

乾溼交替灌溉處理對水稻台農71號與台南11號生長特性與產量之影響¹

郭芝秀²、吳以健^{3*}

摘 要

本研究旨在評估乾溼交替灌溉(Intermittent Irrigation, ITI)在臺灣水稻栽培中的適用性與永續價值，並比較其不同氮肥施用下對“台農 71 號”(TNG71)與“台南 11 號”(TN11)之生理性狀與產量構成要素的影響。試驗於 2021 與 2022 年進行，設置乾溼交替與慣行持續性淹水兩種灌溉處理，並以智慧灌溉系統精準控制水位，調查項目包括株高、葉綠素含量(SPAD)、穗數、稔實率、千粒重與單位面積產量。結果顯示，乾溼交替灌溉不僅未抑制植株生長，反而因改善土壤通氣性，使株高略低於慣行淹水，有助降低倒伏風險；葉綠素含量呈品種差異，TNG71 對灌溉方式與氮肥量較敏感，在中等施肥下表現最佳，而 TN11 在各處理間皆能維持較高 SPAD 值，顯示其具有較佳的氮素利用能力。在產量構成方面，兩品種穗數與粒數大多隨氮肥增加而提升，但乾溼交替在高氮下常出現稔實率下降，使產量未必持續增長；然 TNG71 在乾溼交替下維持較高的千粒重與穩定的稔實率，使其可在節水條件下仍保持良好產量，而 TN11 則因高氮下充實度下降，對氮肥過量較為敏感。整體而言，乾溼交替灌溉在兩品種中皆展現節水、降低甲烷排放且不影響產量的優勢，並能提升根系環境與養分利用效率，配合智慧監測更具推廣潛力。未來建議結合碳足跡評估、氣候風險調適與精準灌溉決策，以建構具在地化、低碳且高效率的水稻灌溉管理模式，促進臺灣稻作永續發展。

關鍵字：水稻、乾溼交替、水管理、氮肥、株高、葉綠素、產量、智慧灌溉

¹ 農業部臺中區農業改良場研究報告第 1117 號。

^{2,3} 農業部臺中區農業改良場計畫助理、副研究員。

*通訊作者：吳以健，Email: wuyc@tcdares.gov.tw

前 言

水稻作為全球超過半數人口的主食，其穩定生產關乎世界糧食安全與社會穩定。然而，水稻的傳統栽培方式，尤其是持續性淹水灌溉，對水資源的依賴性極高，據統計，臺灣水稻田每公頃每年兩期作總計耗用 20,000-28,000 m³ 的灌溉用水(Yang *et al.*, 2025)，而臺灣的水稻面積多達 240,000 公頃(農糧署, 2024)，再加上農業用水部分被移撥至工業後，將導致糧食自給率的危機(林等, 2020)，且中部地區身為臺灣水稻最重要產區之一，反而處於最具風險的缺水困境(黃等, 2023)，因此，尋找一種既能節約水資源、又能兼顧環境效益與產量的新型水稻栽培模式，已成為當前農業研究的迫切議題。

在眾多替代方案中，乾溼交替灌溉(Intermittent Irrigation, ITI)，因其顯著的節水效果與潛在的環境效益而受到廣泛關注。此模式透過週期性地控制土壤水分，使其經歷湛水與排水的過程，而非持續保持湛水狀態。這不僅能大幅減少灌溉用水量，更能改善土壤的通氣性，從而抑制甲烷的產生與排放(Loaiza *et al.*, 2024)，另一方面，水田有助於穩定水循環與地下水補充，所以提高水田生產的用水效率，並不只有節水的效益，而是有助整個環境的水資源(甘等, 2021；賴等, 2022)。此外，乾溼交替的環境能促進水稻根系的健康發育。相較於傳統淹水灌溉下根系主要集中於土壤表層且活力易於衰退，乾溼交替能刺激根系向下扎根，增加根系量與活力(Sandhu *et al.*, 2017)，從而增強植株對養分的吸收能力與對逆境的抵抗力(Yadav *et al.*, 2025)。特別是氮素(N)的吸收與利用，在適度通氣的土壤中能得到有效提升(Engelaar *et al.*, 2000；Rubinigg *et al.*, 2002)，進而提高整體養分利用效率，減少肥料流失，達到永續農業的目標。

然而，乾溼交替灌溉對水稻生長發育與最終產量的影響，仍存在一些變數。其一，品種之間對乾溼交替灌溉的反應不盡相同，前人研究就指出，品種間的甲烷排放與產量效應可能有超過 30% 的差異(Loaiza *et al.*, 2025)；其二，雖然理論上此模式有利於根系發育與養分吸收，但過度的乾旱逆境也可能對植株生理造成壓力(Bittawat *et al.*, 2025)，進而影響其生長指標，如株高、分蘗數與葉色(Adzigbe *et al.*, 2025)。這些生長指標是反映植株健康狀態與生長勢的關鍵參數，其變化與最終產量之間存在複雜的關聯(Zhou *et al.*, 2023)。同時，在氣候變遷所帶來的極端高溫與降雨不確定性下，水稻對灌溉管理的敏感性可能進一步加劇，使得探討在實際田間環境中，乾溼交替灌溉如何影響水稻的生理性狀與產量構成要素顯得尤為重要。

本研究旨在探討在臺灣中部地區，以“台南 11 號”與“台農 71 號”做為試驗材料，採用國興科技智慧灌溉系統進行精準水分管理下的乾溼交替灌溉模式(田間水深維持在 0-5 cm)，對其生育期間的生理性狀與最終產量的影響。研究透過每週記錄植株高度、

分蘗數及葉色等關鍵生長指標的變化，並在收穫期調查產量構成要素，包括穗數、穗重、千粒重、不稔粒數與稔實率，以量化評估乾溼交替灌溉對水稻產量表現的實際效益。同時將納入米飯食味品質(熟飯食味計與硬度黏度儀)及官能品評分析，全面評估乾溼交替灌溉模式的綜合效益，為臺灣水稻產業發展提供一套更具彈性、高效率與永續性的灌溉管理策略，以應對日益嚴峻的氣候挑戰，確保糧食生產的穩定與永續。

材料與方法

一、試驗地點與材料

本試驗分別於 2021 年與 2022 年進行，試驗地點為臺中區農業改良場二甲南一至南四試驗田區(24°00'12.9"N 120°31'58.5"E)，試驗材料選用目前國內栽培面積最廣的品種“台南 11 號”與(Tainan 11, TN11)及“台農 71 號”(Tainung 71, TNG71)作為試驗品種，並使用智慧灌溉系統(Smart Irrigation System, 國興科技)進行水分管理，探討不同氮肥施用量與灌溉方式對水稻生長及產量的影響。

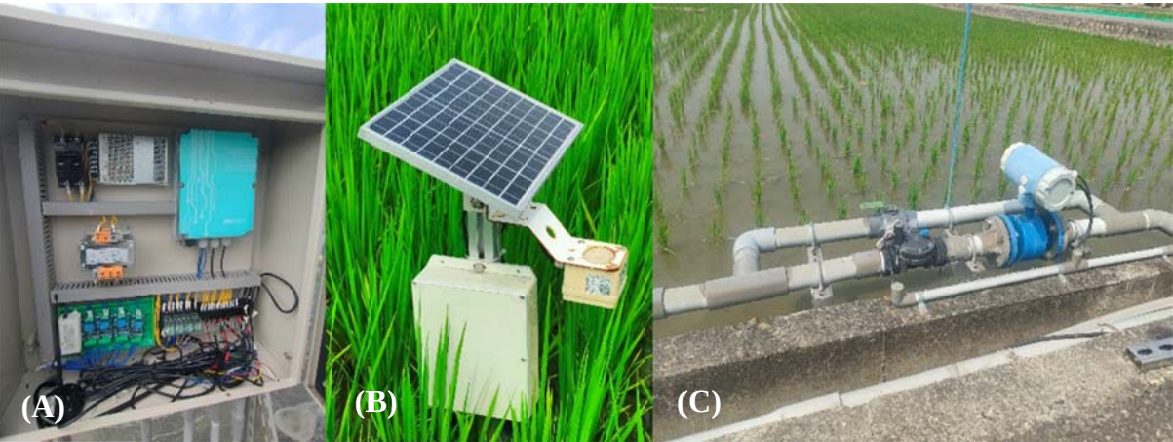
二、試驗處理

(一)田間栽培準備

將水稻秧苗以機械插秧方式，行距 30 cm、株距 21 cm，種植於 4 塊 0.08 ha 的田地，東邊兩大區塊種植“台南 11 號”、西邊兩大區塊種植“台農 71 號”，於田間設置水位尺標，並以 0 cm 處對齊土面，每一區塊各設置五支。

田邊設置智慧灌溉系統控制面板，與水管線路連接至蓄水池電箱的灌溉馬達，手機連接上系統操作頁面，將數值校正過後即可開始灌水。啟動系統頁面開關，待該區電磁閥開關畫面顯示 ON，以及瞬時流量出現數值即可。

待田間土面無水時於各田區中央處安裝一支超音波水位計(Ultrasonic Liquid Level Sensor, ARI-UD, 銘祥科技)於智慧灌溉系統調整設備參數，將水位數值調整為 0 cm，並設定水位超高點警報，以維持試驗標準。



圖一、智慧灌溉系統主機面板(A)、超音波水位計(B)、電磁閥馬達與水位流量計(C)。
Fig. 1. Smart irrigation system main console (A), ultrasonic water level gauge (B), and a solenoid valve motor with a water flow meter (C).



圖二、智慧灌溉系統開關水操作畫面(A)、水位計數值設定操作畫面(B)。
Fig. 2. Operation screen of the smart irrigation system's on/off water control (A) and the setting screen for the water level gauge (B).

(二)水分處理

試驗田區由西至東依序劃分為四個長條區塊，配置分別為：TNG71-乾溼區、TNG71-慣行區、TN11-慣行區及 TN11-乾溼區。

為確保水分管理之精確度，各處理均以智慧灌溉系統與水位感測器進行即時監控。乾溼交替灌溉處理係指除分蘖盛期進行常規曬田 7 日外，其餘生育期間採循環灌溉模

式：待水位自然降至土表無水(0 cm)時，即重新灌溉至 5 cm，以此循環操作至收穫前斷水；慣行灌溉處理，則除中期曬田外，則以長期維持 3-5 cm 湛水層，作為對照基準。試驗以超音波水位計與水位流量計，記錄每日水位變化，及每期作之灌溉水用量，並換算為每公頃灌溉水用量(圖一)。同時記錄各田區之灌溉日期，以計算灌溉次數、總湛水日數(水位大於 0 公分之日數)及復灌時間(由水深 5 cm 至 0 cm 的日數)。

(三)栽培管理

田間進行粗整地後以台肥 39 號當基肥施用(12-18-12-10 (有機質) 20 kg/0.08 ha)、萌前除草劑(克稗，butyl (R)-2-[4-(4-cyano-2-fluorophenoxy)phenoxy]propionat，82.5 ml/0.08 ha，臺灣道禮股份有限公司)、稻田喜(3-(2,2-difluoroethoxy)-N-(5,8-dimethoxy[1,2,4]triazolo[1,5-c]pyrimidin-2-yl)-a,a,a-trifluorotoluene-2-sulfonamide，82.5 ml/0.08 ha，臺灣道禮股份有限公司)與苦茶粕(Camillia oil meal，(N- P₂O₅- K₂O)3-1.5-2.1-90(有機質)，10 kg/0.08 ha，三木實業)以防治福壽螺。

行株距 30 cm * 21 cm 的多本植插秧，於插秧後間隔 4 至 5 天後開始進行灌溉處理，並分別於插秧後約 12、26、55 日，以硫酸銨施用第一次追肥(21-0-0，農友牌)、以硫酸銨施用第二次追肥(21-0-0，農友牌)、以硫酸銨(21-0-0，農友牌)及氯化鉀(0-0-60，農友牌)施用穗肥。抽穗期間持續進行間歇灌溉處理，於收穫前一星期斷水，收穫期進行樣本收割，每一區肥料處理各割取兩重複，每一重複收穫 100 株。

表一、氮素單位面積用量(kg/ha)

Table 1 . Nitrogen application rates (kg/ha)

Cultivar	N	First dressing		Second dressing		Panicle fertilizer	
		ITI (N)	CP (N)	ITI (N)	CP (N)	ITI (N)	CP (N)
TNG71	80	16.7	16.7	18.24	17.81	18.24	17.81
	120	30	30	32.76	32	32.76	32
	160	43.3	43.3	47.29	46.19	47.29	46.19
	200	56.7	56.7	61.92	60.48	61.92	60.48
TN11	60	9.42	9.42	10.29	10.27	10.29	10.27
	180	33.85	34.76	50.72	52.09	33.65	34.55
	260	56.35	57.86	84.57	86.84	56.35	57.86
	340	78.95	81.07	118.42	121.6	78.95	81.07

*ITI: Intermittent Irrigation ; CP : Conventional Practice

(四) 肥料管理

在田間配置上，每個品種的各水分處理組由南至北設有 6 個小區，其中最南與最北的小區為保護行(N0，無氮處理)，中間 4 個小區則配置不同的氮肥施用級距(N-levels)，小區與小區之間以浪板相隔，浪板插入土中 15 公分深並維持土上 45 公分高作為區隔，以防止肥分交互干擾。

關於兩品種氮肥級距之設定，本研究依據品種生理特性採取差異化策略，以確保數據之有效性。針對台南 11 號，依前人相關研究(陳等，2018)，並鑑於其具有較佳之耐肥性與高產潛力，故設定較高之氮肥梯度(最高達 340 kg/ha)以探討其極限產量反應；反觀“台農 71 號”，考量其易倒伏且對氮素敏感，若施用過量氮肥恐導致嚴重倒伏而影響採樣準確度，故採用較低且密集之氮肥級距(80-200 kg/ha)，以精確評估其最適施肥量。

三、水稻植株生理性狀與產量調查

(一) 植株生理調查

測量株高及葉色。植株葉色則以手持式葉綠素計(SPAD-502Plus，廣柏實業)測定，每株取 3 片最上位完全展開葉，葉脈左右各測量 1 個數值，共計 6 個數值，一小區共 18 個數值平均。

(二) 產量調查

於水稻收割適期，進行產量調查與樣品收穫，採收時機以稻穗成熟度為採收基準。當每穗稻穀中基部(最下方)二至三粒稻穀仍呈現綠色，其餘穀粒已達充分成熟(呈金黃色且乾燥)時，即可進行採收。此標準確保穀粒整體成熟度與品質符合收穫要求，同時避免過早或過晚採收對產量與品質造成的影響。

每個肥料等級小區各收穫 200 株，進行脫粒後將穀粒乾燥至水分含量 14%，接著使用電動風選機調整標準適當風速進行篩選，並以手捏是否有充實穀粒為標準，再進行秤重，並依照行株距 30 cm*21 cm 之單位公頃株數，進行單位面積產量之計算。

試驗於碾製白米的過程同時測量稻穀與糙米容積重。稻穀容積重的量測方式係以手動方式為之，首先取適量之稻穀放入容積重量測量容器(bulk density measuring container)之盛料斗，打開閘門讓稻穀自然落入一公升之量測容器，刮平後秤重，所得之重量即為容積重。

(三) 產量構成要素調查

於水稻成熟期，每個小區隨機採三株作為產量構成要素材料，調查穗數、穗重、

千粒重、不稔粒數、粒重，依公式推算稔實率與單位面積穗數。

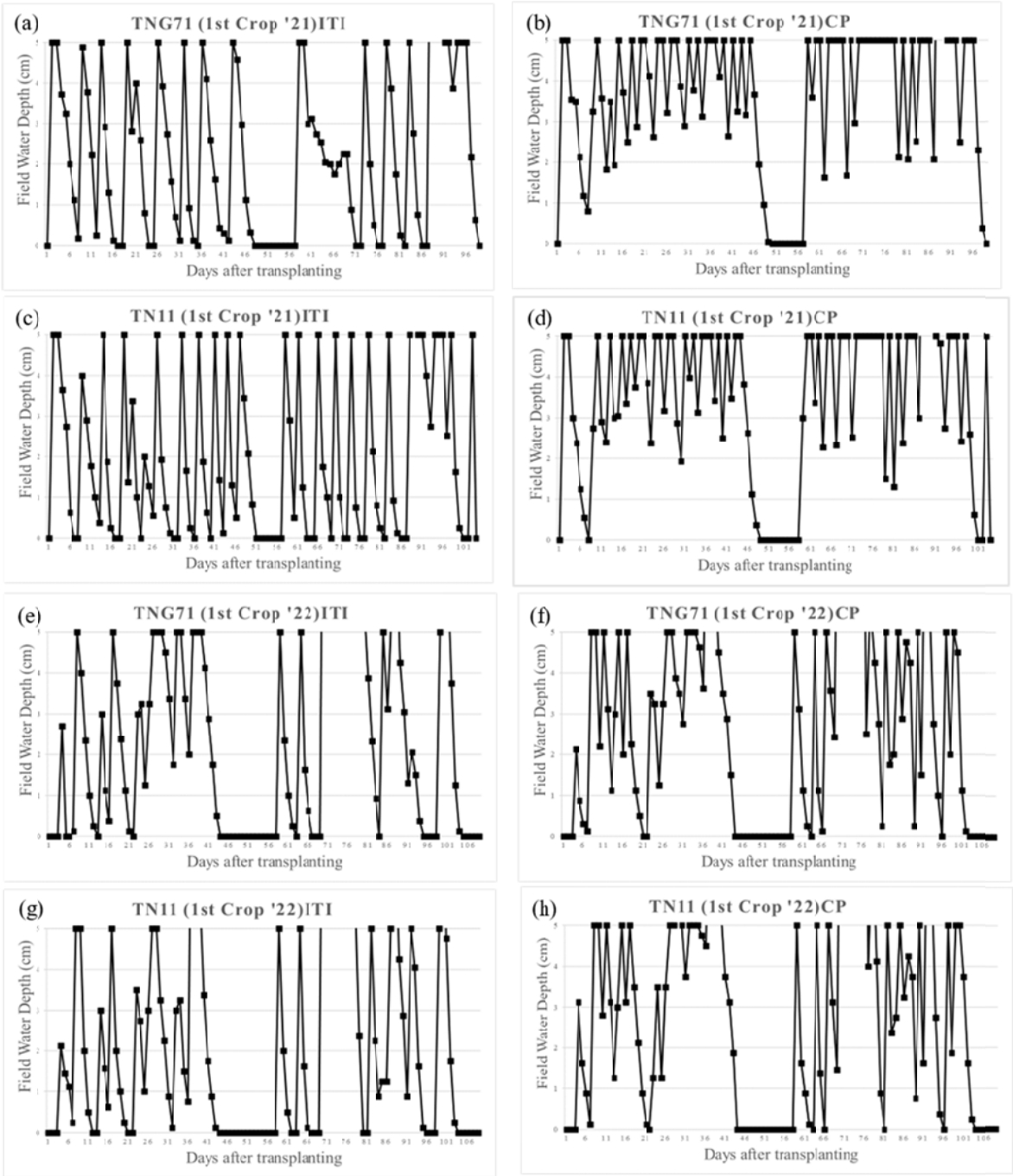
考種步驟為，先將該區樣本(含穀粒、穗軸)進行秤重、計算穗數，使用玻璃培養皿將穀粒全數脫落，拔除殘留於穀粒上的小穗軸，使穀粒重量精確。脫粒後使用礱穀機 (THU35B, SATAKE) 進行風選，分出稔實粒及不稔實粒，不稔實粒數為手動計算，稔實粒數則使用數粒器計算，並攫取 1,000 粒作為千粒重，依稔實粒數與不稔實粒數以下列方式計算稔實率。

1. 稔實率(Fertility Rate): $(\text{稔粒數}/(\text{稔粒}+\text{不稔粒}))\times 1000$
2. 單位面積穗數(Number of Panicles per Unit Area): 單叢穗數*面積

結 果

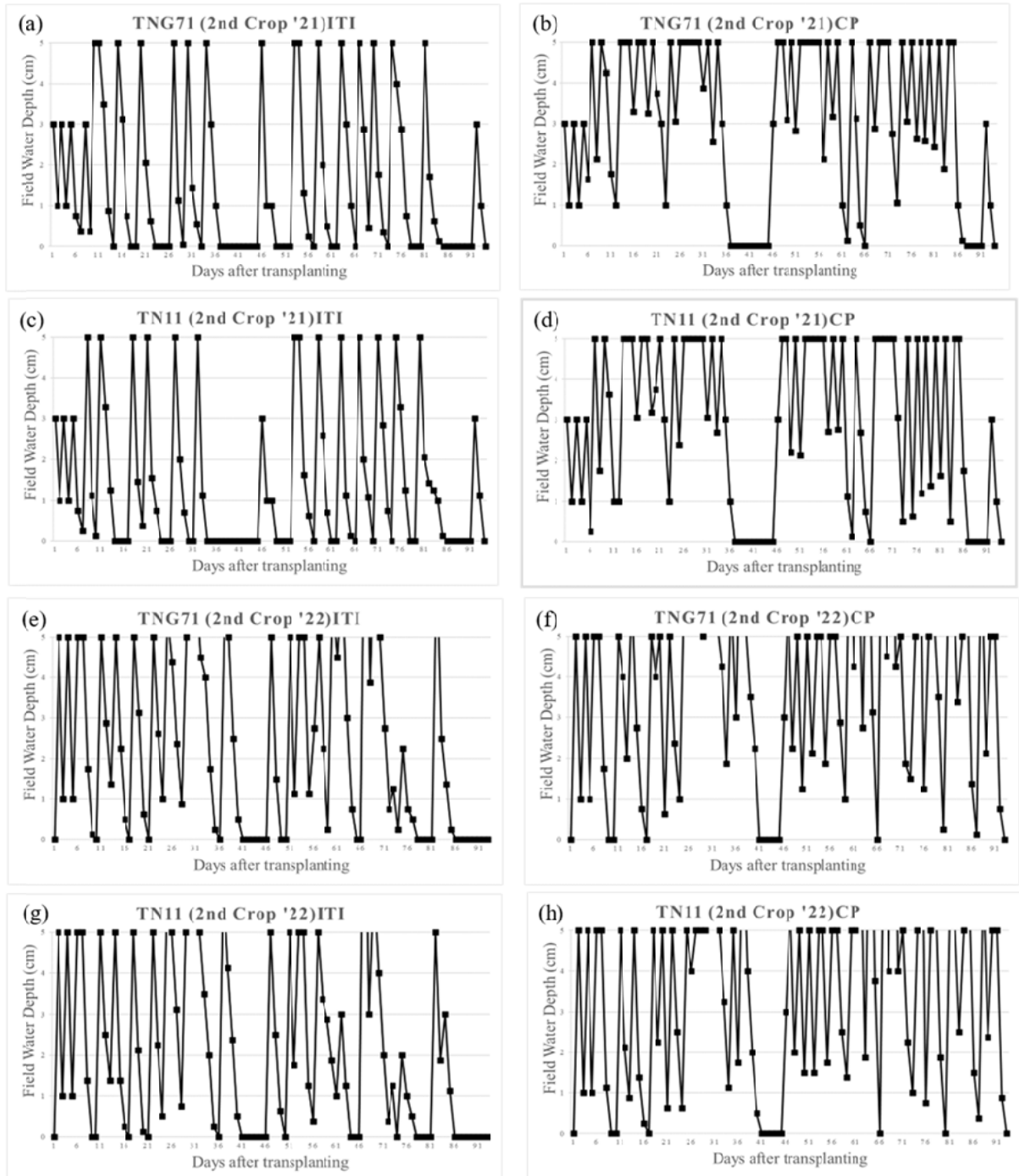
一、乾濕交替灌溉之水位變化與灌溉相關結果

使用“台農 71 號”與“台南 11 號”於 2021 年與 2022 年進行乾溼交替灌溉試驗，與作為對照的慣行灌溉進行比較，水位變化如圖三與圖四，結果顯示，除了 2022 年一期作外，其他的 3 個期作的乾溼交替灌溉的水位都明顯較慣行灌溉低，可看出田區的水位與水分狀態都以乾溼交替灌溉處理較低，因此其每期作的總用水量、灌溉次數、總湛水日數、復灌時間皆以乾溼交替灌溉處理較少(表二)，顯示其灌溉處理確實營造田間水分環境的差異。



圖三、2021 年與 2022 年一期作乾溼交替灌溉處理與慣行灌溉處理在台農 71 號與台南 11 號田區的逐日水位資料。

Fig. 3. Daily water level data for the 1st crop ITI and CP in TNG71 and TN11 fields in 2021 and 2022.



圖四、2021 年與 2022 年二期作乾溼交替灌溉處理與慣行灌溉處理在台農 71 號與台南 11 號田區的逐日水位資料。

Fig. 4. Daily water level data for the 2nd crop ITI and CP in TNG71 and TN11 fields in 2021 and 2022.

表二、乾溼交替灌溉處理與慣行灌溉處理的每期作每個品種的總灌溉水用量、總湛水日數、復灌日數、灌溉次數

Table 2. Total irrigation water usage, flooding days, re-irrigation days, and number of irrigations for each crop and variety under alternating wet and dry irrigation and conventional irrigation

Year	Crop	Variety	Irrigation	Irrigation water usage (m ³ /plot)	Flooding days	Re-irrigation days	Number of irrigations
2021	1st crop	TNG71	ITI	109.5	75	7	11
			CP	166.3	89	2	38
		TN11	ITI	106.8	73	4	19
			CP	159.4	89	2	37
	2nd crop	TNG71	ITI	82.7	57	4	14
			CP	206.2	79	2	39
		TN11	ITI	151.3	54	5	15
			CP	187.8	78	2	37
2022	1st crop	TNG71	ITI	92.8	73	6	8
			CP	207.4	80	3	15
		TN11	ITI	80.0	71	5	7
			CP	242.0	80	3	17
	2nd crop	TNG71	ITI	81.5	66	3	14
			CP	374.1	82	2	35
		TN11	ITI	131.1	64	3	14
			CP	376.7	81	2	35

二、乾溼交替灌溉對株高的影響

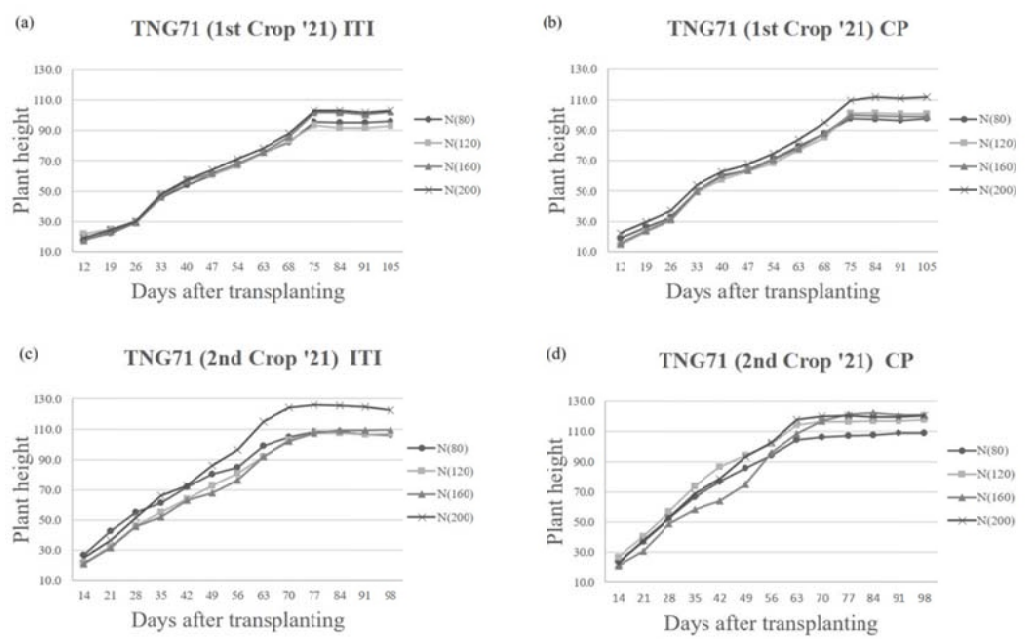
株高結果如圖五-圖八所示。於 2021 年時，“台農 71 號”在二期作中，各種處理間變化較為穩定，而在二期作中株高增加幅度較一期作更大(如圖五)。在灌溉方式方面，“台農 71 號”在二期作時，於乾溼灌溉下的肥料間株高差距較慣行灌溉明顯，其中慣行灌溉下高氮肥處理組的株高較突出；然而二期作時趨勢相反，慣行灌溉下的氮肥料差距反而較乾溼灌溉明顯。在肥料處理方面，一期作的慣行灌溉下 N200 處理組的株高較其

他處理明顯偏高，而乾溼灌溉則呈現變化不大的穩定成長；惟至二期作時，乾溼灌溉下高氮肥處理組的株高增加更為明顯，且整體上升趨勢亦高於一期作。

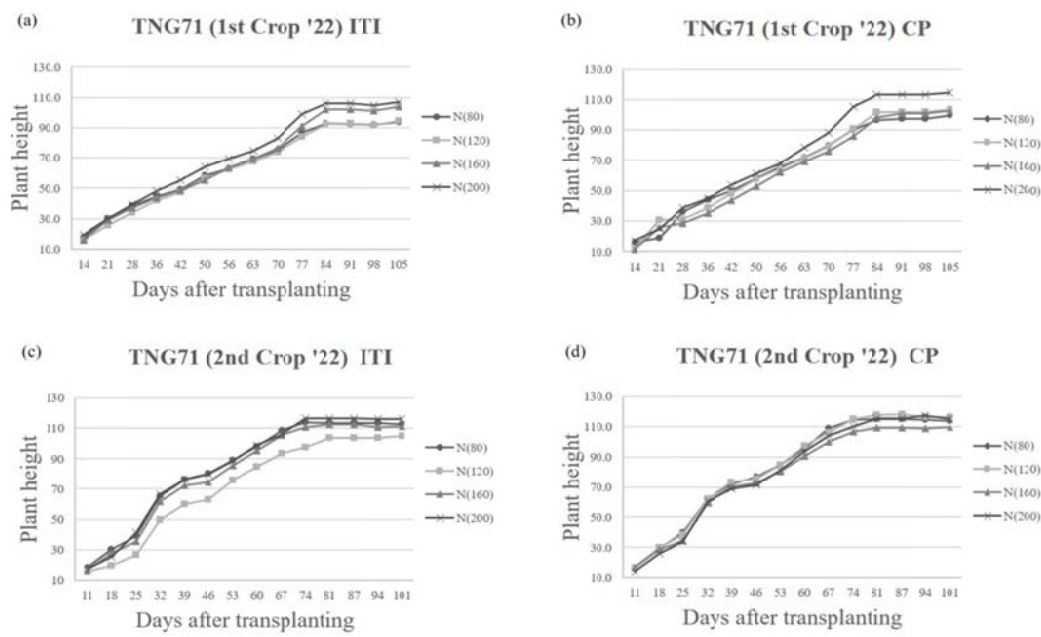
2022 年的結果顯示，如圖六，“台農 71 號”株高於各種處理間的變化較 2021 年更為穩定，且肥料處理間的差距仍屬明顯。在灌溉方式方面，“台農 71 號”在一期作時，乾溼灌溉下的各肥料處理間株高差距較慣行灌溉明顯；二期作時，兩種灌溉模式的株高差異則趨於相近。在肥料處理方面，一期作的慣行灌溉 N200 處理組株高最高，乾溼灌溉則保持穩定成長；惟至二期作時，乾溼灌溉的 N120 處理與慣行灌溉的 N160 處理株高較其他氮肥處理低。

“台南 11 號”於 2021 年時，如圖七，在各處理間皆呈現穩定的上升趨勢，高氮肥處理的植株高度普遍高於低氮肥處理。在灌溉方式方面，一期作中兩種灌溉方式下的各肥料處理間差異皆相當明顯，且慣行灌溉的低氮肥處理株高明顯低於其他氮肥處理；然而至二期作時，乾溼灌溉下各處理的生長曲線變化趨於相近，慣行灌溉下的株高則整體略高，顯示該品種對水分條件的反應相對穩定。在肥料處理方面，一期作的慣行灌溉下 N60 處理組的株高遠低於其他氮肥處理，這與乾溼灌溉下各氮肥處理間呈現平均差異的趨勢不同；惟至二期作時，乾溼灌溉的高氮肥處理組(N260 與 N340)與低肥處理組(N60 與 N180)兩組曲線呈現明顯的分群現象，差異拉開，而慣行灌溉則各肥料處理間差異明顯且維持穩定。

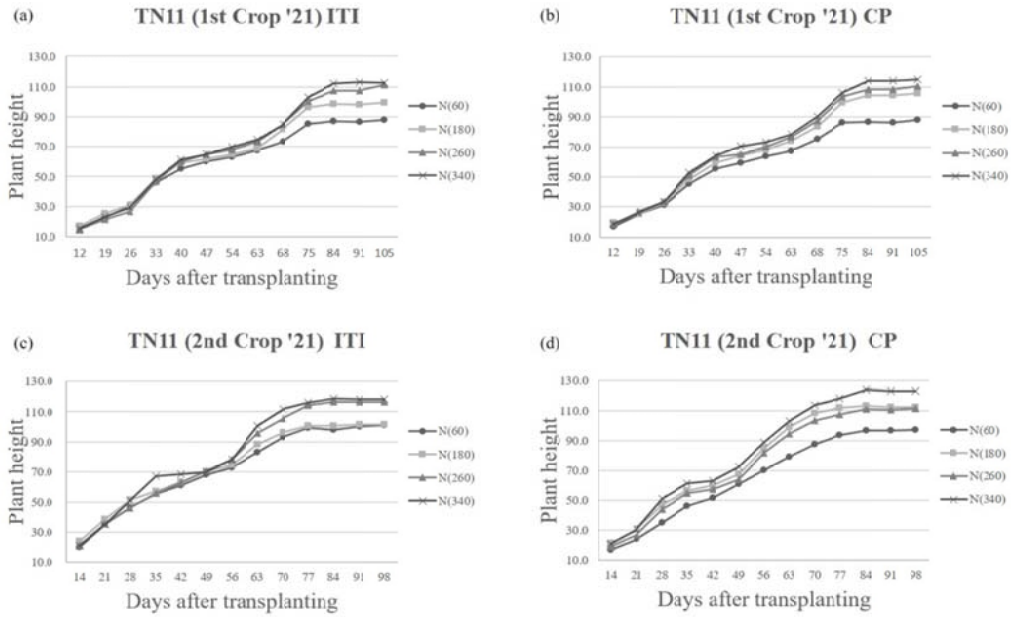
到了 2022 年，如圖八，“台南 11 號”的株高在各肥料處理間變化幅度較 2021 年小，顯示其具有良好的氮素利用效率與穩定的生理反應。在灌溉方式方面，一期作時兩種灌溉方式下的各肥料處理間生長曲線相近，並無太大變化；二期作時，慣行灌溉下的各肥料處理間株高差距拉開的程度較乾溼灌溉明顯。在肥料處理方面，一期作的慣行灌溉下 N340 處理組株高略低於 N180，顯示即使如“台南 11 號”之耐肥性佳的品種，過量施肥仍可能導致生理抑制而影響生長；惟至二期作時，N340 處理組在各灌溉處理中皆為最高，且慣行灌溉的 N60 處理組株高略高於 N180。



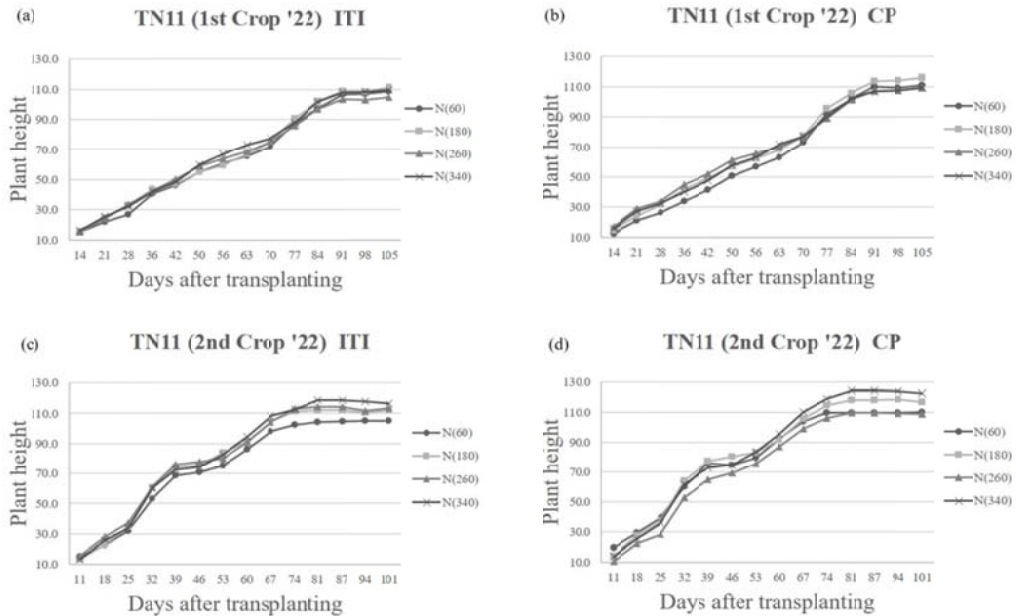
圖五、2021 年台農 71 號乾濕交替灌溉處理與慣行灌溉處理之株高。
Fig. 5. Plant height of Tainung 71 under ITI and CP treatments in 2021.



圖六、2022 年台農 71 號乾濕交替灌溉處理與慣行灌溉處理之株高。
Fig. 6. Plant height of Tainung 71 under ITI and CP treatments in 2022.



圖七、2021 年台南 11 號乾濕交替灌溉處理與慣行灌溉處理之株高。
Fig. 7. Plant height of Tainan 11 under ITI and CP treatments in 2021.



圖八、2022 年台南 11 號乾濕交替灌溉處理與慣行灌溉處理之株高。
Fig. 8. Plant height of Tainan 11 under ITI and CP treatments in 2022.

三、乾溼交替灌溉對葉綠素含量的影響

乾溼交替灌溉對葉綠素含量的影響，調查結果如圖九-圖十二所示。2021 年試驗中，“台農 71 號”與“台南 11 號”在不同期作、灌溉方式及施肥處理下均呈現明顯變化。於 2021 年試驗中，如圖九，“台農 71 號”在不同期作與處理下的葉綠素含量呈現顯著變化。在灌溉方式方面，一期作時，於乾溼交替灌溉下的各肥料處理初期數值相近，直至抽穗後高氮肥與處理才逐漸高於低氮肥處理；而在慣行灌溉下，僅高氮肥處理數值明顯高於其他氮肥處理；二期作時，乾溼交替灌溉與慣行灌溉皆呈現相似的變化趨勢，且各肥料處理間的差異略大於一期作，葉綠素含量於生育後期皆呈緩慢下降，顯示葉片在後期的老化現象。在肥料處理方面，一期作時，前期各處理趨勢相近，直至抽穗後，乾溼交替灌溉下的高氮肥處理(N160 與 N200)與低肥處理(N80 與 N120)差距拉大，慣行灌溉處理間差距雖不大，但仍以 N200 處理組最高，且兩種灌溉下的葉綠素含量皆於後期呈現急速下降；二期作時，各肥料處理間的整體趨勢接近，乾溼交替灌溉與慣行灌溉的趨勢相似，其中慣行灌溉下的各肥料間差距較為明顯，N200 處理僅略高於其他氮肥處理，且所有處理之葉綠素含量在後期皆呈緩慢下降趨勢。

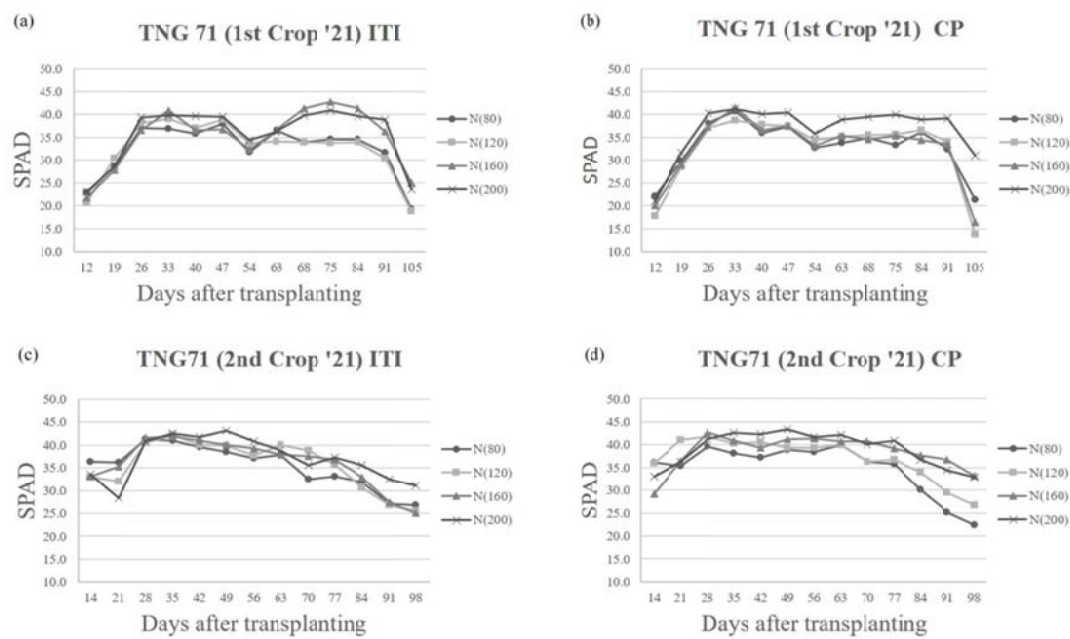
到了 2022 年時，在氣候條件相對穩定的環境下(如圖十)“台農 71 號”的葉綠素變化趨勢較前一年平緩，且至收穫前皆呈緩慢下降。在灌溉方式方面，一期作時，慣行灌溉的整體葉綠素含量數值高於乾溼交替灌溉，且至收穫前的下降趨勢較為平緩，其中高氮肥處理的表現較為突出；二期作時，兩種灌溉方式下的各肥料處理間差異不大，但至收穫前的下降趨勢較一期作更為明顯。在肥料處理方面，一期作時皆以高氮肥處理 N200 的葉綠素值最高，顯示此施肥量有助於維持葉片的光合作用能力；二期作時，僅乾溼交替灌溉下的高氮肥處理 N200 葉綠素略高於其他處理；反觀慣行灌溉下，各肥料處理間無太大變化，甚至出現低氮肥 N80 數值略高於高氮肥 N200 的現象。

“台南 11 號”於 2021 年時的葉綠素含量普遍高於“台農 71 號”(如圖十一)，顯示其具備較強的葉片含氮量及光合作用潛力。在灌溉方式方面，一期作時，兩種灌溉方式下的趨勢相近，中高氮肥肥處理的葉綠素持續上升，低氮肥處理則緩慢下降，且高氮肥處理直至生育後期仍維持上升趨勢；二期作時，慣行灌溉下的各肥料處理間趨勢相近，而乾溼交替灌溉下的各肥料處理間則出現明顯差距，惟兩種灌溉處理的葉綠素含量於最後一週皆急速下降，顯示氣候條件與成熟階段對葉片氮素再分配具有顯著影響。在肥料處理方面，一期作於抽穗後各肥料處理之間的變化更為明顯，高氮肥處理(N340)在收穫前仍維持上升趨勢，反映該品種對高氮供應的耐受與利用能力較佳。二期作則呈現相反趨勢，高氮肥處理(N340 與 N260)除最後一周下降幅度較一期作大之外，於慣行灌溉處理下，

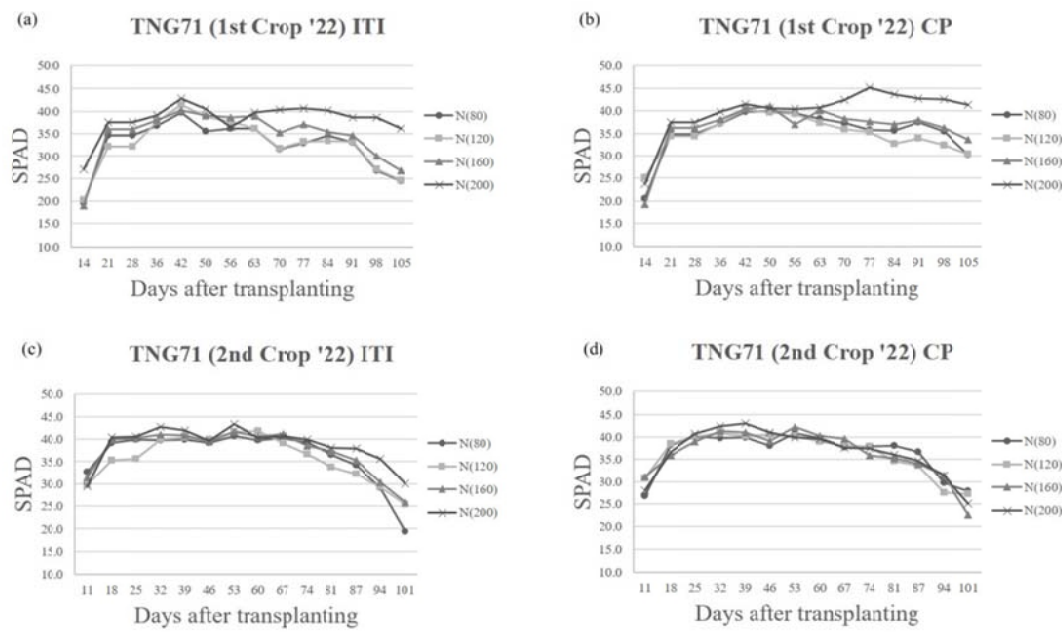
其數值甚至低於中低氮肥(N60 與 N180)。

2022 年的試驗結果顯示，“台南 11 號”的葉綠素含量在相對穩定的氣候條件下，如圖十二，“台南 11 號”的葉綠素含量變化趨勢較 2021 年更為平緩，且至收穫前皆呈現緩步下降的趨勢。在灌溉方式方面，一期作時，於慣行灌溉下各肥料處理間的差異較為顯著，且數值皆於穗肥施用後呈現緩慢上升，其生育後期之葉綠素含量高於乾溼交替灌溉，至收穫前，乾溼交替灌溉的數值趨於平穩，而慣行灌溉則呈現平緩下降；二期作時，慣行灌溉下各肥料處理間的差異依然明顯，並隨生育後期緩慢下降；反觀乾溼交替灌溉，各肥料處理間的差異較小，收穫前同樣呈現緩降趨勢。在肥料處理方面，一期作的慣行灌溉下，低氮肥處理 N60 與中氮肥處理 N180 間的葉綠素差異顯著，乾溼交替灌溉雖呈現類似趨勢，但其處理間的差距幅度略小於慣行灌溉，且兩種灌溉模式下的整體變化幅度均低於 2021 年；二期作時，各肥料處理間的葉綠素變化趨勢相對穩定，兩種灌溉模式下的高氮肥處理 N340 僅略高於其他氮肥處理；其中，慣行灌溉各處理間的差異直至穗肥施用後才逐漸拉開，並於收穫前緩慢下降，而乾溼交替灌溉雖有細微差異，但低氮肥處理(N60 與 N180)在後期的下降幅度較大。

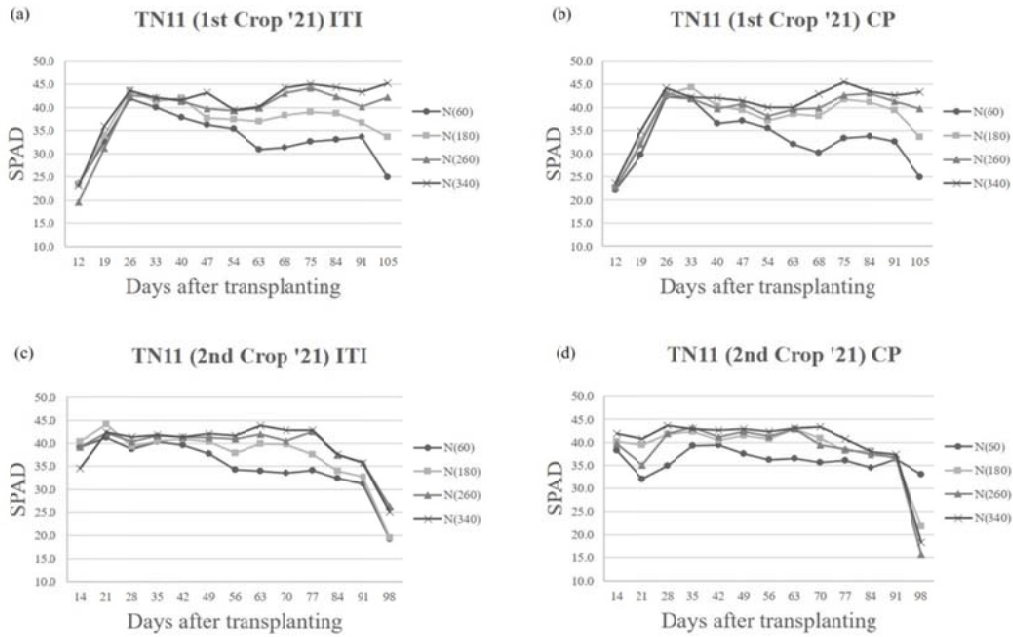
整體而言，“台農 71 號”對肥料施用量及灌溉方式的反應較為明顯，葉綠素含量在中等施肥量(N120 至 N160)下維持最佳水平，而“台南 11 號”則能在不同施肥條件下維持穩定的葉綠素表現。兩品種於二期作後期皆呈下降趨勢，推測與氣溫上升、成熟期葉片氮素再分配及生理老化有關，顯示氣候條件與品種特性在葉綠素變化中具關鍵影響。



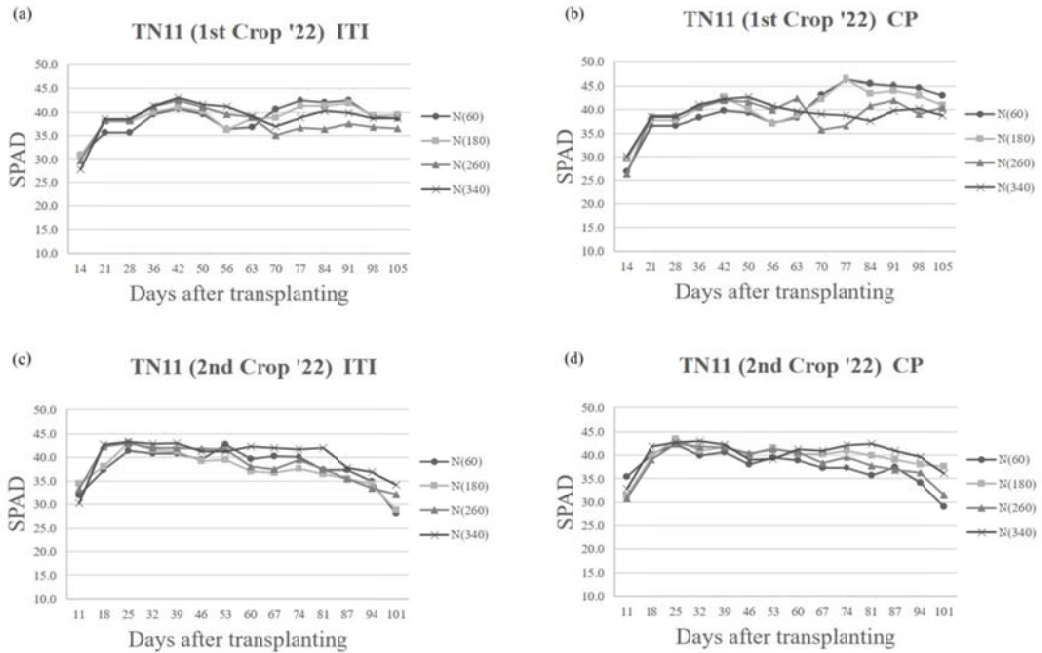
圖九、 2021 年台農 71 號乾濕交替灌溉處理與慣行灌溉處理之 SPAD 值。
Fig. 9. Leaf color SPAD values of Tainung 71 under ITI and CP treatments in 2021.



圖十、 2022 年台農 71 號乾濕交替灌溉處理與慣行灌溉處理之 SPAD 值。
Fig. 10. Leaf color SPAD values of Tainung 71 under ITI and CP treatments in 2022.



圖十一、2021 年台南 11 號乾濕交替灌溉處理與慣行灌溉處理之 SPAD 值。
Fig. 11. Leaf color SPAD values of Tainan 11 rice under ITI and CP treatments in 2021.



圖十二、2022 年台南 11 號乾濕交替灌溉處理與慣行灌溉處理之 SPAD 值。
Fig. 12. Leaf color SPAD values of Tainan 11 under ITI and CP treatments in 2022.

四、產量構成要素結果

2021 年與 2022 年“台農 71 號”與“台南 11 號”的產量構成要素分析結果如表三至表六所示。2021 年，“台農 71 號”的產量與構成要素表現，如表三所示。在灌溉方式方面，“台農 71 號”於一期作時，在乾溼交替灌溉之下，整體產量展現出隨著氮肥增加而持續攀升的趨勢，顯示該灌溉模式在一期作環境下利於發揮高氮肥的增產潛力；反觀慣行灌溉雖產量隨氮肥提升，至 N200 處理反而出現下滑，顯示長期湛水環境限制了高氮肥的轉化效率；二期作的趨勢則不同，乾溼交替灌溉下的產量在低氮肥區間即達高峰，隨氮肥增加反而呈現下降，顯示該期作環境下乾溼交替灌溉對高氮肥的承載力較弱，而慣行灌溉在高氮肥處理仍能維持相對穩定的高產量，整體高氮肥表現優於同期的乾溼交替灌溉。在肥料處理方面，於一期作時，乾溼交替灌溉下的 N200 處理組產量達到最高，穗數部分也隨著肥料而增加，在慣行灌溉下，產量於 N120 達到高峰，當氮肥提高至 N200 時，雖然穗數隨之提升，但稔實率卻大幅下降，導致產量不增反減；二期作時，乾溼交替灌溉的最佳產量出現在低氮肥的 N80，高氮肥 N200 反而產量下降；慣行灌溉則在 N160 處理組達到最高產量，顯示在二期作環境中，適度的水分保持配合中高氮肥較能達到最佳產量。

2022 年的“台農 71 號”的產量與構成要素表現，如表四所示。在灌溉方式方面，於一期作時，在乾溼交替灌溉之下，產量隨著低氮肥增加呈現微幅上升，但當進入高氮肥區間後，產量反而出現顯著下降的趨勢，而在慣行灌溉之下，產量隨著氮肥持續增加，最高氮肥處理時急劇下降，顯示一期作環境下，無論何種灌溉方式，過高的氮肥施用皆不利於最終產量；二期作時，乾溼交替灌溉下的產量表現呈現波動狀態，雖在中高氮肥處出現產量高峰，但在最高氮肥時又再度下降，反觀慣行灌溉之下，產量隨著氮肥增加呈現較為穩定的上升趨勢，並在最高氮肥處理組達到最高產量，顯示慣行灌溉於二期作較能承載高氮肥的施用以提升產量。在肥料處理方面，於一期作時，雖然穗數隨氮肥增加而提升，且於最高氮肥處理下達到高峰，但並未轉化為產量優勢，主因在於高氮肥處理導致稔實率與千粒重顯著下降，特別是稔實率的急遽下降，抵消了穗數增加的效益，導致高氮肥處理產量反而低於無氮肥處理。至於二期作，乾溼交替灌溉在中高氮肥處理 N260 下產量最高，高氮肥處理 N340 則同樣因稔實率下降而減產，而在慣行灌溉中，儘管最高氮肥處理的稔實率與千粒重同樣受到抑制而略有下降，但因穗數與粒數的顯著增加，且足以彌補穀粒充實的缺失，使得最終產量仍能隨著氮肥增加。

“台南 11 號”於 2021 年時的產量與構成要素表現，如表五所示。在灌溉方式方面，一期作時，兩種灌溉方式之下，整體產量趨勢皆呈現隨著氮肥增加而上升，但在最高氮

肥處理時皆出現轉折下降的趨勢；二期作時，乾溼交替灌溉的產量在達到高峰後，隨著氮肥繼續增加反而呈現明顯的下降趨勢，反觀慣行灌溉，其產量隨著氮肥增加呈現持續上升的趨勢，顯示在二期作環境下，慣行灌溉較能維持高氮肥下的產量表現。在肥料處理方面，於一期作時，兩種灌溉方式的產量皆在 N260 處理組達到最高，穗數隨氮肥增加而提升，然而當氮肥增加至 N340 時，雖然穗數與每穗粒數仍維持高檔，但稔實率卻明顯下降，導致最終產量不增反減；二期作，乾溼交替灌溉在 N180 處理組達到高峰，N340 處理組雖然每穗粒數大幅增加，但產量卻隨著稔實率大幅下降；反之，慣行灌溉在二期作的 N340 處理組仍維持最高產量，主因在於其在高氮肥下仍能維持相對穩定的稔實率。

2022 年“台南 11 號”的產量與構成要素表現，如表六所示。在灌溉方式方面，“台南 11 號”於一期作時，於兩種灌溉處理之下，產量表現呈現出對高氮肥的耐受性較低，整體趨勢在低氮肥與無氮肥區間維持較高產量，隨著氮肥增加最高時，產量反而出現明顯下降，顯示一期作環境下，過量施肥對兩種灌溉模式皆產生了負面影響；二期作的趨勢則與一期作截然不同，兩種灌溉方式下的產量在經歷低氮肥的波動後，隨著氮肥增加至高氮肥區間，產量呈現回升並持續攀升的趨勢，且在最高氮肥處理時皆達到該灌溉組別的產量高點，顯示在二期作環境下，“台南 11 號”配合兩種灌溉模式皆能有效利用高氮肥來維持或提升產量，未如一期作般出現嚴重的減產現象。在肥料處理方面，於一期作時，雖然穗數隨著氮肥增加而呈現上升趨勢，然而高氮肥處理卻同時導致了稔實率與千粒重的顯著下降，這種穀粒充實度的不足抵消了穗數增加帶來的優勢，導致產量在最高氮肥處理時不增反減；二期作時，雖然低氮肥處理曾出現產量波動，但在進入中高氮肥區間後，穗數隨著氮肥增加而提升，且稔實率與千粒重並未像一期作那樣隨氮肥增加而大幅下降，而是維持在相對穩定的狀態，使得穗數增加能夠確實轉化為最終產量，因此在高氮肥處理組觀察到產量隨之升高的現象。

表三、2021 年台農 71 號於不同水分處理下之產量構成要素

Table 3 . Yield components of TNG71 under different water management treatments in 2021

TNG71 Treatment	N Rate	1st Crop					2nd Crop				
		PN	GN	FR (%)	GW (g)	Yield (kg/ha)	PN	GN	FR (%)	GW (g)	Yield (kg/ha)
ITI	N(0)	21	44.2	77.6	27.2	4229	17	45.6	85.6	24.0	4177
	N(80)	18	43.8	73.8	28.5	5024	19	47.8	75.7	25.4	5235
	N(120)	22	47.1	70.3	27.5	6194	20	39.9	87.5	26.9	4824
	N(160)	23	46.5	67.4	28.9	6305	20	44.4	85.4	24.6	4225
	N(200)	27	46.9	68.0	28.0	6503	26	50.4	75.5	24.0	4751
CP	N(0)	19	37.0	92.0	28.3	4557	20	44.9	86.3	24.3	3870
	N(80)	26	40.0	89.3	26.6	5638	22	42.5	84.4	26.1	4970
	N(120)	26	43.2	87.6	24.9	6048	27	45.1	79.4	26.1	4736
	N(160)	29	41.0	89.1	26.0	5824	26	46.9	80.2	24.6	5682
	N(200)	34	49.1	70.8	25.5	5548	27	45.2	77.5	26.5	5551

*ITI: Intermittent Irrigation ; CP : Conventional Practice ; PN: Panicle Number per hill ; GN: Grain Number per panicle ; FR: Fertility ; GW: 1000-grain weight.

表四、2022 年台農 71 號於不同水分處理下之產量構成要素

Table 4 . Yield components of TNG71 under different water management treatments in 2022

TNG71 Treatment	N Rate	1st Crop					2nd Crop				
		PN	GN	FR (%)	GW (g)	Yield (kg/ha)	PN	GN	FR (%)	GW (g)	Yield (kg/ha)
ITI	N(0)	20	44.6	89.8	23.4	4511	20	45.0	84.3	25.1	5546
	N(80)	20	44.3	85.3	24.7	4752	16	39.6	87.5	27.5	4830
	N(120)	26	46.9	83.8	23.5	4772	15	41.3	86.1	26.7	4617
	N(160)	24	44.7	85.8	23.5	3331	17	45.6	84.6	24.6	5976
	N(200)	33	67.3	62.5	20.3	3700	22	51.4	73.2	24.3	5236
CP	N(0)	18	43.1	90.3	24.3	6747	21	50.4	83.0	22.4	4953
	N(80)	24	43.4	84.2	25.3	6752	21	44.7	81.4	25.8	4097
	N(120)	26	52.5	71.7	23.6	6467	22	44.6	83.2	25.4	5256
	N(160)	26	49.5	77.9	23.7	6587	25	46.2	82.4	24.1	4878
	N(200)	26	51.6	71.5	24.0	4586	27	53.2	71.9	23.9	5369

*ITI: Intermittent Irrigation ; CP : Conventional Practice ; PN: Panicle Number per hill ; GN: Grain Number per panicle ; FR: Fertility ; GW: 1000-grain weight.

表五、2021 年台南 11 號於不同水分處理下之產量構成要素

Table 5. Yield components of TN11 under different water management treatments in 2021

TN11 Treatment	N Rate	1st Crop					2nd Crop				
		PN	GN	FR (%)	GW (g)	Yield (kg/ha)	PN	GN	FR (%)	GW (g)	Yield (kg/ha)
ITI	N(0)	19	38.4	93.6	27.7	4386	16	41.5	90.5	25.3	3808
	N(60)	22	37.8	93.6	28.0	5849	16	41.6	90.4	25.2	5500
	N(180)	20	38.5	93.4	27.5	7794	20	45.6	79.5	25.3	5877
	N(260)	25	43.5	88.0	25.4	8081	16	45.5	76.6	26.3	5761
	N(340)	28	44.3	82.4	26.1	7335	19	53.6	68.5	24.1	5157
CP	N(0)	20	37.4	94.3	28.3	6259	13	43.8	86.9	24.5	3670
	N(60)	24	37.5	95.0	28.0	5946	17	48.7	81.7	23.2	3720
	N(180)	29	43.2	87.7	25.6	8276	18	41.0	86.5	25.9	5240
	N(260)	26	46.3	84.1	24.6	8763	22	43.4	86.4	24.8	5475
	N(340)	27	48.1	78.9	26.0	7830	17	43.4	84.4	25.3	5693

*ITI: Intermittent Irrigation ; CP : Conventional Practice ; PN: Panicle Number per hill ; GN: Grain Number per panicle ; FR: Fertility ; GW: 1000-grain weight.

表六、2022 年台南 11 號於不同水分處理下之產量構成要素

Table 6 . Yield components of TN11 under different water management treatments in 2022

TN11 Treatment	N Rate	1st Crop					2nd Crop				
		PN	GN	FR (%)	GW (g)	Yield (kg/ha)	PN	GN	FR (%)	GW (g)	Yield (kg/ha)
ITI	N(0)	15	38.0	94.6	26.4	6189	17	43.6	88.5	24.2	6081
	N(60)	24	40.0	91.5	25.7	5926	19	43.9	81.1	26.2	5022
	N(180)	24	44.1	84.8	24.0	5955	19	44.1	86.5	24.5	5925
	N(260)	25	43.0	85.7	25.3	6185	19	48.9	77.9	24.0	6024
	N(340)	25	46.3	78.3	25.2	4610	22	42.9	88.1	24.2	6254
CP	N(0)	18	43.1	90.3	24.3	6747	16	41.3	87.9	25.9	6582
	N(60)	24	43.4	84.2	25.3	6752	15	41.4	89.0	25.7	5598
	N(180)	26	52.5	71.7	23.6	6467	19	47.0	80.2	24.6	6025
	N(260)	26	49.5	77.9	23.7	6587	19	46.1	80.5	24.7	6181
	N(340)	26	51.6	71.5	24.0	4586	21	46.1	81.1	24.6	6647

*ITI: Intermittent Irrigation ; CP : Conventional Practice ; PN: Panicle Number per hill ; GN: Grain Number per panicle ; FR: Fertility ; GW: 1000-grain weight.

整體觀察顯示,“台農 71 號”與“台南 11 號”在乾溼交替灌溉與慣行灌溉下,於株高、葉綠素含量與產量構成均呈現明顯差異反應。“台南 11 號”在慣行灌溉條件下普遍具有較高的株高與葉綠素含量,顯示其具較佳的氮素吸收與光合能力;而“台農 71 號”於乾溼交替灌溉下株高表現相對穩定,尤其在二期作高溫長日照環境下表現更佳。葉綠素方面,“台農 71 號”在乾溼交替灌溉配合中等施肥時表現最佳,顯示其對水分變動及氮肥供應敏感;“台南 11 號”則在兩種灌溉條件下皆能維持高葉綠素值,僅於成熟期呈快速下降,反映其氮素再移轉特性。產量構成要素顯示,兩品種於兩種灌溉方式下皆呈隨施肥量增加,穗數與粒數上升的趨勢,但乾溼交替灌溉組的高氮肥處理常出現稔實率下降,導致產量未必持續增加;其中“台南 11 號”在高氮肥下更易產生籽粒充實度下降,而“台農 71 號”於乾溼交替灌溉仍能維持相對穩定的稔實率。綜合而言,乾溼交替灌溉對兩品種之生理指標與產量並未造成負面影響,甚至在“台農 71 號”上可兼具節水與維持產量之效果;惟“台南 11 號”在高氮與穩定水分條件下產量潛力較高,但對施肥過量與後期水分變動較敏感,顯示不同品種仍需採取差異化灌溉與肥培管理策略。

討 論

臺灣與東亞地區的傳統水稻栽培多採用持續湛水的方式,會耗用相當大的水資源,乾溼交替灌溉或間歇灌溉提供了現代與未來水稻一個解方,將可降低灌溉水的使用,本研究亦印證此方面的結果,乾溼交替灌溉降低了19-67%的用水量(表二),更可能降低田間溫室氣體甲烷的排放(Lagomarsino *et al.*, 2016),以本研究結果來說,除了降低了灌溉用水,對於未來氣候變遷下的水資源不穩定提供解方的選擇之外,同時也節約了灌溉次數,即表示農民可較傳統方式更減少灌溉作業的時間與人力,若該田區採用抽取地下水的方式,甚至可節約抽水機的電力或柴油,達到節約能源與降低能源碳排的效益(Karimi *et al.* 2012 ; Nalley *et al.* 2015)。

然而,導入這些新栽培技術的同時,維持稻株健康生理以及最終的穀粒產量更是重要的前提,因此,本研究針對乾溼交替灌溉下的生理性狀如株高與葉色,以及最終的單位面積產量與產量構成要素進行分析,同時並進行不同期作以及不同氮肥等級處理的多面向評估,以作為未來更全面的栽培管理參考。

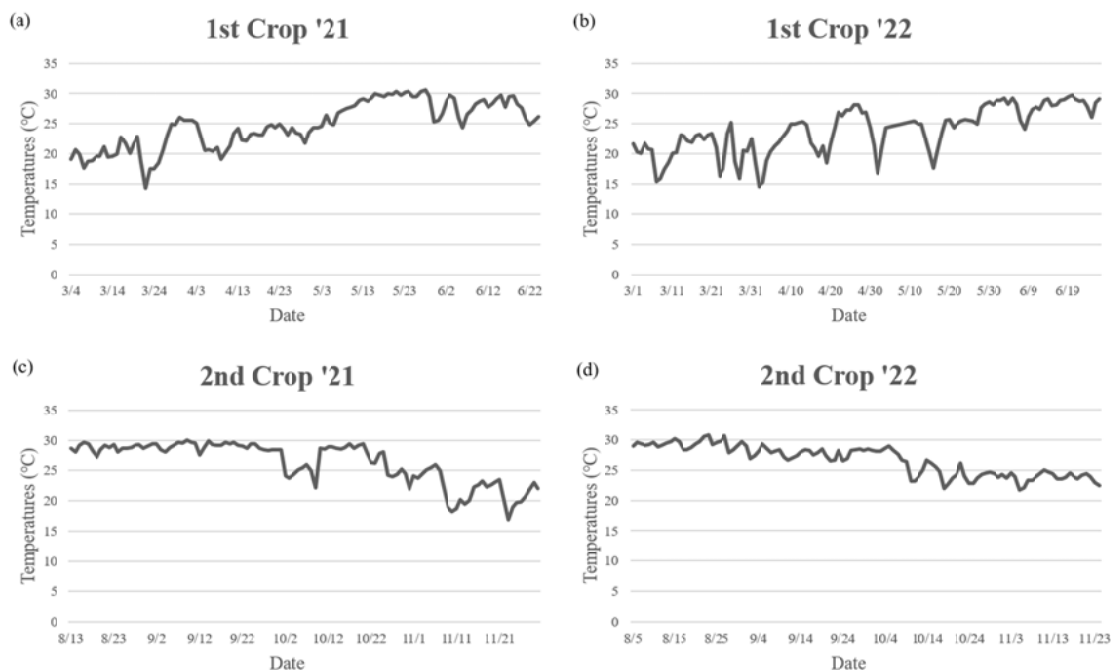
在株高方面,大抵上乾溼灌溉組的株高皆略低於慣行灌溉組,且在低氮肥處理組或一期作的差異更為顯著,主要原因在於慣行灌溉組的湛水時間久,一般來說,灌溉水中含有 1-3 mg/L 的氮素,湛水越久,吸收氮素越多,因而導致株高的增加(Cheng, 2025),更可能進一步導致倒伏。在低氮肥處理組差異更大也是由於低氮組的長期湛水可促進氮

素的吸收(Chen *et al.*, 2025)，以補外加氮肥的不足，提供株高生長的需要；而一期作則因為生長季較長，氮素需求高且生長時間充份，更能夠造成株高上的明顯差異，前人研究亦指出間歇灌溉處理可以改善水稻節間的生長、形態與理化特性，進而降低倒伏的風險(Gu *et al.*, 2025)，然而，灌溉處理對於品種之間的效應可能有所不同，一般來說，但可能關聯到品種本身的早晚熟特性與氮素吸收效率，以及對氣候環境的交感，另一方面，氮素吸收同時也受到氣象環境的影響，舉例來說，如圖十三，2022 年一期作的氣溫較 2021 年低且不穩定，因此 2022 年株高的增長速度較平緩，可能可以推測是氣溫較涼爽的原因(Stuerz and Asch, 2021)，且在慣行灌溉處理下，也就是氮素充足的狀況下更為顯著；在二期作方面，2022 年株高在氮素處理之下的差異較不明顯，則是可能由於降雨量的差異，因 2022 年二期作的降雨較 2021 年高(圖十四)，雨水將作為額外的氮素投入(Cheng, 2025)，將可能造成原本氮素處理的效應變得較不明顯，此外，降雨較多的現象，也可能造成田區湛水時間變長，湛水期間的土壤氮素更不容易被分解為氣體流失(Wu *et al.*, 2023)，也是使稻株吸收氮素較多的原因，另一方面，降雨較多正會讓乾溼交替灌溉的效果減弱(圖三)，使整體水分環境更接近慣行灌溉。

在葉綠素含量方面，一般來說，葉片的葉綠素含量與葉色呈正相關，而葉色同時也是栽培者在辨識稻株氮素營養狀況的一個重要的依據，因此若氮素充分，稻株葉片的葉綠素含量通常會較高，也就是 SPAD 值會較高。與株高相似的趨勢是，乾溼交替灌溉的在一期作低氮肥組的葉綠素含量較低，且二期作也有類似但幅度較小的趨勢，因此葉綠素含量與株高方面呈現相似的結果。前人研究指出，葉綠素與氮素投入量將較株高更有關聯性(Yang *et al.*, 2014)，與葉綠素含量較相關的時期為栽培前期，而二期作之降雨量較一期作高，可能使二期作氮肥施用的效應不如一期作明顯，尤其是在慣行灌溉處理或是雨量較高的年份(如 2022 年二期作)。另一方面，前人亦就品種的差異進行研究，Yeboah *et al.*, 2026 指出，傳統舊有品種在間歇灌溉處理下的葉綠素含量與總氮含量都較低，但新改良的品種(氮素利用效率較高的品種)的葉綠素含量與總氮含量則在間歇灌溉與慣行灌溉之間並無差異，也就是說在品種之間仍具有交感，且可能有更顯著的效應，而這些葉綠素含量的差異，或是 SPAD 值的差異，將可能導致產量上的差異(Liu *et al.*, 2025 ; Sarkar *et al.*, 2025)，以及品質上的差異(Fitri *et al.*, 2025)。

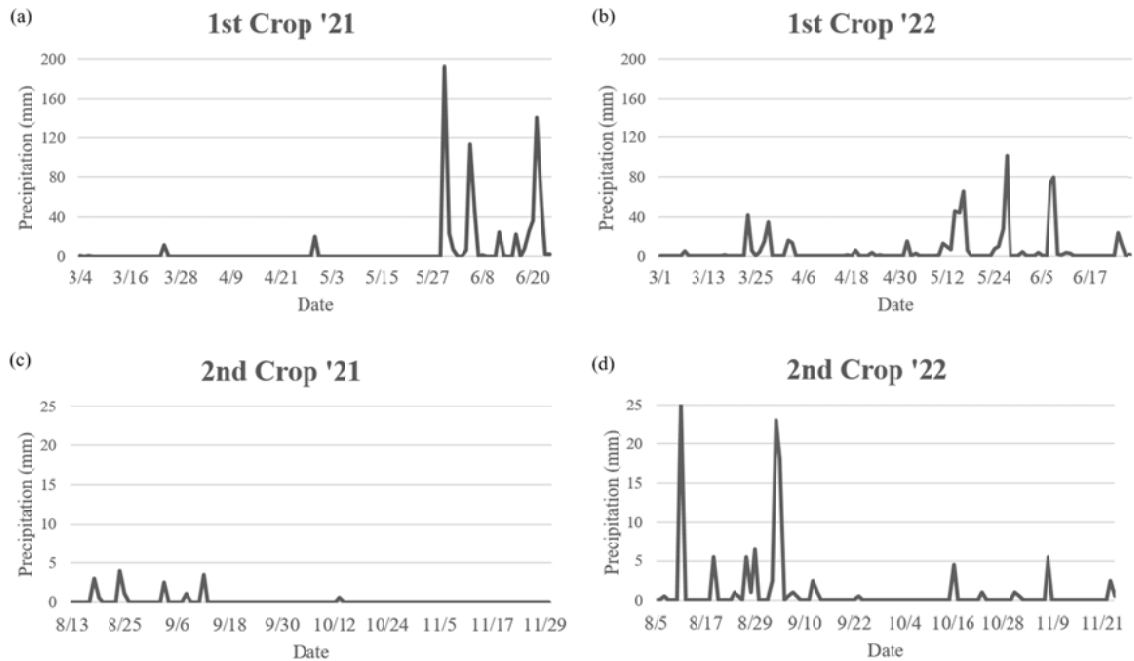
依照前述的株高與葉綠素含量結果，進一步探討產量構成要素，大抵上單位面積產量皆隨著氮素施用的增加而提高，而主要來自單株穗數的增加，並對比到可作為稻株氮素營養狀態指標的葉綠素含量，顯示單株穗數的增加是由於氮素供給的充足，且灌溉處理之間也有相同的趨勢，慣行灌溉組的穗數確實高於乾溼交替灌溉組(Sun *et al.*, 2020)，

然而，千粒重方面則以乾溼交替灌溉組較高，推測原因在於穗數的較少亦等同於單株總穀粒數的較少，而若在相同的「源」(source)之下，乾溼交替灌溉組的「庫」(sink)較低，也就是說能夠有更優良效率的每顆穀粒的充實，進而使千粒重更加優良(Zhang *et al.*, 2025)，最終在灌溉處理之間，其單位面積產量並無顯著差異。值得注意的是，若進一步分析氮肥與灌溉之交互作用，結果顯示，乾溼交替灌溉在適當氮肥施用下可維持與慣行灌溉相當之產量，且有助於台農71號之千粒重；惟在高氮肥處理下，乾溼交替可能因稔實率下降而限制產量增長。這可能歸因於高氮肥促進了營養生長，但在水分交替的環境中，生殖生長期的養分競爭加劇，導致稔實率受損，顯示此灌溉模式須配合適當的肥培管理策略。同時，依千粒重的結果，亦可推測，這樣優良的穀粒充實狀況，可能促進穀粒品質，有較優良的外觀與良好的食味(Wu *et al.*, 2020 ; Idowu *et al.*, 2023)。另一方面，在期作之間，與株高與葉綠素含量的狀況相似，以一期作的灌溉處理間與氮肥處理間的差異較為顯著，而前人研究亦提到，二期作的田間溫室氣體甲烷的排放顯著高於一期作(游等，2024)，綜上所述，若在二期作導入乾溼交替灌溉，並搭配合宜的氮肥管理，則可以在不影響產量的前提下，抑制甲烷排放以達到田間減碳的效益。



圖十三、2021 年與 2022 年一期作與二期作之逐日氣溫變化。

Fig. 13. Daily air temperature during the 1st and 2nd crops in 2021 and 2022.



圖十四、2021 年與 2022 年一期作與二期作之逐日降雨變化。

Fig. 14. Daily rainfall during the 1st and 2nd crops in 2021 and 2022.

儘管本試驗有於田區限制，無法規劃重複區集，因此以年度作為重複，進行產量構成要素之統計分析，以複因子變方分析進行，各因子之分析結果如表七與表八，肥料等級相較於期作與灌溉處理，對水稻產量構成要素具有較明顯的影響，顯示在本試驗條件下，氮素供應仍是調節分蘖形成、穗粒發育與穀粒充實的重要因子，然而，雖然部分產量構成要素對肥料等級呈現顯著反應，但最終產量未必同步達顯著差異，可能與水稻本身具有產量補償效應有關(Kumar *et al.* 2016)。另一方面，灌溉處理對多數產量構成要素及產量未呈現顯著影響，表示間歇灌溉在本試驗條件下可能尚未造成足以限制稻株生長、開花授粉或穀粒充實的水分逆境。因此間歇灌溉應具有作為節水及低碳栽培管理策略之潛力。然而，少數交感作用出現在特定品種與性狀，顯示不同品種對期作環境、水分管理及肥料供應的反應可能並不一致，未來仍需進一步釐清其生理與栽培機制。由於本試驗並無重複或區集，統計分析結果應審慎解讀，尤其在田間環境容易受到土壤肥力、水分分布、微地形及氣象條件變異影響的情況下，缺乏區集設計可能降低處理差異判斷的穩定性。因此，未來應進行區集之設計，以提高統計分析的可靠性，並更明確評估期作、灌溉與肥料管理對水稻產量構成及產量表現之實際影響。

表七、台農 71 號之期作、灌溉、肥料等級對各產量構成要素之處理顯著性 *P* 值Table 7. Significance *P*-values of the effects of Crop season, Irrigation, and Fertilizer rate on each yield component of TNG71

	PN	GN	FR	GW	Yield
Crop season	ns	ns	ns	ns	ns
Irrigation	ns	ns	ns	ns	ns
Fertilization	***	**	***	*	ns
Crop season x Irrigation	ns	ns	ns	ns	ns
Crop season x Fertilization	ns	ns	ns	*	ns
Irrigation x Fertilization	ns	ns	ns	ns	ns
Crop season x Irrigation x Fertilization	ns	ns	ns	ns	ns

*(ns: $P > 0.05$; *: $0.05 > P > 0.01$; **: $0.01 > P > 0.001$; ***: $0.001 > P$)

表八、台南 11 號之期作、灌溉、肥料等級對各產量構成要素之處理顯著性 P 值Table 8. Significance P -values of the effects of Crop season, Irrigation, and Fertilizer rate on each yield component of TN11. (ns: $P > 0.05$; *: $0.05 > P > 0.01$; **: $0.01 > P > 0.001$; ***: $0.001 > P$)

	PN	GN	FR	GW	Yield
Crop season	ns	ns	ns	ns	ns
Irrigation	ns	ns	ns	ns	ns
Fertilization	***	**	**	ns	ns
Crop season x Irrigation	*	ns	*	ns	ns
Crop season x Fertilization	ns	ns	ns	ns	ns
Irrigation x Fertilization	ns	ns	ns	ns	ns
Crop season x Irrigation x Fertilization	ns	ns	ns	ns	ns

*(ns: $P > 0.05$; *: $0.05 > P > 0.01$; **: $0.01 > P > 0.001$; ***: $0.001 > P$)

結 論

本研究旨在評估乾溼交替灌溉於臺灣水稻栽培之可行性與永續價值。綜合整體研究成果與相關文獻，可歸納出乾溼交替灌溉不僅能兼顧節水與減碳效益，亦符合當前智慧農業及氣候變遷調適的發展方向。此灌溉模式透過間歇性水分管理，能在維持生產穩定的前提下，有效提升水分利用效率、減少溫室氣體排放，並促進根系健康與養分循環，展現出在未來氣候風險下的韌性與可持續性。此結果顯示，若能配合智慧感測與自動化控制技術，乾溼交替灌溉可成為水稻栽培體系中兼顧產量、品質與環境永續的核心策略。未來應進一步結合碳足跡評估、農業淨零政策及區域水資源管理，建構更具精準與在地化的水稻灌溉決策模式，推動臺灣稻作向高效率、低碳化與智慧化方向發展。

參考文獻

1. 甘俊二、鄭涵予、陳榮松。2021。臺灣水田生態系服務功能之量化與評估。農業工程學報。67: 12-28。
2. 林國慶、蘇明道、張嘉玲。2020。氣候變遷對臺灣農業用水及糧食安全之影響評估。農業經濟叢刊。26: 89-112。
3. 陳鴻堂、曾宥紘、郭雅紋、鄭佳綺。2018。水稻台南11號、台梗9號及台中秈10號於砂頁岩及粘板岩混合沖積土壤之最適氮肥用量研究。臺中區農業改良場研究彙報。139: 65-76。
4. 黃紹毅、吳儀宣、林映辰。2023。氣候變遷下臺灣中部地區水稻生產風險之空間分析。農林學報。72: 21-38。
5. 賴哲緯、蘇明道、游進裕。2022。水田灌溉對區域地下水補注貢獻之時空分析：以彰化地區為例。臺灣水利。70: 34-51。
6. 游承翰、廖崇億、吳以健、郭芝秀。2024。臺灣中部地區水田甲烷排放因子調查。臺中區農業改良場研究彙報。165: 49-62
7. 農業部。2024。農業統計資料查詢網。
<https://agrstat.moa.gov.tw/sdweb/public/inquiry/InquireAdvance.aspx>
8. Adzigbe, J., Frimpong, F., Danquah, A., Danquah, E. Y., Asante, I. K., Abebrese, S. O., Dormatey, R., Afriyie-Debrah, C., Ribeiro, P. F., Danquah, E. O., Agyeman, K., Bam, R. K., Asante, M. D. 2025. The responses and adaptations of rice (*Oryza sativa* L.) to drought stress: A review. *Climate Smart Agriculture*. 2(4), 100080.
9. Bittawat, W., Intrman, A., Junhom, P., Puttrawutichai, S., Rewtragulpaibul, C., Suksaroj, C. 2025. The effect of irrigation practices on stress-related physiological characteristics, water productivity, and water footprint in rice cultivation. *Environmental and Sustainability Indicators*. 26, 100695.
10. Chen, S., Zhao, C., Yang, W., Wang, W., Zhu, Q., He, M., Elrys, A. S., Meng, L., Meng, H., Cai, Z., Zhang, J., Müller, C. 2025. Enhancing rice nitrogen use efficiency via plant-microbe-soil interactions: Insights from ¹⁵N tracing. *Applied Soil Ecology*. 207, 105931.
11. Cheng, W. 2025. Preface to the Special Section “Research Frontiers on Organic Rice Farming from the Soil Science and Plant Nutrition Perspectives (SSPN-ORF)”. *Soil Science and Plant Nutrition*. 71, 227-228.

12. Engelaar, W., Matsumaru, T., Yoneyama, T. 2000. Combined effects of soil waterlogging and compaction on rice (*Oryza sativa* L.) growth, soil aeration, soil N transformations and ¹⁵N discrimination. *Biology and Fertility of Soils*. 32, 484-493.
13. Fitri, A., Basyah, B., Zakaria, S. 2025. Morpho-physiological characters and their relationship with the yield and quality of improved rice lines on upland. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 1476(1), 012043.
14. Gu, H., Xiao, Z., Meng, Q., Fa, X., Wang, C., Jing, W., Wang, W., Zhu, K., Zhang, W., Gu, J., Liu, L., Zhang, J., Zhang, H. 2025. The synergistic effect of variety improvement and alternate wetting and drying irrigation on yield, water use efficiency and lodging resistance in rice. *European Journal of Agronomy*. 164, 127507.
15. Idowu, O., Katsube-Tanaka, T., Shiraiwa, T. 2023. Nitrogen fertilizer application does not always improve available carbohydrate per spikelet but decreases chalkiness under high temperature in rice (*Oryza sativa* L.) grains. *Field Crops Research*. 290, 108741.
16. IPCC. 2023. Summary for policymakers. In: *Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Core Writing Team: H. Lee, J. Romero (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 1-34.
17. Karimi, P., Qureshi, A. S., Bahramloo, R., Molden, D. 2012. Reducing carbon emissions through improved irrigation and groundwater management: A case study from Iran. *Agricultural Water Management*. 108, 52-60.
18. Kumar, U., Laza, M. R., Soulié, J. C., Pasco, R., Mendez, K. V. S., Dingkuhn, M. 2016. Compensatory phenotypic plasticity in irrigated rice: Sequential formation of yield components and simulation with SAMARA model. *Field Crops Research*. 193, 164-177.
19. Lagomarsino, A., Agnelli, A. E., Linqvist, B., Adviento-Borbe, M. A., Agnelli, A., Gavina, G., Ravaglia, S., Ferrara, R. M. 2016. Alternate wetting and drying of rice reduced CH₄ emissions but triggered N₂O peaks in a clayey soil of central Italy. *Pedosphere*. 26(4), 533-548.
20. Liu, W., Gai, D., Liang, J., Cui, J., Geng, Y., Zhang, Q., Guo, L., Shao, X. 2025. Paclobutrazol enhances lodging resistance and yield of direct-seeded rice by optimizing plant type and canopy light transmittance. *Field Crops Research*. 331, 109882.
21. Loaiza, S., Verchot, L., Valencia, D., Costa, C., Trujillo, C., Garcés, G., Puentes, O.,

- Ardila, J., Chirinda, N., Pittelkow, C. 2024. Identifying rice varieties for mitigating methane and nitrous oxide emissions under intermittent irrigation. *Journal of Environmental Management*. 372, 123376.
22. Nalley, L., Linquist, B., Kovacs, K., Anders, M. 2015. The economic viability of alternative wetting and drying irrigation in Arkansas rice production. *Agronomy Journal*. 107(2), 579-587.
23. Rubinigg, M., Stulen, I., Elzenga, J. T. M., Colmer, T. D. 2002. Spatial patterns of radial oxygen loss and nitrate net flux along adventitious roots of rice raised in aerated or stagnant solution. *Australian Journal of Plant Physiology*. 29, 1475-1481.
24. Sandhu, N., Subedi, S. R., Yadaw, R. B., Chaudhary, B., Prasai, H., Iftekharuddaula, K., Thanak, T., Thun, V., Battan, K. R., Ram, M., Venkateshwarlu, C., Lopena, V., Pablico, P., Maturan, P. C., Sta. Cruz, M. T., Raman, K. A., Collard, B., Kumar, A. 2017. Root traits enhancing rice grain yield under alternate wetting and drying condition. *Frontiers in Plant Science*. 8, 1-10.
25. Sarkar, M., Saha, P., Ghosh, M., Banerjee, S., Gunri, S. K., Biswas, T., Mani, P. K., Patra, B. C., Kundu, C. K. 2025. Physiology, productivity and grain quality of aromatic rice under organic manure and LCC-based N top dressing by neem-coated urea, nano urea and mustard cake. *Vegetos*.
<https://doi.org/10.1007/s42535-025-01410-y>
26. Stuerz, S., Asch, F. 2021. Responses of rice growth to day and night temperature and relative air humidity — leaf elongation and assimilation. *Plants*. 10(1), 134.
27. Sun, Y., He, Z., Wu, Q., Zheng, J., Li, Y., Wang, Y., Chen, T., Chi, D. 2020. Zeolite amendment enhances rice production, nitrogen accumulation and translocation in wetting and drying irrigation paddy field. *Agricultural Water Management*. 235, 106126.
28. Wu, Q., Wang, Y., Chen, T., Zheng, J., Sun, Y., Chi, D. 2020. Soil nitrogen regulation using clinoptilolite for grain filling and grain quality improvements in rice. *Soil and Tillage Research*. 199, 104547.
29. Yang, H., Li, J. W., Yang, J. P., Wang, H., Zou, J. L., He, J. J. 2014. Effects of nitrogen application rate and leaf age on the distribution pattern of leaf SPAD readings in the rice canopy. *PLOS ONE*. 9(3), e92509.

30. Yang, X. C., Huang, M. Y., Chen, C. I., Lin, C. H., Huang, W. H. 2025. Impact of alternate wetting and drying irrigation on greenhouse gas emissions and water use in rice paddies in Taiwan. *Taiwania*. 70(2), 175-185.
31. Yeboah, S., Amankwaa-Yeboah, P., Puértolas, J., Agyenim, F. B., Semple, K. T., Dodd, I. C. 2026. Different responses of African rice cultivars to alternate wetting and drying irrigation and anaerobic digestate application. *Field Crops Research*. 335, 110189.
32. Zhang, H., Mi, K., Chen, T., Zhang, M., Xu, F., Zhang, H. 2025. Enlarged sink capacity and optimized population physiological characteristics are key to high yield in conventional japonica rice. *Rice Science*. 15, 1-10.
33. Zhou, Z., Struik, P. C., Gu, J., van der Putten, P. E. L., Wang, Z., Yin, X., Yang, J. 2023. Leaf-colour modification affects canopy photosynthesis, dry-matter accumulation and yield traits in rice. *Field Crops Research*. 290, 108746.

Effects of intermittent irrigation treatments on growth characteristics and yield of rice varieties TNG71 and TN¹

Chi-Shiou Kuo ², Yi-Chien Wu ^{3*}

ABSTRACT

This study aimed to evaluate the applicability and sustainability of intermittent irrigation (ITI) in Taiwan's rice cultivation and to compare its effects, under different nitrogen application levels, on the physiological traits and yield components of two major cultivars, Tainung 71 (TNG71) and Tainan 11 (TN11). Field experiments were conducted in 2021 and 2022 with two irrigation treatments—intermittent irrigation and conventional continuous flooding—using a smart irrigation system to precisely control water levels. Measurements included plant height, leaf chlorophyll content (SPAD), panicle number, fertility rate, thousand-grain weight, and grain yield. The results showed that ITI did not suppress plant growth; rather, by improving soil aeration, it produced slightly shorter plants than continuous flooding, thereby reducing lodging risk. Leaf chlorophyll responses differed by cultivar: TNG71 was more sensitive to irrigation and nitrogen levels and performed best under moderate nitrogen supply, whereas TN11 consistently maintained higher SPAD values across treatments, indicating stronger nitrogen-use efficiency. In terms of yield components, both cultivars showed increasing panicle and grain numbers with higher nitrogen levels, but under high nitrogen, ITI frequently led to reduced fertility, limiting further yield gains. Nevertheless, TNG71 maintained stable fertility and higher thousand-grain weight under ITI, allowing it to sustain good yield performance under water-saving conditions, while TN11 exhibited reduced grain filling under excessive nitrogen, indicating higher sensitivity to over-fertilization.

¹Contribution No.1117 from Taichung DARES, COA.

²Research Assistance of Crop Improvement Section Taichung DARES, Changhua, Taiwan, ROC.

³Associate Researcher of Crop Improvement Section, Taichung DARES, Changhua, Taiwan, ROC.

*Corresponding Author: Yi-Chien Wu, Email: wuyc@tcdares.gov.tw

Overall, ITI demonstrated advantages in water saving, methane reduction, and maintaining yield performance, while enhancing root-zone conditions and nutrient uptake efficiency. When combined with smart monitoring technology, ITI shows strong potential for broader adoption. Future work should integrate carbon-footprint assessment, climate-risk adaptation, and precision-irrigation decision frameworks to establish localized, low-carbon, and high-efficiency irrigation strategies that support the sustainable development of rice production in Taiwan

Key words: rice, intermittent irrigation, water management, nitrogen fertilizer, plant height, chlorophyll, yield, smart irrigation.

