

南化水庫及甲仙攔河堰考量河道放流量與供水之 最佳營運策略

The Optimal Operating Policy of Nanhua Reservoir- Chiahsien Weir System for Considering Instream Flow Release and Water Supply

淡江大學水資源及環境工程學系
副教授

蕭政宗

Jenq-Tzong Shiau

淡江大學水資源及環境工程學系
研究助理

張婉如

Wan-Ju Chang

摘 要

本文旨在利用多標的優選模式尋求同時考量供水及河川水域環境的南化水庫及甲仙攔河堰最佳營運策略。由於水利設施的興建與營運會對河川水域環境造成負面的影響，本文將以具有自然變化範圍的流量，亦即以變化範圍法(Range of Variability Approach, RVA)中的 32 個水文改變指標(Indicator of Hydrologic Alteration, IHA)來量化評估河川水流特性受水利設施蓄引水的影響，本文另將 32 個水文改變指標的水文改變度(degree of hydrologic alteration)整合成單一的整體水文改變度(overall degree of hydrologic alteration)，以利優選模式的演算。在水利設施的營運效率方面則以缺水率來評估。由於河道放流量與引水運用對水利設施的營運而言是互相衝突的標的，因此本文以多標的妥協規劃(compromise programming)來尋求同時對河川水域環境影響最小且缺水率最少的水利設施最佳營運策略。本文先以南化水庫及甲仙攔河堰興建前的 1959 年至 1995 年之日流量紀錄為基礎訂定河川流量未受水利設施影響的評估標準，經由模擬模式演算相同流量紀錄在南化水庫與甲仙攔河堰不同河道放流量時之下游河川流量，據以評估河川水流受水利設施的影響及相對之缺水率。本文所探討的情況有南化水庫及甲仙攔河堰在定值河道放流量及隨豐枯季節變化河道放流量時之河川水域整體水文改變度及缺水率，並利用妥協規劃推求在這些情況之最佳營運策略。演算結果證實本文所建議之方法不僅可以有效量化水利設施營運對河川水域環境的影響及用水的效率，更可將之整合於多標的優選模式中以尋求最佳營運策略。

關鍵詞：變化範圍法，水文改變指標，河道放流量，缺水率，妥協規劃。

ABSTRACT

In this paper, a multiobjective optimization model is presented to search for the optimal Nanhua reservoir-Chiahsien weir operation scheme aimed to simultaneously assure the water-supply stabilities and sustain the natural flow variations. The Range of Variability Approach (RVA) and thirty-two hydrologic parameters, called Indicators of Hydrologic Alteration (IHA), are used to evaluate the hydrologic alteration of streamflows caused by reservoir-weir operation. The resulting hydrologic alterations of 32 IHAs are then combined into a single index such that it can be incorporated in the objective function of optimization model. Shortage ratio is used to evaluate the operation performance of water-supply system. Since water supply and instream flow release are conflicting, the multiobjective optimization model is needed to solve these conflicting objectives in water-supply system. The compromise programming algorithm is used in this study to derive the optimal reservoir-weir operation for simultaneously consideration of minimum impacts to riverine environment and minimum shortage ratio. The water-supply facilities considered in this study include the Nanhua reservoir and the Chiahsien weir. The daily flow records prior to dam and weir construction from 1959 to 1995 are used to establish RVA targets. A reservoir-weir operation model is established to derive the post-diversion flows for various operating schemes. In this study, various operating schemes, including constant inflow release and wet-dry season varying inflow release, are evaluated to determine associated impacts on shortage ratio and hydrologic alteration. The optimal instream flow releases are determined for various operating scheme using the compromise programming. The methodology proposed in this study could serve as a useful quantitative evaluation tool for the decision makers of the water-supply systems.

Keywords: Range of Variability Approach (RVA), Indication of hydrologic alteration (IHA), Instream flow release, Shortage ratio, Compromise programming.

一、前言

水利設施如壩、堰等所發揮的給水、灌溉、發電、防洪等興利除弊的功能，為人類文明的發展帶來了正面的效益。然而，其對環境的負面影響近年來亦備受關注，特別是對河川水域環境的衝擊，例如橫跨河川的壩及堰等水利設施會阻礙迴流性魚類的遷移、水庫蓄水或攔河堰引水均會改變下游河川之水流特性及河相狀態，進而影響到水中生物的棲息環境等。因此，近年來有關減緩水利設施對河川水域環境影響的研究也日益增多，例如新建水利設施的營運規則中多半會包括河道放流量等措施以減緩引水對河川水域環

境的影響。

對保護河川水域環境所需流量的推估方法近年來也持續不斷的發展出來，儘管名稱不一，有稱為生態參考流量(ecological reference flow)、環境流量(environmental flow)、最低流量(minimum flow)、溪內流量(instream flow)等(吳富春等, 1998)，但其目的均為對河川水域環境提供某種程度的保護。Jowett(1997)及 Tharme(2003)回顧了世界各國目前所使用的方法後指出，水文法(hydrological methodology)是目前使用非常廣泛的方法，其中最常用的 Tennant 法或稱為 Montana 法(Tennant, 1976)，此法將不同季節所需之河川流量以年平均流量的百分比來表示；尚

有其他的方法，但多半以單一指標來訂定河川所需的最低流量，例如 Q_{95} 等。棲地模擬法(habitat simulation methodology)是另一類目前廣被接受的方法，棲地法近年來在國內應用甚廣，相關的研究有吳富春等(1998)應用棲地模式估算台灣河川之生態流量、胡通哲與葉明峰(2002)應用棲地法及其他方法探討基隆河之生態基流量、張楨驩等(2002)應用棲地法研究卑南溪魚類棲地分布、楊承峰等(2002)以河川低水流量分流演算推估烏溪上游魚類棲地、謝暉棹等(2002)應用棲地法推估大漢溪生態流量等。除此之外，國內尚習慣使用經驗法則，此法多半利用集水區面積來決定河川應維持的流量，例如陳弘由等(2001)曾應用水文法、水力法、棲地法與經驗法則於評估及比較大甲溪馬鞍壩址所需要的河川保留基流量。

河川的水流無可否認的是維持河流水域生態系統重要的驅動力之一，早期多強調以最低流量來保護河川水域環境(Dixon 及 Cox, 1985; Poff 等, 1977; Barson 等, 2002)。然而，近年來對河川水域環境的保護及生物多樣性的維持有異於以往的看法，維持環境系統自然變化的範圍(range of natural variability)才是生態管理的準則(Frissell 及 Bayles, 1996)，而自然的狀態亦包括不利於生物生存的狀態，例如洪水及乾旱等，但人類的活動應盡量避免巨幅的改變此一自然變化範圍。Reiser 等(1989)指出只專注某一或少數特定標的物種或僅維持河川某一低流量是多數評估河道放流量方法的缺點。事實上，一具有完全自然變化範圍(full range of variation)的流量，而非僅保留某些特定流量，才是維持河川生態及生物多樣性的主要驅動力(NRC, 1992)。Poff 等(1997)指出自然的河制(natural flow regime)應包括不同時間間距的流量特性，此特性包括量(magnitude)、時間(timing)、頻率(frequency)、期距(duration)及變化率(rate of change)等。Richter 等(1997)延伸此一觀念發展出變化範圍法(Range of Variability Approach, RVA)，整合水文變化及水域系統以建立河川管理機制。此法利用稱為水文改變指標(Indicators of Hydrologic Alteration, IHA)的 32 個水文參數來評估河川流量在量、時

間、頻率、延時及變化率的改變程度(Richter 等, 1996)，以瞭解該位址之河川流量受到水利設施的影響程度，以及是否仍具有水利設施興建前之自然流量變化。

由於對河川水域環境的影響較難以量化，但 Richter 等(1998)以變化範圍法之水文改變指標所定義之水文改變度(degree of hydrologic alteration)即很容易量化河川水文特性受影響之嚴重性，進而可評估其對水域環境之影響。雖然河川流量的保留可以維持某種程度的自然河川流量變化，減緩因為興建水利設施所帶來對河川水域環境的負面衝擊，但是大量河川流量的保留將會嚴重的影響到水利設施的蓄引水功能及供水的穩定性，因此如何在河川取水及維持河川環境之間尋求一平衡是現今水資源規劃、開發及管理中非常重要的一環。由於取水與保護河川水文特性對水利設施營運而言，是相互衝突的營運目標，因此必須以多標的優選模式求解，Goicoechea 等(1982)曾建議多種多標的優選模式，本文將以妥協規劃(compromise programming)求解水庫及攔河堰考量取水與河道放流量之最佳營運策略。本文將先以南化水庫及甲仙攔河堰興建前未受水利設施干擾的日流量紀錄訂定評估基準，而後以模擬模式演算相同流量在南化水庫與甲仙攔河堰不同河道放流量之下游河川流量，河道放流量(instream flow release)在本文定義為水利設施主動釋放於河道以提供河川生態所需及維持河川流量變化之流量，此為水利設施營運之決策變數。之後即可以變化範圍法據以評估受水利設施影響的程度，本文另以缺水率評估水利設施之營運效率。演算得不同河道放流量之河川特性改變程度及缺水率後，即可以妥協規劃求取同時考量引水及河川水域環境之最佳營運策略。

二、研究方法

2.1 變化範圍法(RVA)

近年來許多研究河川流量變化與河川生態系統間關聯性的報告均指出，河川需要自然流量狀態(natural flow paradigm)，即年際間及年內完全的自然流量變化，包括量、延時、頻率、時間

及變化率等特性的變化，才能維持河川生態系統的完整性及生物的多樣性(Richter 等，1997)。為量化河川流量受水利設施影響的改變程度，Richter 等(1997)發展了變化範圍法(Range of Variability Approach, RVA)，利用稱為水文改變指標(Indicator of Hydrologic Alteration, IHA)的 32 個水文參數評估流量特性受水利設施影響之改變程度，來替代整個河川水域生態環境受水利設施興建及營運而改變的幅度。

IHA 分為 5 組，各組 IHA 所包含之參數請參閱表 1，其對河川生態之影響請詳閱 Richter 等(1998)。RVA 需先以詳細的流量紀錄來評估未受水利設施影響前之河川流量自然變化狀態，Richter 等(1996)建議以日流量紀錄為基礎，以未受水利設施影響前之流量自然變化狀態為基準，評估受水利設施影響後之流量紀錄，以了解受影響的改變程度。而認定水文改變指標受影響的標準需以生態方面受影響的資料為依據，但若缺乏此方面的資料，Richter 等(1997)建議以各指標之平均值加減一標準偏差，或各指標發生機率之 75%及 25%(Richter 等，1998)，作為各個指標之上下限，稱為 RVA 標的(RVA targets)。水利設施興建後受影響流量紀錄之 IHA 若落在 RVA 標的內的頻率與水利設施興建前的頻率一樣，則表示水利設施對河川的影響輕微，仍然保有自然的流量變化範圍，但若受影響之流量紀錄落於 RVA 標的內的頻率遠大於或遠小於水利設施興建前的頻率，則表示水利設施已經改變了原有河川的流量變化特性，此一改變將進一步對河川水域生態系統有嚴重的負面影響。

RVA 的評估步驟可分為下列四個步驟：

1. 以水利設施興建前的日流量紀錄計算 32 個 IHA 的年變化情形；
2. 依據步驟 1. 所得未受水利設施興建或營運影響的結果訂定各個指標的 RVA 標的，本文將以各個指標發生機率之 75 %及 25 %作為評估標的；
3. 蒐集或以模擬模式演算水利設施興建後的日流量紀錄之 32 個 IHA 的年變化情況；
4. 以步驟 2. 所得之 32 個 IHA 的 RVA 標的評估

表 1 RVA 所使用之水文改變指標(IHA)

組別	內容	特性	IHA
第 1 組	每個月之流量	量、延時	各月份之流量平均值
第 2 組	年極端流量	頻率、延時	年最大 1 日流量平均值 年最小 1 日流量平均值 年最大 3 日流量平均值 年最小 3 日流量平均值 年最大 7 日流量平均值 年最小 7 日流量平均值 年最大 30 日流量平均值 年最小 30 日流量平均值 年最大 90 日流量平均值 年最小 90 日流量平均值 年最小 7 日流量平均值對年平均流量比值
第 3 組	年極端流量之發生時間	時間	年最大 1 日流量發生時間 年最小 1 日流量發生時間
第 4 組	高及低流量 ^a 之頻率及延時	頻率、延時	每年發生高流量之次數 每年發生低流量之次數 高流量平均延時 低流量平均延時
第 5 組	流量變化之改變率及頻率	頻率、變化率	流量平均增加率 ^b 流量平均減少率 ^b 每年流量逆轉次數 ^c

說明：^a 高及低流量分別指未興建水利設施前之流量紀錄發生機率 75%及 25%之日流量；
^b 相鄰二日流量間之平均流量增加率及減少率；
^c 河川日流量由增加變成減少或由減少變成增加的次數。

步驟 3. 所得水利設施興建後的情況，即可了解水利設施的興建與營運對河川水文特性之影響程度。

為量化 IHA 受水利設施影響之改變程度，Richter 等(1998)建議以水文改變度(degree of hydrologic alteration)來評估，其定義如下：

$$D = \left| \frac{N_o - N_e}{N_e} \right| \times 100\% \dots\dots\dots(1)$$

其中 N_o 為觀測年數，指水利設施興建後 IHA 仍落於 RVA 標的內之年數； N_e 為預期年數，指水

利設施興建後 IHA 預期落於 RVA 標的內之年數，可以 $r \times N_T$ 來評估， r 為水利設施興建前之 IHA 落於 RVA 標的內之比例，若以各 IHA 之 75 % 及 25 % 作為 RVA 標的，則 $r = 50\%$ ，而 N_T 為水利設施興建後受影響流量紀錄之總年數。

Richter 等(1998)建議若上式 D 值介於 0-33 % 間屬於無或低度改變(little or no alteration)；33-67 % 間屬於中度改變(moderate alteration)；67-100 % 則屬於高度改變(high alteration)。由此量化的數值很容易判斷表 1 所列 32 個 IHA 受水利設施興建與營運影響的程度。Shiau 及 Wu (2004a)曾利用此法探討攔河堰不同引水量對河川流量特性影響與缺水指標之關聯性。

Richter 等(1998)曾以 32 個 IHA 的水文改變度之平均值來評估河川水域環境的整體改變情形，Shiau 及 Wu(2004b)曾建議以下列方式進行整體評估：當 32 個 IHA 均為低度改變時則歸類為整體低度改變(overall low alteration)；當至少有 1 個 IHA 屬於中度改變，但無任何 IHA 屬於高度改變時，則歸類為整體中度改變(overall medium alteration)；當至少有 1 個 IHA 屬於高度改變時，則歸類為整體高度改變(overall high alteration)。以此方法作為整體評估方式即不會因取平均值而看不出屬於中、高度改變情況之 IHA，雖然此方法可區分出整體低、中、高等不同的水文改變情況，但仍無法有一整體改變之數值來比較同屬於整體低度、中度、或高度改變的二種不同情況的差異性，另亦無法使用於優選模式的標的函數中。蕭政宗及吳富春(2004)另建議以權重平均的方式來評估整體的水文特性改變情況，此法分為三種情況：第一種情況為 32 個 IHA 都屬於低度改變，即 D 值均小於 33%，則整體水文改變度(overall degree of hydrologic alteration)，以 D_o 來表示，取 32 個 IHA 的 D 值之平均值，如下式所示：

$$D_o = \frac{1}{32} \sum_{i=1}^{32} D_i \quad \dots\dots\dots(2a)$$

上式的 D_o 值將會低於 33%，代表整體低度改變。第二種情況為 32 個 IHA 中至少有一個指標

屬於中度改變，而沒有任何指標屬於高度改變，則採取下列的權重平均方式來計算：

$$D_o = 33\% + \frac{1}{32} \sum_{i=1}^{N_m} (D_i - 33\%) \quad \dots\dots\dots(2b)$$

其中 N_m 為屬於中度變化的 IHA 個數。依此式計算， D_o 的數值將會介於 33% 與 67% 之間，代表整體中度改變。第三種情況為 32 個 IHA 中至少有一個指標屬於高度改變，則採取下列的權重平均方式來計算：

$$D_o = 67\% + \frac{1}{32} \sum_{i=1}^{N_h} (D_i - 67\%) \quad \dots\dots\dots(2c)$$

其中 N_h 為屬於高度改變的 IHA 個數。此種情況 D_o 值將高於 67%，代表整體高度改變。

以此法來評估河川水域整體改變情況之優點為：(1)可以突顯 IHA 屬於中度或高度的改變現象，不會因為取平均值而消失；(2)仍然分為三階段，且其分界與 Richter 等(1998)當初的建議值一致；(3)整合式量化的表示方式易於使用於優選模式中以決定最佳策略。因此本文亦將利用此法來評估受水利設施影響之河川整體水域環境之改變程度。

2.2 水庫與攔河堰系統營運模式

由於水庫及攔河堰興建完工後之流量紀錄甚短，且僅代表某一種特定的水庫及攔河堰系統營運狀態，本文意欲探討水庫及攔河堰系統在不同河道放流量時之水文改變情況及缺水率，因此必須先建立系統營運模擬模式以演算水利設施引水後之河道下游流量，方能進行 RVA 評估。然為簡化分析，本文所建立之系統營運模擬模式並不考慮相關的防洪措施，河道流量的設定亦與現行措施略有不同，詳細說明如下。

本文所考慮的水利設施系統如圖 1 所示，此系統包括一水庫及一越域引水的攔河堰。圖 1 中的 Q'_{N_1} 為水庫的天然入流量； Q'_{N_2} 為攔河堰引水前的河川天然流量； Q'_{D_1} 為水庫的計畫供水； Q'_{D_2} 為攔河堰的計畫越域引水量； Q'_{DF_1} 為水庫的實際供水； Q'_{DF_2} 為攔河堰的實際越域引水量； Q'_{F_1} 為水庫的計畫河道放流量； Q'_{F_2} 為

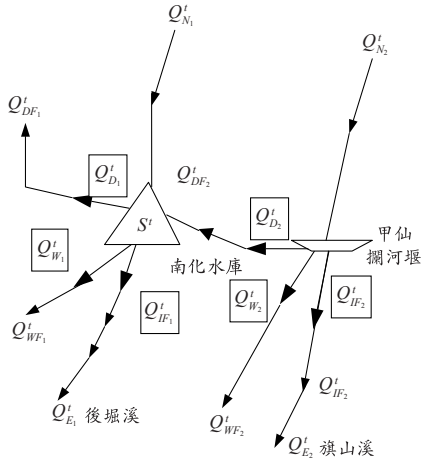


圖 1 南化水庫及甲仙攔河堰系統示意圖(□內之變數表計畫量，其餘之變數表實際量)

攔河堰的計畫河道放流量； Q'_{E_1} 為水庫下游的河川剩餘流量，包括河道放流量及水庫溢流量等； Q'_{E_2} 為攔河堰引水後河道剩餘流量； Q'_{w_1} 為水庫下游水權保留量； Q'_{w_2} 為攔河堰下游水權保留量； Q'_{WF_1} 為水庫實際供給水權量； Q'_{WF_2} 為攔河堰下游實際水權取水量。其中 Q'_{IF_1} 及 Q'_{IF_2} 分別為水庫及攔河堰為減緩水利設施引水及保護下游河川水域環境所釋放的流量，此二變數為水庫及攔河堰營運策略之決策變數。本文所模擬之水庫及攔河堰均有 3 項放水目標，水庫為計畫供水量(Q'_{D_1})、既有水權量(Q'_{w_1})及計畫河道放流量(Q'_{IF_1})；攔河堰則為計畫越域引水量(Q'_{D_2})，既有水權量(Q'_{w_2})及計畫河道放流量(Q'_{IF_2})。至於將水庫及攔河堰的河道放流量與其他的供水量區分為不同的項目，最主要的理由在於各特定供水目標放流至下游的水量至下游某特定地點後即被該目標所引用，該水量即不存在河道內，無法提供河川生態所需及維持河川天然的流量變化，因此，河道放流量對水庫及攔河堰的營運而言需單獨考量為一項。另 Shiau 及 Wu(2004a)及 Shiau 及 Wu(2004b)均指出河道放流量應優先於其他供水標的方能達到減緩水利設施的興建與營運對河川天然流量改變的影響，因此本文假設水庫及攔河堰營運規則中以河道放流量具有最高優先權，水利設施興建前即已存在的既有水權

量次之，計畫供水量或引水量再次之。

由於水庫的入流量包括越域引水量，因此需先決定攔河堰的實際越域引水量。攔河堰的供水先後順序為計畫河道放流量(Q'_{IF_2})、既有水權量(Q'_{w_2})及計畫越域引水量(Q'_{D_2})，由於未考慮攔河堰的調蓄功能，此三項供水目標實際供水量均由入流量(Q'_{N_2})來決定。各目標實際放水量與入流量之關係可分為底下四種情況：

1. 當攔河堰天然流量小於計畫河道放流量時：全數保留為河道放流量，無多餘流量提供既有水權量及越域引水量，各目標實際放水量如下所示：

$$\text{當 } Q'_{N_2} < Q'_{IF_2} \text{ 則 } Q'_{E_2} = Q'_{N_2}, Q'_{WF_2} = 0, Q'_{DF_2} = 0 \dots\dots\dots (3)$$

2. 當攔河堰天然流量小於計畫河道放流量與既有水權量之和，但大於計畫河道放流量時：除可提供計畫河道放流量外，尚有多餘水量提供水權量，但無越域引水，各目標實際放水量如下所示：

$$\text{當 } Q'_{IF_2} \leq Q'_{N_2} < Q'_{IF_2} + Q'_{w_2}, \text{ 則 } \dots\dots\dots (4)$$

$$Q'_{E_2} = Q'_{IF_2}, Q'_{WF_2} = Q'_{N_2} - Q'_{IF_2}, Q'_{DF_2} = 0$$

3. 當攔河堰天然流量小於計畫河道放流量、既有水權量與計畫越域引水量之和但大於計畫河道放流量與既有水權量之和時：此種情況除可滿足河道放流量及既有水權量外，尚有多餘水量可越域引水，惟越域引水量不應過大而使水庫滿庫而溢流，因此越域引水需限制在不使水庫溢流之最大量，各目標實際放水量如下所示：

$$\text{當 } Q'_{IF_2} + Q'_{w_2} \leq Q'_{N_2} < Q'_{IF_2} + Q'_{w_2} + Q'_{D_2}, \text{ 則}$$

$$Q'_{E_2} = \text{Max}\{Q'_{IF_2}, Q'_{IF_2} + (Q'_{N_2} - Q'_{IF_2} - Q'_{w_2}) - \text{Max}\{0, C - S' + \text{Min}\{0, Q'_{IF_1} + Q'_{w_1} - Q'_{N_1}\} + Q'_{D_1}\}\},$$

$$Q'_{WF_2} = Q'_{w_2},$$

$$Q'_{DF_2} = \text{Min}\{Q'_{N_2} - Q'_{IF_2} - Q'_{w_2},$$

$$\text{Max}\{0, C - S' + \text{Min}\{0, Q'_{IF_1} + Q'_{w_1} - Q'_{N_1}\} + Q'_{D_1}\}\} \dots\dots\dots (5)$$

4. 當攔河堰天然流量大於計畫河道放流量、既有水權量與計畫越域引水量之和時：此種情況可滿足各目標計畫放水量，惟越域引水量不應過大而使水庫發生溢流，且多餘之水量需再釋放於河道下游，各目標實際放水量如下所示：

當 $Q'_{N_2} \geq Q'_{IF_2} + Q'_{W_2} + Q'_{D_2}$ ，則

$$Q'_{E_2} = \text{Max} \left\{ Q'_{N_2} - Q'_{W_2} - Q'_{D_2}, (Q'_{N_2} - Q'_{W_2}) + Q'_{D_2} \right. \\ \left. - \text{Max} \left\{ 0, C - S' + \text{Min} \left\{ 0, Q'_{IF_1} + Q'_{W_1} - Q'_{N_1} \right\} + Q'_{D_1} \right\} \right\}$$

$$Q'_{WF_2} = Q'_{W_2},$$

$$Q'_{DF_2} = \text{Min} \left\{ Q'_{D_2}, \text{Max} \left\{ 0, C - S' + \text{Min} \left\{ 0, Q'_{IF_1} + Q'_{W_1} - Q'_{N_1} \right\} + Q'_{D_1} \right\} \right\} \dots\dots\dots(6)$$

決定攔河堰之越域引水量後即可進行水庫演算，由於既有水權量在水庫興建前即存在，因此既有水權量的供水僅依水庫入流量，即原有的河川流量(Q'_{N_1})來決定，不由水庫蓄水量(S')來決定。而為保持河川獨有的水流特性，河道放流量亦僅依據原有的河川流量，即水庫入流量(Q'_{N_1})來決定。水庫實際供水量(Q'_{DF_1})的多寡則需由水庫蓄水量(S')、越域引水量(Q'_{DF_2})及剩餘的水庫入流量決定。因此可分為以下三種情況：

1. 當水庫入流量小於計畫河道放流量時：入流量全數為河道放流量，無多餘水量提供既有水權量，實際供水量的多寡則視水庫蓄水量與越域引水量之和來決定，各目標實際放水量如下所示：

$$\text{當 } Q'_{N_1} < Q'_{IF_1} \text{ 且 } S' + Q'_{DF_2} < Q'_{D_1} \text{ 則} \dots\dots\dots(7a)$$

$$Q'_{E_1} = Q'_{N_1}, Q'_{WF_1} = 0, Q'_{DF_1} = S' + Q'_{DF_2}$$

$$\text{當 } Q'_{N_1} < Q'_{IF_1} \text{ 且 } S' + Q'_{DF_2} \geq Q'_{D_1} \text{ 則} \dots\dots\dots(7b)$$

$$Q'_{E_1} = Q'_{N_1}, Q'_{WF_1} = 0, Q'_{DF_1} = Q'_{D_1}$$

2. 當水庫入流量小於計畫河道放流量與既有水權量之和，但大於計畫河道放流量時：除可滿足河道放流量外，尚有多餘水量提供既有水權量，實際供水量的多寡亦視水庫蓄水量與越域

引水量之和來決定，各目標實際放水量如下所示：

$$\text{當 } Q'_{IF_1} \leq Q'_{N_1} < Q'_{IF_1} + Q'_{W_1} \text{ 且 } S' + Q'_{DF_2} < Q'_{D_1}$$

$$\text{則 } Q'_{E_1} = Q'_{IF_1}, Q'_{WF_1} = Q'_{N_1} - Q'_{IF_1}, Q'_{DF_1} = S' + Q'_{DF_2} \dots\dots\dots(8a)$$

$$\text{當 } Q'_{IF_1} \leq Q'_{N_1} < Q'_{IF_1} + Q'_{W_1} \text{ 且 } S' + Q'_{DF_2} \geq Q'_{D_1} \dots\dots\dots(8b)$$

$$\text{則 } Q'_{E_1} = Q'_{IF_1}, Q'_{WF_1} = Q'_{N_1} - Q'_{IF_1}, Q'_{DF_1} = Q'_{D_1}$$

3. 當水庫入流量大於計畫河道放流量與既有水權量之和時，需另依據水庫蓄水量與越域引水量之和、剩餘入流量與計畫供水間之關係分為下列四種情況討論：

(1) 水庫蓄水量與越域引水量之和小於計畫供水，但剩餘入流量小，不致使水庫滿庫而溢流，但是否足以滿足水庫計畫供水則視水庫剩餘入流量多寡而定，各目標實際放水量如下所示：

$$\text{當 } Q'_{N_1} \geq Q'_{IF_1} + Q'_{W_1} \text{ 且 } S' + Q'_{DF_2} < Q'_{D_1}$$

$$\text{及 } S' + Q'_{DF_2} + Q'_{N_1} - Q'_{IF_1} - Q'_{W_1} - Q'_{D_1} < C \dots\dots\dots(9a)$$

$$\text{則 } Q'_{E_1} = Q'_{IF_1}, Q'_{WF_1} = Q'_{W_1}$$

$$, Q'_{DF_1} = \text{Min} \left\{ Q'_{D_1}, S' + Q'_{DF_2} + Q'_{N_1} - Q'_{IF_1} - Q'_{W_1} \right\}$$

(2) 水庫蓄水量與越域引水量之和小於計畫供水，但剩餘入流量甚大，除可補足原計畫供水不足量外尚會發生溢流，因此水庫下游流量遠較計畫河道放流量來的大，各目標實際放水量如下所示：

$$\text{當 } Q'_{N_1} \geq Q'_{IF_1} + Q'_{W_1} \text{ 且 } S' + Q'_{DF_2} < Q'_{D_1}$$

$$\text{及 } S' + Q'_{DF_2} + Q'_{N_1} - Q'_{IF_1} - Q'_{W_1} - Q'_{D_1} \geq C, \dots\dots\dots(9b)$$

$$\text{則 } Q'_{E_1} = S' + Q'_{DF_2} + Q'_{N_1} - Q'_{W_1} - Q'_{D_1} - C,$$

$$Q'_{WF_1} = Q'_{W_1}, Q'_{DF_1} = Q'_{D_1}$$

(3) 水庫蓄水量與越域引水量之和大於計畫供水，但剩餘入流量較小，可充分供應計畫供水外，尚可增加水庫蓄水量，但不會發生溢流，各目標的實際放水量如下所示：

$$\begin{aligned} &\text{當 } Q'_{N_1} \geq Q'_{IF_1} + Q'_{N_1} \text{ 且 } S^t + Q'_{DF_2} \geq Q'_{D_1} \\ &\text{及 } S^t + Q'_{DF_2} + Q'_{N_1} - Q'_{IF_1} - Q'_{W_1} - Q'_{D_1} < C \dots\dots(9c) \\ &\text{則 } Q'_{E_1} = Q'_{IF_1}, Q'_{WF_1} = Q'_{W_1}, Q'_{DF_1} = Q'_{D_1} \end{aligned}$$

(4) 水庫蓄水量與越域引水量之和大於計畫供水，但剩餘入流量甚大，除可充分滿足計畫供水外，水庫會發生溢流，各目標實際放水量如下所示：

$$\begin{aligned} &\text{當 } Q'_{N_1} \geq Q'_{IF_1} + Q'_{W_1} \text{ 且 } S^t + Q'_{DF_2} \geq Q'_{D_1} \\ &\text{及 } S^t + Q'_{DF_2} + Q'_{N_1} - Q'_{IF_1} - Q'_{W_1} - Q'_{D_1} \geq C \dots\dots(9d) \\ &\text{則 } Q'_{E_1} = S^t + Q'_{DF_2} + Q'_{N_1} - Q'_{IF_1} - Q'_{D_1} - C \\ &\quad , Q'_{WF_1} = Q'_{W_1}, Q'_{DF_1} = Q'_{D_1} \end{aligned}$$

水庫及攔河堰系統的演算步驟簡述如下，先利用(3)、(4)、(5)及(6)式決定攔河堰的越域引水量及其他放水量，再由水庫演算(7)、(8)及(9)式決定水庫的各項放水量，然後再由水平衡方程式計算下一時刻之水庫蓄水量，如下：

$$S^{t+1} = S^t + Q'_{N_1} + Q'_{DF_2} - Q'_{E_1} - Q'_{WF_1} - Q'_{DF_1} \dots(10)$$

上述水庫水平衡方程式中並未考慮蒸發及滲漏等損失。本文所建立之水庫及攔河堰系統模擬模式之決策變數為水庫及攔河堰之計畫河道放流量，演算時先利用自然流量計算 32 個 IHA 的 RVA 上下限，再利用前述模擬模式演算得受水庫及攔河堰影響之河川流量，再分別計算受水庫及攔河堰影響之 32 個 IHA 的變化情況，再以(1)式計算個別 IHA 之水文改變度及以(2)式計算整體水文改變度。

2.3 缺水指標

當水庫及攔河堰的實際供水量少於計畫供水量時，則會有缺水現象產生，缺水現象的描述需考慮缺水延時、缺水量、缺水頻率等(蕭政宗，1999)，本文僅以缺水率(shortage ratio, SR)來代表水庫及攔河堰的營運績效。由於所考慮系統包括水庫及攔河堰，因此缺水率之評估將包括水庫下游水權量、水庫計畫供水量及攔河堰下游水權量等三項，分別定義如下：

$$SRW_1 = \frac{\sum_{t=1}^N \left| \min \{ Q'_{WF_1} - Q'_{W_1}, 0 \} \right|}{\sum_{t=1}^N Q'_{W_1}} \times 100\% \dots\dots(11)$$

其中 SRW_1 為水庫下游水權量之缺水率； N 為總分析時程； Q'_{W_1} 為 t 時刻之水庫下游水權量； Q'_{WF_1} 為 t 時刻水庫實際供給水權量。

水庫計畫供水量之缺水率定義為：

$$SRD_1 = \frac{\sum_{t=1}^N \left| \min \{ Q'_{DF_1} - Q'_{D_1}, 0 \} \right|}{\sum_{t=1}^N Q'_{D_1}} \times 100\% \dots\dots(12)$$

其中 SRD_1 為水庫計畫供水量之缺水率； Q'_{D_1} 為 t 時刻之水庫計畫供水量； Q'_{DF_1} 為 t 時刻之水庫實際供水量。

攔河堰下游水權量之缺水率定義為：

$$SRW_2 = \frac{\sum_{t=1}^N \left| \min \{ Q'_{WF_2} - Q'_{W_2}, 0 \} \right|}{\sum_{t=1}^N Q'_{W_2}} \times 100\% \dots\dots(13)$$

其中 SRW_2 為攔河堰下游水權量之缺水率； Q'_{W_2} 為 t 時刻之攔河堰下游水權量； Q'_{WF_2} 為 t 時刻之攔河堰下游實際水權取水量。

2.4 妥協規劃

在前述水庫及攔河堰模擬模式中所考慮的主要營運標的為引水及維持河川引水後的流量自然變化範圍，此二標的分別以缺水率(SR)及RVA中IHA的整體水文改變度(D_o)來定義。因此，水庫及攔河堰營運模式標的就是同時要將此二相互衝突的標的最小化，亦即

$$\text{Min} \{ SRW_1, SRD_1, SRW_2, D_{o_1}, D_{o_2} \} \dots\dots\dots(14)$$

其中 D_{o_1} 及 D_{o_2} 分別代表水庫及攔河堰之整體水文改變度。

由於這些標的相互衝突，對於此種情況，可利用多標的規劃的方式來求解，本文將以妥協規劃(compromise programming)來尋求最佳解。Simonovic 及 Burn(1989)曾指出妥協規劃的優點在於其適用於離散的(discrete)優選問題，而且可依決策者對標的重要與否給於不同的權重

值，因此本文將以此法來研究水庫及攔河堰引水與維護河川流量自然變化範圍的問題，並尋求最佳的營運策略。

能同時讓缺水率及河川整體水文改變度達到個別的最小值為最佳的水庫及攔河堰營運方式，但相互衝突的標的不可能同時達到個別的最小值，亦即此點並非可行解(feasible solution)，但此點可當作一參考點，在妥協規劃中稱此點為理想點(ideal point)，妥協規劃即以可行解中距理想點最短距離(L)的點為最佳解，因此(14)式可以改寫為：

$$\begin{aligned} \text{Min } L = & \text{Min} \left[w_1^p \left(\frac{SRW_1^b - SRW_1^w}{SRW_1^b - SRW_1^w} \right)^p + w_2^p \left(\frac{SRD_1^b - SRD_1^w}{SRD_1^b - SRD_1^w} \right)^p \right. \\ & \left. + w_3^p \left(\frac{SRW_2^b - SRW_2^w}{SRW_2^b - SRW_2^w} \right)^p + w_4^p \left(\frac{D_{o_1}^b - D_{o_1}^w}{D_{o_1}^b - D_{o_1}^w} \right)^p + w_5^p \left(\frac{D_{o_2}^b - D_{o_2}^w}{D_{o_2}^b - D_{o_2}^w} \right)^p \right]^{1/p} \end{aligned} \quad (15)$$

其中 L 為理想點 $(SRW_1^b, SRD_1^b, SRW_2^b, D_{o_1}^b, D_{o_2}^b)$ 與任意點 $(SRW_1, SRD_1, SRW_2, D_{o_1}, D_{o_2})$ 間的距離；上標 b 與 w 分別代表最佳與最壞的標的函數值，本文中即為最小與最大的標的函數值； w_1 、 w_2 、 w_3 、 w_4 、 w_5 為權重值，且 $\sum_{i=1}^5 w_i = 1$ ； p 為大於等於 1 的參數。

演算時分為二階段，第一階段為計算不同河道放流量時的缺水率及河川整體水文改變度；第二階段則以第一階段演算所得的結果為基礎，先分別找尋演算結果中最小與最大的缺水率與整體水文改變度，再利用(15)式求取最佳解。

三、個案研究—南化水庫及甲仙攔河堰系統

南化水庫位於曾文溪支流後堀溪之中游，為供應台南及高雄地區自來水之單一目標水庫，集水區面積約為 104 平方公里，原設計庫容量為 158 百萬立方公尺，呆容量為 3.45 百萬立方公尺。其水源除水庫集水區流量外，另包括旗山溪甲仙攔河堰的越域引水量。甲仙攔河堰位於高屏溪支流旗山溪，集水區面積約為 408 平方公里，其設計越域引水量為 30 cms。

南化水庫壩址處及甲仙攔河堰堰址處均無流量站的設置，因此需利用其他流量站之紀錄來推估，本文採用水利處(2002)的估算方式。南化水庫的入流量由位於壩址下方約 15 公里之玉田站觀測資料依面積比直接推估而得，其公式如下：

$$Q_{\text{南化水庫}} = 0.6479 Q_{\text{玉田站}} \quad (16)$$

甲仙攔河堰的堰址流量則由小林站、月眉站、民族站及民權站等站之觀測流量資料間接推估而得，不同時間之推估方程式如下所示：

1. 1959 年 1 月~1970 年 2 月：

$$Q_{\text{甲仙堰}} = 1.1816 Q_{\text{小林站}} \quad (17a)$$

2. 1970 年 3 月~1974 年 12 月：

豐水期(6~10 月)

$$Q_{\text{甲仙堰}} = 1.2879 Q_{\text{月眉站}}^{0.940} \quad (17b)$$

枯水期

$$Q_{\text{甲仙堰}} = 1.2655 Q_{\text{月眉站}}^{0.895} \quad (17c)$$

3. 1975 年 1 月~1985 年 12 月：

$$Q_{\text{甲仙堰}} = 1.3434 Q_{\text{民權站}} \quad (17d)$$

4. 1986 年 1 月~1992 年 12 月：

$$Q_{\text{甲仙堰}} = 1.4473 Q_{\text{民權站}} \quad (17e)$$

5. 1993 年 1 月~1995 年 12 月：

$$Q_{\text{甲仙堰}} = 1.3434 Q_{\text{民族站}} \quad (17f)$$

依此方式推估，南化水庫及甲仙攔河堰 1959 年至 1995 年間的日平均流量分別為 6.38 及 35.52 cms，各月份平均流量列於表 2。另在南化水庫及甲仙攔河堰興建之前，在壩址及堰址處即有引水利用，此部分水權量應優先保留，各月份應保留之水權量亦列於表 2。甲仙攔河堰各月份之計畫越域引水量詳表 2。南化水庫之計畫供水量平均每日為 80 萬立方公尺，但各月份略有不同，各月份之需水比例亦示於表 2。

四、結果與討論

為了解水庫及攔河堰供水系統興建後其營運對河川自然流量的影響，本文以南化水庫及甲仙攔河堰未興建前的河川流量變化特性為基

表 2 南化水庫及甲仙攔河堰各月份之平均入流量、水權量、計畫越域引水量及計畫供水比例

月份	月平均流量(cms)		水權保留量(cms)		計畫越域引水量(cms)	計畫供水比例(%)
	南化水庫	甲仙攔河堰	南化水庫	甲仙攔河堰	甲仙攔河堰	南化水庫
1 月	0.158	4.663	0.199	8.321	1.5	82.5
2 月	0.178	5.981	0.211	7.422	1.5	84.5
3 月	0.180	7.424	0.254	8.161	3.5	88.0
4 月	1.534	11.854	0.256	8.090	3.5	97.5
5 月	4.428	31.617	0.267	8.976	3.5	107.4
6 月	15.647	101.179	0.716	20.62	30.0	111.0
7 月	13.895	62.356	0.716	23.45	30.0	113.0
8 月	24.144	101.183	0.716	21.39	30.0	113.0
9 月	13.623	62.937	0.716	21.38	30.0	112.5
10 月	2.202	22.698	0.706	15.08	8.8	106.9
11 月	0.441	8.936	0.414	12.58	3.5	95.9
12 月	0.152	5.437	0.248	9.20	3.5	87.8

準，以模擬模式模擬興建完工後不同營運狀況的流量，評估在不同河道放流量情況下之缺水率、整體水文改變度之變化情況，據以訂定不同狀況之最佳營運策略。

4.1 無河道放流量時之水文改變狀況及缺水率

本文以 1959 年至 1995 年間南化水庫及甲仙攔河堰未興建前的日流量紀錄來代表自然的河川流量，以這 37 年期間的日流量紀錄計算 32 個水文改變指標(IHA)之年變化情況，並以各個指標之發生機率 75%定為 RVA 上限、25%定為 RVA 下限，稱為 RVA 標的。表 3 所列即為南化水庫及甲仙攔河堰未興建前河川天然流量 32 個 IHA 之 RVA 上下限。

以前節所建立之模擬模式模擬南化水庫及甲仙攔河堰的營運，在相同的流量記錄且沒有河道放流量($Q_{IR_1}^t = 0$, $Q_{IR_2}^t = 0$)的條件下，南化水庫 32 個 IHA 中總計有 20 個 IHA 屬於高度改變，5 個 IHA 屬於中度改變，僅有 7 個 IHA 屬於低度改變，整體水文改變度為 82.9%，屬於整體高度改變。相反的，由於沒有河道放流量的釋放，缺水情況並不嚴重，既有水權量的缺水率為 19.1%，計畫供水量的缺水率為 9.0%，相關數據列於表 4。甲仙攔河堰在無河道放流量的情況下，32 個 IHA 中計有 17 個 IHA 屬於高度改變，8 個 IHA

屬於中度改變，僅有 7 個 IHA 屬於低度改變，整體水文改變度為 82.6%，屬於整體高度改變，其既有水權量的缺水率為 17.3%，相關數據亦列於表 4。由於本文並未考慮攔河堰之蓄水功能，因此在無河道放流量的情況下，其整體水文改變度略低於水庫，但二者均屬於整體高度改變，代表在無河道放流量的情況下，水利設施的營運會對河川水域環境造成嚴重的影響。

4.2 定值河道放流量時之水文改變狀況及缺水率

南化水庫及甲仙攔河堰在無河道放流量時均造成嚴重的河川流量特性的改變，本節將探討南化水庫及甲仙攔河堰系統河道放流量由 0 cms 每隔 1 cms 增加至 60 cms 時對河川水域環境影響的改善及對供水的影響。

圖 2 為南化水庫計畫供水量在水庫及攔河堰不同河道放流量時之缺水率，此缺水率隨著水庫及攔河堰的河道放流量增加而增加，水庫增加河道放流量則減少蓄存於水庫內之水量而降低水庫之供水能力，而攔河堰增加河道放流量則會減少越域引水量，間接的減少水庫供水的調蓄量而增加缺水率。圖 3 為南化水庫既有水權量在水庫及攔河堰不同河道放流量時之缺水率，既有水權量缺水率隨水庫河道放流量的增加而增加，但不隨攔河堰河道放流量的增加而改變。圖 4 為南

表 3 南化水庫及甲仙攔河堰興建前河川天然流量之 RVA 上下限

組別	IHA	南化水庫		甲仙攔河堰	
		上限	下限	上限	下限
第 1 組	1 月份之流量平均值(cms)	0.14	0.06	5.70	3.54
	2 月份之流量平均值(cms)	0.13	0.04	6.59	3.05
	3 月份之流量平均值(cms)	0.15	0.02	7.68	3.16
	4 月份之流量平均值(cms)	0.46	0.03	12.01	4.05
	5 月份之流量平均值(cms)	5.39	0.66	41.66	14.72
	6 月份之流量平均值(cms)	20.54	6.04	129.45	51.37
	7 月份之流量平均值(cms)	20.98	4.99	81.87	34.36
	8 月份之流量平均值(cms)	34.52	11.81	132.33	47.11
	9 月份之流量平均值(cms)	16.81	5.17	87.53	30.78
	10 月份之流量平均值(cms)	2.47	0.88	27.48	15.10
	11 月份之流量平均值(cms)	0.49	0.31	9.96	7.18
	12 月份之流量平均值(cms)	0.19	0.10	5.94	4.73
第 2 組	年最小 1 日流量 (cms)	0.01	0.00	3.16	2.10
	年最大 1 日流量 (cms)	311.64	123.11	1371.61	585.95
	年最小 3 日流量平均值(cms)	0.01	0.00	3.16	2.13
	年最大 3 日流量平均值(cms)	208.19	82.35	944.55	418.29
	年最小 7 日流量平均值(cms)	0.01	0.00	3.34	2.17
	年最大 7 日流量平均值(cms)	118.09	54.03	495.45	268.58
	年最小 30 日流量平均值(cms)	0.04	0.00	3.77	2.53
	年最大 30 日流量平均值(cms)	49.90	25.50	191.64	125.59
	年最小 90 日流量平均值(cms)	0.11	0.03	6.52	3.01
	年最大 90 日流量平均值(cms)	26.71	13.99	116.87	72.30
年最小 7 日流量平均值對年平均流量比值	0.003	0.00	0.11	0.05	
第 3 組	年最大 1 日流量發生時間	283.50	181.50	238.50	189.50
	年最小 1 日流量發生時間	193.00	151.00	170.50	108.50
第 4 組	每年發生高流量之次數(次)	11.00	6.50	7.50	4.50
	每年發生低流量之次數(次)	6.00	3.00	6.00	3.00
	高流量延時(日)	106.00	73.00	111.50	74.50
	低流量延時(日)	120.50	69.50	125.00	61.50
第 5 組	流量平均增加率(%)	13.14	5.89	51.51	22.24
	流量平均減少率(%)	-2.97	-6.09	-7.39	-15.40
	每年流量逆轉次數(次)	124.00	90.50	103.50	84.50

表 4 不同河道放流量時之水庫及攔河堰缺水率及整體水文改變度

	河道放流量		缺水率及整體水文改變度				
	南化水庫	甲仙攔河堰	南化水庫			甲仙攔河堰	
	Q'_{IF_1} (cms)	Q'_{IF_2} (cms)	SRW_1 (%)	SRD_1 (%)	D_{o_1} (%)	SRW_2 (%)	D_{o_2} (%)
無河道放流量	0	0	19.1	9.0	82.9	17.3	82.6
最佳定值河道放流量	1	5	44.7	14.2	70.8	36.1	69.8
最佳豐枯變化河道放流量	1(枯)、1(豐)	5(枯)、3(豐)	44.7	13.0	70.3	33.8	71.0

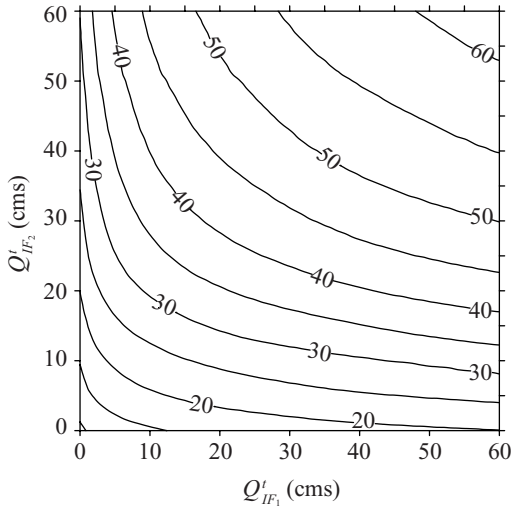


圖 2 南化水庫計畫供水量在不同河道放流量時之缺水率(%)

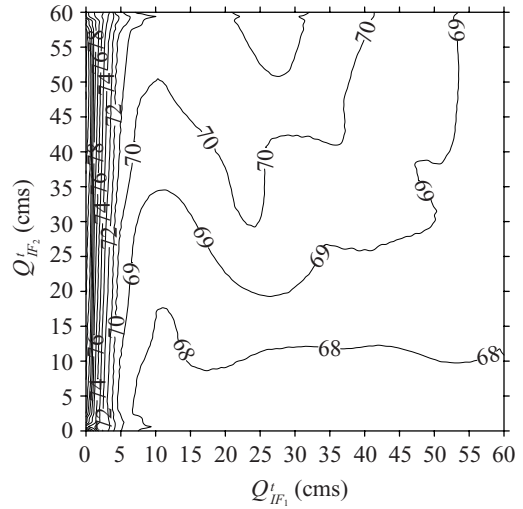


圖 4 南化水庫在不同河道放流量時之整體水文改變度(%)

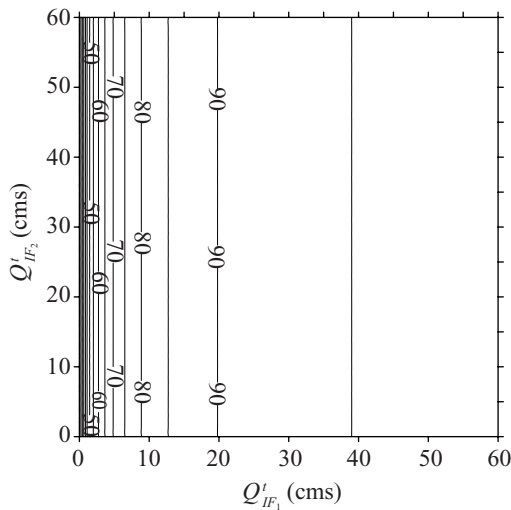


圖 3 南化水庫既有水權量在不同河道放流量時之缺水率(%)

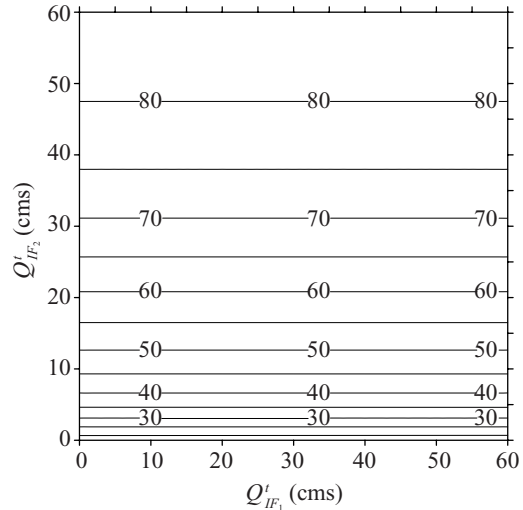


圖 5 甲仙攔河堰既有水權量在不同河道放流量時之缺水率(%)

化水庫整體水文改變度在不同水庫及攔河堰河道放流量時之變化情況，水庫河道放流量由 0 cms 增加至 5 cms 時，整體水文改變度由超過 80 % 降至約 69 %，之後即使再增加至 60 cms，所能減低之幅度甚小，且均維持在整體高度改變的狀況；而攔河堰河道放流量的增加則會微幅的增加水庫下游之整體水文改變度，雖然水庫河道放

流量是由其入流量多寡來決定，與攔河堰的營運無直接關聯，但攔河堰河道放流量增加即會減少越域引水量，進而減少水庫之蓄水量，因此水庫發生溢流的情況會大幅減少，致使整體水文改變度略微增加。

圖 5 為甲仙攔河堰既有水權量在水庫及攔河堰不同河道放流量時之缺水率，此缺水率僅隨

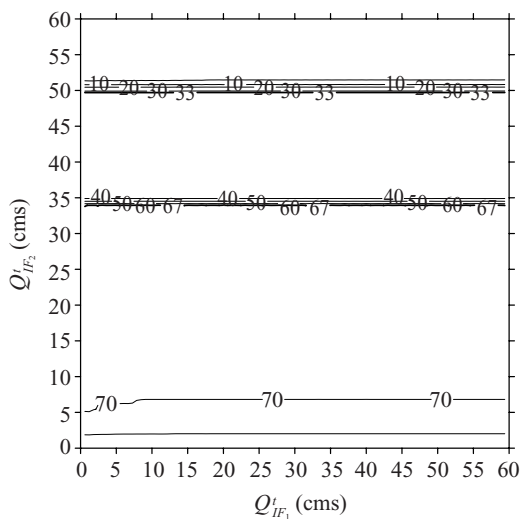


圖 6 甲仙攔河堰在不同河道放流量時之整體水文改變度(%)

著甲仙攔河堰河道流量的增加而增加。圖 6 為甲仙攔河堰整體水文改變度在不同水庫及攔河堰河道放流量時之變化情況，在無河道放流量時為整體高度改變，當甲仙攔河堰河道放流量超過至 34 cms 時即成為整體中度改變，此放流量超過 50 cms 時即變為整體低度改變。由圖 4 及圖 6 的比較可知，水庫與攔河堰的整體水文改變度隨河道放流量增加的變化情況並不相同，主要的原因在於攔河堰的營運並不考慮其蓄水量，因此超過引水量之入流量均釋放於河道下游，可保有若干程度的自然流量變化狀態；而水庫藉由其庫容調蓄水量，除計畫河道放流量外，僅少數極端洪水量造成溢流外，餘均蓄存於水庫內，較不利於維持自然的流量變化狀態。

由於南化水庫及甲仙攔河堰系統的五項營運標的隨增加河道放流量之變化趨勢不甚相同，因此無法直接由前述分析結果獲得最佳解，但利用妥協規劃可求解在此河道放流量範圍內之最佳南化水庫及甲仙攔河堰河道放流量。假設南化水庫及甲仙攔河堰系統各項營運標的的重要性均一致，亦即(15)式中的 $w_1 = w_2 = w_3 = w_4 = w_5 = 0.2$ ，至於 p 值的選擇則依據 Goicoechea 等(1982)的建議取 $p = 2$ ，依此參

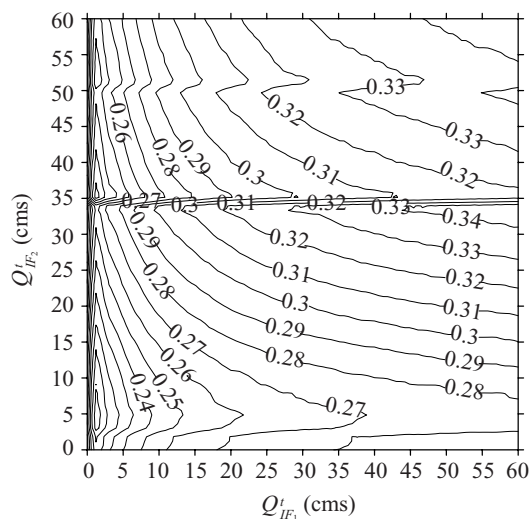


圖 7 不同河道放流量時之標的函數值(L)

數所得不同河道放流量時之標的函數值(L)的變化情況如圖 7 所示，最佳的南化水庫計畫河道放流量為 1 cms，甲仙攔河堰之計畫河道流量為 5 cms，其所造成的整體水文改變度在南化水庫及甲仙攔河堰分別為 70.8%及 69.8%，雖然仍屬於高度改變，但比無河川放流量之情況改善甚多，惟其供水量及既有水權量的缺水率均有增加，南化水庫既有水權量及計畫供水量的缺水率分別由 19.1%及 9.0%增加至 44.7%及 14.2%。而甲仙攔河堰既有水權量缺水率亦增加甚大，由 17.3%增加至 36.1%，惟其幅度不若水庫既有水權量缺水率大。相關數據亦列於表 4 以供比較。

南化水庫在最佳定值河道放流量 ($Q'_{I_{r_1}} = 1$ cms)的情況下，32 個 IHA 中有 7 個 IHA 屬於高度改變，與無河道放流量時有 20 個 IHA 屬於高度改變相比較，有甚大幅度的改善，另有 9 個 IHA 屬於中度改變，有 16 個 IHA 屬於低度改變。甲仙攔河堰在最佳定值河道放流量 ($Q'_{I_{r_2}} = 5$ cms)的情況下，32 個 IHA 中計有 4 個 IHA 屬於高度改變，與無河道放流量時有 17 個 IHA 屬於高度改變的情況相比較，亦有甚大幅度的改善，另有 9 個 IHA 屬於中度改變，有 19 個 IHA 屬於低度改變。

4.3 隨豐枯季變化河道放流量之水文改變狀況及缺水率

前節所討論之河道放流量均為定值，即不隨時間而變化，但由流量記錄中可知南化水庫及甲仙攔河堰處之入流量在豐枯季節的變化甚大，因此本節將考慮隨時間變化之河道放流量。惟河道放流量若隨月份變化，則妥協規劃中最佳解之計算量將甚為龐大，因此本文將僅考慮隨豐(5月~10月)-枯(11月~4月)季節變化之河道放流量及相對之缺水率及整體水文改變度。

由於南化水庫之入流量較小，其枯水季節之河道放流量範圍訂為 0 ~ 1 cms 間，豐水季節則訂為 0 ~ 20 cms 間，甲仙攔河堰枯水季節之河道放流量範圍訂為 0 ~ 10 cms 間，豐水季節則在 0 ~ 60 cms 間。在此豐枯季不同河道放流量範圍內之最佳水庫及攔河堰河道放流量分別為南化水庫在豐、枯季節均為 1 cms，甲仙攔河堰豐水季節河道放流量為 3 cms，枯水季節則為 5 cms；其相對之南化水庫計畫供水量及既有水權量缺水率分別為 13.0% 及 44.7%，整體水文改變度為 70.3% (整體高度改變)，甲仙攔河堰既有水權量缺水率為 33.8%，整體水文改變度為 71.0% (整體高度改變)。上述演算結果亦列於表 4 以供比較，與前節最佳定值河道放流量的結果相比較，水庫之最佳河道放流量並未改變，但攔河堰之河道放流量減少，因此水庫之計畫供水量缺水率及整體水文改變度均略為減少。攔河堰在枯水季節之河道放流量高於豐水季節之河道放流量，主要原因在於枯水季節河川流量較小，因此需要較高的保護標準，而豐水季節河川流量較豐沛，且越域引水量又有其限制，因此可有較低的保護標準。攔河堰之既有水權量缺水率為 33.8%，稍低於最佳定值河道放流量的情況，惟整體水文改變度則稍高於原有之情況。

五、結論與建議

本文利用變化範圍法評估河川水流特性受水利設施營運的影響，及以缺水率來評估水利設施的營運效率，由於此二標的係屬相互抵觸，因此本文以妥協規劃求解最小整體水文改變度及

缺水率之最佳營運策略。經由以南化水庫及甲仙攔河堰為例演算，可獲致以下的結論。

1. 本文以多標的規劃方式整合水庫及攔河堰引水與維護河川環境的問題，在保持河川自然流量變化的條件下，對於水庫及攔河堰營運對河川水域環境的影響可以有量化的評估，因此可推求水庫及攔河堰系統考量河道放流量及供水的最佳營運策略。
2. 水利設施營運若無河道放流量的保留，將會對河川水域環境造成極嚴重的影響。以南化水庫及甲仙攔河堰系統為例，在無河道放流量時之整體水文改變度分別為 82.9 及 82.6%，均屬於整體高度改變，由此可知河道放流量的保留在水利設施營運中的重要性。
3. 南化水庫及甲仙攔河堰在定值河道放流量時可改善受蓄引水影響之河川水域環境，但水庫及攔河堰的情況並不相同，攔河堰增加河道放流量至某特定量時可降低至整體低度改變，但水庫持續增加河道放流量仍無法降至整體中度改變，主要原因在於水庫蓄存大部分的流量，而攔河堰將超過引水量的流量再釋放於河川下游，因此可保有某種程度的流量變化範圍。在 0 至 60 cms 的河道放流量範圍內，利用妥協規劃求解之最佳河道放流量在南化水庫為 1 cms，甲仙攔河堰則為 5 cms，此情況下之南化水庫整體水文改變度為 70.8%，既有水權缺水率為 44.7%，計畫供水量缺水率為 14.2%；甲仙攔河堰之整體水文改變度為 69.8%，既有水權量缺水率為 36.1%，雖然二者的整體水文改變度仍同屬整體高度改變，但已較無河道放流量時改善甚多，且屬於高度改變之指標個數均大幅減少，惟其供水量及既有水權量的缺水率均有增加。
4. 若考慮南化水庫及甲仙攔河堰之河道放流量可隨豐枯季節改變，則其最佳河道放流量在南化水庫豐、枯季節均為 1 cms，甲仙攔河堰豐、枯季節分別為 3 cms 及 5 cms；南化水庫相對之計畫供水量及既有水權量缺水率分別為 13.0 及 44.7%，整體水文改變度為 70.3%，甲仙攔河堰既有水權量缺水率為 33.8%，整體水

文改變度為 71.0 %。與最佳定值河道放流量的結果相比較，水庫之最佳河道放流量並未改變，但攔河堰之河道放流量減少，因此水庫之計畫供水量缺水率及整體水文改變度均略減。

台灣南部河川各月份流量豐枯差別甚巨，南化水庫及甲仙攔河堰計畫河道放流量若隨月份變化是否能進一步改善定值或僅隨豐枯季節變化河道放流量的結果，值得深入的探討。惟直接延伸本文所建議的方法，其計算量將甚為龐大，如何較有效且迅速搜尋隨月份變化的最佳計畫河道放流量的計算方法將是下一階段之研究重點。其次，本文使用蕭政宗及吳富春(2004)之建議以權重平均的方式來評估整體的水文特性，此方法較著重受中度及高度改變的 IHA，只要有 1 個 IHA 歸類為中度或高度改變，則整體水文改變度亦歸類為整體中度及整體高度改變，未來如何將 32 個 IHA 之水文改變度以其他方式來加以詮釋將是另一個研究方向。不同標的用水對缺水的容忍程度並不相同，但本文對不同用水標的在妥協規劃中的權重值均取為一致，權重值與用水標的缺水特性之關聯如何在優選模式中加以考慮亦是另一可探討之處。

謝 誌

本研究部分研究經費承國科會經費補助 (NSC93-2218-E-032-003)，特此表示謝忱。

參考文獻

1. 吳富春、胡通哲、李國昇、李德旺，1998，「應用棲地模式估算台灣河川之生態流量」，第九屆水利工程研討會論文集，第 C21-C28 頁。
2. 胡通哲、葉明峰，2002，「基隆河生態基流量之研究」，第十三屆水利工程研討會論文集，第 F8-F13 頁。
3. 張楨驩、吳瑞賢、廖洪鎰、毛振泰，2002，「河川魚類棲地分布之推估與分析-以卑南溪上游為例」，第十三屆水利工程研討會論文集，第 F14-F23 頁。
4. 楊承峰、吳瑞賢、毛振泰、溫博文，2002，「河川低流量分流演算魚類棲地之研究-以烏溪上游為例」，第十三屆水利工程研討會論文集，第 F24-F31 頁。
5. 謝暉樟、吳瑞賢、溫博文、毛振泰，2002，「大漢溪中游生態流量推估與棲地改善之研究」，第十三屆水利工程研討會論文集，第 F32-F40 頁。
6. 陳弘由、謝國正、李世偉、王育民、王藝峰，2001，「河川保留基流量評估技術規範之研究」，第十二屆水利工程研討會論文集，第 F1-F7 頁。
7. 蕭政宗、吳富春，2004，「集集攔河堰最佳引水與河川生態流量之研究」，第十四屆水利工程研討會論文集，第 C1-C8 頁。
8. 蕭政宗，1999，「單一水庫系統缺水特性之探討」，台灣水利，第 47 卷，第 2 期，第 72-91 頁。
9. 經濟部水利處，2002，「曾文水庫及南化水庫聯合運用可行性規劃-三、工程可行性規劃專題，1. 相關工程規劃」。
10. Barson, J. S., Poff, N. L., Angermeier, P. L., Dahm, C. N., Gleick, P. H., Hairston, N. G., Jackson, R. B., Johnston, C. A., Richter, B. D., and Steinman, A. D., 2002. Meeting ecological and societal needs for freshwater, *Ecological Application*, 12(5), 1247-1260.
11. Dixon, W. D., and Cox, W. E., 1985, Minimum flow protection in riparian states, *Journal of Water Resources Planning and Management*, 111(2), 149-156.
12. Frissell, C. A., and Bayles, D., 1996, Conservation of aquatic biodiversity and ecological integrity, *Water Resources Bulletin*, 32(2), 229-240.
13. Goicoechea, A., Hansen, D. R., and Duckstein, L., 1982, *Multiobjective Decision Analysis with Engineering and Business Application*, John Wiley, New York.
14. Jowett, I. G., 1997, Instream flow methods: A comparison of approaches, *Regulated River:*

- Research and Management*, 13(2), 115-127.
15. National Research Council, 1992, *Restoration of Aquatic System: Science, Technology, and Public Policy*, National Academy Press, Washington, DC.
 16. Poff, N. L., Allan, J. D., Bain, M. B., Karr, J. R., Prestegard, B. D., Richter, B. D., Sparks, R. E., and Stromberg, J. C. , 1997, The natural flow regime: A paradigm for river conservation and restoration, *Bioscience*, 47(11), 22-29.
 17. Reiser, D. W., Wesche, T. A., and Estes, C., 1989, Status of instream flow legislation and practices in North American, *Fisheries*, 14(2), 22-29.
 18. Richter, B. D., Baumgartner, J. V., Powell, J., and Braun, D. P., 1996, A method for assessing hydrologic alteration within ecosystems, *Conservation Biology*, 10(4), 1163-1174.
 19. Richter, B. D., Baumgartner, J. V., Wigington, R., and Braun, D. P., 1997, How much water does a river need, *Freshwater Biology*, 37(1), 231-249.
 20. Richter, B. D., Baumgartner, J. V., Braun, D. P., and Powell, J., 1998, A Spatial assessment of hydrologic alteration within a river network, *Regulated River: Research and Management*, 14(4), 329-340.
 21. Shiau, J. T., and Wu, F. C., 2004a, Assessment of hydrologic alterations caused by Chi-Chi diversion weir in Chou-Shui creek, Taiwan: Opportunities for restoring natural flow conditions, *River Research and Application*, 20(4), 401-412.
 22. Shiau, J. T., and Wu, F. C., 2004b, Feasible diversion and instream flow release using Range of Variability Approach, *Journal of Water Resources Planning and Management*, 130(5), 395-404.
 23. Simonovic, S. P., and Burn, D. H., 1989, An improved methodology for short-term operation of a single multipurpose reservoir, *Water Resources Research*, 25(1), 1-8.
 24. Tennant, D. L., 1976, Instream flow regimes for fish, wildlife, recreation, and related environmental resources, *Fisheries*, 1(4), 6-10.
 25. Tharme, R. E., 2003, A global perspective on environmental flow assessment: Emerging trends in the development and application of environmental flow methodologies for rivers, *River Research and Applications*, 19(5-6), 397-441.

收稿日期：民國 94 年 5 月 31 日
修正日期：民國 94 年 8 月 9 日
接受日期：民國 94 年 9 月 2 日