

桃園市智慧節水管理系統研發與水資源多元應用計畫

Development of Smart Water-saving Management System and Multiple Application of Water Resources in Taoyuan City

委託單位：經濟部水利署

代辦單位：桃園市政府水務局

陳豐文

Feng-Wen Chen

譚允維

Yun-Wei Tan

張雅婷

Ya-Ting Chang

林修德

Hsiu-Te Lin

方文村

Wen-Tsun Fang

卓宇謙

Yu-Chien Cho

財團法人農業工程研究中心

摘要

臺灣降雨豐枯比懸殊、坡短流急，氣候變遷現象使農業水資源短缺問題更顯嚴峻，因應缺水危機下，研擬氣候變遷下水資源多元開發及有效利用為重要課題。本計畫今年度以桃園市為研究區域，擬整合物聯網(IoT)感測技術、智慧環控管理技術初步建立智慧節水管理系統，並以2次現地示範區省水試驗進行驗證，建立前瞻智慧節水管理系統，可作為氣候變遷下提升水資源韌性重要調適策略方案。

本計畫標的作物篩選考量(1).作物需水特性、(2).用水來源、(3).作物代表性、(4).國土規劃適宜性、(5).是否地方重點發展作物等篩選原則綜合評析，進行本計畫本年度與後續推動之標的作物篩選，本年度標的作物以短期旱作物為主，分別為葉菜類蔬菜的小白菜及萵苣等2種。並建立智慧節水管理系統，包含田區微氣候監測站，構建環境監測系統，感測元件包含(1).溫度、(2).濕度、(3).風速風向計、(4).日輻射計、(5).大氣壓力計、(6).雨量計、(7).土壤水分張力計、(8).自記水位計、(9).自動資料蒐集記錄器；智慧灌溉系統採用以色列Netafim滴灌設備作；透過NMC PRO灌溉控制器及網路傳輸裝置(4G)進行資料紀錄及傳輸整合。利用管理平台供管理者及用戶共同使用，完整架構包括用戶使用介面(前臺)及管理者查詢及管理介面(後臺)。

智慧節水試驗於農工中心位於大園區試驗田區執行，2次試驗作物依序為小白菜及萵苣，試驗期間為7~9月，示範場域包含試驗組(滴灌區)及對照組(溝灌區)，每一區試驗田長25 m、寬15 m(面積375 m²)，試驗水源為桃園大圳灌溉原水，各試驗田區設置10畦，每畦種植400株，每1試驗田區4,000株，總計第1次試驗蔬菜總株數為8,000株。第1次智慧節水試驗期間共計試驗20日；本計畫依據智慧節水管理系統試驗成果初步顯示採用智慧節水系統(滴灌)較傳統農法(溝灌)節省水量約57.7%；另作物品質評估，針對作物抽樣800株進行(1).生長株高、(2).葉片數量、(3).單葉葉寬、(4).單株總葉寬等4項參數觀測，利用Rg(H) (株高生長倍數)、Rg(L) (葉數生長倍數)等指標進行評估，以釐清省水灌溉對於對於生長及產量之影響；試驗成果顯示Rg(H)及Rg(L)分別介於0.86~1.05及0.91~1.04，

綜合評估顯示滴灌或溝灌方式對作物生長無明顯正面或負面影響，但對產量具微幅正面效益。第2次智慧節水試驗共計30日；依據智慧節水管理系統試驗成果顯示採用智慧節水系統(滴灌)較傳統農法(溝灌)節省水量約77.3 %；另作物品質評估，以作物抽樣400株的方式分析顯示使用滴灌之水量僅約溝灌水量22%的前提下，單株株高約傳統溝灌的1.24倍、平均總葉面寬為1.25倍、平均單株重量高達1.91倍；顯見灌溉方法選用及感測元件之搭配決定灌排時機，有助於大幅減省水源又可確保(提升)原有作物品質及產量之雙贏目標。

本計畫另針對4處桃園市政府主管之生活污水(都市排水)處理場，選定及評估大溪水資源回收中心再生水應用之規劃，初步調查成果顯示再生水水質符合景觀澆灌用途、進一步評估稀釋後可初步應用於農業灌溉，應用區域初步規劃以桃園水利會大溪工作站月眉圳灌區下游區域約4.8 ha農地為示範區域，研擬重力式供水系統及分散式加壓供水系統等供水方案。

關鍵詞：氣候變遷、智慧節水、調適策略

Abstract

The obvious difference of dry and rainy seasons, steep river bed slope and climate change cause the decrease of the agricultural water resources in Taiwan. Under the crisis of water shortage, it is an important issue to research the diversified development and efficient use of water resources under climate change. Taoyuan City is the target area in this year. Internet of Things (IoT), sensing technology and intelligent environmental management are combined to establish a smart water-saving management system, moreover, 2 on site demonstration experiments are carried out to verify the effects of water-saving and establish a forward-looking smart water-saving manage system that can be used as an adjustment strategy for improving water resilience under climate change.

Selection of the target crops: In consideration of (1). Crop water requirements, (2). Water resources, (3). Representative of crop (4). Land suitability, (5). Regional development cultivation, Brassica rapa chinensis and Lactuce sativa are chosen as the target leaf crops. Microclimate and environment monitoring station systems are constructed, including (1). thermometer, (2). Hygrometer, (3). Wind speed anemometer, (5). Barometer (6). Rain gauge, (7) Soil water tension meter, (8) Self-recording water level meter, (9) Automatic data collection system. Netafim, a company from Israeli, whose drip irrigation systems are chosen to use. By the means of NMC PRO irrigation control device and network transmission device (4G), the all experiments data is collected. A data management platform is developed for managers and clients to use. The complete frames of the platform include the client-side interface and the back-side server to manage. The client-side interface would be developed in this year, which contains environment monitoring, crops grow records, irrigation water analysis, cultivated land geography, and cropland management.

Brassica rapa chinensis and Lactuce sativa are chosen respectively as the target leaf crops in the experiment which is carried out Dayuan District from July to September. The

demonstrate area contains test group (drip irrigation) and comparison group (furrow irrigation). The length and the width of each group are about 25 m and 15 m (area 375m²). There are 10 furrows in each group, 400 plants were grown in 1 furrow, this means there were 4,000 in 1 group, 8,000 plants were grown in the first experiment. The period of the first smart water-saving experiment is from July 25th (transplant seedings) to August 13th (crop harvest), counted 20 days totally. The results show that test group (drip irrigation) is about 58 % water-saving comparative to comparison group (furrow irrigation). Speaking to the crop's quality evaluation, 400 plants were chosen randomly in each group to compare to the other one, 4 basic factors: (1). The height of plant, (2). The numbers of leaf, (3). The width of the largest leaf, (4). The width of the total plant was observed and the index of Rg(H) (plant height growth factor) and Rg(L)(leaf number growth factor) were calculated. The results show that Rg(H) and Rg(L) are 0.86~1.05 and 0.91~1.04 respectively, in other words, there is no significant difference between test group (drip irrigation) and comparison group (furrow irrigation). The second wisdom water-saving test totaled 30 days; according to the results of the smart water-saving management system test, the use of smart water-saving system (drip irrigation) saved about 77.3 % of water compared with traditional agricultural methods (ditch irrigation); another crop quality assessment, analysis of 400 strains of crops It shows that the amount of water used for drip irrigation is only about 22% of the amount of furrow irrigation. The plant height per plant is about 1.24 times that of traditional furrow irrigation, the average total leaf width is 1.25 times, and the average weight per plant is 1.91 times. The selection and sense of irrigation methods are obvious. The combination of measuring components determines the timing of irrigation and drainage, which helps to significantly reduce water sources and ensure (improve) the win-win target of original crop quality and yield.

Daxi Sewage Treatment Plant, one of the four sewage treatment plant (urban drainage) in Taoyuan City, is selected and evaluated where the recycled water quality meets the standard of landscape watering, furthermore, advance dilution would be used as the agricultural irrigation. The irrigation area of Yuemei canal (4.8 ha) in Daxi work station in TIA would be chosen as the demonstrated irrigation area, besides, the schemes of gravity water supply system and decentralized pressurized water supply system will be researched in the future.

Keywords : Climate change, Smart water saving, Adaptation strategy.

一、前言

臺灣地區之豐枯降雨比例懸殊，加上坡短流急、水資源蓄存不易。近年來更受到氣候變遷影響，極端降雨事件頻仍，使水資源短少的問題更顯嚴峻，相關研究均顯示常態性或極端性的乾旱問題日漸顯著，致使農業發展也面臨極大挑戰。因應臺灣水資源短缺以及氣候變遷的雙重挑戰下，以農業行為的灌溉管理為出發，如何研擬提升氣候變遷下水資源韌性的可行方案，在不破壞環境平衡、水資源使用更有效率的前提下，兼顧糧食

安全與產業發展，即成為一項重要的課題。

此外，近年來智慧化水資源利用之推動亦為國際趨勢，農業占整體水資源的大宗約70~73%，如何由農業生產過程導入智慧化管理，達成節水且同時兼顧農業生產本質的目標是為本計畫之重點所在。本計畫以桃園境內重要農業生產為節水的產業對象，透過物聯網(IoT)之感測技術整合、智慧環控技術、智慧管理技術等，透過作物栽培過程之相關生長與環境參數組合，並利用大數據分析技術，建立不同作物之前瞻智慧節水管理系統，可作為氣候變遷下提升水資源韌性的重要調適策略方案，期能達成精進農業節水管理技術、提高作物產量及提升作物品質之目的。因此，實際執行將以桃園市境內之主要作物進行示範，透過實地試驗，測試智慧環境監測與控制系統之適用性，再配合作物栽培管理分析平台，研發一套完整的前瞻智慧節水管理系統。同時，也將以計畫成果為基礎，針對桃園市境內智慧灌溉管理相關產業發展之現況與願景，進行整體性推廣之發展與擘劃。藉以提供桃園市智慧節水管理推動之重要參據。

二、標的作物篩選

短期旱作物以本年度的標的作物-蔬菜而言，就有47種之多，蔬菜類又可區分為根菜類、莖菜類、蔥類、葉菜類、花菜類、果菜類、菇蕈類等。桃園市2018年種植各類蔬菜之面積情形中，其他葉菜類面積2,596.25 ha，其餘栽培面積前6高者分別為不結球白菜(1,182.28 ha)、竹筍(873.35 ha)、莧菜(420.14ha)、蕹菜(376.30ha)、西瓜(254.33ha)、菠菜(202.48ha)，蔬菜類種植面積總計為7,065.63ha。

本計畫標的作物篩選擬考量1.作物需水特性、2.用水來源、3.作物代表性(栽種面積及經濟價值)、4.國土規劃適宜性(是否種植於山坡地，不利於水土保持限制)、5.是否地方重點發展作物等篩選原則綜合評析，進行本計畫本年度與後續推動之標的作物篩選。

本年度(2019年)標的作物以短期旱作物為主，標的作物篩選考量桃園市2018年蔬菜栽種面積(表3-2)及本年度之試驗期間預計為7~10月，應以適合夏季及秋季，且生長日數於2個月內之短期作物為對象；短期作物適合栽種之月份、生長日數及株行距詳表3-9、3-10，參考農糧署統計之2018年桃園市作物栽種面積，其中符合以上需求且栽種面積高之短期作物為不結球白菜。不結球白菜適合之栽種期為8~12月，最短生長日數為20天，栽種面積為桃園市境內之最。萵苣適合之栽種期為8~12月，最短生長日數為40天，2018年栽種面積佔154.16ha。依據前述作物篩選原則，本計畫建議2種短期旱作標的作物：1. 葉菜類蔬菜-小白菜；2. 葉菜類蔬菜-萵苣：進行本年度省水試驗。

三、智慧節水管理系統之先期規劃

由農業生產過程導入智慧化管理，達成節水且同時兼顧農業生產本質的目標是為本計畫重點所在。因此，本(108)年度計畫需施設示範場域包含試驗組與對照組各一組，針對兩種不同蔬菜類作物分別進行一次試驗、監測及分析；透過實地試驗，測試智慧環境監測與控制系統之適用性，再配合作物栽培管理分析平台，研發一套完整的前瞻智慧節水管理系統，期能達成精進農業節水管理技術、提高作物產量及提升作物品質之目的。針對智慧節水管理系統之先期規劃，包含作物環境感測器整合、作物環境控制系統整合

及作物栽培智慧管理平台發展等項目。

3.1 作物環境感測器整合

針對今年度短期標的作物(蔬菜)栽培過程之特性，提出環境監測系統所需包含之主要感測元件項目，包含溫度、濕度、大氣壓力、雨量計、日照計(日輻射計)、土壤水分張力計、風速計、流量設備(水位計)等，以物聯網概念、節省成本且傳輸穩定為目標，將前述感測器系統整合。茲將環境監測系統所包含之主要感測元件項目說明如下(元件實體如圖4-1)，包含1.溫度感測器、2.濕度感測器、3.風速風向計、4.NMC PRO灌溉控制器、5.日輻射計、6.大氣壓力計、7.傾斗式雨量計、8.土壤水份計、9.沉水水壓式水位計、10.1.8米可伸縮式氣象用三腳架 1組、11.自動資料蒐集記錄系統、12.網路傳輸裝置(4G)，共12項。滴灌系統則採用以色列Netafim出產之UNIRAM CNL16010 -1.6 LPH @ 0.2m. 系統，配置圖如圖1、2所示。

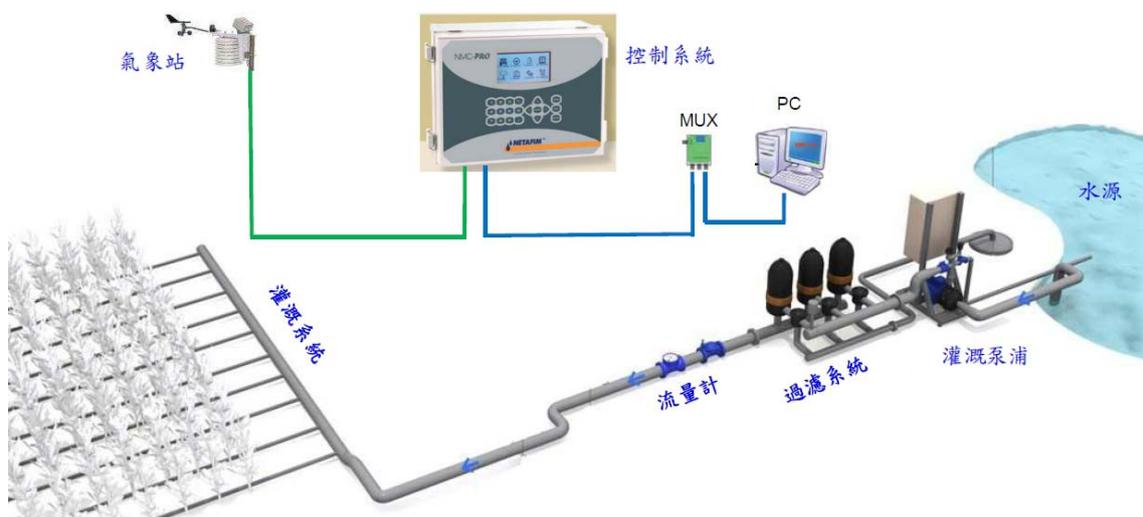


圖1 Netafim滴灌系統灌溉配置圖

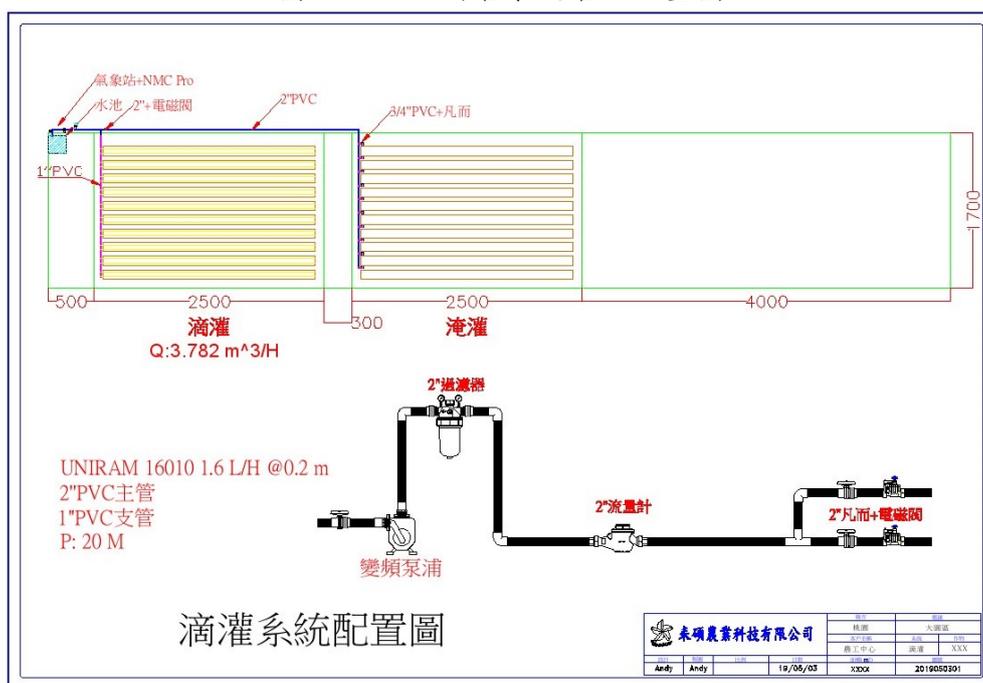


圖2 滴灌系統配置圖

3.2 作物環境控制系統整合

自動控制使管路灌溉可精密分水，準確供水，自動施藥，監視土壤含水分；代替人力做全天候之執行功用，以降低成本，提高收益。灌溉自動控制，從簡單手動操作至高度自動控制之設施，有多種方式，其功能有簡單分水之開啟關閉操作、水壓開關、噴藥噴肥自動混入操控等，在設置自動控制，須依自然條件及農業經營方式充分檢討，分析比較投資經濟效益，作適切之配置，一般均由控制設備及控制程式所組成，利用相關設備及控制指令完成控制系統，提供作物最佳生長環境。作物控制系統具備之優點包括節省勞力；減小設備容量，提高效率；提高水之利用效益；充分發揮水-土壤-作物之關係；配合農業機械化；提高作物產量。

自動控制基本原理，乃針對各項操作條件分別檢討，應用資料處理，將各項操作轉化為一般性操作，使合乎以點為控制對象，充分利用輪替方式。即自動控制原理須包括下列三項：

1. 自動檢測：檢測管路壓力、流量、抽水機動力源及作物生理指標。
2. 自動操作：抽水機及控制閥之啟動開關、輪灌之執行等。
3. 自動調節：根據自動檢測結果，依實際需要，自動調節控制閥之開度及抽水機之轉速，以符合必要之條件。

3.3 作物栽培智慧管理平台發展

本計畫開發一個管理平台供管理者及用戶(農民)共同使用，因此完整的架構包括一個供農民使用的介面(以下稱為前臺)和一個供系統管理員查詢及管理的介面(以下稱為後臺)。整個系統架構功能包含以下規劃：

1. 供農民監看耕地環境及作物生長狀況。(前臺)
2. 供農民遙控灌溉、排水、照明等設備之功能。(前臺)
3. 作為未來平台管理人員管理會員(農民)相關事宜之介面。(後臺)
4. 未來相關單位分析農業供水、生長、產量等數據之供應來源。(後臺)

因計畫擬分年完成，本年度為前導計畫，耕地僅有實驗田，故目前完成前臺監看耕地環境及作物生長狀況功能之開發，其餘部分將於後續計畫進行。本年度系統建置功能主要為環境監控、作物生長紀錄、用水分析、耕地地理資訊儲存、用戶耕地管理等。因應用戶及管理者需求提供展示、查詢、管理之視覺化管理功能，同時為便於後續推廣使用，已同時開發視窗版及手機版等兩種介面，其中手機版採用響應式(RWD: Responsive Web Design)網頁技術進行開發，網頁亦提供給「桃園市水情資訊網」介接。建置軟體時也符合水利署「水資源物聯網安全要求建議書」等規定辦理。

本年度計畫之平台主要功能有四項：

1. 擔任背景服務伺服器：接收佈設於田間之感測器所傳遞來之監測值，包括：
 - (1).環境監測，如溫度、濕度、大氣壓力、雨量計、日照計(日輻射計)、土壤水分張力計、流量計等。
 - (2).控制器狀態監測，如電池電壓、太陽能板電壓、電量計算等。
2. 擔任資料庫功能：除接收感測器所傳遞來之監測值，同時也提供管理員跟使用者登打及查詢耕地相關資訊，例如：

- (1).耕地資訊，如種植面積、產量、產值、土壤、地形等。
 - (2).用水方式，如灌溉方式(漫灌、溝灌、噴灌或滴灌)、地面水(水庫、農塘)、回收水(或再生水)、地下水、分布位置、潛在可用水量、水源、給水量、給水頻率等。
 - (3).作物資訊，如作物種類、水分生理特性、需水期程等。
3. 分析灌區內各項資訊：依據接收及登打之資料，分析灌區內農作物特性，如栽種期、農地收益、區域分布、灌溉管理方式彙整、耕作方式統計、人力勞動時數、空間、時間與生長過程等。
 4. 資料查詢及作物環境監控：建置作業網頁，供管理員及使用者登打、彙整及分析所有資料；另外建置一個作物環境監控RWD網頁，供使用者查詢及管理該用戶所擁有之耕地及作物資訊。

四、智慧節水試驗規劃

依據本計畫目標及工作項目內容要求，本年度示範場域施設在農業工程研究中心(以下簡稱農工中心)位於桃園市大園區之試驗田區，農工中心之試驗田區主要用途為水稻田及早作物之現地試驗，以架設觀測及試驗儀器，更改物理環境或耕作制度來進行農業試驗。茲將示範場域(試驗田區)資料說明如下：

4.1 示範場域布置與監測規模說明

示範場域為(一).土地區段地號：桃園市大園區五塊厝段大埔小段938、939、940號地段。(二).用地編定：特定農業區農牧用地。(三).兩期作水稻田區，臨6米產業道路。本計畫示範場域位屬桃園水利會桃園大圳第4支線4-5號埤塘灌區，田區坵塊長為93 m、寬17 m(面積：0.1581 ha)，田面經2018年農委會計畫試驗以雷射整平，田區上游現設有供水蓄水池提供試驗供水所需，本計畫示範場域相關位置及空拍圖如圖3及圖4所示。

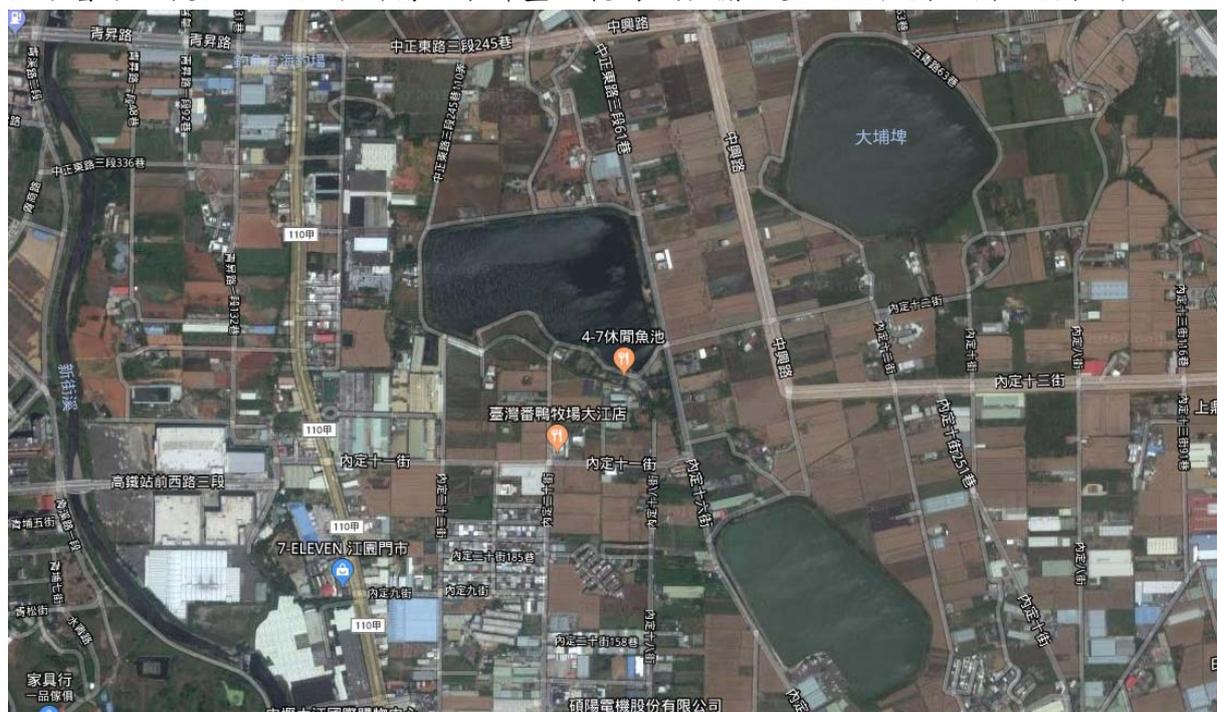


圖3 本計畫示範場域(試驗田區)周邊區位圖



圖4 本計畫示範場域(試驗田區)坵塊空拍圖

本計畫研究團隊規劃試驗田區設置試驗組與對照組田區，試驗組以設置滴灌系統為主、對照組則以該作物之慣行農法為主。試驗田區坵塊規模相同，均為長25 m與寬15 m之試驗田區，試驗田區面積375 m²；水源為桃園大圳第4支線水源，經由4-5號埤塘調節放水供灌。

示範場域控制系統施設以完整記錄及擷取所有數據為前提，施設2組控制系統，第1組為智慧節水滴灌系統、第2組為氣象暨土壤水分記錄站。因此示範場域(田區)設置1套智慧滴水灌溉系統，作為試驗組的主要灌溉設施。田區設置氣象監測設備1組，包含紀錄擷取器、溫度計、溼度計、壓力計、雨量計、日照計(日輻射計)、風速計等設施。為監測兩田區之土壤水分狀況，每一試驗組施設土壤水份計6支；流量監測方面，為監測兩試驗田區於試驗期間之分別引灌水量及排出田區水量，各田區設置1組入流監測及出流監測；其中入流量監測統一由滴灌系統的2組流量計分別觀測試驗組及對照組之供灌水量，因此另需於設置2組流量觀測設備，2組分別施設於2田區之出流口處；由於本計畫於田間實施，水量極小，採用6吋PVC排水管配合自記水位計監測方式獲得排水量。

4.2 示範田區參數調查及試驗規劃

本計畫今年度以執行2次蔬菜省水試驗為主，農工中心針對試驗所需設備裝置、系統安裝測試、田區整備、試驗區移苗、試驗觀測及作物收成等不同階段工作進行期程安排，如表1所示。

為進行不同灌溉方法之用水量比較，本計畫於示範場域(田區)規劃設置智慧節水之滴水灌溉(試驗組)及實施傳統慣行農法採用溝灌之對照組；每一田區規模為L×W=25 m×15 m；每一田區布置坵塊(畦)10塊，每1塊畦寬度為1m、每1塊畦之兩側均為寬50 cm

之灌溉土溝，如圖5所示。作物栽培行距參考曾盟群(2015)之建議指出，作物行距主要提供作物合適生長空間，若行株距拉大可提高通氣性行株距建議短期葉菜類一般株距15~25 cm、番茄或包葉菜類40~60 cm、小胡瓜40~60 cm、南瓜或絲瓜為1~2 m。由於栽培作物種類及習慣差異，設計可調整單畦、雙畦或半畦作業，畦面寬度與畦溝深度可任意調整；例如迴轉犁寬度2.4 m，一次作單畦畦面寬200 cm，畦溝寬30 cm，畦溝深28 cm。基於上述原則，本計畫採用蔬菜作物行距(株距) 25 cm，如圖6所示，滴水灌溉試驗組編號，每一畦分別為D-1、D-2...，實施傳統慣型農法對照組編號，每一畦分別為T-1、T-2...；後續田間紀錄依各小坵塊分別記錄統計及分析。

表 1 智慧節水灌溉試驗期程規劃一覽

月份	日期		序號	事件項目	
	起	訖			
一、試驗場地整備					
7月	7月5日	7月5日	1.	設備控制機房安裝	
	7月8日	7月9日	2.	試驗田水稻收割及整地	
	7月10日	7月12日	3.	試驗田區畦溝製作	
	7月15日	7月19日	4.	設備安裝-滴灌系統、給排水系統	
	7月18日	7月18日	5.	設備安裝-氣象設備、土壤水分計	
	7月18日	7月19日	6.	無線傳輸設備及測試(申請電信號碼)	
	7月18日	7月19日	7.	系統試運轉	
二、第1次短期旱作物節水試驗(小白菜)					
	7月12日	7月18日	1.	小白菜育苗(7/12育苗)	
	7月18日	7月19日	2.	小白菜植苗(7/18送苗至田區)	
	7月19日	7月19日	3.	試驗田區灌水浸潤土壤	
8月	7月20日	8月11日	4.	節水試驗進行(生長情形觀測)	
	8月12日	8月13日	5.	產量、品質檢測作業	
	8月14日	8月15日	6.	田區整理	
	三、第2次短期旱作物節水試驗(萵苣)				
		8月10日	8月15日	1.	萵苣育苗
		8月16日	8月17日	2.	萵苣植苗
	8月16日	8月17日	3.	試驗田區灌水浸潤土壤	
9月	8月16日	9月17日	4.	節水試驗進行(生長情形觀測)	
	9月16日	9月17日	5.	產量、品質檢測作業	

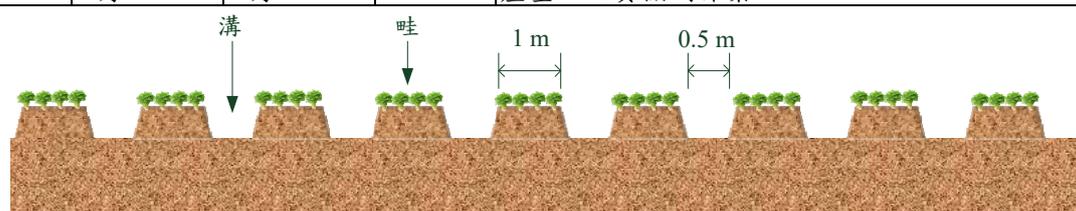


圖5 示範場域(試驗田區)之畦塊及土溝佈置

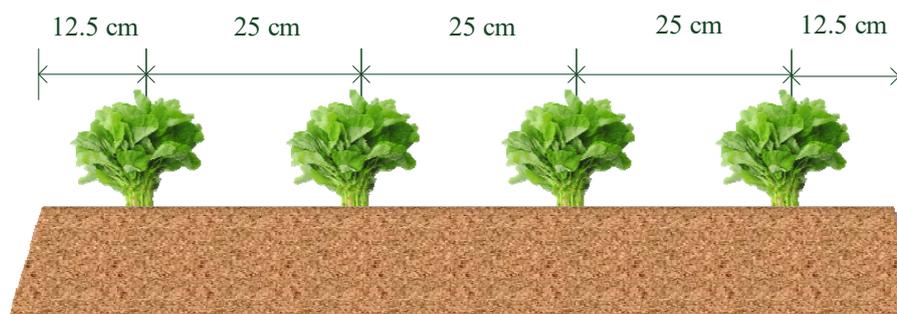


圖6 每一畦塊之作物栽培行距示意圖

本試驗水源乃自桃園大圳4-5號埤塘放水至第4支線小給水路後，由該水路取水引入

蓄水池後，再分別由滴灌系統抽水管路灌溉及使用管路閘門控制對照組所需灌溉量流入田區，若試驗過程遭遇降雨產生之逕流或溝灌區引灌過量之迴歸水則可由下游PCV排水管及自記水位計量測得，並經由曼寧公式輔助推估排水量。

為確認本試驗使用之水體品質安全無虞，農工中心於2019年3月8日進行水體採樣，由環境試驗室檢驗均符合灌溉用水水質標準；其中水體呈現微黃濁，pH為7.64、DO為8.20 mg/L、水溫為17.9°C、EC為171 ($\mu\text{s}/\text{cm}$, 25°C)，氨氮為0.16 mg/L、硝酸鹽氮為0.16 mg/L、亞硝酸鹽氮未檢出、磷酸鹽為0.32 mg/L；重金屬項部份則檢出但未超標，銅(Cu)為0.0037mg/L、鋅(Zn)為0.0232mg/L、鉛(Pb)為0.0021mg/L、鎘(Cd)為0.0033mg/L、鉻(Cr)為0.0037mg/L、鎳(Ni)為0.0025mg/L。

試驗田區所需灌溉水量之計算，依臺灣省農田水利會聯合會(2007)之計算方法，計算總速效性有效水分TRAM為本試驗區之灌溉需水量，TRAM計算之意義在於土壤水分由田間容水量降至永久凋萎點時水量，多久需灌溉一次？則需配合田區每日消耗性水量推估，若不考量降雨，平時田區之消耗水量為蒸發散量及土壤層之入滲量，由(5-5)式可推估適當之灌溉期距，或推算一日之灌溉頻率；向為民等(2005)指出利用高頻度灌溉(一日一次或數日一次者)或稱少量頻繁灌溉法，可以精準控制維持土壤水分張力在適當範圍內，以保持良好通氣、水分及疏鬆的土壤物理狀；由於作物生長適當溫度為15~25 °C，作物於土溫超過30 °C時可能受抑制。本計畫配合智慧節水灌溉系統之操作，將灌溉頻率定為每日1次，依據田區時序需求水量給水；初始設定為溝灌供水1小時(定額17噸水量)、省水滴灌系統設定為1小時(4噸)，供水頻率視氣候及田區土壤水分臨前條件予以調整。

五、智慧節水管理系統試驗效益評估

本計畫共進行2次短期蔬菜作物栽培智慧節水試驗，第1次以小白菜為試驗對象、第2次則為萵苣，茲將2次作物栽培智慧節水試驗效益評估說明如下。

5.1 灌溉用水量差異評估

本計畫試驗過程以實際用水量進行節水效益評估，另施灌效率 E_a ，因試驗期間並無流量流失(迴歸水)，因此實驗組與對照組之施灌效率相同，以下僅針對試驗期間之用水情形及成果分析如下。

第1次及第2次試驗期間之灌溉水量觀測結果分別彙整如圖8、圖9所示，藍色長條圖為滴灌區之給水量，綠色長條圖為溝灌區之給水量。第1次試驗期間滴灌區之給水量約為1.88~4.39 (cmd)，平均值為3.01 (cmd)；給水量多寡需視當日溫度及田面乾溼程度，於試驗第1天為確保試驗作物能順利度過苗期，故給予較多之灌溉水量，而後開始降滴灌溉水量於1.88~1.90 (cmd)，然至試驗第9天(8月2日)，連日不雨、土壤表面龜裂，故將滴灌時間延長增加滴灌灌溉水量約3.77~3.82 (cmd)，溝灌區之灌溉水量則較固定約4.36~8.43 (cmd)，平均值為6.62 (cmd)；試驗第15天(8月8日)，為避免颱風夾帶之雨勢造成試驗田區土壤水份過高以至於根系泡水腐爛，將2處試驗田區之灌溉閘關閉，故試驗第15~19天(8月8日至12日)均無給水紀錄，總給水量方面滴灌區及溝灌區分別為39.19 m^3 及92.73 m^3 ，初步估算節水量約57.74 %。

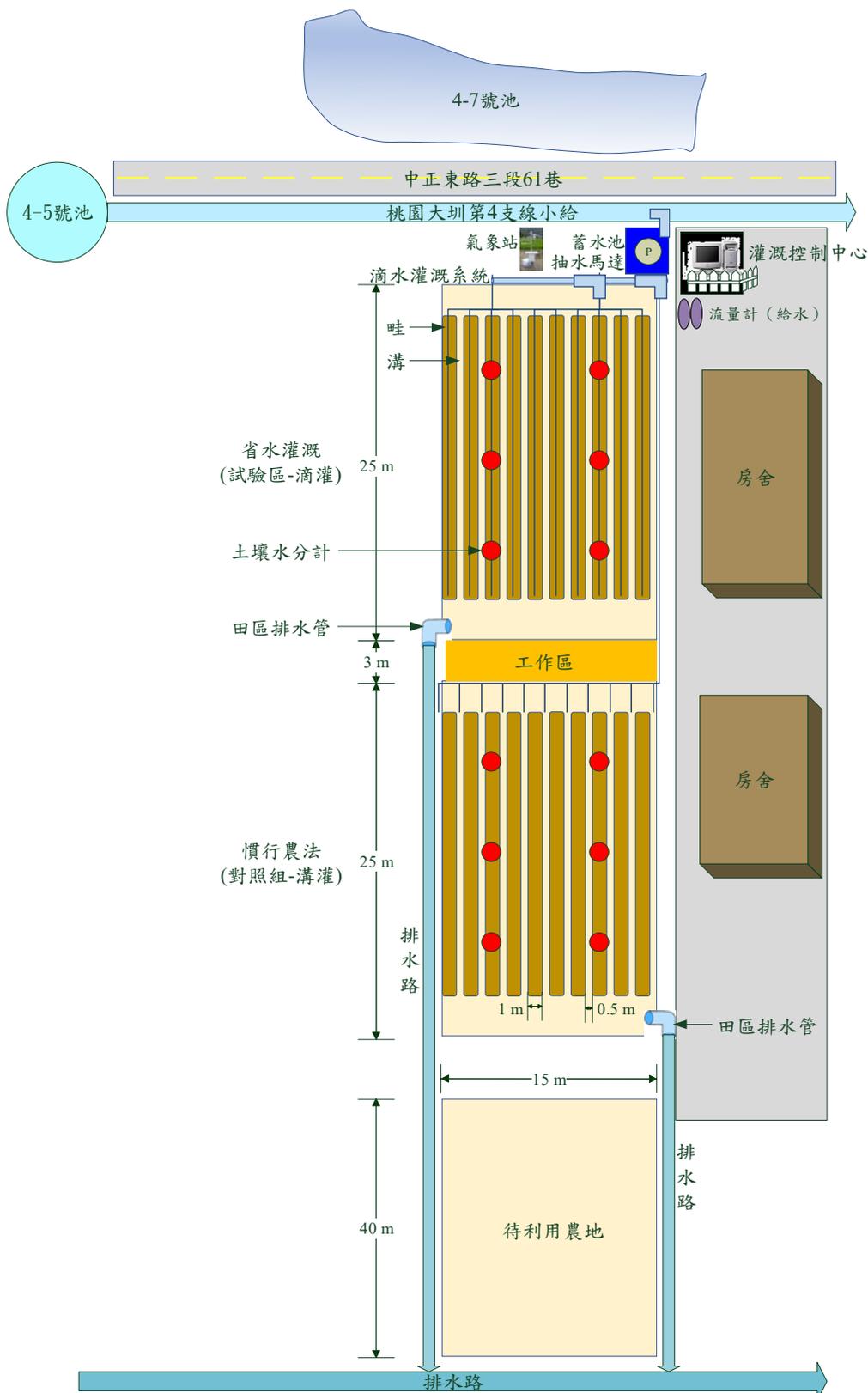


圖7 示範場域(試驗田區)之感測元件及灌溉設備布置示意圖

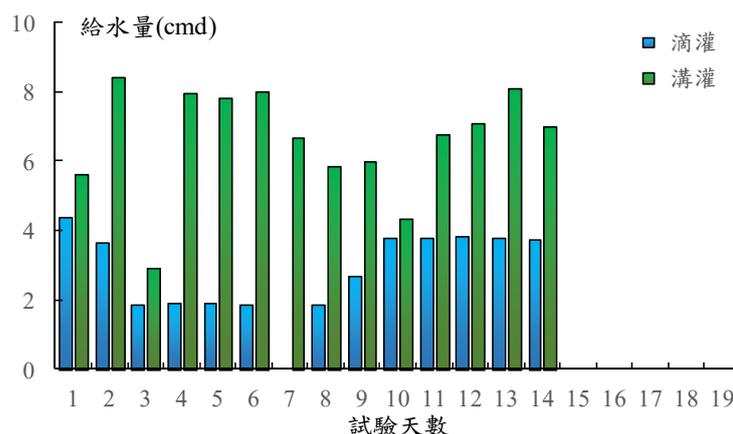


圖8 第1次智慧節水灌溉試驗期間之給水量觀測資料一覽

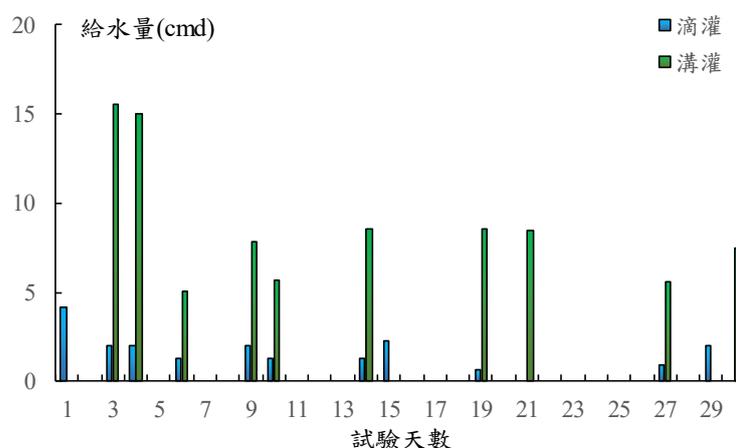


圖9 第2次智慧節水灌溉試驗期間之給水量觀測資料一覽

第2次試驗滴灌區之給水量約為0.9~4.14 (cmd)，平均值為1.81 (cmd)；給水量多寡需視土壤水份計之數據進行調整，於試驗初期為確保試驗作物能順利度過育苗期，故給予較多之灌溉水量(4.14 cmd)，而後開始降低灌溉水量於0.9~2.03 (cmd)，至試驗第3天(8月17日)，依據土壤水份計數據將滴灌時間延長增加滴灌灌溉水量約1.97~1.99 (cmd)，溝灌區之灌溉水量則約5.01~7.84 (cmd)，試驗初期為使得畦溝之間充滿水份增加灌溉水量為14.99~15.58(cmd)；試驗第22~26天(9月5日至9日)，因應9月4日至6日降雨事件之雨勢可能有土壤水份過高、根系腐爛之虞，故將2處試驗田區之灌溉閘關閉，故該期間內均無給水紀錄，總給水量方面滴灌區及溝灌區分別為19.88 m³及87.79 m³，節水率經計算分析約77.36%。

5.2 短期標的作物產量差異評估

由於作物產量優劣直接影響農民收益，亦是影響農民是否願意使用智慧節水管理系統之關鍵因子。本計畫針對第1次作物省水試驗(小白菜)及第2次作物省水試驗(萵苣)之作物產量試驗結果彙整如表2及表3、圖10及圖11，其中第1次的小白菜試驗成果顯示試驗期間存活株數比例甚高，滴灌區折損率約為溝灌區的1/3，滴灌區的總收穫量為3,965株，總重為89,570 g，略高於溝灌區的3,906株(84,961g)，若以每一單株評估，滴灌區為25.4 (g/株)，約為溝灌區24.1 (g/株)的1.05倍。第2次的萵苣試驗成果顯示試驗期間受作物類別特性、溫度及蟲害的影響，株數折損比例較第1次試驗相對偏高，滴灌區折損數量

620株與溝灌區618株數量相似，滴灌區的總收穫量為2,380株，總重為74,458 g，明顯高於溝灌區的2,382株(40,207 g)，若以每一單株評估，滴灌區為33.6 (g/株)，約為溝灌區18.1 (g/株)的1.86倍；滴灌區第2次試驗所用水量更低於第1次，溝灌區維持相同的灌溉頻率及原則，顯見利用滴灌系統配合氣象及數壤水分感測元件操控灌溉及排水，可獲得良好之作物收穫量及品質；後續建議朝向系統自動判斷及操作的方式，逐步達成智慧灌溉、智慧省水、智慧管理的目標。

表 2 第 1 次智慧節水試驗-小白菜作物收成統計一覽

滴灌區						溝灌區					
畦別	試驗株數	不良或死亡	收成株數	總重量	單株重量	畦別	試驗株數	不良或死亡	收成株數	總重量	單株重量
D-1	400	2	398	9,648	27.3	T-1	400	7	393	11,523	32.9
D-2	400	3	397	6,255	18.4	T-2	400	20	380	8,687	21.4
D-3	400	4	396	5,503	16.0	T-3	400	15	385	6,089	16.7
D-4	400	6	394	3,548	10.8	T-4	400	30	370	7,796	19.4
D-5	400	7	393	9,260	26.1	T-5	400	5	395	12,445	35.3
D-6	400	3	397	11,309	32.0	T-6	400	7	393	9,899	30.5
D-7	400	4	396	9,477	26.6	T-7	400	4	396	7,366	20.7
D-8	400	1	399	9,672	26.9	T-8	400	1	399	7,450	26.0
D-9	400	2	398	11,491	32.1	T-9	400	2	398	7,499	20.5
D-10	400	3	397	13,407	37.6	T-10	400	3	397	6,207	17.4
總計	4,000	35	3,965	89,570		總計	4,000	94	3,906	84,961	

註：試驗株數、不良或死亡、收成株數單位為株；總重量及單株重量單位為 g。

表 3 第 2 次智慧節水試驗-萵苣作物收成統計一覽

滴灌區						溝灌區					
畦別	試驗株數	不良或死亡	收成株數	總重量	單株重量	畦別	試驗株數	不良或死亡	收成株數	總重量	單株重量
D-1	300	66	234	6,485	30.3	T-1	300	24	276	4,409	17.2
D-2	300	32	268	10,373	41.8	T-2	300	25	275	4,964	19.5
D-3	300	55	245	6,430	28.6	T-3	300	54	246	3,718	16.5
D-4	300	32	268	8,185	33.0	T-4	300	60	240	5,409	24.6
D-5	300	60	240	6,523	29.7	T-5	300	85	215	3,340	17.1
D-6	300	14	286	11,324	42.6	T-6	300	40	260	5,973	24.9
D-7	300	80	220	7,749	38.7	T-7	300	75	225	3,330	16.2
D-8	300	71	229	7,761	37.1	T-8	300	62	238	4,358	20.0
D-9	300	130	170	3,915	26.1	T-9	300	89	211	3,405	17.8
D-10	300	80	220	5,713	28.6	T-10	300	104	196	1,301	7.4
總計	3,000	620	2,380	74,458		總計	3,000	618	2,382	40,207	

註：試驗株數、不良或死亡、收成株數單位為株；總重量及單株重量單位為 g。

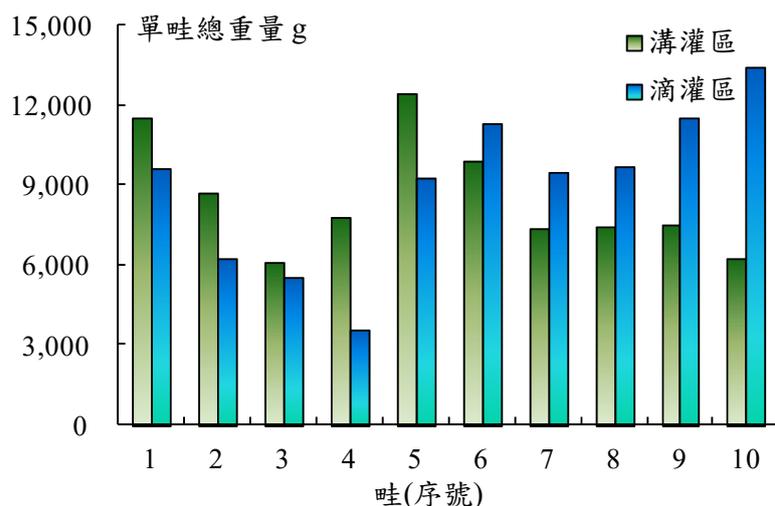


圖10 第1次智慧節水試驗-小白菜各畦之收成重量比較

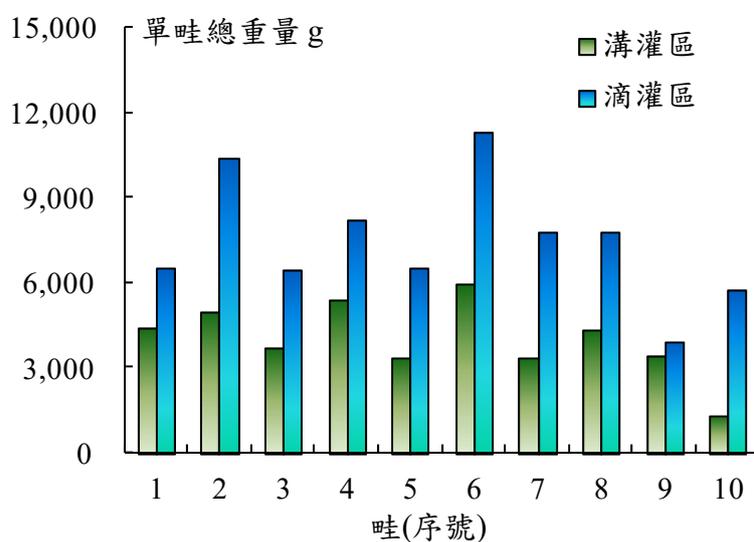


圖11 第2次智慧節水試驗-萵苣各畦之收成重量比較

六、回收水應用於農業灌溉之可行性評估

考慮桃園市境內各水資源回收中心及其周圍灌區位置，本計畫選定大溪水資源回收中心及桃園北區水資源回收中心等2處水資源回收中心，作為回收水應用於農業灌溉之可行性評估廠區。

1. 大溪水資源回收中心回收水應用可行性評估：

大溪水資源回收中心回收水現行放流承受水體為大漢溪支流街口溪排水，為桃園市市管區域排水，其最近一期申報之回收水為2018/10/01~2018/12/31，平均每日放流量約2,058.74 噸(約0.02 CMS)，尚未達到大溪水資源回收中心最大設計處理容量3,750 cmd (約0.04 CMS)，回收水目前用途分別為娛樂及環境用水；景觀澆灌及都市非飲用水及地面水補注用水。

至大溪水資源回收中心周遭調查耕地種植作物結果顯示，鳶山堰供灌之石頭溪圳灌區，種植作物多為短期作物(葉菜類蔬菜)；鄰近大溪水資源回收中心，位於放流口上游

之月眉圳灌區則以水稻為主、蔬菜各半。由水質數據顯示，大溪水資源回收中心回收水為可利用於景觀澆灌之水體，本計畫規劃以月眉圳灌區末流、大溪水資源回收中心周遭12ha土地中約10.6 ha農牧用地為示範區域，因該區域位於月眉圳灌區末流，屬水源相對缺乏之區域。規劃區域內種植之作物為稻作、火龍果、樹苗及景觀作物(盆栽)，經初步訪查得知當地里長正積極推廣地方社區發展生態教育，為潛在回收水應用使用者及推廣者之一，本計畫依現場地勢規劃2種供水方案進行評估，方案說明如下：

方案一：分散式加壓供水系統

設置3組灌溉水路系統，由現行放流口抽水至各自管線末流之配水池，有用水需求之農民再自行自配水池引水灌溉或於私有農地設置配水箱引水灌溉，3組灌溉水路分別為北區系統、南1系統、南2系統，主幹線長度分別約330m(北區系統)、240 m(南1系統)、700 m(南2系統)。配水工程以40萬元/處概估，3處配水池之工程經費約120萬元；輸水工程以4" PVC管每進行米350元/米估算，需佈設管線總長約1,270 m，工程經費約45萬元；抽水工程設置5台15 hp抽水機(3台常態運轉、2台備援)，以每台25萬元估算(含安裝)，購置費用約125萬元；分散式加壓供水系統方案概估工程總經費約290萬元。

方案二：重力式供水系統

設置1座直徑10 m、總高10 m，蓄水量約100噸之蓄水塔且於塔頂設置觀景台，由現行放流口抽水至蓄水塔貯存，其下方配水管線分為北區配水系統、南區配水系統等2組水路系統，由水塔底部洩水閘放水至管路沿線之配水箱，有用水需求之農民自行於私有農地設置配水箱引水灌溉，蓄水塔塔頂觀景台亦可作為環境教育平台使用。配水工程以60萬元/處概估，1處蓄水塔之工程經費約60萬元；輸水工程以4" PVC管每進行米400元/米估算(含配水接頭預留口)，需佈設管線總長約2,075 m，工程經費約90萬元；抽水工程設置2台15 hp抽水機(1台常態運轉、1台備援)，以每台25萬元估算(含安裝)，購置費用約50萬元；重力式供水系統方案概估工程總經費約200萬元。

2. 桃園北區水資源回收中心回收水應用可行性評估：

桃園北區水資源回收中心回收水現行放流承受水體為南崁溪，其最近一期申報之回收水為2018/10/01~2018/12/31，平均每日放流量約28,096.03 噸(約0.33CMS)，尚未達到桃園北區水資源回收中心最大設計處理容量50,000 CMD(約0.58 CMS)；回收水目前用途分別為娛樂及環境用水及景觀澆灌及都市非飲用水。

由水質數據顯示，桃園北區水資源回收中心回收水為可利用於景觀澆灌之水體，本計畫考量桃園北區水資源回收中心緊鄰桃園農田水利會2-23號池，且現有生態池原為該池之一部分，故初步規劃於生態池興建一連絡水路至2-23號池，並於生態池端設制水門一座，平日將回收水蓄存於生態池內，連絡水路制水門之起閉操作則依桃園農田水利會2-23號池灌區需求調配，受益之供灌面積以2-23號池灌區計算，受益面積約143.56 ha。水路連接工程以6,000元/m概估，生態池連接至2-23號之連絡水路總長約50 m，連接工程總經費約30萬元，周邊雜項工程以15%計算(含水門、操作設備、道路交通管制…等)，工程總經費約35萬元。

七、結論與建議

7.1 結論

1. 因應臺灣水資源短缺以及氣候變遷的雙重挑戰下，本計畫以農業行為的灌溉管理為出發點，在不破壞環境平衡、水資源使用更有效率的前提下，於農業生產過程導入智慧化管理，盼可達成節水且同時兼顧農業生產，作為氣候變遷下提升水資源韌性的可行方案。
2. 本計畫完整蒐集桃園市境內作物基本資訊、多元水源盤查、國內外案例與相關文獻後，就(1).作物需水特性、(2).用水來源、(3).作物代表性、(4).國土規劃適宜性、(5).是否為地方重點發展作物等篩選原則進行綜合評析，篩選出本計畫本年度與後續推動之標的作物。本年度標的作物以短期旱作物為主，分別為葉菜類蔬菜的小白菜及萵苣等2種；後續2年度標的作物篩選建議分別為2020年的(1).果菜類蔬菜(胡瓜或蕃茄)、(2).常綠果樹(火龍果)；2021年的(1).水稻、(2).根莖類蔬菜(馬鈴薯或芋頭)。
3. 本計畫以桃園境內重要農業生產為節水的產業對象，透過物聯網(IoT)之感測技術整合、智慧環控技術、智慧管理技術等，透過作物栽培過程之相關生長與環境參數組合，建立不同作物之前瞻智慧節水管理系統。除建立田區微氣候監測站，並於試驗田區構建環境監測系統，感測元件包含(1).溫度、(2).濕度、(3).風速風向計、(4).日輻射計、(5).大氣壓力計、(6).雨量計、(7).土壤水分張力計、(8).自記水位計、(9).自動資料蒐集記錄器；智慧灌溉系統採用以色列Netafim滴灌設備作；透過NMC PRO灌溉控制器及網路傳輸裝置(4G)進行資料紀錄及傳輸整合。
4. 作物栽培智慧管理平台擬分年完成，本年度為前導計畫，耕地僅有實驗田，故目前完成前臺監看耕地環境及作物生長狀況功能之開發，系統建置功能主要為環境監控、作物生長紀錄、用水分析、耕地地理資訊儲存、用戶耕地管理等。因應用戶及管理者需求提供展示、查詢、管理之視覺化管理功能，同時為便於後續推廣使用，已同時開發視窗版及手機版等兩種介面。
5. 本計畫智慧節水試驗於農工中心位於大園區試驗田區執行，2次試驗作物依序為小白菜及萵苣，試驗期間為7~9月，示範場域包含 試驗組(滴灌區)及對照組(溝灌區)，每一區試驗田長25 m、寬15 m(面積375 m²)，試驗水源為桃園大圳灌溉原水，各試驗田區設置10畦，每畦種植400株，每1試驗田區4,000株，總計第1次試驗蔬菜總株數為8,000株；第2次試驗則改種植福山萵苣，總株數為6,000株。
6. 第1次智慧節水試驗期間為移苗(7/25)至作物收成(8/13)，田間試驗共計20日；本計畫依據智慧節水管理系統試驗成果初步顯示採用智慧節水系統應用於試驗組(滴灌區)較傳統農法的對照組(溝灌區)節省水量約57.7%；另作物品質評估，針對作物抽樣800株進行(1).生長株高、(2).葉片數量、(3).單葉葉寬、(4).單株總葉寬等4項參數觀測，利用Rg(H)(株高生長倍數)、Rg(L)(葉數生長倍數)等指標進行評估，以釐清省水灌溉對於生長及產量之影響；試驗成果顯示Rg(H)及Rg(L)分別介於0.86~1.05及0.91~1.04，綜合評估顯示滴灌或溝灌方式對作物生長無明顯趨勢，惟產量具增產5%之正面影響。第2次智慧節水試驗期間為移苗(8/16)至作物收成(9/17)，田間試驗共計30日；依據智慧節水管理系統試驗成果顯示採用智慧節水系統(滴灌)較傳統農法(溝灌)節省水量約77.3%；另作物品質評估，針對作物抽樣400株於收成日進行(1).單株株高、(2).單株重量、

(3).單株總葉寬等3項參數觀測，以釐清省水灌溉對於生長及產量之影響；試驗成果顯示使用滴灌之水量僅約溝灌水量22%的前提下，單株株高約為1.24倍、平均總葉面寬為1.25倍、平均單株重量高達1.91倍；顯見灌溉方法選用及感測元件之搭配決定灌排時機，有助於大幅節省水源又可確保(提升)原有作物品質及產量之雙贏目標。

7. 考慮桃園市境內各水資源回收中心及其周圍灌區位置，本計畫選定大溪水資源回收中心及桃園北區水資源回收中心等2處水資源回收中心，作為再生水應用於農業灌溉之可行性評估廠區。以多元水資源利用的考量，綜合評估及盤點水資源回收中心之再生水可再利用之用途及潛在供水農地範圍及潛在效益。

7.2 建議

1. 本年度計畫為前導試驗性質，經由氣象、水文感測元件的建置並透過4G穩定傳輸方式，兩次作物栽培省水試驗期間均能隨時掌握田區資料，惟後續若於系統技術成熟及整合完成後，欲推廣至其他區域，則須考慮偏遠地區用電及無線傳輸覆蓋率是否完善之問題，因此有必要進一步嘗試太陽能或低功耗傳輸的方式，以提高於都會區或偏遠區域均能適用。
2. 本年度建立之智慧節水系統採用以色列的滴灌系統，該系統之操作模式為封閉式，無法提供規劃者將針對特定作物之給水及排水的時機原則及量體設定進程式撰寫的方式，讓系統以自動感測及執行決策的方式操作，因此尚未能達成智慧化的階段，現階段僅能稱為自動化灌溉系統；因此後續仍須針對如何將程式可與智慧節水的控制系統連結進行系統的調整及改進。
3. 本年度計畫安裝多種感測器、氣象儀器及一套灌溉系統於示範田區。其中氣象儀器重要性對於農民而言相對較低，針對旱作物栽培，主要設備仍為田間土壤水分感測器及灌溉系統。前者監測土壤含水量，決定是否啟動灌溉系統，後者則配合適時、適量供水。兩者若充分配合則可達到自動化灌溉，有效降低人力管理時間。依據本計畫使用經驗，發現仍有改善空間，例如土壤水分計的探腳長度多在5~10公分，無法涵蓋全部根系範圍，可朝向開發探腳長度更長的產品，另土壤水分計的原始量測值與土壤含水量之間的率定關係跟標準程序仍有待進一步研究；以上為後續試驗之參考。
4. 日本在智能農業的推動已有多年經驗及成果。全日本至2014年已有半數以上農戶，選擇使用資訊與通信科技(ICT)與物聯網(IoT)技術，且大幅提高農產品生產效率與行銷效益，亦改善從農人口老化及勞動力不足問題。考量日本農業生產環境及農田水利設施與台灣高度相似，加上日本以智慧化設施導入農業生產已有相當多的成功案例，未來可引進日本智慧灌溉系統及其應用經驗，作為臺灣智慧節水試驗之學習對象。
5. 由於台灣多數農民為小農性質，單一農民使用之農地面積偏小，生產成本相對歐美國家偏高，因此面對智慧節水系統高成本但可擴大應用至50種不同作物分區之特性，建議朝向「小農結盟」方式降低成本、共同創造效益的方式為之，另政府若能針對設備(系統)以水資源節水獎勵金的方式補助用戶購置，將有助於節水系統的推廣，相關配套措施仍需進一步研擬。
6. 農田水利產業除了旱田透過智慧節水系統操作達成節水目標之外，台灣豐富的降雨亦是最豐沛的灌溉替代水源，因此水田如何於水稻生長期間善用歷次降雨事件產生的雨

- 量做為灌溉用水，其量體效益、影響因子、供水及用水機關如何操作值得進一步研討。
7. 本年度計畫建置之智慧節水系統乃針對旱作栽培為應用對象進行感測元件的佈設；由於水田灌溉用水為國內作物栽培用水量之首，因此建議後續智慧節水系統亦可以擴充發展以水稻栽培為主的設備元件，考量水稻及早作物栽培的農機使用方式、用水期程及特性的不同，水稻田的智慧省水感測元件建議朝向給水及排水閘門自動化、地表及地下水位感測連結操作之方式發展，以期後續可全面性應用於不同作物栽培的智慧省水系統之遠程目標。
 8. 再生水為水資源多元應用的方式之一，桃園市境內具多座以生活污水為主要處理目標的各水資源回收中心，經處理後之再生水均具可再利用之潛力，用於工業、生活雜用水、取代灌溉水質不佳的用水等多種用途均有助於提升水資源利用價值，後續可整體規劃其應用之可行性。

參考文獻

1. Allen, Lucy, 2013, 「Smart Irrigation Scheduling: Tom Rogers' Almond Ranch」, Pacific Institute。
2. Muhammad A., Abdul M., 2006, “Water requirements of major crops for different agro-climatic zones of balochistan”, International Union for Conservation of Nature and Natural Resources, Pakistan.
3. Simonne, E. H., Dukes, M. D., Zotarelli, L., 2011, “Principles and practices of irrigation management for vegetables”, AE260, Horticultural Sciences Dept., University of Florida.
4. 向為民、劉禎祺，2005，「合理化施肥之土壤水管理」，農業試驗所特刊第 121 號，合理化施肥專刊，行政院農業委員會農業試驗所、中華永續農業協會出版，第 87-101 頁。
5. 桃園市政府水務局，2016，桃園市水權精進暨旱災應變規劃委託技術服務。
6. 桃園市政府水務局，2018，桃園市再生水評估規劃委託技術服務正式報告書。
7. 財團法人農業工程研究中心，1994，「作物灌溉技術實務」，行政院農業委員會科技計畫成果報告。
8. 財團法人農業工程研究中心，2006~2008，「再生水應用及節水灌溉之理論、技術與設備研發(全程 3 年)」，行政院農業委員會科技計畫研究報告。
9. 陳豐文、陳獻、林筠，2008，自來水及再生水應用於瓜類灌溉之試驗研究，臺灣水利第 56 卷第 3 期。
10. 陳豐文、劉振宇、蔡西銘、林修德，2013，「臺灣農業水權量計算方法對長年作物灌區灌溉管理之影響」，臺灣水利，第 61 卷，第 1 期，p.53~74。
11. 農田水利會聯合會，2015，農田水利會管理類業務規範。
12. 環保署土壤及地下水污染整治網，<https://sgw.epa.gov.tw/public>。
13. 經濟部水利署南區水資源局，2017，「精進灌溉節水管理技術-以嘉南灌區為例」。
14. 經濟部水利署，2009，「地面水水權(臨時用水)登記申請手冊」。