

# 應用禁忌演算法進行降雨-淹水警戒值之優化： 以臺北市文山區及新北市新店區為例

## Applying the Tabu Search to Optimize a Rainfall-Inundation Warning Threshold: Case Studies in Wenshan, Taipei City and Xindian, New Taipei City

國立臺灣大學  
氣候變遷與永續發展研究中心  
專任助理

**廖 皓 宇**

Hao-Yu Liao

國立臺灣大學  
氣候天氣災害研究中心  
助理研究員

**潘 宗 毅\***

Tsung-Yi Pan

國立臺灣大學  
生物環境系統工程學系  
教授

**譚 義 績**

Yih-Chi Tan

國立臺灣大學  
水工試驗所  
研究員

**賴 進 松**

Jihn-Sung Lai

國立臺灣大學  
生物環境系統工程學系  
教授

**蘇 明 道**

Ming-Daw Su

### 摘 要

臺灣飽受季風盛行區域產生的短延時強降雨或是每年平均 3~4 次颱風暴雨所導致淹水災害造成的財產及人員損失。據此，經濟部水利署採用非工程手段建立全臺灣降雨-淹水預警系統，當觀測累積雨量到達或超過該區域設定的降雨-淹水警戒值時，預警系統會發出提醒警戒區域若降雨持續將有淹水之虞。然而部分警戒區域之警戒值設定不佳，仍有改善之空間。本研究收集臺北市文山區及新北市新店區淹水災害事件及歷年時雨量資料，爾後透過雨場分割法劃分各降雨事件的開始及結束時間點，再利用禁忌演算法針對各降雨事件之 1、3、6、12 及 24 小時累積雨量之五種降雨延時同時演算最佳化降雨-淹水警戒組。研究結果顯示，本研究設定之降雨-淹水警戒值具有良好的預警能力，其精度最大可提升 40%，淹水時命中淹水結果之準確率最大可提升 33.3%，而預警時命中淹水結果之準確率最大可提升 5.7%。

\*通訊作者，國立臺灣大學氣候天氣災害研究中心助理研究員，10617 臺北市大安區羅斯福路四段 1 號，tsungyi.pan@gmail.com

**關鍵詞：**降雨-淹水警戒值，累積雨量，災害事件，雨場分割法，禁忌演算法。

## ABSTRACT

Taiwan located in Southeast Asia faces strong monsoon and three to four typhoons annually which may cause floods and may result in great damage as well as loss of property. The Water Resource Agency (WRA) has established a warning system as a non-structural measure. The concept of the warning system is based on rainfall threshold. When the cumulative rainfall reaches or exceeds rainfall threshold, the warning system will alert emergency response personnel. According to flood records provided by WRA between 2013 and 2015, the records of flood alarm showed that the warning accuracy of warning system needs to be improved.

This study provides a methodology to build effective rainfall thresholds through the tabu search which optimizes rainfall thresholds based on 1、3、6、12 and 24 hour duration at the same time. The cases of study are in the Wenshan and Xindian district. And the rainfall events are divided into four situations, including correct alert (A), missed alert (B), false alert (C) and correct rejection (D). The results show that the rainfall thresholds of study have more alerting ability than official rainfall thresholds. The increasing maximum of accuracy is 40%, the increasing maximum of hitting flood during flooding time is 33.3%, and the increasing maximum of hitting flood during warning time is 5.7%.

**Keywords:** rainfall threshold, cumulative rainfall, flood disaster events, inter-event time definition, tabu search

## 一、前 言

政府間氣候變化專門委員會 (Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC) 在 2008 年的報告書中表示東南亞季風區，其夏天的降水量將會有增加的趨勢，對於臺灣常飽受東南亞季風所產生的短延時強降雨淹水災害，未來的淹水情況將可能比往來嚴重。再者，臺灣每年平均受到 3~4 次颱風的侵襲，昌鴻颱風於 2015 年重創臺灣導致經濟損失，該颱風曾經列入全球因自然災害經濟損失前 10 大排名中 (Guha-Sapir *et al.*, 2016)。另外受到氣候變遷的因素，東南亞地區等包含臺灣洪水頻率將會有增加的趨勢 (Hirabayashi *et al.*, 2013)。綜合上述原因，臺灣如何面對未來淹水災害的衝擊為重要議題。

經濟部水利署為減緩淹水災害的衝擊，採用非工程手段 (non-structural measures) 建立全臺灣

降雨-淹水預警系統，當觀測累積雨量到達或超過該區域設定的降雨-淹水警戒值時，預警系統將發出警告訊息，促使應變人員針對該系統提供的警告訊息，為該區域進行淹水災害應變措施，根據預警歷史紀錄，降雨-淹水警戒值具有淹水災害預警的能力。Rogers and Tsirkunov (2011) 表示預警系統具有降低人員以及財產損失的能力；Golian *et al.* (2014) 表示降雨-淹水警戒值屬於非工程手段的洪水緩衝方法，為非常有效的洪水災害預警工具。因此有效率定降雨-淹水警戒值對於淹水預警具有顯著的重要性。

前人的研究中，降雨警戒值最常使用為山坡滑動或土石流預警 (Huang *et al.*, 2015; Rosi *et al.*, 2016; Saito *et al.*, 2017)，或是針對洪水預警使用 (Martina *et al.*, 2006; Montesarchio *et al.*, 2009; Jang, 2015)。過去洪水預警的研究中，主要是建立水理模型，考慮不同臨前狀況 (Antecedent

Moisture Condition, AMC)，及假設不同情境，計算水理模型河川斷面的臨界流量與降雨-淹水警戒值的關係(Martina *et al.*, 2006; Norbiato *et al.*, 2008; Montesarchio *et al.*, 2009)。或是根據不同情境的水理模型建立洪水淹沒圖(flood inundation mapping)，嘗試計算降雨量與淹水機率之間的關係(Golian *et al.*, 2011; Jang *et al.*, 2012)。Montesarchio *et al.* (2015)使用三種方法，分別是經驗法(empirical method)、建立水文模型及機率方法推估降雨-淹水警戒值。近年針對臺灣降雨-淹水警戒值的研究，Yang *et al.* (2016)結合定量降雨系集預報試驗(Taiwan cooperative Precipitation Ensemble forecast experiment, TAPEX)及經濟部水利署提供的降雨-淹水警戒值，根據 7 場颱風淹水事件，建立全臺灣 352 鄉鎮市區的降雨-淹水警戒機制。Jang (2015)以 22 場包含颱風及豪大雨之淹水事件，應用多變數方法，建立臺灣內 252 鄉鎮市區的降雨-淹水警戒值。楊尊華及柳文成(2014)採用微基因演算法及結合 TAPEX 預報結果與歷史淹水紀錄，建立屏東縣鄉鎮市區降雨-淹水機率。

過去前人的研究對於降雨-淹水警戒值具有重要性，然而國外的研究主要針對土石流或山坡滑動，而針對洪水預警的研究數目相對少量。儘管國外仍有洪水預警的研究，但是都以建立水理模型，假設不同臨前狀況包含土壤含水量或降雨分布，推估臨界流量與降雨-淹水警戒值之間關係，並且主要是針對河川外水淹水的研究，不是針對都市內水淹水的研究。針對都市內水淹水的研究，以假設情境的水理模型可能非常不適合，隨著都市化的發展，土壤含水量將顯得不重要(Priest *et al.*, 2011)，且固定假設的情境可能忽略實際狀況與降雨-淹水警戒值之間的關係，如不同的季節月份，流域的水文條件將有所不同(Golian *et al.*, 2014)。因此根據假設情境的降雨量分布或流域水文條件等，所推估的降雨-淹水警戒僅適用河川外水部分，而針對都市內水淹水部分，較不適當。

本研究目標為應用即時觀測雨量研發都市內水之降雨-淹水警戒值率定機制。為深入探討降

雨-淹水警戒值與區域淹水災害之關係，選擇小尺度之鄉鎮區為單位進行研析。本研究採用多變數方法，同時考慮 1、3、6、12 及 24 小時作為降雨-淹水警戒值之五種延時變數，五種變數組合的非線性解，提升計算過程之複雜度。因此本研究透過禁忌演算法，搜尋最佳化降雨-淹水警戒值。禁忌演算法針對非線性解以及搜尋最佳解的時間，具有優秀的能力(Huang *et al.*, 2015)。

## 二、研究方法

首先本研究透過雨場分割方法(Inter-Event Time Definition, IETD)，劃分雨量站之降雨事件的開始及結束時間點，降雨事件為雨場分割法劃分後的最小單位，根據淹水與預警之間的四種情況，如表 1 所示，將各劃分好的降雨事件，歸納不同的情況進而推估當下降雨-淹水警戒值的統計指標。劃分好降雨事件後，根據建立好的專門計算最佳化降雨-淹水警戒值的禁忌演算法，禁忌演算法為計算最佳化降雨-淹水警戒值的主要核心，計算過程為同時考慮五種降雨延時(1、3、6、12 及 24 小時累積雨量)計算各延時之最佳化降雨-淹水警戒值。

表 1 淹水災害與預警之四種情況

|     | 預警 | 無預警 |
|-----|----|-----|
| 淹水  | A  | B   |
| 無淹水 | C  | D   |

### 2.1 雨場分割法

雨場分割法主要為劃分，降雨事件的開始及結束的時間點(Lee and Jan, 2006; Joo *et al.*, 2014; Yoo *et al.*, 2016)。獨立的降雨事件，將會落在兩個分割區間內，而分割區間內並沒有任何降雨量數值，Lee and Jan (2006)當時提出了六種雨場分割方法，其中一種方法為，分割區間內長達 24 小時，且沒有任何雨量數值，而一場降雨事件為落在這兩個分割區間內，才能代表一場降雨事件，如圖 1 所示，兩場獨立降雨事件，各落在兩個 24 小時無任何降雨的分割區間

內。根據此方法，降雨資料可以完整分割出各場不同的降雨事件。

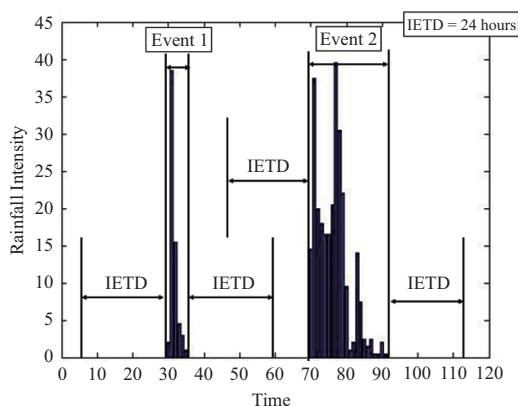


圖 1 雨場分割法分割獨立降雨事件過程

## 2.2 最佳化警戒值統計指標

檢定指標用來檢定何種降雨-淹水警戒值為最佳值，並且可反應該降雨-淹水警戒值對於成功預警以及誤報預警的程度。最佳化降雨-淹水警戒值的率定，由歷史淹水災害事件，回歸統計得出，淹水與預警之間的關係，可組合成四種情況，分別是：(A)預警淹水、(B)無預警淹水、(C)預警無淹水、(D)無預警無淹水，如表 1 所示。

在表 1 中，正確預警為 A 及 D 情況；而錯誤預警的為 B 及 C 情況。A 情況代表當目前觀測累積雨量，到達或超過該預警雨量站之降雨-淹水警戒值時，該預警區域未來發生淹水災害，屬於成功預警；B 情況為目前觀測累積雨量，尚未到達或超過降雨-淹水警戒值，未來卻發生淹水災害，屬於失敗預警；C 情況為目前觀測累積雨量，到達或超過降雨-淹水警戒值，未來卻無任何淹水災害發生，屬於誤報預警；D 情況為目前觀測累積雨量，沒有到達或超過降雨-淹水警戒值且未來無發生淹水災害，屬於正確拒絕預警。雖然 D 情況屬於正確預警，但是在計算過程中，D 情況的數量龐大，遠大於 A、B、C 三種情況，若將 D 情況列入統計檢定公式之分母內，將使統計數值結果非常小，難以比較 A、B、C 情況對於最佳化降雨-淹水警戒值之影響，因此本研究不考慮 D

情況。根據 A、B、C 三種情況，可由統計公式表示如下：

$$P(A) = \frac{\Sigma A}{T}; \quad P(B) = \frac{\Sigma B}{T}; \quad P(C) = \frac{\Sigma C}{T}; \dots (1)$$

$$T = \Sigma A + \Sigma B + \Sigma C \dots\dots\dots (2)$$

其中  $\Sigma A$  代表成功預警的淹水事件數量； $\Sigma B$  為失敗預警的淹水事件數量； $\Sigma C$  為錯誤預警的無淹水事件數量； $T$  為  $\Sigma A$ 、 $\Sigma B$ 、 $\Sigma C$  的集合，包含有淹水災害事件以及無淹水災害事件數量。 $P(A)$  的統計值的提高，代表降雨-淹水警戒值能有效預警未來發生的淹水災害，能在淹水災害未發生之前，正確提早發出預警，以利提早進行防救災應變措施。 $P(B)$  的統計數量降低，可以降低無任何預警的情況下，發生淹水災害事件數量，避免民眾在無預警情況下飽受洪澇災害。降低  $P(C)$  的數量，可減少誤報數量，避免無任何淹水災害下卻發生預警。根據上述，本研究目標為提高  $P(A)$  的統計數量，降低  $P(B)$  與  $P(C)$  的數量。

降雨-淹水警戒值的決定，需透過統計檢定公式率定，若將降雨-淹水警戒值設定過高，雖然會降低  $P(C)$  的數量，但可能會增加  $P(B)$  的數量，相對地降低  $P(A)$  的數量；將降雨-淹水警戒值設定過低，雖然會增加  $P(A)$  的數量且相對地降低  $P(B)$  的數量，但是  $P(C)$  的數量將會增加。為在上下界之間，找到最佳降雨-淹水警戒值，本研究將使用如下三種檢定公式，率定最佳降雨-淹水警戒值：

1. 第一種檢定公式為「精度公式 (Accuracy)」，可表示如下：

$$Accuracy(\%) = \frac{p(A)}{p(A \cup B \cup C)} \dots\dots\dots (3)$$

2. 第二種檢定公式為「淹水時命中淹水 (Hitting flood (HF) during flooding time)」，可表示如下：

$$P(HF | Flood) = \frac{p(HF \cap Flood)}{p(Flood)} \dots\dots\dots (4)$$

$$= \frac{p(A)}{p(A \cup B)}$$

3. 第三種檢定公式為「預警時命中淹水

(Hitting flood (HF) during warning time)」，可表示如下：

$$P(HF | Warning) = \frac{p(HF \cap Warning)}{p(Warning)} \dots\dots(5)$$

$$= \frac{p(A)}{p(A \cup C)}$$

在搜尋最佳降雨-淹水警戒值時，首先提高  $P(A)$  的數量，該情況能命中淹水災害的發生，其二降低  $P(B)$  的數量，該情況的發生，民眾將在無預警情況下遭受洪害，最後降低  $P(C)$  的誤報數量。根據考慮順序的條件下，首先優化公式(3)，因公式同時考慮  $P(A)$ 、 $P(B)$ 、 $P(C)$  三種情況，在使用禁忌演算法時，可廣泛的搜尋最佳化降雨-淹水警戒值，其二優化公式(4)，該檢定指標只有考慮  $P(A)$ 、 $P(B)$  兩種情況，可以集中降低失敗預警的程度，滿足本研究次先考慮降低  $P(B)$  失敗預警的情況，最後優化公式(5)，該檢定指標只有考慮  $P(A)$ 、 $P(C)$  兩種情況，能有效降低誤報預警情況。

### 2.3 禁忌演算法

禁忌演算法為國外學者 Glover 於 1986 年提出的架構，該演算法具有跳脫區域局部解(local solutions)，達到全域最佳解(global optimum solution) 的能力，如圖 2 所示。在使用該演算法計算最佳化降雨-淹水警戒值之前，五種參數必須設定，分別是：(1)迭代次數(iteration times)、(2)搜尋步伐(search space)、(3)初始解(initial solutions)、(4)禁忌名單(tabu list)及(5)破禁原則(aspiration criteria, AC)。本研究的迭代次數即為破禁原則的啟動次數，本研究設定迭代次數為 200 次，此意義為當破禁原則啟用破禁機制達到 200 次時，該演算法則停止運算；搜尋步伐為目前解，移動到下一解的距離，降雨-淹水警戒值之單位為毫米(mm)，因此本研究設定解與解之間的步伐為 1 mm；初始解的設定為 1000 組降雨-淹水警戒值，使用初始解的時機為二，其一為演算法剛開始計算時會給予 1000 組初始解，其二為當破禁原則啟動時，將會給予 1000 組初始解重新

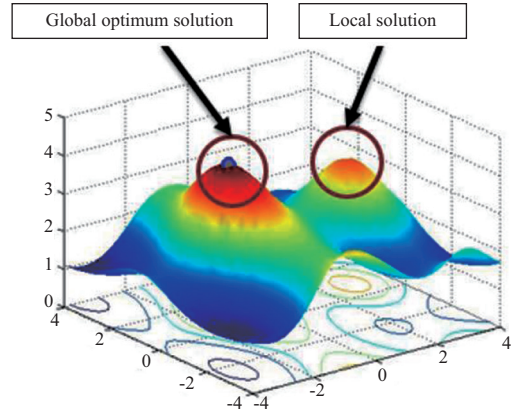


圖 2 禁忌演算法達全域最佳解的過程

演算；禁忌名單為禁止重複計算相同的值，為主要跳脫局部解的機制之一，本研究設定禁忌名單長度為 20 組，該意思為已被計算的解，將會被列入禁忌名單內，並且在 20 回內的計算中，搜尋步伐不可移動曾經計算降雨-淹水警戒值的解，該解必須在第 21 回合，才能跳離禁忌名單內，此解才能重新被允許搜尋；破禁原則為主要跳離局部解的機制之一，本研究設定破禁原則為，當目前解為最高精度，並且搜尋步伐移動至四周的解，小於該目前解的精度時，將會啟動破禁原則，本原則啟動時，將會隨機給予 1000 組解，重新演算最佳降雨-淹水警戒值，而破禁原則啟動 200 次數，本演算法將會停止，根據目前 200 次的解，比較何解為最佳值，作為最佳降雨-淹水警戒值。因此每回合有 1000 組解，迭代次數為 200 次，總共會嘗試不重複的 200,000 次數的初始解計算最佳降雨-淹水警戒值，禁忌演算法推估最佳化降雨-淹水警戒值流程如圖 3 所示。

#### 2.3.1 目標函數及限制式

本研究在使用禁忌演算法計算時，將會同時演算五種類型的降雨-淹水警戒值(1, 3, 6, 12 及 24 小時累積雨量)，並且將各類型警戒值歸納成五種變數( $X_1$ ,  $X_2$ ,  $X_3$ ,  $X_4$  及  $X_5$ )，不同變數的組合將會產生不同數值的  $p(A)$ 、 $p(B)$  及  $p(C)$ ，再代入上述提及的三種不同的檢定公式，作為回歸最佳化降雨-淹水警戒值的目標函數(objective function)，



表 2 預警雨量站於 2013 年至 2015 年之警戒結果

| 城市  | 區域  | SA | MA | FA | Accuracy (%) | $P(HF Flood)$ (%) | $P(HF Warning)$ (%) |
|-----|-----|----|----|----|--------------|-------------------|---------------------|
| 新北市 | 板橋區 | 6  | 5  | 1  | 50.0         | 54.5              | 85.7                |
| 新北市 | 新店區 | 2  | 6  | 4  | 16.7         | 25.0              | 33.3                |
| 臺北市 | 文山區 | 4  | 4  | 2  | 40.0         | 50.0              | 66.7                |
| 新北市 | 中和區 | 8  | 0  | 2  | 80.0         | 100.0             | 80.0                |
| 桃園市 | 中壢區 | 3  | 2  | 2  | 42.9         | 60.0              | 60.0                |
| 嘉義市 | 布袋鎮 | 3  | 2  | 2  | 42.9         | 60.0              | 60.0                |

表 3 研究區域及各對應的預警雨量站

| 城市  | 區域  | 站碼     | 站名 | 警戒區域範圍                                                                             |
|-----|-----|--------|----|------------------------------------------------------------------------------------|
| 新北市 | 新店區 | C0A580 | 屈尺 | 寶福里、寶安里、復興路 80 巷、中興路、安康路一段二段、北新路三段 221 巷、柴埕路、安和路、德正街、安和路安康路下城社區、安中路、中央五街、民生路 158 巷 |
|     |     | C0AG90 | 中和 |                                                                                    |
| 臺北市 | 文山區 | C0AC80 | 文山 | 木新路、保儀路一帶(樟腳里、順興里)、興德路、福興路一帶(興旺里、興光里)                                              |
|     |     | C1A730 | 公館 |                                                                                    |



圖 4 新店區行政區域及預警雨量站位置



圖 5 文山區行政區域及預警雨量站位置

考慮 1、3、6、12 及 24 小時累積雨量，率定最佳降雨-淹水警戒值組。

### 三、研究區域及流程

#### 3.1 研究區域

本研究參考經濟部水利署之「經濟部水利署災害緊急應變小組服務團報告書」，收集 2013 年至 2015 年淹水災害事件。水利署已規劃全臺灣預警雨量站，各預警雨量站對應不同的預警區域，根據服務團報告書，整理全臺各雨量站預警

的狀況，取部分縣市區之預警雨量站狀況如表 2 所示。

在表 2 中，SA(successful alert, SA)代表淹水事件，被預警雨量站預警成功的次數；MA(missed alert, MA)代表淹水事件下，預警雨量站失敗預警的次數；FA(false alert, FA)代表預警雨量站誤報次數。由表 2 得知，新北市新店區(圖 4)及臺北市文山區(圖 5)之三種檢定公式顯示，此兩區相較於其它區域有較大的改善空間，因此選定此二作為研究區域，各區域之預警雨量站如表 3 所示。

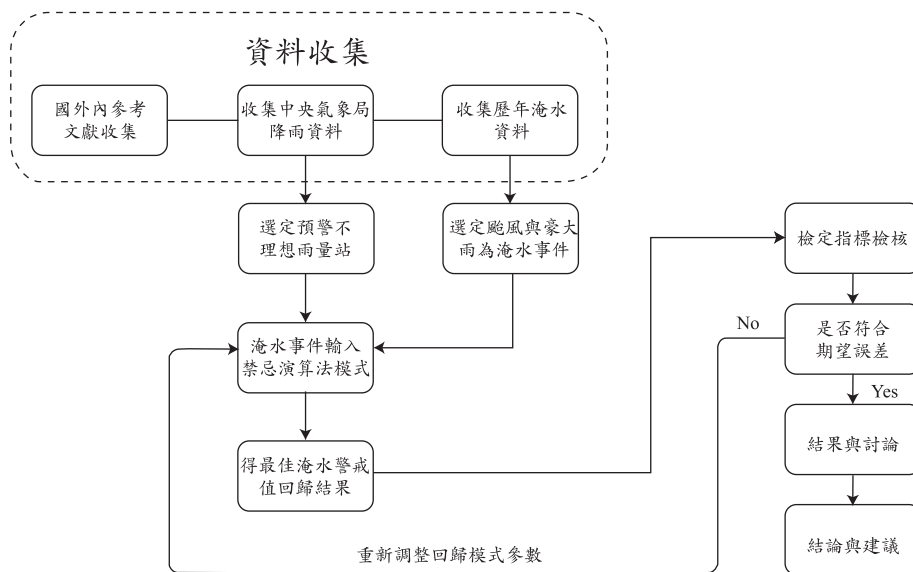


圖 6 研究流程圖

本研究降雨-淹水警戒值討論的雨量站地點，係參考經濟部水利署設定之預警雨量站資料。經濟部水利署在規劃預警雨量站時，已有規劃各預警雨量站對應之易淹水區域，其淹水警戒之空間解析度為易淹水區域之里、路及街等。因此本研究最佳化降雨-淹水警戒值之預警站所發布警戒區域，與經濟部水利署之淹水警戒區域相同。

而中和站曾經於 2015 年被移除，但本研究結果顯示，中和站對於新店區仍有預警功能，建議將中和站保留預警新店區；公館站雖沒有被列入水利署的預警雨量站名單內，但地理位置距離文山區最近且本研究結果顯示，針對文山區具有預警淹水災害的能力。

### 3.2 研究流程

本研究流程如圖 6 所示，首先收集中央氣象局的降雨資料及 2012 年至 2015 年曾經發生的淹水災害事件，並且整理「經濟部水利署災害緊急應變小組服務團報告書」之全臺灣各區域預警雨量站的預警狀況，評估結果選定新店區及文山區作為本研究區域。研究區域確定後，將收集的淹

水事件及降雨資料輸入禁忌演算法推估最佳化降雨-淹水警戒值組合，禁忌演算法在演算過程會同時考慮五種不同累積雨量之降雨-淹水警戒值。演算法輸出最佳結果後，將會與舊有雨量站之降雨-淹水警戒值與本研究推估的最佳化降雨-淹水警戒值進行結果與討論跟結論與建議。

## 四、研究結果與討論

### 4.1 研究結果

經濟部水利署現已規劃全臺灣各鄉鎮區域之預警雨量站，在規劃各區域預警雨量站後，預警雨量站確實有能力在淹水災害發生之前，發揮預警的功用，促使當地政府能在淹水災害發生之前，即早規劃避難措施。雖然現有預警雨量站具有預警淹水災害的功能，但是部分區域仍曾經遭受未發出預警訊息時當下的淹水災害。有鑒於此，本研究選定改善空間較大的研究區域進行研究，使用禁忌演算法計算最佳化降雨-淹水警戒值。表 4 為本研究之最佳化降雨-淹水警戒值率定結果。

表 4 中，類別為目前的項目，代表該為水利

表 4 最佳化及目前降雨-淹水警戒值之計算結果

| 雨量站 | 類別  | 降雨-淹水警戒值 (mm) |       |       |        |        | Accuracy<br>(%) | $P(HF Flood)$<br>(%) | $P(HF Warning)$<br>(%) | 演算時間<br>(sec) |
|-----|-----|---------------|-------|-------|--------|--------|-----------------|----------------------|------------------------|---------------|
|     |     | 1 hr          | 3 hrs | 6 hrs | 12 hrs | 24 hrs |                 |                      |                        |               |
| 屈尺  | 目前  | 50            | 120   | 150   | 200    | 300    | 30.4            | 58.3                 | 88.4                   | -             |
|     | 最佳化 | 61            | 117   | 162   | 205    | 297    | 46.7            | 58.3                 | 94.1                   | 1150.0        |
| 中和  | 目前  | 50            | 120   | 150   | 200    | 300    | 26.3            | 41.7                 | 91.9                   | -             |
|     | 最佳化 | 49            | 97    | 136   | 164    | 262    | 45.0            | 75.0                 | 89.9                   | 2543.0        |
| 文山  | 目前  | 50            | 100   | 150   | 210    | 320    | 43.8            | 58.3                 | 92.9                   | -             |
|     | 最佳化 | 73            | 80    | 149   | 150    | 170    | 62.5            | 83.3                 | 97.2                   | 1731.0        |
| 公館  | 目前  | 50            | 100   | 150   | 210    | 320    | 40.0            | 60.0                 | 95.8                   | -             |
|     | 最佳化 | 71            | 122   | 150   | 195    | 197    | 80.0            | 80.0                 | 100.0                  | 3256.0        |

署規劃的雨量站使用之降雨-淹水警戒值；類別為最佳化的項目為本研究透過禁忌演算法計算的最佳化降雨-淹水警戒值。格子為紅底，代表該統計比較結果相對差；若格子為藍底，代表該統計比較結果相對優；格子為黃底，代表統計比較結果相當。

本研究在使用三種統計檢定公式計算全臺灣各區域之預警狀況時，發現水利署在規劃全臺灣各區雨量站時，將預警相同區域的雨量站之降雨-淹水警戒值設定相同，如表 4，在類別為目前的屈尺及中和雨量站之降雨-淹水警戒值設立相同。雖然公館站並沒有列入水利署規劃的雨量站考量，根據上述原因，本研究假設公館雨量站之目前降雨-淹水警戒值與文山站相同。

研究結果顯示，最佳化降雨-淹水警戒值，可透過禁忌演算法計算得出，且根據統計檢核公式可比較，相對目前降雨-淹水警戒值，對於淹水災害預警有更好的能力。考慮降雨-淹水警戒值在實際運作時，是五種不同類型之 1、3、6、12 及 24 小時累積雨量的降雨-淹水警戒值同時預警，若只要任一降雨-淹水警戒值啟動，其啟動原則為目前觀測雨量到達或超過該降雨-淹水警戒值，未來將有可能發生淹水災害事件。根據此運作機制，禁忌演算法在計算最佳化降雨-淹水警戒值

時，是同考慮五種不同變數(1、3、6、12 及 24 小時累積雨量之降雨-淹水警戒值)一起計算，由五種變數構成的降雨-淹水警戒值組合，超過上百萬種，故透過禁忌演算法跳脫局部解達到最佳全域解的能力，找尋最佳的降雨-淹水警戒值組合。表 5 為本研究計算之最佳化降雨-淹水警戒值，與目前降雨-淹水警戒值之比較，表中符號為 O，代表該降雨-淹水警戒值成功預警此淹水災害事件；相反地，符號為 X 則代表該降雨-淹水警戒值失敗預警此淹水災害事件。

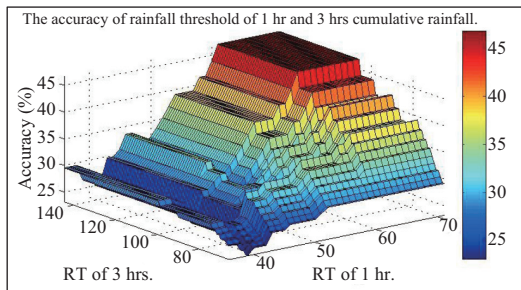
本研究在使用禁忌演算法計算最佳化降雨-淹水警戒值為同時考慮五種變數之降雨-淹水警戒值，而同時考慮五種變數的可變動情況下，難以畫出五維的精度計算結果圖，故圖 7 結果為，將 6、12 及 24 小時累積雨量之降雨-淹水警戒值設定為最佳化值，並且固定其值，畫出在 1、3 小時累積雨量之降雨-淹水警戒值可變動情況下，探討本研究使用禁忌演算法時，如何逃離區域局部解，到達全域最佳解之機制。

#### 4.2 研究討論

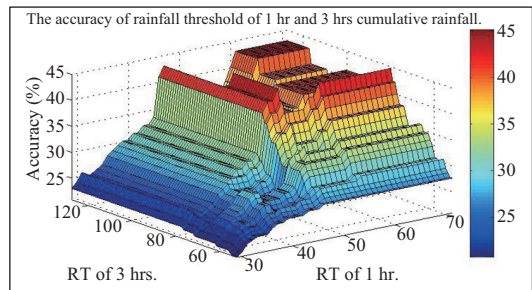
本研究使用禁忌演算法計算最佳化降雨-淹水警戒值過程中，同時考慮 1、3、6、12 及 24 小時累積雨量資料推估同時預警的 5 種類型之降

表 5 最佳化與目前降雨-淹水警戒值之預警淹水事件結果

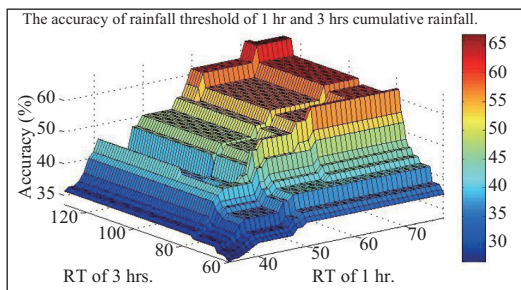
| 警戒區域 | 雨量站 | 淹水事件 | 2012  | 2012 | 2012   | 2013 | 2013 | 2013   | 2013 | 2014   | 2014   | 2014 | 2015   | 2015   | 2015  | 2015   | 2015        | 2015 | 統計結果 |    |
|------|-----|------|-------|------|--------|------|------|--------|------|--------|--------|------|--------|--------|-------|--------|-------------|------|------|----|
|      |     |      | 610水災 | 蘇拉颱風 | 0914豪雨 | 蘇力颱風 | 潭美颱風 | 0822豪雨 | 康芮颱風 | 0519豪雨 | 0530豪雨 | 鳳凰颱風 | 0607豪雨 | 0614豪雨 | 蘇迪勒颱風 | 0813豪雨 | 0825&0829豪雨 | 杜鵑颱風 | O    | X  |
| 新店區  | 屈尺  | 目前   | O     | O    | O      | X    | O    | O      | X    |        |        | X    | X      |        | O     |        | X           | O    | 7    | 5  |
|      |     | 最佳化  | O     | O    | O      | X    | O    | O      | X    |        |        | X    | X      |        | O     |        | X           | O    | 7    | 5  |
|      | 中和  | 目前   | O     | X    |        | X    | X    | O      | X    |        |        | X    |        | X      | O     | X      | O           | O    | 5    | 7  |
|      |     | 最佳化  | O     | O    |        | X    | O    | O      | X    |        |        | O    |        | O      | O     | X      | O           | O    | 9    | 3  |
| 文山區  | 文山  | 目前   | O     | O    |        | X    | X    | O      | X    | O      | X      |      | O      | X      | O     |        |             | O    | 7    | 5  |
|      |     | 最佳化  | O     | O    |        | X    | O    | O      | X    | O      | O      |      | O      | O      | O     |        |             | O    | O    | 10 |
|      | 公館  | 目前   | O     | X    |        | X    | X    | O      | X    | O      |        |      |        | O      | O     |        |             | O    | 6    | 4  |
|      |     | 最佳化  | O     | O    |        | X    | O    | O      | X    | O      |        |      |        | O      | O     |        |             | O    | O    | O  |



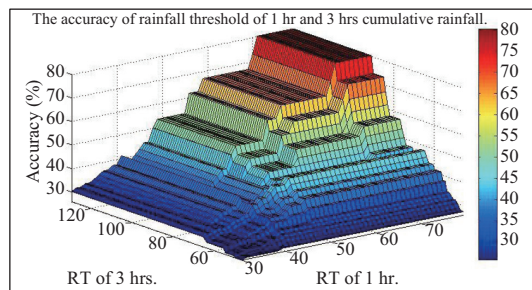
(a)



(b)



(c)



(d)

圖 7 固定 6、12、24 小時為最佳化降雨-淹水警戒值時，變動 1、3 小時降雨-淹水警戒值之精度計算過程，其中(A)屈尺站；(B)中和站；(C)文山站；(D)公館站

雨-淹水警戒值。由於同時考慮五種類型之降雨-淹水警戒值，因此可能的降雨-淹水警戒值組合，

將會超過上百萬種。在這上百萬種之降雨-淹水警戒值中，需使用演算法來推估最佳組合，透過演

算法跳脫局部解，達到全域最佳解的能力，計算得出最佳化降雨-淹水警戒值。根據禁忌演算法推估之最佳化降雨-淹水警戒值，比較目前降雨-淹水警戒值時，結果顯示，本研究推估之最佳化降雨-淹水警戒值，對於預警淹水災害事件，有更好的表現。

#### 4.2.1 最佳化與目前降雨-淹水警戒值之統計檢定結果

中和站之  $P(HF|Warning)$  檢定公式，目前值為 91.9%，最佳化值為 89.9%，其兩統計值非常接近，該檢定公式數值越高，則雨量站發出預警時命中淹水機率越高；相反地越低，代表發出預警下，命中淹水機率越低，該統計檢定公式，可顯示對於發出預警而未發生淹水的誤報狀況。其餘雨量站對於  $P(HF|Warning)$  檢定公式都有很好的表現，其結果顯示該統計值可達 90% 以上，都比目前降雨-淹水警戒值好。

關於  $P(HF|Flood)$  檢定結果，其統計值的意義為，在淹水時的情況下，預警雨量站命中(預警)該淹水的程度，若該統計值越高，代表預警雨量站，越有能力成功命中淹水事件；反之越低，代表失敗(未發出)預警程度會越高，並且可反應預警雨量站對未發出預警而發生淹水的程度，其統計值越高，能減少民眾在未預警情況下遭受洪澇的次數。在表 4 中針對  $P(HF|Flood)$  檢定結果，能看到屈尺站目前與最佳化降雨-淹水警戒值之統計指標相同外，其它預警站結果顯示，最佳化降雨-淹水警戒值相對於目前值，有更好的統計檢定結果，中和站從 41.7% 提升至 75.0%；文山站從 58.3% 提升至 83.3%；公館站從 60.0% 提升至 80.0%，結果顯示最大改善的程度將近提升 30% 左右的效能。

關於精度(Accuracy)統計檢定公式結果顯示，最佳化降雨-淹水警戒值有很好的表現結果，其中屈尺站提升 16.3% 的精度；中和站提升 18.7% 的精度；文山站提升 18.7% 的精度；公館站提升 40% 的精度，其提升精度的範圍約 16.3% 至 40%。

#### 4.2.2 最佳化與目前降雨-淹水警戒值之率定值結果

在表 4 中，可以看到目前與最佳化之 1、3、6、12 及 24 小時累積雨量之降雨-淹水警戒值設定大小，結果顯示，1 小時最佳化降雨-淹水警戒值數值，相對目前值有更高的門檻值，若門檻值設定越高，可以減少對於預警時未淹水的事件數量，也就是降低誤報的次數，其  $P(HF|Warning)$  統計檢定公式顯示，可改善的最大程度為 5.7% 的效能。

對於 3、6、12 及 24 小時累積雨量之降雨-淹水警戒值之設定結果顯示，除屈尺站 6、12 小時最佳化門檻值以及公館站 3 小時最佳化門檻值，相對於目前值略高；其餘雨量站之 3、6、12 及 24 小時累積雨量之最佳化門檻值，相對於目前值略低。該結果顯示，大部分的 3、6、12 及 24 小時門檻值降低，可以改善未預警發生淹水的事件數量，其改善程度，由  $P(HF|Flood)$  統計檢定公式顯示，其最佳化降雨-淹水警戒值改善淹水時成功預警之程度最大達到 33.3% 之改善程度，代表目前的降雨-淹水警戒值，設定值相對高，降低淹水而無預警的次數。

#### 4.2.3 禁忌演算法之演算結果

禁忌演算法，具有逃脫區域局部解，達到全域最佳解的能力，本研究同時考慮五種不同之降雨-淹水警戒值情況，其五種降雨-淹水警戒值，其解將可能有上百萬種組合，其中包含局部解及最佳解，因此使用禁忌演算法之演算特性，計算最佳化降雨-淹水警戒值。禁忌演算法在計算過程中，其各 1、3、6、12 及 24 小時門檻值變數，可能移動的步數有三種，其一是原值不動，或原值加減一個移動步伐，變成新的值計算，因此禁忌演算法在計算迴圈時，每次將會有三的五次方之 243 組解，在這 243 組解，有幾組解可能有相同統計精度結果作為目前最佳解，該目前解可能是局部或全域最佳解，其餘統計檢定不理想的解，將會放入禁忌名單，禁止重覆計算。若前次迴圈有  $n$  組統計檢定結果相同之最佳解組，則下次迴圈將會有  $n \times 243$  組解計算。而禁忌名單長度，為幾回合，每回合被禁忌的解不同，將根據每次迴圈產生的解，而決定。

在表 4 研究結果中，可以看到，禁忌演算法

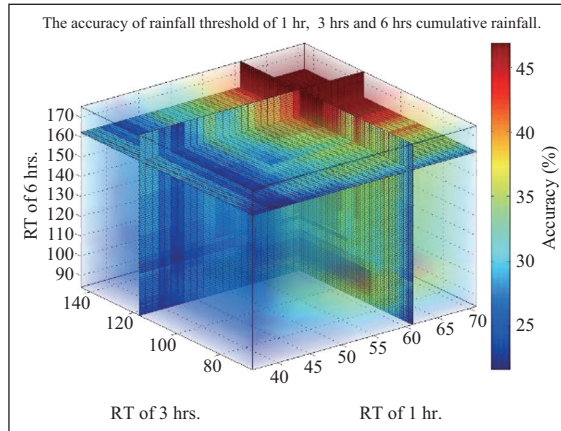


圖 8 固定 12、24 小時為最佳化降雨-淹水警戒值時，變動 1、3、6 小時降雨-淹水警戒值之屈尺站精度計算結果

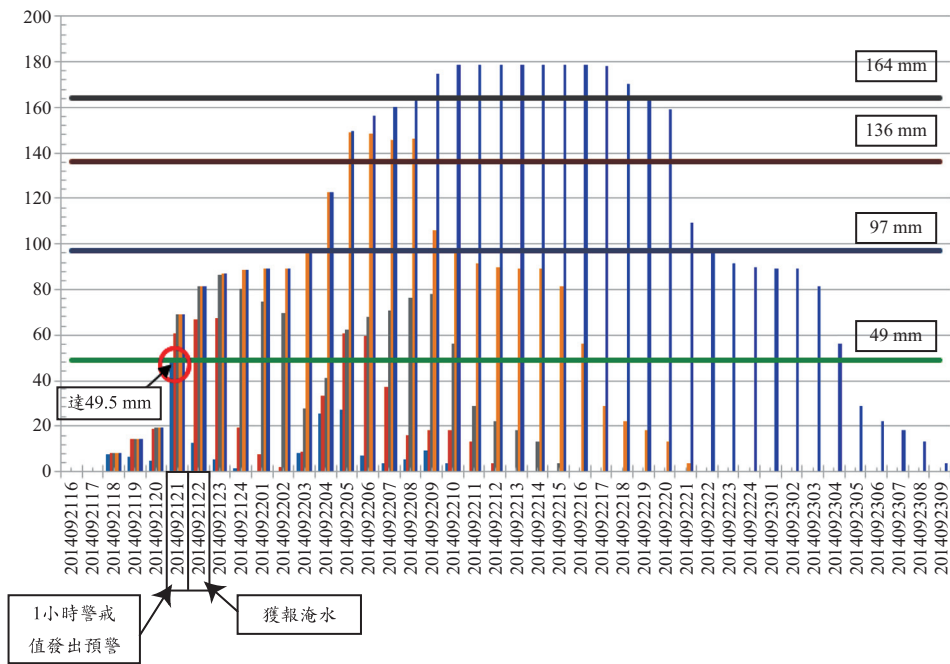


圖 9 中和站之最佳化降雨-淹水警戒值於鳳凰颱風預警狀況

在計算最佳化降雨-淹水警戒值，需要花費的時間，其中，屈尺站演算時間為 1150.0 秒；中和站為 2543.0 秒；文山站為 1731.0 秒；公館站為 3256.0 秒。在圖 7 可以看到，各預警雨量站，在 6、12、

24 小時門檻值設定最佳化值下，嘗試畫出 1、3 小時門檻值為變數情況的結果圖，可以看到計算過程中之局部解的範圍且各圖形狀複雜，常可看到在相同統計檢定值下，其各解卻不相同。在精

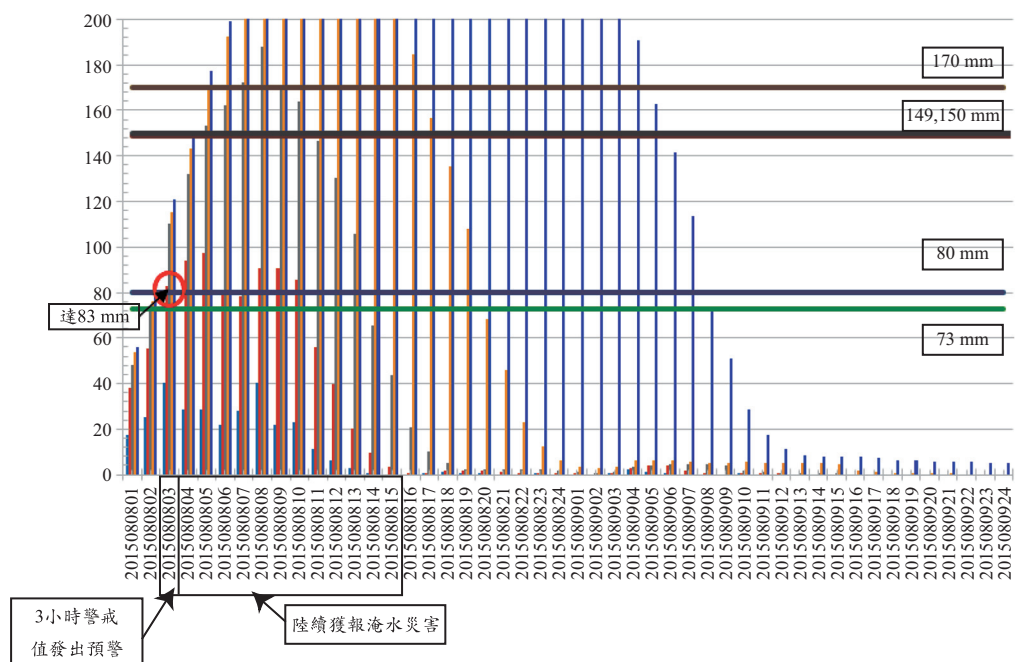


圖 10 文山站之最佳化降雨-淹水警戒值於蘇迪勒颱風預警狀況

度值相同的情況下，解不同的數量非常多，因此很容易得到局部解的結果，然而本研究結果顯示，本研究使用禁忌演算法，可以逃脫相同精度下而解不同的局部解，達到最佳全域解的結果。其中本研究發現屈尺站演算時間短，公館站演算時間最長。從圖 7 之 D，可以看到公館站在 1 小時降雨-淹水警戒值於 50~70 mm 及 3 小時降雨-淹水警戒值於 90~120 mm 下之在相同精度下，可明顯的看到不同組合的降雨-淹水警戒值所組成的一塊面積；而在圖 7 之 A，可以看到相同精度下，不同組合的降雨-淹水警戒值的面積，相對少。因此公館站計算時間較長之可能的原因，在於相同精度下，不同組合降雨-淹水警戒值數量眾多，導致需要花費更大量時間於跳脫局部區域解的計算。

圖 8 為嘗試固定 12 及 24 小時最佳門檻值，在 1、3、6 小時門檻值可變動情況下之屈尺站精度立方圖。在圖中可以看到，當顏色越深的區域，代表該區域之統計檢定值越高，而在 1 小時門檻

值為 61 mm、3 小時門檻值為 117 mm 且 6 小時門檻值為 162 mm 之平面交叉點，有最好的統計檢定表現。

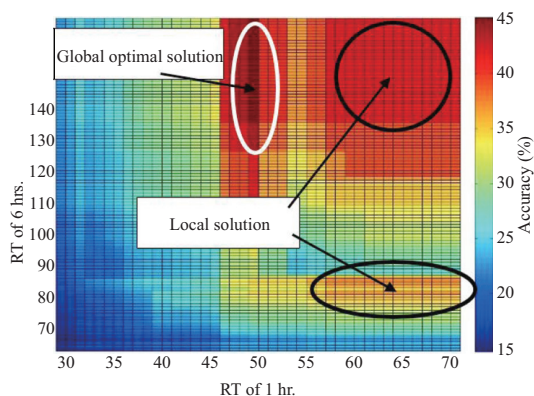


圖 11 固定 3、12 及 24 小時為最佳化降雨-淹水警戒值時，變動 1、6 小時降雨-淹水警戒值之中和站精度計算結果

## 五、結論與建議

研究結果顯示，最佳化降雨-淹水警戒值，於統計檢定值標，有更好的表現，其中精度統計檢定結果，最大優化程度為 40%；淹水時命中淹水之統計檢定結果，最大優化程度為 33.3%；而預警時命中淹水檢定公式，最大優化程度為 5.7%。

研究結果顯示最佳化降雨淹水警戒值，其 1 小時最佳門檻值，相對於目前門檻值高，代表可降低預警時未淹水的次數；而 3、6、12 及 24 小時最佳門檻值相對於目前門檻值低，代表可降低淹水時未預警的次數。

圖 7 以及圖 8，表示本研究計算最佳降雨-淹水警戒值，其相同精度下不同解的數量非常多，而結果顯示，禁忌演算法確實有能力跳脫區域局部解，演算至全域最佳解的能力。且禁忌演算法在計算過程中，考慮五種變數下組合的上百萬組解中，找尋最佳組合解的演算時間，最多至 3256.0 秒的時間，能有效減少計算時間，若考慮逐步每組解計算，將耗費 10 天以上的計算時間。

降雨-淹水警戒值的重要性，能彌補工程手段的不足，工程手段措施，需要等待大量的工作期，才能看到效果，如建設河堤；但是非工程手段，如本研究之降雨-淹水警戒值，能透過學理的依據，在短時間內找到全臺灣各區域合適的降雨-淹水警戒值，耗費時間短，成本低，其最大可觀的價值為，能在短時間內提供全臺灣各區需要的最佳化降雨-淹水警戒值，並且立刻使用。

本研究建議，可計算不同時間累積雨量之降雨-淹水警戒值，因本研究為探討最佳化解與目前解之比較，只考慮 1、3、6、12 及 24 小時門檻值，未考慮其它降雨延時之門檻值，建議未來研究可嘗試計算不同時間區間之降雨-淹水警戒值變化結果。

本研究只有檢核單點式的預警雨量站門檻值，考慮降雨時空可能分布不均，因降雨-淹水警戒值為固定，只要目前觀測雨量值到達該門檻值，將會發布預警，然而不同淹水事件其降雨分布不一定相似，卻到達相同門檻值，建議可嘗試

使用網格資料，解決降雨分布不均問題。

## 參考文獻

1. 臺灣大學氣候天氣災害研究中心，2013~2015，“經濟部水利署災害緊急應變小組服務團報告書”，經濟部水利署。
2. 廖依玲、林文賜、周文杰、蔡真珍，2010，「降雨警戒值分析系統建置之研究」，水土保持學報，第 35 卷，第 2 期，121-136。
3. 葉克家、張駿暉、傅鏵漩、傅金城、李文正、江申、吳啟瑞、葉森海、黃成甲，2012，「淹水警戒分級之探討」，社團法人臺灣災害管理學會電子報，第 10 期。
4. 經濟部水利署，2014，防災資訊服務網 (<http://fhy.wra.gov.tw/>)。
5. 楊尊華、柳文成，2014，「國研天霖鈴淹水潛勢預判系統」，水利土木科技資訊，第 59 期，13-19。
6. 傅金城、張駿暉、黃成甲、葉森海、游保杉、葉克家、許銘熙，2010，「淹水預警技術精進研究」，國家災害防救科技中心。
7. 郭文達、威勝、王毓麒、何興亞，2011，「台灣都會區淹水快速評估系統」，中華民國自動化科技學會會刊，2011/6，3-1。
8. Adams, B., H. Fraser, C. Howard, M. Sami Hanafy, 1986, “Meteorological Data Analysis for Drainage System Design,” *Journal of Environmental Engineering*, Vol. 112, 827-848.
9. André, S. H., T. B. M. J Ouarda, M. Lachance, B. Bobée, J. Gaudet, C. Gignac, 2003, “Assessment of the impact of meteorological network density on the estimation of basin precipitation and runoff: A case study,” *Hydrological Processes*, Vol. 17, 3561-3580.
10. Aquater, S.P.A., V. Tolstoj, S. G. Milanese, 2000, “A warning system for rainfall-induced shallow failures Pietro Aleotti,” *Engineering Geology*, Vol. 73, 247-265.
11. Balistrocchi, M., G. Grossi, B. Bacchi, 2009, “An analytical probabilistic model of the quality

- efficiency of a sewer tank,” *Water resources research*, Vol. 45, W12420.
12. Balloffer, A., M. L. Scheffler, 1982, “Numerical Analysis of the Teton Dam Failure Flood,” *Journal of Hydraulics Research*, Vol. 20, 317-428.
  13. Bates, B., Z. W. Kundzewicz, S. Wu, J. Palutikof, 2008, “Climate Change and Water IPCC Technical Paper VI,” *Intergovernmental Panel on Climate Change*.
  14. Brunetti, M. T., S. Peruccacci, M. Rossi, S. Luciani, D. Valigi, F. Guzzetti, 2010, “Rainfall thresholds for the possible occurrence of landslides in Italy,” *Natural Hazards and Earth System Sciences*, Vol. 10, 447-458.
  15. Caporali, E., E. Cavigli, A. Petrucci, 2008, “The index rainfall in the regional frequency analysis of extreme events in Tuscany (Italy),” *Environmetrics*, Vol. 19, 714-724.
  16. Dirks, K.N., J.E. Hay, C.D. Stow, D. Harris, 1998, “High-resolution studies of rainfall on Norfolk Island Part II: interpolation of rainfall data,” *Journal of Hydrology*, Vol. 208, 187-93.
  17. Franco, C.S., R. F. P. V. Marques, A. S. Oliveira, L. F. C. de Oliveira, 2014, “Probability distributions for maximum daily rainfall in the watershed of Rio Verde, Minas Gerais, Brazil,” *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, Vol. 18, 735-741.
  18. Glover, F., 1986, “Future paths for integer programming and links to artificial intelligence,” *Computers & Operations Research*, Vol. 13, 533-549.
  19. Golian, S., B. Saghafian, M. Elmi, R. Maknoon, 2011, “Probabilistic rainfall thresholds for flood forecasting: evaluating different methodologies for modelling rainfall spatial correlation (or dependence),” *Hydrological Processes*, Vol. 25, 2046-2055.
  20. Golian, S., M. R. Fallahi, S. M. Behbahani, S. Sharifi, A. Sharma, 2014, “Real-Time Updating of Rainfall Threshold Curves for Flood Forecasting,” *Journal of Hydrologic Engineering*, Vol. 20, 1-9.
  21. Guha-Sapir, D., P. Hoyois, R. Below, 2016, “Annual Disaster Statistical Review 2015,” *Centre for Research on the Epidemiology of Disasters*.
  22. Hirabayashi, Y., R. Mahendran, S. Koirala, L. Konoshima, D. Yamazaki, 2013, “Global flood risk under climate change,” *Nature Climate Change*, Vol. 3, 816-821.
  23. Hosking, J. R. M., J. R. Wallis, 1993, “Some statistic useful in regional frequency analysis,” *Water resources research*, Vol. 29, 271-281.
  24. Hosking, J. R. M., J. R. Wallis, 1997, “Regional frequency analysis an approach based on L-moments,” *Cambridge University Press*.
  25. Huang, C.-L., N.-S. Hsu, C.-C. Wei, W.-J. Luo, 2015, “Optimal Spatial Design of Capacity and Quantity of Rainwater Harvesting Systems for Urban Flood Mitigation,” *Water*, Vol. 7, 5173-5202.
  26. Huang, J., N. P. Ju, Y. J. Liao, D. D. Liu, 2015, “Determination of rainfall thresholds for shallow landslides by a probabilistic and empirical method,” *Nature Hazards and Earth System*, Vol. 15, 2715-2723.
  27. Huff, F.A., 1967, “Time distribution of rainfall in heavy storms,” *Water resources research*, Vol. 3, 1007-1019.
  28. Jang, J. H., 2015, “An Advanced Method to Apply Multiple Rainfall Thresholds for Urban Flood Warnings,” *Water*, Vol. 7, 6056-6078.
  29. Jang, J.H., P. S. Yu, S. H. Yeh, J. C. Fu, C. J. Huang, 2012, “A probabilistic model for real-time flood warning based on deterministic flood inundation mapping,” *Hydrological Processes*, Vol. 26, 1079-1086.

30. Kang, M. S., M. G. Kang, S. W. Park, J. J. Lee, K. H. Yoo, 2006, "Application of grey model and artificial neural network to flood forecasting," *Journal of the American Water Resources Association*, Vol. 42, 473-486.
31. Kassim, A. H. M., N. T. Kottegoda, 1991, "Rainfall network design through comparative kriging methods," *Hydrological Sciences-Journal-des Sciences Hydrologiques*, Vol. 36, 223-240.
32. Laio, F., G. D. Baldassarre, A. Montanari, 2009, "Model selection techniques for the frequency analysis of hydrological extremes," *Water Resources Research*, Vol. 45, W07416.
33. Mandal, S., B. U. Choudhury, 2015, "Estimation and prediction of maximum daily rainfall at Sagar Island using best fit probability models," *Theoretical and Applied Climatology*, Vol. 121, 87-97.
34. Marques, R. F. P. V., C. R. de Mello, A. M. da Silva, C. S. Franco, A. S. de Oliveira, 2014, "Performance of the probability distribution models applied to heavy rainfall daily events," *Ciência e Agrotecnologia*, Vol. 38, 335-342.
35. Martina, M. L. V., E. Todini, A. Libralon, 2006, "A Bayesian decision approach to rainfall thresholds based flood warning," *Hydrology and Earth System Sciences*, Vol. 10, 413-426.
36. Martina, M.L.V., E. Todini, A. Libralon, 2009, "Rainfall Thresholds for FloodWarning Systems: A Bayesian Decision Approach," *Hydrological Modelling and the Water Cycle*, Vol. 63, 203-227.
37. Montesarchio, V., F. Lombardo, F. Napolitano, 2009, "Rainfall thresholds and flood warning: an operative case study," *Hydrology and Earth System Sciences*, Vol. 9, 135-144.
38. Montesarchio, V., F. Napolitano, M. Rianna, E. Ridolfi, F. Russo, S. Sebastianelli, 2015, "Comparison of methodologies for flood rainfall thresholds estimation," *Nature Hazard*, Vol. 75, 909-934.
39. Norbiato, D., M. Borga, S. D. Esposti, E. Gaume, S. Anquetin, 2008, "Flash flood warning based on rainfall thresholds and soil moisture conditions: An assessment for gauged and ungauged basins," *Journal of Hydrology*, Vol. 362, 274-290.
40. Papa, M. N., V. Medina, F. Ciervo1, A. Bateman, 2012, "Estimation of debris flow critical rainfall thresholds by a physically-based model," *Hydrology and Earth System Sciences*, Vol. 9, 12797-12824.
41. Petry, B., 2002, "Coping with floods: complementarity of structural and non-structural measures," Flood Defense, Wu *et al.*, (eds.), Science Press, New York, ISBN 1-880132-54-0.
42. Priest, S. J., D. J. Parker, A. P. Hurford, J. Walker, K. Evans, 2011, "Assessing options for the development of surface water flood warning in England and Wales," *Journal of Environmental Management*, Vol. 92, 3038-3048.
43. Rogers, D., V. Tsirkunov, 2011, "Global Assessment Report on Disaster Risk Reduction: Costs and Benefits of Early Warning Systems," ISDR and World Bank.
44. Rosi, A., P. Tina, M. Jemec-Auflič, M. Komac, S. Segoni, N. Casagli, 2016, "Rainfall thresholds for rainfall-induced landslides in Slovenia," *Landslides*, Vol. 13, 1571-1577.
45. Saito, H., W. Murakami, H. Daimaru, T. Oguchi, 2017, "Effect of forest clear-cutting on landslide occurrences: Analysis of rainfall thresholds at Mt. Ichifusa, Japan," *Geomorphology*, Vol. 276, 1-7.
46. Tiranti, D., D. Rabuffetti, 2010, "Estimation of rainfall thresholds triggering shallow landslides for an operational warning system

- implementation,” *Landslides*, Vol. 7, 471-481.
47. Yang, T. H., G. D. Hwang, C. C. Tsai, J. Y. Ho, 2016, “Using rainfall thresholds and ensemble precipitation forecasts to issue and improve urban inundation alerts,” *Hydrology and Earth System Sciences*, Vol. 20, 4731-4745.

收稿日期：民國 106 年 6 月 15 日

修正日期：民國 106 年 8 月 7 日

接受日期：民國 106 年 8 月 14 日