

行政院國家科學委員會專題研究計畫 成果報告

攔河堰引水與河川生態流量最佳營運策略之評估

計畫類別：個別型計畫

計畫編號：NSC93-2218-E-032-003-

執行期間：93年08月01日至94年07月31日

執行單位：淡江大學水資源及環境工程學系

計畫主持人：蕭政宗

計畫參與人員：黃敬芳、張婉如、楊志傑

報告類型：精簡報告

處理方式：本計畫可公開查詢

中 華 民 國 94 年 8 月 1 日

一、計畫中文摘要

引水設施如攔河堰的興建與營運，雖然可為人類社會帶來供應水源的便利，但其對河川水域生態環境的影響近年來備受關注。為減緩水利設施對河川水域生態環境的負面衝擊，目前多半以維持最低河川生態流量的措施為主。但近年來對於河川生態環境的管理認為，維持河川流量的完全自然變化範圍(full range of natural variation)才是維持河川生態及生物多樣性的主要驅動力。延伸此一觀念所發展出來的變化範圍法(Range of Variability Approach, RVA)，係利用稱為水文改變指標(Indicators of Hydrologic Alteration, IHA)的水文參數來評估河川流量在量、時間、頻率、期距及變化率的改變情況，以瞭解河川流量受水利設施影響的程度及是否仍具有水利設施興建前之自然流量變化。為維持河川流量的自然變化範圍有時無法開發大量的水資源，而此會嚴重的影響到水利設施原本的引水功能及供水穩定度，因此如何在攔河堰引水及維持河川水域生態環境之間尋求一平衡點是水資源規劃、開發及管理非常重要的一環。由於取水與河川生態放流量對水利設施營運而言是相互衝突的標的，因此必需利用多標的優選模式(multi-objective optimization model)來尋求最佳的水利設施營運規則，以符合引水及河川生態環境上的雙重準則。

本計畫的研究目的為利用多標的優選模式尋求符合引水需求及河川水域生態環境標準的最佳攔河堰營運策略。河川水域生態環境將以具有自然變化範圍的流量為準則，亦即以變化範圍法的水文改變指標來評估河川水域生態環境受攔河堰引水的影響；在水利設施的營運方面將以缺水特性來評估，亦即以達不到計畫取水量的缺水率來評估攔河堰的營運成效。對於此二相互衝突的攔河堰營運標的，本計畫預計採用多標的妥協規劃(compromise programming)來尋求對河川水域生態環境影響最小且缺水率最低的攔河堰最佳營運策略。本計畫以位於濁水溪中游的集集攔河堰為例說明，演算結果顯示本計畫所建議的方法不僅可以瞭解攔河堰供水的風險，也儘量維持河川原有的自然流量變化，本計畫所建議的演算方法對目前的水資源管理及未來的水資源規劃將會有實質的助益。

關鍵詞：河川生態流量、變化範圍法、水文改變指標、多標的妥協規劃。

二、計畫英文摘要

Water resources facilities such as weirs offer water supplies to human beings. However, their influences on aquatic environments receive extensive attentions recently. To mitigate the negative impacts on aquatic environments caused by hydraulic structures, maintaining the minimum flows is a common measure in the past. The full range of natural variation of hydrologic regimes is considered as one of the driving force for sustaining the full native biodiversity and integrity of aquatic ecosystem. The Range of Variability Approach (RVA) is based on this concept and uses thirty-two hydrologic parameters, called Indicators of Hydrologic Alteration (IHA), to evaluate the hydrologic alteration of streamflows caused by hydraulic structures. These thirty-two hydrologic parameters include the magnitude, timing, frequency, duration, and rate of changes of stream flow characteristics. To maintain full range of natural variation of stream flows needs large instream flow release. This definitely affects the operation efficiency of water resources facilities. Multi-objective optimization model is needed to solve these conflicting objectives in operation of water resources facilities.

The major purpose of this project is to determine the optimal weir operation policy which simultaneously considering flow diversions and instream flow release. The RVA is used to evaluate the impacts on hydrologic alterations caused by flow diversion. Shortage characteristics are employed to assess the weir operating efficiency. Conflicting in water usages, the multi-objective compromise programming is used to derive the optimal weir operation policy that has the minimum impacts on aquatic environment and minimum water shortages. The Chi-Chi diversion weir, located at the midstream reach of Chou-Shui Creek, is used as an example to illustrate the proposed methodology. The results will inform the water resources managers not only the risk of water supplies, but also maintaining the natural stream flow variation to mitigate the negative impacts on aquatic environments.

Key words: Instream flow, Range of Variability Approach, Indicators of Hydrologic Alteration, Multi-objective compromise programming.

三、報告內容

(一) 前言

水利設施的興建與營運均有其特定的目標，例如給水、防洪、發電等，雖然可為人類社會經濟發展及生活品質改善帶來正面的效益，但其對環境的負面影響亦備受關注，特別是對河川水域生態環境的衝擊，例如水工結構物橫跨河川會影響迴游性魚類的移動、蓄引水設施會改變下游河川之水文及河相狀態，進而影響水中生物的棲息環境等。因此，近年來有關水利設施對河川環境影響的研究也日益增多，為減少水工結構物的設置對河川生態環境的影響，近年來對水域生態環境提供某種程度保護的要求愈來愈多，國內對於此方面也極為重視，在水資源政策白皮書(1997)中即對未來水利工程建設的原則有政策性的宣示：「生態保育與開發利用兼顧」，經濟部水利署(2002)於新世紀水利政策中亦提到以「建立生物多樣性河川環境」為目標。雖然河川生態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生態環境的負面衝擊，但是大量河川生態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河川生態流量之間尋求一平衡點是水資源規劃、開發及管理中非常重要的一環。由於河川取水與生態流量對水利設施營運而言是相互衝突的標的，亦即大量取水就無法保有足夠的河川生態流量以維持自然的河川流量變化範圍；相反的，保留足夠的河川生態流量可以維護一自然的水域環境，但引水量就可能無法達到預定的目標。因此，對於相互衝突的水利設施營運標的就必需利用多標的優選模式(multi-objective optimization model)來尋求最佳的水利設施營運規則，使符合引水及河川生態環境上的雙重準則。

(二) 研究目的

本計畫的研究目的為利用多標的優選模式尋求符合引水及河川水域生態環境標準的最佳水利設施營運策略。河川水域生態環境將以具有自然變化範圍的流量為準則，因此將以變化範圍法(Range of Variability Approach, RVA)來評估河川水域生態環境因水利設施引水所受的影響，而此一影響應該愈小愈好；另外在水利設施的營運效率方面將以缺水特性來評估，亦即以達不到計畫取水量的總量或比例來評估水利設施的營運成效，此一不足量亦應愈小愈好。由於此二標的是相互衝突的，亦即無法同時達到各別的最小值，因此必須以多標的規劃(multi-objective programming)的演算方式來找尋最佳解，本計畫預計採用妥協規劃(compromise programming)的演算方式來尋求對河川水域生態環境影響最小且引水不足量最少的水利設施營運策略。台灣地區現正朝向多元的水源開發方式，而其中的一項開發方式便是興建攔河堰，配合附近水庫以聯合營運的形式來供給水源，因此本計畫將以位於濁水溪中游之集集攔河堰為研究標的，利用妥協規劃演算方式的多標的優選模式，以變化範圍法來評估攔河堰引水的影響及以缺水特性來評估攔河堰的營運效率，尋求對河川水域生態環境及引水影響最小的最佳攔河堰營運策略。

(三) 文獻探討

有關水利設施對河川環境影響的相關研究有 Hadley 及 Emmett(1998)研究美國 Bear 河因興建水庫後對下游河川斷面之影響；Smith 等(2000)研究位於匈牙利與斯洛伐克間 Danube 河 Gabcikovo Barrage 系統因引水發電造成對環境之影響；Flug 等(2000)研究美國 Glen Canyon 壩對 Colorado 河流域環境之影響；Cowell 及 Stoudt(2002)研究美國 Kinzau 壩對 Allegheny 河上游之影響。

近年來對保護河川生態所需流量的推估方法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，但其目的均為對河川水域環境提供保護。Jowett(1997)回顧了各種方法後指出估測河川生態流量的方法可分為三類，即(1)歷史流量法(historical flow method)；(2)水力法(hydraulic method)；及(3)棲地法(habitat method)。歷史流量法僅利用河川過去的流量紀錄來推估所需的生態流量，例如最常用之 Tennant 法(1976)，此法假設河川若能維持平均流量之若干百分比即可擁有一健康的河流環境。水力法則先建立流量與河川斷面水力特性(如河寬、水深、流速、濕周等)間之關係，並以所建立之斷面特性標準決定河川生態流量。棲地法係水力法之延伸，主要的差異在於河川生態流量的評估是基於水力條件能滿足某特定生物需求(biological requirements)而非水力參數(hydraulic parameters)，例如目前廣被使用之物理棲地模式(Physical Habitat Simulation, PHABSIM)即屬於此類方法(Milhous 等, 1989)。國內近年來應用棲地模式於探討河川生態流量的研究頗多，相關研究有吳富春等(1998)應用棲地模式估測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佈；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；謝暉樟等(2002)應用棲地法推估大漢溪生態流量。除上述三種方法外，陳弘凸等(2001)指出尚有經驗法則，而此多半利用集水面積來決定河川應維持的流量，其並應用四種方法於評估及比較大甲溪馬鞍壩址所需要的河川保留基流量。

(四) 研究方法

I. 變化範圍法(Range of Variability Approach, RVA)

近年來許多研究河川流量變化與河川生態系統間關聯的報告(NRC, 1992; Poff 等, 1997)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(magnitude)、時間(timing)、頻率(frequency)、期距(duration)及變化率(rate of change)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, 以下簡稱為 RVA)，利用稱為水文改變指標(Indicators of Hydrologic Alteration, IHA)的 32 個水文參數評估受水利設施影響之河川流量狀態。水文改變指標(IHA)分為 5 組，包括河川流量特性在量、時間、頻率、延時及變化率的改變程度(Richter 等, 1996)。水文改變指標列於表 1 並說明如下：

1. 第 1 組

本組參數主要評估各月份的流量大小，包括一月至十二月各月份平均流量，共計 12 個參數。

2. 第 2 組

本組參數主要評估極端流量的狀況，包括年最大及年最小之 1 日、3 日、7 日、30 日及 90 日平均流量，計有 10 個參數；另一個參數為年最小 7 日流量對日平均流量之比值(此參數視為基流狀態)，因此本組總計有 11 個參數。

3. 第 3 組

本組參數主要評估極端流量的發生時間，包括年最大日流量及年最小日流量之發生日期，共計 2 個參數。

4. 第 4 組

本組參數主要評估高流量及低流量的發生頻率及延時，包括每年高流量及低流量的發生頻率及延時，共計 4 個參數。依據 Richter 等(1996)的定義，高流量指未興建水利設施前

之流量紀錄發生機率為 75%之日流量，而低流量為發生機率為 25%之日流量。

5. 第 5 組

本組參數主要評估日流量間之變化率及變化次數，包括每年相鄰二日流量間之平均流量增加率、相鄰二日流量間之平均流量減少率、流量逆轉(flow reversal)次數，共計 3 個參數。年流量逆轉次數代表河川日流量由增加變成減少或由減少變成增加的次數。

表 1. RVA 所使用之水文變化指標(IHA)

組別	內容	特性	參數
第 1 組	每個月之流量	量、時間	各月份之流量平均值
第 2 組	年極端值之量	量、延時	年最小 1 日流量平均值 年最大 1 日流量平均值 年最小 3 日流量平均值 年最大 3 日流量平均值 年最小 7 日流量平均值 年最大 7 日流量平均值 年最小 30 日流量平均值 年最大 30 日流量平均值 年最小 90 日流量平均值 年最大 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	年極端值之發生時間	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 流量平均減少率 每年流量逆轉次數

上述 5 組水文參數共計有 32 個水文改變指標來評估河川流量受水利設施引水的影響程度。RVA 需要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，以瞭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%，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流量的影響有限，仍然保有自然的流量變化範圍，但若受影響之流量紀錄落在 RVA 標的內的頻率遠大於或遠小於水利設施興建前的頻率，則代表水利設施已經改變了原有河川的流量變化特性，此將對河川水域生態環境有嚴重的負面影響。因此 RVA 的評估步驟可概略分為下列四個步驟：

1. 以水利設施興建前的日流量紀錄計算 32 個水文改變指標(IHA)的年變化情況；
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；
3. 演算水利設施興建後的日流量紀錄之 32 個水文改變指標(IHA)的年變化情況；
4. 以步驟 2.所得之 32 個水文改變指標 RVA 標的評估步驟 3.所得水利設施興建後的情況，即可瞭解水利設施的興建與營運對河川流量之影響程度。

為量化水文改變指標(IHA)受水利設施影響之改變程度，Richter 等(1998)建議以下式評估：

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

其中 D 為各個水文改變指標的水文改變度(degree of hydrologic alteration)；

N_o 為觀測年數，指水利設施興建後水文改變指標仍落於RVA標的內之年數；

N_e 為預期年數，指水利設施興建後水文改變指標預期落於RVA標的內之年數，可以 $r \times N_T$ 來評估，其中 r 為水利設施興建前之水文改變指標落於RVA標的內之比例，而 N_T 為水利設施興建後受影響流量紀錄之總年數。

為對水文改變指標的水文改變度嚴重與否有一客觀的判斷標準，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 個水文改變指標受水利設施興建與營運影響的程度。

II. 整體水文改變度

至於 32 個水文改變指標間不同的水文改變度該如何評估呢？Richter 等(1998)曾以平均值來評估河川水域生態環境的整體變化情形，然而，依此整體平均的評估方式將無法顯現具有中度及高度改變的水文改變指標。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)另建議以下列權重平均的方式來評估整體的水文特性改變的情況，分為三種情況。第一種情況為 32 個水文改變指標都屬於低度改變，即 D 值均小於 33%，則整體水文改度(overall degree of hydrologic alteration)，以 D_o 來代表，取 32 個水文改變指標 D 值之平均值，如下式所示：

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

上式 D_o 的數值將會低於 33%，代表整體低度改變(overall low alteration)。第二種情況為 32 個水文改變指標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：

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

其中 N_m 為屬於中度改變的水文改變指標個數。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(overall medium alteration)。第三種情況為 32 個水改變指標中至少

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：

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

其中 N_h 為屬於高度改變的水文改變指標個數。 D_o 值將高於67%，代表整體高度改變(overall high alteration)。

本計畫所使用的權重平均評估方式有下列幾項優點，其一為可以突顯水文改變指標中屬於中度或高度改變的現象，不會因為取平均值而消失；其二為仍然分為三階段，且三階段的分界與 Richter 等(1998)當初的建議值一致；其三為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。

III. 攔河堰營運模式

橫跨河川的攔河堰為台灣地區常見的水利設施，因此本計畫以攔河堰為研究對象，探討攔河堰引水後對河川水域生態環境的影響，及尋求對河川水域生態環境影響最小且缺水量最小的攔河堰最佳營運策略。圖 1 所示即為攔河堰引水的示意圖，其中 Q_N^t 為攔河堰未引水前的河川天然流量； Q_D 為攔河堰的計畫引水量，假設為已知值； Q_{DF}^t 為攔河堰的實際引水量； Q_{IF} 為河川生態放流量，此生態放流量優先於攔河堰引水，即攔河堰的營運應優先滿足河川生態放流量後才引水； Q_E^t 為攔河堰引水後的河川剩餘流量。

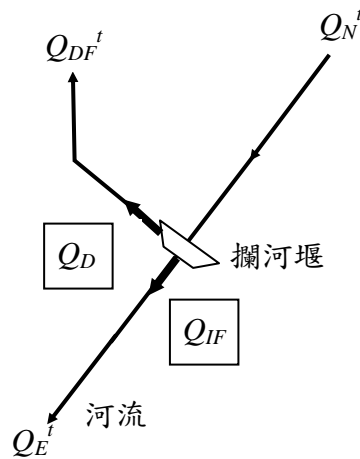


圖 1. 攔河堰引水示意圖

上述各變數間之關係如下式所示：

$$\begin{cases} Q_E^t = Q_N^t, Q_{DF}^t = 0 & \text{當 } Q_N^t < Q_{IF} \\ Q_E^t = Q_{IF}, Q_{DF}^t = Q_N^t - Q_{IF} & \text{當 } Q_{IF} \leq Q_N^t < Q_D + Q_{IF} \\ Q_E^t = Q_N^t - Q_D, Q_{DF}^t = Q_D & \text{當 } Q_N^t \geq Q_D + Q_{IF} \end{cases} \quad (3)$$

第一式為當河川天然流量少於生態放流量時，則攔河堰不引水，全數保留為生態放流量；第二式為當河川天然流量高於生態放流量但低於生態放流量與計畫引水量之合時，則優先滿足生態放流量，此種情況下實際引水量將低於計畫引水量；第三式為當河川天然流量高於生態放流量與計畫引水量之合時，此種情況下將可有充分的取水量。前二種情況都是實際取水量少於計畫取水量，因此會有缺水的現象產生，缺水的現象非常複雜，有許多的缺水指標可用來評估缺水的特性(蕭政宗，1999)，在此僅以缺水率(shortage ratio, SR)來表示，

缺水率定義為分析時程內總缺水量對總需水量的比值(Cancelliere et al., 1998),如下式所示:

$$SR = \frac{\sum_{t=1}^N S_D^t}{NQ_D} \quad (4)$$

其中 S_D^t 為 t 時刻之缺水量, 定義為:

$$S_D^t = \begin{cases} |Q_{DF}^t - Q_D|, & \text{當 } Q_{DF}^t < Q_D \\ 0, & \text{當 } Q_{DF}^t \geq Q_D \end{cases} \quad (5)$$

河川生態放流量 Q_{IF} 為攔河堰營運模式的決策變數, 在已知計畫引水量 Q_D 的情況下, Q_{IF} 愈大對河川水域生態環境的影響愈小, 但將會使得缺水率愈大; 反之, Q_{IF} 愈小對河川水域生態環境的影響愈嚴重, 但缺水率愈小。 Q_N^t 為攔河堰未引水前的河川天然流量, 先以 Q_N^t 評估水文改變指標的變化情形並制定RVA標的, 之後以攔河堰引水後的河川流量 Q_E^t 評估建堰之影響並計算水文改變度 D 值。因此攔河堰的營運目標有二, 其一為儘量減少缺水率 SR , 另一為儘量降低引水後的整體水文改變度 D_o , 由於此二營運標的相互衝突, 因此必須以多標的規劃模式來尋求攔河堰的最佳營運策略。

IV. 多標的優選模式 (Multi-objective Optimization Model)

在前述的攔河堰營運模式中所考慮的主要標的為引水及河川引水後水文特性的改變, 此二標的分別以缺水率及RVA中水文改變指標的整體改變度來定義, 即前述(4)式之 SR 與(2)式之 D_o 。因此, 攔河堰營運模式的目標就是同時要將此二標的最小化, 亦即

$$\text{Min } \{SR, D_o\} \quad (6)$$

由於此二標的相互衝突, 引水量大則缺水率小, 但是對河川水域生態環境的改變較大; 相反的, 取水量小對流量特性的改變較小, 但會有較大的缺水率。對於此種情況, 可利用多標的規劃 (Multi-objective programming) 的方式來求解, 多標的規劃求解的方式有許多種 (Goicoechea 等, 1982), 本計畫預計採用妥協規劃 (Compromise programming), 妥協規劃是 Zeleny (1973) 所發展出來的, 已有許多學者將之應用於尋求水庫的最佳操作策略, 例如 Duckstein 及 Oprocovic (1980)、Simonovic 及 Burn (1989)、Simonovic 等 (1992) 等。妥協規劃的優點在於其非常適用於離散 (discrete) 的優選問題, 而且可依決策者對標的的重要與否給於不同的權重值, 因此對於本計畫預計研究的攔河堰引水與維護河川水域生態完整性的問題非常適用。

以本計畫所欲應用的攔河堰營運為例說明妥協規劃的演算方式, 能同時讓缺水率 SR 及河川整體水文改變程度 D_o 達到各別的最小值為最佳的攔河堰營運方式, 但相互衝突的標的不能同時達到各別的最小值, 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), 妥協規劃即以距離同時具有最小標的的理想點的最短距離 (L) 的點為最佳解, 因此(6)式可改寫為:

$$\text{Min } L = \text{Min} \left[w_1^p \left(\frac{SR^b - SR}{SR^b - SR^w} \right)^p + w_2^p \left(\frac{D_o^b - D_o}{D_o^b - D_o^w} \right)^p \right]^{1/p} \quad (7)$$

其中 L 為理想點 (SR^b, D_o^b) 與任意點 (SR, D_o) 間的距離;

上標 b 與 w 分別代表最佳與最差的標的函數值，在本計畫中即為最小與最大的標的函數值；

w_1 與 w_2 為權重值，且 $w_1 + w_2 = 1$ ；

p 為一介於 1 至 ∞ 間的參數，當 $p = 1$ ，距離理想點的權重一致，當 $p = 2$ ，權重與標的值成比例，當 $p = \infty$ ，所解的問題即成為 Min-Max 的問題。

妥協規劃演算時將分為二階段，第一階段為計算不同河川生態放流量 Q_{IF} 時的缺水率 SR 及河川整體水文改變度 D_o ；第二階段則以第一階段演算所得的結果為基礎，先找尋演算結果中的最小與最大的 SR 與 D_o ，再利用(7)式求取最佳解。

(五) 結果與討論

I. 個案研究：集集攔河堰

濁水溪流域位於台灣中部，流域面積 3,155 平方公里，其相關位置請參閱圖 2。濁水溪兩岸約十萬公頃農田為台灣農業生產的精華區，為提供濁水溪流域鄰近區域穩定的供水，在 1984 年間即開始規劃集集共同引水計畫，建造集集攔河堰，統籌調度濁水溪水源以提供農業、生活及工業用水(王雄及林玲珠，1998)。



圖 2. 濁水溪流域及集集攔河堰相關位置圖

以集集站(1510H021)的流量紀錄來代表集集攔河堰的入流量，該站 1951 年至 1993 年的平均日流量如圖 3 所示，有明顯的季節性分布，年平均逕流量約為 42.3 億立方公尺，其中約有 76.4% 的逕流量集中在五月至十月的半年期間。集集攔河堰目前登記為農業、生活及工業用水的水權量分布如圖 3 所示，約有 32.7 億立方公尺(經濟部水利處，2000)，約佔年平均逕流量的 77.2%，一至三月及十一至十二月份的水權量大於平均日流量，顯示該期間恐無法提供穩定的水源。

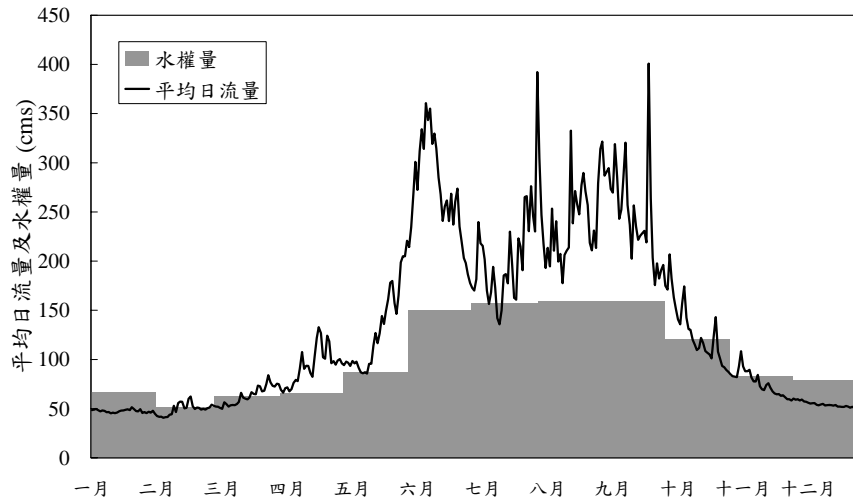


圖 3. 集集攔河堰平均日流量與水權量

II. 現有水權量下之水文改變度及攔河堰最佳營運策略

本計畫假設攔河堰的營運策略必須優先滿足河川的生態需求，有多餘的河川逕流才予以引水供應農業等其他用途。生態放流量 Q_{IF} 的範圍假設在 0 與 150 cms 之間，依照(3)式演算在不同生態放流量情況下之引水量及引水後河川剩餘流量，而後分別依(4)式及(2)式評估在該生態放流量情況下之缺水率 SR 及整體水文改變度 D_o 。圖 4 所示即為缺水率及整體水文改變度隨攔河堰增加生態放流量之變化情況，缺水率及整體水文改變呈現相反的變化趨勢，缺水率隨生態放流量增加而增大，從 0 cms 生態放流量的 20% 增加到 150 cms 生態放流量的 81.4%，而整體水文改變度隨生態放流量增加而減小，起初減小幅度甚小，都維持在整體高度改變情況，但生態放流量分別增加至 143 及 150 cms 時則整體水文改變度巨幅下降至整體中度及低度改變，此變化趨勢與先前的研究成果相若(Shiau及Wu, 2004a, 2004b)。在考慮相同的權重 ($w_1 = w_2 = 0.5$) 及 $p = 2$ 的條件之下，依(7)式所得最佳的生態放流量為 39 cms，所造成的缺水率為 47.2%，整體水文改變度為 73.1%，屬於整體高度改變情況。

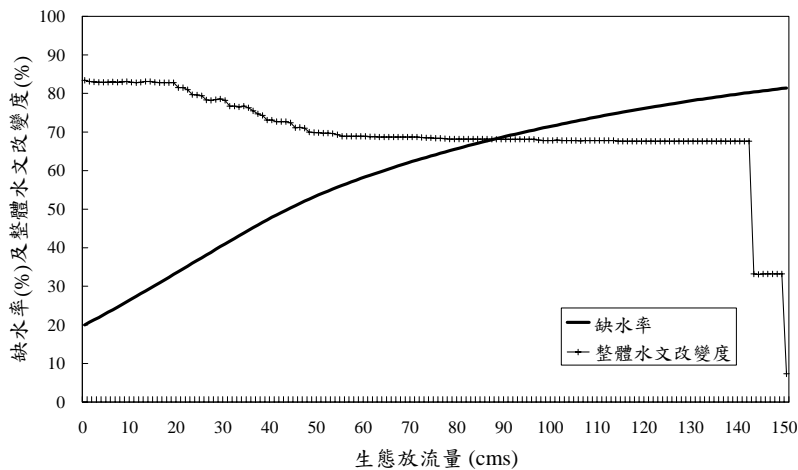


圖 4. 缺水率及整體水文改變度隨生態放流量增加之變化情況

III. 減少需水量下之水文改變度及攔河堰最佳營運策略

假設未來因加入 WTO 或其他因素影響使得需水量不如現有水權量大，本計畫所考慮減少需水量的情況有底下二種，其一為依照各月份原有水權量以相同的比例減少，其二為豐水期水權量減少的比例較小，而枯水期減少的比例較高。

本計畫所考慮的第一種減少需水量的狀況計有以下四種：即原有水權量的 80%、60%、40% 及 20% 等；而第二種其況則依豐枯期的不同有不同比例，一至十二月份本計畫採用的比例分別為 10%、10%、20%、30%、50%、70%、60%、60%、40%、20%、10% 及 10%，此比例之總需水量為 12.8 億立方公尺，約為原有水權量的 39.2%。這五種情況之缺水率及整體水文改變度隨生態放流量增加之變化趨勢分別示於圖 5 及圖 6。不同水權量情況下之缺水率變化趨勢一致，均隨生態放流量增加而增大，且低比例水權量之缺水率較低，但不同比例水權量在生態放流量大於 46 cms 之缺水率小於 20% 水權量之缺水率。而整體水文改變度隨生態放流量增加而減小，且增加至某一量後即可降低至中度或低度水文改變狀況。

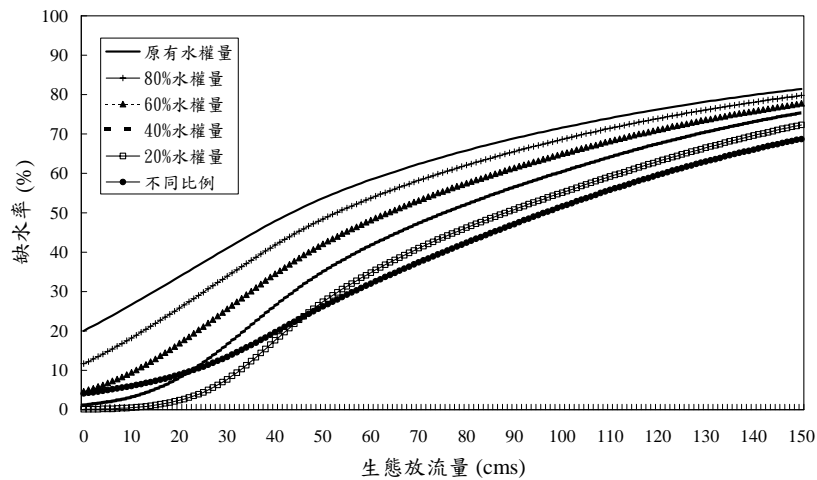


圖 5. 不同水權量情況下缺水率隨生態放流量增加之變化情況

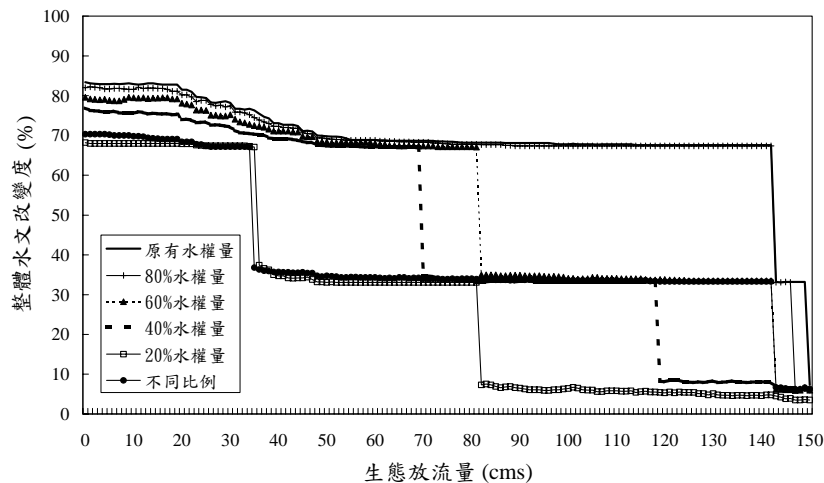


圖 6. 不同水權量情況下整體水文改變度隨生態放流量增加之變化情況

在考慮相同的權重 ($w_1 = w_2 = 0.5$)及 $p = 2$ 的條件下，不同水權量之最佳營運策略如表 2 所示。需水量減少的比例愈大，缺水率愈低且能維持較低的整體水文改變度，而本計畫所建議之不同比例減少豐枯期水權量的缺水率及整體水文改變度約略與 20%水權量的情況相當，但供水量卻約有原水權量的 40%，顯見本計畫建議的引水策略比 40%水權量的情況有較高的供水穩定性，而其整體水文改變度僅略為增加。

表 2 不同水權量情況下之最佳策略

水權量情況	生態放流量(cms)	缺水率(%)	整體水文改變度(%)
原有	39	47.2	73.1
80%	39	41.0	72.3
60%	82	58.3	35.0
40%	65	44.6	35.0
20%	39	16.5	35.0
不同比例	36	17.0	36.3

(六) 結論與建議

1. 本計畫以多標的規劃方式整合水域生態環境影響及水利設施營運效率以建立攔河堰的最佳營運策略，所得策略不僅可以瞭解攔河堰供水的風險，更可以儘量維持河川保有自然的流量變化範圍。
2. 本計畫以變化範圍法評估河川生態環境受攔河堰引水之影響，整體水文改變度隨生態放流量增加而減小。而攔河堰的營運效率則以缺水率來代表，缺水率隨生態放流量增加而增大。至於此二相互衝突的營運標的，本計畫則以多標的妥協規劃尋求最佳的營運策略。
3. 集集攔河堰在現有水權量情況下，不僅無法有穩定的供水且對河川生態環境影響極大，本計畫建議水權量隨豐枯期依不同比例減少，雖然引水量較原有水權量少，但相對的可有較穩定的供水量，且對河川水域生態環境影響較輕微。

四、參考文獻

- 水資源政策白皮書，1997，經濟部水資源局。
- 水利署業務展望，2002，經濟部水利署。
- 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，中壢，C21-C28 頁。
- 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，斗六，F8-F13 頁。
- 張楨驩、吳瑞賢、廖宏鎰、毛振泰，2002，河川魚類棲地分佈之推估與分析研究-以卑南溪為例，第十三屆水利工程研討會，斗六，F14-F23 頁。
- 楊承峰、吳瑞賢、毛振泰、溫博文，2002，河川低水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，斗六，F24-F31 頁。
- 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，斗六，F32-F40 頁。

- 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，台南，F1-F7 頁。
- 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，新竹，C1-C8 頁。
- 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。
- 王雄、林玲珠，1998，濁水溪水資源統籌調配之總樞紐-集集共同攔河堰計畫，第九屆水利工程研討會，中壢，D1-D13 頁。
- 經濟部水利處，2000，曾文水庫及南化水庫聯合運用可行性規劃。
- Cancelliere, A., Ancarani, A., and Rossi, G., 1998, Susceptibility of water supply reservoirs to drought conditions, *Journal of Hydrologic Engineering*, 3, 140-148.
- Cowell, C. M., and Stoudt, R. T., 2002, Dam-induced modifications to upper Allegheny River streamflow patterns and their biodiversity implications, *Journal of the American Water Resources Association*, 38, 187-196.
- Duckstein, L., and Opricovic, S., 1980. Multiobjective optimization in river basin development. *Water Resour. Res.* 16(1), 14-20.
- Flug, M., Seitz, H. L. H., and Scott, J. F., 2000, Multicriteria decision analysis applied to Glen Canyon dam, *Journal of Water Resources Planning and Management*, 126, 270-276.
- Goicoechea, A., Hansen, D. R., and Duckstein, L., 1982. Multiobjective Decision Analysis With Engineering and Business Applications. John Wiley, New York.
- Hadley, R. F., and Emmett, W. W., 1998, Channel changes downstream from a dam, *Journal of the American Water Resources Association*, 34, 629-637.
- Jowett, I. G., 1997, Instream flow method: a comparison of approaches, *Regulated Rivers: Research and Management*, 13, 115-127.
- Milhous, R. T., Updike, M. A., and Schneider, D. M., 1989. *Physical habitat simulation system reference manual – Version II*. Instream Flow Information Paper No. 26. Biological Report 89(16). US Fish and Wildlife Service: Washington, DC.
- National Research Council. 1992. *Restoration of Aquatic Systems: Science, Technology, and Public Policy*. National Academy Press, Washington, DC.
- 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, 769-784.
- Richter, B. D., Baumgartner, J. V., Powell, J., and Braun, D. P., 1996. A method for assessing hydrologic alteration within ecosystems. *Conservation Biology*, 10, 1163-1174.
- Richter, B. D., Baumgartner, J. V., Wigington, R., and Braun, D. P., 1997. How much water does a river need. *Freshwater Biology*, 37, 231-249.
- Richter, B. D., Baumgartner, J. V., Braun, D. P., and Powell, J., 1998, A spatial assessment of hydrologic alteration within a river network, *Regulated Rivers: Research and Management*, 14, 329-340
- 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.

- 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.
- Simonovic, S. P., and Burn, D. H., 1989. An improved methodology for short-term operation of a single multipurpose reservoir. *Water Resour. Res.* 25(1), 1-8.
- Simonovic, S. P., Venema, H. D., and Burn, D. H., 1992. Risk-based parameter selection for short-term reservoir operation. *J. Hydro.* 131, 269-291.
- Smith, S. E., Buttner, G., Szilagyi, F., Horvath, L., and Aufmuth, J., 2000, Environmental impacts of river diversion: Gabcikovo Barrage System, *Journal of Water Resources Planning and Management*, 126, 138-145.
- Tennant, D. L., 1976, Instream flow regimes for fish, wildlife, recreation, and related environmental resources, in Orsborn, J. F. and Allman, C. H. (Eds), *Proceedings of the Symposium and Speciality Conference on Instream Flow Needs II*. American Fisheries Society, Maryland, 224-234.
- Zeleny, M., 1973. *Compromise Programming in Multiple Criteria Decision Making*, edited by J. L. Cochrane and M. Zeleny, University of South Carolina Press, Columbia.

五、計畫成果自評

本計畫是國內首度以水文變化範圍法(RVA)配合多標的規劃模式尋求攔河堰最佳營運策略之研究，並將應用於濁水溪集集攔河堰，研究成果證實本計畫所建議之方法可有效量化攔河堰的營運績效及其對河川水域生態環境之影響，研究所得成果不僅達到預期目標，並於研究期間發表一篇論文，另已投稿二篇論文，研究成果豐碩。