

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^[1] 連政佳^[1*] 吳宜珍^[2] 鄭克聲^[3] 潘宗毅^[4] 黃立遠^[5]

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^[1] Cheng-Chia Lian^[1] Yii-Chen Wu^[2] Ke-Sheng Cheng^[3]
Tsung-Yi Pan^[4] Li-Yuan Huang^[5]

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

-
- [1] 國立臺灣大學 天氣氣候災害研究中心 研究助理 (* 通訊作者 E-mail: lesjjia@gmail.com)
Research Assistant, Center for Weather Climate and Disaster Research, Nation Taiwan University
- [2] 國立臺灣大學 博士後研究
Post-Doctoral Fellow, Hydrotech Research Institute, Nation Taiwan University
- [3] 國立臺灣大學 生物環境系統工程學系 教授
Professor, Department of Bioenvironmental Systems Engineering, Nation Taiwan University
- [4] 國立臺灣大學 天氣氣候災害研究中心 助理研究員
Assistant Research Fellow, Center for Weather Climate and Disaster Research, Nation Taiwan University
- [5] 臺北市政府工務局大地工程處 處長
Chief, Geotechnical Engineering Office, Public Works Department, Taipei City Government

壹、前言

為協助臺北市政府工務局大地工程處瞭解臺北市 26 處山坡地雨量站及平地雨量站提供之雨量資料效益，並評估雨量站觀測密度與測站調整之必要性。研究成果除完成雨量站網效益評估成果，並提供臺北市山坡地雨量站新增、配置與改善之規劃建議。

本研究基於臺北市山坡地防災需求，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，調查臺北市及新北市鄰近臺北市之雨量站歷史雨量資料，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。並對臺北市 26 處山坡地雨量站與環境的相關性進行分析，加入保全住戶、土石流潛勢溪及影響區域等山坡地高潛勢敏感區考量因子，提出現有雨量站是否需要遷移或新增等建議。

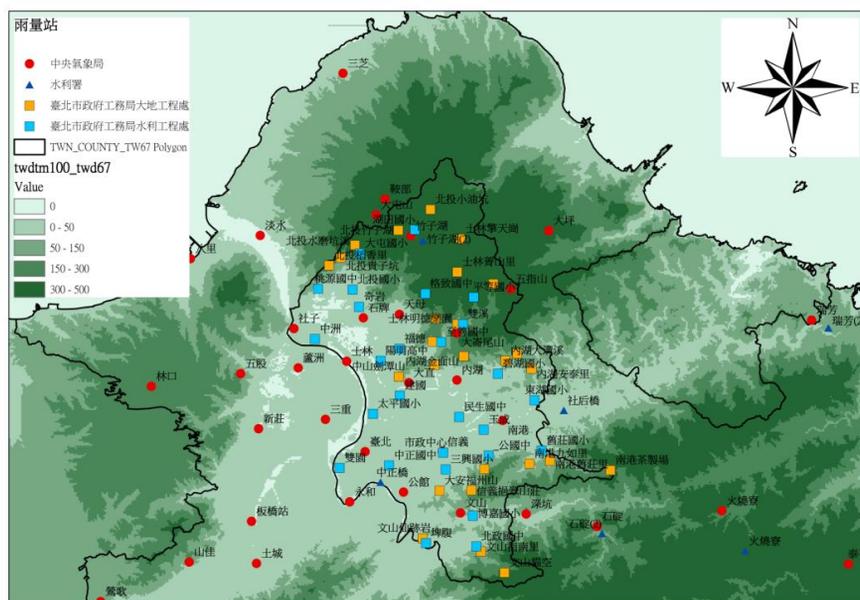
根據上述工作項目完成本委託技術服務案，內容包括(1)資料蒐集、(2)雨量站網觀測密度評估方法探討、(3)雨量空間推估及驗證、(4)雨量站網設計與效益推估。

貳、資料搜集

本研究蒐集大臺北盆地內之機關 26 處、水利處、中央氣象局(含新北市)、水利署(含新北市)等雨量站資料，和土石流潛勢溪流、山坡地老舊聚落、坡地住宅社區、列管邊坡敏感區等分布情形，及高潛勢敏感區、集水區分布範圍與地形地貌等資料，及機關所辦理 26 處雨量站維護和遷移等工作成果報告書之資料蒐集工作。

為滿足本研究規劃之雨量站觀測密度評估方法，須蒐集大臺北盆地內雨量站時雨量資料。蒐集的雨量資料除臺北市政府本身現有坡地雨量觀測系統資料庫資料外，亦取得交通部中央氣象局局屬氣象站及自記雨量站。臺北市政府工務局水利工程處、水利署等資料，經由交通部中央氣象局申請取得。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。

本研究使用大臺北盆地淡水河流域共 106 站雨量站時雨量資料，其位置圖如圖一。



圖一 大臺北盆地淡水河流域雨量站位置圖

Fig. 1 The rain gauge locations of Danshuei River over Taipei basin.

(regionalized variable)。

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下表所列之三種，以物理量而言較適於推估雨量等具明顯空間影響範圍之物理量。

表一 常用之半變異元函數理論模型
Table 1 The common theoretical model of semi-variogram.

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	ω
指數模式(Exponential model)	$\gamma(h) = \omega \left[1 - \exp \left(-\frac{h}{a} \right) \right]$	3a	ω
高斯模式 (Gaussian model)	$\gamma(h) = \omega \left\{ 1 - \exp \left[-\left(\frac{h}{a} \right)^2 \right] \right\}$	$\sqrt{3}a$	ω

克利金估計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 $Z(\mathbf{x}_i)$ ($i=1,2,\dots,n$)，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

$$Z^*(x_0) = \sum_{i=1}^n \lambda_{0i} Z(x_i) \quad , \quad i = 1, 2, \dots, n \tag{3-1}$$

- (2) 不偏估 (Unbiased)：估計值之期望值等於區域化變數之期望值

$$E[Z^*(x_0)] = E[Z(x_0)] \tag{3-2}$$

- (3) 最佳化 (Best)：估計值與觀測值其差之變異數為最小

$$\min \left\{ \text{Var} [Z^*(x_0) - Z(x_0)] \right\} = E \left\{ [Z^*(x_0) - Z(x_0)]^2 \right\} \tag{3-3}$$

其中， $Z(x_i)$ 為在 \mathbf{x}_i 點之觀測值、 $Z^*(x_0)$ 為 $Z(x_0)$ 之估計值。

克利金變異數 σ_k^2 之計算式如下：

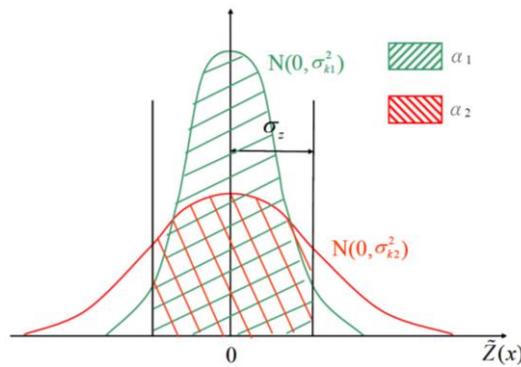
$$\sigma_k^2 = \text{Var} [Z^*(x_0) - Z(x_0)] = \mu + \sum_{i=1}^n \lambda_{i0} \gamma(x_i - x_0) \tag{3-4}$$

計算出每個網格點上之克利金變異數 σ_k^2 後，再根據式(3-5)即可計算每個網格點上的推估誤差 $\tilde{Z}(x)$ 落在 $k\sigma$ 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, pA)。

$$\begin{aligned}
 P\left[|Z^*(x) - Z(x)| < k\sigma_z\right] &= P\left[\tilde{Z}(x) < k\sigma_z\right] \\
 &= P\left[\frac{\tilde{Z}(x)}{\sigma_k} < \frac{k\sigma}{\sigma_k}\right] = P\left[Z < \frac{k\sigma_z}{\sigma_k}\right] = \alpha = P_A(x)
 \end{aligned}
 \tag{3-5}$$

其中， σ_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），

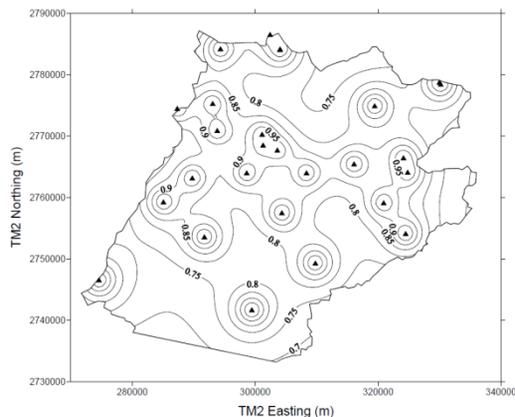
不同克利金變異數下之推估誤差落在 $k\sigma_z$ 範圍內的機率值 $P_A(x)$ 不盡相同，其推估誤差之常態分布示意圖如圖七所示，在這兩個具有不同分布的圖形上可以比較出，克利金變異數 σ_{k1}^2 比 σ_{k2}^2 來的小，因此在克利金變異數為 σ_{k1}^2 的這個網格點上，其推估誤差 $\tilde{Z}(x)$ 落在 $k\sigma_z$ 這個範圍內的機率值 $P_A(x)$ 會比 σ_{k2}^2 這個網格點的機率值來的大。由此可知當網格點上的克利金變異數較小時 $P_A(x)$ 機率值較大，反之則其機率值會較小。利用每個網格點上之機率值繪製研究區域內之等值線，依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。



圖七 在不同克利金變異數下之 $P_A(x)$ 值

Fig. 7 The values of PA based on different kriging variances.

從式(3-5)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 1 時，以淡水河流域為例，計算各個網格點之推估誤差落在 1 倍 σ_z 範圍內的機率值 $P_A(x)$ 及繪製 P_A 等值圖，其結果如圖八所示。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(Still)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。



圖八 梅雨時雨量之機率值 P_A 等值圖(淡水河流域)

Fig. 8 The contour of P_A of hourly May-yu rainfall.

肆、雨量空間推估及驗證

本次研究之雨量資料以大臺北地區淡水河流域測站為主要來源，其所屬單位包含中央氣象局 5 個局屬測站，37 個自記雨量站；臺北市政府工務局水利工程處 27 個雨量站，大地工程處 26 個雨量站；水利署 11 個雨量站，共計 106 站。

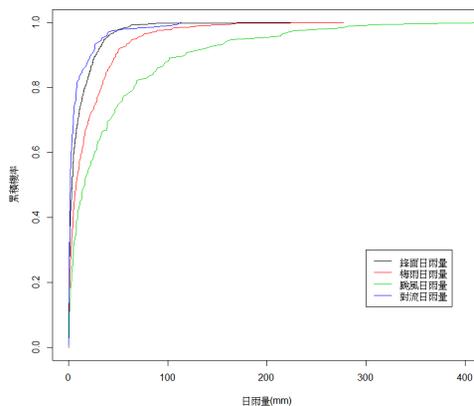
為考慮同一時刻下有雨量紀錄之測站個數不能太少，地理統計於空間資料分析的經驗建議選取至少有三分之二以上測站(即 71 個測站)之降雨資料不為零者，以進行後續空間變異分析，因此雨量資料是採用研究區域內 1998 年 1 月至 2012 年 12 月間 106 站之時雨量資料進行分析(1998 年以後才有三分之二測站有雨量資料)。本研究針對各類型(鋒面 11 至 4 月、梅雨 5 至 6 月、颱風 7 至 10 月中央氣象局公佈之颱風事件、夏季對流 7 至 10 月)降雨，研究時雨量空間分布特性。

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，如圖九所示。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，如表二所示。

如前述提到考慮同一時刻下有雨量紀錄測站不能太少，鋒面、梅雨及颱風事件選取同一時刻下至少三分之二以上測站(71 個測站)及臺北站之降雨資料不為零者，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。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。

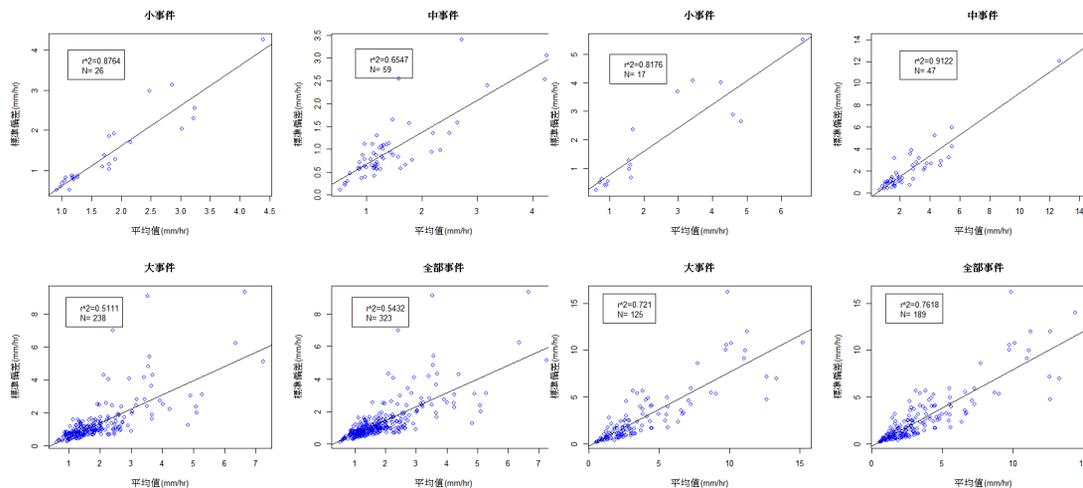
將每個小時 106 個測站之雨量平均值及標準偏差之關係畫在座標軸上，可看出其比例關係，由圖十中可看出不同降雨事件之雨量平均值及標準偏差大約呈線性相關，代表平均降雨強度越大時，其降雨量之空間變異分布越大，此即比例效應。基於比例效應，若將降雨量除以標準偏差，便可將降雨量大小造成之影響消除，本研究之雨量資料便是先將前述挑出之四種降雨類型時雨量事件資料，先減去個測站 1998 至 2012 年之時雨量平均值，再除以 1998 至 2012 年之時雨量標準偏差，然後將各測站四種降雨類型事件之標準化資料(頻率因子)作除去比例效應的處理，即除以每個事件小時所有測站

頻率因子之標準偏差，以消除降雨量大小造成之影響。



圖九 四種降雨類型之日雨量累積率圖

Fig. 9 Cumulative probabilities of daily rainfalls based on 4 rainfall types.

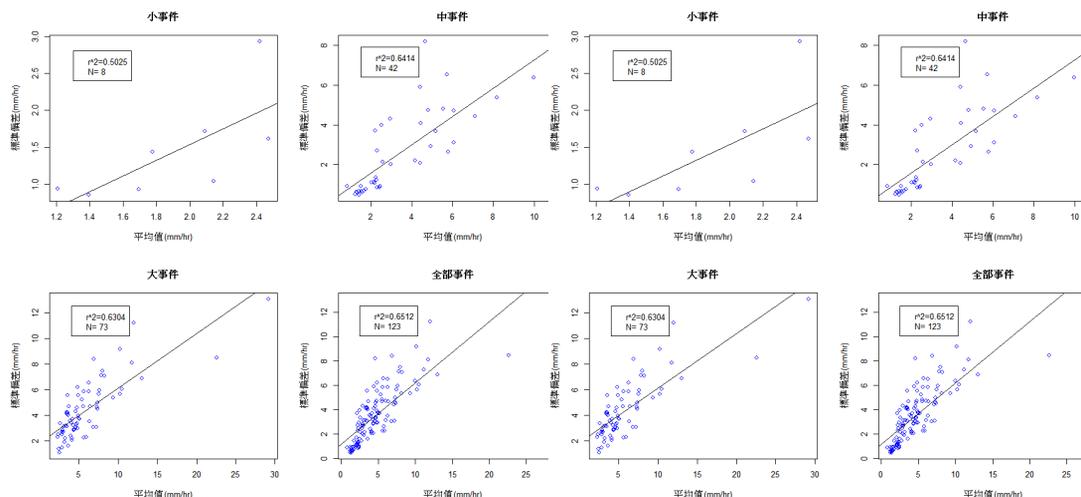


圖十(a) 鋒面時雨量之平均值與標準偏差關係圖

Fig. 10(a) The relationship between mean and standard deviation of hourly frontal rainfall.

圖十(b) 梅雨時雨量之平均值與標準偏差關係圖

Fig. 10(b) The relationship between mean and standard deviation of hourly May-yu rainfall.



圖十(c) 颱風時雨量之平均值與標準偏差關係圖
Fig. 10(c) The relationship between mean and standard deviation of hourly typhoon rainfall.

圖十(d) 夏季對流時雨量之平均值與標準偏差關係圖
Fig. 10(d) The relationship between mean and standard deviation of hourly summer convective rainfall.

表二 各類型降雨之大中小事件日雨量代表值及選取範圍

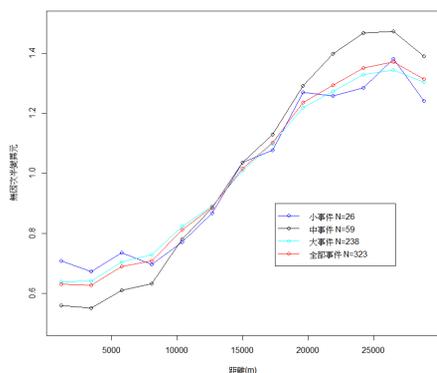
Table 2 The daily rainfall and data range of each degree rainfall for different rainfall types.

降雨類別	事件等級	臺北	選取範圍
		466920	(±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

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，結果如圖十一至圖十四所示。

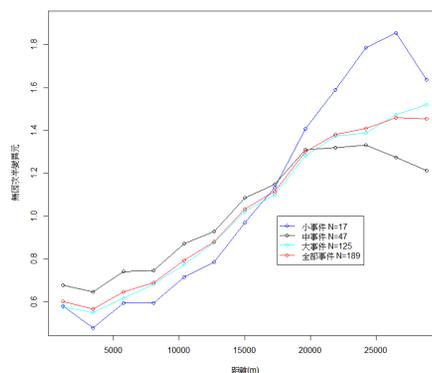
由試驗無因次半變異元圖形可看出，每種類型降雨之無因次半變異元圖形臨界值趨於定值，且大、中、小及全部事件之圖形趨勢一致，顯示地域因素對不同降雨強度事件之空間變異特性之影響類似，

故本研究以全部事件之無因次半變異元作為代表。



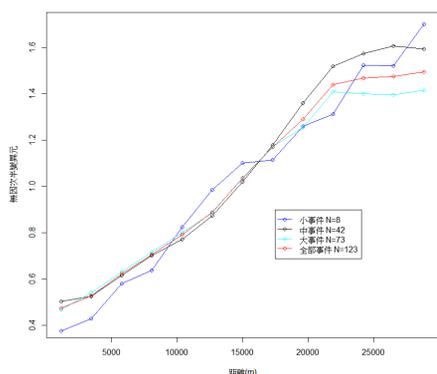
圖十一 鋒面時雨量在不同降雨強度下之無因次半變異元

Fig. 11 The dimensionless semi-variograms of hourly frontal rainfall based on different rainfall intensities.



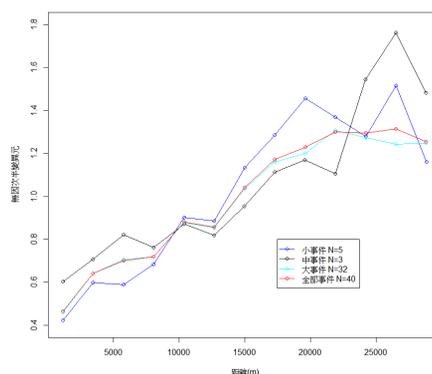
圖十二 梅雨時雨量在不同降雨強度下之無因次半變異元

Fig. 12 The dimensionless semi-variograms of hourly May-yu rainfall based on different rainfall intensities.



圖十三 颱風時雨量在不同降雨強度下之無因次半變異元

Fig. 13 The dimensionless semi-variograms of hourly typhoon rainfall based on different rainfall intensities.

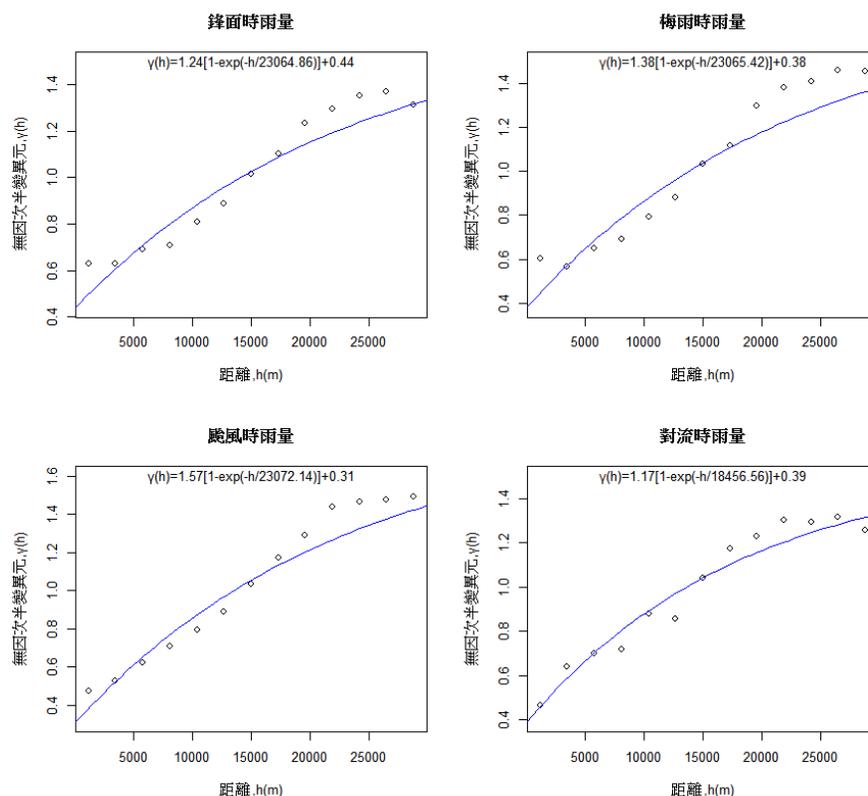


圖十四 夏季對流時雨量在不同降雨強度下之無因次半變異元

Fig. 14 The dimensionless semi-variograms of hourly summer convective rainfall based on different rainfall intensities.

本研究將各類型降雨所求得之全部事件無因次半變異元，進行指數模式之配適，其配適結果如圖十五及表三所示，由配適結果可發現，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，其他三種雨型影響範圍較大(約 69 公里)則空間分布較均勻。

此外，為了研究挑選降雨事件以日累積雨量為標準，是否造成短時間內暴雨事件被忽視，本團隊參考大地工程處的建議，在空間變異性較大的夏季對流雨類型事件另以任一測站時雨量超過 40 毫米的事件作半變異元分析，共挑出 35 個事件小時，事件時間由 1979 年至 2011 年不等，其指數模式理論半變異元配適結果如表三所示。配適結果顯示，夏季對流雨降雨類型以小時降雨強度為挑選事件標準得到的半變異元結果，與前述以日累積雨量為標準得到的結果差異不大，且日累積雨量標準之半變異元影響範圍較小，代表此標準的空間變異性較大，較能呈現夏季對流雨的空間變異性，因此後續之降雨量空間推估還是以日累積雨量標準挑出之事件為主。



圖十五 各類型降雨之理論半變異元模式配適圖

Fig. 15 The theoretical semi-variograms of different rainfall types.

表三 各類型降雨之指數模式配適參數

Table 3 The parameters of exponential model for each rainfall type.

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	*夏季對流 時雨量
ω	1.24	1.38	1.57	1.17	1.29
δ	0.44	0.38	0.31	0.39	0.38
a (m)	23064.86	23065.42	23072.14	18456.56	22958.95

附註：半變異元模式 $\gamma(h) = \omega[1 - \exp(-h/a)] + \delta$ ，影響範圍為 $3a$

*標註夏季對流雨事件挑選標準為任一測站之時雨量超過 40 毫米

雨量資料進行分析並掌握了推估所需之參數，在本節將進行驗證部分。本研究掌握了 106 站雨量站之雨量資料，因此驗證部分直接對觀測雨量資料進行驗證。作法為：

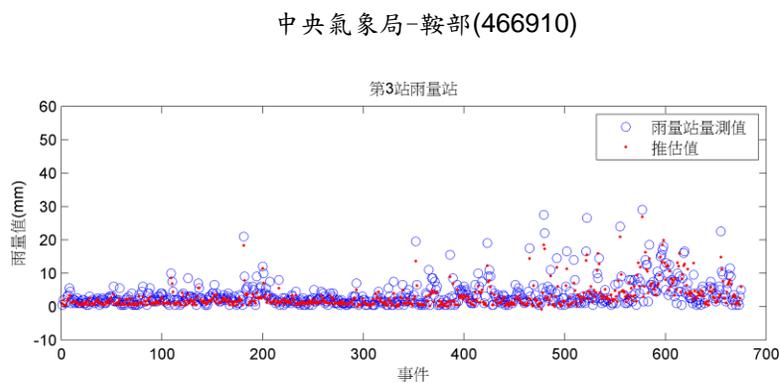
移出空間上某一觀測雨量站雨量資料。

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。

重複完成 675 小時各事件在此站之推估值。

比較各小時事件之觀測值與推估值之狀況與誤差。

其結果如圖十六 中央氣象局鞍部雨量站推估結果，藍圈為此站觀測雨量值，紅點為此站之推估雨量值。

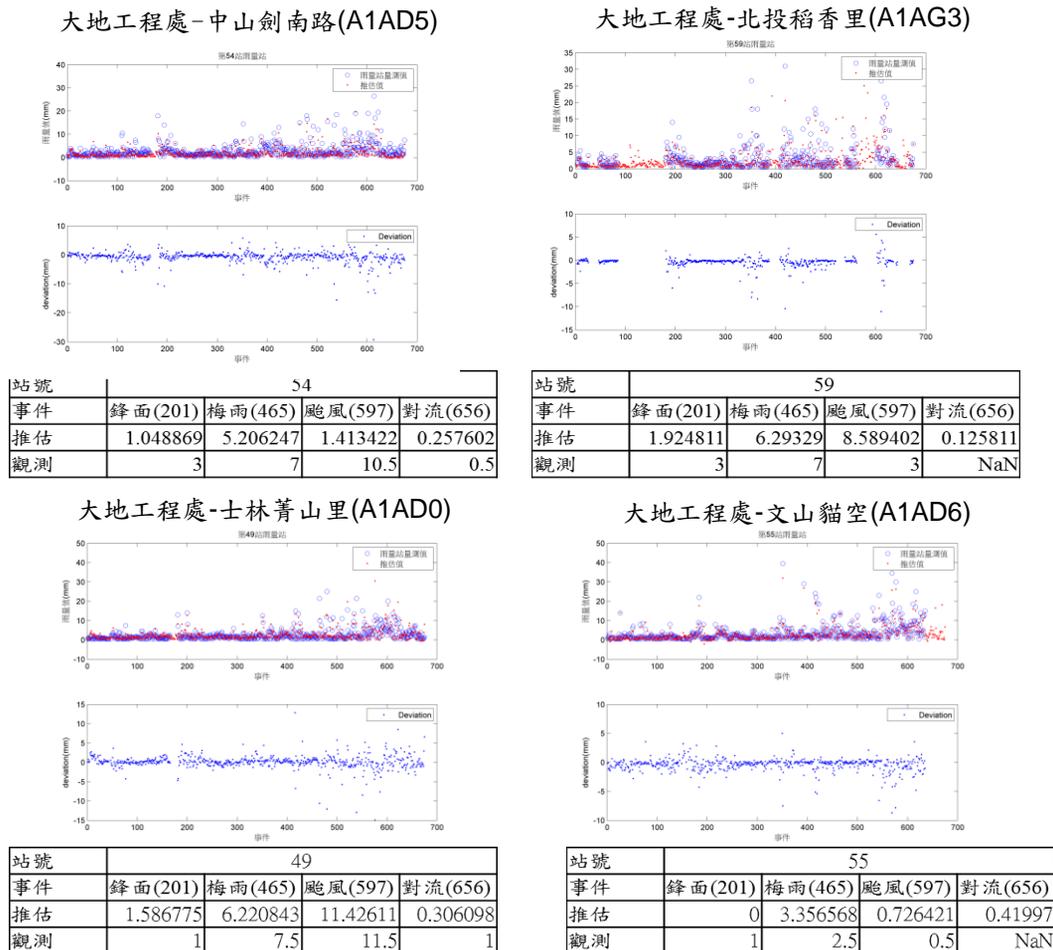


圖十六 中央氣象局鞍部雨量站推估結果

Fig. 16 The estimated results of Anbu rain gauge of CWB.

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。

針對各單位，選出山坡地雨量站，如下圖十七，表格中的數值為針對四個降雨類型挑出的事件中，其推估之結果。

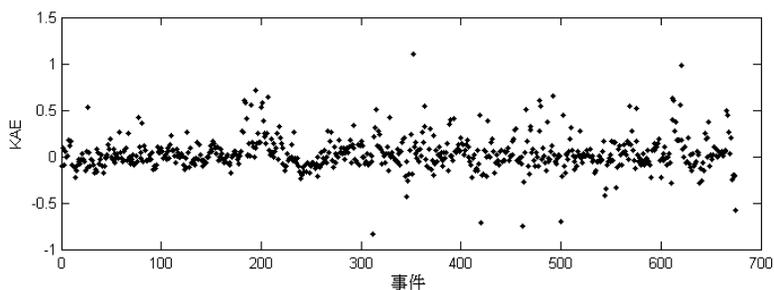


圖十七 大地工程處四處山坡地雨量站推估驗證結果

Fig. 17 The validation of the four slopeland rain gauges of Geotechnical Engineering Office of Taipei city.

結果顯示推估狀況都在可接受的範圍內，中山劍南路雨量站，在颱風事件中，其推估值遠小於觀測值，若此雨量站周圍雨量站沒有量測到較大的雨量值，此雨量站卻有較大的雨量值，克利金推估雨量較無法推估到較大的值。期造成因素可能是雨量站環境遮蔽狀況或局部性強降雨等因素。

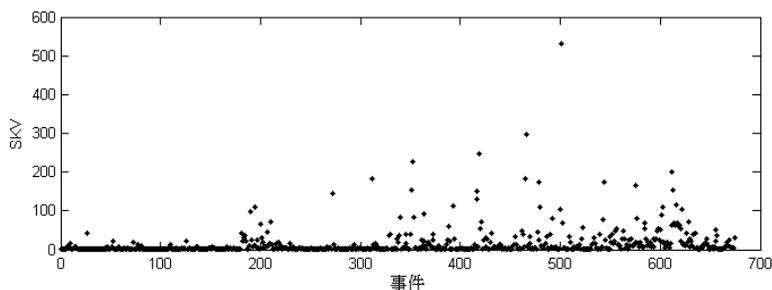
以不偏估驗證，其驗證為空間所有各站之結果，越接近 0 表示此事件推估效益越佳，重複 675 小時事件驗證，其成果如下圖十八，可見多數事件驗證成果 KAE 值皆落在 -0.2 至 0.2 之間，少數事件有較大之 KAE 值，可能造成因素為觀測雨量資料有缺漏，或是觀測雨量空間變異較大。



圖十八 各事件不偏估 KAE 結果

Fig. 18 The results of unbiased AKE of each events.

以一致性驗證，圖十九，可驗證所使用之模式是否適合，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像較大，其一致性驗證結果較差。



圖十九 各事件一致性 SKV(指數模式)結果

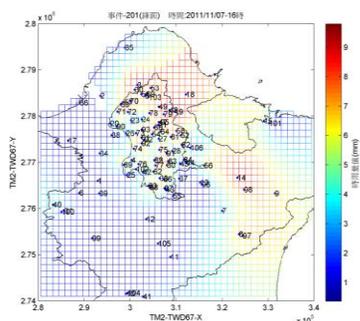
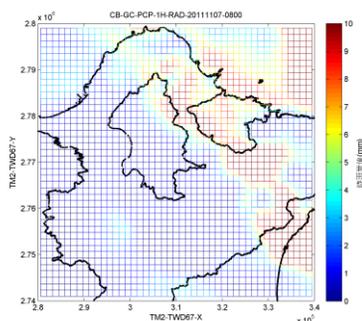
Fig. 19 The results of consistency SKV (exponential model) of each events.

本研究向中央氣象局申請劇烈天氣觀測系統(QPESUMS)之雨量推估產品與本研究雨量推估結果做比較，於 675 小時事件中以各雨型挑出 4 個大事件函文中央氣象局申請劇烈天氣觀測系統(QPESUMS)上述事件歷史雨量推估資料，並與本研究推估結果比較。圖二十為克利金推估與 QPESUMS 比對結果為。

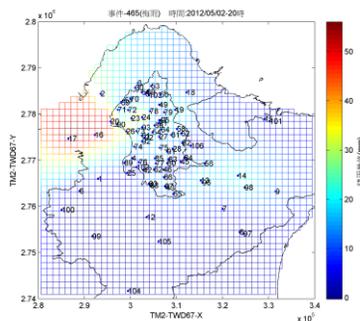
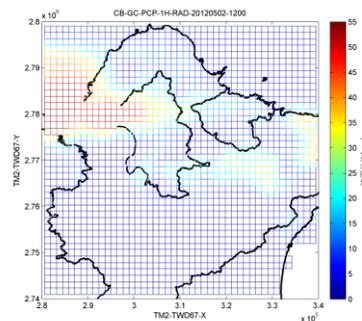
QPESUMS 推估雨量資料

本研究推估雨量資料

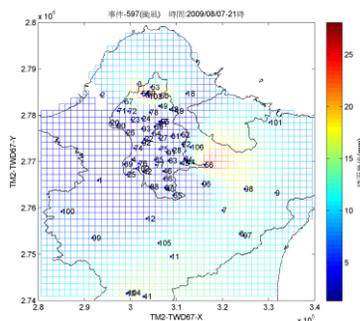
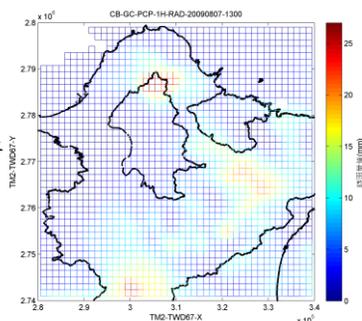
鋒面(201)
2011/11/07-16 時



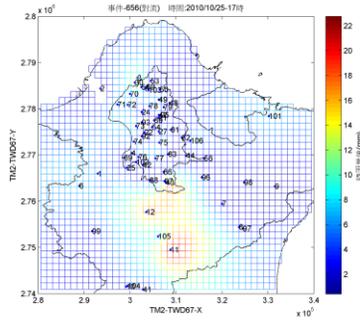
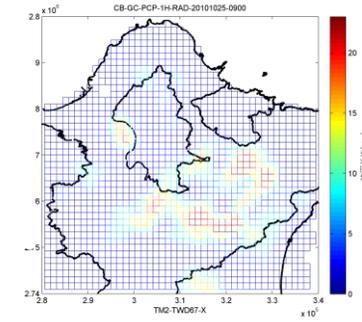
梅雨(465)
2012/05/02-20 時



颱風(597)
2009/08/07-21 時



夏季對流(656)
2010/10/25-17 時



圖二十 QPESUMS 推估雨量資料與本研究推估雨量資料比較

Fig. 20 The comparison between the QPEs of QPESUMS and estimated rainfall by this project.

其結果可見雨量分布狀況十分吻合，因本研究指探討大臺北地區淡水河流域之雨量站，因此在邊界部分會與 QPESUMS 雨量推估資料有較大的落差，另外本研究雨量站使用中央氣象局、水利署、

臺北市政府工務局水利工程處以及大地工程處雨量站資料，中央氣象局劇烈天氣觀測系統則是使用中央氣象局雨量站推估，因此在特定地區（如臺北市山區）會有較大之差異。

伍、雨量站網設計與效益評估

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。

由於半變異元函數之臨界變異值(Sill)代表該隨機變域之變異數，因此若資料間存在比例效應，則在不同降雨強度或不同時刻下所計算求得之變異元應有不同的臨界變異值。為了消除不同降雨強度及地域特性對降雨空間變異結構的影響，在進行分析前須先資料無因次化，再將各雨量站之無因次降雨量(頻率因子)除以該小時或該年各測站頻率因子之標準偏差，再利用此無因次化資料計算其變異元，用此無因次資料得到的無因次變異元進行雨量站網設計與評估。

此外，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。本團隊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雨型影響範圍較大，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。因此，在進行雨量站的效益評估時，本團隊將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計畫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。並考慮土石流潛勢溪流、山坡地老舊聚落、坡地住宅社區等相關位置，其分析步驟如下：

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、坡地住宅社區等相關位置，決定優先增設山坡地雨量站之位置。

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。

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 σ_z 範圍內的機率值 P_A 。

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。

本研究針對台北市行政區之站網分析，訂定 k 值為 0.5，門檻值為 0.82 時，控制面積百分比在減站分析後之變化，藉此決定哪些測站為基本測站，而哪些測站建議移站。圖二十一為現有雨量站空間分布下所能取得之推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，提升機關現有 26 個雨量站其被視為推估足夠準確之區域面積範圍。

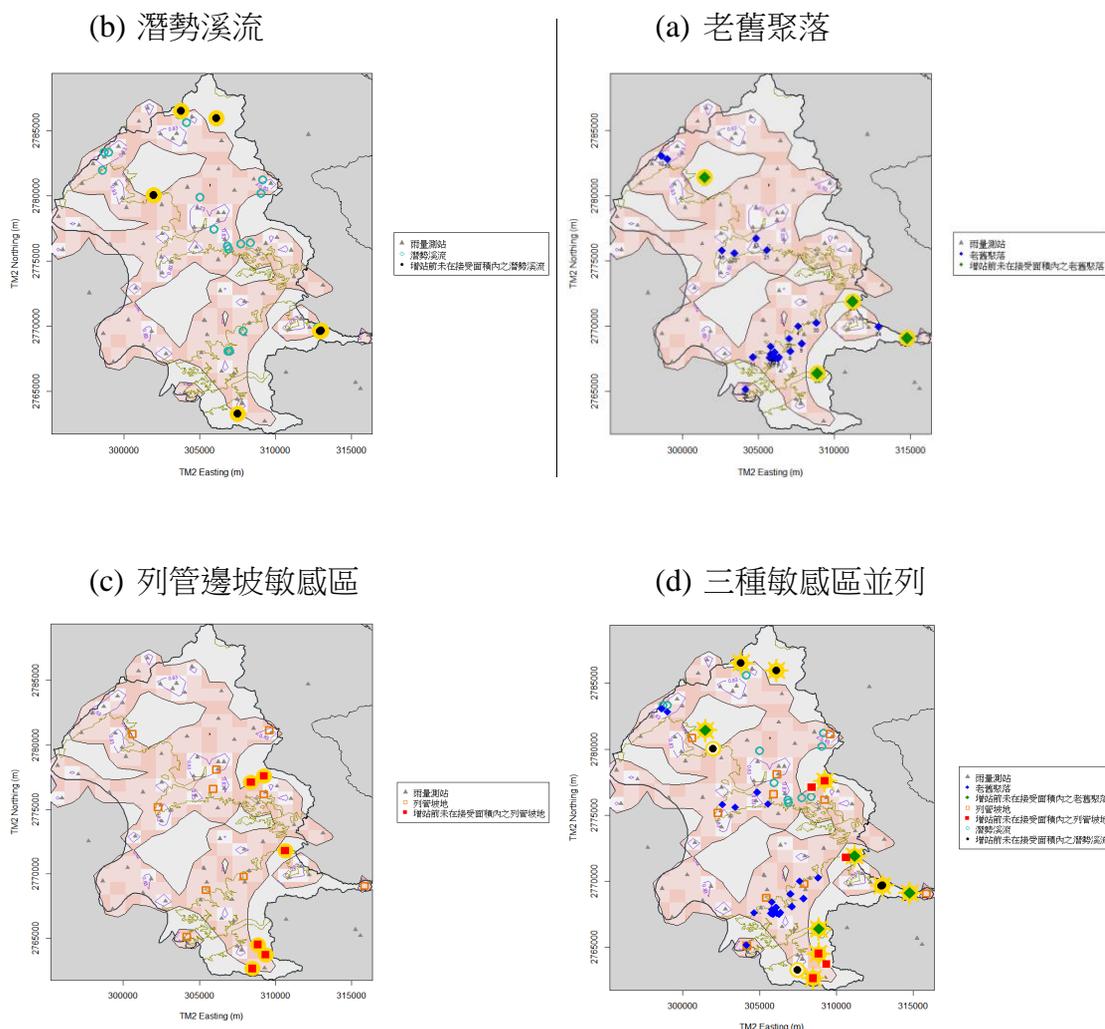
減站順序	測站編號	站號	來源	站名	城市	面積(km ²)	面積比(%)
12	15	C0A660	氣象局自計站	瑞芳	新北市	171.90	63.72
13	17	C0A710	氣象局自計站	林口	新北市	171.90	63.72
14	31	C0AC60	氣象局自計站	三峽	新北市	171.90	63.72
15	35	C0AD00	氣象局自計站	三芝	新北市	171.90	63.72
16	36	C0AD10	氣象局自計站	八里	新北市	171.90	63.72
17	39	C0AD40	氣象局自計站	土城	新北市	171.90	63.72
18	40	C0AD50	氣象局自計站	鶯歌	新北市	171.90	63.72
19	41	C1A630	氣象局自計站	下盆	新北市	171.90	63.72
20	97	01A190	水利署	碧湖	新北市	171.90	63.72
21	98	01A200	水利署	火燒寮	新北市	171.90	63.72
22	99	01A210	水利署	大豹	新北市	171.90	63.72
23	100	01A220	水利署	三峽	新北市	171.90	63.72
24	101	01A380	水利署	瑞芳(2)	新北市	171.90	63.72
25	104	01A430	水利署	福山(3)	新北市	171.90	63.72
26	105	01A440	水利署	大桶山	新北市	171.90	63.72
27	96	00A130	水利署	石碇(2)	新北市	171.90	63.72
28	34	C0ACA0	氣象局自計站	新莊	新北市	171.90	63.72
29	14	C0A650	氣象局自計站	火燒寮	新北市	171.90	63.72
30	12	C0A580	氣象局自計站	屈尺	新北市	171.87	63.71
31	1	466880	氣象局局屬站	板橋站	新北市	171.84	63.70
32	38	C0AD30	氣象局自計站	蘆洲	新北市	171.78	63.68
33	2	466900	氣象局局屬站	淡水	新北市	171.70	63.65
34	18	C0A860	氣象局自計站	大坪	新北市	171.61	63.61
35	21	C0A990	氣象局自計站	大崙尾山	臺北市	171.48	63.56
36	69	A1A9S	水利工程處	湖田國小	臺北市	171.29	63.50
37	13	C0A640	氣象局自計站	石碇	新北市	171.11	63.43
38	5	466930	氣象局局屬站	竹子湖	臺北市	170.85	63.33
39	61	A1AG5	大地工程處	中山劍潭山	臺北市	170.55	63.22
40	56	A1AD7	大地工程處	南港茶製場	臺北市	170.12	63.06
41	29	C0A9I1	氣象局自計站	三重	新北市	169.61	62.87
42	88	A1AB1	水利工程處	碑腹	臺北市	169.10	62.68
43	106	1140P16	水利署	社后橋	新北市	168.44	62.44

減站順序	測站編號	站號	來源	站名	城市	面積(km ²)	面積比(%)
		0					
44	68	DF042	大地工程處	內湖大溝溪	臺北市	167.76	62.18
45	3	466910	氣象局局屬站	鞍部	臺北市	167.09	61.94
46	94	A1AB7	水利工程處	奇岩	臺北市	166.41	61.69
47	43	A1AC4	大地工程處	文山指南里	臺北市	165.73	61.44
48	65	DF011	大地工程處	北投水磨坑溪	臺北市	164.77	61.08
49	84	A1AA7	水利工程處	舊庄國小	臺北市	163.74	60.70
50	77	A1AA0	水利工程處	三興國小	臺北市	162.70	60.31
51	37	C0AD20	氣象局自計站	深坑	新北市	161.59	59.90
52	102	01A410	水利署	中正橋	臺北市	160.35	59.44
53	33	C0AC80	氣象局自計站	文山	臺北市	159.00	58.94
54	67	DF024	大地工程處	士林猴硐溪莊頂路	臺北市	157.51	58.39
55	60	A1AG4	大地工程處	信義四獸山	臺北市	155.96	57.81
56	19	C0A870	氣象局自計站	五指山	新北市	154.33	57.21
57	44	A1AC5	大地工程處	南港舊莊里	臺北市	152.20	56.42
58	20	C0A980	氣象局自計站	社子	臺北市	150.02	55.61
59	55	A1AD6	大地工程處	文山貓空	臺北市	147.70	54.75
60	63	A1AG7	大地工程處	文山仙跡岩	臺北市	145.24	53.84
61	87	A1AB0	水利工程處	北政國中	臺北市	142.97	53.00
62	58	A1AG2	大地工程處	內湖大湖里	臺北市	140.34	52.02
63	45	A1AC6	大地工程處	南港九如里	臺北市	137.62	51.01
64	25	C0A9D0	氣象局自計站	永和	新北市	134.92	50.01
65	86	A1AA9	水利工程處	博嘉國小	臺北市	132.15	48.98
66	90	A1AB3	水利工程處	中洲	臺北市	129.27	47.92
67	71	A1A9U	水利工程處	桃源國中	臺北市	126.34	46.83
68	30	C0AC40	氣象局自計站	大屯山	新北市	123.66	45.84
69	48	A1AC9	大地工程處	士林溪山里	臺北市	120.64	44.72
70	22	C0A9A0	氣象局自計站	大直	臺北市	117.61	43.60
71	91	A1AB4	水利工程處	玉成	臺北市	114.51	42.45
72	89	A1AB2	水利工程處	雙園	臺北市	111.35	41.28
73	4	466920	氣象局局屬站	臺北	臺北市	108.15	40.09

減站順序	測站編號	站號	來源	站名	城市	面積(km ²)	面積比(%)
74	51	A1AD2	大地工程處	北投竹子湖	臺北市	104.97	38.91
75	70	A1A9T	水利工程處	大屯國小	臺北市	101.67	37.69
76	59	A1AG3	大地工程處	北投稻香里	臺北市	98.39	36.47
77	72	A1A9V	水利工程處	北投國小	臺北市	95.83	35.52
78	76	A1A9Z	水利工程處	中正國中	臺北市	92.52	34.30
79	42	C1A730	氣象局自計站	公館	臺北市	89.15	33.05
80	74	A1A9X	水利工程處	太平國小	臺北市	86.17	31.94
81	26	C0A9E0	氣象局自計站	士林	臺北市	82.63	30.63
82	23	C0A9B0	氣象局自計站	石牌	臺北市	78.92	29.26
83	73	A1A9W	水利工程處	陽明高中	臺北市	75.04	27.82
84	92	A1AB5	水利工程處	建國	臺北市	71.31	26.43
85	53	A1AD4	大地工程處	北投小油坑	臺北市	68.74	25.48
86	103	01A420	水利署	竹子湖(2)	臺北市	64.80	24.02
87	50	A1AD1	大地工程處	士林擎天崗	臺北市	61.16	22.67
88	49	A1AD0	大地工程處	士林菁山里	臺北市	58.69	21.75
89	79	A1AA2	水利工程處	平等國小	臺北市	54.63	20.25
90	78	A1AA1	水利工程處	格致國中	臺北市	51.15	18.96
91	24	C0A9C0	氣象局自計站	天母	臺北市	47.21	17.50
92	93	A1AB6	水利工程處	福德	臺北市	43.54	16.14
93	66	DF021	大地工程處	士林猴硐溪至善路	臺北市	41.02	15.20
94	95	A1AB8	水利工程處	雙溪	臺北市	37.62	13.95
95	54	A1AD5	大地工程處	中山劍南路	臺北市	34.68	12.85
96	64	A1AG8	大地工程處	內湖金面山	臺北市	31.57	11.70
97	27	C0A9F0	氣象局自計站	內湖	臺北市	27.86	10.33
98	75	A1A9Y	水利工程處	民生國中	臺北市	24.58	9.11
99	81	A1AA4	水利工程處	碧湖國小	臺北市	20.44	7.58
100	52	A1AD3	大地工程處	內湖安泰里	臺北市	16.39	6.08
101	82	A1AA5	水利工程處	東湖國小	臺北市	13.85	5.13
102	28	C0A9G0	氣象局自計站	南港	臺北市	11.06	4.10
103	83	A1AA6	水利工程處	留公國中	臺北市	8.59	3.18
104	32	C0AC70	氣象局自計站	信義	臺北市	4.75	1.76

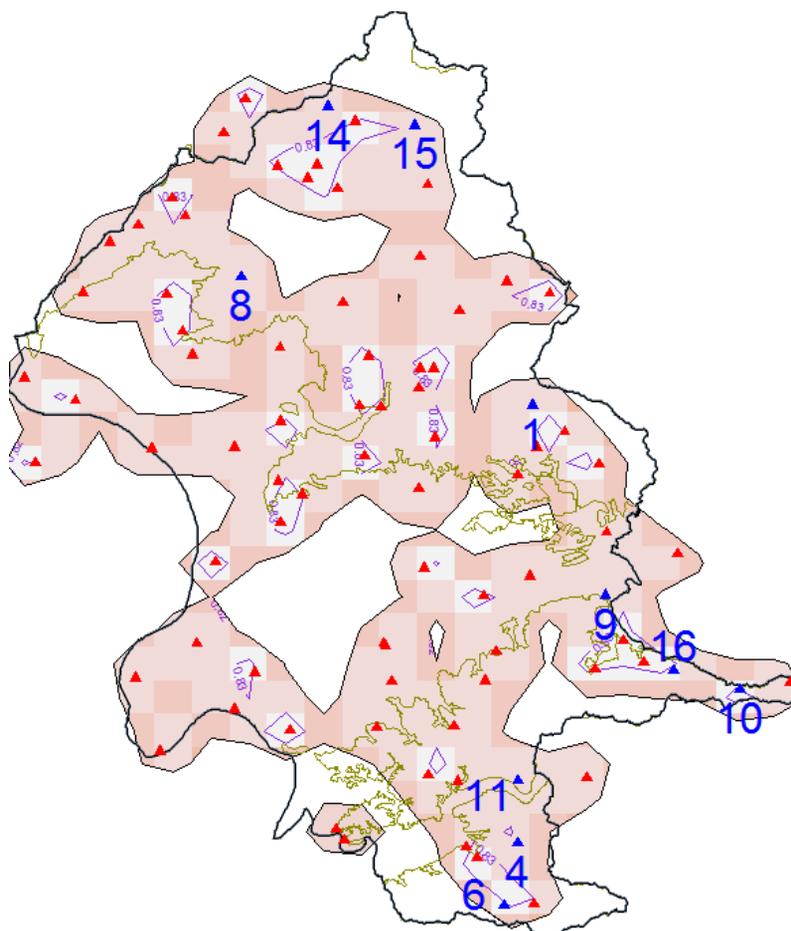
減站順序	測站編號	站號	來源	站名	城市	面積 (km ²)	面積比 (%)
105	46	A1AC7	大地工程處	信義挹翠山莊	臺北市	2.37	0.88
106	62	A1AG6	大地工程處	大安福州山	臺北市	0.43	0.16

本研究進行山坡地雨量站網設計評估時，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二十二所示，共有 17 個地點，挑出其中 10 個地點為實際增站位置。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；增設雨量站後之推估準確度可被接受範圍如圖二十三所示，增設雨量站之地點則如表五所示，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)，提升機關現有 26 個雨量站其被視為推估足夠準確之區域面積約 9.3%。



圖二十二 臺北市山坡地建議增設雨量站之地點(黃色點)

Fig. 22 The suggested locations (yellow points) of adding rain gauges for Taipei slopland.



圖二十三 台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. 23 The PA of each districts of Taipei city after adding rain gauges for blue locations.

表五 臺北市山坡地建議增設雨量站之地點

Table 5 The suggested location of adding rainfall gauges for Taipei slopland.

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	內湖區碧山段二小段	87-1	309167	2777606	保護區
			424	309102	2777682	
4	列管邊坡 敏感區	文山區頭廷段三小段 二小段	407-1	308805	2764239	保護區
			314	308826	2764251	
6	列管邊坡 敏感區	文山區指南段四小段	296	308254	2762574	保護區
			15	308483	2762640	
8	老舊聚落	北投區崇仰段一小段	33-1	301187	2781330	保護區
			33	301152	2781380	

9	老舊聚落 列管邊坡 敏感區	南港區中南段一小段	425 349	310945 311031	2771785 2771765	保護區(或第二 種工業區)
10	老舊聚落	南港區大豐段一小段	305-1	314605	2769100	保護區
11	老舊聚落	文山區富得段二小段	223	308810	206692	保護區
14	潛勢溪流	北投區湖田段二小段	44	303797	2786521	陽明山國家公園 區
15	潛勢溪流	北投區湖田段一小段	181 179	305895 305898	2785924 2785946	陽明山國家公園 區
16	潛勢溪流	南港區大豐段三小段	143-4 143	312950 312968	2769622 2769590	保護區

陸、結 論

(一)本研究建立大臺北盆地四大降雨類型之參數：

(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： $\gamma(h)=1.17[1-\exp(-h/18456.56)]+0.39$

以上述模型即可描述未知空間位置在某時刻之推估雨量值，再與本研究於雨量站網設計及效益評估工作項目中建立之門檻值評估方法，考慮土石流潛勢溪流警戒區、老舊聚落、列管邊坡敏感區等保全區因子，提高保全區於分析時之門檻值，即可評估雨量站之空間分布是否適當，並提出遷站或新設之建議。

(二)QPESUMS 推估與克利金方法推估比較中，有些位置之雨量值有明顯差異，可能是考慮雨量站之不同(QPESUMS 雨量推估取用資料以中央氣象局雨量站為主)，建議未來因應防災需求可同時參考雨量站雨量觀測資料與 QPESUMS 雨量推估資料。

(三)災害發生之降雨可能發生降雨於新北市，但災害事件發生在臺北市之情況，反之亦然。建議臺北市政府與新北市政府合作相關議題，提出雨量站設置建議；商討於該點設置雨量測站，以防範跨區域災害的形成。

(四)本研究初步建議在土石流潛勢溪流、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，並找出不在推估準確度可被接受範圍之地點，考慮其中 10 個地點為實際增站位置，增站後將提升機關現有 26 個雨量站其被視為推估足夠準確之區域面積約 9.3%。

參考文獻

1. 戴志輝、林博雄、張培臣，(2013)，「臺灣地區夏季對流閃電空間特性初步分析」，天氣分析與預報研討會，中央氣象局。
2. 劉清煌、李育棋、楊啟瑞、黃紹欽、林大偉，(2013)，「臺灣西部地區自動雨量站分布之探討」，天氣分析與預報研討會，中央氣象局。

3. 張譯心、林博雄、魏聰輝、謝新添，(2012)，「雪山冬季降雪之微氣象觀測」，天氣分析與預報研討會，中央氣象局。
4. 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」。
5. 經濟部水利署，(2009)，「濁水河流域及彰化縣與雲林縣淹水潛勢圖更新計畫」。
6. 林昫靜，(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。
7. 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，第 51 卷，第 2 期，pp. 10-21。
8. 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。
9. 鄭克聲、許正芳，(1997)，「臺灣地區降雨之碎形分析」，臺灣水利，第 45 卷，第 2 期，pp. 38-46。
10. 鄭克聲、許敏楓、葉惠中，(1996)，「雨量站網設計與評估—區域化變數理論之應用」，臺灣水利，第 44 卷，第 1 期，pp. 16-25。
11. 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。
12. 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。
13. Lai, Y., M. Chou, and P. Lin, "Parameterization of topographic effect on surface solar radiation," *J. Geophys. Res.*, 115, D01104, doi:10.1029/2009JD012305, 2010.
14. WMO, "WMO Field Inter-comparison of Rainfall Intensity Gauges," WMO -Td. 1504. pp 290, 2009.
15. WMO, "Guide to Meteorological Instruments and Methods of Observation," WMO -No.8. pp681, 2008.
16. Cheng, K.S., Lin, Y.C., Liou, J.J., 2008. Raingauge network evaluation and augmentation using geostatistics. *Hydrological Processes*, 22(14): 2554-2564. DOI: 10.1002/ hyp.6851.
17. André, S. H., Ouarda, T. B. M. J, Lachance, M., Bobée, B., Gaudet, J. and Gignac, C., "Assessment of the impact of meteorological network density on the estimation of basin precipitation and runoff: A case study," *Hydrological Processes*, Vol. 17, pp. 3561-3580, 2003.
18. Prudhomme, C. and Reed, D.W., "Mapping extreme rainfall in a 108 mountainous region using geostatistical techniques. A case study in Scotland," *International Journal of Climatology*, Vol. 19, pp. 1337-1356, 1999.
19. Pardo-Igúzquiza, E., "Comparison of geostatistical methods for estimating the areal average climatological rainfall mean using data on precipitation and topography," *International Journal of Climatology*, Vol. 18, pp. 1031-1047, 1998.
20. Prudhomme, C. and Reed, D.W., "Relationships between extreme daily precipitation and topography in a mountainous region. A case study in Scotland," *International Journal of Climatology*, Vol. 18, pp. 1439-1453, 1998.
21. Krstanovic, P. F. and Singh V. P., "Evaluation of rainfall network using entropy: I. Theoretical development," *Water Resources Management*, Vol. 6, pp. 279-293, 1992.
22. Krstanovic, P. F. and Singh V. P., "Evaluation of rainfall network using entropy: II. Application," *Water Resources Management*, Vol. 6, pp. 295-314, 1992.
23. Kassim, A. H. M. and Kottegoda, N. T., "Rainfall network design through comparative kriging methods," *Hydrological Sciences-Journal-des Sciences Hydrologiques*, Vol. 36, No. 3, pp. 223-240, 1991.
24. Amorocho, J; Esplidora, B., "Entropy in the assessment of uncertainty of hydrologic

- systems and models,” *Water Resources Research* . v. 9 p. 1522–1551. 1973.
25. Shannon, C. E. and Weaver, W., “Mathematical theory of communication,” University of Illinois Press, IL, 1949