

國立臺灣大學生物資源暨農學院生物環境系統工程學系

碩士論文

Department of Bioenvironmental Systems Engineering

College of Bioresources and Agriculture

National Taiwan University

Master Thesis

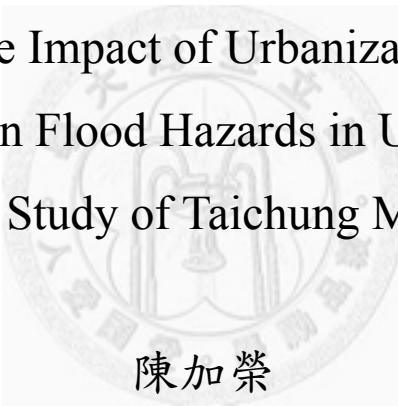
都市化與氣候變異對都會地區淹水之衝擊評估

—以台中都會區為例

Evaluation of the Impact of Urbanization and Climate

Variation on Flood Hazards in Urban Areas

– A Case Study of Taichung Metropolis



陳加榮

Chia-Jung Chen

指導教授：張倉榮 教授

Advisor: Prof. Tsang-Jung Chang

中華民國 100 年 6 月

June, 2011

國立臺灣大學碩士學位論文
口試委員會審定書

都市化與氣候變異對都會地區淹水之衝擊評估

—以台中都會區為例

Evaluation of the Impact of Urbanization and Climate
Variation on Flood Hazards in Urban Areas
— A Case Study of Taichung Metropolis

本論文係陳加榮君 (R98622009) 在國立臺灣大學生物環境系統工程學系完成之碩士學位論文，於民國 100 年 6 月 16 日承下列考試委員審查通過及口試及格，特此證明

口試委員：

張倉榮

(簽名)

(指導教授)

許銘旻

柳文成

鄧慰光

賴文彬

郭文斌

系主任(所長)

(簽名)

謝誌

時光匆匆兩年的時光稍縱即逝，在這段期間歷經了許多酸、甜、苦、辣，每一種滋味都點滴在心頭，真的很感謝不斷陪在我身邊的每個人，讓我在快樂的時候得以分享，在低潮的時候得以傾訴。我只能說我真的是太幸福了！回想打拼的過去感謝我的指導教授張倉榮老師，在我論文遇到瓶頸的時候以風趣的方式教導我，並在生活中給我很大的幫助。而軍廷技士感謝你在我寫論文的時候指導我幫助我，沒有你的指導我還真不知道我的論文會在這裡，太感謝你了！另外，也感謝我的家人以及陳日頌老師，有你們的支持我才有勇氣過完每一個挑戰，真是太愛你們了！感謝我的好室友冠宏（冠逃），沒有你我可能不會有今日的成就，感謝你在我生活中投下很多很多幸福的種子，真的很懷念我們一起上學、一起打拼的時間，能認識你真的是太棒了！也特別感謝我的學弟小風，有你的幫助我的論文才不致於難產，有你這學弟我只能說我太幸運了，謝謝你啦！還要感謝我的學姊曉芬、佳真的幫助！也要感謝我身邊的好朋友銘浩、詩怡、孟萍、敏柔、敏敏、宇軒、伊薇、凱文、毛毛、婷婷、雪麗阿姨、美恩老師、逸斌、頌揚、慧茹、修敏、小黑、志鴻學長、許銘熙老師研究室的大家、丞瑋學長、_____、_____、_____等等（沒寫到的自己加）！總之感謝你們，我不會忘記你們的！特別感謝我的好戰友家銘，在寫論文的時候一起狂叫、一起聊天、一起吃飯，還好有你這戰友，讓我的淹水模式不會淹到我的論文！還有我的同學們小八、嘉瀚，以及辛苦幫我改論文的大學長宏名！謝謝你們！最後，我要感謝主耶穌，讓我的人生如此的兼具挑戰性以及成就感，隨時隨地成為我的幫助，願一切榮耀都歸於祢。

摘要

近年來，隨著氣候之改變以及都市土地利用之變化，淹水災害之影響變得日益嚴重。都會區是一個複雜且敏感之系統，其降雨逕流過程往往受到人為構造物之影響，而形成複雜之水理流程，本研究將針對區域排水、雨水下水道系統以及地表逕流之交替互動情形，分別以分離演算法以及整合演算法，進行一維區排渠道變量流模式、都會區雨水下水道模式以及二維地表漫地流淹水模式之銜接，建構一套適合都會區之地表淹水模擬模式，以反映實際降雨逕流與淹水情形。本研究擬以臺中都會區為研究對象，研析都會地區受到氣候改變以及都市化相關淹水災害的衝擊影響。

此外，本研究藉由 2008 年卡玫基颱風淹水事件，進行上述兩銜接模式之檢定驗證，透過實測淹水範圍比對後，淹水趨勢大致皆吻合。同時，本研究將整合演算法以及分離演算法進行淹水潛勢圖之比較，結果指出整合演算法能更實際反應雨水下水道之迅速排水功能，其原因在於整合演算法容許溢流水體再次回流至雨水下水道進行排水。

最後，本研究採用整合演算法為基礎演算模式，以氣候改變以及土地利用改變作為主要探討因子進行境況設定並模擬，在境況設定中之都市土地利用因子設定，是以內政部地政司於 1997 年以及 2007 年兩次國土利用現況調查數化資料進行區分。另外，在氣候變化則分為 1980 年至 1999 年之氣候變異比較期，以及 1980 年至 2009 年之氣候變異現況，透過上述區分交叉配對四種情境。在各情境之模擬結果比較後顯示，土地利用變化所帶來之淹水範圍增加幅度大於氣候變異之影響，並隨著土地利用改變幅度愈大，其對淹水災害之衝擊就愈廣泛。

關鍵詞：都市化、氣候變異、淹水模擬、臺中都會區、整合演算法、

分離演算法

Abstract

Recently, flood hazard has become progressively serious due to climate variations and urbanizations. The metropolitan area is a complex and sensitive system. The rainfall runoff process is primarily affected by the anthropogenic factors. The main objective of this research is to evaluate the impact of climate variations and urbanizations on flood hazards in Taichung metropolis. Two kinds of flood-inundation simulation modules, i.e. the separation algorithm and integration algorithm, linking the 1-D river routing model, the storm water management model and the 2-D inundation routing model, to study the interactions of regional drainage, surcharged manholes and surface runoff.

In addition, in order to validate the accuracy of the separation algorithm and integration algorithm, the Typhoon Kalmaegi event in 2008 is applied to verify the above two algorithms. In general, the simulated results have good agreement with the measured data. Based on the simulated results, the present research has revealed that the integration algorithm is more practical to simulate the rapid storm sewer drainage function than the separation one. The integration algorithm is allowed overland flow to return into storm sewer drainage system once again.

Finally, this research utilizes the integration algorithm as the computational model, considering the environmental factors of climate

variations and urbanizations, to simulate the study case. In different urbanization setting, the study case is based on two kinds of landuse data which was supplied by Dept. of Land Administration in 1997 and 2007, respectively. In climate variations setting, the study case takes two periods (one is from 1980 to 1999 and the other is from 1980 to 2009) into account. Thus, the study case has four simulated scenarios. Based on a series of simulations, the results show that the urbanization causes more significant effect on inundation areas than climate variations. With the better urbanization, the flooding hazards will result in more damages in the metropolis.

Keywords : Urbanization, Climate Variation, Flood simulation, Taichung metropolis, Integration algorithm, Separation algorithm.

目錄

摘要	I
Abstract	II
目錄	IV
表目錄	VI
圖目錄	VII
第一章 緒論	1
1.1 前言	1
1.2 文獻回顧	1
1.3 研究目的	6
第二章 研究方法	7
2.1 基本理論	7
2.2 分離演算法	22
2.3 整合演算法	24
第三章 研究區域資料建置及模式驗證與比較	35
3.1 研究區域概述	35
3.2 資料來源及蒐集	37
3.3 地理資訊資料庫建置	39
3.4 水文資料	40
3.5 水理資料	41
3.6 模式驗證與比較	44
第四章 都市化與氣候變異境況設定與模擬分析	77
4.1 境況設定架構	77
4.2 土地利用分析	79
4.3 降雨情境之探討	81

4.4 都市化對淹水之衝擊.....	83
4.5 氣候變異對淹水之衝擊.....	86
4.6 都市化與氣候變異之衝擊評估.....	86
第五章 結論與建議.....	100
5.1 結論.....	100
5.2 建議.....	102
參考文獻.....	103



表目錄

表 2.1 網格數與模擬速度對照表	26
表 3.1 各都市計畫區之計畫面積、計畫人口及計畫年期表	48
表 3.2 模擬流域排水路與雨水下水道系統整合表	49
表 3.3 雨量測站基本資料整合表	50
表 3.4 各土地利用型態曼寧糙度值	51
表 3.5 各渠道斷面之曼寧糙度值	51
表 3.6 不同土地利用之 SCS 曲線編號表	52
表 3.7 面積折減因子對照表	52
表 3.8 模擬渠道下游邊界條件	53
表 4.1 情境設定表	88
表 4.2 各土地利用面積比例表	88
表 4.3 卡玫基颱風於 1997 年以及 2007 年都市化程度淹水情形比較	89
表 4.4 氣候變異頻率分析表	89
表 4.5 都市化於不同情況之最大淹水體積	89
表 4.6 各情境於重現期距 100 年之模擬淹水情況整合表	90
表 4.7 筏子溪流域各情境於各淹水深度之淹水範圍及淹水體積統計	90
表 4.8 旱溪流域各情境於各淹水深度之淹水範圍及淹水體積統計	91

圖目錄

圖 2.1	模擬層面整合示意圖.....	26
圖 2.2	數值演算流程圖.....	27
圖 2.3	單元網格流量計算示意圖.....	27
圖 2.4	SCS-CN 關係曲線圖.....	28
圖 2.5	模式演算流程圖.....	28
圖 2.6	模擬範圍雨水人孔分佈圖.....	29
圖 2.7	SWMM 模式演算整體架構圖.....	30
圖 2.8	非線性水庫模型示意圖.....	31
圖 2.9	次集水區地表逕流演算示意圖.....	31
圖 2.10	人孔節點與管線輸水演算示意圖.....	32
圖 2.11	分離演算法演算流程圖.....	33
圖 2.12	溢流點位溢流量輸入網格示意圖.....	34
圖 2.13	整合演算法演算流程圖.....	34
圖 3.1	研究區域水係分佈概況圖.....	54
圖 3.2	研究區域高程圖.....	54
圖 3.3	臺中市都市計畫分佈概況.....	55
圖 3.4	臺中縣都市計畫分佈概況.....	55
圖 3.5	臺中縣市都市計畫於研究區之分佈概況.....	56
圖 3.6	資料蒐集架構及流程圖.....	56
圖 3.7	筏子溪流域排水路分佈圖.....	57
圖 3.8	旱溪流域排水路分佈圖.....	57
圖 3.9	航照圖對位示意圖.....	58
圖 3.10	渠道斷面比對示意圖.....	58
圖 3.11	模擬區域地表高程圖.....	59

圖 3.12	1997 年筏子溪流域土地利用分佈圖	59
圖 3.13	1997 年旱溪流域土地利用分佈圖	60
圖 3.14	2007 年筏子溪流域土地利用分佈圖	60
圖 3.15	2007 年旱溪流域土地利用分佈圖	61
圖 3.16	參數整合建置示意圖	61
圖 3.17	地表集水區流域範圍劃分示意圖	62
圖 3.18	雨水下水道子集水區劃分示意圖	62
圖 3.19	模擬流域範圍劃分示意圖	63
圖 3.20	雨量測站地理位置圖	63
圖 3.21	筏子溪流域徐昇法面積權重示意圖	64
圖 3.22	旱溪流域徐昇法面積權重示意圖	64
圖 3.23	筏子溪流域 1997 年 SCS 曲線編號分佈圖	65
圖 3.24	筏子溪流域 2007 年 SCS 曲線編號分佈圖	65
圖 3.25	旱溪流域 1997 年 SCS 曲線編號分佈圖	66
圖 3.26	旱溪流域 2007 年 SCS 曲線編號分佈圖	66
圖 3.27	筏子溪流域 1997 年 ARF 分佈圖	67
圖 3.28	筏子溪流域 2007 年 ARF 分佈圖	67
圖 3.29	旱溪流域 1997 年 ARF 分佈圖	68
圖 3.30	旱溪流域 2007 年 ARF 分佈圖	68
圖 3.31	筏子溪下游邊界水位歷線	69
圖 3.32	旱溪下游邊界水位歷線	69
圖 3.33	卡玫基颱風大坑站真實雨型	70
圖 3.34	筏子溪流域於卡玫基颱風之雨量權重分部圖	71
圖 3.35	旱溪流域於卡玫基颱風之雨量權重分部圖	72
圖 3.36	筏子溪流域於卡玫基颱風之淹水調查圖	73

圖 3.37 旱溪流域於卡玫基颱風之淹水調查圖	73
圖 3.38 整合演算法於筏子溪流域之模擬淹水圖	74
圖 3.39 整合演算法於旱溪流域之模擬淹水圖	74
圖 3.40 地表子集水區劃分示意圖	75
圖 3.41 分離演算法於筏子溪流域卡玫基颱風事件之模擬淹水圖	75
圖 3.42 整合與分離演算法模擬筏子溪流域卡玫基颱風事件淹 水總體積比較圖	76
圖 4.1 情境模擬流程及設定架構圖	92
圖 4.2 情境時間軸設定示意圖	92
圖 4.3 卡玫基颱風於筏子溪流域在 2007 年都市化程度之淹水 模擬圖	93
圖 4.4 卡玫基颱風於旱溪流域在 2007 年都市化程度之淹水模擬	93
圖 4.5 卡玫基颱風於筏子溪流域在不同都市化程度之流量歷線圖 ..	94
圖 4.6 卡玫基颱風於旱溪流域在不同都市化程度之流量歷線圖	95
圖 4.7 豪雨事件發生次數圖	96
圖 4.8 氣候變異之設計雨型	96
圖 4.9 都市化於不同情況之淹水體積歷線	97
圖 4.10 筏子溪流域重現期距 100 年降雨事件之淹水模擬圖	98
圖 4.11 旱溪流域重現期距 100 年降雨事件之淹水模擬圖	99

第一章 緒論

1.1 前言

近年來隨著氣候之改變，導致海平面不斷上升、極端降雨事件成為常態，全球淹水災害也因此日漸頻繁，其所帶來之衝擊已逐漸超出人類所能想像，影響層面既廣泛又深遠。根據全球氣候變遷指標性研究機構「政府間氣候變遷專家委員會」(IPCC) 2007 年 2 月 2 日於巴黎，公布之『第四次氣候變遷評估報告(簡稱 AR4)』中再次明確指出全球暖化日漸嚴重之趨勢。台灣因屬海島型國家，於特殊之地形、地質條件下，氣候的改變對於沿海低窪地區以及河川下游之淹水災害更為首當其衝之影響區域。又台灣地區因地形之因素，人口聚集之都會區常位於河川中下游與沿海低窪地帶，更將受其影響而加劇了淹水災害之災情以及危險度。此外，近幾年來台灣隨著經濟之成長、人口不斷增加，導致人為活動與開發愈趨頻繁，於快速都市化下整體地形、地貌產生極大之改變，間接影響水文循環與防災系統環境之變遷。故綜合以上所述，對於人口密集之都會區而言，氣候變遷以及都市化將對淹水災害造成影響，因此評估其對於都會區所帶來之衝擊，將可供未來工程設計以及防災系統之參考。

1.2 文獻回顧

本研究主要探討於都會區中都市化效應以及氣候變異下對於洪水災害所帶來之衝擊，因此，根據文獻回顧將其探討議題進行主題式分類，並藉此回顧國內外相關之研究，於本研究所分類之主題中可概分為三類，首先，回顧於整體氣候之改變以及都市化對於環境災害之衝擊，接著於地理相關資料之篩選、校正、建置以及分析中，回顧前人如何以近年較熱門之地理資訊系統，結合淹水模式進行介面式模擬分

析，最後，由於本研究之模擬區域為都會地區，其流域特性常因人為構造物之介入而有所改變，如雨水下水道系統、抽水站以及跨渠構造物等，也因此於淹水模式上隨著不同之考量，而有不同之銜接方式，故本研究亦針對前人對於模式之不同銜接方法進行文獻回顧，藉由上述三個方向之文獻回顧，架構本研究之主要探討議題，其詳述如下。

1、氣候變遷與都市化之衝擊

根據IPCC於2007年公布之『第四次氣候變遷評估報告(簡稱AR4)』報告中估計，1990年至2100年全球平均溫度將上升 0.9°C 到 3.5°C ，並陸地之溫度上升幅度將大於海洋。此外，據推估海平面受全球溫度上升之影響，至2100年時將較1990年提升38到56公分，其將對沿海城市造成很大的衝擊，也因此近年來氣候變遷導致全球各地災害肆虐。柳等(2008)根據IPCC-AR4之結果進行台灣地區未來氣候變遷之預估，研究指出台灣溫度上升隨著季節性不同而有所差異，夏季溫度於百年後將上升 1.4°C 至 3.2°C ；而冬季則上升 1.4°C 至 3.5°C 。總降雨量也隨之增加，於全年增加幅度約有-8%至+22%的變化，而秋季更有25%至96%之增加幅度，由此可知，其將造成台灣未來淹水災害之衝擊。中央大學太空及遙測中心於2004年亦根據IPCC-AR4之報告內容，透過模擬推估全球暖化對台灣可能之影響，其推估在無人為工程設施下，台灣周圍海域水位若上升1公尺，將會有0.4%之陸地面積遭海水淹沒；若上升10公尺則將有8.8%陸地面積遭受淹沒。行政院環保署在2001年，針對台灣因海平面上升可能影響之人口進行研究，在無人為因素介入下，海平面上升0.5公尺影響人口達166萬人，占全國人口7.2%；而海平面上升1公尺時，影響人口更達到185萬人，占全國人口8.1%。王(2008)針對台灣西南沿海地區因地層下陷與氣候變遷所帶來淹水災害之衝擊評估，發現同時考慮氣候變遷情境之降雨變化與海水位變化，其在短期（2010

年至2039年) 就會有嚴重淹水現象產生。此外，高度之都市發展亦為都會區帶來嚴重之衝擊，Anil(2010)針對印度恆河流域，進行都市化對於水資源之衝擊，其發現人口增加將對其流域之水文條件，包括溫度、降雨量以及地下水位等，均將帶來可觀之影響。潘等(2006)針對中上游之都市化改變對於員山子分洪道所帶來之影響，提出調整後都市化效應影響後之合理流量。徐等(2007)對於台中市之都市變更所帶來對氣溫之影響做完整分析，其發現未來都市化之結果將造成年平均溫度上升。其皆說明於氣候變遷以及都市化之影響下，因水文、地文之改變將帶來淹水災害之衝擊。

2、 地理資訊系統於淹水模式上之應用

地理資訊系統於近年來普遍為國內外學者應用於空間特性分析上，而其於淹水模式亦為如此，Schumann(1993)說明如何將地理資訊系統應用於水文模式中，並利用其功能協助各項參數之估算。Tsihrintzis et al.(1996)對地理資訊系統在水資源方面的應用做了完整的回顧，其中更詳細的介紹未來研究趨勢。隨著地理資訊系統對於水資源方面之應用愈趨成熟，其走向自動化分析階段，Martz and Garbrecht(1993)應用地理資訊系統，由數值高程模型 (Digital Elevation Model, DEM) 建立自動劃分集水區、排水網路及各項水文參數之模式構想。Perez(2000)針對地表水流之流動特性，建立自動描述集水區分析模式，依據數值高程模型進行地表集水區邊界以及集流點之計算劃分。Liang and Mackay(2000)透過數值高程模型自選全域地表水流之流動方向以及流動路徑，藉此繪製地表排水路作為無相關資料時之參考。而於國內早期楊等(1995)利用地理資訊系統處理高雄市淹水模擬所需大量的空間參數。Chang et al.(2000b)將漫地流淹水模式結合地理資訊系統，應用於台灣高速鐵路車站之淹水潛勢評估。經濟部水利署水利規劃試驗所

在 2010 年，透過地理資訊系統建置流域數值地形系統淹水模組，提供結構化之系統操作介面，並建置完整之集水區水文及水理計算系統。

3、 淹水模式之銜接

於都會區中常因人為構造物之介入，使流域中之排水特性產生複雜之改變，甚至使流域與流域間產生模糊之邊界，而都會區中常見之排水構造物，莫過於雨水下水道系統之建立，因其建立使流域之渠道排水路、漫地流以及下水道系統產生複雜之水流特性，Akan(1993)研究中描述漫地流與下水道系統流況屬複雜之非均勻變量流。早期對其淹水之模擬，常受模式之限制而只能針對其中一種進行分析模擬，而隨著地表構造物之卻趨複雜，淹水模擬開始漸漸透過模式之銜接，求得相互之間之互動情況，以更符合實際情況。過去常見之銜接方式依據不同之假設以及簡化可分為三種，早期 Rosener(1988)假設降雨之逕流立即流入下水道系統，當溢流產生時利用簡化之水位與體積關係曲線，推求地表淹水範圍；第二種銜接方式為許等(2000)所發展，其假設地表逕流均由直接流入下水道內，透過一維下水道模式之計算後，再將獲得之溢流資訊輸入二維零慣性漫地流模式中，演算地表實際流動之情形，目的在於求得人孔溢流在地表之淹水情況，本文中稱為「分離演算法」。王(2009)利用上述其銜接方式，進行台北市雨水下水道系統之模擬，藉此評估氣候變遷對雨水下水道系統之衝擊影響評估；第三種銜接方式則同步進行漫地流以及下水道模式之演算，Rosener(1988)將地表逕流區分為地面排水以及下水道排水，同步進行模擬。陳(2002)改進其銜接方式，以二維零慣性漫地流模式為基礎，利用交替方向顯示法求解地表逕流在都會區所造成之淹水情形，並將下水道集流以及溢流考慮為點匯與點源，進行下水道與地表逕流雙向互動之模擬，以提供更接近實際流況之模擬結果，本文稱之為「互動演

算模式」，隨後陳(2002)將其模式應用於具有高度發展之都會地區台北市進行模擬，獲得良好之模擬成果。上述各銜接方法中常以不同維度進行地表漫地流以及雨水下水道之水流演算，Jorge et al.(2009)比較以一維漫地流模式和一維雨水下水道模式進行銜接，以及二維漫地流模式以及一維雨水下水道模式進行銜接，發現前者雖有較快之模擬演算速度，但對於淹水空間分佈展示較為薄弱；而後者雖有完善之空間分佈展現，但往往需花上比較長之演算模擬時間。

本文所採用之銜接模式，為將第三種銜接模式進行改良，以 FLO-2D V.2009 中之二維漫地流與一維渠道水流之雙向互動模式作為基礎模式，將雨水下水道假設為箱涵，進行研究區模擬網格中之斷面建置，藉此同時計算地表漫地流、渠道以及雨水下水道系統之互動模擬，本文將其演算模式稱為「整合演算法」，並為本研究模擬漫地流、渠道水流以及雨水下水道系統之主要模式。

1.3 研究目的

回顧前述之研究，目前許多國內外氣候變遷之研究，大致上將氣候變異之轉折點訂於 2000 年前後，並以 1960 年至 1989 年共三十年為氣候變遷前之研究基期，1990 年後再依研究需求分為若干變遷情境進行分析討論。而本研究，將以 1980 至 2009 年之實測水文資料建構氣候改變之情境，目的在於探討從古至今之變化趨勢，並非針對未來作任何推估或以 IPCC-AR4 氣候變遷預測模式模擬境況作為分析探討之標的，故名之為「氣候變異(Climatic variation)」以示區別，同時本研究定義 1980 年至 1999 年為氣候變異比較期，1980 年至 2009 年為氣候變異現況，以建構氣候變異之不同情境。

本研究以臺中都會區為例，探討都市化以及氣候變異對該地區從 1980 年至今淹水衝擊之模擬評估。臺中都會區為台灣前三大經濟重鎮一，目前超過三百萬人口居住於此，並於近年台中縣市合併升格為大臺中地區，其都市化程度隨著人口之增加而不斷提昇並土地利用型態之改變顯著。綜觀其發展史，台中都會區於日治時期以來以幾近全台最快速的都市發展速度，進行系統化之都市規劃以及設計，其發展於整體排水系統而言，造成都會區區域排水與雨水下水道逕流量大量增加，急遽加重該地區之淹水災情，因此藉由探討分析該地區都市化以及氣候變異之淹水模擬，以評估其對都會區所帶來淹水災害之衝擊。

第二章 研究方法

都會區中淹水模擬常伴隨著地表漫地流、渠道以及雨水下水道之交替，水流互動關係頗為複雜，本研究透過一維區排渠道變量流模式、都會區雨水下水道模式以及二維地表漫地流淹水模式進行都會區淹水模擬，利用三種模式之不同銜接方式，分別對於地表漫地流、渠道水流以及雨水下水道管流進行三者間互動之動態模擬，用以整合建立適用於都會區複雜互動關係之淹水模擬模式。而本研究所採用之銜接方式分別為分離演算法以及整合演算法，透過此兩種銜接方式之模擬結果，比較其差異並進行後續都市化及氣候變異之情境淹水動態模擬，其模擬演算之基本理論以及銜接方式詳細說明如下。

2.1 基本理論

1、二維淹水模式

當集水區中發生超滲降雨或河川產生測溢流時，於地表將形成漫地流方式之地表逕流，其水流隨著地形產生非單向性之流動(郭，2010；許等，2000；許等，2002)，此時如要瞭解模擬區中之淹水範圍以及空間分佈，即必須採用二維地表漫地流演算加以模擬。本研究於二維淹水模擬使用 FLO-2D V.2009 進行模擬演算，其模式起源於 1988 年 O'Brien et al.於美國科羅拉多大學所提出之二維洪水數值模擬方法(1993)，並由 FLO-2D 公司發展為商業套裝軟體，現今為美國聯邦急難管理署(FEMA)認證之模式之一(U.S. Army Corps of Engineers, 1996)。此模式當中結合了二維漫地流模式以及一維河道變量流模式，透過兩模式之交替演算，以達模擬地表漫地流與渠道水流之互動情形，包括溢堤、潰堤、潰壩等之模擬。因此，FLO-2D 常應用於都市淹水模擬、防災策略分析、風險管理、水工結構物水理演算及工程設計等；此外，軟體本身還提供泥流演算，多年來亦常運用於沖積扇洪泛水流、土石

流、泥流等之模擬研究(廖，2008；林，2010；Bertolo and Wieczorek, 2005)，整合以上述模擬演算之應用範圍如圖 2.1 所示。

FLO-2D 藉由網格進行模擬演算，可於每一網格當中分別給定地表高程值、曼寧係數、入滲指數、面積與寬度折減因子以及降雨權重值等地文及水文相關之資料，藉此使模式模擬更逼近現實情況，關於各項參數之設定情況將於 3.3 節水文資料與 3.4 節水理資料進行進一步之說明。FLO-2D 在演算上模式做了四項基本假設：(1) 假設時間差分間隔中為定量流 (steady flow)；(2) 假設為靜水壓分佈；(3) 假設為淺水波；(4) 假設河道網格之斷面幾何參數與水力粗糙度為均值(O'Brien, 2007)。經由以上之基本假設後，進行控制方程式之設定以及整體模式演算之構架，以求取每一網格中之待求未知數並使模式達穩定之條件，其控制方程式、演算流程以及穩定條件說明如下：

a、控制方程式

模式中之基本控制方程式為連續方程式 (2-1) 以及動量方程式 (2-2)、(2-3)，如下所示(O'Brien et al., 1993)：

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial(hu)}{\partial x} + \frac{\partial(hv)}{\partial y} = i \quad (2-1)$$

$$S_{fx} = S_{ox} - \frac{\partial h}{\partial x} - \frac{u}{g} \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right) - \frac{v}{g} \left(\frac{\partial u}{\partial y} \right) - \frac{1}{g} \left(\frac{\partial u}{\partial t} \right) \quad (2-2)$$

$$S_{fy} = S_{oy} - \frac{\partial h}{\partial y} - \frac{u}{g} \left(\frac{\partial v}{\partial x} \right) - \frac{v}{g} \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right) - \frac{1}{g} \left(\frac{\partial v}{\partial t} \right) \quad (2-3)$$

式中，
 h : 模擬區域之地表水深 (m)；
 t : 時間座標 (s)；
 x, y : 模擬區域之迪卡兒空間座標 (m)；
 u : x 方向的平均流速 (m/sec)；
 v : y 方向的平均流速 (m/sec)；

$$\begin{aligned}
i & : \text{有效降雨強度 (m/sec)}; \\
g & : \text{重力加速度 (m/sec}^2\text{)}; \\
S_{fx} & : \text{沿 x 方向之摩擦坡降, } S_{fx} = \frac{n^2 u \sqrt{u^2 + v^2}}{h^{\frac{4}{3}}}; \\
S_{fy} & : \text{沿 y 方向之摩擦坡降, } S_{fy} = \frac{n^2 v \sqrt{u^2 + v^2}}{h^{\frac{4}{3}}}; \\
S_{ox}, S_{oy} & : \text{底床坡降沿迪卡兒空間座標之分量}; \\
n & : \text{曼寧糙度係數 (m}^{\frac{1}{6}}\text{)}
\end{aligned}$$

以上方程式為二維連續方程式以及運動方程式，主要用以計算二維漫地流的部份。而一維河道變量流則將以上二維方程式改寫為忽略 y 方向變數之單向一維模式，此時，方程式中之流速 u 、 v 將變成為平均水深下之平均流速 V 。另外，式中之摩擦坡降 S_f 則以曼寧公式為基礎。

式 (2-2) 及式 (2-3) 分別為沿 X 軸與 Y 軸方向之運動方程式，主要由迪聖凡南方程式 (de Saint-Venant equation) 加以推導而成之動力波動量方程式，其方程式為描述洪水波於模擬區域中以動力波方式傳遞的情形。以式 (2-2) 為例就方程式架構來看將更為清楚，方程式中包含了壓力梯度項 ($-\frac{\partial h}{\partial x}$)、對流加速度項 ($-\frac{u}{g}(\frac{\partial u}{\partial x}) - \frac{v}{g}(\frac{\partial u}{\partial y})$) 以及局部加速度項 ($-\frac{1}{g}(\frac{\partial u}{\partial t})$) 等三項加以構成，依據不同之假設以及考量，此方程式將可分為運動波方程 (kinematic wave equation)、擴散波方程 (diffusive wave equation) 以及動力波方程 (dynamic wave equation)。其中運動波方程為將以上三項加以忽略，僅考慮重力與摩擦力的關係；擴散波方程則忽略對流加速度項以及局部加速度項等慣性項，因考慮壓力項而可用以計算迴水效應 (back water effect) 以及湧浪 (surchage) 現象；最後動力波方程則將以上三項皆納入考慮，比起前兩形式之方程，

因多考慮了壓力項以及慣性項，故可計算亞臨界流之流況以及水流條件突然改變之情況，如閘門開關、分水堰等(Neil et al., 2007; 林, 2005)。在數值計算穩定之需求以及模擬區域之物理性質考量下，模式運算將會以上述基本控制方程式為基礎，進行方程式之調整以及運算，詳細內容於演算方法及流程中加以說明。

b、 演算方法及流程

動力波方程式為二階非線性偏微分方程式，於模式演算上主要利用中央有限差分法進行方程式之離散，並以顯示法進行流體流動控制方程式之求解(O'Brien, 2007)。顯示法求解之特性在於利用簡捷的方式進行公式之代入計算，但相對其計算就必須縮短時間步長以符合模式之數值穩定標準，因此，利用有限差分顯示法進行緩變洪水波、複雜的斷面、突變的坡降、湖泊滯流以及較多網格等演算時需耗費較多的演算時間，其演算時間與網格數之關係參考如表 2.1 所示。

整體模式運算透過網格進行，以求解網格中水深以及流速兩未知數後得知模擬區域之淹水範圍及空間分佈。演算過程以東(e)、南(s)、西(w)、北(n)、東北(ne)、東南(se)、西北(nw)以及西南(sw)等八個向位來描述網格間水流之互動情形。因此在計算單位網格之流速及水深時，將會與相鄰八格網格以線性假設的方式計算單元網格邊界上於下一時段之平均代表水深以及水力參數，包括曼寧粗糙係數、底床坡降、水位高程、潤周以及水面坡降等，此時即可代入運動方程式以求解邊界上之未知數流速。而其數值計算之流程為利用相鄰網格之平均代表水深及水力參數，代入擴散波方程式進行流速首次的推估，接著將推估之結果當為起始值，代入動力波方程式中以牛頓-拉夫生(Newton-Raphson)法進行數值之迭代，求解單元網格邊界上之流速值，如以牛頓-拉夫生法進行迭代三次後皆未達收斂條件，則模式將預

設首次以擴散波計算之解為最佳解，其計算流程如圖 2.2 所示(O'Brien, 2007)。當求出單位網格邊界上之流速時，即透過流速、水深以及網格邊界改善寬度（及考慮寬度折減因子）進行相互乘積，以求得單位網格邊界流入或流出之流量，如圖 2.3 所示。最後，計算網格中心之流量增量並代入式（2-4）後求得水深增量，藉此完成網格中流量及水深之演算。

$$\sum Q_k^{i+1} = \Delta Q_j^{i+1} = A_{surf} \Delta h / \Delta t \quad (2-4)$$

式中，
 i : 時間座標指數；
 ΔQ_j : 單元網格中心之流量增量 (m^3/sec)；
 Q_k : 單元網格邊界之八向位互動流量 (m^3/sec)；
 A_{surf} : 具蓄水能力之地表面積 (Storage Area) (m^2)；
 Δh : 單元網格中心之水深增量 (m)；
 Δt : 時間增量 (s)

而在快速都市化的情形下，本研究將考慮都會地區建築物之阻水效應所帶來淹水情形的改變。隨著建築用地面積之增加，單位網格可蓄水體積亦隨之受到影響，因此透過計算網格中不可提供水體流通之面積比例，設定 A_{surf} 之面積大小，其演算公式由式（2-4）所推導而成之式（2-5）進行，式中每一時間步長中，透過網格中於八方位所帶來之流量改變量及水體可儲蓄之面積計算水深改變量，並代入每一演算時階中以計算下一時段水深之改變量藉此更符合實際淹水情形。

$$\Delta d_x^{i+1} = \frac{\Delta Q_x^{i+1} \Delta t}{A_{surf}} \quad (2-5)$$

式中，
 Δd_x^{i+1} : 下一時段水深之改變量；
 ΔQ_x^{i+1} : 下一時段流量之改變量；
 Δt : 演算之時間間距；

A_{surf} : 網格中或渠道中水體可儲蓄之面積。

此外，都會地區之入滲截流因子亦為本研究所考慮之重要因子，而對於模擬區域當中入滲與截流之描述，本研究係利用美國農業部土壤保持局（USDA Soil Conservation Service）於 1956 年所發展之 Soil Conservation Service Curve Number (以下簡稱 SCS-CN) 模式進行設定，此模式從發展至今為許多水文學家、水資源規劃者以及農林業專家等所大量引用以及研究(Mishra et al., 2003)。尤其 Ponce 與 Hawkins(1996) 等對於模式之經驗基礎、限制以及其用途亦有詳細的研究以及討論，因此，模式之完整性與其應用性可見一般。

SCS-CN 模式中主要利用累積超滲降雨與累積雨量相互之關係進行一系列之推導以及演算，其模式之基礎建立於水文平衡方程式，如 (2-6) 所示，

$$P = I_a + F + P_e \quad (2-6)$$

以及兩基本假設，如 (2-7) (2-8) 所示，

$$\frac{P_e}{P - I_a} = \frac{F}{S} \quad (2-7)$$

$$I_a = \beta S \quad (2-8)$$

將 (2-6) 式代入 (2-7) 式中可得如 (2-9) 式所示，

$$P_e = \frac{(P - I_a)^2}{P - I_a + S} \quad (2-9)$$

式中，

P : 總降雨量；

I_a : 初期扣除量；

F : 入滲量；

P_e : 實際超滲降雨量；

S : 潛在最大滯留量；

β ：期初扣除係數。

而(3-3)式中期初扣除係數 β 依經驗之建議標準係數為0.2(Washington, 1956)。因此，將(2-8)式代入(2-9)式得(2-10)式即為SCS-CN模式用以估計直接逕流所推導出之實際降雨量與超滲降雨量之關係曲線，其關係曲線圖如圖2.4所示。

$$P_e = \frac{(P - 0.2S)^2}{P + 0.8S} \quad (2-10)$$

然而，(2-10)式中惟有 S 值為待推估值，必須透過土壤覆蓋條件加以決定(易和王，2001)，又土壤覆蓋條件隨著土地利用、水文條件、土壤種類之不同而有所不同，因此，將其關係曲線依上述條件之不同，定義分類出曲線編號(Curve number, CN)，其定義如(2-11)式所示，式中，CN之值介於1至100之間。透過曲線編號之選定，即可估算超滲降雨量之多寡(O'Brien, 2007)。

$$S = \frac{1000}{CN} - 10 \quad (2-11)$$

由於模式計算分為一維河道變量流演算以及二維地表漫地流演算，因此在計算上亦有整體演算流程，來計算河道以及漫地流之水流互動情形，其模式詳細演算流程如圖2.5所示；首先將模擬區域之各項參數，包括水文資料以及地文資料進行網格之建製以及調整，再進入模式運算全域之邊界入流量以及網格之降雨量並更新網格之初始值，接著進行河道演算以計算每一河川斷面之流速、水深，如有溢堤則以八向位的方式流入二維漫地流也就是河道與地表之交界網格，最後進行漫地流之演算後輸出相關文件並進行下一時階之運算直至模擬時間結束。當然，於演算過程中河道演算或漫地流演算皆須符合預設之穩定條件，若尚未達到模式則將縮短步長並捨棄運算結果值重新進行演算，詳細穩定條件內容於下段進行說明。

c、穩定條件

模式整體演算當中，將數值穩定的基礎建立於時間步長之控制上，由上段所述模式之數值計算透過顯示法進行，故其運算之時間步長不能太長，以致於失去計算成果之代表性，因此，每次運算將會確認每一網格於每一時階上之數值穩定，若不符合數值穩定條件則捨棄演算成果並減少時間步長重新計算。大部分對於顯示法之穩定條件皆使用庫倫-弗里德里希條件(Courant-Friedrich-Lewy, CFL)進行判斷(Jin and Fread, 1997)，而模式之判斷亦為如此，其判別式如式(2-12)所示。

$$\Delta t = \frac{C\Delta x}{\beta V + c} \quad (2-12)$$

式中，

Δt	: 時間步長
C	: 庫倫數
Δx	: 網格寬度
β	: 為一係數，於寬渠道為 5/3
V	: 平均斷面流速
c	: 洪水波速

整體計算透過庫倫數進行數值穩定的判斷，一般庫倫係數為小於等於 1.0。每一時階之運算初始時間步長預設為 1 秒，透過計算後代入式(2-12)中進行庫倫數之判斷，並依判斷之結果進行時間步長增減之調整直到符合穩定條件為止(O'Brien, 2007)。

2、雨水下水道模式

建構雨水下水道系統，為都市開發當中常見的現象之一，由於土地利用大規模的改變，以致於地表逕流、洪峰流量以及整體地形地貌隨之改變，為避免開發都市土地利用之變更以及排水系統之效能相互抵觸，常利用雨水下水道系統來降低都市因開發所帶來之淹水風險，因此，雨水下水道之水理現象常為研究都市淹水的重要課題之一。然

而，對於未完全開發都會區來說，雨水下水道系統只建構於局部地區，並非完整涵蓋都市區域當中，導致其排水形式變為由地表逕流匯入下水道系統後，再由區域排水路進行排水，使得整體排水系統構成明渠、暗管交替之複雜物理現象。而本研究之模擬分析區域即具如此特性，如圖 2.6 所示。因此，於模擬中加入雨水下水道系統之考量，進行都市淹水之模擬。

本研究之雨水下水道模式使用 PCSWMM V.2006，其為加拿大 CHI (Computational Hydraulics Int.) 公司以美國環境保護署 (U.S.EPA) 開發之 SWMM5.0 (Storm Water Management Model) 模式為基礎所發展之商業套裝軟體，具有 SWMM 之所有模擬功能以及視窗操作介面，於模式中除具有都會區中暴雨逕流及下水道水文模擬等功能之外，還可進行降雨、融雪及水質污染等多項模擬分析(葉，2005)。因此，SWMM 模式廣泛地應用於規劃、設計和分析都會區或非都市區域之暴雨逕流排水系統、混合流式下水道以及其他排水系統，功能甚多應用範圍廣泛(王，2009；蔡，2006)。

SWMM 模式起源於 1969~1971 年由美國環境保護署所研發之系統，模式之整體架構可分為 COMBINE、EXECUTIVE、GRAPH 以及 STATISTICAL 四個主要區塊，而於 EXECUTIVEFM 區塊中又分為 Runoff、Transport、Extran、Storage/treatment 以及 Receiving Water 等五個計算模組，其架構圖如圖 2.7 所示(葉，2005)，每一區塊分別處理計算不同階段及不同屬性類別之分析。後來模式隨著電腦效能之日趨提昇，以及使用者之需求改版至 SWMM5.0 版後，即不再區分區塊程式，而將整體計算模組整合為一個完善的形式，以供各領域研究者使用 (Huber and Dickinson,1988)。而本研究即利用其中之 Runoff 模式以及 Extran 模式，進行地表逕流演算和幹線輸水演算，其詳細內容於下節

說明。

SWMM 之主要控制方程式為連續方程式以及一維迪聖凡南（de Saint-Venant）變量流方程式，於變量流方程式中 SWMM 亦可依需求，選擇以動力波方程式、運動波方程式或擴散波方程式進行模擬，藉由方程式之計算求解每一時階下之流量以及通水斷面面積，其方程式如式（2-13）及式（2-14）所示(林，2005；Yen,1986)：

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial A}{\partial t} = 0 \quad (2-13)$$

$$\frac{1}{g} \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial(Q^2/A)}{\partial x} + gA \frac{\partial H}{\partial x} + gAS_f + gAh_L = 0 \quad (2-14)$$

式中，
 Q : 流量 (m^3/sec)；
 A : 通水斷面面積 (m^2)；
 x : 沿流動方向之空間座標；
 t : 時間座標 (s)；
 g : 重力加速度 (m/sec^2)；
 H : 水深 (m)；
 S_f : 摩擦坡降；
 h_L : 損失水頭 (m)。

其中摩擦坡降 S_f 以曼寧公式推導而得，如式（2-15）所示。式中透過絕對值的方式避免數值計算時因正負相消而失去其代表之方向性。

$$S_f = \frac{n^2 V |V|}{R^{4/3}} \quad (2-15)$$

式中，
 n : 曼寧糙度係數 ($\text{m}^{1/6}$)；
 V : 斷面平均流速 (m/sec)；
 R : 水力半徑 (m)。

損失水頭 h_L 則可透過式（2-16）加以計算，利用其控制方程式以及

各項參數之計算進行數值之整體演算。因此，在給予適當之邊界以及起始條件後，即可聯立式（2-13）及式（2-14）進行管線流量 Q 以及通水面積 A 之求解。

$$h_L = \frac{KV^2}{2gL} \quad (2-16)$$

式中，
 K : 損失係數；
 L : 管件長度（m）。

a、地表逕流模式（RUNOFF modules）

地表逕流模式為計算每一時距之降雨到達地面後，透過測溝或水工結構物匯集至控制點之水流情形，其計算原理以質量守恆的概念進行，把集水區依人孔點或河川斷面樁位當為集流點劃分成若干個次集水區，並將每一次集水區視為非線性水庫（reservoir），利用非線性水庫模型來模擬地表逕流。而其演算整體架構可透過水文平衡方程式進行說明，如式（2-17）所示。

$$\text{Inflow} - \text{Outflow} = \frac{d\text{Storage}}{dt} \quad (2-17)$$

式中，
 Inflow : 次集水區之入流量（ m^3/sec ）；
 Outflow : 次集水區之出流量（ m^3/sec ）；
 Storage : 次集水區中之貯蓄量（ m^3 ）。

於 SWMM 之描述中次集水區中入流量（Inflow）假設主要來源為降雨以及上游次集水區之出流量；而出流（Outflow）部分則主要為入滲、蒸發以及逕流等。求解過程當中次集水區之貯蓄量（Storage）超過地表滯留量時，則次集水區之集流點產生出流，此時出流量透過曼寧公式進行計算，其整體模型示意圖如圖 2.8 所示。

而其求解步驟為根據所輸入之降雨資料進行地表深度 D_e 之計算，

並扣除其入滲損失，得到考慮入滲因子後之水深 D_f ，計算式如式(2-18)及式(2-19)所示，其中入滲之估算可由 Horton's 公式、Green-Ampt 模式或 Curve Number 模式求得(Yen,1986)。

$$D_e = D_t + R_t \cdot \Delta t \quad (2-18)$$

$$D_f = D_e - f_t \cdot \Delta t \quad (2-19)$$

式中，
 D_e : 降雨後之地表水深（未考慮入滲）(m)；
 D_t : 降雨 t 時刻後之地表水深（未考慮入滲）(m)；
 R_t : Δt 時距內之平均降雨強度 (mm/hr)；
 Δt : 時間步長 (s)；
 D_f : 降雨後之地表水深（考慮入滲）(m)；
 f_t : t 時刻之入滲率 (m/sec)。

若考慮入滲之地表水深 D_f 大於零，則地表開始形成逕流，並於填滿地表滯留量後，產生地表逕流出流量 Q_w ，其計算式如式(2-20)所示。

$$Q_w = \frac{1}{n} (D_f - D_d)^{5/3} S^{1/2} \cdot W \quad (2-20)$$

式中，
 Q_w : 地表逕流出流量 (m³/sec)；
 n : 曼寧糙度係數 (m^{1/6})；
 D_d : 地表滯留量 (m³/sec)；
 S : 次集水區平均坡度；
 W : 次集水區寬度 (m)。

方程式中可知 SWMM 模式將次集水區假設為矩形，並在考慮不同之入滲因子、窪蓄因子、土地利用型態以及曼寧糙度係數後，進行地表出流量之計算，其演算示意圖如圖 2.9 所示。

當該時段之地表水深（考慮入滲） D_f 以及地表逕流出流量 Q_w 求得後，利用連續方程式進行計算下一時段 ($t + \Delta t$) 之水深 $D_{t+\Delta t}$ ，其求解

方程式如式 (2-21)。

$$D_{t+\Delta t} = D_f - \left(\frac{Q_w}{A_k}\right) \cdot \Delta t \quad (2-21)$$

式中， $D_{t+\Delta t}$ ：下一時段 $t + \Delta t$ 之水深 (m)；

A_k ：次集水區面積 (m^2)。

透過以上計算程序進行反覆之迭代運算直至模擬時間結束，並記錄所計算之地表逕流出流量 Q_w ，作為輸水管道模式 (EXTRAN modules) 之輸入資料，其詳細內容於下節說明。

b、輸水管道模式 (EXTRAN modules)

輸水管道模式中主要計算雨水下水道系統間之水流情形，其整體數值計算透過顯示法加以求解，而求解採用 link (管線) - node (人孔節點) 之觀念進行，在管線 (link) 中假設流量不變且滿足動量方程式，以求解管線內之流量；在人孔節點 (node) 處則滿足連續方程式，以求解人孔節點之水位(王，2009；陳，2002)，若人孔節點處發生水位超過地表高程時，則將計算該處之人孔溢流歷線。對於 link 而言，雨水下水道管線水流可分為未滿管流況以及滿管流況，當管線未滿管之狀態下，其可視為明渠流，以主要控制方程式式 (2-13) 以及式 (2-14) 求解即可；若為滿管流況，則流量取決於壓力梯度，即由上下游之水位或壓力水頭所控制，其水流之控制方程式變為式 (2-22) 連續方程式及式 (2-23) 能量方程式所示(Yen, 1986)，在管線上下游之壓力水頭及水頭損失係數皆已知之情形下，可透過式 (2-13) 進行流量 Q_c 之求解，並代入式 (2-22) 求得管線平均水流速度 V_c 。

$$Q_c = A_c V_c \quad (2-22)$$

$$\frac{\partial Q_c}{\partial t} = g A_c \frac{h_u - h_d}{L} - (K_u + K_d) \frac{Q_c^2}{2 A_c L} - g A_c S \quad (2-23)$$

式中，
 Q_c : 管線滿管流量 (m³/sec)；
 A_c : 管線滿管通水斷面面積 (m²)；
 V_c : 管線平均水流速度 (m/sec)；
 h_u : 管線上游入口處之壓力水頭 (m)；
 h_d : 管線下游出口處之水位或壓力水頭 (m)；
 K_u : 管線上游入口處之水頭損失係數；
 K_d : 管線下游出口處之水頭損失係數。

而對於人孔節點 (node) 而言，其在雨水下水道中除了連結管線以及提供集水區入流控制點外，其亦有貯蓄(storge)水流的功能。當人孔節點處之下游管線無法承受上游入流管線之流量時，人孔水位會因水流宣洩不及而提升，但此時之水位在具貯蓄功能下並不會造成人孔之溢流，其水位必須在大於人孔節點當中之貯蓄水位後，才會發生溢流情形漫淹至地表，其人孔節點貯蓄特性與管線輸送概況如圖 2.10 所示。故人孔溢流量 Q_o 可以以連續方程式表示如式 (2-24) 所示(Yen, 1986)。

$$Q_o = \sum_i Q_{c,i} + Q_k - A_s \frac{\partial h_c}{\partial t} \quad (2-24)$$

式中，
 Q_o : 人孔溢流量 (m³/sec)；
 $Q_{c,i}$: 連結人孔節點管線流量，流入為正，流出為負 (m³/sec)；
 i : 連結人孔節點之管線數；
 Q_k : 地表集水區進水口入流量 (m³/sec)；
 A_s : 人孔之截面積 (m²)；
 h_c : 人孔水位 (m)。

人孔節點部分亦可分為未滿管流況以及滿管流況進行討論，當輸水管線及人孔節點均未滿管時，此時無溢流情形，人孔溢流量 Q_o 為零，則式(2-24)可改寫為式(2-25)所示。於各連結人孔節點管線流量以及地表集水區進水口入流量為已知之狀態下，可由式(2-14)進行人孔水位 h_c 之求解。

$$\frac{\partial h_c}{\partial t} = \frac{1}{A_s} \left(\sum_i Q_{c,i} + Q_k \right) \quad (2-25)$$

當人孔節點及輸水管線發生滿管流況時，則式(2-24)中將出現 h_c 以及 Q_o 兩未知數，此時人孔節點改採式(2-26)進行運算，求得人孔之溢流量 Q_o 後，再以式(2-27)建立人孔節點水位變量 Δh_c 及流量 $Q_{c,i}$ 、 Q_k 、 Q_o 之間的關係(王，2009；陳，2002)。

$$Q_o = \sum_i Q_{c,i} + Q_k \quad (2-26)$$

$$\sum_i Q_{c,i} + Q_k - Q_o + \sum_i \left(\frac{\partial Q_{c,i}}{\partial h_c} \Delta h_c \right) = 0 \quad (2-27)$$

透過以上之計算即可求解人孔水位之變量 Δh_c ，並求出人孔節點之水位 h_c 。當人孔水位未超過地表高程時，人孔節點因具貯蓄功能而不產生溢流情形；相對的人孔水位一旦超出地表時，人孔節點將產生溢流情形，此時進行人孔溢流量 Q_o 之計算，並與二維漫地流模式進行銜接模擬。

2.2 分離演算法

本節所述之演算流程名稱為參考王(2009)及陳(2002)之研究，將其稱為「分離演算法」，其方法主要目的在於求得雨水人孔溢流時所造成之地表淹水分佈情形，演算流程上首先進行雨水下水道之演算，當獲得所有雨水人孔之溢流歷線後，再將其溢流歷線輸入二維地表漫地流模式，進行實際之地表流動情形模擬，整體演算流程圖如圖 2.11 所示。

因雨水下水道模式為一維模擬演算，其運算上並未包含地表逕流演算之部分，因此，在計算開始之前必須透過雨水下水道子集水區劃分模式進行流域內子集水區的劃分，即將模擬區域中之雨水人孔點位以及河道斷面樁位視為集流點，依道路街廓分佈與地表高程劃分為多個子集水區。然後在計算各個子集水區之相關地文參數後，輸入 Runoff 模式中進行地表逕流之演算，以決定各子集水區集流點之出流歷線。最後，輸入至 EXTRAN 模式中當作入流邊界條件，進行雨水下水道之模擬運算，其運算流程透過 PCSWMM V.2006 進行，也就是分離演算流程圖中虛線所框選之階段。

當下游輸水管道容量不足以宣洩上游管道及集流點之總入流量時，則將發生溢流。因此，將 EXTRAN 模式中計算所得之集流點溢流歷線，依各集流點之空間位置所相對應於網格之位置編號輸入至二維漫地流網格中，並以溢流點源 (source) 的形式匯入二維漫地流模式之中，其對應網格輸入示意圖如圖 2.12 所示。另外，由於本研究所採用之網格解析度為 40X40 公尺，當區域排水路或河道寬度大於 40 公尺時，於模擬演算上點源溢流之地表逕流特性將顯現出溢流量流回渠道網格中之情形，為避免此現象本研究於分離演算法中之二維漫地流演算網格部分，透過河川位置對位的方式依據渠道寬度將渠道網格設定為演算上之閉合邊界，再進行整體二維漫地流之模擬演算。

因集流點溢流之出流歷線為點源輸入於往網格之中，因此分離演算法之控制方程式將可表示為如式（2-28）、式（2-29）及式（2-30）所示(陳，2002)。

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial(hu)}{\partial x} + \frac{\partial(hv)}{\partial y} = q_{source} - q_{link} \quad (2-28)$$

$$S_{fx} = S_{ox} - \frac{\partial h}{\partial x} - \frac{u}{g} \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right) - \frac{v}{g} \left(\frac{\partial u}{\partial y} \right) - \frac{1}{g} \left(\frac{\partial u}{\partial t} \right) - \frac{[q_{source}]u}{gh} \quad (2-29)$$

$$S_{fy} = S_{oy} - \frac{\partial h}{\partial y} - \frac{u}{g} \left(\frac{\partial v}{\partial x} \right) - \frac{v}{g} \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right) - \frac{1}{g} \left(\frac{\partial v}{\partial t} \right) - \frac{[q_{source}]v}{gh} \quad (2-30)$$

式中， q_{source} ：集流點之溢流量（m³/sec）；

q_{link} ：集流點之回流量（m³/sec）。

其控制方程式與原二維漫地流模式之控制方程式主要差別在於，網格之中將不再考慮降雨逕流的因子而考慮集流點所提供之 q_{source} 以及 q_{link} 。由於當有效降雨降於子集水區之地表時，透過許多水工構造物或排水構造物流入河川或雨水下水道當中，因此，在有效降雨降於地面時皆流入河川以及雨水下水道中之概念下，雨水所造成之地表逕流已於 RUNOFF 模式中演算完成，並匯入集流點當中，故當進行二維地表漫地流演算時，就不再考慮降雨所帶來之地表逕流，只考慮集流點之溢流歷線，也就是控制方程式中 q_{source} 的部份。而 q_{link} 的部份，因模式演算上為分離運算，當計算二維漫地流的時候，河川及雨水下水道之演算皆已完成，故集流點無論在任何時刻下輸水管道內的流況為何，地表逕流將無法再進入輸水管道之中，因此二維淹水模式中不再考慮重新進入河川以及雨水下水道之回流量 q_{link} 。

2.3 整合演算法

由於未完全開發之都會區常為渠道及雨水下水道交替之模式進行排水，導致水理演算上極為複雜，因此整合演算法之主要目的即在於透過雨水下水道與明渠流之共同水流特性，假設雨水下水道為箱涵以一維河道變量流演算並配合二維漫地流模式進行水流之交替模擬，以求得實際淹水分佈。以下透過雨水下水道之水流流動特性以及水流之流況進行其與明渠流之共同性說明及其假設。

首先，以雨水下水道之水流流動特性而言，當雨水降於地面時大部分雨水經由道路邊溝、雨水人孔或其他排水構造物收集流入該區域之雨水管線系統中(王，2009)，而當下水道系統發生溢流時，水流亦透過其側溝或雨水人孔進入地表。輸水管道上任意位置點皆可能以側入流方式匯入其中並排至集流點，而當溢流發生時也將從任意位置反向溢出至地表，在假設忽略地表逕流進入道路邊溝、雨水人孔或其他排水構造物之稽延時間及儲蓄特性下，雨水下水道之匯入及溢出特性形同明渠流與地表漫地流於交替界面上之水流流動特性。

以水流之流況而言，管中流況可分為未滿管流況以及滿管流況，當未滿管流況時管中水流可視為具有自由液面之明渠水流(陳，2002；Yen, 1986)，水體流動將以重力為驅動力 (Driving force) 進行輸水，因此於未滿管流況部分即可透過一維河道演算進行模擬；而滿管流況時，則決定於輸水管道上下游之壓力水頭及水位，即水體之流動將改變以壓力為主要之驅動力，其物理特性雖與未滿管水流具有很大的差別，但在一般雨水下水道之流量設計上卻有所限制。為避免雨水下水道管件泥沙淤積以及雜草叢生或流速過大導致管壁沖刷，一般流速限制於 0.8m/s 至 3.0m/s 之間(陳，2004)。因此，在一般流速限制之前提下，其透過壓力梯度所造成之流量則可視為極端事件並其影響有限。

且就極端降雨事件而言，在渠道及雨水下水道交雜之都會區，其淹水問題往往因降雨型態趨向集中且短暫，再加上都市開發而導致水流快速聚集所造成，使得河川洪水位與市區排水超出既有之設計標準，造成主要河川提防溢堤、區域排水溢流或雨水下水道系統功能喪失等淹水災害，其溢流淹水體積相對於雨水下水道系統之淹水體積，雨水下水道系統所造成之影響實則有限並且於滿管溢流之延時也相對短暫，因此對於滿管所造成之壓力管流部分於整合演算法中將忽略不考慮。

綜合以上之觀點，在考慮雨水下水道之集流特性並簡化其複雜演算過程之前提下，整合演算法當中雨水下水道之部分將合理視為箱涵並以一維河道變量流加以運算。而整體演算流程如圖 2.13 所示。在演算開始之前透過資料蒐集以及 GIS 定位後，分別進行二維漫地流之網格建製以及一維河道變量流之斷面建置，於二維漫地流網格建置上利用地表集水區模式，劃分區域排水及雨水下水道之子集水區域，並將所有流入該流域之子集水區進行整合即為模擬之流域範圍，最後依所蒐集之高程資料（DTM）尺寸 40X40 公尺進行網格之轉換並輸入相關之地表參數；於一維河道斷面建置上，以樁點對位的方式將量測之區域排水及雨水下水道斷面對應於相對之網格編號上，而排水路所經過之網格則透過上下游斷面內插的方式，將內插所得之代表斷面置入每一渠道網格之中。當所有資料建製完成後則輸入 FLO-2D V.2009 中進行模擬演算。

表 2.1 網格數與模擬速度對照表(O'Brien, 2007)

模擬網格數	模式計算速度
1,000-15,000	迅速 (分鐘)
150,000-60,000	快 (小於 1 小時)
60,000-100,000	中等 (多於 1 小時)
100,000-200,000	慢 (好幾小時)
> 200,000	極慢(24 小時以上)

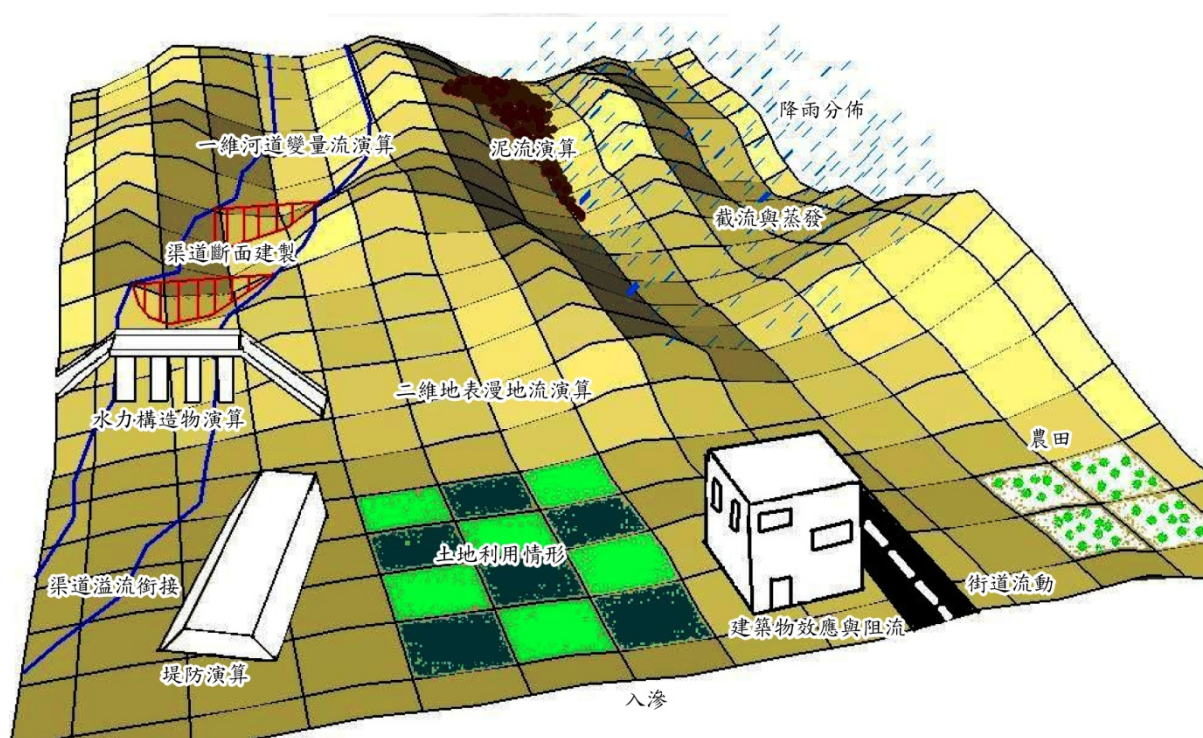


圖 2.1 模擬層面整合示意圖

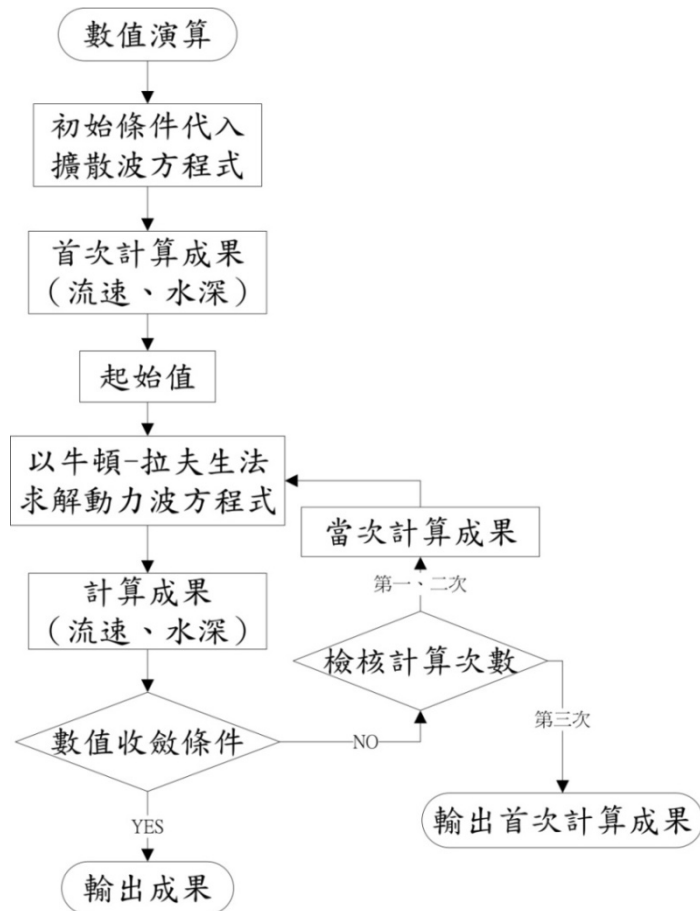


圖 2.2 數值演算流程圖

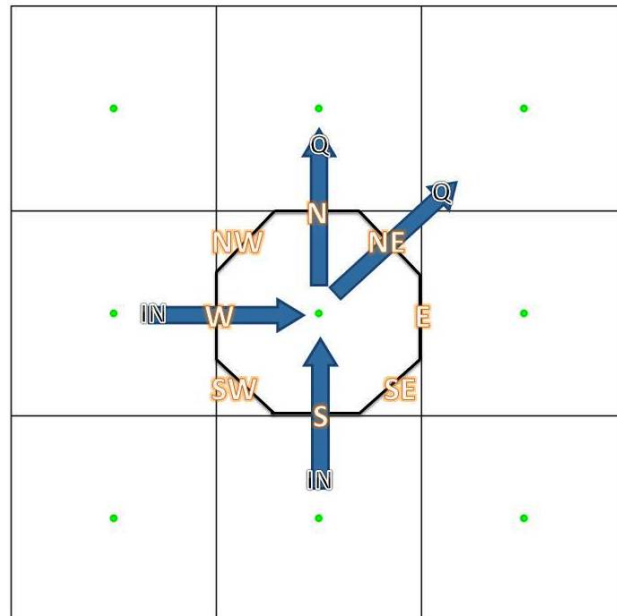


圖 2.3 單元網格流量計算示意圖

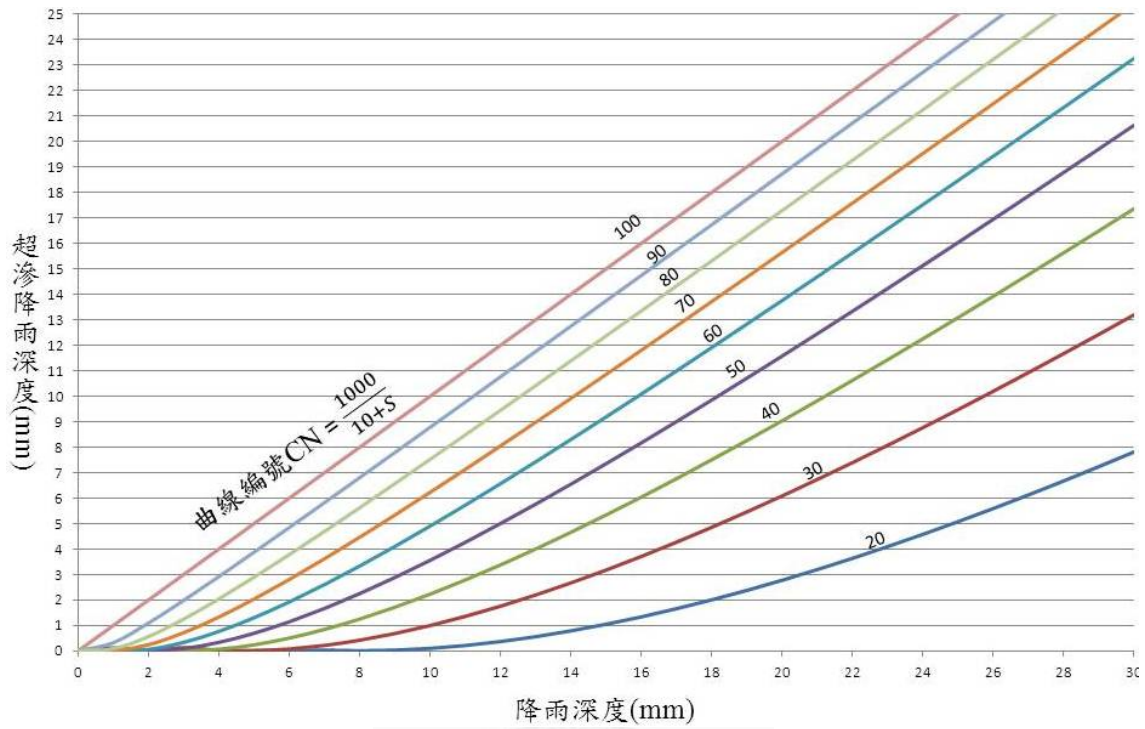


圖 2.4 SCS-CN 關係曲線圖

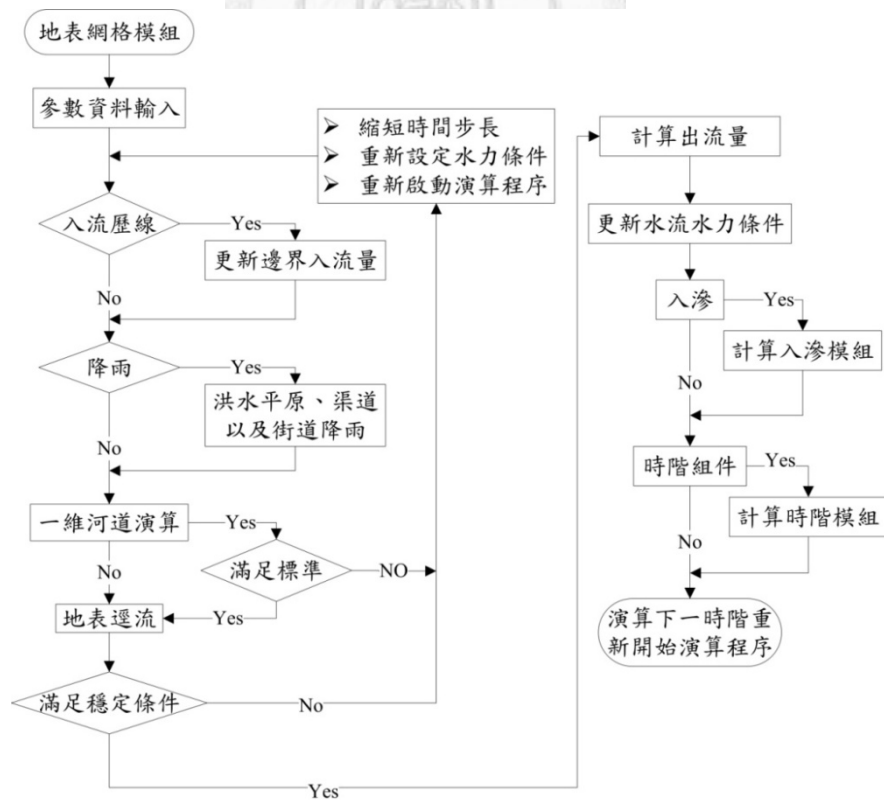


圖 2.5 模式演算流程圖(O'Brien, 2007；顏，2007)

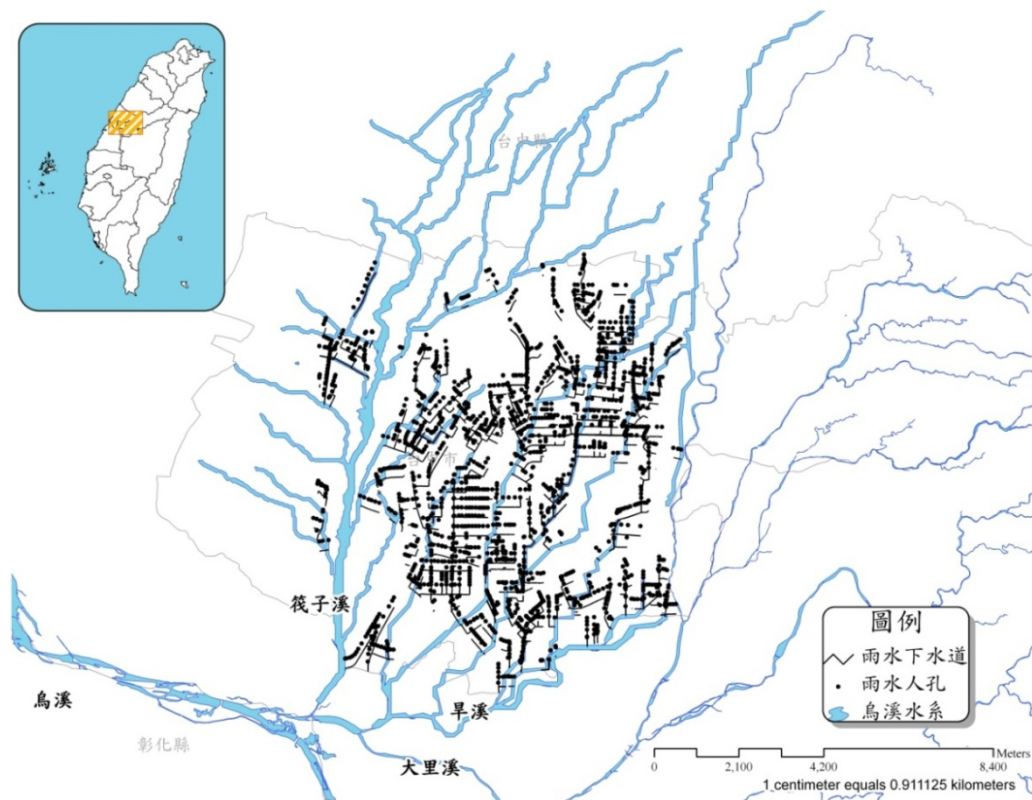


圖 2.6 模擬範圍雨水人孔分佈圖

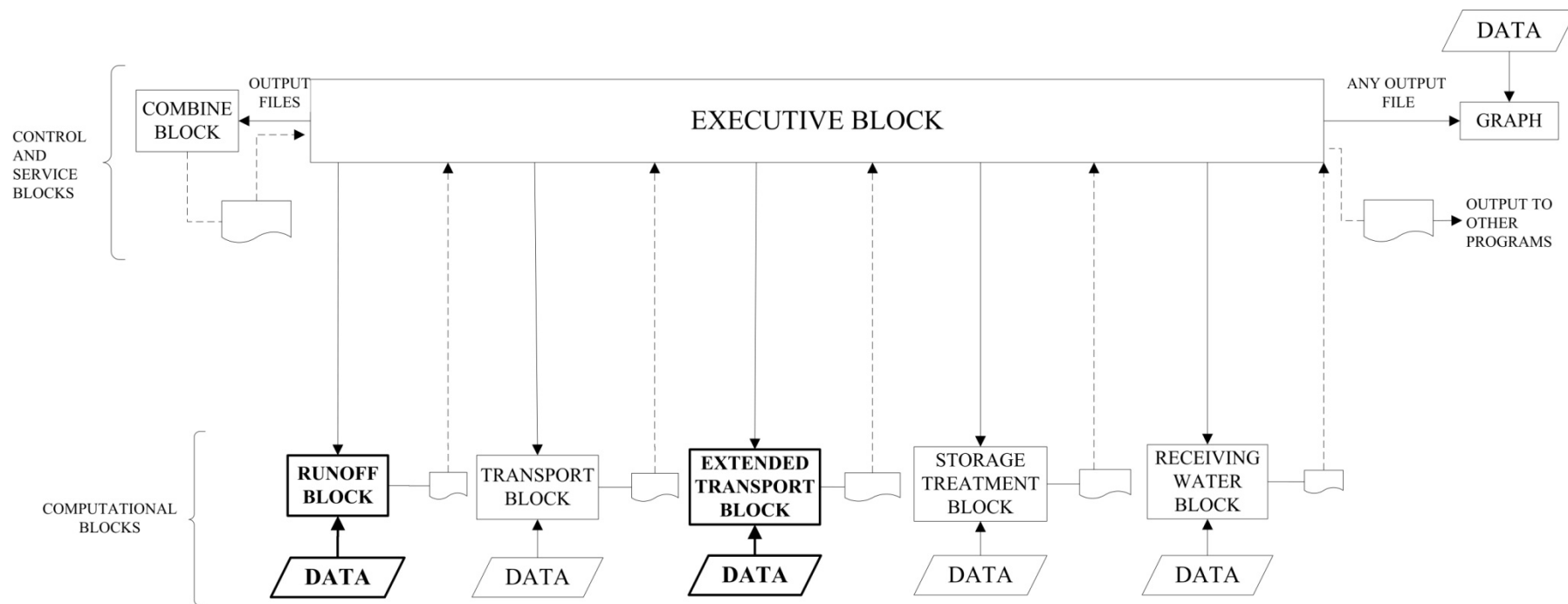


圖 2.7 SWMM 模式演算整體架構圖(葉，2005)

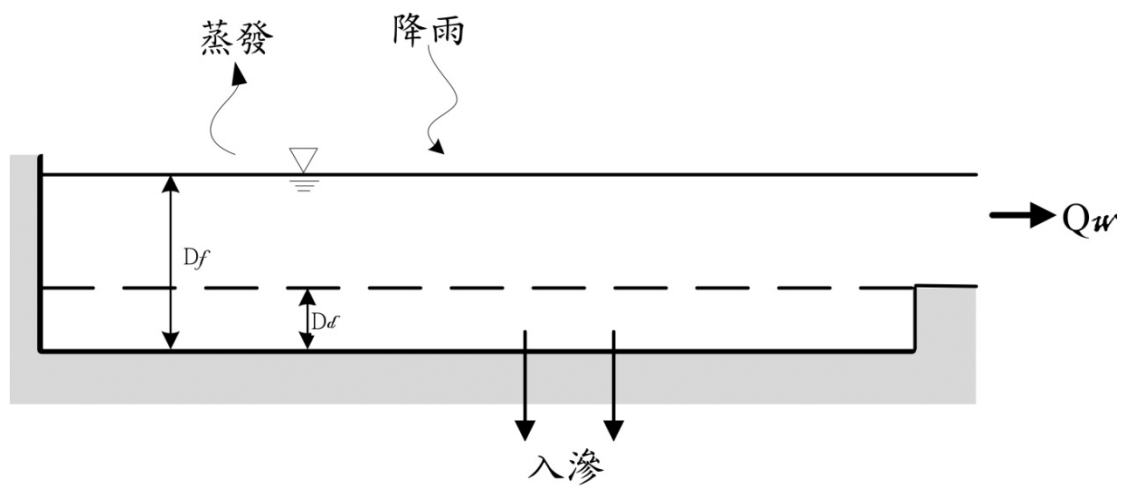


圖 2.8 非線性水庫模型示意圖(Huber and Dickinson, 1988)

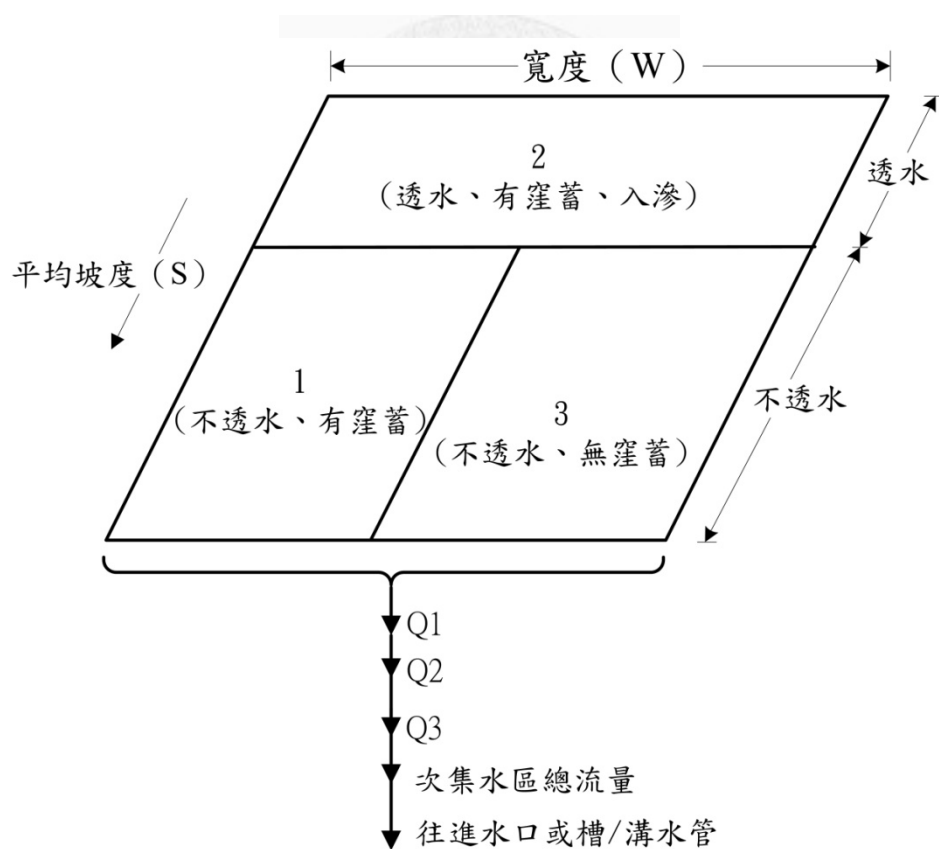


圖 2.9 次集水區地表逕流演算示意圖(蔡，2006)

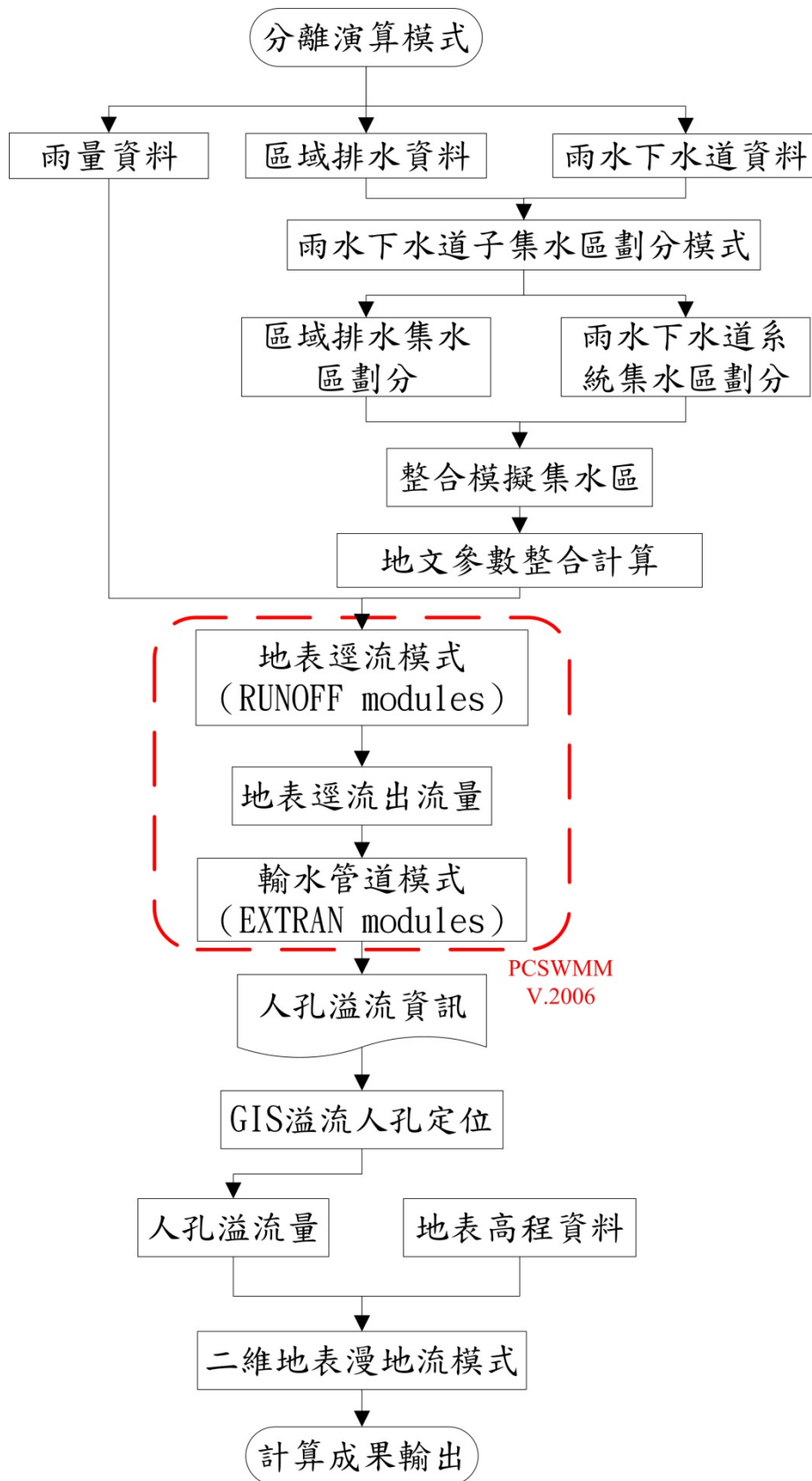


圖 2.4 分離演算法演算流程圖

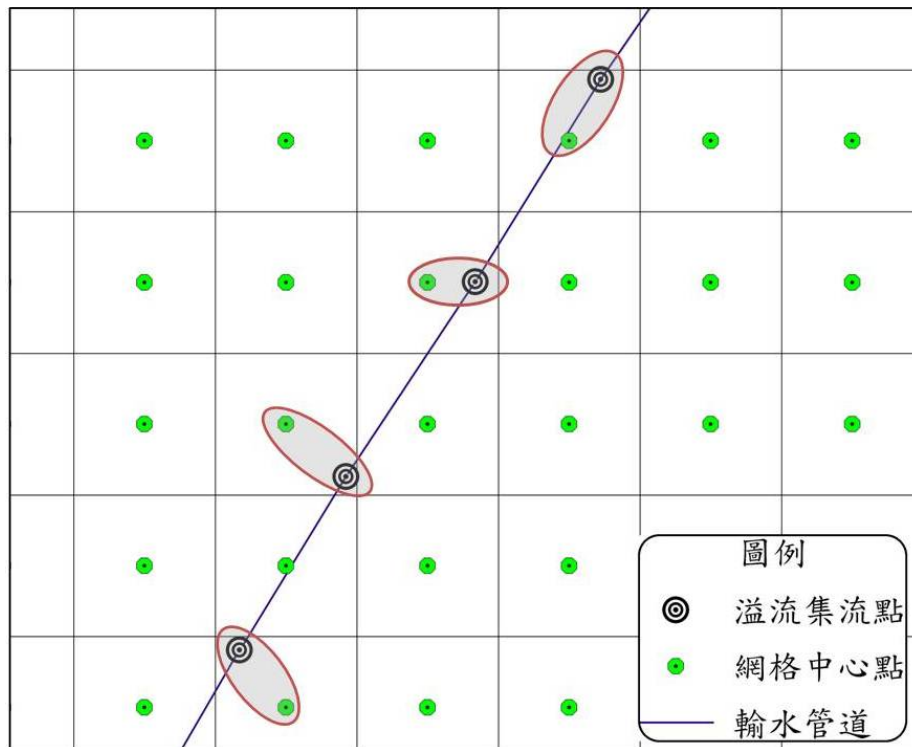


圖 2.5 溢流點位溢流量輸入網格示意圖

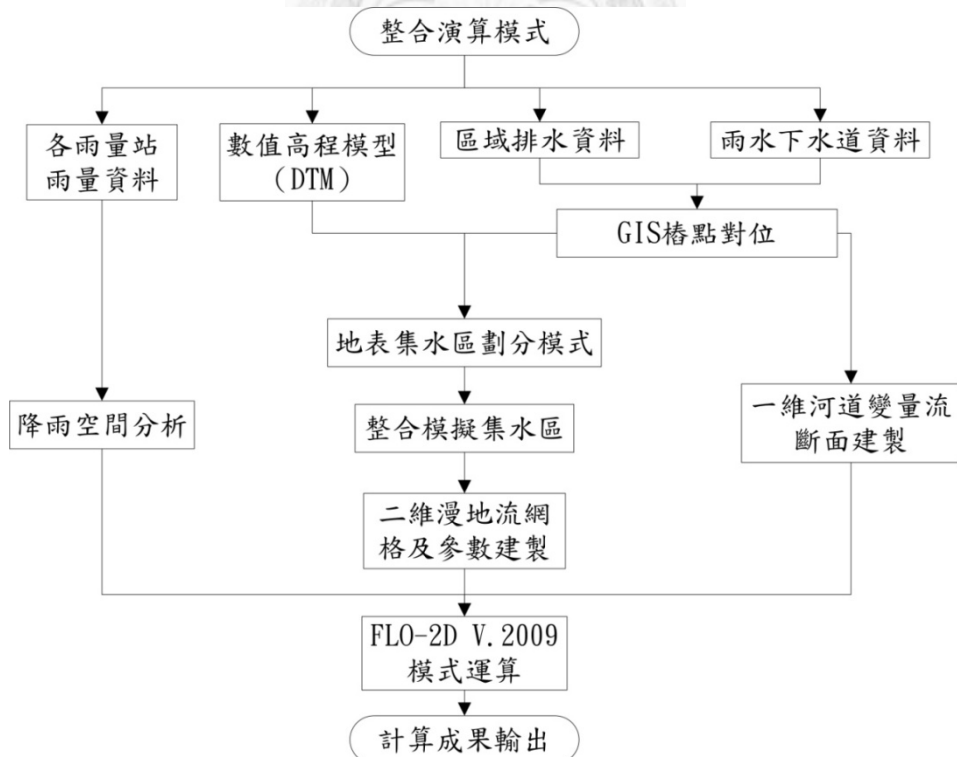


圖 2.6 整合演算法演算流程圖

第三章 研究區域資料建置及模式驗證與比較

本研究以位於大臺中都會區之筏子溪以及旱溪流域為研究模擬區域，透過相關資料蒐集以及模式建置進行模擬演算，並以卡玫基颱風所發生之淹水災害範圍作為驗證之依據，供後續各情境模擬之參數設定準則，其研究區域及資料蒐集建製詳細內容如下節所示。

3.1 研究區域概述

本研究所模擬區域範圍為臺灣中部之都會精華地區，其範圍為烏溪流域之支流筏子溪以及旱溪流域，兩者皆流入大里溪後匯入烏溪，如圖 3.1 所示。其中，筏子溪位於臺中盆地西側，根據「流域數值地形系統淹水模組開發及建置之研究-以大里溪流域為例」(2010)之調查描述，其發源於臺中縣大雅鄉橫山圳排水，為一全長 24 公里之平地河川。長年來因受烏溪下游潮位影響，常有洪水災害，近年來因中下游都會區開發需求而構築提防加以保護；而旱溪位於臺中盆地之東側，為全長約 10.4 公里之蜿蜒河川，主要承接上游流經都會區之柳川、綠川、梅川等之區域排水，因兼具區域排水及灌溉排水功能，稱之為旱溪排水路，早期因河幅寬狹不一、流路變遷不定，常造成下游氾濫成災，因此，1995 年 11 月於上游開闢一條長 900 公尺之新河道，用以疏導旱溪中上游之大量洪水(臺灣省水利局規劃總隊，1989)。由上述可知，此兩流域因皆流經臺灣中部地區之都會區屬容易有重大災損之區域，特別近年來臺中都市計畫大幅度的規劃及推動，其所造成之淹水災害潛勢更需加以重視。

筏子溪流域及旱溪流域之西側為大肚山台地而東側緊鄰大坑山區，此兩流域依據本研究透過地表集水區模式以及雨水下水道子集水區劃分模式，分類整合其流域面積分別為 11863 公頃以及 7280 公頃。整體地面標高介於 35 至 125 公尺之間，為一平均坡度約 1.3%之東北往

西南方向平緩傾斜之盆地，如圖 3.2 所示。此兩流域有山線縱貫鐵路以及中山高速公路橫貫其中，並涵蓋大部分之臺中都會區為中部地區之精華所在，根據 2010 年之人口調查臺中都會區已有一百一十萬人之多，人口密集、交通發達、產業集中並都市化現象顯著，為臺灣前三大經濟重鎮。近年來臺灣中部地區隨著人口及交通建設的愈趨集中與發達，臺中整體都會區於 1986 年開始進行大規模都市開發計畫，通盤檢討並以新市區建設配合市地重劃方式辦理市鎮開發，目前土地重劃已進行至十二期，而十三期土地重劃亦已接近完成，其相對位置如圖 3.3 所示；另外，臺中都會區以外之地區亦有許多區域性之鄉街計畫、市鎮計畫及特定區計畫，根據臺中縣政府所公告之統計資料，整體計畫概況如表 3.1 所示，並相對位置如圖 3.4 所示。綜上所述，如此之變革使臺灣中部地區之整體地文特性產生許多的改變，以開發概況而言，開發標的可分位於臺中縣市中央之地形平緩區以及非都市發展區，於平緩區規劃為一般生活住宅；而非都市發展區之西側規劃為大肚山台地生產區，包括中部科學園區及臺中工業區之設置，並東側之大坑山區規劃為生態遊憩區。大面積的整地開發不僅讓土地利用、產業結構產生大規模的變更，亦使整體地形、地貌有所改變，故整合上述之範圍於研究區域筏子溪流域以及旱溪流域之整體變更概況，如圖 3.5 所示，可知於筏子溪流域之變更範圍約為 55.78%而旱溪流域則為 85.67%。

3.2 資料來源及蒐集

本研究針對筏仔溪流域以及旱溪流域進行所需之相關資料蒐集，其蒐集資料及處理資料之流程圖，如圖 3.6 所示。在資料蒐集上主要可分為量測資料、航照圖、數值高程模型（DEM）以及土地利用等，其蒐集資料來源以及概況詳述如下：

1、量測資料

於量測資料上主要蒐集渠道斷面量測資料，包括所量測之樁點位置、斷面之量測值以及渠道上之跨渠構造物等相關資料；以及雨水下水道排水系統資料，包括各雨水人孔之位置、排水管線之尺寸以及子集水區之範圍。其中渠道斷面量測資料為根據經濟部水利署水利規劃試驗所，所整合蒐集之臺中縣市政府公告區域排水路為主，筏仔溪與旱溪之建檔河段分別為 32 條及 13 條，其位置圖如圖 3.7 與圖 3.8 所示。雨水下水道系統則根據臺中市政府『臺中市淹水原因研究及改善方案規劃-西屯及南屯區』（2006）之書面報告內容進行資料之整合建檔，而超出其報告研究範圍以外之雨水下水道資料則由經濟部水利署水利規劃試驗所所提供之資料加以建製，其建檔之雨水下水道系統於筏仔溪流域為 29 個並旱溪流域為 42 個，整體建檔系統如表 3.2 所示。

2、航照圖

航照圖主要來源為線上地理資訊平台 Google Earth V.6.0.2，透過 Arc GIS 之編輯及套疊技術，將所蒐集之圖層套疊於 Google 所開發之線上地球模型上進行渠道之現況查詢，如圖 3.9 以筏子溪為例，透過座標系統之轉換以及套疊功能，將筏子溪所建檔之 33 條河段進行系統性的比對以及現址查詢，並透過其所提供之街景視圖服務瞭解都會區中細部渠道斷面變更之情形及河道斷面位置附近土地利用現況，藉此篩選比對渠道之斷面資料，其渠道斷面之相對位置比對如圖 3.10 所示，

此外，旱溪部分亦同。

3、數值高程模型

數值高程模型採用經濟部水利署規劃試驗所提供，於 1996 年至 1997 年所量測臺中縣市之數值高程模型，為網格高程經度 40 公尺 X40 公尺之高程資料，總資料筆數共有 1387514 格網格，進行後續模擬分析之用，圖 3.11 為整體數值高程模型。

4、土地利用

根據本研究之資料蒐集，土地利用資料方面採用 1996 年至 1997 年內政部地政司之臺灣省國土利用現況調查數化資料，以及於 2007 年 6 月所完成之第二次土地利用現況調查資料，並依據 2007 年之最新土地使用分類進行與 1996 年至 1997 年之資料一致性整合，其主要共分為九類，分別為農業使用土地、森林使用土地、交通使用土地、水利使用土地、建築使用土地、公共使用土地、遊憩使用土地、礦鹽使用土地以及其他使用土地，並每一類別皆以三級層別進行細部劃分。透過以上之分類之方式，依據建置參數考慮精細程度之需求進行土地利用層級類別之選用，土地利用主要分類於研究區域分佈情形 1996 年至 1997 年如圖 3.12 及圖 3.13 所示；2007 年如圖 3.14 及圖 3.15 所示。

除根據以上資料資蒐集以及校正其水理與地文資料外，透過 GIS 圖層套疊之概念劃分出研究之模擬流域範圍，並將資料作整合輸出用以建製於模式之中，詳細資料建製及流域劃分內容於以下各節進行說明。

3.3 地理資訊資料庫建置

本研究之圖層資料皆以座標系統 TWD67 進行座標之定位，並透過 ESRI 公司所發行之 Arc GIS V.9.2 進行圖層倉儲管理及套疊分析，此外，由於模式演算透過網格進行，並其模式參數設定亦由網格進行個別設定，因此，其輸入原則透過網格中心點之點圖層屬性資料表進行整合輸入，其儲存點位分別於筏子溪流域有 74143 點；旱溪流域則有 45521 點，其點位及屬性資料表處理概況如圖 3.16 所示。

關於流域範圍之劃分，因本研究所模擬之地理位置為都會地區，故其淹水行為常因人工構造物之介入，而使整體流域界定範圍變得相當模糊，如雨水下水道之建製即為最佳的例子，於都會地區中常為避免洪水漫淹至重要精華地區，而藉由雨水下水道系統進行水體流動特性之改變，將原本於地表上向低處流動匯集的特性，轉變為由雨水下水道系統排至其他地區或其他流域，如此之改變使本研究所模擬之兩流域範圍邊界界定上有所困難，因此，本研究採用地理資訊系統之概念，進行地表特性分析以及雨水下水道系統之分類，藉由圖層套疊分析其水體流向，並合併歸類繪製都會區中考慮雨水下水道系統後之流域範圍。

首先，本研究參考臺中市政府『臺中市淹水原因研究及改善方案規劃-西屯及南屯區』(2006)之地表集水區分區系統進行小範圍集水分區之界定，主要概念透過 DEM 高程網格相互之關係，計算局部最高點後並將其連線繪製成地表局部集水區分區，整體分部情形如圖 3.17 所示，隨後，將其地表集水區圖層與該流域排水路進行套疊，選出屬於該流域之地表集水區範圍。接著考慮雨水下水道系統所帶來之影響，關於雨水下水道系統之地表子幾水區劃分，亦參考其報告中之雨水下水道地表子集水區劃分模式進行劃分，其劃分概念為以街廓為區分

方式，由於都會區中街道因道路地基之墊高效應，使街道馬路成為都會區中相對之局部高點，因此，透過街廓之劃分來訂定雨水下水道系統之子集水區劃分，並依據其出口所匯入之排水路位置屬性進行所屬流域之區分，其整體雨水下水道系統地表子集水區分部如圖 3.18 所示。最後，將所屬之地表集水區圖層與雨水下水道系統子集水區圖層進行套疊整合歸類，劃分出較符合實際情形之流域形狀，其劃分筏子溪流域及早溪流域如圖 3.19 所示。

3.4 水文資料

本研究蒐集筏子溪流域以及早溪流域附近之雨量測站資料，包括臺中、梧棲、大肚、石岡、大甲、大坑與彰化共七個測站，其各站之基本屬性整合如表 3.3 所示，並地理位置如圖 3.20 所示，而各站之區域劃分則以徐昇法進行，其劃分於筏子溪流域以及早溪流域概況如圖 3.21 及圖 3.22 所示，於筏子溪流域共七個雨量測站；早溪流域共五個雨量測站。

關於雨量資料之蒐集依據本研究模式驗證所需，蒐集各測站於卡玫颱風期間所測之逐時降雨資料，資料長度為 2008 年 7 月 17 日中午 12 點至 2008 年 7 月 19 日凌晨 12 點共計 36 小時。而關於氣候變異分析之資料，透過資料之蒐集整合發現只有臺中站有較長之資料長度，並其歷年資料亦較為完整，因此，本研究針對臺中站進行逐時降雨資料之蒐集整理，總計資料長度為 1980 年至 2009 年共 30 年。此外，針對降雨之雨型描述，於模式驗證上以大坑站所量測之真實雨型進行建置，而情境模擬部分則使用臺中站所蒐集 30 年之逐時降雨資料進行設計雨型之分析建置。詳細驗證案例與境況模擬之雨量及雨型內容將於 3.6 節及 4.2 節中說明。

雨量資料之建置於 FLO-2D V.2009 與 PCSWMM V.2006 中皆有所

不同，FLO-2D V.2009 模式中之雨量資料輸入，以單位網格相對於模式設定之累積雨量值百分比，進行單位網格雨量權重之分配輸入，因此，本研究透過輸入流域雨量測站中所測之最大累積降雨量，以徐昇法作為網格地理位置所屬權重之輸入分配；而 PCSWMM V.2006 之演算則透過徐昇法進行平均雨量計算，並輸入模式中進行演算。

3.5 水理資料

於模式中所輸入之水理資料包括曼寧糙度係數、入滲、面積折減因子以及下游邊界條件等，每一相關參數皆以數值高程模型中之網格中心點位作為建製之單元，亦即以網格精細度作為資料建製精細程度之依據，其建製參數之說明以及依據內容詳序說明如下。

1、曼寧粗糙係數

於模式演算當中，曼寧粗糙係數表現了水流於地表流動中之阻力特性，其將影響整體運算最後的結果，於第二章所述之模式控制方程式當中即可瞭解，因此多年來對於此參數的研究及探討不計其數，如美國工兵團（The U.S. Army Corps of Engineers, 1996）、賴(2009)、Subramanya(2003)等，皆有豐富的分析以及提供許多建議參考值。由於本研究所分析模擬的範圍位於臺中都會地區，其地表粗糙改變隨著人類於地表上之行為而有所差異。因此，都會區中之曼寧粗糙係數設定更影響了整體模擬最後之結果，本研究將其依模式計算之二維地表漫地流以及一維渠道變量流劃分，分為地表漫地流、渠道水流以及雨水下水道管流三個部分，分別進行曼寧粗糙係數資料蒐集以及整合輸入。首先，地表漫地流部分因受到不同土地利用類別之影響而有不同的曼寧粗糙係數，本研究依據內政部地政司所公布 1996 年至 1997 年以及 2007 年之國土利用現況調查數化資料，將每一網格之土地類別分為農業、交通、水利、建築、工業、遊憩、養殖、礦業、軍事、公共

以及其他用地。而網格中之土地利用判斷依據以每一網格中心點之土地類別為主，其建置值參考經濟部水利署水利規劃試驗所(2004)之研究依據建議範圍調整，整合如表 3.4 所示；渠道水流部分，本研究參考「大里溪水系治理規劃檢討報告」(2009)以及蘇等(2007)之研究，分別對於筏子溪以及旱溪之河道曼寧糙度建議值，依每一河段於報告書中之評估給予糙度值，整合如表 3.5 所示；最後，為雨水下水道部分，根據陳(2004)之研究，其建議下水道管件糙度值於管徑小於 600mm 時為 0.015；大於等於 600mm 時為 0.013；而箱涵則為 0.015。透過以上曼寧糙度係數之設定依據，進行整體模式之建製及資料輸入。

2、SCS (Soil Conservation Service) 入滲曲線

本研究之模擬範圍位於都會區中，其入滲與截流特性受土地利用之影響甚大，因此，依據土地利用之分類以及文獻資料之蒐集整合設定 CN 值如表 3.6 所示。另外，由於模擬運算透過網格進行，因此在輸入檔案建製當中以面積權重的方式計算每一網格中之等值 SCS 曲線編號，計算方式如 (3-1) 式所示。而其建製依流域以及不同都市化程度之結果如圖 3.23、圖 3.24、圖 3.25 及圖 3.26 所示。

$$CN^* = \frac{\sum a \times CN}{A_c} \quad (3-1)$$

式中， CN^* ：等值 SCS 曲線

a ：不同土地利用類別於網格中所佔之面積

A_c ：網格總面積

3、面積折減因子

面積折減因子 (Area Reduction factor, ARF) 為網格中不可提供水體流通之面積比例，透過比例設定計算 A_{surf} 以求得下一時段水深，其主要表示都會區中因建物密集，而改變網格中水體之流動以及儲蓄

特性，綜上所述，參數之設定目的在於凸顯洪水流量由於建築物或地形所帶來儲存量之減少，在假設不考慮建築物中地下室淹儲水特性下，本研究透過土地利用資料中之建築用地細分第二級分類加以設定，設定中依據各類建築用地中建築物所佔之比例加以給定，其所佔之比例設定整合如表 3.7 所示。藉此，給定不可儲蓄水體之面積相對於整體網格之百分比，而網格中因建築用地所佔百分比隨每格網格之土地利用類別差異而有所不同，本研究之整體面積折減因子透過面積權重加以計算，其計算式如式 3-2 所示。

$$ARF^* = \frac{\sum A_s \times ARF}{A_c} \quad (3-2)$$

式中， ARF^* ：等值面積折減因子；

A_s ：建築用地細分第二層類別於網格中所佔之面積；

A_c ：網格總面積。

其整體面積折減因子於模擬區域中之設定情形如圖 3.27、圖 3.28、圖 3.29 及圖 3.30 所示，由圖 3.27 及圖 3.28 中可看出，筏子溪流域於 1997 年開發至今，其面積折減因子呈現較均勻之散佈；而旱溪流域則較集中於原臺中市舊市區，如圖 3.29 以及圖 3.30。

4、下游邊界條件

由於所模擬之流域下游為烏溪之感潮河段，其下游邊界條件對於整體模擬而言相當重要，因此本研究以蒐集水位資料為主，作為流域下游邊界條件之設定，而資料蒐集之來源主要分為兩部分，一為卡玫基颱風驗證模擬所需之逐時水位歷線，另一則為模擬境況所需之重現期水位。對於筏子溪流域及烏溪流域下游之水位而言，由於只有溪南橋測站，並其測站距兩流域之下游邊界甚遠，對於其實測水位資料較不符合模擬之需求，因此，本研究對於卡玫基颱風模擬之下游邊界條

件採用氣候變異與都市化對河川洪水保護標準與溢堤之研析(柳, 2010) 研究中，對於卡玫基颱風模擬兩流域之下游第一斷面水位歷線，進行下游邊界條件之輸入，其模擬水位歷線如圖 3.31 及圖 3.32 所示；而對於境況模擬之下游邊界條件描述，則採用陳(2004)對於筏子溪及旱溪所蒐集整合之重現期水位進行模式之設定，其水位資料如表 3.8 所示。透過以上水位資料之設定使整體模擬更符合實際情況。

3.6 模式驗證與比較

本研究透過 FLO-2D V.2009 以及 PCSWMM V.2006 兩模式，以第二章所述之整合演算法和分離演算法，進行一維渠道變量流模式、二維地表漫地流模式以及雨水下水道模式之交互動態模擬。由於模式中包含許多參數，包括地表糙度因子、面積折減因子、入滲因子等，故其各項參數皆須透過驗證進行校正以符合實際情況，而本研究透過卡玫基颱風之實際案例進行模式驗證。

1、卡玫基颱風

卡玫基颱風於 2008 年 7 月 15 日在菲律賓東北方形成，17 日 21 時 40 分由宜蘭縣南部登陸，並 18 日 7 時 20 分於桃園附近出海，其整體期間對台灣中南部各縣市造成嚴重災情，並全台各地皆有災情傳出，據統計全台死亡及失蹤人數高達 26 人。尤其，臺灣中部地區淹水災情更是嚴重，根據 2008 年 9 月逢甲大學防災研究中心之臺中市彰化縣「卡玫基與鳳凰颱風災情現地調查」(2008)報告之統計結果，臺中市之災情通報資料高達 800 多筆，其中臺中火車站、中港交流道以及臺中港路更因瞬間降雨過大，導致其區域形成大範圍淹水以及路面水流如瀑，一度造成交通停擺，淹水其災情之嚴重可想而知。

根據本研究對其降雨量之蒐集以大坑站為蒐集測站資料中最大，其 36 小時累積雨深度為 630mm，並尖峰降雨深度更高達 149mm/hr，

因此演算模式中針對大坑站所量測之實際雨型作為模擬流域中之真實雨型，其雨型如圖 3.33 所示，而其他測站之雨量資料則以各站所測得之 36 小時累積雨深度相對於該站 36 小時累積雨深度之百分比，進行降雨量之權重設定，並以徐昇法作為測站面積權重之地理位置分配，其權重分部於筏子溪流域如圖 3.34 所示，而旱溪流域如圖 3.35 所示。

關於淹水範圍本研究根據臺中市彰化縣「卡玫基與鳳凰颱風災情現地調查」報告書所整合之資料以及經濟部水利署第三河川局所提供之實測資料，進行淹水範圍地理位置之數化，整合較完整之淹水範圍於筏子溪流域共五處，如圖 3.36 所示；旱溪流域共十一處，如圖 3.37 所示。藉此作為模式之調整依據以及參數校正之用，其模擬成果與模式驗證如下所述。

2、整合演算法

本節透過第二章所述之整合演算法進行模擬分析，其模擬成果如圖 3.38 及圖 3.39，分別為筏子溪流域及旱溪流域之最大淹水深度圖，將其圖層與淹水實測範圍圖作比較，可發現筏子溪流域於臺中市範圍之趨勢大致吻合，於五權西路交流道、黎明路、臺中中港交流道及龍洋巷等模式皆有明顯集中之淹水情形，而臺中港路之道路漫淹由於模式之網格尺度大於道路之寬度，故模式對此較無法敏感反應淹水情形，其餘位於原臺中縣範圍之零星淹水現象，則因淹水實測資料較為不完整故無法加以判斷，但可透過其瞭解位於筏子溪上游之零星淹水，受到流域中間中山高速公路以及環中路貫穿的影響，而產生區域性淹水情況，依據臺中市政府『臺中市淹水原因研究及改善方案規劃-西屯及南屯區』（2006）報告中之描述，臺中市主要道路環中路以南北方向沿著筏子溪河堤興建，使排水方向可能受到路提效應影響，水流無法順利排往筏子溪，因此，其亦說明模式之模擬淹水圖於趨勢上大致吻合；

此外，對於旱溪流域部分亦為如此，其整體淹水趨勢大致上吻合，其主要淹水範圍為下游較為低窪之部分，根據實測資料之描述，位於旱溪下游之九德村位置，因瞬間雨量過大導致排水宣洩不及，產生大面積之淹水，而於模式中其相對位置之有集中淹水氾濫之趨勢，故整體而言由其淹水模擬圖與實測淹水範圍圖對照後可看出淹水區域大致吻合。

3、分離演算法

為合理考慮雨水人孔溢流所引致的地表淹水情形，分離演算法利用 PCSWMM V.2006 先行針對雨水下水道進行演算，再將溢流資料置入 FLO-2D V.2009 進行地表漫地流演算，本研究於分離演算法中以卡孜基颱風對筏子溪流域所產生之淹水為例進行模擬分析。

由於演算模式假設雨降至地面後所產生之地表逕流，不受進水口設計流量及雨水下水道之流況限制，依據每一雨水人孔點及渠道集流點所屬之上游子集水區所產生之逕流，均可匯入雨水人孔及渠道集流點中(陳，2002)，因此本研究以雨水人孔點為以及渠道量測斷面樁位為集流點，進行所屬子集水區之劃分，其劃分依據為參考臺中市政府『臺中市淹水原因研究及改善方案規劃-西屯及南屯區』(2006)報告中之雨水下水道地表子集水區劃分模式，先行與渠道集水區分開，隨後針對其餘之渠道集水區範圍以街廓為邊界進行子集水區劃分，其總劃分子集水區共 1733 個並整體流域劃分情形如圖 3.40 所示。

圖 3.41 為筏子溪流域經由分離演算法進行模擬之成果，由圖中可知其淹水範圍，因溢流水體無法再次流回雨水下水道系統中而擴大，淹水之趨勢向筏子溪主流聚集並漫淹於附近，而途中亦可看出明顯因中山高速公路與環中路所造成之路提效應，雖然淹水範圍較大，但其與實測淹水範圍圖進行套疊比較，可發現其趨勢大致上吻合。

4、 模式比較

以筏子溪流域為例，本研究分別以整合演算法以及分離演算法進行模擬，並在驗證趨勢大致吻合之前提下比較其模擬淹水圖圖 3.38 及圖 3.41，由兩圖可知分離演算法之淹水範圍明顯擴大，並聚集至下游使下游淹水水深提升，其主要原因在於整合演算法中，當雨水人孔或渠道斷面溢流時，其溢流水體可透過下游或其他未溢流之雨水人孔或渠道斷面進行排除，並當雨水下水道或渠道中之流量下降至可以繼續排除地表逕流時，地表之淹水水體將迅速被排除掉，使整體停留於地表之時間積延及淹水量大幅縮短。而分離演算法則因演算流程之限制，不容許溢流水體再次流入排水系統中，使得溢流水體積蓄於地表上並匯集於渠道附近或流至下游使下游水深提升，其不僅造成淹水體積高估，於低窪之地區也因溢流之淹水體積無法流回排水系統中，而積蓄其上無法排除。此外，以淹水體積歷線進行比較亦證實以上所述之現象，其模擬淹水體積歷線比較圖如圖 3.42 所示。

透過上述之模式比較，可發現分離演算法非但對於整體淹水體積有高估之現象且對於都市低窪地區依賴雨水下水道系統迅速排除之機制無法反應出來，因此，本研究選用整合演算法進行都市化與氣候變異對都會地區淹水衝擊之境況模擬分析。

表 3.1 各都市計畫區之計畫面積、計畫人口及計畫年期表

類型	計畫區	計畫人口 (萬人)	計畫面積 (m ²)	計畫年期 (西元)
鄉街計畫	后里	3.5	641.0	1996
	神岡	1.4	472.8	2002
	潭子	4.0	556.2	1998
	大雅	6.8	582.3	2011
	新社	0.9	196.8	1996
	外埔	0.8	124.0	2000
	大安	0.9	193.3	2003
	烏日	3.5	541.2	1996
	大肚	3.5	509.2	2011
	霧峰	4.5	412.4	2011
市鎮計畫	豐原	19.3	2,203.1	1996
	東勢	6.0	1,056.2	2000
	大甲	6.0	705.4	1996
	大甲(日南)	1.9	307.5	1996
	大里	11.0	585.4	1996
	大里(草湖、塗城)	5.2	371.9	2001
	太平	3.2	440.0	1996
	太平(新光)	4.0	307.1	2003
	太平(中平)	7.5	541.9	2011
特定區計畫	豐原交流道	10.0	2,277.3	2011
	石岡水壩	1.2	756.9	2000
	梨山	0.2	141.2	2011
	梨山(新佳陽)	0.02	14.7	1996
	梨山(環山)	0.06	21.2	1996
	梨山(松茂)	0.11	16.1	1996
	臺中港	58.0	17,674.3	2011
	王田交流道	3.5	1,380.5	1996
	谷關	0.08	148.1	2003
	鐵砧山	0.03	138.9	2006

[資料來源：摘自臺中縣政府網站]

表 3.2 模擬流域排水路與雨水下水道系統整合表

排水路名稱	代號	長度 (Km)	下水道系統數	雨水下水道系統編號
筏子溪流域				
筏子溪	FG	12.7	2	809、913
內新庄子	IN	6.2	7	815、806、805、917、 807、823、824
東安大坑	DD	4.4	3	822、819、818
林厝坑	LC	2.6	1	1112
下橫山支線	DM	5.2	1	821
七星溪	SS	4.1	1	921
文山溪	WS	4.2	2	920、922
普記坑	PG	3.6	1	820
劉厝	LH	4.5	4	906、923、914、915
鎮平溪	GP	1.2	2	929、931
黎明溝	LN	1.6	2	919、825
內新庄子二支線	INB	1.5	3	811、810、812
員寶庄圳支線	UB	6.9	0	—
南邊溪	SR	4.0	0	—
上橫山	US	0.7	0	—
四塊厝圳支線	FU	3.1	0	—
下員林支線	DJ	3.4	0	—
大雅	DE	3.1	0	—
十三寮	SL	4.8	0	—
塔蓮溝	TL	3.7	0	—
十四張圳	FC	6.4	0	—
十四張圳分線	FCB	1.9	0	—
大埔厝圳支線	DP	4.4	0	—
中央圳七輪排水	CS	2.4	0	—
水窟頭坑	WH	1.7	0	—
三角泳排水支線	TG	2.4	0	—
大社支線七號支線	DS	1.7	0	—
東員寶支線	DU	1.1	0	—
東大溪	DB	1.6	0	—
港尾子	GU	4.5	0	—
牛埔庄圳支線	QP	3.1	0	—
社皮次分線	SP	4.0	0	—

排水路名稱	代號	長度 (Km)	下水道系統數	雨水下水道系統編號
旱溪流域				
梅川	MH	5.4	4	803、804
南屯溪排水	TS	7.1	1	924
土庫溪排水	TP	12.2	13	802、905
麻園頭溪	TT	7.1	12	801、901、902、903、 904、907、908、909、 910、911、912、918
柳川排水	LU	27.4	6	—
旱溪排水	HS	10.4	1	—
下橋子頭排水	SA	2.1	1	—
綠川排水	GH	6.6	3	—
大智排水	DG	2.2	1	—
北屯圳	BT	4.2	0	—
水柳溝	WL	3.2	0	—
三分埔分線	TF	2.8	0	—
龍形溝	LS	4.5	0	—

註：雨水下水道系統編號參考整理自臺中市政府(2006)，表中 — 為無建置雨水下水道或無系統編號

表 3.3 雨量測站基本資料整合表

站名	TM_67X	TM_67Y	站號	所屬單位	高程	屬性流域
臺中	217054.93	2671432.13	467490	中央氣象局	34.0	筏子溪 旱溪
梧棲	200751.98	2683785.42	467770	中央氣象局	31.7	筏子溪
大肚	205736.84	2672262.70	C1F000	中央氣象局	348.0	筏子溪 旱溪
石岡	225859.92	2686243.11	C1F920	中央氣象局	280.0	筏子溪 旱溪
大甲	212851.80	2694178.06	C1F930	中央氣象局	90.0	筏子溪
大坑	222367.94	2674281.90	C1F970	中央氣象局	170.0	筏子溪 旱溪
彰化	203931.85	2664054.22	C1G630	中央氣象局	15.0	筏子溪 旱溪

表 3.4 各土地利用型態曼寧糙度值

土地類別	曼寧糙度值
農業用地	0.15
森林用地	0.2
交通用地	0.03
水利用地	0.02
建築用地	0.08
工業用地	0.07
遊憩用地	0.15
養殖用地	0.015
礦業用地	0.075
軍事用地	0.045
公共用地	0.14
其他	0.12

表 3.5 各渠道斷面之曼寧糙度值

河段名稱	斷面編號	曼寧糙度係數
筏子溪	全斷面	0.04
旱溪	斷面 78 - 斷面 80	0.033
旱溪	斷面 80- 1 - 斷面 87	0.039
旱溪	斷面 89 - 斷面 105	0.034

表 3.6 不同土地利用之 SCS 曲線編號表

(易和王，2001；Ponce and Hawkins,1996)

土地類別	細項分類	曲線編號 (CN)
農業用地	畜牧	69
	農作	78
	農業附帶設施	74
	水產養殖	98
森林用地		60
交通用地		98
水利用地		89
建築用地	貿易商業範圍	92
	工業	88
	住宅	85
遊憩用地		61
礦業用地		85
其他用地		69

註：土壤種類 B，最小入滲率 (mm/hour) 3.81~7.62

表 3.7 面積折減因子對照表

第一級		第二級		面積折減因子
類別	代碼	類別	代碼	
建築用地	05	貿易商業範圍	0501	85
建築用地	05	住宅	0502	85
建築用地	05	工業	0503	72
建築用地	05	其他	0504	65

表 3.8 模擬渠道下游邊界條件

重現期（年）	筏子溪口(m)	旱溪排水出口（m）
5	22.5	26.4
10	23.3	27.1
25	24.2	28.0
50	25.1	29.0
100	25.7	29.6
200	27.0	31.0



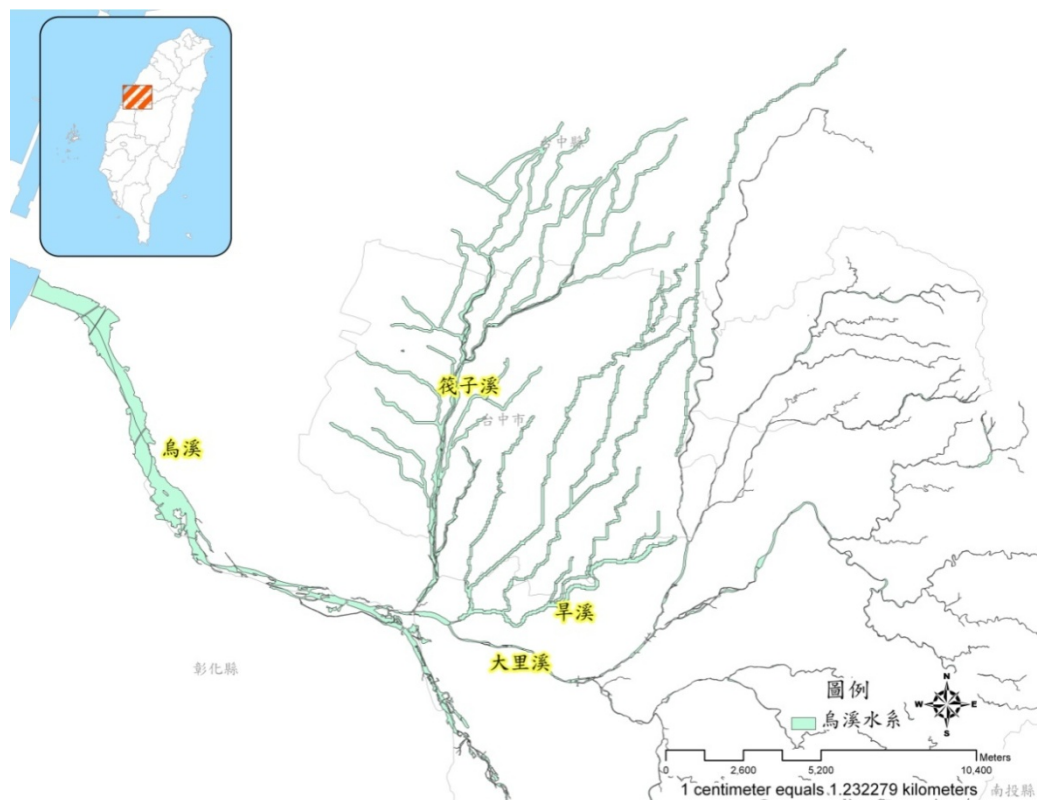


圖 3.1 研究區域水係分佈概況圖

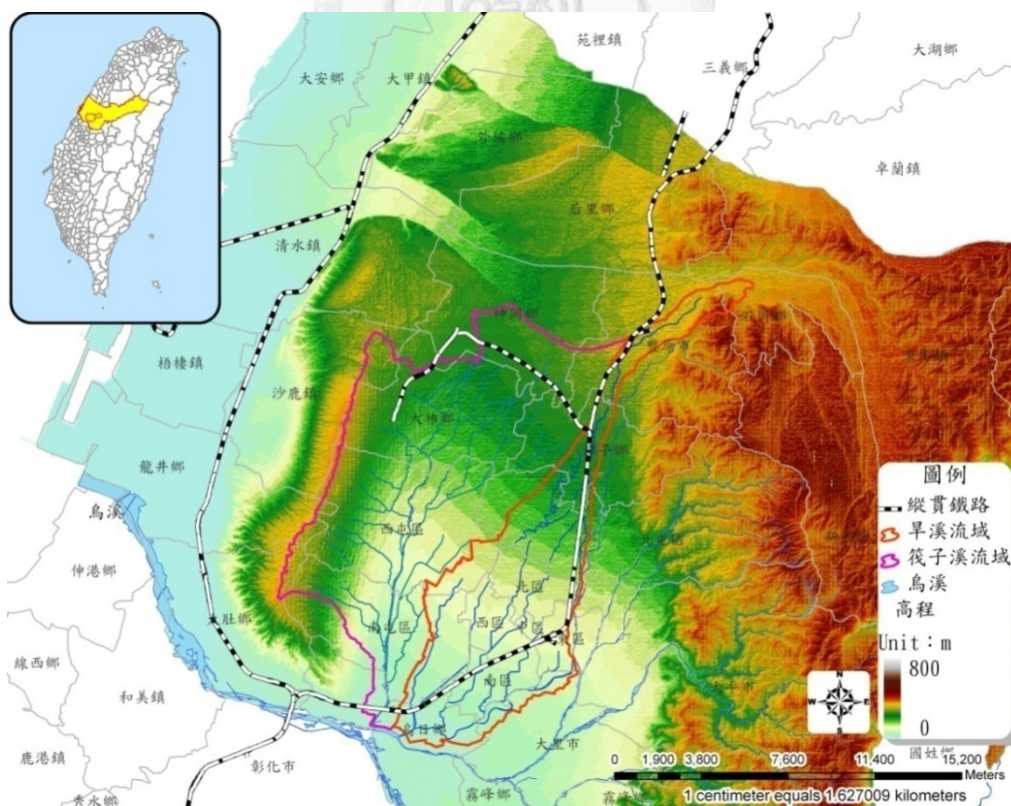


圖 3.2 研究區域高程圖

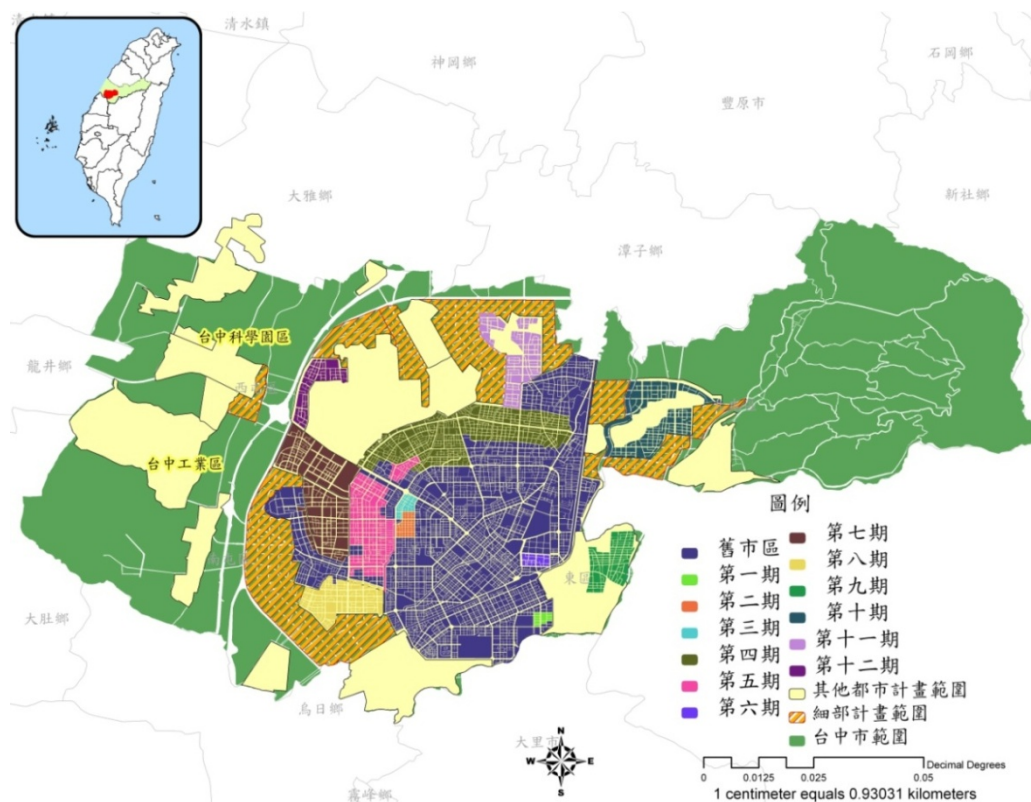


圖 3.3 臺中市都市計畫分佈概況

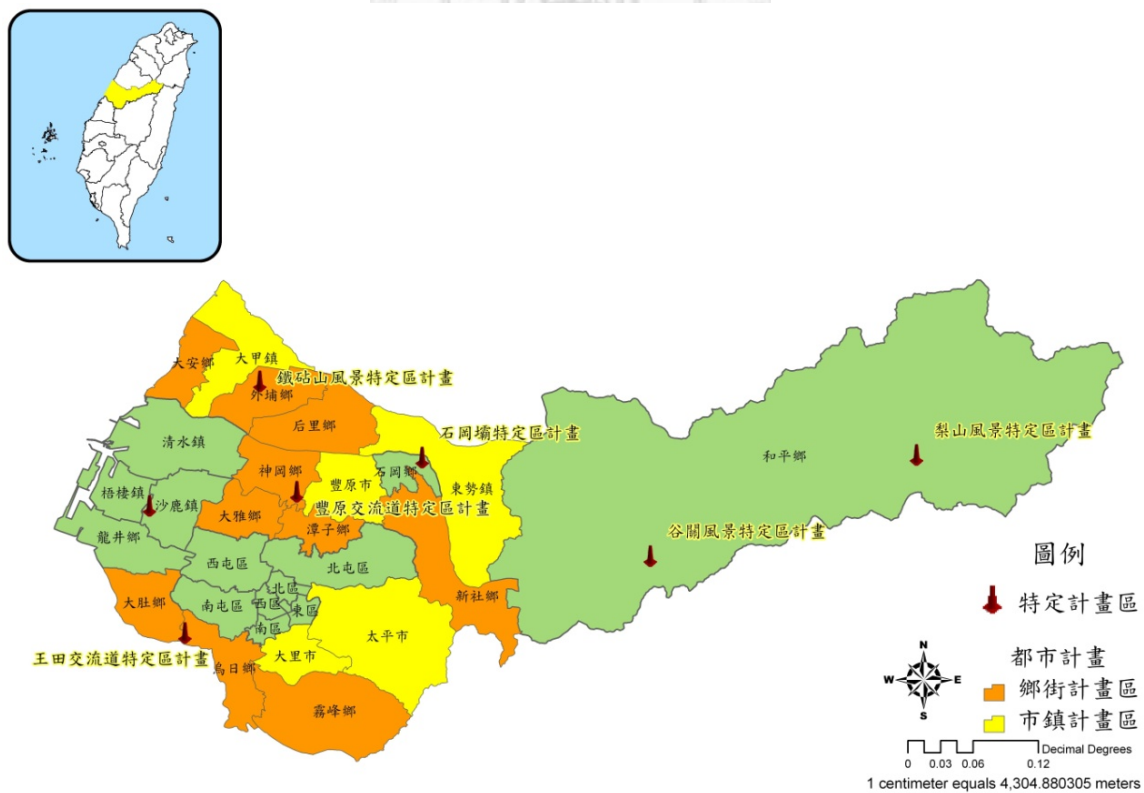


圖 3.4 臺中縣都市計畫分佈概況

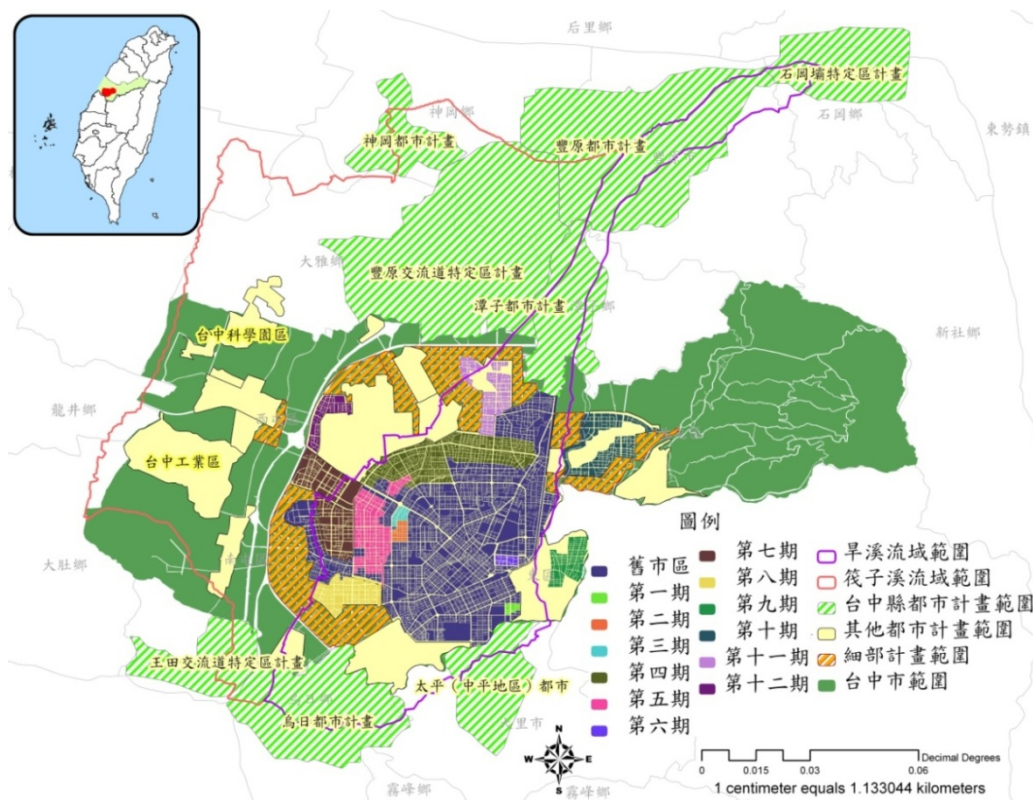


圖 3.5 臺中縣市都市計畫於研究區之分佈概況

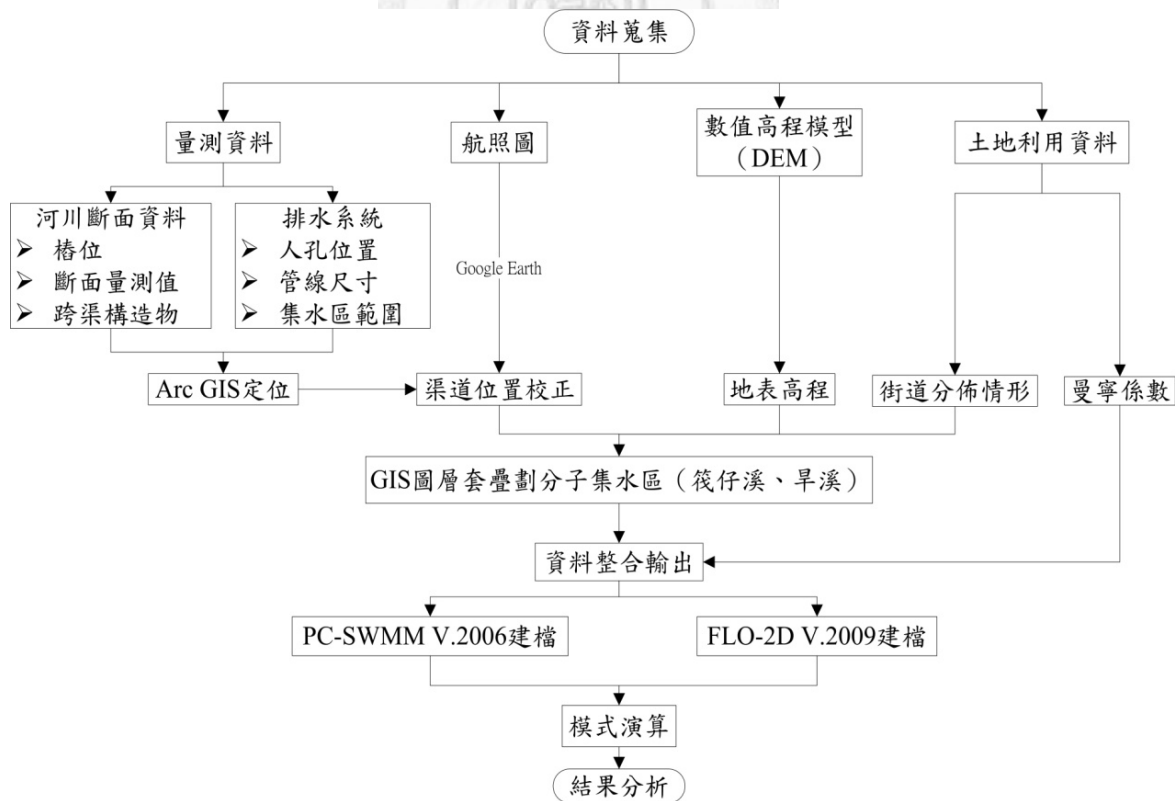


圖 3.6 資料蒐集架構及流程圖

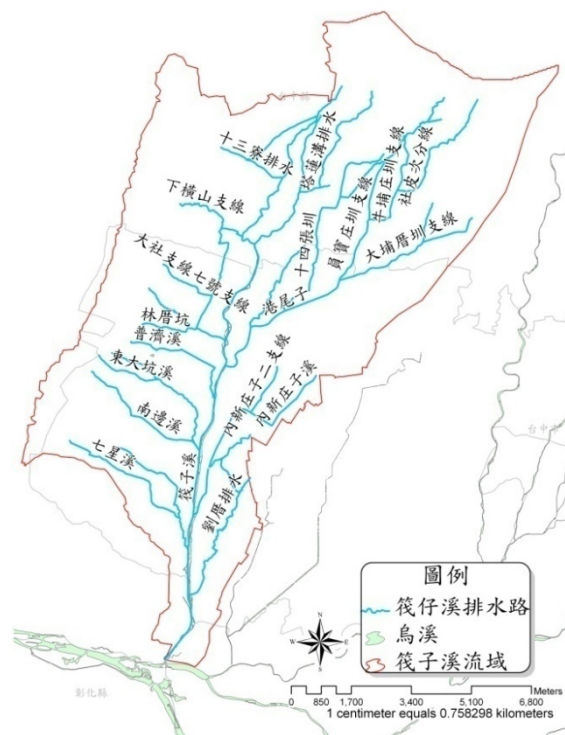


圖 3.7 筏子溪流域排水路分佈圖

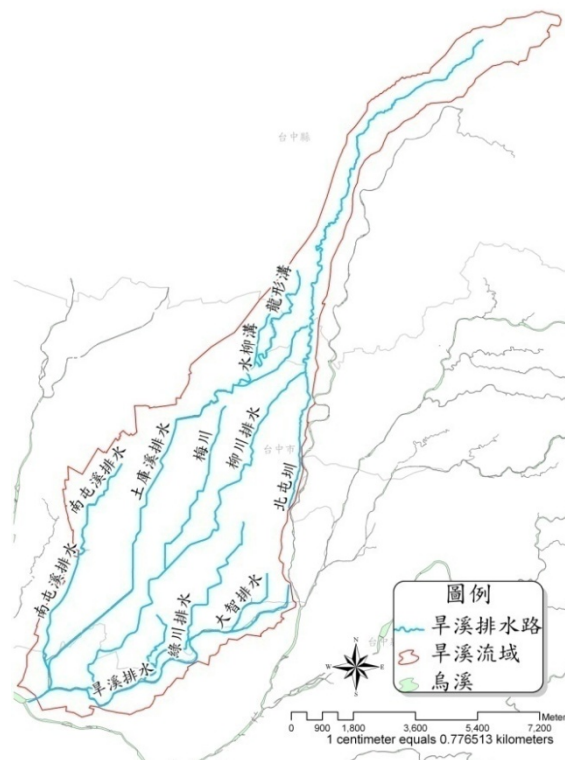
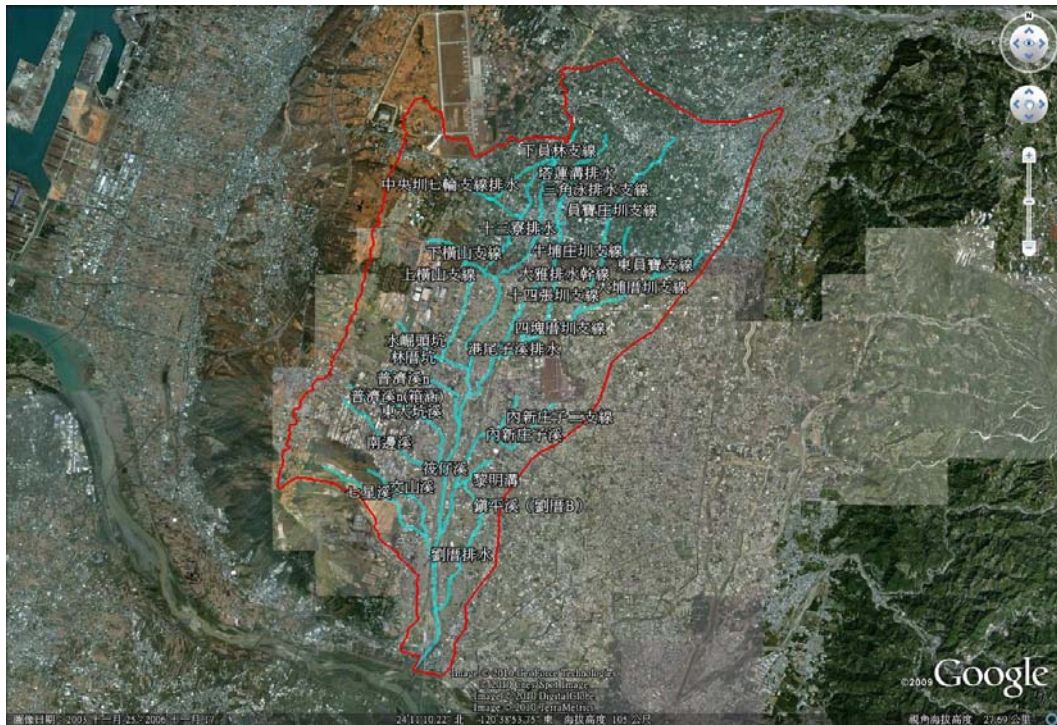


圖 3.8 旱溪流域排水路分佈圖



[資料來源：摘自 Google Earth]

圖 3.9 航照圖對位示意圖



[資料來源：摘自 Google Earth]

圖 3.10 渠道斷面比對示意圖

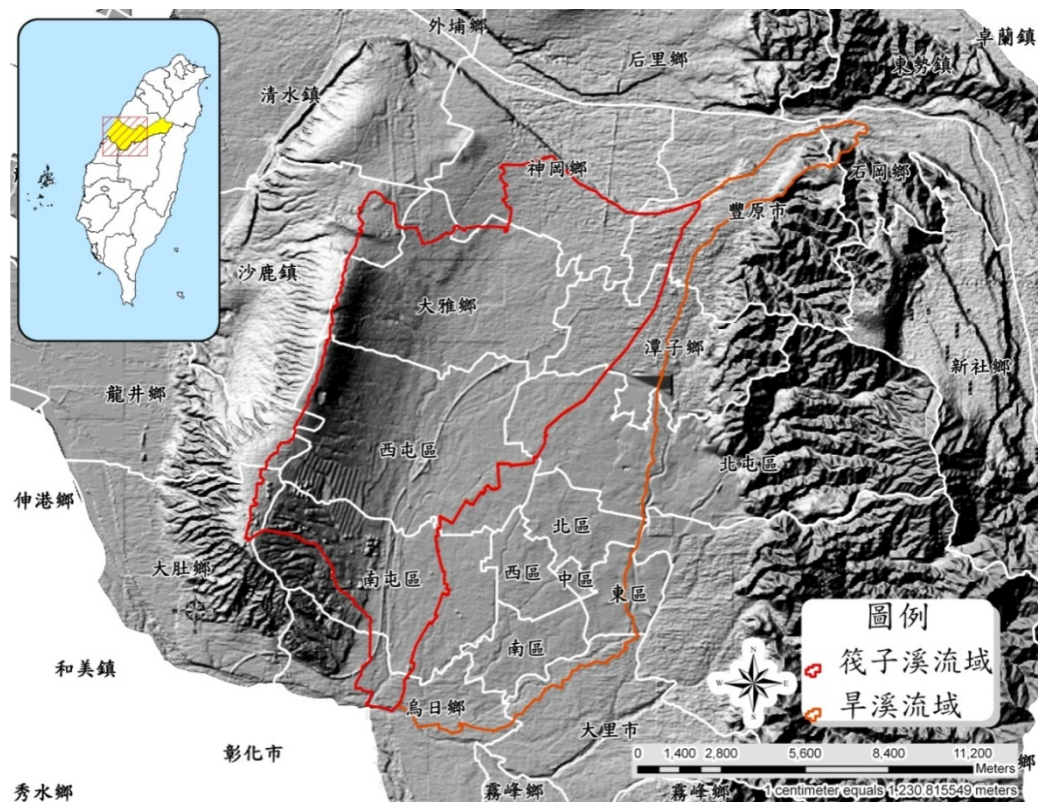


圖 3.11 模擬區域地表高程圖

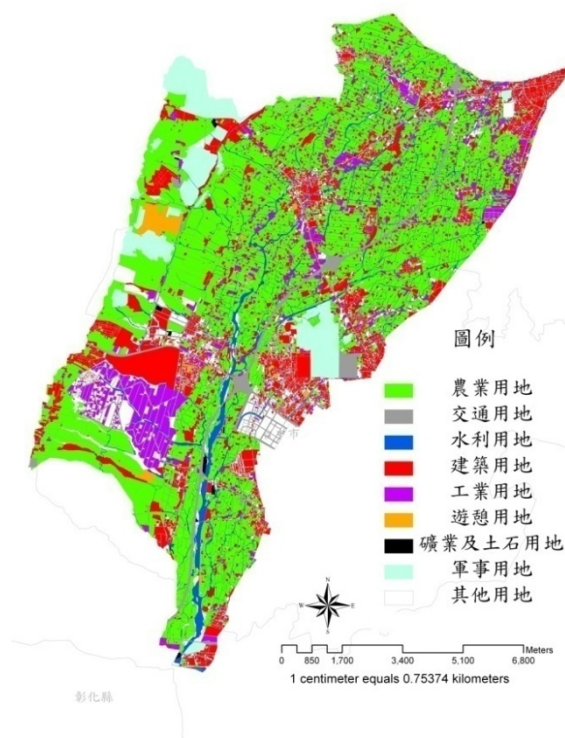


圖 3.12 1997 年筏子溪流域土地利用分佈圖

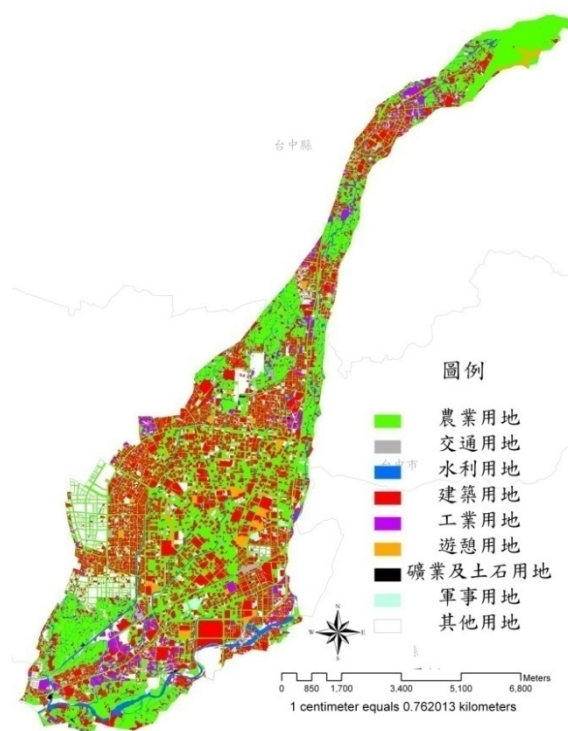


圖 3.13 1997 年旱溪流域土地利用分佈圖

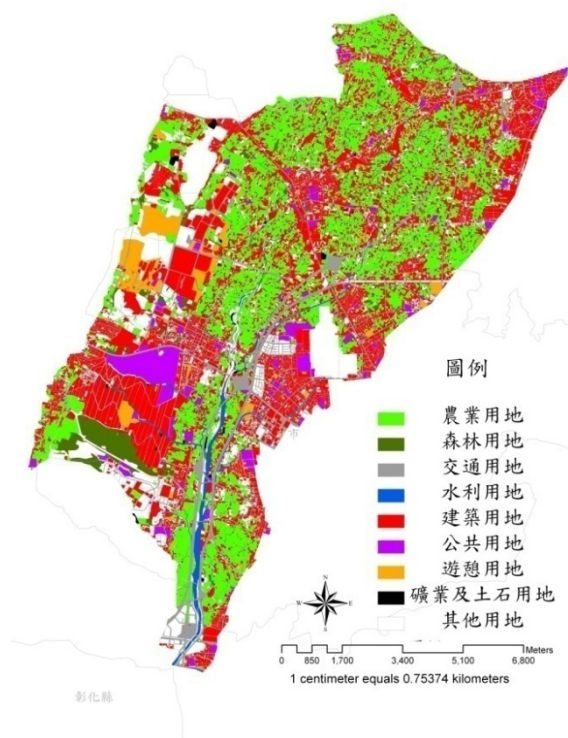


圖 3.14 2007 年筏子溪流域土地利用分佈圖

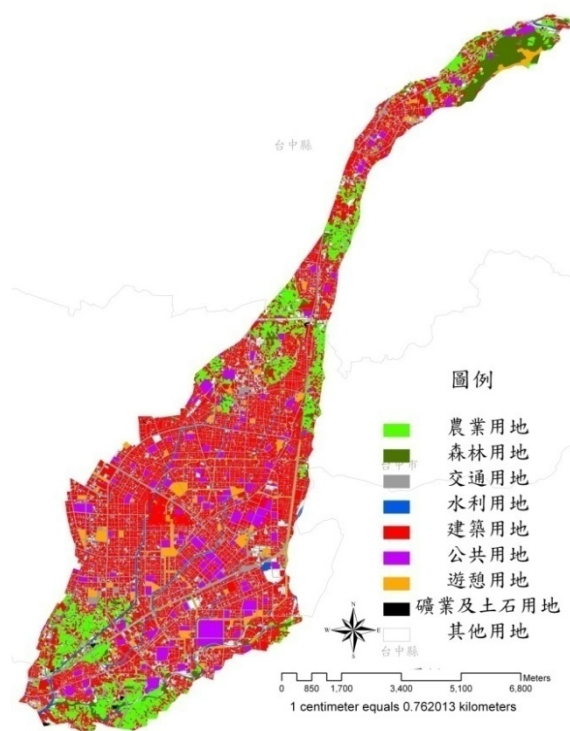


圖 3.15 2007 年旱溪流域土地利用分佈圖

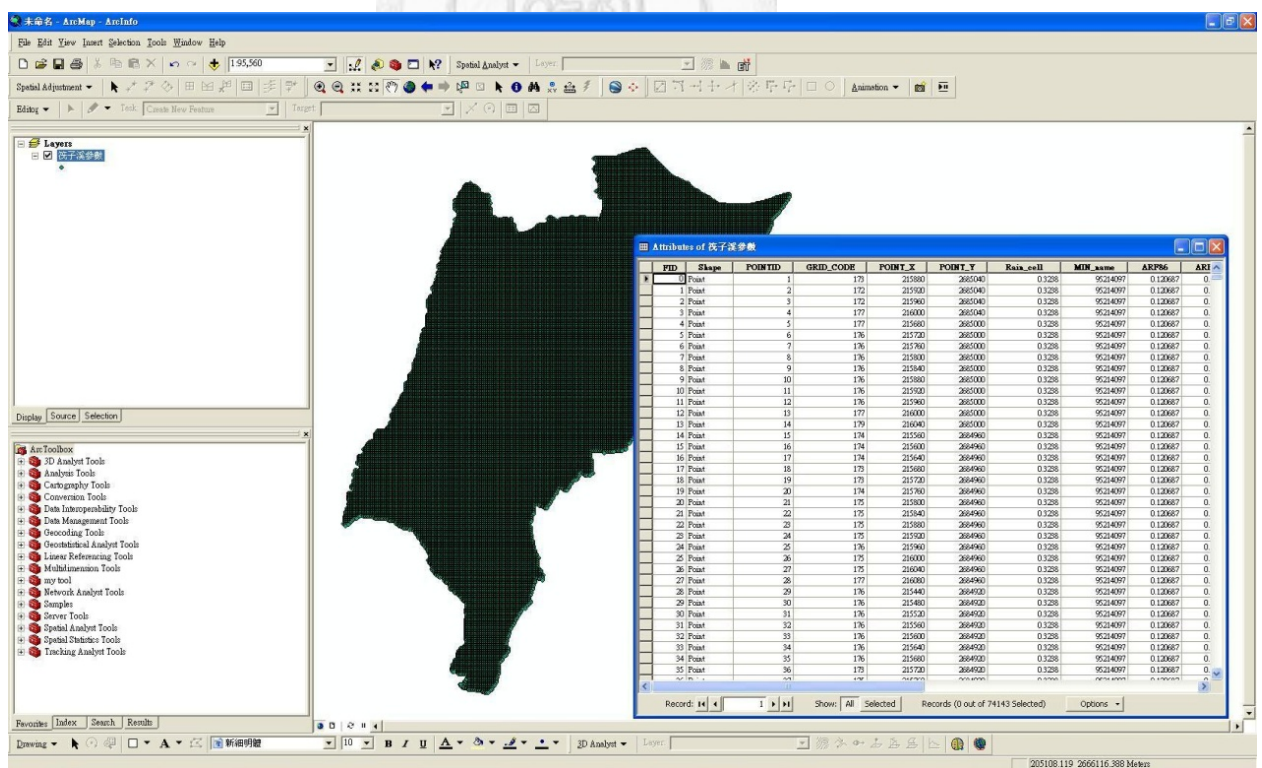


圖 3.16 參數整合建置示意圖

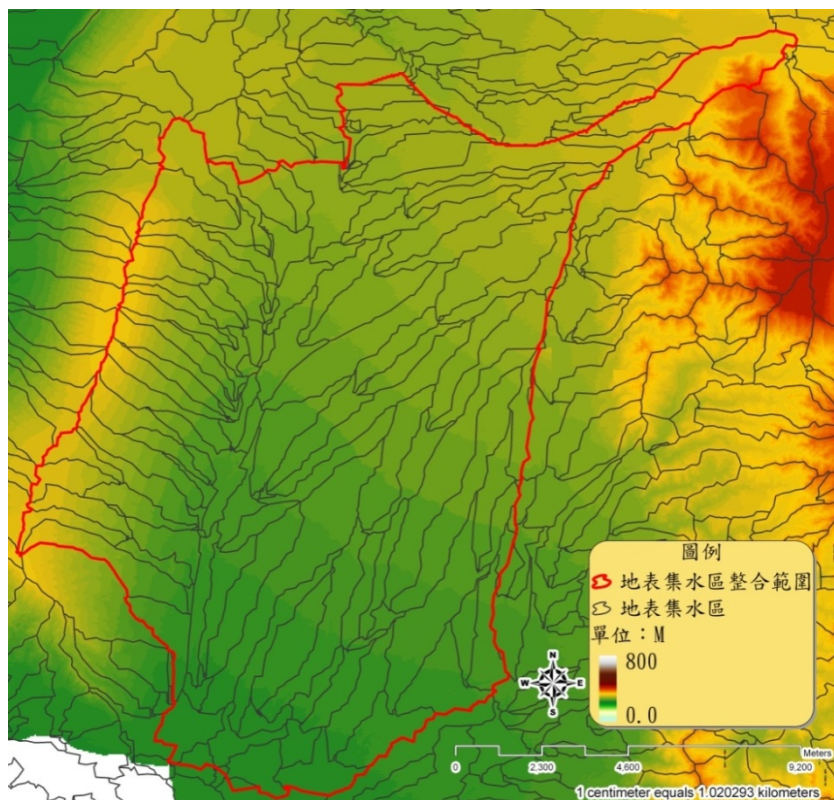


圖 3.17 地表集水區流域範圍劃分示意圖

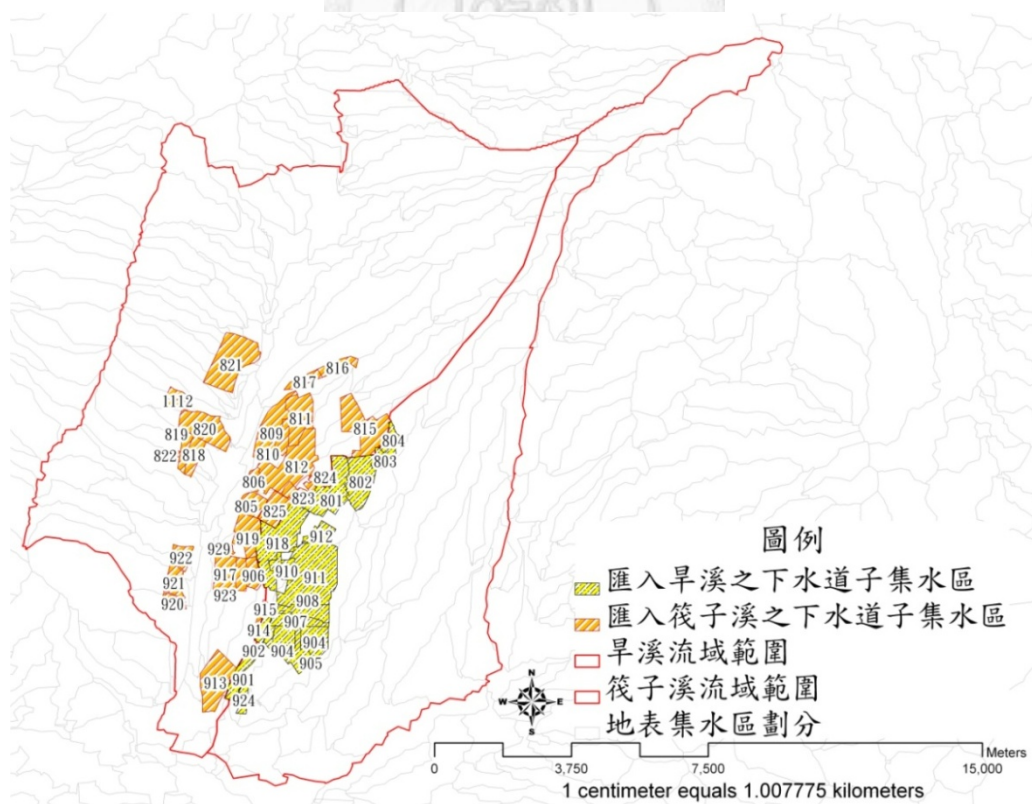


圖 3.18 雨水下水道子集水區劃分示意圖

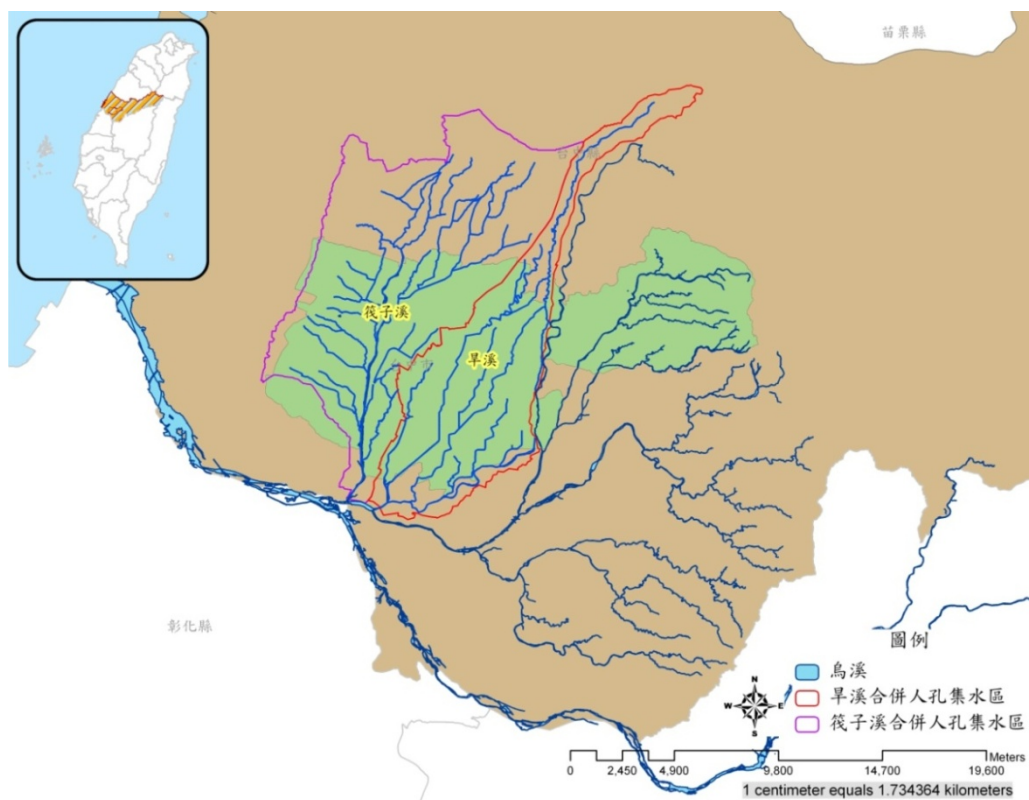


圖 3.19 模擬流域範圍劃分示意圖

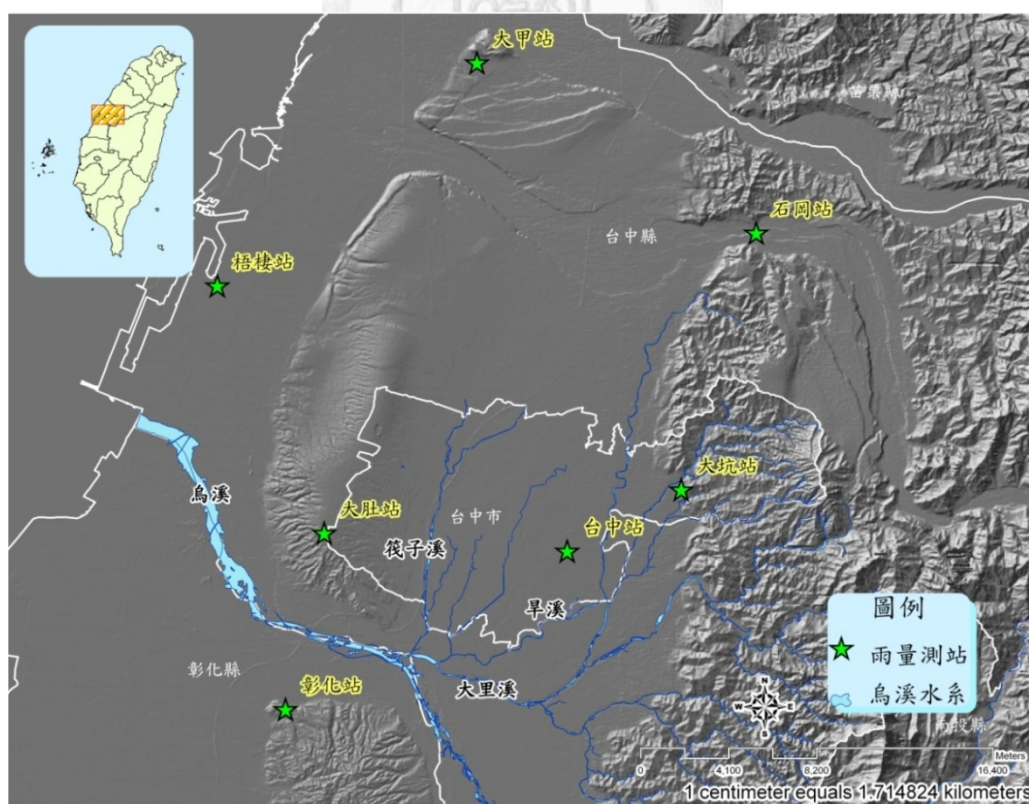


圖 3.20 雨量測站地理位置圖



圖 3.21 筏子溪流域徐昇法面積權重示意圖

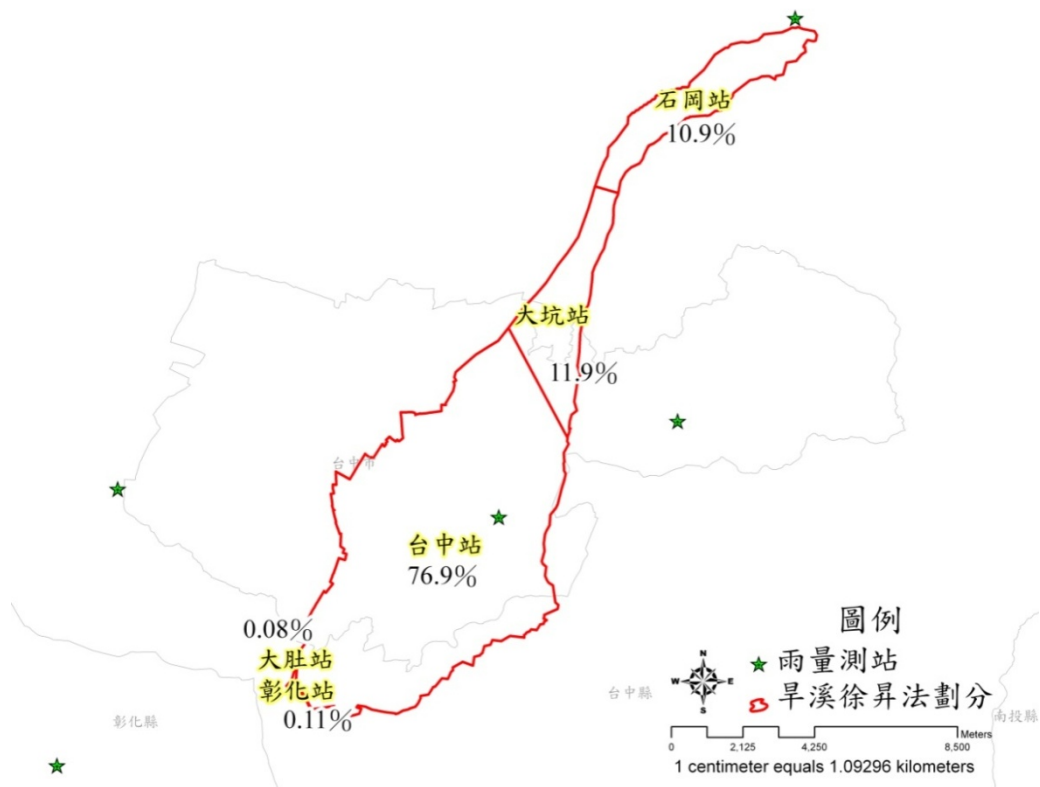


圖 3.22 早溪流域徐昇法面積權重示意圖



圖 3.23 筏子溪流域 1997 年 SCS 曲線編號分佈圖



圖 3.24 筏子溪流域 2007 年 SCS 曲線編號分佈圖



圖 3.25 旱溪流域 1997 年 SCS 曲線編號分佈圖

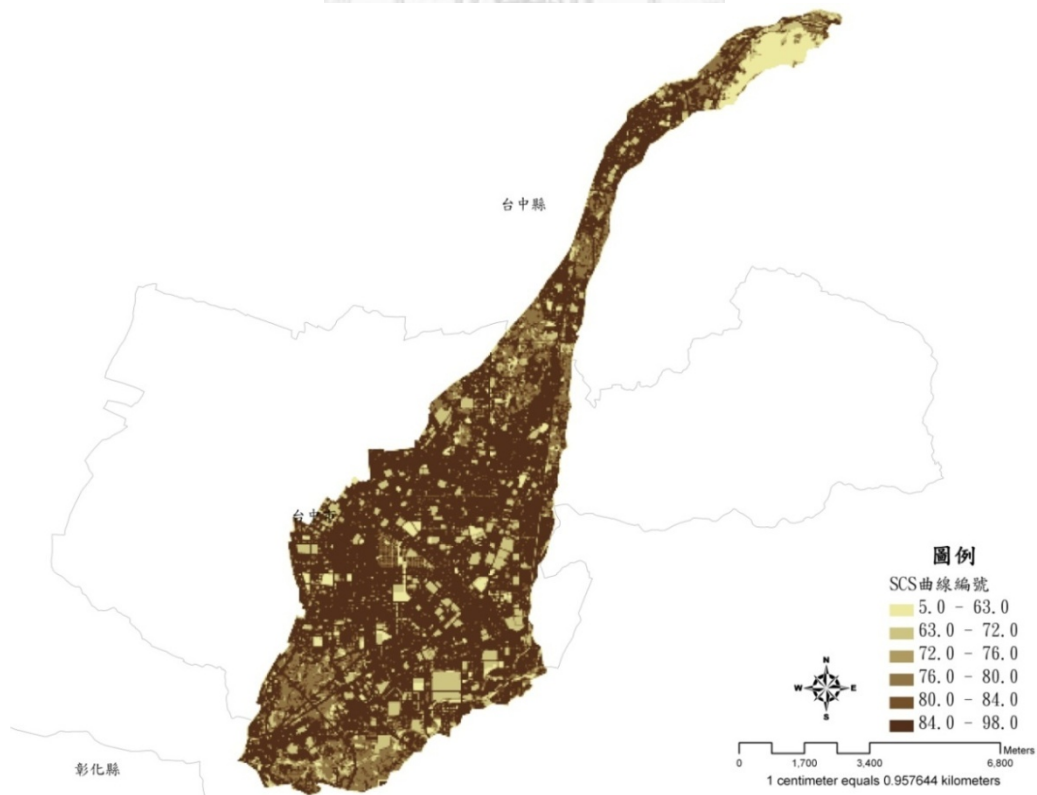


圖 3.26 旱溪流域 2007 年 SCS 曲線編號分佈圖

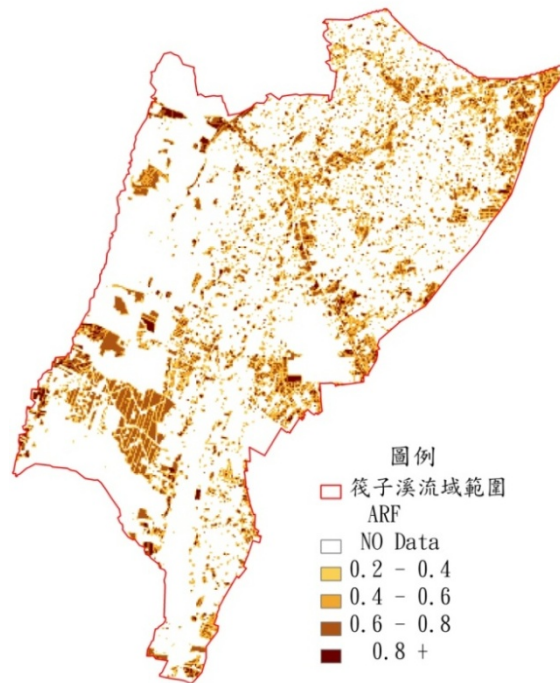


圖 3.27 筏子溪流流域 1997 年 ARF 分佈圖

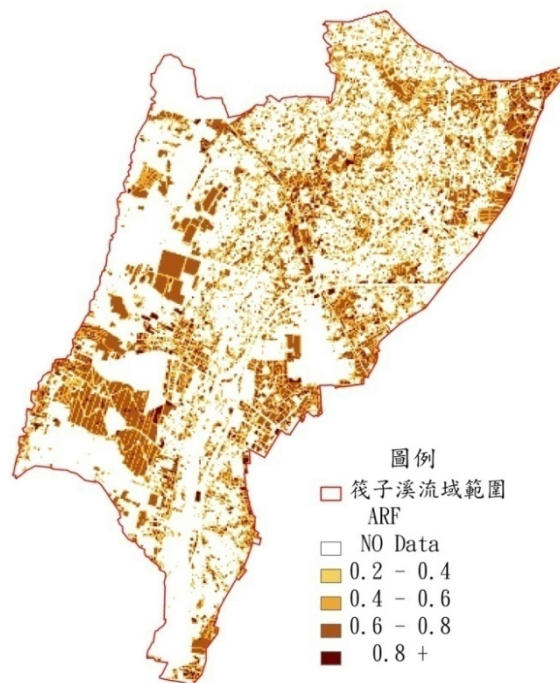


圖 3.28 筏子溪流流域 2007 年 ARF 分佈圖

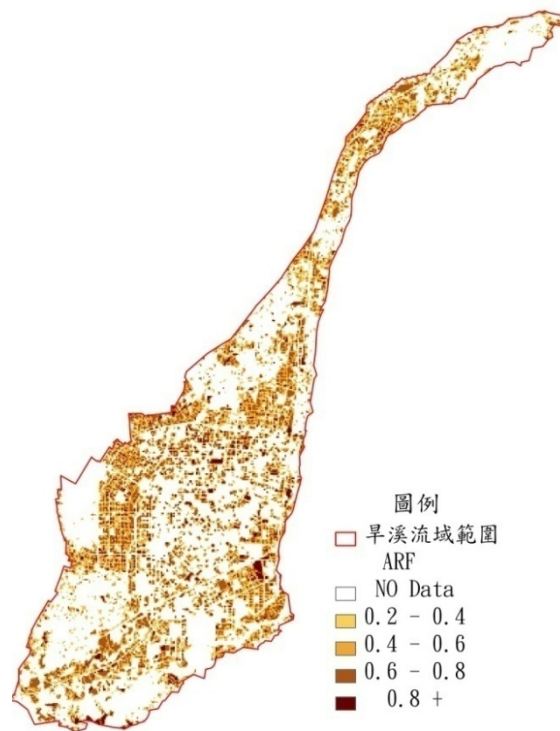


圖 3.29 早溪流域 1997 年 ARF 分佈圖

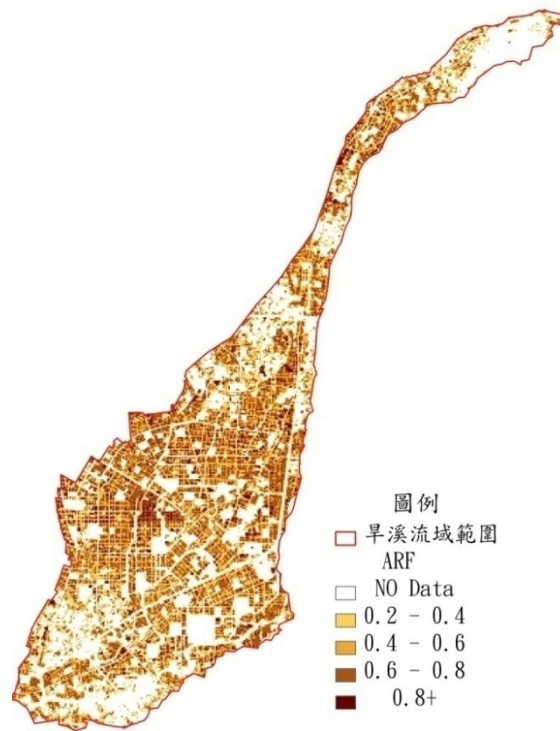


圖 3.30 早溪流域 2007 年 ARF 分佈圖

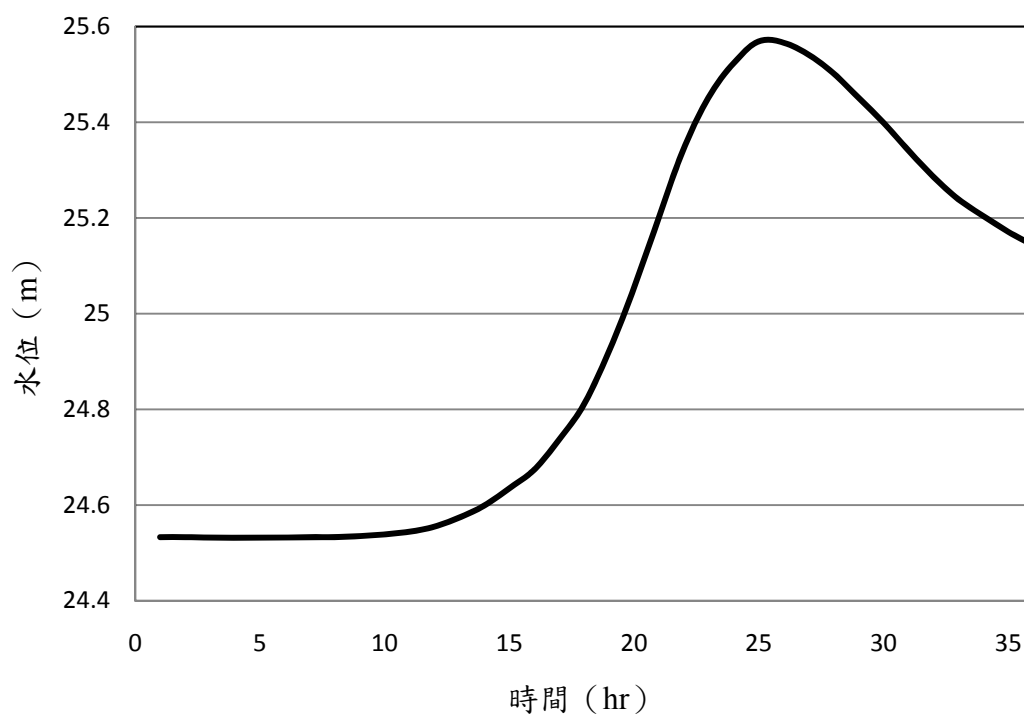


圖 3.31 筏子溪下游邊界水位歷線

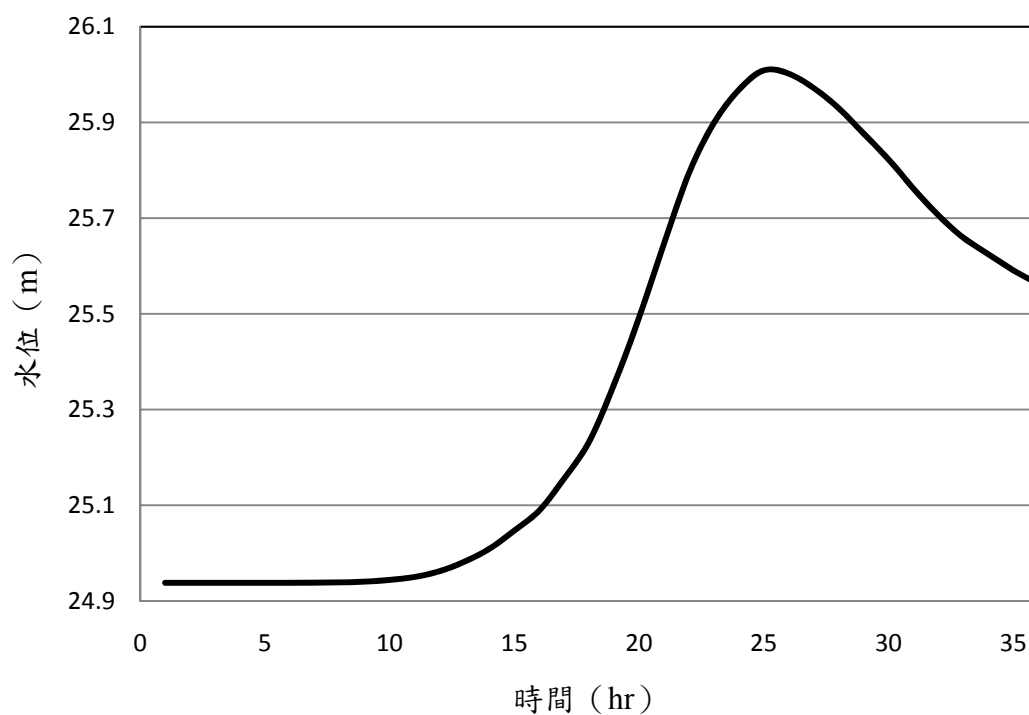


圖 3.32 旱溪下游邊界水位歷線

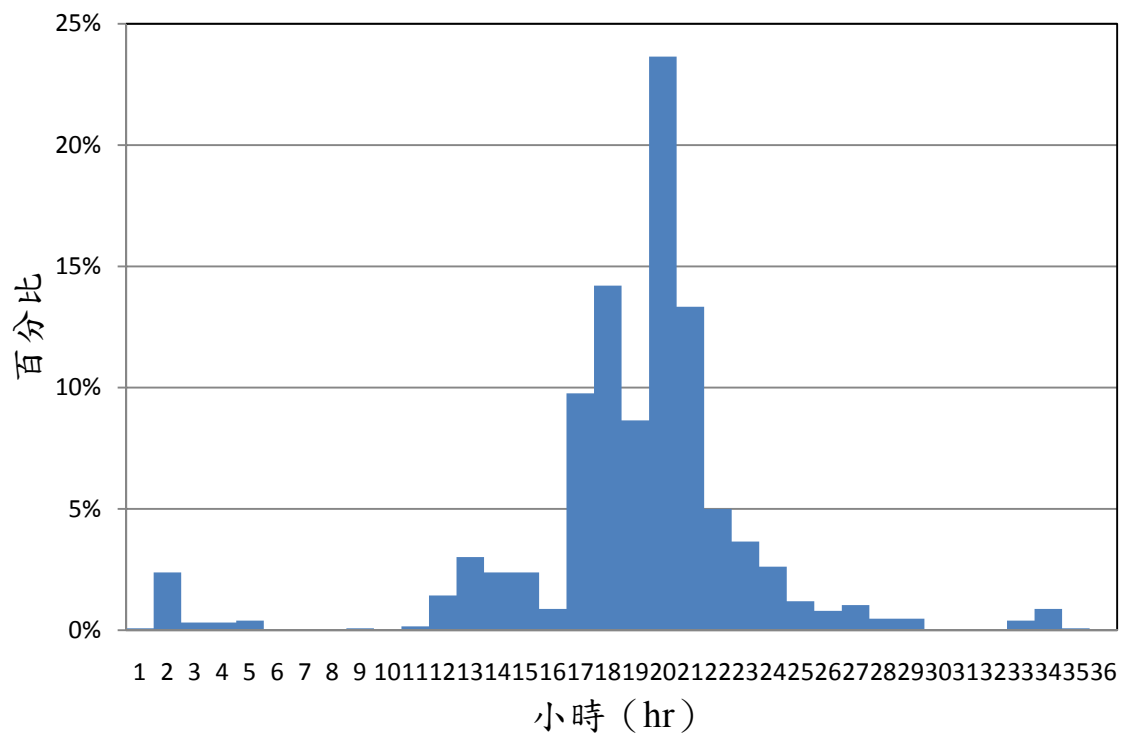


圖 3.33 卡玫基颱風大坑站真實雨型

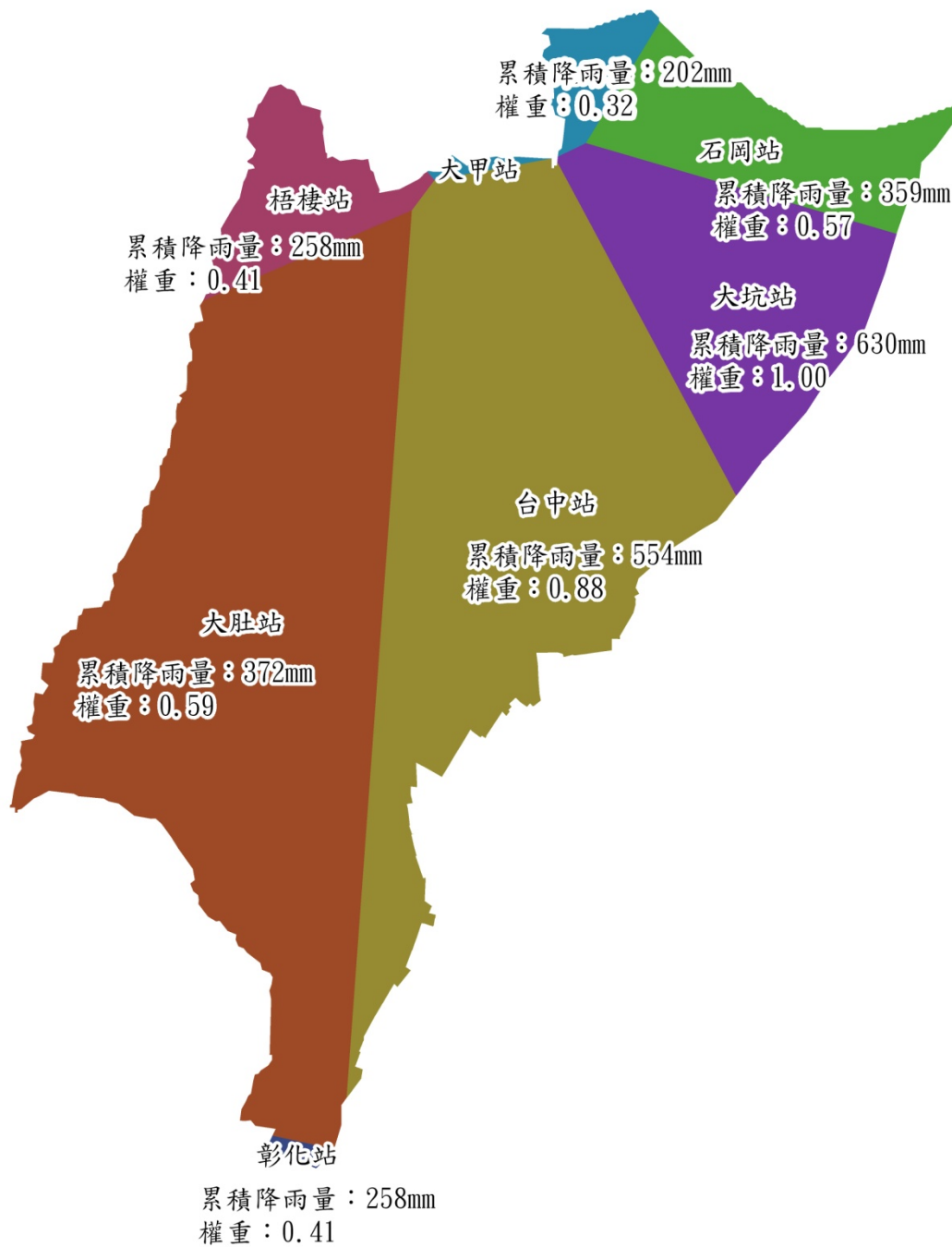


圖 3.34 筏子溪流域於卡玫基颱風之雨量權重分部圖

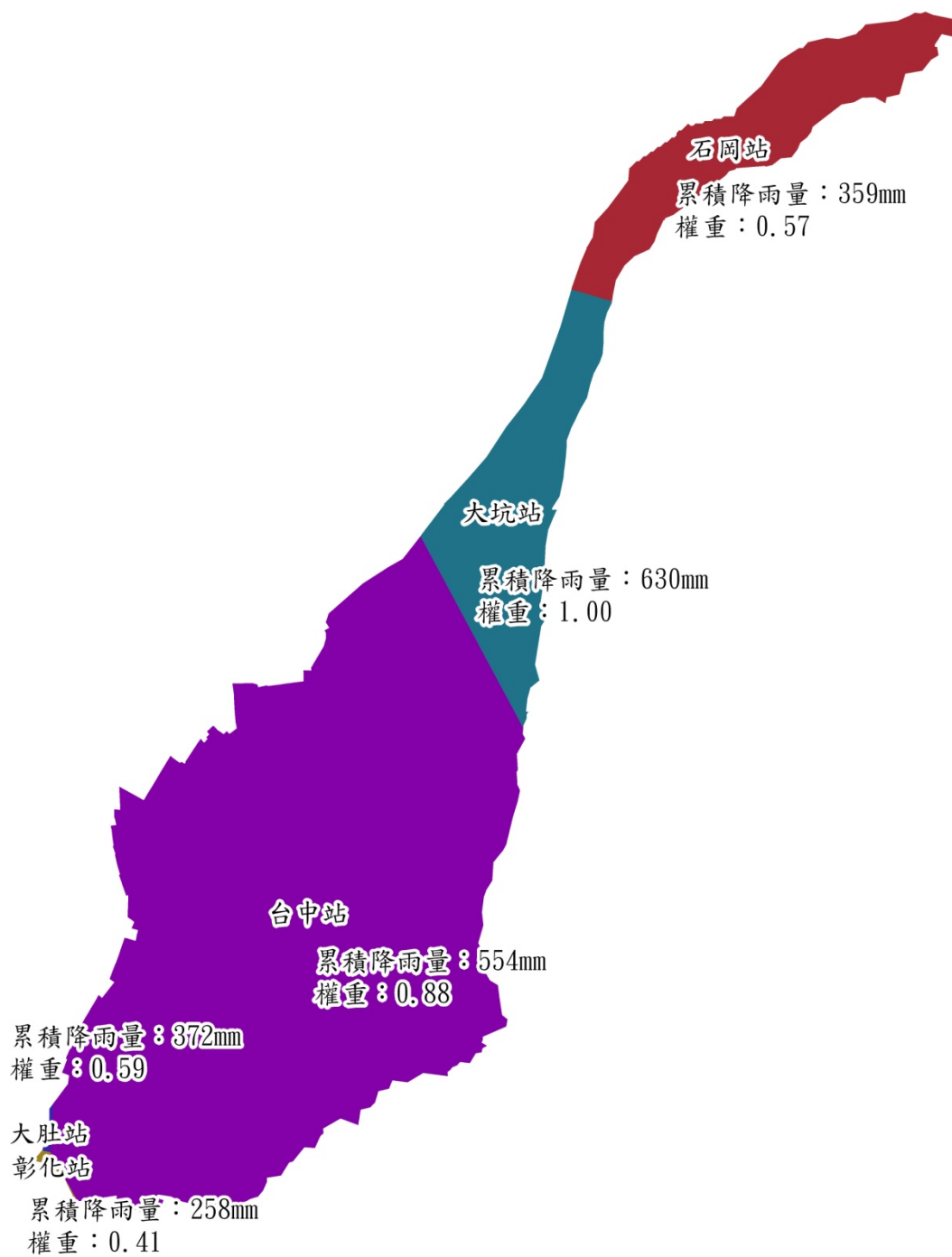
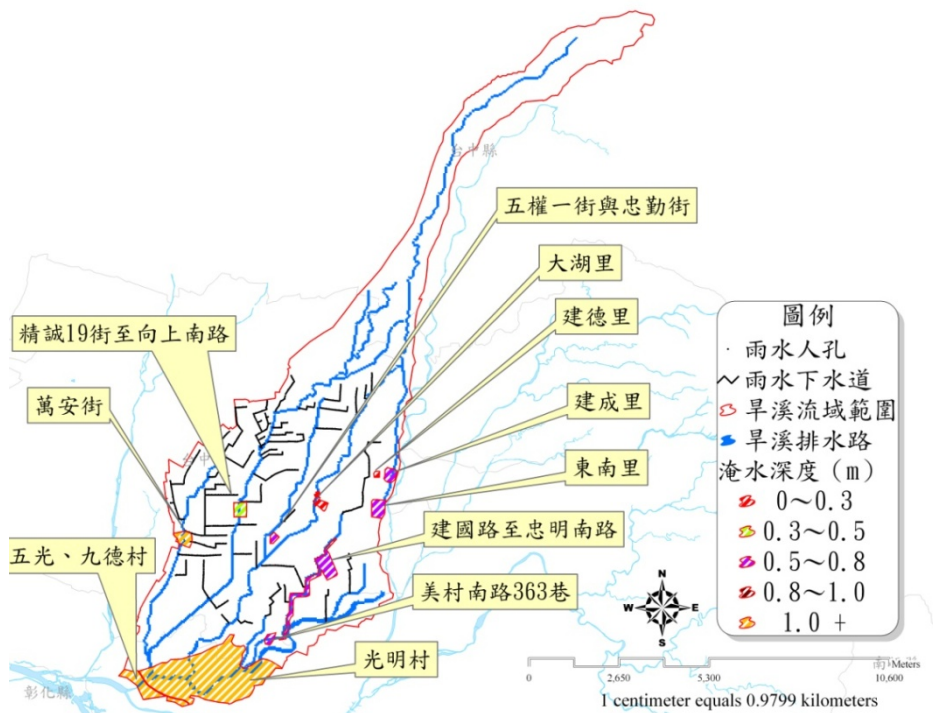


圖 3.35 旱溪流域於卡玫基颱風之雨量權重分部圖



[資料來源：經濟部水利署第三河川局、逢甲防災中心]

圖 3.36 筏子溪流域於卡玫基颱風之淹水調查圖



[資料來源：經濟部水利署第三河川局、逢甲防災中心]

圖 3.37 旱溪流域於卡玫基颱風之淹水調查圖

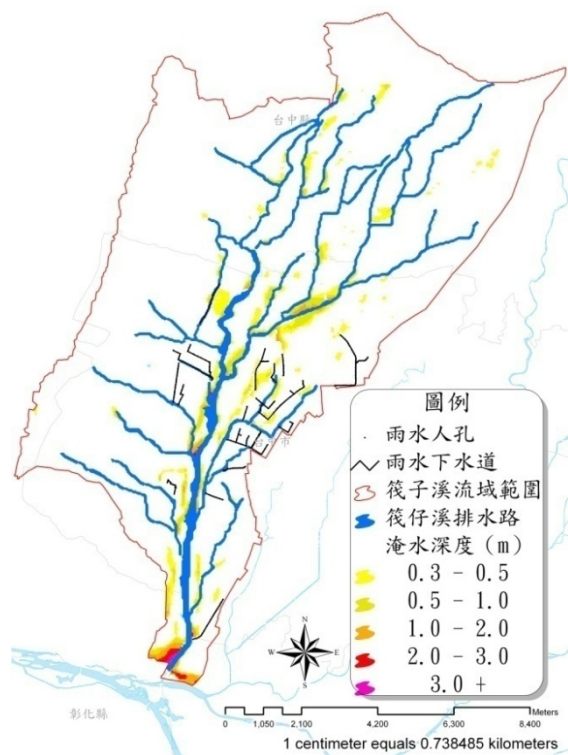


圖 3.38 整合演算法於筏子溪流域之模擬淹水圖

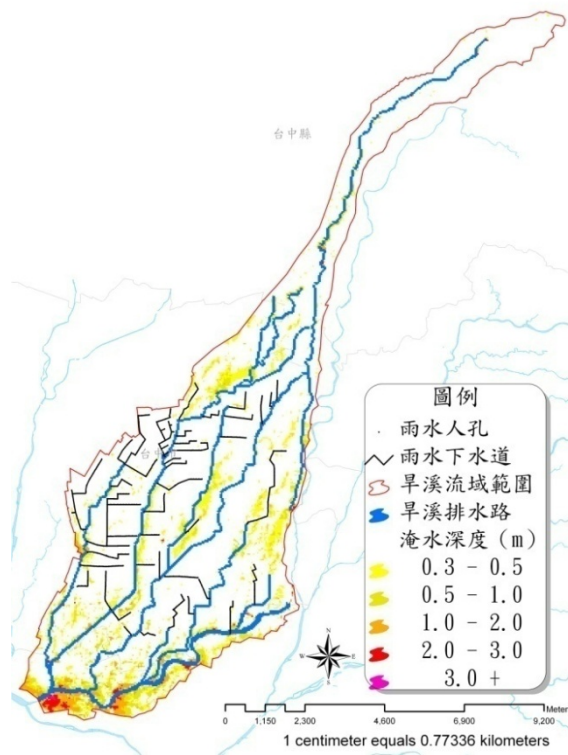


圖 3.39 整合演算法於旱溪流域之模擬淹水圖

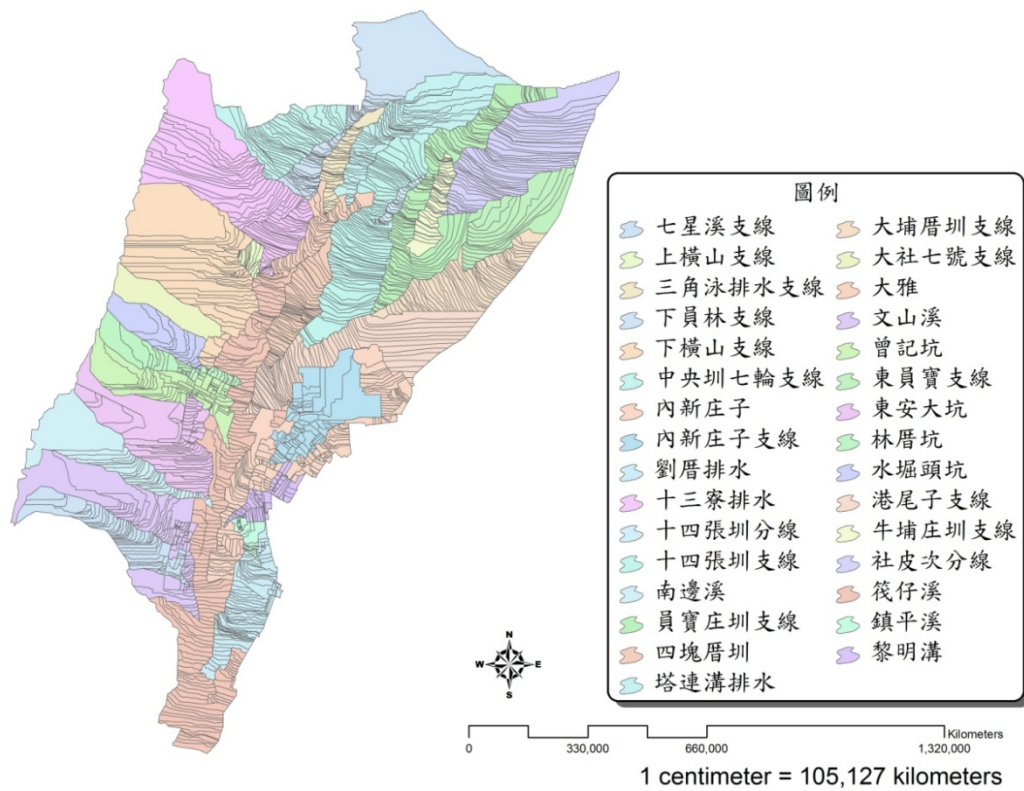


圖 3.40 地表子集水區劃分示意圖

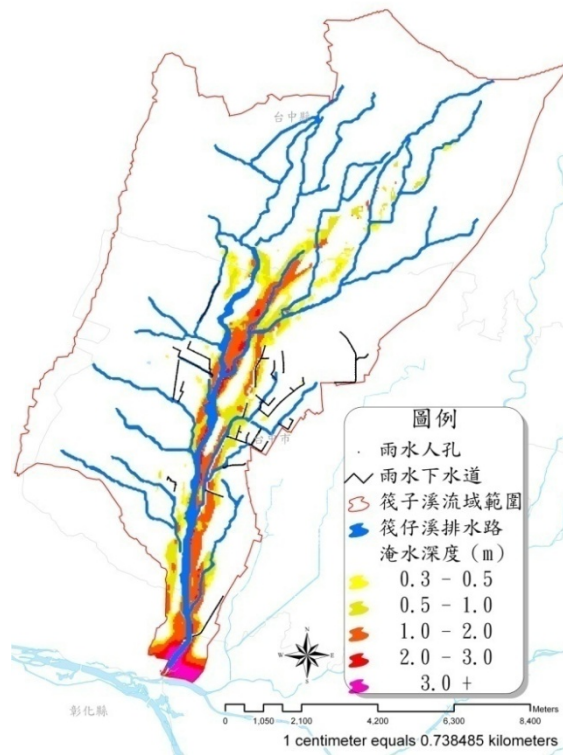


圖 3.41 分離演算法於筏仔河流域卡玫基颱風事件之模擬淹水圖

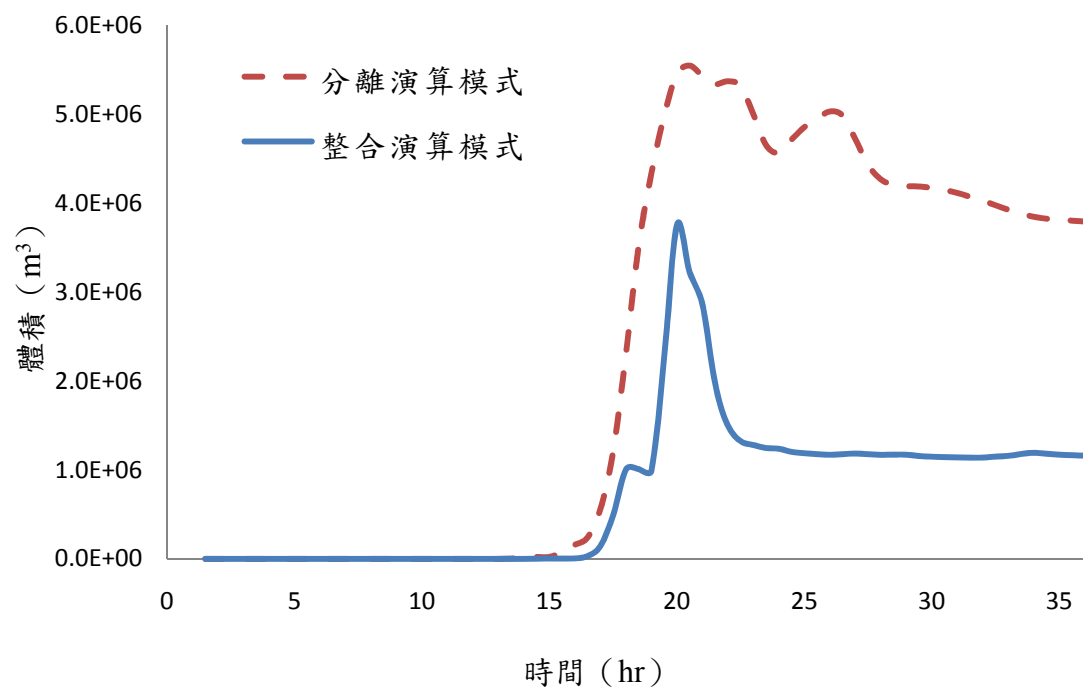


圖 3.42 整合與分離演算法模擬筏子溪流域卡玫基颱風事件淹水總體積比較圖

第四章 都市化與氣候變異境況設定與模擬分析

經第三章之資料蒐集以及模式驗證後，本研究採用整合演算法進行淹水模擬演算，並以都市化與氣候變異為主要探討變數，進行境況設定與模擬成果分析比較，藉此評估環境變異與氣候變異兩因子對於都會地區所帶來之淹水衝擊。

本研究對於淹水之定義參考經濟部水利署水利規劃試驗所『台中市及周邊排水淹水潛勢與預警系統建立之研究』(2004)之報告內容，其對於一般淹水災害定義可分為兩種，其一為工程設計所用之一次降雨事件浸水深度在 30 公分以上區域稱之；另一則為災害救助之定義，淹水達 50 公分以上稱之，如『水災公用氣體與油料管線輸電線路災害救助種類及標準』第二條或前台北市政府針對三重大淹水事件所訂定三級賠償通案賠償之最低標準中皆有所規定。本研究所探討之議題為衝擊評估，其將提供後續工程設計及災害風險評估之參考，因此本研究對於淹水深度定義係以 30 公分以上為主要淹水區域判斷依據。

本章依據上述境況模擬之方向以及對於淹水深度之定義，進行整體衝擊評估之分析探討，其境況設定之架構、成果分析討論，如下各節所述。

4.1 境況設定架構

本節針對本研究所探討之都市化以及氣候變異，進行時間點之定義，用以界定都市化以及氣候之變異，於都市化分為 1997 年都市化程度與 2007 年都市化程度；氣候變異分為氣候變異比較期以及氣候變異現況。根據定義設定四種組合情境，其整體模擬流程及設定架構如圖 4.1 所示，並情境別內容以及說明如表 4.1 所示，其中情境 1 為 1997 年都市化程度與氣候變異比較期之組合，其用以表示原始基礎狀態；而情境 2 為 2007 年都市化程度與氣候變異比較期之組合，用以表示只

考慮都市化程度的環境變異因子；情境 3 則為 1997 年都市化程度與氣候變異現況之組合，用以表示只考慮氣候變異之環境變異因子；而情境 4 為 2007 年都市化程度以及氣候變異現況之組合，用以表示目前正在發生中之情境。藉由上述之情境設定及模擬，交叉分析其對都會區所帶來之淹水衝擊。

對於都市化而言，由於近年來大台中都會地區以幾近全台最快的都市發展速度，明顯的改變整體地形及地貌，由最早日治時期之舊市區規劃，一直到近年所推動的台中科學園區以及整體都市重劃，包括一到十四期之期數重劃、細部規劃、特定區計畫、鄉街計畫、市鎮計畫等，其整體產業結構及土地利用型態走向密集且多元之運用層次。目前，土地重劃已進行至十二期，而十三期土地重劃亦已接近完成，隨著一期接著一期市地重劃，與科學工業園區之建造完成度愈來愈高，間接改變水文循環與災害系統的環境。因此，為了要評估其所帶來之衝擊，本研究針對大台中都會區之都市化情境，進行不同都市化程度之分析探討，其參考台中都會區市地重劃推動期別與開發時間，並以蒐集 1997 年以及 2007 年所完成之土地利用數化資料為主要都市化程度之不同區分。

本研究之建構模擬原則為採取研究區域內實測水文資料，並非透過 IPCC-AR4 氣候變遷預測模式進行境況模擬，故本研究稱之為「氣候變異」以示區別。因蒐集資料之種種限制，本研究將以 1980 年至 1999 年之實測水文資料做為氣候變異之比較期，並以 1980 至 2009 年資料建構氣候變遷後情境，其分析資料長度共 30 年。此外，於資料蒐集上，依據研究流域附近範圍進行資料年限較長之雨量測站蒐集，發現研究區位於平地都會區之雨量測站設點較山區少，且擁有較長記錄年限之雨量測站更是屈指可數，本研究礙於資料記錄年限需大於三十年，以

及雨量資料必須為較完整之逐時資料，選用台中站進行主要分析測站，其測站位於台中市精武路 295 號，為都會區中之測站屬氣象局列管，由 1896 年設站至今資料記錄長度長達 50 年以上，於各方面條件上皆符合本研究之需求，因此採用此測站之資料進行分析。

透過都市化程度之不同以及氣候變異比較期與現況之區分，其區分時間軸示意如圖 4.2 所示。以下各節將個別分析探討土地利用之改變情形以及降雨情境之比較設定。

4.2 土地利用分析

根據內政部地政司所提供兩次土地利用調查之數化資料，先將其資料以第二次調查之土地使用分類系統表作為依據，進行一致性之統合，並以 Arc GIS V.9.2 之系統服務進行各類用地面積之計算，其兩流域中各用地面積並占總流域面積比例整理如表 4.2 所示。由表可知，由於都市計畫及用地架構之改變下，於筏子溪流域因都市化之影響造成農業用地下降 15%之多，並整體交通用地與建築用地皆有明顯之上升趨勢，分別上升 3%以及 12%，其說明筏子溪於都市化之過程中，整體之用地類別由原本的農業轉變為以交通、商業以及住宅為主。並因交通以及建築用地之快速增加下，形成與水爭地之現象，由原本之農田灌溉水路以及區域排水路，鋪蓋為箱涵、雨水下水道排水系統之地下化構造物以供交通用地使用，其整體減少之比例為 4%，也因此形成大臺中都會地區渠道以及雨水下水道交雜之水流模式；而旱溪流域之農業用地則因日治時期，原臺中市舊市區即展開土地規劃，對於都市開發方面較早，農業用地相對於整體流域中所佔面積比例即較少，但在近年都市計畫之快速發展下，其農業用地於旱溪流域亦有與筏子溪流域相同之下降趨勢，只是其降幅並無筏子溪這麼多，其只下降 4%。此外，旱溪流域與筏子溪流域之差異，在於交通用地之增減，於旱溪流

域中整體交通用地有減少之現象，此現象究其原因由數化圖層進行套疊比較發現，旱溪流域原本之道路寬度由以前較寬敞變較為狹窄，並因都市規劃之原因其道路附近之建築用地皆以規劃為較寬大且完善之商業住宅區為主，因此，交通用地有下降之情形，其下降約 6% 左右。而水利用地與建築用地之增減情形即與筏子溪相符，其分別水利用地下降 2%，並建築用地增加 16%。

根據都市化程度之不同土地利用情形對淹水所帶來之影響，本研究以卡玫基颱風為例，模擬 1997 年都市化程度之淹水情況，藉此，與所驗證之淹水模擬圖進行分析比較，其 1997 年都市化程度如發生卡玫基颱風事件，其淹水模擬成果於筏子溪流域將如圖 4.3 所示；而旱溪流域如圖 4.4 所示。其淹水範圍以及淹水體積比較表，如表 4.3 所示，其淹水範圍於筏子溪流域 2007 年都市化程度增加 11.59%，而旱溪流域則增加 26.84%；淹水體積於筏子溪流域增加 3.71%，而旱溪流域則為 20.91%。

此外，本研究亦比較其筏子溪流域四個斷面位置，如圖 4.5 所示，以及旱溪流域三個斷面位置之流量歷線，如圖 4.6 所示。於圖 4.5 筏子溪流域中選取位置，a 點為近年來快速發展之臺中科學園區附近、b 點為港尾子溪排水系統之下游、c 點為流域中都會區行政中心精華地段之下游以及 d 點為流域最下游，在不同時期都市化程度之流量歷線比較後發現，尖峰流量隨著近年來之快速開發而有所增加，並尖峰流量到達亦隨之提前，其中以 c 點為例，洪峰流量之增加量約為 16.39%，主要原因在於都會地區之開發，使建築用地面積快速增加，在考慮面積折減因子下，地表儲蓄量隨之減少並逕流速度隨之加快，如再加上上游雨水下水道快速集流之特性，當各排水系統洪峰流量齊至時，不僅到達時間提前 1 小時，其增加量亦相當可觀；反觀開發程度較不密集

之 b 點，其洪峰流量之增加量 8.11% 則為較為不明顯。另外，在 a 點臺中科學園區之部分洪峰流量增加量約為 7.33%，洪峰到達時間約提前 0.5 小時，透過土地利用之比對後可知，雖然臺中科學園區之開發相當密集且迅速，但由於其規劃過程中加入防災設計概念，於園區中設置滯洪池，故其洪峰流量雖然有增加，但部分增加量滯流於上游，使整體洪峰流量增加幅度不至於太大。最後，以筏子溪流域下游出流鄰近之流量歷線進行比較，亦可看出整體流域受都會區快速變遷之影響，洪峰流量增加量約 16.77%，並到達時間提前約 1.5 小時。

旱溪流域之尖峰流量增量及到達時間亦有與筏子溪流域相同之趨勢，在旱溪流域中分別選取，e 點柳川排水路之中游、f 點綠川排水路之下游，以及 g 點土庫溪排水下游進行流量歷線之比較，以其洪峰流量改變之幅度而言，於下游之 f 點以及 g 點之增加幅度大於中游之 e 點，其主要原因在於旱溪流域之土地利用改變集中於下游都會區，並其排水特性為所有排水路，均匯入下游之旱溪進行排水，因而當流域中土地利用因都市計畫而產生改變，其尖峰流量增量就會快速向下游傳遞，使下游產生嚴重之淹水災害，其洪峰流量增量分別於 f 點約為 23.6% 以及 g 點約為 27.4% 之多，反觀中游之 e 點則因上游之土地利用改變程度較低而較為不明顯，增量約為 1.24%。因此，由旱溪流域之比較中再次證實在都會地區快速土地利用改變下，確實會帶來洪峰流量之增加，並其改變幅度隨著建築、交通、工業用地等，都會地區常見土地使用型態之占地率愈高，淹水災害之衝擊就愈明顯。

4.3 降雨情境之探討

關於氣候變異降雨情境之探討，本研究採用記錄資料長度較長，且記錄較完整之臺中站作為主要分析對象，根據蒐集整合資料年份為 1980 年至 2009 年共三十年。並將其資料分為 1980 年至 1999 年為氣候

變異比較期以及 1980 年至 2009 年為氣候變異現況，藉此探討其氣候變異情況。

根據資料本研究將 24 小時累積雨量達 130mm 以上之降雨事件，以 1999 年作為分界進行次數之統計，可發現 1999 年以前於臺中站之平均發生次數為 1.25 次，而 1999 年以後之平均發生次數為 2.1 次，整體發生次數增加 0.85 次，其次數統計圖如圖 4.7 所示。此外，根據情境模擬之需求，本研究進行降雨資料之頻率分析成果以及設計雨型之建置，其詳細內容探討說明如下。

1、 頻率分析

雨量資料之序列選擇方式，採非年計之極端值選用法，於氣候變異比較期選出 1980 年至 1999 年間，最大降雨之連續 24 小時序列資料 20 筆，並於氣候變異現況選出 1980 年至 2009 年間資料 30 筆，以其為主要輸入資料分別進行頻率分析，其分析結果如表 4.4 所示。

於情境模擬之降雨頻率年設定，本研究參考『易淹水地區水患治理綱要計畫』之設計標準，以中央管河川 100 年重現期距之設計原則進行境況模擬，藉此，評估都市化與氣候變異對於模擬區域中之中央管河川筏子溪，以及其他公告區域排水之淹水衝擊。於分析結果表中 100 年之累積頻率降雨量可發現，氣候變異現況之頻率降雨量相較於氣候變異比較期有增加之趨勢，其增加之比例為 30% 左右。

2、 設計雨型之建置

於設計雨型之建置，由 1980 年至 1999 年之氣候變異比較期，與 1980 年至 2009 年之氣候變異現況，分別選取連續 24 小時累積降雨量最大之七場降雨事件進行分析，並以同位序法建置設計雨型，其分析成果如圖 4.8 所示。由圖中可發現，氣候變異比較期之設計雨型尖峰百分比為 16.2%，其較氣候變異現況之設計雨型尖峰百分比 15.6% 為高，

於氣候變異現況中略減 0.6%，但整體雨型兩者無太大之差異，由此可知，氣候變異對於雨型之變化並無太大之改變。

4.4 都市化對淹水之衝擊

關於都市化對於淹水之衝擊，本研究首先以卡孜基颱風事件為模擬標的，分析模式設定之各項參數對於都市化所帶來的淹水衝擊，由於都市化之衝擊對於模式參數的影響將涉及，曼寧 N 值、入滲指數(CN)以及面積折減因子(ARF)，因此，本研究以民國 86 年之淹水模擬成果為基礎狀態，藉由上述各項參數之逐項改變，比較其淹水體積之差異，於表 4.5 最大淹水總體積之比較下可發現，都市化下面積折減因子對於淹水之衝擊為最大，由於建築物之增設使得水體之流動路徑受到阻撓，在無法宣洩之狀況下水體將會抬高水位並向周圍擴散，使得淹水體積大幅度上升，因此整體淹水體積增加 5.38%；其次為曼寧 N 值之影響，在土地利用之改變下地表糙度將隨之改變，而在大量都市用地增加的情形下，水體流動之速率將隨之提升並匯流於下游地區，使得整體排水系統宣洩不及進而增加淹水總體積，其使整體淹水體積增加 2.8%，最後為入滲指數，由於大面積之土地開發，導致透水面積大量減少，在無防洪設施改善之情形下，其地表逕流所增加之量將相當可觀，其使整體淹水體積增加 1.51%。而旱溪流域亦有相同之結果，分別面積折減因子之改變，使得淹水體積增加 17.35%；次之為曼寧糙度值之改變，使得淹水體積增加 8.00%；最後為入滲指數之改變，使得淹水體積增加 2.58%。此外，本研究分析筏子溪流域之淹水體積歷線如圖 4.9 所示，於圖中筏子溪流域之淹水總體積歷線可發現，當淹水體積歷線開始上升時，受面積折減因子之影響將為最大，其主要因整體建物之增加，而使得整體水深抬升並向外擴散，使得整體都市排水系統宣洩不及造成大量淹水，其次為曼寧 N 值之影響，最後為入滲之減少所帶來

淹水體積的增加，並如此情形一直持續到淹水體積之尖峰點。隨後進入退水階段時，其受影響之排序將有所改變，其分別受曼寧 N 值之影響最大，入滲指數次之，並面積折減因子最小，主要原因在於都市化效應，於曼寧 N 值之改變下導致地表逕流之整體流速增加，淹水水體快速集中至下游造成大面積之淹水，並於退水時期因通水斷面之不足，導致退水時間較長；面積折減因子則因淹水水體在建物之影響下，大部分水體儲存於地表，當進入退水時期，由於地表之水位較高，使得淹水水體快速排入河川及區域排水系統，因此於退水時期之淹水體積將快速減少。

此外，本研究將由情境之對應與配對進行都市化以及氣候變異之衝擊比較，於本節主要探討都市化程度之不同對於都會地區所帶來之淹水衝擊，於氣候變異比較期以及氣候變異現況分別針對其淹水體積以及淹水範圍進行討論，其於筏子溪流域以及旱溪流域之整合如表 4.6 所示，並結果分析詳述如下。

透過四種情境之分析探討，於都市化程度不同之境況中，將分為氣候變異比較期以及氣候變異現況，前者為情境 1 以及情境 2 之比較；而後者為情境 3 以及情境 4 之比較。以重現期一百年之累積降雨頻率雨量而言，筏子溪流域於 1997 年之都市化程度發展至 2007 年時，淹水體積均受到人為活動而有上升之趨勢，於 1997 年之都市化程度因都市規劃尚未成熟，地表逕流常滯留於田區並集流速度較緩慢，非但削減河川中之洪峰流量且下游溢流之情形亦隨之減少，由前節流量歷線之探討即可略知一二，也因此淹水體積較限縮於筏子溪主流附近，其整體淹水體積於氣候變異比較期以及氣候變異現況分別約為 69.8×10^8 立方公尺以及 75.8×10^8 立方公尺；而相對於 2007 年之都市程度，其都市規劃皆邁入成熟階段，整體商業行為活躍並其居住人口數亦不斷爬

升，然而，其淹水體積卻受到整體商業用地、交通用地、建築用地之影響，地表逕流因此快速排入區域排水系統以及雨水下水道系統，導致整體流域下游因各區域排水之洪峰齊至，而造成下游大範圍之淹水災情，整體淹水體積於氣候變異比較期以及氣候變異現況中，皆因此增加為 175.3×10^8 立方公尺以及 183.6×10^8 立方公尺，改變之增加量對於原先之淹水體積，於氣候變異比較期以及氣候變異現況漲幅均約為 2.5 倍，對筏子溪流域而言其改變量相當可觀。此外，於旱溪流域亦有相同之趨勢，其整體淹水體積之改變於氣候變異比較期中約為 1997 年都市化程度之 1.7 倍，並氣候變異現況中約為 2 倍。

而以淹水範圍而言，亦有與淹水體積相同之趨勢，整體筏子溪流域於 1997 年都市化程度尚未成熟時，氣候變異比較期以及氣候變異現況情境中之淹水範圍，分別為 397 公頃以及 413 公頃，而都市發展至 2007 年時，則增加至 648 公頃以及 669 公頃，其增加之幅度約為原先淹水範圍之 1.6 倍。如以淹水深度之分佈進行檢視，如表 4.7 所示，則可發現淹水深度介於 0.3 至 1 公尺之間，以及 3 公尺以上之淹水深度增加量為多，其主要原因在於筏子溪流域為長型流域，並流域中央位置又有中山高速公路以及近年來所開發之環中路橫貫其中，當地表逕流往流域中間匯流時往往因路堤效應，使水流聚其附近難以排除，以至於回流漫淹於附近地表，故淹水增加量主要集中於 3 公尺以上之匯集淹水深度以及 0.3 至 1 公尺之間之回流淹水深度，情境模擬淹水圖如圖 4.10 所示。而旱溪流域之淹水則集中於增加 0.3 至 0.5 公尺以及 2 至 3 公尺之間，如表 4.8 所示，其主要因為旱溪流域中包含大部分台中主要精華都會區，其對於極端降雨事件之衝擊較為脆弱，當降雨量過大時，雨水下水道排除不及使都會區中產生零星淹水，並其流域特性為所有區域排水路均匯集至下游旱溪進行排水，當各區域排水之洪峰流量齊

至時，水流將溢堤漫淹至地表上，因此，其淹水分佈主要增加於 0.3 至 0.5 公尺之零星淹水，以及 2 至 3 公尺之下游淹水部分，情境模擬淹水圖如圖 4.11 所示。

4.5 氣候變異對淹水之衝擊

就氣候變異而言，本節分別探討 1997 年都市化程度以及 2007 年都市化程度因氣候變異所帶來之淹水衝擊，透過情境 1 以及情境 3 之淹水總體積以及淹水範圍比較。由表 4.6 中可知，兩流域中整體淹水體積隨著氣候變異而有所增加，其筏子溪流域於 1997 年都市化程度淹水體積為原本之 1.08 倍，而 2007 年之淹水體積則為原本之 1.04 倍；旱溪流域亦有相同之結果，於 1997 年都市化程度淹水體積變為原本之 1.04 倍，2007 年之淹水體積則變為原本之 1.26 倍。淹水範圍亦有相同之結果，筏子溪流域於 1997 年都市化程度淹水範圍變為原本之 1.04 倍，而 2007 年都市化程度之淹水範圍則變為原本之 1.03 倍；旱溪流域則分別為原本之 1.06 倍以及 1.14 倍。由上述可知，氣候變異所帶來之雨量增加皆會造成都會地區淹水程度上之衝擊，如再加上都市化程度之改變則其淹水災害將更為嚴重。

4.6 都市化與氣候變異之衝擊評估

就整體而言，經由上節各情境間之比較分析後，可發現都市化所帶來之淹水體積以及淹水範圍，增加幅度大於氣候變異之影響。由此可知，都會地區中因土地利用型態大量變更，改變了整體水文、水理環境，使都會區中之防災體系變的較為脆弱，因此造成較嚴重之淹水衝擊。淹水衝擊固然隨著都市發展程度愈高而愈趨嚴重，但其衝擊程度卻因都市發展階段之差異而有所不同，如比較筏子溪流域以及旱溪流域則將更為清楚，於氣候變異現況下，筏子溪流域之淹水面積因受都市化影響而有 61.9%之改變量，旱溪流域卻只有 44.9%，而淹水體積

亦有相同之趨勢，究其原因可發現，由於旱溪流域自日治時代以來即開始進行都市規劃，其規劃之範圍大部分位於旱溪流域下游，開發程度於 1997 年即相當完善，而反觀筏子溪流域，其都市規劃卻在 1997 年之後才開始有大幅度之改變，包括臺中科學園區以及都市細部規劃之部分，如此之改變讓淹水災害之衝擊較旱溪流域為大。因此，由上述可知當都市化程度愈高時其淹水災害將愈趨嚴重，並且以發展程度對淹水衝擊之影響，卻隨著都市化發展幅度愈大，淹水災害之衝擊範圍就愈廣泛。



表 4.1 情境設定表

情境別	情境設定	情境內容說明
情境 1	1997 年都市化程度及 氣候變異比較期	原始基礎狀態
情境 2	2007 年都市化程度及 氣候變異比較期	只考慮都市化的環境變異因子
情境 3	1997 年都市化程度及 氣候變異現況	只考慮氣候變異的環境變異因子
情境 4	2007 年都市化程度及 氣候變異現況	正在發生中

表 4.2 各土地利用面積比例表

流域	土地類別	1997 年都市化程度		2007 年都市化程度	
		用地面積 (ha)	百分比%	用地面積 (ha)	百分比%
筏子溪流域	農業用地	5,692.3	47.9	3,893.7	32.8
	交通用地	1,193.5	10.0	1,576.5	13.2
	水利用地	772.6	6.5	268.6	2.2
	建築用地	2,678.4	22.5	4,108.5	34.6
	遊憩用地	108.2	0.9	346.3	2.9
	礦業及土石用地	18.4	0.1	26.6	0.2
	其他用地	1,399.4	11.8	1,642.7	13.8
旱溪流域	農業用地	1,415.8	19.4	1,127.6	15.4
	交通用地	1,965.5	27.0	1,596.1	21.9
	水利用地	340.9	4.6	143.5	1.9
	建築用地	2,512.5	34.5	3,694.2	50.7
	遊憩用地	144.6	1.9	302.6	4.1
	礦業及土石用地	7.7	0.1	8.4	0.1
	其他用地	893.2	12.2	405.0	5.5

表 4.3 卡孜基颱風於 1997 年以及 2007 年都市化程度淹水情形比較

情境	筏子溪流域		旱溪流域	
	淹水範圍 (ha)	淹水體積 ($\times 10^8 \text{m}^3$)	淹水範圍 (ha)	淹水體積 ($\times 10^8 \text{m}^3$)
1997 年 都市化程度	595.0	145.1	769.60	258.2
現況	664.0	167.9	976.16	396.0
改變量	11.5%	15.73%	26.84%	53.36%

表 4.4 氣候變異頻率分析表

單位：mm

重現期（年）	2	5	10	25	50	100	200
氣候變異比較期	206	260	297	344	378	412	445
氣候變異現況	244	325	386	466	527	589	651

表 4.5 都市化於不同情況之最大淹水體積

	筏子溪流域 ($\times 10^6 \text{m}^3$)	改變量	旱溪流域 ($\times 10^6 \text{m}^3$)	改變量
基礎狀態 (民國 86 年之土地利用)	3.88	-	6.62	-
面積折減因子(ARF)之影響	4.09	5.38%	7.77	17.35%
更改曼寧 N 值之影響	3.99	2.80%	7.15	8.00%
更改入滲指數(CN)之影響	3.94	1.51%	6.79	2.58%

表 4.6 各情境於重現期距 100 年之模擬淹水情況整合表

	筏子溪流域		旱溪流域	
	淹水範圍 (ha)	淹水體積 ($\times 10^8 \text{m}^3$)	淹水範圍 (ha)	淹水體積 ($\times 10^8 \text{m}^3$)
情境 1	396.64	69.8	421.76	79.2
情境 2	648.16	175.0	566.40	140.0
情境 3	412.96	75.8	448.48	85.9
情境 4	668.80	184.0	649.76	176.0

表 4.7 筏子溪流域各情境於各淹水深度之淹水範圍及淹水體積統計

淹水深度 (m)	情境 1		情境 2		情境 3		情境 4	
	範圍 (ha)	體積 ($\times 10^8 \text{m}^3$)	範圍 (ha)	體積 ($\times 10^8 \text{m}^3$)	範圍 (ha)	體積 ($\times 10^8 \text{m}^3$)	範圍 (ha)	體積 ($\times 10^8 \text{m}^3$)
0.3-0.5	229.6	12.2	394.1	36.2	239.8	13.3	424.0	41.8
0.5-1	95.8	3.9	153.6	10.0	98.4	4.13	162.6	11.2
1.0-2.0	47.2	2.0	56.3	2.8	50.4	2.26	55.4	2.7
2.0-3.0	18.2	0.5	25.1	1.0	18.1	0.5	25.6	1.0
3.0-	5.7	0.1	10.1	0.2	6.2	0.1	10.2	0.2

表 4.8 旱溪流域各情境於各淹水深度之淹水範圍及淹水體積統計

淹水深度 (m)	情境 1		情境 2		情境 3		情境 4	
	範圍 (ha)	體積 ($\times 10^8 \text{m}^3$)	範圍 (ha)	體積 ($\times 10^8 \text{m}^3$)	範圍 (ha)	體積 ($\times 10^8 \text{m}^3$)	範圍 (ha)	體積 ($\times 10^8 \text{m}^3$)
0.3-0.5	198.1	9.2	290.9	20.0	224.2	11.8	358.2	30.4
0.5-1	137.8	8.4	164.3	12.0	143.0	9.0	179.2	14.0
1.0-2.0	75.4	4.8	96.3	8.0	71.2	4.3	95.8	7.9
2.0-3.0	8.9	0.1	13.3	0.3	8.8	0.1	14.9	0.3
3.0-	1.6	0.01	1.6	0.01	1.3	0.01	1.6	0.01



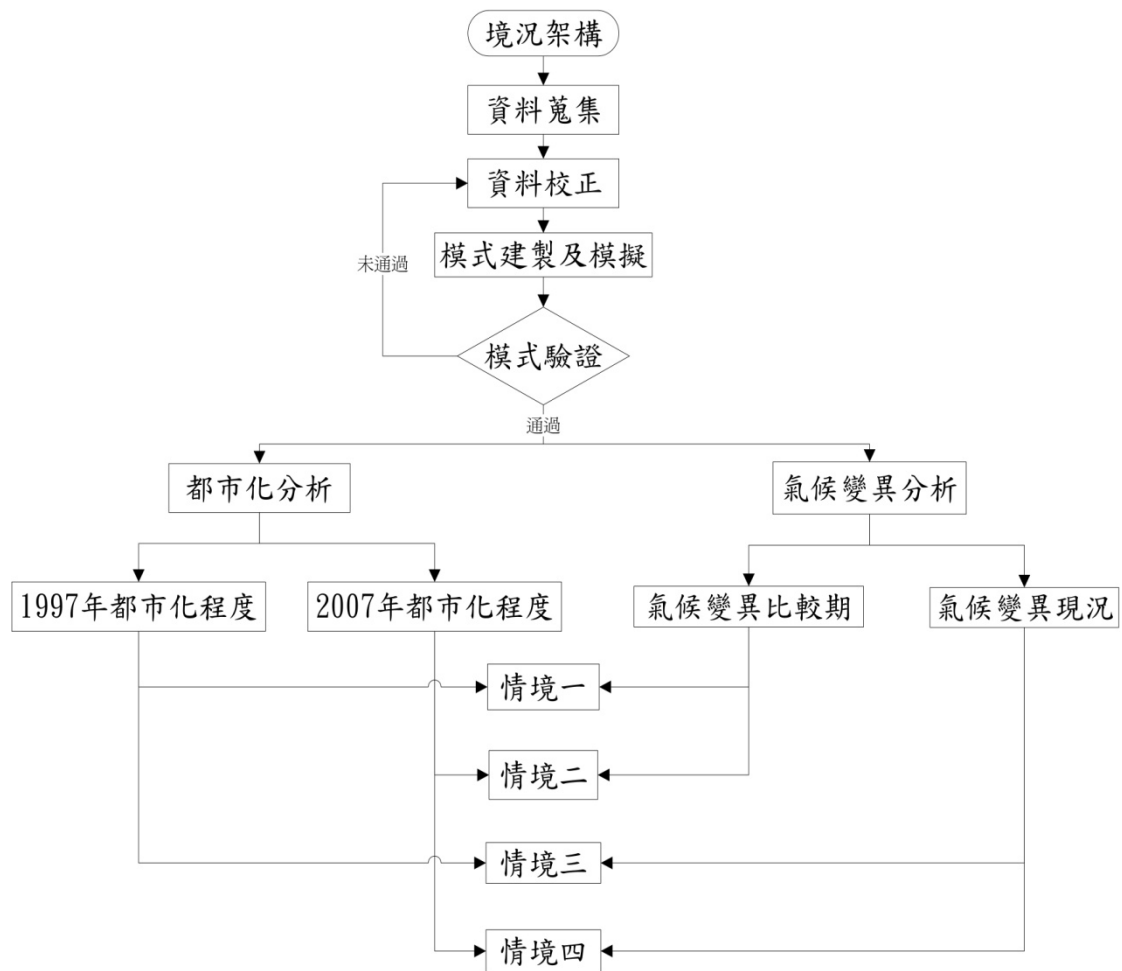


圖 4.1 情境模擬流程及設定架構圖

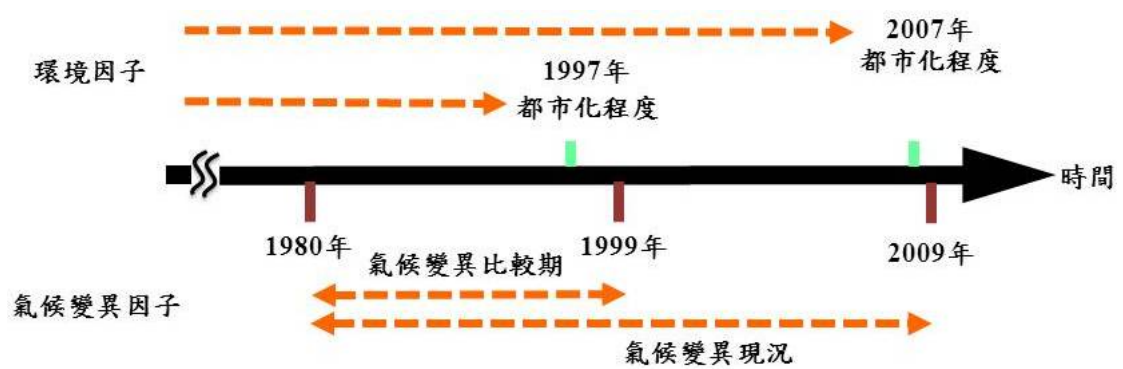


圖 4.2 情境時間軸設定示意圖

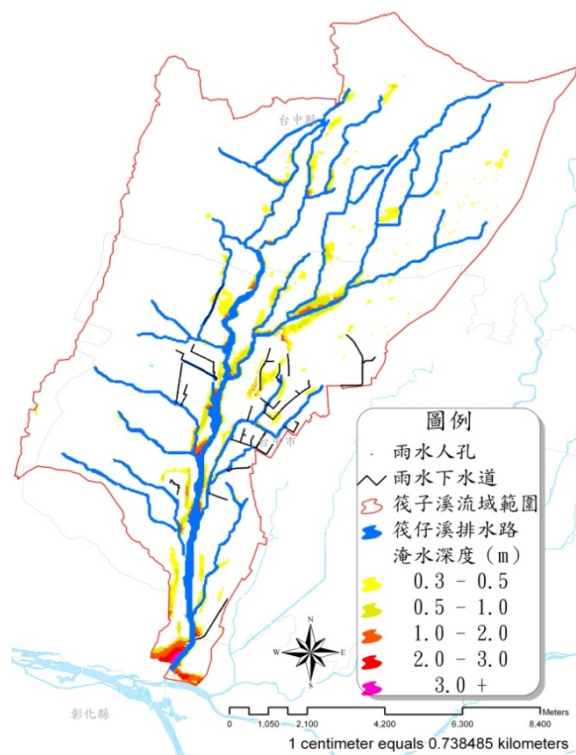


圖 4.3 卡玫基颱風於筏子溪流域在 2007 年都市化程度之淹水模擬圖

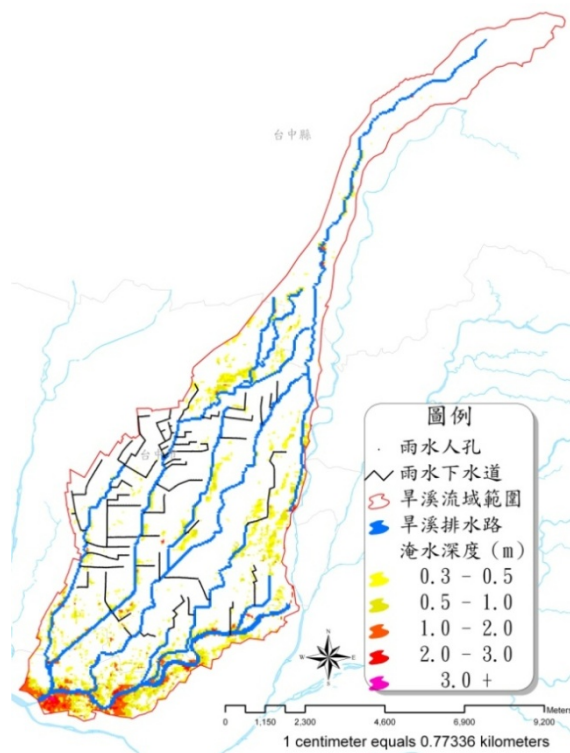


圖 4.4 卡玫基颱風於旱溪流域在 2007 年都市化程度之淹水模擬

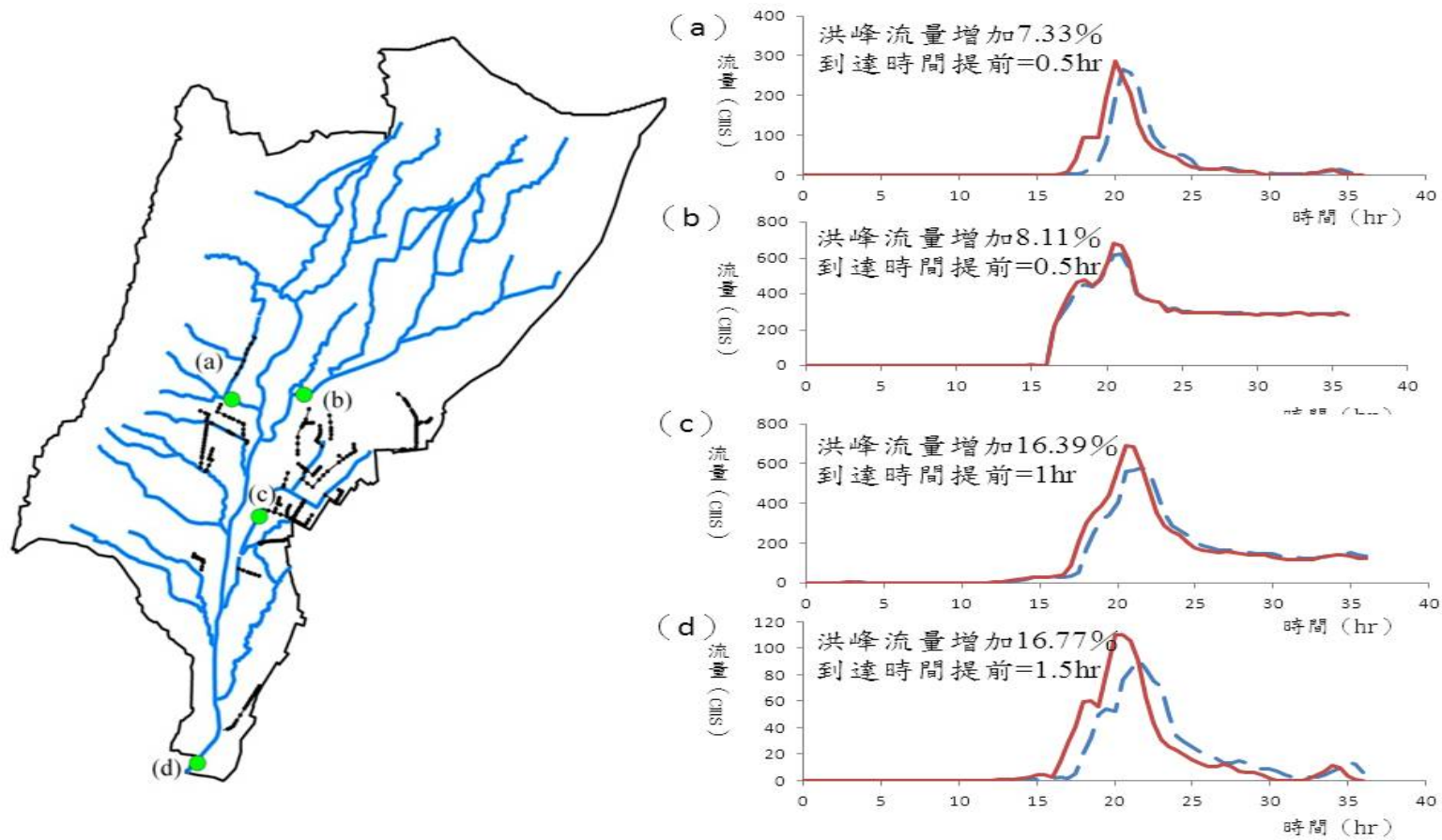


圖 4.5 卡玫基颱風於筏子溪流域在不同都市化程度之流量歷線圖

(註：虛線為 1997 年都市化程度之流量歷線；實線為 2007 年都市化程度之流量歷線)

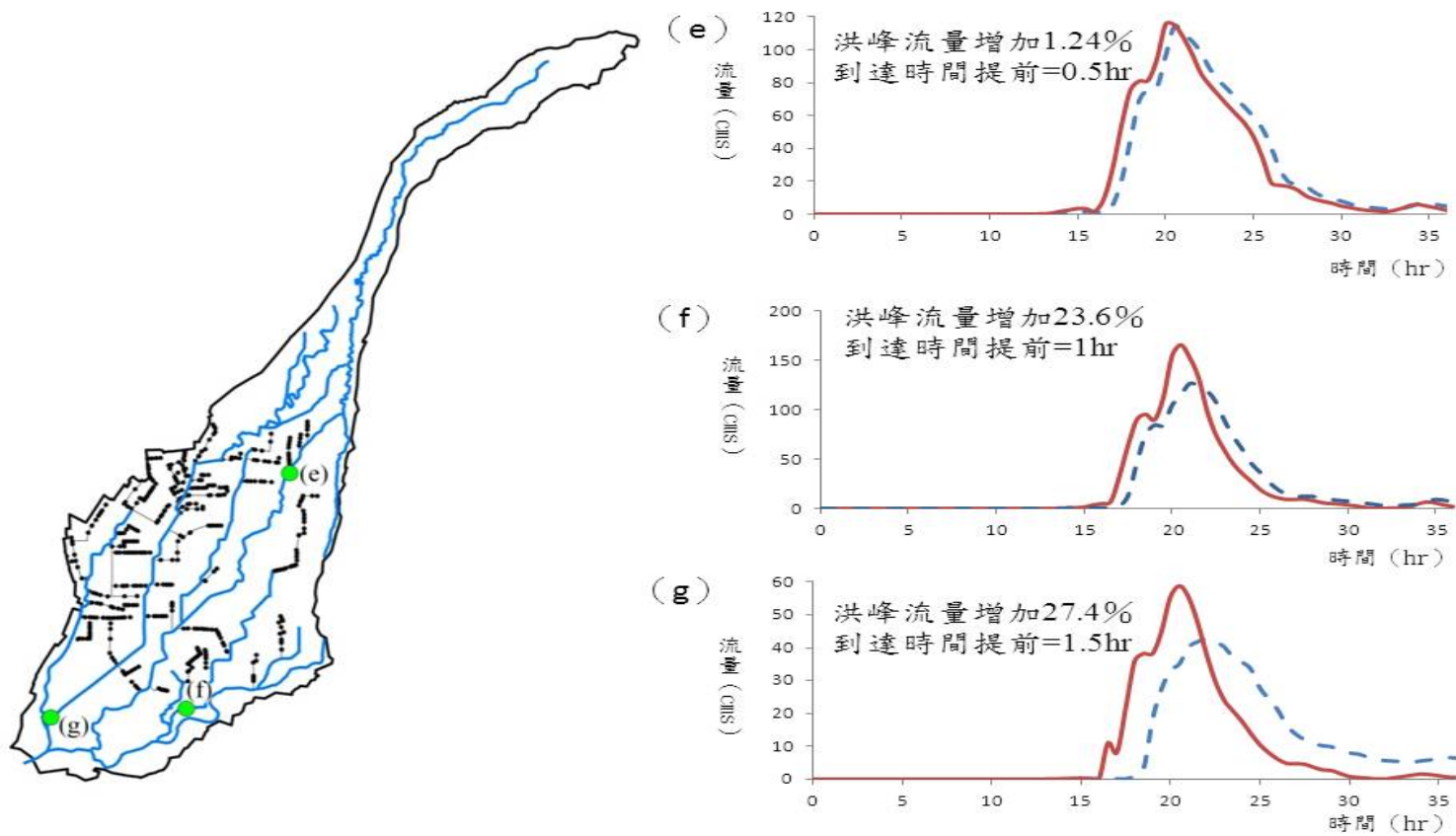


圖 4.6 卡玫基颱風於旱溪流域在不同都市化程度之流量歷線圖

(註：虛線為 1997 年都市化程度之流量歷線；實線為 2007 年都市化程度之流量歷線)

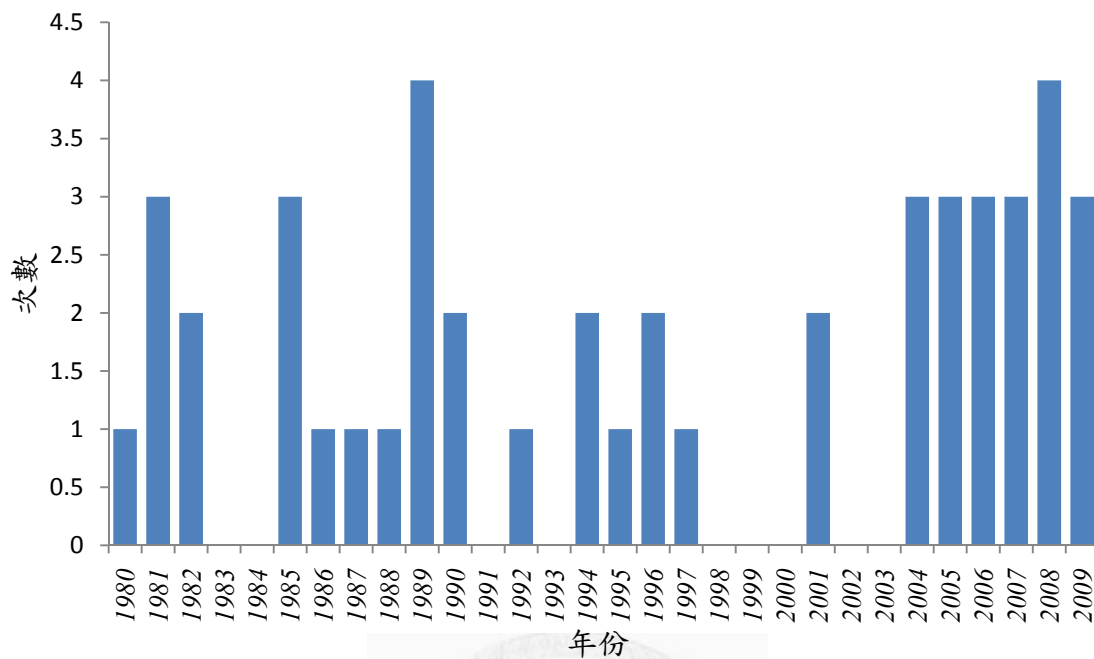


圖 4.7 豪雨事件發生次數圖

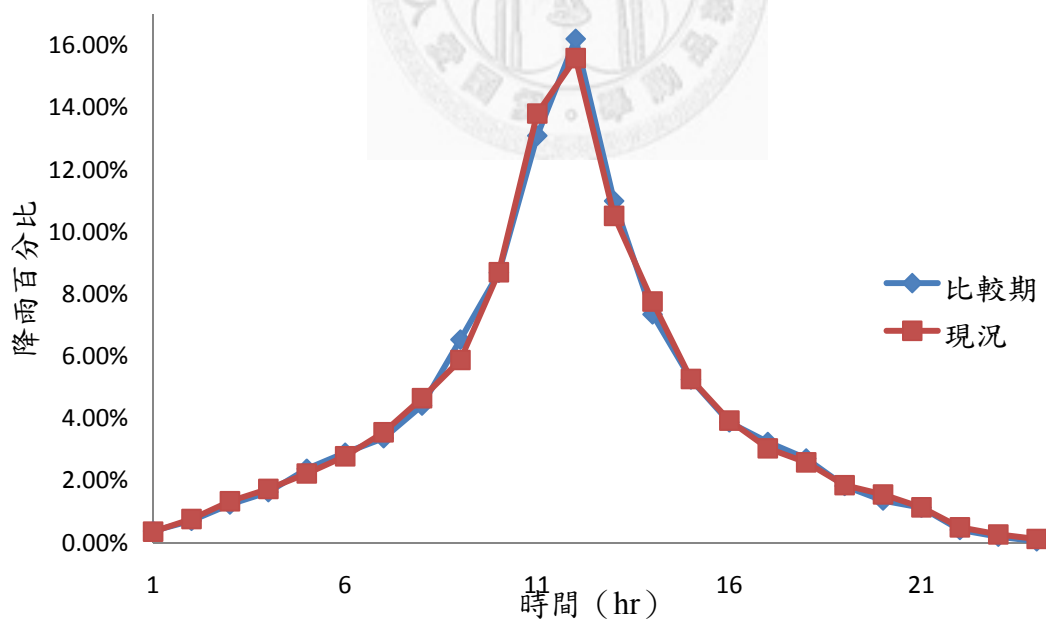


圖 4.8 氣候變異之設計雨型

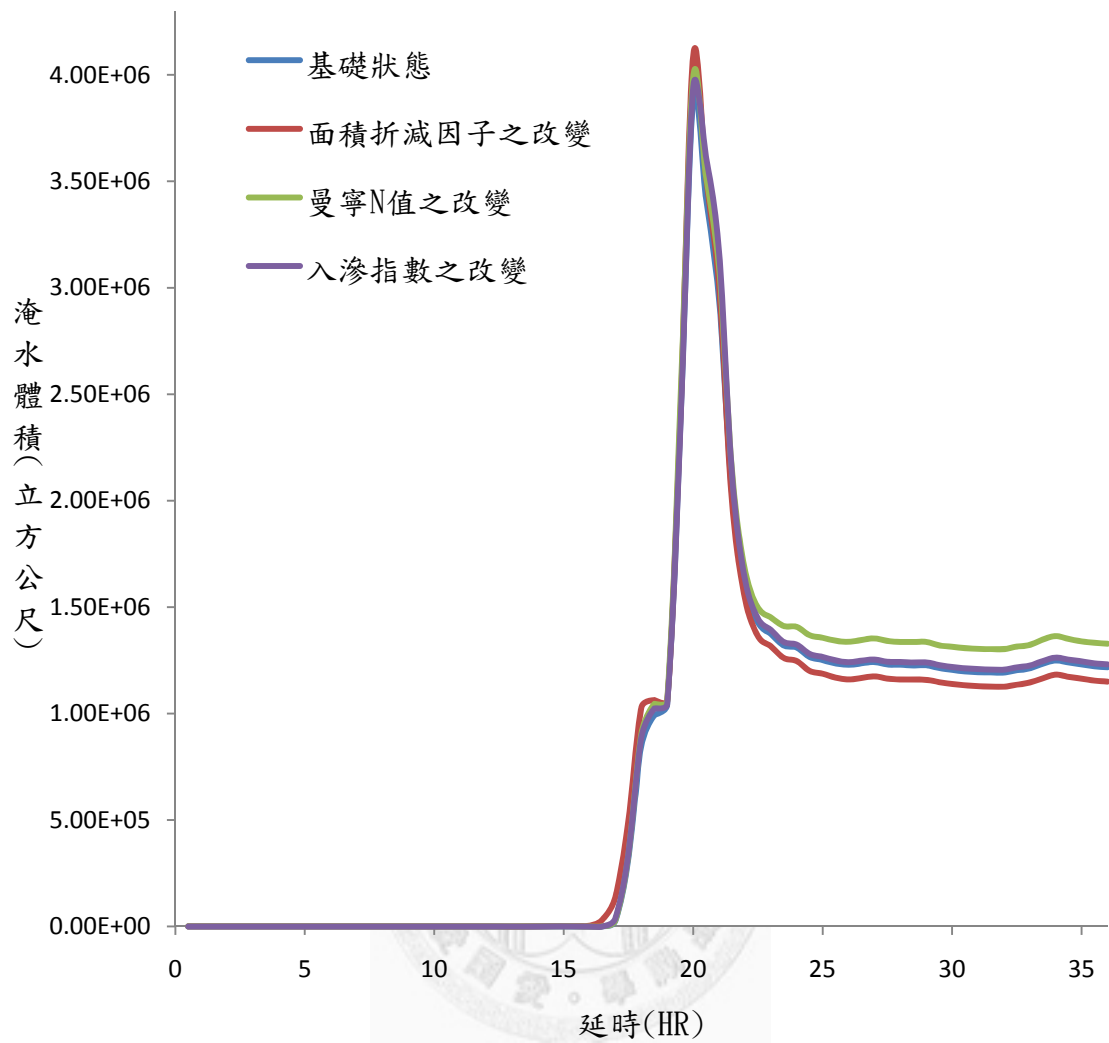
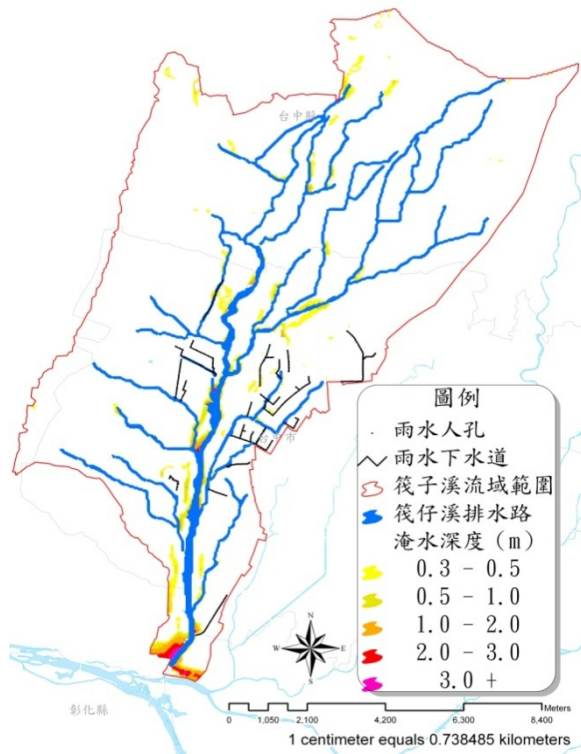
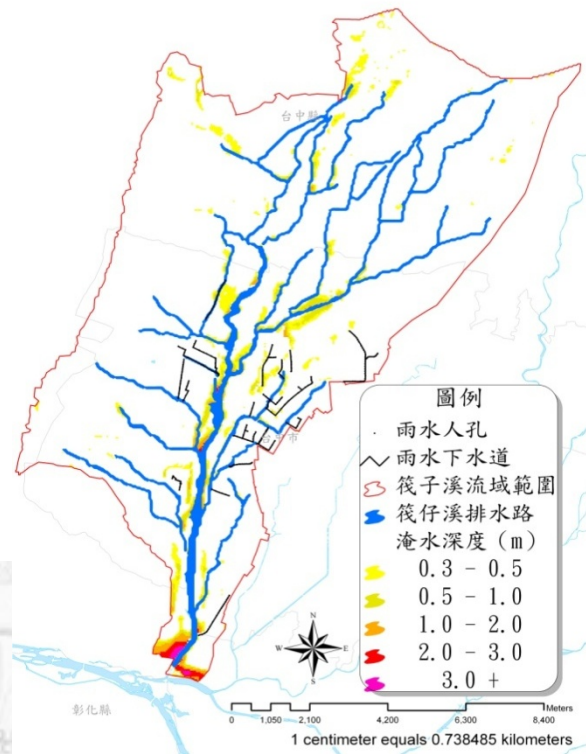


圖 4.9 都市化於不同情況之淹水體積歷線

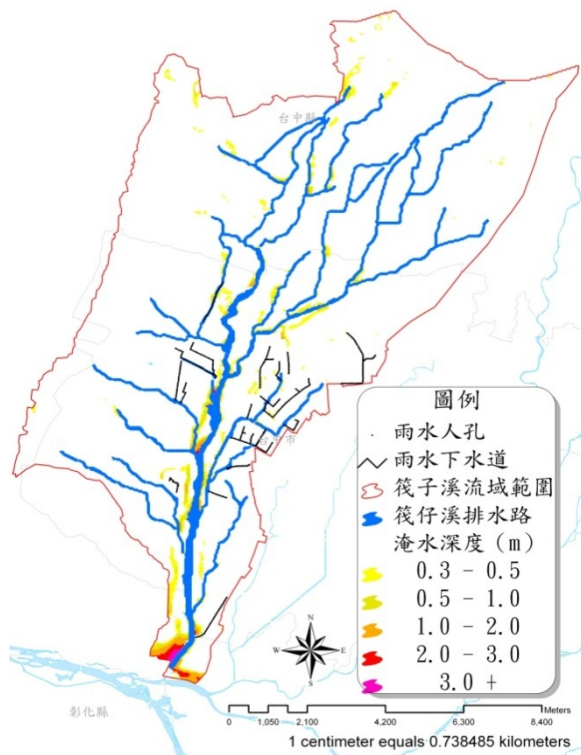
情境 1



情境 2



情境 3



情境 4

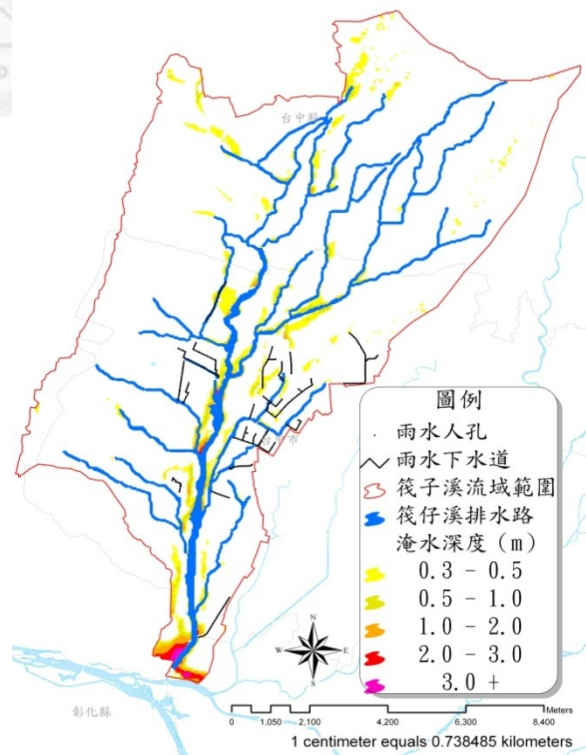
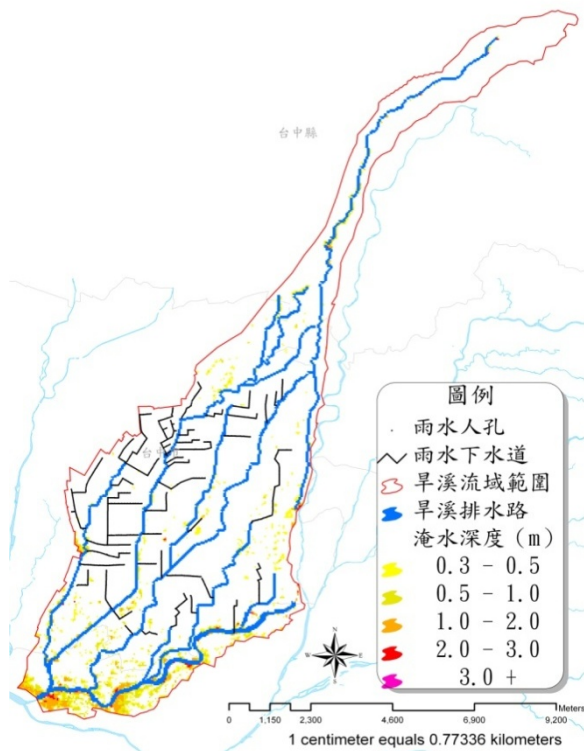
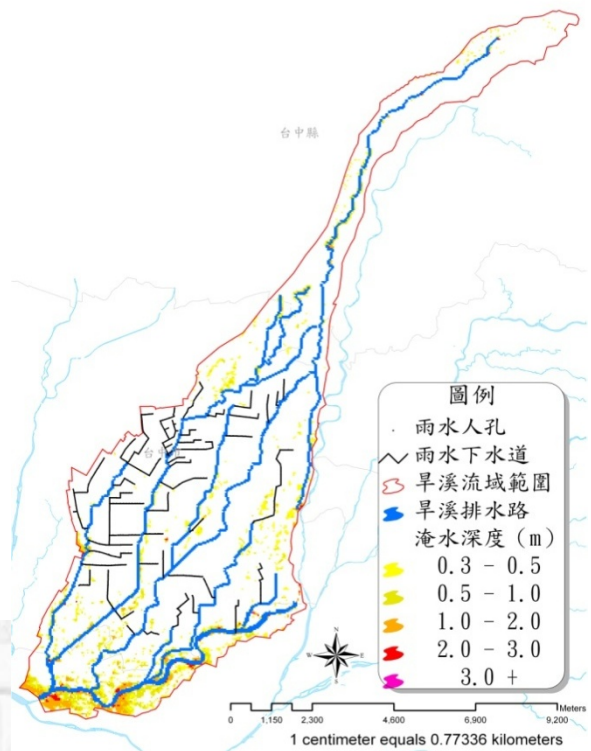


圖 4.10 筏子溪流域重現期距 100 年降雨事件之淹水模擬圖

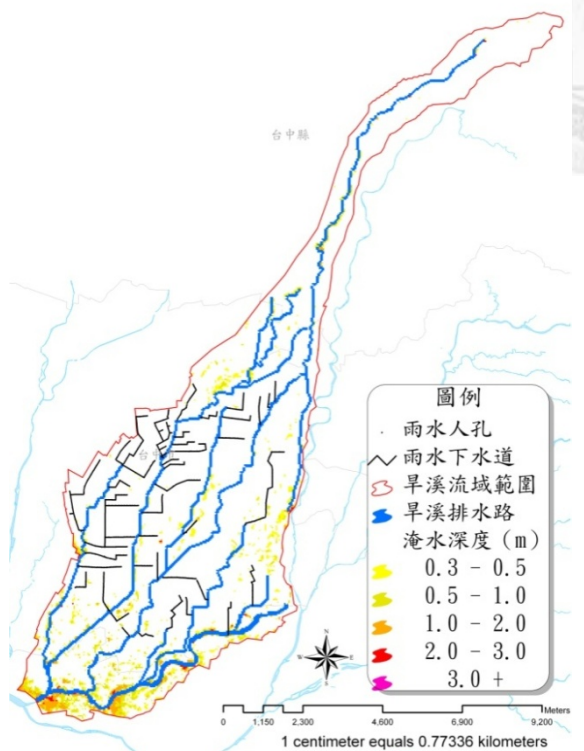
情境 1



情境 2



情境 3



情境 4

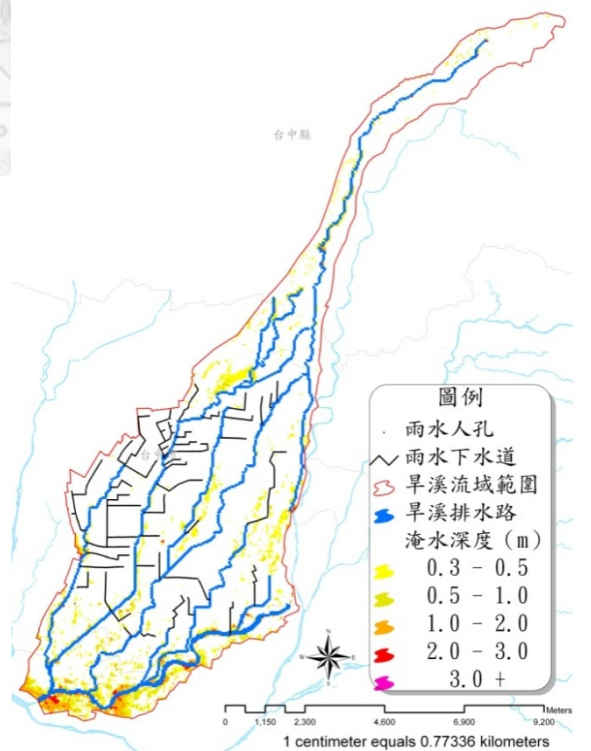


圖 4.11 旱溪流域重現期距 100 年降雨事件之淹水模擬圖

第五章 結論與建議

本研究透過分離演算法以及整合演算法之不同模式銜接方式，進行考慮漫地流、區域排水以及雨水下水道之模擬。藉由銜接模式之比較，探討其模擬之精確度，並架構設定不同之情境，希冀藉此瞭解都市化與氣候變異對於都會地區淹水所帶來之影響，以供後續都市防災以及防洪排水管理之相關應用，以下將說明本研究之結論以及建議。

5.1 結論

- 1、本研究分別以分離演算法以及整合演算法，針對筏子溪流域進行淹水之模擬，其比較結果發現，由於整合演算法中可容許雨水下水道溢流水流自由進出，得以反映出都會區中雨水下水道迅速排水之特性，使水流不因溢流而持續滯留於地表。故於低窪地區可反應退水時，雨水下水道之排水效能，而分離演算法則對此較無法完整表達。
- 2、在筏子溪流域以及旱溪流域中比較其土地利用變化情形，本研究發現因都市化效應使整體建築用地有提升之趨勢。在筏子溪流域中原水利用地區域因都市規劃之需要，而鋪蓋箱涵、雨水下水道排水系統之地下化構造物供交通用地使用；另外，在旱溪流域中則因都市規劃而縮減道路寬度，使得整體交通用地下降。
- 3、根據卡玫基颱風對於不同都市化程度之影響，其模擬結果顯示都會地區在土地利用快速變更下，確實會帶來洪峰流量之增加，且其改變幅度隨著建築、交通、工業用地等型態之占地率愈高，造成淹水災害之衝擊就愈明顯。以筏子溪流域為例，位於都會區行政中心精華地段之洪峰流量增量（如圖 4.5c），將大於開發幅度相對較低之港尾子溪下游河段（如圖 4.5b）；而旱溪流域因土地利用改變集中於下游原舊市區，當流域中土地利用因都市計畫而產生

改變，其尖峰流量增量就會快速向下游傳遞，使下游產生嚴重之淹水災害。因此，旱溪流域中位於綠川排水下游以及土庫溪排水下游(如圖 4.6f 和 4.6g)，其洪峰流量增加幅度將大於柳川中游(如圖 4.6e)。

- 4、根據中央氣象局所管轄的臺中站於 1980 年至 2009 年之逐時降雨資料分析結果，發現於氣候變異現況(1980 年~2009 年)之 100 年重現期降雨量，較氣候變異比較期(1980 年~1999 年)增加約 30%左右。另外，在設計雨型比較面上，於氣候變異現況較氣候變異比較期略減 0.6%，但是兩者之整體雨型並無太大差異。
- 5、本研究總括關於土地利用改變所帶來之淹水體積及淹水範圍的影響幅度，大於氣候變異之影響，且當都市化程度愈高時其淹水災害將愈趨嚴重。以土地利用改變之程度來看，於氣候變異現況中，筏子溪流域之淹水範圍因受都市化影響而有 61.9%之改變量，旱溪流域卻只有 44.9%，淹水體積亦有相同之趨勢，其原因在於筏子溪流域於近年來之改變程度大於旱溪流域，故其對淹水衝擊之影響隨著改變程度愈大，淹水災害之衝擊範圍就愈廣泛。

5.2 建議

- 1、 本研究所考慮之雨水下水道系統，係為直徑大於 60 公分以上並具完整資料之條件，才加以考慮建置，建議蒐集更多雨水下水道相關之完整資料，建置於模式中進行淹水模擬，以符合實際狀況。
- 2、 本研究對於都市化以及氣候變異之淹水模擬分析為長延時之降雨事件，建議未來可加入熱島效應所帶來之短延時降雨，以評估其對都會區之雨水下水道衝擊。
- 3、 在整合演算法中雨水下水道與二維漫地流之交替互動模擬，存在網格尺度上之差異，建議未來可縮小網格尺度，以符合人孔與人孔間之管件之尺寸輸入，藉此反應更實際之淹水情形。



參考文獻

1. 臺灣省水利局規劃總隊，1989 年，大里溪治理基本計畫。
2. 楊昌儒，林廷郎，蔡長泰，游保杉，顏沛華，1995 年，地理資訊系統在城鎮淹水模擬上之應用，台灣水利第 43 卷第 1 期，41-55。
3. 行政院環保署，2001 年，氣候變遷海平面上升對我國之衝擊評估與適應策略。
4. 易任，王如意，2001 年，「應用水文學」，國立編譯館出版。
5. 陳宣宏，2002 年，漫地流與雨水下水道水流之交互動態模擬，國立台灣大學生物環境系統工程學系博士論文。
6. 陳志鴻，2004 年，應用淹水模式評估都市區雨水下水道之效能，國立台灣大學生物環境系統工程學系碩士論文。
7. 經濟部水利署水利規劃試驗所，2004 年，臺中市及周邊排水淹水潛勢與預警系統建立之研究-淹水潛勢建置。
8. 中央大學及太空遙測中心新聞稿，2004 年。
(http://www.csr.sr.ncu.edu.tw/chin.ver/c6communicate/e_news/37/7.php)
9. 林旭信，2005 年，都市雨水下水道系統最佳化操作模擬，國立台灣大學土木工程學研究所博士論文。
10. 葉穎叡，2005 年，應用 PCSWMM 模擬透水鋪面之研究，臺北科技大學土木與防災研究所碩士論文。
11. 潘宗毅，謝龍生，鄭士仁，2006 年，流域中上游之都市化效應與分洪設施對下游流量推估之影響，農業工程學報第 25 卷第一期。
12. 蔡期有，2006 年，雨水下水道逕流污染控制系統自動化規劃及模擬，國立台灣大學環境工程學研究所碩士論文。
13. 臺中市政府，2006 年，臺中市淹水原因研究及改善方案規劃-西屯及

南屯區。

- 14.顏瑞龍，2007 年，東港溪流域淹水模擬與消洪策略分析，國立屏東科技大學土木工程學系碩士論文。
- 15.徐森雄，唐琦，陳品如，黃雅琳，2007 年，臺中市之都市化對氣溫變化之影響，作物環境與生物資訊，4，307-313。
- 16.蘇惠珍，楊美美，郭怡君，陳昶憲，2007 年，以 HEC-HMS 模式進行洪水出流管制分析-以筏子溪流域為例，中華建築技術學刊，第四卷第一期，55-70。
- 17.廖于慧，2008 年，網格解析度對淹水模擬影響分析，國立屏東科技大學土木工程學系碩士論文。
- 18.柳中明，吳明進，林淑華，陳盈蓁，楊胤庭，林瑋翔，曾于恆，陳正達，2008 年，台灣地區未來氣候變遷預估，台灣大學全球變遷研究中心。
- 19.王嘉和，2008 年，氣候變遷與地層下陷對台灣西南沿海地區淹水之衝擊評估，國立台灣大學生物環境系統工程學系碩士論文。
- 20.國家災害防救科技中心，2008 年，臺中市彰化縣「卡玫基與鳳凰颱風災情現地調查」報告書。
- 21.王宣賀，2009 年，氣候變遷對台北市雨水下水道系統之衝擊影響評估，國立台灣大學生物環境系統工程學系碩士論文。
- 22.賴彥維，2009 年，機率淹水潛勢圖研析，國立台灣大學生物環境系統工程學系碩士論文。
- 23.經濟部水利署第三河川局，2009 年，大里溪水系治理規劃檢討報告。
- 24.經濟部水利署水利規劃試驗所，2010 年，流域數值地形系統淹水模組開發及建置之研究-以大里溪流域為例。

- 25.郭曉芬，2010 年，水田區調洪蓄水減災功能數值探討與層級分析之比較，國立台灣大學生物環境系統工程學系碩士論文。
- 26.林奕舟，2010 年，以數值模式模擬知本溪及利嘉溪之淹水情形，淡江大學水資源及環境工程學系碩士班論文。
- 27.柳文成，2010 年，氣候變異與都市化對台中盆地洪災之影響研究—子計畫:氣候變異與都市化對河川洪水保護標準與溢堤之研析(II)，國科會研究計畫報告，NSC 98-2625-M-239-001。
- 28.臺中市政府都市計畫網站，2010 年。
(<http://upmap.taichung.gov.tw/>)
- 29.經濟部水利署易淹水地區水患治理計畫專屬網站，2011 年。
(<http://fcp.wra.gov.tw/>)
- 30.Akan, A.O. (1993), Urban Stormwater Hydrology. Technomic Publishing Co., Inc., Lancaster, PA, U.S.A.
- 31.Anil, K. M. (2010), Impact of Urbanization on the Hydrology of Ganga Basin (India), Water Resour Manage, **25**, 705-719.
- 32.Bertolo, P. and Wiecezorek, G.F. (2005), Calibration of numerical models for asmal debris flows in Yosemite Valley, California, USA, Natural Hazards and Earth System Sciences, **5**(6), 993-1001.
- 33.Chang, T. J., Hsu, M. H., Teng, W. H. and Huang, C. J. (2000b), A GIS-Assisted Distributed Watershed Model for Simulating Flooding and Inundation, Journal of the American Water Resources Association, **36**(5), 975-988.
- 34.Huber, W.C. and Dickinson, R.E. (1988), Storm Water Management Model. User's Manual Ver.IV, U.S. EPA.
- 35.Hsu, M.H., Chen, S.H. and Chang, T.J. (2000), Inundation Simulation

- for Urban Drainage Basin with Storm Sewer System, *Journal of Hydrology*, **234**(1-2), 21-37.
- 36.Hsu, M.H, Chen, S.H. and Chang, T.J. (2002), Dynamic Inundation Simulation of Storm Water Interaction between Sewer System and Overland Flows, *Journal of the Chinese Institute of Engineers*, **25**(2), 171-177.
- 37.IPCC (2007), *Climate change 2007: The Physical Science Basis*. Intergovernmental Panel on Climate Change.
(http://ipcc-wg1.ucar.edu/wg1/Report/AR4WG1_Print_FrontMatter.pdf)
- 38.Jin, M. and Fread, D. L. (1997), Dynamic Flood Routing with Explicit and Implicit Numerical Solution Schemes, *Journal of Hydraulic Engineering-ASCE*, **123**(3), 166-173.
- 39.Jorge, L., Albert, S.C., Slobodan, D. and Dragan, A.S. (2009), Comparison of 1D/1D and 1D/2D Coupled (Sewer/Surface)Hydraulic Models for Urban Flood Simulation, *Journal of Hydraulic Engineering*, 495-504.
- 40.Liang, C. and Mackay, D. S. (2000), A General Model of Watershed Extraction and Representation Using Globally Optimal Flow Paths and Up-Slope Contributing Areas, *International Journal of Geographical Information Science*, **14**, 337-358.
- 41.Martz, L. W. and Garbrecht, J. (1993), Automated Extraction of Drainage Network and Watershed Data from Digital Elevation Models, *Water Resources Bulletin*, **29**(6), 901-908.
- 42.Mishra, S. K., Vijay, P. S., Sansalone, J. J. and Aravamuthan, V. (2003), A Modified SCS-CN Method: Characterization and Testing, *Water Resources Management*, **17**, 37-68.

43. Neil, M. H., Paul, D. B., Matthew, S. H. and Matthew, D. W. (2007), Simple spatially-distributed models for predicting flood inundation: A review, *Journal of Geomorphology*, **90**, 208-225.
44. O'Brien, J. S., Julien, P. Y. and Fullerton, W. T. (1993), Two-Dimensional Water Flood and Mudflow Simulation, *Journal of Hydraulic Engineering*, **119**(2), 244-259.
45. O'Brien, J. S. (2007), FLO-2D User Manual Version 2009.
46. Ponce, V. M. and Hawkins, R. H. (1996), Runoff curve number: Has it reached maturity?, *Journal of Hydraulic Engineering*, **1**(1), 11-19.
47. Perez, A. (2000), Surface Water Protection Project: A comparison of Watershed Delineation Methods in ARC/INFO and Arc View GIS, *Hydrologic and Hydraulic Modeling Support with Geographic Information Systems*, 53-64.
48. Roesner, L. A., Aldrich, J. A. and Dickinson, R. E. (1988), Storm Water Management Model. User's Manual Ver. IV: EXTRAN addendum. U.S. Environmental Protection Agency.
49. Shumann, A. H. (1993), Development of Conceptual Semi-Distributed Hydrological Models and Estimation of their Parameters with the Aid of GIS, *Journal of Hydrological Sciences*, **38**(6), 519-528.
50. Subramanya, K. (2003), Flow in Open Channels, Department of Civil Engineering Indian Institute of Technology, 99-100.
51. Tsirintzis, V. A., Hamid, R. and Fuentes, H. R. (1996), Use of Geographic Information System (GIS) in Water Resources: A Review, Dordrecht, Netherlands Kluwer Academic Publ, *Water Resources Management*, **10**(4), 251-277.
52. U.S. Army Corps of Engineers. (1996), Risk-based analysis for flood

damage reduction studies, Rep. No. ER 1110-2-1619.

53. Washington, D.C. (1956), Soil Conservation Service: Hydrology, National Engineering Handbook, Supplement A, Section 4, Chapter 10, Soil Conservation Service, USDA.
54. Yen, B.C. (1986), Hydraulics of Sewers, Advances in Hydroscience, V.14. Academic Press, New York, 1-123.

