

## 地理統計應用於臺北市山坡地雨量站網評估與調整

連琮勛<sup>[1]</sup> 連政佳<sup>[1]</sup> 吳宜珍<sup>[2]</sup> 鄭克聲<sup>[2]\*</sup>  
潘宗毅<sup>[1]</sup> 黃立遠<sup>[3]</sup> 李正利<sup>[3]</sup> 潘彥華<sup>[3]</sup>

**摘要** 土石流災害發生受到降雨的強度和空間變異性影響。因此，了解降雨的空間變異性特性是土石流減災的先決條件。在本研究中，針對不同降雨類型使用地理統計進行降雨空間變異特性分析，分別對夏季對流雨、颱風、梅雨和冬季鋒面雨進行分析，選取較適合的降雨空間變異特性。結果發現夏季對流雨的影響範圍最小（約 55 公里），代表其空間變異大，而其他三種降雨類型影響範圍較大（約 69 公里）則空間分布較均勻。因此，在研究中建議以夏季對流雨的空間變異特性，進行台北市雨量站網的評估。

**關鍵詞：**克利金、地理統計、雨量站網。

## Rainfall Network Evaluation and Augmentation Using Geostatistics – An Example in Taipei City

Tsung-Hsun Lien<sup>[1]</sup> Cheng-Chia Lien<sup>[1]</sup> Yii-Chen Wu<sup>[2]</sup> Ke-Sheng Cheng<sup>[2]\*</sup>  
Tsung-Yi Pan<sup>[1]</sup> Li-Yuan Huang<sup>[3]</sup> Cheng-Li Li<sup>[3]</sup> Yen-Hua Pan<sup>[3]</sup>

**ABSTRACT** The intensity and spatial variability of storm rainfalls play an essential role in occurrences of debris flows. Thus, understanding and characterizing the spatial variability of storm rainfalls is a prerequisite for debris flows mitigation. In this study, we investigate the spatial variabilities of rainfalls induced by different storm types using geostatistics. Summer convective storms are found to exhibit higher degree of rainfall spatial variability than typhoons, Mei-Yu and winter frontal systems. The semi-variogram of hourly rainfalls of convective storms was then used to assist in evaluation and augmentation of an existing raingauge network in Taipei.

**Key Words :** Kriging, geostatistics, raingauge network.

### 一、前言

本研究基於臺北市山坡地防災需求，調查臺北市及新北市鄰近臺北市之雨量站歷史雨量資料，已蒐集大臺北盆地內之臺北市大地處 26 站、水利處 27 站、中央氣象局（含新北市）42 站、水利署（含新北市）11 站等 106 個雨量站時雨量資料（如圖 1 所示），並以區域化變數理論評估雨量站觀測密度及效益，瞭解臺北市境內各雨量站提供之區域代表性及數量是否仍有不足之處。其中雨量資料內含：測站站號、紀錄降雨事件發生年份、日期及二十四小時制時間和單位小時內的降雨量。

接著對臺北市 26 處山坡地雨量站與環境的相關性進行分析，加入土石流潛勢溪流、山坡地老舊聚落、列管邊坡敏感區等山坡地高潛勢敏感區考量因子（其相對位置分布情形如圖 2 所示），提出現有雨量站是否需要遷移或新增等建議。

根據上述研究內容，在資料蒐集完備後之整體架構包括  
(1) 雨量站網觀測密度評估方法、(2) 雨量空間推估及驗證、  
(3) 雨量站網設計與效益推估。

### 二、雨量站網觀測密度評估方法

#### 1. 區域化變數理論

自然界中諸多物理量，如降雨、氣溫等常隨時間與空間改變，因此對此類具空間、時間變異之自然現象，可視為隨機函數或隨機變域 (random field) 進行估計，其空間中各隨機變數間隨位置不同並非完全獨立，可能存在某種程度之相關性，這些隨機變數所代表之物理量即為區域化變數 (regionalized variable)。

[1] 國立臺灣大學天氣氣候災害研究中心  
Center for Weather Climate and Disaster Research, National Taiwan University, Taipei, Taiwan.  
[2] 國立臺灣大學生物環境系統工程學系  
Department of Bioenvironmental Systems Engineering, National Taiwan University, Taipei, Taiwan.  
[3] 臺北市政府工務局大地工程處  
Geotechnical Engineering Office, Public Works Department, Taipei City Government, Taipei, Taiwan.  
\* Corresponding Author. E-mail : rslab@ntu.edu.tw

本研究自空間中分布之各樣本點（即雨量站）進行試驗半變異元圖之運算。求出試驗半變異元圖後，可再將其套配於理論模式中，以進而求取其他未進行取樣點之物理量推估。理論半變異元函數模型包含表 1 所列之三種。

## 2. 克利金推估法

克利金推估法是針對區域化變數所具有之特性所發展出推估系統方程組。利用隨機變域中已知之區域化變數  $Z(x_i)$  ( $i=1,2,\dots,n$ )，推估此空間中任一位置，只要已知相對距離  $h$  即可利用克利金推估法求得該位置之估計值  $Z^*(x_0)$ 。由統計角度觀之，克利金推估具有最佳線性不偏推估 (Best Linear Unbiased Estimator, 簡稱 BLUE) 特性，因此於空間推估方面經常使用，其特性說明如下：

(1) 線性 (Linear)：估計值為區域內所有觀測值之線性組合

$$Z^*(x_0) = \sum_{i=1}^n \lambda_{0i} Z(x_i) \quad , \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (1)$$

(2) 不偏估 (Unbiased)：估計值之期望值等於區域化變數之期望值

$$E[Z^*(x_0)] = E[Z(x_0)] \quad (2)$$

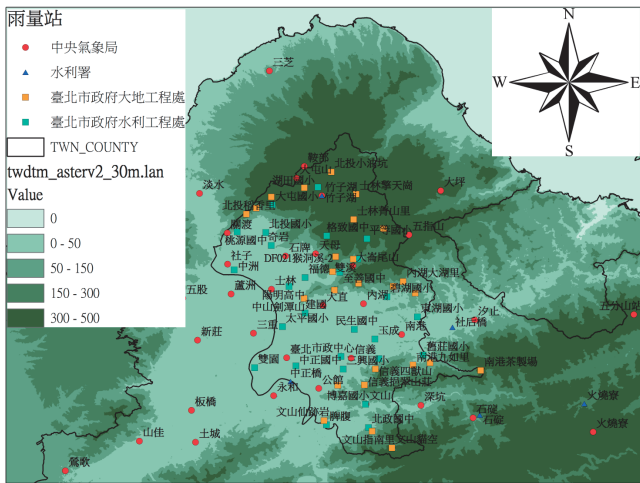


圖 1 大臺北地區淡水河流域雨量站位置圖  
Fig.1 Locations of raingauges in Tamsui river basin

表 1 常用之半變異元函數理論模型

Table 1 Theoretical semi-variogram models that commonly used

模式	函數形式	影響範圍 (IR)	臨界變異值 (Sill)
球體模式 (Spherical Model)	$\gamma(h) = \begin{cases} \omega \left[ \frac{3}{2} \left( \frac{h}{a} \right) - \frac{1}{2} \left( \frac{h}{a} \right)^3 \right], & h \leq a \\ \omega, & h > a \end{cases}$	a	$\omega$
指數模式 (Exponential Model)	$\gamma(h) = \omega \left[ 1 - \exp\left(-\frac{h}{a}\right) \right]$	3a	$\omega$
高斯模式 (Gaussian Model)	$\gamma(h) = \omega \left\{ 1 - \exp\left[-\left(\frac{h}{a}\right)^2\right] \right\}$	$\sqrt{3}a$	$\omega$

附註：表中  $h$  為隨機變域中任兩點之相對距離， $\gamma(h)$  為此距離  $h$  之半變異元函數值。

(3) 最佳化 (Best)：估計值與觀測值其差之變異數為最小

$$\min \{Var[Z^*(x_0) - Z(x_0)]\} \quad (3)$$

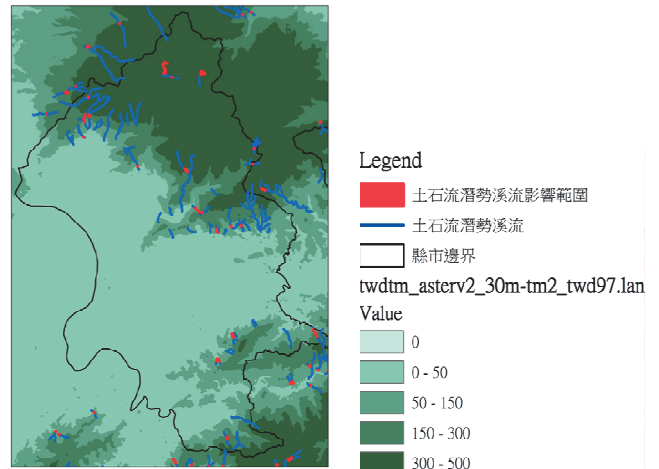


圖 2(a) 臺北可土石流潛勢溪流與其影響範圍  
Fig.2(a) Locations of potential debris flows and their affected area in Taipei city

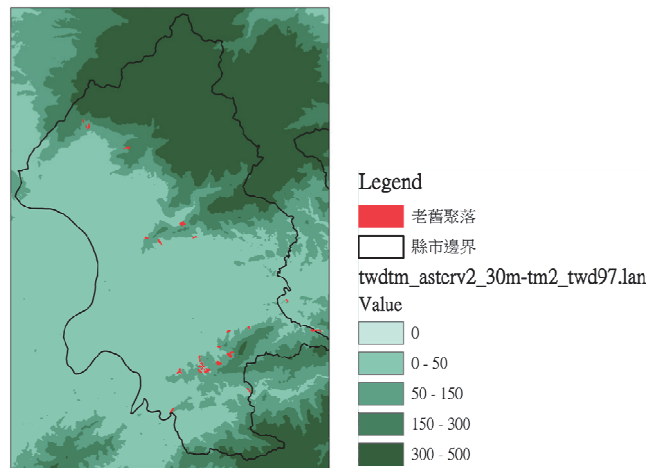


圖 2(b) 臺北可老舊聚落  
Fig.2(b) Locations of old settlements in Taipei city

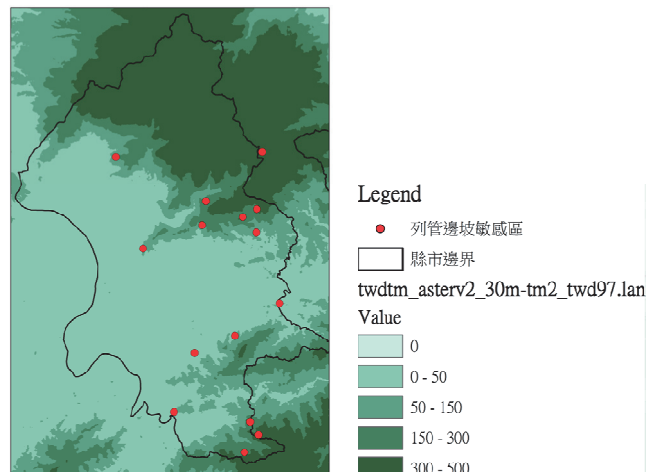


圖 2(c) 臺北可列管邊坡敏感區  
Fig.2(c) Locations of controlled slope sensitive areas in Taipei city

其中,  $Z(x_i)$  為在  $x_i$  點之觀測值,  $Z^*(x_0)$  為  $Z(x_0)$  之估計值,  $\lambda_{0i}$  為觀測值最佳估計權重。

克利金推估法之克利金變異數  $\sigma_k^2$  計算式如下：

$$\sigma_k^2 = \text{Var}[Z^*(x_0) - Z(x_0)] = \mu + \sum_{i=1}^n \lambda_{0i} \gamma(x_i - x_0) \quad (4)$$

計算出每個網格點上之克利金變異數  $\sigma_k^2$  後, 再根據式 (5) 即可計算每個網格點上的推估誤差  $\tilde{Z}(x)$  落在  $k\sigma_z$  這個範圍內的機率值, 即為滿足降雨量推估準確度要求之機率 (Acceptance Probability,  $P_A$ )。

$$P\left[|Z^*(x) - Z(x)| < k\sigma_z\right] = P\left[|\tilde{Z}(x)| < k\sigma_z\right] \\ = P\left[\frac{\tilde{Z}(x)}{\sigma_k} < \frac{k\sigma_z}{\sigma_k}\right] = P\left[z < \frac{k\sigma_z}{\sigma_k}\right] = a \quad (5)$$

其中,  $\sigma_z$  為該隨機變域內  $Z(x)$  之標準偏差 (即半變異元函數臨界變異值 (Sill) 之平方根)。

不同克利金變異數下之推估誤差落在  $k\sigma_z$  範圍內的機率值  $P_A(x)$  不盡相同, 其推估誤差之常態分布示意圖如圖 3 所示, 在這兩個具有不同分布的圖形上可以比較出, 克利金變異數  $\sigma_{k1}^2$  比  $\sigma_{k2}^2$  來的小, 因此在克利金變異數為  $\sigma_{k1}^2$  的這個網格點上, 其推估誤差  $\tilde{Z}(x)$  落在  $k\sigma_z$  這個範圍內的機率值  $P_A(x)$  會比  $\sigma_{k2}^2$  這個網格點的機率值來的大。由此可知當網格點上的克利金變異數較小時  $P_A(x)$  機率值較大, 反之則其機率值會較小。利用每個網格點上之機率值繪製研究區域內之等值線, 依此機率值等值線即可觀察出在哪一區域其推估機率較低, 也就代表此區的推估結果是比較不好的。

從式 (5) 中可知道, 各個網格點上所求得之機率值  $P_A(x)$  會隨倍數  $k$  之不同而有變化, 以下針對當  $k$  值定為 0.5 時, 計算大臺北地區各個網格點之推估誤差落在 0.5 倍  $\sigma_z$  範圍內的機率值  $P_A(x)$  及繪製  $P_A$  等值圖, 其結果如圖 4 所示。由  $P_A$  等值圖可發現, 等值線數值會隨著各個半變異元模式之臨界變異值 (sill) 及影響範圍 (influence range) 大小的不同, 而使每個網格點上的推估結果不一樣, 當影響範圍越小時等值線較密, 影響範圍越大等值線越疏。

### 三、雨量空間推估及驗證

#### 1. 雨量空間推估

本次研究利用挑選之時雨量事件進行雨量推估, 為考慮同一時刻下有雨量紀錄之測站個數不能太少, 地理統計於空間資料分析的經驗建議選取至少有三分之二以上測站 (即 71 個測站) 之降雨資料不為零者, 以進行後續空間變異分析, 因此雨量資料是採用研究區域內 1998 年 1 月至 2012 年 12 月間 106 站之時雨量資料進行分析。本研究針對各類型 (鋒面 11 至 4 月、梅雨 5 至 6 月、颱風 7 至 10 月中央氣象局公佈之颱風事件、夏季對流 7 至 10 月) 降雨, 研究時雨量空間分布特性。

而夏季對流事件樣本數較少, 因此挑選準則是以同一時刻下至少有二分之一以上測站 (53 個測站) 及臺北站之降雨資料不為零者為主。

由於降雨之空間變異特性可能因降雨強度而改變, 故本研究參考「地理統計應用於雨量站網設計之研究」(2006) 論文之作法, 先將降雨量劃分為大、中、小三種不同等級的降雨事件, 並以臺北站 (站號 466920) 作為挑選事件的基準測站。再以臺北站 1998 至 2012 年之逐時雨量資料計算其每日總雨量, 分為鋒面雨、梅雨、颱風雨及夏季對流雨四種降雨類型, 繪製這四種降雨之日雨量累積圖, 如圖 5 所示。自臺北站日雨量累積機率圖中取相對應於累積機率 0.25、0.5、0.75 之日雨量, 並以前述累積機率上下 0.075 代表小、中、大降雨事件日雨量選取範圍, 如表 2 所示。其中共選出了鋒面雨共有小事件 26 小時, 中事件 59 小時, 大事件 238 小時; 梅雨共有小事件 17 小時, 中事件 47 小時, 大事件 125 小時; 颱風雨共有小事件 8 小時, 中事件 42 小時, 大事件 73 小時; 夏季對流雨共有小事件 5 小時, 中事件 3 小時, 大事件 32 小時。

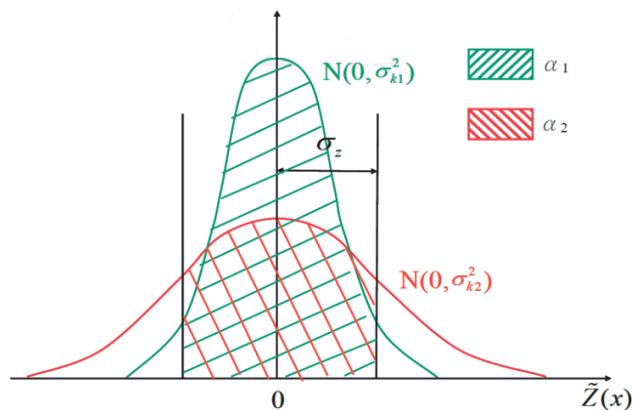


圖 3 在不同克利金變異數下之  $P_A(x)$  值

Fig.3 Probability distribution of the estimation error (and acceptance probability) under different kriging variance

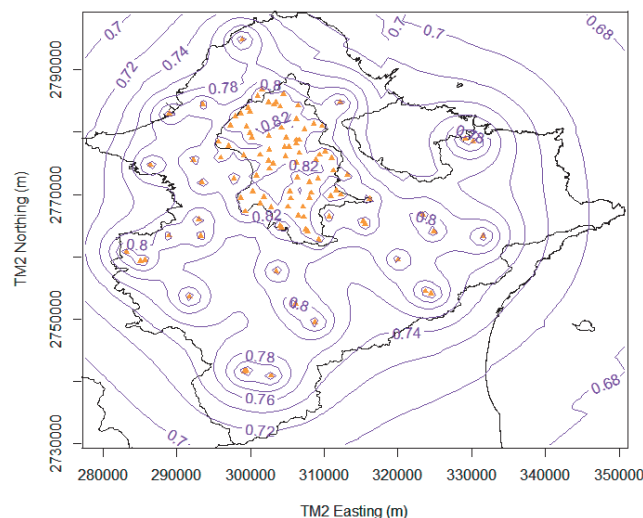


圖 4 大臺北地區夏季對流雨時雨量之機率值  $P_A$  等值圖

Fig.4 Contour map of acceptance probabilities of hourly rainfall of summer convective rainfalls in Taipei area

將每個小時 106 個測站之雨量平均值及標準偏差之關係畫在座標軸上，可看出其比例關係，由圖 6 中可看出不同降雨事件之雨量平均值及標準偏差大約呈線性相關，代表平均降雨強度越大時，其降雨量之空間變異分布越大，此即比例效應。基於比例效應，若將降雨量除以標準偏差，便可將降雨量大小造成之影響消除，本研究之雨量資料便是先將前述挑出之四種降雨類型時雨量事件資料，先除去各測站 1998 至 2012 年之時雨量平均值，再除以 1998 至 2012 年之時雨量標準偏差，然後將各測站四種降雨類型事件之標準化資料（頻率因子）作除去比例效應的處理，即除以每個事件小時所有測站頻率因子之標準偏差，以消除降雨量大小造成之影響。其數學式如下：

$$R'_i(j) = \frac{R_i(j) - \mu R_i}{\sigma R_i}, R^*_i(j) = \frac{R'_i(j)}{\sigma R^*_i} \quad (6)$$

其中， $R_i(j)$  為第  $i$  站第  $j$  年之原始雨量資料， $\mu R_i$  為第  $i$  站雨量資料平均值， $\sigma R_i$  為第  $i$  站雨量資料標準差， $R'_i(j)$  為第  $i$  站第  $j$  年之頻率因子， $\sigma R^*_i$  為第  $i$  站頻率因子標準差， $R^*_i(j)$  為第  $i$  站第  $j$  年消除比例效應之頻率因子。

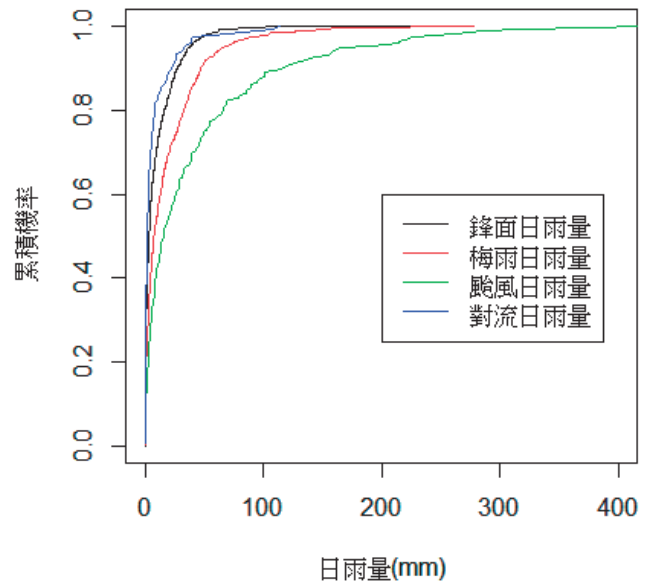


圖 5 各類型降雨之日雨量累積機率圖  
Fig.5 Cumulative probabilities plot of daily rainfall under different rainfall types

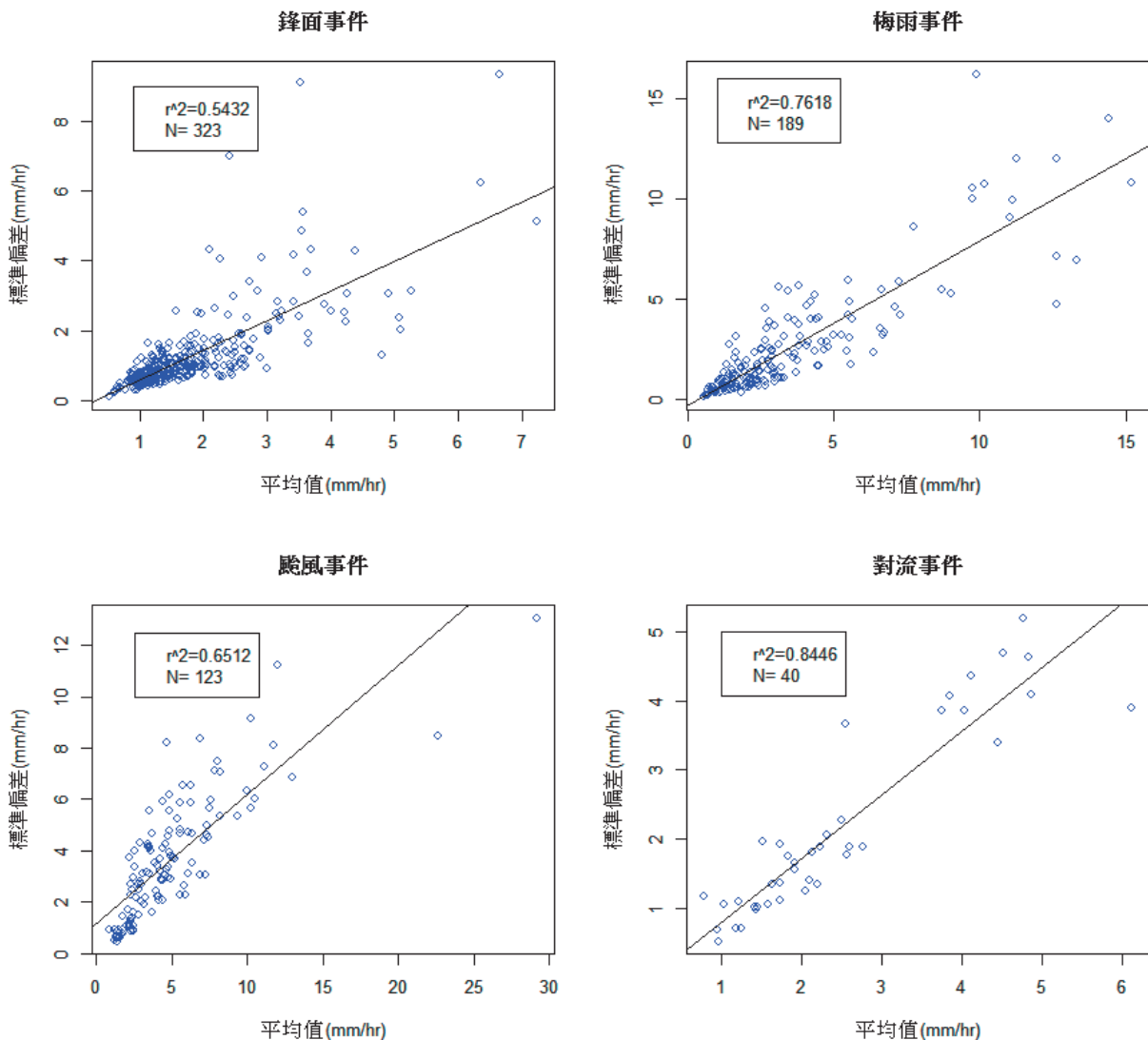


圖 6 各類型降雨時雨量之平均值與標準偏差關係圖  
Fig.6 Relationship between average value and standard deviation of hourly rainfall under different rainfall types



將個別降雨類型所有小時之無因次化時雨量資料，依照大、中、小及全部事件進行半變異元分析，並把不同降雨強度下平均距離與平均試驗半變異元之關係繪於座標軸上，結果如圖 7 所示。由試驗無因次半變異元圖形可看出，每種類型降雨之無因次半變異元圖形臨界值趨於定值，且大、中、小及全部事件之圖形趨勢一致，顯示地域因素對不同降雨強度事件之空間變異特性之影響類似，故本研究以全部事件之無因次半變異元作為代表。

本研究將各類型降雨所求得之全部事件無因次半變異元，先進行球體、指數及高斯模式之配適，發現指數模式配適情形最佳，且在後續一致性驗證中只有指數模式之標準克利金變異數趨近於 1(如公式 (8))，因此研究採用指數模式之配適結果，如圖 8 及表 3 所示。由配適結果發現，在相同時間尺度下，夏季對流雨影響範圍最小(約 55 公里)，代表其空間變異大，其他三種降雨類型影響範圍較大(約 69 公里)則空間分布較均勻。

## 2. 雨量空間驗證

本研究在雨量資料分析並掌握了推估所需之參數後，接著對雨量資料進行驗證部分，作法如下：

- (1) 移出空間上某一觀測雨量站雨量資料。

表 2 各類型降雨之時雨量事件挑選特性

Table 2 Properties of the selected hourly rainfall data

降雨類別	事件等級	臺北466920	選取範圍 (mm/day)(±7.5%)
鋒面	小 (0.25)	0.7	0.5~1.1
	中 (0.5)	3.5	2.2~4.7
	大 (0.75)	12.5	8.275~19
梅雨	小 (0.25)	1.6	0.815~3
	中 (0.5)	7.5	5.165~11.205
	大 (0.75)	27.1	17.83~35.925
颱風	小 (0.25)	3.85	2~5.71
	中 (0.5)	16.1	9.87~23.27
	大 (0.75)	50.65	38.485~70.64
夏季對流	小 (0.25)	0.5	0.5~0.975
	中 (0.5)	2	1.475~2.5
	大 (0.75)	6.25	4.275~10.35

表 3 各類型降雨之指數模式配適參數

Table 3 Parameters for dimensionless exponential variogram fitting

模式參數	鋒面時雨量	梅雨時雨量	颱風時雨量	夏季對流時雨量
$\omega$	1.24	1.38	1.57	1.17
$\delta$	0.44	0.38	0.31	0.39
a (m)	23064.86	23065.42	23072.14	18456.56

附註：半變異元模式  $\gamma(h) = \omega[1 - \exp(-h/a)] + \delta$ ，其中影響範圍為  $3a$ ，臨界變異值為  $\omega$ ，而  $\delta$  為模式之塊金效應 (Nugget Effect)(本研究配適之指數模式與表 1 中之指數模式相同，差別在本研究之指數模式於相對距離  $h$  為 0 時， $\gamma(h)$  有一值為  $\delta$ ，如圖 8 所示)。

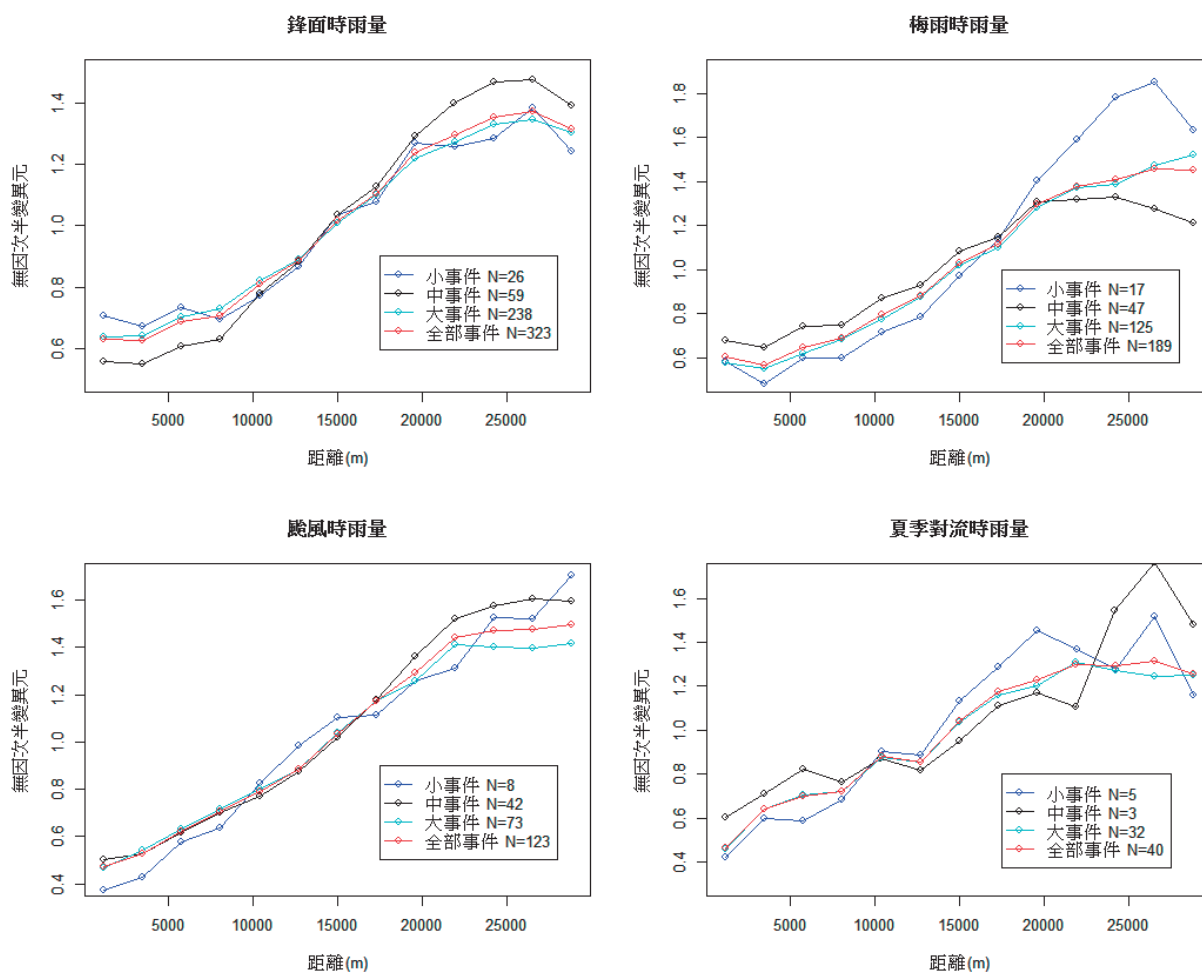


圖 7 各類型降雨在不同降雨強度下之時雨量無因次半變異元

Fig.7 Experimental variograms of hourly rainfall under different rainfall intensity

- (2) 以此站作為空間上要推估雨量值之座標點 (假設此點雨量未知)，以其他雨量站雨量值推估此座標位置雨量推估值，並將此推估值與原雨量觀測值比對。
- (3) 重複完成 675 個小時事件在此站之推估值。
- (4) 比較各小時事件之觀測值與推估值之狀況與誤差。

中央氣象局鞍部雨量站推估結果如圖 9 所示，藍圈為此站觀測雨量值，紅點為此站之推估雨量值。重複完成各雨量站，即可比較空間中各雨量站雨量推估之成果狀況。

以克利金平均誤差 (Kriging Average Error, KAE) 進行不偏估驗證，公式如下：

$$KAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Z^*(x) - Z(x)) \cong 0 \quad (7)$$

其驗證為空間所有各站之結果，KAE 值越接近 0 表示此事件推估效益越佳，重複 675 小時事件驗證，其成果如圖 10 所示，可見多數事件驗證成果 KAE 值皆落在 -0.2 至 0.2 之間，少數事件有較大之 KAE 值，可能造成因素為觀測雨量資料有缺漏，或是觀測雨量空間變異較大。

以標準克利金變異數 (Standardized Kriging Variance, SKV) 進行一致性驗證，公式如下：

$$SKV = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left[ \frac{(Z^*(x) - Z(x))^2}{\sigma_k^2} \right] \cong 1 \quad (8)$$

其中克利金變異數  $\sigma_k^2$  之如前述公式 (4)，驗證結果如圖 11 所示，可驗證所使用之模式是否適合，模式 SKV 值越接近 1 表示此模式推估效益越佳，本研究測試高斯、球型、指數模式，其中以指數模式推估成果較佳，另外兩模式推估成果受觀測雨量資料有缺漏、觀測雨量空間變異較大、以及站與站之間空間距離等因素影響較大，其一致性驗證結果較差。

## 四、雨量站網設計與效益評估

### 1. 雨量站網設計

雨量站網設計與效益評估乃為判斷臺北市內雨量站的個數及其位置是否可以用來適當的描述臺北市的降雨空間變異特性。為瞭解臺北市 26 處山坡地及平地雨量站提供之雨量資料效益，利用本研究之雨量站網評估模式進行雨量站網設計與評估。

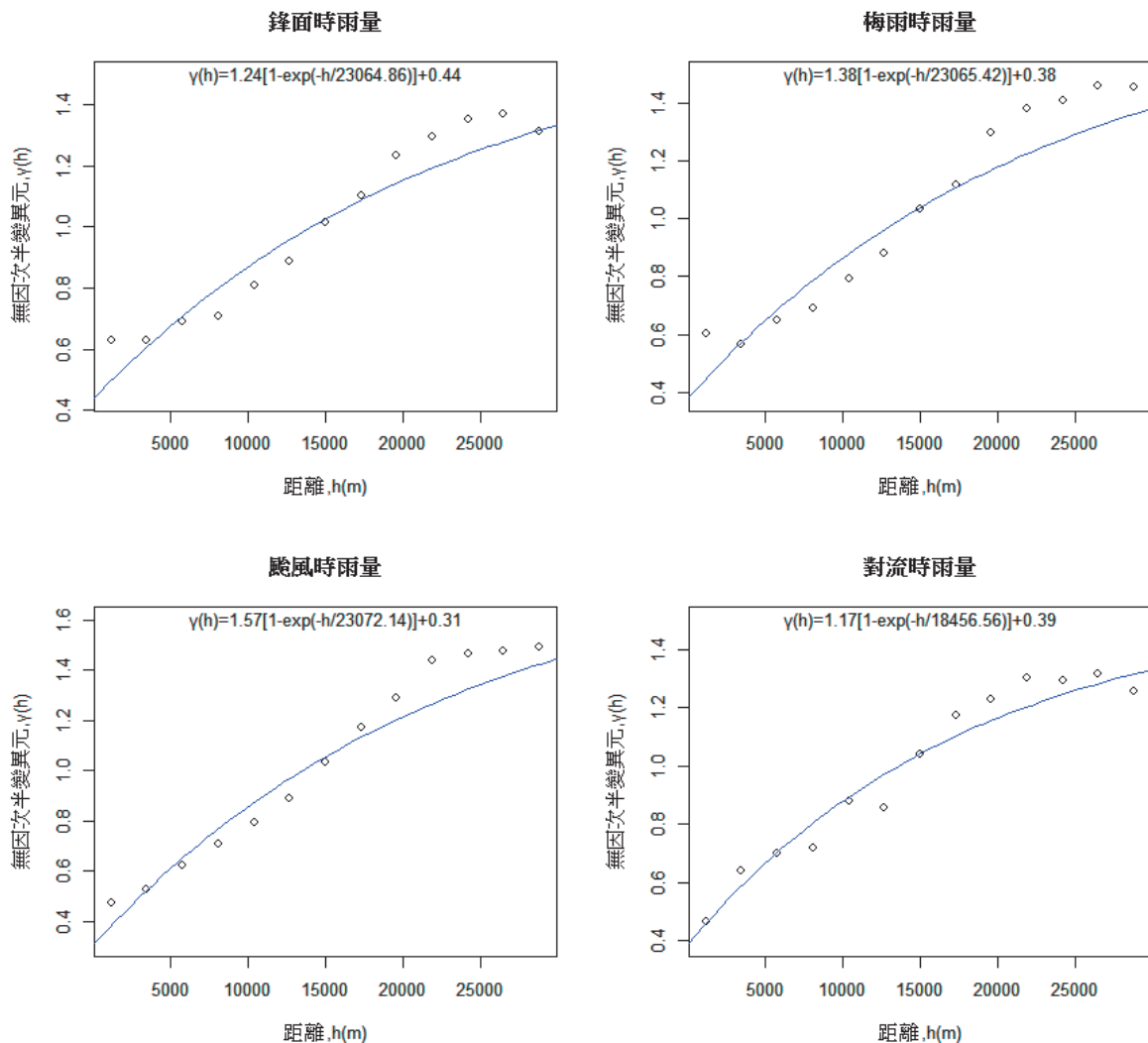


圖 8 各類型降雨之理論半變異元模式配淨圖

Fig.8 Fitted variograms of hourly rainfall under different rainfall types

不同類型暴雨之時雨量具有不同之降雨空間變異特性，故其半變異元函數的影響範圍亦不同。本研究分析大臺北地區雨量站網設計，利用不同降雨類型（鋒面雨、梅雨、夏季對流雨、颱風）分別求得各降雨類型的無因次半變異元函數，藉由半變異元函數的影響範圍，發現在相同的時間尺度下，夏季對流雨的影響範圍最小而其他三種降雨類型影響範圍較大，代表夏季對流雨的空間變異大而其他類型降雨的空間分布則較均勻。

基於臺北市山坡地防災需求，期望在雨量空間變異大的情況下做即時雨量推估，因此本研究只須找出一年中各種降雨類

型裡雨量空間變異最大的一種半變異元作雨量推估，所以在進行雨量站的效益評估時，本研究選用最大空間變異之夏季對流雨降雨類型作為雨量站網評估設計之依據。

在進行基本站網分析時，須記錄下刪除各站時，現有雨量站所維持之可推估面積比例，先找出有些測站是可以移除並且在其移除前後對整個研究範圍並沒有顯著影響性存在，接著再利用剩下影響性較大的測站，即基本測站來進行後續的移站分析，其分析步驟如下：

- (1) 如前述提到，記錄下刪除各站時，現有雨量站所維持之可推估面積比例，保留基本測站來進行後續的山坡地雨量站網分析。接著再考量土石流潛勢溪流、山坡地老舊聚落、列管坡地敏感區等相關位置，決定優先增設山坡地雨量站之位置。
- (2) 利用最大空間變異降雨類型下之  $n$  個基本站及優先增設山坡地雨量站之位置，並將每個山坡地雨量站都視為一個可移站之位置。
- (3) 當加入山坡地雨量站時，可利用此  $n+1$  個測站（即  $n$  個基本站及加入之某個山坡地雨量站）來推估其餘山坡地雨量站上之推估誤差落在  $k$  倍  $\sigma_2$  範圍內的機率值  $P_A$ 。
- (4) 計算區域內機率值  $P_A$  大於門檻值的面積佔全部面積的百分比，即控制面積百分比，若加入某一山坡地雨量站時，可求得最大的控制面積百分比，則此一山坡地雨量站即為最佳的設置位置，如此重複計算。當控制面積到達設定值時，即可得到山坡地雨量站網最佳數量。

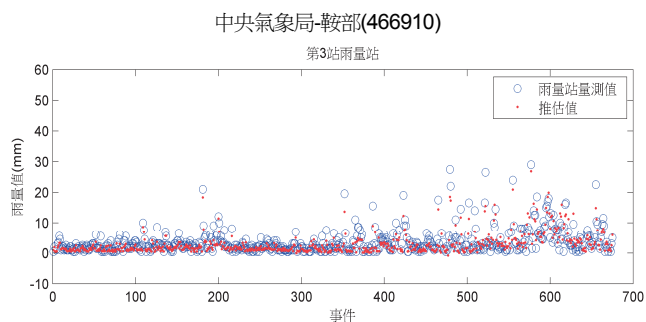


圖 9 中央氣象局鞍部雨量站推估結果  
Fig.9 The estimation result of Anbu weather station

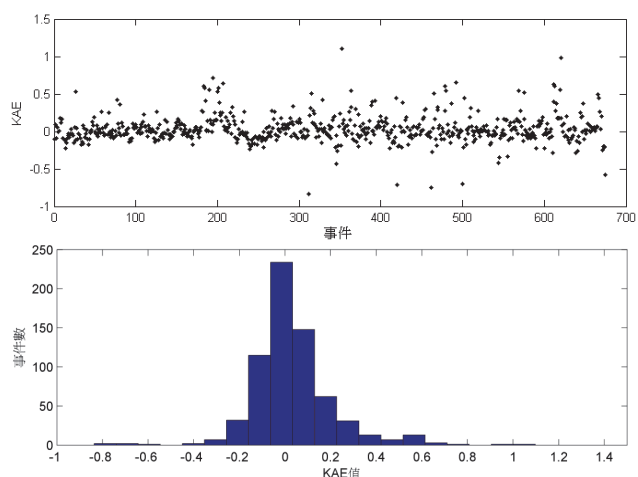


圖 10 各事件不偏估 KAE 結果  
Fig.10 The result of unbiased estimator KAE

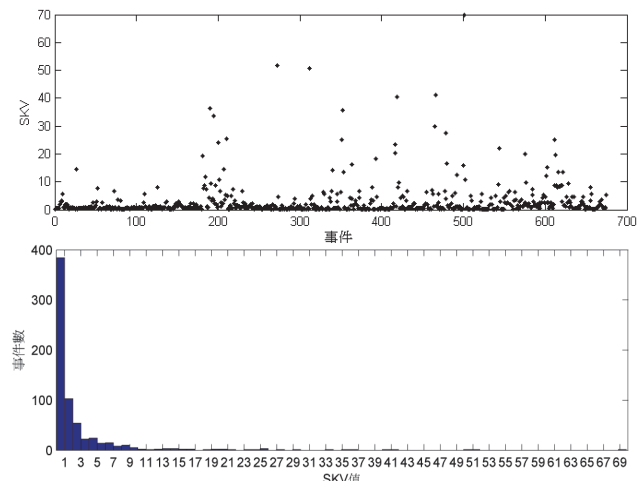


圖 11 各事件一致性 SKV(指數模式) 結果  
Fig.11 The result of consistent estimator SKV

## 2. 雨量站網效益評估

本研究針對臺北市行政區之站網分析，訂定  $k$  值為 0.5，門檻值為 0.82 時，控制面積百分比在重要性排序 (priority order) 分析後之變化，藉此決定哪些測站為基本測站，而哪些測站建議移站。圖 12 為現有雨量站空間分布下所能取得之推

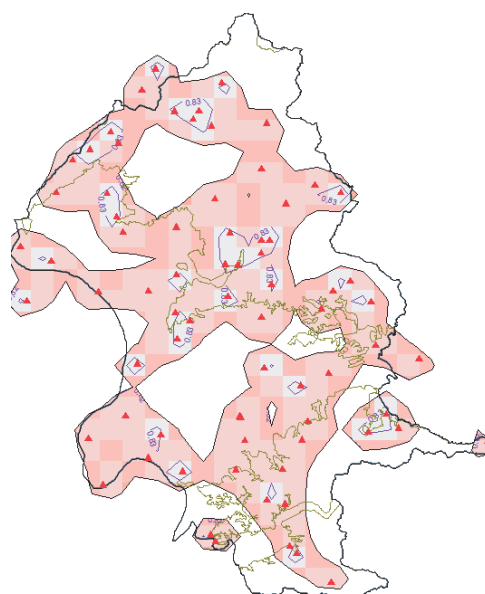


圖 12 臺北行政區現有雨量站所能提供之準確估計面積  
Fig.12 The area with acceptable accuracy established by the existing network of hourly summer convective rainfall in Taipei city

估準確度可被接受範圍，等值線 0.82 以內之範圍（淺橘色區域）皆被視為推估足夠準確之區域，其中淺橘色區域約佔臺北市面積（269.76 平方公里）之 63.67%（171.76 平方公里），將藉由後續的移站分析，評估現行雨量站網是否需要遷移調整。

重要性排序分析結果如圖 13 所示，透過上述的步驟可得到若忽略該測站，所得到的控制面積百分比，當控制面積百分比最大者，表示捨棄該站所影響的範圍最小，則該區第一個被捨棄的站為北投貴子坑（A1AD8，編號 57）。

臺北市地區經移站分析之可準確推估面積比例變化情形如圖 15 所示，其中橫軸為站數，縱軸為面積變化比例；藍色線為重要性排序分析結果，紅色線為移站分析結果。由圖 13 所示，北部的基本站數為 56 站（使推估準確度接受面積比達 60%以上之測站），非基本站數 50 站，因本研究只考量臺北市

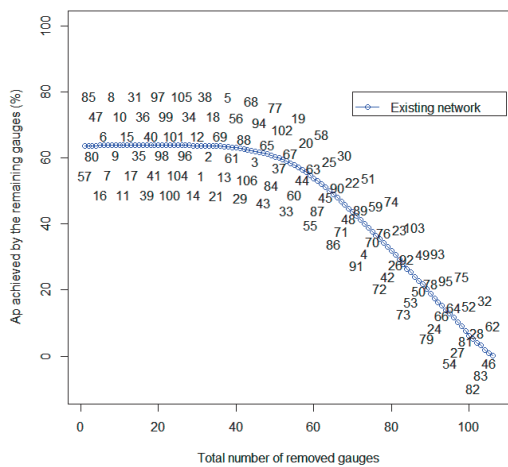


圖 13 臺北市地區雨量站之重要性排序  
Fig.13 Raingauge prioritization and corresponding Ap values of Taipei area

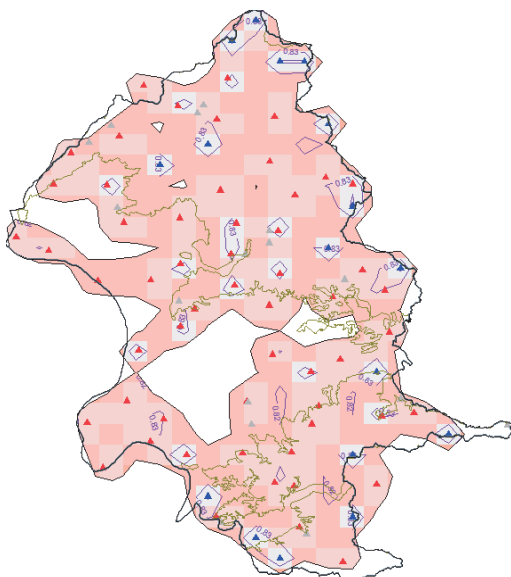


圖 14 臺北市行政區移站後所能提供之準確估計面積（藍色點為建議移站地點）  
Fig.14 The area with acceptable accuracy established by the augmented network of hourly summer convective rainfall in Taipei city (The blue sign points represent the relocated gauges)

行政區內的測站，所以非基本站只分析臺北市內之 17 站，加回測站 17 站後，可以使全區域面積推估雨量足夠準確的區域佔全區之 83.47%（不設測站在平地部分），如圖 14 所示。本研究透過此分析，評估臺北市增設雨量站之需求，後續將考量土石流潛勢溪流、列管坡地敏感區及老舊聚落，提出建議增設雨量站之山坡地區。

本研究考慮土石流潛勢溪流、山坡地老舊聚落及列管邊坡敏感區等相關位置以實施站網設置之調整，建議設站之地點如圖 16 所示，共有 17 個地點，挑出其中 10 個地點為實際設站位置，挑選原則以這 10 個地點增加之可接受準確度推估面積能涵蓋 17 個不在原本接受範圍的敏感區為主。因為本研究只考慮山坡地防災，所以不考慮平地雨量站之增設；增設雨量站

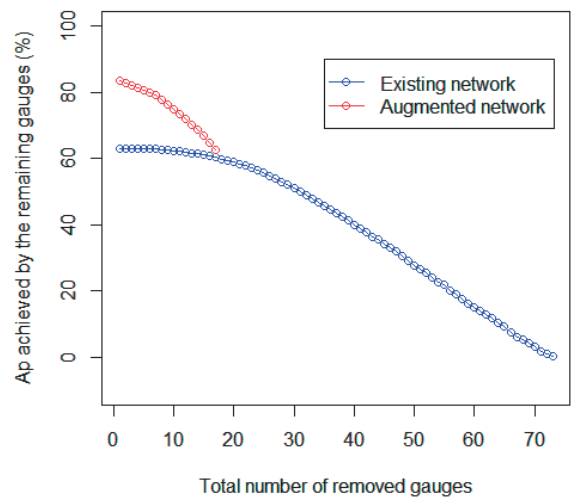


圖 15 臺北市地區移站分析之結果  
Fig.15 Raingauge prioritization and corresponding Ap values of existing and augmented network of Taipei area

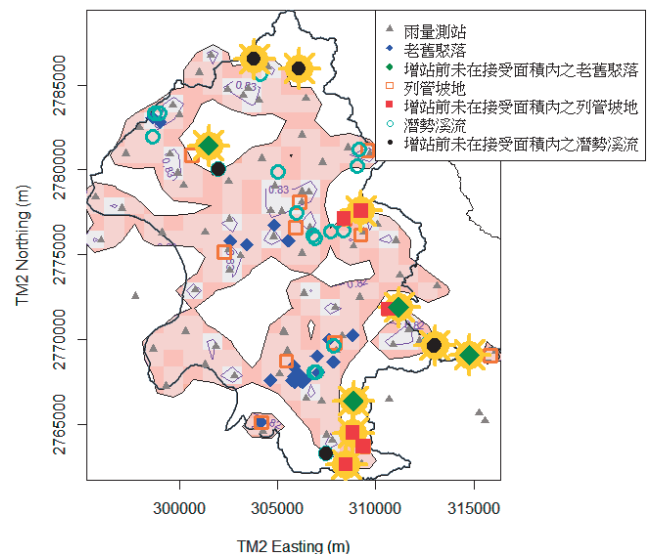


圖 16 臺北市山坡地建議增設雨量站之地點（黃色點）  
Fig.16 Suggested locations of adding raingauges in hillsides of Taipei city



後之推估準確度可被接受範圍如圖 17 所示, 增設雨量站之地點則如表 4 所示, 等值線 0.82 以內之範圍 (淺橘色區域) 皆被視為推估足夠準確之區域, 約佔臺北市面積 (269.76 平方公里) 之 72.89%(196.648 平方公里), 提升臺北市雨量站網其被視為推估足夠準確之區域面積約 9.3%。

### 五、結 論

1. 本研究建立大臺北盆地四大降雨類型之指數模式半變異元參數：  
 (1) 鋒面： $\gamma(h)=1.24[1-\exp(-h/23064.86)]+0.44$   
 (2) 梅雨： $\gamma(h)=1.38[1-\exp(-h/23065.42)]+0.38$   
 (3) 颱風： $\gamma(h)=1.57[1-\exp(-h/23072.14)]+0.31$   
 (4) 夏季對流： $\gamma(h)=1.17[1-\exp(-h/18456.56)]+0.39$   
 由上述模型即可描述未知空間位置在某時刻之推估雨量值, 因在相同時間尺度下夏季對流雨的空間變異大 (影響範圍最小) 而其他類型降雨的空間分布則較均勻。所以本研究選用最大空間變異之夏季對流雨降雨類型作為雨量站網評估設計之依據。
2. 由本研究之不偏估驗證顯示克利金法推估雨量值預測情形佳 (KAE 值接近 0), 而一致性驗證說明指數模式表現情形較好 (指數模式 SKV 值接近 1), 建議於即時雨量值推估上可採用指數模式半變異元進行克利金推估。
3. 本研究評估大臺北地區現有雨量站之效益, 在 k 值 0.5、接受機率門檻值 0.82 之分析下, 現有雨量站網之推估準確度接受面積比為 63.67%(171.76 平方公里), 顯示現有雨量站效益尚有改善之空間。
4. 本研究評估臺北市雨量站之遷站可行性, 以非基本測站中隸屬臺北市之 17 個雨量站作移站分析, 於遷移 17 個雨量

站後, 調整站網之推估準確度接受面積比提升為 83.47%(225.17 平方公里), 顯示調整現有站網將能有效提升雨量站效益。

5. 本研究考慮土石流潛勢溪流、山坡地老舊聚落及列管邊坡敏感區等相關位置實施站網之調整, 並找出不推估準確度可被接受範圍之地點, 建議其中 10 個地點為實際增站位置, 增站後將提升臺北市現有雨量站其被視為推估足夠準確之區域面積約 9.3%, 亦增加臺北市在災害發生時之即時雨量推估準確度。

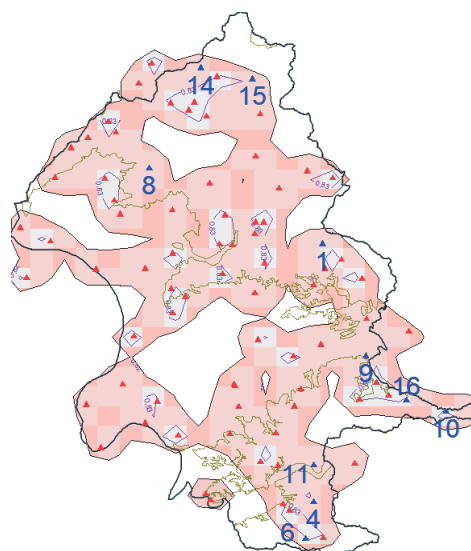


圖 17 臺北市行政區增設雨量站後所能提供之準確估計面積 (藍色點為建議增設測站)

Fig. 17 The area with acceptable accuracy established by adding gauges to the existing network of hourly summer convective rainfall in Taipei city (The blue sign points represent the added gauges)

表 4 臺北市山坡地建議增設測站之地點

Table 4 Recommended locations of adding rain-gauge for Taipei city hillsides

編號	類型	建議設站地點	地號	經度	緯度	使用分區
1	列管邊坡敏感區	內湖區碧山路62號	87-1 424	309167 309102	2777606 2777682	保護區
4	列管邊坡敏感區	文山區萬壽路75巷47號後側已整治區東北側邊坡附近	407-1 314	308805 308826	2764239 2764251	保護區
6	列管邊坡敏感區	文山區指南路3段38巷16號	296 15	308254 308483	2762574 2762640	保護區
8	老舊聚落	北投區幽雅路杏林巷曹洞寺附近山坡聚落	33-1 33	301187 301152	2781330 2781380	保護區
9	老舊聚落列管邊坡敏感區	南港區中南街134巷及168巷一帶山坡聚落	425 349	310945 311031	2771785 2771765	保護區 (或第二種工業區)
10	老舊聚落列管邊坡敏感區	南港區舊庄里2段306巷1號山坡聚落	305-1 223	314605 308810	2769100 2766300	保護區
11	老舊聚落	文山區木柵路5段象頭埔山坡聚落	242 133	308790 308845	2766366 2766360	保護區
14	潛勢溪流	DF002北投區湖田里南磺溪	44	303797	2786521	陽明山國家公園區
15	潛勢溪流	DF003北投區湖田里青碧溪	181 179	305895 305898	2785924 2785946	陽明山國家公園區
16	潛勢溪流	DF037/DF038南港區舊莊里	143-4 143	312950 312968	2769622 2769590	保護區

## 參考文獻

- [1] 經濟部水利署 (2009), 「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」。(Water Resources Agency, Ministry of Economic Affairs (2009). "Upgrading potential inundation maps of Tamsui River, Taipei city, Taipei county, Taoyuan county, and Keelung city." (in Chinese))
- [2] 經濟部水利署 (2009), 「濁水溪流域及彰化縣與雲林縣淹水潛勢圖更新計畫」。(Water Resources Agency, Ministry of Economic Affairs (2009). "Upgrading poteneial inundation maps of Chou-shui River, Changhua county and Yunlin county." (in Chinese))
- [3] 林昀靜 (2006), 「地理統計應用於雨量站網設計之研究」, 國立臺灣大學生物環境系統工程研究所碩士論文。(Lin, Y.C. (2006). *Raingauge Network Design Using Geostatistics*, Master Thesis, National Taiwan University, Taiwan, ROC. (in Chinese))
- [4] 侯如真、鄭克聲 (2003), 「訊息熵應用於雨量站網設計之理論探討」, 臺灣水利, 51(2), 10-21。(Hou, J.C., and Cheng, K.S. (2003). "A Theoretical Study of Raingauge Network Design Using Information Entropy." *Taiwan Water Conservancy*, 51(2), 10-21. (in Chinese))
- [5] 葉惠中 (2000), 「區域化變數理論與隨機變域模擬在雨量站網設計之研究」, 國立臺灣大學農業工程學研究所博士論文。(Yeh, H.C. (2000). *Raingauge Network Design Using Theory of Regionalized Variables and Random Field Simulation*, Doctoral Dissertation, National Taiwan University, Taiwan, ROC. (in Chinese))
- [6] 鄭克聲、許正芳 (1997), 「臺灣地區降雨之碎形分析」, 臺灣水利, 45(2), 38-46。(Cheng, K.S., and Shiu, Z.F. (1997). "Fractal analysis of rainfall for Taiwan area." *Taiwan Water Conservancy*, 45(2), 38-46. (in Chinese))
- [7] 鄭克聲、許敏楓、葉惠中 (1996), 「雨量站網設計與評估一區域化變數理論之應用」, 臺灣水利, 44(1), 16-25。(Cheng, K.S., Shiu, M.F., and Yeh, H.C. (1996). "Rainage Network Design and Evaluation--Application of the Theory of Regionalized Variables." *Taiwan Water Conservancy*, 44(1), 16-25. (in Chinese))
- [8] 林清豐 (1993), 「雨量空間分佈特性之研究」, 國立臺灣大學土木工程研究所碩士論文。(Lin, Q.F. (1993). *The Distribution of Spatial Characteristics of Rainfall*, Master Thesis, National Taiwan University, Taiwan, ROC. (in Chinese))
- [9] 許敏楓 (1993), 「雨量空間變異及站網設計之研究」, 國立臺灣大學農業工程學研究所碩士論文。(Shiu, M.F. (1993), *Study of spatial variation of rainfall and rain gauge network*, Master Thesis, National Taiwan University, Taiwan, ROC. (in Chinese))
- [10] Lai, Y., Chou, M., and Lin, P. (2010). "Parameterization of topographic effect on surface solar radiation." *J. Geophys. Res.*, 115, D01104, doi:10.1029/2009JD012305.
- [11] WMO (2009). "WMO Field Inter-comparison of Rainfall Intensity Gauges." *WMO*, Td. 1504, 290.
- [12] WMO (2008). "Guide to Meteorological Instruments and Methods of Observation." *WMO*, 8, 681.
- [13] Cheng, K.S., Lin, Y.C., and Liou, J.J. (2008). "Raingauge network evaluation and augmentation using geostatistics." *Hydrological Processes*, 22(14), 2554-2564.
- [14] André, S.H., Ouarda, T.B.M.J., Lachance, M., Bobée, B., Gaudet, J., and Gignac, C. (2003). "Assessment of the impact of meteorological network density on the estimation of basin precipitation and runoff: A case study." *Hydrological Processes*, 17, 3561-3580.
- [15] Prudhomme, C., and Reed, D.W. (1999). "Mapping extreme rainfall in a 108 mountainous region using geostatistical techniques. A case study in Scotland." *International Journal of Climatology*, 19, 1337-1356.
- [16] Pardo-Igúzquiza, E. (1998). "Comparison of geostatistical methods for estimating the areal average climatological rainfall mean using data on precipitation and topography." *International Journal of Climatology*, 18, 1031-1047.
- [17] Prudhomme, C., and Reed, D.W. (1998). "Relationships between extreme daily precipitation and topography in a mountainous region. A case study in Scotland." *International Journal of Climatology*, 18, 1439-1453.
- [18] Krstanovic, P.F., and Singh, V.P. (1992). "Evaluation of rainfall network using entropy: I. Theoretical development." *Water Resources Management*, 6, 279-293.
- [19] Krstanovic, P.F., and Singh V.P. (1992). "Evaluation of rainfall network using entropy: II. Application." *Water Resources Management*, 6, 295-314.
- [20] Kassim, A.H.M., and Kottegoda, N.T. (1991). "Rainfall network design through comparative kriging methods." *Hydrological Sciences-Journal-des Sciences Hydrologiques*, 36(3), 223-240.
- [21] Amorocho, J., and Esplidora, B. (1973). "Entropy in the assessment of uncertainty of hydrologic systems and models." *Water Resources Research*, 9, 1522-1551.
- [22] Shannon, C. E., and Weaver, W. (1949). "Mathematical theory of communication." *University of Illinois Press*, IL.

2014年03月10日 收稿

2014年04月10日 修正

2014年05月08日 接受

(本文開放討論至2015年3月31日)