

一套評估水稻需水量的低成本實用方法 之開發與驗證

A Low-Cost and Practical Method for Assessing Paddy Rice Water Requirement: Development and Validation

國立屏東科技大學土木工程系

大學部學生	大學部學生	大學部學生	教授	助理教授
楊世樺	鄭皓霖	許定宏	葉一隆	陳智謀
Shi-Hua Yang	Hao-Lin Zheng	Ding-Hong Xu	Yi-Lung Yeh	Zhi-Mou Chen

摘要

因應全球氣候變遷導致的區域性乾旱風險，精準掌握作物需水量已成為永續農業水資源管理的關鍵。然而，現行主流的通量塔監測技術成本高昂，限制了其廣泛應用。為此，本研究旨在開發並驗證一套應用於水稻田的低成本、高實用性作物需水量量測方法。

本研究於國立屏東科技大學智慧農場，採用筒測法原理設計實驗。透過在田間佈設有底與無底的量測筒，每日以高精度游標卡尺量測水位變化，藉此分離並計算水稻的蒸發量、蒸散量與入滲量。

將本研究獲得的作物需水數據與試驗田已安裝的通量塔數據以及田間實際用水情況進行方法驗證，以驗證本試驗的準確性。本研究希望能建立一套可信賴的替代監測方案，為缺乏精密儀器的田間管理者提供了評估水稻需水量的實用工具，對推廣精準灌溉具有重要貢獻。

關鍵詞：作物需水量，水稻，蒸散量，筒測法，方法驗證

Abstract

In response to the regional drought risks driven by global climate change, accurately determining crop water requirements has become a key element of sustainable agricultural water resource management. However, the high cost of mainstream monitoring technologies such as flux towers limits their widespread adoption. Therefore, this study aims to develop and validate a low-cost, highly practical method for measuring crop water requirements in paddy rice fields.

This research was conducted at the Smart Farm of National Pingtung University of Science and Technology, using an experimental design based on the Cylinder Method. By deploying both bottomed and bottomless measurement cylinders in the field and performing daily high-

precision water level measurements with a vernier caliper, the experiment separates and quantifies evaporation, evapotranspiration, and infiltration for paddy rice cultivation.

The crop water requirement data obtained in this study will undergo method validation by comparing it with the flux tower data from the experimental field and actual field water use, to verify the accuracy of the experiment. This study aims to establish a reliable alternative monitoring method, providing a practical tool for field managers without access to sophisticated instruments to assess paddy rice water requirements, and making an important contribution to the promotion of precision irrigation.

Keywords: Crop water requirement, Paddy rice, Evapotranspiration, Cylinder method, Method validation

一、前言

針對於全球氣候變遷議題，於聯合國政府間氣候變化專門委員會(IPCC) AR6 評估報告中已提及，在未來全球暖化程度升高下，各地方乾旱事件將更頻繁且乾旱的時間將拉長，倘若人們對於水資源應用效率不再提升，將導致乾旱的範圍及影響的程度將會進一步擴大，區域性農業、生態與人們的生活及健康都將構成危害(IPCC,2021)^[1]。由於乾旱風險的上升，農業用水的效率與精準度日益受到重視，特別是在水稻等高耗水作物的種植管理上，如何準確掌握作物需水量已成為永續農業與水資源管理的重要課題(Allen et al., 1998)^[2]。

針對作物需水量(Evapotranspiration Crops, ETc)研究，Bayisa et al. (2024)^[3]利用排水蒸散儀(Drainage lysimeter)調查 Kingbird 小麥品種的需水量和作物係數，該研究結果為加強該地區灌溉小麥生產的設計和管理提供了寶貴的參考。Baldocchi (2014)^[4]介紹以通量塔(Eddy covariance, EC)等高精度監測技術，藉此獲取田區尺度連續量潛熱通量，進而換算作物的蒸散作用量並提供可靠環境數據。但此類設備不僅採購與維護成本高昂，且安裝與操作需具備專業技術，對於一般農戶與小規模農場而言應用門檻較高。因此，如何開發低成本、易操作且具準確性的監測方法，成為推動精準灌溉與水資源永續利用的關鍵挑戰。

本實驗建立在筒測法的原理上進行。筒測法作為一種簡易的田間監測手段，透過在作物種植區域設置不同結構的量測筒，能夠有效分離蒸發、蒸散與入滲等水分變化過程，並以簡單量測設備獲取每日的數據變化。相較於精密儀器，筒測法具備成本低、安裝方便與維護需求低等優勢，適合推廣至缺乏高端監測設備的農業生產現場。然而，該方法在水稻田的應用與其與高精度監測數據的對比驗證，仍缺乏系統性研究。基於上述考量，本研究以國立屏東科技大學智慧農場為試驗場域，設計並實施應用於水稻田的筒測法試驗，並將所得數據與通量塔監測數據及實際田間用水情況進行比對，以評估其精度與可

行性。期望能建立一套低成本、高實用性的水稻需水量監測方法，為農業現場提供可行的精準灌溉評估工具，進而促進水資源的有效利用與永續農業的發展。

二、試驗方法

2-1 筒測法原理設計實驗

本實驗主要參考行政院農業委員會(2020)^[5]所出版的灌溉原理，其中滲透筒觀測水稻需水量實驗。本實驗設計如下：在田區設置了3個高度50cm、直徑40cm的鐵環，參考過去水稻農藝性狀調查資料，於此試驗區水稻根系生長深度約為20cm，因此將鐵環打入土下25cm，使得根系能於鐵環內發展。這3個鐵環的外在環境條件相同，環內則因應需要求得的數據做調整，分別為：

- 水稻環：環內有數株水稻，此裝置可量測「田區入滲量」+「田區蒸發量」+「水稻蒸散量」。如圖1所示。
- 無水稻環：環內無水稻，此裝置可量測「田區入滲量」+「田區蒸發量」，如圖2所示。
- 入滲環：環內無水稻，且頂部加蓋，該桶內可量測「田區入滲量」，如圖3所示。
- 此外，田區設置一蒸發筒(封底鐵筒)，桶內填土並加水，可量測「田區蒸發量」，如圖4所示。



圖 1 水稻環



圖 2 無水稻環



圖 3 入滲環



圖 4 田區蒸發筒

於環內製作一支橫梁作基準點，用於固定於桶口，便於游標卡尺進行量測盡可能減

少量測誤差，大環的水位量測使用游標卡尺透過基準點量測每天的減水量並記錄，觀透過每天固定一時段量測，紀錄田間的水位變化，轉換為環內單位面積的蒸發、蒸散及入滲量。本研究依據不同環體的配置與功能，透過下列差異計算各組份水量：

- 蒸散量：由「水稻環水位變化量 - 無水稻環水位變化量」推算。
- 蒸發量：由「田區蒸發桶水位變化量」直接獲取。
- 入滲量：由「入滲桶水位變化量」直接獲取。

作物需水量 ET_c (Evapotranspiration Crops) 基本原理，是指在特定氣候和土壤條件下，作物在生長過程中因蒸發和蒸騰作用而損失的水量，也代表了作物實際需要補充的水分量。計算公式如式(1)所列(廖崇億等,2024)^[6]。

$$ET_c = ET_0 \times K_c \dots\dots\dots(1)$$

其中 ET_0 (Reference crop evapotranspiration) 是參考作物蒸發散量，代表在標準條件下(例如，無病蟲害、充足施肥的草地)的蒸發散量，通常可以透過氣象站或特定軟體計算推求。而 K_c 則是該作物種類在特定生育階段的作物係數，表示特定作物種類(如水稻、葡萄等)在特定生育階段的 ET_c 與 ET_0 的比例。

本研究則透過筒測法藉由「水稻環水位變化量」減去「入滲環水位變化量」獲取作物需水量 ET_c 。

2-2 利用通量塔推估試驗場域之作物需水量

本研究除了利用筒測法獲取作物需水量 ET_c ，亦取用國立屏東科技大學智慧農場之通量塔觀測資料，通量塔之設置如圖 5 所示。筒測法實驗鐵環則埋設於通量塔旁。

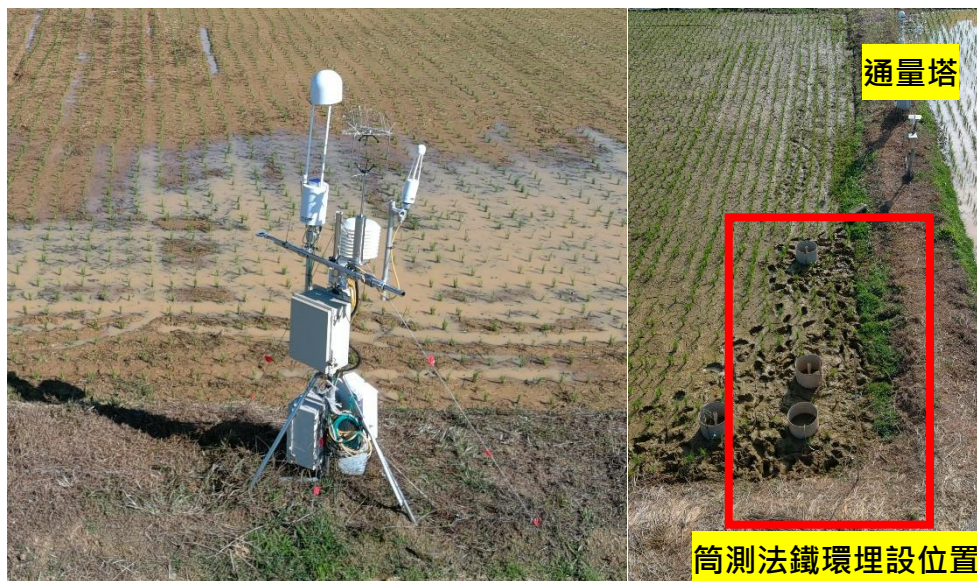


圖 5 國立屏東科技大學智慧農場之通量塔與筒測法鐵環設置相對位置

應用通量塔(Eddy covariance, EC)可獲取實驗場域周邊之相對溼度、平均風速、風向、

飽和水氣、顯熱存儲、潛熱存儲、非色散紅外 (NDIR) 光譜值(可獲取二氧化碳及水氣通量)。許多研究透過通量塔資料推估區域作物需水量,其原理為利用非色散紅外(NDIR)光譜儀測量水氣的濃度變化,並配合風速計進行「渦度相關法」計算,藉此獲取水氣通量的數值。再建立水氣通量(H₂O flux)與蒸發散量(Evapotranspiration, ET)之關係式,再藉由各個試驗場域積累的作物需水量 **ETc** 數據,進行數據回歸獲取水氣通量與作物需水量之關係式 Sánchez(2019)^[7]。本研究將彙整通量塔所提供的蒸發散量 **ET** 數據,比對筒測法所獲得的作物需水量 **ETc**,探討兩者之差異。

三、量測數據分析結果

3-1 筒測法數據分析

本研究利用筒測法,以事件的方式,獲取各個時間點的作物需水量 **ETc** 資料。資料如圖 6 所示。本研究配合用水操作均配合田區灌溉操作,詳實記錄水稻栽培過程各時期作物需水量 **ETc**,由數據顯示分蘗期及幼穗期作物需水量相較其他時期為低,孕穗時期則較其他時期為高,抽穗期、乳熟期及黃熟期則維持 10~20 mm 之作物需水量。由此圖可知,以筒測法可以與實際灌溉用水互相搭配,筒測法所獲取的作物需水量資料與實際用水情形能相呼應。

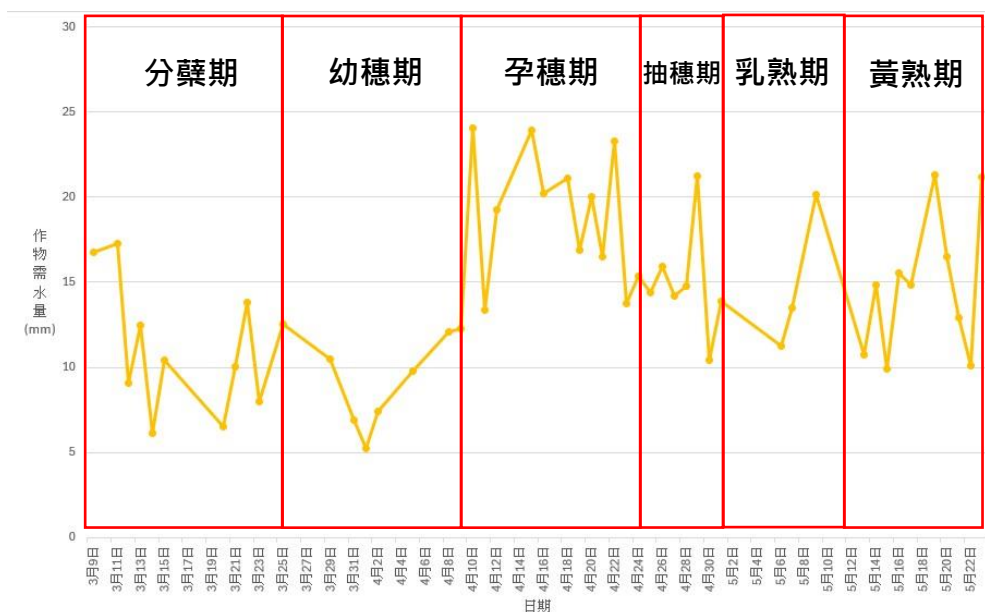


圖 6 依水稻不同生長時期之作物需水量變化

3-2 筒測法與通量塔數據比較分析

本研究針對水稻栽培期間提取 13 個時間區段,分別以筒測法及通量塔數據,求取作物需水量 **ETc** 及蒸發散量 **ET**,比對此兩筆資料,如圖 7 所示。

圖 7 中,以筒測法量測獲得的作物需水量 **ETc** 及通量塔數據推估之蒸發散量 **ET**,本研究將兩者單位均化為 mm/day,比對兩者資料可知,水稻栽培初期因為執行灌水作業,並供給水稻存活,田間操作會提供相對充足的水量,作物需水量 **ETc** 可達 16.72

mm/day，當水稻達到分蘗期後，灌溉用水量將會大幅減少，作物需水量 E_{Tc} 最少可達 5.97 mm/day，但開始進入孕穗期，則會再提供相對充足水量作為水稻穀粒充填所需，乳熟期及黃熟期則作物需水量 E_{Tc} 維持在 10~12 mm/day。若檢視通量塔所推估的蒸發散量 ET ，則是隨著時間逐漸遞增，這反應出作物成長階段，於初期水稻還幼小，測得的蒸發散量較少，但隨著水稻逐漸成長，株高及葉片數量增加，整個區域作物蒸發散量也隨之增加，期間於孕穗期，由於再次提供充足的灌溉水量，整體蒸發散量有明顯上升。

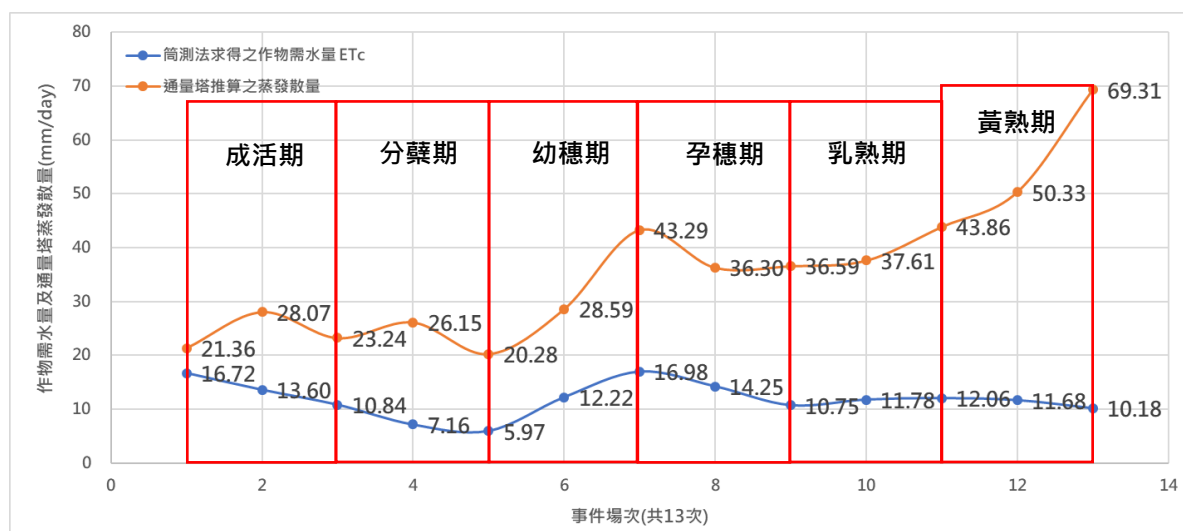


圖 7 將水稻栽培期間分成 13 個時間區段(事件)比對作物需水量與蒸發散量

四、結語

由本研究可知，利用簡測法可以直觀的反應出水稻栽培期間，作物需水量 E_{Tc} 將隨著不同水稻不同生長時期變化，以此方法可掌握此研究區之作物需水量 E_{Tc} 。再由通量塔所推論的蒸發散量 ET 隨著作物生長而隨之增加。但比對簡測法之作物需水量 E_{Tc} 及通量塔蒸發散量 ET 兩者之關係，於成活期、分蘗期、幼穗期及孕穗期兩者關聯性很好，但乳熟期及黃熟期則較差，這裡可能是因為試驗田區位於相對開放的場域，通量塔的量測可能受到周圍人為活動的干擾，而導致後期數據有所偏差，建議未來可執行多次重複實驗，重新檢驗兩者之關聯性。

參考文獻

1. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2021). Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (V. Masson-Delmotte, P. Zhai, A. Pirani, et al., Eds.). Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781009157896>
2. Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., & Smith, M. (1998). Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements (FAO Irrigation and Drainage Paper No. 56). Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations.
3. Bayisa, G. D., Ayana, M., Mekonnen, B., Hordofa, T., & Dinka, M. O. (2024). Drainage lysimeter based measurement of water requirement and crop coefficient of bread wheat

- under semi-arid climate of Melkassa, Ethiopia. *Heliyon*, 10(17), e36969. doi:<https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e36969>
4. Baldocchi, D. (2014). Measuring fluxes of trace gases and energy between ecosystems and the atmosphere – the state and future of the eddy covariance method. *Global Change Biology*, 20(12), 3600–3609. <https://doi.org/10.1111/gcb.12649>
 5. 行政院農業委員會 (2020), 灌溉原理, 第 62 頁。
 6. 廖崇億、錢昌聖、游承翰、許建輝 (2024), 彰化地區作物需水量觀測與研究—以花椰菜為例。臺中區農業改良場研究彙報, 165, 第 63–78 頁。
 7. Sánchez, J. M., López-Urrea, R., Valentín, F., Caselles, V., & Galve, J. M. (2019). Lysimeter assessment of the Simplified Two-Source Energy Balance model and eddy covariance system to estimate vineyard evapotranspiration. *Agricultural and Forest Meteorology*, 274, 172-183. doi:<https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2019.05.006>