2 深層抽水量示意圖	53
圖 5.3-3 F1 淨抽水量之空間分佈	54
圖 5.3-4 F2 抽水量之空間分佈	55
圖 5.3-5 F3 抽水量之空間分佈	55
圖 5.3-6 F1 之抽水量之變異圖	56
圖 5.3-7 F2 之抽水量之變異圖	57
圖 5.3-8 F3 之抽水量之變異圖	57
圖 5.3-9 F1 淨抽水量之組體圖	59
圖 5.3-10 F2 抽水量之組體圖	59
圖 5.3-11 F3 抽水量之組體圖	60



表目錄

表 2.1 濁水溪沖積扇淨補注量及抽水量相關研究比較.....	8
表 4.1-1 各分區之 MODFLOW 抽水量	26
表 4.2-1 第一含水層檢定結果.....	29
表 4.2-2 第二含水層檢定結果.....	30
表 4.2-3 第三含水層檢定結果.....	30
表 5.1-1 F1 之觀測資料.....	35
表 5.1-2 F2 之觀測資料.....	36
表 5.1-3 F3 之觀測資料.....	37
表 5.2-1 各含水層之半變異元參數.....	41
表 5.2-2 組體圖誤差比較	42
表 5.2-2 100 組透水係數之統計分析	49
表 5.3-1 某一組各分層之總抽水量.....	54
表 5.3-2 1000 組各層抽水量之平均及標準差.....	58

第一章 前言

1.1 研究動機與目的

台灣雨量豐沛，約為世界平均值之 2.6 倍，但因地狹人稠，每人每年所分配可用水量僅世界平均值之七分之一，且雨量在時間及空間上之分佈極不均勻，五月至十月之累積雨量即佔全年累積雨量之 78%，其餘六個月為枯水期，累積雨量僅有 22%。再加上河川坡陡流急與腹地狹隘等，逕流量被攔蓄利用的僅有 177.54 億立方公尺，約佔年總逕流量之 18%，其餘均奔流入海。再加上近年度經濟發展蓬勃造成需水量大增，與氣候變遷造成之水文不確定性，因此僅依靠地表水資源，難以滿足急遽增加之需水量。幸而台灣除了地表水資源外，尚蘊含豐富之地下水資源，地下水使用量約佔總用水量 34%，倘若能善用地下水資源將可減緩台灣枯水期地表水資源之供水負擔，因此如何有效的運用與管理地下水是一門重要的課題。

為了有效的運用與管理地下水資源，地下水資源之補注量與抽水量為管理上重要的依據，而水文地質參數之不確定性將影響補注量與抽水量等地下水資訊推估之正確性。水文地質參數之調查來源主要藉由觀測井之鑽鑿與抽水試驗所得，受到鑽井成本之影響，觀測井數量與分布有其極限，因此對於具有高度異質性之現地問題而言，有限試驗資料傳統往往必須以內插等方法推估整個研究區域之參數分布。

傳統內插方法雖然可以快速的產生單組資料但缺乏可能變動性之探討；而條件模擬不但可以重新產生多組與資料半變異元相同之現地參數空間分佈且不改變已知值。本條件模擬軟體為用來自 GSLIB 開發的程式 SASIM 模擬出相同半變異元下的透水係數場。

條件模擬是以觀測資料之半變異元為前提，合成資料之半變異元

需符合觀測資料之半變異元，可提供大量之水文地質合成參數。除此之外，條件模擬之合成成果，亦可作為參數不確定性分析之依據。

在地下水管理中，地下水補注量與抽水量為重要的管理依據，而水文地質參數之不確定性強烈影響補注量與抽水量推估之正確性。為模擬上方便起見與計算量之考量，過去多半搭配研究者之主觀判斷與假設，決定單一組或少數組之水文地質參數，以進行後續補注量與抽水量之推估，因此前述研究者之主觀判斷與假設，可能對後續補注量與抽水量推估引入不確定性。為避免研究者主觀判斷與假設造成的不確定性，以條件模擬合成之多組參數，搭配水平衡模式推估不同參數下的淨補注量，可客觀地評估模式淨補注量的不確定性。

濁水溪沖積扇是台灣重要的地下水資源之一，雖然此區地下水資源補注豐沛，但仍然因當地社會經濟發展的關係使得濁水溪沖積扇大量用水均取於地下水源，部分區已有超抽地下水而造成地層下陷，故濁水溪沖積扇之地下水資源管理顯得格外重要。其次，濁水溪沖積扇已建置了完善的觀測井網，並記錄了十年以上詳盡的水位資料，因此就資料的完整度與密度而言，該地下水區乃全國之冠。

有鑑於此，本研究將利用 SASIM 建立多組濁水溪沖積扇不同分層之透水係數場，並利用分佈型水平衡模式推估不同透水係數下之淨補注量，藉此分析透水係數與淨補注量之不確定性。

1.2 研究流程

本研究之研究步驟如圖 1-1 所示，首先針對研究區域濁水溪沖積扇收集相關資料，包括濁水溪沖積扇各觀測站之地下水位、透水係數及地下水分層架構……等資料。

第二階段可分為地下水位場及透水係數場之建置兩個部分。在地

下水水位場建置的部分，參考了王雲直於 2010 年的「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」，以參數檢定之地下水模式(MODFLOW)，提供穩態模擬水位場，資料形式為網格化之水位，本研究使用此水位場並假設為真值水位；在透水係數場之建置方面，首先依據觀測透水係數建立半變異元模型；其次再以此半變異元模型合成大量相同變異元特性之透水係數場。

第三階段為建置分佈型水平衡模式，結合前述之地下水位場與透水係數場，以達西公式與質量守恆方程式推估不同參數下之淨補注量。第四階段，使用平均、標準偏差及超越機率.....等方法來分析不同的抽水量分析，來綜合呈現透水係數與抽水量之不確定性。



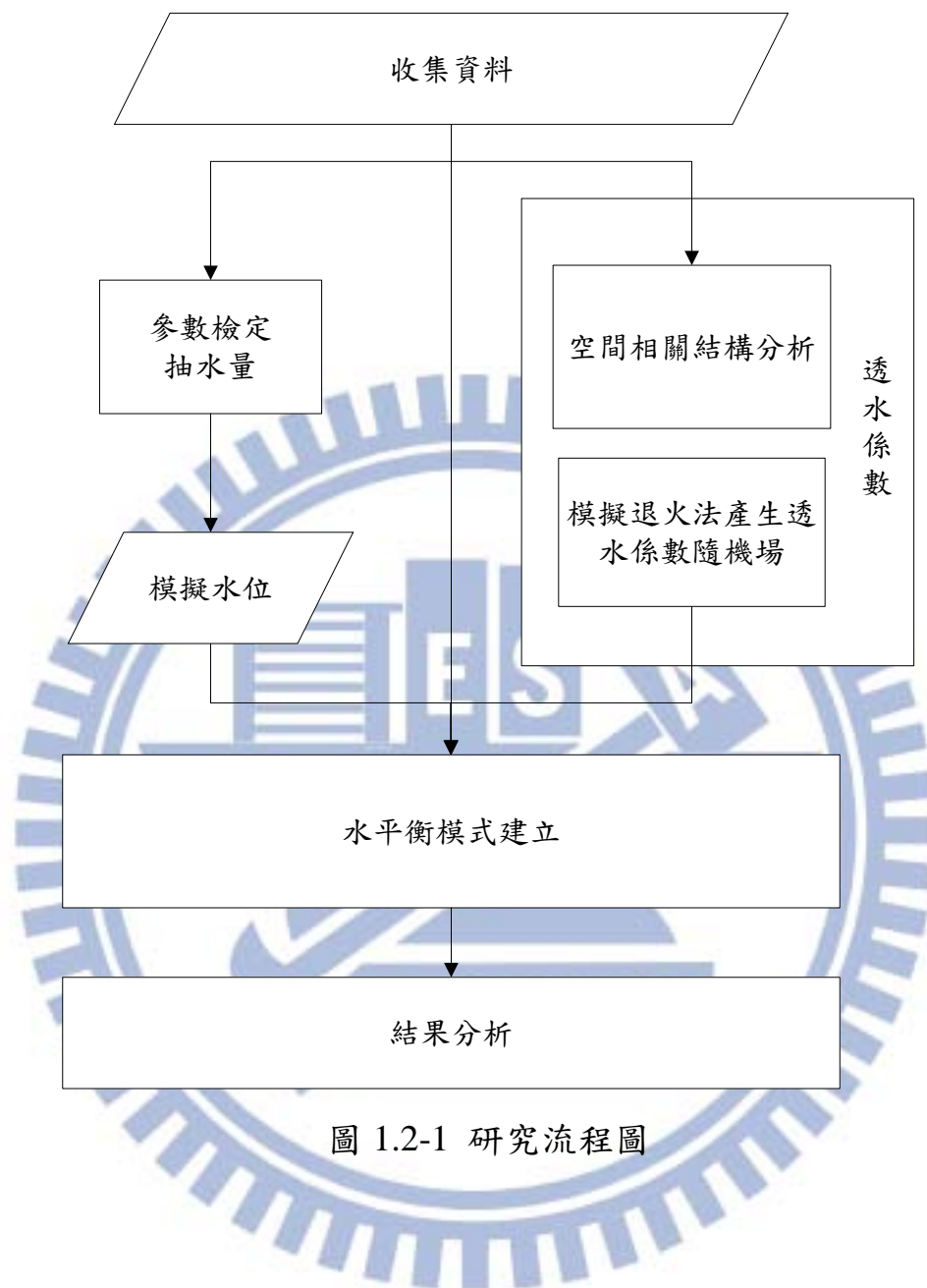


圖 1.2-1 研究流程圖

第二章 文獻回顧

本研究是以應用地質統計理論中的條件模擬，建立與合成濁水溪沖積扇之透水係數場，並藉由合成資料來進行現地淨補注量之模擬。此章節主要分為兩個部分，第一部分為地質統計相關文獻；第二部分則是針對濁水溪沖積扇補注量推估之相關研究。

2.1 地質統計相關文獻

地質統計理論早在 50 年代已使用於礦區開採作業中，但遲至 1963 年才由法國地質統計學家馬特隆(G. Matheron)完備其數學理論 (Matheron,1963)，屬於最近五十多年才發展而成的學門。

本研究使用地質統計中作為分析水文地質資料的工具。地質統計使用變異元(Variogram)分析空間分佈結構，選擇適當的克利金(Kriging)或是模擬(Simulation)方法進行研究區域內的資料內插估計或可能之分佈。地質統計學原是為了解決礦山開拓時礦物存量的估算和誤差的估計，現今地質統計學廣泛應用於多個方面，如資源探勘、地表水文、地下水文、環境工程及地球科學。

克利金相關文獻眾多在國外的研究中，Avoufirassi and Marino (1984)以克利金法作為內插工具分析含水層水文地質參數。Warrick (1986)用克利金法來探討土壤物理性質於空間分佈之變異研究。國內研究約於1992年開始利用克利金家族進行相關之研究，如蘇惠珍與張良正(1992)、潘禎哲與張良正(1994)、邱怡芬與張良正(1997)及許文鴻和張良正(2004)都將克利金應用在地下水觀測網的設計規劃、莊凱瑋與蕭朱杏(2001)運用克利金探討公共衛生之區域關聯性、黃信彰與徐國錦(2002)使用指標克利金建構水文地質場。

而在 Deutsch and Journel 於 1991 及 1992 年提出使用模擬退火技巧，並配合地質統計中的半變異元產生隨機場的詳細步驟，後續也有學者根據此方法進一步應用於產生透水係數場。如劉易聰與葉弘德(2005)應用此方法來產生多組透水係數場並進一步分析模擬污染物傳輸。而番成正與徐國錦(2004)分別比較退火模擬及逐步高斯法兩種方法於隨機場的空間分佈特徵，結果顯示退火模擬較能掌握現地的統計資訊。Bettinger 等人(2002)比較演算法多種演算法(模擬退火、禁忌搜尋法、遺傳演算法及遺傳演算法加上禁忌)應用於求解空間上的森林規劃，結果顯示退火模擬在設計案例中有較佳的解。林裕斌等人(2001)使用一般克力金(Ordinary Kriging)與退火模擬來產生北港溪的導水係數(Transmissivity)研究結果顯示在考量全區統計特性及空間分布的特性下，退火模擬會有較良好的解。所以本研究在此以退火模擬的方法來進行後續相關研究。

地質統計應用的範圍廣泛其中在模擬退火演算法中顯示之空間分佈較能掌握現地的半變異元。故在進行現地分析時，本研究將以退火模擬進行空間隨機場的產生。

2.2 濁水溪補注量推估

而關於濁水溪沖積扇之相關地下水收支研究甚多，以下是各種研究方法所估計得到濁水溪沖積扇歷年來之地下水抽水量，並整理於表 2.1。劉聰桂(1996)利用熱核爆氙示蹤方法評估地下水抽水量；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，評估地下水抽水量；台灣大學土木工程研究所(1997)、台灣大學水工試驗所(1998)以溼地及早地入滲串聯未飽和一維垂向地下水流模式評估地下水抽水量；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流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(2011)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 年間之平均抽水量；上述各種研究估得濁水溪沖積扇歷年來之地下水抽水量在 6.6 億到 23.1 億之間，而淨抽水量在 2.13 億至 23.12 億之間。

其中可發現前人研究常常推估濁水溪沖積扇的淨補注量但甚少有討論到淨補注量的不確定性，所以本研究想藉由地質統計的模擬方法，大量產生出透水係數模擬資料，並能將透水係數的模擬資料的快速計算出淨補抽水量，所以才開發出本研究中的地下水分佈型水平衡模式。最後則能藉由此透水係數的不確定推得淨補注量的不確定性。

表 2.1 濁水溪沖積扇淨補注量及抽水量相關研究比較(資料來源：
經濟部水利署)

方法	估算人	範圍/面積	淨補注量	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
碳十四定年與氙示蹤	劉聰桂(1996)	濁水溪沖積扇/約1800平方公里	9 億噸/年	-
現場調查	水資會(1992)	濁水溪沖積扇/約1800平方公里	-	21.02 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	張誠信、劉振宇(1996)/國科會	雲林/約1120平方公里	4.88 億噸/年	6.6 億噸/年
MODFLOW 數值模擬	姜儷安、歐陽湘(1996)	雲林地區/約1120平方公里	4.66 億噸/年	-
MODFLOW 數值模擬	交通大學(1997)	雲林/約1120平方公里	5.32 億噸/年	-
MODFLOW 數值模擬	葉文工(1998)	濁水溪沖積扇/約1800平方公里	8.97 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	8.07 億噸/年	11.12 億噸/年
MODFLOW 數值模擬(未考慮邊界入流補注)	中興工程(1998)	濁水溪沖積扇/2000.5平方公里	8.18 億噸/年	8~9 億噸/年
MODFLOW 數值模擬(未考慮邊界入流補注)	中興工程(2001)/水利署	濁水溪沖積扇/2000.5平方公里	8.5 億噸/年	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	22.6 億噸/年	23.1 億噸/年
現場調查法	嘉義農專(1991)	濁水溪沖積扇/約1800平方公里	11.4 億噸/年	-
水平衡法	陳進發(1997)	彰化/約830平方公里	4.43 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 1800 平方公里	-	14.1 億 噸/年
非飽和一維長期水文 模式(未考慮邊界入流 補注、旱作灌溉補注)	李天浩等(1997a)	濁水溪沖積扇扇頂 /約 285 平方公里	2.13 億噸/ 年(1995) /3.04 億噸/ 年(1996)	-
水平衡法	中興工程(1998)	濁水溪沖積扇/約 1800 平方公里	5.25 億噸/ 年	7.44 億 噸/年
非飽和一維長期水文 模式(未考慮邊界入流 補注、旱作灌溉補注)	劉振宇等(1998)	濁水溪沖積扇扇央 及扇尾/約 1515 平 方公里	9.3 億噸/年 (1995) /8.9 億噸/ 年(1996)	-
一維垂向水平衡法(未 考慮邊界流入補注、旱 作灌溉補注)	能邦科技(2000)	濁水溪沖積扇 /2697 平方公里	12.55~14.29 億噸/年	-
消退曲線位移法	陳尉平、李振誥等 (1999)	濁水溪流域(濁水 溪沖積扇)	19.4 億噸/ 年(10.5 億 噸/年)	13.32 億 噸/年
基流資料估計法	陳尉平、李振誥等 (2000)	濁水溪流域(濁水 溪沖積扇)	17.13 億噸/ 年(9.3 億噸 /年)	-
地下水歷線分析法(未 考慮未降雨時期之邊 界入流補注和灌溉補 注)	江崇榮等(2006)	濁水溪沖積扇 /2079 平方公里	12.95 億噸/ 年	-
用電量分析	雲科大(2008) /水利 署	濁水溪沖積扇 /1800 平方公里	-	20.90 億 噸/年
地下水歷線分析法(同 時考慮降雨補注、河水 補注、邊界入流補注和 灌溉補注)	台灣大學(2011)/經 濟部水利署	濁水溪沖積扇 /2562 平方公里	23.12 億噸/ 年	22.28 億 噸/年

第三章 理論方法與工具

本研究是以應用地質統計理論中的條件模擬，建立與合成濁水溪沖積扇之透水係數場，並藉由合成資料來進行現地淨補注量之模擬。所以首先在 3.1 節中會介紹地質統計理論，其中包含 3.1.1 小節之半變異元理論及 3.1.2 小節之條件模擬與 SASIM 模式；再來，在 3.2 節介紹地下水分佈型水平衡模式，分別說明如下：

3.1 地質統計理論

3.1.1 半變異元理論

地質統計學以空間隨機變數函數 $Z(X)$ ，代表任何與地質特性有關之參數，稱為區域性變數(Regionalized Variables，以下簡稱 Re.V.)，其中 $X=(x,y,z)$ 代表點所在之空間位置。一般而言，區域性變數(Re.V.)所呈現的兩大特質可歸納如下：

1. 隨機性(Randomness)

即在所分析區域中任一點值，皆具不確定性。

2. 結構性(Structure)

對任意研究區域而言，區域性變數(Re.V.)除具有上述的隨機性，同時具有某種統計上的結構性，如區域性變數(Re.V.)於空間上可能具有某種趨勢(trend)，又稱為空間傾向值(Drift)；或區域性變數(Re.V.)於不同位置的觀測值之間亦可能具有某種程度的相關性(correlation)。在區域性變數理論中則以半變異元(Semi-variogram)做為此相關性之量化表示式。

半變異元亦稱為半變異數(semi-variance)，其可以區域性變數(Re.V.)沿特定方向，但不同位置間之隨機函數，或其殘數值(residual)之差的變異程度來表示，其定義如下：

$$\gamma(h) = \frac{1}{2} [\text{Var}(Z(x) - Z(x+h))] \dots\dots\dots (式 3.1-1)$$

其中，h 為相依兩點間之分離向量；應用於二維場域且定義域面積為 S 之平面 A 上，其半變異元可表示為：

$$\gamma(h) = \frac{1}{2S} \int_S [Z(x) - Z(x+h)]^2 \dots\dots\dots (式 3.1-2)$$

若區域性變數(Re.V.)具等向性(isotropic)，則 h 為任兩點之分離距離。一般傳統所指的等向性是指空間上任一點的參數於任何方向其參數皆相同，如透水係數(K)在垂直及水平方向的透水能力相同。而在區域性變數理論中的等向性是指其半變異元只跟空間上兩點間之距離有關，與方向無關，即空間上任兩點之相關性僅與兩點距離有關。本研究假設區域性變數(Re.V.)為等向性。

假設區域性變數(Re.V.)符合穩定(stationary)，亦即區域性變數(Re.V.)之平均值為常數，則半變異元可由下式估算[Journel,1984]。

$$\gamma(h) = \frac{1}{2n} \sum_{i=1}^n [Z(x) - Z(x+h)]^2 \dots\dots\dots (式 3.1-3)$$

其中，x代表空間上的座標，h代表間距，n 為在特定間距 h 內，任意兩樣本點的組合配對數(Pairs)。半變異元可代表在不同間距下，區域性變數的變異數之半。

藉由式 3.1-3 搭配觀測資料，可建立研究區域之半變異元，其半變異元圖往往由少數幾組離散數據組成。一般往往會以迴歸法或人工觀察的方式，建立半變異元模型，以取代前述離散的數據。圖 3.1-1 中為三種半變異元模型，半變異元模型中由三個參數所組成，說明如下：

1. 基值(Sill)：

在 h 對 $\gamma(h)$ 關係圖中，當間距(h)越遠，則 $\gamma(h)$ 漸增且收斂至一定值(C)，則此 C 稱之為基值

2. 影響範圍(Range)：

在 h 對 $\gamma(h)$ 關係圖中，半變異元 $\gamma(h)$ 會隨著間距(h)的增大而變大，在一定範圍之後將會趨近於基值，該範圍就稱為影響範圍。影響範圍內的資料具有空間相異性，但在影響範圍外的資料會互相獨立。

3. 金塊效應(Nugget Effect)：

當間距(h)為 0 時，理論上變異數應等於 0，亦即 $\gamma(0)$ 為 0，但實際上常發生 $\gamma(0)$ 不等於 0 的狀況發生，即稱為金塊效應。發生原因可能是參數量測誤差，或在非常小的距離之內即有相當大小之變異，而觀測點位置較疏，導致彼此間距離較大，無法顯現極小範圍內之變異狀況。

一般而言，以下列三種模型為最常見之半變異元模型，其分別為：

指數模型(Exponential Model)：

$$\gamma(h) = C_0 + sill \left[1 - \exp\left(\frac{-h}{Range}\right) \right] \dots\dots\dots (式 3.1-4)$$

高斯模型(Gaussian Model)

$$\gamma(h) = C_0 + Sill \left\{ 1 - \exp\left[-3\left(\frac{h}{Range}\right)^2\right] \right\} \dots\dots\dots (式 3.1-5)$$

球形模型(Spherical Model)

$$\gamma(h) = C_0 + Sill \left[\frac{3}{2}\left(\frac{h}{Range}\right) - \frac{1}{2}\left(\frac{h}{Range}\right)^3 \right] \dots\dots\dots (式 3.1-6)$$

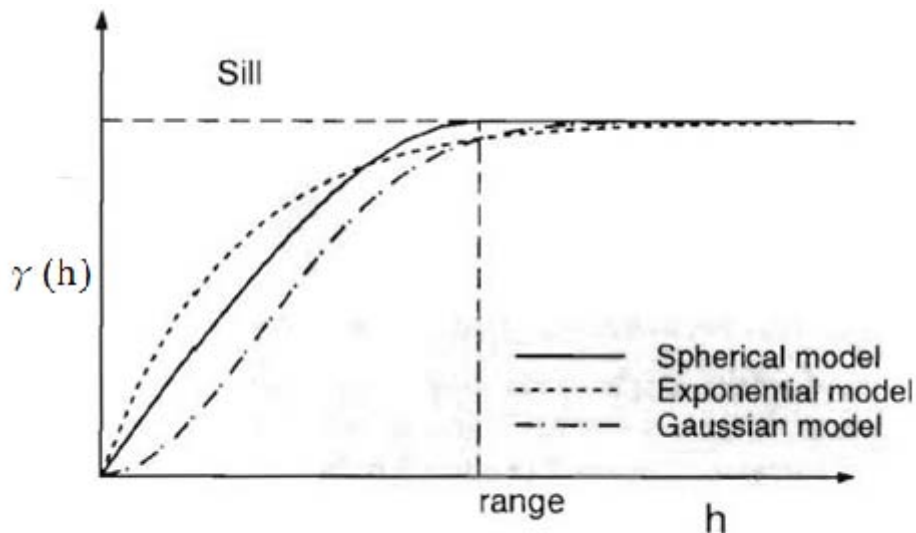


圖 3.1-1 球形模型、指數模型與高斯模型示意圖

3.1.2 條件模擬與 SASIM 模式

模擬在地質統計學裡有其特殊的意義，研究對象為區域化的變數，具有隨機性。由於成本上與實務上的考量，採樣點不可能無限制地遍佈整個研究區域，傳統上常常藉由克利金內插法滿足無採樣點位置參數的需求，但是克利金內插法提供之資料，為統計上最可能發生之情況，使得推估結果在空間上顯得相對平滑，而在觀測點與點之間，無法呈現細部的隨機性。而地質統計學的模擬，則是著重於產生與觀測資料統計性相符之現地參數空間分布場。傳統上可分為非條件模擬與條件模擬兩種，詳述如下：

1. 非條件模擬：

傳統統計模擬僅需滿足觀測資料之統計特性，在地質統計領域中，推估參數除需具備隨機性外，亦需滿足其相關性。傳統上，非條件模擬之資料點，需滿足共變函數與共差函數的空間相關性。

2. 條件模擬：

與非條件模擬相比，最大不同在於，條件模擬可減少真實世界不

可能發生的模擬案例，使得模擬成果更為接近現實環境。

本研究屬於條件模擬並使用退火演算法來產生大量資料，本研究使用 SASIM 程式。SASIM 為 GSLIB (Deutsch and Journel, 1992)所開發之條件模擬程式，且是以模擬退火演算法(Simulated Annealing)所建立，GSLIB 為 Geostatistical Software Library 之縮寫，其實作大量地質統計方面之相關函式。以下將介紹退火演算法的由來及概念：

退火演算法：

退火演算法又可稱為模擬退火演算法，屬於最常見啟發式演算法之一，最早是 S. Kirkpatrick, C. D. Gelatt 與 M. P. Vecchi 等人在 1983 年所發明。「退火」是屬於冶金學中的專有名詞，是將金屬材料加熱後經由特定速率冷卻，可以增大晶粒的體積，並且減少晶格中的缺陷。在冶金學中，如果將金屬緩慢冷卻，其金屬結構能緩慢地變換為最小能量之分子構型；反之，若將金屬急速冷卻，則無法達至最小能量之分子構型。因此透過緩慢退火與淬火過程，將可獲得其最低能量狀態，數學家則利用前述之退火與淬火之物理現象，發展出退火演算法。

實際退火過程是應用高溫熔化金屬或是玻璃，然後慢慢冷卻這物質，最後會變換為低能量之穩定狀態。在這過程中，任何溫度(T)之下，物質中的分子構型能量是不斷地上下起伏波動的，但是其長期趨勢是向下減低的，這些改變是隨機變化的。但是在同樣之溫度下，能量向上躍升之機率則與波茲曼機率呈正比。

由其概念可知，退火演算法是應用溫度來調整接受較差結果的機率，藉由反覆的進行求解，直至達到均衡的狀態。因此，當某一溫度下之均衡狀態達成後，溫度將降至下一階段，反覆重複以上的流程，直到溫度達到結束溫度時，演算方為結束。

退火演算法在演算過程中，若搜尋到較佳之鄰近解，則予以接受；

反之，若搜尋到較差之鄰近解，被接受與否為某一機率，因此本演算法具有跳脫局部最佳解，進而求取全域最佳解之可能性。

在退火演算法中，促使跳脫局部最佳解進而求得全域最佳解之機制，係其可以接受較差之鄰近解。然而，若無限制之接受較差之鄰近解，則與隨機搜尋法一致，其演算效率較差。因此本演算法則以波茲曼(Boltzmann)機率作為接受與否之判斷。由圖 3.1-2 所示，在同樣之能量降低量下，當溫度較高時，其接受較差解的機率較大，隨著溫度降低後，其接受較差解的機率則隨之變小。波茲曼機率分布函數由式 3.1-7 所示，其中 ΔS 為變化前後之能量(熵, entropy)差值，K 代表波茲曼常數，T 則是當時溫度。

實際分子模擬問題中，波茲曼常數有其實際意義，其數值亦可由教科書查得，不可隨便給定。然而若以模仿退火行為，來作為最佳化問題之求解，則可依據問題型態而有不同之給予值。可依據所選定之初始溫度與可接受之能量差值，以 3.1-8 式來推求，C 為常數，一般建議為 0.5(亦有部分說法為 0.999)。

$$P_b = e^{-\Delta S / KT} \dots\dots\dots(式 3.1-7)$$

$$K \leq \frac{-\Delta S_{limit}}{T_0 \ln(C)} \dots\dots\dots(式 3.1-8)$$

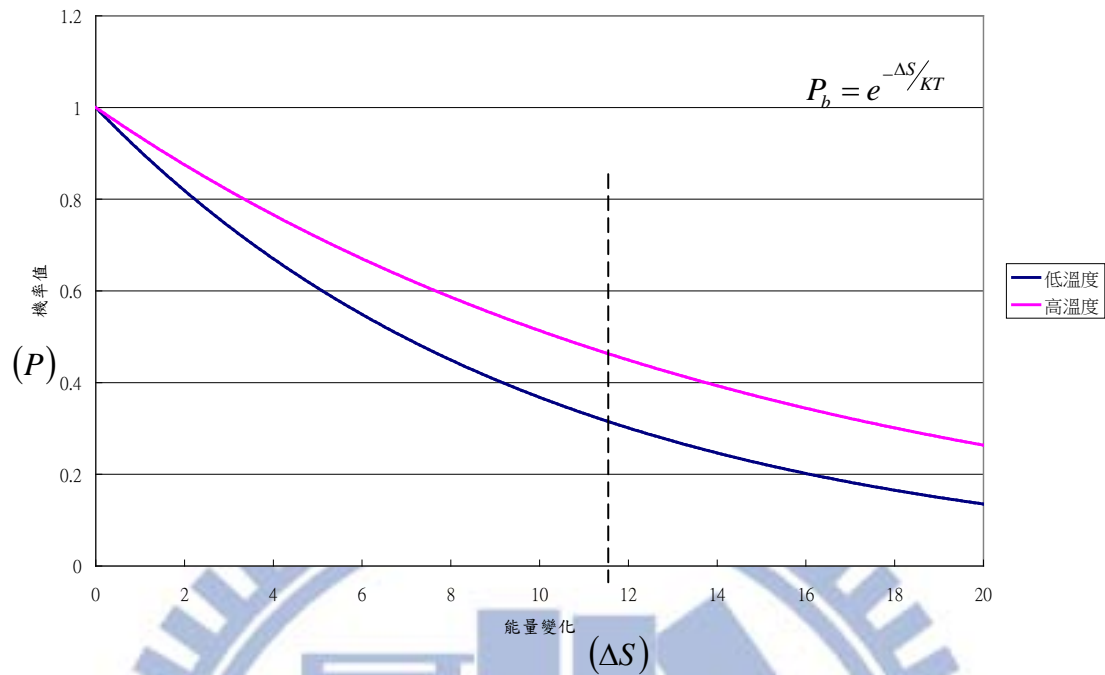


圖 3.1-2 波茲曼機率分布示意圖

3.2 地下水分佈型水平衡模式

本研究自行開發一地下水穩態模式，主要是想藉由在相同地下水位的情況下，計算出多組透水係數不確定性所對應出抽水量的不確定性。而本模式是給予水位及相關地質參數，並快速切換不同透水係數場，最後模擬出抽水量。若使用傳統地下水模式則是給予抽水量、相關地質參數及透水係數，最後得到模擬水位，但此模擬水位又不會完全等於觀測水位需要加入參數檢定的技巧才能使得模擬水位趨近於觀測水位，而且在參數檢定時會耗費較多時間，若又再分析更多組透水係數則會耗費更多時間，所以本研究才開發此分布型地下水模式。

而在本模式中的參數將細分為參數設定、邊界條件及模式理論並接著介紹：

在參數設定方面，本模式會先給定一初始水位、多組的透水係數場及地質架構。在初始水位的部分，本研究使用王雲直(2010)的專家

系統檢定方式得到穩態模式中的水位來當作初始水位，並假設此水位為該系統之真值；透水係數場則是由退火模擬模擬出多組透水係數場，其中模擬透水係數場的半變異元均符合現地觀測資料透水係數的半變異元；最後在地質架構上，本模式將給予網格的大小與數目及含水層的層數，在案例中本模式分成三層含水層各層皆給予頂層及底層的高程參數資料其他資訊將在實際案例詳細敘述。

在邊界條件上，本模式主要目的是由水位模擬出抽水量且為穩態模擬。基於穩態的條件下，水位從開始至模擬結束均不會改變，此現象相當於定水頭的條件，如圖 3.2-1 及圖 3.2-2 中白色區域。在濁水溪案例模擬中，在 F1 的西側沿海處有定水頭邊界條件且高程設定為 0 公尺與海平面相同，如圖 3.2-1 中的藍色網格所示；而在較深層的 F2 及 F3 層中的西側並無定水頭邊界條件，且因地質結構的關係將模擬區域往外海延伸 5 公里，如圖 3.2-2 所示。而圖 3.2-1 及圖 3.2-2 中灰色網格表示為零流量(no flow)。

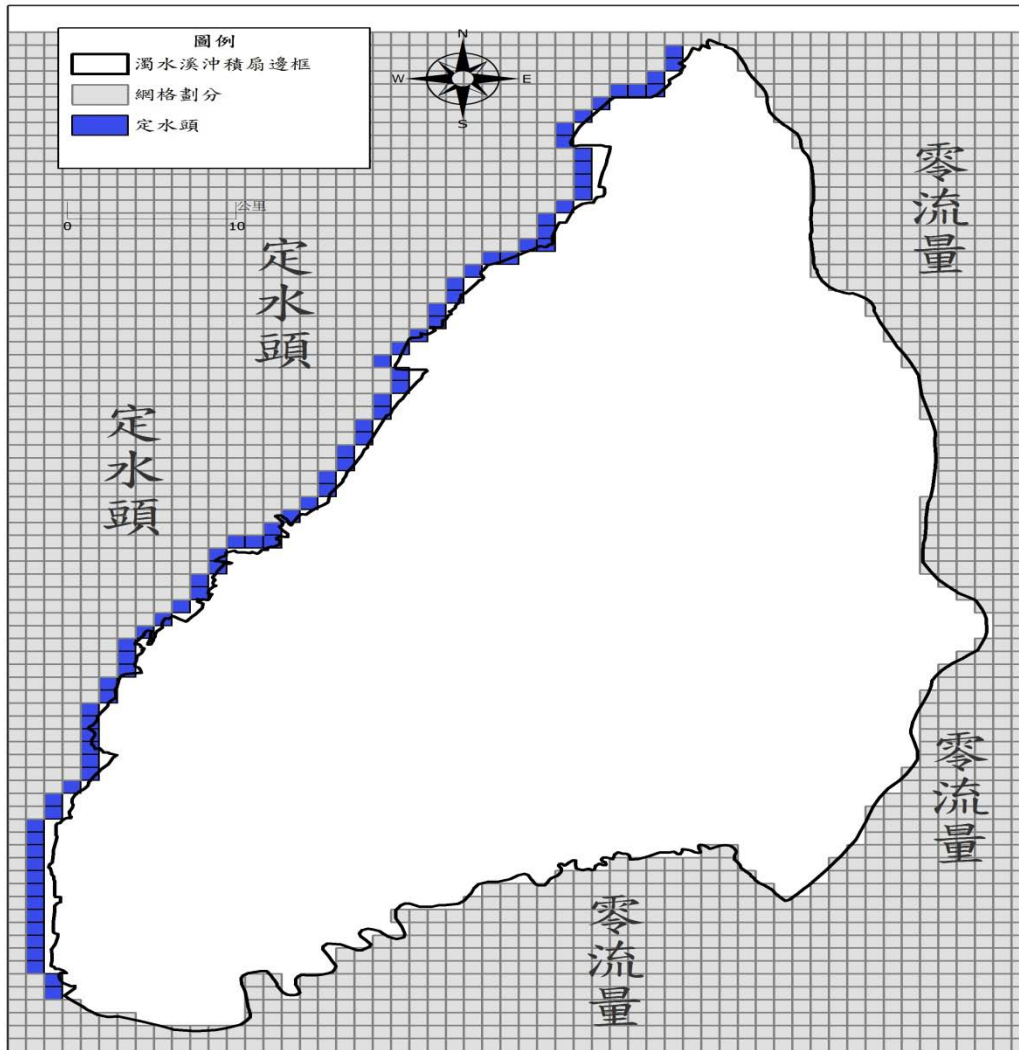


圖 3.2-1 濁水溪沖積扇模式 F1 之格網與邊界條件

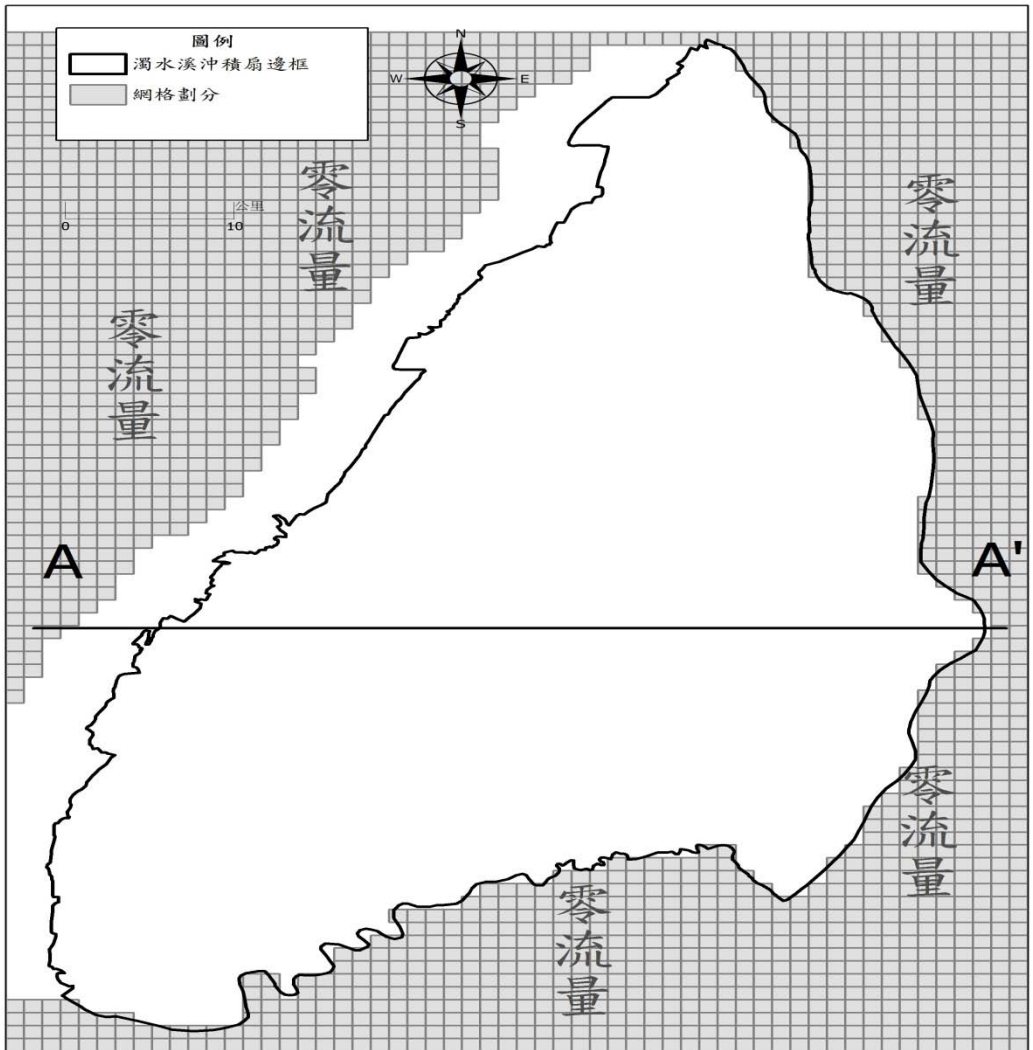


圖 3.2-2 濁水溪沖積扇模式 F2 及 F3 之格網與邊界條件

在模是理論方面上，達西公式為地下水流動最重要的公式，如式 3.2-1 所示，其以兩點間的水頭高程梯度，乘上多孔介質的透水係數，即可表達水流流動之速度。

$$V = -KI = -K \frac{\partial h}{\partial s} \dots\dots\dots (3.2-1)$$

其中，V 為地下水平均流速(m/day)，K 為透水係數(m/day)，I 為水力梯度，h 為水頭高程，s 為水平位置。

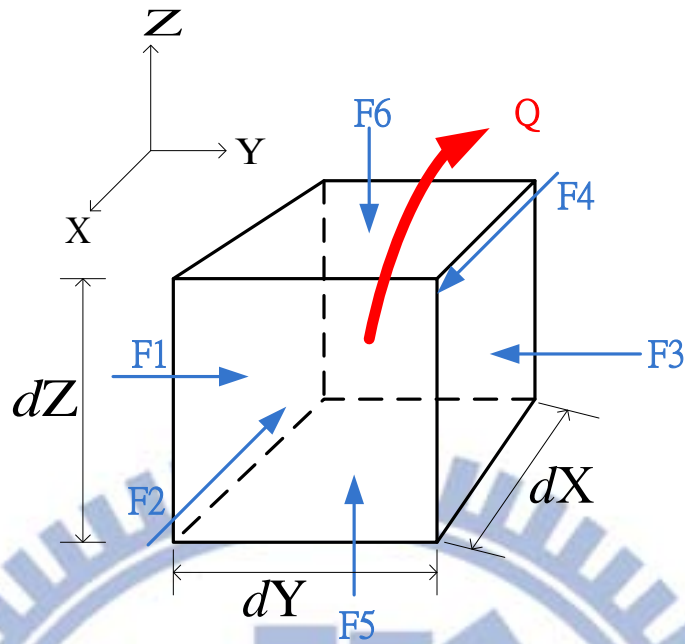


圖 3.2-3 地下水流系統控制體積

圖 3.2-3 為地下水流系統之控制體積，基於雷諾傳輸定律，進出系統控制表面之流量，必須恆等於系統控制體積內部之水量變化。如在穩態系統中，因內部並無變化，故進出系統表面之流通量必須平衡。

$$F_1 + F_2 + F_3 + F_4 + F_5 + F_6 - Q = 0 \dots\dots\dots (3.2-1)$$

其中， F_1 至 F_6 代表控制表面上、下、左、右、前與後六個表面的流入量； Q 代表匯流項(sink)，在此即為系統之抽水量。因此六面流入總量與抽水量應滿足式 3.2-1。

如果系統中各控制體積之水位，均可藉由觀測系統或其他來源取得，控制表面之流通量即以達西公式，再乘上控制體積流通面積計算得之，故各控制體積之抽水量即可推得。

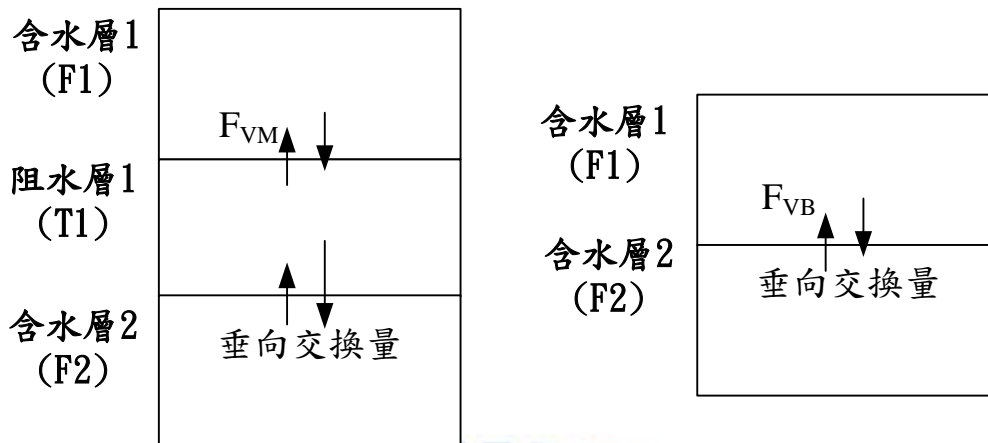


圖 3.2-4 MODFLOW 垂向體積流率示意圖 圖 3.2-5 分佈型水平衡模式垂向體積流率示意圖

圖 3.2-4 及圖 3.2-5 則說明在計算垂向體積流率上，由於阻水層水位與否造成 MODFLOW 與分佈型水平衡模式有所差異，即 MODFLOW 不論在含水層及阻水層均會模擬出水位，所以在計算垂向交換量時 MODFLOW 只會進行兩層的參數合成，也就是說上一層 F1 及下層的 T1 進行參數的合成。但由於在真實情況下只有在含水層才會有地下水水位，而分佈型水平衡模式中也只會有含水層的水位，但在考慮垂向水流流動時又不能忽略阻水層的地質參數，所以進行參數合成時將會合成三層地質參數，即 F1、T1 及 F2 的地質參數合成。此處為本研究模式與 MODFLOW 垂向合成參數上的差異之處，但經由下一章節的簡單案例驗證後發現其差異甚小。

第四章 地下水分佈型水平衡模式案例驗證

在上一章節已說明水平衡模式的理論，接著將使用 MODFLOW 數值模擬並搭配逆問題求解抽水量，在給定水位與透水係數的前提下，水平衡模式可快速求解系統之抽水量。為驗證模式開發之正確性，本章將以簡單案例進行驗證。

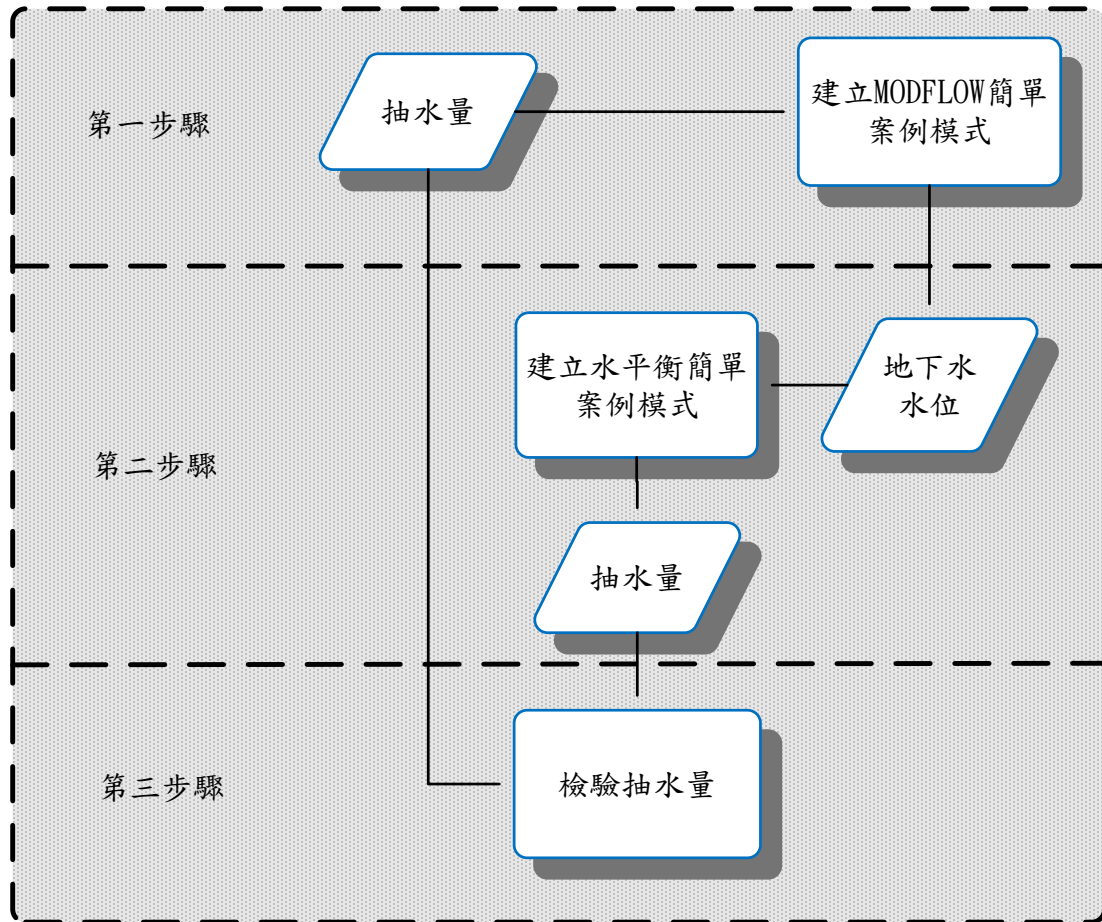


圖 4.1 地下水水平衡模式驗證流程圖

檢驗流程圖如圖 4.1 所示，檢驗流程主要分為三個步驟：

由於本地下水水平衡模式需提供水位，方能計算對應之抽水量，在此以數值試驗的方式來驗證。首先，利用 MODFLOW 數值模式產生所需之水位資料，輸入一組抽水資訊(其中此抽水量為隨機給定，並將值列於表 4.1-1)，可作為後續驗證之比較對象，並藉由數值模擬

模擬出對應之水位。其次，將 MODFLOW 數值模式中，除抽水量以外的資訊，包含模式網格切割、透水係數與水位，完全輸入至水平衡模式中，並藉由水平衡模式求得對應之補注量。最後，比較兩者補注量之結果，兩者必須一致方可證明本水平衡模式之正確性。

4.1 案例概述

本模式為穩態模擬，模擬區域長為 11,000 公尺、寬為 11,000 公尺，網格長寬皆為 1,000 公尺，而模擬的層數共有 5 層，第一層、第三層及第五層為含水層，第二層和第四層為阻水層如圖 3-1 所示。其含水層型態，第一層為非受壓水層(Unconfined aquifer)，其他層為受壓層(Confined aquifer)。總計區域內之網格數為 605 個(11×11×5)正方形網格。



圖 4.1-1 MODFLOW 概念分層

在邊界條件方面，首先說明含水層分佈。含水層總共有三層，第一含水層的西邊界設定為定水頭邊界，水位定為 0 公尺，南方、北方及東方為不透水邊界。第二、三、四與五分層的周圍四個方向均為不透水邊界，僅有在第二與第三含水層之東邊為定水頭邊界，其水位定為 100 公尺。

在分區方面，本案例在第一層、第三層及第五層均分為9個分區，共有 27 個分區，分區可同時應用於抽水量與透水係數上，相同分區內各網格數值一致。其中除了第二與第三含水層在右側為定水頭時該分區為 6 個網格其餘分區皆為 9 個網格，如圖 4.1-2、圖 4.1-4 及圖 4.1-5 所示。

在地表高程方面，地勢由右向左下降，由右方邊界高程之 120 公尺降至左方邊界之 0 公尺處。含水層厚度為 25~60 公尺不等，阻水層厚度約為 5 公尺。

在參數設定方面，整體模擬區域初始水位高皆為 100 公尺，而各分層之 K 值設定如圖 4.1-2、圖 4.1-3、圖 4.1-4 及圖 4.1-5 所示，為一非均質分布之含水層。而在補注量的給定上第一層每平方公里介於 -3000 至 5000 (cmd)，第三與五分層則是每平方公里從 -2000 至 1000 (cmd)不等，如表 4.1-1。圖 4.7 至圖 4.9 為前述設定下之模擬水位。

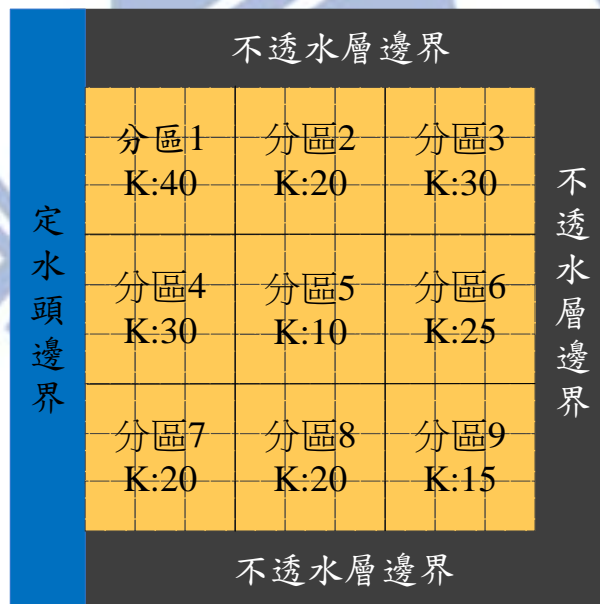


圖 4.1-2 第一分層分區與邊界及 K 值(公尺/每天)配置圖

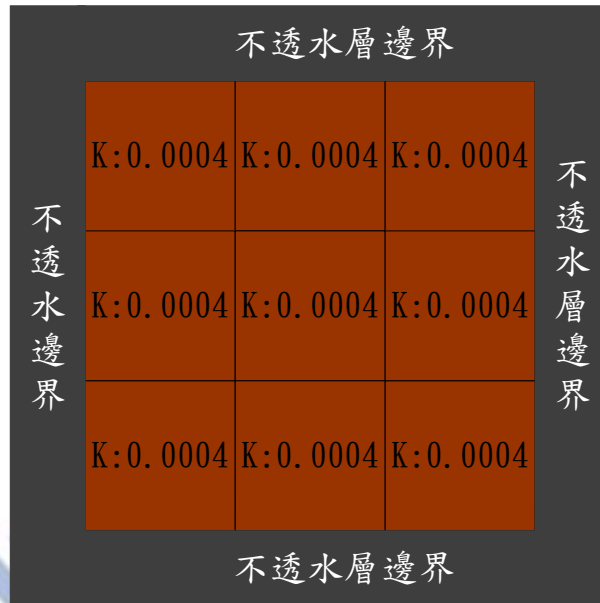


圖 4.1-3 第二與第四分層分區與邊界及 K 值(公尺/每天)配置圖

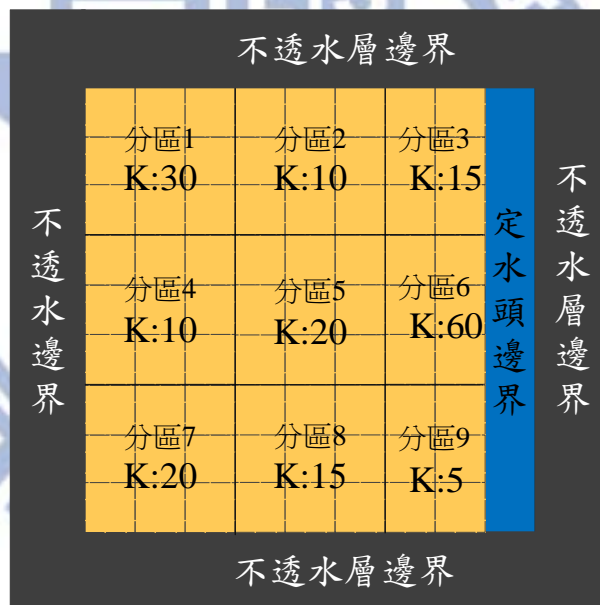


圖 4.1-4 第三分層分區與邊界及 K 值(公尺/每天)配置圖

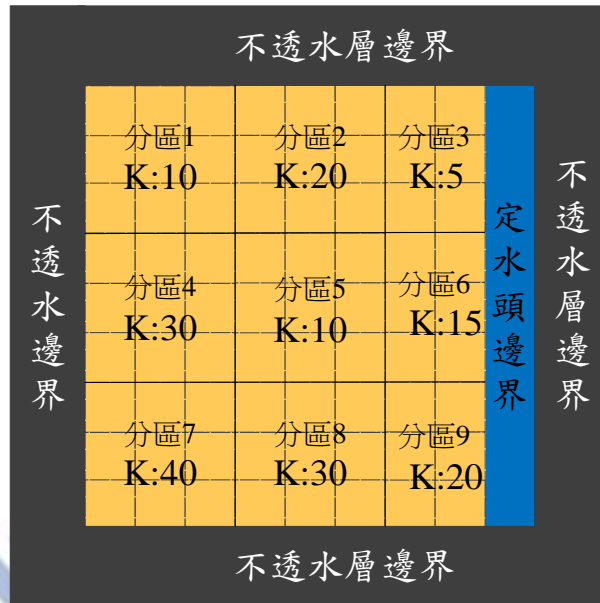


圖 4.1-5 第五分層分區與邊界及 K 值(公尺/每天)配置圖

表 4.1-1 各分區之 MODFLOW 抽水量

分區	F1	F2	F3
1	1500	-2000	-1800
2	3000	-1000	-200
3	5000	1000	-800
4	-3000	-1700	-1100
5	-2000	-1500	-700
6	5000	-700	-500
7	-2500	-1500	-1500
8	-1500	-1000	-900
9	5000	-500	-300

($m^3/km^2 day$)

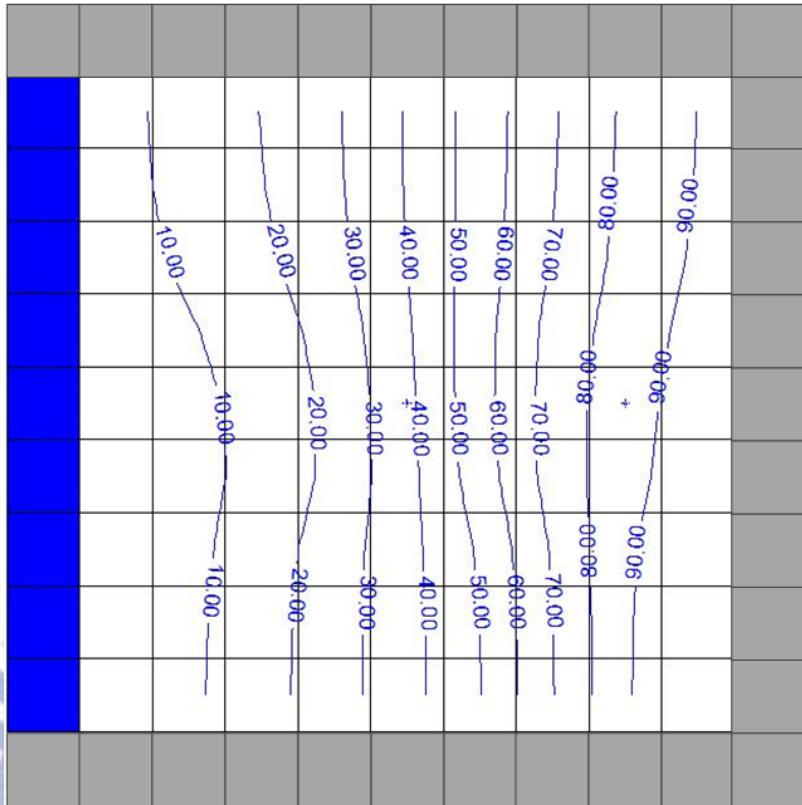


圖 4.1-6MODFLOW 之 F1 模擬水位(公尺)

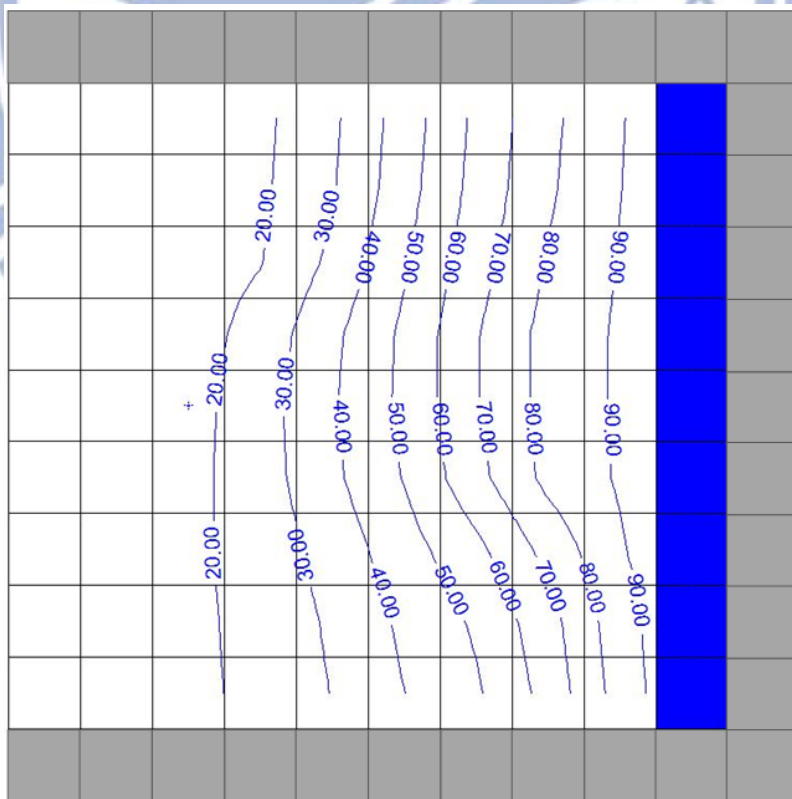


圖 4.1-7MODFLOW 之 F2 模擬水位(公尺)

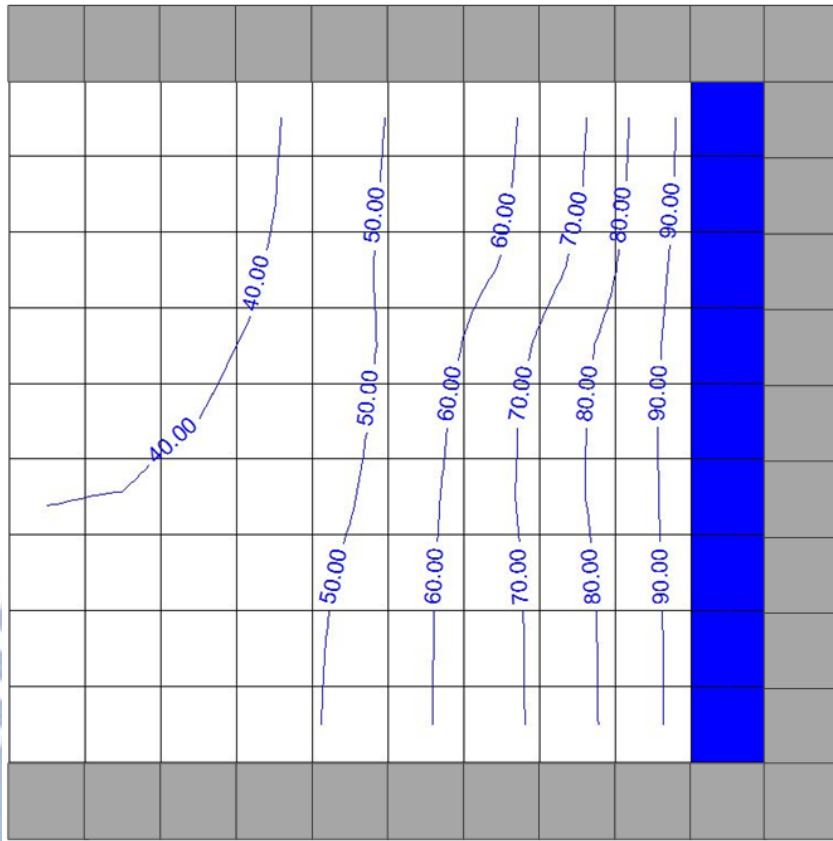


圖 4.1-8MODFLOW 之 F3 模擬水位(公尺)

4.2 案例驗證

由於 MODFLOW 模式與本地下水水平衡模式在概念模型上略有差異，如 3.2 節中所介紹，而在此處將繪製簡例圖型，如圖 4.2-1 所示，在 MODFLOW 模式中，含水層與阻水層合計共有五層，因此模式可模擬得阻水層之水位變化。在地下水水平衡模式中，僅模擬三層含水層的水量平衡，在阻水層之交換部分，僅以調和平均計算垂向之等效透水係數，以模擬阻水層之垂直交換。由於兩模式概念模型上略有不同，因此將分佈型水平衡模式在合成參數的部分進行修正，而最後得到與 MODFLOW 模式中結果一致。

表 4.2-1、表 4.2-2 及表 4.2-3 分別為兩方法於含水層 1、含水層 2

與含水層 3 之抽水量比較表，可發現在每一層含水層的誤差百分比均小於 0.1 個百分比，顯示本地下水水平衡模式之正確性，可應用於實際案例之研究。

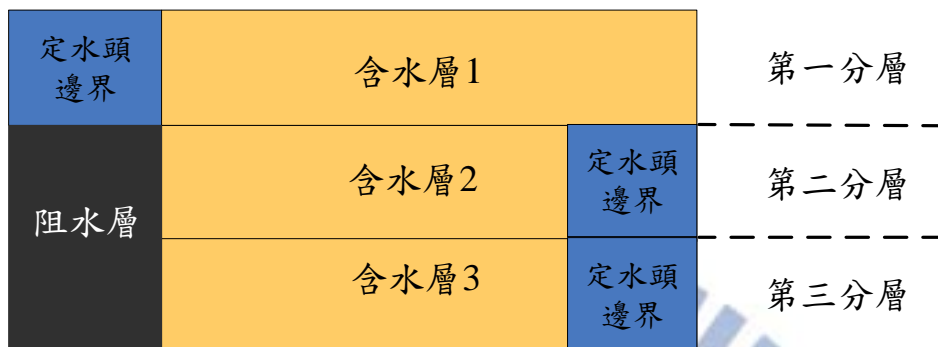


圖 4.2-1 水平衡模式簡例之概念分層

表 4.2-1 第一含水層檢定結果

分區	抽水量		誤差百分比
	水平衡模式	MODFLOW	
1	-1500	-1500	0.000%
2	1000.12	1000	0.012%
3	-4999.73	-5000	0.005%
4	3000.01	3000	0.000%
5	2000	2000	0.000%
6	-5000.06	-5000	0.001%
7	2500	2500	0.000%
8	1500.02	1500	0.001%
9	-5000.3	-5000	0.006%

($\text{m}^3/\text{km}^2\text{day}$)

表 4.2-2 第二含水層檢定結果

分區	抽水量		誤差百分比
	水平衡模式	MODFLOW	
1	2000.03	2000	0.002%
2	1000	1000	0.000%
3	499.99	500	0.002%
4	1699.98	1700	0.001%
5	1500	1500	0.000%
6	700.02	700	0.003%
7	1500.03	1500	0.002%
8	1000	1000	0.000%
9	499.98	500	0.004%

($\text{m}^3/\text{km}^2\text{day}$)

表 4.2-3 第三含水層檢定結果

分區	抽水量		誤差百分比
	水平衡模式	MODFLOW	
1	1800.03	1800	0.002%
2	199.99	200	0.005%
3	799.98	800	0.002%
4	1099.98	1100	0.002%
5	700.03	700	0.004%
6	500.02	500	0.004%
7	1499.95	1500	0.003%
8	899.9	900	0.011%
9	299.94	300	0.020%

($\text{m}^3/\text{km}^2\text{day}$)

第五章 結合 SASIM 與地下水分佈型水平衡模式於濁水溪沖積扇抽水量推估之應用

本研究之地下水分佈型水平衡模式已於第四章以設計案例進行測試與驗證，證實本模式之正確性。本研究先以條件模擬產生多組透水係數，這些透水係數之半變異元特性，需符合樣本之半變異元特性，其次再以地下水分佈型水平衡模式推估系統之抽水量。

本章節首先於第 5.1 節進行濁水溪沖積扇的區域概述；接著於第 5.2 節說明應用地質統計條件模擬工具(SASIM)建立多組透水係數場，並檢驗條件模擬成效；最後於第 5.3 節將不同之透水係數場，代入前述地下水分佈型水平衡模式中，求得不同透水係數場下對應之抽水量場。

5.1 研究區域概述

本研究參考資料地調所之研究資料 88 年度完成第一期計畫濁水溪沖積扇水文地質調查研究報告及 98 年度臺灣地區地下水區水文地質調查及地下水資源評估之地下水補注潛勢評估與地下水模式建置的報告。

1. 區域範圍

濁水溪沖積扇地下水區位於臺灣西部海岸之中段，北起烏溪，南至北港溪南岸，東以八卦台地及斗六丘陵山脊線為界，並沿兩丘陵間之隘口向東擴及竹山、名間一帶，西臨臺灣海峽，面積約 1,800 平方公里。本沖積扇最主要之溪流為濁水溪，其主流發源自中央山脈西翼、合歡山以南與玉山山塊北側之間地區，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

積扇之中央，向西注入臺灣海峽。其他位於沖積扇之河川，自北而南尚有舊濁水溪、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 公尺之間。而本研究之實際模擬範圍為 2074 平方公里。

2. 水文地質架構

地調所於 88 年度完成第一期計畫濁水溪沖積扇水文地質調查研究報告中，以濁水溪沖積扇 72 站之地層柱狀圖，完成水文地質剖面 1 至 12，深度至 300 公尺左右，及丘陵及河谷區之 8 站地層柱狀圖繪製水文地質剖面 13 至 15，深度約達 250 公尺左右；並以這些觀測水井之鑽探資料分析規劃出濁水溪沖積扇概念分層，包括含水層一(F1)、阻水層一(T1)、含水層二(F2)、阻水層二(T2)、含水層三(F3)、阻水層三(T3)、含水層四(F4)及阻水層四(T4)。上述各分層之剖面示意圖如圖 5.1-1 所示。

3. 水文地質參數

本研究之觀測井空間分佈於圖 5.1-2，而含水層 F1、F2 及 F3 之觀測資料整理得表 5.1-1、表 5.1-2 及表 5.1-3。其中 F1、F2 和 F3 分別有 36、42 及 37 口觀測水井資料，表中 $\ln K$ 代表自然對數之透水係數值。

濁水溪沖積扇由含水層與阻水層共同組合而成，由於並無現地試驗調查阻水層之透水能力，本研究在此假設為 0.0004(m/day)。此外，由於抽水試驗所得之透水係數為水平流向之透水能力，無法試驗得垂直流向之透水係數，本研究在此假設垂直向之透水係數為水平向之透水係數的 1/10。

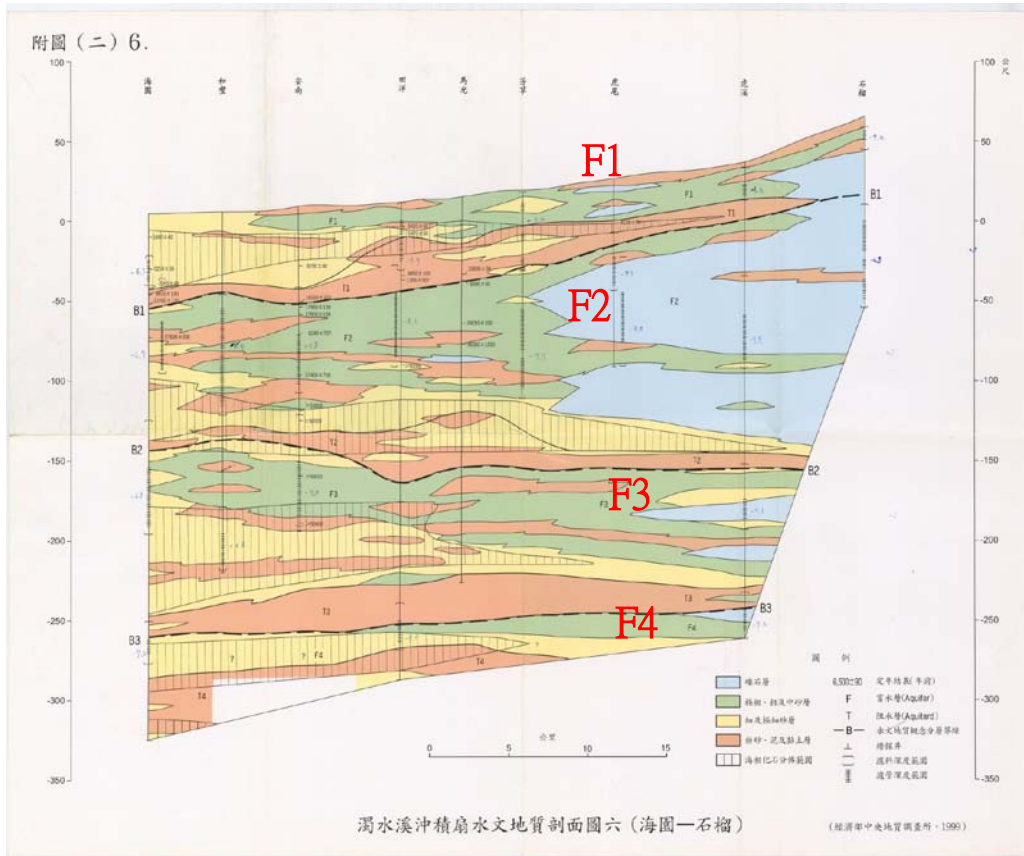


圖 5.1-1 濁水溪海園-石榴水文地質剖面圖

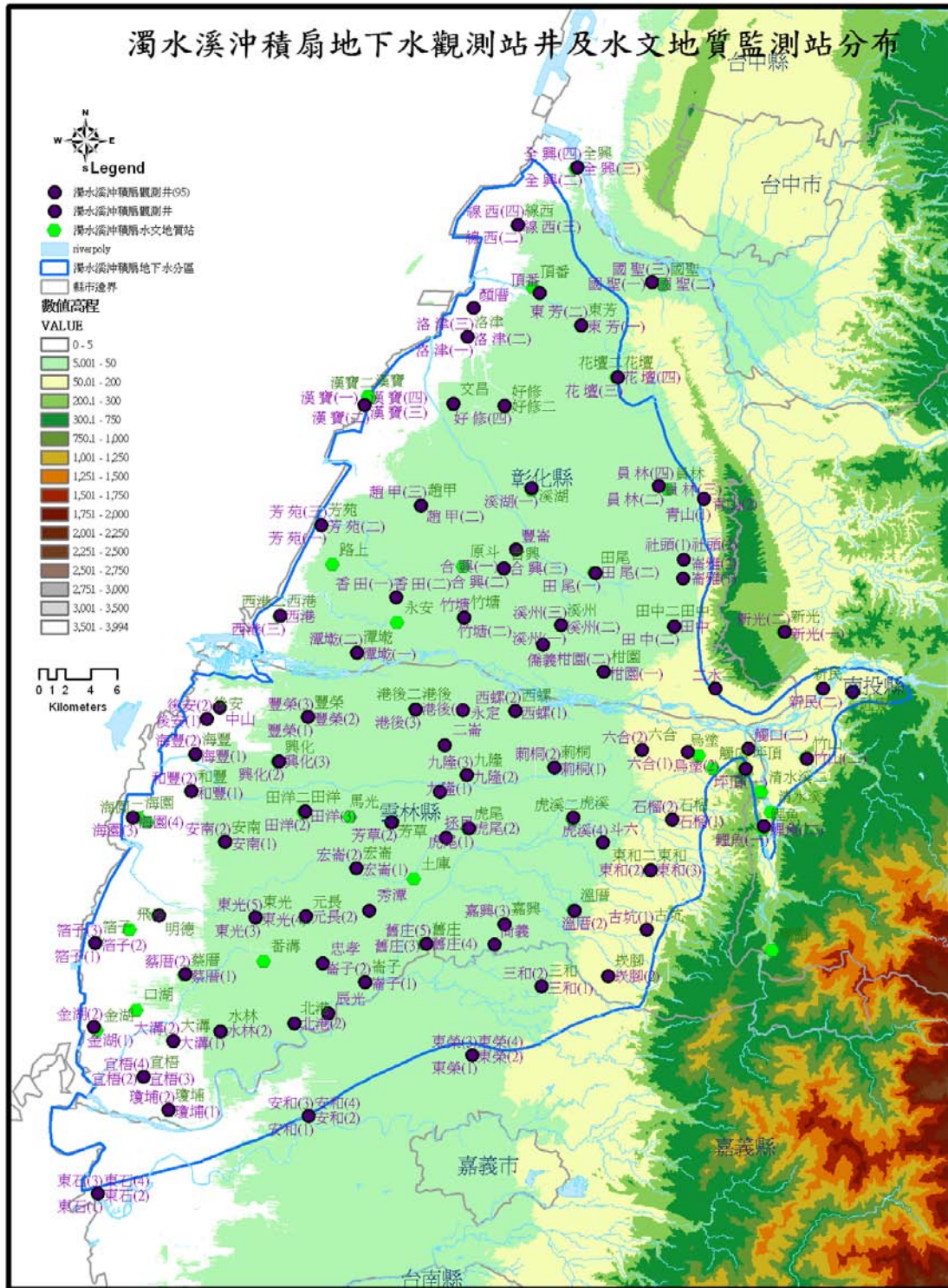


圖 5.1-2 濁水溪沖積扇地下水觀測網站井分布圖(繪製於民國 98 年)

表 5.1-1 F1 之觀測資料

F1							
井名	X	Y	lnK (m/day)	井名	X	Y	lnK (m/day)
線西(1)	195102	2669884	3.02	荊桐(1)	197896	2628388	4.04
洛津(1)	191236	2661358	1.74	六合(2)	204584	2629706	4.89
文昌(1)	190140	2656198	2.88	烏塗(2)	209025	2629314	4.91
香田(1)	185725	2641405	2.99	花壇(1)	202695	2658255	3.90
合興(1)	193986	2643604	5.25	宏崙(1)	182663	2620668	3.51
田尾(1)	200962	2643305	4.53	虎溪(1)	199331	2624337	2.82
竹塘(1)	190937	2639847	5.04	石榴(1)	206944	2624360	1.57
溪洲(1)	198369	2639271	3.92	箔子(1)	162680	2614972	1.08
田中(1)	207086	2639186	3.85	明德(1)	167471	2617008	0.43
豐榮(1)	178957	2632236	3.81	東光(1)	174991	2616887	3.82
西螺(1)	194880	2632717	3.75	舊庄(1)	187952	2614849	3.00
柑園(1)	201760	2635691	4.59	溫厝(1)	199385	2617419	2.16
二水(1)	210251	2634448	4.91	東和(1)	205270	2620469	1.05
海園(1)	165930	2624508	2.92	古坑(1)	205034	2615922	1.55
田洋(1)	178667	2624918	3.78	崁腳(1)	202020	2612378	1.36
芳草(1)	185344	2624154	2.52	全興(1)	199514	2674258	3.97
九隆(1)	191170	2627767	4.35				

表 5.1-2 F2 之觀測資料

F2							
站名	X	Y	lnK (m/day)	站名	X	Y	lnK (m/day)
線西(3)	195102	2669884	4.39	荊桐(2)	197896	2628388	3.35
全興(2)	199514	2674258	0.04	六合(2)	204584	2629706	3.97
好修(2)	194101	2656018	4.21	烏塗(2)	209025	2629314	4.13
花壇(3)	202695	2658255	2.45	東芳(1)	199963	2662263	4.26
芳苑(2)	179979	2646956	3.28	洛津(2)	191236	2661358	2.81
趙甲(2)	187628	2648436	3.99	文昌(3)	190140	2656198	3.98
溪湖(2)	196163	2649628	4.49	漢寶(2)	183749	2656699	2.35
員林(3)	206621	2649676	3.23	海園(2)	165930	2624508	0.80
西港(2)	176792	2639943	0.14	安南(1)	172585	2622642	4.45
潭墘(2)	182697	2637170	2.73	芳草(2)	185344	2624154	4.67
溪洲(3)	198369	2639271	4.81	虎尾(2)	191232	2623693	4.41
田中(1)	207086	2639186	2.82	虎溪(2)	199331	2624337	3.91
後安(1)	171189	2632094	2.83	石榴(2)	206944	2624360	2.37
豐榮(2)	178957	2632236	3.93	竹塘(2)	190937	2639847	2.97
港後(2)	187224	2632826	3.68	舊庄(3)	187952	2614849	1.91
西螺(2)	194880	2632717	3.75	元長(2)	178806	2616895	3.93
柑園(2)	201760	2635691	4.00	蔡厝(2)	169451	2612475	-0.21
二水(1)	210251	2634448	4.01	箔子(2)	162680	2614972	5.54
海豐(1)	170295	2629365	1.62	瓊埔(2)	168258	2602097	1.22
和豐(1)	169996	2626540	2.85	明德(2)	167471	2617008	5.32
興化(2)	176677	2628802	-1.19	東光(3)	174991	2616887	4.11
九隆(2)	191170	2627767	3.02				

表 5.1-3 F3 之觀測資料

F3							
站名	X	Y	lnK (m/day)	站名	X	Y	lnK (m/day)
線西(4)	195102	2669884	4.61	箔子(3)	162680	2614972	5.27
漢寶(3)	183749	2656699	4.10	明德(4)	167471	2617008	5.55
好修(3)	194101	2656018	3.11	安南(2)	172585	2622642	4.23
東芳(2)	199963	2662263	4.62	宏崙(2)	182663	2620668	5.52
芳苑(3)	179979	2646956	2.32	九隆(3)	191170	2627767	5.19
趙甲(3)	187628	2648436	2.33	虎溪(3)	199331	2624337	3.11
溪湖(3)	196163	2649628	3.48	東和(3)	205270	2620469	3.27
員林(4)	206621	2649676	3.12	嘉興(3)	194032	2616366	2.16
西港(3)	176792	2639943	1.64	舊庄(4)	187952	2614849	2.96
合興(2)	193986	2643604	4.06	崙仔(2)	183344	2611936	3.45
田尾(2)	200962	2643305	2.04	北港(2)	177885	2608753	2.93
田中(2)	207086	2639186	2.47	水林(2)	172329	2608150	0.94
後安(2)	171189	2632094	-0.71	大溝(2)	168631	2607417	0.80
興化(3)	176677	2628802	3.71	宜梧(3)	166291	2604639	1.33
港後(3)	187224	2632826	1.78	文昌(4)	190140	2656198	2.60
海豐(2)	170295	2629365	-1.04	洛津(3)	191236	2661358	1.63
和豐(2)	169999	2626544	1.47	全興(3)	199514	2674258	4.30

5.2 透水係數之半變異元分析與 SASIM 條件模擬

第 5.2 節說明應用地質統計條件模擬工具(SASIM)建立多組透水係數場，並檢驗條件模擬成效。於第 5.2.1 小節說明如何應用樣本之透水係數建立半變異元高斯模型；第 5.2.2 小節則基於前述建立之半變異元高斯模型，以 SASIM 工具進行透水係數之條件模擬，產生大量之透水係數場；第 5.2.3 小節則進行前述建立之透水係數場的成效分析。



5.2.1 透水係數半變異元高斯模型建立

搜集研究區域之透水係數資料，再依據各層分別進行透水係數的半變異元分析，本研究使用 VarioWin 軟體進行分析。由表 5.2-1 可知分別為 F1、F2 與 F3 之透水係數資訊，各層分別共有 36、42 及 37 筆資訊。由於透水係數在數值上橫跨數個因次，直接呈現數值本身差異過大，在此以自然對數呈現。

在建立半變異元的過程中，可區分為兩個階段，首先是由樣本資料建立試驗半變異元(Experimental Semi-variogram)，接著再以迴歸分析等方法求得理論半變異元(Theoretical Semi-Variogram)。

常見模型有三種，本研究採高斯模型建立理論半變異元，圖 5.2-1 至 5.2-3 為三個含水層之理論半變異元，相關參數整理於表 5.1-2-1 中。由圖 5.2-1 至 5.2-3 顯現試驗半變異元與理論半變異元趨勢兩者一致，可藉由所選擇之高斯模型取代試驗值。

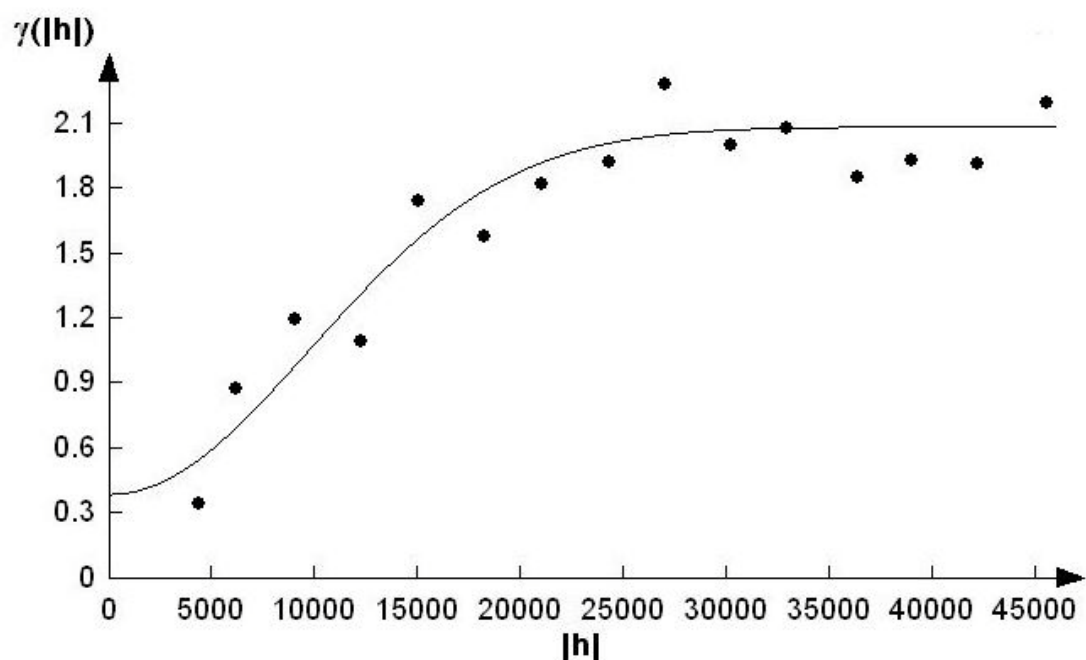


圖 5.2-1 F1 半變異元分析

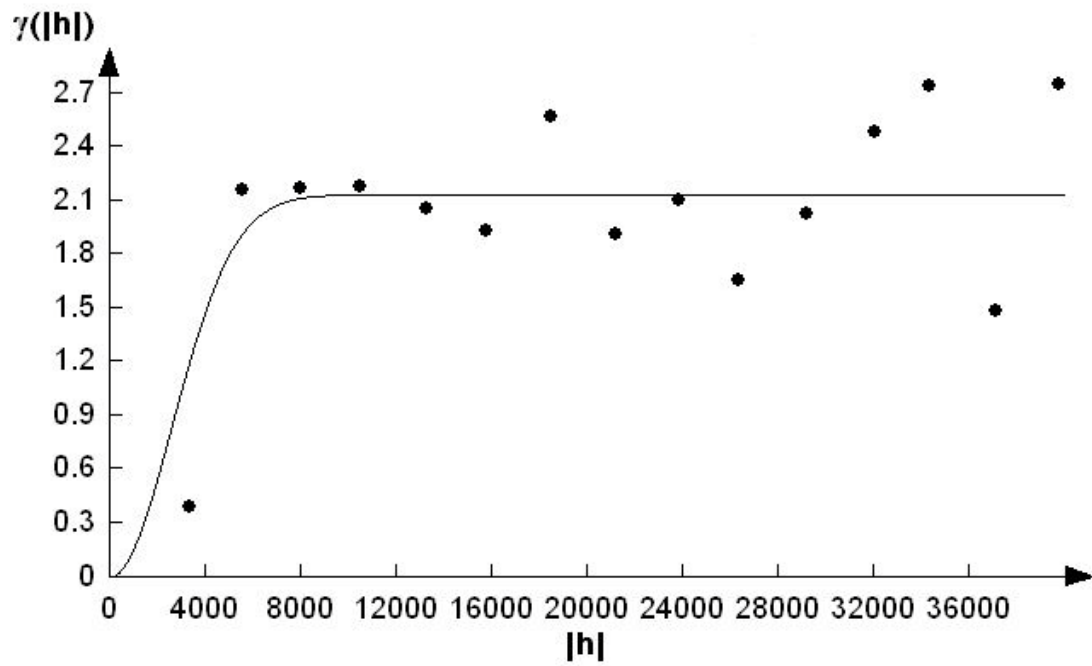


圖 5.2-2 F2 半變異元分析

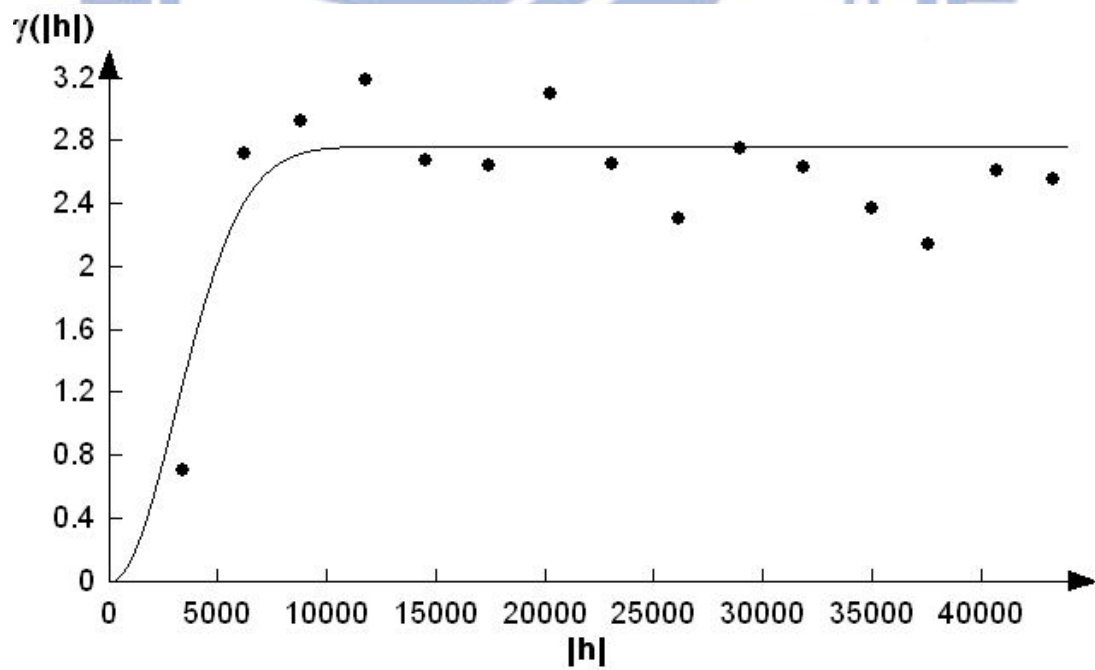


圖 5.2-3 F3 半變異元分析

表 5.2-1 各含水層之半變異元參數

	F1	F2	F3
Nugget	0.391	0	0
Range(m)	23778	6400	7478
Sill	1.7	2.139	2.772

5.2.2 條件模擬結果分析

在給定模型參數後(表 5.2-1)，SASIM 軟體可進行不同分層之條件模擬，合成大量透水係數場，透水係數場可滿足前述給予之半變異元模型。

如計算合成資料之試驗半變異元，與給定之理論半變異元比較，檢查 SASIM 軟體之模擬結果，兩者是否具有相同之半變異元，圖 5.2-4 至 5.2-6 分別比較不同含水層之理論半變異元與合成資料之試驗半變異元，其中合成資料呈現前 10 組結果。其中，紅色線條為高斯模型之理論半變異元，其他含點線段則為合成資料之試驗半變異元，圖形顯示前 10 組合成資料可滿足條件模擬之規範，具有相同之統計特徵。

另外，以合成資料之累積分布曲線(CDF)來呈現資料特徵，以檢驗資料特徵是否一致，如圖 5.2-7 至 5.2-9 所示，合成資料則在資料樣本周遭形成一個帶狀，帶狀極為細瘦。而將各層透水係數模擬的半變異元與理論半變異元求取平均均方根誤差平方和，可得 F1、F2 及 F3 分別為 0.002、0.007 及 0.007(m/day)，顯現合成結果良好。

由於 SASIM 所產生之合成資料場，外框為矩形形狀，因此如應用於濁水溪沖積扇時，如刪除扇外的資料，扇內的資料之半變異元可

能不見得與整體半變異元一致，為避免前述之問題，本研究亦以累積分布曲線(CDF)檢討，圖 5.2-10 至圖 5.2-12 為刪除扇外區域資料之累積分布曲線，合成資料所形成之帶狀區域較原合成資料之帶狀區域寬，且略有偏移的特徵產生，但仍在可接受之範圍內，如表 5.2-2 所示個分層之平均均方根誤差小於 0.1 個百分比，故此合成資料可應用於後續地下水分佈型水平衡模式，以推估對應之抽水量。

表 5.2-2 組體圖誤差比較

	F1	F2	F3
模擬區域內的透水係數的平均均方根誤差百分比(%)	0.00811	0.00622	0.0137
濁水溪邊框內的透水係數的平均均方根誤差百分比(%)	0.0325	0.0290	0.0379

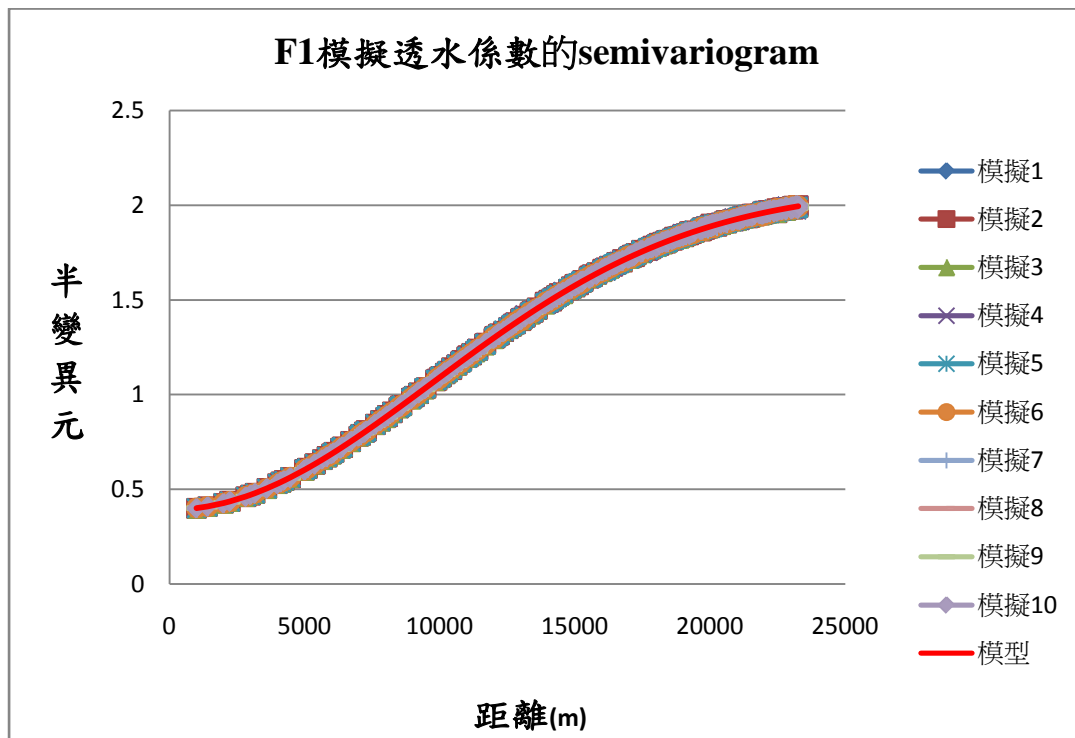


圖 5.2-4 F1 模擬透水係數的半變異元圖形

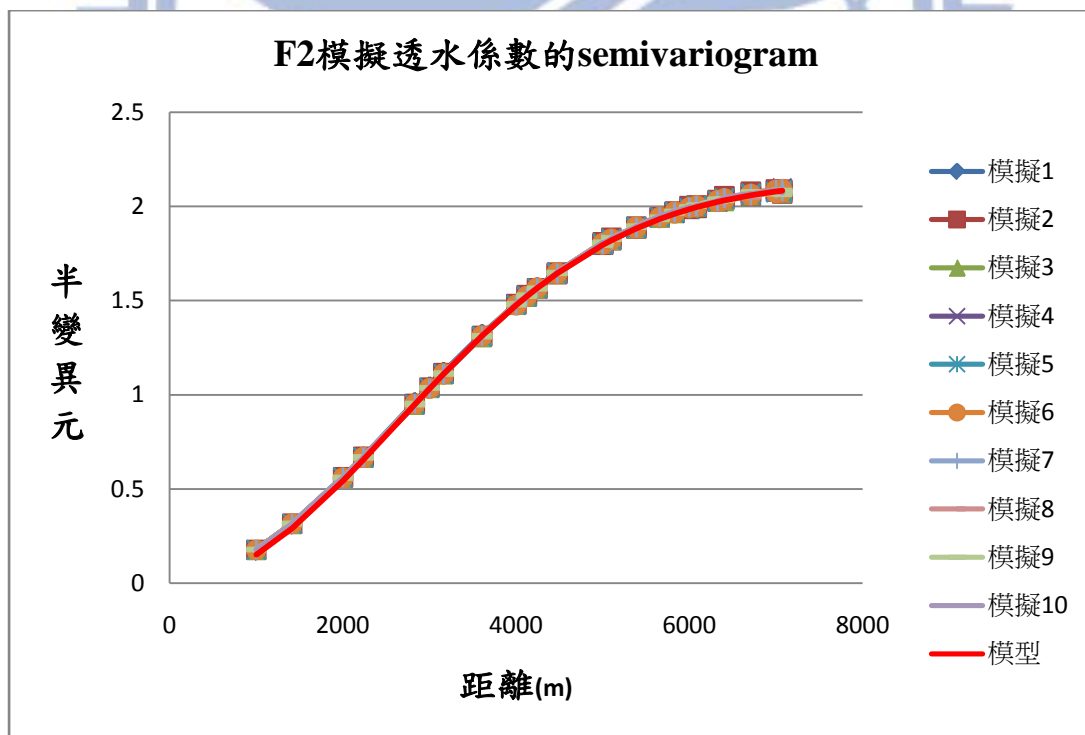


圖 5.2-5 F2 模擬透水係數的半變異元圖形

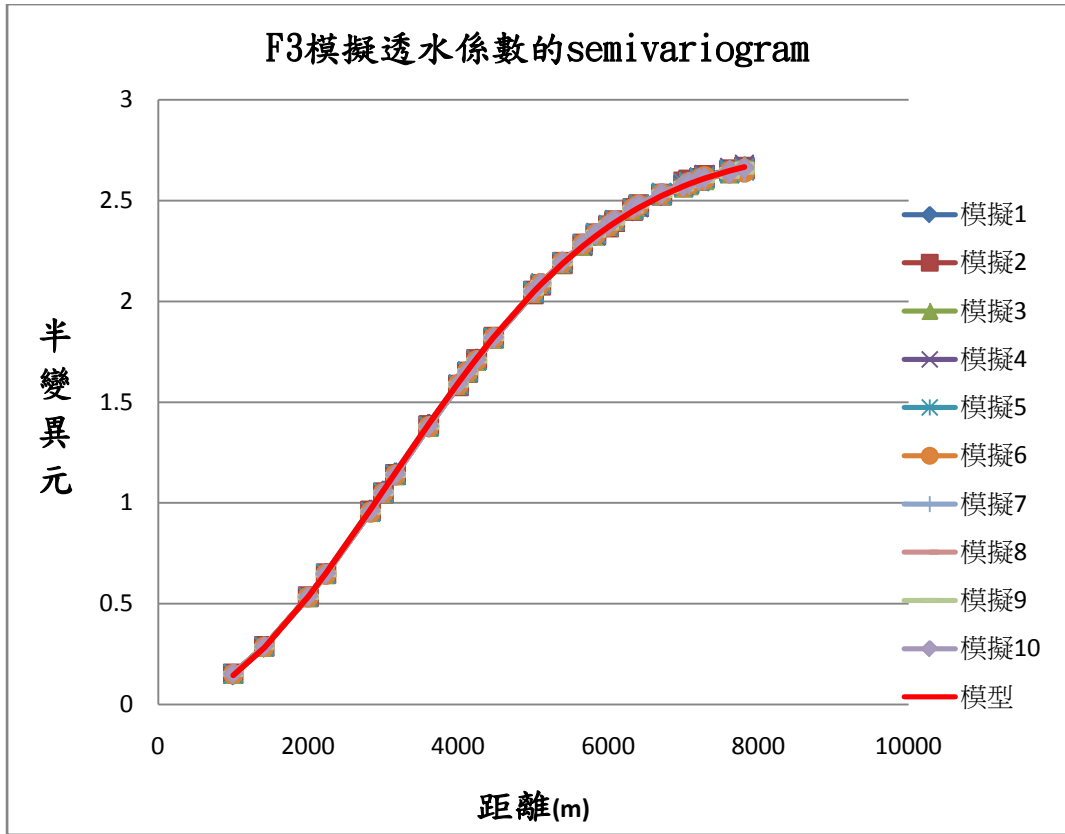


圖 5.2-6 F3 模擬透水係數的半變異元圖形

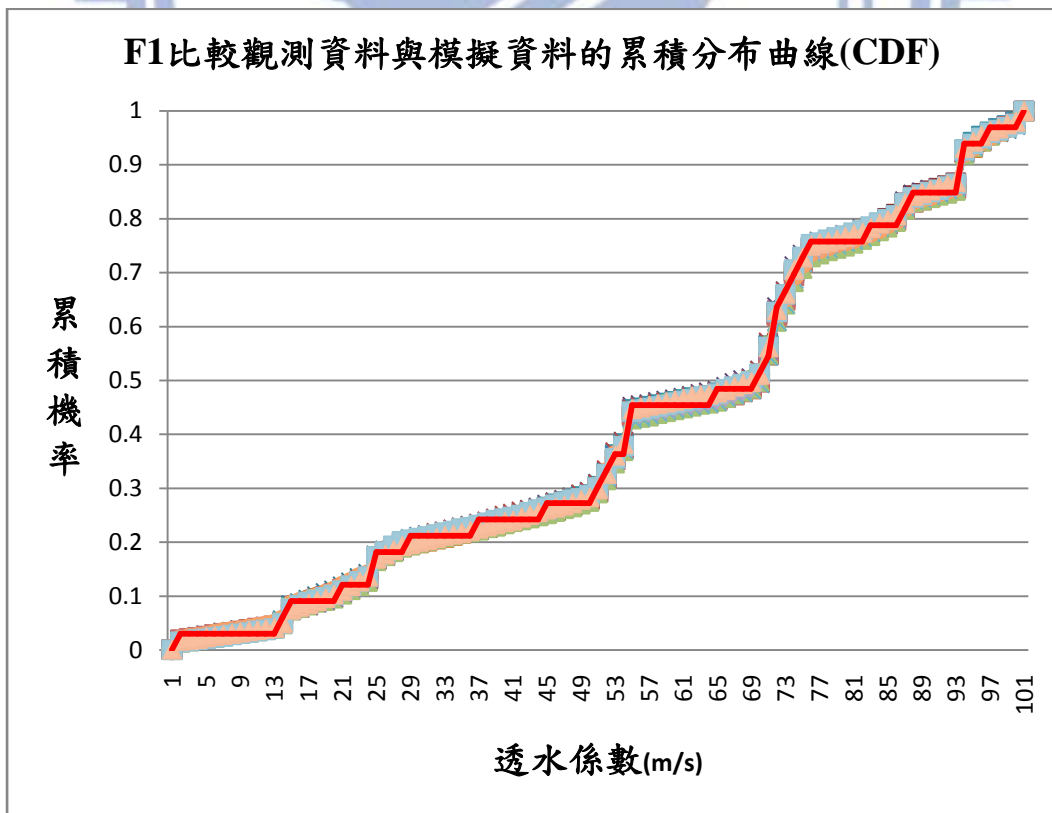


圖 5.2-7 F1 模擬透水係數場之組體圖

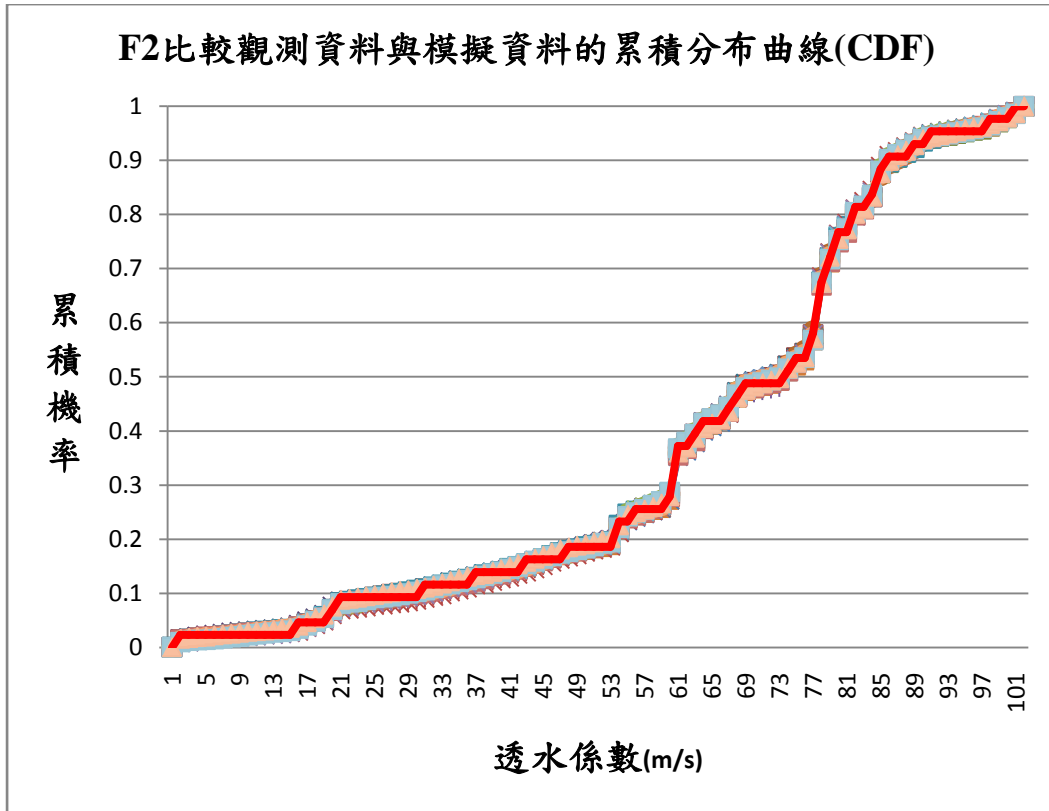


圖 5.2-8 F2 模擬透水係數場之組體圖

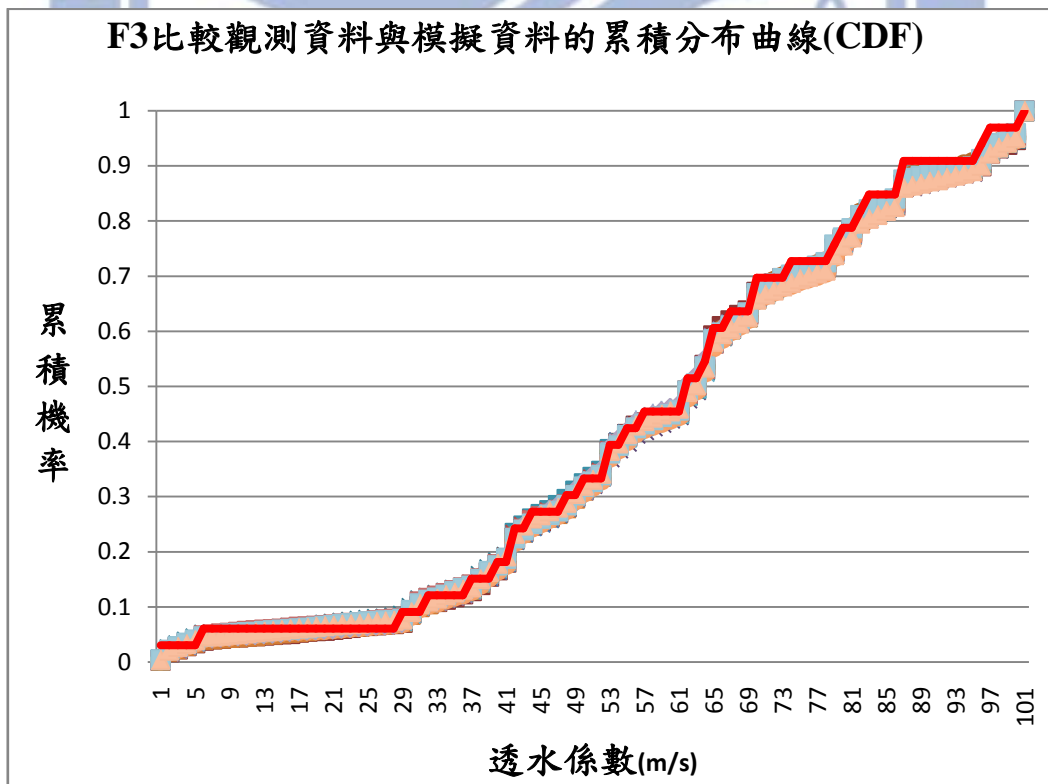


圖 5.2-9F3 模擬透水係數場之組體圖

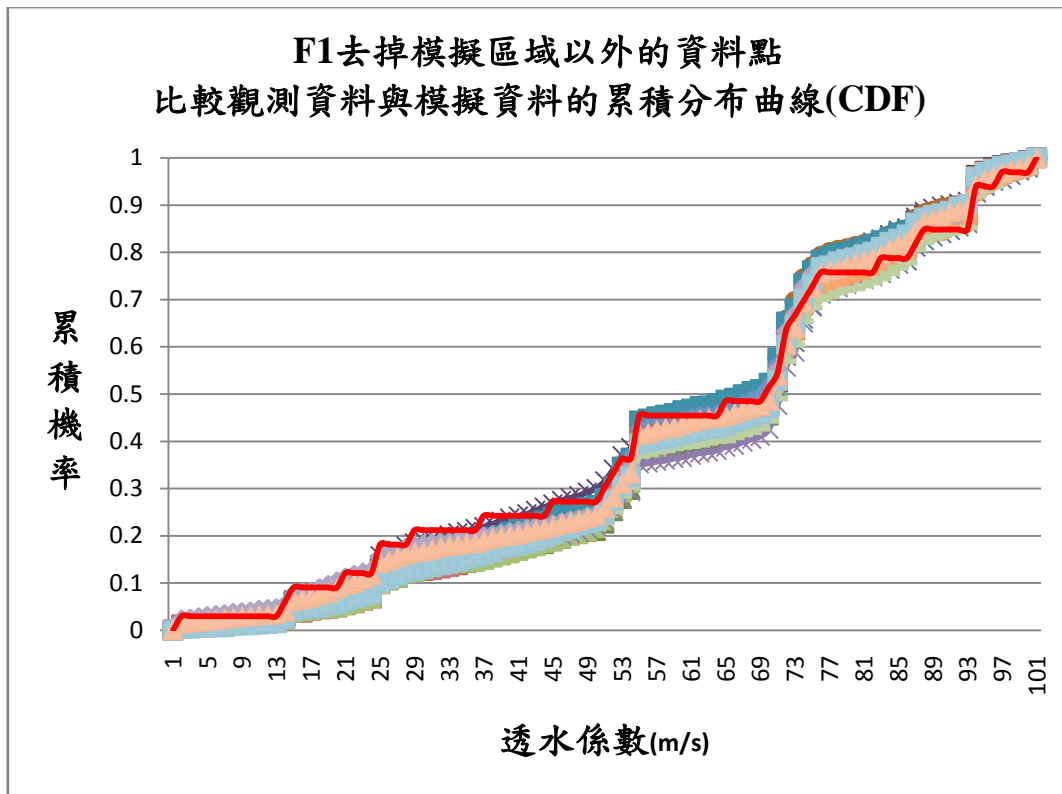


圖 5.2-10 F1 模擬透水係數之濁水溪沖積扇區域組體圖

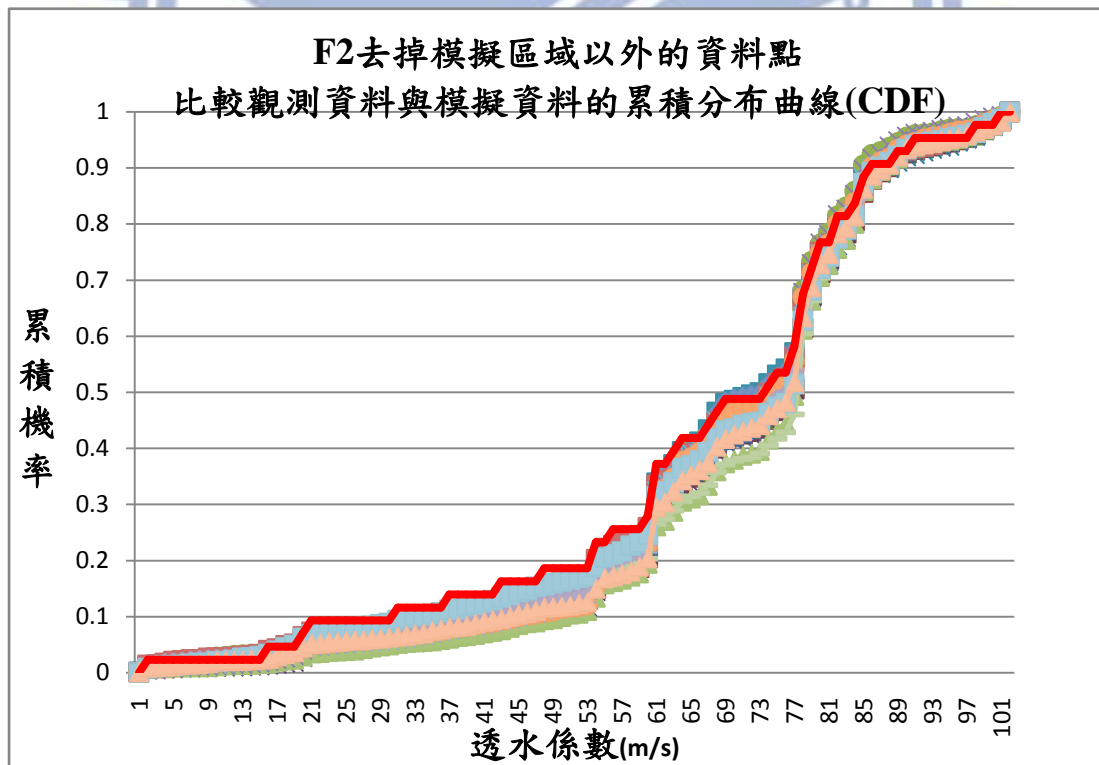


圖 5.2-11 F2 模擬透水係數之濁水溪沖積扇區域組體圖

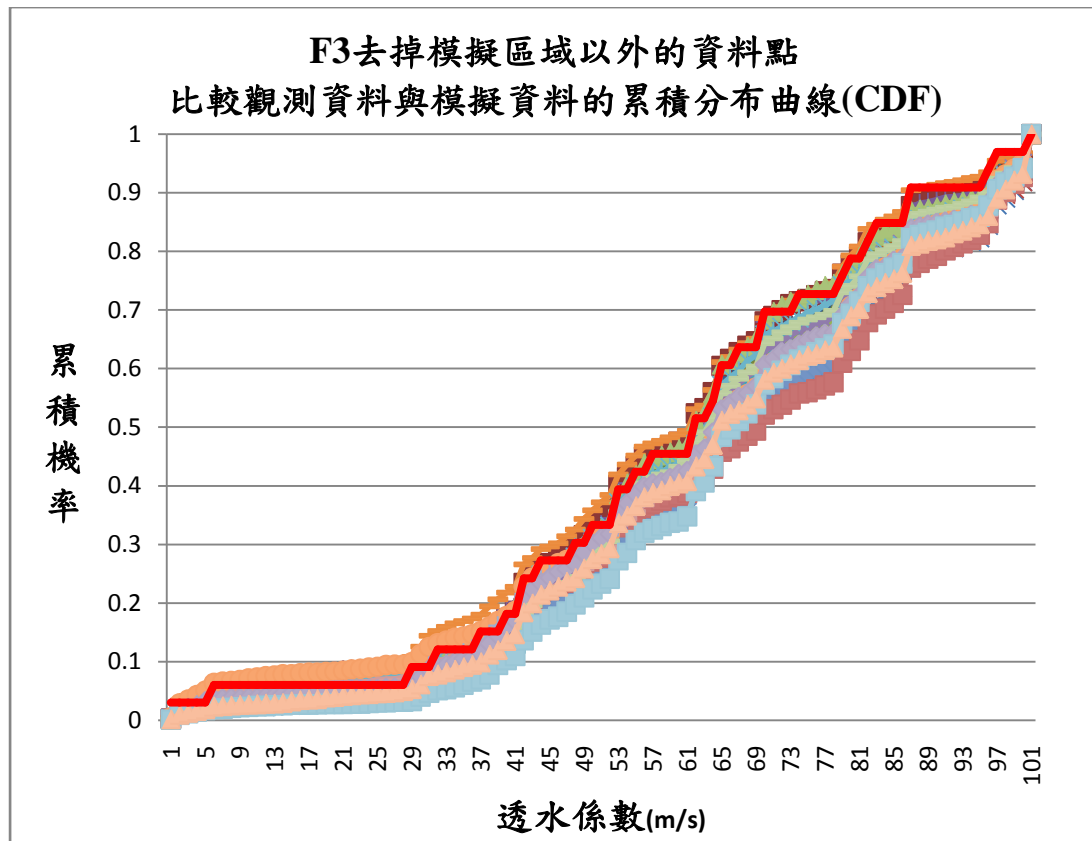


圖 5.2-12 F3 模擬透水係數之濁水溪沖積扇區域組體圖

5.2.3 合成透水係數與其變異數空間分布

本小節將多組合成之透水係數場進行標準偏差分析，其中以 100 組之合成資訊進行分析，各分層之透水係數標準偏差如圖 5.2-13 至 5.2-15 所示。

以 F1 為例，標準偏差較大者主要分布於濁水溪沿岸，以北岸彰化縣居多，另外雲林縣南部邊界一帶標準偏差亦較大。如進一步觀察站井與標準偏差之分布，可以發現站井所在位置標準偏差小，而無站井之區域則標準偏差大，顯現站井空間密度較低的區域，其參數變異數大，而有較高之不確定性。此外，站井透水係數較高者，由於數據以自然對數處理，故在高透水係數站井鄰近區域，其變異數較高。相對於 F1，F2 與 F3 之高標準偏差區域遍佈整個濁水溪沖積扇。

觀察不同分層的半變異元模型，F1 的影響範圍(Range)較 F2 與 F3 為大，三者範圍分別為 23,778、6,400 與 7,478(m)，其代表當間距小於影響範圍時，隨機變數之變異性隨距離增加，但在大於影響範圍時，變異性則趨於基值，隨機變數間互相獨立。這結果顯示 F2 與 F3 之隨機變數，隨機變數之數值相互獨立。

圖 5.2-16 至 5.2-18 分別為不同分層合成之透水係數分布圖，由於 F1 之影響範圍較大，隨機變數數值相依，因此分析結果顯現高透水係數區主要位於濁水溪沿岸、彰化地區扇頂部分與雲林地區扇央部分。反之，F2 與 F3 則相互獨立，圖中則較無顯著趨勢，並將其統計分析參數列於表 5.2-2。



表 5.2-2 100 組透水係數之統計分析

	F1	F2	F3
平均	49.75	47.48	48.81
標準差	36.41	16.68	25.97

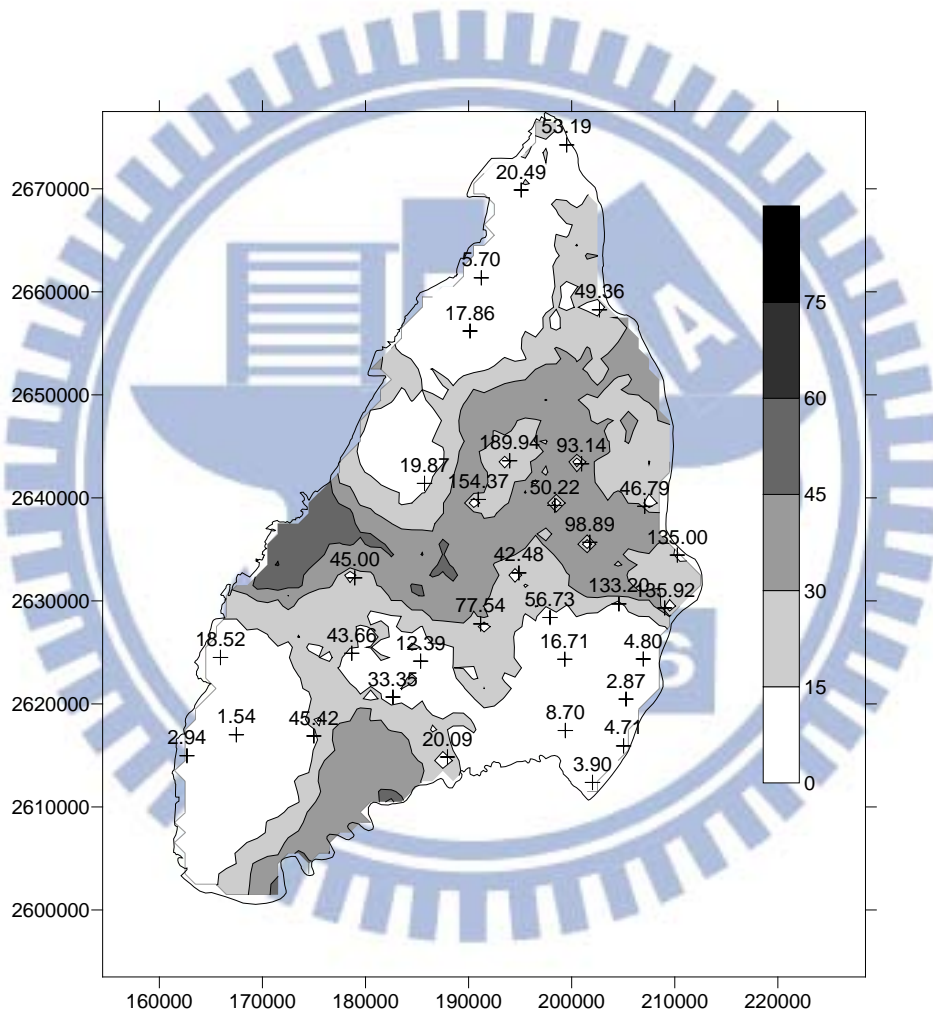


圖 5.2-13 F1 條件模擬透水係數標準偏差分布圖

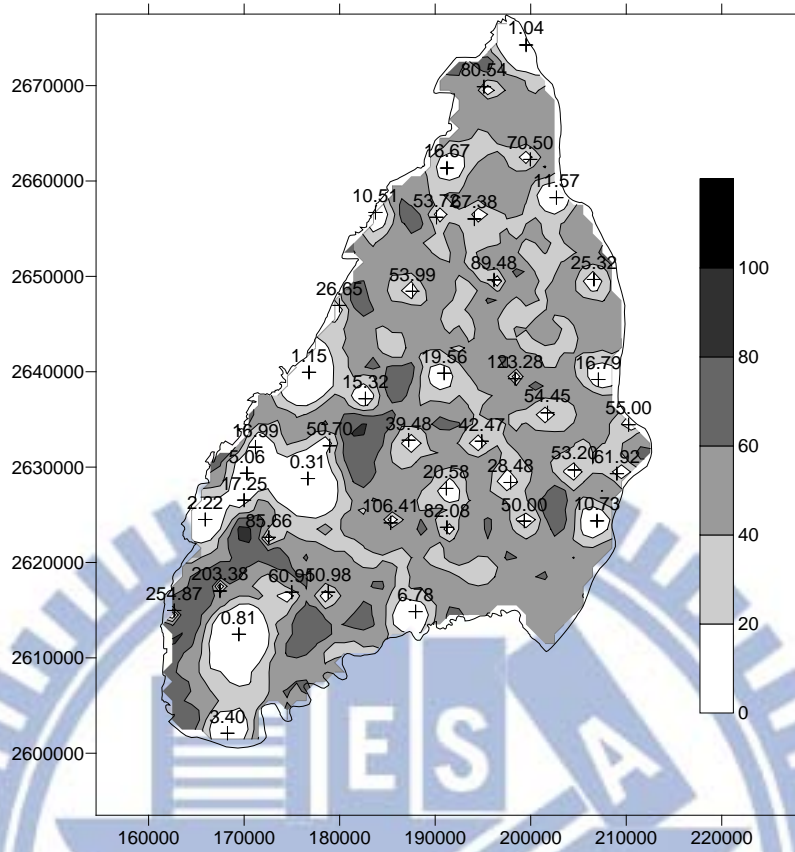


圖 5.2-14 F2 條件模擬透水係數標準偏差分布圖

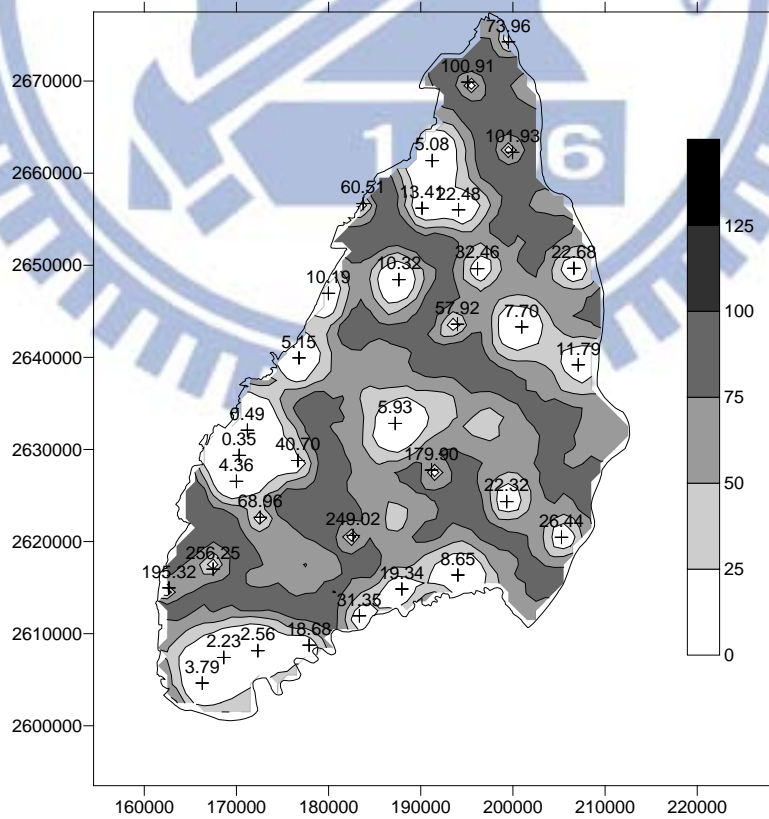


圖 5.2-15 F3 條件模擬透水係數標準偏差分布圖

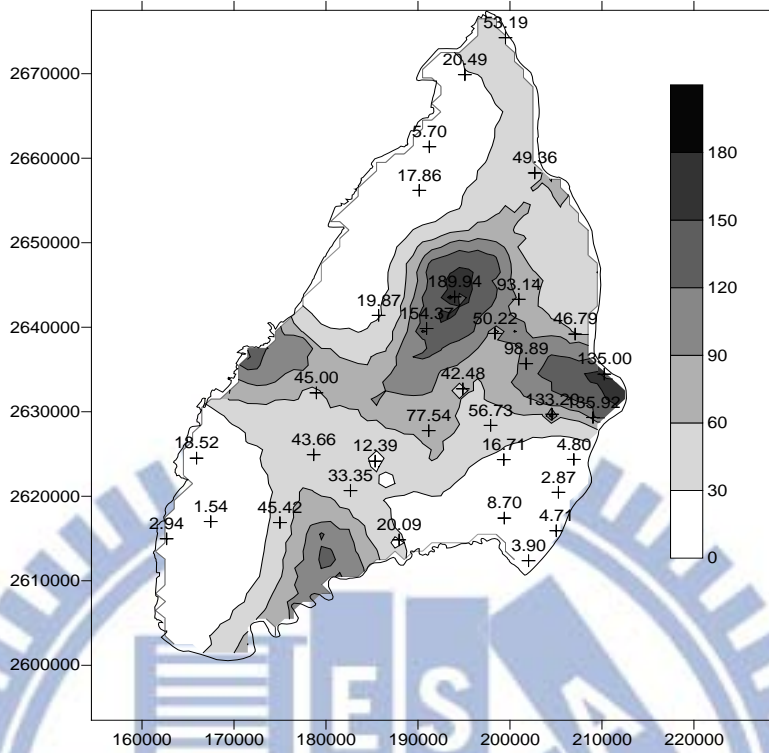


圖 5.2-16 F1 模擬透水係數場 100 組平均空間分布

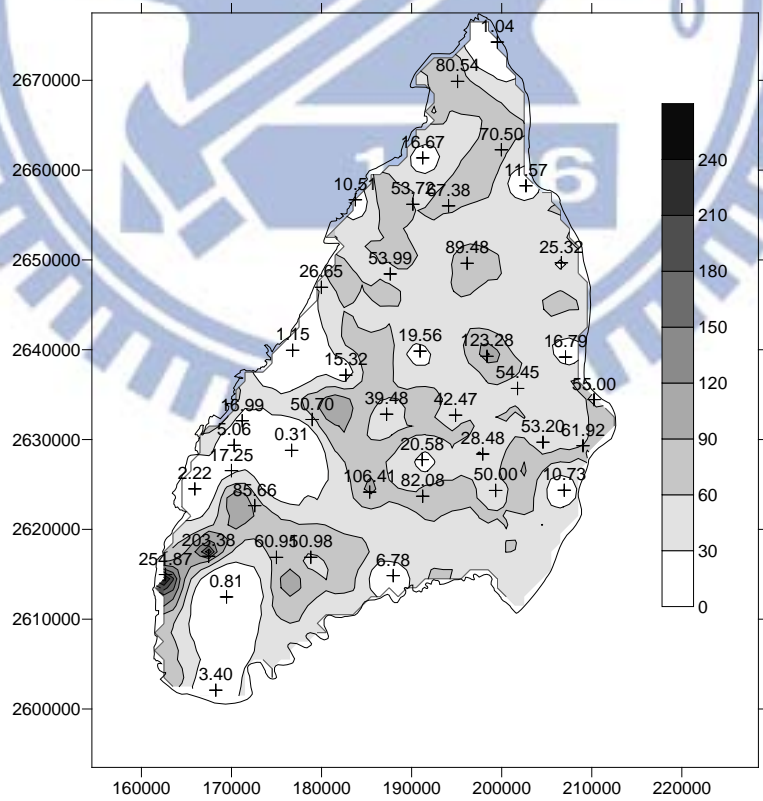


圖 5.2-17 F2 模擬透水係數場 100 組平均之空間分布

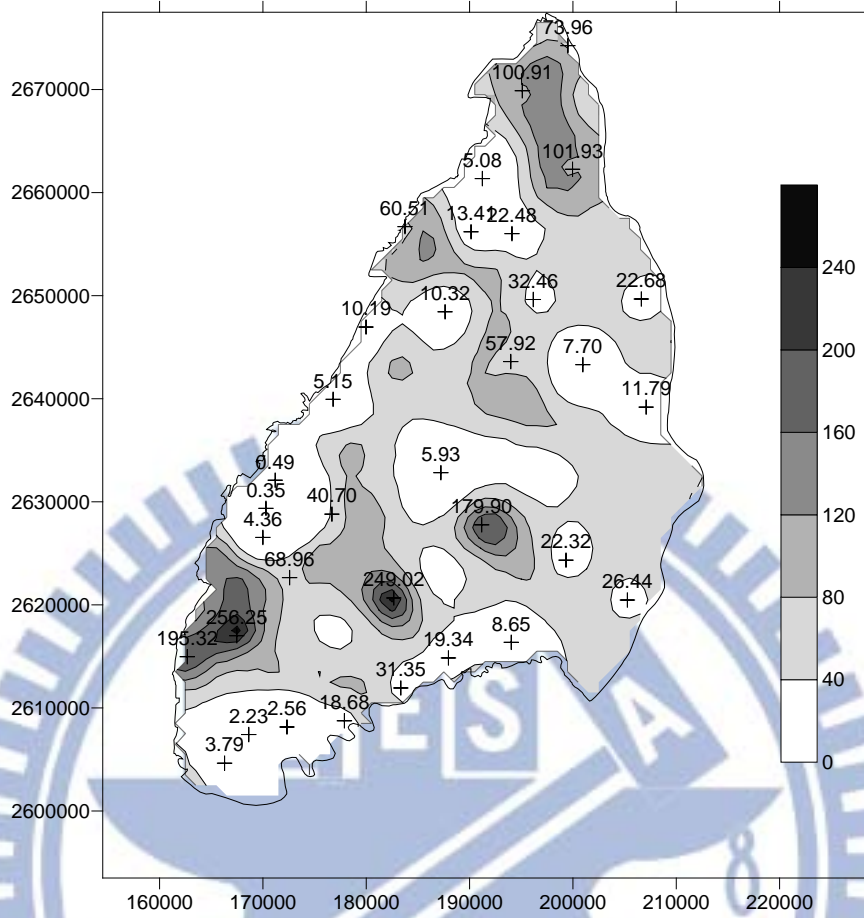


圖 5.2-18 F3 模擬透水係數場 100 組平均之空間分布

5.3 濁水溪沖積扇地下水分佈型水平衡模式建置與分析

將 5.2 節得到的各層 10 組模擬透水係數結果輸入至分佈型水平衡模式，即可得到 1000 組對應的各層抽水量資料。

5.3.1 抽水量與其變異數空間分佈

在分析結果之前，首先須要說明淺層的淨抽水量及深層的抽水量有何差異：因在淺層含水層不僅受到抽水量的影響，還考量了淺層會有補注量的可能性，即表示淨抽水量為抽水量減去補注量，如圖中 5.3-1 所示；而在深層的抽水量方面則很難有深層的補注量發生，所以僅考量了抽水量的發生，如圖 5.3-2 所示。

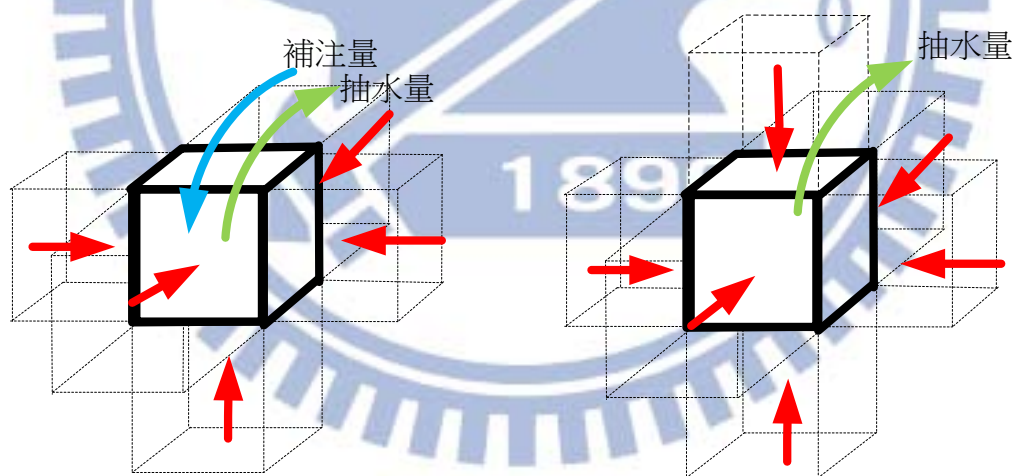


圖 5.3-1 淺層淨抽水量示意圖

圖 5.3-2 深層抽水量示意圖

圖 5.3-3、圖 5.3-4 及 5.3-5 分別為 F1、F2 及 F3 之抽水量空間分佈圖 (1000 組中隨機一組)，表 5.3-1 為該情況之各層總抽水量。其中 F1 總抽水量為負值表示，此處為補注水量較多，而其他層均為正值即表示為抽水。再觀察圖 5.3-3 可發現在濁水溪沖積扇扇頂處明顯，淨抽水水量負值較多表示扇頂補注量明顯，而在圖 5.3-4 與圖 5.3-5 則抽水水量情況較大且分佈均勻。

表 5.3-1 某一組各分層之總抽水量

	F1	F2	F3
總抽水量	-1.64E+06	1.33E+06	6.95E+05

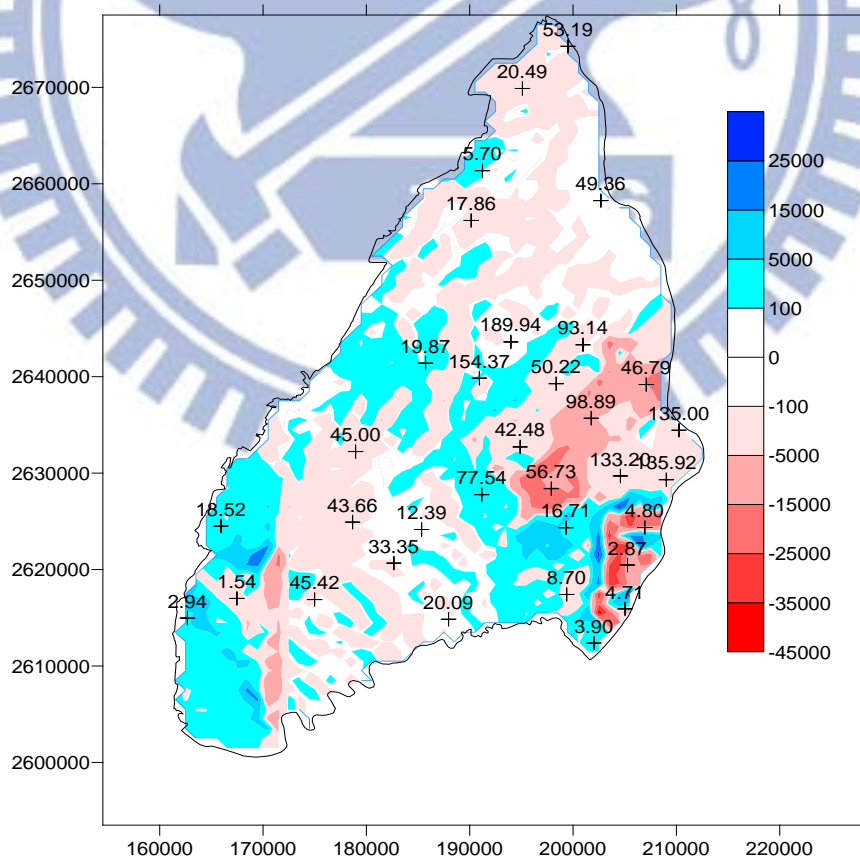


圖 5.3-3 F1 淨抽水水量之空間分佈

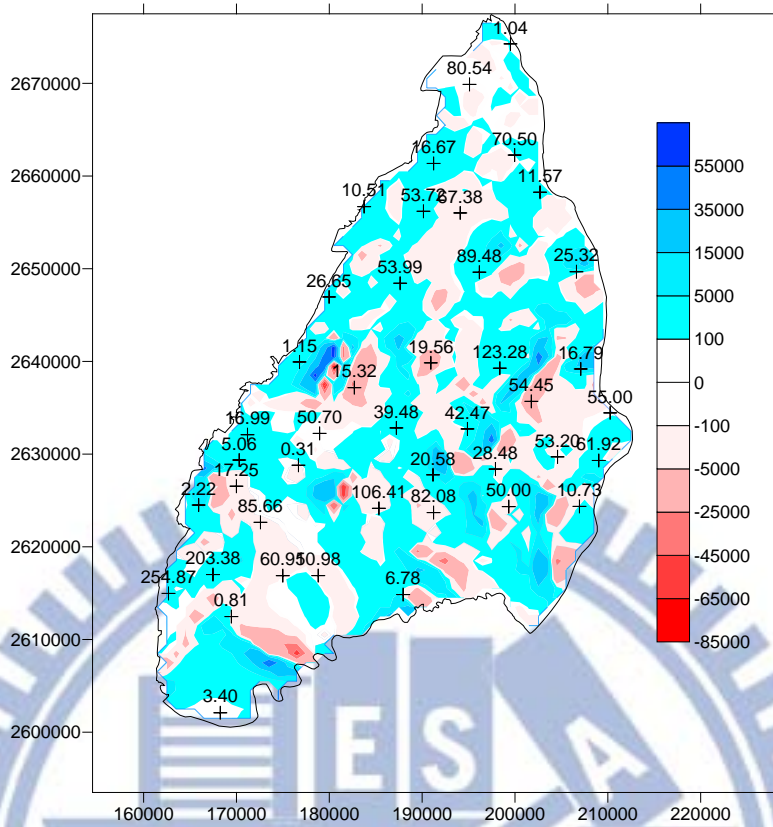


圖 5.3-4 F2 抽水量之空間分佈

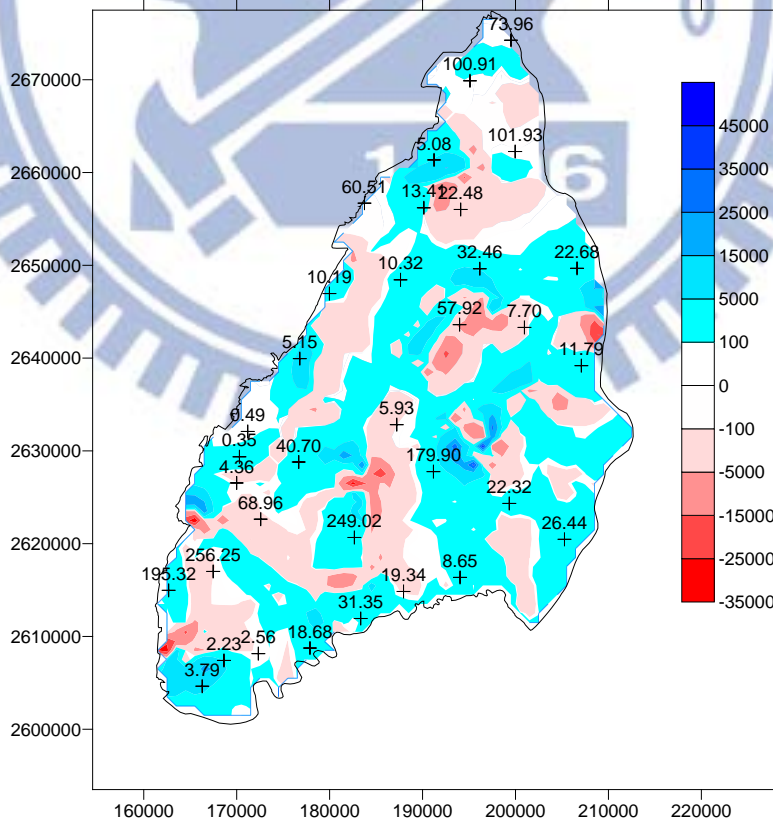


圖 5.3-5 F3 抽水量之空間分佈

圖 5.3-6 至圖 5.3-8 則分別為 F1、F2 及 F3 之抽水量的變異數空間分佈圖。理論上透水係數比較大時，通透性較高則反應在抽水量或是補助量的量也較大，同理隨著透水係數場變異數的變化較大時反應在抽水量的變異數亦變化較大。但圖(圖 5.2-13、圖 5.2-14 及圖 5.2-15)中透水係數場的變異數分布圖比抽水量的變異數分布圖(圖 5.3-3、圖 5.3-4 及圖 5.3-5)較隨著位置不同而有明顯的差異，主要原因為地質架構的阻水層使得透水係數的變動不是很顯著，導致抽水量的變異較不明顯。

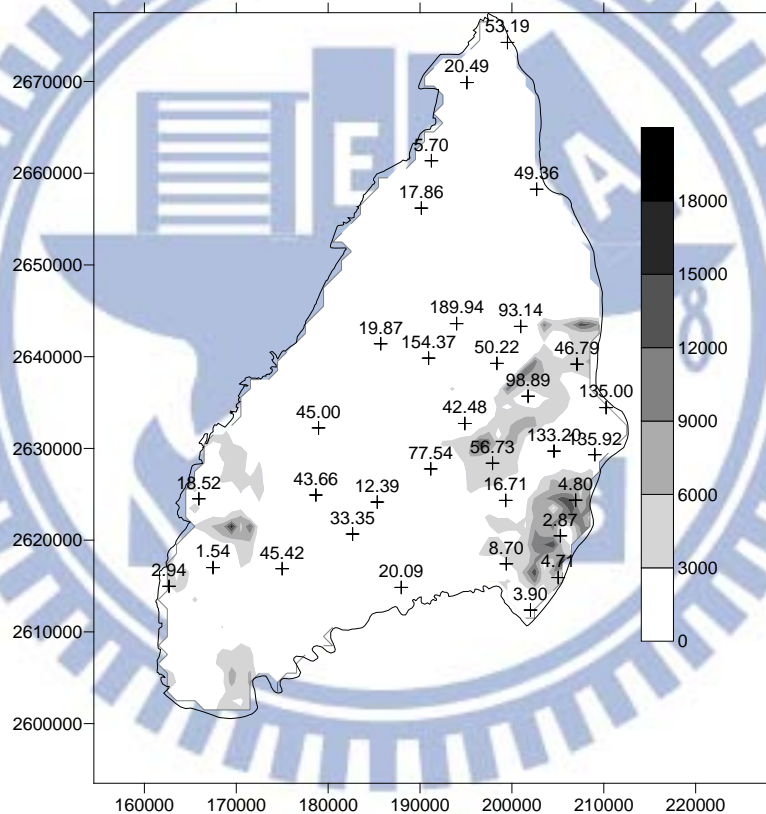


圖 5.3-6F1 之抽水量之變異圖

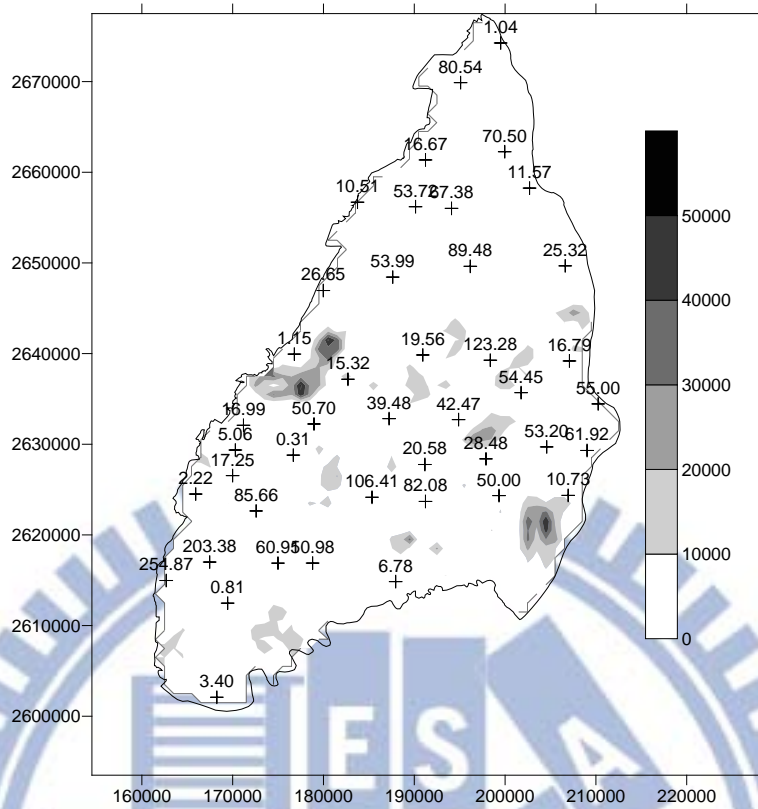


圖 5.3-7 F2 之抽水量之變異圖

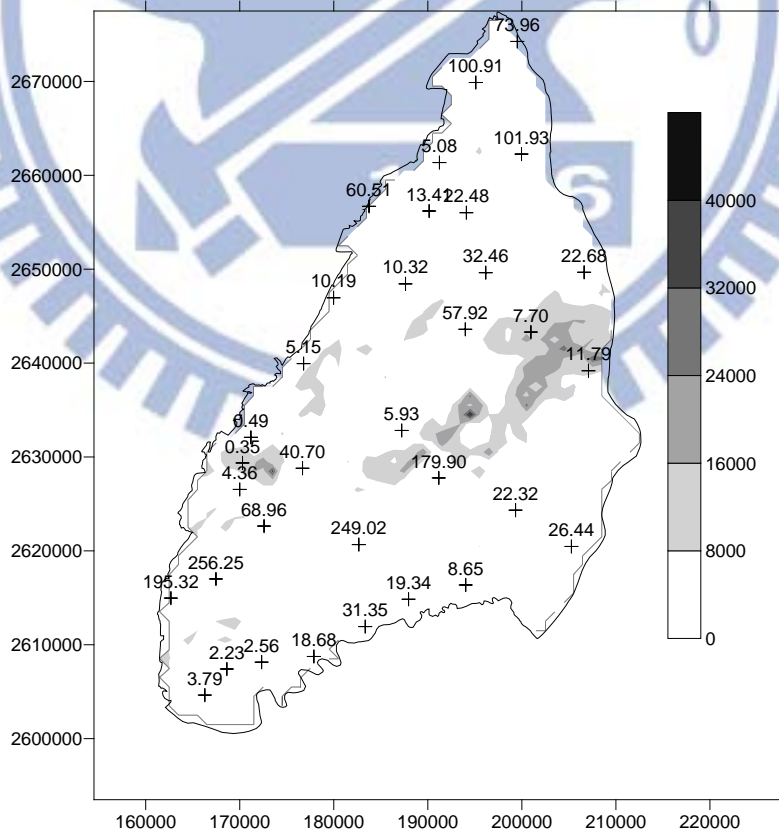


圖 5.3-8 F3 之抽水量之變異圖

5.3.2 抽水量統計分析

圖 5.3-9 至圖 5.3-11 為不同分層下 1000 組推估結果之抽水量組體圖。此圖為抽水量由最大值至最小值間取 10 個間距，並依此間距分類繪製組體圖，如圖中直條圖所示，下方座標即為抽水量等間距範圍，左方則為對應的組數個數，組體圖略為呈現常態鐘形分布。

表 5.3-1 為各分層抽水量之平均值與標準偏差，F1 平均抽水量每天約-1.41 百萬噸，呈現流入狀態，係因為受到補注量之影響。F2 與 F3 之平均抽水量則分別為 1.25 與 0.549 百萬噸。在標準偏差方面，不同分層則有 0.175、0.167 與 0.118 百萬噸，由於表 5.3-1 是以條件模擬所產生之大量透水係數場，藉由分佈型水平衡模式模擬推估之抽水量場，由結果顯示由於水文地質參數本身具有不確定性，因此推估而得之抽水量亦伴隨而有不確定性，顯現傳統常以克利金推估水文地質參數，僅以單一組參數推估區域補注量或抽水量之作法有所疏漏。

表 5.3-2 1000 組各層抽水量之平均及標準差

	F1	F2	F3
平均	-1.41E+06	1.25E+06	0.549E+06
標準差	0.175E+06	0.167E+06	0.118E+06

(m³/day)

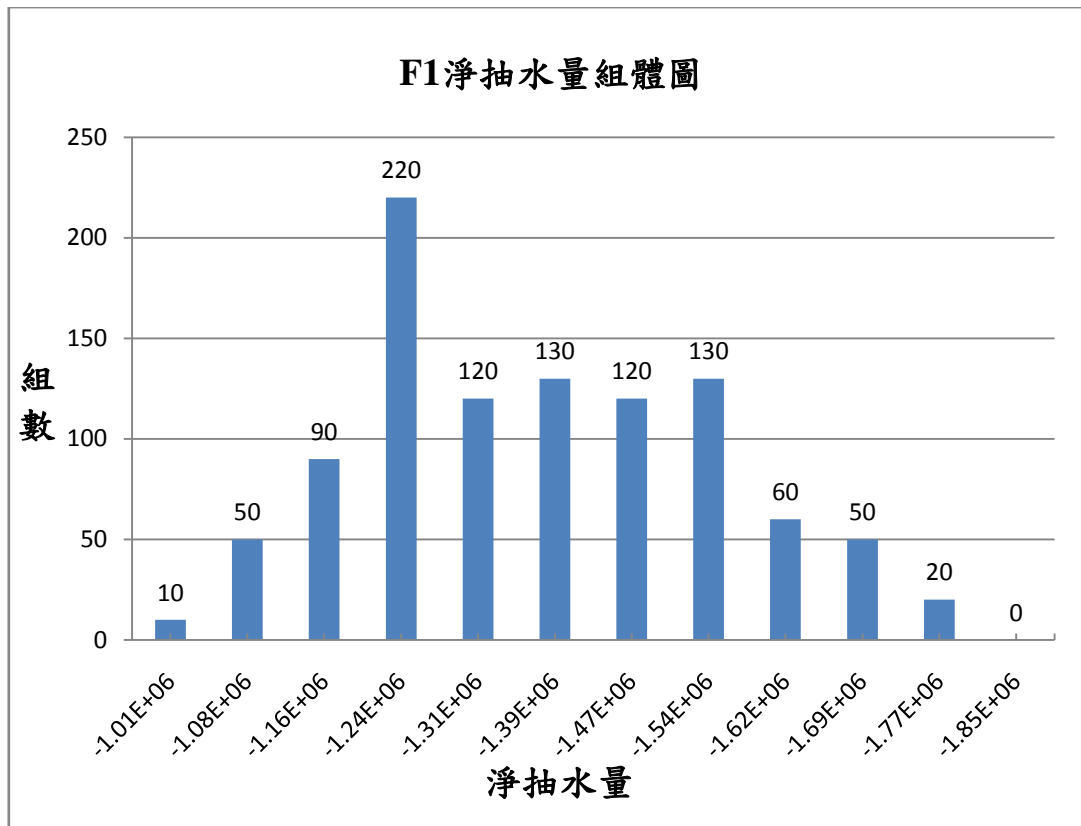


圖 5.3-9 F1 淨抽水水量之組體圖

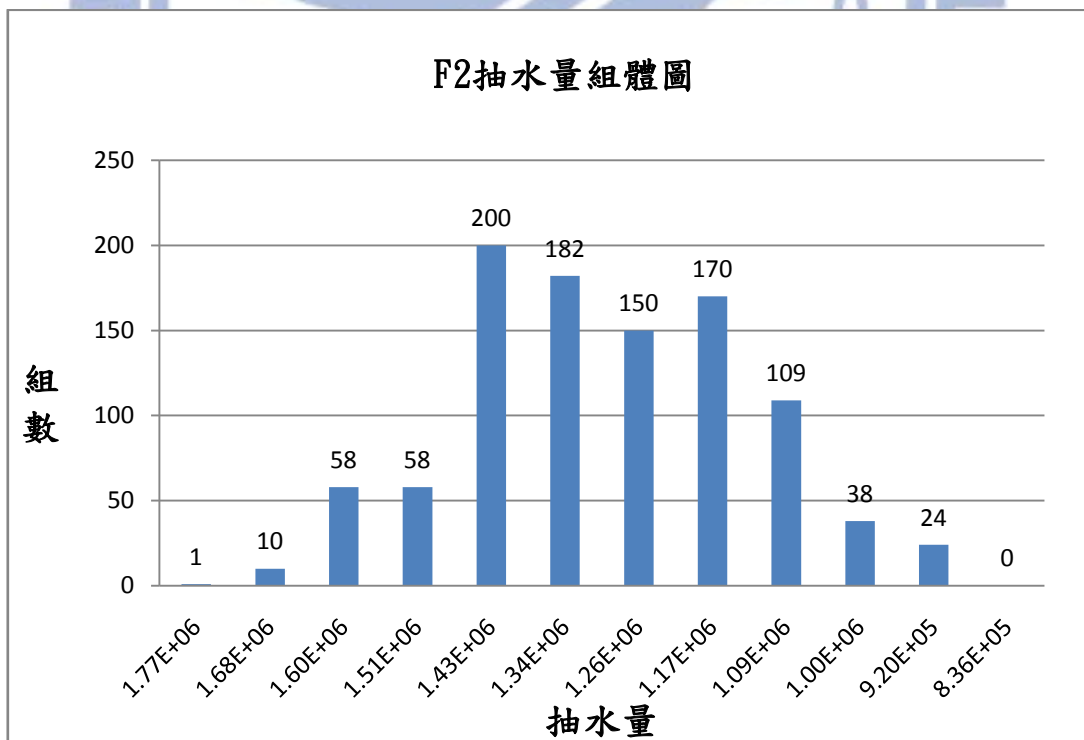


圖 5.3-10 F2 抽水水量之組體圖

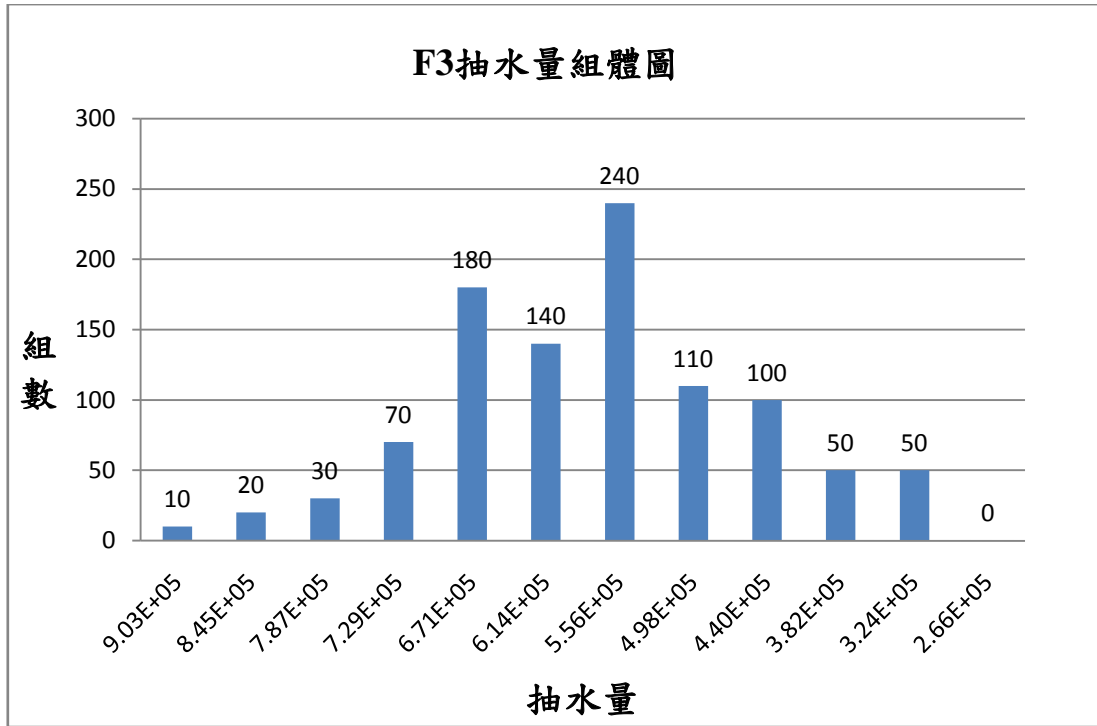


圖 5.3-11 F3 抽水量之組體圖



第六章 結論與建議

6.1 結論

1. 本研究整合條件模擬與分佈型水平衡模式，並應用蒙地卡羅模擬的理念，藉由模擬濁水溪沖積扇 1000 組合透水係數所對應之 1000 組抽水量，完成對濁水溪沖積扇抽水量推估不確定性之研究。分析成果顯示平均而言，年補注量第一含水層(F1)為 5.15 億噸、年抽水量第二及第三含水層(F2 與 F3)分別為 4.56 億噸及 2 億噸，而標準差各層分別為 0.64、0.61 與 0.43 億噸，此結果顯示透水係數之不確定性對抽水量推估確實在各層造成了 12%、13% 及 22% 的影響。
2. 條件模擬部份，本研究應用 GSLIB 之 SASIM 程式針對濁水溪沖積扇各分層分別產生出 100 組透水係數之網格資料，並經驗證顯示，各分層之各組合成網格資料的半變異元值皆符合各分層觀測資料之半變異元，顯示條件模擬所合成之網格資料與觀測資料之半變異元一致。
3. 前述條件模擬所得之各分層合成透水係數資料顯示，各分層透水係數之平均值分別為第一層 49.75、第二層 47.48 與第三層 48.81(m/day)，及標準差分別為 36.41、16.68 及 25.97(m/day)。
4. 傳統模擬模式(如 MODFLOW)為給定參數及其他抽水或補注量

值而計算出水位值，為符合本研究蒙地卡羅模擬，需模擬多組透水係數所對應之多組抽水量的需求，本研究另行以水平衡條件為基礎，發展一在給定水文地質參數與水位值下，計算補注量之模擬模式，應用此模式可對多組透水係數場快速計算出其相對之多組抽水量。

5. 本研究將抽水量之標準差求得其空間分佈圖，可發現在 F1 標準差分佈顯示值較大者集中於扇頂，F2 之標準差分佈則較鬆散並無明顯集中的情況，F3 標準差分佈則顯示較大值集中於扇央。

6.2 建議

1. 本研究目前仍為穩態模擬，建議將來可進行暫態模擬之研究，除了抽水量空間及總量之不確定性外，可進一步評估抽水量時間分佈上之不確定。
2. 本研究實際案例為濁水溪沖積扇，未來可以將本研究應用於不同的地區並比較其相關的半變異元。

參考文獻

1. Avoufirassi , M. and M. A. Marino, "Cokring of Aquifer Transmissivity from Field Measurements of Transmissivity and SpecificCapacity", Mathematical Gelolgy, Vol.16, No.1, pp.19-34. (1984)
2. Deutsch, C. V. & Journel , A. G. ,GSLIB: Geostatistical Software Library and User's Guide,Oxford University Press , New York
3. 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.
4. Pete Bettinger, David Graetz, Kevin Boston, John Sessions and WoodamChung, 2002. Eight Heuristic Planning Techniques Applied to Three Increasingly Difficult Wildlife Planning Problems. Fennica, 36(2),561-584.
5. Warrick, A. W., D. E. Myers and D. R. Nielsen," GeostatisticsMethods Applied to Soil Science", in A. Klute(ed.) Methoes of SoilAnalysis,part1.P53-80 (1986)
6. Y.P. Lin,Yih-Chi Tan,Shahrokh Rouhani,"Identifying spatial characteristicsof transmissivity using simulatedannealing and kriging methods",Environmental Geology,Vol41,pp.200-208(2001)
7. 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。

8. 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。
9. 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。
10. 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向補注量評估。經濟部水資源局委託計畫報告，1998。
11. 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。
12. 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。
13. 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。
14. 劉聰桂，濁水溪沖積扇之地下水資源—碳十四與氙定年/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。
15. 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。
16. 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。

17. 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。
18. 經濟部水利署，地下水資源整體營運規劃與綜合評估，2002。
19. 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
20. 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，國立交通大學，碩士論文，民國 100 年
21. 楊深惠，應用衛星影像辨識與河道水里演算於濁水溪沖積扇地下水數值模擬，國立交通大學，碩士論文，民國 101 年
22. 潘禎哲，改良式降低變異數分析於地下水觀測井網規劃之應用，國立交通大學，碩士論文，民國 83 年
23. 許文鴻，因子克利金應用於地間水質監測井網設計之研究，國立交通大學，碩士論文，民國 93 年
24. 邱怡芬，聯克利金法於地下水觀測井網規劃之應用，國立交通大學，碩士論文，民國 85 年
25. 陳敏華，應用模擬退火法及景觀指數於及水區土地利用最佳化規劃，台灣大學，碩士論文，民國 96 年
26. 蕭朱杏、莊愷璋，地理統計於醫學與環境之應用，地理統計在農業和環境科學之應用研討會論文集，pp.93-112.，民國 90 年

27. 黃信彰、徐國錦，以指標地質統計法建構水文地質模式之研究，
成功大學，碩士論文，民國 91 年
28. 番成正，優勢水流對坡地安定影響之研究 - 以草嶺為例，成功大學，
碩士論文，民國 92 年
29. 劉原，地質統計方法對水文地質場模擬影響之研究，成功大學，
碩士論文，民國 98 年

