災害防救科技與知識專欄 —

沿海鄉鎮之動態淹水警戒值的建置與測試

林嫩瑛[1]、張志新[1]、陳偉柏[1]、陳奕如[2]、于宜強[2]、林欣弘[2]

[1]國家災害防救科技中心 坡地與洪旱組

[2]國家災害防救科技中心 氣象組

摘要

臺灣西南沿海鄉鎮，多位在地勢平坦的感潮河段內，淹水成因易受沿海潮位影響。為使淹水預警訊息能反應此類水文特性，國家災害防救科技中心(以下簡稱災防科技中心)於 2020 年開發適合沿海鄉鎮的動態淹水警戒值預警技術，並於 2021 年完成建置「海岸淹水預警(https://watch.ncdr.nat.gov.tw/watch_coastalflood)」展示系統，進行作業化測試。動態淹水警戒值，是透過聯合風險分析(Copula Analysis)方法，建置可考量潮位和雨量淹水風險因子的警戒值。動態淹水警戒值的預警特性是，淹水門檻值會隨著潮位變化，當沿海潮位增高時，淹水門檻值會降低，反之亦然。當動態淹水警戒值完成設定後，本預警系統即可透過天氣與海象預報系統提供的雨量和潮位資訊，提供未來 48 小時內的淹水預警訊息。

一、 前言

本研究使用聯合風險分析方法，依據沿海鄉鎮淹水特性，建置複合式雨量-潮位淹水預警指標(以下簡稱動態淹水指標)。由於沿海鄉鎮區域排水能力多與沿海潮位有關[1-3]，若僅使用雨量作為淹水指標，劃分沿海鄉鎮淹水風險等級，常導致誤判情形。本研究以發生在臺灣西南沿海鄉鎮的淹水事件為樣本，透過聯合風險分析方法[4-5]，建置能表示區域淹水警戒值、雨量和沿海潮位之間的相關公式。此淹水警戒值的表示式，可透過多種雨量和沿海潮位組合表示相同淹水風險情境。例如，當沿海潮位增高時，達淹水門檻所需的雨量強度會降低。

動態淹水警戒值的應用方式，與僅使用雨量作為淹水指標的預警方式相似。例如，雨量淹水指標，搭配雨量預報產品，產製淹水預警訊息；沿海鄉鎮動態淹水指標，則搭配雨量和暴潮聯合預報產品，提供未來 48 小時內的淹水預警訊息。本研究以三場歷史颱風事件和今年 8 月發生在臺灣西南沿海的豪雨致災事件為例，說明動態淹水警戒值的應用情形。

動態淹水警戒值預警成果，已初步展示在災防科技中心的天氣監測網頁 WATCH 上，提供雲林、嘉義和高雄部分沿海鄉鎮的淹水預警。後續，將持續完善此展示平台與預警效能。

二、 動態淹水警戒值預警流程

動態淹水警戒值預警方法的作業流程，如圖1所示。首先，運用大氣模式WRF (Weather Research Forecasting)進行系集預報作業，評估颱風動態和可能的降雨分布。接著，將各系集成員預報的海面風場和氣壓場，作為暴潮模式POM (Princeton Ocean Model)的驅動力，模擬臺灣周圍海域的暴潮動態。同時，暴潮模式系統亦可考慮天文潮的運動，透過全球天文潮預報模式TPXO 6.2 (TOPEX/POSEIDON)推算的天文潮，作為暴潮模式的水位邊界條件而得。詳細的颱風-暴潮聯合預報系統介紹與預報效能評估，請參見[6]。最後，各系集成員提供的預報雨量和暴潮，即可輸入動態淹水警戒值轉換公式，評估沿海鄉鎮淹水風險。

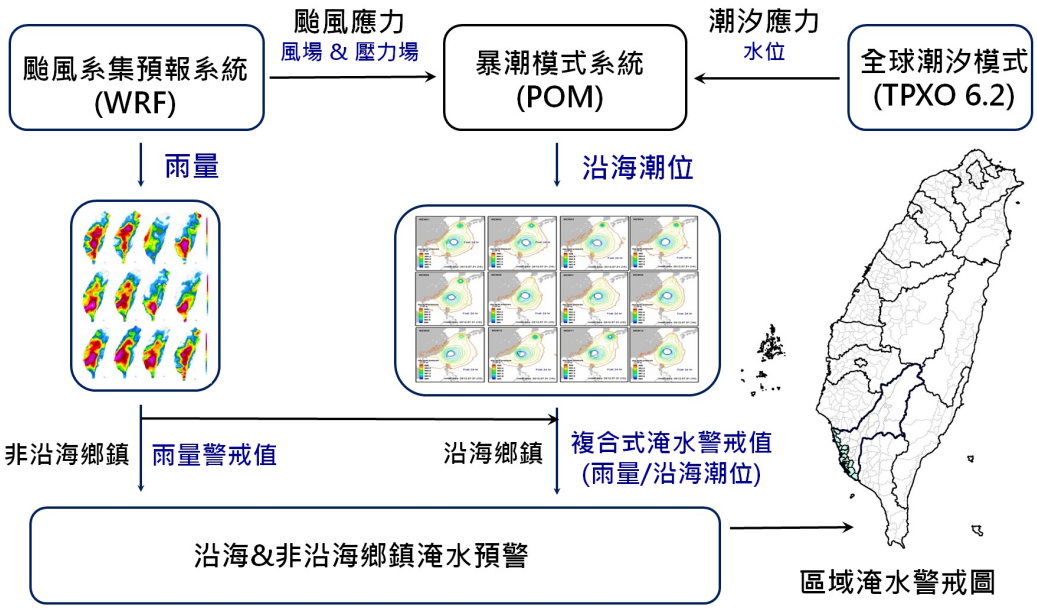

圖 1　沿海與非沿海鄉鎮淹水預警流程

（一）動態淹水警戒值設定方式

沿海鄉鎮的動態淹水警戒值$f_{X1X2}(x1,x2)$設定方是可表示為

$$f_{X1X2}(x1,x2) = C \cdot f_{X1}(x1) \cdot f_{X2}(x2) + \epsilon \quad (1)$$

其中，$f_{X1}(x1)$和$f_{X2}(x2)$分別是潮位和雨量淹水因子$x1$和$x2$的時序分布圖，C為相關係數，ϵ為背景參考值。

（二）關聯結構相關係數

關聯結構(Copula)是聯合風險分析方法，是用來表示兩個以上的隨機變數(例如，雨量和沿海水位)與應變數(例如，淹水事件)之間的對應關係，已被廣泛應用在天然災害風險分析領域[4]。用來表示關聯結構的函數種類很多，最受歡迎的類別為阿基米德關聯結構(Archimedean copulas)，包括Clayton、Frank和Gumbel三種函數[5]。這類型函數的優點是可以將雙變數之間的相關性，僅用一個參數表達，此相關參數稱為τ (Kendall's tau)。因此，聯合風險分析方法得到的相關參數τ，即是本研究用來建置動態淹水警戒值之相關係數C的參考依據。

用來分析多變數的關聯結構的分析工具有很多，例如，Matlab [7]和R語言[8]數學軟體。本研究使用R語言所建置的數學分析工具，找出臺灣西南沿海鄉鎮發生的淹水事件與致災因子(雨量和潮位)之間

的關聯結構。應用方法與操作流程，包含觀測資料的初步統計特性分析、使用卡方適合度檢定找出最適合之關聯結構、計算關聯結構相關參數、使用蒙地卡羅模擬法產製不同風險組合資訊、資料輸出並製圖等。關於進一步的說明，讀者可參閱[9-11]。

資料分類的方式，本研究以臺灣西南沿海鄉鎮的淹水事件為樣本，依不同集水區的雨量站和鄰近沿海潮位站作為採樣分類。例如，雲林縣的四湖雨量站和箔子寮潮位站觀測到的雨量和潮位，代表影響四湖鄉的淹水風險因子；嘉義縣的鰲鼓雨量站和東石潮位站的觀測雨量和潮位，用來分析東石鄉的淹水風險；高雄市的高雄雨量站和潮位站觀測，用來分析愛河流域所屬行政區的淹水特性等。

資料採樣的方式，我們以最大時雨量為中心，紀錄前後3小時內的時雨量和水位，如圖2的藍色圓點所示。由於，計算淹水事件的關聯結構時，雨量和水位的數值需介在0和1之間。因此，我們將雨量和水位分別除以它們的最大值，其中，最大時雨量R_{max}為110毫米，最大沿海水位η_{max}為2.2公尺。

關聯結構Copula的選取方式，我們以R 語言平台上內建的模組BiCopSelect進行分析，得到法蘭克關聯結構(Frank copula)為最佳適合函數，如圖2的曲線所示。圖2中的曲線，為法蘭克函數的等值線，也

是淹水風險相同的等值線，說明相同淹水風險的事件，可由不同的雨量和潮位組合而成。當沿海潮位增高時，雨量的淹水門檻值會降低，反之亦然。同時，造成淹水事件的雨量和潮位組合，以位在等值線內圈的組合出現機率最高，外圈的組合出現機率最低。

（三）應用案例

動態淹水警戒值預警方法，如圖 3a-c 所示。紅色線表示的是動態淹水警戒值在時間上的變化情形，藍色柱狀圖表示的是 1 小時累積雨量的時序變化圖；當雨量(藍色柱狀圖)超越警戒值(紅線)時，則發布淹水警戒。由於，紅色線所表示的動態淹水警戒值能反映沿海潮位的影響，且波動的相位與沿海潮位相反，因此，當沿海潮位升高時，淹水警戒值會降低。

本研究分別以凡那比(2010)、莫蘭蒂(2016)、卡玫基(2008)三場颱風事件，說明動態淹水警戒值在高雄市愛河流域的應用結果。

凡那比(2010)颱風造成的淹水事件，若依據傳統雨量淹水門檻值的預警方式，1 小時累積雨量未達 60 毫米的情況下，不會發布淹水預警訊息。但是，若依據本研究建置之動態淹水警戒值，凡那比颱風事件的降雨(3a；藍色柱狀圖)情況，有達發布淹水警戒的條件(圖 3a；紅線)，而實際也有發生淹水情形(圖 3d)。

莫蘭蒂(2016)和卡玫基(2008)颱風事件，互為對照案例。兩場颱風事件的降雨強度相當，但是莫蘭蒂(2016)和卡玫基(2008)颱風的降雨時間點，落在不同漲退潮時期。

若依據傳統雨量淹水警戒值的預警方式，這兩場颱風事件的時雨量都超過 60 豪米，預警作業皆會發布淹水警戒訊息。但是，實際的觀測結果顯示，僅莫蘭蒂颱風事件有造成淹水(圖 3e)情形，而卡玫基颱風則無(圖 3f)。

若依據本研究開發的動態淹水警戒值預警方法，莫蘭蒂颱風事件的降雨(圖 3b；藍色柱狀圖)，發生在沿海潮位較高，也就是淹水門檻值(圖 3b；紅線)較低的情況下，有達發布淹水預警訊息的條件，而實際也有觀測到淹水情形(圖 3e)。相反地，卡玫基(2008)颱風事件，1 小時的降雨強度雖與莫蘭蒂颱風相近(圖 3c；藍色柱狀圖)，但因沿海潮位較低，淹水門檻值較高(圖 3c；紅線)，雨量未超過淹水警戒條件，而實際也沒有淹水發生(圖 3f)。

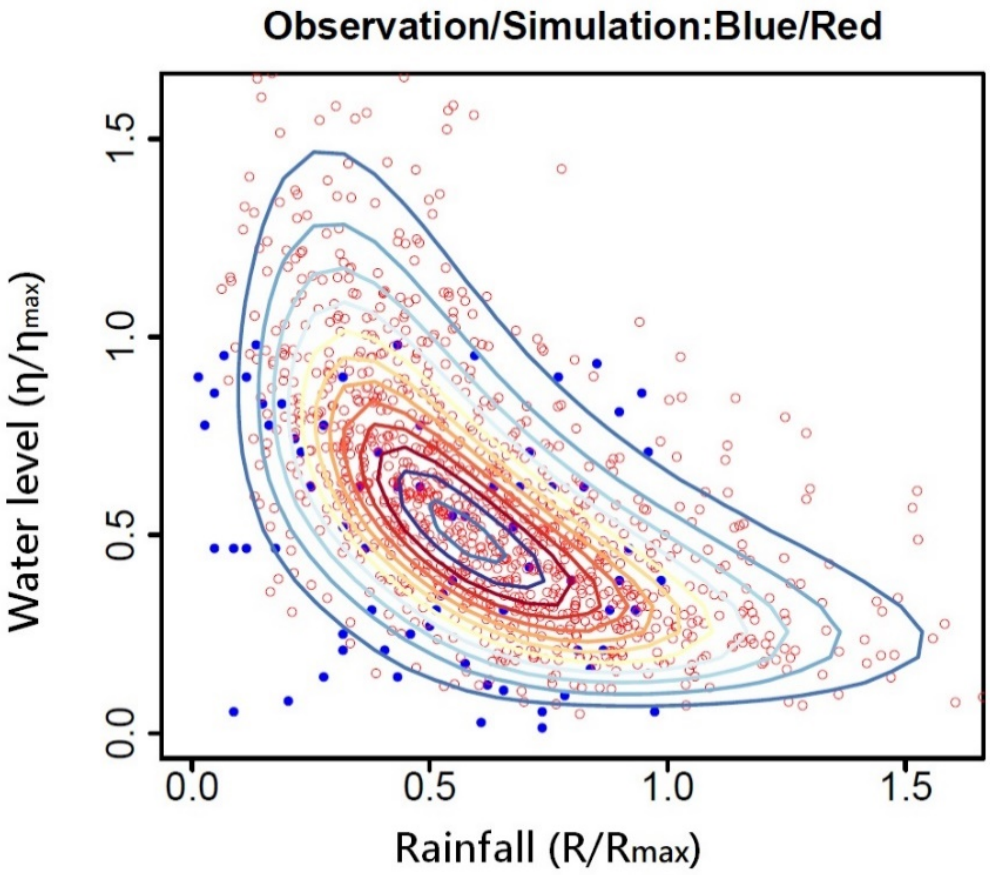

圖 2　淹水風險受雨量和潮位影響下的關聯結構分布情形。藍色圓點為歷史淹水事件的雨量和沿海潮位觀測；紅色圓點為符合法蘭克關聯結構(Frank Copula)下產製的虛擬淹水事件。其中，最大歷史觀測時雨量 R_{max} 為 110 毫米，最大歷史觀測水位高 η_{max} 為 2.2 公尺

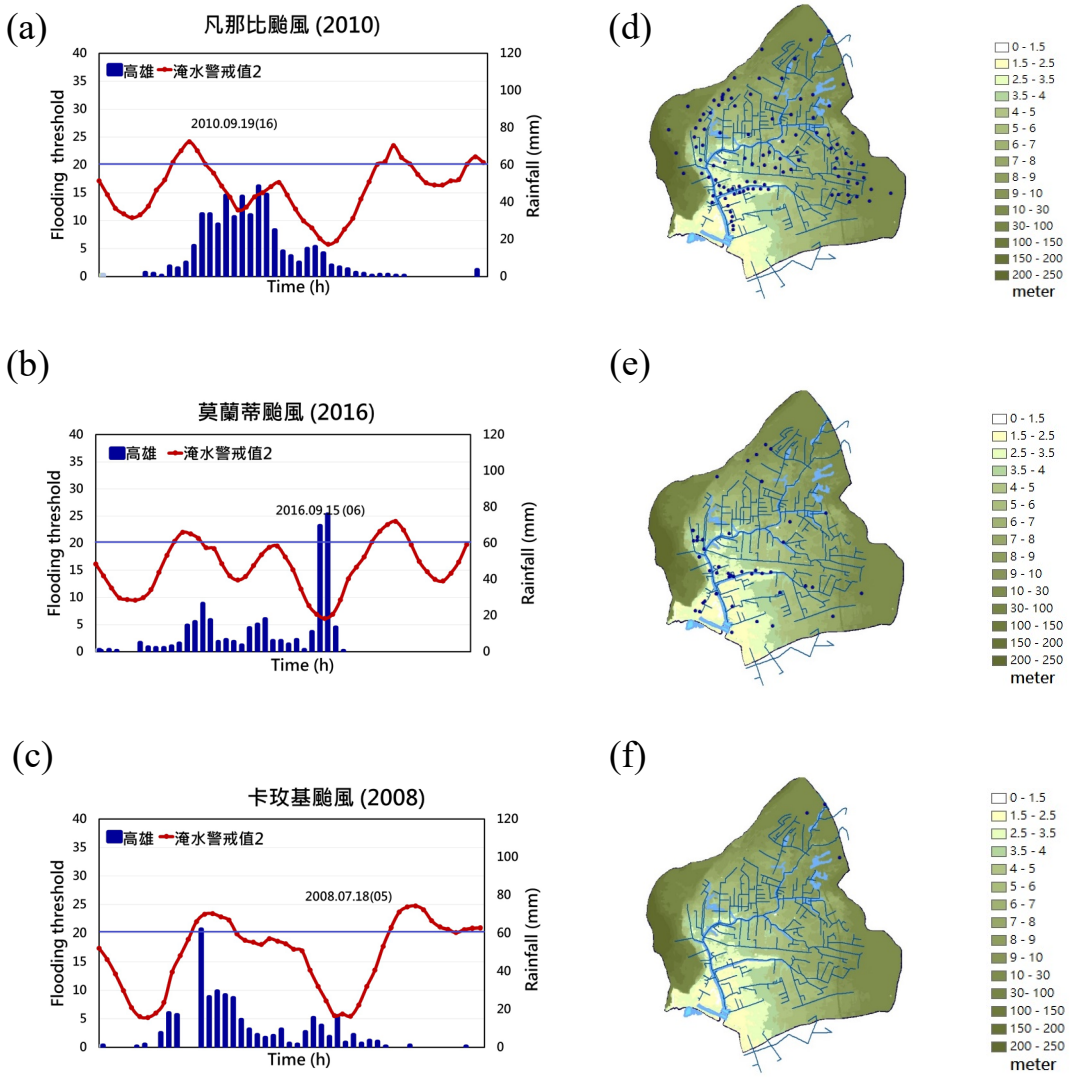

圖 3　高雄市愛河流域(圖 d-f)顯示不同颱風事件的淹水點(藍色圓點)、都市排水渠道(藍線)和地理高程(顏色對照表)的相對位置。動態淹水警戒值(紅線；圖 a-c)與降雨分布(藍色柱狀圖)的相對分布情形，當降雨強度(藍色柱狀圖)超越淹水警戒值(紅線)時，表示需發布淹水警戒。圖 a-c 中的藍線為傳統方法所使用的一級淹水雨量警戒值

三、 沿海鄉鎮淹水預警展示平台

沿海鄉鎮動態淹水警戒值預警成果，目前已建置在災防科技中心的天氣監測 WATCH 網頁上，如圖 4 所示。

沿海鄉鎮預警展示平台，共分成三個展示區塊。圖 4 左方(A 區)展示的是目前有進行預警作業的沿海鄉鎮，包含雲林縣的台西鄉、四湖鄉、口湖鄉，嘉義的東石鄉、布袋鎮和義竹鄉，高雄市的鹽埕區、苓雅區和前鎮區；圖 4 右上方(B 區)展示的是動態淹水警戒值和雨量的時序變化情形，當 1 小時累積雨量超越動態淹水警戒值時，即表示該區域有淹水風險。其中，橘色的線和柱狀圖，表示的是觀測資料的應用結果；淡藍色的線和柱狀圖，表示的是預報資料的應用結果。當沿海鄉鎮有淹水風險時，即會列在圖 4 右下方的表格中(C 區)。

為檢驗動態淹水警戒值的預警效能，本研究以實際觀測到的雨量(橘色柱狀圖)和使用實際沿海潮位推算的動態淹水門檻值(橘色線)，校驗達淹水警戒的鄉鎮，是否有實際發生淹水的情形。圖 5-8 顯示三場沿海鄉鎮淹水預警展示平台的作業實例，包含 2021 年 8 月 6 日發生在雲林縣和嘉義縣的淹水事件，以及 2021 年 8 月 1 日發生在高雄市的淹水事件。這三場淹水事件，皆反應沿海鄉鎮淹水與否，與沿海潮位相關。

實例一，圖 5 顯示雲林縣口湖鄉的淹水感測器記錄到兩個淹水時段，開始淹水時間大約在 8 月 6 日 4:00 AM (藍色箭頭)和 9:00 AM(紅色箭頭)。紅色箭頭所指的時段，淹水警戒(圖 5 左)與淹水感測器觀測(圖 5 右)相符。但是，藍色箭頭所指的時段，有觀測到淹水，但是口湖鄉區域平均雨量未超過動態淹水警戒值。若進一步檢視口湖鄉雨量站的觀測(圖 6)，發現區域平均雨量(約 30 毫米)，比觀測站的雨量(約 40 毫米)略低。說明雨量在空間解析度的準確度，即雨量觀測誤差，會影響動態淹水警戒值的預警效能。當雨量觀測誤差較低時，例如紅色箭頭所指的時段，動態淹水警戒值的預警成果，符合實際淹水情形。

實例二，圖 6 顯示嘉義縣東石鄉的兩個淹水時段，淹水警戒與淹水觀測皆相符。尤其，在第二個淹水時段(藍色箭頭指示處)，由於，降雨發生在滿潮時段，動態淹水警戒值降低，所以，即使當時雨量較小(大約 20 毫米)，雨量仍超越淹水警戒值，與實際淹水觀測相符。

實例三，圖 7 顯示高雄市前鎮區的淹水事件比對結果，同樣說明沿海潮位升高時，區域淹水風險會增加。動態淹水警戒值的設定方式，可以判別潮位帶來的淹水風險。

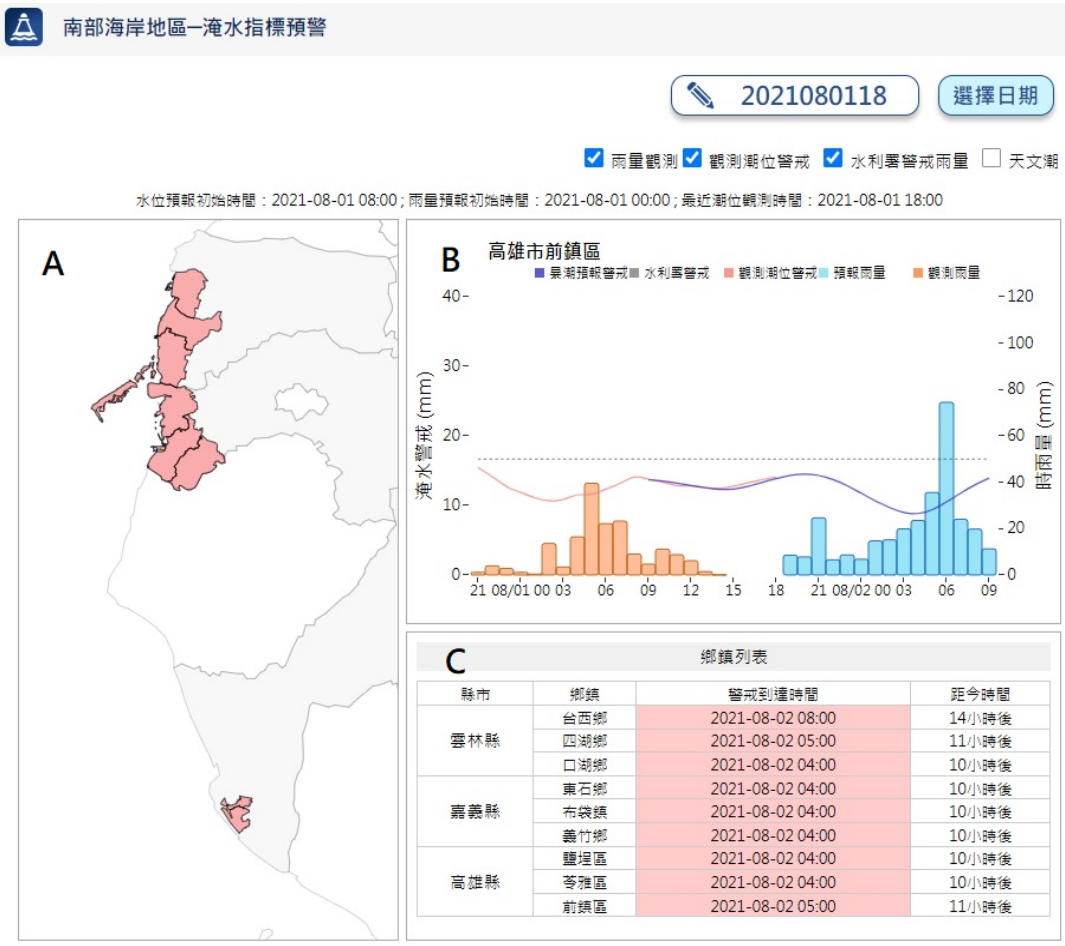

圖 4　沿海鄉鎮動態淹水警戒值預警展示平台。A 區展示的是有提供預警的沿海鄉鎮，使用粉紅/灰色，標示有/無淹水風險。B 區展示的是動態淹水警戒值(曲線)和時雨量(柱狀圖)的分布圖，曲線和柱狀圖顏色為橘色/藍色時，分別表示追報/預報(hindcast/forecast)。C 區表列的是將有淹水風險的鄉鎮，以及淹水可能發生時間

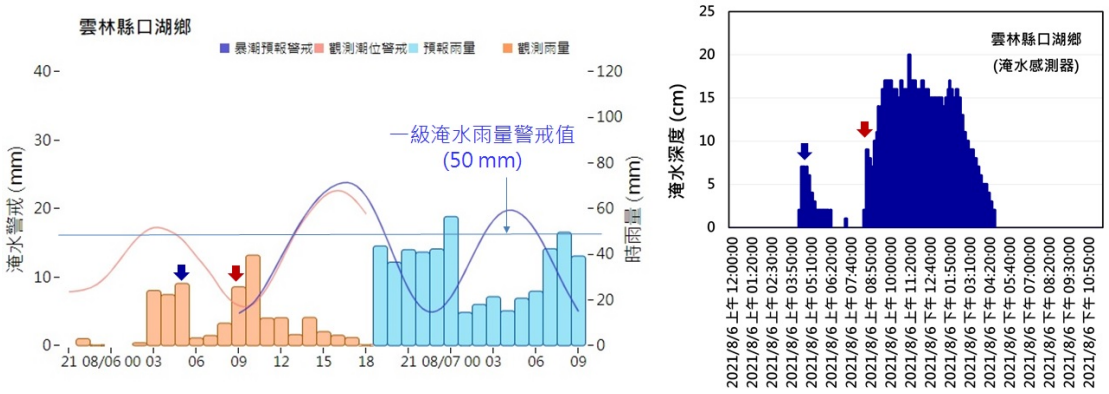

圖 5　雲林縣口湖鄉動態淹水預警作業成果(左)和淹水感測器觀測到的淹水歷程(右)。發生在 2021 年 8 月 6 日的淹水事件，可分成兩個時段，淹水起始時間，大約分別落在上午 5 點和 9 點

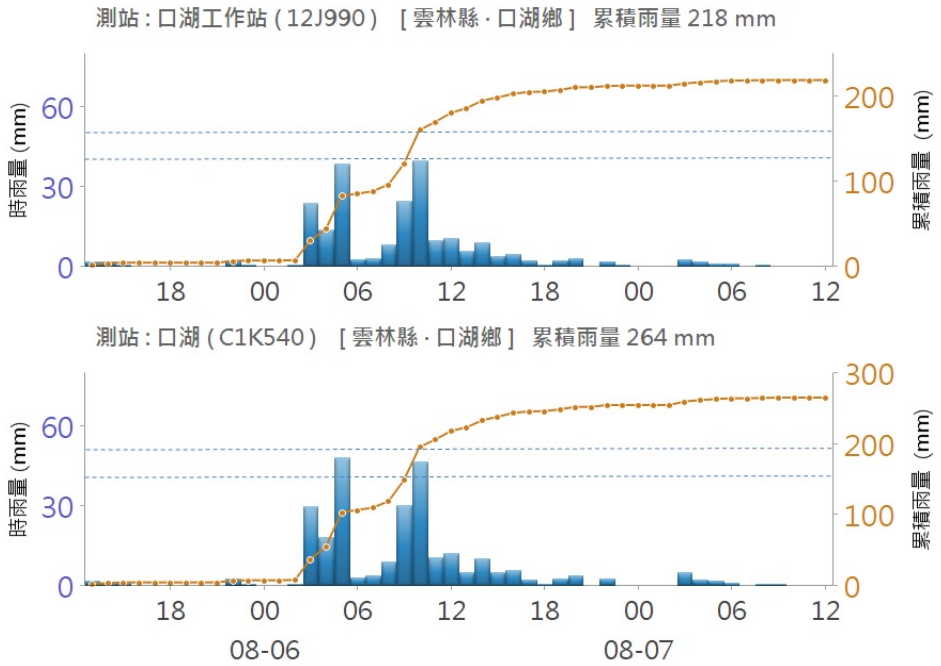

圖 6　雲林縣口湖鄉雨量站觀測到的雨量歷程。雨量站分別為口湖工作站(上)和口湖(下)

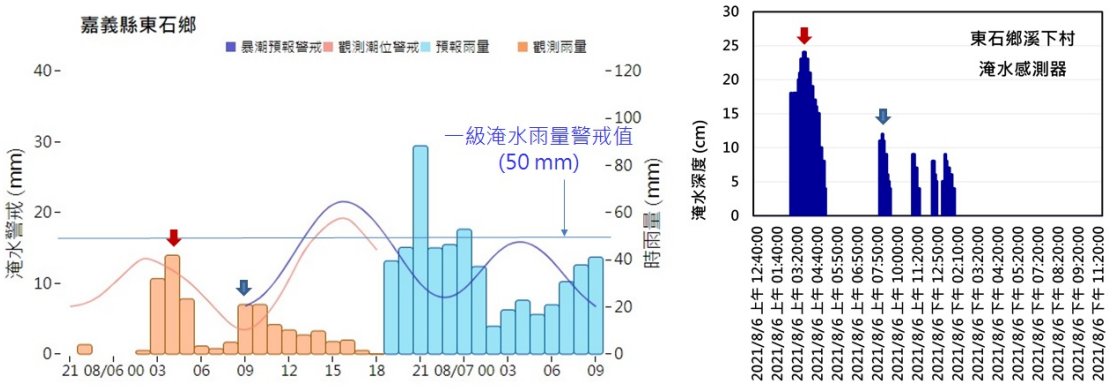

圖 7　嘉義縣東石鄉動態淹水預警作業成果(左)和淹水感測器觀測到的淹水歷程(右)。發生在 2021 年 8 月 6 日的淹水事件，可分成兩個時段，淹水起始時間，大約分別落在上午 5 點和 9 點

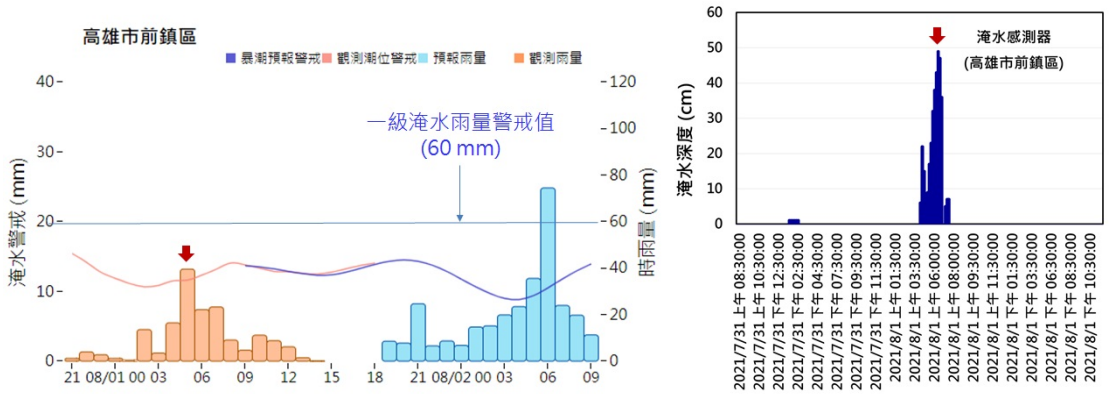

圖 8　高雄市前鎮區動態淹水預警作業成果(左)和淹水感測器觀測到的淹水歷程(右)。發生在 2021 年 8 月 1 日的淹水事件，淹水起始時間大約落在上午 4 點

四、 結論

臺灣西南沿海地勢平坦，是較常發生淹水的區域。同時，也是人口聚集，都市快速發展的地方。隨著都市發展，滯洪綠地逐漸變少，當颱風帶來的強降雨降落地表時，都市排水系統的疏洪能力，決定了區域淹水風險的高低。然而，都市防洪建設有其限度，隨著氣候變遷，降雨強度超過都市防洪標準的極端降雨事件，幾乎每年都會發生，不再罕見。因此，如何提供有時效性且準確的預警訊息，做為防災應變作業參考，是建構韌性城市的要素。

由於沿海鄉鎮所在的河川集水區小，洪水匯流時間短，淹水模式系統所需的空間和時間解析度皆高。淹水預警區域所需的準確度，即是雨量和暴潮預報的主要挑戰來源。例如，愛河流域面積僅 56 平方公里，集流時間約 1-2 小時。若雨量預報的空間誤差若大於 10 公里，即意味著雨是下在不同的集水區；又或者，當預報降雨時間誤差大於 2 小時，即意味著洪水匯流至海口時，可能是遇到不同的漲退潮情境，淹水風險明顯不同。另一方面，高雄愛河流域的都市人口，約 70 萬人。若短時強降雨是發生在人們上下班通勤時刻，意味著將有很多人同時暴露在災害風險中。因此，越早提供準確的預警訊息，越能降低人們暴露在災害的風險中。

本研究依據臺灣西南沿海鄉鎮的水文特性，分析多場歷史淹水事件；並且，透過聯合風險分析方法，找出淹水事件和區域降雨量及沿海潮位的關係，建置了複合式雨量-潮位之淹水警戒值，亦即動態淹水警戒值，並完成多場淹水預警作業測試。測試結果顯示複合式雨量-潮位之淹水警戒值能反映沿海鄉鎮的淹水特性，在搭配雨量和暴潮預報資訊的情況下，可提供沿海鄉鎮未來 48 小時的淹水預警訊息。

致謝

雨量和潮位觀測資料為氣象局提供，淹水觀測資料為應變管理資訊雲端服務 EMIC 系統提供，淹水感測器資料為水利署提供。

參考文獻

1. Chen, Y. C., Yang, T. M., Hsu, N. S., and Kuo, T. M., 2012. Real-time discharge measurement in tidal streams by an index velocity. Environ. Monit. Assess., 184, 6423-6436
2. Sassi, M. G. and Hoitink, A. J. F., 2013. River flow controls on tides and tide-mean water level profiles in a tidal freshwater river. J. Geophys. Res. Oceans, 118(9), 4139-4151
3. Hoitink, A. J. F., and Jay, D. A., 2016. Tidal river dynamics: Implications for deltas. Rev. Geophysics., 54(1), 240-272
4. Lian, J. J., Xu, K., & Ma, C., 2013. Joint impact of rainfall and tidal level on flood risk in a coastal city with a complex river network: A

case study of Fuzhou City, China. Hydrol. Earth Syst. Sci., 17, 679-689

5. Nelsen, R. B., 1997. Dependence and order in families of Archimedean copulas, Journal of Multivariate Analysis, 60, 111-122
6. Lin, M.-Y., Sun, W.-Y., Chiou, M.-D., Chen, C.-Y., Cheng, H.-Y., and Chen, C.-H., 2018. Development and evaluation of a storm surge warning system in Taiwan, Ocean Dynamics, 68, 1025-1049
7. MathWorks, 2021. Simulating Dependent Random Variables Using Copulas, The MathWorks, Inc., https://reurl.cc/43gvZD
8. Michy A., 2017. Advanced Modeling in R: Modeling Dependence with Copulas in R, https://reurl.cc/q1D4xy
9. Mic in R bloggers, 2015. How to fit a copula model in R, R-bloggers, https://www.r-bloggers.com/2015/02/how-to-fit-a-copula-model-in-r/
10. Mic in R bloggers, 2016. How to fit a copula model in R [heavily revised]. Part 1: basic tools, R-bloggers, https://reurl.cc/XlXyeM
11. Mic in R bloggers, 2016. How to fit a copula model in R [heavily revised]. Part 2: fitting the copula, R-bloggers, https://reurl.cc/95za5v