利用深層施肥技術施用緩效性肥料對水稻產量及溫室氣體排放之影響

張繼中[1]、黃文益[2]、林資哲[3]

[1]農業部臺東區農業改良場作物環境科　副研究員
[2]農業部臺東區農業改良場作物環境科　助理研究員
[3]國立屏東科技大學農園生產系　助理教授

摘　要

利用深層施肥技術施用緩效性肥料2023年1期作及2期作每公頃分別可節省55.7公斤及62.9公斤的三要素用量，每公頃分別可增加15,120元及5,940元之收益，如列入肥料施用及施作成本，每公頃分別增加14,410元及5,410元之粗收益。對溫室氣體排放之影響，2023年1期作及2期作對照組的氧化亞氮排放量分別為每公頃22.7及48.2公斤，而深施緩效性肥料處理組分別為每公頃20.7及2.4公斤，如以全球暖化潛勢(global warming potential，GWP)計算，對照組的GWP分別為每公頃6.1及15.5公噸二氧化碳當量，而深施緩效性肥料處理組分別為每公頃5.8及4.7公噸二氧化碳當量。不論是1期作或2期作，對照組的全球暖化潛勢高於深施緩效性肥料處理，研究結果顯示利用深層施肥技術施用緩效性肥料，可減少溫室氣體排放，有助於達到淨零排放的目標。

一、前言

目前水稻田施肥以撒施方式為主，將硫酸銨或複合肥料撒施於水田中，肥料留存於土壤表面，易氧化及流失，肥料利用效率低，不僅浪費肥料，更有環境污染之虞；且追肥施用時，田區為湛水狀態，行走困難[(2)]。農友一般使用之化學肥料持續性差，較不能配合作物於生長過程中的養分吸收，如施用不當，亦容易有肥傷、污染水質等問題[(10,12)]。肥料管理不當，在傳統慣行農業操作中，將導致農民損失利潤、對環境造成潛在破壞以及無法有效利用能源[(9)]。而緩效性肥溶解度低，可長期提供漸進的養分供給，提高肥料的養分吸收效率，減少淋失損失[(4,14)]。過去的二十年

裡，已經開發和測試了幾種類型的緩釋肥料來解決這些問題[11]。緩效性肥料以往因價格過高，農友不易接受，但近年來經多方研究及努力，不僅成本及售價降低，且養分釋出可配合作物生長所需，具備節省肥料施用成本及避免造成環境污染等優點[1]。

二、材料與方法

(一)供試品種：高雄139號。

(二)試驗地點：池上鄉錦富段0408-290號。

(三)試驗方法：處理1為施用緩效性肥料(緩效性肥料於水稻插秧時，利用插秧機附掛深層施肥裝置，將緩效性肥料埋入秧苗旁約6-10公分深度位置；追肥則以人工撒施方式進行，施肥量如表1)。處理2為對照組(基肥及追肥皆以人工撒施方式進行，施肥量如表1)。採簡單比較試驗。

(四) 1期作插秧日期為2023年2月10日，收穫期為2023年6月15日；2期作插秧日期為2023年7月20日，收穫期為2023年10月30日。

(五)土壤溫室氣體排放調查：以密閉罩法進行溫室氣體甲烷及氧化亞氮之監測。

(1)於田間設置40×60×120公分之壓克力箱，進行溫室氣體取樣及量測，每處理3個取樣點。

(2)每週於上午9點至12點間量測。

(3)第1期作於第0分鐘及第20分鐘取樣，以溫室氣體分析儀(GC-2030 NCCC1, Nexis)分析，第2期作於第0分鐘及第20分鐘直接以甲烷分析儀(GLA131-GGA, ABB)及氧化亞氮氣體分析儀(LI-7820, LI-COR)於田間量測分析。

(4)於生長季湛水期間至少每週量測2次，遇農事管理(灌溉、排水、氮肥施用)或天候事件(如大雨)，為了解上述農事及天候對溫室氣體排放之影響，量測頻率增加至每週3次。

(六)產量調查：於水稻試驗田前、後、左、右、中各處分別選取1處坪割，共分5處紀錄並估算單位面積產量。

表1. 深層施肥區及對照區每公頃肥料用量比較

Table 1. The comparison of fertilizer dosage per hectare between deep fertilization area and control Area

處理	肥料用量(公斤)	三要素總量(公斤)
深層施肥區	1 期作： 基肥： 300 公斤(15 包)之 17-7-10.1 緩效性料 穗肥： 100 公斤(2.5 包)之 16-8-12 之複合肥 2 期作： 基肥： 300 公斤(15 包)之 17-7-10.1 緩效性料 穗肥： 80 公斤(2 包)之 16-8-12 之複合肥	1 期作： 氮素：磷酐：氧化鉀 =67：29：42.3 合計：138.3 2 期作： 氮素：磷酐：氧化鉀 =63.8：27.4：39.9 合計：131.1
對照區	1 期作： 基肥及追肥： 400 公斤(10 包)之 20-5-10 複合肥 穗肥： 167 公斤(4 包)之 16-8-12 複合肥 2 期作： 同 1 期作	1 期作： 氮素：磷酐：氧化鉀 =104：32：58 合計：194 2 期作： 同 1 期作
處理比較	1 期作：-167/2 期作：-187	1 期作：-55.7/2 期作：-62.9

三、結果

(一)利用深層施肥技術施用緩效性肥料對水稻產量及收益之分析

本研究之深層施肥區2023年1期作及2期作因深層施肥處理之氮肥利用率較佳，因此穗肥用量也可減少，如換算成三要素，1期作及2期作每公頃分別可節省55.7公斤及62.9公斤的三要素用量(表1)。雖然氮肥用量減少，但從表2之分析結果顯示深層施肥區之產量略高於對照區，2023年1期作及2期作換算每公頃分別可增加15,120元及5,940元之收益(表2)，且食味值不受影響。

如以肥料施用及施作成本，每公頃分別可增加14,410元及5,410元之粗收益(表3)。由試驗結果，顯示利用深層施肥技術施用緩效性肥料可減少化學肥料用量，並增加水稻產量。

表2. 試區品質及產量調查及稻穀收益分析

Table 2. Survey on quality and yield of experimental field and analysis of rice profits

處理	期作	食味值	稻穀產量 (台斤/公頃)	稻穀收益 (元)
深層施肥區	1 期作	78	12,560	226,080
	2 期作	79	11,735	211,140
對照區	1 期作	75	11,722	210,960
	2 期作	74	11,400	205,200

註：池上鄉稻穀每百台斤價格為1,800元

表3. 2023年深層施肥區及對照區每公頃成本及收益差異比較

Table 3. The comparison of cost and benefit per hectare between the deep fertilization area and control area in 2023

處理	稻穀收益 (元)	肥料成本 (元)	施肥費用 (元)	粗收益 (元)
深層施肥區	1 期作： 226,080 2 期作： 211,140	1 期作： 基肥： 15 包*450=6,750 穗肥： 2.5 包*410 =1,025 合計：7,750 2 期作： 基肥： 15 包*450=6,750 穗肥： 2 包*410 =820 合計：7,570	1 期作： 基肥： 深層施肥費用為 3,000 元 (0 人次) 穗肥：1,500 元 (1 人次) 合計：4,500 元 2 期作： 同 1 期作	1 期作： 213,830 2 期作： 199,070
對照區	1 期作： 210,960 2 期作： 205,200	1 期作： 基肥： 10 包*390=3,900 穗肥： 4 包*410=1,640 合計：5,540 2 期作： 同 1 期作	1 期作： 基肥及追肥： 共施肥 3 次，每次 1,500 元 3*1,500元=4,500 元 (3 人次) 穗肥：1,500 元 (1 人次) 合計：6,000 元 2 期作： 同 1 期作	1 期作： 199,420 2 期作： 193,660

處理	稻穀收益 (元)	肥料成本 (元)	施肥費用 (元)	粗收益 (元)
處理比較	1 期作： +15,120	1 期作： +2,210	1 期作： -1,500(-3 人)	1 期作： +14,410
	2 期作： +5,940	2 期作： +2,030	2 期作： -1,500(-3 人)	2 期作： +5,410

註：1.17-7-10.1緩效性肥料每包450元，20-5-10複合肥料每包390元，16-8-12複合肥每包410元。
2.本調查未含秧苗、病蟲害防治及採收烘乾等費用

(二)利用深層施肥技術施用緩效性肥料對溫室氣體排放之分析

利用深層施肥技術施用緩效性肥料後，於田間進行溫室氣體甲烷及氧化亞氮量測。2023年各期作甲烷量測情形如圖1及圖2，量測結果顯示水稻栽培過程中有甲烷的排放，量測的數據進行通量計算，2023年各期作之甲烷排放量如表4，2023年1期作及2期作對照組的甲烷排放量分別為每公頃5.0及98.9公斤，而深施緩效性肥料處理組分別為每公頃11.8及146.4公斤，深層施肥區之排放量高於對照區。

2023年各期作氧化亞氮量測情形如圖3及圖4，量測結果顯示水稻栽培過程中有氧化亞氮的排放，其中對照組於施肥後，其氧化亞氮的排放有明顯上升的情形。量測數據進行通量計算2023年各期作之氧化亞氮的排放量如表4， 2023年各期作對照組的氧化亞氮排放量分別為每公頃22.7及48.2公斤，而深施緩效性肥料處理組分別為每公頃20.7及2.4公斤，深層施肥區之排放量低於對照區。

因甲烷及氧化亞氮為不同種類之溫室氣體，如以全球暖化潛勢(global warming potential，GWP)計算，也就是將不同溫室氣體和相同質量二氧化碳比較之下，造成全球暖化的相對能力，二氧化碳的全球暖化潛勢定義為1，甲烷及氧化亞氮分別為28及265，因此2023年各期作對照組的GWP分別為每公頃6.1及15.5公噸二氧化碳當量，而深施緩效性肥料處理組分別為每公頃5.8及4.7公噸二氧化碳當量(見表4)，不論是1期作或2期作，對照組的全球暖化潛勢高於深施緩效性肥料處理，其主要原因即為因深施緩效性肥料之氧化亞氮的排放量低於對照組，而氧化亞氮造成全球暖化潛勢的能力高於甲烷，故深施緩效性肥料之GWP較對照組低。

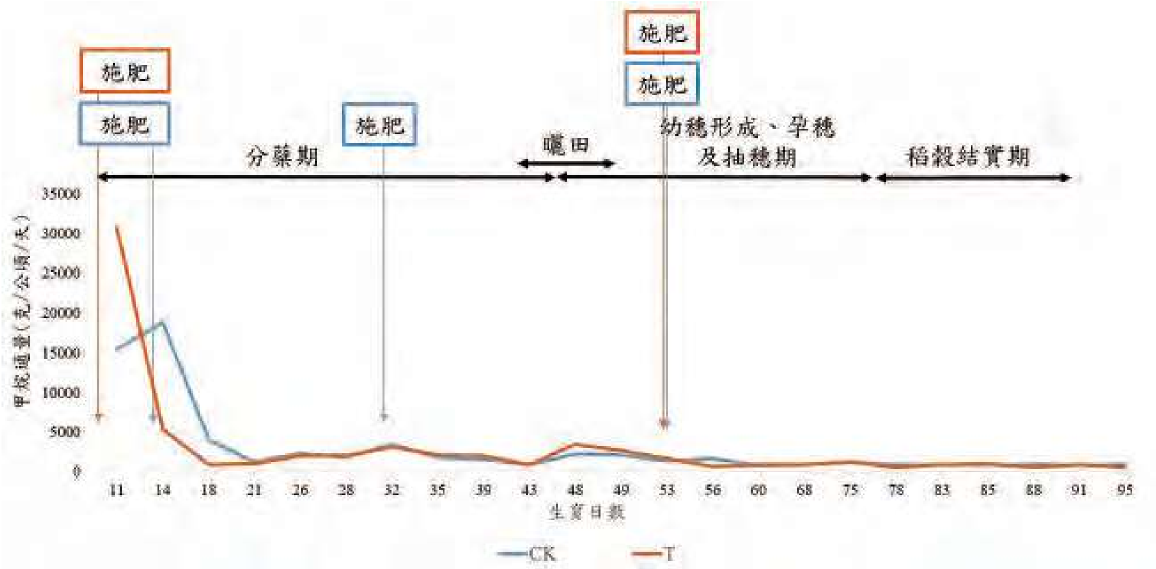

圖1. 臺東縣池上鄉試區2023年1期作甲烷量測結果
註：藍色為對照區(CK)，橘色為深層施肥區(T)
Fig. 1. The methane measurement results of 1st crop of 2023 in Chishang Township of Taitung County

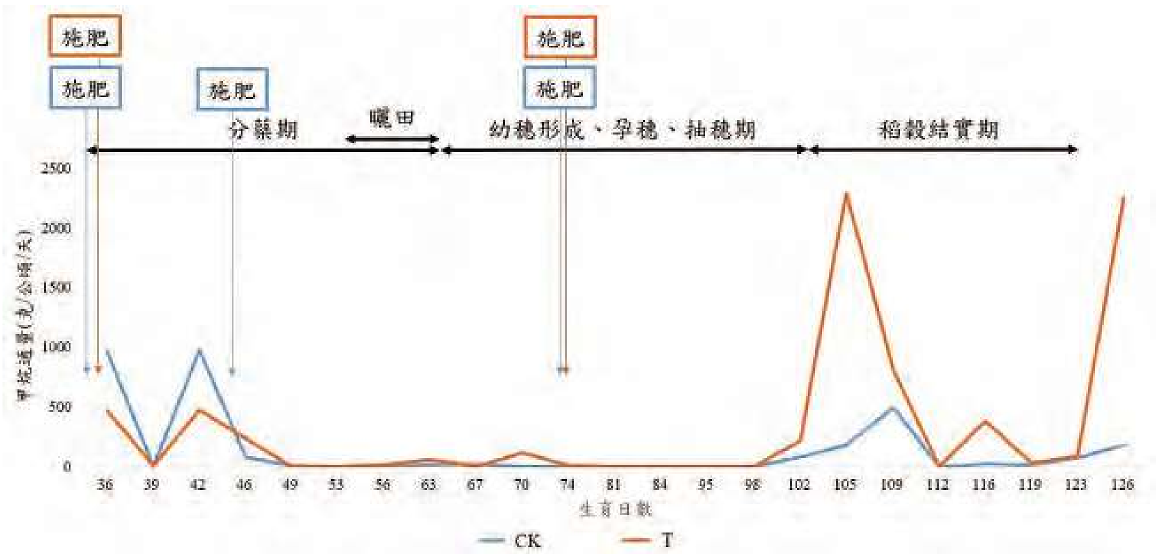

圖2. 臺東縣池上鄉試區2023年2期作甲烷量測結果
註：藍色為對照區(CK)，橘色為深層施肥(T)
Fig. 2. The methane measurement results of 2nd crop of 2023 in Chishang Township of Taitung County

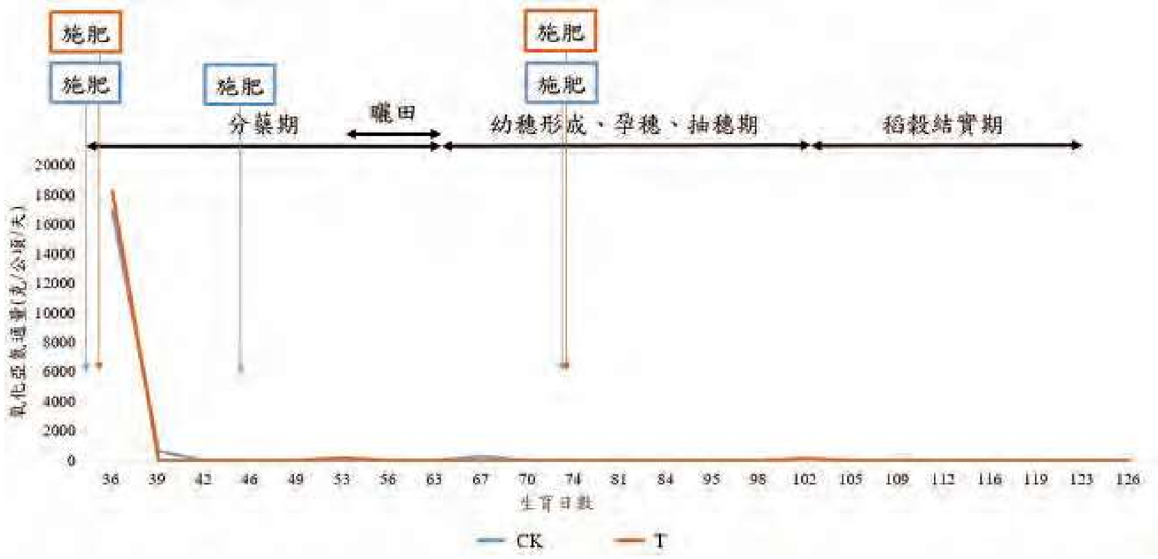

圖3. 臺東縣池上鄉試區2023年1期作氧化亞氮量測結果

註：藍色為對照區(CK)，橘色為深層施肥(T)

Fig. 2. The methane measurement results of 1st crop of 2023 in Chishang Township of Taitung County

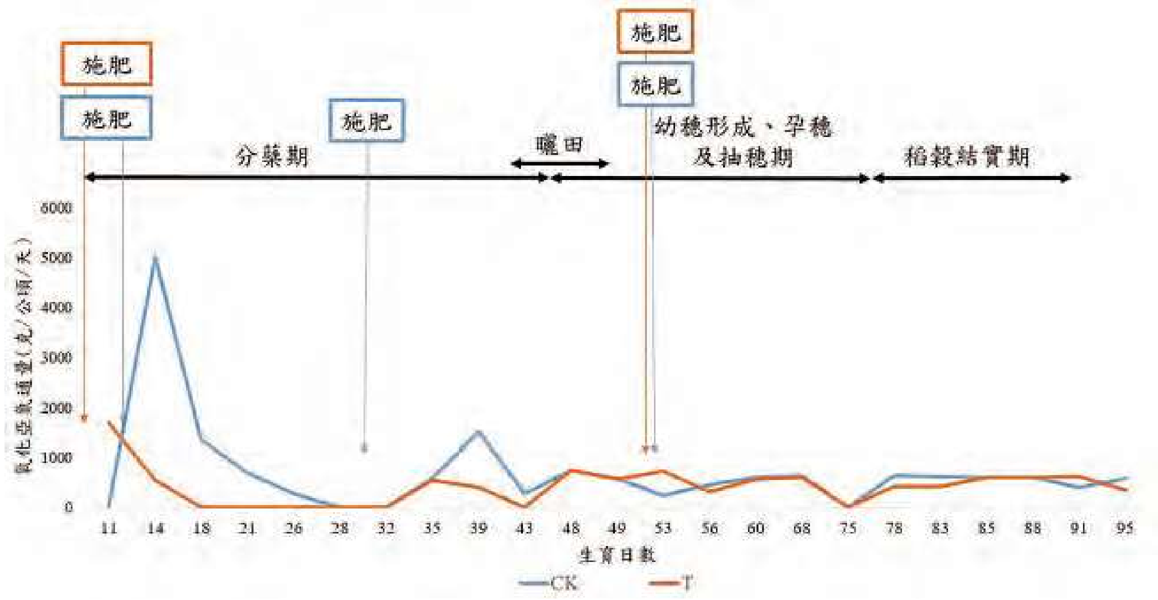

圖4. 臺東縣池上鄉試區2023年2期作氧化亞氮量測結果

註：藍色為對照區(CK)，橘色為深層施肥(T)

Fig. 4. The nitrous oxide measurement results of 2nd crop of 2023 in Chishang Township of Taitung County

表4. 臺東縣池上鄉試區甲烷排放量、氧化亞氮排放量及全球暖化潛勢
Table 4. The experimental plot of methane and nitrous oxide emissions and global warming potential in Chishang Township of Taitung County

處理	甲烷 (公斤/公頃)		氧化亞氮 (公斤/公頃)		全球暖化潛勢 (公噸二氧化碳當量/公頃)	
	第 1 期作	第 2 期作	第 1 期作	第 2 期作	第 1 期作	第 2 期作
深層施肥區	11.8 a	146.4 a	20.7 a	2.4 a	5.8 a	4.7 a
對照區	5.0 a	98.9 b	22.7 a	48.2 b	6.1 a	15.5 b

四、討論

深層施肥區施用緩效性肥料，每公頃可節省55.7公斤的三要素用量(見表1)，此結果與張等(2015)之研究結果相似，該文獻結果顯示以深層施肥技術施用一般化學複合肥料及單質氮肥，亦可減少三要素用量[(2)]，Hang *et al*. (2014)、Huda *et al*.(2016)及Liu *et al*.(2015)等研究告指出深層施肥之所以可減少化學肥料用量，是因為深層施肥可減少化學肥料的流失並提升肥料利用效率，因此三要素用量可較傳統撒施化學肥料減少[(5,6,8)]，而本研究深層施肥區的三要素用量的確較對照組有減少的情形。

此外，Bandaogo *et al*.(2015)及Liu *et al*.(2015)之研究結果顯示深層施肥可增加水稻產量[(3,8)]，而本研究亦有相同的結果，雖然化學肥料用量減少，但深層施肥區之產量略高於對照區，此結果與文獻研究結果相似，但文獻較少調查對成本及收益之影響，本研究顯示深層施肥技術亦可增加水稻收益。

本研究利用深層施肥技術施用緩效性肥料後，量測田間溫室氣體甲烷及氧化亞氮的排放，深層施肥區的氧化亞氮排放量則較對照區有減少的情形，此與Li *et al*.(2021)及Rychel *et al.* 的結果相同，Li *et al*.(2021)之研究結果顯示種植水稻時，採用深層施肥方式可減少氧化亞氮的排放[(7)]，而Rychel *et al*.(2020)之研究結果亦顯示種植小麥時，如採用深層施肥方式亦可減少氧化亞氮的排放[(13)]。

深層施肥之所以會減少氧化亞氮的排放，Venterea和Stanenas(2008)

的研究指出氧化亞氮的產生主要發生在土壤表面附近，因為土壤表層微生物硝化作用和反硝化作用高於土壤深層[15]，因此傳統撒施氮肥於土壤表面，較深層施肥處理會有較高的氧化亞氮的排放。雖然深層施肥區氧化亞氮排放量較對照組少，但本研究之深層施肥區甲烷排放量較對照組高，此與Li *et al*. (2021)的結果不同，該文獻指出種植水稻時，深層施肥處理的甲烷排放量較傳統施肥方式低[7]，因本研究為1年2期作之研究結果，仍待更多的分析資料驗證。

不論甲烷排放量減少或是增加，因氧化亞氮的全球暖化潛勢為甲烷的9倍，因此如以全球暖化潛勢表示，深層施肥處理之全球暖化潛勢，較對照區低，而此結果亦與Li *et al*.(2021)相同[7]，顯示深層施肥的方式，的確可減少溫室氣體排放。

五、結論

慣行水稻田施肥方式以撒施化學肥料為主，以此方式施肥，由於水田在湛水情形易流失，肥料利用效率低，不僅浪費肥料，且有導致土壤惡化之虞；此外，追肥施用亦需施肥人力。插秧機附掛深層施肥裝置，可將緩效性肥料埋入秧苗旁約6-10公分深度位置，可節省化學肥料用量，雖然化學肥料用量減少，但深層施肥區之產量略高於對照區，因此農友如採行深層施肥技術施用緩效性肥料，不只可減少化學肥料用量，亦可降低施肥之人力需求，且產量亦高於慣行施肥方式，可提升農友之收益。對溫室氣體排放之影響，由於化學肥料減少施用，所以深層施肥技術用緩效性肥料，其氧化亞氮排放量低於慣行施肥方式，如以GWP計算，對照組的GWP高於深施緩效性肥料處理。由本研究結果顯示，利用深層施肥技術施用緩效性肥料不僅可提升產量及增加收益，亦可減少溫室氣體排放，有助於達到淨零排放的目標。

致　謝

承蒙國立屏東科技大學林資哲助理教授協助2023年第1期作之甲烷及氧化亞氮量測，使本試驗順利完成，謹此誌謝。

參考文獻

1. 江景村、楊光盛。1981。緩效性肥料Slow-release fertilizers(Review)。臺灣糖業研究所研究彙報69:19-30。
2. 張繼中、廖勁穎、黃文益。2015。水稻田深層施肥技術之介紹。臺東區農業專訊 96:18-20。
3. Bandaogo, A., F. Bidjokazo, S. Youl, E. Safo, R. Abaidoo, and O. Andrews. 2015. Effect of fertilizer deep placement with urea supergranule on nitrogen use efficiency of irrigated rice in Sourou Valley (Burkina Faso), Nutr. Cycl. Agroecosyst. 102:79–89.
4. Escobar, R. F., M. Benlloch, E. Herrera, and J.M.G. Novelo. 2004. Effect of traditional and slow-release N fertilizers on growth of olive nursery plants and N losses by leaching. Scientia horticulturae, 101:39–49.
5. Hang, X., X. Zhang, C. Song, Y. Jiang, A. Deng, R. He, M. Lu, and W. Zhang.2014. Differences in rice yield and CH4 and N2O emissions among mechanical planting methods with straw incorporation in Jianghuai area, China, Soil Tillage Res. 144:205–210.
6. Huda, A., Y. Gaihre, M. Islam, U. Singh, M. Islam, J. Sanabria, M. Satter, H. Afroz, A. Halder, and M. Jahiruddin. 2016. Floodwater ammonium, nitrogen use efficiency and rice yields with fertilizer deep placement and alternate wetting and drying under triple rice cropping systems, Nutr. Cycl. Agroecosyst. 104:53–66
7. Li, L., H. Tian, M. Zhang, P. Fan, U. Ashraf, H. Liu, X. Chen, M. Duan, X. Tang, Z. Wang , Z. Zhang, and S. Pan. 2021. Deep placement of nitrogen fertilizer increases rice yield and nitrogen use efficiency with fewer greenhouse gas emissions in a mechanical direct-seeded cropping system. The Crop J.9:1386-1396.
8. Liu, T., D. Fan, X. Zhang, J. Chen, C. Li, and C. Cao. 2015. Deep placement of nitrogen fertilizer reduces ammonia volatilization and increases nitrogen

utilization efficiency in no-tillage paddy fields in central China, Field Crops Res. 184:80–90.

9. Mortain, L., I. Dez, and P.J., Madec. 2004. Development of new composites materials, carriers of active agents from biodegradable polymers and wood. Comptes Rendes Chimie 7:635–640.
10. Nelson, D. W. and T. J. Logan. 1983. Chemical processes and transport of phosphorous. In F. W. Schalter & G. W. Bailey(Eds.), Agricultural management and water quality. Iowa State University Press:65.
11. Notario, J. S., I.J.A.Pardon, M.M.G. Martin, and J.E.G. Hernandez. 1995. Phosphorus and potassium release from phillipsite-basedslowrelease fertilizers. Journal of Controlled Release, 34:25–29.
12. Rao, C. S. 1991. Environmental pollution control engineering. NY: Wiley:302.
13. Rychel, K., K. Meurer, G. Borjesson, M. Stromgren, G. Getahun, H. Kirchmann, and T. Katterer. 2020. Deep N fertilizer placement mitigated N2O emission in a Swedish field trial with cereals, Nutr. Cycl. Agroecosyst. 18:133–148.
14. Trenkel, M. E. 1997. Improving fertilizer use efficiencycontrolled-release and stabilized fertilizer in agriculture. IFA:Paris:13.
15. Venterea, R.T. and A.J. Stanenas. 2008. Profile analysis and modeling of reduced tillage effects on soil nitrous oxide flux, J. Environ. Qual. 37:1360–1367.

Effects of Applying Slow-release Fertilizers by Deep Fertilization Technology on Rice Yield and Greenhouse Gas Emissions

Chi-Chung Chang[1], Wen-Yi Huang[2], and Tzu-Che Lin[3]

[1]Associate Researcher of Crop Environment Department of Taitung DARES, MOA.
[2]Assistant Researcher of Crop Environment Department of Taitung DARES, MOA.
[3]Assistant Professor of Department of Plant Industry of NPUST

Abstract

The research results showed that 55.7 kilograms of the N-P-K can be saved per hectare in 1st crop of 2023 and 62.9 kilograms of the N-P-K in 2nd crop of 2023 by a deep fertilization device is attached to the transplanter to apply slow-release fertilizer is buried at a depth of about 6-10 centimeters next to the seedlings. Although the amount of chemical fertilizers was reduced, however, the yield in the deep fertilization area was slightly higher than that in the control area. The conversion can increase the income by 15,120 NTD and 5,760 NTD per hectare respectively. If the cost of fertilizer application is included, the crude income can be increased by 14,410 NTD and 5,410 NTD per hectare respectively. Regarding the impact on greenhouse gas emissions, the nitrous oxide emissions of the control groups in the 1st and 2nd crops of 2023 were 22.7 and 48.2 kg/ha respectively, while the deep application of slow-release fertilizer treatment were 20.7 and 2.4 kg/ha respectively. If calculated based on global warming potential (GWP), the GWP of the control group were 6.1 and 15.5 metric tons of carbon dioxide equivalent/hectare respectively, while the deep application of slow-release fertilizer treatment were 5.8 and 4.7 metric tons of carbon dioxide equivalent/hectare respectively. Whether it was stage 1st or 2nd crops, the global warming potential of the control was higher than that of the deep application of slow-acting fertilizers. The research results showed that the use of deep fertilization technology to apply slow-acting fertilizers, which reduce greenhouse gas emissions and help to reach net-zero emissions targets.