

## 需求導向之灌溉用水量動態模擬系統評估

### A Dynamic Simulation Approach in Modeling On-Demand Irrigation Water Consumption

國立台灣大學  
生物環境系統工程學系  
博士後研究員

謝心怡

Hsin-I Hsieh

巨廷工程顧問  
股份有限公司  
工程師

潘麒帆

Chi-Fan Peng

國立台灣大學  
生物環境系統工程學系  
教授

蘇明道

Ming-Daw Su

國立台灣大學  
生物環境系統工程學系  
博士後研究員

林美君\*

Mei-Chun Lin

#### 摘要

台灣現行灌溉管理方式是由農田水利會擬定各區域的供水流量與時間，再依照各區域及給水時間順序供水，同一區域內之農民須在預先規劃設定之時間到田區內引水灌溉。考量未來農民可能需要更彈性之供水方式以因應農業經營型態之改變，因此本研究透過整合作物生長之蒸發散過程與農民自主灌溉之行為，以模擬需求導向之灌溉用水量，作為日後「需求導向之灌溉系統設計」之參考。由於估算灌溉用水量涉及地理環境等空間資料與時間動態之過程，本研究亦將整合網格式地理資訊系統(Raster GIS)與系統動態模擬，評估從以往依照各區域及給水時間順序供水之方式，轉為農民自主性灌溉後用水量之差異。本研究採用「個體式模擬(agent-based simulation)」方式模擬農民在時間-空間維度相互影響下之灌溉行為，其中將每個田區之農民視為獨立之個體，而這些個體的灌溉行為分別由氣象環境、田區土壤質地、距離前次灌溉天數、田區距離水源距離等因素決定，建立農民灌溉行為影響因素之機率分布後，利用個體式模擬工具評估農民在環境與個體決策差異下之隨機灌溉行為，透過 Monte-Carlo 模擬後之頻率分析，將可評估輪灌區內灌溉需水量之可能範圍，以期能由隨機模擬建立農民自主需求導向之灌溉用水曲線，作為後續發展需求導向灌溉系統之參考。

**關鍵詞：**灌溉，地理資訊系統，系統分析，個體式模擬，用水管理。

#### ABSTRACT

Traditional irrigation systems in Taiwan have common disadvantages that irrigation water must be regulated by some rotation criteria which guarantee equal benefits to all

\*通訊作者，國立台灣大學生物環境系統工程學系博士後研究員，10617 台北市大安區羅福路 4 段 1 號，madgebse@gmail.com

farmers. The cropping patterns have to adapt to the irrigation supply schedule and the cultivation flexibility of farmers is limited. Farmers may take more risk facing the challenges in future agricultural business, and increasing flexibility in the irrigation water supply will definitely help. The spatial-temporal distribution of farm irrigation demands is critical data for on-demand irrigation system design. This study integrated raster GIS with system dynamic simulation modeling in simulating farmers' irrigation behaviors and compare on-demand irrigation with rotational irrigation.

In this pilot study, agent-based simulation modeling was used for simulating individual farmer's irrigation behaviors based on climate conditions, soil texture, irrigation periods, etc. Monte-Carlo simulation analysis was used for evaluating irrigation water demand in the study area. Probabilistic irrigation demand charts generated from this process could be valuable references for on-demand irrigation system design.

**Keywords:** Irrigation, Geographic information system, System analysis, Agent-based simulation, Water management.

## 一、前 言

因考慮水資源有限以及管理上的便利，台灣現行灌溉管理方式以區域輪流供水灌溉為主，由農田水利會擬定各區域的供水流量與時間，依照各區域及給水時間順序供水，同一區域內之農民須在預先規劃設定之時間輪流到田區內引水灌溉。然而台灣加入「世界貿易組織(WTO)」後農業面臨國際農產品的競爭壓力，作物制度與灌溉管理勢需面臨調整以為因應未來農業經營型態之改變，農民可能會要求更彈性之供水方式，因此，目前之灌溉管理策略可能須大幅改變，以提供農民依其耕作需要機動灌溉之需求。為了提高農民灌溉之用水機動性，聯合國農糧組織(Food & Agriculture Organization of The United Nation, FAO)亦開始檢討以往農民依照排定時間與固定水量之輪流供水方式，進而轉為發展能夠在非特定時間提供農民取用所需灌溉水量之供水系統，通常稱為「需求導向之灌溉系統設計(On-Demand Irrigation Systems Design)」(Lamaddalena, *et al.* 2000)。

在過去的灌溉配水方式中農民往往扮演被動的角色，由農田水利會先估算出區域的灌溉用

水量後，再擬定各區域的供水流量與農民輪流灌溉的時間，此種配水方式有其管理上的便利；相反地，在以需求為導向的灌溉管理系統中，農民可以自由意志來進行灌溉，此種灌溉方式不限定一定的灌溉時間或水量，系統配合農民灌溉行為供水，如此可提高農民灌溉的便利性與自由度，提高其改變經營型態的彈性。但若維持以往的配水方式，因灌溉行為的不確定而無法掌握確切的灌溉用水量，將可能造成原本沒有的缺水風險。過去的配水量與時間均是預先規劃的，但當灌溉行為變為隨機事件，此時過去的配水方式是否適當、該如何調整均是該探究的議題，因此本研究試圖評估在過去配水方式下讓農民自主灌溉其中供水量與需水量的差異，提供評估以需求為導向之灌溉系統可行性的依據。

本文以作物的蒸發散量推估灌溉用水量，除了考慮有效雨量、土壤滲漏量、輸水損失等，更加入農民可自由灌溉的彈性機制。基於此，本研究中以網格式地理資訊系統(Raster GIS)與系統動態模擬來推估農民在自由灌溉下之用水量，主要考量個體在時間以及空間上的變化。在網格式地理資訊系統中，個體是描述構成系統的組成分子，可以分別拆解獨立，擁有不同

的狀態，這些狀態亦也有可能彼此互相影響，合成起來，成為一個作用者模型(Reynolds, 1999)，藉以觀察個體在獨立或是大環境的影響下的行為差異。而系統動態模擬部分著重時間上的變化，以往灌溉方式均以旬為時間單位配水，但在農民自主決定灌溉的情況下，勢必每一日均有灌溉的可能，為了更詳細探討農民自主灌溉與以往以旬為單位的配水方式的用水量差異，本研究以日為單位進行模擬。研究中透過整合各種自然地理氣象因子、作物生長之蒸發散過程與農民自主灌溉之行為，以推估需求導向之灌溉用水量，整合網格式地理資訊系統與系統動態模擬，評估以往各區域及給水時間順序供水之方式，轉為農民自主性灌溉後用水量之差異，以作為灌區水資源的供給分配以及蓄水池容量設計等規劃之參考依據。

## 二、研究方法

本研究主要包括田間作物灌溉需水量推估以及模擬農民實施自主灌溉行為等兩部分，以評估區域灌溉用水量。研究中假設水稻為灌區的主要作物，由於水田是採浸水栽培，田中湛水深會逐日消耗，因此若是由農民自主灌溉，每一塊田區隨距離上一次灌溉時間不同，所需要的灌溉水量也會有所差異。此種情況下每一塊田區都可視為一個獨立的個體進行模擬，每一塊田區受灌機率都因為田區本身條件不同而有所差異。舉例而言，A 田區距上次受灌的時間為 1 天，B 田區距上次受灌時間為 20 天，若以農民自主性灌溉的情況下，相較之下由於 B 田區的作物明顯受到較大的缺水威脅，故其受灌的機率大於 A。本研究將以個體田區為基礎，利用個體式網格來模擬每一個田區的灌溉情況，同時也在模擬過程中加入個體與個體相互影響的機率，以此呈現全區域施行自主性灌溉下的總需水量。故推估出每日作物消耗水量後，配合各田區農民是否灌溉的決策後，才能估算全灌區總用水量，因此農民灌溉與否的決定是估算灌溉用水量的關鍵。研究中透過個體式網格反覆模擬農民灌溉行為的結果，以頻率分析方式討論農民在自由灌溉下用水量的範

圍，以作為需求導向灌溉系統相關規劃設計的原則與基礎。文中依據田間作物耗水量配合上以灌溉機率為基礎之個體農民行為模擬來推估整個灌區所需要的用水量範圍，以下將針對灌溉用水量推估、個體式模擬架構以及模式建立三個部分進行說明。

### 2.1 灌溉用水量推估

本文以水田為主要耕作形式，採用 Modified B-C method 以田間作物耗水量、有效雨量以及土壤滲漏量為主要考慮因素來推估作物的消耗水量(consumptive use)，如式(1)所示：

$$\text{Demand}_{\text{Crop}} = \text{ET}_c + P - \text{ER} \dots\dots\dots (1)$$

$\text{Demand}_{\text{Crop}}$ ：作物消耗水量(mm/day)。

$\text{ET}_c$ ：田間作物耗水量(mm/day) =  $\text{ET}_0 \times \text{KC}$ 。

P：土壤滲漏量(mm/day)，水田滲漏量約在 5 mm/day 左右。(農田水利教材，1998)

ER：有效雨量(mm/day) =  $\min [0.6 \times R, 0.5 \times (\text{ET}_c + P)]$ 。(甘俊二，1993)

$\text{ET}_0$ ：參考作物耗水量(mm/day)。(FAO, 1998)

KC：作物生長係數。(FAO, 1998)

R：日常雨量(mm/day)。

根據FAO定義以 40 公分高的苜蓿做為參考作物，田間作物耗水量為參考作物耗水量與作物生長係數的乘積。其中作物生長係數依據作物種類以及生長階段而有所差異，FAO亦提供相關參考數據(FAO, 1998)。參考作物耗水量計算則需考慮種種氣象因素，如氣溫、日照係數(緯度)、風速等等，於本文中採用甘俊二，「灌溉排水原理」(1993)中將其簡略為氣溫以及日照係數(緯度)函數的方式，如下列式(2)：

$$\text{ET}_0 = [(0.46 \times T) + 8] \times \text{Sun} \dots\dots\dots (2)$$

T = 氣溫。

Sun = 日照係數。

利用式(1)、式(2)可算出作物每日所需灌溉水

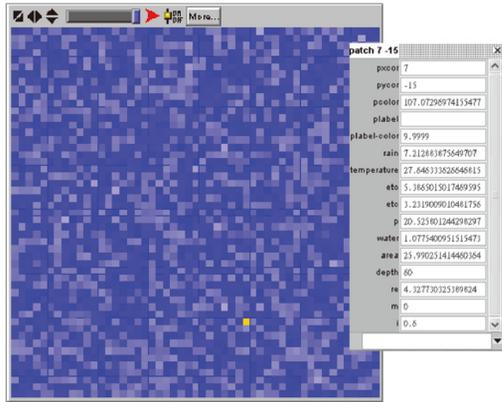


圖 1 個體式模擬示意圖

深，然而是否要灌溉則以個體式網格模擬每一塊田區的灌溉行為，考量每塊田區的面積、距離上一次灌溉的時距可以計算出每一塊田區需要灌溉的水量，進而計算出全灌區每日需要的灌溉總水量。

## 2.2 系統模擬方法一個體式網格模擬

John Conway在1970年代提出「生命遊戲」(Game of life)的模擬架構，先將區塊拆解成許多「網格」，每一個網格皆可儲存不同的狀態，並在網格間建立不同狀態之運算模型，這些網格稱之為「個體(Individual)」或「代理人(Agent)」，該模型亦稱為「代理人基模擬(Agent-Based Model, ABM)」(Reynolds, 1999)，此類網格式的模擬環境適合應用於描述區塊內部的異質性分佈，因此較能合理模擬族群或區塊與環境異質性之間相互作用的關係。而系統內之個體係描述構成系統的組成分子，可以代表社會系統之人群、生態系統之動植物或是交通系統的車輛等等，一旦拆解成「個體」之後，將可模擬個體間在環境空間分佈的不同行為，進而瞭解「個體」的社會行為、生態族群等等。此種概念用以模擬個體行為以觀察對於整體的影響(Kim & Yoon, 2014; Wagner & Agrawal, 2014)，並廣泛應用於不同的領域。

如以圖1來說明，圖中將每一個網格(patch)為一個個體(也就是一個代理人 Agent)，本研究中以一個網格個體代表一個田區，每個網格的顏色

代表此塊田區的含水程度，顏色越淺代表此塊田區越乾，亦即距上次灌溉時間越長，在動態模擬的過程中可以看見每日各田區含水量的變化。每個個體各自擁有不同的參數，如圖1為各田區的示意圖，圖中裡的(7, -15)表示此為座標(7, -15)的田區(即圖中的黃色區塊)所擁有的參數值。雖然每個個體各自擁有不同參數，但是相鄰個體之間可能相互影響。若以模擬的灌溉用水來說，雖然各田區之面積可能有所差異，但附近相鄰之田區是否灌溉，亦會影響農民是否想要灌溉之意願，研究中考慮各項可能之因素產生的機率問題，並加以整合模擬。考量上述各田區狀況以及鄰近田區的條件後，將逐日個別模擬每一塊田區的灌溉行為。首先，每一塊田區將逐日消耗作物所需的水量，判斷各田區的條件後，依據灌溉機率(詳見第3部分)模擬每一塊田區是否需要灌溉，若需灌溉則灌溉至滿水深，若不需灌溉則此塊田區於當日的需水量為0，最後計算全灌區的總用水量。

## 2.3 模式建立

研究中建立之模式架構圖大致如圖2所示，主要模擬運算部分與資料連結後推估出灌區的用水量，並透過蒙特卡羅多次模擬後，進一步分析結果。模式架構中主要分為「灌溉用水量推估」以及「是否灌溉之機率模擬」兩部分：

於灌溉用水量推估部分，表1為推估灌溉用水量時各參數的類型以及範圍整理，模擬的參數類型大致可分為兩種：(1)隨時間變異；(2)隨空間變異。隨時間變異的參數如氣溫、雨量以及作物係數(Kc)，氣象資料將以其分布進行逐日模擬，作物於不同階段其Kc值亦有所差異，將影響田間作物耗水量，故以每日氣象條件以及作物係數進行計算。隨著空間而變異的參數，如土地面積等，則依據各田區而各自有不同的數值。

上述參數條件以及田區鄰近是否灌溉將會影響此田的灌溉機率，進而影響全灌區模擬的總水量。關於灌溉與否的決策機率部分，農民灌溉意願相關研究中(黃志鵬, 2005)，以問卷方式調查影響其農民灌溉意願因子，並透過AHP層級

表 1 模擬參數類型及範圍

變數名稱	時間	空間	產生方式	單位
雨量(Rain)	●		依歷史氣象資料分布產生	mm/day
溫度(Temperature)	●		依歷史氣象資料分布產生	°C
土地面積(Area)		●	給定範圍(3000~5000)隨機產生	m <sup>2</sup>
土地滲漏量(P)		●	給定範圍(4-6)隨機產生	mm/day
Kc (水稻)	●		依時間不同而不同	-

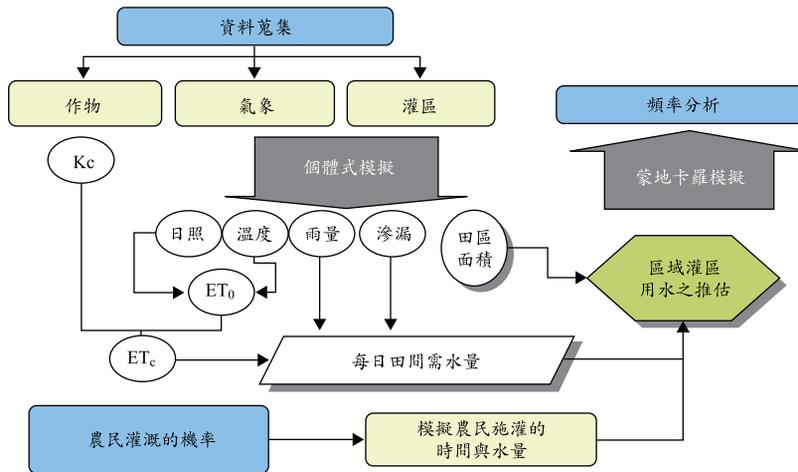


圖 2 模式建立架構圖

分析方式彙整影響農民灌溉的各因素所占權重，彙整其結果得知三個直接影響灌溉機率的因子為：(1)作物生長期需水(Kc)；(2)距離上次灌溉的日數；(3)氣象因素(今日溫度、今日降雨)。研究中即以此三個因子做為灌溉機率的參考依據。又因其中「距離上次灌溉的日數」這項因素與田間所剩的湛水深有高度相關，因此本文模擬中，採用每日的 Kc、水深、氣象情況來決定此時農民的灌溉機率後再進行模擬。

圖 3 為模擬模式的介面，考量區域不同則上述影響灌溉因素的機率可能不相同，使用者於模擬介面中可將上述因素自行調整，以符合模擬區域情況。a 部分調整灌滿水位的水深、周圍農民若灌溉將提高此田區的機率值(為考慮周圍田區灌溉與否對於農民本身灌溉意願的影響，文中採取對原本灌溉機率作加減來處理，亦即在依前述設定的方式計算出灌溉意願的機率後，如果周圍

農民都灌溉，則再提升固定的灌溉機率來處理)、兩期水稻的起始日期。b 部分代碼依序為 Kc、水深、氣象。Kc、水深分為高低(H、L)兩種狀況，氣象分為適合灌溉、不適合灌溉以及普通三種情況(H、M、L)，如此便共有 12 種情況組合，使用者可以自行設定各組合下的受灌機率，於此先分別假設 12 種情況下決定要灌溉的機率(如表 2)來做模擬，此外為了避免作物枯萎，在低水量時農民必定會去灌溉，研究中設定當田區中的水深低於 3 cm 時，灌溉機率將為 100%。上述 Kc、水深、氣象的門檻值可由 e 部分自行訂定，於此設定 Kc 值門檻為 1.1，水深為灌滿情況下的一半，氣象則較為複雜，雨量的門檻值為 25 mm，氣溫為 25，若氣溫高、雨量少為適合灌溉，氣溫低、雨量高則不適合灌溉，其餘則為普通情況。上述物理門檻均可由使用者依據模擬區域、考量種植作物情況自行設定。介面 c 部分為模擬

表 2 考慮各種情況下灌溉機率

灌溉機率	0.8	0.7	0.6	0.6	0.6	0.5
Kc	高	高	高	高	低	高
田間水深	低	低	高	低	低	高
氣象(是否適合灌溉)	適合	中等	適合	不適合	適合	中等
灌溉機率	0.5	0.4	0.4	0.4	0.3	0.2
K c	低	高	低	低	低	低
水深	低	高	高	低	高	高
氣象(是否適合灌溉)	中等	不適合	適合	不適合	中等	不適合

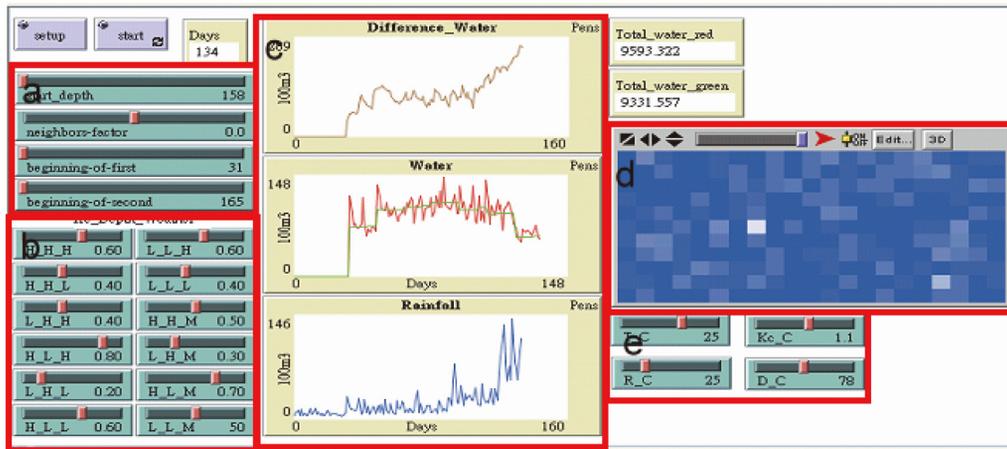


圖 3 模擬模式介面說明

水量變化，d 部分則為模擬各田區的示意圖。

### 三、模擬結果與討論

本研究之目的在模擬假設田區由農民自主灌溉與實施配水灌溉的用水量差異，如圖 4 所示是為期一年的模擬結果。實線為逐日模擬農民自主灌溉得出的灌溉用水量，以下稱為模擬用水量，虛線為考慮田區之氣象、作物與立地條件以現行灌溉用水計算方式所推估出的旬灌溉用水，以下稱為計畫用水量，由圖中可見模擬用水量在大部分情況下，仍依循傳統用水量的趨勢在進行，但有小規模之振幅，其原因在於現行用水量以旬為單位，輪流提供各田區所需的用水，因此在同一旬中所提供的水量是相同的，導致實際運作所提供的水量線如同階梯，呈現較整齊的趨勢；而以農民自由意願灌溉為前提下所作的模擬

用水量，雖然呈現一不規則曲線，但仍舊可以看出不同時期所需不同水量之階梯趨勢，雖然無傳統運所方式下穩定，大致上，在相近的時間內水量的變異不大，此結果可提供未來灌區水資源規劃時之參考與依據。

圖 5 為模擬用水量與現行用水量之差值(現行用水量-模擬用水量)，理論上不論是在農民自由意識下灌溉或者是現行的灌區輪流灌溉管理方式，整年所使用總水量不應該有太大的差異，兩種管理方式主要的差別在於水量分配時間的不同，故理論上圖 5 中用水量差值之累積曲線於年末時應該會趨近於 0，但實際模擬出的結果卻不然；由圖中可以看出雖然每日用水量差值有正有負，但整體而言模擬用水量較計畫用水量為高，由圖中可以發現不論一期作或二期作，在起始耕作時期計畫用水累積量有低於模擬用水累積量的趨勢。

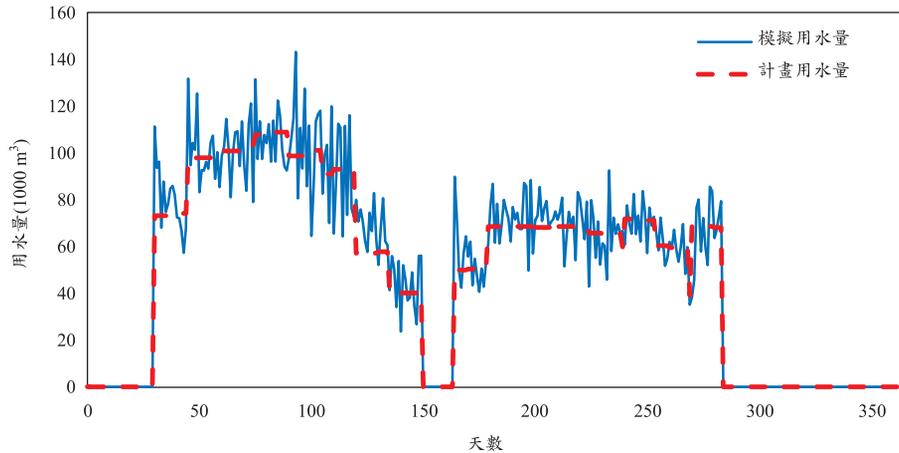


圖 4 模擬用水量與現行用水量的比較

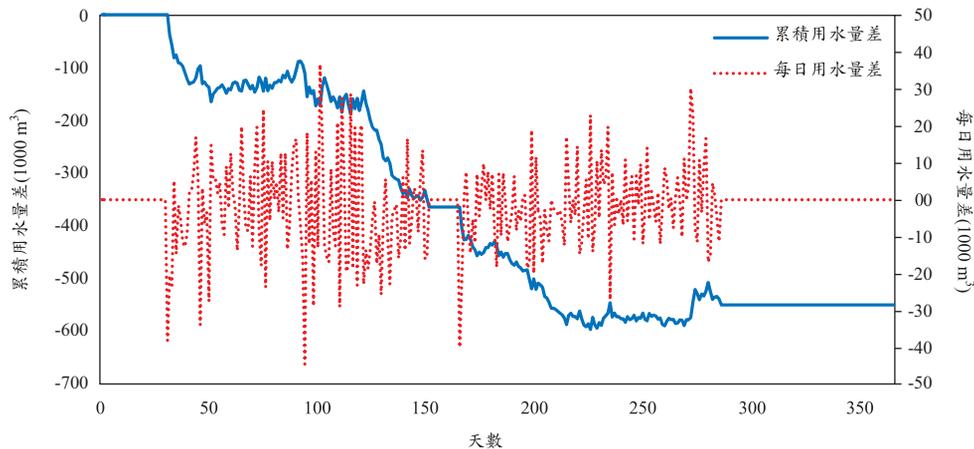


圖 5 模擬總用水量與運作總用水量差異圖

圖 6 中所示為在經 50 年模擬後之最大與最小模擬用水量範圍與現行用水量之比較，圖中展示各時期用水量多寡及特性，於枯水時期模擬用水量變動振幅較大，此結果可用來規劃灌區水資源的供給分配，或是蓄水池容量設計等，作為農民自由灌溉下用水彈性的依據。

綜合上述結果，若以現行配水方式讓農民以自主性方式灌溉，則實際農民所需的水量不一定會等於配水量，可能會出現的水量短缺或剩餘情形，但不論是現行的配水輪灌方式或讓農民自由灌溉方式，其一年內所用的總水量差異應不大，

因此若在每一年的模擬中，以當年中累積最大日缺水量為容量設置一蓄水池，便可以調節盈缺有效改善該短缺或剩餘水量的情況。相同的概念除了應用於灌溉蓄水設施，於雨水儲集等設施也同樣可行(Su, *et al.*, 2009)，透過建置蓄水設施可降低缺水狀況的風險。頻率分析為水文、風險分析等領域常用的分析方式(Onyutha, *et al.*, 2013；Reddy, *et al.*, 2013)，透過頻率分析來提供各設計容量下的缺水風險，以提供蓄水設施設計容量準則。

由於每一年模擬出的結果均不相同，因此每

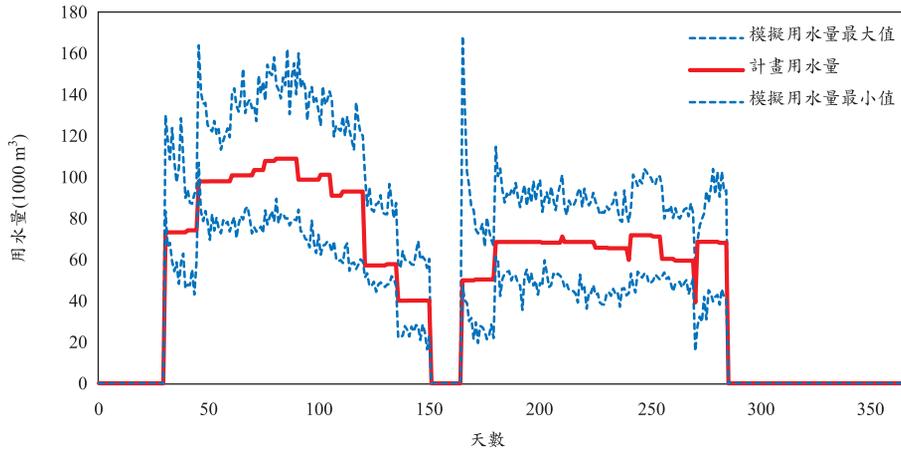


圖 6 需求導向之灌溉用水量與實際灌溉用水比較圖

次模擬的最佳蓄水池設計容量也會有所差異，在研究中將多次模擬後之結果經過頻率分析後，可繪製如圖 7 所示蓄水池容量風險圖，顯示當蓄水池容量在 1,020 千噸(約占全年計畫用水量的 5.5%)時，信心水準約為 95%，此時農民若以自主灌溉方式灌溉，僅約有 5%之機率會產生缺水現象，此圖展示不同信心水準下，蓄水池容積-缺水機率之關係，結果可作為蓄水池規劃之依據。

#### 四、結論與建議

研究中結合 GIS 與 ABM 技術所建立的模擬模式已具雛形，能以每一塊田區為一獨立個體模擬農民自主灌溉下之灌區用水量，並與現行之配水輪灌下之水量作比較，並經由系統模擬研討在改變現行灌溉管理制度後灌溉用水之時空分布趨勢及變異範圍，其結果能提供未來農民較為彈性的自由灌溉制度作為依據，以供相關水資源分配以及灌區蓄水池規劃管理作為參考。

由於會對灌溉需水量造成影響之因素甚多，如氣象(雨量、溫度)、作物資料(Kc)，或是土地面積大小、土壤狀況等等，在現階段的研究中為了能模擬出農民灌溉可能發生的狀況，須有詳盡的地理氣候資料才能根據模擬區域的資料特性來進行逐日用水消耗之模擬。其中較困難也是造成主要誤差原因的是氣象資料的蒐集與模

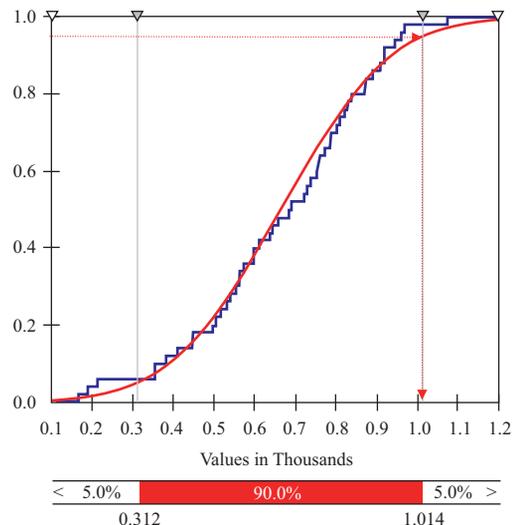


圖 7 蓄水池設計容量與缺水風險圖

擬，如果標的區域缺乏長期的氣候資料，模擬出來的結果可能就會造成相當大的誤差。由於近幾年有氣候變遷的現象，降雨事件以及氣溫的母體是否有變動仍未可知，此模式應用於不同區域、不同氣候母體時，應以該區域適當的參數可於介面上自由修正模擬，以上因素均為本研究成果應用之前限制。

另影響農民自主灌溉行為機率的因素很多，為了模擬農民自主灌溉行為，除了需較全面

對農民實施問卷調查與分析外，再由於考慮的影響因子眾多，會造成整合機率上的困難；以本研究為例，目前僅考慮三項因子就有多達十二種可能組合，且各個因子間的權重的決定也相當困難，本研究中將此十二種可能的機率設為輸入參數，雖然可以自行變動各項機率值，以試誤的方式嘗試各種影響因子機率的組合，從中挑選出較符合現況的搭配，但這畢竟是較為直觀的處理方式，如何合理的訂出適當機率值使得模擬行為更符合農民自主灌溉行為仍須進一步研討修正。

### 參考文獻

1. Grimm, G, "Ten Years of Individual-Based Modeling in Ecology", *Ecological Modeling*, 115, pp.129-148, 1999.
2. Conway, J, "Game of life", available at <http://www.bitstorm.org/gameoflife>.
3. FAO, "Crop evapotranspiration - Guidelines for computing crop water requirements-FAO Irrigation and drainage paper 5", 1998. Available at [http://www.engr.scu.edu/~emaurer/classes/ceng140\\_watres/handouts/FAO\\_56\\_Evapotranspiration.pdf](http://www.engr.scu.edu/~emaurer/classes/ceng140_watres/handouts/FAO_56_Evapotranspiration.pdf)
4. Kim, Sojung, Yoon, Byungun, "A systematic approach for new service concept generation: Application of agent-based simulation", *EXPERT SYSTEMS WITH APPLICATIONS*, 41(6), p.2793-2806, 2014.
5. Lamaddalena, N., Sagardoy, J. A., "Performance analysis of on-demand pressurized irrigation schemes", 2000.
6. Onyutha, Charles, Willems, Patrick, "Uncertainties in Flow-Duration-Frequency Relationships of High and Low Flow Extremes in Lake Victoria Basin", *WATER*, 5(4), p.1561-1579, 2013.
7. Reddy, M. Janga, Ganguli, Poulomi, "Spatio-temporal analysis and derivation of copula-based intensity-area-frequency curves for droughts in western Rajasthan (India)", *STOCHASTIC ENVIRONMENTAL RESEARCH AND RISK ASSESSMENT*, 27(8), p.1975-1989, 2013.
8. Reynolds, C, "Individual-Based Models", available at <http://www.red3d.com/cwr/ibm.html>.
9. Su, Ming-Daw, Lin, Chun-Hung, Chang, Ling-Fang, Kang Jui-Lin, Lin, Mei-Chun, "A probabilistic approach to rainwater harvesting systems design and evaluation", *Resources, Conservation and Recycling*, 53(7), p.323-399, 2009.
10. Wagner, Neal, Agrawal, Vikas, "An agent-based simulation system for concert venue crowd evacuation modeling in the presence of a fire disaster", *EXPERT SYSTEMS WITH APPLICATIONS*, 41(6), p.2807-2815, 2014
11. 甘俊二，灌溉排水原理，1993。
12. 甘俊二，「農業水資源節餘的推廣與實踐」，節水季刊，第 23 期，2001。
13. 洪培浩，「應用空間決策支援系統探討作物制度變更對農業灌溉用水之影響」，台灣大學碩士論文，1999。
14. 張煜權，「台灣之地域性水田灌溉用水量之推估研究」，台灣大學碩士論文，1995。
15. 黃志鵬，「利用蓄水設施提升灌溉機動性」，台灣大學碩士論文，2005。
16. 溫在弘，「標的間用水移轉對區域乾旱缺水風險分佈之影響」，台灣大學博士論文，2006。
17. 溫在弘、蘇明道，「評估作物制度調整對區域農業用水規劃之影響：決策支援系統之觀點」，資訊科技於農業之應用學術研討會論文集，2003。
18. 溫在弘、蘇明道、林俊宏、陳增壽，「以地理資訊系統建立區域灌溉用水推估模式」，台灣水利季刊，46(3)，12-23 頁，1998。
19. 溫在弘，「空間決策支援系統與區域農業用水推估之應用」，台灣大學碩士論文，1998。
20. 農田水利教材，水田灌溉一伍：水稻灌溉用水，財團法人台北市七星農田水利研究發展

基金會、財團法人農業工程研究中心編印，  
1998。

21. 廖一光，「專家系統應用於灌溉用水之推估」，台灣大學碩士論文，1997。
22. 顏志和，「農地灌溉用水量之推估及實態用水特性之分析研究」，台灣大學碩士論文，1996。

23. 蘇明道，「地理資訊系統在水利會業務管理應用之研究」，1993。

收稿日期：民國 102 年 11 月 12 日

修正日期：民國 103 年 4 月 8 日

接受日期：民國 103 年 4 月 26 日