

# 透過田間智能水位感測管理水稻灌溉用水量及 稻株生理性狀與產量變化探討

吳郁嫻<sup>1</sup>、許奕婷<sup>1</sup>、陳忠澤<sup>2</sup>、吳佩真<sup>3</sup>、吳東鴻<sup>3</sup>、賴明信<sup>3</sup>、  
郭寶錚<sup>1</sup>、陳宗禮<sup>1</sup>、楊靜瑩<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>國立中興大學農藝學系

<sup>2</sup>國立中興大學生物科技學研究所

<sup>3</sup>行政院農業委員會農業試驗所作物組

## 摘要

田間智能感測器之應用為智慧農業發展重要趨勢之一，利用無線網路傳輸及物聯網技術，可望緩解農村人力短缺之困境與提高田間作業之效能。將感測器所接收之資料傳輸至雲端中，田間管理者可即時且快速地蒐集作物生長數據與環境資料並進行有效率之管理及決策。水稻於慣行栽培時常需集約使用大量水資源，然而近年來因氣候變遷導致水資源分配不均或汛期漂移，因此提高水資源之調配利用效益成為當前水稻栽培管理之重要議題。本試驗運用智能水位監測器即時蒐集水稻田間各生育期間之水位變化，於水稻全生育期分別進行慣行與乾溼交替之灌溉管理模式，並透過物聯網方式將數據彙整至雲端，而田間管理者可藉由手機或電腦即時獲得田間水位變化資訊。由試驗結果顯示，使用智能感測器進行乾溼交替之水管理，較現行慣行栽培方式可有效節省總灌溉用水量，分別為 30.9% 及 49.8%。且於乾溼交替之水管理模式下不影響水稻發育之生理性

狀，例如株高、葉齡、葉色以及最終之產量報告。進一步整合田間環境資料與植株生理性狀結果顯示，環境中之積溫或輻射量與植株生理性狀中之株高、葉齡、植冠、葉面積具高度正相關，可供作為水稻生產過程精準管理之用。綜合本試驗之結果，田間智能水位感測器應用於稻作進行乾溼交替水管理，將可達有效節省水資源，並使稻作產業朝智慧化生產管理邁進。

**關鍵詞：**水稻、智慧農業、田間智能感測器、水管理、乾溼交替栽培。

## Management of Paddy Field Irrigation Using Intelligent Water-level Monitoring Devices and Examining Corresponding Changes in Physiological Characteristics and Yield in Rice

Yu-Sian Wu<sup>1</sup>, Yi-Ting Hsu<sup>1</sup>, Chung-Tse Chen<sup>2</sup>, Pei-Jhen Wu<sup>3</sup>, Dong-Hong Wu<sup>3</sup>, Ming-Hsin Lai<sup>3</sup>, Bo-Jein Kuo<sup>1</sup>, Chung-Li Chen<sup>1</sup>, Chin-Ying Yang<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> Department of Agronomy, National Chung Hsing University, Taichung 40227, Taiwan, ROC

<sup>2</sup> Graduate Institute of Biotechnology, National Chung Hsing University, Taichung 40227, Taiwan, ROC

<sup>3</sup> Crop Science Division, Taiwan Agricultural Research Institute, Taichung 41362, Taiwan, ROC

\*通信作者, emiyang@dragon.nchu.edu.tw

投稿日期：2019 年 04 月 01 日

接受日期：2019 年 06 月 25 日

作物、環境與生物資訊 16:87-97 (2019)

Crop, Environment & Bioinformatics 16:87-97 (2019)

DOI: 10.30061/CEB.201906\_16(2).0003

In intelligent agriculture technology, the application of intelligent field sensors is a crucial development trend. When used in conjunction with wireless network transmission and Internet of things (IoT) technologies, intelligent field sensors can resolve manpower shortage problems in farm villages as well as improve the efficiency of field operations. By sending the data received by sensors to cloud storage, field managers can collect instantaneous crop-growth data and environmental information; subsequently, these data can be used as a basis for performing efficient management and decision-making. Conventional cultivation of paddy fields typically consumes a large amount of water resources. However, climate change has resulted in a shortage of water resources, causing their effective utilization to become a critical concern in paddy cultivation management. Our results showed that the usage of intelligent sensors for water management of alternate wetting and drying irrigation can effectively save the total irrigation water consumption for 30.9% and 49.8%, respectively, which was compared with the conventional irrigation management. In addition, the physiological characteristics (e.g., plant height, leaf age, and leaf color) in rice and yields were not affected under alternate wetting and drying irrigation management condition. Furthermore, the field environmental information was integrated to analyze the correlation between physiological characteristics in rice and environmental factors. The results showed significant positive correlation between plant height, leaf age, plant canopy, and leaf area in physiological characteristics and growing degree days and radiation in environmental factors. Taken together, we can achieve water resource conservation by used intelligent water-level monitoring devices and advance toward intelligent production management.

**Keywords:** Rice, Intelligent agriculture, Intelligent field sensors, Water management, Alternate wetting and drying planting.

## 前言

在網路普及與資訊流通的世代，農業 4.0 目標為將農業從生產、行銷到消費市場系統

化整合 (Mohanraj *et al.* 2016)。於作物生產管理方面，目標運用人機協同智能機具，在耕作過程中減少人力勞動，並能改善農業作業環境，落實田間管理紀錄。另一方面，透過智能感測機具協助蒐集環境參數 (例如：土壤水分含量、輻射量、風速、濕度及氣溫等)、作物各生長發育階段之生理參數 (例如：葉色、葉齡及株高等)，並彙整入管理資料庫中，進一步建置智慧農業巨量資料平台，再輔以農業專家系統判讀，除了可有效率進行作物栽培管理外，更可進一步達省時省工之目的，並有效穩定生產優質產品 (Chen *et al.* 2018, Srbinovska *et al.* 2015)。

現代農業需加速轉型調整來保障農作物生產品質、進行農業產業結構調整、提高生產穩定品質及解決勞動力缺乏等問題。為了將生產管理從專家經驗轉化為數據化，現代農業需引入跨域多元技術並加值產出主動性訊息，藉由互聯網 (Internet of things, IoT) 將栽培或儲藏環境中感測器所檢測到之各項參數透過網路即時上傳，亦或搭配施藥或施肥日期，可協助生產管理者紀錄，回饋改善生產者栽培經驗，並提供消費者多一層保障 (Chen *et al.* 2018, Tzounis *et al.* 2017)。各式感測器所檢測到之數值或資料量過於龐大，需資料科學人員將數值資料分門別類並進行嚴格管理。領域專家可進一步利用所得之大數據，進行作物品質與環境因子的分析，評估商業生產之供需或產品生產作業曆之排程規劃 (Roopaei *et al.* 2017, TongKe 2013)。因此高端智能設備雖在生產初期看似墊高生產成本，然其節省勞務力與穩定生產優質農產品，皆是未來我國智慧農業永續發展的根基。

隨著近年來全球氣候變遷加劇，導致台灣農業生產面臨水資源分配不均之問題，其中稻作多採湛水栽培，灌溉用水需求量大，時常面臨水資源需求集約但雨季延遲的情境；而水稻栽培管理中，除特定時間點進行肥培與病蟲害防治外，管理勞務主要耗費於水分調控上，然過度簡化水分管理則造成溢

流與肥料流失。因此，如何在有限的水資源下，更有效利用農業水資源達到最大農作物生產效益，並同時精準省工，係重要的永續發展議題 (Chartzoulakis and Bertaki 2015)。東南亞如泰國等地於低地稻栽培地區，藉由雨水灌溉栽培時常遭遇乾旱問題，因此建立許多池塘，除了收集雨水也水產養殖。為解決灌溉缺水問題，東南亞地區與印度孟加拉近年快速普及地下水井管線與抽水幫浦，以調節短期乾旱造成的灌溉缺水問題 (Haefele *et al.* 2016)。He 等人 (2013) 欲提高水稻生產過程時水分的利用效率，在人工氣候室中設置慣行栽培與滴灌處理方式，結果發現，當土壤水勢越低時產量也明顯下降。土壤水勢在-150 毫巴 (mbar) 滴灌處理下，產量下降約 10%，但可節約 27% 用水量，因此認為此水分管理技術未來將可能應用於缺水環境下。針對葉綠素螢光反應與氣體交換能力於不同水分管理策略下影響之研究結果顯示，經淹水-乾旱-飽和水位 (flooding-midseason drying-saturating, FDS) 之處理為水位由 10 公分下降至 3 公分時再灌水至 10 公分，分蘖盛期後水位降至 0 公分，接著間歇灌水維持水位在土面下 0 至 3 公分處，無明顯積水。此種水分處理模式並不影響水稻淨光合速率與氣孔導度，亦不影響水稻產量。然而田間用水量結果發現，FDS 處理相較淹水-乾旱-淹水 (flooding-midseason drying-flooding, FDF) 之處理模式可節約 17.2% 水量，綜合結果顯示，FDS 水分管理模式可以做為節約用水灌溉方式參考 (Wu *et al.* 2018)。

Tao 等人 (2006) 為降低田間土壤水分之散失，利用表面覆蓋稻草或塑膠薄膜於水稻栽培，結果顯示，覆蓋處理之稻田水資源使用比例相較慣行栽培處理節省 32-54%。然而於生理性狀與產量之結果顯示覆蓋處理相較慣行處理，水稻葉面積較小且穗數較少，且產量下降 8%。水稻強化栽培體系 (The system of rice intensification, SRI) 透過利

用水稻自身分蘖發展的規律進行小量水分灌溉節省水分，強化稻株水分、養分與土壤間的管理，以提升水稻產量 25-50%，用水量相較慣行栽培節省約為 25-50% (Satyanarayana *et al.* 2007)。在中國、菲律賓、柬埔寨、印尼等國家種植結果表明，利用乾溼交替的方式有助於提升水稻根系旺盛生長，增強根系生長潛力並減少倒伏問題。另外，根系發展強健亦增加養分吸收與增強抗病性，使產量顯著提升 (Satyanarayana *et al.* 2007)。國際水稻研究所 (International Rice Research Institute, IRRI) 於田間灌溉系統進行乾溼交替管理，以人工目測水位方式，將水位灌溉至土面 4 公分後即停止灌溉，待水位降至 0 公分後才恢復灌溉。結果顯示，水稻可在此管理模式下完成生育，降低灌溉用水量及增加水稻水分利用效率 (Lampayan *et al.* 2015)。

運用資通技術並配合田間感測器可精簡勞務管理，但對其作物經濟生產力與穩定品質之整合技術仍待磨合，本試驗目標為運用田間智能水位感測器及無線網路即時傳輸方式，進行稻作於慣行栽培與乾溼交替不同水分管理模式下之探討。利用田間智能水位感測器於水稻全生長發育時期，全時段監測並記錄田間水位高度之變化，透過物聯網方式將數據彙整至雲端，可即時獲得田間水位變化，藉此評估智能水位感測器對田間水分管理之可行性，並結合水稻生育時期相關性狀，例如株高、葉齡、葉色等非破壞性調查及最終產量報告，朝農業智慧化生產，有效節省人力管理之目標邁進。

## 材料與方法

### 一、試驗地點與材料

本試驗以國內最廣泛種植之梗稻栽培品種台南 11 號為試驗材料，於 2018 年第一、第二期兩期作在台中霧峰之行政院農委會農業試驗所進行田間試驗。

## 二、試驗田區水分管理

本試驗利用兩種不同的田間水分管理方式進行差異性水分管理，控制組田區水分管理採慣行法 (Conventional plant, CP)，依照一般慣行栽培方式提供灌溉水，於全生育時段維持水位 3-5 公分，曬田時停止灌水。處理組田區灌溉採乾溼交替法 (Alternative wet and dry, AWD)，田間水分乾濕交替管理模式為水位最高同慣行模式一樣高，當田間水位值降到 0 後，隔天才進行灌水至水位 3-5 公分，然後停止灌水，反覆進行直到收穫期，其中於曬田時停止灌水，抽穗期避免停水。田區採兩處理，各處理田區大小為 0.1 公頃。利用田間智能感測器之導入進行田間水流量管理，可分為兩個項目，分別為流量計及水位計 (Fig. 1)。流量計每日 9 點依序由人工記錄各田區前一日整日水流量，每兩塊田間設置水閘確保水位高度，讓每塊田流速相近以維持整日流量相近。由智能水位感測器得知當前水位高度，再至田間進行開關水閘，並記錄用水量。為確認智能感測器傳輸水位高度之準確性，於試驗期間亦在田間裝設傳統水位尺，並由人工紀錄水位高度，進行管控。運用水流量計紀錄田間用水量時，灌溉之用

水需注意泥沙混濁情形，且灌溉水中之異物易堵塞流入水孔，因此需時常注意清除異物，確保水表正常運行。智能水位感測模組 (PaddyWatch) 設置於每塊田區中央，可每日全時段偵測田區水位高度、水溫、地表溫度及溼度並透過物聯網將數據記錄於雲端資料庫，使用者可透過專屬的 APP 利用智慧型手機即時獲取田區資訊，並可通過設定，若水位超出臨界值時可傳送警訊通知管理者，達到智慧管理之功能 (Fig. 2)。

## 三、植株生理性狀與田間環境因子調查

調查各處理田區水稻之株高、葉齡、葉色、植冠數值及葉面積等生理性狀，各處理田於前中後標定三小區，每小區標定 15 叢進行生理性狀調查。株高之量測自每叢植株固定選取一主莖量測。葉齡指主莖長出葉的數目，可實際反應水稻植株不同生長發育過程，自每叢植株固定選取一主莖，掛牌標示每株葉片數。自每叢植株固定主莖後，由上向下計算第二成熟葉並使用葉綠素儀 (型號：SPAD 520) 夾取葉身，測量葉片在 650 nm 及 940 nm 兩波長光學濃度差的方式得到當前葉片中的葉色數值。

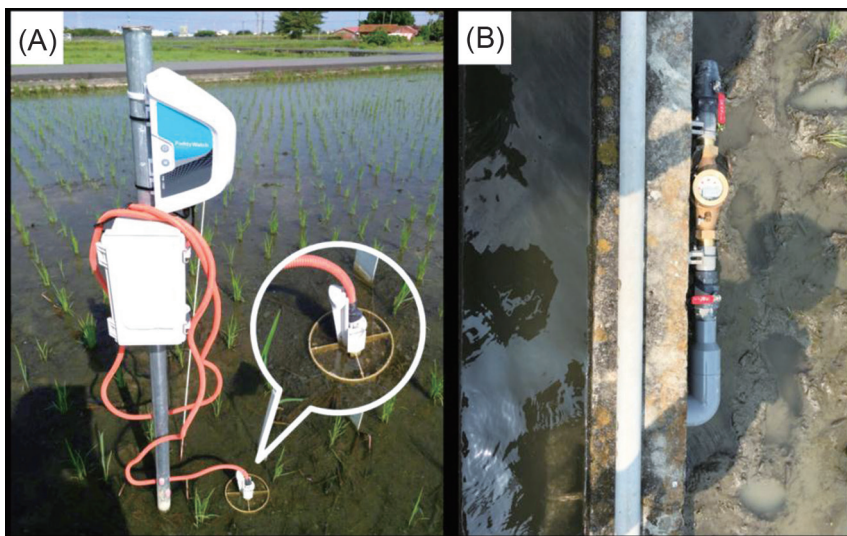


Fig. 1. The photograph of installing paddywatch (A) and water meter (B) in the field in Taiwan Agricultural Research Institute (TARI).

植冠分析方式為每小區選定 4 叢植株 (面積 30 cm×63 cm) 進行分析, 使用植冠儀 (型號: LAI-2000) 進行水平且固定離地高度測量, 將光學感測器置於冠層上方, 確保視野內沒有遮擋物, 按下光學感測器的 Log 鍵來計錄 A 值, A 值表示當下植冠上方的光線值。接著依次於植株 3 個等行距間檢測 B 值, B 值表示植冠下方的光線值。將 A 與 B 數值利用軟體 FV2200 (ver 2.0) 進行植冠面積分析。葉面積分析方式為將植冠分析後之 4 叢植株自各小區刈取後, 將每叢葉片剪下並將各叢葉片攤平送入葉面積儀 (型號: LI-3100、LI-3050A/4) 中, 透過陰影掃描得到各樣本之葉面積。將 4 叢植株之葉面積加總後除以取樣面積 (面積 30 cm × 63 cm), 即可得葉面積指數。本試驗於植株完熟期時, 調查單位面積穗數、每穗粒數、稔實率與千粒重。另外, 各處理田於前中後標定三小區, 每區均取 100 叢, 以自走式小型脫穀機收穫總產量, 乾燥至穀粒含水量 13% 後計算產量。

試驗田區環境資料如累積雨量、日射量及氣溫, 皆由農業試驗所農業工程組姚銘輝研究員研究室之氣象站提供。紀錄一期作與二期作試驗期間之月均溫及平均雨量資料 (Table 1), 供後續田間積溫與總水量計算, 一期作試驗期間為 3 月 2 日至 6 月 8 日, 二期作試驗期間為 8 月 13 日至 11 月 12 日。

#### 四、統計分析

生理性狀數據之統計分析以 Student's *t*-test ( $p < 0.05$ ) 比較同一調查時間下, 慣行栽培與乾溼交替處理間之顯著差異。產量構成要素與產量數據則利用 SAS 9.4 軟體分

析, 經變方分析測驗處理間之顯著性, 再以最小顯著差異性測驗 (LSD test) 進行處理間平均值的差異檢定 ( $p < 0.05$ )。分析環境因子與生理性狀之相關係數 (correlation coefficient) 使用 R 程式 (版本 3.5.2) 之 *corrplot* 套件繪製成梯形圖, 星號表示  $p < 0.05$  為統計顯著相關。因子間相關係數若為正相關顯示數字為正值, 負相關則為負值。

## 結果

### 一、智能水位計協助田間水分管理

水資源之匱乏為當前農業生產面臨之重要困境, 因此水稻節水栽培管理與提高稻株水分利用效率, 是一項重要的議題 (Zhao *et al.* 2011)。智能水位感測裝置連結互聯網, 可即時記錄田間水位變化並搭配栽培曆進行田間管理作業, 試驗兩期作水稻於不同水分管



Fig. 2. Intelligent agriculture: received information of environmental factors by intelligent sensor in the field with internet.

Table 1. Monthly average temperature and rainfall at experiment area in 2018.

| Month                    | First crop |      |       |       | Second crop |      |      |      |
|--------------------------|------------|------|-------|-------|-------------|------|------|------|
|                          | Mar.       | Apr. | May   | Jun.  | Aug.        | Sep. | Oct. | Nov. |
| Average temperature (°C) | 20.6       | 24.0 | 28.0  | 28.4  | 27.8        | 27.9 | 24.5 | 23.4 |
| Average rainfall (mm)    | 27.0       | 29.5 | 118.5 | 220.0 | 470.5       | 32.5 | 0.5  | 15.0 |

First crop from March 2<sup>nd</sup> to June 8<sup>th</sup>. Second crop from August 13<sup>th</sup> to November 12<sup>th</sup>.

理下之生育時期之變化。第一期作於插秧後第 18 天開始利用智能水位裝置監控田間水位高度，慣行栽培 (Conventional plant, CP) 之水分管理採用保持田區水位高度 3-5 公分，其中曬田時停止灌水，而乾溼交替處理 (Alternative wet and dry, AWD) 之水分管理以灌水至水位達 3-5 公分，待水位值降到 0 公分後，隔天再灌水至水位 3-5 公分，反覆處理直到收穫期，其中曬田時停止灌水、抽穗期避免停水。每周進行一次生理性狀調

查，第一期作於插秧後第 42 天開始曬田，第 52 天回復供水，再持續進行差異性水分管理直至收穫。第二期作則於插秧後第 2 天開始利用智能水位裝置監控田間水位高度，每二周進行一次生理性狀調查，並於插秧後第 40 天開始曬田，第 50 天回復供水，再持續進行差異性水分管理直至收穫。由我們的實驗結果得知，透過田間智能水位感測系統可以有效並即時地偵測田間水位高度之變化，達田間智慧化水分管理之差異性 (Fig. 3)。

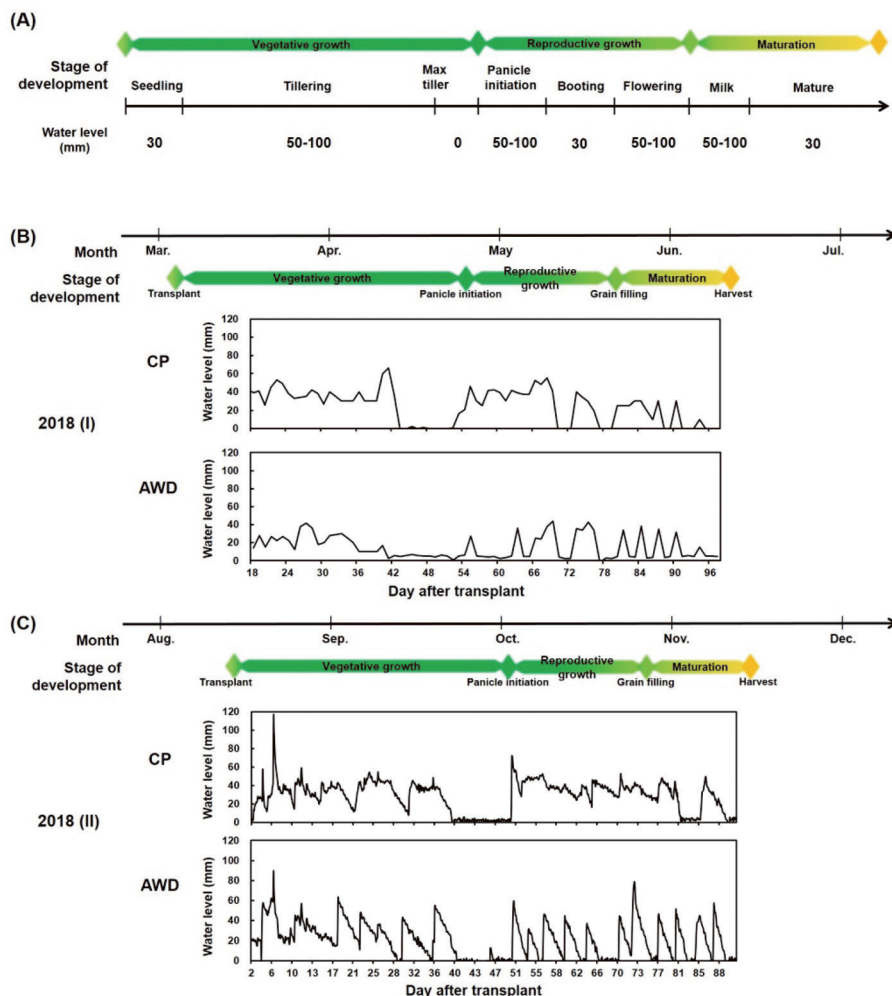


Fig. 3. The rice variety TN11 cultivation calendar and the change of water level during days after transplant in fields. The water level during development process was recorded by intelligent field sensor and compares the effect of treatment between CP and AWD. (A) The model of water management in Taiwan. (B) The cultivation calendar of first crop in TN11. The rice transplanted to soil in March, and harvested in June 2018. (C) The cultivation calendar of second crop in TN11. The rice transplanted to soil in August, and harvested in November 2018. CP: Conventional plant; AWD: Alternative wet and dry.

## 二、不同水管理對農藝性狀與產量之影響

利用智能水位裝置監控田間水位，探討差異性水管理間水稻於不同生育時期之農藝性狀影響。於第一期作不同生育時期下連續調查兩處理間之株高、葉齡與葉色變化，由調查結果可知隨著處理天數增加，於 AWD 模式下，株高與葉齡之變化相較 CP 無顯著差異。另外，利用 SPAD 520 進行非破壞性葉綠素含量檢測結果顯示，於 AWD 模式下葉色與 CP 無顯著差異 (Fig. 4)。於第一期作不同生育時期下連續調查兩處理間之植冠與葉面積變化，由結果可知隨著處理天數增加，在 AWD 模式下，植冠與葉面積之變化相較 CP 無顯著差異 (Fig. 5)。顯示 AWD 處理下，不論第一期作與第二期作皆不影響水稻生長發育。研究者於坦尚尼亞進行水稻節水栽培試驗，分別以 CP 模式及 AWD 方式處理，當土壤出現裂縫時再灌水至土面上 3 公分，並調查株高、分蘗數、根系生長發育與產量，結果發現不論 CP 模式或是 AWD 處理，株高、分蘗數、根系生長發育與產量皆無明顯差異 (Kahimba *et al.* 2013)。文獻提出利用土壤水分張力計檢測土壤下 20 公分處的數值作為節水處理，處理組之水分張力計達到 -20 kPa 時再進行復水至土面上 2 公分，重複至收穫。結果顯示，節水處理組的株高、穗數及產量，皆明顯低於對照組，推測此節水處理方式造成根系生長受阻，進一步造成地上部矮小與減產 (Lu and Lo 2014)。我們進一步分析 CP 與 AWD 處理之開花日數與產量構成要素，結果顯示第一期作不論 CP 與 AWD 處理下，台南 11 號之開花日數、單位面積穗數、每穗粒數、稔實率與千粒重皆無顯著差異，且乾溼交替處理下產量與慣行栽培無顯著差異 (Table. 2)。第二期作於 AWD 處理下開花日數晚於 CP，而單位面積穗數、每穗粒數、稔實率、千粒重與產量，不論 CP 與 AWD 處理皆無顯著差異。表示 AWD 處理下於第一期作或第二期作對水稻

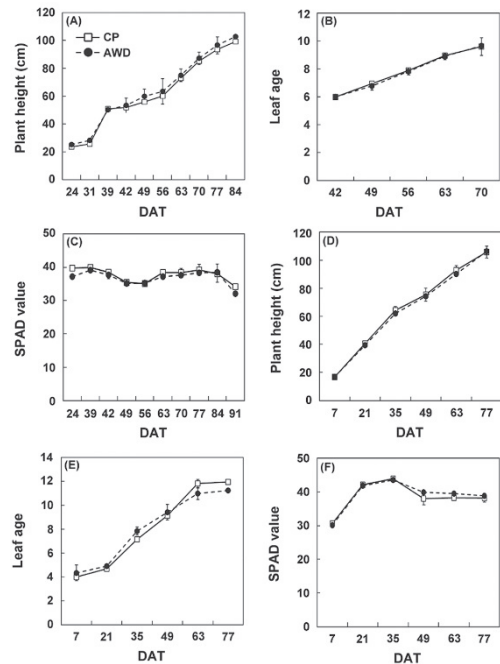


Fig. 4. Effects of plant height, leaf age and SPAD value during days after transplant between CP and AWD treatments in the first crops (A-C) and second crops (D-F). CP: Conventional plant. AWD: Alternative wet and dry. DAT: Days after transplant. The data represent average value from three biologically independent experiments and error bar indicate SD.

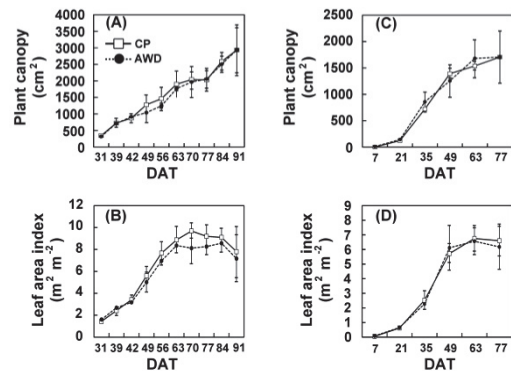


Fig. 5. Effects of plant canopy and leaf area index during days after transplant between CP and AWD treatments in the first crops (A, B) and second crops (C, D). CP: Conventional plant. AWD: Alternative wet and dry. DAT: Day after transplant. The data represent average value from three biologically independent experiments and error bar indicate SD.

的產量構成要素與產量並無負向影響。

### 三、不同水分管理下田間環境因子與農藝性狀之相關性分析

將田間測得之植株農藝性狀與環境因子進行迴歸分析，其中農藝性狀包含株高、葉齡、葉綠素含量、植冠與葉面積，環境因子包含積溫或輻射量。分析結果顯示於第一及

第二期作時，不論慣行栽培模式或是乾溼交替處理，葉齡、植冠、葉面積與積溫或輻射量呈現顯著正相關，而葉綠素含量之 SPAD 數值雖與積溫或輻射量呈現正相關但並無顯著差異 (Fig. 6A, 6B)。由此分析結果顯示，於田間不同水分之管理下，不影響株高、葉齡、植冠、葉面積與積溫或輻射量之相關性。

Table 2. The yield components and grain yield in rice cultivar TN11 during first- and second-crops (2018).

| Year      | Treatments | Flower stage after transplant | Number of panicles per (m <sup>2</sup> ) | Number of spikelet     | Percentage of fertility (%) | 1000-grain weight (g)  | Grain yield (kg/ha)       |
|-----------|------------|-------------------------------|--|------------------------|-----------------------------|------------------------|---------------------------|
| 2018 (I)  | CP*        | 74.0±0.2 <sup>a</sup>         | 426.3±46.9 <sup>ab</sup>                 | 99.3±0.3 <sup>a</sup>  | 97.0±0.0 <sup>a</sup>       | 23.3±0.6 <sup>b</sup>  | 7684.8±794.4 <sup>a</sup> |
|           | AWD**      | 74.0±1.4 <sup>a</sup>         | 457.5±73.8 <sup>a</sup>                  | 106.8±2.1 <sup>a</sup> | 95.0±0.0 <sup>a</sup>       | 23.4±1.0 <sup>ab</sup> | 8165.6±361.7 <sup>a</sup> |
| 2018 (II) | CP         | 65.3±0.5 <sup>c</sup>         | 328.1±50.4 <sup>c</sup>                  | 100.5±6.6 <sup>a</sup> | 90.0±0.0 <sup>b</sup>       | 24.9±1.0 <sup>a</sup>  | 6841.3±384.2 <sup>b</sup> |
|           | AWD        | 67.3±1.4 <sup>b</sup>         | 361.9±39.8 <sup>bc</sup>                 | 98.6±3.4 <sup>a</sup>  | 89.0±0.0 <sup>b</sup>       | 23.4±2.7 <sup>ab</sup> | 6510.7±82.0 <sup>b</sup>  |

\* CP: Conventional plant ; \*\*AWD: Alternative wet and dry.

The values are present as mean ± SD, and different letters indicate significant difference between the treatments assessed by LSD test ( $P < 0.05$ ).

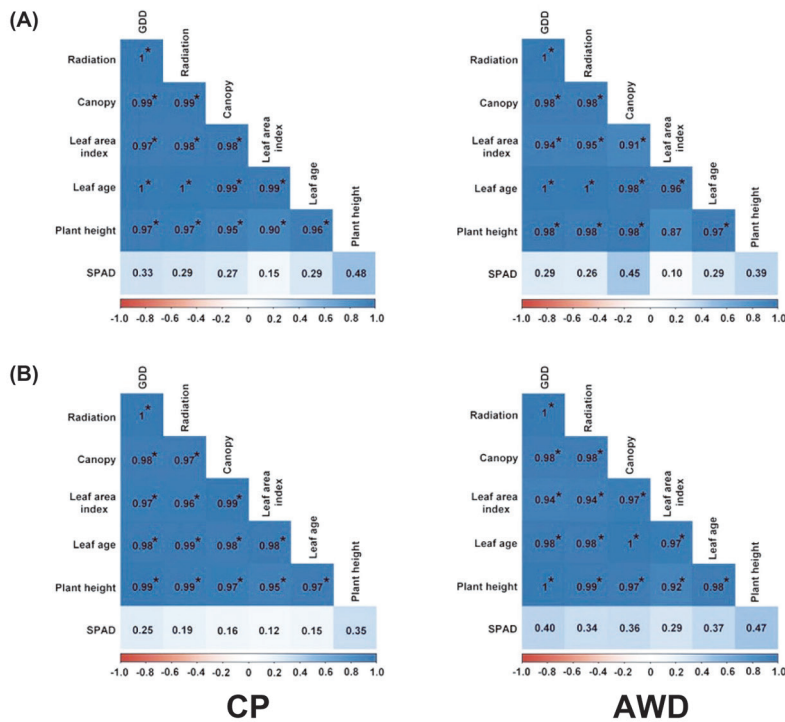


Fig. 6. The correlation coefficient between agronomic traits and environment factors under CP and AWD treatments in the first crops (A) and second crops (B). CP: Conventional plant. AWD: Alternative wet and dry. GDD: growing degree days. Correlations coefficient with  $p$ -value < 0.05 are considered as significant with star.

#### 四、乾溼交替之水管理可顯著節約田間用水量

於田間總用水量之分析結果顯示，第一期作水稻生育期間，慣行及乾溼交替處理田區累積雨量分別為每公頃 1.8 及 1.9 立方公尺。第二期作之慣行及乾溼交替處理田區累積雨量分為每公頃 4.4 及 4.5 立方公尺。試驗期間加上利用流量計進行灌溉用水量之紀錄，第一期作慣行栽培之田間總水量為每公頃 16854.5 立方公尺，乾溼交替處理之田間總水量為每公頃 11647.0 立方公尺，結果顯示乾溼交替處理相較慣行栽培節約總灌溉用水量 30.9%。第二期作慣行栽培之田間總水量為每公頃 18678.1 立方公尺，乾溼交替處理之田間總水量為每公頃 9386.2 立方公尺，結果顯示乾溼交替處理相較慣行栽培可節約總用水量 49.8% (Table. 3)。

#### 討論

水稻各生長階段之水管理至為重要，傳統水稻慣行栽培之水位管理為插秧至成活期維持田間水位 3 公分，分蘖始期至盛期澆水 5–10 公分，於最高分蘖期停止澆水並曬田，復水後進入幼穗分化期澆水 5–10 公分，孕穗期維持田間水位 3 公分，開花至充實期澆水 5–10 公分，黃熟至完熟期間歇灌溉 3 公分至收穫前 5–7 天斷水 (Fig. 3A) (Yang *et al.* 2013)。本試驗以智慧科技方式進行水稻生育期間之用水管理監控，利用智能水位裝置即時監控田間水位變化並搭配水流量管理，不

論一期作或二期作在乾溼交替處理下，灌溉用水量相較慣行栽培處理皆顯著下降，且水稻之生長發育及產量相較慣行栽培處理並無顯著差異，顯示此智能水位計可有效應用於田間水管理，對於面對氣候變遷下農業可用水資源短少之因應，及提升水資源之調配，具有重要之意義。

試驗結果顯示於一期作曬田期時乾溼交替處理組感測器傳輸數值仍尚有 0.5–0.7 公分之水位高度，而利用目視人工水位尺確認水位為 0 公分，此部分則為儀器之誤差讀值，在經校正過後此問題可順利解決。因此對於未來田間智能感測器之應用仍須注意水位感測之準確性問題。而水流量計可能因灌溉水泥沙淤積或異物造成流量減弱或阻塞之情況，此時仍需耗費人力排除，以確保水表正常運行。因此若進一步加入自動化水閘門系統，將可順利解決此一問題，除可達省時省力的效果，更可進行田間精準水管理及調配。由於戶外田間環境對於電子硬體設備的耗損率較室內高，當智慧化設備無法正常運行與回傳資料時，將衍生設備維護與更新之成本，是後續進一步推廣應用所需面臨的問題，未來若能搭配政府補助方案及農業保險制度，降低農民於設備裝置及設備維護之成本花費，對後續推廣應用將有助益。

作物之生長與發育受環境因子影響甚劇，其中溫度與光線是環境因子中決定作物生長發育最重要且關鍵的因子。因此利用有效積溫分析與水稻發育速率之相關性，並建

Table 3. The effect of the water consumption between conventional plant and alternative wet and dry treatments in TN11 during first- and second-crops (2018).

| Year      | Treatments | Rainfall in field (m <sup>3</sup> /ha) | Consumption of water (m <sup>3</sup> /ha) | Total water volume in field (m <sup>3</sup> /ha) | Irrigation water saving (%) |
|-----------|------------|--|---|--|-----------------------------|
| 2018 (I)  | CP*        | 1.8                                    | 16852.6                                   | 16854.5  | 30.9                        |
|           | AWD**      | 1.9                                    | 11645.2                                   | 11647.0  |                             |
| 2018 (II) | CP         | 4.4                                    | 18673.7                                   | 18678.1  | 49.8                        |
|           | AWD        | 4.5                                    | 9381.7                                    | 9386.2   |                             |

\* CP: Conventional plant; \*\*AWD: Alternative wet and dry.

立線性回歸模式推估水稻之生育階段具有高準確性，且已漸被廣泛應用於田間栽培管理 (Parthasarathi *et al.* 2013)。隨著水稻生育日數增加，以水稻分蘗數、葉面積指數與乾物質作為動態發展模型建置參數，並加入環境積溫參數，可以進行水稻不同生育期的預測 (Yan *et al.* 2006)。Guo 等人 (2015) 利用遙測方式探討水稻生長發育階段之植冠面積與環境因子間的模型建置，在 2012–2013 年間採用兩種粳稻品種種植於田間，蒐集有效積溫、水稻植冠面積、葉面積、葉角度等環境與農藝性狀資料，結果發現水稻植冠截光面積與有效積溫呈現正相關，且有效積溫可作為預測植冠面積之參數。水稻行光合作用會截取光能，產生能量提供生長發育，Basu 等人 (2014) 蒐集水稻各生育時期之輻射量、葉面積與乾物質，結果發現輻射量與乾物質及葉面積呈現正相關。葉面積與植冠面積呈現正相關且植冠面積與輻射量亦呈現正相關 (Stroppiana *et al.* 2006, Fang *et al.* 2014)。由本試驗結果得知，不論慣行栽培或乾溼交替處理下，隨著生育日數增加，積溫及輻射量與植冠面積及葉面積呈現顯著正相關，且株高和葉齡亦與積溫及輻射量呈顯著正相關 (Fig. 6)。在水稻生長發育過程中，株高、葉齡、葉面積與植冠面積可作為農藝性狀參數，並搭配環境參數中之輻射量與積溫，將可用於預測水稻生育時期，了解水稻生長動態，並搭配栽培管理作業曆，將可更加精準管理水稻之生產過程。

綜合本試驗結果可知，稻作田間栽培期間利用智能水位感測裝置可即時偵測水位之變化，於乾溼交替處理下，節水處理對水稻的生長發育與收穫產量皆無顯著影響，顯示透過水位監測器檢視田區水位變化，用於田間水分管理為相當便利且穩定生產的可行方式。對於未來之應用推廣尚需考慮水位計、水流量計、水管線路與電線配置等硬體設備架設及維護成本，智能感測器於田間之應用尚在發展階段，本試驗可作為初探之參考。

利用智能水位裝置進行即時監控田間水位變化，為將智慧科技實際應用於農業生產之方式之一，除了有利於緩解農村人力短缺之困境及提高田間作業效率之功能外，並在氣候變遷下對農業水資源之調節做出貢獻。因此透過智能水位感測裝置即時監控田區變化，除了可達提高用水效益且省工之效能外，於稻作生產過程中能更有效的提供主動式栽培管理，達智慧農業之目標。

### 致謝

本研究之研究經費係由行政院農業委員會計畫 (107 農科-14.2.4-糧-Z1) 提供支持，並感謝農業試驗所農業工程組姚銘輝研究員研究室之氣象站提供田間氣象資料，謹致最大謝忱。

### 引用文獻

- Basu S, S Maji, SK Dutta, S Jena, R Nath, PK Chakraborty (2014) Impact of PAR interception at different time points on total dry matter production in rice (*Oryza sativa* L.) crop transplanted on different dates. **J. Food Agri. Environ.** 12(3&4):285–291.
- Chartzoulakis K, M Bertaki (2015) Sustainable water management in agriculture under climate change. **Agric. Sci. Procedia** 4:88–98.
- Chen Y, S Zhao, Y Zhou (2018) Research on intelligent agricultural planting system based on internet of things technology. **J. Comput. Commun.** 6:54–60.
- Fang H, W Li, S Wei, C Jiang (2014) Seasonal variation of leaf area index (LAI) over paddy rice fields in NE China: Intercomparison of destructive sampling, LAI-2200, digital hemispherical photography (DHP), and AccuPAR methods. **Agric. For. Meteorol.** 198:126–141.
- Guo Y, L Zhang, Y Qin, Y Zhu, W Cao, Y Tian (2015) Exploring the vertical distribution of structural parameters and light radiation in rice canopies by the coupling model and remote sensing. **Remote Sens.** 7(2):5203–5221.
- Haefele SM, Y Kato, S Singh (2016) Climate ready rice: augmenting drought tolerance with best management practices. **Field Crops Res.**

- 190:60–69.
- He, H, F Ma, R Yang, L Chen, B Jia, J Cui, H Fan, X Wang, L Li (2013) Rice performance and water use efficiency under plastic mulching with drip irrigation. **PLoS ONE** 8(12): e83103. doi:10.1371/journal.pone.0083103
- Kahimba F, E Kombe, H Mahoo (2013) The potential of system of rice intensification (SRI) to increase rice water productivity: a case of mkindo irrigation scheme in Morogoro Region, Tanzania. **Tanzania J. Agri. Sci.** 12(2):10–19.
- Lampayan RM, RM Rejesus, GR Singleton, BA Bouman (2015) Adoption and economics of alternate wetting and drying water management for irrigated lowland rice. **Field Crops Res.** 170:95–108.
- Lu CF, JC Lo (2014) Effect of water saving cultivation on rice yield and quality. **Res. Rep. Tainan DARES** 64:10–19. (in Chinese)
- Mohanraj I, K Ashokumar, J Naren (2016) Field monitoring and automation using IOT in agriculture domain. **Procedia Comput. Sci.** 93:931–939.
- Parthasarathi T, G Velu, P Jeyakumar (2013) Impact of crop heat units on growth and developmental physiology of future crop production: a review. **Res. Rev. J. Crop Sci. Technol.** 2(1):2319–3395.
- Roopaei M, P Rad, K-KR Choo (2017) Cloud of things in smart agriculture: Intelligent irrigation monitoring by thermal imaging. **IEEE Cloud Comput.** 4(1):10–15.
- Satyanarayana A, T Thiyagarajan, N Uphoff (2007) Opportunities for water saving with higher yield from the system of rice intensification. **Irrigation Sci.** 25(2):99–115.
- Srbinovska M, C Gavrovski, V Dimcev, A Krkoleva, V Borozan (2015) Environmental parameters monitoring in precision agriculture using wireless sensor networks. **J. Clean. Prod.** 88:297–307.
- Stroppiana D, M Boschetti, R Confalonieri, S Bocchi, PA Brivio (2006) Evaluation of LAI-2000 for leaf area index monitoring in paddy rice. **Field Crops Res.** 99(2-3):167–170.
- Tao H, H Brueck, K Dittert, C Kreye, S Lin, B Sattelmacher (2006) Growth and yield formation of rice (*Oryza sativa* L.) in the water-saving ground cover rice production system (GCRPS). **Field Crops Res.** 95(1):1–12.
- TongKe F (2013) Smart agriculture based on cloud computing and IOT. **J. Conv. Info. Tech.** 8(2):210–216.
- Tzounis A, N Katsoulas, T Bartzanas, C Kittas (2017) Internet of things in agriculture, recent advances and future challenges. **Biosyst. Eng.** 164:31–48.
- Wu X, W Wang, X Xie, C Yin, K Xie (2018) Photosynthetic and yield responses of rice (*Oryza sativa* L.) to different water management strategies in subtropical China. **Photosynthetica** 56(4):1031–1038.
- Yan D, Y Zhu, S Wang, W Cao (2006) A quantitative knowledge-based model for designing suitable growth dynamics in rice. **Plant Prod. Sci.** 9(2):93–105.
- Yang JL, CC Cheng, CS Sheu (2013) The technical manual of rice cultivation management. **Techn. Rep. Taichung DARES** 193:3–10. (in Chinese)
- Zhao L, L Wu, M Wu, Y Li (2011) Nutrient uptake and water use efficiency as affected by modified rice cultivation methods with reduced irrigation. **Paddy Water Environ.** 9(1):25–32.