

## 水田灌溉後迴歸水估算模式之建立及應用

### Establishment and Application on Estimation Model of Return Flow in Paddy Fields after Irrigation

農業工程研究中心  
研究員兼組長

**陳 獻**

**Shinne Chen**

台東大學區域政策與發展研究所  
副教授

**蔡西銘**

**Shi-Ming Tsai**

農業工程研究中心  
助理研究員

**陳豐文**

**Feng-Wen Chen**

農業工程研究中心  
高級研究助理

**陳靖濂**

**Cheng-Wei Chen**

農業工程研究中心  
高級研究助理

**劉日順**

**Jih-Shun Liu**

#### 摘 要

本研究自 1998~2004 年期間以水田水收支平衡為基礎理論，首先以桃園大圳第 4 支線 4-5 號池灌區進行現場觀測試驗，經試驗資料驗證砂箱試驗與現場觀測試驗結果趨近相似後，利用坡度可調式之砂箱模型進行試驗，推估桃園大圳灌區在不同坡度條件下(坡度為 1/100、1/150、1/200)之四種土壤(粘土、粘質壤土、砂質壤土、砂質粘壤土)的迴歸水計算方程式，並以該諸方程式為基本計算式，依土壤別、坡度及水路分佈系統為輸入條件，建立適用於桃園大圳灌區之迴歸水量估算模式；並以桃園大圳灌區為迴歸水估算模式之應用區域，當田間小給水路之輸水損失為 20%，其引水量為灌溉計畫水深之 1.25 倍的正常灌溉下，桃園大圳各支線迴歸水佔引水量之比例約為 29.41%~50.01%；而桃園大圳 12 條支線灌區總引水量為 902,785 m<sup>3</sup>/day，所產生總迴歸水量為 348,027 m<sup>3</sup>/day，其總迴歸水量佔總引水量之比例為 38.55%。

**關鍵詞：**迴歸水，灌溉，砂箱試驗。

#### ABSTRACT

Water budget balance theorem is used in this research. Firstly, a field experiment is carried out at irrigation area of No.4-5 storage pond of the Taoyuan main canal during the

period of 1998~2004. The data show that results of the sandbox experiment as similar to these of the field experiment. Then, by using the slop-adjustable sandbox experiment ( $S=1/100, 1/150, 1/200$ ), the basic equations of return flow in Tao-Yuan Main Canal irrigation area for the different soils (clay, clay loam, sandy clay loam and sandy loam) can be obtained. A systematical estimated model of the regional return flow for Tao-Yuan Main Canal irrigation area will be established. According to the results of the estimated model, the return flow is 29.41%~50.01% in proportion to irrigation water in every secondary canal of Tao-Yuan Main Canal based on 20% water conveyance loss in farm ditches, and 1.25 times for planned water requirement. The gross water requirement is 902,785 m<sup>3</sup>/day, and total amount of the return flow is 348,027m<sup>3</sup>/day in the irrigation area of Tao-Yuan Main Canal. The total amount of the return flow is 38.55% in proportion to that of total irrigation water.

**Keywords:** Return flow, Irrigation, Sandbox experiment.

## 一、前言

台灣早期水資源開發、管理均以支援農田灌溉，如桃園縣石門水庫、苗栗縣明德水庫等，其最初興建以增加灌溉水源及擴大灌溉面積而增加糧食生產量為目的。但隨著產業結構變遷、人口密度增加，其用水標的逐漸轉移以民生與工業用水等公共給水為重心，因此在水資源有限而總用水量劇增，且經濟水源已開發殆盡之狀況下，水資源不能再以開發利用作為唯一方法，更須加強水資源的有效管理、保育及統籌調配，才能做到水資源永續經營的理念。

水利法第 18 條明文規定，農業用水雖為用水標的第二順位，但水資源受地形及氣候影響，造成時間及空間的分佈不均，加上經濟體系改變，嚴重缺水時各用水標的調配移用似乎難以避免，故在有限的水資源須尋求一可靠替代之水源，而農地迴歸水既可成為下游農地灌溉之水源，可有效利用農業水資源，亦可滿足其他用水標的之部分需水量，因此正確估算水田迴歸水建立其應用模式，可提高農業用水效率，更可協助其他標的的用水解決局部缺水問題。

## 二、迴歸水定義及前人研究

### 2.1 迴歸水定義

駱安華(1960)將迴歸水定義為計畫灌區內之

雨水、灌溉水和自然排出之地下水，凡能流返河渠者概屬迴歸水。徐世大(1972)解釋迴歸水為「自一河川或其他水體導引，供灌溉或其他目標之水，經下滲至下土之地下水，而最終流達於一地表川流或其他水體者。」。羅樹孝(1995)表示迴歸水(Return water)意同再現水(Regenerated water)，係指「由河槽或其他水體引出之水，經灌溉或他種用途後再流回下游河槽或其他水體之餘水」。另也意同回流(Return flow)，「未經蒸發散而再流回原水源或流回其他地下或地面水體之灌溉水」。

農業工程技術辭典(2002)，對水田灌溉及早作灌溉之迴歸水作一詮釋，對水田灌溉而言，「水田的灌溉，經過外排之水量，流入下游田區或河川，重作水源供灌溉者，稱為還原水(return flow)」。以旱作灌溉而論，迴歸水係為「上游之一部份灌溉水回流至下游水溝而可再加攔截利用者，即包括由地表面流入下游水溝及滲入地下再湧出於水溝之上游灌溉水」；而本文所探討之迴歸水為乃指灌溉期間，農田經引水(不含降雨部分)灌溉後所產生之迴歸水量，包括由灌溉水路和田間地表水溪流至下游者，及地下滲流水於下游給、排水路湧出者。

### 2.2 國內迴歸水之研究

台灣在 1950 年起，國內相繼開始迴歸水之

研究課題，回顧過往的相關研究，以研究方法可歸類為：現場觀測實驗、水筒模式、數值模擬方法、資料收集配合水收支平衡理論等，分別簡述如下：

#### 1. 現場觀測實驗：

##### A. 雲林農田水利會(1991)

- (a) 試驗方法：運用水筒模式，依灌溉水量、迴歸水量、雨量滲漏、蒸發等資料加以解析。
- (b) 試驗區域：濁水溪、新螺新宅、饒平、北港元長等灌區。
- (c) 試驗成果：大區域迴歸水可利用量約為引水量的 30.56%；小區域迴歸水量於 1、2 期作，迴歸水量佔引水量的比例為 27% 和 36%。

##### B. 甘俊二、張煜權(1998)

- (a) 試驗方法：以田間水收支的實地觀測，建立水筒模式，以超量灌溉試驗探討超量灌溉對農田排水量及滲漏量的影響。
- (b) 試驗區域：高雄水利會灌區。
- (c) 試驗成果：約 15% 引水量流入排水路，59% 滲漏至渠道下，其餘 26% 為作物蒸發散量、農田最後湛水深及飽和土壤所增加之水量。

##### C. 簡傳彬等(2000)

- (a) 試驗方法：利用 2000 年水稻第一期作現場觀測資料，配合水收支平衡模式進行推估迴歸水量分析。
- (b) 試驗區域：桃園大圳 11-2 號池灌區 1~5 單區。
- (c) 試驗成果：當灌區入流量為 6.41~131.88 mm/day，可產生 3.35~89.14% 之迴歸水比例。

##### D. 台灣省水利局(1972)

- (a) 推估方法：以迴歸水的反覆利用率評估該試驗地區之迴歸水的使用情形。
- (b) 試驗區域：新竹、苗栗地區。
- (c) 試驗成果：該試驗地區之迴歸水平均反覆利用率为 10%，部分地區高達 40%。

##### E. 農業工程研究中心(1996)

(a) 推估方法：依以往取水量、作物面積記錄、灌溉計畫及降雨資料推估之。

(b) 試驗地區：石岡壩南幹渠道灌區。

(c) 試驗成果：石岡壩南幹渠道之迴歸水量(不含都市排水)佔總灌溉水量的 20%。筏子溪系統與葫蘆墩圳取用之迴歸水量約佔取水量之 13.62%，葫蘆墩圳約有 50% 之取水量流出可再利用。

#### 2. 水筒模式方法：

##### A. 劉君帆(1997)

- (a) 推估方法：將嘉南灌區分為三個灌溉系統，配合水筒模式及問卷調查方式進行。
- (b) 試驗地點：嘉南灌區。
- (c) 試驗成果：推估 1996 年，嘉南地區水稻一期作之迴歸水總量為 2.45 億噸，二期作之迴歸水總量為 8 億噸，其中深層滲漏佔迴歸水量比例約 70~80%。

#### 3. 數值模擬方法：

##### A. 林癸妙(1998)

- (a) 推估方法：分開計算明迴歸水與暗迴歸水。暗迴歸水乃以定水頭試驗推估側向與垂直滲漏量；明迴歸水之計算係利用水文連續方程式與堰流公式推估。
- (b) 試驗區域：雲林荊桐地區。
- (c) 試驗成果：側向滲漏量與垂直滲漏量之比例為 1：5，雲林荊桐地區迴歸水量佔灌溉水量與降雨量之和的 24%。

##### B. 吳珮菁(1999)

- (a) 推估方法：分田埂及田區兩部分，以相同面積下田區之長寬比、田埂寬度及田面有效水深等因素，探討迴歸水佔有效雨量與灌溉水量之和的比例。
- (b) 試驗區域：桃園大園地區。
- (c) 試驗成果：試驗灌區的田區寬長比為 1：10 時，其側向與垂直滲漏量之比為 1：2。

##### C. 高振程(2003)

(a) 推估方法：以田間蒸發散量、滲漏量、引水量、排水量、降雨量、坵塊空間型態等建立演算模式，計算田間動態湛水深變化。水田坵塊系統之迴歸水量，由堰口流

出量及田埂側向滲漏量累加之。

- (b) 試驗區域：桃園大圳 11-2 號池灌區第 1 單區。
- (c) 試驗成果：預設各項參數之條件下，坵塊系統有效暗迴歸水量約佔坵塊系統總需水量的 4.97~5.64%。

#### 4. 水文資料收集配合水收支理論推估：

##### A. 駱安華(1960)

- (a) 推估方法：利用迴歸水量等於灌區引水量減去灌區耗水量之原理。
- (b) 試驗區域：濁水溪流域下游彰化灌區。
- (c) 試驗成果：推估年迴歸水量約為  $5.27 \times 10^8 \text{m}^3$ ，平均日迴歸水量為  $1.44 \times 10^6 \text{m}^3$ ，約為試驗灌區內平均日引水量之 48.36%。

##### B. 徐龍淵、徐恭也(1986)

- (a) 推估方法：以計畫用水量、實際取水量及灌溉面積推估迴歸水利用現況。
- (b) 試驗區域：桃園、苗栗地區。
- (c) 試驗成果：桃園灌區迴歸水利用率佔總用水量 10%以上，苗栗公館地區迴歸水平均利用率為 15%。

##### C. 林啓超(1997)

- (a) 推估方法：以灌溉水源還原率及灌溉水源反覆利用率作為評估各灌區之灌溉用水特性及水源迴歸使用之指標。
- (b) 試驗地區：台灣地區
- (c) 試驗成果：以 1996 年台灣地區農業灌溉用水為例，還原水量約 51.897 億噸，約佔灌溉引水量之 63%。

### 2.3 國外迴歸水之研究

國外對於迴歸水之研究始於 1885 年美國科羅納多洲北部的 Cache La Poudre 河流域，1922 年調查東北 South Platte 河域之灌區之迴歸水量為平均每 3,975 公頃之灌區，便會產生 1cms 之迴歸水(約 20%為河濱蓄水池之滲漏水)，1931 年估計 North Platte 河域之灌區為每公頃之年迴歸水量  $7,620 \text{m}^3$ (其中 43%為暗迴歸水)。另美國加州於 1924~1929 年間，其估算各灌區之年迴歸水量佔年引水量約 15~42.5%。

Oad etc.(1997)利用實地量測科羅納多洲科泉市(the city of Colorado Springs)之迴歸水量，推估其迴歸水量佔總用水量約 37%。

Zulu etc.(1995)於日本新瀉 Kaliyada 地區，利用水收支平衡理論與水筒模式，推估 1991~1993 年間約有 14.5%之灌溉用水可再利用。

## 三、水收支平衡模式

### 3.1 水田水收支平衡理論

本研究之模式理論乃採用水收支平衡法，對一灌區而言，利用總進流量等於總流出量的原理來計算迴歸水，其基本計算式如下。

$$P + I + G_1 = ET + O + G_0 + \Delta S \dots\dots\dots(1)$$

式中，P 為降雨量；I 為地表流入量； $G_1$  為地下水流入量；ET 為作物蒸發散量；O 為地表流出量； $G_0$  為地下水流出量； $\Delta S$  為田間貯蓄變化量。若以水田為研究對象，由水收支平衡系統(圖 1)顯示降雨、灌溉或地下水湧出等皆會增加流入水田之水量；反之排水、滲透及蒸發散等則會增加流出水田之水量。水田水收支平衡方程式可表示如(1)式；其中部分參數定義需修正如下：I 為引灌水量；O 為迴歸水量； $\Delta S$  項包括地面水位變化量、土壤水分變化量與水田滲透量；ET 可稱為作物需水量  $ET_{\text{crop}}$ 。

由於水田滲透量為暗迴歸水的主要來源，因此需將水田滲透量與田間貯蓄變化量分開計算較具合理性，則(1)式可修改如(2)式。此外，水田在水稻耕作期間常需處於浸水狀態，且台灣地區兩期作水稻的生長期約 120~150 天，因此就長期觀測之觀點視之，土壤水分變化量在飽和狀態下可視為零，則(2)式可修改如(3)式。

$$P + I + G_1 = ET_{\text{crop}} + O + G_0 \pm \Delta S_1 + \Delta S_2 \pm \Delta S_3 \dots\dots(2)$$

$$P + I + G_1 = ET_{\text{crop}} + O + G_0 \pm \Delta S_1 + \Delta S_2 \dots\dots(3)$$

式中 $\Delta S_1$  為田間湛水深變化量； $\Delta S_2$  為水田滲透量(含垂直及水平方向)； $\Delta S_3$  為土壤水分變化量。

又水田長期處於浸水狀態，因此水稻灌溉期間，水田之地下水位變化與流動狀況可視為平衡狀態，即  $G_1 = G_0$ ，因此(3)式可改寫為：

$$P + I = ET_{\text{crop}} + O \pm \Delta S_1 + \Delta S_2 \dots\dots\dots(4)$$

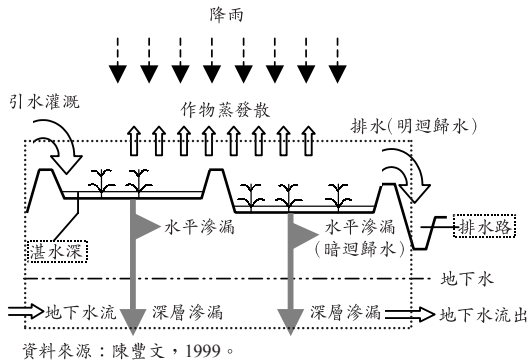


圖 1 水收支平衡示意圖

本文所估算之迴歸水量為水田經灌溉後由地表流出或滲漏至地下水層後於下游排水路湧出者，其中包含降雨產生之逕流量，但由於其與有效雨量不易釐清，在確保觀測所得之迴歸水量皆由引灌水量所產生之前提下，由降雨所產生之迴歸水暫不予估算，則(4)式可改寫為(5)式，易言之，本研究推估之迴歸水為非降雨時期所產生者。

$$I = ET_{crop} + O \pm \Delta S_1 + \Delta S_2 \dots \dots \dots (5)$$

$$O = I - ET_{crop} \pm \Delta S_1 - \Delta S_2 \dots \dots \dots (6)$$

(6)式利用水收支平衡理論來推算理論迴歸水量方程式，可作為檢視觀測迴歸水量之用。

(6)式中 I、O、 $\Delta S_1$  為現場觀測值， $\Delta S_2$  可經由田間試驗求得， $ET_{crop}$  則可利用經驗公式估算。

根據國際糧農組織 FAO 所推薦與國際灌溉排水協會 ICID 所公佈的方法，間接推算作物需水量  $ET_{crop}$  可分為三個步驟，經濟部水利司 (1995)：

Step1：求參考作物需水量  $ET_0$ 。

Step2：再由作物耕種型態、種植時間、作物生長段及生長週期決定作物係數  $K_c$  值，則作物蒸發散量  $ET_{crop}$  可由(7)式求得：

$$ET_{crop} = K_c \times ET_0 \dots \dots \dots (7)$$

Step3：考慮影響作物蒸發散量因子的地域條件，包括地域特性與灌溉方式等調整作物需水量。

國際糧農組織 FAO 對於  $ET_0$  的估算推薦四

種常用方法：Blaney-Criddle Method、Radiation Method、Penman Method、Pan Evaporation Method；根據前人對台灣各地區二十年來作物需水量的研究，結果顯示以 Radiation Method 與 Penman Method 在台灣的適用性較佳，然 Penman Method 在應用上過於繁雜，因此本研究以 Radiation Method 推算作物蒸發散量  $ET_{crop}$ 。

Radiation Method 係由 Makkink 氏於 1957 年所提之經驗公式修正而來，該法假設溫度、日照及太陽輻射為影響作物蒸發散量的主要因子，其估算公式如下：

$$ET_0 = C(W \times R_s) ; R_s = R_a(0.25 + 0.50n/N) \dots \dots \dots (8)$$

式中  $ET_0$ ：參考作物蒸發散量(mm/day)； $R_s$ ：太陽輻射之蒸發當量(mm/day)； $R_a$ ：最大可能太陽輻射量(mm/day)；W：加權因子，依溫度緯度而定；C：校正因子，依平均濕度與日間風速而定；n/N：實際日照時間與最大可能日照時間之比，施嘉昌 (1987)。

本研究從水田水收支平衡及灌溉管理的角度探討迴歸水的影響因子，如農田水利會已完成不同土壤所需之灌溉水深，稱為灌溉計畫水深(d)，以桃園農田水利會為例，水稻 1、2 期作的計畫水深分別為 6 mm/day、6.4mm/day，其已包含作物蒸發散量及水田滲透量；而不同的地形坡度及灌區大小亦會對迴歸水量之變化造成影響。因此若將迴歸水與其影響因子間之關係以函數型式表示，則迴歸水與其影響因子可以函數型式表示為：

$$O = F_1(I, d, S, A) \dots \dots \dots (9)$$

式中 I：引灌水量、d：灌溉計畫水深、S：灌區坡度、A：灌區面積。

陳豐文(1999)試驗結果顯示為表達迴歸水之概念，不宜以迴歸水絕對量表示，本文以迴歸水佔引灌水量之比例表之，將引水量大小與計畫水量作一比較，可清楚表達引水量過多或過少之程度上的差異，(9)式可修正為：

$$R_r = \frac{O}{I} \times 100\% = F_2\left(\frac{I}{d}\right) \dots \dots \dots (10)$$

表 1 試驗灌區的面積一覽表

面積別 (ha)	1998 二期作	1999 一期作	1999 二期作	2000 一期作	2000 二期作
水田面積	14.32	12.65	18.97	17.16	18.97
旱作面積	—	1.67	—	1.81	—
建物面積	1.31	1.31	1.65	1.65	1.65
試驗總面積	15.63	15.63	20.62	20.62	20.62

式中  $R_r$ ：迴歸水佔引水量之比例、 $d$ ：灌溉計畫水深。

本文乃以引水量為計畫水量之倍數作為迴歸水佔引水量百分比之變數，對於不同引水量與相對迴歸水量之觀測結果，經迴歸分析得迴歸水推估模式，其數學式可假設為以下之型式：

$$Y=AX^3+BX^2+CX+D \dots\dots\dots(11)$$

式中  $Y$  為迴歸水佔引水量之比例(%)； $X$  為引水量為計畫水量之倍數； $A$ 、 $B$ 、 $C$ 、 $D$  為待定係數，依試驗值決定。

### 3.2 迴歸水現地試驗設計

#### 1. 試驗場址選定

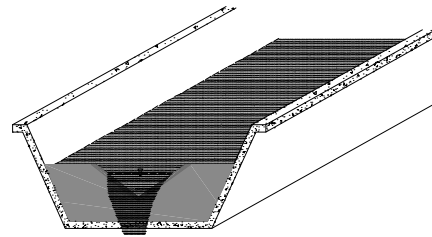
本研究以精密觀測法進行灌區迴歸水量之觀測試驗，項目包含引水量、排水量、田面湛水深、土壤滲漏量等，並選定桃園大圳第 4 支線 4-5 號貯水池灌區，試驗區之面積自 1998~2000 年期間各期作水、旱田之分佈如表 1 所示，試驗灌區坡度條件為 1/150，土壤質地為砂質粘壤土。

#### 2. 流量觀測站選定

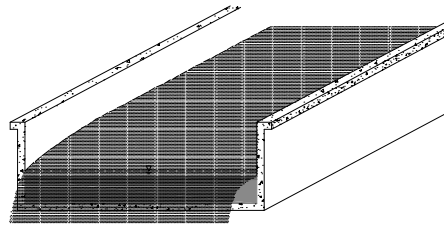
為完整觀測試驗區內所有之進出流量，因此分別於灌區的上游處、下游處及所有外來水源的匯入點之前後的水路中設置水量觀測點，以確保精確量測灌區引水量及本試驗場址灌溉後之迴歸水。

#### 3. 量水設備設置及流量觀測

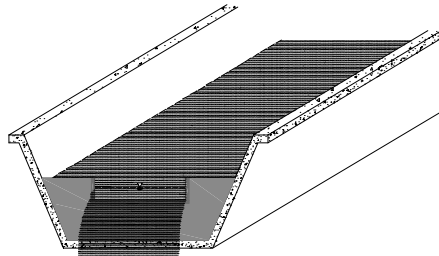
在觀測點選定後，裝設適當之量水設備，考量量水精確度及容易觀測的前提下，採用量水堰作為觀測設備，並考量各觀測點之渠道斷面形狀及尺寸規模分別設置標準 90 度 V 缺口三角堰、標準不收縮矩形堰及標準收縮矩形堰等三型，如圖 2 所示。



a. 標準90度V缺口三角堰



b. 標準不收縮矩形堰



c. 標準收縮矩形堰

圖 2 量水堰斷面示意圖

#### 4. 觀測頻率及流量計算

本研究對於流量及湛水深等項目之觀測頻率的決定，乃基於 4-5 號貯水池的放水量並非定時定量，而是視農民灌溉需要而有所變動，因此若僅以一次觀測值作為當日之代表值將有失客觀，因此觀測頻率以一日觀測三次為之。

此外，有鑑於水收支方程式中的各項參數中僅作物需水量採用經驗公式估算，估算之單位為 mm/day，即估算的起迄時間為 24 小時，且 Radiation Method 主要的影響因子為日照，因此當日之作物需水量的估算應從當日早上起算至隔日的相同時間為止，水收支平衡方程式的各項觀測項目，其時間間距皆應與作物蒸發散量相同，因此在上述條件的考量下，本研究將第  $N$  日的三次的觀測結果及第  $N+1$  日早上的觀測結果平均作為第  $N$  日之代表值，示意圖如圖 3 所

	第N-1天			第N天			第N+1天		
	8:00	12:00	16:00	8:00	12:00	16:00	8:00	12:00	16:00
引水量觀測值				← 24 hrs →					
迴歸水觀測值				← 24 hrs →					
作物蒸發散量				← 24 hrs →					
水田滲漏量				← 24 hrs →					
湛水深變化值				← 24 hrs →					

圖 3 水收支平衡各項參數觀測日程示意圖

示。由於本研究探討迴歸水時並不考慮降雨因素，因此流量及湛水深觀測僅於非降雨期間進行。

流量計算需將每日觀測得之溢流水深配合各測點之斷面資料(量測點與該量水堰間之高程差、堰頂高、渠道至渠頂水深、堰頂寬)，再由經驗公式求算流量，三角堰、不收縮矩形堰、收縮矩形堰所應用之流量經驗公式分述如下，台灣省水利局(1978)：

$$\text{沼知、黑川、淵澤公式：} Q = Kh^{5/2} \dots\dots(12)$$

$$\text{石原、井田公式：} Q = CBh^{3/2} \dots\dots(13)$$

$$\text{板谷、手島公式：} Q = Cbh^{3/2} \dots\dots(14)$$

上述公式中：K、C 為流量係數；h 為溢流水深；B 為堰寬；b 為堰頂缺口寬度。

### 3.3 現地試驗結果

本研究為瞭解迴歸水在不同引水量下的變化行為，依 1998 年水稻 2 期作~1999 年 1 期作觀測結果：引水量為 12.20~34.75 mm/day，可產生 7.44~22.46 mm/day 迴歸水量，迴歸水佔引水量比例為 34.52~77.27%；並分別以 a.(引水量)與(迴歸水量)、b.(引水量)與(迴歸水佔引水量之比例)、c.(引水量/計畫水量)與(迴歸水佔引水量之比例)等 3 種型態的表示法來探討迴歸水與引水量之關係，並以 2 次方程式之型式進行回歸分析求算其相關性，上述 3 種型式之相關係數分別為  $R_a=0.6286$ 、 $R_b=0.1407$  及  $R_c=0.7287$ ，顯示以(引水量/計畫水量)與(迴歸水佔引水量之比例)的表示法來探討迴歸水與引水量之關係較恰當。

迴歸水的現地觀測自 1998 年 1 期作~2000 年 2 期作止，共 5 個期作，惟 1998 年水稻 2 期

作~1999 年 1 期作期間觀測結果顯示選取之試驗灌區面積過小，無法順利觀測引水量為 0~3 倍計畫水量時的迴歸水量，因此自 1999 年 2 期作開始將試驗灌區擴大為 20.62 ha；對於迴歸水觀測曲線的推估，則以 1999 年水稻 2 期作、2000 年水稻 1、2 期作耕作期間實地觀測的調查結果進行分析，結果顯示本灌區 2000 年 1 期作的引水量為 11.21~30.35 mm/day 時，可產生 4.24~22.23 mm/day 之迴歸水量；另在 1999~2000 年 2 個期作期間，引水量為 3.87~37.59 mm/day，產生之迴歸水量範圍介於 0.46~25.21 mm/day。

若依期作分別探討引水量與迴歸水相對關係，可將 2000 年水稻 1 期作、1999~2000 年水稻 2 期作觀測結果點繪於橫軸為(引水量/計畫水量)，縱軸為(迴歸水/引水量)×100%之直角座標，並假設邊界條件如下：a.當引水量為零時，迴歸水量理論上為零；b.當引水量為 6.5 倍計畫水量時，可產生的迴歸水量佔引水量的 95%；亦即當引水量為  $\infty$ ，迴歸水量應為  $\infty$ 。並以三次方程式之型式進行回歸分析，求算其相關性，茲將上述兩項假設依據說明如下：

本文定義迴歸水來源全來自灌溉水源，因此理論上，當引水量為零時，迴歸水應為零，因此如欲進行引水量為零之迴歸水現地觀測試驗及砂箱試驗，僅需停止供水，即引水量為零之條件，由於田面及渠道無任何水源，因此迴歸水量亦為零，本項假設與實際灌溉狀況吻合，可視為一已知條件，亦即迴歸水曲線的邊界條件，因此將 a 項假設視為已知資料點與所有實驗觀測資料共同進行回歸分析，較為合理。

b 項之設定乃基於引水量為  $\infty$  時，迴歸水亦為  $\infty$  之基本假設，由於迴歸水現地試驗僅觀測到引水量為灌溉計畫水量 0~6 倍條件下的結果，因此於回歸分析時，加入引水量為  $\infty$  時迴歸水亦為  $\infty$  之基本假設較為合理，惟考量實際灌溉通常甚少超量灌溉至 6 倍灌溉計畫水量以上，外插延伸資料至  $\infty$  並無實用性可言，因此，依據引水量為  $\infty$  時迴歸水亦為  $\infty$  之基本假設及田間灌溉實用性的考量，設定 b 項邊界條件為引水量為 6.5 倍計畫水量，由於無法由現場試驗得知當引水量為



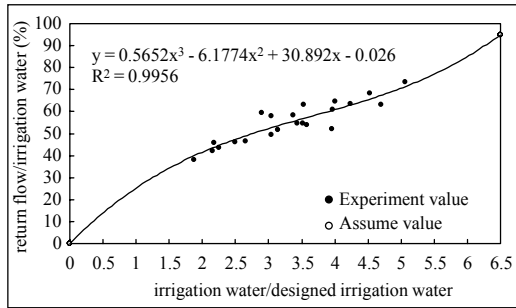


圖 4 2000 年 1 期作迴歸水曲線圖

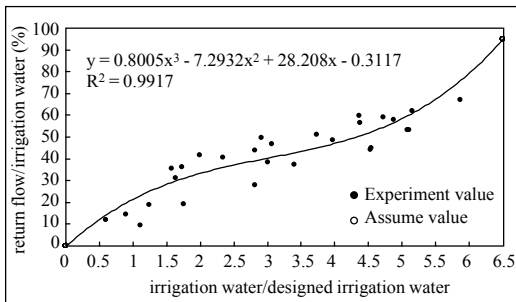


圖 5 1999~2000 年 2 期作迴歸水曲線圖

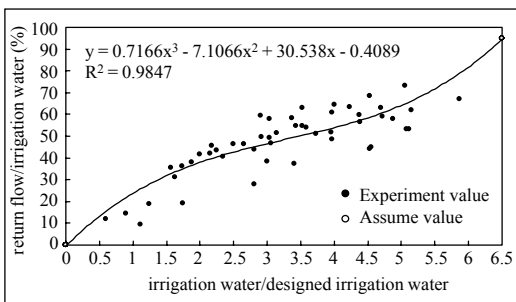


圖 6 1999~2000 年 1、2 期作迴歸水曲線圖

6.5 倍灌溉計畫水量時，迴歸水比例為何？因此本文採用試誤法進行回歸分析後，顯示當引水量為 6.5 倍灌溉計畫水量時，迴歸水佔引水量比例為 95%時，迴歸水曲線之相關性最佳。

迴歸水曲線經回歸分析後如圖 4 及圖 5 所示，若不區分期作別，則可將 1999~2000 年間 3 個期作的調查結果點繪如圖 6。

由圖 4~6 之回歸分析結果，1 期作迴歸水之估算方程式可表示如(15)式；2 期作迴歸水之估算方程式可表示如(16)式；不分期作的迴歸水估算方程式可表示如(17)式。

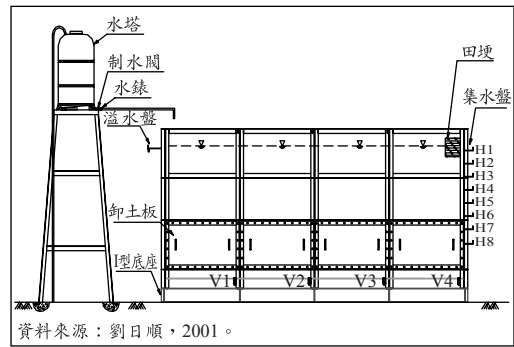


圖 7 砂箱模型示意圖

$$Y = 0.5652X^3 - 6.1774X^2 + 30.8920X - 0.0260$$

$$R^2 = 0.9956 ; 6.5 \geq X \geq 0.0009 \dots \dots \dots (15)$$

$$Y = 0.8005X^3 - 7.2932X^2 + 28.2080X - 0.3117$$

$$R^2 = 0.9917 ; 6.5 \geq X \geq 0.0111 \dots \dots \dots (16)$$

$$Y = 0.7166X^3 - 7.1066X^2 + 30.5380X - 0.4089$$

$$R^2 = 0.9847 ; 6.5 \geq X \geq 0.0135 \dots \dots \dots (17)$$

式中 Y：為迴歸水佔引水量之比例，即(迴歸水量/引水量)×100%。X：引水量/計畫水量之倍數；R<sup>2</sup>：R-Square Value。

#### 四、迴歸水估算模式之建立

##### 4.1 砂箱模型建立及試驗設計

以現地觀測方式計算迴歸水量雖有資料精密之優點，但僅限於觀測區之特有土壤、地質條件下方得實施，無法推廣應用至其他地區，因此本研究依引水量、土壤質地及坡度等因子進行砂箱實驗，模擬 4 種土壤(砂質粘壤土、砂質壤土、粘土、粘質壤土)於 3 種坡度下(1/100、1/150 及 1/200)產生之迴歸水量，並依(11)式型式進行回歸分析，以建立迴歸水推估模式。

本研究採用之砂箱模型為厚度 3mm 鐵板與 4mm 角鐵焊接而成之長方形鐵製砂箱，長、寬、高各為 4m、0.8m、1.5m，砂箱下游外側自箱底向上每隔 15cm 設一橫向集水盤共 8 組，用以統計水平滲漏量(迴歸水量)；垂直滲漏量則由砂箱底部每 1m 設置一支垂直出水管及一組量水器材進行量測，共計 4 組，其砂箱模型示意圖如圖 7。

本研究利用砂箱模型進行迴歸水試驗，乃以



表 2 砂箱試驗之迴歸水方程式

土壤質地	坡度	迴歸水方程式	使用限制
粘土	1/100	$Y = 0.1202X^3 - 3.8047X^2 + 33.2180X - 0.9634$	$6.5 \geq X \geq 0.0291$
	1/150	$Y = -0.0396X^3 - 1.7401X^2 + 25.411X - 0.2530$	$6.5 \geq X \geq 0.0100$
	1/200	$Y = 0.0938X^3 - 2.5495X^2 + 22.3740X - 0.5346$	$6.5 \geq X \geq 0.0240$
粘質壤土	1/100	$Y = -0.0126X^3 - 2.2959X^2 + 29.009X - 1.0459$	$6.5 \geq X \geq 0.0362$
	1/150	$Y = -0.1697X^3 - 0.1394X^2 + 20.590X - 0.7549$	$6.5 \geq X \geq 0.0367$
	1/200	$Y = 0.0173X^3 - 1.8033X^2 + 20.0780X - 0.4868$	$6.5 \geq X \geq 0.0243$
砂質粘壤土	1/100	$Y = 0.0971X^3 - 3.1600X^2 + 31.0260X - 0.1870$	$6.5 \geq X \geq 0.0061$
	1/150	$Y = 0.1606X^3 - 3.1790X^2 + 27.6890X - 0.2644$	$6.5 \geq X \geq 0.0096$
	1/200	$Y = 0.1170X^3 - 2.4509X^2 + 20.1910X - 0.1940$	$6.5 \geq X \geq 0.0097$
砂質壤土	1/100	$Y = 0.2648X^3 - 4.8969X^2 + 30.5520X - 0.6771$	$6.5 \geq X \geq 0.0223$
	1/150	$Y = 0.2091X^3 - 3.8583X^2 + 25.3270X - 1.1027$	$6.5 \geq X \geq 0.0439$
	1/200	$Y = 0.0811X^3 - 2.1694X^2 + 17.9420X - 0.8726$	$6.5 \geq X \geq 0.0499$

桃園灌區為研究範圍，以粘土、粘質壤土、砂質粘壤土、砂質壤土及坡度 1/100~1/200 為試驗條件，模擬施灌水量為 1 倍、3 倍、6 倍的灌溉計畫水量時之迴歸水量，灌溉計畫水深以 6 mm/day 為基礎給水量，探討不同引灌水量條件下所產生迴歸水比例，經由試驗可推估得 12 組迴歸水方程式，作為基本架構，以取代費時耗力的現場觀測方式。

#### 4.2 砂箱試驗結果

依不同土壤於 1/100、1/150、1/200 的坡度條件下，當引水量為 1 倍、3 倍、6 倍計畫水量時，試驗結果顯示砂質粘壤土之迴歸水比例分別為 23.39~87.85%、18.23~78.55%、13.13~52.45%；砂質壤土為 23.80~61.78%、18.23~54.26%、13.13~43.93%；粘質壤土為 23.43~84.91%、17.92~79.15%、16.77~57.54%；粘土為 26.52~84.82%、22.84~80.36%、21.59~64.64%。

由於單一土壤於單一坡度條件下之砂箱試驗值只有 3 點數據，另配合「引用水量為零時，迴歸水應為零」之假設點為已知資料值，共計有 4 點資料可推估  $Y = AX^3 + BX^2 + CX + D$  型式之 4 個未知數方程式。依不同土壤、坡度及引水倍數條件下之砂箱試驗結果，經回歸分析後可求得 12 組迴歸水曲線，如圖 8~11 所示，茲將推估方程式彙整如表 2。

圖 8~圖 11， $(X, Y) = (0, 0)$  為已知假設資料， $X = 6.5$  時之  $Y$  值則屬外插延伸資料點，其假設依據及  $Y$  值數據的推求方法(試誤法)皆與現地觀測試驗分析過程相同，茲就試誤法分析流程說明如下：

1. 4 種土壤於坡度  $S = 1/100$  時： $X = 6.5$  時之  $Y$  值選定乃針對  $X_{(S=1/100)} = 6$  之  $Y$  值與  $Y_{(\max)} = 100\%$  間，選取回歸分析後相關係數最高者，作為  $X_{(S=1/100)} = 6.5$  時之  $Y$  值。
2.  $S = 1/150$  時： $X = 6.5$  時之  $Y$  值選定乃以  $S = 1/100$  條件下之  $X_{(S=1/100)} = 6$  時的  $Y$  值為上限，以  $X_{(S=1/150)} = 6$  時的  $Y$  值為下限，選取上下限區間之  $Y$  值(整數)進行回歸分析後，取相關係數最高者，作為  $X_{(S=1/150)} = 6.5$  時之  $Y$  值。
3.  $S = 1/200$  時： $X = 6.5$  時之  $Y$  值選定乃以  $S = 1/150$  條件下之  $X_{(S=1/150)} = 6$  時的  $Y$  值為上限，以  $X_{(S=1/200)} = 6$  時的  $Y$  值為下限，選取上下限區間之  $Y$  值(整數)進行回歸分析後，取相關係數最高者，作為  $X_{(S=1/200)} = 6.5$  時之  $Y$  值。

#### 4.3 迴歸水現場觀測及砂箱試驗之比較

比較現地觀測結果(如圖 6)與砂箱試驗結果(如圖 11)之迴歸水方程式，結果顯示在同樣條件下(砂質粘壤土及 1/150 的坡度)，引水量為 1 倍

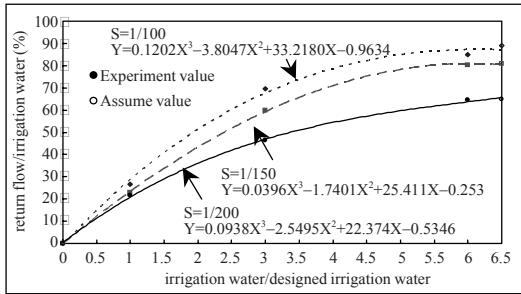


圖 8 砂箱試驗 - 不同坡度下之迴歸水曲線(粘土)

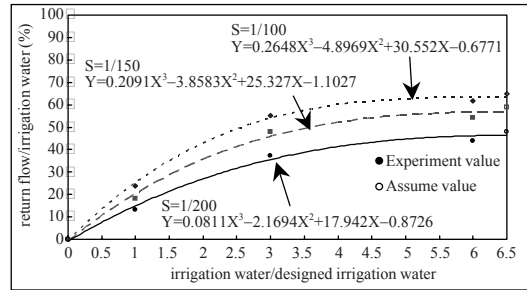


圖 10 砂箱試驗 - 不同坡度下之迴歸水曲線(砂質壤土)

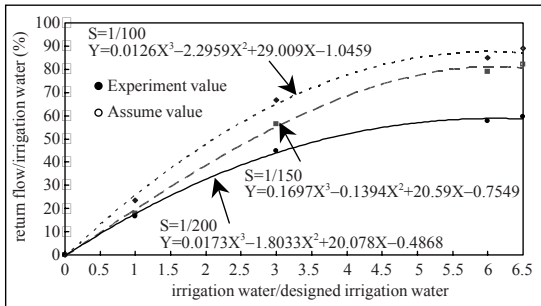


圖 9 砂箱試驗 - 不同坡度下之迴歸水曲線(粘質壤土)

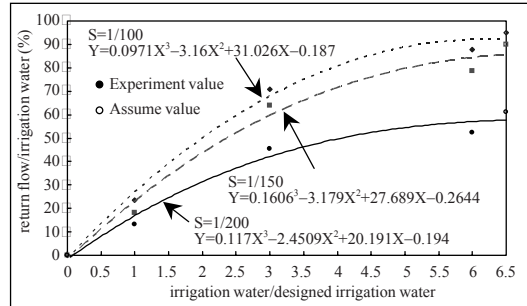


圖 11 砂箱試驗 - 不同坡度下之迴歸水曲線(砂質粘壤土)

計畫水量時，現地觀測與砂箱試驗所得迴歸水比例分別為 23.74%、24.41%；當引水量為 3 倍計畫水量時，現地觀測與砂箱試驗所得迴歸水比例分別為 37.97%、43.68%；當引水量為 6 倍計畫水量時，現地觀測與砂箱試驗所得迴歸水比例分別為 46.59%、58.53%；當引水量為計畫水量的 0.76 倍時，現地觀測與砂箱試驗所獲得的迴歸水量相等，迴歸水佔引水量的比例皆為 19.01%。

比較上述兩項試驗結果(圖 6、圖 11)，顯示引水量為計畫水量的 0.76、1、3、6 倍時，砂箱試驗所得迴歸水比例皆高於現地觀測結果，兩者之誤差量分別為 0%、0.67%、5.71%、11.93%，顯示兩者結果之差異大小與引水量成正比，若按灌溉計畫進行灌溉(實際灌溉水深與計畫水深相同)，兩者誤差尚 < 1%，當超量灌溉程度達 6 倍計畫水深時，誤差為 11.93%。

砂箱試驗所得迴歸水比例皆高於現地觀測結果，推究其原因如下：砂箱試驗進行時，砂箱表土為裸露地，其作物蒸發散量相對小於有水稻

覆蓋之現地試驗；由水收支平衡式(6)式可知，作物蒸發散量及滲漏量與迴歸水量成反比，意即灌區消耗水量(作物蒸發散量及滲漏量)愈大者，其迴歸水量愈小；因此砂箱試驗所得迴歸水量大於現地試驗結果與水收支平衡理論相符；由以上結果可知砂箱模型推估迴歸水與現地觀測方式所得結果趨近一致。將來可以砂箱試驗方式應用至相同土壤、滲透係數及地形條件下之灌溉區域；惟應用本模式推估不同土壤、滲透係數及地形條件地區之迴歸水量時，建議可再進行其他不同土壤及坡度條件下之現地試驗，與相同條件下之砂箱試驗結果比較之，推算不同引水條件下之誤差修正係數，俾使模式推估值與現地實際值相符。

#### 4.4 迴歸水估算模式架構組成

本研究建立迴歸水估算模式是由砂箱試驗結果進行回歸分析所得 12 組基本迴歸水推估方程式組成，迴歸水推估方程式中的 X 表示引水量為灌溉計畫水量之倍數，如桃園大圳的計畫灌溉

水深為 6mm/day；本研究乃將不同倍數之計畫灌溉水深的引水量代入迴歸水推估方程式計算，可求得粘土、粘質壤土、砂質粘壤土、砂質壤土等四種土壤於不同坡度條件下所產生迴歸水佔引水量之比例以作為模式基本資料。

## 五、迴歸水估算模式之應用

### 5.1 迴歸水估算模式之演算流程

影響迴歸水量多寡之因子甚多且複雜，如引灌水量、降雨量、田區土壤飽和狀態、地下水位、灌區坡度、水路分佈等眾多影響因子，但在本研究之迴歸水估算模式中，未含降雨及地下水位之影響。

運用本研究之迴歸水估算模式需先選定試驗灌區，初步調查試驗灌區之地形坡度及土壤類別，並建立砂箱模型及試驗步驟，經砂箱試驗結果建立迴歸水方程式，其中砂箱試驗以灌溉計畫水深的倍數作為灌溉供水量，並將田間灌溉管理納入考量；因此只需將灌區坡度、水路分佈、土壤類別、灌溉計畫水量及實際引水量之條件輸入模式中，即可估算該試驗區及其他與該試驗區條件相同地區之迴歸水量。茲將估算迴歸水量之步驟詳述如下。

**Step 1：**劃分大區域。本研究以桃園大圳為研究範圍，其桃園大圳所屬 12 條支線灌區乃有各自獨立之灌溉系統，因此試驗灌區大小之選定以支線別為迴歸水估算模式之基準。

**Step 2：**劃分演算區域。桃園大圳所屬之各支線的灌區內，以橫向大排水路或中排水路的分佈為邊界，將各支線之灌區分割為數個演算區域，以估算各演算區之迴歸水。

**Step 3：**將引水量為灌溉計畫水量之倍數輸入迴歸水推估方程式。本研究以桃園大圳灌區之灌溉計畫水深為 6 mm/day，以 1 倍、1.25 倍、1.5 倍及 2 倍作探討，因此依據坡度可調式之砂箱模型試驗結果，可得不同引水量下產生的迴歸水比例。

**Step 4：**計算各演算區域之面積及坡度。

**Step 5：**依各演算區域之土壤別及坡度計算迴歸水比例。依演算區域之土壤類別比例和坡度為模式輸入條件，利用線性內差及權重方式計算各演算區於不同引灌水量下所產生之迴歸水比例。

**Step 6：**各演算區之迴歸水量化。第一演算區引水量及迴歸水量計算式如下：

$$I_1 = \frac{d}{(1-L)} \times A_1 \dots\dots\dots(18)$$

$$R_1 = X_1 \times I_1$$

各演算區之引水量及迴歸水量之計算式如下：

$$I_i = \frac{d}{1-L} \times A_i - R_{i-1} \quad I_i \geq 0 \dots\dots\dots(19)$$

$$R_i = X_i \times (I_i + R_{i-1}) \quad i = 2, 3, 4 \dots n$$

式中  $I_i$  為第  $i$  演算區之引水量( $m^3$ )、 $R_i$  為第  $i$  演算區之迴歸水量( $m^3$ )、 $d$  為灌溉計畫水深(mm)、 $A$  為演算區域之灌溉面積( $m^2$ )、 $X$  為迴歸水佔引水量之比例、 $L$  為灌溉給水路之輸水損失(%)、 $i$  為演算區序號。

**Step 7：**計算支線別之引水量與迴歸水量，進而推估支線別之迴歸水佔引水量的比例值，計算式如下。

支線別引水量

$$I_j = \sum_{i=1}^n I_i = I_1 + I_2 + I_3 + \dots + I_n \dots\dots\dots(20)$$

支線別迴歸水量

$$R_j = \sum_{i=1}^n R_i = R_1 + R_2 + R_3 + \dots + R_n \dots\dots(21)$$

支線別平均迴歸水比例

$$X_j = \frac{\sum R_j}{\sum I_j} \dots\dots\dots(22)$$

式中  $I_j$  為支線別之引水量( $m^3$ )、 $R_j$  為支線別之迴歸水量( $m^3$ )、 $i$  為演算區序號、 $n$  為演算區數目。

**Step 8：**計算全區總迴歸水量。

表 3 桃園大圳各支線灌區之土壤質地表

支線別 \ 土壤別	輕黏土	粘質壤土	砂質粘壤土	砂質壤土	合計
1 支線	449.31	130.12	171.53	934.30	1685.26
2 支線	201.66	173.05	119.00	1754.43	2248.14
3 支線	415.51	64.47	—	—	479.98
4 支線	724.54	29.08	139.04	91.11	983.77
5 支線	—	—	226.76	494.27	721.03
6 支線	332.52	—	430.46	14.26	777.24
7 支線	—	—	795.02	—	795.02
8-1 支線	241.89	—	—	—	241.89
8 支線	669.37	537.49	—	980.98	2187.84
9 支線	599.79	101.86	308.12	182.64	1192.41
10、11 支線	—	2048.74	—	1285.70	3334.44
12 支線	359.08	634.00	—	681.33	1674.41
12-1 支線	—	—	181.74	—	181.74
合計	3993.67	3718.81	2371.67	6419.02	16503.17
土壤比例(%)	24.20	22.53	14.37	38.90	100

資料來源：陳靖薇，2004。

大圳總引水量計算式

$$\bar{I} = \sum_{j=1}^{14} I_j = I_1 + I_2 + I_3 + \dots + I_{14} \dots\dots\dots(23)$$

大圳總迴歸水量計算式

$$\bar{R} = \sum_{j=1}^{14} R_j = R_1 + R_2 + R_3 + \dots + R_{14} \dots(24)$$

$$\text{大圳平均迴歸水比例 } \bar{X} = \frac{\bar{R}}{\bar{I}} \dots\dots\dots(25)$$

式中 j 為支線別序號。

## 5.2 應用區域概述

### 1. 灌區面積

本研究選定桃園大圳 1~12 支線灌區為迴歸水估算模式之試驗場址，其面積共有 16,503 公頃，灌區內土壤質地以砂質壤土 38.90% 為最多，其次為輕黏土 24.20%，再者為粘質壤土 22.53% 及砂質粘壤土 14.37%，其土壤分佈詳如表 3。

### 2. 灌區高程

本文利用航照圖計算各支線灌區之高程及坡度，由航照圖判斷高程與距離之原則，其上游高程為支線由桃園大圳取水處起算，下游高程為灌區最低處或出海口，距離以取水處至灌

區最低處或出海口為基準。桃園大圳各支線灌區之坡度介於 1/100 ~ 1/150 之間，其坡度計算結果如表 4。

### 3. 灌排水路分佈系統

桃園大圳之灌溉系統為利用水庫、河川及埤塘調配取水灌溉，灌溉水源經由上田往下田灌溉後排入下游排水路；其水路分佈系統具有支線與河川兩兩相鄰之特性，如圖 12 所示，介於第 1~12 支線間之河川依序茄苳溪、南崁溪、埔心溪、黃墘溪、新街溪、老街溪、田心子溪、雙溪口溪、月桃溪、大堀溪、新屋溪、社子溪等。因此桃園大圳灌區之水路分佈及地形具有高度利用之條件。

### 4. 模式演算區劃分

本研究利用迴歸水推估模式進行試驗場址之迴歸水演算，將桃園大圳各支線灌區分割為數個小演算區，分割原則以灌區內橫向水路作為劃分演算區域之邊界，演算區域之命名原則乃自支線上游往下游依序為第一區、第二區、... 第 n 區。但有些支線灌區因都市發展、其他地形、地物等影響，則改以演算區內池塘灌區為邊界。

桃園大圳各支線灌區經分割為 1~5 個演算區，分割結果如下：無分區者：本身視為一個演

表 4 桃園大圳各支線灌區之高程與坡度

支線別	灌區高程			距離 (m)	灌區坡度
	上游高程 (m)	下游高程 (m)	高程差 (m)		
1 支線	110.0	45.0	65.0	9463	1/146
2 支線	110.0	5.0	105.0	15969	1/152
3 支線	104.2	35.0	69.2	8201	1/119
4 支線	105.3	5.5	99.8	12853	1/129
5 支線	101.2	5.0	96.2	11736	1/122
6 支線	105.0	5.0	100.0	10587	1/106
7 支線	105.0	5.0	100.0	10865	1/109
8-1 支線	104.8	55.0	49.8	5095	1/102
8 支線	98.5	4.5	94.0	10218	1/109
9 支線	101.6	30.0	71.6	7661	1/107
10 支線	95.0	3.4	91.6	9760	1/107
11 支線	100.0	5.0	95.0	10904	1/115
12 支線	100.0	4.4	95.6	10744	1/112
12-1 支線	96.9	55.0	41.9	4564	1/109

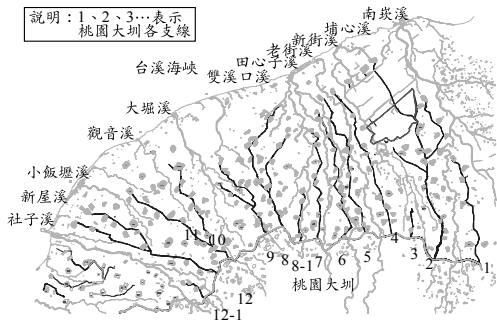


圖 12 桃園大圳系統水路分佈特性

算區域，共有第 12、12-1 支線等 2 個灌區。分 2 區者：第 8-1 支線等 1 個灌區。分 3 區者：第 3、5、9、10 支線等 4 個灌區。分 4 區者：第 1、4、6、7、11 支線等 5 個灌區。分 5 區者：第 2、8 支線等 2 個灌區。

茲將桃園大圳各支線灌區分割後之演算區的坡度、灌溉面積、土壤類別及所佔比例彙整如表 5~表 6 所示。

### 5.3 桃園大圳灌區迴歸水之推估

#### 1. 模式演算區之迴歸水比例

本研究建立迴歸水估算模式推估桃園大圳灌區迴歸水，並以桃園大圳第 1 支線~第 12-1 支線灌區為模式應用區域，各支線灌區以分割後的演算區域為模式計算區，針對表 5~表 6 所列各演

算區進行迴歸水佔引水量比例之演算，茲將各演算區的迴歸水比例計算結果彙整如表 7。

目前桃園及其他地區之水田灌溉，普遍存在著實際引水量多於計畫水量之情形，其乃灌溉期間，灌區自貯水池、水庫或攔河堰取水口取水至各田區施灌，過程中常因渠道本身的滲漏、人為的水門操作管理等問題而有輸配水損失量；一般灌溉給水路之輸水損失約為 20%，支線之輸水損失約為 15%，因此以下敘述皆以引水量為灌溉計畫水量之 1.25 倍或 1.5 倍進行討論分析。

以第 1 支線為例，表 7 顯示在施灌 1 倍、1.25 倍、1.5 倍及 2 倍的灌溉計畫水量下，迴歸水佔引水量之比例約為 21.88~45.24%，第一~四區皆顯示引水量以倍數增加時，迴歸水量佔引水量的比例並非等倍數增加，其遞增率 $<1$ 且有逐漸趨緩的現象；若以灌區上下游的關係來探討，結果顯示依計畫灌溉水深施灌時(即為 1.25 倍)，灌區最上游處的迴歸水比例為 28.50%，因地形坡度變陡導致其下游的第二區增加至 31.71 % 為最高，迴歸水比例於第三區及第四區因坡度變緩而降低，其中以最下游的第四區之迴歸水比例最低，約 26.60%；施灌水量為 1 倍、1.25 倍、1.5 倍及 2 倍，其第三區之迴歸水佔引水量比例比第二區為多，乃因第三區粘土所佔比例較多，其所產生的迴歸水相對亦會增加。

表 5 模式演算區劃分資料(1~8 支線)

支線別	灌區分割編號	坡度	土壤類別	面積 (ha)	所佔比例(%)
1 支線	第一區	1/113	砂質壤土	73.62	100.00
			黏土	18.47	22.16
	第二區	1/98	砂質壤土	64.89	77.84
			黏土	157.04	67.06
	第三區	1/153	砂質壤土	77.15	32.94
			黏土	9.23	27.16
第四區	1/142	砂質壤土	24.76	72.84	
		黏土	157.04	67.06	
2 支線	第一區	1/146	砂質壤土	479.22	92.13
			砂質粘壤土	40.91	16.87
	第二區	1/134	黏土	201.66	17.16
			砂質壤土	895.33	76.19
	第三區	1/238	砂質粘壤土	78.09	6.65
			黏質壤土	45.21	100.00
	第四區	1/160	黏質壤土	207.79	61.91
			砂質壤土	127.84	38.09
第五區	1/171	砂質壤土	127.80	100.00	
		黏土	153.51	70.42	
3 支線	第一區	1/111	砂質壤土	64.47	29.58
			黏土	165.02	100.00
	第二區	1/115	黏土	96.98	100.00
4 支線	第一區	1/87	黏土	261.94	90.01
			粘質壤土	29.08	9.99
	第二區	1/100	黏土	322.8	85.87
			砂質壤土	53.12	14.13
	第三區	1/129	黏土	55.32	59.28
			砂質壤土	37.99	40.72
	第四區	1/250	黏土	84.48	37.80
			砂質壤土	139.04	62.20
5 支線	第一區	1/114	砂質壤土	196.93	100.00
	第二區	1/111	粘質壤土	226.96	58.65
			砂質壤土	160.02	41.35
第三區	1/404	砂質壤土	124.22	100.00	
6 支線	第一區	1/96	黏土	183.71	100.00
	第二區	1/222	黏土	128.35	54.08
			砂質粘壤土	108.97	45.92
	第三區	1/42	砂質粘壤土	197.51	100.00
第四區	1/118	砂質粘壤土	123.98	100.00	
7 支線	第一區	1/96	砂質粘壤土	231.84	100.00
	第二區	1/88	砂質粘壤土	410.99	100.00
	第三區	1/96	砂質粘壤土	109.70	100.00
	第四區	1/153	砂質粘壤土	42.49	100.00
8 支線	第一區	1/97	黏土	107.11	24.16
			黏質壤土	336.30	75.84
	第二區	1/98	黏土	367.28	47.63
			砂質壤土	202.72	26.29
	第三區	1/109	黏質壤土	201.19	26.09
			黏土	154.3	33.75
	第四區	1/94	砂質壤土	302.83	66.25
			黏土	40.68	12.46
第五區	1/84	砂質壤土	285.68	87.54	
			砂質壤土	139.27	100.00



表 6 模式演算區劃分資料(8-1~12-1 支線)

支線別	灌區分割編號	坡度	土壤類別	面積 (ha)	所佔比例(%)
8-1 支線	第一區	1/129	黏土	57.38	100.00
	第二區	1/92	黏土	146.37	100.00
9 支線	第一區	1/92	黏土	302.12	100.00
	第二區	1/86	黏土	196.86	77.03
			砂質黏壤土	58.7	22.97
	第三區	1/71	黏土	56.08	13.77
			砂質黏壤土	249.42	61.23
黏質壤土			101.86	25.00	
10 支線	第一區	1/117	黏質壤土	326.15	100.00
	第二區	1/98	砂質壤土	87	48.84
			黏質壤土	91.12	51.16
第三區	1/80	砂質壤土	719.99	100.00	
11 支線	第一區	1/129	黏質壤土	233.74	100.00
	第二區	1/91	黏質壤土	262.55	100.00
	第三區	1/117	砂質壤土	260.03	28.82
			黏質壤土	642.18	71.18
	第四區	1/113	砂質壤土	241.45	37.09
黏質壤土			409.55	62.91	
12 支線	無分區	1/115	黏土	359.08	19.07
			砂質壤土	681.33	36.18
			黏質壤土	781.46	41.50
			砂質粘壤土	61.11	3.25
12-1 支線	無分區	1/109	砂質粘壤土	181.74	100.00

其它同一支線的上下游演算區經計算所得結果之差異亦可由該演算區之土壤別分佈比例、灌區坡度等條件分析之。

## 2. 支線別灌區之迴歸水比例推估結果

各演算區於不同引水量下所產生的迴歸水比例，依該演算區面積佔該支線總面積比例加權計算可得該支線之平均迴歸水比例，演算結果如表 8 及圖 13 所示。

結果顯示桃園大圳各支線灌區於引水量為 1 倍、1.25 倍、1.5 倍及 2 倍之灌溉計畫水量條件下，所產生平均迴歸水之比例約為 17.54~55.91%，其中以第 12 支線所產生之迴歸水比例為最少，分別為 17.54%、21.48%、25.18%、31.90%。在正常引灌水量之下(即引水量為灌溉計畫水量之 1.25 倍)，桃園大圳各支線之平均迴歸水比例約為 21.48~36.16%；依實際灌溉操作而

言，擬定灌溉計畫水量時，由水源地或水庫取水等方式，幹支線以 20% 之輸水損失估算，而小給水路以 15% 之輸配水損失估算，因此實際取水量會多於灌溉計畫水量，而多餘的水量，部分水量會因輸送灌溉水至田間之溝渠而損失，另一部分則產生迴歸水，若以經驗而論，其會產生至少有 20% 的迴歸水，是故與本研究之迴歸水推估模式所估算之平均迴歸水比例相似。

就桃園大圳各支線灌區整體趨勢而言，桃園大圳上游至下游各支線之平均迴歸水比例變化不大，其中上、中游部份，第 2、5 支線呈現比例稍低之趨勢，桃園大圳下游部份，其迴歸水比例則自第 10 支線以後呈現下降的趨勢。

## 3. 迴歸水量化結果及比較

桃園大圳各支線灌區之迴歸水佔引水量比例之推估結果如表 8 所述，如欲將上述結果量化

表 7 模式演算區之迴歸水比例演算結果

支線別	演算區 編號	灌區 坡度	迴歸水佔引水量比例(%)	引水量/計畫水量 (L/d)			
			R/I(坡度,土壤別)	1	1.25	1.5	2
1 支線	第一區	1/113	R/I(1/113,SL)	23.63	28.50	32.92	40.48
	第二區	1/98	R/I(1/98,C,SL)	26.27	31.71	36.67	45.24
	第三區	1/153	R/I(1/153,C,SL)	24.17	29.58	34.68	43.98
	第四區	1/142	R/I(1/142,C,SL)	21.88	26.60	30.96	38.66
2 支線	第一區	1/146	R/I(1/146,SL,SCL)	23.20	28.14	32.66	40.55
	第二區	1/134	R/I(1/134,C,SL,SCL)	22.43	27.21	31.61	39.33
	第三區	1/238	R/I(1/238,CL)	16.98	20.58	23.90	29.76
	第四區	1/160	R/I(1/160,CL,SL)	19.13	23.59	27.85	35.72
	第五區	1/171	R/I(1/171,SL)	17.83	21.69	25.24	31.46
3 支線	第一區	1/111	R/I(1/113,C,SL)	26.09	31.76	37.05	46.48
	第二區	1/115	R/I(1/115,C)	26.54	32.45	38.01	48.12
	第三區	1/266	R/I(1/226,C)	18.85	23.36	27.80	36.38
4 支線	第一區	1/87	R/I(1/87,C,SL)	30.54	37.12	43.20	53.91
	第二區	1/100	R/I(1/100,C,SL)	28.10	34.22	39.91	50.05
	第三區	1/129	R/I(1/129,C,SL)	23.86	29.08	33.96	42.72
	第四區	1/250	R/I(1/250,C,SL)	13.65	16.71	19.57	24.70
5 支線	第一區	1/114	R/I(1/114,SL)	23.52	28.37	32.77	40.32
	第二區	1/111	R/I(1/111,SL)	23.84	29.18	34.19	43.25
	第三區	1/404	R/I(1/404,SL)	6.51	8.31	10.10	13.64
6 支線	第一區	1/96	R/I(1/96,C)	29.22	35.62	41.57	52.21
	第二區	1/222	R/I(1/222,C,SCL)	17.03	20.68	24.08	30.13
	第三區	1/42	R/I(1/42,SCL)	41.74	51.06	59.92	76.18
	第四區	1/118	R/I(1/118,SCL)	26.23	31.95	37.32	47.11
7 支線	第一區	1/96	R/I(1/96,SCL)	28.20	34.37	40.18	50.79
	第二區	1/88	R/I(1/88,SCL)	29.15	35.55	41.58	52.59
	第三區	1/96	R/I(1/96,SCL)	28.20	34.37	40.18	50.79
	第四區	1/153	R/I(1/153,SCL)	23.88	29.05	33.90	42.71
8-1 支線	第一區	1/129	R/I(1/129,C)	25.07	30.71	36.06	45.87
	第二區	1/92	R/I(1/92,C)	29.92	36.45	42.51	53.28
8 支線	第一區	1/97	R/I(1/97,C,CL)	26.91	33.03	38.81	49.36
	第二區	1/98	R/I(1/98,C,CL,SL)	27.26	33.21	38.74	48.62
	第三區	1/109	R/I(1/109,C,SL)	25.17	30.48	35.36	43.91
	第四區	1/94	R/I(1/94,C,SL)	26.56	31.99	36.92	45.38
	第五區	1/84	R/I(1/84,SL)	27.91	33.49	38.52	47.05
9 支線	第一區	1/92	R/I(1/92,C)	29.92	36.45	42.51	53.28
	第二區	1/86	R/I(1/86,C,SCL)	30.72	37.39	43.59	54.63
	第三區	1/71	R/I(1/71,C,SCL,CL)	32.64	39.77	46.45	58.48
10 支線	第一區	1/117	R/I(1/117,CL)	22.98	28.48	33.77	43.69
	第二區	1/98	R/I(1/98,CL,SL)	25.79	31.39	36.60	45.88
	第三區	1/80	R/I(1/80,C,SCL,CL)	28.74	34.46	39.61	48.33
11 支線	第一區	1/129	R/I(1/129,CL)	21.52	26.77	31.85	41.50
	第二區	1/91	R/I(1/91,CL)	27.47	33.73	39.64	50.41
	第三區	1/117	R/I(1/117,CL,SL)	23.05	28.34	33.36	42.58
	第四區	1/113	R/I(1/113,CL,SL)	23.57	28.90	33.91	43.02
12 支線	無分區	1/115	R/I(1/115,C,CL,SL,SCL)	17.54	21.48	25.18	31.90
12-1 支線	無分區	1/109	R/I(1/109,SCL)	28.09	34.23	40.03	50.59

註：黏土、黏質壤土、砂質壤土、砂質粘壤土之代號為 C、CL、SL、SC

表 8 桃園大圳支線別灌區之迴歸水比例

支線別	引水量/計畫水量 (I/d)			
	1 倍	1.25 倍	1.5 倍	2 倍
1 支線	24.50	29.65	34.40	42.72
2 支線	21.92	26.69	31.11	38.98
3 支線	24.96	30.48	35.63	44.86
4 支線	24.98	30.30	35.21	43.86
5 支線	22.45	27.85	33.03	42.10
6 支線	29.75	36.16	42.17	53.05
7 支線	28.43	34.64	40.48	51.11
8-1 支線	28.45	34.68	40.48	50.89
8 支線	26.75	32.56	37.98	47.66
9 支線	31.26	38.09	44.46	55.91
10 支線	26.80	32.46	37.67	46.83
11 支線	23.52	28.90	34.00	43.35
12 支線	17.54	21.48	25.18	31.90
12-1 支線	28.09	34.23	40.03	50.59

則需將所得之迴歸水比例與該區域支線面積及灌溉水深相乘即可得該支線之總迴歸水量。

本研究將引水量分別設定為桃園水利會灌溉計畫水深 6mm/day 的 1 倍、1.25 倍、1.5 倍及 2 倍；桃園大圳各支線內之演算區面積計算如表 5-表 6 所示；利用不同引水量與演算區面積相乘則可分別推得各演算區域於不同引水條件下之迴歸水量，本研究分別以第 1、7 支線灌區之估算結果說明支線系統之迴歸水變化情勢。

以桃園大圳第 1 支線為例，以灌溉計畫水深 6 mm/day 施灌時，給水路之輸水損失為 20%計算，則實際引灌水深為 7.2 mm/day，因此當引水量為灌溉計畫水量之 1.25 倍時，第 1 支線每日需引灌水量為 13,203m<sup>3</sup>，相對產生 5,322 m<sup>3</sup>/day 之迴歸水量；比較第 1 支線系統的 4 個演算區域，以第一區的引灌水量為最多，約為 5,522 m<sup>3</sup>/day，迴歸水量為 1,574 m<sup>3</sup>/day，第四區引灌水量為 146 m<sup>3</sup>/day，其所產生的迴歸水量最少，約為 494 m<sup>3</sup>/day。除考慮灌溉小給水路之輸水損失外，尚考慮 15%的支線輸水損失，其迴歸水量增為 15,474 m<sup>3</sup>/day，則所產生迴歸水量為 7,667 m<sup>3</sup>/day，而第四區引水量為 0 m<sup>3</sup>/day，乃因第三區所產生之迴歸水足以提供第四區灌溉，所以無

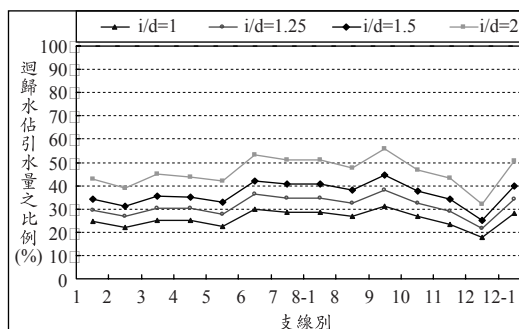


圖 13 桃園大圳支線別灌區之迴歸水比例變化趨勢

須再由支線引水灌溉；若超量灌溉時，即引水量為灌溉計畫水量之 2 倍施灌，第 1 支線總引水量增加為 18,780 m<sup>3</sup>/day，則迴歸水量增加為 12,744 m<sup>3</sup>/day。

桃園大圳第 7 支線之迴歸水變化情形，當引水量為 1 倍的灌溉計畫水量時，亦即不考慮灌溉溝渠之輸水損失，其 5 個演算區域總引水量為 37,197 m<sup>3</sup>/day，產生迴歸水量約 14,232 m<sup>3</sup>/day；若只考慮灌溉小給水路之輸水損失，其引水量為灌溉計畫水量之 1.25 倍，其引水量為 45,423 m<sup>3</sup>/day，迴歸水量則為 22,718 m<sup>3</sup>/day；若考慮小給水路及支線之輸水損失，則引水量為灌溉計畫水量之 1.5 倍施灌，引水量增為 54,661 m<sup>3</sup>/day，所產生迴歸水量為 34,191 m<sup>3</sup>/day。比較第 7 支線系統的 5 個演算區，於引水量為灌溉計畫水量之 1.25 倍施灌條件下，因第二區灌區面積最大，因此引水量為最多，約 24,848 m<sup>3</sup>/day，迴歸水量部分，亦因第二區坡度較陡，產生之迴歸水量為最多，約 10,957 m<sup>3</sup>/day；第三區利用上游第二區所產生的迴歸水量即可滿足灌溉所需水量，因而無須再由支線渠道引水灌溉。

茲將各支線內演算區所得迴歸水量加總，即可得支線別灌區於不同引水量條件下之迴歸水量，如表 9 及圖 14~17 所示。

表 9 顯示當引水量為灌溉計畫水量之 1.25 倍時，桃園大圳各支線的引水量約為 13,557 ~ 144,984 m<sup>3</sup>/day，所產生之迴歸水量約為 4,020 ~ 39,743 m<sup>3</sup>/day，桃園大圳灌區總引水量約為 934,912 m<sup>3</sup>/day，其總迴歸水量為 277,577

表 9 桃園大圳各支線於不同引水量條件下產生之迴歸水量

支線別	不同引水量及其迴歸水量											
	I/d=1			I/d=1.25			I/d=1.5			I/d=2		
	I	R	R <sub>r</sub> (%)	I	R	R <sub>r</sub> (%)	I	R	R <sub>r</sub> (%)	I	R	R <sub>r</sub> (%)
1 支線	11,147	2,731	24.50	13,557	4,020	29.65	16,294	5,605	34.40	20,398	8,715	42.72
2 支線	118,425	25,961	21.92	144,984	38,697	26.69	174,952	54,436	31.11	219,341	85,501	38.98
3 支線	23,665	5,906	24.96	28,475	8,679	30.48	33,895	12,078	35.63	41,761	18,733	44.86
4 支線	48,673	12,160	24.98	58,770	17,808	30.30	70,592	24,858	35.21	88,029	38,607	43.86
5 支線	34,835	7,821	22.45	41,674	11,608	27.85	49,233	16,264	33.03	60,542	25,491	42.10
6 支線	35,392	10,529	29.75	42,068	15,211	36.16	49,346	20,811	42.17	58,609	31,093	53.05
7 支線	37,733	10,728	28.43	45,423	15,734	34.64	54,661	22,128	40.48	68,108	34,813	51.11
8-1 支線	11,362	3,233	28.45	13,960	4,841	34.68	16,898	6,841	40.48	21,291	10,834	50.89
8 支線	102,121	27,314	26.75	122,046	39,743	32.56	144,227	54,780	37.98	174,796	83,311	47.66
9 支線	49,434	15,452	31.26	60,040	22,867	38.09	72,111	32,061	44.46	90,287	50,479	55.91
10 支線	67,362	18,052	26.80	82,847	26,889	32.46	100,546	37,880	37.67	127,851	59,870	46.83
11 支線	104,783	24,644	23.52	126,217	36,476	28.90	149,942	50,977	34.00	182,455	79,098	43.35
12 支線	112,979	19,822	17.54	141,224	30,335	21.48	173,814	43,767	25.18	225,958	72,070	31.90
12-1 支線	10,904	3,063	28.09	13,631	4,666	34.23	16,776	6,715	40.03	21,809	11,033	50.59
總量(m <sup>3</sup> /day)	768,815	187,415	24.38	934,912	277,577	29.69	1,123,285	389,200	34.65	1,401,235	609,647	43.51

註：I 為引水量、d 為迴歸水量、I/d=引水量/計畫水量、R<sub>r</sub>(%) 為迴歸水佔引水量之比例。

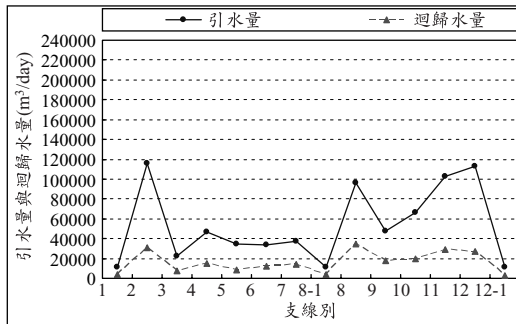


圖 14 桃園大圳各支線引水量為計畫用水量 1 倍之迴歸水量變化趨勢

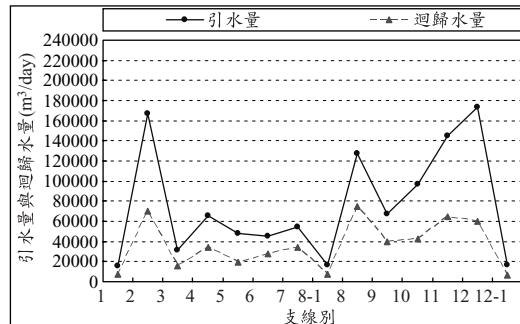


圖 16 桃園大圳各支線引水量為計畫用水量 1.5 倍之迴歸水量變化趨勢

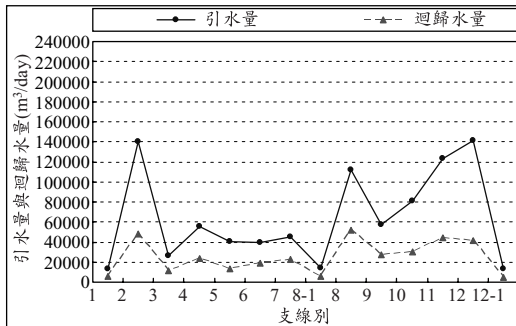


圖 15 桃園大圳各支線引水量為計畫用水量 1.25 倍之迴歸水量變化趨勢

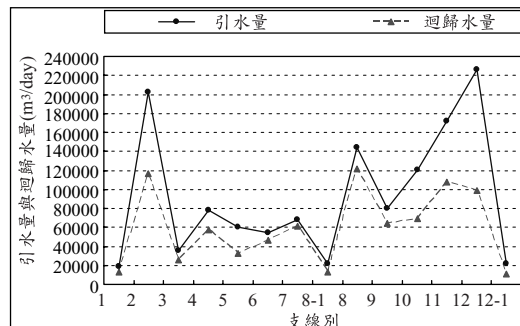


圖 17 桃園大圳各支線引水量為計畫用水量 2 倍之迴歸水量變化趨勢

m<sup>3</sup>/day，迴歸水佔引水量之比例約為 29.69%；比較各支線灌區，以第 2 支線之引水量最多，迴歸水量以第 8 支線為最多；迴歸水佔引水量之比例以第 9 支線為最高，約 38.09%，以第 12 支線為最低，約 21.48%。

以整個桃園大圳灌區而論，引水量為 1 倍、1.25 倍、1.5 倍及 2 倍之灌溉計畫水量時，其總引水量由 768,815 m<sup>3</sup>/day 增加至 1,401,235 m<sup>3</sup>/day，所產生的總迴歸水量由 187,415 m<sup>3</sup>/day 增加至 609,647 m<sup>3</sup>/day，其總迴歸水佔總引水量之比例分別為 24.38%、29.69%、34.65%、43.51%。

## 六、結 語

### 6.1 結論

1. 本研究之迴歸水推估模式乃由坡度可調式砂箱模型之試驗結果所建立，在 3 種坡度 (1/100、1/150、1/200) 及 4 種土壤 (粘土、粘質壤土、砂質粘壤土及砂質壤土) 條件下可推估出 12 組迴歸水方程式，並作為模式之基本架構，因此利用本模式計算迴歸水比例及迴歸水量時，以灌溉計畫水量、坡度、土壤類別、灌溉面積及水路分佈為輸入模式之條件，即可得區域性迴歸水比例及其水量。
2. 本文以砂箱模型進行 4 種土壤於 3 種不同坡度之迴歸水試驗，結果顯示土壤質地為砂質粘壤土於地形坡度為 1/150 條件下，所得迴歸水模式之曲線型式與現地試驗 (砂質粘壤土、坡度為 1/150) 所得迴歸水模式相同，顯示本研究以砂箱模型推估迴歸水與採現地觀測方式所得結果趨近一致。將來若利用砂箱模型配合與灌區相同土質、坡度條件下進行迴歸水試驗，並與現地觀測結果互相印證，則由砂箱試驗所得之推估模式，將可應用至相同土質、地形條件下之灌溉區域。
3. 由砂箱試驗結果顯示，當引水量相同，坡度變陡時，迴歸水量有隨之增長的趨勢。且不論是高倍數或低倍數之計畫引水量，

坡度對於迴歸水量之變化均有相同程度之影響，由此可推斷以砂箱模型推估不同坡度下之迴歸水量具有可行性。

4. 在不同引水量下，桃園大圳各支線所產生迴歸水量比例之平均值約為 17.54~55.91%。若引水量為灌溉計畫水量之 1.25 倍正常引灌水量之下，桃園大圳各支線之迴歸水比例平均值約為 21.48~36.16%。
5. 引水量為灌溉計畫水量之 1.25 倍正常引灌水量之下，桃園大圳 12 條支線灌區之總引水量為 934,912 m<sup>3</sup>/day，所產生總迴歸水量為 277,577 m<sup>3</sup>/day，其總迴歸水量佔總引水量之比例為 29.69%；其中已於上游已反覆利用者約有 145,419 m<sup>3</sup>/day，而灌區最下游末端因無抽水設備或貯水設施，無法再利用之迴歸水量約有 41,996 m<sup>3</sup>/day。

### 6.2 建議

1. 砂箱試驗建議採用更好的材質作為土壤與砂箱內壁之介質，使土壤試體與箱壁完全密合，減少滲流管道形成，則砂箱較不易發生異常大之滲流情況，以提高砂箱試驗之準確度。
2. 本研究利用現地觀測模式及砂箱模型試驗，在依灌溉計畫施灌下，所求得各為 12.38%~87.85% 之迴歸水比例，並非在引水灌溉時可直接於引水量中扣除上述比例之水量，而是提供灌溉管理者在擬定灌溉計畫時對於灌區可能產生之迴歸水量有一參考對象，進一步制定更具效率之灌溉制度。
3. 本研究由迴歸水推估模式所計算之迴歸水比例，其結果為一推估值，若要以迴歸水作為新開發水資源，則尚需驗證，若欲驗證本模式之精準度，建議於灌區上游取水口及下游排水處設置精密的流量量測設備，便可明確地得知該灌區的灌排情形，進而可推算出精確迴歸水量。
4. 本研究以砂箱模型試驗結果所建立區域迴歸水推估模式，乃基於地形坡度為 1/100、1/150、1/200 及土壤為砂質粘壤

- 土、砂質壤土、粘質壤土、粘土之條件，並以桃園大圳灌區為研究範圍之前提，目前本模式僅適用於符合上述條件之灌區，因此若於其他地區應用本模式，尚須調查該灌溉地區的土壤別、坡度、水路分佈等資料，以擴充模式通用性。
5. 砂箱試驗模式之驗證，由於現地試驗僅進行一種土壤於一種坡度條件下之試驗，因此建議後續可再進行其他不同土壤及坡度條件下之現地試驗，與相同條件下之砂箱試驗結果比較之，推算不同引水條件下之誤差修正係數，俾使模式推估值與現地實際值相符。
  6. 由於本文使用砂箱模型尺寸之長寬比例乃依試驗灌區之長寬比等比例縮小，土壤厚度則無；因此建議後續進行相關試驗時，可依現場灌區之長寬及土壤深度比例，依等因次比例方式縮小試驗之，評估砂箱試驗結果高於現地觀測試驗是否砂箱模型高度未依比例縮小所致。

### 參考文獻

1. 台灣省水利局，「新竹苗栗地區水資源繼續調查研究計畫報告-苗栗公館區後龍溪河道與穿龍圳灌區水之動態研究」，1972。
2. 台灣省水利局，「灌溉排水工程設計（下冊）」，農復會特刊新二十八號，1978。
3. 行政院農業委員會、財團法人七星農田水利研究發展基金會，「農業工程技術辭典」，2002。
4. 林啓超，「水田灌溉用水回歸利用之研究」，國立台灣大學農業工程研究所，碩士論文，1997。
5. 林癸妙，「水田回歸水之研究」，國立中央大學土木工程研究所，碩士論文，1998。
6. 吳珮菁，「水田回歸水之模式及驗證」，國立中央大學土木工程研究所，碩士論文，1999。
7. 施嘉昌、黃振昌，「作物需水量與氣象因子相關理論分析之研究」，農業工程學報，第33卷第2期，p.1~27，1987。
8. 徐世大、聯合國亞洲暨遠東經濟委員會防洪及水資源開發局，「水文語彙」，經濟部水資源統一規劃委員會出版，1972。
9. 徐龍淵、徐恭也，「迴歸水利用現狀及加強方法」，農田水利第34卷第8期，1986。
10. 高振程，「水田坵塊系統之回歸水量推估」，國立中央大學土木工程研究所，碩士論文，2003。
11. 財團法人農業工程研究中心，「石岡壩南幹渠道可再利用迴歸水源調查」，1996。
12. 雲林農田水利會，「雲林灌區迴歸水有效利用調查研究」，1991。
13. 陳豐文，「農地可再利用迴歸水之調查研究-以桃園地區為例」，私立中原大學土木工程學系，碩士論文，1999。
14. 陳靖薇，「區域迴歸水推估模式之建立與應用」，私立中原大學土木工程學系，碩士論文，2004。
15. 劉君帆，「灌溉系統迴歸水推估方法之研究-以嘉南水利會為例」，國立台灣農業工程研究所，碩士論文，1997。
16. 劉日順，「水田灌溉後可再利用迴歸水推估模式之研究」，私立中原大學土木工程學系，碩士論文，2001。
17. 駱安華，「回歸水之計算和運用」，台灣水利第8卷第2期，1960。
18. 經濟部水利司、台北市七星農田水利研究發展基金會，「研擬合理農業用水標準(I)」，1995。
19. 羅樹孝，「水文學辭典」，茂昌圖書，1995。
20. 簡傳彬、李總集、李英正、吳瑞賢、溫志超、杻家慶，「水稻田迴歸水量量測及初步分析」，89年度農業工程研討會論文集，p.575~p.582，2000。
21. Kan C. E. and Y. C. Chang, "The Impacts of Over-Irrigation toward Return Flow and Percolation in Paddy Field", 1998 Sino-Japanese Workshop on the Agricultural Development and Engineering, p.191~216,



- 1998.
22. Oad R., and M. DiSpigno, 「Water Rights to Return Flow from Urban Landscape Irrigation」, Journal of Irrigation and Drainage Engineering, ASCE, Vol. 123, No.4, July/August, p.293~299, 1997b.
23. Zulu G., M. Toyota, S-i. Misawa, “Characteristics of Water Reuse and its Effects on Paddy

Irrigation System Water Balance and the Riceland Ecosystem” Agricultural Water Management, 31, p.269~283, 1995.

收稿日期：民國 94 年 4 月 8 日

修正日期：民國 94 年 5 月 26 日

接受日期：民國 94 年 5 月 31 日