

土木水利

The Magazine of The Chinese Institute of Civil and Hydraulic Engineering

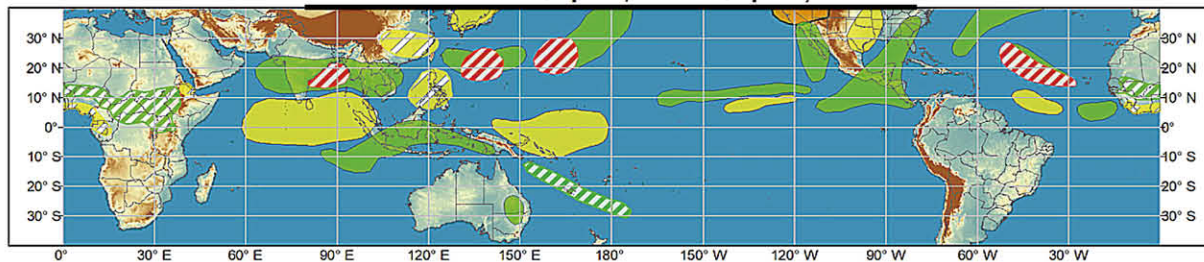
June
2023



Global Tropics Hazards and Benefits Outlook - Climate Prediction Center



Week 1 - Valid: Sep 07, 2022 - Sep 13, 2022



Week 2 - Valid: Sep 14, 2022 - Sep 20, 2022



Produced: 09/06/2022
Forecaster: Collow

Confidence		
High	Moderate	
		Tropical Cyclone Formation Development of a tropical cyclone (tropical depression - TD, or greater strength).
		Above-average rainfall Weekly total rainfall in the upper third of the historical range.
		Below-average rainfall Weekly total rainfall in the lower third of the historical range.
		Above-normal temperatures 7-day mean temperatures in the upper third of the historical range.
		Below-normal temperatures 7-day mean temperatures in the lower third of the historical range.

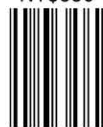
Product is updated once per week, except from 6/1 - 11/30 for the region from 120E to 0, 0 to 40N. The product targets broad scale conditions integrated over a 7-day period for US interests only. Consult your local responsible forecast agency.



ISSN 0253- 3804



NT\$350



Volume 50, No. 3

社團法人
中國土木工程學會 發行
CIVIL AND HYDRAULIC ENGINEERING

封面圖說：美國 NCEP CPC 全球熱帶區域
災害展望預報圖

中央氣象局 2008 開發熱帶氣旋展期預報偵測
系統，與美國 NCEP EMC 合作接收全球預報
資料，成果公開供各國氣象預報單位參考。

專 輯

氣象水文

夢想和幸福

零距離的接軌

技術必須經得起考驗，專業來自於永不妥協的堅持，
夢想的城堡、幸福的家園，就座落在不遠的前方，
台灣世曦和您一起攜手而行，用築夢的心、關懷的情，
戮力建設出每一項希望的工程。



Creativity · Excellence · Conservation · Integrity

CECI



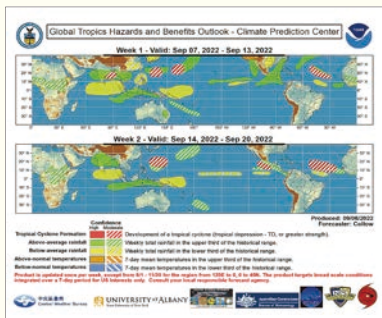
台灣世曦
工程顧問股份有限公司

台北市11491內湖區陽光街323號
Tel:(02) 8797 3567 Fax:(02) 8797 3568
<http://www.ceci.com.tw> E-mail:pr@ceci.com.tw

土木水利



社團法人中國土木工程學會會刊



美國 NCEP CPC 全球熱帶區域災害展望預報圖

先進工程

- 混凝土工程
- 鋼結構
- 運輸工程
- 鋪面工程
- 資訊工程
- 工程管理
- 非破壞檢測
- 先進工程

永續發展

- 永續發展
- 國土發展
- 水資源工程
- 大地工程
- 海洋工程
- 環境工程
- 景觀工程
- 綠管建工程
- 能源工程
- 天然災害防治工程
- 工程美化
- 營建材料再生利用

國際兩岸

- 國際活動及亞洲土木工程聯盟
- 兩岸活動
- 亞太工程師

教育學習

- 工程教育
- 終身學習
- 土木史
- 工程教育認證
- 大學教育
- 技專院校
- 學生活動

學會活動

- 學會選舉
- 學術活動
- 土水法規
- 介紹新會員
- 專業服務
- 學會評獎
- 學會財務
- 年會籌備
- 會務發展
- 會士審查
- 公共關係 [工程倫理]

出版活動

- 中國土木水利工程學刊
- 土木水利雙月刊

分會

- 土水學會
- 土水南部分會
- 土水中部分會
- 土水東部分會

發行人：宋裕祺

出版人：社團法人中國土木工程學會

主任委員：詹錢登 (國立成功大學水利系特聘教授兼工學院院長、編輯出版委員會主任委員兼總編輯)

定價：每本新台幣350元、每年六期共新台幣1,800元 (航郵另計)

繳費：郵政劃撥00030678號 社團法人中國土木工程學會

會址：10055台北市中正區仁愛路二段一號四樓

電話：(02) 2392-6325 傳真：(02) 2396-4260

網址：<http://www.ciche.org.tw>

電子郵件信箱：service@ciche.org.tw

美編印刷：中禾實業股份有限公司

地址：22161新北市汐止區中興路98號4樓之1

電話：(02) 2221-3160

社團法人中國土木工程學會第二十五屆理監事 (依姓氏筆劃排序)

理事長：宋裕祺

常務理事：伍勝園 高宗正 楊偉甫 廖學瑞

理事：王宇睿 余信遠 李政安 林子剛 林聰利 胡宣德 高銘堂

張大鵬 張荻薇 莊均緯 許泰文 陳仲賢 曾榮川 黃慧仁

壽克堅 歐善惠 賴建信 謝啟萬

常務監事：呂良正

監事：王藝峰 李建中 沈景鵬 林其璋 邱琳濱 劉國慶

中國土木工程學會任務

1. 研究土木水利工程學術。
2. 提倡土木水利最新技術。
3. 促進土木水利工程建設。
4. 提供土木水利技術服務。
5. 出版土木水利工程書刊。
6. 培育土木水利技術人才。

土木水利雙月刊已列為技師執業執照換發辦法之國內外專業期刊，土木工程、水利工程、結構工程、大地工程、測量、環境工程、都市計畫、水土保持、應用地質及交通工程科技師適用。

中國土木工程學會和您一起成長！

中華郵政北台字第 518 號 執照登記為雜誌 行政院新聞局出版事業登記証 局版臺誌字第 0248 號

「氣象水文」專輯 (客座主編：陳憲宗教授／詹錢登特聘教授)

- | | | |
|-----------------------------------|-----------------------------|----|
| 📖 專輯序言：氣象水文 | 陳憲宗／詹錢登 | 3 |
| 📖 氣象水文研究之發展概況與趨勢—從文獻計量學談起 | 陳佳正 | 4 |
| 📖 2022年台灣秋季異常降雨初探 | 朱容練／林冠伶／江宙君／王安翔／黃紹欽／吳宜昭／徐理寰 | 12 |
| 📖 2~4週颱風預報之發展與挑戰 | 蔡孝忠／羅資婷／陳孟詩 | 17 |
| 📖 雷達與雨量站降雨資料融合於都市水文之應用 | 汪立本／Susana Ochoa Rodriguez | 22 |
| 📖 以 TCCIP AR6 統計降尺度日資料探討臺灣未來水資源衝擊 | 劉子明／林祺恒／童裕翔／陳正達 | 34 |
| 📖 未來氣候變遷條件下之漁業損失與調適措施成效 | 陳映彤／蕭學勇／楊尊華／鄭兆尊／張雅琪 | 43 |
| 📖 集水區埤塘演變及其對滯洪潛在影響—以台南橋頭港橋上游集水區為例 | 侯佳秀／詹錢登／徐郁超／賴東暘 | 51 |

廣告特搜

- | | |
|------------------------------------|-----|
| 根基營造股份有限公司 — 永續城市工程隊 | 封底 |
| 台灣世曦工程顧問股份有限公司 — 夢想和幸福 零距離的接軌 | 封面裡 |
| 中興工程顧問股份有限公司 — 湖山水庫工程 掌握億萬年記錄的奧秘 | 封底裡 |
| 臺北市政府捷運工程局 — 建構安全便捷的捷運系統 萬大-中和-樹林線 | 64 |
| 台北市土木技師公會 — 專業、客觀、公益、永續 | 50 |

50周年系列研討會預告，敬邀報名參加！

**台灣大地工程大數據應用
與管理精進研討會**

112.6.30 (五) 8:50-17:20
台科大 AU101 視聽館

費用：1000 元
敬邀報名

主辦單位：中國土木工程學會大地工程委員會
協辦單位：中華民國大地工程學會
中華民國大地工程技師公會
地工技術研究發展基金會

「臺灣鐵道發展史」研討會

50
1945-2025

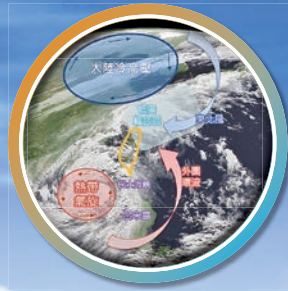
交通部長趙啟昇
Railway Bureau, MOT

CECI 台灣財團
台灣鐵道博物館

中國土木工程學會50周年慶系列講座



台灣秋季共伴效應示意圖

研究發展趨勢、颱風預報、
氣候變遷、工程與防災應用現地量測取得排水渠道斷面及
埤塘深度相關資料

氣象水文 專輯序言

專輯客座主編 陳憲宗／國立成功大學水利及海洋工程學系 教授

詹錢登／國立成功大學水利及海洋工程學系 特聘教授

水文學為土木水利工程的基礎學科之一，水文學為探討水在空間與時間上的分布、運移、變化的科學，可以水文循環過程涵蓋之。土木水利工程以水資源利用與水災害防治為目的，估計水文循環過程中的貯蓄量與流動量，進而施以工程建設與管理方法來興水利、除水害，讓民眾安居樂業並促進文明發展。

水的貯蓄與分布可劃分為地表水、地下水、海水及大氣水，水在不同空間分布的運移流動，既然以水文「循環」稱之，即表示此過程是綿綿不止、無始無終。但人類生活於地面，主觀感受到大地的水來自於天降甘霖，故一般在描述水文循環時，會以降水做為起點。降水是指大氣水以不同方式降到地球表面的天氣現象，屬於氣象水文的範疇。氣象水文學主要內容為探討大氣水的分布與流動，以及地球表面與大氣之間的水和能量交換，於水文循環中的主要成分為降水與蒸發，是土木水利工程師較少著墨的領域。

氣象水文學屬於土木水利與大氣科學交集的跨領域專業，相較於土木水利的其它領域，似乎少了些工程應用，多了些科學研究。然而氣象水文的研究發展，可增進降水現象的了解及提升雨量預報的效能，對於土木水利工程面臨的水太多、水太少、水不均的

問題，能更往上溯源探討，延展工程規劃設計的思維面向，提升土木水利工程效益，深具工程應用價值。

本專輯邀請氣象水文領域專家學者，介紹氣象水文的科學研究及工程應用之最新進展，包含氣象水文的研究發展趨勢、颱風預報、氣候變遷、工程與防災應用等。第一篇闡述氣象水文學的歷史沿革，並以文獻計量學方法來量化分析氣象水文的最新研發趨勢。第二篇針對 2022 年台灣秋季的異常多雨進行成因探討，並論及聖嬰現象與侵台颱風的關聯性。第三篇介紹颱風預報的最新發展與面臨挑戰，並闡述應用數值模式提升颱風展期預報的精進作為。第四篇介紹雷達降雨及雨量站降雨的資料融合技術，用以提升都市降雨估計的準確性，並實際應用於都市集水區之逕流模擬。第五篇介紹臺灣最新版的氣候變遷情境雨量資料，並用以分析臺灣未來的水資源衝擊。第六篇應用氣候變遷情境雨量結合淹水模式估計淹水情況，進而推估氣候變遷情境下淹水造成的漁業損失。第七篇探討在不同重現期之暴雨情境下，集水區內多種埤塘滯洪方案對於減洪之成效。本專輯以氣象水文為主題，內容涵蓋氣象水文的沿革、雨量預報、氣候變遷、工程應用等，期望能促進氣象水文領域於土木水利工程的交流與發展。



氣象水文 研究之發展概況與趨勢

— 從 文獻計量學 談起

陳佳正 / 國立中興大學土木工程學系 副教授

本文以文獻計量學之角度嘗試分析氣象水文學 (hydrometeorology) 於過往數十年之發展概況與趨勢，發現氣象水文學有很大重心在於研究與「降水 (precipitation)」和「模式 (model)」相關之主題。本文接續分享數則與此二主題相關之臺灣研究案例，包含了衛星遙測降雨資訊於全臺灣之評比、應用、校正、及融合分析，以及利用數值天氣預報模式評估臺灣中部水文氣候如何響應於土地利用與覆蓋變遷和其他耦合模擬分析。

關鍵詞：水文氣象、bibliometrix、衛星降雨、數值模式

前言

氣象水文學、又或水文氣象學 (hydrometeorology)，顧名思義為一結合氣象與水文學之地球物理學科，其主要探討之議題包含水文循環 (hydrological cycle)、水收支 (water budget)、及地表 (land surface) 與低層大氣 (low atmosphere) 之水和能量交換 (water and energy exchange) 等 (<https://en.wikipedia.org/wiki/Hydrometeorology>)。

關於氣象水文學之發展史，倘見於學科核心期刊之出版狀況，如美國氣象學會 (American Meteorological Society) 出版之 *Journal of Hydrometeorology* (JHM)，其創刊號始於西元 2000 年，因此，以 21 世紀作為研究出版開端之氣象水文學「看似」較於其他地球物理學科年輕許多，其原因或可追溯於人類文明對於學科知識所作之分類。就古希臘柏拉圖、亞里斯多德[†] 時代即開始提倡將自然界進行剖析，hydrology 與 meteorology 之淵源即來自古希臘文，水文和氣象也因而開始分家。在經歷了文藝復興 (14 ~ 17 世紀) 與工業革命時期 (18 ~

19 世紀)，各種觀測方法進步與流體力學、熱力學等理論發展，的確水文和氣象各自對於水循環系統中不同環節得孕育出更細部之研究成果。然而，時至 20 世紀，分家之兩學科逐漸認清彼此相依重要性，特別是在「數值模式」發展進入百家爭鳴階段，浮現了諸如「水文模式」對於空間降雨資訊要求提升、「氣象模式」發現無法忽視地表水文機制反饋影響等問題。再以去年獲得諾貝爾物理學獎之 Suki Manabe (真鍋淑郎) 教授為例，其早期對大氣環流模式最大之貢獻，簡單地來說就是在地球表面放置一個水桶模型 (bucket model) 用以計算土壤濕度變化以至於反應和調整大氣之濕對流 (moist convection) 現象^[1,2]。真鍋之計算方式可謂是第一代地表模式 (land surface model)，而其投入即是氣象水文研究，只不過當年該名詞還沒有被廣泛使用。

而氣象水文學對於「土木水利工程」而言亦扮演著舉足輕重之角色。就水文學本身而言，其發展足跡上一直都被賦予著工程應用端之價值，就因為水本身乃為一種資源，多種工程手段之存在就是為了處理水資源會遇到之各種議題，而水資源之科學核心就是水文學。再提升到氣象水文學層面上來說，就成為

[†] 亞里斯多德也是世界上最早氣象書籍《氣象匯論》之作者。

了針對地表甚至地下可利用水之「來源 (source)」、「交互作用 (interaction)」、及「響應 (response)」等再進行科學性深究，而對於科學機制上更深入之瞭解將有助於再回饋至工程手段之革新。而土木水利老牌期刊 *Journal of hydrology* (JH) 亦有特別將氣象水文學一詞納入其 aims & scope 中與水文學、水文地質學 (hydrogeology)、及水文地球物理學 (hydrogeophysics) 並列；再從上述之專門期刊 (JHM & JH) 主要編輯人員來看，多數為全球各大土木水利相關學系之教授與研究人員。以上種種，足見氣象水文研究在土木水利工程中之重要性。

於臺灣，產學各界對於氣象水文學之研究應用仍處於奠基至發展階段。本文以文獻計量學 (bibliometrics) 作為出發點，彙整世界氣象水文研究之發展概況與趨勢，再配合個人研究發表經驗，分享數則臺灣氣象水文相關研究案例，以期達到拋磚引玉之效。因此後文之編排，將先由文獻計量學談起，包含其定義、分析工具、分析過程與結果之說明，再帶到數則臺灣之案例分享。

文獻計量學

文獻計量學定義

文獻計量學 (Bibliometrics) 又或書目計量法，是 1969 年由 Alan Pritchard 提出^[3]，是一種應用數學、統計、及邏輯等方法，藉由計算與分析從出版物之書目、目錄等引用資訊 (citations) 中文字之不同層面來顯現關鍵資訊之過程，從而瞭解某一學科發展概況與趨勢。文獻計量學涉及集群分析 (cluster analysis)、引文分析 (citation analysis)、共引網絡分析 (co-citation network analysis)、書目耦合 (bibliographic coupling)、及共詞分析 (co-word analysis) 等。

文獻計量學分析工具

本文利用之文獻計量學分析工具為 Bibliometrix，其為建構於 R 程式語言中之套件^[4]，因 Bibliometrix 是建構於 R 程式語言環境中，故其為完全開源使用 (open access)。Bibliometrix 目前版本允許多種文獻資料庫作為輸入分析，包含了 SCOPUS, Clarivate Analytics Web of Science (WOS), Digital Science Dimensions, Cochrane Library, Lens, 及 PubMed 等。

文獻計量學分析過程與結果

本文選定於臺灣相對較常被使用之 SCOPUS 與 WOS 資料庫進行分析，首先以關鍵字「hydrometeorology」輸入 SCOPUS 與 WOS 資料庫中，以「All Fields」進行文獻搜尋。以本日 (2022 年 11 月 22 日) 為基準，SCOPUS 呈現之搜尋結果共 70,827 筆文件，在限縮至僅限英文與期刊或書籍條件後仍有 68,845 筆文件，從文件發表件數與年份來看，最早可追溯至 1938 年，但 1999 年以前每年僅不到 100 筆，爾後開始呈現指數遞增，至 2021 年計有 7,001 筆文件與 hydrometeorology 相關進行了發表，其中美國佔發表總數約四成，接續為中國約兩成，和英國約 8%，而臺灣於其中所佔發表總數亦有約 1% 左右。而其中排名前幾位貢獻度最高之前五位學者包含了 Princeton University 之 Eric F. Wood、University of Oklahoma 之 Yang Hong、Texas A&M 之 V. P. Singh、University of California, Irvine 之 Soroosh Sorooshian 及 University of California, Los Angeles 之 Dennis P. Lettenmaier 等，全都是領域內世界知名學者。這些文件之出處前五大來源包含了 JH、JHM、*Journal of Climate*、*Climate Dynamics*、及 *Journal of Geophysical Research Atmosphere* 等。

WOS 呈現之搜尋結果與 SCOPUS 相比則大幅減少，僅 3,314 筆，文件發表最早可追溯至 1966 年，但其他資訊如發表件數成長率、國家發表佔比、最有貢獻學者、及文件出處等大致與 SCOPUS 相似，其中國家發表佔比多了加拿大與德國排名至前五，最有貢獻學者包含了 Scripps Institution of Oceanography 之 Martin Ralph、NASA 之 Randal Koster、及 Center for Ocean Land Atmosphere Studies 之 Paul Dirmeyer 等，而出刊來源以 JHM 為最大宗，並另有老牌水資源期刊 *Water Resources Research* 與 AMS 著名雜誌 *Bulletin of the American Meteorological Society* 晉升至前五。

由於 SCOPUS 搜尋出之文獻總量過多，推測可能其搜尋條件可能較於寬鬆 (例如非 SCI 期刊之收錄)，而過量之文獻也不利於 Bibliometrix 進行分析，因此本文以 WOS 之搜尋結果，即上述之 3,314 筆文獻匯入至 Bibliometrix 進行後續處理與分析。

Bibliometrix 之功能非常豐富，在將文獻資料匯入後即可進行許多一般分析如總覽 (overview)、來源 (sources)、及作者 (authors) 等如 SCOPUS 提供之基本

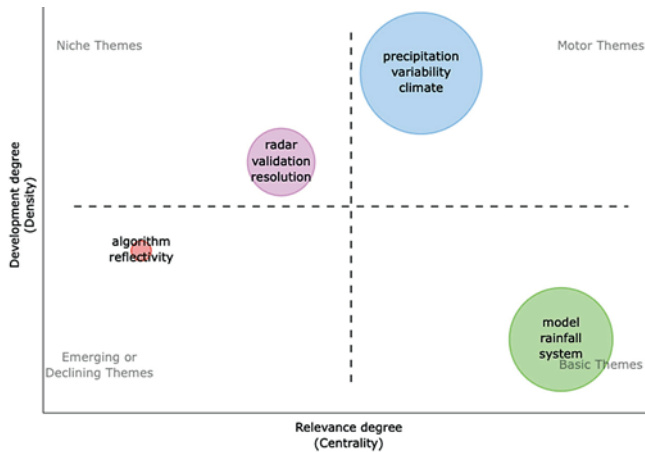


圖 3 概念結構分析產製之氣象水文研究主題合成圖 (composite thematic map)

近於發動主題。左上角 Niche themes (利基主題) 代表高密度但低中心性之研究主題，亦即此些主題對於特定研究群組內有一定程度重要性，但缺乏群組外之連結或延伸應用性，以氣象水文而言不太有這些主題存在。最後是左下角 Emerging or declining themes (新興或衰退主題) 代表低密度且低中心性之研究主題，顧名思義這些主題不是才方出現或已呈現衰退減少狀況，才會呈現最低之相關性與發展程度，以氣象水文為例 algorithm (演算法) 與 reflectivity (反射率) 較屬於此類主題。除上述主題外，氣象水文研究中 radar (雷達)、驗證、及 resolution (解析度) 等主題較接近合成圖原點，代表相當一般、平均之研究主題選項。

主題合成圖提供了一個基於中心性與密度之衡量，讓我們瞭解氣象水文一些主要研究主題，接續我們再選定不同年份時段來觀察此些主題是如何隨年代演變，此外還可檢視在不同年代有否其他重要主題存在。由前述 SCOPUS 或 WOS 文獻基本資料發現 1999 年以前之文獻數量較少，因此第一個年份斷點我們選取在 2000 年，而第二個年份斷點則以十年後即 2011 年作為代表，由此區分出三個時間片段 (time slices)，即 1966 ~ 2000、2001 ~ 2011、及 2012 ~ 2022 分別進行概念結構分析。

依據此三個時間片段進行概念結構分析首先可得一沖積圖 (alluvial graph) 或縱向主題演變圖 (longitudinal thematic map)，如圖 4 所示，此圖表示各主題是如何興起、消失、融入於其他主題、或者重新出現於年代中，亦即主題隨年代之演變。由圖 4 可解釋早期由美國引領了氣象水文研究，重點放在氣候變遷、fluxes (通量)、simulation (模擬)、及降水等，

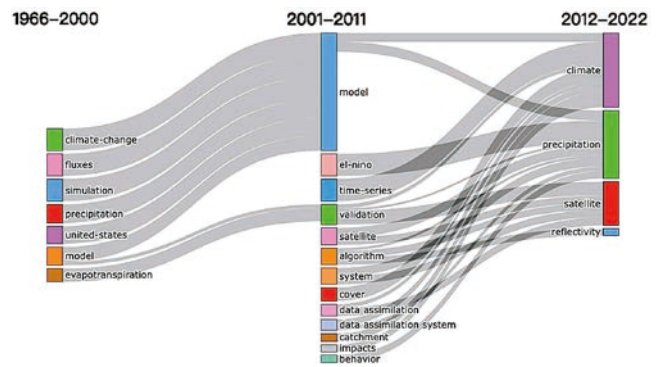


圖 4 以 2000 和 2011 年作為斷點所產製之氣象水文研究主題演變圖 (thematic evolution)

而此些主題隨年代迄 2000 年後融入了模式開發之主題，另外早期對於 evapotranspiration (蒸發散) 之研究也隨著年代演變成為驗證方向之主題。在 2001 開始這十年間，除了模式相對來說是最重要之主題發展方向外，研究人員也對其他許多主題感到興趣，包含了 time series (時間序列)、El Niño (聖嬰現象)、衛星、演算法、system (系統)、cover (地表覆蓋)、及 data assimilation (資料同化) 等，可謂是氣象水文研究百發齊放之時段。而到了 2012 年後，此些主題多半都融入了氣候、降水、及衛星等三大主題，代表氣象水文研究之主題方向被進行了一次大規模之統整。

除縱向演變圖外，我們也仿照圖 3 繪製此三個時間片段之主題合成圖，如圖 5 至圖 7 所示，用以強化瞭解各主題在演變過程中位居於該時間片段之何種地位 (即基礎、發動、利基、及新興或衰退主題)。圖中包含研究主題之泡泡大小仍舊代表主題出現頻率之相對高低程度，而為了更凸顯在不同年代之主題，我們限縮每個泡泡僅包含了最關鍵之兩個字詞。於第一個時間片段 (1966 ~ 2000) 沒有任何基礎或利基主題被辨識出，而較接近發動主題為氣候變遷與水文、降水與循環、及美國與 pattern (型態) 等；因此時間片段為氣象水文研究發展之起點，我們也可推測通量、蒸發散、及衛星資料等應屬於新興主題。時至第二時間片段 (2001 ~ 2011)，如同主題演變圖提及之眾多主題發展情況，主題合成圖 (圖 7) 亦呈現許多泡泡，在此階段系統與預測較接近基礎主題，而演算法與 passive microwave (被動微波) 較接近利基主題，另有模式、降水、及資料同化等較接近發動主題，而 management (管理)、聖嬰、及 pollution (污染) 等較接近新興或衰退主題，其他仍有許多主題接近圖中原點，代表此時有許多一般、平均之主題選項發展中。最後到了近

十年（2012 ~ 2022），前述許多主題收斂至少數幾個，降水、模式、氣候、及溫度等較屬於基礎主題，代表此些主題有其熱度與未來發展性，而反射率與演算法屬於利基主題，有著特定研究群組內部之擁護和投入，另外衛星與雷達等遙測主題可為當今具有一般性之主題選項。

臺灣研究案例分享

衛星遙測降雨資訊之評比與應用

前節之文獻計量學分析揭露了氣象水文研究在過往數十年以至於最近十年之全球發展概況，不難發現過往雖有相當多研究主題被開發，較多研究重心甚至未來趨勢仍著眼於「降水」與「模式」此二主題上。由此，本文接續分享數則與此二主題相關之臺灣研究案例，以期達到拋磚引玉之效；此節首先呈現關於衛星遙測降雨資訊於臺灣之評比。

Li *et al.*^[6] 於 JHM 之發表內容評比了於臺灣 2015 至 2017 年各種衛星和模式降雨產品之性能，包括來自全球降水觀測（Global Precipitation Mission, GPM）之 Integrated Multisatellite Retrievals for GPM Early and Final Runs (IMERG Early 與 IMERG Final)、Global Satellite Mapping of Precipitation (GSMaP)、及 Weather Research and Forecasting (WRF) 模式預測資料。該研究以 304 個氣象局測站與「臺灣氣候變遷推估資訊與調適知識平台計畫」(TCCIP) 提供之網格數據來評比上述各降雨產品（如圖 8，摘錄自 Li *et al.*^[6]），並針對會影響降雨估計之因素，例如季節、溫度、海拔和極端事件等進行分別論述。此外，該研究還利用了由美國陸軍工兵團發展之水文模式系統（HEC-HMS），於選定之流域以上述各降雨產品作為輸入進行連

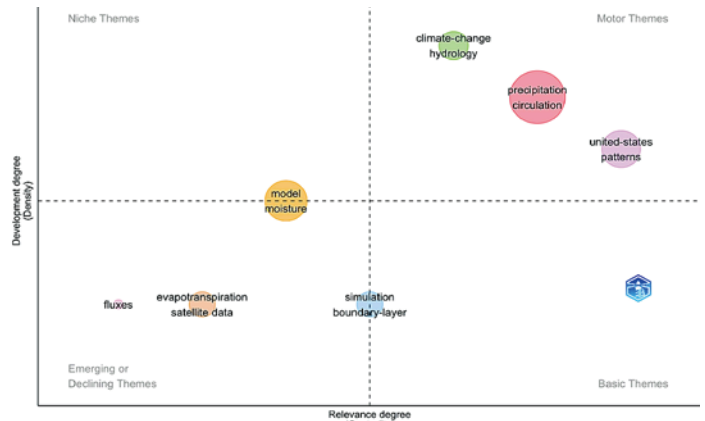


圖 5 如圖 3，但為第一時間片段（1966 ~ 2000）之主題合成圖。

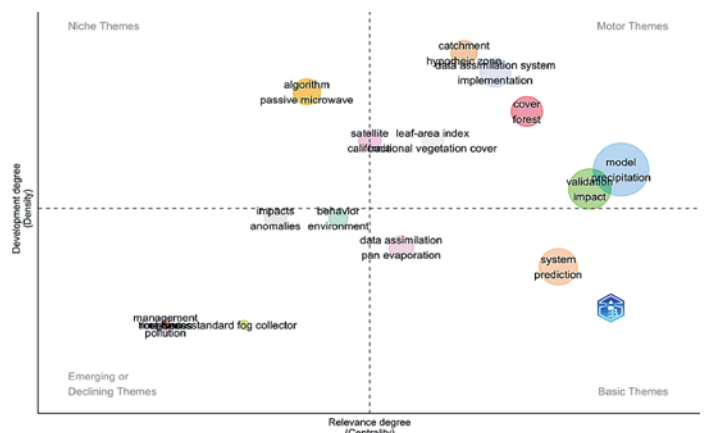


圖 6 如圖 3，但為第二時間片段（2001 ~ 2011）之主題合成圖。

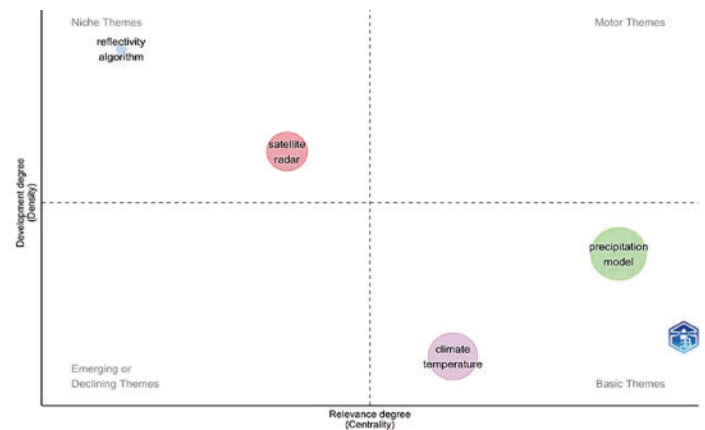


圖 7 如圖 3，但為第三時間片段（2012 ~ 2022）之主題合成圖。

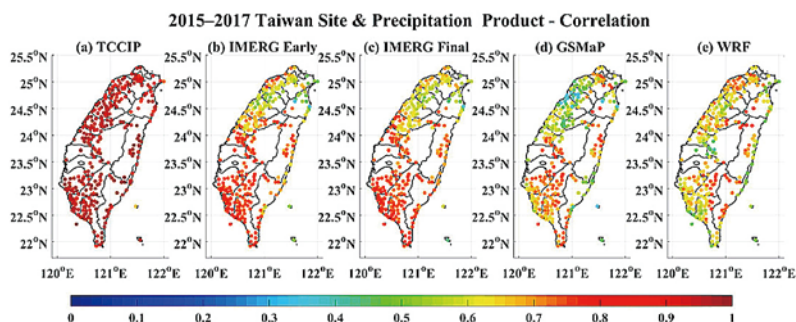


圖 8 2015 至 2017 年不同降雨產品與氣象局測站計算之相關係數（圖來源：Li *et al.*^[6]）

續性之流量模擬，以評估各降雨產品造成之水文響應 (hydrologic response)。研究結果指出 IMERG 和 GSMaP (即衛星降雨) 在溫暖季節比 WRF (即模式) 表現更好，在寒冷季節則反之，尤以臺灣北部特別明顯。對於選定之極端事件，WRF 可以合理地模擬降雨量和分佈 (如圖 9，摘錄自 Li *et al.* [6])。降雨推估準確度之季節性和區域變化也反映在流量模擬中，如 IMERG 通常能產生最合理之流量模擬，GSMaP 因其對於雨量之高估因而造成流量模擬之參考性最差 (如圖 10，摘錄自 Li *et al.* [6])。

承續上述遙測降雨產品於臺灣之研究分析，為提供更準確之降水資訊，高詠盛 [7] 嘗試將各種不同來源之降雨產品進行融合 (merging) 分析。這項研究利用之融合方法稱為多源加權集總降雨 (Multi-Source Weighted-Ensemble Precipitation, MSWEP) 技術，而融合對象包含以測站為基礎開發之 TCCIP、以衛星遙測推估之 IMERG、及基於模式推估之臺灣歷史氣候重建資料 (Taiwan ReAnalysis Downscaling, TReAD) [8]。由於 IMERG 數據中已知存有偏差，我們使用長短期記憶 (long short-term memory, LSTM) 和新興之卷積長短期記憶 (convolutional long short-term memory,

ConvLSTM) 網絡對其進行偏差校正。爾後，校正過之 IMERG 如何影響 MSWEP 之效能亦被評估。由 IMERG 之校正結果顯示，LSTM 和 ConvLSTM 有著相似效果，能將 IMERG 與 TCCIP 之相關性提升約 10% (如圖 11，摘錄自高詠盛 [7])。雖然臺灣之 MSWEP 產品會有很大程度仰賴 TCCIP 資料，但我們仍然可以在缺乏地表測站觀測地區發現 IMERG 和 TReAD 具顯著權重。此外，MSWEP 確實可以提供比僅靠測站資料空間內差更準確之降水資訊。

數值天氣預報模式之各種耦合分析

其二重點研究主題為模式相關，而以氣象水文時空尺度而言，數值天氣預報 (numerical weather prediction, NWP) 模式為其大宗，由此，本節接續分享關於利用 NWP 模式於臺灣進行之數種耦合分析研究。

Chen *et al.* [9] 於 Environmental Research Letters 之發表內容檢視了臺灣中部自 1990 年代以來發生之土地利用與覆被變遷 (land use/cover change, LUCC)，並使用 WRF 模式進行數值實驗，及針對臺灣中部連續變遷之土地覆蓋和 TCCIP 降雨資料進行關聯性分析。該研究

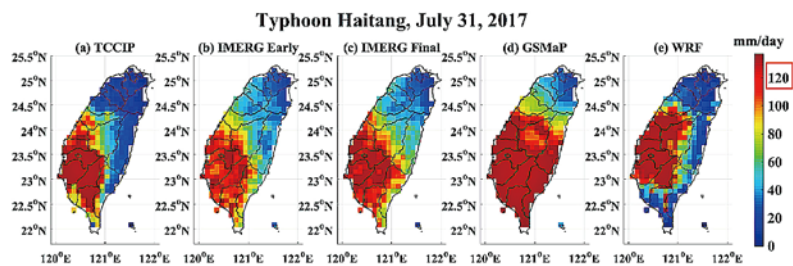


圖 9 2017 年海棠颱風之不同降雨產品之空間分佈狀況 (圖來源：Li *et al.* [6])

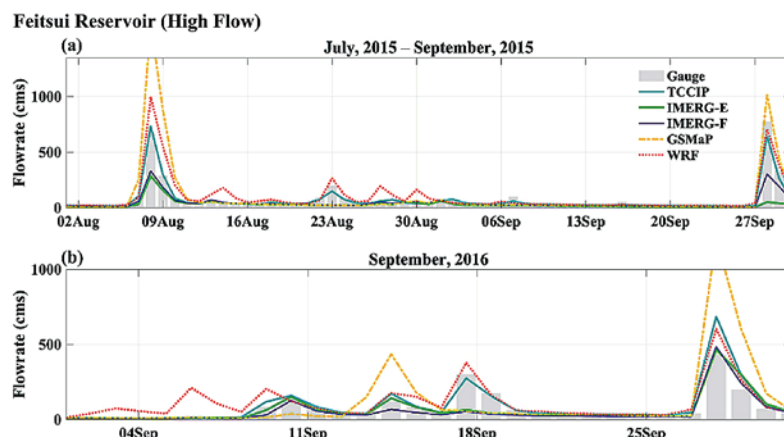


圖 10 利用不同降雨產品於翡翠水庫集水區於特定高流量事件進行模擬之流量歷線 (圖來源：Li *et al.* [6])

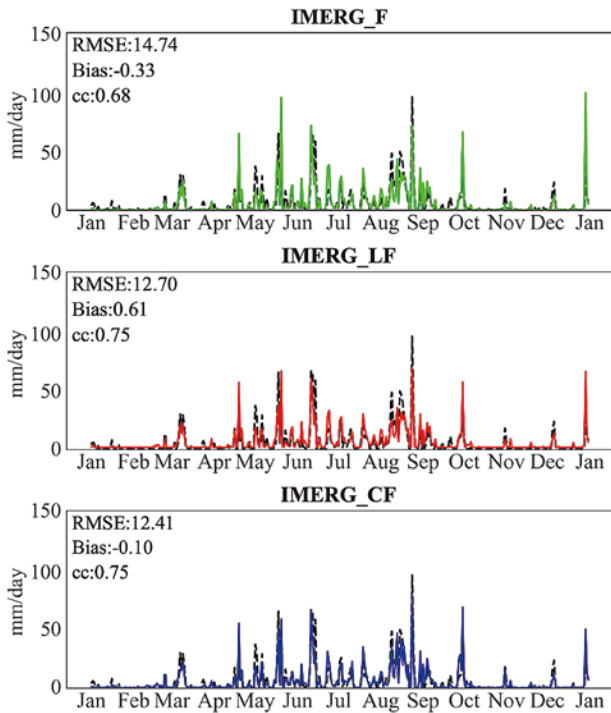


圖 11 由上至下分別為 2019 年未校正 (綠色) 和利用 LSTM 或 ConvLSTM 校正 (紅色和藍色) 之 IMERG Final Run 於臺灣地區之平均日降雨序列, 黑色虛線為同年之 TCCIP 序列。由兩雨序列計算出之三個指標一併附於圖中 (圖來源: 高詠盛^[7])。

將 1995 年和 2007 年由國土測繪局公布之土地利用數據作為 WRF 模式之地表條件 (如圖 12), 模擬七八月

弱綜觀天氣條件下之晴天和雨天情況。數值實驗結果發現此二年之土地利用變化, 特別是由於都市和建地增加, 導致了各種氣象水文變量之變異, 例如 2007 與 1995 年相比, 晴天結果顯示可感熱通量和兩米高溫度 (潛熱通量和兩米高比濕) 增加 (減少)。而由 Landsat 推導之土地覆蓋和 TCCIP 降雨之關聯分析說明了都市化和七八月降雨量之增加趨勢有顯著相關性。因此 WRF 模擬和統計關聯分析都證實了 LUCC 導致了東、下風處之七八月雨量變異 (如圖 13)。

承續上述利用 WRF 進行之 LUCC 影響研究, 為更瞭解地表水文歷程 (terrestrial hydrologic processes) 在 LUCC 影響所扮演之角色, 葉靜茹^[10] 嘗試將 WRF 模式進一步與 WRF-Hydro Modeling System 進行耦合, 並將 2007 年之土地利用更新至 2015 年, 同樣評估臺灣中部水文氣候如何響應於 LUCC。根據研究結果發現 WRF 與 WRF-Hydro 之耦合指出某些氣象水文變量 (如潛熱通量和兩米高比濕) 對更佳之水體和河川支流描述具有高敏感度 (如圖 14)。平均峰值流量和總逕流量因 LUCC 會有普遍增加之結果, 但峰值流量發生時間卻較不確定, 指出了純水文 / 水理觀點與陸地 - 大氣相互作用之間存在協同但有時競合之關係。研究結論表明了對於區域氣象水文模擬, 更全面之物理模式有其存在必要。

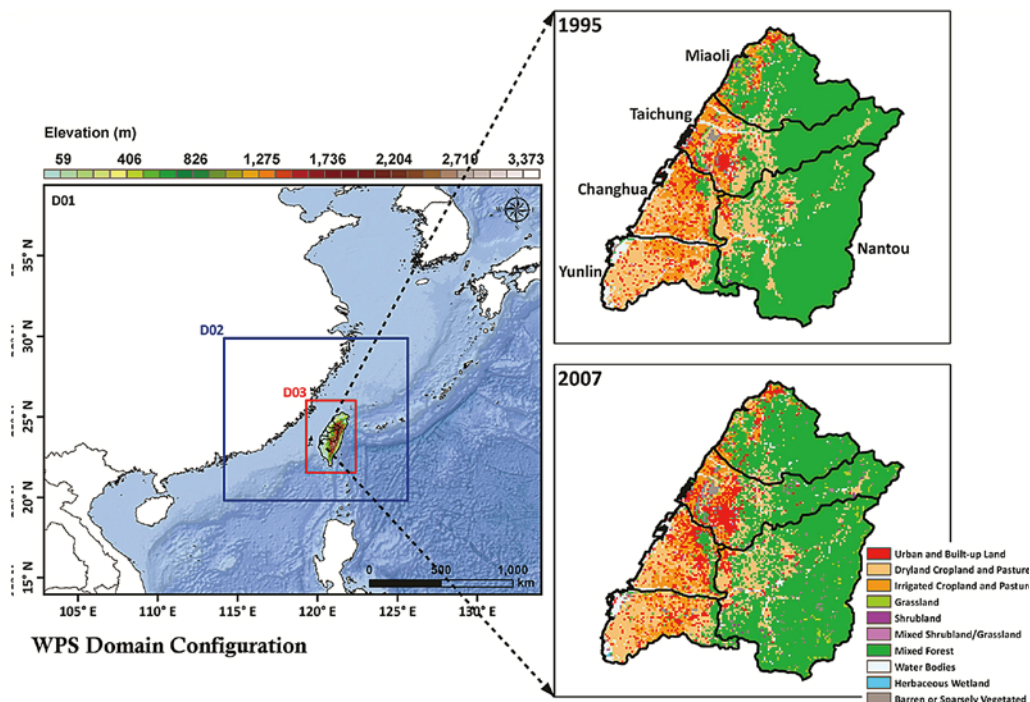


圖 12 針對臺灣中部地區之土地利用與覆蓋變遷所進行之數值模擬實驗, 左圖呈現 WRF 模式三層巢狀網格, 右圖則呈現臺灣中部地區 1995 與 2007 年由國土測繪局公布之土地利用狀況 (圖來源: Chen et al.^[9])。

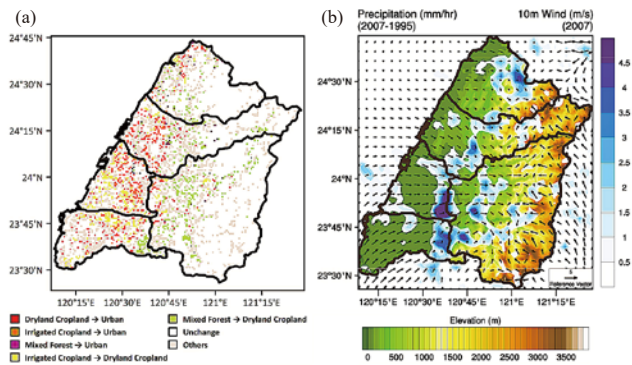


圖 13 (a) 1995 至 2007 之土地利用轉化情形；(b) 模擬降水之正距平與十米高風場和高程疊合結果 (圖來源：Chen *et al.* [9])。

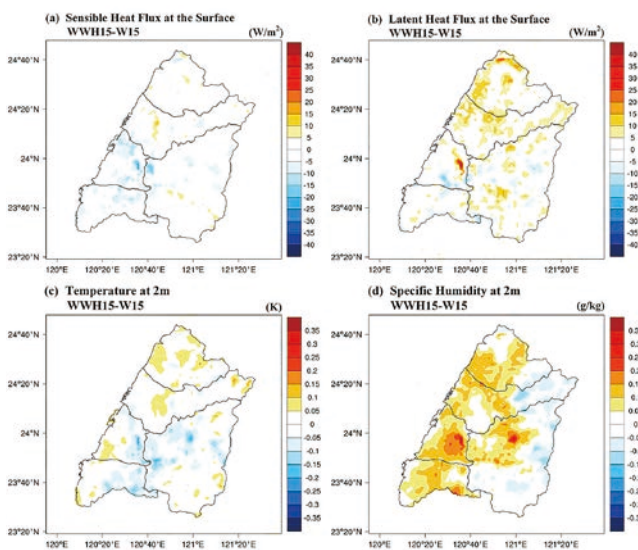


圖 14 WRF 與 WRF-Hydro 模式耦合模擬與 WRF 獨立運行之模擬結果差異，兩者皆以 2015 年土地利用作為地表驅動條件 (因此以 WWH15 代表前者，W15 代表後者)；(a)~(d) 分別為可感熱、潛熱、兩米高溫度、及兩米高比濕 (圖來源：葉靜茹 [10])。

因 NWP 或就 WRF 模式而論其開發程度已日臻成熟，配合高效運算 (high-performance computing, HPC) 之逐日進步，其對於氣象水文、水利、甚至水土保持相關研究而言應具有相當高之可應用性與可耦合性。如紀旻宏 [11]，其研究即耦合了 WRF、WRF-Hydro、及一個由橡樹嶺國家實驗室開發之 HPC 二維水理模式「Two-dimensional Runoff Inundation Toolkit for Operational Needs, TRITON」[12] 對高屏區進行即時洪災預報實驗。另外，此些模式可望再與輸砂、動床等模式機制耦合，進行輸砂啟動條件與河床演變之模擬與預測。

結語

氣象水文研究對於許多土木水利工程來說是不可或缺之背景知識。本文利用 R 語言中文獻計量學分析工具 Bibliometrix，針對以 hydrometeorology 作為索引

依據之 WOS 文獻資料進行分析，不論是以 Keywords Plus 產製之字雲圖與共現網絡，又或是以概念結構分析產製之主題合成圖與演變圖，都顯示了氣象水文研究發展概況與趨勢有很大重心放在與「降水」和「模式」相關之主題。為成引玉之磚，本文接續分享數則與此二主題相關之臺灣研究案例，包含了 IMERG (衛星) 與 WRF (模式) 降雨資訊之評比、應用、校正、及融合分析，以及利用 WRF 進行之土地利用與覆蓋變遷影響評估和其他耦合模擬分析。

實際上，氣象水文學之發展與當代科學和教育方法之沿革亦有關聯，都是以問題導向為基礎 (problem-based)、為了解決科學和工程發展中之重大問題而興起之學科。當人們意識到單一學科在解析研究問題之瓶頸時，發現跨領域之「Know-How」是無可避免之手段，並將凸顯氣象水文這個具有濃厚跨領域研究色彩之學科未來可發展性與可應用性。

參考文獻

- Manabe, S., Smagorinsky, J., and Strickler, R.F. (1965), Simulated climatology of a general circulation model with a hydrologic cycle. *Monthly Weather Review*, 93(12), 769-798.
- Manabe, S. (1969), Climate and the ocean circulation: I. The atmospheric circulation and the hydrology of the earth's surface. *Monthly weather review*, 97(11), 739-774.
- Pritchard, A. (1969), Statistical bibliography or bibliometrics. *Journal of documentation*, 25, p. 348.
- Aria, M. and Cuccurullo, C. (2017), bibliometrix: An R-tool for comprehensive science mapping analysis. *Journal of informetrics*, 11(4), 959-975.
- Callon, M., Courtial, J.P., and Laville, F. (1991), Co-word analysis as a tool for describing the network of interactions between basic and technological research: The case of polymer chemistry. *Scientometrics*, 22(1), 155-205.
- Li, P.L., Lin, L.F., and Chen, C.J. (2021), Hydrometeorological Assessment of Satellite and Model Precipitation Products over Taiwan. *Journal of Hydrometeorology*, 22(11), 2897-2915.
- 高詠盛 (2022)，應用遞迴與卷積神經網路於臺灣多源加權系集降雨數據之產製，國立中興大學土木工程學系碩士論文。
- 林秉毅、林士堯 (2021)，臺灣歷史氣候重建資料生產履歷 (1.0 版)，[擷取日期：11/22/2022]，取自臺灣氣候變遷推估資訊與調適知識平台：https://tccip.ncdr.nat.gov.tw/upload/data_profile/20210702170602.pdf。
- Chen, C.J., Chen, C.C., Lo, M.H., Juang, J.Y., and Chang, C.M. (2020), Central Taiwan's hydroclimate in response to land use/cover change. *Environmental Research Letters*, 15(3), p. 034015.
- 葉靜茹 (2021)，利用大氣水文耦合模式探討土地利用與覆蓋變遷對中台灣水文氣候之影響，國立中興大學土木工程學系碩士論文。
- 紀旻宏 (2022)，耦合氣象水文和水理模式於即時洪災預報，國立中興大學土木工程學系碩士論文。
- Morales-Hernández, M., Sharif, M.B., Kalyanapu, A., Ghafour, S.K., Dullo, T.T., Gangrade, S., Kao, S.C., Norman, M.R., and Evans, K.J. (2021), TRITON: A Multi-GPU open source 2D hydrodynamic flood model. *Environmental Modelling & Software*, 141, p.105034.



2022年 台灣秋季 異常降雨 初探

朱容練／國家災害防救科技中心 研究員

林冠伶／國家災害防救科技中心 專案佐理研究員

江宙君／國家災害防救科技中心 助理研究員

王安翔／國家災害防救科技中心 助理研究員

黃紹欽／國家災害防救科技中心 助理研究員

吳宜昭／國家災害防救科技中心 副研究員

徐理寰／國家災害防救科技中心 副研究員

本文針對 2022 年台灣秋季異常降雨進行探討。從秋季降雨氣候特徵的分析顯示，台灣秋季降雨主要集中在東半部地區，約佔當地年雨量的四～五成。造成秋季降雨的天氣型態主要有三，分別為東北風、熱帶氣旋以及共伴效應，其中共伴效應佔比最高（48%）。分析結果顯示，2022 年台灣北部秋季降雨量約為歷史同期 2 倍以上，降雨強度則是與歷史同期相近。透過 AutoEncoder 天氣類型判識模組的分析發現，共伴事件日的氣候平均約為每年 2.17 日，反聖嬰年的平均共伴事件日為每年 3 日，而 2022 年共伴事件日達到 10 日，超出氣候值 3 個標準差以上。相關模組建置與判識流程也於文中說明。整體而言，反聖嬰現象與共伴效應頻率增加是造成 2022 年秋季極端降雨的主要原因。

前言

在 2022 年 10 月 15～16 日受到尼莎颱風外圍環流與東北季風共伴影響，造成北部與東北部發生劇烈降雨，其中宜蘭縣大同鄉的累積雨量最高，達到 835.5 毫米。此次颱風事件造成全台的農業損失約 3,239 萬元^[1]，以宜蘭縣損失 1,369 萬元（占 42%）最為嚴重。而這樣劇烈的降雨也導致宜蘭縣台 7 線於 10 月 16 日 16 時 30 分傳出道路崩塌事故，中央災害應變中心立即啟動即時情資研判作業機制，協助一共 254 人、88 台車輛從宜蘭縣大同鄉山區順利脫困^[2]。有別於大多數的颱風災害大都發生於夏季，該起事件卻發生在秋季的宜蘭，其背後的致災天氣型態為何？是值得進一步探究的議題。

根據 Chen *et al.*^[3] 的研究顯示，台灣秋季降雨多發生於北部與東北部，而造成劇烈降雨的天氣系統有颱風及東北季風。尤其當颱風與東北季風產生共伴效應時，所造成的降雨將更為劇烈。例如，1987 年 10 月 22～27 日，琳恩颱風由呂宋島北部近海向西移動，受

到颱風外圍環流與東北季風共伴的影響，使得台北在 10 月 24 日降下超過 1,000 毫米以上的降水，導致大台北地區發生嚴重的淹水災情^[4]。

除了前述的共伴結構外，聖嬰現象也是影響台灣秋季降雨的一個重要因素。聖嬰現象指的是熱帶太平洋海洋-大氣氣候系統異常變化的現象。正常年時，熱帶東太平洋因有湧升流將冷海水往淺層海洋輸送的關係，該區域海表面溫度相對較低，在低層東北信風的驅動與日照輻射的加熱下，暖海水大多累積於西太平洋，逐漸形成東太平洋偏冷；西太平洋偏暖的海溫配置。而具有暖海水的熱帶西太平洋海域，也被稱為暖池。因暖池具有適合熱帶氣旋生成與發展的環境（高海溫、高水氣含量），使西太平洋暖池成為全球熱帶氣旋好發的區域。聖嬰年時，受到東北信風與湧升流減弱的緣故，西太平洋暖池區往熱帶中、東太平洋位移，形成太平洋海溫西邊冷，東邊暖的配置，而其上邊界的大氣環流亦隨之發生改變，呈現與正常年相反的氣候狀態。主要影響熱帶

地區的氣候，如正常年多雨的印尼突然發生乾旱、平常偏乾的祕魯突然下大雨 … 等。受到熱帶大氣環流突然改變的影響，全球的大氣環流將因此而相應隨之調整，使得聖嬰現象的影響力逐漸往中高緯度延伸，大氣上將此類的遠距影響過程稱之為大氣的遙相關機制。聖嬰現象便藉由大氣遙相關的過程影響著全球的氣候，使各地發生異常的氣候現象。聖嬰現象中，與聖嬰年相反的，稱為反聖嬰年。其主要特徵為東太平洋海表面溫度異常偏冷與西太平洋暖池範圍擴大。

林淑芬^[5] 研究顯示，反聖嬰年的秋季，颱風多行經台灣南方海域，配合東北季風產生共伴現象，經常導致宜蘭與東北部地區出現致災性降雨。從 2020 年冬季開始至 2022 年，美國國家海洋暨大氣總署 (National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA) 氣候預報中心 (Climate Prediction Center, CPC) 的海洋聖嬰指數 (Oceanic Niño Index, ONI) 監測結果顯示，ONI 呈現負相位，亦即反聖嬰的氣候型態。在台灣降雨方面，2022 年位於宜蘭的西帽山自動雨量站監測到的年累積雨量超過 1 萬毫米，創歷史新高，其中有 7 千多毫米的雨量發生於當年的秋季。有鑒於此，本文將針對台灣秋季的降雨特性、天氣類型與 2022 年同期的降雨異常進行探討，第一部分為前言，第二部分說明台灣秋季降雨的氣候特徵及秋季侵台颱風與聖嬰的關聯，2022 年秋季極端降雨事件概述及分析將於第三部分闡述，最後則是結語。

氣候背景探討

台灣秋季降雨氣候特徵

秋季的台灣正值颱風季即將結束，而冬季東北季風逐漸建立的階段，其降雨型態與夏季明顯不同。圖 1 為平均季節降雨與平均年雨量比值圖，由圖可知，台灣夏季與秋季降雨對台灣各地降雨的重要性，存在著明顯的差異。台灣夏季降雨幾乎涵蓋全台，除了東北角以外，其他地區都有五成以上的年降雨貢獻。尤其西南部地區甚至有七成以上的年降雨皆來自夏季。反觀秋季 (圖 1b)，台灣西部逐漸進入枯水期，主要降雨集中在東半部地區，約佔當地整年降雨的四~五成，其他地區如中部、南部則占比在二成以下，由此可知，台灣秋季降雨受到影響的區域主要以宜蘭、花蓮或是台東為主。

造成秋季極端降雨的天氣型態主要有三種，分別為東北風 (簡稱 NE type)、熱帶氣旋 (簡稱 TC type) 以及熱帶氣旋-東北風 (簡稱 TC-NE type) 等，其中

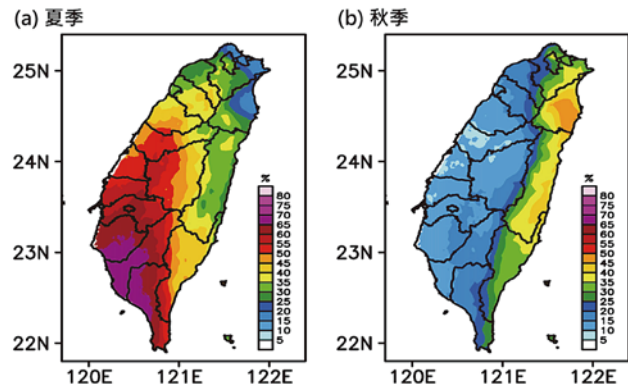


圖 1 台灣夏季、秋季與全年總降雨量比值圖

熱帶氣旋-東北風類型即為共伴效應的天氣型態。圖 2 為 Hsu *et al.*^[6] 以人工智慧 (Artificial Intelligence, 簡稱 AI) 演算法分析出此三種天氣類型的降雨分布，圖中顯示，TC type 所造成的降雨除了東部以外，也擴及台灣中部與南部山區；另外兩種天氣型態 (NE type、TC-NE type) 因受到環流的影響，主要降雨則是侷限在東半部迎風面，強降雨區多發生在宜蘭，而且具有共伴效應的 TC-NE type 所造成的降雨強度也明顯高於 NE type。分析過去 41 年的資料顯示，極端降雨 (日最大雨量達 255.4 mm 以上者) 個案中的天氣型態以 TC-NE type 最多，約佔所有個案的 48%，其次為 TC type，約佔 36%，第三為 NE type (16%)。

颱風與聖嬰現象

影響台灣的颱風，其移行路徑存在明顯的年際變化，也和聖嬰現象有著顯著的關聯性。聖嬰現象對台灣的影響，除了聖嬰現象發生的隔年春雨容易偏多外，還有侵台颱風個數容易偏少的情形。由於聖嬰年西太平洋暖池移至中、東太平洋，使得颱風好發區也從菲律賓海移到了距離台灣較遠的西太平洋東南側，受到暖池東移影響，聖嬰年副熱帶高壓正距平勢力也多位於中、東太平洋，因此颱風生成後受到副熱帶高壓西南側的駛流導引影響而傾向北轉朝日本移動，形成侵台颱風個數偏少

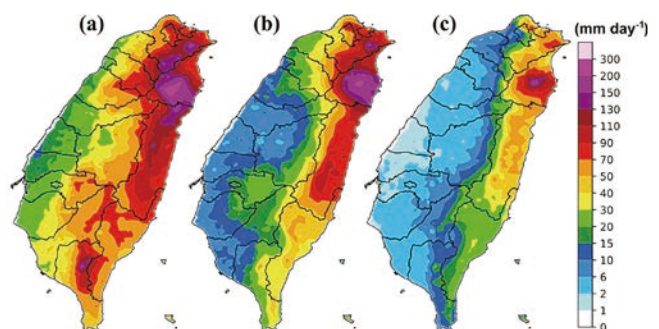


圖 2 台灣秋季極端降雨分類

的狀況。然而值得注意的是，如果聖嬰年有出現侵襲台灣的颱風，由於距離遠，颱風於暖洋面停留較長時間，到達台灣時，其強度往往也相對較強。

圖 3 為聖嬰年與反聖嬰年秋颱密度分布。由圖可知，聖嬰年時，颱風生成區較反聖嬰年偏東，距離台灣較遠，颱風主要傾向日本移動。反觀反聖嬰年，受到西太平洋暖池範圍擴大的影響，颱風生成區域較接近台灣，且副熱帶高壓脊有西伸的傾向，與聖嬰年相比，颱風受駛流影響具有較多西行的分量，往南海移行颱風個數有增多的趨勢。受到反聖嬰年影響，通過巴士海峽的秋颱個數較正常年多，共伴型態的秋季降雨也存在反聖嬰年時偏多的特性。從長期資料分析顯示，反聖嬰年與台灣秋季共伴降雨二者之間存在顯著關聯性 [6]。

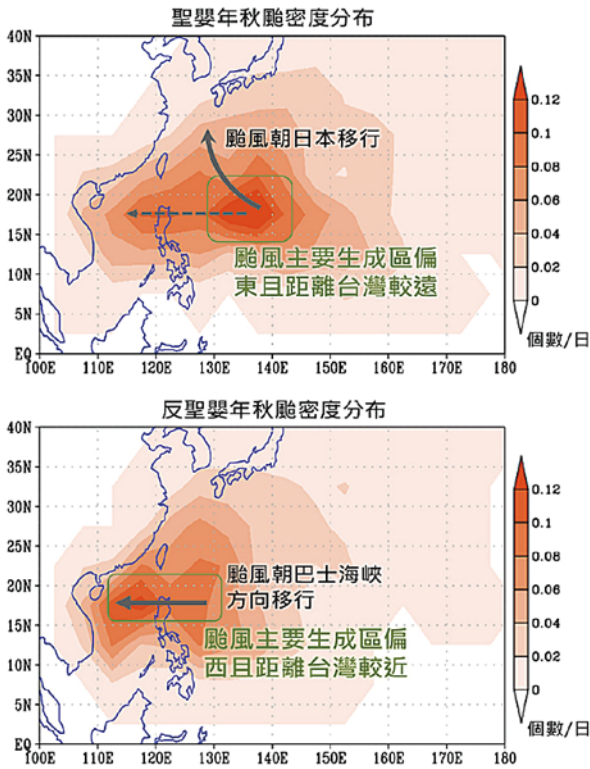


圖 3 聖嬰年與反聖嬰年秋颱密度分布圖。將西太平洋暖池，以 10 個經度與 10 個緯度為區域單位，計算每日經過西太平洋暖池各區域中秋颱的個數，並將此定義為熱帶氣旋路徑密度（單位：個數 / 日）

2022 年秋季降雨分析

2022 年秋季極端降雨事件概述

圖 4 為 2022 年秋季總降雨量（圖 a）、降雨強度（圖 b）與歷史同期的比較。由圖可知，2022 年秋季北部降雨約高出歷史平均值的 2 倍以上，其中又以宜蘭地區最為顯著；南部地區則是較歷史同期少了 1 倍的降

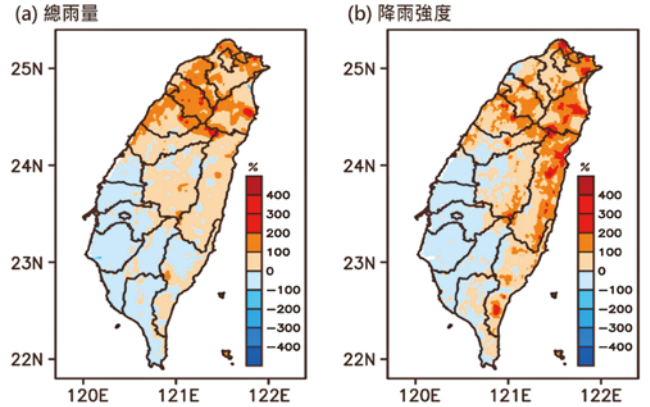


圖 4 2022 年秋季 (a) 總降雨量、(b) 降雨強度與歷史同期差異比較圖。圖 (a) 為 $(2022 - \text{氣候值}) / \text{氣候值} * 100\%$ ；圖 (b) 計算方式同圖 (a)，惟變數為降雨強度。

雨。在降雨強度方面，北部和東半部地區約較歷史同期高出 2 ~ 3 倍之多（宜蘭秋季平均降雨強度約為 30 mm/day，而 2022 年當地秋季降雨強度為 70 mm/day）。

本研究利用機器學習演算法針對 2022 年秋季進行天氣類型判識，有別於過去僅能單一個案判斷秋季降雨天氣類型的限制，透過 AI 演算法可針對颱風移行過程中，以日為單位針對不同階段的降雨天氣型態進行判識。如圖 5 所示，將歷史長期的大尺度環流觀測資料，如海平面氣壓、低層風場、低層溫度場以及相對濕度場等氣象變數分別輸入 AutoEncoder (AE) 演算法，該演算法擅長將變數進行特徵擷取，透過重複地編碼與解碼過程，計算出大尺度環流變數的特徵向量，將其擷取並儲存於特徵空間之中，以完成特徵擷取模組的訓練。相較於原始變數場，儲存於特徵空間中的特徵向量除了維度較低外，更可透過解碼還原成原始變數場，兼具資料降維與雜訊濾除的功能。其後將極端事件的目標資料（即每日的氣象變數場）導入特徵擷取模組，將其降維並儲存於特徵空間中。搭配傳統的 K-Means 分群方法 [7] 將特徵空間中，每日

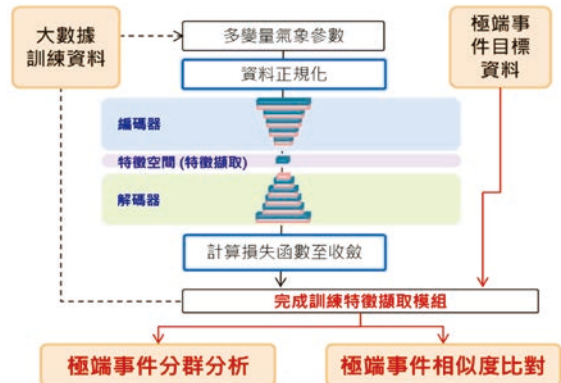


圖 5 AutoEncoder 演算法特徵擷取模組架構圖

的特徵向量進行分群，即可歸整出造成台灣秋季極端降雨的天氣型態。關於 AE 演算法於極端降雨天氣型態分類的進階應用，可參考 [6]。

利用上述訓練完成的 AI 模組分析 2022 年的秋季極端降雨發現，具有高度貢獻的尼莎颱風，其降雨過程存在著多重天氣型態。如圖 6 所示，尼莎颱風於 10 月 15 日開始接近台灣周邊海域，10 月 18 日遠離，約有 4 天的時間影響台灣降雨。從 15 日接近台灣開始至 17 日期間為共伴類型的降雨型態，而 18 日颱風逐漸遠離時方轉為東北風類型。其中颱風通過巴士海峽過程中，是該事件中主要的降雨時期。另一方面，除了尼莎颱風外，該時期具共伴降雨天氣型態的降雨事件還包含了諾盧颱風、編號 26 熱帶氣旋、以及奈格颱風（表 1）。上述事件的共伴型態降雨，於宜蘭地區降下接近 3,000 mm/day 的雨量，佔 2022 年宜蘭秋季降雨的四~五成。

要發生共伴型態的降雨必須包含東北風與熱帶氣旋二個元素，東北風是台灣秋季逐漸盛行的主要風向，而熱帶氣旋的移行路徑則是決定共伴事件發生與否的關鍵因素。當熱帶氣旋（或颱風）通過巴士海峽時，其外圍環流將與東北季風於台灣東北部產生輻合效應（Convergence），搭配旺盛充足的水氣，於東北部

地區造成強降雨，並在地形效應的加乘下，容易於宜蘭發生極端降雨（圖 7）。

2022 年秋季共伴降雨分析

2022 年為反聖嬰年，颱風容易生成於台灣附近，受高壓脊西伸影響，颱風北轉不易，以往西移行的路徑居多，此一路徑的颱風在行經巴士海峽時，其外圍環流便因此容易與東北風輻合，形成共伴效應，造成東北部地區的極端降雨。圖 8(a) 為反聖嬰年台灣秋季降雨與歷史同期平均降雨之比較。由圖可知，反聖嬰年時，台灣秋季降雨約為歷史同期平均的 1.3 倍，其中又以中部山區及東部最為顯著。圖 8(b) 則顯示 2022 年共伴事件（表 1）的降雨量與秋季總降雨量的比值，共伴事件造成的降雨量在新北及台灣東部最顯著，可達到 40% 以上，在宜蘭山區甚至可達到 60%，顯示 2022 年秋季異常降雨有很大的貢獻來自於共伴事件。透過將 2022 年的秋季共伴事件降雨與反聖嬰年共伴事件平均總降雨比較發現（圖 8(c)），同樣是反聖嬰年的氣候環境下，2022 年北部秋季共伴降雨大約是過去反聖嬰年平均共伴降雨的 1.6 倍，中部以南則是大都只有過去反聖嬰年的 50% 降雨。但從圖 8d 的分析中，2022 年共伴事件平均降雨強度與過去反聖嬰年共伴事件平均降雨強度比起來，在宜蘭山區至新北並無顯著差異，約在 70% 至 100% 之間，顯示 2022 年北部秋季共伴降雨異常（圖 8(c)）主要是共伴事件次數較多所造成，而非降雨強度變強。

由上述的分析可知，影響 2022 年台灣秋季降雨的因素有二，分別為共伴效應與反聖嬰現象。反聖嬰現象使西太平洋暖池區域擴大，颱風生成位置較靠近台灣。此時，若颱風於秋季生成，在大氣低層逐漸轉為以東北

表 1 2022 年共伴降雨天氣型態事件列表

颱風名稱	起始時間	結束時間	降雨類型
諾盧	2022.09.25	2022.09.26	9/26 TC-NE
尼莎	2022.10.15	2022.10.18	10/15 ~ 10/17 TC-NE 10/18 NE
TD26	2022.10.21	2022.10.23	TC-NE
奈格	2022.10.29	2022.11.01	10/29 ~ 10/30 TC-NE 10/31 TC 11/1 TC-NE

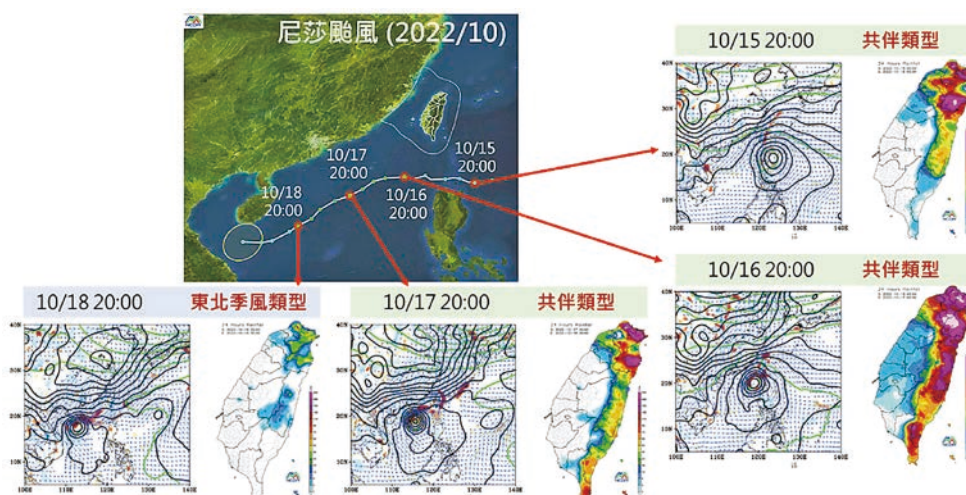


圖 6 尼莎颱風影響台灣期間之極端降雨天氣類型判識

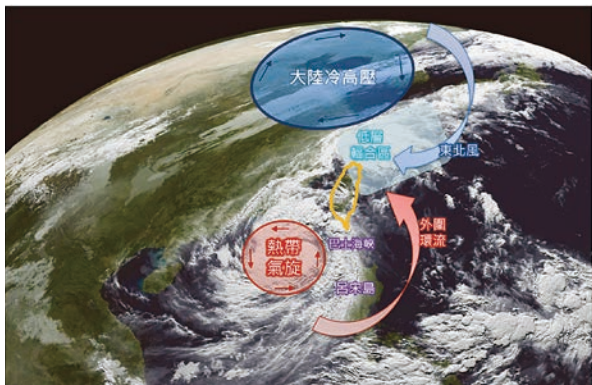


圖 7 台灣秋季共伴效應示意圖

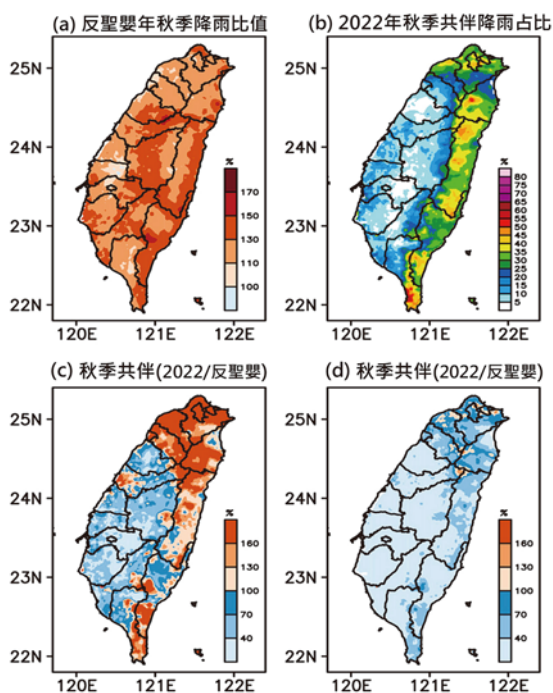


圖 8 秋季降雨比值圖，單位 (%)。其中 (a) 為反聖嬰年秋季平均降雨與秋季降雨長期氣候平均之比值；(b) 為 2022 年秋季共伴降雨與當年秋季總降雨的比值；(c) 是 2022 年與過去反聖嬰年秋季共伴降雨的比值；(d) 同 (c) 惟變數為降雨強度。

風為主的背景風場的大氣環境下，颱風傾向向西移動，在行經巴士海峽與東北風輻合，形成共伴結構，造成東北部地區的極端降雨。2022 年秋季降雨異常有一大部分是由於共伴事件發生日數異常增多影響，統計分析顯示共伴事件日的氣候平均約為每年 2.17 日，反聖嬰年的平均共伴事件日為每年 3 日，而 2022 年共伴事件日達到 10 日，超出氣候值 3 個標準差以上。

結語

本文針對 2022 年台灣秋季的極端降雨進行初步分析與探討，利用 AI 演算法所建置的天氣類型判識模組進行降雨類型分類，結果顯示，造成台灣秋季極端降

雨主要集中在東半部地區。天氣類型有東北風、共伴效應以及熱帶氣旋等三種類型。其中又以共伴效應占比最多。2022 年的尼莎颱風因共伴效應顯著，整起事件在宜蘭地區降下超過 1,200 mm 的雨量，使台七、台七甲多處路段坍方，數百輛汽車與民眾一度受困其中，所幸在中央與地方防災人員合力搶救下，順利脫困。透過 AI 判識模組的分析得知，尼莎颱風整起事件包含了多重的降雨天氣類型，有別於傳統單一事件只具有單一天氣類型的主觀分析結果，此 AI 模組提供了更多降雨型態的時序變化細節。

2022 年為氣候學家所認定的反聖嬰年，透過長期的歷史資料分析發現，類似的秋季極端降雨好發於反聖嬰年，其原因與秋季的氣候背景風場、颱風移行路徑以及二者所構成的共伴效應有密切關聯。整體而言，反聖嬰年時颱風較容易於台灣東南方附近海域生成，於當年秋季生成的颱風容易有往西移行的傾向，意味著颱風本體與東北風背景風場形成共伴結構的機會將較正常年高，2022 年秋季的共伴事件雖然降雨強度沒有比過去反聖嬰年共伴事件降雨強度強，但因共伴事件發生日數多達 10 日，導致東北部（尤其宜蘭）的降雨高於歷史同期平均的結果。除了上述主要原因外，反聖嬰年也可能增加東北風造成台灣東北部極端降雨事件的機會^[6]，東北風的貢獻與其他因素中小尺度系統的影響，如邊界層大氣與地形的交互作用、颱風結構與中尺度對流系統對強降雨的影響等，都將是後續須要進一步研究的重要課題。

參考文獻

1. 中央災害應變中心應變處置報告，(2022)，尼莎颱風災害應變處置報告 (2022 年 10 月 17 日 8 時 30 分)。
2. 農委會，(2022)，111 年尼莎颱風農業災情報告，(111 年 10 月 25 日 17 時最末報)。
3. 林淑芬，(2018)，宜蘭地區秋季共伴豪雨與聖嬰 - 南方震盪的遙相關，大氣科學，46，35-68。
4. 李清勝、羅英哲、張龍耀，(2007)，琳恩颱風 (1987) 與東北季風交互作用產生強降水之研究，大氣科學，35，13-34。
5. Chen, C. -S. and Chen, Y. L. (2003). The rainfall characteristics of Taiwan. Mon. Wea. Rev., 131, 1323-1341.
6. Hsu, L.H., Wu, Yc., Chiang, CC., Chu, J.-L, Yu, Y.C., Wang, A.-H., Jou, B. J.-D. (2022). Analysis of the Interdecadal and Interannual Variability of Autumn Extreme Rainfall in Taiwan Using a Deep-Learning-Based Weather Typing Approach. Asia-Pac J Atmos Sci. <https://doi.org/10.1007/s13143-022-00303-3>
7. Kanungo, T., Mount, D. M., Netanyahu, N. S., Piatko, C. D., Silverman, R., and Wu, A. Y. (2002). An efficient k-means clustering algorithm: analysis and implementation. in IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol. 24, No. 7, pp. 881-892. <https://doi.org/10.1109/TPAMI.2002.1017616>



2~4 週 颱風預報 之發展與挑戰

蔡孝忠／淡江大學水資源及環境工程學系 副教授

羅資婷／中央氣象局氣象預報中心 課長

陳孟詩／中央氣象局第三組 簡任技正

世界氣象組織近年推動展期 (extended-range) 或次季節時間尺度 (sub-seasonal) 的天氣預報相關研究計畫，主要希望延長劇烈天氣的提前預警時間，以降低天氣災害造成的影響。在颱風預報方面，中央氣象局於 2008 年自行開發熱帶氣旋展期預報偵測系統 (CWB TC Tracker)，提供未來 2 週颱風生成及路徑預報等參考資訊。近期，中央氣象局與淡江大學、雲灣資訊合作更新 CWB TC Tracker 系統，將預報時間延長至 4 週，並納入多種數值天氣預報模式之即時預報資訊。本文將介紹國際間 2~4 週颱風預報的發展情形，並簡介 CWB TC Tracker 開發過程，最後將簡短討論 4 週颱風預報技術現況及未來展望。

前言

根據中央氣象局的統計，過去 30 年 (1991~2020) 平均每年有 25.3 個颱風於西北太平洋生成，其中平均有 3.2 個颱風侵台。侵台颱風經常造成嚴重災情，但颱風所帶來的降雨亦為台灣重要的水資源來源。Tsai and Elsberry^[1] 指出，侵台颱風的個數約呈常態分布，但每年颱風侵台時間具有明顯差異，使得防災相關工作及水資源規劃面臨挑戰。Tsai and Elsberry^[1] 分析梅雨季結束 (每年 6 月 30 日) 後的第一個侵台颱風的間隔日數，該研究指出間隔日數最短為 0 天，最高則長達 3 個月。以 1993 年為例，該年度的梅雨季結束之後，一直到 9 月份才出現第一個影響台灣的颱風，該颱風並未登陸，僅通過台灣南方的巴士海峽，加上該年度僅有 2 個侵台颱風，因此政府實施農業限水，直到隔年春雨充沛才解除旱災危機^[2]。近年颱風生成數量減少且路徑發生改變，過去三年 (2020~2022) 更是創下連續 3 年無颱風登陸的紀錄，造成台灣中南部水庫之蓄水量屢創新低，對於民生及經濟的影響甚鉅。

世界氣象組織 S2S 計畫簡介

有鑑於高衝擊性天氣現象 (high-impact weather) 的影響，世界氣象組織 (World Meteorological Organization, WMO) 期望將天氣預報之時間延長至 1~4 週，以彌補預報作業對於展期 (extended-range) 或次季節時間尺度 (sub-seasonal) 預報的不足，並達到無接縫預報 (seamless forecast) 的目標。自 2013 年 11 月起，WMO 啟動了為期 5 年的研究計畫—Subseasonal to Seasonal Prediction Project (S2S; 圖 1)，計畫目標是提升對於 S2S 尺度之高衝擊天氣現象的了解，以提升預報技術。此外，除了研究工作之外，S2S 計畫亦重視預報作業中心的合作及下游單位的應用，因此在計畫執行的過程中，亦提供相關預報之實驗性產品，以確保研究成果可落實到實際預報作業之應用端。目前 S2S 計畫已執行至第二期，今年 (2023 年) 將舉辦 10 年計畫成果回顧。同一期間，美國海洋暨大氣總署 (National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA) 亦推動 Subseasonal Experiment (SubX) 計畫，以評估美國國內各單位開發之全球預報模式在次季節時間尺度的

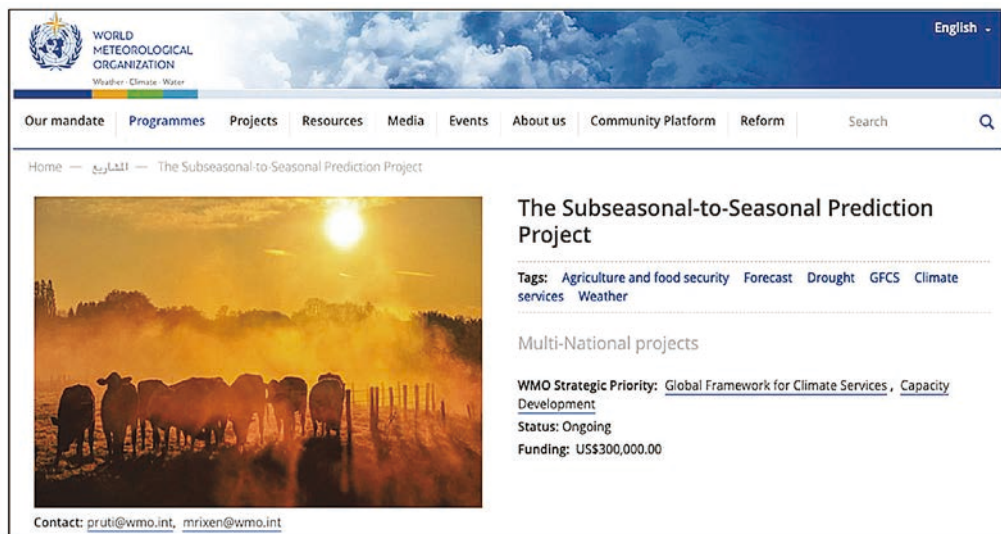


圖 1 世界氣象組織之 S2S 計畫網頁

預報能力。SubX 計畫之相關細節請見：<http://weather.ou.edu/~kpegon/subx/index.html>。

颱風預報與 S2S/SubX 計畫

颱風預報亦為 S2S/SubX 計畫之工作項目之一。當時各國預報單位的颱風預報作業產品，主要針對颱風生成後 3 ~ 5 天的路徑及強度發展提供預報資訊，部分預報單位亦提供 12 或 24 小時之颱風生成機率預報。當時中央氣象局除了提供颱風路徑預報之外，亦提供臺灣的風雨預報及各地之颱風侵襲機率 (strike probability) [3]。至於預報時間尺度較長的颱風預報，當時則是以一整季的颱風數量預報為主，例如：中央氣象局在颱風季之前會提供 6 ~ 11 月的颱風生成總數預估，且估計侵臺颱風的數量。不過，從季節預報所提供之颱風生成或侵襲數量的預報產品，並無法得知颱風可能生成的時間及位置，對於水資源規劃及防災工作的幫助有限。因此在 S2S/SubX 計畫之中，颱風預報的部分主要是希望能提供一週以上的颱風生成及路徑預報產品。1 週以上颱風預報相關工作的推動，主要是以美國及英國之預報作業中心及研究單位為主，研究範圍主要專注於大西洋及東太平洋。西北太平洋區域之預報作業及研究相關工作的推動，則是以中央氣象局及日本氣象廳為主；南太平洋區域則以澳洲氣象局為主。

一週前預報颱風？怎麼做？

短期 (1 ~ 5 天) 颱風預報所重視的項目主要為颱風路徑及強度預報。相較之下，一週以上的颱風預報所要面對的主要挑戰有：颱風生成時間、生成地點、伴隨路徑或活動區域 ... 等。Majumdar and Finocchio [4] 指出，改善短期颱風預報將有助於減少防救災時期不必要的預警及疏散措施，而長時間的颱風預報則可提供更充足的時間進行災害管理之決策支援。

針對長時間的颱風預報，當時主要採用統計模式進行颱風數量的推估，或進一步提供強颱風數量比例 ... 等季節預報資訊。然而，此類方法無法提供颱風生成或影響的確切時間，對於影響範圍的掌握也有待加強。近年，動力數值模式之解析度提高、預報能力也有所提升，已有許多研究指出數值模式可提供颱風生成、路徑或侵襲機率等預報資訊。

在動力數值模式的模擬研究方面，Shen *et al.* [5] 利用高解析度全球模式模擬在 2012 年造成美國東部嚴重災害、紐約淹水及地鐵停擺的颶風珊迪 (Sandy)。該研究指出，數值模式可在 Sandy 生成前 6 天模擬出近似的生成位置，且生成後的移動路徑也與實際觀測相近，相關研究成果若可實際應用，類似 Sandy 事件約防災準備工作將有機會大幅提前。Xiang *et al.* [6] 以 50 km 解析度之全球氣候模式模擬近年在大西洋及西北太平洋最具破壞性的個案—Hurricane Sandy 及 Typhoon

Haiyan (2001 年後西北太平洋最強颱風)。該研究發現以上兩個極端個案生成之可預報度約為 11 天，模式亦可提供與實際觀測近似之路徑及登陸位置。

實際預報研究與評估

在實際預報作業的研究方面，以歐洲中期氣象預報中心 (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, ECMWF) 及美國國家環境預測中心 (National Centers for Environmental Prediction, NCEP) 的發展較早，且具有明顯領先地位。Elsberry *et al.* [7] 利用當時還是實驗性產品的 ECMWF 32 天預報模式，協助 Tropical Cyclone Structure-2008 (TCS08)/THORPEX Pacific Asian Regional Campaign (T-PARC) 颱風觀測實驗計畫。Belanger *et al.* [8] 利用歐洲 ECMWF 的 32 天系集預報資料 (Ensemble Prediction System, ECEPS)，發現大西洋熱帶氣旋 (Tropical Cyclone, TC) 的主要生成區的可預報度達 15 天以上。Tsai *et al.* [9] 自動偵測美國 NCEP 16 天全球系集預報模式 (Global Ensemble Forecast System, GEFS) 內的颱風並進行預報評估。該研究指出強度較強的颱風個案，具有較長之預報領先時間 (leadtime)，部分個案的預報技術可達兩週。Tsai *et al.* [10] 及 Elsberry *et al.* [11] 分析 ECMWF 32 天系集預報，該研究指出模式可於 2 ~ 4 週前提供颱風生成及路徑預報資訊，僅有少

數生命期短或強度較弱之個案發生漏報的狀況，不過模式亦具有為數不少的誤報案例 (false alarm)，顯示模式有颱風過度活躍的情形，因此亦進一步分析誤報個案特徵。Lee *et al.* [12] 利用 S2S 資料庫提供的多個數值模式，分析熱帶氣旋生成預報技術。分析結果顯示，ECMWF 及 BoM (澳洲氣象局) 模式之歷史再預報 (reforecast 或 hindcast) 具有最佳的預報技術。Elsberry *et al.* [13] 及 Tsai *et al.* [14] 的研究指出，在 2019 年玲玲颱風 (Lingling) 生成的 6 ~ 7 天前，ECEPS 模式可提供與觀測相當近似之預報路徑及颱風生成時間預報。

國內相關單位的參與

為了評估預報作業模式的 2 週颱風預報技術，中央氣象局於 2008 年自行開發熱帶氣旋展期預報偵測系統 (簡稱 CWB TC Tracker) [9]，並與美國 NCEP EMC (Environmental Modelling Centers) 合作，即時接收美國 NCEP GEFS 全球系集模式的 16 天預報資料、自動偵測模式內的熱帶氣旋，將相關產品放置於公開網頁供各國預報單位參考，例如：美國 NCEP CPC (Climate Prediction Center)。NCEP CPC 於每週二發布未來兩週之全球熱帶區域災害展望預報 (Global Tropics Hazards and Benefits Outlook) (圖 2)，採用 CWB TC Tracker 做為熱帶氣旋預報主要參考指引之一。

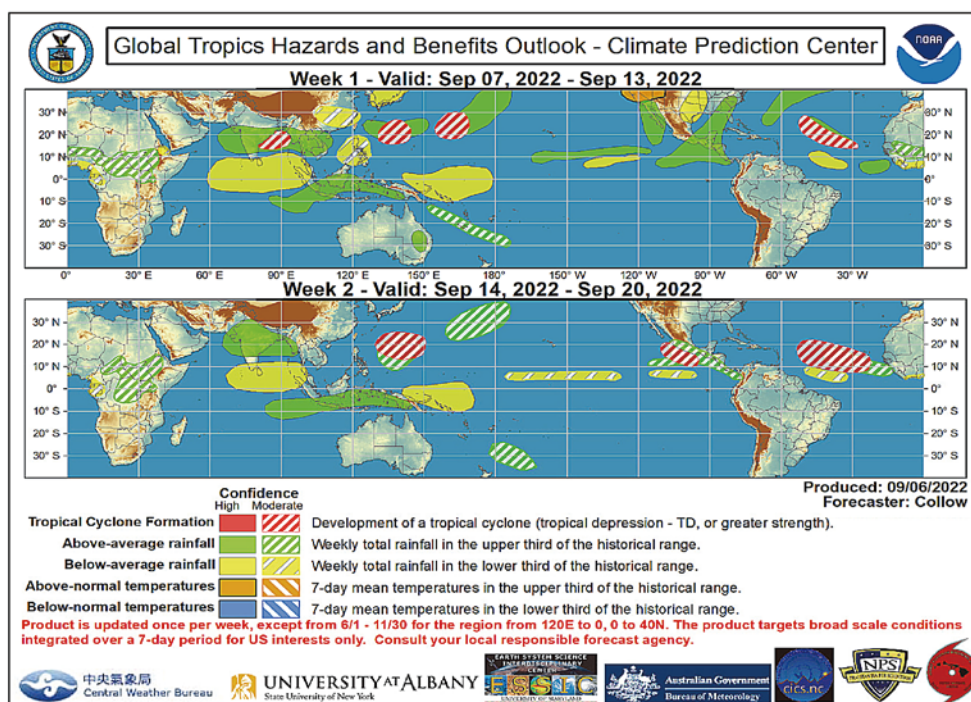


圖 2 美國 NCEP CPC 於 2022 年 9 月 6 日發布之未來兩週全球熱帶區域災害展望預報。左下角可見中央氣象局之官方標誌。

近期中央氣象局與淡江大學、雲灣資訊合作，於 2020 年將 CWB TC Tracker 更新為 2.0 版（圖 3）。除了軟硬體架構的改進升級之外，本次改版的主要工作是將原本的 2 週預報延長至 4 週，並納入多種預報模式。除了 NCEP GEFS 即時預報之外，在經濟部水利署的協助之下，CWB TC Tracker 2.0 加入了具有 51 個系集成員的 ECMWF 46 天系集預報模式。除了上述兩種預報模式，新系統亦納入 NCEP Climate Forecast System (CFSv2) 及氣象局海氣耦合模式 (CWBIT1)，並保留未來擴充模式的彈性。近三年亦透過台灣-菲律賓之國合計畫 (VOTE TWG)，以 CWB TC Tracker 2.0 協助菲律賓氣象局 (PAGASA) 進行颱風監測預報，並發展適合菲律賓區域的相關預報產品 [15]。PAGASA 近期於聯合國世界氣象組織舉辦的 ITWC-10 國際研討會 (WMO International Workshop on Tropical Cyclones) 簡報中亦提到相關合作成果。

未來發展與挑戰

相關研究結果顯示，數值預報模式確實對於長時間的颱風預報具有一定的掌握能力。以 ECMWF 46 天系集預報模式為例（圖 4），第 1 週之 Area Under Curve (AUC) 為 0.91，第 2~4 週則分別為 0.85、0.81、0.80，顯示模式對於颱風侵襲機率具有良好的判別能力。然而，研究結果亦顯示數值模式具有颱風過於活躍、產生較多熱帶氣旋的情形。

未來除了持續改進數值模式之外，例如：強化資料同化技術 (data assimilation)、增加系集成員數量、提升時間及空間解析度、改進模式動力核心 (dynamical core) ... 等，在實際預報應用時，可配合多年的歷史再預報資料，評估數值模式之預報技術，並針對模式誤報及漏報個案進行詳細分析，以進一步提升 2~4 週颱風預報之可應用性。此外，颱風預報技術在不同的季節、大尺度環境之下也有所差異。氣象局近期已針對不同大尺度環境

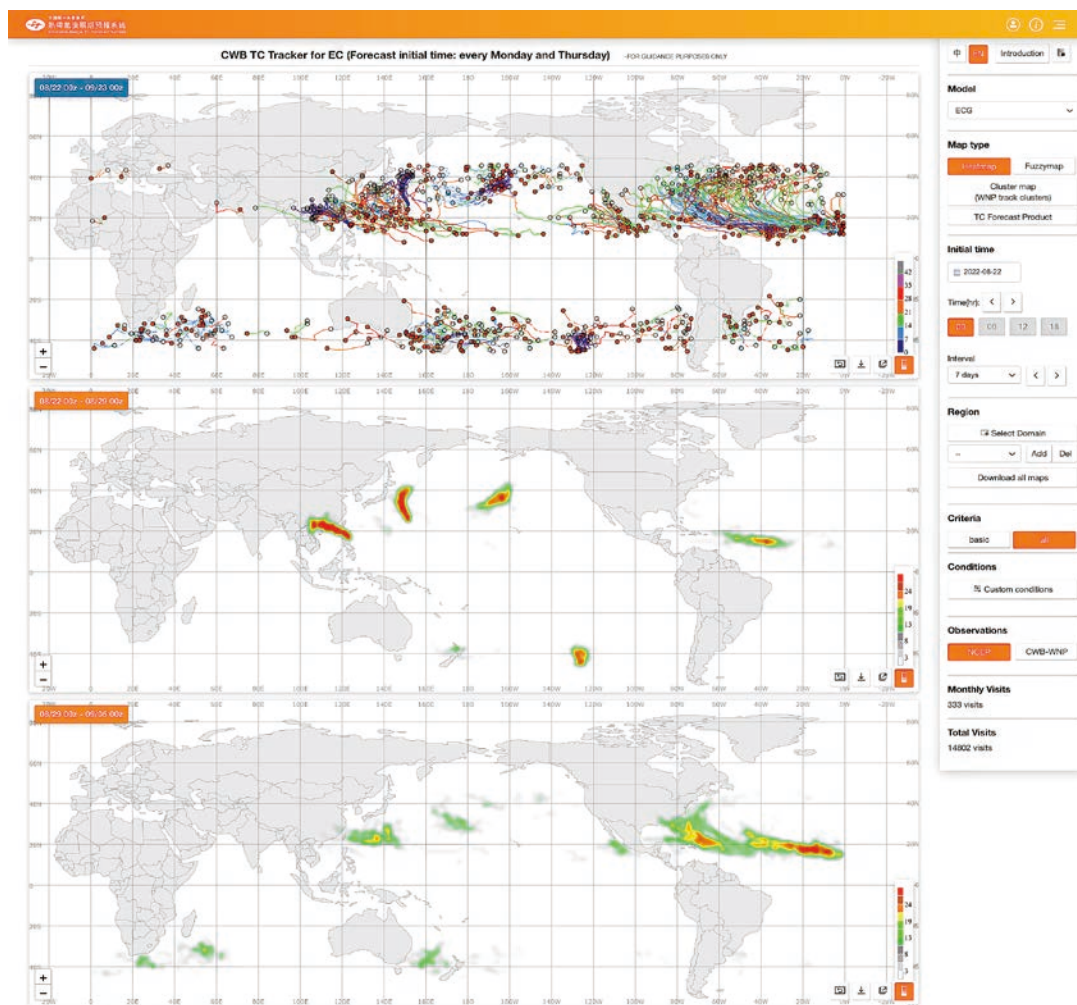


圖 3 CWB TC Tracker 2.0 之網頁預報產品範例。進階使用者可透過帳號登入，取得更多模式預報資訊及進階功能。網址：<https://tctracker.cwb.gov.tw/>。

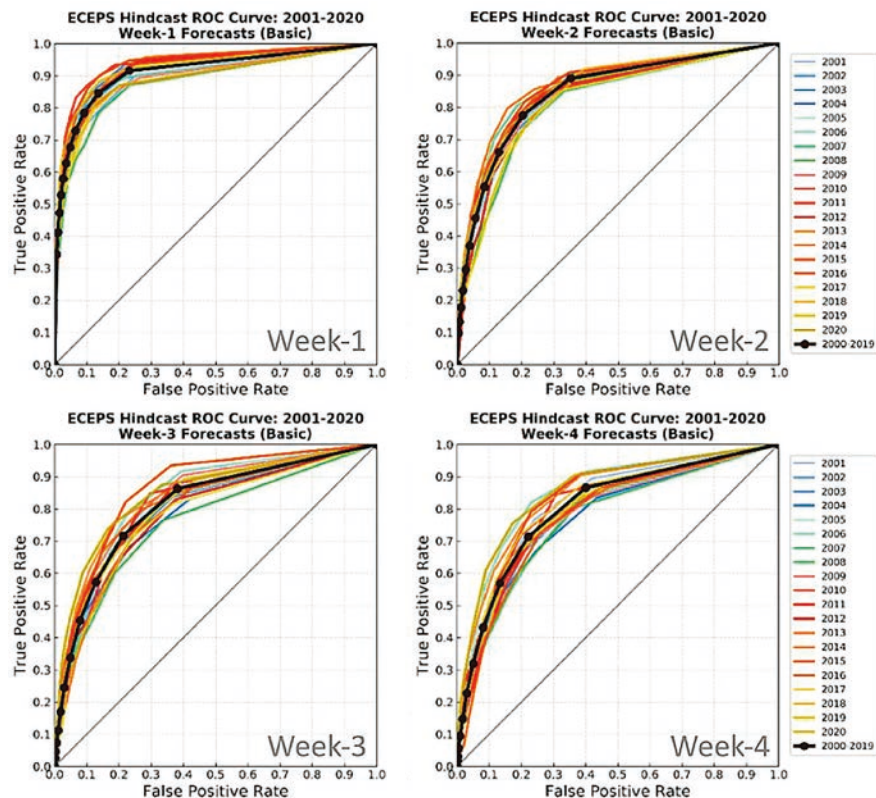


圖 4 ECMWF 歷史再預報之 1~4 週颱風侵襲機率預報技術評估

條件（例如：聖嬰 / 反聖嬰年、Madden Julian Oscillation 相位、西北太平洋季風強弱 … 等），進行預報技術評估，未來在提供 2~4 週颱風預報產品時，預計將藉由大尺度環境指標與颱風預報技術的關聯性分析結果，提供預報可靠度相關資訊，做為預報決策支援之參考依據。

參考文獻

1. Tsai, H.-C., and R.L. Elsberry, (2013), Opportunities and challenges for extended-range predictions of tropical cyclone impacts on hydrological predictions. *J. Hydrology*, 506, 42-54.
2. Hsu, H.-H., Chen, C.-T., Lu, M.-M., Chen, Y.-M., Chou, C., Wu, Y.-C., (2011), Taiwan Climate Change Science Report. Taiwan National Science Council, 362 pp. (in Chinese).
3. 蔡孝忠、呂國臣、許乃寧、賈愛玟、DeMaria, M. (2011)，蒙地卡羅法在颱風侵襲機率估計的應用。大氣科學期刊，39-3，269-288。
4. Majumdar, S.J., and P.M. Finocchio, (2010), On the ability of global ensemble prediction systems to predict tropical cyclone track probabilities. *Wea. Forecasting*, 25, 659-680.
5. Shen, B.-W., M. DeMaria, J.-L. F. Li, and S. Cheung, (2013), Genesis of Hurricane Sandy (2012) simulated with a global mesoscale model, *Geophys. Res. Lett.*, 40, 4944-4950, doi: 10.1002/grl.50934.
6. Xiang, B., S.-J. Lin, M. Zhao, S. Zhang, G. Vecchi, T. Li, X. Jiang, Lucas Harris, J.-H. Chen, (2015), Beyond weather time scale prediction for Hurricane Sandy and Super Typhoon Haiyan in a global climate model, *Monthly Weather Review*, 143, 524-535.
7. Elsberry, R.L., M.S. Jordan, and F. Vitart, (2010), Predictability of tropical cyclone events on intraseasonal timescales with the ECMWF monthly forecast model. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, 46, 135-153.
8. Belanger, J.I., J.A. Curry, and P.J. Webster, (2010), Predictability of North Atlantic tropical cyclones on intraseasonal time scales, *Mon. Wea. Rev.*, 138, 4393-4401.
9. Tsai, H.-C., K.-C. Lu, R. L. Elsberry, M.-M. Lu, and C.-H. Sui, (2011), Tropical cyclone-like vortices detection in the NCEP 16-day ensemble system over the western North Pacific in 2008: Application and Forecast Evaluation. *Wea. Forecasting*, 26, 77-93.
10. Tsai, H.-C., R.L. Elsberry, M.S. Jordan, and F. Vitart, (2013), Objective verifications and false alarm analyses of western North Pacific tropical cyclone event forecasts by the ECMWF 32-day ensemble. *Asia-Pacific J. Atmos. Sci.*, 49, 409-420.
11. Elsberry, R.L., and H.-C. Tsai, and M.S. Jordan, (2014), Extended-range forecasts of Atlantic tropical cyclone events during 2012 using the ECMWF 32-day ensemble predictions. *Wea. Forecasting*, 29, 271-288.
12. Lee, C., S.J. Camargo, F. Vitart, A.H. Sobel, and M.K. Tippett, (2018), Subseasonal Tropical Cyclone Genesis Prediction and MJO in the S2S Dataset. *Wea. Forecasting*, 33, 967-988.
13. Elsberry, R.L., Tsai, H.-C., Chin, W.-C., and Marchok, T.P. (2020), Advanced Global Model Ensemble Forecasts of Tropical Cyclone Formation, and Intensity Predictions along Medium-Range Tracks. *Atmosphere*, 11, 1002.
14. Tsai, H.-C., Elsberry, R.L., Chin, W.-C., Marchok, T.P. (2020), Opportunity for Early Warnings of Typhoon Lekima from Two Global Ensemble Model Forecasts of Formation with 7-Day Intensities along Medium-Range Tracks, *Atmosphere*, 11, 1162.
15. Villafuerte, Marcelino, Tzu-Ting Lo, H.-C. Tsai, Esperanza O. Cayan, (2021), Assessing the potential predictability of tropical cyclone activity in the Philippines on weekly timescales. *Terrestrial, Atmospheric and Oceanic Sciences (TAO)*, 32(5), 1-14. 



雷達與雨量站 降雨資料融合於 都市水文 之應用

汪立本／國立臺灣大學土木工程學系電腦輔助工程組 助理教授

Susana Ochoa Rodriguez／RainPlusPlus (Rain++) Ltd., UK. Senior Hydrometeorologist

都市水文傳統上多使用地面雨量站觀測資料作為主要降雨資訊來源，然而雨量站資料有其地理位置限制，無法提供足夠之空間降雨資訊。近年來，隨著資訊科技之進步，都市排水模型之解析度越來越高，為了得到最好之模擬結果，也需要高品質、高解析度之降雨資訊，僅使用雨量站數據可能無法滿足都市排水模擬之需求。隨著訊號處理技術之進步及硬體設備之升級，雷達降雨於大尺度水文模擬之應用逐漸普及，然而在都市水文之應用還是相對有限，主要原因還是因為雷達降雨之準確度不足。本研究透過二個位於英國之都市集水區案例，分享透過雷達、雨量站降雨資料融合技術，可以生成高解析度、高準確度之降雨數據，並透過都市排水模擬，展示融合降雨資訊可以產出較使用原始雷達降雨或是僅使用雨量站降雨資料更好品質之流量模擬結果。此外本研究也分析在不同降雨型態及模擬不同雨量站密度等情況下，對於融合結果品質產生之影響，此分析結果可以作為實務上使用資料融合技術之參考。

Abstract

Rainfall estimates of high accuracy and resolution are required for urban hydrological applications, given the high imperviousness, small size and fast response of urban catchments. Despite significant progress in rainfall measurement in recent decades, the resolution and accuracy of the rainfall estimates typically available from national meteorological services are still insufficient for urban hydrological applications. The work focuses upon the techniques that can help improve radar rainfall accuracy, with the aim to provide guidance on the application of radar-rain gauge merging techniques at urban scales, so that high-accuracy rainfall estimates which meet urban requirements can be obtained. Three merging techniques, namely Mean Field Bias (MFB) correction, kriging with external (KED) and Bayesian (BAY) data merging, are selected for testing on grounds of performance and common use. Results suggest that all merging methods improve the applicability of radar estimates to urban hydrology. Overall, KED displays the best performance, with BAY a close second and MFB providing the smallest benefits.

前言

都市洪水管理

都市雨水、洪水之適當管理可以有效降低人員和基礎設施受洪水侵襲之風險，也可以讓水資源之利用更加有效率。然而近年來隨著都市化及氣候變遷加速，大幅增加了都市雨水、洪水管理（urban stormwater management）之迫切性及挑戰性^[1]。目前世界上已經有超過一半的人口居住在都市，而且預計都市化之速度將持續加快，這對於都市水資源管理及排水系統造成了巨大壓力，並加劇了洪水和乾旱等水相關災害發生時帶來之影響^[2]。而氣候之快速變遷更是導致極端氣候事件的頻率和強度增加，而且此增加趨勢預計將持續下去^[3,4]。尤其觀測資料顯示，在過去幾十年中，在世界上許多地方（尤其在北半球地區），極端降雨事件的發生頻率，以及造成災害之嚴重程度都不斷攀升^[5]；而氣候變遷模擬推估（climate projection）更進一步顯示此增加之趨勢未來沒有減緩之跡象^[6]。此趨勢將增加

大幅都市極端降雨及洪水發生之頻率和影響程度，例如英國相關評估報告顯示，英國都市地區將有超過 200 萬人^[7] 受到極端降雨及洪水之影響，相關之經濟損失預計將超過 2.7 億英鎊。

為了應對以上挑戰，許多先進國家已經立定相關計畫以有效管理都市水資源（例如歐洲議會^[8,9] 及英國議會^[10]）；而其中都市排水管理方面之實施核心部分，即是要建置可靠的都市排水模型，可以準確地模擬都市逕流之歷程，並可以用來分析在不同環境條件下，都市排水系統之性能、反應，從而做出最佳之雨水、洪水管理決策。

降雨是都市排水模型的主要輸入，由於都市集水區之特色，包括其面積通常相對較小（與河流流域相比）、地表土地使用變化很大且通常不透水，因此，都市排水對降雨之反應相當迅速（即降雨轉換成逕流門檻值低且快速），對於降雨之時空變化非常敏感^[11-13]。降雨之準確性因此大幅決定都市逕流估算的準確性及可靠度，無論是降雨資料之解析度或是準確度，都市排水模擬都需要使用最高標準之降雨估算作為輸入值^[14-18]。

都市排水模擬之降雨需求

都市水文應用傳統上多使用地面雨量站數據作為主要雨量資料來源，雖然雨量站可以提供近地面準確地點位降雨估算值（point rainfall estimates），不過無法完全捕捉降雨的空間變異性（spatial variability），此限制對於都市逕流模擬之準確度有不可忽視之影響^[17-19]。近年來，由於雷達影像資料具有良好捕捉降雨空間分布及其隨時間之演變等特點，許多文獻已經證明雷達定量降水估計（Quantitative Precipitation Estimation, QPE）應用於都市水文之潛力^[13,17,20-22]。然而，雷達定量降雨產品往往是由國家級氣象單位提供，在設置、營運成本及涵蓋範圍等考量下，勢必對於產品之時空解析度有所取捨（常見時空解析度為 1 公里 / 5 ~ 10 分鐘），且無法針對特定區域提供客製化降雨產品，因此雷達定量降雨之準確度及解析度並不總是能夠滿足都市水文之需求。

長期以來，有許多研究針對都市排水模擬所需之降雨解析度作探討，而近年來隨著高解析度都市排水（水文 / 水力）模型之普及，且逐漸在實務上被大量使用，解析度相關主題再次成為研究重點^[23,24]。然而受

限於使用資料之真實解析度或是實驗設計之侷限性，過去研究對於都市水文所需之降雨解析度並沒有定論。直到近年來雷達及資訊技術之快速發展，Ochoa-Rodriguez *et al.*^[25] 可以利用高時空解析度 X-band 雷達定量降雨產品（100 公尺 / 1 分鐘），搭配高解析度都市排水模型，在多個不同的都市集水區、利用不同時空解析度之降雨產品，測試都市排水模擬之變化，該研究歸納出以下結論：

1. 空間解析度：除非是很小的集水區（ ≤ 1 公頃），目前常見雷達定量降雨產品的 1 公里空間解析度普遍上是足夠的，而當降雨空間解析度低於 3 公里時，都市排水模擬計算之誤差會大幅增加。由於地面雨量站之平均距離通常超過三公里，此結論也可用來推論，利用雨量站內插產生之降雨量當作排水模擬輸入值時，可能會有不可忽視之排水流量估算誤差。
2. 時間解析度：目前雷達定量降雨產品常見之 5 分鐘解析度，對於都市排水模擬是不足的，此結論與前人研究一致^[26]。Ochoa-Rodriguez *et al.*^[25] 進一步探討誤差原因，發現主要是因為雷達影像是固定時間間隔（例如每 5 或 10 分鐘）做一次「瞬間」降雨分布掃描（snapshot image），當這樣的降雨產品直接做為排水模擬輸入值時，背後隱含之假設是，在此時間間隔內的降雨強度是維持不變的。然而事實上，降雨是一個時空上持續變化的過程，所以用「瞬間」雷達降雨產品直接當成輸入值會有很大的時間抽樣誤差（temporal sampling error）。文獻中有提出減少時間抽樣誤差影響之方法，例如 Wang *et al.*^[27] 透過電腦視覺技術（computer vision），將 5 ~ 10 分鐘雷達降雨產品內插至 1 分鐘高解析度雷達降雨影像來降低抽樣誤差，結果顯示可以得到更好的都市排水模擬結果。

關於準確性，過去文獻普遍認為雷達 QPE 產品的準確性無法滿足都市水文應用之需求，尤其常常低估極端降雨量，此缺點可能導致都市逕流計算出現較大誤差^[15,17,28]。準確性不足之原因，主要是因為雷達降雨是間接降雨測量值（indirect measurements），是從量測的雷達回波（radar reflectivity）推估出降雨強度（radar rain rate），此推估過程需要經過一連串訊號處理、校正（correction）步驟，而這些步驟的參數許多是根據統

計歸納或是理論推估出之數值，因此有許多誤差來源（uncertainty sources）；加上有些區域會有特定地理因素（orographic effect），造成雷達 QPE 之品質在時空分布上不甚穩定^[13,29,30]。過去幾十年來，在雷達訊號處理及硬體發展上取得了長足進展，包括近年來許多國家級氣候單位都正在或是已經將原本之氣象雷達升級為雙極化雷達，藉以獲得更好之降雨量測品質^[31,32]。然而，即便有新的雷達硬體或是處理技術，雷達 QPE 還是有無可避免之誤差，因為並沒有改變雷達作為降雨量測量工具固有之侷限，即雷達降雨量是間接測量值、雷達之掃描平面通常遠高於地面，還有訊號之品質及有效解析度通常會隨著跟雷達之距離增加而逐漸下降。為了有效提高雷達 QPE 之準確度，以及其作為水文應用之合適性，又同時保留其對空間降雨描述之優勢，利用地表雨量站資料（動態）調整雷達降雨量測（gauge-based radar rainfall adjustment，或是也經常被稱為雷達、雨量站降雨資料融合（radar-rain gauge data merging））是廣泛應用之技術。然而，過去的相關應用大多專注於大尺度水文應用（large-scale hydrological applications）；直到近年來，隨著高解析度都市排水模擬逐漸普及，為了增進都市降雨估算品質，融合技術逐漸被應用至都市水文範疇。然而相關文獻還是相對有限，且多半專注於評估降雨品質之改善程度，較少結合排水模擬來進一步評估對於都市排水估算之影響及可能帶來之效益。

本文將針對雷達、雨量站降雨資料融合技術於都市水文之應用做深入探討。以下將先介紹常用之雷達、雨量站降雨資料融合技術；然後利用位在英國的二個都市集水區作為案例探討，分別就不同型態之降雨事件，測試資料融合可能帶來之都市水文模擬效益做分享。

雷達、雨量站降雨資料融合技術

如前所述，雷達、雨量站降雨資料融合已經被廣泛應用於大尺度水文模擬，因此已經有許多技術被提出，而文獻中也提出數種將不同融合技術加以分類之方法。例如 Wang *et al.*^[33] 根據融合技術背後不同理論假設之差異，將融合技術分為偏差減少法（bias reduction）和誤差方差最小化（error (co-)variance minimisation）等二種方法。此分類後來也被 McKee and Binns^[34] 和 Lo Conti *et al.*^[35] 採用。Erdin^[36]、Goudenhoofd and Delobbe^[37] 和 Jewell and Gaussiat^[38]

等則是將融合技術區分為地理統計（geostatistics）與非地地理統計，其中地理統計法被之定義取決於該技術是否有使用變異函數（variogram）。不同於上述二種分類專注於融合技術之理論，Decloedt *et al.*^[39] 提出以融合結果之數據來源（即雷達和雨量站降雨資料）作為分類方式，共分為調整（adjustment）和整合（integration）兩種分類。前者之融合結果主要是根據地表雨量站數值來調整雷達降雨估算；後者則是實際上兩種數據來源之權重組合。

由於上述分類各有其侷限性，Ochoa-Rodriguez *et al.*^[40] 延伸 Decloedt *et al.*^[39] 的分類，並導入 Wang *et al.*^[33] 的理論分類法，提出更完善之融合技術分類方法，將融合技術共分為三類：(1) 雷達降雨偏差調整法；(2) 以雷達空間關聯作為附加資訊之雨量站降雨量內插法；(3) 雷達、雨量站降雨數據整合法。以下將講述各分類技術之融合原理，以及實務上最常見、最具代表性之方法。

雷達降雨偏差調整方法

這類方法的原理為假設地面雨量站之量測值能夠以某種形式代表真實降雨（例如其空間平均可以當作真實區域降雨量），然後用來校正對應之雷達降雨估算偏差（bias）。此類方法推估出之融合降雨量通常以整個雷達空間降雨作為背景，然後透過乘法或是加法應用校正因子來簡單調整雷達數值。校正因子之計算通常是依據給定時間段內雨量站和雷達降雨之差值，可能是由長期（靜態）或是短期（動態）觀測值推估而成^[21,29,41,42]。

此類方法中最簡單也是最常被使用的方法是平均偏差調整法（MFB, Mean Field Bias correction）。此方法假設雷達降雨誤差在特定空間範圍內為均勻分布，產生偏差之原因可能是由於雷達訊號校正時的數值偏移。這種方法經常使用乘法校正因子，而校正因子最簡單、常用的估算方式為求取固定時間段內雨量站和相對應雷達降雨量空間平均值之比例，然後將此比例值作為校正因子與整個空間範圍內之雷達降雨相乘^[21,29]。文獻中還有許多更複雜之偏差調整方法，例如考慮偏差的空間變異性^[43]，或是利用卡門濾波演算法（Kalman filter）估算偏差於時間上之演變^[44,45]，不過其應用原則上都與 MFB 相差不大。

以雷達空間關聯作為附加資訊之雨量站降雨量內插法

不同於偏差調整法，內插法並不使用雷達空間降雨作為背景；相反地，這類方法是利用雷達降雨之空間關聯性，來幫助雨量站資料進行空間內插（spatial interpolation）；此類方法皆由地理統計理論發展而來，大多為克利金法（kriging）之延伸。由於克利金法為無偏差最佳線性估算法（unbiased best linear estimator），因此此類方法之特色是估算出之融合降雨與雨量站降雨觀測值沒有數值上的偏差。

此類方法中最被廣泛使用的為外部趨勢克利金法（Kriging with External Drift, KED）^[46]。KED 是克利金法之延伸，其中外部趨勢變量（在此為雷達降雨量）會提供內插時的輔助資訊，因此內插之過程，會受到目標值與雨量站位置，以及與雷達降雨值之間的空間關聯性之影響。

此類方法中另一個被廣泛使用的是條件融合法（conditional merging），由 Ehret ^[47] 首先提出，然後 Sinclair and Pegram ^[48] 改善及測試，在文獻中也稱為克利金雷達誤差校正法（kriging with radar-based error correction, KRE）。KRE 法首先利用位於雨量站位置之雷達網格資料進行克利金內插，然後將內插之雷達雨場和原始雷達雨場相減，此相減之差可以用來代表克利金內插之誤差分布，相差值較大的地方，通常離雨量站位置較遠，該處之內插品質也較低，需要較多誤差校正；然後 KRE 法將以上雷達相差分布值添加至雨量站之克利金內插雨場，如此雷達之空間結構就被納入了基於雨量站內插所產生之雨場。

雷達、雨量站降雨數據整合法

不同於以上兩類方法，整合法並不特別偏向使用雷達或雨量站（內插）資料作為背景參考值，而是藉由找到將降雨估算之整體不確定性（overall estimation uncertainty）降到最低之方式，將兩種降雨數據作數值上的實質結合。因此融合降雨估算量通常為雷達和雨量站降雨量測值之加權平均（weighted average），而相關權重則是根據雷達、雨量站降雨數據之相對不確定性來求取。例如，在雨量站稀少的地區，利用雨量站資料估算該處降雨之不確定性相對較高，因此最終融合之降雨場自然與雷達降雨場較為相似；而在雨量

站密度高的地區，最終融合之降雨場就與雨量站（內插）降雨場較為類似^[49]。

聯合克利金法（Co-kriging, CoK）為文獻中主要的降雨數據整合方法之一。CoK 將雷達和雨量站降雨數據合併至單一（聯合）克利金矩陣系統中，求解該矩陣系統之過程，等同於將估計誤差之變異性最小化。CoK 是克利金法的多變量版本延伸，目的是利用有良好空間分佈之共同（或是次要）變量（例如雷達 QPE）來幫助空間分布不佳之主要變量（例如雨量站資料）完成空間內插^[50]。CoK 之概念與前述之 KED 相似，皆是將雷達資料納入雨量站資料內插之克利金矩陣系統，然而根本區別在於，KED 僅使用雷達數據的空間關聯來影響內插值之（線性）權重，因此本質上，所有的融合數值都還是雨量站數據之線性組合。而在 CoK 中，最終融合數值是雷達與雨量站數據之（線性）組合。

貝式資料融合（Bayesian data merging, BAY）^[51] 為另一個主要的降雨數據整合方法；不同於 CoK 整合雷達、雨量站資料至單一矩陣系統，BAY 則是分別量化雷達及雨量站降雨估算之不確定性，然後透過比較兩者不確定性之相對大小，推估出將整體不確定性最小化之方式來融合降雨數據。BAY 資料融合法包含三個步驟：(1) 利用克利金法內插出雨量站空間降雨場，並利用克利金法估算之誤差共變異數矩陣（error covariance）來代表雨量站降雨之不確定性；(2) 將雷達降雨場與雨量站內插降雨場相減，以獲得降雨估算偏差場，此偏差場之共變異數矩陣可用來推導出雷達降雨之不確定性；(3) 利用卡門濾波演算法分析雷達、雨量站之相對不確定性、按比例組合出融合降雨數值。

融合技術對於都市排水模擬之影響

實驗案例概述

本案例設計旨在評估融合降雨數據對於都市排水模擬準確度之影響，根據上述資料融合方法分類，挑選各分類最具代表性的一種方法，來探索不同資料融合方法之特性，及當作排水模擬降雨輸入值之表現。選擇之融合方法包括：平均偏差調整法（MFB）、外部趨勢克利金法（KED）和貝式資料融合（BAY）。此外，原始雷達降雨資料（Radar, RD）以及實務上常用的雨量站內插法：（區塊）克利金（block kriging, BK）

及徐昇多邊形網法 (Thiessen's Polygon, TP)，也會用來產生降雨估算值作為比較參考。

根據 Ochoa-Rodriguez *et al.* [40]，資料融合之結果會受到降雨型態 (storm types) 以及雨量站密度 (gauge network density) 之影響，因此本研究也將案例降雨事件根據季節分為冬季及夏季降雨事件，以及 (由高至低) 模擬六種不同之雨量站密度，分析資料融合在不同降雨型態、不同雨量站密度之表現差異。本研究之案例集水區為位於英國的二個都市集水區 (請參考圖 1)：愛丁堡-洛錫安 (面積 254 平方公里) 和伯明罕-黑鄉 (面積 431 平方公里)，融合後之降雨估算將作為這兩個都市集水區排水模型之輸入值，流量模擬結果會與實際流量觀測值比較。(圖 1(a))

案例集水區

愛丁堡-洛錫安 (Edinburgh-Lothian, EL) (圖1(a))

此集水區位於蘇格蘭東南部，包括愛丁堡市中心，以及中、東洛錫安鄰近郊區，主要是住宅區。集水區的高程變化範圍達 230 公尺。集水區面積約為 254 平方公里，其中 144 平方公里由下水道系統排水；排水面積中，約 47% 為不透水鋪面 (impervious surface)。都市排水系統由數個獨立下水道結合。雖然主要由重力驅動，但有數百個控制元件，其中包括 132 個抽水站。

伯明罕-黑鄉 (Birmingham-Black Country, BC) (圖1(b))

此集水區位在英格蘭的西米德蘭 (West Midlands)，覆蓋了整個伯明翰地區及黑鄉工業區，主要為住宅、商業和工業用地。集水區的高程變化範圍達 200 公尺，集

水面積約 431 平方公里，其中 325 平方公里為下水道系統。排水面積中，約 68% 為不透水鋪面。與愛丁堡-洛錫安一樣，伯明翰-黑鄉的都市排水系統由數個獨立下水道結合。雖然主要由重力驅動，但有數百個控制元件，其中包括 166 個抽水站。

都市排水模擬系統 (urban drainage models)

本研究兩個實驗集水區的排水模型皆為半分布式 (semi-distributed)；在半分布式模型中，整個集水區表面被分成許多非常小的子集水區單元 (sub-catchment units)；模擬時，每個集水區子單元被視為一個集總式水文模型 (lumped model)，施加在每一個單元上之降雨會被假設為均勻分布，演算之徑流量會被引導至子集水區出口 (outlet)，此出口通常會對應到下水道系統的入口。本研究使用之模型是依照英國標準構建和校準 [52]，愛丁堡-洛錫安及伯明罕-黑鄉集水區分別被劃分為 18,105 及 97,764 個子集水區單元，排水透過 InfoWorks ICM 軟體模擬。

降雨、流量資料集

本研究之雨量站及流量測站資料來自於當地水公司 (water company) 每五年一次之集水區排水監測活動，這些監測活動通常歷時 4~6 個月，水公司可以收集大量降雨及流量數據，用校正及驗證都市排水模型。本研究利用此難得之降雨、流量監測資料集，搭配英國氣象局之高解析度 C-band 氣象雷達產品 Nimrod (1 公里 / 5 分鐘) [53]，測試並比較不同雷達、雨量站降雨融合技術結果，以及對於都市排水模擬之影響。

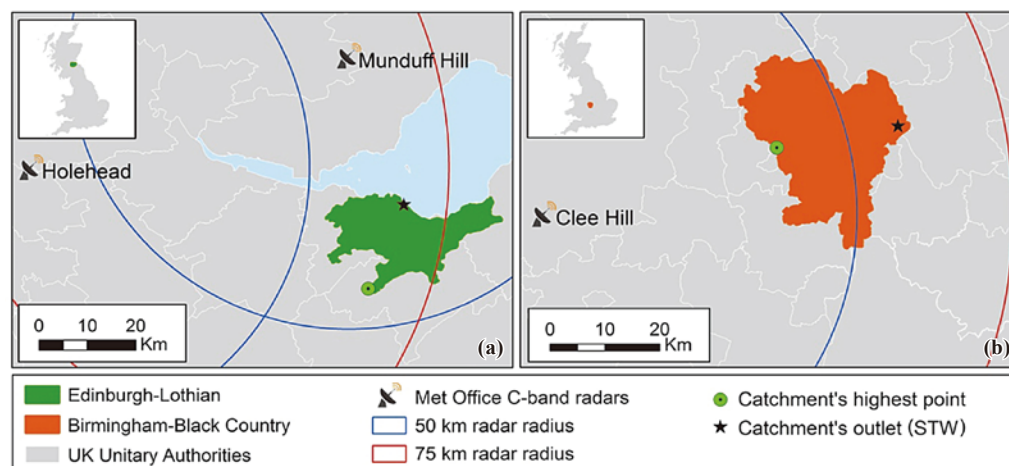


圖 1 本研究兩個案例集水區之地理位置，以及附近英國氣象局雷達站位置：(a) 愛丁堡-洛錫安，(b) 伯明罕-黑鄉。如圖所示，兩個案例集水區附近都有英國氣象局之 C-band 氣象雷達，且大部分區域都在雷達掃描半徑 50 公里範圍內。

愛丁堡-洛錫安之集水區排水監測活動介於 2013 年 12 月至 2014 年 4 月之間，共設置了 96 個傾斗式雨量計 (tipping-bucket rain gauge, TBR) 和 233 個流量監測站 (每個站都有一個水位和流速感測器，據此估算流量) (設置位置詳見圖 2)。伯明罕-黑鄉之集水區排水監測活動則是介於 2011 年 12 月至 2012 年 9 月期間，共設置了 84 個 TBRs 及 66 個流量監測站 (設置位置詳見圖 3)。

本研究從兩個案例集水區皆個別挑選了 15 個雨量站作為獨立驗證融合結果使用 (請參考圖 2(a)、圖 3(a))，挑選原則為盡量能夠涵蓋整個集水區域，如此能不偏重特定區域。流量資料之品質比較不穩定，本研究根據流量資料之品質、所在位置 (涵蓋上、中、下游區域)，在愛丁堡-洛錫安及伯明罕-黑鄉集水區各挑選了 14 及 8 個測站之流量資料作為結果驗證 (請參考圖 2(b)、圖 3(b))。降雨及流量資料更進一步後處理確保資料品

質，其中雨量站資料採用 Luyckx and Berlamont^[54] 提出之傾斗式雨量計校正方法，有效減少高降雨強度之低估現象；流量資料部分，則是參考 Rico-Ramirez *et al.*^[55] 提出之後處理方式，使用 10 分鐘寬度之均值濾波 (mean filter) 來降低原始流量資料之雜訊比例。

結果分析

本研究將從以下三個層面分析資料融合結果，並探討降雨事件型態、雨量站密度對結果之影響。

資料融合結果於不同降雨型態、不同雨量站密度情況下之空間結構變化

圖 4、圖 5 分別顯示冬季及夏季降雨型態下，不同降雨融合、內插結果隨著雨量站密度改變 (圖中由上至下代表密度由高到低)，其空間降雨結構之變化。從圖 4、圖 5 之降雨事件案例，我們可以觀察到：

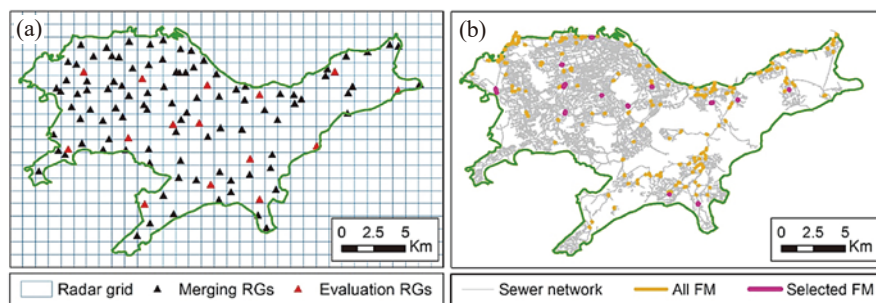


圖 2 (a) 愛丁堡-洛錫安集水區雨量站、(b) 下水道網路分布及流量測站位置分布。圖 (a) 中，以紅色三角形標示之雨量站會用來評估資料融合結果，不會用作資料融合使用；圖 (b) 中，粉紅色標示為評估流量模擬結果之流量測站位置。

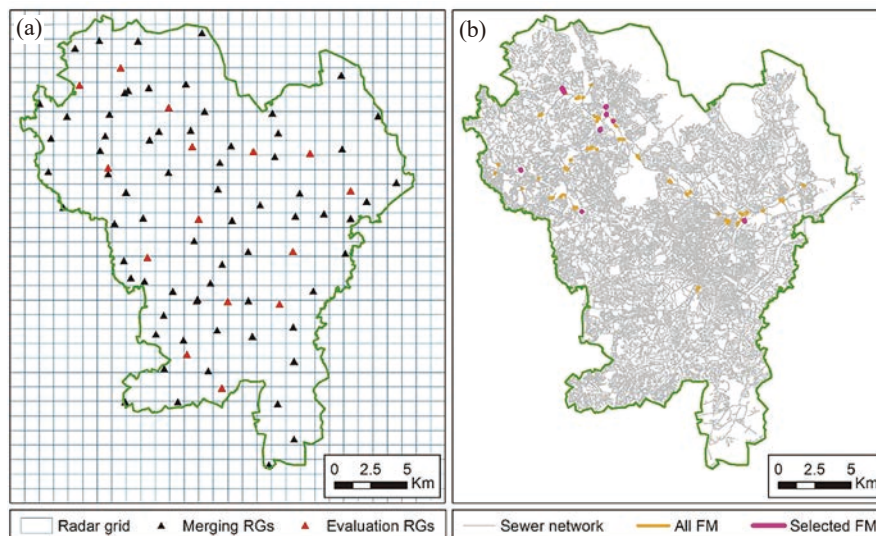


圖 3 (a) 伯明罕-黑鄉集水區雨量站、(b) 下水道網路分布及流量測站位置分布。圖 (a) 中，以紅色三角形標示之雨量站會用來評估資料融合結果，不會用作資料融合使用；圖 (b) 中，粉紅色標示為評估流量模擬結果之流量測站位置。

1. MFB 的降雨空間輪廓基本上跟原始雷達 RD 一致，只是隨著雨量站密度變化而造成雨量站估算之區域平均降雨不同，MFB 整體降雨估算值跟著上下變動。
2. 相較於內插法 (BK 和 TP)，KED 能夠產生空間上更真實之降雨分布；然而，類似內插法，KED 對於雨量站密度變化相對敏感。當夏季對流降雨集中在某個小區域、加上雨量站密度低時，可能會因此沒有捕捉到降雨之核心雨胞 (參考圖 5)，此時 KED 及內插法就可能大幅低估真實降雨。冬季降雨之分布通常涵蓋較大之空間範圍，因此即便處於雨量站密度較低之情況，雨量站錯失捕捉到降雨之機率還是相對較低 (圖 4)，因此發生大幅低估真實降雨之機率較低。
3. 相較於 KED，BAY 採用更多雷達資訊，因此 BAY 對於雨量站密度變化較為不敏感，此優勢於夏季型態降雨事件特別明顯。此外，當雨量站密度高的時候，BAY 降雨跟 BK 內插較為類似，因為此時雨量站降雨估算值之不確定性較低；不過隨著

雨量站密度變低，BAY 降雨之空間結構逐漸轉變成較類似 RD。

4. 不同內插法之間，我們可以觀察到 BK 較 TP 展現出更高之空間降雨變異性。此外，類似 KED，內插法在冬季降雨型態表現較好，且對於雨量站密度變化相對敏感。

資料融合技術於不同降雨型態、不同雨量站密度情況下預測未知位置降雨表現之變化

圖 6 顯示不同資料融合、內插方法，在不同雨量站密度條件下，預測驗證雨量站 (圖 2、圖 3 紅色三角形標示點) 降雨數據之結果，此處選用平均絕對誤差 (Mean Absolute Error, MAE) 做為評估指標。我們可以觀察到：

1. 所有的資料融合技術都能有效地提高原始雷達降雨資料之品質；提高之程度與採用之融合方法、降雨型態及雨量站密度息息相關。大致上來說，融合方法對於冬季降雨之預測力較高。
2. 從冬季降雨事件之結果可以發現 (圖 6 左)，利用

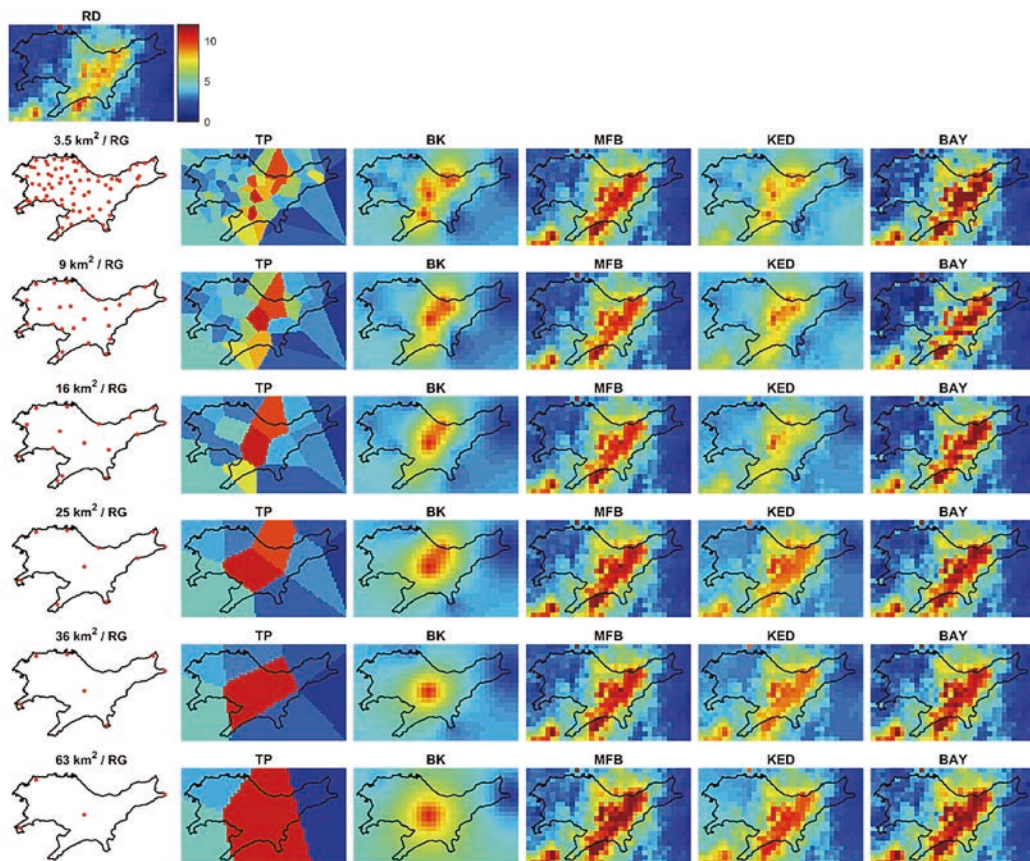


圖 4 不同資料融合、內插技術於愛丁堡-洛錫安集水區產出之 (冬季) 降雨空間分布 (2013/12/30 09:40 UTC)，隨不同雨量站密度 (由上至下由高至低) 之空間結構變化。

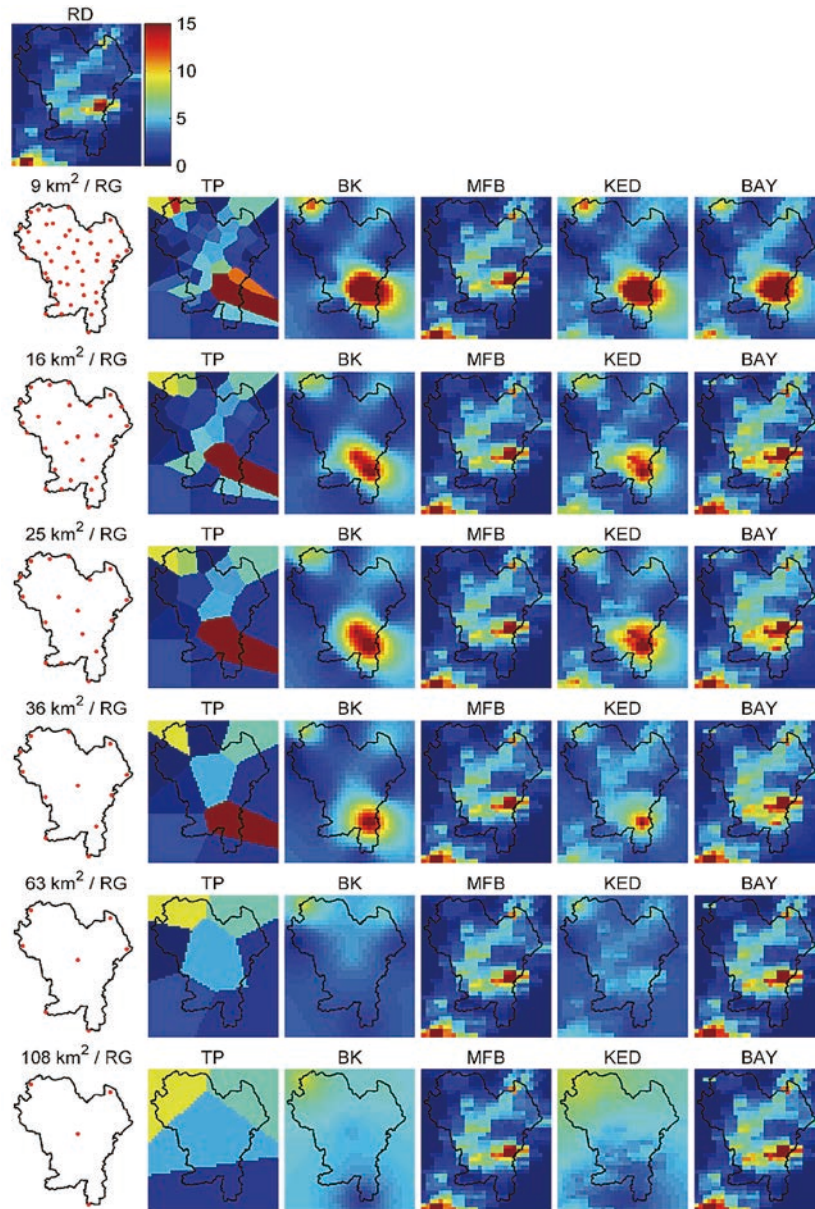


圖 5 不同資料融合、內插技術於伯明罕-黑鄉集水區產出之(夏季)降雨空間分布(2012/06/06 16:40 UTC)，隨不同雨量站密度(由上至下由高至低)之空間結構變化。

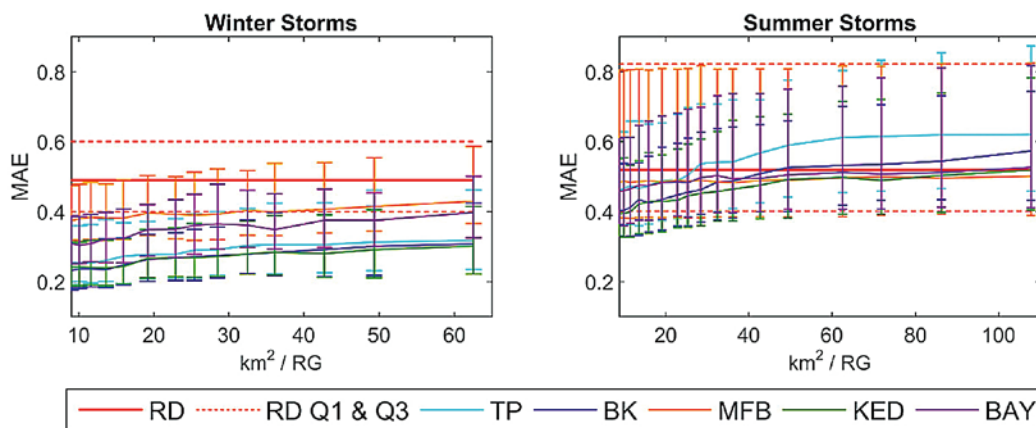


圖 6 不同資料融合、內插技術在冬季(左圖)及夏季(右圖)降雨事件中,平均絕對誤差(MAE)評估指標隨不同雨量站密度(由高至低)之變化。

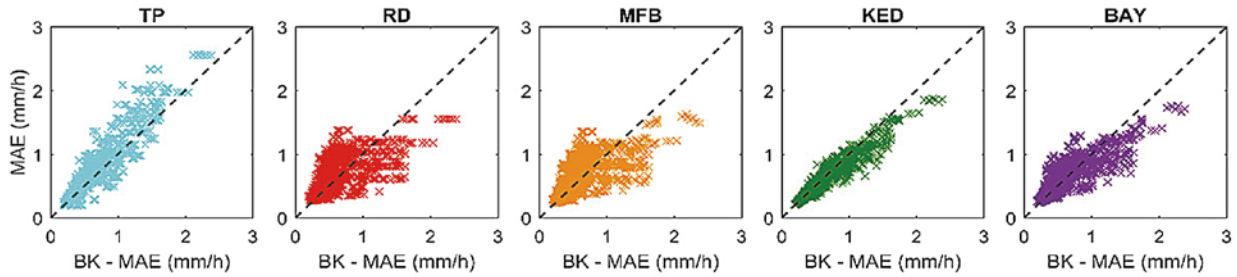


圖 7 不同資料融合、內插技術與 BK 內插法之平均絕對誤差 (MAE) 比較。45° 斜虛線代表其他方法與 BK 之表現一樣；斜虛線右下之區域，表示其他方法表現較佳 (MAE 較低)；左上區域則表示 BK 表現較佳。

雨量站降雨資料做空間內插，即便在雨量站密度很低的情況下，還是較原始雷達降雨資料有更佳之預測能力。如前所述，這主要是因為冬季降雨型態通常在空間上涵蓋較大之範圍，而且降雨量之空間變異性較小，所以內插效果很好。

- 相反地，使用雷達的效益在夏季降雨型態就很明顯。圖 6 右可以觀察到，僅使用雨量站內插之結果只有在雨量站密度很高的時候，有較雷達降雨更好的預測能力。而融合氣象雷達之結果，即使在雨量站密度很低的情況下，還是有較原始雷達更好的預測能力。
- 整體來說，KED 融合結果的預測能力最好，然後是 BAY；MFB 的效益僅在夏天降雨型態較為明顯。
- BK 內插法由於考量降雨空間關聯性，因此其預測能力較 TP 佳，尤其在夏季降雨型態特別明顯。

由於 BK 的良好預測性，水文實務上常常被用來產生空間降雨，文獻中也常被當作資料融合或是雷達降雨之參考比較對象^[48]，因此我們進一步比較 BK 與其他融合結果，藉此分析資料融合技術於實務應用上之附加價值。如圖 7 所示，我們比較 BK 預測驗證雨量站之 MAE (圖 7 水平軸) 與其他內插、融合方法 (圖 7 垂直軸) 之 MAE；45° 斜虛線代表其他方法與 BK 之表現一樣；斜虛線右下方之區域，表示其他方法表現較佳 (MAE 較低)；左上區域則表示 BK 表現較佳。我們可以觀察到：

- BK 與 TP 之比較，可以發現資料點幾乎都集中在左上區域，尤其當 BK 的 MAE 數值較大 (> 2 mm/h) (表示內插效果較差的情況)，BK 展現出較佳之降雨預測能力。
- BK 與原始雷達降雨之比較，當 BK 的 MAE 數值較小 (< 1 mm/h) (表示內插效果較佳的情況)，

BK 是比較好之降雨估算方法選擇。但是相反地，當 BK 的 MAE 數值較大 (> 2 mm/h)，使用雷達降雨之效益開始浮現，而這種情況多半為夏季降雨型態。

- MFB 之結果跟 RD 幾乎一樣。
- KED 和 BAY 之結果顯示，資料融合技術結合了內插法與雷達降雨之優勢。當 BK 的 MAE 數值較小 (< 1 mm/h) 時，KED 和 BAY 可以將雷達降雨之誤差降低；而當 BK 的 MAE 數值較大 (> 2 mm/h) 時，融合技術可以善用額外之雷達降雨資訊，提供較佳之預測能力。

資料融合技術於不同降雨型態、不同雨量站密度情況下水文模擬準確度變化

圖 8 顯示不同資料融合、內插方法在最高雨量站密度之條件下，於伯明罕 - 黑鄉集水區 (夏季降雨型態) 上游測站 (M34)、BB-07 (2012/06/06) 事件之流量模擬與觀測值比較。我們可以觀察到：

- 所有的流量模擬都可以良好地反應出觀測流量之變化趨勢，這表示所使用之都市排水模型有經過良好之校正過程，模擬之流量具有一定代表性。
- 都市水文實務上經常使用之 TP 內插法大幅地高估尖峰流量觀測值，推測是因為 TP 直接使用最接近之雨量站資料、缺乏考量空間降雨之變異性，因此較容易出現高估或是低估降雨及流量之情況。BK 內插法展現出較好之流量模擬結果及穩定性。
- 原始雷達降雨與 MFB 之流量模擬都大幅低估尖峰流量觀察值，不過整體流量之變化趨勢跟觀測值一致性很高，展現出雷達降雨之潛力。
- 透過 KED 及 BAY 等資料融合技術，雷達降雨之準確性有所提升，其流量模擬結果也展現出與觀測值最高之一致性。

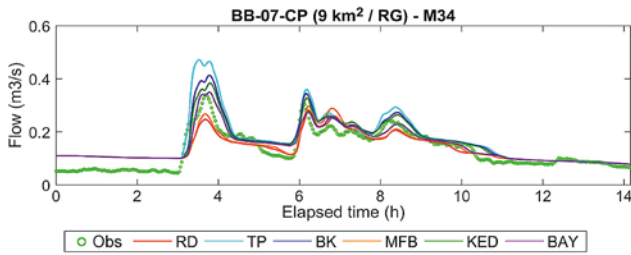


圖 8 不同資料融合、內插技術於伯明罕-黑鄉（夏季降雨型態）集水區上游測站（M34）、BB-07 事件（2012/06/06）之流量模擬與觀測值比較。

除了單一事件之模擬結果比較，我們進一步比較所有事件之結果，分析在不同降雨型態、不同雨量站密度等條件下，流量模擬結果之變化。從圖 9 之評估指標（流量峰值相對誤差（RE Peak Flow）及線性相關係數（ r ），我們可以觀察到：

1. 無論是冬季或是夏季降雨型態，所有的資料融合方法都改善了原始雷達降雨之流量模擬結果。
2. 使用資料融合技術之價值在夏季降雨事件及低雨量站密度時尤為明顯。
3. 整體來說，KED 的流量模擬結果最佳，然後是 BAY；MFB 的效益在夏天降雨型態較為明顯。不過值得注意的是，BAY 對於夏季型態降雨之流量峰值模擬有最好之結果，此結果值得都市防災模擬參考。
4. 相較於內插法（TP 和 BK）之流量模擬結果，KED 和 BAY 對於雨量站密度之變化，比較不敏感。只有在夏季型態降雨、雨量站密度極低的情況下，KED 的表現會突然大幅下降。

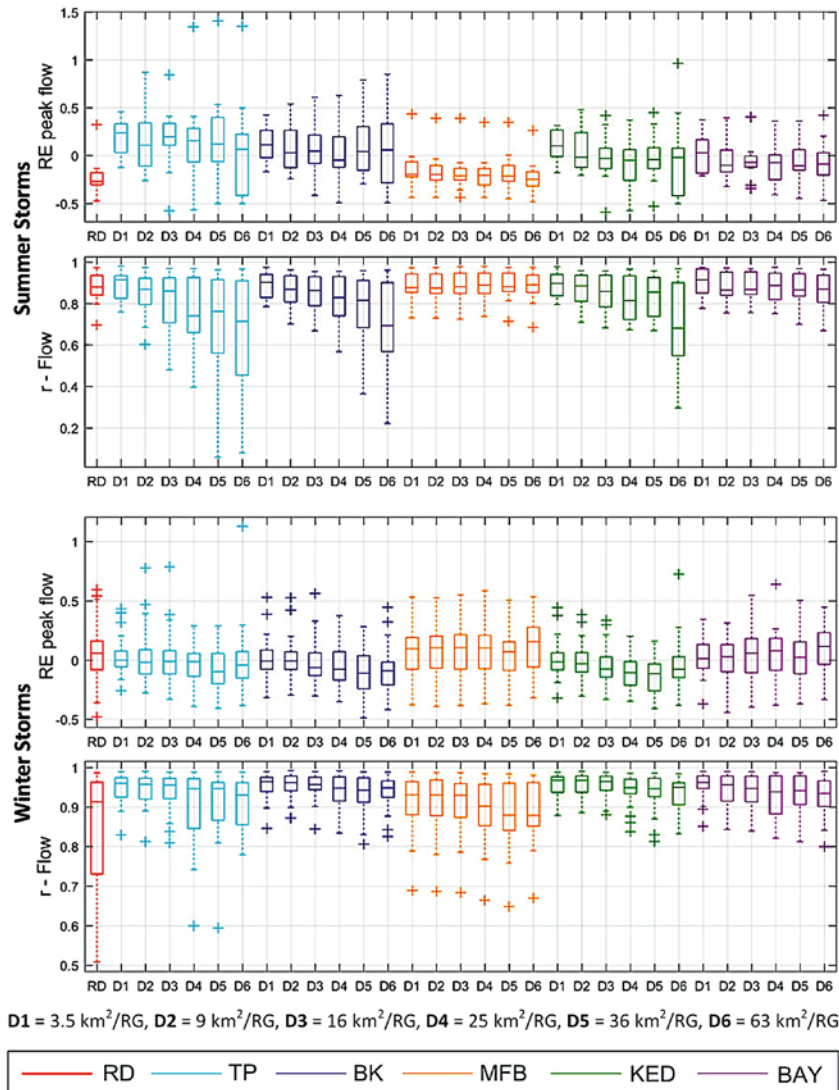


圖 9 不同資料融合、內插技術於伯明罕-黑鄉（夏季，上二圖）及愛丁堡-洛錫安（冬季，下二圖）之流量模擬結果，隨不同雨量站密度（D1 至 D6，密度由高至低）之評估指標變化。展示之評估指標包括：流量峰值相對誤差（RE Peak Flow）及線性相關係數（ r ）。

結語

本研究分享利用雷達、雨量站降雨資料融合提高都市降雨估算準確性，並透過實際集水區案例證明融合技術可以有效增進雷達降雨於都市水文應用性的。此外，並針對實務上會有不同氣候、雨量站密度等條件，評估可能對融合結果造成之影響，藉此提供實務上應用融合技術之參考。本研究主要結論包括：

1. 案例結果顯示，所有的資料融合方法都可以獲得較原始雷達資料更好之降雨估算量，從而得到更好地都市排水模擬結果，有效提高雷達降雨在都市水文之應用性。此外，在大部分的情況下，融合降雨估算也優於僅使用雨量站降雨之內插降雨值，此結果證明雷達降雨可以提供有效之降雨資訊。不過，雷達降雨能夠提供額外資訊之程度，因使用不同資料融合方法而異，而且在不同氣候及雨量站密度條件下，融合結果之變化程度也會有所差異。
2. 雷達降雨資料的附加價值在夏季降雨事件，以及當雨量站密度較低之情況下尤為明顯。在這些條件下，雷達、雨量站降雨融合產品都明顯優於僅用雨量站內插之降雨估計值。
3. 總體而言，KED 融合降雨之表現最好，BAY 緊隨其後。不過，KED 之表現對於氣候條件及雨量站密度之變化較為敏感。而因為採用較 KED 更多的雷達降雨資訊，BAY 對於氣候條件及雨量站密度之變化較不敏感，當雨量站沒有捕捉到降雨資訊時，BAY 還是可以利用雷達資訊提供有效之降雨估算。
4. 根據案例結果，本研究建議在雨量站密度相對高（平均每 30 km² 或是更小的面積有一個雨量站），或是已知雷達降雨品質不佳時，可以使用 KED，如此使用較多雨量站降雨數據。相反地，當雨量站密度較地，且雷達降雨資料之品質合理時，BAY 可能是更合適的選擇。而 MFB 方法之結果雖然沒有其他兩個方法好，大部分情況下還是比原始雷達 QPE 及僅用雨量站內插之結果好，建議可以做為除了以上兩個融合方法以外之最後選擇。

參考文獻

1. Yazdanfar, Z. and Sharma, A. (2015). Urban drainage system planning and design – challenges with climate change and urbanization: a review. *Water Science and Technology*, 72 (2), 165-179.
2. UN. (2014). *World Urbanization Prospects: The 2014 Revision*. United Nations, New York, US.
3. Smith, K. and Petley, D. (2009). *Environmental hazards: assessing risk and reducing disaster* (Fifth ed.). Routledge - Taylor & Francis Group, UK.
4. OECD. (2014). *Managing water for future cities*. Organisation for Economic Cooperation and Development, Paris, France.
5. Lloyd's Emerging Risk Team. (2010). East London extreme rainfall: Importance of granular data. In London, UK.
6. IPCC. (2012). *Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaption. A Special Report of Working Groups I and II of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, UK, and New York, USA.
7. Houston, D., Werritty, A., Bassett, D., Geddes, A., Hoolachan, A., and Marion, M. (2011). Pluvial (rain-related) flooding in urban areas: the invisible hazard. In J. R. Foundation (Ed.), York, UK.
8. European Parliament. (2000). Directive 2000/60/EC Establishing a framework for community action in the field of water policy. Document available online: <https://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=CONSLEG:2000L0060:20011216:EN:PDF>
9. European Parliament. (2007). Directive 2007/60/EC on the assessment and management of flood risks. Official Journal of the European Union, Strasbourg, France. Document available online: <https://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2007:288:0027:0034:EN:PDF>
10. UK Parliament. (2010). Flood and Water Management Act 2010. UK Legislation.
11. Syed, K.H., Goodrich, D.C., Myers, D.E., and Sorooshian, S. (2003). Spatial characteristics of thunderstorm rainfall fields and their relation to runoff. *Journal of Hydrology*, 271 (1-4), 1-21.
12. Segond, M.L., Neokleous, N., Makropoulos, C., Onof, C., and Maksimović, Č. (2007). Simulation and spatio-temporal disaggregation of multi-site rainfall data for urban drainage applications. *Hydrological sciences journal*, 52 (5), 917-935.
13. Villarini, G. and Krajewski, W. (2010). Review of the Different Sources of Uncertainty in Single Polarization Radar-Based Estimates of Rainfall. *Surveys in Geophysics*, 31 (1), 107-129.
14. Berne, A., Delrieu, G., Creutin, J.-D., and Oblé, C. (2004). Temporal and spatial resolution of rainfall measurements required for urban hydrology. *Journal of Hydrology*, 299, 166-179.
15. Einfalt, T., Jessen, M., and Mehlig, B. (2005). Comparison of radar and raingauge measurements during heavy rainfall. *Water Science and Technology*, 51 (2), 195-201.
16. Golding, B.W. (2009). Uncertainty propagation in a London flood simulation. *Journal of Flood Risk Management*, 2 (1), 2-15.
17. Schellart, A.N.A., Shepherd, W.J., and Saul, A.J. (2012). Influence of rainfall estimation error and spatial variability on sewer flow prediction at a small urban scale. *Advances in Water Resources*, 45 (0), 65-75.
18. Del Giudice, D., Honti, M., Scheidegger, A., Albert, C., Reichert, P., and Rieckermann, J. (2013). Improving uncertainty estimation in urban hydrological modeling by statistically describing bias. *Hydrology and Earth System Sciences*, 17 (10), 4209-4225.
19. Gires, A., Onof, C., Maksimović, Č., Schertzer, D., Tchiguirinskaia, I., and Simoes, N. (2012). Quantifying the impact of small scale unmeasured rainfall variability on urban runoff through multifractal downscaling: A case study. *Journal of Hydrology*, 442, 117-128.
20. Vieux, B.E. and Vieux, J.E. (2006). Statistical evaluation of a radar rainfall system for sewer system management. *Atmospheric Research*, 77 (1/4), 322-336.

21. Smith, J.A., Baeck, M.L., Meierdiercks, K.L., Miller, A.J., and Krajewski, W.F. (2007). Radar rainfall estimation for flash flood forecasting in small urban watersheds. *Advances in Water Resources*, 30 (10), 2087-2097.
22. Krämer, S. and Verworm, H.-R. (2009). Improved radar data processing algorithms for quantitative rainfall estimation in real time. *Water Science & Technology*, 60 (1), 175-184.
23. Salvatore, E., Bronders, J., and Batelaan, O. (2015). Hydrological modelling of urbanized catchments: A review and future directions. *Journal of Hydrology*, 529, 62-81.
24. Pina, R., Ochoa-Rodríguez, S., Simões, N., Mijic, A., Marques, A., and Maksimović, Č. (2016). Semi- vs. Fully-Distributed Urban Stormwater Models: Model Set Up and Comparison with Two Real Case Studies. *Water*, 8 (2), 58.
25. Ochoa-Rodríguez, S., Wang, L.-P., Gires, A., Pina, R. D., Reinoso-Rondinel, R., Bruni, G., Ichiba, A., Gaitan, S., Cristiano, E., Assel, J. v., Kroll, S., Murlà-Tuyls, D., Tisserand, B., Schertzer, D., Tchiguirinskaia, I., Onof, C., Willems, P., and ten Veldhuis, M.-C. (2015). Impact of spatial and temporal resolution of rainfall inputs on urban hydrodynamic modelling outputs: A multi-catchment investigation. *Journal of Hydrology*, 531, 389-407.
26. Notaro, V., Fontanazza, C. M., Freni, G., and Puleo, V. (2013). Impact of rainfall data resolution in time and space on the urban flooding evaluation. *Water Science & Technology*, 68 (9), 1984-1993.
27. Wang, L.-P., Ochoa-Rodríguez, S., Van Assel, J., Pina, R. D., Pessemier, M., Kroll, S., Willems, P. and Onof, C. (2015). Enhancement of radar rainfall estimates for urban hydrology through optical flow temporal interpolation and Bayesian gauge-based adjustment. *Journal of Hydrology*, 531, 408-426.
28. Collier, C. G. (2009). On the propagation of uncertainty in weather radar estimates of rainfall through hydrological models. *Meteorological Applications*, 16 (1), 35-40.
29. Harrison, D.L., Scovell, R.W., and Kitchen, M. (2009). High-resolution precipitation estimates for hydrological uses. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Water Management*, 162 (2), 125-135.
30. Krajewski, W. F., Villarini, G., and Smith, J. A. (2010). Radar-Rainfall Uncertainties: Where we are after thirty years of effort. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 91 (1), 87-94.
31. Bringi, V.N., Rico-Ramirez, M.A., and Thurai, M. (2011). Rainfall Estimation with an Operational Polarimetric C-Band Radar in the United Kingdom: Comparison with a Gauge Network and Error Analysis. *Journal of Hydrometeorology*, 12 (5), 935-954.
32. Chandrasekar, V., Keränen, R., Lim, S., and Moiseev, D. (2013). Recent advances in classification of observations from dual polarization weather radars. *Atmospheric Research*, 119, 97-111.
33. Wang, L.-P., Ochoa-Rodríguez, S., Simoes, N., Onof, C. and Maksimović, Č. (2013). Radar-raingauge data combination techniques: a revision and analysis of their suitability for urban hydrology. *Water Science & Technology*, 68 (4), 737-747.
34. McKee, J.L. and Binns, A.D. (2015). A review of gauge-radar merging methods for quantitative precipitation estimation in hydrology. *Canadian Water Resources Journal / Revue canadienne des ressources hydriques*, 41 (1-2), 186-203.
35. Lo Conti, F., Francipane, A., Pumo, D., and Noto, L.V. (2015). Exploring single polarization X-band weather radar potentials for local meteorological and hydrological applications. *Journal of Hydrology*, 531, 508-522.
36. Erdin, R. (2013). Geostatistical methods for hourly radar-gauge combination: An explorative, systematic application at MeteoSwiss - Scientific Report MeteoSwiss No. 92. MeteoSwiss, Zurich, Switzerland.
37. Goudenhoofd, E. and Delobbe, L. (2009). Evaluation of radar-gauge merging methods for quantitative precipitation estimates. *Hydrology and Earth System Sciences*, 13, 195-203.
38. Jewell, S.A. and Gaussiat, N. (2015). An assessment of kriging-based rain-gauge-radar merging techniques. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 141 (691), 2300-2313.
39. Decloedt, L.C., Willems, P., and Gires, A. (2013). Review document: Methods and experiences in radar based fine scale rainfall estimation. Deliverable of EU RainGain's Project Work Package 2, Leuven, Belgium.
40. Ochoa-Rodríguez, S., Wang, L.-P., Willems, P., and Onof, C. (2019). A review of radar-rain gauge data merging methods and their potential for urban hydrological applications. *Water Resources Research*, 55 (8), 6356-6391.
41. Wright, D.B., Smith, J.A., Villarini, G. and Baeck, M.L. (2014). Long-Term High-Resolution Radar Rainfall Fields for Urban Hydrology. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, 50 (3), 713-734.
42. Borup, M., Grum, M., Linde, J.J., and Mikkelsen, P.S. (2016). Dynamic Gauge Adjustment of High-Resolution X-Band Radar Data for Convective Rain Storms: Model-Based Evaluation against Measured Combined Sewer Overflow. *Journal of Hydrology*, 539, 687-699.
43. Cole, S.J., and Moore, R.J. (2008). Hydrological modelling using raingauge- and radar-based estimators of areal rainfall. *Journal of Hydrology*, 358, 159-181.
44. Fulton, R.A., Breidenbach, J.P., Seo, D.-J., and Miller, D.A. (1998). The WSR-88D rainfall algorithm. *Weather and Forecasting*, 13 (2), 377-395.
45. Chumchean, S., Sharma, A., and Seed, A. (2006). An Integrated Approach to Error Correction for Real-Time Radar-Rainfall Estimation. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 23 (1), 67-79.
46. Wackernagel, H. (2003). *Multivariate Geostatistics, An Introduction with Applications* (3rd ed.). Springer, Heidelberg.
47. Ehret, U. (2002). Rainfall and flood nowcasting in small catchments using weather radar. PhD Thesis, University of Stuttgart, Germany.
48. Sinclair, S. and Pegram, G. (2005). Combining radar and rain gauge rainfall estimates using conditional merging. *Atmospheric Science Letters*, 6 (1), 19-22.
49. Kitzmiller, D., Miller, D., Fulton, R., and Ding, F. (2013). Radar and Multisensor Precipitation Estimation Techniques in National Weather Service Hydrologic Operations. *Journal of Hydrologic Engineering*, 18 (2), 133-142.
50. Journel, A.G. (1989). *Fundamentals of Geostatistics in Five Lessons - Short Course in Geology*. AGU, Washington, US.
51. Todini, E. (2001). A Bayesian technique for conditioning radar precipitation estimates to rain-gauge measurements. *Hydrology and Earth System Sciences*, 5, 187-199.
52. WaPUG. (2002). *Code of Practice For The Hydraulic Modelling of Sewer Systems*, Wastewater Planning Users Group.
53. Golding, B.W. (1998). Nimrod: A system for generating automated very short range forecasts. *Meteorological Applications*, 5, 1-16.
54. Luyckx, G. and Berlamont, J. (2001). Simplified method to correct rainfall measurements from tipping bucket raingauges. In *Proceedings of Urban Drainage Modelling*, Florida, US.
55. Rico-Ramirez, M.A., Liguori, S., and Schellart, A.N.A. (2015). Quantifying radar-rainfall uncertainties in urban drainage flow modelling. *Journal of Hydrology*, 528, 17-28. 



以 TCCIP AR6 統計降尺度日資料 探討臺灣未來水資源衝擊

劉子明／國家災害防救科技中心 助理研究員

林祺恒／國家災害防救科技中心 佐理研究員

童裕翔／國家災害防救科技中心 助理研究員

陳正達／師範大學地球科學系 優聘教授

國科會「臺灣氣候變遷推估資訊與調適知識平台」於 2023 年 1 月釋出了最新的 IPCC AR6 統計降尺度日資料下載，提供我國各界之氣候變遷風險評估使用。為了解最新資料所呈現未來氣候變遷對水資源之衝擊，本研究乃使用 TCCIP AR6 統計降尺度日資料，探討全臺供水相關集水區在氣候變遷影響下之衝擊。結果顯示臺灣北中南東四區水資源相關集水區，未來年雨量為增加的趨勢，但雨量與集水區流量仍為「豐越豐，枯越枯」的變化趨勢，且多集中於颱風季（7~9 月），增加水資源管理的困難。春季的雨量及流量多為減少趨勢，此趨勢將會增加未來水資源乾旱之風險。利用最新氣候變遷資料進行評估，顯示臺灣水資源之衝擊為負面趨勢，然而是否造成各供水區之缺水風險，仍需進一步進行供需水模擬，並同時考量氣候變遷不確定性，以擬定適當之氣候變遷調適策略與方案。

前言

近年來，極端氣候事件層出不窮，無論是高溫事件、豪雨災害、亦或是乾旱事件的侵襲，都顯示氣候變遷正在影響我們，在全球暖化趨勢逐漸上升的情況下，必須有長遠的規劃與評估，並將氣候變遷的不確定性考量進來，才能因應氣候變遷所造成的風險。國際上氣候變遷風險評估一直都是使用聯合國政府間氣候變遷專門委員會（Intergovernmental Panel on Climate Change, 簡稱 IPCC）定期發布的評估報告所使用的氣候變遷情境資料。隨著科學的演進，全球趨勢變化，氣候變遷情境資料也跟著改變，也因此氣候變遷風險評估必須隨著氣候變遷情境資料的改變來滾動修正，每次釋出新的氣候變遷情境資料，都代表更貼近可能的未來，因此利用新的氣候變遷情境資料進行評估，才更能掌握未來氣候變遷的風險。

IPCC 於 2021 年 8 月 9 日公布氣候變遷第六次評估報告（The 6th Assessment Report, 簡稱 AR6）第一工作小組報告的最終版草案（final draft of WGI AR6）^[1]，揭露了使用最新氣候變遷情境資料所評估未來世界的氣候變遷衝擊。此時，國科會「臺灣氣候變遷推估資訊與調適知識平台」（Taiwan Climate Change Projection Information and Adaptation Knowledge Platform, 簡稱 TCCIP），已蒐集了 IPCC AR6 所使用最新的耦合氣候模式對比計畫（Coupled Model Intercomparison Project, CMIP）第六階段（簡稱 CMIP6）資料，著手進行統計降尺度至臺灣 0.05 度經緯度網格解析度，稱為 TCCIP AR6 統計降尺度日資料，此資料已於 2023 年 1 月釋岀下載，提供我國各界之氣候變遷風險評估使用。新的氣候變遷情境資料，因為情境設定的不同，氣候模式模擬技術的精進，以及統計降尺度方

式的精進，對於未來可能會有不同的評估結果。為了解 TCCIP 所釋出最新的 AR6 統計降尺度日資料所呈現未來氣候變遷對水資源供水之衝擊，本研究乃使用 TCCIP AR6 統計降尺度日資料，探討全臺供水相關集水區在氣候變遷影響下之衝擊。

氣候變遷情境資料

IPCC AR6 中所使用之未來氣候變遷情境，乃延伸 IPCC 第五次評估報告 (The 5th Assessment Report, 簡稱 AR5) [2] 使用之代表濃度途徑 (Representative Concentration Pathways, 簡稱 RCPs) [3], 再結合「共享社會經濟路徑」(Shared Socioeconomic Pathways, 簡稱 SSPs) [4] 來代表與反應未來可能的溫室氣體排放情境。RCPs 主要表示溫室氣體或氣膠的排放量濃度及土地利用變遷等條件，並且以世紀末 2100 年的輻射強迫力 (Radiative Forcing, 單位: W/m^2) 來區分不同途徑變化，分別為 RCP2.6、RCP4.5、RCP6.0 及 RCP8.5，AR6 以此為基礎再增加 RCP1.9、RCP3.4 及 RCP7.0 三種情境；SSPs 分五種不同社經發展情境，代表全球或社會經濟發展程度及人類社會發展，如人口、教育或能源利用等發展情境。SSP1 為永續發展的理想情境，SSP2 為與歷史發展相似的中間路線，SSP3 與 SSP4 分別代表區域競爭及不平等發展，皆強調高挑戰性的調適，SSP5 則為高度仰賴化石燃料的高發展、高排放情境。將上述兩者結合來呈現不同之排放路徑 (即為 SSPs-RCPs)，AR6 中常用之情境為 SSP1-2.6 (永續)、SSP2-4.5 (中間路線)、SSP3-7.0 (區域競爭)、SSP5-8.5 (石化燃料發展)。

我們使用的氣候變遷情境資料，則是利用全球環流模式 (General Circulation Models, 簡稱 GCMs) 以及地球系統模式 (Earth System Models, 簡稱 ESMs) [4], 代入各種氣候情境所代表的溫室氣體排放濃度變化所模擬出來的氣候資料。

臺灣面積狹小且地形複雜，全球尺度的空間解析度太低 (網格邊長約為數十至數百公里)，無法反映臺灣東南西北各流域之氣候空間差異與變化，須以統計降尺度或動力降尺度方式將全球尺度 GCMs 或 ESMs 的資料轉換為較高解析度之資料。臺灣氣候變遷降尺度的資料，主要是由 TCCIP 計畫在國科會的支持下產

製，並於臺灣氣候變遷整合服務平台 (<https://tccip.ncdr.nat.gov.tw/>) 提供資料下載服務，以最新的 AR6 統計降尺度日資料而言，空間解析度為 0.05 經緯度之網格，資料分為歷史基期段 (1960 ~ 2014 年) 的降尺度資料以及未來推估段 (2015 ~ 2100 年) 的降尺度資料。

統計降尺度方法採用先調整降雨門檻值來修正每月降雨機率，再進行偏差修正的兩階段偏差修正方式 [5,6]。利用歷史模擬段的資料推估修正降雨門檻值，未來推估段的資料則應用基期資料之修正降雨門檻值分出降雨日資料來進行偏差修正。此外，AR5 統計降尺度日資料使用分位數映射法 (Quantile Mapping, 簡稱 QM) [7-10]，而 AR6 統計降尺度日資料則使用分位數增量映射法 (Quantile Delta Mapping, 簡稱 QDM) [11] 進行降尺度進行偏差校正，可以減少累積分布函數 (Cumulative Distribution Function, 簡稱 CDF) 因外插造成之降雨過度放大的現象，更能保留模式原始的推估變化 [12]。

全球暖化程度

IPCC AR6 報告中使用了全球暖化程度 (Global Warming Levels, 後面簡稱 GWLs) [13] 之方式，去探討未來不同暖化程度下的衝擊。GWLs 定義為全球表面溫度相對於 1850 ~ 1900 年平均值增加 1.5°C 或 2°C 等，因此是獨立於特定情境或時間段來整合氣候資訊的有用方法 [13]。應用 GWLs 來評估未來氣候變遷衝擊的方法，乃根據多重模式的平均結果，並非以不同排放情境的方式來描述可能的氣候變化，而是提供全球均溫上升到某個程度來進行評估，故 GWLs 涵蓋多種排放路徑 (SSPs-RCPs) 之結果。各情境下之各模式達到設定之 GWL 的時間並不相同，圖 1 乃利用每個情境中所有模式的全球平均溫度資料，再以 20 年移動平均繪製而成，隨著時間變化的曲線與淺色帶狀範圍代表著各情境中所有模式的平均以及 5% ~ 95% 的範圍。以 SSP1-2.6 情境而言，暖化程度有達到 GWL2°C 的共有 11 個模式，TaiESM 為其中之一，該模式於 2040 年到達 GWL2°C，評估應用上會取前後共 20 年資料進行評估，也就是 2041 ~ 2060 年的資料來代表該模式的 GWL2°C 的結果 (如圖 1 右圖所示)。每個模式到達 GWL2°C 並不相同，因此使用的時間段並不相同。應用上，為了評估不同 GWLs 相對於「現況」的衝

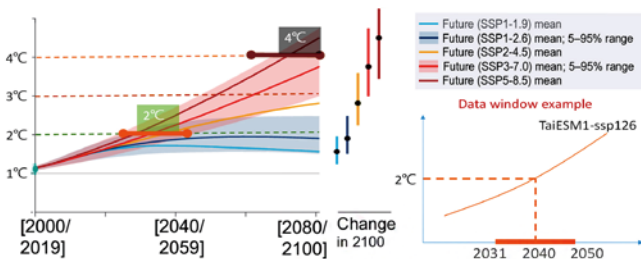


圖 1 GWL2°C 及 GWL4°C 情境示意圖

(取自 IPCC, 2021: Summary for Policymakers. Figure SPM.8^[1], 本研究再製)

擊程度，代表現況的資料段則使用基期段最接近現況的 20 年時間，1995 ~ 2014 年來進行衝擊評估的比較基準。本研究參考 IPCC 在 AR6 報告中之建議，採用 GWL2°C 所有暖化情境共計 86 個模式及 GWL4°C 所有暖化情境共 26 個模式^[12]，評估未來不同暖化程度下的水資源衝擊。

供水相關集水區與測站

為探討氣候變遷對於未來氣候與水文之影響，及其面對各季節降雨變化影響下對於集水區水量之衝擊，乃以水資源北、中、南及東四分區之供水集水區為分析對象，挑選主要集水區之供水取水點為控制點，並以鄰近流量站為參考測站，以北部地區主要供水之一的大漢溪為例，其主要控制點為石門水庫及支流三峽河取水點，所對應之流量模擬參考測站則為石門水庫以及三峽流量站；而基隆河主要供水為基隆河川流水及離槽水庫新山水庫，故選擇介壽橋為控制點代表基隆河之流量。為模擬供水相關的集水區流量變化，乃以控制點為集水區出流端，界定出跟供水相關之集水區範圍，如圖 2 以曾文水庫為例，控制點為曾

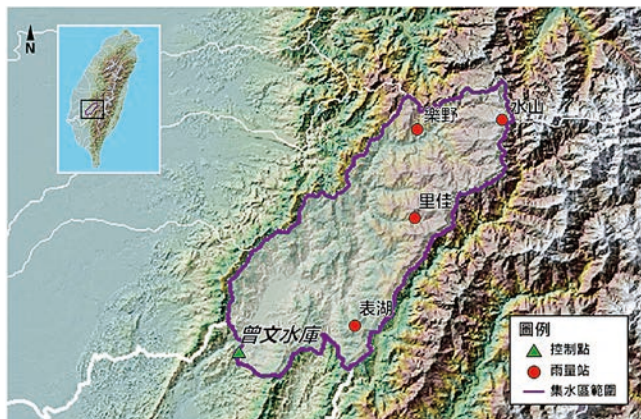


圖 2 集水區挑選及雨量站選用以曾文溪為例
(本研究自製)

文水庫，而供水相關的集水區範圍為曾文水庫集水區，評估上會使用集水區範圍內觀測紀錄大於 20 年之測站，因此，便設定表湖、里佳、樂野、水山等 4 個測站為評估點，而統計降尺度日資料則挑選這 4 個測站所座落的網格點資料進行評估，再以徐昇式法進行空間加權平均，作為整個集水區的降雨量進行評估以及流量模擬，流量模擬則使用 GWLF (Generalized Watershed Loading Function) 模式^[14,15]，全臺集水區及測站如表 1 所示。

分析方法

為探討氣候變遷對未來水資源的衝擊，本研究以未來相對於現況的水文量改變率作為水資源的衝擊評估指標，如年雨量、平均最大連續不降雨日數的改變率，以及春季 (2 ~ 4 月)、梅雨季 (5 ~ 6 月)、颱風季 (7 ~ 9 月)、秋季 (10 ~ 11 月) 及冬季 (12 ~ 1 月) 等五個降雨季節^[16]的降雨改變率，並選擇對應五個降雨季節之流量改變率進行評估。

各項指標計算以改變率 (%) 方式呈現，意指未來相對於基期之變化程度，用以呈現不同情境下未來氣候變遷下水文之變化。未來氣候資料使用 GWL2°C 及 GWL4°C 各 GCMs 或 ESMs 所對應的 20 年資料，並以 1985 ~ 2014 年各 GCMs 或 ESMs 模擬的 20 年資料作為基期，指標的方程式表示如下：

$$f(\text{index}_x) = x_{GWLs} / x_{base} \quad (1)$$

其中，

index_x ：指標之改變率 (%)， x 表示對應之類別如年總降雨量、春季降雨量、梅雨季降雨量、...、秋季流量或冬季流量等。

x_{GWLs} ：不同類別指標於不同 GWL 情境之數值

x_{base} ：不同類別指標基期之數值

GWL2°C 共有 86 個模式及 GWL4°C 共 26 個模式，所有模式的結果並不相同，原因在於氣候變遷模式的不確定性以及情境的不確定性。這些不確定性可以箱形圖方式來呈現，本研究為了以空間分佈圖呈現全臺水資源相關集水區之衝擊評估之結果，乃以中位數對應的結果來繪圖。

表 1 供水區域相關之集水區及採用之控制點及測站

分區	流域	集水區	控制點對應流量站	雨量站
北	基隆河	基隆河	介壽橋(1)	瑞芳(2)
	新店溪	北勢溪	翡翠水庫	坪林(4)、碧湖
		南勢溪	南勢溪	大桶山、福山(3)
	大漢溪	大漢溪	石門水庫	石門(3)、石門、巴陵、高義、嘎拉賀、長興、霞雲、三光、鞍部、秀巒、玉峰、白石、鎮西堡
		三峽河	三峽(2)	三峽、大豹
	頭前溪	油羅溪	內灣	梅花、鳥嘴山
		上坪溪	上坪	大關南、清泉
	蘭陽溪	羅東溪	羅東堰	新北城
	雙溪	雙溪	雙溪	坪林(4)、碧湖、瑞芳(2)
	中	中港溪	中港溪	田美攔河堰
後龍溪		老田寮溪	明德水庫	和興
		後龍溪	打鹿坑堰	大湖(1)
大安溪		大安溪	士林堰	象鼻(1)、松安
		雪山坑溪	雪山坑溪	雪嶺
		景山溪	鯉魚潭水庫	卓蘭(2)
大甲溪		大甲溪	石岡壩	八仙山(1)
烏溪		大里溪	溪南橋	頭汫坑
		北港溪	南北通橋	清流(1)、惠蓀(2)、翠巒、翠峰
		南港溪	觀音橋	北山(2)
		貓羅溪	南崗大橋	六分寮
濁水溪		濁水溪	集集攔河堰	玉山、日月潭、集集(2)、西巒、內茅埔(2)、望鄉、東埔
		清水溪	桶頭堰	阿里山、桶頭(2)、草嶺(2)
南	曾文溪	曾文溪	曾文水庫	里佳、水山、樂野、表湖
		後堀溪	南化水庫	關山
	四重溪	四重溪	牡丹水庫	牡丹
	八掌溪	八掌溪	觸口	小公田(2)、大湖山
	高屏溪	高屏溪	高屏堰	甲仙(2)、美濃(2)、古夏、新瑪家、三地門、梅山(2)、天池
		旗山溪	阿其巴橋	梅山(2)、天池
東	和平溪	大濁水溪	南溪壩	大濁水
	花蓮溪	馬鞍溪	馬鞍溪橋	馬太安
		豐坪溪	立山	苗圃
	秀姑巒溪	樂樂溪	卓樂橋	卓麓(4)
		富源溪	馬遠橋	大坪
	卑南溪	新武呂溪	新武呂(4)	霧鹿、向陽(2)
		卑南溪	臺東大橋	武陵、上里
	利嘉溪	利嘉溪	利嘉(2)	南鶴
	知本溪	知本溪	知本(3)	知本(5)

結果與討論

本研究以所有模式結果的中位數來呈現氣候變遷下全臺水資源衝擊評估指標之空間分佈與差異，結果如表 2~表 5 所示。說明如下：

年雨量與平均最大連續不降雨日數變化率

未來全臺水資源相關集水區之年降雨量為增加的趨勢，當達到全球暖化程度 2°C 時，增加趨勢不超過 5%，尚不明顯。當達到全球暖化程度 GWL4°C 時，增加趨勢較為明顯，如表 2、表 3、圖 3 所示。這樣的結果顯示未來氣候變遷對於水資源似乎是樂觀的結果，

其實不然。從平均最大連續不降雨日數評估的結果可以知道，未來最大連續不降雨日數為增加趨勢，全球暖化程度達到 GWL4°C 相較於 GWL2°C 有更明顯的增加趨勢，如圖 4 所示。綜合兩個評估指標的結果可以得知，未來氣候變遷影響下，雖然總降雨是增加的，但最大連續不降雨日數也是增加，顯示乾旱發生的機率與程度會增加，降雨呈現極端化趨勢。

各季節之降雨改變率

如表 2、表 3 與圖 5 所示，全球暖化程度 GWL2°C 時，春季及梅雨季的降雨一致為減少趨勢，颱風季為增加趨勢，而秋季及冬季則互有增減，其中秋季之大

表 2 全臺水資源相關集水區於全球暖化程度 GWL2°C 之降雨評估指標改變率

分區	集水區	指標改變率 (%)	年雨量	平均最大連續不降雨日數	春季降雨 (2~4月)	梅雨季降雨 (5~6月)	颱風季降雨 (7~9月)	秋季降雨 (10~11月)	冬季降雨 (12~1月)
北	基隆河	1.0	1.0	1.0	-3.0	-1.5	6.5	2.0	-2.0
	新店溪	1.5	0.0	0.0	-4.5	-1.0	6.0	2.0	-4.0
	大漢溪	1.0	4.5	4.5	-3.5	-3.0	6.0	-1.0	-2.0
	頭前溪	1.0	3.5	3.5	-3.0	-3.5	7.0	0.0	-1.5
	蘭陽溪	3.0	0.0	0.0	-3.5	-0.5	4.0	4.0	-5.5
	雙溪	1.0	0.5	0.5	-3.0	-1.5	6.0	2.0	-2.5
中	中港溪	1.0	6.5	6.5	-3.0	-1.0	7.0	-6.5	-2.0
	後龍溪	2.0	5.5	5.5	-3.0	-2.0	6.5	-9.5	-4.0
	大安溪	1.0	4.5	4.5	-3.5	-3.0	6.5	-2.5	-2.0
	大甲溪	1.0	4.5	4.5	-2.0	-2.5	6.0	-11.0	0.0
	烏溪	0.0	3.5	3.5	-1.5	-2.0	7.0	-7.5	-0.5
南	濁水溪	0.5	5.0	5.0	-3.0	-4.0	5.5	-9.0	2.0
	八掌溪	0.0	4.0	4.0	-2.5	-6.0	5.5	-17.5	1.0
	曾文溪	0.0	4.0	4.0	-4.0	-3.5	4.5	-10.5	1.0
	高屏溪	0.5	11.0	11.0	-3.0	-2.0	4.0	-9.5	3.5
	四重溪	1.5	11.5	11.5	-3.0	1.5	3.0	-3.0	-1.5
東	和平溪	1.5	4.0	4.0	-6.0	-4.0	4.0	7.0	-4.0
	花蓮溪	1.0	5.5	5.5	-5.0	-1.5	4.5	0.5	-3.0
	秀姑巒溪	2.0	6.5	6.5	-5.0	-3.0	5.0	0.0	-5.0
	卑南溪	2.0	7.0	7.0	-2.0	-1.5	4.0	-4.0	-0.5
	利嘉溪	2.0	8.0	8.0	-3.0	-0.5	4.5	-3.0	-4.5
	知本溪	2.0	9.0	9.0	-3.0	1.0	4.0	-1.5	-6.5

表 3 全臺水資源相關集水區於全球暖化程度 GWL4°C 之降雨評估指標改變率

分區	集水區	指標改變率 (%)	年雨量	平均最大連續不降雨日數	春季降雨 (2~4月)	梅雨季降雨 (5~6月)	颱風季降雨 (7~9月)	秋季降雨 (10~11月)	冬季降雨 (12~1月)
北	基隆河	2.0	7.5	7.5	-3.0	7.5	19.5	-2.0	-8.5
	新店溪	3.0	7.0	7.0	-5.5	3.0	15.5	-1.0	-12.0
	大漢溪	10.0	17.5	17.5	-5.0	4.0	16.0	-3.0	-5.0
	頭前溪	12.5	13.0	13.0	-2.5	5.0	24.5	-2.0	-2.5
	蘭陽溪	4.0	6.0	6.0	-5.0	2.5	13.5	0.5	-11.5
	雙溪	2.0	7.0	7.0	-3.0	7.5	19.0	-2.0	-9.5
中	中港溪	12.0	13.5	13.5	-3.5	10.0	23.5	-11.5	-3.0
	後龍溪	13.0	13.5	13.5	-4.0	10.5	21.5	-9.5	-4.0
	大安溪	10.5	15.5	15.5	-4.0	6.0	20.5	-3.5	-2.5
	大甲溪	10.0	12.0	12.0	-2.0	5.5	20.5	-12.0	-3.5
	烏溪	9.5	12.0	12.0	-2.0	2.0	20.5	-9.0	-1.5
南	濁水溪	15.0	21.0	21.0	-5.0	2.5	22.0	-3.0	-2.5
	八掌溪	15.5	18.5	18.5	-2.5	1.5	23.5	-4.5	1.5
	曾文溪	13.0	17.0	17.0	-4.5	3.5	23.0	-7.0	-1.0
	高屏溪	14.0	21.5	21.5	-6.0	6.0	22.5	-10.0	0.0
	四重溪	15.0	27.0	27.0	-16.0	2.5	20.0	2.5	-6.5
東	和平溪	4.5	9.5	9.5	-8.0	-1.0	13.0	6.0	-9.0
	花蓮溪	12.0	13.0	13.0	-6.0	0.5	20.5	-4.0	-11.0
	秀姑巒溪	15.0	14.5	14.5	-4.5	-0.5	22.5	0.0	-11.5
	卑南溪	18.5	18.0	18.0	-7.5	6.0	25.5	-5.5	-3.0
	利嘉溪	19.0	17.5	17.5	-7.5	6.5	25.5	-1.5	-7.5
	知本溪	18.5	20.0	20.0	-8.0	7.5	25.0	-1.5	-9.5

表 4 全臺水資源相關集水區於全球暖化程度 GWL2°C 之流量評估指標改變率

分區	集水區	指標改變率 (%)	春季流量 (2~4月)	梅雨季流量 (5~6月)	颱風季流量 (7~9月)	秋季流量 (10~11月)	冬季流量 (12~1月)
北	基隆河		-4.5	-6.0	10.0	-0.5	-3.5
	新店溪		-6.0	-8.5	8.0	0.0	-5.0
	大漢溪		-7.5	-9.5	5.0	-3.5	0.0
	頭前溪		-6.0	-12.0	5.5	1.5	2.5
	蘭陽溪		-6.0	-8.5	12.5	0.5	-6.0
	雙溪		-5.5	-6.5	10.5	-1.0	-4.0
中	中港溪		-5.5	-6.0	3.5	-7.5	-0.5
	後龍溪		-5.0	-8.5	6.5	-5.5	6.5
	大安溪		-5.0	-8.0	5.5	-3.0	1.0
	大甲溪		-6.0	-6.5	7.0	-13.0	5.0
	烏溪		-4.5	-9.0	5.0	-2.5	8.5
南	濁水溪		-8.0	-7.5	3.0	-4.5	9.5
	八掌溪		3.0	-10.0	3.0	-3.0	3.0
	曾文溪		-2.5	-8.0	2.5	-0.5	4.5
	高屏溪		6.5	-6.5	3.0	-1.5	19.0
	四重溪		5.5	0.5	3.0	-1.0	2.5
東	和平溪		-8.0	-12.5	4.0	4.0	-1.0
	花蓮溪		-12.0	-10.0	5.0	-4.0	-7.0
	秀姑巒溪		-5.0	-12.0	6.0	-1.0	-4.5
	卑南溪		3.0	-4.0	3.5	-4.5	-2.0
	利嘉溪		10.0	-2.5	4.0	-5.5	4.0
	知本溪		11.0	1.0	4.5	-5.0	1.0

表 5 全臺水資源相關集水區於全球暖化程度 GWL4°C 之流量評估指標改變率

分區	集水區	指標改變率 (%)	春季流量 (2~4月)	梅雨季流量 (5~6月)	颱風季流量 (7~9月)	秋季流量 (10~11月)	冬季流量 (12~1月)
北	基隆河		-9.5	-0.5	30.5	-6.0	-11.5
	新店溪		-16.5	-8.5	19.0	-5.5	-12.5
	大漢溪		-16.5	-5.0	18.5	-5.0	-6.5
	頭前溪		-13.5	-3.0	27.5	0.0	-1.5
	蘭陽溪		-19.0	-0.5	25.5	-3.5	-12.0
	雙溪		-10.5	-2.0	29.0	-7.0	-12.5
中	中港溪		-15.0	4.5	32.5	-6.5	5.0
	後龍溪		-16.0	0.5	28.0	8.0	18.5
	大安溪		-14.5	-0.5	21.5	-4.0	1.0
	大甲溪		-13.0	1.5	23.5	-25.5	4.0
	烏溪		-12.0	-4.0	18.0	3.0	3.0
南	濁水溪		-14.5	2.0	23.5	2.5	11.0
	八掌溪		-8.0	4.5	25.5	11.5	7.0
	曾文溪		-15.0	0.0	24.0	4.0	11.5
	高屏溪		-15.5	5.0	24.0	-2.5	30.0
	四重溪		-22.0	5.5	27.5	8.0	1.5
東	和平溪		-21.0	-0.5	17.5	6.0	-6.0
	花蓮溪		-29.0	-8.0	26.0	-4.0	-17.0
	秀姑巒溪		-19.0	0.0	32.0	9.0	-11.5
	卑南溪		-5.0	17.5	37.5	2.0	-3.0
	利嘉溪		-12.5	12.5	35.0	1.0	2.5
	知本溪		-12.5	15.0	32.0	-0.5	-12.5

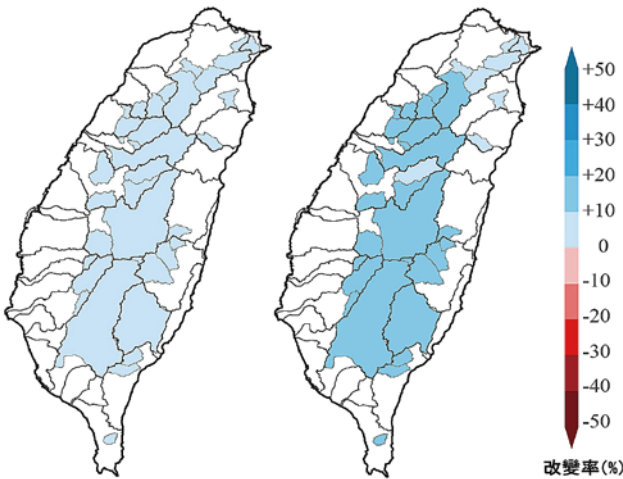


圖 3 全臺水資源相關集水區平均年雨量於全球暖化程度 GWL2°C (左圖) 及 GWL4°C (右圖) 之改變率分布圖

甲溪、八掌溪、曾文溪減少趨勢較為明顯 (10% 以上)。而全球暖化程度達到 GWL4°C 時，原本梅雨季轉為增加趨勢，但趨勢並不明顯。颱風季則有明顯增加趨勢，春雨季、秋季及冬季之訊號則普遍顯示為明顯之減少趨勢，此結果再對應前項年雨量增加的分析結果，可知未來年雨量增加的主要集中於颱風季，對於水資源而言，增加的雨量可能難以增加可利用的水資源量，同時增加水資源操作與管理之困難。整體而言，秋季、冬季、到春季的雨量減少，將增加水資源乾旱風險，以臺灣歷史的乾旱事件來看，當秋季跟冬季雨量不樂觀時，就會連帶影響隔年春季的水稻耕種需求，加上春季的雨量減少，如果乾旱管理與調配不當，將會增加乾旱所造成的損失。

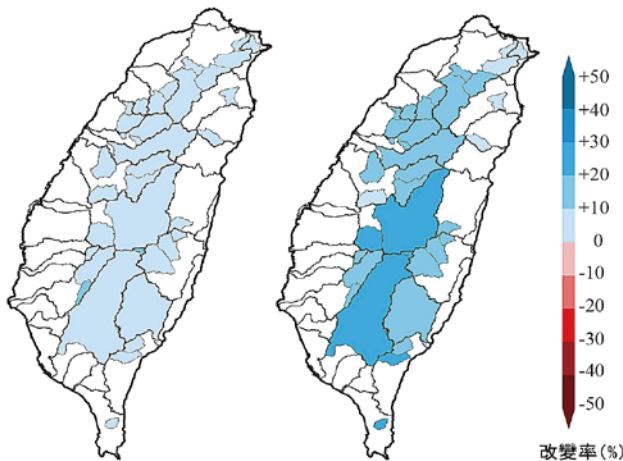


圖 4 全臺水資源相關集水區最大連續不降雨日數於全球暖化程度 GWL2°C (左圖) 及 GWL4°C (右圖) 之改變率分布圖

各季節之流量改變率

未來水資源相關集水區的流量在全球暖化程度達到 GWL2°C 時，如表 4 及圖 6 所示，春季除了八掌溪、高屏溪、四重溪、卑南溪、利嘉溪及知本溪流域之外，均為減少趨勢，其中又以花蓮溪減少趨勢較為明顯 (12%)；梅雨季除了四重溪跟知本溪之外，其餘皆為減少趨勢，其中又以頭前溪、八掌溪、和平溪、花蓮溪、秀姑巒溪、減少趨勢較為明顯 (10% 以上)，綜合春季以及梅雨季之流量變化趨勢，花蓮溪在這兩季減少趨勢最為明顯。全臺水資源相關集水區在颱風季之流量為增加趨勢；秋季之變化趨勢多為減少趨勢，

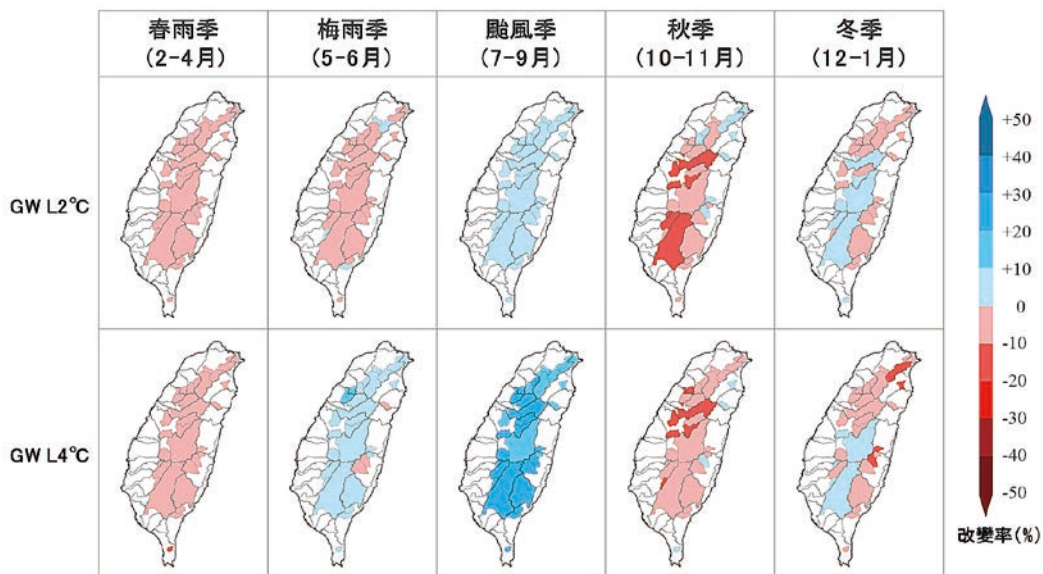


圖 5 全臺水資源相關集水區各季節降雨於全球暖化程度 GWL2°C 及 GWL4°C 之改變率分布圖

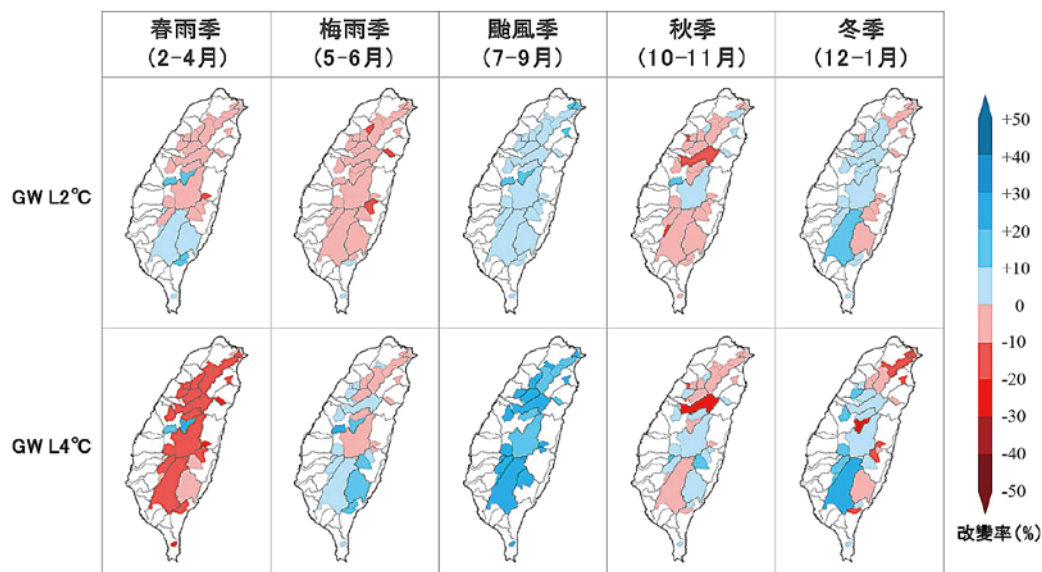


圖 6 全臺水資源相關集水區各季節流量於全球暖化程度 GWL2°C 及 GWL4°C 之改變率分布圖

整體而言，北部變化趨勢不明顯，中部則有明顯減少趨勢，尤其是大甲溪，南部變化趨勢雖不明顯，但均為減少趨勢，東部除了和平溪之外，皆為減少趨勢；冬季集水區流量變化趨勢多數為增加，整體而言，北部變化不明顯，集水區流量有增有減，中部多數為增加趨勢，南部皆為增加趨勢，尤以高屏溪增加較多，東部集水區變化趨勢則各有增減，利嘉溪與知本溪為增加趨勢，其餘為減少趨勢。

當全球暖化程度達到 GWL4°C 時，如表 5 及圖 6 所示，全臺水資源相關集水區春季流量明顯減少，梅雨季則變為互有增減，颱風季大致上為明顯增加，秋季維持互有增減但大甲溪為明顯減少，冬季流量變化有增有減，但曾文溪、高屏溪為明顯增加。

結論與建議

本研究以最新之 IPCC AR6 統計降尺度日資料應用於全臺水資源相關集水區之降雨及流量分析，探討 IPCC 最新情境下，臺灣水資源可能之衝擊。IPCC AR6 報告中，使用了全球暖化程度 -GWLs 探討未來不同的暖化程度下對於不同領域、不同地區之衝擊，本研究亦使用全球暖化程度 -GWLs 進行分析，並以 GWL2°C 及 GWL4°C 分析臺灣水資源未來在不同的暖化程度下之衝擊。整體分析結果可綜合歸納以下幾點：

1. 未來全球暖化不同程度下的年雨量均為增加趨

勢，但增加雨量多數集中於颱風季（7~9月），因此增加的雨量並非有利於水資源，颱風季雨量及流量的增加，反而增加水資源操作與管理之困難，亦增加高濁度造成缺水之風險。

2. 整體而言，全球暖化程度 GWL2°C 及 GWL4°C 兩者變化趨勢大致相同，但 GWL2°C 多數集水區評估指標變化趨勢較不明顯，不確定性較高，但 GWL4°C 結果則有明顯趨勢，顯示全球暖化對於臺灣水資源之衝擊與影響為負面的趨勢。
3. 研究結果顯示，無論是全球暖化程度 GWL2°C 或是 GWL4°C，未來多數集水區在春季為減少的趨勢，臺灣歷史上的幾次乾旱事件，春季降雨的減少為主要影響關鍵，因此未來可能因為春季雨量的減少，增加水資源乾旱的風險。
4. 全臺水資源相關集水區最大連續不降雨日數在未來為增加趨勢，此結果也顯示未來發生乾旱之程度會加劇，頻率可能增加。
5. 本研究利用最新的 AR6 統計降尺度日資料進行水資源衝擊評估，整體趨勢與過去臺灣氣候變遷水資源衝擊評估研究結果之趨勢大致接近，氣候變遷對於臺灣水資源衝擊的定性描述仍舊是「豐越豐，枯越枯」，也就是豐水期雨量與流量增加，枯水期雨量與流量減少的未來趨勢。
6. 本研究以指標分析方式評估氣候變遷對於臺灣水資源之衝擊，並以中位數呈現全臺水資源相關集

水區衝擊評估指標之空間分佈，僅能呈現未來衝擊的趨勢與程度，水資源缺水風險與水資源系統之供水能力以及需水量有關，水資源衝擊增加，並非直接代表水資源缺水風險增加。供水系統之缺水風險是否增加，仍須進一步進行水資源缺水風險模擬，並考慮氣候變遷不確定性才能評估。

參考文獻

1. IPCC, (2021), Summary for Policymakers. In: *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (eds.)]. In Press.
2. IPCC, (2013), *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1535 pp.
3. Cubasch, U., D. Wuebbles, D. Chen, M.C. Facchini, D. Frame, N. Mahowald, and J.-G. Winther, (2013), Introduction. In: *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
4. Chen, D., M. Rojas, B.H. Samset, K. Cobb, A. Diongue Niang, P. Edwards, S. Emori, S.H. Faria, E. Hawkins, P. Hope, P. Huybrechts, M. Meinshausen, S.K. Mustafa, G.-K. Plattner, and A.-M. Tréguier, (2021), Framing, Context, and Methods. In *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*[Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 147-286, doi:10.1017/9781009157896.003.
5. 劉子明、鄧澤宇、鄭克聲 (2022 年)，水資源領域應用統計降尺度日資料之轉換研究。臺灣氣候變遷推估資訊與調適知識平台電子報，第 60 期。
6. Teng, T.-Y., Liu, T.-M., Tung, Y.-S., and Cheng, K.-S. (2021), "Converting Climate Change Gridded Daily Rainfall to Station Daily Rainfall—A Case Study at Zengwen Reservoir", *Water* 13, No. 11: 1516. <https://doi.org/10.3390/w13111516>
7. 王俊寓，林士堯 (民 111 年 7 月 25 日)，AR5 統計降尺度資料說明文件 (2.2 版)，[Jan.5, 2023] 取自臺灣氣候變遷推估資訊與調適知識平台 https://tccip.ncdr.nat.gov.tw/upload/data_document/20200219113149.pdf
8. Gobiet, A., Suklitsch, M., and Heinrich, G. (2015), The effect of empirical-statistical correction of intensity-dependent model errors on the temperature climate change signal, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 19, 4055-4066, <https://doi.org/10.5194/hess-19-4055-2015>
9. Maurer, E.P. (2007), Uncertainty in hydrologic impacts of climate change in the Sierra Nevada, California under two emissions scenarios, *Climatic Change*, 82, <https://doi.org/10.1007/s10584-006-9180-9>.
10. Wood, A.W., E.P. Maurer, A. Kumar, and D.P. Lettenmaier, (2002), Long-range experimental hydrologic forecasting for the eastern United States. *J. Geophysical Research-Atmospheres* 107(D20), 4429.
11. Cannon, A.J., Sobie, S.R., and Murdock, T.Q., (2015), Bias correction of gcm precipitation by quantile mapping: how well do methods preserve changes in quantiles and extremes? *Journal of Climate*, Vol. 28, issue 17, pp. 6938-6959.
12. 林修立、童裕翔、王俊寓、林士堯 (民 112 年 1 月 1 日)，AR6 統計降尺度雨量資料生產履歷 (1.0 版)，[Jan.5, 2023]，取自臺灣氣候變遷推估資訊與調適知識平台 https://tccip.ncdr.nat.gov.tw/upload/data_profile/20220718101540.pdf
13. Arias, P.A., N. Bellouin, E. Coppola, R.G. Jones, G. Krinner, J. Marotzke, V. Naik, M.D. Palmer, G.-K. Plattner, J. Rogelj, M. Rojas, J. Sillmann, T. Storelvmo, P.W. Thorne, B. Trewin, K. Achuta Rao, B. Adhikary, R.P. Allan, K. Armour, G. Bala, R. Barimalala, S. Berger, J.G. Canadell, C. Cassou, A. Cherchi, W. Collins, W.D. Collins, S.L. Connors, S. Corti, F. Cruz, F.J. Dentener, C. Dereczynski, A. Di Luca, A. Diongue Niang, F.J. Doblas-Reyes, A. Dosio, H. Douville, F. Engelbrecht, V. Eyring, E. Fischer, P. Forster, B. Fox-Kemper, J.S. Fuglestedt, J.C. Fyfe, N.P. Gillett, L. Goldfarb, I. Gorodetskaya, J.M. Gutierrez, R. Hamdi, E. Hawkins, H.T. Hewitt, P. Hope, A.S. Islam, C. Jones, D.S. Kaufman, R.E. Kopp, Y. Kosaka, J. Kossin, S. Krakovska, J.-Y. Lee, J. Li, T. Mauritsen, T.K. Maycock, M. Meinshausen, S.-K. Min, P.M.S. Monteiro, T. Ngo-Duc, F. Otto, I. Pinto, A. Pirani, K. Raghavan, R. Ranasinghe, A.C. Ruane, L. Ruiz, J.-B. Sallée, B.H. Samset, S. Sathyendranath, S.I. Seneviratne, A.A. Sörensson, S. Szopa, I. Takayabu, A.-M. Tréguier, B. van den Hurk, R. Vautard, K. von Schuckmann, S. Zaehle, X. Zhang, and K. Zickfeld, (2021), Technical Summary. In *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 33-144. doi: 10.1017/9781009157896.002.
14. 鄧澤宇、劉子明、鄭克聲 (2020)，水資源領域氣候變遷危害與衝擊圖資建製成果，國家災害防救科技中心技術報告。
15. Haith, D.A., Mandel, R., Wu, R.S., GWLF, Generalized Watershed Loading Functions, Version 2.0, User's Manual. Department of Agricultural & Biological Engineering, Cornell University: Ithaca, NY, USA, 1992.
16. 陳昭銘 (2008)，臺灣之自然季節，水利土木科技資訊季刊，42 期。



未來 氣候變遷 條件下之 漁業損失 與 調適措施 成效

陳映彤／黎明工程顧問有限公司 工程師
蕭學勇／國立陽明交通大學土木工程學系 博士候選人
楊尊華／國立陽明交通大學土木工程學系 副教授
鄭兆尊／國家災害防救科技中心 副研究員
張雅琪／工業技術研究院綠能所 研究員

本研究考慮聯合國政府間氣候變化專門委員會（Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC）第五次評估報告（AR5）中未來溫室氣體高度排放的情境（RCP8.5），並使用臺灣氣候變遷推估資訊與調適知識平台計畫（TCCIP）提供之動力降尺度偏差修正時雨量，透過統計分析與動力模擬探討洪災對台灣嘉義沿海地區養殖漁業的損失。本研究以澳洲 TUFLOW 一二維耦合淹水模式，配合 GPU 高速運算能力，模擬不同重現期一日連續降雨下之最大淹水範圍。此外，台灣沿海地區多以農漁業尤其養殖漁業為主要經濟來源，本研究透過現地調查與專家訪談，並參考生物特性後提出一以淹水深度對應魚塭損失之線性災損分析公式，藉此快速將淹水範圍轉以評估漁業經濟損失。接著本研究聚焦在未來氣候變遷環境下，以改善漁業經濟損失為目的量化各項調適措施之具體成效。本研究採用之調適措施包括預佈抽水機、利用閒置地進行在地滯洪，以及考慮沿海養殖魚塭地區低於海平面之特性進行預先降低魚塭水位操作等措施。研究結果顯示若能結合滯洪池及排洪設施之工程措施（structural measure）與預先降低既有養殖魚塭水位蓄洪之非工程措施（nonstructural measure），從減少淹水範圍與降低漁業損失的角度有最大的減災效益。研究結果除了可以作為災前預警應變措施之參考，也期許未來也可做為沿海低地水患防治工作時之工程設計依據，減緩水患對養殖漁民之衝擊。

關鍵詞：動力降尺度、氣候變遷、減災成效、TUFLOW、漁業損失

前言

近年氣候變異，頻繁的天然災害例如洪災與寒害，造成台灣沿海地區人民生活不便與財產嚴重損失。近年天然災害如寒害與洪災則是造成台灣養殖漁業龐大的損失，根據漁業署 2020 年統計，近海養殖漁業年產值約為 270 億新台幣^[1]。以 2018 年 8 月 23 日豪雨事件為例，全台灣降雨累積近 1,000 mm，而嘉義漁業損失全國最高為 4 億 6,000 萬元^[2]。而 2016 年 1 月霸王寒流更

是台灣近十年最強一波寒流，造成全台灣由北到南急凍以外，養殖漁業損失高達 21 億 9,465 萬元^[3]。以台南七股地區為例，寒流期間氣溫為 5~7 度，而魚池水溫為 7~9 度，創下近 10 年最低溫紀錄^[4]。天然災害對養殖漁業除了產值的直接損失，對以養殖賴以維生的漁戶生計更是莫大衝擊。極端天氣肆虐全球已是未來常態，以美國為例，根據 1989~2019 年資料顯示，84.5% 的漁業災害部分或完全歸因於極端天氣事件，而

這樣的結果則是帶來約 50 億美金的經濟損失^[5]。相關研究結果顯示未來短延時強降雨的極端天氣發生頻率只會更加頻繁，連帶而來的洪災損失也將會更大^[6]。

例如 2018 年 8 月 23 日豪雨事件重創嘉義縣東石鄉，除了降雨量太大超過排水設計標準，豪雨適逢大潮，還有該地區的地層下陷，都是淹水久久不能退去的原因^[7]。該事件除了造成嘉義縣人民生活不便以外，養殖漁業損失更是全國之冠。本研究因此選擇該地區為研究區域，並在災後進行現地調查與專家訪談，參考養殖物種特性提出一以淹水深度對應魚塢損失之線性災損分析公式。本研究因此提出結合以非結構性（non-structural）與結構性（structural）調適措施，探討其在未來來氣候變遷條件下之效益，目標在提升我國漁業對極端天氣的調適力，確保我國沿海養殖漁業的可持續性和社會利益，並藉此符合聯合國永續社會及與災害共存的韌性永續發展目標（Sustainable Development Goals, SDGs）^[8]。

文獻回顧

有關沿海低地淹水的方法有許多種討論，Wim Silva *et al.*^[9] 以荷蘭作為研究區，提倡在易淹水區域做淹水管理，其中一項為「在地滯洪」之觀念，調整土地利用之用途，以公園、後院、自然區域類似用途之用地保留為臨時滯洪池。李晉安^[10] 則是以嘉義縣北華村為例，探討包括村落圍堤設置、設置舊五區田旁排水渠道以及抽水站設置等措施對淹水衝擊之影響。研究結果顯示唯有妥善利用該地鹽田之滯洪功能，方能最有效減患淹水。經濟部水利署近年也已積極推廣「在地滯洪」的減洪觀念，利用農地或荒廢土地，透過加高田埂、排水路整理等措施讓洪水有短暫的棲身之所，以空間換取時間，土地利用效率更高、更減省土地徵收及工程施作流程，在不改變用地原有用途，只在需要時轉變為臨時滯洪池^[11]。

若從災前準備與災中應變的角度來看，若能事前掌握不同淹水情境與可能之影響範圍，災害來時就能更有效設置對應之減災避災措施。而透過不同雨量情境與物理模式之模擬，就可有效了解洪水影響之範圍，提前進行應變規劃。許多研究也有透過一維或者二維物理模式進行淹水範圍模擬。例如華道明^[12] 針對台灣中港河流域，採用 WASH123D 模式進行定量降雨和重現期降雨的淹水模擬。鍾婷羽^[13] 則是利用 SOBEK

模式，局部細化考慮建物與街道流效應，納入低衝擊開發設施，探討高雄典寶溪下游市區淹水面積之變化情形。洪水帶來的衝擊，除了人命的威脅以外，最重要的就是經濟的損失。陳元培^[14] 以中港溪及附近流域為研究區域，應用 WASH123D 模式進行重現期的淹水情形模擬，套疊土地利用及不同住宅使用面積，再帶入張齡方^[15]、鄭思蘋^[16] 和 Shaw *et al.*^[17] 提出之淹水損失公式加以分析比較，評估不同工商產業的淹水損失。有別於上述研究針對大規模的工商業損失進行評估。本研究針對養殖漁業因為淹水造成的損失，進行快速推估方法探討與發展。Yang *et al.*^[18] 整合歷史資料與現場調查，提出漁業損失與淹水面積之關係，快速評估漁業損失。該研究中以淹水深度超過 30 公分為閾值，計算事件淹水面積。經濟部水利署^[19] 「淹水損失推估模式精進及暴露量」不考慮水深度變化下之養殖漁業不同損失率，而以當淹水達一定高度後就全損的假設評估魚損（%）。目標希望以不低估養殖漁業損失的目標來設定養殖區淹水高度門檻值，結果淹水閾值設定為高出魚塢鄰近道路之高程 30 公分即造成養殖生物全損（100%）。根據 Queensland Government^[20] 說明一般經濟損失評估的兩個方法為（1）以根據水位與損壞比率的 stage-damage 方法與（2）根據個別物件評估損失後加總為總損失的 unit loss 方法。本研究則採取第一種之 stage-damage 之假設，並配合實地調查法與專家訪談法，建立漁業損失與深度之 stage-damage 曲線，藉此將淹水結果做量化研究，在未來氣候變遷條件下之，評估各個調適策略之具體效益，以提供決策者進行災前準備、災中應變，乃至於災後補償之參考。

淹水模式

本研究採用的 TUFLOW 模式是澳洲 WBM 公司和昆士蘭大學在 1990 年共同開發之洪水模擬軟體。此軟體核心為三種數值引擎（Numerical Engines）分別為 TUFLOW、TUFLOW HPC 以及 TUFLOW FV。TUFLOW 以及 TUFLOW HPC 主要是模擬固定網格（Fixed Grid）的淹水，TUFLOW HPC 則是可以應用圖形處理器（Graphical Processing Units, GPUs）進行高速運算，提升運算效率。兩者皆可設置包括一維渠道及管網水流模型、一維二維耦合洪水及都市淹水模型。適合模擬城市排水、分布式水文直接降雨、集水區淹水、潮汐等情境。TUFLOW FV 則是用於使用三角形及

四邊形網格作為計算結構，可模擬 2D 及 3D 的情境，適用於模擬洪水、潮汐、暴風及海嘯等沿岸水力學。TUFLOW FV 也包括如對流分散、沉積物傳輸模組、水質模擬、泥沙運輸與河床演變模擬等模組可靈活運用其功能，進行更細節之運算與模擬。陳思豪^[21]等相關的研究除了證明 TUFLOW 在淹水模擬之適用性外，也證明其應用 GPU 加速演算之效益可較原本無 GPU 之模式高達 8 倍以上。本研究後續之淹水模擬皆是採用 TUFLOW HPC 搭配 GPU 進行相關情境模擬，以提升運算之效率。

研究區域與模式建置

研究區域

本研究區域位於台灣西南部的嘉義縣東石鄉，區域內地勢平坦且低窪，因為臨海且土壤嚴重鹽化導致許多農地轉而發展養殖漁業以促進地方經濟。養殖魚塢面積不斷擴建，當地居民大量採用地下水作為調節水溫與水質的使用。長年下來的結果造成區域性的大規模地層下陷^[22]，目前下陷率已有趨緩現象，但年平均下陷速率還是有 5 公分/年，本研究區域有 60% 的區域都低於海平面（圖 1）。統計民國 80 ~ 94 年之監測結果，14 年總下陷量在 20 公分以上之區域涵蓋了東石鄉、布袋鎮、朴子市、義竹鄉等，而最主要的下陷中心就是本研究區域東石鄉。本研究使用 6 m × 6 m 數值高程地形資料（DEM）建置二維淹水模型，並蒐集河道及下水道資料建置一維河道模式與一維下水道模式。本研究考慮一維河道、一維排水系統及二維漫地流之交互影響（coupling），進行全區模擬。模式建置範圍以 20180823 豪雨事件衝擊最大的掌潭村為中

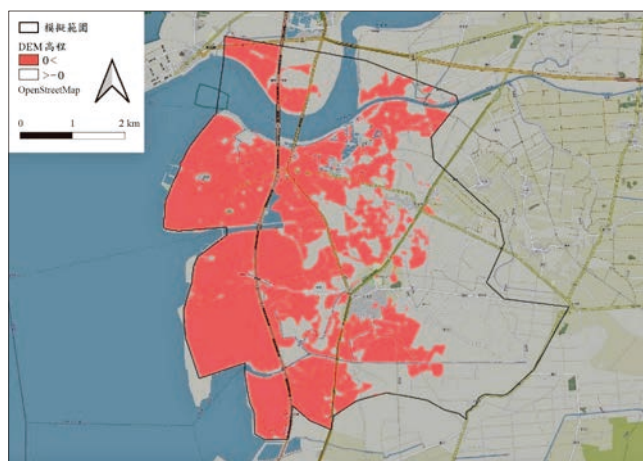


圖 1 研究區域低於海平面範圍圖

心，模擬區域包括栗子崙集水區及考試潭集水區（圖 2），北側為朴子溪，南側為考試潭排水，西側為台灣海峽。掌潭村位於考試潭排水的北邊偏南側，其西南側及西側分別有白水湖第一滯洪池及白水湖第二滯洪池。整個研究區域由西到東約 7.3 公里，由南到北約為 7.5 公里。最主要之排水為松子溝排水，位於研究區域中段，另兩條主要排水幹線為最下方考試潭排水幹線以及研究區域上方之栗子崙排水幹線。

淹水模式結果驗證

本研究淹水模式之驗證以 20180823 事件作為模式驗證之參考。本次事件發生時間為 8/23 12:00 ~ 8/24 22:00 共 35 個小時，模式雨量資料來源為東石雨量站。下游邊界條件則採用東石潮位站。模擬淹水深度與實際觀測值之比較則採用均方根誤差（root mean square error, RMSE）進行分析。實際淹水觀測值來源包括嘉義縣政府災後調查報告、當地居民於水災當下之實錄相片，以及本研究現場調查之結果。最大淹水範圍模擬結果與觀測值之比較如圖 3 與表 1 所示。

本研究模式模擬結果與觀測值平均誤差 RMSE = 0.175 m，模式模擬結果整體有低估的現象。例如編號 9 掌潭村保安宮及編號 12 栗子崙慈靈宮，實際淹水水位與模擬淹水水位分別有 34 cm 與 21 cm 之誤差。推測原因為當時研究區域上游可能透過淹水漫流到下游，但因本研究集水區範圍未能涵蓋所有區域，因此低估地表逕流量，也有可能是本模式排水渠道未設置閘門，從災後訪談中了解真實當時閘門為全數關閉，使內水無法流出。本模式未建置閘門導致內水沿可著排水設施流出集水區。綜整驗證結果與其他單位淹水紀錄之比較，本模式模擬結果與表現仍有一定之參考價



圖 2 模式研究區域

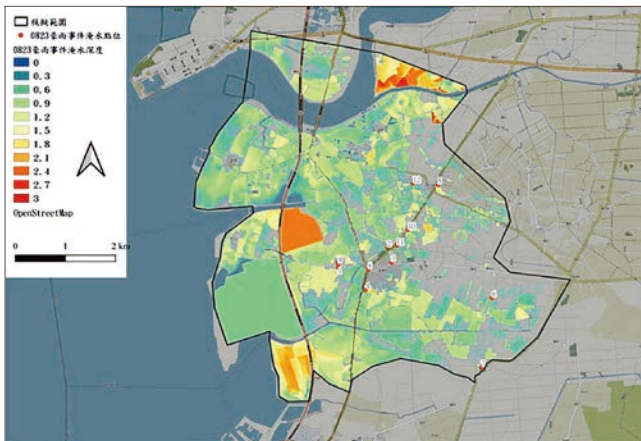


圖 3 研究區域 20180823 最大淹水範圍模擬結果

表 1 模擬結果與淹水觀測值比較

0823 淹水事件				
編號	點位座標	淹水點位敘述	實際調查淹水深度 (m)	最大模擬淹水水深 (m)
1	120.1730,23.4185	活動中心	0.40	0.386
2	120.1823,23.4214	九司伯廟	0.50	0.538
3	120.1832,23.4188	道路積水	0.40	0.355
4	120.1783,23.4138	布袋鎮 150 號	0.60	0.475
5	120.1919,23.4328	東崙村	0.40	0.353
6	120.2022,23.4124	布袋鎮中安里	0.50	0.251
7	120.2003,23.3999	布袋鎮考試里	0.20	0.197
8	120.1787,23.4174	便利商店	0.35	0.313
9	120.1731,23.4185	保安宮	0.80	0.466
10	120.1862,23.4246	錦成機械	0.65	0.503
11	120.1841,23.4218	鴻達	0.50	0.174
12	120.1871,23.4330	慈靈宮	0.80	0.594
RMSE =				0.175

值與代表，因此將繼續用此模式設定來模擬後續不同情境下各個調適策略之效益表現。

漁業水位與損失 (stage-damage) 曲線

過往研究評估漁業損失採取超過 30 cm 淹水深度就全部損失之脈衝函數 [18,19]，而未有將現地不確定性與魚類游動納入考量，因此常有容易有低估損失之結果。本研究提出考慮魚類生活特性及線性損失之水位與損失方程式，探討其與原本脈衝函數 winner takes all 之損失假設結果比較。為減少模式設定之不確定性，本研究假設 (1) 研究區內養殖魚種皆為虱目魚，(2) 不另外考慮水質改變對魚塭造成的損失，(3) 只計算淹水深度造成魚隻流失之損失，並 (4) 以每塊魚塭堤防之高程平均當作該魚池鄰近道路高程平均，並計算各魚池內平均淹水高度作為該魚池之淹水高，後以這兩項數值的差值進行漁塭損失 (淹水高度) 之運算。本研究使用兩種魚塭損失公式，分別為現行漁塭損失公式 [19]、以及線性損失之方式 (圖 4) 進行淹水後養殖漁業損失的估算。

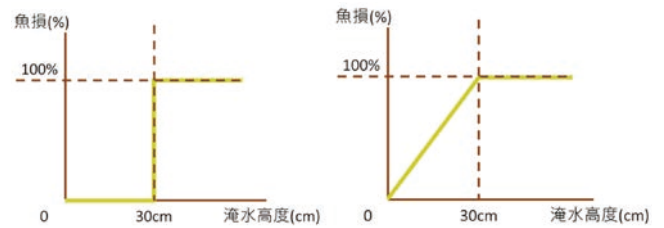


圖 4 漁業損失 (stage-damage) 曲線 (左) 現有脈衝函數 [19] (右) 本研究提出之線性損失函數

結果與討論

氣候變遷雨量水文頻率分析結果分析

水文頻率分析 (Hydrological Frequency Analysis) 主要是將水文資料包括雨量或河川流量等，透過在收集資料期間內的極端值資料 (例如年最大值) 分析，以統計方法分析設計雨量值與重現期間的關係，其分析結果常作為水工結構物設計及規劃之依據。舉例來說方程式 (1) 中的重現期 T (Return Period) 就是定義事件發生機率 (P) 的倒數。若以降雨延時 D (Duration) 1 小時累積雨量 100 mm 的重現期 T 是 100 年，代表發生機率 P 為 1/100 或者是 1%。

$$P = \frac{1}{T} \tag{1}$$

其中 P 為水文特定門檻值 (Threshold) 的發生機率； T 為重現期。為找出某一特門檻值 (Threshold) 對應的重現期或發生機率，頻率因子 (Frequency Factor) [23] 是最常使用的方法，方程式 (2) 為標準頻率分析常用之公式概述。

$$X_T = \bar{x} + K.s \tag{2}$$

其中 X_T 為某一水文門檻值對應之重現期； \bar{x} 為水文資料之平均值； K 為頻率因子； s 則為水文資料之標準偏差。方程式 (2) 中之頻率因子 K 會因為不同的機率分析模式 (Probabilistic Model) 而有所不同。為進行未來氣候變遷雨量之統計分析，本研究採用國家災害防救科技中心 (NCDR) 所提供之 HiRAM 動力降尺度在 RCP8.5 情境下基期 (1980 ~ 2008 年)、世紀中 (2039 ~ 2065 年)、以及世紀末 (2075 ~ 2099 年) 的年最大 1、3、6、12、24、48 小時延時雨量資料 (網格尺寸 5 km × 5 km)，產製在不同重現期之雨量分布以及不同延時定量雨量條件下之降雨機率分布。透過常態機率分布 (Normal)、兩變數 (LN-2) 與三變數 (LN-3) 對數機率分布、皮爾森三型 (P-III)、對數皮爾森三型 (LP-III)，以及極端值 I 型 (EV-I) 六個不同的機率分佈模式，最後以 Kolmogorov-Smirnov (KS)

檢定法來決定最適合之機率分佈模式。分析的方式將按照資料大小排序後之計算之機率分析結果成為理論分析結果 (Analytical Solution) 與統計模式所獲得的結果進行差值 (Maximum Differences, D_n) 比較如方程式 (3) 所示：

$$D_n = \text{abs} (\max (P(x) - P_0(x))) \quad (3)$$

其中 D_n 為最大差值, $P(x)$ 為理論統計分析的結果, $P_0(x)$ 是採用不同統計模式分析的結果。在 KS 檢定法中, 針對不同的信賴區間 (α), 皆有一個可接受的差值 (D_{critical})。也就是說只要差值 (D_n) 比 D_{critical} 小, 表示該統計模式通過 KS 檢定。本研究以 5-yr、10-yr、25-yr、50-yr、100-yr、200-yr 五個重現期分別計算對應不同延時的雨量強度。表 2 到表 4 為一小時雨量強度在基期、世紀中, 及世紀末的結果。結果顯示所有的模擬結果都可以符合 KS 檢定, 但若以最小平均差距 D_n 來評估, 則在基期與世紀中兩個情境中對數皮爾森三型 (LP-III) 9% 表現最好, 而在世紀末的結果中, 雖然與對數皮爾森三型 (LP-III) 結果差距不大, 但表現最好的模式則為三參數對數分布 (LN-3) 模式 7.32% 為最佳。

依據所有檢定結果, 六個統計模式皆通過信賴區間

$\alpha = 95\%$ 的 KS 檢定。但若將所有分析年份的最大雨量值進行比較, 發現對數皮爾森三型 (LP-III) 在台灣本島大部分的網格上有較多最小 D_n 差值的表現 (圖 5), 因此本研究判定對數皮爾森三型 (LP-III) 有較好的模擬結果, 因此後續的淹水模式所需之雨量條件, 皆採用對數皮爾森三型 (LP-III) 模式進行後續重現期雨量結果產製。

氣候變遷條件下不同調適策略對淹水風險的影響

本研究設置了三種調適策略 (S1、S2、S3) 以及現況 (S0) 共四種, 在 NCDR 之未來氣候變遷雨量資料下推估 10-yr、50-yr、100-yr、200-yr 等重現期下各個調適策略之效益與現況結果比較。有關各個調適策略簡述如下, S0 情境為 baseline 條件也就是現況, S1 情境為參考經濟部水利署在 20180823 豪雨事件, 設置對應的抽水機型式、擺設位置以及滯洪池周圍之固定式抽水站。S2 情境則參考低衝擊開發之思維, 希望在地臨時滯洪可達到減洪的效果。本研究中臨時滯洪池之面積則參考嘉義縣政府 2018 年統計休養魚池與總養殖面積之比例為 0.015, 以研究區域之漁業養殖面積為總養殖面

表 2 基期統計模式結果比較

Return Period (Years)	Probability Distributions					
	Normal	LN-2	LN-3	P-III	LP-III	EV-1
5	71.89	67.43	72.30	71.17	70.64	68.82
10	82.95	82.87	85.05	83.87	87.45	83.53
25	94.75	103.25	99.56	98.27	108.64	102.12
50	102.37	119.01	109.46	108.04	124.27	115.91
100	109.22	135.23	118.74	117.16	139.71	129.60
200	115.49	152.00	127.55	125.78	155.04	143.23
D_n (%)	9.849	13.356	10.581	9.402	8.988	11.474
D_{critical} (%)	24.60					

表 3 世紀中統計模式結果比較

Return Period (Years)	Probability Distributions					
	Normal	LN-2	LN-3	P-III	LP-III	EV-1
5	91.06	80.07	91.75	87.13	83.32	86.19
10	108.60	105.48	115.78	110.96	112.47	109.52
25	127.30	141.52	145.78	140.03	154.00	138.99
50	139.38	171.11	167.93	160.87	188.09	160.86
100	150.25	202.97	189.94	181.03	224.70	182.56
200	160.20	237.31	211.99	200.68	263.97	204.19
D_n (%)	18.372	11.607	17.313	12.269	9.092	13.547
D_{critical} (%)	25.50					

表 4 世紀末統計模式結果比較

Return Period (Years)	Probability Distributions					
	Normal	LN-2	LN-3	P-III	LP-III	EV-1
5	91.60	87.98	92.11	89.22	91.10	88.25
10	103.67	104.26	108.33	105.29	104.86	104.30
25	116.55	124.95	128.33	124.71	119.68	124.59
50	124.87	140.45	142.94	138.53	129.14	139.65
100	132.35	156.02	157.36	151.85	137.47	154.59
200	139.19	171.79	171.70	164.79	144.88	169.47
D_n (%)	7.400	10.397	7.323	10.427	7.548	9.776
D_{critical} (%)	26.40					

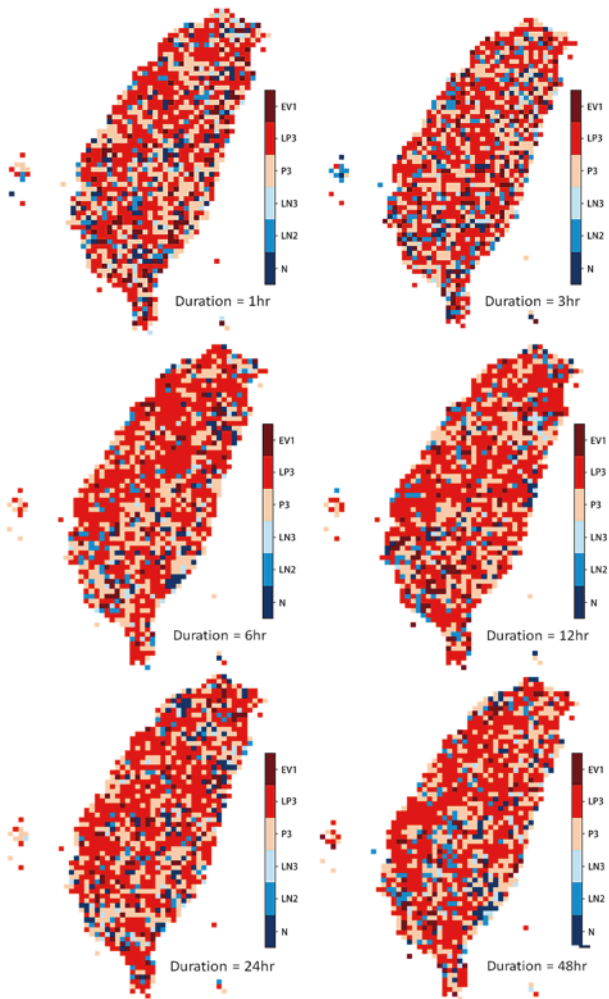


圖 5 不同降雨延時各個網格顯示最小 Dn 值之統計模型結果

積，再選擇兩塊區域做為臨時在地滯洪池，控制該面積與總面積比值約為 0.015，這兩塊區域就是臨時在地滯洪池。最後 S3 情境則結合了 S1 抽水機以及 S2 滯洪池策略，另外設置每個魚池初始水位高度與 S0 相較減少 30%。如此可模擬沿海養殖於豪雨來臨之時，漁塢預先抽排作為預留空間承載降雨，以防止漁塢因降雨溢堤的情況發生，也同時提供額外滯洪空間^[23]。

首先統計研究區域內最大淹水深度超過 30 公分之網格面積，以圖 6 顯示各調適策略與在氣候變遷基期下 200 年與 10 年重現期的比較結果為例，在 200 年重現期中央雨型的情況下（圖 6 上），S3 措施之減災成效最明顯，抽水機運作（S1, S3）可使淹水面積上升幅度減少。以 200 年重現期為例，各調適策略之減少面積約 23% (S3) > 8% (S1) > 2% (S2)。除此之外，S3 的預排效果也可以大幅減少抽水機之負荷，結果如圖 7 所示，S3 措施 200 年的抽水量僅為 S1 情境之 25 年抽水

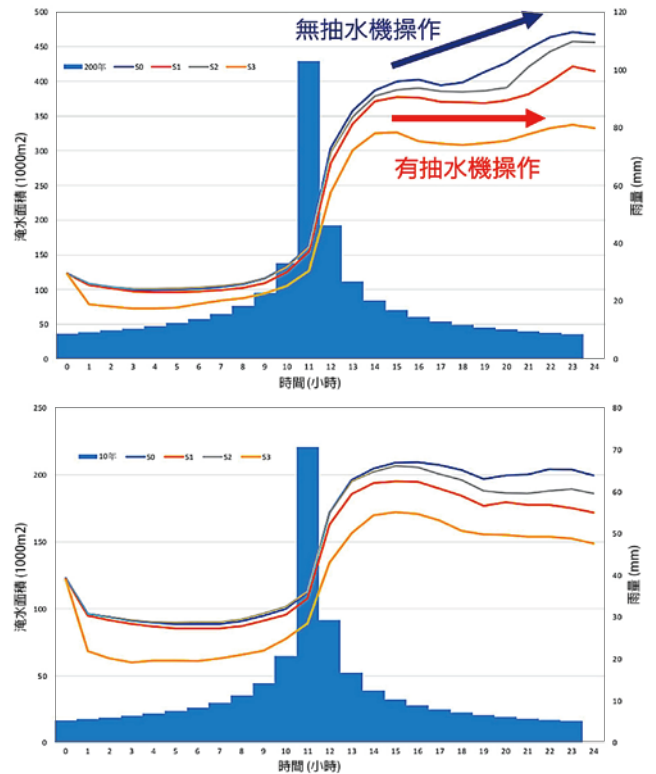


圖 6 基期情況下不同重現期淹水範圍模擬結果比較 (上) 200 年 (下) 10 年

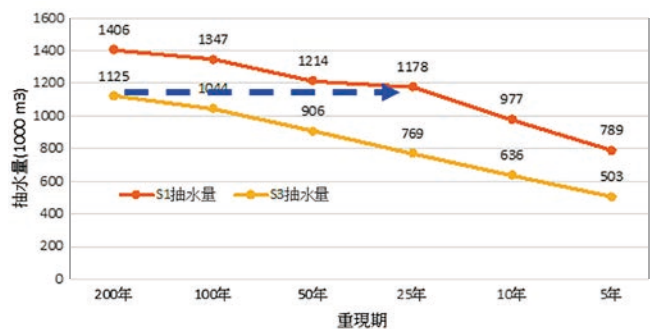


圖 7 S1 & S3 在基期條件下不同重現期之抽水總量比較結果

圖 8 顯示在動力降尺度的未來氣候變遷雨量條件下，不同重現期之淹水面積有顯著增加，尤其是在 50 年重現期之後增加幅度最為明顯。但從本研究的結果顯示，世紀中到世紀末的淹水面積增加率較基期到世紀中為小。

圖 9 則是將世紀末也就是淹水面積增加最大的情況下比較各個調適策略的效益，總整結果結合在地滯洪與魚池預排的 S3 的效益與 S0 的比較還是最明顯，但隨著重現期，也就是雨量增加的情況下，減少效益差異越小。

氣候變遷條件下對漁業損失的影響

本研究最後將上述淹水面積的模擬結果與線性及脈衝函數假設之漁業損失曲線（圖 4）結合推估淹水轉

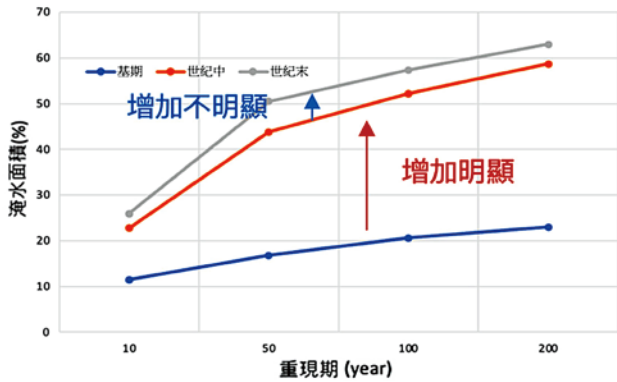


圖 8 氣候變遷條件下不同重現期模擬淹水面積增加結果比較

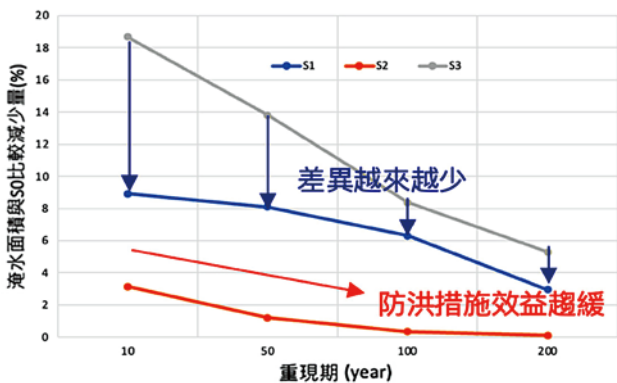


圖 9 世紀末氣候變遷條件下不同重現期在不同調適策略與現況比較減少淹水面積結果比較

化為漁業損失的量化結果。研究結果整理如表 5 所示，在本研究提出之線性損失的假設條件下，隨著淹水面積增加，漁業損失金額也提升，且與原本脈衝函數假設之金額為高。但在基期情境下，不同重現期雨量與淹水面積增加情況下，雖然魚損就數字上並沒有對應之明顯增加，但若以百分比為指標分析，基期情境下漁損也有接近 50% 損失的增加。有趣的是不論何種損失假設，基期到世紀末之漁業損失增加金額比基期到到世紀中之金額多了非常多。表 6 顯示在世紀末情境下，不同重現期，不同調適策略 (S1-S3) 與現況 (S0) 災損減少之結果。結果顯示 S3 策略之減少損失最為明顯，然而與淹水面積減少結果相同，隨著重現期提升，淹水狀況越來越嚴重情況下，各情境減少損失之幅度越來越不明顯。若以本研究提出之線性損失方程式結果為例，以 10 年重現期 S3 與 S0 相比，可以減少約 10% 的經濟損失，但到了 200 年重現期僅剩下 0.79%。綜整所有結果，S3 調適措施 (魚池預先排水與在地滯洪) 仍然是最有效率的減災措施。執得一提的是在脈衝函數損失結果中，因為淹水超過 30 公分即全損的假設下，雖然估計金額較線性函數假設估計為少，但效益評估結果的比

表 5 不同氣候變遷情境、不同重現期、漁業損失的結果評估

氣候變遷情境	10-yr		50-yr		100-yr		200-yr	
	線性	脈衝	線性	脈衝	線性	脈衝	線性	脈衝
基期	\$300	\$216	\$381	\$248	\$415	\$280	\$446	\$322
世紀中	\$442	\$320	\$551	\$482	\$574	\$513	\$592	\$564
世紀末	\$853	\$630	\$1,018	\$906	\$1,055	\$969	\$1,083	\$1,021

表 6 世紀末情境下、不同重現期、不同調適策略漁業損失改善結果

調適策略	10-yr		50-yr		100-yr		200-yr	
	線性	脈衝	線性	脈衝	線性	脈衝	線性	脈衝
S1	2.44	6.99	0.56	2.94	0.18	0.54	0.15	0.00
S2	0.81	4.84	0.82	0.05	0.68	0.00	0.40	1.05
S3	10.23	21.29	3.28	6.73	1.73	4.14	0.79	1.37

單位：%

較上卻比線性函數假設更為明顯。以 10 年重現期 S3 與 S0 相比，可以減少約 21.29% 的經濟損失，相較於線性函數假設的 10% 損失減少為高。

結論

本研究以嘉義東石鄉掌潭村為中心，透過 TUFLOW 模式進行一二維耦合淹水模擬，再透過使用 NCDR 提供之 RCP8.5 動力降尺度不同延時雨量預測結果，探討氣候變遷情境下與不同調適策略對該地漁業損失的影響。結果顯示在僅使用地滯洪對魚塭損失及社會影響範圍的改善效果小，而抽水機針對都市淹水效果較好，但整體效果則以預先排水與在地滯洪整合之策略有最顯著的減災效益。但是不論何種調適策略，隨著重現期雨量與淹水面積的增加，減少效益差異性就越小。最後本研究嘗試以線性函數而非脈衝函數的水深對應漁業損失曲線，探討沿海地區因為淹水而產生之最大的災損狀況，考慮線性函數的漁業損失評估損失較原來脈衝函數的結果為高，而 S3 調適策略較其他策略減少損失為最多，也就是最好最有效的調適策略。但因為不同情境之本益比並不在本研究分析考慮，而且不同魚種之損失評估並不相同，本研究採取簡化之災損假設，加上缺乏真實災損資料驗證，因此有關本研究之魚損分析所提出之線性損失函數仍需要在未來有更深入討論與改善，才能確定其真實的應用性。


誌謝

本論文感謝「臺灣氣候變遷推估資訊與調適知識平台計畫」提供相關資料供參考與使用。

參考文獻

1. 漁業署，民國 109 年 (2020) 漁業統計年報，<https://www.fa.gov.tw/cht/PublicationsFishYear/content.aspx?id=35&chk=6c7f7242-297c-47d1-8bb1-51e7c8a5961c>。
2. 台北市政府消防局，民國 107 年 11 月 26 日，熱帶低壓水災災害

應變處置作為暨災後檢討報告。

3. 網路新聞，擷取時間民國 110 年 12 月 18 日，https://www.cardu.com.tw/news/detail.php?nt_pk=6&ns_pk=28695。
4. 吳育甄、林峰右、胡益順、朱永桐、王俊堯、呂連棋、葉信利 (2016)，霸王寒流後臺南養殖業的災損及今後的因應對策，水試專訊，第 54 期，第 32-35 頁。
5. The Natural Conservancy, Extreme Climate Events Threaten US Fisheries, Fishermen, and Coastal Communities, May 04, 2021, <https://www.nature.org/en-us/newsroom/ca-climate-threatens-fisheries/>。
6. Fowler, H.J., Wasko, C., and Prein, A.F. (2021). Intensification of short-duration rainfall extremes and implications for flood risk: Current state of the art and future directions. Philosophical Transactions of the Royal Society A, 379(2195), 20190541.
7. 今周刊 (2018)，「還在淹！南台灣淹水難退 水利署分析三大原因」，網路新聞，擷取時間民國 110 年 12 月 18 日。
8. United Nations. The 17 goals. Available online: <https://sdgs.un.org/goals> (assessed on 13 November 2022)
9. Silva, W., Dijkman, J.P., and Loucks, D.P. (2004). Flood management options for The Netherlands. International Journal of River Basin Management, 2(2), 101-112.
10. 李晉安 (2020)，「嘉義沿海低地淹水調節策略—以嘉義縣北華村為例」，國立成功大學水利及海洋工程研究所碩士論文。
11. 水利署電子報 (2021)，「小小面積大大發揮·韌性承洪幸福有才」，第 0437 期。
12. 華道明 (2018)，「水文數值模式模擬淹水潛勢—以中港溪流域為例」，國立中央大學土木工程學系碩士論文。
13. 鍾婷羽 (2017)，「設置低衝擊開發設施對都市淹水影響之研究」，國立交通大學土木工程學系碩士論文。
14. 陳元培 (2017)，「台灣地區淹水損失分析—以中港溪及其附近流域為例」，國立交通大學土木工程學系碩士論文。
15. 張齡方 (2000)，「住宅區淹水損失之推估」，國立台灣大學農業工程學系碩士論文。
16. 鄭思蘋 (2003)，「都會區颶風災害損失之分析與評估」，國立台灣大學生物環境系統工程研究所博士論文。
17. Shaw, D.G., Huang, H.H., and Ho, M.C. (2005). Modeling flood loss and risk perception: The case of typhoon Nari 2001 in Taipei. In Poster presented at the 5th Annual Meeting of the IIASA-DPRI (International Institute for Applied Systems Analysis-Disaster Prevention Research Institute) meeting, Beijing, China.
18. Yang, S.Y., Chan, M.H., Chang, C.H., and Chang, L.F. (2018). The damage assessment of flood risk transfer effect on surrounding areas arising from the land development in Tainan, Taiwan. Water, 10(4), 473.
19. 經濟部水利署 (2019)，108 年淹水損失推估模式精進及暴露量更新。
20. Queensland Government, (2002), Disaster loss assessment Guidelines, Qld-Department of Emergency Services and Emergency Management Australia. (Written by Handmer, J. Read, C. and Percovich, O.).
21. 陳思豪 (2019)，「應用 GPI 加速一二為耦合淹水模擬與無斷面資料河段之資料發展—以典寶溪為例」，國立交通大學土木工程學系碩士論文。
22. 吳馥光 (2003)，「沿海低地之豪雨暴潮淹水之研究」。
23. Chow, V., Maidment, D., Mays, L. (1988), Applied Hydrology; McGraw-Hill Book Company: New York, NY, USA. 

開路架橋 穿山越水
治河理川 穩土固石



專業、客觀
公益、永續




 **台北市土木技師公會**
Taipei Professional Civil Engineers Association

歡迎掃碼，獲知我們最新消息！



 105612 台北市松山區東興路28號9樓

 02-27455168

 tpce@tpce.org.tw



集水區 埤塘演變 及其對滯洪潛在影響

— 以 台南橋頭 港橋上游集水區 為例

侯佳秀／國立成功大學水利及海洋工程學系 碩士

詹錢登／國立成功大學水利及海洋工程學系 特聘教授

徐郁超／國立成功大學水土保持生態工程研究中心 副研究員

賴東暘／國立成功大學水利及海洋工程學系 博士候選人

本研究以台南橋頭港橋上游集水區為研究區域，探討埤塘變遷（包含農塘與魚塢兩大類）及其存在對降低洪峰的潛在效果。此研究區域可分為菁埔埤排水、南廊排水及瓦瑤埤排水等三個子集水區。首先分析埤塘 1904 年至 2018 年間的變遷，然後使用 SWMM 模式，以 2018 年研究區域地文條件（地形、高程、排水路、土地利用及埤塘分布）為基礎，在五種埤塘滯洪情境（方案一至方案五）及四種重現期（2、5、10 及 25 年）暴雨條件下，模擬前述 3 個子集水區的地表逕流及減洪效果。方案一假設埤塘（農塘及魚塢）都不可用於滯洪、方案二假設只有農塘可用於滯洪（滯洪水深為 1.0 m）、方案三假設只有魚塢都可用於滯洪（滯洪水深 0.5 m）、方案四假設農塘及魚塢都可用於滯洪（滯洪水深分別為 1.0 m 及 0.5 m）、及方案五增加農塘及魚塢可滯洪水深 0.5 m。模擬結果顯示埤塘（農塘與魚塢）具有顯著減洪效果，對於較小重現期暴雨事件其滯洪效果尤佳。方案五是防災超前佈署方案，暴雨前先將埤塘水位降低 0.5 m，增加埤塘滯洪能力，結果顯示增加埤塘可滯洪水深可大幅降低洪峰流量。縮減埤塘面積或降低埤塘滯洪能力將導洪峰流量的增加，增加渠道溢堤淹水風險；反之，增加埤塘面積或增加埤塘滯洪水深可顯著提升減洪效果。

關鍵詞：埤塘、SWMM 模式、滯洪水深、洪峰、減洪

前言

台灣擁有豐富埤塘歷史，埤塘包含「農塘」與「魚塢」兩大類。「農塘」係指在低窪地區或溪流適當地點，構築堤壩攔蓄逕流，以提供滯洪、農業等用水及改進生態環境並供休閒、遊憩之用。「魚塢」係指在陸地圍築、挖築或以建構室內養殖池設備，供繁殖或養殖水產動植物之設施。埤塘最初是為灌溉、漁業或是水產養殖而建造的，但隨著時間的推移，部分埤塘也成為受歡迎的休閒旅遊區。埤塘具有生產、生態及生活等三生功能，在農業、經濟和文化發展中發揮重要的作用。然而隨著人口增長，經濟發展，伴隨產業型態的快速轉變，

埤塘數量與面積發生大幅增加或減縮的變化。近年來台灣地區土地利用方式發生劇烈變化，農業發展衰退，農田面積縮減，灌溉需求減少，加上大型水利設施與灌溉圳路的興建，河道寬度縮減甚至渠道化，導致早期台灣提供農業灌溉的埤塘被荒廢、面積縮小或是被填平變更為其他用途^[1]。以台北市南港區後山埤、新庄仔埤及三重埔埤三個埤塘為例，2015 年埤塘面積相較於 1904 年分別減少 82%、76% 及 92%^[2]。再以桃園市埤塘為例，1999 年埤塘數量（1545 口）相較於 1926 年（4521 口）減少約 66%；1999 年埤塘面積（2,926 公頃）相較於 1926 年（6,658 公頃）減少約 56%^[3]。

埤塘面積減少量與該地區人口增加量及土地開發量的關係最為密切。此外，水質變差導致埤塘逐漸失去功能^[4]，傳統灌溉方式逐漸被新的灌溉系統所取代^[3]，石門水庫與石門大圳的興建使得原有灌區的埤塘功能式微^[5]，這些也都是造成埤塘減縮的原因。埤塘縮減原因可歸納成四大類：(1) 產業型態由農業轉型為工商業（灌溉需求降低）、(2) 工商業發展土地需求增加（填埤塘造土地）、(3) 埤塘水質遭受污染，不再適灌溉而任其淤積荒廢、以及(4) 公共建設用地取得不易，優先考量公有埤塘用地^[1]。簡言之，埤塘面積的減少與當地人口成長、土地利用變遷、工業化、都市化、水質汙染及水利建設等息息相關。

埤塘除了具有生產、生態及生活等三生功能之外，還有滯洪功能。洪佳瑩^[6]曾經以 Vensim 軟體模式建構水資源系統動力模組，依當地集水區水文及地文條件，模擬評估桃園大圳二支線之埤塘滯洪能力，結果顯示埤塘對於暴雨重現期小於 5.27 年的滯洪效果較好。翁國豪^[7]使用 HEC-HMS 分析濁水溪下游集水區水稻田與農塘的滯洪效果，結果顯示水稻田與農塘對於 2 年重現期暴雨的滯洪效果較好（16%~52%），對於 100 年重現期暴雨的滯洪效果有限（大約只有 3%~8%）。為了進一步深入埤塘的滯洪效果，本研究以台南橋頭港橋上游集水區為研究區域，先分析埤塘（含農塘與魚塢）的歷史變遷，然後以研究區域地文條件（地形、高程、排水路、土地利用及埤塘分布）為基礎，使用 SWMM 模式，在有埤塘、無埤塘及埤塘不同面積或不同蓄水深度情境下，評估埤塘減洪效果。

研究區域

基本地文條件

本研究以台南將軍溪排水系統橋頭港橋上游集水區為研究區域（如圖 1 所示），位於官田區及六甲區內。自古以來即為台灣南部農業發展的大宗，為使農業的發展不受天氣影響而缺水灌溉，在農田周圍開鑿埤池蓄水備用，造成此區域擁有大量的埤塘，其中最著名的為菁埔埤、橋頭仔港埤、瓦寮埤等。經過多年的歷史變遷埤塘逐漸縮減，以橋頭港橋上游集水區為例，於 2008 至 2018 年間，埤塘面積減少約 19.8%。比對過往豪雨淹水事件及淹水潛勢圖可知部分易淹水區即為過去埤塘所在地。

研究區域總面積約 29.92 km²，按排水系統可區分為菁埔埤排水（約 10.51 km²）、南廊排水（約 19.41 km²）及瓦瑤埤排水（約 7.60 km²）等三個子集水區，其中瓦瑤埤排水集水區在南廊排水集水區內，如圖 2 所示。此區域高程變化小，坡度平緩，高程介於 1.3 至 32.1 m 之間，平均高程為 13.7 m，坡度介於 0~70.6%，大部分為一級坡（佔 90.8%），平均坡度只有 1.9%。以國土測繪中心土地利用分析為依據，此區域大致可分為農業用地、人為開發用地、水利用地、森林用地、以及裸露地及荒地五大類，如圖 3 所示。以 2008 年為例，研究區域農業用地宗佔 21.13 km²（71.04%），人為開發用地佔 7.01 km²（23.0%），水利用地佔 1.12 km²（3.69%）、森林用地 0.62 km²（2.12%）、以及裸露地及荒地佔 0.04 km²（0.15%）。研究區域土地利用分布。此外，根據行政院農委會農業試驗所土壤資料庫平地土壤調查報告，研究區域土壤質地分布，如圖 4 所示。研究區域內大多為沖積土，此類土壤多為耕地土壤，大都由丘陵地上之砂頁岩沖積而成，其次為台灣黏土，此土壤之土層深厚，質地粘而緊密，不適合農耕，多發展為魚塢用地。

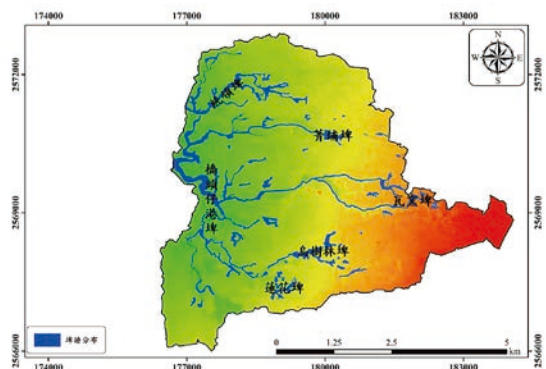


圖 1 研究區域水系及主要埤塘位置

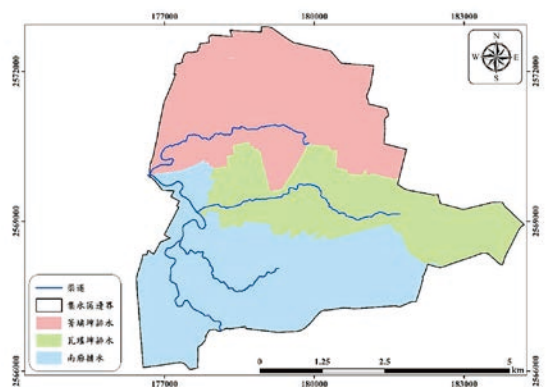


圖 2 研究區域三個主要排水系統及集水區邊界

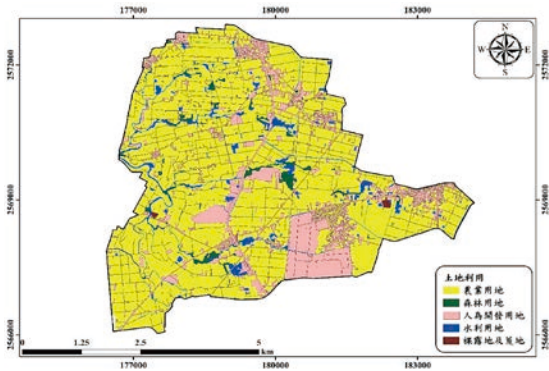


圖 3 研究區域土地利用分布情形

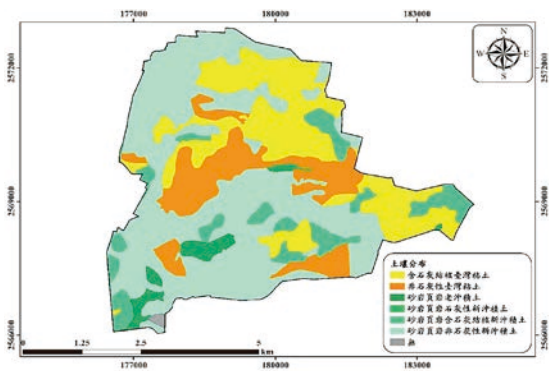
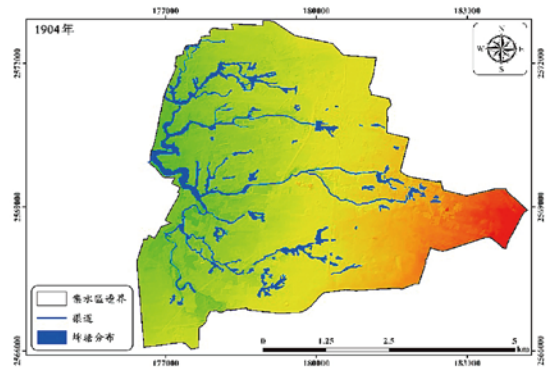


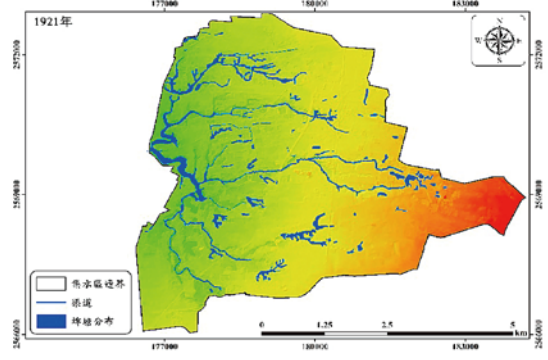
圖 4 研究區域土壤質地分布

研究區域埤塘變遷

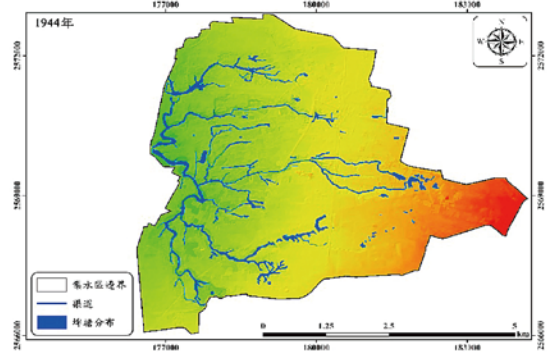
為了瞭解研究區域埤塘的歷史變遷，本研究由地理資訊科學研究專題中心百年歷史地圖檔中取得 1904 及 1921 年日據版二萬五千分之一地形圖、1944 及 1955 年美軍版二萬五千分之一地形圖及 1999 年經建版二萬五千分之一地形圖，並由 Google 衛星雲圖資取得 2008 及 2018 年影像圖資，來分析研究區域埤塘（農塘及魚塢）之變遷。前述 1904 至 1955 年的圖資只能辨識埤塘但無法分辨是魚塢或農塘，埤塘分布情形如圖 5 所示。1904 年為日據時期，此區域農田多為水田，主要產物是稻米及菱角，需要埤塘來蓄存水源，其中以橋頭子港埤、菁埔埤與瓦窯埤為最主要的埤塘。上述 7 個年度的埤塘面積分別為 204.29、164.14、150.67、165.34、290.28、343.89 及 275.86 ha，如圖 6 所示。前 4 個年度（1904~1955）埤塘面積的變化不大，但隨著人口增加，農業發展及養殖業的興盛，1955 年至 2008 年埤塘面積遽增，由 165.34 ha 增加到 343.89 ha（一倍有餘）。後續由於經濟發展轉型，農業及養殖較疲弱，埤塘面積降為 275.86 ha（低於 1999 年埤塘面積）。相較於 2008 年，2018 年埤塘面積減少約 19.8%。2008 至 2018 年橋頭子港埤已轉變為渠道，埤塘面積持續減少。橋頭子港埤 1904 年至 2008 年的平均寬度由 160 m 至 2008 年僅剩 30 m（約只有 1904 年寬度的五分之一）。



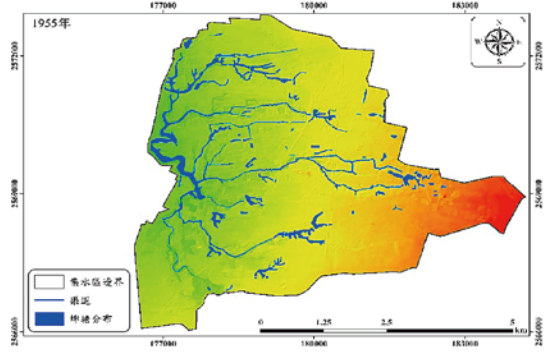
(a) 1904 年



(b) 1921 年



(c) 1944 年



(d) 1955 年

圖 5 研究區域在 1904 至 1955 間 4 個年度埤塘分布圖

研究區域 1999、2008 及 2018 年間埤塘（農塘及魚塢）分布如圖 7 所示，埤塘（農塘與魚塢）面積變化如表 1 所示。

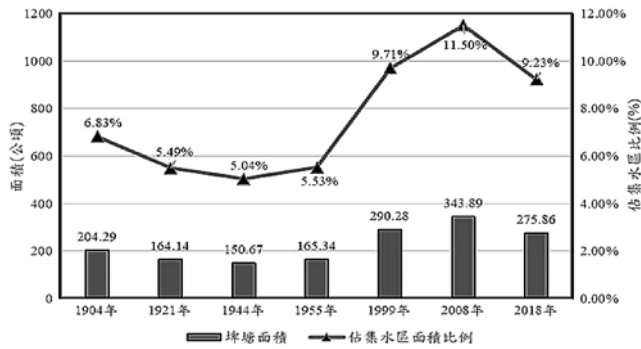
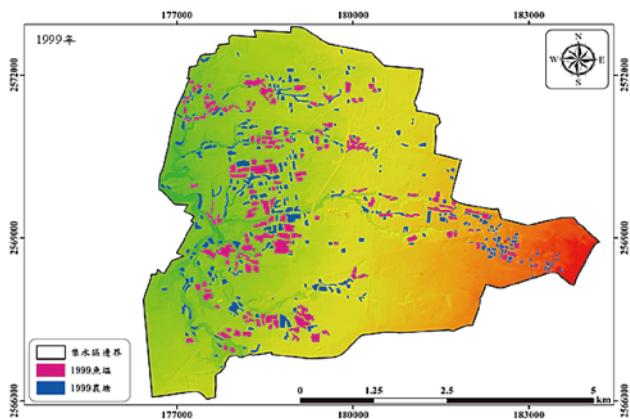
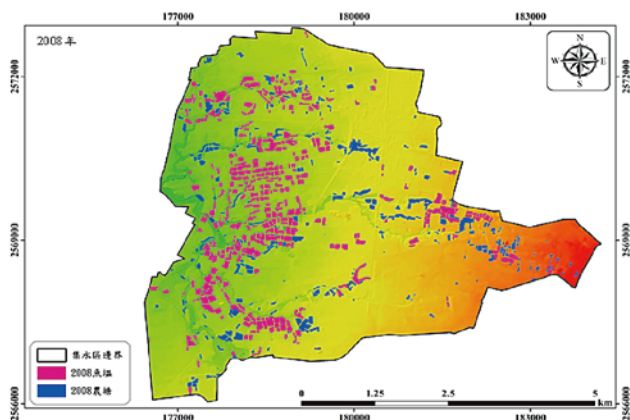


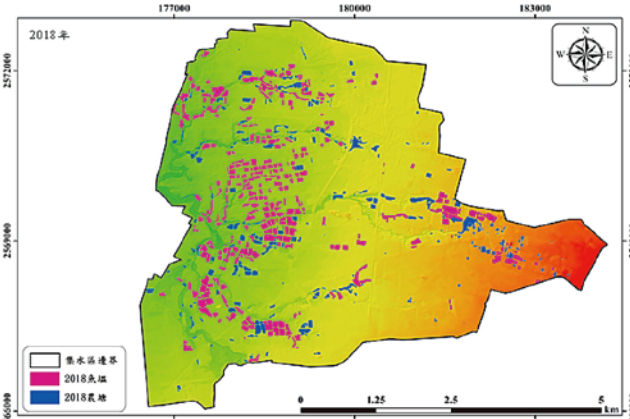
圖 6 研究區域在 1904 至 2018 間 7 個年度的埤塘面積變化



(a) 1999 年



(b) 2008 年



(c) 2018 年

圖 7 研究區域 1999、2008 及 2018 年農塘 (藍色) 與魚塢 (紅色) 分布圖

表 1 研究區域 3 個時期農塘、魚塢及整體埤塘之變化

年分		1999 年	2008 年	2018 年
農塘	個數	308	363	293
	個數變化	55		-70
	個數變化比例 (%)	17.86		-19.28
	總面積 (公頃)	130.64	114.19	82.31
	總面積變化 (公頃)	-16.45		-31.88
	總面積變化比例 (%)	-12.59		-27.92
	佔集水區面積比例 (%)	4.36	3.81	2.75
佔集水區面積比例差 (%)	-0.55		-1.06	
魚塢	個數	150	428	400
	個數變化	278		-28
	個數變化比例 (%)	185.33		-6.54
	總面積 (公頃)	159.64	229.7	193.55
	總面積變化 (公頃)	70.06		-36.15
	總面積變化比例 (%)	43.89		-15.74
	佔集水區面積比例 (%)	5.33	7.67	6.46
佔集水區面積比例差 (%)	2.34		-1.21	
埤塘	總面積 (公頃)	290.28	343.89	275.86
	總面積變化 (公頃)	53.61		-68.03
	總面積變化比例 (%)	18.47		-19.78
	佔集水區面積比例 (%)	9.69	11.48	9.21
	佔集水區面積比例差 (%)	1.79		-2.27

由前述 1999 年的經建版地圖判釋成果，當時農塘約 308 處，面積約 130.64 ha (佔集水區面積比例 4.36%)；魚塢約 150 處，面積約為 159.64 ha (佔集水區面積比例 5.33%)；埤塘總面積 (農塘加上魚塢面積) 約 290.28 ha，相較於 1955 年 (165.34 ha)，大幅增加 124.94 ha。由 2008 及 2018 年衛星影像判釋成果，2008 年農塘約 363 處，面積約 114.19 ha (佔集水區面積比例 3.81%)；魚塢約 428 處，面積約 229.7 ha (佔集水區面積比例 7.67%)；埤塘總面積約 343.89 ha，相較於 1999 年，增加 53.61 ha。在 2018 年農塘減為 293 處，面積約 82.31 ha (佔集水區面積比例 2.75%)；魚塢約 400 處，面積約 193.55 ha (佔集水區面積比例 6.46%)；埤塘總面積約 275.86 ha，相較於 2008 年，減少 68.03 ha。

前述資料經由比較可得知在 1999 至 2008 年之間雖然農塘數量增加 55 處 (約 17.86%)，但面積反而減少約 16.45 ha (約 12.59%)，主要原因是較大面積的農塘被分割為多個較小面積的農塘。這段期間魚塢數量增加 278 處 (約 185.33%)，面積也增加約 70.06 ha (約 43.89%)，此時期魚塢面積大幅增加，說明此時期養殖業的興盛。在 2008 至 2018 年間農塘數量減少 70 處 (約 19.28%)，面積也減少約 31.88 ha (約 27.92%)，反映農塘需求降低。這段期間魚塢數量也減少 28 (約 6.54%)，面積也減少約 36.15 ha (約 15.74%)。農塘及

魚塭面積減少原因除了部分消失外，最主要是農塘及魚塭個別面積的縮減。若以佔集水區面積比例來看，魚塭與農塘各減少 1.06% 與 1.21%，合計 2.27%，此期間集水區可蓄水空間減少 2.27%，也就是說減少滯洪能力。埤塘蓄水空間的減少使得洪水期間其下游的出流量及洪峰流量增加。由本研究現地調查資料顯示研究區域的魚塭深度大約 3.5 m，農塘深度大約 2.5 m，推估研究區域在 2008 至 2018 年間埤塘蓄水空間（可滯洪水量）減少約 2.06 百萬立方公尺（相當於烏山頭水庫設計總容量 154.16 百萬立方公尺的 1.3%）。

暴雨水管理模式（SWMM）

SWMM 模式概述

在分析集水區埤塘對滯洪的影響時，需要考慮埤塘的容積和水位、降雨和逕流的關係、埤塘周圍的地形和植被等因素。本研究採用美國環保署暴雨水管理模式（Storm Water Management Model, SWMM），模擬集水區在不同暴雨頻率及不同埤塘情境下之地表逕流，藉以分析埤塘的減洪效果。SWMM 模式是一種用於模擬暴雨水流和其對城市基礎設施影響的軟體，水利工程師及相關專業人員常使用它來計算暴雨水的流量和排放量，以利進行暴雨水評估及管理規劃設計之參考^[8]。當暴雨落在地表，扣除入滲及地表滯留，經由漫地流匯集進入節點（Node），再由節點進入排水渠道（Link），而排水渠道在流路途中持續有水流由節點匯入，整個排水系統形成一個複雜的流況。SWMM 模式採用一維緩變量流聖維南（Saint-Venant）方程式，在渠道中要滿足連續方程式及動量方程式，在節點處要滿足連續方程式，藉此了解各渠道中流量變化以及可能溢流位置及溢流量。張向寬等人^[9]曾經使用 SWMM 模式分析嘉義縣後鎮大排集水區魚塭的減洪效益，並以重現期 25 年 24 小時雨量為條件，評估排水路溢淹風險，結果顯示魚塭地的存在可大幅降低排水路溢堤風險。

使用 SWMM 模式，簡要流程包括：(1) 輸入數據，輸入研究區域基本水文及地文數據，如降水數據、地形數據、排水系統結構數據等；(2) 模型創建，將真實環境轉換為數學表示，並創建模擬分析網格、入流節點、渠道和水流控制其他組件；(3) 水文模擬，模擬暴雨地表逕流過程，包括逕流、滲透和窪蓄；(4) 水力模擬，模擬水在系統中通過渠道的流速和水深；(5) 演算：進行水流在地表、渠道排水系統中的流動聯

合演算，演算過程考慮渠道網絡、蓄水網格以及各種組件的高程條件；(6) 結果輸出，輸出流量歷線用於評估暴雨事件期間系統的性能，包括流量和流速、水位以及可能發生的洪水溢流^[8-11]。

建構 SWMM 模式所需資料收集與整理

應用 Horner 公式計算研究區域各頻率（2、5、10、25 年重現期）之暴雨強度。

$$I = [a / (T + b)]^c \quad (1)$$

其中 I (mm/hr) 為暴雨延時 T (min) 對應之暴雨強度， T 為暴雨延時；參數 a 、 b 及 c 是與集水區特性及暴雨頻率有關之待定參數。參考經濟部水利署^[12]「易淹水地區水患治理計畫—台南縣管區域排水將軍溪排水系統規劃報告」，採用對數皮爾遜三型暴雨頻率分析結果，2、5、10 及 25 年重現期一日暴雨量分別為 159、225、272 及 336 mm；上述 4 個重現期對應之待定參數，如表 2 所示。另外，參考「83 年曾文溪水系治理規劃報告」假設每小時降水損失量為 3.5 mm。

本研究建構 SWMM 模式需要先進子集水區、渠道、節點、蓄水空間等資料的收集，如圖 8 所示。子集水區資料的處理，本研究經由內政部地政司資料系統取得 2008 年 5 公尺 DEM 資料、由全國土地使用分區資料查詢系統取得土地利用資料，及由區域排水整合系統取得將軍溪集水區邊界。渠道資料的處理，由區域排水整合系統取得區域排水渠道位置，由水利規劃試驗所取得區域排水渠道斷面型態資料，在農田水利會地理空間圖資處理平臺取得農田排水渠道位置，以及經由本研究現地量測取得排水渠道斷面及埤塘深度相關資料，現地調查照片詳圖 9。排水節點的處理，則通過水利規劃試驗所取得區域排水渠道斷面高程及現地量測取得農田排水渠道高程，來確定節點位置。蓄水空間（農塘及魚塭）的辨別，則通過 Google Earth 衛星雲圖取得 2008 年及 2018 年農塘及魚塭分布情形，並由現地量測取得農塘及魚塭平均深度。研究區域 SWMM 模式建構完成之分析渠道網格示意圖如圖 10 所示。

表 2 各重現期 Horner 公式參數 a 、 b 及 c

重現期 (年)	a	b	c
2	1460.5	19.7	0.6896
5	1581.0	17.6	0.6057
10	1599.5	15.9	0.6215
25	1505.4	10.6	0.5762

資料來源：經濟部水利署^[12]

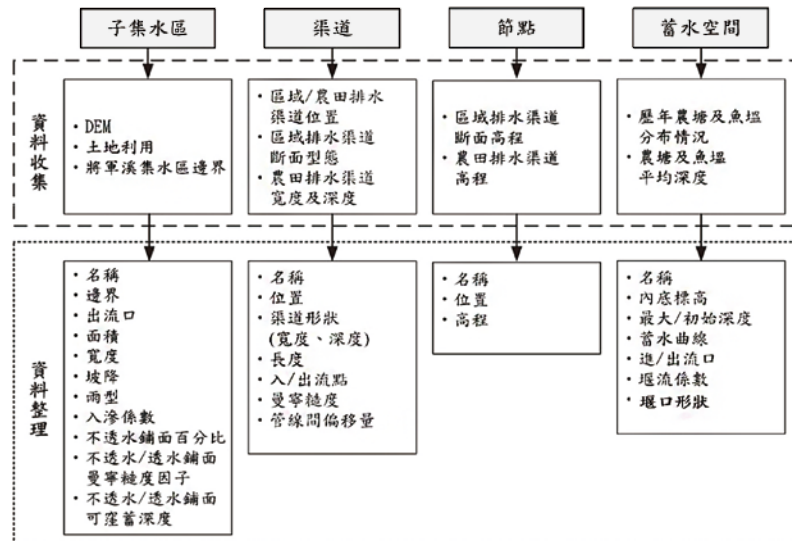


圖 8 建構 SWMM 模式需收集與整理的相關資料



(a) 使用手持雷射測距儀量測渠寬 (b) 使用雷射測距槍量測渠寬 (c) 使用 RTK 量測渠頂高程 (d) 使用 DEEPER 智能聲納探測器量測水深

圖 9 現地量測取得排水渠道断面及埤塘深度相關資料

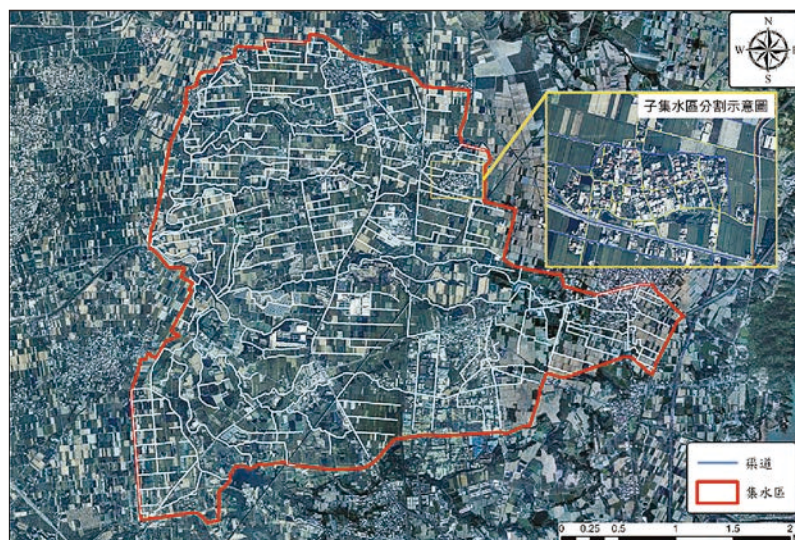


圖 10 研究區域 SWMM 模式建構完成之分析渠道網絡示意圖

模式驗證

與三角形單位歷線計算結果比較

集水區排水路規劃常以三角形單位歷線來推估集水區出口洪峰流量。三角形單位歷線假設單位時間之超滲雨量所形成的流量歷線呈三角形。本研究參考「易淹水

地區水患治理計畫—台南縣管區域排水將軍溪排水系統規劃報告」^[12]，依美國水土保持局之經驗公式，洪峰流量 Q_p (cms) 與集水區面積 A (km²)、超滲雨量 (mm) 及開始漲水至洪峰發生之時間 T_p (hr) 之關係為：

$$Q_p = 0.208 A (R_e / T_p) \quad (2)$$

其中 $T_p = D/2 + 0.6 T_c$ ， D 為單位降雨延時 (hr)， T_c 為集流時間 (hr)，洪峰流量發生至歷線終端的时间 T_r (hr) = 1.67 T_p 。本研究採用加州公路局經驗公式估算集流時間^[11]。將使用 SWMM 模式計算結果與三角形單位歷線模式計算結果相比較，以評估所建構 SWMM 模式的適用性。

以菁埔埤排水 5 年重現期暴雨評估結果為例，前述兩種模式所得出口處洪水歷線評估結果相近，如圖 11 所示，但是三角形單位歷線模式所得結果洪峰有延遲現象，洪峰時間差約 36 分鐘，洪峰流量略高約 5.4%。使用 SWMM 模式及三角形單位歷線模式所得菁埔埤排水出口 2 年、5 年、10 年、25 年重現期暴雨洪峰流量結果列於表 3。對於重現期愈長的暴雨，兩種模式洪峰流量評估結果的差異也愈大一些，但至多為 14.6%，在可接受範圍內。其他兩個子集水區（南廊排水及瓦瑤埤排水）也有類似的結果，顯示本研究所建構 SWMM 模式具有合理的適用性，可作為後續分析使用。

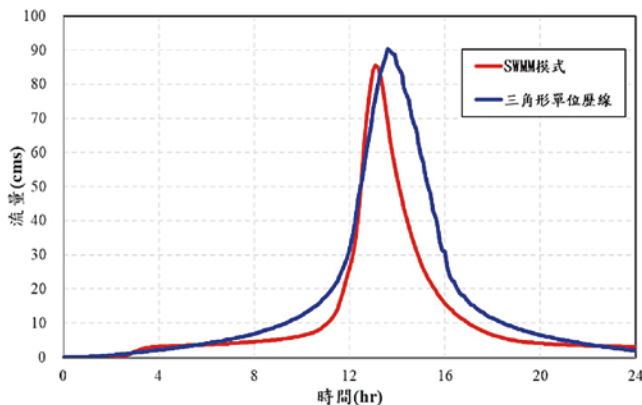


圖 11 菁埔埤排水 5 年重現期暴雨出口處洪水歷線

表 3 菁埔埤排水兩種模式所得各重現期暴雨所對應之洪峰流量

重現期 (年)	三角形單位歷線模式 (cms)	SWMM 模式 (cms)	差異百分比 (%)
2	74.8	72.10	3.6
5	90.5	85.63	5.4
10	116.9	110.32	5.6
25	135	115.35	14.6

溢堤位置模擬

以 2009 年 8 月莫拉克颱風暴雨淹水事件進行溢堤淹水位置模擬結果之比較。莫拉克颱風暴雨事件研究區域附近下營雨量站暴雨資料顯示最大 48 小時暴雨為 784.5 mm (發生在 2009/8/7 14:00 到 2009/8/9 14:00)，最大 1 小時暴雨量約 68 mm (發生在 2009/8/8 21:00)。淹水主要發生在橋頭仔港埤及其下游處，如圖 12 所示。本研究以此暴雨資料及 2008 年埤塘分布情境，使用 SWMM 模式進行莫拉克颱風暴雨事件地表逕流模擬演算，結果顯示有多處渠段會發生溢流，發生溢流的渠段總共長度約 1,800 m，溢流渠段位置與實際淹水範圍相符，反映 SWMM 模式演算結果具有相當好的可信度，後續用此模式進行埤塘減洪效益分析。

應用 SWMM 模式評估埤塘減洪效果

埤塘分布

本研究以研究區域 2018 年相關地文條件及埤塘分布，在不同暴雨頻率及不同埤塘情境下，使用 SWMM 模式模擬評估研究區域菁埔埤排水、南廊排水及瓦瑤埤排水等三個子集水區埤塘的減洪效果。其中瓦瑤埤

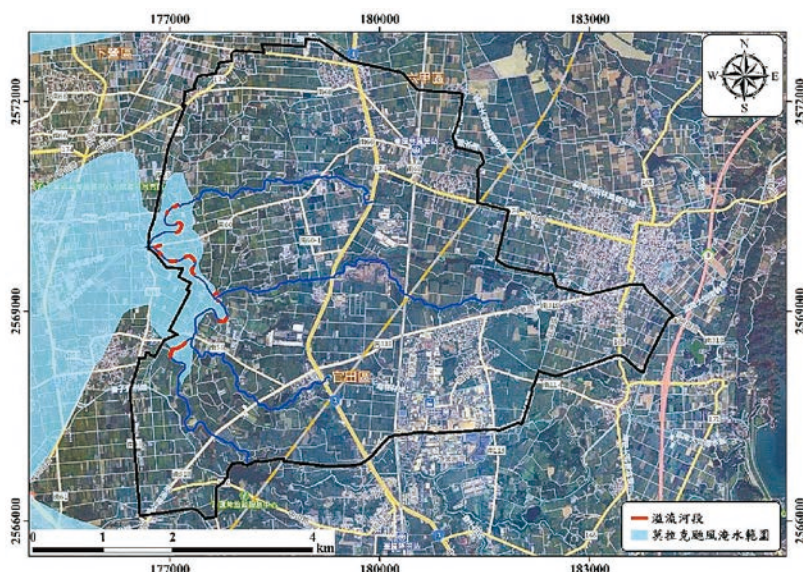


圖 12 莫拉克颱風渠道溢流淹水段模擬結果與實際淹水區域相符

排水集水區在南廊排水集水區內，因此在模擬分析南廊排水集水區時，包含瓦瑤埤排水集水區的範圍。前述三個子集水區 2018 年的魚塢及農塘分布如圖 13 及圖 14 所示，對應之面積資料列於表 4，其中埤塘面積為魚塢及農塘之合計面積。

埤塘不同情境下滯洪效果之比較

考量五種不同埤塘情境，使用 SWMM 模式進行集水區地表逕流模擬。方案一：假設農塘及魚塢都不用於滯洪；方案二：假設只有農塘可用於滯洪（可滯洪水深 1.0 m），但是魚塢不能用於滯洪；方案三：假設只有魚塢可用於滯洪（可滯洪水深 0.5 m），但是農塘不能用於滯洪；方案四：假設農塘及魚塢同時可用於滯洪

（可滯洪水深分別為 1.0 m 及 0.5 m）。方案五：增加埤塘（農塘及魚塢）可滯洪水深 0.5 m。模擬演算時上述方案一至方案四使用集水區 2018 年相關地文條件、土地利用情形及埤塘（農塘及魚塢）分布。以方案一的

表 4 研究區域三個子集水區 2018 年魚塢、農塘及埤塘面積統計

名稱	菁埔埤排水	南廊排水 (含瓦瑤埤排水)	瓦瑤埤排水
集水區面積 (ha)	1,050	1,940	760
魚塢面積 (ha)	61.1	132.3	70.5
魚塢佔集水區比例 (%)	5.8	6.8	9.3
農塘面積 (ha)	23.7	48.9	22.9
農塘佔集水區比例 (%)	2.3	2.5	3.0
埤塘面積 (ha)	84.8	181.2	93.4
埤塘佔集水區比例 (%)	8.1	9.3	12.3

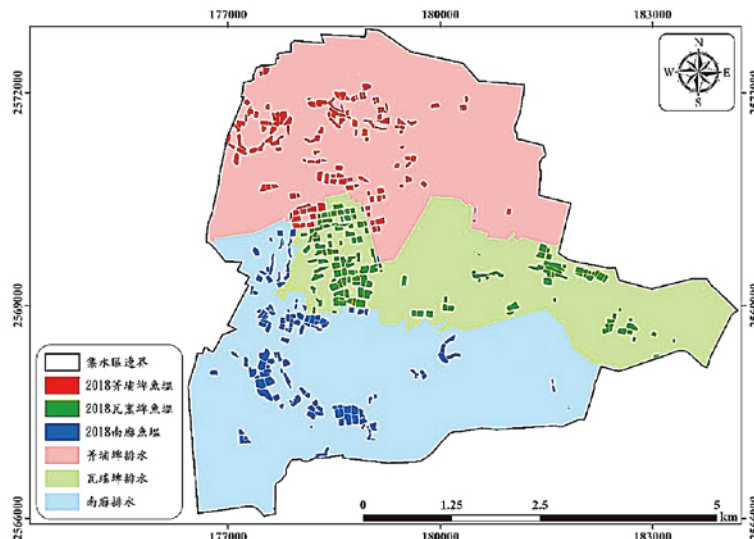


圖 13 研究區域三個子集水區 2018 年魚塢分布圖

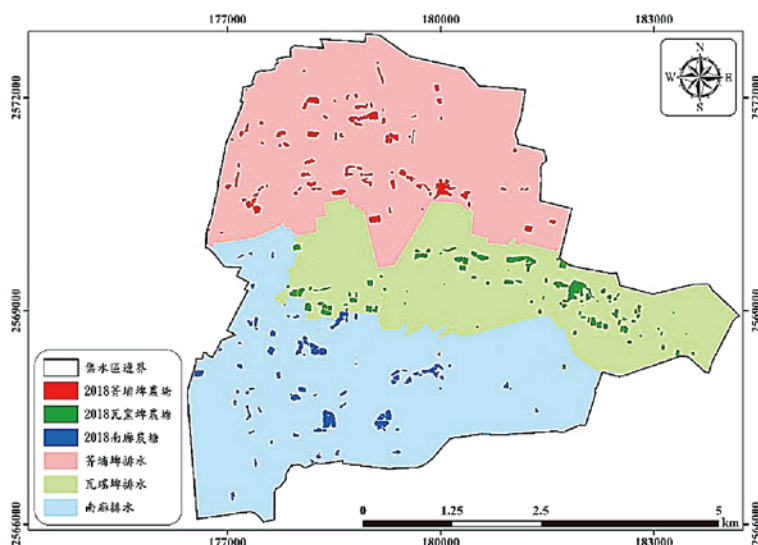


圖 14 研究區域三個子集水區 2018 年農塘分布圖

模擬結果為基礎，其他方案模擬結果進行比較，以探討埤塘（農塘及魚塢）不同情境下減洪效果。方案五為超前佈署方案，分析增加農塘與魚塢滯洪水深 0.5 m 對提升減洪效果的影響。

我國易淹水地區水患治理計畫規定以 10 年重現期洪水進行設計，並以 25 年重現期洪水不溢堤為基準。因此本研究以 25 年重現期暴雨事件為上限，進行 2 年、5 年、10 年及 25 年重現期暴雨之地表逕流模擬，暴雨延時為 24 小時。表 5 為菁埔埤排水集水區洪峰流量模擬結果彙整表。以 5 年重現期暴雨模擬結果為例，菁埔埤排水集水區在四種埤塘不同情境下之出口流量歷線，如圖 15 所示，方案一至方案四的洪峰流量分別為 85.63、67.87、75.96 及 61.19 cms；洪峰時間（hr:min）分別為 13:07、13:14、13:13 及 13:20。相較於方案一，方案二、三及四的洪峰降低量（減洪量）分別為 17.76、9.67 及 24.44 cms；對應之洪峰延遲時間

分別為 7、6 及 13 min。農塘及魚塢均有降低洪峰及延遲洪峰時間的效果，同時將農塘及魚塢同時納入滯洪功能考量（方案四）具有最佳的減洪效果。

後續說明菁埔埤排水集水區 2 年、5 年、10 年及 25 年重現期暴雨各方案之模擬結果，方案一模擬結果的洪峰流量分別為 72.10、85.63、110.32 及 115.35 cms；方案二的洪峰流量分別為 53.39、67.87、97.59 及 115.24 cms；方案三的洪峰流量分別為 60.78、75.96、100.56 及 114.77 cms；方案四的洪峰流量分別為 47.85、61.19、88.81 及 106.96 cms。相較於方案一，方案二 2 年、5 年、10 年及 25 年重現期暴雨集水區出口洪峰流量減少量分別為 18.71、17.76、12.73 及 0.11 cms；方案三的洪峰減少量分別為 11.32、9.67、9.76 及 0.58 cms；而方案四的洪峰減少量分別為 24.25、24.44、21.51 及 8.39 cms。以上結果點繪於圖 16，圖中顯示對於較大重現期暴雨，洪峰減少量較差。另外兩

表 5 菁埔埤排水集水區洪峰流量模擬結果彙整表

重現期	方案	洪峰時間 (hr:min)	洪峰延後時間 (hr:min)	洪峰流量 (cms)	洪峰減量 (cms)	洪峰減量比例 (%)
2 年	一	13:12	-	72.10	-	-
	二	13:24	00:12	53.39	18.71	26.0
	三	13:19	00:07	60.78	11.32	15.7
	四	13:26	00:14	47.85	24.25	33.6
5 年	一	13:07	-	85.63	-	-
	二	13:14	00:07	67.87	17.76	20.7
	三	13:13	00:06	75.96	9.67	11.3
	四	13:20	00:13	61.19	24.44	28.5
10 年	一	13:02	-	110.32	-	-
	二	13:06	00:04	97.59	12.73	11.5
	三	13:03	00:01	100.56	9.76	8.8
	四	13:10	00:08	88.81	21.51	19.5
25 年	一	13:45	-	115.35	-	-
	二	13:01	00:16	115.24	0.11	0.1
	三	13:00	00:15	114.77	0.58	0.5
	四	13:03	00:18	106.96	8.39	7.3

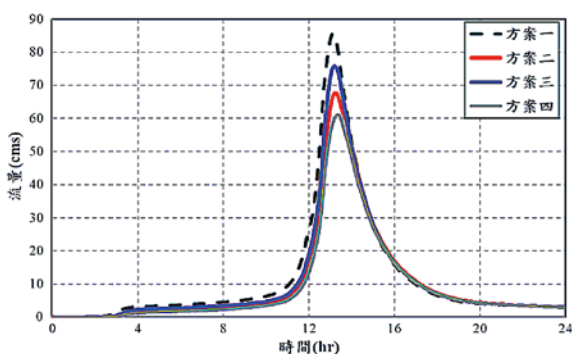


圖 15 比較菁埔埤排水 5 年重現期暴雨四種埤塘方案之模擬結果

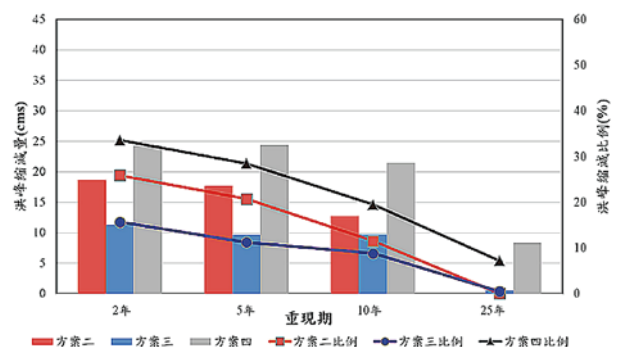


圖 16 菁埔埤排水方案二、三及四相較於方案一的洪峰縮減量

個集水區（瓦瑤埤排水集水區及南廊排水集水區）的模擬結果也得到相似之結果，如圖 17 及圖 18 所示。

對於 2 年、5 年、10 年及 25 年不同重現期暴雨，在農塘及魚塢同時可用於滯洪的情況（方案四），相較於完全沒有農塘及魚塢協助滯洪的情況（方案一），菁埔埤排水集水區的洪峰縮減比例為 33.6%、28.5%、19.5% 及 7.3%；南廊排水集水區洪峰縮減比例為 38.1%、30.3%、26.6% 及 18.8%；瓦瑤埤排水集水區洪峰縮減比例為 50.9%、43.6%、40.6% 及 30.0%。由結果可以看出，洪峰縮減比例與暴雨重現期呈相反趨勢（圖 19），也與埤塘（農塘及魚塢）在集水區分布及埤塘面積比有關，當埤塘面積佔集水區比例愈高，減洪

效果愈顯著。菁埔埤排水、南廊排水及瓦瑤埤排水三個子集水區埤塘面積佔集水區比例分別為 8.1%、9.3% 及 12.3%，所以就減洪量比例而言，菁埔埤排水集水區 < 南廊排水集水區 < 瓦瑤埤排水集水區。

此外，就上述 2 年與 25 年重現期暴雨所對應之洪峰流量縮減比例的差異來看，菁埔埤排水集水區為 26.3%，南廊排水集水區為 19.3%，瓦瑤埤排水集水區為 20.9%，如圖 17 所示。洪峰縮減量受限於到暴雨峰值到達前埤塘是否已經被水填滿，若埤塘已被雨水填滿那就沒有滯洪效果，其下游渠道的洪峰就不會得到縮減。當暴雨強度增加（高重現期暴雨）洪峰縮減效果會降低，因為高強度暴雨，部分較小面積的埤塘在暴雨峰值來臨前就已被填滿。比較魚塢與農塘的減洪效果，發現魚塢的面積較農塘大，但是魚塢洪峰縮減量較農塘小，其原因為魚塢需長期保持高水位，可滯洪深度較少（本研究假設魚塢及農塘可滯洪水深分別為 0.5 m 及 1.0 m）。

增加埤塘滯洪能力提升減洪效果分析

接下來進行為防災超前佈署方案，方案五：農塘與魚塢在暴雨事件前提前排水，增加可滯洪蓄水深度 0.5 m，即將方案四中的農塘與魚塢可滯洪水深分別改為 1.5 m 及 1.0 m，再進行地表逕流模擬，以探討提升埤塘蓄洪能力對集水區出流減洪的效果。以菁埔埤排水集水區 5 年重現期暴雨方案一、四及五的模擬結果為例（圖 20），提升埤塘滯洪能力（方案五）對集水區出流的減洪效果相當顯著。原方案四的 5 年重現期洪峰流量為 61.19 cms（相較於方案一的洪峰減量為 24.44 cms，減量比例為 28.5%），方案五的洪峰流量降為 51.30 cms（相較於方案一的洪峰減量為 34.33 cms，減洪量比例為 40.1%）。也就是說，方案五增加減洪量為 9.89 cms（增加減洪量比例為 11.6%）。表 6 為菁埔埤排水集水區方案一、四及五洪峰流量模擬結果的彙整表。表 5 顯示相較於方案一，方案四及五洪峰到達時間沒有顯著差異；對於 2 年、5 年、10 年及 25 年不同重現期暴雨，方案四及五減洪量及減洪量比例如圖 21 所示。相較於方案四，方案五減洪量增量（減洪量比例增量）分別為 10.77 cms（15.0%）、9.89 cms（11.6%）、17.61 cms（16.0%）及 20.34 cms（17.9%）。另外兩個集水區（瓦瑤埤排水集水區及南廊排水集水區）的模

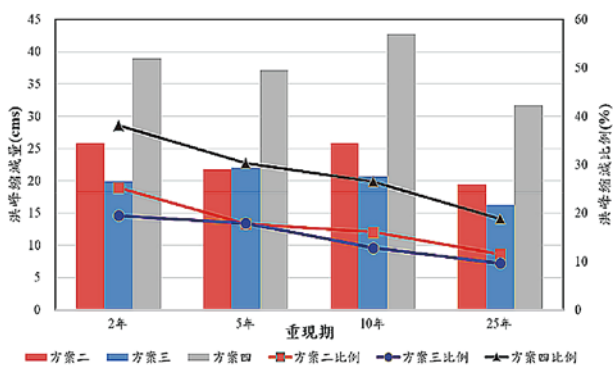


圖 17 南廊排水方案二、三及四相較於方案一的洪峰縮減量

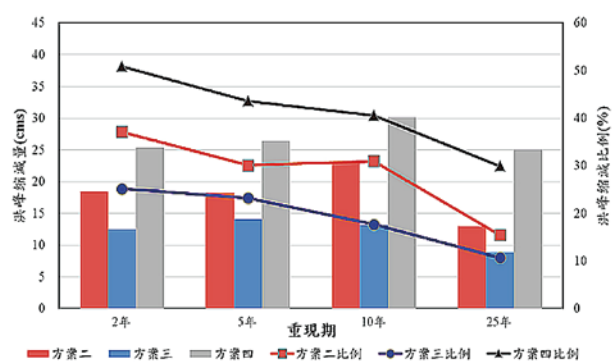


圖 18 瓦瑤埤排水方案二、三及四相較於方案一的洪峰縮減量

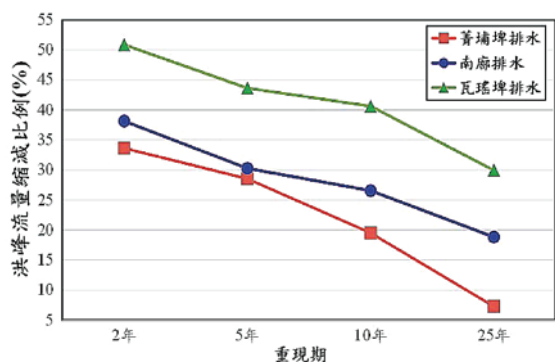


圖 19 方案四相對於方案一之三個子集水區洪峰流量縮減比例

表 6 菁埔埤排水集水區三種方案洪峰流量模擬結果彙整表

重現期	方案	洪峰時間 (hr:min)	洪峰延後時間 (hr:min)	洪峰流量 (cms)	洪峰減量 (cms)	洪峰減量比例 (%)
2 年	一	13:12	-	72.10	-	-
	四	13:26	00:14	47.85	24.25	33.6
	五	13:24	00:12	37.08	35.02	48.6
5 年	一	13:07	-	85.63	-	-
	四	13:20	00:13	61.19	24.44	28.5
	五	13:21	00:14	51.30	34.33	40.1
10 年	一	13:02	-	110.32	-	-
	四	13:10	00:08	88.81	21.51	19.5
	五	13:10	00:08	71.20	39.12	35.5
25 年	一	13:45	-	115.35	-	-
	四	13:03	00:18	106.96	8.39	7.3
	五	13:04	00:19	86.62	28.73	24.9

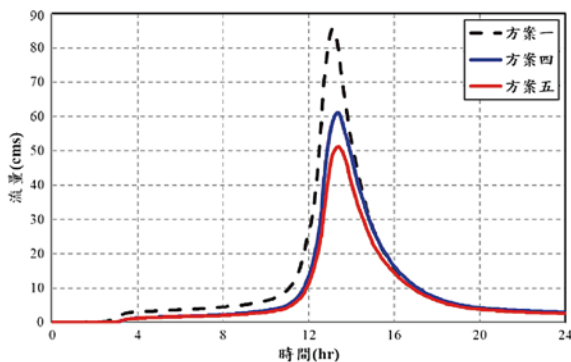


圖 20 菁埔埤排水集水區 5 年重現期暴雨三種方案流量歷線之比較

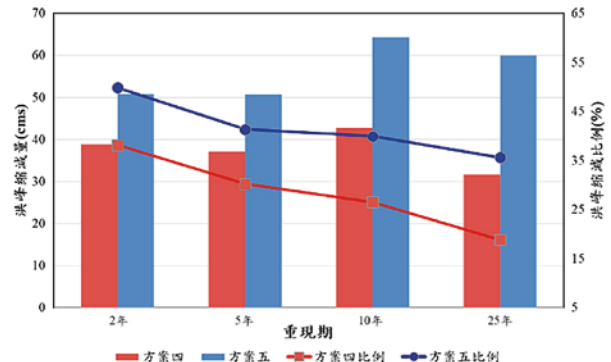


圖 22 南廊排水方案四及五的減洪效果比較

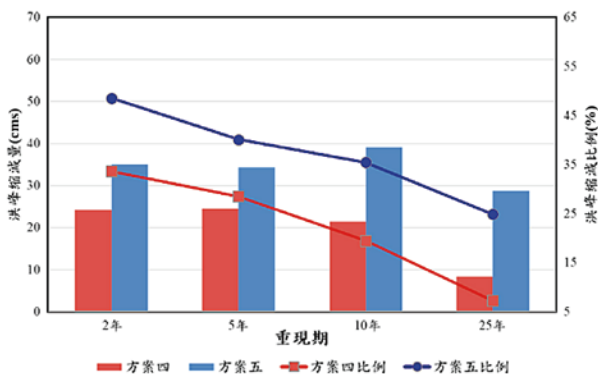


圖 21 菁埔埤排水方案四及五的減洪效果之比較

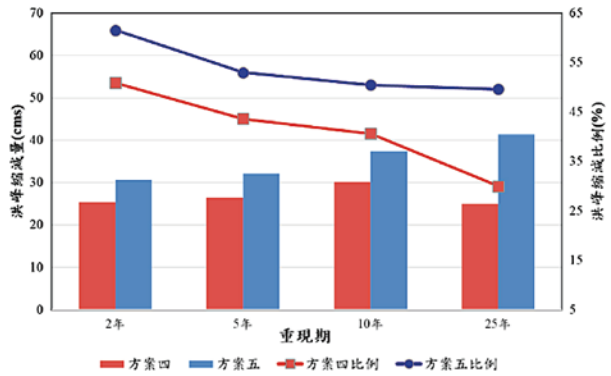


圖 23 瓦瑤埤排水方案四及五的減洪效果比較

擬結果也得到相似之結果，如圖 22 及圖 23 所示。模擬結果顯示提升埤塘蓄洪能力（方案五）可以大幅提升減洪效果，提升效果除了與暴雨頻率（重現期）有關之外，也與集水區及其埤塘特性有關。

結論與建議

本研究以台南橋頭港橋上游集水區為研究區域，探討集水區內埤塘（農塘及魚塢）的變遷及滯洪效果。研究區域包含菁埔埤排水、南廊排水及瓦瑤埤排水等 3

個子集水區，其中瓦瑤埤排水集水區包含在南廊排水集水區內。使用 SWMM 模式分析此 3 個子集水區在 5 種情境（方案一至方案五）及 4 種重現期暴雨（2 年、5 年、10 年及 25 年）條件下埤塘的減洪效果。所得結論與建議說明如下：

1. 圖資收集與判識的結果顯示研究區域在 1904、1921、1944、1955、1999、2008 及 2018 等 7 個年度的面積分別為 204.29、164.14、150.67、165.34、290.28、343.89 及 275.86 公頃。前 4 個年

度(1904~1955)埤塘面積的變化不大,但隨著人口增加,農業及養殖業的發展,埤塘面積遽增,1955年至2008年埤塘面積由165.34公頃增加到343.89公頃(一倍有餘)。後續經濟發展轉型,農業及養殖較為疲弱,2018年埤塘面積降為275.86公頃(低於1999年面積),相較於2008年,這10年間埤塘面積減少約19.8%。

- 在2018年菁埔埤排水、南廊排水、瓦瑤埤排水等三個子集水區的埤塘面積(佔其集水區面積比例)分別為84.8公頃(8.1%)、181.2公頃(9.3%)及181.2公頃(12.3%),其中魚塢(農塘)佔其集水區面積比例分別為5.8%(2.3%)、6.8%(2.5%)及9.3%(3.0%)。這三個子集水區魚塢面積約是農塘面積的2.5、2.7及3.1倍。
- 以2018年地文條件及埤塘分布為基礎,SWMM模式模擬結果,相較於方案一(假設埤塘沒有滯洪功能),埤塘(方案四)對菁埔埤排水、南廊排水及瓦瑤埤排水等三個集水區減洪效果,以2年重現期暴雨為例,分別為34%、38%及51%;以25年重現期暴雨為例,分別為7%、19%及30%。埤塘具有顯著減洪效果,減洪效果與集水區及其埤塘特性有關;對於較小重現期暴雨,埤塘減洪效率更顯著。
- 超前佈署方案(方案五),暴雨前先提升埤塘滯洪能力0.5 m,模擬結果顯示對於2年、5年、10年及25年重現期暴雨,超前佈署方案可增加菁埔埤排水的減洪率分別為15.0%、11.6%、16.0%及17.6%;可增加南廊排水的減洪率分別為11.8%、11.1%、13.4%及16.9%;可增加瓦瑤埤排水的減洪率分別為10.6%、9.4%、9.9%及19.6%,其中以25年重現期暴雨事件的減洪增加率最多。
- 提升埤塘面積或滯洪水深可顯著降低洪峰及淹水風險。反之,降低埤塘面積或可滯洪水深將會導致洪峰增大及增加淹水風險。土地開發利用規劃時,除要評估埤塘生產、生態及生活等三生功能外,更要重視埤塘的滯洪減災功能。此外,集水區埤塘的演變和滯洪效果受到多種因素的影響,隨著氣候變化和人類活動的持續影響,未來埤塘的演變和滯洪效果也將面臨更大的挑戰,需要綜合分析和有效管理加以應對。

誌謝

本研究承蒙國立成功大學「在地實踐社會責任計畫」及「水土保持生態工程研究中心」的支持,順利完成研究區域環境、埤塘、土地利用、渠道及相關水利設施等相關資料的收集彙整及現地調查工作,並依據收集及現地調查資料完成後續模擬分析之工作,特此誌謝。

參考文獻

- 林玲珠(2013),「因應氣候變遷應致力埤塘復育」,財團法人國家政策研究基金會。
- 郭櫻慧(2015),「臺北市南港三大埤塘的變遷探究」,臺北市立大學歷史與地理學系社會科教學碩士學位班碩士論文。
- 方偉達(2015),「埤塘濕地歷史變遷管理數位模式之探討」,濕地學刊,第4卷,第1期。
- 閻克勤、蔡宜穎、紀思寧(2014),「影響桃園市埤塘土地利用變遷因素之研究」,建築與規劃學報,第15卷,第2/3期,第193-214頁。
- 林暉淳(2015),「遙測影像應用於桃園地區埤塘之變遷分析」,國立臺灣大學生物環境系統工程學研究所碩士論文(指導教授:鄭克聲)。
- 洪佳瑩(2006),「桃園地區人工埤池對水資源輔助之分析研究」,國立中央大學水文科學研究所碩士論文(指導教授:李明旭)。
- 翁國豪(2015),「不同土地利用型態滯洪空間效益之探討—以濁水溪下游集水區為例」,銘傳大學都市規劃與防災學系碩士論文(指導教授:吳杰穎)。
- Gironás, J., Roesner, L.A., Davis, J. Davis (2009). "Stormwater Management Model Application Manual." U.S. Environmental Protection Agency.
- 張向寬、權順忠、賴進松、譚義績(2013),「魚塢區域之排洪特性與防止溢堤方案」,農業工程學報,第59卷第1期,第15-25頁。
- Kim, H.D., Kim, J.T., Nam, W.H., Kim, S.J., Choi, J.Y., and Koh, B.S. (2016). "Irrigation canal network flow analysis by a hydraulic model." Irrigation and Drainage (65), 57-65.
- 侯佳秀(2020),「應用SWMM模式分析埤塘對集水區地表逕流影響之研究—以台南橋頭港橋上游集水區為例」,國立成功大學水利及海洋工程學系碩士論文(指導教授:詹錢登)。
- 經濟部水利署(2009),「易淹水地區水患治理計畫—台南縣管區域排水將軍溪排水系統規劃報告」,水利規劃試驗所。

歡迎加入學會



www.ciche.org.tw

下載入會申請書



中國土木水利工程學會
CIVIL AND HYDRAULIC ENGINEERING

e-mail: service@ciche.org.tw

電話:(02) 2392-6325

傳真:(02) 2396-4260



茲附上廣告式樣一則
請按下列地位刊登於貴會出版之「土木水利」雙月刊

此致
社團法人中國土木工程學會

「土木水利」雙月刊
廣告價目表

(費率單位：新台幣元)

刊登位置	金額 (新台幣元)	敬請勾選
封面全頁 彩色	60,000	
內頁中間跨頁 彩色	80,000	
封底全頁 彩色	50,000	
封面裏/封底裏 全頁彩色	40,000	
內頁全頁 彩色 (直式)	30,000	
內頁半頁 彩色 (橫式)	15,000	
內頁 1/4 頁 彩色 (直式)	8,000	
折扣	3 期 9 折， 4 期以上 8.5 折	

刊登月份：

50.4 50.5 50.6 51.1 51.2 51.3 共 次
(8月) (10月) (12月) (2月) (4月) (6月)

註：稿件請提供設計完稿之廣告稿；
相片、圖片等請提供清楚原件或電腦檔。

上項廣告費計新台幣 元整

隨單繳送請查收摺據
請於刊登後檢據洽收

機構名稱：
商號 (請蓋公司印)

負責人：

地 址：

廣告聯絡人：

電 話：

廣告訂單聯絡：社團法人中國土木工程學會 電話：(02) 2392-6325 email: service@ciche.org.tw

98-04-43-04

郵政劃撥儲金存款單

收款帳號	0	0	0	3	0	6	7	8	金額 新台幣 (小寫)	萬	佰	拾	萬	萬	仟	佰	拾	元
------	---	---	---	---	---	---	---	---	-------------------	---	---	---	---	---	---	---	---	---

通訊欄 (限與本次存款有關事項)

繳納會費

- 常年會員年費 1,200 元
 初級會員年費 300 元

訂閱土木水利雙月刊，一年六期

- 國內·個人會員 新台幣 300 元
 國內·非會員及機關團體 新台幣 1,800 元
自第 卷第 期起， 年期雙月刊 份

訂閱中國土木工程學刊，一年八期

- 國內·個人會員 新台幣 1,600 元
 國內·非會員及機關團體 新台幣 3,600 元
 國外·個人 美金 80 元
 國外·機關團體 美金 200 元
自第 卷第 期起 年期學刊 份

收款戶名	社團法人中國土木工程學會	
姓名	寄 款 人	
地 址	地 址	
電 話	電 話	
	主管：	
	經辦局收款戳	

虛線內備供機器印錄用請勿填寫

- ◎ 寄款人請注意背面說明
◎ 本收據由電腦印錄請勿填寫

郵政劃撥儲金存款收據

收款帳號戶名	
存款金額	
電腦紀錄	
經辦局收款戳	



建構安全便捷的捷運系統

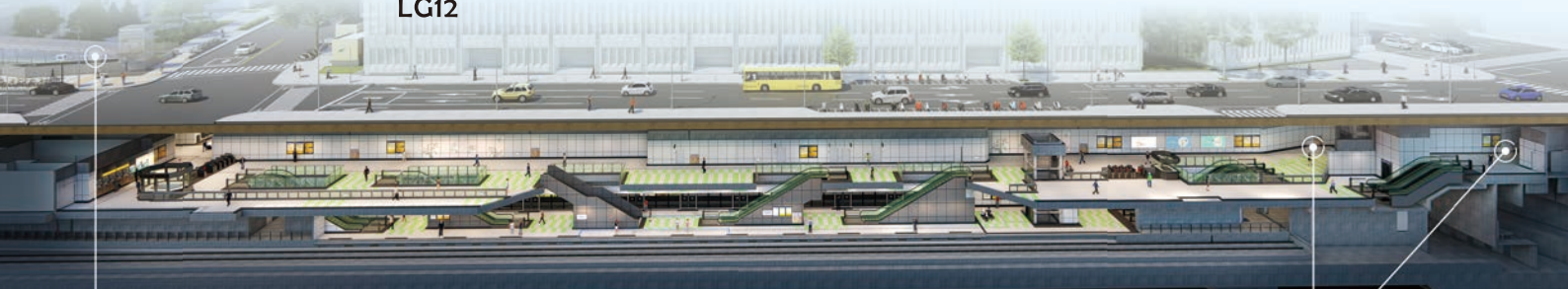
萬大-中和-樹林線

第一期工程路段：中正紀念堂站(臺北市)-機廠段(新北市土城區金城路)，均為地下段，全長約9.5公里(含機廠支線約0.7公里)，共設9座地下車站和1座機廠。

第二期工程路段：機廠(新北市土城區金城路)-迴龍段(新北市新莊區與中和新蘆線迴龍站相接)，全長約13.3公里(地下段2.8公里/高架段10.5公里)，共設13座車站(2座地下車站及11座高架車站)。



臺北市政府捷運工程局
 臺北市中山北路二段48巷7號
 Tel: 886-2-25215550 <http://www.dorts.gov.taipei>



廣告

出入口 A

轉乘 **R** 淡水信義線 Tamsui-Xinyi Line **G** 松山新店線 Songshan-Xindian Line

中正紀念堂站



* 湖山水庫工程
掌握億萬年記錄的奧秘

湖山水庫由湖山主壩、湖山副壩及湖南壩等壩所組成於清水溪建置桶頭攔河堰越域引水，並與集集攔河堰聯合運用中興自2002年起參與大壩及溢洪道等結構物之規劃與設計從大壩完工至今，持續負責水庫安全檢查與監測工作



大地工程團隊


中興團隊專業服務

水利、大地、電力、結構、建築、軌道、交通、系統機械、環境、海岸及港灣、都市設計、工業城鄉開發園區規劃等之規劃、設計與施工監造管理

聯絡資訊

105409 臺北市松山區南京東路五段171號
電話：(02) 2769-8388 傳真：(02) 2763-4555
E-mail：sinotech@sinotech.com.tw
<https://www.sinotech.com.tw>

正派經營 · 品質保證 · 追求卓越 · 創新突破

 中興工程顧問股份有限公司
SINOTECH ENGINEERING CONSULTANTS, LTD.



▼ 新店寶高智慧產業園區



高品質的營建工程

是我們對構築永續城市的承諾

永續城市 工程隊

從民生消費到國際展會
從軌道經濟到產業聚落
城市的發展與經濟脈動密不可分



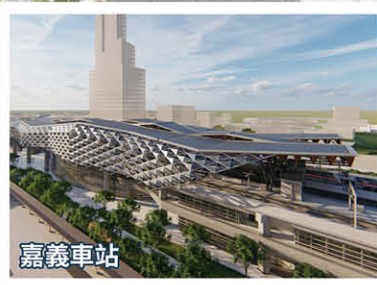
冠德微山丘



南門市場



桃園會展中心



嘉義車站



根基營造
KEDGE CONSTRUCTION

台北市大安區和平東路三段131號
02-2378-6789



根基營造 F B 粉絲頁



根基營造官方網站