

連續型機率分配模式應用於台灣灌區 有效雨量之推估

Using the Model of Continuous Probability Distributions to Estimate the Effective Rainfall of Paddy Fields in Taiwan

國立臺灣大學
生物環境系統工程學系
博士候選人
農業工程研究中心工程組
助理研究員

陳 豐 文
Feng-Wen Chen

國立臺灣大學
生物環境系統工程學系
教授

劉 振 宇
Chen-Wuing Liu

國立臺東大學
公共與文化事務學系
副教授

蔡 西 銘
Shi-Ming Tsai

摘 要

有效雨量為潛在的灌溉用水來源，台灣地區估算及應用有效雨量以水庫取水灌溉灌區為主，皆於年度灌溉計畫擬定時將有效雨量納入估算計畫灌溉用水量並預先扣除，其他非水庫取水型灌區則較不重視雨量之利用；現今面臨水資源開發及調配日益困難之際，有效雨量如能善加利用作為灌溉水源之一，期能對整體水資源調配有所助益。本研究以水門操作法計算應用於灌溉之有效雨量，並優選連續型機率分配模式推估計畫有效雨量。本文採用桃園、臺中、高雄、臺東灌區 1981-2000 年(共計 20 年)雨量資料評估台灣北部、中部、南部、東部地區之降雨特性、有效雨量利用率及有效雨量利用效益。結果顯示桃園、臺中、高雄、臺東灌區等之年有效雨量平均值分別為 1,005 mm/yr、802 mm/yr、809 mm/yr、827 mm/yr；年有效雨量利用率分別為 54.9%、53.6%、41.0%、49.6%；另應用連續型機率分配模式推估 53 個工作站 1-12 月的月計畫有效雨量，636 次的演算結果顯示月計畫有效雨量分佈型態以伽瑪分佈為主、其次為常態分佈型態、少數為 20 年倒數第 5 位法。

關鍵詞：灌溉用水，有效雨量，計畫有效雨量，水門操作法，連續型機率分配模式。

*通訊作者，國立臺灣大學生物環境系統工程學系教授，10617 台北市羅斯福路 4 段 1 號號，lcw@gwater.agec.ntu.edu.tw

ABSTRACT

Effective is a potential source of water resource for irrigation, the estimation and utilization of effective rainfall are predominantly based on the irrigation area of reservoir systems in Taiwan. The effective rainfall is always previous estimated and listed in the annual irrigation scheduling of each Irrigation Associations in Taiwan, It is used to forecast the potential available rainfall for irrigation and conducted to deduct the irrigation water in the next year. But the irrigation area of non-reservoir is de-emphasis on the utilization of the natural rainfall. Whereas the water resources are increasingly difficult to develop and deploy in Taiwan, the appropriate usage of effective rainfall will be helpful to improve the whole water resource problems which of the effective rainfall is regarded as one source of irrigation water. In this study, Taoyuan, Taichung, Kaohsiung and Taitung irrigation areas are selected as the research region. Water gate operation method and the continuous probability distribution methods are conducted to evaluate the effective rainfall and planned effective rainfall, respectively. The 20-year long daily rainfall data in the period of 1981-2000 are used to estimate the rainfall characteristics, utilization rate and use efficiency of effective rainfall in the northern, middle, southern, and eastern of Taiwan.

The result shows that the average of annual effective rainfall is 1,005 mm/yr, 802 mm/yr, 809 mm/yr, and 827 mm/yr respectively in Taoyuan, Taichung, Kaohsiung, and Taitung irrigation areas. The corresponding utilization rate of annual effective rainfall is 54.9%, 53.6%, 41.0%, and 49.6%, respectively. Further, the continuous probability distribution method was conducted to estimate the monthly planned effective rainfall of 53 workstations from January to December. According to the result of 636 times of mathematical calculation, it shows that the optimal distribution of monthly effective rainfall is primary characterized by Gama distribution, the subsequent models are the normal distribution, and the fifth least value of the monthly effective rainfall for the past 20 years.

Keywords: Irrigation water, Effective rainfall, Planned effective rainfall, Water gate operation method, Continuous probability distributions.

一、前言

農業作物栽培所需水量來源包含降雨及灌溉，早期農業的作物栽培過程所需水源乃利用降雨為主，隨著農業灌溉設施的完備，農作物生長期間的用水需求以灌溉(以人工方式供給作物所需水量)為主，一般而言，降雨發生於作物生長期間時，如妥適利用則可減少灌溉供水量；現今灌溉設施不發達的國家或地區仍非常仰賴雨量對

農業生產的貢獻，如孟加拉(Rahman *et al.*, 2008)。以臺灣的灌溉事業而言，水稻為主要作物，由於雨量的有效利用可與取水引灌呈現互補作用，對於具高用水特性的水稻栽培，有效雨量的利用可減少自水庫、貯水池、河水、抽取地下水引灌量；在水資源開發困難的今日，善用水田的有效雨量，除可滿足水稻生長需求外，尚有蓄水調節、補助及涵養地下水之直接效益；例如自水庫或貯水池取水之灌溉系統，水田有效雨量的

利用可減少水庫放水量，間接將節餘水源蓄留於水庫，提高水庫配水的運用彈性以提供其他標的用水使用(Horikawa and Hayase, 2006)；對於河川取水型之灌溉系統而言，增加水田有效雨量有助於水源枯竭河川的水資源利用及分配，例如大安溪灌區；其次，臺灣的降雨雖因工業及都會區的發展，普遍具有酸雨(pH < 5.6)的特徵，全台降雨平均發生酸雨的機率為 52%，並以都會區為主(潛在酸雨區)，雖然部分區域的降雨具酸化的缺點，無助於提高灌溉水質，然而對於非都會區且引灌水質不佳的灌區而言，特別是灌溉水體遭受畜牧廢水、工業廢水排放而灌溉水質污染嚴重的灌區如桃園、臺中(大里、潭子)、彰化、高雄灌區等(農委會，2007)，作物生長期間如能利用降雨作為替代水源，減少引灌受污染之河川水體，相對可獲得較佳的灌溉水質水體；對抽取地下水之灌溉系統者而言(彰化及雲林灌區)，水田有效雨量減少地下水抽水量，減緩因超抽地下水造成之區域性的地層下陷，上述為不同取水系統灌區善用有效雨量之潛在效益。國內對於有效雨量的利用主要著重於水庫型灌區；對河川取水型之灌溉系統而言，可能因為灌區範圍廣大、配水式的灌溉管理供水型態無法因應臨時隨機性的降雨利用、河川水源普遍容易取得的概念(水量取得不受限於水庫的操作規則)，因此基於灌溉水源取得難易度及灌溉管理方式的不同，經陳豐文等(2005)調查結果顯示有效雨量預估及利用的重視程度，國內水庫型的灌區(桃園、石門、嘉南灌區)普遍高於非水庫型灌區(宜蘭、彰化、高雄、臺東灌區…)

Horikawa and Hayase (2006)以灌溉條件與臺灣相似的日本為例，約半數的降雨事件均可達成減少水田人工灌溉的目的，減少灌溉時間至少 15 小時，約 30%透過事前的田間操作可延續 3 日以上；同時灌溉系統操作過程亦達成減緩洪災的功能。由此顯見有效雨量對於農業灌溉、水資源利用、減災等多元的功能；因此本研究以台灣北部中部南部及東部等水資源分區，各選定桃園、台中、高雄及台東灌區，探討有效雨量利用於灌溉之各項特性。

二、有效雨量方法回顧及比較

2.1 有效雨量定義的釐清

張建勛(1970)回顧許多灌溉文獻發現有效雨量尚未有完善的解釋或定義，僅為一項觀念或構想；曹以松(1973)指出有效雨量(Effective rainfall)與可利用雨量(Available rainfall)並不相同，可利用為有效之先決條件，作物生長季節的天然降雨均為可利用雨量，但非全部有效，因此可利用雨量未必是有效雨量，而有效雨量則必為可利用雨量之一部份。回顧過去諸多研究顯示，許多研究從不同觀點探討有效雨量，對於有效雨量的定義不盡相同，諸如 Krul and Liefrinck (1946)以地下水的觀點視之，定義有效雨量為降雨量可到達地下水位者稱之；李德滋(1955)定義有效雨量為作物栽培期內，可能利用於灌溉之降雨量。Hayes and Buell (1955)認為有效雨量應是可利用於作物生長者，其量為降雨扣除蒸發及逕流者；Ogrosky and Mockus (1964)看法與 Hayes and Buell (1955)相同，但強調應於降雨發生後土壤為飽和狀態下或已灌溉下仍產生的蒸發及逕流者。Suzuki (1984); Odhiambo and Murty (1996)以水田為例，說明降雨量超過田區產生逕流後，仍蓄存於田區的雨量；雨量無法產生逕流者，則為無效雨量；其與 Yonts and Klocke (1985)蓄存於土壤層而未產生逕流者可視為有效雨量，雨量小於 0.3 inch (7.62 mm)時為無效雨量的看法相反。Jackson (1992)定義為作物生長期間之降水，可以成為作物用水量者，不包括根系土層以下之滲漏與地面逕流。駱安華(1962)認為降雨落於灌區，可增加土壤含水量，供給作物之消耗水量者稱之。秦立德(1965)定義使作物生長不受抑制，產量可維持正常之適時適量的降雨。曹以松(1966)定義為凡天然降雨降於作物生長季節，其降雨可供作物利用成長或能減少灌溉需水量者即為有效雨量。USDA (1967); Obreza and Pitts (2002); Rahman *et al.* (2008)明確說明需可為作物利用，符合作物消耗的水量稱之；其與劉戰東等(2007)以旱作栽培為前提之定義相符，即滿足作物蒸發散量者，因此降雨產生滲漏量的部分為無效雨量。農復會

(1970)；陳獻(1979)以灌溉管理的觀點說明雨量需與灌溉具相同效果者稱之，能減少灌溉量之雨量皆視為有效雨量。Miller and Thompson (1970)定義有效雨量為降雨與蒸發的比值，其意義著重於強調降雨的有效性(Effectiveness of Rainfall)，以說明乾旱地區使用雨量灌溉的程度；張啓濱(1977)以作物、土壤水分、灌溉管理及經濟等四種不同觀點定義有效雨量，其中作物觀點與曹以松(1966)相同；Dastane (1978)說明有效雨量廣義的概念即是直接或間接降於灌區對作物生產有益者；陳獻(1989)將有效雨量歸類為田間型有效雨量、水源型有效雨量、實際有效雨量、計畫有效雨量等四種類型。上述對於有效雨量之定義基於觀點不同而有所差異；本研究探討的有效雨量定義乃從灌溉管理的觀點視之，即雨量必須與田間灌溉水量有相同效果，亦即雨量可以代替灌溉需水量的部分。

影響有效雨量估算因素甚多，作物別為決定有效雨量之主要因素，水稻及早作物之灌溉方法及用水需求差異甚大，水田注重給水，旱作灌溉則注重排水，因此就水資源調配利用之觀點，估算水田之有效雨量較具實質意義，旱作有效雨量之估算則對水資源調配助益甚微。旱作物有效雨量主要受降雨量、作物耗水量、土壤含水量等三大要素影響，水田有效雨量影響因素則繁雜許多，可歸類為田區影響因子(田埂高度、土壤類別、田間滲漏量)、氣候影響因子、耕作制度及田間灌溉管理、降雨影響因子(降雨時間分佈、降雨空間分佈、降雨強度與降雨日數)等(曹以松，1966、1972；張啓濱，1977；Dastane, 1978；Yonts and Klocke, 1985；陳豐文等，2004)。Al-Taher (1995)以沙烏地阿拉伯的 Abha 和 An-Nemas 區域的案例研究發現同一區域內不同土壤條件會產生不同的有效雨量、不同區域亦會產生空間的變化。

2.2 有效雨量的推估

有效雨量的推估可追溯至 Dakshinamurti *et al.* (1961)建立有效雨量、有效灌溉量與地下水位上升的關係式，並以印度農業工程研究所於

1942-1944 年雨季(7 月-12 月)的農地觀測數據顯示有效雨量利用率為 42-51%；有效雨量的推估方法，通常區分為旱作有效雨量及水田有效雨量。

2.2.1 旱作有效雨量

台灣對於旱作有效雨量之規劃，始於 1949 年經濟部水資會對於濁水溪北岸灌區土壤及需水量之研究，作物為甘蔗，將降雨事件區分為單獨降雨及連續降雨，以單日降雨為例，有效雨量範圍為 20-60 mm (秦立德，1965)；台灣大學農工系於 1962-1963 年進行大豆、甘薯旱作灌溉試驗，大豆有效雨量係假定連續降雨 2 日以上，降雨 30-60 mm/day 時以 70%計算之、甘薯則以全部雨量的 60%估計之。臺灣省水利局對於旱作灌溉有效雨量之計算規定根系土層田間含水量與降雨時土壤有效水份之差數為有效雨量，日雨量 5 mm 以下、灌溉後 24 小時內之降雨、超出根系土層田間含水量之降雨均為無效雨量(張啓濱，1977；陳獻，1979)。曹以松(1966)提倡有效水份收支平衡法，依據作物需水量、灌溉水深、降雨量及蒸發量配合灌溉計算尺估算。由於早期計算有效雨量時，大部分為手算法，曹以松 (1969；1970)開始以電腦輔助計算，以逐日計算法為基礎，透過作物需水量及一次灌溉最大水深的計算，建立適用於推估大區域灌區的有效雨量查圖法，並於苗栗後龍地區獲得良好成效，並於岡山地區計算無灌溉情形下的有效雨量。國外的方法部分，Herdhfield (1964)提出以年平均季雨量、蒸發量、淨灌溉用水量等參數建立作物生長季之有效降雨圖，惟該法不考慮土壤類別及氣候的動態變化特性，旱作有效雨量以土壤水分缺乏量 SMD 為上限；本法曾應用於推估模里西斯境內的甘蔗有效雨量 (Ratna *et al.*, 1998)。美國農業部 USDA (1967)發展的 SCS(1970 年後稱 TR-21)計算模式，本法基於土壤水分平衡原理，綜合考量降雨量、作物蒸發散量和灌溉因素，提出推估月有效雨量的經驗公式，因未考量作物、土壤種類、降雨強度等影響，因此推估結果較實際發生值偏高的現象(Dastane, 1978; Patwardhan *et al.*, 1990)；USDA-SCS 被廣泛使用，Al-Taher (1995)應用於評估沙烏地阿拉伯 Assir 山脈區域的小麥栽培的

灌溉需水量及有效雨量；Obreza and Pitts (2002) 推估南佛羅里達柑橘噴灌區的有效雨量，TR-21 (USDA-SCS) 的年有效雨量推估結果為 673 mm/yr，低於水收支平衡法驗證的 744 mm/yr，顯示該案例於土壤透水性不佳的條件下，實際可使用之有效雨量約比 TR-21 估計的結果還要高 10.5%；濕季發生高估而旱季低估的趨勢；Gislain (2008) 亦應用於推估盧安達 Nyagatare 地區樹薯及香蕉的有效雨量值。除上述 USDA-SCS 方法，許多學者採用簡單方式或經驗式進行推估；例如 Yomota and Ndegwa (1995) 以日本為例，旱作月有效雨量為灌區每日基本灌溉需水量與月份日數之乘積扣除每月實際灌溉需水量後求得，其基本假設為 5 mm/day 以下的雨量為蒸發損失、超過 30 mm/day 則產生深層滲漏及逕流，因此有效雨量範圍為 5-30 mm/day。Van der Gulik (2004) 指出加拿大卑詩省地區計算旱作有效雨量採用降雨量扣除 5 mm 後的 75% 計算之。劉戰東等(2007) 採用簡單經驗公式法推估中國山西及陝西等地區旱作有效雨量，即降雨量乘上某係數的方式，方法簡單、但參數少導致精度不佳。Du Plessis (2001) 以那米比亞的 Estosha 國家公園為例，觀測 1994-1995 年雨季期間的日雨量與每旬牧草生長狀態，並建立關係式用以推估牧草的有效雨量，結果顯示該地區年雨量約 35.5-57.6% 為有效雨量。此外，以統計回歸方式確認雨量及有效雨量關係式後進行推估的方式亦被許多學者採用，包含千家正照等(1991) 利用線性複迴歸模式進行日本旱作有效雨量的推估；劉戰東等(2009) 亦利用中國河南地區 2004-2006 年冬小麥耕作試驗，獲得雨量與有效雨量呈現二次拋物線關係式，並藉此回歸式推估有效雨量。

2.2.2 水田有效雨量

由於臺灣的農業灌溉事業，早期迄今均以水田為主軸，因此水田有效雨量對於國內的農業灌溉及其他標的用水調配量均有影響性。國內外對於水田有效雨量計算方法甚多，以臺灣為例，桃園大圳及嘉南大圳初期將有效雨量區分為三個階段計算之，以桃園大圳為例，工程規劃階段以 52% 的有效雨量率訂為有效雨量；灌溉計劃階段

以 3-36 mm 水深為有效雨量範圍；配水管理階段則為 5-33 mm (秦立德, 1965)。薛觀瀛(1963) 利用雨量及作物之關係推導有效雨量，並利用日雨量 ≤ 50 mm 的簡單式計算有效雨量。張啓濱(1977) 以水稻輪流灌溉制度為前提，以逐日灌溉水量及降雨量決定是否應給水或斷水，全面性計算全台灣 81 處雨量站的有效雨量。陳獻(1979) 提出旬、月、期作有效雨量模型，以桃園地區為例，結果顯示旬有效雨量模型適用範圍廣。陸允熙(1980) 利用迴歸方式推求雙曲線方程式，應用於印尼之結果顯示其相關性極佳。朱榮彬(1988) 提出雨量及田區消耗水量比較法，提出有效雨量為滿足作物需水量與田間滲漏量的最小值的觀點進行計算；童慶斌等(2000) 亦採用本法估算之。

除了臺灣使用的推估方法，國外亦有許多不同推估理論及方法，USDA (1967) 發展的 USDA-SCS 計算模式亦廣泛應用於水田有效雨量推估(Cuenca, 1989; Jensen *et al.*, 1990; Patwardhan *et al.*, 1990)；MOAF (2000) 以南韓水田案例說明 USDA-SCS 法的推估結果與實測值相似；Kuo *et al.* (2006) 應用 USDA-SCS 推估國內嘉南灌區水稻有效雨量；Chung *et al.* (2011) 評估南韓主要稻作區的有效雨量，並進一步探討受氣候變遷下，未來雨量雖有增加 25-53% 的趨勢，惟有效雨量部分僅增加 2-8%，其原因為大部分降雨增量發生於灌溉尖峰用水期後，因此無法顯著提高有效雨量的利用量。Dastane (1978) 於 FAO 的報告推薦印度推估法-1、印度推估法-2、越南推估法、蒸發散-降雨比率法等；印度推估法-1 採用總雨量 50-80% 為有效雨量、印度推估法-2 界定有效雨量範圍為 6.25-75 mm/day 及 125 mm/10-day 上限，越南推估法則是界定有效雨量範圍為 5-50 mm/day、蒸發散-降雨比率法已應用於印度及菲律賓(IRRI, 1981)。Dhandapani (1980) 以日本、中國及印度的推估法探討有效雨量對印度水田灌溉用水需求的貢獻及其時空分佈時，分析 1962-1975 年雨量記錄，顯示印尼的水田有效雨量可以雨量發生機率 65% 計算之。另外日本農林省計算法將有效雨量分為單日降雨及連續降雨計算，以單日降雨為例，採用有效雨量下限為 5

mm、上限為 50-80 mm，五日內總雨量再以 70-80% 估算後重新分配為日有效雨量(Shih, 1991)。涉谷勤治郎(1982)利用線性迴歸方式進行推估。

上述計算水田有效雨量的方法各有其優缺點，Mohan *et al.* (1996)比較 Dastane (1978)推薦的 4 種方法、USDA-SCS 法、水收支平衡法等，結果顯示印度推估法-2、潛勢蒸發散-降雨比率法(Potential Evapotranspiration/Precipitation Ratio method)的結果與水收支平衡法相似、USDA-SCS 法應用於推估水田有效雨量之趨勢與應用於旱作時相反，其有效雨量值低於其他 5 種方法。Rahman *et al.* (2008)使用 Renfro Equation Method, R-E 法(Chow, 1964)、美國墾務局法(U.S. Bureau of Reclamation method, USBR)、USDA-SCS、潛勢蒸發散-降雨比率法等 4 種方法估算孟加拉東南部兩個主要作物生長期(豐水期 7-10 月、枯水期 12-3 月)的有效雨量分佈，枯水期的推估結果顯示 USDA-SCS 的 63.30-76.79%低於其他 3 種方法(100%)，豐水期時則以 USBR 法高於其他 3 種方法；Adnan and Khan (2009)則是利用巴基斯坦 58 處氣象站資料，同樣採用上述 4 種方法計算有效雨量，並得到不同方法的特點，該研究認為 R-E 法並不適用於短期間的規劃、USBR 法適用於豪大雨或高降雨強度事件、USDA-SCS 則適用於低降雨強度的事件，以灌溉計畫預備規劃階段而言，潛勢蒸發散-降雨比率法優於其他方法。

2.2.3 計畫有效雨量的推估

有效雨量預測主要為推估計畫有效雨量，作為農田水利會編列下一年度灌溉用水計畫之用，亦即一般農田水利會年度灌溉計畫，需按某種有效雨量發生機會，求取單一值為計畫有效雨量。計畫有效雨量可定義為依水文的歷史資料與灌溉管理方式於計算有效雨量後依某種可能發生機率推估往後可能發生的有效雨量值。Shih (1991)曾認為有效雨量無法預測，因此灌溉計畫訂定時不應考量有效雨量；事實上，有效雨量編列於灌溉計畫中已行之有年，尤其對水庫型灌區的調配用水更為重要；Rahman *et al.* (2008)；Adnan and Khan (2009)以孟加拉及巴基斯坦利用

有效雨量的經驗顯示將有效雨量納入灌溉計畫可以達成灌溉用水利用最佳化的目標。過去常用之計畫有效雨量推估(預測)方法包含：(1) 5 年平均日雨量法、(2)月平均雨量百分比法、(3) 20 年第 4 枯水月法、(4)乾早年條件法、(5)超越機率法、(6)機率分佈法。其原理分別簡述：5 年平均日雨量法採用連續 5 年日雨量記錄，30 mm/day 以下為有效雨量，累計為月有效雨量後，取 5 年平均值作為各月份之平均有效雨量，此方法在雲林、嘉南、高雄等地採用(葉在德, 1995；陳豐文等, 2005)，惟引用 5 年水文資料是否具代表性仍有待商榷。月平均雨量百分比法以歷年各月平均雨量之 60%計算，上限值為 180 mm；此法雖有計算簡便之優點，但未考慮降雨時間分佈，其值亦僅為粗估值，精確度明顯不足。李錦育等(2004)以本法配合 GIS 軟體計算屏東水利會隘寮灌區之旱作有效雨量。20 年第 4 枯水月法以過去 20 年間每月有效雨量之第 4 枯水月值為計畫有效雨量，亦即過去 20 年間每月之倒數第 4 位月有效雨量為計畫月有效雨量值，桃園水利會目前即採用此法(Tsai *et al.*, 2005)，此法雖有計算簡便之優點，但易發生某些月份之有效雨量值偏小，本法雖無考慮統計分佈型態，但已具機率概念。乾早年條件法以某乾旱發生重現期距下之乾早年的各月雨量作為計畫有效雨量，台灣省水利局(1975)以 10 年發生 1 次乾早年的頻率為基準分析 1927-1963 年之年有效雨量，結果採用 1934 年之有效雨量 618 mm/yr，該年之各月份有效雨量即編列為石門大圳灌溉計畫書之計畫有效雨量，本法有可能發生部分月份的計畫有效雨量為極端值的現象；高橋賢一(2001)亦採用 10 年發生一次乾早年的條件下，將日雨量 5-80 mm 的 80%視為有效雨量。

超越機率法(Probability of Exceedance)應用於有效雨量推估預測，其有效雨量值為超越機率 80%條件之時對應值的 70%為之(Smith, 1992)；Panigrahi *et al.* (1992)即採用超越機率法與改良的偉伯點繪法(Modified Weibul's Plotting Position)進行月有效雨量推估；Tekwa and Bwade (2011)使用 10 年雨量資料，以超越機率法配合甘伯法

(Gamble approach)推估奈及利亞東北部 Maiduguri 地區月有效雨量，結果顯示月有效雨量最高與最低值分別發生於 8 月(3.91 mm/day)及 6 月(1.09 mm/day)。

機率分佈法由日有效雨量或月有效雨量為基本數據，依據不同的機率分佈方法進行分析，以獲得不同發生機率之計畫有效雨量。農工中心(1996)利用伽瑪分佈計算石門水庫灌區 90%、80%、75%、67%及 10%發生機率下之計畫有效雨量，結果顯示伽瑪分佈模式發生機率 10%時之數值偏高，當時灌溉計畫表所列數值與伽瑪分佈法(90%)結果相似。王心怡(1999)；Tsai *et al.* (2005)綜合伽瑪分佈、常態分佈、20 年第 4 枯水月法，以可靠度最佳之分佈為計算模式計算桃園大圳灌區計畫月有效雨量；陳豐文等(2002)以石門大圳灌區為例，比較 5 年平均日雨量法、月平均雨量百分比法、20 年第 4 枯水月法、20 年第 5 枯水月法、機率分佈法等推估月計畫有效雨量的成果顯示 5 年平均日雨量法及月平均雨量百分比法之推估結果偏高，20 年第 5 枯水月法優於 20 年第 4 枯水月法，其與機率分佈法具相似的結果與趨勢；陳豐文等(2003)修正水門操作模式配合機率分佈法計算深水灌溉制度下之計畫有效雨量，以石門大圳灌區為例，兩期作約可提高約 1,907 萬噸的降雨利用量。Kar *et al.* (2004)利用 30 年的雨量資料，配合以週為時間單位之降雨或然率的概念及乾溼季節的分析來預測決定東印度旱作稻田地區合適耕種的時間。

三、材料與方法

3.1 研究區域及資料

本研究為評估臺灣不同區域的有效雨量分佈趨勢及利用潛勢，由臺灣水資源四大分區中的 17 處農田水利會灌區：北部(宜蘭、北基、瑠公、七星、桃園、石門、新竹灌區)、中部(苗栗、臺中、南投、彰化灌區)、南部(雲林、嘉南、高雄、屏東灌區)、東部(臺東及花蓮灌區)，分別擇一灌區進行分析，依序分別為桃園、臺中、高雄及臺東灌區，研究灌區分佈位置如圖 1 所示。農田水利會聯合會(2011)統計 2010 年度資料顯示桃園

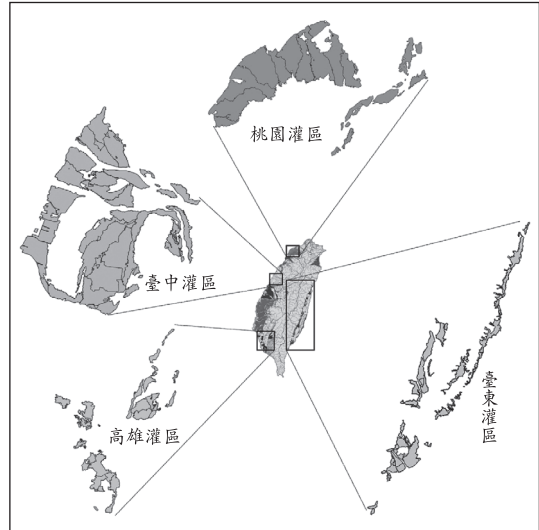


圖 1 研究區域

灌區之灌溉面積約 24,650 ha，主要灌溉水源為石門水庫；臺中灌區約 27,658 ha，主要灌溉水源為大甲溪、大安溪、烏溪等河川水源；高雄灌區約 20,274 ha，主要灌溉水源為二仁溪、阿公店水庫、高屏溪、荖濃溪、旗山溪等河川水源；臺東灌區約 14,318 ha，主要灌溉水源為太麻里溪、秀姑巒溪、卑南溪、知本溪、鹿野溪、鹿寮溪等河川水源。

資料蒐集包含雨量站座標定位及日雨量記錄。其中雨量站座標定位使用 TW97 系統，灌區內各雨量站座標定位成果如表 1 所示。雨量資料的蒐集，考量本文的研究區域以農田水利會灌區為主體，因此雨量資料以農田水利會工作站(雨量站)既有的觀測記錄為主，由於各農田水利會工作站設站年份不一，若農田水利會系統之雨量資料不齊時，改以水利署測站或氣象局測站輔助取代之，以求雨量資料之完整性，資料型態需為日雨量(mm/day)資料；日雨量資料均採用起迄期間一致者，其中桃園灌區共計採用 19 處雨量站，日雨量記錄為 1955-2003 年、臺中灌區為 13 處雨量站，日雨量記錄為 1976-2006 年、高雄灌區為 14 處雨量站，日雨量記錄為 1981-2004 年、臺東灌區為 7 處雨量站，日雨量記錄為 1975-2005 年。由於記錄年限會影響機率分析成果，雨量資料引

表 1 研究區域內各雨量站座標及權重因子一覽

序號	桃園灌區			臺中灌區				高雄灌區				臺東灌區				
	測站	E	N	W	測站	E	N	W	測站	E	N	W	測站	E	N	W
1	桃園	278901	2765072	0.039	大南	230035	2679400	0.025	左營	177406	2509360	0.075	知本	255450	2513301	0.128
2	山腳	278972	2775488	0.017	東勢	232925	2682495	0.013	楠梓	180958	2514674	0.042	東河	281051	2540836	0.186
3	大竹	276335	2768347	0.036	卓蘭	232920	2689458	0.021	鳥松	183517	2505530	0.055	成功	288957	2555456	0.164
4	大園	270182	2773263	0.106	泰安	224891	2691022	0.022	鳳山	183927	2503265	0.049	長濱	296335	2579311	0.257
5	大崙	268255	2764473	0.063	苑裡	214889	2704216	0.065	小港	185376	2497464	0.134	鹿野	261930	2535583	0.096
6	草漯	264541	2771312	0.073	月眉	217962	2689988	0.043	大寮	187838	2500895	0.137	關山	266521	2549650	0.089
7	新坡	263792	2767178	0.069	磁磘	214993	2691924	0.040	岡山	177640	2522100	0.062	池上	272009	2557812	0.080
8	觀音	258381	2769478	0.075	日南	215012	2697246	0.080	阿蓮	180988	2530753	0.054				
9	新屋	260243	2764911	0.076	大甲	211781	2693821	0.085	竹子門	207282	2529874	0.057				
10	永安	254652	2764520	0.088	清水	206763	2684744	0.106	旗山	196860	2531144	0.083				
11	大坡	254349	2765157	0.045	豐原	221166	2683199	0.121	中壇	201092	2531973	0.116				
12	湖口	254512	2755500	0.123	大雅	215702	2683583	0.163	吉洋	202138	2526519	0.006				
13	豐野	258808	2759162	0.042	大肚	203629	2672182	0.217	湖內	167721	2534618	0.060				
14	大溪	278929	2751837	0.016					月眉	204353	2542393	0.071				
15	新莊	295076	2769113	0.031												
16	海山	296336	2767004	0.009												
17	柑園	289336	2760982	0.034												
18	水尾	274083	2764205	0.036												
19	缺子	279104	2755212	0.023												

註：W 為加權因子。

用過短亦有代表性不足之虞，因此本文 3.4 節建立的評估模式輸入雨量資料以 20 年為主，其次本文為比較不同水資源分區內灌區的有效雨量的發生總量、時間分佈趨勢、有效雨量利用比例、有效雨量降雨發生機率分配模式等特性，本文採用的雨量站記錄統一使用 1981-2000 年期間，共計 20 年的日降雨資料進行分析，其考量因素為避免不同灌區引用的雨量資料期限不同，可能發生某些灌區引用的記錄期間發生極端水文事件(極端枯旱或極端多雨)，而其他灌區引用雨量資料期限未涵蓋上述發生極端水文事件時，於分析探討區域別灌區的有效雨量差異性時，不易釐清是區域特性造成的差異或是引用雨量資料期限不同所致；舉例來說，假設桃園灌區採用 1980-2000 年期間資料，而高雄灌區採用 1975-2005 年的資料，若 1978 及 2003 年發生水文特殊現象(極端少雨或高雨量的極端現象)，這 2 年的水文(降雨)數據會反應至高雄灌區灌區的推估結果，而桃園灌區因採用的記錄年限並沒有

涵蓋到這 2 年的資料，因此統計特性不受這 2 次極端值的影響，綜合評估時，不易評估不同區域別的有效雨量差異原因為區域本身的特性造成或是因彼此採用不同的雨量記錄期間所造成，因此本研究基於上述因素的考量，才會希望將 4 個區域所採用的降雨資料長度及期間統一，以利比較。當然如果是個別水利會灌區要針對該水利會的有效雨量進行推估，可以針對不同資料時間分別推估比較之，以建立屬於該灌區專屬的 Optimization Model。

3.2 研究流程及步驟

本研究建立之水田有效雨量模式，主要以水田灌溉為研究對象，探討兩期作灌溉期間之發生雨量可作為灌溉用水用途的各種潛在利用量，應用對象僅以農田水利會灌溉管理系統為主，本研究應用上述理論進行單一站別的日有效雨量、月有效雨量的推估、月有效雨量預測模式建立及區域有效雨量預測均依據圖 2 所列

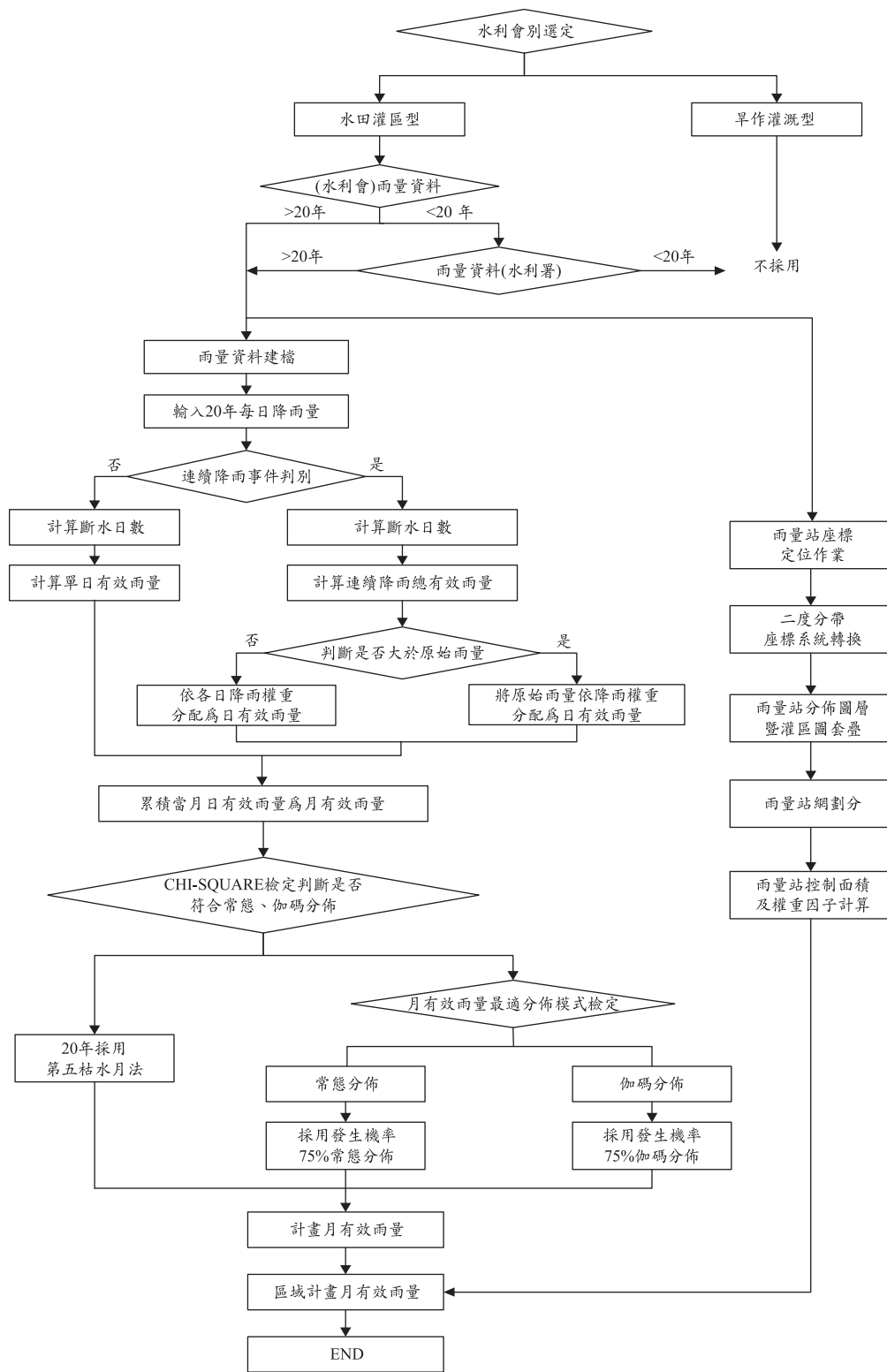


圖 2 本研究之有效雨量推估流程

研究流程執行之。主要步驟如下：(1)建立各雨量站 20 年的日雨量資料為輸入資料。(2)區分為單日降雨事件或連續降雨事件，依水門操作法計算各雨量站之日有效雨量(mm/day)及月有效雨量(mm/month)。(3)建立計畫月有效雨量(mm/month)的連續型機率分配模式，包含常態分佈(Normal Distribution)、伽瑪分佈(Gamma Distribution)及 20 年第 5 枯水月法等 3 種。(4)優選最佳的連續型機率分配模式：以 20 年月有效雨量進行上述 3 種機率分配模式之適合度(Goodness of Fit)檢定，評估各月份之最適分佈，以最佳的機率分配模式作為推估該站該月份之計畫月有效雨量(mm/month)，優選原則以適合度檢定結果決定之，其中 Chi-Square 檢定法與 Kolmogorov-Smirnov 檢定法均為常用的適合度檢定方法(Walpole and Myers, 1972; Hahn and Shapiro, 1994)，本研究採用適用性廣之 Chi-Square 檢定作為優選模式的判別依據。其檢定過程，先進行常態分佈與伽瑪分佈的檢定，並符合顯著水準(Significance level $\alpha = 0.05$)者，再依其最適分佈之發生機率 75%作為計畫有效雨量值，若常態分佈與伽瑪分佈均同時無法通過顯著水準($\alpha = 0.05$)時，則改採 20 年第 5 枯水月法推估之。(5)區域有效雨量的計算：應用 Thiessen polygon method (徐昇多邊形法)，將桃園、臺中、高雄、臺東灌區內單一雨量站之有效雨量及計畫有效雨量，轉化為區域有效雨量，藉以評估有效雨量於空間分佈的差異、並可以灌區系統整體評估有效雨量的各項利用趨勢。

3.3 水門操作法

本文對於有效雨量的推估分為兩階段，第一階段為降雨發生時有效雨量的計算(判定有效或無效雨量)，第二階段則以第一階段的成果為基礎，以連續型機率分配模式進行推估(詳 3.4 節)。本節以說明第一階段的有效雨量計算為主，當降雨事件發生時，以單一坵塊或小面積灌區而言，有效雨量可以人工觀測方式記錄每日蒸發散量、引水量、田間湛水深、降雨量等

參數以逐日計算法計算每一降雨事件的有效雨量值；然而應用於大面積灌區時，本法難以施行；因此如何取代上述觀測方式而可符合實際發生狀態下計算有效雨量值則甚為重要。本法認為應將降雨事件區分為單日降雨及連日降雨分別評估之，其目的均以計算單日有效雨量為主(mm/day)，再累計為月有效雨量的方式較直接採用月雨量值並依某一比例推估的方式更為合理。每日有效雨量值的判定準則為何？本文基於有效雨量為降雨期間作為替代灌溉用水為前提的觀點，以水利會實務操作灌溉用水的法則進行估算，其中水門設施的操作及具調節配水功能的池塘被認為是影響雨量利用之重要田間設施(台灣省水利局，1982；Horikawa and Hayase, 2006)；陳獻(1989)基於有效雨量的妥適利用乃建立於水利會訂定灌溉計畫與田間管理之實際操作一致的前提下，並依雨量規模決定斷水時間的觀點提出的水門操作法則；本文認同陳獻(1989)的方法符合依降雨量規模與單日灌溉水量比較以決定繼續供水或停止灌溉之作法，由於一般灌溉系統分佈範圍廣泛，依據降雨發生與否進行斷水的實務操作時，事實上一般存在因關閉灌溉系統上游或田間水門所產生的時間差問題，即使立即關閉水門，各級灌溉水路的水仍會慢慢往下游流動，此一部份水量則未因有效雨量的利用而節餘，上述技術性的操作問題尚未克服前，依據水門操作法則計算而得的有效雨量應視為有效雨量潛勢值，若上述技術性問題假設以埤塘等中間蓄水設施將因時間差造成的灌溉用水予以攔蓄並於下次非降雨日施灌時，此時的有效雨量潛勢值才等同於替代灌溉水量；因此本研究採用水門操作法則進行有效雨量的判定及計算，於現有的田間管理制度下，其成果屬於有效雨量潛勢值。水門操作法在有效雨量之應用上屬於預扣與後扣法兼用型，即於擬定灌溉用水計畫時預先扣除有效雨量並於灌溉期間依實際降雨量施行減少供水或停水之措施，由於本法利用田間水門實際操作以配合灌區實際降雨狀況，較預扣法更能符合灌區實際有效雨量。水門操作法之原理如

表 2 水門操作法估算法則

降雨日數	降雨量 R (mm)	斷水時間 Y (日)	日有效雨量 ER (mm)
1 日	$R \leq 5$	不斷水	0
	$5 < R \leq 9$	1	6
	$9 < R \leq 30$	$1 + (R - 9)/6$	$[1 + (R - 9)/6] \cdot d ; \leq R$
	$30 < R$	$1 + (30 - 9)/6$	$[1 + (30 - 9)/6] \cdot d ; \leq R$
N 日	$\Sigma R \leq 5$	不斷水	0
	$5 < \Sigma R \leq 9$	1	6
	$9 < \Sigma R \leq 30$	$1 + (\Sigma R - 9)/6$	$\{[1 + (\Sigma R - 9)/6] \cdot d\} / N ; \leq R$
	$30 < \Sigma R$	$1 + [(30 - 9)/6] + N$	$\{[1 + [(30 - 9)/6] + N] \cdot d\} / N ; \leq R$

資料來源：臺灣省水利局(1982)；陳獻(1989)；Tsai *et al.* (2005)。

下：即一次降雨 R (mm)，則停灌 Y 天，則該次降雨之有效雨量 ER 為停灌日數 Y 與每日灌溉水深 d 之乘積，其數學表示式如(1)式；其中灌區因可能由不同土壤組成而有不同的灌溉計畫水深 d (mm/day)，本研究以保守估算的觀點進行評估，採用輕黏土的灌溉水深 6 mm/day 為標準。

$$ER_i = Y \cdot d ; \leq R \dots\dots\dots(1)$$

式中： d 為灌溉計畫之每日灌溉水深(mm/day)； R 為原始降雨量(mm)。

本研究採用的水門操作法之計算原則以桃園灌區的田間管理方法為基礎(臺灣省水利局，1982；陳獻，1989；Tsai *et al.*, 2005)，如下列 3 點，並依降雨日數、降雨量及斷水日數關係將有效雨量之計算式表示如表 2：(1)單獨日雨量在 5 mm 以下時照常放水。(2) 5-9 mm/day 者斷水一日，每增加 6 mm/day 增加斷水一日，但有效雨量以 30 mm 為限。(3)如降雨持續至 2 日以上，應就上述(2)之標準加每日田間消耗水深 6 mm/day 為有效雨量，予以計算斷水日數。由於土壤質地、田間管理方式均會影響有效雨量的估算，本研究為評估不同區域別灌區有效雨量的利用及差異，將以桃園灌區為主的水門操作法則應用於其他灌區時，其前提為將土壤條件均視為輕黏土的基準(亦即採用最保守評估標

準)，並於相同的田間灌溉管理方式下推估所獲得的成果。

3.4 連續型機率分配模式

本文估算有效雨量之基本假設為將日雨量的記錄視為連續分佈型態而非離散的型態，因此本研究對計畫有效雨量之預測推估採用連續型機率分配模式，包含常態分佈、伽瑪分佈及 20 年第 5 枯水月法，計算平水年的發生機率為 75% 之常態分佈與伽瑪分佈之計畫有效雨量值，再依 Chi-Square 檢定；優選各月份最佳的連續型機率分配模式；本推估模式基本原理如下：

3.4.1 常態分佈模式

常態分佈(Normal Distribution)又稱為高斯分佈(Gaussian Distribution)，為連續型機率分配模式中最高及最重要的分配模式，其函數表示式如(2)式，將(2)式積分如(3)式(Tsokos,1972; Walpole and Myers, 1972; Hahn and Shapiro, 1994)，應用(3)式可推求(預測)發生某一機率之月有效雨量，本研究設定大於 75% (亦即某一值不發生機率小於 25%)。

$$n(x, \mu, \sigma) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-(1/2)[(x-\mu)/\sigma]^2} ; -\infty < x < \infty \dots\dots\dots(2)$$

$$P(x_1 < x < x_2) = \int_{x_1}^{x_2} n(x; \mu, \sigma) dx = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \int_{x_1}^{x_2} e^{-(1/2)[(x-\mu)/\sigma]^2} dx = 25\% \dots\dots\dots(3)$$

式中： x 為隨機變數； μ 及 σ 為隨機變數 x 的平均數及變異數； $\pi = 3.14159\dots$ ； $e = 2.71828\dots$ 。

3.4.2 伽瑪分佈模式

伽瑪分佈(Gamma Distribution)的函數表示式如(4)式，當 $\alpha > 0$ 及 $\beta > 0$ 時，(4)式可表示為(5)式，當 $\alpha > 0$ ，利用分部積分法(Integrating by Parts)可算出 $\Gamma(\alpha)$ 之值，如(6)式，當 $\alpha = n$ 時修正如(7)式 (Tsokos,1972; Walpole and Myers, 1972; Hahn and Shapiro, 1994)；以本研究欲推求發生機率大

於 75% (亦即某一值不發生機率小於 25%) 之計畫月有效雨量為例，將(5)式函數積分如(8)式即可推求預測。

$$f(x) = \begin{cases} \frac{1}{\beta^\alpha \Gamma(\alpha)} x^{\alpha-1} e^{-x/\beta} & x > 0 \\ 0 & \text{elsewhere} \end{cases} \dots\dots\dots (4)$$

$$\Gamma(\alpha) = \int_0^\infty x^{\alpha-1} e^{-x} dx \dots\dots\dots (5)$$

$$\Gamma(\alpha) = (\alpha - 1)\Gamma(\alpha - 2) \dots\dots\dots (6)$$

$$\Gamma(n) = (n - 1)! \dots\dots\dots (7)$$

$$P(x_1 < x < x_2) = \int_{x_1}^{x_2} f(x) dx = \int_{x_1}^{x_2} \frac{1}{\beta^\alpha \Gamma(\alpha)} x^{\alpha-1} e^{-x/\beta} dx = 25\%; \mu = \alpha\beta; \sigma^2 = \alpha\beta^2 \dots\dots\dots (8)$$

3.4.3 20 年第 5 枯水月法

20 年第 5 枯水月法乃修正自 20 年第 4 枯水月法，由於 20 年第 4 枯水月相當於發生機率為 80%，與現行登記平水年發生機率 75% 不符，因此本法修正為 20 年第 5 枯水月法，其發生降雨機率即與平水年發生機率相符；本法具分析步驟簡易及避免極端值發生的特性，乃將單一測站各月份 20 年的月有效雨量依大小順序排列，擇定倒數第 5 順位的月有效雨量值作為該月份之計畫有效雨量。

3.5 區域有效雨量之推估方法

上述章節計算之有效雨量及計畫有效雨量均以工作站為單位，各別計算之。而農田水利會灌區內的各工作站皆須遵循同一灌溉計畫，因此各工作站於各月份皆採用相同有效雨量值，考量各工作站之降雨時空特性不一，因此若該工作站之實際有效雨量值遠高於灌溉計畫訂定者，則有浪費水資源之虞；反之，若該工作站之有效雨量值遠低於灌溉計畫訂定者，則易造成灌溉水源不足現象。本研究將單一測站成果轉化為區域有效雨量，將單一測站控制區域內的有效雨量視為均值，再依面積規模輔以權重計算全體灌區的區域有效雨量，藉以評估研究區域內整體的區域有效

雨量，以灌區系統整體評估有效雨量的各項利用趨勢；並可進一步探討各工作站之有效雨量值與灌溉計畫使用區域有效雨量值之差異，將各工作站之有效雨量值及本會之區域有效雨量值以逐月變化趨勢線共同比較之，評估各工作站與本會訂定之有效雨量值之差異性，以作為水利會未來是否訂定單一灌溉計畫或訂定各工作站專屬灌溉計畫的參考依據。

灌溉計畫之區域有效雨量的計算方式乃應用 Thiessen polygon method (徐昇多邊形法) 進行推估(Viesman *et al.*, 1977)，該法乃主要應用於推算集水區或平地區域內的平均降雨量，也廣泛應於農業灌溉區的區域平均雨量估算(Hajare *et al.*, 2008)，本文茲將 Thiessen Polygon 步驟簡述如下：(1)將所有 N 個相鄰之雨量站以直線兩兩相連，構成多個三角形。(2)建構各雨量站連線之垂直平分線，亦即做三角形各邊之垂直平分線，三邊之垂直平分線必交於一點，即三角形之外心。(3)連接各三角形之外心，或以垂直平分線交會形成 N 個多邊形，即構建徐昇多邊形網。

該法具有通用性質且精度佳的優點，但早期應用時因計算過程繁雜，人工分析不易，造成相關研究或分析上的不便，現今的研究過程可使用電腦軟體輔助推估。以 Thiessen Polygon 進行區

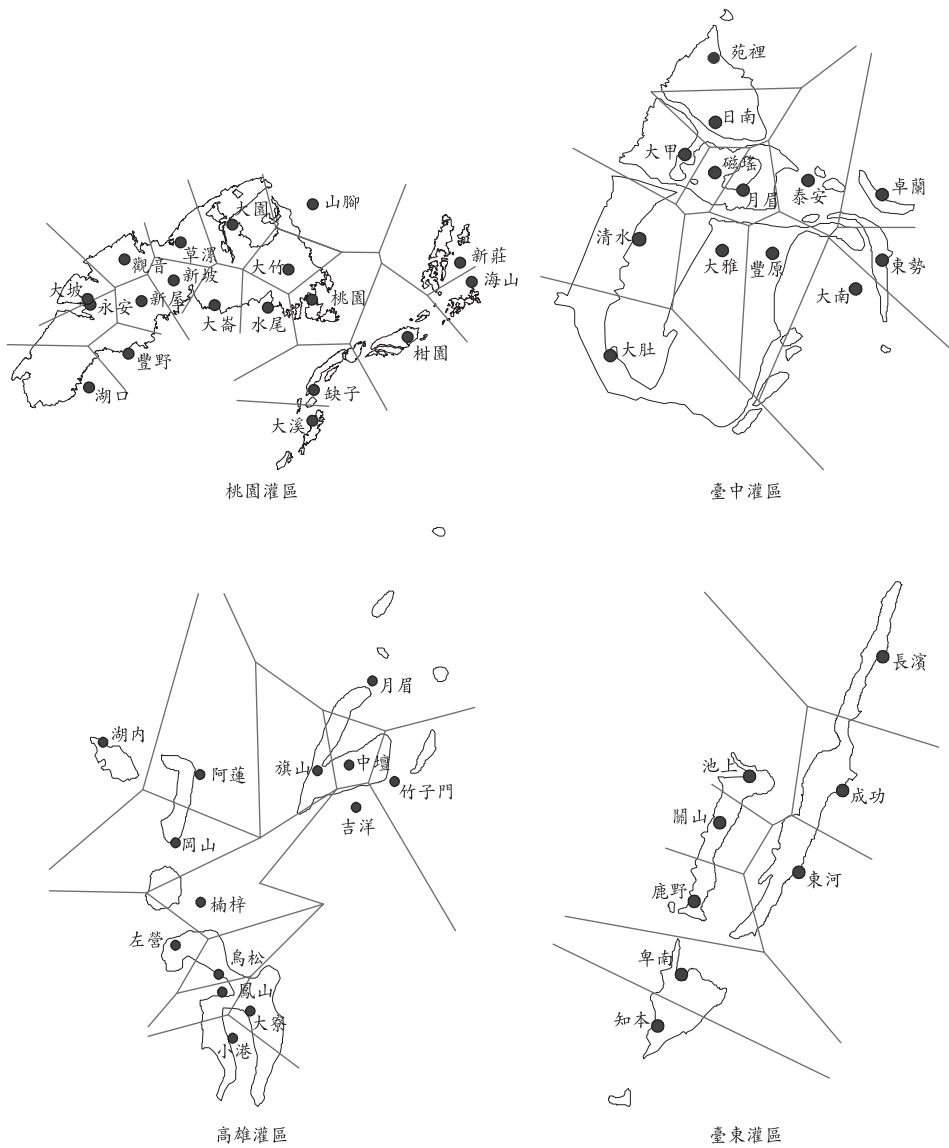


圖 3 本研究區域之 Thiessen Polygon 網格劃分結果

域有效雨量計算時，假設此多邊形內之雨量值即等於該雨量站之雨量，故每個雨量站所控制的範圍，即為該多邊形之面積 A_i 。故將各雨量站實測之雨量記錄 P_i 乘以各站之控制面積 A_i ，然後求其總和，再以總灌區面積除之，即得灌區之平均雨量值，原始公式如(9)式，本研究為推估區域性的有效雨量，因此降雨參數修正為(10)式，(10)式可改由各雨量站的權重與有效雨量值的乘積表達，如(11)-(12)式：

$$\bar{P}_i = \frac{\sum_{j=1}^N P_j A_j}{\sum_{j=1}^N A_j} \dots\dots\dots (9)$$

$$\overline{ER}_i = \frac{\sum_{j=1}^N ER_j A_j}{\sum_{j=1}^N A_j} \dots\dots\dots (10)$$

$$\overline{ER}_i = \sum_{j=1}^N ER_j \cdot W_j \quad \dots\dots\dots(11)$$

$$W_j = \frac{A_j}{A_T} \quad \dots\dots\dots(12)$$

式中： \overline{P}_i 為農田水利會 i 灌區內的平均降雨量 (mm)； P_j 為雨量站 j 的降雨記錄(mm)； A_j 為雨量站 j 應用徐昇多邊形法的控制面積 (ha)； N 為農田水利會 i 的雨量站數量； \overline{ER}_i 為農田水利會 i 灌區內的平均有效雨量 (mm)； P_j 為雨量站 j 的降雨記錄(mm)； W_j 為雨量站 j 的加權因子(無因次)； A_T 為農田水利會 i 的總控制面積(ha)。

本文 4 處農田水利會灌區圖繪製及應用 Thiessen Polygon 劃分雨量站網之作業，均使用 Arc GIS 軟體及 AutoCAD 軟體輔助完成。各研究灌區之 Thiessen Polygon 網格劃分結果如圖 3 所示，各雨量站之權重因子計算乃依據各控制面積與灌區總面積資料配合(12)式計算如表 1，每一農田水利會灌區之權重因子總和均為 1.0。

四、結果與討論

4.1 單一雨量站有效雨量之推估

本文計算桃園、臺中、高雄及臺東灌區之有效雨量，以雨量站為獨立單位並各別計算之，共計演算 53 個雨量站之有效雨量，雨量輸入檔為日雨量資料，演算結束後之輸出成果的型式為月有效雨量，表 3-表 6 為應用水門操作法計算之有效雨量值及應用連續型機率分配模式優選後推估之計畫有效雨量值；表格內數據均為各雨量站於 1981-2000 年期間之 20 年的統計平均值，53 個雨量站演算結果均顯示計畫有效雨量值低於有效雨量平均值，其意義為計畫有效雨量為前一年度預測各月份可能發生的有效雨量值，採用平水年 75%的發生機率推估所致。

為評估臺灣四種水資源分區內的有效雨量利用率，本文茲將上述 53 個雨量站於 1981-2000 年期間推估 1-12 月有效雨量加總為年有效雨量 ER_a ，並與當年之年降雨記錄 R_a 比較可得有效雨

量利用率 ER_r ，如(13)式。

$$ER_r = \frac{ER_a}{R_a} \times 100\% \quad \dots\dots\dots(13)$$

年有效雨量利用率的評估結果如表 7 及圖 4 所示；圖 4 為該灌區內雨量站之 20 年雨量平均值與有效雨量計算後之各別利用率分佈特性。年雨量依豐沛程度排序分別為高雄(1,983 mm/yr)、桃園(1,830 mm/yr)、臺東(1,543 mm/yr)、臺中灌區(1,505 mm/yr)；若不考慮降雨量的時間分佈，僅以年雨量視之，高雄及桃園灌區的降雨特性相似，而臺中與臺東灌區則具相似的年雨量特性。進一步統計其年有效雨量，本文依該雨量站之控制權重經加權計算後，可得區域有效雨量的 20 年平均值，分析結果按數值高低依序為桃園(1,005 mm/yr)、高雄(809 mm/yr)、臺中(802 mm/yr)、臺東灌區(827 mm/yr)；年有效雨量利用率依序為桃園(54.9%)、臺中(53.6%)、臺東(49.6%)、高雄灌區(41.0%)。上述結果顯示高降雨量地區未必會產生有效雨量高利用率的現象，年雨量最高的高雄灌區卻產生有效雨量利用率最低的現象，其與臺東灌區之利用率均低於 50%；僅桃園及臺中灌區之利用率略高於 50%。有效雨量利用率之意義為該比例之降雨可經水門操作法加以利用於灌溉；有效雨量雖與天然雨量成正比，有效雨量利用率卻受限於降雨頻率及強度而定；其與 Yomota and Ndegwa (1995)於日本旱作區案例發現有效雨量利用率隨著總雨量降低而提升的現象相似；茲將本文推估的有效雨量利用率進一步與其他文獻比較，其結果與曹以松(1972)於麻豆水田區之 52.29%相似；低於台大實驗農場 1950-1954 年的平均值，一期作為 68.3%、二期作為 64.6% (駱安華, 1962)；另外南印度 Annamalaiinga 的水田案例顯示乾季及濕季的有效雨量利用率相似，其中水收支平衡法、印度推估法-2、蒸發散量-降雨比率法均顯示水田有效雨量利用率於乾季及濕季的比例分別為 77.3-80.9%及 72.2-82.6% (Mohan *et al.*, 1996)；孟加拉的案例顯示枯水期的有效率用率(R-E 法、USBR、蒸發散-降雨比率法等 3 種方法均 100%、

表 3 有效雨量及計畫有效雨量推估結果(桃園灌區)

序號	雨量站	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	
1	桃園	*	72.2	111.3	142.2	120.2	127.3	124.3	86.4	111.4	96.3	52.9	52.1	54.6
		**	39.6	76.1	115.5	82.0	93.1	81.8	58.6	88.7	61.9	27.2	28.8	35.0
2	山腳	*	84.5	115.0	135.9	118.6	118.7	100.9	58.7	73.9	89.0	57.8	63.8	71.0
		**	55.2	79.5	102.9	83.1	89.8	65.0	31.6	42.7	55.5	33.1	37.9	44.0
3	大竹	*	72.8	109.6	139.0	119.2	122.6	104.2	74.1	89.3	84.7	47.8	50.1	55.4
		**	46.2	73.1	114.8	83.4	100.5	67.4	45.1	61.1	51.5	23.5	28.2	34.5
4	大園	*	71.9	114.7	130.3	116.4	120.9	100.4	61.5	76.8	77.5	41.9	55.1	55.4
		**	42.0	74.4	102.4	85.9	88.6	68.8	36.5	45.5	49.1	22.5	29.3	35.0
5	大崙	*	65.9	112.0	135.2	116.7	122.2	100.5	67.9	86.8	83.1	49.1	53.1	59.7
		**	42.7	78.2	110.6	84.9	91.9	64.3	43.9	57.2	49.5	25.1	30.7	40.4
6	草漯	*	67.1	107.7	133.9	118.2	126.4	100.4	56.9	81.1	75.5	39.4	53.6	51.1
		**	33.8	69.0	105.2	83.2	90.2	69.2	32.2	46.0	41.9	20.9	22.1	31.5
7	新坡	*	74.2	108.9	140.1	120.0	123.7	96.4	60.7	81.3	79.8	45.6	55.3	60.0
		**	49.7	70.4	109.2	86.5	90.0	65.2	33.9	48.7	50.1	23.8	28.9	40.5
8	觀音	*	65.0	105.5	130.2	113.6	125.8	99.3	51.1	77.0	73.0	38.4	45.5	47.2
		**	37.8	64.9	101.5	79.2	94.1	69.1	28.1	46.0	40.5	19.4	24.6	34.0
9	新屋	*	69.9	106.1	137.0	117.3	120.5	103.1	61.1	88.7	80.2	44.0	51.3	55.7
		**	43.7	61.7	110.0	84.5	84.6	68.6	35.8	56.7	50.1	20.3	23.1	35.4
10	永安	*	64.9	100.2	130.4	115.9	115.1	100.1	54.1	84.9	78.1	40.2	47.4	50.0
		**	34.8	57.9	102.5	85.6	80.9	69.8	31.3	57.1	48.6	16.6	24.1	29.9
11	大坡	*	58.6	97.4	131.6	112.5	118.8	96.8	54.5	84.2	78.1	36.4	45.8	45.1
		**	28.5	53.9	103.1	81.7	85.4	65.5	31.8	57.3	47.6	13.7	23.4	25.2
12	湖口	*	46.7	45.5	69.8	60.1	77.1	80.3	51.6	64.6	50.2	32.8	22.1	30.2
		**	33.6	65.1	101.8	75.8	90.2	70.2	36.7	45.8	52.1	13.0	15.8	29.5
13	豐野	*	69.0	108.3	137.5	117.2	120.2	98.9	59.7	85.5	79.8	43.4	44.3	50.3
		**	43.2	69.8	110.4	84.8	85.6	70.1	35.7	52.1	53.5	20.7	17.3	33.4
14	大溪	*	83.4	114.0	139.1	115.1	143.0	144.5	122.5	137.6	100.3	64.2	54.9	67.2
		**	49.7	74.7	110.0	70.4	112.1	101.9	96.1	107.8	68.7	38.8	26.0	44.1
15	新莊	*	64.6	115.2	131.7	123.1	131.9	135.3	117.7	127.8	108.0	60.4	59.8	56.0
		**	32.6	77.0	107.8	87.1	101.6	102.4	100.8	92.4	70.5	33.6	37.6	36.5
16	海山	*	69.0	111.7	129.5	117.0	131.9	146.4	120.7	136.1	106.9	56.4	60.8	55.0
		**	39.8	74.7	101.1	82.7	101.1	97.0	97.6	105.7	69.2	27.6	37.6	34.5
17	柑園	*	68.8	112.3	132.8	116.9	130.8	144.9	119.8	141.7	105.0	65.8	63.1	56.6
		**	37.8	74.2	106.6	60.3	98.8	113.6	94.2	107.9	68.5	39.1	35.9	36.1
18	水尾	*	79.3	113.6	140.8	118.0	127.6	113.1	80.6	93.4	89.9	46.8	56.1	56.0
		**	49.3	77.9	111.0	82.1	96.3	73.1	51.7	62.9	54.0	25.5	28.4	36.0
19	缺子	*	84.3	121.1	146.9	128.5	136.9	138.8	113.8	130.8	99.1	69.9	59.9	64.4
		**	55.9	86.4	120.6	74.4	101.8	99.3	82.0	100.5	67.6	44.4	30.0	42.9
$\overline{ER}_{\text{桃園,w}}$			66.9	101.1	126.9	110.4	117.9	103.6	66.9	87.7	79.2	44.5	48.7	51.5
$\overline{ER}_{\text{桃園,f}}$			40.1	69.2	106.5	81.8	90.8	73.1	43.2	58.4	51.6	22.3	25.7	34.4

註¹：*值為應用水門操作法之月有效雨量平均值(1981-2000年)；**值為計畫月有效雨量預測值。

註²： $\overline{ER}_{\text{桃園,w}}$ 為桃園灌區區域月有效雨量； $\overline{ER}_{\text{桃園,f}}$ 區域計畫月有效雨量；單位為mm/month。

表 4 有效雨量及計畫有效雨量推估結果(臺中灌區)

序號	雨量站	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	
1	大南	*	29.5	84.5	94.5	105.1	124.2	156.6	143.2	160.2	72.7	14.1	13.1	22.6
		**	13.9	37.0	67.9	67.7	86.6	126.9	115.5	134.4	43.2	1.2	0.0	9.7
2	東勢	*	31.8	88.8	101.3	108.2	124.0	160.9	140.8	163.7	82.4	16.1	16.4	24.0
		**	17.0	45.6	76.3	59.2	90.3	132.0	110.6	134.7	53.3	0.0	0.0	7.0
3	卓蘭	*	31.6	86.2	98.5	104.6	121.6	145.6	123.6	155.7	73.8	13.8	14.1	22.2
		**	15.7	43.5	77.6	67.4	86.8	116.9	81.3	130.0	46.5	0.0	0.0	6.9
4	泰安	*	25.5	72.8	91.3	99.3	118.0	124.8	110.7	130.0	51.0	9.5	13.2	20.6
		**	12.0	30.8	61.1	68.0	86.7	90.5	76.0	79.0	27.6	0.0	0.0	6.4
5	苑裡	*	20.5	72.5	84.6	97.6	112.9	105.9	71.0	87.5	44.8	9.2	14.0	26.2
		**	5.9	33.8	60.5	64.6	79.2	75.5	43.7	53.1	20.6	0.0	0.0	11.2
6	月眉	*	25.1	77.7	86.3	106.1	114.6	118.2	101.4	110.5	54.5	9.6	13.6	21.4
		**	13.5	32.2	60.6	73.7	80.3	83.7	64.5	83.1	27.2	0.0	0.0	8.6
7	磁璠	*	27.7	78.8	88.2	102.5	117.8	120.5	83.9	102.9	49.6	9.7	14.8	20.1
		**	13.6	24.8	60.2	70.3	81.6	93.3	49.8	72.9	26.2	0.0	0.0	7.7
8	日南	*	24.3	74.5	84.0	96.7	113.3	110.6	73.0	90.1	47.1	10.8	14.5	22.2
		**	6.6	31.0	56.7	62.3	77.5	79.4	42.6	56.2	22.6	0.0	0.0	6.8
9	大甲	*	22.9	71.0	84.9	103.5	121.0	106.3	76.4	96.5	46.0	10.4	11.3	22.2
		**	8.5	28.6	58.0	65.9	87.1	77.8	48.5	67.9	22.0	0.0	0.0	6.5
10	清水	*	20.5	66.6	78.5	93.8	114.1	104.9	80.9	91.8	48.7	7.6	12.0	16.7
		**	0.0	23.9	50.4	58.6	81.8	79.4	47.5	68.3	20.5	0.0	0.0	3.9
11	豐原	*	29.8	84.0	94.9	101.6	121.7	126.7	115.9	129.3	66.0	10.9	18.4	23.5
		**	17.2	44.2	66.6	62.8	86.1	92.7	76.7	101.1	33.4	0.0	3.1	8.8
12	大雅	*	22.4	75.9	82.4	93.4	111.8	117.2	98.3	111.8	46.5	9.7	11.6	18.3
		**	11.4	35.5	55.2	60.7	80.0	80.1	69.3	82.9	13.3	0.0	0.0	3.6
13	大肚	*	19.4	66.4	71.0	90.4	102.7	112.5	93.4	95.3	46.0	7.5	12.8	18.3
		**	10.0	24.4	45.8	53.6	71.6	85.2	58.3	63.0	18.9	0.0	0.0	5.2
$ER_{臺中,w}$			23.4	73.8	83.0	96.9	113.4	116.3	93.9	106.4	51.1	9.5	13.5	20.4
$ER_{臺中,f}$			10.0	31.5	56.4	61.4	80.1	85.6	61.0	76.4	23.0	0.0	0.4	6.3

註¹: *值為應用水門操作法之月有效雨量平均值(1981-2000年); **值為計畫月有效雨量預測值。

註²: $ER_{臺中,w}$ 為臺中灌區區域月有效雨量; $ER_{臺中,f}$ 為區域計畫月有效雨量; 單位為 mm/month。

表 5 有效雨量及計畫有效雨量推估結果(高雄灌區)

序號	雨量站	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	
1	左營	*	10.0	24.1	32.2	54.4	102.2	118.4	122.7	146.3	73.4	20.0	10.7	10.9
		**	0.0	4.1	7.3	21.2	73.4	86.6	87.4	116.4	43.9	2.1	0.0	3.1
2	楠梓	*	8.5	24.6	29.3	59.1	101.4	123.2	120.7	145.1	88.1	16.8	11.3	8.3
		**	0.0	5.4	6.4	27.2	73.3	88.5	88.0	114.9	55.2	0.0	0.0	0.0
3	烏松	*	10.1	21.9	32.5	59.0	100.4	126.1	119.6	156.8	107.3	22.1	10.4	9.4
		**	0.8	3.7	7.9	26.0	74.2	95.9	87.3	124.4	70.4	0.0	0.0	0.0
4	鳳山	*	12.1	19.8	32.5	57.3	97.1	128.1	126.1	163.9	101.2	22.4	9.8	8.5
		**	0.0	2.7	4.2	27.5	75.5	99.5	92.5	135.4	61.1	3.9	0.0	0.0
5	小港	*	9.8	18.1	30.1	47.9	88.8	120.6	119.2	142.1	90.5	22.9	9.8	9.3
		**	0.0	0.0	5.2	19.2	63.0	94.9	89.0	107.5	58.5	0.0	0.0	0.0

表 5 有效雨量及計畫有效雨量推估結果(高雄灌區)(續)

序號	雨量站	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	
6	大寮	*	12.5	22.9	30.2	53.8	92.2	128.2	116.4	156.6	107.7	25.3	10.1	11.5
		**	0.0	0.0	5.0	23.0	64.3	98.3	82.0	130.1	72.8	0.0	0.0	0.0
7	岡山	*	11.5	24.6	34.5	60.0	98.4	113.8	115.8	137.2	76.1	17.2	11.1	9.6
		**	0.0	5.7	11.6	15.4	64.7	82.8	81.2	106.3	44.9	0.0	0.0	0.0
8	阿蓮	*	10.8	27.8	34.7	67.8	104.7	124.9	125.8	156.6	91.0	18.1	9.3	10.5
		**	0.0	7.1	9.3	31.4	73.7	89.7	89.3	109.7	59.9	0.0	0.0	0.0
9	竹子門	*	16.5	32.8	31.3	68.0	127.7	132.8	165.8	189.4	148.8	50.9	9.7	10.5
		**	3.8	9.6	8.1	37.3	101.0	103.4	135.9	169.2	110.2	24.6	0.0	3.1
10	旗山	*	11.0	29.7	36.3	62.9	118.6	135.2	143.1	168.1	120.2	33.4	9.6	10.1
		**	0.0	7.3	9.0	30.3	88.3	103.9	115.3	138.1	89.4	7.6	0.0	3.1
11	中壇	*	12.7	31.1	36.1	65.2	132.1	143.5	168.2	180.2	140.5	48.6	9.1	12.6
		**	0.0	7.0	9.0	31.1	98.5	114.7	141.0	158.2	109.9	24.3	0.0	3.4
12	吉洋	*	14.5	33.2	34.2	71.4	125.3	141.4	163.1	184.4	137.9	48.8	13.7	13.4
		**	0.0	9.3	9.3	40.7	94.3	111.2	132.8	155.8	99.1	19.4	0.0	3.6
13	湖內	*	9.8	28.6	26.6	60.3	93.7	105.4	103.7	137.1	74.0	17.7	10.9	7.6
		**	0.0	6.7	5.2	27.7	64.0	75.4	72.8	107.8	46.3	0.0	0.0	0.0
14	月眉	*	13.8	31.4	36.6	65.8	130.2	138.8	153.9	187.4	137.8	38.5	10.1	10.8
		**	0.0	7.7	11.1	37.3	98.7	102.3	124.4	166.5	104.5	10.4	0.0	2.1
$ER_{高雄,w}$			11.5	25.7	32.6	59.1	106.4	127.1	131.7	159.3	106.3	28.5	10.1	10.3
$ER_{高雄,f}$			0.3	4.6	7.5	26.7	77.4	96.7	100.2	130.3	73.5	6.0	0.0	1.2

註¹: *值為應用水門操作法之月有效雨量平均值(1981-2000年); **值為計畫月有效雨量預測值。

註²: $ER_{高雄,w}$ 為高雄灌區區域月有效雨量; $ER_{高雄,f}$ 為區域計畫月有效雨量; 單位為 mm/month。

表 6 有效雨量及計畫有效雨量推估結果(臺東灌區)

序號	雨量站	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	
1	知本	*	23.6	36.6	38.6	54.5	107.0	95.2	76.1	102.8	113.2	64.2	40.4	25.2
		**	8.5	12.4	11.3	20.3	66.7	48.8	50.1	63.9	76.6	23.8	15.9	8.2
2	東河	*	87.0	83.2	87.0	103.6	100.4	73.0	45.9	50.2	37.4	42.8	35.2	56.4
		**	12.6	21.2	18.2	26.6	59.4	66.5	37.5	65.5	75.0	43.7	27.3	16.8
3	成功	*	62.5	58.1	57.6	65.6	102.3	103.4	77.1	93.5	122.7	110.0	75.2	60.7
		**	41.5	38.8	23.8	35.3	69.0	61.8	51.9	60.9	85.5	78.8	45.0	32.3
4	長濱	*	77.6	54.7	48.4	60.8	108.7	90.4	66.6	88.1	133.0	109.1	88.0	73.1
		**	43.1	30.5	17.3	39.0	71.9	58.4	44.6	68.0	93.7	68.2	55.2	46.3
5	鹿野	*	32.3	45.4	45.9	59.4	105.0	103.9	81.4	122.1	123.0	79.9	48.7	33.9
		**	16.6	20.9	18.6	32.9	69.7	55.7	52.4	92.0	79.0	41.1	23.5	14.7
6	關山	*	26.7	45.3	39.7	45.6	106.1	109.0	84.1	126.4	121.6	76.3	42.1	23.2
		**	10.9	18.6	15.8	21.2	69.9	66.0	50.6	100.4	79.7	37.0	18.0	7.4
7	池上	*	22.6	42.4	38.4	40.3	101.4	102.6	94.6	122.4	128.4	71.5	38.6	17.8
		**	11.0	30.5	17.3	39.0	71.9	58.4	44.6	68.0	93.7	68.2	55.2	46.3
$ER_{臺東,w}$			44.2	44.3	43.8	53.4	82.0	74.1	55.0	72.4	82.4	63.8	44.4	38.3
$ER_{臺東,f}$			19.8	22.2	15.6	26.6	58.6	51.7	40.7	61.8	71.7	46.2	30.2	21.5

註¹: *值為應用水門操作法之月有效雨量平均值(1981-2000年); *值為計畫月有效雨量預測值。

註²: $ER_{臺東,w}$ 為臺東灌區區域月有效雨量; $ER_{臺東,f}$ 為區域計畫月有效雨量; 單位為 mm/month。

表 7 研究區域內年有效雨量利用率分析成果一覽

雨量站 序號	桃園灌區			臺中灌區			高雄灌區			臺東灌區		
	R_a	ER_a	ER_r	R_a	ER_a	ER_r	R_a	ER_a	ER_r	R_a	ER_a	ER_r
1	1,994	1,151	57.7	2,153	1,020	47.4	1,734	725	41.8	1,553	777	50.1
2	1,783	1,088	61.0	2,154	1,058	49.1	1,838	736	40.1	1,726	802	46.5
3	1,854	1,069	57.6	1,970	991	50.3	1,791	776	43.3	1,845	989	53.6
4	1,753	1,023	58.3	1,723	867	50.3	1,847	779	42.2	1,921	999	52.0
5	1,853	1,052	56.8	1,317	747	56.7	1,651	709	42.9	1,921	881	45.9
6	1,704	1,011	59.3	1,613	839	52.0	1,878	767	40.9	1,762	846	48.0
7	1,784	1,046	58.6	1,583	816	51.6	1,780	710	39.9	1,755	821	46.8
8	1,662	972	58.5	1,406	761	54.1	1,882	782	41.6			
9	1,829	1,035	56.6	1,488	772	51.9	2,570	984	38.3			
10	1,716	981	57.2	1,335	736	55.1	2,199	878	39.9			
11	1,693	960	56.7	1,809	923	51.0	2,480	980	39.5			
12	1,727	631	36.5	1,508	799	53.0	2,527	981	38.8			
13	1,776	1,014	57.1	1,299	736	56.7	1,614	675	41.8			
14	2,439	1,286	52.7				2,395	955	39.9			
15	2,268	1,232	54.3									
16	2,218	1,241	56.0									
17	2,285	1,259	55.1									
18	1,924	1,115	58.0									
19	2,318	1,295	55.8									
加權平均	1,830	1,005	54.89	1,505	802	53.6	1,983	809	41.0	1,797	827	49.6

註： R_a 為年雨量、 ER_a 為年有效雨量，單位為(mm/yr)； ER_r 為年有效雨量利用率(%)。

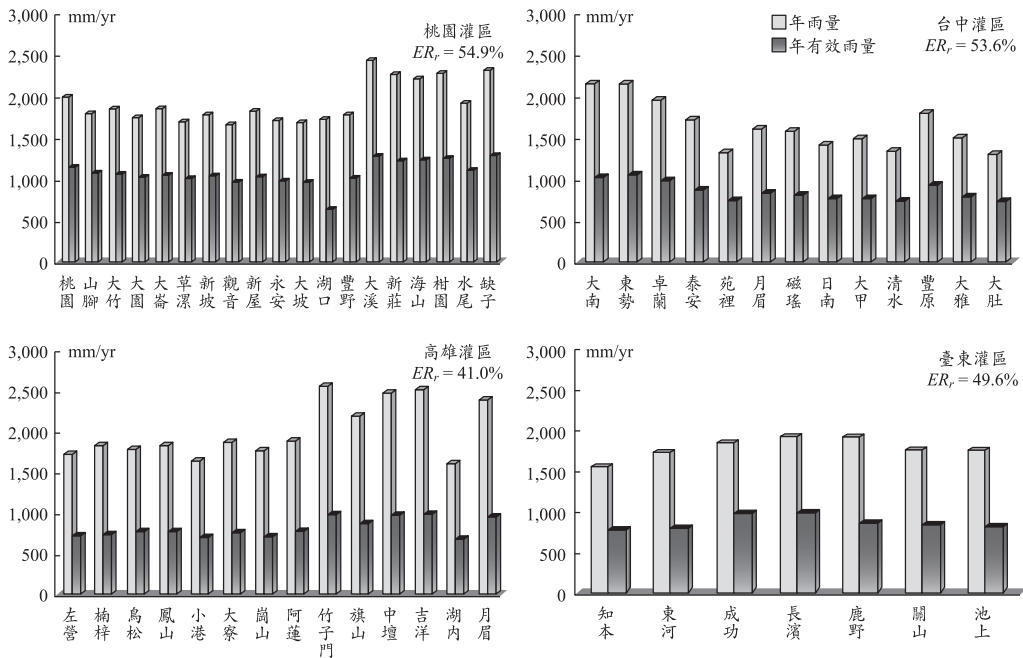


圖 4 研究灌區之年有效雨量利用率

表 8 有效雨量最適機率分佈模式發生比例統計一覽

連續機率分配模式		各月份發生次數												年度	
		1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	數次	比例
桃園	*	10	12	2	6	7	3	8	4	5	7	9	16	89	39.0
	**	9	7	17	10	10	15	11	15	13	11	10	2	130	57.0
	***	0	0	0	3	2	1	0	0	1	1	0	1	9	3.9
臺中	*	8	5	3	4	6	4	3	6	5	0	1	7	52	33.3
	**	4	7	10	8	7	9	9	6	7	1	0	4	72	46.2
	***	1	1	0	1	0	0	1	1	1	12	12	2	32	20.5
高雄	*	0	5	3	7	5	3	1	3	3	2	0	6	38	22.6
	**	2	7	10	6	9	11	12	8	11	5	0	0	81	48.2
	***	12	2	1	1	0	0	1	3	0	7	14	8	49	29.2
臺東	*	5	5	3	2	2	3	3	2	0	1	7	3	36	42.9
	**	2	2	4	5	5	4	3	5	7	6	0	4	47	56.0
	***	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	1.2

註：*為常態分佈；**為伽瑪分佈；***為 20 年倒數第 5 位；比例單位為%。

USDA-SCS 為 63.30-76.79%)遠高於豐水期(R-E 法 13.94-47.27%、USBR 法 18.79-46.33%、蒸發散-降雨比率法 52.94-100%、USDA-SCS 法 22.58-64.14%)，其原因為豐枯水期雨量懸殊分佈所致 (Rahman *et al.*, 2008)。相較於旱作的部分，日本宮古、東伯地區實行滴灌區域的有效雨量利用案例，平水年之有效雨量利用率為 76-81%，設計基準年(10 年發生 1 次乾旱)則高達 82% (山本太平, 1999)；盧安達 Nyagatara 地區樹薯及香蕉的年有效雨量為 600.3 mm/yr，約為年雨量 707 mm/yr 的 84.9% (Gislain, 2008)；中國河南地區冬小麥生長試驗(2004-2006)顯示有效雨量利用率亦高達 90.07% (劉戰東等, 2009)；相較於上述水田及早作區的案例，顯示本研究區域之水田有效雨量利用率亦受限於降雨因素的影響，但透過田間蓄水高度的調整措施，仍有提升的空間。

4.2 連續型機率分配模式優化分析

本文應用連續型機率分配模式：包含常態分佈、伽瑪分佈、20 年倒數第 5 位法；以各雨量站 20 年的月有效雨量進行分析，各月份最佳機率分配模式優選後，應用於推估各月計畫有效雨量。表 8 及圖 5 為 3 種機率分配模式於桃園、臺中、高雄、臺東灌區分析最佳分配模式發生次數及比

例之成果，桃園、臺中、高雄、臺東灌區分別統演算 19 處、13 處、14 處、7 處測站於 1-12 月份的最佳模式探討，上述灌區的演算次數分別為 228 次、156 次、168 次、84 次；結果顯示以年度統計數據觀點(不分月份別)，所有灌區均顯示月有效雨量的最佳連續型機率分配模式以伽瑪分佈為主，分別為桃園(57.0%)、臺中(46.2%)、高雄(48.2%)、臺東灌區(56.0%)；月有效雨量以常態分佈模式為最佳的模式於分別臺東及桃園灌區分別高達 42.9%及 39.0%；同時臺東灌區僅 1.2%及桃園灌區 3.9%的月有效雨量型態因採用伽瑪分佈及常態分佈模式均無法通過顯著性檢定，改以 20 年倒數第 5 位法來表達，高雄及臺中灌區則高達 29.2%及 20.5%的月有效雨量型態需以 20 年倒數第 5 位法來表達。

表 8 及圖 5 亦清楚顯示 3 種連續型機率分配模式於不同月份的分佈比例及特性，多數月份均為伽瑪分佈，諸如桃園灌區(3 月-11 月)、臺中及高雄灌區(2 月-9 月)、臺東灌區(3 月-10 月)；常態分佈模式及 20 年倒數第 5 位法分佈模式多發生於 12 月、1 月-2 月等枯水期間的降雨事件。比較臺中灌區及高雄灌區發生於 10 月-12 月的最佳機率分配模式的結果(圖 5)，上述 2 測站均以 20 年倒數第 5 位法來表達月有效雨量的分佈特性；

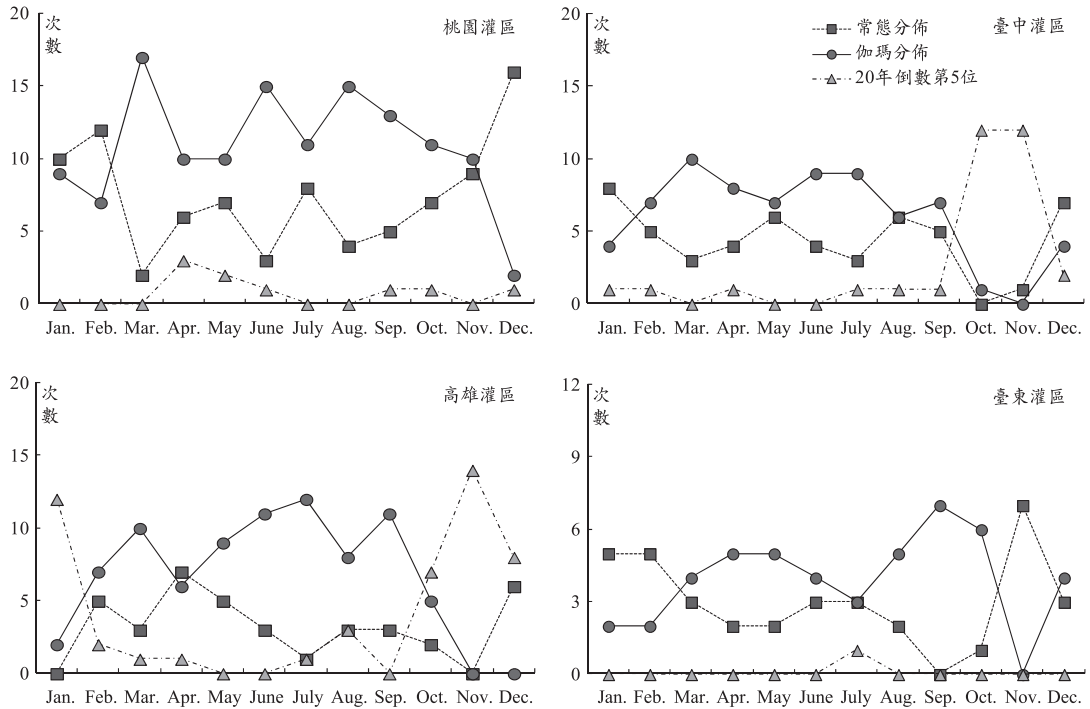


圖 5 連續型機率分配模式之逐月最佳化次數分佈

而常態分佈、伽瑪分佈無法通過顯著性檢定的原因均與其月雨量低的少雨型態有關。由於記錄年限會影響機率分析成果，雨量資料引用不宜過短，因此後續於個別水利會灌區進行推估時，可依灌區內既有雨量記錄年限進行分析，無須受限於 20 年的記錄限制，以期獲得可信度更高的機率分佈成果。

4.3 區域性計畫有效雨量

單一雨量站之有效雨量可視為該雨量站控制面積內之雨量有效利用於灌溉的特性，該站之計畫有效雨量亦僅適用於預測該站次年各月可能發生之有效雨量值；由於農田水利會灌區由多個工作站組成，因此因應農田水利會單一灌溉計畫的編制，需進一步計算區域性的有效雨量，本文以表 1 所列桃園、臺中、高雄及臺東灌區內各測站所屬權重因子，經加權計算後可得該農田水利會灌區之區域計畫月有效雨量，如表 3-表 6；圖 6 顯示區域計畫月有效雨量的逐月分佈趨勢，結果顯示桃園灌區於 2-5 月具較高之有效雨量，

此一期間可自石門水庫減少取水，增加此期間石門水庫抗旱忍耐度；臺中灌區於 3-8 月期間，有效雨值較高量，此期間亦為河川豐水期，其對河川取水型灌區節省水資源效益不大，然可利用有效雨量方式減少自河川取用受污染之灌溉水源或作為稀釋水源之用途，其 10-11 月有效雨量極低，顯示臺中灌區於 10-11 月期間無法透過有效雨量利用達成水資源的調配及改善灌溉水質之效益；高雄與臺中灌區具相同趨勢，惟其具較高之有效雨量月份為 5-9 月，10-3 月則為明顯枯水期，高雄灌區為臺灣各水資源分區中，有效雨量利用的豐枯特性變化最為懸殊者；臺東灌區之各月的趨勢變化則無明顯極端差異，有效雨量利用量較高月份為 5-6 月、8-9 月等。

以水稻期作別來評估有效雨量應用於灌溉的貢獻，由於各區域水稻栽培的起迄時間略有差異，本文統一以 1-7 月視為一期作期間，8-12 月視為二期作的計算期間，結果顯示桃園灌區的區域計畫有效雨量發生於一期作及二期作期間的比例為 66.2%及 33.8%；其特性與臺中灌區一期

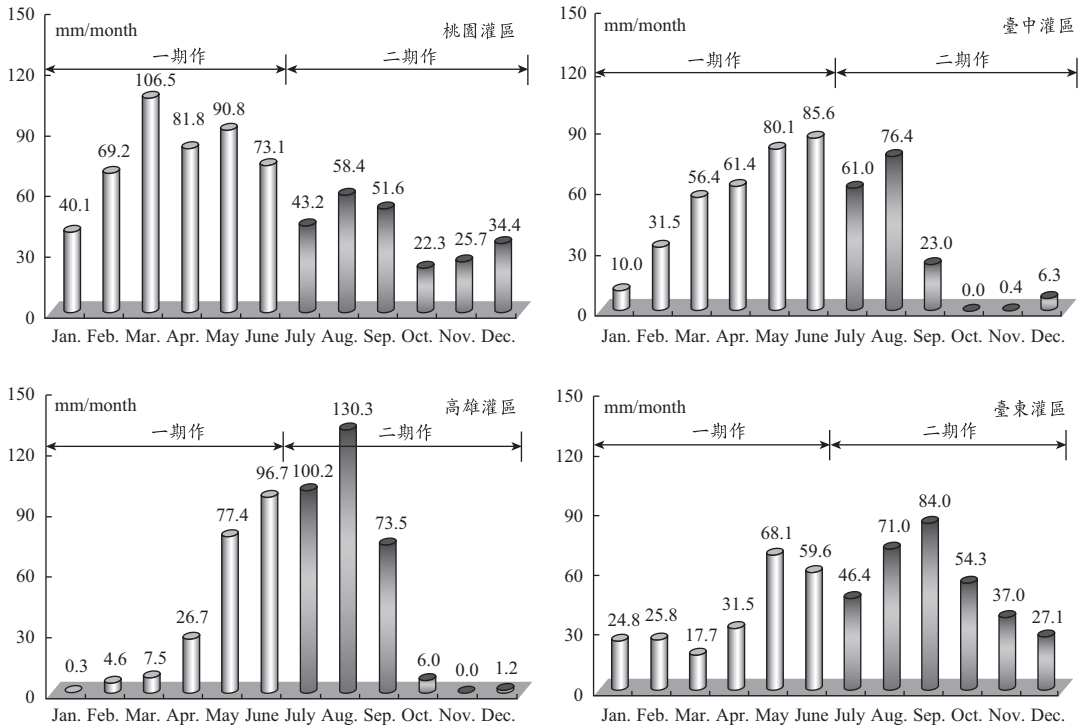


圖 6 研究灌區之區域計畫有效雨量逐月變化趨勢

作的 66.0%、二期作的 34.0%具相同分佈趨勢。高雄與臺東則具相同分佈趨勢，其趨勢恰與桃園及臺中灌區相反，高雄灌區於一期作及二期作期間可利用的有效雨量比例為 40.6%及 59.4%；臺東灌區則為 41.6%（一期作）、58.4%（二期作）。

本文進一步評估豐水期(5月-10月)及枯水期(11月-隔年4月)的有效雨量分佈情形，全年度的有效雨量分佈僅桃園灌區發生枯水期的比例(51.3%)高於豐水期者(48.7%)，顯示桃園灌區於枯水期間利用有效雨量灌溉潛勢高於其他灌區；其餘灌區均為豐水期的有效雨量高於枯水期者，枯水期的有效雨量越低代表需仰賴水庫或河川供水灌溉的程度越高；以台中灌區而言，有效雨量發生於豐水期與枯水期的比例為 66.3%：33.7%，臺東灌區則為 70.1%及 29.9%，豐枯水期比例最為懸殊者為高雄灌區，年度有效雨量約 92.3%發生於豐水期，僅 7.7%發生於枯水期，因此高雄灌區於枯水期間利用有效雨量輔助調節灌溉用水的功能薄弱，相對灌溉用水承擔的缺水

風險具增高的現象。

表 7 所列桃園(1,005 mm/yr)、高雄(809 mm/yr)、臺中(802 mm/yr)、臺東灌區(827 mm/yr)為各灌區內單一測站加權計算而得之總灌區的區域有效雨量；因有效雨量於作物生長期間可潛在作為替代部分的灌溉水源，因此有效雨量的利用面臨是否應由農業灌溉水權量直接刪減之疑慮(現行水權計算制度無考量有效雨量)，本文基於下述原因說明有效雨量的利用不應被考量刪除等量之農業灌溉水權量：水利法第 17 條規範每一標的用水取得水權，其用水量應以其事業所必須者為限，以灌溉事業為例，水權量上限應以該灌區維持常態灌溉需求下可能用水量為上限，如無降雨發生時，則整期作需仰賴灌溉以滿足作物生長所需水量，因此水權量核算無須考量有效雨量、迴歸水量利用、續灌、非常灌溉等非正常態性的潛在水源或因應枯旱程度不同而採取的灌溉措施，上述有效雨量及迴歸水的利用實為乾旱時期，農業面臨水源短缺而需減量取水灌溉

表 9 各測站與區域計畫有效雨量差異分析一覽

雨量站 序號	桃園灌區			臺中灌區			高雄灌區			臺東灌區		
	ER_f	E_v	E_r	ER_f	E_v	E_r	ER_f	E_v	E_r	ER_f	E_v	E_r
1	788	91	13.1	704	212	43.1	446	-79	-15.0	407	-141	-25.7
2	720	23	3.3	726	234	47.5	459	-65	-12.5	470	-77	-14.1
3	729	32	4.6	673	180	36.7	490	-34	-6.5	625	77	14.1
4	680	-17	-2.4	538	46	9.3	502	-22	-4.2	636	89	16.2
5	720	23	3.2	448	-44	-9.0	437	-87	-16.6	517	-30	-5.5
6	645	-52	-7.4	527	35	7.2	475	-49	-9.3	495	-52	-9.5
7	697	0	0.0	500	8	1.6	412	-112	-21.3	604	57	10.4
8	639	-58	-8.3	442	-51	-10.3	470	-54	-10.4			
9	675	-23	-3.2	471	-22	-4.4	706	182	34.7			
10	639	-58	-8.3	434	-58	-11.8	592	68	12.9			
11	617	-80	-11.5	593	101	20.4	697	173	33.0			
12	630	-67	-9.7	492	0	-0.1	676	151	28.9			
13	677	-20	-2.9	436	-56	-11.4	406	-118	-22.6			
14	900	203	29.1				665	141	26.9			
15	880	183	26.2									
16	869	172	24.6									
17	873	176	25.2									
18	748	51	7.3									
19	906	209	29.9									

註： ER_f 為年計畫有效雨量、 E_v 為年計畫有效雨量之差異量，單位為(mm/yr)； E_r 為年計畫有效雨量差異率(%)。

或調撥部分灌溉用水予其他標的用水使用之調配來源之一，因此有效雨量利用為水資源高效利用的表現，因灌區直接利用有效雨量而節餘等值灌溉水量可蓄存於水庫，提高後續區域水資源可調配空間。

4.4 區域性計畫有效雨量差異性分析

為探討區域性計畫有效雨量是否適用於灌區內每一工作站，本文茲以桃園、臺中、高雄、臺東灌區之年計畫有效雨量 ER_f 為基準，分別為 697.0 mm/yr、492.2 mm/yr、524.3 mm/yr、547.3 mm/yr；並與其灌區內各工作站的年計畫有效雨量比較，以探討區域性計畫有效雨量單一值編列至灌溉計畫對各工作站預測有效雨量的差異性，結果如表 9 及圖 7，本文暫不考慮各月份的時間分佈，僅比較年計畫有效雨量值，因此表 9 所列參數 E_v 為年計畫有效雨量之差異量，其意義為各站的年計畫有效雨量值與採用區域計畫有

效與量值單一值時所產生的年雨量推估差異值，若數據為負值，代表採用區域計畫有效雨量作為預測該站有效雨量時有高估之虞，容易產生灌溉期間缺水現象，差異值 E_v 即可解釋為該工作站灌區的年缺水量；反之，當數據為正值時，表示灌溉計畫預估值於該工作站屬於偏低值，若為水庫放水者，則有施放過多水源之虞，造成水資源的浪費。

參數 E_r 為則以年差異量為分子，各灌區之區域年計畫有效雨量為分母時之差異率(%)，用以評估各工作站與區域單一值的差異比例。若以 $E_r = \pm 10\%$ 為比較基準，結果顯示桃園灌區 19 處工作站中，6 處 $E_r > 10\%$ ，其中大溪、新莊、海山、柑園、缺子測站 E_r 介於 20~30%，其有效雨量明顯高出灌溉計畫採用值約 200 mm/yr，若依灌溉計畫施灌，則上述灌區可能高估約 200 mm/yr 的引用水量，如個別採用工作站之計算結果則可節省水量 200 mm/yr，供其他標的用水使

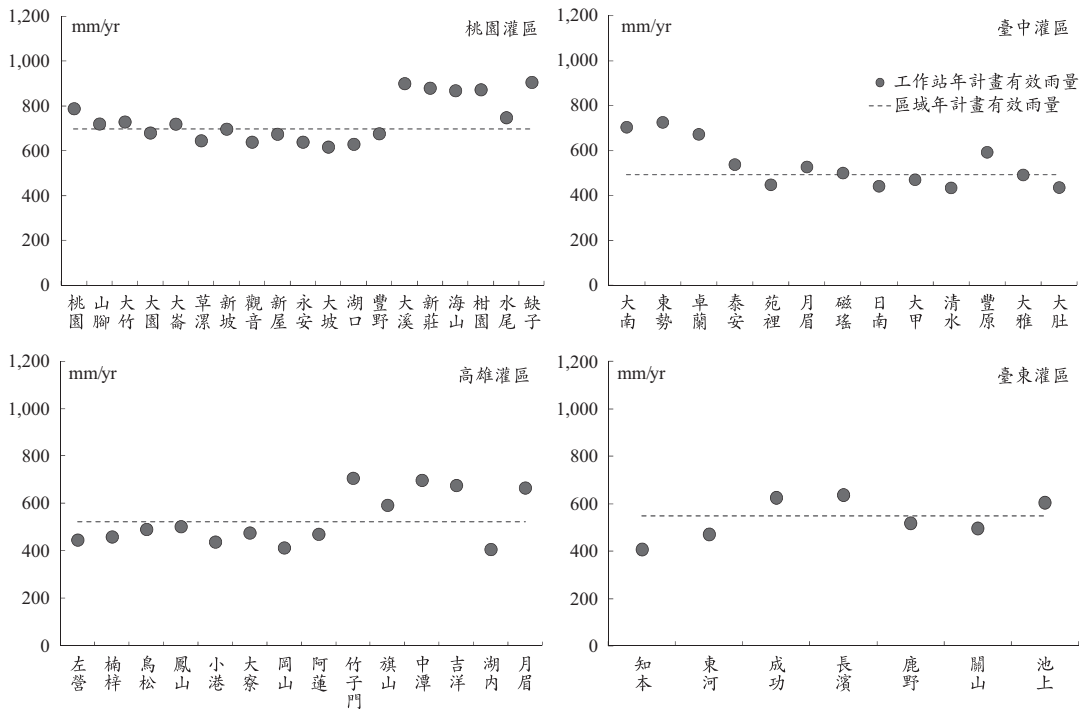


圖 7 研究灌區之各測站計畫有效雨量差異性分析

用；僅 1 處 $E_r > -10\%$ (大坡： -11.5% 。台中灌區有 4 處超出 $E_r = +10\%$ 的基準，其中東勢、大南、卓蘭等山區型工作站的 E_r 高達 47.5%、43.1%、36.7%；3 處低於 $E_r = +10\%$ 的基準。大南、東勢、卓蘭站等灌區之有效雨量高於灌溉計畫採用值約 170-200 mm/yr，若依灌溉計畫施灌，自河川取水餘溢量約 170-200 mm/yr，上述 3 個工作站皆位於大安溪及大甲溪上游處，如個別採用工作站之計算結果則可節省 170-200 mm/yr 水量供下游灌區使用，有助於減緩大甲溪及大安溪水系下游灌區缺水的窘境。高雄灌區則有 5 處超出 $E_r = +10\%$ 的基準，分別為月眉、吉洋、中壇、竹子門等灌區之有效雨量低估值約 120-180 mm/yr，上述工作站灌區的節水空間約 120-180 mm/yr、6 處低於 $E_r = -10\%$ 的基準，其中岡山及湖內工作站 E_r 高達 -21.3% 、 -22.6% ，其計畫有效雨量遠低於水利會灌溉計畫採用值約 120-130 mm/yr，易有灌溉水源不足情事發生。臺東灌區則有 3 處超出 $E_r = +10\%$ 的基準、2 處低於 $E_r =$

-10% 的基準，臺東灌區的知本工作站 E_r 高達 -25.7% ，具較高的缺水風險。

上述分析結果顯示工作站之計畫有效雨量分佈趨勢如與區域計畫有效雨量相近，則適合使用經加權計算後所得之區域計畫有效雨量作為該會訂定灌溉計畫時之計畫有效雨量值。上述其餘 E_r 比例偏高 ($> \pm 10\%$) 的工作站則可能受地形分佈及水文條件影響，明顯與其他地區不同，需承擔較高缺水風險或施放過多水源等現象，因此該工作站灌區則建議單獨採用使用該站之計畫有效雨量值，而非該灌區統一使用之計畫有效雨量。

五、結 論

1. 本文利用水門操作法則計算以灌溉用途為主要目的之有效雨量，研究結果顯示年有效雨量 (1981-2000 年期間平均值) 依序為桃園灌區 (1,005 mm/yr)、高雄灌區 (809 mm/yr)、臺中灌區 (802 mm/yr)、臺東灌區 (827 mm/yr)；月有效

雨量之分佈趨勢，桃園灌區之有效雨量高峰值集中發生於3-6月、臺中為3-8月、高雄為5-9月、臺東為5-9月。以豐水期及枯水期進行區分，僅桃園灌區的有效雨量分佈發生枯水期的比例(51.3%)高於豐水期(48.7%)，顯示桃園灌區於枯水期間利用有效雨量灌溉潛勢高於其他灌區；枯水期的有效雨量越低代表需仰賴水庫或河川供水灌溉的程度越高；其餘灌區的有效雨量發生於豐水期及枯水期的比例為臺中灌區的6.6:3.4、臺東灌區7:3、高雄灌區9:1，豐枯水期比例最為懸殊者為高雄灌區，因此高雄灌區於枯水期間利用有效雨量輔助調節灌溉用水的功能薄弱，相對灌溉用水承擔的缺水風險具增高的現象。

2. 年有效雨量利用率依序為桃園灌區(54.9%)、臺中灌區(53.6%)、臺東灌區(49.6%)、高雄灌區(41.0%)，結果顯示高降雨量地區未必會產生有效雨量高利用率的現象，年有效雨量利用率與年降雨量不成正比關係，顯示降雨強度、降雨延時、空間分佈對雨量利用之影響性。有效雨量於不同期作別的貢獻值部分，桃園及臺中灌區於一期作及二期作的比例約6:4、高雄及臺東灌區為4:6。
3. 本文應用常態分佈、伽瑪分佈、20年倒數第5位法等3種連續型機率分配模式推估計畫有效雨量。桃園、臺中、高雄及臺東灌區的研究結果顯示月計畫有效雨量的分佈型態以伽瑪分佈為主，其次為常態分佈；以月份別視之，伽瑪分佈多發生於3月-11月、12月-隔年2月則符合常態分佈或20年倒數第5位法的分佈型態。
4. 本文以區域計畫有效雨量與各工作站推估的計畫有效雨量進行差異性比較時，顯示本研究4個研究灌區中，均發生部分工作站的年計畫有效雨量與編列於農田水利會灌溉計畫內的區域年計畫有效雨量存在10-40%的差異比例；若工作站的年計畫有效雨量高於區域年計畫有效雨量，代表灌溉計畫低估該站的有效雨量貢獻量，有未善用有效雨量之虞；反之，當工作站的年計畫有效雨量低於區域年計畫有效雨量，代表灌溉計畫高估該站的有效雨量貢獻量，容易產生灌溉取水量不足之虞。
5. 土壤質地、田埂高度、田間管理方式、雨量資料的採用均會影響有效雨量的估算，建議個別灌區應用水門操作法則或連續型機率分配模式計算及預測有效雨量時，可詳細調查灌區各項必要田間及雨量資料後，修正模式的計算規則及決定最適合的雨量記錄年限；並可試算不同灌溉管理方式下對有效雨量利用率的影響，以提高有效雨量利用率為前提下，決定該灌區最佳的灌溉管理方式。
6. 台灣地區有效雨量利用，以水資源調配利用之觀點，以水田灌區為最實用，旱田灌區則以水源缺乏地區較具實用性；水庫供水型、河川取水型、地下水抽取型灌區利用有效雨量潛在效益分別為提高水資源利用率、提升灌溉水質、減緩地層下陷之功用。

參考文獻

1. Adnan, S., and Khan, A. H., "Effective Rainfall for Irrigated Agriculture Plains of Pakistan", *Pakistan Journal of Meteorology*, Vol. 6, Issue 11, pp. 61-72, 2009.
2. Al-Taher, A. A., "Effective Rainfall and Irrigation water Requirement for wheat in Assir Mountains, Saudi Arabia", *Journal of the Gulf and Arabian Peninsula Studies*, Vol. 20, No. 76, 1995.
3. Chow, V.T., Handbook of Applied Hydrology, McGraw Hill Book Co, New York, 1964.
4. Cuenca, R. H., Irrigation System Design: An Engineering Approach, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, 1989.
5. Chung, S.-O., Rodríguez-Díaz, J. A., Weatherhead, E. K., and Knox, J. W., "Climate Change Impacts on Water for Irrigating Paddy Rice in South Korea", *Irrigation and Drainage*, Vol. 60, pp. 263-273, 2011.
6. Du Plessis, W. P., "Effective Rainfall Defined Using Measurements of Grass Growth in the

- Etosha National Park, Namibia”, *Journal of Arid Environments*, Vol. 48, pp. 397-417, 2001.
7. Dakshinamurti, C., Saxena, P. N., and Rao, E. G. K., “Evaluation of Effective Rainfall and Irrigation from Ground-water Measurement”, *Nature*, Vol. 190, pp. 1100-1101, 1961.
 8. Dastane, N. G., Effective Rainfall in Irrigated Agriculture, FAO irrigation and drainage paper NO.25, Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, Italy, 1978.
 9. Dhandapani, K. R., “Effective Rainfall in the Estimation of Irrigation Requirement of Transplanted Rice”, *Oryza*, Vol. 17, No. 1, pp. 1-5, 1980.
 10. Gislain, N. T., Irrigation Water Requirement of Prioritized Crops in Nyagatare District, Report of Institut des Sciences Agronomiques (ISAR), 2008.
 11. Hahn, G.J., and Shapiro, S.S., Statistical Models in Engineering, John Wiley & Sons Inc., New York, 1994.
 12. Hayes, G.I., and Buell, J.H., Water and Our Forests: Trees Also Need Water at the Right Time and Place, Yearbook of Agriculture, USDA, pp. 219-228, 1955.
 13. Hershfield, D. M., “Effective Rainfall and Irrigation Water Requirement”, Proceedings of the ASCE. *Journal of Irrigation and Drainage Division* Vol. 90, pp. 33-37, 1964.
 14. Horikawa, N., and Hayase, Y., Irrigation System Operations and Effective Rainfall: Case Study on Low Land Paddy Irrigation Area, Technical Report of the National Institute for Rural Engineering, No. 204, pp. 175-183, 2006.
 15. Hajare, H. V., Raman, D. N. S., and Dharkar, E. J., “New Technique for Evaluation of Crop Water Requirement”, *WSEAS Transactions on Environment and Development*, Issue 5, Vol. 4, pp. 436-446, 2008.
 16. IRRI, Irrigation and water management, International Rice Research Institute Report for 1980, Los Banos, USA, 1981.
 17. Jensen, M. E., Burman, R. D., and Allen, R. G. (eds.), “Evapotranspiration and Irrigation Water Requirements”, ASCE-Manuals and Reports on Engineering Practice 70, ASCE, New York, 1990.
 18. Jackson, A., “Deciding How much to Plant During A Drought”, Drought Tips, Number. 92-43, UC Department of Land, Air and Water Resources, 1992.
 19. Kar, G., Singh, R., and Verma, H. N., “Alternative Cropping Strategies for Assured and Efficient Crop Production in Upland Rainfed Rice Areas of Eastern India Based on Rainfall Analysis”, *Agricultural Water Management*, Vol. 67, pp. 47-62, 2004.
 20. Krul, W. F. J. M., and Lieftrinck, F. A., Recent Ground Water Investigations in the Netherlands, Elsevier Pub. Co., Inc., Amsterdam, 1946.
 21. Kuo, S. F., Ho, S. S., and Liu, C. W., “Estimation Irrigation Water Requirements with Derived Crop Coefficients for Upland and Paddy Crops in ChiNan Irrigation Association, Taiwan. *Agricultural Water Management*, Vol. 82, pp. 433-451, 2006.
 22. Miller, A., and Thompson, J.C., Elements of Meteorology, Ohio, Merrill Pub. Co., 1970.
 23. Ministry of Agriculture and Forestry, Republic of Korea (MOAF), Agricultural Water Supply Survey Report, Seoul, Korea, pp. 566, 2000.
 24. Mohan, S., Simhadrirao, B., and Arumugam, N., “Comparative Study of Effective Rainfall Estimation Methods for Lowland Rice”, *Water Resources Management*, Vol. 10, pp. 35-44, 1996.
 25. Odhiambo, L. O., and Murty, V. V. N., “Modeling Water Balance Components in Relation to Field Layout in Lowland Paddy Fields. II. Model Application”, *Agricultural Water Management*, Vol. 30, pp. 201-216, 1996.

26. Ogrosky, H.O., and Mockus, V., Hydrology of Agricultural Lands, Sec. 21 in Handbook of hydrology, McGraw Hill Book Co. pp. 1-79, New York, 1964.
27. Obreza, T. A., and Pitts, D. J., "Effective Rainfall in Poorly Drained Microirrigated Citrus Orchards", *Soil Science Society of America Journal*, Vol. 66, No. 1, pp. 212-221, 2002.
28. Patwardhan, A. S., Nieber, J. L., and Johns, E. L., "Effective Rainfall Estimation Methods", *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, Vol. 116, No. 2, pp. 182-193, 1990.
29. Panigrahi, B., Sharma, S. D., and Behera, B. P., "Irrigation Water Requirement Models of Some Major Crops", *Water Resources Management*, Vol. 6, pp. 69-77, 1992.
30. Ratna, D., Teeluck, M., and Ah-Koon, D., "Improving Use of Limited Water by Sugarcane", AMAS, Food and Agricultural Research Council, Réduit, Mauritius, pp. 61-70, 1998.
31. Rahman, M.M., Islam, M.O., and Hasanuzzaman, M., "Study of Effective Rainfall for Irrigated Agriculture in South-Eastern Part of Bangladesh", *World Journal of Agricultural Sciences*, Vol. 4, No. 4, pp. 453-457, 2008.
32. Shih, C. C., "Discuss on Effective Rainfall for Irrigation. Proceedings of the 5th international conference on rain water cistern systems", pp. 23-34, Keelung, Taiwan, 1991.
33. Smith, M., A Computer Program for Irrigation Planning and Management, FAO Irrigation and Drainage Paper, No. 46, pp. 49-62, 1992.
34. Suzuki, M., "Comparative Study on Water Management at the Farm Level in Paddy Fields" *Irrigation Engineering and Rural Planning*, No. 6, pp. 4-19, 1984.
35. Tsai, S. M., Chen, S., and Wang, H. Y., "A study on the Practical Model of Planned Effective Rainfall for Paddy Fields in Taiwan", *Journal of Marine Science and Technology*, Vol. 13, No. 2, pp. 73-82, 2005.
36. Tekwa, I. J., and Bwade, E. K., "Estimation of Irrigation Water Requirement of Maize (*Zea-mays*) Using Pan Evaporation Method in Maiduguri, Northeastern Nigeria", *Agricultural Engineering International: the CIGR Journal*, Vol.13, No.1, pp. 1-5, 2011.
37. Tsokos, C. P., *Probability Distributions: An Introduction to Probability Theory with Applications*, Wadsworth Publishing Company, California, 1972.
38. USDA, Irrigation Water Requirements, Technical Release No 21, USDA Soil Conservation Service, Washington, DC, 1967.
39. Van der Gulik, T. W., Trickle Irrigation Scheduling Using Evapotranspiration Data, *Water Conservation Factsheet*, Ministry of Agriculture, Food and Fisheries of British Columbia (MAFF), Canada, pp. 1-9, 2004.
40. Viessman, W. Jr., Knapp, J. W., Lewis, G. L., and Harbaugh, T. E., Introduction to Hydrology, Dun-Donnelly Publishing Corporation, New York, 1977.
41. Walpole, R. E., and Myers, R. H., Probability and Statistics for Engineers and Scientists, The Macmillan Company, New York, 1972.
42. Yonts, C. D., and Klocke, N. L., "Irrigation Scheduling Using Crop Water Use Data", G85-753A, Historical Materials from University of Nebraska-Lincoln Extension. Paper 1200, 1985.
43. Yomota, A., and Ndegwa, G. M., "Water Use for Upland Irrigation in a Humid Region of Japan", *Agricultural Water Management*, Vol. 28, pp.185-200, 1995.
44. 千家正照、西出勤、矢部勝彦、谷川寅彦，「日本旱作灌漑區域有效化之實態」，台灣水利，第39卷，第2期，pp. 70-76，1991。
45. 山本太平，「砂地灌漑－節水灌漑への道」，日本學術會議創立 50 周年記念公開講演會，

- 日本，1999。
46. 涉谷勤治郎，「流域の保留能に基づく雨量・有効雨量関係の定式化のための新方法」，農業土木試験場報告 22 号，pp.1-14，1982。
 47. 高橋賢一，「農業用水の実態」，第 6 回水問題研究会要旨，北海道土地改良設計技術協会，盛岡市，日本，2001。
 48. 王心怡，「桃園大圳灌區有效雨量實用模式之研究及其應用」，碩士論文，中原大學土木工程學系，1999。
 49. 台灣省水利局，「配合台灣北區區域建設計畫調整灌溉系統改善水源分配規劃報告」，pp. 35-38，1975。
 50. 台灣省水利局，「農田水利會工作站業務規範」，pp. 109-117，1982。
 51. 朱榮彬，「農田高度利用與有效排水系統設置之研究」，台灣水利，第 36 卷，第 1 期，pp. 23-48，1988。
 52. 李德滋，「水稻灌溉有效雨量之估計」，中國農業工程學會通訊，第 8 期年會專號，pp. 98-99，1955。
 53. 李錦育、張文虎，「農業有效雨量推估之研究」，九十三年度農業工程研討會，pp. 449-456，桃園，2004。
 54. 秦立德，「有效雨量研究」，農業工程學報，第 11 卷，第 4 期，pp. 17-27，1965。
 55. 陳獻，「有效雨量之估算」，農業工程學報，第 25 卷，第 1 期，pp. 44-47，1979。
 56. 陳獻，「台灣桃園地域における水管理と有効雨量に関する研究」，博士論文，北海道大学，北海道，日本，1989。
 57. 陳豐文、陳獻、蔡西銘、陳靖薇，「水田有效雨量推估模式建立及其應用之研究-以石門大圳灌區為例」，水資源管理 2002 研討會，pp.593-608，桃園，2002。
 58. 陳豐文、陳獻、蔡西銘，「應用水田深水灌溉制度推估有效雨量之研究」，2003 農業工程研討會，pp. 701-712，高雄，2003。
 59. 陳豐文、陳獻，「影響水田有效雨量利用因素之探討」，九十三年度農業工程研討會，pp. 1374-1385，桃園，2004。
 60. 陳豐文、陳獻、蔡西銘、黃勝頂，「有效雨量計算及利用方法回顧」，九十四年度農業工程研討會，苗栗，2005。
 61. 陸允煦，「由月雨量推算水稻田間有效雨量」，農業工程學報，第 26 卷，第 3 期，pp. 59-64，1980。
 62. 曹以松，「旱作灌溉之有效雨量」，農業工程學報，第 12 卷，第 1 期，pp. 33-41，1966。
 63. 曹以松，「電子計算機計算旱作灌溉之有效雨量方法及後龍地區旱作灌溉有效雨量之檢討」，農業工程學報，第 15 卷，第 1 期，pp. 19-35，1969。
 64. 曹以松，「電子計算機計算旱作灌溉有效雨量方法之再研究及岡山地區旱作灌溉有效雨量之探討」，農業工程學報，第 16 卷，第 3 期，pp. 5-13，1970。
 65. 曹以松，「電子計算機計算水田有效雨量之研究」，台灣水利，第 19 卷，第 2 期，pp. 7-29，1972。
 66. 曹以松，「有效雨量模擬與估算之研究及應用於台灣南部之結果」，農工-灌溉第十七號研究報告，1973。
 67. 張建勛，「有效雨量商榷」，台灣水利，第 17 卷，第 1 期，pp. 8-12，1970。
 68. 張啓濱，「輪流灌溉下之臺灣水稻有效雨量」，台灣水利，第 24 卷，第 4 期，pp. 60-82，1977。
 69. 童慶斌、連宛渝，「氣候變遷對灌溉需水量之影響」，農業工程學報，第 46 卷，第 1 期，pp. 57-68，2000。
 70. 葉在德，「濁幹線灌溉系統用水管理」，第二屆海峽兩岸農田水利技術研討會，pp. 88-113，1995。
 71. 農復會，「台灣之水稻灌溉」，pp. 62-64，1970。
 72. 農委會，「九十六年度農業發展計畫-灌排渠道水質監測調查之技術服務計畫」正式報告，2007。
 73. 農業工程研究中心，「石門水庫灌區最合理灌溉水量研究(II)」，農業工程研究中心研究

- 報告，pp.21-86，1996。
74. 農田水利會聯合會，「中華民國 99 年度農田水利會資料輯」，農田水利會聯合會編印，2011。
75. 劉戰東、段愛旺、肖俊夫、劉祖貴，「旱作物生育期有效降水量計算模式研究發展」，灌溉排水學報，第 26 卷，第 3 期，pp. 27-30，2007。
76. 劉戰東、段愛旺、肖俊夫、高陽、劉浩，「冬小麥生育期有效降水量計算模式研究」，灌溉排水學報，第 28 卷，第 2 期，pp. 21-25，2009。
77. 駱安華，「灌溉水源之估算和運用」，台灣水利，第 9 卷，第 2 期，pp. 12-21，1962。
78. 薛觀瀛，「田間有效雨量估計」，台灣水利，第 10 卷，第 3 期，pp. 13-16，1963。

收稿日期：民國 101 年 5 月 7 日

修正日期：民國 101 年 7 月 6 日

接受日期：民國 101 年 8 月 7 日