

國立臺灣大學生物環境系統工程學研究所
碩士論文

Graduate Institute of Bioenvironmental Systems Engineering

National Taiwan University
Master Thesis

流域格網局部細化之淹水模擬

Down-scale Inundation Simulations for Local Area



研究生：陳彥宏
Advisee：Yen-Hung Chen

指導教授：許銘熙 博士
Advisor：Dr. Ming-Hsi Hsu

中華民國九十七年六月
June, 2008

誌 謝

一篇論文記載著學習的歷程，三年的時光，承蒙恩師 許教授銘熙悉心指導與鼓勵，不時地討論並指點學生正確的方向，使學生的研究生涯充實美好且受益匪淺。感謝老師平日對學生的諄諄教誨與提供優良的學習環境，而對學問的嚴謹與要求更是學生一直以來學習的典範，使學生於待人處世道理之領悟與學術研究之方法上獲益良多，師恩浩蕩，永銘於心，在此謹致最崇高之謝意。

文稿初成，承蒙成功大學 游教授保杉、交通大學 葉教授克家與聯合大學 鄧教授慰先 於口試中不吝斧正、惠賜卓見，使得本論文能夠更完整而嚴謹，僅此向諸位師長敬表由衷之謝意。

感謝洪災研究室 黃成甲學長在研究中不厭其煩地教導我專業的知識與 傅博士金城、林洙宏學長及 陳志鴻學長的教導與關懷；本系同學高華、可欣、鵬豪、郁惠及學弟孟原、亞達的共同砥礪與幫忙我也銘感於心，有了你們的陪伴讓我的研究生活變的絢麗多采。

於此向所有關心我的人致上最深的謝意，尤其感謝摯愛的雙親辛苦的培育與照料，女友筑君默默的支持與陪伴，謹以此文獻上衷心之感謝。

摘要

近年遙測技術的迅速發展，提升了地形資料的解析度和準確性。尤其是airborne scanning laser altimetry(LiDAR)的準確度大幅改善其可用性。若使用高精度的數值地形資料(DTM)必須配合相當可觀的電腦資源以進行計算是模擬時的一項難題。大區域的模擬計算必須給予適當的邊界條件，而高精確性的資料卻可能只需應用在整體區域中有限的一小部分。若能使用不同精度的格網於不同地區(格網間互相密合)，將可減少模擬時計算資源上之浪費。

本研究主要目的在研發及建立一套淹水模式可計算不同解析度之多重格網，並進一步整合中央氣象局研發的定量降水預報系統(QPESUMS system)結合雷達觀測降雨系統之資料進行淹水模擬。

本研究模擬區域為八掌溪流域，以2005年6月12日暴雨事件，並以多重尺度格網進行淹水模擬並分析比較不同格網對模式運算時間及模擬精度的影響。結果顯示局部高解析度格網之多重格網計算方式，可在精度及效率的平衡中有更佳的表现。

關鍵詞：淹水模式、多重格網模擬、定量降水預報系統

Abstract

The quick growing of remote sensing technology in recent years has obviously elevated the quality, in both resolution and precision respects, of topographic data. The accuracy and availability of the airborne scanning laser altimetry have been promoted and the applications are widening. The requirements of computation resources cause the difficulty for massive simulations by using the high quality digital terrain models (DTM). In most practical situations, the large area for computation is essential to having proper boundary conditions, nevertheless, the high accuracy might be needed only in limited parts of the domain. The local refinement method is a feasible solution to provide results comparable to a much higher resolution (uniformly refined) mesh with less computational expense.

In this study, an efficient 2D inundation model, incorporating the QPESUMS radar precipitation and multi-scale computational method, will be established to provide accurate resolution results.

The 0612 Storm event of 2005 in Bajhang River basin is adopted as the study case of the newly developing model. The accuracy and efficiency of proposed model are evaluated with different grid scale. The high performance of the multi-scale inundation model with high resolution grids in local area is obtained.

Keywords: Inundation model, multi-scale simulation, QPESUMS system

目 錄

誌謝.....	I
摘要.....	II
Abstract.....	III
目錄.....	IV
圖錄.....	VII
表錄.....	XI
第一章 緒論.....	1
1-1 研究背景與目的.....	1
1-2 文獻回顧.....	2
第二章 演算模式.....	6
2-1 二維漫地流淹水模式.....	6
2-1-1 基本方程式.....	6
2-1-2 數值方法.....	7
2-1-3 初始及邊界條件.....	9
2-2 多重格網之銜接.....	11
2-2-1 數值模式之穩定性.....	11
2-2-2 多重格網之演算時距.....	12
2-2-3 多重格網之邊界銜接.....	13
第三章 資料整合與輸入.....	14
3-1 模擬區域.....	14

3-1-1 八掌溪北岸.....	14
3-1-2 八掌溪南岸.....	15
3-2 雨量資料.....	15
3-2-1 QPESUMS 簡介	16
3-2-2 雷達回波估計雨量方法.....	17
3-2-3 雷達-雨量站整合降雨估計法.....	17
3-3 地文資料.....	18
3-3-1 DTM 數值地形.....	18
3-3-2 資料之處理.....	19
3-3-3 土地利用型態.....	20
3-4 地表格網與QPESUMS格網之套疊.....	20
第四章 模擬結果與比較.....	21
4-1 雨量資料之比較.....	21
4-2 全區 120 公尺格網模擬結果.....	23
4-3 全區 120 公尺格網與局部細化 120 公尺格網對應區域 模擬結果與比較.....	25
4-3-1 八掌溪南北岸局部模擬區域結果比較.....	26
4-3-2 演算效率.....	28
4-4 局部細化 120 公尺格網模擬區域之淹水體積.....	29
第五章 結論與建議.....	31
5-1 結論.....	31

5-2 建議.....	32
參考文獻.....	34
附錄 A 模式架構流程圖.....	80
附錄 B 徐昇氏多邊型法.....	83



圖 錄

圖 2-1	多重格網演算時距示意圖.....	38
圖 2-2	多重格網邊界銜接關係示意圖.....	38
圖 2-3	格網邊界上個別流量示意圖.....	39
圖 2-4	格網邊界流量分配示意.....	39
圖 3-1	八掌溪流域南、北岸模擬區示意圖.....	40
圖 3-2	八掌溪流域南、北岸行政區示意圖.....	40
圖 3-3	局部細化 120 公尺格網模擬之區域.....	41
圖 3-4	八掌溪流域水系分佈位置圖.....	41
圖 3-5	台灣地區雷達掃描涵蓋範圍分布.....	42
圖 3-6	傳統雨量估計與 QPESUMS 系統雨量估計方式比較.....	42
圖 3-7	雷達-雨量站觀測降雨整合法概念示意圖.....	43
圖 3-8	八掌溪流域數值高程圖.....	43
圖 3-9	八掌溪流域北岸淹水計算格網(格網解析度 120m×120m)....	44
圖 3-10	八掌溪流域南岸淹水計算格網(格網解析度 120m×120m)....	44
圖 3-11	八掌溪流域北岸淹水計算格網(格網解析度 600m×600m)....	45
圖 3-12	八掌溪流域南岸淹水計算格網(格網解析度 600m×600m)....	45
圖 3-13	模擬格網與 QPESUMS 格網銜接示意圖.....	46
圖 3-14	面積權重平均方法示意圖.....	46
圖 4-1	0612 暴雨事件水利署調查淹水範圍圖.....	47
圖 4-2	北岸模擬區徐昇多邊形分區圖.....	47

圖 4-3	南岸模擬區徐昇多邊形分區圖.....	48
圖 4-4	6月14日3~4時降雨強度空間分布圖.....	49
圖 4-5	6月14日4~5時降雨強度空間分布圖.....	49
圖 4-6	6月14日5~6時降雨強度空間分布圖.....	49
圖 4-7	6月14日6~7時降雨強度空間分布圖.....	50
圖 4-8	6月14日7~8時降雨強度空間分布圖.....	50
圖 4-9	6月14日8~9時降雨強度空間分布.....	50
圖 4-10	6月14日9~10時降雨強度空間分布圖.....	51
圖 4-11	6月14日10~11時降雨強度空間分布圖.....	51
圖 4-12	6月14日11~12時降雨強度空間分布圖.....	51
圖 4-13	6月14日12~13時降雨強度空間分布圖.....	52
圖 4-14	6月14日13~14時降雨強度空間分布圖.....	52
圖 4-15	6月14日14~15時降雨強度空間分布圖.....	52
圖 4-16	6月14日15~16時降雨強度空間分布圖.....	53
圖 4-17	6月14日16~17時降雨強度空間分布圖.....	53
圖 4-18	6月14日17~18時降雨強度空間分布圖.....	53
圖 4-19	6月14日18~19時降雨強度空間分布圖.....	54
圖 4-20	6月14日19~20時降雨強度空間分布圖.....	54
圖 4-21	6月14日20~21時降雨強度空間分布圖.....	54
圖 4-22	6月14日21~22時降雨強度空間分布圖.....	55
圖 4-23	6月14日22~23時降雨強度空間分布圖.....	55

圖 4-24	6 月 14 日 23~24 時降雨強度空間分布圖.....	55
圖 4-25	6 月 15 日 0~1 時降雨強度空間分布圖.....	56
圖 4-26	6 月 15 日 1~2 時降雨強度空間分布圖.....	56
圖 4-27	6 月 15 日 2~3 時降雨強度空間分布圖.....	56
圖 4-28	0612 暴雨模擬最大淹水深圖(格網 600 公尺).....	57
圖 4-29	0612 暴雨模擬第 4 小時淹水深圖(時間 06.14.06:00;格網 120 公尺).....	58
圖 4-30	0612 暴雨模擬第 8 小時淹水深圖(時間 06.14.10:00;格網 120 公尺).....	58
圖 4-31	0612 暴雨模擬第 12 小時淹水深圖(時間 06.14.14:00;格網 120 公尺).....	59
圖 4-32	0612 暴雨模擬第 16 小時淹水深圖(時間 06.14.18:00;格網 120 公尺).....	59
圖 4-33	0612 暴雨模擬第 20 小時淹水深圖(時間 06.14.22:00;格網 120 公尺).....	60
圖 4-34	0612 暴雨模擬第 24 小時淹水深圖(時間 06.15.02:00;格網 120 公尺).....	60
圖 4-35	0612 暴雨模擬最大淹水深圖(格網 120 公尺).....	61
圖 4-36	北岸 120 公尺格網模擬第 4 小時淹水深圖.....	62
圖 4-37	北岸 120 公尺格網模擬第 8 小時淹水深圖.....	62
圖 4-38	北岸 120 公尺格網模擬第 12 小時淹水深圖.....	63
圖 4-39	北岸 120 公尺格網模擬第 16 小時淹水深圖.....	63
圖 4-40	北岸 120 公尺格網模擬第 20 小時淹水深圖.....	64
圖 4-41	北岸 120 公尺格網模擬第 24 小時淹水深圖.....	64
圖 4-42	北岸 120 公尺格網模擬最大淹水深圖.....	65

圖 4-43	北岸相同格網點淹水深比較(時間 06.14.06:00).....	66
圖 4-44	北岸相同格網點淹水深比較(時間 06.14.10:00).....	66
圖 4-45	北岸相同格網點淹水深比較(時間 06.14.14:00).....	67
圖 4-46	北岸相同格網點淹水深比較(時間 06.14.18:00).....	67
圖 4-47	北岸相同格網點淹水深比較(時間 06.14.22:00).....	68
圖 4-48	北岸相同格網點淹水深比較(時間 06.15.02:00).....	68
圖 4-49	北岸相同格網點最大淹水深比較(最大淹水深).....	69
圖 4-50	南岸 120 公尺格網模擬第 4 小時淹水深圖.....	70
圖 4-51	南岸 120 公尺格網模擬第 8 小時淹水深圖.....	70
圖 4-52	南岸 120 公尺格網模擬第 12 小時淹水深圖.....	71
圖 4-53	南岸 120 公尺格網模擬第 16 小時淹水深圖.....	71
圖 4-54	南岸 120 公尺格網模擬第 20 小時淹水深圖.....	72
圖 4-55	南岸 120 公尺格網模擬第 24 小時淹水深圖.....	72
圖 4-56	南岸 120 公尺格網模擬最大淹水深圖.....	73
圖 4-57	南岸相同格網點淹水深比較(時間 06.14.06:00).....	74
圖 4-58	南岸相同格網點淹水深比較(時間 06.14.10:00).....	74
圖 4-59	南岸相同格網點淹水深比較(時間 06.14.14:00).....	75
圖 4-60	南岸相同格網點淹水深比較(時間 06.14.18:00).....	75
圖 4-61	南岸相同格網點淹水深比較(時間 06.14.22:00).....	76
圖 4-62	南岸相同格網點淹水深比較(時間 06.15.02:00).....	76
圖 4-63	南岸相同格網點最大淹水深比較(最大淹水深).....	77

表 錄

表 3-1	各土地利用型態之曼寧糙度係數值.....	78
表 4-1	八掌溪北岸徐昇控制面積權重表.....	78
表 4-2	八掌溪南岸徐昇控制面積權重表.....	79



第一章 緒論

1-1 研究背景與目的

台灣河川大多坡陡水急，集流時間短，下游多為平原，且因自然地理環境位置特殊，全年平均降雨量約為 2,500 毫米，每到夏、秋兩季受颱風及西南氣流影響，驚人的雨量常伴隨而來，由於降雨的時間與空間分佈極不均勻，加上山區坡度陡峻，易引發集水區上游短時間匯集洪流，對其中、下游坡度平緩地區造成嚴重水患；此外，都會區之局部地區，亦可能因豪雨之雨量超過排水設施之設計標準，而有淹水情形，導致人民生命財產之嚴重損失。就水害防治而言，若能事先模擬當地於各種暴雨事件發生時之淹水情形並研判其合理性，則可進一步先行推估可能淹水之地區並發出警報，使地方防災應變單位及居民能預作警戒及防護工作，有效減少洪災損失。

本文主要目的為使用一準確、可靠之淹水模式，並結合QPESUMS雷達回波推估之雨量資訊進行水理演算，以計算地表淹水情況，期建立降雨量與淹水範圍之關係。本文探討以兩種不同解析度之格網同步模擬之可行性，目的為對於局部淹水災害危險程度較高之人口、公共設施稠密之重點地區能夠以較小尺度之格網進行模擬，以達更高之精度；而局部以外之地區以較大尺度之格網進行模擬，以達到較佳之演算效率，期能兼顧模擬精度及模擬時間，並能實際應用於即時淹水預警，對淹水災害可能引發的災情做一量化模擬與損失評估。

1-2 文獻回顧

本文應用都卜勒氣象雷達的即時降雨資料做為輸入淹水模式的雨量，利用雷達進行定量降雨估計，已是相當成熟的雨量估計技術，尤其台灣環島雷達網的建置，在高時空解析(時間解析度約 10 分鐘，空間解析度約 1.25 公里× 1.25 公里)的優勢下，更建立台灣地區發展定量降雨預報技術的基礎。而回波在地形複雜的台灣地區之降雨估計是否合理，則必須加以校驗檢視。

國內對於雷達回波在降雨估計上的相關研究，鳳雷(1992)使用民航局中正氣象台(CAA)之 C 波段都卜勒雷達回波資料、氣象局自動雨量站每分鐘雨量及台電、水利局、石門水庫管理局之逐時雨量資料，分析 1990 年 8 月 19 日楊希颱風登陸期間降雨回波垂直結構及回波與地面降雨間的關係。王意郎(1993)分析 1989 ~ 1991 年梅雨期間降雨系統，同樣使用中正氣象台都卜勒雷達的回波場強度資料，及中央氣象局臺灣北部地區的自動雨量測站觀測網資料，進行降雨估計。楊政潭(2003)利用雷達資料具有時間和空間高解析度之優點進行降雨空間分佈之討論，並發現以五分山雷達觀測石門水庫集水區之降雨，由於受到雪山山脈所阻擋，而有低層回波不完整之現象，迫使雷達觀測仰角必須提高。所以使用雷達估計降雨受地形因素影響相當大，若觀測地勢較高處容易造成降雨估計的誤差。

在國內淹水模式方面，顏清連(1986)等人分別利用簡單顯式法 (simply explicit scheme, 簡稱 SES) 與交替方向顯式法 (alternating direction explicit scheme, 簡稱 ADE) 等兩種差分法，建立二維零慣性數值模式以模擬三重、蘆州地區萬一堤防潰決後洪流在洪氾區之流

況。沈榮茂、楊德良(1992)曾利用有限元素法探討流域漫地流水理特性。吳啟瑞(1993)建立二維漫地流淹水模式應用於八掌溪流域，並模擬其淹水情況。楊昌儒、蔡長泰(1995)討論數值高程模型解析度對於淹水模式分區代表高程之影響，其方法係將原始之解析度 40 公尺× 40 公尺數值高程模型分別以雙線性內插與選取最近點法重新取樣，各產生 20 公尺× 20 公尺與 80 公尺× 80 公尺兩種解析度之數值高程模形，再依重新取樣對分區代表高程於賀伯颱風淹水模擬所得之最大分區淹水深度差異進行比較。黃成甲(1997)將二維核胞淹水模式應用於嘉義地區，並完成流域逕流及淹水之模擬；另將二維核胞淹水模式應用於八掌溪北岸進行淹水模擬，證明二維核胞可用於各流域之地表淹水模擬，並成功銜接一維河系變量流模式及核胞淹水模式。盧重任(1998)成功銜接一維河系變量流模式及二維漫地流淹水模式，以模擬賀伯颱風台北縣板橋地區之淹水情況。賴進松、林孟郁(2000)針對潰堤之淹水情況進行模擬，在一維變量流模式及二維漫地流淹水模式模擬潰堤銜接部分，潰堤寬度為單位格網寬度 120 公尺，潰堤高度由堤頂至地表；由堰流公式計算後得到潰堤入流歷線。

國外淹水模式方面，Gustafsson(1971)利用交替方向隱式法解淺水波問題，並探討臨前狀況為無水陸地之流況。Xanthopoulos(1976)，Katopodes(1978，1979)，Balloffet(1982)曾建立二維數值模式以模擬潰壩後河川或洪氾平原區水流之流況。Cunge(1980)等人曾將洪氾區依地形與地貌劃分格網，配合所發展之理想渠道、堰等概念模式，再利用一維水流理論求解各格網中心的淹水深度，並將此模式應用於湄公河三角洲低窪之洪氾平原。後來 Vongvisessomjai(1985)等人亦將此模式應用在曼谷地區，但此種概念模式需要較完整之水文站網與長期之

記錄，方可檢定其參數值。Garcia(1986)等人發展 MacCormack scheme 應用於二維 St. Venant equation，並模擬突擴性斷面水流產生環場流 (circulation) 之情形。Inoue(1987)等人利用 stagger scheme 模擬二維洪水波傳遞動態。另 Aknbi、Katopodes(1988)在初始無水陸地的洪水傳遞，利用有限元素法求解水流前進線及淹水深。

近年來，一般模式模擬為考慮許多因素，通常結合不同模式，以期更符合實際流況：許銘熙等人(1998)年結合一維河川變量流動力波模式與二維零慣性漫地流淹水模式，考慮水流在地表漫地流出口與河川匯流情況及抽水站與閘門操作等之交互作用，同時可計算河川洪水及地表淹水之情況。簡名毅(1999)成功地銜接一維河系變量流模式與二維漫地流淹水模式，應用在鹽水溪流域，並模擬其淹水情形。陳欣怡(2001)，銜接暴雨經理模式 (SWMM)、二維漫地流淹水模式及滯洪池演算模式，應用在台南科學工業園區，模擬暴雨期間之排水動態及淹水情形。陳昌榮(2002)考慮鹽水溪流域的地表逕流及排水路流量，以模擬台南科學工業園區颱風期間可能發生淹水的程度。另外，陳宣宏(2002)結合二維零慣性漫地流淹水模式以及雨水下水道經理模式，發展出都市淹水模式，其驗證與結果都顯示，考量下水道影響較能反應都市水實況，對於提供規劃防災措施，有較佳程度的幫助。

另為增進數值解的準確性與同時兼顧模擬時間之效率，在時間與空間上的局部尺度細化已被認為是一個可行的方法。Ruge(1995)等人發展使用於地表淺水波之時間與空間上局部細化多重格網演算法，證明在時間與空間上，單一尺度配合局部細化的模擬結果能獲得準確性。Spitaleri、Corinaldesi(1997)利用多重格網計算模擬集水區內水流情況，亦獲得符合實際情況之近似數值解。Shishkin、

Vabishchevich(2000)發展出極低計算量但亦能獲得準確精度之即時預報修正模式並應用於局部細化之多重格網。Borthwick(2001a;2001b)等人提出適合淺水波之四分樹格網數值地形解法，專注於複雜大尺度區域內重要局部小尺度區域中之水流特性。Lamby(2005)等人應用適當之多重解析度於二維淺水波方程式以增進空間解析度與減低數值模擬之計算成本。Hu(2006)等人發展 mesh-patching 模式，結果顯示此模式不僅提高局部細化格網空間內水流特性之解析度，亦簡化並加速了複雜地形模擬區域中格網交替演算之過程。Yu、Lane(2006a;2006b)研究格網解析度對於二維漫地流淹水模式之影響，之後亦使用縮小格網尺度之方法以真實模擬都會區內由於建築物所造成之水流阻擋效應。



第二章 演算模式

2-1 二維漫地流淹水模式

2-1-1 基本方程式

對於一般廣闊平坦的洪氾平原而言，變量流方程式中加速項之大小級次（order of magnitude）通常遠小於重力項與摩擦項。假設洪水歷線上升平緩，且忽略科氏力、風力、垂直方向速度分量及加速項之影響，除缺口處附近之水理現象外，地表漫地流流況可用二維零慣性模式予以描述，其控制方程式可簡化如下：

$$\frac{\partial d}{\partial t} + \frac{\partial(ud)}{\partial x} + \frac{\partial(vd)}{\partial y} = q \quad (2.1)$$

$$-\frac{\partial h}{\partial x} = u \left[\frac{n_x^2 |u|}{d^{4/3}} + \frac{q}{dg} \right] \quad (2.2)$$

$$-\frac{\partial h}{\partial y} = v \left[\frac{n_y^2 |v|}{d^{4/3}} + \frac{q}{dg} \right] \quad (2.3)$$

- 式中，
- x, y ：模擬地區標示之迪卡兒空間座標[m]；
 - t ：時間座標[sec]；
 - d ：模擬區地表水深[m]；
 - u, v ：分別為沿 x, y 方向之平均流速[m/sec]；
 - n_x ：沿 x 方向之曼寧糙度值[sec/m^{1/3}]；
 - n_y ：沿 y 方向之曼寧糙度值[sec/m^{1/3}]；
 - h ： $d+z$ ，地表水位[m]；

z : 地表高程[m] ;

g : 重力加速度[m/sec²] ;

q : 單位表面積之進流量[m/sec] , 為有效降雨強度。

(2.1)式為連續方程式 ; (2.2)式、(2.3)式分別為沿 x 、 y 方向之運動方程式。若地形高程、曼寧糙度和側流量已知，則(2.1)、(2.2)及(2.3)式含有三個因變數 d 、 u 、 v ，以及 x 、 y 、 t 三個自變數。此含三因變數的偏微分聯立方程式，須利用數值方法求解之。

2-1-2 數值方法

假若地表於初始時刻為無水狀態，洪流傳遞之前緣與乾地表接觸之交界鋒線將隨時間向下游推進，為簡易處理這種移動邊界水流流況，本文採用交替方向顯式差分法 (Alternating Direction Explicit Method，簡稱 ADE) 以建立模式。依標示網格 (Marker And Cell，簡稱 MAC) 差分觀念，若將(2.1)、(2.2)及(2.3)式中任意變量以 f 表示，其中 f 可代表 d 、 n_x 、 n_y 、 q 、 u 或 v 等變量，採用之差分型式如下：

$$\begin{aligned} f_{i+1/2,j} &= \frac{1}{2}(f_{i,j} + f_{i+1,j}) \\ f_{i,j+1/2} &= \frac{1}{2}(f_{i,j} + f_{i,j+1}) \\ \frac{\partial f}{\partial t} &= \frac{f_{i,j}^{m+1} - f_{i,j}^m}{\Delta t} \\ \frac{\partial f_{i,j}^m}{\partial x} &= \frac{f_{i+1/2,j}^m - f_{i-1/2,j}^m}{\Delta x} \\ \frac{\partial f_{i,j}^m}{\partial y} &= \frac{f_{i,j+1/2}^m - f_{i,j-1/2}^m}{\Delta y} \end{aligned} \quad (2.4)$$

式中， Δx 、 Δy 代表沿 x 、 y 方向之網格距離； Δt 代表演算時間間距； m

為時間指標； i 、 j 分別為沿 x 、 y 之空間指標。

本研究採用交替方向顯式法，將演算時距(Δt)等分為兩個時階，且每前進一個時階即分別交替求解流速 u 及 v 。(2.1)、(2.2)及(2.3)式之差分方程式可依第一、二時階，分別列出如下：

(1) 第一時階($m + 1/2$)：

$$d_{i,j}^{m+1/2} = d_{i,j}^m - \frac{1}{2} \Delta t \left\{ \frac{[(d^m u^{m+1/2})_{i+1/2,j} - (d^m u^{m+1/2})_{i-1/2,j}]}{\Delta x} \right. \\ \left. \frac{[(dv)_{i,j+1/2}^m - (dv)_{i,j-1/2}^m]}{\Delta y} - q_{i,j}^{m+1/2} \right\} \quad (2.5)$$

$$\frac{[(d+z)_{i,j}^{m+1/2} - (d+z)_{i+1,j}^{m+1/2}]}{\Delta x} = \left\{ u^{m+1/2} \left[\frac{(n_x)^2 |u|^{m+1/2}}{(d^m)^{4/3}} + \frac{q^{m+1/2}}{(d^m * g)} \right] \right\}_{i+1/2,j} \quad (2.6)$$

$$\frac{[(d+z)_{i,j}^{m+1/2} - (d+z)_{i,j+1}^{m+1/2}]}{\Delta y} = \left\{ v^{m+1/2} \left[\frac{(n_y)^2 |v|^{m+1/2}}{(d^{m+1/2})^{4/3}} + \frac{q^{m+1/2}}{(d^{m+1/2} * g)} \right] \right\}_{i,j+1/2} \quad (2.7)$$

式中， m 為時間座標；(2.5)式為 $(i, j, m + 1/2)$ 座標點之連續方程式，(2.6)及(2.7)式則分別為 $(i + 1/2, j, m + 1/2)$ 座標點沿 x 方向運動方程式與 $(i, j + 1/2, m + 1/2)$ 座標點沿 y 方向運動方程式。求解時首先將(2.5)及(2.6)兩式聯立解出 u 及 d ，再代入(2.7)式中解出 v ，如此可得 $m + 1/2$ 時階之 u 、 v 及 d 。

(2) 第二時階($m + 1$)：

將(2.5)式待求流速分量 u 更替 v ，並將(2.6)、(2.7)式之 u 、 v 互換，則(2.1)、(2.2)及(2.3)式之差分方程式可表示如下：

$$d_{i,j}^{m+1} = d_{i,j}^{m+1/2} - \frac{1}{2} \Delta t \left\{ \frac{[(du)_{i+1/2,j}^{m+1/2} - (du)_{i-1/2,j}^{m+1/2}]}{\Delta x} \right. \\ \left. \frac{[(d^{m+1/2} v^{m+1})_{i,j+1/2} - (d^{m+1/2} v^{m+1})_{i,j-1/2}]}{\Delta y} - q_{i,j}^{m+1} \right\} \quad (2.8)$$

$$\frac{[(d+z)_{i,j}^{m+1} - (d+z)_{i,j+1}^{m+1}]}{\Delta y} = \left\{ v^{m+1} \left[\frac{(n_y)^2 |v^{m+1}|}{(d^{m+1/2})^{4/3}} + \frac{q^{m+1}}{(d^{m+1/2} g)} \right] \right\}_{i,j+1/2} \quad (2.9)$$

$$\frac{[(d+z)_{i,j}^{m+1} - (d+z)_{i,j+1}^{m+1}]}{\Delta x} = \left\{ u^{m+1} \left[\frac{(n_x)^2 |u^{m+1}|}{(d^{m+1})^{4/3}} + \frac{q^{m+1}}{(d^{m+1} g)} \right] \right\}_{i+1/2,j} \quad (2.10)$$

(2.8) 式為 $(i, j, m+1)$ 連續方程式，(2.9) 及 (2.10) 式則分別為 $(i, j+1/2, m+1)$ 座標點沿 y 方向運動方程式與 $(i+1/2, j, m+1)$ 座標點沿 x 方向運動方程式。第二時階以(2.8)及(2.9)兩式首先聯立而解出 v 及 d ，再將之代入(2.10)式解出 u ，則 $m+1$ 時階之 u 、 v 及 d 即可求得。由第一及第二時階可交替解出每一演算時距 Δt 中之 u 、 v 及 d 等三個未知變數之值。

2-1-3 初始及邊界條件

二維漫地流淹水模式之初始條件係依臨前水文情況而定，本文中假設模擬區域內為無水狀態，亦即水深及流速均為零，故初始條件可表示為：

$$d_{i,j}^0 = u_{i+1/2,j}^0 = v_{i,j+1/2}^0 = 0 \quad (2.11)$$

利用數值方法求解二維性變量流方程式時，對於如何給予邊界條件之問題應多加注意，因為不適當或錯誤之邊界條件，將隨演算時間及空間的增展而使誤差擴大。本文之邊界分為兩種形式：閉合邊界及

開放邊界，分別說明如下：

(1)閉合邊界：

任何阻擋水流穿越之障礙物，如堤防線、擋水牆或模擬區域之周圍高地等皆可視為閉合邊界。因水流無法穿越堤防，故垂直於堤防線之流速可令其為零，即為模式之閉合邊界條件。本文中，模擬區內各排水路流入八掌溪之出口處，亦假設為閉合邊界，即假設其流速為零。在海岸排水系統出口處，於模式中視出口情況予以設定，若海岸之潮位高於地表淹水位則假設閘門關閉，即零流速之閉合邊界；若海岸之潮位低於地表淹水位則閘門開啟，並假設使用堰流公式計算排入外海之流量。

(2)開放邊界：

此為模擬區域內水流進出之邊界處，如堤防缺口位置或模擬區抽水站設置處等。開放邊界條件可給予流量歷線、水位歷線、流速歷線等。若欲精確計算入流量體積，必須採用流量歷線作為數值模擬之開放邊界條件；本文中，細格網模擬區之邊界給予粗網格在其交疊邊界上之入流量歷線，作為模式中之開放邊界條件。

(2.1)至(2.3)式中的側流量 q ，代表單位面積進出地表面的水量，通常包括降雨量、入滲量，本文中忽略入滲與蒸發之影響即假設降雨損失為零，本研究將地表淹水計算網格之平均降雨強度 I_{eff} 換算成單位面積之側流量輸入二維漫地流淹水模式中，以模擬地表之流況。因此，(2.5)至(2.10)中的側流量 q 可寫成：

$$q = I_{eff} * C \quad (2.12)$$

式中， I_{eff} : 地表淹水計算網格之平均降雨強度[mm/hr]；(詳見 3-4 節)
 C : 單位換算因子 ($C = 1/3600000$)。

2-2 多重格網之銜接

本文使用二維漫地流淹水模式進行模擬，並完成全模擬區大尺度格網內部結合局部區域小尺度格網進行同步演算工作(模式架構流程圖請參見附錄 A)，可望在模擬精度及模擬時間上取得更有效率之搭配結果。以下就多重格網之演算時距及邊界銜接部分逐步做一說明。

2-2-1 數值模式之穩定性

數值模式之穩定性(stability)是指數值解的誤差不隨著時間的增加而增加的性質，它應該是逐步消失或保持有界(bound)，而不會不斷持續的擴大，以致發散。數學表示式如下：

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \epsilon^n \leq K \quad (2.13)$$

式中， ϵ 為數值解與正確解之間的誤差，有限常數 K 跟時階數 n 之間是獨立的。此穩定條件對任何形式的誤差皆成立。

一個不穩定的數值模式會產生隨時間增加之擾動(perturbation)，此一擾動來自於數值解之誤差。不穩定的數值模式大部分擾動的增幅呈指數增加，導致數值模式演算結果發散的情形，所以不穩定的數值模式是不能用的。對於數值模式的穩定性常取決一重要參數，即可蘭數(Courant number); 已知，

$$\text{可蘭數 } C_r = U * \Delta t / \Delta x \quad (2.14)$$

式中， U 為數值模式計算格網平均流速[m/sec]; Δt 為演算時距[sec]; Δx

為計算格網尺度[m]。

穩定的數值模式可以分為以下兩種：一種是有條件性的穩定(conditionally stable)，例如顯示差分法，需可蘭數小於 1 時才穩定；另一種則是無條件性的穩定(unconditionally stable)，例如隱式差分法，理論上可允許任意的演算時距。在使用顯示差分法數值模式時，若要得到穩定的情形，需要使可蘭數小於 1，此即所謂”可蘭條件”(Courant-Friedrichs-Lewy,CFL)。

由於可蘭數的選取不當會造成計算的誤差，因此數值解之穩定條件要求： $0 < C_r \leq 1$ ，這個條件限制了格網尺度 Δx 和演算時距 Δt 的範圍，若 Δx 變小， Δt 也必須隨之變小。

2-2-2 多重格網之演算時距

若所使用之粗格網為解析度 $a \times a$ 的計算格網，局部細化格網採用解析度 $b \times b$ 的淹水計算格網(即粗格網尺度的 b/a 倍)，因此細格網演算時距的設定亦為粗格網演算時距的 b/a 倍，以符合可蘭條件。首先，令粗格網的演算時距為 Δt_c 秒、細格網的演算時距為 Δt_f 秒，則 $\Delta t_c = a/b * \Delta t_f$ ，而模擬時間設定為 24 小時(即 86,400 秒)，因此粗格網之演算次數 $step_c$ 為 $86,400 / \Delta t_c$ ，細格網之演算次數 $step_f$ 為 $86,400 / \Delta t_f$ ，則可知 $step_f = a/b * step_c$ 。多重格網的個別演算次數在模式中必須互相配合(多重格網演算時距關係示意圖如圖 2-1 所示)，所以在模式中設定，當粗格網進行 t 時刻時的一次演算後，隨即進行細格網連續 a/b 次的演算，待細格網完成其 a/b 次演算後，再回到粗格網演算步驟中，進行粗格網 $t + \Delta t_c$ 時刻的一次演算，以此類推達到同步演算之效果至模擬結束。

2-2-3 多重格網之邊界銜接

多重格網在模式中搭配模擬時，細格網所涵蓋之模擬區域包含於粗格網所模擬之區域範圍中，則細格網之模擬區域邊界乃屬於粗格網模擬區域之內部；因此，細格網模擬區域之邊界條件須由粗格網模擬結果而得(多重格網邊界銜接關係示意圖如圖 2-2 所示)。在細格網的邊界條件上，本文將粗格網在細格網的邊界交疊上之入流量歷線平均分配做為細格網模擬區之開放邊界條件。於模式中，每一格網上皆有其專屬之 x 、 y 方向編號(i, j)，首先將淹水深度 d 乘上格網寬度 Δx 則可獲得通水斷面積 A ；再將通水斷面積 A 乘上通過此斷面之速度 U ，則可求得每一格網邊界上個別之流量 Q (示意圖請參見圖 2-3)。令單一粗格網 c 與細格網接觸邊界上之流量為 Q_c ，而每一粗格網邊界等分為 l 個細格網，則在接觸邊界上，可求得單一細格網所接受之邊界入流量 $q_f = 1/l * Q_c$ (示意圖請參見圖 2-4)。遂將上述關係式如下表示：

$$Q_c = d_c * \Delta x * U_c \quad (2.15)$$

$$q_f = 1/l * Q_c \quad (2.16)$$

式中， Q_c ：細格網所對應至粗格網上單一粗格網之流量[m³/sec]。

q_f ：單一細格網邊界上之入流量[m³/sec]。

d_c ：細格網所對應至粗格網上之粗格網水深[m]。

Δx ：細格網所對應至粗格網上之粗格網尺度[m]。

U_c ：細格網所對應至粗格網上之粗格網速度[m/sec]，可分為

x 方向速度 u 及 y 方向速度 v 。

l ：粗格網流量均分至細格網上之細格網個數。

第三章 資料整合與輸入

3-1 模擬區域

八掌溪位於台灣中南部，屬於中央管河川，是台南縣與嘉義縣的縣界溪。全長約80.86公里，流經嘉義縣的義竹鄉、布袋鎮、鹿草鄉、水上鄉、嘉義市、中埔鄉、番路鄉；還有台南縣的北門鄉、學甲鎮、鹽水鎮、後壁鄉、白河鎮。流域面積約474.74平方公里。八掌溪發源於嘉義縣海拔1,940公尺的阿里山奮起湖。於嘉義縣布袋鎮虎尾寮入海。主要支流為赤蘭溪、頭前溪。其名稱由來非源自地名(流域中無鄉鎮名為八掌)，據稱為該河坡度較平緩，支流甚多，高達八條以上因而得名。嘉義市境內的蘭潭水庫及仁義潭水庫(位於番路鄉與嘉義市交界)，都是由八掌溪引水，做為民生用水以及供應嘉義市、水上鄉、民雄的頭橋以及嘉義市後湖等工業區的工業用水。當溪水流過忠義橋後，屬於八掌溪的下游，這時溪水進入廣闊的嘉南平原，兩岸也築起了堤防，嘉南農田水利會引水作為兩岸田疇的灌溉用水，滋養了農作與土地，所以八掌溪也是一條肩負民生、農田灌溉及工業水的河川。本文以八掌溪主流為界，以堤防為邊界劃分北岸與南岸兩個二維淹水模擬區域，請參見圖3-1。

3-1-1 八掌溪北岸

模擬區範圍北鄰朴子溪南岸堤防、南至八掌溪北岸堤防、東抵嘉義市東區、西臨台灣海峽，包含嘉義市、嘉義縣太保市、水上鄉、鹿草鄉、朴子市、義竹鄉、布袋鎮等行政區，總面積約 431.69 平方公

里，詳見圖 3-2。北岸的區域排水有鹿草排水、新埤排水；南靖排水全長 9,917 公尺；荷苞嶼排水全長 14,680 公尺進入朴子市後，匯集「木康榔」、「下竹園」、以及俗稱「鬼仔潭」的雙溪口排水，向西流直到東石鄉溫仔，才匯入朴子溪主流；龍宮溪位於八掌溪與荷苞嶼排水流域之間，大部份隸屬義竹鄉，少部份屬於布袋鎮，溪墘、新店等二條主要排水幹線於龍宮橋上游匯集後納入普通河川龍宮溪，於布袋鎮南端出海，集水面積 8,297 公頃。而本文中北岸局部細化格網所模擬之區域選擇為朴子市內 4.2 公里× 4.2 公里之方形區域，有荷苞嶼排水路經過其中(請參見圖 3-3)。八掌溪相關水系分佈位置請參見圖 3-4。

3-1-2 八掌溪南岸

南岸模擬區北鄰八掌溪南岸堤防、南至急水溪北岸堤防、東抵嘉義縣中埔鄉、西臨台灣海峽，包含嘉義縣中埔鄉、水上鄉、台南縣白河鎮、後壁鄉、新營市、鹽水鎮、學甲鎮與北門鄉，總面積約 369.21 平方公里詳見圖 3-2，南岸的河川有赤蘭溪、頭前溪等八掌溪主要支流，區域排水部分菁寮排水全長 15,250 公尺，主要流經台南縣後壁鄉，而後鎮排水全長 5,879 公尺位於菁寮排水的南方，同樣主要流經後壁鄉，另外在台南縣鹽水鎮的鹽水大排水路貫穿全鎮。本文中南岸局部細化格網所模擬之區域選擇為新營市與鹽水鎮交界處內 4.2 公里× 4.2 公里之方形區域，有鹽水大排水路經過其中(請參見圖 3-3)。八掌溪相關水系位置請參見圖 3-4。

3-2 雨量資料

本文選用 2005 年 6 月 12 日發生之暴雨事件(以下簡稱 0612 暴

雨)，且參考所蒐集之水利單位繪製的調查淹水範圍圖進行模擬結果之比對分析，並使用經地面雨量站校準整合後之 QPESUMS 雷達回波估計雨量做為模式中輸入之雨量資料，關於 OPESUMS 簡介如下節。

3-2-1 QPESUMS 簡介

中央氣象局於 2001 年底，完成全台都卜勒雷達觀測網，包括有五分山、花蓮、七股及墾丁等 4 個都卜勒雷達站(請參見圖 3-5)；同時，雷達觀測網範圍包括整個台灣地區及其鄰近海域。另於 2002 年起，與經濟部水利署、農委會水土保持局及美國劇烈風暴實驗室(National Severe Storm Laboratory; 簡稱 NSSL)共同合作開發多重觀測工具之定量降雨估計與分類技術(Quantitative Precipitation Estimation and Segregation Using Multiple Sensors; 簡稱 QPESUMS)，並進行台灣地區之定量降雨作業的平行測試，希望透過相關技術的開發，結合不同觀測工具，以提供颱風、豪雨等劇烈天氣系統即時且大範圍的定量降雨資訊。由於雷達資訊所推估的降雨可以提供比雨量站點狀分佈資訊更高解析度的空間降雨分佈資訊，可提升局部區域內雨量變化的觀測，傳統雨量與 QPESUMS 系統雨量估計方式之比較如圖 3-6 所示。經由 QPESUMS 整合處理過所產製的網格資料，空間解析度約 1.25 公里×1.25 公里、時間間距為 10 分鐘，資料的起始點為北緯 27°及東經 118°，資料範圍介於北緯 20° ~ 27°和東經 118° ~ 123.5°之間，其中東西向與南北向網格點分別為 441 與 561 個格點資料(請參見圖 3-5)。

3-2-2 雷達回波估計雨量方法

本文中 QPESUMS 系統使用之雷達回波估計雨量方法為 Power-law Z-R 關係式，此法利用雷達觀測某一降雨事件，取該地區之某一空間上單點回波值(即 Z 值)，再與該空間點之雨量觀測值(即 R 值)做線性回歸，以求得兩者之相關曲線，即 Z-R 關係式。依據中央氣象局網站說明文件，QPESUMS 系統現階段使用之 Z-R 關係式為 $Z = 32.5R^{1.65}$ ，主要是參考 Alberta, Canada 之夏季對流降雨和雷達觀測資料之關係(Xin et al., 1997)，並非參考台灣地區降雨系統之降雨與回波相關性統計。因此，欲使用單一 Z-R 關係式來進行台灣地區不同降雨型態之降雨量估計，仍存在有極高之不確定性，尚需依賴更多降雨資料來進行統計及驗證；故本文所使用之雨量資料為上述雷達回波估計雨量再與地面雨量站整合後之雨量資料，整合方法如下所述。

3-2-3 雷達-雨量站整合降雨估計法

中央氣象局 QPESUMS 系統之定量降雨資料，其空間解析度大約 1.25 公里× 1.25 公里，時間解析度約 10 分鐘。因此對於淹水預警研究而言，應可以提供解析度較高之災害點雨量資料。圖 3-7 為雷達-雨量站觀測降雨整合法的概念示意圖，其中 scale 1 (請參見圖 3-7a) 表地面雨量觀測，假設其為真實降雨值，但其解析度約為 10 公里，在山區或偏遠地區則更差。scale2 (請參見圖 3-7b) 表雷達估計降雨，其特色為雨量估計為間接求取，但空間分佈較密，解析度較高(大約 1.3 公里)，假設其為空間之內插權重值。

根據圖 3-7 的概念模式，如圖 3-7c 所示，將逐步求出雷達-雨量

站整合雨量 $R_i(x, y)$ ，其中 x, y 為 QPESUMS 的網格矩陣， x 共有 441 點， y 共 561 點，東西方向範圍 (x) 為東經 118° 到 123.5° ，南北方向範圍 (y) 為北緯 20° 到 27° 。

以下為雷達-雨量站整合雨量 $R_i(x,y)$ 求取方法：

1. 令雷達回波估計雨量為 $R_r(x,y)$ ，地面雨量站觀測所得雨量為 $R_g(k)$ ，其中 k 為地面站代號， k 為 1 到 406。
2. 將 $R_r(x,y)$ 內插至 $R_g(k)$ 所在之經緯座標上，得到 $R_r(k)$ 。
3. 求取雨量站上 $R_r(k)$ 與 $R_g(k)$ 之差值為 $\Delta R(k)$ ， $\Delta R(k) = R_r(k) - R_g(k)$ 。
4. 應用數值內插方法將 $\Delta R(k)$ 內插回雷達估計網格 x, y 上得到 $\Delta R(x,y)$ 。
5. 求得雨量站整合雨量 $R_i(x,y)$ ， $R_i(x,y) = R_r(x,y) - \Delta R(x,y)$ 。

雷達-雨量站整合降雨估計法主要是將雷達估計降雨與地面觀測雨量間之差值，透過 Ordinary Kriging 法計算。然後，將差值計算結果再加回雷達估計降雨值中，以估計各地之降雨值。

3-3 地文資料

3-3-1 DTM 數值地形

台灣地區 DTM 資料由國立中央大學太空及遙測研究中心提供，其資料型態為 ASCII 碼，資料內容含各點之 UTM 國際座標與高程資料。本文模擬區範圍為八掌溪中、下游流域，由台灣地圖像片基本圖檢索取得所需之 DTM 資料。

3-3-2 資料之處理

地理資料庫之建立需考慮地形之幾何與屬性資料，此外，所利用之地圖種類亦很多，包含台灣地區 1/25,000 地形圖、區域排水系統調查圖、雨水下水道系統圖、淹水區域調查圖、雨量站位置圖、縣市鄉鎮行政分區圖等。為整合上述各種資料，需引用地理資訊系統 (Geographic Information System, 簡稱 GIS) 之技術，採用美國 ESRI 公司 (Environmental Systems Research Institute) 研發之 ArcView 軟體來建立地理資料庫。

由 DTM 資料建立之點屬性圖層為空間間距 40 公尺之高程資料，可滿足 40 公尺×40 公尺數值計算格網所需。格網間距大小對淹水模擬的影響甚大，若採用小格網之數值模擬，模式所需資料量十分龐大，且增加模式演算時間。因此，本文中將 DTM 之 40 公尺間距之高程資料統計平均後，分別獲得 120 公尺與 600 公尺格網之平均高程資料。即分別針對 120 公尺間距格網與 600 公尺間距格網中之 9 個與 225 個 40 公尺間距之 DTM 資料點，將各點高程經統計分析後得到算術平均高程，做為該格網之代表高程。

八掌溪北岸、南岸模擬區之地表數值高程如圖 3-8 所示。八掌溪北岸模擬區空間解析度 120 公尺×120 公尺有 29,984 個計算格網(請參見圖 3-9)、南岸有 25,658 個計算格網(請參見圖 3-10)；而解析度 600 公尺×600 公尺部份，北岸為 1,210 個計算格網(請參見圖 3-11)、南岸則為 1,028 個計算格網(請參見圖 3-12)。

3-3-3 土地利用型態

模式中採用的地表曼寧糙度是根據內政部地政司的台灣省國土利用現況調查數化資料中的分類來決定各格網的土地利用狀況。由於不同的土地利用型態會有不同的曼寧糙度，所選定之曼寧糙度值請參見表 3-1。因單一數值地形高程格網內可能包含一種以上之土地利用型態，因此，最後將每個數值地形高程格網依其土地利用之曼寧糙度值採用面積權重方式平均而得其糙度代表值。

3-4 地表格網與 QPESUMS 格網之套疊

由於地表格網空間解析度 600 公尺× 600 公尺或 120 公尺× 120 公尺皆小於 QPESUMS 格網的 1.25 公里× 1.25 公里，因此兩種網格套疊後無法完全緊密疊合，為求得降雨資訊在研究區域內之最合理輸入值，本文以面積權重平均的方式進行地表格網與 QPESUMS 網格間之銜接，兩者銜接概念如圖 3-13 所示。有關面積權重平均方式，茲挑選其中一種格網套疊組合為例，如圖 3-14 所示，因此(2.12)式中，單一地表淹水計算網格之平均降雨強度 I_{eff} [mm/hr]可表示為：

$$I_{eff} = \frac{\sum_{i=1}^N R_i A_i}{\sum_{i=1}^N A_i} \quad (3.1)$$

式中， R_i 為單一 QPESUMS 格網之降雨強度[mm/hr]， A_i 為地表格網內於個別 QPESUMS 格網所佔的面積[m²]。以本例而言，地表格網總共與四個 QPESUMS 格網有交疊，即 $N = 4$ 。

第四章 模擬結果與比較

八掌溪流域於 2005 年 0612 暴雨的侵襲下遭受淹水重創，由於該場事件水利署已完成調查淹水範圍，因此選用此場降雨事件做為研究案例並對淹水模擬的結果進行討論與分析。此外，本文中淹水之定義為一場降雨事件積水深度在 30 公分以上之區域稱為淹水區域(經濟部水利署水利規劃試驗所，2004)。而最大淹水深係指研究區域內所有二維計算格網，在該場事件降雨歷程中，個別格網發生最大之累積水深，經過統計後呈現之結果即為最大淹水深圖。本文以水利署繪製的 0612 暴雨調查淹水範圍圖(請參見圖 4-1)做為二維漫地流淹水模式最大淹水深比較之依據。

4-1 雨量資料之比較

在沒有 QPESUMS 雷達估計降雨資料之前，進行淹水模擬經常使用徐昇雨量站網的方式做為輸入模式的雨量，本節以雷達-雨量站整合降雨估計法整合後之雨量資料與徐昇雨量站網之雨量資料作一對照，且選用相同的時間段為 0612 暴雨事件從 6 月 14 日 3 時至 15 日 3 時，共計 24 小時。另外，在挑選雨量站方面，本文以徐昇控制面積權重(請參見表 4-1 及表 4-2)做為考量。

雨量站提供整點時刻的逐時雨量資料，在八掌溪北岸模擬區域內或鄰近的雨量站皆使用中央氣象局自動雨量站的記錄資料，包含鰲鼓、朴子、魚寮、中埔、南靖、東後寮、岸內共 7 個站；南岸模擬區內或鄰近的雨量站共有 15 個，其中 13 個為中央氣象局自動雨量站分別為北門、東後寮、岸內、下營、新營、南靖、東河、白河、中埔、

內埔、馬頭山、頭凍、大棟山，另外兩個雨量站關子嶺、小公田則隸屬經濟部水利署。上述八掌溪南、北岸模擬區的雨量使用徐昇氏多邊形法當做降雨空間分佈的分析並做為輸入淹水模式的雨量，研究區域之徐昇式多邊形法分區如圖 4-2 與圖 4-3 所示，理論簡述如附錄 B 所示。

首先將選定之 24 小時內使用雷達-雨量站整合降雨估計法整合後單一小時之降雨強度逐一繪製成圖 4-4a 至圖 4-27a，再將使用徐昇雨量站網單一小時之降雨強度逐一繪製成圖 4-4b 至圖 4-27b，相同空間區域的兩種雨量資料呈現出來的降雨趨勢相當接近，降雨尖峰時段大致介於 6 月 14 日 6~10 時之間，可說明雷達-雨量站整合降雨估計法提供的雨量在相同空間位置的時間變化資訊是值得信賴的，但觀察每一時刻降雨強度值代表的顏色區塊配置，可發覺雷達-雨量站整合降雨估計法的高空間解析度資料能呈現雨量在研究區域內分佈上較細緻的變化，在空間上較能提供局部小地區之雨量變化，有別於過去傳統水文的作法，單純將地面雨量站的資料配置在徐昇網劃分之控制面積上，並完全代表該塊面積的雨量，往往無法實際對應同一時間條件下各區域降雨的局部變化與差異；此外，地面雨量站在颱風期間的觀測偶爾會發生故障或異常，因而造成雨量資料的遺失，連帶影響在淹水模擬上無足夠的雨量參數可用。而在本場事件中，由圖 4-4 至圖 4-27 比較可知，在 24 小時模擬時段內使用徐昇雨量站網所提供之雨量資料與雷達-雨量站整合降雨估計法提供之雨量相較有低估之趨勢，因此較未能實際反應出本場事件之真實降雨情形，比較地文條件相同的解析度 600 公尺× 600 公尺計算格網之最大淹水深圖(請參見圖 4-28a 與圖 4-28b)，觀察模擬淹水範圍可發現徐昇雨量站網法的淹水面積與

淹水深度亦皆有低估之趨勢，經與實際調查淹水範圍(請參見圖 4-1)比較之後，雷達-雨量站整合降雨估計法較能反應降雨實況，故在以下章節皆採用雷達-雨量站整合降雨估計法所提供之雨量資料來進行模擬與比較，期能反應出符合實際雨量下之模擬結果。

4-2 全區 120 公尺格網模擬結果

首先針對全模擬區使用解析度 120 公尺× 120 公尺之淹水計算格網做探討。本場事件輸入雷達-雨量站整合降雨估計法整合後之雨量資料，並使用演算時距 4 秒進行模式演算，採用此演算時距之原因為考慮於此解析度之格網下，模式能夠收斂之最大演算時距。模擬起始時刻為 2005 年 6 月 14 日 3 時、結束時刻為 6 月 15 日 3 時，共計 24 小時。該場事件模擬時間之逐一時刻之雷達-雨量站整合降雨估計法雨量空間分布圖如圖 4-4a 至圖 4-27a 所示。圖 4-29 至圖 4-34 分別為模擬淹水之第 4、8、12、16、20、24 小時之淹水圖。圖中可見模擬第 4 小時(時間為 06.14.06:00)後，南北兩岸開始發生零星 0.5 公尺以下的積水，唯有南岸中的中埔鄉、水上鄉與白河鎮產生較多 0.5 公尺~1.0 公尺的些許積水;模擬第 8 小時(時間為 06.14.10:00)，南北兩岸已開始產生沿著有水系經過的低窪地區積水，除了南岸中的中埔鄉、水上鄉與白河鎮有少部分 2.0 公尺~3.0 公尺的積水外，其餘地區多屬 0.3 公尺~0.5 公尺與 0.5 公尺~1.0 公尺的淹水高度;模擬第 12 小時(時間為 06.14.14:00)，淹水趨勢不變，唯淹水深度與淹水範圍逐漸擴大，而北岸中因朴子市有荷苞嶼排水路及太保市、六腳鄉有新埤排水路經過，在這兩條排水路附近也產生 2.0 公尺~3.0 公尺的淹水，另外在南岸中水上鄉赤蘭溪匯入八掌溪前的地區亦有相同深度的淹水;模擬第

16 小時(時間為 06.14.18:00)後，上游地區開始產生退水，但中下游地區淹水規模持續擴大，整個北岸東石鄉、布袋鎮都是大面積淹水，而南北兩岸之下游的各排水路也都產生了 0.5 公尺~1.0 公尺甚至是 1.0 公尺~2.0 公尺的淹水；模擬第 20 小時(時間為 06.14.22:00)，上游持續退水，反之，北岸中的東石鄉、布袋鎮淹水範圍與淹水深度持續加劇，此時南岸中的鹽水鎮幾乎全面的淹水，而後壁鄉整個八掌溪沿岸也皆有淹水，南北兩岸在此時的淹水深大約介於 0.5 公尺~2.0 公尺之間；模擬第 24 小時後(時間為 06.15.02:00)，上游又開始增加淹水，中下游各排水路附近淹水範圍與淹水深度仍不斷增加，已有部分地區淹水深達到 2.0 公尺~3.0 公尺，北岸之朴子市、東石鄉與布袋鎮及南岸之鹽水鎮、學甲鎮與北門鄉的淹水此時最為嚴重。

模擬最大淹水深如圖 4-35 所示；發現模擬淹水範圍與水利署 0612 調查淹水範圍有相似之趨勢(請參閱圖 4-1)，觀察八掌溪北岸沿海低窪地區東石鄉、布袋鎮以及鄰近的義竹鄉(龍宮溪排水)，由於長期超抽地下水使得地層下陷加上暴雨期間受大潮影響甚鉅，因而造成大範圍的淹水現象，與實際調查淹水範圍相當符合，位於朴子市和東石鄉的荷苞嶼排水以及太保市的新埤排水其兩岸皆有反應實際淹水情形，朴子市境內東北方與六腳鄉接壤處模擬結果也與實際淹水災情接近。八掌溪南岸部分，位於水上鄉境內靠近中埔鄉的赤蘭溪根據水利署調查圖有淹水記錄，模擬結果亦反應此一狀況，而比較後壁鄉菁寮排水的淹水情形，亦靠近實際發生的地點，學甲鎮和北門鄉交界處及鄰近區域的淹水災害，模擬結果亦獲得相同位置，另外貫穿鹽水鎮的鹽水大排水路因為地勢較低的緣故，淹水模式模擬結果亦顯示出此水系之流路。

經由上述結果比較可知，利用二維漫地流淹水模式配合 QPESUMS 雷達回波估計雨量再與地面雨量站所測得雨量整合後之雨量資料，再搭配正確之地文資料做為流域淹水計算之輸入條件，模擬結果能正確反應八掌溪流域之淹水特性。因此，本文緊接於下一節中探討全模擬區使用解析度 120 公尺× 120 公尺之淹水計算格網與全模擬區使用解析度 600 公尺× 600 公尺，結合局部細化解析度 120 公尺× 120 公尺之淹水計算格網所相互對應其局部細化區域的模擬結果與比較。

4-3 全區 120 公尺格網與局部細化 120 公尺格網對應區域模擬結果與比較

本文在全區使用解析度 600 公尺× 600 公尺之淹水計算格網中搭配局部細化模擬區域使用解析度 120 公尺× 120 公尺之淹水計算格網，劃定之區域範圍南北兩岸皆為 4.2 公里× 4.2 公里之方形區域，因此每個局部細化模擬區內包含 1,225 個 120 公尺之格網點。為評估模式中局部細化格網所演算之精度，本文採用均方根誤差 (Root-Mean-Squared Error) *RMSE* 與相關係數 (Correlation Coefficient) *R* 做為評比指標，其公式分別如下：

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (d_o - d_f)^2}{N}} \quad (5.1)$$

$$R = \frac{N \sum_1^N d_o d_f - \sum_1^N d_o \sum_1^N d_f}{\sqrt{N \sum_1^N d_o^2 - (\sum_1^N d_o)^2} \sqrt{N \sum_1^N d_f^2 - (\sum_1^N d_f)^2}} \quad (5.2)$$

式中， d_o 為全區 120 公尺格網點淹水深[m]； d_f 為局部細化 120 公尺格網點淹水深[m]； N 為格網點數目。

一般而言，可藉由 RMSE 之數值進而瞭解局部細化 120 公尺格網點淹水深值與全區 120 公尺格網點淹水深值之離散程度。RMSE 值愈小代表局部細化格網模擬結果之離散程度愈小，也愈靠近全區皆使用 120 公尺格網之演算結果，其結果亦較佳。而 R 之數值顯示上述兩個變數之間線性關係的強度和方向。在統計學中，相關係數的意義是用來衡量兩個變數相對於其相互獨立的距離，若定義相關係數為以一變數預測另一變數之能力，則相關係數可定義為預測能力之測度值，介於-1 與+1 之間，若相關係數愈靠近-1 或是+1 時，表示預測能力愈可信。

4-3-1 八掌溪南北岸局部模擬區域結果比較

為探討模擬區內局部細化 120 公尺格網之區域與全區 120 公尺格網中其相對應之區域兩者在模擬結果的差異，本文將模擬時間 24 小時中之第 4、8、12、16、20、24 小時與最大淹水深之模擬結果做一比較。觀察北岸全區 120 公尺格網淹水深圖(請參見圖 4-36a 至圖 4-42a)與北岸局部細化 120 公尺格網淹水深圖(請參見圖 4-36b 至圖 4-42b)，比較之後可發現兩者有極雷同之趨勢，因此進一步分析兩者於第 4、

8、12、16、20、24 小時與最大淹水深於相同位置格網點上之淹水深比較(請參見圖 4-43 至圖 4-49)。於第 4 小時, RMSE 值為 0.014 公尺, R 為 0.990; 於第 8 小時, RMSE 值為 0.069 公尺, R 為 0.983; 於第 12 小時, RMSE 值為 0.218 公尺, R 為 0.956; 於第 16 小時, RMSE 值為 0.205 公尺, R 為 0.962; 於第 20 小時, RMSE 值為 0.260 公尺, R 為 0.913; 於第 24 小時, RMSE 值為 0.301 公尺, R 為 0.891; 於最大淹水深時, RMSE 值為 0.308 公尺, R 為 0.888。由上述結果可知, 當時間愈往後推移, 局部細化 120 公尺格網模擬之結果與全區 120 公尺格網模擬之結果, 兩者之 RMSE 值會愈大, 而 R 值則會愈小, 說明兩者之模擬結果隨演算時間增展產生愈大的差異。

而南岸部分, 觀察南岸全區 120 公尺格網淹水深圖(請參見圖 4-50a 至圖 4-56a)與北岸局部細化 120 公尺格網淹水深圖(請參見圖 4-50b 至圖 4-56b), 比較之後可發現兩者亦出現極相似之趨勢, 因此再次分析兩者於第 4、8、12、16、20、24 小時與最大淹水深於相同位置格網點上之淹水深比較(請參見圖 4-57 至圖 4-63)。於第 4 小時, RMSE 值為 0.029 公尺, R 為 0.937; 於第 8 小時, RMSE 值為 0.075 公尺, R 為 0.962; 於第 12 小時, RMSE 值為 0.072 公尺, R 為 0.990; 於第 16 小時, RMSE 值為 0.099 公尺, R 為 0.986; 於第 20 小時, RMSE 值為 0.143 公尺, R 為 0.973; 於第 24 小時, RMSE 值為 0.221 公尺, R 為 0.958; 於最大淹水深時, RMSE 值為 0.216 公尺, R 為 0.959。同樣的結果顯示, 南岸局部細化 120 公尺與北岸局部細化 120 公尺格網所模擬出之結果一致, 趨勢皆是當時間愈往後推移, 局部細化 120 公尺格網所模擬之結果會與全區 120 公尺格網所模擬之結果產生愈大的差異。而造成此差異之原因可歸咎於因為不同之初始邊界條件, 將

隨演算時間及空間的增展而使兩者之差異增大。本文中局部細化 120 公尺格網所採用之邊界條件為相鄰近 600 公尺格網之演算結果平均而來，而全區 120 公尺格網所採用之邊界條件為相鄰近 120 公尺格網之演算結果，因兩者之初始邊界條件即為不同，而造成上述南北兩岸所顯示之模擬結果。然局部細化 120 公尺格網模擬結果與全區 120 公尺格網模擬結果雖隨時間增展會導致誤差增大，但於不同時刻所模擬之結果，兩者趨勢仍相當吻合。

4-3-2 演算效率

本文中執行模式所使用的計算機之作業系統為 Microsoft Windows XP Professional Version 2002，中央處理器規格為 Intel® Core(TM)2 CPU 6320@ 1.86 GHz ; 1.86GHz, 0.98GB 記憶體實體位置延伸。文中解析度 120 公尺淹水計算格網所使用之演算時距為 4 秒，解析度 600 公尺淹水格網所使用之演算時距為 20 秒。北岸部份，全模擬區使用解析度 600 公尺× 600 公尺之淹水計算格網共計 1,210 個，所搭配局部細化解析度 120 公尺× 120 公尺之淹水計算格網共計 1,225 個；全模擬區使用解析度 120 公尺× 120 公尺之淹水計算格網共計 29,984 個。演算時間上，全模擬區使用解析度 600 公尺× 600 公尺之淹水計算格網中搭配局部細化模擬區使用解析度 120 公尺× 120 公尺之淹水計算格網演算時間為 4 分 51 秒，全模擬區使用解析度 120 公尺× 120 公尺之淹水計算格網演算時間為 12 時 9 分 21 秒。

南岸部分，全模擬區使用解析度 600 公尺× 600 公尺之淹水計算格網共計 1,028 個，所搭配局部細化解析度 120 公尺× 120 公尺之淹水計算格網共計 1,225 個；全模擬區使用解析度 120 公尺× 120 公尺之

淹水計算格網共計 25,658 個。演算時間上，全模擬區使用解析度 600 公尺× 600 公尺之淹水計算格網中搭配局部細化模擬區使用解析度 120 公尺× 120 公尺之淹水計算格網演算時間為 4 分 37 秒，全模擬區使用解析度 120 公尺× 120 公尺之淹水計算格網演算時間為 11 時 12 分 42 秒。

由上述結果可知，若採取全模擬區使用解析度 600 公尺× 600 公尺之淹水計算格網中搭配局部細化模擬區使用解析度 120 公尺× 120 公尺之淹水計算格網做為模擬條件，在演算時間上將可獲得大幅的縮減，而在其局部細化格網演算結果之部分，模擬結果亦與全模擬區使用解析度 120 公尺× 120 公尺之淹水計算格網所相對應區域之模擬結果有相當程度的吻合。因此應能以兩種不同解析度之格網進行模擬，以達到較佳之演算效率，兼顧模擬精度及模擬時間，並能實際應用於即時淹水預報。

4-4 局部細化 120 公尺格網模擬區域之淹水體積

本節將探討八掌溪南北岸局部細化 120 公尺格網模擬區域內之淹水體積守衡的情況。首先，北岸部分經過統計，模擬 24 小時後局部細化 120 公尺格網模擬區域內之總淹水體積為 11,712,240 立方公尺，而其對應之 24 小時總降雨量為 7,007,575 立方公尺，邊界上之淨總入流量(總入流量-總出流量)為 4,354,216 立方公尺，即北岸局部細化 120 公尺格網模擬區域部分，降雨量與出入流量之總和為 11,361,791 立方公尺。比較總淹水體積與降雨量及邊界流量之總和後可發現兩者之誤差百分比為 2.99%。

而南岸部分經過統計，模擬 24 小時後局部細化 120 公尺格網模擬區域內之總淹水體積為 16,155,360 立方公尺，而其對應之 24 小時總降雨量為 7,476,725 立方公尺，邊界上之淨總入流量(總入流量-總出流量)為 8,605,978 立方公尺，即南岸局部細化 120 公尺格網模擬區域部分，降雨量與出入流量之總和為 16,082,703 立方公尺。比較總淹水體積與降雨量及邊界流量之總和後可發現兩者之誤差百分比為 0.45%。

由上述結果可知，南北兩岸在模擬後皆出現總淹水體積略大於總降雨量與總出入流量之和的情況，其原因為本文中局部細化格網之邊界條件乃由鄰近粗格網之模擬結果而給定，其中包含邊界出流與出流。在出流的部份，本文假設出流量均勻分配至每一細格網上，唯實際情況中，細化之格網較能反應出局部不規則地形，以平均方式分配其出流量，將可能使得局部高程較高之隔網點無足夠之淹水深產生此出流量，進而造成出流量無法達到所給定之流量值，因此會有上述體積不完全守衡之情形。若是將來粗格網給予細格網之邊界條件上能考量更多條件輸入以符合兩者交疊邊界上模擬之情況，則應可消除上述體積不完全守衡之情況。

第五章 結論與建議

5-1 結論

1. 本文主要利用二維漫地流淹水模式搭配使用雷達-雨量站整合降雨估計法所提供之雨量。相較於無法考慮到雨量站之高度及地形變化，而是假設雨量站的降雨量呈線性變化，將分割的控制面積分配至最接近的雨量站之徐昇雨量站網法，使用雷達-雨量站整合降雨估計法所得到之雨量值更能反應出實際降雨情況以提高模擬結果之精度。
2. 本文中完成不同尺度格網邊界之銜接，並進行大尺度格網內部結合局部區域小尺度格網之同步演算工作。邊界銜接部分，採用流量平均之方式將大尺度格網演算所得流量平均分配至小尺度格網邊界上為其開放邊界條件，如此，在大尺度格網中結合局部小尺度格網於模擬時間上將獲得更佳之效率，若能取得即時預報之預測雨量值則可實際應用於即時淹水預報。
3. 空間解析度 120 公尺× 120 公尺之淹水計算格網演算時距採用 4 秒，空間解析度 600 公尺× 600 公尺之淹水計算格網演算時距採用 20 秒。隨格網尺度不同而使用相對應不同之演算時距，可避免可蘭數(Courant number)的選取不當而產生計算結果逐漸發散，而導致極大的誤差，形成數值解的不穩定性。因此在模擬過程中，不同尺度之淹水計算格網使用不同大小之演算時距，模擬結果將更符合實際流況。
4. 比較局部細化解析度 120 公尺× 120 公尺之淹水計算格網點與全模

擬區解析度 120 公尺×120 公尺之淹水計算格網點在相同位置上之淹水深，可知雖隨模擬演算時間往後推移逐漸產生較大誤差，但兩者間之趨勢仍屬相當吻合。本文中局部細化格網係使用相鄰近較大尺度格網之演算結果為其開放邊界入流條件，因初始邊界條件即為不同，遂造成此兩者模擬結果之差異。

5. 探討全模擬區解析度 600 公尺×600 公尺，結合局部細化解析度 120 公尺×120 公尺之淹水計算格網與全模擬區解析度 120 公尺×120 公尺之淹水計算格網兩者在演算時間上的差異，可顯見前者所需之演算時間遠低於後者；北岸部分，多重格網之演算時間為 4 分 51 秒，全區單一細格網之演算時間為 12 時 9 分 21 秒，兩者差距約 150 倍。而南岸部分，多重格網之演算時間為 4 分 37 秒，全區單一細格網之演算時間為 11 時 12 分 42 秒，兩者差距約 146 倍。其主要原因為模擬區域內格網尺度、數目與演算時距之差異所造成；若是針對局部重點地區以較小尺度之格網進行模擬，而局部重點區域以外之區域以較大尺度之格網進行模擬，則可有效率地兼顧模擬精度及模擬時間。

5-2 建議

1. 本文中細格網之開放邊界條件係由相鄰近之粗格網演算後之結果而得，並採用流量歷線為其邊界輸入條件，將來細格網之開放邊界條件除上述之流量歷線外，亦可嘗試給予水位歷線、流速歷線或是前兩者之組合，以引入其他適當的邊界條件。
2. 本文中粗格網所給予細格網之邊界入流歷線乃經由粗格網上之流

量平均分配而得，唯實際流況包含多項影響因子，將來於邊界流量之分配上可搭配曼寧公式、Chezy 公式等方式計算，期能掌握更符合現況之流況。

3. 本研究僅針對單一粗格網模擬區域中搭配單一局部細化格網模擬區，未來可朝向單一粗格網模擬區域包含多個局部細化格網模擬區進行同步演算，與能夠即時自動化劃分局部細化模擬區域進行模擬之方向發展，以達更高之演算效率；此外，若將來能夠加入更多颱風個案研究，進行更多的模擬與驗證工作，將可使模式更趨於成熟完善。



參考文獻

1. Aknbi, A. A., and Katopodes, N. D., "Model for Flood Propagation on Initially Dry Land", *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol. 114, pp.689-705, (1988).
2. Balloffet, A., and Scheffler, M. L., "Numerical Analysis of the Teton Dam Failure Flood", *Journal of Hydraulic Research*, Vol. 20, pp.317-428, (1982).
3. Borthwick, A.G.L., Leon, S.C. and Jozsa, J., "Adaptive Quadtree Model of Shallow-flow Hydrodynamics", *Journal of Hydraulic Research*, Vol. 39(4), pp.3413-424, (2001a)
4. Borthwick, A.G.L., Leon, S.C. and Jozsa, J., "The Shallow Flow Equations Solved on Adaptive Quadtree Grids", *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, Vol. 37(6), pp.691-719, (2001b)
5. Cunge, J. A., Holly, F. M., and Verwey, A., "Practical Aspects of Computational River Hydraulics", Pitman Publishing Ltd., London (1980).
6. Garcia, R., and Kahawata, R. A., "Numerical Solution of the St. Venant Equations with the MacCormack Finite-Difference Scheme", *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, Vol.6, pp.259-274, (1986).
7. Gustafsson, B., "An Alternating Direction Implicit Method for Solving the Shallow Water Equations", *Journal of the Computational Physics*, No. 7, pp.239-254, (1971).
8. Hu, K., Mingham, C.G. and Causon, D.M., "A Mesh Patching Method for Finite Volume Modelling of Shallow Water Flow", *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, Vol. 50(12), pp.1381-1404, (2006).
9. Inoue, K., Iwasa, Y., and Matsuo, N., "Numerical Analysis of Two Dimensional Free Surface Flow by Means of Finite Difference Method and Its Application to Practical Problems", *Proceedings of*

ROC-Japan Joint Seminar on Water Resources Engineering, Taipei, R.O.C, (1987).

10. Katopodes, N. D., and Strelkoff, T., "Computing Two Dimension Dam-Break Flow Wave", Journal of Hydraulics Division, ASCE, Vol. 104, (Sept.,1978).
11. Katopodes, N. D., and Strelkoff, T., "Two-Dimensional Shallow Water-Wave Models", Journal of the Engineering Mechanics Division, ASCE, Vol. 105, No, EM2, pp.317-434, (April,1979).
12. Lamby, P., Muller, S. and Stiriba, Y., "Solution of Shallow Water Equations Using Fully Adaptive Multiscale Schemes", International Journal for Numerical Methods in Fluids, Vol. 49(4), pp.417-437, (2005).
13. Ruge, J.W., McCormick, S.F. and Yee, S.Y.K., "Multilevel Adaptive Methods for Semiimplicit Solution of Shallow-Water Equations on a Sphere", Monthly Weather Review, Vol. 123(7) pp.2197-2205, (1995).
14. Shishkin, G.I. and Vabishchevich, P.N., "Interpolation Finite Difference Schemes on Grids Locally Refined in Time", Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 190(8-10), pp.889-901, (2000).
15. Spitaleri, R.M. and Corinaldesi, L., "Multigrid Computation for the Two-dimensional Shallow Water Equations", Nonlinear Analysis Theory Methods & Applications, Vol. 30(2), pp.709-717, (1997).
16. Vongvisessomjai, S., Tingsanchali, T., and Chaiwat, C., "Bangkok Flood Plain Model", 21st IAHR Congress, Melbourne, Australia, 19-23 pp.433-488, (August,1985).
17. Xanthopoulos, T., and Koutitas, C., "Numerical Simulation of Two-Dimensional Flood Wave Propagation due to Dam Failure", Journal of Hydraulic Research, Vol. 14, pp.321-331, (1976).
18. Xin, L., G. Recuter, and B. Larochelle, "Reflectivity-rain Rate Relationship for Convective Rainshowers in Edmonton", Atmos. Ocean, Vol. 35, pp.513-521, (1997)

19. Yu, D. and Lane, S.N., "Urban Fluvial Flood Modelling Using a Two-dimensional Diffusion-wave Treatment, Part 1: Mesh Resolution Effects", *Hydrological Processes*, Vol. 20(7), pp.1541-1565, (2006a).
20. Yu, D. and Lane, S.N., "Urban Fluvial Flood Modelling Using a Two-dimensional Diffusion-wave Treatment, Part 2: Development of a Sub-grid-scale Treatment", *Hydrological Processes*, Vol.20(7), pp.1567-1583, (2006b).
21. 王意郎，1993，"利用中正都卜勒雷達對臺灣北部地區降水系統雨量估計之研究"，國立中央大學大氣物理研究所碩士論文。
22. 吳啟瑞，1993，"八掌溪流域之淹水模擬"，國立台灣大學農業工程研究所碩士論文。
23. 吳書幃，2007，"即時降雨資料應用於淹水預報之研究"，國立台灣大學生物環境系統工程研究所碩士論文。
24. 沈榮茂、楊德良，1992，"流域之漫地流有限元素模式及穩定度分析之研究"，第六屆水利工程研討會論文集 pp.82-93，新竹市。
25. 張智昌，2006，"整合氣象雷達與即時降雨資料於颱風降雨推估之研究"，國立台灣大學地理環境資源研究所碩士論文。
26. 許銘熙、鄧慰先、盧重任、黃成甲、葉森海，1998，"抽水站與閘門操作對都會區淹水影響之研究(一)"，行政院國科會，台北市。
27. 陳昌榮，2002，"流域暴雨逕流和淹水之模擬"，國立台灣大學生物環境系統工程研究所碩士論文。
28. 陳欣怡，2001，"台南科學工業園區暴雨排水之動態模擬"，國立台灣大學農業工程研究所碩士論文。
29. 陳宣宏，2002，"漫地流與雨水下水道水流之動態模擬"，國立台灣大學生物環境系統工程研究所博士論文。
30. 國家災害防救科技中心，2005，"0612 豪雨水災災因勘查報告書"，台北市。
31. 黃成甲，1997，"流域洪水與淹水演算模式之研究"，國立台灣大學農業工程研究所碩士論文。

32. 楊昌儒、蔡長泰，1998，”數值高程模型解析度對嘉義沿海地區淹水模式影響之研究—以賀伯颱風為例”，台灣水利第46 第一期，pp.43-52。
33. 楊政潭，2003，”雷達回波應用於颱風降雨空間分佈與總量之研究—以納莉颱風為例”，國立中央大學水文所碩士論文。
34. 經濟部水利署水利規劃試驗所，2004，”台中市及周邊排水淹水潛勢與預警系統建立研究-淹水潛勢建置(2/2)研究報告”，台中。
35. 鳳雷，1992，”雷達回波垂直結構與降水定量估計—楊希颱風”，國立台灣大學大氣科學研究所碩士論文。
36. 賴進松、林孟郁，2000，”台北縣三重蘆洲及新莊樹林區淹水預測之研究”，89 年農工研討會論文，高雄市。
37. 盧重任，1998，”台北縣板橋地區洪水及淹水演算模擬”，國立台灣大學農業工程研究所碩士論文。
38. 簡名毅，1999，”鹽水河流域洪水與淹水演算模式”，國立台灣大學農業工程研究所碩士論文。
39. 顏清連、許銘熙、陳昶憲、賴進松，1986，”淡水河系洪水演算模式(四)堤防潰決洪流模式之建立”，行政院國科會，防災科技研究報告 pp.75-19，台北市。

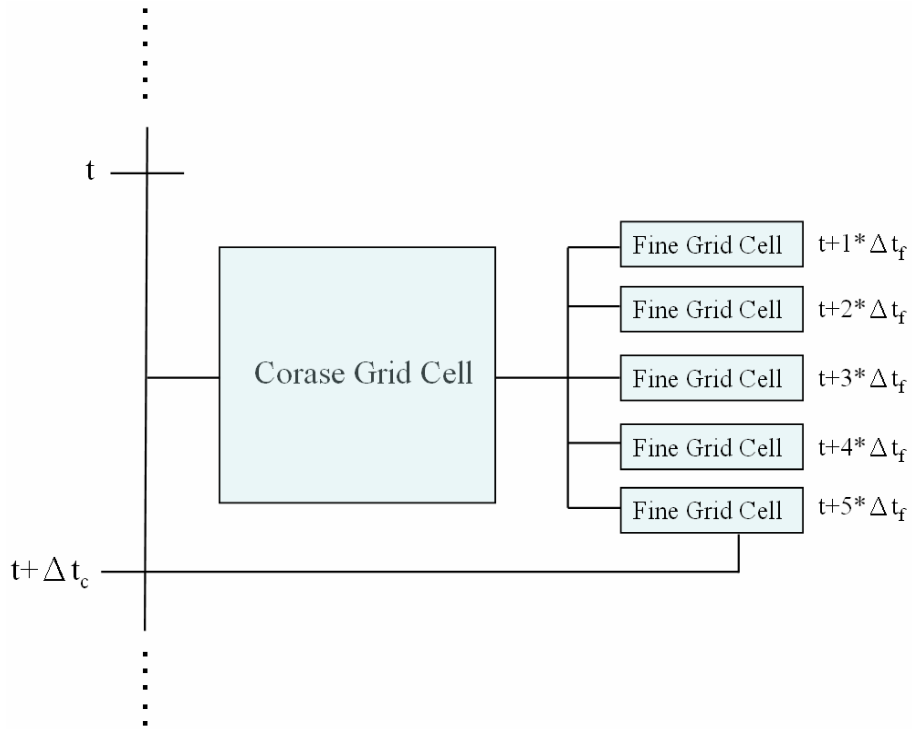


圖 2-1 多重格網演算時距示意圖

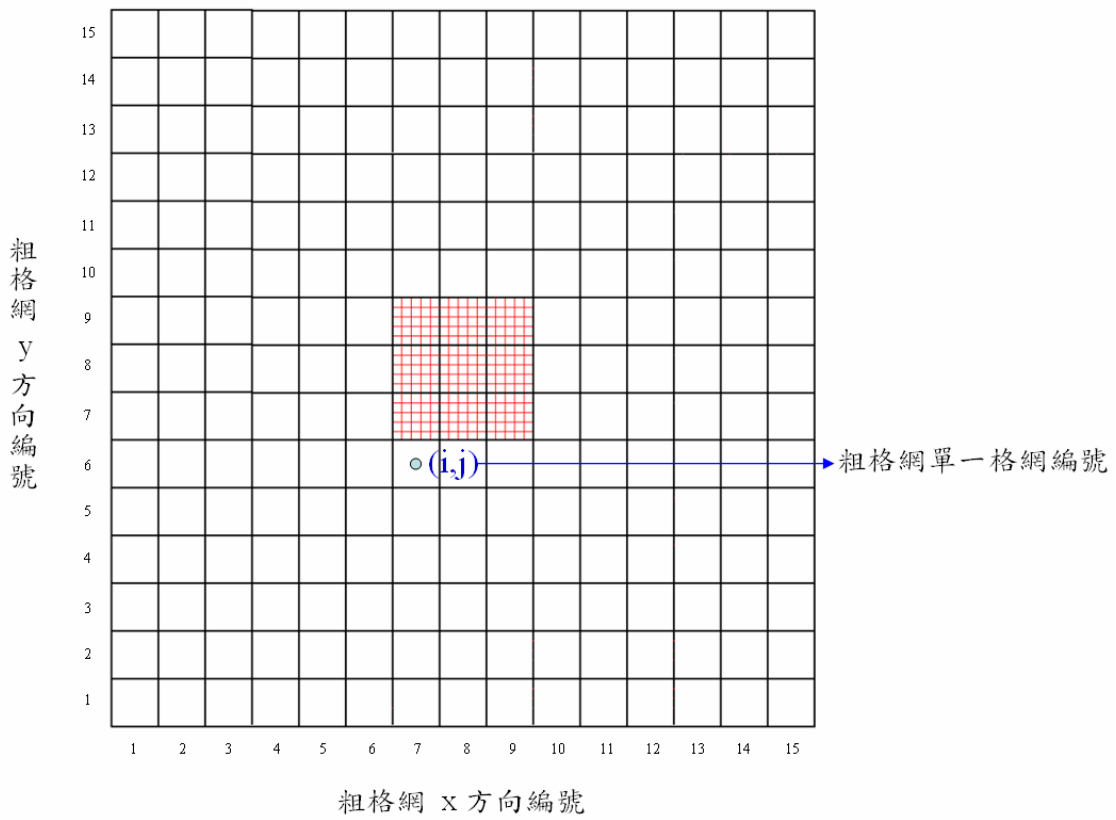


圖 2-2 多重格網邊界銜接關係示意圖

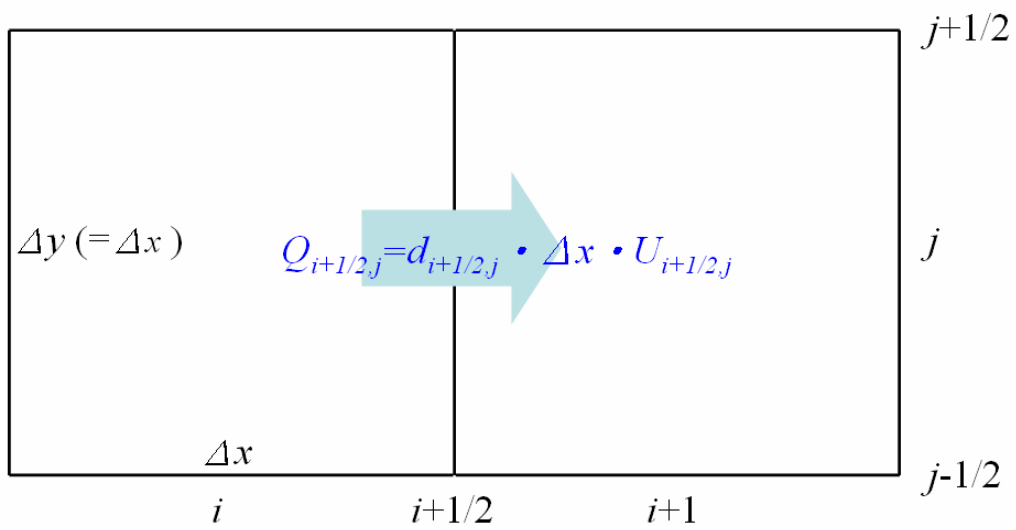


圖 2-3 格網邊界上個別流量示意圖

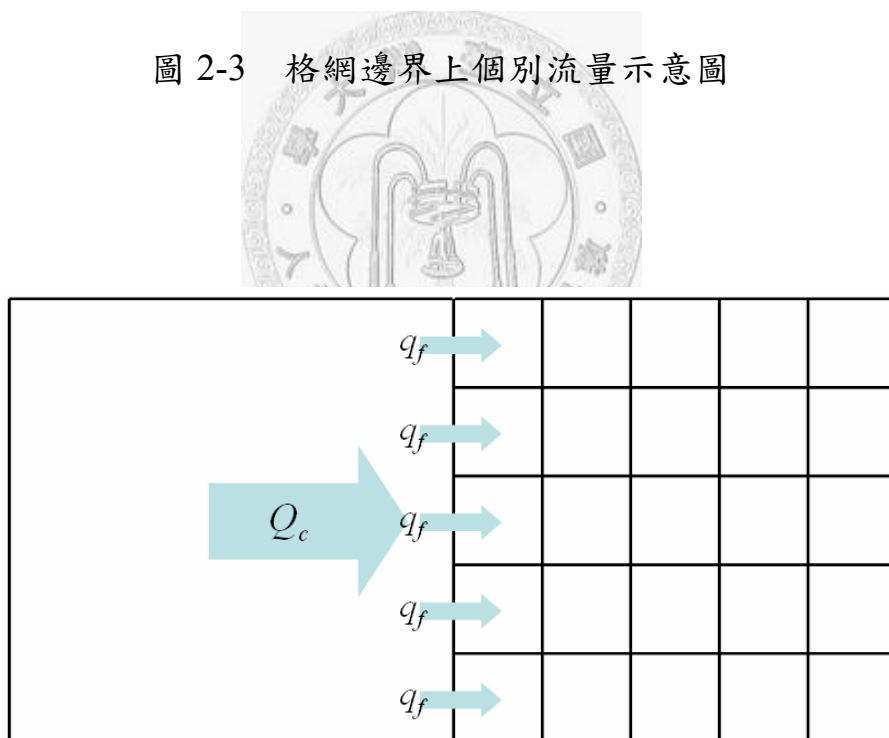


圖 2-4 格網邊界流量分配示意圖

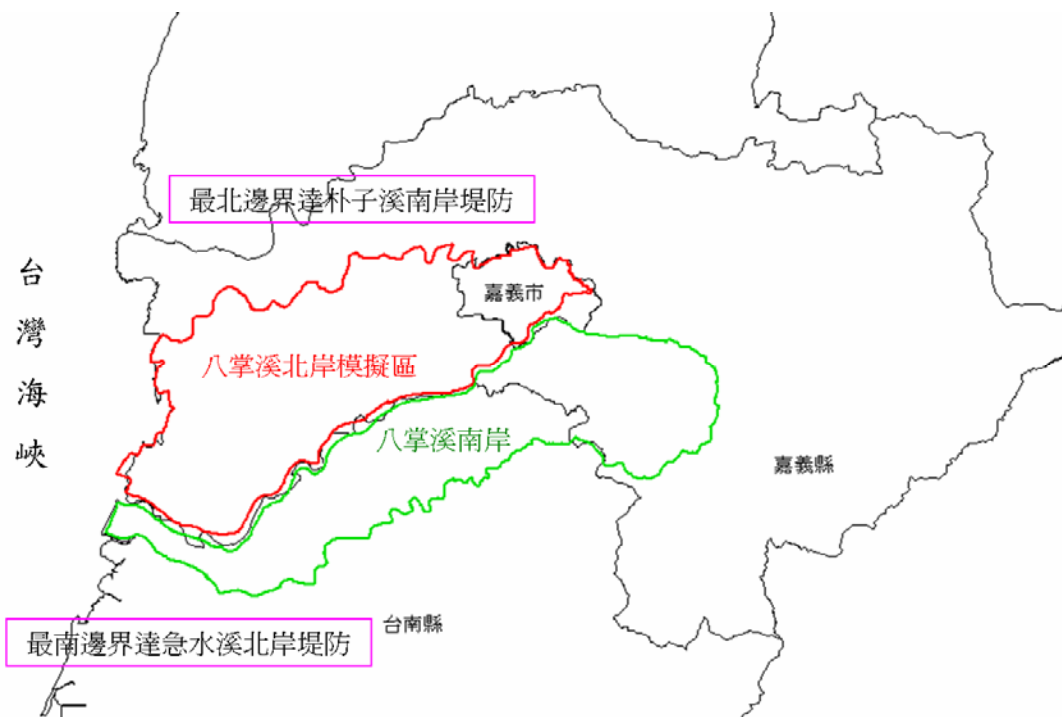


圖 3-1 八掌溪流域南、北岸模擬區示意圖

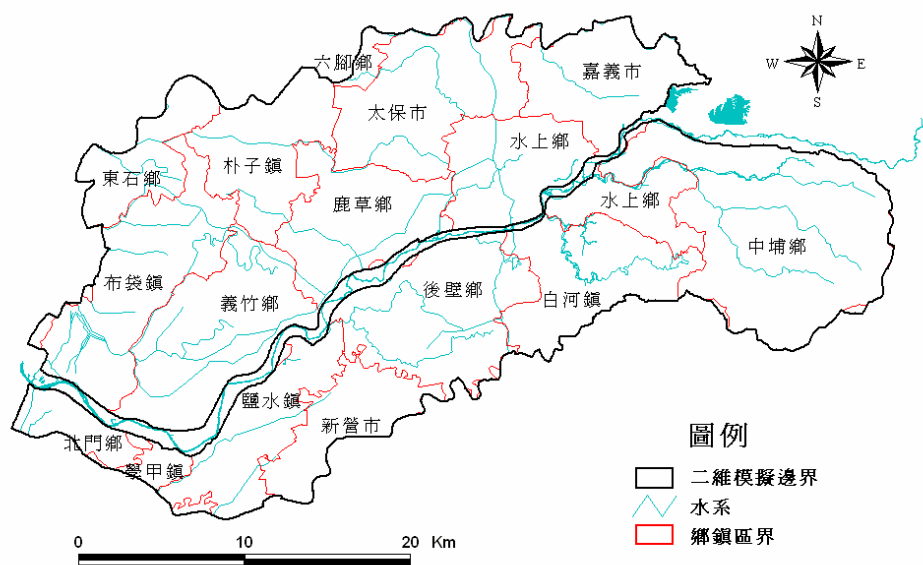


圖 3-2 八掌溪流域南、北岸行政區示意圖

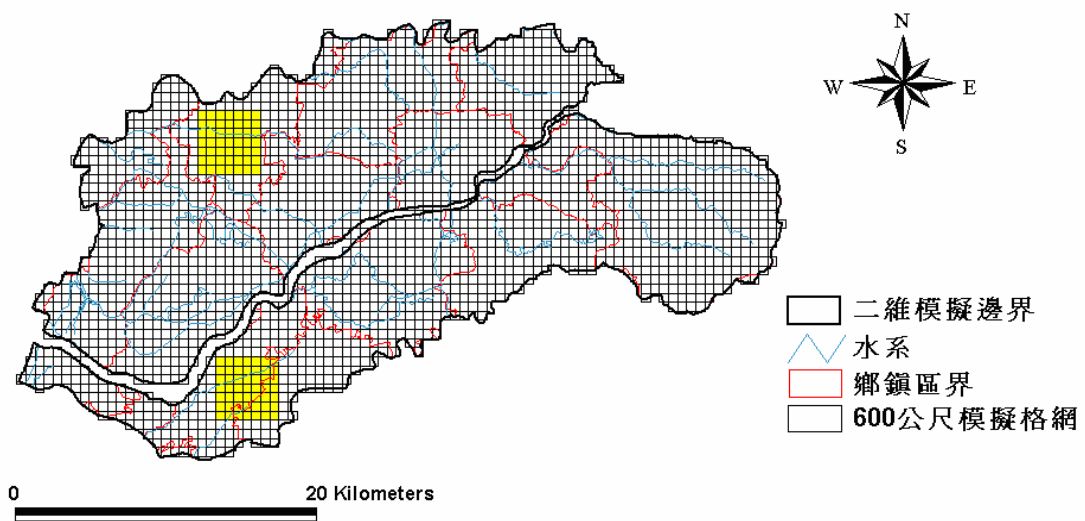


圖 3-3 局部細化 120 公尺格網模擬之區域

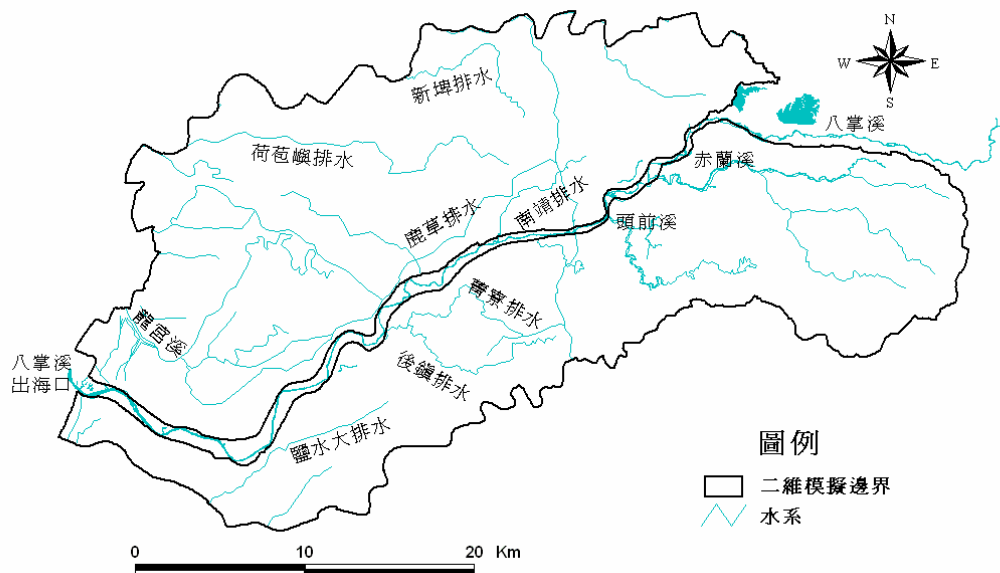


圖 3-4 八掌河流域水系分佈位置圖

QPESUMS 雷達雨量估計

時間解析度~10分鐘
 空間解析度~1.25公里
 台灣環島雷達網

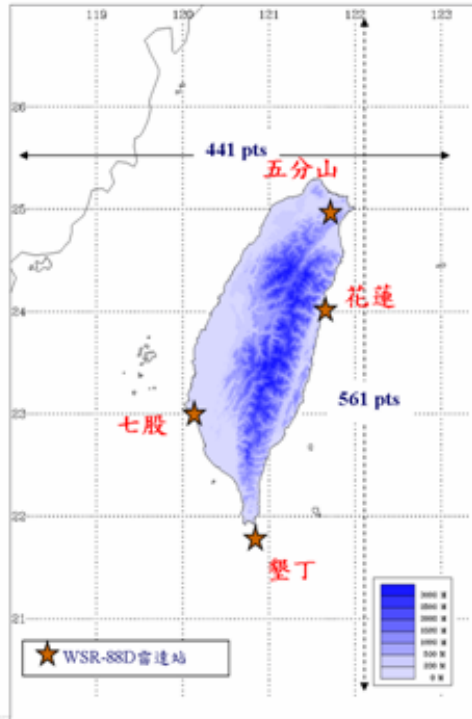
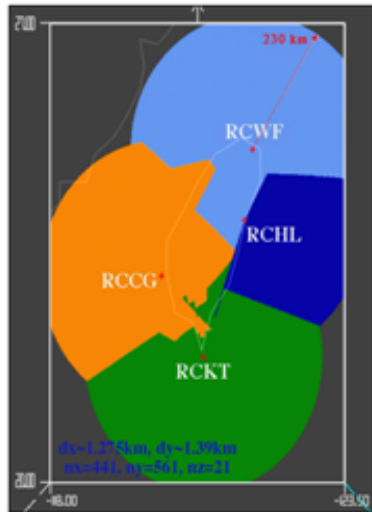


圖 3-5 台灣地區雷達掃描涵蓋範圍分佈(摘錄自張智昌, 2006)

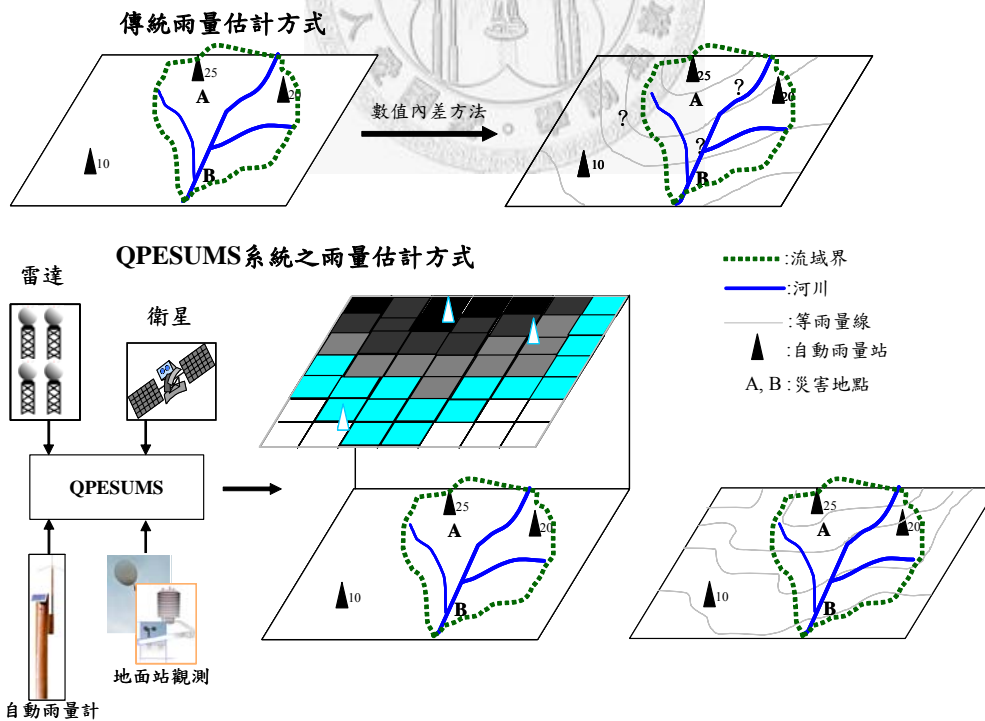


圖 3-6 傳統雨量估計與 QPESUMS 系統雨量估計方式比較

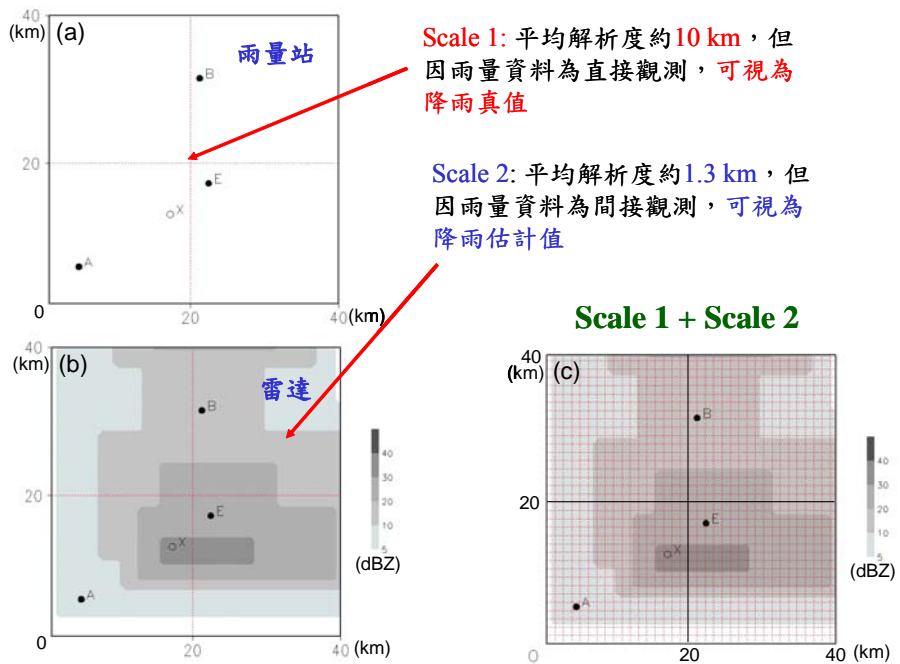


圖 3-7 雷達-雨量站觀測降雨整合法概念示意圖

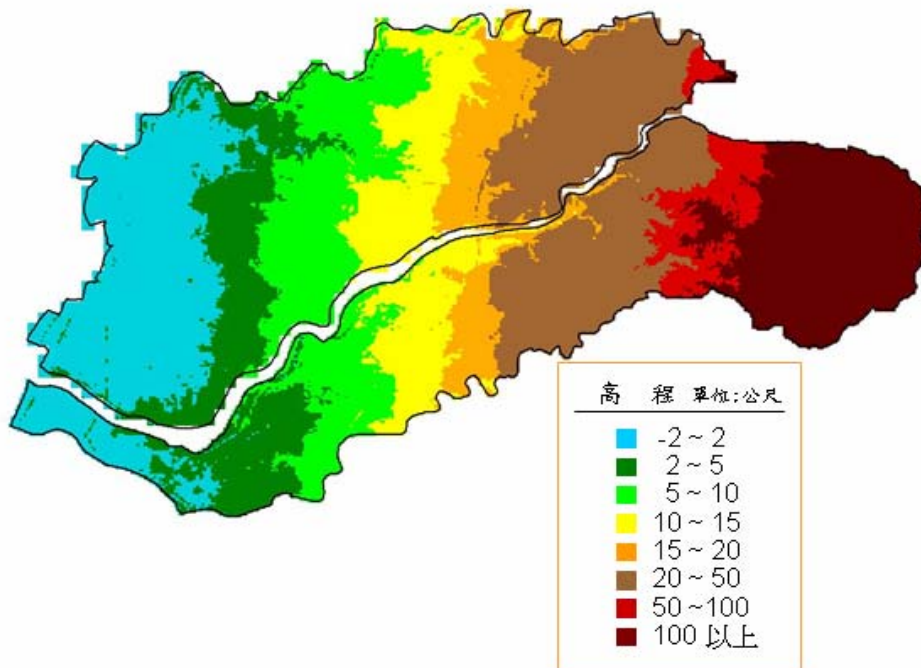


圖 3-8 八掌河流域數值高程圖

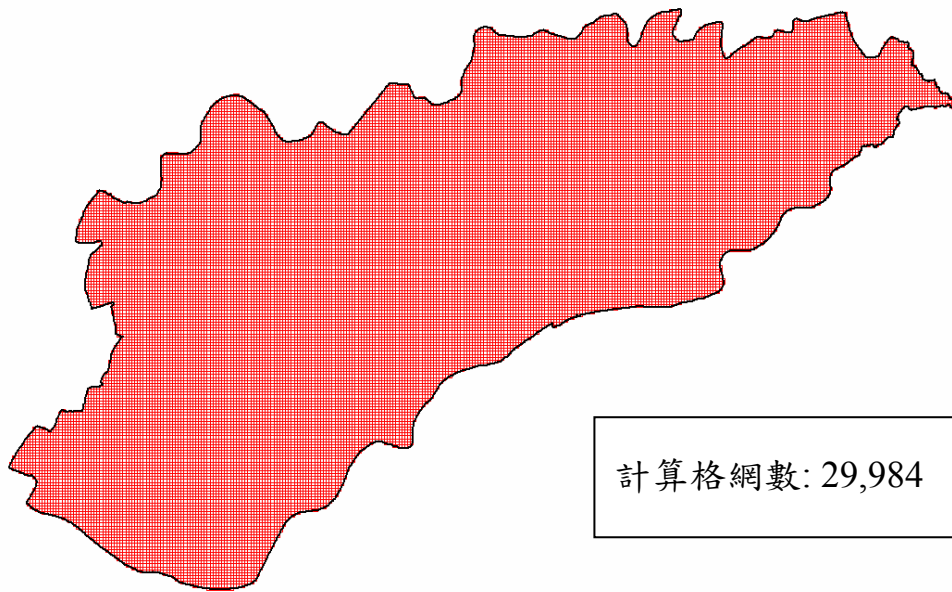


圖 3-9 八掌溪流域北岸淹水計算格網(格網解析度 120m×120m)

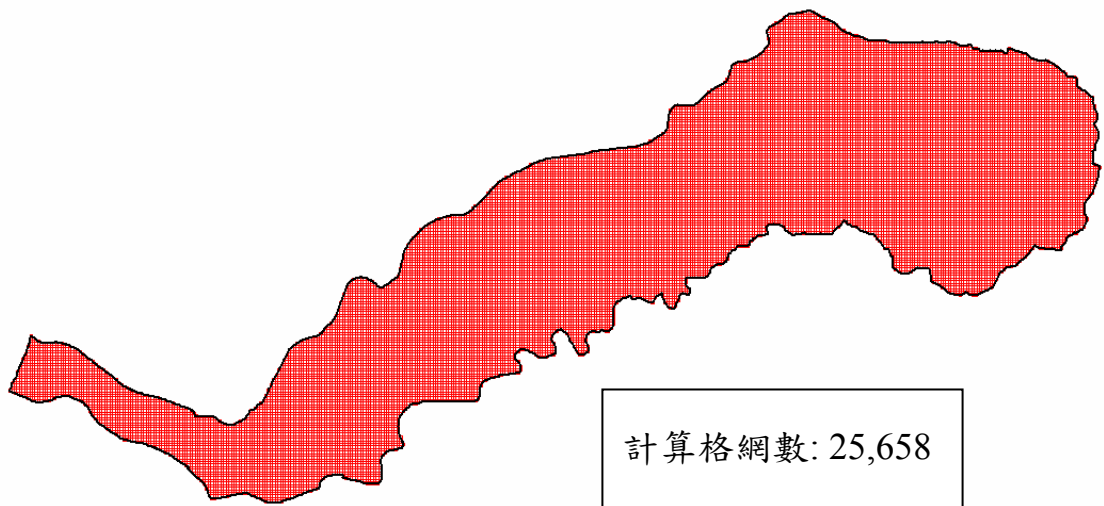


圖 3-10 八掌溪流域南岸淹水計算格網(格網解析度 120m×120m)

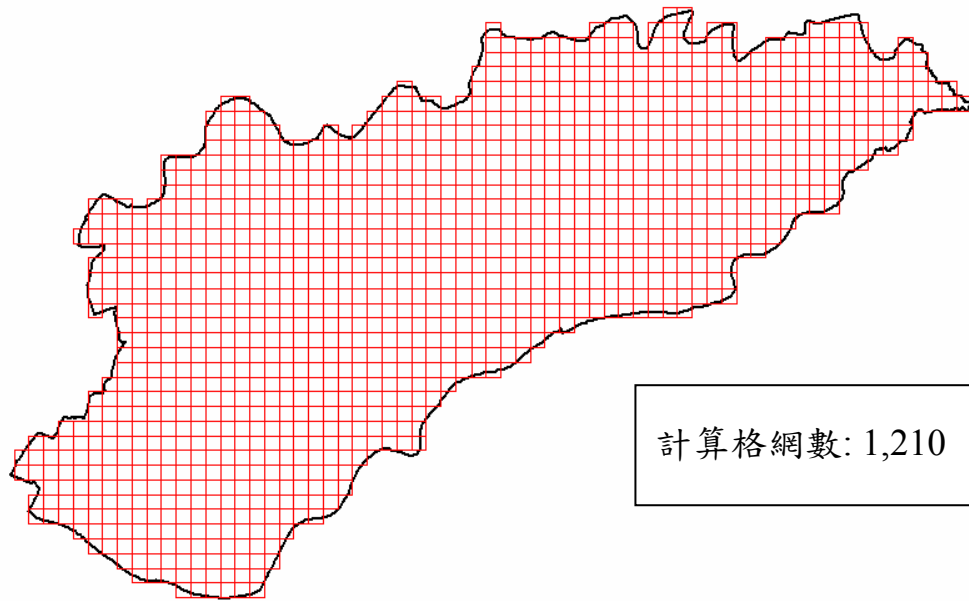


圖 3-11 八掌溪流域北岸淹水計算格網(格網解析度 600m×600m)

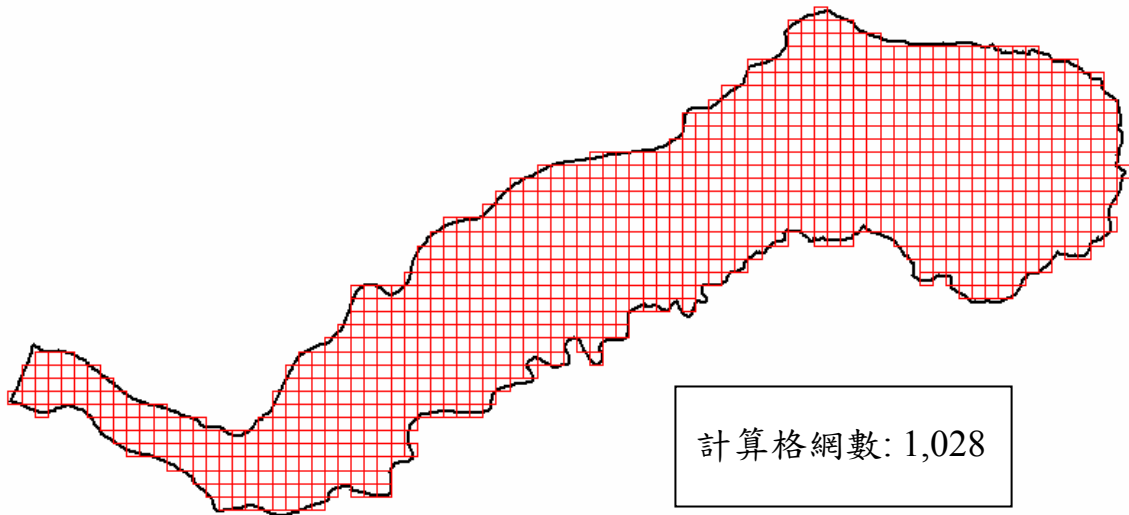


圖 3-12 八掌溪流域南岸淹水計算格網(格網解析度 600m×600m)

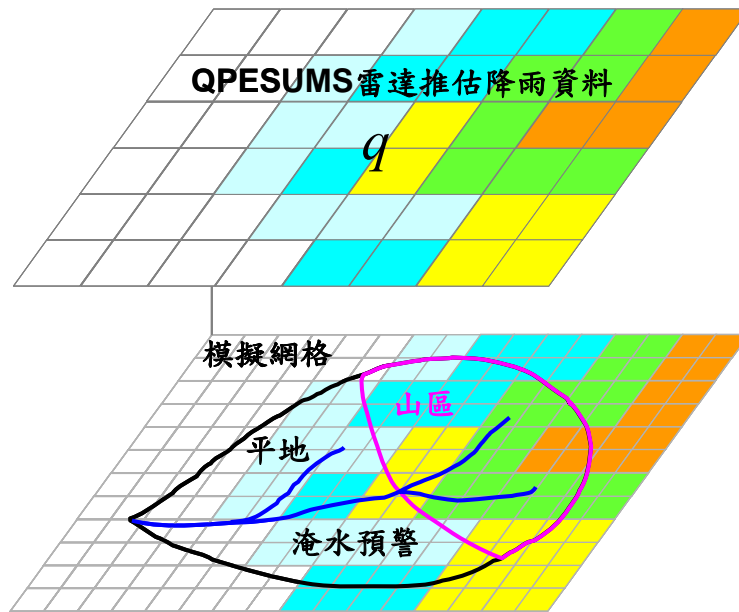


圖 3-13 模擬格網與 QPESUMS 格網銜接示意圖

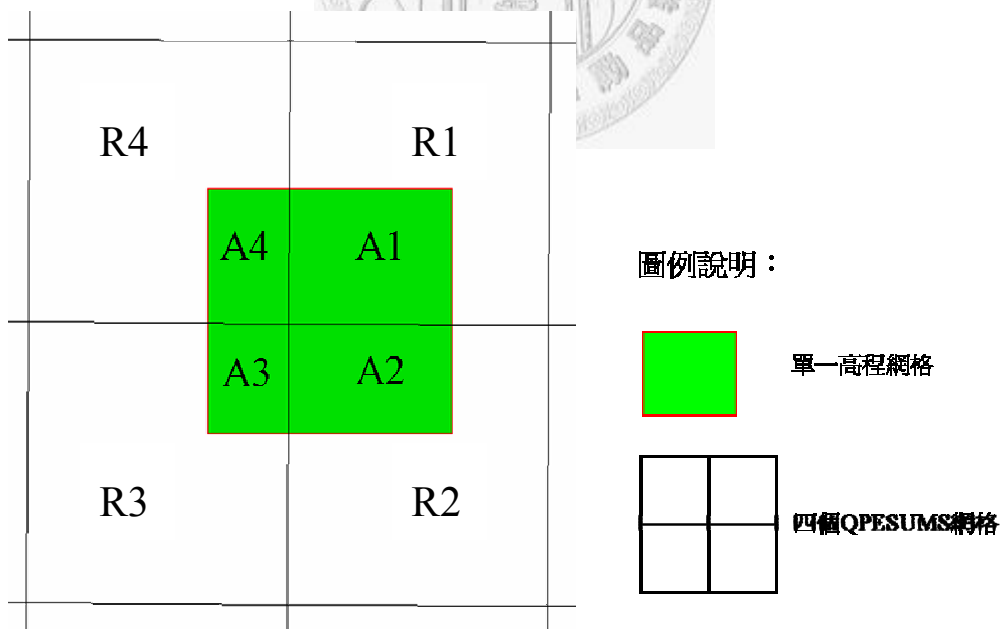


圖 3-14 面積權重平均方法示意圖

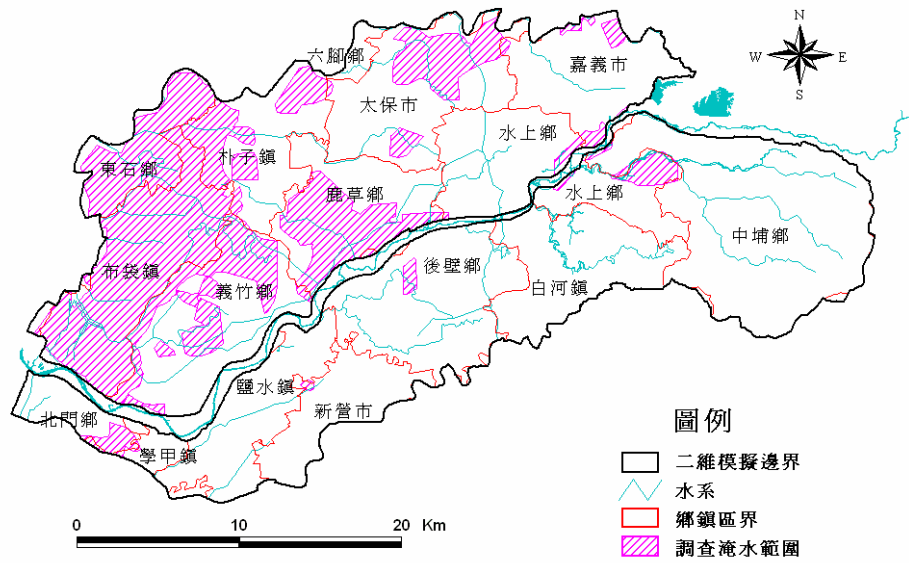


圖 4-1 0612 暴雨事件水利署調查淹水範圍圖

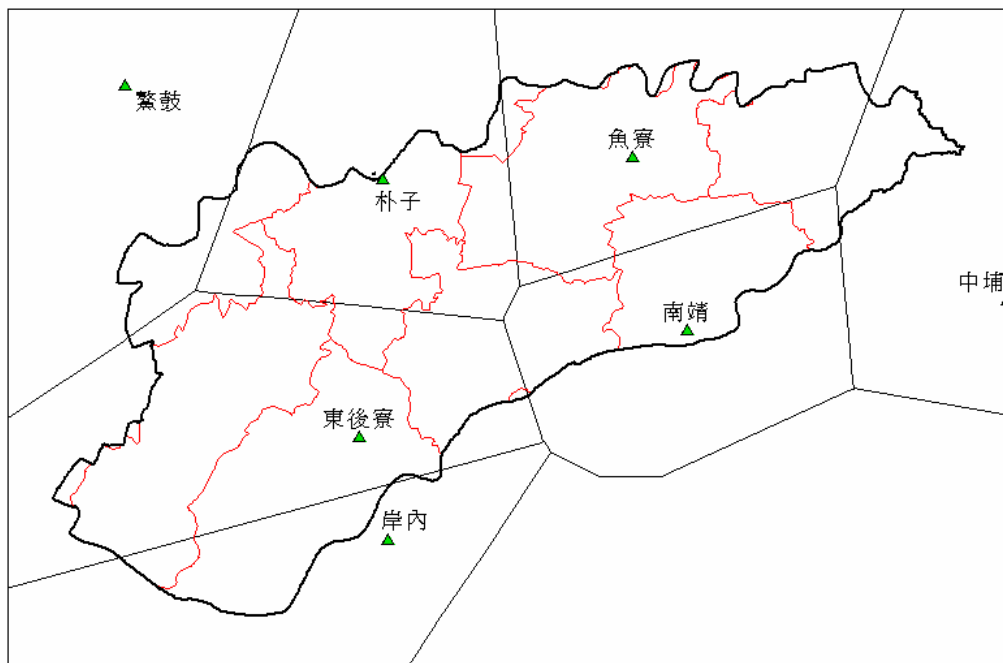


圖 4-2 北岸模擬區徐昇多邊形分區圖

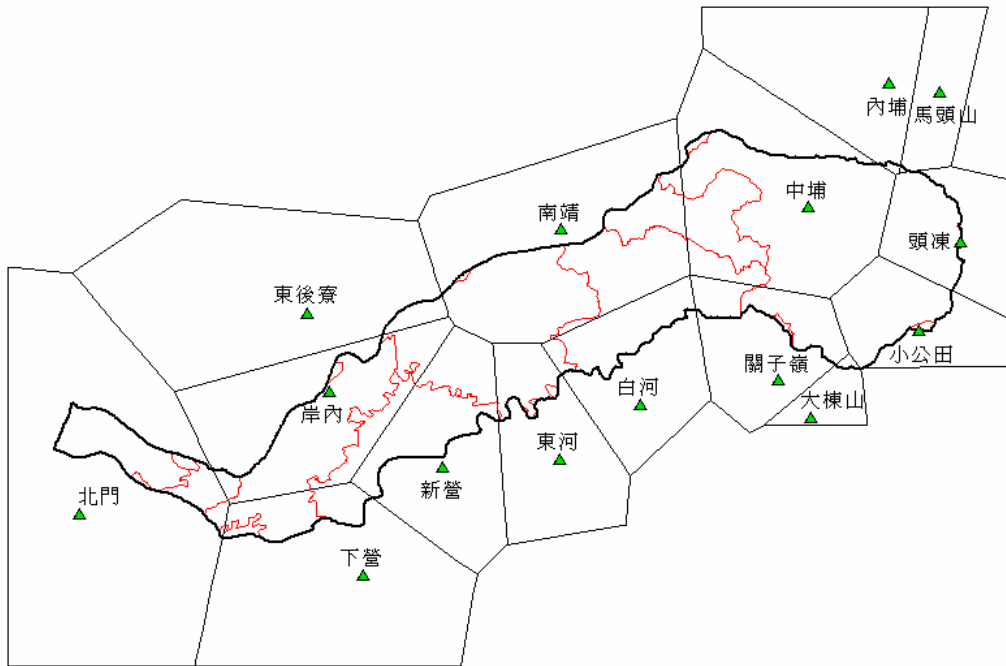
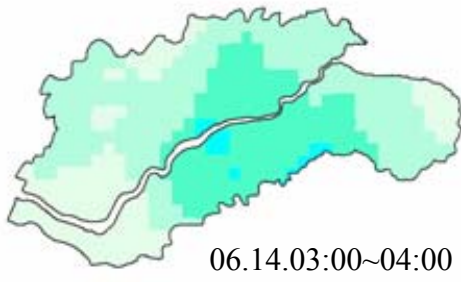
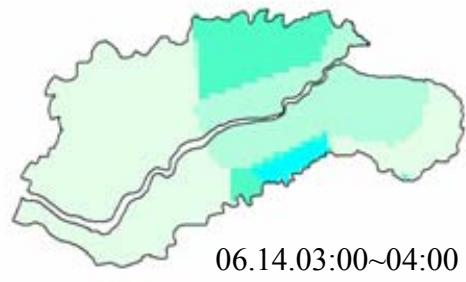


圖 4-3 南岸模擬區徐昇多邊形分區圖



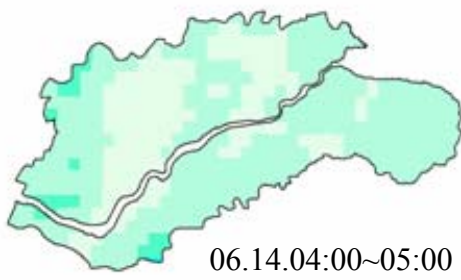


(a)整合降雨估計法雨量

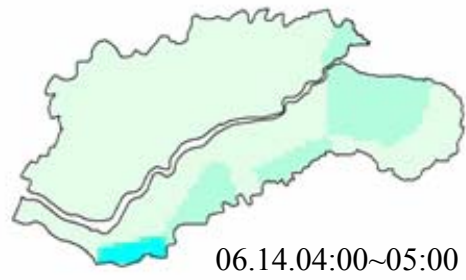


(b)徐昇雨量站網雨量

圖 4-4 6月14日3~4時降雨強度空間分布圖

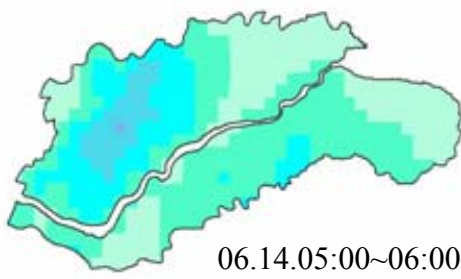


(a)整合降雨估計法雨量

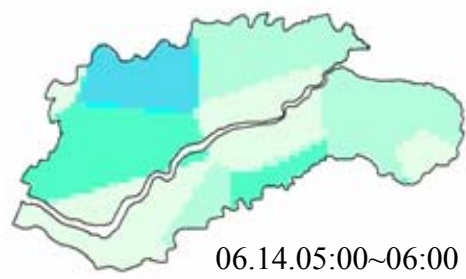


(b)徐昇雨量站網雨量

圖 4-5 6月14日4~5時降雨強度空間分布圖

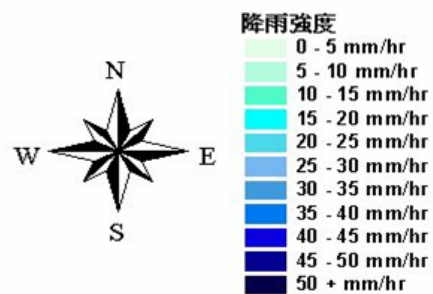


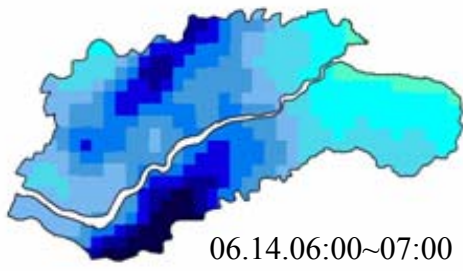
(a)整合降雨估計法雨量



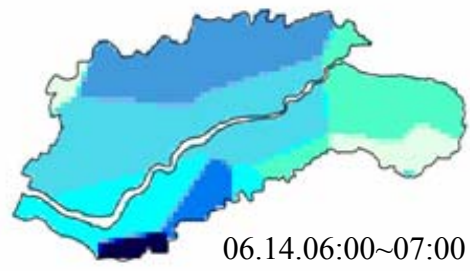
(b)徐昇雨量站網雨量

圖 4-6 6月14日5~6時降雨強度空間分布圖



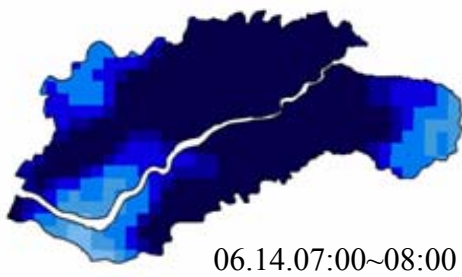


(a)整合降雨估計法雨量



(b)徐昇雨量站網雨量

圖 4-7 6月14日6~7時降雨強度空間分布圖

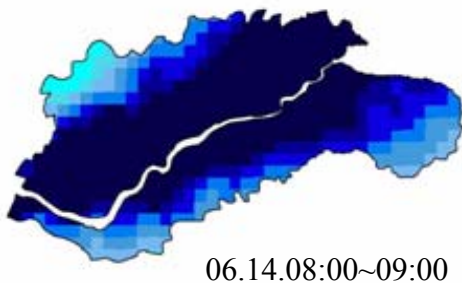


(a)整合降雨估計法雨量



(b)徐昇雨量站網雨量

圖 4-8 6月14日7~8時降雨強度空間分布圖

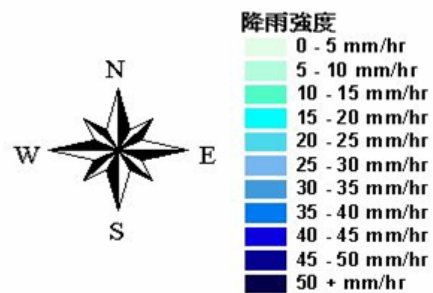


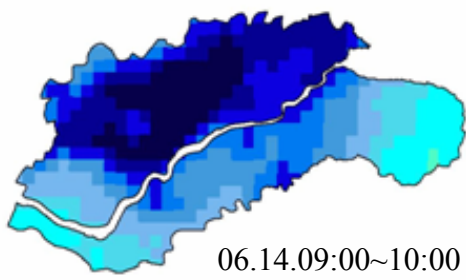
(a)整合降雨估計法雨量



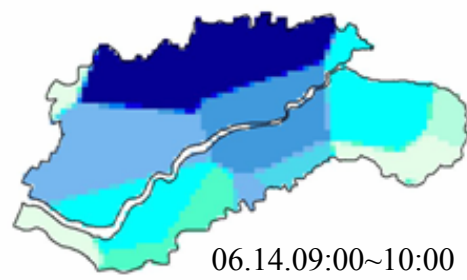
(b)徐昇雨量站網雨量

圖 4-9 6月14日8~9時降雨強度空間分布圖



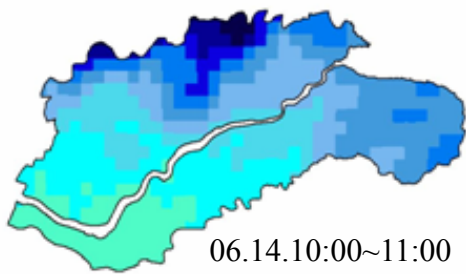


(a)整合降雨估計法雨量

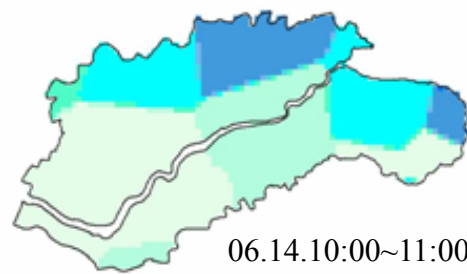


(b)徐昇雨量站網雨量

圖 4-10 6月14日9~10時降雨強度空間分布圖

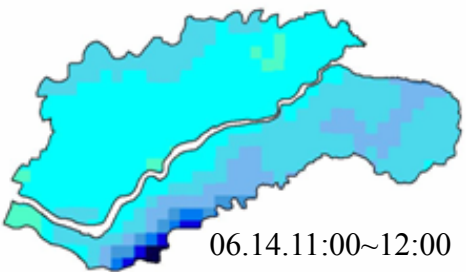


(a)整合降雨估計法雨量

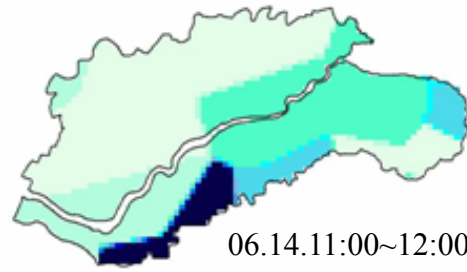


(b)徐昇雨量站網雨量

圖 4-11 6月14日10~11時降雨強度空間分布圖

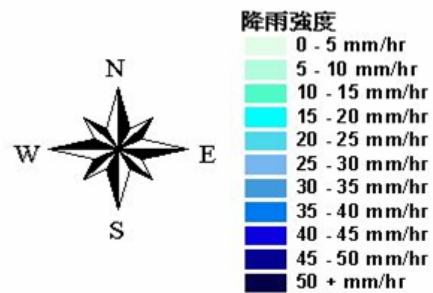


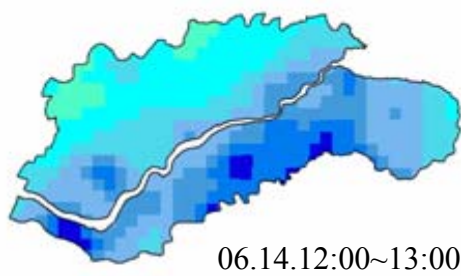
(a)整合降雨估計法雨量



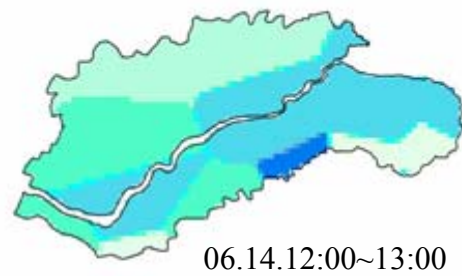
(b)徐昇雨量站網雨量

圖 4-12 6月14日11~12時降雨強度空間分布圖



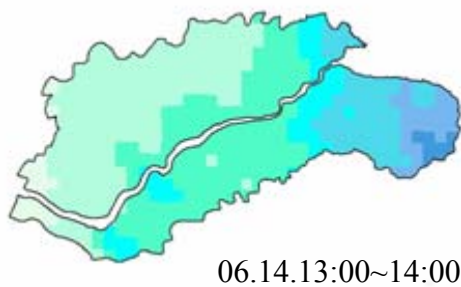


(a)整合降雨估計法雨量

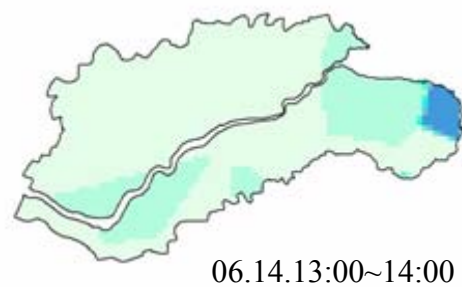


(b)徐昇雨量站網雨量

圖 4-13 6 月 14 日 12~13 時降雨強度空間分布圖

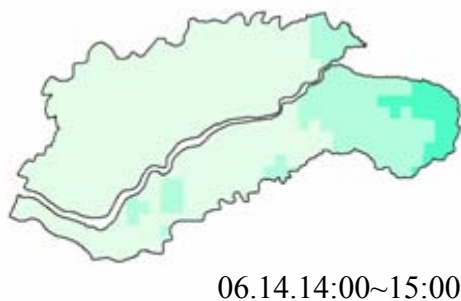


(a)整合降雨估計法雨量

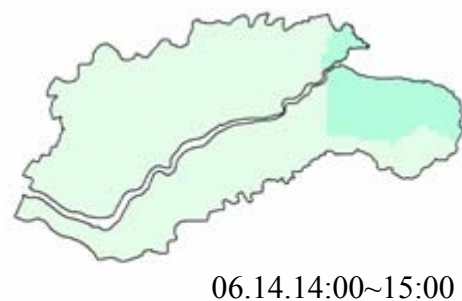


(b)徐昇雨量站網雨量

圖 4-14 6 月 14 日 13~14 時降雨強度空間分布圖

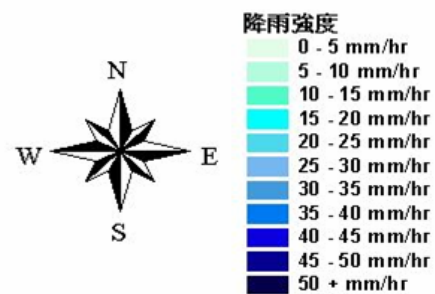


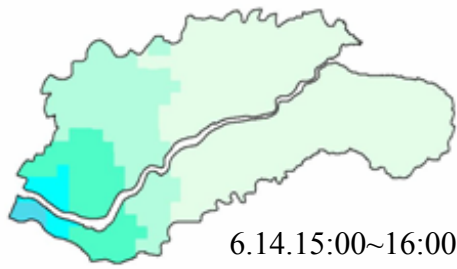
(a)整合降雨估計法雨量



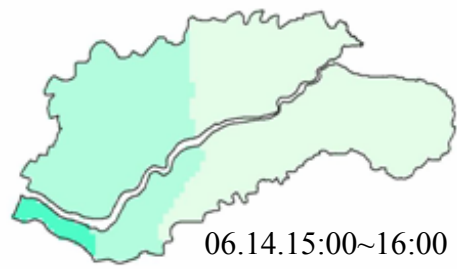
(b)徐昇雨量站網雨量

圖 4-15 6 月 14 日 14~15 時降雨強度空間分布圖



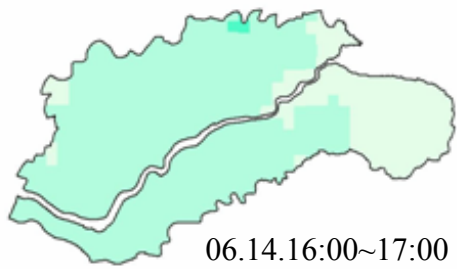


(a)整合降雨估計法雨量

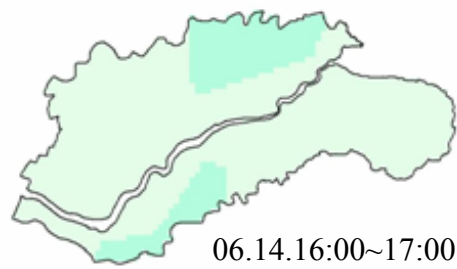


(b)徐昇雨量站網雨量

圖 4-16 6 月 14 日 15~16 時降雨強度空間分布圖

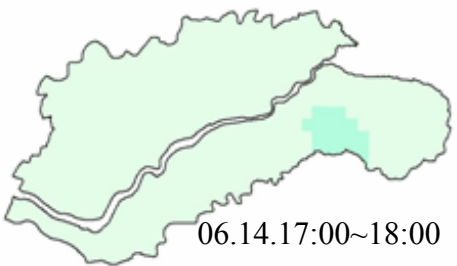


(a)整合降雨估計法雨量

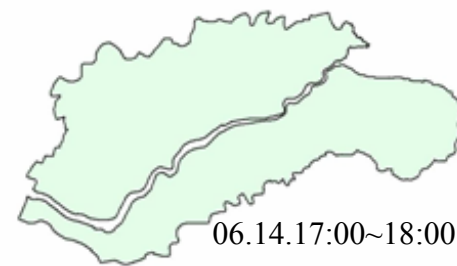


(b)徐昇雨量站網雨量

圖 4-17 6 月 14 日 16~17 時降雨強度空間分布圖

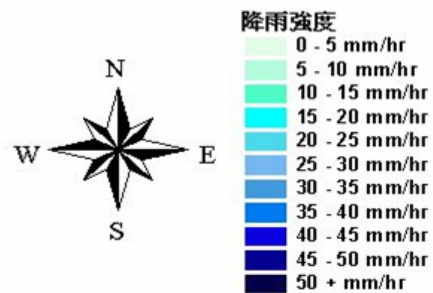


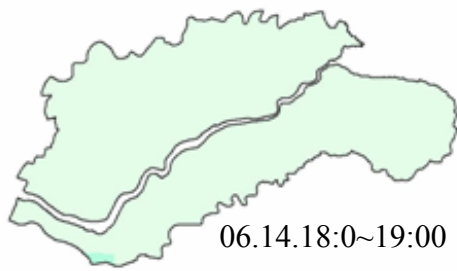
(a)整合降雨估計法雨量



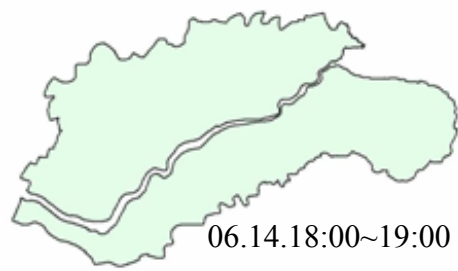
(b)徐昇雨量站網雨量

圖 4-18 6 月 14 日 17~18 時降雨強度空間分布圖



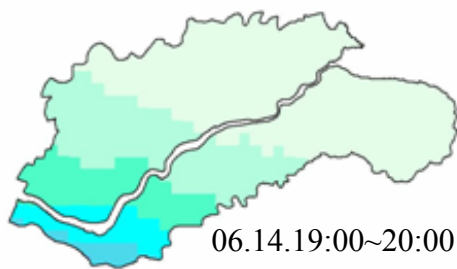


(a)整合降雨估計法雨量

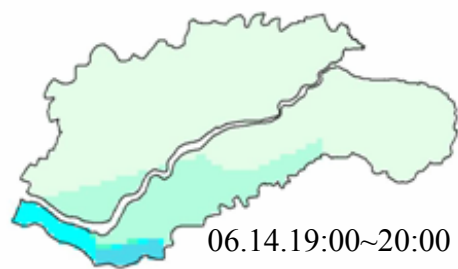


(b)徐昇雨量站網雨量

圖 4-19 6 月 14 日 18~19 時降雨強度空間分布圖

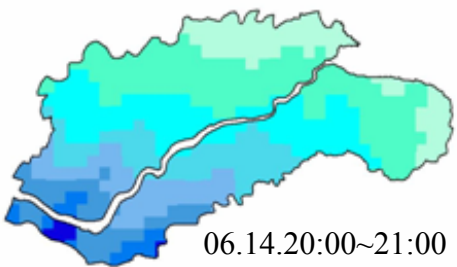


(a)整合降雨估計法雨量

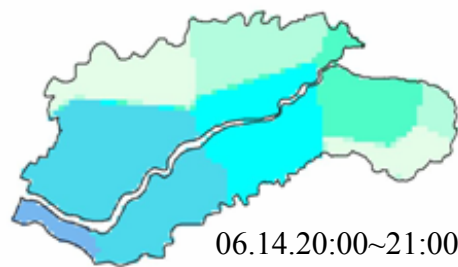


(b)徐昇雨量站網雨量

圖 4-20 6 月 14 日 19~20 時降雨強度空間分布圖

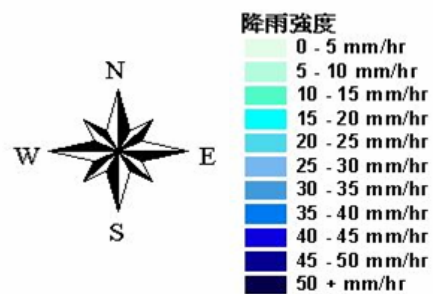


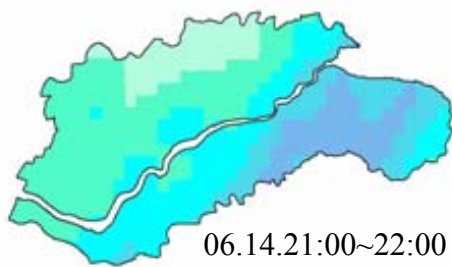
(a)整合降雨估計法雨量



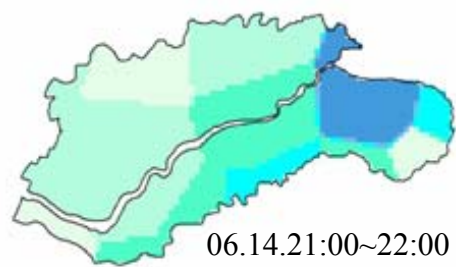
(b)徐昇雨量站網雨量

圖 4-21 6 月 14 日 20~21 時降雨強度空間分布圖



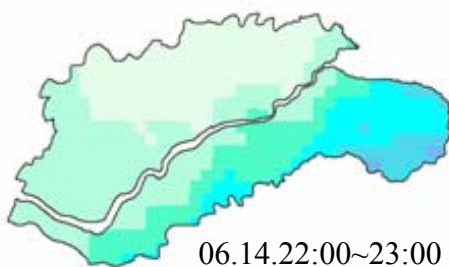


(a)整合降雨估計法雨量

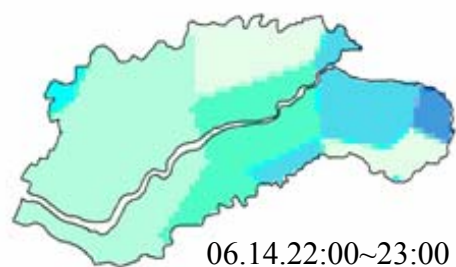


(b)徐昇雨量站網雨量

圖 4-22 6 月 14 日 21~22 時降雨強度空間分布圖

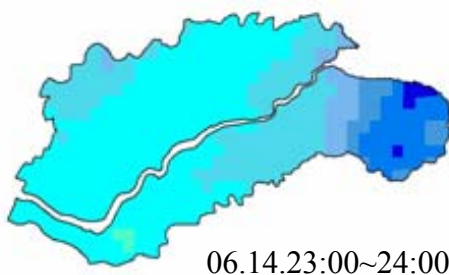


(a)整合降雨估計法雨量

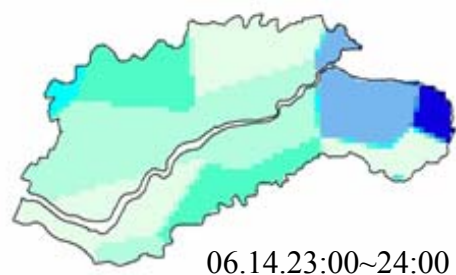


(b)徐昇雨量站網雨量

圖 4-23 6 月 14 日 22~23 時降雨強度空間分布圖

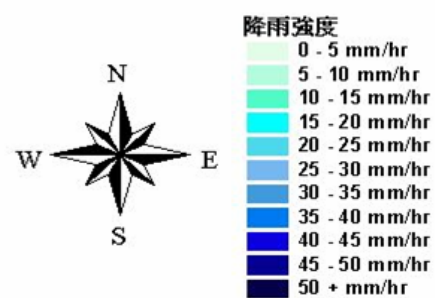


(a)整合降雨估計法雨量



(b)徐昇雨量站網雨量

圖 4-24 6 月 14 日 23~24 時降雨強度空間分布圖



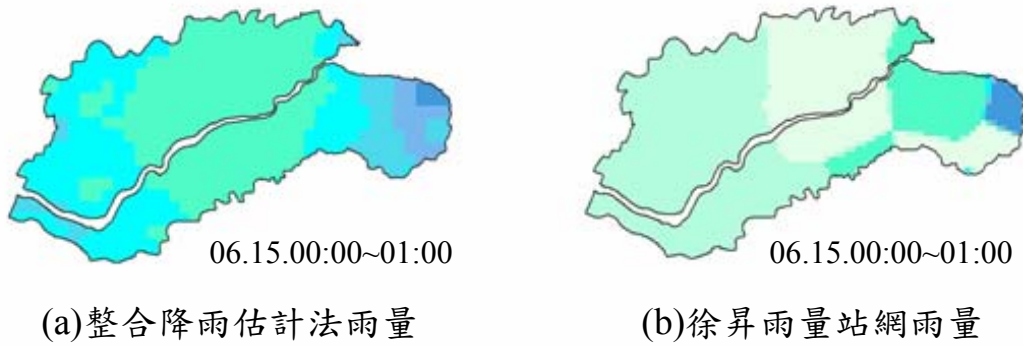


圖 4-25 6月15日0~1時降雨強度空間分布圖

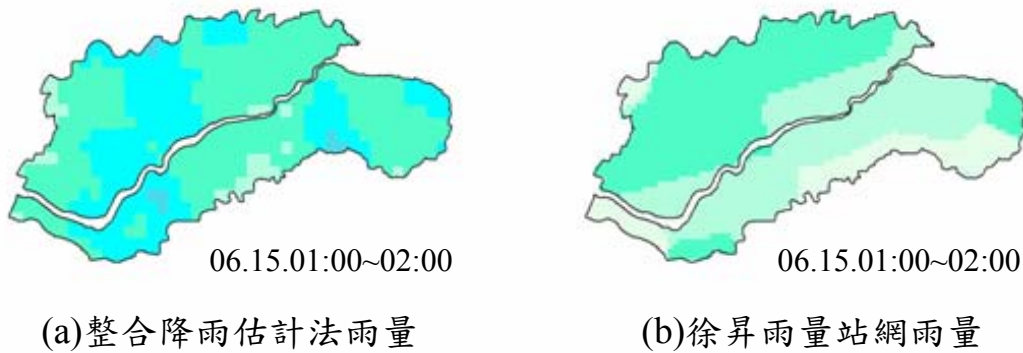


圖 4-26 6月15日1~2時降雨強度空間分布圖

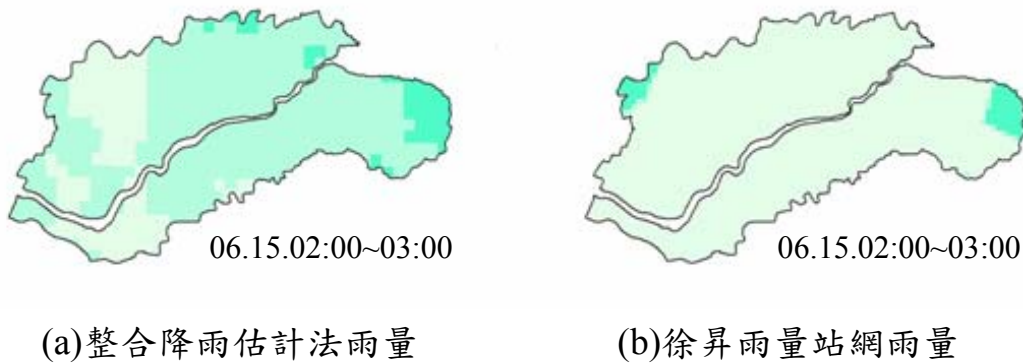
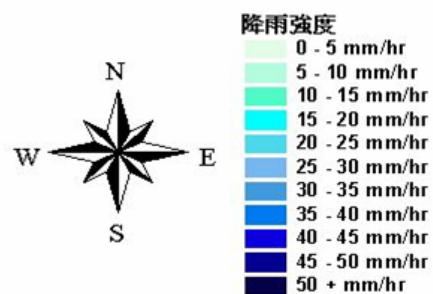
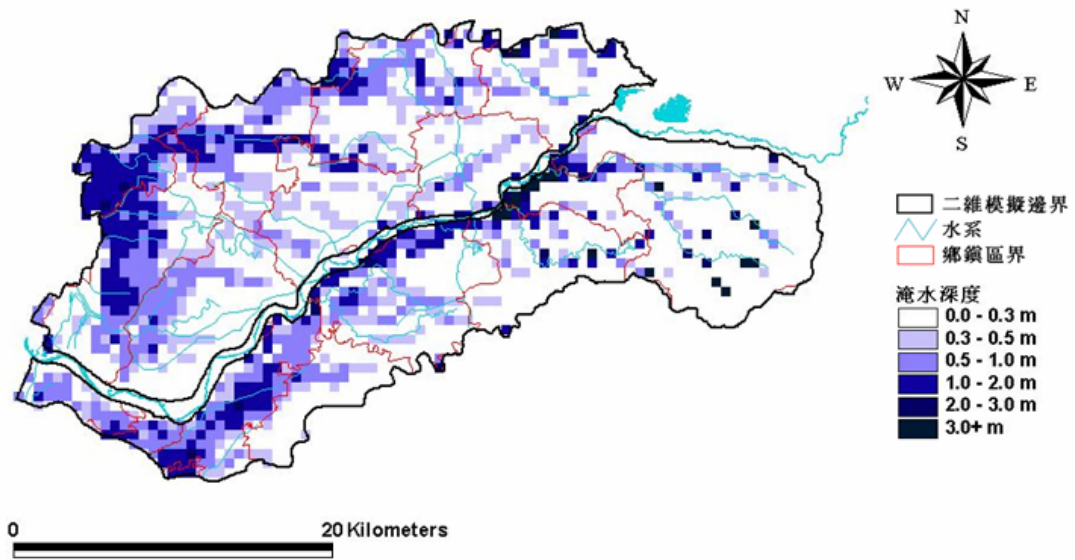
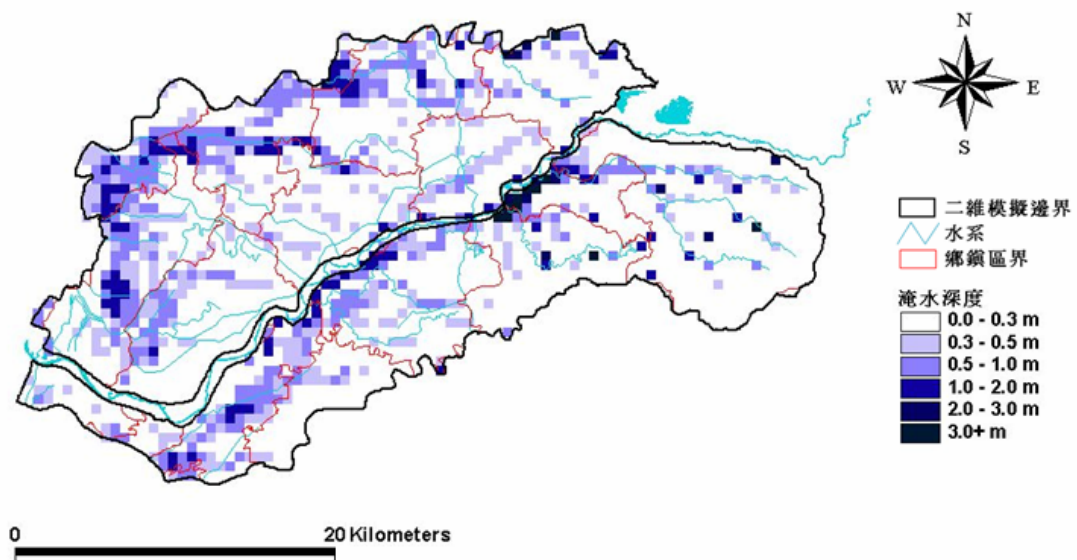


圖 4-27 6月15日2~3時降雨強度空間分布圖





(a)雷達-雨量站整合降雨估計法雨量



(b)徐昇雨量站網雨量

圖 4-28 0612 暴雨模擬最大淹水深圖(格網 600 公尺)



圖 4-29 0612 暴雨模擬第 4 小時淹水深圖(時間 06.14.06:00;格網 120 公尺)



圖 4-30 0612 暴雨模擬第 8 小時淹水深圖(時間 06.14.10:00;格網 120 公尺)

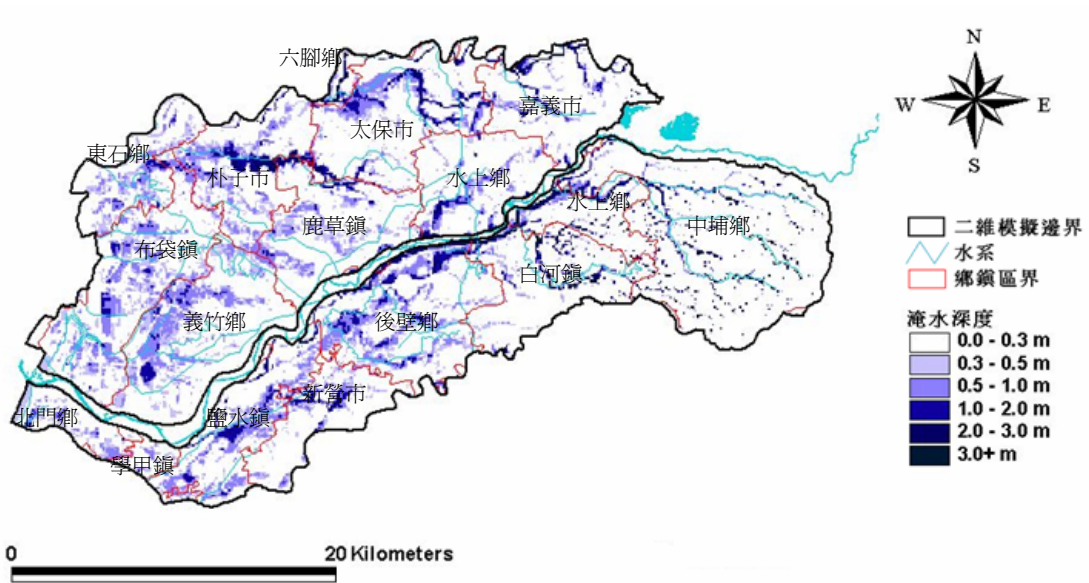


圖 4-31 0612 暴雨模擬第 12 小時淹水深圖(時間 06.14.14:00;格網 120 公尺)



圖 4-32 0612 暴雨模擬第 16 小時淹水深圖(時間 06.14.18:00;格網 120 公尺)

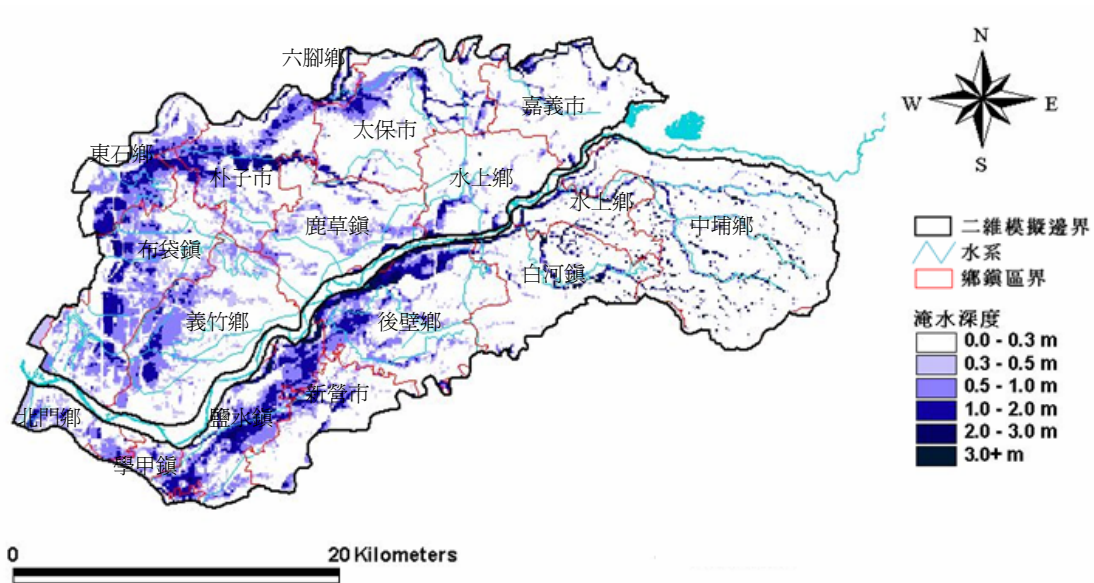


圖 4-33 0612 暴雨模擬第 20 小時淹水深圖(時間 06.14.22:00;格網 120 公尺)

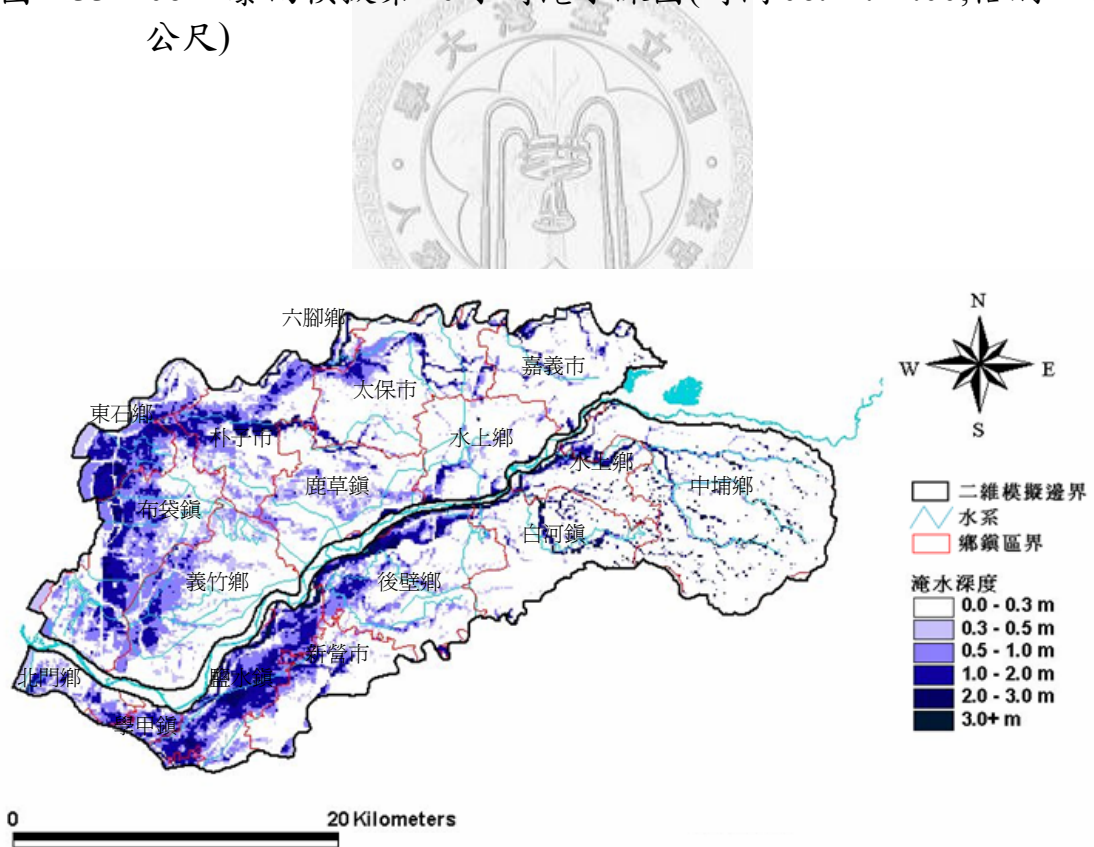


圖 4-34 0612 暴雨模擬第 24 小時淹水深圖(時間 06.15.02:00;格網 120 公尺)

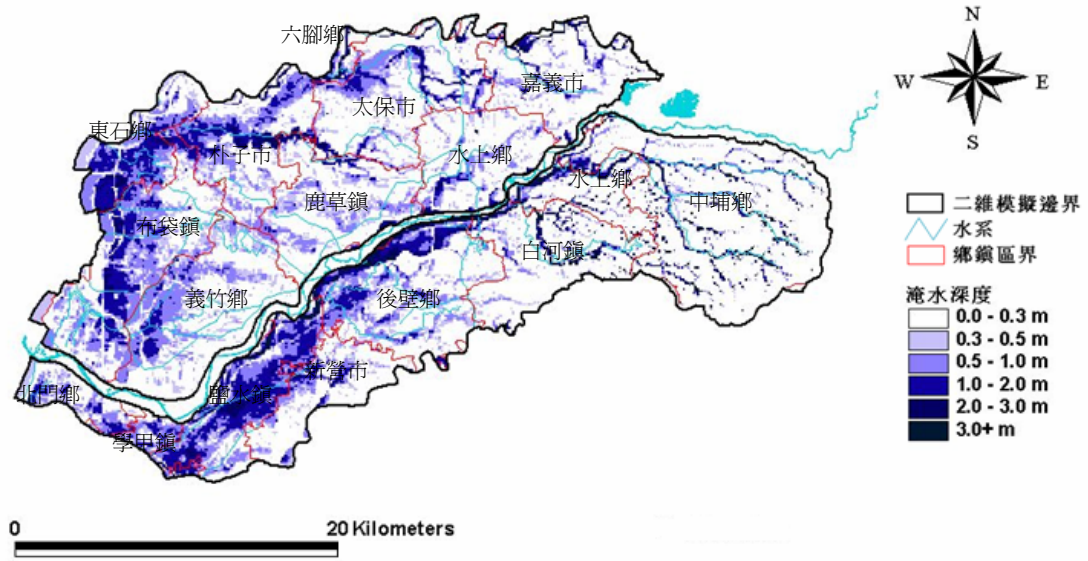
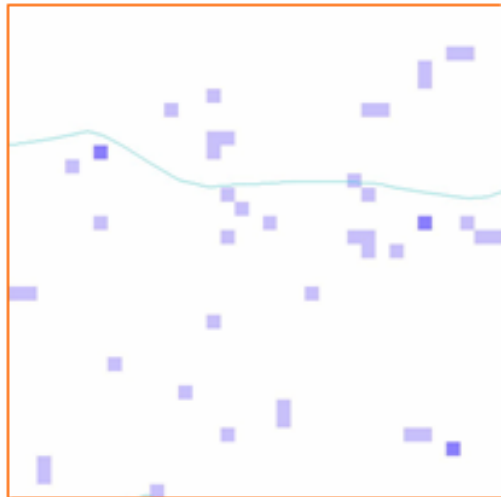
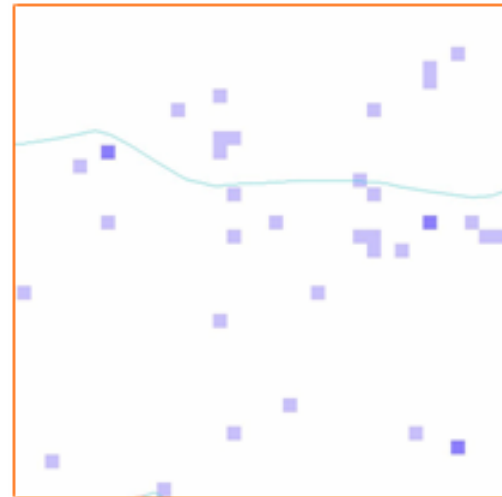


圖 4-35 0612 暴雨模擬最大淹水深圖(格網 120 公尺)



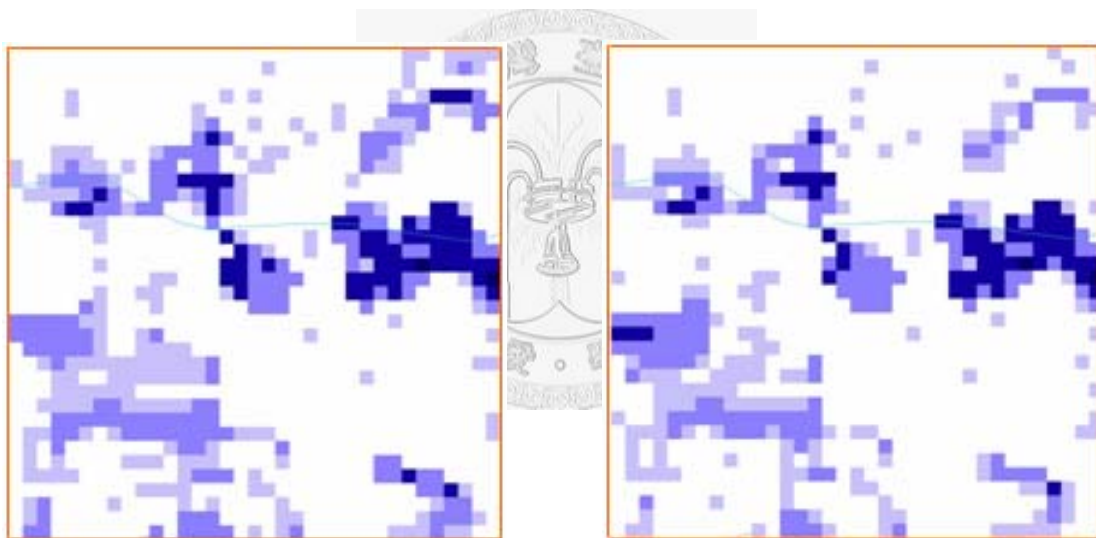


(a)全區 120 公尺格網
(時間 06.14.06:00)



(b)局部 120 公尺格網
(時間 06.14.06:00)

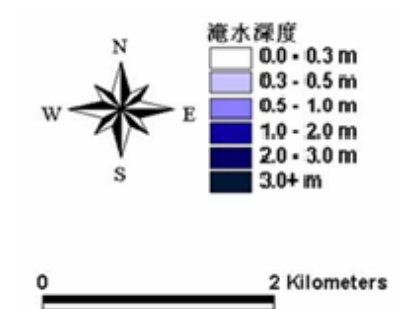
圖 4-36 北岸 120 公尺格網模擬第 4 小時淹水深圖

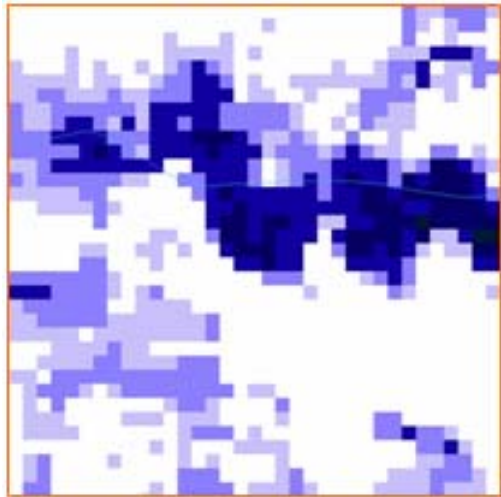


(a)全區 120 公尺格網
(時間 06.14.10:00)

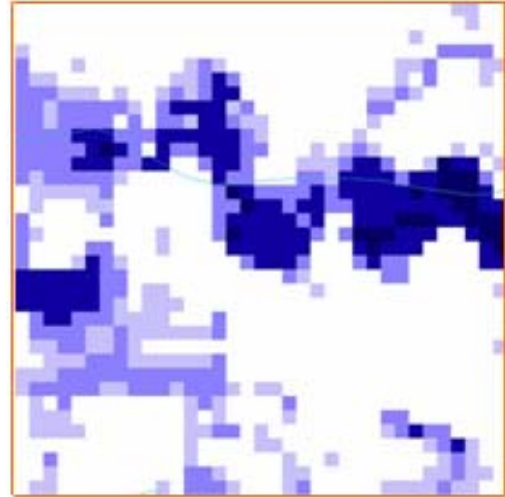
(b)局部 120 公尺格網
(時間 06.14.10:00)

圖 4-37 北岸 120 公尺格網模擬第 8 小時淹水深圖



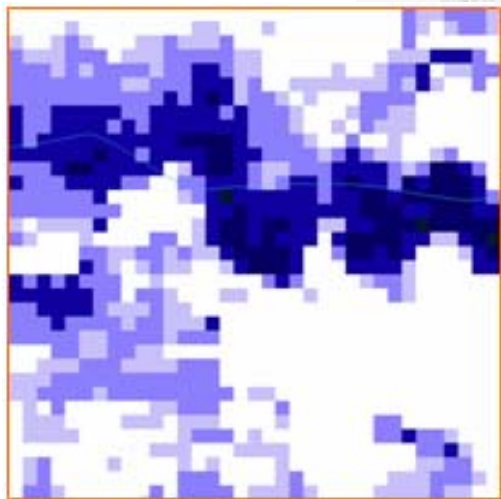


(a)全區 120 公尺格網
(時間 06.14.14:00)

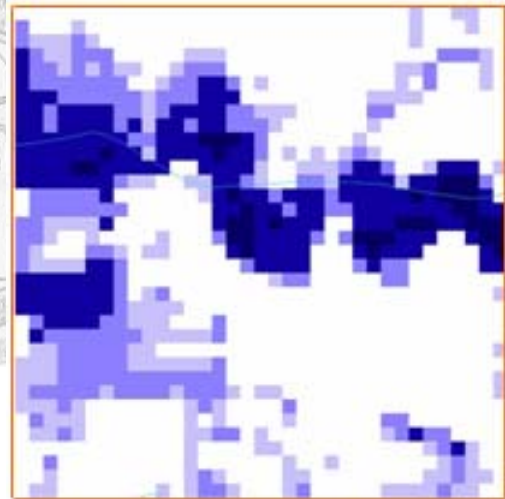


(b)局部 120 公尺格網
(時間 06.14.14:00)

圖 4-38 北岸 120 公尺格網模擬第 12 小時淹水深圖

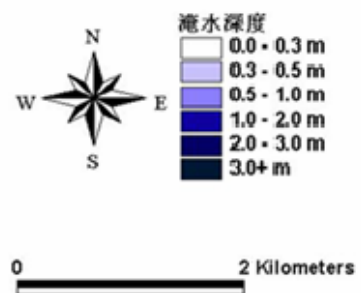


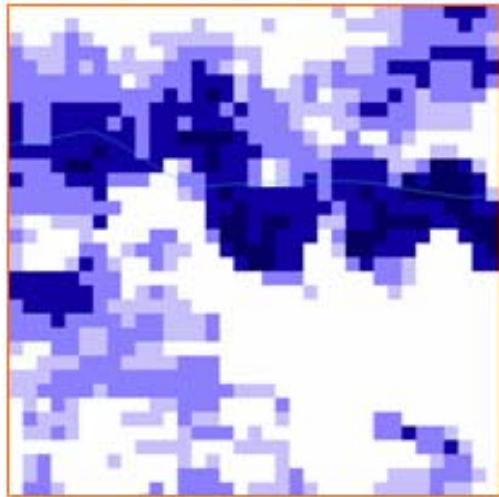
(a)全區 120 公尺格網
(時間 06.14.18:00)



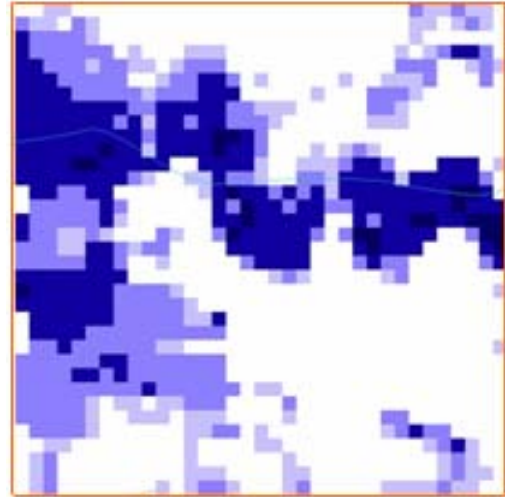
(b)局部 120 公尺格網
(時間 06.14.18:00)

圖 4-39 北岸 120 公尺格網模擬第 16 小時淹水深圖



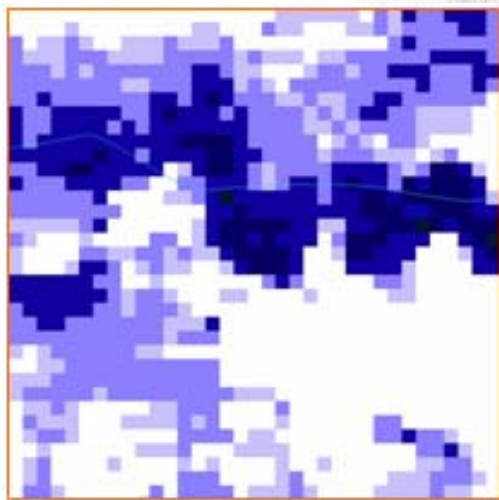


(a)全區 120 公尺格網
(時間 06.14.22:00)

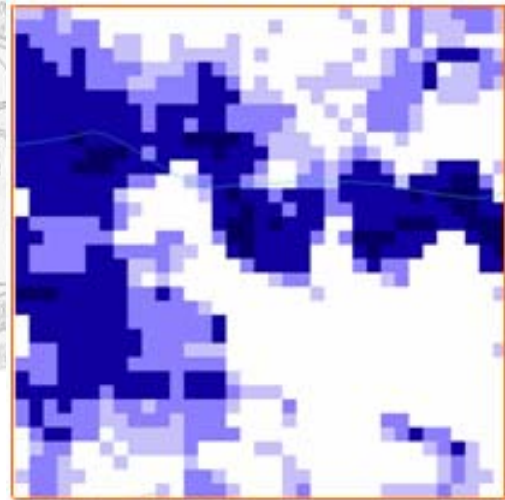


(b)局部 120 公尺格網
(時間 06.14.22:00)

圖 4-40 北岸 120 公尺格網模擬第 20 小時淹水深圖

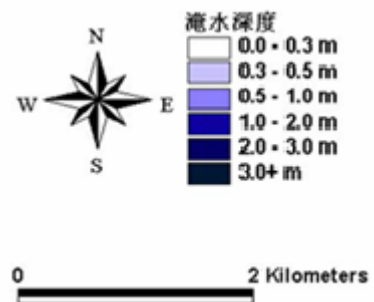


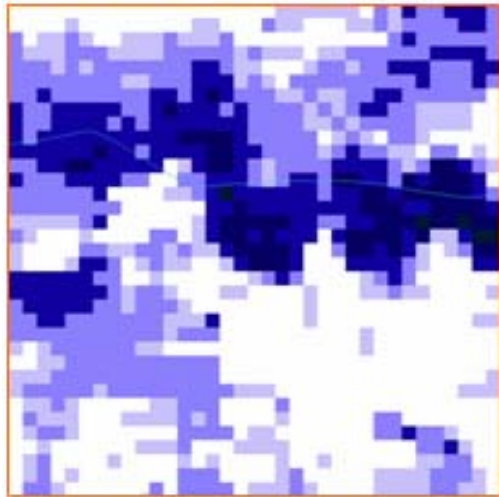
(a)全區 120 公尺格網
(時間 06.15.02:00)



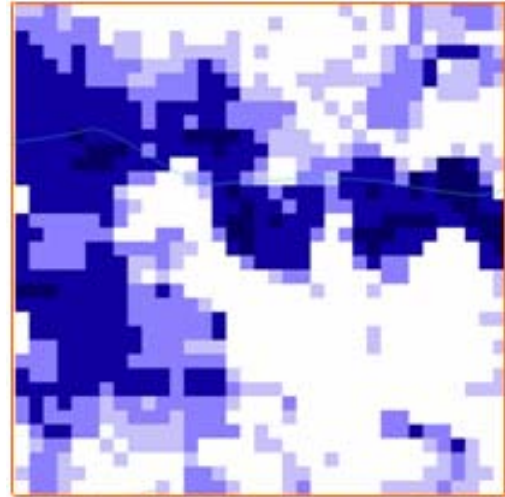
(b)局部 120 公尺格網
(時間 06.15.02:00)

圖 4-41 北岸 120 公尺格網模擬第 24 小時淹水深圖



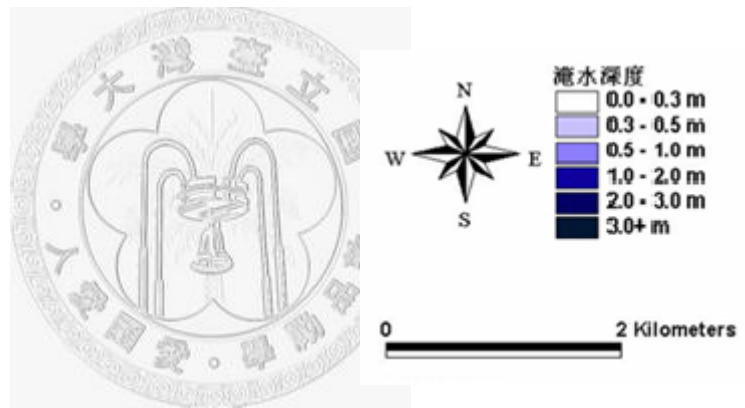


(a)全區 120 公尺格網



(b)局部 120 公尺格網

圖 4-42 北岸 120 公尺格網模擬最大淹水深圖



模擬第 4 小時

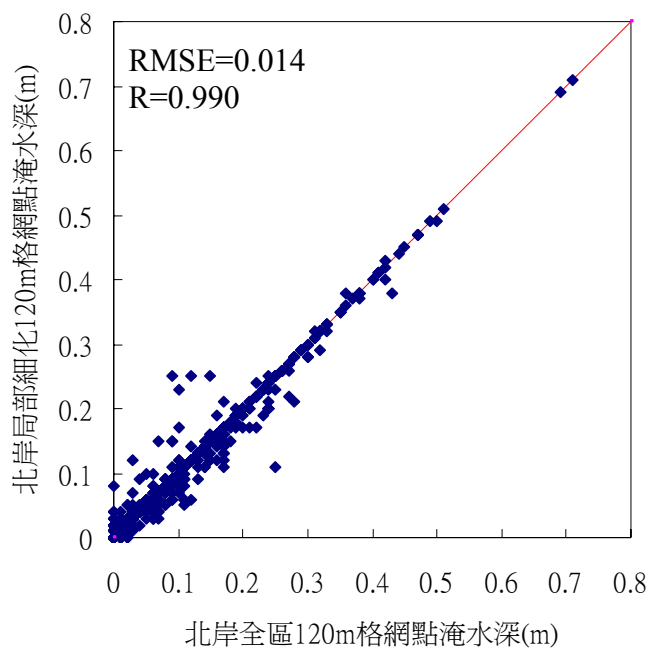


圖 4-43 北岸相同格網點淹水深比較(時間 06.14.06:00)

模擬第 8 小時

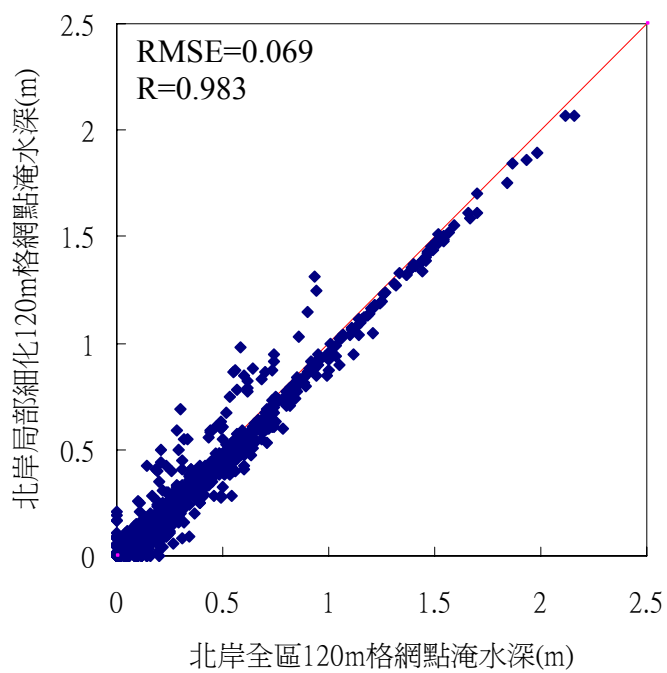


圖 4-44 北岸相同格網點淹水深比較(時間 06.14.10:00)

模擬第 12 小時

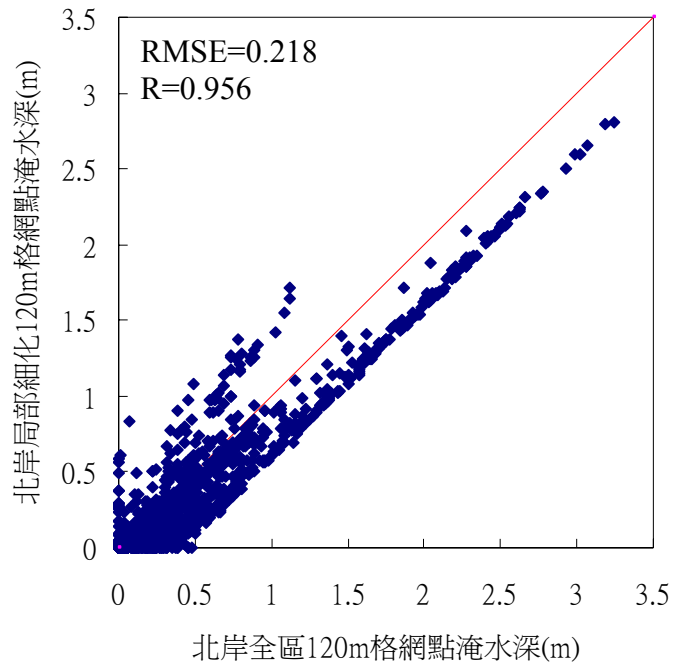


圖 4-45 北岸相同格網點淹水深比較(時間 06.14.14:00)

模擬第 16 小時

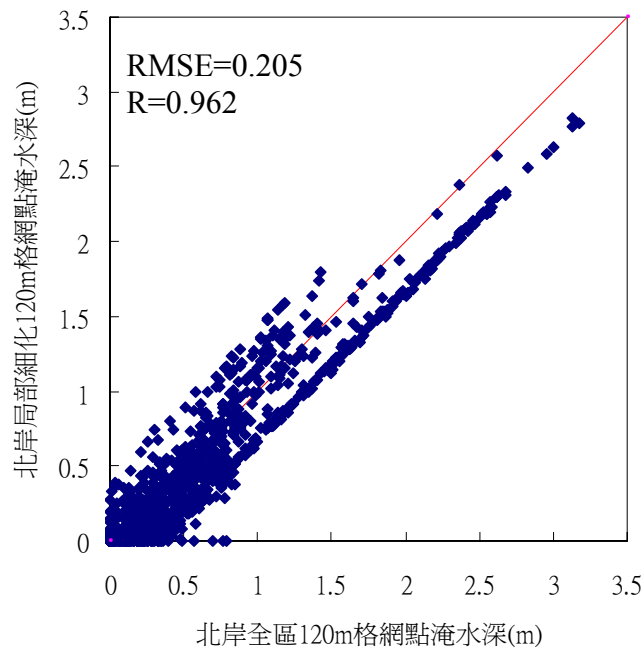


圖 4-46 北岸相同格網點淹水深比較(時間 06.14.18:00)

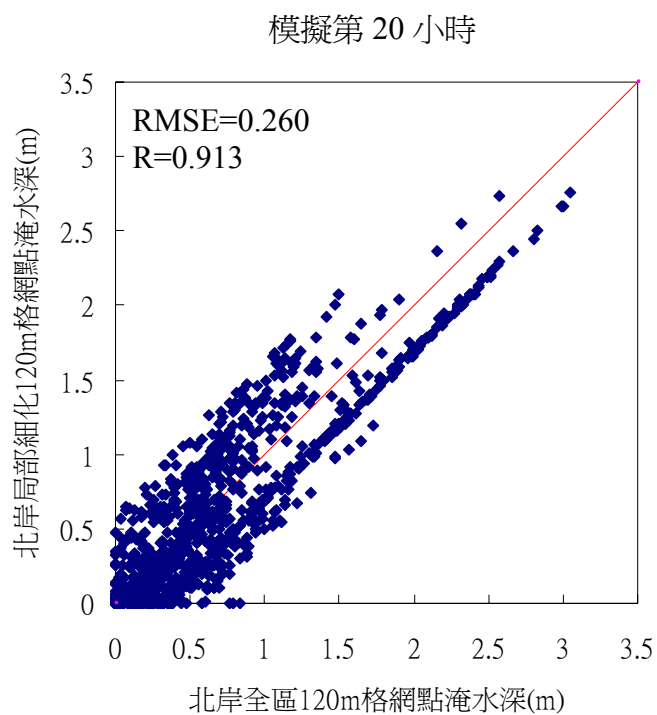


圖 4-47 北岸相同格網點淹水深比較(時間 06.14.22:00)

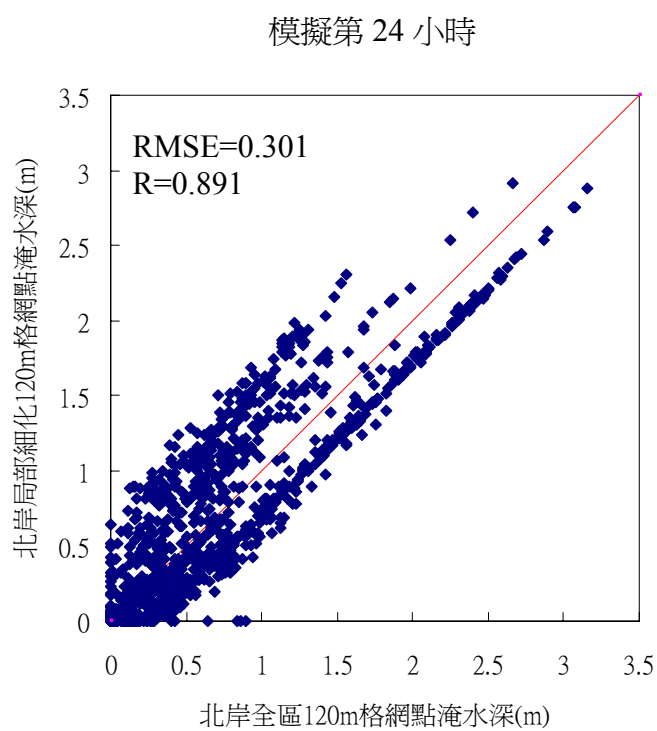


圖 4-48 北岸相同格網點淹水深比較(時間 06.15.02:00)

模擬最大淹水深

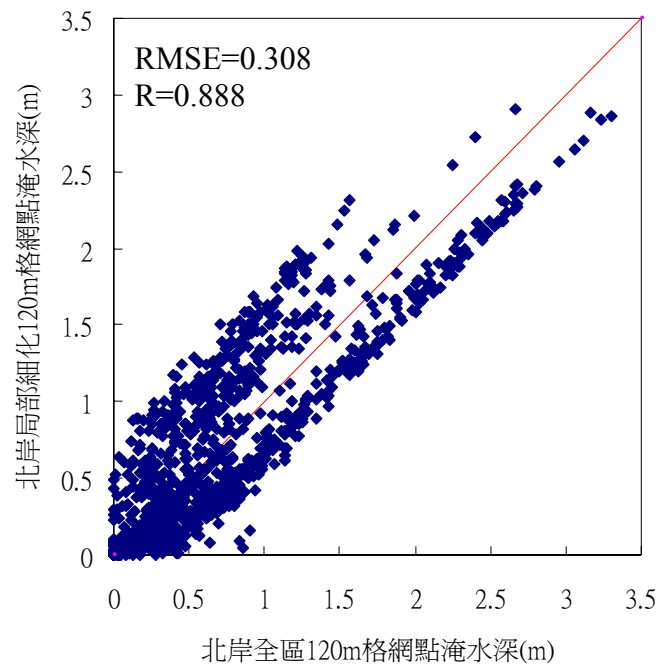
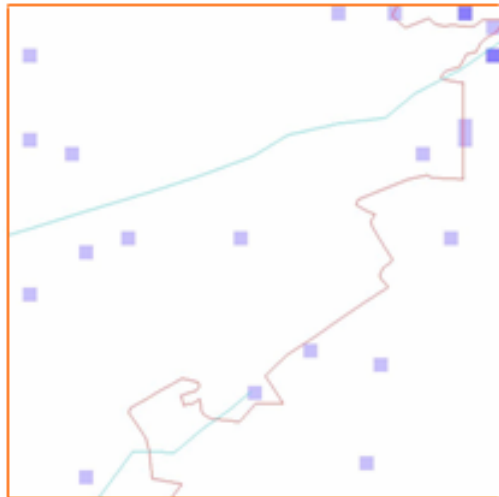
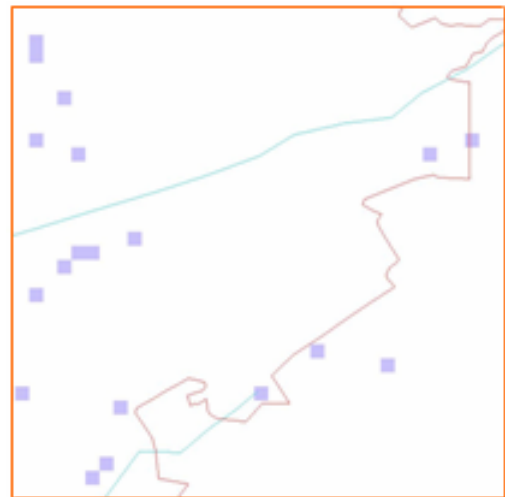


圖 4-49 北岸相同格網點淹水深比較(最大淹水深)



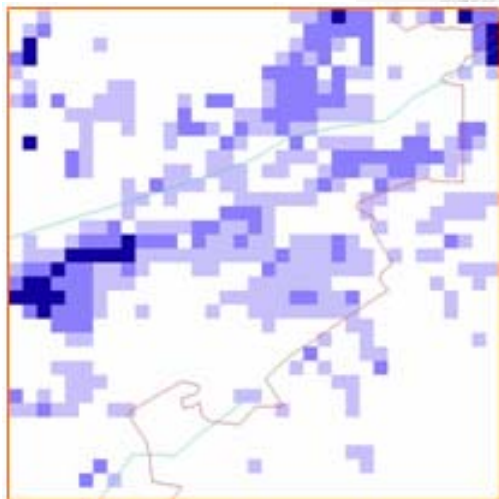


(a)全區 120 公尺格網
(時間 06.14.06:00)

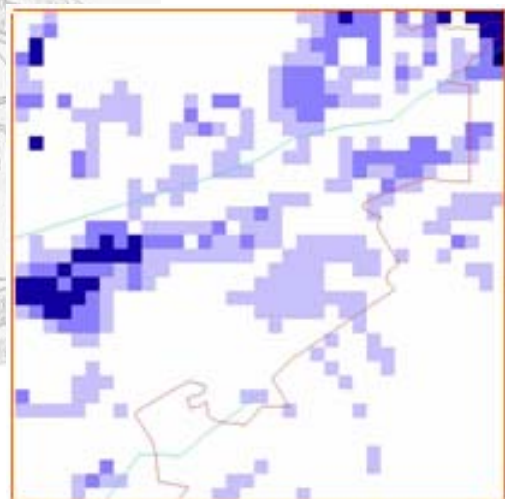


(b)局部 120 公尺格網
(時間 06.14.06:00)

圖 4-50 南岸 120 公尺格網模擬第 4 小時淹水深圖

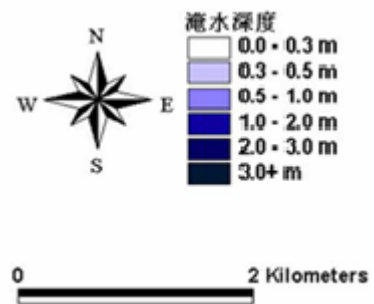


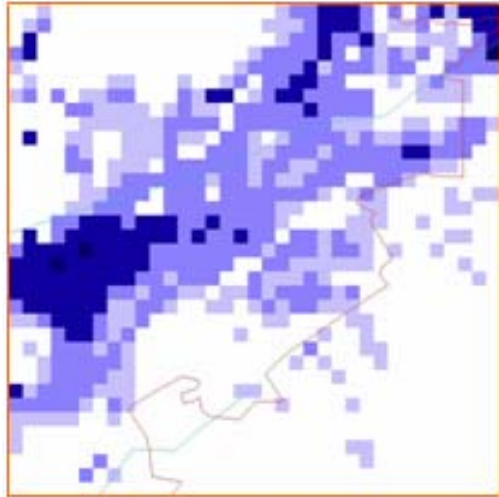
(a)全區 120 公尺格網
(時間 06.14.10:00)



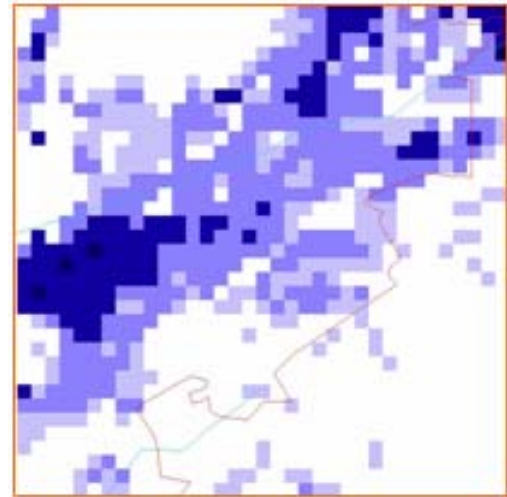
(b)局部 120 公尺格網
(時間 06.14.10:00)

圖 4-51 南岸 120 公尺格網模擬第 8 小時淹水深圖



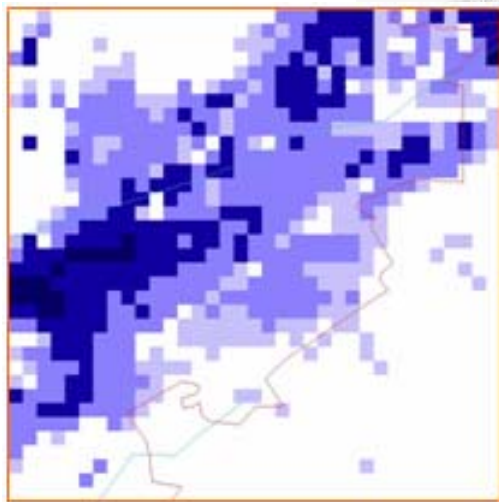


(a)全區 120 公尺格網
(時間 06.14.14:00)

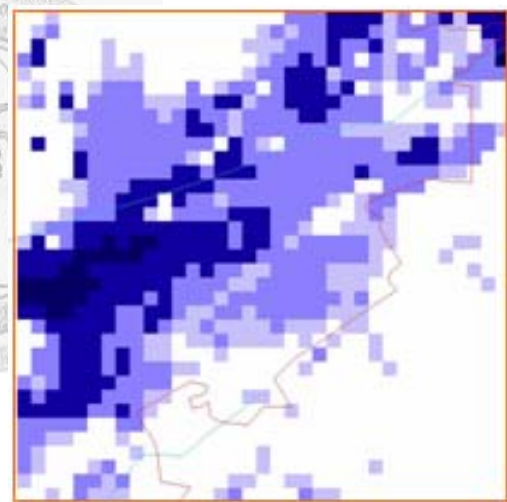


(b)局部 120 公尺格網
(時間 06.14.14:00)

圖 4-52 南岸 120 公尺格網模擬第 12 小時淹水深圖

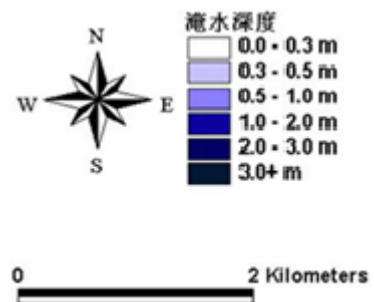


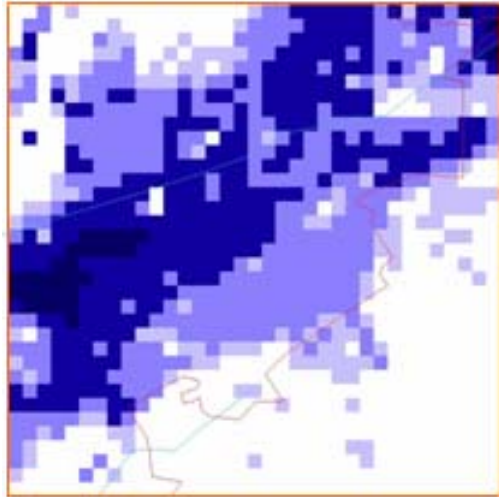
(a)全區 120 公尺格網
(時間 06.14.18:00)



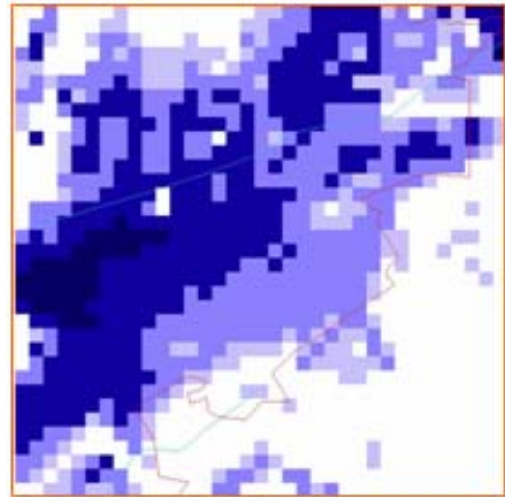
(b)局部 120 公尺格網
(時間 06.14.18:00)

圖 4-53 南岸 120 公尺格網模擬第 16 小時淹水深圖



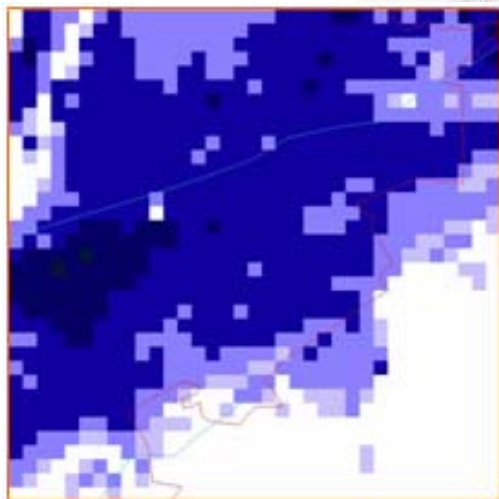


(a)全區 120 公尺格網
(時間 06.14.22:00)

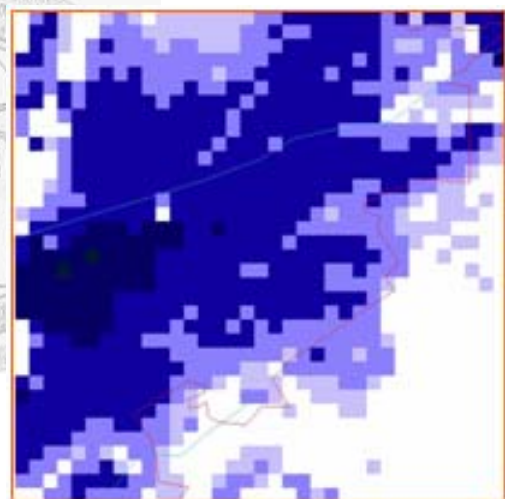


(b)局部 120 公尺格網
(時間 06.14.22:00)

圖 4-54 南岸 120 公尺格網模擬第 20 小時淹水深圖

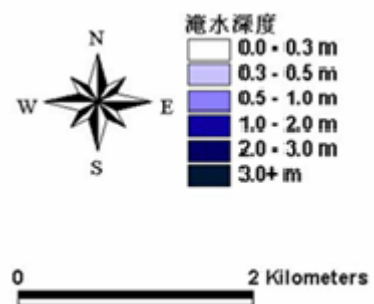


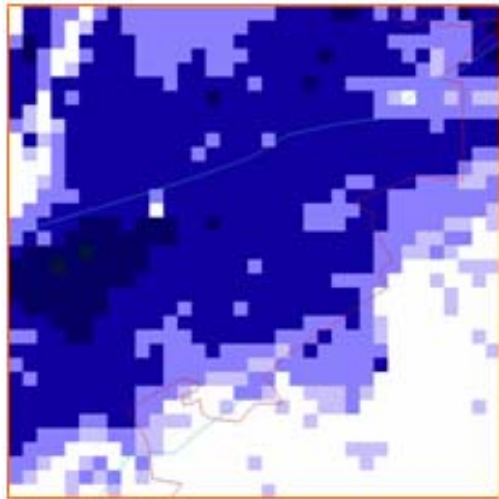
(a)全區 120 公尺格網
(時間 06.15.02:00)



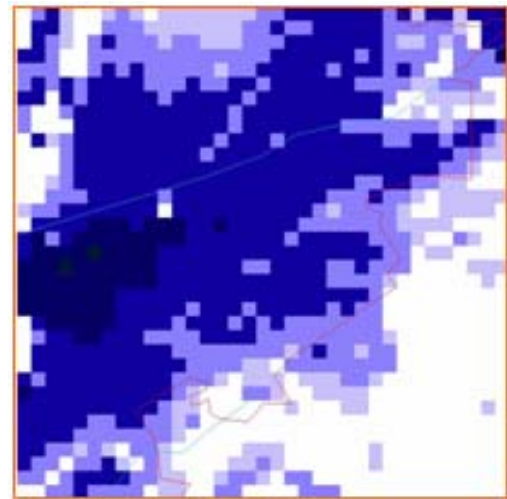
(b)局部 120 公尺格網
(時間 06.15.02:00)

圖 4-55 南岸 120 公尺格網模擬第 24 小時淹水深圖



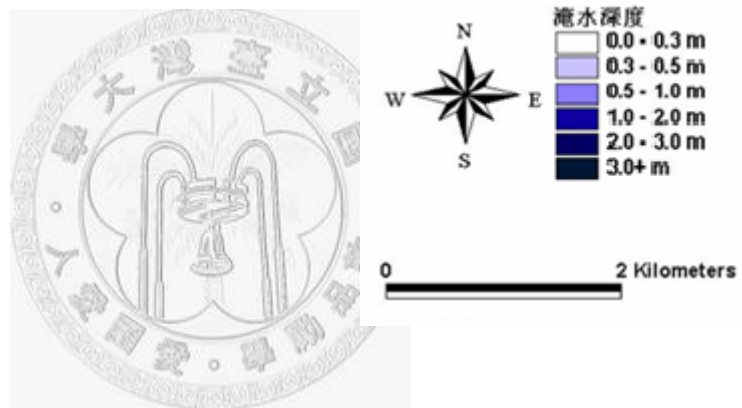


(a)全區 120 公尺格網



(b)局部 120 公尺格網

圖 4-56 南岸 120 公尺格網模擬最大淹水深圖



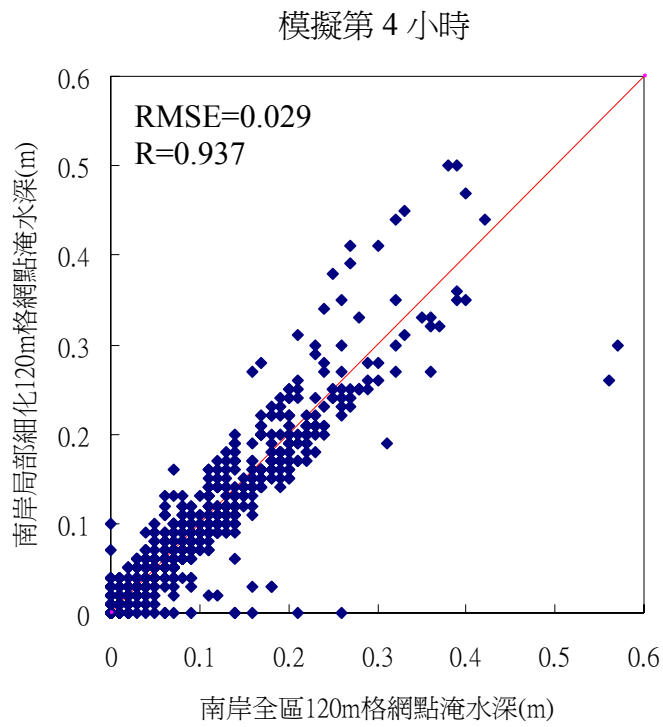


圖 4-57 南岸相同格網點淹水深比較(時間 06.14.06:00)

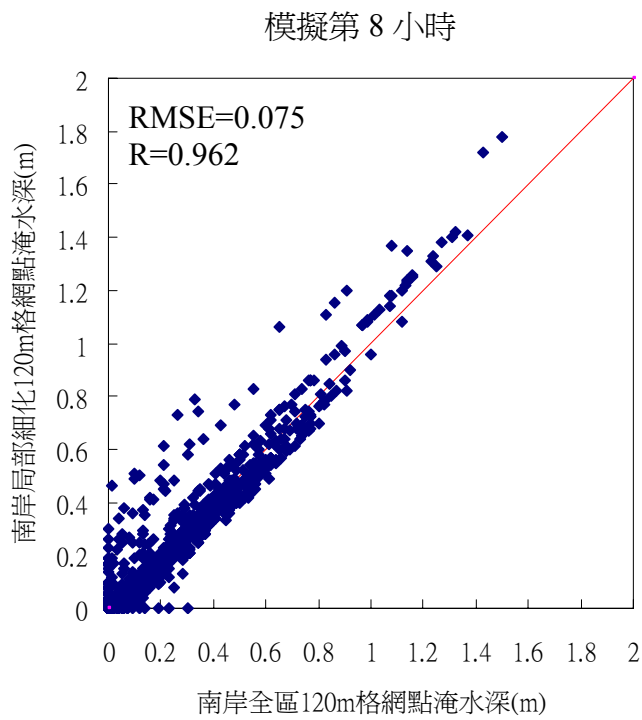


圖 4-58 南岸相同格網點淹水深比較(時間 06.14.10:00)

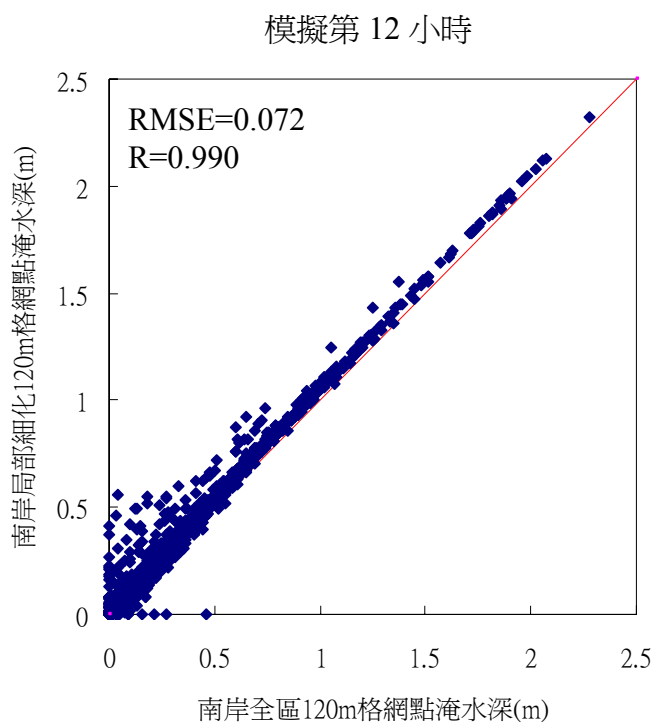


圖 4-59 南岸相同格網點淹水深比較(時間 06.14.14:00)

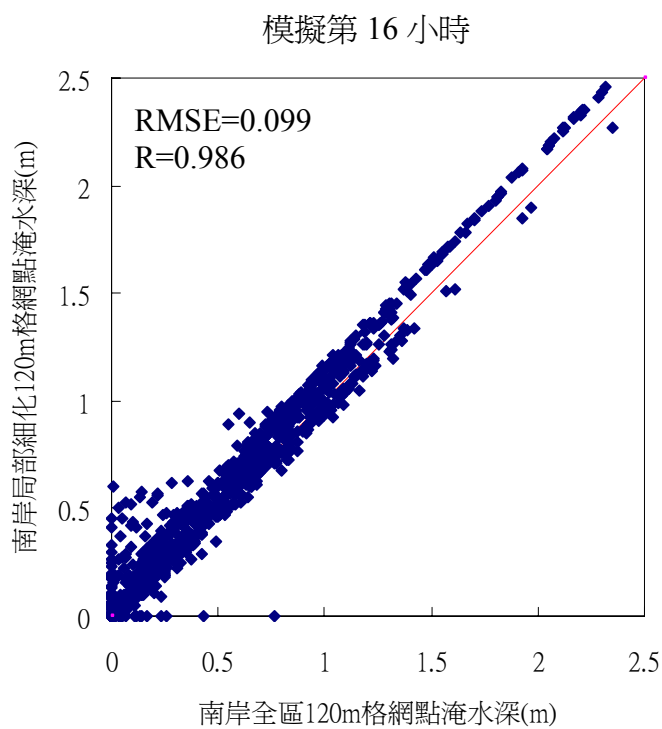


圖 4-60 南岸相同格網點淹水深比較(時間 06.14.18:00)

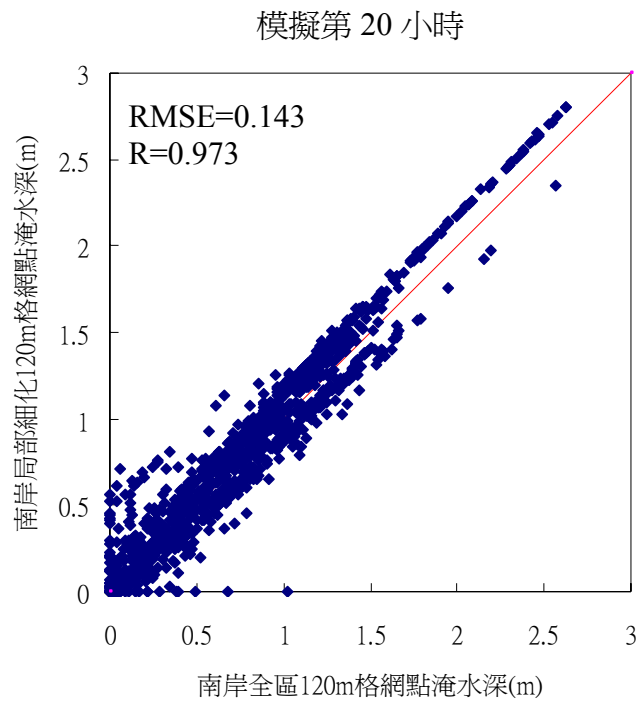


圖 4-61 南岸相同格網點淹水深比較(時間 06.14.22:00)

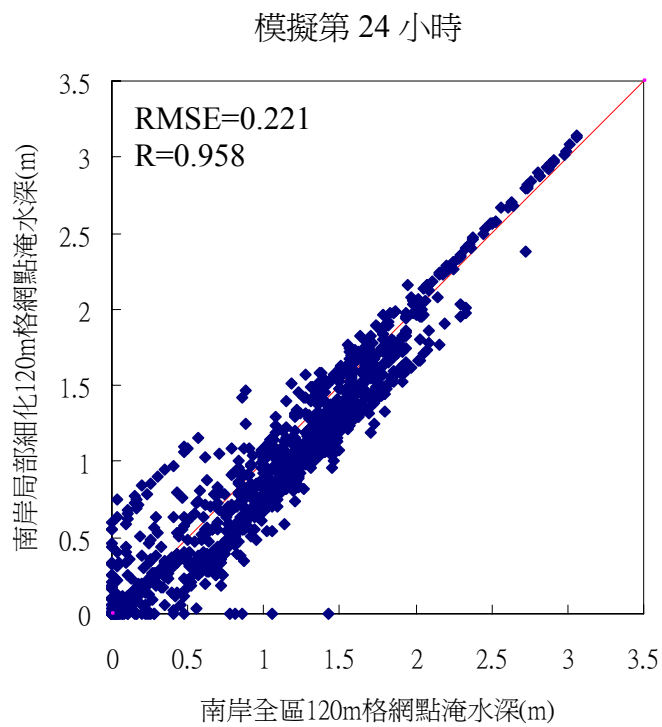


圖 4-62 南岸相同格網點淹水深比較(時間 06.15.02:00)

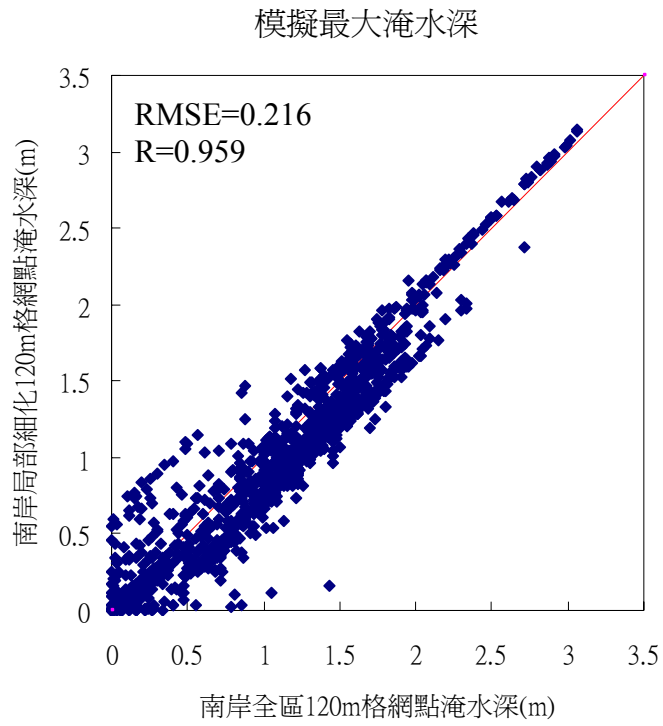


圖 4-63 南岸相同格網點淹水深比較(最大淹水深)



土地利用型態	代號	曼寧糙度係數值
農業用地	0	0.13
交通用地	1	0.13
水利用地	2	0.10
建築用地	3	0.20
工業用地	4	0.20
遊憩地	5	0.13
鹽田	6	0.10
礦區	7	0.13
軍事用地	8	0.13
其他	9	0.13

表 3-1 各土地利用型態之曼寧糙度係數值



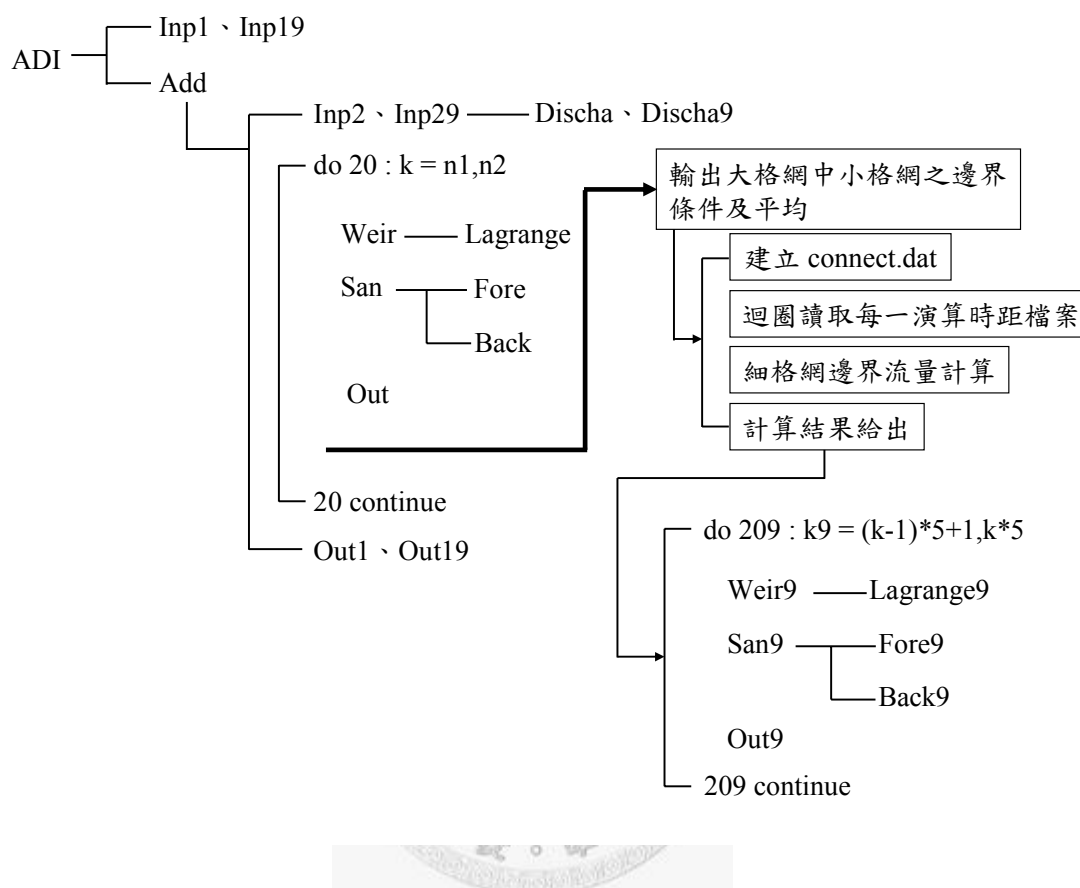
雨量站	面積(km ²)	權重(%)
東後寮	140.33	32.53
魚寮	99.12	22.98
朴子	81.82	18.97
南靖	55.25	12.81
岸內	29.18	6.76
中埔	13.70	3.18
鰲鼓	11.97	2.78
總和	431.37	100

表 4-1 八掌溪北岸徐昇控制面積權重表

雨量站	面積(km ²)	權重(%)
中埔	82.22	22.27
南靖	64.83	17.56
岸內	50.39	13.65
新營	31.63	8.57
小公田	23.63	6.40
北門	23.27	6.30
頭凍	21.62	5.85
白河	20.37	5.52
關子嶺	18.19	4.93
下營	16.84	4.56
東河	11.67	3.16
東後寮	3.40	0.92
大棟山	0.63	0.17
內埔	0.41	0.11
馬頭山	0.10	0.03
總和	369.21	100

表 4-2 八掌溪南岸徐昇控制面積權重表

附錄 A 模式架構流程圖



ADI : 為主程式，其包含三個副程式 Inp1、Inp19、Add。

Inp1 : 為粗格網基本參數之輸入及判斷所開矩陣之維度是否合理。

Inp19 : 為細格網基本參數之輸入及判斷所開矩陣之維度是否合理。

Add : 對於淹水區域內流速及水深之計算，其內包含 10 個副程 Inp2、Inp29、Weir、San、Out、Weir9、San9、Out9、Out1、Out19 等。

Inp2 : 為粗格網之地表高程、縱橫方向之速度編號及排水站位置、起始排水高程、時間等之輸入，其內包含 Discha 副程式。

Inp29 : 為細格網之地表高程、縱橫方向之速度編號及排水站位置、起

始排水高程、時間等之輸入，其內包含 Discha9 副程式。

Discha :於粗格網模擬區之入流點輸入入流量。

Discha9 :於細格網模擬區之入流點輸入入流量。

20 迴圈:模式中粗格網計算之迴圈，演算步階 k 由 n1 至 n2 個步階。

Weir :粗格網中排水站出流點之出流量計算及內插。

Lagrange :為粗格網中所使用之 Lagrange interpolation method。

San :對於粗格網淹水區域內流速及水深之計算，其內包含兩個副程式

Fore、Back。

Fore :於粗格網中利用顯式法解 x 方向之流速及淹水深。

Back :於粗格網中利用顯式法解 y 方向之流速及淹水深。

Out :輸出各時段粗格網淹水模擬區內之流速、水位、淹水深等資料。

connect.dat :粗細格網之對應關係表，包含座標、水深、流速等對應關係編號。

209 迴圈:模式中細格網計算之迴圈，演算步階 k9 由 $(k-1)*5+1$ 至 $k*5$

個步階，當粗格網進行一次演算後，細格網進行連續五次演算。

Weir9 :細格網中排水站出流點之出流量計算及內插。

Lagrange9 :為細格網中所使用之 Lagrange interpolation method。

San9 :對於細格網淹水區域內流速及水深之計算，其內包含兩個副程

式 Fore9、Back9。

Fore9 :於細格網中利用顯式法解 x 方向之流速及淹水深。

Back9 :於細格網中利用顯式法解 y 方向之流速及淹水深。

Out9:輸出各時段細格網淹水模擬區內之流速、水位、淹水深等資料。

Out1:檢驗模式中粗格網模擬結束後之體積守衡與輸出模擬區域流速

為零的格點位置和時間與格點發生之最大淹水深。

Out19:檢驗模式中細格網模擬結束後之體積守衡與輸出模擬區域流

速為零的格點位置和時間與格點發生之最大淹水深。



附錄 B 徐昇氏多邊形法

此方法亦稱為加權平均法(Weighted Mean Method)，由荷蘭的 A.H. Thiessen(1911)所提出。其估計作法為，先將計算區域內 k 個雨量站連結成多個三角形，原則上三角形的各個角不可大於 90° 。接著取每個三角形的外心，然後連接各個外心，形成多邊形網(Thiessen polygons networks)。而多邊形面積即為多邊形內雨量測站之控制面積。故將每個雨量站之降雨量乘以其控制面積，累加之後再除以研究區域總面積，即為平均雨量。其公式如下所示：

$$\bar{P} = \frac{\sum_{i=1}^k P_i A_i}{\sum_{i=1}^k A_i} = \sum_{i=1}^k P_i \cdot W_i$$

式中， \bar{P} 為研究區域之平均降雨量(mm)， k 為研究區域內的雨量測站數， P_i 為研究區域內各雨量站之降雨量(mm)， A_i 為控制面積(m^2)， W_i 為面積權重係數。

當研究區域之雨量站站數較少或是分佈不均時，此方法較算數平均法為佳。但並沒有考慮到雨量站之高度及地形變化，而是假設雨量站的降雨量呈線性變化，將分割的控制面積分配至最接近的雨量站，可能會影響其精確度(吳書幃，2007)。