

# 廣域水資源開發計畫之最佳排程分析

## Optimal Scheduling of Regional Water Resources Developments

國立成功大學水利及海洋工程學系  
教授

周 乃 昉\*

Frederick N.-F. Chou

國立成功大學水利及海洋工程學系  
博士候選人

李 皓 志

Hao-Chih Lee

### 摘 要

當供水系統無法負荷與日俱增之用水需求時，一般以開發水資源設施提高系統供水能力因應。就經濟觀點而言，需在滿足未來各年期需求水量，或一可容忍之缺水限度下，尋求規劃期程內總建造與營運成本最小的整體開發策略。在已有許多設施營運下之廣域系統，安排新設施的開發期程，必須先確認既有設施與新開發設施並存下的系統整體可供水量或新設施的增供水量，本文運用通用性廣域水資源運用模擬模式，依據水庫運用規線及其他水源運用原則，計算每一新增設施或數個設施組合對系統的增供水量，再應用動態規劃法求得最佳的系列所需開發方案與其供水年度。本研究以台灣北部基隆河水系總體開發規劃為例，對有關單位擬議的開發方案，分析該系統最小總開發成本的水資源計畫開發期程。

**關鍵詞：**水資源開發，排程，動態規劃，網流模式。

### ABSTRACT

Developing water resources facilities is the traditional measure to reduce the shortage if the yield of a water supply system is unable to cope with the rising demand. The optimal capacity expansion strategy should provide sufficient water to satisfy the required demand during the time horizon with minimum construction and operation, maintenance and repairment costs. The yield of a regional system is jointly contributed by existing and newly developed water resource facilities. It should be estimated before setting up the optimal scheduling strategy of proposed projects in a regional water supply system. This paper applied a generalized water resources allocation model to simulate the increased system yields of different combinations of proposed water resource facilities.

\*通訊作者，國立成功大學水利及海洋工程學系教授，70101 台南市東區大學路 1 號，hyd4691@mail.ncku.edu.tw

It then applied the dynamic programming to optimize the schedule of developing proposed projects to reliably supply water. This study devised the master plan of the Keelung river system in northern Taiwan as an example. All potential projects scheduled were proposed by Water Resources Agency, Taiwan. The optimal scheduling strategy of minimum developing cost in the studied time horizon of the Keelung river system was determined along with meeting future water demands.

**Keywords:** Water resources development, Project scheduling, Dynamic programming, Network flow model.

## 一、前言

由於經濟與人口的快速成長，未來許多地區用水需求激增，以致超過廣域水資源系統之可供水量，解決缺水最有效的方法為開發新水源，直接增加供水系統之可供水量。Luss (1982)指出水資源系統供水能力擴充(capacity expansion)課題乃是由有限的擬議方案中選取適當方案開發，亦即於滿足分析期程各階段用水需求與最小化開發成本目標下，尋求擬議方案之最適開發順序。擬議方案必須已符合環境、生態、社會、政治、財務及工程技術等限制條件方得以納入選擇。擬議方案的階段開發、開發規模影響最佳開發策略，當方案數量增加，或方案開發規模可增減，均會導致廣域供水系統的開發排程分析更形複雜。針對一流域或廣域供水系統處理開發課題之排程時，必須先分析可能擬議方案組合之系統可供水量及各擬議方案之總開發成本，方可求解最佳開發排程策略。

由於水資源設施開發順序與規模相互影響，分析開發排程時，數項因素必須納入考慮：(1)所有納入排程分析的開發方案必須預期可通過環境影響評估；(2)每一方案所需的工期；(3)開發規模；(4)規劃期程內各階段需求水量；(5)不同開發方案組合之水量運用原則及系統可供水量。本文採用網流模式模擬廣域水源運用，依據水庫運用規線及其他水量運用原則，模擬在既有設施與新開發方案並存下的系統整體可供水量，然後應用可有效求解排程問題的動態規劃法(Luss, 1982)，在設定的條件下分析各開發方案

開發與否、彼此間開發順序及開發方案開始供水之時機，其中系統狀態取為新開發方案之組合，控制變量則取為該階段內可新增供水的方案。實務上可在客觀的分析條件變動時，即時運用本文所建置之方法，重新修正水資源開發綱領計畫中各設施最適當的興建期程。

基於上述問題背景，本文探究最小開發成本之廣域水資源系統供水設施興建排程，主要分析內容涵蓋最適開發方案選擇及如何決定其開發規模與開發順序，並配合規劃時程各階段需求水量，求出各方案開始供水時間。

## 二、文獻回顧

1960年代開始，全世界許多重要流域的水資源開發均邁入流域整體規劃時代，因應整體開發之方案排程所需，許多學者投入探討水資源系統的最適整體開發策略(Viessman, 1985)。

由於方案屬於離散個體，且開發課題涵蓋長期之時間排程與累計開發成本，動態規劃為可以直接完整應用的分析方法，前人以之求解最佳排程問題的文獻包括：Butcher 等人(1969)在滿足已知用水需求過程下，以最小化開發成本現值為目標函數，利用動態規劃法自擬議方案中求得開發順序與各方案開始供水時間。Jacoby 與 Loucks (1972)整合模擬模式與優選模式探討 Delaware 河流域 35 座水庫之最佳開發策略，目標函數為最大化系統之年供水、水力發電、休閒遊憩、洪水及水質控制之總效益，他們先以序率線性規劃優選廣域系統內各擬議方案開發組合的最佳操作策略，再採用模擬模式計算該組合的最大淨效

益，最後以動態規劃分析開發排程。Hinomoto (1972)應用動態規劃法求解公共用水系統新淨水場之擴充問題，目標函數為最小化總投資及操作成本，最佳開發策略則包含興建時機與開發規模。

在滿足需求下，Erlenkotter (1973a)在擬議的開發方案中，尋找最小開發成本現值的開發順序。他指出開發順序課題有二個特性：一為於某特定情境下，系統擴充時機僅由需求與系統供水量之關係即可決定，另者為開發時機支配特性 (timing dominance property)，即平均單位成本愈高，開發順序愈晚。他以二元狀態變量表示每一開發方案，並以動態規劃證明僅依據平均單位成本決定開發順序並不正確。而正確的開發順序必須同時考量方案間的綜合作用，應用動態規劃選擇開發尺度及順序時，延續之前採用的二元狀態變量，每一狀態向量代表所有方案的開發狀態。Erlenkotter (1973b)於最小開發成本滿足電力需求下，以動態規劃法描述一流域的水力發電開發問題，並將上下游水力發電設施間的相互影響納入考量，結果顯示當系統內水力發電設施彼此間具有相關時，尚不致顯著增加開發問題分析的困難度。Kuiper 和 Ortolano (1973)評估巴西一水力及火力混合的發電系統的擴充規劃，他們以動態規劃求解替代電廠之開發順序，由於模擬所有可能電廠開發狀態的發電量過於耗時，改以一計算快速的近似模擬模式概估系統發電量。在動態規劃法中，以電廠開發組合為狀態變量，目標函數為最小化總成本現值。

Morin 和 Esogbue (1971)發展一嵌入式狀態空間動態規劃法(imbedded state space dynamic programming approach, ISSDP)解決維度問題並加快計算速度。應用此法可求得最小總開發成本現值的開發方案與開始供水時機。Morin (1973a)舉例說明傳統動態規劃法對水資源開發策略問題可能無法求得最佳解，並論證 ESSDP 的計算效率優於傳統動態規劃法，及可用以求解大部分的排程問題。Morin (1973b)採用 ISSDP 求解數個實際水資源系統的一些 2 維或 3 維狀態變數排序問題，並敘述其計算經驗，另針對分析數據進行敏

感度分析。為簡化命題尺度，Morin and Esogbue (1974)指出在一維的排序問題中，若不同的方案子集合中，所有開發方案都有相同容量或相同成本，則在任意的最佳順序中，這些方案依照單位容量之開發成本由小而大之排序不會改變。

Becker 和 Yeh (1974a)指出一流域可靠出水量除與水庫規模相關外，亦與系統架構與水庫操作有關。他們利用前向遞移動態規劃結合流域的水庫操作模擬模式求解廣域供水系統水資源設施之開發順序、規模及開始供水時機，並以最小化總開發成本現值為目標函數。另於文中指出系統出水量與一特定地點水庫開發成本間並不具直接關聯性，既有系統與新規劃系統二者間亦非獨立無關。Becker 和 Yeh (1974b)則合併出水分析與水電開發求解多目標計畫之開發排程。Erlenkotter (1975a)指出 Becker and Yeh (1974a)採用之前向遞移動態規劃屬於一種啟發法，因為其利用兩個二維矩陣描述替代方案水庫之布置型態無法表達所有方案的開發規模，可能無法求得全域最佳解。Braga 等人(1985)發展一容量擴充模式規劃巴西聖保羅省 Juquia 河水資源系統(水庫與抽水站)的整體開發策略，由於事先設定由上游向下游逐一開發，規劃課題簡化為開發時程與規模。因抽水站與水庫間會交互影響(trade-off)所需規模，他們採用一啟發性計算程序，對每一開發策略進行 42 年的月運用模擬，在滿足用水需求及最小化最上游水庫的溢流量下，以動態規劃法尋求可達到最小總開發成本現值之水庫與抽水站最佳開發規模與啓用時機。Kim 和 Yeh (1986)提出一啟發式程序求解排程策略，該啟發程序整併一用來產生基本開發順序的最短路徑動態規劃法(shortest path dynamic programming, SPDP)及一用來改善方案規模的單變數循環搜尋程序(cyclic coordinate univariate direct search procedure)。以 SPDP 求解問題可於較少狀態下尋求解答，但因已限制狀態範圍，所以無法保證求得最佳解。他們先以一簡易之假設系統，在已知開發規模與未知開發規模二種情境下，比較其他不同求解程序得到之開發順序，此諸程序包括：imbedded state space DP, binary state space DP, Minimum Annual

Cost (MAC) decision rule, incomplete dynamic programming-MAC decision rule, SPDP-20, SPDP-10, total enumeration 等。應用上分析北加州 Eel 流域的開發課題，結果顯示啓發式程序求得之開發時機與規模，於滿足成長需求與最小化總開發成本下，優於其他六種求解程序。

Martin (1987)整合動態規劃 DPSIM-I 模式、AL-V 模式與 SIM-V 模式，發展出一套求解系統容量擴增策略的計算程序，可自多個擴增替代方案中，評估近似實際最小經濟成本的系統容量擴增策略，並應用於美國德州之 Guadalupe and San Antonio 流域。蔣錦華與朱文生(1989)發展港灣水質規劃模式以優選最小整治成本之港灣水質管理策略，首先建立模式模擬港灣水理及水質，並據以建立水質反應函數(Water Quality Response Function)。在既訂管理目標及各項限制條件下，採用離散前向式動態規劃法(Discrete Forward-Moving Dynamic Programming)與水質反應函數(Water Quality Response Function)找出各整治方案之最佳整治期距(Timing)、整治程度(Sizing)、及實施順序(Sequencing)。此最佳策略內涵包含各污染源之處理程度、各階段之整治時間以及各污染源之整治順序。

能邦顧問公司(經濟部水利署，2006)採用 Becker 和 Yeh (1974a)所提出之動態規劃容量擴充命題型式，在滿足目標年用水需求與各方案開發尺度限制下，於各項調配農業用水情境下，評估桃竹地區多元化水源的開發策略，多元化水源方案包括海水淡化廠、廢污水再生利用場與平地水庫。周乃昉與李皓志(2008)以模擬法配合動態規劃，評估基隆河系統的最適開發排程，並與採用工程師經驗法則、規劃方案總開發成本及單位原水成本等原則所研擬之三種開發策略比較，結論以動態規劃所研擬的開發策略最為經濟；其中動態規劃分析考慮部分方案開發具有先後順序之要求，可適用探討水壩階段性加高之最佳興建時程。Luo 等人(2007)混合區間數量優選分析(interval-number optimization)與序率動態規劃(stochastic dynamic programming, SDP)組成區間序率動態規劃(interval SDP)模式，探討具不確定

性環境的水資源開發。該模式可反映機率流量與離散時間間隔的不確定性，可處理具備動態、資料不確定及多階段等特性之規劃問題，並以一簡單案例證明該模式可行，且探討影響分析成果之重要因子。Chang (張良正)等人(2009)以遺傳演算法(genetic algorithm)的染色體代表地下水利用之替代方案，再用受限微分動態規劃法(constrained differential dynamic programming)分析最佳抽水策略及相關之代表染色體，據以對成長的需求求解最佳開發策略，分析成果顯示可較傳統設計方法減少開發成本現值。

其他以非動態規劃方法求解排程問題的文獻包括：Young 等人(1970)應用模擬法分析廣域水資源系統的局部最佳開發策略。O'Laoghaire 和 Himmelblau (1971, 1972)爲了自有限的可行方案中尋找合適方案開發，並求解應上場供水的時間，目標函數採最大化總淨效益現值，在預算、社會、物理及需求等限制下，發展一水資源系統最佳開發策略分析模式：該模式以混合整數規劃法(0-1 mixed integer programming problem)建立系統開發命題，再以分支界定法(branch-and-bound algorithm)尋求可行之方案組合，每一開發方案組合之最佳效益以網流分析程式求解。Tsou 等人(1973)發展一啓發式搜尋法，採用等級指標(ranking index)做爲開發策略評估準則，該指標類似 Erlenkotter (1973a)提出之年成本因子。Piper 等人(1989)以模擬模式分析泰國北部 Chi 流域內多個水庫與農業開發的各種組合計畫情境，若欲應用該模式評估其他流域的整體開發時，則須針對流域特性重新撰寫模擬模式。Geriani 等人(1998)發展一最小成本模式分析利比亞人造河方案(Great Man-Made River Project, GMRP)之最佳開發方案組合，包括系統內各設施設計流量，井的口數，輸水管、抽水站與海淡廠規模，並依據不同方案模擬結果評估各開發方案之容量擴增與開發效益。Hsu (徐年盛)等人(2007)發展一套分析水資源系統開發策略之計算程序，利用網流模式、四種評估指標及一系列步驟分析既有系統的供水瓶頸，以缺水指數(shortage index, SI)與穩定度(stability degree, SD)確認系統是否有供水瓶

頸，另以負載率(loading rate, LR)與滿載頻率(congestion frequency, CF)尋找系統的供水瓶頸，他們並應用該法分析頭前溪水資源系統之最佳開發策略。王鑫儒與徐年盛(2008)結合選擇權分析與傳統優選模式，評估埤塘的容量擴充時程問題，透過實質選擇權分析，評量不同情境下擴充時程對水利設施效益的影響。由分析結果可知若擴充容量後之運用效益足以彌補前期缺水損失時，越早執行擴充容量越好。

### 三、研究方法

#### 3.1 廣域水資源方案開發排程之數學命題

分析最佳的長程水資源開發策略，必須將所有可行方案之開發組合納入篩選，包括各蓄水設施與導水管路的各種可能容量，並須正確模擬每一方案組合的供水能力，方可求得最佳解。由於單一方案在多水庫系統可增供水量，與系統內既有設施的布置及數量有關，其單位水量開發成本並非定值，當在廣域系統內開發一新水源以供應多個用水區的新增用水時，往往又需要配合新增導水管線或擴建淨水場，因此需要經由廣域用水模擬以估算各用水區需求可滿足之程度，進而決定各年期所需的開發方案。

一流域或廣域的水資源開發規劃，需要模擬包含許多設施之複雜系統的水資源運用，其系統架構及水源運用原則可能有相當出入，採用模擬分析必須改寫不同的電腦計算程式，但在組合數量大幅增加下，甚難在短期間內完成所有方案組合之模擬。前人或有採用優選法計算不同系統布置下之水資源最佳利用，以迴避撰寫不同模擬計算程式之負擔，但一般必須在系統架構或水文過程上加以簡化，造成估算的供水能力失真，否則會大幅增加排程分析時間，另則優選法亦會高估系統供水能力，兩者都可能造成開發時程提前或延後。

唯有將前述所有組合方案都納入開發策略篩選，才可確保得到最佳的開發時程。檢視前人的篩選方法，以動態規劃法最為簡潔。原則上每一開發方案均有未開發及已開發兩種狀態，故得視為一狀態變量；若有階段性開發之情況，例如

水壩分階段加高，則會以階段開發次數之二次方倍增加方案開發狀態的數量。當方案數量增加時，因為維度詛咒(curse of dimensionality)效應，導致方案組合數量大幅增加。每一開發方案之組合均需模擬其供水能力，在模擬計算一特定系統布置需耗費一定時間下，相當數量增加動態規劃篩選最佳開發策略所需計算時間。

過去為簡化命題尺度以利求解，一種處理方式是將所有開發計畫區分成數個子集合，並且各子集合中的每個計畫開發成本都相同，或是可供水能力都相同，再以不同成本或可供水能力區分開發順序。實務上除了人工的海淡場或污水再生利用外，幾乎不可能有這種條件的開發計畫，排程時必須面對不同開發成本與可增供水量之課題。更者在廣域的供水系統中，尚須確認新增設施的出水量，有否適當的導水管路供應不同流域的新增需求。此外，過去文獻均假定開發方案之經濟壽命超過計畫排程時限，在此情況下，於排程規劃時程內選取開發方案時，開發方案建造成本不得引用總成本的現值，而應由各方案建造成本年值估算該方案自開發至排程規劃期限之期間所負擔之所有開發成本。

因此廣域排程分析面對兩種挑戰：(1)廣域水資源運用下的正確供水能力，與(2)廣域水資源運用模擬及動態規劃排程分析之計算時效。本研究面對上述兩種挑戰，且在台灣地區以缺水指數(SI)做為供水能力設計準則下，採用廣域水資源網流模式 WRASIM (周乃昉與吳嘉文, 2010)模擬水源運用，方得以在短期內正確模擬所有開發方案組合的供水能力，大量減少方案建立計算所需時間，再配合動態規劃法建置最佳開發策略評估模式，得以評估多個流域的大量開發方案之排程。

本研究分析各種擬議開發方案組合的增供水量時，以區域系統為架構，配合長期紀錄之流量模擬設計準則條件下的系統供水能力，再相互比較不同系統布置之供水能力，以求出不同背景布置下新增開發方案組合的增供水量。進一步以動態規劃分析最佳開發排程策略時，本研究將擬議方案所需工期納入排程限制，因此一定期程後纔得以供水，以致完工前之系統供水量可能無法

滿足需求，故無法避免的缺水情況亦為可接受的開發策略。相關之動態規劃基本假設、分析條件與數學命題說明如下：

### 3.1.1 基本假設及分析條件

本研究分析水資源開發計畫排程所設定的系統條件及一些假設如下：

- (1)分析時程中單位分析時段固定不變。
- (2)各用水戶在各時段的需求水量已知，且應盡量被滿足。
- (3)規劃的水資源設施彼此間並無開發先後條件，即各規劃方案為離散且可獨立開發。
- (4)由於環保因素導致水源開發方案不易推動，本文假定各擬議開發方案開發規模均達到其規劃之最大上限容量。
- (5)每項方案均為一次開發完成(Erlenkotter 1973a, Becker and Yeh, 1974a, Becker and Yeh, 1974b, Braga 等人 1985)，其開發規模與各年期開發成本均已確定。
- (6)每項開發方案以其得以加入系統供水之時機為計畫完成時間點。
- (7)擬議方案開發後在分析時程內皆可持續供水。
- (8)Martin (1987) 指出由眾多水資源設施組成的廣域系統之供水能力可能遠大於各設施單獨出水能力之和。因此在本研究中每一開發方案均可獨立供水，但與其他方案並存時，或可發揮聯合供水之效，提高系統可供水量。數個既有及新增方案同時供水時，系統可供水量並非直接加總，而是必須在既有水權、水庫運用規線及用水協議下模擬系統水量運用後方可確認。
- (9)方案成本包括工程建造費，設施操作、維護及更新成本。其中也已涵蓋與各水資源設施相關連的導水工程成本。
- (10)各方案在各年期的總開發成本經由適當利率轉換成現值。Luss (1982)提到在大部分的投資問題中，利率對最佳決策有顯著影響，但由於最佳開發策略的分析期程通常較長，欲於每一階段正確預估適當的利率並不容易，但若為合理反映因開發技術精進而降

低之成本，可利用調整各階段利率之方式呈現。本文之排程分析採用固定利率，假設開發成本不受未來建造技術更新而有所改變，另假設通貨膨脹效應所致的成本改變，自然會有相應的利率調整得以補償，因此得以自我平衡而不納入考慮。(Becker 與 Yeh, 1974a, 1974b; Braga 等人, 1985; Martin, 1987)。

### 3.1.2 目標函數

一般均在滿足用水需求下，尋求最小成本或最大淨效益的開發排程，實務上應納入評估的實際開發成本與效益視系統特性而定，典型的目標函數採用最小總開發成本之現值(Butcher 等人, 1969; Morin 與 Esogbue, 1971, 1974; Jacoby 與 Loucks, 1972; Erlenkoter, 1973; Kuiper 與 Ortolano, 1973; Becker 與 Yeh, 1974a, 1974b; Luss, 1982; Braga 等人, 1985; Martin, 1987 及 Geriani 等人, 1998)。但如果系統操作成本因設施規模或用水量多寡而異，且不可忽略，則應一併納入評估，例如：Jacoby 與 Loucks (1972)計算年效益除考慮新設施的建設與操作成本外，既有系統設施之操作成本亦納入分析；Braga 等人(1985)的總開發成本為建造成本與操作成本(抽水成本)之和，建造成本與開發規模有關，並採事先估算，建造成本轉換成現值之年期估算並非以該設施開始服務時間為基準，而是以建造與蓄滿所需時間和之中間點為基準。操作成本為抽水成本，自抽水站開始服務至分析期程結束期間以年值計算總操作成本，再依照利率換算成現值；Martin (1987)總開發成本除建造成本外，亦考量依照輸送水量之值計算之抽水成本。

本研究分析目標為尋求所有開發方案總成本最小現值之開發排程，總開發成本包括水資源設施、相關導水管路與淨水設備建造成本，及設施建造完成後之營運、維護與修復成本。分析目標可以下式計算總現值：

$$\min \sum_k TC^k \frac{1}{(1+r)^i} \dots\dots\dots(3.1-1)$$

式中，

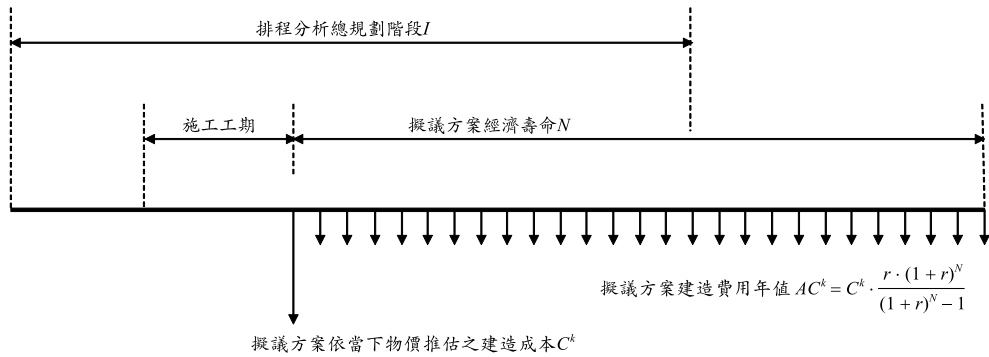


圖 1 擬議方案於經濟壽命內之年建造成本計算示意圖

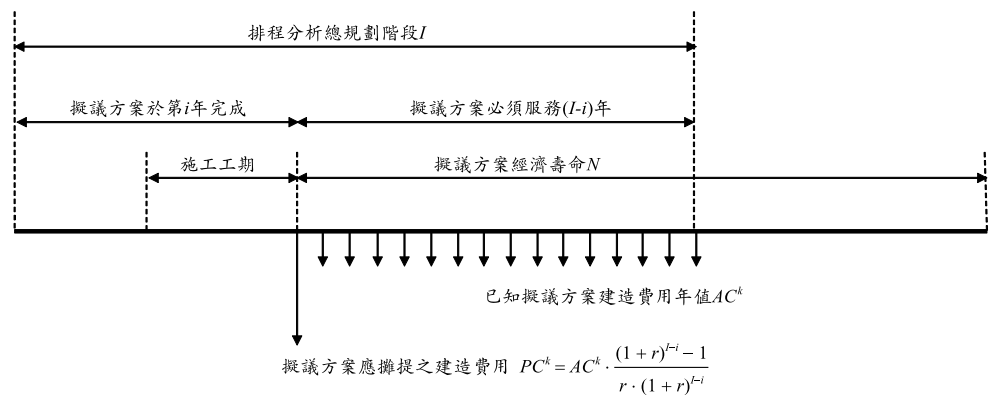


圖 2 擬議方案在排程分析規劃階段中應攤提之建造成本計算示意圖

- $k$  = 代表第  $k$  開發方案；
- $TC^k$  = 第  $k$  開發方案在排程年限內所需攤提之總開發成本，事先推算至方案完工之年期  $i$ ；
- $i$  = 第  $k$  開發方案完成之年期；
- $r$  = 年利率。

本文事先依照當下物價推估各擬議方案的總建造成本，並評估各方案預期的每年營運管理成本 ( $AOMR^k$ )。假設所有擬議設施的經濟壽命均大於或等於排程年限，故在排程年限內開發之方案所應負擔的並非全部建造成本，而僅包含排程年限內的所應攤提的建造成本年值。建造成本之攤提如圖 1 及圖 2 所示，將各擬議方案 ( $k$ ) 的建造成本現值 ( $C^k$ ) 依照其經濟壽命 ( $N$ ) 計算每年應攤提的建造成本年值 ( $AC^k$ )，如方程式 (3.1-2) 所示。假設某方案於第  $i$  年底完成，則該設施在規劃期程  $I$  年中得供水 ( $I-i$ ) 年，即該設施在排程分析中

應負擔 ( $I-i$ ) 年的建造成本年值，並依方程式 (3.1-3) 轉換成應負擔的現值 ( $PC^k$ )。

方案總成本另應納入排程年限內的各年營運管理成本，假設某方案於第  $i$  年底完成，則該設施在規劃期程  $I$  年中可供水 ( $I-i$ ) 年，總營運管理成本現值 ( $POMR^k$ ) 可由 ( $I-i$ ) 年中各年的營運管理成本 ( $AOMR^k$ ) 依方程式 (3.1-4) 計算求得。

各方案依前述方式計算之建設成本與營運管理成本現值之和為總開發成本現值 ( $TC^k$ )，如方程式 (3.1-5) 所示，標記於各方案之完成年度：

$$AC^k = C^k \cdot \frac{r \cdot (1+r)^N}{(1+r)^N - 1} \dots\dots\dots (3.1-2)$$

$$PC^k = AC^k \cdot \frac{(1+r)^{I-i} - 1}{r \cdot (1+r)^{I-i}} \dots\dots\dots (3.1-3)$$

$$POMR^k = AOMR^k \cdot \frac{(1+r)^{I-i} - 1}{r \cdot (1+r)^{I-i}} \dots\dots\dots (3.1-4)$$

$$TC^k = PC^k + POMR^k \dots\dots\dots (3.1-5)$$

式中，

- $C^k$  = 依照當下的物價推估具有固定經濟壽命擬議方案  $k$  之建造成本(現值)；
- $AC^k$  = 開發方案  $k$  在經濟壽命內每年的建設成本(年值)；
- $PC^k$  = 開發方案  $k$  在排程分析年限內應攤提的建設成本(現值)；
- $N$  = 開發方案對應之經濟壽命；
- $I$  = 排程分析總規劃時程；
- $AOMR^k$  = 依照當下的物價推估各擬議方案  $k$  每年的操作營運管理成本(年值)；
- $POMR^k$  = 開發方案  $k$  於第  $i$  年開始營運至排程規劃結束的總操作營運管理成本(現值)。

### 3.1.3 狀態變量

狀態變量設定為所有開發方案完成狀態之組合，其中可行之狀態數目將隨擬議方案增加而增加(Luss, 1982)。

$$X_i = (x^1, x^2, \dots, x^k, \dots, x^K)^T \dots\dots\dots (3.1-6)$$

$$x^k = \begin{cases} 0, & \text{方案 } k \text{ 尚未完成無法供水} \\ 1, & \text{方案 } k \text{ 已經完成可以開始供水} \end{cases} \quad k = 1, 2, \dots, K \dots\dots\dots (3.1-7)$$

式中，

- $X_i$  = 第  $i$  階段之起始狀態，表示各開發方案在第  $i$  階段開始前的完成狀態；
- $x^k$  = 第  $k$  方案之開發狀態，其值為 0 代表尚未完成；其值為 1 代表已興建完成供水；
- $K$  = 所有已研擬納入排程分析的方案總數。

### 3.1.4 決策變數

決策變數設定為開發方案是否在階段內興建完成之組合：

$$U_i = (u^1, u^2, \dots, u^k, \dots, u^K)^T \dots\dots\dots (3.1-8)$$

$$u^k = \begin{cases} 0, & \text{方案 } k \text{ 在第 } i \text{ 階段尚未完成無法供水} \\ 1, & \text{方案 } k \text{ 第 } i \text{ 階段已經完成開始供水} \end{cases} \quad k = 1, 2, \dots, K \dots\dots\dots (3.1-9)$$

式中，

- $U_i$  = 第  $i$  階段之決策，表示各開發方案在本階段內之興建完成狀況；
- $u^k$  = 第  $k$  方案之階段內開發完成狀況，其值為 0 代表尚未完成，或在本階段之前業已完成供水；其值為 1 代表正好在本階段內完成興建並可供水。

### 3.1.5 狀態方程式

參考上述對狀態及決策變數之定義，狀態方程式可用以求出在階段結束所有開發方案的完成狀態：

$$X_{i+1} = X_i + U_i \dots\dots\dots (3.1-10)$$

或

$$x_{i+1}^k = x_i^k + u_i^k \quad k = 1, 2, \dots, K \dots\dots\dots (3.1-11)$$

在每個方案均一次興建完成下，由於每階段終了之系統開發狀態包含該階段的起始狀態與階段內開發決策的所有方案。因此在第  $i$  階段前已完成的開發方案，在後續階段中必然存在，不會成為  $i$  階段內或之後任一階段的候選決策，確保不致重複開發。

### 3.1.6 遞迴關係式

本文採用前向遞移動態規劃估算階段結束的累計總開發成本之現值，其遞迴關係式如下：

$$F_i(X_{i+1}) = \min_{X_i} \left[ f_i(U_i) \cdot \frac{1}{(1+r)^i} + F_{i-1}(X_i) + P^D(X_{i+1}) \right] \dots\dots\dots (3.1-12)$$

$$f_i(U_i) = \sum_k C^k, \quad C^k = \begin{cases} TC^k & \text{if } u^k = 1 \\ 0 & \text{if } u^k = 0 \end{cases} \dots\dots\dots (3.1-13)$$

式中，

- $F_i(X_{i+1})$  = 第  $i$  階段終了開發狀態  $X_i$  的累計現值；
- $f_i(U_i)$  = 第  $i$  階段完成開發之方案組合的總開發成本；
- $F_{i-1}(X_i)$  = 第  $i$  階段起始開發狀態  $X_i$  的累計現值；



$P^D$  = 本階段結束之系統可供水量無法滿足計畫需求水量時的懲罰值；將之設定為缺水量的函數；

$C^k$  = 第  $k$  方案在第  $i$  階段建設完成之總開發成本。

台灣地區一般以缺水指數(shortage Index, SI)等於 1 為水資源系統供水能力的設計標準，但北部或無農業用水可資移用之地區，亦有以 0.5 為設計標準。因此需對不同規劃容量的水庫、越域引水路、聯通管等設施之組合布置，估算缺水指數準則下的系統供水能力。在此可接受的缺水準則下，各階段的系統可供水量應大於或至少等於需求水量。在根據水資源開發綱領計畫(master plan)逐一如期開發各方案下，供水系統於各年期的預期可供水量應都大於計畫需求水量，但實務上因為環保、社會、政治或財務等因素，可能造成某些開發方案在規劃、設計或施工階段延後，以致未能如期供水，因此造成的缺水無法避免，實務上一旦發生此種供水缺口，可採限水、水量調度移用等管理手段減輕缺水衝擊。然而此種缺水本應為適時開發水資源方案的消除對象，故就開發觀點安排水資源方案的開發期程時，應盡量以必要且最小成本開發所需水資源以避免發生缺水，且不宜將管理措施(例如移用農業用水)視為開發方案的替代選項。

由於實務上仍可能發生開發不及造成某些階段的可供水量小於需求水量，採動態規劃排程時必須容許此種缺水情況發生，以避免無可行策略，故本文給予此種缺水數量適當的懲罰值以儘量規避，其值計算如下：

$$P^D = \begin{cases} 0 & \text{if } Q_i(X_{i+1}) \geq D_i \\ w[D_i - Q_i(X_{i+1})]^2 & \text{if } Q_i(X_{i+1}) < D_i \end{cases} \dots\dots\dots(3.1-14)$$

式中，

$Q_i(X_{i+1})$  = 第  $i$  階段終了開發狀態  $X_{i+1}$  的系統可供水量；

$D_i$  = 第  $i$  階段系統各用水標的總需求水量；

$w$  = 缺水量的加權值；

$P^D$  = 缺水懲罰值。

### 3.1.7 起始條件

起始條件為現況供水系統，亦即尚未開發任何設施，總開發成本累計現值之起始值為 0，表示如下：

$$F_1(X_1) = 0 \dots\dots\dots(3.1-15)$$

$$X_1 = \bar{0} \dots\dots\dots(3.1-16)$$

式中，

$F_1(X_1)$  = 第 1 階段起始開發狀態  $X_1$  的累計現值。

### 3.1.8 其他排程限制

(1) 將正施工中或已核定可預期在特定年啓用供水之開發方案納為既有供水系統

由於有些水資源設施正在興建中，另外有的已規劃完成，且經政府核定起始供水年期，若其完工啓用年期在方案排程的分析時程內，便應在該啓用年期的階段內視為已確定完成的決策，為避免重複估算其開發成本，或可直接在該階段的起始狀態中增加設定為已完成的開發方案。

(2) 每一開發方案必須考慮所需施工年期才能確定可否納入決策選擇

在每一階段選取開發方案時，必須先確認該方案實務上可即時完工，方可納入決策選擇。若第  $k$  方案來不及開發完成，則必須直接設定該方案之可行決策為 0：

$$u^k = 0 \quad \text{if } d^k > i \dots\dots\dots(3.1-17)$$

式中，

$d^k$  =  $k$  開發方案施工所需之工期。

(3) 開發方案有效規模

一開發方案的最大可開發規模由地形、地質、工程材料等條件決定，另者由於經濟規模要求，每一方案也應有最小必要的規模：

$$V_{\min}^k \leq V^k \leq V_{\max}^k \dots\dots\dots(3.1-18)$$

式中，

$V^k$  = 第  $k$  方案之開發規模；

$V_{\min}^k$  = 第  $k$  方案的最小必要開發規模；

$V_{\max}^k$  = 第  $k$  方案的最大可開發規模。

### 3.1.9 最佳策略

採用動態規劃可逐階段求出各終了狀態的累計最小現值、最佳決策與起始開發狀態：

$$F_i^*(X_{i+1}), X_i^*(X_{i+1}), U_i^*(X_{i+1}) \dots\dots\dots(3.1-19)$$

式中，

$F_i^*(X_{i+1})$  = 第  $i$  階段終了狀態  $X_{i+1}$  的最小累計總開發成本現值；

$X_i^*(X_{i+1})$  = 第  $i$  階段可達成終了狀態  $X_{i+1}$  的最小累計總開發成本現值  $F_i^*(X_{i+1})$  之最佳起始狀態；

$U_i^*(X_{i+1})$  = 第  $i$  階段內可達成終了狀態  $X_{i+1}$  的最小累計總開發成本現值；  
 $F_i^*(X_{i+1})$  之最佳開發決策。

在求得最後一階段的最佳開發策略後，即可由最後階段可滿足需求水量的最小累計成本現值之最終開發狀態開始回溯至第 1 階段，逐階段回推各階段內的最佳開發策略，與整體分析期程的最佳開發狀態。

### 3.2 各開發方案組合之系統供水能力

在水源可互補運用下，一內含眾多水資源設施的廣域系統之整體供水能力往往大於各設施獨立運用供水能力之和；此外，若水源相同時，系統聯合運用的實際供水能力則可能小於各設施獨立運用供水能力之和。

早期研究排程策略時，受到電腦計算能力與分析工具的限制，有些研究直接假設系統供水能力為各水資源設施獨立運用下水能力之和，之後為了客觀考慮系統聯合運用的供水能力，部分研究已在其排程分析中加入多設施的水源聯合運用模擬，Becker 和 Yeh (1974a)、Moore 和 Yeh (1980) 及 Braga 等人(1985)以歷史水文紀錄配合設定的廣域水源運用原則，模擬整體系統的可靠出水量。由於系統未建置前，在規劃階段尚無法確認其運用規則，因此 Young (1967)、Revelle 等人(1969)、Butsch (1970)、Gablinger 和 Loucks (1970) 及 Eisel (1972) 等均採用優選模式估算系統可靠出水量，包括應用動態與線性規劃、連續趨近法(successive approximations)、增量動態規劃

(incremental dynamic programming)、機率限制模式(chance-constrained model)與線性決策模式(linear decision model)等方法。採用優選分析方法不易詳細考慮系統的運用細節及估算特定缺水指數的系統開發規模，而優選的系統可靠出水量也與實務上依據設定的運用規則或原則下的系統可出水量不同。採用實際水文紀錄模擬系統可靠出水量是最常見的分析方式，但 Askew 等人(1971)另將水庫流入流量的隨機性納入考量，採用蒙地卡羅法或套配機率分佈函數等方法處理。

為使分析過程明確且易於處理，本文將系統供水能力模擬與開發方案排程分開獨立計算。分析開發排程之動態規劃命題，事先必須已知每一開發方案組合之系統可供水量，以供選擇可滿足各階段計畫需求水量之開發策略。由於探討涵蓋數個流域的廣域供水系統開發策略，本文採用通用性廣域水資源運用模擬模式(Water Resources Allocation Simulation Model, WRASIM)配合長期之歷史流量模擬系統可供水量。與前人研究的不同處是本研究以完整廣域系統及以日為分析時段，模擬系統於特定缺水指數下之整體供水能力。

WRASIM 係針對台灣地區之水資源運用特性，以線性最小成本網流規劃為理論基礎，所發展的通用性廣域水資源供需模擬與優選調度模式(周乃昉與吳嘉文，2010)，其分析架構類同於美國科羅拉多州立大學研發之 MODSIM 模式，並應用超限演算法求解網流命題(Fulkerson, 1961; Barr et al., 1974)。台灣地區坡陡流短且蓄水設施開發不易，水資源系統多已發展成水庫蓄水與下游地區或鄰近流域的未控制流量一併聯合運用，因此一般要求以日為單位模擬時段，WRASIM 即可設定以日為演算時距。在水庫運轉部份，WRASIM 可模擬台灣地區採用的運用規線，此外亦具有模擬尖離峰發電放水、在槽用水、系統損失水量、水質混濁限制取水及設定系統內水量分流或取用之順序等功能，可快速正確求得廣域供水系統之可供水量。計算廣域系統供水能力時，本研究採用缺水指數(Shortage index, SI)為衡量系統供水能力之評鑑指標，缺水指數計

算式如下：

$$SI = \frac{100}{N} \sum_{i=1}^N \left( \frac{DF_i}{D_i} \right)^2 \dots\dots\dots(3.1-16)$$

SI = 缺水指數，Shortage index

N = 分析總年數

$D_i$  = 第  $i$  年之需水量

$DF_i$  = 第  $i$  年中之缺水量

## 四、實例應用分析與討論

台灣北部區域的翡翠水庫負責提供台北用水區及板新用水區的部分用水，而大漢溪的石門水庫則負擔桃園用水區及大部分板新用水區的用水。惟近年來缺水狀況頻傳，但主要河系新店溪及大漢溪之利用率均已超過 50%，惟基隆河利用率僅約 17%，屬於偏低情況，因此期望開發基隆河尚稱豐沛的水資源，以減少翡翠水庫供應板新用水區大部份用水所增加的營運風險，確保北部各用水區之供水穩定。本文以基隆河水系之水源開發規劃為實例，分析最小總現值開發成本的各水資源方案開發時程，以滿足基隆用水區及支援台北、板新用水區至西元 2035 年逐年新增的需求水量。

### 4.1 實例分析系統概述

本文以基隆河、雙溪及瑪鍊溪流域之供水系統水資源規劃為例分析其最佳開發排程，既有及研擬中的水資源設施位置如圖 3 所示。既有的主要蓄水設施有：新山水庫、西勢水庫、東勢坑堰、瑪陵坑堰、分洪用之員山子堰、基隆與八堵二抽水站及貢寮堰等。貢寮堰設置於雙溪主流，引取川流水至貢寮淨水場處理，除供應貢寮地區外，亦透過管線常態供應基隆地區，是基隆用水區的重要水源之一。瑪鍊溪中游設置有取水工引取地表水至中幅淨水場及安樂淨水場處理，主要供應萬里地區，豐水期流量較多時可部分供應基隆用水區，枯水期時若流量不足則無法支援。其餘的水資源設施均引取基隆河或其支流水源。臺灣自來水公司在基隆河上游的瑞芳河段設有取水工引取河水至員山淨水場處理，以供應瑞芳地區需

求；基隆抽水站鄰近員山子堰下游，抽取基隆河水至暖暖淨水場；八堵附近的八堵抽水站，抽取基隆河水至新山淨水場處理，多餘水量則加壓送進新山水庫蓄存，此外八堵抽水站亦可將抽取之河水送至暖暖淨水場處理。

新山水庫集水面積 1.6 平方公里，係一離槽水庫，水庫大壩於民國 88 年 12 月加高工程完工後，總蓄水量達 1,000 萬立方公尺，有效蓄水容量 970 萬立方公尺。水源除少量的大武崙溪水直接流入外，主要由八堵抽水站抽取基隆河水蓄存，可於枯水期或枯旱年當基隆河水源不足時調節供水，免除供水區的缺水之苦；此外若貢寮淨水場輸水至基隆用水區的管路中斷時，在搶修期之緊急補充水源則必須由新山水庫供應。西勢水庫位於基隆河支流西勢溪上，現況總容量為 39.2 萬立方公尺，有效容量為 37.8 萬立方公尺，主要功能為攔蓄西勢溪豐水期水量，以備枯水期使用；支流東勢坑溪設有東勢坑堰，以抽水至暖暖淨水場處理；支流瑪陵坑溪上游之瑪陵坑堰可引水至六堵淨水場處理；支流友蚋溪在豐水期時不引水，僅於枯水期基隆河水源或新山水庫蓄水不足時，才引水經簡易處理後支援友蚋溪沿岸地區不足之水量；支流康浩坑溪設有康浩坑堰引水至白雲淨水場處理後供應汐止地區。

### 4.2 新設施排程分析條件

本研究案例探討之開發期程自西元 2008 年至 2035 年，由於基隆用水區之新增需求有限，單一設施水源開發即可滿足，惟基隆河水資源利用率有相當幅度提升空間，政府規劃單位也研擬不同方案增加基隆河水資源的利用率，本研究為檢驗所發展排程模式對多方案組合的排程能力，假設基隆河新開發的水資源設施，除供應基隆用水區外，尚需負擔板新、桃園與新竹用水區未來的部分新增需求，經加總北部各用水區在未來各年度的新增需求水量後列於表 1。

為計算各開發方案在規劃期程內應負擔之建造費用，分別假定各開發方案經濟壽命為 50 年，各開發方案的建造費用參照「北部地區水資源系統備用水源及管網之分析檢討」(經濟部水利

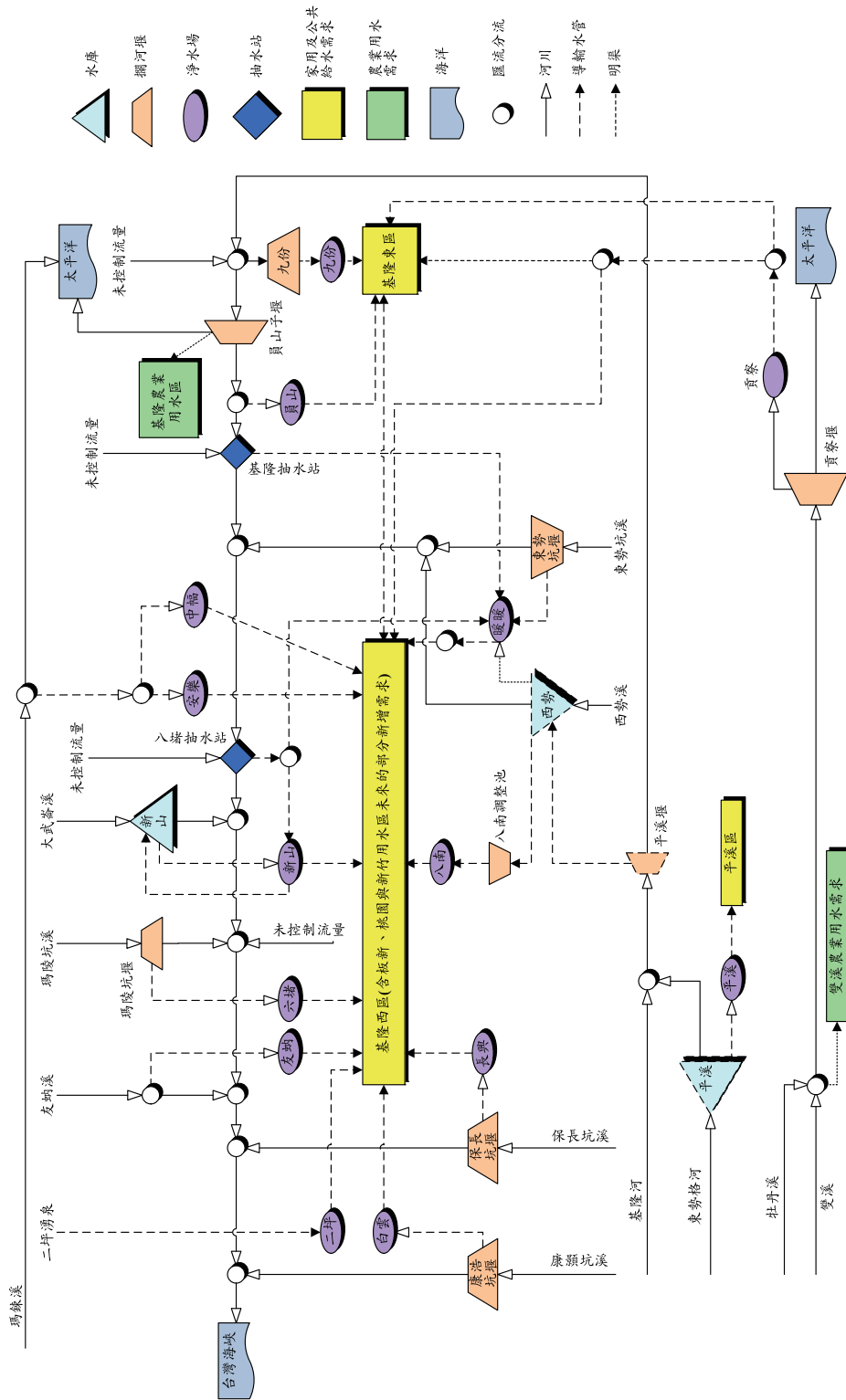


圖 3 基隆河供水系統示意圖

表 1 規劃期程內各年度假設系統需水量

西元年	需求水量	西元年	需求水量	西元年	需求水量
2008	31.00	2018	56.38	2028	62.60
2009	34.32	2019	57.76	2029	62.82
2010	37.62	2020	58.94	2030	63.02
2011	40.71	2021	59.91	2031	63.20
2012	43.58	2022	60.70	2032	63.36
2013	46.25	2023	61.20	2033	63.50
2014	48.70	2024	61.52	2034	63.62
2015	50.94	2025	61.82	2035	63.72
2016	52.96	2026	62.10	—	—
2017	54.77	2027	62.36	—	—

單位：萬 CMD。

表 2 開發方案工程內容、規模及開發成本

開發方案名稱	經濟壽命(年)	施工工期(年)	開發規模	總建造成本(百萬元)	年建造成本(百萬元)	年營運管理維護費用(百萬元)	年總開發成本(百萬元)
八南調整池開發方案	50	2	—	5,208.0	202.41	156.24	358.65
西勢水庫至八南調整池導水路	—	—	40.0	408.8	—	—	—
八南調整池	—	—	163.4	4,139.2	—	—	—
八南淨水場	—	—	20.0	660.0	—	—	—
九份調整池開發方案	50	2	—	2,675.0	103.97	80.25	184.22
員山子堰至九份調整池導水路	—	—	40.0	250.0	—	—	—
九份調整池	—	—	65.0	1,625.0	—	—	—
九份淨水場	—	—	30.0	800.0	—	—	—
西勢水庫加高開發方案	50	4	302.1	775.0	30.12	23.25	53.37
平溪堰引水方案	50	2	—	2,849.0	110.73	85.47	196.20
平溪堰	—	—	0.0	1,649.0	—	—	—
平溪堰至西勢水庫導水路	—	—	50.0	1,200.0	—	—	—
平溪水庫開發方案	50	6	—	11,525.0	447.92	345.75	793.67
平溪水庫	—	—	5484.0	11,525.0	—	—	—

單位說明：開發規模欄之蓄水設施為萬立方公尺；淨水場或導水路為萬 CMD。

署水利規劃試驗所，2005)，年操作運轉維護費用以總建造費用之 3%推估(馮鍾豫，1996；經濟部水利處中區水資源局，2000)，年利息採用 3%固定利率(經濟部水利署水利規劃試驗所，2005；經濟部水利署水利規劃試驗所，2006)。

擬議中的開發方案包含八南調整池、九份調整池、西勢水庫加高、平溪堰及平溪水庫等，各開發方案的工程內容、規模及成本如表 2 所列，說明如下：

1. 八南調整池開發方案：八南調整池總容量為

164.2 萬立方公尺，有效容量為 163.4 萬立方公尺，水源來自西勢水庫之越域引水，包含西勢溪川流水及由平溪堰越域引取之基隆河水，預計新建八南淨水場配合處理原水。該整體開發案中，八南調整池建造經費為 4,139.2 百萬元，八南淨水場建造經費為 660 百萬元，西勢水庫至八南調整池導水路建造經費為 408.8 百萬元，總建造費用為 5,208 百萬元，年操作運轉維護費用為 156.24 百萬元。

2. 九份調整池開發方案：九份調整池位於基隆河

表 3 各開發方案組合系統之供水能力(SI = 0.5)

開發方案組合	供水能力	開發方案組合	供水能力	開發方案組合	供水能力	開發方案組合	供水能力
(0,0,0,0,0)	42.6	(1,0,0,1,0)	49.4	(1,1,1,0,0)	*	(0,1,0,1,1)	74.5
(1,0,0,0,0)	44.9	(1,0,0,0,1)	76.1	(1,1,0,1,0)	52.8	(1,0,0,1,1)	79.4
(0,1,0,0,0)	49.4	(0,1,1,0,0)	52.7	(1,1,0,0,1)	*	(1,1,1,1,0)	56.7
(0,0,1,0,0)	44.7	(0,1,0,1,0)	49.7	(0,1,1,1,0)	54.4	(1,1,1,0,1)	*
(0,0,0,1,0)	42.9	(0,1,0,0,1)	74.3	(0,1,1,0,1)	75.2	(0,1,1,1,1)	76.1
(0,0,0,0,1)	73.8	(0,0,1,1,0)	46.3	(0,0,1,1,1)	75.5	(1,0,1,1,1)	80.3
(1,1,0,0,0)	51.7	(0,0,1,0,1)	74.7	(1,0,1,1,0)	52.4	(1,1,0,1,1)	79.9
(1,0,1,0,0)	*	(0,0,0,1,1)	73.9	(1,0,1,0,1)	*	(1,1,1,1,1)	80.4

表格說明：(-)內依序代表(八南調整池、九份調整池、西勢水庫加高、平溪堰引水、平溪水庫)等方案開發狀態，0代表未開發，1代表開發；\*表示該方案組合不可行。

單位：萬 CMD。

支流九份溪上，總容量為 65.5 萬立方公尺，主要蓄存基隆河川流水，取水口設於員山子分洪道上游右側導流牆轉彎起點處之前，預計新建九份淨水場配合處理原水。該整體開發案中，九份調整池建造經費為 1,625 百萬元，九份淨水場建造經費為 800 百萬元，西勢水庫至八南調整池導水路建造經費為 250 百萬元，總建造費用為 2,675 百萬元，年操作運轉維護費用為 80.25 百萬元。

3. 西勢水庫加高：西勢水庫水質佳，但庫容有限經常溢流，加高後除可增加蓄存西勢溪水源外，尚可由規劃中的平溪堰將基隆河上游水質良好的河水越域引至西勢水庫蓄存。出水工除既有設施外，另規劃導水隧道將水輸送至擬議中的八南調整池。該開發方案建造成本為 775 百萬元，年操作運轉維護費用為 23.25 百萬元。
4. 平溪堰引水方案：位於東勢格河及基隆河匯流口下游之基隆河主流上，集水區面積 36.92 平方公里，主要功能為攔蓄基隆河川流水，藉由導水隧道以重力將水越域引至西勢水庫或八南調整池蓄存。另外若在其上游興建平溪水庫，亦可將該水庫蓄水導至暖暖或八南淨水場處理，以供應用水需求。該整體開發案中，平溪堰建造經費為 1,649 百萬元，平溪堰至西勢水庫導水路建造經費為 1,200 百萬元，總建造費用為 2,849 百萬元，年操作運轉維護費用為 85.47 百萬元。
5. 平溪水庫：水庫壩址位於基隆河支流東勢格河

上，攔蓄東勢格河溪水，集水區面積 19.32 平方公里，總庫容 5,580 萬立方公尺，有效容量為 5,484 萬立方公尺。該開發方案建造成本為 11,525 百萬元，年操作運轉維護費用為 345.75 百萬元。該水庫之供水成效視下游不同的配合開發方案之運用而異，若八南及九份調整池均已開發，則水量運用可優先採平溪水庫、平溪堰、西勢水庫及八南調整池聯合運用方案，或優先採用平溪水庫、圓山子堰及九份調整池聯合運用方案；另一可能更有成效之運用方案為平衡八南及九份調整池之蓄水。

#### 4.3 系統供水能力分析結果

基隆河系統農業用水需求所佔比例較小，當遭遇嚴重枯旱時，可調度移用的農業用水有限，為避免開發後之供水系統產生嚴重缺水情勢及增加系統的供水可靠性，分析最佳開發策略時，採用特定缺水指數(SI = 0.5)為計算上述開發方案組合之系統供水能力評估準則，當方案組合包含八南調整池與西勢水庫加高二方案時，平溪堰引水方案必須已經開發完成，否則視為不可行的方案組合，各方案組合之供水能力示如表 3。

#### 4.4 排程分析結果討論

本案例分析以 2008 年為現況，依照經濟部水利署水利規劃試驗所規劃資料顯示，九份調整池工期需時 2 年，平溪水庫工期需時 6 年，若工程已可直接施工，則該二設施最快可分別於 2010

表 4 以動態規劃優選之開發時程表

供水時間 (年)	開發方案名稱	SI = 0.5 系統供水量 (萬 CMD)	需求水量 (萬 CMD)	實際應負擔開發成本 (百萬元)
2008	現況	42.6	31.00	—
2012	九份調整池	49.4	43.58	3,119.78
2015	平溪水庫	74.3	50.94	12,234.51
總開發成本現值(百萬元)				12,719.67

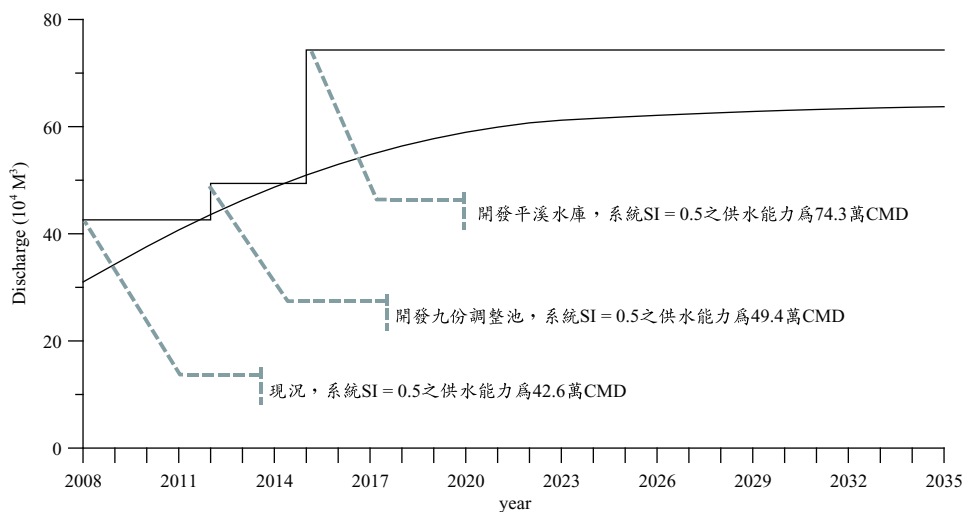


圖 4 基隆河系統開發時程示意圖

年與 2014 年開始供水。經以前述動態規劃法排程後，最佳開發策略各方案開始供水時間如圖 4 及表 4 所示，其中九份調整池必須於 2012 年、平溪水庫必須於 2015 年完成並供水，方可達成以最小總開發成本滿足未來的成長需求，總開發成本現值為 12,720 百萬元。

由表 2 可知西勢水庫加高方案之年總開發經費最小，且其與平溪水庫開發方案組合之供水能力 74.7 萬 CMD 亦可滿足規劃期內各目標年用水需求，示如表 3，但此策略並未被開發策略評估模式選取，此乃當西勢水庫加高方案開發時，系統供水能力 44.7 萬 CMD 僅可滿足用水需求至西元 2012 年，而平溪水庫因施工工期限限制，西元 2014 年方得啓用供水，期間造成缺水現象，若不開發其他設施，則會產生缺水懲罰成本，若開發其他水資源設施避免缺水亦會提高總開發成本。

水源運用模擬顯示，平溪水庫水源可經由九份調整池供應基隆用水區之東區，或經基隆河由基隆或八堵抽水站抽取供應全基隆用水區，至於多餘水源尚可經由導水管供應汐止或台北市，原由翡翠水庫供應汐止及台北市之部分水源，可調撥增供板新用水區，部分板新淨水場之出水量則可經由大漢溪水源南調計畫之導水管供應桃園用水區。

## 五、結論與建議

本文探討廣域水資源開發方案之最佳開發策略，在確定方案規模下，以動態規劃法配合 WRASIM 配水模式分析各方案的最佳開發排程，另針對基隆河水系擬議中的開發方案評估其開發策略。所得結論與建議如下：

1. 分析水資源方案開發排程時，納入排程分析之方案應在工程、經濟、財務、環境及社會等各

層面均確切可行。

2. 應在既有水權、水庫運用規線、標的間用水協議及其他水源分配原則下，以適當模式正確模擬不同開發方案組合對廣域水資源系統可增加的供水能力，方不致選到錯誤的開發策略。
3. 本文利用動態規劃優選最經濟之開發排程，以最小開發總成本現值為目標函數，取所有開發方案之可能組合為狀態變量，以在階段內可完成的方案組合為決策變數，其他限制條件包括各階段之系統可供水量必須滿足需求水量，及完成開發方案必需之工期。
4.  $n$  個方案可組成  $2^n$  個可能的開發組合，惟部份組合受限可供水量及開發期程等條件，在實際水源運用上並不可行，可經事前篩選予以去除。
5. 各用水標的均針對需求開發其可用的水資源，當系統因為枯旱或緊急情況缺水時，為期民生安定及總體經濟發展而實施的水量移用措施，並非水資源運用的常態，所以本研究探討不同開發方案的排程時，均以開發水資源為目標，而不將水量移用之管理方案納為替代的開發方案。惟若研提的管理方案將成為常態供水措施，則可視為開發方案納入排程分析。
6. 案例分析結果顯示，基隆系統因應未來北區需求成長之最佳開發策略，需於 2012 年完成九份調整池，2015 年完成平溪水庫，總開發成本現值為 127.2 億元。
7. 本研究假設擬議開發方案均可永續使用，即各開發方案一旦完成開始供水，即成為水資源系統既有設施之一，惟部分水資源設施有固定使用年限，例如海淡廠，當排程分析期程大於其使用期限時，將導至水資源系統中既有設施產生變化現象，排程規劃應進一步納入該類型設施特性。

## 六、致 謝

本研究由經濟部水利署水利規劃試驗所提供部分研究經費(研究計畫名稱：「北部地區水資源系統備用水源及管網之分析檢討」、「水資源計畫之規劃與管理模式整合研究—以桃園地區

為例(1/2)」)，進行初步研究，研究期間承蒙經濟部水利署謝勝彥前副署長、中區水資源局彭瑞國前副局長、水利規劃試驗所王國樑課長、鍾寬茂工程司、徐明童工程司等針對實務觀點提供建議及分析資料、方便本研究得以順利完成，特此致謝。

## 七、參考文獻

1. 王鑫儒、徐年盛，2008，「應用實質選擇權決定埤塘擴充時程之研究」，國立台灣大學土木工程學系碩士論文。
2. 周乃昉、李皓志，2006「區域供水系統資源設施開發擴張之排程探討」，第十五屆水利工程研討會，中壢，台灣。
3. 周乃昉、李皓志，2008，「基隆河水系水資源設施開發排程分析」，第十二屆海峽兩岸水利科技交流研討會，北京，中國。
4. 周乃昉、吳嘉文，2010，「通用性廣域水資源運用模擬模式」，農業工程學報，第 56 卷，第 1 期。
5. 蔣錦華、朱文生，1989，「港灣水質規劃模式之研究」，國立台灣大學土木工程學系碩士論文。
6. 經濟部水利處中區水資源局，2000，「台灣省中區水資源局所屬水庫最佳財務經營模式研究計畫」。
7. 經濟部水利署水利規劃試驗所，2005，「北部地區水資源系統備用水源及管網之分析檢討」。
8. 經濟部水利署，2006，「多元化水源開發策略研究--以桃竹地區為例」。
9. 經濟部水利署水利規劃試驗所，2007，「水資源計畫之規劃與管理模式整合研究—以桃園地區為例(1/2)」。
10. 馮鍾豫，1996，「水資源規劃」，中國土木工程學會。
11. Askew AJ, Yeh W W-G, Hall WA. Use of Monte Carlo techniques in the design and operation of a multipurpose reservoir system. *Water Resour Res* 1971; 7(4): 819-826.



12. Barr RS, Glover F, Klingman D. An Improved Version of the Out-of-kilter Method and a Comparative Study of Computer Codes. *Math Program* 1974; 7(1): 60-85.
13. Becker L, Yeh W W-G. Timing and sizing of complex water resource systems. *Technical Council on Water Resour Plan Manage, J Hydraul Div, ASCE, 100(HY10), Proc. Paper 10883; October 1974a. p. 1457-70.*
14. Becker L, Yeh W W-G. Optimal timing, sequencing, and sizing of multiple reservoir surface water supply facilities. *Water Resour Res* 1974b; 10(1): 57-62.
15. Braga BPF, Conejo JGL, Becker L, Yeh W W-G. Capacity Expansion of Sao Paulo Water Supply. *J Global Optim* 1985; 26: 3-24.
16. Butcher WS, Haines YY, Hall WA. Dynamic programming for the optimal sequencing of water supply projects. *Water Resour Res* 1969; 5(6): 1196-1204.
17. Butsch RJ. Reservoir system design optimization. *J Hydraul Div, ASCE, 1970; 96(1): 125-130.*
18. Chang L-C, Chen Y-W, Yeh M-S. Optimizing system capacity expansion schedules for ground-water supply. *Water Resour Res* 2009; 45, W07407, doi: 10.1029/2008WR006835.
19. Eisel LM. Chance constrained reservoir model. *Water Resour Res* 1972; 8(2): 339-347.
20. Erlenkotter D. Sequencing expansion projects. *Oper Res* 1973a; 21(2): 542-553.
21. Erlenkotter D. Sequencing of Interdependent Hydroelectric Projects. *Water Resour Res* 1973b; 9(1): 21-27.
22. Erlenkotter D. Comments on Optimal timing, sequencing, and sizing of multiple reservoir surface water supply facilities. *Water Resour Res* 1975a; 11(2): 380-381.
23. Fulkerson DR. An Out-of-Kilter Method for Minimal-Cost Flow Problems. *J Soc Ind Appl Math* 1961; 9(1): 18-27.
24. Gablinger M, Louks DP. Markov models for flow regulation. *J Hydraul Div, ASCE, 1970; 96(1): 165-181.*
25. Geriani AMEI, Essamin O, Gijbsbers PJA, Loucks DP. Cost-Effectiveness Analyses of Libya's Water Supply System. *J Water Resour Plan Manage* 1998; 124(6): 320-329.
26. Hinomoto H. Dynamic Programming of Capacity Expansion of Municipal Water Treatment System. *Water Resour Res* 1972; 8(5): 1178-1187.
27. Hsu N-S, Cheng W-C, Cheng W-M, Wei C-C, Yeh W W-G. Optimization and Capacity Expansion of a Water Distribution System. *Adv Water Resour* 2008; 31: 776-786.
28. Jacoby HD, Loucks DP. Combined Use of Optimization and Simulation Models in River Basin Planning. *Water Resour Res* 1972; 8(6): 1401-1414.
29. Kim SK, Yeh W W-G. A Heuristic Solution Procedure for Expansion Sequencing Problems. *Water Resour Res* 1986; 22(8): 1197-206.
30. Kuiper J, Ortolano L. A Dynamic Programming-Simulation Strategy for the Capacity Expansion of Hydroelectric Power Systems. *Water Resour Res* 1973; 9(6): 1497-1510.
31. Luo B, Maqsood I, Huang GH. Planning water resources systems with interval stochastic dynamic programming. *Water Resour Manage* 2007; 21: 997-1014.
32. Luss H. Operations research and capacity expansion problems: a survey. *Oper Res* 1982; 30(5): 907-947.
33. Martin QW. Hierarchical Algorithm for Water Supply Expansion. *J Water Resour Plan Manage, ASCE* 1987; 113(5): 677-695.
34. Moore NY, Yeh W W-G. Economic Model for Reservoir Planning. *J Water Resour Plan Manage* 1980; 106(2): 383-400.
35. Morin TL, Esogubue AMO. Some efficient dynamic programming algorithms for the optimal

- sequencing and scheduling of water supply projects. *Water Resour Res* 1971; 7(3): 479-484.
36. Morin TL. Pathology of a Dynamic Programming Sequencing Algorithm. *Water Resour Res* 1973a; 9(5): 1178-1185.
37. Morin TL. Optimal sequencing of capacity expansion projects. *J Hydraul Div, ASCE*, 1973b; 99(9): 1605-1622.
38. Morin TL, Esogubue AMO. Some efficient dynamic programming algorithms for the optimal sequencing and scheduling problems occurring in capital expenditure planning. *Water Resour Res* 1974; 7(3): 49-56.
39. O'laoghaire DT, Himmelblau DM. Optimal Capital Investment in the Expansion of an Existing Water Resources System. *Water Resour Bull* 1971; 7: 1194-1209.
40. O'laoghaire DT, Himmelblau DM. Modeling and Sensitivity Analysis for Planning Decisions in Water Resources Expansion. *Water Resour Bull* 1972; 8: 653-668.
41. Piper BS, Sukhsra C, Thanopanuwat S, and Knott DG. A Simulation Model for Planning Water Resource Developments in the Chi River Basin. *Water Resour Manage* 1989; 3: 141-153.
42. ReVelle C, Joeres E, Kirby W. The linear decision rule in reservoir management and design, 1, Development of the stochastic model. *Water Resour Res* 1969; 5(4): 767-777.
43. Tsou CA, Mitten LG, Russel SO. Search techniques for project sequencing. *J Hydraul Div, ASCE*, 1973; 99(5): 833-839.
44. Viessman W, Welty C, *Water Management: Technology and Institutions*, Harper & Row Publishers Inc., New York, 1985.
45. Young GK. Finding reservoir operating rules. *J Hydraul Div, ASCE*, 1967; 93(6): 297-321.
46. Young GK, Moseley JC, Evenson DE. Time sequencing of element construction in a multi-reservoir system. *Water Resour Bull* 1970; 6(4): 528-541.

收稿日期：民國 99 年 7 月 5 日  
修正日期：民國 99 年 8 月 27 日  
接受日期：民國 99 年 8 月 31 日