

國立交通大學

土木工程學系

碩士論文

改良動態維度搜尋法於地下水模式參數檢定
之應用

**Modified Dynamically Dimensioned Search
Algorithm for Parameter Identification of
Groundwater Model Program**

研究生：許國陞

指導教授：張良正 博士

中華民國一百零二年八月

改良動態維度搜尋法於地下水模式參數檢定
之應用

**Modified Dynamically Dimensioned Search
Algorithm for Parameter Identification of
Groundwater Model Program**

研究生：許國陞

Student : Kuo S. Hsu

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
August 2013
Hsinchu, Taiwan, Republic of China**

中華民國一百零二年八月

改良動態維度搜尋法於地下水模式參數檢定 之應用

學生：許國陞

指導教授：張良正 博士

國立交通大學土木工程學系

摘要

動態維度搜尋法(Dynamically Dimensioned Search Algorithm)係由 Bryan Tolson於2007年所發表的新型態搜尋演算法，屬於一種啟發式演算法(Heuristic Algorithm)，適用於高維度之優選問題，亦曾應用於地下水模式參數檢定問題中，惟若應用原始之動態維度搜尋法，各個參數之更新機率皆是相同，而此將使得演算法後期之參數更新效率相對不佳，因此為提高此演算法應用於地下水參數優選之適用性，有必要針對此進行改進。

本研究將以地下水參數優選為目標，改良原始動態維度搜尋法之參數選定及更新方式，以提高整體參數優選模式之效率。其中選定參數進行更新之機率，從原來之均勻分布修正為以水位誤差大小決定選取機率，參數修正量之正負號亦以水位誤差為參考。本研究為進一步提高收斂效率，亦探討修正鄰近擾動參數，分階段進行參數檢定之效率，並分別以設計案例及濁水溪沖積扇現地模式進行探討，由於動態維度搜尋法具隨機性，因此每項探討皆重複20次計算，再觀察其目標

函數收斂值的平均值與標準偏差，研究結果顯示，修正後的動態維度搜尋法及分階段優選，皆能夠大幅地改善檢定效率。其中濁水溪沖積扇之檢定結果中，各分區之觀測水位與模擬水位的相關係數高達0.999以上，且檢定出來的淨補注量分布，符合現地土地利用之狀況，可間接驗證其檢定結果之可信度，本研究提出之修正型動態維度搜尋法及分階段優選方式，具效率性及容易使用，可為地下水參數檢定之良好工具。



Modified Dynamically Dimensioned Search Algorithm for Parameter Identification of Groundwater Model Program

Student : Kuo-Sheng Hsu Advisor : Dr. Liang-Cheng Chang

Department of Civil Engineering
National Chiao Tung University

Abstract

This study modifies Dynamically Dimensioned Search Algorithm (DDS), which is a heuristic algorithm developed by Bryan Tolson in 2007, for high dimension optimization problems. The proposed algorithm is applied to a parameter identification problem of groundwater problems. The original DDSA assumes equal probability of parameter selection for update and decreasing number of selected parameters while the number of iteration is increasing. These assumptions reduce the efficiency of the search process due to predefined maximum number of iteration and the difficulty of selecting proper parameters especially when the number of iteration is large. This study modified these limitations using a new parameter selection mechanism based on error information obtained from state variables, higher selection probability for higher error, to improve the selection and update of the parameters. The proposed algorithm is applied to highly dimensional parameter identification problems: (1) a hypothetical groundwater simulation model and (2) the groundwater basin of Chou-Shui River Alluvial Fan. In this application, the state variable is groundwater level. To evaluate the convergence efficiency, several scenarios are used and 20 simulation runs are repeated for each scenario. The mean and

standard deviation of the optimal objective values show that the proposed algorithm and two-phase search, which mimics global-local search using different step sizes, obtain best results. The relation coefficient between the simulated and observed water levels in the case of Chou-Shui River Alluvial Fan is 0.999. The identified groundwater recharge agrees with the land use which can be seen as indirect verification of the proposed algorithm.



謝誌

交大是台灣所有大學中數一數二的學府，能夠有幸考上這裡且順利完成口試畢業，著實讓我感到驕傲無比，並對未來更有想法去規劃，更有自信心去實踐。首先最要感謝的就是我的指導教授，張良正博士，老師不但在論文研究上對我們指導有方，更是在日常生活中給予我們充分的經費援助，讓我們能夠無後顧之憂地完成論文，學生由衷感恩之。另外承蒙口試委員，蕭金財教授與鄭蔚辰博士，於口試之前細心審閱學生的論文，並於口試期間給予寶貴的意見，使得本文更趨於完備，在此特別表示衷心謝意。

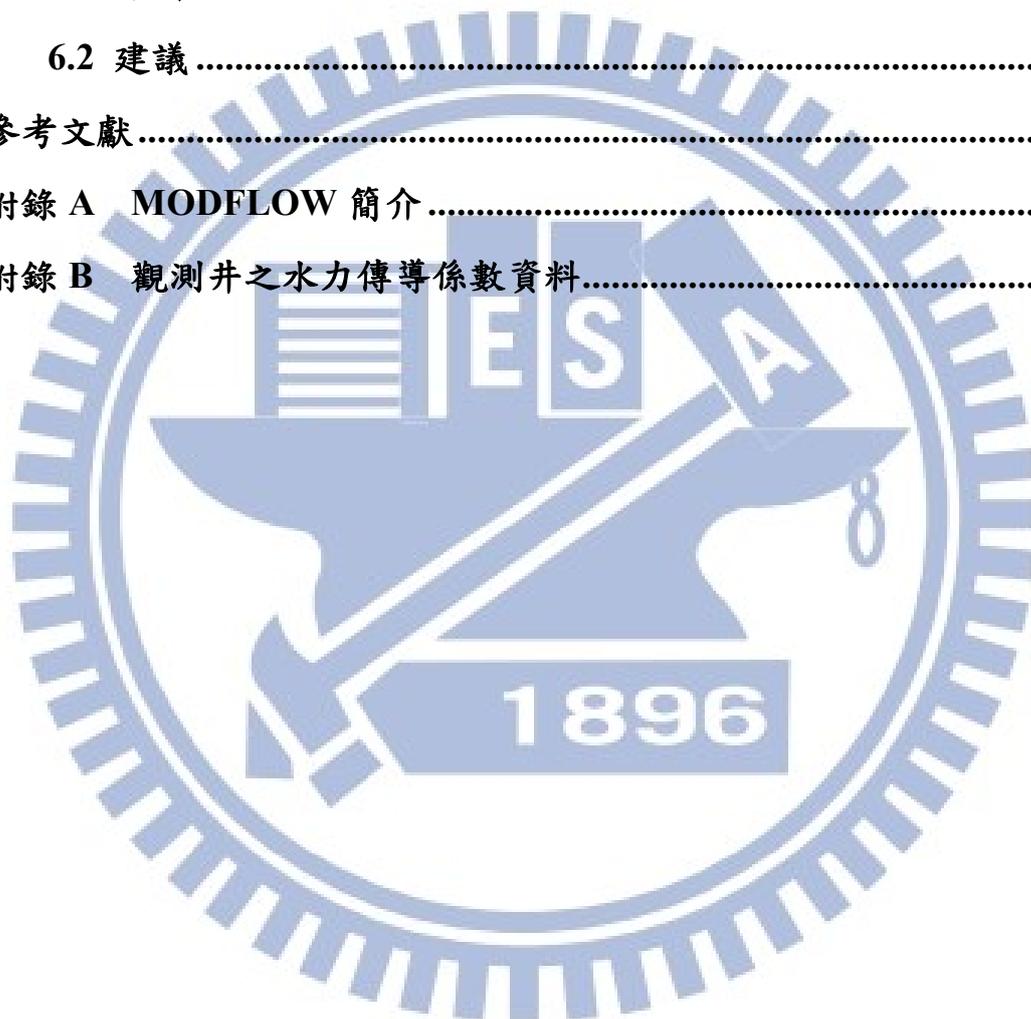
接著感謝 419 研究室中所有的成員，感謝貓哥在我進來的第一個暑假就陪著我們瘋狂打籃球，感謝陳文哥與彬哥對研究細節上的指導或是即時給予適當的意見，感謝雲直學長與祐誠學長也參與論文上的討論，感謝上一屆的學長姐小瑜、阿布、深惠、弼舜的照顧，感謝同窗快三年的呱呱與宏卿的互助支持，以及學弟妹們奕漳、小又、瀚文、阿鎧、海倫、曉雲、韋炫的陪伴與幫忙。

最後感謝家人在經濟上與精神上的支持與鼓勵，以及大學時候或是研究所認識的大小朋友的力挺，讓我得以順利取得碩士學位，謝謝你們，感恩再感恩大家。

目錄

摘要.....	I
Abstract.....	III
謝誌.....	V
目錄.....	VI
表目錄.....	VIII
圖目錄.....	IX
第一章 緒論.....	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.....	5
2.1 啟發式演算法.....	5
2.2 動態維度搜尋法.....	6
2.3 濁水溪沖積扇地下水收支之相關研究.....	7
第三章 研究方法.....	9
3.1 動態維度搜尋法介紹.....	9
3.2 修正動態維度搜尋法的原因與方法.....	15
3.3 MDDS 地下水模式參數檢定系統的建置.....	20
第四章 數值試驗.....	21
4.1 數值試驗流程與案例設計.....	21
4.2 DDS 與 MDDS 地下水檢定系統之檢定結果比較.....	26

第五章 濁水溪沖積扇實例驗證	38
5.1 濁水溪沖積扇地下水數值模式建置	38
5.2 濁水溪沖積扇地下水模式參數檢定結果分析	50
5.3 MDDS 檢定濁水溪沖積扇之檢定成果	55
第六章 結論與建議.....	63
6.1 結論	63
6.2 建議	65
參考文獻.....	66
附錄 A MODFLOW 簡介	69
附錄 B 觀測井之水力傳導係數資料.....	74



表目錄

表 2-1 濁水溪沖積扇地下水收支相關研究比較.....	8
表 3-1 動態維度演算法所有修正型態之整理	20
表 4.2-1 不同修正方式的演算法下之檢定目標函數值的平均值	30
表 4.2-2 不同修正方式的演算法下之檢定目標函數值的標準偏差 ...	30
表 4.2-3 第一階段之檢定結果再加入 MDDS_P 後之綜合比較	36
表 5.2-1 DDS 與 MDDS 之檢定結果比較.....	52
表 5.2-2 第一階段之檢定結果再加入 MDDS_P 後之綜合比較	54



圖目錄

圖 1-1 研究步驟流程圖	4
圖 3-1 常態分布亂數	13
圖 3-2 動態維度搜尋法的演算步驟流程圖	14
圖 3-3 MDDS_P 之修正機制	19
圖 3-4 自動化地下水參數檢定系統架構圖	21
圖 4.1-1 地下水模式參數檢定之正確性驗證流程	22
圖 4.1-2 設計案例之模擬網格	24
圖 4.1-3 設計案例之概念分層	24
圖 4.1-4 第一分層分區與邊界及 K 值(公尺/天)配置圖	25
圖 4.1-5 第二分層邊界及 K 值(公尺/天)配置圖	25
圖 4.1-6 第三分層分區與邊界及 K 值(公尺/天)配置圖	26
圖 4.2-1 最大迭代次數 M=100 之不同修正方式的演算法下 之檢定目標函數值的平均值與標準偏差	30
圖 4.2-2 最大迭代次數 M=500 之不同修正方式的演算法下 之檢定目標函數值的平均值與標準偏差	31
圖 4.2-3 最大迭代次數 M=1000 之不同修正方式的演算法下 之檢定目標函數值的平均值與標準偏差	31
圖 4.2-4 最大迭代次數 M=5000 之不同修正方式的演算法下 之檢定目標函數值的平均值與標準偏差	32
圖 4.2-5 最大迭代次數 M=100 之不同修正方式的演算法下 之檢定曲線	32

圖 4.2-6 最大迭代次數 $M=500$ 之不同修正方式的演算法下 之檢定曲線	33
圖 4.2-7 最大迭代次數 $M=1000$ 之不同修正方式的演算法下 之檢定曲線	33
圖 4.2-8 最大迭代次數 $M=5000$ 之不同修正方式的演算法下 之檢定曲線	34
圖 4.2-9 MDDS 分別以 $R=0.2$ 與 0.01 直接檢定 與分階段檢定結果之目標函數值比較	37
圖 4.2-10 MDDS 分別以 $R=0.2$ 與 0.01 直接檢定下 分區 4 的淨補注量檢定過程	37
圖 5.1-1 地層柱狀圖分布位置	39
圖 5.1-2 濁水溪沖積扇水文地質架構概念分層	40
圖 5.1-3 濁水溪沖積扇地下水邊界之概念圖	41
圖 5.1-4 濁水溪沖積扇模式之格網劃分	43
圖 5.1-5 濁水溪沖積扇模式第 1 分層格網劃分	44
圖 5.1-6 濁水溪沖積扇模式第 2-7 分層格網劃分	45
圖 5.1-7 濁水溪沖積扇模式第 49 列格網劃分割面圖	45
圖 5.1-8 濁水溪沖積扇模式第 1 分層徐昇式網格分區	47
圖 5.1-9 濁水溪沖積扇模式第 3 分層徐昇式網格分區	47
圖 5.1-10 濁水溪沖積扇模式第 5 分層徐昇式網格分區	48
圖 5.1-11 濁水溪沖積扇模式第 2 分層水力傳導係數分布	48
圖 5.1-12 濁水溪沖積扇模式第 4 分層水力傳導係數分布	49
圖 5.3-1 第一層觀測水位與檢定後模擬水位等值圖	57
圖 5.3-2 第三層觀測水位與檢定後模擬水位等值圖	58
圖 5.3-3 第五層觀測水位與檢定後模擬水位等值圖	59

圖 5.3-4 檢定後第一層淨補注量分布情形60

圖 5.3-5 檢定後第三層淨補注量分布情形61

圖 5.3-6 檢定後第五層淨補注量分布情形62



第一章 緒論

1.1 研究動機

台灣雨量十分豐沛，但因地狹人稠與雨量於時空上的分布極不均勻，加上河川坡陡流急、腹地狹隘，逕流量被攔蓄利用的比例約佔年總逕流量的 18%，其餘均奔流入海，所以實際上每人每年所分配到的雨量僅及世界各區平均值的七分之一而已。為了增加河川流量的利用率，增建水工結構物為最直接的方法，但由於近年來環保意識漸長與原本地表水工結構物的密度趨於飽和，使得該方法並無法完全落實；幸好台灣尚有蘊含豐富的地下水資源，假使能好好利用將可減緩枯水期內缺水的負擔。因此為了有效地運用與管理地下水資源，建立地下水模式分析相關資訊是最常用的方法，其中參數檢定流程是數值模式建置過程中之必要步驟。

一般的參數檢定方法可分為人工與自動化兩大類，人工參數檢定是以試誤法(Trial and Error)來調整參數值大小，使得觀測水位與模擬水位兩者之差異縮小至可接受範圍內，但此方式在檢定的過程中往往過於耗時，且對檢定人員的背景知識要求甚高。相對來說，自動化參數檢定一般則是結合優選法與地下水模式，透過優選過程，自動搜尋最佳之參數解，可改善人工檢定費時費力的問題。

因本研究所欲求解之問題為高維度之參數檢定問題，且 Bryan

Tolson(2007)指出動態維度搜尋法(Dynamically Dimensioned Search, DDS)因為沒有複雜的參數調整方式，即演算法中無需另行調整的控制參數，且可由使用者自行設定的最大迭代次數下，自動地調整搜尋維度而找到良好的解，所以它較其他演算法更適用於高維度問題上，因此本研究採用動態維度搜尋法進行地下水模式之參數檢定。然而，動態維度搜尋法在求解高維度之地下水逆問題時，因其隨機挑選待檢定參數，且參數檢定數量隨著迭代次數增加而下降，造成其目標函數並無法隨著搜尋次數增加而有效改善，因此尚有改善之空間。

1.2 研究目的

本研究主要目的為改善動態維度搜尋法求解高維度地下水參數檢定問題時的效率與精度，使得求解問題之目標函數可隨著搜尋次數增加而更加有效下降，達到本研究預期之合理範圍。

1.3 研究流程

本研究之研究流程如圖 1-1 所示，第一階段為資料蒐集，蒐集內容主要為地下水模擬、參數檢定與動態維度搜尋法之相關應用文獻等資料，在完成資料蒐集後，將可熟悉地下水模擬與參數檢定的專家知識，並對動態維度搜尋法有適切的了解。

第二階段為系統建置，此階段可分為地下水模式建置與 MDDS 地下水參數檢定系統兩部分。在地下水模式建置部分，本研究採用 USGS(美國地質調查所)所開發的地下水模式 MODFLOW，此模式亦是目前最被廣泛使用的地下水模式之一，其乃一使用有限差分法之三維地下水模式，可模擬受壓與非受壓之穩態與非穩態流場，本研究所採用的版本為 MODFLOW-2000，有關 MODFLOW 其他介紹詳見附錄 A。在 MDDS 地下水參數檢定系統建置部分，本研究首先修正動態維度搜尋法之演算流程，改善其參數檢定效率，本研究稱之為修正型動態維度搜尋法(Modified Dynamic Dimension Search, MDDS)，接著本研究建立 MDDS 與 MODFLOW 的輸入與輸出介面，使其可應用於地下水模式之參數檢定問題上。

第三階段為系統測試，此階段為進行數值試驗，以簡例測試 MDDS 與 DDS 之檢定結果差異，測試 MDDS 改善 DDS 檢定效能之程度。

第四階段為實際案例測試，此階段本研究選取濁水溪沖積扇建立地下水模式，因濁水溪沖積扇為流域尺度之實際案例，屬於高維度之地下水參數檢定問題，因此適合作為 MDDS 之測試對象。本研究分別以 DDS 與 MDDS 進行參數檢定，由兩者之檢定結果進一步分析 MDDS 改善 DDS 檢定效能之程度。

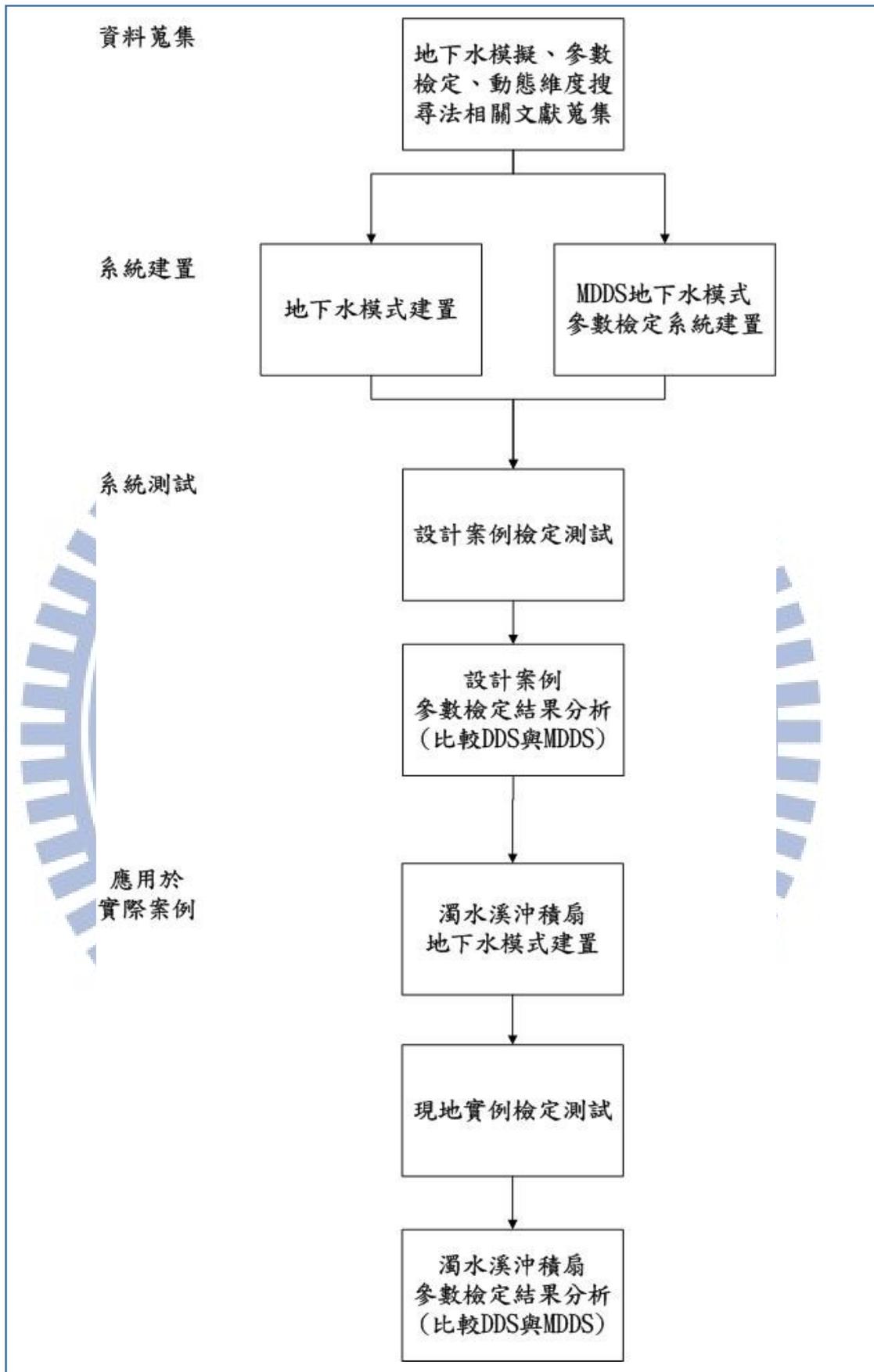


圖 1-1 研究步驟流程圖

第二章 文獻回顧

2.1 啟發式演算法(Heuristic Algorithm)

傳統的作業研究(Operation Research)中，針對不同問題所提供的演算法，例如線性規劃、整數規劃與非線性規劃等，對於某些特定問題而言，這些方法已經被證實為最適合的解決方法。然而，對許多實務問題而言，問題型態與特性極為複雜，使得最佳解之搜尋上近乎不可能。

其中就以具有嚴謹理論基礎的梯度搜尋法(Gradient Search Method)來說，基於以下兩大原因，使其不適用於求解多維度最佳化問題。其一，搜尋解的範圍只侷限於初始解附近，若無法取得良好的初始解，則會因為演算機制中沒有跳脫困境的設定，非常容易發生落入局部最佳解(Local Optimal Solution)的情形，而缺乏了多樣化(Diversity)的搜尋功能；其二，梯度下降法只能處理導數存在的問題，但在自然界或工程實務上，許多問題描述通常是不連續的，進而限制了求解的可能性。

為了克服以上所述的缺點，遂有了啟發式演算法的發展。啟發式演算法大部分起源於自然界觀察而來的現象，如有模仿生物進化過程的演化式演算法(Evolutionary Algorithms)，有習自蟻群覓食的蟻拓搜尋法(Ant Colony Optimization)，也有效法鳥類覓食的粒子群搜尋法(Particle Swarm Optimization)，亦有兩代之間基因轉換的遺傳搜尋法(Genetic Algorithm)、禁忌演算法(Tabu Search)、模擬退火演算法(Simulated Annealing Algorithm)、動態維度演算法(Dynamically Dimensioned Search Algorithm)等等，前述的啟發式演算法大都成功地設計出避免落入局部最佳解的機制，如禁忌搜尋法中禁忌名單機制、

遺傳演算法中的突變運算元，模擬退火演算法跳脫出局部最佳解的方式則是依溫度的變化，設定解移動至鄰近區域的機率；而動態維度搜尋法則是隨著迭代次數的增加，對於被選取更新的待參數會大幅變更且逐步減少的機制下，改變解的搜尋範圍大小，使得演算法能夠更廣泛地尋找候選解，以此跳脫局部最佳解。

以上這些搜尋方法，不外乎均是聰明試誤法，利用各種自然法則、學習能力、機率特性、模糊概念、記憶功能等組合，目的在於建構出更加具有最佳化求解能力之演算方法，甚至是能應用於不同領域中，以達到萬用為最終目的，藉此因應未來高科技發展可能帶來的龐大解問題。

2.2 動態維度搜尋法

動態維度搜尋法是由 Bryan Tolson(2007)所提出，該篇文章內容主要為該新型態演算法應用於河川模式的自動檢定上，並將檢定結果與 SCE(Shuffled Complex Evolution)演算法比較，發現動態維度搜尋法只需要 15%至 20%的搜尋次數，即可達到與 SCE 相同的目標函數值，證明其檢定效率良好。

接著 Tolson 及其研究團隊等人(B.Tolson, et al. ,2009、2010、2012)，也陸續應用動態維度搜尋法於供水管網的研究上，其中包含更進一步地對演算法修正，而衍生出「HD-DDS」(Hybrid Discrete-DDS)與「PA-DDS」(Pareto Archived-DDS)之不同類型的動態維度演算法。另外 L. Shawn Matott, Kenny Leung, Junyoung Sim 等人(2011)應用於地下水模式中的 Pump-and-Treat 參數檢定問題上，但問題維度僅僅是 6 個待參數而已，並未驗證於高維度問題上的求解能力。

黃與熊(2010)亦採用修正之後的動態維度搜尋法，對多水筒模式進行參數檢定，其修正主要部分為更新解之後重新調整的方式，與鄰近擾動參數會隨迭代次數變化的機制，進而正確地預測地下水位與檢定出合理的邊坡穩定因子。

杜(2009)發表的論文，題目為「動態維度搜尋法應用於河川不恆定流模式自動率定之研究」，內容為應用該演算法於河川模式的率定上，其待定參數的設定上為曼寧 n 值(河川阻力係數)，以淡水河流域為研究區域，選用不同在台灣發生的颱風場次資料去測試，發現於檢定結果差不多的狀況之下，比起前人的研究中，該演算法能夠大幅降低檢定時間。

2.3 濁水溪沖積扇地下水收支之相關研究

而關於濁水溪沖積扇之相關地下水收支研究甚多，如劉聰桂(1996)利用熱核爆氙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；台灣大學土木研究所(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模式評估地下水補注量；農業工程中心(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是逆推地下水收支；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；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；推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 2-1。

表 2-1 濁水溪沖積扇地下水收支相關研究比較

方法	估算人	補注量(億噸)
飽和地下水流模式 1971~1985	農業工程研究中心(1989)	12.25
以地下水氣 \geq ITU 為判別值 1953~1993	劉聰桂(1996)	10.7
地下水流模式 1995~1996	中興工程顧問公司(1997,1998)	8.18
未飽和一維垂向水流模式 1995~1996	台灣大學土木工程研究所(1997)及台灣大學水工試驗所(1998)	11.69
地下水流模式	葉文工(1999)	8.97
垂向入滲評估 豐、平、枯年 1981、1973、1964 年	能邦科技顧問股份有限公司(2000)	14.29、13.81、12.55
垂向入滲補注評估 豐、平、枯年 1981、1973、1964 年	巨廷工程顧問股份有限公司及國立交通大學(2005)	8.96、8.20、7.13
水位歷線法 1999、2000、2001	江崇榮、黃智昭、陳瑞娥(2006)	15.36、15.34、15.30
水位歷線法 1997~2005	地調所及國立交通大學(2009)	13.85

第三章 研究方法

本研究應用動態維度搜尋法於地下水模式參數檢定問題上，首先於 3.1 節概述動態維度搜尋法的發展與特點，而後介紹其演算機制與步驟；接著 3.2 節則是說明修正其演算法的原因與方法，主要有兩大修正方案，分別是檢定時選取待參數的標準，與待參數更新的修正方向；最後加上兩階段檢定流程建立，使得檢定結果更精進。本章最後 3.3 節說明應用修正型動態維度搜尋法於自動化參數檢定系統之開發流程。

3.1 動態維度搜尋法介紹

3.1.1 動態維度搜尋法的發展與特點

動態維度搜尋法是由 Bryan Tolson 於 2007 年所發表的新型態全域式搜尋演算法，屬於一種啟發式演算法(Heuristic Algorithm)，其中 Bryan Tolson 的個人網頁上尚有自撰的動態維度搜尋法程式碼可供學者下載，分別是 Fortran 與 Matlab 版本，並附上簡易說明文件以利本研究實作應用。以下先說明 Bryan Tolson 於上述的說明文件中，所敘述動態維度搜尋法的特點。

- 一、動態維度搜尋法是一項求解率定問題的檢定工具，其檢定概念是基於使用者自行設定的最大迭代次數下，以找到良好的解(而非全域最佳解)為目的。
- 二、動態維度搜尋法唯一要設置的控制參數為鄰近擾動參數(Neighborhood size perturbation parameter)，其意義為選取待定參數更新的修正量大小；經過許多案例測試之後，發現其值等於0.2時，其檢定過程中不但可以輕易地避開局部最佳解，且檢定後的目標函數值為穩健的(Robust)。
- 三、本演算法會在設定最大迭代次數下改變搜尋解的範圍大小(Scale the search)，而沒有其他用以判斷的檢定停止機制。對於演算法來說，最大迭代次數是輸入資料(input)而非控制參數，通常是由使用者考量計算成本之後而決定。

3.1.2 動態維度搜尋法的演算機制與步驟

動態維度搜尋法的演算機制說明如下：不論使用者設定的最大迭代次數多少為何，在候選解(Candidate Solution)的搜尋上，均可由全域式(globally)的搜尋朝向區域式(locally)的搜尋方向進行；而此項調整機制為隨著迭代次數的增加，待定參數被選取的數量會逐漸下降，並以隨機方式選取待定參數進行修正，此即為其「動態維度」之意義。而每一次迭代所產生的候選解，則是根據截至目前迭代次數為止的最佳

解(以下簡稱現有解)進行調整而得，之後再將候選解與現有解代入目標函數式後進行比較，若候選解能求得較現有解更小之目標函數值(假設求解最小值問題)，則候選解將取代現有解，成為下一次搜尋時的現有解，反過來說，則不接受此次的搜尋結果，再由原本的現有解產生另一組新的候選解，如此反覆執行直到到達最大迭代次數為止。最後一次迭代的最佳目標函數值與其對應的待定參數，即是 DDS 的檢定結果。

DDS 的演算步驟如圖 3-2 所示，可分為三個主要步驟，依序是初始解設定、選取參數維度的決定、更新現有解；而其所需設定之參數分別為鄰近擾動參數(r)、最大迭代次數(m)、以及待定參數之上下限(x^{max} 與 x^{min})。以下依序說明各演算步驟。

1. 初始解設定

初始解產生方式可分為兩種，第一種是系統本身利用隨機變數產生初始解。第二種是使用者自行給定待定參數產生初始解。最後將初始解代入目標函數式中即可求得目標函數值，即為本研究的初始目標函數值，如式 3-1 所示，其中 x^0 是初始解， F 為目標函數。

$$\begin{aligned} x^0 &= [x_1, x_2, x_3 \dots x_D] \\ \text{Set } F_{best} &= F(x^0), x^{best} = x^0 \end{aligned} \quad (3-1)$$

2. 選取參數維度的決定

以下是動態維度搜尋法的參數維度選取法則：

於鄰近解空間的 D 個待定參數中，按照機率 $P(i)$ 選取 J 個，如 3-2 式所示，其中 i 為目前迭代次數，其選取法則以 0-1 的隨機變數與機率 $P(i)$ 相比，若小於 $P(i)$ 值則選取，若隨著迭代次數的增加，每個獲選的參數個數將逐次減少，相當於由一開始的全域式搜尋，慢慢的朝區域式搜尋移動，直到到達最大迭代次數為止，才停止演算。

$$P(i)=1-[\ln(i)/\ln(m)] \quad (3-2)$$

例如假設本研究求解的是待定參數維度(個數)為 20，最大迭代次數為 1000 的參數檢定問題，目前迭代次數為 1，代入式(3-2)中， $P(1)=100\%$ ，亦即第一次搜尋過程中，所有 20 個待定參數均會被挑選進行更新，而第二次搜尋過程中，被選取出來更新的參數個數之「期望值」等於 $P(2)$ 乘上 20；依此類推，之後的每個迭代次數被挑選到的待定參數將持續減少。若在某幾次迭代中沒有挑選到任何一個待定參數，則系統會隨機給定其中一個去更新。

3. 更新待定參數

將第二步驟後獲選的待定參數，依照式(3-3)式進行更新。

For $j=1,2,\dots,J$

$$x_j^{new}=x_j^{best}+\delta_j \times N(0,1) \quad (3-3)$$

其中 $\delta_j = r(x_j^{max} - x_j^{min})$ ，即鄰近擾動參數(r)與待定參數上下區間大小的乘積。而 $N(0,1)$ 則是以 $\mu = 0$ 為平均數， $\sigma = 1$ 為標準偏差的常態分布亂數，又稱標準常態分布亂數(如圖 3-1 所示)。補充說明， J 等於總待定參數個數， j 則是代表被選取的參數；而鄰近擾動參數的意義為待定參數之修正量相對大小。

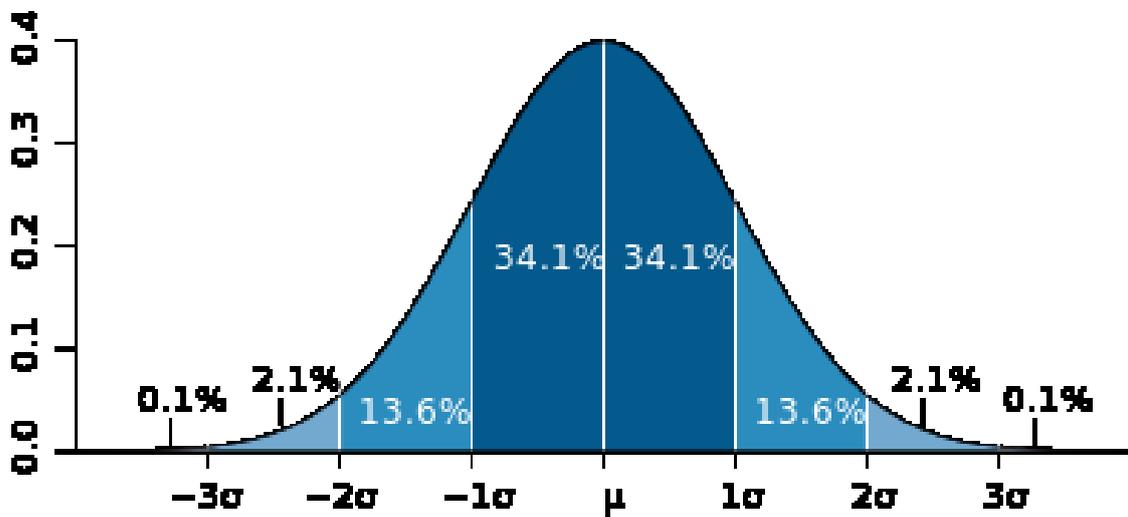


圖 3-1 常態分布亂數

接著必須修正更新之後的解，使其同樣滿足於待定參數的上下區間內，分別依照 3-4 式與 3-5 式去調整。其中 3-4 式為針對更新過後的參數超出了下邊界的情況，3-5 式則反之。

$$\text{If } x_j^{new} < x_j^{min}, \text{ Then } x_j^{new} = x_j^{min} + (x_j^{min} - x_j^{new}) \quad (3-4)$$

$$\text{If } x_j^{new} > x_j^{max}, \text{ Then } x_j^{new} = x_j^{max} - (x_j^{new} - x_j^{max}) \quad (3-5)$$

最後將更新且經過上述調整後之參數代入目標函數式中，與上一階段的現有解相比較，若目標函數值獲得改善，即取代成為新的現有解；若否，則沿用上一階段的現有解重覆第二與第三步驟繼續檢定，直到滿足最大迭代次數為止。

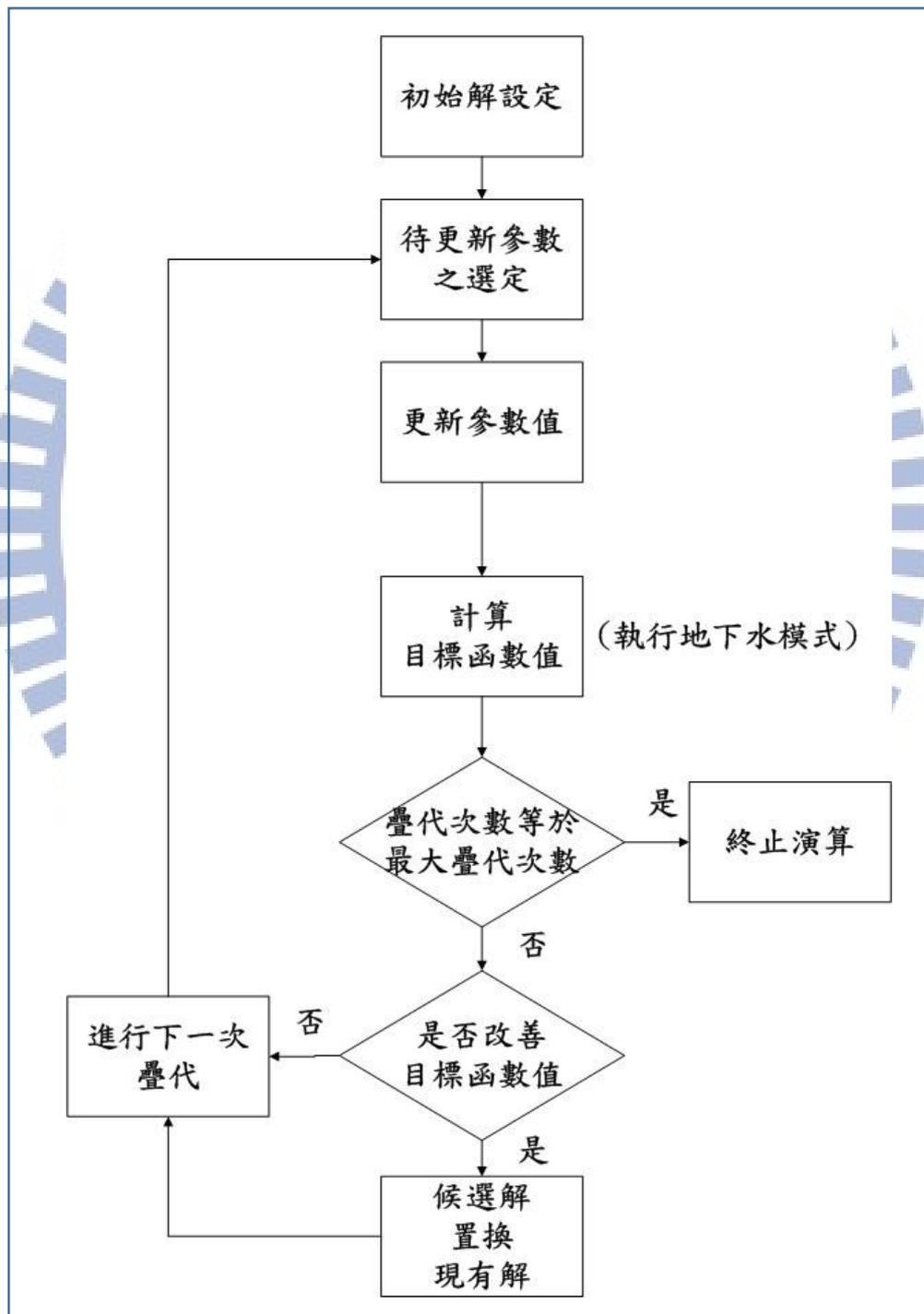


圖 3-2 動態維度搜尋法的演算步驟流程圖

3.2 修正動態維度搜尋法的原因與方法

因本研究主要應用 DDS 進行地下水模式之參數檢定，其中檢定之主要對象為「淨補注量」，因此以下首先說明本研究之目標函數以及地下水系統之設定，接著說明修正 DDS 之原因以及方法。

本研究在地下水模式參數檢定問題之設定上的目標函數式與限制式，說明如下：其中目標函數式為觀測水位與模擬水位之系統均方根誤差(RMSE)，求解最小值(Minimum)問題，而待定參數則為各觀測站之淨補注量。

$$\text{目標函數式}=\text{RMSE}=\text{Min}\left[\frac{1}{N}\sum_{n=1}^N((H_n^{obs}-H_n^{sim}(Q_{sim})))^2\right]^{1/2}$$

本研究在參數分區上，以觀測井為基礎，建立徐昇式分區，各分區均有一口觀測井，分區內之淨補注量均為相同數值。式中 H_n^{obs} 為第 n 個參數分區內之觀測井之觀測水位， H_n^{sim} 則為第 n 個參數分區內之觀測井位置處之模擬水位。N 為參數分區之總數；此目標函數式主要目的為使各分區之檢定誤差最小，其中檢定誤差為一個參數分區的模擬水位與觀測水位之絕對差值，如式(3-6)所示。

$$e_n=\text{abs}(H_n^{sim}-H_n^{obs}) \quad (3-6)$$

而限制式的部分則是因應動態維度搜尋法上的需求，針對待定參數也就是地下水模式中的淨補注量，以使用者自行設定待定參數上下限的方式給定，其中最關鍵的是深層含水層假設沒有補注量，所以令淨補注量均大於 0。

3.2.1 修正 DDS 之主要原因

DDS 的演算步驟如圖 3.2 所示，其中的第二步驟為「候選解選取」，此步驟對於同一次迭代內的每個待定參數，其被選取的機率均為相等，因為其選取待定參數進行更新的標準，主要以式(3-2)中的 $P(i)$ 作為基準，系統在選取一個待定參數前，會隨機產生一變數，若此隨機變數小於 $P(i)$ ，則選取此待定變數進行更新，因為每個待定變數選取與否皆由隨機變數決定，因此每個待定變數被選取之機率皆相等。如此對於檢定前期雖然影響不大，但到了檢定的中後期時，因為選取的個數逐漸減少，且不一定保證選取檢定誤差較大之參數分區，故無法有效降低目標函數值，導致其檢定後期之檢定效率大打折扣。

3.2.2 DDS 之修正方法

本研究修正 DDS 的方法主要包含待定參數之選取與待定參數修正方向兩大部分，修正後之演算法本研究稱為修正型 DDS (Modified Dynamically Dimensioned Search, MDDS)。

(1) 待定參數選取

本研究為了改善前述問題，增加檢定誤差較大之分區被選取之機會，因此將 DDS 演算法進行修正，說明如下：

首先定義兩個參數，一是 e_n ，二是 w_n 。令 e_n 為某一次迭代後各分區的檢定水位絕對值誤差，也就是各分區的觀測水位與模擬水位的差值取絕對值。再來是 w_n 定義(如式 3-7 所示)， w_n 是第 n 個參數是否被選取的機率門檻值，各分區皆為不同。目的是為了檢定水位誤差的較大的分區有比較大的機率被選取；最後本研究將經過本小節修正後的演算法，以「MDDS_W」代稱，其中 W(weighted) 是權重的意義。

$$w_n = [(e_1 + e_2 + \dots + e_n) / \sum e_n] \times NP \quad (3-7)$$

P 是表示 3-2 式中原始演算法的機率門檻值為判斷該參數是否被更新的依據。N 是表示所有待定參數的總數。

(2) 待定參數修正方向

在 DDS 的演算步驟中(如圖 3-2)，第三步驟為「更新待定參數」，主要式(3-3)進行待定參數更新，式中 $N(0,1)$ 為標準常態分布之亂數，因此其修正方向亦為隨機。而本研究定義待定參數之修正量值與方向，量值仍以式(3-3)決定，而修正方向則以分區之觀測水位與模擬水位進行判斷，當某分區的檢定誤差為正時，亦即模擬水位高於觀測水位，代表該分區蓄水量太多，所以其淨補注量的應減少，故其修正方向應為負值，以使觀測水位趨近模擬水位，反之，則檢定誤差為負，亦即模擬水位低於觀測水位，代表該分區蓄水量較少，故其淨補注量的應增加，其修正方向應為正值。而該部分修正的以「MDDS_D」代稱，其中 D(direction)即是方向的意義。

3.2.3 兩階段檢定流程建立

動態維度搜尋法是利用隨著迭代次數的增加，逐漸減少選取參數更新的個數，但檢定過程中的鄰近擾動參數保持不變，亦即其維持相同的步伐進行解的搜尋，因此到了 DDS 之迭代後期，其目標函數之改善幅度有限，因此其檢定結果仍有改善空間

本研究嘗試應用 MDDS 與 DDS 以兩階段進行參數檢定，在第一階段以較大之鄰近擾動參數進行參數檢定，此部份則參考 DDS 之原始設定，將其值設定為 0.2，以期在較少迭代次數內搜尋到不錯的解，

接著再以第一階段所求得各待定參數之解作為第二階段之初始解，並以一較小之鄰近擾動參數進行求解，以精鍊(refine)各參數之求解結果，此部份本研究則設定其值為 0.01。兩階段檢定流程如圖 3-3 所示，此部分以「MDDS_P」表示之，P(Parts)則是表示分部分的意義。最後所有關於動態維度搜尋法的修正型態整理於表 3-1。附註說明，本研究觀察 MDDS 檢定過程中目標函數值之改善速率，於此第一階段的最大迭代次數設定為 100 至 500，而第二階段設定為第一階段的 9 倍(詳見 4.2 節的圖 4.2-4)。



圖 3-3 MDDS_P 之修正機制

表 3-1 動態維度演算法所有修正型態之整理

不同修正之型態	修正說明
1.DDS	未修正
2.MDDS_W (MDDS_Weighted)	僅修正檢定時選取待定參數的標準
3.MDDS_D (MDDS_Direction)	僅修正待定參數更新的修正方向
4.MDDS	結合上述第 2 與 3 項之修正
5.MDDW_P (MDDS_Parts)	以第 4 項為基礎，分階段檢定之

3.3 MDDS 地下水模式參數檢定系統的建置

本研究中所謂的「MDDS 地下水模式參數檢定系統」，其中 M 是 Modified 的簡稱，也就是修正型的動態維度搜尋法，套用於地下水模式參數檢定工作時之自動化檢定系統，其系統架構圖如圖 3-4 所示。首先是由 Groundwater Vista 圖形化介面套裝軟體，設定格網與邊界條件，再輸入水文地質參數，以完成地下水模式建置，之後輸出 MODFLOW 執行所需輸入檔(包含儲存淨補注量資料的 WEL 檔)，待執行完畢之後獲得輸出檔(主要為各分區水位資料 HDS 檔的產生)，其計算結果再投入 MDDS 檢定流程下修正參數值，如此反覆操作，直到滿足最大迭代次數為止。

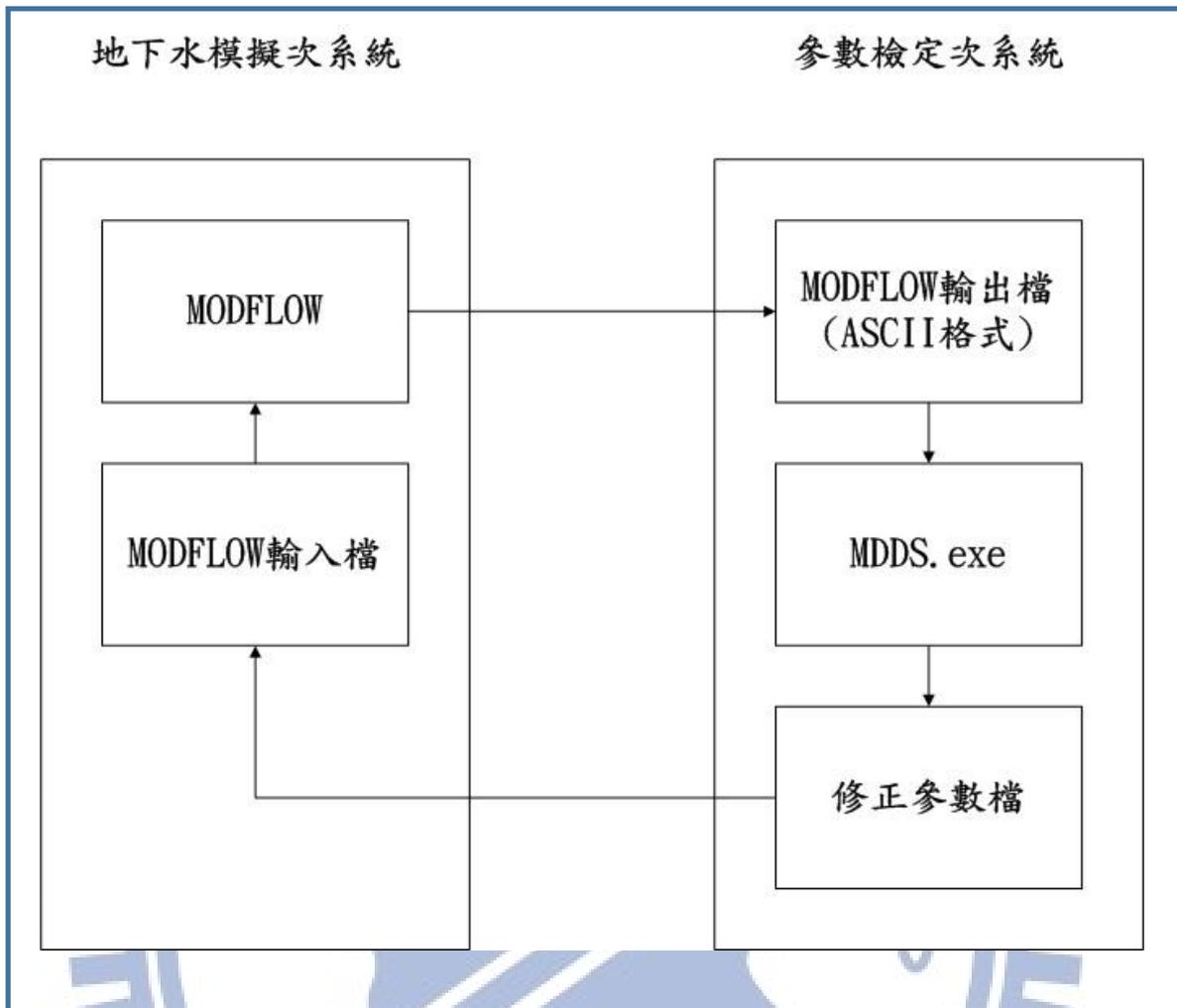


圖 3-4 自動化地下水參數檢定系統架構圖

第四章 數值試驗

本章節將以數值試驗測試動態維度搜尋法(DDS)與其修正過後的演算法(MDDS)之對於地下水模式檢定效能，檢定參數為淨補注量。本章 4.1 節說明數值試驗流程及案例設計，4.2 節則對 DDS 與 MDDS 的檢定結果進行比較分析。本章的目的即是以較低維度的地下水問題先行測試，檢驗是否本研究的 MDDS 檢定系統是否真能有效地改善檢定效率。

4.1 數值試驗流程與案例設計

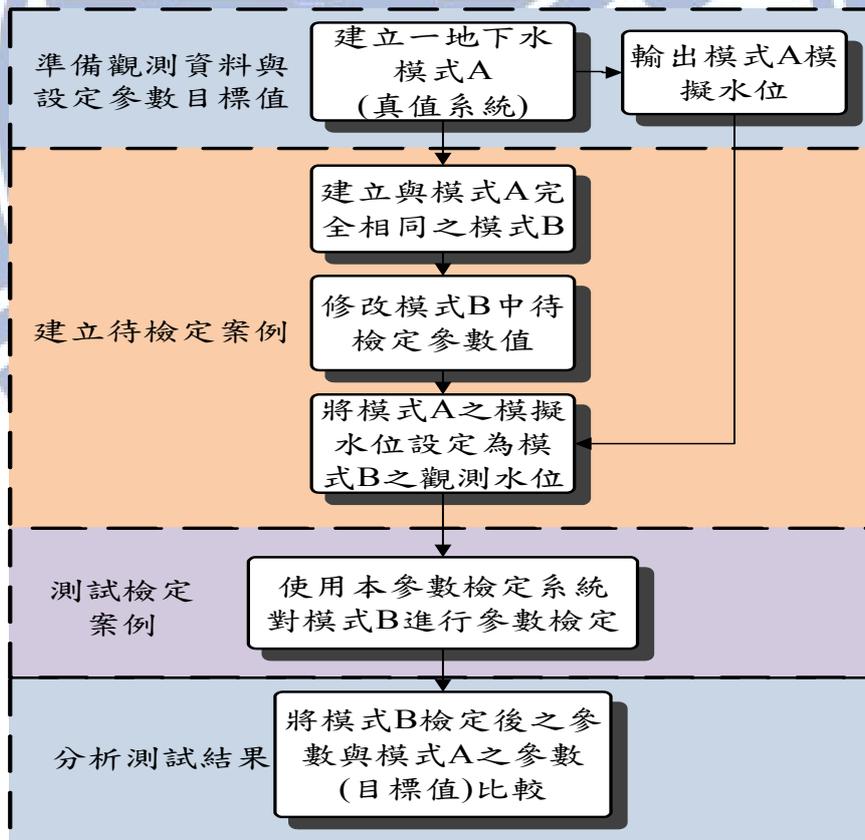


圖 4.1-1 地下水模式參數檢定之正確性驗證流程

數值試驗的流程圖如 4.1-1 所示，無論是 DDS 與 MDDS 版本的地下水模式參數檢定系統，均須透過數值試驗檢驗系統之正確性，待確認兩系統均可完成檢定後，接著再進一步較兩者之檢定成果，以驗證 MDDS 確實可改善 DDS 檢定地下水模式之效率。數值試驗之流程分為四個步驟：第一步驟為建立「真值系統」，此真值系統概念上代表真實世界之地下水系統，因此真值系統之模擬水位將作為現地之觀測水位。第二步驟則是建立「待檢定系統」，由於本研究著重於穩態模式之淨補注量檢定，故待檢定系統中除了淨補注量以隨機方式給定外，其他參數均直接給予真值系統之參數值。第三步驟即使用本研究建立之參數檢定系統，對待檢定系統進行參數檢定，其檢定依據為真值系統之模擬水位。第四步驟則是檢驗參數檢定成果，比較待檢定系統與真值系統之淨補注量差異。

在地下水流模式的設計上，本研究設定為穩態地下水模擬，模擬區域為 $11(\text{km})\times 11(\text{km})$ ，以 $1(\text{km})\times 1(\text{km})$ 見方切割整個模擬區域，共 121 個網格，如圖 4.1-2 所示。此外，含水層共分為三層，如圖 4.1-3 所示，第一層及第三層為含水層，第二層為阻水層，但阻水層在空間上並未涵蓋整個模擬區域，有部分區域之透水性近似含水層。故在模擬上，第一層之含水層型態為非受壓水層(unconfined aquifer)，第二、三層之含水層型態為受壓層(confined aquifer)。總計區域內之網格數為

393 個(11×11×3)之正方形網格。

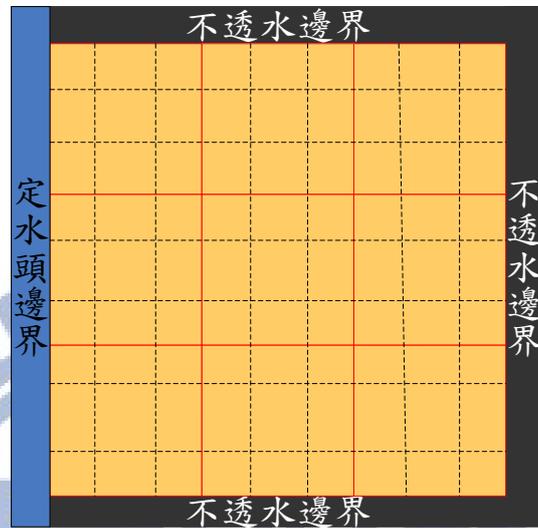


圖 4.1-2 設計案例之模擬網格



圖 4.1-3 設計案例之概念分層

在邊界條件方面，第一分層的左邊界設定為定水頭邊界且水位高在 0 公尺，用以模擬大海，右方、上方及下方為不透水邊界；第二、三分層四個方向均為不透水邊界；在分區方面，本案例在第一層及第三層均分為 9 個分區，共有 18 個分區，每個分區內皆為 9 個網格，如圖 4.1-4、4.1-5 與 4.1-6 所示。在地表高程方面，地勢由右向左遞減，由 120 公尺逐漸降至 0 公尺高。含水層厚度為 25 至 60 公尺不等，阻

水層厚度約為 5 公尺。在初始條件方面，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 4.1-4、4.1-5 與 4.1-6 所示，為一非均質分布之含水層。

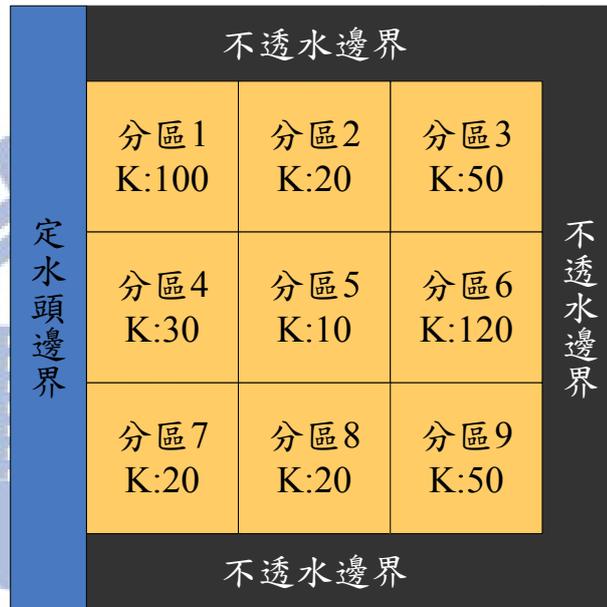


圖 4.1-4 第一分層分區與邊界及 K 值(公尺/天)配置圖

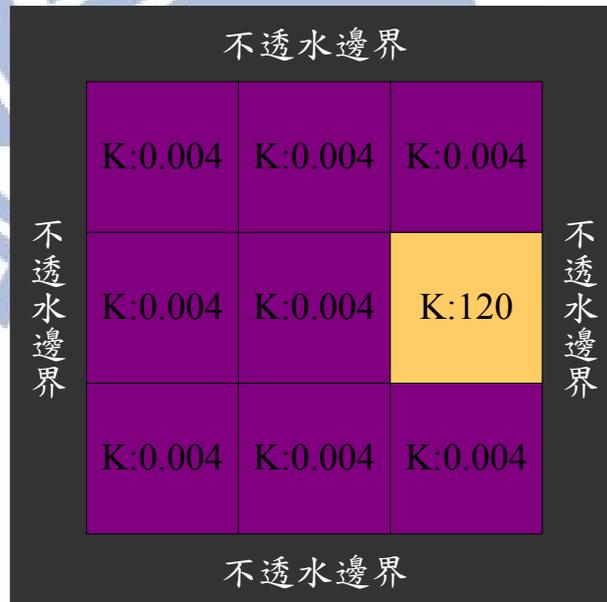


圖 4.1-5 第二分層邊界及 K 值(公尺/天)配置圖

不透水邊界		
分區10 K:30	分區11 K:10	分區12 K:15
分區13 K:10	分區14 K:20	分區15 K:120
分區16 K:20	分區17 K:15	分區18 K:5
不透水邊界		

圖 4.1-6 第三分層分區與邊界及 K 值(公尺/天)配置圖

4.2 DDS 與 MDSS 地下水檢定系統之檢定結果比較

本地下水模式參數檢定系統主要檢定對象為淨補注量，而待檢定系統在初始淨補注量之設定上，主要以均勻亂數分佈產生初始值。而在真值系統的淨補注量設定上，第一分層淨補注量之設定範圍為-6000 至 25000(cmd/km^2)，第三分層則為-2000 至 0(cmd/km^2)。

為了分析 MDSS 是否可有效地改善 DDS 之檢定結果，本研究設定 20 組案例，各組案例皆給定不同的「隨機變數種子」，分別是 12、16、18...50，即給定不同的初始解與檢定過程中的更新參數之選取機率(產生不同的隨機亂數數列)，之後再分別以 DDS 與 MDSS 進行檢定，並比較兩者之檢定結果。此外，為了分析本研究提出的 DDS 修正方法的成效，本研究將案例檢定分為兩大部分進行，第一部分為以

DDS、MDDS_W、MDDS_D 及 MDDS 進行檢定，並比較分析其檢定結果；第二階段則是加入 MDDS_P 進行比較。

在第一部分之檢定中，最大迭代次數分別設定為 100、500、1000、5000 次下，比較 DDS、MDDS_W、MDDS_D 與 MDDS 四種不同演算法之檢定結果，如表 4.2-1 與 4.2-2 所示，表 4.2-1 為 20 個案例之目標函數平均值(系統均方根誤差)，表 4.2-2 為目標函數之標準偏差；之後將表 4.2-1 與表 4.2-2 的數據結果進一步整理成直條圖型，如圖 4.2-1 至圖 4.2-4 所示。

由表 4.2-1 可知，無論迭代次數為何，MDDS 之檢定結果為最佳，MDDS_D 次之，MDDS_W 再次之，而 DDS 最差。由此可知，本研究提出之修正方法皆能有效改善 DDS 之檢定效能，其中 MDDS_W 為改善誤差較大之待定參數被選取之機率；MDDS_D 則為確保待定參數在檢定時，能有效減少檢定誤差，而 MDDS 則兼顧此兩種修正方法，因此其檢定之效能最佳。比較各演算法在各種迭代次數設定下之檢定結果可知，MDDS 在最大迭代次數為 500 之設定下，其目標函數(系統均方根誤差)即小於 1，MDDS_W 與 MDDS_D 則需最大迭代次數為 5000 之設定下，才可將目標函數改善至 1 以下，而 DDS 在最大迭代次數為 5000 次時，其系統均方根誤差仍為 1.7 左右，無法將目標函數檢定至 1 以下。由此可證明 MDDS 為四種方法中最有效率的一

種檢定方法，且確實改善 DDS 之檢定效能。

由表 4.2-2 可知，4 種演算法在不同迭代次數下，完成 20 組案例檢定後，統計目標函數值之標準偏差。由表可知，最大迭代次數為 500 以下之案例，20 組案例之目標函數標準偏差以 MDDS 最小，其值約為 0.29，代表 MDDS 在 20 組案例之檢定中，各案例之目標函數改善幅度差異不大，亦即其檢定後，各案例之檢定結果差異不大；配合表 4.2-1 可知，MDDS 在最大迭代次數為 500 之設定下，可將目標函數(系統均方根誤差)檢定至 1 以內；綜合前述結果可知，MDDS 可在最大迭代次數為 500 之設定下，將大部分案例之目標函數檢定至 1 以下；而 MDDS_W 之目標函數標準偏差約為 0.68，亦表示其檢定後，各組案例之目標函數相當接近。而造成 MDDS 與 MDDS_W 檢定後，此 20 組案例之目標函數均較為接近之原因，應為 MDDS 與 MDDS_W 均會增加檢定誤差較大之待定參數被選取之機率，故此兩方法所檢定後目標函數值(系統均方根誤差)皆較有機會調整檢定誤差較大的參數。因為 MDDS_W 未考量有效修正檢定誤差之方法，因此其目標函數平均值較 MDDS 為大。因為 DDS 與 MDDS_D 均為隨機選取待定參數進行檢定，故在檢定的過程中未必能選取到檢定誤差較大之待定參數，因而造成此兩方法檢定後，20 組案例之目標函數變異較大之結果。

圖 4.2-6 至圖 4.2-8 為四種最大迭代次數設定下，四種演算法檢定

20 組案例時，統計各次迭代之目標函數值平均值(系統均方根誤差之平均)，繪成目標函數收斂曲線圖。由圖可知，四種演算法在四種最大迭代次數設定下，均以 MDDS 為最佳，MDDS_D 次之，MDDS_W 再次之，而以 DDS 之收斂性最差；而四種演算法均隨著最大迭代次數增加而改善目標函數值。此外，MDDS_W 隨著最大迭代次數增加，其目標函數改善幅度逐步逼近 MDDS_D，而在最大迭代次數為 5000 次時，超越 MDDS_D。進一步分析圖 4.2-7 可知，當最大迭代次數設定在 1000 次時，MDDS_D 在迭代次數約為 200 次以內，目標函數下降的斜率較 MDDS_W 為大；而在迭代次數 200 次以後，MDDS_D 目標函數的下降斜率趨緩，而 MDDS_W 目標函數的下降斜率較 MDDS_D 為大，故在迭代次數達到最大迭代次數時，MDDS_W 之目標函數值已趨近 MDDS_D 之目標函數值。由圖 4.2-8 可知，當最大迭代次數設定在 5000 次時，當迭代次數抵達最大迭代次數時，MDDS_W 之目標函數值已小於 MDDS_D 之目標函數值，表示 MDDS_W 檢定效果較 MDDS_D 為佳。由此可推論，當最大迭代次數夠大時，因為 MDDS_W 有較高的機率修正「檢定誤差較大之待定參數」，故其實際修正「檢定誤差較大之待定參數」的次數應遠較 MDDS_D 為多，故其可充分調整待定參數，改善目標函數值。而相較於 MDDS_W，MDDS_D 則可在較少迭代次數內改善目標函數值。而

MDDS 因為整合 MDDS_W 與 MDDS_D，故可有效地隨著最大迭代次數增加而改善目標函數值。

表 4.2-1 不同修正方式的演算法下之檢定目標函數值的平均值

	M=100	M=500	M=1000	M=5000
DDS	16.03821	6.09686	4.499601	1.679303
MDDS_W	5.026987	1.933878	1.294218	0.683775
MDDS_D	12.19558	3.250809	1.418178	0.668947
MDDS	3.373285	0.997983	0.785926	0.341735

表 4.2-2 不同修正方式的演算法下之檢定目標函數值的標準偏差

	M=100	M=500	M=1000	M=5000
DDS	5.281057	3.029024	1.539862	0.993654
MDDS_W	2.493819	0.675921	0.336662	0.261808
MDDS_D	4.434231	2.023337	0.52913	0.26544
MDDS	2.008882	0.285335	0.162333	0.086952

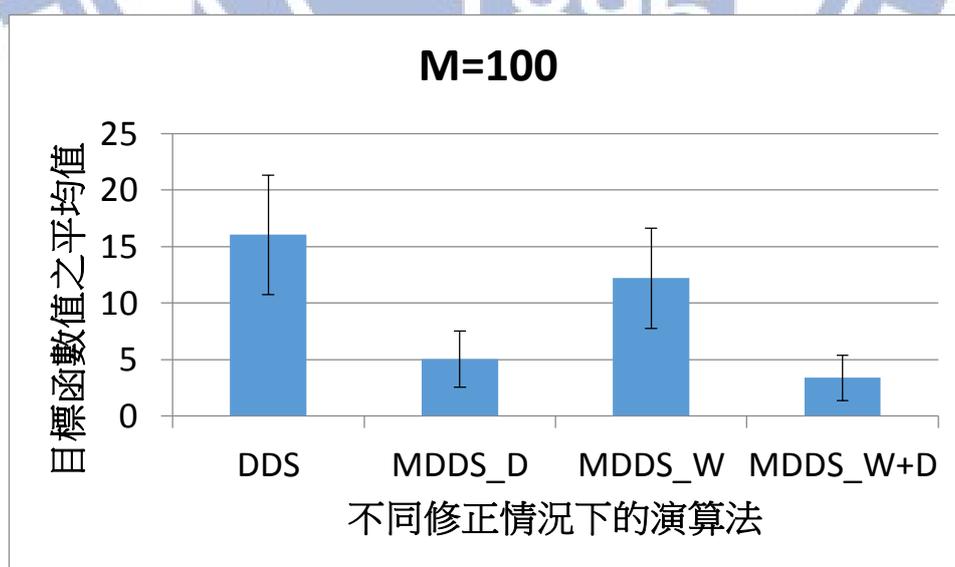


圖 4.2-1 最大迭代次數 M=100 之不同修正方式的演算法下之檢定目標函數值的平均值與標準偏差

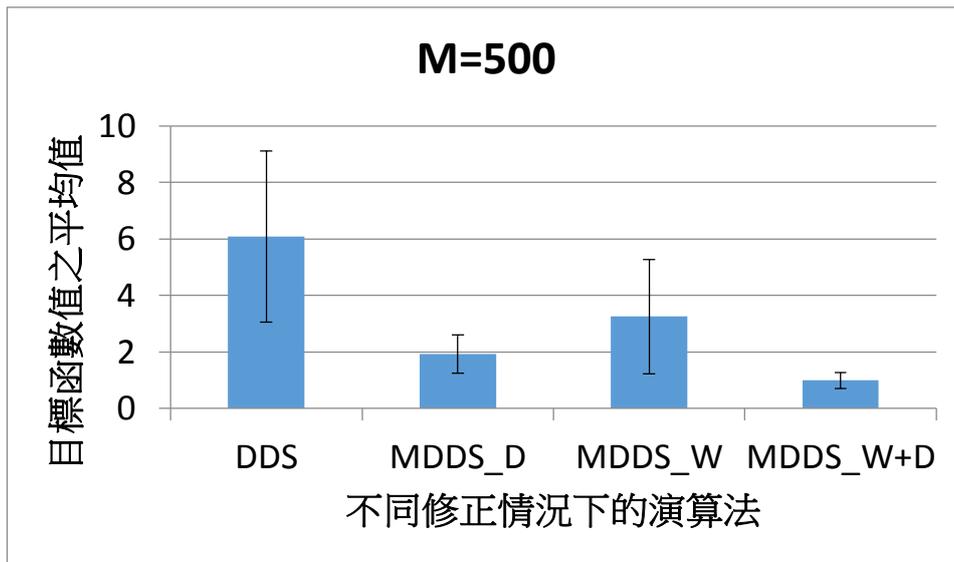


圖 4.2-2 最大迭代次數 $M=500$ 之不同修正方式的演算法下之檢定目標函數值的平均值與標準偏差

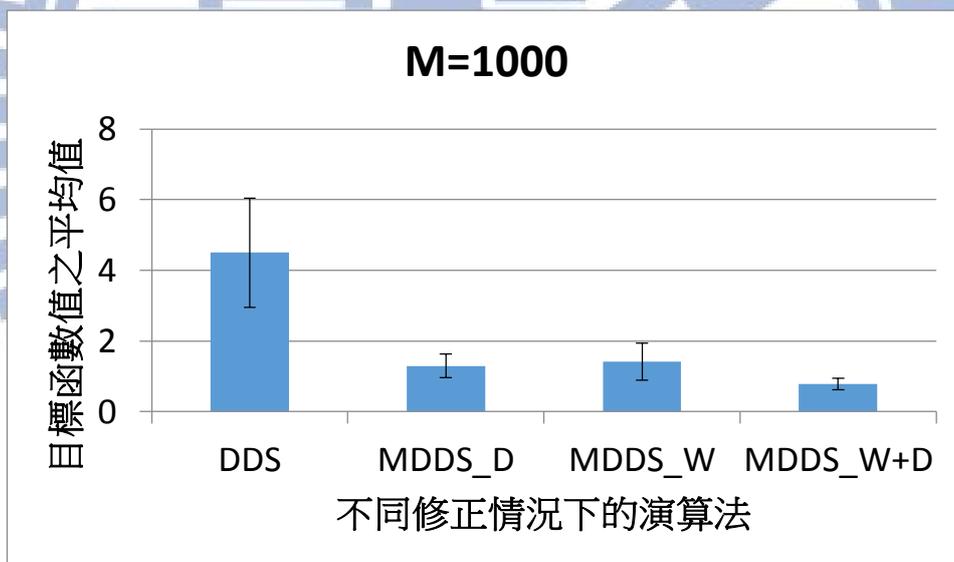


圖 4.2-3 最大迭代次數 $M=1000$ 之不同修正方式的演算法下之檢定目標函數值的平均值與標準偏差

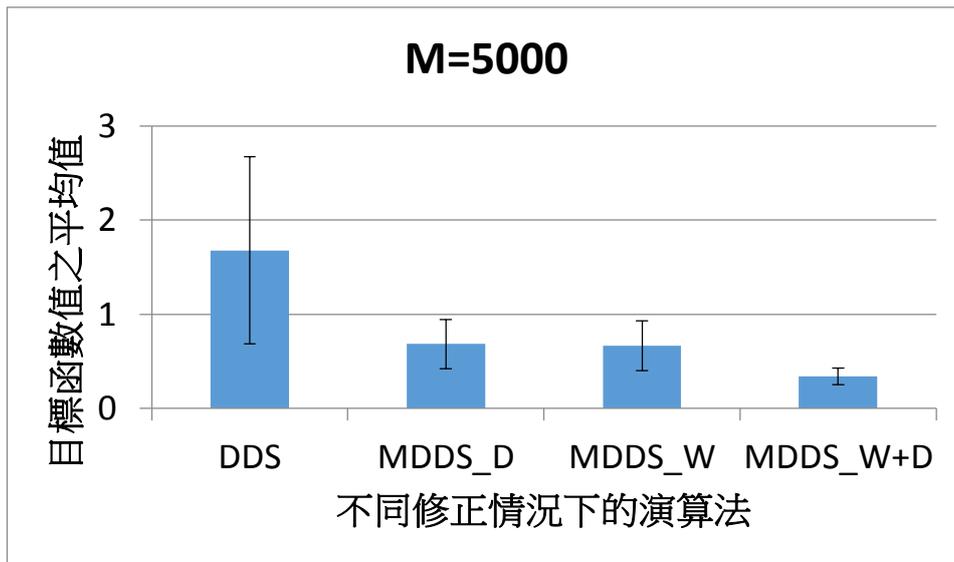


圖 4.2-4 最大迭代次數 $M=5000$ 之不同修正方式的演算法下之檢定目標函數值的平均值與標準偏差

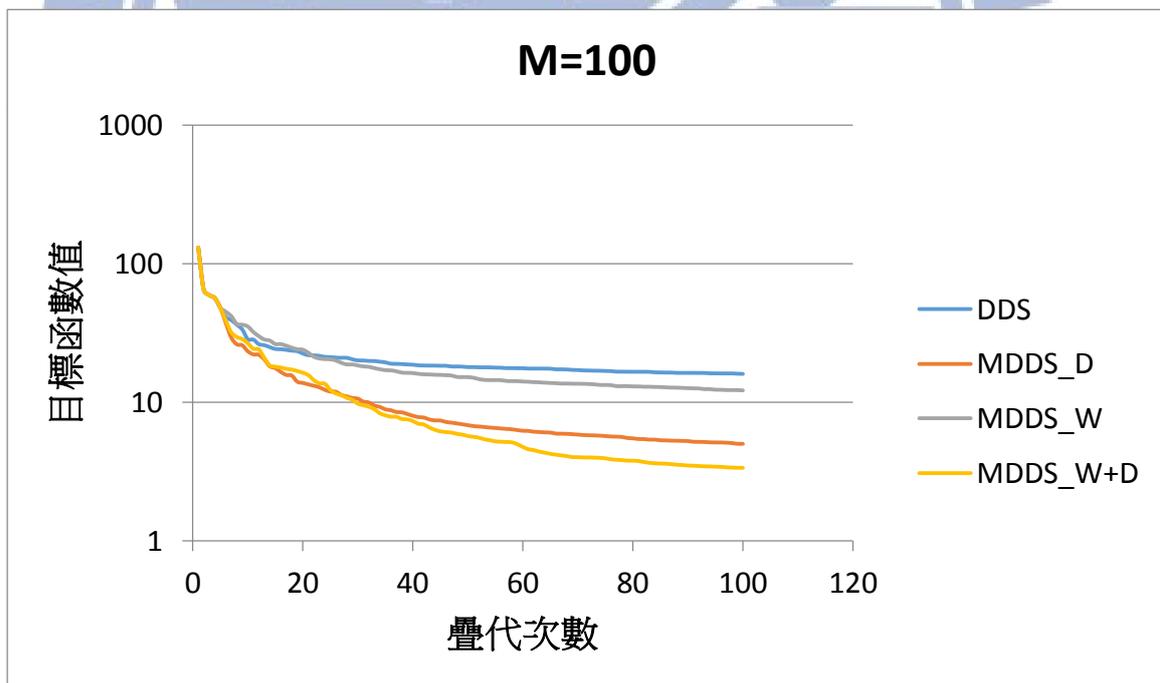


圖 4.2-5 最大迭代次數 $M=100$ 之不同修正方式的演算法下之檢定曲線

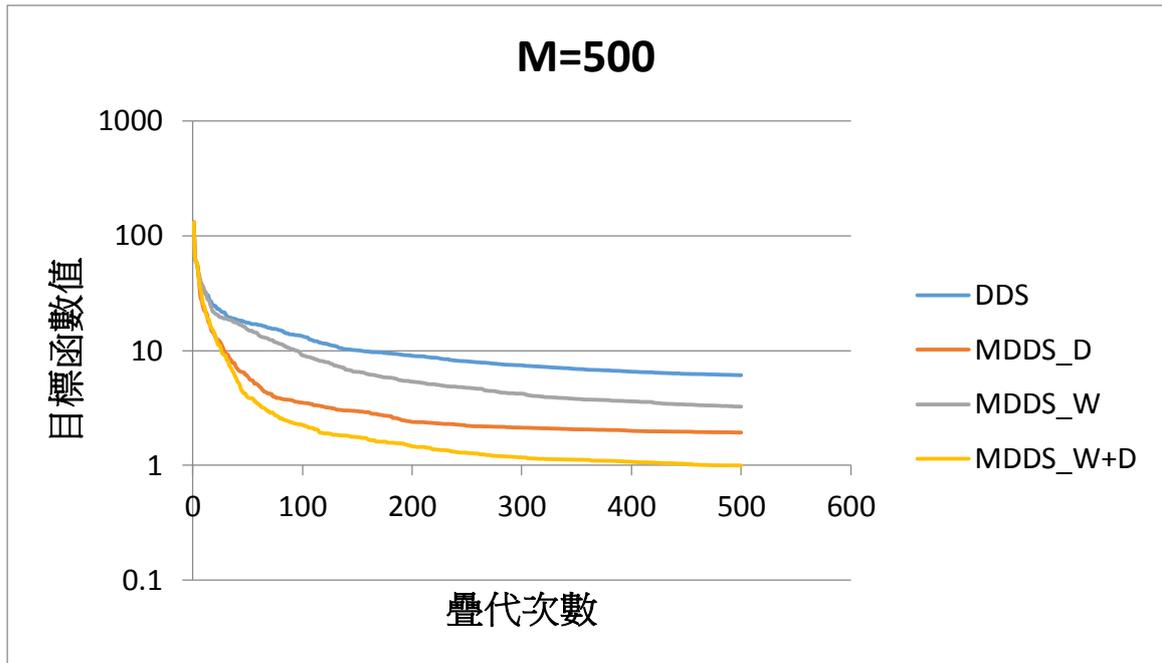


圖 4.2-6 最大迭代次數 M=500 之不同修正方式的演算法下
之檢定曲線

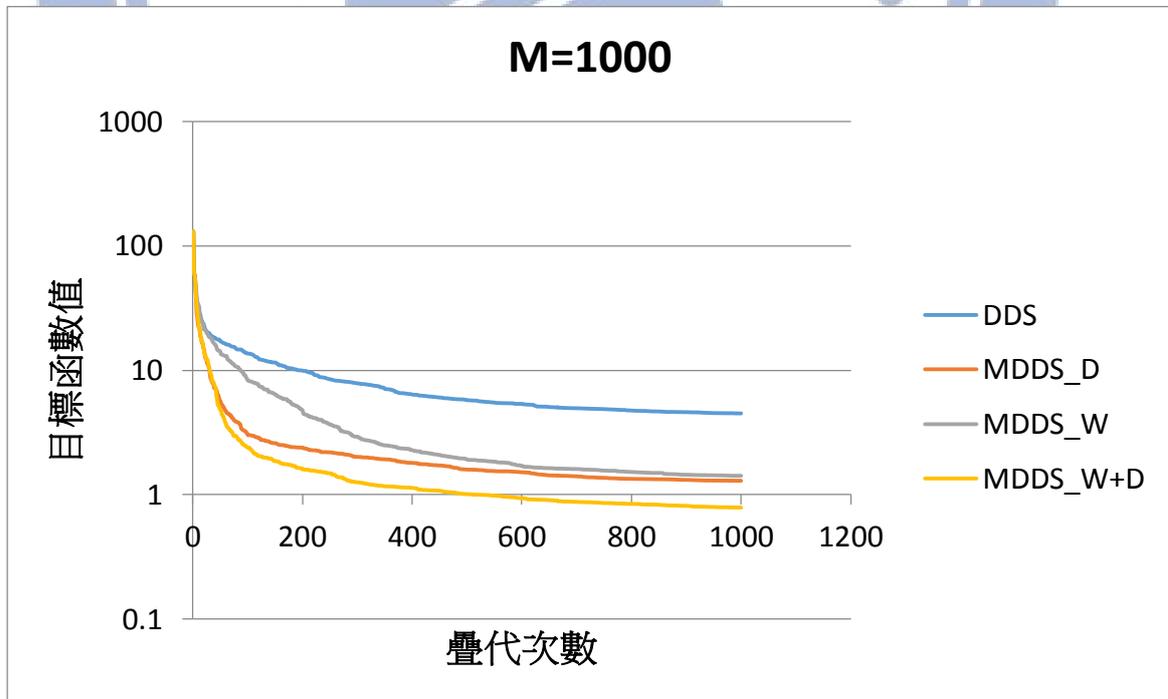


圖 4.2-7 最大迭代次數 M=1000 之不同修正方式的演算法下
之檢定曲線

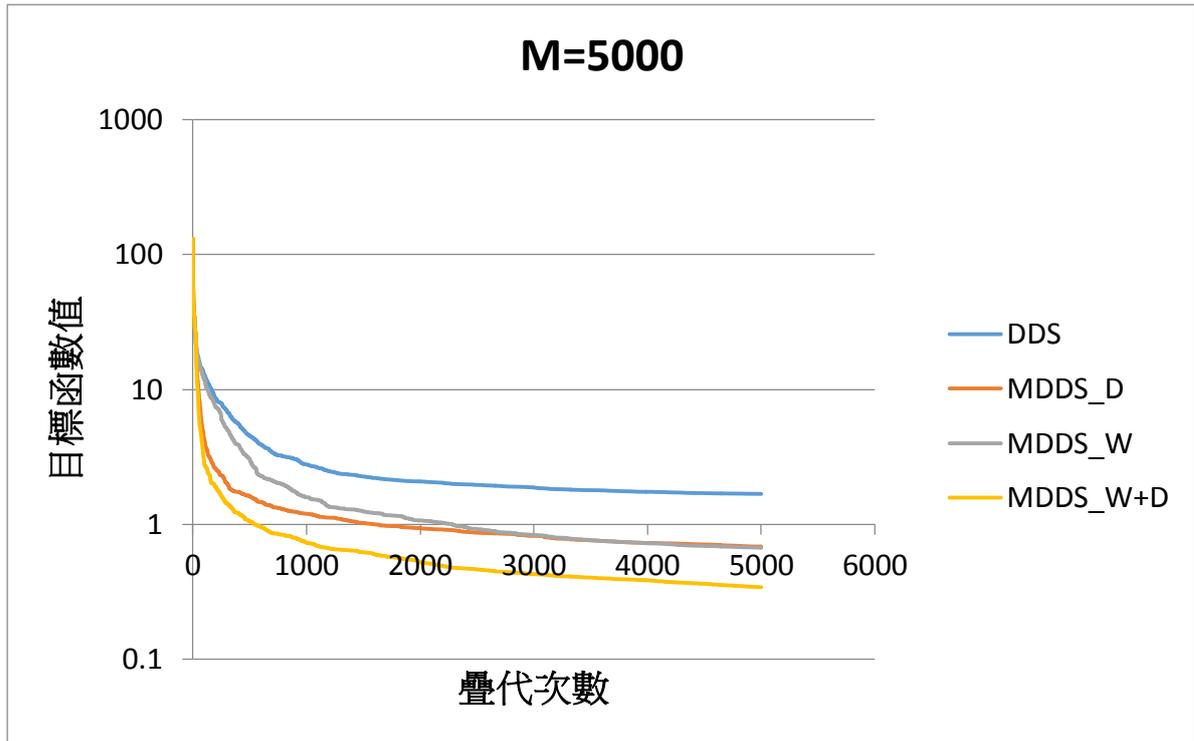


圖 4.2-8 最大迭代次數 $M=5000$ 之不同修正方式的演算法下
之檢定曲線

第二部份之檢定案例設計，則以 MDDS_P 進行分階段檢定，其檢定結果再與 MDDS 及 DDS 進行單一階段檢定之結果進行比較，其中 MDDS 的檢定部分可在細分為鄰近擾動參數設定為 0.2 與鄰近擾動參數設定為 0.01 兩部分，檢定結果如表 4.2-3 所示。此部份之檢定案例同樣以 20 組不同的隨機種子產生隨機亂數，並計算各案例之目標函數值，之後取平均值、最大值、最小值與標準差。表之第一行與第二行為「MDDS_P」的分階段檢定結果，第一階段最大迭代次數設定為 100、鄰近擾動參數等於 0.2，而第二階段為最大迭代次數設定為 900、鄰近擾動參數設定為 0.01，合計迭代次數為 1000；第三行與第四行則

是以 MDDS 進行參數檢定，並分別以鄰近擾動參數等於 0.2 與 0.01 直接以最大迭代次數為 1000 進行檢定之結果，第五行則是以 DDS 進行檢定，並設定鄰近擾動參數等於 0.2(為預設值)直接檢定 1000 次的結果。

由表 4.2-3 的結果顯示，MDDS_P 檢定後之目標函數值(系統均方根誤差)較 DDS 改善幅度約為 45 倍，由 4.5 改善至 0.1；較原本之 MDDS 改善幅度約達 2 倍至 8 倍，由 0.2 與 0.8 改善至 0.1。

由圖 4.2-9 可知，MDDS_P 所檢定之目標函數隨著迭代次數增加而迅速下降，而 MDDS 設定鄰近擾動參數為 0.2 與 0.01 之案例，其目標函數之改善幅度不如 MDDS_P。取其 20 組案例之隨機種子為 12 之案例，並取第四個待定參數(即第 4 分區的淨補注量)繪成圖 4.2-10。由圖可知，當 MDDS 設定鄰近擾動參數為 0.2 時，因為其修正量變化幅大較大，導致待定參數值大幅度的變化，產生震盪現象，因此當到迭代次數到達最大迭代次數時，才接近真值。而 MDDS 設定鄰近擾動參數為 0.01 時，其初期改善目標函數之幅度最慢，但因其可持續但較緩慢的改善目標函數直到迭代結束，故其在 568 次之後已相當接近真值。而 MDDS_P 在第一階段時，以較大之鄰近擾動參數(0.2)增加解的搜尋速度，使得目標函數先迅速下降，第二階段時，再以較小的鄰近擾動參數進行檢定，逐步有效率地縮小目標函數，避免因搜尋步伐過大

而產生震盪的情況，此即為 4.2-9 中，MDDS_P 可迅速且持續改善目標函數之原因。

表 4.2-3 第一階段之檢定結果再加入 MDDS_P 後之綜合比較

隨機變數	MDDS_W+D	MDDS_W+D	MDDS_W+D	MDDS_W+D	DDS
	100_0.2	900_0.01	1000_0.2	1000_0.01	1000_0.2
12	1.369323	0.055201	0.656142	0.096817	2.506794
14	9.544217	0.087854	0.487153	0.11015	6.342443
16	2.524357	0.060112	0.855357	0.087368	5.926875
18	2.792277	0.214531	0.767845	0.110808	2.905701
20	3.301868	0.034067	0.93226	0.082902	5.637253
22	2.002604	0.183982	0.919727	0.18882	3.20483
24	1.89866	0.103342	0.555251	0.441118	7.57482
26	1.817519	0.099049	1.010465	0.154831	4.666007
28	2.5597	0.09523	0.712672	0.156238	5.415672
30	2.047055	0.087694	0.914485	0.13232	3.797412
32	4.915678	0.113334	0.955638	0.189132	3.521821
34	4.574179	0.09605	0.997447	0.219263	2.698048
36	2.313684	0.031903	0.531388	0.109398	2.440424
38	3.376882	0.049684	0.723478	0.302192	3.137175
40	3.156011	0.117394	0.529372	0.333953	3.601344
42	4.002938	0.14682	0.934952	0.22353	3.921035
44	1.479419	0.044412	0.739109	0.148153	7.397972
46	7.406459	0.084034	0.822686	0.190143	4.38301
48	4.485864	0.18196	0.914057	0.166402	5.406175
50	1.896997	0.078042	0.759038	0.158062	5.5072
平均值	3.37328455	0.09823475	0.7859261	0.18008	4.49960055
最大值	9.544217	0.214531	1.010465	0.441118	7.57482
最小值	1.369323	0.031903	0.487153	0.082902	2.440424
標準偏差	2.008882208	0.049390512	0.162333053	0.088104094	1.539862377

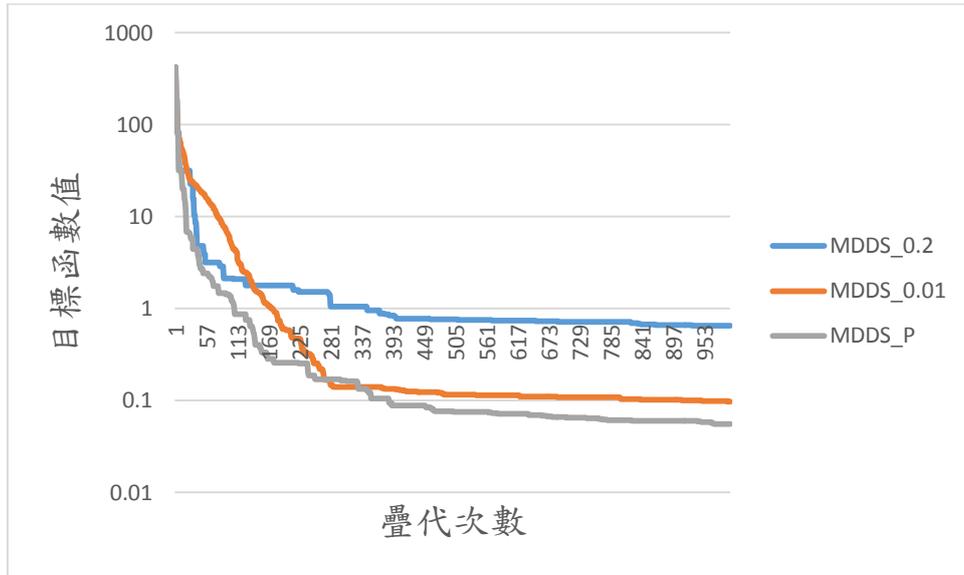


圖 4.2-9 MDDS 分別以 R=0.2 與 0.01 直接檢定
與分階段檢定結果之目標函數值比較

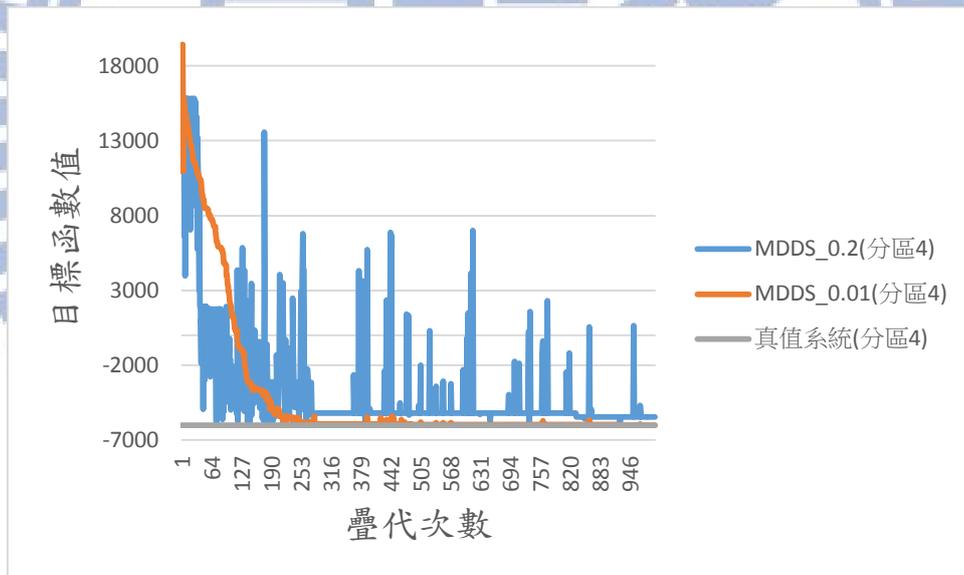


圖 4.2-10 MDDS 分別以 R=0.2 與 0.01 直接檢定下
分區 4 的淨補注量檢定過程

第五章 濁水溪沖積扇實例驗證

本研究之 MDDS 地下水模式參數檢定系統，在以設計案例進行數值試驗之後，初步證實 MDDS 較 DDS 之檢定效能大幅精進。本章更進一步地以濁水溪沖積扇實例進行測試，本章 5.1 節說明濁水溪沖積扇地下水數值模式之建置，5.2 節則以 MDDS 與 DDS 檢定濁水溪沖積扇之地下水模式，並對檢定結果進行比較分析，最後 5.3 節呈現 MDDS 檢定後之淨補注量與地下水位之空間分佈，並透過土地利用所反映之可能用水概況進行比對，以檢驗 MDDS 地下水模式參數檢定系統之正確性。

5.1 濁水溪沖積扇地下水數值模式建置

(一) 邊界條件與格網劃分

1. 地下分層架構

MODFLOW 模擬的設定上，可將地下分層設定為受壓或非受壓含水層，並需輸入各分層之上部與底部的高程值。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」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 5.1-1 所示，並完成平原地區水文地質剖面一至十二(深度至 300 公尺左右)，再依據丘陵及河谷區之 8 站地層柱狀圖，繪製水文地質剖面十三至十五(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、以及含水層四，濁水溪沖積扇模式共分為第一至第七分層，如圖 5.1-2 所示。

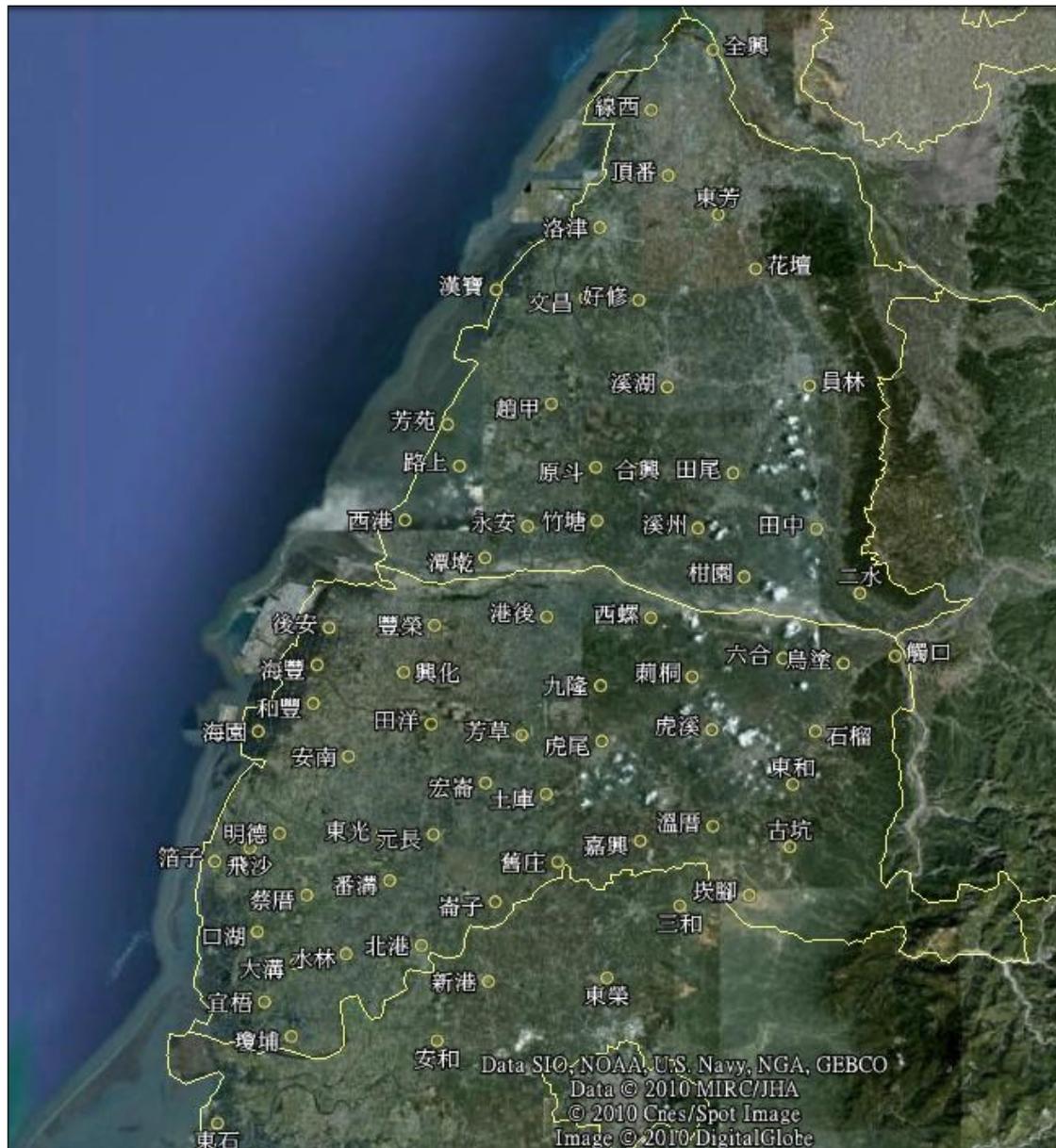


圖 5.1-1 地層柱狀圖分布位置

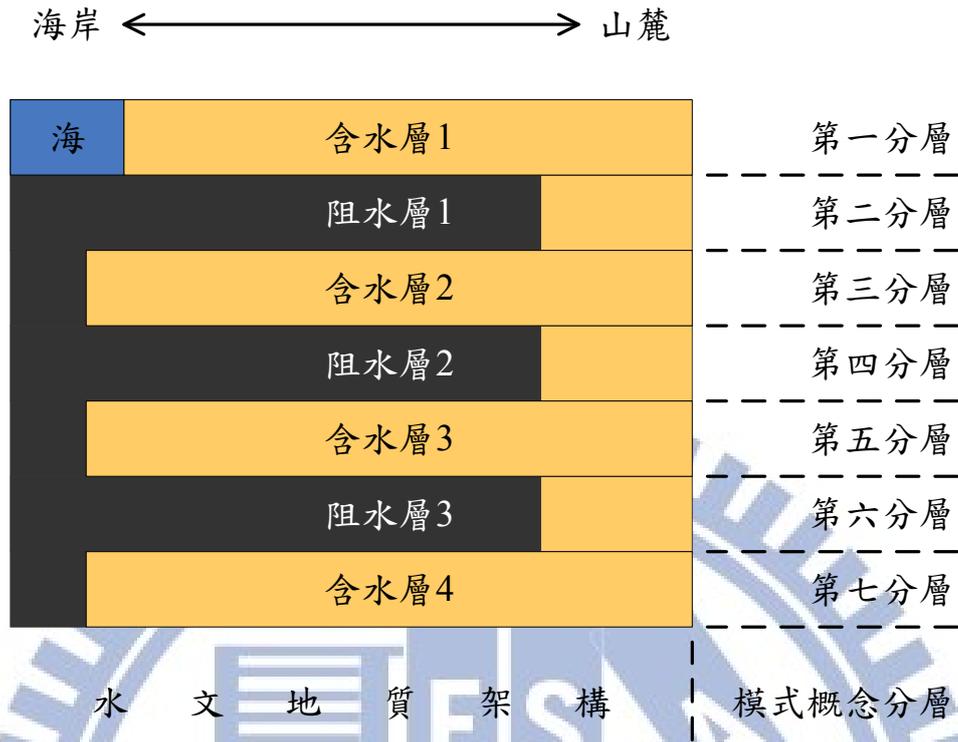


圖 5.1-2 濁水溪沖積扇水文地質架構概念分層

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 5.1-3 所示。

度均顯著變小，然而並未尖減，因此無實體之阻隔邊界，然而從地下水流網分布型態，顯示 BC 段與地下水流線大致平行，於本身即可認定為一條流線，所以亦屬於零流量邊界。海岸附近之洩降錐，其在邊界南北之形狀及大小若相當，則不會影響零流量邊界的假設。

c. CD 段

此段為含水層尖滅封閉於阻水層之位置，屬於零流量邊界。

d. 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，唯與地下水流方向大致平行，故認定為零流量邊界。

e. EF 段

位於和美沖積扇頂上，河水可由河床入滲補注地下水。

f. 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升降變化。

g. 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 5.1-4 所示，淺黃色區域為模擬範圍：

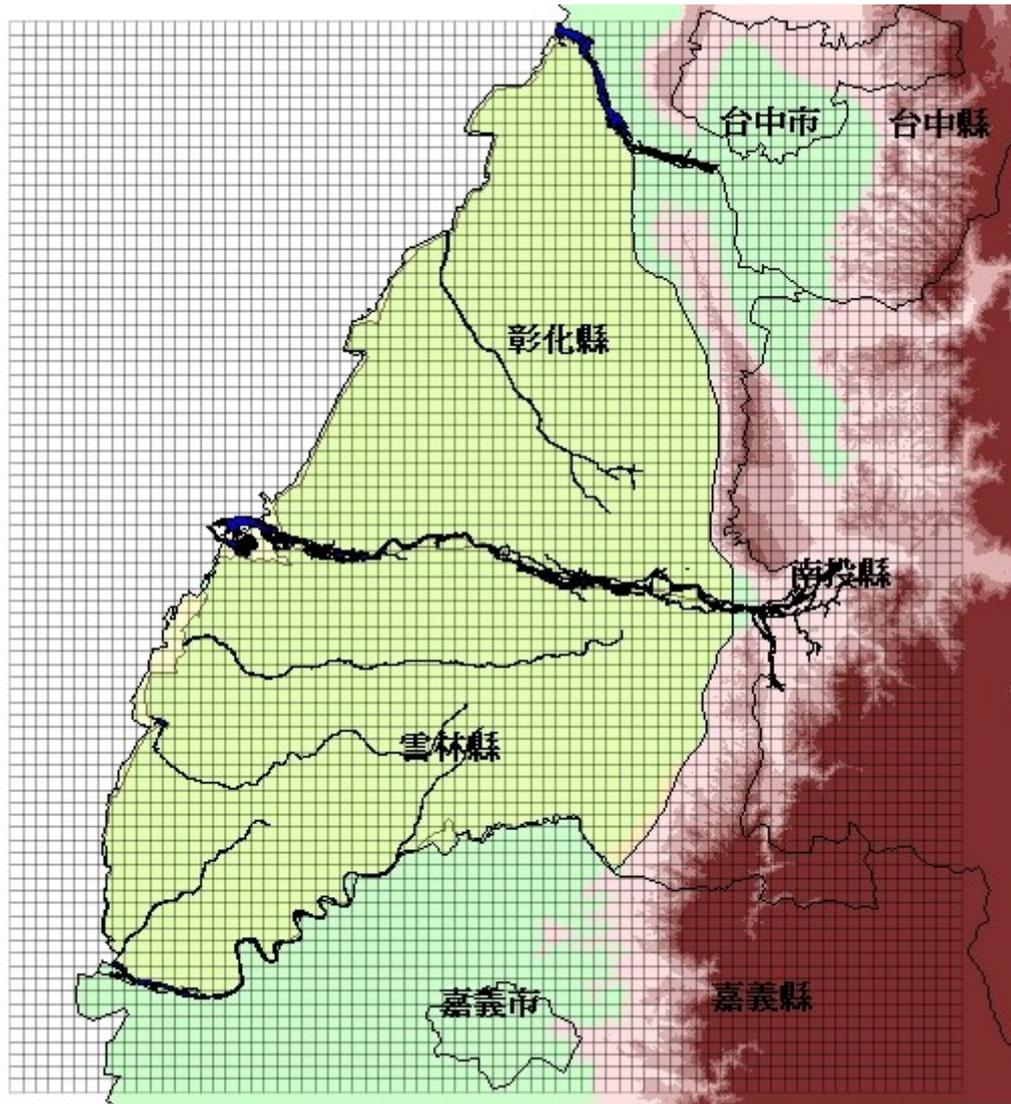


圖 5.1-4 濁水溪沖積扇模式之格網劃分

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，且設定為零流量之邊界條件。北部邊界為烏溪，南部邊界為北港溪，各層皆有零流量邊界。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 5.1-5 所示)，其餘含水層延伸 5 公里後尖滅，設為零流量之邊界條件(如圖 5.1-6 所示)。圖中藍色網格為定水頭邊界，灰色網格為零流量。圖 5.1-7 所示為第 49 列剖面圖，水平向長度為垂直向長度的 30 倍。



圖 5.1-5 濁水溪沖積扇模式第 1 分層格網劃分

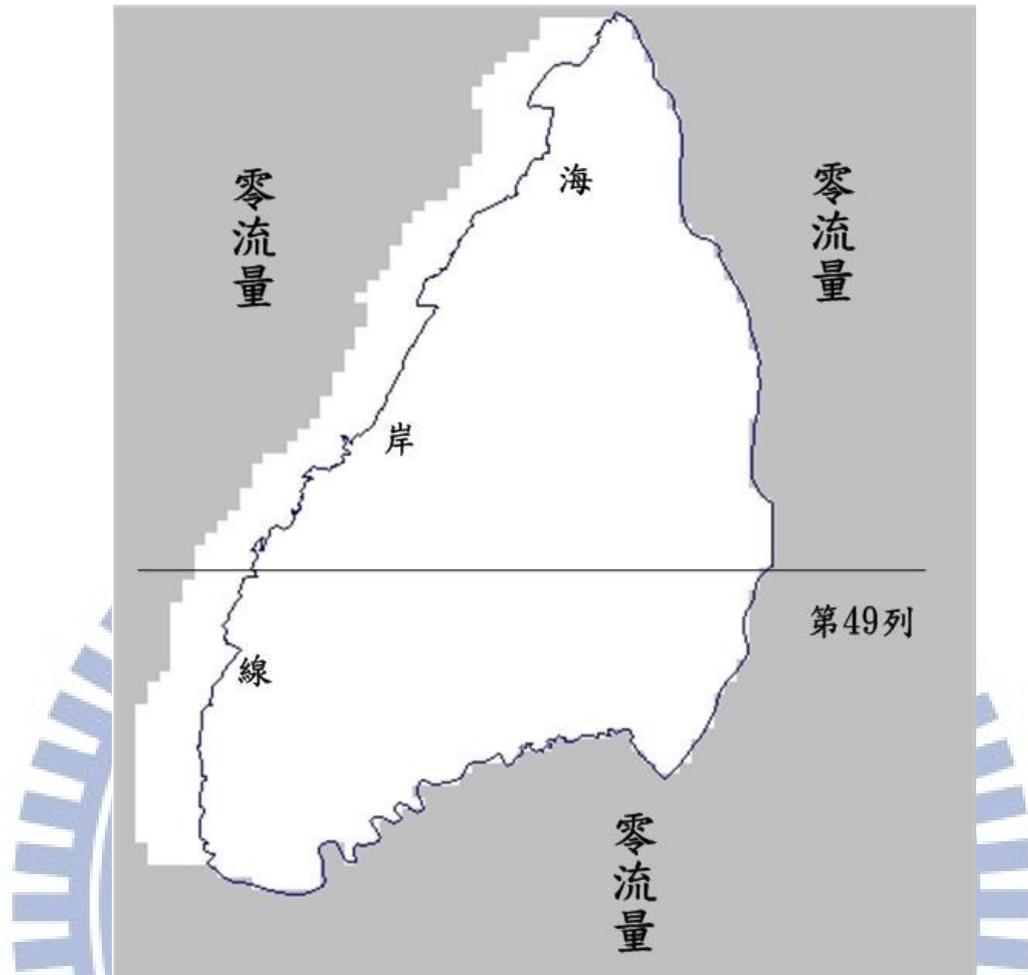


圖 5.1-6 濁水溪沖積扇模式第 2-7 分層格網劃分

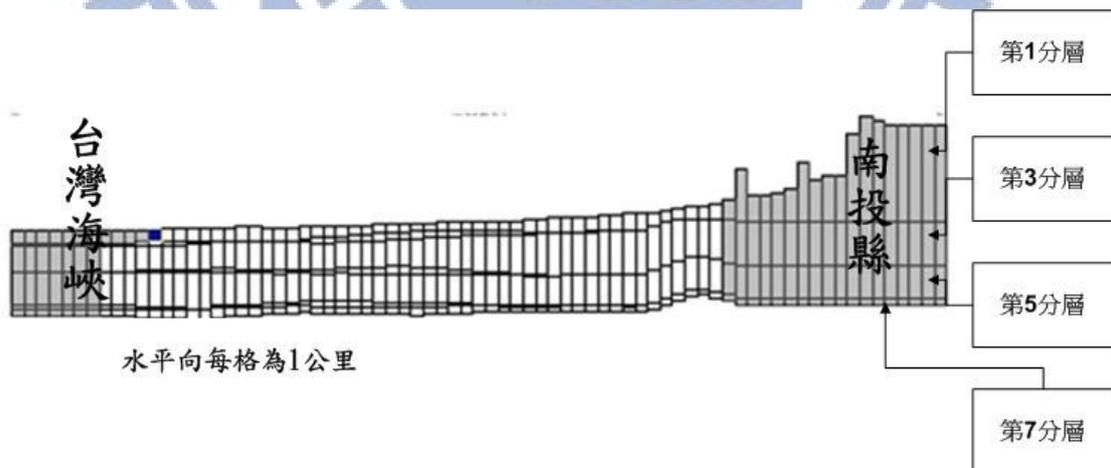


圖 5.1-7 濁水溪沖積扇模式第 49 列格網劃分割面圖

(二)模式之輸入資料

模式之輸入資料包括水力傳導係數、垂向水力傳導係數、儲水係數、起始地下水水位、補注量及抽水量等。以下說明以 MODFLOW 建置濁水溪沖積扇之地下水模式所需之各項參數：

1. 水力傳導係數

觀測站網建置時，各觀測井必進行單井或複井抽水試驗，因此分析所得各含水層之水力傳導係數相當多，故後續以觀測站位置及資料為依據，進行徐昇式多邊形法分區，同一分區內水力傳導係數相同，如圖 5.1-8 至圖 5.1-10 分別為模式第 1、3、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 B，而模式第 2、4 分層在下游部分為阻水層，其阻水層水力傳導係數參考 Schwartz and Zhang(2003)，設定為 4×10^{-3} (公尺/天)，並且從中游開始，水力傳導係數逐漸變大，到上游部分，水力傳導係數則與含水層相當，其分布如圖 5.1-11 與 5.1-12 所示。此外，前述抽水試驗所得結果為水平向之水力傳導係數，垂向水力傳導係數則假設為水平向之 1/10。

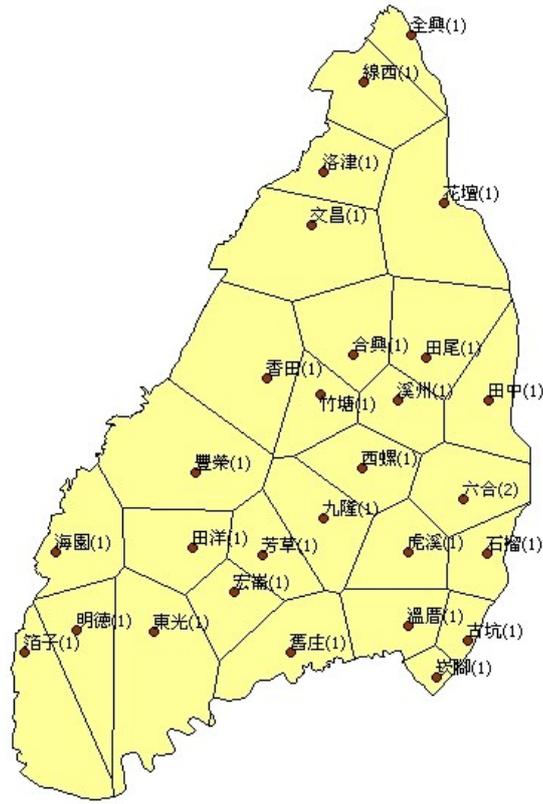


圖 5.1-8 濁水溪沖積扇模式第 1 分層徐昇式網格分區

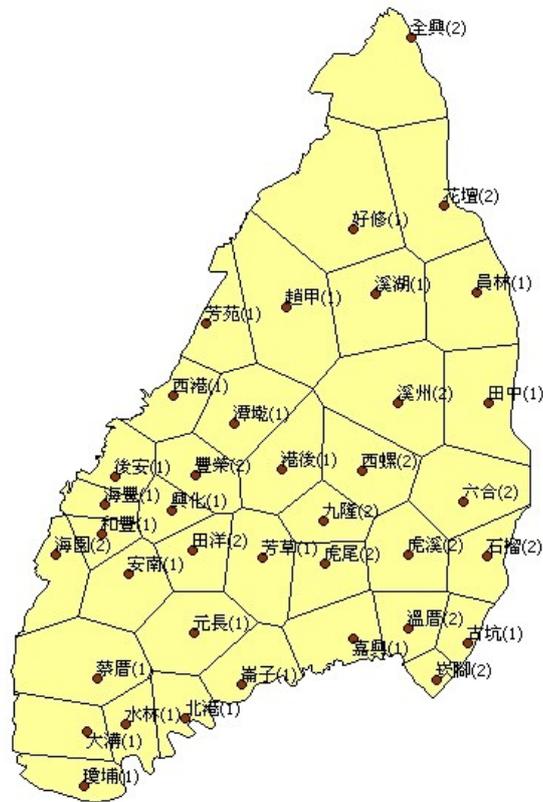


圖 5.1-9 濁水溪沖積扇模式第 3 分層徐昇式網格分區

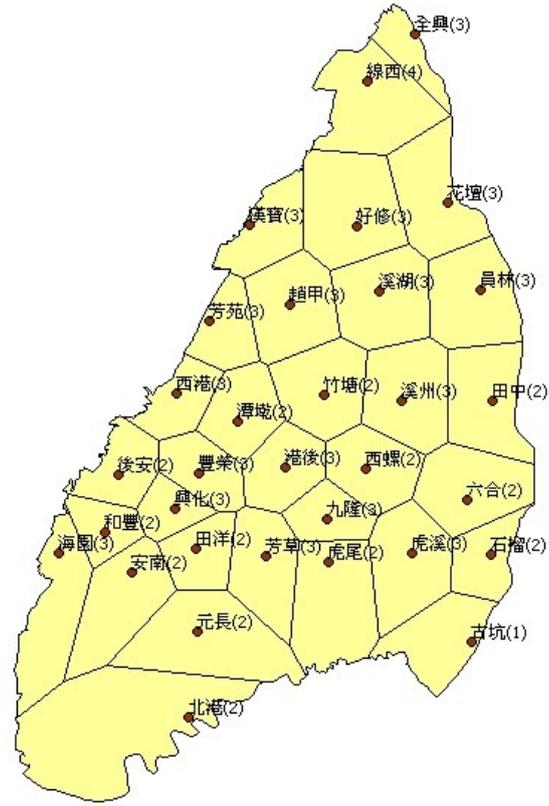


圖 5.1-10 濁水溪沖積扇模式第 5 分層徐昇式網格分區

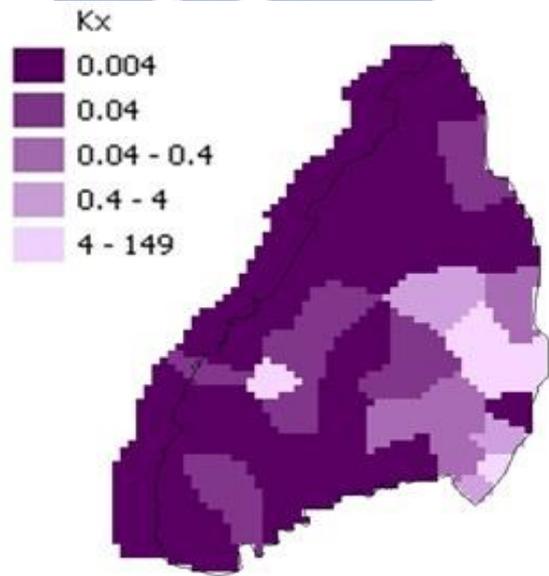


圖 5.1-11 濁水溪沖積扇模式第 2 分層水力傳導係數分布

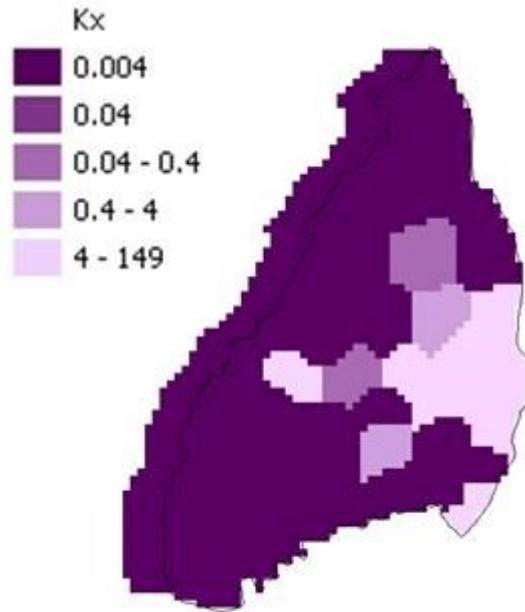


圖 5.1-12 濁水溪沖積扇模式第 4 分層水力傳導係數分布

2. 儲水係數

由於本研究進行穩態模式建構，所以尚不需要輸入儲水係數定。

3. 起始地下水水位

由於本研究進行穩態模擬之參數檢定，所以起始地下水水位僅作為求解穩態水位之初始值。

4. 淨補注量

本研究以參數檢定方法推估淨補注量。本研究在初始值之設定上，第一層所有網格皆給定 2000cmd，第三層及第五層每個網格皆給定抽水 500cmd。因本研究假定深層含水層(模式第三與第五分層)不會有人為補注，因此限制其淨補注量小於 0，意即深層僅有抽水發生，而淺層含水層因為可接受天然補注與人為抽水，故其淨補注量可為正值或負

值。待 MDDS 地下水參數檢定系統完成檢定後，即可求得淨補注量。

5. 檢定穩態模式之參照水位設定

本研究進行穩態模擬參數檢定，以民國 89 年至民國 96 年濁水溪沖積扇各觀測井之觀測水位平均值，作為穩態模式之參照水位。

5.2 濁水溪沖積扇地下水模式參數檢定結果分析

本研究以徐昇氏網格進行參數分區，以降低待參數之維度，而待參數之徐昇氏分區如圖 5.1-8 至 5.1-10 所示，參數分區共 98 區，為一高維度之參數檢定問題。本研究分別以 DDS 與 MDDS 進行地下水模式參數檢定，並比較兩者之檢定結果。在檢定案例之設計上，首先本研究以 20 組同樣的初始解(詳見模式設定第四點)，但使用不同的隨機變數種子(random seed)產生隨機變數，以分析待參數的選取對檢定成果之影響。接著，本研究將檢定案例設計分為兩大部分，第一部分為以 DDS 與 MDDS 進行參數檢定，最大迭代次數設定為 1000 與 2000 次，以分析 MDDS 是否可確實改善 DDS 之檢定成果。第二部分則僅以 MDDS 進行兩階段之參數檢定，並比較分階段與不分階段進行檢定造成之影響。在完成檢定後，計算 MDDS 與 DDS 檢定案例之目標函數平均值與標準偏差，進行比較分析。

第一部分之檢定結果如表 5.2-1 所示，第一行與第三行分別是 DDS 以鄰近擾動參數等於 0.2 時，分別檢定 1000 次與 2000 次後，所

求得之目標函數值；第二行與第四行則是以 MDDS 在相同鄰近擾動參數設定下(0.2)的檢定結果。就 20 組案例之檢定結果而言，在 1000 次迭代次數的案例中，MDDS 之平均目標函數值較 DDS 縮減約 3.5 倍左右(15.1 改善到 4.6)。在 2000 次迭代次數的案例中，MDDS 之平均目標函數值較 DDS 縮減約 4 倍左右(11.6 改善到 3.0)。由此可知，MDDS 的檢定結果顯著的較 DDS 為佳，表示 MDDS 在高維度地下水模式檢定問題，確實可有效改善 DDS 的檢定結果。此外，由標準偏差、最大值與最小值可知，MDDS 檢定後之目標函數變化幅度較小(1000 次迭代之案例為 2.9 至 7.6；2000 次迭代之案例為 2.1 至 4.8)，顯示 MDDS 可有效地挑選待定參數進行檢定，降低目標函數值，受給定的隨機變數影響較小，反觀以 DDS 所檢定 20 組案例之結果，其目標函數值變化範圍較大(1000 次迭代之案例為 9.8 至 21.4；2000 次迭代之案例為 8.4 至 16.1)，顯示其隨機挑選待定參數進行檢定，無法保證可選擇檢定誤差較大之待定參數進行檢定，因此若選擇到誤差較大之分區進行檢定，則可改善其目標函數，若未選擇到誤差較大之分區進行檢定，將無法有效改善目標函數。此即為 DDS 檢定案例之目標函數值變化範圍較大的原因。

表 5.2-1 DDS 與 MDDS 之檢定結果比較

隨機變數	DDS	MDDS	DDS	MDDS
<i>seed</i>	M=1000	M=1000	M=2000	M=2000
12	21.405682	3.856985	10.668165	2.366265
14	16.167636	7.584507	11.002245	2.655629
16	17.02598	4.725629	12.064238	2.060499
18	17.870677	4.205404	10.714148	2.991232
20	12.476437	3.303524	12.204512	2.85532
22	17.817416	5.688983	12.219348	2.912776
24	13.840178	3.387192	13.221883	2.721078
26	14.434116	4.263202	13.577582	4.769036
28	12.261063	3.796436	13.988391	3.016506
30	16.850084	4.062379	16.125081	2.894656
32	15.614836	4.351766	8.394388	2.414205
34	15.762858	4.451652	8.368919	2.921742
36	15.968792	4.174935	10.497953	3.412111
38	20.49002	4.532372	12.455955	3.596594
40	13.605624	5.082567	11.849963	3.120803
42	16.103529	4.124753	10.885447	2.297673
44	10.14375	7.365648	11.461352	3.497817
46	9.765059	6.411426	10.249103	3.284551
48	12.563498	3.800754	13.38353	3.601855
50	12.66649	2.933184	9.435416	2.650159
平均值	15.14168625	4.6051649	11.63838095	3.00202535
最大值	21.405682	7.584507	16.125081	4.769036
最小值	9.765059	2.933184	8.368919	2.060499
標準偏差	2.990039422	1.22659864	1.852217097	0.585079915

第二部分則將 MDDS 以兩階段進行參數檢定(MDDS_P)，本研究在第一階段將鄰近擾動參數設定為 0.2，最大迭待次數設定為 100 次，接著再第二階段將鄰近擾動參數設定為 0.01，最大迭待次數設定為 900 次。本研究再將 MDDS 直接進行 1000 次檢定，並分為鄰近擾動

參數 0.2 與 0.01 兩組，再將檢定結果與兩階段檢定結果進行比較。檢定結果如表 5.2-2 所示。

由表 5.2-2 之成果可知，MDDS_P 之檢定結果較其他兩組 MDDS 之結果為佳，其目標函數值明顯的改善，改善幅度約為 5 倍。造成此現象之主因由第四章數值試驗之分析結果可知，MDDS_P 在第一階段時，以較大之鄰近擾動參數增加解的搜尋速度，使得目標函數先迅速下降，第二階段時，再以較小的鄰近擾動參數進行檢定，逐步有效率地縮小目標函數，避免因搜尋步伐過大而產生震盪的情況。而以 MDDS 檢定 1000 次，且鄰近擾動參數為 0.2 之設定，因此其待參數修正之幅度較大，故在檢定初期會以較明顯之幅度改善目標函數，之後則因參數修正幅度較大而引起震盪現象，故其改善目標函數之程度有限。而以 MDDS 檢定 1000 次，且鄰近擾動參數設定為 0.01，其初期改善目標函數之幅度較鄰近擾動參數設定為 0.2 之案例為慢，但因其可持續但較緩慢的改善目標函數直到迭代結束，故其最後之檢定成果較鄰近擾動參數設定為 0.2 之案例為佳；此外，其檢定成果與兩階段檢定相較下差不多，其檢定後之目標函數平均值已小於 1，實屬不錯之檢定結果。

綜合前述分析可知，將 MDDS 分為兩階段進行參數檢定可進一步提升 MDDS 之檢定效率，因其第一階段設定較大之鄰近擾動參數，故

在檢定初期，其可迅速地改善目標函數，第二階段則以較小之鄰近擾動參數進行檢定，避免待參數修正幅度過大，造成參數數值大幅震盪，故可逐步有效地改善目標函數。

表 5.2-2 第一階段之檢定結果再加入 MDDS_P 後之綜合比較

隨機變數	MDDS	MDDS	MDDS	DDS
	第一階段 M=100, R=0.2	第二階段 M=900, R=0.01	不分階段 M=1000, R=0.2	不分階段 M=1000, R=0.2
12	21.965906	1.17016	3.856985	21.405682
14	10.819216	1.061572	7.584507	16.167636
16	12.396452	0.936747	4.725629	17.02598
18	8.275739	0.943213	4.205404	17.870677
20	21.021273	1.11408	3.303524	12.476437
22	8.568026	0.828835	5.688983	17.817416
24	16.67577	0.761116	3.387192	13.840178
26	9.806153	0.883447	4.263202	14.434116
28	13.09487	0.948703	3.796436	12.261063
30	15.894684	0.975139	4.062379	16.850084
32	21.043138	0.804271	4.351766	15.614836
34	11.111895	0.935936	4.451652	15.762858
36	21.192849	1.254589	4.174935	15.968792
38	9.036297	0.96208	4.532372	20.49002
40	18.137037	0.805466	5.082567	13.605624
42	15.578459	0.758105	4.124753	16.103529
44	6.418945	0.847804	7.365648	10.14375
46	9.398088	0.764136	6.411426	9.765059
48	11.857408	0.898519	3.800754	12.563498
50	14.670199	0.736637	2.933184	12.66649
平均值	13.8481202	0.91952775	4.6051649	15.14168625
最大值	21.965906	1.254589	7.584507	21.405682
最小值	6.418945	0.736637	2.933184	9.765059
標準偏差	4.764613622	0.139668358	1.22659864	2.990039422

5.3 MDDS 檢定濁水溪沖積扇之檢定成果

本研究以 MDDS 分階段進行檢定，第一階段最大迭代次數設定為 200，鄰近擾動參數設定為 0.2；第二階段最大迭代次數設定為 1800，鄰近擾動參數設為 0.01。兩階段合計 2000 次迭代次數。檢定後各含水層之觀測水位與模擬水位如圖 5.3-1 至 5.3-3 所示，而淨補注量於濁水溪沖積扇下的各含水層分布，如圖 5.3-4 至 5.3-6。檢定後之目標函數值等於 0.60 公尺(即整體觀測水位與模擬水位的均方根誤差等於 0.60 公尺)，而分析所有參數分區可知，最大檢定誤差約 1.8 公尺，顯示檢定成效良好。由圖 5.3-1 至 5.3-3 可知，觀測水位與模擬水位之空間分佈相當接近，若將觀測水位與模擬水位繪製散佈圖，兩者相關係數高達 0.999584，顯示檢定成果良好。附註說明，以上結果是由 20 組重複優選之後選出其中一組最接近「平均值」之呈現。

圖 5.3-4 至 5.3-6 為淨補注量之空間分布，由第一層淨補注量之分布圖可知，濁水溪沖積扇補注量多集中於靠近山麓的地區，與山區雨量多且多為礫石層，入滲量大的情況相當符合。而在雲林地區接近濁水溪沖積扇出海口的區域，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，所以淨補注量較其他地區稍大一些。由第三層與第五層抽水量(無補注量)分布可知，抽水量較大的地區多分布於沿海與鐵路車站附近，主因為沿海地區有許多養殖漁業，魚池遍佈，

所以地下水抽取量較大；而在鐵路車站附近，大部分為都市中心，工業區則為位於都市外圍，因此形成一個人口密集、工業發達，用水量需求大增，推測這些區域的地下水使用量相對較大。經由現地土地利用概況分析，發現本研究檢定後之淨補注量分布與現況近似，證實本研究中利用 MDDS 地下水模式參數檢定系統，應用於實際案例時仍深具可信度。

另外本研究再針對檢定結果進行「水平衡分析」，同樣以 20 組重複優選之後選出其中一組最接近「平均值」的結果來呈現。因為本研究套用修正型的動態維度搜尋法進行參數檢定，所參考之觀測水位為補注與抽水之綜合結果，所以在淺層僅能反應抽水或補注加總後的結果，故無法推估淺層補注量或抽水量，只能求得「淨補注量」；因此若能取得淺層補注量，將可推得淺層抽水量。假設將江崇榮等人(2006)所推估之濁水溪沖積扇於 1999 至 2001 年之補注量平均，可得平均總補注量為 15.33 億噸，將此值代入本參數檢定結果，可得第一層總抽水量為每年 3.15 億噸，總抽水量為每年 14.7 億噸，若將江崇榮等人(2006)所推估之 3 年抽水量與流失量總和取平均，其推估值為 15.70 億噸，與本研究所推估之值接近。

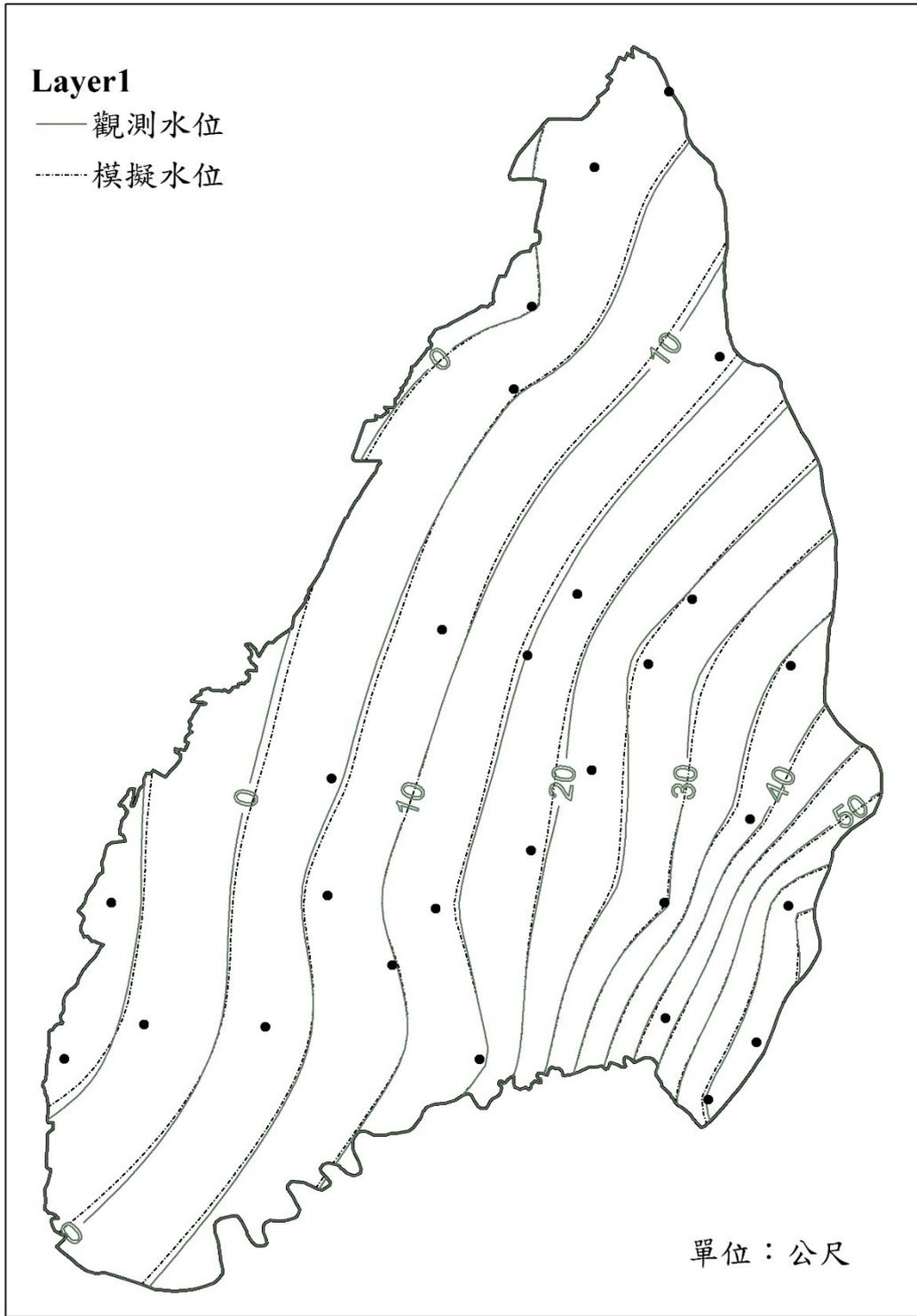


圖 5.3-1 第一層觀測水位與檢定後模擬水位等值圖

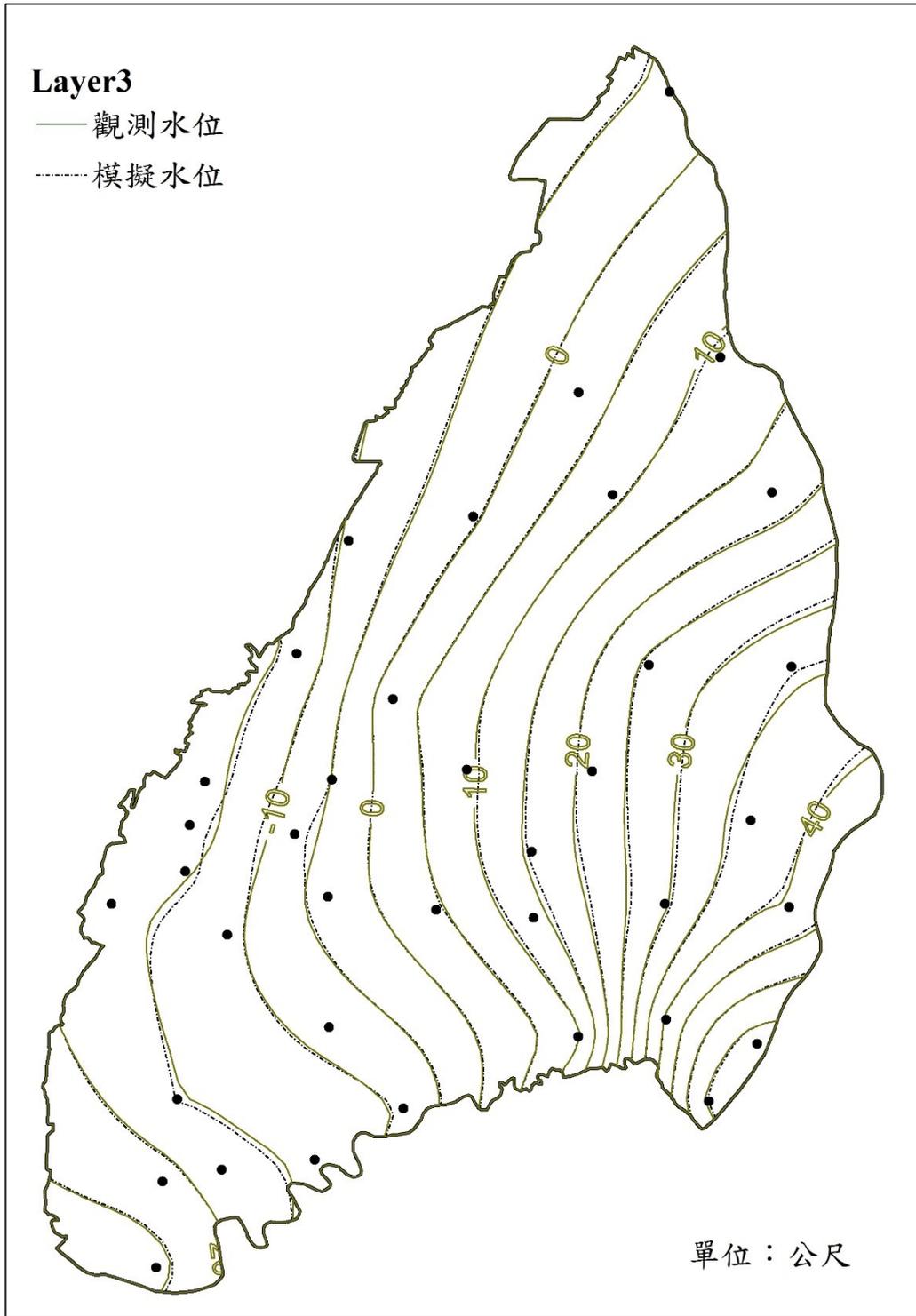


圖 5.3-2 第三層觀測水位與檢定後模擬水位等值圖

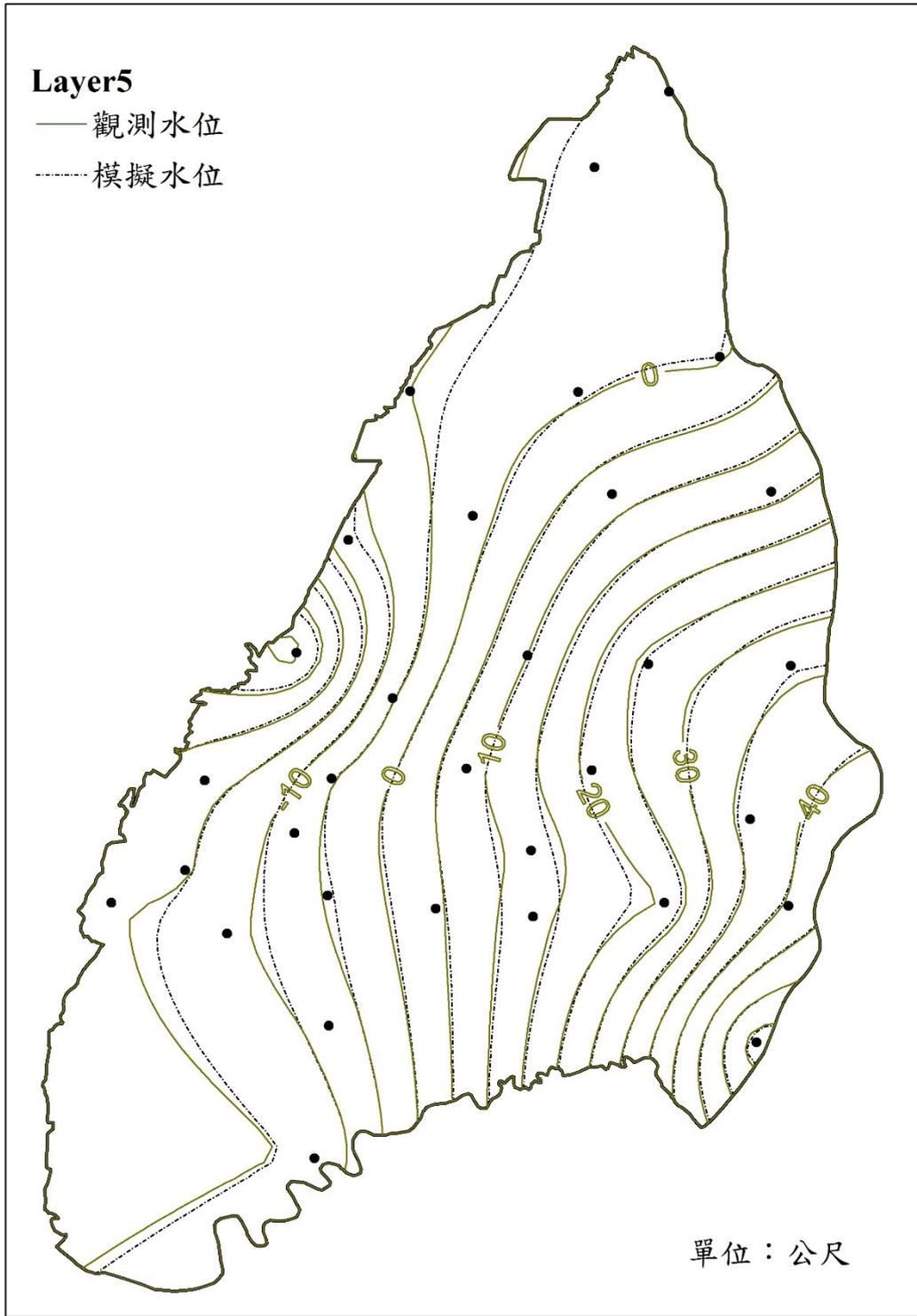


圖 5.3-3 第五層觀測水位與檢定後模擬水位等值圖

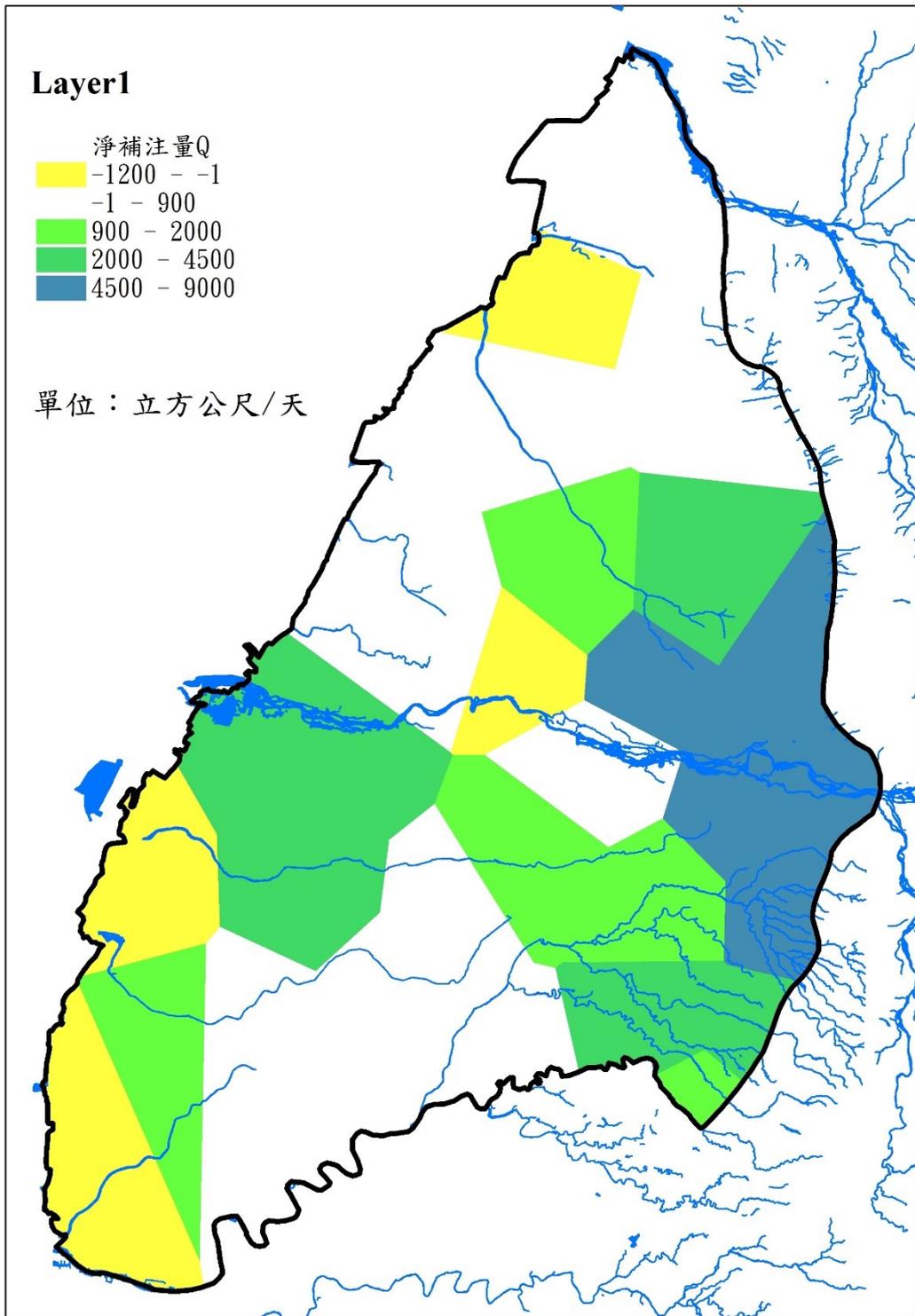


圖 5.3-4 檢定後第一層淨補注量分布情形

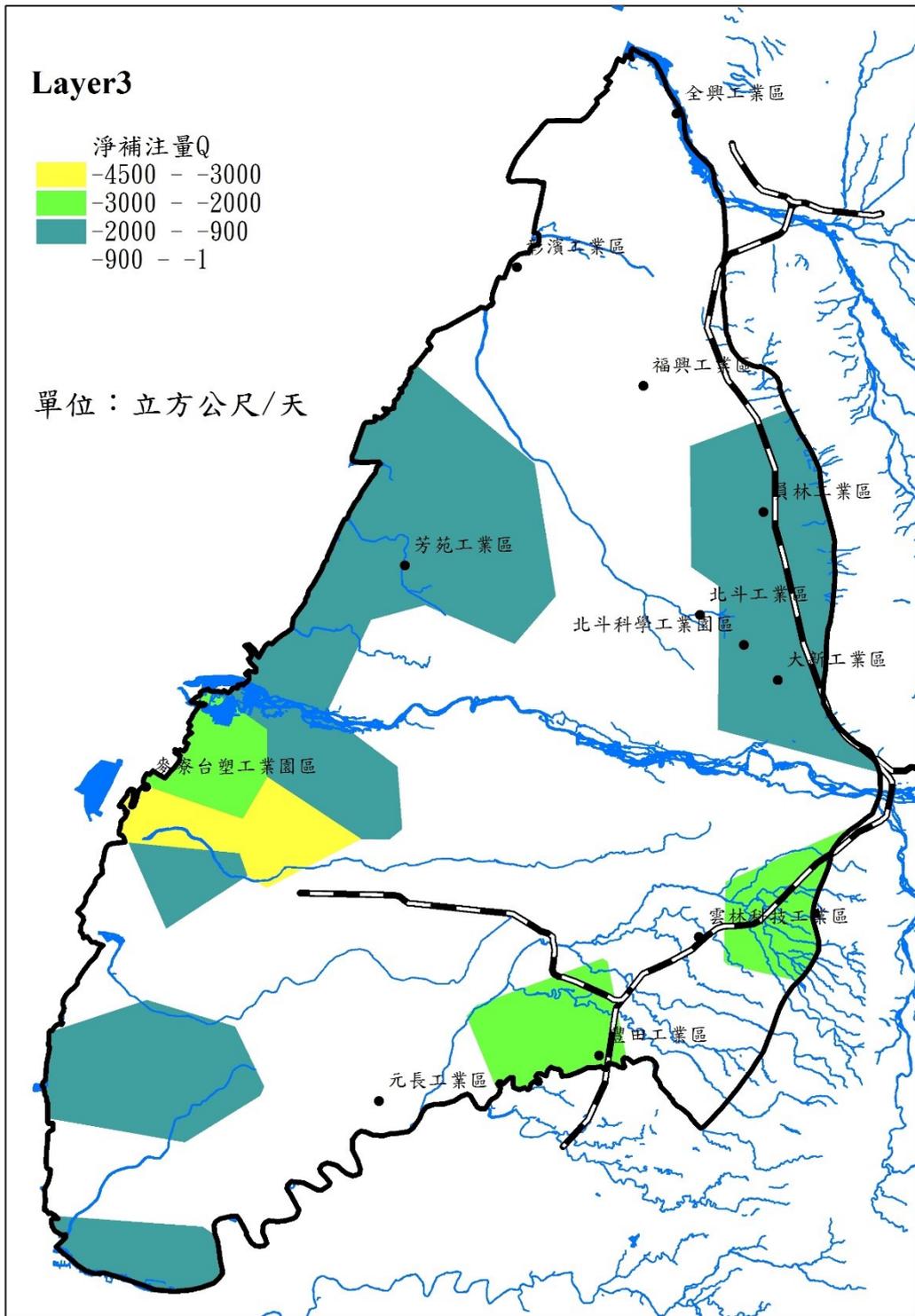


圖 5.3-5 檢定後第三層淨補注量分布情形

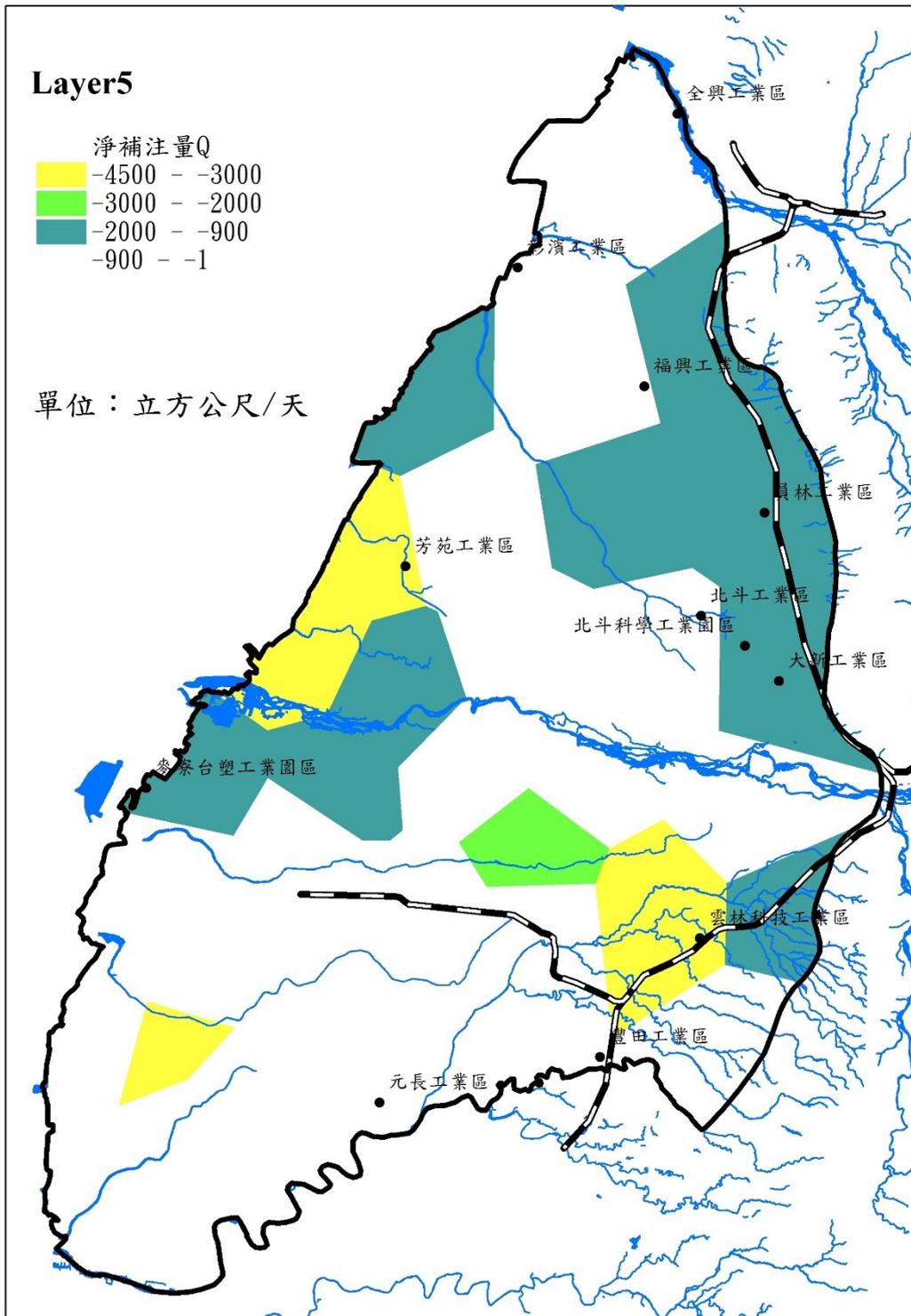


圖 5.3-6 檢定後第五層淨補注量分布情形

第六章 結論與建議

6.1 結論

1. 本研究以地下水參數優選為目標，改良動態維度搜尋法之參數選定及更新方式，完成一有效率而穩健的參數優選模式，前述參數優選模式經以設計案例或是濁水溪沖積扇地下水模式驗證，均顯示就地下水參數檢定問題而言，修正後的動態維度搜尋法相對於原本的演算法，對參數檢定結果均有大幅度地改善。
2. 由於動態維度搜尋法具隨機性，因此本研究以蒙地卡羅法的精神，對每項探討皆重複 20 組優選計算，再統計此 20 組最佳目標函數值的平均值與標準偏差，研究結果顯示，若僅改變參數之選定與更新方式，在相同的迭代次數下，以設計案例而言，其誤差均方根約可為原本演算法所得之 20%，而對濁水溪沖積扇之實際案例而言，則約為原本演算法所得之 30%至 25%，此顯示改變參數之選定與更新確能提高整體演算法之收斂效率。
3. 若除了改變參數之選定與更新外再修正演算法中之鄰近干擾參數，進而分階段進行參數優選，則對設計案例而言，其誤差均方根可進一步下降為原本演算法所得之 1/8，對濁水溪沖積扇來說，其誤差均方根可下降為原本演算法所得之 1/5 倍。換句話說，結合所有的

修正方案，即改變參數之選定與更新、修正演算法中之鄰近干擾參數及分階段參數優選等，則其誤差均方根可下降為原本演算法所得之 1/40 至 1/15，對收斂效率有顯著的提升。

4. 前述濁水溪沖積扇之實際案例應用中，其待定參數維度為 98 個，在 CPU 為 Intel(R) Core(TM) i7 2.93GHz 且記憶體為 4.00GB 之個人電腦上，完成 2000 疊代次數之優選，所需計算時間約為 30 分鐘左右，同樣進行 20 組重複優選，其平均觀測水位與模擬水位之誤差均方根，約為 0.6 公尺左右，各觀測站的觀測水位與模擬水位之相關係數約為 0.999，且檢定所得的參數值(淨補注量)分布，亦符合現地土地利用之情形，顯示本研究發展之參數優選模式應用於如濁水溪沖積扇之實際複雜案例亦可得相當良好之結果。

6.2 建議

1. 經對設計案例進一步檢視其計算過程，發現即使是修正後的演算法，由於後期待修正參數個數仍然相當少，以致中後期之目標函數下降效率遠小於前期，因此建議可設定一待修正參數個數之最小門檻值，或是適當降低待修正參數個數之減少速率，或可進一步改善收斂效率。
2. 雖然不論最大疊代次數與鄰近擾動參數之設定為何，演算法皆能獲得相對不錯的解，對於實際應用而言，已是一個有效率而穩健的演算法，惟最大疊代次數與鄰近擾動參數值，仍會一定程度影響最佳參數值，因此建議可再進行更多的數值試驗，探討較佳的最大疊代次數與鄰近擾動參數值之給定原則，進一步完善此演算法之實用性
3. 針對 3.3 節中的 MDDS 地下水模式參數檢定系統的建置，如果能夠增設一個虛擬的記憶體，藉此避免檢定過程中一些不必要的輸入與輸出，使得檢定時間能夠大幅縮減。

參考文獻

1. Bryan Tolson and Christine Shoemaker , 2007 , Dynamically dimensioned search algorithm for computationally efficient watershed model calibration , WATER RESOURCES RESEARCH.
2. Bryan Tolson and Christine Shoemaker , 2008 , Efficient prediction uncertainty approximation in the calibration of environmental simulation models , WATER RESOURCES RESEARCH.
3. L. Shawn Matott , Bryan A. Tolson , Masoud Asadzadeh , 2012 , A benchmarking framework for simulation-based optimization of environmental models , Environmental Modelling & Software.
4. L. Shawn Matott , Kenny Leung , Junyoung Sim , 2011 , Application of MATLAB and Python optimizers to two case studies involving groundwater flow and contaminant transport modeling , Computers & Geosciences.
5. Bryan A. Tolson , Masoud Asadzadeh , Holger R. Maier , and Aaron Zecchin , 2009 , Hybrid discrete dynamically dimensioned search (HD-DDS) algorithm for water distribution system design optimization , WATER RESOURCES RESEARCH.
6. Saman Razavi , Bryan A. Tolson , L. Shawn Matott , Neil R. Thomson , Angela MacLean , and Frank R. Seglenieks , 2010 , Reducing the computational cost of automatic calibration through model preemption , WATER RESOURCES RESEARCH.
7. Masoud Asadzadeh and Bryan Tolson , 2011 , Hybrid Pareto archived dynamically dimensioned search for multi-objective combinatorial optimization: application to water distribution network design , Journal of Hydroinformatics.

8. Xiao-Lan Huang, Jun Xiong, 2010, Parameter Optimization of Multi-tank Model with Modified Dynamically Dimensioned Search Algorithm, Proceedings of the Third International Symposium on Computer Science and Computational Technology.
9. 杜晨豪, 動態維度搜尋法應用於河川不恆定流自動率定之研究, 國立台灣大學, 碩士論文, 民國 98 年。
10. Schwartz, F.W., and Zhang, H., 2003, Fundamentals of ground water, John Wiley & Sons, New York.
11. 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。
12. 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。
13. 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。
14. 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。
15. 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。
16. 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。
17. 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。
18. 劉聰桂, 濁水溪沖積扇之地下水資源—碳十四與氫定年/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。

19. 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。
20. 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。
21. 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。
22. 經濟部水利署，地下水資源整體營運規劃與綜合評估，2002。
23. 童慶彬(2002)，”啟發式演算法與水資源管理講義”，國立台灣大學生物環境系統工程學系，永續發展研究室。
24. 王雲直，應用專家系統於地下水模式自動化參數檢定之研究_以濁水溪沖積扇為例，國立交通大學，碩士論文，民國 99 年。

附錄 A MODFLOW 簡介

MODFLOW 為美國地質調查局(U.S.G.S.)發展之程式。該程式可解二維及三維之地下水流問題，含水層之種類可為自由、受壓、半受壓含水層，依地質特性分類可為均質、非均質及等向性、非等向性含水層。MODFLOW 程式乃利用有限差分法(Block Centered Finite Difference Approach)解水流控制方程式，計算機數值求解方法乃採用兩種疊代技巧強制隱式法(SIP)及鬆弛疊代法(SSOR)。程式包括之重要單元有水井、區域性補注量、蒸發散、河川之滲流及定水頭邊界。以下就對MODFLOW程式發展作一介紹：

三維地下水流在孔隙介質中的運動行為可以下列之偏微分方程式來表示：

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k_{xx} \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_{yy} \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k_{zz} \frac{\partial h}{\partial z} \right) - W = S_s \frac{\partial h}{\partial t} \quad [\text{附A.1}]$$

其中

K_{xx}, K_{yy}, K_{zz} ：沿主軸 X, Y, Z 方向的透水係數 (Hydraulic Conductivity) (LT^{-1})

h ：管壓水頭(Potentiometric Head) (L)

W ：單位體積的體積流率 (Volumetric Flux)，代表源匯項 (Sources/Sinks) (T^{-1})

S_s ：孔隙介質的比儲水量(Specific Storage) (L^{-1})

t ：表時間(T)

上述式 (附A.1) 若結合了含水層系統邊界情況、起始條件等資訊，可組成一地下水流系統的數學表示式。但由於其解析解難以求得，故必須用數值方法來作推導，MODFLOW以有限差分法求得其數值解。

若以有限差分方式來表達地下水流方程式，則必須利用連續性方程式 (所有進入及流出 cell 的流量必定等於在cell中儲蓄量的改變率)，且假設地下水流之密度(ρ)為一定值。所以對於一個cell(i,j,k)來說，若考慮本身及其鄰近的六個含水層的 cells($(i-1,j,k),(i+1,j,k),(i,j-1,k),(i,j+1,k),(i,j,k-1),(i,j,k+1)$)。如圖附A.1所示：

假設在列 (row) 方向的 cell($j,j-1,k$) 流進 cell(i,j,k) 的流量為：

$$q_{i,j-1/2,k} = KR_{i,j-1/2,k} \Delta C_i \Delta v_k \frac{(h_{i,j-1,k} - h_{i,j,k})}{\Delta r_{j-1/2}} \quad [\text{附A.2}]$$

上式中：

$h_{i,j,k}$ 及 $h_{i,j-1,k}$ 分別代表在節點 (i,j,k);($i,j-1,k$)水頭。

$q_{i,j-1/2,k}$ 為通過介於cell(i,j,k)和($i,j-1,k$) 間界面體積的流量 (L^3t^{-1})。

$KR_{i,j-1/2,k}$ 為在列 (row) 方向介於節點 (i,j,k) 和 ($i,j-1,k$) 間的透水係數。

$\Delta C_i \Delta v_k$ 為垂直於列 (row) 方向的 cell 面的截面積。

$\Delta r_{j-1/2}$ 為節點 (i,j,k) 和 ($i,j-1,k$) 間的距離。

所以同理可求得其餘的五個面流進 cell(i,j,k)的流量：

$$q_{i,j+1/2,k} = KR_{i,j+1/2,k} \Delta C_i \Delta v_k \frac{(h_{i,j+1,k} - h_{i,j,k})}{\Delta r_{j+1/2}}$$

$$q_{i+1/2,j,k} = KR_{i+1/2,j,k} \Delta r_j \Delta v_k \frac{(h_{i+1,j,k} - h_{i,j,k})}{\Delta c_{j+1/2}}$$

$$q_{i+1/2,j,k} = KR_{i-1/2,j,k} \Delta r_j \Delta v_k \frac{(h_{i-1,j,k} - h_{i,j,k})}{\Delta c_{i-1/2}}$$

$$q_{i,j,k+1/2} = KR_{i,j,k+1/2} \Delta r_j \Delta c_i \frac{(h_{i,j,k+1} - h_{i,j,k})}{\Delta v_{k+1/2}}$$

$$q_{i,j,k-1/2} = KR_{i,j,k-1/2} \Delta r_j \Delta c_i \frac{(h_{i,j,k-1} - h_{i,j,k})}{\Delta v_{k+1/2}}$$

若 $CR = KR \times \frac{\Delta t}{L}$ ，則連續性方程式可表示為：

$$\begin{aligned} & CR_{i,j-1/2,k} (h_{i,j-1,k} - h_{i,j,k}) + CR_{i,j+1/2,k} (h_{i,j+1,k} - h_{i,j,k}) + CC_{i-1/2,j,k} (h_{i-1,j,k} - h_{i,j,k}) \\ & + CC_{i+1/2,j,k} (h_{i+1,j,k} - h_{i,j,k}) + CV_{i,j,k-1/2} (h_{i,j,k-1} - h_{i,j,k}) + CV_{i,j,k+1/2} (h_{i,j,k+1} - h_{i,j,k}) \\ & = S_{s_{i,j,k}} \frac{\Delta h_{i,j,k}}{\Delta t} \Delta r_j \Delta c_i \Delta v_k \end{aligned} \quad [\text{附 A.3}]$$

上式中：

$S_{s_{i,j,k}}$: cell(i,j,k) 的比儲水量

$\Delta r_j \Delta c_i \Delta v_k$: cell(i,j,k) 的體積

現在若在多加以考慮源、匯 (Sources、Sinks)，則連續性方程式變為：

$$\begin{aligned} & CR_{i,j-1/2,k} (h_{i,j-1,k} - h_{i,j,k}) + CR_{i,j+1/2,k} (h_{i,j+1,k} - h_{i,j,k}) + CC_{i-1/2,j,k} (h_{i-1,j,k} - h_{i,j,k}) \\ & + CC_{i+1/2,j,k} (h_{i+1,j,k} - h_{i,j,k}) + CV_{i,j,k-1/2} (h_{i,j,k-1} - h_{i,j,k}) + CV_{i,j,k+1/2} (h_{i,j,k+1} - h_{i,j,k}) \\ & + QS_{i,j,k} = S_{s_{i,j,k}} \frac{\Delta h_{i,j,k}}{\Delta t} \Delta r_j \Delta c_i \Delta v_k \end{aligned} \quad [\text{附 A.4}]$$

一般而言， $QS_{i,j,k} = \sum_{n=1}^N a_{i,j,k,n} = \sum_{n=1}^N P_{i,j,k,n} h_{i,j,k} + \sum_1^N q_{i,j,k,n}$

此處： $a_{i,j,k,n}$: 第 n 個外在的源流進 cell(i,j,k) 的流量。

$P_{i,j,k,n} (L^2 T^{-1})$ 、 $q_{i,j,k,n} (L^3 T^{-1})$ 均等於常數。

MODFLOW中所採用的為後向差分(Backward Difference)，所以對於 cell(i,j,k)來說，若以 t_m 和 t_{m-1} 之間來代表 Δt ，則：

$$\left(\frac{\Delta h_{i,j,k}}{\Delta t} \right) = \frac{h_{i,j,k}^m - h_{i,j,k}^{m-1}}{t_m - t_{m-1}} \quad [\text{附A.5}]$$

將方程式 (附C.5) 代入 (附C.4) 中，則可得：

$$\begin{aligned} & CR_{i,j-1/2,k} (h_{i,j-1,k}^m - h_{i,j,k}^m) + CR_{i,j+1/2,k} (h_{i,j+1,k}^m - h_{i,j,k}^m) + CC_{i-1/2,j,k} (h_{i-1,j,k}^m - h_{i,j,k}^m) \\ & + CC_{i+1/2,j,k} (h_{i+1,j,k}^m - h_{i,j,k}^m) + CV_{i,j,k-1/2} (h_{i,j,k-1}^m - h_{i,j,k}^m) + CV_{i,j,k+1/2} (h_{i,j,k+1}^m - h_{i,j,k}^m) \\ & + P_{i,j,k} h_{i,j,k}^m + Q_{i,j,k} = S_{s_{i,j,k}} \frac{(h_{i,j,k}^m - h_{i,j,k}^{m-1})}{t_m - t_{m-1}} \Delta r_j \Delta c_i \Delta v_k \end{aligned}$$

[附A.6]

所以將有含 $h_{i,j,k}^m$ 的項全移至左邊，而含 $h_{i,j,k}^{m-1}$ 的項移至右邊，則可得：

$$\begin{aligned} & CV_{i,j,k-1/2} h_{i,j,k-1}^m + CR_{i,j-1/2,k} h_{i,j-1,k}^m + CC_{i-1/2,j,k} h_{i-1,j,k}^m + (-CR_{i,j-1/2,k} - CC_{i-1/2,j,k} \\ & - CR_{i,j+1/2,k} - CC_{i+1/2,j,k} - CV_{i,j,k-1/2} - CV_{i,j,k+1/2} + HCOF_{i,j,k}) h_{i,j,k}^m + CV_{i,j,k+1/2} h_{i,j,k+1}^m \\ & + CR_{i,j+1/2,k} h_{i,j+1,k}^m + CC_{i+1/2,j,k} h_{i+1,j,k}^m = RHS_{i,j,k} \end{aligned}$$

[附A.7]

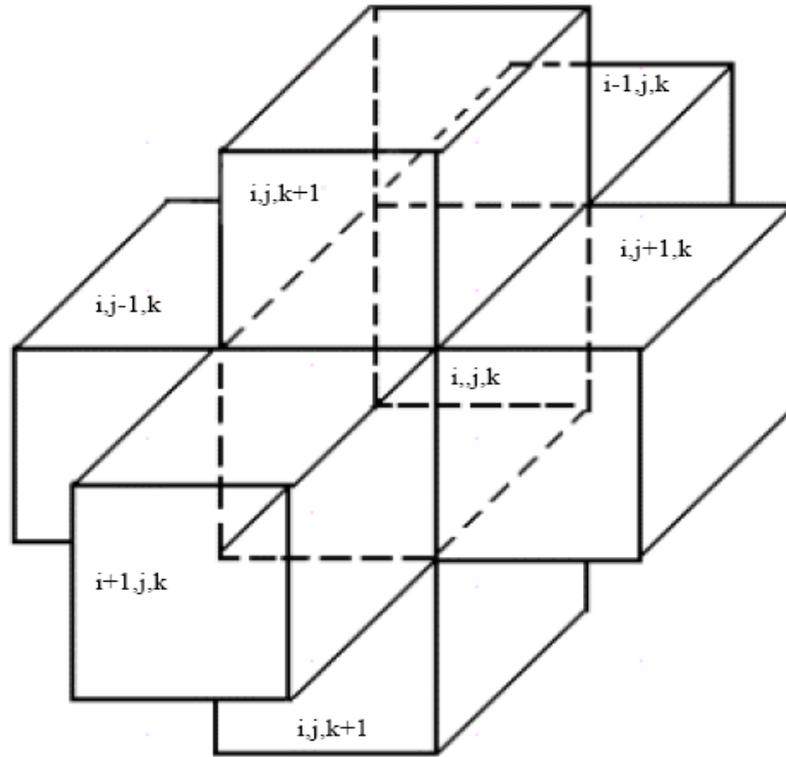
其中：

$$HCOF_{i,j,k} = P_{i,j,k} - S_{s_{i,j,k}} / (t_m - t_{m-1})$$

$$RHS_{i,j,k} = -Q_{i,j,k} - S_{s_{i,j,k}} h_{i,j,k}^{m-1} / (t_m - t_{m-1})$$

$$S_{s_{i,j,k}} = S_{s_{i,j,k}} \Delta r_j \Delta c_i \Delta v_k$$

而附A.7式即是MODFLOW程式所解之差分式。



圖附 A.1 $cell(i,j-1,k)$ 進入 $cell$ 之地下水流



附錄 B 各觀測井之水力傳導係數資料

站井名稱	K(m/day)	站井名稱	K(m/day)	站井名稱	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
		芳草(1)	46.4112	海園(3)	22.2192
站井名稱	K(m/day)	虎尾(2)	52.0848	石榴(2)	10.7309
豐榮(2)	50.7024	虎溪(2)	58.1904	全興(3)	63.9648
九隆(2)	80.5824	後安(1)	16.992		
石榴(2)	10.7309	海園(2)	22.2192		
全興(2)	1.0368				