

屏東隘寮圳灌區最佳分水率之探討

The Optimal Water Allocation for Ailiao Irrigation Area, Pingtung

國立成功大學
資源工程學系
博士班研究生

鄭 遠

Yum Cheng

國立成功大學
資源工程學系
教授

李 振 誥*

Cheng-Haw Lee

國立成功大學
資源工程學系
碩士班研究生

陳 美 惠

Mei-Hui Chen

國立成功大學
資源工程學系
博士班研究生

葉 信 富

Hsin-Fu Yeh

摘 要

本研究主要進行隘寮溪隘寮圳灌區地表水與地下水聯合運用，本研究首先透過大尺度的概念，藉由 MODFLOW 軟體建構大區域屏東平原之地下水水流數值模擬，以求出符合現地水文地質架構與水力參數的模型。另外，採取小尺度的概念，以屏東農田水利會隘寮圳灌區為研究區域，利用 MODMAN 軟體將地下水流連續性方程式、出水限制、洩降限制作為限制條件模擬出響應矩陣，再利用 LINDO 軟體解響應矩陣最佳解，並提出最大允許抽水量。將此最大允許抽水量，配合由隘寮圳灌區各主給需水量、渠道損失量、圳路初始流量所建立的主給平衡方程式及渠道損失方程式，求取最小抽水量並提出最佳分水率之方法。本研究以隘寮圳 2003 年每旬之取水量為依據，進行最佳化模擬。模擬結果顯示最佳分水率在 12/25-5/31 期間，分水率的建議為新東勢圳 0.48、德協圳 0.2、鹽埔圳 0.32；在 6/1-11/14 期間，分水率的建議為新東勢圳 0.42、德協圳 0.25、鹽埔圳 0.33；在 11/15-12/24 期間，分水率的建議為新東勢圳 0.40、德協圳 0.25、鹽埔圳 0.35。

關鍵詞：地表水與地下水聯合運用，線性規劃，MODFLOW。

ABSTRACT

In order to conjunct use of surface water and groundwater in Ailiao Irrigation Area, this research plans to divide into two parts. In the first part, the groundwater numerical simulation was built with MODFLOW to construct the hydro-geological structure of regional Pingtung plain. In the second part, the irrigated area of Pingtung irrigation association, Taiwan was adopted to investigate the conjunctive use of surface water and

*通訊作者，國立成功大學資源工程學系教授，701 台南市東區大學路 1 號，leech@mail.ncku.edu.tw

groundwater. Furthermore, several conditions such as the firm water requirement, channel loses, and the initial flow of channel are considered to set up to the balance equation of the firm water, obtained the minimum pumping water amount to evaluate the optimal allocate water rate. Finally, MODMAN and LINDO were used to obtain the best unit plus value and response matrix of allowable pumping water for groundwater resource management.

The optimal simulation result shows the best allocate water rates are 48%, 20%, and 32% for Xin-Dong-Shi, De-Shi, and Yan-Pu during December 25 to May 31, respectively. Meanwhile, the allocated rates are 42%, 25%, 33% for Xin-Dong-Shi, De-Shi, and Yan-Pu during June 1 to November 14, respectively. The allocated rates are 40%, 25%, 35% for Xin-Dong-Shi, De-Shi, and Yan-Pu during November 15 to December 24, respectively.

Keywords: Conjunctive use of surface water and groundwater, Linear programming, MODFLOW.

一、前言及前人研究

隘寮圳引水之歷史，始於民國二十七年，所轄灌區跨越屏東縣北端之長治、內埔及鹽埔等三個鄉鎮，由於社會的變遷及耕作制度的改變，目前灌溉面積計為 3,464 公頃。其中水田約佔 23 公頃，旱田約佔 3,441 公頃大部分為果樹。隘寮圳所轄灌區佈置除在隘寮溪設置攔河堰取地表水灌溉外尚有諸多水井取地下水以補地表水因時間及空間分配不均勻所致之不足。長久以來隘寮圳分水率皆承襲先人所訂未作過調整，但由於近年來經濟結構之改變、工商業快速成長，農業與非農業各方面對各項資源之需求日益俱增，隘寮圳所轄灌區由於農地之大量被移作他用，以及耕作之物種改變，昔日之配水方式實有檢討之必要(如表 1 所示)。然而在目前新水源開發困難且地表水水源缺乏下，隘寮堰引水又是目前農田水利會惟一地表水源。本區每年雨量又分佈不均，雨季時，河川短流水急，很快入海，無法滯留陸地，所幸屏東平原地下水豐富，目前大部分農田均可鑿井灌溉，但其成本較高。如果該隘寮圳灌區採用地面水與地下水聯合運用，進行加強豐枯水期之用水管理，則在豐水期時以地面水取水為主，不影響農業用水情形下，如仍有剩餘水量，

可補注地下水或移作其他標的使用，而在枯水期，農業用水轉移用以救旱時，以地下水輔助之，考慮灌溉配水計畫與可轉移水量，配合地面水與地下水聯合營運，以因應減少之水資源，方能不嚴重影響農業生產，亦能滿足其他標之之需求。

地下水資源管理(groundwater resources management)的研究是隨著經濟發展和社會的進步而逐漸興起的一門科學，目的乃在解決地下水資源的利用使之達到合理分配的效果。關於地下水資源管理研究在國內方面，丁澈士(1994、2003)應用 MODMAN 於優化管理與地下水數學模式的耦合，並選取林邊河流域進行人工湖入滲補注方法之優化管理，運用線性規劃進行開發管理之研究，研究結果指出，經優化管理之人工湖可得較佳之水資源調配之運作成效；劉俊達等人(1998)及陳俊焜(1998)針對彰化地區與濁水溪沖積扇區域進行二維模擬，對於抽水量的最佳調配與沿海地層下陷區域補注地下水的最佳調配，兩人皆建立多個抽水方案與注水方案；李振誥等人(2000)針對濁水溪沖積扇進行多層含水層之地下水調配管理之研究，提出最經濟也最適合濁水溪沖積扇多層地下水調配管理的方案；劉志文(2000)針對屏東平原進行地下水資源調配與管理

表 1 隘寮圳灌區之灌溉計畫分水率(單位：%)

圳別	大番水	后期作期間	小番水
	11月15日至12月24日	6月1日至11月14日	12月25日至5月31日
新東勢圳(一、二、三號、老埤支線)	30.0	30.0	35.8
德勢圳(四號支線)	40.0	40.0	56.7
鹽埔圳(五、六、七、八、九號支線)	30.0	30.0	7.5

最佳化分析，提出可於一年內達成使地下水零水位面下之面積不再增加之地層下陷管制方案的量化目標；廖培明等人(2004)利用烏溪地表水源與彰化地區地下水源，以地表地下水聯合運用之方式，規劃供應彰化地區及其鄰近區域未來用水需求，並規劃建議彰化地區及其鄰近區域地表地下水聯合運用之各地表、地下水之運用個案之水源運用量及配合措施。

在國外方面，Psilovikos (1999)比較線性規劃法與混合整數規劃法(mix integer programming)對希臘北部盆地做地下水最佳化管理，結果指出，當考慮水位限制及抽、補水的分布時，線性規劃法優於混合整數規劃法；Gong *et al.* (2000)結合地下水流數值模擬與地下水資源最佳化管理，運用於中國大陸城市 Zhengzhou 管理地下水。Singh *et al.* (2001)利用線性規劃模式，可在不同供水條件下，規劃出最佳種植模式，以產生最大的淨利潤；Azaiez (2002)利用機會成本的觀念，對於擁有人工補注之地面水和地下水聯合運用情形下，發展出一個多階段判斷模式；Doppler *et al.* (2002)利用線性規劃探討灌溉分配水及種植模式的最佳化，在考慮農業產物和水價上升的條件下，求其最大毛利及最小毛利變化潛能，結果指出，在最佳化的種植模式及灌溉分配水的情形下，農業仍有著增加經濟利潤的重要潛能；Senthil *et al.* (2002)利用線性規劃，提出一個種植和地下水管理開發模式，可使經濟效益達到最佳化。

本研究擬以屏東農田水利會隘寮圳灌區(包括長治、內埔及鹽埔等鄉鎮)為研究區域，計畫方法是藉由分析大區域整體屏東平原之水資源，以了解小區域隘寮圳灌區對於屏東平原水資源之影響，再依本灌區之現有農地耕作面積、土壤類

別、不同作物之需水量以及地表水量等特性，探討灌區內各主給之需水量、地表水量及地下水量在時間與空間的差異進行最佳化分配。

二、研究方法

本研究擬分二部分進行，第一部分欲透過大尺度的概念，以建構大區域屏東平原之地下水流數值模擬，模擬區域內非均質、異向性含水層和不規則邊界的地下水流狀態。第二部分採取小尺度的概念，以屏東農田水利會隘寮圳灌區(包括長治、內埔及鹽埔等鄉鎮)為研究區域，利用地下水流模擬模式與最佳化管理模式所形成的地下水資源管理模式對研究區進行管理措施進而提出最佳分水率之方法。

在建構屏東平原之地下水流數值模式部分，利用美國地質調查所發展之地下水流模擬程式 MODFLOW 進行數值模擬，以模擬屏東平原內之水文地質架構及地下水流狀態；故此需蒐集屏東平原區域內之各項相關模式資料，如：地質狀況、水文地質參數、水文氣象資料等，並加以處理、分析，建構屏東平原之水文地質架構以進行數值模擬；在將數值模擬所得之水位，經由率定的過程以求得符合現地狀況之地下水流模式及水力參數。

在地下水資源線性管理規劃模式部分，是選取隘寮圳灌區(包括長治、內埔及鹽埔等鄉鎮)，透過響應矩陣法(method of response matrix)將地下水流數值模擬與線性管理規劃模式進行耦合，運用 GeoTrans 所發展之 MODMAN (MODflow MANagement) 將地下水流數值模式之優化目標概念化，並轉換至 LINDO 進行線性規劃，構成地下水資源線性規劃管理模式，求取水位洩降與抽水量之關係後，再配合各主給需水量、渠道損

变量、圳道初始流量等参数，建立线性规划数学式后，求取满足现有耕作方式之最佳地表分水率。

2.1 研究目的与流程

本研究以屏东农田水利会隘寮圳灌区(包括长治、内埔及盐埔等乡镇)为研究区域。研究中以各主给需水量、渠道损失量、圳道初始流量、抽水量等为参数，应用水资源系统分析中之线性规划方法，以 LINDO 软件工具建立目标式及限制式之数学模式，其主要目的如下：

- (一) 建立研究区域内灌区地表水及地下水联合运用之数学模式。
- (二) 建立研究区域内地表水之最佳分水率。
- (三) 检讨研究区域内地下水最小抽用量。
- (四) 检讨本灌区可能之释水条件。

其中，本研究针对抽水量此一参数加以进行讨论。首先，由于隘寮圳灌区无明显之天然边界，故选取屏东平原作为数值概念模式建立，待模式率定完成后，利用 MODMAN 与 LINDO 得水位洩降与抽水量之关系后，在将此抽水量视为参数。研究流程图如图 1 所示。

2.1.1 屏东平原地下水数值模式

地质由于形成的时间及沉积环境等复杂因素的影响，使得均质(homogeneity)、等向性(isotropy)等理想状态的含水层在现地环境中是难以发现的，亦即含水层常为非均质、异向性、水力及几何边界条件不规则、厚度变化存有差异。如此的含水层使得地下水流动之数学模式的解析解难以获得。因此，对于求解研究区域的地下水问题，一般应用乃以数值分析法为主。

求解地下水控制方程式时，本研究主要采用地下水数值模式。研究中为了便于资料的输入以及处理，所采用的是 PROCESSING MODFLOW 5.06(Chiang & Kinzelbach, 1998)之软件。此套软件是依据美国地质调查所(U.S.G.S: United States Geological Survey)所发展之 MODFLOW (McDonald & Harbaugh, 1988)地下水流模拟程式再行研发而成。

2.1.2 屏东平原之概念模式建構

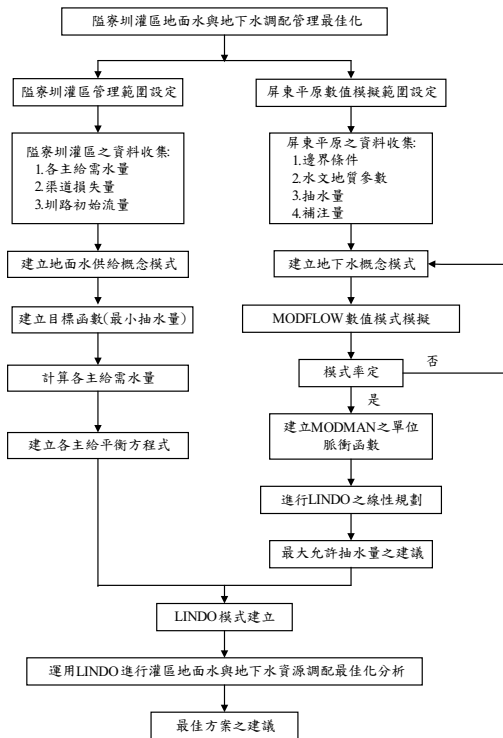


圖 1 研究流程圖

建立概念模式的目的是為了簡化現場實地的情況，並將現場的資料整合，快速的分析此系統。因此，將原本複雜的地质状况简化是一个非常重要的步骤。模式的建立，首先需根据研究区域之水文地质特性与含水层的空间分布建立地下水水文地质架构及概念模式，作为地下水流数值模式模拟之基础；接著以数值模拟的方法，来推算研究区域内的地下水流。模式设定包含：分层设定、水文地质参数的输入与设定、初始水位、降雨补注、抽水量及蒸发散量等，本模式采用民国 91 年所收集之相关资料建置整个屏东平原的地下水流数值模式(陈美惠, 2005)。

2.2 屏东平原地下水流模式基本架构

屏东平原位于台湾的西南端，长约 60 公里，宽约 20 公里，略成南北延长的矩形，属于一个陷落构造盆地上的冲积平原，如以地形标高 100 公尺以下为范围，面积约约为 1,210 平方公里。北部以旗山、美浓一带的低山为边界，此为中央山

脈西翼之低度變質帶，屬於第三世紀之故結岩層，經過變質作用所形成之板岩及變質砂岩，其透性較低，故可視為零流量邊界。西側以旗山至鳳山丘陵的稜線為邊界，稜線通過嶺口礫岩層並假定其為地下水分水嶺，分水嶺的兩側之降雨入滲後各自向東西分流，故可定西側邊界為零流量邊界。屏東平原南以台灣海峽為邊界，實際邊界應深入海中，但缺乏鑽探資料，故一般均以海岸線為其邊界，雖然沿海地區有潮汐的影響，但是以長時間觀點而言可視為固定之零水位面，及設定其為定水頭邊界。在東部邊界的設定，利用汪中和(1997)以穩定同位素探討屏東平原的補注分區的研究結果推測本區地下水的補注，主要來自 100 至 400 公尺以上的山麓地區，故設定其為定流量邊界。本研究在網格劃分上，以 1,000×1,000 公尺之網格為基本計算格點，分為三個含水層，形成每層 35 行、70 列，共 2450 個網格。本研究所模擬時段為自民國 91 年 1 月至 91 年 12 月止，以一個月為一模擬時段，共模擬十二個時段。模式的率定主要分成兩個階段過程，一為穩態狀態(Steady State)，一為動態狀態(Transient State)，如下述處理過程：

(一) 穩態狀態(Steady State)

所謂的穩態狀態率定乃是指模擬含水層系統長期平均趨於穩定的狀態，此時地下水流控制方程式中地下水頭變化可忽略，故水頭可視為不隨時間變化。本研究中，此階段需率定的因素有三：含水層厚度、抽水量、補注量、透水係數、滲漏係數。含水層厚度於模式調整過程中，本研究先假設含水層的厚度是已知、正確而不須做任何調整的參數。模式中抽水量與補注量存有較大的不確定性，因此，針對觀測值與模式值水位的差異，對抽水量做一適度的調整。透水係數在模式設定之初將透水係數分成數區來做模擬，而分區的範圍、所在位置及透水係數值對於地下水位的影響便成為調整的重點。滲漏係數因含水層間有滲漏發生，也就是說，上下含水層間有水量的交換又因含水層本身的概念模式是假設為侷限含水層與非侷限含水層，所以也經多次反覆試誤，將參數適當的調整。

(二) 動態狀態(Transient State)

在此步驟的率定過程中，地下水頭除受空間位置影響外，短時期內亦會隨時間而變化，所以主要針對的是貯水係數、抽水量及補注量，而在穩定狀態下已確定的參數便不做調整。整個率定過程隨時間變化，因此，補注的值便隨雨季(5 月至 10 月)及乾季(11 月至 4 月)來做調整及率定。而貯水係數之率定是隨著透水係數分區，檢定侷限及非侷限含水層之貯水係數輸入值對地下水位之影響作為率定的重點。本動態狀態的模擬時段選自民國 91 年 1 月至 91 年 12 月止。本研究於試誤法中為便於率定工作的進行採用平均誤差(Mean Deviation)來判斷模擬結果的正確性。一年的模擬時段內各觀測井之平均誤差結果，小於 1 公尺的有六十八口井，平均誤差介於 1~2 公尺的有三口井，平均誤差介於 2~5 公尺的有一口井。由此顯示約有九成的觀測井平均誤差在 1 公尺之內，模式模擬成果可以接受。

三、隘寮圳灌區之實例分析

本研究於利用 PROCESSING MODFLOW 針對屏東平原進行水文地質架構以及水力參數的確定，在此便將這初邊值條件和地下水補給、排洩的已知典型時段(就本研究而言，其時間段乃自民國 92 年 1 月至民國 92 年 12 月)對各含水層進行 MODMAN 程式模擬。

為了更能精確的描述隘寮圳灌區，故將此區域以 500×500 公尺為間隔分割，其中，隘寮圳灌區有 292 個網格元素。一般來說，灌溉用水都在淺層抽取，故本研究之管理模式，為第一層 292 個網格元素，分為 3 個管理亞區，分別為新東勢圳、德協圳、鹽埔圳，其中，新東勢圳佔 131 個網格元素、德協圳佔 82 個網格元素、鹽埔圳佔 79 個網格元素，如圖 2 所示。管理期限係自民國 91 年 1 月至民國 91 年 12 月，管理期距以每旬計算一次，以月表示之。

所期待求得之目標針對 92 年隘寮圳灌區 292 個網格元素之開採及分佈概況，在已模擬出之地下水用水狀況為基準下，為了應付大量地下水需求，在可容許的水位洩降限制條件下，欲

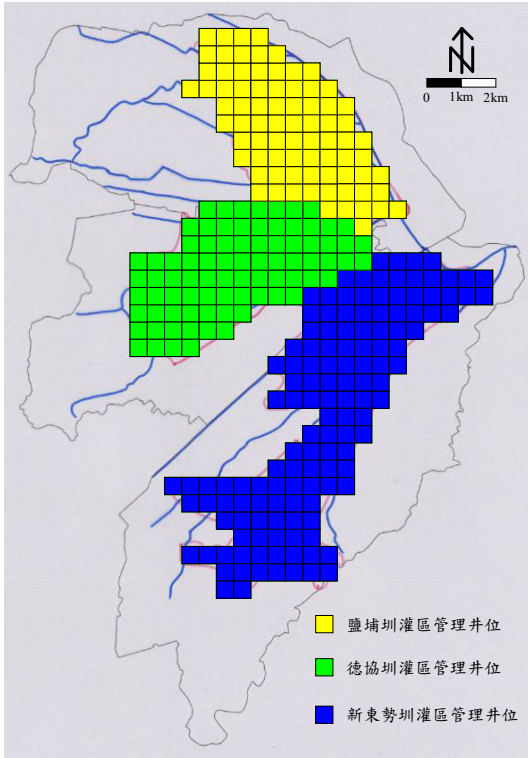


圖 2 隘寮圳灌區各圳區格網化圖

再多開採地下水量。依此，則令各管理亞區的每個格網單元之地下水開採量和各控制點的地下水水位為決策變量，目標函數則訂定為在全管理期（即一年），在滿足各控制點的地下水水位限制和各種供水指標限制的情況下，隘寮圳灌區所能再開採最大的抽水量。故目標函數寫為如下：

$$\max Z = \sum_{i=1}^{292} \sum_{t=1}^{12} Q(i,t) \dots\dots\dots(1)$$

其中， i = 模擬區內管理井數； t = 模擬區域之管理時段

管理模式主要考量之限制條件，分別為：

- (一) 洩降量之限制：本限制乃考慮在抽水時期位預防地下水因抽水所產生之水位急遽下降而定。其內容依模擬區域內之新東勢圳、德協圳、鹽埔圳分區，由各區內之觀測井歷年地下水水位狀況，判定該區地下水涵養能力，再分別給定洩降條件。根據疊加的原理，管理區內任一點、某一時刻的水位洩降值 S_i

等於各管理亞區之格網元素 j 於同一時段以 \bar{Q}_j 量抽水在控制點 i 點所引起水位洩降值的疊加。

$$S_i = \sum_{j=1}^{160} \beta_{i,j} Q_j \quad i = 1, 2, \dots, 160 \dots\dots\dots(2)$$

其中， $\beta_{i,j}$ 為 j 點施加脈衝在 i 點引起的水位響應值。而利用(2)將各格網元素所形成之水位洩降值改以響應矩陣和抽水量來轉換，以矩陣形式則可表示為

$$[S] = [A][Q] \dots\dots\dots(3)$$

故水位的限制可寫成

$$[A][Q] \leq [S_{\max}] \dots\dots\dots(4)$$

其中， $[A]$ 為該管理期的水位響應矩陣； $[Q]$ 為管理期各亞區之格網元素地下水開採量的矩陣； $[S_{\max}]$ ：管理期各控制點水位洩降極限值之矩陣。

- (二) 各抽水單元欲增加開採量之限制：基於原本開採狀況下欲再增加開採量，為了避免地下水源過度開採造成區域地下水源匱乏，所以要對原有抽水單元的增加開採量作合理的限制。利用民國 92 年隘寮圳灌區抽水量之資料，將枯水期所抽用之地下水量加總平均，分區將此開採量當作欲再增加開採量之最大限制。

本研究之最佳化方案均在此目標函數與限制式之設計下，進行優化計算與方案配置，各參數之其輸入值整理如表 1 之方案 A1 所示。在方案 A1 中，各抽水單元欲增加開採量之限制，是將枯水期所抽用之地下水量加總平均，在方案 A2 中，各抽水單元欲增加開採量之限制，是取各區單一月份之最大抽水量。其他限制條件及目標函數、數值及符號意義與方案 A1 相同。在方案 A3 中，將水位洩降值限制修改較方案 A1 嚴格，藉著控制水位洩降值限制為約方案 A1 水位洩降值限制之 0.8 倍，其他限制條件及目標函數、數值及符號意義與方案 A1 相同。

表 2 抽水方案之目標函數及限制式

	方案 A1	方案 A2	方案 A3
目標函數	$\max Z = \sum_{i=1}^{292} \sum_{t=1}^{12} Q(i,t)$	$\max Z = \sum_{i=1}^{292} \sum_{t=1}^{12} Q(i,t)$	$\max Z = \sum_{i=1}^{292} \sum_{t=1}^{12} Q(i,t)$
限制式	$[A][Q] \leq [S_{\max}]$	$[A][Q] \leq [S_{\max}]$	$[A][Q] \leq [S_{\max}]$
輸入值	水位洩降限制： 鹽埔圳 ≤ 10 公尺 德協圳 ≤ 10 公尺 新東勢圳 ≤ 6 公尺	水位洩降限制： 鹽埔圳 ≤ 10 公尺 德協圳 ≤ 10 公尺 新東勢圳 6 公尺	水位洩降限制： 鹽埔圳 ≤ 8 公尺 德協圳 ≤ 8 公尺 新東勢圳 ≤ 5 公尺
	單元增加開採之抽水限制： 鹽埔圳：18.16 萬噸 德協圳：15.08 萬噸 新東勢圳：4.51 萬噸	單元增加開採之抽水限制： 鹽埔圳：30.42 萬噸 德協圳：24.14 萬噸 新東勢圳：7.32 萬噸	單元增加開採之抽水限制： 鹽埔圳：18.16 萬噸 德協圳：15.08 萬噸 新東勢圳：4.51 萬噸

表 3 各抽水方案中各圳區之最大允許抽水量(單位：噸/月)

月	鹽埔圳			德協圳			新東勢圳		
	方案 A1	方案 A2	方案 A3	方案 A1	方案 A2	方案 A3	方案 A1	方案 A2	方案 A3
1	1845357	1939574	1680359	1486443	1493247	1386740	631456	785059	612655
2	2411606	2418956	2330266	1419576	1439606	1410495	860051	866349	844938
3	2317918	2369231	2267963	1378311	1401000	1367113	887747	889721	857868
4	2434162	2438123	2366350	1680803	1696477	1673296	938280	939788	913529
5	1084988	1107904	1050406	1692690	1696871	1675963	589392	596529	572245
6	994968	1047190	944492	1430464	1437212	1420837	885639	891850	867595
7	1960998	2001514	1810191	1836725	1876177	1724199	826793	964188	811752
8	639769	670269	558350	296904	316267	289790	296550	301277	277559
9	466274	504241	413798	186916	210164	180407	173063	177945	148071
10	736603	775050	686388	638505	662778	621796	233498	239436	213694
11	645736	650353	596038	573485	597576	557138	272547	279425	257326
12	670159	723454	631718	629345	651939	624342	405614	407075	388654

比較方案 A1、方案 A2 與方案 A3，在基於不同的水位洩降限制及增加開採抽水限制條件下，可得到不同的最大允許抽水量之建議，如表 2 所示。由表 3 可看出方案 A1 與 A2 之最大允許抽水量差異不大，即各區洩降限制與水位限制相同、各抽水單元欲增加開採量之限制不同的情況下，對結果影響並不大。而方案 A3 是根據方案 A1 增倍各區洩降限制與水位限制，藉以觀察比較與方案 A1 的不同。結果發現，最大允許抽水量明顯增加，即各區洩降限制與水位限制不同、各抽水單元欲增加開採量之限制相同的情況下，對結果影響較為明顯。

四、屏東農田水利會隘寮圳灌區最佳化模式

4.1 模式簡介

隘寮圳灌區以取自隘寮溪之地表水為主要灌溉水源，當地表水量不足時則以抽水機抽取地下水以補其不足，灌區內之分水係依昔日制定之分水率。為有效的利用隘寮圳地表水資源，本研究以線性規劃數學式，在滿足各種天然及人為之限制條件下，求其最大之地表水用水效率亦即以最小抽水量代表最低用電量為模式之目標函數，並求出參與此模式各參數之最佳數量。在此

模式中，各限制條件為各主給需水量、最大允許抽水量、平衡方程式、渠道輸水損失與配水等形成一組別之等式或不等式之線性方程式，其目標函數亦為一線性方程式。綜上所述，茲將模式之目標函數及限制式敘述如下：

(一) 目標函數：(最小抽水量)

$$\text{Min} \sum_{i=1}^9 \sum_{j=1}^4 \sum_{k=1}^{18} PUMP_{i,j,k} \quad \forall \quad i, j, k \dots \dots \dots (5)$$

其中， $PUMP$ 為各主給抽水機的抽水量； i 為系統支線數； j 為各支線之分線數； k 為各分線主給數。

(二) 限制式：

(1) 平衡方程式

$$DEMAND_{i,j,k} \leq Q3_{i,j,k} + PUMP_{i,j,k} \quad \forall \quad i, j, k \dots (6)$$

其中， $DEMAND$ 為各主給的需水量； $Q3$ 為分配至各主給的水量； $PUMP$ 為各主給抽水機的抽水量。

(a) 各主給需水量

$$DEMAND_{i,j,k} = \sum_{m=1}^2 AREA_{i,j,k,m} \times U_m \quad \forall \quad i, j, k \dots \dots \dots (7)$$

其中， $DEMAND$ 為各主給的需水量； $AREA$ 為各主給的面積； U 為作物的單位需水量； m 為作物種類(本研究於計算作物需水量時是分水作與旱作兩種，分別設定 $m = 1$ 與 $m = 2$)。

(b) 最大允許抽水量

$$\sum_{i=1}^9 \sum_{j=1}^4 \sum_{k=1}^{18} PUMP_{i,j,k} \leq W \times T \quad \forall \quad i, j, k \dots \dots \dots (8)$$

其中， $PUMP$ 為各主給抽水機的抽水量； W 為單位時間最大允許抽水量； T 為時間(旬)。在第 3 節中有探討基於不同的水位洩降限制及增加開採抽水限制條件下，可得到的不同最大允許抽水量，如表 2 所示，將其最大允許抽水量作一平均的動作，使時間由月改為旬。並將最大允許抽水量分別代入方案 A1、方案 A2 及方案 A3，做不同案例的探討比較。

(2) 渠道損失與配水

(a) 主渠道

$$QQ_i = QF \times \left(1 - S \times \frac{L_i}{1000} \right) \text{ for } i = 1 \dots \dots \dots (9)$$

其中， QQ 為總水量沿幹線至各支線點時的水量； QF 為起始點流量； S 為損失率(在損失率方面，根據參考鄭遠等人(2003)所提出，假設圳路輸水損失每公里 5%，做為模式的運算值)； L 為各支線間的距離。

$$QQ_i = (QQ_{i-1} - Q_{i-1}) \times \left(1 - S \times \frac{L_i}{1000} \right) \quad \forall \quad i \geq 2 \dots \dots \dots (10)$$

其中， QQ 為總水量沿幹線至各支線點時的水量； Q 為分配至各支線的水量； S 為損失率； L 為各支線間的距離。

(b) 支線

$$\sum_{j=1}^4 Q1_{i,j} = Q_i \times \left(1 - S \times \frac{L1_i}{1000} \right) \quad \forall \quad i \dots \dots \dots (11)$$

其中， $Q1$ 為分配至各分線的水量； Q 為分配至各支線的水量； S 為損失率； $L1$ 為幹線至各支線上分流點的距離。

(c) 分線

$$Q2_{i,j,k} = Q1_{i,j} \times \left(1 - S \times \frac{L2_{i,j,k}}{1000} \right) \quad \forall \quad i, j \text{ and } k=1 \dots \dots \dots (12)$$

其中， $Q2$ 為分配至各分線的水量沿分線至各主給時的水量； $Q1$ 為分配至各分線的水量； S 為損失率； $L2$ 為主給與主給間的距離。

$$Q2_{i,j,k} = (Q2_{i,j,k-1} - Q3_{i,j,k-1}) \times \left(1 - S \times \frac{L2_{i,j,k}}{1000} \right) \quad \forall \quad i, j \text{ and } k \geq 2 \dots \dots \dots (13)$$

其中， $Q2$ 為分配至各分線的水量沿分線至各主給時的水量； $Q3$ 為分配至各主給的水量； S 為損失率； $L2$ 為主給與主給間的距離。

4.2 假設方案

4.2.1 最大允許抽水量之假設方案

表 4 假設方案之內容與說明

假設方案	內 容	說 明
B1 方案	以 92 年每旬之取水量及最大允許抽水量的限制為方案 A1，進行最佳分水率之地表水與地下水聯合運用。	在合理的洩降限制與增加開採量之限制的情況下，求取最小抽水量。
B2 方案	以 92 年每旬之取水量及最大允許抽水量的限制為方案 A2，進行最佳分水率之地表水與地下水聯合運用。	將增加開採量之限制條件較方案 A1 放寬的情況下，求取最小抽水量。
B3 方案	以 92 年每旬之取水量及最大允許抽水量的限制為方案 A3，進行最佳分水率之地表水與地下水聯合運用。	將洩降限制條件較方案 A1 嚴格的情形下，求取最小抽水量。

表 5 方案 B1 之隘寮圳灌區最佳與灌溉計劃分水率比較表(表中括弧內數字為目前灌溉計劃分水率，單位：%)

圳 別	大番水	后期作期間	小番水
	11月15日至12月24日	6月1日至11月14日	12月25日至5月31日
新東勢圳(一、二、三號、老埤支線)	40(30)	42(30)	48(35.8)
德勢圳(四號支線)	25(30)	25(40)	20(56.7)
鹽埔圳(五、六、七、八、九號支線)	35(30)	33(30)	32(7.5)

表 6 方案 B2 之隘寮圳灌區最佳與灌溉計劃分水率比較表(表中括弧內數字為目前灌溉計劃分水率，單位：%)

圳 別	大番水	后期作期間	小番水
	11月15日至12月24日	6月1日至11月14日	12月25日至5月31日
新東勢圳(一、二、三號、老埤支線)	41(30)	36(30)	47(35.8)
德勢圳(四號支線)	20(30)	30(40)	21(56.7)
鹽埔圳(五、六、七、八、九號支線)	39(30)	34(30)	32(7.5)

表 7 方案 B3 之隘寮圳灌區最佳與灌溉計劃分水率比較表(表中括弧內數字為目前灌溉計劃分水率，單位：%)

圳 別	大番水	后期作期間	小番水
	11月15日至12月24日	6月1日至11月14日	12月25日至5月31日
新東勢圳(一、二、三號、老埤支線)	36(30)	44(30)	46(35.8)
德勢圳(四號支線)	23(30)	26(40)	20(56.7)
鹽埔圳(五、六、七、八、九號支線)	41(30)	30(30)	34(7.5)

基於不同的水位洩降限制及單元增加開採之抽水限制條件下(如表 2)，可得不同最大允許抽水量之值。本研究擬訂三個假設方案，如表 4，分別以方案 A1、方案 A2、方案 A3 所提出之最大允許抽水量代入最佳化模式，進行最佳分水率之地表水與地下水聯合運用之探討。

將方案B1、方案B2、方案B3模擬後之隘寮圳灌區最佳分水率與灌溉計劃分水率做比較，整理為表5、表6與表7所示。並將隘寮圳灌區B1~B3

方案最小抽水量與剩餘水量整理為表8。

由表 8 可看出方案 B1 與 B2 之豐、枯水期最小抽水量及剩餘水量差異不大，即各區洩降限制相同、各抽水單元欲增加開採量之限制不同的情況下，對結果影響並不大。而方案 B1 較 B3 全年的抽水量少 331.3 萬噸，剩餘水量則多出 560 萬噸，即各區洩降限制不同、各抽水單元欲增加開採量之限制相同的情況下，對結果影響較為明顯。

表 8 隘寮圳灌區 B1~B3 方案最小抽水量與剩餘水量統計表

方 案	最小抽水量(10^3m^3)			剩餘水量(10^3m^3)		
	枯水期	豐水期	合 計	枯水期	豐水期	合 計
B1 方案	8324	3870	12194	1864	35642	37506
B2 方案	8136	3393	11529	1879	36464	38343
B3 方案	10372	5136	15508	1734	30170	31904

本研究目的之一在於求得隘寮圳灌區所轄各工作站由隘寮圳之分配。比較表 5~表 7 中數字得知，各區最佳分水率與灌溉計畫分水率有明顯的差異，顯示屏東農田水利會延用已久的分水率有調整的必要。而 B1~B3 方案所得之最佳分水率差異不大，故選用各抽水單元欲增加開採量之限制較嚴格的 B1 方案所提出之分水率視為最佳分水率，如表 5 所示。

五、結論與建議

本研究主要目的為探討隘寮圳灌區地表水與地下水聯合運用，運用 MODMAN 將地下水流數值模式之優化目標概念化，並轉換至 LINDO 進行線性規劃，構成地下水資源線性規劃管理模式，求取水位洩降與抽水量之關係後，再配合各主給需水量、渠道損失量、圳道初始流量等參數，建立線性規劃數學式後，求取滿足現有耕作方式之最佳地表分水率。最佳地表分水率之建議如下：在 12/25-5/31 期間，分水率的建議為新東勢圳 0.48、德協圳 0.2、鹽埔圳 0.32；在 6/1-11/14 期間，分水率的建議為新東勢圳 0.42、德協圳 0.25、鹽埔圳 0.33；在 11/15-12/24 期間，分水率的建議為新東勢圳 0.40、德協圳 0.25、鹽埔圳 0.35。

對於單目標管理模式其最佳方案的選擇，以本研究而言，最小抽水量是最重要的考慮因素，但若需考量經濟效益、社會成本的話，則以擬定多目標(multiple objective)管理，才能提高更準確的評估結果。

致 謝

本研究承蒙行政院農委會農業發展計畫補助(94 農發-5.1-利-05)以及屏東農田水利會提供

部分資料，使本研究得以順利進行，僅此謝忱。

參考文獻

1. Azaiez, M. N., "A model for conjunctive use of ground and surface water with opportunity costs", *European Journal Operational Research*, 143(3), 611-624, 2002.
2. Chiang, W. H., and W. Kinzelbach, "Processing Modflow for windows (version 5.06)", Hamburg, Germany, 1998.
3. Doppler, W., Z. S. Amer, K. A. Emad, and H. Wolff, "The impact of water price strategies on the allocation of irrigation water: the case of the Jordan Valley", *Agricultural Water Management*, 55(3), 171-182, 2002.
4. Gong, H., M. Li, and X. Hu, "Management of groundwater in Zhengzhou City, China", *Water Research*, 34(1), 57-62, 2000.
5. McDonald, M. G., and A.W. Harbaugh, "A modular three-dimensional finite-difference ground-water flow model, U. S. Geological Survey", Virginia, 1988.
6. Psilovikos, A. A., "Optimization models in groundwater management, based on linear and mixed integer programming. An application to a Greek hydrogeological basin", *Physics and Chemistry of the Earth, Part B: Hydrology, Oceans and Atmosphere*, 24(1-2), 139-144, 1999.
7. Singh, D. K., C. S. Jaiswal, K. S. Reddy, R. M. Singh, and D. M. Bhandarkar, "Optimal cropping pattern in a canal command area", *Agricultural Water Management*, 50(1), 1-8,

- 2001.
8. Senthil, L. N., D. N. Kumar, S. N. Panda, and B. C. Mal, "Optimal crop planning and conjunctive use of water resources in a Coastal river basin", *Water Resources Management*, 16(2), 145-169, 2002.
 9. 丁澈士，屏東平原地下水管理最佳化模式，地下水資源及水質保護研討會，265-284 頁，1994。
 10. 丁澈士、黃信恩，屏東平原地下水人工補注水資源優化管理之可行性研究-以林邊河流域為例，*臺灣水利*，51(2)，54-61 頁，2003。
 11. 汪中和、張慈君、劉文徹、劉聰桂，屏東地區的同位素水文變化，長期水資源預測研討會，119-131 頁，1997。
 12. 李振誥、許清荃、林椒寬，「濁水溪沖積扇多層地下水調配與管理之研究」，*臺灣水利*，48(4)，41-52 頁，2000。
 13. 陳俊焜，濁水溪沖積扇地下水資源調配與管理之研究，成功大學資源工程所碩士論文，1998。
 14. 陳美惠，屏東隘寮灌區水資源調配運用及管理最佳化之研究，成功大學資源工程所碩士論文，2005。
 15. 廖培明、潘禎哲、龔誠山、蔡文豪、陶方策、傅奕靜，「彰化地區與烏溪水系地表地下水聯合運用」，第六屆地下水資源及水質保護研討會，369-375 頁，2004。
 16. 劉俊達、李振誥、許惠悛，「彰化地區地下水資源調配與管理之研究」，*鑛冶*，42(3)，87-101 頁，1998。
 17. 劉志文，屏東沖積平原地下水資源調配與管理之研究，成功大學地球科學研究所碩士論文，2000。
 18. 鄭遠、陳美惠、王裕民、李振誥，「地表水與地下水灌區水資源聯合運用之研究-以屏東隘寮圳灌區為例」，*農業工程學報*，49(4)，73-82 頁，2003。

收稿日期：民國 94 年 6 月 30 日

修正日期：民國 94 年 11 月 29 日

接受日期：民國 94 年 12 月 8 日