

台灣脆弱度及風險地圖製作與整合應用(1/2)

Produce, integration and application of the vulnerability and risk maps of Taiwan (1/2)

主管單位：經濟部水利署

張倉榮 ^{1,2}	許銘熙 ¹	賴進松 ²
Chang, Tsang-Jung ^{1,2}	Hsu, Ming-Hsi ¹	Lai, Jin-Song ²
譚義績 ^{1,2}	潘宗毅 ²	張向寬 ^{1,2}
Tan, Yih-Chi ^{1,2}	Pan, Tsung-Yi ²	Chang, Hsiang-Kuan ^{1,2}

¹ 國立臺灣大學生物環境系統工程學系

² 國立臺灣大學氣候天氣災害研究中心

摘要

臺灣平均每年遭受 3~5 個颱風侵襲，颱風豪雨及梅雨季節豪雨或偶發性豪雨都會引致之淹水災害是造成每年臺灣地區人民生命財產損失主要天然災害。近年來，全球氣候變遷現象日益顯著，未來極端天氣的產生將更形頻繁，水利署為了降低颱風豪雨所引致之淹水災害，近年已完成全臺灣的淹水潛勢圖並公開民眾查詢。但製作淹水潛勢圖時，通常只選擇高程 50 公尺以下之區域模擬，但近年來，高地鄉鎮淹水災情之發生偶有所聞，因此，本計畫欲建立考量亞臨界流、超臨界流及穿臨界流等滿足山區地勢變化顯著之淹水水理特性的高地淹水模擬模式，並繪製高地淹水災害區域之淹水潛勢圖。

而水利署同步於民國 98 年參酌世界先進國家相關學者專家之研究與所建議之因應作為，分別蒐集並彙整國內外因水所致之各類災害相關文件，以淹水潛勢圖為基礎，考慮人文社會、經濟活動、土地利用、淹水損失...等與國家發展及民生相關之因數，針對淹水潛勢資料進行加值分析，以強化洪災研判分析能量，發展適合應用於災害應變之淹水風險圖與脆弱度圖資，完成「脆弱度及風險地圖分析方法研究」並研擬「水災危險度、脆弱度與風險圖製作技術手冊」。本計畫依照「水災危險度、脆弱度與風險圖製作技術手冊」製作淡水河及磺溪、蘭陽溪、鳳山溪、頭前溪、中港溪、後龍溪與宜蘭縣、基隆市、臺北市、新北市、桃園縣、新竹縣、新竹市、苗栗縣地區之水災危險圖、脆弱度地圖及風險地圖，以期提供更有效率、更實務的資訊，作為政府相關水利單位決策之依據。

本計畫沿用過去台北市、新北市、基隆市、宜蘭縣、桃園縣、新竹縣市、苗栗縣等 8 縣市之平地區域的淹水潛勢圖，依據「水災危險度、脆弱度與風險圖製作技術手冊」，完成宜蘭縣、基隆市、臺北市、新北市、桃園縣、新竹縣、新竹市、苗栗縣(含淡水河及磺溪、蘭陽溪、鳳山溪、頭前溪、中港溪、後龍河流域)之水災危險度地圖、水災脆弱度地圖及水災風險度地圖。其中，以 100 年重現期及歷史最嚴重

之水災事件之水文條件產製示範區之水災風險地圖。所有圖資之產製分為生命面向及財產面向兩種。8 縣市共計產製 16 張生命之水災風險圖、16 張財產之水災風險圖、16 張生命之水災危險度圖、16 張財產之水災危險度圖、8 張生命之水災脆弱圖、8 張生命之財產脆弱圖。這些圖資，在中央層級方面，可以提供水利防災單位於水災之減災、避災應用；在地方政府方面，可就圖中高危險區進行水利防洪設施之工程改善；在民眾企業方面，民眾及企業可藉由水災風險度地圖，可瞭解居家及企業周邊之潛在風險，可提升居民及企業之風險意識，但建議在公告水災風險地圖前，應該於全臺灣第一版製作完成後，經由審議小組審議其內容，再經由舉辦說明會之形式，讓民眾徹底瞭解再由審議小組決定其公告時機。

在山地淹水圖資方面，已完成台北市木柵老泉里、新北市新店區屈尺、新北市瑞芳、新北市鶯歌、新北市三峽、苗栗縣獅潭、宜蘭縣三星、宜蘭縣冬山鄉大進村、宜蘭縣蘇澳、宜蘭縣東澳、宜蘭縣南澳等高地區域之淹水潛勢圖。其模擬情境為重現期 1.1 年、2 年、5 年、10 年、20 年(宜蘭區域無此項)、25 年、50 年、100 年、200 年、500 年延時 24 小時之設計雨量與定量降雨 200mm/day(苗栗縣獅潭為 150mm/day)、350mm/day(苗栗縣獅潭為 300mm/day)、450mm/day、600mm/day。總共產製出 287 張圖資。以補足之前淹水潛勢圖未完成之部分。

關鍵詞：高地淹水潛勢圖、脆弱度、風險

Abstract

There are three to five typhoons to attack Taiwan annually. Flooding disaster induced by the torrential rain of typhoons is one of the major natural disaster in Taiwan that causes the losses of people's life and property. Recently, climate change is becoming more significant and the extreme weather events will frequently happen in the future. In order to minimize flooding disaster, Water Resources Agency (WRA) has completed inundation potential maps of Taiwan in recent years and announced these maps for public. Recently, inundation disaster often occurred in some highland townships where are not in the simulation area with the elevation less than 50 m. Therefore, the project will build a highlands inundation model that can simulate subcritical, supercritical and transcritical flows to meet the hydraulic characteristics of the mountainous terrain changes, and the inundation potential maps of highland townships are finally produced.

In 2009, WRA has reached the goal of flood risk map and vulnerability map based on advance research, flood maps and the development of our country. Based on the contribution of "a study of methodology for analyzing vulnerability and risk maps" and "The handbook of flood vulnerability and hazard map process", this project will build the flood hazard, vulnerability and risk maps of Tamsui River, Sulfur Creek, Lanyang Creek, Fengshan Creek, Touqian Creek, Zhonggang Creek, Houlong Creek, Yilan County, Keelung City, Taipei City, New Taipei City, Taoyuan County, Hsinchu County, Hsinchu City and Miaoli County. The results of this project could give more effective and practical information to governments for making correct decisions.

This project produces flood risk maps on the basis of two hydrological conditions, including the most severe historical flood events and the designed 100-year return-period rainfall events. All flood risk maps contain life-oriented and property-oriented productions. In the present project, there are 8 counties to be executed and a total amount of 16 life-oriented and 16 property-oriented flood risk maps, 16 life-oriented and 16 property-oriented flood hazard maps, and 8 life-oriented and 8 property-oriented flood vulnerability maps is produced.

Additionally, this project has produced the highland inundation maps of Taipei City's Muzha, New Taipei City's Ruifang Dist., Xindian Dist., Yingge Dist. and Sanxia Dist., Yilan County's Dongshan Township and Su'ao Township and Miaoli County's Shitan Township. The products include 30 highland inundation maps based on 24, 48, 72-hr rainfall with 10 return periods (1.1 years, 2 years, 5 years, 10 years, 20 years, 25 years, 50 years, 100 years, 200 years, 500 years), 12 highland inundation maps based on 24, 48, 72-hr rainfall with fixed amount rainfall (200mm/day · 350mm/day · 450mm/day · 600mm/day). There are totally 287 maps for highland inundation in this project.

Keywords : highlands potential inundation map, vulnerability, risk.

一、前言

從民國88年起至90年度止，行政院國家災害防救科技中心(前國家科學委員會防災國家型科技計畫辦公室)辦理全臺第一次淹水潛勢圖工作，完成臺灣地區22縣市淹水潛勢圖的分析與製作。民國95年內政部完成了全國數值高程更新，因此同年度水利署執行了「淹水潛勢圖更新前期計畫-演算資料調查及雨量預警之研究」計畫，以彰化縣、雲林縣、嘉義縣與臺南縣(99年12月25日已合併至臺南市)為示範區進行淹水潛勢更新，計畫中並以類神經網路模式進行與雨量—淹水預警之模擬。從民國95至98年間水利署逐年完成全臺第二次的淹水潛勢圖之更新，但製作淹水潛勢圖時，山區地勢變化顯著，通常只選擇高程50公尺以下之區域模擬，但近年來，高地鄉鎮淹水災情之發生偶有所聞，因此，本計畫欲建立考量亞臨界流、超臨界流及穿臨界流等滿足山區地勢變化顯著之淹水水理特性的高地淹水模擬模式，並繪製高地淹水災害區域之淹水潛勢圖。

近年逐步更新全臺各縣市之淹水潛勢圖後，水利署在民國98年以淹水潛勢圖為基礎，考慮人文社會、經濟活動、土地利用、淹水損失…等與國家發展及民生相關之因子，針對淹水潛勢資料進行加值分析，以強化洪災研判分析能量，發展適合應用於災害應變之水災風險圖與脆弱度圖資，完成「脆弱度及風險地圖分析方法研究」。該研究將水災風險圖區分為生命及財產兩面向，以提供淹水災害防救之決策支援參考。其研究亦針對水利署未來產製各縣市、流域之淹水脆弱度及風險圖，完成「水災脆弱度與風險圖製作技術手冊」之研擬，以確保研究成果品質。同年至民國100年，水利署以「水災危險度、脆弱度與風險圖製作技術手冊」為基礎，完成高雄、屏東、臺南、嘉義等地區之製作示範計畫，99年共產製高雄市、高雄縣、屏東縣(含高屏溪及東港溪)之水災危險度地圖6張、水災脆弱度地圖6張及水災風險度地圖10張，100年共產製嘉義市、嘉義縣、臺南市(含曾文溪、北港溪、八掌溪、樸子溪、急水河流域)之水災危險度地圖6張、水災脆弱度地圖6張及水災風險度地圖16張。預計於101-102年完成全臺水災危險度、脆弱度及風險地圖製作示範，並於民國102年進行圖資整合與應用規劃。

二、高地淹水模式建立及圖資繪製

2.1 高地淹水區域相關資料蒐集及淹水模擬區域選取

本計畫為挑選近十年曾發生淹水災情之高地鄉鎮，蒐集水利署製作之第二代全臺淹水潛勢圖(如圖1)、內政部消防署的歷年天然災害損失統計年報及災害應變處置報告，並透過水利署向國家災害防救科技中心蒐集其所製作之90年至100年之歷史淹水災害GIS圖層，並加入最新之2012年0610暴雨淹水資料，本計畫重新繪製如圖2所示，以進行後續未模擬高地淹水鄉鎮區之挑選。本計畫利用前述所蒐集之資料，並以三個篩選原則(1)挑選民國90~100年歷史淹水區域(圖2)；(2)挑選第二代淹水潛勢模擬範圍未涵蓋之歷史高地淹水區域(圖1)；(3)加入民國101年發生高地淹水而未模擬區域，挑選出應模擬區域共23個高地淹水鄉鎮(如圖3)，今年優先完成之9處高地鄉鎮，包括臺北市文山區、新北市新店區、新北市瑞芳區、新北市鶯歌區、新北市三峽區、宜蘭縣三星鄉、宜蘭縣南澳鄉、宜蘭縣冬山鄉、苗栗縣獅潭鄉等9個區域(圖4)，剩下之14處會於102年全部完成。

第二代淹水潛勢模擬範圍圖



歷史淹水範圍(民國90年-100年)



圖1、水利署製作第二代全臺灣淹水潛勢圖

圖2、全臺灣90-100年歷史災害淹水範圍圖

高地淹水模式欲模擬區域



圖3、本計畫挑選之高地淹水鄉鎮分布圖

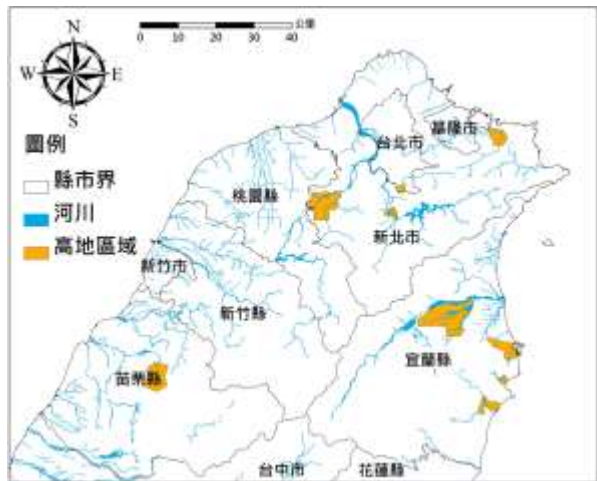


圖4、本計畫高地淹水模式位置圖

2.2 高地淹水模式建立

本計畫所採用的高地淹水模式係在有限體積法(finite volume method, 簡稱FVM)之數值離散架構下, 配合特徵逆風守恆算則, 進行數值通量之估算, 可計算不連續解, 且

防止數值非物理性的振盪發生，本計畫所研發之高地淹水模式簡稱為高地FVM淹水模式。該模式已成功應用模擬於天然河川及洪泛區內複雜地形之水理流場模擬及應用；茲將模式理論說明如下。

基於緩變量流之假設，不計科氏力、風力和紊流擴散項之影響，忽略垂直方向速度分量，將納維爾－史托克方程式沿水深方向積分，守恆型的二維淺水波方程式(shallow water equations)為：

$$\frac{\partial \mathbf{Q}}{\partial t} + \frac{\partial \mathbf{E}_{\text{conv}}}{\partial \bar{x}} + \frac{\partial \mathbf{G}_{\text{conv}}}{\partial \bar{y}} = \frac{\partial \mathbf{E}_{\text{diff}}}{\partial \bar{x}} + \frac{\partial \mathbf{G}_{\text{diff}}}{\partial \bar{y}} + \mathbf{H} \quad (1)$$

其中，

$$\mathbf{Q} = \begin{bmatrix} \bar{h} \\ \bar{h}\bar{u} \\ \bar{h}\bar{v} \end{bmatrix}; \mathbf{E}_{\text{conv}} = \begin{bmatrix} \bar{h}\bar{u} \\ \bar{h}\bar{u}^2 + \frac{1}{2}g\bar{h}^2 \\ \bar{h}\bar{u}\bar{v} \end{bmatrix}; \mathbf{G}_{\text{conv}} = \begin{bmatrix} \bar{h}\bar{v} \\ \bar{h}\bar{u}\bar{v} \\ \bar{h}\bar{v}^2 + \frac{1}{2}g\bar{h}^2 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{E}_{\text{diff}} = \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{\bar{h}\bar{T}_{\bar{x}\bar{x}}}{\rho} \\ \frac{\bar{h}\bar{T}_{\bar{x}\bar{y}}}{\rho} \end{bmatrix}; \mathbf{G}_{\text{diff}} = \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{\bar{h}\bar{T}_{\bar{x}\bar{y}}}{\rho} \\ \frac{\bar{h}\bar{T}_{\bar{y}\bar{y}}}{\rho} \end{bmatrix}; \mathbf{H} = \begin{bmatrix} 0 \\ g\bar{h}(\bar{s}_{0\bar{x}} - \bar{s}_{f\bar{x}}) \\ g\bar{h}(\bar{s}_{0\bar{y}} - \bar{s}_{f\bar{y}}) \end{bmatrix}$$

式中 \mathbf{Q} 為守恆物理向量； \mathbf{E}_{conv} ， \mathbf{G}_{conv} 分別為 \bar{x} ， \bar{y} 方向之對流(非黏性)通量向量；

\mathbf{E}_{diff} ， \mathbf{G}_{diff} 分別為 \bar{x} ， \bar{y} 方向之擴散(黏性)通量向量； \mathbf{H} 為源項，包含摩擦阻力與地面坡

降； \bar{h} 為水深； \bar{u} ， \bar{v} 分別為 \bar{x} ， \bar{y} 方向之水深平均流速； g 為重力加速度； $\bar{s}_{0\bar{x}} = -\partial\bar{z}_b/\partial\bar{x}$ ，

$\bar{s}_{0\bar{y}} = -\partial\bar{z}_b/\partial\bar{y}$ 與 $\bar{s}_{f\bar{x}} = \bar{n}_m^2\bar{u}\sqrt{\bar{u}^2 + \bar{v}^2}\bar{h}^{-4/3}$ ， $\bar{s}_{f\bar{y}} = \bar{n}_m^2\bar{v}\sqrt{\bar{u}^2 + \bar{v}^2}\bar{h}^{-4/3}$ 分別為沿 \bar{x} ， \bar{y} 方向之

底床坡度與摩擦坡度； \bar{z}_b 為底床高程； \bar{n}_m 為曼寧粗糙係數； $\bar{T}_{\bar{x}\bar{x}}$ 、 $\bar{T}_{\bar{x}\bar{y}}$ 與 $\bar{T}_{\bar{y}\bar{y}}$ 為水平紊流

應力； ρ 為流體密度。另外，可將紊流應力寫成分子黏滯項的形式，則 $\bar{T}_{\bar{x}\bar{x}}$ 、 $\bar{T}_{\bar{x}\bar{y}}$ 與 $\bar{T}_{\bar{y}\bar{y}}$ 表

示如下：

$$\bar{T}_{\bar{x}\bar{x}} = \frac{2\rho\bar{\mu}_t}{\bar{h}} \frac{\partial(\bar{h}\bar{u})}{\partial\bar{x}}; \bar{T}_{\bar{x}\bar{y}} = \frac{\rho\bar{\mu}_t}{\bar{h}} \left[\frac{\partial(\bar{h}\bar{u})}{\partial\bar{y}} + \frac{\partial(\bar{h}\bar{v})}{\partial\bar{x}} \right]; \bar{T}_{\bar{y}\bar{y}} = \frac{2\rho\bar{\mu}_t}{\bar{h}} \frac{\partial(\bar{h}\bar{v})}{\partial\bar{y}} \quad (2)$$

式中， $\bar{\mu}_t$ 為紊流運動黏滯係數(turbulent kinematic viscosity)，以經驗公式

$\bar{\mu}_t = \bar{C}\sqrt{8g\bar{h}}^{5/6}\sqrt{\bar{u}^2 + \bar{v}^2}$ 估算之；其中， \bar{C} 為係數，需控制在0.1至1.0之間(Rodi, 1980)。

1. 數值離散

採用元素中心式FVM，進行控制方程式積分，並配合散度定理之使用，以及採用預測與校正MUSCL(monotonic upstream schemes for conservation laws)方法，獲得：

$$\hat{Q}_{\bar{i},\bar{j}} = Q_{\bar{i},\bar{j}}^{\bar{n}} - \frac{\Delta t}{2A_{\bar{i},\bar{j}}} \left\{ \sum_{l=1}^L T(\theta)^{-1} [E_{\text{conv}}^{(1)}(Q') + E_{\text{diff}}(Q')] \bar{L}^l \right\}_{\bar{i},\bar{j}} + \frac{\Delta t}{2} H(Q_{\bar{i},\bar{j}}^{\bar{n}}) \quad (3a)$$

$$Q_{\bar{i},\bar{j}}^{\bar{n}+1} = Q_{\bar{i},\bar{j}}^{\bar{n}} - \frac{\Delta t}{A_{\bar{i},\bar{j}}} \left\{ \sum_{l=1}^L T(\theta)^{-1} [E_{\text{conv}}^{(2)}(\hat{Q}') + E_{\text{diff}}(Q')] \bar{L}^l \right\}_{\bar{i},\bar{j}} + \Delta t H(\hat{Q}_{\bar{i},\bar{j}}) \quad (3b)$$

式中， \bar{i} 和 \bar{j} 分別表示 \bar{x} ， \bar{y} 方向之離散化空間指標； $A_{\bar{i},\bar{j}}$ 為元素 (\bar{i}, \bar{j}) 之面積； $Q_{\bar{i},\bar{j}}^{\bar{n}}$ 代表第 \bar{n} 時刻元素 (\bar{i}, \bar{j}) 之物理向量； $\hat{Q}_{\bar{i},\bar{j}}$ 為元素 (\bar{i}, \bar{j}) 之預測物理向量； L 為控制體之周邊界總數； \bar{L}^l 為控制體第 l 邊之長度； θ 為向量 \mathbf{n} 與 \bar{x} 軸之夾角(從 \bar{x} 軸以逆時鐘方向算起)； $Q' = [T(\theta)Q] = [\bar{h}, \bar{h}\bar{u}_{x'}, \bar{h}\bar{v}_{y'}]^T$ 代表於 \bar{x} ， \bar{y} 座標系統中的物理向量 Q 通過座標旋轉變換得到於 x' ， y' 新座標系統下之轉換物理向量 Q' ，其中新座標系統即為垂直邊界之座標系統，代表速度分量分別為垂直和平行邊界方向； $\bar{u}_{x'} = \bar{u} \cos \theta + \bar{v} \sin \theta$ 和 $\bar{v}_{y'} = \bar{v} \cos \theta - \bar{u} \sin \theta$ 分別為新座標系統下 x' ， y' 方向之流速； $E_{\text{conv}}^{(1)}(Q')$ 與 $E_{\text{conv}}^{(2)}(\hat{Q}') = E_{\text{conv}}^{(2)}[T(\theta)\hat{Q}]$ 分別為一階與二階精度之非黏性法向數值通量； $T(\theta)$ 和 $T(\theta)^{-1}$ 分別為轉置矩陣與逆轉置矩陣，定義如下：

$$T(\theta) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta & \sin \theta \\ 0 & -\sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix}; T(\theta)^{-1} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta & -\sin \theta \\ 0 & \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \quad (4)$$

在一階數值通量之計算方面，採用 Lai et al. (2005) 提出的 UFF 算則(upstream flux-splitting finite-volume scheme)， $E_{\text{conv}}^{(1)}(Q') = E_{\bar{L}\bar{R}}(Q'_L, Q'_R)$ ：

$$E_{\bar{L}\bar{R}}(Q'_L, Q'_R) = (1 - \bar{K}) \left[\frac{1}{2} (\bar{P}_{\bar{L}} + \bar{P}_{\bar{R}}) + \Delta Q'_{av} \right] + \bar{K} [(\bar{u}_{x'})_{\bar{L}\bar{R}} - \bar{s}_2] Q'_{\bar{L}\bar{R}} + \bar{K} \bar{P}_{\bar{L}\bar{R}} \quad (5)$$

式中，變量下標 \bar{L} 、 \bar{R} 分別代表元素交界面 \bar{LR} 之左邊與右邊之變量； $\bar{P} = [0, \bar{p}, 0]^T$ 為壓力項， $\bar{p} = gh^2/2$ 為靜水壓力； $\Delta Q'_{av}$ 代表人工黏滯性 (artificial viscosity)；下標 \bar{L}/\bar{R} 定義為

$$\bar{L}/\bar{R} = \begin{cases} \bar{L} & \text{if } \bar{s}_1 > 0 \\ \bar{R} & \text{if } \bar{s}_1 \leq 0 \end{cases} \quad (6)$$

(5)式中之 $\Delta Q'_{av}$ 可表示為：

$$\Delta Q'_{av} = \frac{1}{2\bar{c}_{\bar{LR}}} \begin{bmatrix} \bar{p}_{\bar{L}} - \bar{p}_{\bar{R}} \\ (\bar{p}\bar{u}'_{x'})_{\bar{L}} - (\bar{p}\bar{u}'_{x'})_{\bar{R}} \\ (\bar{p}\bar{v}'_{y'})_{\bar{L}} - (\bar{p}\bar{v}'_{y'})_{\bar{R}} \end{bmatrix} \quad (7)$$

式中， $\bar{c}_{\bar{LR}} = \max(\bar{c}_{\bar{L}}, \bar{c}_{\bar{R}})$ ， $\bar{c} = \sqrt{gh}$ 為重力波之波速。

另外，(5)式中 \bar{K} 為兩個純量常數 \bar{s}_1 與 \bar{s}_2 所組成，表示如下：

$$\bar{K} = \frac{\bar{s}_1}{\bar{s}_1 - \bar{s}_2} \quad (8)$$

式中，波傳速度 \bar{s}_1 與 \bar{s}_2 ，可表示如下：

$$\bar{s}_1 = \frac{1}{2}(\bar{u}_{x\bar{L}} + \bar{u}_{x\bar{R}}) \quad (9)$$

$$\bar{s}_2 = \begin{cases} \min(0, \bar{u}_{x\bar{L}} - \bar{c}_{\bar{L}}, u_{x'}^* - c^*) & \text{if } \bar{s}_1 > 0 \\ \max(0, \bar{u}_{x\bar{R}} + \bar{c}_{\bar{R}}, u_{x'}^* + c^*) & \text{if } \bar{s}_1 \leq 0 \end{cases} \quad (10)$$

其中， $u_{x'}^*$ 與 c^* 分別定義如下：

$$u_{x'}^* = \frac{1}{2}(\bar{u}_{x\bar{L}} + \bar{u}_{x\bar{R}}) + \bar{c}_{\bar{L}} - \bar{c}_{\bar{R}} \quad (11)$$

$$c^* = \frac{1}{2}(\bar{c}_{\bar{L}} + \bar{c}_{\bar{R}}) + \frac{1}{4}(\bar{u}_{x\bar{L}} - \bar{u}_{x\bar{R}}) \quad (12)$$

在二階數值通量之計算方面，基於MUSCL方法，可將元素邊界面 $(\bar{i}+1/2, \bar{j})$ 之左、右邊物理量建構如下：

$$Q'_{\bar{i}+1/2, \bar{j}} = T(\theta) \left[\hat{Q}_{\bar{i}, \bar{j}} + \frac{\bar{d}_{\bar{i}+1/2, \bar{j}}^{\bar{L}}}{\bar{d}_{\bar{i}+1/2, \bar{j}}^{\bar{L}} + \bar{d}_{\bar{i}+1/2, \bar{j}}^{\bar{R}}} \bar{\Delta}_{\bar{i}, \bar{j}} \right] \quad (13a)$$

$$Q'_{\bar{i}+1/2, \bar{j}} = T(\theta) \left[\hat{Q}_{\bar{i}+1, \bar{j}} - \frac{\bar{d}_{\bar{i}+1/2, \bar{j}}^{\bar{R}}}{\bar{d}_{\bar{i}+1/2, \bar{j}}^{\bar{L}} + \bar{d}_{\bar{i}+1/2, \bar{j}}^{\bar{R}}} \bar{\Delta}_{\bar{i}+1, \bar{j}} \right] \quad (13b)$$

式中， $\bar{d}_{\bar{i}+1/2, \bar{j}}^{\bar{L}}$ 代表為元素 (\bar{i}, \bar{j}) 至元素邊界面 $(\bar{i}+1/2, \bar{j})$ 之垂直距離， $\bar{d}_{\bar{i}+1/2, \bar{j}}^{\bar{R}}$ 為元素 $(\bar{i}+1, \bar{j})$ 至元素邊界面 $(\bar{i}+1/2, \bar{j})$ 之垂直距離， $Q'_{\bar{i}+1/2, \bar{j}}^{\bar{L}}$ 和 $Q'_{\bar{i}+1/2, \bar{j}}^{\bar{R}}$ 分別代表元素邊界面 $(\bar{i}+1/2, \bar{j})$ 之左邊與右邊物理量； $\bar{\Delta}_{\bar{i}, \bar{j}} = \bar{\Delta}_{\bar{i}, \bar{j}}(\Delta_{\bar{i}+1/2, \bar{j}}, \Delta_{\bar{i}-1/2, \bar{j}})$ 為元素 (\bar{i}, \bar{j}) 之雙參數坡度限制子函數 (two-parameter slope limiter function)，為了避免插值過程中坡度過大，使得數值解可能存在振盪，故需加以限制坡度。文獻上已有許多不同的坡度限制子函數可供採用，本文使用 van Leer 限制函數：

$$\bar{\Delta}_{\bar{i}, \bar{j}} = [\text{sgn}(\Delta_{\bar{i}+1/2, \bar{j}}) + \text{sgn}(\Delta_{\bar{i}-1/2, \bar{j}})] \frac{|\Delta_{\bar{i}+1/2, \bar{j}}| \cdot |\Delta_{\bar{i}-1/2, \bar{j}}|}{|\Delta_{\bar{i}+1/2, \bar{j}}| + |\Delta_{\bar{i}-1/2, \bar{j}}| + \bar{\varepsilon}} \quad (14)$$

式中， $\Delta_{\bar{i}-1/2, \bar{j}} = Q'_{\bar{i}, \bar{j}} - Q'_{\bar{i}-1, \bar{j}}$ 和 $\Delta_{\bar{i}+1/2, \bar{j}} = Q'_{\bar{i}+1, \bar{j}} - Q'_{\bar{i}, \bar{j}}$ 為變量差(坡度)；sgn代表正負號函數， $\bar{\varepsilon}$ 為一個微小正數。接著，可將元素邊界面 $(\bar{i}+1/2, \bar{j})$ 之左、右邊物理量 $Q'_{\bar{i}+1/2, \bar{j}}^{\bar{L}}$ 和 $Q'_{\bar{i}+1/2, \bar{j}}^{\bar{R}}$ 代入一階數值通量計算式(5)，所獲的之數值通量，即具有二階準確度。而通過其它元素邊界面之二階數值通量計算如同上述之方式。

在求解黏性數值通量方面，採用常用之中央差分求解，通過元素介面之 $E_{\text{diff}}(Q')$ 為：

$$E_{\text{diff}}(Q') = \left[\begin{array}{c} 0 \\ 2\bar{\mu}_t \frac{\partial(\bar{h}\bar{u}_{x'})}{\partial x'} \\ \bar{\mu}_t \frac{\partial(\bar{h}\bar{u}_{x'})}{\partial y'} + \bar{\mu}_t \frac{\partial(\bar{h}\bar{v}_{y'})}{\partial x'} \end{array} \right]_{\bar{i}+1/2, \bar{j}} \quad (15)$$

其中，速度之梯度導數項可表示為：

$$\frac{\partial(\bar{u}_{x'})}{\partial x'} = \frac{[(\bar{u}_{x'})_{\bar{i}+1, \bar{j}} - (\bar{u}_{x'})_{\bar{i}, \bar{j}}](y'_{\bar{i}+1/2, \bar{j}+1} - y'_{\bar{i}+1/2, \bar{j}-1}) - [(\bar{u}_{x'})_{\bar{i}+1/2, \bar{j}+1} - (\bar{u}_{x'})_{\bar{i}+1/2, \bar{j}-1}](y'_{\bar{i}+1, \bar{j}} - y'_{\bar{i}, \bar{j}})}{(x'_{\bar{i}+1, \bar{j}} - x'_{\bar{i}, \bar{j}})(y'_{\bar{i}+1/2, \bar{j}+1} - y'_{\bar{i}+1/2, \bar{j}-1}) - (x'_{\bar{i}+1/2, \bar{j}+1} - x'_{\bar{i}+1/2, \bar{j}-1})(y'_{\bar{i}+1, \bar{j}} - y'_{\bar{i}, \bar{j}})} \quad (16)$$

$$\frac{\partial(\bar{u}_{x'})}{\partial y'} = \frac{[(\bar{u}_{x'})_{\bar{i}+1, \bar{j}} - (\bar{u}_{x'})_{\bar{i}, \bar{j}}](x'_{\bar{i}+1/2, \bar{j}+1} - x'_{\bar{i}+1/2, \bar{j}-1}) - [(\bar{u}_{x'})_{\bar{i}+1/2, \bar{j}+1} - (\bar{u}_{x'})_{\bar{i}+1/2, \bar{j}-1}](x'_{\bar{i}+1, \bar{j}} - x'_{\bar{i}, \bar{j}})}{(y'_{\bar{i}+1, \bar{j}} - y'_{\bar{i}, \bar{j}})(x'_{\bar{i}+1/2, \bar{j}+1} - x'_{\bar{i}+1/2, \bar{j}-1}) - (y'_{\bar{i}+1/2, \bar{j}+1} - y'_{\bar{i}+1/2, \bar{j}-1})(x'_{\bar{i}+1, \bar{j}} - x'_{\bar{i}, \bar{j}})} \quad (17)$$

$$\frac{\partial(\bar{v}_{y'})}{\partial x'} = \frac{[(\bar{v}_{y'})_{i+1,j} - (\bar{v}_{y'})_{i,j}](y'_{i+1/2,j+1} - y'_{i+1/2,j-1}) - [(\bar{v}_{y'})_{i+1/2,j+1} - (\bar{v}_{y'})_{i+1/2,j-1}](y'_{i+1,j} - y'_{i,j})}{(x'_{i+1,j} - x'_{i,j})(y'_{i+1/2,j+1} - y'_{i+1/2,j-1}) - (x'_{i+1/2,j+1} - x'_{i+1/2,j-1})(y'_{i+1,j} - y'_{i,j})} \quad (18)$$

2. 數值穩定與邊界條件

為確保數值模擬可獲得穩定數值解，數值演算所須之時距 Δt ，須符合：

$$C_r = \frac{\Delta t}{\min(d_{LR})} \max(\sqrt{\bar{u}^2 + \bar{v}^2} + \bar{c}) \leq 1 \quad (19)$$

其中， \bar{d}_{LR} 為兩相鄰元素形心之距離， C_r 為可蘭數(Courant number)。

在數值邊界條件方面，為獲得通過邊界元素界面處的數值通量，則必須給定適當的邊界條件。邊界條件可分為閉邊界(closed boundary)以及開邊界(open boundary)。其中，閉邊界可表示為 $\bar{h}_R = \bar{h}_L$ ， $\bar{u}_{xR} = -\bar{u}_{xL}$ ， $\bar{v}_{yR} = \bar{v}_{yL}$ ，係指不透水之邊界；式中，下標 \bar{L} 之物理量可代表計算區域內之已知物理量；下標 \bar{R} 之物理量即代表邊界處之未知物理量。另外，開邊界可根據局部流態(亞臨界流或超臨界流)選擇輸出的關係式，並利用給定的物理邊界條件加以確定。有關詳細之邊界條件關係式可參考Lai et al. (2010a)。

2.3 高地淹水潛勢圖資繪製

高地模擬區域為臺北市文山區老泉里、新北市新店區屈尺、新北市瑞芳、新北市鶯歌、新北市三峽、苗栗縣獅潭、宜蘭縣三星、宜蘭縣冬山鄉大進村、宜蘭縣蘇澳、宜蘭縣東澳、宜蘭縣南澳等區域。高地區域的模擬情境因為為延續補充過去平地淹水潛勢圖沒模擬的高地區塊，所以各區域情境設定略有差異。大致上為重現期1.1年、2年、5年、10年、20年、25年、50年、100年、200年、500年延時24小時、48小時、72小時之設計雨量與定量降雨200mm/day、350mm/day、450mm/day、600mm/day、450mm/2day、600mm/2day、750mm/2day、900mm/2day、700mm/3day、900mm/3day、1050mm/3day、1200mm/3day。總共產製出287張圖資，以下以新北市瑞芳區為例，其淹水潛勢圖如圖5至圖18所示，發生淹水區域為河道兩側與地勢低窪地區，隨著雨量增大淹水區域亦慢慢地擴張。

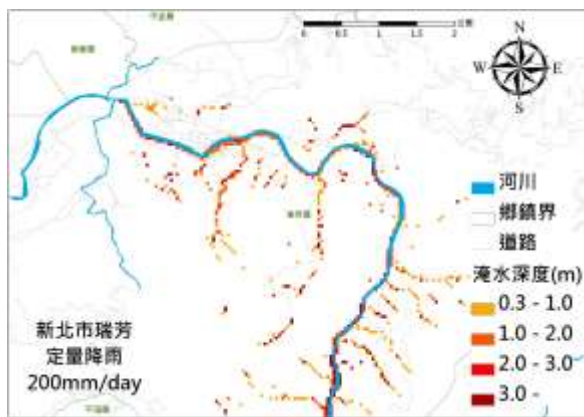


圖 5、新北市瑞芳區 200mm/day 降雨淹水

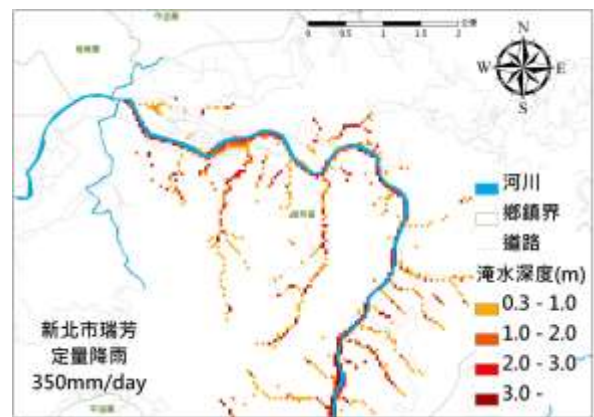


圖 6、新北市瑞芳區 350mm/day 降雨淹水

潛勢圖

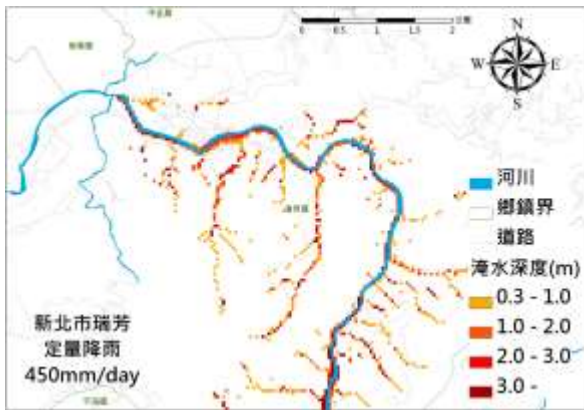


圖 7、新北市瑞芳區 450mm/day 降雨淹水潛勢圖

潛勢圖

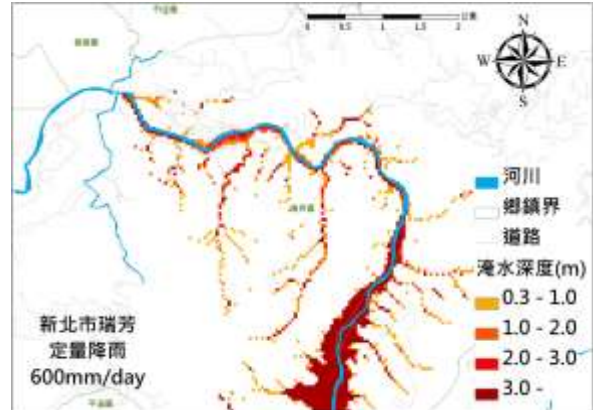


圖 8、新北市瑞芳區 600mm/day 降雨淹水潛勢圖

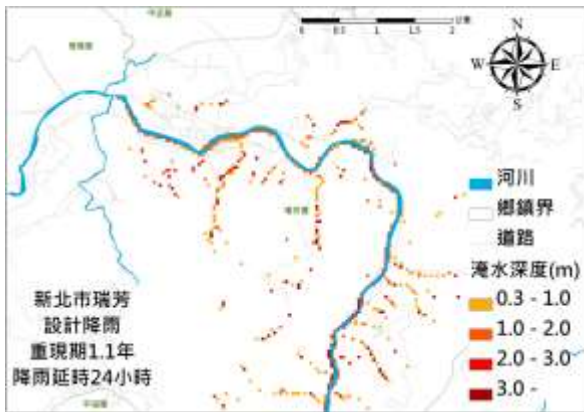


圖 9、新北市瑞芳區重現期 1.1 年 24 小時降雨淹水潛勢圖

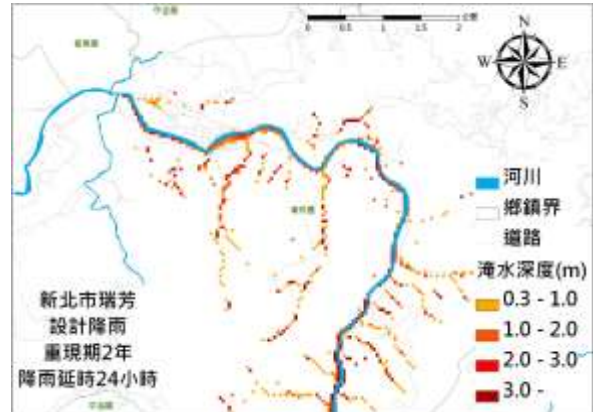


圖 10、新北市瑞芳區重現期 2 年 24 小時降雨淹水潛勢圖

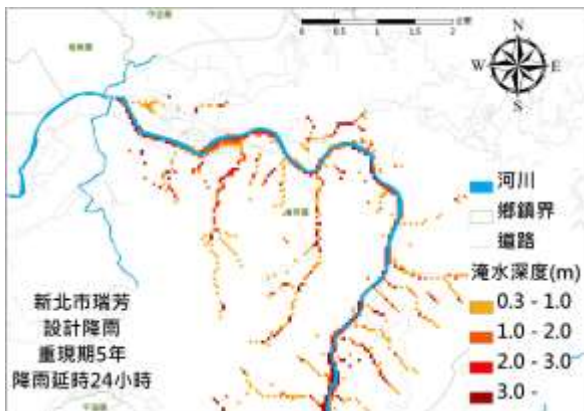


圖 11、新北市瑞芳區重現期 5 年 24 小時降雨淹水潛勢圖

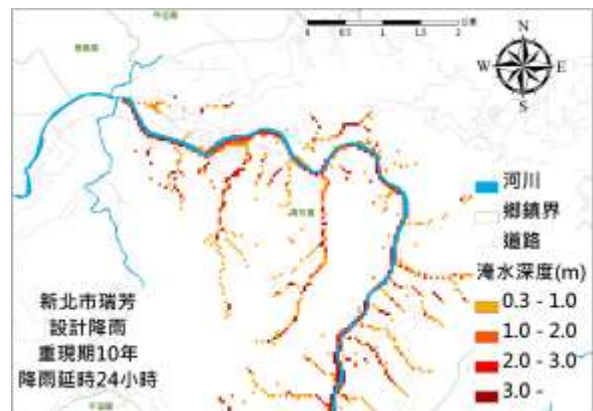


圖 12、新北市瑞芳區重現期 10 年 24 小時降雨淹水潛勢圖

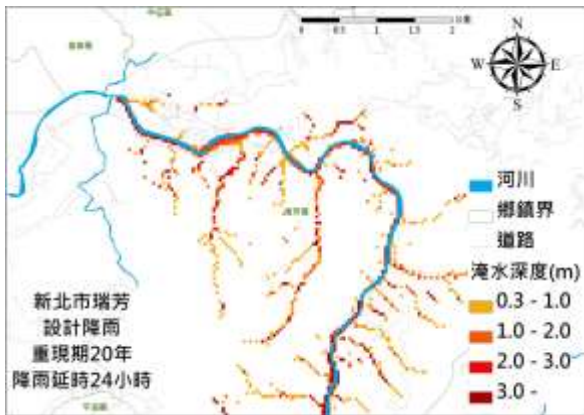


圖 13、新北市瑞芳區重現期 20 年 24 小時
降雨淹水潛勢圖

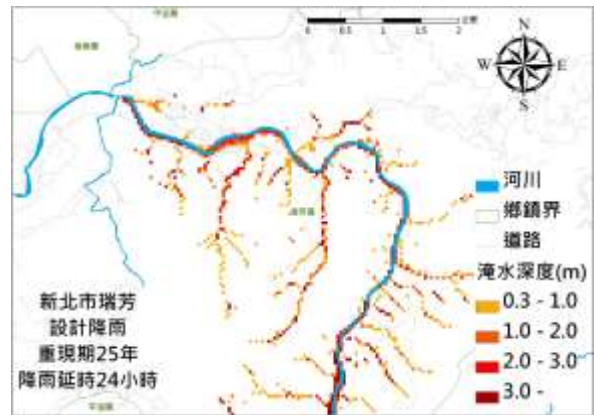


圖 14、新北市瑞芳區重現期 25 年 24 小時
降雨淹水潛勢圖

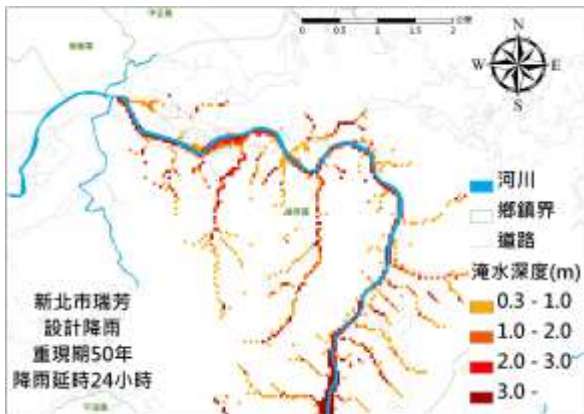


圖 15、新北市瑞芳區重現期 50 年 24 小時
降雨淹水潛勢圖

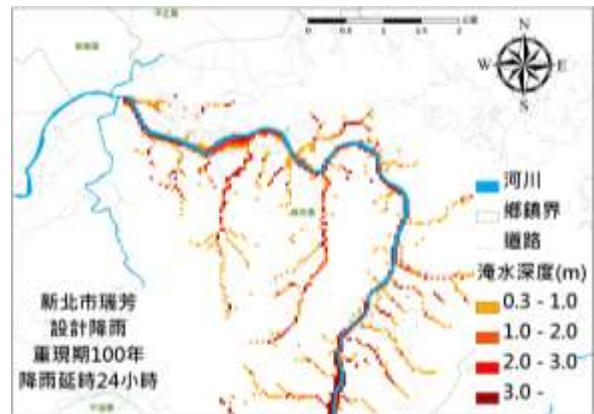


圖 16、新北市瑞芳區重現期 100 年 24 小
時降雨淹水潛勢圖

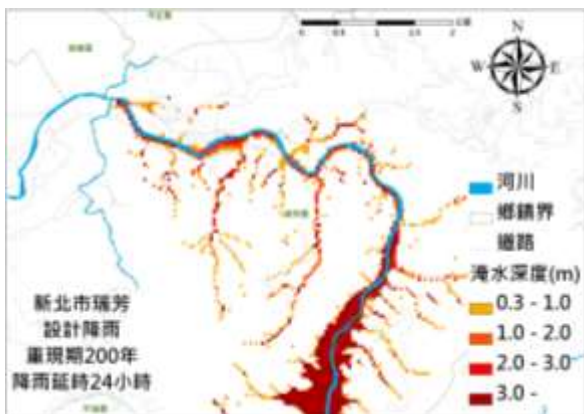


圖 17、新北市瑞芳區重現期 200 年 24 小
時降雨淹水潛勢圖

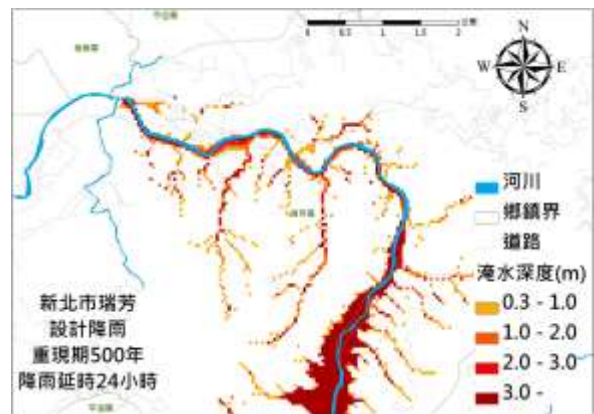


圖 18、新北市瑞芳區重現期 500 年 24 小
時降雨淹水潛勢圖

三、水災危險度、脆弱度及風險圖製作

3.1 製作方法及流程

本計畫是依據「水災危險度、脆弱度與風險地圖製作技術手冊」製作水災危險度、

脆弱度及風險地圖。製作流程共分10個程序，包括：資料蒐集、淹水潛勢模擬、脆弱度因子分類、危險度因子分級、脆弱度因子分級、權重訂定、危險度等級計算、脆弱度等級計算、水災風險等級計算，及水災危險度、脆弱度、風險地圖繪製。分別以生命面向與財產面向進行分級計算，再代入手冊中之水災風險公式，輔以GIS軟體繪製各面向之危險度地圖與脆弱度地圖，並採用風險矩將生命面向與財產面向之水災風險值以GIS軟體出圖完成水災風險圖。

3.2 基本資料

本計畫以宜蘭縣、基隆市、臺北市、新北市、桃園縣、新竹縣、新竹市、苗栗縣地區及淡水河及磺溪、蘭陽溪、鳳山溪、頭前溪、中港溪、後龍溪流域範圍作為研究區域，本計畫研究區內之水利署雨量站共有67站，中央氣象局局屬雨量站及中央氣象局自記雨量站共有112站。而水位/流量站由水利署水文技術組提供共49站，流量站資料用於針對特定歷史事件模擬結果進行檢定、驗證，以及模式邊界條件設定。水位站資料用於針對特定模擬事件設定模式之邊界條件。本計畫蒐集到計畫範圍內之潮位站共計有19站，依照潮位站資料之品質，挑選出蘇澳、淡水河口、桃園、新竹以及苗栗等5站適合之潮位站進行潮位分析。另外，為了進行脆弱度分析，本計畫蒐集、分析及統計製作脆弱度與風險度圖製作所需之人口、社經產業資料等相關資料。

四、計畫成果

本計畫完成宜蘭縣、基隆市、臺北市、新北市、桃園縣、新竹縣、新竹市、苗栗縣(含淡水河及磺溪、蘭陽溪、鳳山溪、頭前溪、中港溪、後龍溪流域)之水災危險度圖、脆弱度圖及風險地圖，找出高風險區域以提供相關單位製作時之規範依據，可以提供更有效率、更實務的資訊，作為政府相關水利單位防救災決策之依據。其成果如下：

1. 水災生命風險圖：

本計畫完成危險度地圖與脆弱度地圖後，以危險度為橫軸，脆弱度為縱軸建立風險矩陣，利用其計算各村里之風險值，最後將風險值以村里尺度呈現其空間分布，完成水災生命風險地圖，其結果如圖19-21所示。由圖中可知，從圖中可知，臺北市、桃園縣、新北市、新竹縣高風險區域之原因主要是因為水災生命危險度高，宜蘭縣、苗栗縣、基隆市、新竹市高風險區域之原因主要是因為水災生命危險度及水災生命脆弱度都高。

2. 水災財產風險圖：

本計畫完成危險度地圖與脆弱度地圖後，以危險度為橫軸，脆弱度為縱軸建立風險矩陣，利用其計算各村里之風險值，最後將風險值以村里尺度呈現其空間分布，完成水災財產風險地圖，其結果如圖22~24所示。從圖中可知，臺北市、桃園縣、新北市高風險區域之原因主要是因為水災財產危險度高，宜蘭縣、苗栗縣、基隆市、新竹市、新竹縣高風險區域之原因主要是因為水災財產危險度及水災財產脆弱度都高。

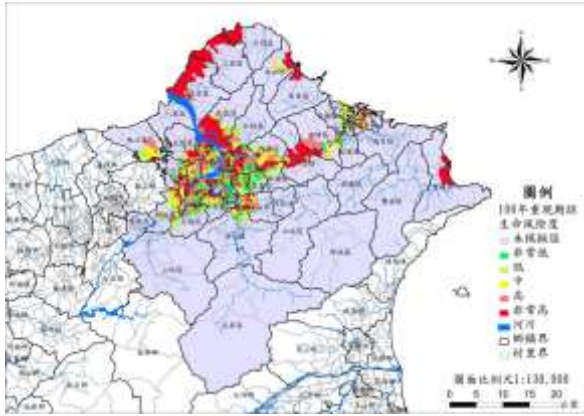


圖 19、北北基水災生命風險圖

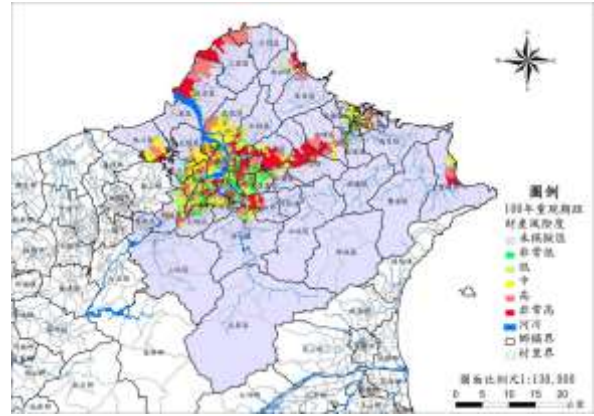


圖 22、北北基水災財產風險圖

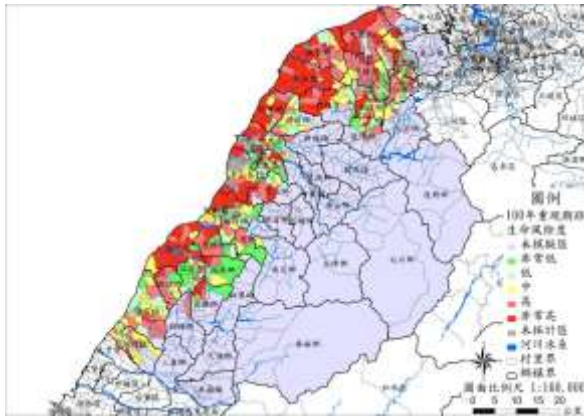


圖 20、桃竹苗水災生命風險圖

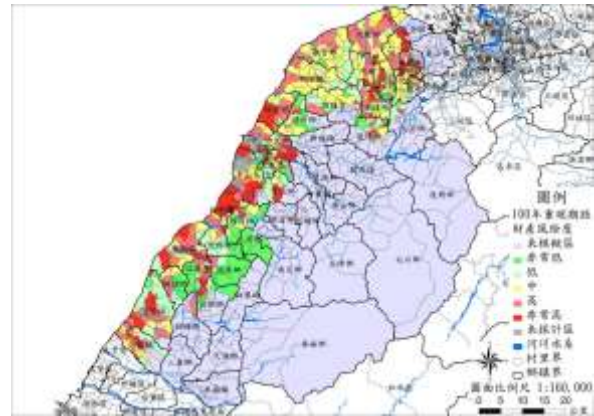


圖 23、桃竹苗水災財產風險圖

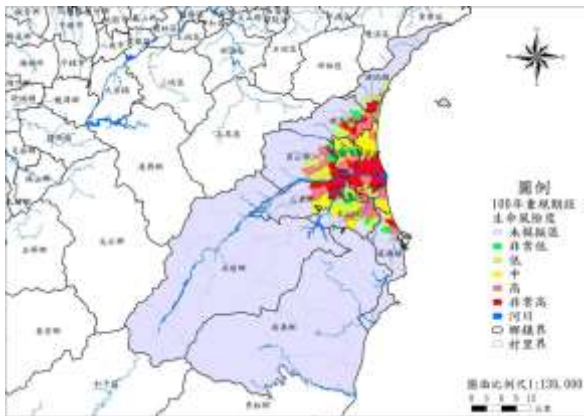


圖 21、宜蘭縣水災生命風險圖

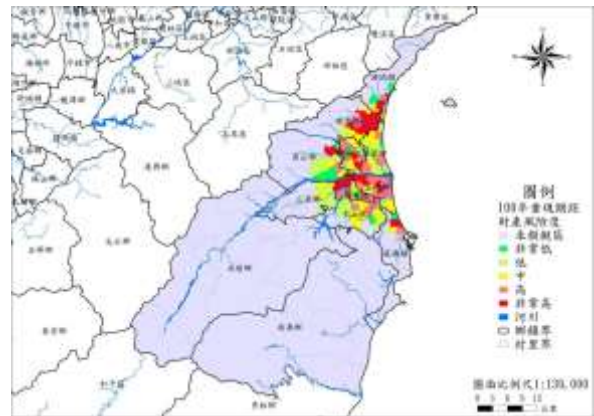


圖 24、宜蘭縣水災財產風險圖

五、結論與建議

本計畫主要完成兩大成果，建立高地淹水模擬模式，並依照模擬結果繪製高地淹水災害區域之淹水潛勢圖，共產製287張圖資；此外，參酌「水災危險度、脆弱度與風險圖製作技術手冊」，產製出之台北市、新北市、基隆市、宜蘭縣、桃園縣、新竹縣市、苗栗縣等8縣市之水災風險圖資。本計畫產製之高地淹水潛勢圖，可以補足之前淹水潛勢圖為模擬到之區域，另外，水災風險圖資可以提供水利相關主管單位參考研判有水災發生時，高風險之區域，可以進早提供減災、避災之規劃策略。本計畫建議相關單位執

行防洪減災措施後，應每5年更新一次水災風險圖，據以研析相關措施對水災風險之改善所產生效益之具體呈現。且在公告水災風險地圖時，應該於全臺灣第一版製作完成後，經由審議小組審議其內容，再經由舉辦說明會之形式，讓民眾徹底瞭解再由審議小組決定其公告時機。

參考文獻

1. 國立臺灣大學，「全國海岸海岸溢淹潛勢圖資製作之研究(1/2)」，經濟部水利署，2011。
2. 國立臺灣大學，「曾文溪、北港溪、八掌溪、樸子溪、急水河流域與台南市、嘉義市、嘉義縣脆弱度及風險地圖製作」，經濟部水利署，2011。
3. 國立臺灣大學，「高屏溪、東港溪及高雄市、高雄縣、屏東縣脆弱度及風險地圖製作示範」，經濟部水利署，2010。
4. 國立臺灣大學，「2011 水利防災年報」，經濟部水利署，2012。
5. 國立臺灣大學，「淡水河流域及臺北市、臺北縣、桃園縣與基隆市淹水潛勢圖更新計畫」，經濟部水利署，2009。
6. 中興工程顧問股份有限公司，「曾文溪、北港溪、八掌溪、樸子溪、急水河流域與臺南市、嘉義市、臺南縣與嘉義縣淹水潛勢圖更新計畫」，經濟部水利署，2009。
7. 國立臺灣大學，「脆弱度及風險地圖分析方法之研究」，經濟部水利署，2009。
8. 國立臺灣大學，「濁水河流域及彰化縣與雲林縣淹水潛勢圖更新計畫」，經濟部水利署，2009。
9. 中興工程顧問股份有限公司，「頭前溪、後龍溪、中港河流域及新竹縣、新竹市與苗栗縣淹水潛勢圖更新計畫」，經濟部水利署，2008。
10. 國立臺灣大學，「蘭陽溪、花蓮溪、秀姑巒溪流域、卑南溪及宜蘭縣、花蓮縣與臺東縣淹水潛勢圖更新計畫」，經濟部水利署，2008。
11. 中興工程顧問股份有限公司，「高屏河流域及高雄縣、高雄市與屏東縣淹水潛勢圖更新計畫」，經濟部水利署，2007。
12. 國立臺灣大學水工試驗所，「淹水潛勢圖更新前期計畫-演算資料調查及雨量預警之研究」，經濟部水利署，2006。
13. 網站資料：經濟部水利署縣市政府水情中心建置規劃之研究-水災保全計畫資料下載專區(<http://www.dprc.ncku.edu.tw/download/main.htm>)，淹水潛勢圖。
14. J. S. Lai, W. D. Guo, G. F. Lin and Y. C. Tan, "A well-balanced upstream flux-splitting finite-volume scheme for shallow-water flow simulations with irregular bed topography," Intl. Jour. for Numerical Methods in Fluids, Vol. 62, pp.927-944, 2010.
15. C. D. Jan, C. J. Chang, J. S. Lai and W. D. Guo, "Characteristics of hydraulic shock waves in an inclined chute contraction – Experiments," Jour. of Mechanics, Vol.25, No.2, pp.129-136, 2009.