

# 滿江紅取代田菁作為宜蘭休耕綠肥之減碳效益評估<sup>1</sup>

簡梓丞<sup>2</sup>、倪禮豐<sup>2</sup>、張琇妍<sup>3\*</sup>、嚴國恩<sup>4</sup>、

李明霞<sup>4</sup>、黃浩銓<sup>5</sup>、蔡昀珊<sup>5</sup>

## 摘要

宜蘭休耕基線操作模式—栽培田菁作為綠肥後翻耕入田並立即湛水，會造成大量溫室氣體排放；而以滿江紅取代田菁作為休耕綠肥，每公頃可減少 8.9%至 61.4%的二氧化碳當量排放；若搭配稻草分解菌使用，每公頃則可減少 19.5%至 82.2%的二氧化碳當量排放。此外，本研究評估改變休耕綠肥對隔年一期稻作栽培之影響，顯示休耕栽培滿江紅並不會於一期稻作期間有明顯甲烷排放；且綠肥翻埋後可減少一期稻作氮肥使用，與施用 60 kg ha<sup>-1</sup> 氮肥之處理相比，施用 30 kg ha<sup>-1</sup> 氮肥之處理可減少甲烷排放，並且維持水稻產量，證實滿江紅具有綠肥效益。本研究調查為期三年的基線及減碳操作之溫室氣體排放數據，提供「滿江紅取代田菁作為宜蘭休耕綠肥」的基線及減碳操作之排放係數，以利後續申請自願減量專案等相關減碳效益計算使用。

關鍵字：田菁、滿江紅、綠肥、低碳栽培、排放係數

- 
1. 農業部花蓮區農業改良場研究報告 321 號。
  2. 農業部花蓮區農業改良場作物環境科助理研究員。
  3. 農業部農業試驗所農業化學組助理研究員。\*通訊作者 hychang@tari.gov.tw
  4. 農業部花蓮區農業改良場作物環境科研究助理。
  5. 農業部花蓮區農業改良場作物環境科前研究助理。

## 前言

宜蘭一期作水稻種植面積約為 11,000 ha，二期作生育後期因東北季風帶來長期陰雨天氣，使得日照量不足和氣溫下降，導致稻穀產量降低。若一年中選擇最佳氣候條件下，只栽培一期水稻，不僅可避免第二期作水稻生育環境不良所造成之損失，且可利用休耕農田轉作綠肥，增加土壤肥力，以提升隔年一期作水稻產量 (李祿豐, 1999)。目前宜蘭休耕基線操作模式為，每年七月底水稻收穫後種植田菁，待八至九月將田菁翻耕入田，並立即灌水至隔年一期作水稻預備種植時期。甲烷產生途徑主要為有機質在厭氧條件下經由還原作用所生成 (Le Mer and Roger, 2001, Humphreys *et al.*, 2019)；氧化亞氮生成機制包含好氧及厭氧之過程，經由好氧之硝化作用產生硝酸根，而硝酸根在厭氧條件下會進行脫氮作用產生氧化亞氮，若脫氮作用持續進行，則會生成氮氣 (Losada *et al.*, 2007)。因此，預期田菁翻耕入田後立即灌水，提供大量有機質及氮源進入厭氧土壤，將造成大量溫室氣體排放。因應全球暖化及氣候變遷，國際上為回復自然系統平衡，在 2021 年 3 月許多國家宣示推動淨零排放政策，未來各國將設立相關碳關稅，藉由貿易外交手段影響其他國家加強氣候治理強度，促使各國朝 2050 淨零排放邁進 (經濟部產發局, 2025)。為順應國際趨勢，臺灣也宣示在 2050 年達到淨零排放，故如何研發農業低碳排放栽培管理模式，有效降低碳排放極為重要。

滿江紅為水生蕨類植物，因其具有水生和生長迅速等特性，並且可與藍綠藻共生而具有固氮能力，常被作為水田之綠肥作物。滿江紅可增加氮的回收率，而改善土壤肥力 (Lauren, 1994)，且滿江紅漂浮於水面可有效減少使用尿素所造成之氮揮失 (Vlek *et al.*, 1996)，進而提升氮肥利用效率。研究也指出，施用滿江紅可以減少甲烷及氧化亞氮排放 (Ma *et al.*, 2012, Xu *et al.*, 2017, Malyan *et al.*, 2021)。施用滿江紅降低甲烷排放之機制有二，其一為滿江紅及藍綠藻於水田中行光合作用而泌氧，使水中可溶性氧濃度增加，進而使土壤氧化還原電位提高，減少有機質還原為甲烷或將生成之甲烷氧化，而降低水田甲烷排放 (Ali *et al.*, 2015)，且水中可溶性氧濃度增加、土壤氧化還原電位提高，也可能提高甲烷氧化菌活性 (Kimani, *et al.*, 2018)；其二為滿江紅漂浮於水面作為氣體由厭氧之土壤逸散至大氣之屏障，而阻擋甲烷排放至大氣 (van der Steen *et al.*, 2003)。而施用滿江紅降低氧化亞氮排放主要之機制為，因施用滿江紅可以減少氮肥使用，而降低氧化亞氮排放 (Xu *et al.*, 2017, Kimani *et al.*, 2018, Malyan *et al.*, 2019)。然而，也有研究提出，施用滿江紅會增加甲烷及氧化亞氮排放，主要因為死亡之滿江紅被分解，而作為有機質及進行硝化作用及脫氮作用之來源，使甲烷及氧化亞氮排放量提 (Chen *et al.*, 1997, Adhya *et al.*, 2000, Ying *et al.*, 2000)。但與其他綠肥作物 (田菁) 相比，滿江紅產生甲烷與產量之比值為最低 (Adhya *et al.*, 2000)，顯示以滿江紅作為綠肥最具減碳效益。

因此，本研究目的為，評估以滿江紅取代田菁作為休耕綠肥並於隔年一期稻作減施氮肥之減碳效益，並且調查不同休耕綠肥對隔年一期稻作產量及品質之影響，以維持糧食生產。

## 材料與方法

本研究評估之減碳操作為改變宜蘭休耕綠肥作物並調整相關農事管理時程，並評估將綠肥翻埋至土壤後，對隔年一期稻作產量及溫室氣體排放之影響，故試驗處理自每年度休耕開始至隔年一期水稻收穫結束。因此，此項減碳操作完整的評估期程為每年 7 月至隔年 6 月。此研究已累計調查 3 年度 (民國 111 年 7 月至民國 114 年 6 月) 的溫室氣體排放、水稻產量及土壤性質等相關數據。

## 一、休耕期之減碳效益評估

### (一) 試驗處理

為評估以滿江紅取代田菁作為宜蘭休耕綠肥於休耕期之減碳效益，本研究於宜蘭縣五結鄉設置(1)基線操作、(2)減碳操作－滿江紅及(3)減碳操作－滿江紅＋稻草分解菌(*Bacillus licheniformis*)，共 3 種處理，每處理設置 3 處量測點以量測溫室氣體，各處理相關農事栽培及操作時程如下。

1. 基線操作：於 7 月種植田菁、8 月底田菁翻耕入田並灌水，隔年 2 月曬田整地，此處理面積為 0.3 ha。
2. 減碳操作－滿江紅：於 7 月底灌水栽培滿江紅、隔年 1 月將滿江紅翻耕入田，隔年 2 月整地預備種植水稻，此處理面積為 0.1 ha。
3. 減碳操作－滿江紅＋分解菌：於 7 月底灌水並施用稻草分解菌，於 2 週後栽培滿江紅、隔年 1 月將滿江紅翻耕入田，隔年 2 月整地預備種植水稻，此處理面積為 0.1 ha。



圖一、休耕期基線操作田區 (左) 及減碳操作田區 (右)

Fig. 1. Baseline operation (left) and carbon reduction project operation (right) fields during fallow period.

### (二) 溫室氣體量測方法及量測期程

以密閉罩法(closed chamber method) 進行甲烷及氧化亞氮之量測。使用長 60 cm、寬 40 cm、高 120 cm 之透明壓克力箱，並配置氣溫溫度計偵測箱內氣溫。於上午 9 點至 12 點間進行量測，各試驗點於第 0 min 及第 20 min 取樣，搭配痕量氣體分析儀(LI-7810 CH<sub>4</sub>/CO<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>O Trace Gas Analyzer、LI-7820 N<sub>2</sub>O/H<sub>2</sub>O Trace Gas Analyzer)直接現場量測甲烷及氧化亞氮濃度，或以採氣袋收集樣品，於實驗室以氣相層析儀(Agilent 8890 gas chromatography system)分析樣品甲烷及氧化亞氮濃度。休耕期量測期程自每年 7 月至隔年 1 月。水田溫室氣體量測頻率，於生長季灌水期間至少每週量測兩次，遇農事管理(如灌水、分解菌施用及綠肥翻耕等)量測頻率應達每週兩次以上。

## (三)農事管理項目及期程

基線操作之農事管理包含種植田菁、將田菁翻耕並澆水等；減碳操作之農事管理包含田區翻耕、澆水、施用稻草分解菌、福壽螺防治、栽培滿江紅等。稻草分解菌使用芸艸纖維速效(肥製(質)字第 0903033 號，為苗栗區農業改良場技術授權)，施用量為  $5 \text{ kg ha}^{-1}$ 。福壽螺防治使用 80%聚乙醛可濕性粉劑，施用量為  $1.2 \text{ kg ha}^{-1}$ 。滿江紅為台灣原生種(*Azolla pinnata*)。各年管理時程如表一及表二所示。

表一、各年度休耕期基線操作之農事管理期程

Table 1. Management schedule of baseline operations during fallow periods.

Management	第一年度 (111 年)	第二年度 (112 年)	第三年度 (113 年)
Rice harvesting	6 月 29 日	7 月 6 日	6 月 20 日
Field plowing	7 月 28 日	7 月 17 日	7 月 15 日
Planting <i>Sesbania</i>	7 月 28 日	7 月 31 日	7 月 15 日
<i>Sesbania</i> biomass survey	8 月 30 日	9 月 8 日	8 月 29 日
<i>Sesbania</i> plowing	9 月 2 日	9 月 9 日	8 月 31 日
Field flooding	9 月 2 日	9 月 9 日	8 月 31 日

表二、各年度休耕期減碳操作之農事管理時程

Table 2. Management schedule of project operations during fallow periods.

Management	第一年度 (111 年)	第二年度 (112 年)	第三年度 (113 年)
Rice harvesting	7 月 2 日	7 月 6 日	6 月 20 日
Field plowing	7 月 28 日	7 月 17 日	7 月 15 日
Field flooding	7 月 31 日	7 月 25 日	8 月 6 日
Application of rice straw decomposing bacteria	8 月 1 日	8 月 8 日	8 月 7 日
Planting <i>Azolla</i>	8 月 12 日	8 月 22 日	8 月 26 日
<i>Azolla</i> biomass survey	隔年 2 月 8 日	11 月 9 日	隔年 1 月 17 日

(四) 溫室氣體計算

溫室氣體通量以下列方程式計算：

$$F = \frac{[(S_{t=initial} - S_{t=end}) \times V] / [R \times (273 + T) \times 1000 \times A]}{t} \times 10^{-9} \times M \times 10^4 \times 86400$$

F：溫室氣體排放通量(g ha <sup>-1</sup> d <sup>-1</sup> )	V：水面上之壓克力箱體積(mL)
S <sub>t=initial</sub> ：測量起始時間之溫室氣體濃度(ppb)	S <sub>t=end</sub> ：測量結束時間之溫室氣體濃度(ppb)
R：理想氣體常數, 0.082(atm L mol <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> )	T：溫度(°C)
1000：體積轉換常數(mL L <sup>-1</sup> )	A：壓克力箱面積(m <sup>2</sup> )
t：壓克力罩收集氣體之時間(second)	M：甲烷或氧化亞氮分子量(g mol <sup>-1</sup> )
10000：面積轉換常數(m <sup>2</sup> ha <sup>-1</sup> )	86400：時間轉換常數(s d <sup>-1</sup> )

以每日溫室氣體通量對時間作圖，圖形下方面積總和即累積通量，以梯形法計算累積通量。

(五) 綠肥生質調查及土壤採樣分析

分別於綠肥翻埋前調查田菁及滿江紅生質量，並於各農事管理前進行土壤採樣及分析。

二、一期稻作減碳效益及綠肥效益評估

(一) 試驗處理

為探討不同休耕綠肥對於一期稻作溫室氣體排放量和產量之影響及評估綠肥效益，本試驗於基線操作及減碳操作田區各設置三種不同氮基肥施用量處理，分別為施用 60 kg N ha<sup>-1</sup>(施肥手冊推薦用量)、施用 30 kg N ha<sup>-1</sup> 及不施用氮基肥之處理，以評估滿江紅減碳及綠肥效益。氮肥種類皆為尿素(46-0-0)，而磷肥及鉀肥各處理種類及施用量皆相同，磷肥施用 313 kg ha<sup>-1</sup> 寶粒磷(5-16-0)、鉀肥施用 83 kg ha<sup>-1</sup> 氯化鉀(0-0-60)。各項處理操作及氮基肥施用量如下，田區處理示意圖如圖二。

- (1) 休耕綠肥為田菁＋一期稻作施用 60 kg 氮基肥 (*Sesbania*+60N)
- (2) 休耕綠肥為田菁＋一期稻作施用 30 kg 氮基肥 (*Sesbania*+30N)
- (3) 休耕綠肥為田菁＋一期稻作施用 0 kg 氮基肥 (*Sesbania*+0N)
- (4) 休耕綠肥為滿江紅＋一期稻作施用 60 kg 氮基肥 (*Azolla*+60N)
- (5) 休耕綠肥為滿江紅＋一期稻作施用 30 kg 氮基肥 (*Azolla*+30N)
- (6) 休耕綠肥為滿江紅＋一期稻作施用 0 kg 氮基肥 (*Azolla*+0N)

(二) 溫室氣體量測及計算

一期稻作量測期程自 1 月至 7 月。水田溫室氣體量測頻率，於生長季灌水期間至少每週量測 2 次，遇農事管理（如整地、灌水、施肥等）量測頻率應達每週兩次以上。溫室氣體量測及計算方法同二(二)及(四)節所述。

(三) 農事管理項目及期程

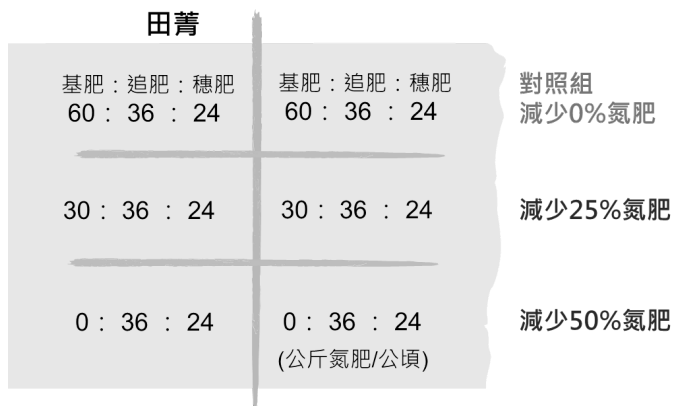
一期稻作基線及減碳操作農事管理皆包含基肥施用、整地、插秧、福壽螺防治、追肥、穗肥及產量調查。福壽螺防治使用 80%聚乙醛可濕性粉劑，施用量為 1.2 kg ha<sup>-1</sup>。各年度管理時程如表三所示。

## (四) 水稻產量調查及米質分析

以坪割法調查各處理之水稻產量，坪割面積為寬 10 叢水稻及長 7 叢水稻，共 70 叢水稻，每處理進行三重複坪割。分析米質包含正常粒、白粉質粒、碎粒、被害粒、胴裂粒、異型粒、食味、蛋白質、水分及直鏈澱粉。

## (五) 土壤採樣分析

於一期稻作栽培前後採集各處理之土壤樣本進行性質分析，包含土壤酸鹼值、電導度、有機質及營養元素分析等。



圖二、一期稻作各處理田間設置

Fig. 2. Field layout of operations in the first rice season.

表三、各年度水稻栽培之農事操作時程

Table 3. Management schedule of rice cultivation practices by year.

Management	第一年度 (112 年)	第二年度 (113 年)	第三年度 (114 年)
Basal fertilizer	2 月 10 日	1 月 29 日	1 月 14 日
Land preparation	2 月 12 日	1 月 30 日	1 月 19 日
Transplanting (rice seedlings)	3 月 7 日	2 月 16 日	2 月 25 日
Topdressing	4 月 10 日	3 月 26 日	3 月 25 日
Panicle fertilizer	5 月 11 日	4 月 29 日	4 月 29 日
Yield survey	7 月 6 日	6 月 20 日	7 月 3 日

## 結果與討論

### 一、休耕期綠肥生長及溫室氣體排放

#### (一) 休耕期不同處理之綠肥生長情形

各年度休耕期種植田菁及滿江紅之生長情形如表四所示。田菁生質量為 2,432-3,875 kg ha<sup>-1</sup>，滿江紅生質量為 865-1,920 kg ha<sup>-1</sup>，與田菁相比滿江紅生質量較低，但可提供 29-65 kg N ha<sup>-1</sup> 供下期作水稻利用。因綠肥為非具經濟價值作物，農友栽培並無固定之種植行株距及密度，且因各年度氣候條件差異，故無論是田菁或滿江紅，各年度之綠肥生質量差異極大，進而影響不同年度之溫室氣體排放量。

#### (二) 休耕期不同處理之溫室氣體排放

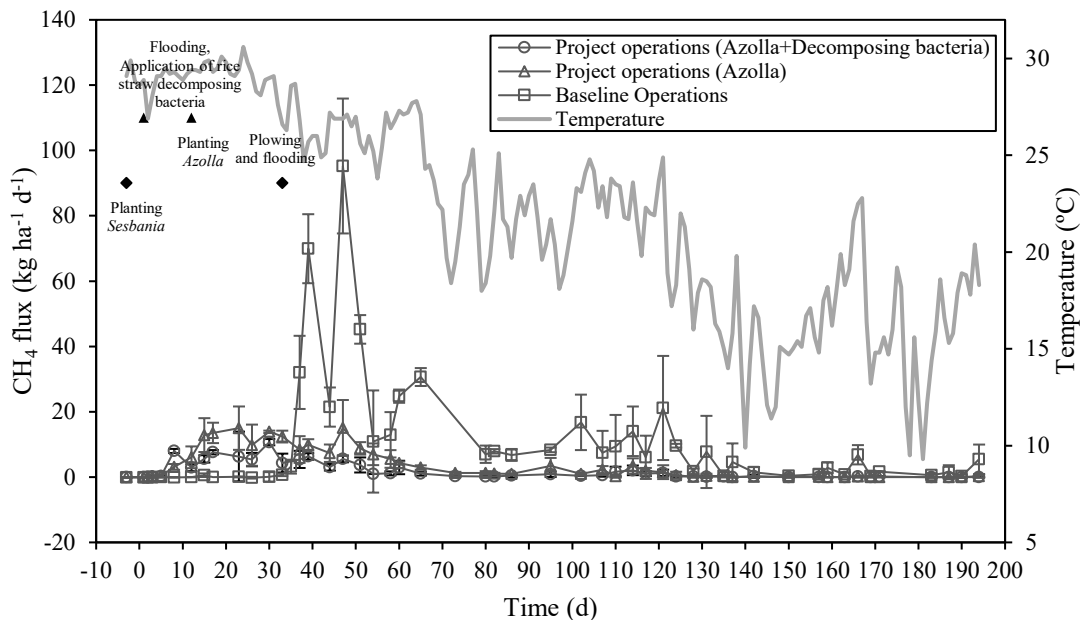
各年度休耕期不同處理之溫室氣體排放情形如圖三至圖七所示。宜蘭休耕期基線操作之甲烷排放量為 678-1,745 kg ha<sup>-1</sup>，氧化亞氮排放量為 0.21-0.18 kg ha<sup>-1</sup>，相當於 19.0-48.9 Mg ha<sup>-1</sup> 二氧化碳當量排放（表五），顯示目前宜蘭休耕期基線操作會造成大量溫室氣體排放。減碳操作－滿江紅處理之甲烷排放量為 614-1,015 kg ha<sup>-1</sup>，氧化亞氮排放量為 0.26-0.78 kg ha<sup>-1</sup>，相當於 17.3-28.6 Mg ha<sup>-1</sup> 二氧化碳當量排放（表五）；比基線操作減少 1.7-30.0 Mg ha<sup>-1</sup> 二氧化碳當量排放，相當於可減少基線排放之 8.9-61.4%（表六）。減碳操作－滿江紅+稻草分解菌處理之甲烷排放量為 311-910 kg ha<sup>-1</sup>，氧化亞氮排放量為 0.26-0.46 kg ha<sup>-1</sup>，相當於 8.7-25.6 Mg ha<sup>-1</sup> 二氧化碳當量排放（表五）；比基線操作減少 3.7-40.2 Mg ha<sup>-1</sup> 二氧化碳當量排放，相當於可減少基線排放之 19.5-82.2%（表六）。

研究指出，土壤有機質含量及使用低碳氮比之有機質會增加甲烷排放（Yagi and Minami 1990, van der Gon and Neue 1995, Le Mer and Roger 2001, Humphreys *et al.*, 2019），而栽培滿江紅取代田菁作為休耕綠肥，減少於夏季高溫時將大量有機質埋入厭氧土壤，而降低湛水田區之甲烷排放；施用稻草分解菌處理則透過將前期作稻草分解後再湛水，而降低甲烷排放（Ji *et al.*, 2024）。氧化亞氮排放，因休耕期各操作皆維持連續湛水，故各處理並未量測到明顯氧化亞氮排放（Losada *et al.*, 2007, Oertel *et al.*, 2016）。減碳操作之氧化亞氮量比基線操作排放略高，但其排放量仍極低，僅占該操作總體二氧化碳排放當量之 0.4-0.7%，顯示於休耕期減碳操作並不會顯著影響氧化亞氮排放。

表四、各年度休耕期不同綠肥之生長

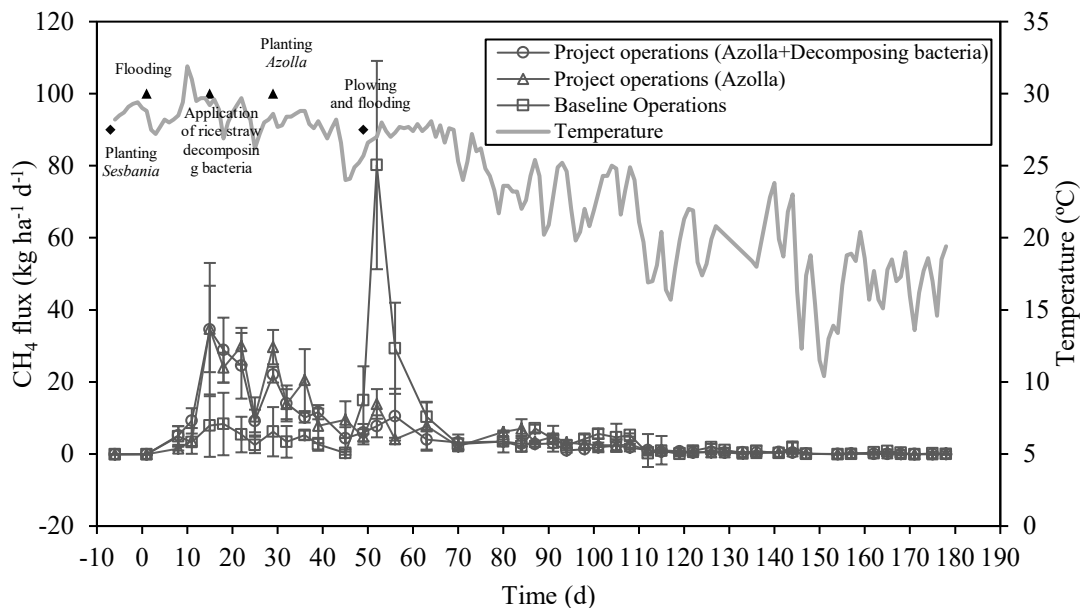
Table 4. Different green manure growth during fallow periods

		Green manure biomass	Amount of nitrogen provided by green manure
		kg ha <sup>-1</sup>	kg ha <sup>-1</sup>
<i>Sesbania</i>	1 <sup>st</sup> year	2,432±152	83
	2 <sup>nd</sup> year	3,091±685	105
	3 <sup>rd</sup> year	3,872±855	132
<i>Azolla</i>	1 <sup>st</sup> year	1,920±679	65
	2 <sup>nd</sup> year	980±208	33
	3 <sup>rd</sup> year	865	29



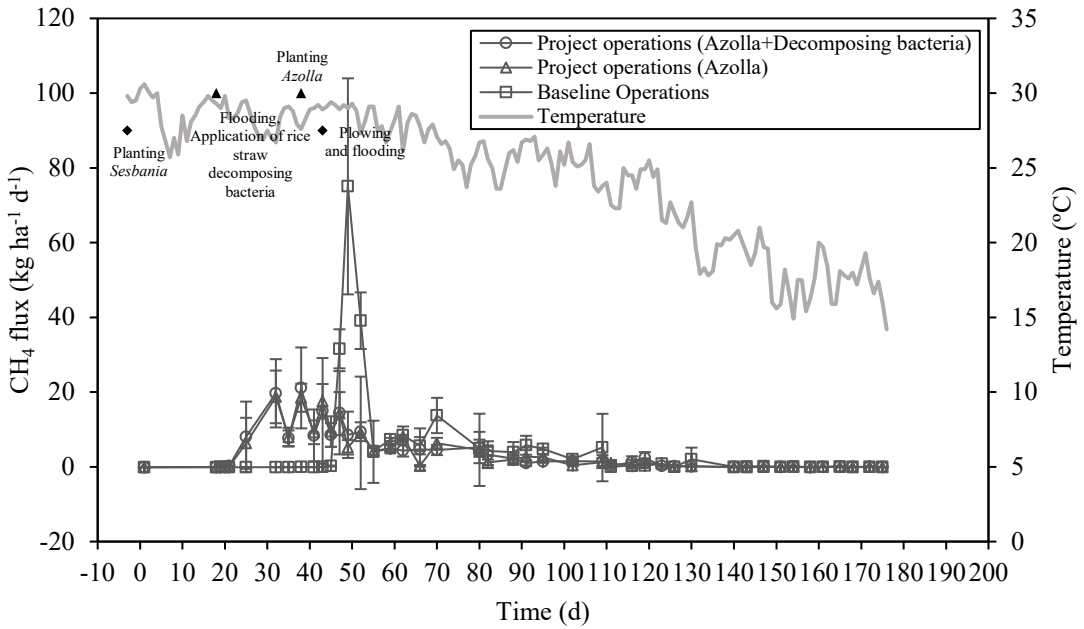
圖三、第一年度休耕期不同操作之甲烷排放

Fig. 3. Methane emissions under different operations during the 1st-year fallow period.



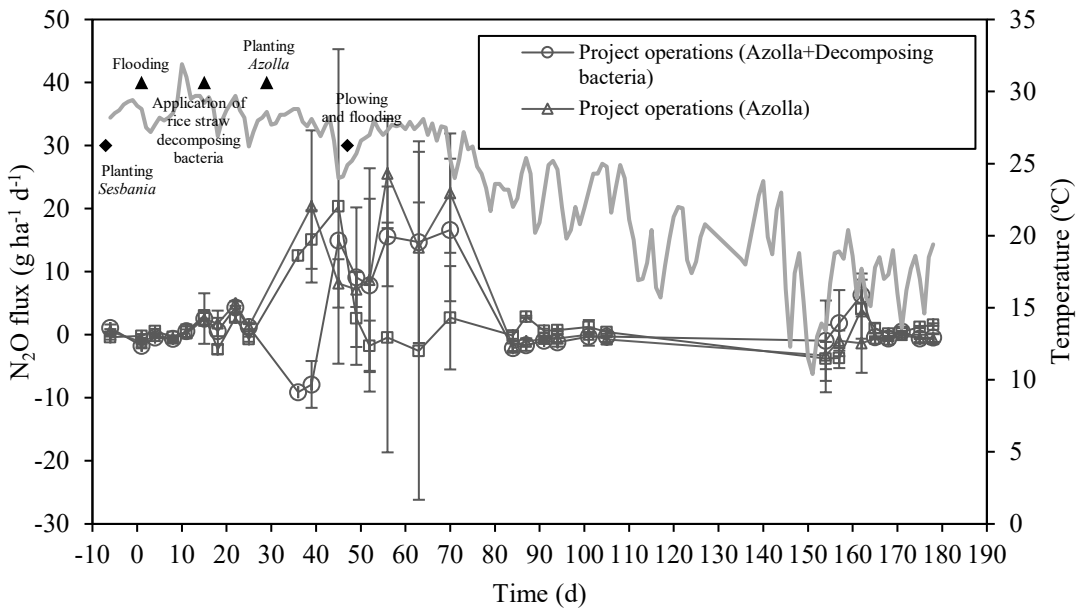
圖四、第二年度休耕期不同操作之甲烷排放

Fig. 4. Methane emissions under different operations during the 2nd-year fallow period.



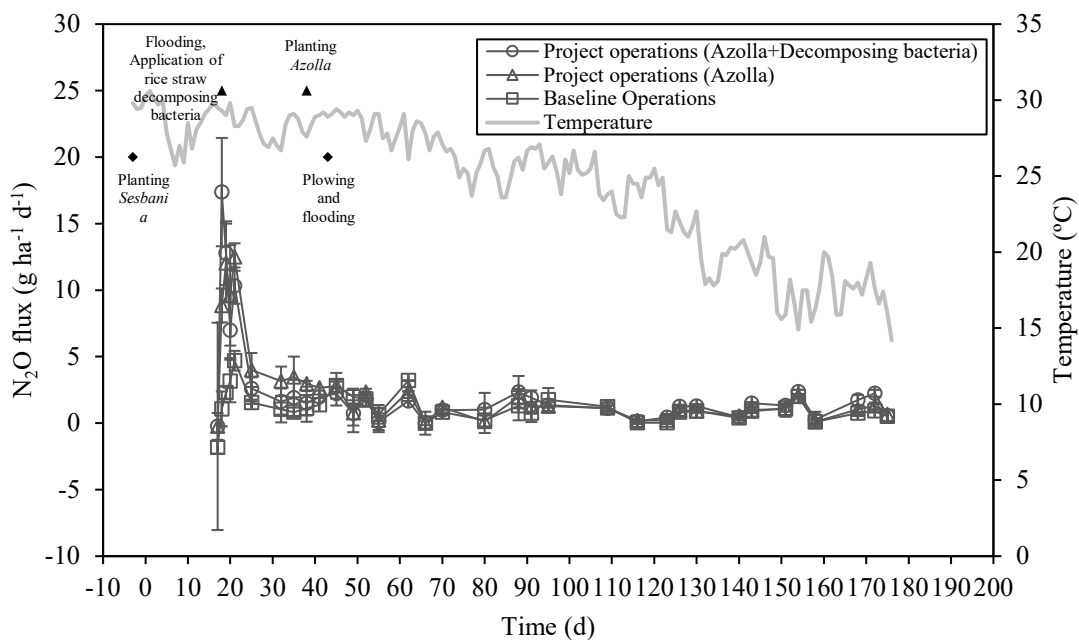
圖五、第三年度休耕期不同操作之甲烷排放

Fig. 5. Methane emissions under different operations during the 3rd-year fallow period.



圖六、第二年度休耕期不同操作之氧化亞氮排放

Fig. 6. Nitrous oxide emissions under different operations during the 2nd-year fallow period.



圖七、第三年度休耕期不同操作之氧化亞氮排放

Fig. 7. Nitrous oxide emissions under different operations during the 3rd-year fallow period.

表五、各年度休耕期不同處理之溫室氣體排放量

Table 5. Greenhouse gas emissions from different operations during fallow periods

	1 <sup>st</sup> year			2 <sup>nd</sup> year			3 <sup>rd</sup> year		
	CH <sub>4</sub>	N <sub>2</sub> O <sup>Z</sup>	GHG	CH <sub>4</sub>	N <sub>2</sub> O	GHG	CH <sub>4</sub>	N <sub>2</sub> O	GHG
	kg ha <sup>-1</sup>	kg ha <sup>-1</sup>	Mg CO <sub>2</sub> e ha <sup>-1</sup>	kg ha <sup>-1</sup>	kg ha <sup>-1</sup>	Mg CO <sub>2</sub> e ha <sup>-1</sup>	kg ha <sup>-1</sup>	kg ha <sup>-1</sup>	Mg CO <sub>2</sub> e ha <sup>-1</sup>
Baseline operations	1745±228	—	48.9	1165±105	0.21±0.39	32.7	678±130	0.18±0.03	19.0
Project operations ( <i>Azolla</i> )	674±172	—	18.9	1015±146	0.78±0.12	28.6	614±222	0.26±0.03	17.3
Project operations ( <i>Azolla</i> + decomposing bacteria)	311±73	—	8.7	910±282	0.46±0.29	25.6	544±289	0.26±0.06	15.3

<sup>Z</sup>Nitrous oxide measurement was not conducted in the first year.

表六、各年度休耕期減碳操作與基線操作相比之減碳效益

Table 6. Carbon reduction benefits of project operations compared with baseline operations in fallow periods .

	1 <sup>st</sup> year				2 <sup>nd</sup> year				3 <sup>rd</sup> year			
	CH <sub>4</sub>	N <sub>2</sub> O <sup>Z</sup>	GHG		CH <sub>4</sub>	N <sub>2</sub> O	GHG		CH <sub>4</sub>	N <sub>2</sub> O	GHG	
	kg ha <sup>-1</sup>	kg ha <sup>-1</sup>	Mg CO <sub>2</sub> e ha <sup>-1</sup>	%	kg ha <sup>-1</sup>	kg ha <sup>-1</sup>	Mg CO <sub>2</sub> e ha <sup>-1</sup>	%	kg ha <sup>-1</sup>	kg ha <sup>-1</sup>	Mg CO <sub>2</sub> e ha <sup>-1</sup>	%
Project operations ( <i>Azolla</i> )	-1071	-	-30.0	-61.4	-150	0.57	-4.1	-12.5	-64	0.08	-1.7	-8.9
Project operations ( <i>Azolla</i> + Decomposing bacteria)	-1434	-	-40.2	-82.2	-255	0.25	-7.1	-21.7	-134	0.08	-3.7	-19.5

<sup>Z</sup>Nitrous oxide measurement was not conducted in the first year.

## 二、一期稻作之溫室氣體排放

各年度一期稻作不同操作之溫室氣體排放情形如圖八至圖十三所示。一期作水稻溫室氣體排放量，以田菁作為休耕綠肥之田區於一期稻作施用 60、30、0 kg 氨基肥處理的甲烷累積排放量分別為 65.1-174.9 kg ha<sup>-1</sup>、43.7-167.6 kg ha<sup>-1</sup>、10.5-89.5 kg ha<sup>-1</sup>（表七）；以滿江紅作為休耕綠肥之田區於一期稻作施用 60、30、0 kg 氨基肥處理的甲烷累積排放量分別為 51.0-128.9 kg ha<sup>-1</sup>、40.7-122.3 kg ha<sup>-1</sup>、23.4-45.8 kg ha<sup>-1</sup>（表七）。可知滿江紅在冬季翻耕並未造成明顯甲烷排放，其原因為滿江紅與田菁相比翻耕入田之生質量較少（表四），而田菁翻耕時間為夏季，夏季氣溫及土壤溫度較高而使甲烷生成菌活性較高，導致於夏季翻耕綠肥時造成較多的甲烷排放。文獻指出，溫度會影響水田生成甲烷的碳及電子流向，進而影響甲烷生成菌之組成，並且指出甲烷生成量隨土壤溫度提高而增加（Chen and Chang, 2020; Chin *et al.*, 1999; Fey and Conrad, 2000）。此外，無論是栽培田菁或滿江紅作為休耕綠肥，在一期稻作的甲烷累積排放量會隨氨基肥施用量減少而降低。以上結果指出，減少施用尿素形態的氨基肥可以減少水稻栽培期間之甲烷排放。研究成果亦顯示，減少尿素施用並搭配增施磷肥或甲烷氧化菌，可降低甲烷排放（Fatma *et al.*, 2021, Wang *et al.*, 2024, Yang *et al.*, 2024）。

氧化亞氮排放部分，主要於基肥及穗肥施用後量測到氧化亞氮排放，搭配田區氧化還原電位數據（圖十二至十四），推測氧化亞氮排放除了施用肥料的種類及時間影響，亦會受土壤水分狀況影響（Losada *et al.*, 2007, Oertel *et al.*, 2016），而未監測到施用追肥的氧化亞氮排放。以田菁作為休耕綠肥之田區於一期稻作施用 60、30、0 kg 氨基肥處理的氧化亞氮累積排放量分別為 0.00-0.25 kg ha<sup>-1</sup>、0.06-0.85 kg ha<sup>-1</sup>、0.05-0.86 kg ha<sup>-1</sup>（表七）；以滿江紅作為休耕綠肥之田區於一期稻作施用 60、30、0 kg 氨基肥處理的氧化亞氮累積排放量分別為 -0.08-0.15 kg ha<sup>-1</sup>、-0.04-0.10 kg ha<sup>-1</sup>、-0.01-0.10 kg ha<sup>-1</sup>（表七）。以上結果指出，在水稻栽培期間氧化亞氮排放量極低，顯示於水稻栽培期，以尿素作為氮肥施用無明顯氧化亞氮排放。

以滿江紅作為休耕綠肥並於隔年一期稻作施用 30 kg 氨基肥施用之處理與基線操作（以田菁作為休耕綠肥並於隔年一期稻作施用 60 kg 氨基肥施用）相比，可減少 24.4-52.6 kg ha<sup>-1</sup> 之甲烷排放量及 -0.03-0.26 kg ha<sup>-1</sup> 之氧化亞氮排放量，相當於可減少 0.6-1.5 Mg CO<sub>2</sub>e ha<sup>-1</sup> 之溫室氣體排放量。

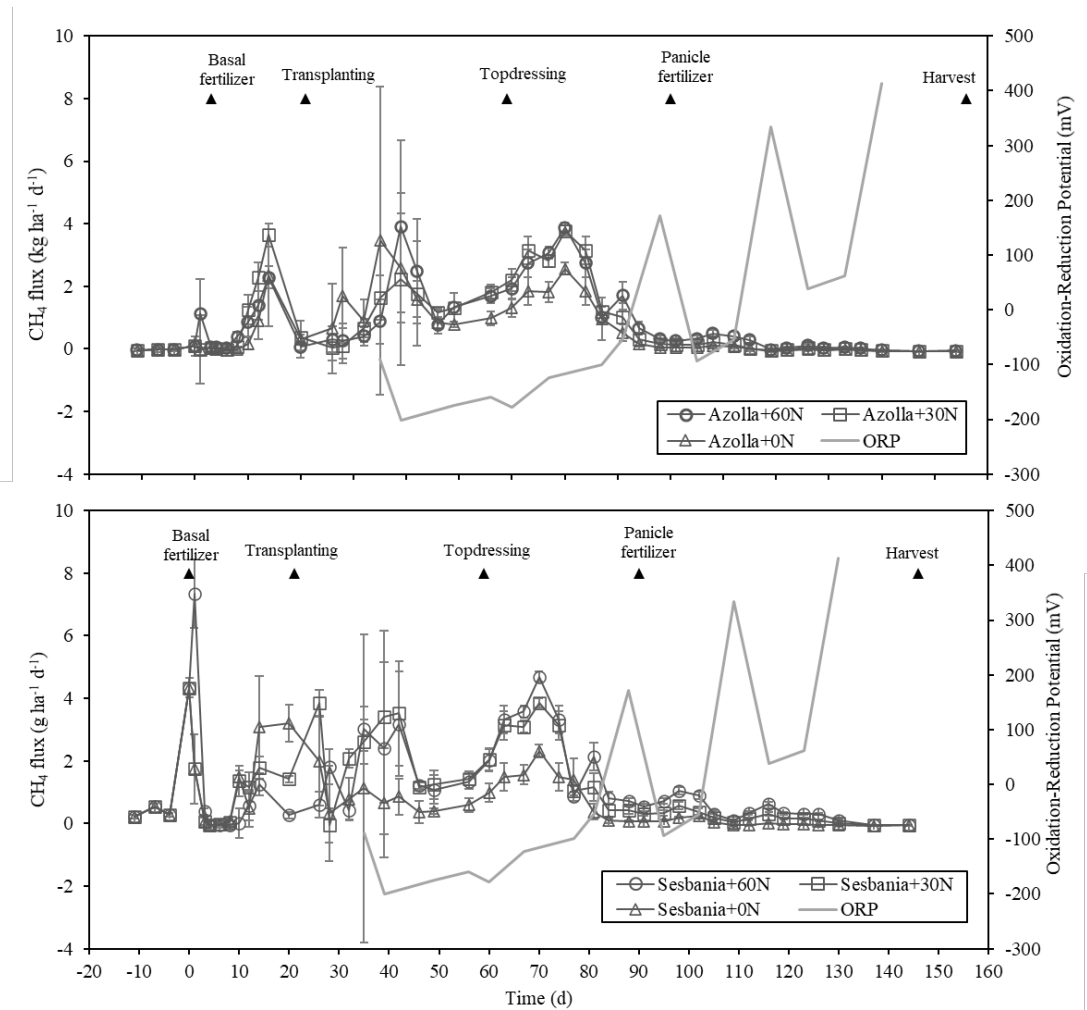
## 三、不同休耕綠肥對水稻產量及品質之影響

各處理一期作水稻產量如表九所示。與基線操作(*Sesbania*+60N)相比，減碳操作各處理 (*Azolla*+60N、*Azolla*+30N 及 *Azolla*+0N) 之水稻產量無顯著差異或顯著較高，顯示滿江紅具有綠肥效益，將其翻埋入田可減少隔年一期稻作氨基肥施用，此結果指出減少溫室氣體排放同時，亦可維持作物產量。以田菁作為休耕綠肥並減少一期稻作氮肥施用量之處理 (*Sesbania*+30N 及 *Sesbania*+0N) 與基線操作 (*Sesbania*+60N) 相比，其水稻產量皆無顯著差異或顯著較高，顯示田菁亦具有綠肥效益，將其翻埋入田可提供 83-132 kg ha<sup>-1</sup> 氮量（表四），因此若維持原推薦施肥量，則亦發生倒伏或病蟲害而影響產量。

稻米品質部份，各處理之正常粒、碎粒、被害粒、胴裂粒、異型粒皆無顯著差異。僅有白粉質粒部份，無論休耕期栽培田菁或滿江紅在一期稻作不施用氨基肥與施用 60 kg 氨基肥之處理相比具有顯著差異（表十）。而各處理在食味、蛋白質含量部分，與基線操作(*Sesbania*+60N)相比，減碳操作各處理 (*Azolla*+60N、*Azolla*+30N 及 *Azolla*+0N) 之食味顯著較高、蛋白質含量顯著較低；水分及直鏈澱粉則無顯著差異（表十）。

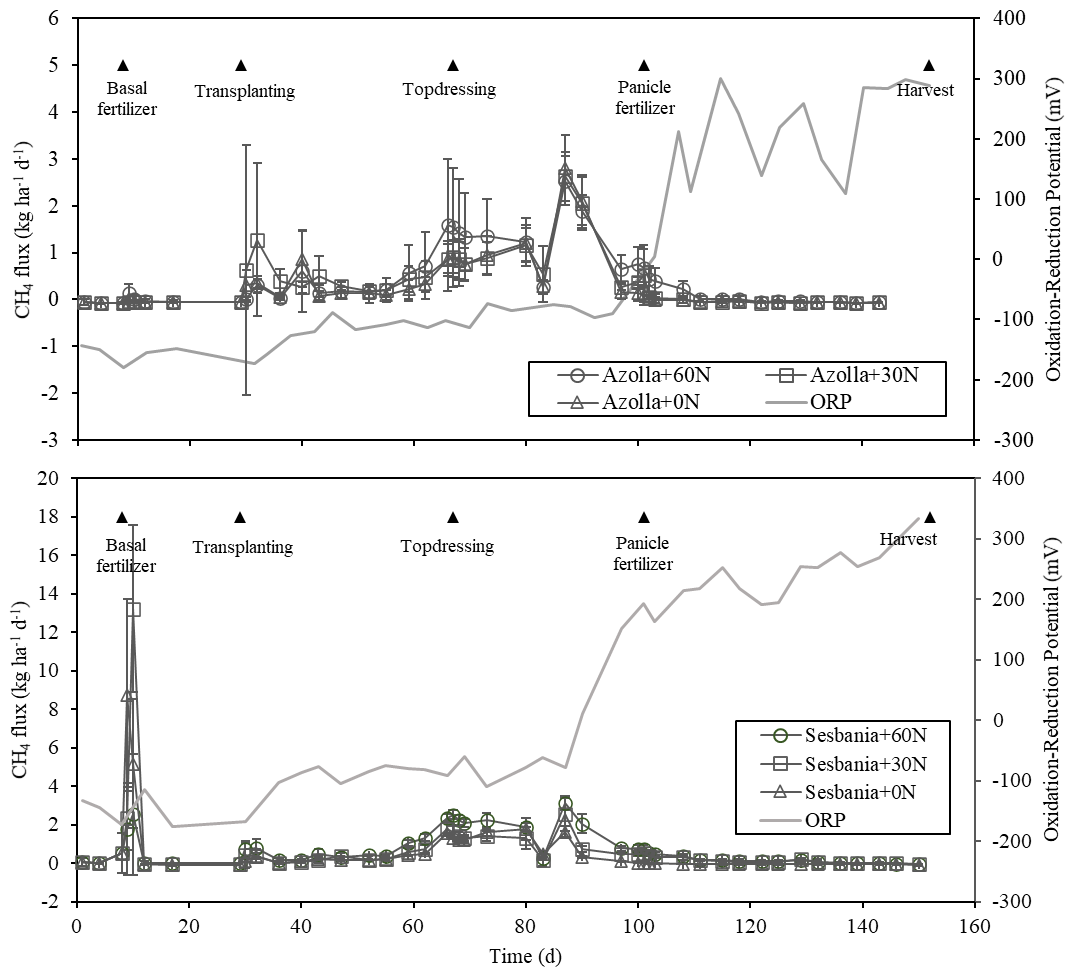
四、不同休耕綠肥對土壤有機質含量之影響

休耕期無論是栽培滿江紅或是田菁，皆為碳氮比低之資材，用途皆作為綠肥使用。圖十四為基線操作田區及減碳操作田區三年度之土壤有機質含量，顯示在短期內全年度操作後，兩種操作模式之土壤有機質無明顯差異。土壤有機質變化趨勢則需長期監測，以釐清其對土壤碳匯之影響。



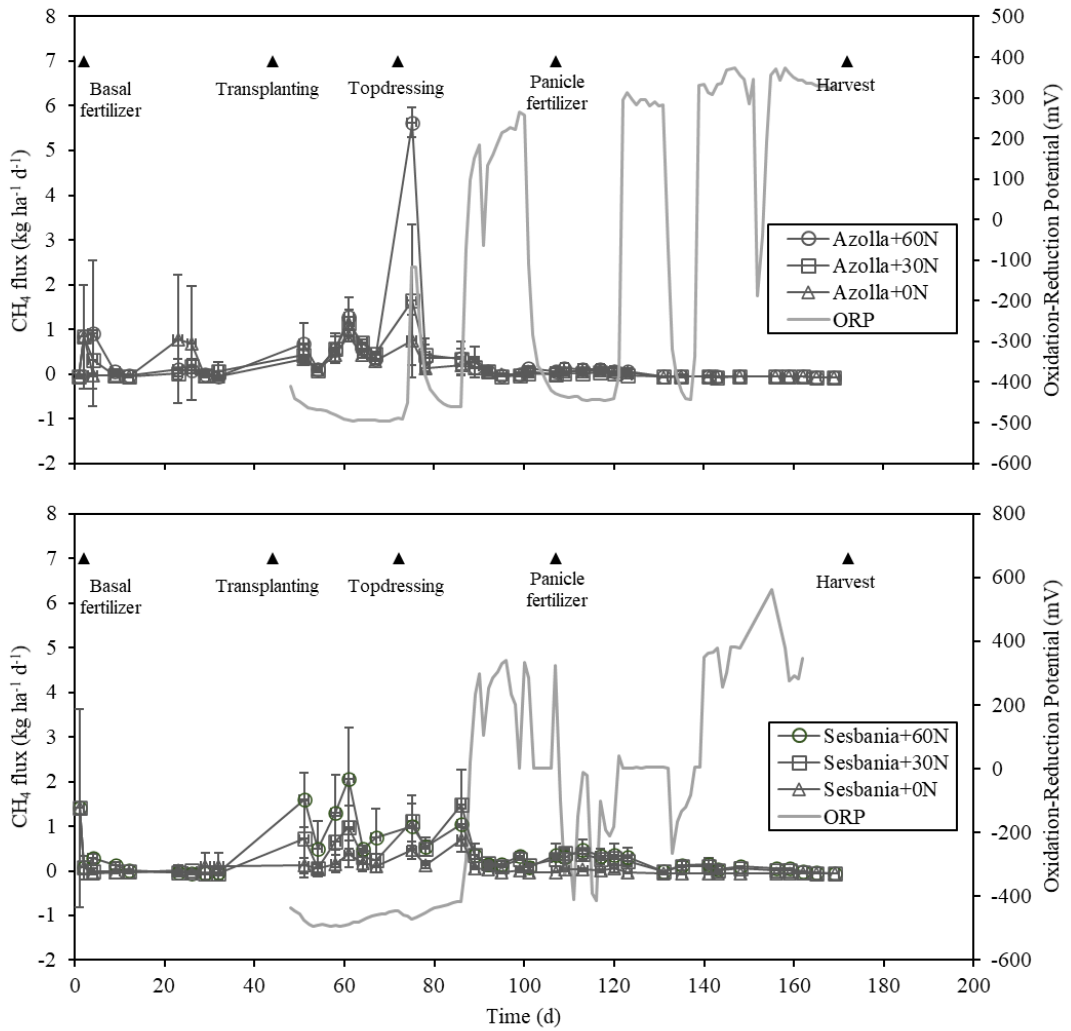
圖八、第一年度一期稻作不同操作之甲烷排放

Fig. 8. Methane emissions under different operations during the 1st-year rice season.



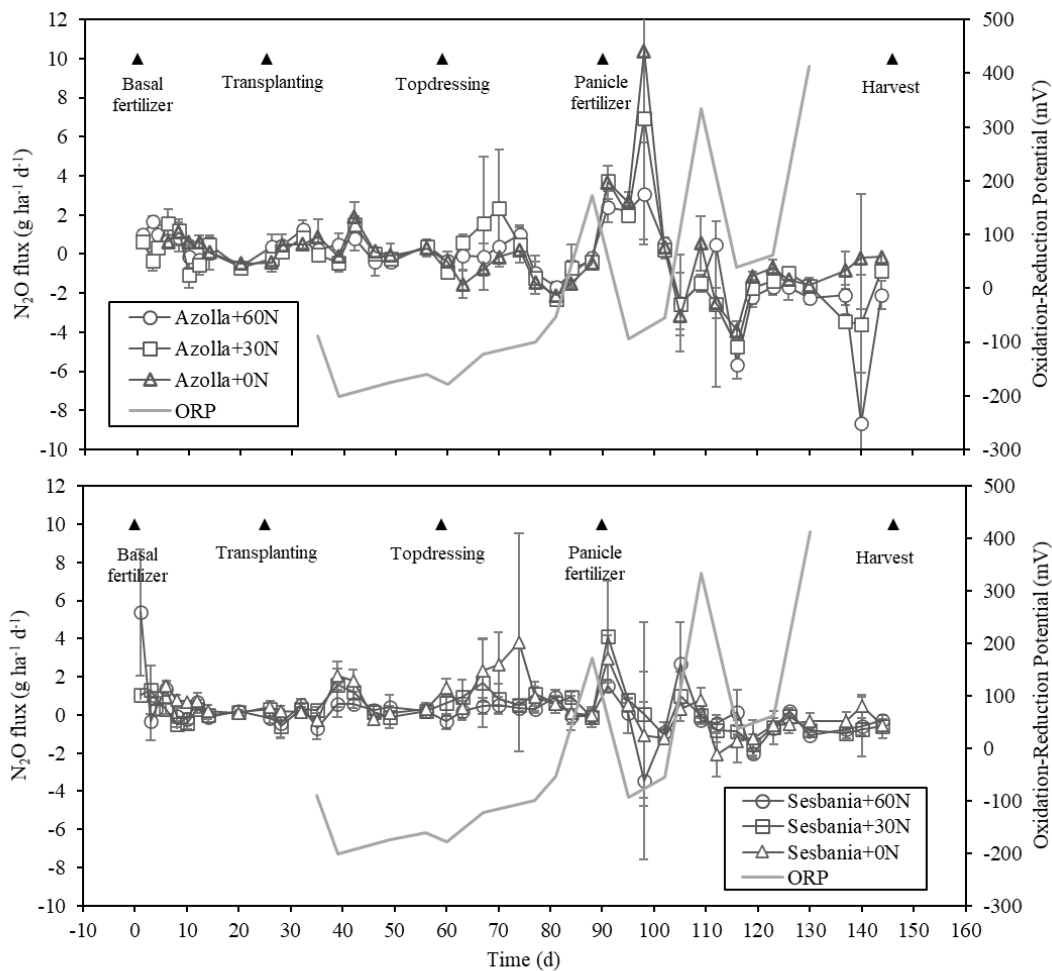
圖九、第二年度一期稻作不同操作之甲烷排放情形

Fig. 9. Methane emissions under different operations during the 2nd-year rice season.



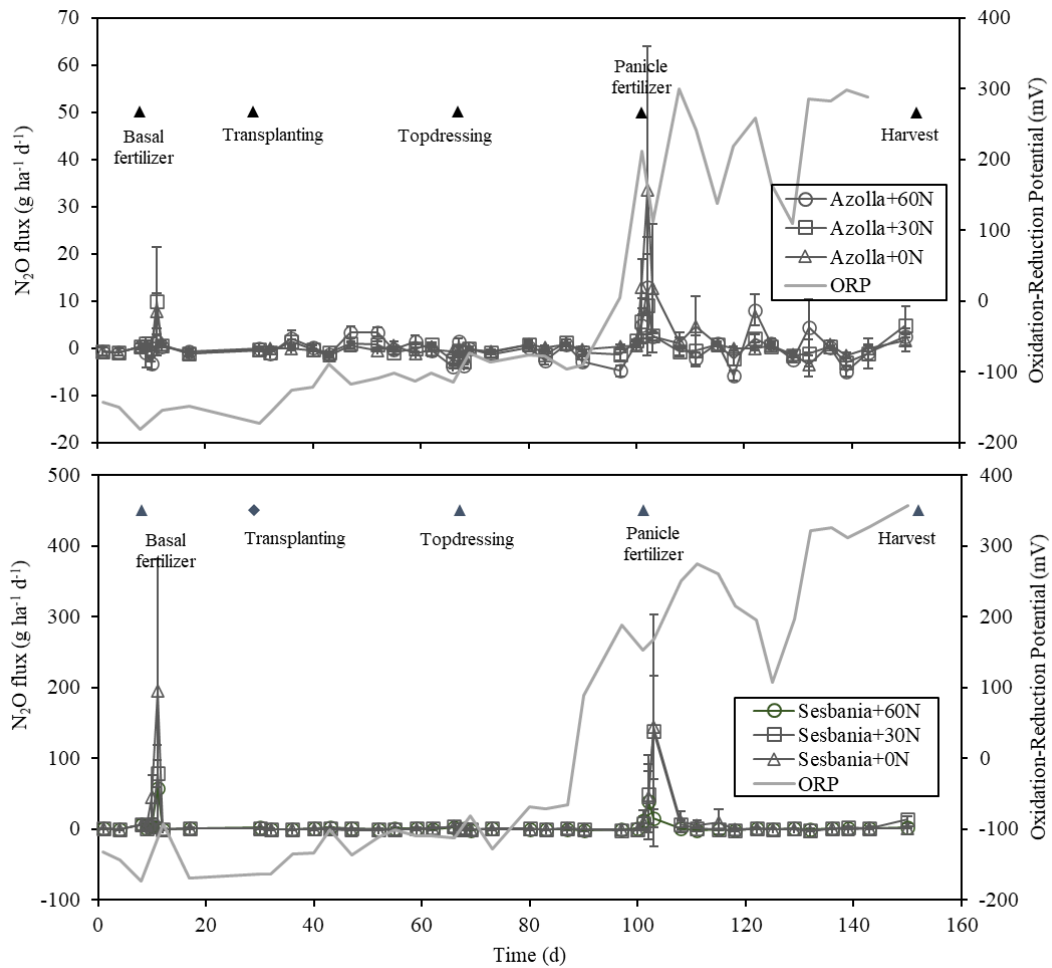
圖十、第三年度一期稻作不同操作之甲烷排放

Fig. 10. Methane emissions under different operations during the 3rd-year rice season.



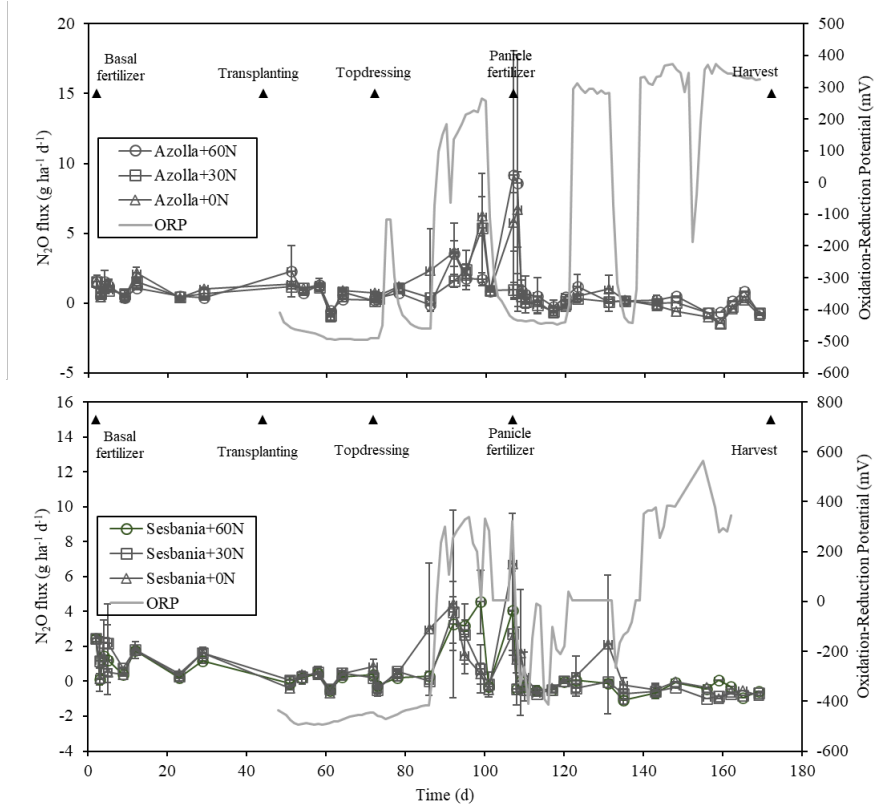
圖十一、第一年度一期稻作不同操作之氧化亞氮排放

Fig. 11. Nitrous oxide emissions under different operations during the 1st-year rice season.



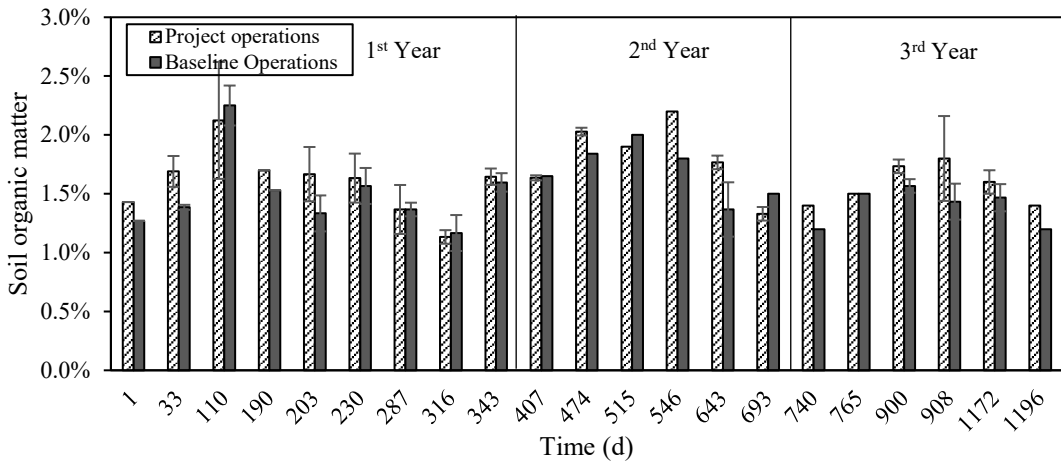
圖十二、第二年度一期稻作不同操作之氧化亞氮排放

Fig. 12. Nitrous oxide emissions under different operations during the 2nd-year rice season.



圖十三、第三年度一期稻作不同操作之氧化亞氮排放

Fig. 13. Nitrous oxide emissions under different operations during the 3rd-year rice season.



圖十四、不同操作之土壤有機質含量隨時間之變化

Fig. 14. Temporal changes in soil organic matter under different operations.

表七、各年度一期稻作不同處理之溫室氣體排放量

Table 7. Greenhouse gas emissions under different operations in the rice season.

	1 <sup>st</sup> year			2 <sup>nd</sup> year <sup>Z</sup>			3 <sup>rd</sup> year		
	CH <sub>4</sub>	N <sub>2</sub> O <sup>Z</sup>	GHG	CH <sub>4</sub>	N <sub>2</sub> O	GHG	CH <sub>4</sub>	N <sub>2</sub> O	GHG
			Mg			Mg			Mg
	kg ha <sup>-1</sup>	kg ha <sup>-1</sup>	CO <sub>2</sub> e ha <sup>-1</sup>	kg ha <sup>-1</sup>	kg ha <sup>-1</sup>	CO <sub>2</sub> e ha <sup>-1</sup>	kg ha <sup>-1</sup>	kg ha <sup>-1</sup>	CO <sub>2</sub> e ha <sup>-1</sup>
<i>Azolla</i> +60N	128.9±17.9	-0.08±0.04	3.6	51.0±29.8	-0.01±0.05	1.5	66.0±30.6	0.15±0.06	1.9
<i>Azolla</i> +30N	122.3±11.9	-0.04±0.04	3.4	44.9±15.0	-0.01±0.08	1.3	40.7±14.1	0.10±0.01	1.2
<i>Azolla</i> +0N	45.8±41.6	-0.01±0.00	2.7	31.7±14.3	0.08±0.10	1.1	23.4±21.5	0.10±0.00	0.7
<i>Sesbania</i> +60N	174.9±67.9	0.00±0.02	4.9	91.2±5.37	0.25±0.12	2.6	65.1±15.4	0.07±0.02	1.8
<i>Sesbania</i> +30N	167.6±35.4	0.06±0.04	4.7	80.1±57.7	0.85±0.84	2.5	43.7±19.5	0.06±0.01	1.2
<i>Sesbania</i> +0N	89.5±44.1	0.05±0.06	2.5	57.7±13.2	0.86±0.33	1.8	10.5±7.2	0.12±0.07	0.3

<sup>Z</sup>Differences between rice variety Tainan No. 16 (using *Azolla* as fallow green manure) and Kaohsiung No. 147 (using *Sesbania* as fallow green manure) in the second year

表八、各年度一期稻作減碳操作與基線操作(*Sesbania*+60N)相比之減碳效益

Table 8. Carbon reduction benefits of project operations compared with baseline (*Sesbania* + 60N) operations in the rice season.

	1 <sup>st</sup> year			2 <sup>nd</sup> year <sup>Z</sup>			3 <sup>rd</sup> year					
	CH <sub>4</sub>	N <sub>2</sub> O <sup>Z</sup>	GHG	CH <sub>4</sub>	N <sub>2</sub> O	GHG	CH <sub>4</sub>	N <sub>2</sub> O	GHG			
			Mg			Mg			Mg			
	kg ha <sup>-1</sup>	kg ha <sup>-1</sup>	CO <sub>2</sub> e %	kg ha <sup>-1</sup>	kg ha <sup>-1</sup>	CO <sub>2</sub> e %	kg ha <sup>-1</sup>	kg ha <sup>-1</sup>	CO <sub>2</sub> e %			
			ha <sup>-1</sup>			ha <sup>-1</sup>			ha <sup>-1</sup>			
<i>Azolla</i> +60N	-19.0	-0.08	-1.3	-26.5	-40.2	-0.26	-1.1	-42.3	0.9	0.08	0.1	5.6
<i>Azolla</i> +30N	-52.6	-0.04	-1.5	-30.6	-46.3	-0.26	-1.3	-50.0	-24.4	0.03	-0.6	-33.3
<i>Azolla</i> +0N	-129.1	-0.01	-2.2	-44.9	-59.5	-0.17	-1.5	-57.7	-41.7	0.03	-1.1	-61.1

<sup>Z</sup>Differences between rice variety Tainan No. 16 (using *Azolla* as fallow green manure) and Kaohsiung No. 147 (using *Sesbania* as fallow green manure) in the second year

表九、各年度一期稻作產量

Table 9. Grain yield of the first rice crop

	<i>Azolla</i> +60N	<i>Azolla</i> +30N	<i>Azolla</i> +0N	<i>Sesbania</i> +60N	<i>Sesbania</i> +30N	<i>Sesbania</i> +0N
	kg ha <sup>-1</sup>					
1 <sup>st</sup> year	7874±753 b*	8358±599 ab	8992±282 a	8117±402 b	7871±291 b	8100±565 b
2 <sup>nd</sup> year <sup>Z</sup>	6262±213 c	6487±742 c	5257±757 d	6746±550 bc	7321±542 ab	7995±242 a
3 <sup>rd</sup> year	7983±650 ab	7892±308 ab	7216±493 bc	6250±1076 c	7752±1018 ab	8843±970 a

<sup>Z</sup>Differences between rice variety Tainan No. 16 (using *Azolla* as fallow green manure) and Kaohsiung No. 147 (using *Sesbania* as fallow green manure) in the second year

\* Values followed by different letters within a column (or row) are significantly different at (p<0.05) (or (p<0.01)) according to Least Significant Difference (LSD) test.

表十、第三年度一期稻作水稻品質分析-外表性狀

Table 10. Rice quality traits under different operations in the third-year rice season

	正常粒	白粉質粒	碎粒	被害粒	胴裂粒	異型粒
	%					
<i>Azolla</i> +60N	58.4±4.6 a*	14.4±1.8 b	20.2±2.6 a	0.2±0.1 a	6.8±2.1 a	0.0±0.0 a
<i>Azolla</i> +30N	54.4±2.7 a	19.5±1.1 a	19.5±3.1 a	0.3±0.1 a	6.4±0.7 a	0.0±0.0 a
<i>Azolla</i> +0N	52.1±3.1 a	19.1±1.1 a	21.7±1.8 a	0.2±0.1 a	6.9±0.7 a	0.0±0.0 a
<i>Sesbania</i> +60N	58.6±2.0 a	10.4±1.4 c	23.9±0.6 a	0.3±0.1 a	6.8±0.9 a	0.0±0.0 a
<i>Sesbania</i> +30N	59.4±5.1 a	14.3±3.0 b	20.3±3.2 a	0.3±0.1 a	5.7±0.2 a	0.0±0.0 a
<i>Sesbania</i> +0N	58.9±4.5 a	15.8±1.4 b	20.1±2.3 a	0.3±0.2 a	4.9±1.1 a	0.0±0.0 a

\* Values followed by different letters within a column (or row) are significantly different at  $(p<0.05)$  (or  $(p<0.01)$ ) according to Least Significant Difference (LSD) test.

表十一、第三年度一期稻作水稻品質分析

Table 11. Rice quality parameters under different operations in the third-year rice season

	食味	蛋白質	水分	直鏈澱粉
		%	%	%
<i>Azolla</i> +60N	78.0±2.6 a	5.4±0.5 c	14.6±0.3 a	18.6±0.3 a
<i>Azolla</i> +30N	77.7±0.6 ab	5.4±0.1 c	14.6±0.1 a	18.8±0.1 a
<i>Azolla</i> +0N	79.7±1.5 a	5.1±0.3 c	14.6±0.4 a	18.3±0.3 a
<i>Sesbania</i> +60N	71.7±1.5 c	6.6±0.3 b	14.4±0.2 a	19.0±0.2 a
<i>Sesbania</i> +30N	75.3±1.2 b	5.9±0.2 b	14.3±0.3 a	18.9±0.3 a
<i>Sesbania</i> +0N	75.3±1.5 b	5.9±0.3 a	14.4±0.1 a	18.8±0.5 a

\* Values followed by different letters within a column (or row) are significantly different at  $(p<0.05)$  (or  $(p<0.01)$ ) according to Least Significant Difference (LSD) test.

## 結 論

本研究自民國 111 年起至 114 年進行以滿江紅取代田菁作為宜蘭休耕綠肥之減碳效益評估，結果顯示，宜蘭休耕基線操作模式—栽培田菁作為綠肥後翻耕入田並立即湛水，會造成大量溫室氣體排放；而以滿江紅取代田菁作為休耕綠肥可減少  $1.7\text{-}30.0 \text{ Mg ha}^{-1}$  二氧化碳當量排放，相當於可減少基線排放之  $8.9\text{-}61.4\%$ ；若搭配稻草分解菌使用，則可減少  $3.7\text{-}40.2 \text{ Mg ha}^{-1}$  二氧化碳當量排放，相當於可減少基線排放之  $19.5\text{-}82.2\%$ 。並且休耕期栽培滿江紅不會於一期稻作期間有明顯甲烷排放；而與一期稻作施用  $60 \text{ kg}$  氨基肥之處理相比，施用  $30 \text{ kg}$  氨基肥之處理可減少甲烷排放，並且維持水稻產量，證實滿江紅具有綠肥效益。

對於土壤碳匯影響，因田菁及滿江紅翻耕後容易分解而作為綠肥用途，目前經全年度操作後，兩種操作模式之土壤有機質含量無顯著差異，指出與基線操作相比，減碳操作短期內並不會對土壤有機質含量造成影響。

本研究三年之調查，顯示以滿江紅取代田菁作為宜蘭休耕綠肥具有減碳效益，並可維持水稻產量，同時亦監測土壤有機質含量變化，以評估此減碳操作對土壤碳匯之影響。本研究成果可提供建立宜蘭休耕基線及減碳操作之排放係數參考，以利後續申請我國自願減量專案等相關計算使用。

## 致 謝

本研究承蒙本場杜前場長麗華、楊場長大吉、宣副場長大平、邱研究員淑媛及陳分場長季呈之指導與指正，及試驗期間承本場鄒宇杰先生、盧伯諺先生、張瑞霞小姐、謝德蘭小姐、林春蘭小姐、邱垂龍先生、陳文昇先生及楊豫花小姐的協助，謹此申謝。

## 參考文獻

1. 李祿豐 1999 氣象因素對宜蘭地區水稻產量之影響 花蓮區研究彙報 17 : 93-102。
2. 經濟部產發署 2025 114 年經濟部產業發展署 iPAS 低碳化精修班公版教材(114 年 1 月版) 產業節能減碳資訊網。 [https://ghg.tgpf.org.tw/CVData/CVData\\_more?id=a69e3f7686054dfabffd8e7c3b8c95fd](https://ghg.tgpf.org.tw/CVData/CVData_more?id=a69e3f7686054dfabffd8e7c3b8c95fd)
3. Adhya, T.K., K. Bharati, S.R. Mohanty, B. Ramakrishnan, V.R. Rao, N. Sethunathan and R. Wassmann 2000 Methane emission from rice fields at Cuttack, India. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 58(1-3):95-105.
4. Ali, M.A., P.J. Kim and K. Inubushi 2015 Mitigating yield-scaled greenhouse gas emissions through combined application of soil amendments: A comparative study between temperate and subtropical rice paddy soils. *Science of the Total Environment* 529:140-148.
5. Chen, G.X., G.H. Huang, B. Huang, K.W. Yu, J. Wu and H. Xu 1997 Nitrous oxide and methane emissions from soil-plant systems. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 49(1-3):41-45.
6. Chin, K.J., Lukow, T., Conrad, R. 1999. Effect of temperature on structure and function of the methanogenic archaeal community in an anoxic rice field soil. *Applied and Environmental Microbiology* 65(6):2,341-2,349.
7. Fatma, Y.S., I. Rusmana and A.T. Wahyudi 2021. Community structure of total bacteria and methane emission-related prokaryotes in the rice fields applied with urea and biofertilizer. *Asian Journal of Agriculture and Biology* 2021(02).
8. Fey, A., Conrad, R. 2000. Effect of temperature on carbon and electron flow and on the archaeal community in methanogenic rice field soil. *Applied and Environmental Microbiology* 66(11):4,790-4,797.
9. Humphreys, J., K.R. Brye, C. Rector and E.E. Gbur 2019 Methane emissions from rice across a soil organic matter gradient in Alfisols of Arkansas, USA. *Geoderma Regional* 16: e00200.
10. Ji, C., J. Wang, C. Xu, Y. Gu, J. Yuan, D. Liang, L. Wang, Y. Ning, J. Zhou and Y. Zhang 2024 Amendment of straw with decomposing inoculants benefits the ecosystem carbon budget and carbon footprint in a subtropical wheat cropping field. *Sci Total Environ* 923:171,419.
11. Kimani, S.M., W.G. Cheng, T. Kanno, T. Nguyen-Sy, R. Abe, A.Z. Oo, K. Tawaraya and S. Sudo 2018 *Azolla* cover significantly decreased CH<sub>4</sub> but not N<sub>2</sub>O emissions from flooding rice paddy to atmosphere. *Soil Science and Plant Nutrition* 64(1):68-76.
12. Lauren, J.G. 1994. Isotopic Studies of *Azolla* and Nitrogen Fertilization of Rice. *Journal of Environmental Quality* 23(5):1,121-1,122.
13. Le Mer, J. and P. Roger 2001 Production, oxidation, emission and consumption of methane by soils: A review. *European Journal of Soil Biology* 37(1):25-50.
14. Losada, J.M., J.M. G. Hol, C. Rappoldt and J. Dolfing 2007 Precise soil management as a tool to reduce CH<sub>4</sub> and N<sub>2</sub>O emissions from agricultural soils.
15. Ma, Y., C. Tong, W. Wang and C. Zeng 2012 Effect of *Azolla* on CH<sub>4</sub> and N<sub>2</sub>O emissions in Fuzhou Plain paddy fields. *Zhongguo Shengtai Nongye Xuebao / Chinese Journal of Eco-Agriculture* 20(6):723-727.
16. Malyan, S.K., A. Bhatia, S.S. Kumar, R.K. Fagodiya, A. Pugazhendhi and P. A. Duc 2019 Mitigation of greenhouse gas intensity by supplementing with *Azolla* and moderating the dose of nitrogen fertilizer. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology* 20:101,266.

17. Malyan, S.K., A. Bhatia, R. Tomer, R.C. Harit, N. Jain, A. Bhowmik and R. Kaushik 2021 Mitigation of yield-scaled greenhouse gas emissions from irrigated rice through *Azolla*, Blue-green algae, and plant growth-promoting bacteria. *Environmental Science and Pollution Research* 28(37):51,425-51,439.
18. Oertel, C., J. Matschullat, K. Zurba, F. Zimmermann and S. Erasmi 2016 Greenhouse gas emissions from soils-A review. *Geochemistry* 76(3):327-352.
19. van der Gon, H.A.C.D. and H. U. Neue 1995 Influence of organic matter incorporation on the methane emission from a wetland rice field. *Global Biogeochemical Cycles* 9(1):11-22.
20. van der Steen, N.P., P. Nakiboneka, L. Mangalika, A.V.M. Ferrer and H.J. Gijzen 2003 Effect of duckweed cover on greenhouse gas emissions and odour release from waste stabilisation ponds. *Water Science and Technology* 48(2):341-348.
21. Vlek, P.L.G., M.Y. Diakite and H. Mueller 1996 The role of *Azolla* in curbing ammonia volatilization from flooded rice systems. *Nitrogen Economy in Tropical Soils: Proceedings of the International Symposium on Nitrogen Economy in Tropical Soils, held in Trinidad, W.I., January 9-14, 1994*. N. Ahmad. Dordrecht, Springer Netherlands: 165-174.
22. Wang, Y., Z. Hu, B. Gu, J. Xing, X. Hu and Y. Xu 2024 Reduced nitrogen fertilizer application mitigated CH<sub>4</sub> fluxes from rice paddies under an elevated CO<sub>2</sub> concentration. *Journal of Soils and Sediments* 24(8):3,028-3,040.
23. Xu, H.S., B. Zhu, J.N. Liu, D.Y. Li, Y.D. Yang, K. Zhang, Y. Jiang, Y.G. Hu and Z.H. Zeng 2017 *Azolla* planting reduces methane emission and nitrogen fertilizer application in double rice cropping system in southern China. *Agronomy for Sustainable Development* 37(4).
24. Yagi, K. and K. Minami 1990 Effect of organic matter application on methane emission from some Japanese paddy fields. *Soil Science and Plant Nutrition* 36(4):599-610.
25. Yang, Y., F. Yao, Y. Sun, Z. Yang, R. Li, G. Bai, W. Lin and H. Chen 2024 Appropriately Reduced Nitrogen and Increased Phosphorus in Ratoon Rice Increased the Yield and Reduced the Greenhouse Gas Emissions in Southeast China. *Plants* 13 DOI: 10.3390/plants13030438.
26. Ying, Z., P. Boeckx, G.X. Chen and O. Van Cleemput 2000 Influence of *Azolla* on CH<sub>4</sub> emission from rice fields. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 58(1-3):321-326.