

埤塘灌溉系統中擴充埤塘關鍵位置之辨識

Identification of Key Ponds for Enlargement in a Pond Irrigation System

國立台灣大學
土木工程學系
博士後研究

鄭文明

Wen-Ming Cheng

稻江科技暨管理學院
資訊管理學系
助理教授

魏志強

Chih-Chiang Wei

國立台灣大學
土木工程學系
教授

徐丰盛*

Nien-Sheng Hsu

摘 要

本研究之目的為建立一方法以供辨識埤塘灌溉系統中擴充埤塘之最關鍵位置，透過所建立之埤塘灌溉系統優選模式最佳化供水結果後，得到最佳供水條件下各埤塘之入流率，入流率之大小順序即為擴充埤塘之重要性順序，由此即可辨識灌溉系統中埤塘擴充之關鍵位置。本研究埤塘灌溉系統優選模式其目標函數考慮田區缺水量總和最小化；模式限制條件則包括埤塘蓄水之連續方程式、埤塘蓄水容量之限制、埤塘蒸發、各節點之水平衡方程式、引水圳路之引水能力限制。本研究將所建立之方法應用於桃園大圳第 11 號支線，由研究結果可知 17 個埤塘之最佳入流率，其中埤塘 11-20 具有最大之入流率。本研究並利用敏感度分析以證明所決定關鍵埤塘之正確性。

關鍵詞：埤塘，優選模式，水源調配。

ABSTRACT

The purpose of this study is to identify the key ponds in a pond irrigation system. In order to identify the key pond for enlargement, an optimization linear model is developed and employed to calculate the optimal water distribution of a pond irrigation system and the inflow rate of each pond is computed. The order of the inflow rates is also the ranking of ponds for enlargement, and then the key ponds in a pond irrigation system are identified. The paper adopts the optimization linear model, constructed by using network flow structure, of each time step-wise to carry out the research work of the optimal water allocation. The model will include objective function and constraints. The objective

*通訊作者，國立台灣大學土木工程學系教授，10617 台北市大安區羅斯福 4 段 1 號號，nsshue@ntu.edu.tw

function consists of the conveying water from ponds, weirs, reservoirs, etc. Then, the constraints include the balance equations of pond nodes, diversion nodes, general nodes, etc and are limited by nature conditions such as pipe capacity, ditch design, and pond volumes. The No. 11 branch of Taoyuan canal is employed as a case study area for assessing the capability of water supply in a pond irrigation system. The result shows the optimal inflow rate of 17 ponds, and the pond with maximum inflow is pond No. 11-20. This study could provide the optimal allocation strategy for policymakers and identify the key ponds.

Keywords: Pond, Optimization model, Water distribution.

一、前言

臺灣位於亞熱帶氣候區，夏季長而溫度高，冬季短而溫度略低，全年均適宜農田稻作生長。農田灌溉水源以水庫及川流水為主，地下水水源為次。桃園、石門農田水利會灌溉地區主要灌溉蓄水設備為人工所挖掘之埤塘，其眾多埤塘星羅遍布於田區內，為臺灣農業灌溉系統之特例。此灌溉系統之水源主要來自埤塘集水、攔河堰取水及水庫水源供給，再輔以幹支分線等圳路進行水源之調配運用，因此埤塘為此灌溉系統中重要之一環。埤塘為蓄水功能，可藉閘門控制洩放水量，故於水源管理系統中可視為小型水庫，並與其他水源(如川流水、水庫放水)共同調配。埤塘灌溉系統係利用地勢進行人工挖掘而成，在灌溉取水時可順應地形坡度以重力方式進行取、引水，若有餘水可再引至下游埤塘蓄存之。此數量眾多之埤塘群組成之灌溉系統為一錯綜複雜之供灌兼排水系統，其水資源設施之組成型式則為一串、並聯兼具之型式。因此如何將複雜之灌溉供水系統進行水源有效之調配，並辨識埤塘灌溉系統中擴充埤塘之關鍵位置，增加其供水量並將埤塘蓄水功能做更有效之開發及利用，實為一重要研究課題。

有關國內外埤塘灌溉系統之研究文獻屈指可數，主要之研究文獻有洪惠祥(1988) [3]應用流域水量分配模式(Riverbasin Distribution Model)，建立埤塘灌溉系統支線田區之整體模擬模式，考慮有效雨量、蒸發、滲漏與田區之需水量及回歸

水等因素，模擬在桃園大圳第9號支線水源輸送狀況以及池塘、田區之聯結情形，並定出現況水資源配置圖，而模式之優點在於應用整體之模擬來反映池塘聯合營運之功能；林俊男(1996) [2]利用線性規劃法建立灌溉田區之水源調配模式，其供水水源可藉由幹線、支線、池塘等水利設施輸送，研究模式考慮河水堰取水原則，顧及水質、需求、輸送、貯存能力等問題，並以桃園大圳新坡工作站所轄之田區為研究區域；簡傳彬與方文村(2000) [7]利用線性規劃法建立水源最佳調配模式，在以最大農業收益為目標下求解最佳調配方式，該文以桃園農田水利會光復圳田區為例，建構一整合埤塘、水庫、回歸水及攔河堰系統；謝勝彥(2004) [6]利用模擬法進行桃園農田水利會埤塘擴大改善方案，以浚深不同位置之埤塘作為各種可行方案，該文經由埤塘改善方案增加了埤塘供水能力並減緩桃園地區供水壓力；陳慶和等(2004) [5]分析桃園大圳田區之回歸水量，作為該地區日益迫切之用水調配問題之參考。

國外埤塘灌溉系統相關之研究文獻，Mushtaq *et al.* (2006) [12]利用統計迴歸及訪查農民方式分析埤塘取水及採用乾濕灌溉策略(Practicing Alternate Wetting and Drying, AWD)，該文在中國湖北省 Zhanghe 埤塘田區建立一評分制度，結果顯示較依賴埤塘灌溉之農民，較不喜好採用乾濕灌溉策略灌溉方式並指出埤塘可有效地避免土壤乾旱之情況發生，顯示埤塘引水灌溉在此田區之重要性；Mushtaq *et al.* (2007) [11]利用經濟分析方法，在中國湖北省 Zhanghe 埤塘

田區隨機挑選 100 口埤塘，分析大、中及小容量埤塘灌溉之內生報酬率、淨現值及益本比，結果顯示大容量埤塘經濟效益較中容量及小容量埤塘為佳。

除上述蒐集之文獻外，本研究亦蒐集其他水庫調配相關之文獻。Sharif and Wardlaw (2000) [14] 以遺傳演算法建立一多水庫聯合最佳化系統，並和動態規劃法建立一多水庫聯合最佳化系統做比較。Chandramouli and Raman (2001) [8] 以動態規劃為基礎之類神經網路系統建立一多水庫聯合操作模式。Labadie (2004) [10] 以多水庫聯合操作求取最大發電量為目的，討論利用各種啟發式演算法(GA、類神經等)與所優選之結果比較。

本研究之目的為建立一套方法，以供埤塘灌溉系統中辨識擴充埤塘之關鍵位置，透過埤塘灌溉系統優選模式最佳化供水結果後，得到最佳供水條件下各埤塘之入流率，進而由此辨識灌溉系統中辨識擴充埤塘之關鍵位置，擴充其埤塘容量以有效地增加系統供水量。本研究以桃園地區桃園大圳第 11 號支線田區為研究區域評估埤塘及大圳之供水能力，研究結果可知各個埤塘之入流量佔水庫供給水源量之最佳入流比例，以此可供決策者辨識擴充埤塘之最關鍵位置，以及放水至各埤塘水量之參考及依據。

二、擴充埤塘關鍵位置辨識方法之建立

本研究擴充埤塘關鍵位置之辨識方法如圖 1 之說明，主要係分為方法建立與方法應用兩個部分。方法建立之部分包含埤塘灌溉系統優選模式之建立，以及埤塘入流率之定義；方法應用之部分包含將埤塘灌溉系統優選模式所需之相關資料，輸入至埤塘灌溉系統優選模式以求得最佳供水條件下之結果，然後結果計算在最佳供水條件下各埤塘之入流率，最後完成辨識埤塘灌溉系統中關鍵埤塘之工作。茲將研究方法埤塘灌溉系統優選模式之建立，以及埤塘入流率之定義說明如后。

2.1 埤塘灌溉系統優選模式之建立

本研究為能在最佳供水條件下計算各埤塘

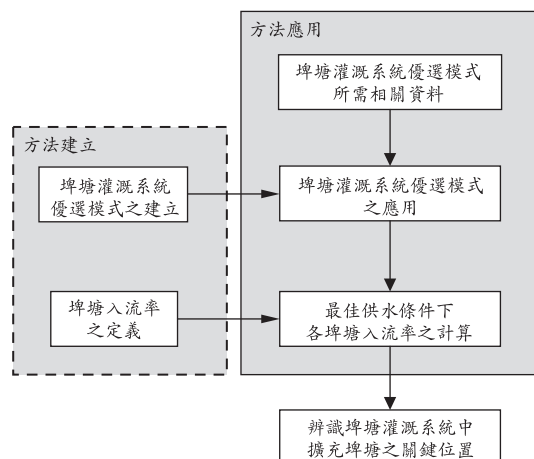


圖 1 研究方法建立與應用關係圖

之入流率，辨識埤塘灌溉系統中最關鍵位置之埤塘，埤塘灌溉系統優選模式之建立為首要完成之工作。本研究建立優選模式過程為先定義系統元件，再繪製灌溉系統圖，最後進行優選模式公式化。本研究模式公式化考慮埤塘蓄水、埤塘取水、攔河堰取水、圳路引水、回歸水及降雨供水所造成之田區缺水量總和最小化，茲說明如后。

2.1.1 系統元件定義

埤塘灌溉系統可由實際之灌溉系統所需之各元件繪製組合而成。圖 2 為埤塘灌溉系統示意圖，圖中元件符號之定義如下：第 1 個元件符號為實線代表灌溉渠道其包括幹線、支線、分線及給水小路；第 2 個元件符號為圓圈表示水源，如大圳、溪流、河川等其它水源；第 3 個元件符號代表分水點，如河流分水至灌溉渠道處、大圳將水分至支線處、支線分水至分線及分線分水至給水路等；第 4 個元件符號表示降雨至埤塘集水量；第 5 個元件符號方形之中有一交叉，表示灌溉尾水放水之處；第 6 個元件符號為長方形有一橫線區隔，表示有水路提供灌溉及排水之田區；第 7 個元件符號為正三角形表示埤塘；第 8 個元件符號圓圈之中有一交叉用來表示合流節點，即不同之渠道合流成一條渠道處；第 9 個元件符號為埤塘蒸發損失之水量。

2.1.2 埤塘灌溉系統之特性與系統圖繪製

就實務而言，埤塘灌溉系統之特性在於各田

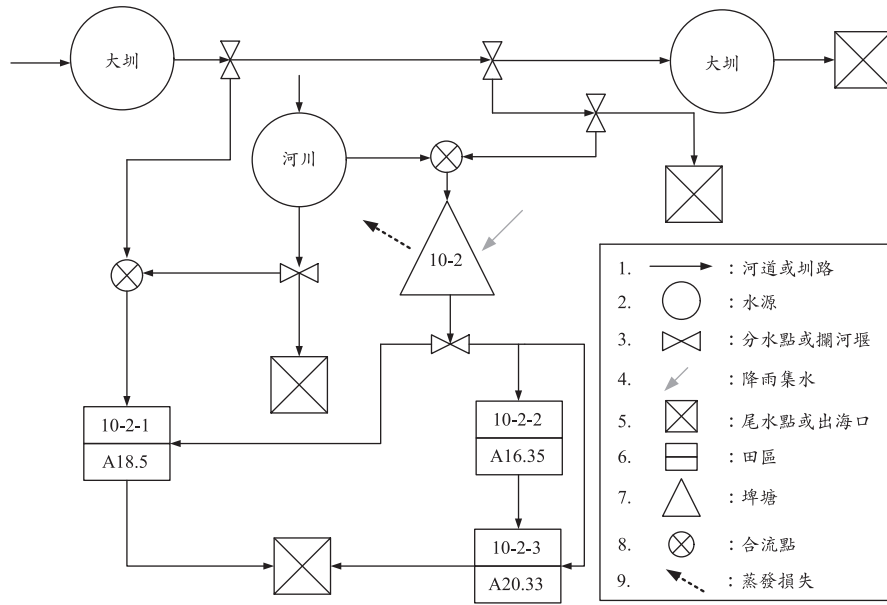


圖 2 埤塘灌溉系統各類元件定義圖

區之灌溉水源來源複雜，可能來自有效降雨、埤塘、河川以及上游田區之回歸水與溢流量。埤塘之蓄水來源包括降雨、大圳之支線流入(由水庫供給)以及攔河堰輸入(河流供給)；埤塘水量損失則包括蒸發、入滲以及其他不明原因之損失，本研究僅考慮蒸發損失；灌溉系統末端之田區可將溢流量排至尾水點或出海口。由於實際之埤塘灌溉系統連結錯綜複雜，在進行水量計算時需簡化其各渠路與供需節點之鍵結關係，因此本研究利用圖 2 之示意圖可用來說明灌溉系統中各種設施與河川、渠道等之聯結關係。圖 2 中田區元件中之 10-2-2 代表第 10 支線的第 2 號埤塘的第 2 個田區，而其下方的 A16.35 代表其田區面積公頃數。完成埤塘灌溉系統圖繪製後，則可在圖上編碼以釐清各供需節點鍵結之關係，並配合優選模式公式化輸入相關資料撰寫電腦程式，完成埤塘灌溉系統優選模式之建立。

2.1.3 優選模式公式化

本研究在進行供水調配之優化分析過程中，考慮最小化系統各田區之總缺水量。茲將優選模式之公式化過程分述如下。

1. 目標函數

本模式以最小之總缺水量為考量之目標，其目標函數可表如下式：

$$\text{Min.} \sum_{t=1}^T [\sum_f w_f S_{f,t}] \quad \dots\dots\dots (1)$$

上式中 f 表田區之代號； t 表期距之代號； T 為總期距數； $S_{f,t}$ 為田區 f 在 t 時段之缺水量；係數 w_f 為田區缺水量之權重係數。

2. 限制式

本模式之限制式包括田區需水節點、埤塘節點、一般節點、回歸水限制式及其他限制式等五種，茲說明如后。

(1) 田區需水節點

田區 f 之需水量 $D_{f,t}$ 必須大於等於田區入流量 $x_{f,t}^{\text{in}}$ 加上有效降雨量 $P_{f,t}^e$ 後扣除溢流量 $x_{f,t}^o$ ，即：

$$D_{f,t} \geq P_{f,t}^e + x_{f,t}^{\text{in}} - x_{f,t}^o \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$P_{f,t}^e = C_e h_t A_f \quad \dots\dots\dots (3)$$

$$x_{f,t}^{\text{in}} = x_{f,t}^p + x_{f,t}^L + x_{f,t}^W \quad \dots\dots\dots (4)$$

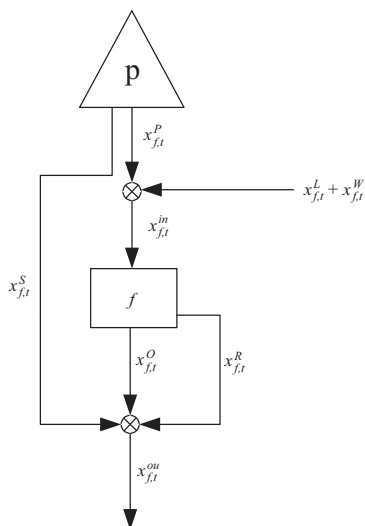


圖 3 田區需水節點及上下游關係示意圖

上式中 $D_{f,t}$ 為田區 f 在 t 時刻之田間需水量； $P_{f,t}^e$ 為田區 f 在 t 時刻之有效降雨量； $x_{f,t}^{in}$ 為田區 f 在 t 時刻之入流量； $x_{f,t}^o$ 為田區 f 在 t 時刻之為田區溢流量。在(3)式中 C_e 有效降雨係數； h_t 為 t 時刻之降雨深度； A_f 為田區 f 之面積。在(4)式中入流量包括埤塘灌溉 $x_{f,t}^p$ 、大圳直灌 $x_{f,t}^L$ 以及河流直灌 $x_{f,t}^W$ 。各田區 f 於 t 時刻缺水量之計算方式，應係需水量 $D_{f,t}$ 減去田區入流量 $x_{f,t}^{in}$ 與有效降雨量 $P_{f,t}^e$ ，再加上田區溢流量 $x_{f,t}^o$ ，即：

$$S_{f,t} = D_{f,t} - x_{f,t}^{in} - P_{f,t}^e + x_{f,t}^o \quad (5)$$

又田區出流量 $x_{f,t}^{ou}$ 為由田區 f 灌溉之後流出之回歸水及側補流量之總和，用來補給下游田區用水，即：

$$x_{f,t}^{ou} = x_{f,t}^S + x_{f,t}^O + x_{f,t}^R \quad (6)$$

式中， $x_{f,t}^S$ 為從埤塘流出流入經過田區 f 之後，再由田區 f 流出補給下游埤塘或田區之補給水量；本研究回歸水之來源僅考慮上游田區之地表滲出量，且和其土質有關，而其他滲流忽略不計，故令可自田區 f 流出之回歸水為 $x_{f,t}^R$ ； $x_{f,t}^{ou}$ 為田區 f 之總出流量。式(4)及式(6)可利用圖 3 圖為田區需水節點示意圖來表示。

(2) 埤塘節點

埤塘蓄水連續方程式可表如下列諸式：

$$V_{p,t} = V_{p,t-1} + P_{p,t} + x_{p,t}^{in} - x_{p,t}^{ou} - E_{p,t} \quad (7)$$

$$A_{p,t} = a_p V_{p,t} + b_p \quad (8)$$

$$x_{p,t}^{in} = x_{p,t}^L + x_{p,t}^W \quad (9)$$

$$x_{p,t}^{ou} = \sum_{f \in p} x_{f,t}^p + \sum_{f \in p} x_{f,t}^S \quad (10)$$

$$E_{p,t} = 0.5 \times (A_{p,t-1} + A_{p,t}) \times h_t^E \quad (11)$$

$$P_{p,t} = 0.5 \times (A_{p,t-1} + A_{p,t}) \times h_t \quad (12)$$

上諸式中， $V_{p,t}$ 為埤塘 p 在 t 時刻之儲水量； $V_{p,t-1}$ 為埤塘 p 在 $t-1$ 時刻之儲水量； $x_{p,t}^{in}$ 為埤塘 p 在 t 時刻之外部入流量； $x_{p,t}^{ou}$ 為埤塘 p 在 t 時刻之出流量至田區之總量； $x_{p,t}^L$ 為 t 時刻由大圳流入埤塘 p 之流量； $P_{p,t}$ 為埤塘 p 在 t 時刻之降雨體積，為 $t-1$ 時刻之埤塘 p 之面積 $A_{p,t-1}$ 及 t 時刻埤塘 p 之面積 $A_{p,t}$ 之平均值和這一時刻降雨量深度 h_t 之乘積； $x_{p,t}^W$ 為在 t 時刻由攔河堰流入埤塘 p 之流量； $\sum_{f \in p} x_{f,t}^p$ 為由埤塘 p 流出至所灌溉各田區之總水量； $E_{p,t}$ 為埤塘 p 在 t 時刻之蒸發體積，為 $t-1$ 時刻之埤塘 p 之面積 $A_{p,t-1}$ 及 t 時刻埤塘 p 之面積 $A_{p,t}$ 之平均值和這 t 時刻蒸發深度 h_t^E 之乘積；圖 4 為一埤塘節點示意圖，可表示埤塘入流和出流之關係。式(8)為埤塘體積 V 和面積 A 線性化公式，用以表示埤塘面積和體積之間之關係，其中 a 、 b 為線性公式之係數，如圖 10 為桃園農田水利會桃園大圳 11-16 號之埤塘面積與體積資料所繪製之關係圖，由圖可知所示 $a = 0.1896$ 、 $b = 35497$ (桃園農田水利會觀音工作站，2001 [4])。

p 埤塘在 t 時刻之蓄水量 $V_{p,t}$ ，必須介於最大蓄水量 $V_p^{\max}$ 及呆容量 $V_p^{\min}$ 之間，即

$$V_p^{\min} \leq V_{p,t} \quad (13)$$

$$V_{p,t} \leq V_p^{\max} \quad (14)$$

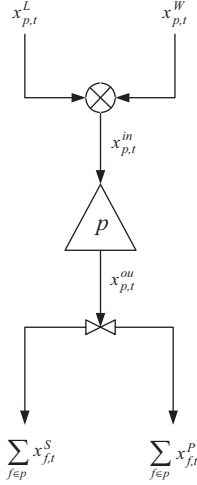


圖 4 埤塘節點及上下游關係示意圖

(3)一般節點

一般節點之連續方程式需令入流至節點 n 之總流量 $\sum x_{n,t}^{in}$ 等於其總出流量 $\sum x_{n,t}^{ou}$ ，即

$$\sum C_n^{in} x_{n,t}^{in} - \sum x_{n,t}^{ou} = 0 \quad (15)$$

式中， $x_{n,t}^{in}$ 及 $x_{n,t}^{ou}$ 可代表 $x_{f,t}^R$ ， $x_{f,t}^L$ ， $x_{f,t}^W$ ， $x_{p,t}^W$ ， $x_{p,t}^{in}$ ， $x_{p,t}^L$ ， $x_{p,t}^W$ ， $x_{p,t}^{ou}$ ， $x_{f,t}^{in}$ ， $x_{f,t}^S$ ； C_n^{in} 為節點 n 之上游供水係數。

(4)回歸水限制式

回歸水為水田田區之降雨及灌溉用水量，在扣除蒸發散量、深層滲漏量及溢流後，其餘部分之水量可經由地表逕流或地下水滲流回歸至渠道供給下游田區使用，此部分回歸至渠道之可用水量即為回歸水(Wheeler (1987) [1]; Gronning Engineering Company (1989) [9]; Oad *et al.* (1997) [13])。

當考慮回歸水之來源由地表以及地下回歸水時回歸水公式可表如式(16)及(17)：

$$x_{f,t}^R = C_{S1}^{su} (x_{f,t}^{in} + P_{f,t}^e - x_{f,t}^O) + C_{S1}^{gr} (x_{f,t-1}^{in} + P_{f,t-1}^e - x_{f,t-1}^O) \quad (16)$$

$$x_{f,t}^R = C_{S2}^{su} (x_{f,t}^{in} + P_{f,t}^e - x_{f,t}^O) + C_{S2}^{gr} (x_{f,t-1}^{in} + P_{f,t-1}^e - x_{f,t-1}^O) \quad (17)$$

上在兩式中假設地下回歸水稽延流出，即是由 $t-1$ 時刻之地下回歸水在時間 t 流出； C_{S1}^{su} 及 C_{S2}^{su} 為因流出回歸水田區有兩種不同之土質 (S_1 為黏質土壤； S_2 為砂質土壤)，而分別造成不同可用地表回歸水之百分比，如桃園地區之 $C_{S1}^{su} = 0.35$ 、 $C_{S2}^{su} = 0.28$ (陳慶和等(2004) [5])； C_{S1}^{gr} 及 C_{S2}^{gr} 為因流出回歸水田區有兩種不同之土質，而分別造成不同可用地下回歸水之百分比，其中 $C_{S1}^{gr} = 0.10$ 、 $C_{S2}^{gr} = 0.08$ (陳慶和等(2004) [5])。

當考慮回歸水之來源僅由地表回歸水時，回歸水公式可表如式(18)及(19)：

$$x_{f,t}^R = C_{S1}^{su} (x_{f,t}^{in} + P_{f,t}^e - x_{f,t}^O) \quad (18)$$

$$x_{f,t}^R = C_{S2}^{su} (x_{f,t}^{in} + P_{f,t}^e - x_{f,t}^O) \quad (19)$$

上兩式中， $x_{f,t}^R$ 為 $x_{f,t}^{in}$ 入流至田區 f 之回歸水； $P_{f,t}^e$ 為降至 f 田區之有效降雨； C_{S1}^{su} 及 C_{S2}^{su} 為因流出回歸水田區有兩種不同之土質，而分別造成不同可用回歸水之百分比，其中 $C_{S1}^{su} = 0.35$ 、 $C_{S2}^{su} = 0.28$ (參考陳慶和等(2004) [5])。

(5)其他限制式

本模式另外假設任一條渠道在任一 t 時刻之流量 x_t 必須小於其渠道最大流量 $x^{\max}$ ，且入流渠道之入流量必須小於最大入流量，兩種限制式可表示如下：

$$0 \leq x_t \leq x^{\max} \quad (20)$$

$$Q_t^L \geq x_t^{L0} \quad (21)$$

上式中 x_t 可代表 $x_{f,t}^R$ ， $x_{f,t}^L$ ， $x_{f,t}^W$ ， $x_{p,t}^W$ ， $x_{p,t}^{in}$ ， $x_{p,t}^L$ ， $x_{p,t}^W$ ， $x_{p,t}^{ou}$ ， $x_{f,t}^{in}$ ， $x_{f,t}^S$ ； Q_t^L 為入流渠道 t 時刻之最大入流量； x_t^{L0} 為入流渠道 t 時刻之入流量。

2.2 埤塘入流率之定義

本模式考慮缺水量最小為目標之情況下，討論大圳供水量和各埤塘之入流關係，以辨識埤塘灌溉系統中關鍵位置之埤塘。為了解大圳供水量和各埤塘入流關係，本研究定義埤塘入流率 RI_p ，

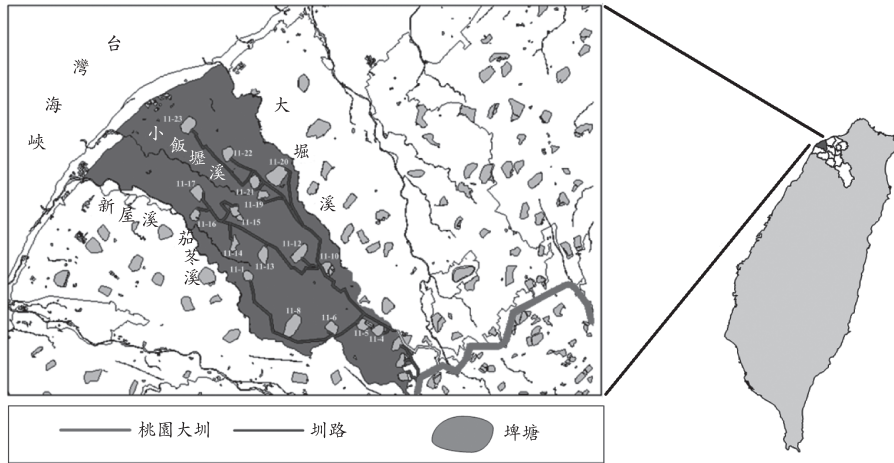


圖 5 研究區域位置圖

以呈現各個埤塘之入流情況，其定義如下：

$$RI_p = \frac{\sum_{t=1}^T x_{p,t}^{in} + \sum_{t=1}^T p_{p,t}}{\sum_{t=1}^T X_p^{OL} + \sum_{t=1}^T \sum_{f=1}^F p_{f,t}^e + \sum_{t=1}^T \sum_{p=1}^P p_{p,t}} \dots\dots (22)$$

上式中 RI_p 為埤塘 p 之入流率； X_t^{OL} 為時間 t 實際使用大圳供水量； $p_{f,t}^e$ 為時間 t 降至田區 f 之有效雨量； $p_{p,t}$ 為在時間 t 降至埤塘 p 之降雨量； $x_{p,t}^{in}$ 為在時間 t 流入埤塘 p 之流量； $t = 1 \sim T$ 表示時間為總共 T 時刻； $f = 1 \sim F$ 表示田區代號，共有 F 個田區； $p = 1 \sim P$ 表示埤塘代號，共有 P 個埤塘。又因河水取用量非常少，且大部分之埤塘並無河水引入，故在入流率定義時將其忽略不計。

三、應用與結果

3.1 研究區域

配合農業灌溉之習慣本研究優選模式之計算時距定為旬。本研究之研究區域為桃園農田水利會觀音工作站所轄之桃園大圳第 11 號支線灌溉區域(如圖 5)。此灌溉區域位於桃園縣境內，東以大堀溪為界，南臨桃園大圳幹線，西至新屋溪、茄苳溪右岸，北面延伸到台灣海峽，其水源主要來自石門水庫，其他水源則包括回歸水，集水區雨水及河水。本研究挑選區域中之埤塘 17

口(另外 3 口埤塘屬大圳直灌，故未加入供水調配系統中)，以及 26 個田區(另外 3 個田區屬大圳直灌，故未加入供水調配系統中)。圖 6 為研究區域之灌溉系統示意圖，由圖中各箭線起始及終止連接各元件，可瞭解各埤塘所負責供給之田區，一個埤塘可供灌約 1~3 個田區，特別是埤塘 11-4 除供給田區 11-4-1 外還可供水至 11-6-1，埤塘 11-11 除供給田區 11-11-1 外還可供水至 11-8-2，另圖中各田區之分組方式(如埤塘 11-12 負責供水至 3 組田區分別係田區 11-12-1、11-12-2 及 11-12-3)，主要是根據桃園工作站現地工作人員之訪查資料，以及 2004 年桃園農田水利會之 GIS 資料所建立。

3.1.1 田區需水量

本研究依據桃園農田水利會「93 年度灌溉計劃書」(台灣省桃園農田水利會，2004 [1])推估田區需水量，即按照各田區之土質及面積，推求該年之計畫灌溉水量，並假設模式分析期間，各年之需水量皆依據「93 年度灌溉計劃書」之內容。圖 7 為各埤塘所轄田區之年需水量。

3.1.2 蒸發量資料

觀音工作站所轄地區並無蒸發量之測站，本研究乃使用與其地理位置同為靠海相鄰之新屋鄉之後庄測站之資料(記錄年份為 1985~1999 共 15 年)之月平均蒸發量，並且於模式分析時簡化其蒸發量輸入資料，使用 15 年間之平均蒸發量。

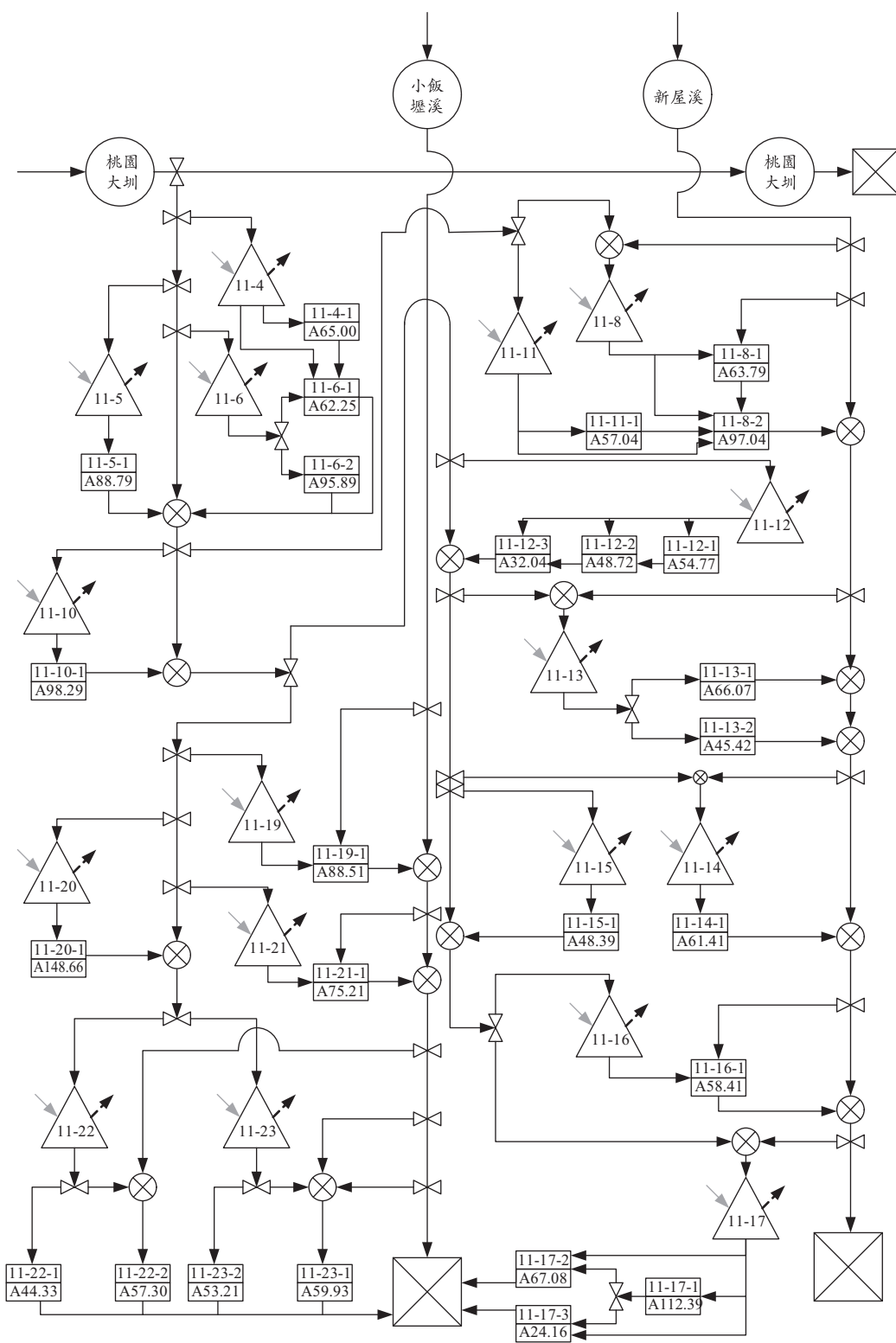


圖 6 研究區域灌溉系統示意圖

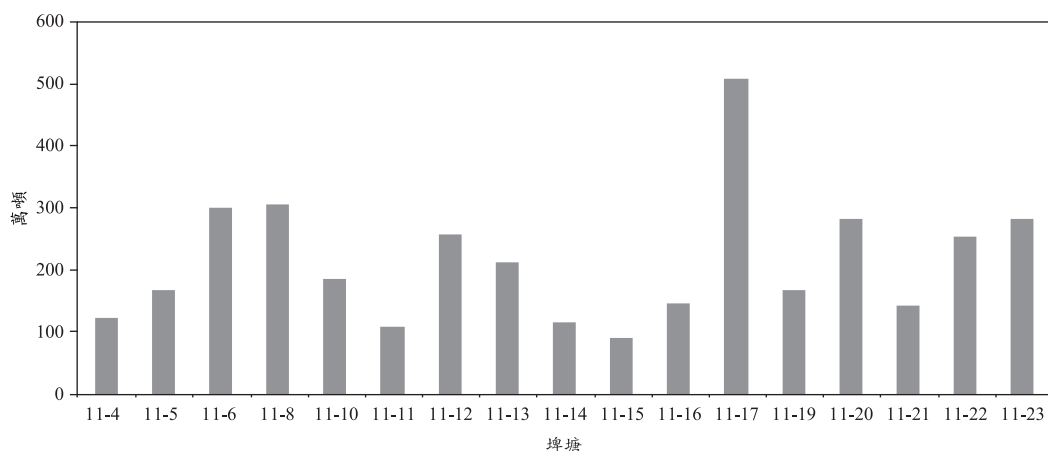


圖 7 各埤塘所轄田區之年需水量

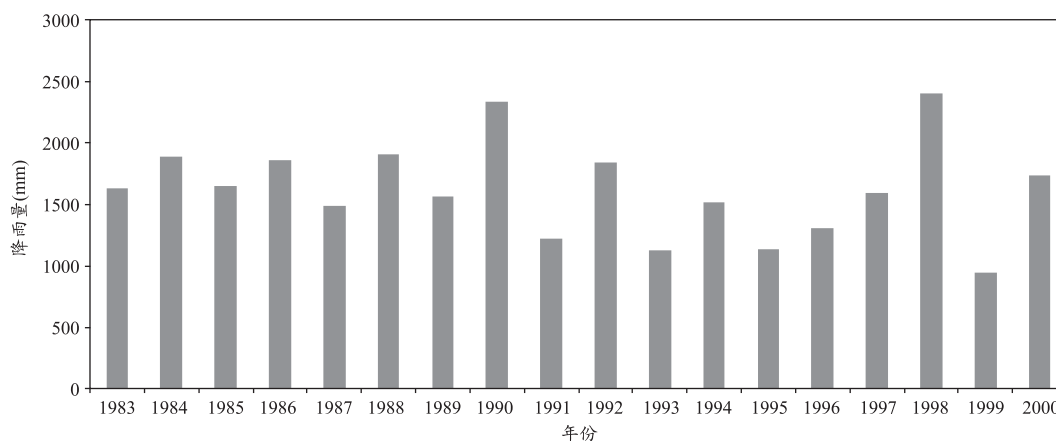


圖 8 觀音站 1983 年到 2000 年之降雨量

3.1.3 降雨量

降雨量資料乃採用觀音站(站號：11c270)之雨量紀錄，本研究選擇 1983 年到 2000 年共 18 年間之雨量資料來作為模式之輸入資料，並參考桃園農田水利會(2004 [1])根據歷年資料分析結果，假設埤塘之有效降雨量為全部降雨量；而田區有效降雨量則假設為降雨量之 25%。

3.1.4 埤塘水位－面積－容量關係

研究區域中各埤塘均有水深－面積－容量關係圖。圖 9 為第 11 支線第 16 號埤塘之水深－面積－容量關係圖，實線表示水深和蓄水量之關係曲線，虛線表示水深和蓄水面積之關係曲線。

本研究將各埤塘之水深－面積－容量關係圖轉換為埤塘面積與蓄水體積關係圖(圖 10)，其線性方程式可表示如下：

$$A = aV + b \quad \dots\dots\dots (23)$$

其中 A 為面積、 V 為蓄水體積、 a 為斜率 b 為截距，各埤塘之面積與蓄水體積關係曲線之係數 a 及 b 則列如表 1 所示。

3.2 優選模式合理性驗證

為了解不同大圳供水量對於埤塘灌溉系統供灌之影響，以及確切找出枯水期間真正之關鍵

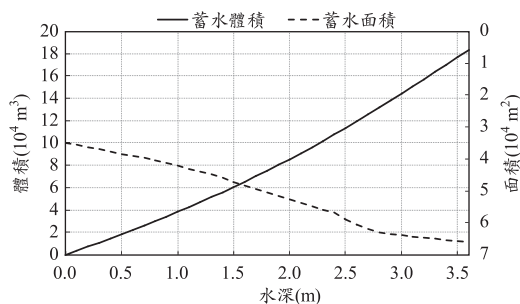


圖 9 第 11-16 號埤塘水深－面積－容量關係圖

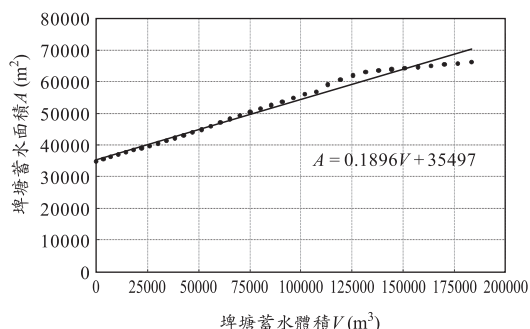


圖 10 第 11-16 號埤塘蓄水面積－體積關係圖

埤塘，本研究擬定大圳計畫供水以及大圳打 5 折供水(石門水庫水位於嚴重下限以下時農業供水打 5 折)兩個不同之供水情境，分別執行 1983 年到 2000 年共 18 年間之埤塘灌溉系統優選模式，以計算兩種情境下埤塘入流率及各田區缺水率，並比較豐枯情境下之埤塘灌溉系統供灌調配之結果。

圖 11 為大圳計畫供水量情況下所優選出各年的年缺水量及缺水率；圖 12 為大圳打折(打 5 折)供水量情況下所優選出各年之缺水率，由圖中結果顯示，大圳供水打折對於各田區缺水率變化，有著顯而易見之影響，即當水庫供水量減少時，各田區之缺水量明顯增加。

3.3 方法應用

本研究就大圳計畫供水量情況下，優選所的各埤塘之入流率如圖 13 所示。由圖可知，在大圳供水足夠之情形下，第 11-17 號埤塘為所有埤塘裡入流率最高的，表示在系統缺水量少供水充足

表 1 研究區域各埤塘面積與蓄水體積關係曲線係數

埤塘	係數 a	係數 b
11-4	0.2584	34587
11-5	0.0901	55749
11-6	0.5095	14636
11-8	0.4408	52934
11-10	0.2055	24437
11-11	0.3765	26264
11-12	0.0496	104156
11-13	0.2790	39274
11-14	0.5609	14098
11-15	0.2338	23313
11-16	0.1896	35497
11-17	0.3500	35138
11-19	0.8411	0
11-20	0.3149	81231
11-21	0.3162	29097
11-22	0.4340	25056
11-23	0.3030	56110

時，所有大部分溢流的水由系統末端的 11-17 號埤塘溢流出整個系統，而其他埤塘如 11-11、11-12 及 11-20 這幾口位於系統較中心處且相對於蓄水容量較大者也是有較高的入流率。本研究為求得缺水情況下之關鍵埤塘，進而有效地增加田區之供水量，因此擬定大圳打折供水之情境優選，以估算優選可使用水不足的情形下各埤塘之入流率，由圖 14 可看出在(打 5 折)可使用水不足的情形下位於系統中心且蓄水容量最大的第 11-20 號埤塘，雖其所轄之田區需水量，未較其他田區之需水量為大，但其入流率仍為所有埤塘中最高的，其他如第 11-12 等靠近系統中心且蓄水容量較大者也會有入流率較大的優選結果。由以上結果顯示埤塘之蓄水量大小及所在系統之位置，對於其入流率有著非常重要的影響，尤其是在缺水的情形下，優選模式並未對所轄需水量最大之田區之埤塘，給予最大之入流率，反而會依據埤塘之蓄水量大小及所在系統之位置，讓有限之水資源做最有效率之運用，因而造成在打折與否之情況下，各埤塘不同入流率之結果。

為確保本研究之埤塘灌溉系統優選模式，能

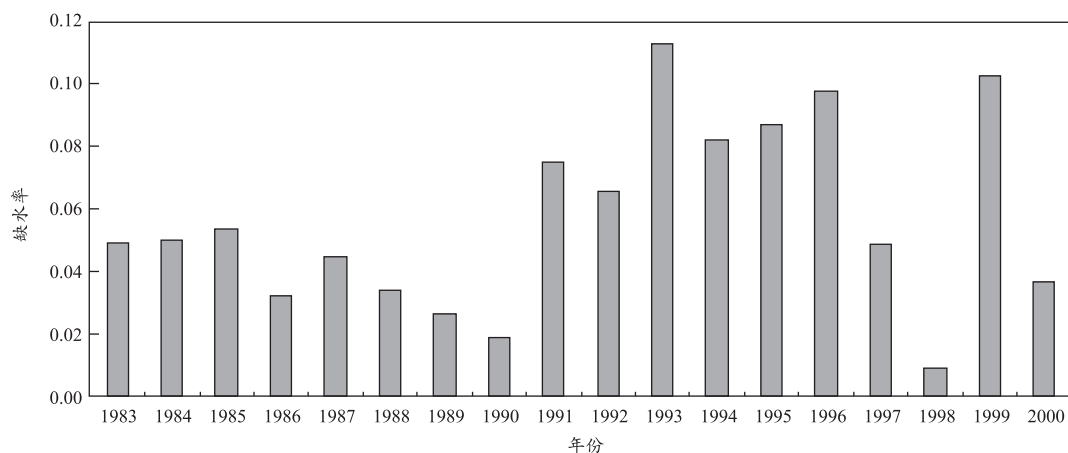


圖 11 大圳計畫供水下各年缺水率

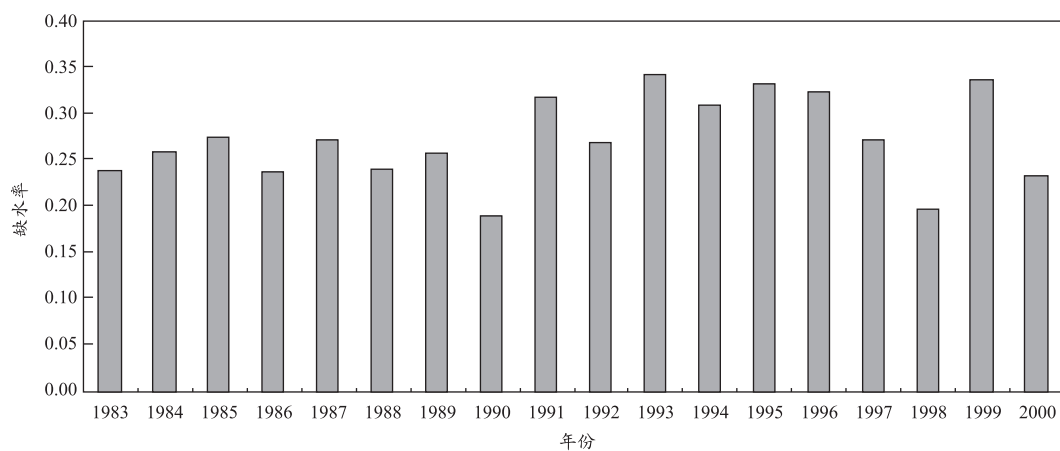


圖 12 大圳打折供水下各年缺水率

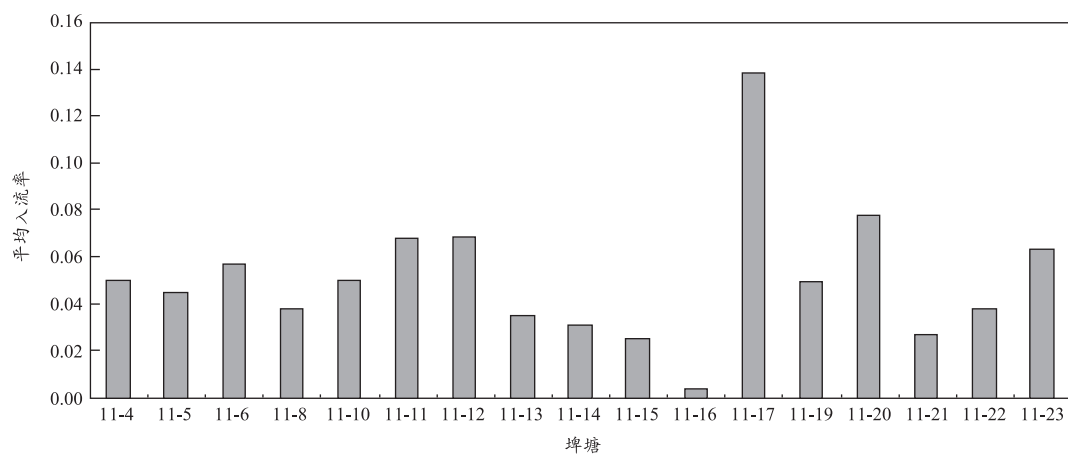


圖 13 大圳計畫供水平均入流率

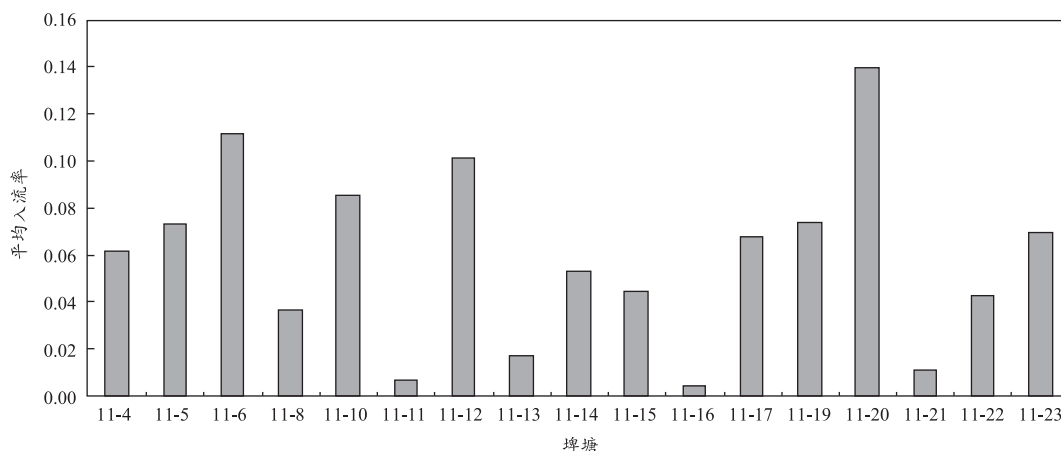


圖 14 大圳打折供水平均入流率

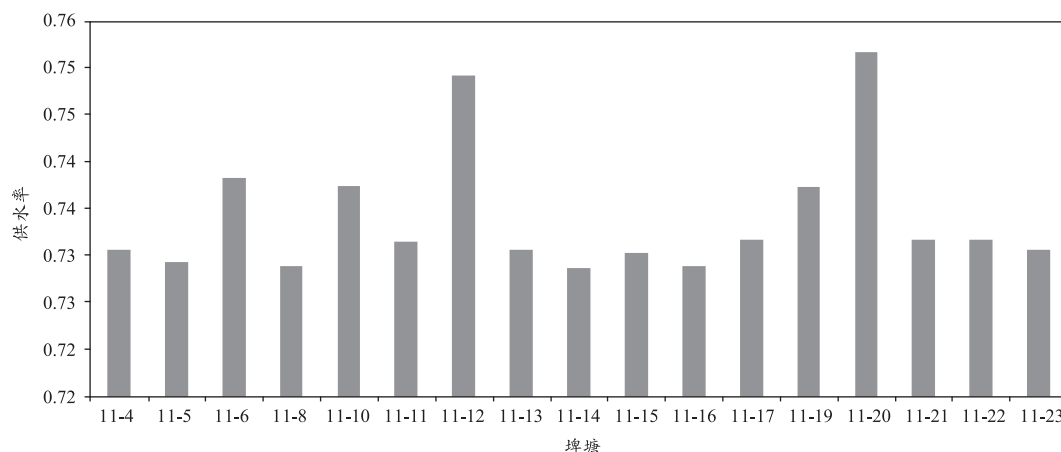


圖 15 單獨擴充各個埤塘之供水率計算結果

確實辨識出擴充埤塘之最關鍵位置，本研究利用敏感度分析進行驗證，若枯水期間即大圳計畫供水打 5 折之情境下，關鍵埤塘擴充容量後相較擴充其他埤塘，能更有效降低整個埤塘灌溉系統之缺水量(提升供水率)，則表示本優選模式能確實辨識出擴充埤塘之最關鍵位置。

本研究將各個埤塘單獨擴充所有埤塘最大容量總和之 10%，再分別進行優化調配計算供水結果，得到單獨擴充各個埤塘之供水率如圖 15 所示。由圖可知當分別單獨擴充 11-6、11-12 及 11-20 埤塘相較擴充其他埤塘，可明顯地增加供

水量提升供水率，此等結果與入流率較高之埤塘有顯著之相關性，相關係數高達 0.76。

四、結論與建議

4.1 結論

本研究之目的為辨識埤塘灌溉系統中擴充埤塘之最關鍵位置，透過埤塘灌溉系統優選模式最佳化供水結果後，得到最佳供水條件下各埤塘之入流率，進而以此辨識灌溉系統中擴充埤塘之最關鍵位置。本研究利用各埤塘之平均入流率辨識關鍵位置，主要係因為埤塘入流率可以瞭解各

個埤塘的入流量，佔所有可供給水源量的最佳入流比例，以此可供決策者辨識擴充埤塘之最關鍵位置，以及放水至各埤塘水量之參考及依據。

由模式計算結果可知，埤塘所位於灌溉系統的位置及埤塘容量的大小對於其埤塘入流率有很重要的影響。埤塘位於靠近灌溉系統位置中心處，且容量相對於其他埤塘較大者，其入流率會較其他埤塘的入流率為大，即為此埤塘灌溉系統中重要之埤塘(如 11-6、11-12 及 11-20 號埤塘)，若擴充之對於整個系統則有顯著之供水貢獻；反之埤塘若位於系統末端或前端處且容量相對於其他埤塘較小者，其入流率會較其他埤塘的入流率為小，並且這些情形在大圳打折供水時會更加明顯。由模式優選的結果可以發現到缺水的田區通常是位於系統末端的田區，主要原因是由於系統末端的田區其大圳放水及上游埤塘放流灌溉到此田區時，流經距離較長造成水流損失較大，故模式將其視為最終輸水之田區，所以時常缺水之田區其水源主要為雨水加上游田區的回歸水及其負責灌溉之埤塘，而缺少大圳之輔助灌溉，或許也能增加其負責田區灌溉之埤塘容量，以增加該田區之供水量。

4.2 建議

本研究優選模式在演算時之演算時距係以旬為單位，建議未來演算時間間隔以日為單位增加模式運算更接近實際情形，以提高計算之準確度符合實際之需求。本研究渠道部分僅考慮主要渠道之分佈與流向，建議未來可對渠道之分佈及水流情況作更深入及細部之調查，以使模式架構更接近實際灌溉之情形。本研究優選模式之目標函數僅考慮最小缺水量，建議可將其他經濟收益列入其中，考量多目標函數之計算結果與分析。本研究僅以桃園大圳第 11 號支線為研究區域，未來可將桃園大圳等其他支線一併納入研究範圍內，進而將各支線相互串並聯，擴充至整個桃園灌溉系統作整體之研究。

參考文獻

1. 台灣省桃園農田水利會，2004，93 年度灌溉

計劃書。

2. 林俊男，1996，河水取入利用檢討，財團法人桃園農田水利發展基金會。
3. 洪惠祥，1988，支線及池塘聯合營運配水模擬之研究，國立台灣大學農業工程研究所碩士論文。
4. 桃園農田水利會觀音工作站，2001，貯水池能量表。
5. 陳慶和、簡傳彬、王宇傑、吳瑞賢，2004，桃園大圳田區回歸水量之討論，桃園大圳水資源暨營運管理學術研討會論文集，135-150 頁。
6. 謝勝彥，2004，提升桃園水利會田區埤塘供水潛能之探討，桃園大圳水資源暨營運管理學術研討會論文集，173-190 頁。
7. 簡傳彬、方文村，2000，線性規劃在池塘灌溉系統聯合營運之應用，農業工程學報：第 46 卷，第 3 期，69-82 頁。
8. Chandramouli, V. and Raman, H., 2001, Multireservoir Modeling with Dynamic Programming and Neural Networks, *Journal of Water Resources Planning and Management*, 127(2): 89-98.
9. Gronning Engineering Company, Ground-water development, 1989, Augmentation and Exchange Plans for the City of Colorado Springs, Report, Denver, Colorado.
10. Labadie, J.W., 2004, Optimal Operation of Multireservoir Systems: State-of-the-Art Review, *Journal of Water Resources Planning and Management*, 130(2): 93-111.
11. Mushtaq, S., Dawe, D. and Hafeez, M., 2007, Economic evaluation of small multi-purpose ponds in the Zhanghe Irrigation System, *Agricultural Water Management*, 91: 61-70.
12. Mushtaq, S., Dawe, D., Lin, H. and Moya, P., 2006, An assessment of the role of ponds in the adoption of water-saving irrigation practices in the Zhanghe Irrigation System, *Agricultural Water Management*, 83: 100-110.

13. Oad, R.K.L. and Podmore, T., 1997, Consumptive Use and Return Flows in Urban Lawn Water Use, *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, ASCE, 123(1): 62-69.
14. Sharif, M. and Wardlaw, R., 2000, Multireservoir Systems Optimization Using Genetic Algorithms: Case Study, *Journal of Water Resources Planning and Management*, 14(4): 255-263.
15. Wheeler, W.W. and Associates, 1987, Lysimeter Study, Report, Englewood, Colorado.
- 收稿日期：民國 100 年 11 月 3 日
修正日期：民國 101 年 2 月 22 日
接受日期：民國 101 年 2 月 24 日