

水稻田土壤固碳效果評估與產量變化之研究

陳盈穎⁽¹⁾、王咏潔^{*(2)}

摘要

本研究旨在評估不同稻田管理方式對水稻產量、水分利用效率(WUE)與土壤碳儲潛力之綜合影響。透過整合 AquaCrop 與 APSIM 模型，模擬分析八種管理情境(S1–S8)，探討灌溉方式(傳統/乾濕交替 AWD)、矽肥施用與稻稈還田對作物與環境效益之影響。模擬結果顯示，矽肥與還田可提升產量與碳投入，AWD 則提升 WUE 並降低碳排放。以 S8(AWD + 矽肥 + 還田)為最佳組合，於產量、WUE 與 SOC 三項指標皆具優異表現。研究建議推廣具碳效益之智慧稻作管理策略，並強化模式本土化與實測驗證，以支援臺灣農業永續與淨零碳排政策發展。

(關鍵詞：AquaCrop、APSIM、乾濕交替灌溉、矽肥、稻稈還田、土壤碳儲)

Assessment of Soil Carbon Sequestration and Yield Variation in Paddy Rice Fields

Ying-Ying Chen⁽¹⁾ Yung-Chieh Wang^{(2)}*

ABSTRACT

This study aims to evaluate the combined effects of different paddy field management practices on rice yield, water use efficiency (WUE), and soil organic carbon (SOC) sequestration potential. By integrating the AquaCrop and APSIM models, eight management scenarios (S1–S8) were simulated to analyze the impacts of irrigation methods (conventional flooding vs. alternate wetting and drying, AWD), silicon fertilization, and straw incorporation on crop performance and environmental benefits. The simulation results showed that both silicon application and straw return enhanced yield and carbon inputs, while AWD improved WUE and reduced carbon emissions. Among all scenarios, S8 (AWD + silicon fertilizer + straw incorporation) achieved the best overall performance in yield, WUE, and SOC accumulation. The study recommends promoting climate-smart rice management strategies with carbon benefits and strengthening model localization and field validation to support Taiwan's sustainable agriculture and net-zero carbon policies.

(Keywords : AquaCrop; APSIM; Alternate Wetting and Drying Irrigation; Silicon Fertilization; Straw Return; Soil Carbon Stock)

⁽¹⁾ 國立中興大學水土保持學系 碩士生

⁽²⁾ 國立中興大學水土保持學系 教授 *通訊作者 : wangyc@nchu.edu.tw

一、前言

近年來，在面對氣候變遷與糧食安全議題下，全球稻作系統的永續轉型成為重要政策目標。台灣地區具備豐富農業生產歷史與完整灌溉體系，對於田間管理與作物模擬系統之整合具有高度應用潛力。根據農委會統計資料，稻米為台灣主糧作物之一，年產量與種植面積穩定，但氣候不確定性與土地資源壓力逐年上升。因此本研究有助於探討碳中和時代下之永續稻作管理模式。

水稻為臺灣主要糧食作物，其栽培與管理方式對糧食安全與環境永續具有重要影響。隨著氣候變遷與碳中和政策推動，農業部門逐漸被要求兼顧產量穩定與碳足跡減量。稻田作為甲烷主要排放源之一，其管理方式對土壤有機碳儲量與碳排放具有關鍵性影響。近年來，乾濕交替灌溉(Alternate Wetting and Drying, AWD)、稻稈還田與矽肥施用等管理策略逐漸受到重視，顯示其在兼顧作物生產與碳管理上的潛力。然而，不同管理策略對稻田碳儲與產量之交互作用仍存在不確定性，田間實驗成本高且需長時間追蹤，作物模式成為重要輔助工具。透過 AquaCrop 與 APSIM 等模型模擬不同管理組合的生產與碳動態，有助於釐清其潛在影響並作為政策設計參考。

本研究旨在結合 AquaCrop 與 APSIM 模型，模擬與評估不同稻田管理方式對作物產量、水分利用效率與土壤有機碳變化之影響，建立一套可應用於臺灣地區的水稻碳效益模擬方法，具體目標如下：(1) 建立 AquaCrop 模型以模擬不同管理組合下稻作

產量與水分利用效率；(2) 將 AquaCrop 模擬結果轉換為碳輸入參數，輸入 APSIM 模型模擬土壤碳儲動態；(3) 評估不同情境對碳儲潛力與產量效益之綜合影響，提出管理建議。

本研究依序進行文獻整理、模擬模型設定、模擬分析與成果統整，研究流程如圖 1 所示，涵蓋氣象與田間參數蒐集、雙模型建構與管理情境模擬等階段。

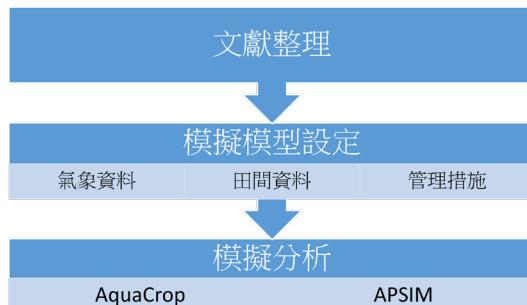


圖 1 研究流程圖

Figure 1 Research Flowchart

二、文獻探討

2.1. 水稻田碳排放與氣候政策背景

水稻系統為亞洲地區主要糧食作物，其栽培面積廣泛，特別是在東亞與東南亞地區，其種植方式深受灌溉管理與田間處理影響(Grassini et al., 2011)。稻田土壤由於長期淹水狀態，常形成缺氧環境，導致甲烷(CH_4)排放顯著，為農業部門主要溫室氣體來源之一(IPCC, 2019)。然而，合理管理稻稈還田與水分條件，可調控碳釋放與固碳潛力，達成農業碳中和目標。

在土壤碳動態方面，稻田之土壤有機碳 (Soil Organic Carbon, SOC) 主要來自作物殘體 (如稻稈) 及根系分泌物。研究指出，透過增加碳輸入(如還田)與降低碳釋放(如減少過度灌溉)，可逐年提升田間 SOC 含量(van Groenigen et al., 2011)。

2.2. 不同灌溉方式對稻作產量與碳排放之影響

傳統淹水灌溉雖能穩定產量，但常伴隨高水耗與甲烷排放。乾濕交替灌溉(Alternate Wetting and Drying, AWD)技術由國際水稻研究所(IRRI)所推廣，能有效減少水分使用達 20–30%，並降低 40% 以上的甲烷排放 (Bouman et al., 2007)。此外，多項田間實驗與模擬結果指出，在適度管理下，AWD 不僅不會降低水稻產量，甚至可因根系強化與氣體交換改善而提升收成與水分利用效率 (WUE)(Bouman et al., 2007；FAO, 2012)。本研究即以 AWD 作為重要因子，探討其對產量與碳的影響潛力。

2.3. 砂肥施用對水稻生長與碳效率的作用

砂為水稻所需之非必需有益元素，能促進葉片挺直、提高光合效率與抗病性。研究顯示，施用砂肥可提升生物量 5–10%，進而帶動地上部碳投入量增加(Sun et al., 2022)。砂亦可強化植株結構，降低倒伏率，提高最終產量與收穫指數(IPNI, 2018)。然而，目前主流作物模式(如 APSIM、DSSAT)對砂元素之吸收與作用機制尚未建構，學界多以田間數據外推砂肥效應，或以修正係數方式套入生物量與產量計算。因此，本研究輔以 Excel 工具建立增益模式，估算砂肥之效益。

2.4. 稻稈還田與土壤碳儲關係

桔梗還田是提升稻田碳輸入的主要手段之一，稻稈含有 35–45% 有機碳，其還田後可透過土壤微生物分解轉化為穩定碳素。研究指出，當稻稈還田比例達 80% 以上時，SOC 每年可增加 0.05–0.12%(Sun et al., 2022；IPCC, 2019)。不過，還田亦可能因過量有機質堆積造成初期氮素競爭或甲烷排放增加，因此需搭配合理灌溉與施肥策略，發揮最大固碳與減排效益。模擬研究多將還田量視為碳輸入參數，用以預估土壤碳儲潛力與田區碳平衡。

2.5. 作物模擬工具應用於稻作分析

AquaCrop 模型

AquaCrop 為聯合國糧農組織(FAO)推出之中簡化型生育與產量模擬模型，強調對水分動態與覆蓋率(Canopy Cover)之模擬能力。Steduto et al. (2009) 指出其在缺水條件下仍具穩健之產量預測能力，適用於資料有限之開發中國家。研究如 Vanuytrecht et al. (2014) 成功應用 AquaCrop 於南亞水稻種植地區，評估不同灌溉策略下之水分效率變異，並建立地方性校正參數以提高預測精度。

APSIM 模型

APSIM (Agricultural Production Systems sIMulator)為澳洲開發之多模組耕作模擬平台，具備土壤碳氮循環、作物生長與經濟分析模組等(Holzworth et al., 2014)。適合用於多年份、長期氣候或政策情境模擬。Jat et al. (2020) 結合 APSIM 與田間實測資料，模擬不同農耕方式對 SOC 穩定性與碳排放影響，證實其在固碳管理情境分析之應用潛力。

AquaCrop 為半機制型作物模式，可模擬產量、生物量與水分利用效率，適合用

於資料不足地區或政策規劃場景(FAO, 2012)。而 APSIM 則具備土壤碳氮循環、作物殘體與長期碳變化模組，可作為 SOC 模擬核心平台(Holzworth et al., 2014)。兩者為本研究主要使用之模式。

三、研究材料與方法

3.1. 研究架構與模擬平台

AquaCrop 模型由 FAO 開發，具備友善操作與輸入需求簡化等優勢，適合用於資料受限地區之初步模擬與產量估計。在模擬設計上，本研究特別考慮三個變因：灌溉方式 (AWD vs 傳統)、矽肥是否施用，以及稻稈還田與否，形成 8 組管理情境，有助於釐清各因子之獨立與交互影響。本研究目的為評估不同水稻田間管理方式對作物產量、水分利用效率(WUE)與土壤有機碳(SOC)變化之影響，並建立作物模擬與碳效率評估架構，整合 AquaCrop 與 APSIM 模型進行模擬分析。整體流程如圖 2 所示，分為三階段：
(1)AquaCrop 模擬產量與水分使用；(2)依據生物量輸出推估碳輸入參數；(3)匯入

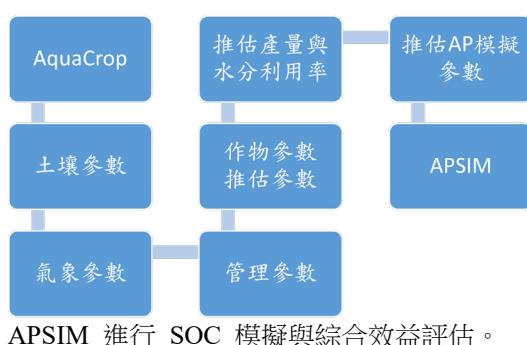


圖 2 AquaCrop 與 APSIM 模擬流程圖

Figure 2. Flowchart of AquaCrop and APSIM Simulations

3.2. 模擬區域與氣象資料

模擬地區與氣象資料研究地點選定臺中中區農業改良場(大村試驗田)，為中部典型水稻栽培區域，氣象資料來源為中央氣象署2024年逐日觀測數據，涵蓋日照、溫度、降雨與參數化 ET_0 。氣象資料經格式轉換後分別輸入AquaCrop CLI格式與APSIM MET檔案。模擬期間以一期作(2024/03/22~2024/07/09)為主。

3.3. 管理情境設定與變因設計

本研究使用 AquaCrop 7.1 與 APSIM 7.10 進行模擬。AquaCrop 模型設定臺梗九號 (TK9) 稻作品種，包含初始與最大覆蓋率、田間持水量土壤設定與灌溉方式(傳統或 AWD)，產量與生物量輸出為碳估算依據。APSIM 模型則用於模擬。

3.4 模型參數與模擬設定

本研究設計八組模擬情境(S1 至 S8)，以探討三項水稻田間管理因子之交互作用對產量、水分利用效率(Water Use Efficiency, WUE)與土壤有機碳(Soil Organic Carbon, SOC)變化之影響。三項主要變因包括：

1. 灌溉方式(傳統持續淹水 vs. 乾濕交替 AWD)
 2. 砂肥施用(有 / 無)
 3. 稻稈還田(有 / 無) 各情境為上述三變因之排列組合，如 圖 2 管理情境變因架構圖所示，詳細分組與管理操作說明列於 表 1 管理情境配置表。

其中，「乾濕交替灌溉(Alternate Wetting and Drying, AWD)」為近年推廣之節水型稻作灌溉技術，係由國際水稻研究所(IRRI)發

展與倡導。其操作方式為：當田間水位自然下降至地表下 10–15 公分後進行再灌水，於關鍵生育期(如抽穗期)則維持淺層水位以保障產量。AWD 的核心為在不損產量的前提下降低灌水量與溫室氣體排放。

根據實地試驗與相關文獻(IRRI, 2020；Bouman et al., 2007)，AWD 技術可：節省灌溉水量 20–38%；降低甲烷(CH_4)排放達 30–70%；在水分利用效率(WUE)提升同時，維持或略增產量。本研究將 AWD 應用於 S5 ~S8 情境，並與矽肥與稻稈還田兩項因子搭配組合，進一步探討其在模擬下的綜合環境與產量效益。

此外，「矽肥施用」亦為本研究關注之碳管理手段之一。已有研究顯示，適量施用矽肥不僅可強化水稻抗逆性、提升光合作用效率與產量(Sun et al., 2022)，亦能透過促進根系生長與微生物活動，間接提升土壤有機碳累積能力。矽肥施用組合設定於 S3、S4(傳統灌溉)與 S7、S8(AWD)，涵蓋「單施矽肥」與「矽肥+還田」兩種管理策略，分析其與灌溉與還田之交互作用對碳效益與生產性的整合效果。

表 1 管理情境配置表

Table 1. Management Scenarios

| 情境編號 | 灌溉方式 | 矽肥 | 稻稈還田 | 說明 |
|------|------|----|------|----------|
| S1 | 傳統 | 無 | 不還田 | 基準情境 |
| S2 | 傳統 | 有 | 還田 | 增加碳源效益 |
| S3 | 傳統 | 無 | 不還田 | 測試矽肥單獨影響 |

| | | | | |
|----|-----|---|-----|---------|
| S4 | 傳統 | 有 | 還田 | 矽肥與還田結合 |
| S5 | AWD | 無 | 不還田 | 節水單因子 |
| S6 | AWD | 有 | 還田 | 節水 + 還田 |
| S7 | AWD | 無 | 不還田 | 高效三減策略 |
| S8 | AWD | 有 | 還田 | 最佳管理組合 |



圖 3. 情境模擬架構圖

Figure 3. Framework of Simulation Scenarios

3.5. 模擬評估指標

由於 APSIM 模型目前尚無臺梗九號(TK9)專屬模組，且不具備矽肥處理與 AWD 管理細節模組，因此本研究輔以以下修正策略進行參數外推：

- (1) 矽肥效應：依據 AquaCrop 生物量模擬值，套用 Sun et al. (2022) 所報導之 5–10% 增益係數進行修正；
- (2) 碳投入估算：以地上部生物量 \times 0.45 作為碳投入量，再依還田比例計入 APSIM

- (3) AWD 處理：於灌溉設定中減少灌溉頻率與水深，並以蒸散量差異計算 WUE；
- (4) SOC 輸出轉換：使用 APSIM Summary.out 與表格計算每組情境之 SOC 增減百分比與碳匯潛力。

四、模擬結果與分析

4.1 模擬概述

本章呈現 AquaCrop 與 APSIM 模擬模型所產出的不同管理情境(S1–S8)結果，探討其對於水稻產量、水分利用效率(WUE)、稻稈還田量與土壤碳儲之影響。由圖 4 雷達圖顯示，於施用矽肥與採取乾濕交替灌溉(AWD)條件下，水稻生產表現與碳效益皆可明顯提升，尤以 S8(AWD + 矽肥 + 還田)為最佳組合。此結果亦顯示管理措施間具協同增益潛力，而非僅單因子所能達成。

4.2 AquaCrop 模擬結果

由AquaCrop模擬結果(表2)，覆蓋率與生育期差異結果顯示施用矽肥組別普遍達較高覆蓋率(92%)，收穫指數亦略增。產量與生物量之結果中，S8 組總生物量 14,200 kg/ha，較 S1 增加逾 25%，產量亦由 S1 之 4900 kg 提升至 6600 kg。而 WUE 表現呈現 AWD 顯著降低灌溉總量(約 減少 30%)，水分利用效率同步提升，矽肥進一步優化植株水分調控能力。

4.3 綜合效益比較與管理情境分類

透過 APSIM 模型對土壤有機碳(SOC)動態的模擬與 Excel 協助運算的碳投入與 CO₂ 排放量推估，本研究評估了同田間管理策略對稻田碳收支的影響。綜合結果顯示，「稻稈還田」為影響 SOC 累積的最關鍵因

子，其次為灌溉方式的轉變，特別是乾濕交替灌溉(AWD)策略可有效降低碳排放強度，並兼顧水資源利用效率。

以 S8 管理情境(AWD + 矽肥 + 還田)為例，其稻稈還田量達 4,200 kg/ha，經推估可轉化為約 1,890 kg C/ha 的有機碳投入。此組情境在 APSIM 模型模擬下，於一期作季末可達成 0.11% 的 SOC 年增幅，為所有情境中最高者，顯示其在固碳潛力上具高度優勢。

| 情境 | 產量 (kg/ha) | 總乾物 (kg/ha) | WUE | 還田量 (kg/ha) | 還田碳輸入 (kg C/ha) | 碳投入 (kg C/ha) | 碳排量 CO ₂ eq (kg CO ₂ /ha) | SOC 增量 (%) |
|----|---------------|----------------|------|----------------|--------------------|------------------|--|---------------|
| S1 | 4900 | 12150 | 1.05 | 0 | 2167 | 0 | 8726 | 0.01 |
| S2 | 5100 | 12550 | 1.08 | 4200 | 2259 | 1850 | 9014 | 0.07 |
| S3 | 5400 | 12900 | 1.35 | 0 | 2322 | 0 | 9272 | 0.02 |
| S4 | 5800 | 13200 | 1.38 | 4200 | 2376 | 1880 | 9499 | 0.08 |
| S5 | 5700 | 11900 | 1.48 | 0 | 2142 | 0 | 8540 | 0.03 |
| S6 | 6000 | 12300 | 1.5 | 4200 | 2214 | 1850 | 8823 | 0.09 |
| S7 | 6300 | 12600 | 1.53 | 0 | 2268 | 0 | 9046 | 0.06 |
| S8 | 6600 | 12950 | 1.55 | 4200 | 2331 | 1890 | 9314 | 0.11 |

表 2 各管理情境模擬指標比較表

Table2. Comparison of Simulation Indicators under Different Management Scenarios

4.4 綜合比較與視覺化分析

為更直觀呈現各情境於三項關鍵指標(產量、WUE、SOC)的相對表現，本研究製作雷達圖進行比較。結果如圖 4 所示，S8 於三項指標皆達高標表現，其次為 S4 與 S6，顯示「矽肥 + AWD + 還田」策略可協同提升碳效率與產能表現。反之，S1 對照組在三項指標表現皆居於末位項指標表現皆居於末位。

整體而言，矽肥與稻稈還田對產量與碳儲均具正面貢獻，而 AWD 則能有效提升水分效率與減少排放。綜合以上結果，S8 管理策略在三項指標中皆為最優，具備成為永續稻作推廣方案之潛力。

除本研究提出之策略外，未來可考慮整合氣候預測模式與區域尺度農業碳收支評估，進一步支持政策決策。APSIM 雖可模擬 SOC 動態，但矽肥與溫室氣體模組尚待擴充，本研究亦點出模型本土化與組件開發之重要性。

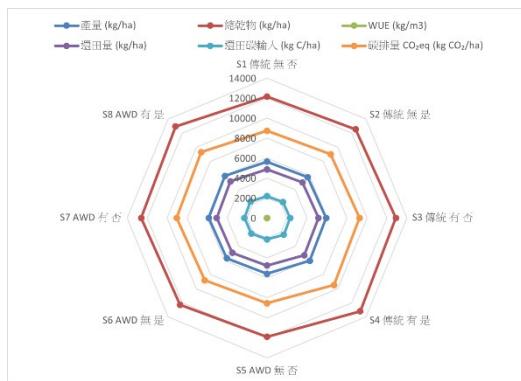


圖 4. 研究結果雷達圖

Figure 4. Radar plot of the results

五、結論與建議

5.1 結論

本研究結合 AquaCrop 與 APSIM 模擬模型，評估不同水稻管理策略(灌溉、矽肥、還田)對於產量、水分利用效率(WUE)與土壤碳儲(SOC)之影響。依據模擬結果，歸納出以下主要結論：

- (1) AquaCrop 模擬結果顯示，矽肥能有效提升水稻覆蓋率與生物量，進而增加產量與 WUE。
- (2) APSIM 模擬結果指出，稻稈還田為影響 SOC 增量的主要因子，碳輸入與還田比例具明顯正相關。
- (3) AWD 乾濕交替灌溉策略能降低總用水與碳排放強度，且對產量並無負面影響。
- (4) 綜合模擬顯示，S8(AWD + 矽肥 + 還田)為綜效最佳策略，可同步提升產量、WUE 與 SOC，為符合永續農業的潛力組合。

5.2 建議

基於本研究結果，提出以下建議以供未來實務應用與研究方向參考：

- (1) 農政單位可推廣 AWD 搭配稻稈還田與矽肥施用技術，提升稻田碳匯與生產力。
- (2) 未來研究可建立臺灣本地水稻矽肥吸收模型與 APSIM 組件，強化矽肥模擬精度。
- (3) 建議田間試驗與長期模擬結合，以驗證模擬參數之穩定性與真實性，並考慮氣候變遷場景下的應對策略。
- (4) AquaCrop 與 APSIM 模型可進一步擴充為碳足跡評估工具，用於淨零農業政策規劃與推估。

參考文獻

1. 農業部農糧署.(2023)·台灣稻米產業現況年報·臺北：農糧署。

2. 行政院農業委員會.(2021)·農業氣候變遷調適策略白皮書(第二版)·行政院農委會出版。
- 行政院環境部.(2022)·臺灣溫室氣體清冊報告·環境部氣候變遷署出版。

3. 台灣碳盤查推動中心。(2023). 農業部
門碳匯潛能與減碳機制建議報告書 ·
內政部國土署委託報告。
4. Bouman, B. A. M., Humphreys, E., Tuong,
T. P., & Barker, R. (2007). Rice and water:
Use and productivity. International Rice
Research Institute.
5. FAO. (2012). Coping with water scarcity:
An action framework for agriculture and
food security. FAO Water Reports.
6. Grassini, P., Thorburn, J., Burr, C., &
Cassman, K. G. (2011). High-yield
irrigated maize in the Western US Corn
Belt: I. On-farm yield, yield potential, and
impact of agronomic practices. *Field
Crops Research*, 120(1), 142–150.
<https://doi.org/10.1016/j.fcr.2010.09.012>
7. Holzworth, D. P., Huth, N. I., deVoil, P. G.,
et al. (2014). APSIM—Evolution towards a
new generation of agricultural systems
simulation. *Environmental Modelling &
Software*, 62, 327–350.
8. Holzworth, D. P., Huth, N. I., deVoil, P. G.,
et al. (2014). APSIM—Evolution towards a
new generation of agricultural systems
simulation. *Environmental Modelling &
Software*, 62, 327–350.
9. Holzworth, D. P., Huth, N. I., deVoil, P. G.,
et al. (2014). APSIM—Evolution towards a
new generation of agricultural systems
simulation. *Environmental Modelling &
Software*, 62, 327–350.
10. International Fertilizer Association (IFA).
(2021). Annual Report 2021. Retrieved
from <https://www.fertilizer.org/>
11. Steduto, P., Hsiao, T. C., Raes, D., &
Fereres, E. (2009). AquaCrop—The FAO
crop model to simulate yield response to
water: I. Concepts and underlying
principles. *Agricultural Water
Management*, 96(3), 287–296.
12. Sun, Y., Chen, Y., Wu, J., et al. (2022).
Silicon improves rice growth and soil
organic carbon by enhancing root biomass
and microbial function. *Science of the
Total Environment*, 824, 153831.
13. Van Groenigen, K. J., et al. (2011). The
soil N cycle feedback to climate change.
Nature Climate Change, 1, 504–508.
14. Vanuytrecht, E., Raes, D., & Steduto, P.
(2014). Climate change effects on crop
water use and crop water productivity: A
modeling study for Belgium. *Agricultural
Water Management*, 117, 160–168.

114 年 10 月 25 日收稿

114 年 12 月 21 日修改

114 年 12 月 22 日接受