



# 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<sup>†</sup> 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<sup>[1,2]</sup>。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

<sup>†</sup> 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<sup>[3]</sup>，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<sup>[4]</sup>，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



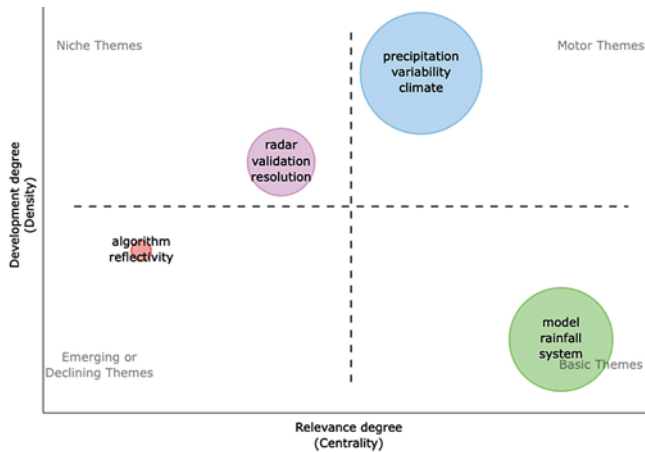


圖 3 概念結構分析產製之氣象水文研究主題合成圖 (composite thematic map)

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，

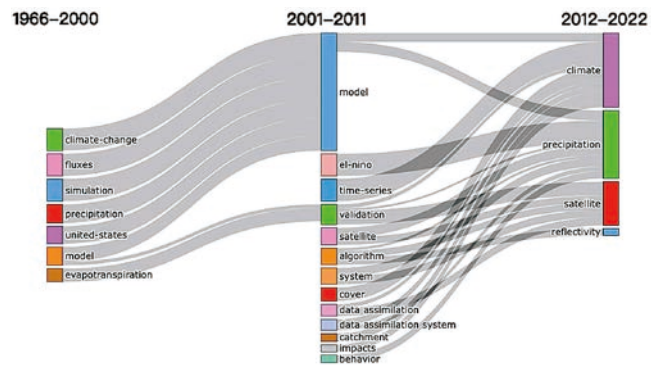


圖 4 以 2000 和 2011 年作為斷點所產製之氣象水文研究主題演變圖 (thematic evolution)

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爲驗證方向之主題。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.*<sup>[6]</sup> 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.*<sup>[6]</sup>），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

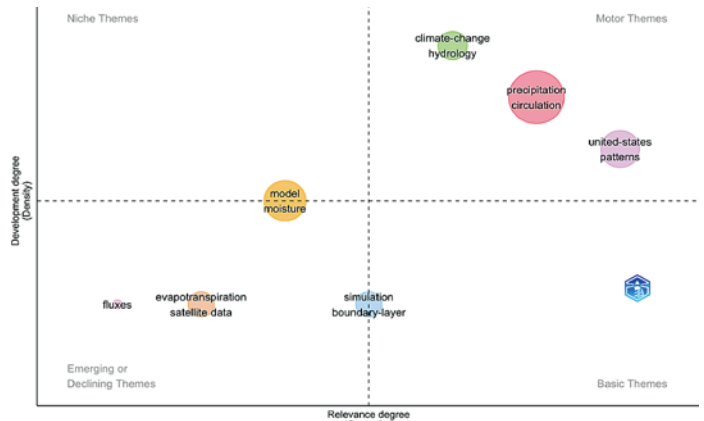


圖 5 如圖 3，但為第一時間片段（1966 ~ 2000）之主題合成圖。

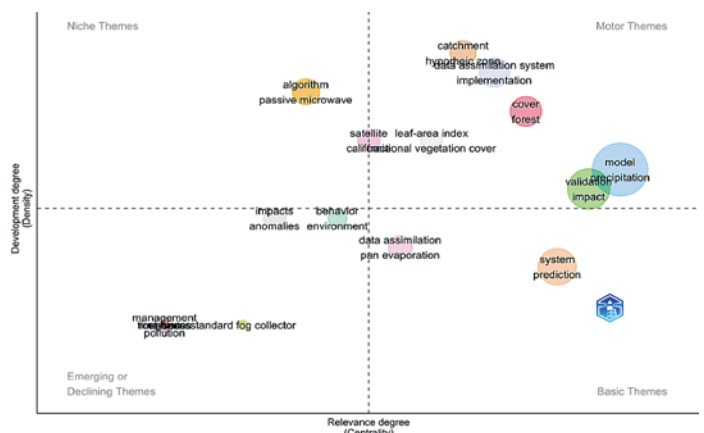


圖 6 如圖 3，但為第二時間片段（2001 ~ 2011）之主題合成圖。

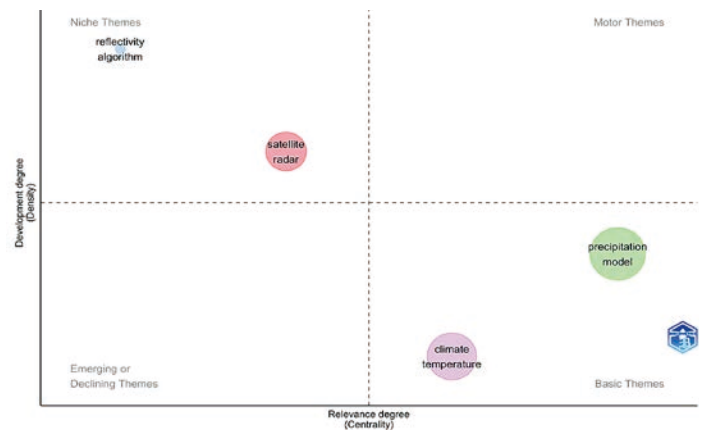


圖 7 如圖 3，但為第三時間片段（2012 ~ 2022）之主題合成圖。

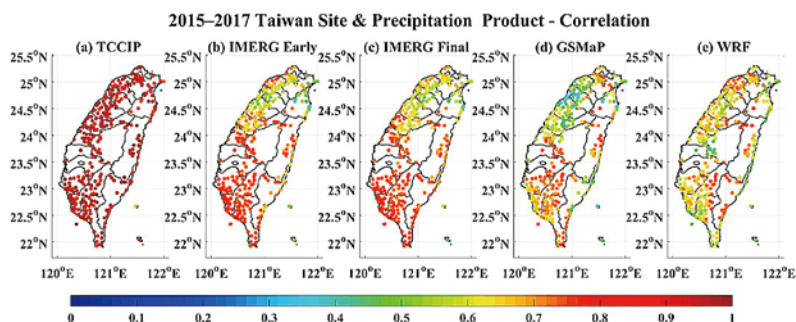


圖 8 2015 至 2017 年不同降雨產品與氣象局測站計算之相關係數（圖來源：Li *et al.*<sup>[6]</sup>）

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

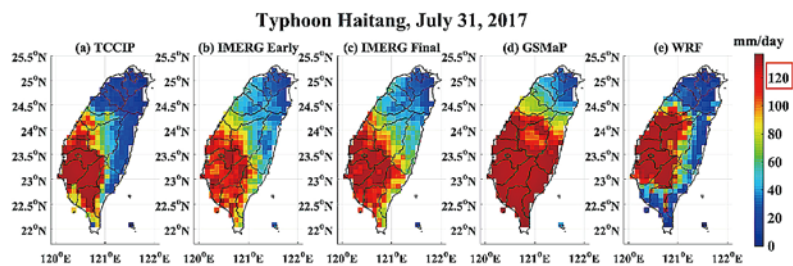


圖 9 2017 年海棠颱風之不同降雨產品之空間分佈狀況 (圖來源：Li *et al.* [6])

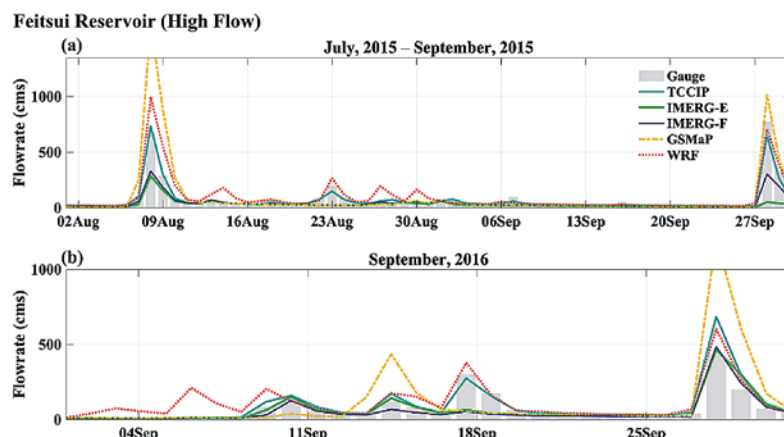


圖 10 利用不同降雨產品於翡翠水庫集水區於特定高流量事件進行模擬之流量歷線 (圖來源：Li *et al.* [6])

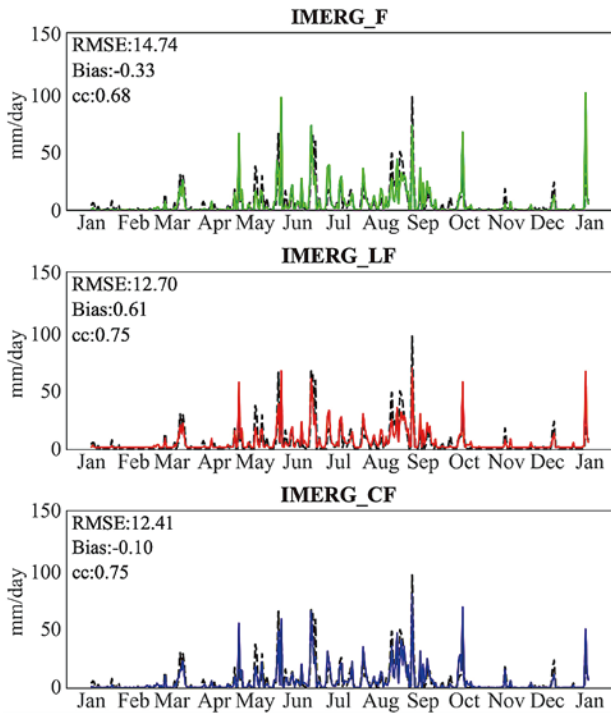


圖 11 由上至下分別為 2019 年未校正 (綠色) 和利用 LSTM 或 ConvLSTM 校正 (紅色和藍色) 之 IMERG Final Run 於臺灣地區之平均日降雨序列, 黑色虛線為同年之 TCCIP 序列。由兩雨序列計算出之三個指標一併附於圖中 (圖來源: 高詠盛<sup>[7]</sup>)。

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<sup>[10]</sup> 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。

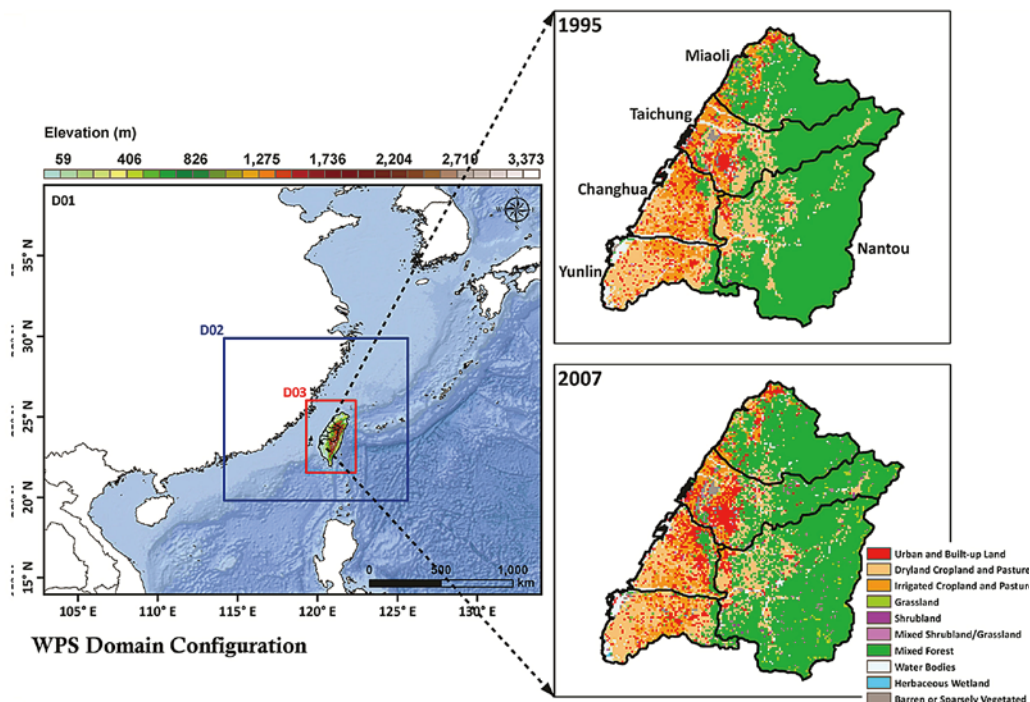


圖 12 針對臺灣中部地區之土地利用與覆蓋變遷所進行之數值模擬實驗, 左圖呈現 WRF 模式三層巢狀網格, 右圖則呈現臺灣中部地區 1995 與 2007 年由國土測繪局公布之土地利用狀況 (圖來源: Chen et al.<sup>[9]</sup>)。

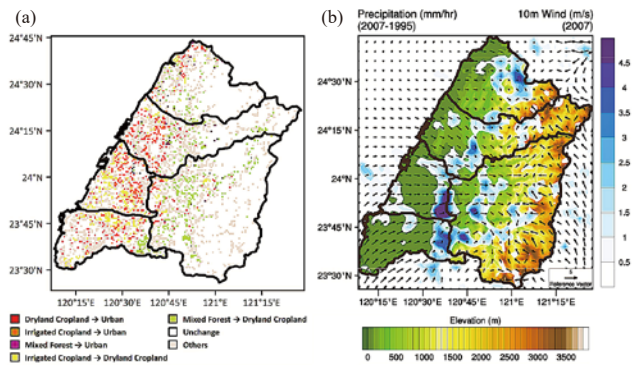


圖 13 (a) 1995 至 2007 之土地利用轉化情形；(b) 模擬降水之正距平與十米高風場和高程疊合結果 (圖來源：Chen *et al.* [9])。

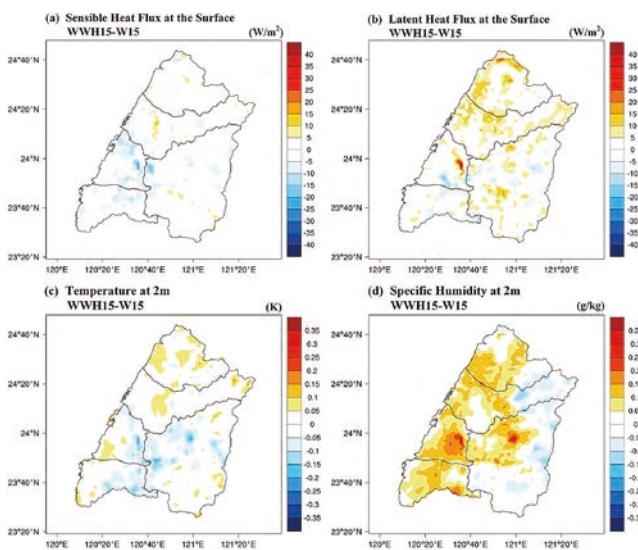


圖 14 WRF 與 WRF-Hydro 模式耦合模擬與 WRF 獨立運行之模擬結果差異，兩者皆以 2015 年土地利用作為地表驅動條件 (因此以 WWH15 代表前者，W15 代表後者)；(a)~(d) 分別為可感熱、潛熱、兩米高溫度、及兩米高比濕 (圖來源：葉靜茹 [10])。

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](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., Ghafoor, 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.