

供水穩定性指標評估之研究

Study on the Stability Criteria for Water Supply System Evaluation

逢甲大學
水利工程
與資源保育學系
研究生

張 皓 博
Hao-Bo Chang

逢甲大學
水利工程
與資源保育學系
教授

張 嘉 玲*
Chia-Ling Chang

逢甲大學
水利工程
與資源保育學系
教授

王 傳 益
Chuan-Yi Wang

逢甲大學
水利工程
與資源保育學系
研究生

洪 廷 岳
Ting-Yue Hung

摘 要

經濟發展與人類活動使得用水需求增加，且提高供水系統之風險。本研究以多評準決策中的簡單加權法評估台灣主要流域供水系統之穩定性，研究範疇界定為集水區上游水環境到淨水場取水端。本研究分別從供給及需求兩個面向探討供水穩定性，經文獻分析及專家效度問卷綜合評估結果，選出兩個面向五個指標，分別為供水面向的水文降雨因子(豐枯比)、地文因子(崩塌率)、淨水場操作(停供門檻)與需水面向的人口密度因子和用水量因子。本研究結果顯示：若從供水面向來看，淡水河流域供水系統之穩定性較佳，若從需水面向來看，則是濁水河流域供水系統之穩定性較佳，而由綜合評估結果可知，台灣主要流域以濁水河流域供水系統之穩定性較佳。

關鍵詞：流域管理，多評準決策分析，供水系統。

ABSTRACT

Economic development and human activity increase the demand of water uses and the risk of water supply systems. This study applies simple additive weighting method, a popular method in multiple criteria analysis, to assess the stability of the water supply systems of the main basins in Taiwan. This study discusses five criteria in the supply phase and the demand phase. The criteria are precipitation ratio, area percentage of landslide, water treatment performance, population density, and daily water use per person. The results show that the stability of the water supply system of the Choshui

*通訊作者，逢甲大學水利工程與資源保育學系教授，40724 中市西屯區文華路 100 號，clchang@fcu.edu.tw

River Basin is higher than those of the other four basins in Taiwan.

Keywords: Basin management, Multiple criteria analysis, Water supply system.

一、前言

近年來由於科技進步，造成地球快速的暖化，各地也因此受到大自然嚴重的反撲。台灣地文條件因地形陡峭，河川長度短水流湍急，加上年平均降雨量高達 2600mm，約為全世界平均直 2.6 倍，高強度降雨再加上降雨分配不均勻，常發生極端天災狀況，導致人民生命財產受到損失，提高了水資源供應的風險，使預期區域的公共用水與農業用水、工業用水等缺水率不斷升高，因此淨水場的穩定供水對於台灣水資源來說格外重要。

為進一步了解供水系統穩定性，在國內文獻中提出多種相關性指標、情境模擬與目標規劃等方法，王鈺閔(2009)以台灣桃園地區為例，藉由缺水指標來計算出缺水情形，依據區域內水資源設施供需情勢適計算出未來目標年區域的需水量，再得到每年缺水的風險，藉以探討缺水指標與缺水風險之間的關係。陳伯豪(2011)利用 VENSIM 軟體建構供水系統模型模擬石門水庫供水系統在不同的供水策略的改變下，淨水場的供水情況，分析系統的可靠度、缺水指標和缺水百分日指標，探討系統發生錯誤的機率和系統的供水情形。連婉余(2012)同樣也是以台灣桃園地區石門供水系統為例，利用可靠度、恢復度、脆弱度等三項風險指標的概念定義永續性指標，藉以表示系統出錯機率、由錯誤回復正常運作的機率、受損程度之嚴重性，考量日後需水量與有效庫容量的改變，評估系統之缺水風險。而陳柏蒼(2010)從降雨資料水文分析方法切入，建置水資源乾旱預警指標，相關單位若能將資訊整合應用，則可延伸發展乾旱預警系統。然而，在過去許多研究中，一般較常從水文面向探討供水系統之水源存在的風險，或是單純從淨水場操作面向檢討供水系統之穩定性，而針對台灣主要供水系

統穩定性之通盤評估與檢討之研究較為不足。

本研究以台灣主要流域供水系統為研究對象，應用多評準決策分析方法，從各供水系統供給及需求面向評估，以探討各供水系統之穩定性及關鍵問題。本研究為能較為全面性地探討供水系統的穩定性，從水資源上游集水區水文及地文環境，往下游淨水場取水後之操作效能等面向，綜合評估供水系統之供水能力，此外，並將從需求面向，檢討各供水系統對應之用水需求程度。

二、研究方法

2.1 研究區域

本研究區域為台灣主要流域，包含淡水河流域、大甲溪流域、濁水溪流域、曾文溪流域、高屏溪流域，其中以板新淨水場、豐原淨水場、林內淨水場、潭頂淨水場、坪頂淨水場為研究目標，各流域中所選取之淨水場為該流域供水量最大之淨水場，可視為該流域之主要供水系統，各流域與淨水場在台灣之相對位置，如圖 1 所示，此五大流域及其對應淨水場之背景說明如下。

1. 淡水河流域與板新淨水場背景

淡水河位於台灣北部，由大漢溪、新店溪、基隆河三大支流匯集而成，河長 135 公里，流域面積 2726 平方公里，並以大漢溪為最大支流，三條支流分別由北、東、南三個方向流進臺北盆地。板新淨水場隸屬於台灣自來水公司第十二區管理處，位於台北縣三鶯大橋邊，北二高三鶯交流道附近，成立於民國 65 年 5 月 10 日，每日設計出水量為約為 95 萬 CMD，供水人口約 187 萬人，普及率約 98.19%。

2. 大甲溪流域與豐原淨水場背景

大甲溪是台灣中部重要的河川，屬於中央管河川，主流上游為南湖溪長度共 124.2 公里，流域面積 1235.73 平方公里，流域主要分布於台中

台灣五大流域與淨水場示意圖

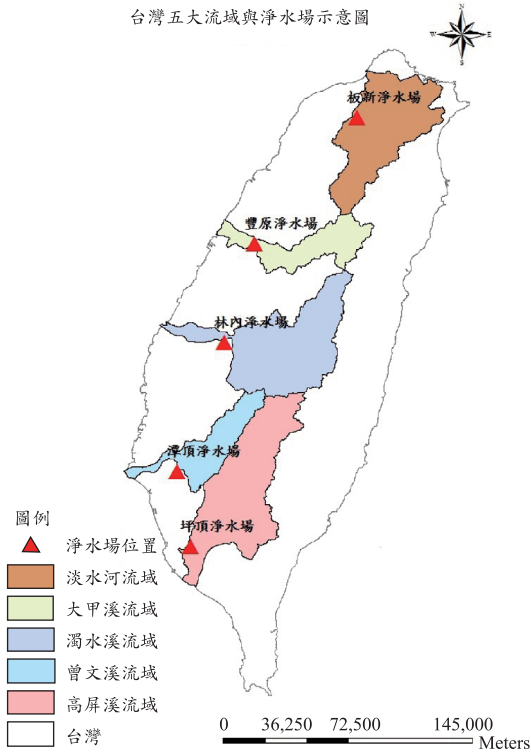


圖 1 台灣主要流域與淨水場示意圖

市以及南投縣與宜蘭縣的一小部分。豐原淨水場水源來自大甲溪石岡壩，水範圍包括台中縣、市，並支援彰化市地區之用水，並與鯉魚潭給水廠共同聯合調配大台中地區用水，為中部地區主要淨水場之一，設計出水量為 100 萬 CMD。

3. 濁水溪流域與林內淨水場背景

濁水溪全長約 186.6 公里，流域面積 3,156.9 平方公里，是台灣最長的河流，流經彰化、雲林、南投、嘉義，共計流經 4 縣市 21 鄉鎮。林內淨水場隸屬於台灣自來水公司第五區管理處林內營運所，民國 95 年 4 月 17 日正式營運後，設計出水量為 19 萬 8 千 CMD，支援供水區域包括雲林縣林內鄉、斗六、斗南、土庫、虎尾、北港（含水林）、大林、西螺（含蔴桐）等地區。

4. 曾文溪流域與潭頂淨水場背景

曾文溪發源於嘉義縣阿里山鄉的東水山，屬於中央管河川，全長 138.5 公里，流域面積 1,176.7 平方公里，源頭海拔高 2,440 公尺，流經台南市

楠西區、玉井區、大內區、山上區、善化區、官田區、麻豆區、安定區、西港區、七股區、最後在安南區和七股區之間，流入台灣海峽。潭頂淨水場隸屬於台灣省自來水公司第六區管理處台南給水廠，全場設計出水量達 18 萬 CMD，供水區域包括台南市之北、西、東、中、等四個行政區及台南縣新市鄉、新化鎮、永康市等地區，供水人口約 40 萬人，普及率達 98.59%。

5. 高屏溪流域與坪頂淨水場背景

高屏溪位於台灣南部為中央管河川，長度僅次於濁水溪。主流河長 171 公里，為全台第二長河；流域面積廣達 3,257 平方公里，分布於南投縣南端、嘉義縣東端、台東縣西端，及高雄市、屏東縣的 23 個鄉鎮市區，流域面積為全台第一大河。隸屬於台灣自來水公司第七區管理處坪頂給水廠，座落於高雄縣大樹鄉小坪村，目前出水量約 55 萬 CMD，供水人口約 120 萬人，供水區域包括高雄縣大樹、仁武、岡山、橋頭、大社、鳳山市北門地。

2.2 供水穩定性指標系統

本研究首先界定研究範疇，供水穩定性與否與用水之供給及需求相關；在供水面向，本研究主要探討各區水源供給之穩定性及取水後淨水場之處理能力，在需水面向，則主要探討對各區之用水需求度。本研究水源部分僅探討地面水，且暫不考慮水源調度及水庫操作等問題。本研究進行供水穩定性指標評估的架構如圖 2 所示，主要考量供水與需水兩大評估構面，根據文獻蒐集及效度問卷結果(Hashimoto *et al.*, 1982；廖崇聖等，2011；Chang and Liao, 2012)，本研究將兩大評估構面再細分成五項指標，分別為供水面向的水文降雨因子(豐枯比)、水文因子(崩塌率)、淨水場操作(停供門檻值)，及需水面向的需水人口密度因子、用水量因子等共五項指標，各指標說明如下，指標定義及計算方式彙整如表 1 所示。

1. 水文降雨因子(豐枯比)：

在台灣的豐水期為 5 月至 10 月，枯水期為 1 月至 4 月與 11 月至 12 月，而豐枯比的計算方式

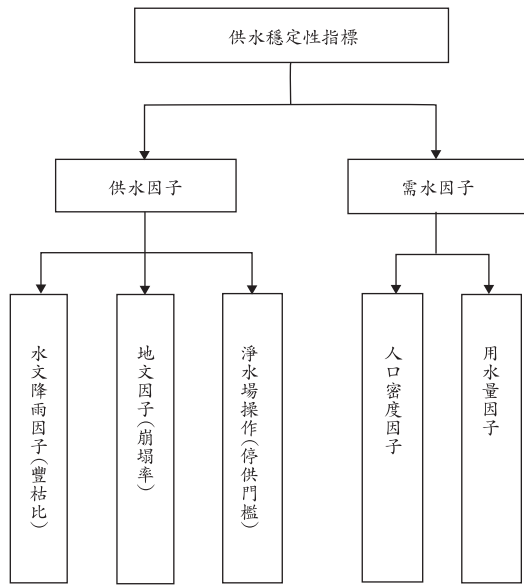


圖 2 供水穩定性指標架構圖

為豐水期總平均降雨量除以枯水期總平均降雨量。此研究資料來源於地理資訊倉儲中心取得降雨資料，在各研究區中選取 4~5 個雨量測站(以 2013~2015 降雨資料較完整者為選取對向)，進而計算各流域近年來之降雨豐枯比。豐枯比越大，豐水期雨量與枯水期雨量差異較大，也代表降雨時間分布較不平均，故豐枯比越大可能降低供水系統穩定性。

2. 地文因子(崩塌率)：

此指標著重在於研究區域中崩塌狀況是否對供水穩定性造成影響，崩塌一詞是指地表邊坡組成物質受重力影響而崩落的現象，進而提高供

水穩定性的風險。計算方式為透過地理資訊系統 (Geographic Information Systems, GIS) 的圖層資料匯出研究區域中崩場地，並轉換成網格數計算，在除以各研究區域總面積求得崩塌率，崩塌率越高，水體受到崩落土砂污染的機會也越大，故相對而言，在崩塌率較高的地文條件下，亦可能降低供水系統穩定性。

3. 淨水場操作(停供門檻)：

由自來水公司相關單位取得資料，了解各淨水場的操作標準，停供與減供門檻值主要由淨水場中的儀器測量原水濁度(NTU)做為判定依據。此項淨水場操作(停供門檻)評估指標的值越高，代表可以處理較高濁度原水的淨水能力較佳，故其相對之供水穩定性越高。

4. 人口密度因子：

人口與空間的比例，表示研究區域內人口分佈稀疏或稠密的狀況，其中人口數資料是由行政院公布的資料取得，將各流域內的人口數除以流域面積，取得人口密度，人口密度指標值越高，代表該區域對用水需求較高，也可能降低供水穩定性。

5. 用水量因子

由台灣自來水公司取得資料，每人每日用水量的計算方式為生活用水量除以供水人口數再除以全年日數最後在乘上一千，通常以 LPCD (liters per capita per day) 來表示。用水量因子值越高，也代表該區域對用水需求較高，故亦可能降低供水穩定性。

表 1 供水穩定性指標定義及計算方式

面向	評量指標	計算方式	單位	說明
供水因子	水文降雨因子(豐枯比)	豐水季雨量/枯水季雨量(2013~2015 年)	-	瞭解流域內降雨情形
	地文因子(崩塌率)	崩塌地面積/集水區面積	%	瞭解流域內崩塌地佔的面積
	淨水場操作(停供門檻)	由相關單位取得淨水場相關資料	NTU	瞭解淨水場操作
需水因子	人口密度因子	人口數/集水區面積(2015 年)	人/km ²	瞭解流域內人口佔的比例
	用水量因子	由相關單位取得每人每日平均用水公升數資料	LPCD	瞭解解流域內每人每日平均用水公升數

2.3 多評準決策分析

多評準決策分析 (Multi-Criteria Decision Analysis, MCDA) 也稱為多準則分析，起源於 Koopmans 提出之有效向量的概念 (Zeleny and Cochrane, 1973)，為解決多屬性、多目標及多評準之方法，此種決策方法適用於管理科學以及作業研究方面。多評準決策又可分為連續型評估問題及離散型評估問題，前者稱為多目標決策 (multiple objective decision-making, MODM)，後者稱為多屬性決策 (multiple attribute decision-making, MADM)。在多評準決策分析方法中，以「簡單加權法」、「簡單多屬性評點法」、「多屬性效用理論」、「理想解類似度偏好順序評估法」、「選擇法」、「層級分析法」較為常見，且已廣泛被應用在環境規劃與管理的領域中 (Guh, 1997; Ahn and Park, 2008; Huang *et al.*, 2011; Hwang and Yoon, 2012; Chang, 2013)。

Kirkwood and Corner (1993) 認為簡單加權法 (simple additive weighting, SAW) 由於理論基礎簡

單且容易計算，故為眾多屬性決策方法中，最常被使用之方法。本研究以多評準決策分析中的簡單加權法來探討供水穩性，其計算正規化與權重因子的方式，為了使所有指標可以互相比較，所以需要正規化，將各指標量化成數值，並將值界定範圍於 0 到 1 之間，最大指標對應數為 1，代表供水穩定性越高；反之最小指標對應為 0，代表供水穩定性越低，本研究假設供水及需水兩構面五項指標對於供水穩定性影響皆同等重要，因此將這五項指標權重假設皆為相同，圖 3 為本研究多評準決策分析流程圖。

三、結果與討論

3.1 台灣主要流域供水因子分析

本研究以多評準決策分析中的簡單加權法評估台灣主要流域之供水穩定性，在供水面向中三個指標項目分別為水文降雨因子(豐枯比)、地文因子(崩塌率)與淨水場操作(停供門檻)，在此面向各指標原始值與正規化值及供水穩定性排名如表 2 所示。

研究中從供水面向清楚發現，在水文降雨因子(豐枯比)指標中，台灣南部高屏溪流域的豐枯比最大，其值為 7.24，豐枯比越大代表豐水期時雨量越多，枯水期時雨量越少；台灣北部淡水河流域的豐枯比最小，其值為 1.57。由本研究分析結果可知，台灣主要流域由北到南排序，豐枯比不斷增大，代表台灣越往南部，降雨時間分布越不平均，對供水系統穩定性之衝擊越大。

在地文因子(崩塌率)指標中，台灣中南部的濁水溪流域與曾文溪流域最高，分別為 4.4% 與 3.3%，在這兩個流域中，因主要水源發源地為合歡山與阿里山皆為台灣較高的山脈，使地形變化甚大，使河流湍急，導致沖刷量與崩塌率都較為明顯；崩塌率最低的為北部淡水河流域只有 0.8%，因北部地勢平緩，水平高差變化沒有這麼劇烈，因此崩塌率較低。崩塌率較大之流域，因暴雨沖刷土砂流入水體，可能使得淨水場原水濁度較高，因此將衝擊供水系統之穩定性，台灣主要流域中，淡水河流域供水系統受崩塌率之衝擊

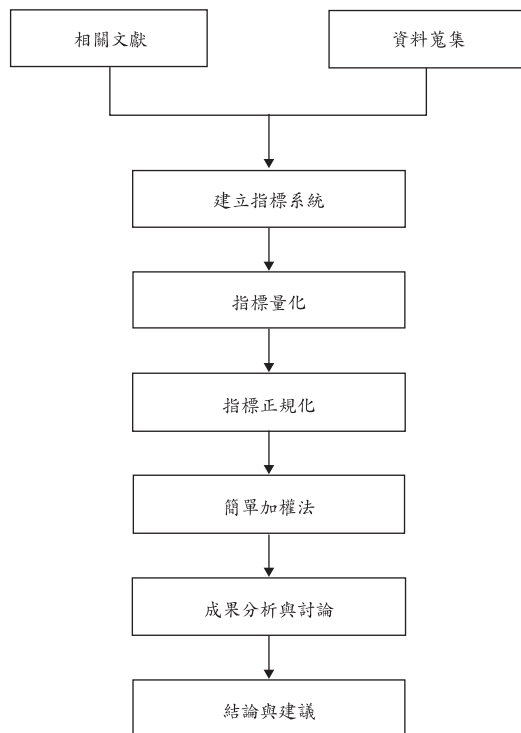


圖 3 多評準決策分析流程圖

表 2 供水指標分析結果

評估因子	水文降雨因子 (豐枯比)		地文因子 (崩塌率) (%)		淨水場操作 (停供門檻) (NTU)		簡單加權法 (平均值)	排名
	原始值	正規化	原始值	正規化	原始值	正規化		
數據資料	原始值	正規化	原始值	正規化	原始值	正規化		
淡水河流域	1.57	1	0.8	1	>12000	0.58	0.86	1
大甲溪流域	2.52	0.83	2.3	0.58	>5000	0.21	0.54	2
濁水溪流域	4.97	0.4	4.4	0	>10000	0.47	0.29	4
曾文溪流域	5.98	0.22	3.3	0.31	>1000	0	0.18	5
高屏溪流域	7.24	0	2.6	0.5	>20000	1	0.5	3

最小。

在淨水場操作(停供門檻)指標中，以高屏溪流域之坪頂淨水場停供門檻最高，原水濁度超過 20000NTU 才會達到停供條件；淨水場停供門檻值最低的為曾文溪流域之潭頂淨水場，原水濁度達 1000NTU 則會停供。淨水場停減供門檻因操作策略差異而有所不同，當淨水場停減供的門檻值越高，代表可容忍原水濁度越高，相對而言供水系統穩定性較高，反之，淨水場停減供門檻值越低，可能因自然環境影響如颱風等，水質濁度大小浮動，使淨水場操作較為敏感容易造成減供或停供的狀況發生。

經過各指標正規化分析，再透過簡單加權法並排名後，針對供水面向三項指標評估供水穩定性，了解到台灣南部曾文溪流域供水系統的供水穩定性狀況最差，綜合三項指標排名第五名；供水穩定性有由南向北提高的趨勢，排名最佳的為台灣北部淡水河流域之供水系統。

3.2 台灣主要流域需水因子分析

本研究在需水面向中兩個指標項目分別為人口密度因子與用水量因子，在此面向各指標原始值與正規化值及供水穩定性排名如表 3 所示。

表 3 需水指標分析結果

評估因子	人口密度因子 (人/km ²)		用水量因子 (LPCD)		簡單加權法 (平均值)	排名
	原始值	正規化	原始值	正規化		
數據資料	原始值	正規化	原始值	正規化		
淡水河流域	2462.28	0	274.2	0	0	5
大甲溪流域	1162.82	0.57	267.9	0.19	0.38	4
濁水溪流域	196.55	1	241.4	1	1	1
曾文溪流域	642.2	0.8	244.7	0.9	0.85	2
高屏溪流域	722.58	0.77	260.7	0.41	0.59	3

研究中從需水面向結果可知，在人口密度因子指標中，台灣北部淡水河流域中人口密集度最大，其值為 2462.28 人/km²；而表中顯示濁水溪

流域的人口密度最低，其值為 196.55 人/km²。人口密度越大，代表越需要有穩定的供水系統才能使研究區域內正常用水，若無法維持供水量則可

能衝擊供水系統穩定性，因此，人口密度越大的區域，相對較容易發生供水不穩定的情形。

在用水量因子分析結果可知，台灣北部的淡水河流域每人每日用水量最高，平均每人每日用水量高達 274.2 公升；而濁水溪流域每人每日用水量最低，其值為 241.4 公升。每人每日用水量亦代表用水需求，當用水需求越高的區域，供水系統若無法滿足用水需求，則較易發生供水不穩定之情形。

經過指標正規化分析，再透過簡單加權法並排名後，針對需水面向兩項指標評估供水穩定性，了解到台灣在需水面向中，濁水溪流域供水系統之穩定性最佳，而淡水河流域因用水需求較高，若從需求面向評估，對供水系統穩定性之要求較高，故淡水河流域供水系統在此面向排名第五名。

由表 3 需水指標分析結果可發現，人口密度因子與用水量因子雖均與用水需求相關，但各流域用水量因子差異並不大，故本研究將此指標刪

除，單採人口密度因子評估各流域對用水之需求；由分析結果可知，各流域之排名並無差異。整體而言，濁水溪流域之用水需求最低，相反地，北台灣因人口密集，淡水河流域之用水需求最高。

3.3 台灣主要流域供水穩定性綜合分析

本研究應用多評準決策方法中的簡單加權法進行分析，探討供水面向與需水面向中五項指標因子在相同權重下，對各流域供水系統之供水穩定性的影響，分析結果如 4 所示。由綜合評估結果可知，濁水溪流域供水系統穩定性最佳，其次為高屏溪流域供水系統，此兩流域所處的水環境條件雖不如北台灣淡水河流域良好，但此區域用水需求相對較低，且林內淨水場與坪頂淨水場操作效能因應水環境特性已有所提升，故供水系統穩定性相對良好；而曾文溪流域因水文及地文條件均不加，再加上潭頂淨水場停供門檻值相當低，故其供水系統之穩定性較差。

表 4 供水穩定性指標正規化值與綜合排名

評估因子	水文降雨因子 (豐枯比)	地文因子 (崩塌率)	淨水場操作 (停供門檻)	人口密度因子	用水量因子	簡單加權法 (平均值)	排名
淡水河流域	1	1	0.58	0	0	0.52	3
大甲溪流域	0.83	0.58	0.21	0.57	0.19	0.49	4
濁水溪流域	0.4	0	0.47	1	1	0.57	1
曾文溪流域	0.22	0.31	0	0.8	0.9	0.45	5
高屏溪流域	0	0.5	1	0.77	0.41	0.54	2

四、結論與建議

針對供水面向三項指標因子評估後，淡水河流域供水系統之供水穩定性最佳，曾文溪流域供水系統之供水穩定性最差。而針對需水面向兩項指標因子評估後，濁水溪流域供水系統之供水穩定性最佳，淡水河流域供水系統之供水穩定性最差。供水系統穩定性評估需要從供水及需水面向綜合評估，因此，本研究應用多評準決策分析，

綜合評估此兩面向五項指標，由研究結果可知，濁水溪流域供水系統之供水穩定性最佳，而曾文溪流域供水系統之供水穩定性最差。

供水系統穩定性在供給面向與流域水環境特性相關，當流域水文及地文環境條件不佳，對水源之質與量均會造成影響，此外，取水進入淨水場後，淨水場之操作效能對於供水系統穩定性之影響甚大。濁水溪流域水環境特性雖不佳，但林內淨水場效能已因應改善，故供水系統穩定性

有相當程度的提升。北台灣淡水河流域水環境特性較為良好，降雨時間分布不均的情形不如台灣南部嚴重，但用水需求較高，因此該區域淨水場效能維持或持續提升仍有其必要性。

本研究較過去研究更全面性檢討供水穩定性指標，惟指標系統、多評準決策分析方法及水資源系統的邊界仍有許多可以持續改善之空間，建議於未來研究中繼續探討之。

參考文獻

1. Ahn, B. S. and Park, K. S. (2008). Comparing methods for multiattribute decision making with ordinal weights. *Computers & Operations Research*, 35, 1660-1670.
2. Chang, C. L. (2013). Evaluation of basin environmental vulnerability: the weighted method compared to the compromise method. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 10(5), 1051-1056.
3. Chang, C. L. and Liao, C. S. (2012). Assessing the risk posed by high-turbidity water to water supplies. *Environmental Monitoring & Assessment*, 184(5), 3127-3132.
4. Guh, Y. Y. (1997). Introduction to a new weighting method--Hierarchy consistency analysis. *European Journal of Operational Research*, 102, 215-226.
5. Hashimoto, T., Stedinger, J. R., and Loucks, D. P. (1982). Reliability, resiliency, and vulnerability criteria for water resource system performance evaluation. *Water resources research*, 18(1), 14-20.
6. Huang, I. B., Keisler, J., and Linkov, I. (2011). Multi-criteria decision analysis in environmental sciences: ten years of applications and trends. *Science of the total environment*, 409(19), 3578-3594.
7. Hwang, C. L. and Yoon, K. (2012). Multiple attribute decision making: methods and applications a state-of-the-art survey (Vol. 186). Springer Science & Business Media.
8. Kirkwood, C. W. and Corner, J. L. (1993). The effectiveness of partial information about attribute weights for ranking alternatives in multiattribute decision making. *Organizational behavior and human decision processes*, 54(3), 456-476.
9. Zeleny, M. and Cochrane, J. L. (1973). Multiple criteria decision making. University of South Carolina Press.
10. 王鈺閔(2009)，缺水指標與缺水風險之相關性，國立中央大學土木工程學系，碩士論文。
11. 連婉余(2012)，建立風險指標系統及其應用於桃園地區供水系統風險分析，國立中央大學土木工程學系，碩士論文。
12. 陳伯豪(2011)，石門水庫供水系統風險分析，國立中央大學土木工程學系，碩士論文。
13. 陳柏蒼 (2010)，水資源乾旱預警指標之建置與應用，成功大學水利及海洋工程學系，博士論文。
14. 廖崇聖、張嘉玲、駱尚廉、胡景堯、馬家麟 (2011)，台灣主要淨水場原水濁度與上游水文特性之相關性分析，*農業工程學報*，第 57 卷，第 2 期，pp.78-86。

收稿日期：民國 105 年 5 月 12 日

修正日期：民國 105 年 6 月 3 日

接受日期：民國 105 年 6 月 6 日