

關門雨量站之評估

賴建信⁽¹⁾ 游繁結⁽²⁾

摘要

水文資訊為水資源規劃、水工構造物設計及水利運轉之最基本構成要素。規劃良好之雨量站網將可提供足以代表該流域特性之精確且可靠的降雨資訊，雨量站位置之選定標準，包含取得之雨量資料需可代表該區域降雨特性、工作人員之安全及交通便捷等因素。經濟部水利署第四河川局所轄之關門雨量站地處偏遠之山區，交通極不方便，因此雨量站場之維護、儀器之維修及資料回收皆不易，此外人員之安全亦常受挑戰，因此有必要檢討該雨量站，以確保資料收集之準確性及方便性。

本研究將應用 Shannon 所提出之資訊熵 (Entropy) 理論，以評估關門雨量站於附近區域之重要性。基於統計觀念之熵值可用以量測不確定性，經由熵值之計算可了解流域中各雨量站將可透漏降雨資訊之多寡，因此可藉由熵之方法以計算雨量站間之不確定性及資訊之轉移，以了解流域中雨量站網中各雨量站之重要順序，此外亦可評估雨量站所含資訊之多寡，以作為是否需增減雨量站之依據。

(**關鍵詞**：集水區、熵、機率、雨量站、不確定性)

Evaluation of the Kranman Rain Gage Station

Chien-Hsin Lai

Graduate Student, Department of Soil and Water Conservation
National Chung-Hsing University, Taiwan

Fan-Chieh Yu

Professor, Department of Soil and Water Conservation
National Chung-Hsing University, Taiwan

ABSTRACT

Hydrometeorological data are the basic ingredients for the planning, design and operation of

(1) 經濟部水利署水源經營組正工程師

(2) 國立中興大學水土保持學系教授

water projects. In theory, a well-designed hydrometeorological network can accurately represent and provide the information of rainfall in the catchment. It is not only the safety of hydrologist but also the easy of access is considered in selection of rain gage station site to ensure that the optimum information is obtained. The Kranman rain gage station locating in the Choshei River watershed and operated by the fourth River Basin Management Bureau is remote and difficult to operate the rain gage station. Thus the usefulness evaluation of the Kranman rain gage station is necessary.

Information entropy proposed by Shannon is used to evaluate the Kranman rain gage station. Entropy based on probability can be used to measure uncertainty. It reveals the rainfall information of the each rain gage station in the catchment. By calculating the joint entropy and the transmitted information, the existing rain gage stations are prioritized. In addition, the saturation of rainfall information can be used to establish or remove the rain gage stations.

(**Keywords** : Catchment, Entropy, Probability, Rain gage station, Uncertainty)

一、前言

降雨資訊之收集為大氣水文與地表水文之介面，其為大氣水文之輸出資料，但為地表水文之輸入資料，因此對此二領域之研究皆十分重要。降雨資料之收集除可用以分析水文循環及提供水資源開發與管理所需資料外，亦可提供氣候變遷所需資料、用以降低大尺度與小尺度降雨研究誤差所需之資料、評估環境不確定性所需資料及評估及了解環境之脆弱性所需等資料。若集水區降雨資料之收集夠充足、收集之時間夠長且收集之密度夠大，則可確保水資源計畫之執行之成功，並可更安全開發可利用之水資源。然降雨常因地形、雨型、延時等因素，使其於空間及時間呈現不均勻之分佈，即使兩個非常靠近之雨量站，僅相距 5 公里，其降雨時間序列之相關係數也可能低於 0.5 (Campbell, 1983)，此現象加深雨量站網設計或調整之困難。

集水區降雨資料之收集需藉由雨量站網收集，雨量站網之設立需收集水文資料以滿足科學或實務應用所需，因此雨量站網之

規劃或調整對集水區水文資料之品質有相當大之影響。影響雨量站網之設立通常包含降雨型態、集水區特性、交通、人力及預算等因子，這些因子將會影響到雨量站之位置與密度，因此每一個集水區雨量站網之設立皆為一特殊之案例，無法套用到其他集水區。事實上不同集水區之雨量站數目有極大之差異，然如圖 1 (Langbein, 1960) 所示，雨量站之密度通常有與人口密度成正比之趨勢，因此早期雨量站之建置一般以人口密度或經費多寡為依據。除以人口密度作為雨量站密度之依據外，能源消耗亦可用以規劃雨量站密度 (Rodda, 1969)，然這些依據並非理想之方法，良好之雨量站網之規劃與調整需長期之觀測、相關理論之應用與經驗之累積，方能提供該集水區降雨特性之資料。國際氣象組織 (WMO) 提出雨量站網最小密度之建議為 (World Meteorological Organization, 1970)：

1. 溫和、地中海型及熱帶氣候地區之平地，每 600-900 km² 設置一雨量站。

2. 溫和、地中海型及熱帶氣候地區之山區，每 100-250 km² 設置一雨量站。
3. 具有高山且不規則降雨之島嶼，每 25 km² 設置一雨量站。
4. 極地每 1500-10000 km² 設置一雨量站。

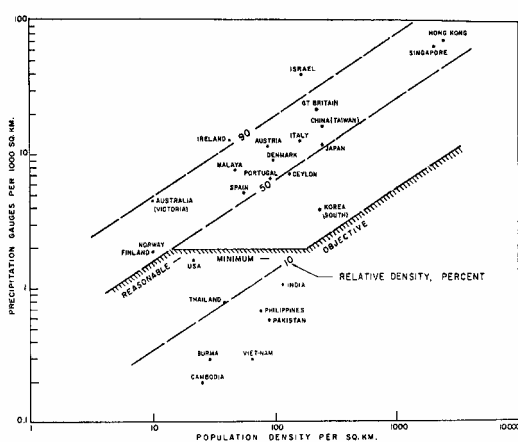


圖 1. 各國雨量站密度與人口關係
(Langbein, 1960)

Figure 1. The relation between the density of rain gage station and population
(Langbein, 1960)

若依 WMO 之建議，台灣應每 25 km² 設置一雨量站，顯然台灣山區雨量站稍有不足。當集水區雨量站不足時，Rycroft (1949) 與 Ganguli 等人 (1951) 則提出需新設雨量站之數目分別為

$$N = \left(\frac{2V}{X} \right)^2 \quad (1)$$

$$N = n \left(\frac{CV_E}{CV_R} \right)^2 \quad (2)$$

其中 N 為新設雨量站數目；V 為變異數；X 為要求準確率；n 為舊有雨量站數目；CV_E 為舊有變異數係數；而 CV_R 為需求之變異數係數。

過去雨量站網之研究主要考慮到雨量站間之距離，然對於降雨有相當大影響之高程 (World Meteorological Organization, 1970) 則較少有討論，雨量站網之研究曾採用經濟效益分析 (Duckstein et al., 1974)、變異數分析 (Shih, 1982)、空間相關函數 (Ferraro and Li, 2002)、克利金 (葉惠中, 2000; Hughes and Lettenmaier, 1981) 及資訊熵 (江介倫、鄭克聲, 2000; Krstanovic and Singh, 1992)，本文以地理統計中之資訊熵探討降雨於空間分佈之問題。有別於熱力學中以熵代表系統中之混亂程度，本研究中之資訊熵則可用以評估系統之不確定性，

二、資訊熵

氣體或物質皆有熱量，其為連續分子之動能總和，然不可能得知此些連續分子之狀態，如位置、速度或其他等特性，但可藉由 Boltzmann 於 1872 提出機與熱動力之機率量測概念的熵推估亂度 (Jou 等人, 2001)，其為

$$energy = -k \sum_j p_i \log p_i \quad (3)$$

其中 p_i 為第 i 個微狀態發生之機率。此概念乃藉由各微狀態之機率以推估巨觀狀態下之氣體或物質之亂度。

有別於熱力學之熵，Shannon 於 1948 提出以機率為基礎之資訊熵 (Shannon 1948)，熵值可用以量測不確定性或代表驚奇 (surprisal) 之程度 (Jessop, 1995)，其可以下式表示

$$surprisal = -\log(probability) \quad (4)$$

(4)式之結果可以圖 2 說明，驚奇程度與發生機率成反比，此外除於處理二進位之問題時使用以 2 為底之對數，一般使用以 e 為底數之對數處理通常之問題。驚奇之程度與資料之重要性或稀有性成正比，當資料十分珍貴不易獲得，其發生之機率必相當低，因此驚奇之程度相對比較高，而確定會發生之資訊，其機率為 1，所獲得之資訊量將為 0，因此也將無法由此一訊息獲得任何資訊；以水文資料收集為例，平常所收集到之資料皆為經常發生中低流量或一般之降雨量，其發生之機率相對較大，所收集到之資料並無太大之驚奇程度，因此對資料之收集之貢獻並不大，然高水位或暴雨發生之機率相對較小，所收集之資料並不常發生，因此驚奇程度也較大，而此時所收集到之資料將對資料庫有莫大之助益。

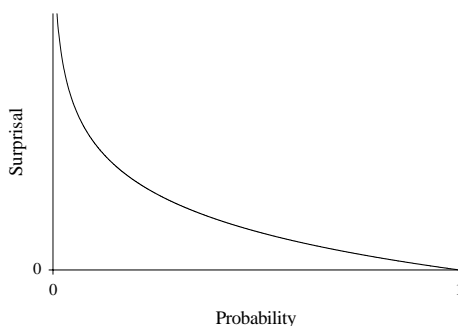


圖 2. 驚奇程度與機率關係

Figure 2. The relation between surprisal and probability.

(4)式可以下式之數學方程式表示

$$H(x) = -\log(p(x_i)) \quad (5)$$

其中 $H(x)$ 為熵值； x 為事件； $p(x_i)$ 為機率。若一事件可能有數種不同發生之機率，則可以下式表示熵值：

$$H(x) = -\sum_j p(x_i) \ln p(x_i) \quad (6)$$

因此可得知當不確定性為零時，其發生之機率將為 1，因此熵值將為零。當系統達到最大之混亂時，其所有發生之機率將相同，此時熵值將為最大，將為

$$H_{MAX} = -\sum \frac{1}{n} \ln\left(\frac{1}{n}\right) = -\ln\left(\frac{1}{n}\right) = \ln(n) \quad (7)$$

式中 n 值表示研究區域內同一時段內，有降雨紀錄之雨量站數量。

圖 3 說明在只有兩種結果可能發生之情形下，熵值將為

$$H(p, 1-p) = -p \ln p - (1-p) \ln(1-p)$$

，其 H_{MAX} 將發生在 $p = 1/2$ 時。

雨量站網中之雨量站所收集之資訊可能會相互重疊，此 2 雨量站之資料可視為 2 變數 x 與 y ，變數 x 與 y 間之聯合機率 p_{ij} 為可以下式表示

$$p_{ij} = p(x = x_i, y = y_j) \quad (8)$$

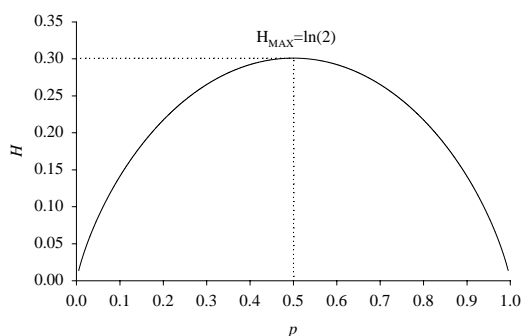


圖 3. 只有兩種結果發生下之熵值
Figure 3. The computed entropy with respects to probability.

而整體之資訊量可藉由聯合熵 (joint entropy) 推算，其為

$$H(x, y) = -\sum_i \sum_j p_{ij} \ln(p_{ij}) \quad (9)$$

(9)代表兩變數 (兩雨量站) 間之不確定性。與聯合機率分佈之特性相同，變數 x 與 y 個別邊際熵之和應大於或等於聯合熵

$$H(x, y) \leq H(x) + H(y) \quad (10)$$

同理 3 變數 (或 3 雨量站) x、y 與 z 之聯合熵將為

$$H(x, y, z) = -\sum_i \sum_j \sum_k p_{ijk} \ln p_{ijk} \quad (11)$$

其中 p_{ijk} 為變數 x、y 與 z 間之聯合機率。

當雨量站 x 測錄到降雨資訊時，雨量站 y 所剩下之不確定性將可以條件熵 (conditional entropy) 表示。當 y 發生狀況下 x 發生之條件機率可以下式表示

$$p(x|y) = p_{ij} = \frac{p_{ij}}{p_j} \quad (12)$$

故

$$\begin{aligned} H(x, y) &= -\sum_i \sum_j p_{ij} \ln(p_{ij}) \\ &= -\sum_j p(y) \ln(p(y)) - \sum_j p(y) \sum_i p(x|y) \ln(p(x|y)) \\ &= -\sum_j p(y) \ln(p(y)) - \sum_j p(y) \sum_i p(x|y) \ln(p(x|y)) \end{aligned} \quad (13)$$

(13) 式中之第一項即為條件熵 $H(x|y)$ ，而第二項中之條件機率 $\sum_i p(x|y) = 1$ ，因此將為變數 y 之熵值。故 (12) 可為

$$H(x, y) = H(x|y) + H(y) \quad (14)$$

而

$$p_{ij} = p(x|y)p(y) = p(y|x)p(x) \quad (15)$$

因此

$$H(x, y) = H(y|x) + H(x) \quad (16)$$

由(13)及(15)式可得知

$$H(x|y) \leq H(x) \quad (17)$$

此外條件熵可以下式推求

$$H(x|y) = -\sum_j \sum_i p_{ij} \ln p_{ij} \quad (18)$$

對同一變數（雨量站）之條件熵而言，則不會含有不確定性，因此條件熵將如下式，其值為零，

$$H(x|x)=0 \quad (19)$$

若要了解兩測站間共有或重複的資訊量，可藉由可轉移資訊（Transferable Information）之計算以求得，即可由 x 雨量站推估 y 雨量站的資訊。可轉移資訊量為

$$\begin{aligned} T(x,y) &= H(y) - H(y|x) \\ &= H(x) - H(x|y) \\ &= H(x) + H(y) - H(x,y) \end{aligned} \quad (20)$$

或

$$T(x,y) = \sum_i \sum_j p_{ij} \ln \frac{p_{ij}}{p_i p_j} \quad (21)$$

雨量站網中各雨量站之重要性可由熵值得知，經由排序之工作可顯示雨量站之優先順序，其中具有最大之熵值之雨量站表示其不確定性最大，因此該站應最優先被選入雨量站網。當第一雨量站決定後，系統與重複資訊量最小之雨量站將逐一加入雨量站網，以降低系統之不確定性，因此決定第二重要之雨量站加入順序之標準為

$$\text{Min}\{H(x_1) - H(x_1|x_2)\} \quad (22)$$

即選擇 $H(x_1|x_2)$ 為最大者。而第 j 個重要之雨量站加入之標準將為

$$\text{Min}\{H(x_1, x_2, \dots, x_{j-1}) - H[(x_1, x_2, \dots, x_{j-1} | x_j)]\} \quad (23)$$

因此在計算時可選擇 $H[(x_1, x_2, \dots, x_{j-1} | x_j)]$ 最大者，以此類推將全雨量站網內之測站之重複性依序排列，其中重複資訊最多的將為最後加入之雨量站。

經由熵值所得到之雨量站重要順序將可作為刪減測站之順序。至於何測站可刪減將以不確定性之增加幅度為準。當測站數目增加到一定數目後， $H[(x_1, x_2, \dots, x_{j-1} | x_j)]$ 將不再增加或變化不大，在增加雨量站對系統能提供之資訊將有限，故可經由測站數目與 $H[(x_1, x_2, \dots, x_{j-1} | x_j)]$ 以如下之指數模式、球體模式等相關模式，找出臨界資訊量與應設測站之數目。指數模式如

$$H(n) = \omega \left[1 - \exp\left(\frac{-n}{a}\right) \right] \quad (24)$$

球體模式則如

$$H(n) = \omega \left[\frac{3n}{2a} - \frac{1}{2} \left(\frac{n}{a} \right)^3 \right], n < a \quad (25)$$

$$H(n) = \omega, n \geq a \quad (26)$$

其中 ω 與 a 皆為待定之參數。

若雨量站網之雨量站數目大於應設測站之數目，則雨量站設站排序在應設測站數目後之雨量站將可進行減站。若雨量站網之雨量站數目小於應設測站之數目，則有增站之必要。

三、關門雨量站之評估

本研究之關門雨量站位於濁水溪流流域，為評估該站之降雨特性，其需評估週遭之雨量站降雨資訊，因此濁水溪旁之部分花蓮溪流流域之雨量站將用以評估關門站。濁水溪發源於合歡山主峰與東峰之「佐久間鞍部」，標高約高 220 m，主要支流有陳有蘭溪、清水溪及東埔溪，而濁水溪流流域位於台灣中部，東以中央山脈為界，南接本省第一高峰玉山，分水嶺有能高山、大石公山、丹大山、馬博拉斯山等。濁水溪幹流長度為本省河川之最長者，總長為 18660 km，而流域面積 3156.9 km²，僅次於全省河川之高屏溪流域，其流經之區域包含：南投縣（水里鄉、名間鄉、竹山鎮）彰化縣（二水鄉、溪洲鄉、大城鄉），以及雲林縣（林內鄉、荊桐鄉、崙背鄉、西螺鎮、麥寮鄉）等地區，並於彰化縣大城鄉之下海漚村與雲林縣麥寮鄉之許厝寮間流入台灣海峽。花蓮溪發源於花蓮縣中央山脈丹大山支脈之拔子山，其主要支流有木瓜溪、壽豐溪、萬里溪、馬鞍溪以及光復溪。花蓮溪幹流長度為 57.28 km，而流域面積為 1507.09 km²，河床平均坡度為 1/285，其流經之區域包含：花蓮縣之吉安鄉、壽豐鄉、萬壽鄉、鳳林鎮、光復鄉、秀林鄉、萬榮鄉以及花蓮市等地區。

關門雨量站為於濁水溪支流的丹大山集水區內，地處偏遠之山區交通不便，距離最近可車行之丹大林道仍需步行爬山約 3 小時，且山徑路況不佳，每遇颱風豪雨過後山路經常中斷，因此雨量站場之維護、儀器之維修及資料回收皆不易，此外資料收集人員需經常暴露於危險的環境中，故有必要檢討該雨量站，以確保資料收集之準確性及方便性。對於關門雨量站之評估，研究中採用濁水溪上游與花蓮溪上游山區部分雨量站，包含水利署與台電之設站，選取設站位置與資料期距較合適者，其中有濁水溪流流域大觀、青雲、西巒、內茅埔、郡大、武界進

水、卡奈托灣、丹大、萬大、奧萬大、關門站及花蓮溪流玉新東礦、新大觀、馬太安等十四站。其相對位置如表 1 與圖 4 所示。本研究所蒐集之資料範圍自 1985 年 9 月至 1998 年 10 月，資料需滿足所有雨量站皆同時降雨，經資料整理後，於 14 年之資料中，僅 624 小時降雨資料可供使用。

表 1. 研究之雨量站基本資料
Table 1. Information of rain gage station.

流域	站名	主管單位	TM2 度分帶	
			X 座標	Y 座標
花蓮溪	馬太安 (01T660)	水利署	286266.6	2618531.58
	新大觀 (01T760)	水利署	284488.0	2627756.03
	新東礦 (01T670)	水利署	288719.3	2633765.50
濁水溪	大觀 (41H530)	水利署	236420.5	2640272.49
	內茅埔 (U2H380)	水利署	234079.6	2621048.36
	西巒 (F2H430)	水利署	238586.6	2624704.81
	武界進水 (41H170)	水利署	255090.4	2645804.29
	郡大 (F2H420)	水利署	243195.6	2608890.33
	奧萬大 (41H230)	水利署	268659.9	2649507.06
濁水溪	萬大 (41H240)	水利署	261871.4	2653191.43
	關門 (01H450)	水利署	268154.2	2624373.29
	丹大 (41H740)	氣象局	261892.2	2627350.75
	卡奈托灣 (01H440)	氣象局	258551.4	2627348.39
	青雲 (40H730)	氣象局	243206.8	2632884.68

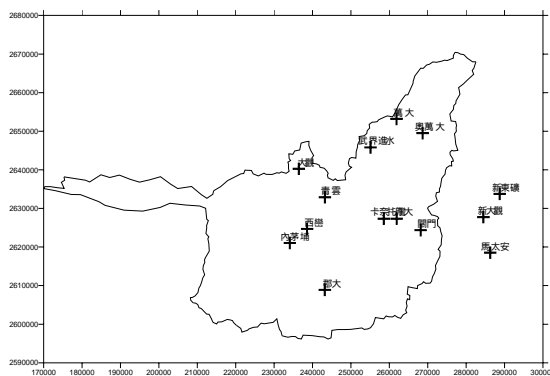


圖 4. 濁水溪上游雨量站位置
Figure 4. The location of rain gage stations in upstream Choushui river watershed.

為計算降雨之機率密度函數，因此將時雨量資料分為 9 級，每級間距分別為 12 mm，而當降雨超過每小時 96 mm 時，則皆歸於第 9 級，如表 2 所示。各站之 624 小時之總降雨量如表 3 所示，其中濁水河流域雨量站之降雨皆介於約 2000 至 3000 mm 之間，唯有關門雨量站之降雨高達 5274 mm，與濁水溪其他山區雨量站降雨有極大之差異，但卻與花蓮溪山區之降雨較為接近。

表 2. 雨量資料之分級

Table 2. Grades of 1-hour rainfall range.

分級	時雨量 (mm)
1	0~12
2	12~24
3	24~36
4	36~48
5	48~60
6	60~72
7	72~84
8	84~96
9	> 96

表 3. 各雨量站高程、累積雨量、熵值之比較

Table 3. The accumulation rainfall and computed entropy for each rain gage station.

流域	站名	高程 (m)	總雨量 (mm)	熵值
花蓮溪	馬太安	1000	6652	0.425
	新大觀	1000	4776	0.314
	新東礦	1100	6252	0.417
濁水溪	大觀	407	2351	0.156
	內茅埔	485	2391	0.173
	西巒	3028	2947	0.216
	武界進水	820	2173	0.152
	郡大	2470	2113	0.123
	奧萬大	1200	3274	0.215
	萬大	890	2391	0.160
	關門	2000	5274	0.338
	丹大	2400	3474	0.223
	卡奈托灣	1390	3266	0.215
青雲	420	1975	0.143	
平均值		1329	3522	0.234
標準偏差		828	1581	0.100

本研究須先利用表 2 計算各區間之相對機率後，組成機率密度函數，再利用(6)式計算各雨量站之熵值，各站高程、累積雨量及熵值之比較如表 3。由各站之累積雨量繪出之等降雨量線如圖 5，而各站之等熵線如圖 6。由此兩等值線可發現等雨量線與等熵線之分佈圖十分類似，這顯示由熵的分佈可以大致了解降雨的分佈狀況，因此可藉由熵對資訊掌握的特性，分析關門雨量站附近之集水區與雨量站降雨特性。

經由找尋具有最大熵值之雨量站馬太安後，再選擇重複資訊最少的測站逐站加入計算，以得到雨量站網中，每一測站重要性之排序，如圖 7 所示，在濁水溪上游最重要之測站為馬太安，其次為郡大，而 14 站中最後加入之雨量站為關門站。表 4 亦顯示各雨量站重複資訊排序，重複資訊愈多者對系統之貢獻越少，因此排序將愈後面，因此關門雨量站的雨量資訊與其他雨量站重複最多，故與濁水溪上游之雨量站中，關門雨量站之重要性最低，若因有任何考量因素而需裁撤該區域之雨量站的話，則可由關門雨量站開始。圖 8 為測站數與條件熵之關係，圖中實線為以指數模式利用非線性迴歸分析套配雨量資訊所得之結果，其中 a 為 0.23 而 b 則為 14.95，而圓點則為條件熵，其顯示條件熵並未隨測站之增加而趨於定值，若有新增之雨量站，其仍可提供有用之資訊，故現有該區所有雨量站之資訊仍無法充分提供雨量站網所需之資訊，所以濁水溪上游雨量站數目仍有不足，無法提供充足之降雨資訊，當前該區域之雨量站數不應有所減少。

表 4. 各雨量站重複資訊之排序
 Table 4. The rank of repeat information for rain gage station.

測站順序	站名	聯合熵	可轉移資訊
1	馬太安	0.425	0
2	郡大	0.545	0.003
3	武界進水	0.668	0.032
4	萬大	0.758	0.102
5	內茅埔	0.843	0.189
6	青雲	0.866	0.311
7	新大觀	1.051	0.440
8	大觀	1.066	0.581
9	奧萬大	1.126	0.736
10	卡奈托灣	1.182	0.895
11	丹大	1.223	1.077
12	西巒	1.241	1.275
13	新東礦	1.417	1.516
14	關門	1.471	1.800

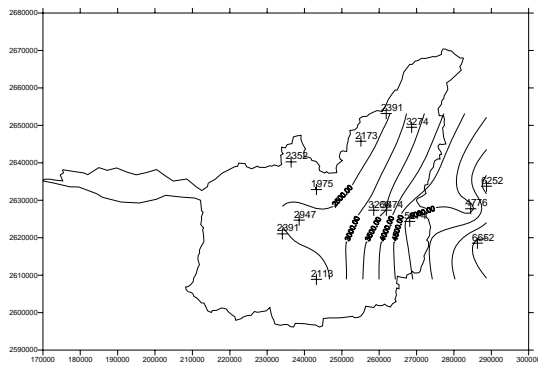


圖 5. 濁水溪上游雨量站累積雨量之等雨量線
 Figure 5. Isorain fall curves for upstream of Choushui river.

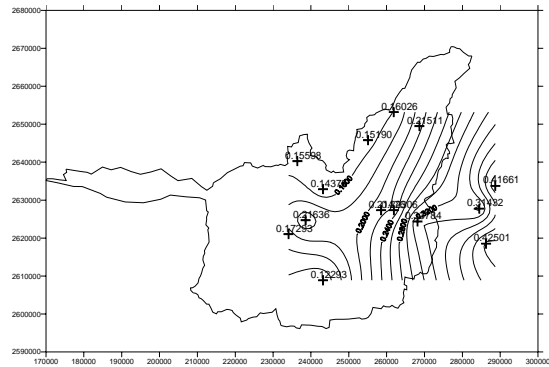


圖 6. 濁水溪上游雨量站之等熵值線
 Figure 6. Isoentropy curves for upstream of Choushui river.

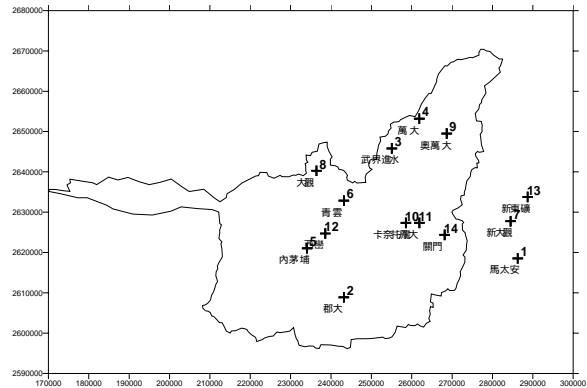


圖 7. 濁水溪上游雨量站重複資訊之排序
 Figure 7. The rank of repeat information for rain gage station on the upstream of Choushui river.

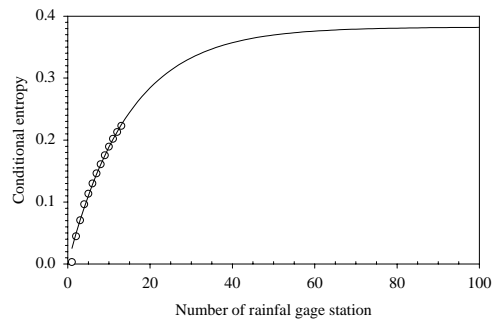


圖 8. 測站數與條件熵之關係
 Figure 8. The relation between conditional entropy and the number of rainfall gage station.

四、結論

本計畫應用 Shannon 所提出之資訊熵理論，以評估濁水溪流域上游關門雨量站之重要性。資訊熵利用機率之概念推估不確定性，而空間之資訊不確定性亦可經由資訊熵加以推算，因此可用以評估空間之不確定性。除非雨量站彼此間之距離甚大或特殊之地文及降雨情況，否則雨量站網中各雨量站間之資訊並不可能完全無關，彼此之資訊皆會相互重疊，因此利用資訊熵可先推算各雨量站降雨之熵值，而後計算各雨量站間之重複資訊量，以推定雨量站網中各雨量站對系統可提供資訊之重要性，因此可將雨量站之重要性加以排序，以作為減站之優先順序。然雨量站網中之雨量站數目是否已多到可以減站則可由條件熵及指數或球型模式判定，當條件熵不會隨測站數而再有明顯增加時，此時之測站數目應可代表該雨量站網當前所需之最小測站數，而多餘之測站則可裁撤，若雨量站少於此數時，則應再增加雨量站。

經由關門站附近之雨量站之重要順序分析，及條件熵與測站之關係顯示，關門站於附近十四個雨量站之重要性最低，但該區域之雨量站尚嫌不足，因此不應裁減該雨量站網中任一雨量站，考量關門雨量站資料蒐集之效益與人員安全考量及場站維護不易等因素，可於附近適當之地點先設置新的雨量站，俟收集足夠之雨量資料後，進行關門及新設雨量站間之雨量資料分析，以評估是否可以新站取代關門雨量站，若可建立該兩站之降雨關係，方可將關門站遷移至附近交通較便利之地點，若此二站間之降雨關係不高，則不宜廢除關門雨量站。

參考文獻

1. 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」，國立台灣大學農業工程學研究所博士論文。
2. 江介倫、鄭克聲 (2000) 「訊息熵在雨量站網設計之應用」，農業工程學報，46(4):55-66。
3. Campbell, S.A. (1983) Sampling and Analysis of Rain. American Society of Testing and Materials, Philadelphia.
4. Chow, V.T. (1964) Handbook of Applied Hydrology. McGraw-Hill, New York.
5. Duckstein, L., Davis, D.R., and Bogardi, I. (1974) "Applications of decision theory to hydraulic engineering." Symposium of ASCE Hydraulic Division Specialty Conference, ASCE.
6. Ferraro, R., and Li, Q.H. (2002) "Detailed analysis of the error associated with the rainfall retrieved by the NOAA/NESDIS Special Sensor Microwave/Imager algorithm 2. Rainfall over land." J GEOPHYS RES-ATMOS 107 (D23): art. no. 4680.
7. Ganguli, M.K., Rangarajan, R., and Panchang, G.M. (1951) "Accuracy of mean rainfall estimates- data of Damodar catchment." Irrigation and Power Journal 8:278-284.
8. Hughes, J.P., and Lettenmaier, D.P. (1981) "Data requirements for Kriging: estimation and network design." Water Resources Research 17(6):1641-1650.
9. Jessop, A. (1995) Informed Assessments. Ellis Horwood, New York.
10. Jou, D., Casas-Vazquez, J., and Criado- S ancho, M. (2001) Thermodynamics of fluids under flow. Springer, New York.
11. Krstanovic, P.F., and Singh, V.P. (1992) "Evaluation of rainfall network using

- entropy I – Theoretical development.”
Water Resources Management 6:279-293.
12. Langbein, W.B. (1960) “Hydrologic data networks and methods of extrapolating or extending available hydrologic data.” in Hydrologic Networks and Methods, Flood Control Series, No. 5, United Nations Economic Commission for Asia and the Far East and World Meteorological Organization.
13. Rodda, J.C. (1969) Hydrological Network Design – Needs, Problems and Approaches. World Meteorological Organization, Geneva.
14. Rycroft, H.B. (1949) “Random sampling of rainfall.” J. South Afr. For. Assoc. 18:71-81.
15. Shannon, C.E. (1948) “A mathematical theory of communication.” The Bell System Technical Journal 27:623-656.
16. Shih, S.F. (1982) “Rainfall variation analysis and optimization of gauging systems.” Water Resources Research 18(4):1269-1277.
17. World Meteorological Organization (1970) Guide to Hydrometeorological Practices. WMO Tech. Pap. 82, Geneva.

92年7月08日收稿

92年9月03日修改

92年9月12日接受

賴建信、游繁結：關門雨量站之評估