

利用空間統計及權重法進行土石流潛勢溪流

雨量站網規劃

洪勝雄⁽¹⁾ 李心平⁽²⁾ 葉惠中⁽³⁾ 蘇意筑⁽⁴⁾ 李威霖⁽⁴⁾

摘要

台灣地區因地理環境的因素易受颱風豪雨的侵襲，颱風豪雨除在平原區帶來淹水的災害外，在山區也有可能造成嚴重的土石流災害，有鑑於氣候環境的變遷導致降雨型態的改變，評估雨量測站能否滿足土石流防災業務的需求，已是重要之課題。

本研究蒐集大台北地區 1998 年至 2013 年颱風及豪雨事件雨量資料，利用克利金推估法計算試驗半變異元，並進行不同模式的理論半變異元套配，透過交叉驗證並引入克利金均方誤差 (KAE) 及克利金平方誤差 (KRMSE) 檢定模型適配程度，評估成果顯示雨量站觀測範圍為半徑 5 公里；透過雨量站觀測範圍評估成果將大台北地區進行網格劃設進行雨量站密度檢討，經評估格網內有土石流潛勢溪流而卻欠缺雨量站網格共計 38 個；為瞭解各欠缺雨量站格網設站的順序，本研究透過循序演算法及現有雨量站空間特性、等加權因子進行檢討，以評估設站優先順序；最後為瞭解新增雨量站的效益，本研究利用克利金變異數推估與空間分析，經評估各區潛勢溪流與鄰近雨量站距離均可縮減至 5 公里以下；此外，研究成果亦發現在新增 10 站雨量站時，克利金變異數下降幅度較高，增站效益較佳。

(關鍵詞：土石流、克利金法、雨量站網評估)

The Rain Gauge Planning for Debris Flow Monitoring Using Spatial Statistics and Weight Factor Method

Sheng-Hsiung Hung⁽¹⁾ Shin-Ping Lee⁽²⁾ Hui-Chung Yeh⁽³⁾ Yi-Chu Su⁽⁴⁾

Wei-Lin Lee⁽⁴⁾

Senior Specialist of Agriculture Department, New Taipei City Government⁽¹⁾ Vice Director of DPRC, National Cheng Kung University⁽²⁾ Associate Professor of Nature Resource Department, Chinese

(1) 新北市政府農業局簡任技正

(2) 國立成功大學防災研究中心副主任(通訊作者 e-mail: morris@dprc.ncku.edu.tw)

(3) 文化大學土地資源學系副教授

(4) 國立成功大學防災研究中心監測組工程師

Culture University⁽³⁾ Engineer of DPRC, National Cheng Kung University⁽⁴⁾

ABSTRACT

Due to the geographical environment conditions, Taiwan frequently suffers from severe typhoons and rainfall events. These events cause not only flooding disasters in the plain area but also the debris flow disasters in mountainous areas. Climate change further changes the rainfall patterns. Therefore, a reliable rainfall gauge observation network is important to support disaster prevention works. This study researches on improving rainfall gauge observation network. An experimental semi-variogram is used to fit different types of theoretical variogram models using collected rainfall data of typhoon and rainfall events from 1998 to 2013 in Taipei area. The appropriate theoretical variogram model is determined with the KAE and KRMSE methods. The analysis result shows that the observation range of rain gauge is about 5 km. Through the foregoing results and reviewing the number of rain gauges in Taipei area. After generating 5 by 5 km grids for Taipei area, we found 38 grids which have potential debris flow risk but lack of rain gauges. In order to assess the priority of rain gauges establishment, this research applies the sequential algorithm with the spatial property and weighting factors to evaluate the benefits for each potential new rain gauges. Kriging variance and spatial analysis are adopted for this assessment. After assessment, the distance between the potential debris flow area and rain gauge nearby can be less than 5 km. Furthermore, the results show that the value of kriging variance will decrease and also have better benefits when 10 rain gauges are established.

(Keywords : Debris flow, Kriging, Rain gauge network)

前言

有鑑於氣候環境的變遷，極端水文事件發生的機率與規模都逐漸攀升，防災作為應由傳統的硬體工程建構，轉換為硬體與軟體整合性的策略方能減低災害損失；以莫拉克颱風對台灣中南部地區造成嚴重災害的經驗，預防性的避難疏散甚或災中的緊急撤離，將是降低災害傷亡的重要手段，因此如

何強化災害來臨前災害潛勢區資訊之整合，及早啟動保全住戶的應變機制，是未來防災減災的重要研究。

由於土石流發生的特性潛勢溪流均分布於山坡地地區，山區降雨的空間分布受到地勢、高程或迎風、背風面的影響，而導致鄰近地區降雨強度與累積量極大的差異性；土石流避難疏散作業或相關的防災預警作為，主要的參考資料為土石流集水區的降

雨量；為強化土石流防災預警作業，本研究以新北市為研究對象，針對區內土石流潛勢溪流分布情形及其警戒參考雨量站進行空間分析與檢討，評估目前選定代表雨量站對於土石流潛勢溪流集水區降雨量推估之代表性，如：雨量站距離土石流溪流過遠或空間差異性過高而不具代表性時，則透過空間統計分析評估，新增雨量觀測站，做為相關業務單位後續增建雨量觀測站之參考；希冀藉由土石流潛勢溪流現有雨量站網檢討及雨量站增設評估以瞭解新設雨量站在空間降雨的解析能力，期能透過雨量站的增設提升土石流溪流集水區降雨觀測資料的精度以強化土石流災害預報的準確度，作為未來發布土石流警報、避難疏散及防救災應變措施參考。

文獻回顧

大自然中有許多現象均可以被視為隨機變域，例如：降雨、氣溫等，因其不同空間的隨機變數間並非完全獨立，而與鄰近區位的資料，可能具有不同程度的相關性，則該隨機變數所代表之物理量即為區域化變數。空間統計學是近年來廣為使用的一種內插方法，可有效推估未知點與觀測點之間的空間相關性。

法國數學家 G. Matheron 教授與地質工程師 D. G.Kriging 等人於 1962 年提出『地質統計學』，再於 1971 年提出命名為『克利金』推估法。經過多年演進，目前克利金推估法為空間統計最常使用的方法，依據不同的假設及用途，分別為一般克利金法及迴歸克利金法，一般克利金法主要應用於利用單一屬

性資料進行空間資料之推估；而迴歸克利金法則可加入輔助變數，做為將空間推估的輔助資訊。

Delhomme(1979)曾運用克利金估計法於未設站河川進行流量評估，其將各測站之最大流量視為區域化變數，求得其試驗與理論半變異元，並評估未設站區域內之最大流量分布情形。Chua 和 Bras 採用克利金估計法，用兩種不同的雨量空間平均值變化進行山區降雨量推估，並針對雨量變異元在不同地形高度下所產生的變化情形加以探討。Bastin 等人(1984)則指出雨量變異元在不同季節與降雨條件下有不同的性質，故進行克利金估計法推估雨量時，對於變異元模式之選擇應同時考慮季節即降雨條件。Warrick 等人(1986)利用地理統計法來探討土壤物理性質在空間上分布之變異。Rouhani 和 Cargile 等人利用通用克利金法研究河川流量並依照其空間變異結構來預測河川流量之季節性變動，最後配合水庫操作模式以預測下次乾旱發生的時間。Cheng 等人(1998)利用指標克利金法來進行水庫水質之評估。Cheng 等人(2000)探討克利金估計法於時間序列分析等模式應用於乾旱發生之預測，比較兩種不同模式，發現克利金估計法有較佳之結果。鄭克聲等人(1997)針對台灣北部地區將克利金估計法應用於設計暴雨量之推估，並將其結果繪製成圖以利後續研究者查詢及應用。

由於利用觀測值所計算之試驗半變異元並不是連續的圖形，且沒有辦法滿足條件半正定的特性，因此在實際應用時必須先套配成連續性的理論半變異元來進行雨量推估。因此，為檢視所選取的理論半變異元模

式之優劣及利用克利金估計法推估時所作的假設是不是合理，國內外有許多利用交叉驗證來檢定模型優劣的經驗，引入的指標有克利金平均誤差(KAE，Kriging Average Error)、克利金均方誤差(KRMSE，Kriging Reduced Mean Square Error)、均方根誤差(RMSE，Root Mean Square Error)等，皆利用模型假設特性來對推估合理性來進行優劣檢定，例如 Everett(1987)即利用 KAE 及 KRMSE 來檢定土壤構造水文分析中浸潤參數模型推估結果之無偏性及一致性，Sarangi 等人(2005)亦利用上述兩種指標來驗證地理統計法對山區降雨量推估之合理性，Kumar(2006)亦根據它們來了解克利金推估法應用於地下水水位推估是否合宜。

雨量站網評估與設計的部分，Hughes and Lettenmaier (1981) 則引進地理統計中之克利金以評估雨量站網。Krstanovic and Singh (1992) 則應用資訊熵評估雨量站網之不確定性。王如意、鄭士仁(1993)利用克利金法研究基隆河流域之降雨深度最佳估計及區域雨量站網之規劃設計。許敏楓(1993)探討淡水河流域之雨量站空間變異及站網設計之研究。葉惠中(2000)應用區域化變數理論之克利金估計法與隨機變域模擬之 HYDRO-GEN 繁衍法評估雨量站既有站網，其結果發現以全域克利金變異數為選站之標準能夠探討整個區域之降雨變化情形。衛強(2011)應用地理統計中之克利金及資訊熵(entropy)理論，提供一套評估集水區既有雨量站觀測網適用性之方法。連琮勛(2014)針對不同降雨類型利用地理統計進行降雨空間變異特性分析，選取較適合的降雨空間變異特性。

研究方法與流程

本研究依觀測雨量資料、土石流潛勢溪流空間分布等資料，透過空間統計分析、站網分析等方法進行新北市土石流潛勢溪流觀測雨量站網檢討評估，除針對新北市都會區邊緣山區現有土石流災害預警所參考的雨量站外，亦透過現有雨量站及土石流分布利用空間統計進行檢討，完成雨量資訊不足的區域配合圖面作業進行新增雨量站的規劃後，進行現地勘查確定土地及通訊的可行性。最後，完成新增雨量站的建議及相關報告的撰寫，相關的作業流程規劃如圖 1，並將各階段所使用的方法簡介如下。

1. 土石流溪流及現有雨量站分布評估

以新北市現有的土石流參考雨量站與土石流潛勢溪流空間分布狀況來看，三芝區參考雨量站為富貴角雨量站，轄內土石流潛勢溪流(3 條)與其參考雨量站之水平距離中位數為 24 行政區中最遠(平均值：6.2 公里、中位數：6.9 公里)，三峽區、汐止區及新店區轄內溪流與其參考雨量站之平均水平距離(平均值：4.5、4.4 及 4.1 公里、中位數：5.2、3.6 及 3.8 公里)雖與新北市全區的平均值(3.6 公里)相差不大，但是其距離全距為 7.6~8 公里，為所有行政區區內差異最大，代表區內有的土石流潛勢溪流距離參考雨量站有的很近，有的則相當遙遠，其距離的差異程度很高，如圖 2 所示。

2. 土石流雨量站網空間統計分析

自然界的諸多現象多具有時間或空間上的變異，研究這些現象時，只能針對時間或空間上的一個點為之，而這些物理量之變異被以隨機變數來描述之，然不同時間或

空間點上之隨機變數未必相同，且各隨機變數形成一隨機變域。

雨量站網所蒐集之降雨資料是否足以說明降雨量在其空間範圍內之分布特性，實取決於兩個因素，分別為雨量站網在空間中之配置及降雨量本身之空間變異特性。為瞭解新北市降雨量空間變異特性，蒐集過去降雨事件資料，並對其進行空間統計分析，以作為後續站網分析及設計之依據，茲將本研究空間統計分析流程如圖 3 所示。

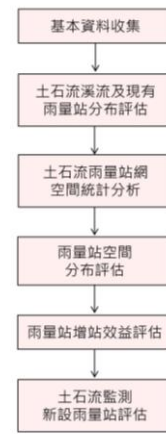


圖 1 新設雨量站研究流程圖

Figure 1. The flow chart of rain gauge valuation research

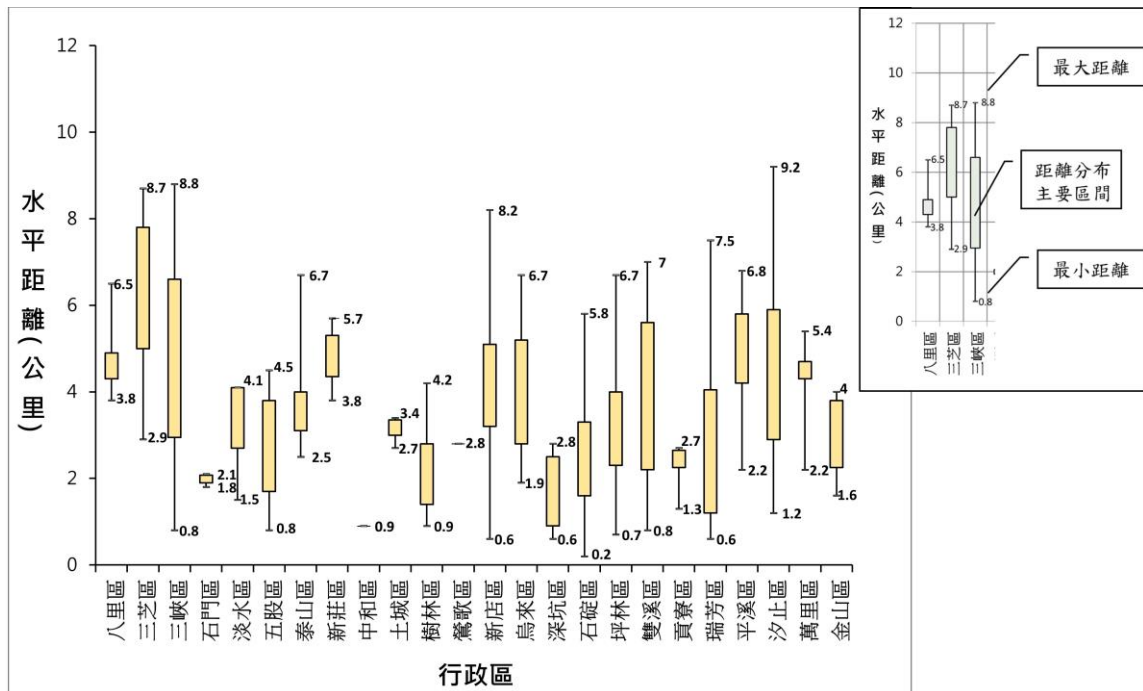


圖 2 新北市土石流溪流集水區與現有雨量站距離盒鬚圖

Figure 2. The box-plot of the distance between current rain gauges and the watershed of potential debris flow torrent in New Taipei City

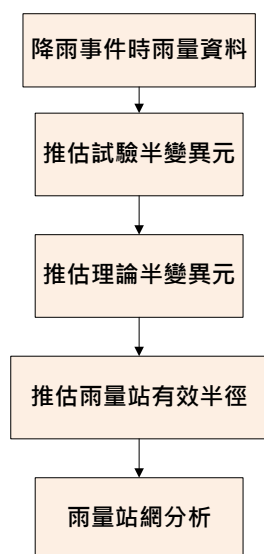


圖 3 雨量站網空間統計分析流程圖

Figure 3. The flow chart of spatial statistical analysis of rain gauge network

空間上不同位置之各隨機變數間並非完全獨立，而可能具有不同程度之相關性，則該等隨機變數所代表之物理量即被稱為區域化變數(regionalized variables, Re.V.)。換言之，具有特殊空間變異結構之性質即為區域化變數，若以 $Z(x)$ 代表一區域化變數， x 為空間中之位置向量，且在 $x_1, x_2, \dots, x_n$ 等位置之觀測值為 $Z(x_1), Z(x_2), \dots, Z(x_n)$ ，且 $Z(x_0)$ 為未知，其空間分布應滿足下列兩個特性，第一：在局部地區呈現隨機性，即 $Z(x)$ 為隨機、不規則之隨機變數；第二：就整體而言呈現結構性，空間中任意兩個點距離與其隨機變數差間具某種程度的相關性，即 $Z(x)$ 具有結構化之空間變異。克利金推估法乃藉由空間已知觀測點對未知點求得最佳線性不偏推估(best linear unbiased estimate，簡稱 BLUE)的方法。其中最常見的是一般估計法(ordinary kriging)，假設隨機變數 $Z(x)$ 滿足

本質性假設(intrinsic hypothesis)，則空間中任意兩個位置的隨機變數之差的期望值為兩點間距離的函數，即：

$$E[Z(x) - Z(x+h)] = m(h)$$

，而其變異數只與空間中兩個位置間的相對距離有關，即

$$\text{Var}[Z(x) - Z(x+h)] = 2\gamma(h)$$

；其中 $\gamma(h)$ 稱為半變異元(semi-variogram)，代表隨機變域之空間變異結構。另外，隨機變數 $Z(x)$ 之推估值為觀測值的線性組合，為求得最佳且唯一之估計權重 λ_i ，必需滿足式 1 及式 2。滿足式 1 及式 2 之 λ_i 可有許多組，故克利金推估法要求 λ_i 必須使得推測誤差變異數為最小，即式 3。為求解 λ_i 使之同時滿足式 1 及式 2，可引用拉格蘭吉乘數 (lagrangian multiplier) μ ，使得式 4 有最小值。將式 4 分別對 λ_i 及 μ 取偏微分，並令其微分式為 0，可得克利金系統方程式(kriging system equation)即式 5，以矩陣形式表為式 6

$$Z^*(x_0) = \sum_{i=1}^n \lambda_i Z(x_i) \quad \text{式 1}$$

$$\sum_{i=1}^n \lambda_i = 1.0 \quad \text{式 2}$$

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

$$L = \text{Var}[Z^*(x_0) - Z(x_0)] - 2\mu \left(\sum_{i=1}^n \lambda_i - 1 \right) \quad \text{式 4}$$

$$= E[Z^*(x_0) - Z(x_0)]^2 - 2\mu \left(\sum_{i=1}^n \lambda_i - 1 \right)$$

$$\sum_{j=1}^n \lambda_j \gamma(x_i - x_j) + \mu = \gamma(x_0 - x_i) \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad \text{式 5}$$

$$\sum_{i=1}^n \lambda_i = 1.0$$

$$\begin{bmatrix} \gamma_{11} & \gamma_{12} & \cdots & \gamma_{1n} & 1 \\ \gamma_{21} & \gamma_{22} & \cdots & \gamma_{2n} & 1 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ \gamma_{n1} & \gamma_{n2} & \cdots & \gamma_{nn} & 1 \\ 1 & 1 & \cdots & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \lambda_1 \\ \lambda_2 \\ \vdots \\ \lambda_n \\ \mu \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \lambda_{10} \\ \lambda_{20} \\ \vdots \\ \lambda_{n0} \\ 1 \end{bmatrix} \quad \text{式 6}$$

3. 試驗半變異元推估

半變異元函數代表降雨資料之空間變異情形，為克利金推估法之重要核心。由觀測值 $Z(x)$ 所求計算求得之半變異元稱為試驗半變異元。

假設在降雨資料空間中，已知雨量站空間位置 $x_1, x_2, \dots, x_n$ ，其雨量觀測值分別為 $z(x_1), z(x_2), \dots, z(x_n)$ ，當 $Z(x)$ 為定常性隨機變域，則 $E[Z(x_i)] = E[Z(x_j)]$ ，故試驗半變異元可由式 7 求得，即：

$$\gamma(x_i - x_j) = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \left\{ \frac{1}{2} [Z(x_i) - Z(x_j)]^2 \right\} \quad \text{式 7}$$

其中 n 為 x_i 與 x_j 之配對個數，為空間向量位置 x_i 與 x_j 之相對距離。

若 $Z(x)$ 為非定常性隨機變域，則其試驗半變異元可由式 8 來求得，即：

$$\gamma(x_i - x_j) = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \left\{ \frac{1}{2} [Y(x_i) - Y(x_j)]^2 \right\} \quad \text{式 8}$$

其中 $Y(x) = Z(x) - M(x)$ ，為空間中不規則之變動值(Erratic Fluctuations)，期望值為零，而 $M(x)$ 為一緩慢變化之定率函數(Deterministic Function)，稱為區域平均值(Drift)，其值為隨機變域在該處之期望值， $M(x) = E[Z(x)]$ 。利用上述計算公式，並依據以下所述之 4 個步驟，則可計算求得試驗半變異元模式。

(1) 計算所有觀測點配對之配對距離，並依等距離區分為若干區間。

(2) 計算每一區間內觀測點之配對個數。

(3) 計算每個區間內所有配對個數之距離與變異元的平均值，並視為該區間之代表距離與變異元值。其中平均距離與平均變異元值得計算公式別為式 9 及式 10。

$$\bar{d}_i = \frac{1}{n_i} \sum_{j=1}^{n_i} d_{ij}, \quad i = 1, 2, \dots, m \quad \text{式 9}$$

$$\bar{\gamma}_i = \frac{1}{n_i} \sum_{j=1}^{n_i} \left[\frac{1}{2} (Z_1 - Z_2)_{ij}^2 \right], \quad i = 1, 2, \dots, m \quad \text{式 10}$$

其中 d_{ij} 表示為第 i 個區間內第 j 組配對數之距離，而 $(Z_1 - Z_2)_{ij}$ 表第 i 個區間內第 j 組配對數之觀測值差， n_i 為第 i 個區間內之配對個數。

(4) 連接所有區間之代表變異元值，即可求得試驗半變異元。由於試驗半變異元並非一個連續性的圖形，且不滿足半正定的特性，無法藉由試驗半變異元來進行雨量推估，因此在應用上必須先進行模型的套配，選定各模式之下與試驗半變異元誤差最小之最佳化理論半變異元。

4. 土石流雨量站網空間統計分析

試驗半變異元由數個不連續點所構成的圖形，實際應用時需以連續性的模式套配後方能用於克利金估計法，此連續性模式稱為理論半變異元。理論半變異元模式必需滿足條件半正定之特性，才能有效且完整地表現出空間變異結構關係，常用之理論半變異元模式有下列四種。

(1) 次方模式 (Power Model)

$$\gamma(h) = \omega h^\lambda \quad (\lambda < 2) \quad \text{式11}$$

(2) 球體模式 (Spherical Model)

$$\gamma(h) = \omega \begin{cases} \frac{3}{2} \left(\frac{h}{a} \right) - \frac{1}{2} \left(\frac{h}{a} \right)^3 & (h \leq a) \\ 1 & (h > a) \end{cases} \quad \text{式12}$$

(3) 指數模式 (Exponential Model)

$$\gamma(h) = \omega \left[1 - \exp\left(-\frac{h}{a}\right) \right] \quad \text{式13}$$

(4) 高斯模式 (Gaussian Model)

$$\gamma(h) = \omega \left[1 - \exp\left(-\left(\frac{h}{a}\right)^2\right) \right] \quad \text{式14}$$

當半變異元模式 $\gamma(h)$ 套配完成後，便可以描述該隨機變域之空間結構特性，並提供克利金估計法來進行位點之最佳推估。計算克利金試驗半變異元，並利用指數模式、次方模式、球體模式及高斯模式與樣本誤差最小時的參數及其相關係數，並求出最佳推估值。

本研究利用大台北地區氣象局與水保局所轄 40 個雨量站，由於目前並無降雨事件選擇的依據方法，且降雨特性受限於區域

環境影響而有所差異，因此本研究選定不同的參數依據後，從歷年降雨資料交叉比對後，選定測站中時雨量大於 60mm/hr 之強降雨且同時間內所選雨量站中必須超過三分之一站數之時雨量大於 10mm/hr 之降雨事件進行統計分析，共計有 53 場降雨事件。

試驗半變異元的計算需先設定單位距離做為影響範圍推估的組距，影響範圍的值域表現上為連續離散資料，因此可以避免碎塊效應(Nugget effect)，將 53 場歷史降雨資料按組距分類後得到一個平均值，以該值做為模式的匹配依據，本研究將影響範圍長度分為 15 個組距，故圖面(圖 4)呈現上僅有 15 點。

針對各模式之相關係數以及統計模式與統計樣本比較結果所得之相對誤差進行分析，指數模式與球體模式在相關係數與誤差表現較好(表 1)，但因指數模式分布較接近實際空間分布現象，因此本研究選用指數模式進行後續的推估。

由於不同模式推估成果，在空間上的所呈現的統計特性與 a 值有高度的關聯性，其中指數模式之影響範圍為 $3a$ ，球體模式之影響範圍為 a ，高斯模式的影響範圍則為 $\sqrt{3a}$ 。距離延伸到影響範圍以外之事件是獨立的，而在影響範圍內則具有相關性。

根據指數模式結果顯示，利用半變異元推估新北市雨量站觀測值的影響範圍約為 28 公里($3a$, $a=9.46$)，其所代表的意義為雨量站 28 公里外的降雨與雨量站呈現無相關性，亦即無法反映在雨量觀測資料上。為考慮雨量站的空間代表意義以提高雨量站代表區域降雨現象的可信度，本研究選擇半變異元值小於 0.5 的影響範圍做為考慮土

石流分布的新增雨量站設站原則，其意義為希望新北市雨量站觀測結果至少能與區域降雨現象有 50% 以上的相關性。由理論半變異元計算結果顯示，理論半變異值為 0.5 的有效範圍應視為 5 公里，因此以新北市空間特性而言，各雨量站所代表的降雨資訊在空間僅約有 5 公里，亦即在雨量站 5 公里以外區域的降雨狀況將無法真確反映在雨量的觀測資料上。由於雨量站的有效觀測距離為 5 公里，將現有的土石流參考雨量站以 5 公里格網繪製格網，在大台北地區共計可分格為 102 個格網。由於本研究新設雨量站網規劃為以土石流防災預警為出發點，因此新設

雨量站網的規劃應先找出網格中含蓋有土石流潛勢溪流的位置，如圖 5 所示，藉由土石流潛勢溪流和 5 公里網格分布圖的套疊，從原本應新設雨量站的 62 網格中，可挑選出 43 處網格，即是考慮土石流防災預警需求的新設雨量站建議網格，如圖 5 中桃紅色標註的框線。

上述選出的 43 處網格中，部份網格內雖然沒有雨量站，但鄰近有中央氣象局管雨量站，因此並無優先設站的必要性，所以本研究將有類似情況的雨量站予以調整，最後建議新設雨量站 38 處的網格如圖 6 所示。

表 1 四種不同模式套配之變異元模式參數表
Table 1. Four kinds of theoretical variogram models

模式名稱	方程式	參數值	相關係數	誤差
指數模式	$\gamma(h) = \omega \left[1 - \exp\left(-\frac{h}{a}\right) \right]$	$w=1.21$ $a=9.46$	0.93	0.13
次方模式	$\gamma(h) = \omega h^\lambda \quad (\lambda < 2)$	$w=0.31$ $\lambda=0.40$	0.77	0.66
球體模式	$\begin{cases} \gamma(h) = \omega \left[\frac{3}{2} \left(\frac{h}{a} \right) - \frac{1}{2} \left(\frac{h}{a} \right)^3 \right] & (h \leq a) \\ \gamma(h) = \omega & (h > a) \end{cases}$	$w=1.22$ $a=24.60$	0.94	0.14
高斯模式	$\gamma(h) = \omega \left[1 - \exp\left(-\left(\frac{h}{a}\right)^2\right) \right]$	$w=1.19$ $a=9.59$	1	0.15

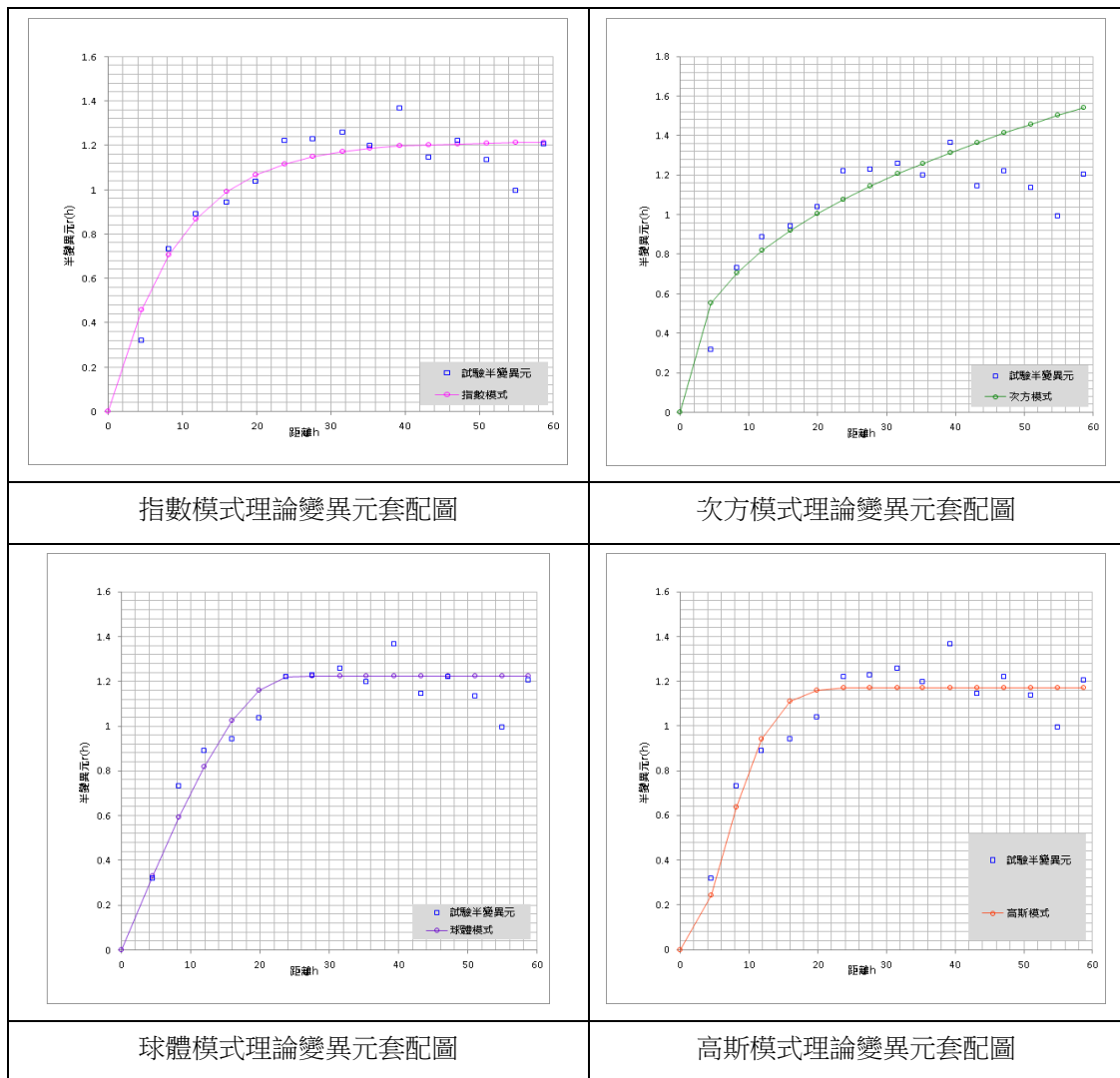


圖 4 各模式理論變異元套配成果圖
Figure 4. The results of four kinds of model

洪勝雄、李心平、葉惠中、蘇意筑、李威霖：
利用空間統計及權重法進行土石流潛勢溪流雨量站網規劃

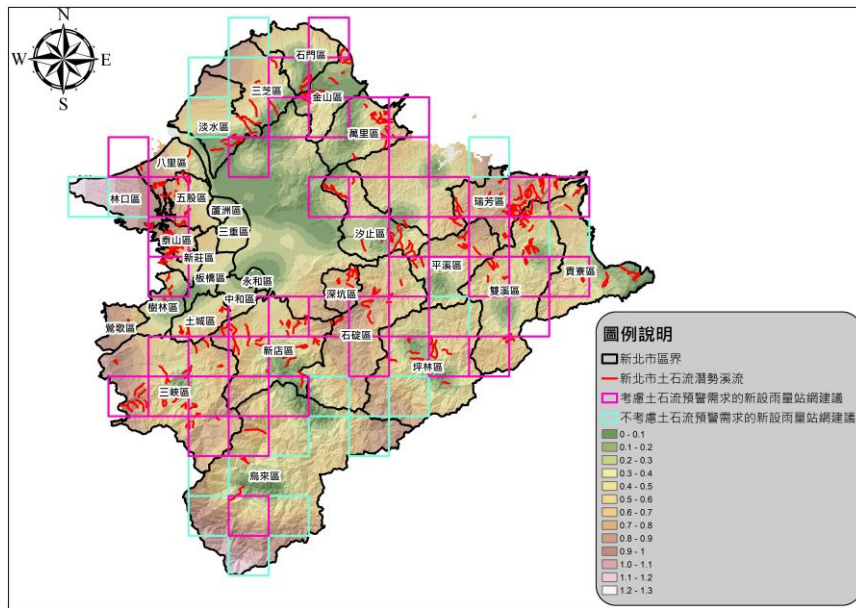


Figure 5. Considered the distribution of potential debris flow torrent to add rain gauges for suggested network

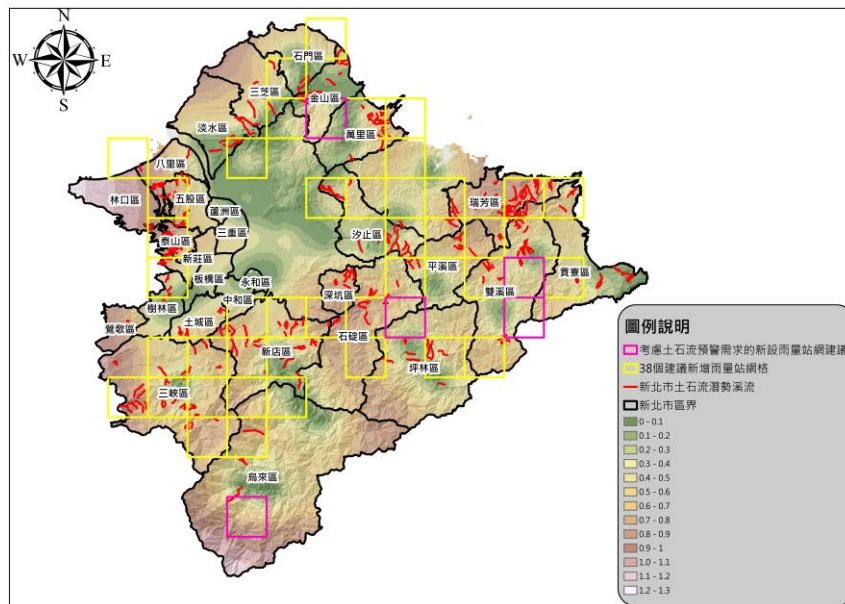


Figure 6. Suggested adding new rain gauge and the network distribution

5. 雨量站增站效益評估

雨量站網規模的選取，經常面臨著過大不合經濟效益或是太小沒有辦法有效獲得雨量資料等問題，因此合理的站網規模設計應同時考慮上述兩項因素，透過克利金估計法推估雨量所求得的克利金變異數作為站網分析的依據，不但可以充分了解降雨資料的空間變異特性，亦可有效評估其雨量站網配置的適當性。傳統的循序演算法(亦稱為減站式循序演算法)，站網評估方式是根據克利金變異數大小排序方法，依序遞減觀測站數目直到滿足需求為止，其克利金變異數應用於雨量站網評估中，推估變異數越小之測站即表示該站之可替代性越高，應優先捨棄；反之，從增站的觀點而言推估變異數越大的地點，表示該處的可替代性越低，應優先設置觀測測站。換而言之，評估研究區域內既有站網，可採用增站式循序演算法，其站網評估方式仍是根據克利金變異數大小排序方法，依序遞增觀測站之數目直到滿足需求為止，因此，不管是透過減站模式或是增站模式均需以循序演算法求得觀測站的優先順序表。因此，將研究區分割成均勻分布的網格點，在任意一次循序演算的過程中，均需要對每一個網格點計算其克利金變異數，再求其平均值以作為該研究區域之代表性克利金變異數，即為全域克利金變異數。

本研究所使用之循序演算法乃利用遞迴演算的步驟，評估增站的優先順序，其流程如下。

(1) 由 n 個已知的觀測站中任選一站，以第 i 站表之，並將該站設為待推測站，利用其餘 $(n-1)$ 個觀測站配合以計算求得之代

表性半變異元函數 $\gamma(h)$ ，估計該待推測站之克利金變異數，

(2) 將步驟 1 所選取之待推測站置回，並選取一新待推測站，以第 j 站表之，以其餘 $(j-1)$ 個觀測站推估第 j 站之克利金變異數。

(3) 重複步驟 1 及步驟 2，直到 n 個觀測站均曾被選用為待推測站為止。比較各站之克利金變異數大小，並註記具有最大克利金變異數者，則該站即為在 n 個觀測站中替代性最低，最應該設站者。

(4) 將替代性最低之站去除，將剩餘站點重複步驟一~三，直至所僅剩兩個站為主，先被去除之站則增站順序越後面。利用循序演算法完成變異數演算後，本研究結合土石流潛勢溪流分布及氣象局即時雨量站分布情況，然後針對上述 38 個初選作業來進行後續加值網格排序。新增雨量站圖面的初選作業為將土石流防災業務需求納入考慮，針對 38 個初選作業得到的設站評估網格之排序結果，結合土石流潛勢溪流分布及氣象局即時雨量站分布情況進行後續加值分析，針對 38 個待選網格進行權重分析，方法如下。

(1) 克利金循序演算法所得之排序，其排序順序越前面，表示其變異數越高，替代性越小，越應該設置雨量站，因此給予越高的分數，從第 1 順位~第 38 順位分別給予 38~1 分。

(2) 網格內所涵蓋的土石流潛勢溪流數量越多，該網格就越有雨量站設置之必要性，因此待選網格加權方式為該網格之土石流潛勢溪流總數量。

洪勝雄、李心平、葉惠中、蘇意筑、李威霖：
利用空間統計及權重法進行土石流潛勢溪流雨量站網規劃

(3) 將現有之氣象局即時雨量站進行 2.5 公里環域分析，並計算每個網格沒有被雨量站 2.5 公里環域範圍包含之面積，若該面積越大，表示該網格目前尚無鄰近雨量站對雨量變化能有準確的推估，有較大的必要增設雨量站，因此給分即為其未被雨量站 2.5

公里環域分析所涵蓋的面積。茲將選為設站評估網格之 38 個網格及新北市土石流潛勢溪流分布、雨量站 2.5 公里環域分析結果展繪於圖 7，並將各網格給分及正規化結果詳列於表 2 所示。

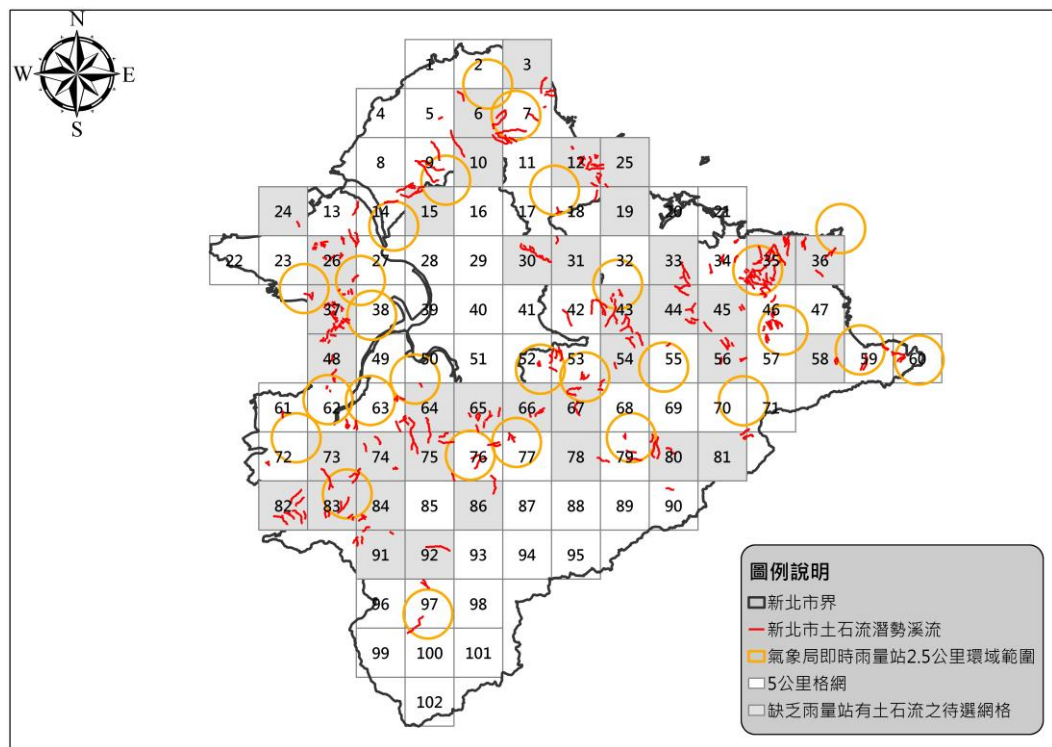


Figure 7. Potential debris flow torrent and buffering 2.5 meters at rain gauge of Central Weather Bureau in New Taipei City.

表 2 設站評估網格權重正規化成果分析。

Table 2. The result of network normalized weight for rain gauge evaluation.

網格編號	土石流潛勢溪流數	溪流數權重正規化	序數	序數給分	序數權重正規化	雨量站 2.5 公里環域範圍以外之面積(平方公尺)	雨量站 2.5 公里環域範圍以外權重正規化	權重加總
3	1	0	12	27	0.70	23.3	0.87	1.58
6	5	0.2	24	15	0.38	15.5	0.31	0.88
10	2	0.05	2	37	0.97	15.3	0.29	1.31
12	9	0.4	21	18	0.46	16.1	0.35	1.21
15	2	0.05	17	22	0.57	11.4	0.00	0.62
19	1	0	7	32	0.84	21.6	0.75	1.58
24	1	0	20	19	0.49	24.5	0.96	1.45
25	4	0.15	35	4	0.08	25.0	1.00	1.23
26	13	0.6	5	34	0.89	17.0	0.42	1.91
30	1	0	11	28	0.73	11.9	0.04	0.77
31	2	0.05	29	10	0.24	21.4	0.74	1.03
33	1	0	22	17	0.43	20.7	0.68	1.12
35	20	0.95	18	21	0.54	25.0	1.00	2.49
36	3	0.1	28	11	0.27	21.2	0.72	1.09
37	21	1	33	6	0.14	14.9	0.26	1.40
43	6	0.25	30	9	0.22	24.1	0.94	1.40
44	3	0.1	37	2	0.03	25.0	1.00	1.13
45	4	0.15	3	36	0.95	25.0	1.00	2.10
48	8	0.35	10	29	0.76	19.6	0.60	1.71
54	4	0.15	14	25	0.65	20.5	0.67	1.47
56	6	0.25	25	14	0.35	24.0	0.92	1.53
58	1	0	9	30	0.78	21.3	0.73	1.51
64	6	0.25	13	26	0.68	19.0	0.56	1.49
65	6	0.25	31	8	0.19	22.5	0.82	1.26
66	2	0.05	1	38	1.00	17.0	0.42	1.47
67	5	0.2	34	5	0.11	18.4	0.51	0.82
73	2	0.05	23	16	0.41	22.1	0.79	1.24
74	5	0.2	36	3	0.05	25.0	1.00	1.25
75	5	0.2	32	7	0.16	22.9	0.84	1.20
78	1	0	16	23	0.59	25.0	1.00	1.59
80	3	0.1	6	33	0.86	17.6	0.46	1.42
81	2	0.05	26	13	0.32	25.0	1.00	1.37
82	7	0.3	15	24	0.62	25.0	1.00	1.92
83	7	0.3	38	1	0.00	25.0	1.00	1.30
84	2	0.05	4	35	0.92	25.0	1.00	1.97
86	2	0.05	19	20	0.51	24.7	0.98	1.54
91	4	0.15	27	12	0.30	25.0	1.00	1.45
92	1	0	8	31	0.81	25.0	1.00	1.81

註：權重分數越高者，代表應優先設站

6. 新設雨量站優選評估

本研究針對建議 38 處新設雨量站的增站，除空間上克利金變異數分布來看外，亦針對如完成新設雨量站後新北市土石流潛勢溪流與參考雨量站距離之盒鬚圖來作檢視。

本研究利用各增站後空間上克利金變異數分布來檢視新設雨量站的預期成效，將規劃新設 38 站雨量站的空間分布位置套疊既有雨量站網克利金變異數分布成果如圖 8 所示，以此累計新北市地區空間內各克利金變異數的總合值，既有雨量站規劃下的克利金變異數總值為 4246。

針對納入新設 38 站雨量站後新北市地區各空間上克利金變異數分布圖如圖 9 所

示，從圖中可見新設站雨量站地區其克利金變異數明顯下降至 0.2 以下，同樣累計新北市地區空間內各克利金變異數的總合值，新設 38 雨量站規劃下的克利金變異數總值為 2217。

從圖 10 可知前 10 站新設雨量站的設站效益最高，新設 10 站雨量站後其正規化克利金變異數從原本 1.0 降至 0.6，其改善幅度將近 40%，其設站成效最好，由於本研究因應土石流防災預警需求來新設雨量站，剩餘 28 站的設站對於雨量觀測的成效提昇雖然沒有前 10 站來得高，但是剩餘 28 站各站皆臨近土石流潛勢溪流的位置，因此仍有設站的必要性，如此方是土石流防災為預警的設站思維。

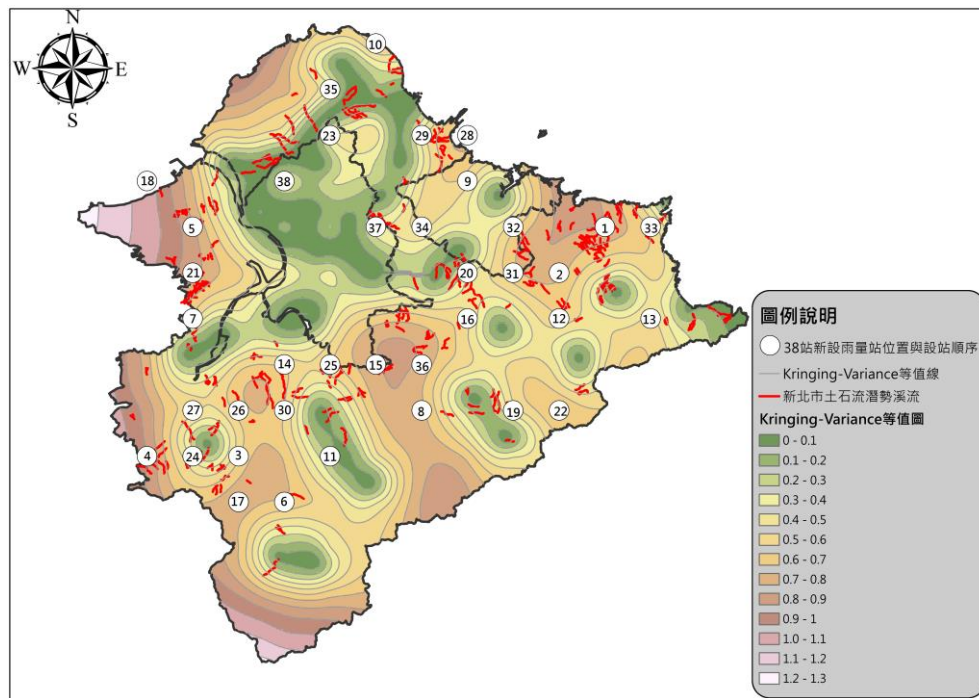


Figure 8. Distribution of Kriging variance about current rain gauge network

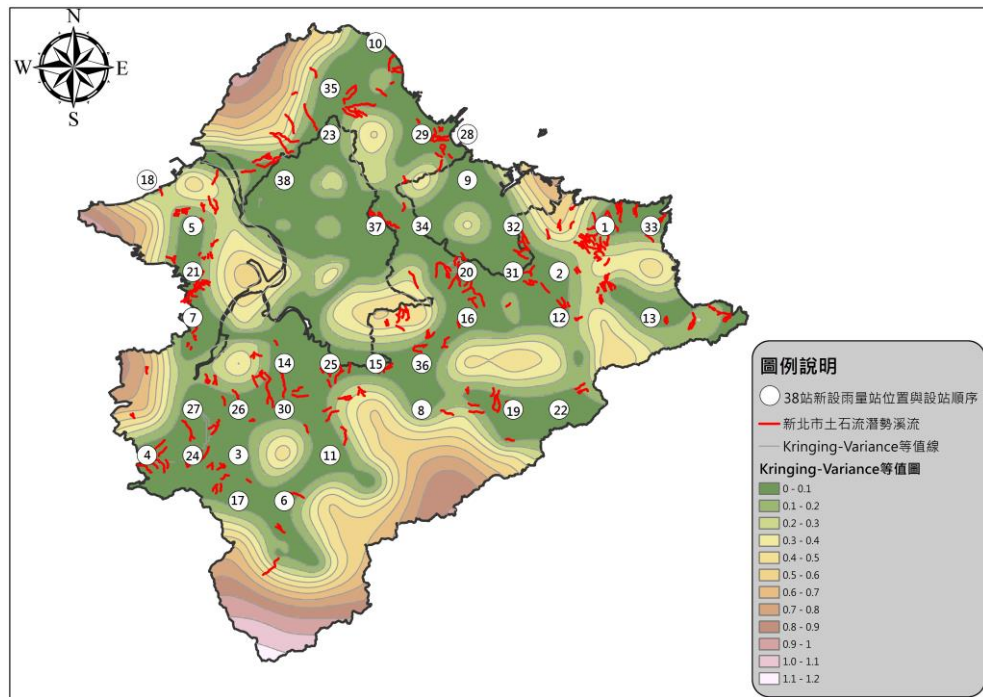


圖 9 新設 38 雨量站後網克利金變異數分布圖

Figure 9. Distribution of Kriging variance about setting up 38 new rain gauges

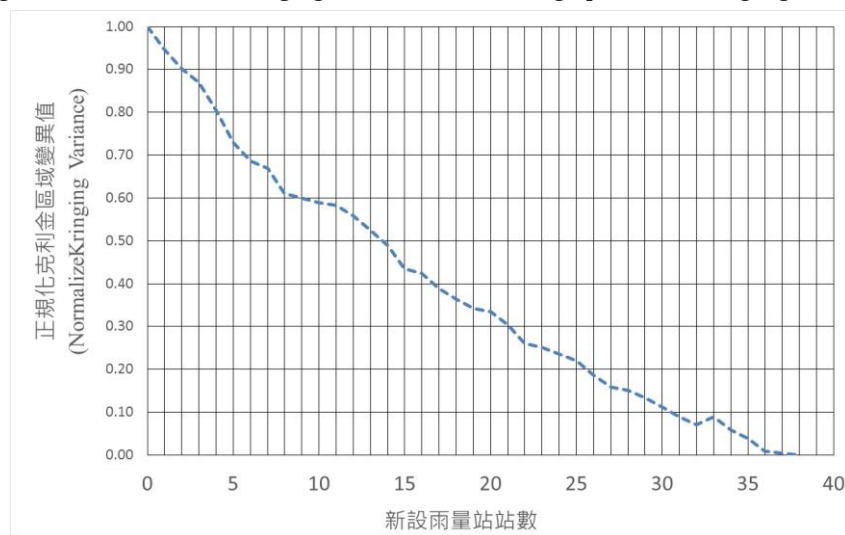


圖 10 新設第 38 站雨量各別增站後正規化克利金變異數變化圖

Figure 10. Change of normalized Kriging variance after adding 38 new rain gauge severally

此外本研究亦從土石流潛勢溪流集水區與既有雨量站網距離改變來探討設站效益，圖 2 為土石流集水區與既有雨量站網距離統計圖(盒鬚圖)，從圖中可以發現部分新北市區里的土石流集水區與既有雨量站網的水平距離超過 5 公里以上，誠如空間統計模式分析成果指出，用於土石流防災預警觀測的雨量站有效觀測半徑約為 5 公里，土石流集水區與既有雨量站網水平距離之第三四分位數，除平溪區、三峽區、烏來區、雙溪區及新莊區這 5 區外，皆大於 5 公里，但仍有許多地區溪流與參考雨量站距離最大值超過 5 公里甚至更遠接近 11 公里，表示區域內雨量站與土石流潛勢溪流之距離具有相當顯著的差異性分布。若將新設 38

雨量站納入後，其土石流集水區與雨量站網距離整體改變的狀況如圖 11 所示，新設雨量站後，所有地區之溪流雨量站距離大幅縮小，最大值皆小於 5 公里，區域內差異性也大幅度減少，顯示新增站結果非常理想。

在透過正規化克利金變異數說明設站效益時，新設雨量站排序前 10 站的設站效益最大，所以將前 10 名新設雨量站設立後的土石流集水區與雨量站網水平距離盒鬚圖繪製如圖 12 所示，如圖所示可見新設前 10 名雨量站後，地區溪流與雨量站距離之中位數及第三四分位數分布相較於未設站狀況(圖 2)已大幅度減小，整體成效已呈現大幅度改善。

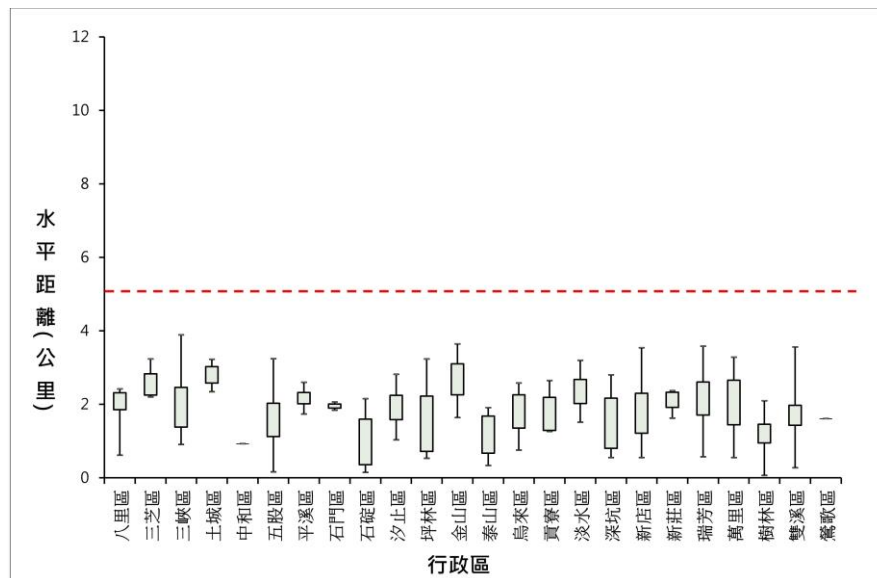


圖 11 新設 38 雨量站後土石流溪流集水區與雨量站網距離盒鬚圖。

Figure 11. The box-plot of the distance between suggested 38 new rain gauges network and potential debris flow torrent.

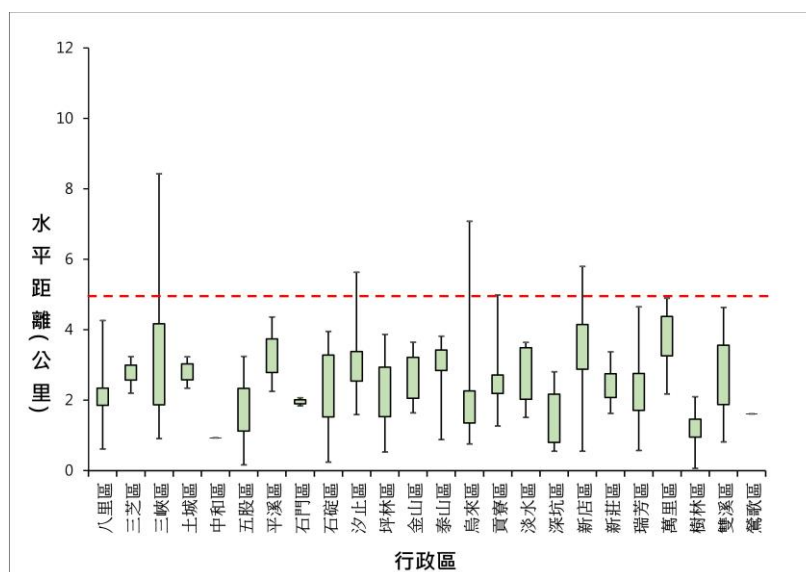


圖 12 排序前 10 雨量站設站後土石流集水區與雨量站網距離盒鬚圖。

Figure 12. The box-plot of the distance between the top 10 rain gauges network after setting and potential debris flow torrent.

結論與建議

本研究利用新北市轄內歷史颱風、豪雨事件雨量資料及土石流潛勢溪流集水區分布相關資料蒐集，針對土石流潛勢溪流及現有雨量站空間分布情形進行檢討，透過空間統計中的克利金推估法進行雨量站空間分布評估，並針對土石流災害預警所需之雨量站站址完成空間統計分析及交叉驗證，發現指數模式較符合本研究之雨量推估及雨量站網規劃之需求，且在新北市山區對於颱風、豪雨期間劇烈降雨，對於此一型態的降雨特性雨量站的觀測資料的代表半徑約為 5 公里。

針對現有雨量站、土石流潛勢溪流空間分布，本研究透過克利金變異數及權重因子進行增站評估，初步選定針對土石流防災需

求新增雨量站共計約 38 站，並針對新設雨量站利用循序演算法進行效益評估，評估成果顯示新增 10 站時增站效益最大，而後克利金變異數將隨增站而減少；亦即依序新增雨量站至第 10 站時變異數由 1 降低至 0.6，爾後陸續增加了 28 站，但變異數下降幅度有限，因此，新增 10 站左右其增站效益最大。

透過新北市降雨之空間分析及新增雨量站分析，發現若單純以循序演算法來進行排序之結果，並不足以求得符合現有土石流潛勢溪流空間分布之雨量站設站順序，因此本研究除循序演算法外，另外納入格網內土石流潛勢溪數量、現有雨量站之空間環域等因子來進行設站優選評估。而在因子選擇及計算方法方面在研究後續執行過程將持續依資料及災害特性進行探討與選用因子、權重之調整，如未來可考慮較多的因子，如土

石流保全住戶分布、土石流潛勢等級…等，並可透過專家法將項目分類來給分，或者透過方程式來率定加權的參數，則能夠設計更符合土石流防災需求之雨量站網規劃。

由於雨量資料為影響防災決策上的重要資訊，評估雨量站網之好壞以及雨量站設

置的適宜性為一項重要的工作；針對土石流潛勢溪流與參考雨量站應進行全面性的檢討並評估增設之可行性與必要性，以提高土石流相關雨量觀測資料的建置及防災預警的精度的強化，減低民眾面對土石流等坡地災害可能的傷亡與損失

參考文獻

1. 王如意、鄭士仁 (1993)，「降雨深度最佳估計方法之研究及其應用於區域雨量站網之規劃設計」，臺灣水利，41(3)，36-67。
2. 李明熹 (2006)，「土石流發生降雨警戒分析及其應用」，國立成功大學水利及海洋工程學系博士論文。
3. 孟河清 (1991)，「泥石流之發生和降雨」，第二屆全國泥石流學術會議論文集，143-148。
4. 吳積善、康志成、田連權、章書成 (1990)，「雲南蔣家溝泥石流觀測研究」，中國大陸科學出版社，中國。
5. 范正成、吳明峰、彭光宗 (1999)，「豐丘土石流發生降雨臨界線之研究」，地工技術，74，39-46。
6. 高力山、吳子青、劉振宇、張斐章 (2009)，「類神經網路於區域地下水砷濃度的推估」，臺灣水利，57(1)，1-12。
7. 莊凱偉、李達源、陳尊賢 (1996)，「地理統計預測污染土壤中重金屬的空間分布 II. 採樣方式之探討」，中國農業化學會誌，34(6)，683-694。
8. 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研究所碩士論文。
9. 張良正、蘇惠珍 (1992)，「通用克利金法於地下水觀測網規劃之應用」，地下水調查分析與保育管理論文集，191-205。
10. 張尊國、鄭克聲 (1994)，「石門水庫集水區人為開發對水質之影響」，第三屆水源水質水量保護區環境管理研討會。
11. 連琮勛、連政佳、吳宜珍、鄭克聲、潘宗毅、黃立遠、李正利、潘彥華 (2014)，「地理統計應用於臺北市山坡地雨量站網評估與調整」，Journal of Chinese Soil and Water Conservation，45(3)，155-164。
12. 葉惠中 (2000)，「區域化變數理論與隨機變域模擬在雨量站網設置之研究」，國立台灣大學生物環境系統工程學研究所博士論文。
13. 詹錢登、李明熹、陳晉琪 (2003)，「土石流設計流量之可靠度分析探討」，中華水土保持學報，34(1)，251-273。
14. 網干壽夫 (1972)，「集中豪雨とつサ土斜面の崩壊」，施工技術，5(11)，45。
15. 鄭森源、萬鑫森 (1994)，「地理統計學在土壤污染方面之應用」，中國農業化學會誌，32(4)，406-429。
16. 衛強、魏聰輝、葉惠中、陳彥璋、江介倫。

- (2011), 「利用地理統計及離散資訊熵進行雨量站觀測網設計之研究-以臺大實驗林轄區為例」, 作物, 環境與生物資訊, 8(1), 58-74。
17. 謝正倫 (2001), 「桃芝颱風土石流災害發生基準初步研究」, 土石流災害及其防治對策研討會論文集, 83-102。
18. Bastin, G., Lorent, B., Duque, C., and Gevers, M. (1984). "Optimal estimation of the average areal rainfall and optimal selection of rain gauge locations." *Water Resources Research*, 20(4), 463-470.
19. Caine, N. (1980). "The rainfall intensity: duration control of shallow landslides and debris flows." *Geografiska Annaler. Series A. Physical Geography*, 23-27.
20. Cannon, S. H., and Ellen, S. D. (1985). "Rainfall conditions for abundant debris avalanches, San Francisco Bay region, California." *California geology*, 38(12), 267-272.
21. Cheng, K. S., Lei, T. C., and Yeh, H. C. (1998). "Reservoir water quality monitoring using Landsat TM images and indicator Kriging." *In Proceedings of the 19th Asian Conference on Remote Sensing*, Manila, Philippine.
22. Cheng, K. S., Tsai, C. H., Yeh, H. C., and Hueter, I. (1999), "A new approach of image rectification by Kriging." *Annual Conference, American Society of Photogrammetry and Remote Sensing*, Portland, Oregon.
23. Cheng, K. S., Yeh, H. C., and Liou, C. Y. (2000), "A Comparative Study of Drought Forecasting by
- and network design." *Water Resources Research*, 17(6), 1641-1650.
25. Krstanovic, P. F., and Singh, V. P. (1992). "Evaluation of rainfall networks using entropy: II. Application." *Water Resources Management*, 6(4), 295-314.
26. Sarangi, A., Cox, C. A., and Madramootoo, C. A. (2005). "Geostatistical methods for prediction of spatial variability of rainfall in a mountainous region." *Transactions of the ASAE*, 48(3), 943-954.
27. Springer, E. P., and Cundy, T. W. (1987). "Field - scale evaluation of infiltration parameters from soil texture for hydrologic analysis." *Water Resources Research*, 23(2), 325-334.
28. Tait, A., Henderson, R., Turner, R., and Zheng, X. (2006). "Thin plate smoothing spline interpolation of daily rainfall for New Zealand using a climatological rainfall surface." *International Journal of Climatology*, 26(14), 2097-2115.
29. Villeneuve, J. P., Morin, G., Bobee, B., Leblanc, D., and Delhomme, J. P. (1979). "Kriging in the design of streamflow sampling networks." *Water resources research*, 15(6), 1833-1840.
30. Kriging and Time Series Analysis." *Journal of American Water Resources Association*, in press.
31. Kumar, M., Ramanathan, A. L., Rao, M. S., and Kumar, B. (2006). "Identification and evaluation of hydrogeochemical processes in the groundwater environment of Delhi, India." *Environmental Geology*, 50(7), 1025-1039.
32. Rouhani, S. (1985). "Variance reduction analysis." *Water Resources Research*, 21(6), 837-846.

33. Warrick, A. W., Myers, D.E., Nielsen, D. R. (1986). "Geostatistical methods applied to Soil Science", in: A.Klute(ed.)Methods of Soil Analysis, Part 1, 53-80.
34. Wiczorek, G. F. (1987). "Effect of rainfall intensity and duration on debris flows in central Santa Cruz Mountains, California." *Reviews in Engineering Geology*, 7, 93-104.
35. Wilson, R. C. (1997). "Normalizing Rainfall/Debris-Flow Thresholds Along the US Pacific Coast for Long-Term Variations in Precipitation Climate." In *Debris-Flow Hazards Mitigation@ Mechanics, Prediction, and Assessment*, 32-43. ASCE.

103 年 01 月 12 日收稿

103 年 01 月 21 日修改

103 年 04 月 29 日接受

水土保持學報 47 (3): 1465–1486 (2015)

Journal of Soil and Water Conservation, 47 (3): 1465–1486 (2015)