



應用DNDC模擬作物生育與溫室氣體排放

陳柱中¹ 戴宏宇² 蘇子珊¹ 廖崇億^{3*} 許龍欣⁴

摘要

愈來愈多證據顯示人類活動與氣候變遷的相關性，降低溫室氣體排放減緩暖化的速率愈顯重要，由於耕作系統溫室氣體的排放受土壤性質、氣象、耕作制度、作物種類、田間管理品種特性等影響，有鑑於此，許多國家針對重要品項採用方法三 (Tier 3) 以實測或模式進行溫室氣體排放計算，其中 DNDC (Denitrification-Decomposition) 模式是廣為使用的農業溫室氣體排放模擬模型之一，本研究目的在於利用本土的水稻、大豆與落花生田間觀測數據進行模式的校正與測試，水稻的田間試驗於 111 年二期作與 112 年一期進行，包含慣行的湛水處理與節水栽培處理兩個處理，從整地到種植期間以密閉罩法監測甲烷排放量。大豆與落花生田間試驗進行於 112 年春作，包含 0、40、80 kg N ha⁻¹ 等三種施氮處理，種植期間進行生育調查並以密閉罩法監測氧化亞氮排放量。水稻試驗結果顯示，二期作的甲烷排放量較一期作高，節水栽培處理可減少兩個期作 33-35% 甲烷排放量，比較 DNDC 模式模擬與實測的甲烷排放量，可觀察到模式能夠表現不同期作、水分管理對於水田甲烷釋出的影響，但也發現一期作高估而二期作低估的現象。DNDC 模式能夠反應不同氮投入量對於大豆與落花生產量的影響，田間氧化亞氮觀測結果顯示主要的峰值發生於施肥或灌溉後，DNDC 模式可以顯示灌溉與氮投入對於氧化亞氮排放的影響。

關鍵詞：溫室氣體、減緩策略、DNDC

1 農業部農業試驗所農業化學組

2 農業部農業試驗所作物組

3 農業部臺中區農業改良場作物環境科

4 農業部臺南區農業改良場鹿草分場

*通訊作者(cyliao@tcdares.gov.tw)



前言

聯合國政府間氣候變化專門委員會 (Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC) 於 2019 出版了用於揭露國家溫室排放清冊編寫計算依據的指南，其以 2006 年版修正及精進。依據分類，溫室氣體計算方法有三階，方法一 (Tier1)，指南提供之預設係數；方法二 (Tier2)，地區或國家排放係數；方法三 (Tier3)，實測或模式應用。部分國家為提高碳排放量的準確與精確性，在一些特定排放源的計算上已採用方法三，如美國與日本在水稻種植分別使用 Daycent、DNDC-rice 作為模擬計算，荷蘭在氮的間接碳排使用「NEMA」和「STONE」進行模擬計算。

我國農業部門的溫室氣體排放約佔整體的 1.17%，遠低於工業與能源部門，但是農業部門在甲烷與氧化亞氮排放分別佔 41.97% 與 28.08%，仍有減排的空間，其中水稻種植與農耕土壤的溫室氣體排放分別佔 18.0% 與 36.8% (行政院環境保護署，2022)。影響水稻田甲烷排放因素包含灌溉管理、有機物添加、土壤類型、水稻品種、硫酸鹽、氮施用量及氣候 (溫度) 等 (Nikolaisen et al., 2023)，在水稻田的水位管理上，慣行作前淹水水位在 2-5 公分間，水田甲烷排放主要途徑為水稻、冒泡及擴散。

DNDC 模式 (Denitrification-Decomposition) 是最廣為使用之土壤有機質變動、農業溫室氣體排放模擬之模型，該模式最早由李長生教授團隊所發展 (Li et al., 1992)，並持續使用不同的田間觀測資料進行模式比對、機制更新，在各區域之模式比對結果顯示出模式之穩健性 (Guest et al., 2017；Vogeler et al., 2013)。應用於作物生長預測、氣候變遷因應、水資源管理、土壤氮流佈與溫室氣體排放等，依據地區環境的差異而進行優化，亦發展出多種衍伸模型，如 Forest-DNDC、Manure-DNDC Model、US-DNDC 和 DNDC-Rice 等 (Gilhespy et. al., 2014)。模式的輸入為每日之氣象、作物種類、土壤資訊與栽培期間田間操作 (耕犁、灌溉、施肥)，輸出則為每日之作物生長、土壤有機質變動與溫室氣體 (CO₂, N₂O, CH₄) 排放。

目前國內排放清冊所引用的本土水稻甲烷排放係數多引自 Yang 等人 (2009) 發表之報告，距前人量測調查至今已逾十多年；以中彰投地區為例水稻單位面積生產量因品種、管理或氣候等因素影響有所變化，相較於 2001 年，2020 年之水稻一期作單位面積產量



約增加 18%、二期作約 44%，若以水稻殘體及收穫量比等於 1 估計，代表水稻殘體掩埋量增加 18% 以上，在平均溫度上，亦約有 1 度的增加，二氧化碳增加以每年 1.5-2.5 ppm 增加，皆可能影響甲烷排放量；整體環境的改變，使當時水稻排放係數至今可能已失準。雖然 2021 年起之國家排放清冊，排放係數已更新部分地區係數，但其與先前調查之水稻田排放係數有明顯差異。

本研究應用田間觀察資料建立 DNDC 模式所需水稻、落花生本土化參數，比較模式模擬與實際量測結果，分析模式在我國栽培環境下進行溫室氣體模擬之可行性。

材料與方法

一、田間處理

水稻試驗區位於臺中區農業改良場之試驗田，包含一般慣行及節水處理兩種水分管理方式，一般慣行除插秧、曬田期間外，盡可能維持淹水或飽和狀況；節水處理是在插秧約 10 日後進行節水處理，在 111 年二期作採 0-5 公分管理，112 年一期作加強至 -15 至 5 公分處理。111 年二期與 112 年一期作插秧時間分別為 8 月 5 日與 2 月 23 日，施肥量依氣候狀況調整，111 年二期作施用量分別為氮 185 kg ha⁻¹、磷酐 58 kg ha⁻¹、氧化鉀 55 kg ha⁻¹，112 年一期施用量分別為氮 265 kg ha⁻¹、磷酐 115 kg ha⁻¹、氧化鉀 110 kg ha⁻¹。

落花生與大豆試驗區位於農業試驗所之試驗田，處理包含 3 種施氮變級，分別為 0、40、80 kg-N ha⁻¹，每處理 3 重複，採完全隨機設計，每小區 36 m²，種植花生品種為‘臺農 11 號’、大豆品種為‘高雄選 10 號’，播種日期為 112 年 3 月 16 日。分別於播種前 1 天、播種後 44 天各施用 50% 氮，以尿素施加之，每處理皆施用磷酸鈣與氯化鉀，施用量為磷酐 60 kg ha⁻¹、氧化鉀 60 kg ha⁻¹，全部的磷於基肥一次施用，鉀分別於基肥與追肥各施用 50%。

二、溫室氣體與作物生育資料量測

本研究利用密閉罩法 (chamber) 調查田間之甲烷與氧化亞氮氣體排放作為模式比較



之驗證，將底座固定於土壤後以密閉罩蓋住底座，將管線連接氣體分析儀，分析罩內溫室氣體累積 (CH₄、N₂O) 變化。氧化亞氮調查設備為 Picarro G2508 與 Face EB-3200，將密閉罩罩住約 30 分鐘後量測 10 分鐘。甲烷調查設備為 ABB GLA131-GGA、Licor li-7810。水稻種植時蓋住水稻植體進行量測。將密閉罩罩住約 5-15 分鐘，每一樣區進行 3 重複量測。

生育期間每 7-10 天進行採樣，每小區隨機採集 5 株，分為葉、莖、莢殼、籽粒等部位，洗淨後置入紙袋中烘乾 72 小時，測定乾重，將植體磨碎均質化，再以元素分析儀測定碳氮濃度。

三、模式

本研究使用之 DNDC 模式為 9.5 版，下載自新罕布夏大學網站，網址為 <https://www.dndc.sr.unh.edu/>。模式所需的輸入資料包括氣象、土壤、管理，氣象資料取自農業試驗所與臺中區農業改良場氣象站，兩地點的土壤特性如表 1 所示。

結果與討論

臺中場田間水田甲烷排放調查結果顯示，一期作初期水田甲烷排放量明顯低於二期作 (圖 1)，2022 年二期作慣行水田甲烷排放量約 410 kg-CH₄ ha⁻¹、節水處理 276 kg-CH₄ ha⁻¹，2023 年一期作調查結果，慣行水田甲烷排放量約 86 kg-CH₄ ha⁻¹、節水處理 56 kg-CH₄ ha⁻¹，兩種水分管理二期作的甲烷排放量為一期作的 4.7、4.9 倍。依據 IPCC 計算指南，前期作植體耕入時間越短、淹水越長，選用的甲烷排放係數越高。對比兩個期作，一期作種植初期為低溫並有較長的準備時間，二期作種植初期溫度較高播種前的準備時間較短，顯示本研究的結果與 IPCC 計算指南相近。從田區調查結果，也可觀察到水稻在二期作前之整地淹水後，就開始有甲烷排放產生 (圖 1) 一直持續到插秧，因此在水田的甲烷排放量計算的調查上，建議應由殘體耕入後開始進行監測與計算，以減少在計算水田甲烷排上有所遺漏。兩個試驗期作的結果顯示節水栽培的甲烷排放量為慣行處理之 67% 與 65% (表 2)，顯示水稻生育期間歇性灌溉可減少甲烷的排放約 33-35%。



DNDC 模擬設定如下，臺中區農業改良場土壤質地實際為黏土，但模式測試上使用中質地土壤，排放趨勢與排放量才會接近田間調查結果，可能參數之土壤物理性質尚需進一步調整，另雖有紀錄田間水位資訊，但 DNDC 載入水位資料後，無法正確演算土壤氧化還原電位，故仍使用預設 10cm、5 至 -5cm 的水位設定，依據田間管理狀況拆分 4 個灌溉管理期，插秧前 10 至 20 日、插秧後 10 日為 10cm 淹灌；插秧後 11 日至曬田及曬田後至收穫前 5 至 10 日，慣行採 10cm 淹灌設定、節水採 5 至 -5cm 的水位設定，其餘依照實際田間管理記錄設定，將相同耕作管理設定，連續模擬三年，最後以 2023 年資料進行比較。

比較 DNDC 模式模擬兩個期作不同水分管理的甲烷排放與實際觀測之時序變化 (圖 1)，可觀察到 DNDC 模式能夠顯示不同期作、不同水分管理對於甲烷排放的影響，模式與實際觀測的結果均顯示 2022 年二期作慣行處理主要的排放時間，為從插秧到 8 月底約 1 個月，此段時間內模擬與實測結果相近 (圖 1)，然而模式有低估後期甲烷排放之情形。整體而言，模式低估二期作兩種水分管理甲烷排放量、略為高估一期作節水處理之甲烷排放之趨勢 (表 2)。

三種不同氮施用量處理之落花生氧化亞氮排放量如圖 2 所示，三種不同施氮量處理的氧化亞氮排放量呈現隨著氮施用量增加的趨勢，但差異並不顯著，由於落花生具有固氮能力，氮投入量較其他作物來得低，因此處理間的差異對於氧化亞氮排放量的影響較少。另外，也可發現到灌溉後有氧化亞氮峰值的產生，後續在監測上應更強化施肥與灌溉後的監測頻率。DNDC 模式可以顯示灌溉與氮投入對於氧化亞氮排放的影響，但是有低估兩次灌水期間氧化亞氮排放的趨勢。

DNDC 的作物輸出檔包含每日之根、莖、葉與穀粒之每公頃碳與氮累積量 (kg/ha)，在本研究將果莢乾重視為穀粒乾重，將各部位的碳含量除以碳濃度計算生質量，落花生與大豆之生物量模擬結果與實測分別如圖 3 與圖 5 所示。經過調參的模式，模擬之收穫期的莖葉和果莢生質量與實測值的接近，此外模式能夠顯示出不同但處理對於穀粒產量的影響，DNDC 模式對於植物地上部的乾重相對簡單，是以氮累積為主要的植物生長機制，並納入缺氮、高溫、缺水對於生長的抑制 (Li et al., 1994)，在本研究中可發現模式對於最終產量模擬的穩定性。在發育期的模擬上，DNDC 模式是以播種到收穫全施用期



的累積溫度轉換為 0 至 1 的植物生長指標 (plant growth index)，該數值從播種期 (生長指標 0) 隨著累積溫度線性增加至收穫期 (生長指標 1)，當植物生長指標達 0.5 時則穀粒開始有乾物質分配 (Krobel et al., 2011)。在本研究當中，選擇果莢開始生長之始莢期 (R3) 計算累積溫度，再以該累積溫度值的兩倍作為全生育期的累積溫度值，結果顯示模擬的果莢生長趨勢與實測值趨勢接近 (圖 3、圖 5)。

相較於果莢的模擬，模式有高估莖葉生長的趨勢，本研究的觀察結果顯示莖葉的生長較接近前期與後期緩慢、中期接近線性生長的 S 曲線，模式的莖葉乾重在生長初期即呈現線性生長，這現象與 Krobel 等人 (2011) 指出 DNDC 模式有高估萌芽與幼苗階段之情形相似。雖然在調參過程中，可透過改變碳氮比來調整乾重的累積速率，但植株的實際碳氮比與真實觀測值則會有落差，因此未進一步進行參數的測試。DNDC 模擬地上部的乾物重的主要目的，為應用於後續模擬植物體堆置回環境中，對於土壤碳匯的影響，最主要的植物碳氮產量為收穫期的乾物重，從本研究可觀察到 DNDC 模式能提供具有參考性的收穫期產量資訊。

結論

本研究應用田間觀察資料進行 DNDC 模式比對，顯示模式能針對莖葉與果莢產量提供具有可信度的模擬結果，水稻試驗結果顯示，節水栽培處理可減少兩個期作 33-35% 甲烷排放量，比較 DNDC 模式模擬與實測的甲烷排放量，可觀察到模式能夠表現不同期作、水管理對於水田甲烷釋出的影響，氧化亞氮排放量呈現隨著氮施用量增加的趨勢，但差異並不顯著，主要的峰值發生於施肥或灌溉後，DNDC 模式可以顯示灌溉與氮投入對於氧化亞氮排放的影響。

參考文獻

陳琦玲、廖崇億、胡正宏、陳孟妘、林旻頡、蔡徵霖、莊秉潔、廖大經、王瑞章、張錦興。2019。臺灣中部水稻田甲烷排放量測與估算。亞熱帶生態學學會、臺灣長期生



態研究網、臺灣通量研究網聯合年會。

IPCC. 2006. Good Practice Guidance and Uncertainty Management in National Greenhouse Gas Inventories. Agriculture.

Italy - National Inventory Report (NIR), 2021.

Japan - National Inventory Report (NIR), 2021.

Kröbel, R., Smith, W., Grant, B., Desjardins, R., Campbell, C. et al. 2011. Development and evaluation of a new Canadian spring wheat sub-model for DNDC. *Can. J. Soil. Sci.* 91(4):503-520.

Nikolaisen, M., Cornulier, Y., Hillier, J., Smith, P., Albanito, F., Nayak, D. 2023. Methane emissions from rice paddies globally: A quantitative statistical review of controlling variables and modelling of emission factors. *J. Clean Prod.* 409:137245.

Netherlands - National Inventory Report(NIR), 2021.

United States of America - National Inventory Report (NIR), 2021.

Li, C., Frolking, S., Harriss, R. C. 1994. Modeling carbon biogeochemistry in agricultural soils. *Global Biogeochem. Cycles* 8:237-254.

Yang, S. S., Liu, C. M., Lai, C. M., Liu, Y. L. 2003. Estimation of methane and nitrous oxide emission from paddy fields and uplands during 1990-2000 in Taiwan. *Chemosphere* 52:1295-1305.

Gilhespy, S. L., Anthony, S., Cardenas, L., Chadwick, D., del Prado, A., Li, C., Misselbrook, T., Rees, R. M., Salas, W., Sanz-Cobena, A., Smith, P., Tilston, E. L., Topp, C. F. E., Vetter, S., Yeluripati, J. B. 2014. First 20 years of DNDC (DeNitrification DeComposition): model evolution. *Ecol. Model.* 292:51-62.



表 1 水稻、大豆與落花生試驗區土壤性質

Table 1 The soil characteristic of paddy rice, soybean and peanuts farmland.

	pH	SOM (%)	Soil Texture	BD
落花生與大豆試驗區	5.6	1.28	Loam	1.28
水稻試驗區	7.6	2.08	Clay	1.33

表 2 水稻慣行與節水處理田間甲烷排放量 (kg CH₄ ha⁻¹)，調查時間量包含由整地翻耕至收穫Table 2 The methane emission (kg CH₄ ha⁻¹) of conventional and AWD paddy rice, the monitoring period started from land preparation to harvest.

	慣行		節水	
	田間調查	DNDC 模擬	田間調查	DNDC 模擬
2022 二期作	410	286	276	202
2023 一期作	86	86	56	66

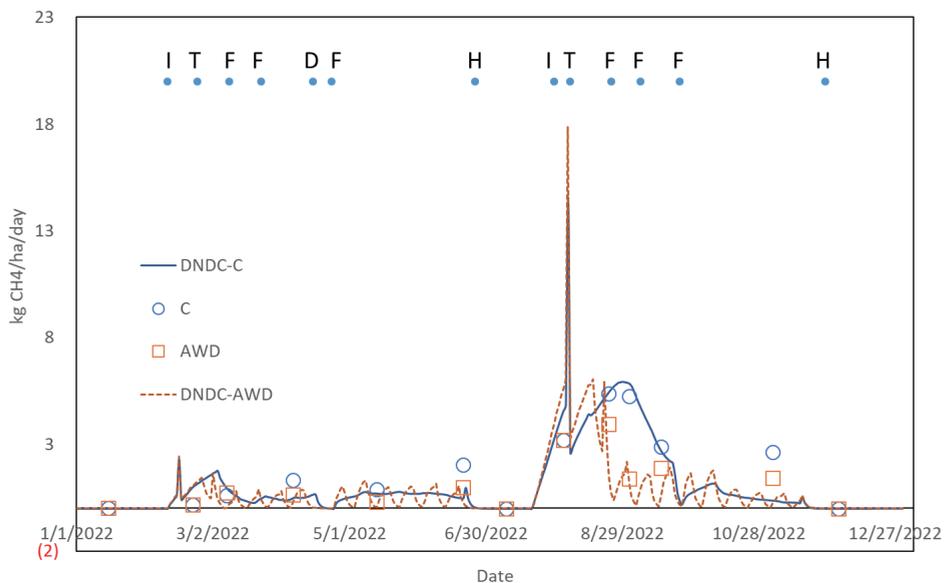


圖 1 水稻田間甲烷調查結果與 DNDC 模擬之比較

Fig. 1 The field observed and DNDC model simulated methane emission of paddy rice farmland.

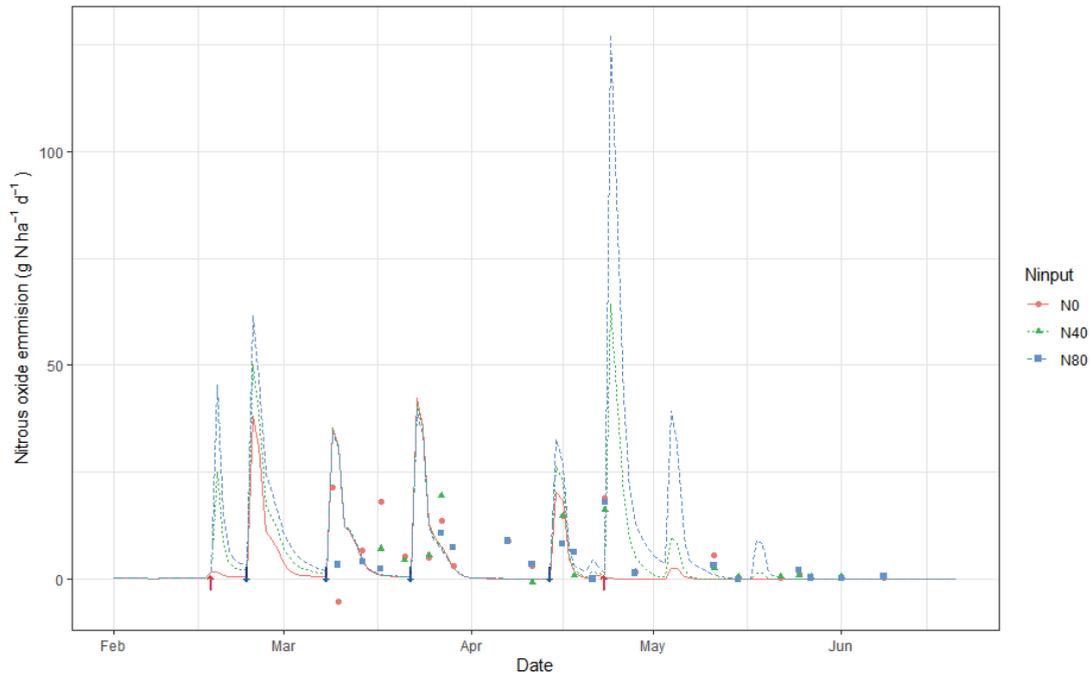


圖 2 落花生試驗區三種施氮處理之氧化亞氮調查結果與 DNDC 模擬比較，施氮處理分別為 0、40、80 kg N ha⁻¹，紅色往上箭頭代表施肥日期，藍色向下代表灌溉日期
Fig. 2 The field observed and DNDC model simulated nitrous oxide emission from peanut farmland of three nitrogen application treatments. The nitrogen treatments includes 0、40、80 kg N ha⁻¹, the upward arrows represent fertilization dates and downward arrows represent irrigation dates.

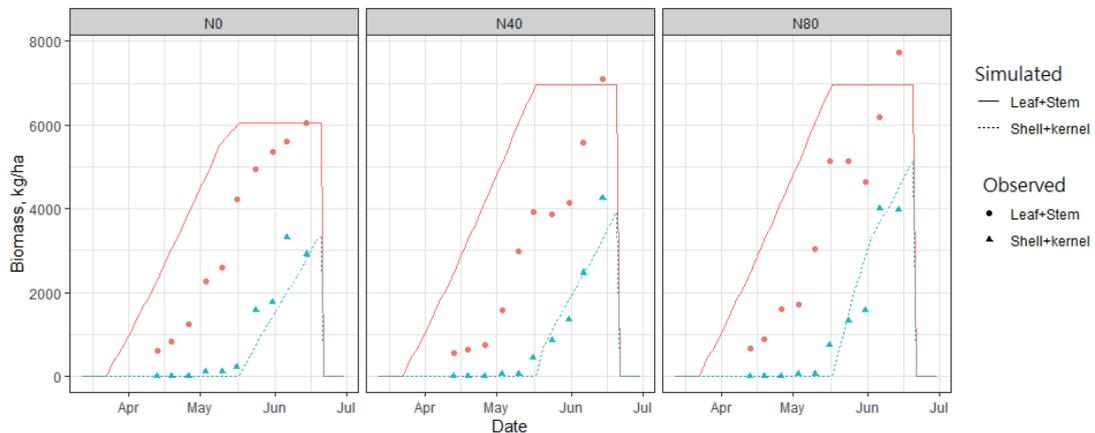


圖 3 落花生試驗區三種施氮處理之生物量 (kg ha⁻¹) 調查結果與 DNDC 模擬比較，施氮處理分別為 0、40、80 kg N ha⁻¹
Fig. 3 The field observed and DNDC model simulated plant biomass of peanut from three nitrogen application treatment (0, 40, 80 kg N ha⁻¹).

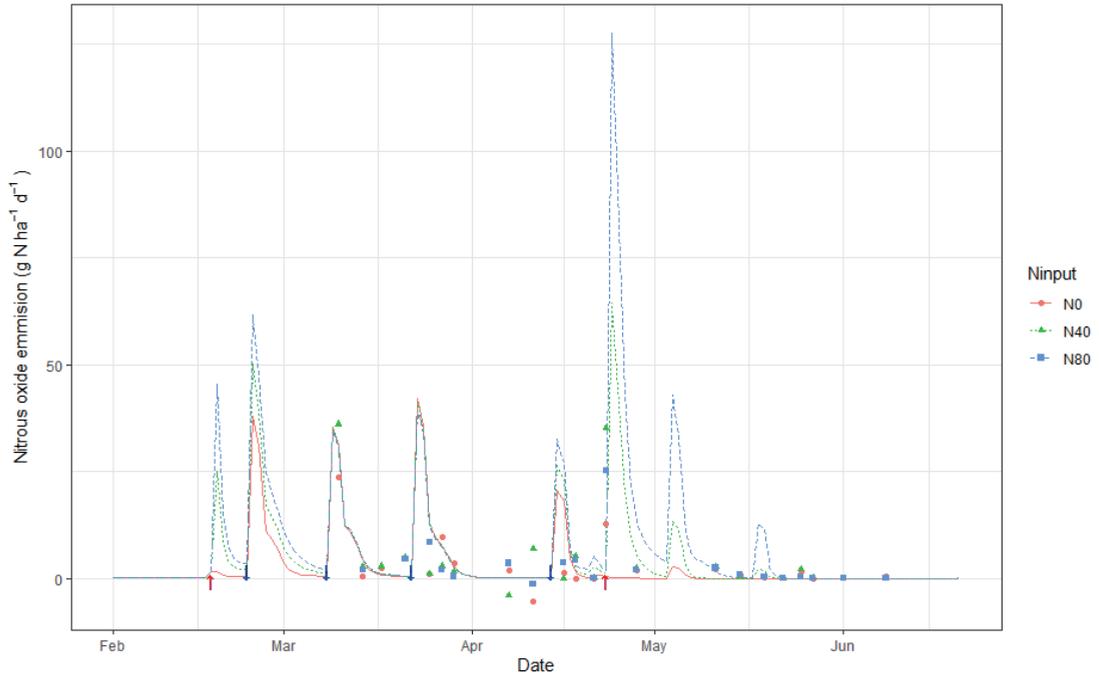


圖 4 大豆試驗區三種施氮處理之氧化亞氮調查結果與 DNDC 模擬比較，施氮處理分別為 0、40、80 kg N ha⁻¹，紅色往上箭頭代表施肥日期，藍色向下代表灌溉日期

Fig. 4 The field observed and DNDC model simulated nitrous oxide emission from soybean farmland of three nitrogen application treatments. The nitrogen treatments includes 0、40、80 kg N ha⁻¹, the upward arrows represent fertilization dates and downward arrows represent irrigation dates.

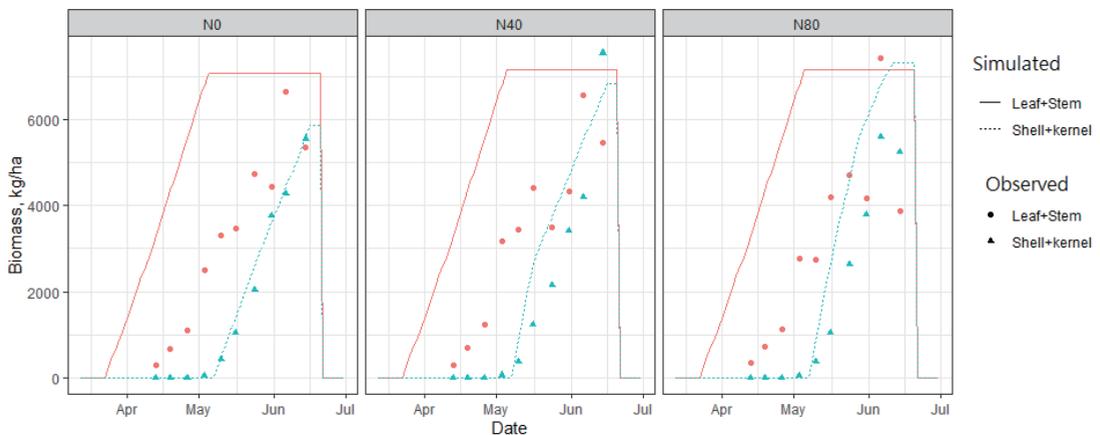


圖 5 大豆試驗區三種施氮處理之生物量 (kg ha⁻¹) 調查結果與 DNDC 模擬比較，施氮處理分別為 0、40、80 kg N ha⁻¹

Fig. 5 The field observed and DNDC model simulated plant biomass of soybean from three nitrogen application treatment (0, 40, 80 kg N ha⁻¹).



Simulation of crop growth and greenhouse emission with DNDC model

Chu-Chung Chen¹ Hung-Yu Dai² Tzu-Shang Su¹ Chong-Yi Liao^{3*} Lung-Hsin Hsu⁴

Abstract

More and more evidence indicates the correlation between human activities and climate change. Therefore, it is important to reduce greenhouse gas emissions to mitigate the pace of global warming. The greenhouse gas emissions from farming systems are affected by soil property, weather condition, farming system and field management activity. In views of this, more and more countries use Tier 3 to calculate greenhouse gas emissions by actual measurement or model for important items. DNDC model is one of the widely used agricultural greenhouse gas emission simulation models. The purpose of this study is to establish local parameter and test the DNDC model by using field observation data of rice, soybean and peanut. The field experiment of rice was carried out in the 2022 second crop of and the 2023 first crop and the treatments included the conventional irrigation practice and alternate wetting and drying (AWD). Methane emissions were monitored by close chamber method from soil preparation to harvesting for both treatments. The soybean and peanut field experiment was carried out in the 2023 spring crop, including three nitrogen treatments of 0, 40, and 80 kg N ha⁻¹. The crop growth parameter and the nitrous oxide emission were monitored during the crop growth period. The rice experiment results show that the methane emission of the second crop was higher than that of the first crop, and the AWD treatment can reduce the methane emission by 33-35%. The DNDC model simulated methane emission in acceptable agreement



with observed in different planting season and irrigation management, but it is also found the model overestimated methane emission in first crop and underestimated in second crop. In the crop simulation, the model simulated the yield of soybean and peanut from different nitrogen application in reasonable results. Field nitrous oxide observations show that the main peak occurs after fertilization or irrigation. The DNDC model can reflect the effects of irrigation and nitrogen inputs on nitrous oxide emissions.

Keyword: Greenhouse gas, Mitigation strategy, DNDC

1 Agricultural Chemistry Division, Taiwan Agricultural Research Institute, MOA, Taiwan

2 Crop Science Division, Taiwan Agricultural Research Institute, MOA, Taiwan

3 Crop Environment Section, Taichung District Agricultural Research and Extension Station, MOA, Taiwan

4 Potzu Branch Station, Tainan District Agricultural Research and Extension Station, MOA, Taiwan

*Corresponding author (cyliao@tcdares.gov.tw)