

國立中央大學

水文科學研究所

碩士論文

極端降雨事件分散式集水區逕流模式
之發展與驗證

Development and Validation of Distributed Watershed
Run-off Model under Severe Rainfall Condition

研究生：黃奕璋

指導教授：蔡武廷 博士

中華民國九十六年七月十八日



國立中央大學圖書館 碩博士論文電子檔授權書

(95 年 7 月最新修正版)

本授權書所授權之論文全文電子檔(不包含紙本、詳備註 1 說明)，為本人於國立中央大學，撰寫之碩/博士學位論文。(以下請擇一勾選)

- () **同意** (立即開放)
() **同意** (一年後開放)，原因是：_____。
() **同意** (二年後開放)，原因是：_____。
() **不同意**，原因是：_____。

以非專屬、無償授權國立中央大學圖書館與國家圖書館，基於推動「資源共享、互惠合作」之理念，於回饋社會與學術研究之目的，得不限地域、時間與次數，以紙本、微縮、光碟及其它各種方法將上列論文收錄、重製、公開陳列、與發行，或再授權他人以各種方法重製與利用，並得將數位化之上列論文與論文電子檔以上載網路方式，提供讀者基於個人非營利性質之線上檢索、閱覽、下載或列印。

研究生簽名： 黃奕璋 學號： 946205002

論文名稱： 極端降雨事件分散式集水區逕流模式之發展與驗證

指導教授姓名： 蔡武廷 博士

系所： 水文科學 所 博士班 碩士班

日期：民國 96 年 7 月 18 日

備註：

1. 本授權書之授權範圍僅限電子檔，紙本論文部分依著作權法第 15 條第 3 款之規定，採推定原則即預設同意圖書館得公開上架閱覽，如您有申請專利或投稿等考量，不同意紙本上架陳列，須另行加填聲明書，詳細說明與紙本聲明書請至 <http://blog.lib.ncu.edu.tw/plog/> 碩博士論文專區查閱下載。
2. 本授權書請填寫並**親筆**簽名後，裝訂於各紙本論文封面後之次頁（全文電子檔內之授權書簽名，可用電腦打字代替）。
3. 請加印一份單張之授權書，填寫並親筆簽名後，於辦理離校時交圖書館（以統一代轉寄給國家圖書館）。
4. 讀者基於個人非營利性質之線上檢索、閱覽、下載或列印上列論文，應依著作權法相關規定辦理。

摘要

本研究發展一分散式集水區逕流模式，考慮了降雨、截留、漫地流、入滲與渠道流共五種水文過程。每種水文過程皆有相對應之控制方程式，此模式採有限差分法將其離散化，配合適當之輸入資料與參數，即可於計算機中模擬各種水文過程。

此外，本研究以石門水庫集水區為研究區域，選用納莉颱風作為降雨事件，並使用不同計算時距和空間解析度資料驗證模式之收斂性，其次探討截留與入滲兩種水文過程在極端降雨事件中的重要性，同時分析渠道粗糙度對於洪水波之影響。最後，我們對本模式提出建議。

關鍵字：集水區逕流模式、洪水波、漫地流、渠道流、降雨、截留、
入滲

Abstract

This study developed a distributed watershed run-off model which consider rainfall, interception, overland flow, infiltration, and channel flow. Finite difference numerical scheme was used in the model to discretize the governing equations of the hydrological processes. With appropriate data and parameters, we could use this model to simulate these hydrological processes in the computer.

In this study, the watershed of Shihmen Reservoir was chosen as the research domain and typhoon Nari was chosen as the rainfall event. We validated the model with different time interval and spatial resolution ,and also discussed the importance of interception and infiltration as well as discussed the impact on flood wave with different roughness of the channel. Finally, we proposed some suggestions to the model.

Key words : watershed run-off model, flood wave, overland flow,
channel flow, rainfall, interception, infiltration.

誌 謝

於中央大學水文所碩士班修業期間，承蒙指導教授蔡武廷老師悉心教導與指正，並提供舒適良好的研究環境，使筆者研究得以順利完成；再者，亦感謝口試委員葉克家老師、李明旭老師、吳祚任老師願意抽空出席筆者的碩士資格口試，並提供寶貴意見與批評指教，使本論文內容更加完備。

同時，感謝研究室夥伴煜欽、韻如、世明學長、立萍學姐以及惠絹學妹在修業過程中多所鼓勵，其中特別感謝世明學長與立萍學姊協助筆者校驗論文文稿，使本文得以如期完成。其次，也感謝研究所同學紹昆、谷州、哲震、雨青、明昇、宥丞、廷暉、佑瑜、呈祥、裕仁、馥揚、一夫、錡樺、奕穎學長和睿唐學長願意在課業和生活上提供許多資訊與建議，不勝感激。

此外，也特別感謝信心之家團契的鄭銘章老師、何秀慧老師、蔡龍珩老師、羅慧筠老師，以及曉恩、禎泰、柏祥、冠甫、淮山、天仁、喬威、柏璋、邱詠、世圓、欣容、詩捷…等許多朋友對我的關心，使我在外地求學期間仍能在校園內找到家的溫暖與支持。另外，要感謝台中旌旗教會中牧者們的教導，使筆者重新建立正確的價值觀；同時，要感謝社青小組團契中銘崧哥與琳帆姐所立下的榜樣，也謝謝鵬宇、安迪、麗貞、文玲、奕君、智傑、政偉、靜煒、魏葦…等組員的祝福。

再者，要將這份畢業的喜悅與在背後默默支持筆者的父母分享，若沒有您們辛勤工作與無悔付出，筆者就不可能有機會在研究所深造，願這份榮耀與驕傲全然歸予我所敬愛的父母；最後，也感謝小妹郁婷給筆者多所鼓勵與打氣，扮演筆者的開心果。

此外，特別感謝摯愛的女友盈蘭在筆者修業期間多所包容與體諒，無論面對何種壓力與挑戰始終願意守候筆者身旁；並且感謝女友家人們視筆

者如己出，經常給予關懷和問候。

最後，要感謝的人實在太多筆者無法逐一致謝，故願效法陳之藩作品《謝天》中的飲水思源，將一切感恩歸予天父上帝，祂是我在任何處境中最大的後盾。

黃奕璋謹識於

國立中央大學水文科學研究所

中華民國九十六年七月十八日

目 錄

	頁次
摘要	i
Abstract	ii
誌 謝	iii
目 錄	v
圖目錄	viii
表目錄	x
第一章 序論	1
1-1 前言	1
1-2 研究目的	1
1-3 模式簡介	2
1-4 地理資訊系統	2
1-5 論文架構	3
第二章 文獻回顧	4
2-1 水文模式發展歷程	4
2-2 洪水演算與擴散波近似	5
第三章 控制方程式	9
3-1 降雨	9
3-2 截留	10
3-3 入滲	11

3-4	漫地流·····	11
3-4-1	漫地流連續方程式·····	12
3-4-2	漫地流動量方程式·····	13
3-4-3	漫地流阻抗定律式·····	14
3-5	渠道流·····	15
3-5-1	渠道流連續方程式·····	15
3-5-2	渠道流動量方程式·····	16
3-5-3	渠道流曼寧公式·····	16
3-6	初始條件與邊界條件·····	16
第四章	數值離散·····	18
4-1	降雨分布·····	18
4-2	截留差分式·····	20
4-3	入滲差分式·····	21
4-4	交錯網格·····	22
4-5	二維漫地流·····	23
4-5-1	漫地流連續方程差分式·····	23
4-5-2	漫地流非慣性波方程差分式·····	24
4-5-3	漫地流阻抗定律差分式·····	26
4-6	一維渠道流·····	28
4-6-1	渠道流連續方程差分式·····	29
4-6-2	渠道流非慣性波方程差分式·····	30
4-6-3	渠道流曼寧公式差分式·····	31
4-7	模擬演算流程·····	32

第五章	研究區域與輸入資料	34
5-1	DEM.....	34
5-2	土地利用.....	34
5-3	土壤種類.....	36
5-4	河系分布.....	38
5-4-1	凹點填平.....	38
5-4-2	流向判斷.....	39
5-4-3	累積流量.....	39
5-5	渠道斷面與粗糙係數.....	41
5-6	雨量資料.....	42
5-7	流量資料.....	49
第六章	模式驗證與模擬分析	54
6-1	模式驗證.....	54
6-1-1	模式驗證結果.....	55
6-2	水文過程考慮與否.....	61
6-2-1	截留與否之模擬結果.....	61
6-2-2	入滲與否之模擬結果.....	61
6-3	渠道粗糙係數分析.....	65
6-3-1	渠道粗糙係數分析結果.....	66
第七章	結論與建議	68
7-1	結果討論.....	68
7-2	研究建議.....	69
參考文獻	70

圖目錄

	頁次
圖 2.1：集水區渠道洪水波流量歷線示意圖·····	5
圖 3.1：集水區水文循環示意圖(來源：中華民國溪流環境協會)···	10
圖 3.2：截留過程示意圖·····	11
圖 3.3：Green-Ampt 入滲模型·····	12
圖 3.4：漫地流示意圖·····	13
圖 3.5：渠道流示意圖·····	15
圖 4.1：分散式集水區逕流模式基本架構示意圖·····	19
圖 4.2：分散式集水區逕流模式數值網格示意圖·····	19
圖 4.3：距離平方反比權重公式計算之降雨強度分布示意圖·····	20
圖 4.4：入滲差分式示意圖·····	22
圖 4.5：漫地流交錯網格示意圖·····	23
圖 4.6：渠道單元交錯網格示意圖·····	28
圖 4.7：河系、河段、節點示意圖·····	29
圖 4.8：漫地流注入渠道示意圖·····	30
圖 4.9：模式演算流程圖·····	33
圖 5.1：石門水庫集水區高程地形圖·····	35
圖 5.2：陣列格式高程資料示意圖·····	35
圖 5.3：石門水庫集水區土地利用分布圖(年份：2004)·····	36
圖 5.4：石門水庫集水區土壤種類分布圖(年份：1996~1999)·····	37
圖 5.5：凹點填平前後之高程差分布圖·····	38

圖 5.6：流向與製作流向圖層示意圖·····	39
圖 5.7：製作累積流量圖層示意圖·····	40
圖 5.8：人工河系製作流程圖·····	40
圖 5.9：人工河系與實際河系比較圖·····	40
圖 5.10：渠道斷面製作原理示意圖·····	41
圖 5.11：石門水庫集水區雨量站位置分布圖·····	42
圖 5.12：納莉颱風路徑圖(來源：中央氣象局)·····	42
圖 5.13：納莉颱風平均降雨強度組體圖·····	46
圖 5.14：納莉颱風各雨量站降雨強度組體圖·····	47
圖 5.15：石門水庫集水區流量站位置與子集水區分布圖·····	49
圖 5.16：石門水庫集水區各流量站流量歷線圖·····	53
圖 6.1：120 公尺解析度下，不同計算時距之模擬值與觀測值流量歷 線比較圖·····	57
圖 6.2：200 公尺解析度下，不同計算時距之模擬值與觀測值流量歷 線比較圖·····	58
圖 6.3：400 公尺解析度下，不同計算時距之模擬值與觀測值流量歷 線比較圖·····	59
圖 6.4：120、200 和 400 公尺空間解析度資料，模擬值與觀測值之 流量歷線比較圖·····	60
圖 6.5：截留過程考慮與否，其模擬值與觀測值之流量歷線比較圖·	63
圖 6.6：入滲過程考慮與否，其模擬值與觀測值之流量歷線比較圖·	64
圖 6.7：不同渠道曼寧粗糙係數之流量歷線比較圖·····	67

表目錄

	頁次
表 2.1：擴散波近似分類表·····	8
表 4.1：渠道單元 x 、 y 座標記錄表·····	29
表 5.1：土地利用對照參數表·····	35
表 5.2：Green-Ampt 公式土壤參數對照表(Rawls&Brakensiek, 1983)·	37
表 5.3：2001 年納莉颱風時降雨量資料表(單位：mm/hr)·····	43
表 5.4：納莉颱風期間石門集水區各流量站時流量表(單位： m^3 / sec)·	50
表 5.5：納莉颱風期間，石門水庫集水區各流量站之洪峰值與集流時 間表·····	52
表 6.1：不同計算時距與空間解析度下，漫地流和渠道流之可蘭數··	55
表 6.2：不同計算時距與資料空間解析度下，流量模擬值之均方根誤 差·····	56
表 6.3：截留與入滲過程考慮與否，其流量模擬值之均方根誤差···	61
表 6.4：考慮截留或入滲過程與否之集水區水文過程水體分布表···	62
表 6.5：渠道曼寧粗糙係數表(王如意, 1988) ·····	65
表 6.6：不同渠道曼寧粗糙係數下，流量模擬值之均方根誤差·····	66

第一章 序論

1-1 前言

根據中央氣象局統計，台灣每年平均總降雨量約為兩千五百公釐，但由於氣候特性屬於乾溼季分明之型態，故其中絕大部份雨量皆集中於春季與夏季，且主要係由清明時節之春雨、春末夏初之梅雨以及颱風所提供，皆為台灣各大集水區每年之重要水資源來源。

相對於降雨所帶來的充沛水資源，台灣由於特殊的山高坡陡地形，使得降雨事件中所形成的地表逕流與渠道洪水，其特性皆為量大流急，特別於颱風侵襲期間，往往更容易在集水區下游人口密集處造成財產損失與人員傷亡；如 2001 年納莉颱風在台灣肆虐期間，共造成九十四人死亡、十人失蹤、兩百六十五人受傷，各方面損失金額粗略估計即高達數百億台幣，且上述災情皆在三天短時間中造成，災害強度可見一斑。因此，如何安全有效地匯集極端降雨所帶來之水資源，並預防或預報其可能造成之水患，以期達成「上善若水，水善萬物而不爭」之目標，實為當前水利防災之重要議題。

1-2 研究目的

首先，有鑒於當前台灣對於颱風、豪大雨…等極端降雨事件的洪水預報需求，本研究欲發展一套適用於台灣各大集水區之極端降雨逕流模式；其次，由於模擬所需之輸入資料為眾多集水區參數資料，所以同時也期望能完整蒐集研究區域之相關地文參數、降雨及流量資料，並彙整成為資料庫以利後續研究；最後，結合輸入資料與模式，即可模擬集水區在極端降雨事件中之水文過程，以期達到洪水逕流預報、集水區參數分析或集水區

開發之影響…等研究目的。

1-3 模式簡介

本研究發展一分散式集水區逕流模式，其基礎架構係建立在眾多方形網格所組成的集水區，所以我們使用顯示差分法將各種水文過程之控制(governing)方程式離散化為差分式，並配合集水區空間參數和降雨事件時間序列，即可模擬集水區在降雨事件後，地表水體的時空分布過程；以下即簡介模式中各種控制方程式。

首先，漫地流(overland flow)使用二維連續方程式、非慣性波方程式和阻抗定律式來描述地表逕流；其次，渠道流(channel flow)使用一維連續方程式、非慣性波方程式和曼寧公式來描述河道逕流；再者，入滲(infiltration)過程使用Green-Ampt入滲公式描述地表水滲入土壤之過程。最後，降雨(rainfall)分布計算係採用距離平方反比權重公式；而截留(interception)過程則係給定一最大水深攔截值，當此水深值被降水填滿後則不再截留。

1-4 地理資訊系統

近年來，由於衛星航太科技之演進及網路系統普及，各種地理資訊被廣泛分享及運用在不同領域上，也因此使得許多軟體公司投入研發地理資訊系統的相關套裝軟體。其中，最具代表性的莫過於美國 ESRI 公司所推出的 ArcGIS 套裝軟體，截至 2007 年 7 月最新版本為 9.2，其內裝軟體主要有 ArcMap、ArcCatalog、ArcGlobe、ArcScene、ArcReader，分別可編輯、管理及讀取各種地理資訊。

其中，ArcMap 為最常使用之軟體，其功能除了可讀取、展示地理資訊外，尚可進行圖、文和表編輯、格式轉換以及各種統計和計算，且使用者可根據需要自行開發外掛模組進行安裝，提昇工作效率。在資料格式部份，

一般可分為向量(vector)形式和陣列(raster)形式。其中，向量形式主要又分為點、線、面資料，並且有與之對應的屬性表可進行編輯修改；反之，陣列形式資料無法由軟體介面直接修改，但可利用 ArcMap 內建之向量陣列轉換功能來達到編輯目的。而本研究由於模式需要，輸入資料部份皆採用陣列格式。

1-5 論文架構

本文除了第一章序論外，第二章為集水區逕流模式和洪水波近似方程式之相關文獻、書籍的回顧。第三章為控制方程式，首先簡述了集水區水文循環過程，再詳述模式中各種水文過程之控制方程式及其意義，並說明初始條件和邊界條件。第四章為數值離散，內容主要係將第三章的控制方程式離散成為差分式，同時配合流程圖說明模式演算過程。第五章為研究區域與輸入資料，係針對集水區特性、參數和降雨事件...等輸入資料進行介紹。第六章為模式驗證與模擬結果的分析比較，先驗證模式的收斂性，其次比較不同水文過程、渠道粗糙係數對模擬結果的影響。最後，第七章為研究成果之結論與建議。

第二章 文獻回顧

由於計算機能力的大幅演進，集水區逕流模式已由早期集塊式模式(lumped model)，發展至以分散式模式(distributed model)為主的階段；主因係集塊式模式過度簡化集水區時空的變異性，結果較為均質化(homogeneous)；反之，分散式模式能考慮空間和時間上的變異性，故能針對任意空間位置和時間點之模擬結果進行分析，這將有助深入了解各種水文過程之時空變化及交互作用。

因此，本章回顧了集水區逕流模式之發展歷程，以及前人所發展之集水區逕流模式；此外，並蒐集整理各種洪水波(flood wave)相關研究之理論，以了解不同洪水波控制方程式之差異與適用條件，並期望未來在模式中加入控制方程式模組化之功能選項，以擴展集水區降雨逕流模式之適用範圍。

2-1 水文模式發展歷程

在眾多集水區逕流模式中，早期由於計算機硬體能力不足，降雨逕流模式多使用集塊式模式，如：Stanford Watershed Model (Crawford and Linsley, 1966)。且集塊式模式傳統上都將集水區視為黑箱(black box)集合，僅考慮輸入資料以及輸出的關係，而忽略了空間上各個水文參數之變異性。

其次，隨著計算機能力的大幅提升，降雨逕流模式也逐漸由集塊式模式演變為分散式模式，如：TOPMODEL(Beven and Kirkby, 1979)、FLO-2D (Julien et al., 1988)、CELMOD5(Karnieli et al., 1994)及本研究主要範例 CASC2D (Julien et al., 1995)…等。而分散式模式係將集水區網格化，將個別網格(grid)視為獨立單元(cell)進行計算，模擬過程中考慮集水區參數在空間上之變異性。

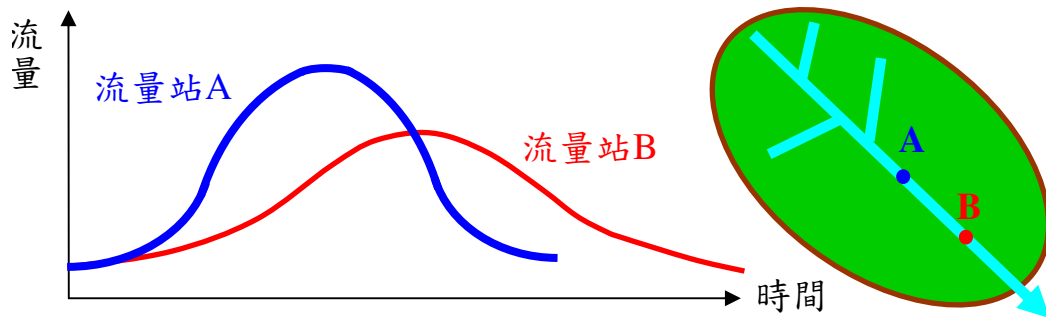


圖 2.1：集水區渠道洪水波流量歷線示意圖

因此，由前述可知，集塊式模式與分散式模式最大差異在於輸入資料的格式；同時由於集塊式模式模擬用之資料在處理過程上較為複雜，且參數檢定不易，目前已較少使用；反之，分散式模式由於提供了跨越空間尺度之參數變異能力，且多能適用地理資訊系統(geographic information system, GIS)所輸出之資料格式，已成為目前集水區逕流模式之主流。同時，在國內的集水區降雨逕流模式發展與研究部分，黃誌川(2002)、葉宗泰(2003)、鄭力嘉(2005)和陳心穎(2005)皆利用地理資訊系統軟體建構出集水區地形以及地文參數，並配合自行開發的水文模式或套裝軟體如：FLO-2D、HEC-RAS…等等，在暴雨事件之渠道洪水模擬中，對於洪峰值與集流時間皆有不錯的結果。因此相對於國外，國內在降雨逕流模式的相關發展與研究上亦逐漸成熟。

2-2 洪水演算與擴散波近似

經驗上，當暴雨降落至集水區後所產生之地表逕流，絕大多數都會匯入河流渠道中；也因此暴雨期間，渠道中便容易產生異於常態流況之洪水傳遞，且由渠道流量測站所繪出之流量歷線圖(圖 2.1)，亦可明顯看出類似波動之特性(波峰、波谷、形狀、衰減)，故在暴雨期間產生之洪水亦稱為洪水波。

實際上，模擬洪水波傳遞過程之方式主要分為水文演算和水力演算這兩種。水文演算部份，其原理只考慮了質量守恆，計算速度較快，如：Puls氏法、係數法及馬士金更法(Muskingum method)··等；而水力演算部分，除了質量守恆外尚加入了動量守恆，其優點在於能更精確描述水文過程的動力機制，缺點則是計算上較為費時，但由於計算機能力不斷提升，水力演算漸漸成為主流，而本研究亦採用水力演算的方式。

在洪水波的水力演算中，以法國科學家聖凡南(Saint-Venant)於 1871 年所提出的聖凡南方程組(Saint-Venant equations)最常被採用(Chow, 1959、Chow, 1988)，其形式由經過淺水假設(shallow water assumptions)後的連續(continuity)方程式和那維爾-史托克(Navier- Stokes)方程式組成如下：

$$u \frac{\partial h}{\partial x} + y \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial h}{\partial t} = 0, \quad (2.1)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} = g \left(-\frac{\partial h}{\partial x} + S_0 - S_f \right), \quad (2.2)$$

其中， u 為流速、 h 為水深、 g 為重力加速度、 S_0 為渠底坡降、 S_f 能量損失坡降。動量方程式等號左邊為局部慣性力(local inertia)項以及對流慣性力(convective inertia)項，等號右邊則依序為壓力梯度(pressure gradient)項、重力(gravity)項以及摩擦力(friction)項。

而針對聖凡南方程組，Ponce(1977)依照作用力項(force term)簡化程度，將動量方程式分類為運動波(kinematic wave)、擴散波(diffusion wave)、準恆定動力波(quasi-steady dynamic wave)和動力波(dynamic wave)方程式。其中，擴散波方程式由於型式簡單，並且對於亞臨界流況下的回水效應(backwater effect)有不錯的模擬結果(Ponce, 1978)，因此被廣泛應用於洪水波計算，且經由 Dooge(1987)推導證明，擴散波方程式能與連續方程式結合成為擴散之數學形式，說明了洪水波具有類似擴散現象之特性。

同時，Ponce(1990)和Yen(2001)也進一步推導證明，經由假設和簡化，

例如：令水深、流速、流量和剪應力在空間和時間上都為逐步穩定(step-wise constant)，推導過程忽略高階微分項(high order term)…等，可使上述各種型式之動量方程式皆能和連續方程式結合，推導成為擴散形式之數學式如下：

$$\frac{\partial C}{\partial t} + U \frac{\partial C}{\partial x} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2}, \quad (2.3)$$

其中， C 為水深或流量、 U 為速度函數、 D 為擴散係數，且擴散係數形式通常為渠道流中各種物理量集合之函數，並可以此說明同一渠道中洪峰的延程衰減(attenuation)現象。再者，式中各項由左至右的依序為，局部擴散項、對流擴散項和擴散來源(source)項。

同時，擴散係數 D 為判斷渠道適用於何種動量方程式之主要依據，如Ponce(1990)所推導之渠道洪水波擴散方程式如下：

$$k_f \left(\frac{\partial y'}{\partial t} + \frac{3u_0}{2} \frac{\partial y'}{\partial x} \right) = \left[k_p + \left(\frac{1}{2}k_c + \frac{3}{2}k_t - \frac{9}{4} \right) F_0^2 \right] v \frac{\partial^2 y'}{\partial x^2}, \quad (2.4)$$

其中， $F_0 = u_0 / \sqrt{gy_0}$ 為均勻流福祿數(Froude number)、 $v = u_0 y_0 / 2S_0$ 為非慣性水力擴散係數(non-inertial hydraulic diffusivity)、 y' 為水深擾動量、 u_0 為均勻流(uniform flow)流速、 y_0 為均勻流水深、 S_0 為渠道底床坡降。

此外，式(2.4)中 k_f 為摩擦力項存在係數、 k_p 為壓力項存在係數、 k_c 為對流慣性力項存在係數、 k_t 為局部慣性力項存在係數，以上不同下標之 k 值為0或1，代表考慮或忽略之外力項，以利於判斷由不同動量方程式推導所得之擴散係數形式；且由於洪水波在單一渠道中傳遞時會延程衰減，所以擴散係數必大於等於零。

其中，為能掌握回水效應而常被採用的擴散波方程式，考慮之作用力項僅有壓力、重力和摩擦力($k_p = k_f = 1$ 、 $k_c = k_t = 0$)，故所得之擴散係數如下：

$$\left[1 - \frac{9}{4} F_0^2 \right] \frac{u_0 y_0}{2S_0}, \quad (2.5)$$

表 2.1：擴散波近似分類表

擴散波近似名稱	局部慣性力	對流慣性力	壓力梯度	重力	摩擦力
動力波	O	O	O	O	O
準恆定動力波	X	O	O	O	O
非慣性波	X	X	O	O	O
運動波	X	X	X	O	O

O：考慮 X：忽略

且由於擴散係數必大於等於零，所以福祿數必定小於等於三分之二，即代表擴散波方程式較適用於亞臨界流況的渠道中，但本研究選擇使用擴散波方程式之理由純粹係因模式開發初期之測試與複雜度的簡化，未來亦可加入其他動量方程式作為不同模擬情況時的選擇。

同時，Yen(2001)除了整理出前人如：Dooge(1987)、Ponce(1990)、Sivapalan(1997)…等人所推導出的線性洪水波擴散方程式外，亦推導出適用於各種渠道斷面的線性和非線性洪水波擴散方程式，並且指出既然所有動量方程式皆能和連續方程式結合成為擴散形式之數學式，則可統稱前述不同簡化的動量方程式為擴散波近似(diffusion wave approximations)，並且強烈建議將擴散波方程式更名為非慣性波(non-inertia wave)方程式，避免誤解擴散波近似單指擴散波方程式。為求容易理解，我們將各種擴散波近似整理成表2.1。

第三章 控制方程式

在天然集水區中，其水文循環如圖3.1所示，若將集水區視為一封閉系統(不包括海洋)，則集水區內水體之輸入量主要為降雪(snowfall)和降雨(rainfall)，輸出量則包括漫地流(overland flow)流出、蒸發散(evapotranspiration)、地下水逕流(groundwater runoff)流出和渠道流(channel flow)流出；而集水區內之蓄水量則有積雪(snow)量、湖泊或滯蓄之地表水、植被截留(interception)量、土壤入滲(infiltration)量和地下水(groundwater)量。

本研究所發展之分散式集水區逕流模式，主要係針對集水區短時間之暴雨進行模擬，故忽略與雪相關之水文過程，另外蒸發散與地下水過程較為複雜，故目前本模式忽略其效應。最後，本模式考慮之水文過程有地表漫地流、河川渠道流、降雨分布、地上物截留和地表入滲共五種，每種過程皆有相對應的控制方程式予以描述，我們將依照水體輸入至輸出之過程於以下章節依序說明。

3-1 降雨

模式中降雨強度的計算係採用距離平方反比權重(inverse distance weight, IDW)公式(Julien et al., 1991、Julien et al., 1995)，此公式係利用集水區任意位置與各雨量站間的距離關係，計算出各個雨量站對此位置的影響權重，再依權重估算此位置之降雨強度，其公式如下：

$$r(x, y, t) = \frac{\sum_{m=1}^{NRG} \frac{r(xrg, yrg, t)}{d_m^2}}{\sum_{m=1}^{NRG} \frac{1}{d_m^2}}, \quad (3.1)$$

其中， $r(x, y, t)$ 集水區內任意位置之降雨強度、 $r(xrg, yrg, t)$ 為雨量站所測得的降雨強度、 d_m 為欲求降雨強度位置與雨量站間的距離、 NRG 為雨量站數目。

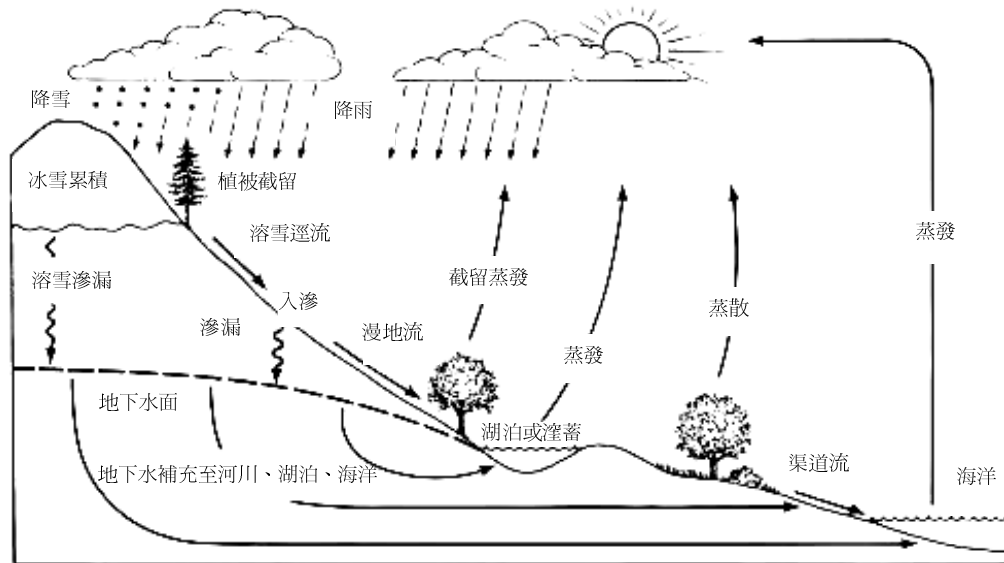


圖3.1：集水區水文循環示意圖(來源：中華民國溪流環境協會)

其次，根據鍾旻修(2003)指出，距離平方反比權重法雖考慮了降雨在空間上之分布變化，但基本上較適用於空間分布均勻的降雨事件，若降雨存在較極端之數值，則需提高雨量測站數目以提昇降雨空間分布之精確度。

3-2 截留

如圖3.2所示，於實際集水區中，地上物(如：建築物、林木...等)的存在會使降雨初期的雨量被攔截而不會直接落至地表，須等待地上物之剩餘截留水深值被降雨量填滿後，降雨才會形成穿落量(through fall)，落至地表進行入滲和逕流之水文過程(Eagleson, 1970)，而最大截留量係根據土地利用之類型決定，並且可將穿落量強度表示如下：

$$r_i(x, y, t) = r(x, y, t) + \frac{\partial r_{et}(x, y, t)}{\partial t} \quad (3.2)$$

其中， $r_i(x, y, t)$ 為穿落量強度、 $r(x, y, t)$ 為降雨強度、 $r_{et}(x, y, t)$ 為剩餘截留深度。至於等號右邊第二項則代表截留強度，且由於剩餘截留水深會不斷減少，所以其值必小於等於零。

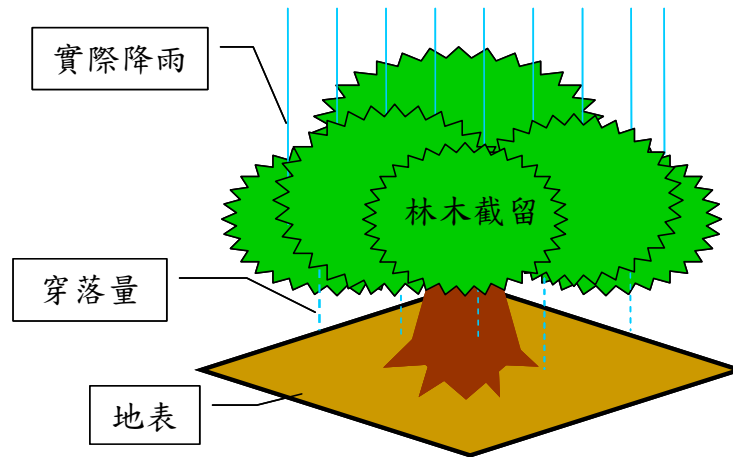


圖3.2：截留過程示意圖

3-3 入滲

一般而言，降雨初期地表並不會立即形成地表逕流，其原因除截留過程外，係因土壤初期多處於未飽和(unsaturated)狀態，故水量皆因入滲作用滲入地表下，須及至降雨強度大於入滲率後始產生地表逕流(Bras, 1990)。而本模式估算入滲率之方法，係根據Green-Ampt所推導之入滲公式：

$$f(x, y, t) = K_s \left(1 + \frac{H_f \cdot M_d}{F(x, y, t)} \right), \quad (3.3)$$

其中， $f(x, y, t)$ 為入滲率、 $F(x, y, t)$ 為入滲深度、 M_d 為土壤有效孔隙率、 K_s 為飽和水力傳導係數、 H_f 為濕潤邊緣(wetting front)的毛細壓力，而入滲模型如圖3.3所示，且式(3.3)之適用之條件為：均質(homogeneous)土壤、土壤深厚(deep)以及乾土體(well-drained)。

3-4 漫地流

在實際研究區域中，其面積廣達數百平方公里，相較於地表垂直方向上的水深變化至多數十公尺，二者尺度(scale)差距大，故可將水深方向上的水壓視為靜水(hydrostatic)壓，對漫地流之控制方程式進行水深方向的垂直

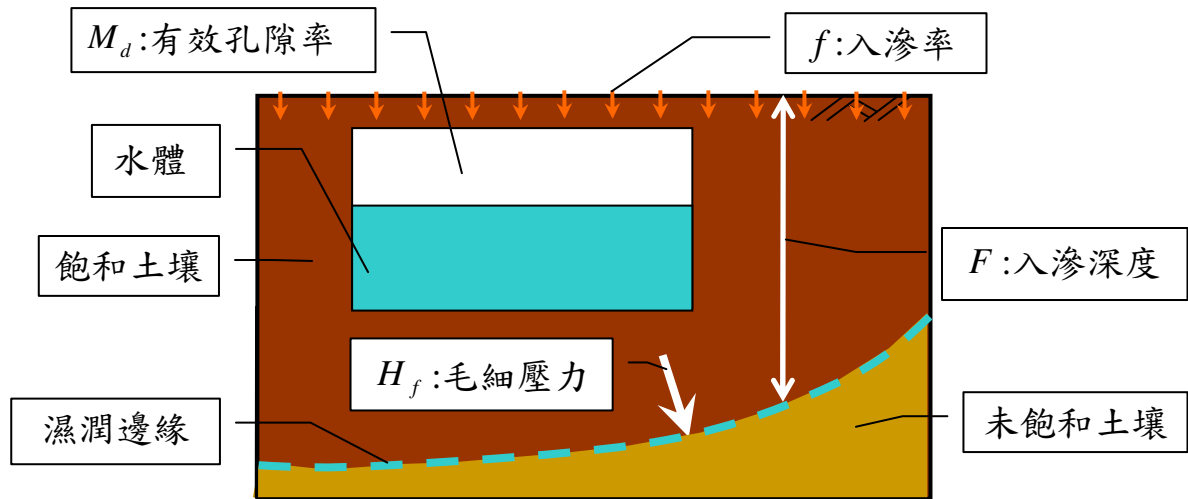


圖3.3：Green-Ampt入滲模型

積分，即所謂淺水假設(shallow water assumption)簡化，最後可得到二維的漫地流連續方程式和動量方程式(Julien et al., 1991、Julien et al., 1995)。

3-4-1 漫地流連續方程式

由質量守恆定律及雷諾傳輸定理(Reynolds transport theorem)可知，在任意控制體積中流體質量隨時間的變化量，會等於通過控制體積表面之負的淨流出量，因此可得到平衡關係式如下：

$$\left. \frac{Dm}{Dt} \right|_{\text{sys}} = \frac{\partial}{\partial t} \iiint_{C.V.} \rho dV + \iint_{C.S.} \rho \bar{V} \cdot \hat{n} dA = 0, \quad (3.4)$$

其中， m 為流體質量、 ρ 為流體密度、 \bar{V} 為流速、 \hat{n} 為控制體積表面法向量。

再者，可將地表視為控制體積如圖3.2所示，圖中深藍色箭頭為降雨、綠色凹槽內水面至槽頂距離則代表剩餘截留深度、淺藍色箭頭代表穿落量強度、深藍色方塊為被截留之水體、淺藍色箭頭為穿落量、淺藍色方塊體為地表水深、深褐色部份則代表已飽和之土體厚度、淺褐色則代表未飽和之乾燥土壤、橘色箭頭代表入滲率。所以，由圖3.2可知，地表水深隨時間的變化量，加上 x 、 y 方向上的流量變化量，會等於已扣掉截留強度的超滲降雨強度，故可得到漫地流連續方程式如下：

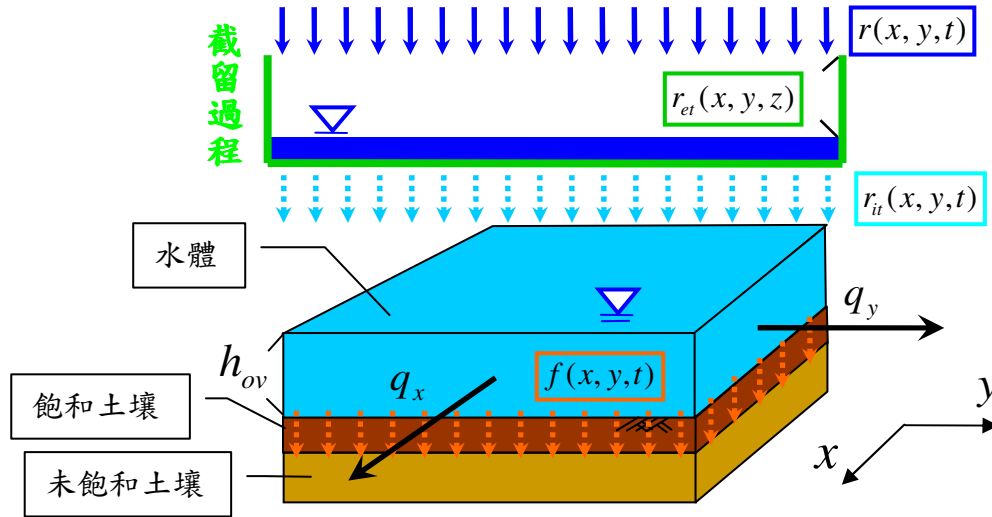


圖3.4：漫地流示意圖

$$\frac{\partial h_{ov}}{\partial t} + \frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} = e(x, y, t) \quad (3.5)$$

且式3.5中

$$e(x, y, t) = r_{ii}(x, y, t) - f(x, y, t) \quad ,$$

其中， h_{ov} 為漫地流水深、 q_x 為 x 方向單位寬度流量、 q_y 為 y 方向單位寬度流量、 $r_{ii}(x, y, t)$ 為穿落量強度、 $f(x, y, t)$ 為入滲率、 $e(x, y, t)$ 為已扣掉截留強度的超滲降雨(excess rainfall)強度

3-4-2 漫地流動量方程式

由動量形式的雷諾傳輸定理可知，控制體積中動量變化加上控制體積表面之淨動量通量，等於外力之和，因此可得到平衡關係式如下：

$$\Sigma \bar{F} = \frac{\partial}{\partial t} \iiint_{C.V.} \bar{V} \rho dV + \iint_{C.S.} \bar{V} \rho \bar{V} \cdot \hat{n} dA \quad (3.6)$$

其中， \bar{F} 為外力向量、 ρ 為流體密度、 \bar{V} 為流速、 \hat{n} 為控制體積表面之法向量。故在忽略掉風力和降雨衝擊力的影響下，可根據雷諾傳輸定理寫出漫地流 x 、 y 方向之動量方程式如下：

$$x \text{ 方向} : \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = gS_{ox} - gS_{fx} - g \frac{\partial h_{ov}}{\partial x} , \quad (3.7a)$$

$$y \text{ 方向} : \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = gS_{oy} - gS_{fy} - g \frac{\partial h_{ov}}{\partial y} , \quad (3.7b)$$

其中， u 為 x 方向流速、 v 為 y 方向流速、 g 為重力加速度、 S_{ox} 為 x 方向地表坡降、 S_{fx} 為 x 方向能量損失坡降、 S_{oy} 為 y 方向地表坡降、 S_{fy} 為 y 方向能量損失坡降、 h_{ov} 為地表水深。式中等號左側為慣性力項，等號右側三項由左至右依序為重力項、摩擦力項和壓力梯度項。

另外，對於一般自然環境中的地表自由液面流(open surface flow)而言，重力為水流主要驅動力，故予以保留；反之，慣性力相對於重力而言重要性不大，且會造成計算上的複雜度，故予以忽略。再者，為考慮回水效應(backwater effect)將壓力梯度項予以保留(Rojas et al., 2003)；最後可得到簡化後的動量方程式 — x 、 y 方向之非慣性波方程式如下：

$$x \text{ 方向} : S_{fx} = S_{ox} - \frac{\partial h_{ov}}{\partial x} , \quad (3.8a)$$

$$y \text{ 方向} : S_{fy} = S_{oy} - \frac{\partial h_{ov}}{\partial y} 。 \quad (3.8b)$$

3-4-3 漫地流阻抗定律式

此時，由於動量方程式為非慣性波方程式之緣故，造成有五個待解變數(h_{ov} 、 q_x 、 q_y 、 S_{fx} 、 S_{fy})卻僅有三個方程式(連續方程式、 x 和 y 方向之動量方程式)的情況，為解決此問題故加入 x 、 y 方向的阻抗定律式(resistance law)，以滿足五個方程式解五個變數之條件。阻抗定律式(Woolhiser, 1975)類似於曼寧經驗公式，作用為計算地表逕流流量，公式如下：

$$x \text{ 方向} : q_x = \frac{S_{fx}^{1/2}}{n} h_{ov}^{5/3} , \quad (3.9a)$$

$$y \text{ 方向} : q_y = \frac{S_{fy}^{1/2}}{n} h_{ov}^{5/3} , \quad (3.9b)$$

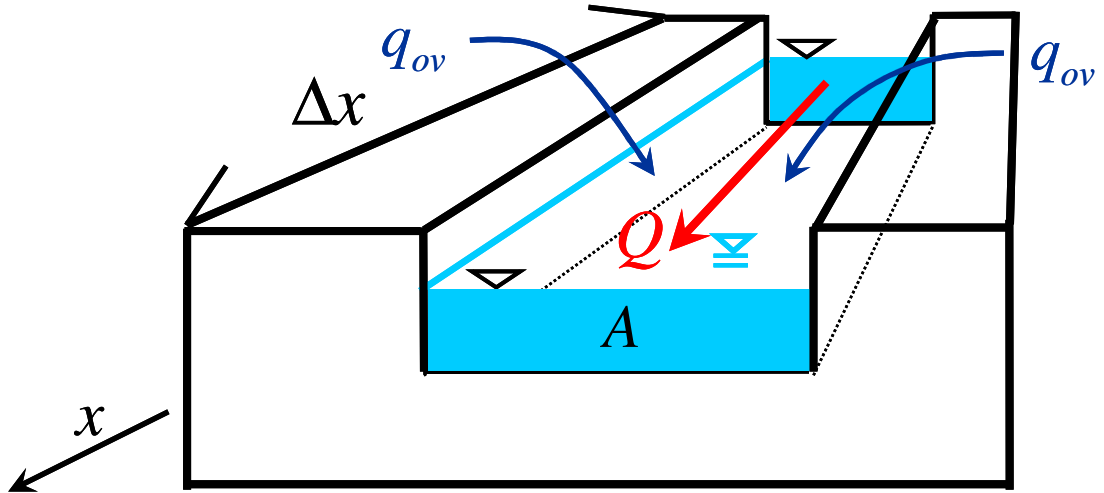


圖3.5：渠道流示意圖

其中， q_x 為 x 方向之單位寬度流量、 S_{fx} 為 x 方向之水力坡降、 q_y 為 y 方向之單位寬度流量、 S_{fy} 為 y 方向之水力坡降、 n 為曼寧粗糙係數、 h_{ov} 為漫地流水深。

3-5 渠道流

同理於漫地流，在實際集水區中渠道縱向尺度遠大於其橫向和深度方向尺度，所以依然能沿用淺水假設並忽略渠道寬方向之流況變化，因此可將渠道流控制方程式簡化為僅考慮縱向的一維控制方程式，且假設渠道通水斷面皆為矩形(Julien et al., 1991、Julien et al., 1995)，如圖3.5所示，圖中 Δx 為渠道長度、 A 為渠道通水斷面面積、 Q 為渠道流量、 q_{ov} 為漫地流所提供的渠道側邊入流量。

3-5-1 渠道流連續方程式

由質量守恆的雷諾傳輸定理可知，渠道水位變化量加上上下游淨流出量，等於漫地流注入渠道的側邊入流量，所以可將渠道流之連續方程式表示如下：

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q_{ov}, \quad (3.10)$$

其中， A 為渠道通水斷面積、 Q 為渠道流量、 q_{ov} 為漫地流注入渠道之流量。

3-5-2 渠道流動量方程式

與漫地流相同，渠道流之動量方程式亦使用非慣性波方程式，以掌握渠道中的回水效應(Rojas et al., 2003)，其方程式如下：

$$S_{fc} = S_{oc} - \frac{\partial h_{ch}}{\partial x}, \quad (3.11)$$

其中， S_{fc} 為摩擦損失坡降、 S_{oc} 為渠道底床坡降、 h_{ch} 為渠道水深。

3-5-3 渠道流曼寧公式

曼寧公式為明渠流中計算流速之經驗公式，由愛爾蘭工程師Robert Manning於1889年所提出，其原理係藉由通水斷面之粗糙度來估算流速，並配合通水斷面積得到流量之經驗公式如下：

$$Q = AV = \frac{1}{n_{ch}} AR^{2/3} S_{fc}^{1/2}, \quad (3.12)$$

其中， Q 為渠道流量、 A 為渠道通水斷面積、 V 為渠道平均流速、 n_{ch} 為渠道曼寧粗糙係數、 S_{fc} 為渠道能量損失坡降、 R 為水力半徑(hydraulic radius)，等於渠道通水斷面面積除以通水斷面之濕潤周長(wetted perimeter)。

3-6 初始條件與邊界條件

首先，模式之初始條件部分，主要係地表與渠道中之水深、以及降雨的驅動(forcing)作用，其中由於集水區內地表以及渠道之水深資料付之闕如，故初始水深值皆設定為零。同時，入滲部分假設土體為全乾之狀態，所以入滲之初始深度為零；此外，截留則係依照土地利用類型，在演算初

始時給定最大截留深度。

其次，邊界條件部分，由於集水區之邊界係按照山區稜線描繪而成，故邊界上之條件為水流流量不通過邊界；此外，沒有上游河段連接之渠道河段(link)，其第一個渠道節點(node)沒有上游之流量輸入；再者，由於水流最後會匯集至渠道中並流出集水區，所以必須設定正確的渠道出口(outlet)單元的座標，並設定其摩擦損失坡降等於底床坡降，以計算出流網格之水體流出量。

第四章 數值離散

本模式基礎架構係建立在一網格化之集水區地形如圖4.1，圖中綠色網格為漫地流網格，藍色網格為河川通過之渠道單元(channel cell)，藍色箭頭為漫地流流量，以阻抗定律式計算而得，紅色箭頭為匯入渠道中之漫地流，計算方式為瞬間流入。再者，數值方法為顯式有限差分法(explicit finite difference scheme)，使用於漫地流、渠道流和入滲之控制方程式；同時，亦配合降雨公式與各網格之截留深度，即可模擬集水區內水文過程。

同時，由於實際研究區域面積廣達數百平方公里，相較於垂直方向上的水深變化至多數十公尺，二者尺度差距大，故可將水深方向上之水壓視為靜水壓，對控制方程式進行水深方向垂直積分，即所謂淺水假設簡化，故集水區三維立體網格也轉變為二維數值網格如圖4.2所示；圖中， i 為網格 x 座標、 j 為網格 y 座標、 Δx 為 x 方向網格長度、 Δy 為 y 方向網格長度。

4-1 降雨分布

計算降雨強度之距離平方反比權重公式(式3.1)如下：

$$r(x, y, t) = \frac{\sum_{m=1}^{NRG} \frac{r(xrg, yrg, t)}{d_m^2}}{\sum_{m=1}^{NRG} \frac{1}{d_m^2}},$$

經過數值離散後可表為下式：

$$r_{i,j}^t = \frac{\sum_{m=1}^{NRG} \frac{r_{m(irg, jr)}^t}{d_m^2}}{\sum_{m=1}^{NRG} \frac{1}{d_m^2}}, \quad (4.1)$$

其中， $r_{i,j}^t$ 為網格內之降雨強度、 $r_{m(irg, jr)}^t$ 為雨量站所觀測之降雨強度、 d_m 為

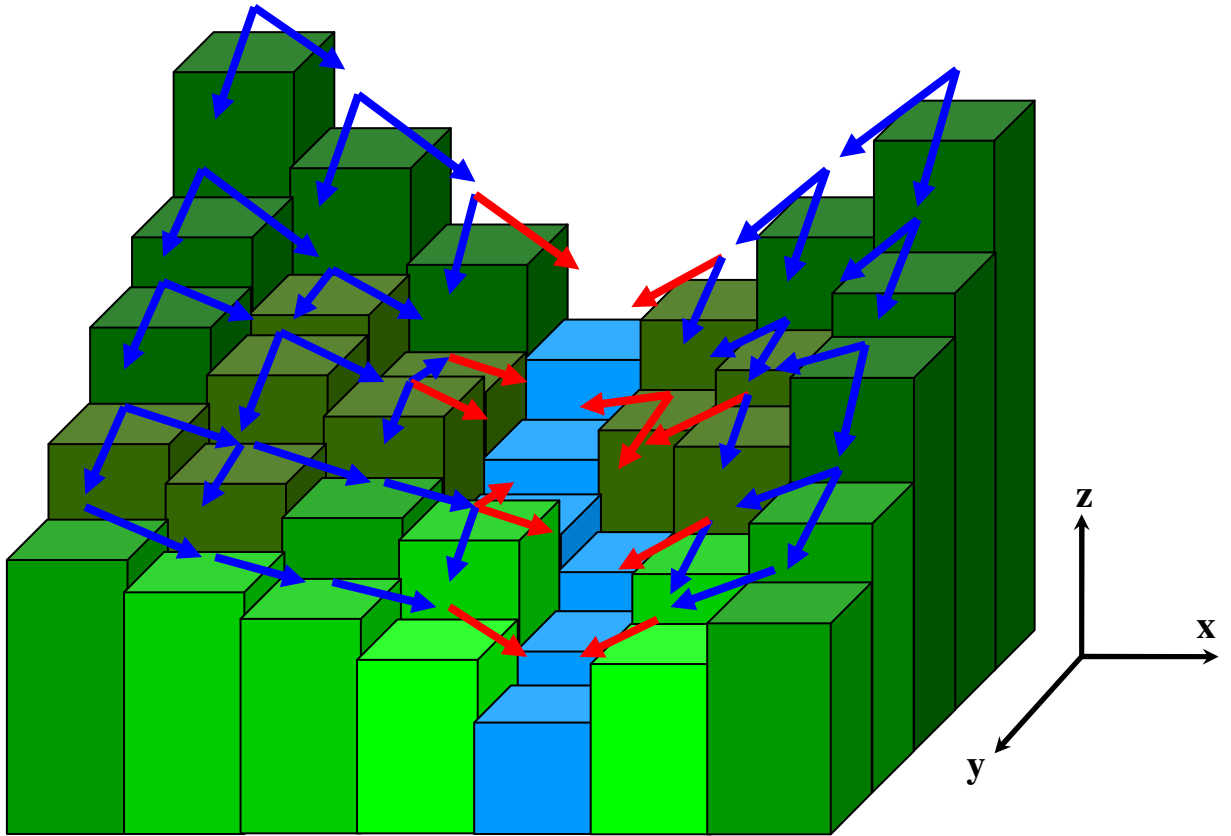


圖4.1：分散式集水區逕流模式基本架構示意圖

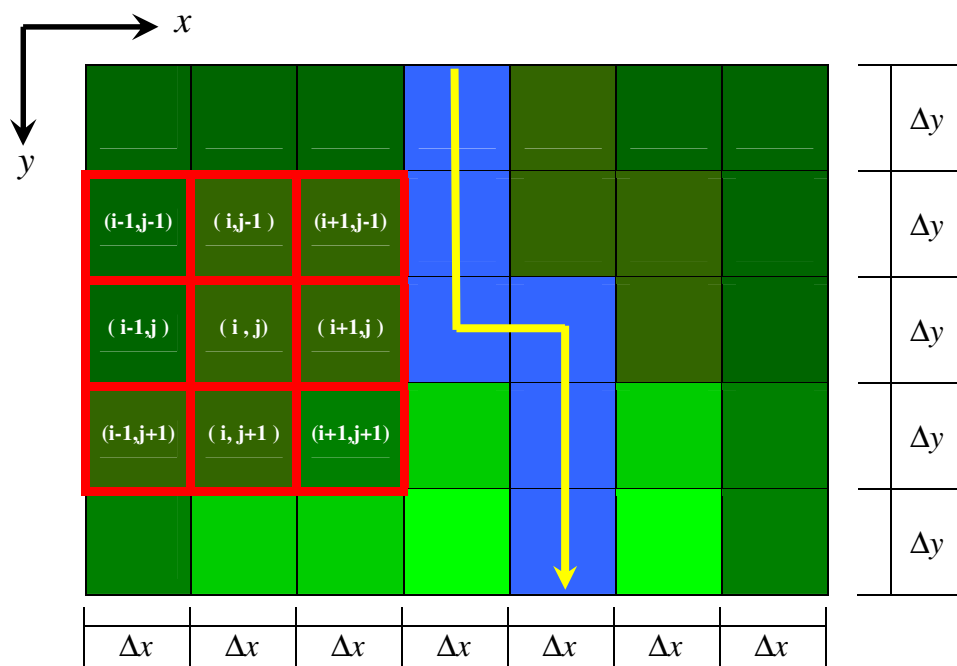


圖4.2：分散式集水區逕流模式數值網格示意圖

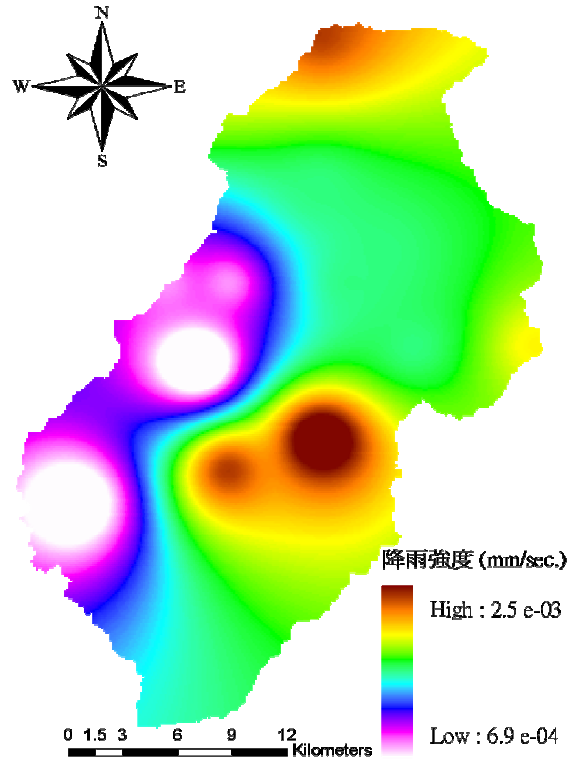


圖4.3：距離平方反比權重公式計算之降雨強度分布示意圖

網格與雨量站間之距離、 NRG 為雨量站之總個數。圖4.3即為距離平方反比權重公式所計算出之降雨強度分布圖，圖中呈現圓點狀漸層分布即為距離權重之影響。

4-2 截留差分式

截留過程中，穿落量強度表示式(式3.2)如下：

$$r_{it}(x, y, t) = r(x, y, t) + \frac{\partial r_{et}(x, y, t)}{\partial t},$$

所以將式(3.2)離散，得穿落量強度之差分式如下：

$$(r_{it})_{i,j}^t = r_{i,j}^t + \frac{(r_{et})_{i,j}^{t+1} - (r_{et})_{i,j}^t}{\Delta t}, \quad (4.2)$$

當穿落量等於零時，剩餘截留水深表示如下：

$$(r_{et})_{i,j}^{t+1} = (r_{et})_{i,j}^t - r_{i,j}^t \times \Delta t, \quad (4.3)$$

其中， $(r_{it})'_{i,j}$ 為穿落量之強度、 $r'_{i,j}$ 為降雨強度、 $(r_{et})^{t+\Delta t}$ 為下一時刻之剩餘截留水深、 $(r_{et})^t_{i,j}$ 為現在時刻之剩餘截留水深、 Δt 為計算時距。此外，若

$$(r_{et})^t_{i,j} < r'_{i,j} \times \Delta t ,$$

將不會再有截留過程的作用。

4-3 入滲差分式

入滲過程之控制方程式Green-Ampt方程式(式3.3)如下：

$$f(x, y, t) = K_s \left(1 + \frac{H_f \cdot M_d}{F(x, y, t)} \right) ,$$

由於入滲公式中存在非線性效應，即入滲率與入滲深度皆會隨時間而改變並互相牽制，勢必無法藉由相同時刻之入滲深度來推求下一時刻之入滲率，因此我們先以 $1/2$ 計算時距求得中間時刻的入滲深度，再以中間時刻之入滲深度近似下個時刻之入滲深度，藉由此技巧則可由圖4.4推導出入滲差分式，所以首先將式(3.3)離散得：

$$f_{i,j}^{t+\Delta t} = (K_s)_{i,j} \left[1 + \frac{(H_f)_{i,j} \cdot (M_d)_{i,j}}{F_{i,j}^{t+\Delta t}} \right] ,$$

並令 $F_{i,j}^{t+\Delta t} \cong F_{i,j}^{t+\Delta t/2} = F_{i,j}^t + \frac{\Delta t}{2} f_{i,j}^{t+\Delta t}$ 代入上式可得：

$$f_{i,j}^{t+\Delta t} = (K_s)_{i,j} \left[1 + \frac{(H_f)_{i,j} \cdot (M_d)_{i,j}}{F_{i,j}^t + \frac{\Delta t}{2} f_{i,j}^{t+\Delta t}} \right] ,$$

移項整理後得：

$$f_{i,j}^{t+\Delta t} = \frac{-(2F_{i,j}^t - (K_s)_{i,j} \Delta t) + \left[(2F_{i,j}^t - (K_s)_{i,j} \Delta t)^2 + 8K_s (H_f)_{i,j} (M_d)_{i,j} \Delta t + F_{i,j}^t \right]^{1/2}}{2\Delta t} , \quad (4.4)$$

再令：

$$P_1 = [(K_s)_{i,j} \Delta t - 2F_{i,j}^t] , \quad P_2 = [(K_s)_{i,j} F_{i,j}^t + (K_s)_{i,j} (H_f)_{i,j} (M_d)_{i,j}] ,$$

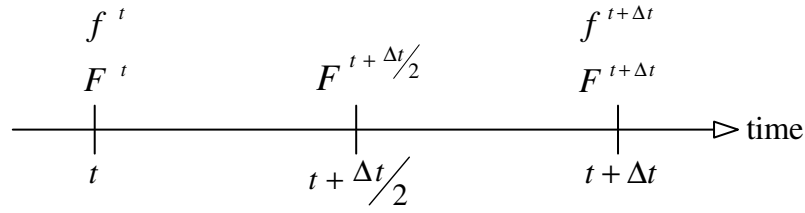


圖4.4：入滲差分式示意圖

並且代入式(4.4)後，可得入滲差分式如下：

$$f_{i,j}^{t+\Delta t} = \frac{1}{2\Delta t} \left[P_1 + (P_1^2 + 8P_2\Delta t)^{1/2} \right], \quad (4.5)$$

其中， $f_{i,j}^{t+\Delta t}$ 為下一時刻之入滲率、 $(K_s)_{i,j}$ 為網格內之飽和水力傳導率、 $(H_f)_{i,j}$ 為網格內土壤濕潤邊緣之毛細壓力、 $(M_d)_{i,j}$ 為網格內之土壤有效孔隙率、 $F_{i,j}^{t+\Delta t}$ 為下一時刻之入滲深度。

4-4 交錯網格

模式中採用交錯網格(staggered grid)來表示 x 、 y 方向相鄰網格間的流量傳遞，故需注意變數之座標表示法，如圖4.5所示。例如： x 水平方向左邊界中心上之流量 $(q_x)_{i,j}$ ，其實際座標為 $(i-1/2, j)$ ，但在計算機網格陣列中並無法如此表示，故需將座標 $(i-1/2+1/2, j)$ 修正為 (i, j) ；同理， y 垂直方向下邊界中心上之流量 $(q_y)_{i,j+1}$ ，其實際座標為 $(i, j+1/2)$ ，同樣無法在計算機中如此表示，故需將座標 $(i, j-1/2+1/2)$ 修正為 $(i, j+1)$ 。所以，由此可知只需將位於交錯網格上之變數座標加上 $1/2$ 即可解決此問題，故上方與右側兩個邊界中心上之變數座標亦依此方式修正表示之。

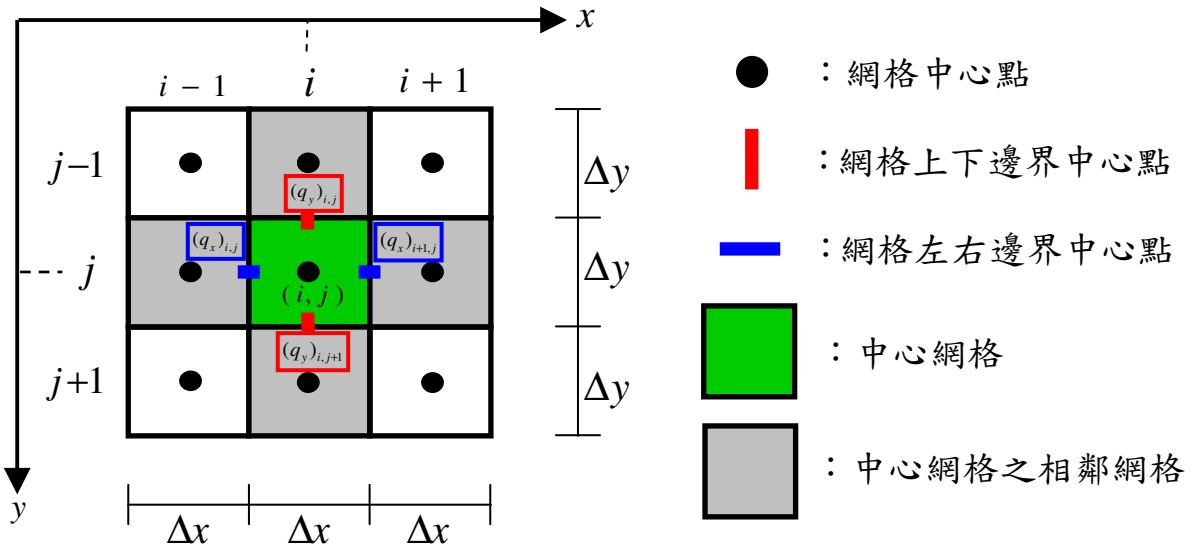


圖4.5：漫地流交錯網格示意圖

4-5 二維漫地流

4-5-1 漫地流連續方程差分式

漫地流之連續方程式(式3.5)如下：

$$\frac{\partial h_{ov}}{\partial t} + \frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} = e(x, y, t) ,$$

接著，我們將式(3.5)推導為差分式。首先，將方程式離散如下：

$$\frac{(h_{ov})_{i,j}^{t+\Delta t} - (h_{ov})_{i,j}^t}{\Delta t} + \frac{(q_x)_{i+1,j} - (q_x)_{i,j}}{\Delta x} + \frac{(q_y)_{i,j+1} - (q_y)_{i,j}}{\Delta y} = e_{i,j}^t ,$$

再將上式移項整理，則可得漫地流連續方程差分式如下：

$$(h_{ov})_{i,j}^{t+\Delta t} = (h_{ov})_{i,j}^t + e_{i,j}^t \times \Delta t - \left[\frac{(q_x)_{i+1,j} - (q_x)_{i,j}}{\Delta x} + \frac{(q_y)_{i,j+1} - (q_y)_{i,j}}{\Delta y} \right] \times \Delta t , \quad (4.6)$$

其中， $(h_{ov})_{i,j}^{t+\Delta t}$ 為下一時刻之漫地流水深、 $(h_{ov})_{i,j}^t$ 為現在時刻之漫地流水深、 $(q_x)_{i+1,j}$ 為網格右側之流量、 $(q_x)_{i,j}$ 為網格左側之流量、 $(q_y)_{i,j+1}$ 為網格下方之流量、 $(q_y)_{i,j}$ 為網格上方之流量、 Δt 為計算時距、 Δx 為網格 x 方向長度、 Δy 為網格 y 方向長度、 $e_{i,j}^t$ 為網格內已扣掉截留強度的超滲降雨強度。

4-5-2 漫地流非慣性波方程差分式

再者，漫地流之非慣性波方程式(式3.8a、式3.8b)如下：

$$x \text{ 方向： } S_{fx} = S_{ox} - \frac{\partial h_{ov}}{\partial x} ,$$

$$y \text{ 方向： } S_{fy} = S_{oy} - \frac{\partial h_{ov}}{\partial y} ,$$

接著，在中心網格左側，將式(3.8a)推導為差分式。首先，將方程式離散化為：

$$(S_{fx})_{i,j} \cong (S_{ox})_{i,j} - \frac{(h_{ov})'_{i,j} - (h_{ov})'_{i-1,j}}{\Delta x} ,$$

上式中，地表坡降可表示為：

$$(S_{ox})_{i,j} = \frac{E_{i-1,j} - E_{i,j}}{\Delta x} ,$$

故整理後，可得網格左邊界的非慣性波方程差分式如下：

$$(S_{fx})_{i,j} \cong \frac{E_{i-1,j} + (h_{ov})'_{i-1,j}}{\Delta x} - \frac{E_{i,j} + (h_{ov})'_{i,j}}{\Delta x} , \quad (4.7a)$$

其中， $(h_{ov})'_{i,j}$ 為中心網格之漫地流水深、 Δx 為網格 x 方向長度、 $(S_{fx})_{i,j}$ 為左邊界之摩擦損失坡降、 $(S_{ox})_{i,j}$ 為左邊界之地表坡降、 $(h_{ov})'_{i-1,j}$ 為左側網格之漫地流水深、 $E_{i-1,j}$ 為左側網格之地表高程。

同理，在中心網格右側，將式(3.8a)推導為差分式。首先，將方程式離散化為：

$$(S_{fx})_{i+1,j} \cong (S_{ox})_{i+1,j} - \frac{(h_{ov})'_{i+1,j} - (h_{ov})'_{i,j}}{\Delta x} ,$$

上式中，地表坡降可表示為：

$$(S_{ox})_{i+1,j} = \frac{E_{i,j} - E_{i+1,j}}{\Delta x} ,$$

故整理後，可得網格右邊界的非慣性波方程差分式如下：

$$(S_{fx})_{i+1,j} \cong \frac{E_{i,j} + (h_{ov})'_{i,j}}{\Delta x} - \frac{E_{i+1,j} + (h_{ov})'_{i+1,j}}{\Delta x} , \quad (4.7b)$$

其中， $(h_{ov})_{i,j}^t$ 為中心網格之漫地流水深、 Δx 為網格 x 方向長度、 $(S_{fx})_{i+1,j}$ 為右邊界之摩擦損失坡降、 $(S_{ox})_{i+1,j}$ 為右邊界之地表坡降、 $(h_{ov})_{i+1,j}^t$ 為右側網格之漫地流水深、 $E_{i+1,j}$ 為右側網格之地表高程。

同理，在中心網格上方，將式(3.8b)推導為差分式。首先，將方程式離散化為：

$$(S_{fy})_{i,j} \cong (S_{oy})_{i,j} - \frac{(h_{ov})_{i,j}^t - (h_{ov})_{i,j-1}^t}{\Delta y},$$

上式中，地表坡降可表示為：

$$(S_{oy})_{i,j} = \frac{E_{i,j-1} - E_{i,j}}{\Delta y},$$

故整理後，可得網格上邊界的非慣性波方程差分式如下：

$$(S_{fy})_{i,j} \cong \frac{E_{i,j-1} + (h_{ov})_{i,j-1}^t}{\Delta y} - \frac{E_{i,j} + (h_{ov})_{i,j}^t}{\Delta y}, \quad (4.7c)$$

其中， $(h_{ov})_{i,j}^t$ 為中心網格之地表水深、 Δy 為網格 y 方向長度、 $(S_{fy})_{i,j}$ 為上邊界之摩擦損失坡降、 $(S_{oy})_{i,j}$ 為上邊界之地表坡降、 $(h_{ov})_{i,j-1}^t$ 為上方網格之漫地流水深、 $E_{i,j-1}$ 為上方網格之地表高程。

同理，在中心網格下方，將式(3.8b)推導為差分式。首先，將方程式離散化為：

$$(S_{fy})_{i,j+1} \cong (S_{oy})_{i,j+1} - \frac{(h_{ov})_{i,j+1}^t - (h_{ov})_{i,j}^t}{\Delta y},$$

上式中，地表坡降可表示為：

$$(S_{oy})_{i,j+1} = \frac{E_{i,j} - E_{i,j+1}}{\Delta y},$$

故整理後，可得網格下邊界的非慣性波方程差分式如下：

$$(S_{fy})_{i,j} \cong \frac{E_{i,j} + (h_{ov})_{i,j}^t}{\Delta y} - \frac{E_{i,j+1} + (h_{ov})_{i,j+1}^t}{\Delta y}, \quad (4.7d)$$

其中， $(h_{ov})_{i,j}^t$ 為中心網格之地表水深、 Δy 為網格 y 方向長度、 $(S_{fy})_{i,j+1}$ 為下邊

界之摩擦損失坡降、 $(S_{ov})_{i,j+1}$ 為下邊界之地表坡降、 $(h_{ov})'_{i,j+1}$ 為下方網格之漫地流水深、 $E_{i,j+1}$ 為下方網格之地表高程。

4-5-3 漫地流阻抗定律差分式

其次，漫地流之阻抗定律式(式3.9a、式3.9b)如下：

$$x \text{ 方向： } q_x = \frac{S_{fx}^{1/2}}{n} h_{ov}^{5/3},$$

$$y \text{ 方向： } q_y = \frac{S_{fy}^{1/2}}{n} h_{ov}^{5/3},$$

接著，在中心網格左側，將 x 方向之阻抗定律式(3.9a)推導為差分式。首先，若摩擦損失坡降 $(S_{fx})_{i,j} > 0$ ，則得差分式如下：

$$(q_x)_{i,j} = \frac{[(S_{fx})_{i,j}]^{1/2}}{n_{i-1,j}} (h_{ov})_{i-1,j}^{5/3}, \quad (4.8a)$$

若摩擦損失坡降 $(S_{fx})_{i,j} < 0$ 代表產生回水效應，則得差分式如下：

$$(q_x)_{i,j} = -\frac{|(S_{fx})_{i,j}|^{1/2}}{n_{i,j}} (h_{ov})_{i,j}^{5/3}, \quad (4.8b)$$

其中， $(S_{fx})_{i,j}$ 為左邊界之摩擦損失坡降、 $(q_x)_{i,j}$ 為左邊界之單位寬度流量、 $n_{i-1,j}$ 為左側網格之曼寧粗糙係數、 $(h_{ov})'_{i-1,j}$ 為左側網格之漫地流水深、 $n_{i,j}$ 為中心網格之曼寧粗糙係數、 $(h_{ov})'_{i,j}$ 為中心網格之漫地流水深。

同理，在中心網格右側，將 x 方向之阻抗定律式(式3.9a)推導為差分式。首先，若摩擦損失坡降 $(S_{fx})_{i+1,j} > 0$ ，則得差分式如下：

$$(q_x)_{i+1,j} = \frac{[(S_{fx})_{i+1,j}]^{1/2}}{n_{i,j}} (h_{ov})_{i,j}^{5/3}, \quad (4.8c)$$

若摩擦損失坡降 $(S_{fx})_{i+1,j} < 0$ 代表產生回水效應，則得差分式如下：

$$(q_x)_{i+1,j} = -\frac{|(S_{fx})_{i+1,j}|^{1/2}}{n_{i+1,j}} (h_{ov})_{i+1,j}^{5/3}, \quad (4.8d)$$

其中， $(S_{fx})_{i+1,j}$ 為右邊界之摩擦損失坡降、 $(q_x)_{i+1,j}$ 為右邊界之單位寬度流量、 $n_{i+1,j}$ 為右側網格之曼寧粗糙係數、 $(h_{ov})'_{i+1,j}$ 為右側網格之漫地流水深、 $n_{i,j}$ 為中心網格之曼寧粗糙係數、 $(h_{ov})'_{i,j}$ 為中心網格之漫地流水深。

同理，在中心網格上方，將y方向之阻抗定律式(式3.9b)推導為差分式。首先，若摩擦損失坡降 $(S_{fy})_{i,j} > 0$ ，則得差分式如下：

$$(q_y)_{i,j} = \frac{[(S_{fy})_{i,j}]^{1/2}}{n_{i,j-1}} (h_{ov})'_{i,j-1}^{5/3}, \quad (4.8e)$$

若摩擦損失坡降 $(S_{fy})_{i,j} < 0$ 代表產生回水效應，則得差分式如下：

$$(q_y)_{i,j} = -\frac{|(S_{fy})_{i,j}|^{1/2}}{n_{i,j}} (h_{ov})'_{i,j}^{5/3}, \quad (4.8f)$$

其中， $(S_{fy})_{i,j}$ 為上邊界之摩擦損失坡降、 $(q_y)_{i,j}$ 為上邊界之單位寬度流量、 $n_{i,j-1}$ 為上方網格之曼寧粗糙係數、 $(h_{ov})'_{i,j-1}$ 為上方網格之漫地流水深、 $n_{i,j}$ 為中心網格之曼寧粗糙係數、 $(h_{ov})'_{i,j}$ 為中心網格之漫地流水深。

同理，在中心網格下方，將y方向之阻抗定律式(式3.9b)推導為差分式。首先，若摩擦損失坡降 $(S_{fy})_{i,j+1} > 0$ ，則得差分式如下：

$$(q_y)_{i,j+1} = \frac{[(S_{fy})_{i,j+1}]^{1/2}}{n_{i,j}} (h_{ov})'_{i,j}^{5/3}, \quad (4.8g)$$

若摩擦損失坡降 $(S_{fy})_{i,j+1} < 0$ 代表產生回水效應，則得差分式如下：

$$(q_y)_{i,j+1} = -\frac{|(S_{fy})_{i,j+1}|^{1/2}}{n_{i,j+1}} (h_{ov})'_{i,j+1}^{5/3}, \quad (4.8h)$$

其中， $(S_{fy})_{i,j+1}$ 為下邊界之摩擦損失坡降、 $(q_y)_{i,j+1}$ 為下邊界之單位寬度流量、 $n_{i,j+1}$ 為下方網格之曼寧粗糙係數、 $(h_{ov})'_{i,j+1}$ 為下方網格之漫地流水深、 $n_{i,j}$ 為中心網格之曼寧粗糙係數、 $(h_{ov})'_{i,j}$ 為中心網格之漫地流水深。

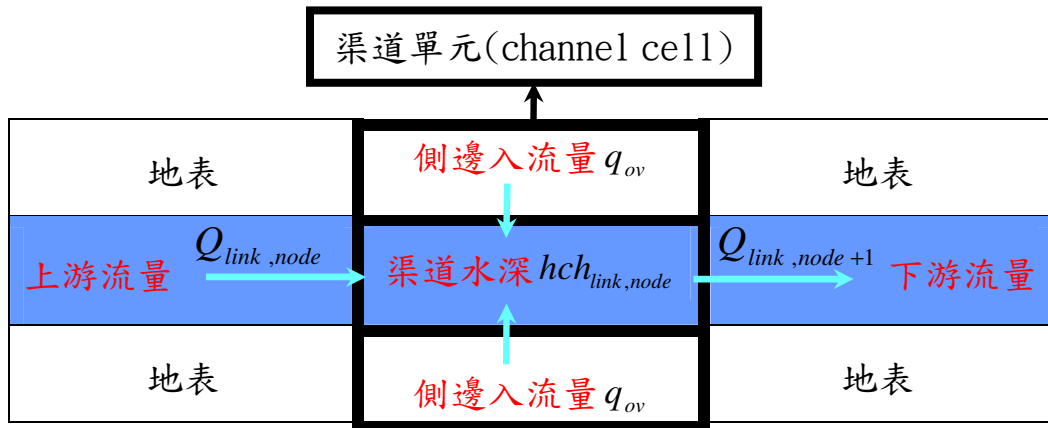


圖4.6：渠道單元交錯網格示意圖

4-6 一維渠道流

如圖4.6所示，渠道單元(channel cell)中除了位於網格中心點之水深值外，還需考慮位於上下游邊界中心點上之變數如：流量、渠道底床坡降和能量損失坡降...等，故以漫地流交錯網格相同之方式，修正位於渠道交錯網格上之變數座標表示。但在本研究中，實際上係利用河段(link)和節點(node)來對應渠道單元所在之 x 、 y 座標。在介紹此方法之前，以下先說明河系(stream)、河段和節點之意義與製作方式。

在本模式中將渠道網格間視為互相連結之樹枝狀架構圖4.7，因此在河系分布計算上，係先利用ArcMap所輸出之渠道流向圖層，再經由我們所撰寫之程式先判斷河系中的匯流點(有兩個以上之上游網格即為匯流點)，再依此點將河系分割為個別獨立之河段，並從上游至下游依序編號；再將各河段切割為個別節點，同樣從上游至下游依序編號；最後，再由渠道流向圖層判斷各渠道單元間的上下游關係，並將河段編號和節點編號存入上下游關係表中，配合渠道流控制方程式即可模擬渠道中水流運動過程。

同時，渠道流模擬之維度(dimension)雖為一維，但渠道單元係位於二維地表網格中，且河系分布並無規律，因此渠道單元座標無法直接使用二維直角座標紀錄，而係利用前述之河段與節點來記錄 x 座標和 y 座標，以下即以圖4.7為範例製作渠道單元 x 、 y 座標紀錄表(表4.1)。

河系(stream)：

				(16,15)	(17,15)	
			(14,14)	(15,14)		
		(13,13)	(14,13)			
	(12,12)	(13,12)		(15,12)	(16,12)	(17,12)
(11,11)						

河段(link)：

			Link_3		
Link_1				Link_2	

節點(node)：

					2	1
			4	3		
		1	4			
	3	2		3	2	1
4						

圖4.7：河系、河段、節點示意圖

表4.1：渠道單元x、y座標記錄表

渠道單元x座標	節點(node)				
	1	2	3	4	
河段(link)	1	13	13	12	11
	2	17	16	15	14
	3	17	16	15	14

渠道單元y座標	節點(node)				
	1	2	3	4	
河段(link)	1	13	12	12	11
	2	12	12	12	13
	3	15	15	14	14

4-6-1 渠道流連續方程差分式

渠道流之連續方程式(式3.10)如下：

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q_{ov}$$

然後，將式(3.10)推導為差分式。首先將方程式離散化為：

$$\frac{A_i^{t+\Delta t} - A_i^t}{\Delta t} + \frac{Q_{i+1} - Q_i}{\Delta x} = (q_{ov})_i$$

移項整理得：

$$A_i^{t+\Delta t} = A_i^t + (q_{ov})_i \times \Delta t - \left(\frac{Q_{i+1} - Q_i}{\Delta x} \right) \times \Delta t$$

將上式同乘 Δx ，可得到體積形式之連續方程差分式如下：

$$V_i^{t+\Delta t} = V_i^t + (q_{ov})_i \times \Delta x \times \Delta t - (Q_{i+1} - Q_i) \times \Delta t \quad (4.9)$$

其中，於渠道單元內， $A_i^{t+\Delta t}$ 為下一時刻之通水斷面積、 A_i^t 為現在時刻之通水斷面積、 $V_i^{t+\Delta t}$ 為下一時刻之通水體積、 V_i^t 為現在時刻之通水體積、 $(q_{ov})_i$ 為漫地流注入渠道之流量、 Q_{i+1} 為下游邊界上之流量、 Q_i 為上游邊界之流量、

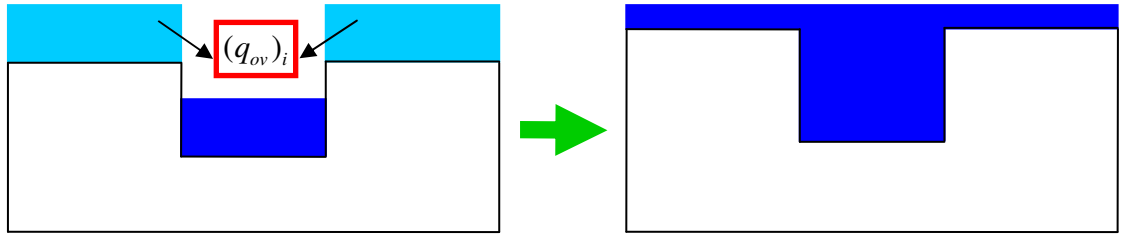


圖4.8：漫地流注入渠道示意圖

Δx 為渠道單元長度、 Δt 為計算時距。

其次， $(q_{ov})_i$ 之模擬部分並無使用任何計算公式，而係假設渠道單元內漫地流瞬間全部注入渠道中，然後比較渠道中總水體積與渠道可容納之水體積，若渠道中總水體積較多，則渠道水淹過河岸形成漫地形式之渠道流如圖4.8所示；反之，若總水體積較渠道可容納之水體積少，則為一般渠道內之渠道流。

4-6-2 渠道流非慣性波方程差分式

渠道流之非慣性波方程式(式3.11)如下：

$$S_{fc} = S_{oc} - \frac{\partial h_{ch}}{\partial x} ,$$

首先，在渠道單元上游將式(3.11)推導為差分式如下：

$$(S_{fc})_i \cong \frac{[(E_c)_{i-1} + (h_{ch})_{i-1}^t] - [(E_c)_i + (h_{ch})_i^t]}{\Delta x} , \quad (4.10a)$$

其次，在渠道單元下游將式(3.11)推導為差分式如下：

$$(S_{fc})_{i+1} \cong \frac{[(E_c)_i + (h_{ch})_i^t] - [(E_c)_{i+1} + (h_{ch})_{i+1}^t]}{\Delta x} , \quad (4.10b)$$

其中， Δx 為渠道單元長度、 $(S_{fc})_i$ 為上游邊界之摩擦損失坡降、 $(S_{fc})_{i+1}$ 為下游邊界之摩擦損失坡降、 $(E_c)_{i-1}$ 為上游渠道單元之渠底高程、 $(E_c)_{i+1}$ 為下游渠道單元之渠底高程、 $(h_{ch})_{i-1}^t$ 為上游渠道單元之水深、 $(h_{ch})_{i+1}^t$ 為下游渠道單元之水深、 $(E_c)_i$ 為渠道單元之渠底高程、 $(h_{ch})_i^t$ 為渠道單元之水深。

4-6-3 渠道流曼寧公式差分式

渠道流量之曼寧公式(式3.12)如下：

$$Q = AV = \frac{1}{n_{ch}} AR^{2/3} S_{fc}^{1/2},$$

首先，在渠道單元上游將式(3.12)推導為差分式，若摩擦損失坡降 $(S_{fc})_i > 0$ ，則得：

$$Q'_i = \frac{1}{(n_{ch})_{i-1}} A'_{i-1} (R_{i-1})^{2/3} (S_{fc})_i^{1/2}, \quad (4.11a)$$

若摩擦損失坡降 $(S_{fc})_i < 0$ 代表產生回水效應，則得：

$$Q'_i = -\frac{1}{(n_{ch})_i} A'_i (R_i)^{2/3} |(S_{fc})_i|^{1/2}, \quad (4.11b)$$

其中， $(S_{fc})_i$ 為上游邊界之摩擦損失坡降， Q'_i 為上游邊界之渠道流量、 A'_{i-1} 為上游渠道單元之通水斷面積、 R_{i-1} 為上游渠道單元之水力半徑、 $(n_{ch})_{i-1}$ 為上游渠道單元之曼寧粗糙係數、 A'_i 為渠道單元之通水斷面積、 R_i 為渠道單元之水力半徑、 $(n_{ch})_i$ 為渠道單元之曼寧粗糙係數。

同理，在渠道單元下游將式(3.12)推導為差分式，若摩擦損失坡降 $(S_{fc})_{i+1} > 0$ ，則得：

$$Q'_{i+1} = \frac{1}{(n_{ch})_i} A'_i (R_i)^{2/3} (S_{fc})_{i+1}^{1/2}, \quad (4.11c)$$

若摩擦損失坡降 $(S_{fc})_{i+1} < 0$ 代表產生回水效應，則得：

$$Q'_{i+1} = -\frac{1}{(n_{ch})_{i+1}} A'_{i+1} (R_{i+1})^{2/3} |(S_{fc})_{i+1}|^{1/2}, \quad (4.11d)$$

其中， $(S_{fc})_{i+1}$ 為下游邊界之摩擦損失坡降， Q'_{i+1} 為下游邊界之渠道流量、 A'_{i+1} 為下游渠道單元之通水斷面積、 R_{i+1} 為下游渠道單元之水力半徑、 $(n_{ch})_{i+1}$ 為下游渠道單元之曼寧粗糙係數、 A'_i 為渠道單元之通水斷面積、 R_i 為渠道單元之水力半徑、 $(n_{ch})_i$ 為渠道單元之曼寧粗糙係數。

4-7 模擬演算流程

本模式在演算流程上主要可分為三個部份。第一個部份，係先宣告所需用的變數和參數值，並將變數初始化，再讀入各種輸入資料如：地表高程、土地利用圖層、土壤分布圖層、河系圖層與渠道參數…等。

第二部份為在空間和時間迴圈中計算各種水文過程，依序有降雨、截留、地表水深、入滲、渠道水深、漫地流流量和渠道流流量…等主要變數的計算。而第三部份係於模擬結束前輸出各種水文變數，並統計整理模擬過程中的相關資料。最後，為了方便理解本模式之演算流程，我們將此過程整理成圖4.9。

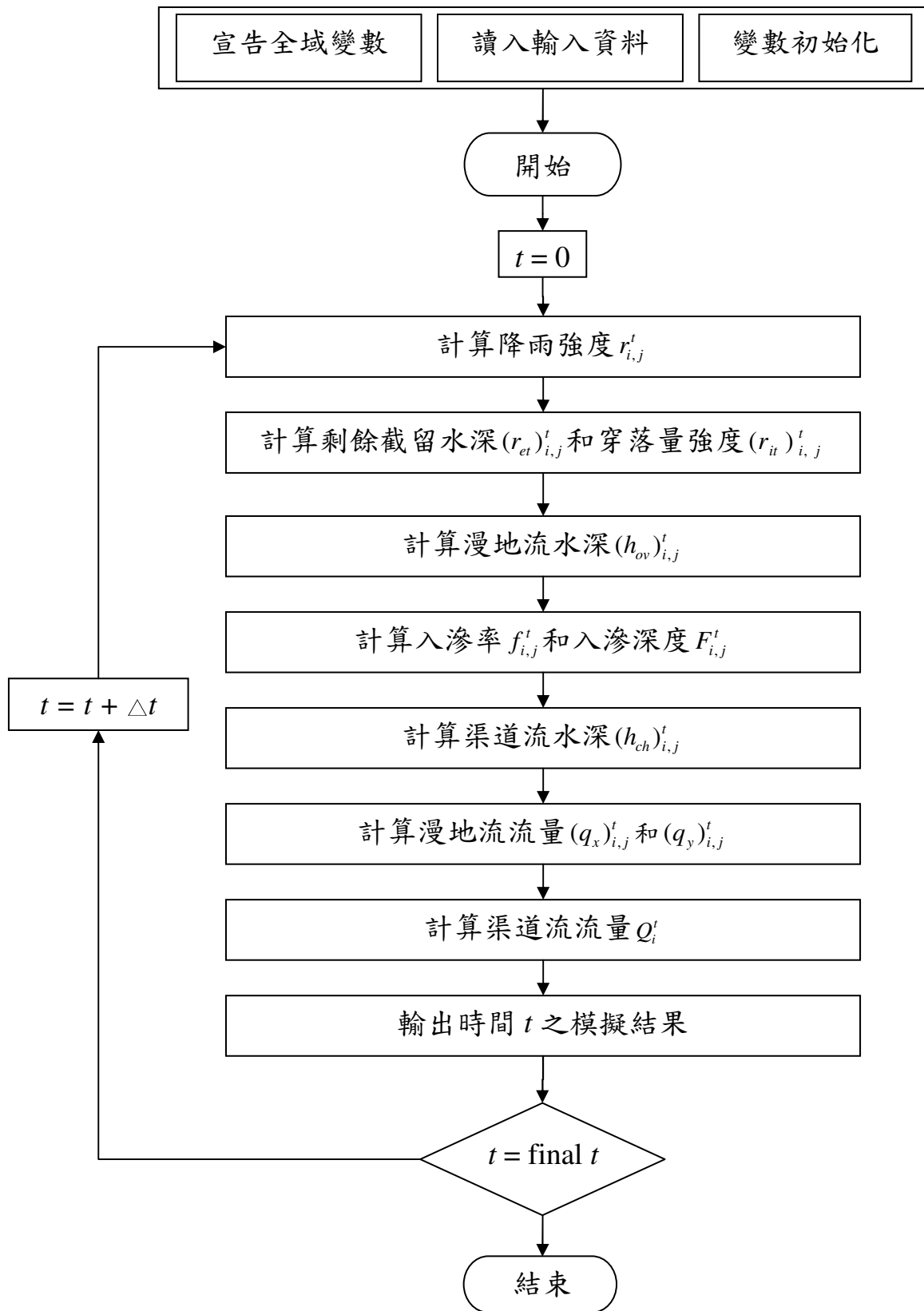


圖4.9：模式演算流程圖

第五章 研究區域與輸入資料

本研究之模擬區域為石門水庫集水區，此集水區位於北臺灣，橫跨桃園縣、新竹縣和宜蘭縣，南北與台中縣、台北縣相鄰，水庫集水區面積達七百六十五平方公里，為台灣最大的水庫集水區；河系的部分由上游的泰崗溪和三光溪匯入下游的大漢溪，如圖 5.1 藍色線所示，圖中紅色圍線為集水區範圍，黃色圍線則為不含水庫區之模擬範圍。此外，由於模式的需求，輸入資料除了地表高程外，尚需要土地利用、土壤種類、河系分布圖層，其格式皆為陣列(raster)形式，並配合颱風事件降雨和渠道斷面資料進行模擬。以下即針對各項輸入資料進行說明。

5-1 DEM

DEM(digital elevation model)其中文名稱為數值高程模型，通常係利用衛星或航照技術取得地表高程值後，再根據解析度存為陣列格式或向量格式，本研究係採用陣列資料如圖 5.2 所示，圖中數字代表高程值；而本研究之 DEM 資料由農林航測所提供，資料空間解析度為 40 公尺，圖 5.1 即由此 DEM 資料繪製而成。

5-2 土地利用

土地利用圖層一般係取得地表空照圖並網格化後，再經由人工或程式決定個別網格內土地利用種類，並予以編號分類而成；同時，土地利用情況會決定地表粗糙度和截留深度；然而，由於曼寧粗糙係數之細目分類參數難以取得，因此我們參考葉宗泰(2003)，將土地利用概略分為八大類如表 5.1，而最大截留深度則係參考王如意(1988)之截留公式求得，所以表 5.1 中不同之土地利用將對應不同的曼寧粗糙係數和最大截留深度。

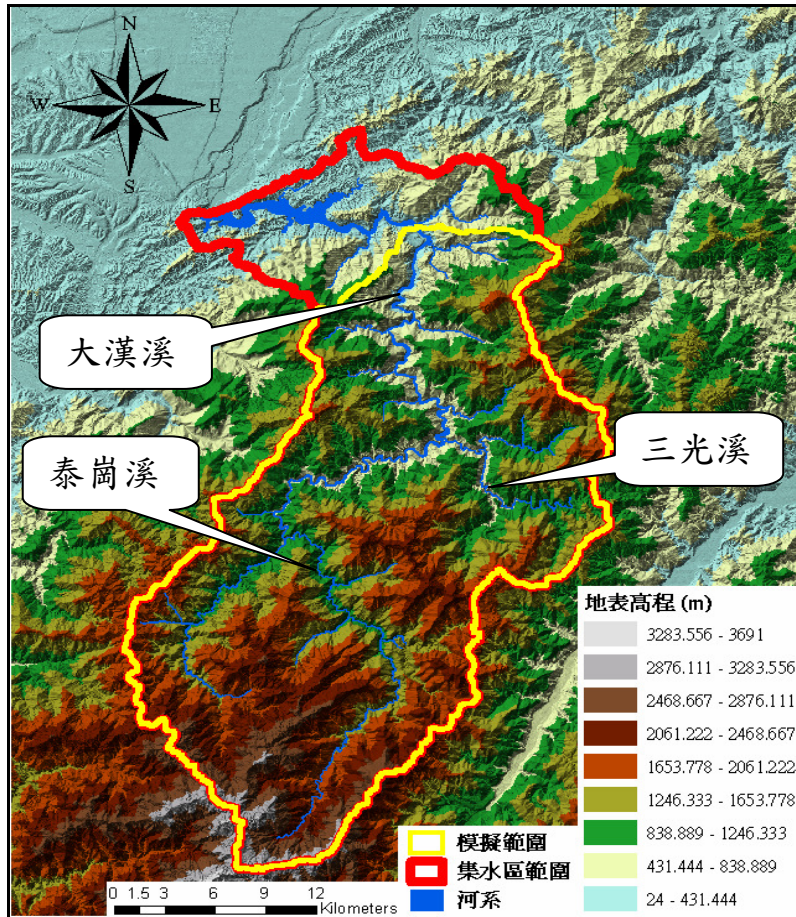


圖 5.1：石門水庫集水區高程地形圖

78	72	69	71	58	49
74	67	56	49	46	50
69	53	44	37	38	48
64	58	55	22	31	24
68	61	47	21	16	19
74	53	34	12	11	12

圖 5.2：陣列格式高程資料示意圖

表 5.1：土地利用對照參數表

	水體	果園	林地	建築	荒地	草地	崩塌地	稻作
曼寧粗糙係數	0.03	0.04	0.09	0.025	0.04	0.03	0.04	0.03
最大截留深度(mm)	0	2.4	2.9	3.0	0	0.2	0	0.4

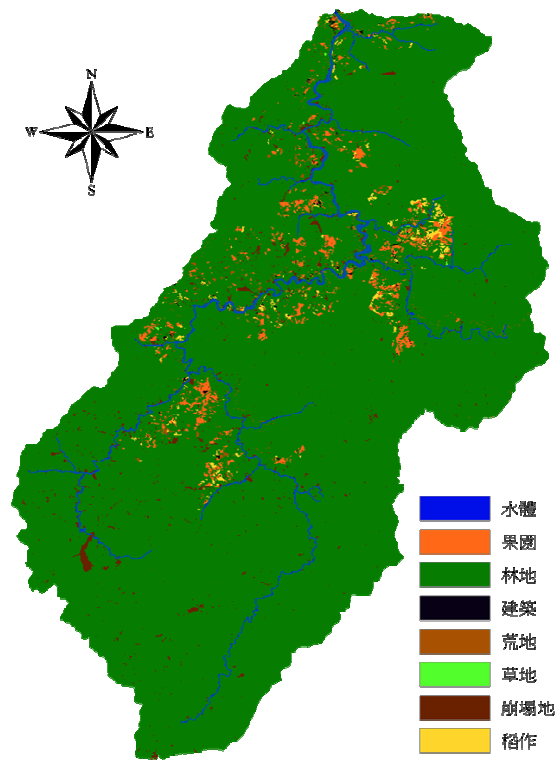


圖 5.3：石門水庫集水區土地利用分布圖(年份：2004)

同時，本研究所使用之土地利用圖層係由中央大學太空遙測中心提供如圖 5.3 所示，並依據表 5.1 分類。圖中，藍色為水體、橘色為果園、深綠色為林地、黑色為建築、褐色為荒地、綠色為草地、深褐色為崩塌地、黃色為稻作；由圖中也可觀察出集水區內多為林地，水體分布大多數即為河川渠道所在位置，其兩側多有稻田、果園、荒地和建築…等人類活動景物，此外在上游以及渠道兩側亦有較多的崩塌地分布。

5-3 土壤種類

土壤種類分布圖層係由行政院農委會林業試驗所提供，配合集水區範圍內土系之調查報告書，並使用 ArcMap 切割出我們所需之研究範圍，即可依土壤粒徑來分類得到研究區域內的土壤分布圖層(圖 5.4)；然而，由於土壤層多為複合土系所組成，其內容繁雜，故本研究分類方式係以表土層土壤做為分類依據，並配合 Green-Ampt 公式之參數表(表 5.2)。

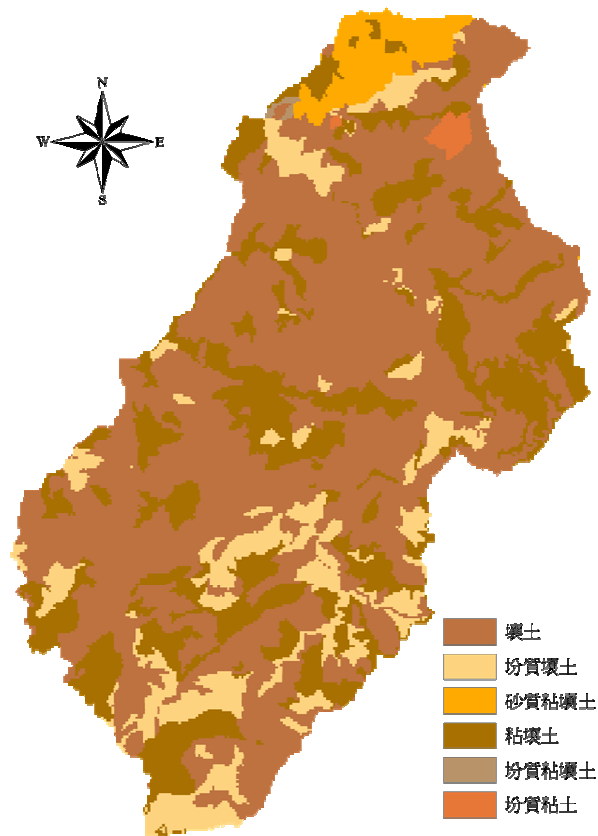


圖 5.4：石門水庫集水區土壤種類分布圖(年份：1996~1999)

表 5.2：Green-Ampt 公式土壤參數對照表(Rawls & Brakensiek, 1983)

土壤分類 (Soil classification)	有效孔隙率 M_d	濕潤邊緣水壓 H_f (cm)	水力傳導率 K_s (cm/hr)
砂土(Sand)	0.417	4.95	11.78
壤質砂土(Loamy sand)	0.401	6.13	2.99
砂質壤土(Sandy loam)	0.412	11.01	1.09
壤土(Loam)	0.434	8.89	0.34
粉質壤土(Silt loam)	0.486	16.68	0.65
砂質粘壤土(Sandy clay loam)	0.330	21.85	0.15
粘壤土(Clay loam)	0.390	20.88	0.10
粉質粘壤土(Silty clay loam)	0.432	27.30	0.10
砂質粘土(Sandy clay)	0.321	23.90	0.06
粉質粘土(Silty clay)	0.423	29.22	0.05
粘土(Clay)	0.385	31.63	0.03

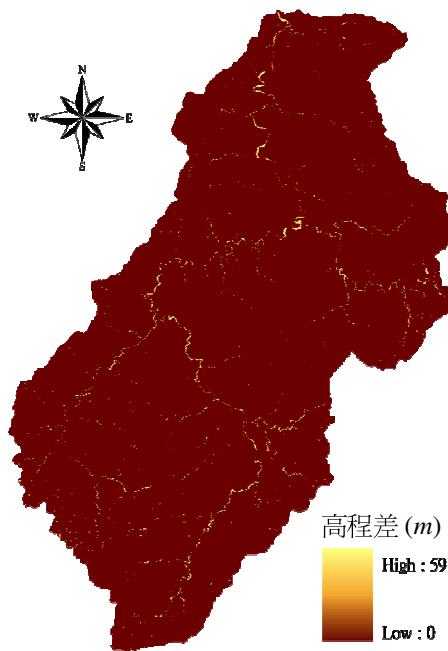


圖 5.5：凹點填平前後之高程差分布圖

5-4 河系分布

本模式之渠道流演算需要明確定義出渠道單元之空間位置，所以需要集水區內之河系(stream)分布圖層，但台灣由於雨季和旱季之降雨特性差異大，加上石門水庫集水區上游地形陡峭，因此雨季時之溪流及至旱季可能隨即消失，無法直接由土地利用圖層直接定義河系分布，然而天然河系分布係由高程地形決定，故我們將利用 ArcMap 外掛模組 Hydrology 中的凹點填平(fill sink)、流向(flow direction)判斷以及累積流量(flow accumulation)功能，由 DEM 圖層製作出人工河系分布圖層。

5-4-1 凹點填平

由於空間解析度或儀器測量之誤差，使 DEM 圖層中存在凹點(sink)，此現象將使模擬之地表水須將凹點填滿後才會溢出至其他網格，進而造成洪峰值的低估；故在地理資訊系統中處理方式係取凹點相鄰八個網格中最低的高程值來取代凹點高程，以達成填平凹點之目的，圖 5.5 即為凹點填平前後之高程差距，相差較大的多位於河谷地形處。

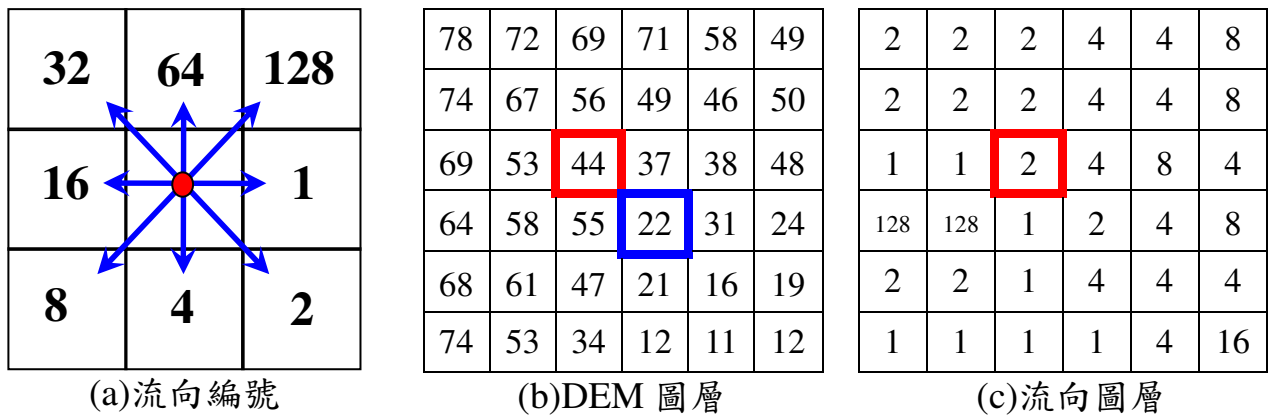


圖 5.6：流向與製作流向圖層示意圖

5-4-2 流向判斷

流向判斷的部份，對於九宮格的中心網格而言，其對應相鄰網格之方向有八個，因此可逆時鐘編號 1~128 來代表此八個方向(圖 5.6(a))；而根據水往低處流的通識，定義中心網格水流往相鄰八個網格中高程最低者流動(圖 5.6(b))，因此即可針對流動方向，在中心網格處給予流向編號，其它網格依此類推則可得到流向圖層(圖 5.6(c))。

5-4-3 累積流量

取得流向圖層後則可繼續計算累積流量，其原理即判斷此網格之水流是由幾個上游網格所提供，以下由範例說明；如圖 5.7a 中，藍框網格之水體最後皆會流經紅框網格，經由計算後藍框網格總數為 7，故此紅框網格之累積流量即為 7，其他網格依此類推即可得到累積流量圖層(圖 5.7(b))。

總結以上步驟(圖 5.8)，最後再設定一累積流量門檻值(threshold)，令累積流量超越此門檻值之網格即視為渠道單元(channel cell)位置，依此方式可得到人工河系分布圖層。此外，將人工河系與土地利用圖層中的河系相比(圖 5.9)，可以發現實際河系與人工河系重疊性極高，差異僅出現在小支流和分布密度上，因此無須顧慮人工河系失真的情形。

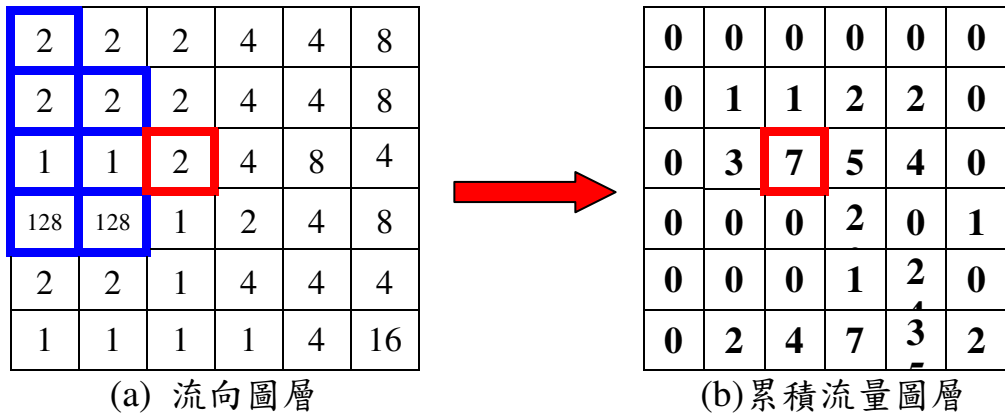


圖 5.7：製作累積流量圖層示意圖

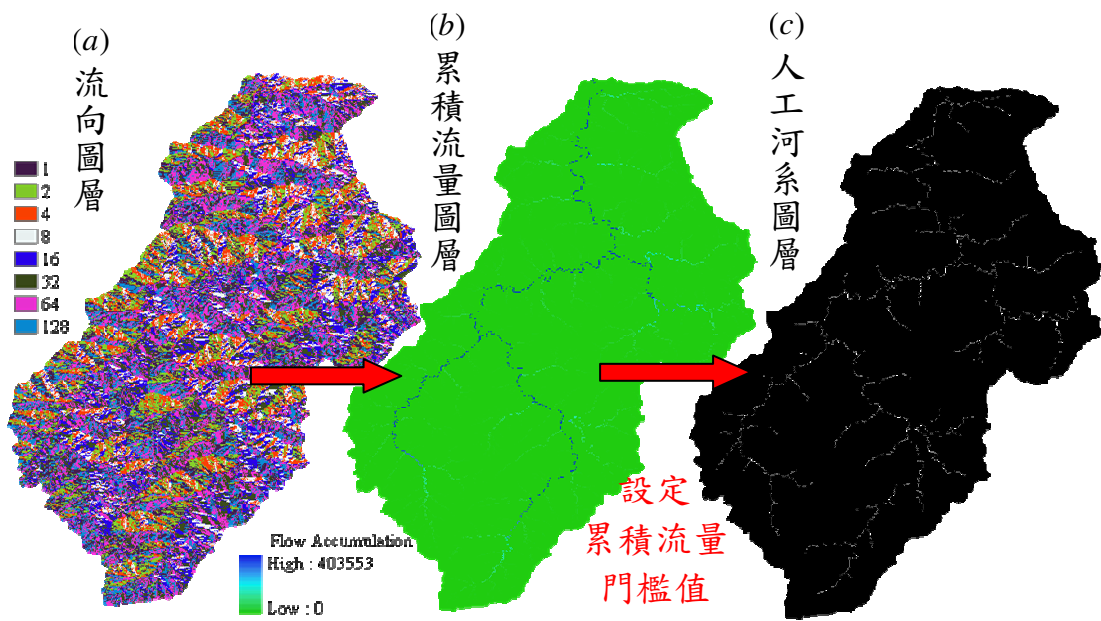


圖 5.8：人工河系製作流程圖

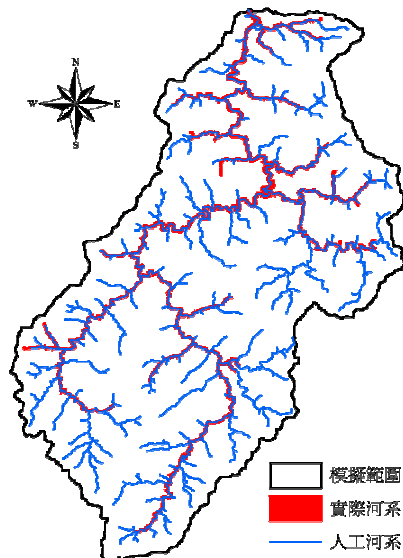


圖 5.9：人工河系與實際河系比較圖

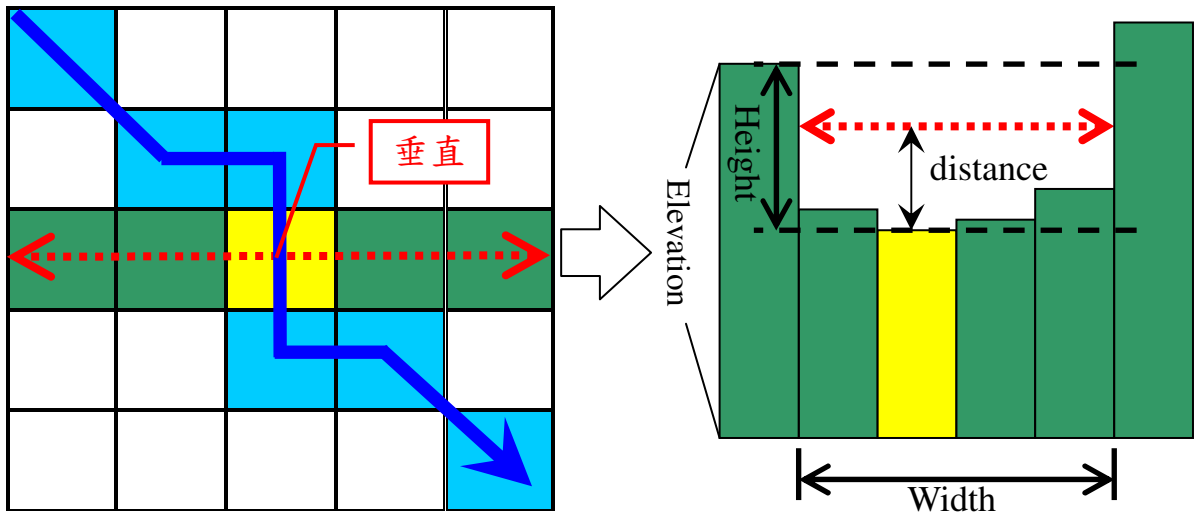


圖 5.10：渠道斷面製作原理示意圖

5-5 渠道斷面與粗糙係數

其次，本模式於渠道演算中尚需要渠道斷面的深度和寬度資料，但石門水庫集水區之渠道斷面資料只侷限於中下游近庫區部分，上游由於交通不便且多為荒溪，目前尚無相關實測資料，因此我們利用現有 40 公尺水平解析度的 DEM 資料，配合自行撰寫的程式來分析判斷渠道之深度與寬度，其分析方式由圖 5.10 說明；圖 5.10 中淺藍色網格為渠道單元(channel cell)，藍色箭頭線代表流向，我們取黃色網格做為分析對象，可畫出與流向相互垂直之正交斷面線，並取出此斷面線上之高程，同時在黃色網格上給定一個高度的差距(distance)值，令兩側大於此差距值之網格為河岸所在位置，即可求出河道斷面之寬度與深度值；而本研究中差距值設為一公尺，原因係由於 DEM 之垂直解析度為一公尺。再者，根據此方法若在河段匯集處有時會出現誤判的情況，這部分我們採人工判斷修正；而我們最後所得之渠道寬度落在 40 公尺至 118.6 公尺間，其中由於本模式目前僅容許渠道單元為單一網格，所以為了使渠道單元能容納下渠道寬度，在第六章之模擬案例中，我們所選用之輸入圖層解析度最小為 120 公尺，而非原始之 40 公尺解析度；另外，模式尚需要渠道粗糙度，但由於相關資料付之闕如，所以係由人為設定，將於第六章分析比較說明。

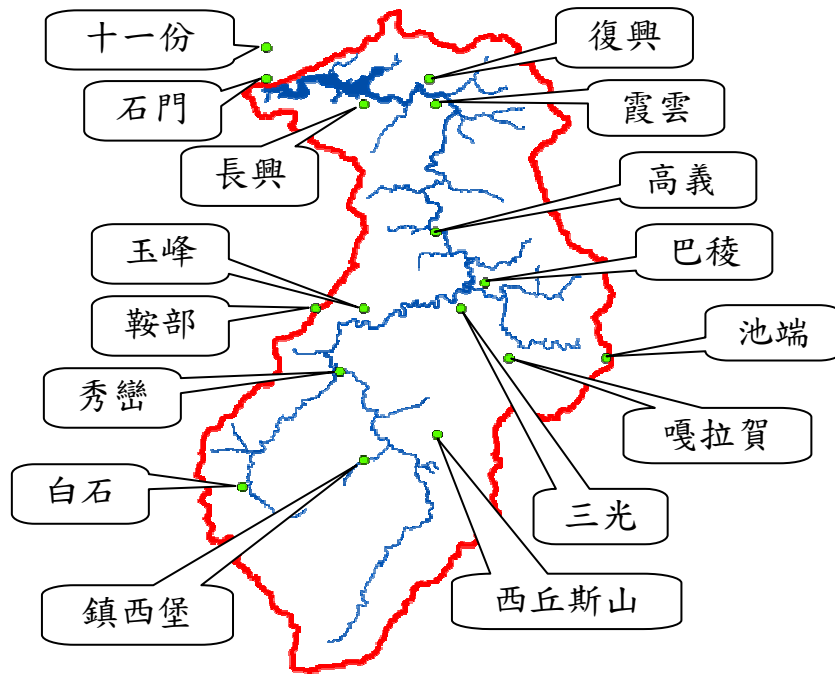


圖 5.11：石門水庫集水區雨量站位置分布圖

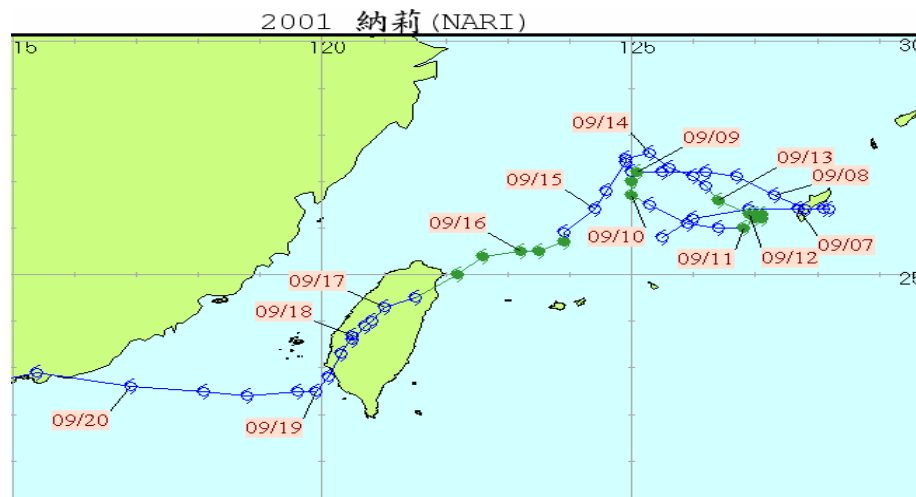


圖 5.12：納莉颱風路徑圖(來源：中央氣象局)

5-6 雨量資料

石門水庫集水區附近共有 16 個雨量站(圖 5.11)，而本研究採用之暴雨事件為 2001 年納莉颱風，歷史路徑為 9 月 16 日由台灣東北角基隆、宜蘭登陸，9 月 18 號從台灣西南部出海(圖 5.12)歷時約 72 小時，但考慮臨前降雨對土壤飽和度影響，因此將模擬時間放大為 9 月 15 日 15 點至 9 月 19 日 12 點共 94 小時，表 5.3 為颱風期間之時雨量資料表，由北部水資源局提供。

表 5.3：2001 年納莉颱風時降雨量資料表(單位：mm/hr)

Date (月/日/時)	石 門	長 興	復 興	霞 雲	高 義	三 光	嘎拉 賀	玉 峰	秀 巒	鞍 部	鎮西 堡	巴 稜	白 石	西丘 斯山	十一 份	池 端	算術 平均
9/15/15	1.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0.2
9/15/16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0.1
9/15/17	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0.1
9/15/18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.0
9/15/19	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0.1
9/15/20	1	3	3.5	2	2	0.5	1	0	0	2.5	0	3	0	0	9	1	1.8
9/15/21	9.5	14	11.5	13	5	1	1	7	2	7.5	1	2	0	0	1	1	4.8
9/15/22	0.5	18	19.5	26	40	28.5	22	19	10	21.5	8	19	3	4	0	3	15.1
9/15/23	1.5	4.5	1.5	2	23	29.5	9	11	13	19.5	13	7	3	18	0	0	9.7
9/15/24	5	5.5	5	4	6	2.5	0	8	10.5	13	5	3	2	8	10	1	5.5
9/16/01	7	14	4.5	6	4	5	5	10	5	7.5	5	4	8	5	4	1	5.9
9/16/02	2	3.5	7	9	18	13	12	11	10.5	14	12	11	8	5	0	8	9.0
9/16/03	1	1.5	2.5	3	16	8	8	8	3.5	7	2	2	8	5	3	3	5.1
9/16/04	2	0	4.5	4	3	1	3	1	1.5	4	2	2	9	2	2	1	2.6
9/16/05	1	1.5	7.5	7	4	1	1	3	6.5	7.5	3	4	2	3	3	2	3.6
9/16/06	2	10	5	8	13	12.5	9	18	10.5	18	13	12	3	5	2	5	9.1
9/16/07	1	4.5	7	9	13	17.5	11	6	9	16.5	5	10	5	6	1	20	8.8
9/16/08	2.5	2.5	7	10	5	11	6	7	14	11	14	5	12	12	1	9	8.1
9/16/09	1.5	4.5	13.5	6	14	6.5	8	3	9.5	3	9	6	11	3	4	7	6.8
9/16/10	13	19.5	28	32	29	21.5	17	21	23	22	15	21	14	10	12	18	19.8
9/16/11	2.5	6	5	7	11	8	7	17	5	15.5	6	6	5	6	1	10	7.4
9/16/12	3	5	11.5	15	9	9	6	13	12.5	19	8	8	12	6	3	6	9.1
9/16/13	11.5	9	9.5	12	22	13.5	14	19	11.5	25.5	7	12	7	3	2	10	11.8
9/16/14	2	15.5	16	12	20	8	8	14	15	20.5	12	14	12	8	5	10	12.0
9/16/15	7.5	13.5	13.5	22	30	20	22	22	16	20	11	19	11	8	7	12	15.9
9/16/16	4	6	10.5	14	20	15.5	13	22	20	28	15	12	15	9	4	11	13.7
9/16/17	7.5	22.5	30	36	37	30	25	31	21	39.5	14	20	12	8	13	20	22.9
9/16/18	8.5	15.5	25.5	28	38	36	25	26	20.5	25.5	14	24	24	11	5	19	21.6
9/16/19	15	33.5	22.5	27	27	25.5	18	36	18	36.5	13	17	17	11	16	15	21.8

Date (月/日/時)	石 門	長 興	復 興	霞 雲	高 義	三 光	嘎拉 賀	玉 峰	秀 巒	鞍 部	鎮西 堡	巴 稜	白 石	西丘 斯山	十一 份	池 端	算術 平均
9/16/20	9	12	19.5	25	27	23	22	31	29.5	35	22	22	26	11	9	17	21.3
9/16/21	50	23	27.5	33	25	21	16	39	27	39.5	22	18	20	10	13	17	25.1
9/16/22	14	30.5	43	48	38	32.5	34	58	32.5	50.5	25	29	33	18	13	28	32.9
9/16/23	24.5	44	59	61	47	34	37	57	35	58	25	33	50	19	32	36	40.7
9/16/24	25	28.5	33	28	30	29.5	16	48	40.5	57.5	28	18	49	21	32	16	31.3
9/17/01	15	14	15.5	17	12	8	6	7	10	13	7	12	12	10	8	18	11.5
9/17/02	7	9	10	13	11	10	10	5	3.5	4.5	3	11	2	3	5	23	8.1
9/17/03	6	5.5	9	6	3	2	3	1	0.5	1.5	0	3	1	2	10	9	3.9
9/17/04	16	10	9.5	7	3	1.5	2	0	0.5	0.5	1	3	0	3	15	11	5.2
9/17/05	7	4	5	3	5	3.5	4	2	0	1	2	5	1	1	5	6	3.4
9/17/06	0.5	1.5	1	2	1	1	4	1	0.5	0.5	0	1	0	2	1	8	1.6
9/17/07	0.5	0	1.5	3	0	1	2	0	1	0.5	3	2	1	2	4	2	1.5
9/17/08	9	12.5	15.5	17	7	3.5	1	3	2	3.5	0	3	1	0	16	0	5.9
9/17/09	6	8.5	6.5	10	0	0	0	2	0	1.5	0	0	0	1	9	2	2.9
9/17/10	3.5	3.5	4	3	5	4	6	2	0.5	1.5	0	5	0	0	7	12	3.6
9/17/11	10	7	8	8	6	6	6	4	2.5	4	8	6	3	9	8	7	6.4
9/17/12	6.5	12	16.5	15	8	9	14	6	5.5	5	7	11	4	14	21	37	12.0
9/17/13	49	41.5	46	28	20	19.5	23	11	8	11	8	22	5	16	25	62	24.7
9/17/14	19	32.5	40	27	16	28	27	17	23	16	11	32	16	24	4	49	23.8
9/17/15	5.5	14	20	46	24	26.5	35	13	11.5	15	16	42	7	20	2	52	21.8
9/17/16	11.5	60.5	47	63	34	37	44	29	26.5	23.5	20	45	15	47	7	61	35.7
9/17/17	17	62.5	51	34	43	37.5	44	33	34.5	27	29	37	23	47	7	49	36.0
9/17/18	12.5	33.5	29	23	33	35	33	34	27	28.5	18	37	10	46	6	34	27.5
9/17/19	10	13.5	16	16	18	15.5	22	13	30.5	12	36	16	27	88	8	14	22.2
9/17/20	40	52.5	58	43	29	11.5	9	15	12.5	15	11	17	10	24	44	19	25.7
9/17/21	30	32	32.5	17	12	32	67	36	42.5	22.5	28	22	20	18	25	53	30.6
9/17/22	59.5	24	20	10	1	7.5	1	5	11	4	12	8	5	33	45	3	15.6
9/17/23	9	4	5	4	2	5.5	7	6	6	5.5	19	6	12	54	19	10	10.9
9/17/24	17	9.5	10	16	1	1	1	1	0.5	0	7	2	8	21	24	4	7.7
9/18/01	26	8.5	6.5	4	2	5.5	12	2	4.5	1.5	8	11	5	23	39	23	11.3

Date (月/日/時)	石 門	長 興	復 興	霞 雲	高 義	三 光	嘎 拉 賀	玉 峰	秀 巒	鞍 部	鎮 西 堡	巴 稜	白 石	西 丘 斯	十 一 份	池 端	算 術 平 均
9/18/02	30.5	27.5	35.5	29	44	17.5	20	8	6.5	6	4	18	4	7	36	36	20.6
9/18/03	24.5	11.5	9.5	10	6	24	22	16	6	9	5	11	2	1	33	23	13.3
9/18/04	52	34	40.5	19	3	7	11	6	11.5	5	7	5	4	9	70	2	17.9
9/18/05	46.5	33	30.5	26	14	8	2	7	3	7.5	2	6	1	9	40	2	14.8
9/18/06	28.5	11	6.5	4	4	10	6	8	4.5	10	3	9	2	6	11	8	8.2
9/18/07	2.5	2	1	2	5	5.5	10	5	7	5	9	7	7	20	3	8	6.2
9/18/08	11	1.5	1.5	1	6	4	7	4	3	3.5	4	5	5	10	15	13	5.9
9/18/09	5.5	2	3.5	1	1	2.5	4	2	3	2	3	3	2	3	35	22	5.9
9/18/10	9.5	1.5	1	2	5	6.5	22	5	3.5	3.5	1	10	1	0	6	20	6.1
9/18/11	0	0	0	0	2	2.5	12	2	2	1	0	7	0	0	0	37	4.1
9/18/12	0	0	0	0	8	10.5	14	5	2.5	3.5	1	13	0	1	0	26	5.3
9/18/13	0.5	0	0	0	0	4	3	2	2	2	3	2	0	3	0	3	1.5
9/18/14	3	0.5	0.5	8	1	5	23	7	5.5	3.5	8	5	2	2	9	29	7.0
9/18/15	0.5	1.5	3.5	1	2	1	1	0	1	1	2	3	0	3	6	0	1.7
9/18/16	3	3.5	5	8	2	7	9	3	0.5	2	0	8	1	0	3	37	5.8
9/18/17	3	3.5	0	2	21	15	9	10	1	6	1	22	0	2	1	30	7.9
9/18/18	0	0	0.5	2	0	1	14	3	4.5	1.5	5	0	1	2	0	13	3.0
9/18/19	2	3	5.5	6	2	5.5	13	3	8.5	2	7	5	1	3	2	41	6.8
9/18/20	0.5	0	0.5	2	3	22	14	15	0.5	11	0	22	1	3	0	26	7.5
9/18/21	0	0.5	0	2	4	1	2	1	1	0	0	8	0	1	0	2	1.4
9/18/22	0	0	0	1	0	1.5	7	0	0.5	0.5	0	5	1	2	0	10	1.8
9/18/23	0	0	0	0	1	6.5	10	3	2	1.5	3	3	0	2	0	35	4.2
9/18/24	0	0.5	0.5	3	3	7.5	13	6	3	3.5	3	11	0	4	0	41	6.2
9/19/01	0	0	0	0	1	3	8	1	1	0.5	2	4	1	6	0	18	2.8
9/19/02	0	0	0.5	1	0	0.5	1	1	0.5	0	1	1	1	2	0	1	0.7
9/19/03	0	0	0	0	0	1	4	0	0	0.5	2	0	0	2	0	0	0.6
9/19/04	0	0	0	0	0	0	1	0	0.5	0	0	0	0	0	0	1	0.2
9/19/05	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.0
9/19/06	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.0
9/19/07	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0.1

Date (月/日/時)	石門	長興	復興	霞雲	高義	三光	嘎拉賀	玉峰	秀巒	鞍部	鎮西堡	巴稜	白石	西丘斯山	十一份	池端	算術平均
9/19/08	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
9/19/09	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.1
9/19/10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
9/19/11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0.1
9/19/12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0.1

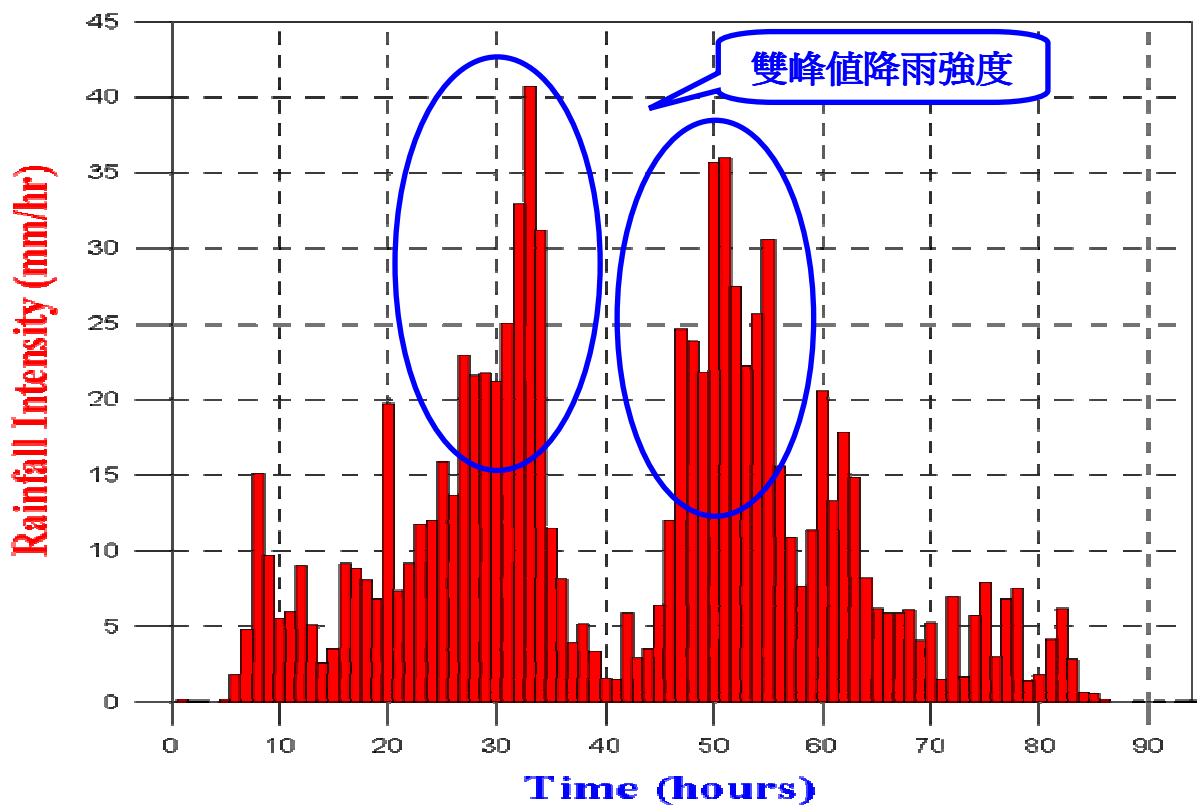
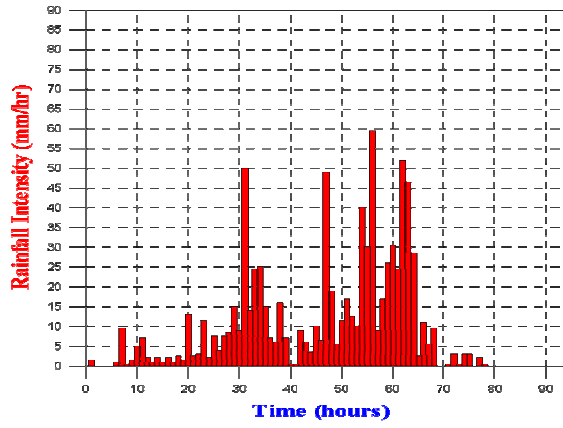


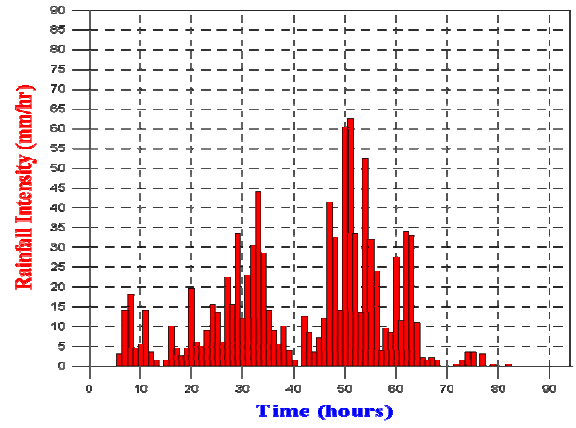
圖 5.13：納莉颱風平均降雨強度組體圖

同時，我們根據雨量資料表，依序繪出石門、長興、復興、霞雲、高義、三光、嘎拉賀、玉峰、秀巒、鞍部、鎮西堡、巴稜、白石、西丘斯山、十一份、池端共十六個雨量站的降雨強度組體圖(圖 5.14(a)~(p))，圖中橫軸代表時間，縱軸則代表降雨強度；其次，並繪出這十六個雨量站的算術平均降雨強度組體圖(圖 5.13)，且由此圖中可觀察到兩個明顯的降雨強度峰值，說明納莉颱風期間石門水庫之降雨特性為間歇式的降雨型態。

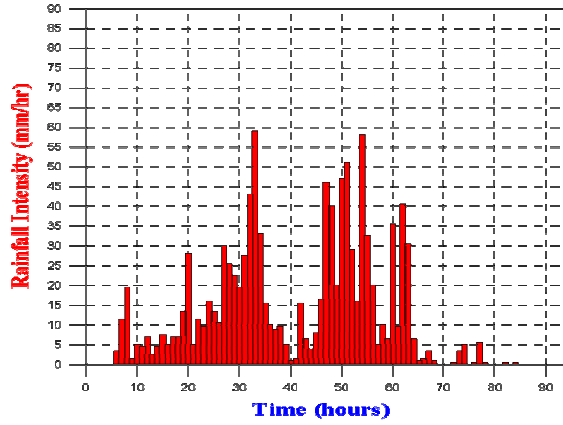
(a)石門



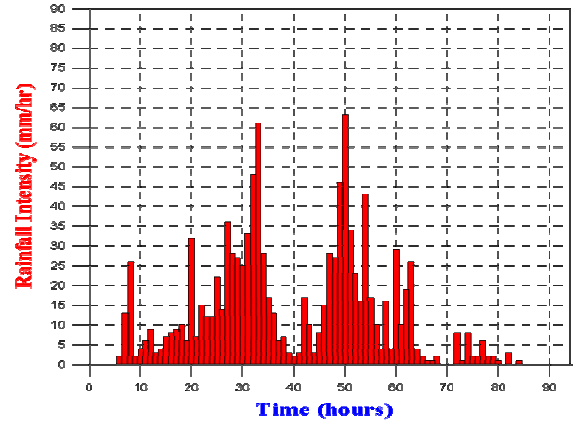
(b)長興



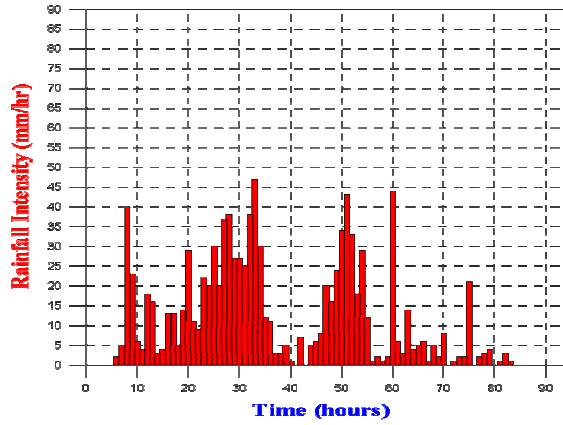
(c)復興



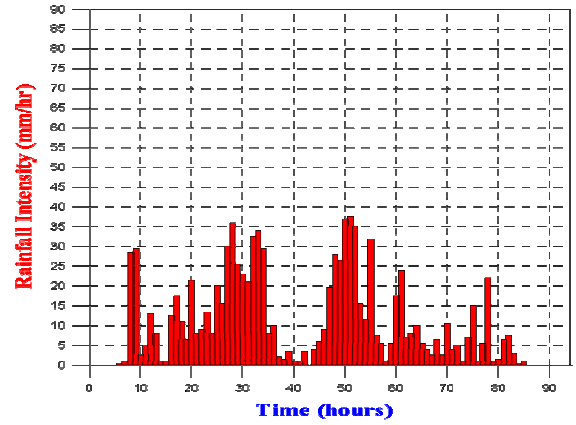
(d)霞雲



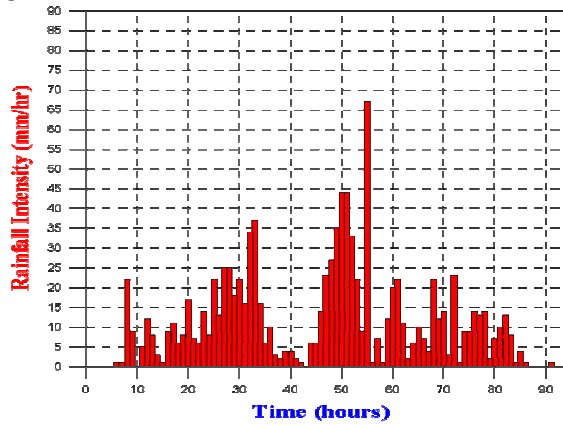
(e)高義



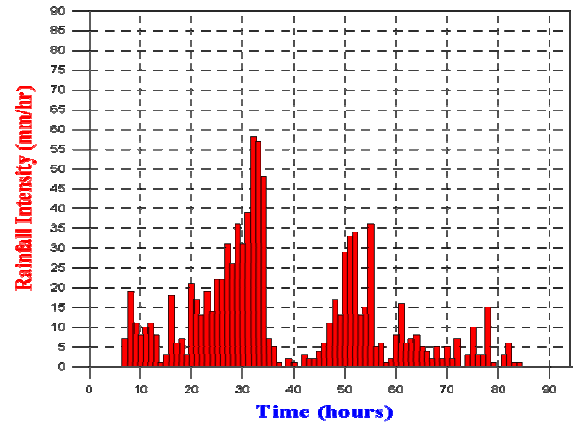
(f)三光



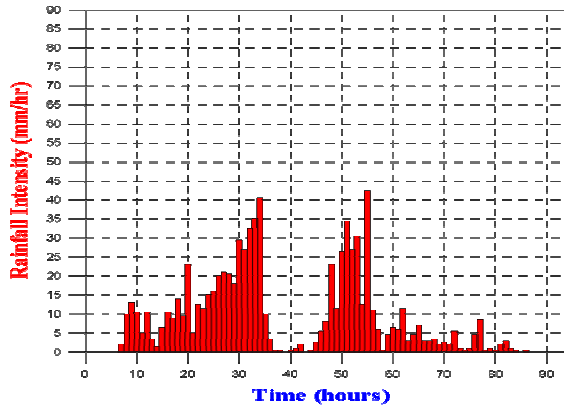
(g)嘎拉賀



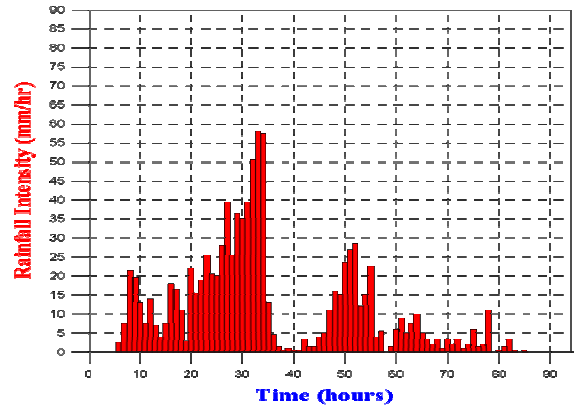
(h)玉峰



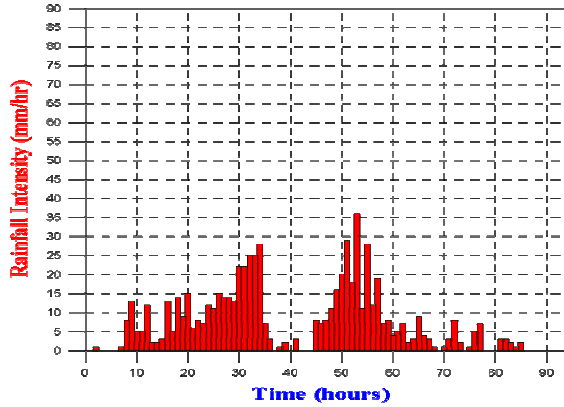
(i) 秀巒



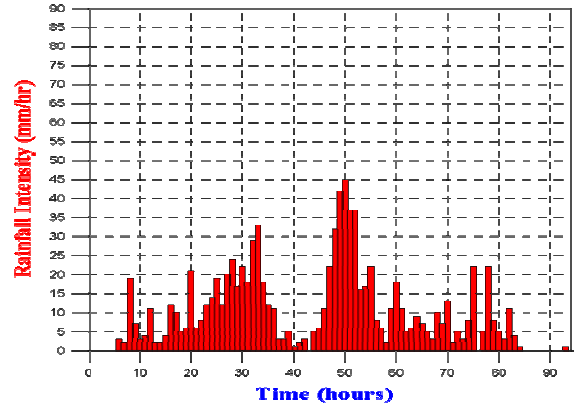
(j) 鞍部



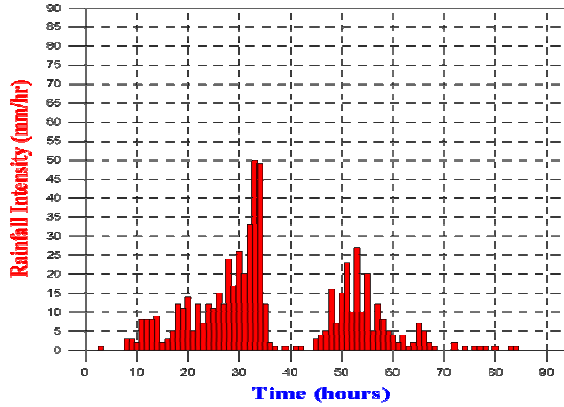
(k) 鎮西堡



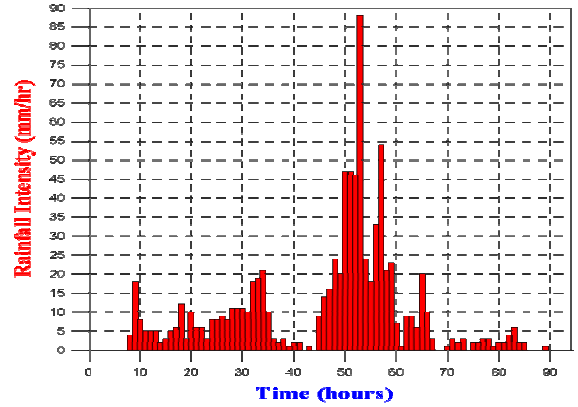
(l) 巴稜



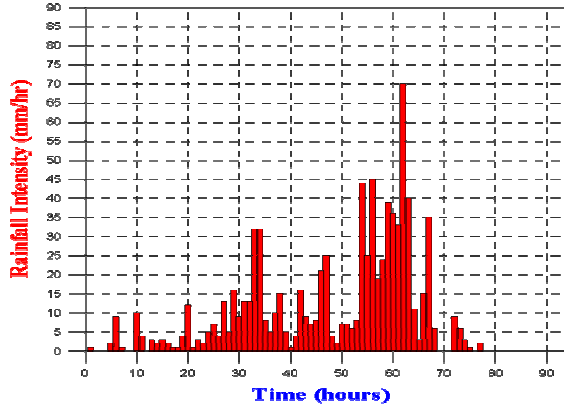
(m) 白石



(n) 西丘斯山



(o) 十一份



(p) 池端

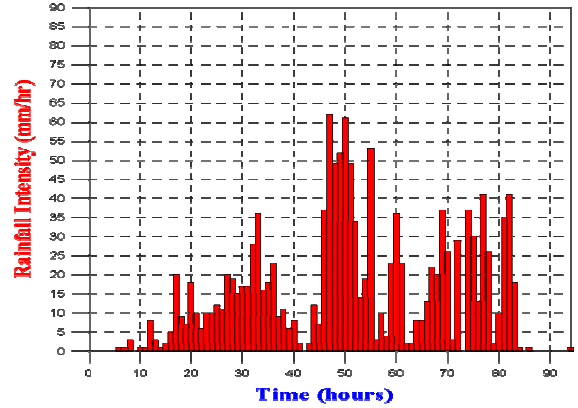


圖 5.14：納莉颱風各雨量站降雨強度組體圖

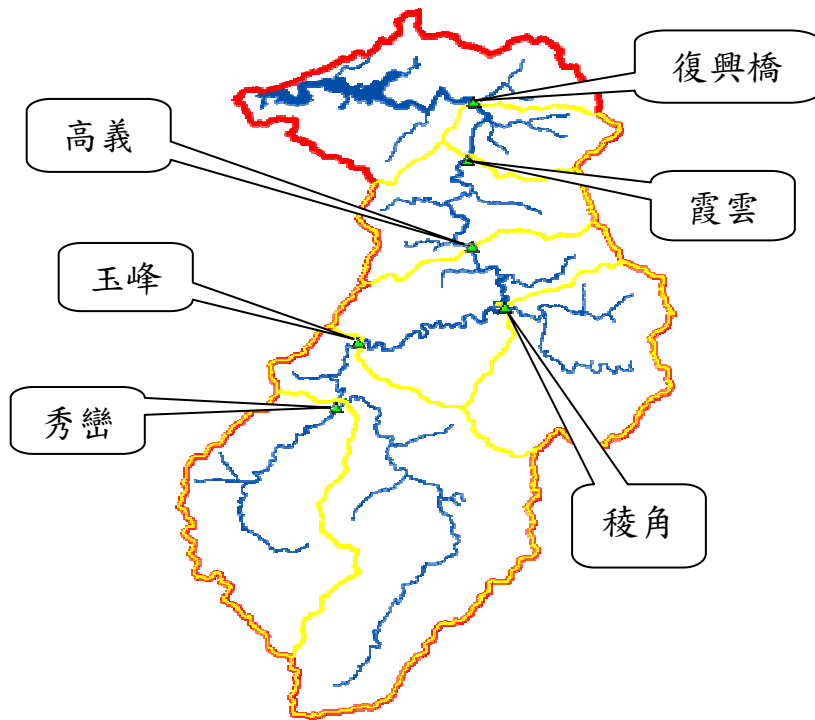


圖 5.15：石門水庫集水區流量站位置與子集水區分布圖

5-7 流量資料

為驗證模式可靠性及準確度，我們使用模擬區域內流量站之流量資料作為驗證與比較之依據，而我們所取得之流量資料係由經濟部北部水資源局提供，其原始格式為水位值之時間序列，所以需配合納莉颱風期間內的渠道率定曲線參數，將水深代入率定曲線公式轉換後方能得到流量形式的時間序列(表 5.4)。

其次，研究區域內共有六個流量站，由上游至下游依序為秀巒、玉峰、高義、稜角、霞雲、復興橋(入庫點)，其位置如圖 5.15 所示，圖中並依照流量站位置將集水區流域劃分為六個子集水區，可做為未來研究個別子集水區之模擬範圍。再者，由於納莉颱風的降雨型態為雙峰值降雨，因此，六個流量站皆觀測到程度不等的渠道雙洪峰流量(圖 5.16)，且根據圖 5.16 所示，下游流量站如復興橋和霞雲，其流量歷線皆比其他流量站高，此係由於下游流量為各個上游子集水區流量之總和；最後，我們也將洪峰流量與集流時間整理成表 5.5。

表 5.4：納莉颱風期間石門集水區各流量站時流量表(單位： m^3/sec)

Date (年/月/日/時)	復興橋	霞雲	高義	稜角	玉峰	秀巒
2001/9/15/15	36.9	33.1	20.2	4.6	11.2	6.0
2001/9/15/16	36.2	33.1	20.2	4.6	11.2	6.0
2001/9/15/17	18.0	32.3	20.2	4.6	11.2	5.9
2001/9/15/18	18.0	32.3	20.2	4.6	11.2	5.8
2001/9/15/19	18.0	32.3	20.2	4.6	11.2	5.8
2001/9/15/20	30.9	31.5	20.2	4.6	11.2	5.8
2001/9/15/21	69.4	32.3	20.2	4.8	11.2	5.8
2001/9/15/22	51.6	33.1	20.7	5.8	11.8	5.9
2001/9/15/23	74.7	33.1	24.3	5.9	13.6	6.2
2001/9/15/24	66.5	35.5	28.2	6.2	14.8	6.5
2001/9/16/01	71.8	37.2	32.4	6.4	16.9	7.0
2001/9/16/02	99.9	38.1	38.4	7.9	20.6	7.3
2001/9/16/03	78.2	43.5	47.9	7.9	23.8	7.7
2001/9/16/04	104.6	49.3	50.3	8.3	24.7	8.1
2001/9/16/05	80.6	52.4	54.4	8.8	25.6	8.7
2001/9/16/06	101.8	54.5	62.2	8.8	28.3	9.6
2001/9/16/07	98.7	90.4	67.7	9.6	31.1	14.6
2001/9/16/08	205.1	102.1	75.5	11.2	38.4	17.7
2001/9/16/09	189.0	160.9	98.2	16.3	46.5	22.2
2001/9/16/10	360.8	183.2	128.3	18.7	61.0	31.5
2001/9/16/11	441.3	230.4	164.3	21.6	91.2	40.5
2001/9/16/12	482.0	305.6	195.0	24.7	115.7	54.9
2001/9/16/13	605.7	346.3	247.5	25.5	154.9	59.8
2001/9/16/14	667.4	457.0	296.3	29.4	174.4	71.6
2001/9/16/15	772.3	549.6	340.6	31.6	184.6	77.4
2001/9/16/16	941.9	557.4	390.9	33.9	237.4	84.7
2001/9/16/17	972.5	691.1	455.8	39.4	297.6	32.5
2001/9/16/18	1391.8	861.1	552.9	53.1	365.2	43.7
2001/9/16/19	1642.3	943.5	714.7	61.8	514.5	55.4
2001/9/16/20	1718.7	1030.1	841.8	69.0	604.6	72.0
2001/9/16/21	1984.9	1439.8	997.0	71.0	735.3	85.4
2001/9/16/22	2391.9	1796.6	1212.7	85.3	986.9	37.9
2001/9/16/23	3140.4	2164.5	1498.6	115.3	1301.7	61.1
2001/9/16/24	3801.1	2617.9	1853.1	132.4	1943.4	399.6
2001/9/17/01	3700.3	3214.0	2077.1	101.0	2205.4	404.0
2001/9/17/02	3574.3	2497.7	2064.6	86.8	1664.7	284.7

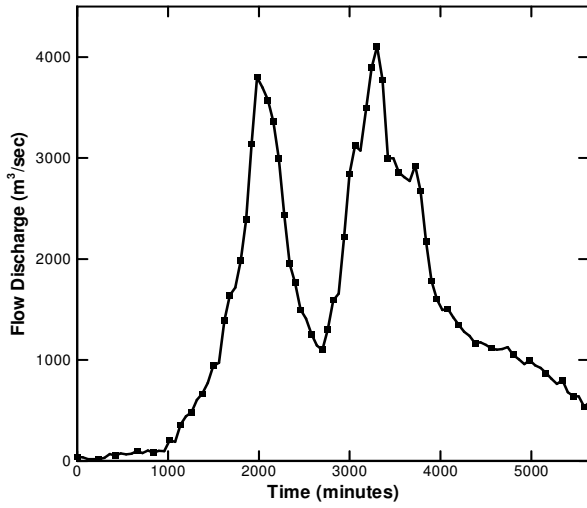
Date (年/月/日/時)	復興橋	霞雲	高義	稜角	玉峰	秀巒
2001/9/17/03	3361.5	2249.6	1692.9	78.7	1332.0	207.9
2001/9/17/04	2995.8	2056.6	1341.6	66.3	917.1	163.9
2001/9/17/05	2437.7	1865.5	1077.9	56.1	708.1	144.7
2001/9/17/06	1953.6	1309.4	923.6	52.6	575.3	128.4
2001/9/17/07	1763.3	1380.3	804.3	50.2	505.4	110.4
2001/9/17/08	1498.3	1240.7	673.8	46.3	453.1	103.8
2001/9/17/09	1411.5	1179.9	580.3	42.5	380.5	95.1
2001/9/17/10	1257.0	1156.1	517.4	41.4	335.8	90.7
2001/9/17/11	1145.3	1058.0	486.1	40.4	290.9	88.0
2001/9/17/12	1099.9	932.9	472.2	41.4	277.8	81.2
2001/9/17/13	1303.0	836.3	480.5	67.0	265.0	82.1
2001/9/17/14	1591.3	938.2	608.5	111.0	284.3	83.4
2001/9/17/15	1658.4	1234.5	707.8	141.9	354.1	88.6
2001/9/17/16	2218.5	1542.2	931.6	155.7	470.2	97.8
2001/9/17/17	2845.4	1373.7	1175.9	220.8	614.5	123.8
2001/9/17/18	3123.1	1904.5	1462.3	185.2	1264.4	163.9
2001/9/17/19	3075.2	2354.1	1737.8	136.1	1393.8	171.5
2001/9/17/20	3493.3	2857.9	1754.8	136.1	2195.4	120.8
2001/9/17/21	3894.0	3007.7	2230.0	180.8	1850.9	121.5
2001/9/17/22	4105.7	3288.1	2574.9	197.5	1805.6	97.6
2001/9/17/23	3775.1	2877.6	2114.8	161.8	1227.6	189.6
2001/9/17/24	2996.9	2371.8	1800.7	117.9	1656.1	195.6
2001/9/18/01	2996.9	1834.7	1847.1	108.4	1513.7	165.9
2001/9/18/02	2857.8	1912.3	1765.6	127.8	1227.6	147.2
2001/9/18/03	2811.1	1857.8	1669.3	141.9	1120.9	139.7
2001/9/18/04	2773.6	1563.2	1506.8	137.1	898.5	128.5
2001/9/18/05	2925.7	1514.5	1358.5	115.3	808.9	116.4
2001/9/18/06	2671.9	1433.1	1214.0	101.8	735.3	102.6
2001/9/18/07	2175.7	1253.0	1100.6	99.3	650.0	103.7
2001/9/18/08	1783.9	1109.3	1044.1	97.7	619.5	99.2
2001/9/18/09	1599.5	1024.5	985.1	96.9	624.6	98.5
2001/9/18/10	1494.8	1024.5	972.7	101.0	594.7	93.4
2001/9/18/11	1508.7	886.4	960.4	102.6	537.4	90.4
2001/9/18/12	1422.8	1002.5	940.0	110.1	501.0	86.7
2001/9/18/13	1349.7	959.4	920.0	105.9	465.9	84.1
2001/9/18/14	1279.9	841.2	868.9	101.8	440.5	83.3
2001/9/18/15	3361.5	2249.6	1692.9	78.7	1332.0	207.9

Date (年/月/日/時)	復興橋	霞雲	高義	稜角	玉峰	秀巒
2001/9/18/16	1166.9	759.4	842.1	100.2	411.9	74.7
2001/9/18/17	1174.5	773.5	830.7	101.0	396.0	75.2
2001/9/18/18	1149.6	783.0	823.2	104.3	372.8	76.3
2001/9/18/19	1114.9	759.4	812.0	114.4	365.2	71.6
2001/9/18/20	1102.8	792.5	804.6	124.1	369.0	71.0
2001/9/18/21	1108.3	802.1	786.2	109.3	357.8	68.0
2001/9/18/22	1127.8	773.5	757.3	99.3	335.8	68.7
2001/9/18/23	1053.2	691.1	729.0	101.8	314.7	64.6
2001/9/18/24	1005.9	656.2	674.1	111.0	297.6	59.7
2001/9/19/01	960.7	651.9	1039.8	115.3	290.9	62.2
2001/9/19/02	998.8	731.7	1027.0	110.1	284.3	58.9
2001/9/19/03	947.7	695.6	1018.6	104.3	277.8	58.1
2001/9/19/04	921.4	569.3	1005.9	101.0	271.4	57.2
2001/9/19/05	870.1	605.7	993.4	97.7	261.9	55.4
2001/9/19/06	814.3	557.4	980.9	94.6	258.7	55.5
2001/9/19/07	762.9	538.0	972.7	91.4	243.4	53.1
2001/9/19/08	799.5	489.2	964.5	87.6	237.4	52.9
2001/9/19/09	679.7	492.9	590.1	83.1	222.8	51.0
2001/9/19/10	641.4	500.3	571.6	80.2	220.0	49.2
2001/9/19/11	639.3	453.5	553.5	78.0	206.0	47.7
2001/9/19/12	538.2	450.0	541.5	75.9	197.8	48.5

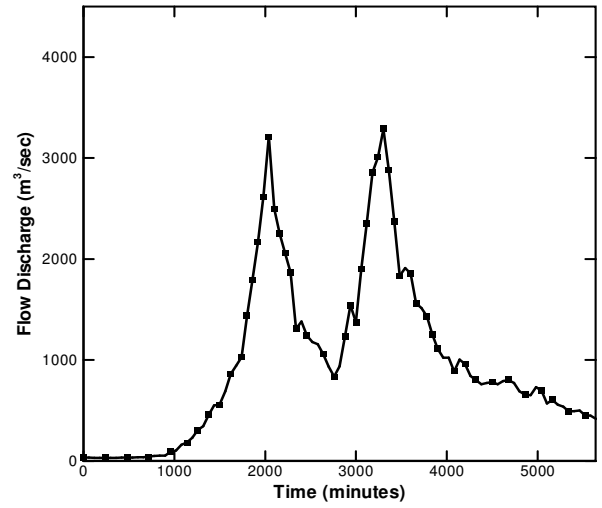
表 5.5：納莉颱風期間，石門水庫集水區各流量站之洪峰量與集流時間表

	復興橋	霞雲	高義	稜角	玉峰	秀巒
第一主洪峰量(m^3 / sec)	3801.1	3214.0	2077.1	132.4	2205.4	404.0
集流時間(hours)	33	34	34	33	34	34
第二主洪峰量(m^3 / sec)	4105.7	3288.1	2574.9	220.8	2195.3	195.6
集流時間(hours)	55	55	55	50	53	57

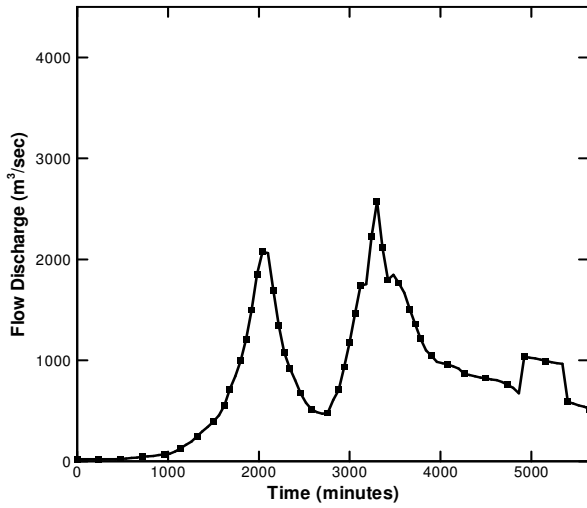
(a) 復興橋



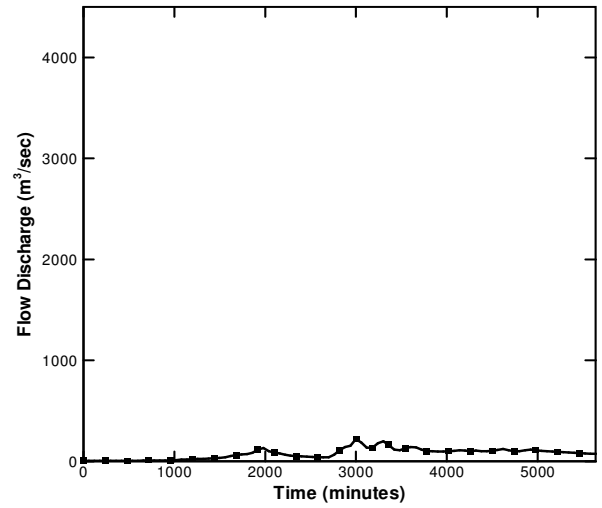
(b) 霞雲



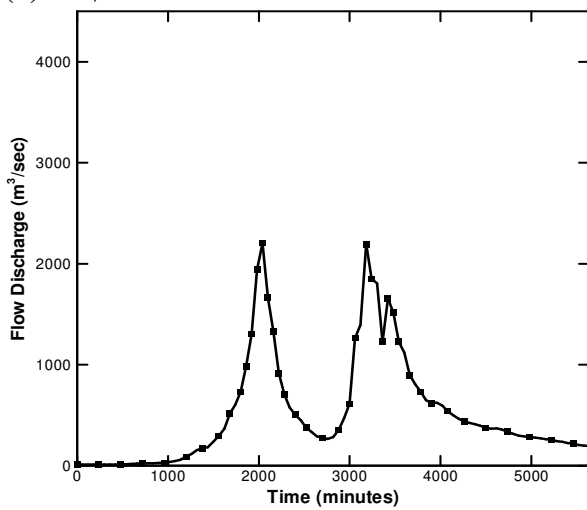
(c) 高義



(d) 稜角



(e) 玉峰



(f) 秀巒

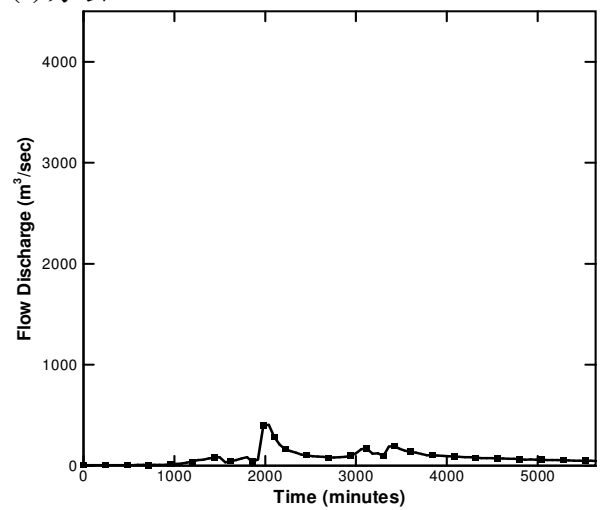


圖 5.16：石門水庫集水區各流量站流量歷線圖

第六章 模式驗證與模擬分析

此章內容主要係驗證模式之收斂性，並探討水文過程考慮與否和渠道粗糙度在極端降雨事件中對模擬結果所產生的影響；此外，模擬結果皆使用正規化(normalize)的均方根誤差(root mean square error, RMSE)公式如下：

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{t=1}^N \left[\frac{Q_{simul.} - Q_{observ.}}{Q_{observ.}} \right]^2}{N-1}}, \quad (6.1)$$

以估計六個流量站中觀測值與模擬值間的差異程度，其值愈小代表與觀測值愈接近，反之差距愈遠。其中， $Q_{simul.}$ 為模擬值、 $Q_{observ.}$ 觀測值、 N 為模擬結果的筆數。

6-1 模式驗證

本研究中所使用之數值方法為顯示差分法，其數值上的特性為絕對不穩定(unconditional unstable)，因此須注意模式中數值不穩定的問題，且由於漫地流之連續方程(式 3.10)和渠道流之連續方程(式 3.5)，其型式皆為波方程式(wave equation)，所以我們以 CFL condition (Courant et al., 1928)作為評估模式穩定性的依據之一，其一維表示式如下：

$$\frac{C \cdot \Delta t}{\Delta x} \leq 1, \quad (6.2)$$

其中， C 為波速、 Δt 為計算時距、 Δx 為數值網格之長度、不等號左邊項則稱為可蘭數(Courant number)，渠道流之可蘭數即以式(6.2)計算而得。其次，CFL condition 二維表示式如下：

$$\frac{C_x \cdot \Delta t}{\Delta x} + \frac{C_y \cdot \Delta t}{\Delta y} \leq 1, \quad (6.3)$$

其中， C_x 為 x 方向波速、 C_y 為 y 方向波速、 Δx 為數值網格 x 方向長度、 Δy

表 6.1：不同計算時距與空間解析度下，漫地流和渠道流之可蘭數

120 公尺解析度			200 公尺解析度			400 公尺解析度		
Δt (sec)	漫地流	渠道流	Δt (sec)	漫地流	渠道流	Δt (sec)	漫地流	渠道流
0.1	0~0.003	0~0.009	1	0~0.016	0~0.054	1	0~0.007	0~0.059
0.25	0~0.008	0~0.023	2	0~0.031	0~0.108	5	0~0.033	0~0.147
0.5	0~0.016	0~0.045	3	0~0.047	0~0.162	10	0~0.066	0~0.294
1	0~0.035	0~0.105	4	0~0.062	0~0.233	15	0~0.099	0~0.446

為數值網格 y 方向長度、 Δt 為計算時距、不等號左邊為可蘭數，漫地流之可蘭數即以式(6.3)計算而得。

所以，我們將 120 公尺解析度資料(計算時距分別為 0.1 秒、0.25 秒、0.5 秒、1 秒)、200 公尺解析度資料(計算時距分別為 1 秒、2 秒、3 秒、4 秒)和 400 公尺解析度資料(計算時距分別為 1 秒、5 秒、10 秒、15 秒)輸入模式中模擬，以計算在不同大小數值網格和計算時距下，漫地流和渠道流的可蘭數範圍(表 6.1)；此外，我們亦繪出不同大小數值網格和計算時距下，六個流量站模擬值與觀測值的流量歷線圖(圖 6.1~6.4)，並計算模擬值之均方根誤差(表 6.2)。

6-1-1 模式驗證結果

由表(6.1)可知，無論輸入資料解析度為 120 公尺、200 公尺或 400 公尺，只要在適當的計算時距下，漫地流與渠道流之可蘭數皆能滿足 CFL condition。再者，根據均方根誤差表(表 6.2)顯示，在相同解析度不同計算時距下，均方根誤差值皆相當接近，表示模擬值之間的差異性相當小。

同時，由流量歷線圖(圖 6.1~6.3)可觀察出，120 公尺解析度資料在四種計算時距(0.1 秒、0.25 秒、0.5 秒、1 秒)下所得之流量歷線重合度相當高；其次，200 公尺解析度資料在四種計算時距(1 秒、2 秒、3 秒、4 秒)下，當計算時距為 4 秒時，流量歷線於流量站高義出現了不穩定振盪的情況；另

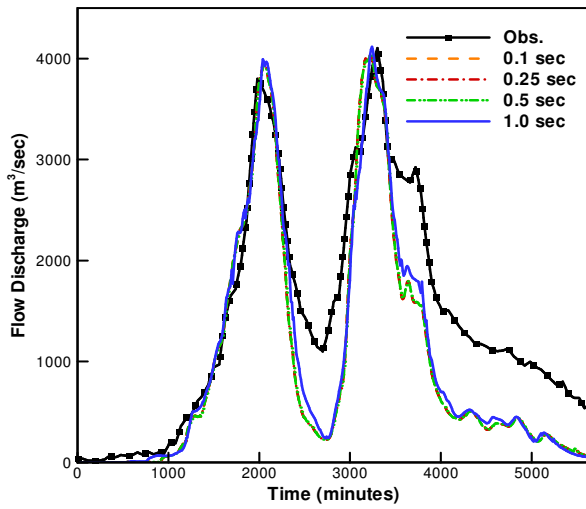
表 6.2：不同計算時距與資料空間解析度下，流量模擬值之均方根誤差

流量站	120 公尺解析度		200 公尺解析度		400 公尺解析度	
	Δt (sec)	RMSE	Δt (sec)	RMSE	Δt (sec)	RMSE
復興橋	0.1	0.63	1	0.59	1	0.55
	0.25	0.63	2	0.59	5	0.55
	0.5	0.63	3	0.59	10	0.55
	1	0.63	4	0.59	15	0.55
霞雲	0.1	0.58	1	0.56	1	0.52
	0.25	0.58	2	0.56	5	0.52
	0.5	0.58	3	0.56	10	0.52
	1	0.58	4	0.56	15	0.52
高義	0.1	0.69	1	0.70	1	0.63
	0.25	0.69	2	0.70	5	0.63
	0.5	0.69	3	0.70	10	0.63
	1	0.68	4	1.03	15	0.62
稜角	0.1	2.34	1	2.68	1	2.73
	0.25	2.34	2	2.68	5	2.73
	0.5	2.34	3	2.68	10	2.73
	1	2.34	4	2.68	15	2.73
玉峰	0.1	0.74	1	0.80	1	0.77
	0.25	0.74	2	0.81	5	0.77
	0.5	0.74	3	0.78	10	0.77
	1	0.74	4	0.85	15	0.75
秀巒	0.1	2.29	1	2.53	1	2.48
	0.25	2.29	2	2.53	5	2.48
	0.5	2.29	3	2.53	10	2.63
	1	2.29	4	2.53	15	3.44

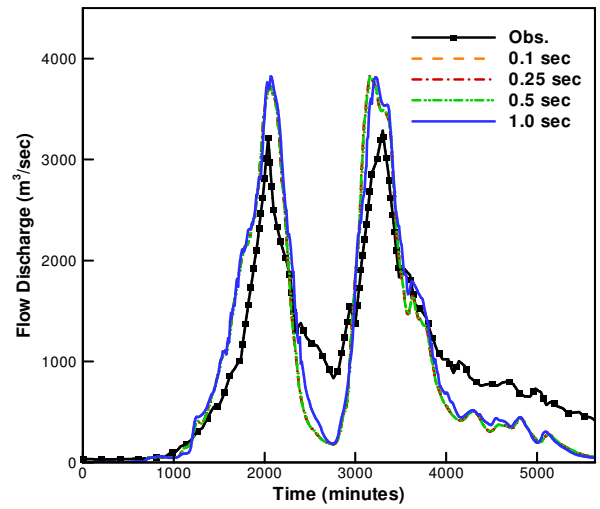
外，400 公尺解析度資料在四種計算時距(1 秒、5 秒、10 秒、15 秒)下，當計算時距為 10 秒與 15 秒時，流量歷線於流量站秀巒也出現了不穩定振盪的情況

此外，由流量歷線圖(圖 6.4)也可觀查出，120 公尺和 200 公尺解析度之流量歷線重疊性較高，400 公尺解析度則差異較大且洪峰值較低，在洪峰集流時間部分三者差距在兩小時以內。最後，我們發現前述之流量歷線模擬值波谷處皆遠低於觀測值，且在退水段較觀測值退水更快。

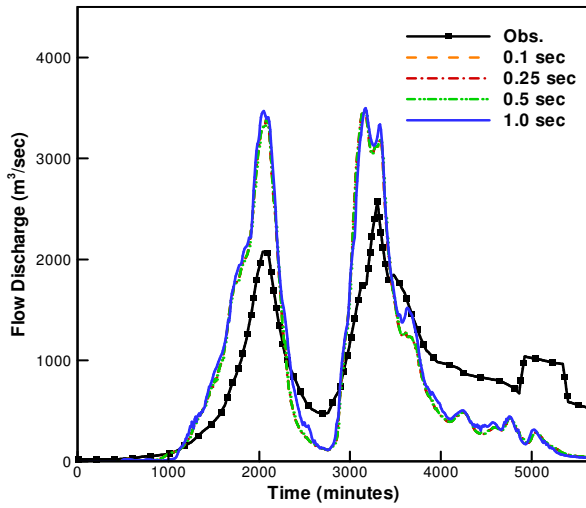
(a) 復興橋



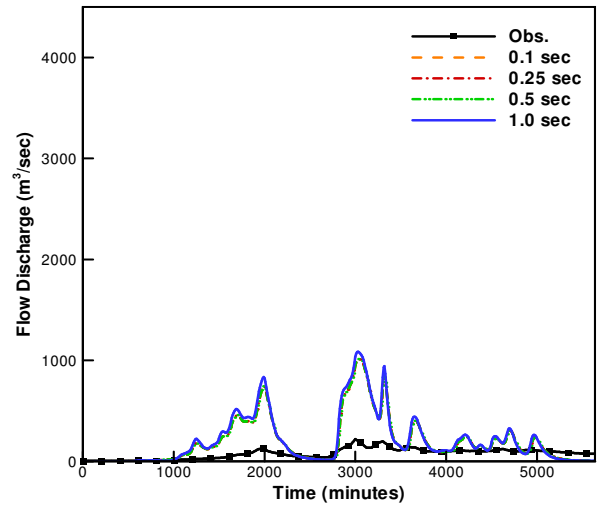
(b) 霞雲



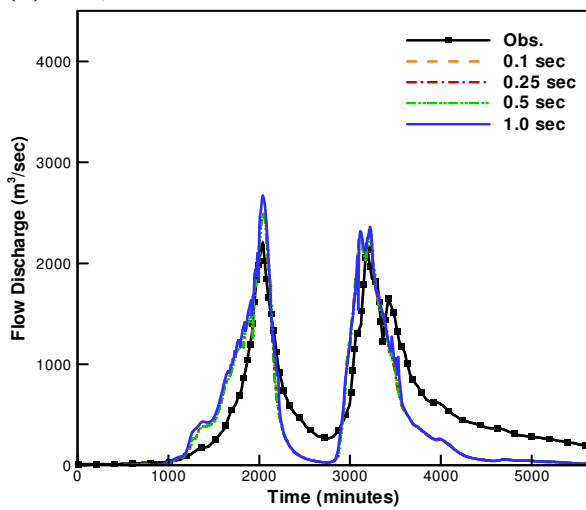
(c) 高義



(d) 稜角



(e) 玉峰



(f) 秀鑾

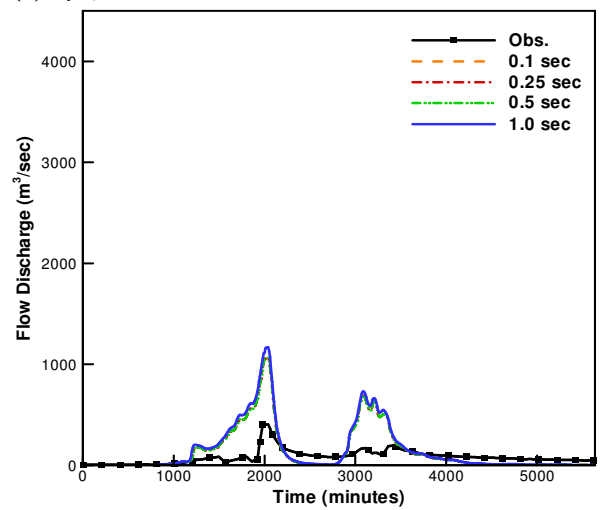
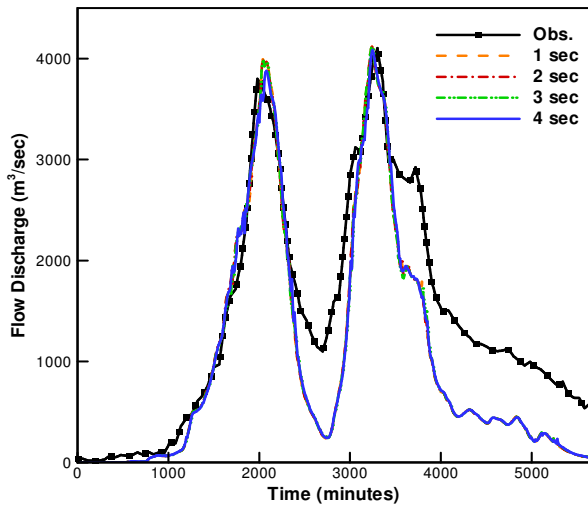
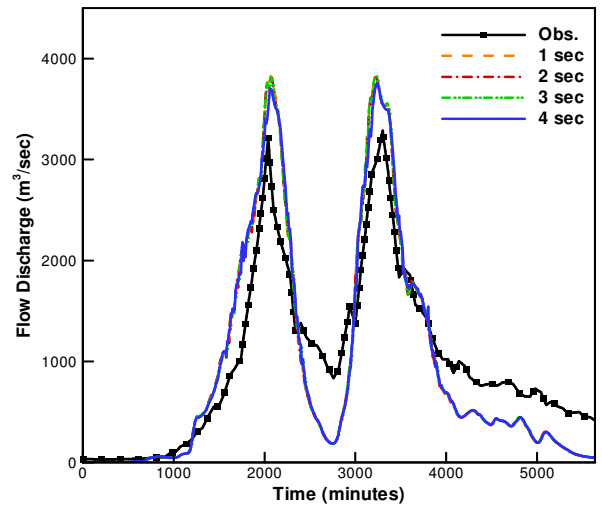


圖 6.1：120 公尺解析度，不同計算時距之模擬值與觀測值流量歷線比較圖

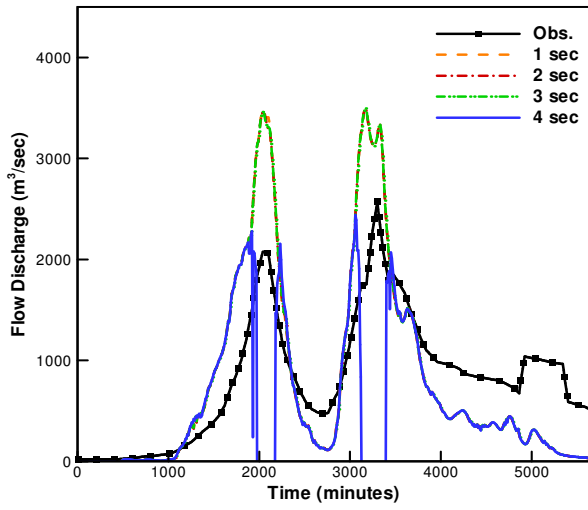
(a) 復興橋



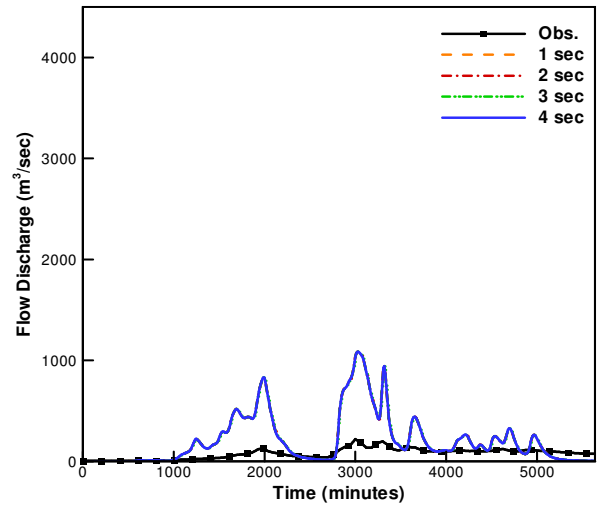
(b) 霞雲



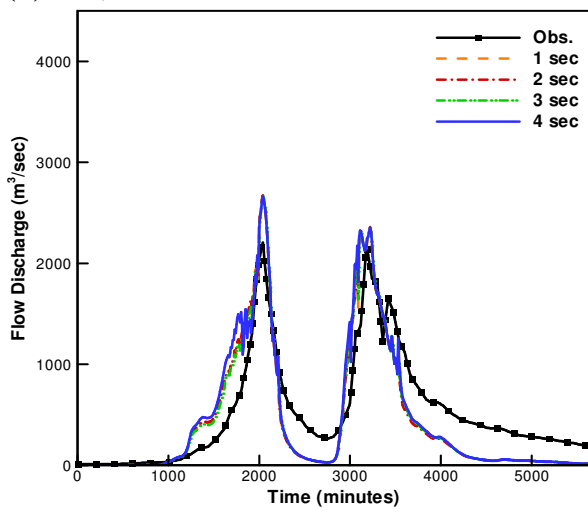
(c) 高義



(d) 稜角



(e) 玉峰



(f) 秀鑾

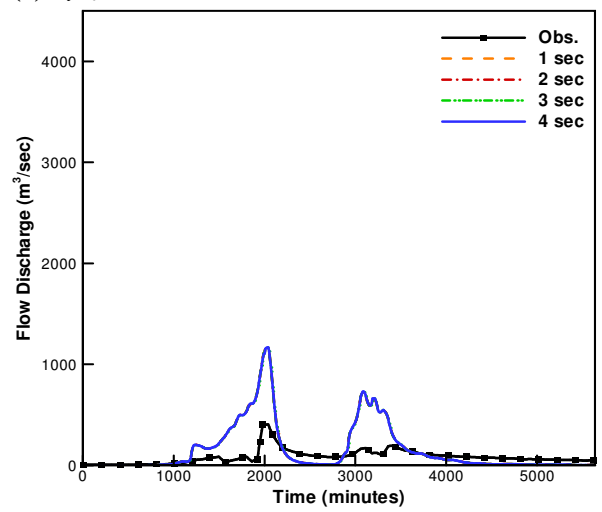
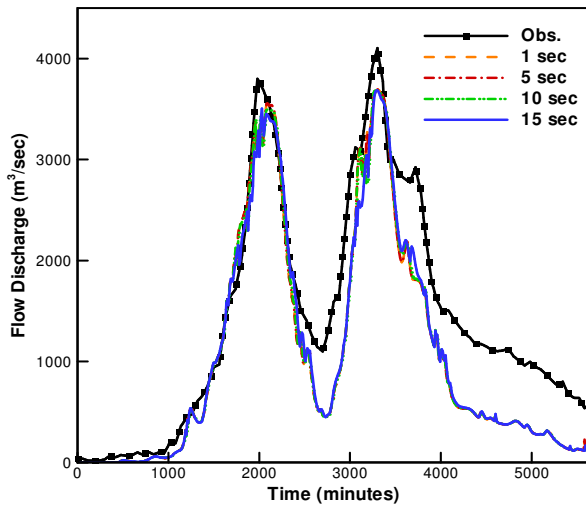
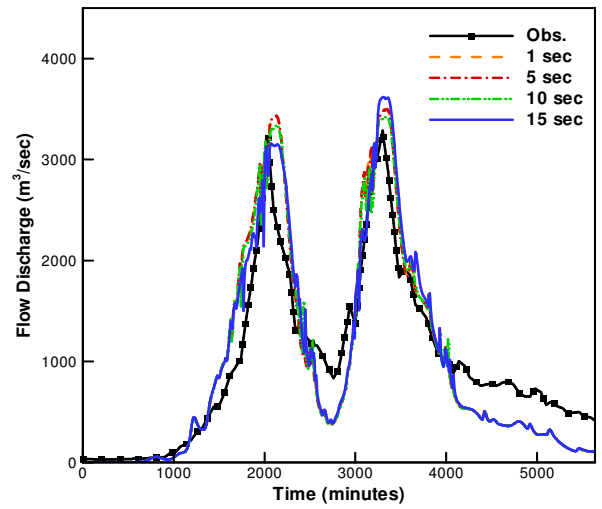


圖 6.2：200 公尺解析度，不同計算時距之模擬值與觀測值流量歷線比較圖

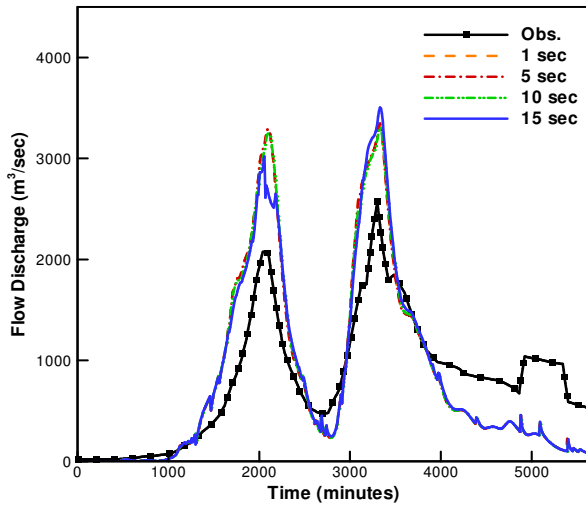
(a) 復興橋



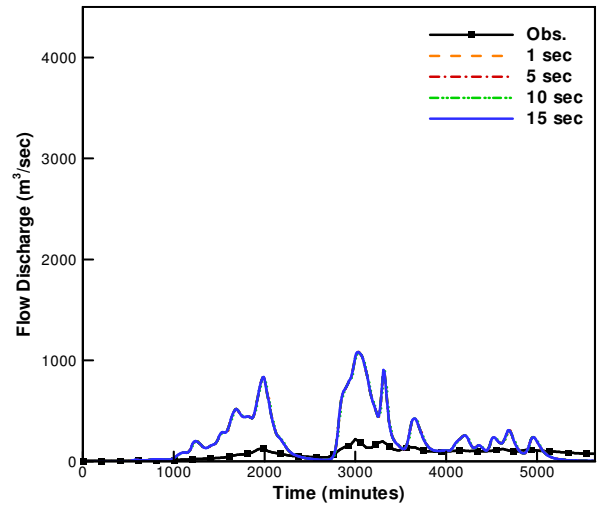
(b) 霞雲



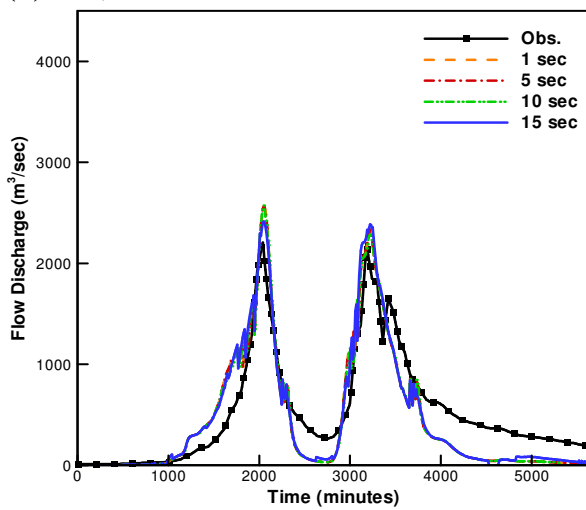
(c) 高義



(d) 稜角



(e) 玉峰



(f) 秀鑾

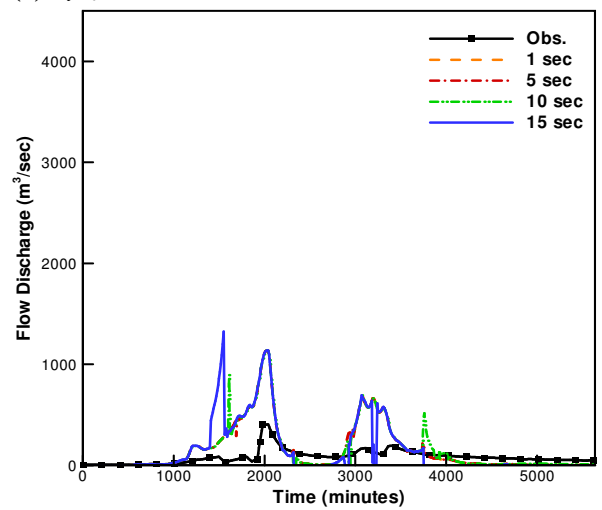
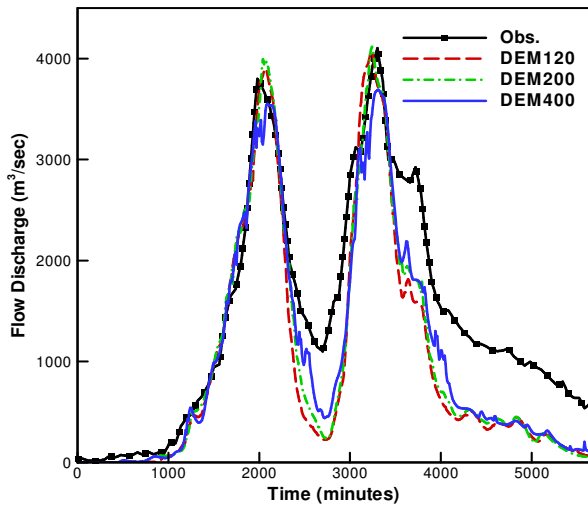
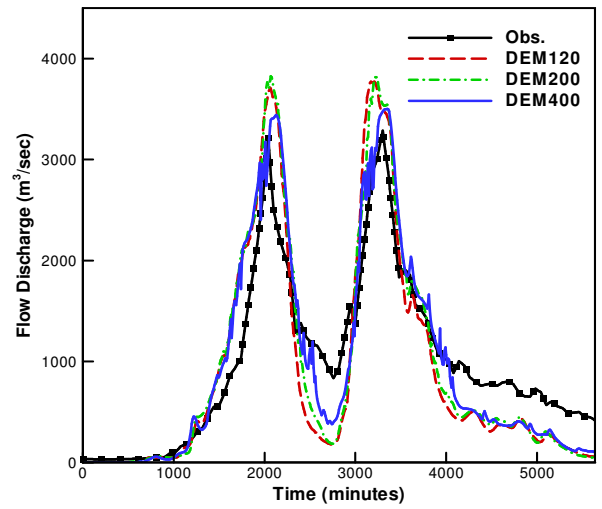


圖 6.3：400 公尺解析度，不同計算時距之模擬值與觀測值流量歷線比較圖

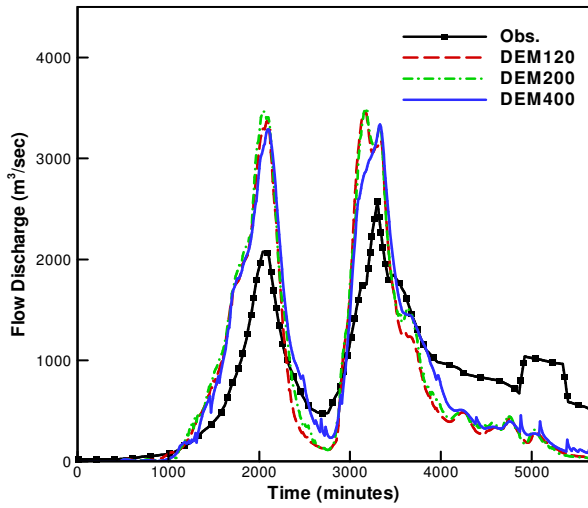
(a) 復興橋



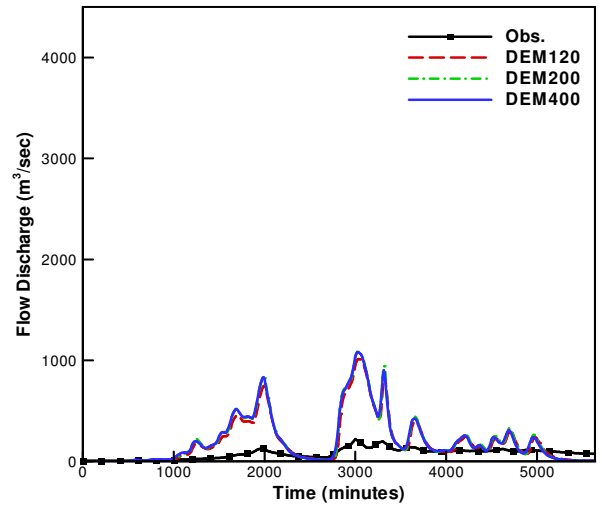
(b) 霞雲



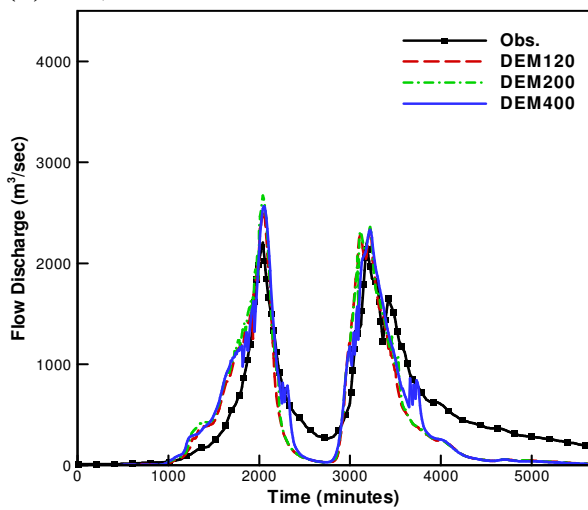
(c) 高義



(d) 稜角



(e) 玉峰



(f) 秀鑾

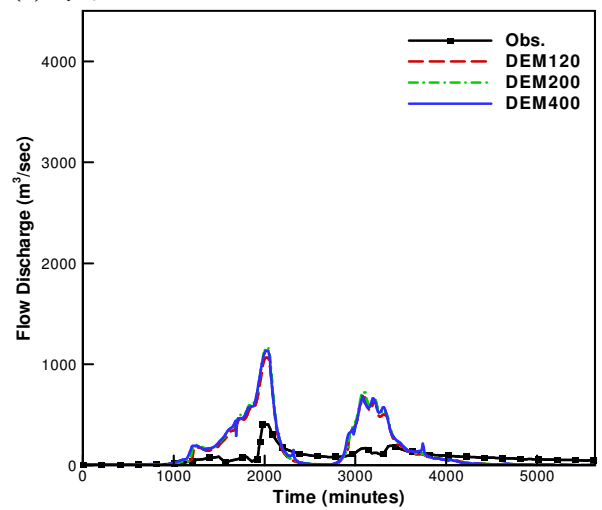


圖 6.4：120、200 和 400 公尺空間解析度資料，模擬值與觀測值之流量歷線比較圖

表 6.3：截留與入滲過程考慮與否，其流量模擬值之均方根誤差

流量站名	考慮截留與入滲過程	忽略截留過程	忽略入滲過程
復興橋	0.63	0.62	1.69
霞雲	0.58	0.57	3.02
高義	0.68	0.68	3.18
稜角	2.34	2.36	6.49
玉峰	0.74	0.75	4.88
秀巒	2.29	2.30	6.96

6-2 水文過程考慮與否

為了解截留和入滲兩種水文過程對模擬結果的影響程度，此節我們將探討有無考慮截留與入滲過程其模擬結果之間的差異性；其次，為有較精確的空間描述以及計算效率，我們係採用 120 公尺空間解析度配合計算時距一秒做為模擬的先決條件，且由表 6.4 知道本模式保持質量守恆。

6-2-1 截留與否之模擬結果

截留過程部份，由流量歷線圖(圖 6.5)可觀察出有無考慮截留過程之模擬結果，除了在降雨初期之流量上升段有些微差異外，整體而言，截留過程對於流量歷線之影響甚小，且發現流量歷線之波谷值遠低於觀測值的情況；此外，由均方根誤差(表 6.3)也可清楚發現，不同流量站中，有無截留過程之模擬結果間的均方根誤差差異皆在 0.1 以下，差異性不明顯。

其次，截留過程在考慮入滲過程情況下，所攔截之水量僅佔總水體積的 0.3%(表 6.4(a))，所佔比例相當低；同時，在忽略截留過程下(表 6.4(b))，也僅使得入滲體積較原來多了 0.1%，渠道出流體積較原來多了 0.2%，而漫地流和渠道流之水體積所佔比例則毫無改變。

6-2-2 入滲與否之模擬結果

接著，我們繼續比較有無考慮入滲過程之模擬結果，由流量歷線圖(圖

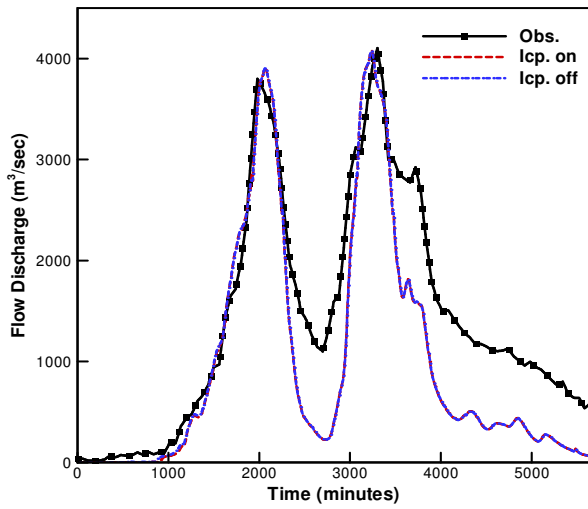
表 6.4：考慮截留或入滲過程與否之集水區水文過程水體分布表

(a) 考慮截留與入滲過程	水體分布	水文過程	水體體積 (m ³)	佔總水體百分比 (%)	質量守恆百分比(%) = $\left[\frac{(\text{儲蓄量} + \text{輸出量})}{\text{輸入量}} \right] \times 100$
	輸入量	降雨	573,434,853	100	100
	儲蓄量	截留	1,803,140	0.3	
		入滲	193,010,185	33.7	
		漫地流	37,995,378	6.6	
		渠道流	6,930,153	1.2	
	輸出量	渠道流出	333,696,060	58.2	
(b) 無截留過程	輸入量	降雨	573,434,853	100	100
	儲蓄量	截留	0	0	
		入滲	193,658,990	33.8	
		漫地流	38,064,201	6.6	
		渠道流	6,931,244	1.2	
輸出量	渠道流出	334,780,481	58.4		
(c) 無入滲過程	輸入量	降雨	573,434,853	100	100
	儲蓄量	截留	1,803,140	0.3	
		入滲	0	0	
		漫地流	47,632,474	8.3	
		渠道流	9,215,983	1.6	
輸出量	渠道流出	514,783,415	89.8		

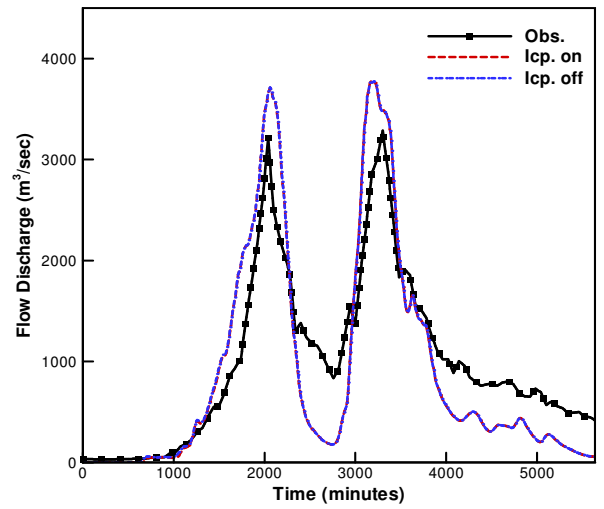
6.6)可觀察到忽略入滲過程所得之流量歷線，較有入滲過程之流量歷線高得多，於渠道下游的洪峰值甚至可差距到 750 (m³/sec)左右，而且也發現流量歷線之波谷值遠低於觀測值的情況；另外，有無入滲的均方根誤差，其之間差距亦介於 1 至 4 之間，顯示二者差異性大。

再者，入滲過程在考慮截留過程情況下，所儲蓄之水量約佔總水體積 33.7%(表 6.4(a))，比例相當高；此外，在忽略入滲過程下(表 6.4(c))，則是使漫地流水體積增加 1.7%，渠道流水體積則增加 0.4%，而渠道出流體積則增加了 31.6%，顯示在無入滲過程情況下，大部分水體皆匯集至渠道中，使其出流量大幅上升。

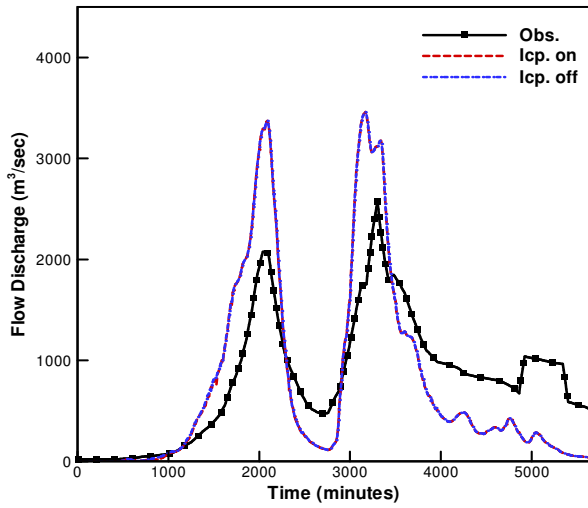
(a) 復興橋



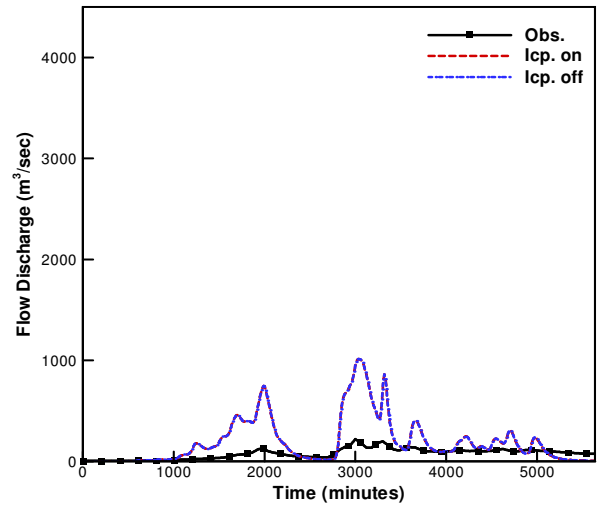
(b) 霞雲



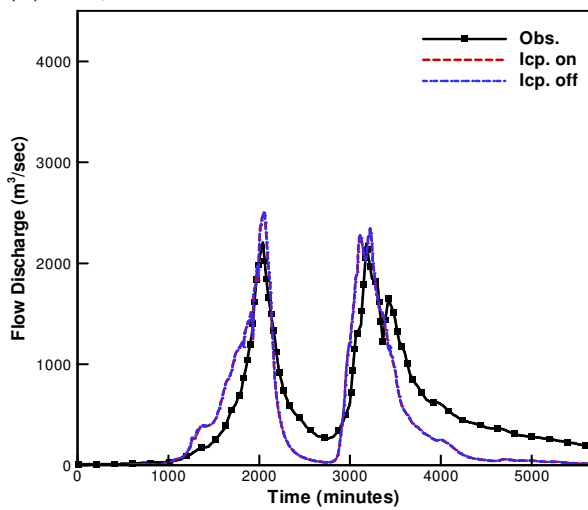
(c) 高義



(d) 稜角



(e) 玉峰



(f) 秀鑾

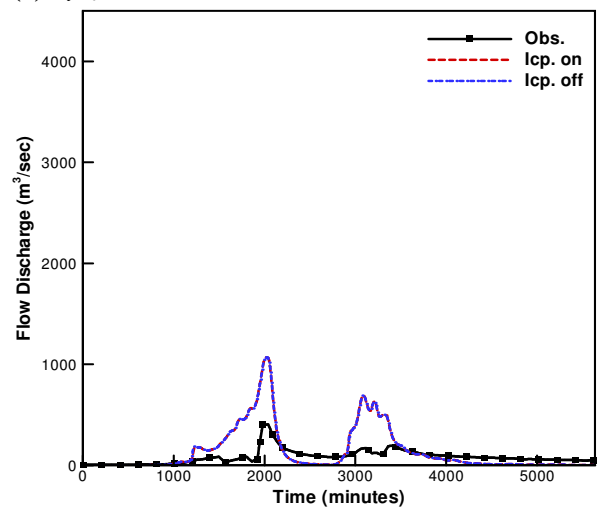
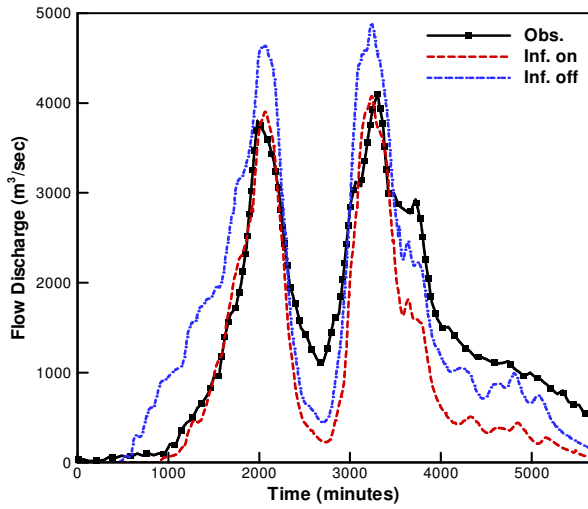
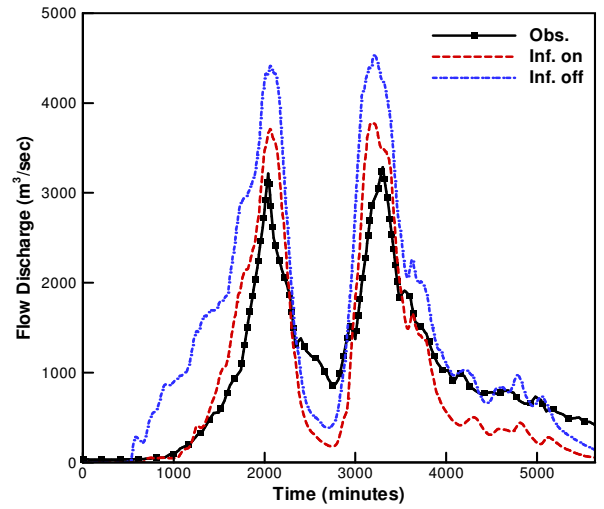


圖 6.5：截留過程考慮與否，其模擬值與觀測值之流量歷線比較圖

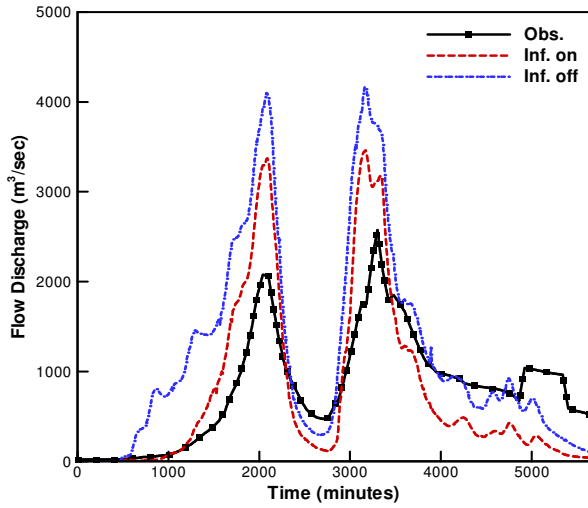
(a) 復興橋



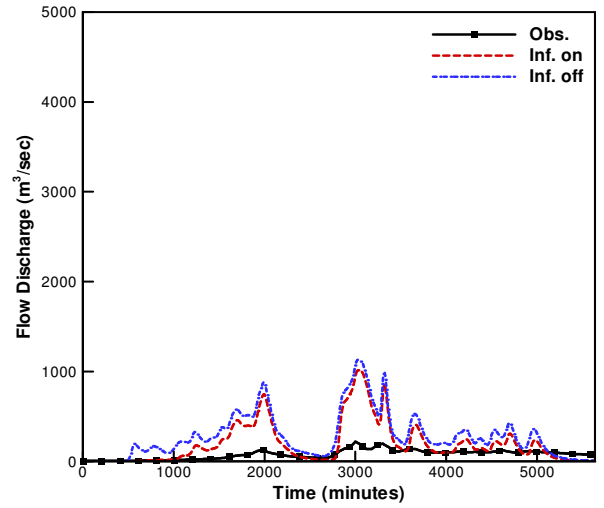
(b) 霞雲



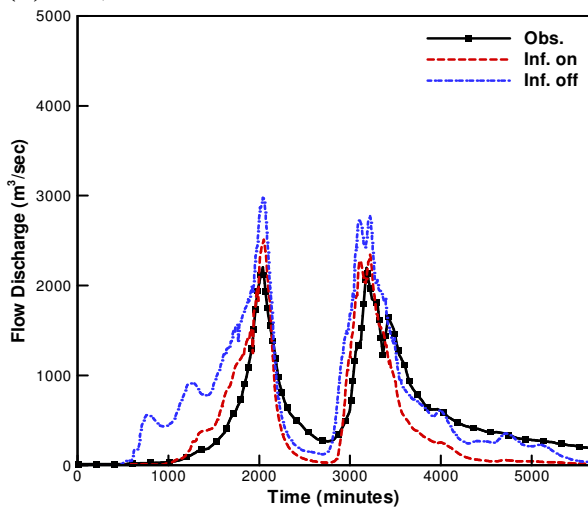
(c) 高義



(d) 稜角



(e) 玉峰



(f) 秀鑾

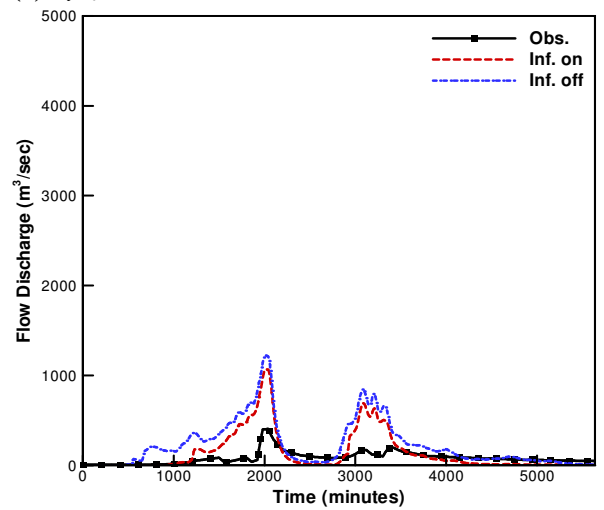


圖 6.6：入滲過程考慮與否，其模擬值與觀測值之流量歷線比較圖

表 6.5：渠道曼寧粗糙係數表(王如意, 1988)

渠道條件		數值	
渠道材料	土質	n_0	0.020
	岩石		0.025
	細卵石		0.024
	粗卵石		0.028
不規則程度	平滑	n_1	0.000
	微		0.005
	普通		0.010
	極不規則		0.020
斷面變化	無	n_2	0.000
	偶有變化		0.005
	經常變化		0.010~0.015
障礙作用	可忽略	n_3	0.000
	微		0.010~0.015
	顯著		0.020~0.030
	極劇烈		0.040~0.060
植物	低短	n_4	0.005~0.010
	普通		0.010~0.025
	高大		0.025~0.050
	極高大		0.050~0.100
蜿蜒程度	微	m_5	1.000
	顯著		1.150
	極劇烈		1.300

6-3 渠道粗糙係數分析

由於本研究目的之一為模擬洪水波在渠道中之傳遞，因此我們欲探討渠道特性與參數對洪水波之影響。然而，在石門水庫集水區中，河川多為無人為整治的天然渠道，其渠道型態與構造多變，造成渠道參數決定不易，例如：渠道寬度、深度和粗糙度…等渠道主要參數，而資料空間解析度我們係選用 120 公尺，計算時距設定為一秒。

其中，渠道寬度和深度可由第五章所述之方法，由 DEM 資料估算而得，但渠道粗糙度則因天然河川易受到沖刷侵蝕作用，使得河床構造多變，

表 6.6：不同渠道曼寧粗糙係數下，流量模擬值之均方根誤差

流量站名	n=0.05	n=0.1	n=0.15	n=0.2
復興橋	0.65	0.63	0.62	0.61
霞雲	0.68	0.58	0.54	0.54
高義	0.82	0.68	0.62	0.60
稜角	2.51	2.34	2.24	2.17
玉峰	0.87	0.74	0.68	0.65
秀巒	2.44	2.29	2.20	2.12

加上實際野地調查資料取得困難，所以本節欲探討人為所設定之渠道曼寧粗糙係數，對於洪水波模擬之影響。首先，我們參考曼寧粗糙係數估算公式(王如意, 1988)如下：

$$n = (n_0 + n_1 + n_2 + n_3 + n_4) \cdot m_5, \quad (6.4)$$

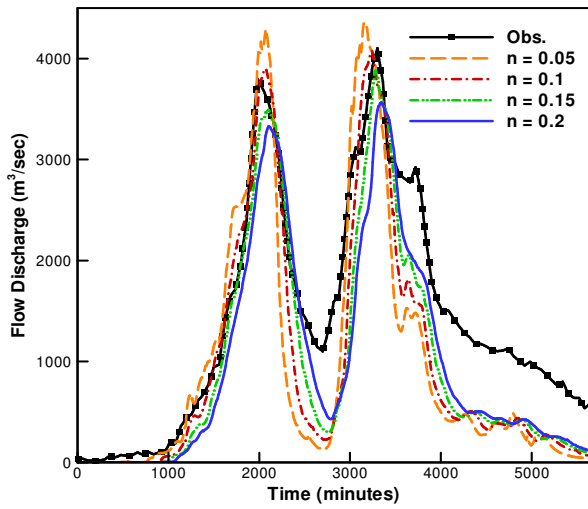
其中， n 為曼寧粗糙係數、 n_0 為渠道材料參數、 n_1 為不規則程度參數、 n_2 為斷面變化參數、 n_3 為障礙作用參數、 n_4 為植物參數、 m_5 為蜿蜒程度參數。

然後，配合渠道曼寧粗糙係數表 6.5 可知其最大值為 0.2899 ($n_0=0.028$ 、 $n_1=0.02$ 、 $n_2=0.015$ 、 $n_3=0.06$ 、 $n_4=0.1$ 、 $m_5=1.3$)，最小值為 0.025 ($n_0=0.02$ 、 $n_1=0$ 、 $n_2=0$ 、 $n_3=0$ 、 $n_4=0.005$ 、 $m_5=1$)，所以渠道曼寧粗糙係數之應落在 0.025~0.2899 的合理範圍內；因此，我們設定四組渠道曼寧粗糙係數(0.05、0.1、0.15、0.2)做為每個渠道單元的輸入條件進行模擬。

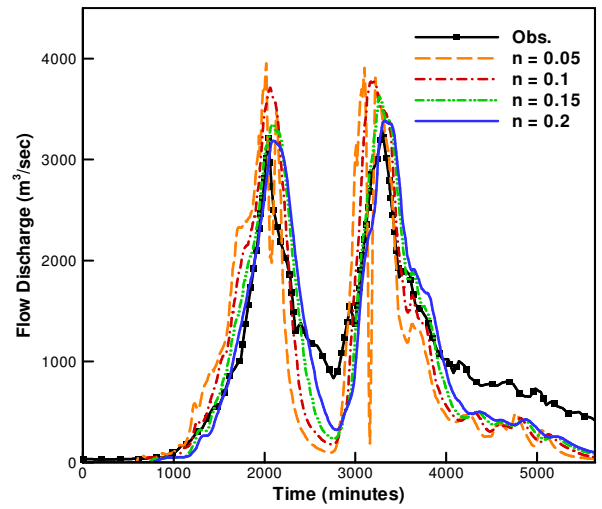
6-3-1 渠道粗糙係數分析結果

由流量歷線圖(圖 6.7)可觀察到，當渠道曼寧粗糙係數愈大時，洪水歷線洪峰值愈小且集流時間愈晚；反之，係數愈大歷線洪峰值愈大且集流時間愈早。此外，當曼寧粗糙係數等於 0.05 時，流量站霞雲的流量歷線出現震盪情況，此係由於上游流量過大所導致的下游水量回流；此外渠道曼寧粗糙係數介於 0.1 和 0.2 之間時有較小且接近的均方根誤差(表 6.6)。

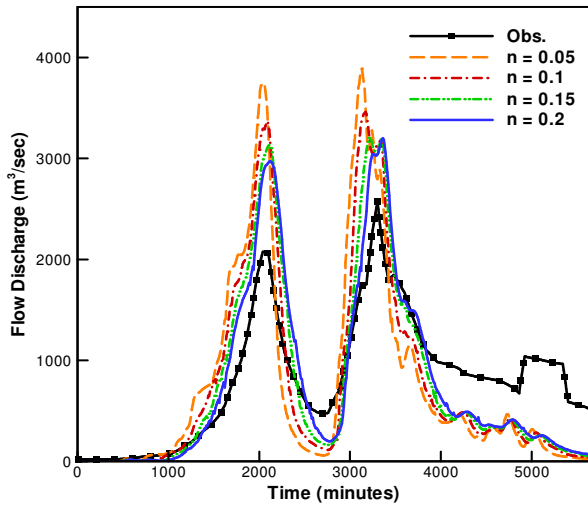
(a) 復興橋



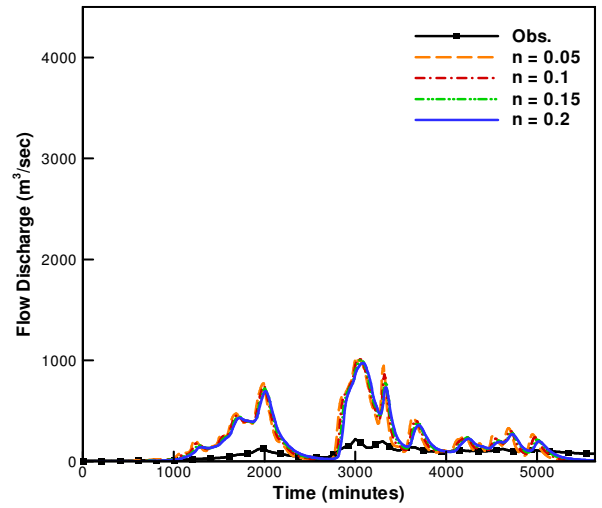
(b) 霞雲



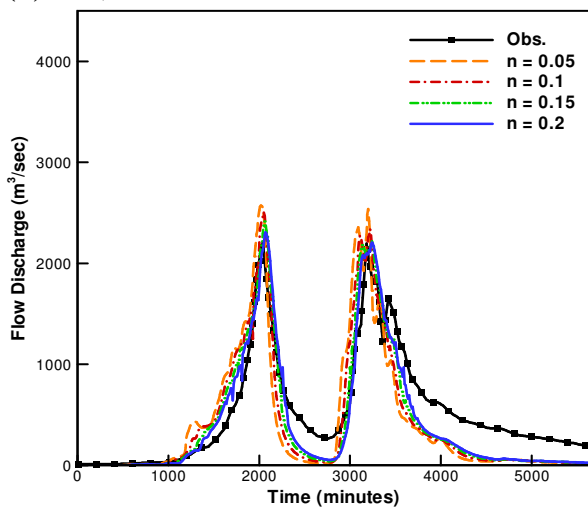
(c) 高義



(d) 稜角



(e) 玉峰



(f) 秀鑾

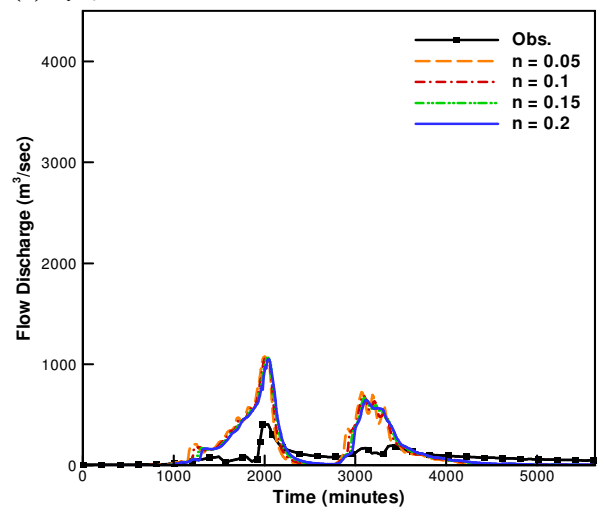


圖 6.7：不同渠道曼寧粗糙係數之流量歷線比較圖

第七章 結論與建議

7-1 結果討論

首先在模式驗證部份，由可蘭數(Courant number)和渠道流量模擬值之均方根誤差可以知道，在不同空間解析度和計算時距驗證下，本模式係具有收斂(convergence)性的；但計算時距愈大時，流量歷線愈容易出現不穩定的震盪情況，因此模擬前使用者須針對需求來設定最合適的空間解析度資料和計算時距，方能有效率地模擬集水區於暴雨期間之渠道洪水波以及其他水文過程。

其次，在截留與入滲過程考慮與否的部份，無論由渠道洪水流量歷線或水體所佔百分比來看，皆可明顯發現截留於暴雨事件中的影響並不大，可考慮將其忽略掉；反之，入滲過程在暴雨事件中不僅水體所佔的百分比高，且對於渠道洪水波洪峰值有關鍵性的影響，係暴雨事件中不可忽略之水文過程。

再者，關於渠道粗糙係數分析的部份，從流量歷線圖可以知道渠道洪水波洪峰值和集流時間，係與渠道粗糙係數成反比關係，即渠道粗糙係數愈大，洪峰值愈小且集流時間愈慢；反之渠道粗糙係數愈小，洪峰值愈大且集流時間愈快；因此可以知道渠道中的構造物與其型態，在渠道洪水波的峰值和集流時間中扮演關鍵的角色。

同時，無論在模式驗證或模擬案例中，皆可由流量歷線圖中觀察到洪水波波谷值遠低於觀測值的情況，其原因我們推測係由於模式並未考慮在地表水體入滲後形成地下水並滲出至渠道的基流(base flow)量補助過程。

最後，我們自行開發的分散式集水區逕流模式，其對於暴雨期間渠道洪水波的洪峰、集流時間與趨勢的模擬有一定的精確度，且在各種水文過程之水體分布上係具有質量守恆的基本條件，因此我們認為此模式仍有繼

續研究改進之條件與價值。

7-2 研究建議

根據前面章節所提出之研究結論，我們於論文最後提出研究心得與建議，期能提供後續研究之發展方向與目標，內容如以下段落說明。

首先，由於本模式係將各水文過程撰寫為單一獨立模組(副程式)，故建議可在不更動其他程式碼前提下，加入地下水過程之模組，以模擬地下水所形成的渠道基流補助量，期望可改善模擬渠道洪水波流量歷線波谷值過低的情況。其次，研究中僅使用均方根誤差公式估算模擬值與觀測值之相似程度，資訊稍嫌不足，未來若能使用更多資料分析方法或手段，將可獲得更多方面的資訊。

再者，未來可再針對集水區內之子集水區進行個別研究，並探討其對於渠道下游洪水波峰值與集流時間之影響；此外，亦可模擬並分析集水區內土地利用改變後，對於渠道洪水波的影響程度。此外，精確的輸入資料為洪水預報之先決要件，因此我們建議若能經由其他管道取得更多相關輸入資料，可先針對不同來源之資料進行分析比較，同時探討各來源資料於模式中之模擬結果，相信可有效檢定出最佳化的集水區資料與參數。

最後，我們發展此模式之最大目的，係希望本模式能應用於台灣其他集水區和各種降雨事件中，但本研究僅針對納莉颱風和石門水庫進行模擬，可靠性尚為不足，還有待未來繼續針對其他集水區和降雨事件進行模擬與模式的驗證。

參考文獻

1. Beven, K. J. and Kirkby M. J., “A physically based variable contributing area model of basin hydrology”, *Hydrological Sciences Bulletin*, Vol24(1), pp. 43-69, 1979.
2. Bras, R. L., Hydrology, an introduction to hydrologic science, Addison-Wesley, 1990.
3. Courant, R., Friedrichs, K., & Lewy, H., “On the partial difference equations of mathematical physics”, *IBM Journal*, pp. 215-234, English translation of the 1928 German original, March 1967.
4. Chow, V. T., Maidment, D. R., & Mays, L. W., Applied Hydrology, McGraw-Hill, New York, 1988.
5. Chow, V. T., Open-channel hydraulics, McGraw-Hill, New York, 1959.
6. Crawford, N. H. and R. K. Linsley, “Digital simulation in hydrology: Stanford Watershed Model IV”, Technical Report, 39., 1966.
7. Dooge, J. C. I. & Napiórkowski, J. J., “Applicability of diffusion analogy in flood routing ”, *Acta Geophys.*, Vol 35(1), pp. 65-75, 1987.
8. Eagleson, P. S., Dynamic hydrology, McGraw-Hill., 1970.
9. Julien, P. Y., and O’Brien, J. S., “Laboratory Analysis of Mud Properties”, *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 114, No.8, August, 1988.
10. Julien, P. Y., and Saghafian, B., “CASC2D user’s manual—A two dimensional watershed rainfall-runoff model ”, *Civil Eng. Report*, CER90-91PYJ-BS-12, Colorado State University, Fort Collins, Fort Collins, CO., 1991.
11. Julien, P. Y., Saghafian, B., & Ogden, F. L., “Raster-based hydrologic

- modeling of spatiality-varied surface runoff ”, *Water Resources Bulletin*, Vol 31(3), pp. 523-536, 1995.
12. Karnieli, A. M., Diskin, M. H., & Lane, L. J., “CELMOD5—a semi-distributed cell model for conversion of rainfall into runoff in semi-arid watersheds ”, *Journal of Hydrology*, Vol 157, pp. 61-85, 1994.
 13. Ponce V. M., Li, Ruh-Ming., & Simons D. B., “Applicability of kinematic and diffusion models ”, *J.Hydraul. Div.*, ASCE, HY3, pp. 353-360, 1978.
 14. Ponce, V. M., and Simons, D. B., “Shallow wave propagation in open channel flow ”, *J.Hydraul. Div.*, Am. Soc. Civ. Eng., Vol 103(12), pp. 1461-1476, 1977.
 15. Rojas, R., Julien, P., & Johnson, B., CASC2D-SED version 1.0 Reference Manual , Colorado State University, July 2003.
 16. Rawls, W.J., & Brakensiek, D. L., “A procedure to predict Green and Ampt infiltration parameters. Advances in Infiltration”, *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 109, No. 1, pp. 62-70, January 1983.
 17. Woolhiser, D. A., "Simulation of unsteady overland flow." Unsteady flow in open channels, K. Mahmood and V. Yevjevich, eds., Fort Collins, CO., 1975.
 18. Yen, B. C., and Tsai, C. W.-S., “Noninertia wave vs. diffusion wave in flood routing ”, *J.Hydrol.*, Vol 244(2), pp. 97-104, 2001.
 19. 中央氣象局，颱風百問，民國九十六年。
http://www.cwb.gov.tw/V5/education/knowledge/Data/typhoon/typhone_index.htm
 20. 中央氣象局，颱風資料庫，民國九十六年。
<http://rdc28.cwb.gov.tw/data.php>

21. 中華民國溪流環境協會，民國九十六年。
http://wagner.zo.ntu.edu.tw/sos/sosknow/sosknow_1_4.htm
22. 王如意、易任，應用水文學(新編上冊)，國立編譯館，臺北，民國七十七年。
23. 鍾旻修，「應用地理統計於土壤重金屬污染物之空間分佈探討」，碩士論文，逢甲大學環境工程研究所，台中，民國九十二年。
24. 經濟部水利署北區水資源局網站，民國九十六年。
<http://www.wranb.gov.tw/>
25. 黃誌川，「集水區降雨逕流時空分布之模擬—結合地文參數之不確定性分析」，博士論文，國立台灣大學，地理環境資源研究所，臺北，民國九十一年。
26. 葉宗泰，「石門水庫集水區降雨逕流模擬」，碩士論文，國立中央大學土木工程研究所，桃園，民國九十二年。
27. 鄭力嘉，「地理資訊系統於石門水庫集水區降雨逕流分析之應用」，碩士論文，中原大學土木工程研究所，桃園，民國九十四年。
28. 陳心穎，「颱風事件下之集水區逕流模擬」，碩士論文，國立中央大學土木工程研究所，桃園，民國九十四年。