

防災淹水機率圖資產製及應用服務系統精進

Stochastic Flood Inundation Mapping Program and Its Decision-Making Support Services

主管單位：經濟部水利署

張倉榮^{1,2}

鄭克聲^{1,3}

王嘉和²

Chang, Tsang-Jung^{1,2}

Cheng, Ke-Sheng²

Wang, Chia-Ho²

¹ 國立臺灣大學生物環境系統工程學系

² 國立臺灣大學氣候變遷與永續發展研究中心

³ 國立臺灣大學水工試驗所

摘要

颱風水利署去年完成第三代淹水潛勢圖資的審議與公開作業，提供防災規劃使用，但淹水潛勢圖資的設計雨型係採 Horner 雨型且在空間上分布均一，與實際降雨情形不同，導致與實際淹水情形產生落差。

為補足災前階段防救災人員對於各地區發生淹水的決策判斷支援能力，本計畫選擇臺北市與基隆市地區作為研究區域，以颱風類型降雨為研究對象，蒐集歷史降雨資料分析時空間的分布特性，建立暴雨事件大數據資料庫以及暴雨序率模擬模式，據此繁衍出大量符合歷史降雨時空間分布特性的模擬降雨事件共 83,000 場，並根據降雨量值大小分為 4 組模擬情境，分別為 24 小時降雨 125~275 毫米、275~425 毫米、425~575 毫米、575 毫米以上，對應於淹水潛勢圖的 24 小時 200、350、500 及 650 毫米情境，從中依照雨量大小區間分別隨機挑選 2,662 場使用 NTU-CAFIM(Cellular Automaton Flood Inundation Model)快速淹水模式進行臺北市與基隆市的淹水模擬。根據淹水模擬的結果，能夠在每個網格點統計不同積淹水深度的發生機率，繪製成防災淹水機率圖資，呈現各種降雨量情境下的易積淹水位置，並能夠根據淹水的發生機率評估救災的優先程度。

防災淹水機率圖資將匯入水災潛勢風險圖資應用服務系統，提供指定降雨情境查詢圖資的功能，搭配系統介接的中央氣象局的預報降雨量，根據雨量值即時挑選防災淹水機率圖資進行展示，提供災中預警及決策支援之充足資訊。此外，本計畫亦持續維運精進水災風險圖資應用服務系統，優化各項服務功能，俾供颱風期間災害應變情資研判之用。

關鍵詞：暴雨序率模式、淹水機率、淹水潛勢圖、快速淹水模式

Abstract

In 2017, the Water Resources Agency has revealed the third version of potential inundation maps for flood disaster prevention. The designed storm pattern is derived by using Horner formula and is assumed to be spatially homogeneous, which is inconsistent with actual rainfall. Thus, the corresponding simulated flood maps may have some inconsistencies with actual flood maps.

In order to support the disaster relief personnel during flood in various regions, the Storm Rainfall Spatiotemporal model was developed to analyze the temporal and spatial distribution of various storms in this project. By using this model, 83,000 rainfall data were simulated and divided into 4 groups, which are respectively 125~275 mm, 275~425 mm, 425~575 mm and over 575 mm precipitation in 24 hours, corresponding to the designed conditions of Flood Potential Maps which are 200 mm, 350 mm, 500 mm, and 650 mm precipitation in 24 hours.

Taipei City and Keelung City were regarded as the target area, randomly selected 2,662 rainfalls to perform flooding simulation by Cellular-Automaton Inundation Model. According to the results, flooding frequency on every mesh was counted and 4 flood probability maps were obtained. Additionally, based on the forecast data offered by the Central Weather Bureau, the developed model could provide a better estimation for flood.

The flood probability maps are imported to the service system for flood potential estimation. Therefore, the query service for a specific rainfall has completed. In addition, this system will show the real-time flood probability maps with the forecast data from the Central Weather Bureau involved. Through this project, the service system for flood potential estimation could be improved to achieve more accurate estimations and decisions.

Keywords : flooding disasters, inundation potential maps, vulnerability, risk.

一、計畫緣起與工作項目

水利署於107年完成第三代淹水潛勢圖資的公開作業，提供淹水防災作業規劃使用，但繪製淹水潛勢圖資所使用的設計雨型，係使用Horner雨型且在空間上為均一分布，與實際降雨的時空間分布情形仍有差距，導致淹水潛勢圖與實際淹水情形認知有落差。

為補足水利防災人員對於各地區發生淹水的決策判斷支援能力，本計畫發展了暴雨時空間分布序率模式，藉此產製大量符合實際降雨特性的不同模擬雨型，進而搭配臺灣大學新開發的NTU-CAFIM快速淹水模式，完成數千場事件的模擬，以空間網格尺度分析積淹水的發生機率繪製成淹水機率圖資，提供不同角度的防救災參考資訊。

防災淹水機率圖資將匯入水災潛勢風險圖資應用服務系統，提供指定降雨情境查詢圖資的功能，搭配系統介接的中央氣象局的預報降雨量，根據雨量值挑選防災淹水機率圖資進行展示，提供災中預警及決策支援之充足資訊。此外，本計畫亦持續維運精進水災風險圖資應用服務系統，優化各項服務功能，提供災害應變情資研判之參考使用。

本計畫工作主要工作項目條列如下：

1. 建立暴雨事件大數據資料庫。
2. 研發暴雨事件降雨量時空分布序率模擬模式。
3. 建立暴雨事件淹水時空分布資料庫。
4. 建立暴雨淹水機率預報及防災淹水機率圖資。
5. 應用服務維護更新及運算功能精進研發。

二、建立暴雨事件大數據資料庫

2.1 蒐集測站雨量資料

本計畫針對颱風降雨事件建立暴雨事件時空序率模擬模式，收集研究區域內各雨量站歷史降雨記錄，並擷取颱風之暴雨事件降雨量時間數列。經由分析各類型暴雨事件之降雨特性，建立暴雨時空分布序率模擬(Storm rainfall spatiotemporal simulation)模式。根據模擬模式繁衍颱風暴雨事件降雨資料，產生大量的降雨量時空分布出象(outcome)或實現值(realization)。

首先挑選淡水河流域紀錄期間長且資料正確性良好之雨量站，蒐集降雨量觀測紀錄資料，共有30個雨量站。暴雨事件通常以小時為降雨歷程之時間尺度，且資料之連續或離散對於後續之暴雨事件萃取會有一定的影響，因此蒐集各站的逐時雨量資料，且考量連續紀錄達一定年限長度較佳，故挑選的30個雨量站觀測年限都有超過20年以上，最長紀錄的年限為1958至2018年。各雨量站的分布位置如圖2-1所示。

2.2 萃取暴雨事件

本計畫構想擬配合中央氣象局針對即將發生或正發生的降雨事件所發佈的24小時雨量預報，建立淹水機率預警報機制，必須先探討多測站降雨事件24小時延時事件最大降雨量之時空分布特性。真實降雨事件在個別雨量站所造成之特定延時(如12或24小時)

事件最大降雨量不同，且降雨量之時間變化亦不相同，因此收集各雨量站24小時延時最大降雨量之時雨量時間數列(hourly rainfall time series)作為時空分布特性分析的對象。本計畫先選擇以致災損害較嚴重的颱風類型降雨進行分析，颱風事件的挑選方法係依據氣象局的颱風警報發布起訖時間為基準，分別往前後尋找連續4小時以上無降雨的間距作為颱風降雨的起迄點，再從中挑選24小時累積雨量最大的時段，如圖2-2所示，得到213場歷史颱風事件的各雨量站最大24小時降雨序列資料，最後篩選降雨時間長度與空間分布充足的事件，留下83場颱風事件的降雨資料進行時空分布的特性分析。

2.3 降雨特性分析

分析歷史颱風暴雨事件之時空分布特性及統計特性，包含降雨事件平均、標準差、偏態係數、區域平均降雨等統計量，以確保模擬成果與歷史事件特性相符。分析得出時雨量的空間半變異元函數與時間半變異元函數，可以導出時空間距離與降雨量變化的關係，如圖2-3所示。後續可藉由時空特性分析建立時空相關性函數，配合高斯序率模擬產生隨機樣本，以繁衍大量暴雨事件之多測站降雨量時間數列，詳細方法說明於下節敘述。本計畫產製的模擬降雨資料亦放置於資料庫中，以便後續查詢及延伸應用。

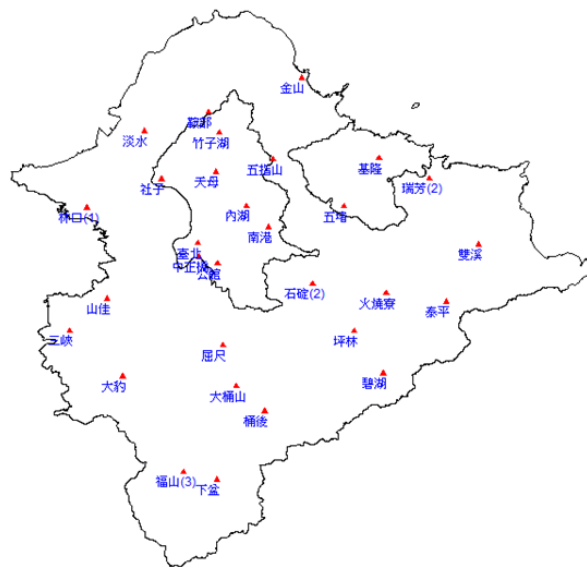


圖2-1、研究區域雨量站分布圖

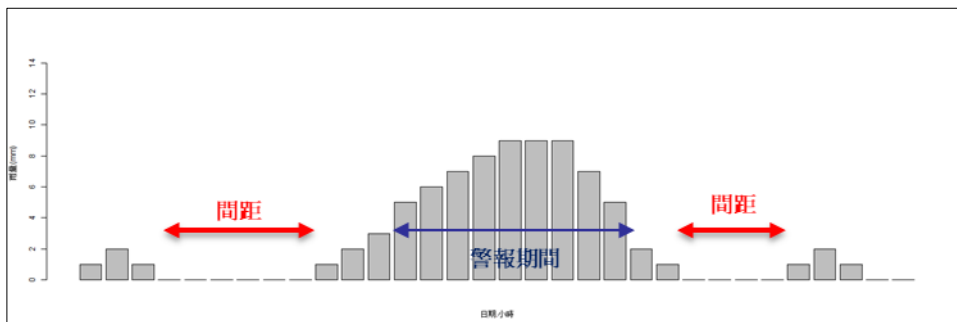


圖 2-2、颱風降雨事件期間的選取方法示意圖

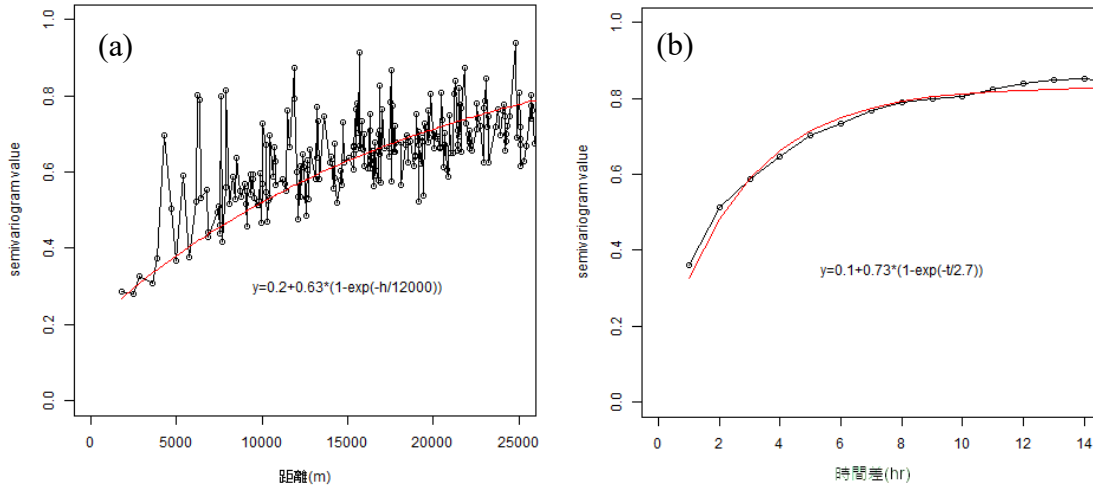


圖 2-3、(a)空間半變異元函數(b)時間半變異元函數

三、研發暴雨事件降雨量時空分布序率模擬模式

3.1 颱風降雨量時空分布序率模擬模式

模擬颱風降雨事件係採用隨機變域序率模擬方法(Guillot, 1999)，將2.3小節所述的空間及時間半變異元函數結合產生時空相關係數矩陣，由於時雨量服從皮爾遜三型分布(Pearson Type 3 distribution, PT3)，需經過轉換使成為服從高斯分布之相關係數矩陣，再以序率高斯模擬法產生隨機樣本，最後將隨機樣本轉回服從PT3分布之隨機樣本，得到最後的模擬降雨序列資料。本計畫所使用的模擬降雨事件資料產製方法詳細流程，如下列步驟說明。

1. 跨事件標準化

$$R_s(t, s, e) = \frac{R(t, s, e) - \text{mean}(t, s)}{sd(t, s)} \quad (1)$$

上式 $R_s(t, s, e)$ 表第 e 事件第 s 測站第 t 小時時雨量， $R_s(t, s, e)$ 表標準化降雨量， $\text{mean}(t, s)$ 與 $sd(t, s)$ 分別代表第 s 站第 t 小時降雨量之長期平均值與標準差。

2. 建立時空相關矩陣 $C_{S,T}(s, t)$

藉時空共變異函數(2)式建立時空相關矩陣

$$C_{S,T}(s, t) = 0.73e^{-\frac{\sqrt{\Delta t^2 + \Delta t^*{}^2}}{a_t}} \quad (2)$$

式中 Δt^2 、 $\Delta t^*{}^2$ 及 a_t 分別為時間距離、空間距離及影響距離。

3. 高斯相關係數矩陣轉換

將服從PT3時空相關矩陣依據(3)式轉換為服從高斯分布之相關係數矩陣 $C_W(h)$ 。

$$\rho_{z_1 z_2} \approx (A^2 - 6AC + 9C^2)\rho_{w_1 w_2} + 2B^2\rho_{w_1 w_2}^2 + 6C^2\rho_{w_1 w_2}^3 \quad (3)$$

$$A = 1 + \left(\frac{\gamma}{6}\right)^4, B = \frac{\gamma}{6} - \left(\frac{\gamma}{6}\right)^3, C = \frac{1}{3}\left(\frac{\gamma}{6}\right)^2 \quad (4)$$

$\rho_{z_1 z_2}$ 與 $\rho_{w_1 w_2}$ 分別代表雙變數皮爾遜三型分布之相關係數與雙變數標準常態分布之相關係數， γ 為皮爾遜三型分布之偏態係數(coefficient of skewness)。

4. 序率高斯模擬法

以序率高斯模擬法根據 $C_W(h)$ 產生隨機樣本，隨機樣本屬於標準常態隨機變域。

5. 頻率因子轉換

將隨機樣本以(5)式轉換屬於皮爾遜三型隨機變域 $z(x)$ 之頻率因子。

$$z \approx w + (w^2 - 1)\frac{\gamma}{6} + \frac{1}{3}(w^3 - 6w)\left(\frac{\gamma}{6}\right)^2 - (w^2 - 1)\left(\frac{\gamma}{6}\right)^3 + w\left(\frac{\gamma}{6}\right)^4 - \frac{1}{3}\left(\frac{\gamma}{6}\right)^5 \quad (5)$$

6. 模擬雨量轉換

以歷史雨量跨事件平均及標準差將頻率因子轉為模擬雨量。

$$R_{simulation}(t, s, e, n) = z(t, s, e, n) \times sd(t, s) + mean(t, s) \quad (6)$$

3.2 模擬事件挑選

完成驗證之模擬降雨事件共計83,000場次，考量淹水模擬所需時間，僅從中挑選部分降雨事件，進行淹水模擬與淹水機率分析。參照現行使用的淹水潛勢圖的24小時總降雨量200毫米、350毫米、500毫米及650毫米定量降雨情境，將模擬得到的颱風暴雨事件按照降雨量分為125~275毫米(第一組、Group 1)、275~425毫米(第二組、Group 2)、425~575毫米(第三組、Group 3)、575毫米以上4個等級(第四組、Group 4)，如表3-1所列。考量到降雨量較高的組別容易致災，需要模擬較多場次分析易致災位置，故依據各組內總雨量挑選出750組、750組、1000組、162組(第四組情境全數模擬)進行淹水模擬與淹水機率分析使用。各情境分組內則是依據分層抽樣概念，各層內樣本數配置應考量各層中降雨事件之比例，以求挑選事件中各組之比例與各層中降雨事件之比例相同或近似，以確保樣本具恰當之代表性，圖3-1為實際颱風降雨與模擬降雨事件的總雨量發生累積機率圖之比較情形，顯示兩者相當符合，代表本暴雨模擬模式產製的模擬降雨的總雨量發生機率特性與實際情形相同。

表3-1、歷史颱風事件(1978~2018)及模擬颱風事件總雨量發生次數一覽表

雨量 (mm)	歷史事件 次數	模擬事件 次數	選用事件 次數	雨量 (mm)	歷史事件 次數	模擬事件 次數	選用事件 次數
第一組情境(Group 1)				第四組情境(Group 4)			
125-150	8	11,294	163	575-600	1	54	54
150-175	12	11,089	161	600-625	0	37	37
175-200	9	9,843	144	625-650	0	27	27
200-225	6	8,122	117	650-675	0	20	20
225-250	6	6,394	93	675-700	0	5	5
250-275	2	4,932	72	700-725	0	8	8
第二組情境(Group 2)				725-750	0	2	2
275-300	6	3,696	246	750-775	0	1	1
300-325	5	2,688	177	775-800	0	4	4
325-350	2	1,922	126	800-825	0	1	1
350-375	2	1,402	91	825-850	0	1	1
375-400	1	992	65	850-875	0	0	0
400-425	1	681	45	875-900	0	2	2
第三組情境(Group 3)							
425-450	0	486	340				
450-475	0	357	234				
475-500	1	243	166				
500-525	0	194	138				
525-550	0	103	67				
550-575	0	77	55				

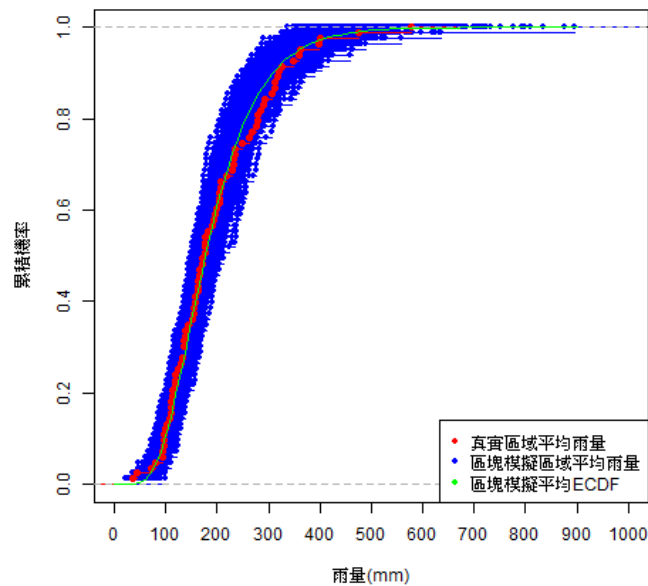


圖3-1、模擬雨量與實際雨量累積機率圖

四、建立暴雨事件淹水時空分布資料庫

4.1 快速淹水模式建置

本計畫選擇臺北市與基隆市地區為研究區域，使用臺灣大學近年發展的NTU-CAFIM快速淹水模式進行前述序率模式所繁衍的模擬颱風降雨雨型的淹水模擬分析，所有淹水模擬的歷程結果皆留存作為暴雨事件淹水時空分布資料庫的建構基礎。NTU-CAFIM快速淹水模式係以細胞自動機(Cellular automata)的概念進行二維漫地流模擬演算，透過排序演算法與權重分配計算網格間的水體傳遞量(Guidolin et al.,2016)，圖4-1為細胞間的水量轉移分配的示意圖，再搭配自動更新演算時間步長的方法縮短模式的演算時間，提升模擬效率(Hunter et al.,2005)。此模式與暴雨經理模式(Storm Water Management Model, SWMM)耦合(Rossmann, 2015)，進行雨水下水道系統的水體傳遞運算，並設定建築物區域藉由排水管導流至下水道系統，能適用於都市地區的降雨淹水歷程模擬，模式耦合的交互演算流程如圖4-2所示。

模式建置所需資料則蒐集兩研究地區的地形高程、建築物分布、排水路與下水道管線系統位置與尺寸等數據，進行快速淹水模式的建置，且將臺北市劃分為7個子集水區進行模擬，提高演算速度。

4.2 快速淹水模式的驗證

以2015年0614淹水事件進行臺北市的快速淹水模式驗證，比較模擬淹水範圍與實際淹水範圍的準確率與捕捉率，準確率與捕捉率定義如圖4-3所示，準確率代表模擬情形與實際淹水情形的吻合程度，捕捉率則是呈現實際淹水範圍被模式模擬到的比例，圖4-4為萬芳醫院站附近實際淹水範圍與模擬淹水區域的比對結果，此驗證事件模擬結果的準確率為64.3%，捕捉率為82.1%，而模擬時間僅需5.4分鐘，參考106年臺北市淹水潛勢圖第二次更新計畫所使用之SOBEK模式的159分鐘，本模式在運算速度上有顯著的進步。

淹水機率分析情境根據3.2小節之敘述，本計畫產製的模擬颱風降雨分為24小時降雨4組情境，從第一至第四組情境中分別挑選出750組、750組、1000組、162組進行淹水模擬，將其結果作為後續淹水機率分析使用。

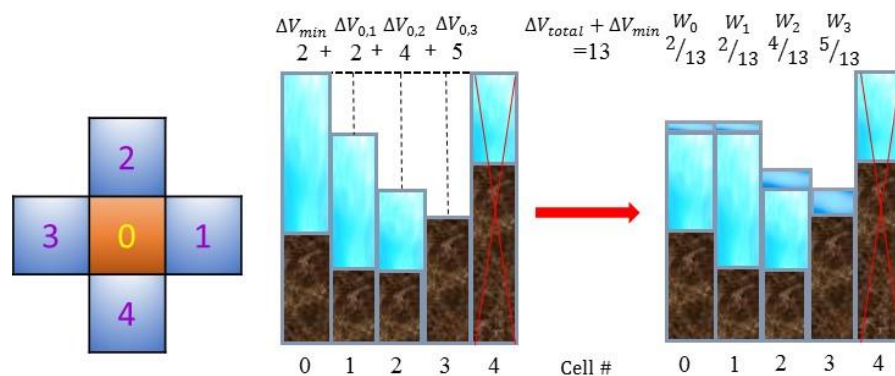


圖 4-1、細胞水量轉移分配示意圖

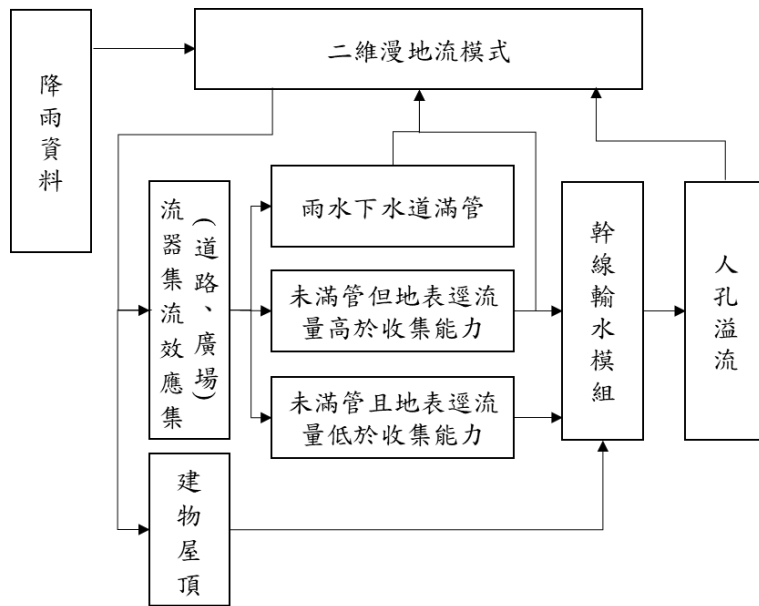


圖 4-2、二維漫地流模式耦合雨水下水道模式之交互演算流程圖

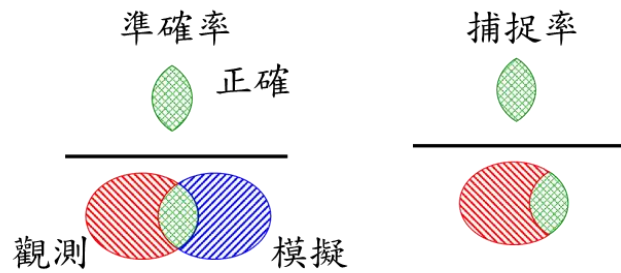


圖 4-3、準確率與捕捉率指標之定義說明圖

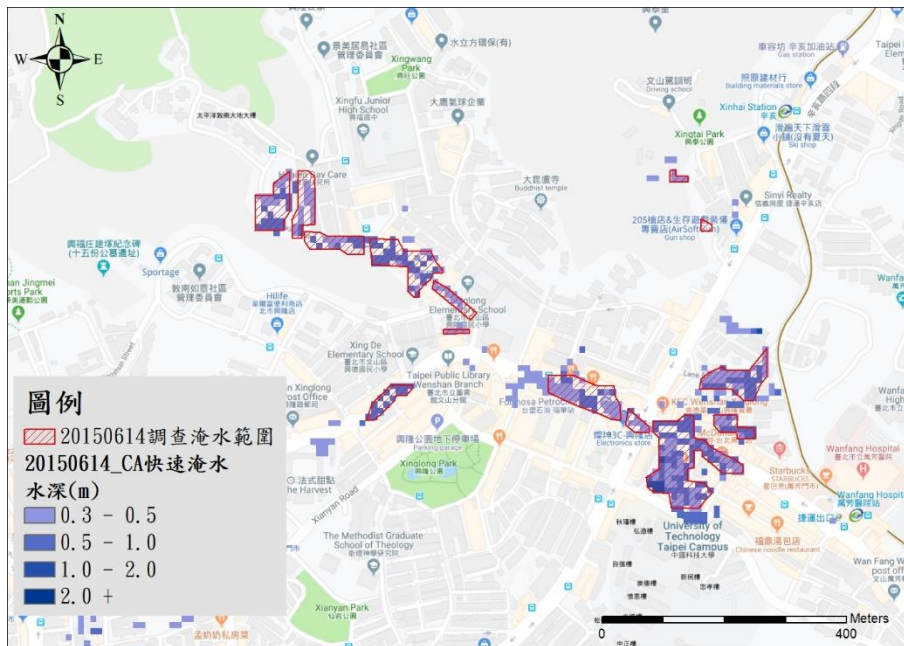


圖 4-4、快速淹水模式驗證：2015 年 0614 淹水事件(萬芳醫院捷運站周邊)

五、建立暴雨淹水機率預報及防災淹水機率圖資

5.1 淹水機率值

淹水機率值係根據淹水模擬結果，4個情境分組分開計算，選定特定淹水深度，統計每個空間網格的積淹水發生次數，最後除以該分組總模擬場數，即是各網格在該降雨情境下的淹水發生機率，此分析流程如圖5-1所示。若有一網格在Group 3情境分組的1,000場降雨模擬中，發生30次以上超過15公分的積淹水，則定義該網格在24小時425~575毫米降雨量情境(Group 3)下發生超過15公分積淹水的機率為0.03，即30/1,000。

5.2 淹水機率圖資

根據淹水機率計算結果，將各個網格依照淹水機率高低標示顏色，如圖5-2，可繪製成淹水機率圖資，本計畫考量研究區域的臺北市與基隆市近幾年發生的颱風雨淹水災害較少，在計算淹水機率的水深門檻方面，選用15公分水深作為門檻值製作淹水機率圖資，依據模擬結果的淹水發生機率分為6個級次，標示為不同顏色，各種分級對應的淹水機率範圍與標色如圖5-3所示。

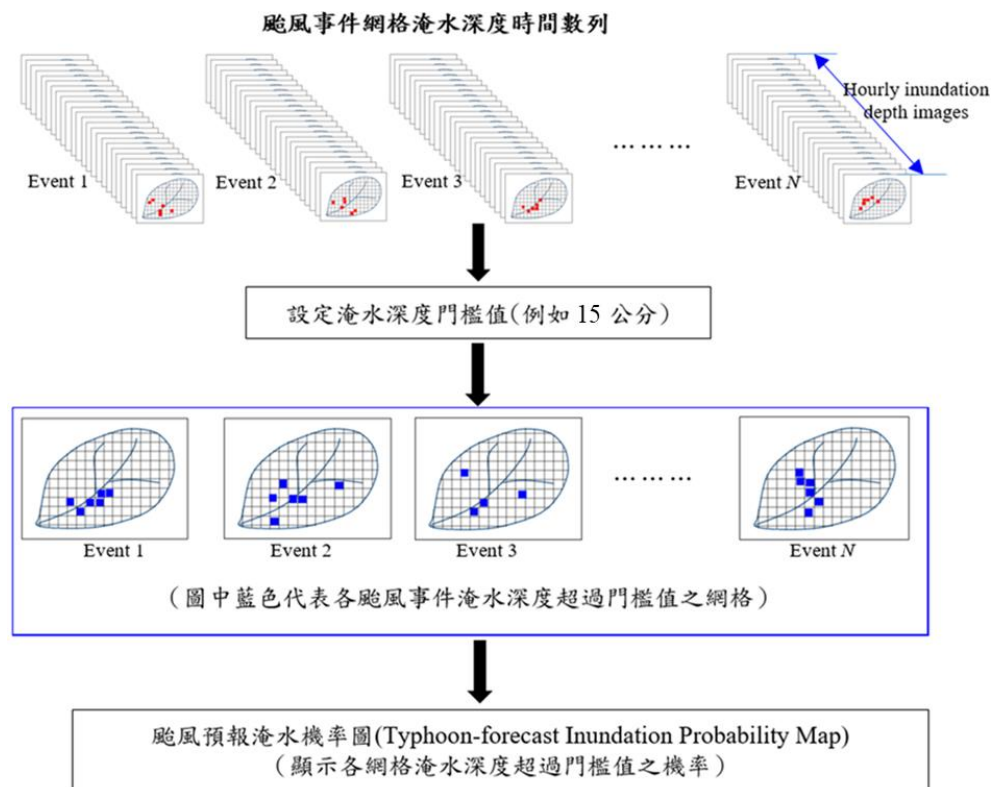


圖 5-1、防災淹水機率圖資製作流程示意圖

標色	分級	淹水機率
亮綠色	1	0.01~0.1
黃綠色	2	0.1~0.2
黃色	3	0.2~0.3
橘色	4	0.3~0.5
橙紅色	5	0.5~0.7
紅色	6	0.7~1.0

圖 5-2、淹水機率圖圖例

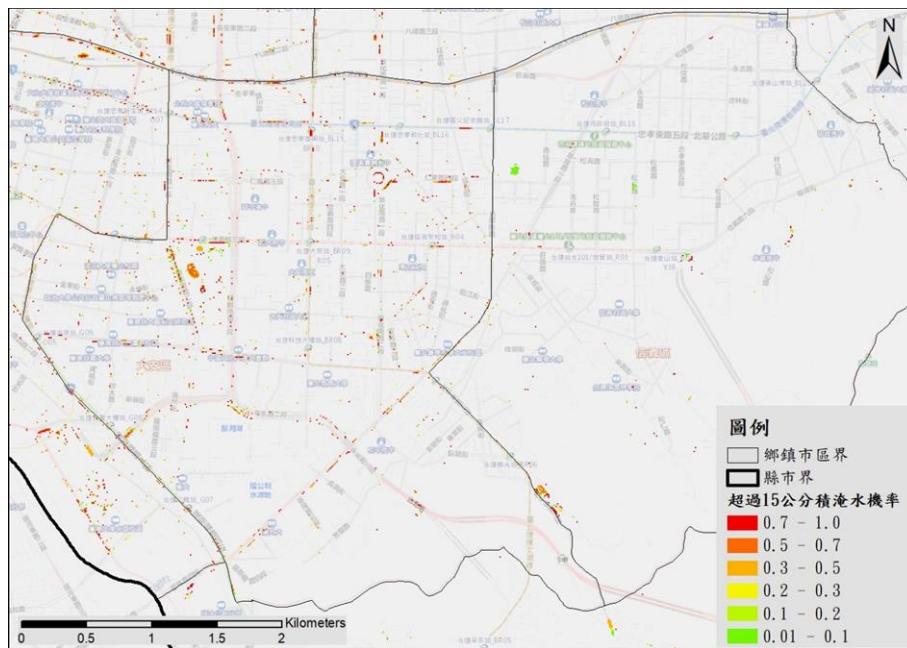


圖 5-3、大安區與信義區 15 公分水深淹水機率圖(第二組情境)

六、應用服務維護更新及運算功能精進研發

水災潛勢風險圖資應用服務系統的更新與精進部分，已將完成更新與公開程序的10種降雨情境淹水潛勢圖資更新至系統上，包含6小時定量降雨150、250、350毫米，12小時定量降雨200、300、400毫米，以及24小時定量降雨200、350、500、650毫米，提供SHP檔與JPG檔的下載連結讓使用者能夠離線查閱，如圖6-1所示。此外系統資料庫的歷史淹水位置與範圍資料更新至2018年的淹水事件，提供套疊查詢使用。

本計畫製作的4種情境防災淹水機率圖資亦加入圖資應用服務系統中，與淹水潛勢圖資相同，可依照降雨情境與地區選擇查閱，並套疊歷史淹水位置與範圍的圖層，如圖6-2所示，並與介接的中央氣象局預報雨量資料結合，提供即時挑選淹水機率圖資展示的功能，提供決策參考。

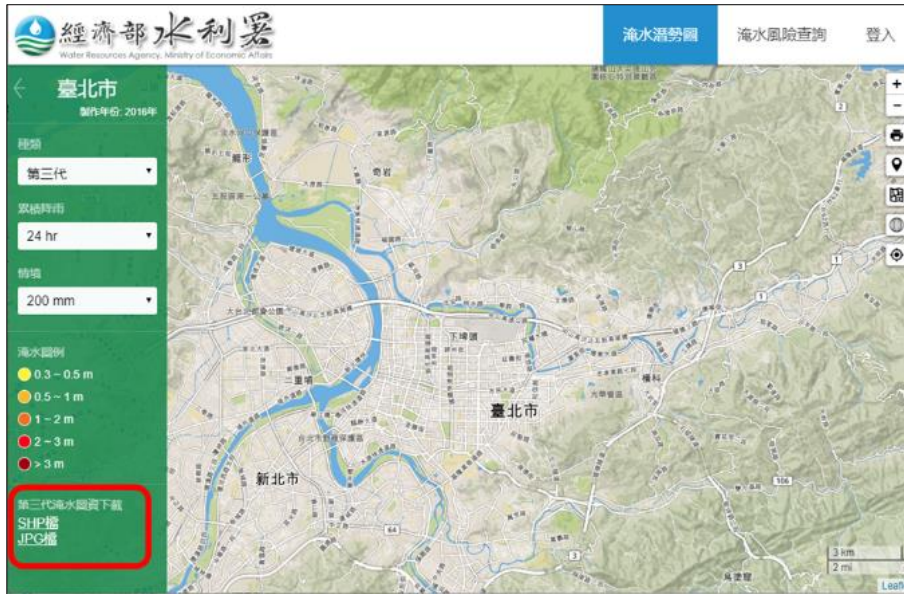


圖 6-1、圖資平台提供淹水潛勢圖檔案下載



圖 6-2、防災淹水機率圖查閱頁面

七、成果彙整

1. 完成蒐集大臺北區域30個雨量測站的歷史觀測降雨量資料，建置颱風事件的降雨量資料庫，並建立降雨量時空分布序率模擬模式之計算方法與流程。
2. 完成降雨分析使用的歷史颱風事件挑選，以及歷史颱風降雨的時間、空間半變異元函數分析，建立颱風降雨的時空分布序率模擬模式。
3. 使用颱風降雨的時空分布序率模擬模式繁衍出符合歷史颱風降雨時空間特性的模擬雨型共83,000場，可提供颱風降雨的大數據資料庫使用。
4. 完成蒐集臺北市與基隆市地區的地表高程，及下水道系統配置與測量資料，建置兩地區的快速都市淹水模式，並使用歷史淹水事件資料完成驗證，且模式的運算速度、準確率與捕捉率皆比現行運用的SOBEK模式有較好的表現。
5. 從繁衍雨型隨機挑選2,662場完成模擬颱風雨型的淹水模擬，並建置200、350、500、650mm/24hr此4種雨量各場次淹水模擬結果資料庫，可供後續使用。
6. 以空間網格分析臺北市與基隆市地區發生超過15公分積淹水的機率，繪製成防災淹水機率圖，探討研究區域內的易積淹水地區分布。

八、未來建議

1. 未來可使用相同方法完成梅雨以及對流雨之時空間特性與淹水機率分析，即可與颱風雨的分析結果統整，繪製臺北市與基隆市地區的降雨淹水機率圖，除提供防救災應變參考外，亦可供洪災保險參考。
2. 本計畫所使用之NTU-CAFIM快速淹水模式可介接相關觀測、預報之水位、雨量進行即時淹水評估，做為即時預警與超前佈署之參考。

九、參考文獻

1. 林吉堃，「都會區快速淹水模擬模式之研發與應用」，國立臺灣大學生物環境系統工程學系碩士論文，2018年。
2. Guidolin, M., Chen, A. S., Ghimire, B., Keedwell, E. C., Djordjevic', S. and Savić, D. A., (2016), A weighted cellular automata 2D inundation model for rapid flood analysis. *Environmental Modelling and Software*, 84: 378-394.
3. Guillot, G., (1999), Approximation of Sahelian rainfall fields with meta-Gaussian random functions. Part 1: model definition and methodology. *Stochastic Environ Res Risk Assessment*, 13:100-112.
4. Hunter, N. M., Horritt, M. S., Bates, P. D., Wilson, M. D. and Werner, M. G. F., (2005). An adaptive time step solution for raster-based storage cell modelling of floodplain inundation. *Advances in Water Resources*, 28: 975-991.
5. Rossman, L. A. (2015), Storm Water Management Model User's Manual, Version 5.0, Nation Risk Management Laboratory, Office of Research and Development, U.S. Environmental Protection Agency.