

國立臺灣大學工學院土木工程學系



碩士論文

Department of Civil Engineering

College of Engineering

National Taiwan University

Master Thesis

時變性洪患韌性指標於高都市化區域之研究

— 以中永和為例

Time-dependent Flooding Resilience Index Applied in
Highly Urbanized Areas — A Case Study of Zhonghe
and Yonghe District

張雅婷

Ya-Ting Chang

指導教授：何昊哲 博士

Advisor: Hao-Che Ho, Ph.D.

中華民國111年7月

July. 2022

誌謝



剛入學時無法想像我要如何完成碩士學位，會不會被同學慘電、被老師嫌笨.....，這篇論文雖並非完美，但回首兩年的歷程發現我真的很幸運，處處得到貴人協助，在充滿正向能量的環境裡成長。

一上高水的震撼教育讓我兢兢業業，感謝李天浩老師的教學熱忱及對學生的鼓勵；修課過程真的非常幸運，組員于萱的 matlab 很強、廷侑的理解能力精確迅速；其他同學如郁真、俊光、元鴻、敬驊、宸羽、孟傑，很謝謝他們平時願意與我討論，從他們身上學到不少東西讓自己比以前更進步。另外也感謝生態水利 gogogog 的敬驊與于萱一起研究模式怎麼跑，還在土研待到四點多做期末報告(和打牌)。一下的課程有俊光、元鴻、魏箏、廷侑同心打拼，挑戰負擔大但收穫滿滿的吳富春老師的課，更感謝老師對於學生的問題都不吝嗇解釋詳盡。

研究過程感謝大冠、莉雅、淵舜對 3Di 的傳授，在模式上遇到任何難題，大冠總會安排時間一起想辦法協助突破；而韌性指標的領域中不管技術或概念若非淵舜帶頭引領邏輯與脈絡、不厭其煩的討論，研究不會如期產出。

感謝西班牙鬥牛團的成員彥丞、淵舜、翰升、棋閔在國外對我的照顧，和你們一起創造的回憶特別難忘；同研究室好夥伴昕妤平日的關心、學妹怡辰的協助與建議；身為 21 世紀初的學生非常慶幸享有科技的便捷，例如 Google 的支援，舉凡學術搜尋、翻譯、衛星地圖等工具增加研究的效率。

兩年下來謝謝何昊哲老師的信任與關心，對於研究的提點精確明瞭，並和學生分享他對這個世界的觀察與體悟，因此致力把我們推向各式不同的舞台展現自我；口試時榮幸受到委員李鴻源教授、葉克家教授給予實際的指教。老師們的肯定是種鼓勵，讓我有足夠的信心與勇氣面對眾多不及之處且繼續努力。

畢業後最希望自己無論從事任何工作都可以保持對新知的好奇心和求知欲、提升學習速度並享受工作帶來的成就感，當然也要多賺點錢別讓父母太辛苦。

摘要



氣候變遷使極端事件的發生機率提高，加上都市化改變了土地利用類型，兩者對都市的排水系統造成很大的挑戰。都市土地面積有限，既無法無限增加抽水容量及堤防高度等集中式的基礎工程，面對高重現期的降雨也難以透過分散式的低衝擊開發(LID) 有效減洪，加上政府救災資源有限，需透過科學化的工具謹慎評估洪水事件中各區域所配給的資源多寡與時間。

本研究以脆弱度(vulnerability)與回復力(recovery)的概念作為韌性的切入點，設計具有時間變異性的洪患韌性指標(Flood Resilience Index, FRI) ，參酌 ISO 14090 對氣候變遷風險的定義，取危害度、暴露度與敏感度為 FRI 內部的三大指標，依照各指標的定義選擇適合研究區域中永和的因子及設計量化公式。

有鑑於防災管理的決策調度時間緊湊，本研究選擇以高精度且計算快速的 3Di 來模擬中永和面臨 RCP8.5 情境雨量的淹水程度，透過 Arc GIS 後處理取得具有時間變異性的物理性因子；而社會性因子則依照公式定義，隨著各里社經條件和淹水延時而改變。

本研究證實社會性因子的時變對 FRI 的作用為分數降低、回復期拉長且出現時間延後。根據危害度指標內超過臨界值的因子數量可將風險程度歸納為三類，FRI 亦可依其趨勢線圖像區分為三類，並與危害度指標的分類做對照。最後本研究透過改變降雨量、降雨延時、降雨型態比較不同設計雨型之 FRI，其中韌性較佳的降雨特徵為小雨量、短延時、左偏雨型的情境。決策者可透過 FRI 事件期中相鄰兩時間的梯度差，判斷區域致災時間點並即時給予救援，以調適災害衝擊，增加韌性。

關鍵字：都市韌性、洪患韌性指標、氣候變遷實體風險、淹水模擬、3Di 模式

ABSTRACT

Climate change has increased the incidence of extreme events, and moreover, urbanization has changed land use patterns, both of which pose significant challenges to urban drainage systems. The space in urban area is too limited to increase in pumping capacity and embankment height for centralized infrastructure unlimitedly. In the face of rainfall with high return period, the decentralized low-impact development (LID) isn't effective of flooding reduction, so under limited resources in the flooding events, government needs a scientific tool to carefully evaluate the amount and timing of resources for each district.

The study introduced vulnerability and recovery as the concepts of resilience, and designed a time-varying Flood Resilience Index (FRI). Based on the definition of climate change risk in ISO 14090, the three main indicators of FRI are hazard, exposure, and sensitivity. The factors are suitable for the study area are selected according to the definition of each indicator and the quantification formula is designed.

In view of the tight activation time for decision making in disaster prevention and management, we simulated the rainfall scenario of RCP8.5 by 3Di, a numerical model with high resolution, fast calculation speed. Subsequently, we obtained the physical factors with time variation through post-processing in Arc GIS.

In the study, the effect of time dependent social factor on FRI was found to be a decrease in score, a longer recovery period, and a delay in occurrence. The number of factors exceeding the reference value in the hazard indicators could be classified into three types from high to low risk level; furthermore, FRI is categorized according to its trend and compared with the level of hazard. Finally, the study contrasted the FRI of different rainfall designs by changing the total precipitations, rainfall duration, and rainfall pattern, among which the more resilient are smaller amount of precipitation,

shorter duration, and left-skewed rainfall pattern. By calculating the gradient difference between two adjacent hours in the event phase of FRI, the decision maker could determine the timing of disaster and provide immediate relief to adjust the impact and increase the resilience.

Keywords: Urban resilience; Flood resilience index; Climate physical risks; Flooding simulation; 3Di mode

目錄



誌謝	I
摘要	II
ABSTRACT	III
目錄	V
圖目錄	VIII
表目錄	XII
第一章 緒論	1
1.1 研究動機	1
1.2 研究目的	3
1.3 研究流程	4
第二章 文獻回顧	5
2.1 都市淹水與模式介紹	5
2.1.1 SWMM	6
2.1.2 FLO – 2D	8
2.1.3 SOBEK	9
2.1.4 Mike 系列	10
2.1.5 InfoWorks ICM	11
2.1.6 HEC-RAS	12
2.1.7 3Di	13
2.2 不同氣候變遷風險下的韌性	15
2.3.1 AR4(2007)	17
2.3.2 AR5(2014)	18
2.3.3 ISO 14090	21

2.3 洪災韌性指標	22
第三章 研究方法與理論	27
3.1 3Di 模式	27
3.1.1 控制方程式	28
3.1.2 網格技術	29
3.1.3 模擬過程	34
3.2 氣候變遷實體風險	37
3.2.1 氣候相關風險	37
3.2.2 氣候實體風險模板	39
3.3 洪患韌性指標(FRI)	40
3.3.1 危害度指標	41
3.3.2 暴露度指標	43
3.3.3 敏感度指標	43
第四章 研究區域	46
4.1 地理位置與地文條件	46
4.2 氣候與水文測站	48
4.3 排水系統	50
4.4 都市計畫與人口發展	53
4.5 經濟發展	56
4.6 自主防災社區與社區參與	58
第五章 模式設置	62
5.1 3Di 模式建置	62
5.1.1 二維參數資料	62
5.1.2 一維參數資料與全域設定	67
5.2 模式驗證	69

5.3 模擬情境	72
5.4 計算危害度指標	74
第六章 結果與討論	77
6.1. 社會因子在 FRI 的作用	77
6.2 FRI 分類及其內部指標型態	81
6.2.1 危害度指標型態	82
6.2.2 FRI 分類	84
6.3 不同設計雨型之 FRI 比較	86
6.3.1 同降雨延時及降雨型態、不同降雨量	87
6.3.2 同降雨量及降雨型態、不同降雨延時	91
6.3.3 同降雨量及降雨延時、不同降雨型態	95
第七章 結論與建議	101
7.1 結論	101
7.2 建議	102
參考文獻	104

圖目錄



圖 1 - 1 歐洲各國貸款曝險於各實體災害的額度	1
圖 1 - 2 研究流程圖	4
圖 2 - 1 雨水下水道各設施連接關係	6
圖 2 - 2 漫地流與下水道連接方式示意圖	7
圖 2 - 3 SWMM 雙系統示意圖	8
圖 2 - 4 FLO-2D 模擬結果圖	9
圖 2 - 5 SOBEK 操作介面	10
圖 2 - 6 Mike 建模圖 (a.) 一維模型；(b.) 二維耦合模型	11
圖 2 - 7 ICM 使用介面	12
圖 2 - 8 一維河道與二維模式銜接圖	13
圖 2 - 9 3Di 可視化模擬介面	14
圖 2 - 10 水生生態(a.) 暴露度(MMM 代表多模型平均值)；(b.) 調適能力	18
圖 2 - 11 水生生態脆弱度指標	18
圖 2 - 12 AR5 下定義之風險概念圖	19
圖 2 - 13 AR4 和 AR5 概念整理	19
圖 2 - 14 ISO14090 界定氣候變遷風險之元素與脆弱度	21
圖 2 - 15 新北市坡地災害風險分析	22
圖 2 - 16 FRI 評估示意圖	23
圖 2 - 17 韌性在洪災時間尺度下的變化	23
圖 2 - 18 FRI 示意圖， t^* 為室內淹水深度 0 公尺的時刻	24
圖 2 - 19 不同區域之 FRI 曲線	25
圖 2 - 20 比較有無 LID (a.)洪水深度；(b.) FRI 趨勢	25

圖 2 - 21 佛羅倫斯洪水事件下的指標模型	26
圖 3 - 1 DEM 與子網格關係圖	29
圖 3 - 2 四分樹網格與 DEM 資料關係.....	30
圖 3 - 3 計算網格在平衡四分樹法之級距示意圖	30
圖 3 - 4 Kmax 與 Grid space 之關係	31
圖 3 - 5 四分樹法優化計算網格的範例	32
圖 3 - 6 羅盤法定義四分樹網格	32
圖 3 - 7 動量與質量分布介紹圖 (a)二維交錯網格；(b)一維網格	33
圖 3 - 8 (a) DEM 點位資料的橫斷面；(b) 模式的初始 V-H 關係圖.....	34
圖 3 - 9 不同精度網格間的(a)流速示意圖；(b)水深變化示意圖	34
圖 3 - 10 3Di 模式使用流程	37
圖 3 - 11 氣候相關風險架構圖.....	38
圖 3 - 12 (a)氣候實體風險模板架構；(b)研究範例	40
圖 3 - 13 Flooding Resilience Index 結構示意圖	41
圖 4 - 1 中永和行政區界圖	46
圖 4 - 2 研究區域流域地形圖	47
圖 4 - 3 中永和歷史災害圖片紀錄	49
圖 4 - 4 蘇拉颱風時福和橋下車輛面臨滅頂	50
圖 4 - 5 研究區域排水系統與水文測站位置圖	52
圖 4 - 6 中永和地區抽水站位置圖	53
圖 4 - 7 研究區域土地利用	54
圖 4 - 8 暴露度相關因子：人口密度	56
圖 4 - 9 暴露度相關因子：營利事業家數密度	57

圖 4 - 10 敏感度相關因子：營利事業銷售額(各類所得金額營利所得).....	57
圖 4 - 11 敏感度相關因子：薪資收入(各類所得金額薪資所得).....	58
圖 4 - 12 中永和社區防災工作流程	59
圖 4 - 13 社區防災訓練	59
圖 4 - 14 敏感度相關因子：社區參與	61
圖 5 - 1 以 HEC-RAS 新店溪斷面地勢	62
圖 5 - 2 摩擦係數分布圖	63
圖 5 - 3 入滲值分布圖	66
圖 5 - 4 截留值分布圖	67
圖 5 - 5 一維模式結構物設置	68
圖 5 - 6 模式網格設置圖	69
圖 5 - 7 0610 豪雨事件中正橋站降雨組體圖	70
圖 5 - 8 0610 豪雨事件流量實測資料	70
圖 5 - 9 模擬結果與淹水調查點位對照圖	71
圖 5 - 10 HEC-HMS 水文模式建置	74
圖 5 - 11 淹水深度因子計算方式.....	75
圖 5 - 12 淹水面積因子計算方式	75
圖 5 - 13 Model Builder—淹水深度	76
圖 5 - 14 Model Builder—淹水面積	76
圖 6 - 1 本研究 17 個參考里	77
圖 6 - 2 模擬期間里 31 與里 96 之指標分數	78
圖 6 - 3 比較里 117 時變與否 (a.)敏感度；(b.) FRI	79
圖 6 - 4 比較有無時變情況下回復期時間長度	80

圖 6-5 里 114 的 FRI 及其內部指標	80
圖 6-6 FRI 及其內部指標 (a.)里 31；(b.)里 70	81
圖 6-7 危害度型態一	82
圖 6-8 危害度型態二	83
圖 6-9 危害度型態三	83
圖 6-10 FRI 分類一	84
圖 6-11 FRI 分類二	85
圖 6-12 FRI 分類三	85
圖 6-13 危害度型態與 FRI 分類關聯對照	86
圖 6-14 (情境 A)里 49 模擬期間 FRI 各時段之梯度值.....	87
圖 6-15 不同雨量之 FRI 比較	88
圖 6-16 不同雨量下各參考里回復期所需時間	91
圖 6-17 不同降雨延時之 FRI 比較	92
圖 6-18 不同降雨延時下各參考里回復期所需時間	94
圖 6-19 不同降雨型態下各參考里回復期所需時間	95
圖 6-20 不同降雨型態之 FRI 比較	96
圖 6-21 比較情境 A 和 F 之危害度分數	99

表目錄



表 2 - 1 各淹水模式功能比較	15
表 2 - 2 供水系統風險要素表	20
表 2 - 3 FRI 因子組成	24
表 3 - 1 一二維相互作用下的三種人孔類型	35
表 4 - 1 中永和行政區域資料	46
表 4 - 2 中正橋站 2020 年月平均雨量及 1977 年-2020 年最大月雨量	48
表 4 - 3 中正橋站 1977 年 - 2020 年統計資料	48
表 4 - 4 秀朗橋站 1970 年 - 2020 年統計資料	49
表 4 - 5 中永和地區嚴重災害彙整	50
表 4 - 6 研究區域內重要水系	51
表 4 - 7 中永和土地利用統計表	54
表 4 - 8 永和區歷史統計人口	55
表 4 - 9 中和區歷史統計人口	55
表 4 - 10 中永和地區自主防災社區	60
表 4 - 11 中永和地區偵水志工之統計	60
表 4 - 12 中永和地區參與新北市社區防災推動計畫之統計	60
表 5 - 1 曼寧 n 值建議範圍及設定值	63
表 5 - 2 SCS 曲線號碼表	64
表 5 - 3 研究區域入滲值設定	65
表 5 - 4 研究區域截留量與土地利用對照	66

表 5-5 淹水歷史點位與模擬結果對照表	71
表 5-6 本研究降雨情境設定一覽表	73
表 5-7 各情境降雨下的尖峰流量值	74
表 6-1 里 31 與里 96 之社會因子	78
表 6-2 比較有無時變最低點分數和出現時間	79
表 6-3 17 個參考里在淹水期間的暴露度指標分數	86
表 6-4 不同雨量情境下參考里於事件期中梯度差最大值及出現時間	89
表 6-5 不同雨量下各參考里 FRI 最低點分數及其出現時間	90
表 6-6 不同降雨延時情境	93
表 6-7 不同降雨延時情境下參考里於事件期中梯度差最大值及出現時間	94
表 6-8 不同降雨情境下參考里於事件期中梯度差最大值及出現時間	97
表 6-9 里 61、里 121 淹水事件前後各指標分數	98
表 6-10 不同降雨型態下，FRI 最低點之累積淹水延時	98
表 6-11 不同雨型情境下各參考里 FRI 最低點分數及其出現時間	99
表 6-12 不同範圍之梯度差之給分	100
表 6-13 統計各情境下不同梯度差範圍的參考里數量	100

第一章 緒論



1.1 研究動機

氣候變遷、經濟發展、社會正義等議題都是近年來世界各國在發展過程中所需要面對的，因此聯合國於 2015 年宣布 17 項「2030 永續發展目標」(Sustainable Development Goals, SDGs)，其中包含 169 項指標，明確地指引世界各國邁向永續(行政院國家發展委員會)，冀望引起各界關注以降低災害衝擊。而氣候變遷風險中，熱浪、乾旱與洪水所造成的極端天氣為三大主要威脅，與永續發展目標中的目標 6、9、11 與 13 相關。

事實上，氣候變遷不僅危及個人生命財產和國家安全，在國際上也廣泛影響企業、金融機構的投資行為，例如圖 1-1 顯示洪水災害對歐洲各國的金融機構影響金額甚鉅。2021 年 9 月歐盟央行發表的氣候壓力測試報告中明確指出企業的還款能力可能受氣候相關天災(例如洪水、野火)或政策變動的影響，導致銀行放貸者暴露的信用風險不斷升高，拉高產險的費率，為此需要企業確實量化氣候變遷對公司的衝擊(IFRS，2020)，避免天災不僅造成企業內部生產中斷，甚至加速滾雪球效應，惡化全球供應緊縮。

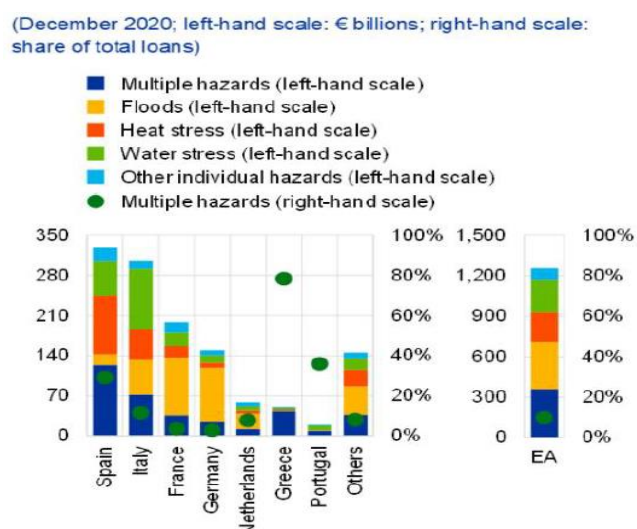
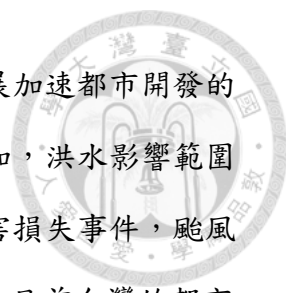


圖 1-1 歐洲各國貸款曝險於各實體災害的額度

(來源：European Central Bank)



氣候變遷在國際間影響甚鉅，而台灣國內目前隨著經濟發展加速都市開發的需求，導致極端洪水事件發生時集流時間縮短、地表逕流量增加，洪水影響範圍因此擴大，根據內政部消防署統計 2000 至 2020 年間的自然災害損失事件，颱風與淹水各自占比 57%及 30.5%，都市暴雨成為國內棘手的挑戰。目前台灣的都市排水多仰賴設計標準為 2 至 5 年重現期的雨水下水道，而臺北市能容受每小時 78.8 毫米的雨量，為全台之最；然而若發生超出設計標準的事件將面臨更嚴峻的水患。不斷增建滯洪設施或擴張排水系統所需付出的社會成本難以負荷，灰色基礎建設的分洪、束洪、導洪、蓄洪僅能提供有限程度的保護作用。

近年來都市治水的思維已逐漸從傳統集中且大型的水利工程手段中加入分散且小型的彈性調適措施，例如低衝擊開發（Low Impact Development, LID）。LID 大多數設置在既有公共設施，便於源頭就地處理雨水，其主要功能包含增加入滲貯存逕流、減緩洪峰、淨化水質、補注地下水位和河川基流量，亦附加綠美化、減緩都市熱島效應等外部效益，除了解決水質水量的問題外也能提升區域的韌性 (Marina Batalini de Macedo et al. 2021)。2014 至 2019 年間，台灣便以此基礎為概念推動流域綜合治理計畫，利用空間規劃抑制逕流的策略進而形成逕流分擔與出流管制政策，將治水工程與策略整合至國土規劃中，藉此增加都市在洪患影響下的容受力與復原力。

極端天氣的發生頻率與強度受氣候變遷影響而不斷升高，工程強度或是設計標準卻無法無限追加，特別是許多基礎建設(例如，都市雨水下水道排水能力與標準)。雖然許多研究嘗試透過 LID 來降低洪災衝擊，但結果顯示解決洪災的最佳策略是以韌性的概念整合工程設施與非工程手段。韌性包含容受力與回復力，若要達成整合工程與非工程，則需將韌性以科學量化的評估指標呈現，並使其具備時間變異性。透過量化的時變性韌性指標，可協助決策者在災害發生時選擇合適的時間將資源分配給需要的地區，有效降低災害的衝擊。此外，量化的時變性韌性指標之設計邏輯可以應用到企業防災，讓災害風險整合其餘的企業風險，藉此

評估氣候變遷影響下企業永續發展。



1.2 研究目的

本研究有鑑於當前對於韌性的概念並無合適的時變性量化指標，且指標內部因子選擇依據缺乏國際通用的架構。因此本研究欲確定因子組成架構與計算方法，擬定一套以防災為目的且具有時間變異性的洪患韌性指標(Flood Resilience Index, FRI)，其計算結果可將災害區分成發生期與災後回復期。

為了詳細探討指標的特性，及各因子對指標的作用，本研究設計多種不同重現期、延時、雨型的降雨情境，嘗試從淹水模擬結果萃取相關資訊，具體應用在高都市化之地區，期望透過不同情境下的 FRI 計算結果，達到下列目的：

(1). 分析社會因子在 FRI 的作用

FRI 包含與淹水特性相關的物理因子及與經濟、社區發展相關的社會因子。物理因子可隨不同時間的淹水狀況可給定不同的分數；社會因子本身雖不具時變性，然而在災害的時間尺度中，本研究認為社會經濟高低除了能比較不同區域的應變和復原的快慢，更應該與當地不同時刻的淹水嚴重程度有所關聯，以反映現實，例如淹水延時過長可能造成救災資源的耗盡。基於此假設，欲探討時變性社會因子對 FRI 的作用為何，並與非時變的計算方式比較差異。

(2). 比較降雨情境如何影響洪災對韌性的下降速度及回復能力

雨量在時間上分布多寡，將直接影響尖峰流量和積淹水發生時間的重要因素，本研究因此推測 FRI 的趨勢變化也會受其影響。除了目前台灣設計雨型中最廣泛使用的中央集中式雨型外，本研究也欲探討降雨組體圖呈現偏態的情境，並比較計算結果，分析 FRI 對雨型的敏感程度。未來實際面對颱風或強降雨，只要掌握降雨分布，即能窺得某地受災害的衝擊及復原程度，及早應變。



1.3 研究流程

綜合 1.2 節所述，本研究之流程如圖 1-2 所示。

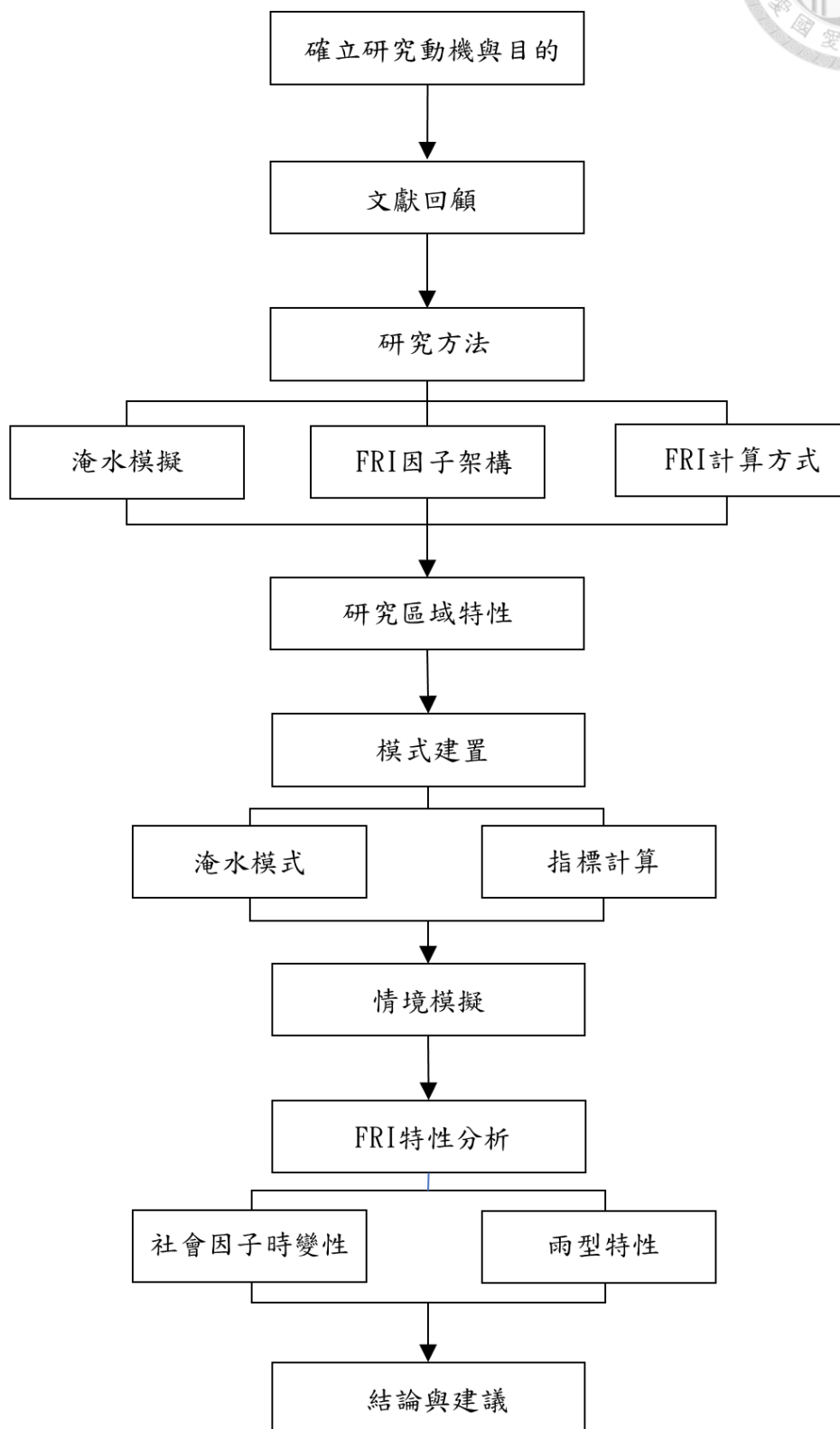


圖 1-2 研究流程圖

第二章 文獻回顧



2.1 都市淹水與模式介紹

都市開發造成大量建築物及不透水鋪面影響土地利用型態，進而改變水文歷程，包含洪峰提前到達、地表直接逕流增加、洪峰流量增加(increased peak discharge rates)、溢堤機率增加(increased bankfull frequency)、減少基流量(decreased baseflow) (徐硯庭, 2014)。因此，整合地表型態及雨水下水道資訊，建立快速演算都市排水過程與淹水的水理模式，有助於預測易淹水區域從而降低淹水損失。

下水道依功能可分為承接家庭或工業廢水的污水下水道，以及都市中專門設立不與汙水混和的雨水下水道。雨水降落至都市地表，會先在街道產生地表逕流，而後流至側溝並經過連接管渠進入人孔(manhole)貯留，人孔透過管線(pipe)相連接，如圖 2 - 1 所示。多條管線依據地形劃分成子集水區，由數個子集水區構成都市雨水下水道系統，雨水透過下水道系統最後匯流於下游河川或區排，經防洪閘門以重力排出；然而若外水位高於內水位則需關閉防洪閘門，藉由抽水站採取機械式抽排。除了上述基本設施，通常系統會連接其他附屬設施，例如滯洪池，或融合建物、公園的暫時儲留設備，使豪大雨發生時能加速排水。

Schmitt et al.(2004)認為地表逕流與雨水下水道流動存在互動關係，例如人孔溢流壓力水頭上升，而造成地表逕流量增加或積淹水深度增加。下水道模式只能評估下水道的水量、流速和及人孔溢流，無法像二維淹水模式能評估地表淹水的範圍。目前研究以及實務面常用的淹水模式，主要利用淺水波方程式，結合一維下水道模式和二維地表逕流模式，欲細緻化和擬真呈現都市淹水 (張天豪, 2019)。本節將介紹常見淹水模式及簡述研究案例，最後蒐研王福杰(2018)、黃莉雅(2021) 及本研究之資料，彙整模式之間的性質與功能，呈現如



表 2 - 1 所示。

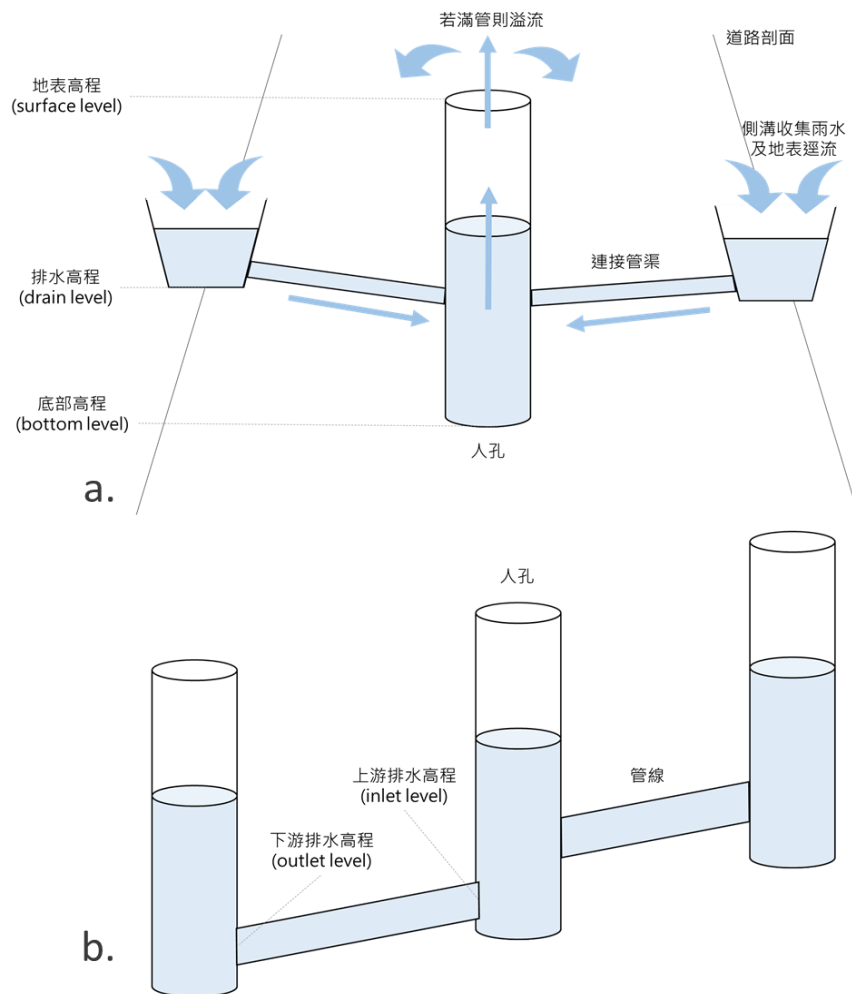


圖 2 - 1 雨水下水道各設施連接關係

2.1.1 SWMM

SWMM(Storm Water Management Model)為美國環保署(US EPA)開發的暴雨管理模型，可模擬與都市排水有關的水質和水量問題，由於其介面完整、免費開源、5.0.22 版本後新增 LID 的元件，並結合 MATLAB、Python 等程式語言編寫演算法設計空間配置最佳化，因此目前在全世界廣泛應用於下水道、排污管道以

及其它排水系統。該模式運算分為兩大模組：

(1) 地表逕流模組(RUNOFF Module)

SWMM 視每個子集水區為坡度均勻且只含單一出口之非線性水庫(nonlinear reservoir)。當降雨強度超過入滲量與截流量，或土壤達飽和狀態時，便會從低窪處開始積水，當積水量超過低窪處可蓄存體積(depression storage)時，即溢流成地表漫地流，再流入排水管線。

(2) 幹線輸水模組(EXTRAN Module)

地表漫地流從側溝匯流至人孔，由於在不同時段均有來自不同人孔的水流入排水系統，故依據緩變量流即動力波理論，以一維連續方程式和動量方程式進行水理演算，並考慮迴水現象。然而 SWMM 假設人孔發生溢流時，水量暫時積存於人孔上方，待排水系統有餘裕時再回流，如圖 2-2(a.)所示無法反映地表逕流的實際流動。此外 SWMM 忽略人孔淹水造成能量坡降提升，而用管線坡度代替能量坡降計算下游管線滿管之流量。

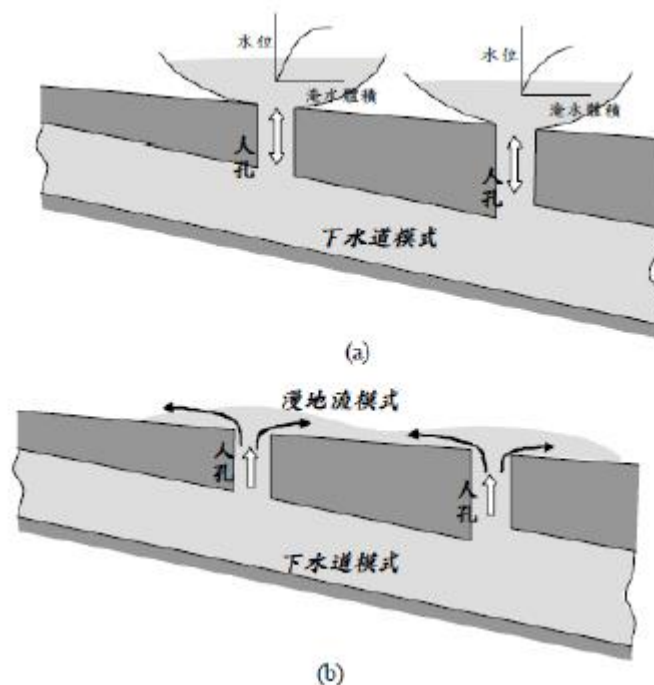


圖 2-2 漫地流與下水道連接方式示意圖(陳宜宏, 2002)

已有許多研究致力於使用 SWMM 開放程式碼修編下水道和漫地流的銜接：Hsu et al. (2000)將人孔溢流的歷線輸入二維零慣性漫地流模式，計算溢流於地表的實際情形，其假設除了經由抽水站排出模擬區域外，溢流後的水不再回流至下水道，如圖 2-2(b.)所示，因此此方法適用於平坦地形，若區域有局部低窪之現象，將使模擬淹水範圍異常大於真實情形。Wang et al. (2019)直接使用 SWMM 的幹線輸水模組建立一個一維街道側溝模組，即在人孔點位上建立上下兩條管線，分別為街道與下水道管線，用開放斷面的管線模擬水流在街道上之流動，如圖 2-3 所示。當人孔水位高於連接管渠連接處時會產生迴水，為雙向流；在人孔內為單向流動，並依據街道與人孔的水位差異，有不同的溢流方式。

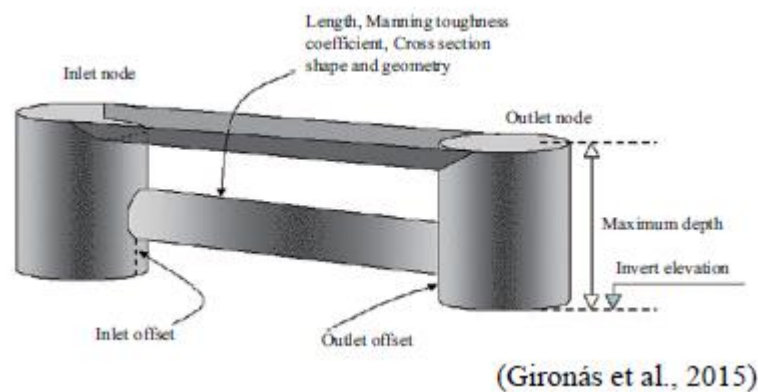


圖 2-3 SWMM 雙系統示意圖

2.1.2 FLO-2D

FLO-2D 為美國 FLO-2D 公司所發展並為美國聯邦急難管理署 (FEMA) 所認可之二維洪水災害模擬模式，其利用有限差分近似求解連續方程式與動力波方程式模擬一維渠道及二維漫地流之流速與深度，藉以推估淹水面積，並在發生溢堤時，擁有堤外渠道與堤內地表逕流的互動機制。模式內含模組包含降雨、河道演算、地表逕流、堤壩、入滲及泥沙運移等，目前廣泛用於泥流、洪水平原管理、河道水理計算、橋樑涵洞水理演算等。使用者建模時先在 Grid Developer System (GDS)指定 DEM、流域範圍、入流點位置、出流口位置，模擬完後可至

Mapper 繪製二維水理參數結果圖。

Erena et al. (2018) 根據 FLO-2D 模擬出的最大水流深度和流速來預測衣索比亞德雷達瓦市內洪水易發生的村莊，繪製極端降水情境下高、中、低災害程度的洪水潛勢圖，如所示。該研究蒐集解析度 30 m 的 DEM、土地利用圖、SCS-CN 值、土壤參數，並參考流域內四個氣象站的統計資料設計出 10、30、50、100 和 300 年重現期的 IDF 曲線作為模式輸入資料。此外從人口、教育和社會經濟的角度調查，發現受洪水影響劇烈的多為社會邊緣群體，例如低教育程度、退休人員和沒有足夠資產的青年，這些地方通常缺乏政府機構致力於科學化的洪水管理，純粹依靠民間力量和社區自主預警，因此研究建議應在最大洪水位的淹沒區域建造永久性擋水牆和其他基礎防禦工程。

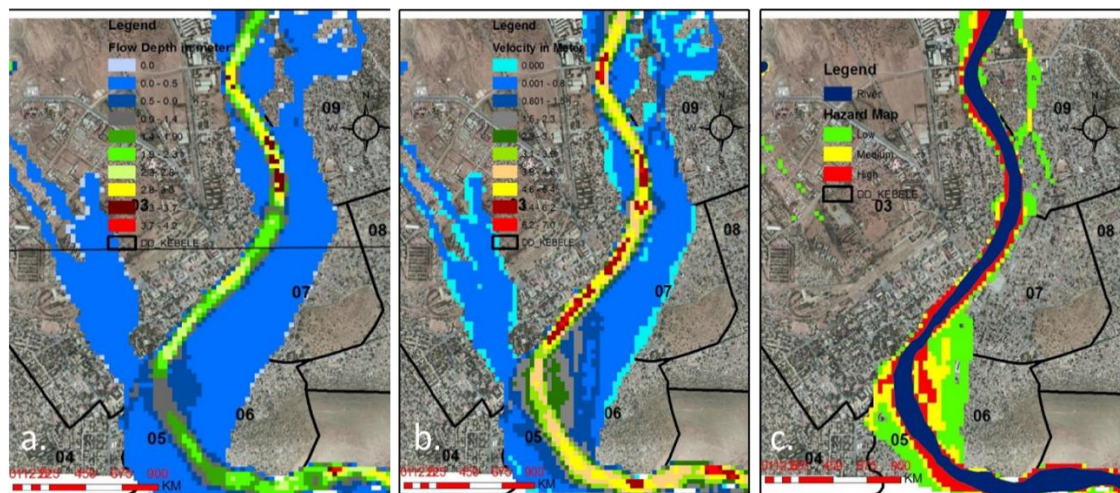


圖 2-4 FLO-2D 模擬結果圖 (a.) 最大水流深度圖；(b.) 最大水流速度圖；(c.) 洪水潛勢圖 (圖片來源：Erena et al. 2018)

2.1.3 SOBEK

SOBEK 由荷蘭 WL|Delft Hydraulic 公司研發，其一維河川和下水道演算採用顯式有限差分模式來求解一維淺水波方程式 (de Saint Venant equation)，而二維地表漫地流由顯式有限差分法求解二維動力波方程式，兩者可同時運算並具有交換機制。SOBEK 模式包含九種模組，因此除了水理演算外，亦可模擬水質、輸

砂及鹽分，並即時調整閘門、堰或抽水機等設施，藉由動態畫面展示讓使用者更靈活控制策略。各項優勢使之成為政府機關、業界顧問公司常用的淹水分析工具，如水利署易淹水地區水患治理計畫、第三代淹水潛勢圖、各縣市雨水下水道設施普查等。

李明儒(2010) 以不同重現期降雨，和土地利用分配探討台北市玉成集水區下水道淤積的淹水情形，結果顯示在相同條件下，下水道減少相同體積，在上游淤積會比在下游淤積產生更大的淹水範圍，且低重現期降雨下，以建築用地受淹水影響程度最大，遊憩用地次之，交通用地最小。Haile et al. (2005) 使用 1.5 m 和 15 m 解析度的 DEM 模擬洪都拉斯的特古西加爾巴市 (Tegucigalpa)，結果顯示粗解析度的資料無法呈現細部地形的水理參數。可見 DEM 為影響 SOBEK 模擬精度的顯著因素，然而若網格數量多，模擬時間恐長達數天 (Tarekegn et al, 2010)。

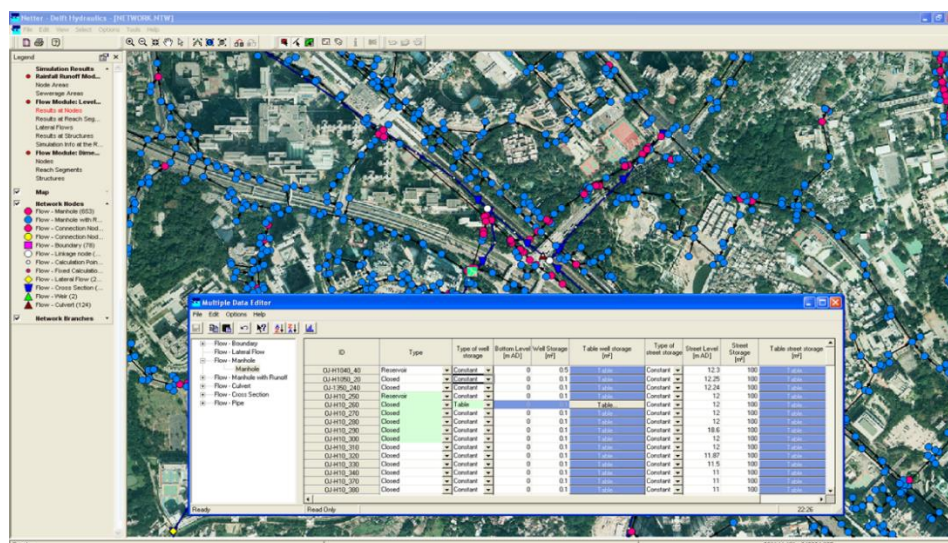


圖 2 - 5 SOBEK 操作介面(圖片來源：全傑科技)

2.1.4 Mike 系列

該系列包含 MIKE URBAN、MIKE 21、MIKE FLOOD 等模式，由丹麥水利學院所(Danish Hydraulic Institute, DHI)研發。Mike urban 採用有限差分法求解一維淺水波方程式，可模擬雨水下水道系統中的明渠與管流流況；MIKE 21 利用有

限差分法分別在時間和空間上積分求解二維淺水波方程式；而 MIKE FLOOD 則耦合上述兩模式使水流能動態交換。

Li et al. (2018) 透過 MIKE URBAN 在中國陝西省西安市與咸陽市交界區域建立一維排水管網模型，並參考當地《低影響發展專項計劃》佈設 LID，如圖 2-6 所示。結果表明不同降雨條件下，LID 措施對各水質指標的效益為 $TP > SS > COD > TN$ ；淹水深度和淹水延時分別減少了 11.11-100% 和 32.23-100%。另外從模式的不確定性分析顯示，hydrological reduction factor、imperviousness、decay constant 等參數強烈影響模式輸出的總逕流量、洪峰流量和水質結果。

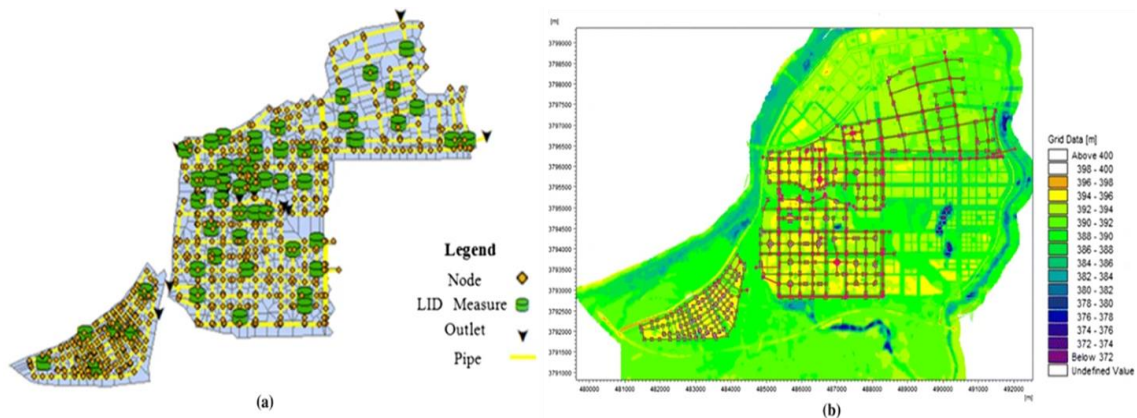


圖 2-6 Mike 建模圖 (a.) 一維模型；(b.) 二維耦合模型 (Li et al., 2018)

2.1.5 InfoWorks ICM

ICM (InfoWorks Integrated Catchment Management) 為英國 Innovyze 所發展的淹水模式，其水文模式採用分布式演算，將流域細化成不同子集水面積進行逕流計算和流量收斂。考慮下水道管線中有明渠流和滿管流兩種流況，因此使用 Preissmann Slot 求解一維淺水波方程式；二維則假設流動主要為水平向，忽略垂直方向的變化以求解深度平均的 Navier-Stokes 方程式。InfoWorks ICM 可以透過 GPU 的並行計算來加速求解過程，並提供表格處理、SQL 查詢和架接 GIS 功能輔助資料預處理和結果後處理。



圖 2-7 ICM 使用介面(圖片來源：Innovyze 官網)

2.1.6 HEC-RAS

HEC-RAS 為美國陸軍工程兵團水文工程中心所(Hydrologic Engineering Center, HEC)研發，版本 4.1 前可計算一維定量流與變量流、輸砂、水溫、水質、水工結構物模擬。2016 年的 5.0 版本新增二維水動力模式，以有限體積法求解二維動力波及二維擴散波方程式。該版本亦可銜接一維與二維模式，以一維形式表示河道流量、以二維形式模擬上下游或越岸淹水量，如圖 2-8 所示，能詳細呈現河道與洪水平原的流況。(Dasallas et al., 2019；賴桂文, 2016)

邱詩婷(2016) 建置 2D 模式，採用 300m 之計算網格時所模擬的洪峰流量值為 407.14cms(相對誤差為-10.7%)，洪峰到達時間差 1.3 小時，總網格數 577 個，模擬所需時間不到一分鐘；而當採用 20m 之計算網格時所模擬的洪峰流量值為 461.6cms(相對誤差為 1.13%)，洪峰到達時間差 1.7 小時，總網格數 131691 個，模擬所需時間 9 小時。最後選擇使用 50m 計算網格，並將計算步長設定在 10 至 30 秒間，結果無數值不穩情形，洪峰流量誤差約-4%。此外該研究指出 HEC-RAS 為防止一、二維交換間流量過低，故指定一個最低流量以利計算，導致降雨強度低的情境下 1D/2D 模式並未完全遵守質量守恆。

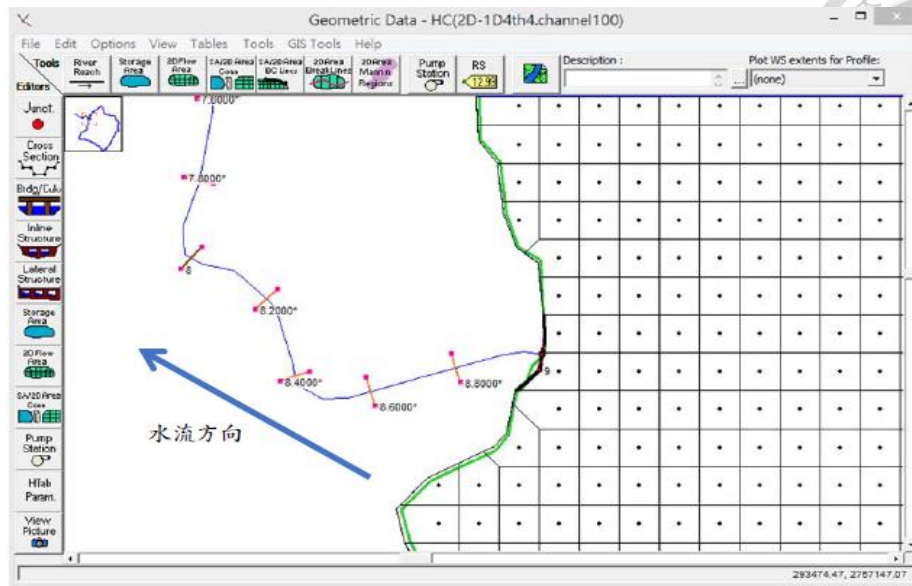


圖 2 - 8 一維河道與二維模式銜接圖

2.1.7 3Di

3Di 為 2010 年荷蘭開發之商用軟體，模式初期的版本為結合子網格法、四分數法、底床摩擦修正、交錯網格有限體積法的二維淹水軟體，以有限體積法求解忽略慣性向的二維擴散波方程式。模式後期加入一維下水道排水系統的功能，考量浸淹及乾燥網格的半隱式數值方法利用牛頓迭代(Newton iteration)法求解非穩態的淺水波方程式，以維持過程中的質量守恆(Casulli, 2009)。本研究使用 3Di 建立一二維的暴雨逕流模式，詳細模式技術參照本文 3.1 節。

多篇文獻探討 DEM 對 3Di 的模擬效能：Hsu et al. (2016) 以台南三爺溪流域為例，以 1m 至 40m 等五種光達 DEM 建立洪水模型，結果表明解析度低，淹水面積愈大，40m 甚至比 1m 的 DEM 模擬出多 1.5 倍的淹水面積。Dahm et al. (2014) 以宜蘭美福排水集水區為研究區域，所使用的 DEM 網格數量 3Di 比 SOBEK 多出了 200 倍，但藉由設定不同組合的四分樹級距及子網格大小讓計算網格比 DEM 網格數量減少了 1000 至 10000 倍，因此運行得更快，結果也接近實際觀察值。王福杰(2018)針對入滲量、地表糙度、子網格大小、四分樹級距做

敏感度分析，入滲量及地表糙度分別為模式最敏感及最不敏感之參數；透過率定結果尋找最佳參數組合建模，以 2017 年海棠颱風在 QPESUMS 所預測的降雨為輸入值，結果顯示預報水位誤差為 2 至 3%，且僅需花模擬 15 分鐘即可預報未來 3 小時的降雨，有 2 小時 45 分鐘的時間進行防災調度。

基於 3Di 具有高空間精度、高速水理計算能力及模擬過程可視化平台等優勢，另有多篇研究將 3Di 作為洪水事件損失評估的工具：Afifi et al. (2019) 實地調查台南市仁德區在颱風事件下的淹水深度與損失對照，並比較使用解析度 1m、5m、10m 的 DEM 模擬所造成的洪水損失差異，由於該研究以住宅為最小單位，因此使用 10m 的差異高達 11.2%。Nicklin et al. (2019) 以荷蘭鹿特丹為例，將 3Di 模擬出的洪水水位輸入至洪水損失估計工具 Waterschadeschatter (WSS)，該工具透過水位扣除 DEM 所得之水深，與各土地利用類型擬合出損失函數，進而估算出在 60mm/hr 的降雨強度下的有形財產損失為 1090 萬歐元。



圖 2 - 9 3Di 可視化模擬介面

表 2 - 1 各淹水模式功能比較

	一維	二維					
模式種類	SWMM	FLO- 2D	SOBEK	Mike	ICM	HEC-RAS	3Di
數值方法	有限差分	有限差分	有限差分	有限差分	有限體積	有限體積	有限體積
下水道模擬	●		●	●	●		●
河道模擬	●	●	●	●	●	●	●
漫地流模擬		●	●	●	●	●	●
計算網格種類		方形網格	方形網格	彈性網格	彈性網格	彈性網格	四分樹網格
計算解析度		計算網格	計算網格	計算網格	計算網格	計算網格	子網格
結合 GIS 系統		●	●		●		●
設置結構物	●	●	●	●	●	●	●
模擬 LID	LID 專門元件	利用既有功能	LID 專門元件	利用既有功能			利用既有功能
軟體取得	開源免費	付費軟體	付費軟體	付費軟體	付費軟體	開源免費	付費軟體
即時展示							●

2.2 不同氣候變遷風險下的韌性

韌性一詞在物理學上廣泛指材料在斷裂前吸收能量和塑性變形的能力。1970 年代起，韌性(resilience) 被愈來愈多科學領域應用，其中以心理學和生態學最為突出。生態學定義一個系統遭到變化時雖無法維持原始的樣貌，但仍能保有一定運作的能力即可稱為韌性 (Holling, 1973)，後續在社會學、災害規劃、城市發展等學門中出現，用於分析人類與環境的相互作用(Martin-Breen, 2011)，例如 Timmerman(1981)將韌性連結至社會經濟，定義為外在壓力對環境變化、政治、社會、基礎設施的變動和從中恢復的能力。然而在自然環境或災害管理的領域，韌性的定義長期以來存在爭議，並沒有發展成統一的學說，且韌性與脆弱度

(vulnerability)之間的關係模稜兩可(Füssel, 2007; Gallopín, 2006; Miller et al. 2010;)。

基於以上的不確定，Lin (2017)整理出三種韌性與脆弱度的關係：第一種是韌性和脆弱度互為反義詞，系統若愈有韌性，則脆弱度愈小，遇到災害承受的衝擊愈小 (Adger, 2000; Joakim et al. 2015)；第二種論點將韌性視為系統遭逢某些壓力下，構成脆弱度的變量之一，此處的韌性包含調適能力 (adaptive capacity) 的概念，部分學者認為韌性等同於調適能力 (Smit & Wandel, 2006)，另一部分學者卻認為只是包含在內的元素 (Carpenter & Gunderson, 2001)；第三種認為考慮長時間的尺度及複雜性的系統來看，脆弱度與韌性並非單純的對應關係，脆弱度增加韌性也可能增加，必須透過實證探討其多重含意 (Gunderson, 2010)。Lin (2017)指出第一種論點最為廣泛使用，亦即藉由評估脆弱度可間接評估韌性。

綜觀目前對氣候變遷下災害管理領域中韌性與脆弱度評估的研究，多出自 Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) 以及 International Organization for Standardization (ISO)所發布的評估報告(O' Brien et al., 2006; Field et al., 2012; Pachauri et al., 2014; Becken, 2017; Dobie et al., 2018)。IPCC 評估報告內的資訊來源為搜集權威學者的科學研究或技術文獻，經過編輯、撰寫、審查成三冊，一冊由一個工作組負責：第一工作組 (WGI) 舉出氣候變遷的物理科學證據；第二工作組 (WGII) 評估氣候變遷對社會經濟和自然系統面向的脆弱性以及調適行方案；第三工作組 (WGIII) 提供抑制溫室氣體排放的氣候變遷調適方法以及去除大氣層之溫室氣體的氣候變遷減緩方法。IPCC 於 1990、1995、2001 年出版了第一、二、三次的評估報告(Assessment Report)。ISO 為國際標準組織，負責制定全球工商業通用標準，適用於任何規模、類型的組織。本節後續將針對第四次評估報告(AR4)、第五次評估報告(AR5)以及 ISO 14090 中面對氣候變遷調適評估框架說明，並舉出相關應用文獻。

2.3.1 AR4(2007)

AR4 以脆弱度為評估重心，將脆弱度定義為「系統易受或無法處理氣候變遷（包括氣候易變性與氣候極端事件）負面效應影響的程度」，可將其視為由三個元素組成的函數，如式(2 - 1)所示，其中暴露度（exposure）指系統有可能遭受氣候相關壓力大小與持續的時間長；敏感度（sensitivity）為系統受到氣候變遷及環境變異之直接或是間歇影響程度；調適能力（adaptive capacity）用來調適暴露和敏感度，包含減少衝擊的能力、可利用的資源和從事件中恢復的能力等。如此定義下的脆弱度囊括了兩種情形，一是脆弱的系統本身(例如低窪島嶼)，二是災害下的脆弱系統(例如洪水事件下的低窪島嶼) (IPCC WG II, 2007)。

$$Vulnerability = F(Exposure, Sensitivity, Adaptive capacity) \quad (2 - 1)$$

Delaney(2021)針對美國中西部河岸的水生生態建立氣候變遷的脆弱性指標，為了界定問題並確定指標架構，邀集專家舉辦工作坊，決定以 AR4 的脆弱度作為研究框架，在量化分析的過程對缺乏數據或不確定性分析中表現不佳的指標進行調整，最後集思廣益研擬出暴露度及調適能力分別包含的參數。暴露度共有 15 項參數，包含三大類別：河川流量相關、降水相關、溫度相關，因此不同氣候模型下的結果會不同；調適能力含 5 項參數分別為水壩密度、景觀多樣性、地景連通性、耕地面積百分比和已開發土地增加率。經過所有參數的正規化(Min-Max normalization)計算，並調整使調適能力參數符合與脆弱度為負相關之定義，呈現結果如圖 2 - 10、圖 2 - 11 所示。

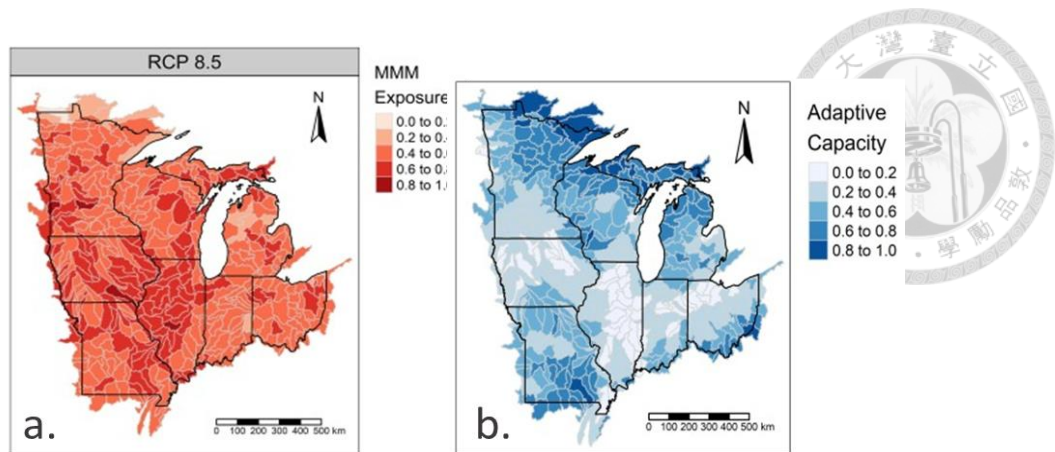


圖 2 - 10 水生生態(a.) 暴露度(MMM 代表多模型平均值)；(b.) 調適能力

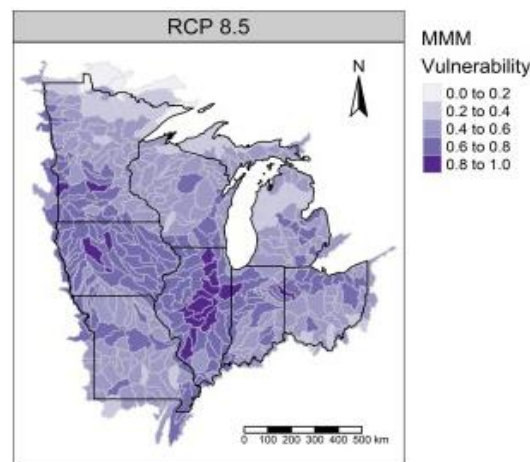


圖 2 - 11 水生生態脆弱度指標

2.3.2 AR5(2014)

不同於 AR4 對脆弱度的理解，AR5 以風險(Risk)為評估重心，風險主要用於氣候變遷影響下使系統受到威脅且結果不確定的情況，明確定義組成要素為式(2-2)及式(2-3)所示，可表示成危害事件發生的概率乘以事件發生後果的概念 (Hammer, 1972)，並強調社會經濟過程與土地利用變化可能對氣候變遷的反饋，如圖 2-12 所示。

危害(Hazard)是指可能發生在系統內與氣候相關的自然或人為物理事件，可造成生命財產、基礎設施、服務提供、或環境資源的損害(IPCC WGII, 2014)；暴露(Exposure)是指系統可能遭受不利影響的位置與設置；脆弱度(Vulnerability)指容易受負面影響的傾向(propensity) 與本質(predisposition)，包括敏感性、容易受災

特性以及調適的能力(NCDR, 2019)。圖 2 - 13 明確顯示與 AR4 與 AR5 的邏輯與不同詞彙的定義：AR4 的暴露／AR5 的危害表示構成系統脆弱度／風險的外部因素，即氣候相關事件；AR4 的敏感度、調適能力和 AR5 的暴露、脆弱度均在描述系統的內部因素。

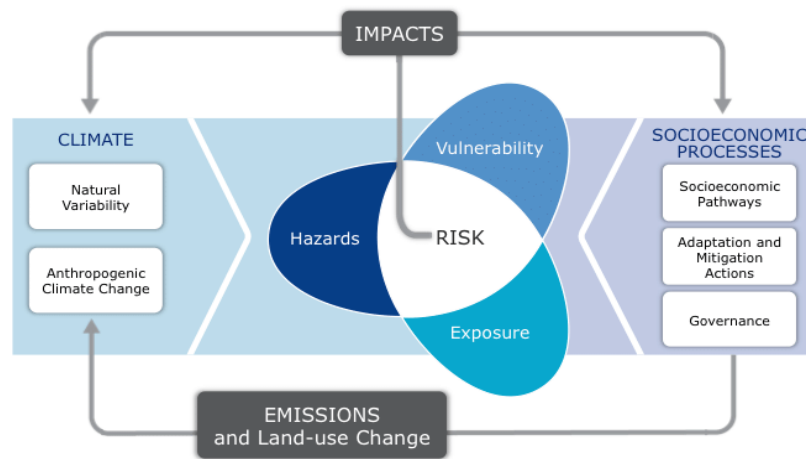


圖 2 - 12 AR5 下定義之風險概念圖(IPCC, 2014)

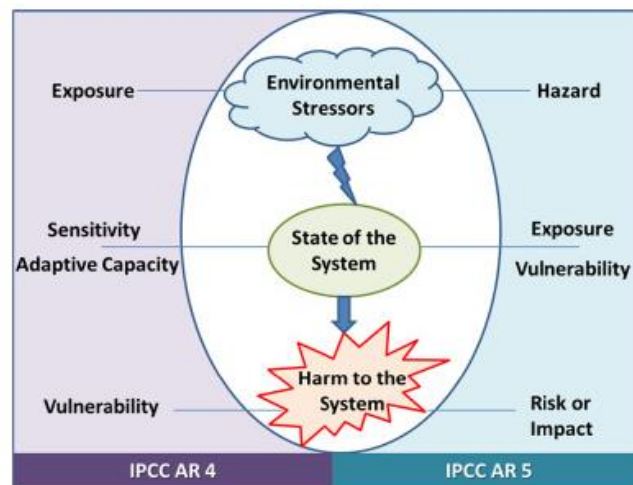


圖 2 - 13 AR4 和 AR5 概念整理 (Shouvik Das, 2020)

$$Risk = F(Hazard, Exposure, Vulnerability) \quad (2 - 2)$$

$$Vulnerability = F(Sensitivity, Adaptive capacity) \quad (2 - 3)$$

國家災害防救科技中心(National Science and Technology Center for Disaster Reduction, NCDR)於 2019 年以 AR5 的定義評估供水系統在氣候變遷下的水資源風險，擬定因子如表 2-2 所示，其中因豐枯差異、水源量減少、高濁度、設施損毀等物理事件或物理影響所引起的缺水定義為危害；脆弱度與暴露度共指民生、工業、農業用水標的面對缺水的影響，包括供水能力、城鄉供水韌性、人口成長、農業發展、工業發展等。

表 2-2 供水系統風險要素表(NCDR, 2019)

目標	要素	類別	因子	資料來源
風險	危害	氣候因子	氣溫	中央氣象局
			未來氣溫	TCCIP
			雨量	中央氣象局
			未來雨量	TCCIP
		非氣候因子	集水區面積	水利署
			集水區逕流曲線係數 CN	水利署
			集水區退水係數	水利署
			生活需水量	水利署
			工業需水量	水利署
			農業需水量	水利署
	脆弱度	調適力	水塔數量	尚無資料
			蓄水池容量	尚無資料
			埤塘容量	尚無資料
		敏感度	鄉鎮年齡組成	各縣市民政局(處)網站
			鄉鎮工業產值	100 年工商及服務業普查成果
			鄉鎮水稻種植面積	農田水利會
	暴露度		鄉鎮人口密度	內政部地政司人口統計資料庫
			鄉鎮工廠數量	100 年工商及服務業普查
			鄉鎮灌區面積	農田水利會

Shouvik Das (2020)選用 33 個參數做主成分分析 (PCA)，以相同參數集合探討印度孟加拉三角洲在 AR4 和 AR5 的框架分別造成氣候變遷的脆弱度和風險，最後顯示最脆弱及最高風險為兩個不同但鄰近且具相似地理特徵的街區，並依據主成分的解釋能力認為 AR5 修正對暴露的定義有助於區別系統自身的弱點和外



在環境，便於在高不確定的氣候變遷風險下制定特定地點的應對措施。

2.3.3 ISO 14090

2019 年 6 月公布 ISO 14090 氣候變遷調適原則、要求和指南，旨在讓組織實際面對氣候變遷的影響下能增強適應力並向利害關人證明其具備有效、可信的風險管理方法。該標準著重擬定調適行為，將組成風險的三個元素定為危害、暴露度即敏感度，其中危害和暴露度的定義與 AR5 相同，敏感度的定義與 AR4 相同。有別於 AR5 認為調適只針對於敏感度，ISO 擴大到三項元素分別可以有各自的調適行為，各元素經過調適後的殘留風險即為脆弱度，概念如圖 2 - 14 所示。

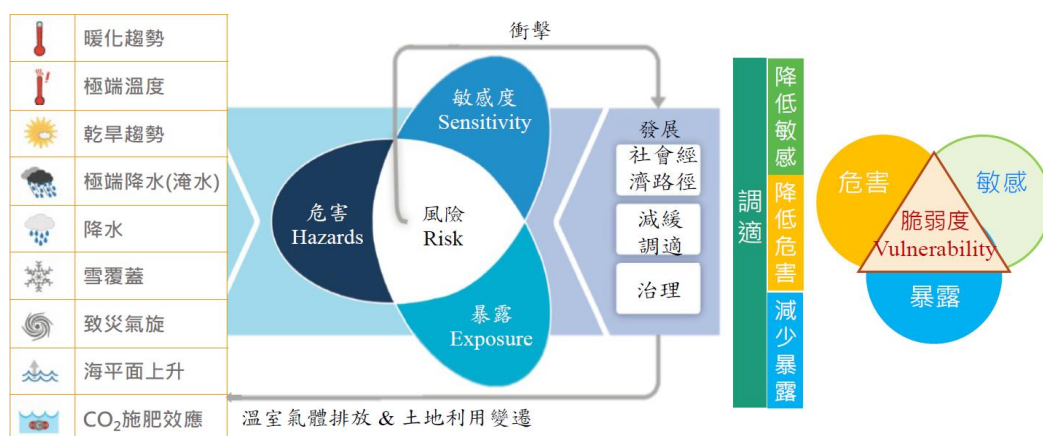


圖 2 - 14 ISO14090 界定氣候變遷風險之元素與脆弱度(童慶斌, 2020)

Chin-Yu He (2020)以氣候風險模板(Tun, 2019)及 ISO 14090 所定義的風險為基礎，融合氣候變遷調適(Climate Change Adaptation, CCA)與災害風險降低(Disaster Risk Reduction, DRR)，設計出結合 DRR 與 CCA (DRCA) 的風險模板。並以坡地災害風險為例，從新北市減災 2.0 方案與新北市氣候變遷調適方案內現有計畫中選取代表性之 34 個因子，率定因子內涵且重新修正與氣候風險的定義不一致者，分析如圖 2 - 15 所示。最後嘗試提出適合地方層級治理的 DRCA 融合模型以提供決策者規劃調適路徑。

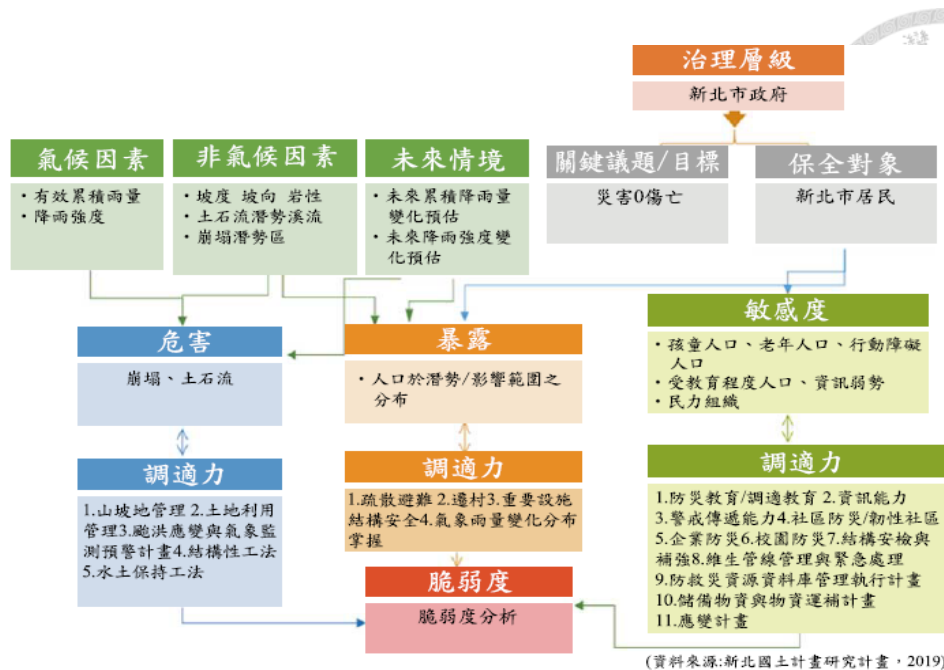


圖 2 - 15 新北市坡地災害風險分析(何謹余, 2020)

2.3 洪災韌性指標

過往評估都市暴雨常使用淹水深度、逕流量、洪峰流量與洪峰延遲時間等模式輸出參數，試圖以工程技術解決洪水問題。根據前小節的文獻可知近年趨勢已轉變為理解氣候變遷與人類活動的相互作用；然而洪水歷程長達數小時至數天不等，若僅考慮最大淹水範圍與量體，無法體現整個水文歷程，因此需將時間納入災害指標內各因子之變數 (Kong, 2016)。本節針對洪災韌性指標進行系列的回顧，從提供質性的評估流程、建立量化的評估架構、實際計算出具時間變異的指標、最後應用洪災韌性指標在都市防災，摘錄相關文獻並說明。

Jelena et al. (2013) 將洪水事件從事件開始前到下一個洪水事件開始前視為一管理週期，依先後順序區分成：Relief 為洪水前利用現有結構和綠地來匯集洪水的設施；Resist 為洪水前透過整治基礎設施和經濟行為來抵禦洪水破壞；Response 為洪水期間採取的危機管理行動；Recovery 為洪水事件後社區重建的能力；Reflect 為從經驗中學習，在下一場洪水來臨前加強風險意識。各階段結合五種面向的評分指標(自然、物理、社會、經濟和制度) 及權重，評估都市內不同規

模和功能承受洪災衝擊後恢復至原始水平的能力，即為 Flood Resilience Index (FRI)的概念，如圖 2 - 16 所示。

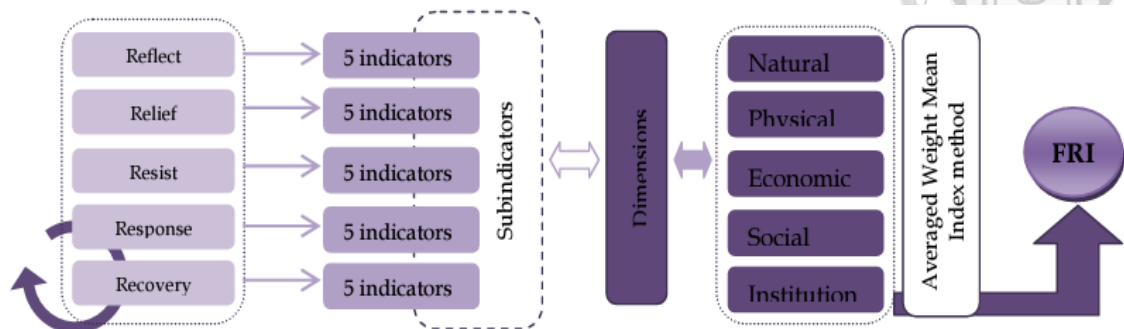


圖 2 - 16 FRI 評估示意圖(Jelena et al., 2013)

Hemmati (2019)認為社會經濟發展是洪水風險顯著增加的因素之一，因此洪水風險應納入未來都市規劃政策以確保社區韌性。韌性是都市在洪水事件保有的功能性(例如居住、水電、汙水處理、醫療、燃料系統、通信、警察和消防等服務)，過於老化的都市在洪水事件(Event)發生前其功能(Functionality)即以一斜率下降，如圖 2 - 17 紅色圈起處，反之若事件發生前具備調適措施能以更高的功能性承受衝擊；事件後是否有完善的復原計畫決定恢復完整功能所需的時間和成本。該研究僅提出時間變異性的圖像化概念如圖 2 - 17 所示，但尚未具體計算。

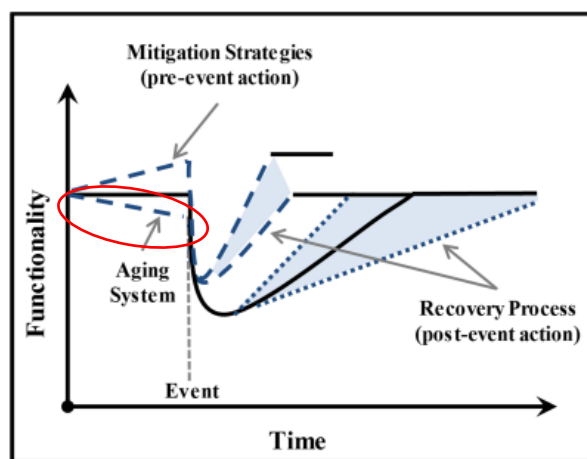


圖 2 - 17 韌性在洪災時間尺度下的變化(Hemmati, 2019)

Chen et al. (2019) 將具時間變異性的概念納入 FRI 的計算中。如圖 2 - 18 所

示，將 FRI 分成以物理因子主宰的事件期 (Event Phase)、以社會經濟型態因子主宰的回復期 (Recovery Phase)，因子選擇如表 2 - 3 所示，各因子均有對應的臨界值 (Reference Parameters) 及自訂權重。該研究設計具時間變異性的物理因子，設計不同因子在不同階段的計算公式，並以 P-DWave (Parallel Diffusive Wave Model) 二維逕流模式模擬德國慕尼黑 (Munich) 的淹水情形，量化家戶的韌性指標。

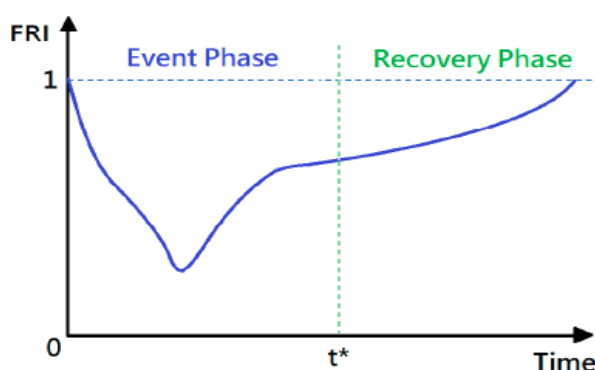


圖 2 - 18 FRI 示意圖， t^* 為室內淹水深度 0 公尺的時刻 (Chen et al., 2019)

表 2 - 3 FRI 因子組成(資料來源：Chen et al., 2019)

	Event Phase				Recovery Phase		
factor	water depth	accumulated water depth	flooding duration	water accumulation rate	children population	elderly population	household income

Leandro et al. (2020) 使用 Chen et al. (2019) 計算 FRI 的方法，將慕尼黑分為四個街區，讓所有家戶受洪水時採用氣候變遷調適 (Climate Change Adaptation, CCA)，包含 10cm 的防洪閘門、 3m^3 的儲留水箱、效率 3L/s 的抽水機等三種措施。整體而言在世紀末的降雨情境下採用 CCA 可以使 57% 的建物 FRI 分數保持為 1，然而因無法改變社會經濟型態因子的分數和權重，四個街區的 FRI 不一定都得到良好的改善。另外該研究尚未考慮雨水下水道的逕流，為了產生回復期，設定模擬 1 小時後室外水深即恢復成 0 公尺，讓該時刻 FRI 明顯上升如圖 2 - 19



所示，可能扭曲真實的韌性。

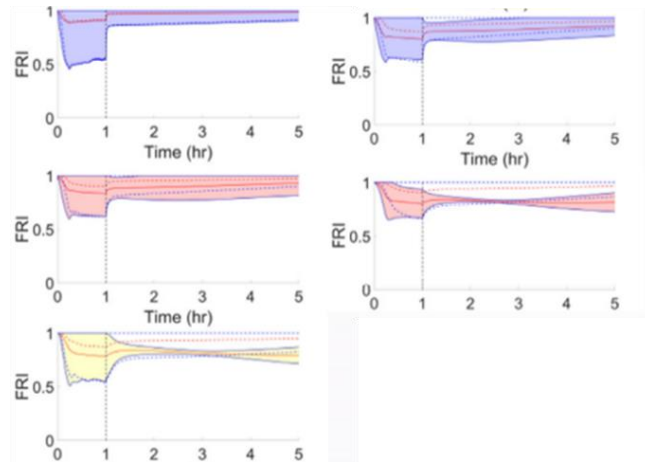


圖 2 - 19 不同區域之 FRI 曲線(Leandro et al., 2020)

有別於多數研究著重 LID 的減洪效果(Damodaram et al., 2013; Feofilovs, 2017; Ho et al., 2020) ，Chang (2021) 加入 FRI 評估台南新化市區佈設 LID 的韌性成效。該研究以 2009 年莫拉克颱風為情境降雨，配置 LID 因入滲增加使淹水發生時間延後、深度降低、影響面積減小 4%；然而聚焦嚴重區域只減少 1%的淹水面積，且若拉長降雨延時則減洪成效不彰。在韌性的表現上，佈設 LID 能延遲 FRI 的下降時間和幅度，最低點分數稍高且出現時間提前，平均早約 6.5 小時恢復至初始狀態。圖 2 - 20 顯示其研究結果。

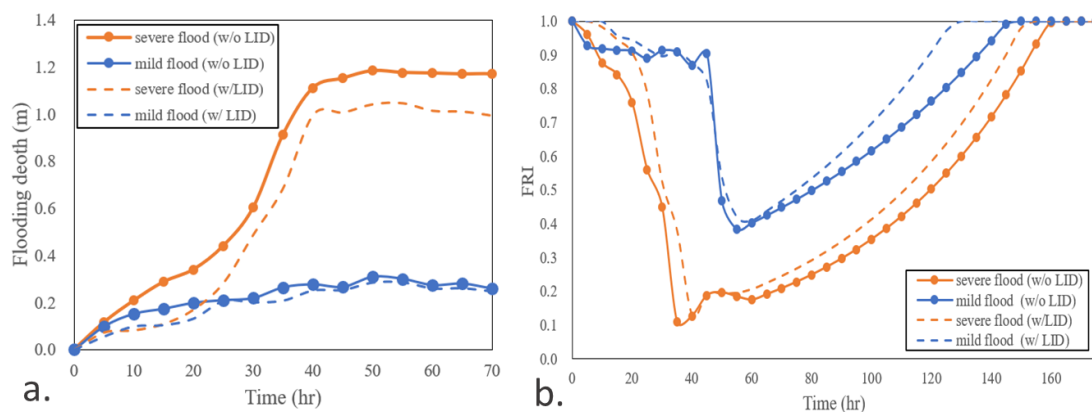


圖 2 - 20 比較有無 LID (a.)洪水深度；(b.) FRI 趨勢

觀光收入為古都(art cities)的重要經濟來源，倘若遭遇洪災，城市內許多文化資產的受損價值難以衡量，且洪災影響期間觀光景點的門票、餐飲、住宿收入勢必受衝擊。Arrighi et al. (2022) 使用 HEC-RAS 求出淹水深度作為危害度；暴露度代入景點參觀統計人數，若缺乏資料則以實際參觀人數與網路點閱次數的線性迴歸模型估算；再將洪水深度與建築物重新開放時間建立脆弱度迴歸模型。該研究結合上述三者算法，計算出義大利佛羅倫斯 (Florence) 在 200 年重現期降雨情境下需要 351 天才能恢復遊客數量，過程中共損失 1050 萬名遊客，如圖 2-21 所示。另外根據敏感度分析，災害前期受到吸引力參數影響、後期受脆弱度影響劇烈，因此官方除了加快景點重新開放時間，應透過宣傳活動使遊客回流，減少損失。

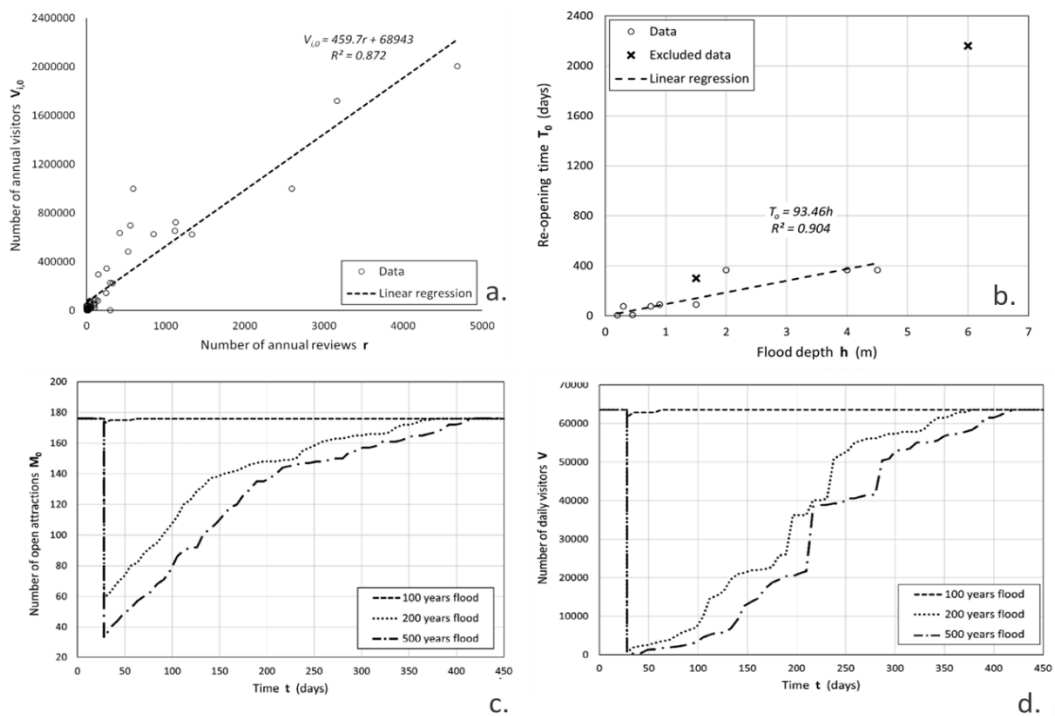


圖 2-21 佛羅倫斯洪水事件下的指標模型(a.) 暴露度；(b.) 脆弱度；(c.)事件後開放的景點數量；(d.) 事件後遊客人數 (Arrighi et al., 2022)

第三章 研究方法與理論



本研究針對都市區域建構以洪災為主體的韌性指標架構。在水理模擬中使用 3Di Water Management 暴雨逕流模式，模擬新北市中永和四條明渠排水路流域在氣候變遷情境下不同設計雨型的暴雨所造成的淹水；並參酌 ISO 14090 針對氣候變遷調適行為的定義以及實體風險評估模板的架構，設計結合物理淹水因子與社會經濟狀況，且具有時間變異性的洪患韌性指標(Flood Resilience Index, FRI)，探討不同降雨情境對 FRI 的敏感度。本章將進逐步介紹 3Di 模式基礎理論、氣候變遷實體風險、FRI 計算架構。

3.1 3Di 模式

3Di 是由荷蘭新創顧問公司 Nelen & Schuurmans、技術研究所 Deltares、TU Delft 及政府部門等單位共同合作所開發的互動式高解析度淹水模式。有別於其他水力計算軟體，其優勢能將高空間解析度之地理資訊(如土地利用、地形高程)、模型數據和龐大模擬資料構成的水力模型(hydraulic model)自動且迅速地架構成資料模式(data model)，此資料模式可提供 DEM、土地利用、土壤類型等資訊，水理模式可模擬一維管線、二維漫地流、河道流況並進行一、二維的水體交換和內外水動態的流動，更貼近真實情境(Dahm et al., 2014；黃莉雅, 2021)，藉此提供本研究淹水模擬精度之需要。此軟體以 Local 端建模以及雲端運算的模式運行，當任一原始資料變動，資料模式便會在資料庫更新，並自動將其存放於雲端伺服器，以供使用者立即模擬。3Di Live 數據可視化展示的技術讓使用者迅速、直觀地瞭解模擬區域水情即時變化以做出各種應變，因此實用上該模式適合輔助預測都市淹水以及評估韌性。

子網格法提供 3Di 在高解析度的資料中能保持高速計算，乃是考量無論在濕潤或乾燥過程中均允許較粗的計算網格中包含較高解析度的探測資料



(Casulli,2009)。利用子網格粗化成計算網格進行模擬(Volp, 2013)，並結合牛頓迭代的有限體積數值方法求解非線性方程式，能得到最佳準確度和高效率的模擬結果。後續就控制方程式、網格方法、模擬過程做進一步介紹。

3.1.1 控制方程式

在 3Di 模擬中，數值解採用迪聖凡南(de Saint Venant)淺水波方程式(shallow water equation)求解出一維和二維流況。

淹水模擬所計算之流體屬於無黏性淺水波(inviscid water)，且考慮在相對坡度較小波，淺水波方程式包含連續方程式及動量方程式在一維及二維的方向，如式(3 - 1)至式(3 - 3)所示。

$$\text{(連續方程式)} \quad u \frac{\partial h}{\partial x} + v \frac{\partial h}{\partial y} + \frac{\partial h}{\partial t} = 0 \quad (3 - 1)$$

$$\text{(x 方向之動量方程式)} \quad u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial u}{\partial t} + g \frac{\partial \zeta}{\partial x} + \frac{c_f}{h} u \|u\| = 0 \quad (3 - 2)$$

$$\text{(y 方向之動量方程式)} \quad v \frac{\partial v}{\partial x} + u \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial t} + g \frac{\partial \zeta}{\partial y} + \frac{c_f}{h} v \|v\| = 0 \quad (3 - 3)$$

式中， ζ 為水位， h 為水深($h = \zeta - e$)， e 為地表高程， u 及 v 為 x 及 y 方向的平均水深流速，加上絕對值為流速大小， c_f 為曼寧公式之無因次摩擦係數(Stelling 2012; Van't Veld 2015)。

模擬雨水下水道的管流情形需假設管渠系統間互相流通，且遵守一維明渠方程式的動量方程式與連續方程式。如式(3 - 4)和式(3 - 5)所示。

$$\text{(動量方程式)} \quad u \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial h}{\partial t} = -g \frac{\partial \eta}{\partial x} - \gamma u \quad (3 - 4)$$

$$\text{(連續方程式)} \quad u \frac{\partial A u}{\partial x} + \frac{\partial A}{\partial t} = 0 \quad (3 - 5)$$

式中， t 為時間， u 為一維管流中未知水深或水寬下的流速， η 為水面或壓力水頭， A 為通水斷面， g 為重力加速度， γ 為非負數和非線性變化之變數(Casulli

& Stelling 2013)。

3.1.2 網格技術

3Di 模式採用 DEM 作為地表數值高程網格的資料形式，故 DEM 的解析度愈高，愈能避免地形高程被平均化或扭曲化後與現實產生誤差（台灣大學慶齡工業研究中心，2019）。在一般數值模型中，通常是自動產出單一大小的網格或手動劃設大小不均勻的網格，再將 DEM 內插至網格中賦予其高程；而 3Di 的子網格法 (subgrid technique)、四分樹法 (quadtree) 搭配底床剪應力修正以及交錯網格有限體積法等技術能有效將網格粗化，並在特定區域加密網格 (Stelling, 2012; Afifi, 2019)，使模式節省大量的計算時間成本且保持高準確度。

子網格法以 DEM 像素 (pixel) 網格為子網格 (subgrid)，將屬性相同的四個或四個的冪次方個子網格結合成一個大的正方形計算網格計算流速與水深等水理參數。此方法考慮在流體動力學計算或傳統測深方法中，均假設計算單元中的水位為均勻，因此子網格法也允許水位或地形變化不大的空間中，在一個計算單元內測深的變化，同時水位保持均勻。此技術主要應用於高空間解析度的 DEM 資料或計算網格數量過多時，地表高程、糙度等底床資訊由 DEM 的網格提供；流速、水位等流場資訊則是由比 DEM 更粗化的計算網格計算得出。

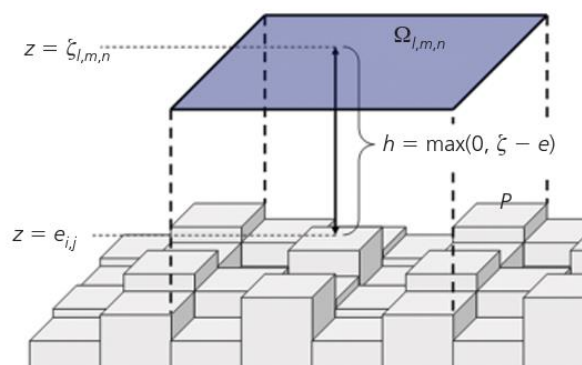


圖 3 - 1 DEM 與子網格關係圖 (Stelling, 2012)

四分樹法是一建立分級計算精度的技術，此數據架構形式的概念類似樹狀圖：將二維區域分成四個正方形，每四個正方形又可以再切割成四個大小相同的

方格，每當進行一次網格精細化，計算網格的解析度將會是上一次的兩倍，以此類推。圖 3-2 上方灰綠色圖層代表計算網格具有兩種精度，一個計算網格由 4 或 16 個 DEM 網格組成，如圖 3-3 畫成示意圖來看，此方法可以減少至少 32 至 5 個計算網格數量(van't Veld, 2015)。

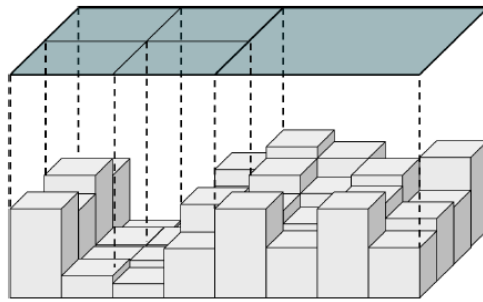


圖 3-2 四分樹網格與 DEM 資料關係(Stelling, 2012)

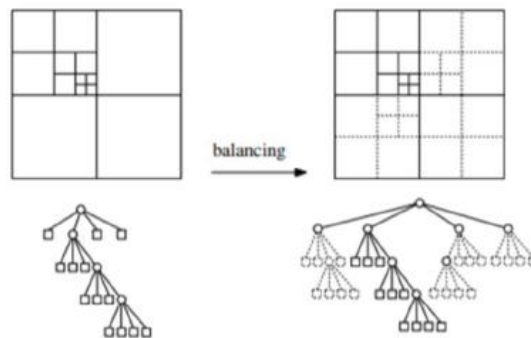


圖 3-3 計算網格在平衡四分樹法之級距示意圖(<https://docs.3di.lizard.net>)

3Di 模式採用平衡四分樹法，考慮周圍的計算網格的級數(l)，使之與周圍差異保持 1 級。由模式中的最大四分樹級數(K_{max})和最小計算網格尺寸(Grid space)參數共同決定網格大小，Grid space 需為 DEM 像素之偶數倍，如圖 3-4 所示，若 k_{max} 設為 4 代表最大網格面積大小為最小計算網格的 2^4 倍。

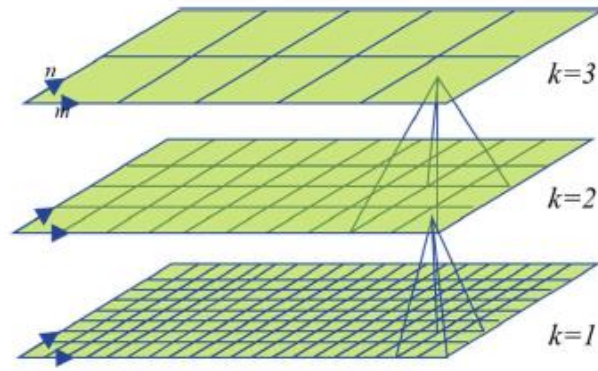


圖 3 - 4 Kmax 與 Grid space 之關係(3Di's documentation, 2022)

建立模型時某些地區必須著重細部資料。如：都市區域比鄉村區域來的重
要、堤防周圍比平坦地形地區更為重要(Niemczynowicz, 1999)，故配合加密線或
多邊形的設置，可在重點範圍(如下水道管線、堤防、河道、局部低漥處)進一步
精細計算網格，以呈現流體傳輸時的流暢性，且減少重點區域外圍的計算網格的
數量，如圖 3 - 5 所示。排序規則以羅盤法定義 (Stelling, 2012)。 P_{ij} 為大小 $\delta_x \times \delta_y$
(其中， $\delta_x = \delta_y$) 的 DEM 像素， $\Delta X = \Delta Y$ 為粗化網格的大小， Γ 和 l 為根據四分
數排序的整數， Ω 為網格編號， m 、 n 為周圍網格編號，而圖 3 - 6 把 $\Omega_{l,m,n}$ 分成
大小相同的四個網格，表示方式如式(3 - 6)至式(3 - 10)所示。

$$\Omega_{l,m,n} = [(m-1)\Delta x_l, m\Delta x_l] \times [(n-1)\Delta y_l, n\Delta y_l] \quad (3 - 6)$$

$$\Omega_{l,m,n}^{SW} = \Omega_{l-1,2m-1,2n-1} = [(m-1)\Delta x_l, (m-\frac{1}{2})\Delta x_l] \times [(n-1)\Delta y_l, (n-\frac{1}{2})\Delta y_l] \quad (3 - 7)$$

$$\Omega_{l,m,n}^{NW} = \Omega_{l-1,2m-1,2n} = [(m-1)\Delta x_l, (m-\frac{1}{2})\Delta x_l] \times [(n-\frac{1}{2})\Delta y_l, n\Delta y_l] \quad (3 - 8)$$

$$\Omega_{l,m,n}^{NE} = \Omega_{l-1,2m,2n} = [(m-\frac{1}{2})\Delta x_l, m\Delta x_l] \times [(n-\frac{1}{2})\Delta y_l, n\Delta y_l] \quad (3 - 9)$$

$A_{y,l}$ (3 - 10)

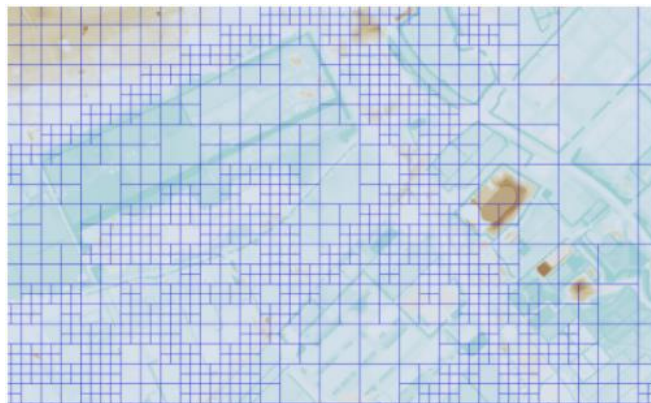


圖 3-5 四分樹法優化計算網格的範例(3Di's documentation, 2022)

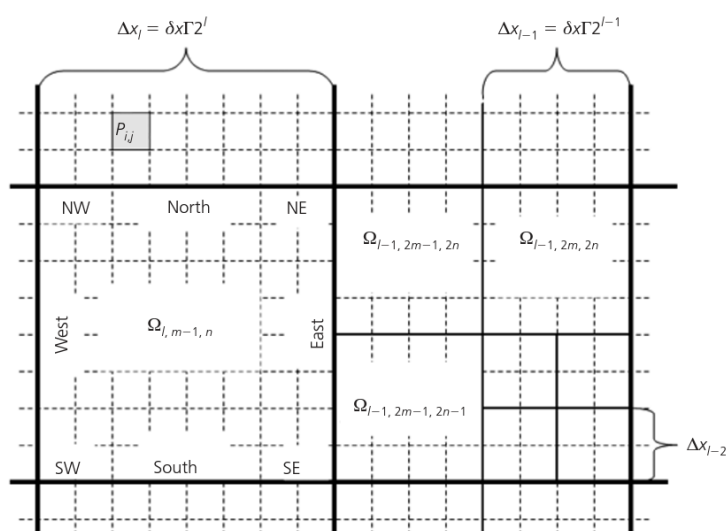


圖 3-6 羅盤法定義四分樹網格(Stelling, 2012)

DEM 通常會比計算網格更精細，故可能發生同一計算網格中部份 DEM 網格為淹水但部份 DEM 網格為非淹水(王福杰，2018)，因此必須修正底床剪應力如式(3-11)至式(3-12)，其中 τ_b 為底床剪應力， ρ 為流體密度， $h_f = \frac{h}{c_f}$ 為糙度深度(Roughness Depth)。得出水位後扣除每一個 DEM 子網格的高程後所得高解析度之淹水深度，這是考慮地形特徵未被簡化的水深，更貼近真實淹水深度與範圍。

在子網格間，3Di 嚴格地利用有限體積法將連續方程式及動量方程式解為質量守恆和動量守恆。如圖 3-7 所示，地表逕流的二維域和下水道系統中的一維域流動中，水位和壓力被定義在四分樹的小單元中心的藍點；水位域和靜壓域為藍色區塊。速度以兩個相鄰小單元的界面為中心，被定義在網格邊緣的藍色線段；動量域為綠色和橙色區域，若相鄰單元格的大小相等，則由每個單元格的一半組成，若相鄰單元格的大小不同，則由較大單元格的四分之一和較小單元格的一半組成(黃莉雅，2021)。

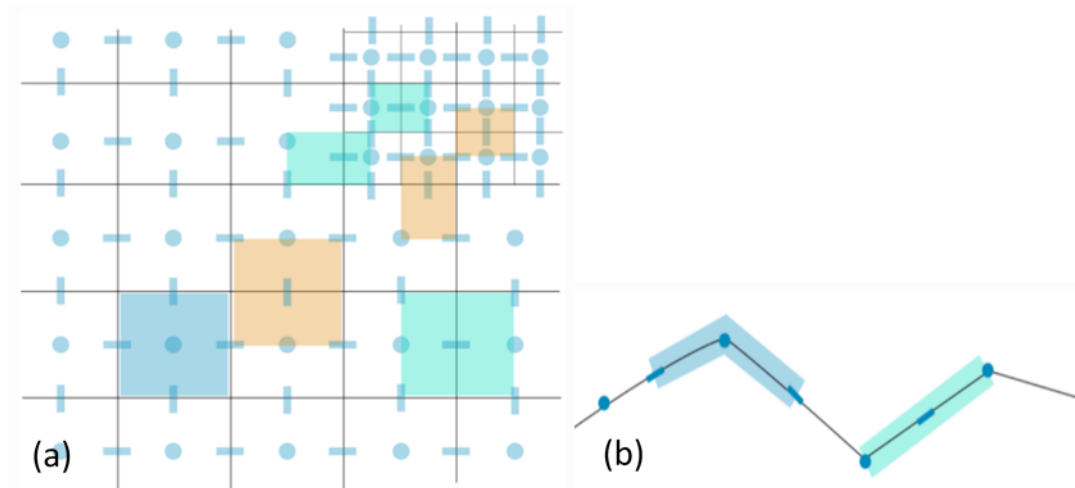


圖 3-7 動量與質量分布介紹圖 (a)二維交錯網格；(b)一維網格



3.1.3 模擬過程

決定好計算網格後，3Di 會先暫存單一計算網格的水位變化跟流量非線性關係 V-H 圖，如圖 3 - 8 所示，模擬時只需儲存網格上的水位，便可從暫存檔內的演算得到網格水位升降多少，當計算結果水深高於臨近地表高程時，會以對應的流量流向低高程的計算網格，省去模擬當下的換算時間。兩個計算網格間的流速將會受到陰影處(shaded cells)，及四分樹網格大小所影響，如圖 3 - 9 所示。

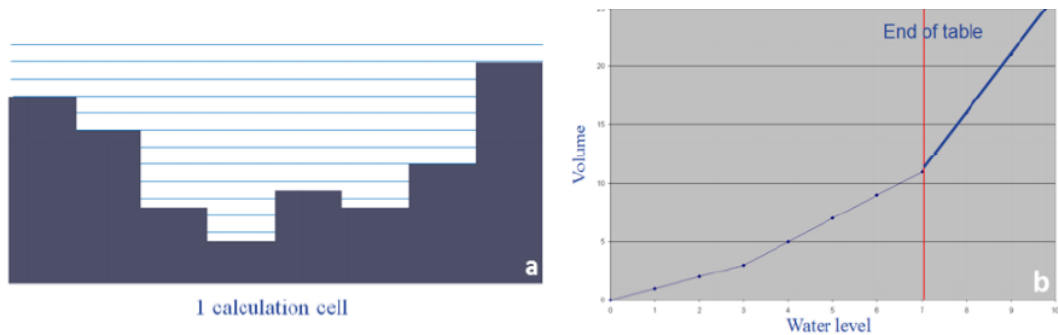


圖 3 - 8 (a) DEM 點位資料的橫斷面；(b) 模式的初始 V-H 關係圖(王福杰，2018)

$$\text{(當網格內全部淹水)} \quad \frac{\tau_b}{\rho} = \frac{1}{2} c_f u \|u\| \quad (3 - 11)$$

$$\text{(當網格內部分淹水)} \quad \frac{\tau_b}{\rho} = \frac{1}{2} \frac{h}{h_f} u \|u\| \quad (3 - 12)$$

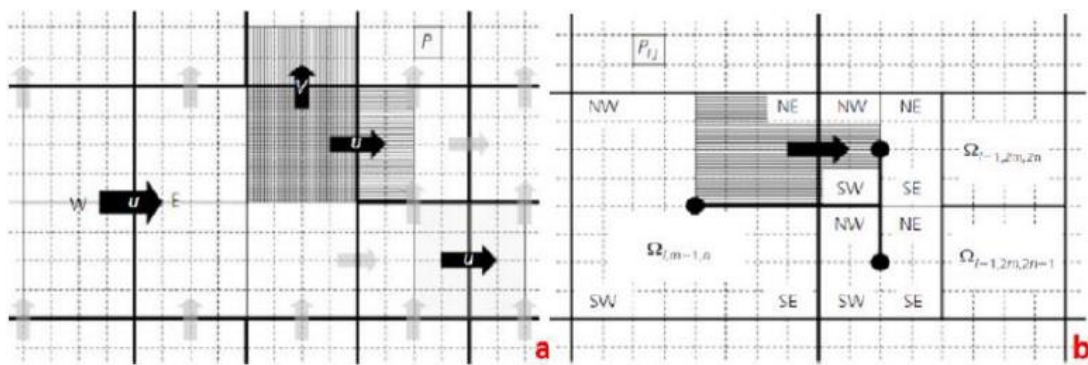
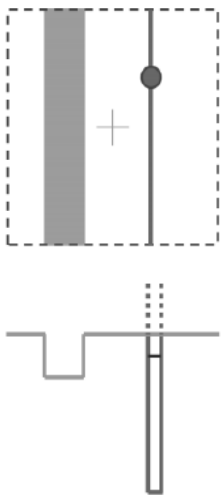
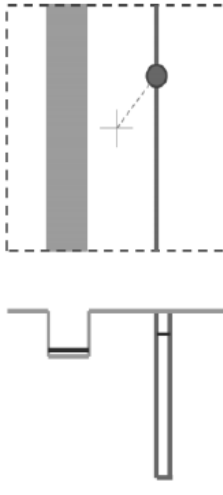
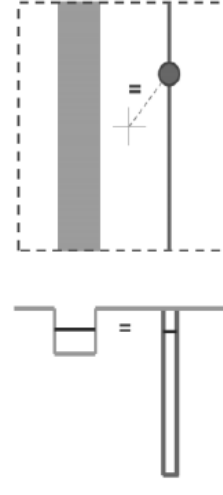


圖 3 - 9 不同精度網格間的(a)流速示意圖；(b)水深變化示意圖(Stelling, 2012)

雨水降至地表後會先以地表逕流的方式流入雨水下水道系統內，3Di 因具有 1D 及 2D 流體交換的連續方程式(Nelen & Schuurmans, 2016)，呈現在模式中的人孔(manhole)類型，可分為三種型式如表 3 - 1 所示，因為連接式(connected)能考慮到雨水下水道系統與地表逕流的耦合(van Dijk 2011; Mark & Parkinson 2005)，故本研究於都市區域使用連接式，於河川設置的邊界條件使用嵌入式(embedded)以詳實呈現都市淹水模擬。

表 3 - 1 一二維相互作用下的三種人孔類型(圖片來源：台灣大學慶齡工業研究中心，2019)

	孤立式 (isolated)	連接式 (connected)	嵌入式 (embedded)
定義	人孔內的水體不會與地表逕流水體相互影響，可反應水壓。	人孔內計算水深大於地表排水系統或人孔高程，水體流入；當計算水深大於地表高程，水體流出地表。	當雨水下水道水位高於地表高程時不被約束而全部溢流出地表，反之亦然。
應用	雨水下水道箱涵的分支點或一維邊界條件	雨水下水道系統	一維節點的出入口在河川、湖泊等開放水域
圖示			

3Di 模式中以 DEM 資料提供地表高程資訊，都市淹水模擬一般常使用到的空間不均勻參數如摩擦係數、入滲量、截流量，均以 QGIS 建置成點陣式(raster)檔案，其座標系統、像素大小(pixel)、邊界範圍(extent)需與 DEM 相同，且任一

個網格之間需互相對齊，依模式所需設定資料形式為 Float32，進行高度壓縮，方成為輸入資料。sqlite 檔案則為資料庫型式，亦以 QGIS 編輯，內含一維管線系統與堤防結構物、加密區域、邊界條件、數值計算參數以及統整所有參數的全域設定(Global setting)。

建模完成後的模擬過程需靠各種平台交互完成：先使用 3Di 的 checker 工具初步檢查檔案格式是否正確及合乎預設條件。爾後藉由 TortoiseHG 平台將模型所有檔案上傳至雲端指定的資料庫中，上傳成功後 Lizard Data Bank 及 3Di models 隨即會有最新版本的模型，此時需再注意 3Di models 是否提出錯誤訊息，若有則須重新修正模型；若無錯誤則可回到 QGIS 中利用 API client 工具箱給定模擬名稱、降雨事件、初始條件、結果產出等。模擬過程中可在 3Di Live 網頁中跟隨模擬，此功能可透過動態畫面即時追蹤二維地表逕流、一維雨水下水道系統人孔及管線的水理參數，並選取特定點位輸出 csv 檔。模擬完成後 QGIS 的 API client 工具箱可下載 nc 檔案(限模擬後 7 天內)，和至 Lizard demo 網頁輸出模擬範圍中各水理參數的 raster 檔案作為後續分析淹水深度及範圍的資料來源。整個流程整理如圖 3 - 10 所示

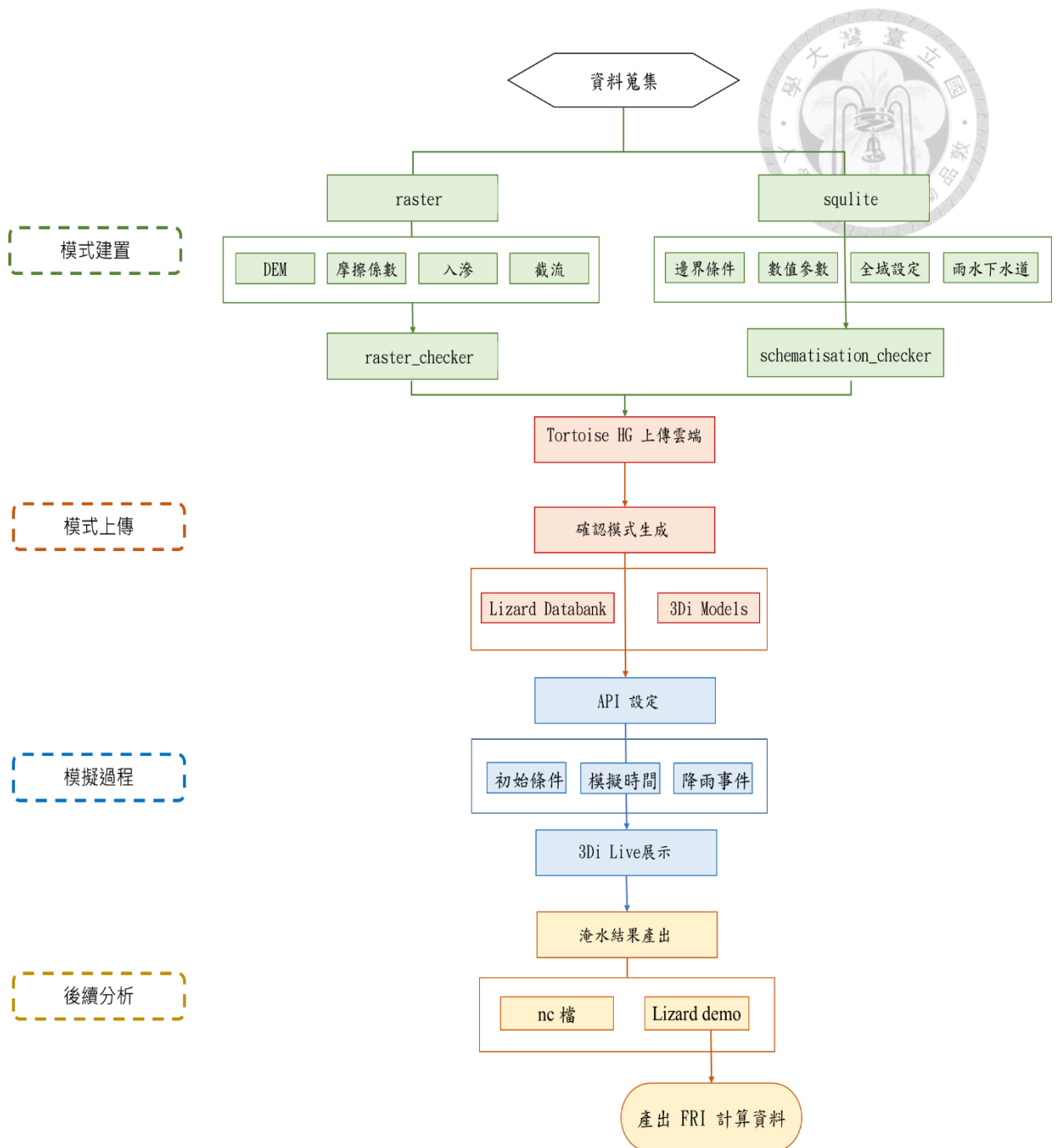


圖 3 - 10 3Di 模式使用流程

3.2 氣候變遷實體風險

3.2.1 氣候相關風險

氣候變遷對人類生活帶來的影響愈來愈明顯，除了盡力減少溫室氣體排放外，各行各業需要更明確定義氣候問題、以針對調適行為做出規範。目前銀行

業、保險公司及金融業在評估企業永續時，常將氣候變遷所帶來的風險區分成實體風險與轉型風險(TCFD，2015)，架構如圖 3 - 11 所示。實體風險(Physical Risk)指的是受到淹水乾旱、暴潮、坡地災害等極端氣候事件的影響，使企業的經濟行為、服務產品遭受破壞，不僅讓公司盈利能力下降、股價下跌、資產價值降低，更會產生公共財政的損失風險，造成大眾財富縮水：例如對整個經濟體的供應鏈中斷；對保險業而言，需清償更多承保損失的理賠成本；對金融業而言，房地產和企業資產的貶值讓其擔保價值下降，加大銀行的企業信用資產風險。轉型風險(Transition Risk)指的是朝向碳中立經濟(Carbon Neutral Economy)的過程中促使重新評估各種資產價值、能源價格產生變化，因而需對企業內部或整個經濟體進行重大結構調整所伴隨的風險。

實體風險又可區成長期性風險(Chronic Risk) 和立即性風險(Acute Risk)兩種。長期性風險指的是源自氣候模式的長期變化，如經年累月的高溫所引起的海平面上升或熱浪等現象。立即性風險是以單一的極端氣候事件為主，包括颱風、龍捲風、洪水等所造成的災害(產業永續發展整合資訊網，2020)。其中立即性風險為本研究關注的類型，將探討其對都市韌性隨時間所造成的不同變化。

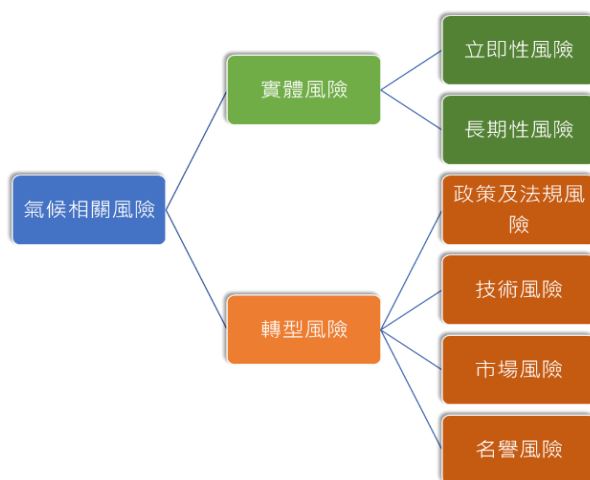


圖 3 - 11 氣候相關風險架構圖



3.2.2 氣候實體風險模板

氣候變遷帶來的立即性風險雖存在區域上的獨特性，但評估的過程或調適行為的準則卻可以存在共通性，因此藉由風險模板(林李耀等，2018) 鑑別風險能使不同使用者在相同基準上做風險溝通。

氣候實體風險模板(Climate Physical Risk Canvas)(童慶斌，2021)，如圖 3 - 12 (a)所示，為架構在 ISO14090 及 ISO14091 準則之上的風險評估模板，格子左上角 1 至 12 的編號為方便使用者釐清風險所建議的填答順序。保全對象可為人、動植物、物品，若無欲保全的對象則不具有公益性及必要性，氣候相關災害所造成的風險也不會使任何對象構成危害，故確定被災害影響的保全對象為首要之務。關鍵議題為保全對象暴露在危害下所產生的風險。危害為與保全對象無直接關係卻會造成生命損失或財產損害的外在因素，其因子可區分成氣候因子與非氣候因子，ISO14091 中提出危害包括緩慢發生的氣候發展(例如長期升溫)以及迅速發展的極端事件(例如熱浪)增加的變率。暴露為保全對象之空間分布情形，若保全對象分布於無危害的區域，則不會構成氣候變遷的風險，而 ISO14090 中指出暴露可能隨時間變化，例如土地利用為可能之因子。敏感度為保全對象暴露在危害的不利或有利的影響程度，ISO14091 中指出其影響可能是直接(例如作物產量因平均溫度、範圍的變化而變化)或間接(例如海洋引起的沿海洪水頻率增加而造成損害)的致災情形。圖 3 - 12(b)為保險公司評估農業保險應用此模板的實例。綜合以上所述，本研究考量 ISO 14090 相比 AR4 與 AR5 的架構更為嚴謹，將危害、暴露、敏感度的定義結合成氣候變遷實體風險，並允許三者可分別有相關的調適行為(氣候變遷調適行為)，使風險減去各自的調適後能代表指標分數隨時間下降的脆弱度，另外加上分數隨時間上升的回復力，即能與韌性的概念相呼應。因此本研究將參考 ISO 14090，定義出 FRI 指標不同層面的影響因子。

保全對象	危害	危害氣候因子	危害非氣候因子	危害調適
1	4	7	7	10
關鍵議題	暴露	暴露因子		暴露調適
2	5	8		11
氣候實體風險	敏感度	敏感度因子		敏感調適
3	6	9		12

a

保全對象	危害	危害氣候因子	危害非氣候因子	危害調適
1 作物	4 暴雨淹水 乾旱 高溫 寒害 	7 暴雨降雨強度 連續不降雨日 溫度	7 區域排水能力 區域供水能力	10
關鍵議題	暴露	暴露因子		暴露調適
2 (作物)暴露在(天氣災害)下的保險賠償損失	5 投保作物空間分佈	8 N/A		11
氣候實體風險	敏感度	敏感度因子		敏感調適
3 天氣災害導致作物損害賠償	6 投保作物受天氣災害損害之敏感度	9 (1)作物種類 (2)在地之防洪能力 (3)在地之供水能力 (4)在地溫度控制設施		12

b

圖 3 - 12 (a)氣候實體風險模板架構；(b)研究範例(童慶斌，2021)

3.3 洪患韌性指標(FRI)

本研究採用隨時間變化的洪患韌性指標(FRI) 量化洪水事件來臨前後都市的韌性變化過程。使用此指標計算時，可依據管理者的治理層級或利害關係人將研究區域分成若干個均質的分析單元(例如行政區、村里鄰、最小統計單元……等)，並假設受淹水衝擊時同一個單元內部的物理特性與社會經濟特性相同。每個單元洪災發生前後的脆弱度與回復力隨時間的變化需要在相同基準下評估，故計算 FRI 時需要將所有不同特性的影響因子(factors)標準化，以利比較各個單元彼此的差異。而不同因子具有各自對應之臨界值，超過某因子臨界值的所有單元將有一致的因子分數，代表這些單元的條件狀況均低於或高於某因子的水準。

FRI 可將一場洪水事件區分成災害發生期(Event Phase)與災後復原期(Recovery Phase) (Chen et al., 2019)。在 Event Phase 中因為系統受到災害的衝擊使

FRI 隨時間下降，而在 Recovery Phase 因淹水事件已結束，不再造成額外的破壞，故能著手災後的復原工作，此時 FRI 逐漸上升回到逼近原始的狀態。因此本研究從 FRI 變化趨勢線的極值(最低點)作為兩個時期的區分點，如圖 3-13 所示，以作為管理決策者判斷投入都市防災資源之最佳時機點。

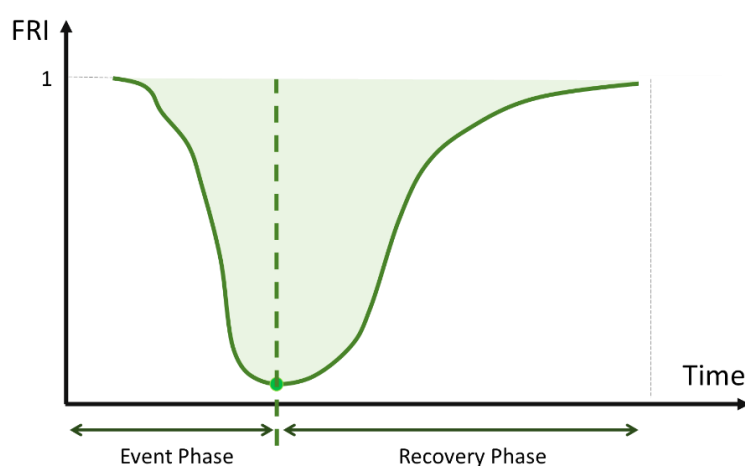


圖 3-13 Flooding Resilience Index 結構示意圖

國家災害防救科技中心(National Science and Technology Center for Disaster Reduction, NCDR)對積淹水的描述為「當道路積水高度超過 25~30 公分時，就會對兩旁的住家或商店造成影響」。是故本研究定義在一場暴雨中， t_s 為第一個淹水水深大於 0.25 公尺的時間，亦為淹水事件的起始時間； t_e 為最後一個淹水深度大於 0.25 公尺的時間，亦為淹水事件的終止時間和回復力作用點。

參照 ISO14091 及氣候實體風險模板之定義，區域受到淹水影響的因子可區分為物理因子與社會因子，因此本研究將 FRI 內部指標進一步細分成內含物理因子的危害度指標、內含社會因子的暴露度指標和敏感度指標，以下依序說明。

3.3.1 危害度指標

危害度指標 $I_{hazard}(t)$ 乃包含氣候相關的物理事件趨勢或其物理影響，本研究考慮淹水發生期間的影響因子包括淹水深度因子 $F_H(t)$ 、淹水影響面積因子 $F_A(t)$ 、淹水延時因子 $F_D(t)$ 。若淹水造成的深度愈高、面積愈大、延時愈長，

因子分數愈低，危害度愈高，危害度指標愈低，使整體脆弱度上升及韌性降低。

(3) 淹水深度因子(Flooding Depth Factor)：淹水深度可為該地區在某一時刻實際觀測數據的範圍平均值，若愈高將直接影響到生命財產安全，為一立即性因子。

《災害防救法》第 48 條明定若實際居住之住屋因水災淹水達五十公分以上，可申請水災補助，本研究依此定義將淹水深度的臨界值(H_{ref})設定為 0.5 公尺，超過臨界值會使生命財產損失嚴重。計算如式(3 - 13)所示， $H_i(t)$ 為各里在t 時刻的平均淹水深度。

$$F_H(t) = \begin{cases} 1 - (H_i(t) / H_{ref}), & \text{if } H_{ref} \geq H_i(t) \\ 0 & , \text{if } H_{ref} < H_i(t) \end{cases} \quad (3 - 13)$$

(4) 淹水影響面積因子(Flooding Area Factor)：由 3Di 暴雨模擬結果提供的淹水水深數據進行估算，為一立即性因子，分析時必須考慮整體淹水狀況。根據本研究區域的淹水特性將臨界值(A_{ref})設為整個分析單元面積的 10%。計算如式(3 - 14)所示， $A_i(t)$ 為各里在t 時刻的淹水面積百分比。

$$F_A(t) = \begin{cases} 1 - (A_i(t) / A_{ref}), & \text{if } A_{ref} \geq A_i(t) \\ 0 & , \text{if } A_{ref} < A_i(t) \end{cases} \quad (3 - 14)$$

(5) 淹水延時(Flooding Duration Factor)因子：每一小時的淹水延時為從 t_s 至當下淹水事件所持續的時間，為一持續性因子。淹水延時愈長會使排水系統運作效能不佳且降低洪水的儲存空間，可能造成愈嚴重的積淹。本研究考慮研究區域的社會經濟對於淹水的忍受程度，故將臨界值(D_{ref})設為 8 小時。計算如式(3 - 15)所示， $D_i(t)$ 為各里在t 時刻的淹水延時。

$$F_D(t) = \begin{cases} 1 - (D_i(t) / D_{ref}), & \text{if } D_{ref} \geq D_i(t) \\ 0 & , \text{if } D_{ref} < D_i(t) \end{cases} \quad (3 - 15)$$

將三個因子以算術平均方式結合成危害度指標，可表示為(3 - 16)式所示。

$$I_{hazard}(t) = \frac{1}{3} \times \{F_H(t) + F_A(t) + F_D(t)\} \quad (3 - 16)$$



3.3.2 暴露度指標

暴露度指標 $I_{exposure}(t)$ 乃與受災時保全對象之空間分布有關，本研究考慮研究區域為都市型態，人口數及商家數眾多，在淹水事件發生時以人口密度因子 F_P 、營利事業密度因子 F_B 計算。若兩者的密度愈高，因子分數愈低，暴露度愈高，暴露度指標愈低，使區域受災時的脆弱度上升及韌性降低。

- (1) 人口密度因子(Population Density Factor)：本研究將各里人口密度的第一四分位數設為臨界值(P_{ref})，計算如式(3 - 17)所示，其中 P_i 為各里的人口密度。

$$F_P = \begin{cases} 1 & ,if P_{ref} \geq P_i \\ P_{ref}/P_i & ,if P_{ref} < P_i \end{cases} \quad (3 - 17)$$

- (2) 營利事業密度因子(Businesses Density Factor)：本研究將營利事業密度的第一四分位數設為臨界值(B_{ref})，計算如式(3 - 18)所示， B_i 為各里的營利事業密度。

$$F_B = \begin{cases} 1 & ,if B_{ref} \geq B_i \\ B_{ref}/B_i & ,if B_{ref} < B_i \end{cases} \quad (3 - 18)$$

將兩項因子以算術平均方式結合成暴露度指標，可表示為式(3 - 19)所示。

$$I_{exposure}(t) = \begin{cases} 1 & ,if t < t_s \text{ or } t > t_e \\ \frac{1}{2}(F_P + F_B) & ,if t_s \leq t \leq t_e \end{cases} \quad (3 - 19)$$

3.3.3 敏感度指標

敏感度指標 $I_{sensitivity}(t)$ 乃與保全對象自身抗災能力有關，考慮愈高的經濟水準和社區參與程度能在平時做好愈充分的防災準備，故因子分數愈高，敏感度愈低，面臨災害下所受衝擊愈低，在回復期也愈快恢復到初始狀態。綜合上述因素，此指標以薪資收入因子 F_S 、營利事業收入因子 F_T 、社區參與因子 F_C 計算，將三種原始數據先以各自的臨界值標準化為 x ，再讓 x 在淹水事件期間以指數型式下降，且在回復力作用點後以指數型式上升回復至1。使用指數函數能藉由次方項結合標準化的 x 與時間 t ，使相對高收入的區域在淹水延時過長的情境下，有機

會比相對低收入、淹水延時短的區域分數還低，使因子能同時反映出社會經濟程度差異與淹水延時的相互作用，體現淹水對經濟及救援的影響。以下為因子詳細計算方式。

(3) 薪資收入因子(Salary Factor)：本研究將各里的平均薪資收入第三四分位數設為臨界值(S_{ref})。計算過程如式(3 - 20)至(3 - 21)所示，其中， S_i 為各里的平均薪資收入。

$$x_s = \begin{cases} 1 & ,if\ S_{ref} < S_i \\ S_i/S_{ref} & ,if\ S_{ref} \geq S_i \end{cases} \quad (3 - 20)$$

$$F_s(t) = \begin{cases} 1 & ,if\ t < t_s \\ e^{-(1-x_s)t} & ,if\ t_s \leq t \leq t_e \\ e^{(1-x_s)t} & ,if\ t_e \leq t \leq t_e + D_i(t_e) \\ 1 & ,if\ t_e + D_i(t_e) < t \end{cases} \quad (3 - 21)$$

(4) 營利事業收入因子(Turnover Factor)：本研究將各里的平均營利事業收入第三四分位數設為臨界值(T_{ref})。計算過程如式(3 - 22)至式(3 - 23)所示，其中， T_i 為各里的平均營利事業收入。

$$x_T = \begin{cases} 1 & ,if\ T_{ref} < T_i \\ T_i/T_{ref} & ,if\ T_{ref} \geq T_i \end{cases} \quad (3 - 22)$$

$$F_T(t) = \begin{cases} 1 & ,if\ t < t_s \\ e^{-(1-x_T)t} & ,if\ t_s \leq t \leq t_e \\ e^{(1-x_T)t} & ,if\ t_e \leq t \leq t_e + D_i(t_e) \\ 1 & ,if\ t_e + D_i(t_e) < t \end{cases} \quad (3 - 23)$$

(5) 社區參與因子(Community Participation Factor)：本研究藉由統計社區志願服務人數、自主防災社區評量、防災教育講座等來量化社區參與程度，並給予 0 至 1 的自訂評分 x_c ，故本因子未定義臨界值。計算過程如式(3 - 24)所示。

$$F_c(t) = \begin{cases} 1 & , \text{if } t < t_s \\ e^{-(1-x_c)t} & , \text{if } t_s \leq t \leq t_e \\ e^{(1-x_c)t} & , \text{if } t_e \leq t \leq t_e + D_i(t_e) \\ 1 & , \text{if } t_e + D_i(t_e) < t \end{cases} \quad (3-24)$$



將三個因子以算術平均方式結合成敏感度指標，可表示為式(3 - 25)所示。

$$I_{sensitivity}(t) = \frac{1}{3} \times \{F_s(t) + F_T(t) + F_C(t)\} \quad (3-25)$$

最終，各個時段的 FRI 為三項指標相乘，可表示為式(3 - 26)所示。

$$FRI(t) = I_{hazard}(t) \times I_{exposure}(t) \times I_{sensitivity}(t) \quad (3-26)$$

第四章 研究區域



4.1 地理位置與地文條件

以行政區劃定而言，本研究區域位於新北市中和區及永和區，兩者緊密相鄰，生活圈融為一體，一般合稱為「雙和地區」或簡稱為「中永和」，面積總和為 25.86 平方公里，詳見表 4-1。中永和地區位於台北盆地的西南隅，且皆屬於台北都會區的衛星城市。研究區域東南邊為新店區，西邊與土城區及板橋區相鄰，南依鹿寮山地與新店區為界，北濱新店溪，與台北市的山山區、中正區、萬華區相隔，相對位置如圖 4-1 所示。

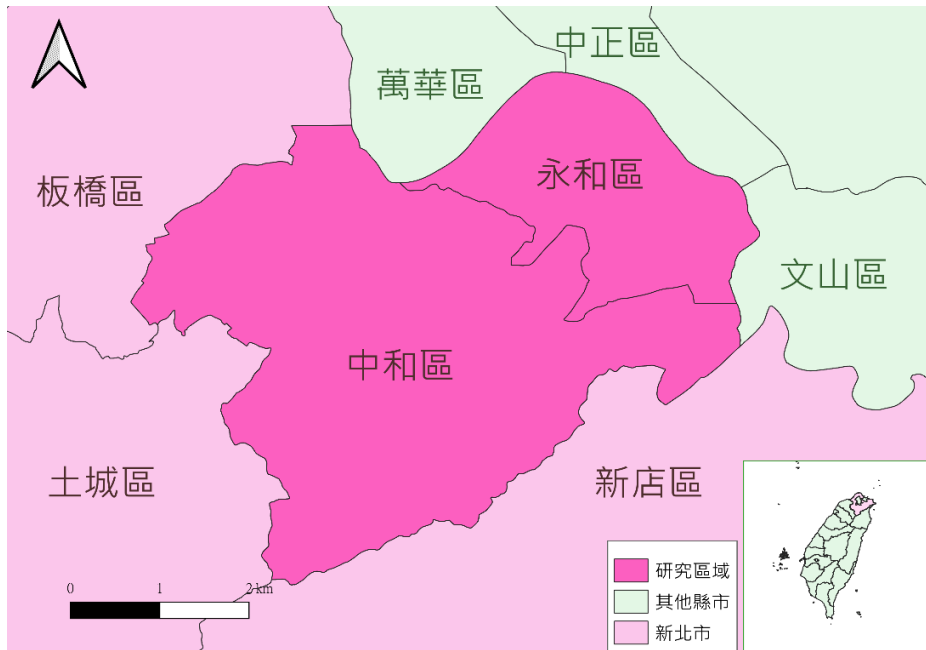


圖 4-1 中永和行政區界圖

表 4-1 中永和行政區域資料

	中和區	永和區
面積	20.144 平方公里	5.714 平方公里
下級區劃	93 里，2963 鄰	62 里，1243 鄰

由於淹水需以流域為單元模擬，故以流域的概念本研究屬於新店溪的支流流域，包含南山溝(南勢角溪)與中原溝，其中二八張溝(中和排水路)與瓦礫溝又為南山溝的主要支流，構成涵蓋中永和地區以及少部分板橋區、土城區的四大排水明渠流域型態，總流域面積約 27.55 平方公里。

本研究地區背山面水，地勢南高北低，海拔高程最高 318.97 公尺，最低約 2 公尺，標高 12 公尺以上的坡地佔總面積約 30%，如圖 4-2 所示。北部平原因河道數度遷徙和古台北湖的淤積，故為古代新店溪沙洲堆積出的沖積平原，以未凝固的礫石、砂及黏土為主(中央地質調查所)，雖然依沉積先後區分老沖積土和新沖積土的不同性質，但地形起伏不大。最南端丘陵地多呈單斜山脊地形，縱橫砂岩、頁岩互層和凝灰岩，其沖刷力量大使土壤無法堆積，故土層大多為石質，剖面無良好發育，表層土壤以砂土為大宗；海拔一百公尺以下者多屬坡度較平緩的山腳低丘台地，由砂、頁岩風化而形成疏鬆易於滲透的黃壤。

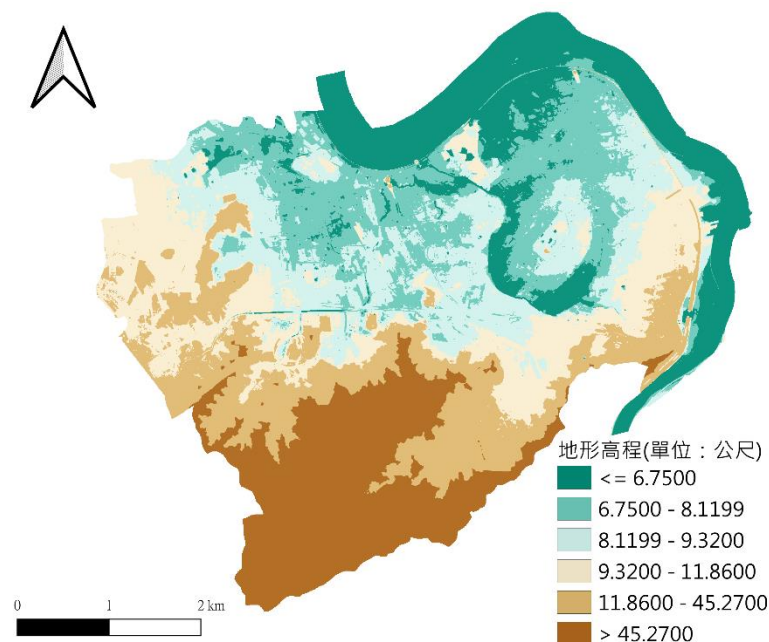


圖 4-2 研究區域流域地形圖



4.2 氣候與水文測站

研究區域屬於亞熱帶季風氣候，夏熱冬暖，年平均溫為攝氏 23 度(中央氣象局，1981-2010)。春末有滯留鋒面過境、夏秋兩季的颱風雨及對流雨帶來豐沛的降水、冬季迎東北季風伴隨地形雨，故全年無乾季，年平均雨量約為 2172.8 毫米，年平均流量約為 60.51 cms (水文年報，2020)。水文設計應用手冊劃定了台灣北部地區短延時雨型均一區，中永和地區全在北二區的範圍內，故本研究流域為中小型集水區，降雨受地形和地勢影響較小，其所需水文資料來源以水利署管轄之中正橋雨量站、秀朗橋流量站為主要參考測站。表 4-2 至表 4-4 為測站相關資料，可窺見極端事件的強大威力。

表 4-2 中正橋站 2020 年月平均雨量及 1977 年-2020 年最大月雨量

月份	一	二	三	四	五	六
平均月雨量(mm)	78.2	145.6	164.3	157.4	235.6	316.5
最大月雨量(mm) (發生年分)	253 (2018)	510 (1983)	412 (1978)	537 (1990)	622 (2014)	806 (1991)
月份	七	八	九	十	十一	十二
平均月雨量(mm)	225.3	289.9	312.8	128.8	82.3	78.8
最大月雨量(mm) (發生年分)	509 (1996)	689 (2013)	1512 (2001)	900 (1998)	312 (2000)	227 (2003)

表 4-3 中正橋站 1977 年 - 2020 年統計資料

最大年雨量(mm) (發生年分)	年一日最大雨量(mm) (發生日期)	年二日最大雨量(mm) (發生日期)
4254.0 (1998)	466.0 (2001/09/17)	706 (2001/09/17-2001/09/18)

表 4-4 秀朗橋站 1970 年 - 2020 年統計資料

歷年最大洪峰量(cms) (發生日期)	2020 年最大平均日流量(cms) (發生日期)	2020 年最大瞬時流量(cms) (發生時刻)
5560.00 (2000/11/01)	301.68 (2020/12/2)	505.52 (2020/05/29 19:00:00)

當降雨深度超過當下都市排水系統的設計標準，由於先天地勢平坦或後天高都市化程度、排水系統尚未建置及清淤等因素，使都市排水不易、內水溢淹。尤其近年受極端降雨，即使如本研究地區位於大台北地區內，排水系統健全也可能因都市內水宣洩不及釀成災情，如圖 4-3 及圖 4-4 所示。本研究區域內歷史上之淹水災情紀錄，亦整理如表 4-5 所示。



圖 4-3 中永和歷史災害圖片紀錄(a) 2021 年永和受西南風影響及午後旺盛對流影響；(b) 2012 年 6 月中和受滯留鋒面影響

(圖片來源：網路社群、台灣環境資訊協會)



圖 4-4 蘇拉颱風時福和橋下車輛面臨滅頂(圖片來源：翻攝 YouTube 畫面)

表 4-5 中永和地區嚴重災害彙整

事件	時間	事紀
賀伯 颱風	1995/ 07/31	中和區轄內省府建設防洪三期各項水利設施未完全完工，造成溪水位暴漲灌入，積水約 2 公尺，連續淹水二天，南勢角周圍 24 里災情嚴重，仰賴國軍各界協助災後重建。
納莉 颱風	2001/ 09/15	由於颱風停留時間過久及其貫穿的特殊路徑，以致豐沛的雨量刷新紀錄。中和南山溝因便橋被沖斷，洪水直瀉而下，導致南山路、和平街、南勢角淹水，當時的中和市公所、警分局、國小、加油站也有積淹水災情。
蘇拉 颱風	2012/0 8/02	永和地區連夜大雨，福和橋下多輛汽車滅頂，如 錯誤！找不到參照來源 。所示。秀朗橋汪洋一片，兩部公車受困水中，水淹 1.5 公尺以上，居民在屋頂求援。
麥德 姆颱 風	2014/7 /22	颱風期間各處路樹傾倒、招牌掉落，除了積淹水災情外，各區也有多起停電事故。

4.3 排水系統

本研究地區北方緊臨淡水河支流新店溪，為淡水河水系三大支流之一，更是北部區域重要之水源地區。雖為中央管河川，但配合台北地區防洪計畫，分區段

有不同保護措施。新店溪自碧潭橋以上河道因河道兩岸受限於山坡，為單槽斷面，採重現期 100 年的設計標準，然而大部份未規劃護岸或堤防；碧潭橋以下，坡度緩橫斷面寬，至秀朗橋的間河道為複式斷面，高灘地部份已闢建成公園綠地，又因流經都會區，故設計標準採用重現期 200 年。其中流經本研究地區之秀朗橋至中正橋河段，為台北市、新北市共管，兩岸堤防、閘門、抽水站等防洪設施均已布設完備(經濟部第十河川局)。

中永和境內四條明渠皆為新店溪支流，整理如表 4-6 所示，相對位置如圖 4-5 所示，並從發源地由東至西給予 1 到 4 的編號。平時做為北部的沖積平原主要排水幹道，流量很小；遇暴雨時龐大山洪從山腳溝壑直奔市區，湍急的水體經由排水系統收集，並從明渠排放至新店溪下游(徐硯庭，2014)。

表 4-6 研究區域內重要水系

編號	名稱	流域資料	概述
1	瓦礫溝 主流	全長約 4.4 公 里，總流 域面積約 516 公頃	發源於永和區民族公園，中下游為中永和界河，主要收集永和境內逕流。兩側皆為人口稠密區，然而右岸地區高程均低於左岸，因此過去每逢豪雨往往釀成永和區內民有街、民治街、民享街、中和區內安平路、安樂路的淹水災情(何媚華，2014)。
2	南山溝	全長約 3 公里	發源於中和區之橫路里鹿寮山區，向東北行約 2 公里。為解決大雨時排水不及的困境，2005 年時任台北縣政府於啟動西至東南向的南山溝分洪工程，每秒最大分洪量可達 52 立方公尺，降低從中和山區流入市區的逕流量。(林士惟，2020)
3	中和排 水路	集水面積 約 1268 公頃	上游源自土城區，二八張溝與南勢角溪支流(圓通溝、中坑溝、中和溝)截彎取直後，成為中和地區最大明渠排水溝且解決不少水患問題。其寬約 15 至 18 公尺，下遊經中和抽水站注入新店溪。
4	中原溝	全長約 0.86 公里	經中原抽水站獨立流入新店溪的支流，未流入南勢角溪。集水區內多工廠，現已被整治為典型的工業排水溝，並在多處蓋馬路或停車場。

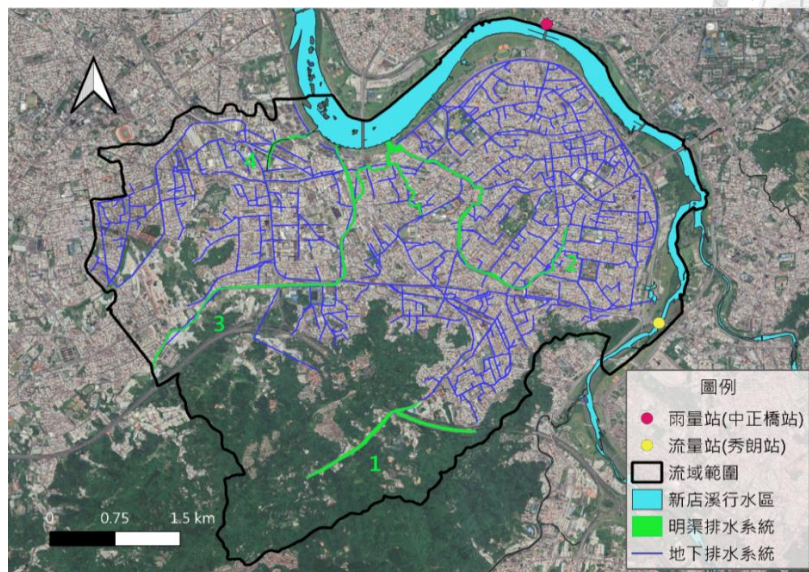


圖 4-5 研究區域排水系統與水文測站位置圖

自民國 47 年起，台灣省政府公共工程局開始逐年辦理各都市計畫區內，關於雨水下水道系統規劃相關業務。而永和地區的市鎮發展比中和地區早，故永和地區在管渠系統於民國 58 年的「三重永和都市建設計畫」中已布設部分幹線；民國 66 年完成「中和鄉、永和鎮雨水下水道規劃報告」，區分各個子排水區並藉由地形高低落差重力排放，匯流至境內明渠，一路往低處新店溪流入。

爾後經過「臺北縣 99 年度雨水下水道現況調查與系統模擬分析中和區雨水下水道水理分析報告」(2011 年版)、內政部營建署「中和市、永和市(重新檢討)雨水下水道系統」(2002 年版)規劃報告、「中和市雨水下水道系統整體檢討」(2003 年版)規劃報告等，重新調整排水分區、將斷面淤積整建、增加下水道管線及人孔密度、新增工程治理措施(如南山溝分洪、中和排水路)、抽水站(如圖 4-6 所示)。



圖 4 - 6 中永和地區抽水站位置圖(營建署，2011)

2008 年莫拉克颱風侵襲台灣損失慘重，災害過後重新檢討各地區雨水下水道保護標準，中和區及永和區雨水下水道重現期距原為 3 年，提高至 5 年(余濬，2012)。根據新北市公務統計科資料，截至 2018 年底，中和區及永和區之雨水下水道實施率(規劃幹線已建設長度與總規劃幹線長度之比值)已達 100%。2019 年新北市府水利局進行排水改善工程，增設雨水下水道，並將排水幹線延伸，期望擴增後每小時可承受 100 毫米之降雨量。

4.4 都市計畫與人口發展

1955 年公告的「永和花園城市都市計畫」原本期望將永和打造成「花園城市」，當時居民不過三萬人，規劃七座公園，佔總面積的九分之一，道路迂迴在綠地之間。然而適逢台灣光復及國民政府遷台初期，土地急於開發且湧入大量軍、公、教人員居住，遠超出原先計畫，使住宅、文教、公務機關取代了原本的公園預定地，至今公園數量僅存一個半：「823 紀念公園」(永和四號公園)、「仁愛公園」(永和區境內唯一一座，其另外一半為今日的永平高中及住宅用地)。花園

城市宣告失敗後，原先大量狹窄的道路仍舊維持著緊密的街廓。

1955 年發布「中和鄉都市計畫」劃定土地利用，沿今永和路、中正路及中和區中和路設成帶狀商業區；工業區集中在中和區二八張溝至景新街附近；其他區域大部分為住宅區，從 2019 年營建署資料來看，仍延續當年的利用雛型，如表 4-7 及圖 4-7 所示。由於持續的政治移民與軍官家眷，1958 年成立永和鎮，並與中和鄉分治。隨著興築堤防及幾座聯外橋樑，且台灣以出口民生與輕工業製品為導向，吸引大批勞動力北上在此定居，發展愈趨蓬勃，1979 年遂正式升格為永和市。1984 年後人口增加漸趨緩和，表 4-8 呈現永和人口數的變化，如今永和區人口密度高達每平方公里 3.85 萬人，不僅為全國人口密度最高，更超越澳門、新加坡。

表 4-7 中永和土地利用統計表(備註：不包含新店溪堤防外之面積)

土地利用	商業用地	綠地	水利用地	工業用地	住宅用地	交通用地	公家機關 / 學校
面積 (公頃)	89.98	724.22	13.29	183.13	916.07	383.6	144.56
百分比	3.67%	29.50%	0.54%	7.46%	37.32%	15.63%	5.89%

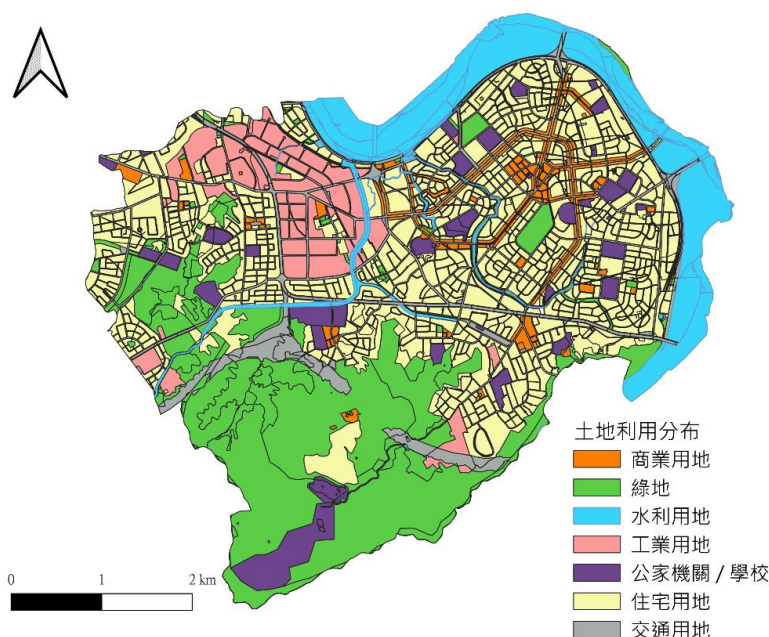


圖 4-7 研究區域土地利用



表 4-8 永和區歷史統計人口 (資料來源：永和市誌、內政部)

年分	1957	1958	1965	1975	1979	1984
人數	14,983	38,727	62,379	138,399	192,729	230,057
年分	1990	1997	2004	2011	2018	2021
人數	249,736	228,909	233,384	232,386	221,098	214,964

中和鄉於 1977 年規劃雨水下水道系統時人口已突破 17 萬。因台灣整體經濟結構改變，農村人口轉往向都市遷移，中和鄉緊鄰台北市成為衛星市鎮，人口快速成長，1979 年改制為縣轄市，2010 為中和區。目前是新北市人口總數第三大區，人口高居全國鄉鎮市區中的第五名，惟近年來人口老化程度和人口遷出情勢愈趨明顯，且略高於新北市平均值。表 4-9 為統計中永和各里人口分佈狀況作為本研究之暴露度因子，參考內政部戶政司全球資訊網資料，計算各里人口密度並以四分位區間呈現如圖 4-8 所示。

表 4-9 中和區歷史統計人口(資料來源：內政部)

年分	1981	1983	1986	1989	1991	1993
人數	279,664	304,430	334,663	355,400	379,968	387,264
年分	1996	2001	2006	2011	2016	2021
人數	383,175	401,619	411,011	414,939	414,266	406,140

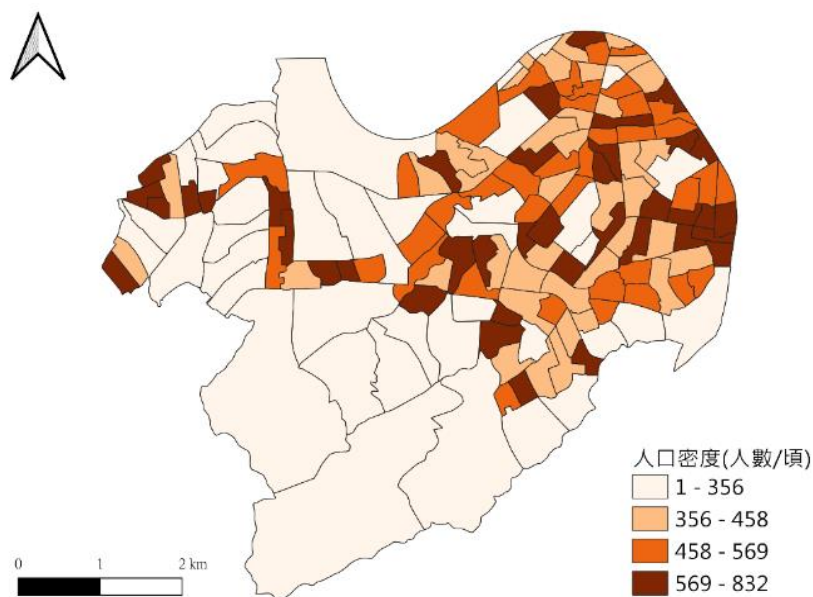


圖 4-8 暴露度相關因子：人口密度

4.5 經濟發展

永和區轄內住商混合，無工業區，從工廠登記資料顯示工廠登記家數主要為批發及零售業(約佔 61%)，次為運輸及倉儲(8%)及營造業(6%)，且工商登記資本額與家數比例差異不大，故以中小型企業為主。2010 年三級產業登記家數及資本額分別為 91.62%及 86.38%，首度超過二級產業，目前除了新店溪河堤外的高灘地之外，發展已達飽。

中和區工業發展優於永和，2016 年二級產業占比 35%。自 1960 年代後以紡織業與印刷業為主。由於近年高科技產業興起，在國道三號中和交流道附近為電子產業主要聚集地，並吸引多家金融機構在此設點。二八張工業區目前登記生產中的工廠以中、小型工廠聚集為多，優勢產業為印刷資訊、紙類製造。

考量中永和地區內住有大量因工作、就學或經濟考量而選擇租屋的外地人口，根據新北市地政局統計 110 年度第一季合法申報的租屋總件數，中和區、永和區分別排名新北市的第二名及第八名，若以房地產總價評估經濟發展會無法反映實際居住與收入的關聯。為探討研究區域內的社會經濟發展，以作為洪患韌性

指標(FRI)的資料來源，本研究從 SEGIS 社會經濟資料服務平台(由內政部為召集單位)蒐集營利事業分布、銷售額，以及薪資收入的相關資料，並以四分位區間呈現如圖 4-9 至圖 4-11 所示。

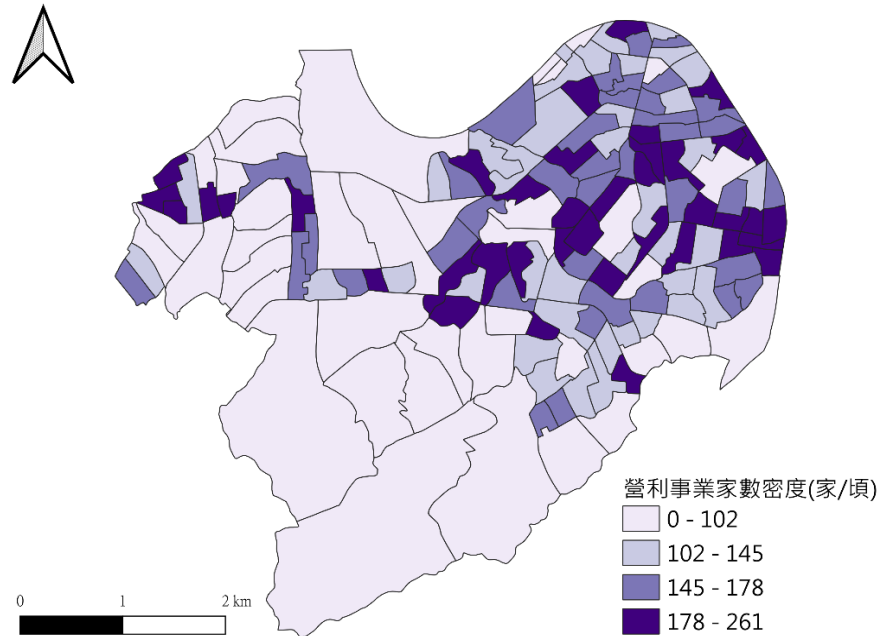


圖 4-9 暴露度相關因子：營利事業家數密度

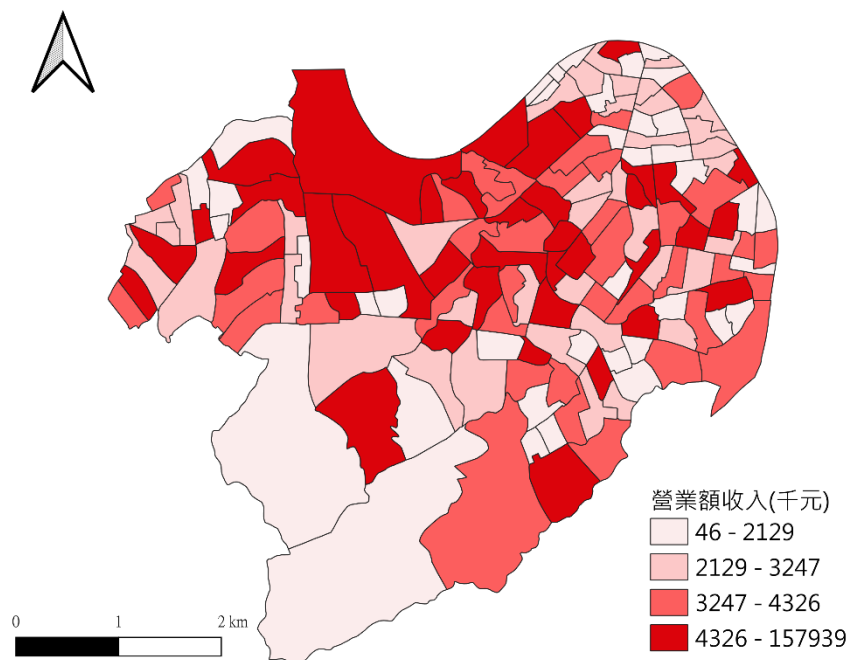


圖 4-10 敏感度相關因子：營利事業銷售額(各類所得金額營利所得)

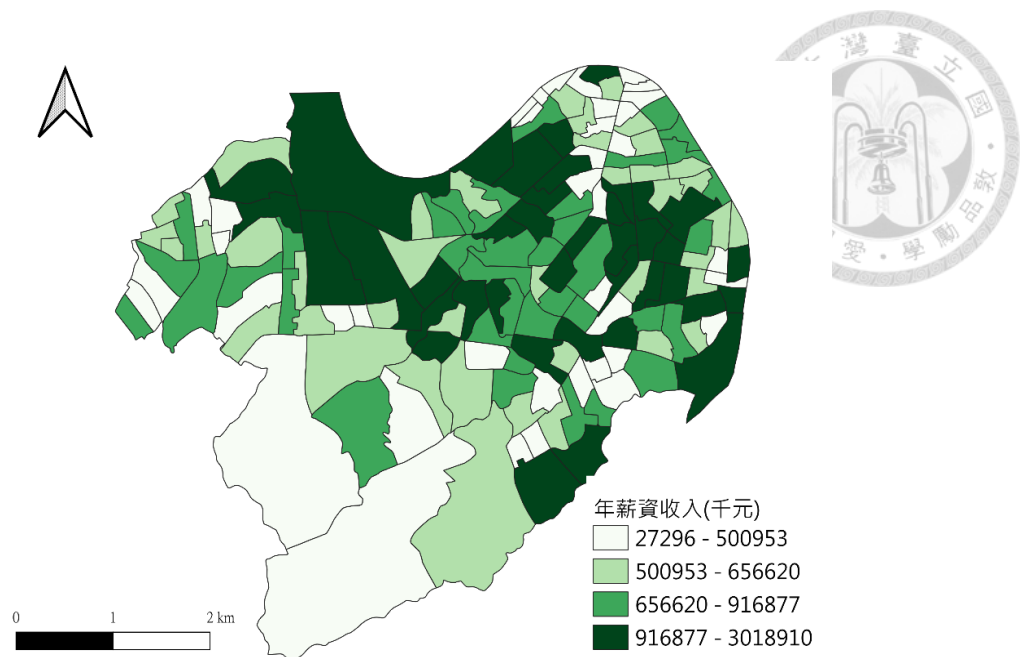


圖 4 - 11 敏感度相關因子：薪資收入(各類所得金額薪資所得)

4.6 自主防災社區與社區參與

台灣目前由中央推動自主防災社區的機關有消防署、水利署、水土保持局(以下簡稱水保局)。根據《經濟部水利署水患自主防災社區評鑑作業》法規條文中明定各社區可整理防汛演練、應變作為、防救災資源盤點等相關資料彙集成冊後報名評鑑，由水利署及河川局組織評鑑小組，審查後遴選出種子社區合格、特優、優等、甲等不同獎項。目前中永和並無任一里獲得水利署評鑑認證，僅有錦盛里為水保局認證之自主防災社區。

有鑑於新北市幅員遼闊，針對政府在短延時強降雨積淹水事件中所救援之不足之人力及物力，期望借助民間資源彌補，並凝聚民眾防汛意識。2019 年 5 月新北市水利局首創「偵水志工」，截至 2021 年 10 月已有 21 個行政區成立，共 692 人結訓取得志工資格，其中包含中永和地區的里民。志工主要在豪大雨前至易淹水地點做預防性巡檢；在降雨期間從市府提供之網路監控系統判別，就近勘查當地道路側溝或洩水孔處是否遭雜物堵塞，先進行簡易排除並初步調查積淹水範圍、深度及原因。

新北市另有推動社區防災推動計畫，然而對於災害的範疇包含地震、火災、化學毒害等，水災僅為其中一部分。由新北市府協同台大氣候天氣災害研究中心團隊至各個里推動防災訓練的工作項目，綜合中永和各市里執行情形歸納出常見工作項目流程如圖 4-12 所示，圖 4-13 為執行過程之照片記錄。

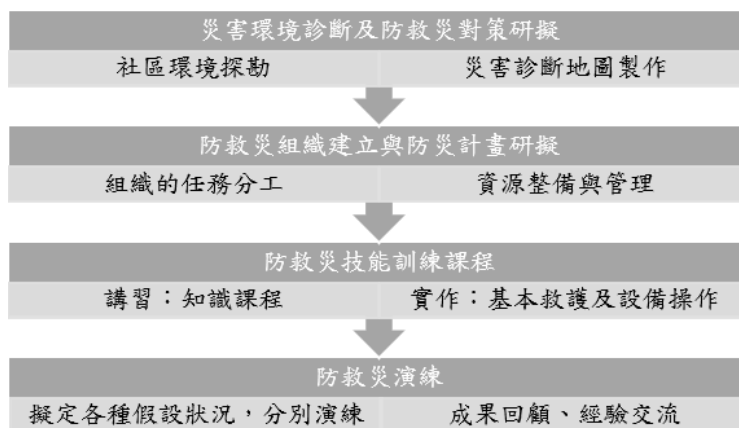


圖 4-12 中永和社區防災工作流程



圖 4-13 社區防災訓練(a)秀林里(永和)；(b)華新里(中和)；(c)碧河里(中和)；(d)碧河里(中和)

(圖片來源：新北市消防局 <http://pc183.hy.ntu.edu.tw/ntpcdrc/index.php>)

本研究將中永和地區曾擁有或參與自主防災社區認證、偵水志工、新北市社區防災推動計畫的里整理如

表 4-10 至表 4-12 所示，給予自訂評分 x_c ，以作為敏感度指標內的社區參

與因子，如圖 4-14 所示。

表 4-10 中永和地區自主防災社區

行政區(總數)	里	權責機關	自訂評分
中和區(1)	錦盛里	水土保持局	0.9

表 4-11 中永和地區偵水志工之統計

行政區(總數)	里	人數	自訂評分
中和區 (5)	秀景里	12	0.8
	民享里	12	0.8
	瑞穗里	12	0.8
	冠穗里	12	0.8
	景本里	12	0.8
永和區(1)	光明里	15	0.9

表 4-12 中永和地區參與新北市社區防災推動計畫之統計

行政區(總數)	里	工作項目	活動時間	參加人數	自訂評分
中和區 (8)	德行里	(非臺大團隊執行計畫)	(缺乏資料)	(缺乏資料)	0.7
	內南里	防救災組織建立、任務分工與運作及防災計畫研擬	106.06.22	89	0.7
	頂南里	災害環境診斷與防救災對策研擬	107.04.25	60	0.7
	華新里	防救災演練	108.07.27	59	0.7
	嘉慶里	防救災技能訓練	108.08.31	86	0.7
	復興里	防救災技能訓練	109.08.16	43	0.7
	碧河里	防救災演練	110.11.28	61	0.7
	中安里	防救災演練	110.11.06	41	0.7
永和區 (4)	竹林里	防救災演練	107.10.07	42	0.7
	秀林里	防救災演練	108.06.29	37	0.7
	光明里	防救災演練	109.09.27	35	0.9
	福和里	防救災演練	110.09.02	50	0.7

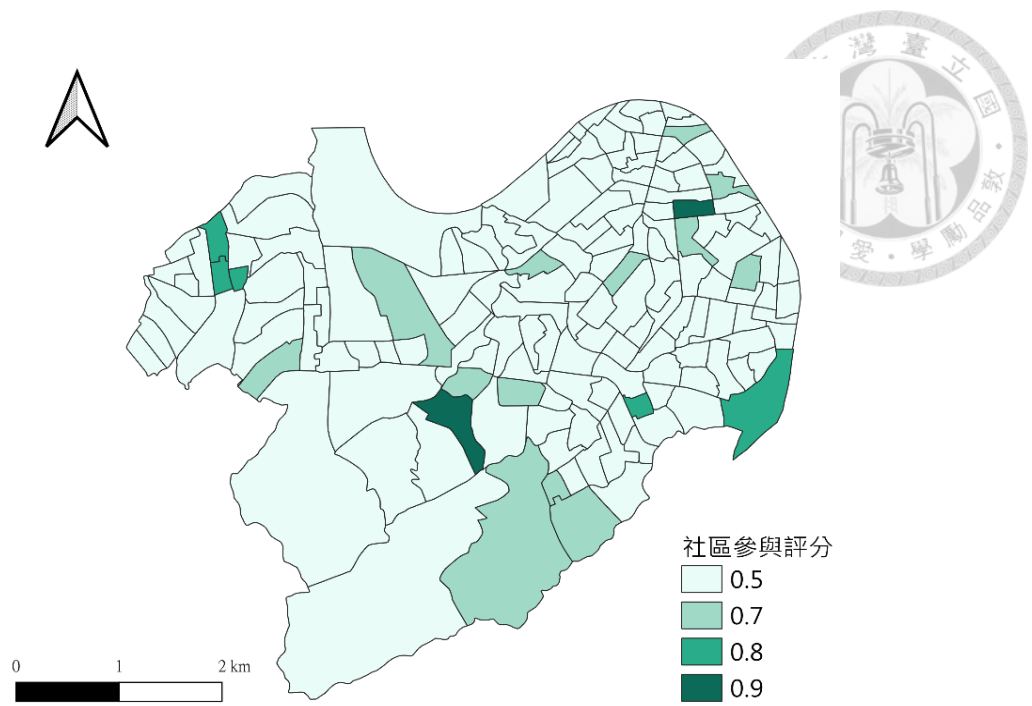


圖 4 - 14 敏感度相關因子：社區參與

第五章 模式設置



本研究建置 3Di 模式，主要透過 QGIS 製作二維不均勻參數；在 QGIS 安裝 3Di 工具列建置一維參數和進行全域設定。建置完成後，以歷史事件驗證模式之準確性；並設計多個降雨情境以供後續計算 FRI 結果之比較。

5.1 3Di 模式建置

5.1.1 二維參數資料

使用一公尺解析度之光達 DEM(2010-2015)給定研究區域高程資料，然而該 DEM 僅代表地表高程，未考量市區建物的高程，此為本研究的限制。另外為了更真實反映新店溪主槽河道地形，本研究蒐集第十河川局於 2018 年施測的大斷面資料，以 HEC-RAS(Hydrologic Engineering Center - River Analysis System)進行地形預處理後內插生成一公尺的河道 DEM，成果如圖 5-1 所示。將河道 DEM 與原 DEM 合併後共約含三千萬個網格資料。

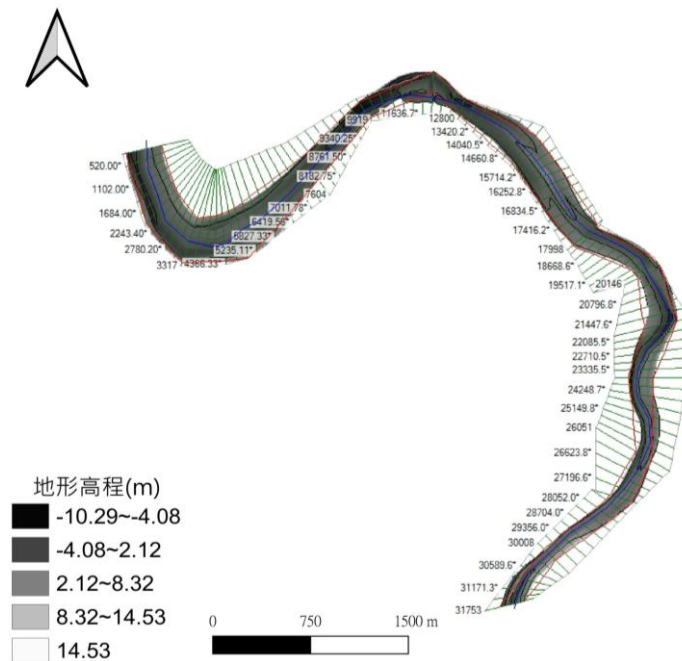


圖 5-1 以 HEC-RAS 新店溪斷面地勢

地表摩擦係數的設置以曼寧 n 值作為輸入，參考水利署易淹水地區水患治理計畫及內政部低衝擊開發操作手冊總報告中，並以建議範圍之最小值保守估計逕流情況，設定如表 5-1 所示，分布如圖 5-2 所示。

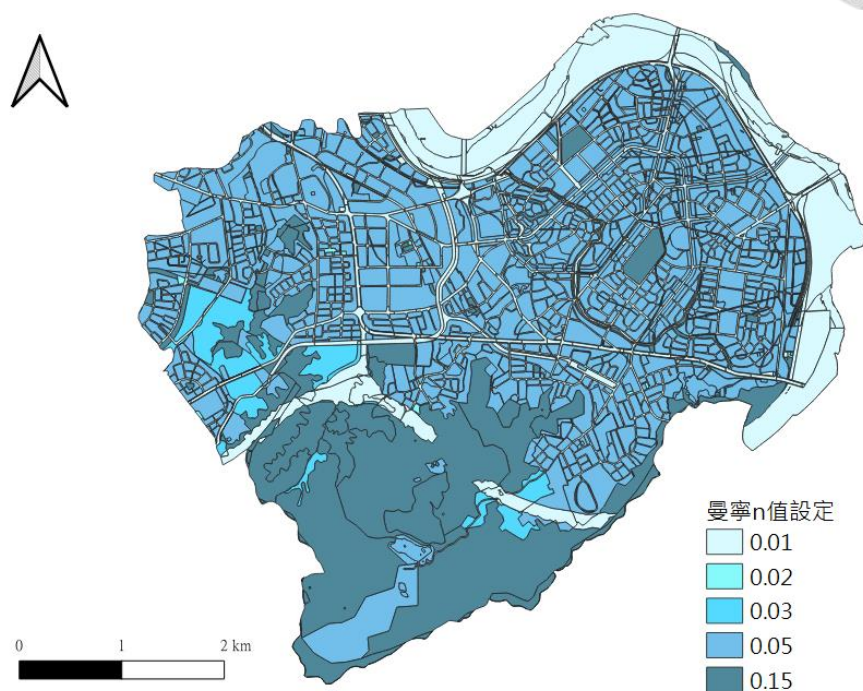


圖 5-2 摩擦係數分布圖

表 5-1 曼寧 n 值建議範圍及設定值

土地利用型態	手冊建議範圍	本模式設定值
水利用地	0.01-0.02	0.01
交通用地(道路、鐵路)	0.01-0.03	0.01
交通用地(停車場、人行道)	0.024	0.02
農業用地	0.03 - 0.07	0.03
商業用地、工業用地	0.05-0.08	0.05
住宅用地、公家機關 / 學校 / 醫院	0.05-0.10	0.05
綠地(公園、林地)	0.15-0.60	0.15

有效降雨量為降雨量減去降雨損失，入滲值為降雨量減去有效降雨量。而入滲值依照水利署公告之《出流管制計畫書與規劃書檢核基準及洪峰流量計算方

法》中，以美國水土保持局(US Soil Conservation Service，簡稱 SCS)經過實驗與經驗累積所發展之曲線號碼(CN)法計算。目前我國國土利用現況分為九大類，共 103 個子類別；每一子類別各自對應一 SCS 分類，共 21 種 SCS 分類。因此根據研究區域土壤種類，再由對照所屬土地利用子項的 SCS 分類決定曲線號碼表的 CN 值，即可帶入式(5 - 1)至式(5 - 2)中計算，其中， P_e 為累積有效降雨(mm)， P 為累積降雨(mm)， Y 為集水區最大蓄水量(mm)，CN 為查表的曲線值。

表 5 - 2 SCS 曲線號碼表

SCS 分類	土地利用情形	土壤分類		
		A	B	C
	耕地：			
1	無保護措施	72	81	88
2	有保護措施	62	78	78
	牧草地或放牧地：			
3	不良情況	68	79	86
4	良好情況	39	61	74
5	草地：良好情況	30	58	71
	森林：			
6	稀疏、覆蓋少、無覆蓋物	45	66	77
7	良好覆蓋	25	55	70
	空地、林間空地、公園、高爾夫球場、墓地等：			
8	良好情況：草地覆蓋面積超過 75%	39	61	74
9	稍好情況：草地覆蓋面積 50~75%	49	69	79
10	商業區(85%面積不透水)	89	92	94
11	工業區(72%面積不透水)	81	88	91
	住宅：			
12	≤ 1/8 英畝 (65%)	77	85	90
13	1/4 英畝 (38%)	61	75	83
14	1/3 英畝 (30%)	57	72	81
15	1/2 英畝 (25%)	54	70	80
16	1 英畝 (20%)	51	68	79
17	鋪石(混凝土或柏油)、停車場、屋頂、道路等	98	98	98
18	街道	98	98	98
19	鋪石(混凝土或柏油)道路及雨水下水道	76	85	89
20	碎石道路及泥土道路	72	82	87
21	水體	98	98	98

$$P_e = \frac{(P - 0.2Y)^2}{P + 0.8Y} \quad (5 - 1)$$

$$Y = 25.4 \times \left(\frac{1000}{CN} - 10 \right)$$



(5 - 2)

本研究引用《淡水河水系水文水理論證報告》之分析成果，以新店溪口 200 年重現期距最大二日設計降雨量 981mm 作為入滲值的計算。研究區域南部山區為疏鬆砂岩、頁岩，北側則為砂土為大宗的沖積平原，故以 typeA 為土壤類別，依各土地利用情形選擇之 CN 值，詳細設定如表 5 - 3 所示、分布如圖 5 - 3 所示；其中為保守估計將水利用地、交通用地視為不透水。

表 5 - 3 研究區域入滲值設定

土地利用型態	SCS 分類	CN 值	本模式入滲量(mm /day)
農業用地	1	72	54.66438137
林業用地	6	45	147.0689941
學校用地	9	49	129.32
公園用地	9	49	129.32
商業用地、公家機關	10	89	18.34618149
工業用地、公共設施	11	81	34.02270372
住宅用地	12	77	42.75914323
交通用地(停車場、人行道)	17	76-100	0
交通用地(道路、鐵路)	18	98-100	0
水利用地	21	98-100	0

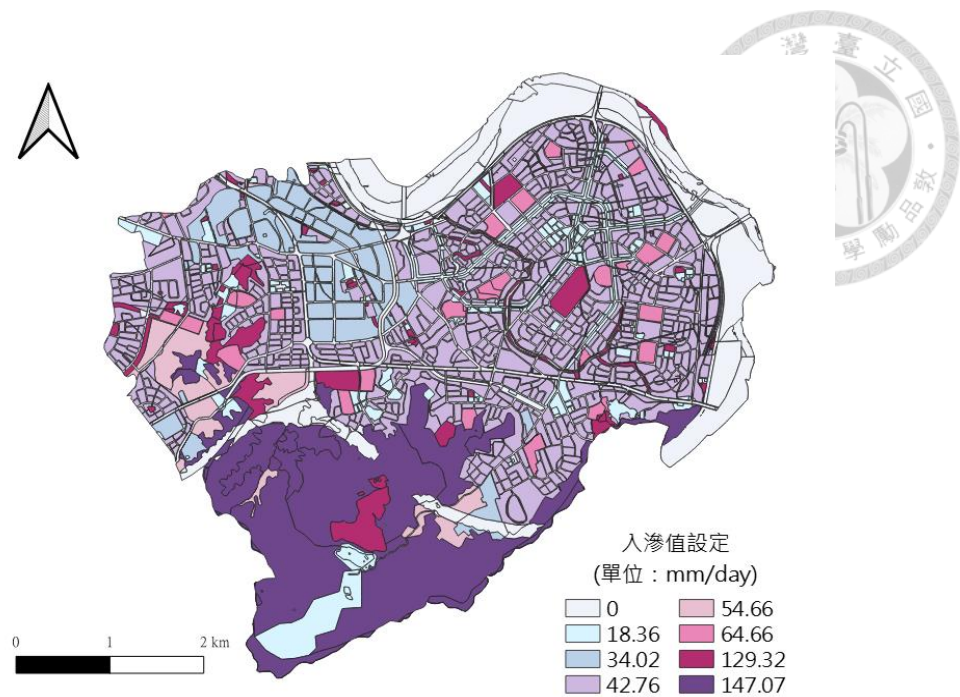


圖 5-3 入滲值分布圖

當雨水降落於地表過程期間，若被建物、樹葉和其枝幹截住，此部分水體稱為截留。截留量的多寡與植物的茂密程度、樹種、建物型態等均有關係。本研究參考國土測繪中心提供之土地利用參數對照表設定 3Di 模式之截留量，設定如表 5-4 所示，並呈現如圖 5-4 所示。

表 5-4 研究區域截留量與土地利用對照

本研究土地利用型態	本模式截留量(單位:m)
交通用地、水利用地	0
墓園用地	0.0002
公園用地	0.0013
農業用地	0.0014
學校用地	0.0016
林業用地	0.0029
住宅、商業、工業用地、公家機關、公共設施	0.003

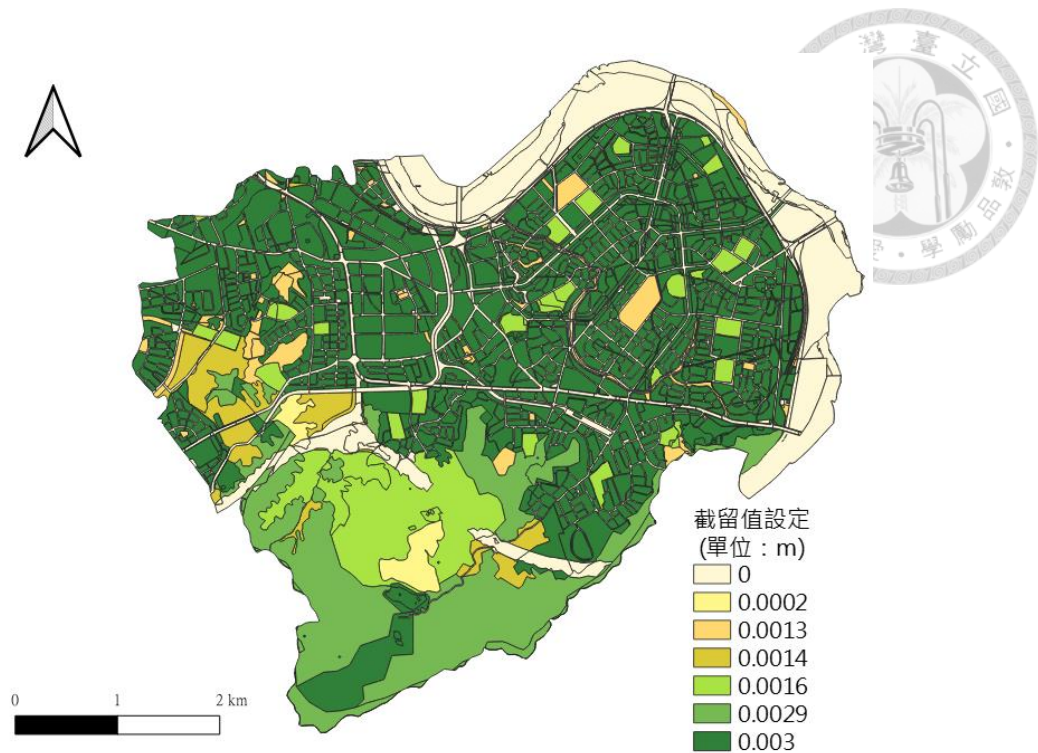


圖 5-4 截留值分布圖

5.1.2 一維參數資料與全域設定

雨水下水道資料為一維參數資料，本研究參考新北市雨水下水道地理資訊系統及林士惟(2019)建立之中永和 SWMM 模型，彙整出符合 3Di 的資料樣態：人孔資料(Manhole) 共計 3379 個，由具地理資訊的連接點(connect node)構成；管線資料(pipe) 共計 3427 條，須先由斷面設定(cross section)定義形狀尺寸 (黃莉雅, 2021)。

一維邊界條件的設置，於研究河段的起始位置給定河川流量的時間序列、於終止位置給定水位的時間序列。另外由於研究區域下游與淡水河河海匯流處還有約莫 20 公里的距離，感潮特性不顯著，故未設置二維邊界條件。一維單向連動孔口流(Orifice)的設置，可使都市內水位較高時排向河川；都市外水位較高時防止藉由孔口倒流入堤內，更貼近實際水流情形。

3Di 水位計算是由計算網格最低點高程起算，若網格太大或堤防相對網格較窄，可能使得新店溪堤內堤外水位相同，故需建立與新店溪堤防周圍之 DEM 相

近高程的堤防結構物(levee)，確保新店溪水位大於堤防頂部高程時水才會溢流越堤。由於光達 DEM 未能如實反映研究區內四條主要明渠排水行水區之底部高程，故參考一般區域排水防洪標準，藉由設置堤防結構物(levee) 將行水區與左右沿岸周圍高程差控制在四到五公尺範圍內。一維模式結構物設置完成圖如圖 5-5 所示。

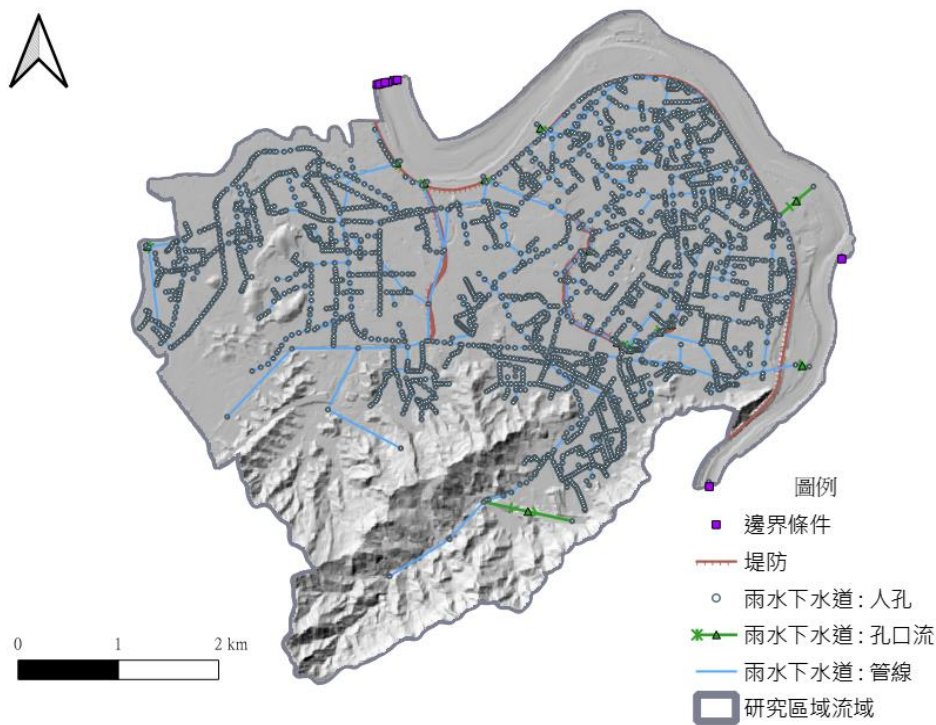


圖 5-5 一維模式結構物設置

研究區域位處都市，故使用 20m 作為計算網格大小(grid space)，最大四分樹級數(k-max)設定為 6，再於結構物附近適當設置加密線細化網格，堤防和邊界條件給定 refinement level 為 3、管線定為 2 以細部呈現周圍水流變化。流域內共計 8405 個計算網格，網格大小介於 40 至 640 公尺，如圖 5-6 所示。

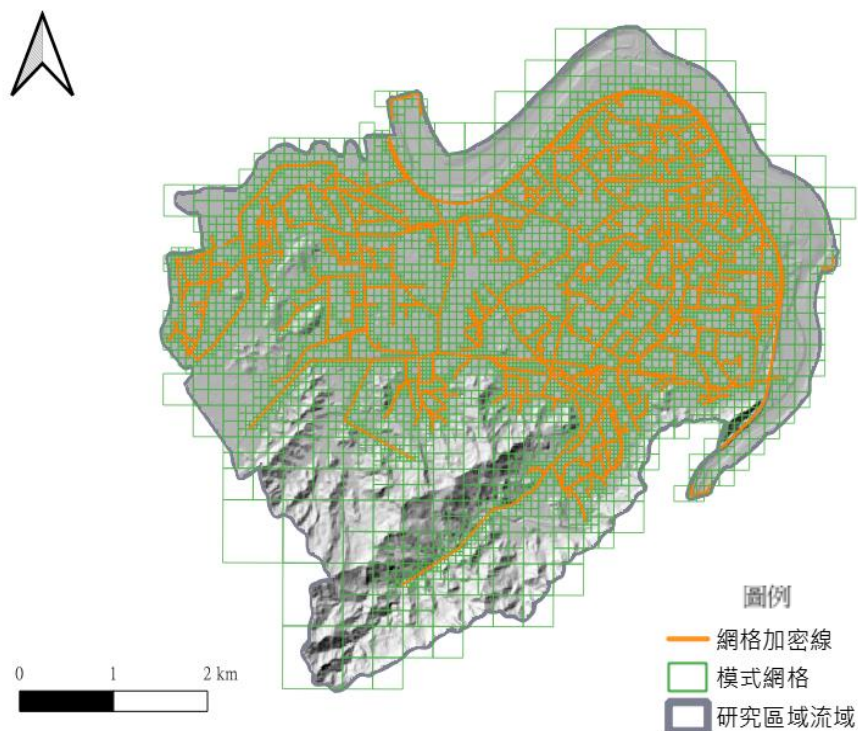


圖 5 - 6 模式網格設置圖

5.2 模式驗證

本研究使用 2012 年 0610 豪雨事件對模式進行驗證。此事件肇因於滯留鋒面與西南氣流的強盛威力使南臺灣持續降雨；12 日後北部降雨明顯增加，根據中央災害應變中心的處置報告，板橋、新莊、蘆洲、中永和等市區有多起積淹水災情。以下針對驗證過程、驗證結果做進一步說明。

本研究參考水利署架構的水文資訊網整合服務系統平台，選擇中正橋站的歷史雨量查詢，蒐集 2012 年 6 月 11 日 19 時至 6 月 13 日 0 時，共 31 小時的時雨量資料，繪製成如圖 5 - 7 所示的降雨組體圖。研究區域位處新店溪中下游，流量站與水位站設置密度不高，故使用相同時段內秀朗站實測資料作為新店溪主流、使用寶橋站實測資料作為支流景美溪之流量輸入，其歷線如圖 5 - 8 所示。

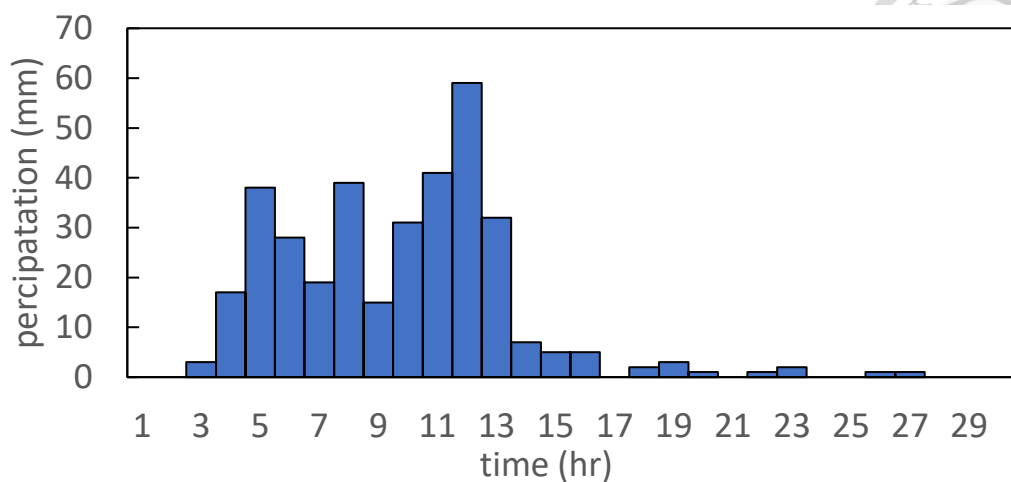


圖 5-7 0610 豪雨事件中正橋站降雨組體圖

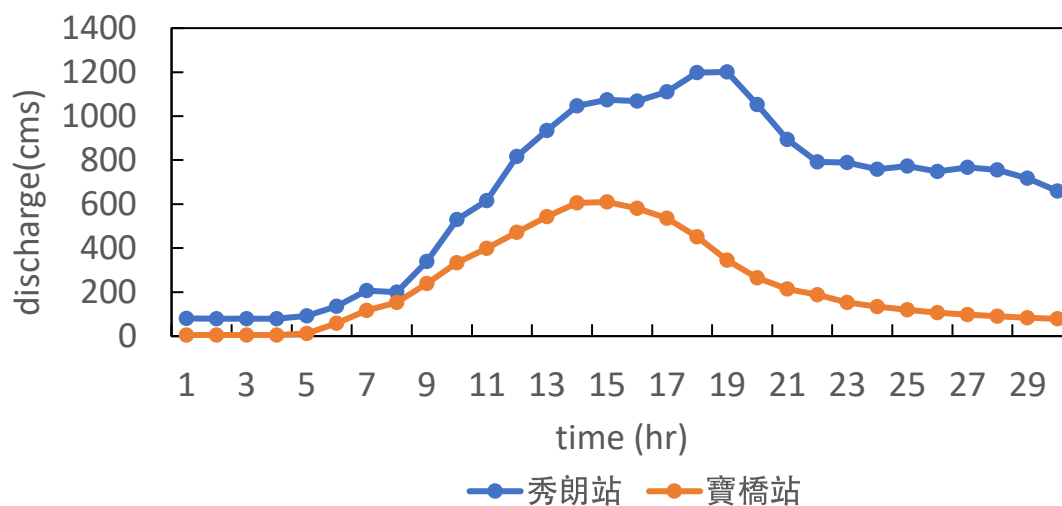


圖 5-8 0610 豪雨事件流量實測資料

經過 68 小時的模擬，產生模擬結果最大水深圖，並標示 NCDR 紀錄之積淹水點位共 14 處，如圖 5-9 所示。考量該淹水點位多為當地居民回報，可能受各自定位方式不同而產生點位座標的誤差，且淹水型態在空間上並非單點呈現，故本研究統計 14 處歷史淹水點位半徑 10 公尺範圍內的最高模擬淹水深度，呈現如表 5-5 所示。

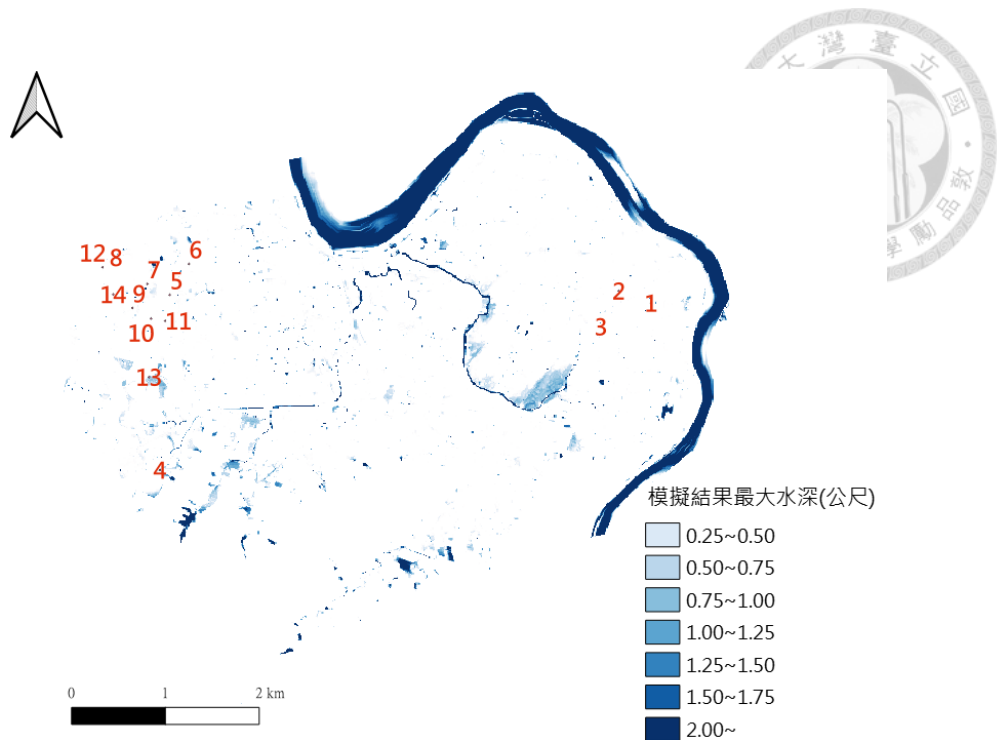


圖 5-9 模擬結果與淹水調查點位對照圖

表 5-5 淹水歷史點位與模擬結果對照表

點位編號	1	2	3	4	5	6	7
模擬水深(公尺)	0.33	0.01	0.02	1.00	0.05	0.67	1.93
點位編號	8	9	10	11	12	13	14
模擬水深(公尺)	0.06	0.30	0.26	0.11	0.40	0.99	0.05

本研究驗證工作考慮以準確度及偵測率為依據。準確度(Accuracy, ACC) 可計算事件在模式中預測正確的比例，愈接近 1 表示模擬愈準確；偵測率(Probability of Detection, POD) 可計算實際有淹水的點位中，被模式偵測到的比例為何 (Chang et.al., 2015)。鑑於本研究區域實際淹水所偵測的點位數量不多，模式模擬無淹水且實際無淹水之範圍廣大，使用準確度評量可能過於高估，故本研究使用偵測率(Probability of Detection, POD)評估，公式如式(5-3)所示。式中定義 TP 為 True positive 之縮寫，代表該處存在淹水調查點位且模擬亦有淹水，而 FN 為 False negative 之縮寫，代表該處存在淹水調查點位但模擬結果沒有淹水。而表 5

- 5 所示 14 處調查點位在模擬結果中均有讀取到水深資料，且其中有 8 處超過 0.25 公尺的定義淹水深度，其偵測率達 57% 以上，淹水建模尚屬合理。

$$POD = \frac{TP}{TP + FN} \quad (5-3)$$

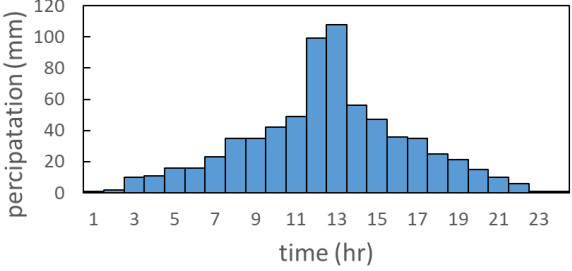
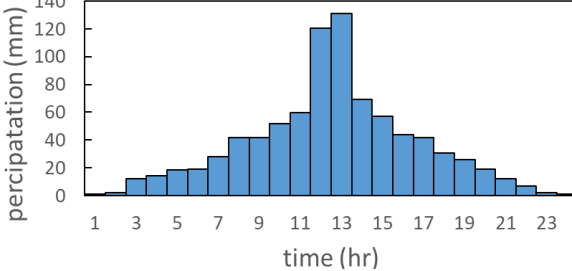
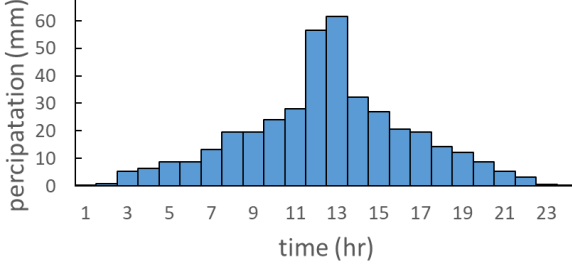
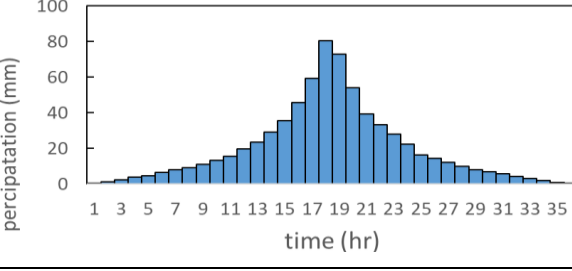
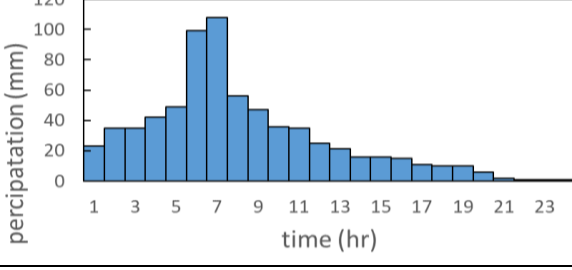
5.3 模擬情境

IPCC 第五次評估報告(AR5)中，以代表濃度途徑(Representative Concentration Pathways, RCPs) 定義四組世紀末氣候變遷的情境。其中 RCP8.5 情境是溫室氣體排放最高的情境，每平方公尺的輻射強迫力將增加 8.5 瓦。NCDR (2020)將 AR5 提及之全球環流模式 (General Circulation Model, GCM) 粗網格資料提高解析度，統計出世紀末(2075 - 2099)時符合臺灣區域降尺度之 IDF (Maximum Rainfall Intensity-Duration-Frequency) 曲線圖，其中 50、100 年重現期一日設計降雨深度的系集平均值分別為 700mm 和 850mm；而相同重現期及延時下的基期(1981 - 2005) 系集平均值分別為 400 mm 及 495mm。

本研究使用位序法(余濬, 2009) 設計中央集中式雨形；以平均法(Huff, 1967) 設計偏態雨型，並以上述數據為基礎，設計不同重現期、降雨延時之情境給予 A 至 F 的編號，整理如表 5 - 6 所示，以供後續探討 FRI 對於雨型變化之敏感度。

為了得到不同情境下的上游輸入流量，本研究使用美國陸軍工兵團發展的降雨 - 逕流模式 Hydrologic Modeling System (HEC-HMS) 模擬集水區暴雨事件下的設計流量。圖 5 - 10 HEC-HMS 水文模式建置為在 HEC-HMS 下建置的集水區模型，本研究使用模型中編號 R240、R150 的出流歷線分別作為 3Di 模式中景美溪、新店溪的輸入流量，表 5 - 7 為整理不同情境下兩條河流流量歷線的尖峰流量值。

表 5-6 本研究降雨情境設定一覽表

情境	總降雨量	降雨延時	雨型	雨量組體圖
A	700mm	24 小時	中央 集中 式	
B	850mm	24 小時	中央 集中 式	
C	400mm	24 小時	中央 集中 式	
D	700mm	36 小時	中央 集中 式	
E	700mm	24 小時	右偏	

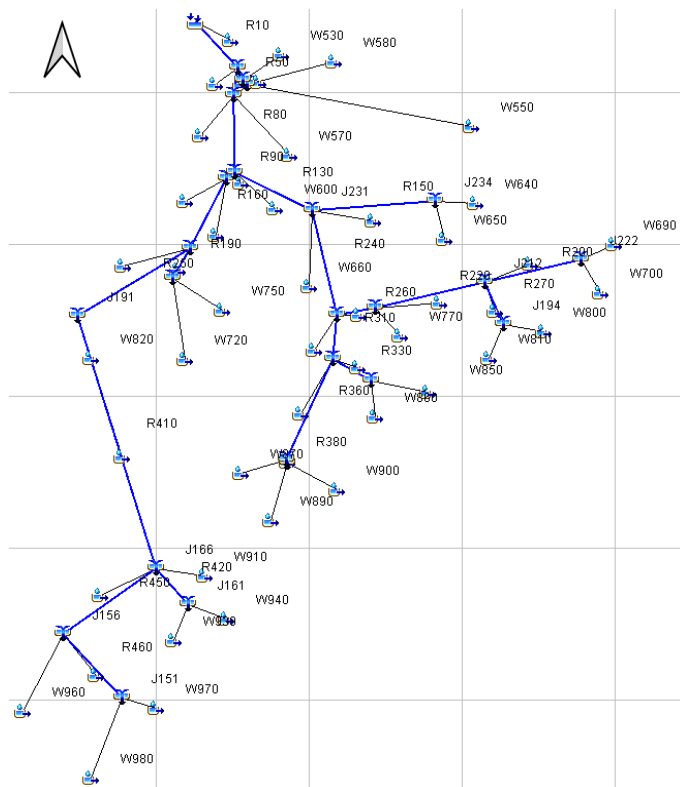
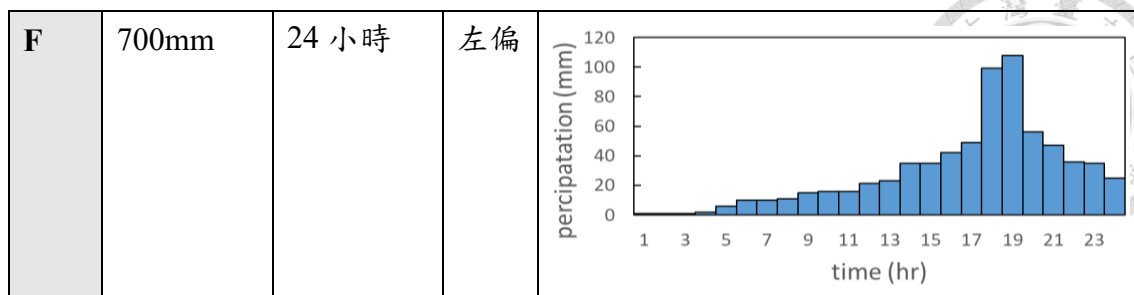


圖 5 - 10 HEC-HMS 水文模式建置

表 5 - 7 各情境降雨下的尖峰流量值(單位：cms)

情境	A	B	C	D	E	F
R240	10160.1	13007.7	4624	8680.1	9477.9	13007.7
R150	1357.9	1710.1	651.1	1057.7	1299.2	1399.1

5.4 計算危害度指標

在 3Di 中分別輸入六種降雨情境，並均從模擬後第 5 小時開始降雨。為了完

整呈現研究區域的退水情形，以利完整觀察 FRI 在災害發生期(Event Phase)及災後回復期(Recovery Phase)的趨勢變化，本研究將 API 之模擬時間拉長為 53 個小時，故每個情境可輸出 53 張的淹水深度 tiff 檔(Tagged Image File Format)，以讀取淹水深度、面積、延時，這部分的資料萃取使用 ArcMap 軟體，後續計算 FRI 則使用 MATLAB 程式語言。本章節著重描述以中永和的里為最小分析單元，透過 ArcMap 軟體，計算危害度指標內的因子。

將淹水深度 tiff 檔轉換成與中永和地區的里界圖相同的投影座標後，利用分帶統計功能(Zonal Statistics)，將不同里內所有網格的淹水深度各自加總，再除以該里面積以獲得該里平均淹水深度。若該里在某時段平均淹水深度開始大於 0.25 公尺，則視為淹水延時的第一小時，直到平均淹水深度淹水小於 0.25 公尺後結束延時的計算。淹水面積則藉由柵格計算(Raster Calculator)先篩選出大於定義淹水高度 0.25 公尺的網格，才能使用 Zonal Statistics 加總這些網格的淹水面積並除以該里面積以獲得該里平均淹水面積百分比。作法流程整理如圖 5 - 11 至圖 5 - 12 所示。



圖 5 - 11 淹水深度因子計算方式



圖 5 - 12 淹水面積因子計算方式

有鑑於中永和地區的里數有 155 個，模擬時間共 53 小時，為提高資料處理

之效率，本研究將上述操作概念透過模型建置器 (Model Builder) 實踐，加入 Raster 的批次處理功能(Iterate) 讓 GIS 自動重複運算 53 個小時的淹水深度 tiff 檔後在指定資料夾輸出成果表格，並將整套流程儲存在 toolbox (工具箱)中以供重複使用。模型建置完成圖如圖 5 - 13 至圖 5 - 14 所示。

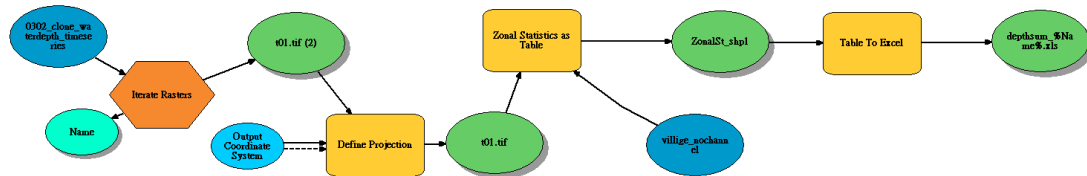


圖 5 - 13 Model Builder—淹水深度

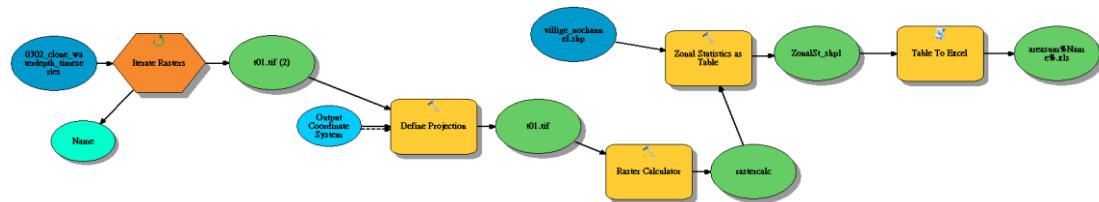


圖 5 - 14 Model Builder—淹水面積

第六章 結果與討論

根據中永和 155 個里在降雨情境 A 下的淹水深度，共計 17 個里在模擬過程中出現連續五小時以上平均淹水深度大於 0.25 公尺、其中 11 個里出現大於 0.5 公尺的時刻，且無局部低漥影響水深結果，能顯著觀察 FRI 中各因子隨時間的起伏趨勢，將這些里標示如圖 6-1 所示。本章後續將以該 17 個里為參考里，統整出 FRI 結果及內部各因子作用方式，並探討不同雨型間的趨勢變化。

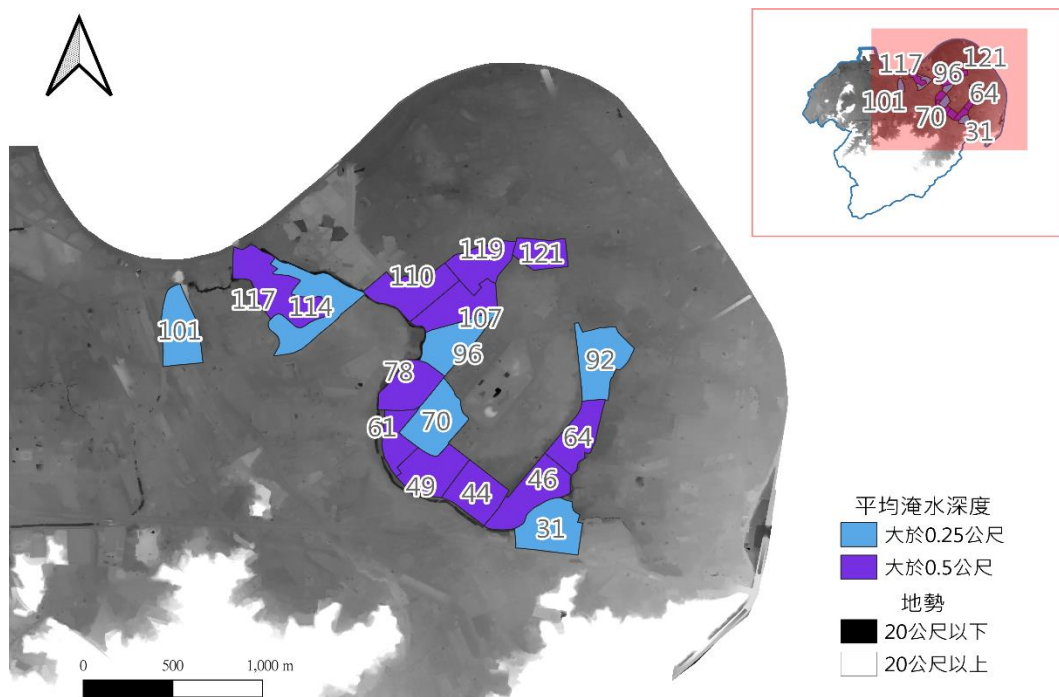


圖 6-1 本研究 17 個參考里

6.1. 社會因子在 FRI 的作用

本小節以情境 A 分析 17 個里社會因子在 FRI 中的特性，社經狀況好壞體現在暴露度及敏感度指標。圖 6-2 比較編號 31 里及 96 里的危害度分數與敏感度分數，淹水事件期間兩個里擁有相同的淹水延時(均為 7 小時)和相近的淹水深度，兩個里的危害度分數差距皆維持在 0.2 左右。若考量社會因子，雖然平均里民收入不相上下，但平均商家營業額落差甚大，如表 6-1 所示，造成回復力作用

點前里 96 敏感度的下降程度遠大於里 31，綜合計算後使里 96 第 21 小時(FRI 最低點時刻)分數只有 0.0521，遠低於里 31 第 22 小時(FRI 最低點時刻)的 0.156；此外，在回復力作用點後，敏感度指標亦影響 FRI 回升快慢，即回復力。整體而言，里 96 與里 31 雖然淹水狀況相似，但因為加入敏感度相關因子，使里 96 卻是相對韌性低、回復慢的社區，決策者可以在第 21 小時優先支援該里救災行動，並依據後續 FRI 的分數調整各里分配到的救災資源。

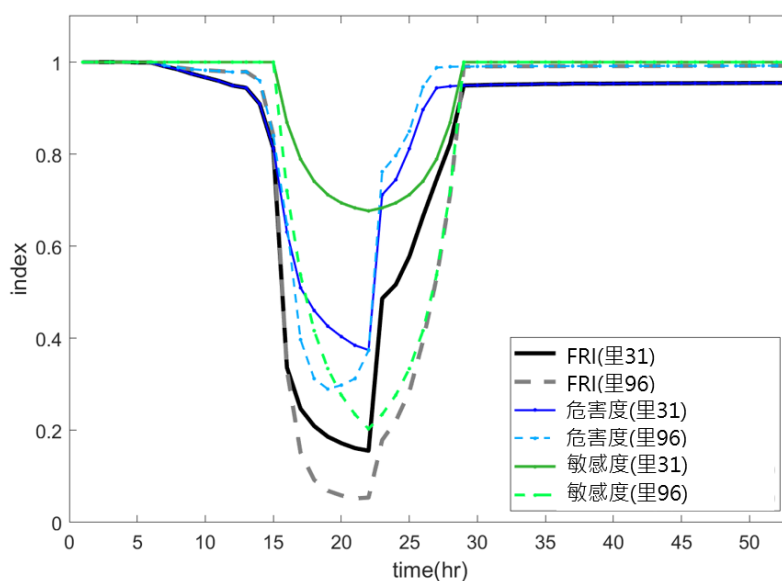


圖 6-2 模擬期間里 31 與里 96 之指標分數

表 6-1 里 31 與里 96 之社會因子

	F_p	F_B	x_s	x_T
里 31	0.5733	0.6458	1	1
里 96	0.5775	0.8434	0.9110	0.552

本研究欲探討社會因子(分別為敏感度指標中的 x_s 、 x_T 、 x_C ，定義詳見 3.3.3)時變與否的影響為何；未時變即因子分數在淹水期間為定值、在未淹水期間分數均為 1，呈現階梯式變化，以里 117 為例呈現如圖 6-3(a.)所示，其他危害度指標及暴露度指標計算方式維持一致，圖 6-3(b.)顯示主要差異為淹水期間有時變的分數均會低於無時變，且有時變的 FRI 在回復期的回彈速度慢於無時變。表

6-2 及圖 6-4 整理 17 個里在 FRI 最低點的分數差異以及回復至接近初始狀態所需的時間(回復期時間)，均可觀察出與里 117 一致的現象。

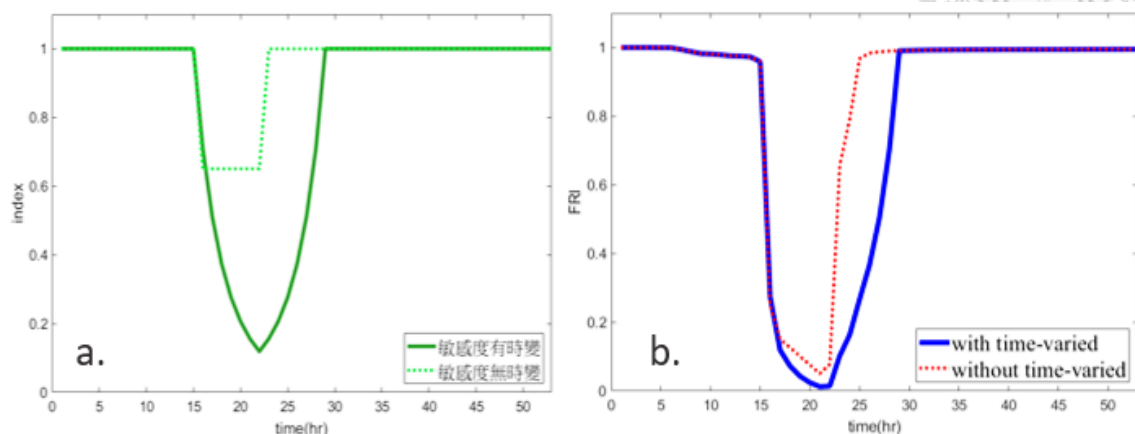


圖 6-3 比較里 117 時變與否 (a.)敏感度；(b.) FRI

表 6-2 比較有無時變最低點分數和出現時間

里	社會因子時變		社會因子未時變	
	最低點FRI	出現時間(第 小時)	最低點FRI	出現時間(第 小時)
31	0.1557	22	0.1917	22
44	0	23	0	23
46	0	22	0	22
49	0.0063	22	0.0202	22
61	0	22	0	22
64	0.0009	23	0.0121	23
70	0.1061	19	0.1193	19
78	0	23	0	23
92	0.0914	21	0.1327	19
96	0.0521	21	0.1347	19
101	0.0803	20	0.1170	19
107	0.0057	22	0.0336	21
110	0.0060	23	0.0092	23
114	0.0979	20	0.1419	19
117	0.0121	21	0.0503	21
119	0.0111	21	0.0408	21
121	0.0112	21	0.0506	20

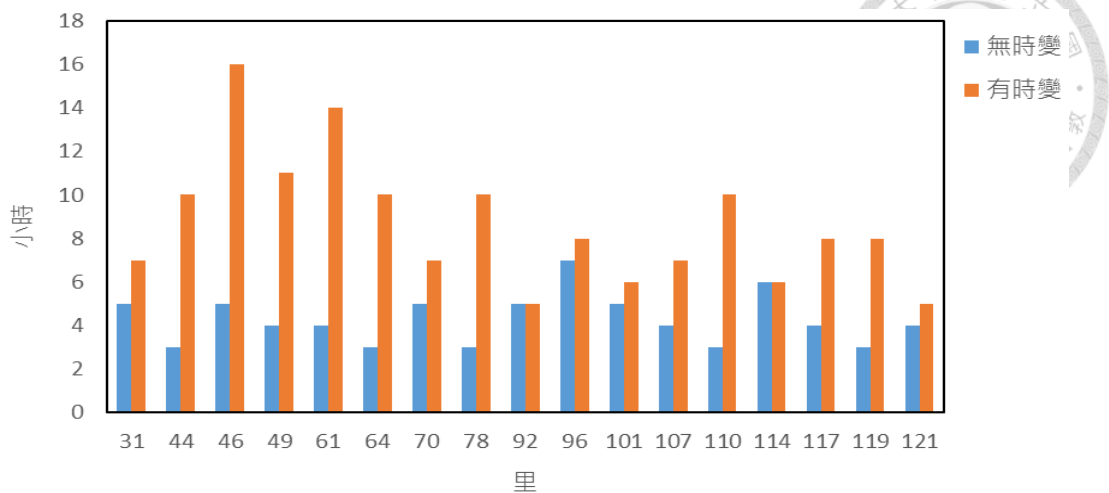


圖 6-4 比較有無時變情況下回復期時間長度(單位：小時)

進一步細究表 6-2 可觀察出共六里的 FRI 最低點在社會因子時變下延後出現。其中除了里 121 外，模擬期間任一時刻平均深度均未超過臨界值，整體淹水情形不嚴重，以致有時變的情況在危害度最低點發生時，因淹水延時仍在累加，故尚未到達敏感度最低點(回復力作用點)，最終造成回復期起始時間點延後至敏感度最低點時刻。以里 114 為例，第 19 小時為未時變情形下的 FRI 最低點，即危害度最低點；有時變的狀態下如圖 6-5 所示，FRI 最低點處延後至第 21 小時，即敏感度最低點。

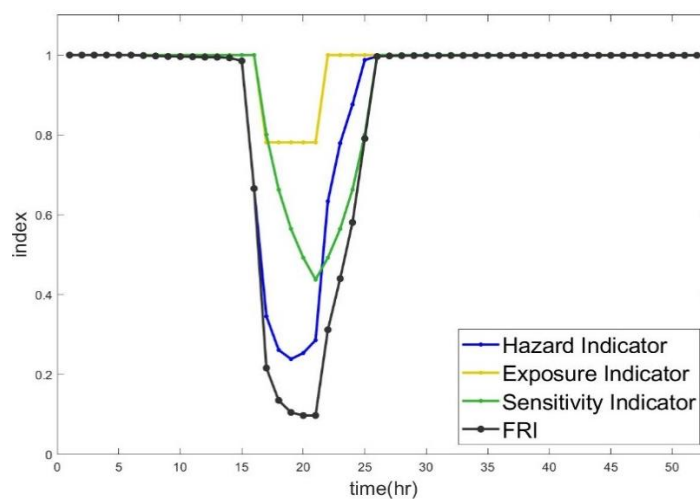


圖 6-5 里 114 的 FRI 及其內部指標

其他還有兩個里平均淹水深度也從未超過 0.5 公尺，分別為里 31 和里 70，但因為其社經條件極佳，如圖 6-6 所示在時變情形下敏感度分數即使在最低點都有 0.6 以上，與危害度和暴露度指標分數相乘後不會拉低 FRI，FRI 最低點出現在危害度最低點時刻（里 31 在第 22 小時，里 70 在第 19 小時），故社經條件佳的里敏感度指標是否時變不影響 FRI 最低點(回復期)出現時間。

綜合以上敘述，FRI 中的敏感度指標反映一個區域的經濟發展情形，使兩個區域淹水狀況相似，韌性卻產生落差。此外淹水期間中有時變的敏感度指標會導致所有里的 FRI 在事件期、回復期的分數降低、回復期的時間拉長；若該里的社經狀況相對弱勢會使回復期的出現時間延後，若該里的社經狀況相對優勢則不影響回復期的出現時間。將這些結論反應到真實的洪水事件，使用敏感度無時變的 FRI 可能造成決策者低估區域受到災害的衝擊且誤判淹水破壞結束的時間點，進而高估該里的韌性，使災後的復原工作無論在各里間的資源分配上或投入時間點都受影響。

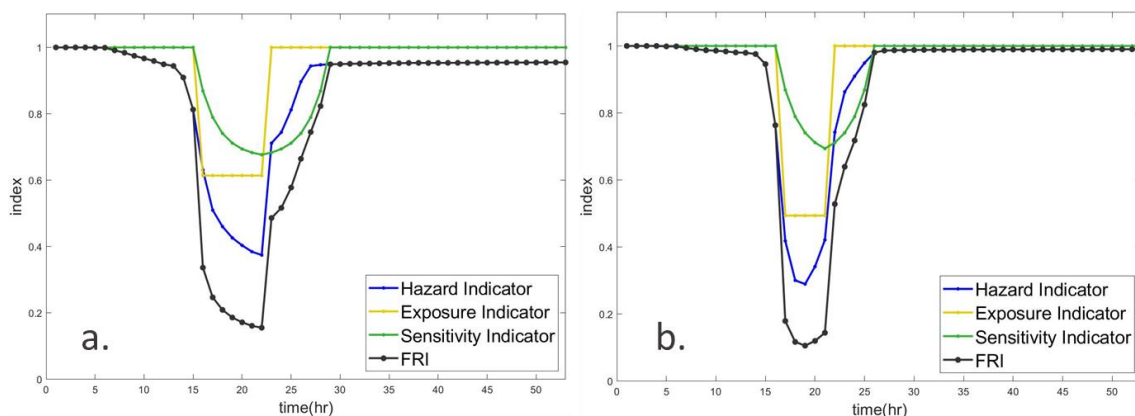


圖 6-6 FRI 及其內部指標 (a.)里 31；(b.)里 70

6.2 FRI 分類及其內部指標型態

危害度指標及敏感度指標在淹水期間內具有時間變異性，且危害度為災害的來源，為影響 FRI 趨勢的重要因素。本小節根據情境 A 的淹水模擬結果，先解釋 17 個里的危害度指標的三種型態差異，危害度型態由一至三分別為高危害度風

險、中危害度風險、低危害度風險；再將 FRI 依趨勢型態分類並與危害度相互對照。



6.2.1 危害度指標型態

- (6) 型態一：特色為危害度指標在淹水期間呈現斜率為負的線性變化。水深因子及面積因子均在淹水事件期間內持續超過臨界值，使該兩項因子分數也保持為 0，因此危害度時變情形由延時因子完全主宰。然而若累積淹水延時也超過其臨界值時，則該時段危害度徹底崩潰，如里 46、61。決策者應特別警惕屬於型態一的里其社經相關因子分數高低，若該里社經條件差將造成社區自主恢復的能力較薄弱，須外力介入援助。屬於型態一的里共 11 個，如圖 6-7 (a.)至(k.)所示，依序為里 44、46、49、61、64、78、107、110、117、119、121。

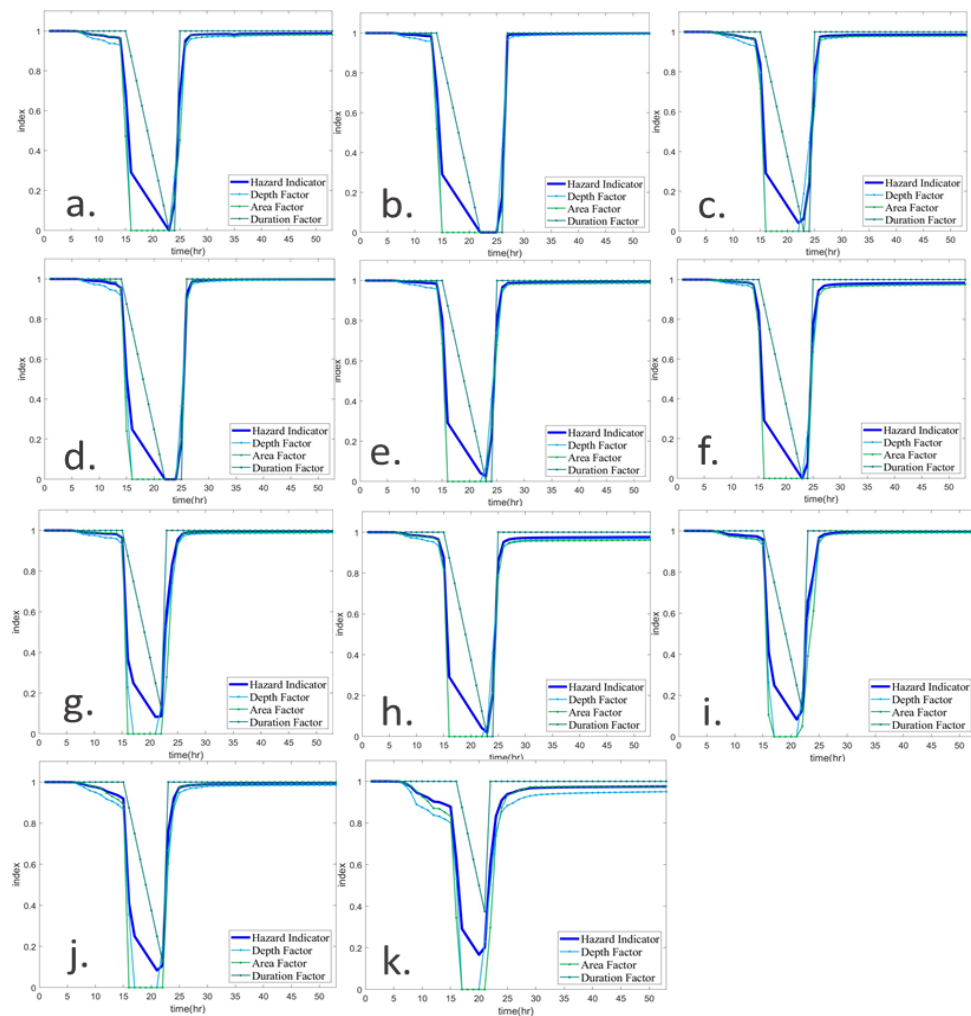


圖 6-7 危害度型態一



- (7) 型態二：淹水事件期間只有面積(或深度)持續超過臨界值，因此危害度時變情形由深度(或面積)、延時因子共同主宰，相鄰時間的危害度分數變化比型態一更平緩。屬於型態二的里共 2 個，如圖 6-8 (a.)至(b.)所示，依序為里 92、101。

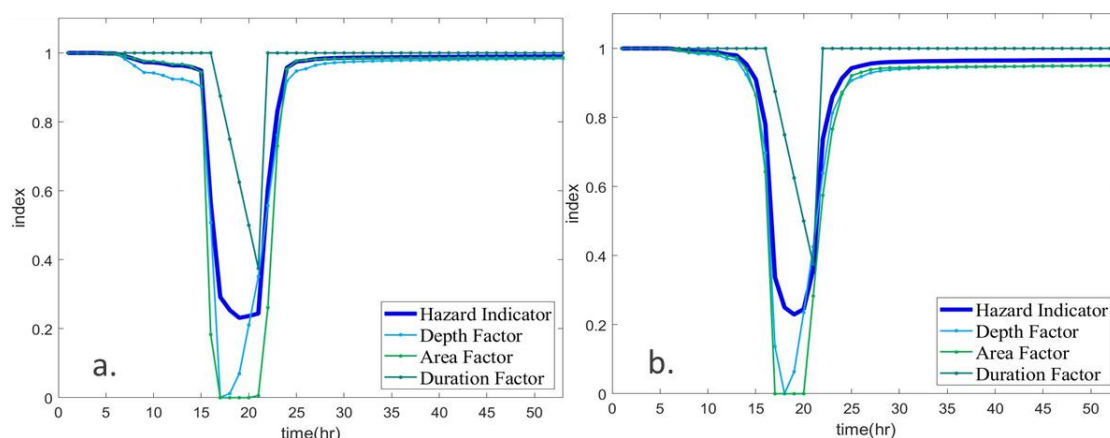


圖 6-8 危害度型態二

- (8) 型態三：淹水事件期間水深、面積及延時都未超過臨界值，因此三個因子各自的分數不會為 0，危害度分數由三個因子共同主宰。屬於型態二的里共 4 個，如圖 6-9 (a.)至(d.) 所示，依序為里 31、70、96、114。

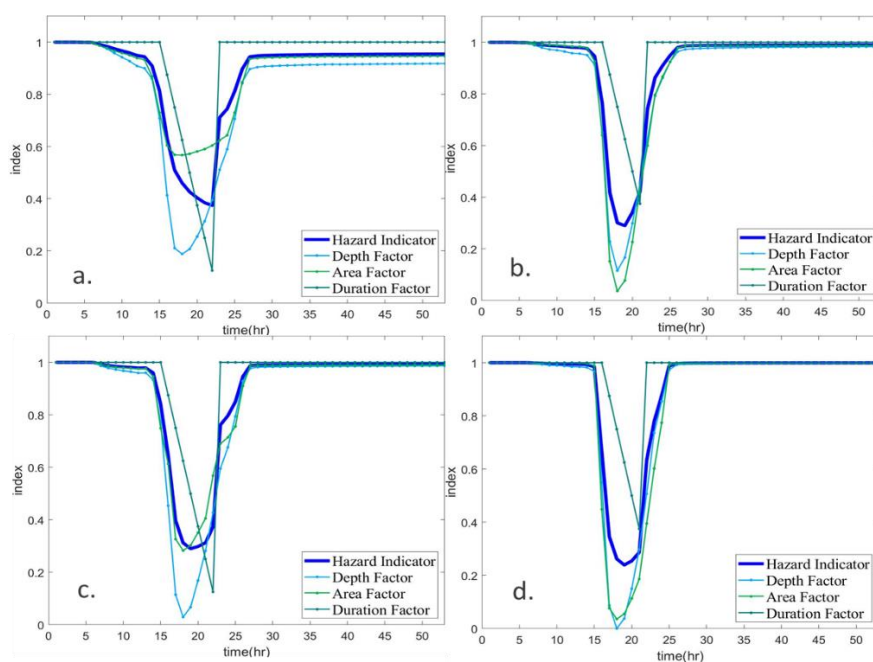


圖 6-9 危害度型態三

6.2.2 FRI 分類

- (9) 分類一：回復力作用點前的深度和面積因子很快超過臨界值，若淹水延時長將造成敏感度持續下降使最低點跟危害度同樣趨近於 0。然而回復力作用點後退水迅速，且延時因子全為 1，故危害度急遽回復接近至 1，FRI 遂緊貼著敏感度回升至初始狀態。共有 4 個里屬於 FRI 分類一，如圖 6-10 FRI 分類一(a.)至(f.) 所示，依序為里 46、64、107、117、119、121。

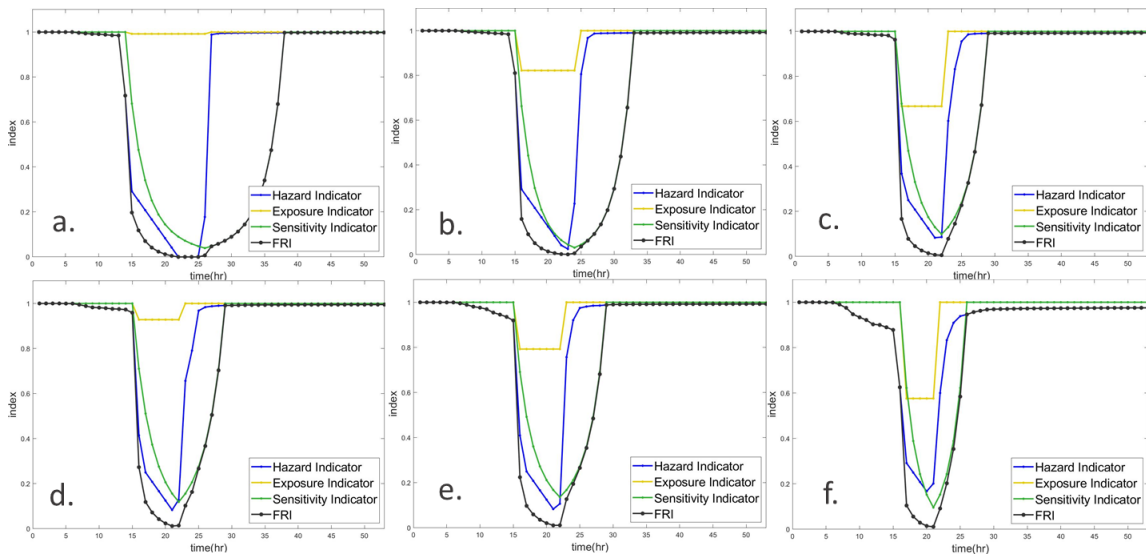


圖 6-10 FRI 分類一

- (10) 分類二：與分類一的最大差異為淹水期間的敏感度遠高於危害度。回復力作用點前敏感度下降的比危害度慢且少，使 FRI 在回復力作用點處急速抬升；回復力作用點後與分類一狀況相同，使 FRI 在回復期也緊貼著敏感度變化。共有 5 個里屬於 FRI 分類二，如圖 6-11 (a.)至(e) 所示，依序為里 44、49、61、78、110。

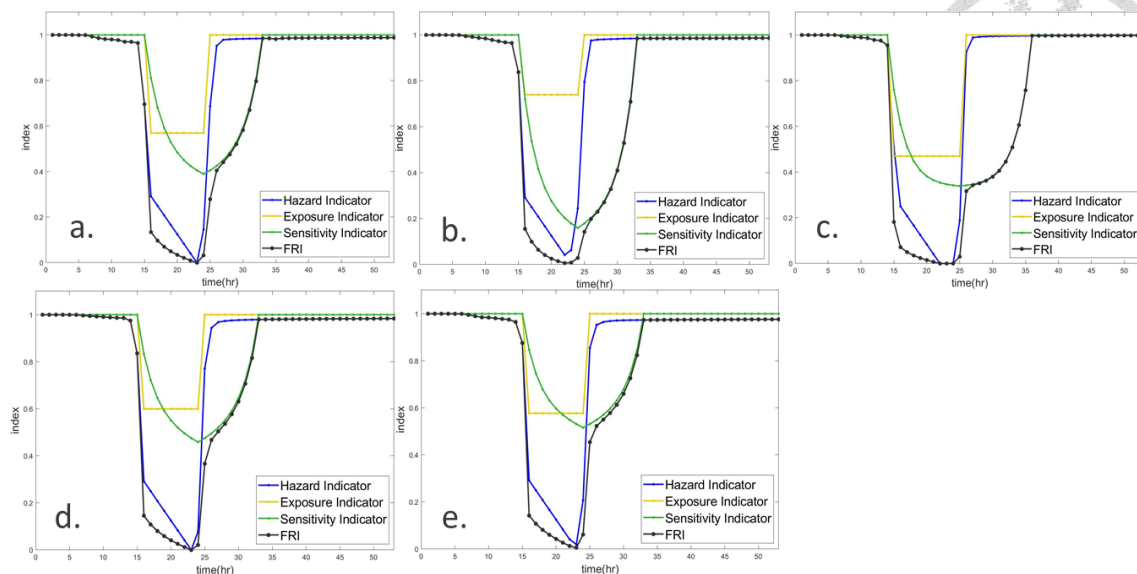


圖 6-11 FRI 分類二

(11) 分類三：與分類一和分類二的最大差異為淹水面積和深度呈逐步好轉，使危害度在回復力作用點後逐步上升，FRI 沒有完全依靠敏感度回彈。共有 6 個里屬於 FRI 分類三，如圖 6-12(a.)至(f) 所示，依序為里 31、70、92、96、101、114。

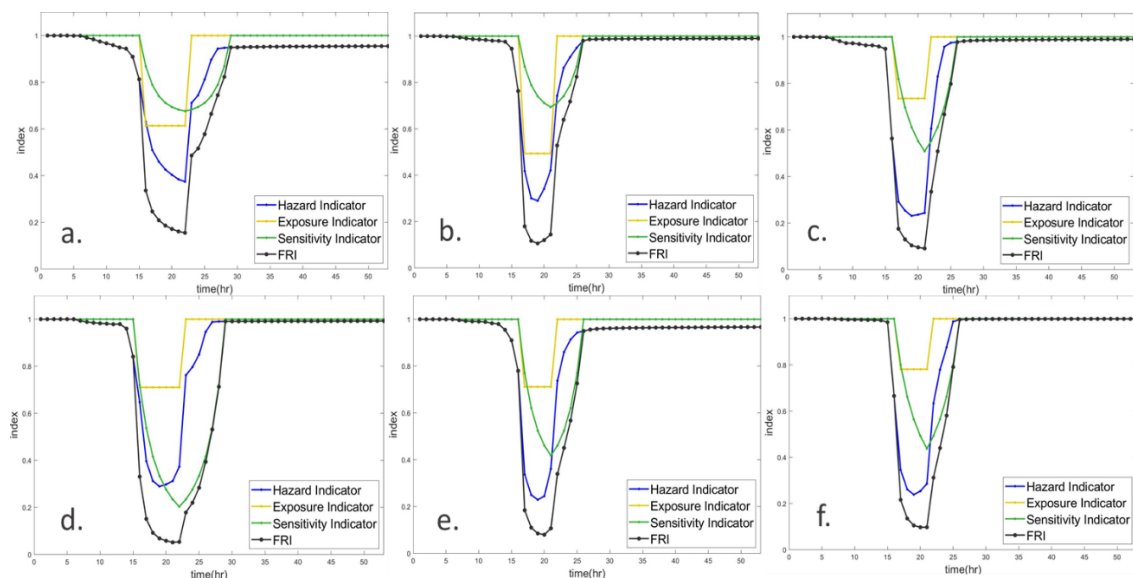


圖 6-12 FRI 分類三

暴露度指標在淹水期間內作用為加快各里 FRI 下降的幅度；然而本研究 17 個參考里的暴露度指標分數在研究區域多屬優良，如表 6-3 所示，因此相比危害

度及敏感度而言對 FRI 整體影響不大。透過本節圖像化詮釋 FRI 的趨勢，統整出本研究區域危害度型態和 FRI 分類的對照，歸納如圖 6-13 所示：危害度為型態一必屬於者 FRI 分類一或分類二、危害度為型態二和三者必屬於者 FRI 分類三，如此一來決策者得知危害度趨勢時能立即將實際淹水情形與 FRI 連結，增加決策便利性。

表 6-3 17 個參考里在淹水期間的暴露度指標分數($I_{exposure}$)

里 31	里 44	里 46	里 49	里 61	里 64	里 70	里 78	里 92
0.6141	0.5695	0.9919	0.7395	0.4698	0.8222	0.4941	0.5996	0.7355
里 96	里 101	里 107	里 110	里 114	里 117	里 119	里 121	
0.7104	0.7115	0.6674	0.5770	0.7814	0.9282	0.7927	0.5763	

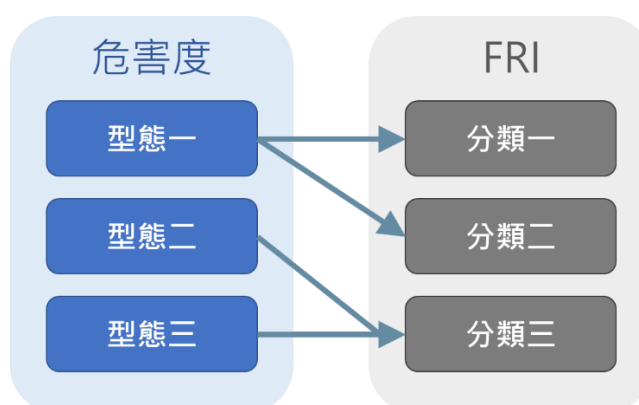


圖 6-13 危害度型態與 FRI 分類關聯對照

6.3 不同設計兩型之 FRI 比較

本節依序將降雨量、降雨延時、降雨型態視為操作變因，探討對 FRI 在事件期下降的快慢、最低點分數及其出現時間、回復期所需時間。一元函數圖形的切線斜率為梯度，若將 FRI 隨時間變化的趨勢線視為一元函數，藉由計算各個時段的梯度值可判斷 FRI 分數下降的快慢。以圖 6-14 為例，里 49 在情境 A 模擬期間 FRI 各時段的梯度值如藍線所示，事件期前期的梯度隨時間下降，該期間相鄰兩時間的梯度差最大值為粉線所示，若決策者掌握受衝擊的關鍵致災時間點並做

出調適行為，例如派駐移動式抽水站以降低危害度，將能大幅降低區域的風險，增加淹水事件期間的韌性分數。

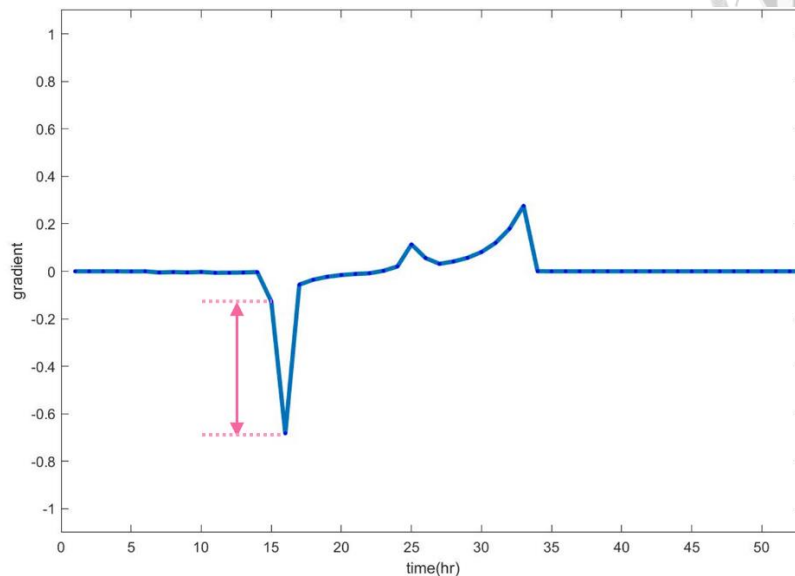


圖 6 - 14 (情境 A)里 49 模擬期間 FRI 各時段之梯度值

6.3.1 同降雨延時及降雨型態、不同降雨量

本小節將以情境 A、B、C 為比較對象，三者同屬中央集中式降雨，降雨延時 24 小時，總降雨量分別為 400mm、700 mm、850 mm。圖 6 - 15 為模擬過程中所有參考里三種情境的 FRI，由(a.)至(q)依序為里 31、44、46、49、61、64、70、78、92、96、101、107、110、114、117、119、121。從結果來看，隨著雨量增大，每個參考里的 FRI 趨勢線都加寬加深，表示同樣一個時間點下的分數隨著雨量增大而降低，事件期提早且回復期延後。

里 70、92、96、101、114、119、121 共 7 里都因為與周遭鄰近里的地勢變化較為平緩，在小雨量的情境 C 模擬過程中無任一時段的平均淹水深度超過 0.25 公尺，故根據本文第三章的計算方法定義暴露度及敏感度指標分數將維持為 1，FRI 分數完全由淹水深度因子及淹水面積因子決定，因此情境 C 分數特別高。然而情境 A 及 B 的分數差距遠不如情境 A 及 C 顯著，歸因於 A 及 B 均為世紀末情境，受臨界值作用使危害度相關因子之分數為 0，FRI 分數也幾乎呈現崩潰。

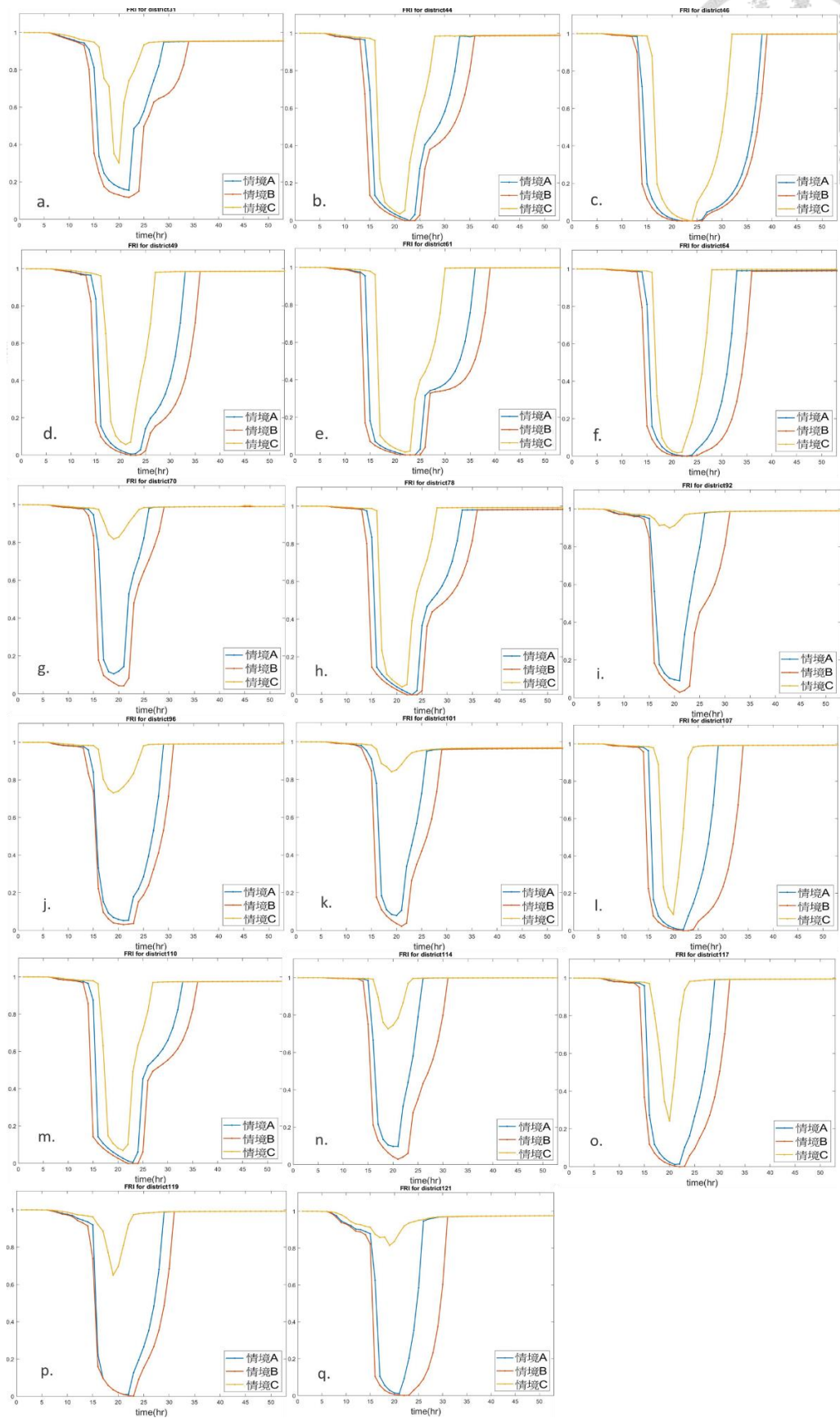


圖 6-15 不同雨量之 FRI 比較

表 6-4 呈現所有參考里在事件期中相鄰兩時間的最大梯度差並以顏色深度區分嚴重情形，整體趨勢為雨量愈大，最大梯度差愈大且出現時間愈延後。然而位於瓦窯溝東側局部低窪一帶的參考里(例如里 44、46、61、64、78)為例外：情境 C 雖然總雨量小，但在降雨尖峰期的雨量值增大到超出排水系統的負荷，使這些里匯集周圍的地表逕流，使全區淹水深度因子也瞬間增大並超過臨界值，故在基期 400mm 的雨量條件下 FRI 分數下降地更急速，梯度差遠大於情境 A 和情境 B (例如里 44 在情境 C 下第 16 和第 17 小時為 FRI 下降最快的時段，梯度差距為 0.7263，大於情境 A 第 15 到第 16 小時的 0.2925 和情境 B 第 14 到第 15 小時的 0.2906)。

表 6-4 不同雨量情境下參考里於事件期中梯度差最大值及出現時間

里	情境A		情境B		情境C	
	梯度差	出現時間	梯度差	出現時間	梯度差	出現時間
31	0.3796	15~16	0.3220	14~15	0.3192	18~19
44	0.2925	15~16	0.2906	13~14	0.7263	16~17
46	0.2667	13~14	0.6224	13~14	0.5763	16~17
49	0.5554	15~16	0.5069	14~15	0.3009	16~17
61	0.7529	14~15	0.7935	13~14	0.8389	16~17
64	0.4782	15~16	0.4422	14~15	0.6525	16~17
70	0.4013	16~17	0.5514	15~16	0.0551	16~17
78	0.5510	15~16	0.4762	14~15	0.7275	16~17
92	0.3755	15~16	0.5700	15~16	0.0210	18~19
96	0.3904	15~16	0.4255	15~16	0.1398	16~17
101	0.4649	16~17	0.6081	15~16	0.0540	16~17
107	0.7780	15~16	0.7078	14~15	0.5683	17~18
110	0.6436	15~16	0.6024	14~15	0.3148	16~17
114	0.3115	15~16	0.3103	15~16	0.0924	16~17
117	0.6718	15~16	0.5590	14~15	0.1496	16~17
119	0.6790	15~16	0.4028	15~16	0.0812	17~18
121	0.2686	16~17	0.6668	15~16	0.0472	18~19

表 6-5 統整三種情境的 FRI 最低點分數及其出現時間，最低點分數隨著雨量增大而降低，出現時間則沒有統一延後或提前的規律。比較 17 個參考里的最低點出現時間，若韌性最低點分數在小雨量情境已為 0，則出現時間會隨雨量增大而提前，代表危害度相關因子的分數較早超過臨界值達到最低點，例如里 44、61、64、78 的情境 A 和 B 及里 46 的三種情境均為此狀況。其他大部分的里在雨量小情境中因為最低點分數相對較高，韌性還有餘裕可以下降到 0，因此 FRI 最低點出現時間會因淹水延時增加，敏感度分數持續下降影響而延後。圖 6-16 比較三種情境回復期所需時間，無論淹水狀況嚴重與否，情境 C 各里都可以在 10 小時內回到逼近初始狀態，但隨著雨量愈大，回復期也拉長。

表 6-5 不同雨量下各參考里 FRI 最低點分數及其出現時間

里	情境A		情境B		情境C	
	最低點 FRI	出現時間 (第__小時)	最低點 FRI	出現時間 (第__小時)	最低點 FRI	出現時間 (第__小時)
31	0.1557	22	0.1173	22	0.3018	20
44	0	23	0	22	0.0354	21
46	0	22	0	21	0	24
49	0.0063	22	0	22	0.0576	21
61	0	22	0	21	0.0149	22
64	0.0009	23	0	22	0.0186	21
70	0.1061	19	0.0426	21	0.8181	19
78	0	23	0	22	0.0413	21
92	0.0914	21	0.0298	21	0.8991	19
96	0.0521	21	0.0305	21	0.7311	19
101	0.0803	20	0.0232	21	0.8413	19
107	0.0057	22	0	22	0.0863	20
110	0.0060	23	0	22	0.0699	21
114	0.0979	20	0.0293	21	0.7267	19
117	0.0121	21	0	22	0.2422	20
119	0.0111	21	0.0014	23	0.6503	19
121	0.0112	21	0.0013	22	0.8149	19

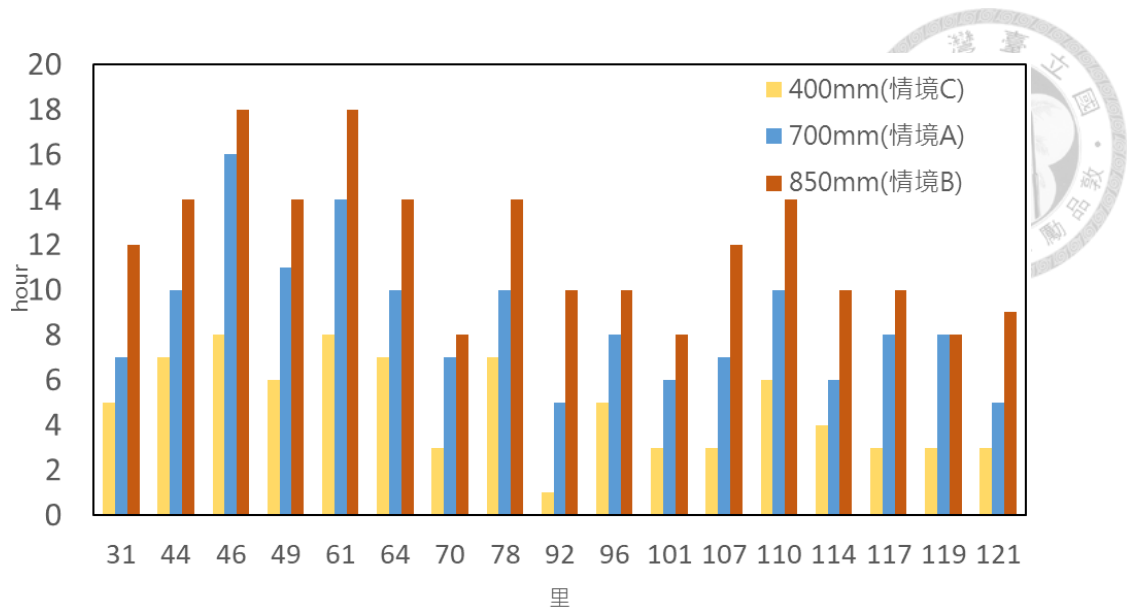


圖 6-16 不同雨量下各參考里回復期所需時間

根據本小節分析結果可以得出在固定降雨延時和雨型分布下，整體來說雨量增大則 FRI 事件期提早開始、分數降低、回復期延後，然而仍須視各里的地形條件是否為局部低窪，結果會略有不同。

6.3.2 同降雨量及降雨型態、不同降雨延時

本小節將以情境 A、D 為比較對象，兩者同屬中央集中式降雨，總降雨量為 700mm，降雨延時分別為 24 小時及 36 小時。圖 6-17 為模擬過程中所有參考里兩種情境的 FRI，由(a.)至(q)依序為里 31、44、46、49、61、64、70、78、92、96、101、107、110、114、117、119、121。從結果來看，無論參考里處於地勢平緩變化亦或局部低窪，情境 D 的 FRI 趨勢線均有右移的趨勢並略微加寬，但分數的落差並不顯著。

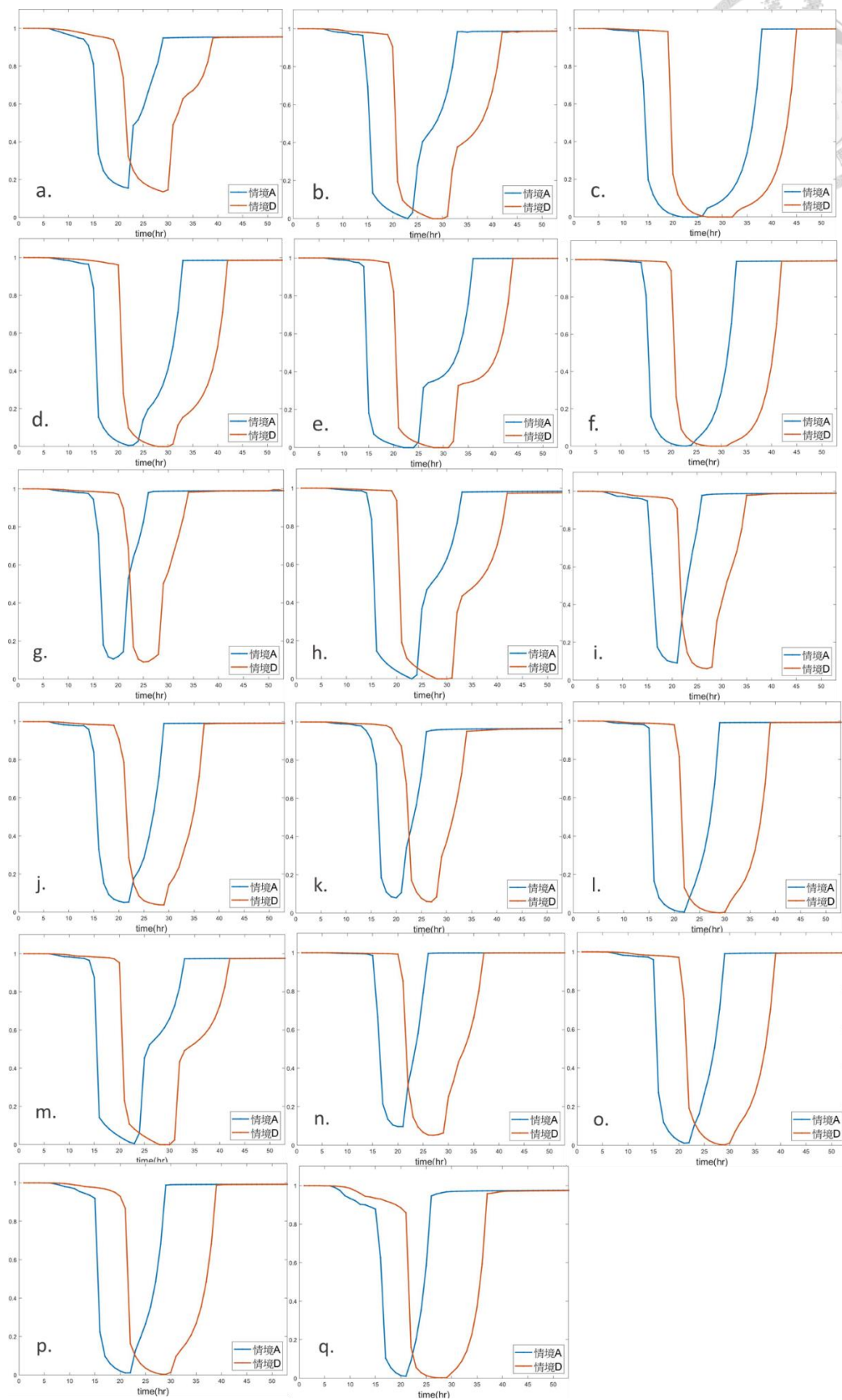


圖 6 - 17 不同降雨延時之 FRI 比較

雖然總累積降雨量不變，情境 D 比情境 A 更能均勻地將雨量分配到每個時間，使尖峰降雨量從 108mm 降低到 80mm 從而減輕危害度；然而 FRI 不只是危害度的時變，細究 FRI 最低點處的累積淹水延時可由表 6 - 6(b.)呈現情境 D 比情境 A 多幾個小時，敏感度分數會隨著降雨延時而拉長時變期間、暴露度也會在淹水事件結束後才能回到 1，造成 36 小時情境的最低點分數比短延時的 24 小時情境還要低，且出現時間隨著降雨尖峰而延後，代表回復期開始時間延後，如表 6 - 6(b.)所示。所有里在情境 D 也要花比情境 A 長的時間才能回復到初始狀態，如圖 6 - 18 所示。

表 6 - 6 不同降雨延時情境 (a.)各參考里 FRI 最低點分數及其出現時間；(b.)淹水

延時差距

里	情境A		情境C	
	最低點 FRI	出現時間 (第_小時)	最低點 FRI	出現時間 (第_小時)
31	0.1557	22	0.1362	29
44	0	23	0	28
46	0	22	0	27
49	0.0063	22	0	28
61	0	22	0	28
64	0.0009	23	0	28
70	0.1061	19	0.0906	25
78	0	23	0	28
92	0.0914	21	0.0615	27
96	0.0521	21	0.0387	29
101	0.0803	20	0.0596	27
107	0.0057	22	0.0010	29
110	0.0060	23	0	28
114	0.0979	20	0.0527	27
117	0.0121	21	0.0029	29
119	0.0111	21	0.0033	29
121	0.0112	21	0.0027	28

a.

里	淹水延時差距
31	4
44	4
46	2
49	4
61	2
64	4
70	2
78	4
92	4
96	2
101	2
107	4
110	4
114	6
117	4
119	4
121	6

b.

危害度相關因子的定義也強烈影響各情境的致災時間。表 6 - 7 呈現所有參考里在事件期中相鄰兩時間的最大梯度差，並以顏色深度區分嚴重程度。雖然各時段雨量在情境 D 比情境 A 更平均分布，危害度趨勢起伏較平緩，然而考慮敏感

度分數無論在何種情境，只要進入淹水事件後均以相同幅度隨時間下降，且情境 A 在淹水事件前期的危害度分數已比情境 D 低，情境 D 甫進入淹水時刻水深即超過臨界值，造成該時刻為梯度差最大值，並大於情境 A。

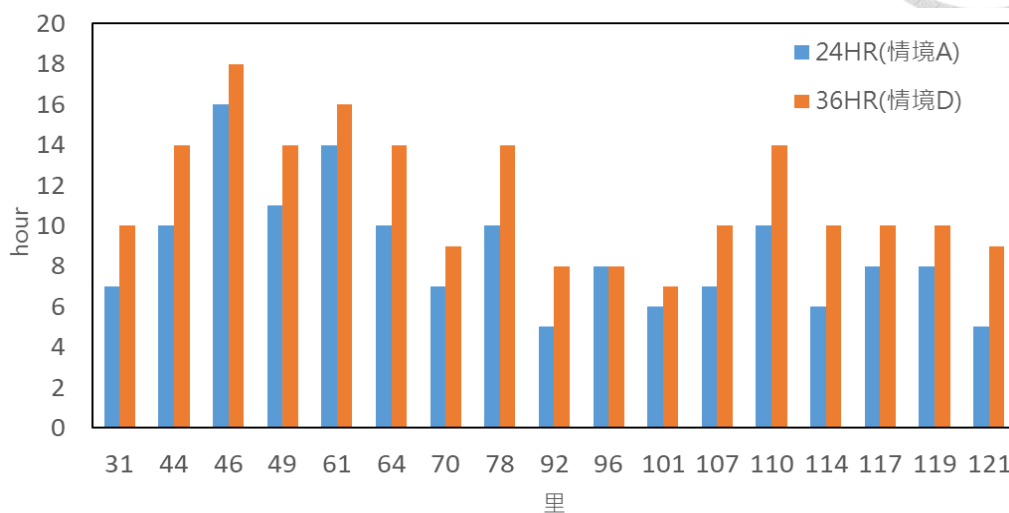
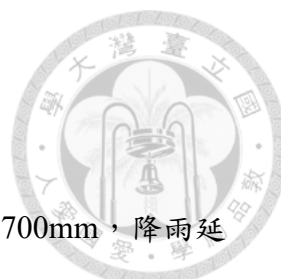


圖 6-18 不同降雨延時下各參考里回復期所需時間

表 6-7 不同降雨延時情境下參考里於事件期中梯度差最大值及出現時間

里	情境A		情境D	
	梯度差	出現時間	梯度差	出現時間
31	0.3796	15~ 16	0.2805	21~ 22
44	0.2925	15~ 16	0.6474	20~ 21
46	0.2667	13~ 14	0.7548	19~ 20
49	0.5554	15~ 16	0.6733	20~ 21
61	0.7529	14~ 15	0.5644	20~ 21
64	0.4782	15~ 16	0.6286	20~ 21
70	0.4013	16~ 17	0.3063	20~ 21
78	0.5510	15~ 16	0.6952	20~ 21
92	0.3755	15~ 16	0.5617	21~ 22
96	0.3904	15~ 16	0.3795	21~ 22
101	0.4649	16~ 17	0.3029	22~ 23
107	0.7780	15~ 16	0.5151	21~ 22
110	0.6436	15~ 16	0.7021	20~ 21
114	0.3115	15~ 16	0.4042	21~ 22
117	0.6718	15~ 16	0.3506	21~ 22
119	0.6790	15~ 16	0.6409	21~ 22
121	0.2686	16~ 17	0.6730	21~ 22

根據本小節分析結果可以得出在固定降雨量和雨型分布下，整體來說降雨延時拉長則 FRI 事件期延後開始、最低點分數降低、回復期延後出現且回復期時間拉長。



6.3.3 同降雨量及降雨延時、不同降雨型態

本小節將以情境 A、E、F 為比較對象，三者的總降雨量為 700mm，降雨延時 24 小時，降雨型態分別為中央集中式雨型、右偏雨型及左偏雨型。圖 6-20 為模擬過程中所有參考里三種情境的 FRI，由(a.)至(q)依序為里 31、44、46、49、61、64、70、78、92、96、101、107、110、114、117、119、121。每個參考里的 FRI 趨勢線都會隨著雨型偏移而左右移動，右偏雨型分數會略大於中央集中式以及左偏雨型，但因為降雨百分比不曾改變，故趨勢線沒有明顯上下移動，而從圖 6-19 顯示三種雨型的回復期所需時間沒有固定的趨勢，需要依照當地的地勢、排水條件等有不同判斷。

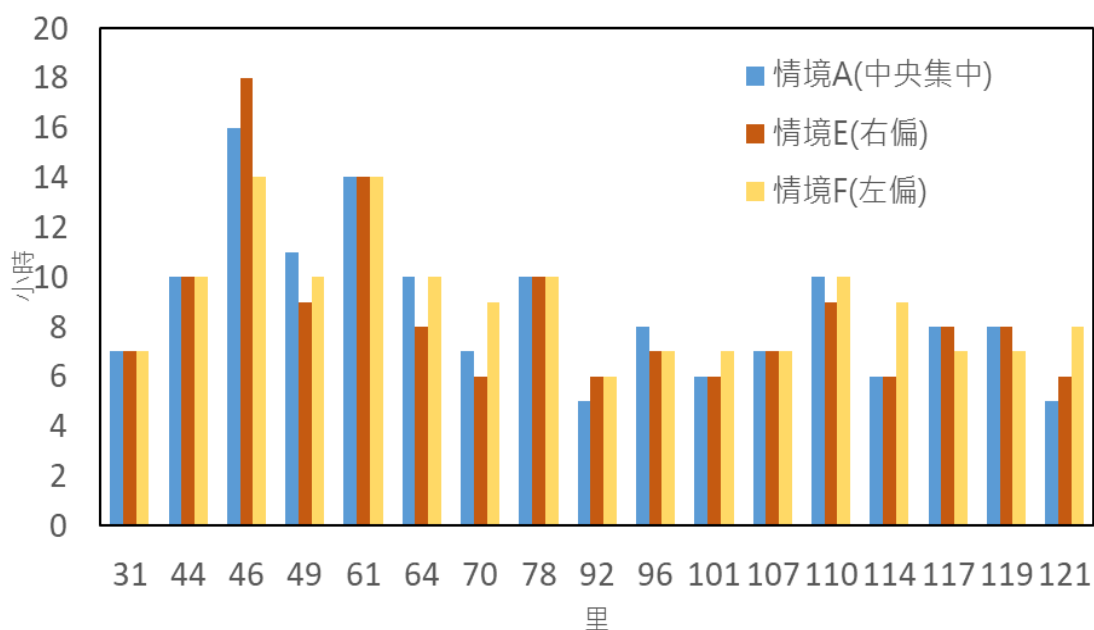


圖 6-19 不同降雨型態下各參考里回復期所需時間

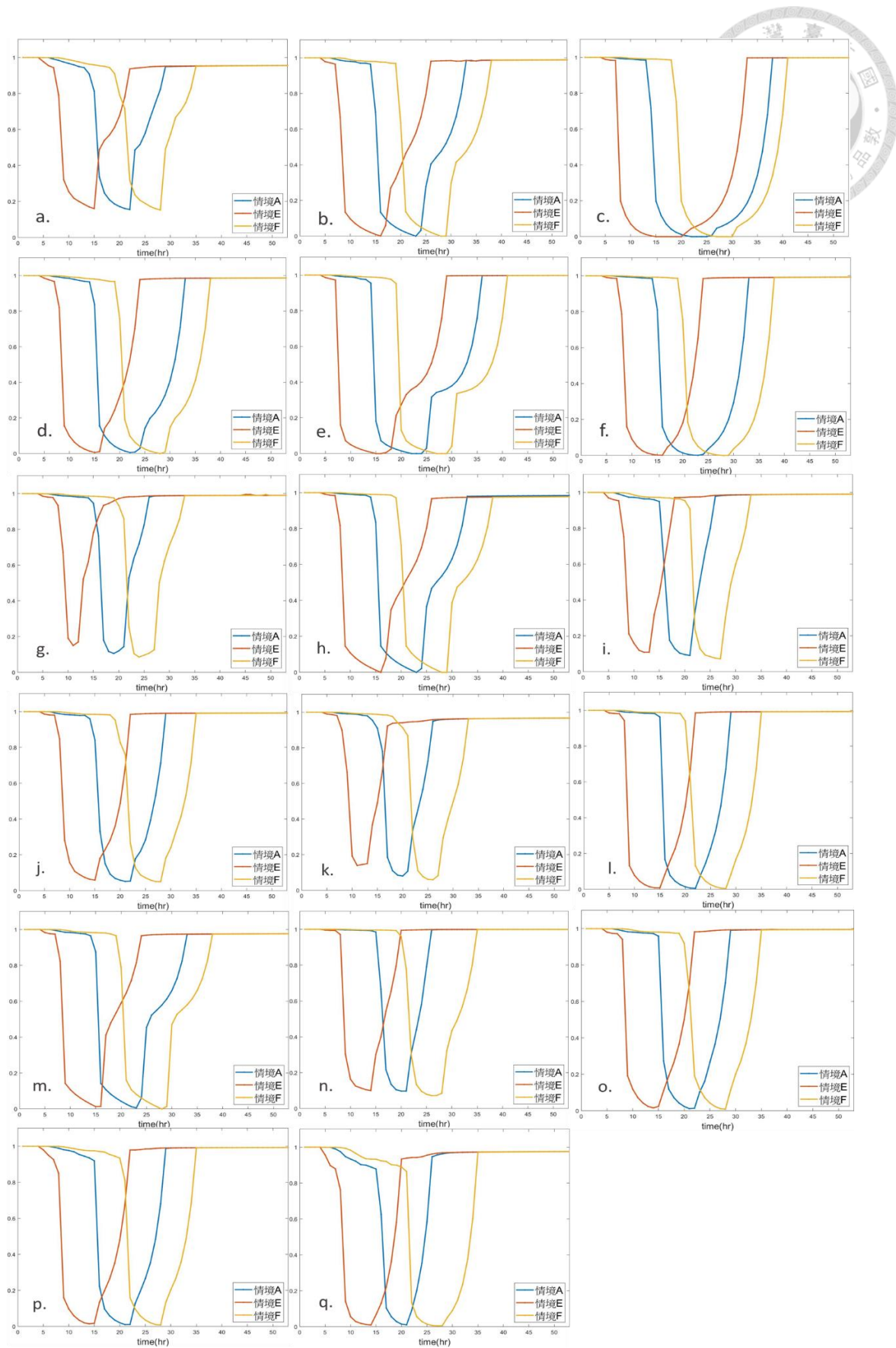


圖 6 - 20 不同降雨型態之 FRI 比較

表 6-8 呈現所有參考里在事件期中相鄰兩時間的 FRI 最大梯度差，可代表各里的致災時點及嚴重程度，故以顏色深度區分嚴重情形。比較情境 A 和情境 E，因為右偏雨型的降雨尖峰比中央集中式雨型早，開始降雨後經過二至三個小時隨即進入淹水事件期，故情境 E 梯度下降最快，承受的衝擊最劇烈。情境 F 的降雨尖峰在模擬期間的第 22 小時，然而第五小時後 FRI 即開始緩慢的變化，整體而言相鄰時間的最大梯度差值小於情境 A 和情境 E。里 61、121 因為其地勢低窪，加上社經狀況與其他里相比並不高，因此甫進入淹水事件期間水深、暴露度及敏感度分數就急速下降，如表 6-9 所示，造成該兩里在情境 F 中為特殊情形，梯度差值較高。

表 6-8 不同降雨情境下參考里於事件期中梯度差最大值及出現時間

里	情境A		情境E		情境F	
	梯度差	出現時間	梯度差	出現時間	梯度差	出現時間
31	0.3796	15~16	0.3196	8~9	0.3267	21~22
44	0.2925	15~16	0.2907	7~8	0.3316	19~20
46	0.2667	13~14	0.7835	7~8	0.3198	19~20
49	0.5554	15~16	0.5166	8~9	0.3562	20~21
61	0.7529	14~15	0.8060	7~8	0.7989	19~20
64	0.4782	15~16	0.4303	8~9	0.3417	20~21
70	0.4013	16~17	0.2196	8~9	0.5300	21~22
78	0.5510	15~16	0.5045	8~9	0.2981	21~22
92	0.3755	15~16	0.3429	8~9	0.6274	21~22
96	0.3904	15~16	0.4324	8~9	0.4274	21~22
101	0.4649	16~17	0.2372	9~10	0.5319	21~22
107	0.7780	15~16	0.7726	8~9	0.2969	20~21
110	0.6436	15~16	0.5299	8~9	0.4498	20~21
114	0.3115	15~16	0.6442	8~9	0.3016	21~22
117	0.6718	15~16	0.7171	8~9	0.2139	20~21
119	0.6790	15~16	0.6151	8~9	0.5252	21~22
121	0.2686	16~17	0.5041	8~9	0.7060	21~22

表 6-9 里 61、里 121 淹水事件前後各指標分數

	t_s	$F_H(t_s - 1)$	$F_H(t_s)$	$I_{Hazard}(t_s - 1)$	$I_{Hazard}(t_s)$	$I_{Exposure}(t_s)$	$I_{Sensitivity}(t_s)$
里 61	20	0.9132	0.1648	0.95226	0.3629	0.4698	0.7607
里 121	22	0.7838	0.2307	0.8639	0.3686	0.5763	0.6228

三個情境 FRI 最低點處的累積淹水延時可由表 6-10 呈現，綠色格子代表該里在左偏雨型情境下比中央集中式和右偏雨型累積較久的淹水延時，造成敏感度時變期拉長，最低點分數受此影響成為三者最低，出現時間也延後，如表 6-11 所示。進一步探討右偏雨型的指標分數，無論是危害度最低點分數亦或 FRI 最低點之危害度分數均比中央集中式還高，如圖 6-21 所示，歸因於第五小時降雨開始時雨量雖大，卻很快在七個小時後到達尖峰 108mm，此時的淹水深度受前幾個小時的雨量影響較小，雨水下水道尚有較大的負荷量，使淹水面積及深度因子都能比情境 A 和情境 D 高、累積淹水延時也較低，使危害度最低點或 FRI 最低點之危害度分數均能略高於另外兩種雨型。

表 6-10 不同降雨型態下，FRI 最低點之累積淹水延時(單位：小時)

里	情境A	情境E	情境F
31	7	7	7
44	8	8	8
46	8	8	8
49	7	7	8
61	8	8	8
64	8	8	8
70	3	2	3
78	8	8	8
92	5	4	6
96	6	7	7
101	4	2	5
107	7	7	7
110	8	7	8
114	4	6	5
117	6	6	7
119	6	6	7
121	5	6	6

表 6-11 不同雨型情境下各參考里 FRI 最低點分數及其出現時間

里	中央集中式		右偏雨型		左偏雨型	
	最低點 FRI	出現時間 (第__小時)	最低點 FRI	出現時間 (第__小時)	最低點 FRI	出現時間 (第__小時)
31	0.1557	22	0.1609	15	0.1532	28
44	0	23	0.0009	16	0	28
46	0	22	0	15	0	27
49	0.0063	22	0.0063	15	0	28
61	0	22	0	15	0	27
64	0.0009	23	0.0015	16	0	28
70	0.1061	19	0.1504	11	0.0860	24
78	0	23	0	16	0	28
92	0.0914	21	0.1092	12	0.0724	27
96	0.0521	21	0.0595	15	0.0508	28
101	0.0803	20	0.1394	11	0.0600	26
107	0.0057	22	0.0084	15	0.0042	28
110	0.0060	23	0.0132	15	0	28
114	0.0979	20	0.1005	14	0.0724	26
117	0.0121	21	0.0163	14	0.0092	28
119	0.0111	21	0.0151	14	0.0088	28
121	0.0112	21	0.0103	14	0.0054	27

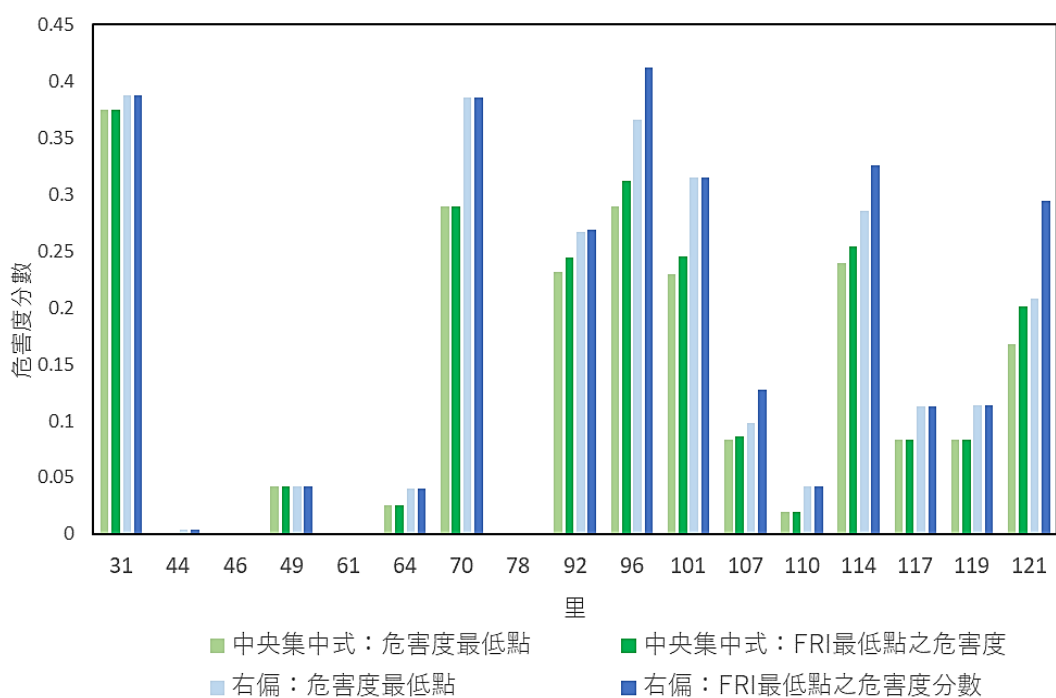


圖 6-21 比較情境 A 和 F 之危害度分數

根據本小節分析結果可以得出在固定降雨延時和雨量分布下，FRI 分數在淹水事件期高低依序為情境 E、情境 A、情境 F；然而從梯度最大差值來看，在事件期前期所受衝擊的劇烈程度由高至低分別為情境 F、情境 A、情境 E。

本章最後綜合六種情境降雨下，各里在事件期中相鄰兩時間的最大梯度差來判斷災害的衝擊時間及程度。本研究將梯度差區分成五種範圍，並依大小給予 1 至 5 的評分，如表 6-12 所示，統計在不同降雨情境下五種梯度差值範圍包含的參考里個數(例如在情境 A 降雨下，有五個里的最大梯度差位在 0.6~0.8 的區間中；在情境 B 降雨下，有八個里的最大梯度差位在 0.4~0.6 的區間中)，將此整理如表 6-13，依據表 6-12 的給分計算各情境的加權得分以判斷何種雨型的受災程度最嚴重。得分區間位於 1 至 5，分數愈低表示該情境在事件期的 FRI 變化愈劇烈，需要在梯度差最大值出現時間介入救援以降低危害度。

表 6-12 不同範圍之梯度差之給分

梯度差範圍	給分
0.8~1	1
0.6~0.8	2
0.4~0.6	3
0.2~0.4	4
0~0.2	5

表 6-13 統計各情境下不同梯度差範圍的參考里數量

梯度範圍	情境A	情境B	情境C	情境D	情境E	情境F
0.8~	0	0	1	0	1	0
0.6~0.8	5	6	3	8	5	3
0.4~0.6	5	8	2	4	6	5
0.2~0.4	7	3	3	5	5	9
0~0.2	0	0	8	0	0	0
加權分數	3.12	2.82	3.82	2.82	2.88	3.35

第七章 結論與建議



氣候變遷與都市擴張下，無論原本就屬於災害潛勢區亦或鮮少發生強降雨的地區都面臨更嚴峻的洪水問題，面對高重現期的降雨需要藉由洪患韌性指標 (Flood Resilience Index, FRI) 的評估結果整合工程設施與非工程手段做出防災決策。本研究導入 ISO 14090 氣候變遷風險的定義，結合物理淹水與社會經濟狀況確立 FRI 的內部指標為危害度、暴露度及敏感度，各指標由定義選擇合適因子。為了探討指標特性和分析不同降雨條件下的變化，選擇中永和為案例，將氣候變遷情境的降雨以 3Di 模式模擬淹水情形，分析該地區淹水危害、保全對象空間分布、經濟收入與社區參與對韌性的交互影響，得出以下結論並給予未來相關研究建議。

7.1 結論

1. 指標中加入社會性因子可區別多個淹水情形相似區域的不同韌性程度。
2. 淹水事件期間敏感度指標無隨時間變化者會導致 FRI 分數比有時變性者高，並使指標提早回復至初始階段，可能使決策者高估該里韌性。
3. 社經狀況相對弱勢會使 FRI 回復期的出現時間在有時變的情境下比無時變情境延後，若社經狀況相對優勢則不影響。
4. 在回復力作用點前 FRI 的趨勢與危害度相關因子相似，敏感度和暴露度相關因子則影響下降速度；回復力作用點後若該里排水系統良好、退水迅速，則 FRI 依靠敏感度因子的回彈速度回復至逼近初始狀態。
5. 危害度為災害的來源，故依據將其指標內部三個因子超出臨界值的個數區分成三種風險程度，可協助釐清 FRI 的圖像化趨勢，統整出危害度分類與 FRI 分類的對照表，作為決策依據。
6. 分析單元內之地形、排水系統、各因子臨界值設定均為影響 FRI 的重要因

素。

7. 整體而言小雨量、短延時的降雨情境韌性佳。比較不同雨型的 FRI，從 FRI 分數判斷，左偏雨型略低分而右偏雨型略高分；然而從梯度判斷事件期受災影響程度，左偏雨型輕微而右偏雨型嚴重。考量本研究對韌性的定義為事件期的致災脆弱度與回復期的回復速度；又觀察各參考里在不同降雨型態下的回復力無規律趨勢，故以左偏雨型的韌性優於右偏雨型。
8. 綜合第 7 點敘述，針對本研究設計的六種情境排序韌性程度為：情境 C > 情境 F > 情境 A > 情境 E > 情境 D = 情境 B。
9. FRI 於即時預警的應用：事件期間的梯度最小值發生時間代表區域受災最嚴重的時段，此時為移動式抽水機最佳的派駐時機點，並以梯度最小值至梯度大於 0 的時間長作為抽水機的作業時間，完成階段性任務後即將設備轉移至其他區域使用，藉由此機制調配災害期間的資源。FRI 最低點為事件期及回復期的分界，此時已無危害度，不因洪水事件干擾而喪失救援行動的成效，故能著手社會性救助活動，例如家園重建。

7.2 建議

1. 本研究社會性因子時變方法為將原始數據標準化後代入指數函數，如本文 3.3.3 節所述，該方法能比較相同時間下不同里間敏感度的差異，以及反映隨淹水延時增加，救災資源下降的情形。未來若有其他適於擬合社會性因子的函數，可比較不同時變方法之間的差異。
2. 針對危害度內部因子本研究僅選用可從 3Di 淹水模式輸出或換算而來的參數；暴露度及敏感度內部因子僅考慮中和區、永和區內較易蒐集的社經統計資料。若選用更多符合指標定義的因子(例如供電系統、路基強度等)，則可呈現更全面的韌性指標。
3. 本研究假設三項指標及其內部因子對災害影響程度均相同，故未分配計算權

重，然而實際上應因地制宜，可透過層級分析法 (Analytic Hierarchy Process, AHP) 制定符合研究區域特性的權重組合，使指標更貼近實際情形。

4. 從結果可知，臨界值的選定將劇烈影響 FRI 事件期中後期及回復期前期的分數。未來研究可從過往災害紀錄中找尋能反映研究區域地勢、降雨等特性的危害度相關因子臨界值。
5. 本研究以里為分析單元，取各里平均淹水深度為因子難以呈現部分地區的水深。若縮小分析單元面積（鄰、最小統計單元），則能細化地區的淹水情形，使危害度因子更趨於真實。因此未來若能取得社經資料，建議縮小分析單元面積，反映地區的受災情形。
6. 本研究著重討論高都市化地區的洪災韌性指標，若應用在鄉村地區，需考量的因子將有別於都市；未來也可將應用在特定區域的實體風險量化，例如計算出觀光景點、工廠或企業營運據點受洪災衝擊即回復的程度；並以該營運範圍的淹水深度、面積、延時做為危害度因子，敏感度及暴露度可自行選擇符合定義之因子。

參考文獻



- [1] Adger WN (2000) Social and ecological resilience: are they related? *Prog Hum Geogr* 24:347–364
- [2] Afifi, Z., Chu, H. J., Kuo, Y. L., Hsu, Y. C., Wong, H. K., & Zeeshan Ali, M. (2019). Residential flood loss assessment and risk mapping from high-resolution simulation. *Water*, 11(4), 751.
- [3] Arrighi, C., Carraresi, A., & Castelli, F. (2022). Resilience of art cities to flood risk: A quantitative model based on depth-idleness correlation. *Journal of Flood Risk Management*, e12794.
- [4] Batika, J., 2013. METHODOLOGY FOR FLOOD RESILIENCE INDEX. International Conference on Flood Resilience Experiences in Asia and Europe, Sep. 5-7, 2013, Exeter, United Kingdom.
- [5] Batika, J., 2014. Flood Resilience Index - Methodology And Application. 11th International Conference on Hydroinformatics HIC, Aug., 2014, New York, City, USA.
- [6] Carpenter SR and Gunderson LH (2001) Coping with collapse: ecological and social dynamics in ecosystem management. *Bioscience* 51:451–457
- [7] Chang YS, Ho HC, Huang LY. (2021). Role of Low Impact Development on Urban Flood Resilience Index. *Advancing Earth and space science Fall Meeting 2021*, Dec. 13-17(2021), New Orleans, USA.
- [8] Chang, T. J., Wang, C. H. and Chen, A. S., “A novel approach to model dynamic flow interactions between storm sewer system and overland surface for different land covers in urban areas,” *Journal of Hydrology*, 524, pp. 662-679, 2015
- [9] Chen, K. F., & Leandro, J. (2019). A conceptual time-varying flood resilience index for urban areas: Munich city. *Water*, 11(4), 830.
- [10] Cheng, T., Xu, Z., Hong, S., & Song, S. (2017). Flood risk zoning by using 2D

hydrodynamic modeling: A case study in Jinan City. *Mathematical Problems in Engineering*, 2017.



[11] Chia-Ho Wang, Hsiang-Lin Yu, Yi-Cyuan Liang, Jia-Yu Wang, Tsang-Jung Chang. (2019) .Rapid Flood Inundation Simulation of Dual Drainage System between Streets and Sewers. *Journal of Taiwan Agricultural Engineering* Vol. 65, No. 1, March 2019.

[12] Chin-Yu He, Ching-Pin Tung, Wan-Ya Wang. (2020). Study on the Integration of Disaster Risk Reduction and Climate Change Adaptation. *Journal of Taiwan Agricultural Engineering* Vol. 66, No. 2, JUNE 2020

[13] Climate Change 2014, the Fourth Assessment Report (AR5) of the United Nations Intergovernmental Panel on Climate Change

[14] Dahm, R., Hsu, C. T., Lien, H. C., Chang, C. H., & Prinsen, G. (2014, November). Next generation flood modelling using 3Di: A case study in Taiwan. In DSD international conference.

[15] Dasallas, L., Kim, Y., & An, H. (2019). Case study of HEC-RAS 1D–2D coupling simulation: 2002 Baeksan flood event in Korea. *Water*, 11(10), 2048.

[16] Erena, S. H., Worku, H., & De Paola, F. (2018). Flood hazard mapping using FLO-2D and local management strategies of Dire Dawa city, Ethiopia. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 19, 224-239.

[17] Ferguson, C., & Fenner, R. (2020). The impact of Natural Flood Management on the performance of surface drainage systems: A case study in the Calder Valley. *Journal of Hydrology*, 590.

[18] Füssel H-M (2007) Vulnerability: a generally applicable conceptual framework for climate change research. *Glob Environ Chang* 17:155–167

[19] Gallopín GC (2006) Linkages between vulnerability, resilience, and adaptive capacity. *Glob Environ Chang* 16:293–303. doi:10.1016/j.gloenvcha.2006.02.004

- 
- [20] Gunderson LH (2010) Ecological and human community resilience in response to natural disasters. *Ecol Soc* 15:18
- [21] Haile, A. T., & Rientjes, T. H. M. (2005). Effects of LiDAR DEM resolution in flood modelling: a model sensitivity study for the city of Tegucigalpa, Honduras. *Isprs wg iii/3, iii/4*, 3, 12-14.
- [22] Hemmati, M., Ellingwood, B. R., & Mahmoud, H. N. (2020). The role of urban growth in resilience of communities under flood risk. *Earth's future*, 8(3), e2019EF001382.
- [23] Hsu, M. H., Chen, S. H. and Chang, T. J. Inundation simulation for urban drainage basin with storm sewer system. *Journal of Hydrology*, 234(1), pp. 21-37, 2000.
- [24] Hsu, Y. C., Prinsen, G., Bouaziz, L., Lin, Y. J., & Dahm, R. (2016). An investigation of DEM resolution influence on flood inundation simulation. *Procedia Engineering*, 154, 826-834.
- [25] Huff, F.A., 1967. Time distribution of rainfall in heavy storms. *Water Resources Research*, 3(4), pp. 1007-1019.
- [26] IPCC. In: Field CB, Barros VR, Dokken DJ, Mach KJ, Mastrandrea MD, Bilir TE, Chatterjee M, Ebi KL, Estrada YO, Genova RC, Girma B, Kissel ES, Levy AN, MacCracken S, Mastrandrea PR, White LL, editors. *Climate change 2014: impacts, adaptation, and vulnerability. Part A: global and sectoral aspects. Contribution of working group II to the fifth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press; 2014 p. 1048.
- [27] Joakim E, Mortsch L, Oulahan G (2015) Using vulnerability and resilience concepts to advance climate change adaptation. *Environ Hazard* 14:137–155
- [28] John T. Delaney, Kristen L. Bouska, Josh D. Eash, Patricia J. Heglund, Andrew J.

Allstadt. (2021). Mapping climate change vulnerability of aquatic-riparian ecosystems using decision-relevant indicators. *Ecological Indicators* 125 (2021) 107581.

[29] Kong, J., & Simonovic, S. P. (2016, June). An original model of infrastructure system resilience. In *Proceedings of the CSCE Annual Meeting: Resilient Infrastructure*, London, ON, Canada (pp. 1-4).

[30] Kuan-Hui Elaine Lin, Hsiang- Chieh Lee & Thung-Hong Lin. How does resilience matter? An empirical verification of the relationships between resilience and vulnerability. *Natural Hazards* volume 88, pages1229–1250 (2017).

[31] Leandro, J., Chen, K. F., Wood, R. R., & Ludwig, R. (2020). A scalable flood-resilience-index for measuring climate change adaptation: Munich city. *Water Research*, 173, 115502.

[32] Li, J., Zhang, B., Mu, C., & Chen, L. (2018). Simulation of the hydrological and environmental effects of a sponge city based on MIKE FLOOD. *Environmental earth sciences*, 77(2), 1-16.

[33] Margherita Giuzio, Dejan Krusec, Anouk Levels, Ana Sofia Melo, Katri Mikkonen and Petya Radulova. Climate change and financial stability. *European Central Bank*. 2021.05

[34] Marina Batalini de Macedo, Thalita Raquel Pereira de Oliveira, Tassiana Halmenschlager Oliveira, Marcus Nóbrega Gomes Junior, José Artur Teixeira Brasil, Cesar Ambrogi Ferreira do Lago, Eduardo Mario Mendiondo. Evaluating low impact development practices potentials for increasing flood resilience and stormwater reuse through lab-controlled bioretention systems. *Water Sci Technol* (2021) 84 (5): 1103–1124.

[35] Miller F et al (2010) Resilience and vulnerability: complementary or conflicting concepts? *Ecol Soc* 15:11

- 
- [36] Nicklin, H., Leicher, A. M., Dieperink, C., & Van Leeuwen, K. (2019). Understanding the costs of inaction—an assessment of pluvial flood damages in two European cities. *Water*, 11(4), 801.
- [37] Schmitt, T.G., Thomas, M., & Ettrich, N. (2004). Analysis and modeling of flooding in urban drainage systems. *Journal of Hydrology*, 299, 300-311.
- [38] Schmitt, T.G., Thomas, M., & Ettrich, N. (2004). Analysis and modeling of flooding in urban drainage systems. *Journal of Hydrology*, 299, 300-311.
- [39] Schneider SH, Semenov S, Patwardhan A, Burton I, Magadza CHD, Oppenheimer M, et al. Assessing key vulnerabilities and the risk from climate change. In: Parry ML, Canziani OF, Palutikof JP, van der Linden PJ, Hanson CE, editors. *Climate change 2007: impacts, adaptation and vulnerability, contribution of working group II to the fourth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge, UK: Cambridge University Press; 2007. p. 779–810.
- [40] Shouvik Das, Amit Ghosh, Sugata Hazra, Tuhin Ghosh, Ricardo Safra de Campos, Sourav Samanta. (2020). Linking IPCC AR4 & AR5 frameworks for assessing vulnerability and risk to climate change in the Indian Bengal Delta. *Progress in Disaster Science* 7 (2020) 100110.
- [41] Smit B and Wandel J (2006) Adaptation, adaptive capacity and vulnerability. *Glob Environ Chang* 16:282–292.
- [42] Wong PP, Losada IJ, Gattuso J-P, Hinkel J, Khattabi A, McInnes KL, et al. Coastal systems and low-lying areas. In: Field CB, Barros VR, Dokken DJ, Mach KJ, Mastrandrea MD, Bilir TE, Chatterjee M, Ebi KL, Estrada YO, Genova RC, Girma B, Kissel ES, Levy AN, MacCracken S, Mastrandrea PR, White LL, editors. *Climate change 2014: impacts, adaptation, and vulnerability. Part A: global and sectoral aspects. Contribution of working group II to the fifth assessment report of the Intergovernmental*

Panel on Climate Change. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA:

Cambridge University Press; 2014. p. 361–409.

[43] 內政部營建署(2015 年 3 月)。水環境低衝擊開發操作手冊總報告。

[44] 內政部營建署下水道誌政府自辦雨水篇。2011 年 7 月。

[45] 王福杰.(2018)。3Di 應用於淹水即時預報之研究。國立成功大學水利及海洋工程學系研究所學位論文。1-117

[46] 出流管制計畫書與規劃書檢核基準及洪峰流量計算方法(2019 年 2 月)。行政院公報 第 025 卷 第 028 期。

[47] 台灣大學慶齡工業研究中心(2019)。應用高速降雨逕流模式協助擬定都市積水防治策略。

[48] 何媚華(2014)。中永和地區都市排洪系統最佳管理措施之探討。國立台灣大學土木工程學研究所學位論文，1-95。

[49] 余濬。由雨型推估流量方法之差異探討－以河川治理與區域排水整治為例。水利會訊 第十二期。

[50] 余濬。雨水下水道與河川重現期距差異之研究-以台北市雨水下水道與景美溪為例。水利會訊 第十二期。

[51] 李明儒(2010)。雨水下水道淤積對於都市淹水之影響評估。國立交通大學土木工程研究所碩士論文。

[52] 林士惟(2018)。多目標基因演算法於韌性城市評估之研究。國立台灣大學土木工程學研究所學位論文，1-98。

[53] 邱詩婷(2016)。HEC-RAS 5.0 二維逕流模式之應用探討。國立臺灣海洋大學河海工程學系碩士學位論文。

[54] 雨水下水道系統維護缺失態樣與改善對策之探討。戴俊地(Tai,Chunti)、陳昶良(Chen Changliang)、蔡得時(Tsay Dershys)(2014)。中華民國營建工程學會第十二屆產業永續發展研討會。

- 
- [55] 徐硯庭(2014)。低衝擊開發運用在高都市化地區的減洪效益—以新北市中永和地區為例。國立台灣大學土木工程學研究所學位論文, 1-126。
- [56] 張天豪(2019)。淺水波慣性力對都市淹水模擬之影響。國立成功大學水利及海洋工程學系研究所博碩士論文。
- [57] 許雅淳(2009)。台灣人口密度之最「永和市」的都市發展研究。臺北市立教育大學歷史與地理系。
- [58] 童裕翔、劉俊志、鄭兆尊、陳正達、連琮勛。氣候變遷之日雨量以及時雨量頻率分析(2020 年 1 月)。國家災害防救科技中心。
- [59] 黃莉雅(2021)。考量內外水動態模擬下之逕流分擔策略成效評估。國立台灣大學土木工程學研究所學位論文, 1-108。
- [60] 新北市中和區區公所官方網站
- [61] 新北市地政局(2021 年)。110 年第 1 季新北市不動產市場分析季報。
- [62] 新北市政府(2019 年 7 月)。變更中和主要計畫(第二次通盤檢討)(第一階段)書。
- [63] 新北市政府(2020 年 1 月)。變更永和都市計畫(部分住宅區區)書為衛生福利特定專用。
- [64] 新北市區域計畫政策評估說明書 附件七新北市歷史災例清冊。(2015)
- [65] 經濟部水利署(2020 年 12 月)。因應氣候變遷洪災韌性提升策略建構(2/2)。
- [66] 經濟部水利署水利規劃試驗所(2018 年 5 月)。淡水河水系水文水理論證報告。
- [67] 經濟部水利署水利規劃試驗所(2013 年 12 月)。易淹水地區水患治理計畫第三階段實施計畫 縣管河川蘇澳溪水系分洪道規劃。
- [68] 經濟部水利署第十河川局 官方網站。
- [69] 劉子明、鄧澤宇。以 IPCC 風險定義探討氣候變遷下水資源風險評估與調適應用(2019 年 1 月)。國家災害防救科技中心。

[70] 賴桂文(2016)。HEC-RAS 水理模式 2D 模組介紹及應用。學術天地-工程技術新知,1-17。

