

灌溉系統內地表及地下水間相互調配下最佳 灌溉配水模式之研究

A Study on the Optimal Water Distribution Model to Inter-Regulation of Surface and Subsurface Water for An Irrigation System

國立臺灣大學農業工程學系助教

陳 焜 耀

Kune-Yao Chen

摘 要

本省自河川取水灌溉之區域，因豐枯季節之影響，河川流量變化甚大，或者有流量不足需以地下水補充灌溉，於灌溉配水技術上，無法以一種最適模式作為永久固定之灌溉配水計畫，因此需根據引進水量機動性的調配地下水，方能有效的利用水資源。

本文主要之目的是研究雲林地區，按灌溉區域之土壤、氣象等諸基本資料，以理論之作物需水量，研擬田間之作物用水模式，並應用系統分析建立優選之系統配水模式，合理推求地下水井配合地表水灌溉之最佳運轉策略，冀以減少灌溉用之地下水抽水量及緩和因地下水超抽所發生之諸問題。

ABSTRACT

At the river supplying irrigation system in Taiwan, there are no optimal model for making a permanent irrigation schedule of water distribution, because of the seasonal variation of river discharge and deficit of surface water. Therefore, the water distribution schedule must be adjusted dynamically in accordance with the intake discharge, then water resources could be used efficiently.

The major objective of this study is to derive a field irrigation requirement model by theoretical crop consumptive uses coping with the soil and meteorology informations of research area. And the algorithm of operation research was applied to this optimization model in order to decrease the pumping discharge to moderate the overpumping problem, and to make an optimal operation policy of using surface and subsurface water resources reasonably and efficiently.

一、前 言

本省之灌溉系統，以水稻灌溉為主要對象，不同土壤間之稻作用水量，差異甚大，在水源日益枯竭的情形下，不得不在灌溉方法上謀求改善之道，積極加強灌溉管理以期逐步改善水源供應與合理配水之目標。在日據時代，日本想利用灌溉事業富強臺灣，作為侵略南洋羣島的跳板，為配合日本統治臺灣發展米糖二大政策，以濁水溪為界進行南糖、北稻之政策，不但控制人民種植何種作物，進而全面征收糧食。臺灣光復後、由於戰爭之破壞，農業衰退，百廢待舉，造成糧食不足之現象，為增加糧食生產及達到公平分配與水源均沾的目的，政府四十年來積極推行與改善水稻灌溉方法，經詳細之設計、試驗、研究、示範而普遍推行，使用水管理漸趨制度化、科學化。對於灌溉事業的發展，須尋求以土地與水源之最有效利用為目標。

本研究之區域，位於濁水溪下游南岸之沖積平原區，受既有水權之限制，對於水資源之開發與利用，在節流方面有進行內面工改善工程與加強灌溉管理，以節省用水量；於開源方面則以開闢新水源為目標，本區因地下水蘊藏豐富，於是積極開發地下水井做為補助水源，所以截至目前為止，本區地下水井之多，居全省之冠。近年來由於大量抽取地下水做為補助水源，以供灌溉之用，不但造成水利會本身龐大費用之支出，更而引起因地下水超抽所造成之不良後果。再者，因目前水利會對於地下水井之配合量，採用預先扣除地下水出水量之調配方式，致使全面性之抽水浪費情形，徒增下游地區之排水問題。

本研究之目的係針對上述之種種問題與缺失，希望藉着合理之配水方式，讓抽水機之抽水量減少到最低之程度，研擬出一套配合地下水井之抽水機調配模式，如此將能更有效的對水資源加以控制與分配。本研究之灌溉配水模式之建立，基於三個基本假設：

- (一)於水源調整期間，水源視為穩定之狀況。
- (二)抽水機之出水量固定，不隨時間而變。
- (三)於水源調整期間，抽水機非關即開。

二、現行之灌溉配水方式

1.營運系統之演進

本省之農田水利事業，開端於元朝，歷經明、

清二代，灌溉埤圳遍及全省，其水利設施，大部份均係人民自費合資興建。截至民前17年（光緒21年，西元1895年），日本人佔據臺灣之後，初時因治安未定，對於土地仍採取放任制度，一律照舊規不動。於西元1900年起日本人為加強對臺灣之經濟管制，以實現其統治臺灣發展米、糖二大政策之目的，開始調查各埤圳，訂定各項發展政策。當時對濁水溪系統採用南糖北稻政策，直接限定水權。本研究區屬濁水溪南岸之旱作區，水源受限而不足，種植作物以甘蔗為主。

臺灣光復之後各河川流量均被已設之埤圳登記使用，於民國四十年代政府鑑於本省人口激增，極須增加糧食生產，以資解決軍糧民食起見，積極增加稻作面積，於節流方面則有大規模的鋪設內面工從事渠道改善，加強灌溉管理等措施。於開源方面則為另闢水源，本研究區位於濁水溪下游之沖積平原，河川水源早已被登記受限，遂開發地下水做為補充農田用水，改善原有之灌溉方式，穩定水源為糧食增產之最佳途徑。

由於本研究區（雲林地區）地下水豐富，自民國47年開始大量開鑿深井，計劃將原有之三年輪作田改為三年二作，水稻單期作田改為雙期作田，或將非灌溉區之看天田改為雙期作田以提高水稻之生產面積。本研究區原為三年一作輪作田，經開發地下水源後改為三年二作之輪作田。截至目前為止，本研究區（小田支線）之補助水源有：地下水井74口及補助水井6處。全區劃分為75水利小組，225個輪區，計劃灌溉面積7858公頃。

2.灌溉計劃

水利會對於灌溉計劃之製作，係先製定一套用水計劃，再依水文記錄進而預估河川流量而訂定各不同取水量之配水計劃，再以用水計畫及配水計畫而訂定灌溉計劃，隨後為灌溉計劃之執行時，再根據實際引進水量進行實地配水。圖（2—1）為整個灌溉計劃製作至執行之過程圖。

3.用水計劃

用水計劃是以區域之立地條件及氣象資料，考慮作物形態與面積之不同，可分為水田用水及早田用水二部份，本研究所用標準分述如下：

(1)水田用水

水田之計劃用水是以稻作種植期間，各種不同階段之用水，本研究區之水稻均於二期作時種植，其灌溉日程如下：

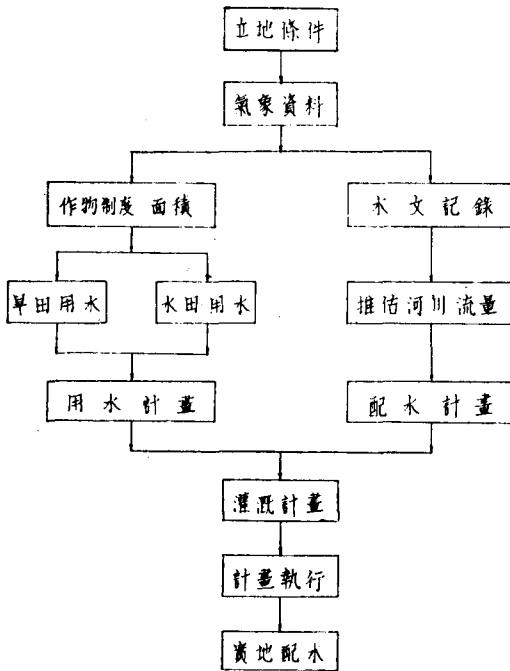


圖2-1、灌溉計畫流程圖

秧田用水期	6月1日至6月20日	20天
整田用水期	6月21日至7月20日	30天
本田用水期	7月21日至10月20日	91天

一般對於水田灌溉用水所考慮之因素有：蒸發散量 (Evapotranspiration)、滲漏量 (Percolation)、有效雨量 (Effective Rainfall)、整地用水量及輸水損失 (Conveyance Loss) 等。以下就水田之不同時期用水分別分析之。

A. 秧田用水

水稻之秧田期用水，其蒸發散量與插秧成活期時之需水量相差甚微，依水利會之計劃，秧田面積約為本田面積之 (1/25) 由於每輪區之秧田面積不大，為保有水頭，秧田期間不考慮有效雨量。對於秧田用水仍採用目前水利會之標準每輪區之供應量為：

砂壤土：0.014 CMS

壤土：0.011 CMS

粘土：0.008 CMS

B. 整田用水

整田乃是稻作於秧苗插植之前，將田間土壤翻耕、犁碎，並施以大量灌溉用水使之由旱田狀況轉變為水田狀況，以利於插秧作業之進行；故土壤物理性為決定整地用水之主要因素。理論上，整田用

水可分為二部份一為將土壤由灌前之狀態轉變為水田之飽和狀態，另一則為利於機械插秧之冠水深。

理論上田間整田用水，對於土壤飽和水深之計算，是假定土壤表面至有效根層深度 (Rootzone) 之土層為均質性 (Homogeneous) 土壤。各變數之定義如下：

d_s ：土壤飽和水深 (mm)。

d_i ：冠水深 (mm)。

S_s ：土壤飽和水分 (%)。

M_s ：灌前之土壤水分 (%)。

A_s ：土壤假比重。

D_r ：有效根層深度 (mm)。

則達到土壤飽和之水深可表為：

$$d_s = \frac{S_s - M_s}{100} \cdot A_s \cdot D_r$$

故整田用水深 D 為：

$$D = d_s + d_i \\ = \frac{S_s - M_s}{100} \cdot A_s \cdot D_r + d_i$$

對於輪區之整田用水，在考慮整田期距之情況下，及整田期不計有效雨量故：

$$FP = [D + (E_o + P) \cdot \frac{(N-1)}{2}] / N$$

$$Q = \frac{1}{(1-L)} \cdot \frac{FP}{8.64}$$

式中：

FP：輪區整地用水深 (mm/day)。

D：整地用水深 (mm)。

E_o ：蒸發量 (mm/day)。

P：滲漏量 (mm/day)。

N：整地日數 (day)。

L：輸水損失。

Q：流量 (ℓ/sec/ha)。

C. 本田用水

本田需水量是指在整田、插秧之後，維持稻作生長所需水量。理論上可分為二部份，即蒸發散量 (Evapotranspiration) 和滲漏量 (Percolation)。而本田用水則尚需扣除有效雨量 (Effective Rainfall)。

① 蒸發散量

影響作物需水量之因素頗多而且複雜，而在各氣象因子中根據 Briggs & Shantz 與日本 Kato 氏等之調查研究，仍以蒸發量之相關係數最高。因此以蒸發量與試驗所得之各作物係數推求蒸

發散量，不失為簡便與實用之方法。本區之蒸發量記錄自民國63年以來，記錄完整，其平均日蒸發量為 3.2mm，最高可達 5.9mm（七月）最低僅有 1.5mm（二月）。故本研究採用蒸發計蒸發量推求法（Pan Evaporation Method）其表示方式如下：

$$ET = K_c \cdot E。$$

式中：

ET 蒸發散量 (mm/day)。

K_c ：作物係數。

E ：蒸發量 (mm/day)。

② 滲漏量

滲漏量之估計，本研究所採用之方法係依照臺灣省水利局設計規範所載之方法，由粘粒百分比計算而得。其經驗公式如下：

$$P = \frac{240}{(\text{clay}\%)} \times I$$

式中：

P：滲漏量 (mm/day)。

clay%：土壤內含 0.005mm 以下粘粒之重量百分比。(%)

I：係數，視粘粒%大小而定。

③ 有效雨量

對於有效雨量之探討，因雨量本身不能加以控制，而使其有效乃人之因素所造成，對灌溉而言雨量必須與灌溉具有相同之效果方能稱之為有效。

關於有效雨量之估計標準，根據以往水稻灌溉試驗田之灌溉用水分析，水田之有效雨量約合平均雨量之60%，但以不超過該月份月需水量之50%為度。故本研究採用有效雨量之估計標準為：

$$\min\{0.6 \times RN, 0.5 \times (ET + P)\}$$

式中：RN 表降雨量 (mm/day)

(2) 旱田用水

對於旱作物之灌溉，往往被忽視，其原因除了水源不足外，另一個重要之因素為本省雨量豐沛，旱作田雖不予灌溉亦可栽培。但歷年之試驗證實旱作物經有計畫的灌溉後，產量顯著的增加。惟旱作物之種類及品種繁多，且種植時期各不相同，各地土壤又有差異，其關係之複雜可以想見。

旱作之用水量與水田稍有不同，一般而言旱田用水除了蒸發散量及有效雨量外，另一重要之因素則為毛管水補給率，故：

旱田用水 = 作物需水量 - 毛管水補給量 - 有效雨量

對於本省各種主要旱作物需水量，依據嘉南水利會學甲旱作試驗，臺大農工系及水利局各旱作推行站歷年實驗資料，採用蒸發量推算法，以決定旱作物需水量。

本研究對於旱作一次灌溉水深之計算是以水利局旱作灌溉立地區分計畫報告之各項標準。以根系深度60公分之標準吸水型態時之總速效性有效水分 (Total Readily Available Moisture 簡稱為 T.R.A.M) 值，經採樣1942點，71mm 以上佔總取樣點之75%，而 TRAM 介於 51至70mm 者佔總取樣點之17%，本研究區屬土壤保水力較高之地區，故對於 TRAM 以土壤為標準分別為：粘土 80mm，壤土 60mm，砂質土 40mm。毛管水補給率以40%計算。

(3) 輸水損失

輸水系統大致可以分為二部分，亦即水路系統之輸水與輪區內之分配灌溉，二者以中、小給水門為分界線。

本研究區屬地形平坦之沖積平原區，於幹、支、分線水路系統為保持水頭取水，於水路各處設有制水閘以抬高水位。因此通水斷面趨於固定。對於水路損失之計算以固定水位之潤週為之，經實測後得各支分線系統之輸水損失量如下表。

表2-1 各表分線輸水損失量

支 分 線	損失量 CMS	支 分 線	損失量 CMS
小田支線(直接)	1.126	中 湖 分 線	0.063
頂 寮 分 線	0.111	子 茂 分 線	0.030
後 湖 分 線	0.027	三 房 寮 分 線	0.025
元 長 分 線	0.063	潭 內 分 線	0.087
鹿 場 分 線	0.123	鬼 子 山 分 線	0.156
內 湖 分 線	0.016	林 厝 寮 分 線	0.129
林厝寮分線之一	0.023	下 雅 分 線	0.164
三 條 崙 分 線	0.055	三 條 崙 分 線 之 一	0.010
小田支線系統總計： 2.208 CMS			

4. 配水計畫

配水計畫之製作是依前述用水計畫再考慮水文因子，預估河川之流量，而訂定配水計畫，最後經由用水計畫及配水計畫來決定當年之灌溉計畫。

本研究區屬濁水溪之灌溉系統，由於南北岸之水權業已固定，因此在豐水期間水量足以應付，而於枯水期（每年之10月至翌年4月），由於水量不足故依照濁水溪南北岸之分水協定（流量百分比），於每日上午九時依記錄流量之變化加以調整。

一般而言，對於系統配水計畫務必確立灌溉系統，再以預估之期作取水量選定適當之配水方式，以水利會之實地經驗，約略可以分為如下四種方式為之：

(1)取水量在用水計畫之80%以上時：

取水量在此一階段時所採用之配水方式，可利用加強灌溉管理以節約用水，達到均勻分配的目的，採用各區域之用水量做為分配比例之依據。

(2)取水量介於用水計畫之60%~80%之間：

由於水量不足以應付全面供水，故採用分區之系統輪灌方式。

(3)取水量介於用水計畫之50%~60%間：

當取水量於此一階段時，執行大輪灌方式產生營運困難之情形，此時一般採用之方式有：

①延長輪距：

對於輪距之決定應視作物之生育情況與執行之難易程度，

②減水深法：

依照分水比例之方式為之，將各次系統減少供應量但不影響大輪灌之原則。

③減少面積法：

減少供灌之面積，由政府政策之配合，將耗水較多者或效益較差地區經由公告實行斷水或停灌，由於農民意願不一，此法農民難以接受，實行不易。

④分區分段輪灌方式：

除了大系統之輪灌方式外，於輪值組再細分上、下游之輪灌。

(4)取水量未達用水計畫之50%時：

取水量未達50%，屬極度缺水之乾旱狀態，務必與政府之政令配合，實施休耕或轉作。

以上為一般配水之原則，於實際配水時在不違反上述原則下可實行機動式之調配，以達到均勻分配之目的，進而能安定農民之心。對於補助水源（地下水井）之調配，在於依照地表水之引進水量經上述之分配原則實行配水作業，於分配後尚不符合用水標準之支、分線採用機動性之抽水機調配。

三、0-1規劃理論

灌溉事業的發展，將須尋求以土地與水源之最有效利用為目標。因此，純就灌溉之立場而言，灌溉即是供給作物正常生長所需之水分；而配水則是，有效的調配水源，使各作物均能得到經濟合理的用水。在地下水蘊藏量豐富之地區，可開發地下水源做為補助水源，補充灌溉，唯顧及國家百年大計，防止地下水超抽問題及如何有效的供給經濟、合理之用水，利用整數規劃中0-1之特性，研擬優選之抽水機調配方式。

1.0-1 規劃原理

對於任何之整數規劃(Integer Programming)問題，其整數變數均可利用純零一壹(Pure Zero-one)之形式，或二元(Binary)變數之觀點來表示。其獲得方法為：

設 $0 \leq x \leq n$ $x, n \in \mathbb{N}$, n 為整數上限

$$y_i = 0 \text{ 或 } 1 \quad i = 1, 2, 3, \dots, n$$

則 x 可表示為：

$$x = y_1 + y_2 + y_3 + \dots + y_n$$

若以二進位之形式表示之，則將使變數之數目減少，使得其表示法更為經濟，其方法為：

$$x = 2^0 y_0 + 2^1 y_1 + 2^2 y_2 + \dots + 2^k y_k$$

式中：

$$y_i = 0 \text{ 或 } 1 \quad i = 1, 2, 3, \dots, k$$

k 為：當 $2^{k+1} - 1 \geq n$ 時之最小整數。

在0與1的特性下，非線性的0~1規劃問題，亦均能轉換成線性0~1規劃問題。但由於二元變數數值之單純，相對的帶來了甚多之變數，因此在解法上，非得利用其特性發展一套理論，專門應用於0~1規劃問題，以利於電子計算機之處理。為便於處理，0~1模式必須具備以下之型式：

$$\text{Minimize : } Z = \sum_{i=1}^n C_j X_j$$

$$\text{Subject to : } \theta_i = \sum_{j=1}^n a_{ij} x_j \geq b_i,$$

$$\theta_i \quad i = 1, 2, 3, \dots, m$$

其中： $x_j = 0$ 或 1

$$C_j \geq 0, \quad j = 1, 2, 3, \dots, n$$

2.暗示窮舉法

(Implicit Enumeration Algorithm)

根據 Lattice 之加成理論，若具有三變數，

且各變數之限定值為：
 $X_1=0,1$
 $X_2=0,1$
 $X_3=0,1,2,3$

則其所有之解集合（可行解及非可行解），計有16個，若以笛卡爾坐標系統表示時，如圖3-1所示。在圖3-1中，每個節點即為每一種解答之組合；圖3-2為將圖3-1之情況，以 Lattice 解答節點表示之情況。

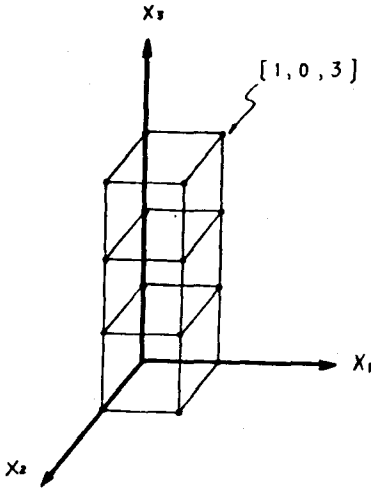


圖3-1 笛卡爾坐標圖

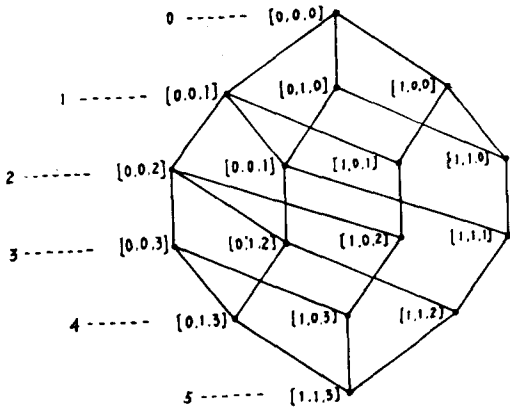


圖3-2 Lattice 節點圖

將以上之情形轉變為純零—壹問題時，則變數數目增加一個，以 Lattice 表示時，如圖3-3所示。對於解答0-1規劃模式之過程，是檢驗所有變數之集合，因此務必檢驗 2^n 個變數組合，這對於 $n>15$ 時之情況，是不可能的。而暗示窮舉法，是在於達到最佳解之前，僅有系統的檢驗所有可能組合中的一小部份集合。如前述之問題，規劃成

0-1問題之後（圖3-3），若發現 $X_1=1$ 為非可行解，則圖3-3之解集合網圖，可略去不可能之部份，而轉變成為圖3-3之粗線部份，其餘可忽略不管。

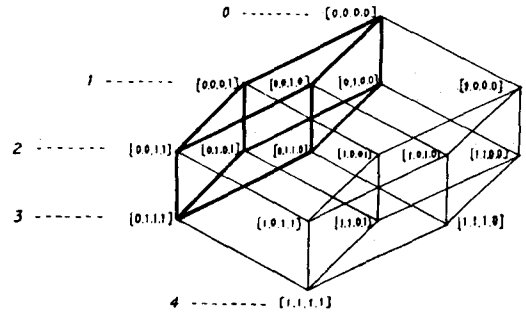


圖3-3 暗示窮舉法示意圖

基本上，暗示窮舉演算法，乃自所有變數均等於零之集合開始，然後有系統的指定某些變數值為1，直到可行解獲得為止，進而得到至當時為止的最優可行解。此演算法乃有系統的盯住那些由0與1所組成之變數，改變那些可能改進到當時為止之最優可行解的變數集合，直到最佳解為止。因此許多不可能導致較優可行解之組合均無須檢驗，如圖3-3所示，故稱為暗示地窮舉。

3.0-1 規劃之條件與特性

以暗示窮舉法解答0-1規劃時，基本設定是求解目標函數的極小值，且目標函數中，各變數之係數皆為正。再者，需將限制式轉換成大於等於零之限制式型式。因此，為了使用暗示窮舉法，標式必須具備如下之型式：

$$\begin{aligned} \text{Minimize: } Z &= \sum_{j=1}^n C_j X_j \\ C_j &\geq 0, j=1,2,3,\dots,n \\ \text{Subject to: } -b_i + \sum_{j=1}^n a_{ij} X_j &\geq 0 \\ i &= 1,2,3,\dots,n \\ X_j &= 0 \text{ 或 } 1, j=1,2,3,\dots,n \end{aligned}$$

為了符合以上之型式，當目標函數為求解極大值時，務必先行將其轉換為極小值之型式。若目標函數之各變數係數有負號情況時，則應重新定義新變數。再者，需將限制式轉換成大於或等於零之限制式型式。至於暗示窮舉法之特性有：

- (1)於電子計算機中，此法僅用到加法及減法的算術運算，於速變上比乘除快了許多。

- (2)採用整數運算，消除了四捨五入之累積誤差。
- (3)限制式之數目不像其他求解方法會增加。

四、抽水機調配模式

雲林水利會所屬灌區位於濁水溪下游沖積扇平原區，由於地下水蘊藏量豐富，於民國47年政府為迅速增加稻米糧食之生產，積極開發水源，於當時成立了臺灣省地下水開發委員會，釐定補助水源開發政策，從事於大規模之地下水開發工程。於民國47年8月至民國59年12月間共鑿深井 441口，淺井 10口，總出水量計有 25.105CMS，平均每一口井出水量為 0.055CMS。截至目前為止，雲林水利會全會之深、淺井共有 566口，經調查包括民井之深、淺井之井數竟達六千餘口，乃臺灣地區擁有地下水井最多之水利會。然而自大規模之開採以後，近十幾年來由於大量抽取地下水之關係，已有明顯的地下水位下降，地盤下陷甚至海水入侵等不良後果。因此，對於利用地下水如何有效地配合地表水灌溉，使得抽用水量能夠減少至滿足作物用水而不致形成用水浪費，以緩和因超抽問題所造成的負面影響，為本文研究之重點。

1.目前之配水方式

依據水利會地表水與地下水統籌分配原則，對於地下水源或補助水源之調配方式，採用預先扣除法，其總用水量為，進水口進水量與地下水源，補

$$VP_m + QS_m \cdot T = RQ_m \cdot T \dots\dots\dots(4-1)$$

- 式中： VP_m ：第m分線之平衡抽水量 (m^3)。
- QS_m ：第m分線之地表水供應量 (m^3/s)。
- RQ_m ：第m分線之灌溉需水量 (m^3/s)
- T ：水源調整時距 (sec)

而各支、分線之總抽水量 VP_m 為：

$$VP_m = \sum_{i=1}^{NP_m} \frac{QP_{m,i}}{1-LP_{m,i}} \cdot T_{m,i} \dots\dots\dots(4-2)$$

- 式中： $QP_{m,i}$ ：第m分線第 i 井之實際出水量 (m^3/s)
- $LP_{m,i}$ ：第m分線第 i 井，相當於由取水口分配之輸水損失 (%)。
- $T_{m,i}$ ：第m分線第 i 井之抽水時間 (sec)。
- NP_m ：第m分線之抽水機數。

將 (4-2) 代入 (4-1) 式，則

$$\sum_{i=1}^{NP_m} \frac{QP_{m,i}}{1-LP_{m,i}} \cdot T_{m,i} + QS_m \cdot T = RQ_m \cdot T \dots\dots\dots(4-3)$$

故

助水源總抽水量之和，各中小給水門之應得水量則為，根據總用水量，扣除輸水損失後之應得比例，乘以核定用水量，而其實際取水量為，應得水量扣除地下水井與補助水源之抽水量。若由以上之營運調配方式配水時，當引進水量接近計畫用水量時，形成抽水機不抽水時水量不夠，而抽水時又形成水量過多，造成嚴重的排水問題。

本區之地下水井甚多，但均非單獨抽水進入田區中，而是將地下水抽至各幹、支、分線後，再將水輸送至各輪區中，此為本區營運之特色。鑑於此一營運方式之缺失，本文所採用之 0-1 調配模式，係以地下水補助水源配合地表引進水量，以最佳之調配方式，將水合理有效的分配輸送至各田區中，使得各區均能達到計畫用水量，而又不致於浪費之最低地下水抽水量。

2.調配模式之建立

對於河川系統之灌溉配水，由於河川流量不穩定，調配不易，所以補助水源應如何配合，實為一項高度之配水技術，本區之補助水源多為地下水井，而抽水機之特性為達到最高效率，開時則以總馬力抽水，無法分段調節其出水量，本模式即針對此一特性，以 0 或 1 分別表示抽水機之關或開，以合理的配地表水灌溉。

(1)機動調配模式

在一調整時段 T 為固定之時間內，各支分線之水平衡方程式為：

$$\sum_{m=1}^n \sum_{i=1}^{NP_m} \frac{QP_{m,i}}{1-LP_{m,i}} \cdot T_{m,i} = \sum_{m=1}^n (RQ_m - QS_m) \cdot T \dots\dots\dots(4-4)$$

若考慮輸水損失，則

$$\begin{aligned} \sum_{m=1}^n \sum_{i=1}^{NP_m} \frac{QP_{m,i}}{1-LP_{m,i}} \cdot \frac{1}{1-L_m} \cdot T_{m,i} &= \sum_{m=1}^n (RQ_m - QS_m) \cdot T \cdot \frac{1}{1-L_m} \\ &= \sum_{m=1}^n (RQS_m - QWS_m) \cdot T \\ &= (RQ - Q) \cdot T \dots\dots\dots(4-5) \end{aligned}$$

式中： L_m ：第m分線之輸水損失 (%)。

RQS_m ：第m分線之水源需水量 (m^3/s)。

QWS_m ：第m分線之水源供水量 (m^3/s)。

RQ ：水源總需水量 (m^3/s)。

Q ：水源之引進水量(m^3/s)。

n ：分線數目。

營運之目的，在於使水利會之效益為最大，故模式之形式為：

$$\text{Minimize: } Z = \sum_{m=1}^n \sum_{i=1}^{NP_m} (QP_{m,i} \cdot C_{m,i}) \cdot T_{m,i}$$

$$\text{Subject to: } \sum_{i=1}^{NP_m} \frac{QP_{m,i}}{1-LP_{m,i}} \cdot T_{m,i} + QS_m \cdot T = RQ_m \cdot T$$

$$\sum_{m=1}^n \sum_{i=1}^{NP_m} \left(\frac{QP_{m,i}}{1-LP_{m,i}} \cdot \frac{1}{1-L_m} \right) \cdot T_{m,i} = (RQ - Q) \cdot T$$

$$T_{m,i} \leq T \quad m=1,2,3,\dots\dots\dots n$$

$$i=1,2,3 \dots\dots\dots NP_m$$

$$T_{m,i} \geq 0, \quad QS_m \geq 0$$

式中： $C_{m,i}$ 表第m分線第 i 井之抽水成本 ($\$/m^3$)。

在水利會之營運方式，尚未全面自動化之前，於一調整時段中，分別調整各抽水機之抽水時間，反而會使營運成本提高而不經濟，為配合營運管理之方便，模式須做適度的調整。

(2) 0-1 調配模式

為管理上之方便及配合水利會之營運型態，假設抽水機之配合，於一調整時段 T 時期之內，開則全開，抽水時間不加以分段。因此各支、分線之實際抽水量，應略大於或等於平衡抽水量。因此模式需修正如下：

原 (4-2) 式修正為：

$$VP_m \leq T \cdot \sum_{i=1}^{NP_m} \frac{QP_{m,i}}{1-LP_{m,i}} \cdot Y_{m,i} \dots\dots\dots(4-6)$$

式中： $Y_{m,i}$ ：第m分線第 i 井之抽水機狀態 (0 表關閉，1 表開啓)。

式 (4-3) 修正為：

$$\sum_{i=1}^{NP_m} \frac{QP_{m,i}}{1-LP_{m,i}} \cdot Y_{m,i} \geq RQ_m - QS_m \dots\dots\dots(4-7)$$

式(4-5) 修正為：

$$\sum_{m=1}^n \sum_{i=1}^{NP_m} \frac{QP_{m,i}}{1-LP_{m,i}} \cdot \frac{1}{1-L_m} \cdot Y_{m,i} \geq (RQ-Q) \cdot T \dots\dots\dots(4-8)$$

關於營運之效益部份 $C_{m,i}$ 包括有：水井出水量與價格，各抽水井之地下水位，輸水損失等。因此模式修正為：

$$\begin{aligned} \text{Minimize: } Z &= \sum_{m=1}^n \sum_{i=1}^{NP_m} (QP_{m,i} \cdot C_{m,i}) \cdot Y_{m,i} \\ \text{Subject to: } &\sum_{i=1}^{NP_m} \frac{QP_{m,i}}{1-LP_{m,i}} \cdot Y_{m,i} + QS_m \geq RQ_m \\ &\sum_{m=1}^n QWS_m = Q \\ &Y_{m,i} = 0 \text{ 或 } 1, \quad i=1,2,3\dots\dots\dots NP_m \\ &\quad \quad \quad m=1,2,3\dots\dots\dots n \end{aligned}$$

本模式所考慮之引進流量範圍為介於計需用水量及計劃用水量扣除地下水水量之間，蓋因引進水量大於計畫用水量時，則可依各取水口之需水量按比例加以分配之，抽水機部份則不必動用。而當引進水量小於計畫水量扣除地下水水量時，表示無法滿足需水量之要求，此時則務必採用其他之配水方式（如：輪灌）方能滿足需水量之要求。

五、結果與討論

本研究之模式採用理論為基礎，並考慮影響灌溉用水諸因子，加以模擬分析，並利用系統分析之規劃，根據實際引進水量從事抽水機調配之規劃，進而得到最佳化之配水。研究結果可分為二部份，其一為依據理論基礎配合現地狀況之灌溉計劃用水量之分析，另一部份則是 0—1 規劃模式。模式之建立，應用電子計算機之特性加以處理之，則不但可以有效的從事規劃，更能快速又經濟的提供合適之決策。以下就各部份之結果分別加以分析討論之。

(一) 計劃用水模式分析

應用計算機處理模式時需有完整及正確的詳細資料，本用水模式所需之基本資料包括有：蒸發量、降雨量、各輪區之土壤資料、灌溉面積及輸水損失等。

依照水稻對水的需要程度不同，將水稻生育期分成八個時期，以不同期之作物係數乘以該旬之蒸發量即為該旬之作物需水量，配合土壤滲漏量所得之田間用水量。最後考慮系統之輸水損失，換算為進水口所需流量。而對於旱田用水因為各作物之耗

水性不一，且各作物之實際種植面積因無調查，無法一一述及，因此本研究對於旱作物之用水量是以旱作物之種植百分比依照水利局旱作立地區分計劃之作物分類：高需水量作物、中需水量作物及低需水量作物分別以 1.2Cu、1.0Cu 及 0.8Cu 表之。旱作之田間用水量除不考慮滲漏量外，另外還增加了毛管水補給量。

(1) 灌溉用水計劃之製作，是以水稻、旱作之用水標準，配合各作物之栽培面積，適宜之栽培日期加以估算之。本研究區為三年一作及三年二作之輪作區，作物制度之安排係將水稻均植於二期作，表 (5~1)、(5~2) 所示為當第一輪區為輪值區時之灌溉計劃用水量。

(2) 表 (5~1) 及表 (5~2) 為依據雲林水利會北港督導區灌區系統，水稻之栽培適宜種植日期起始時間（六月下旬至七月中旬）與旱作栽培起始時期（冬季裏作：十一月月上旬，春季雜作：一月月上旬），配合各水路之輸水損失定出系統中各支分線不同時期之用水量，表中所列之水稻、旱作栽培面積是以 70 年水利會之實際栽培面積資料，因本區為輪作區，所以所列之旱作面積為二期作之旱作面積，於其它時期則將水稻面積併入旱作面積中。為保證水量能輸送至田區中，因此各輪區之最小流量採用本省之標準 8 l/sec。

(3) 由所列之灌溉計劃表中可以看出尖峯用水期為水稻整田期之末期，這是因為本模式所採用的整田型態為定面積之方式，故尖峯用水一定發生於整田之末期（七月中旬）。四月下旬則為配合水利會之疏圳工程因此全面斷水。

表 5-3 配水方式比較表

THE DISCHARGE OF INFLOW Q (CMS)=9.000						Unit:CMS
LATERAL NO.	PROJECT	YUN-LIN SURFACE GROUND		MODEL 0-1 SURFACE GROUND		REMARK
417	1.035	0.974	0.063	0.970	0.063	0.000
418	0.310	0.292	0.050	0.179	0.126	0.076
419	0.432	0.407	0.037	0.432	0.000	-0.037
420	0.427	0.402	0.040	0.365	0.063	0.023
421	1.144	1.077	0.076	1.144	0.000	-0.076
422	0.628	0.591	0.038	0.628	0.000	-0.038
423	1.011	0.952	0.063	0.945	0.063	0.000
424	0.760	0.716	0.043	0.760	0.000	-0.043
425	0.189	0.189	0.000	0.189	0.000	0.000
426	0.281	0.265	0.063	0.154	0.126	0.063
427	0.239	0.225	0.025	0.239	0.000	-0.025
SYSTEM	2.614	2.461	0.147	2.545	0.063	-0.084
SUM OF PUMPING DISCHARGE			0.645		0.504	-0.141

表 5-4 配水方式比較表

THE DISCHARGE OF INFLOW Q(CMS)=8.750						Unit:CMS
LATERAL NO.	PROJECT	YUN-LIN SURFACE GROUND		MODEL 0-1 SURFACE GROUND		REMARK
417	1.035	0.947	0.092	0.970	0.066	-0.026
418	0.310	0.284	0.050	0.180	0.131	0.081
419	0.432	0.395	0.036	0.432	0.000	-0.036
420	0.427	0.391	0.040	0.360	0.067	-0.027
421	1.144	1.046	0.095	1.085	0.059	-0.036
422	0.628	0.574	0.057	0.512	0.118	0.061
423	1.011	0.925	0.089	0.945	0.066	-0.023
424	0.760	0.695	0.063	0.707	0.055	-0.008
425	0.189	0.189	0.000	0.189	0.000	0.000
426	0.281	0.257	0.063	0.147	0.134	0.071
427	0.239	0.219	0.025	0.239	0.000	-0.025
SYSTEM	2.614	2.391	0.219	2.547	0.067	-0.152
SUM OF PUMPING DISCHARGE			0.829		0.763	-0.066

表 5-5 配水方式比較表

THE DISCHARGE OF INFLOW Q (CMS)=8.575						Unit:CMS
LATERAL NO.	PROJECT	YUN-LIN SURFACE GROUND	MODEL 0-1 SURFACE GROUND	REMARK		
417	1.035	0.927	0.113	0.915	0.113	0.000
418	0.310	0.278	0.050	0.179	0.126	0.076
419	0.432	0.387	0.044	0.432	0.000	-0.044
420	0.427	0.383	0.050	0.306	0.113	0.063
421	1.144	1.025	0.114	1.085	0.057	-0.057
422	0.628	0.563	0.063	0.510	0.114	0.051
423	1.011	0.906	0.101	0.945	0.063	-0.038
424	0.760	0.681	0.080	0.705	0.052	-0.028
425	0.189	0.189	0.000	0.189	0.000	0.000
426	0.281	0.252	0.063	0.147	0.126	0.063
427	0.239	0.214	0.025	0.186	0.050	0.025
SYSTEM	2.614	2.342	0.265	2.547	0.063	-0.202
SUM OF PUMPING DISCHARGE			0.968		0.877	-0.091

表 5-6 配水方式比較表

THE DISCHARGE OF INFLOW Q (CMS)=8.175						Unit:CMS
LATERAL NO.	PROJECT	YUN-LIN SURFACE GROUND	MODEL 0-1 SURFACE GROUND	REMARK		
417	1.035	0.883	0.144	0.805	0.213	0.069
418	0.310	0.264	0.050	0.125	0.176	0.126
419	0.432	0.369	0.080	0.379	0.050	-0.030
420	0.427	0.364	0.063	0.306	0.113	0.050
421	1.144	0.976	0.164	1.144	0.000	-0.164
422	0.628	0.536	0.095	0.510	0.114	0.019
423	1.011	0.863	0.149	0.945	0.063	-0.086
424	0.760	0.648	0.112	0.654	0.102	-0.010
425	0.189	0.189	0.000	0.189	0.000	0.000
426	0.281	0.240	0.063	0.147	0.126	0.063
427	0.239	0.204	0.050	0.136	0.100	0.050
SYSTEM	2.615	2.230	0.356	2.426	0.176	-0.180
SUM OF PUMPING DISCHARGE			1.326		1.233	-0.093

(4)本研究採用估算之用水計劃當做灌溉計劃之標準而不另行推估河川流量後再決定適當之灌溉計劃，其主要原因是農民之意願無法配合，誰都不願意失去自己應得之權利，因此截至目前為止水利會之灌溉計劃均以用水計劃為標準。對於以下將提及之實地配水中抽水機之調配問題是以第一輪區時之配水情況。

(一) 0-1 規劃模式分析

(1)雲林地區為本省地下水井最多之地區，由於目前水利會之配水營運方式對於地表水與地下水之統籌分配是依照地表水之進水量，採用預先假定地下水已抽之情況，經過比例分配之後，比照灌溉計劃用水量決定是否需要動用地下水補助水源。此一分配方式在水量之分配上，因為抽水機非關則開容易造成下游之排水問題，本文亦即針對此一營運上的缺失，利用線性規劃從事地下水配合量之調配，以期得到合理，有效的配水方式。

(2)由於一般用水之尖峯期均發生於水稻灌溉之整田期，本實例即以整田時期（七月上旬）之計劃用水量，再根據引進水量之變化，模擬抽水機之營運情況，今假設引進流量為 9.000, 8.750, 8.575 及 8.175CMS 時之營運況，分別列於表（5-3）、表（5-4）、表（5-5）及表（5-6）中，對於不包含抽水機之各直接取水口則供應計劃用水量，表中所列之結果分別為計劃用水量，依照雲林水利會之營運方式所得之地表水供應量與地下水抽水量及經由本模式模擬之結果。

(3)由表中可以看出依照雲林水利會之地表水與地下水統籌分配之方式，所得之結果於各分線上之總分配水量均有過多之現象，此一情況與實地調查之結果符合。若以本模式之規劃分析結果顯示總抽水量可減少，若依照表中所列之 4 種 Case 而言，其減少地下水抽水量為原抽水量之10%左右。故本模式不失為一合理配水之營運模式。

(4)本文所採用之地下水井出水量是根據雲林水利會74年度之實地抽水量調查結果，於分析時對於抽水費用係數暫時採用均一之標準，對於沿海地區有海水入侵或已超抽致使嚴重地層下陷之水井，因目前尚無進一步之資料，今後對於此類問題水井之營運，只要有進一步之資料即可做較完善之配水方式，以減輕嚴重之問題水井。

(5)表中所列抽水之地下水井或補助水源，是由本模式模擬之結果，而各分線依照雲林水利會之配

水方式所動用之抽水井部分是以該分線之最小配合量為之，若分線以下之分配方式再細分，則本模式之減抽水量更可以提高。

(6)本模式之引進流量下限為計劃用水量扣除所有地下水井之抽水量，此即表示若引進水量過小，雖然動用全部之抽水機亦無法滿足需水量之要求，因此套入本模式中並無可行解，這表示水源缺乏，已產生缺水之現象，此時則應另行建立缺水期之營運方式，當缺水模式確立後再配合本模式，則對於用水規劃當更具實際與完整。

(7)本研究針對雲林水利會地下水井之利用，是將水量抽至各幹、支、分渠中而後再配合地表水加以分配，而非像其他水利會之地下水井直接抽至輪區中。所以本研究僅對於大區域系統之配水方式，而不涉及輪區內之配水作業，如果再深入研究輪區間之配水作業，結果將會更完善。

六、結論與建議

(一)結論：

- 1.本研究以理論為基礎，配合實地之情況，決定合理之用水模式與配水模式，其中用水模式之建立，除了考慮影響灌溉諸因子外，再配合區域之特性，推估合宜之用水量。
- 2.實地配水時，抽水機之營運操作標準，根據灌溉計劃，再比照實際地表引進水量，應用系統分析，提供精確及具經濟性之合理配水作業方式。
- 3.以第一輪區為輪灌區為例，於七月上旬整田期之配水作業，若依照雲林水利會地表水與地下水之統籌分配方式，當引進水量在 7.85 CMS (82%) 時，鹿場分線 (423 分線) 便已無法滿足用水量之要求。隨著取水量之遞減，無法營運之分線相對的增加，此時惟有藉助其他之配水型式方能解決。依照本研究之配水方式，在引進水量小於 6.7 CMS (70%) 時，即使 Pump 全抽水無法滿足用水，故宜採用其它配水方式，反之，引進水量在 6.7 CMS 以上時，依本模式，可得到合宜之配水作業。
- 4.河川取水系統，因河川水位變化大，取入流量無法穩定，無法像水庫系統一般穩定地配水。目前水利會因限於人力之關係，若取入水量變化不大，則各水門以一天調整一次為原則；反之若水量之變化可能致使渠道發生危險時，則加以調整，再者流量過小，使下游地區，無法得到應得水量

，則亦隨之調整。本研究是假設每一調整時期T內之流量穩定之情況加以分析。

- 5.關於抽水成本(C_m)之問題，牽涉甚廣，而對於目前電力公司電費計價方式可分為基本電費及流動電費二者。再配合以實地之地下水文情況，加以分析更能減少資源之浪費。對於抽水機之特性，因尚無進一步之資料，於本研究中，暫以各部均相同之情況處理之，亦即模式中，目標函數之成本係數C_m均為1。
- 6.降雨量之靈活應用，對於灌溉用水量影響甚鉅，至目前為止，各國對有效雨量之估計，均屬經驗公式，尚無一套合理滿意之方式。本研究採用之有效雨量，以旬平均降雨量為準，於分析上較為粗放，如有詳細之降雨資料，則於分析結果上將會更精確。於實地配水時，對於雨量之利用，遇降雨則全面停止抽水井之供水；亦即將降雨之利用達到最大。因此本研究之配水模式，於運用時尚須與實地情況配合之。
- 7.本研究所建立之0—1規劃模式，應用於實地灌溉配水作業時，如果電腦之容量夠大，則可考慮把系統灌溉納入以進行規劃，而各支、分線部分再加以分割成幾個灌區，則分配之結果應可得到更佳之減抽水量。

(二)建議：

- 1.近年來由於稻米生產過剩，政府極力推行稻田轉作。因轉作區域為零星散亂之形式，而非集約化之轉作，徒增配水困難。若依膠卷模式原理，此一轉作方式，並不能節省用水量。今後之轉作方式，若應用誘導方式，使轉作集約化或專業區之建立，則不但可以節省用水，更能利於配水作業之進行。
- 2.作物需水量之影響因子甚多，臺灣目前對這方面之資料尚嫌不足，為求灌溉用水之分析更精確，實有待更進一層之研究。
- 3.因目前本省所採用之抽水機型式，均為不可調節式，而本研究之假設為於調整期間抽水機非關即開，於水平衡之觀點，抽水量必大於或等於理論上應補足之水量，故今後若引用可調節式抽水機，則可補足以上之缺失。
- 4.嚴謹而言，灌溉用水量是否經濟合宜，應考慮作物產量、成本、效益等經濟分析探討，因此涉及甚廣。惟限於時間及能力，故本研究祇針對影響灌溉用水量之主要因子，並假設每一調整時期T

時間內之流量固定，抽水時間固定，以節省用水量為目標，使水利會之效益最大，加以分析探討建立地下水配合地表水之配水模式，往後若時間、人力許可，或有志於此一方面之研究者，可以抽水機之時間T為變因，進行進一步的分析與探討。

- 5.以抽水機時間控制抽水量之運轉方式，惟對於抽水時機及抽水時間之安排與抽水機開啓數量之問題，是否能達到最佳利益，也是值得今後探討之方向。
- 6.本研究對於實地配水時之抽水機調配營運，僅止於取水量與抽水量之和，足以灌溉全區時，對於引水量不足時之配水型態中輪流灌溉期距之決定，不同流量時所採取的措施，均為經驗方式，因此於今後對於配水時，理論之引證，亦不失為努力的目標。

七、參考文獻

- 1.施嘉昌、徐玉標、曹以和、甘俊二：灌溉排水原理。71.3
- 2.甘俊二、湯松義：濁幹線系統應用電子計算機處理灌溉配水之可行性研究。62.12
- 3.甘俊二：臺灣之輪區配水技術。74.11
- 4.溫理仁：水稻灌溉系統容量之決定與整田用水之管理。61.4 農工學報第18卷第1期。
- 5.鄭俊澤：水稻灌溉系統渠道容量之估算。72.6 臺灣水利。
- 6.劉佳明：桃園地區水源有效利用與灌溉管理改善之研究。67.12
- 7.臺灣大學水工試驗所、新苗農田水利會：苗栗明德水庫最佳利用之研究。65.12
- 8.林俊男：整地時期灌溉配水模式與尖峯用水及農機作業之研討。73.3 農工學報。
- 9.周芳昌：水田灌溉計畫用水優選樣式之研究。73.6 碩士論文。
- 10.沈榮茂：濁水溪北岸灌溉合理配水之探討。68.6 碩士論文。
- 11.臺大農工系、水利局：雜作灌溉手冊。69.11
- 12.謝堡丁：臺灣灌溉的組織經營與技術。61.2
- 13.Chun-E. Kan: "Estimation of Irrigation Requirement for Jatiluhur Irrigation Area in Indonesia" 1977
- 14.Chun-E. Kan: "Water Distribution in

- Tertiary Block for Jatiluhur Irrigation System in Indonesia." 1977
- 15.FAO: "Irrigation and Drainage Paper: Guideling for Predicting Crop Water Requirements." 1977
- 16.Hamdy A. Taha: "Integer Programming : Theory, Applications, and Computations"
- 17.Hiller, Liberman: "Introduction to Operations Research." Third Edition 1980
- 18.ASCE Committee on Irrigation Water

- Requirements: "Consumptive Use of Water and Irrigation Water Requirement." Edited by Marvin E. Jesen 1973
- 19.Raymond R. Beneke Ronald Winterboer: "Linear Programming Applications to Agriculture." The Iowa State University Press, AMES 1973

收稿日期：民國79年3月19日

修改日期：民國79年4月30日

接受日期：民國79年5月5日

專營土木、水利、建築等工程

富強營造有限公司

負責人：張寶森 地址：台中縣東勢鎮東崎街文昌新村32號
電話：(045) 873089

專營土木、水利、建築等工程

金如祥營造有限公司

負責人：李名祥
地址：高雄市三民區水源街173巷21號

專營土木、建築、庭園綠化等工程
美化工程、砂石水泥製品

久洲營造有限公司

負責人：林淑滿 地址：台中縣大里鄉中興路1段萬壽巷20弄7號
電話：(04) 3302395 · 3395959

專營土木、水利、建築等工程

珍貴田土木包工業

負責人：陳萬 地址：台中縣外埔鄉中山村大馬路92-1號
電話：(046) 862883

專營土木、水利、建築等工程

金煙土木包工業

負責人：張金煙 地址：台中縣大甲鎮文武里德興路153號
電話：(046) 871700