

周美春, 周建江, 王圣燕, 等. 等碳投入三种有机物料对稻田土壤有机碳组分和温室气体排放的影响[J]. 江苏农业学报, 2025, 41(6):1124-1135.

doi:10.3969/j.issn.1000-4440.2025.06.009

等碳投入三种有机物料对稻田土壤有机碳组分和温室气体排放的影响

周美春¹, 周建江², 王圣燕¹, 赵燕¹, 王明玉³, 赵远³

(1.常州环保服务有限公司,江苏常州 213164; 2.江苏中吴环保产业发展有限公司,江苏常州 213003; 3.常州大学环境科学与工程学院,江苏常州 213100)

摘要: 本研究旨在探究水稻秸秆、生物炭和有机肥 3 种有机物料等碳投入对稻田土壤有机碳组分和温室气体排放的影响。以单季稻种植系统为研究对象,等碳施入有机物料,结合三维荧光光谱技术,考察稻田温室气体排放、土壤有机碳含量、可溶性有机质(DOM)荧光组分以及微生物量碳的响应规律。与对照(单施氮磷钾肥)相比,有机肥处理(氮磷钾肥配施有机肥)显著提高了水稻产量。施用有机物料处理下的土壤溶解性有机碳含量均显著高于对照($P < 0.05$);有机肥处理降低了土壤微生物量碳含量。有机物料的投入影响了土壤 DOM 的组成和特性,导致土壤腐殖化水平降低,增加了可溶性微生物副产物与芳香蛋白类 II 物质。3 种有机物料的等碳投入对温室气体排放的影响不同,其中有机肥处理显著增加了全球增温潜势(GWP),较对照提高 40.97% ($P < 0.05$),而生物炭处理显著降低了土壤的 GWP 和温室气体排放强度(GHGI) ($P < 0.05$),分别降低了 29.86% 和 39.13%,水稻秸秆处理对 GWP 和 GHGI 无显著影响($P > 0.05$)。相关性分析结果表明,土壤溶解性有机碳含量与 N_2O 累积排放量、 CO_2 累积排放量之间呈显著负相关($P < 0.05$), N_2O 累积排放量与荧光指数和芳香蛋白类 I 荧光区域积分呈显著正相关($P < 0.05$),相反,芳香蛋白类 II 荧光区域积分和可溶性微生物副产物荧光区域积分均与 N_2O 累积排放量呈极显著负相关($P < 0.001$);芳香蛋白类 II 荧光区域积分与 CO_2 累积排放量呈显著负相关($P < 0.05$)。综上,等碳投入有机物料改变了土壤有机碳含量及溶解性有机质组分,从而影响温室气体的排放。

关键词: 有机物料; 水稻; 温室气体; 土壤有机碳; 全球增温潜势; 温室气体排放强度

中图分类号: S19 文献标识码: A 文章编号: 1000-4440(2025)06-1124-12

Effects of equal carbon input of three organic materials on paddy soil organic carbon fractions and greenhouse gas emissions

ZHOU Meichun¹, ZHOU Jianjiang², WANG Shengyan¹, ZHAO Yan¹, WANG Mingyu³, ZHAO Yuan³

(1.Changzhou Environmental Protection Service Co., Ltd., Changzhou 213164, China; 2.Jiangsu Zhongwu Environmental Protection Industry Development Co., Ltd., Changzhou 213003, China; 3.School of Environmental Science and Engineering, Changzhou University, Changzhou 213100, China)

Abstract: This study aims to investigate the effects of equal carbon input of three organic materials (rice straw, biochar, and organic fertilizer) on soil organic carbon fractions and greenhouse gas emissions in paddy fields. Taking the single-season rice planting system as the research object, and applying organic materials on an equal carbon basis, this

收稿日期:2024-06-21

基金项目:国家自然科学基金项目(42477005)

作者简介:周美春(1985-),女,江西高安人,硕士,正高级工程师,主要从事土壤污染修复技术研究。(E-mail)zhoumc@czeri.com

study investigated the response patterns of greenhouse gas emissions, soil organic carbon content, dissolved organic matter (DOM) fluorescence components, and microbial biomass carbon in paddy fields, with the aid of three-dimensional fluorescence spectroscopy technology. The application of organic fertilizer significantly increased the yield

of rice. The application of organic materials significantly increased the soil dissolved organic carbon content compared with the control ($P < 0.05$). However, the application of organic fertilizer reduced the soil microbial biomass carbon content. The application of organic materials affected the composition and properties of soil dissolved organic matter, resulting in a decrease in the level of humification and an increase in soluble microbial by-products and aromatic protein type II substances. The application of the three types of organic materials had different impacts on greenhouse gas emissions. Specifically, the application of organic fertilizer significantly increased the global warming potential (GWP), which was 40.97% higher than that of the control ($P < 0.05$). In contrast, the application of biochar significantly reduced the soil GWP and greenhouse gas intensity ($GHGI$) ($P < 0.05$), with reductions of 29.86% and 39.13%, respectively. The rice straw application had no significant effect on GWP and $GHGI$ ($P > 0.05$). The results of the correlation analysis showed that the soil dissolved organic carbon content was significantly negatively correlated with the cumulative emissions of N_2O and CO_2 ($P < 0.05$). The cumulative emissions of N_2O were significantly positively correlated with the fluorescence index and the integral of the aromatic protein I fluorescence region ($P < 0.05$). In contrast, the integrals of the fluorescence regions for aromatic protein II and soluble microbial by-products were both significantly negatively correlated with the cumulative emissions of N_2O ($P < 0.001$). The integral of the fluorescence region for aromatic protein II was also significantly negatively correlated with the cumulative emissions of CO_2 ($P < 0.05$). In summary, the application of organic materials on an equal carbon basis altered the soil organic carbon content and the composition of dissolved organic matter, thereby influencing the emissions of greenhouse gases.

Key words: organic materials; rice; greenhouse gases; soil organic carbon; global warming potential; greenhouse gas intensity

《巴黎协定》呼吁各国根据自身国情制定和实施温室气体减排目标,通过国际合作逐步提高减排力度^[1]。农业生态系统是全球人为温室气体排放的重要来源,其温室气体排放量占全球温室气体排放总量的10%~14%^[2]。水稻是重要的谷类作物,中国的水稻产量约占全球水稻产量的29%^[3]。然而,稻田过量施用氮肥导致土壤矿化速度加快,农田温室气体排放量逐年增加,这也导致了土壤有机碳库储量的下降^[4]。因此,为了确保人类粮食安全,并减缓全球气候变化,发展可持续农业已迫在眉睫。

已有研究表明,秸秆、生物炭和有机肥等有机物料的施用会影响农业土壤的理化性质、土壤固碳能力和温室气体排放^[5-7]。例如,Xue等^[8]的研究结果表明,秸秆施入后土壤有机碳含量和作物产量都会有所增加,而Gregorich等^[9]发现激发效应会导致土壤有机碳含量减少。此外,施用不同种类的有机物料对温室气体排放的影响在不同研究中存在差异。在稻田生态系统中,秸秆还田可能会通过影响土壤肥力和土壤微生物的营养供应促进或抑制甲烷(CH_4)的排放^[10]。生物炭的应用可能会降低土壤微生物的活性,从而减少温室气体的排放^[11]。施用有机肥会影响土壤生化条件,影响土壤硝化或反硝化作用,从而导致温室气体排放增加或减少^[12]。

稻田土壤有机碳组分与温室气体的产生关系密

切,施用有机物料可以通过输入碳源和影响稻田土壤有机碳组分转化,进而影响温室气体的产生^[13]。土壤活性有机碳(包括溶解性有机碳和微生物量碳)是微生物增殖的可利用底物,这种可利用性有机碳可以直接调节土壤微生物的活动水平,进而间接影响温室气体的排放^[14]。Naser等^[15]研究发现,当秸秆施用量控制为0~219 g/m²时, CH_4 排放量与秸秆施用量呈正相关, CH_4 和 N_2O 相关微生物的活性增强,为 CO_2 、 CH_4 和 N_2O 的生成补充了更为充足的基质,从而增加稻田温室气体的排放量。可溶性有机质(DOM)广泛存在于土壤系统中,是最富活力的有机质组分之一,在土壤微生物的生长代谢以及碳氮比调控下的矿化过程中扮演着重要角色。有研究表明,有机物料通常以细小颗粒的形式施入土壤中,其作为碳源易产生DOM,所以向土壤中添加的有机物料在分解的时候,会使土壤DOM的含量与组成发生明显改变^[16]。相关研究发现,添加有机肥可以提高土壤中DOM的腐殖化水平及其陆源性^[17]。高忠霞等^[18]也发现,化肥与有机肥或秸秆共同施用可以提高DOM中芳香化合物组分的占比。王瑞^[14]的研究结果表明,施用秸秆的水稻土中DOM类胡敏酸和富里酸物质含量有所增加。Zhang等^[19]的研究结果表明,生物炭配施化肥处理下,DOM的类腐殖酸和类色氨酸成分含量随着生物炭施用量的增加而增加。

DOM 通过微生物降解活动使土壤氧气 (O_2) 含量减少,从而为 CH_4 生成及反硝化过程提供所需要的电子,进而影响 CH_4 和 N_2O 的生成^[20]。此外,DOM 的光学特性,如荧光指数和组分,也与温室气体排放呈正相关^[21]。Barnes 等^[22] 也发现 DOM 的荧光组分与反硝化电位显著相关。然而目前研究主要聚焦于施用有机物料对有机碳组分以及 DOM 荧光组分与性质的影响,对于有机物料-DOM 荧光组分-温室气体的耦合作用机制尚不明确。所以,探讨不同有机物料输入对溶解性有机质 (DOM) 组分及荧光指数的影响,以及其对温室气体排放的作用机制,具有重要的研究价值。

针对以上研究的不足,本研究拟以单季稻种植系统为研究对象,等碳施入水稻秸秆、生物炭和有机肥,结合三维荧光光谱技术,分析稻田温室气体的排放、土壤有机碳组分、DOM 荧光组分的变化以及它们之间的响应规律,以期揭示施用不同有机物料条件下稻田有机碳含量、组分与温室气体的耦合机制,为稻田系统有机碳高效固存与减排协同调控提供理论依据。

1 材料与方 法

1.1 试验地概况

田间试验于 2022 年 3 月至 11 月进行,试验田位于江苏省常州市溧里镇西墅村东里墅 ($31^{\circ}36'53''N$, $119^{\circ}44'6''E$)。该地区属于亚热带季风气候,年平均气温为 $15.5^{\circ}C$,年平均降水量为 $1\ 066\ mm$,全年日照总时数为 $1\ 940.2\ h$,无霜期为 $248\ d$ 。土壤类别属于黄棕壤土,土壤的基础理化性质如下:pH 值 6.84 ± 0.23 ,容重 (BD) (1.92 ± 0.01) g/cm^3 ,土壤有机碳含量 (SOC) (6.28 ± 0.66) g/kg ,全氮含量 (TN) (212.99 ± 9.22) mg/kg ,有效磷含量 (AP) (1.67 ± 0.02) mg/kg ,有效钾含量 (AK) (42.50 ± 2.34) mg/kg 。

1.2 试验设计

本研究设计随机区组,每个小块的面积为 $200\ m^2$,试验设置 4 个处理,每个处理设 3 次重复。4 个处理分别为:单施氮磷钾肥 (CK)、氮磷钾肥配施水稻秸秆 (水稻秸秆)、氮磷钾肥配施生物炭 (生物炭)、氮磷钾肥配施有机肥 (有机肥)。每个处理都施用 $375.0\ kg/hm^2$ 氮 (尿素,46% 氮)、 $67.5\ kg/hm^2$ P_2O_5 (过磷酸钙,12% P_2O_5) 和 $97.5\ kg/hm^2$ K_2O (氯化钾,60% K_2O)。在水稻播种前,将全部的磷肥和 50% 的氮肥、50% 的钾肥作为基肥施入,其余的氮肥

和钾肥在水稻分蘖期和抽穗期用作追肥。本试验所用的生物炭由镇江泽地农业生物科技有限公司提供,使用水稻秸秆在 $450^{\circ}C$ 且缺氧条件下进行热分解得到。有机肥由常州市宏宝生物科技有限公司提供,原料为发酵猪粪。本研究所用的有机物料均按照等碳原则施入,水稻秸秆、生物炭和有机肥处理全碳投入量为 $1\ 200\ kg/hm^2$ ^[23]。根据这 3 种有机物料的总碳含量 (表 1) 计算田间施用量,水稻秸秆、生物炭和有机肥的施用量分别为 $3\ 030\ kg/hm^2$ 、 $2\ 272\ kg/hm^2$ 和 $4\ 393\ kg/hm^2$ 。有机物料在 2022 年 3 月初施入,在试验区域上均匀施加有机物料,然后将其翻压至 $0\sim 20\ cm$ 耕层土壤中,与土壤充分混合。供试水稻品种为南粳 46,秧苗在 6 月中下旬移栽,移栽密度为 $16.7\ cm\times 20.0\ cm$,11 月初收获。其他管理同当地农田日常管理。

表 1 水稻秸秆、生物炭和有机肥的基本特性

Table 1 The basic properties of rice straw, biochar and organic fertilizer

有机物料	总碳含量 (g/kg)	全氮含量 (g/kg)	总磷含量 (g/kg)	总钾含量 (g/kg)
水稻秸秆	395.96	7.87	0.80	14.94
生物炭	528.04	16.30	8.91	25.81
有机肥	273.10	20.72	15.88	15.21

1.3 采样方法及测定指标

1.3.1 土壤样品的采集与测定 水稻成熟后,采用五点法采集各小区 $0\sim 20\ cm$ 耕层土壤。利用环刀法检测各试验小区土层的土壤容重。土壤采集后,一些在 $-20^{\circ}C$ 冰箱中放置,余下则进行风干、研磨和筛分处理。这些土壤样品被用来检测有机碳含量、硝态氮含量和铵态氮含量等理化指标。采取电位法 (水土重量比为 $2.5:1.0$) 检测土壤 pH 值,按照凯氏定氮法检测全氮含量,采用 KCl 浸提-靛酚蓝比色法检测土壤中铵态氮含量,同时,采用紫外分光光度法检测硝态氮含量,采用重铬酸钾容量法-稀释热法检测有机碳含量,此外,溶解性有机碳含量采用去离子水浸提法进行测定,采用氯仿熏蒸- K_2SO_4 浸提法检测微生物量碳含量^[24]。

三维荧光光谱测定:利用水土振荡提取法^[25] 得到 DOM 样品,正确称量 $5.00\ g$ 风干后的土壤样品,倒入离心管中,根据 $10.0:1.0$ 的水土重量比,倒入适量的纯水, $25^{\circ}C$ 下在黑暗处 $200\ r/min$ 振荡提取 $16\ h$

后,再4 000 r/min离心 30 min,然后过 0.45 μm 滤膜过滤后,使用荧光分光光度计[Agilent Cary EclipseE, 购自安捷伦科技(中国)有限公司]检测。荧光光谱分析的参数设置如下:激发波长(E_x)扫描范围为 200~550 nm,步长为 2 nm;发射波长(E_m)检测范围为 200~600 nm,步长为 10 nm。在拉曼散射试验中,通常以纯水作为空白样本进行基准校正。荧光区域积分法是利用 MATLAB 2019 b 软件进行 DOM 成分的半定量(FRI)分析,具体包括:(1)芳香蛋白类 I(API),激发波长 220~250 nm,发射波长 280~330 nm;(2)芳香蛋白类 II(APII),激发波长 220~250 nm,发射波长 330~380 nm;(3)富里酸(FA),激发波长 220~250 nm,发射波长 380~550 nm;(4)可溶性微生物副产物(SMP),激发波长 250~340 nm,发射波长 280~380 nm;(5)腐殖酸(HA),激发波长 250~280 nm,发射波长 280~550 nm。

荧光指标的测定:(1)荧光指数(FI):激发波长为 370 nm,发射波长为 450 nm 和 500 nm 时的荧光强度比值;(2)自生源指数(BIX):激发波长为 310 nm,发射波长为 380 nm 和 430 nm 时的荧光强度比值;(3)腐殖化指数(HIX):激发波长为 254 nm,发射波长为 435~480 nm 与 300~345 nm 时的荧光区域积分的比值。

1.3.2 气体样品的采集 气体排放量采用静态箱-气相色谱法检测。在水稻移栽前,在每个区块中都安装一个底座,为双圈正方形,其尺寸为 50 cm \times 50 cm,凹槽深 5 cm,宽 3 cm,凹槽在采气时进行水封,使得箱体处于密闭状态。采样箱(50 cm \times 50 cm \times 50 cm)的外部用隔热膜包裹,使采样箱在采样过程中的温度变化最小化。采样周期为秧苗返青后 3~4 d 开始,按照周期采样,翻地、施肥和收获后 7 d 内加密采样,为避免激发效应,下雨后顺延 1 d 采样,直到水稻收获为止。

温室气体采样时间为早上 8:00~11:00,用注射器在关箱后 0 min、10 min、20 min、30 min 采集 100 mL 气体,然后转移到密闭真空袋中,带回室内用气相色谱仪[Agilent 7890 a, 购自安捷伦科技(中国)有限公司]同步测量温室气体含量(mg/m^3)变化。根据公式(1)来计算温室气体的排放通量^[26],如下:

$$F = \rho \times \frac{V}{A} \times \frac{\Delta c}{\Delta t} \times \frac{273}{273+T} \quad (1)$$

式中, F 表示 N_2O 、 CO_2 和 CH_4 排放通量, N_2O 排

放通量的单位为 $\mu\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$, CO_2 排放通量的单位为 $\text{mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$, CH_4 排放通量的单位为 $\text{mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$; ρ 表示标准大气压下 N_2O 、 CO_2 和 CH_4 的密度, mg/cm^3 ; V 表示采样箱体积, m^3 ; A 表示采样箱面积, m^2 ; $\Delta c/\Delta t$ 为箱体内温室气体含量的变化率; T 表示取样时采样箱里面的平均温度, $^\circ\text{C}$ 。

水稻整个生育期内的温室气体累积排放量计算如下:

$$E = \sum_i^n \frac{F_i + F_{i+1}}{2} \times (t_{i+1} - t_i) \times 24 \quad (2)$$

式中, E 为温室气体累积排放量, kg/hm^2 ; i 和 $i+1$ 表示连续 2 次采样; t 表示采样天数; F 表示温室气体的排放通量。

1.3.3 水稻产量、全球增温潜势(GWP)和温室气体排放强度(GHGI)的测算 在水稻成熟期先按小区随机采集 5 穴,分别测定水稻产量构成中的穗数、穗粒数、千粒重和结实率;然后按小区单打单收测量实际产量。水稻成熟时,通过小区实际面积收割的方法得到各处理的实际产量,收获后,进行脱粒,然后进行风干,最后,测算各处理的水稻产量,将其换算成含水率为 14%的稻米产量。

GWP 和 GHGI 根据公式(3)和公式(4)来计算^[27]:

$$GWP = 298 \times E_{\text{N}_2\text{O}} + 34 \times E_{\text{CH}_4} + E_{\text{CO}_2} \quad (3)$$

$$GHGI = \frac{GWP}{Yield} \quad (4)$$

式中: GWP 表示全球增温潜势; $GHGI$ 表示温室气体排放强度; $E_{\text{N}_2\text{O}}$ 、 E_{CO_2} 和 E_{CH_4} 分别表示 N_2O 、 CO_2 和 CH_4 累积排放量, kg/hm^2 ;34 和 298 分别表示联合国政府间气候变化专门委员会(IPCC)在 100 年时间范围内将 CH_4 和 N_2O 排放通量转化为 CO_2 当量通量的转换因子; $Yield$ 表示作物产量, kg/hm^2 。

1.4 数据处理及分析

使用 Excel 2019、MATLAB 2019b 进行数据统计分析和作图;通过 SPSS 19.0 进行单因子方差分析(ANOVA)。此外,采用 Duncan's 多重比较法分析各处理间差异的显著水平($P < 0.05$)。采用 Pearson 相关分析法,评估了不同处理的土壤理化指标、DOM 三维荧光特征参数及其组分与温室气体累积排放量及作物产量之间的相关性。数据分析与可视化处理采用 Origin 2021 软件完成。为进一步探究

各环境因子的影响机制,将各处理的理化因子作为解释变量,以不同有机物料处理下的温室气体累积排放总量作为响应变量,进行冗余分析。最后利用 R 4.1.3 中的 Vegan 包进行可视化分析。

2 结果与分析

2.1 施用外源有机物料对稻田土壤理化性质的影响

随着外源有机物料的施用,在水稻成熟期时,稻田土壤的理化性质发生明显变化。表 2 显示,与 CK 相比,水稻秸秆处理、生物炭处理和有机肥处理均显著降低了稻田土壤容重($P<0.05$)。生物炭处理的

表 2 不同处理下的土壤理化指标

Table 2 Soil physicochemical indicators under different treatments

处理	容重 (g/cm ³)	pH 值	铵态氮含量 (mg/kg)	硝态氮含量 (mg/kg)	全氮含量 (mg/kg)	有机碳含量 (g/kg)	溶解性有机碳 含量(mg/kg)	微生物量碳 含量(mg/kg)	碳氮比
CK	1.95±0.01a	7.93±1.72a	26.13±4.14b	4.19±0.08a	1 577.85±35.70ab	6.30±0.01d	16.17±0.35c	41.76±2.83ab	4.00±0.09c
水稻秸秆	1.86±0.01b	7.23±0.40a	34.13±11.68ab	4.23±0.13a	1 278.08±242.41b	6.99±0.06c	21.60±0.46a	47.63±3.02a	5.61±1.10a
生物炭	1.82±0.02c	7.13±0.25a	41.77±3.45a	4.19±0.04a	1 783.64±207.95a	7.35±0.06b	22.03±0.50a	43.31±5.02ab	4.16±0.43bc
有机肥	1.84±0.01c	7.93±1.72a	36.96±7.92ab	4.22±0.13a	1 422.17±167.68b	7.59±0.04a	20.20±0.40b	35.81±5.09c	5.39±0.62ab

同列数据后不同小写字母表示不同处理间差异显著($P<0.05$)。CK:单施氮磷钾肥(对照);水稻秸秆处理:氮磷钾肥配施水稻秸秆;生物炭处理:氮磷钾肥配施生物炭;有机肥处理:氮磷钾肥配施有机肥。

2.2 施用外源有机物料对水稻产量及其构成因素的影响

表 3 显示,与 CK 相比,有机肥处理显著增加了单季稻的产量。水稻单位面积穗数和穗粒数在不同处理间均无显著差异($P>0.05$),千粒重表现为生物炭处理和有机肥处理较 CK 显著提高($P<0.05$),分

表 3 不同处理下的水稻产量

Table 3 Rice yield under different treatments

处理	穗数($\times 10^4$, 1 hm ²)	穗粒数(粒)	千粒重(g)	产量(kg/hm ²)
CK	112.83±3.51a	159.04±6.34a	36.79±0.91c	6 287.60±499.74c
水稻秸秆	113.33±5.25a	166.93±3.04a	38.40±0.90c	6 731.60±394.86c
生物炭	113.00±5.56a	171.63±3.98a	41.46±1.49b	7 267.82±591.24bc
有机肥	112.50±0.50a	174.18±13.11a	45.44±1.09a	7 880.32±503.55a

同列数据后不同小写字母表示不同处理间差异显著($P<0.05$)。CK:单施氮磷钾肥(对照);水稻秸秆处理:氮磷钾肥配施水稻秸秆;生物炭处理:氮磷钾肥配施生物炭;有机肥处理:氮磷钾肥配施有机肥。

2.3 施用外源有机物料对稻田土壤有机质组分的影响

根据三维荧光分析的结果,分析荧光指数(FI)、自生源指数(BIX)和腐殖化指数(HIX)。其中,DOM 的来源可以用 FI 来反映:当 FI>1.90 时,

稻田土壤铵态氮含量显著高于 CK,增幅为 59.85% ($P<0.05$)。等碳投入有机物料对稻田土壤 pH 值和硝态氮含量均无显著影响($P>0.05$)。

有机物料的施用显著增加了土壤有机碳含量(10.95%~20.48%, $P<0.05$)。其中,在有机肥处理下的土壤有机碳含量最高,为(7.59±0.04) g/kg。施用不同有机物料后,稻田土壤溶解性有机碳含量均显著高于 CK ($P<0.05$)。其中水稻秸秆处理与生物炭处理下的土壤溶解性有机碳含量无显著差异。有机肥处理的土壤微生物量碳含量显著低于 CK ($P<0.05$)。相较于 CK,水稻秸秆处理、有机肥处理显著提高了土壤的碳氮比($P<0.05$)。

别提高了 12.69% 和 23.51%。水稻秸秆处理的千粒重与 CK 差异不显著($P>0.05$)。相对于 CK,有机肥处理的水稻产量显著提高了 25.33% ($P<0.05$)。说明有机肥处理在保持较高单位面积穗数和穗粒数的基础上,主要通过提高千粒重获得高产。

DOM 基本从微生物活动中产生,属于内源性,显示出强烈的自生源特性;而当 FI<1.40 时,DOM 基本上来自外源,属于外源性,受其自身生产力以及微生物活力等因素的影响相对较小。表 4 显示,不同有机物料处理的 FI 与 CK 差异显著($P<0.05$),CK 的

FI 为 2.18, 水稻秸秆处理的 *FI* 为 2.02, 生物炭处理的 *FI* 为 2.00, 有机肥处理的 *FI* 为 1.94, 表明各个处理下土壤 DOM 均主要来源于微生物代谢, 内源性特征明显, 外源性 DOM 对微生物活性的影响相对较弱。

DOM 的自生源贡献率可以用 *BIX* 来反映, 若 *BIX* 为 0.60~0.70, 则表示自生源贡献率较低, 当 *BIX* 为 0.71~0.80, 则表示自生源贡献率属于中等水平。本研究发现, 有机物料处理的 *BIX* 与 CK 均存在显著差异 ($P < 0.05$), 而有机物料处理之间的 *BIX* 无显著差异 ($P > 0.05$)。在有机肥处理下, 土壤 DOM 的自生源贡献率属于中等水平, 水稻秸秆处理和生物炭处理下土壤 DOM 的自生源贡献率较低。*BIX* 越大, 自生源特性越突出, 蛋白质组分越丰富, 生物可利用性越高。

DOM 的腐殖化程度通过 *HIX* 来反映, 若 *HIX* < 4.00, 则表明腐殖化程度较低, 自生源特性更为明显。表 4 显示, 施用不同有机物料处理的 *HIX* 与 CK 之间存在显著差异 ($P < 0.05$)。整体上, *HIX* 都小于 4.00。值得注意的是, 相比施加有机物料的处理, CK 中土壤 DOM 的 *HIX* 较高, 意味着其腐殖化程度相对较高。总体而言, 本研究中土壤 *HIX* 与 *FI* 均反映出 DOM 较强的自生源特性。本研究还发现, 添加有机物料可以使土壤 DOM 的腐殖化程度降低。具体而言, 有机物料处理下的土壤 DOM 的腐殖化程度较低, DOM 的结构相对简单时, 易于被微生物分解利用。

表 4 不同处理下土壤的可溶性有机质三维荧光光谱参数

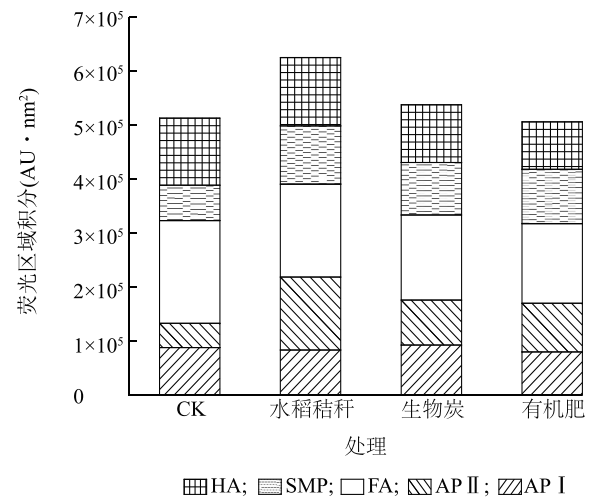
Table 4 Three-dimensional fluorescence spectral parameters of soil soluble organic matter under different treatments

处理	<i>FI</i>	<i>BIX</i>	<i>HIX</i>
CK	2.18±0.03a	0.49±0.08b	0.86±0.03a
水稻秸秆	2.02±0.02b	0.69±0.03a	0.79±0.02b
生物炭	2.00±0.02b	0.68±0.04a	0.76±0.04b
有机肥	1.94±0.05c	0.72±0.06a	0.49±0.03c

CK: 单施氮磷钾肥(对照); 水稻秸秆处理: 氮磷钾肥配施水稻秸秆; 生物炭处理: 氮磷钾肥配施生物炭; 有机肥处理: 氮磷钾肥配施有机肥。*FI*: 荧光指数; *HIX*: 腐殖化指数; *BIX*: 自生源指数。同列数据后不同小写字母表示不同处理间差异显著 ($P < 0.05$)。

为了更好地反映施加有机物料后土壤 DOM 荧光组分的变化, 本研究采用荧光区域积分法(FRI)对水稻成熟期不同处理下土壤 DOM 三维荧光光谱图进行了定量分析。通过三维荧光光谱分析, 本研究计算了

水稻成熟期不同处理下土壤中 DOM 荧光区域的积分, 结果(图 1)显示, 各处理下土壤 DOM 的荧光组分主要为芳香蛋白类 I(AP I)、芳香蛋白类 II(AP II)、富里酸(FA)、可溶性微生物副产物(SMP)及腐殖酸(HA)5 种有机物。与 CK、生物炭处理和有机肥处理相比, 水稻秸秆处理的土壤 DOM 中能够得到的总的荧光组分强度更强。有机肥处理下总的荧光组分强度低于 CK。进一步分析发现, FA 是 CK 及各有机物料处理 DOM 中含量最多的组分, 占比高达 27.51%~37.07%。与 CK 相比, 有机物料处理下 FA 含量较低。此外, CK 及各有机物料处理下的 AP I、AP II、SMP 和 HA 分别占比如下: 13.33%~17.15%、8.79%~21.64%、12.76%~19.91% 和 17.38%~24.24%。各有机物料处理的 AP II 荧光区域积分和 SMP 荧光区域积分均高于 CK。与 CK 相比, 生物炭处理和有机肥处理的 HA 荧光区域积分降低, 水稻秸秆处理的 HA 荧光区域积分增加, 水稻秸秆处理和有机肥处理的 AP I 荧光区域积分降低, 而生物炭处理的 AP I 荧光区域积分增加。



CK: 单施氮磷钾肥(对照); 水稻秸秆处理: 氮磷钾肥配施水稻秸秆; 生物炭处理: 氮磷钾肥配施生物炭; 有机肥处理: 氮磷钾肥配施有机肥。AP I: 芳香蛋白类 I; AP II: 芳香蛋白类 II; FA: 富里酸; SMP: 可溶性微生物副产物; HA: 腐殖酸。

图 1 不同处理下土壤的 5 种有机组分荧光区域积分

Fig.1 Fluorescence regional integration of five organic components in soil under different treatments

2.4 施用外源有机物料对稻田土壤温室气体排放的影响

本研究发现稻田土壤中不同的温室气体对施

用外源有机物料处理具有不同的响应特征。具体而言,本研究发现,在水稻移栽 30 d 后, N_2O 和 CO_2 排放通量出现峰值,随着水稻的生长,不同处理下不同温室气体排放通量的变化呈现相似的变化趋势。施肥后 N_2O 排放通量短暂升高,随水稻生育期变化而波动明显;施肥后 CO_2 排放通量迅速达峰值,其中有机肥处理下最高,水稻秸秆处理下与 CK 相比显著降低;水稻生长初期 CH_4 排放增加,收获期最低,有机肥处理显著促进 CH_4 排放,生物炭处理显著降低 CH_4 排放^[28]。表 5 显示,与 CK 相比,施用有机物料处理显著降低了稻田 N_2O 的累积排放量 ($P < 0.05$),水稻秸秆处理减少了 83.58% 的 N_2O 累积排放量和 25.83% 的 CO_2 累积

排放量。与 CK 相比,有机肥处理使得 CH_4 的累积排放量显著上升了 53.85% ($P < 0.05$),但是,生物炭处理则使 CH_4 的累积排放量显著减少 31.60% ($P < 0.05$)。

总体而言,与 CK 相比,生物炭处理降低了 29.86% 的全球增温潜势 (GWP),而有机肥处理的 GWP 提高了 40.97% (表 5)。温室气体排放强度 ($GHGI$) 在评价农艺措施的经济效益和环境效益方面发挥着重要作用, $GHGI$ 计算的是每单位谷物产量的 CO_2 当量排放量。与 CK 相比,施用生物炭使 $GHGI$ 显著降低 39.13%,另外,施用生物炭还减少了温室气体 N_2O 、 CH_4 的排放,生物炭处理的 $GHGI$ 最低,为 (0.14 ± 0.02) t/t。

表 5 不同处理下的温室气体排放情况

Table 5 Greenhouse gas emissions under different treatments

处理	累积排放量			GWP (t/hm ²)	$GHGI$ (t/t)
	CO_2 (t/hm ²)	CH_4 (kg/hm ²)	N_2O (kg/hm ²)		
CK	47.55±6.59a	36.36±7.09b	0.67±0.02a	1.44±0.24b	0.23±0.02ab
水稻秸秆	35.27±1.81b	39.44±1.17b	0.11±0.05d	1.37±0.05b	0.20±0.01b
生物炭	37.47±4.25ab	24.87±5.64c	0.56±0.03b	1.01±0.18c	0.14±0.02c
有机肥	47.21±6.35a	55.94±2.96a	0.43±0.09c	2.03±0.12a	0.26±0.01a

CK:单施氮磷钾肥(对照);水稻秸秆处理:氮磷钾肥配施水稻秸秆;生物炭处理:氮磷钾肥配施生物炭;有机肥处理:氮磷钾肥配施有机肥。同列数据后不同小写字母表示不同处理间差异显著 ($P < 0.05$)。 GWP :全球增温潜势; $GHGI$:温室气体排放强度。

2.5 土壤理化因子与产量、温室气体排放量的相关性

Pearson 相关性分析旨在阐明不同处理下土壤理化因子和温室气体排放之间是否存在线性相关关系。结果(图 2A)表明, CH_4 累积排放量与全氮含量呈显著负相关 ($P < 0.05$),与碳氮比呈显著正相关 ($P < 0.05$)。稻田 N_2O 累积排放量与溶解性有机碳含量呈显著负相关 ($P < 0.05$),此外,还与碳氮比呈显著负相关 ($P < 0.05$)。稻田 CO_2 累积排放量与 $GHGI$ 呈显著正相关 ($P < 0.05$),稻田 N_2O 和 CO_2 的累积排放量均与土壤溶解性有机碳含量呈显著负相关 ($P < 0.05$)。

土壤 DOM 荧光组分区域积分、荧光光谱特征参数值与稻田温室气体排放量,相关性分析结果(图 2B)显示, HIX 和 AP I 荧光区域积分与 CH_4 累积排放量均呈显著或极显著负相关;而 FI 和 AP I 荧光区域积分与 N_2O 累积排放量呈显著或极显著正相关, BIX 、AP II 荧光区域积分和 SMP 荧光区域积分均与

N_2O 累积排放量呈显著或极显著负相关;AP II 荧光区域积分与 CO_2 累积排放量呈显著负相关。

冗余分析结果有助于揭示各个土壤理化因子对温室气体排放造成影响的程度。冗余分析结果(图 3)表明,第 1 轴、第 2 轴共解释了 86.23% 的总方差。微生物量碳含量、全氮含量、铵态氮含量、硝态氮含量、溶解性有机碳含量、有机碳含量和 pH 值是影响温室气体排放的关键因子。此外,土壤微生物量碳含量与 N_2O 累积排放量分布在同一象限内,表明土壤微生物量碳含量对 N_2O 排放具有重要影响。全氮含量、铵态氮含量与 CO_2 累积排放量分布在同一象限内,说明二者都对 CO_2 排放有影响,其中全氮含量的影响相对更大。土壤硝态氮含量、有机碳含量、溶解性有机碳含量、pH 与 CH_4 累积排放量分布在同一象限内,说明土壤硝态氮含量、有机碳含量、溶解性有机碳含量和 pH 对 CH_4 的排放有影响,其中土壤有机碳含量对 CH_4 累积排放量的影响较大。

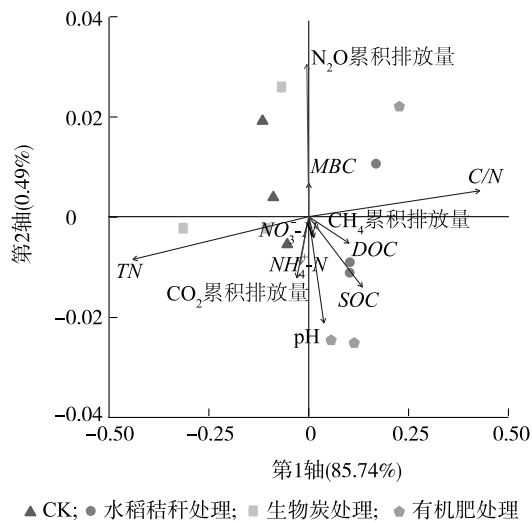
A		CH ₄ 累积排放量	N ₂ O累积排放量	CO ₂ 累积排放量	GWP	GHGI	Yield	SOC	DOC	MBC	TN	铵态氮含量	硝态氮含量	C/N	pH
CH ₄ 累积排放量	1.00	-0.48	0.42	0.97	0.89	0.51	0.28	-0.10	-0.33	-0.65	-0.09	-0.01	0.65	0.30	
N ₂ O累积排放量		1.00	0.26	-0.30	-0.21	-0.26	-0.56	-0.66	-0.11	0.48	-0.34	-0.17	-0.63	-0.05	
CO ₂ 累积排放量			1.00	0.55	0.64	0	-0.14	-0.64	-0.42	0.22	-0.15	-0.07	-0.32	0.47	
GWP	***			1.00	0.91	0.53	0.25	-0.23	-0.44	-0.52	-0.14	-0.05	0.49	0.34	
GHGI	***	*	***	1.00	0.14	-0.09	-0.48	-0.36	-0.50	-0.35	-0.04	0.33	0.38		
Yield					1.00	0.76	0.44	-0.28	-0.25	0.40	-0.05	0.50	0.04		
SOC					**	1.00	0.76	-0.30	0.03	0.61	0.11	0.36	-0.11		
DOC		*	*			**	1.00	0.20	-0.06	0.64	0.04	0.38	-0.28		
MBC								1.00	-0.10	-0.28	0.16	-0.01	-0.30		
TN	*								1.00	0.11	-0.08	-0.90	-0.01		
铵态氮含量						*	*			1.00	-0.18	0.14	-0.05		
硝态氮含量											1.00	0.19	-0.35		
C/N	*	*								***		1.00	-0.05		
pH														1.00	

B		CH ₄ 累积排放量	N ₂ O累积排放量	CO ₂ 累积排放量	FI	BIX	HIX	AP I 荧光区域积分	AP II 荧光区域积分	FA 荧光区域积分	SMP 荧光区域积分	HA 荧光区域积分
CH ₄ 累积排放量	1.00	-0.48	0.42	-0.40	0.37	-0.69	-0.90	0.22	-0.32	0.24	-0.44	
N ₂ O累积排放量		1.00	0.26	0.71	-0.63	0.47	0.63	-0.88	0.50	-0.84	0.18	
CO ₂ 累积排放量			1.00	0.20	-0.29	-0.33	-0.26	-0.59	0.08	-0.50	-0.31	
FI		**		1.00	-0.86	0.77	0.38	-0.59	0.93	-0.85	0.70	
BIX		*		***	1.00	-0.58	-0.35	0.67	-0.80	0.86	-0.53	
HIX		*		**	*	1.00	0.65	-0.17	0.84	-0.45	0.92	
AP I 荧光区域积分		***	*			*	1.00	-0.40	0.29	-0.33	0.34	
AP II 荧光区域积分		***	*	*	*			1.00	-0.36	0.90	0.07	
FA 荧光区域积分				***	**	***			1.00	-0.70	0.88	
SMP 荧光区域积分		***		***	***			***	*	1.00	-0.30	
HA 荧光区域积分				*		***			***		1.00	

A: 土壤理化因子与温室气体累积排放量及水稻产量的相关性分析; B: 荧光光谱特征参数及荧光区域积分与温室气体累积排放量的相关性分析。* 表示在 0.05 水平下显著相关 ($P < 0.05$); ** 表示在 0.01 水平下显著相关 ($P < 0.01$); *** 表示在 0.001 水平下显著相关 ($P < 0.001$)。CH₄: 甲烷; N₂O: 一氧化二氮; CO₂: 二氧化碳; GWP: 全球增温潜势; GHGI: 温室气体排放强度; Yield: 产量; SOC: 土壤有机碳含量; DOC: 溶解性有机碳含量; MBC: 微生物量碳含量; TN: 全氮含量; C/N: 碳氮比; FI: 荧光指数; BIX: 自生源指数; HIX: 腐殖化指数; AP I: 芳香蛋白类 I; AP II: 芳香蛋白类 II; FA: 富里酸; SMP: 可溶性微生物副产物; HA: 腐殖酸。有斜杠的方框表示相关性系数为正值。

图 2 土壤理化因子、荧光光谱相关参数与温室气体累积排放量的相关性分析

Fig.2 Correlation analysis of soil physicochemical factors, fluorescence spectral parameters, and cumulative greenhouse gas emissions



CH₄: 甲烷; N₂O: 一氧化二氮; CO₂: 二氧化碳; SOC: 有机碳含量; DOC: 溶解性有机碳含量; MBC: 微生物量碳含量; TN: 全氮含量; NH₄⁺-N: 铵态氮含量; NO₃⁻-N: 硝态氮含量; C/N: 碳氮比。CK: 单施氮磷钾肥(对照); 水稻秸秆处理: 氮磷钾肥配施水稻秸秆; 生物炭处理: 氮磷钾肥配施生物炭; 有机肥处理: 氮磷钾肥配施有机肥。

图 3 不同处理土壤理化性质和温室气体排放量的冗余分析

Fig.3 Redundancy analysis of soil physicochemical properties and greenhouse gas emissions under different treatments

3 讨论

衡量土壤中活性有机碳含量的重要指标是土壤溶解性有机碳含量和微生物量碳含量。有研究发现,氮磷钾肥配施有机物料明显优于单一化肥施用,能有效提升溶解性有机碳和微生物量碳的含量^[29-31],与本研究得出的结果基本一致。有机物料的等碳投入会刺激土壤中微生物的生长和繁衍,提高根系的生物量和分泌物含量,从而使溶解性有机碳和微生物量碳的含量整体提升;同时,相比于施用单一化肥,化肥配施有机物料(等碳投入)给微生物提供了充足的碳源、氮源,使得微生物活性被激发,促进了可溶性有机化合物的产生。另外,有机物料自身也含有一部分可溶性有机化合物,进一步使溶解性有机碳含量以及微生物量碳含量提高^[32]。土壤碳氮比是评估土壤碳氮养分平衡的重要参数^[33-35],其动态变化在土壤碳氮循环中起着关键作用。作为碳源的有机物料被施加到土壤中,一定会使有机碳含量发生改变,进而也让土壤碳氮比发生改变^[36-37]。在本研究中,相较于对照,水稻秸秆处理和有机肥处理显著提高了土壤的碳氮比,这可能

是由于有机物料本身具有较高的碳含量,将其施用到土壤中会提升土壤有机碳含量,同时也提升了土壤碳氮比。本研究发现,与单独施用化肥相比,有机-无机复合施肥等碳投入对水稻产量具有积极影响,这与前人的研究结果^[38-39]相一致。不同类型的有机物料等碳投入对水稻增产的影响存在差异,其中有机肥处理具有显著的增产效果。这可能是由于水稻秸秆的碳氮比(碳氮比=50)较高,在短时间内,施用水稻秸秆会使土壤中微生物的氮素固定过程加快,对水稻生长发育产生消极影响,进而造成产量增加不显著^[40]。在本研究条件下,有机物料施用是一种增产、培肥的高效管理措施。

稻田系统排放温室气体受到多种因素的调控,包括土壤特性、环境条件以及所施用的有机物料的类型和数量^[7,41-42]。有机物料的施用为土壤提供了大量的有机碳,提高了土壤碳氮比,刺激微生物的氮素竞争行为,从而减少了硝化和反硝化底物,并改善了土壤中微生物对氮的同化和固定^[43]。这导致了土壤的硝化速率和硝酸盐的可用性降低,最终导致稻田中 N₂O 排放量减少^[44]。然而,由于有机肥中的有机碳比生物炭和水稻秸秆中的有机碳更容易降解^[7],所以施用有机肥会导致异养微生物和自养硝化细菌之间更强的 NH₄⁺ 竞争,从而使 N₂O 排放减少^[45]。现有研究发现,碳源供给充分和碱性环境是造成硝化和反硝化过程中 N₂O 排放量降低的重要因子^[46]。这是因为在碱性环境下,N₂O 还原酶在电子竞争方面的能力较差,这时候,电子供体充分的情况对促进 N₂O 的最终还原更有利^[47]。有机物料的施用也总体降低了 CO₂ 的排放量,显示出与 N₂O 排放类似的趋势。有机物料具有较高的碳氮比,施用高碳氮比的有机物料,极易引起土壤中微生物与农作物的氮素竞争,这一结果直接导致了土壤氮素的消耗,抑制了土壤微生物量碳和溶解性有机碳的消耗,间接抑制了 CO₂ 的排放^[48]。在“微生物化学计量平衡理论”的框架下,采用施用氮肥等多种方法提升土壤中氮素的含量,将有助于增加微生物量。有趣的是,本研究发现,施用有机肥导致 CH₄ 累积排放量总体提升,这或许是由于有机肥为土壤提供了大量的碳源,进而选择性地促进了特定的产甲烷菌群的生长^[49]。然而,由于生物炭特殊的高温制备工艺,使得它具备了与水稻秸秆和有机肥截然不同的碳组分特性,施入土壤后通过改善土壤的曝气能力,增加了土壤氧化还原电位和 CH₄ 的氧化,从而间

接降低了 CH_4 的排放量^[50]。总的来说,施用有机物料后 CH_4 累积排放量显著增加,最终导致稻田 *GWP* 显著增加;而生物炭的施用抑制了 N_2O 和 CH_4 的排放,导致稻田 *GWP* 的降低。这些结果突出了生物炭在减少稻田温室气体排放方面的显著优势。应该避免新鲜秸秆的单独施用,在实际农事操作中,秸秆可与化肥配合施用,为微生物提供适宜的碳氮比,从而有效调控稻田生态系统中温室气体的排放。

通过三维荧光技术,本研究探究了不同有机物料等碳投入条件下,土壤溶解性有机质(DOM)荧光组分的组间差异。结果发现,DOM的荧光区域积分情况与特征指数的变化规律呈现出一致性。与CK相比,生物炭处理和有机肥处理的HA荧光区域积分降低,这与HIX的结果一致。说明等碳添加有机物料,对土壤中DOM的腐殖化程度产生了消极影响,间接提升了土壤中微生物对养分的分解和利用效率。此外,SMP主要来源于微生物代谢活动^[51],对自生源有机碳有较大的影响力。本研究发现,施用有机物料后,土壤中的SMP占比较CK明显提高,这与BIX的变化规律相一致。通过深入探究土壤DOM不同组分与稻田温室气体排放之间的相关性,本研究发现土壤DOM特性可能通过直接影响微生物活动,从而间接影响温室气体的排放。具体而言,一方面,AP I 荧光区域积分与 CH_4 累积排放量之间存在极显著的相关性,AP II 荧光区域积分与 CO_2 累积排放量之间存在显著的相关性,由于微生物优先利用更易降解的DOM^[52],因此,大量的蛋白质样组分为微生物的生长繁殖提供了有利的环境,间接导致了稻田 CO_2 的大量排放。另一方面,AP I 荧光区域积分、AP II 荧光区域积分和 SMP 荧光区域积分均与 N_2O 累积排放量显著或极显著相关,DOM对微生物硝化、反硝化过程也有显著影响^[53],类似酪氨酸的蛋白质被观察到与 N_2O 累积排放量呈正相关,表明该部分蛋白质可能使土壤微生物细胞外的电子传递以及生物膜牢固性增强,从而提升反硝化速度及微生物反应活性^[20]。除此之外,能够在硝化反应中扮演重要角色的还有色氨酸蛋白、芳香族蛋白和腐殖酸,这些物质含量的增加将促使稻田 N_2O 的排放。由于有机物料输入会降低土壤DOM腐殖化程度,所以有机物料输入同时也会降低 N_2O 的排放。在本研究中,HIX、AP I 荧光区域积分与 CH_4 累积排放量呈显著或极显著负相关,这与前

人的研究结果^[54]相反, CH_4 的排放主要是由蛋白质样组分的分解促进的^[55]。综上所述,在等碳投入有机物料的稻田生态系统中,土壤DOM组分的变化可能是施用有机物料处理下温室气体排放差异的主要驱动因素。

4 结论

施用外源有机物料显著改善了稻田土壤理化性质,提高了水稻产量,并改变了土壤DOM的组分和特性。其中,有机肥处理的增产效果最为明显。不同有机物料对温室气体排放的影响存在差异,其中生物炭处理在减少温室气体排放和减缓温室效应方面表现出明显优势。土壤DOM组分的变化可能是施用有机物料处理下温室气体排放差异的主要驱动因素,这为稻田生态系统的温室气体减排提供了重要的理论依据和实践指导。在未来的农业管理中,应根据具体目标(如提高产量或减少温室气体排放)选择合适的有机物料类型,以实现稻田生态系统的可持续发展。

参考文献:

- [1] CLARK M A, DOMINGO N G G, COLGAN K, et al. Global food system emissions could preclude achieving the 1.5° and 2 °C climate change targets[J]. *Science*, 2020, 370(6517): 705-708.
- [2] ZHANG J T, TIAN H Q, SHI H, et al. Increased greenhouse gas emissions intensity of major croplands in China: implications for food security and climate change mitigation[J]. *Global Change Biology*, 2020, 26(11): 6116-6133.
- [3] XU Y, LIANG L Q, WANG B R, et al. Conversion from double-season rice to ratoon rice paddy fields reduces carbon footprint and enhances net ecosystem economic benefit[J]. *Science of the Total Environment*, 2022, 813: 152550.
- [4] OLADELE S O, ADETUNJI A T. Agro-residue biochar and N fertilizer addition mitigates CO_2 -C emission and stabilized soil organic carbon pools in a rain-fed agricultural cropland[J]. *International Soil and Water Conservation Research*, 2021, 9(1): 76-86.
- [5] DU Y D, CUI B J, ZHANG Q, et al. Effects of manure fertilizer on crop yield and soil properties in China: a meta-analysis[J]. *Catena*, 2020, 193: 104617.
- [6] FARHANGI-ABRIZ S, TORABIAN S, QIN R J, et al. Biochar effects on yield of cereal and legume crops using meta-analysis[J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 775: 145869.
- [7] ZHOU M H, ZHU B, WANG S J, et al. Stimulation of N_2O emission by manure application to agricultural soils may largely offset carbon benefits: a global meta-analysis[J]. *Global Change Biology*, 2017, 23(10): 4068-4083.

- [8] XUE J F, PU C, LIU S L, et al. Carbon and nitrogen footprint of double rice production in Southern China[J]. *Ecological Indicators*, 2016, 64: 249-257.
- [9] GREGORICH E G, GREER K J, ANDERSON D W, et al. Carbon distribution and losses: erosion and deposition effects[J]. *Soil and Tillage Research*, 1998, 47(3/4): 291-302.
- [10] NGUYEN-VAN-HUNG, SANDER B O, QUILTY J, et al. An assessment of irrigated rice production energy efficiency and environmental footprint with in-field and off-field rice straw management practices[J]. *Scientific Reports*, 2019, 9(1): 16887.
- [11] JOSEPH S, POW D, DAWSON K, et al. Biochar increases soil organic carbon, avocado yields and economic return over 4 years of cultivation[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 724: 138153.
- [12] AGUILERA E, LASSALETTA L, SANZ-COBENA A, et al. The potential of organic fertilizers and water management to reduce N₂O emissions in Mediterranean climate cropping systems. A review[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2013, 164(4): 32-52.
- [13] 陈思, 王灿, 李想, 等. 不同UV-B辐射增幅对稻田土壤酶活性、活性有机碳含量及温室气体排放的影响[J]. *生态环境学报*, 2021, 30(6): 1260-1268.
- [14] 王瑞. 秸秆添加对土壤温室气体排放和溶解性有机碳DOC组分的影响[D]. 武汉: 华中农业大学, 2018.
- [15] NASER H M, NAGATA O, TAMURA S, et al. Methane emissions from five paddy fields with different amounts of rice straw application in central Hokkaido, Japan[J]. *Soil Science and Plant Nutrition*, 2007, 53(1): 95-101.
- [16] 陈丽铭, 吴月颖, 李财生, 等. 土壤溶解性有机质分子特征对不同来源有机质分解的响应[J]. *土壤学报*, 2023, 60(4): 1101-1112.
- [17] 谢军, 赵亚南, 陈轩敬, 等. 长期不同施肥对土壤溶解性有机质含量及其结构特征的影响[J]. *光谱学与光谱分析*, 2018, 38(7): 2250-2255.
- [18] 高志霞, 周建斌, 王祥, 等. 不同培肥处理对土壤溶解性有机碳含量及特性的影响[J]. *土壤学报*, 2010, 47(1): 115-121.
- [19] ZHANG A F, ZHOU X, LI M, et al. Impacts of biochar addition on soil dissolved organic matter characteristics in a wheat-maize rotation system in Loess Plateau of China[J]. *Chemosphere*, 2017, 186: 986-993.
- [20] DING H N, HU Q Y, CAI M L, et al. Effect of dissolved organic matter (DOM) on greenhouse gas emissions in rice varieties[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2022, 330: 107870.
- [21] BEGUM M S, BOGARD M J, BUTMAN D E, et al. Localized pollution impacts on greenhouse gas dynamics in three anthropogenically modified Asian river systems[J]. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 2021, 126(5): 1-20.
- [22] BARNES R T, SMITH R L, AIKEN G R. Linkages between denitrification and dissolved organic matter quality, Boulder Creek watershed, Colorado[J]. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 2012, 117(G1): G01014.
- [23] 孟祥天, 蒋璐霁, 王晓玥, 等. 生物质炭和秸秆长期还田对红壤团聚体和有机碳的影响[J]. *土壤*, 2018, 50(2): 326-332.
- [24] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2000.
- [25] 高洁, 江韬, 李璐璐, 等. 三峡库区消落带土壤中溶解性有机质(DOM)吸收及荧光光谱特征[J]. *环境科学*, 2015, 36(1): 151-162.
- [26] ZHANG A F, CHENG G, HUSSAIN Q, et al. Contrasting effects of straw and straw-derived biochar application on net global warming potential in the Loess Plateau of China[J]. *Field Crops Research*, 2017, 205: 45-54.
- [27] SUN T, FENG X M, LAL R, et al. Crop diversification practice faces a tradeoff between increasing productivity and reducing carbon footprints[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2021, 321: 107614.
- [28] WANG M Y, XIAO X, WEI W W, et al. Crop-soil-environment benefits of equivalent carbon input from organic amendments in rice production ecosystems[J]. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 2024, 24(1): 1201-1211.
- [29] 曹宏杰, 汪景宽. 长期不同施肥处理对黑土不同组分有机碳的影响[J]. *国土与自然资源研究*, 2012(3): 39-41.
- [30] 吕芙蓉, 李忠佩, 刘明, 等. 长期不同施肥处理对红壤水稻土壤微生物量氮周转的影响[J]. *中国农业科学*, 2012, 45(2): 275-282.
- [31] 门倩, 海江波, 岳忠娜, 等. 化肥减量对玉米田土壤酶活性及微生物量的影响[J]. *西北农林科技大学学报(自然科学版)*, 2012, 40(6): 133-140.
- [32] 张蛟蛟, 李永夫, 姜培坤, 等. 施肥对板栗林土壤活性碳库和温室气体排放的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2013, 19(3): 745-752.
- [33] 郭海斌, 石媛媛. 氮肥对夏玉米花期叶片衰老、氮素运移效率及碳氮比的影响[J]. *江苏农业科学*, 2023, 51(22): 76-86.
- [34] 周武, 李鸣雷. 菌渣施用对中国土壤理化性质的影响: 基于Meta分析[J]. *江苏农业科学*, 2024, 52(2): 205-213.
- [35] 吴建飞, 殷梦瑶, 任荣荣, 等. 一氧化氮对棉花幼苗生长和碳氮代谢的影响[J]. *江苏农业科学*, 2023, 51(10): 84-91.
- [36] SUI Y Y, JIAO X G, LIU X B, et al. Water-stable aggregates and their organic carbon distribution after five years of chemical fertilizer and manure treatments on eroded farmland of Chinese Mollisols[J]. *Canadian Journal of Soil Science*, 2012, 92(3): 551-557.
- [37] ZHAO H L, SHAR A G, LI S, et al. Effect of straw return mode on soil aggregation and aggregate carbon content in an annual maize-wheat double cropping system[J]. *Soil and Tillage Research*, 2018, 175: 178-186.
- [38] 柴如山, 徐悦, 程启鹏, 等. 安徽省主要作物秸秆养分资源量及还田利用潜力[J]. *中国农业科学*, 2021, 54(1): 95-109.
- [39] 石吕, 薛亚光, 韩笑, 等. 不同土壤类型条件下生物炭施用量对水稻产量、品质和土壤理化性状的影响[J]. *江苏农业科学*, 2022, 50(23): 222-228.
- [40] 廖萍, 刘磊, 何宇轩, 等. 施石灰和秸秆还田对双季稻产量

- 和氮素吸收的互作效应[J]. 作物学报, 2020, 46(1): 84-92.
- [41] 何振嘉, 贺伟, 罗林涛, 等. 基于碳中和背景的耕地质量提升路径[J]. 排灌机械工程学报, 2023, 41(7): 723-730.
- [42] 李圆圆, 何平, 茅桁. 稻田水肥管理研究进展及思考[J]. 排灌机械工程学报, 2023, 41(8): 825-832.
- [43] 唐海明, 李超, 肖小平, 等. 有机肥氮投入比例对双季稻田根际土壤微生物生物量碳、氮和微生物熵的影响[J]. 应用生态学报, 2019, 30(4): 1335-1343.
- [44] 卜容燕, 李敏, 韩上, 等. 有机无机肥配施对双季稻轮作系统产量、温室气体排放和土壤养分的综合效应[J]. 应用生态学报, 2021, 32(1): 145-153.
- [45] SHAKOOR A, SHAKOOR S, REHMAN A, et al. Effect of animal manure, crop type, climate zone, and soil attributes on greenhouse gas emissions from agricultural soils: a global meta-analysis[J]. Journal of Cleaner Production, 2021, 278: 124019.
- [46] 方明, 任天志, 赖欣, 等. 花生壳生物炭对潮土和红壤理化性质和温室气体排放的影响[J]. 农业环境科学学报, 2018, 37(6): 1300-1310.
- [47] 李鹏章, 王淑莹, 彭永臻, 等. COD/N 与 pH 值对短程硝化反硝化过程中 N_2O 产生的影响[J]. 中国环境科学, 2014, 34(8): 2003-2009.
- [48] 杨硕欢, 张保成, 王丽, 等. 水肥用量对玉米季土壤 CO_2 排放的综合影响[J]. 环境科学, 2016, 37(12): 4780-4788.
- [49] IQBAL S, XU J C, KHAN S, et al. Regenerative fertilization strategies for climate-smart agriculture: consequences for greenhouse gas emissions from global drylands[J]. Journal of Cleaner Production, 2023, 398: 136650.
- [50] CHEN D M, YUAN L, LIU Y R, et al. Long-term application of manures plus chemical fertilizers sustained high rice yield and improved soil chemical and bacterial properties[J]. European Journal of Agronomy, 2017, 90: 34-42.
- [51] CHEN W, WESTERHOFF P, LEENHEER J A, et al. Fluorescence excitation-emission matrix regional integration to quantify spectra for dissolved organic matter[J]. Environmental Science & Technology, 2003, 37(24): 5701-5710.
- [52] LAMBERT T, BOUILLON S, DARCHAMBEAU F, et al. Effects of human land use on the terrestrial and aquatic sources of fluvial organic matter in a temperate river basin (The Meuse River, Belgium)[J]. Biogeochemistry, 2017, 136(2): 191-211.
- [53] ZHANG F Z, PENG Y Z, MIAO L, et al. A novel simultaneous partial nitrification Anammox and denitrification (SNAD) with intermittent aeration for cost-effective nitrogen removal from mature landfill leachate[J]. Chemical Engineering Journal, 2017, 313: 619-628.
- [54] AMARAL V, ORTEGA T, ROMERA-CASTILLO C, et al. Linkages between greenhouse gases (CO_2 , CH_4 , and N_2O) and dissolved organic matter composition in a shallow estuary[J]. Science of the Total Environment, 2021, 788: 147863.
- [55] BAO M W, CUI H, LV Y, et al. Greenhouse gas emission during swine manure aerobic composting: insight from the dissolved organic matter associated microbial community succession[J]. Bioresource Technology, 2023, 373: 128729.

(责任编辑:王妮)