

結合降雨之水文整合模擬技術研發

The Development of Integrated Hydro-meteorological Simulation Technology Combined with TAPEX

王毓麒 Wang, Yu-Chi	王豪偉 Wang, Hau-Wei	洪健豪 Hong, Jian-Hao	譚順忠 Tsung, Shun-Chung
郭文達 Kuo, Wen-Da	林嫩瑛 Lin, Mei-Ying	楊尊華 Yang, Tsun-Hua	張雅琪 Chang, Ya-Chi
楊勝崎 Yang, Sheng-Chi	何瑞益 Ho, Jui-Yi	陳毅青 Chen, Yi-Chin	高宏名 Kao, Hong-Ming
陳政欣 Chen, Cheng-Hsin	李士強 Li, Shih-Chiang		

摘要

除了工程性方法外，有效的災害預警和應變措施，可將損失降至最低程度。而從眾多預警系統經驗可知，欲得到良好之洪水預報結果，雨量預報精確度扮演相當關鍵之角色。因此本計畫整合觀測資料、定量降雨系集預報實驗（TAPEX）結果，發展結合降雨之水文整合模擬技術，包含整合中、上游集水區降雨逕流模式、河道洪水演算模式與區域淹水模式等，以改進洪水預測之時效性與準確度。期望研發成果可供災害防救相關單位，研擬減災應變對策與進行災害防救之減災、整備、應變等相關工作參考，協助降低洪水預警的不確定性，減少洪災損失。

關鍵詞：水文整合模擬技術、定量降雨系集預報實驗、洪水預報

Abstract

In addition to engineering approaches, the effective early warning systems for floods can minimize flooding losses. Based on many operational experiences of warning systems, the accuracy of rainfall forecasting is crucial to the prediction of the flood forecasting. Therefore, the present study aims to develop an integrating hydro-meteorological modeling system combined with Taiwan Quantitative Precipitation Ensemble Forecast Experiment (TAPEX) and to improve the capability of early warning for floods. Three major components of rainfall-runoff model, channel flood routing model and regional inundation model are included in this integrating system. The present research can provide the relevant mitigation units a useful protocol to reduce the uncertainty of flood warning and to the make response operation plan.

Keywords: integrated hydro-meteorological simulation technology, Taiwan Quantitative Precipitation Ensemble Forecast Experiment (TAPEX), flood forecasting.

一、前言

由於位於西北太平洋颱風活動的主要路徑上，台灣是全世界受颱風影響最顯著的地區之一，颱風與豪雨造成的高強度降雨與降雨總量，往往使得台灣遭受嚴重的颱風災害；而台灣的複雜地形與高人口密度除提高防洪減災的困難度外，亦使台灣的颱風災害研究具有相當高的特殊性。

工程性的防洪方法有其限制，欲更有效降低颱風、豪雨與洪水所帶來的整體損失，除必要的工程方法外，亦須配合適當的非工程減災方法。其中可行且有效的方式，莫過於有效的災害預警和應變措施，透過掌握豪雨與颱風動態，搭配災前的淹水預警，並適時啟動可能致災區之防救機制，將災害損失降至最低程度。因此，整合颱風或豪雨期間的定量降雨預報技術、中上游集水區降雨逕流模式、河道洪水演算模式與區域淹水模式，發展大氣水文整合模擬技術有其必要性。研究成果除降低洪水預警的不確定性、提高國內的模式研發能量外，亦可提供相關應用單位作為災害潛勢分析及啟動災害防救機制之參考，進而協助防救災單位改善作業效能、減少洪災損失。本年度計畫目標及成果簡述如下：

- **大氣-水文整合之洪水模擬測試平台開發：**本年度已完成示範流域（宜蘭河）之降雨逕流、河道演算以及區域淹水模式建置，模式可根據集水區之地文與水文因子，進行流量、水位與淹水深度及範圍等水文模擬。另銜接定量降雨系集實驗（Taiwan Quantitative Precipitation Ensemble Forecast Experiment, TAPEX）雨量資訊，串接上述模式，針對兩場歷史颱風事件（101年蘇拉與102年蘇力颱風）進行模式參數率定，並以103年麥德姆颱風事件完成驗證模式。結果顯示，以流域內中山橋、黎霧橋與壯圍橋為例，平均洪峰流量與尖峰水位誤差分別小於3.2%與12%，而洪峰到達時刻誤差亦不超過1小時；淹水模擬方面以蘇拉颱風為例，模擬之最大淹水深度與觀測值小於0.5m，最大淹水發生時間相差少於3小時。未來配合更多水文（含淹水）資料的蒐集，納入大氣-水文整合模擬模式，進而改進模式的環境模擬條件，更可有效掌握整體淹水歷程趨勢，增加洪水預報準確度。後續將持續累積模擬事件，並系統性測試應用此模式於即時預警之成效。
- **前瞻水文模擬技術發展：**為提升快速淹水模型之預判尺度，採用無限流向法與等高程水面假設，初步建置可提供村里精度之快速簡單物理型淹水模型。模式已初步建置完成，並以99年凡那比與100年南瑪都兩個颱風為案例，模擬屏東縣三個鄉鎮市（包括屏東市、林邊鄉及恆春鎮）因強降雨造成之淹水狀況。初步結果顯示，在相同的模擬條件下，本模式計算時間較二維淹水模型節省約50%以上；與淹水之村里比較，準確度達70%以上。模式將持續發展，未來將可作為防災單位先期評估優先預防村里之參考。此外，為提升集水區數值模式WASH123D模擬精度，於模式中增加判讀超亞臨界流流況因子-福祿數之控制模組，提升利用此模式模擬地形變化較劇烈之高屏溪流域水位及淹水的適用性，並進行測試。在一維河道演算部分，以杉林大橋為起點、模擬運算至高屏溪出海口；以102年蘇力颱風及潭美颱風事件進行參數檢定，並以康芮颱風事件作驗證。模擬結果顯示，模擬之流量與各水文測站觀測值之洪峰流量誤差皆小於

10%，而洪峰時間誤差則不超過2小時。在二維淹水計算部分，目前先以流域內之旗山區、美濃區及部分里港鄉為計算區域，針對康芮颱風之初步模擬結果顯示，淹水區域與實測淹水調查範圍具有一致性，顯示新增之控制模組已發揮其預期效益。

- **高災害潛勢試驗流域之定量降雨整合預報技術：**利用定量降雨系集實驗（TAPEX）成果進行加值分析，提供未來24小時之最佳化總降雨量預估資料。本年度採用基因演算法即時整合策略發展總雨量最佳化估計雛形系統，以101年蘇拉與102年蘇力颱風進行個案測試，結果顯示最佳化後的降雨預估整體上對於降雨空間的分布有不錯的預估表現，亦可改善降雨極值的預估表現。本系統已介接至TAPEX系集平台進行實時測試與結果展示，可於TAPEX系集平台上實時比對最佳化估計結果與系集平均結果，亦可於事後同時比對實際觀測值結果。針對本系統在102年5場颱風事件預估表現之系統性評估結果顯示，當降雨門檻值在大雨等級（50 mm / 24h）以上時，整合後的預兆得分（TS）、偵測機率（POD）及公正預兆得分值（ETS）均高於未整合前，後續可再使用更多事件進行校驗與系統性評估，期望可持續改進總雨量最佳化表現。

二、大氣-水文整合之洪水模擬測試平台開發

在洪水模擬測試平台中，所使用之降雨逕流模式為運動波-地貌瞬時單位歷線（KW-GIUH）模式，河道洪水演算與區域淹水模式則採用WASH123D，其中降雨逕流模式、河道洪水演算模式以及區域淹水模式皆利用歷史颱風事件（101年蘇拉、102年蘇力以及103年麥德姆）及試驗流域之水文觀測資料進行率定驗證。

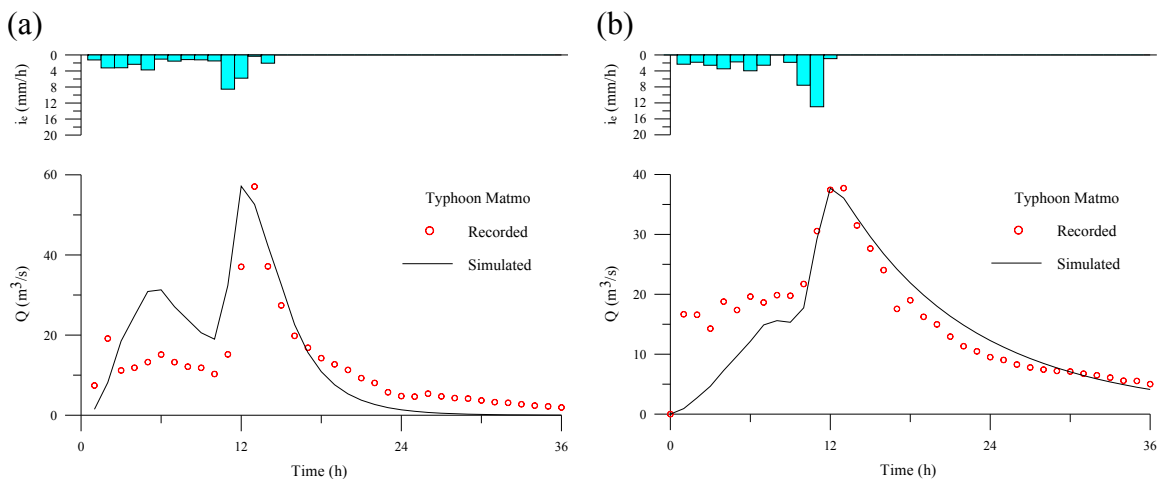


圖 1 KW-GIUH 模式於麥德姆颱風事件之宜蘭河(a)新城橋及(b)員山大橋之降雨逕流模擬結果

圖1顯示為KW-GIUH於麥德姆颱風事件之宜蘭河新城橋及員山大橋之降雨逕流模式驗證結果，顯示模式大致能正確掌握宜蘭河之降雨逕流現象。關於WASH123D河道水位模擬，以101年蘇拉與102年蘇力颱風所率定之曼寧參數，驗證103年麥德姆颱風事件模式所模擬之水位，模擬時間為103/7/22 00時至7/24 23時，共72小時。圖2顯示為WASH123D於麥德姆颱風事件之宜蘭河中山橋與黎霧橋之河道水理演算驗證

結果，顯示WASH123D模式所模擬河道洪水水位歷程與所觀測之洪水歷程趨勢接近；以中山橋結果為例，模擬之洪峰水位值較觀測值高，模擬之最高水位5.92 m，而觀測最高水位則為5.58 m，誤差為0.34 m，觀測洪峰時刻為第37小時，而所模擬之洪峰時刻為第36小時，因此有-1小時的洪峰時刻誤差。表1彙整麥德姆颱風事件之模式表現（包含效率係數、洪峰誤差及最大洪峰時間誤差），顯示WASH123D一維河道模式能掌握真實颱風事件下之洪峰到達時間及河川水位。

表 1 宜蘭河一維河道模擬準確性評估結果

位置	效率係數	洪峰誤差(%)	最大洪峰時間誤差(hr)
中山橋	0.83	6.09	-1
黎霧橋	0.88	20	0
壯圍大橋	0.95	-9.8	0

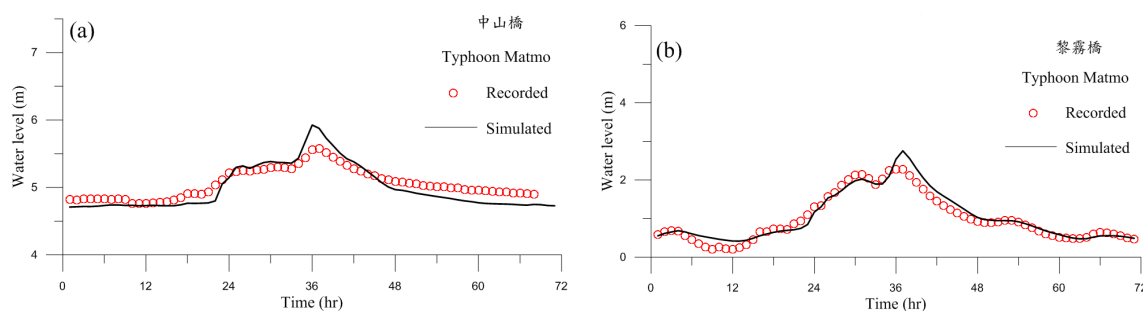


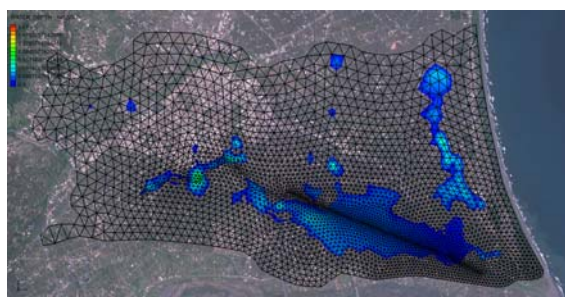
圖 2 WASH123D 模式於麥德姆颱風事件之宜蘭河(a)中山橋及(b)黎霧橋之河道水位模擬結果

關於二維淹水模擬，為使WASH123D二維淹水三角網格資料更能彈性使用，本年度利用克利金法將WASH123D二維淹水的網格資料（圖3a）空間內插至均勻格點上（圖3b），可套疊至不同空間的展示系統。本年度所模擬之二維淹水範圍為新城與員山大橋以下之區域。為平衡模擬計算時間與實際可能淹水情況，故於較不易發生淹水之區域使用較粗網格，例如從上游至下游採用200m至100m解析度，美福大排附近之易淹地區則為40m。目前所使用之數值地形資料空間解析度為5x5m，並內插高程資料至模式產生之網格，WASH123D二維淹水模式於宜蘭河流域內共佈置9,663個網格。以101年蘇拉颱風為例，模擬時間為101年8月1日之00時至8月3日之23時，共72小時。實際淹水範圍位於美福大排兩側區域，尤其於美福村與新南村區域。模擬結果顯示模式模擬出實際淹水範圍，其他地區則模擬出零星淹水情況。表2顯示淹水站之淹水模擬結果評估因子，結果指出所模擬之淹水值有些許誤差，但淹水歷程及洪峰發生時間大致與實測資料相同。

表 2 蘇拉颱風各淹水站模擬結果之評估因子

淹水站	洪峰誤差(%)	最大洪峰時間誤差(hr)	效率係數
美福路 1	40	-2	-3.27
美福路 2	35	-2	0.085
古結路 1	-16	-1	-0.0043
古結路 2	-23	-1	-4.98
ISR5	-67	-2	-9.8
ISR7	-40	-1	0.56
ISR9	16	0	0.51

(a)



(b)

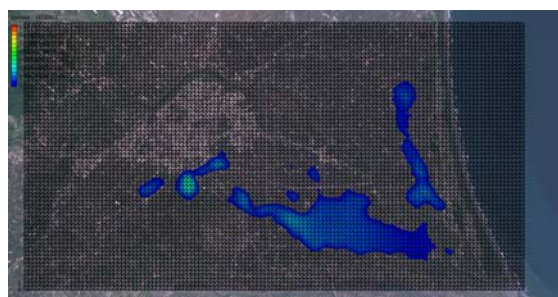


圖 3 蘇拉事件於二維淹水模擬之(a)網格資料及(b)內插至格點資料

另以103年麥德姆颱風為例，進行共72小時之淹水模擬。圖2.1.2-4顯示於美福大排兩側僅有零星淹水，淹水測站則無觀測到明顯淹水情形，顯示模擬結果貼近真實情況。根據中央災害應變中心淹水災情統計資料，103年麥德姆並未有災情發生，然圖2.1.2-5及圖2.1.2-6則顯示模式模擬出麥德姆事件有少數零星淹水情形，而根據現場所拍攝之照片，所模擬之零星淹水情形與現場淹水位置大致相符，證明模式可掌握颱風事件中之淹水範圍及位置的發生。

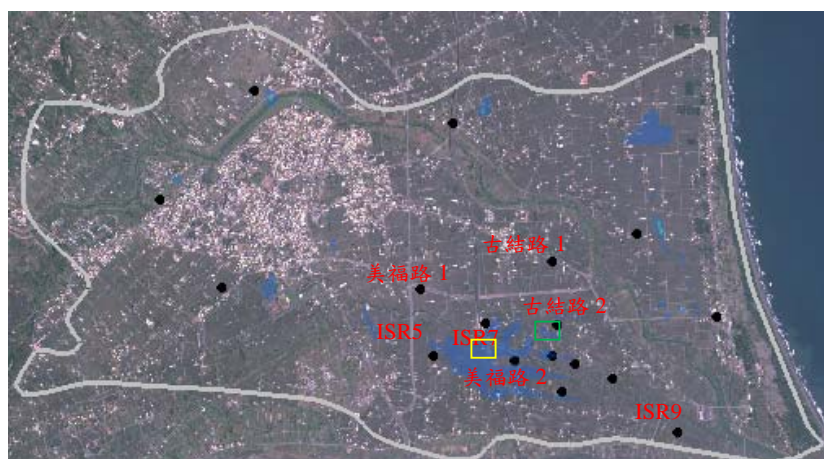


圖 4 麥德姆颱風之二維淹水模擬範圍

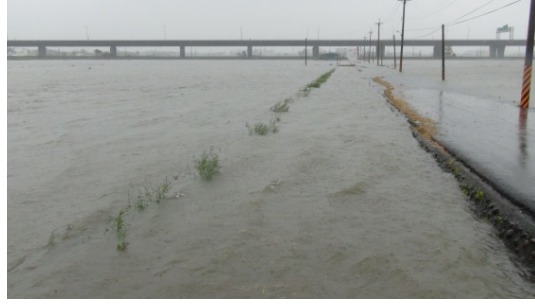


圖 5 麥德姆颱風之現場淹水照片（圖 4 中黃框範圍）



圖 6 麥德姆颱風之現場淹水照片（圖 4 中綠框範圍）

三、前瞻水文模擬技術發展

結合定量降雨系集實驗 (TAPEX) 成果，針對屏東縣開發客制化『淹水潛勢先期評估系統』，除原有雨水下水道設計標準外，另結合水利署發佈之屏東地區淹水潛勢圖及過去歷史淹水事件資料，利用微基因演算法調校淹水雨量警戒值，以提供未來 1 至 3 天之可能淹水區域。本年度選定天兔 (102)、康芮 (102) 及麥德姆 (103) 颱風進行測試。結果顯示，24 小時預測淹水之預兆得分 (Threat Score，簡稱 TS) 表現為 0.31。本年度另針對宜蘭縣進行系統建置，已初步建置完成，預定 104 年汛期開始線上作業，如圖 7 所示。

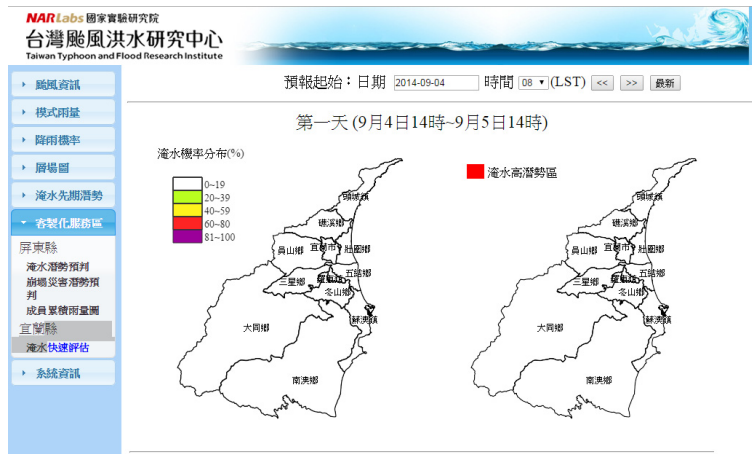
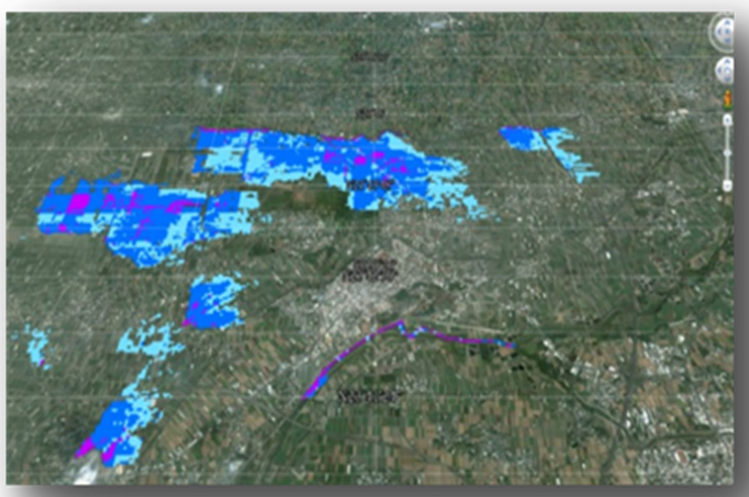


圖 7 宜蘭縣淹水潛勢先期評估系統

為提升颱風中心所研發之快速淹水模型之預判尺度，初步建置以提供村里精度之快速簡單物理型淹水模型（圖8）。模式已初步建置完成，並以99年凡那比與100年南瑪都兩個颱風為案例，模擬屏東縣三個鄉鎮市（包括屏東市、林邊鄉及恆春鎮）因強降雨造成之淹水狀況。初步結果顯示，在相同的模擬條件下，本模式計算時間較二維淹水模型節省約50%以上；與淹水之村里比較，準確度達70%以上。模式將持續發展，未來將可作為防災單位先期評估優先預防村里之參考。

(a)



(b)

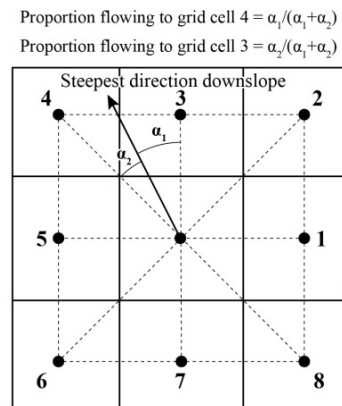
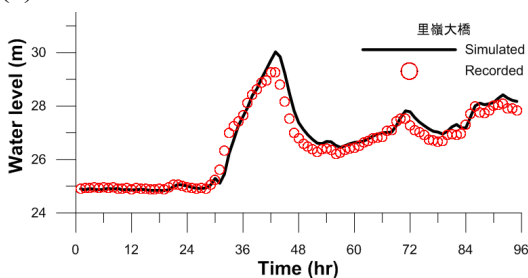


圖8 快速簡單物理型淹水模型之(a)初步測試結果與(b)無限流向法流向判斷示意

此外，為提升集水區數值模式WASH123D模擬精度，於模式中增加判讀超亞臨界流流況因子-福祿數之控制模組，提升利用此模式模擬地形變化較劇烈之高屏溪流域水位及淹水的適用性，並進行測試。在一維河道演算部分，以杉林大橋為起點、模擬運算至高屏溪出海口；模擬時以102年蘇力颱風及潭美颱風事件進行參數檢定，並以康芮颱風事件（圖9）作驗證。模擬結果顯示，模擬之流量與各水文測站觀測值之洪峰流量誤差皆小於10%，而洪峰時間誤差則不超過2小時。在二維淹水計算部分，目前先以流域內之旗山區、美濃區及部分里港鄉為計算區域，針對康芮颱風之初步模擬結果顯示（圖10），淹水區域與實測淹水調查範圍具有一致性，顯示新增之控制模組已發揮其預期效益。

(a)



(b)

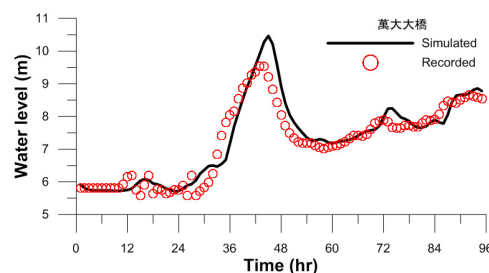


圖9 高屏溪流域於康芮颱風事件之水位模擬結果

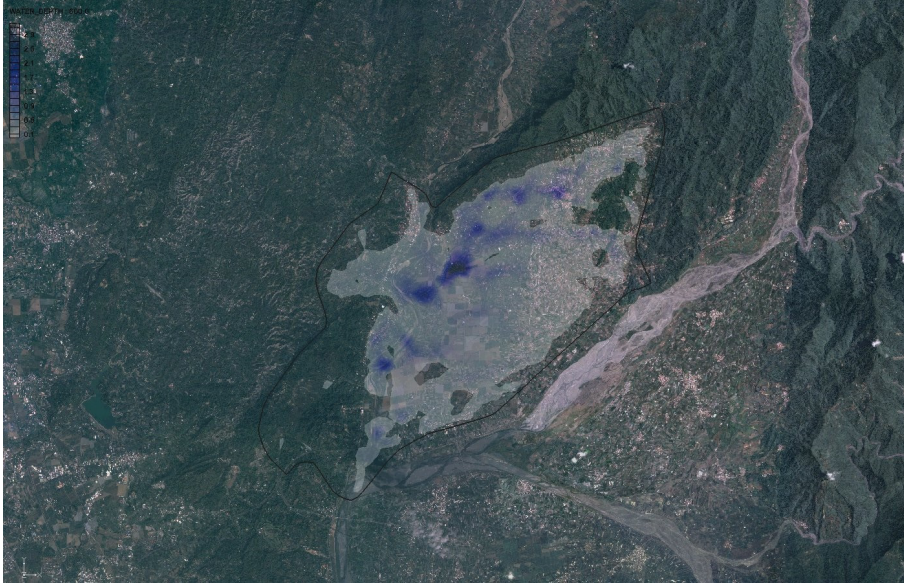


圖10 高屏溪流域於康芮颱風事件之二維淹水模擬初步結果

四、高災害潛勢試驗流域之定量降雨整合預報技術

針對屏東縣開發應用定量降雨系集實驗 (TAPEX) 成果進行加值分析，提供未來24小時之最佳化總降雨量預估資料。採用即時整合策略發展總雨量最佳化估計雛形系統。即時整合策略係依據同一事件前段已發生時間之定量降雨系集實驗 (TAPEX) 中各模式成員的表現，即時訂定各模式成員的最佳組合權重，使最佳組合之預估值與量測值誤差最小，再將此組最佳組合權重應用至後段未發生時間，提供未來24小時累積雨量最佳化預估值。於此即時整合策略中，關鍵點為如何即時訂定各模式成員的最佳組合權重。因考量預估時效性，故藉由即時比對全台雨量測站位置處之過去6小時內TAPEX中21個系集成員預報雨量值與QPESUMS實際雨量值，評估各系集成員表現，並訂定各系集成員間的最佳組合權重，目的為使加權組合後之預估值與量測值誤差最小，上述過程以數學式表示如下：

$$\hat{y}^* = \sum_{i=1}^n w_i x_i, \text{ in which } \sum_{i=1}^n w_i = 1 \quad (1)$$

(1)式中 n 為系集成員個數， x_i 為第 i 個成員的預估結果， w_i 為第 i 個成員的組合權重， \hat{y}^* 即為整合後的預估結果。對於上式中之 w_i 值，需滿足下式限制：

$$\text{OF} = \text{minimize } \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{j=1}^N (o_j - \hat{y}_j^*)^2} \quad (2)$$

(2)式中 j 為觀測站序號， N 為站數， o_j 為第 j 站之過去6小時真實觀測雨量值， \hat{y}_j^* 第 j 站之對應時段內之預估雨量值。

在總雨量最佳化估計雛形系統中，係應用最佳化理論中常見之遺傳演算法技術作為即時訂定各系集成員間最佳組合權重 w_i 之工具。遺傳演算法係仿效生物界中物

競天擇、適者生存的自然進化法則。藉由從上一代物種中選擇出適應力較優的個體進行繁衍，隨機互換彼此的優良基因資訊，以期產生比上一代個體適應性更佳的后代。如此不斷重複，最終將產生適應力最強的最佳物種。

本年度以101年蘇拉與102年蘇力颱風進行個案測試，結果如圖11所示。顯示最佳化後的降雨預估整體上對於降雨空間的分布有不錯的預估表現，亦可改善降雨極值的預估表現。因此，該開發完成之總雨量最佳化估計雛形系統已於本年度6月份介接至TAPEX系集平台進行實時測試與結果展示（如圖12所示），可於TAPEX系集平台上實時比對最佳化估計結果（圖12中之下排左）與系集平均結果（圖12中之上排中），亦可於事後同時比對實際觀測值結果（圖12中之上排右）。

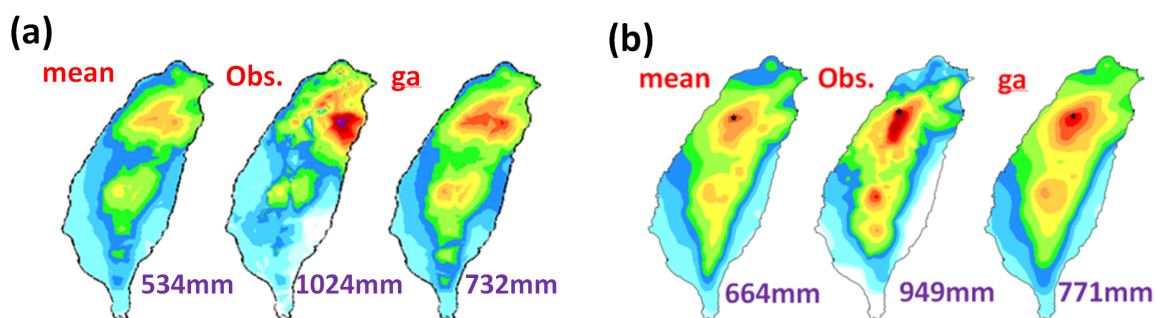


圖11 最佳化估計雛形系統於(a)101年蘇拉颱風與(b)102年蘇力颱風事件之測試結果

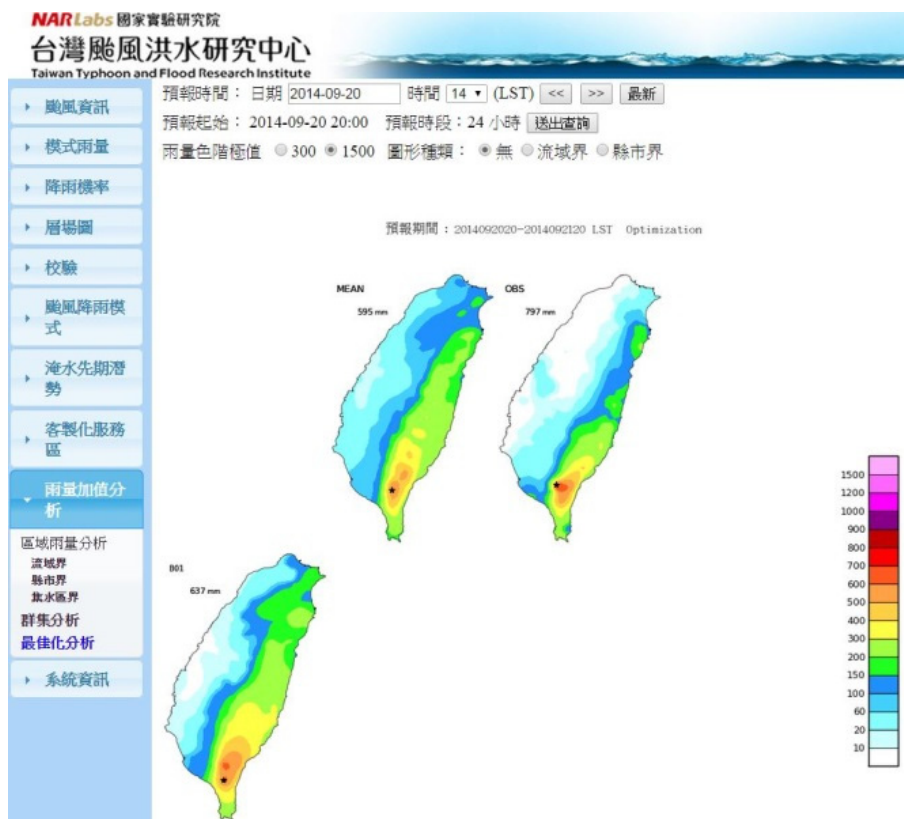


圖12 TAPEX系集平台上最佳化估計雛形系統測試與結果展示

五、結論

- 1. 大氣-水文整合之洪水模擬測試平台開發：**本年度已完成示範流域（宜蘭河）之降雨逕流、河道演算以及區域淹水模式建置，模式可根據集水區之地文與水文因子，進行流量、水位與淹水深度及範圍等水文模擬。另銜接定量降雨系集實驗（TAPEX）雨量資訊，串接上述模式，針對兩場歷史颱風事件（101年蘇拉與102年蘇力颱風）進行模式參數率定，並以103年麥德姆颱風事件完成驗證模式。結果顯示，以流域內中山橋、黎霧橋與壯圍橋為例，平均洪峰流量與尖峰水位誤差分別小於3.2%與12%，而洪峰到達時刻誤差亦不超過1小時；淹水模擬方面以蘇拉颱風為例，模擬之最大淹水深度與觀測值小於0.5m，最大淹水發生時間相差少於3小時。未來配合更多水文（含淹水）資料的蒐集，納入大氣-水文整合模擬模式，進而改進模式的環境模擬條件，更可有效掌握整體淹水歷程趨勢，增加洪水預報準確度。後續將持續累積模擬事件，並系統性測試應用此模式於即時預警之成效。
- 2. 前瞻水文模擬技術發展：**為提升快速淹水模型之預判尺度，採用無限流向法與等高程水面假設，初步建置可提供村里精度之快速簡單物理型淹水模型。模式已初步建置完成，並以99年凡那比與100年南瑪都兩個颱風為案例，模擬屏東縣三個鄉鎮市（包括屏東市、林邊鄉及恆春鎮）因強降雨造成之淹水狀況。初步結果顯示，在相同的模擬條件下，本模式計算時間較二維淹水模型節省約50%以上；與淹水之村里比較，準確度達70%以上。模式將持續發展，未來將可作為防災單位先期評估優先預防村里之參考。此外，為提升集水區數值模式WASH123D模擬精度，於模式中增加判讀超亞臨界流流況因子-福祿數之控制模組，提升利用此模式模擬地形變化較劇烈之高屏溪流域水位及淹水的適用性，並進行測試。在一維河道演算部分，以杉林大橋為起點、模擬運算至高屏溪出海口；以102年蘇力颱風及潭美颱風事件進行參數檢定，並以康芮颱風事件作驗證。模擬結果顯示，模擬之流量與各水文測站觀測值之洪峰流量誤差皆小於10%，而洪峰時間誤差則不超過2小時。在二維淹水計算部分，目前先以流域內之旗山區、美濃區及部分里港鄉為計算區域，針對康芮颱風之初步模擬結果顯示，淹水區域與實測淹水調查範圍具有一致性，顯示新增之控制模組已發揮其預期效益。
- 3. 高災害潛勢試驗流域之定量降雨整合預報技術：**利用定量降雨系集實驗（TAPEX）成果進行加值分析，提供未來24小時之最佳化總降雨量預估資料。本年度採用基因演算法即時整合策略發展總雨量最佳化估計雛形系統，以101年蘇拉與102年蘇力颱風進行個案測試，結果顯示最佳化後的降雨預估整體上對於降雨空間的分布有不錯的預估表現，亦可改善降雨極值的預估表現。本系統已介接至TAPEX系集平台進行實時測試與結果展示，可於TAPEX系集平台上實時比對最佳化估計結果與系集平均結果，亦可於事後同時比對實際觀測值結果。針對本系統在102年5場颱風事件預估表現之系統性評估結果顯示，當降雨門檻值在大雨等級（50 mm / 24h）以上時，整合後的預兆得分（TS）、偵測機

率 (POD) 及公正預兆得分值 (ETS) 均高於未整合前，後續可再使用更多事件進行校驗與系統性評估，期望可持續改進總雨量最佳化表現。

參考文獻

1. 政府科技計畫成果效益報告，計畫名稱：颱風洪水研究計畫(民國 103 年)，執行單位：財團法人國家實驗研究院台灣颱風洪水研究中心。