

線性規劃在池塘灌溉系統聯合營運之應用

Linear Programming Applied in the Conjunctive Use of Pond Irrigation System

農業工程研究中心助理研究員
中央大學土木工程學研究所博士候選人

簡 傳 彬
Chuan-Pin Chien

農業工程研究中心
副研究員兼秘書

方 文 村
Wen-Tsun Fang

摘 要

本研究以線性規劃 (Linear Programming) 之方法來構建一個能整合水庫、池塘 (貯水池)、回歸水及攔河堰做水量最佳調配的數學模式, 以達到農業最大收益之目標。台灣地區中, 桃園農田水利會為一上述池塘集水、回歸水、攔河堰取水及水庫水源供給所構成的灌溉系統範例之一, 然由於整個桃園水利會灌溉區域極大, 因此本研究選擇其光復圳灌區為範例研究區域。整個光復圳灌區由 60 口池塘、109 個輪區及 27 個攔河堰所組成。系統中可視各池塘為小型的水庫來與其他水源共同調配。經由本研究所建置之池塘灌溉系統聯合營運最佳化模式, 對光復圳民國八十六年之資料進行運算, 結果顯示在大圳供水 (即支線配水) 部份, 採用線性規劃結果較灌溉計畫減少 476 萬立方公尺; 較實際配水減少 1,021 萬立方公尺, 較農業工程研究中心 (1998) 之模擬配水減少 799 萬立方公尺; 最大年淨收入 13,980 萬元, 較實際配水增加 2,697 萬元。其原因在充分運用池塘調配, 減少池塘溢流量及田間溢流。當河水之電導度在 $750\mu\text{mhos/cm}$ 以上時, 隨著電導度之增加, 大圳需增加供水量, 而農業收益則相應降低。當大圳之年可供水量低於 3,314 ha-m 時, 隨著大圳之年可供水量減少, 農業收益亦降低。

關鍵詞：線性規劃，聯合營運，灌溉系統，池塘，貯水池，回歸水。

ABSTRACT

This study is to construct a model with linear programming for the objective of maximum profits in agriculture. The model is to give optimal conjunctive use by taking into account of multiple water resources with different characteristics. The irrigation system operated by the Taoyuan Irrigation Association (TIA) in the Northern Taiwan is

one of the best examples for conjunctive use. The system consists of water ponds, diversion weirs, return flow and a main water resource, which is from the Shihmen reservoir. As a study case, the model is constructed according to the characteristics of the area irrigated by the Kung-Fu Canal in TIA. The area includes 60 water ponds, 109 rotational divisions, and 27 diversion weirs. In terms of mathematical formulation in the model, water ponds can be treated as small reservoirs for water allocation or storage, and diversion weirs can supply water through laterals when river flow situation is allowed. As a result, the optimal model can supply water efficiently and economically to the rotational divisions for maximum profits. In 1997, for the water supplied from Shihmen reservoir (i.e., the allocation to the Kung-Fu Canal), the amount can be reduced by $1,021 \times 10^4 \text{M}^3$ for the actual water supply of $4,335 \times 10^4 \text{M}^3$ in the year. The profit for the year is NT\$ 139.80 million, while the actual irrigation plan can only offer profit of about NT\$ 112.83 million. When the electric conductivity of the supply water from weirs is over $750 \mu\text{mhos/cm}$, then the water supplied from Shihmen reservoir is supposed to be increased and the agricultural profit be decreased. When maximum water supply from Shihmen reservoir is under 3,314 ha-m, then the water supplied from Shihmen reservoir is not able to cover the demand and the agricultural profit is decreased.

Keywords: Linear programming, Conjunctive use, Irrigation system, Pond, Return flow.

一、前言

台灣地區共有十七個農田水利會以管理各地區之農田灌溉用水，使灌溉用水得以合理分配至各田區。各農田水利會之灌溉系統依各地區之水源特性可分為四種形態：一為水庫配水型：水源之供給全由水庫供應。如烏山頭水庫、白河水庫等灌溉系統。二為河川引水型：水源主要靠河川引水，如彰化、雲林農田水利會灌區。三為池塘調節型：為在輸配水過程中，利用池塘儲存水源作調節營運之用，如桃園、石門農田水利會灌區。四為零星埤圳型：為小面積之灌溉，如台東農田水利會之成功地區零星埤圳。對於第三種灌溉取水系統，在桃園、石門地區，係以池塘集水、攔河堰取水及水庫水源供給所構成之聯合營運灌溉系統，由於池塘有其集流面積並透過閘門控制排放之水量，故系統中可視池塘為小型水庫來與其他水源共同調配。

近年來台灣地區隨著工商業的發展以及人口的增加，需水量與日劇增，加上降雨空間與時間分佈之不均，造成豐枯季節流量相差懸殊，每

逢冬春季節常久旱不雨，旱災即隨之發生，不僅影響民生，且常造成重大的損失。在水資源永續利用的目標下，如何將現存有限的水資源做最佳的調配，為一件刻不容緩的事情。當水資源發生供不應求時，解決之道不外開源與節流，在新水源開發上由於環保及經濟上的問題，遲遲未能大力推展。所以，如何將現存有限的水資源做最佳的調配，為最可行之解決方案。針對國家整體利益及社會發展，各標的用水應互濟有無，以共渡乾旱時期缺水難關。由於農業用水量為台灣地區各用水量之最大宗，且供需調節上具較大之彈性，故現有之農業灌溉用水應予合理及有效管理，方能配合國家整體之發展，以所節省之水量供應乾旱時期其他標的之所需。本研究即是以線性規劃方法來構建一個能整合水庫、池塘及攔河堰作水量最佳調配之數學模式，以達到農業最大收益之目標，使灌溉管理者能夠充分掌握水量供應資料，做出最佳的水量調配決策。

主要水源與池塘之聯合運用在相關的文獻中多有撰述，但是複雜的網路系統使得最佳化模式的變數數目非常大，再加上在時間的變化上使

得變數之數目增加非常快速，確切的變數數目雖決定在如何規劃整個網路間之連接，但可預見此線性規劃研究之變數數目是非常大。所以，1981 及 1989 年之台灣省石門水利會池塘改善報告皆只能提出原則性的線性規劃討論，吳等（1995）按照洪（1988）之灌溉網路系統繪製方法調查石門水庫灌區之灌溉網路，但其灌溉系統聯合運作，儘只根據灌溉計劃計算各輪區之配水量，並不考慮最佳配水模式，Fang & Peng（1996）之池塘規劃則未考慮灌溉水質之影響。林（1996）之池塘規劃雖已考慮灌溉水質之因素，惟未考慮溢流及不足水量等因素。農業工程研究中心（1998）分別以滿足每旬貯水池的需水量進行第一次配水，如有多餘水量，則再依貯水池之容量大小比例進行第二次配水；或以旬初蓄水量與有效容量 90% 之差值大小比例配水，如有多餘水量，則再平均分配的方式進行模擬配水，並未考慮水質及不足水量等問題。本研究將網路間實際連接之可能限制等依線性關係表示於線性規劃模式中，考慮受限之水庫供水量下農業之最大收益。選擇桃園農田水利會之灌區中灌溉次系統較為獨立，且不因與其他灌溉次系統有高連結性而造成數學模式複雜，湖口地區光復圳以其為水利會灌區灌溉線路末端較具獨立性，而可降低模式之困難度，亦容易看出各參數間之影響情形。故研究區域將以桃園農田水利會之湖口地區光復圳為研究對象，光復圳以其居石門水庫桃園大圳之下游渠段，屢有缺水現象，此亦增加本研究結果之可用性。

二、最佳化模式之建立

（一）系統之定義

在建立最佳化模式之前，須將實際之灌溉系統予以定義及網路化，以利模式之建立。首先定義灌溉網路圖之繪製元件如圖 1 所示（參考：洪，1988），第一個符號橢圓形代表灌溉水源，例如由光復圳輸送來之石門水庫水源及社子溪、十五間溪等河川水源。第二個符號由長方形中間以橫線隔開乃是具有灌排水路提供灌溉排水之輪區。三角形則代表池塘。第四個符號代表分水

點，指沿著光復圳或社子溪等河流將灌溉用水轉移至小給水路、池塘或輪區之分水門或取水口。尾水點以正方形中繪一實心圓表之，代表灌溉尾水排放之處。實線代表供給灌溉用水之渠道或小給水路。虛線則代表池塘或輪區溢流。斜線表示由池塘收集的地面水量（不含支渠供水及攔河堰取水，通常指降雨集流）。

以圖 1 中之元件所繪製的一個簡單灌溉系統如圖 2 所示。利用此一系統示意圖以取代實際之灌溉系統以利本區系統聯合營運最佳化模式之建立。在圖中右線引水而入的是支渠供水，左線引水而入的是河川輔助水源，長方形代表輪區，輪區裡面的數字代表輪區之編碼及面積，編碼為水利會所提供之代號，與本研究之線性規劃無直接關係，如圖中所示 2-9-1 代表 2 支線 9 號池第一輪區，而下方之 A52.57 代表有 52.57 公頃之灌溉面積。而該輪區取入之水量則依據該區

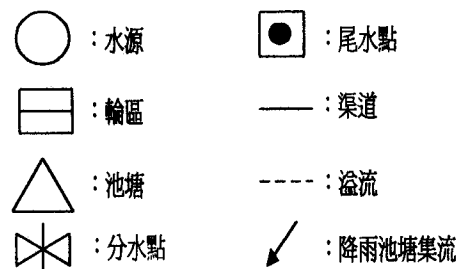


圖 1 灌溉系統之符號設計

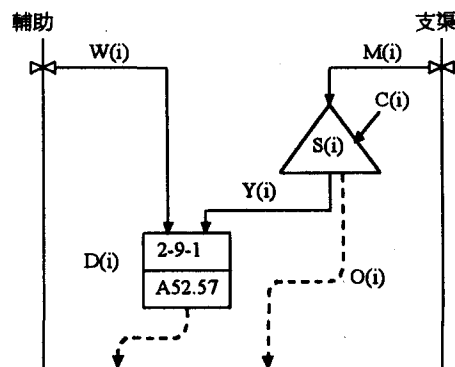


圖 2 灌溉系統簡單示意圖

之土壤質地及面積所計算的斗門用水量，三角形代表調節支渠引入之水的池塘，斜線表示由池塘收集的地面水量，亦即有效降雨量。虛線代表池塘溢流量或輪區溢田水量，在當乾旱時期，可能無溢流量，此視所模擬之年份內的狀況而言。整個系統中之水源包括水庫供水（利用支渠供水）、攔河堰取水（河川輔助水源）及池塘收集的地面水量。需水量為各輪區的斗門用水量。

(二) 有效雨量

作物生長所需用水之來源有天然降雨和人工灌溉二種，天然降雨若能達成作物生長之所需，則人工灌溉之水量可減至最低，甚或並不需要。由於作物需水量與作物生長時期有密切之關係，適量的天然降雨可為作物充分利用，過量之降雨則應加以排除，以免為作物帶來反效果，或淹沒整個農地造成災害。如降雨無法供應作物生長之所需，則應配合作物生長過程做適時、適量之灌溉以補充天然降雨之不足，以使作物有良好之成長。

降雨量之有效利用方式，可為直接利用於田間作物，亦可間接由土壤或池塘蓄存而待用之，凡此種種能達到減少人工灌溉水量作用之降雨量都是有效雨量。所以，人工灌溉僅為補充天然水之不足，通常有效雨量能充分利用時，灌溉水量可相對的有效節省，因之，有效雨量之利用實為影響灌溉計劃需水量之重要因子。

有效雨量之估算甚為複雜，就灌溉管理之立場，能減少灌溉供給水量（即減少渠道供給水量）之天然降雨，即可視為有效雨量（臺灣省水利局，1996）。由於降雨本身屬無法加以控制之變因，含有機率與統計之意義，至目前尚無一定計算之標準。然因水文量之機率分布並不對稱，有偏移之現象，伽瑪分布恰有此特性，故本研究採用常用之二參數伽瑪分布計算有效雨量。定義伽瑪函數(gamma function)為

$$\Gamma(\alpha) = \int_0^{\infty} x^{\alpha-1} e^{-x} dx, \dots\dots\dots (1)$$

為使 $\Gamma(\alpha)$ 之積分為有限， α 必須大於 0。當 $\alpha > 1$ 時， $\Gamma(\alpha) = (\alpha-1)\Gamma(\alpha-1)$ 。而 $\Gamma(1) = \Gamma(2)$

$= 1$ ，所以，對任何正整數 n ， $\Gamma(n) = (n-1)!$ 。二參數（ α, β 且 $\alpha > 0$ 及 $\beta > 0$ ）伽瑪分布可用 $\Gamma(\alpha)$ 表為如下：

$$f(x/\alpha, \beta) = \begin{cases} x^{\alpha-1} e^{-x/\beta} / \beta^\alpha \Gamma(\alpha), & x > 0 \\ 0, & x \leq 0 \end{cases}, \dots\dots\dots (2)$$

式中 α 為型態參數(shape parameter)， β 為比例參數(scale parameter)，則樣本期望值(mean)為 $\alpha\beta$ ，變異數(variance)為 $\alpha\beta^2$ 。

農田水利會於灌溉管理業務上，為便於灌溉計劃之實施，於每年耕作前均需擬定灌溉計畫，在灌溉計畫中採用之有效雨量即根據過去之記錄加以推估，對於長達一年二個期作之有效雨量推估，由於其不確定性甚大，且在桃園水利會之灌溉管理上有池塘之調蓄功能，灌溉計畫的有效雨量之推估採用月之機率分佈可避免旬記錄之過大或過小之現象，且因池塘之調蓄作用可使水資源運用更加靈活，桃園水利會於灌溉管理用水實際調配上，係依據上一旬之實際降雨量及池塘蓄水量來調配下旬之配水，因此，本研究在線性規劃模式上採用旬有效雨量。實際用水量與計畫用水量將因氣象條件與假設之差異有所不同；唯因長期雨量之預測不易準確，在灌溉水源開發計劃，基於經濟考慮，以往多採 4~5 年一次枯旱之頻率年為基準年，即相當於 75%~80%之可靠度，依臺灣省石門水庫多目標運轉規則，以頻率分析 10%為準，即相當伽瑪分佈具 90%可靠度；由於石門水庫灌區有池塘可供調蓄，如能配合動態灌溉計劃及水門操作以提高有效雨量之利用率，則灌溉計畫表中有效雨量可採用三年一次枯旱頻率年為基準年，即 67%可靠度之有效雨量。

(三) 水田需水量

水稻田之需水量包括秧田用水、整（浸）田用水以及本田用水量，將田間需水量減去有效雨量得到灌溉需水量，若加上小給水路輸水損失如：渠道蒸發、滲漏損失等，則等於斗門用水量。因此田間需水量，灌溉需水量，以及斗門用水量之關係可以分別表示如下：

田間需水量=秧田用水+整（浸）田用水
+本田用水量，(3)

灌溉需水量=田間需水量-有效雨量，(4)

斗門用水量=灌溉需水量+輸水損失量。(5)

為方便估計田間輸水損失，通常以所輸送水量之若干百分比來計算輸水損失，小輪區之整（浸）田及本田平均輸水損失率以組成輪區之各單區之輸水損失來計算，其計算方式如下：

$$L = 1 - \frac{\sum A_i}{\sum \left(\frac{A_i}{1-l_i} \right)} , \dots\dots\dots(6)$$

其中 L 表示輪區總輸水損失率； A_i 表示該輪區內單區 i 之面積； l_i 表示單區 i 之輸水損失率，而秧田用水之輸水損失率在實務上認定為 1，即是秧田損失水量與實際需要水量相當，則輸水損失量可與各用水量之關係為：

輸水損失量=秧田用水+ L ·[整（浸）田用水
+本田用水量]。(7)

各單區之輸水損失率與各單區內之小給水路或他種輸水渠道之狀況有關，由水利會依現地調查情況而定。

(四) 目標函數

除了上述對灌溉網路、有效雨量及田間各種需水量之說明，本節將對整個灌溉系統所尋求的一個線性規劃目標加以定義。對於一個灌區而言，可以年總淨收入最大為目標，令輪區 k 之毛收益為 I_k ，總費用為 TC_k ，而整個灌區之總年淨收益為各輪區年淨收入之總和，則目標函數可為下式(Loucks 等，1981)：

$$\text{Max} \sum_k (I_k - TC_k) 。 \dots\dots\dots(8)$$

在台灣地區種植水稻，輪區中單位面積之水稻產量可依據過去之經驗加以估算，若每公頃之產量以 y 表示，而輪區面積為 A_k ，則輪區的毛收益，就是總產量乘以稻米單價 Pr ，該輪區之毛收益 I_k 可表如下：

$$I_k = A_k Pr y , \dots\dots\dots(9)$$

而全部輪區毛收益之總和即為該灌區之毛收益，對於輪區 k 所需之水量 Q_k ，為單位需水量 $\bar{q}_k$ （不同之輪區有不同之單位需水量，係依水利會之調查而定）乘以輪區面積 A_k ，即

$$Q_k = \bar{q}_k A_k 。 \dots\dots\dots(10)$$

由(10)式及(9)式，可得

$$I_k = \frac{Pr y}{\bar{q}_k} Q_k 。 \dots\dots\dots(11)$$

對於輪區 k 之總費用，係所有投入資源之總和加上借用資本之費用。可以下式表之（Loucks 等，1981）

$$TC_k = TC_k^D + TC_k^W + TC_k^F + TC_k^L + TC_k^E + TC_k^S + rM_k^B , \dots\dots\dots(12)$$

其中 TC_k^D 、 TC_k^W 、 TC_k^F 、 TC_k^L 、 TC_k^E 、 TC_k^S 、 rM_k^B 分別為輪區 k 全年所需土地、水、肥料及農藥、勞力、設備、秧苗、借用資金的費用。由於水稻田生長與水有密切之關係，當供應水量為計畫需水量 Q_k 時，在不考慮其他之因素影響下，作物之產量可達預期之目標效益： $\frac{Pr y}{\bar{q}_k} Q_k$ 。唯

當其配水量，較計畫用水量減少 D_k 或增加 E_k 之水量時，將產生收益之減少，分別為函數 $L(D_k)$ 及 $G(E_k)$ ，則輪區 k 之毛收益可以下式表之：

$$I_k = \frac{Pr y}{\bar{q}_k} Q_k - L(D_k) - G(E_k) , \dots\dots\dots(13)$$

將(12) 式及(13)式代入(8)式，則對所有灌區，目標函數變為

$$\begin{aligned} \text{Max } NB = \sum_k & \left[\frac{Pr y}{\bar{q}_k} Q_k - L(D_k) - G(E_k) \right. \\ & - TC_k^D - TC_k^W - TC_k^F - TC_k^L \\ & \left. - TC_k^E - TC_k^S - rM_k^B \right] 。 \dots\dots\dots(14) \end{aligned}$$

其中 NB 為淨收益（Net Benefit）；有關水的費用 $\sum_k TC_k^W$ ，由於本系統具有池塘集水、攔河堰取

水及水庫水源供給等水源，而池塘中又可能有溢流量而未計入輪區之用水量，故應將(14)式中所有水源之費用，改為依各水源來源計算，而非分輪區計算。各種水源之用水量 Q 及單位成本 C 各不同，以其上標 l 、 w 、 r 、 c 分別代表水庫水源透過大圳供給、攔河堰取水、回歸水及池塘集水等水量或成本，則灌區之用水費用可以各水源之單位成本乘以水量之總和表示，即(14)式可修改成：

$$\begin{aligned} \text{Max } NB = \sum_k \left[\frac{\text{Pr } y}{q_k} Q_k - L(D_k) - G(E_k) - TC_k^D \right. \\ \left. - TC_k^F - TC_k^L - TC_k^E - TC_k^S - rM_k^B \right] \\ - C^l Q^l - C^w Q^w - C^r Q^r - C^c Q^c, \dots\dots\dots(15) \end{aligned}$$

且令

$$b_k = \frac{\text{Pr } y}{q_k} - \frac{TC_k^D - TC_k^F - TC_k^L - TC_k^E - TC_k^S - rM_k^B}{Q_k}, \dots\dots\dots(16)$$

則(15)式可簡寫為

$$\begin{aligned} \text{Max } NB = \sum_k [b_k Q_k - L(D_k) - G(E_k)] \\ - C^l Q^l - C^w Q^w - C^r Q^r - C^c Q^c. \dots\dots\dots(17) \end{aligned}$$

(17)式就是將年總淨收入之最大化表示成各種水量之函數（各種水量包含： Q_k 、 D_k 、 E_k 、 Q^l 、 Q^w 、 Q^r 、 Q^c ），而其係數（如 b_k 、 C^l 、 C^w 、 C^r 、 C^c ）則表現各水量與目標函數之比例關係。

(五) 限制方程式

對於池塘灌溉系統之限制式，主要有以下六組限制方程組。第一組限制為池塘之期初及期末貯水量之限制式，在過去之研究中，有關池塘蓄水量之限制式大都假設模擬穩定狀態之情況，因此假設年末之貯水量等於年初之貯水量，本研究為考慮驗證之需要，假設年初及年末之貯水量為已知。在此條件下，由於年初及年年末蓄水量可由使用者設定，不僅可符合前述穩定之情形，並

可供乾旱時期之使用。第二組方程組為需水點（輪區）需滿足水平衡之限制，唯過去有關石門水庫灌區最佳化模式之研究多假設滿足輪區之需水量，考慮救旱措施之實行，本研究允許缺水及溢流之產生。第三組方程組為池塘之蓄水連續方程組，在考慮池塘之蒸發及滲漏損失很小的情況下，假設池塘之池面降雨等於蒸發及滲漏損失，則時段 i 末的蓄水量（即 $i+1$ 的蓄水量）等於時段 i 的蓄水量加上入流量減去出流量。第四個限制式為保證每個時段之各池塘之儲水量須不大於池塘最大容量及不小於呆水容量。水質以電導度為標準，則第五個限制條件為進入輪區之灌溉用水在混合各種水源之後，應符合灌溉水質之電導度標準。最後一個限制式為每一條渠道在各時段之供水應小於渠道之最大輸水能力。

(六) 最佳化模式

本研究之最佳化模式的時間變化單位為旬，又因為以一年之供應水量變化為研究主題，所以各供需水量皆會有 36 個旬變化值，並假設攔河堰取水、池塘集水及回歸水已知，以簡化此一最佳化模式。以下標 i 表示為 1 至 36 旬之變化， k 表不同之輪區，本研究最佳化模式之目標函數及限制條件，依序說明如下：

將 36 旬之時間變化加入目標函數(17)式，則(17)式可改寫為

$$\begin{aligned} \text{Max } NB = \sum_{i=1}^{36} \left\{ \sum_k [b_k Q_{k,i} - L(D_{k,i}) - G(E_{k,i})] \right. \\ \left. - C^l Q_i^l - C^w Q_i^w - C^r Q_i^r - C^c Q_i^c \right\}. \dots\dots(18) \end{aligned}$$

(18)式乃將三十六個旬變化下各輪區之毛收益扣除各水源之用水成本費用。限制方程組為求簡化符號，以某一池塘之變化作說明：

(1)池塘之指定年初及年末儲水：

$$Sp_i = Cpi, \dots\dots\dots(19)$$

$$Sp_{37} = Cpf. \dots\dots\dots(20)$$

式中之 Sp_i 為該池塘第 i 旬之起始蓄水量； Cpi 為池塘之年初已知蓄水量； Cpf 為池塘之年末已

知蓄水量。當 C_{pi} 與 C_{pf} 相等時，表示池塘無越
年儲水。依本研究之湖口光復圳灌區之耕作習
性，池塘之耕作期初及耕作期末分別為第 4 句
初及第 33 句句末。

(2) 需水點（輪區）用水量平衡限制：

輪區所分配的水量 $Q'_{k,i}$ ，為輪區需水量扣除
不夠之水量，或加上多增加的水量，關係如下：

$$Q'_{k,i} = Q_{k,i} - D_{k,i} + E_{k,i} \quad \circ \quad \dots\dots\dots(21)$$

另一方面，輪區所接受的水量即為系統供應各種
水量扣除輸水損失後之和，以各水源之輸水成數
表如下式：

$$Q'_{k,i} = f^p q_{k,i}^p + f^l q_{k,i}^l + f^w q_{k,i}^w + f^r q_{k,i}^r + q_{k,i}^f \quad , \quad (22)$$

式中之 $q_{k,i}^p$ 為第 i 句對第 k 輪區之池塘供水
量，相同地， $q_{k,i}^l$ 為大圳直灌水量， $q_{k,i}^w$ 為攔河堰直
灌水量， $q_{k,i}^r$ 為迴歸直灌水量， $q_{k,i}^f$ 為輪區有效
雨量。而 f^p 、 f^l 、 f^w 、 f^r 分別為池塘供水、
大圳直灌、攔河堰直灌及迴歸水直灌
水量之實際供水成數。由(21)式及(22)式可以看出，
當 $D_{k,i} = E_{k,i} = 0$ 時，前面章節所述之各種水量分
別為：

$$\text{田間需水量} = Q'_{k,i} \quad , \quad \dots\dots\dots(23a)$$

$$\begin{aligned} \text{灌溉需水量} &= Q'_{k,i} - q_{k,i}^f \\ &= f^p q_{k,i}^p + f^l q_{k,i}^l + f^w q_{k,i}^w + f^r q_{k,i}^r \quad , \quad \dots\dots\dots(23b) \end{aligned}$$

$$\text{斗門用水量} = q_{k,i}^p + q_{k,i}^l + q_{k,i}^w + q_{k,i}^r \quad \circ \quad \dots\dots\dots(23c)$$

模式中之灌溉需水量須計入輪區內之小給
水路之輸水損失量，而其各句需水量之計算，牽
涉到水利會所訂定之灌溉計畫中各個農作階段
之起訖時間，並且也與各個輪區之土壤性質有
關。本模式以預先計算好之輪區田間需水量為資
料輸入上述線性規劃模式中予以模擬。

(3) 池塘儲水及供水變化：

$$\begin{aligned} Sp_{i+1} &= Sp_i + f^l q_i^l + f^w q_i^w + f^c q_i^c + f^r q_i^r - \sum q_{k,i}^p - Op_i \quad , \\ &\dots\dots\dots(24) \end{aligned}$$

式中之 q_i^l 較前述 $q_{k,i}^l$ 少了下標 k ，表為第 i 句大

圳供水進入該池塘之水量，而非進入輪區之水
量，使用類似的符號， q_i^w 為攔河堰供水進入池
塘之水量、 q_i^c 為池塘集水供水進入池塘之水
量、 q_i^r 為迴歸水供水進入池塘之水量， $q_{k,i}^p$ 則為
該池塘供應輪區 k 之水量，由於池塘與輪區之關
係並非一對一，而有可能該池塘供應數個輪區之
水量，故以累加符號將各水量總和 $\sum q_{k,i}^p$ ，始能
代表池塘儲水及供水變化。 Op_i 為該池塘之溢
流量。

(4) 池塘之蓄水量限制：

$$Sp_i \leq Sp_{\max} \quad , \quad \dots\dots\dots(25)$$

$$Sp_i \geq Sp_{\min} \quad , \quad \dots\dots\dots(26)$$

式中之 $Sp_{\max}$ 為該池塘蓄水容量， $Sp_{\min}$ 為池
塘呆水容量。

(5) 水質標準之限制方程組（以電導度為標
準）：

電導度為水質標準之限制在第 i 句之輪區 k
的電導度 $EC_{k,i}$ 可以表為進入輪區各種水量
($f^p q_{k,i}^p$ 、 $f^l q_{k,i}^l$ 、 $f^w q_{k,i}^w$ 、 $f^r q_{k,i}^r$ 、 $q_{k,i}^f$) 及其
對應電導度 (EC_i^p 、 EC_i^l 、 EC_i^w 、 EC_i^r 、 EC_i^f)
之權重：

$$\begin{aligned} EC_{k,i} &= \\ &= \frac{f^p q_{k,i}^p EC_i^p + f^l q_{k,i}^l EC_i^l + f^w q_{k,i}^w EC_i^w + f^r q_{k,i}^r EC_i^r + q_{k,i}^f EC_i^f}{f^p q_{k,i}^p + f^l q_{k,i}^l + f^w q_{k,i}^w + f^r q_{k,i}^r + q_{k,i}^f} \quad , \quad \dots\dots\dots(27) \end{aligned}$$

上式中的 EC_i^p 為池塘在第 i 句初期之電導度，相
同地，可以表前一期之中進出池塘之水量的電導
度權重：

$$\begin{aligned} EC_i^p &= \\ &= \frac{Sp_{i-1} EC_{i-1}^p + f^l q_{i-1}^l EC_{i-1}^l + f^w q_{i-1}^w EC_{i-1}^w + f^c q_{i-1}^c EC_{i-1}^c + f^r q_{i-1}^r EC_{i-1}^r}{Sp_{i-1} + f^l q_{i-1}^l + f^w q_{i-1}^w + f^c q_{i-1}^c + f^r q_{i-1}^r} \quad , \quad \dots\dots\dots(28) \end{aligned}$$

水質標準之限制設為

$$EC_{k,i} \leq 750 \quad (\mu mhos/cm) (25^\circ C) \quad \circ \quad \dots\dots(29)$$

(6) 渠道容量限制

$$q_i \leq q_{\max} \quad , \quad \dots\dots\dots(30)$$

式中之 q_i 為某一渠道第 i 句之輸送水量， $q_{\max}$ 為該渠道之渠道最大容量。

三、模式應用

(一) 研究區域概述

本研究以桃園農田水利會光復圳灌區為模式應用區域。桃園農田水利會之灌溉區域依灌溉系統分為四大灌區：桃園灌區、大溪灌區、新海灌區及湖口灌區。而模式應用區域之光復圳灌區屬於湖口灌區，地處高原，水源殊少，昔日民間皆賴鑿掘池塘儲蓄雨水，並以小型水路引水灌溉，如遇天旱池塘乾涸，農作物即遭旱害，且此一區域氣候特殊，地高風大，池水易被蒸發，常有缺水之虞。民國三十六年，臺灣省水利局（經濟部水利處的前身）設置湖口水利工程處，進行光復圳工程之測量、設計及施工，先於民國三十九年完成幹線工程，其後光復圳之各支線工程陸續完成。惟由於區域內七百六十八口私設池塘中，面積達五公頃者，僅三十四口，餘皆狹小，故當遭天旱時，灌溉水源仍嫌不足。至民國五十二年石門水庫工程告竣，此一獨立之灌溉區域得以配合桃園大圳尾水而使得灌溉順暢。

按台灣農業氣候分區，本研究區域位於台灣北部，乃屬於亞熱帶之溼熱氣候，全年均適宜作物生長，年平均溫度為攝氏二十一度，夏季長而溫度高，平均攝氏二十七·六度，冬季短而溫度略低，平均攝氏十五度。根據桃園水利會歷年統計（桃園水利會，1995），平均年雨量在 2,000 公厘上下。雨季在季節分配上，夏季較冬季為多，但冬季並不過分乾旱，據最近二十年灌溉期間平均統計二月至十月之九個月中，可能利用之有效雨量率約占百分之二十五以上。

桃園農田水利會光復圳灌區之灌溉水源分別為石門水庫、池塘、回歸水及攔河堰。石門水庫之水源係由桃園大圳經虹吸暗渠穿過社子溪輸水至光復圳，約佔用水量的 50%，其餘均由池塘、回歸水及攔河堰來承擔；而無論係由石門水庫經桃園大圳輸水，或河川取水引入，大部分水源，均先引入池塘而後再分配至農田。湖口灌區現有實際蓄水供調節灌溉者有六十口池塘，池塘

蓄水以調節灌溉水源使湖口灌區運用自如，此為桃園水利會灌溉系統特色之一（農業工程研究中心，1996）。此等池塘散佈於區內各地，平均水深約三公尺，有效蓄水量共約九〇八萬立方公尺。其水源除由其本身集水面積之集流取入外，可由石門水庫放水經幹支分線灌注，亦可由攔河堰注入。攔河堰之水除注入池塘作間接灌溉外，亦可直接灌溉。故水源之調配非常複雜。桃園農田水利會光復圳灌區之灌溉系統含十三個支線及新豐支線，各個支線共有 62 個池塘（其中新豐一號池及 3-1 號池未實際蓄水供運轉，故實際調節供水有 60 個池塘）以與 109 個輪區相連接。

(二) 灌溉網路圖

光復圳灌區為桃園農田水利會灌區之一部份，於本研究中為方便運算而加以分離，並參考黃等（1995，1996）所進行現場調查加以檢核後並依圖 1 之元件繪製灌溉網路如圖 3。圖 3 左側之光復圳代表石門水庫供給之水源，圖上方之水源分別為社子溪、十五間溪、德盛溪、北勢溪、波羅汶溪、德龜溪及茄苳溪等水源。

(三) 灌溉系統參數說明

模式之應用選擇民國八十六年光復圳之用水量及相關資料進行計算，相關之成本資料，採取當年或較近年份之數據以求得較為真實之模擬。根據經濟部水資源局（1998）之資料，北部地區農業用水之用水量為每公頃 20,984 立方公尺。又依據台灣省糧食局之水稻成本報告，於八十五年度一期作之收入為每公頃 126,010 元，其支出費用包括肥料費用每公頃 5,829 元，農藥費用每公頃 4,057 元，種苗籽費用每公頃 6,862 元，除草劑費用每公頃 1,147 元，勞力費用每公頃 62,586 元，材料費用每公頃 352 元，抽水費用 1,670 元，間接費用（含農舍、農具、水利會費、設算地租及資金利息）22,920 元，共計 105,423 元。八十五年度二期作之收入為 103,253 元，其支出費用包括肥料、農藥、種苗籽、除草劑及材料費共計每公頃 18,455 元，勞力費用每公頃 61,653 元，抽水費用 818 元，間接費用（含農舍、

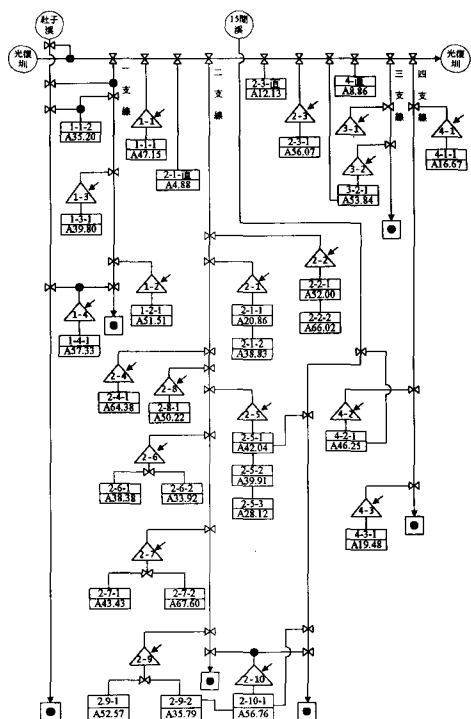


圖 3 湖口光復圳灌區之灌溉系統圖

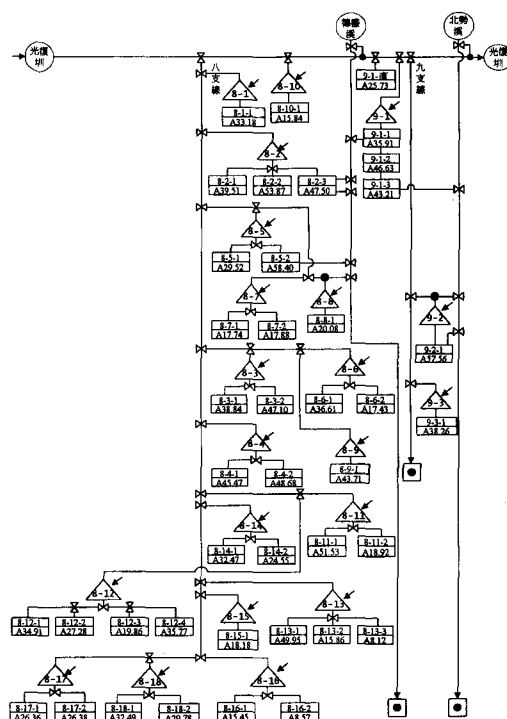


圖 3 湖口光復圳灌區之灌溉系統圖(續 2)

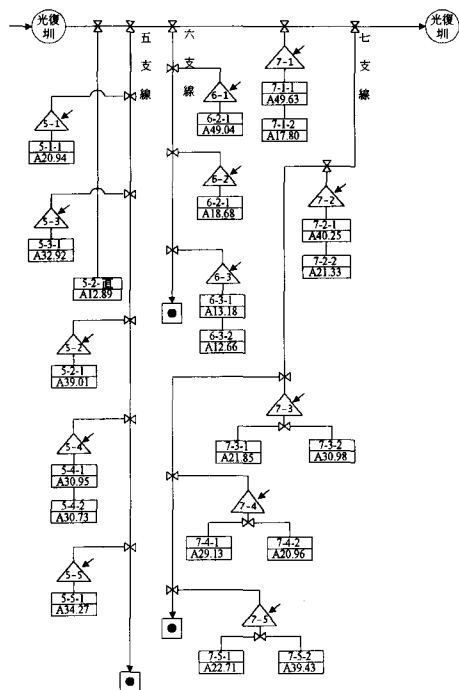


圖 3 湖口光復圳灌區之灌溉系統圖(續 1)

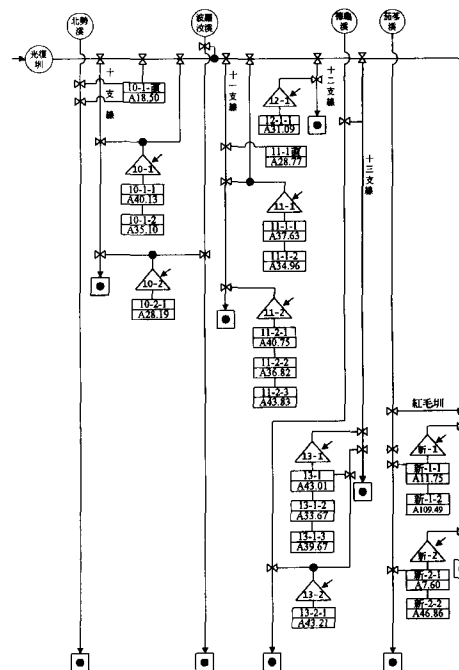


圖 3 湖口光復圳灌區之灌溉系統圖(續 3)

農具、設算地租及資金利息，本期作之水利會費停徵，未來如有新徵水利費用，則可在此間接費用中計入）14,399 元，共計 95,325 元。故每立方公尺用水之收益為 1.4 元，假設不考慮土地租金及無資金利息等間接費用，則每立方公尺之收益為 3.3 元。於本研究中考慮 25% 之間接費用下，假設每立方公尺用水之收益為 2.8 元。

溢流之水如能節省下來供應民生及工業用水使用，依據經濟部水資源統一規劃委員會（1995）之資料，自來水公司移用桃園農田水利會之用水，移用水單價為 1.55 元（民國八十二年），考慮八十二年當時之稻穀收購價格為每公斤 19 元，於八十五年度為 21 元，因此移用水單價依收購價格比例調整為 1.7 元，假設溢流之損失為移用水之單價，即為每立方公尺 1.7 元。此外，在乾旱時期水量不足時，常移轉農業用水供民生用水及工業用水使用，除原有移用水時所增加之加強灌溉管理費用 1.7 元之外，同時亦增加農民之損失約 0.3 元，故假設不足水量之損失為每立方公尺 2.0 元。又依據自來水公司移用桃園農田水利會之用水中之水庫調配單價為 0.85 元（民國八十二年），本研究亦依據收購價格比例修正為 0.9 元。至於攔河堰之用水假設攔河堰之使用費為 0.018 公斤之稻穀，即每立方公尺 0.4 元，而回歸水及池塘集水，假設為攔河堰用水單價之半，即每立方公尺 0.2 元。多重水源灌溉系統最佳運用之線性規畫模式的目標函數(18)式：在所述之限制式下，尋求最大之收益。因之，根據上面之成本單價分析，(18)式可寫成如下：

$$\begin{aligned} \text{Max } NB = & \sum_{i=1}^{36} \left\{ \sum_{k=1}^{109} [2.8Q_{k,i} - 2.0D_{k,i} - 1.7E_{k,i}] \right. \\ & \left. - 0.9Q_i^l - 0.4Q_i^w - 0.2Q_i^r - 0.2Q_i^c \right\} \dots\dots\dots(31) \end{aligned}$$

四、結果與討論

(1) 應用八十六年光復圳之用水量及相關資料進行計算，為利於本模擬結果與其他配水方式比較，除大圳供水量外，其餘有關有效雨量、池塘之期初蓄水（第 4 句句初）及期末蓄水（第 33 句句末）、攔河堰取水均設定與農業工程研究中

心（1998）之模擬配水相同（參考表 1）。經線性規劃後之水庫年供水量可以減至 3,314 萬立方公尺並達到最大年淨收入 13,980 萬元。由表 1 比較兩種模擬配水水量變化，可以顯示，當農業工程研究中心（1998）模擬溢流量及田間越流之 774 萬立方公尺配合運用至灌溉，可減少由支線配水之水庫供水量。在總用水量方面，實際配水在同一年中共用了 7,642 萬立方公尺的水，然本研究之線性規劃模擬配水合計用水量 6,540 萬立方公尺，約只佔實際配水之 85.6%，亦即可省近 15% 之水量；而在目標函數值，即全年灌區淨收益上，增加了 2,697 萬元，若與原農業工程研究中心（1998）模擬配水之目標函數值比較，則可增加 1,760 萬元，在本研究案例中，可以得知在利用線性規劃後，不僅可達到降低使用水量，亦能達到較高的年淨收益。

灌區各句之線性規劃模擬供水量及旬實際大圳配水量變化繪如圖 4，灌溉之最大水源：大圳供水，在實際與線性規劃模擬配水間有相當之差異，尤其是在兩個期作之間（如第 14 句至第 19 句）與期作內之部份時間（如第一期作中之第 5、6、8、10 句），此乃線性規劃使用回歸水及攔河堰來減少由大圳來之水量以降低成本。而池塘雖受限於容量，然於各期作之初期，即整浸田需水期間以及兩期作間，可以大量集水以備輪區之用。此外，模擬之大圳配水由於渠道容量之限制，使得模擬之大圳（光復圳）供水量受限於 2.2 C.M.S.，這可以由圖 4 中之大圳供水最高點都被限制在 190 萬立方公尺以下得知。

回歸水對灌溉之影響可以在期作之需水高峰期中看出，第 8 句及第 20 句之前後為整田及本田之期初，分別為第一、二期作的需水高峰期，需水量較大。由於第 20 句有較大之回歸水，故於第 13 至 18 句減少大圳供水量，並放空池塘，以利儲存第 20 句之回歸水。第 19 句至第 29 句之大圳供水量，受大圳容量之限制，各句之大圳供水量部份已達其渠道容量。

線性規劃模式對水質之限制部份，根據自八十五年七月至八十五年十月於光復圳之輔助水源社子溪 1 號攔河堰採樣四次之結果(林，1996)

表 1 八十六年光復圳灌溉實際與模擬水量結果

分類	目標函數值 (NT\$106 元)	大圳供水 (ha-m)	溢流量及田間 越流(ha-m)	攔河堰取入 (ha-m)	回歸水 (ha-m)	降雨逕流量 (ha-m)	用水量合計 (ha-m)
實際配水*	112.83	4,335	—	1,193	2,114		7,642
灌溉計畫*	113.31	3,790	—	4,002			7,792
模擬配水*	122.20	4,113	774	957	2,083	172	7,325
模擬配水**	139.80	3,314	160	957	2,076	193	6,540

*資料參考農業工程研究中心（1998）。

**模擬配水為本研究線性規劃結果。

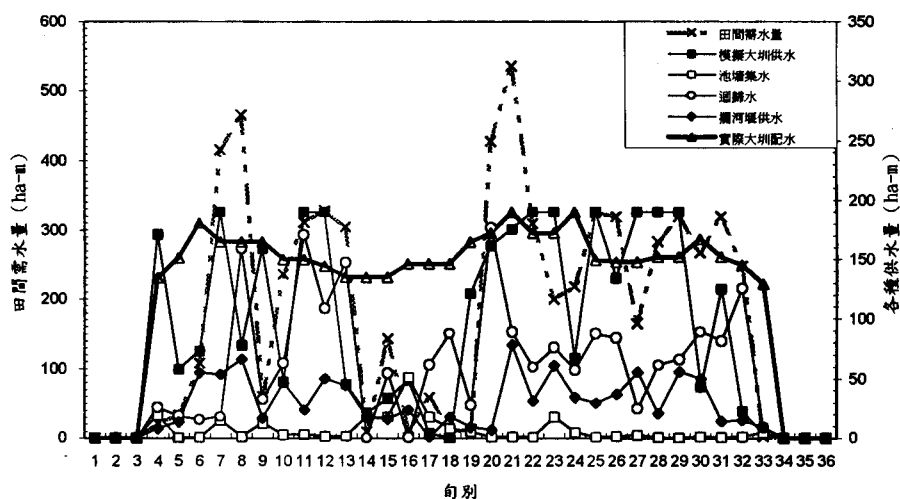


圖 4 線性規劃模式演算之旬供水量及旬實際大圳配水量變化圖

，其電導度在 $294 \sim 419 \mu\text{mhos/cm}$ (25°C) 間，電導度未超過水質標準；至於大圳灌溉水質引用八十一年桃園縣環境保護白皮書（桃園縣環境保護局，1992）之桃園大圳電導度平均值為 $189 \mu\text{mhos/cm}$ (25°C)，本計畫取大圳之電導度為 $200 \mu\text{mhos/cm}$ ，經計算顯示：八十六年度之水質並不需大圳增加供水量以為稀釋，然而，在未來水質惡化時期，將可預期本灌區需增加大圳引水量俾提升水質以符合水質電導度標準。

(2) 雖然本研究選取之年份，水質惡化部份尚未超過標準，然為了解攔河堰水質惡化對大圳供水之影響，本研究假設攔河堰之電導度為 500 、 750 、 $1,000$ 及 $1,250 \mu\text{mhos/cm}$ 之不同情況下，進行池塘灌溉系統聯合營運線性規劃之運算，運算結果如表 2 所示。在電導度超過

$750 \mu\text{mhos/cm}$ 時，即需增加大圳供水量，其電導度由 $500 \mu\text{mhos/cm}$ 提升至 $1,250 \mu\text{mhos/cm}$ 時，大圳供水量由 $3,314$ 萬立方公尺增加到 $3,605$ 萬立方公尺；在電導度介於 $750 \mu\text{mhos/cm}$ 至 $1,000 \mu\text{mhos/cm}$ 間，每增加 $1 \mu\text{mhos/cm}$ 平均增加 0.476 萬立方公尺之大圳供水量；在 $1,000 \mu\text{mhos/cm}$ 至 $1,250 \mu\text{mhos/cm}$ 間，每增加 $1 \mu\text{mhos/cm}$ 平均增加 0.688 萬立方公尺之大圳供水量。顯示隨著電導度之提高，大圳之供水量快速的增加。

為進一步分析電導度對收益之影響，本研究對四個不同電導度值分別計算單位電導度增加或變化時，收益之相對應敏感度。表 3 顯示當攔河堰之電導度在 $1,000 \mu\text{mhos/cm}$ ，大圳電導度仍取用 $200 \mu\text{mhos/cm}$ 時，攔河堰之電導度每增加

表 2 光復圳在模擬不同攔河堰取入水的電導度之水量分析

電導度值 ($\mu\text{mhos/cm}$)	目標函數值 (NT\$106 元)	支線配水 (ha-m)	溢水量 (ha-m)	攔河堰取入 (ha-m)	回歸水 (ha-m)	降雨逕流量 (ha-m)
500	139.80	3,314	160	957	2,076	193
750	139.80	3,314	160	957	2,076	193
1,000	137.05	3,433	259	957	2,076	193
1,250	132.58	3,605	431	957	2,076	193

表 3 光復圳在不同限制條件下之敏感度分析

限制條件	參數值	大圳供水電導度 (元/立方公尺)	大圳電導度敏感度 (元/ $\mu\text{mhos/cm}$)	攔河堰電導度敏感度 (元/ $\mu\text{mhos/cm}$)
攔河堰 電導度值 ($\mu\text{mhos/cm}$)	500	-	0	0
	750	-	0	0
	1,000	-	-5,854	-12,864
	1,250	-	-19,477	-21,413
水庫最大 供給大圳水量 (ha-m)	3,600	0	-	-
	3,000	1.1	-	-
	2,400	1.1	-	-
	2,000	1.1	-	-

表 4 光復圳在不同限制水庫供水電導度之水量分析

水庫最大供給大圳水量 (ha-m)	目標函數值 (NT\$10 ⁶ 元)	大圳供水 (ha-m)	溢水量 (ha-m)	缺水量 (ha-m)	攔河堰取入 (ha-m)	回歸水 (ha-m)	降雨逕流量 (ha-m)
3,600	139.80	3,314	160	0	957	2,076	193
3,000	136.49	3,000	172	296	957	2,076	193
2,400	129.89	2,400	172	896	957	2,076	193
2,000	125.49	2,000	172	1,297	957	2,076	193

(或減少) $1\mu\text{mhos/cm}$ 將減少 (或增加) 12,864 元之收益，大圳之電導度每增加 (或減少) $1\mu\text{mhos/cm}$ 將減少 (或增加) 5,854 元之收益；當攔河堰之電導度在 $1,250\mu\text{mhos/cm}$ 及大圳電導度在 $200\mu\text{mhos/cm}$ 時，攔河堰之電導度每增加 (或減少) $1\mu\text{mhos/cm}$ 將減少 (或增加) 21,413 元之收益，大圳之電導度每增加 (或減少) $1\mu\text{mhos/cm}$ 將減少 (或增加) 19,477 元之收益，表示電導度越大時，單位電導度變化所造成收益之損失將迅速增加。而且相對地，攔河堰電導度的敏感度較大圳的電導度的敏感度要來的大，造成此種現象之原因可能因為大圳引入水量大部分皆要經過支線及池塘等渠道或儲水後再輸

送，與他種水源有較多混合降低電導度的機會，故其電導度之敏感度相對較低。

(3) 為了解乾旱時期，水庫供水受到限制的狀況對目標函數之影響，本研究分別限制水庫供水之供水電導度為 3,600、3,000、2,400 及 2,000 ha-m，進行線性規劃之運算，運算結果如表 4 所示。當供水電導度由 3,600 ha-m 降至 2,000 ha-m 時，農業收益由 13,980 萬元降至 12,549 萬元。

為進一步分析水庫供水對收益之影響，本研究對四個不同水庫供水之限制供水電導度分別計算單位水庫供水變化時，收益之相對應敏感度。表 3 顯示當水庫供水之限制供水電導度在 3,600 ha-m，水庫供水之供水電導度每增加 (或減少) 1 ha-m 時，

其收益並無變化，亦即水庫供水之供水量在 3,600 ha-m 時，該限制式為多餘的；當水庫供水之限制供水量在 3,000、2,400 及 2,000 ha-m，水庫供水之供水量每增加（或減少）1 ha-m 將增加（或減少）1.1 元之收益；經進一步分析，顯示水庫供給大圳最大水量低於 3,314 ha-m 時，單位供水量變化所造成收益之損失均相同，亦即每減少 1 立方公尺之大圳供水量，將減少 1.1 元之收益。造成此種現象之原因係因目標函數(31)式中假設單位缺水量之損失為一常數所造成。

五、結論與建議

本研究係針對民國八十六年光復圳灌區，以線性規劃進行池塘灌溉系統聯合大圳供水、攔河堰取水及有效雨量共同運用，以達該灌區之農業年最大淨收益的目標。

經就八十六年進行測試結果，在大圳供水（即經由支線配水）部份，採用線性規劃結果較灌溉計畫減少 476 萬立方公尺；較實際配水減少 1,021 萬立方公尺，較農業工程研究中心（1998）模擬配水減少 799 萬立方公尺；在農業最大年收益部份，最大年淨收入 13,980 萬元，較經計算後之實際配水收益增加 2,697 萬元。其原因在利用各句之水量變化，充分運用池塘，減少池塘溢流量及田間溢流。

光復圳水質部份，由於電導度未超過水質標準；八十六年度之水質經計算結果並不需大圳增加供水量以為稀釋，在未來水質惡化時期，將可預期本灌區需增加來自大圳或攔河堰之水量俾提升水質以符合水質電導度標準。電導度在不同之範圍間，其水質惡化後所造成之大圳供水量增加並不固定，隨著電導度之增加，大圳之供水量快速的增加。

充分地利用回歸水及池塘之儲水容量，有利於將大圳供水量降低，而增加年總淨收益。

一般而言，極難找到可以完整而準確地描述自然界實際操作情況之模式，本研究之模式尚有改進之地方：

線性規劃方式，顧名思義就是各變數間之變化可以線性關係描述之，然當乾旱時期，各種水

量皆低時，是否各變數間還會有線性關係之存在，值得深入討論，而最需要利用聯合營運之方式來增加用水之效率的乾旱時期，各種用水關係若是非線性關係，本研究之線性規劃有可能無法做出正確之模擬結果。此外，當未來將聯合營運之區域擴大時，線性規劃的變數數目將會增加，必須考慮在能夠模擬實際運作情形之模式下，如何將變數數目降低的計算方法。除了已經考慮到的成本因素，其他各種因素，例如灌溉過程之中對環境生態之貢獻、對地下水之涵養，未來將考慮如何量化，以顯現農業在各種用水上之競爭力。

傳統以句為水量的操作時間若能縮短，是否能夠增加用水效率，乃一值得研究之課題。唯當為達成操作時間縮短，而使得人工成本增加時，年總淨收入是否能夠增加？若各種配水之操作時間能藉自動化操作而達成縮短，是否有一最佳配水操作時間？農業灌溉水質標準事實上不只以電導度為唯一項目，未來之研究應以各種重要水質標準納入限制式中為目標。選擇性之休耕在本研究中尚未考慮進來，對灌溉渠道之末端，須消耗較多損失水量，且流經都市化區域，水質已非上游端可比，未來在模式之應用上，可以藉由各種休耕決策支援之方式，考慮各個輪區之特性，如土壤耗水性質、渠道輸水損失等，由模式選擇輪區進行休耕以達到整個灌區較大之淨收益。

經由本研究所完成光復圳池塘灌溉系統聯合運用模式已有初步之成果，唯石門水庫之水庫供水範圍包含桃園、石門水利會灌區，如何將此模式擴大至整個水利會灌區，以充分利用桃園、石門水利會各池塘作有效的運用，使有限之水資源作最佳之調配則為未來努力之目標。

參考文獻

1. 台灣省水利局，「農田水利會合理灌溉用水量及水源可靠水量調查與評估計畫成果報告」，1996。
2. 台灣省石門農田水利會，「石門大圳灌區保留池塘調整計畫規劃報告」，1981。

3. 台灣省石門農田水利會，「石門大圳灌區池塘改善方案檢討研究報告」，1989。
4. 台灣省桃園農田水利會，「臺灣省桃園農田水利會會誌」，1995。
5. 吳祚任、簡傳彬、黃寄萍，「水庫及池塘灌溉配水模式之研究」，中國農業工程學會，八十四年度農業工程研討會，台北，pp.289-298 1995。
6. 林延郎、簡傳彬、杜俊德，「乾旱時期灌溉營運管理決策支援地理資訊系統建置」，中國農業工程學會，八十五年度農業工程研討會，彰化，pp.559-565，1996。
7. 林俊男，「河水取入利用檢討」，桃園農田水利發展基金會，1996。
8. 洪惠祥，「支線及池塘聯合營運配水模擬之研究」，台灣大學農業工程研究所碩士論文，1988。
9. 桃園縣環境保護局，「桃園縣環境保護白皮書」，1992。
10. 農業工程研究中心，「石門水庫灌區最合理灌溉需水量研究(II)」，AERC-96-RR-11，1996。
11. 農業工程研究中心，「桃園大圳灌區貯水池集水面積釐定及有效蓄水量推估」，1998。
12. 經濟部水資源局，「地層下陷區水土資源規劃決策支援系統」，1998。
13. 經濟部水資源統一規劃委員會，「水資源分派效率之研究(一)—水權對水市場」，1995。
14. Fang, W.-T. and M.-J. Peng, "Linear programming applied in the combined operation of the laterals and the ponds," US Committee on Irrigation and Drainage Conference, Las Vegas, USA, pp.321-329, 1996.
15. Loucks, D. P., J. R. Stedinger and D. A. Haith, Water resource system planning and analysis, 1981.
16. Revelle, C. S., E. E. Whitlatch and J. R. Wight, Civil and environmental systems engineering, 1997.

收稿日期：民國 89 年 5 月 18 日

修正日期：民國 89 年 7 月 21 日

接受日期：民國 89 年 8 月 24 日