

DOI:10.11766/trxb202402230076

杨正宇, 李宗明, 李言言, 沈健林, 吴金水. 连续 11 年不同秸秆还田量下稻田甲烷增排效应变化研究[J]. 土壤学报, 2025, YANG Zhengyu, LI Zongming, LI Yanyan, SHEN Jianlin, WU Jinshui. Variation of the Increased CH<sub>4</sub> Emissions in Paddy Fields with Straw Incorporation across 11 Consecutive Years[J]. Acta Pedologica Sinica, 2025.

## 连续 11 年不同秸秆还田量下稻田甲烷增排效应变化研究\*

杨正宇<sup>1,2</sup>, 李宗明<sup>1</sup>, 李言言<sup>1</sup>, 沈健林<sup>1,2†</sup>, 吴金水<sup>1,2</sup>

(1. 中国科学院亚热带农业生态研究所亚热带农业生态过程重点实验室, 中国科学院亚热带农业生态研究所长沙农业环境观测研究站, 长沙 410000; 2. 中国科学院大学资源与环境学院, 北京 101400)

**摘要:** 探究长期秸秆还田下稻田甲烷 (CH<sub>4</sub>) 增排效应变化及影响机制, 可为长期秸秆还田模式下 CH<sub>4</sub> 排放准确评估提供依据。以亚热带地区典型双季稻田为对象, 设置仅施化肥处理 (CON)、低量秸秆还田处理 (3.0 t·hm<sup>-2</sup>, LS) 和高量秸秆还田处理 (6.0 t·hm<sup>-2</sup>, HS), 进行为期 11 年 (2012—2022) 的定位试验, 观测了秸秆还田初期和后期 CH<sub>4</sub> 排放及相关土壤环境因子变化。结果表明: LS 和 HS 的 CH<sub>4</sub> 排放显著大于 CON (HS>LS>CON) ( $P<0.05$ ), 但在第 11 年增幅相比第 1 年分别减弱了 75.1% 和 83.5%。在第 11 年, LS 和 HS 相对 CON 的土壤有机碳 (SOC)、铵态氮 (NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N) 和溶解性有机碳 (DOC) 整体分别显著提升 7.90% 和 20.8% (LS 和 HS, 下同)、15.0% 和 25.7%、19.5% 和 31.3% ( $P<0.05$ ); 氧化还原电位 (Eh) 和土壤容重 (BD) 分别显著降低 14.1% 和 21.7%、10.3% 和 11.2% ( $P<0.05$ ); LS 和 HS 处理的 *mcrA*、*pmoA* 基因丰度和 *mcrA/pmoA* 丰度比值相对 CON 分别显著增加 96.0% 和 152%、12.7% 和 34.8%、73.9% 和 85.8% ( $P<0.05$ )。通过分析发现在秸秆还田第 11 年, 稻田 CH<sub>4</sub> 排放与土壤中微生物 *mcrA* 丰度和 *mcrA/pmoA* 显著正相关 ( $P<0.05$ ), 其中 SOC 含量增加导致的 BD 降低和 Eh 的上升促进了 *pmoA* 丰度的上升, 可能是导致秸秆还田 11 年后 CH<sub>4</sub> 排放增幅降低的主要原因。综上, 与 CON 相比, 在亚热带地区长期秸秆还田相较短期所产生的 CH<sub>4</sub> 增排幅度, 会受 SOC、BD 和 Eh 改变的影响而显著减弱 80% 左右 ( $P<0.05$ ), 因此, 针对秸秆还田模式下稻田 CH<sub>4</sub> 排放的评估需要根据还田持续时间进行动态调整。

**关键词:** 秸秆还田; 稻田; 甲烷; 长期效应; 土壤环境因子

中图分类号: S19

文献标志码: A

## Variation of the Increased CH<sub>4</sub> Emissions in Paddy Fields with Straw Incorporation across 11 Consecutive Years

YANG Zhengyu<sup>1,2</sup>, LI Zongming<sup>1</sup>, LI Yanyan<sup>1</sup>, SHEN Jianlin<sup>1,2†</sup>, WU Jinshui<sup>1,2</sup>

(1. Key Laboratory of Agro-ecological Processes in Subtropical Region, Changsha Agricultural Environment Observation and Research Station, Institute of Subtropical Agriculture, Chinese Academy of Sciences, Changsha 410000, China; 2. College of Resources and Environment, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 101400, China)

\*国家重点研发计划项目 (2022YFD1700700) 和国家自然科学基金项目 (42077104, 42161144002) 资助 Supported by the National Key Research and Development Program of China (No. 2022YFD1700700) and the National Natural Science Foundation of China (Nos. 42077104 and 42161144002)

†通讯作者 Corresponding author, E-mail: jlshen@isa.ac.cn

作者简介: 杨正宇 (2000—), 男, 湖南岳阳人, 硕士研究生, 主要研究方向为稻田固碳减排, E-mail: 1848001887@qq.com

收稿日期: 2024-02-23; 收到修改稿日期: 2024-05-30; 网络首发日期 (www.cnki.net):

**Abstract: 【Objective】** This study aimed to explore the variations of the increased methane (CH<sub>4</sub>) emissions and its mechanisms in paddy fields with straw incorporation across 11 consecutive years, so as to provide a scientific basis for the accurate assessment of CH<sub>4</sub> emissions under long-term straw incorporation. **【Method】** A typical double-cropping rice field in the subtropical region was selected as the research subject, and the fertilizer only treatment (CON), low amount of straw incorporation treatment (3.0 t·hm<sup>-2</sup>, LS) and high amount of straw incorporation treatment (6.0 t·hm<sup>-2</sup>, HS) were set up. The field experiment was conducted for 11 years (2012—2022) with CH<sub>4</sub> fluxes and related soil and environmental factors measured in the early and late rice seasons across the 11 years. **【Result】** The results showed that in the 11<sup>th</sup> year of straw incorporation, CH<sub>4</sub> emissions in both the LS and HS treatments were substantially higher than those in the CON treatment, with the highest emissions recorded in the HS treatment, followed by the LS and then the CON treatment (HS > LS > CON). However, it was noted that the increment in CH<sub>4</sub> emissions due to straw incorporation in the 11<sup>th</sup> year had diminished by 75.1% and 83.5% when compared to the increment in the first year ( $P < 0.05$ ). In the 11<sup>th</sup> year, the contents of soil organic carbon (SOC), ammonium nitrogen (NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N), and dissolved organic carbon (DOC) in the LS and HS treatments showed significant increases by 7.90% and 20.8% (LS and HS treatments, the same as below), and 15.0% and 25.7%, 19.5%, and 31.3%, respectively, compared to the CON treatment ( $P < 0.05$ ). However, the redox potential (Eh) and soil bulk density (BD) exhibited significant reductions of 14.1% and 21.7%, and 10.3% and 7.76%, respectively ( $P < 0.05$ ). Furthermore, the abundance of the *mcrA* and *pmoA* genes, which are instrumental in methanogenesis and methane oxidation processes, respectively, as well as the *mcrA/pmoA* gene ratio, were significantly enhanced in the LS and HS treatments compared to the CON, which increased by 96.0% and 152%, 12.7% and 34.8%, and 73.9% and 85.8%, respectively ( $P < 0.05$ ). Through redundancy analysis, it was determined that in the 11<sup>th</sup> year of straw incorporation, CH<sub>4</sub> emissions in the paddy field displayed a significant positive correlation with the abundance of *mcrA* and the *mcrA/pmoA* ratio in the soil ( $P < 0.05$ ). The decrease in BD and the rise in Eh, induced by the increase in SOC content, likely fostered the augmentation in *pmoA* gene abundance, which might be the principal reason for the undermined increase in CH<sub>4</sub> emissions for the straw treatments observed in the later stages of the experiment. **【Conclusion】** In the subtropical regions, relative to CON, the increases in CH<sub>4</sub> emissions under long-term straw incorporation was reduced by approximately 80% ( $P < 0.05$ ) compared to the increase under short-term straw incorporation due to the changes in SOC, BD, and Eh. Therefore, the assessment of CH<sub>4</sub> emissions from paddy fields with straw incorporation needs to be dynamically adjusted according to the year of duration of straw incorporation.

**Key words:** Straw incorporation; Rice field; Methane; Long term effects; Soil environmental factors

甲烷 (CH<sub>4</sub>) 是重要的温室气体, 虽然大气中 CH<sub>4</sub> 的浓度远低于二氧化碳 (CO<sub>2</sub>), 但在百年尺度上其全球增温潜势是 CO<sub>2</sub> 的 28 倍, 对全球净变暖的贡献也仅次于 CO<sub>2</sub><sup>[1]</sup>。稻田作为重要的 CH<sub>4</sub> 排放源, 据统计, 我国稻田 CH<sub>4</sub> 排放量约占世界稻田 CH<sub>4</sub> 排放总量的 18%<sup>[2]</sup>。因此, 加强针对稻田 CH<sub>4</sub> 排放的研究对缓解全球气候变化具有重要意义。

秸秆作为重要的可再生农业资源, 在我国不仅其资源十分丰富, 秸秆还田处理也是生产实践上广泛运用的一项耕作措施, 它能够改善土壤物理结构和团聚体组成, 增加作物产量, 提高土壤有机质含量<sup>[3]</sup>。大量研究表明, 秸秆还田在短期内会显著增加稻田 CH<sub>4</sub> 的排放<sup>[4]</sup>。Hu 等<sup>[5]</sup>在亚热带季风气候区进行两年秸秆还田的研究中发现: 水稻季的 CH<sub>4</sub> 排放量可能受溶解性有机碳 (DOC) 含量变化的影响显著增加了 2 倍~3 倍。也有在亚热带地区进行了两年秸秆还田 (半量还田、全量还田) 的研究发现, 添加秸秆增加了稻田产

甲烷细菌生长所需的底物, 促进其增长, 导致半量和全量还田在第一年  $\text{CH}_4$  排放量分别增长 12.5% 和 25.3%, 第二年分别增加 49.6% 和 86.7%<sup>[6]</sup>。针对秸秆还田对稻田温室气体影响的短期研究表明, 秸秆的添加促进了产甲烷菌的活性从而导致了  $\text{CH}_4$  排放增加<sup>[7]</sup>。

秸秆还田作为一种有长期推行背景的农作措施, 越来越多的研究开始聚焦秸秆连续还田的持续性收益: 有研究表明, 进行 4~5 年的秸秆还田可使  $\text{CH}_4$  的排放量显著增加, 土壤 DOC 含量是其中关键影响因素<sup>[8]</sup>; 但也有研究指出, 长期 (6 年) 秸秆还田下会导致土壤容重下降, 通气性增加, 也可能产生有利于促进甲烷氧化而减少甲烷排放的效果<sup>[9]</sup>。然而, 长期秸秆还田下, 稻田土壤性质的改变如何影响  $\text{CH}_4$  排放尚不清楚。本研究以亚热带典型双季稻田为研究对象, 进行不同秸秆还田量下的长期定位试验, 基于稻田  $\text{CH}_4$  排放及土壤理化和生物学性质的长期观测, 旨在明确长期秸秆还田下稻田  $\text{CH}_4$  增排效应的变化及影响机制, 以期为合理评价秸秆还田下稻田  $\text{CH}_4$  排放提供科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验地概况

本研究中的田间长期定位试验始于 2012 年, 在湖南省长沙县金井镇 (28°33'04"N, 113°19'52"E) 典型双季水稻田进行, 该地区属于亚热带湿润季风气候, 海拔 80 m, 年降水量 1 330 mm, 年均气温 17.5°C, 每年降水量的 60% 以上集中在 3—8 月份, 无霜期为 300 d。试验田土壤类型是由花岗岩风化的红壤发育而成的水稻土。试验地土壤 0~20 cm 基本理化性质见表 1<sup>[10]</sup>。

表 1 供试土壤的基本理化性质<sup>[10]</sup>

Table 1 Basic physical and chemical properties of soil<sup>[10]</sup>

土壤类型 Soil type	SOC/ (g·kg <sup>-1</sup> )	TN/ (g·kg <sup>-1</sup> )	TP/ (g·kg <sup>-1</sup> )	TK/ (g·kg <sup>-1</sup> )	BD/ (g·cm <sup>-3</sup> )	pH	砂粒 Sand / (g·kg <sup>-1</sup> )	粉粒 Silt/ (g·kg <sup>-1</sup> )	黏粒 Clay/ (g·kg <sup>-1</sup> )
花岗岩发育 水稻土 <sup>①</sup>	17.5	1.62	0.55	28.4	1.31	5.1	42.4	30.4	27.2

注: SOC: 土壤有机碳; TN: 全氮; TP: 全磷; TK: 全钾; BD: 容重; 下同。Note: SOC: soil organic carbon; TN: total nitrogen; TP: total phosphors; TK: total potassium. BD: bulk density. ① Paddy soil developed from granite. The same as below.

### 1.2 试验设计与管理

田间试验设置三个处理: 常规施肥 (以 CON 表示)、低量秸秆还田处理 (3.0 t·hm<sup>-2</sup>, 以 LS 表示), 高量秸秆还田 (6.0 t·hm<sup>-2</sup>, 以 HS 表示)。

每季水稻收获后将收获的秸秆 (截短至 5~10 cm) 均匀撒在土壤表层, 在新一季水稻犁地时保证秸秆能够均匀翻埋于土壤耕作层 (0~20 cm)。三种处理的田间水分管理方式均为间歇灌溉 (淹水-烤田的干湿交替), 每季的施肥量按照当地习惯进行: 磷肥 (P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 75 kg·hm<sup>-2</sup>)、钾肥 (K<sub>2</sub>O 100 kg·hm<sup>-2</sup>) 和锌肥 (ZnSO<sub>4</sub> 5 kg·hm<sup>-2</sup>) 作为基肥一次性施入, 氮肥的施用 (早稻/晚稻对应 120/150 kg·hm<sup>-2</sup> (以 N 计) 按照 5: 3: 2 的比例分为基肥、分蘖肥与穗肥进行施用。添加秸秆处理下的化肥施用量, 根据当季添加的秸秆养分含量进行调整, 确保各处理投入的养分总量一致。小区面积为 35 m<sup>2</sup> (5 m×7 m), 每个处理设计三个重复, 采用随机区组的方式对小区进行设计。试验早稻季水稻种植密度为 20 cm×16.7 cm, 晚稻季为 20 cm×20 cm。试验所用的早稻水稻品种为“潭两优 45”, 晚稻所用的水稻品种为“玉针香”。本研究利用长期定位试验的

前期(1~3年)数据<sup>[10-14]</sup>,并在2022年进行早稻季和晚稻季田间温室气体排放观测以及土壤和植株样品采集。2022年早稻季,秧苗移栽和施基肥时间为5月2日,施追肥时间为5月16日和6月14日,收获时间为7月13日;2022年晚稻季,秧苗移栽和施基肥时间为7月19日,施追肥时间为8月1日和8月24日,收获时间为10月19日。

### 1.3 样品采集与测定

**1.3.1 气体样品采集与测定** 采用静态暗箱-气相色谱法采集并测定稻田的CH<sub>4</sub>排放通量,采气暗箱由不锈钢材质的底座和采气箱两部分组成,采气箱外部包裹3 cm厚泡沫隔热,采样底座放置在小区的中间位置。气样的采集从秧苗移植的第二天开始,采样频率为每周一次,在施肥后一周与晒田期间为每周两次,采样时间为每日上午的09:00至11:00期间。使用30 mL注射器采集30 mL气体至已抽为真空的12 mL真空玻璃管内,每次的采样间隔为10 min,一共采集4次。在一周内采用气相色谱仪(Agilent GC 7890A,美国)进行浓度的测定,测定环境为:高纯氮为载气,柱温55°C,氢火焰离子化检测器(FID)温度为250°C,通过FID测定CH<sub>4</sub>,用体积比为1:9的CO<sub>2</sub>/N<sub>2</sub>混合气作为尾吹气。CH<sub>4</sub>的排放通量根据式(1)计算:

$$F = M/V_0 \times (H - h/100) \times P/P_0 \times T_0/T \times dc/dt \quad (1)$$

式中, $F$ :气体排放通量,mg·m<sup>-2</sup>·h<sup>-1</sup>;  $M$ :待测气体相对分子质量,g·mol<sup>-1</sup>;  $V_0$ :摩尔体积,1 L·mol<sup>-1</sup>, $V_0=22.4$  L·mol<sup>-1</sup>;  $H$ :箱高,m, $H=1$  m;  $h$ 为平均水深,m;  $P_0$ 和  $T_0$ :理想气体标准状态下的空气压力(101.3 kPa)和气温(273 K);  $P$ 和  $T$ :采样时的大气压力箱内的实际气压和平均气温(K);  $dc/dt$ :箱内目标气体浓度(μg·L<sup>-1</sup>)随时间变化的回归曲线斜率。温室气体的累积排放量为相邻的2个采样时期的该种气体排放量累加,而相邻的2个采样时期的气体排放量为平均排放通量与采样时间的乘积<sup>[15]</sup>。

**1.3.2 田间水因子测定** 田间水因子测定频率与田间气体采集频率保存一致:在每次采集田间气体样品时,使用直尺测量田间水位;每次采集气体样品的同时使用便携式双路输入多参数数字化分析仪(HACH HQ40d,哈希,美国)测定田间水土的溶解氧(电极—LDC10101)。

**1.3.3 土壤样品采集与测定** 在采集气样的同时,使用氧化还原电位(Eh)计(RM-30P,DKK-TOA,日本)测定耕层土壤0~5 cm深度Eh,然后在试验处理小区按“S”形采集5处0~20 cm耕层土壤样品,存于塑料封口袋中,混匀的同时挑出动植物残体。将1份采集的鲜土样迅速带回实验室并及时进行分析,若不能及时分析则将土壤样品保存于4°C冰箱中待测,于两周之内完成土壤铵态氮(NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N)、硝态氮(NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N)和溶解性有机碳(DOC)测定。将每季水稻成熟期采集的土样,采用重铬酸钾容量法(外加热法)测定土壤有机碳(SOC),利用凯氏定氮仪(Kjeltec 8400/8420、FOSS、丹麦)测土壤全氮(TN),采用酸度计法(水土比2.5:1)测定土壤pH,采用环刀法测定土壤容重。采用“氯仿熏蒸-0.5 mol·L<sup>-1</sup> K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>提取法”测定微生物生物量碳(MBC)<sup>[13]</sup>。

**1.3.4 微生物样品采集与测定** 在水稻分蘖期、孕穗期和成熟期采集0~20 cm耕层土壤样品,采集方法同1.3.3。使用Dneasy Power Soil试剂盒(QIAGEN,德国)提取土壤样品微生物DNA,具体步骤参考试剂盒使用说明,将所得的DNA用NanoDrop ONE进行浓度和纯度测定,并将DNA保存于-80°C备用。

采用荧光定量PCR(LightCycler 480II,罗氏,瑞士)测定样品中*mcrA*和*pmoA*。具体反应体现为:5 μL SYBR Premix (RR820, Takara, 日本),引物各为0.5 μL,样品微生物DNA模板1 μL,无菌水补充

总体积至 10  $\mu$ L。反应体系配置完成后用 Roche480 进行荧光定量 PCR 仪进行扩增测定。

**1.3.5 水稻产量测定** 在水稻收获期, 各小区进行单独收割测产, 按照 13.5% 的含水量标准折算产量。

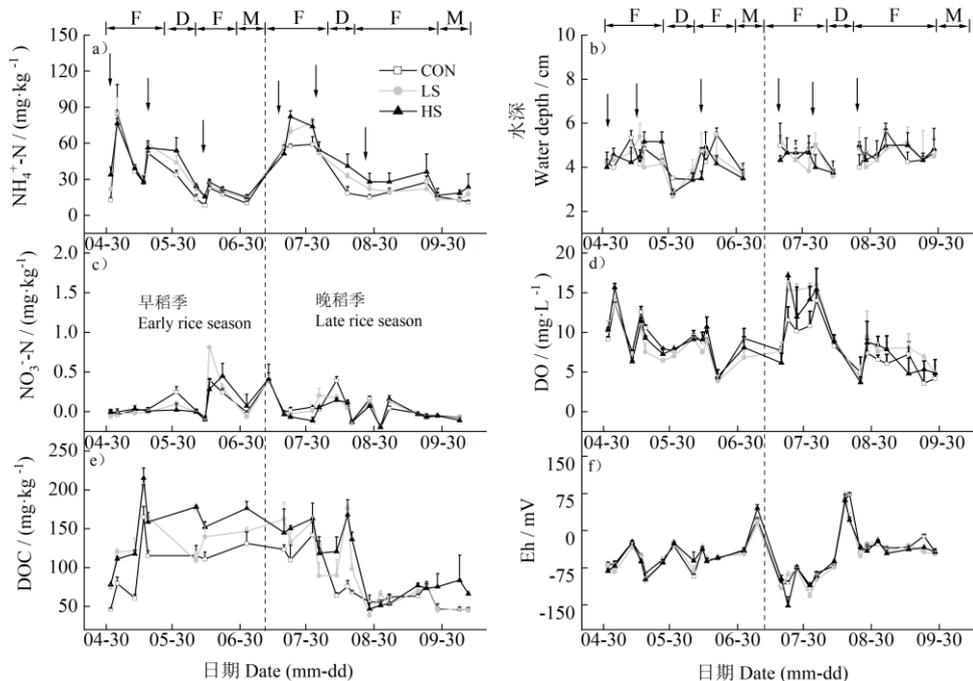
#### 1.4 数据处理与统计分析

实验数据的基础处理和计算在 Excel 2019 中运行。数据分析和作图采用 Excel 2019、R 4.2.0 和 Origin8.1 软件共同完成。使用 Canoco5 对温室气体排放影响因子进行冗余分析。通过 SPSS 26 进行处理之间的单因素方差分析(最小显著差异法(LSD)检验, 统计显著水平为  $P < 0.05$ )。用斯皮尔曼(Spearman)等级相关分析方法检验环境因子与响应因子之间的相关关系

## 2 结果

### 2.1 稻田秸秆还田第 11 年的田间因子动态

本研究通过测定 2022 年早晚稻季期间田间因子动态变化(图 1)发现: 各处理土壤中  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  的起伏主要与肥料的投入有关, 在肥料投入后出现上升趋势, 其在水稻生长期的变化范围在  $8.5\sim 86.7 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。各处理土壤  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  的含量保持较低的水平, 最大浓度为  $0.8 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ , 水稻季整体浓度小于  $0.1 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。土壤 DOC 的含量在晚稻晒田后显著降低, 水稻生长全期内含量在  $40\sim 220 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  变化。田间水深的变化趋势主要受到水分管理措施的影响, 在淹水期保持 4~6 cm, 在排水期保持湿润和无水。各处理的田面水溶解氧(DO)的变化趋势在早晚稻季保持一致, 均呈现逐渐下降的趋势, 整个水稻生长期在  $2.8\sim 17.3 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  范围内变化。土壤 Eh 的峰值出现在早稻收获前落干与晚稻晒田时期, 并在晚稻晒田覆水后保持相对晒田前更高的 Eh, 整个水稻生长期在  $-183\sim 86 \text{ mV}$  范围内变化。



注: F 表示淹水期, D 表示排水期, M 表示收获前落干, 箭头表示施加肥料。CON、LS、HS 分别表示常规施肥处理、低量秸秆还田处理、高量秸秆还田处理。下同。 Note: F represents the flooding period, D represents the drainage period, M represents pre-harvest drying, arrow represents fertilizer application. CON, LS, and HS denote conventional fertilizer treatment, low amount of straw return treatment, and high amount of straw return treatment, respectively. The same as below.

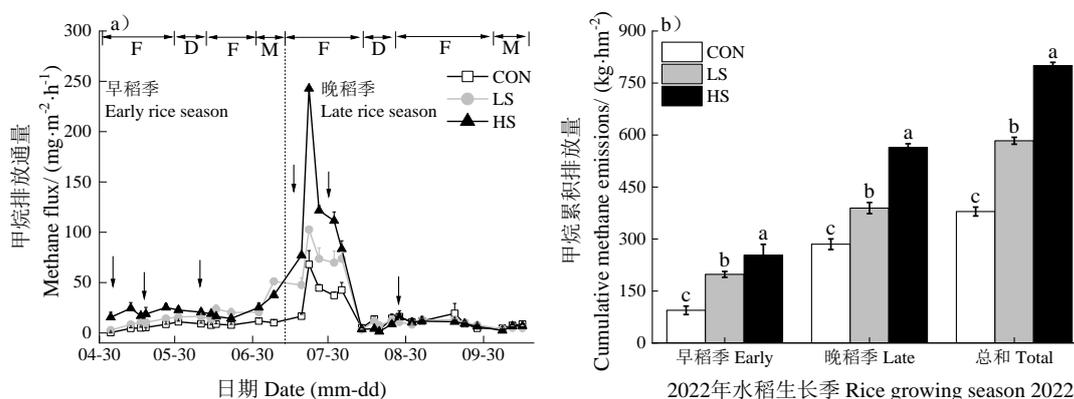
图 1 2022 年早晚稻季田间土壤铵态氮 ( $\text{NH}_4^+\text{-N}$ , a)、田间水深 (b)、土壤硝态氮 ( $\text{NO}_3^-\text{-N}$ , c)、田面水溶解氧 (DO, d)、土壤溶解性有机碳 (DOC, e) 和土壤氧化还原电位 (Eh, f) 变化动态

Fig. 1 Dynamics of changes in soil ammonium nitrogen ( $\text{NH}_4^+\text{-N}$ , a), field water depth (b), soil nitrate nitrogen ( $\text{NO}_3^-\text{-N}$ , c), dissolved oxygen of surface water (DO, d), soil dissolved organic carbon (DOC, e), and soil redox potential (Eh, f) in the field during the early and late rice seasons of 2022

## 2.2 稻田秸秆还田第 11 年的 $\text{CH}_4$ 排放特征

在秸秆还田第 11 年水稻的全生育期内, 各处理  $\text{CH}_4$  的排放通量日动态变化趋势大体一致 (图 2a), 早稻季  $\text{CH}_4$  排放保持小幅上升趋势, 晚稻季  $\text{CH}_4$  排在分蘖期达到峰值, 而后逐步下降, 并在晒田覆水后出现小幅上升情况。在早稻季和晚稻前期, LS 处理和 HS 处理下  $\text{CH}_4$  排放通量显著大于 CON 处理, 且 HS 处理的  $\text{CH}_4$  排放通量要大于 LS 处理 ( $P < 0.05$ )。在晚稻季进入烤田和水稻生长后期, 三种处理下的  $\text{CH}_4$  排放无显著差异。在整个水稻生育期间,  $\text{CH}_4$  的排放通量在  $0.4 \sim 243 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$  (以 C 计, 下同) 之间变化。

在连续秸秆还田第 11 年的晚稻季, CON、LS 和 HS 三种处理的  $\text{CH}_4$  累积排放量 (图 2b) 均要显著高于早稻季 ( $P < 0.05$ ), CON、LS 和 HS 处理下分别增加了 169%、65.2% 和 110%。LS 和 HS 处理下的  $\text{CH}_4$  累积排放量在早稻季相较于 CON 处理分别增加了 131% 和 184%, 而在晚稻季中, 则分别增长了 41.7% 和 121%, 均显著 ( $P < 0.05$ ) 高于 CON 处理, 在晚稻季的秸秆还田处理中 HS 的累积排放量相比 LS 增加了 56.2%, 显著 ( $P < 0.05$ ) 大于 LS 处理下的  $\text{CH}_4$  累积排放。在早稻期间, 各处理的  $\text{CH}_4$  排放累积量在  $82.8 \sim 318 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$  (以 C 计, 下同) 之间变化, 在晚稻生育期间, 各处理的  $\text{CH}_4$  排放累积量则在  $268 \sim 573 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$  之间变化。



注: 柱形图不同字母表示相同生长季不同处理间在 0.05 水平差异显著。Note: Different letters in the bar graph indicate significant differences between treatments at the 0.05 level for the same growing season.

图 2 2022 年不同处理下稻田土壤  $\text{CH}_4$  排放日通量 (a) 与累积排放量 (b)

Fig. 2 The  $\text{CH}_4$  emission fluxes (a) and cumulative emissions (b) of paddy soil under different treatments in 2022

基于观测数据比较了短期和长期秸秆还田下稻田  $\text{CH}_4$  增排效应的差异 (表 2)。  $\text{CH}_4$  的累积排在短期与长期均随秸秆的增加而显著增加 ( $P < 0.05$ ), 在秸秆还田第 1 年、第 3 年和第 11 年, LS 和 HS 的  $\text{CH}_4$  排放量整体均值分别为 CON 处理的 6.2 倍和 12.9 倍 (LS 和 HS, 下同)、4.6 倍和 8.8 倍、1.5 倍和 2.1 倍。在连续施肥的第 11 年, CON 处理下水稻产量有所降低 (表 2), LS 和 HS 产量相对初期无显著差异, 随着还田年限的增加, LS 和 HS 处理产量相对 CON 由显著低于和无显著差异, 转变为第 11 年下显著增加 12.2% 和 13.8% ( $P < 0.05$ )。各处理单位产量甲烷排放量的比值与秸秆添加量呈正相关关系, 但随着还田年限的增加而降低, 第 11 年, LS 和 HS 处理相对第 1 年的比值分别降低了 79.2% 和 85.5%。

表 2 不同年份下不同处理的甲烷累积排放量、水稻产量、甲烷排放量比值及单位产量下甲烷排放强度比值

**Table 2** Cumulative methane emissions, rice yield, methane emission ratios and methane emission intensity ratios per unit of yield for different treatments in different years

年份 Year	处理 Treatment	甲烷累积排放量 Cumulative methane emissions/(kg·hm <sup>-2</sup> )	产量 Yield/(t·hm <sup>-2</sup> )	甲烷排放量比值 <sup>①</sup> (vs CON)	单位产量下甲烷排放比值 <sup>②</sup> (vs CON)
2012	CON	91.6±0.5c	10.6±0.5a	1	1
	LS	565.9±0.6b	9.9±0.6b	6.2	6.6
	HS	1176.6±0.4a	10.6±0.4a	12.9	12.9
2014	CON	177.7±0.5c	11.7±0.5a	1	1
	LS	822.8±0.3b	11.8±0.3a	4.6	4.6
	HS	1554.3±0.6a	11.3±0.6a	8.8	9.2
2022	CON	379.3±0.8c	9.8±0.8b	1	1
	LS	586.1±0.4b	11.1±0.4a	1.5	1.4
	HS	807.2±0.3a	11.2±0.3a	2.1	1.9

注：表中不同字母表示相同年份不同处理间在 0.05 水平差异显著，2012 年和 2014 年的相关数据来源于已发表于文献<sup>[10-13]</sup>。Note: Different letters in the table indicate significant differences between different treatments in the same year at the 0.05 level. The related data for the first and third years are derived from published literature<sup>[10-13]</sup>. ① Ratio of methane emissions ② Ratio of methane emissions per unit of production.

### 2.3 长期秸秆还田下的土壤因子及其变化

在连续秸秆还田第 11 年的土壤中 SOC 和 TN 含量相较于 CON 得到显著提升（表 3）（ $P < 0.05$ ），且随秸秆添加量的增加而增加，LS 和 HS 分别对应 CON 处理的增幅为：18.5% 和 29.1%（SOC），12.2% 和 24.9%（TN）；各处理土壤间 pH 无显著差异；LS 和 HS 处理土壤 BD 相较 CON 分别降低了 10.3% 和 11.2%（ $P < 0.05$ ）。整个水稻生长期平均而言，LS 和 HS 处理的 Eh 相较 CON 分别显著降低 14.1% 和 21.8%（ $P < 0.05$ ）。HS 处理中土壤 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 含量显著低于 LS 和 CON 处理（ $P < 0.05$ ）；LS 和 HS 处理下土壤中 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N、MBC 和 DOC 的整体平均含量均显著大于仅施用化肥（ $P < 0.05$ ），其中土壤 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 含量分别相较 CON 处理显著增加了 15.0% 和 25.7%（ $P < 0.05$ ）；DOC 含量分别相较 CON 处理显著增加了 19.5% 和 31.3%（ $P < 0.05$ ）；MBC 含量分别相较 CON 处理显著增加了 31.0% 和 47.3%。

表 3 2022 年不同秸秆还田量下土壤基本性质

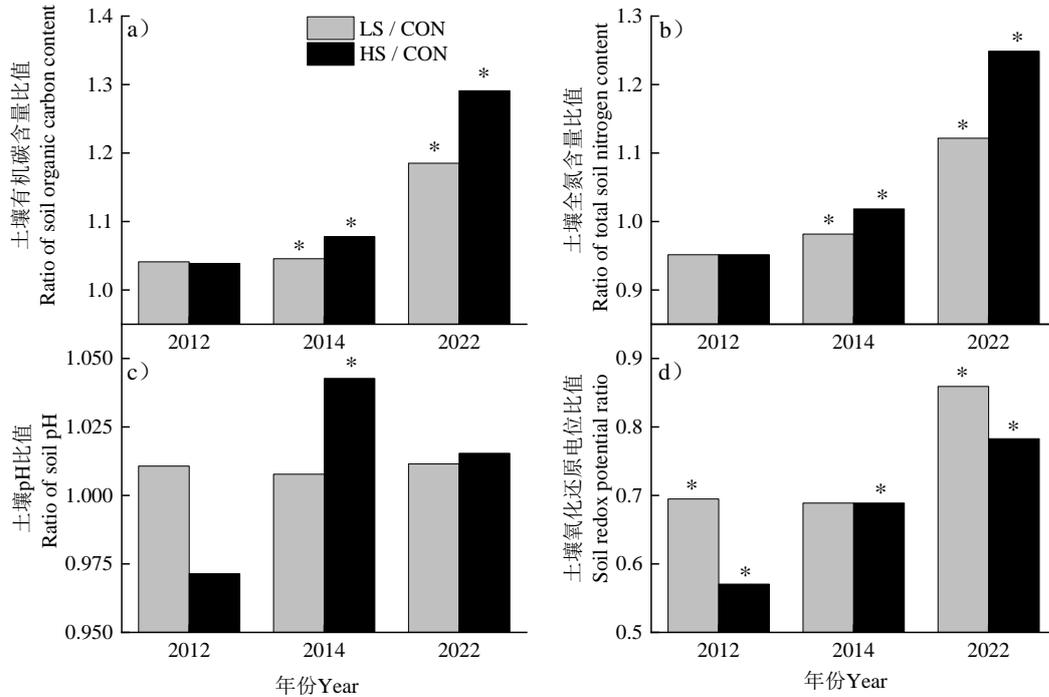
**Table 3** Basic properties of soil under different straw incorporation rates in 2022

处理 Treatment	SOC / (g·kg <sup>-1</sup> )	TN / (g·kg <sup>-1</sup> )	pH	BD / (g·cm <sup>-3</sup> )	Eh/ (mV)	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N / (mg·kg <sup>-1</sup> )	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N / (mg·kg <sup>-1</sup> )	DOC / (mg·kg <sup>-1</sup> )	MBC / (mg·kg <sup>-1</sup> )
CON	18.9±0.24c	1.88±0.02c	5.21±0.07a	1.16±0.03a	-41.9±1.2a	0.06±0.0a	30.7±1.1b	90.3±2.8c	1234±74.8c
LS	22.4±0.10b	2.16±0.04b	5.27±0.05a	1.06±0.01b	-47.8±0.8b	0.06±0.0a	35.3±1.1a	112.7±4.6b	1616±73.0b
HS	24.4±0.21a	2.34±0.09a	5.29±0.01a	1.03±0.01c	-51.0±0.2c	0.05±0.0b	38.6±2.5a	125.3±1.9a	1818±87.9a

注：MBC：微生物生物量碳；同一列数值后面不同字母代表处理之间存在显著差异（ $P < 0.05$ ）。下同。Note: MBC: Microbial biomass carbon; Different letters following the values in the same column represent significant differences between treatments ( $P < 0.05$ ). The same as below.

本研究发现秸秆还田能显著增加 SOC（图 3a）和 TN（图 3b）含量，在 2012 年，处理间 SOC 含量无显著差异，而 2014 年，与 CON 相比，LS 和 HS 土壤 SOC 含量分别显著增加了 4.6% 和 7.8%，2022 年，SOC 含量分别显著增加了 18.5% 和 29.1%（ $P < 0.05$ ）。LS 和 HS 处理的 TN 含量在秸秆还田第 1 年和第 3

年未表现出显著差异, 但 LS 和 HS 相对 CON 处理下 SOC 和 TN 含量的增幅随年限的增长呈现上升的趋势。各处理间土壤 pH 的差异 (图 3c) 随还田年限的变化并不显著, 仅在还田第 3 年, HS 处理相对 CON 增加了 4.3%。LS 和 HS 相对 CON 处理 Eh 的差异 (图 3d) 随还田年限的增加整体表现出减小的趋势, 在 2012 年, LS 和 HS 分别相对 CON 处理减少了 30.5% 和 42.9%, 在 2022 年, 该数值变为 14.1% 和 21.8% ( $P < 0.05$ )。



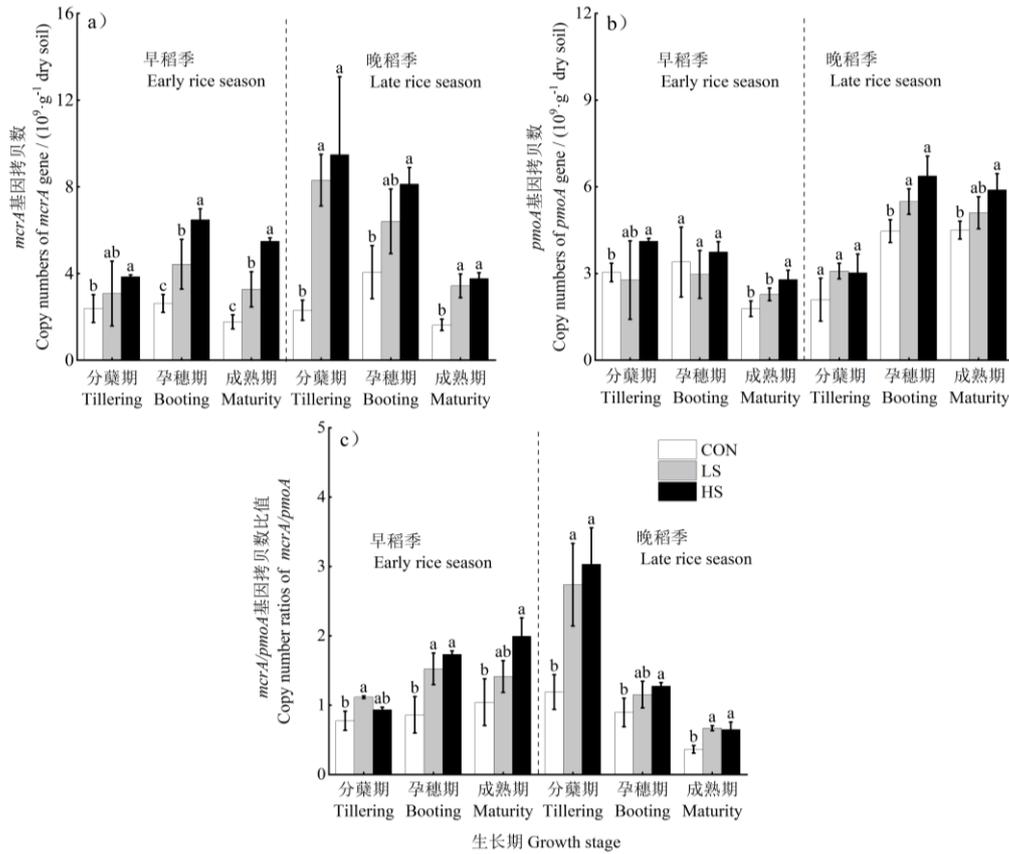
注: 2012 年、2014 年的相关数据来源于已发表文献<sup>[10-13]</sup>, “\*” 表示该处理与 CON 的绝对值之间存在显著差异 ( $P < 0.05$ )。Note: The related data for 2012, 2014 from published literature<sup>[10-13]</sup>, “\*” indicates that there is a significant difference in the absolute value of relative CON between the treatments ( $P < 0.05$ ).

图 3 2012 年、2014 年和 2022 年秸秆还田处理 SOC 含量 (a)、TN 含量 (b)、pH (c) 和 Eh (d) 相对常规施肥 (CON) 的比值

Fig. 3 Ratio of SOC content (a), TN content (b), pH (c), and Eh (d) in straw treatments relative to those in routine fertilization (CON) in 2012, 2014 and 2022

#### 2.4 长期秸秆还田下的 *mcrA* 和 *pmoA* 功能基因与 $\text{CH}_4$ 排放冗余分析

*mcrA* 和 *pmoA* 基因分别通过编码甲基辅酶 M 还原酶将产甲烷底物转化为甲烷, 和编码甲烷氧化单加氧酶实现甲烷氧化, 且由于其几乎分别存在于所有的产甲烷菌和甲烷氧化菌中, 而被广泛运用于  $\text{CH}_4$  相关的研究<sup>[16]</sup>。本研究中, 在秸秆还田第 11 年水稻生长季, 各处理的 *mcrA* 基因丰度在早稻季随着水稻生长逐渐增加 (图 4a), 在成熟期出现降低, 在晚稻季会随着水稻的生长保持降低的趋势; 整体而言, LS 和 HS 处理的 *mcrA* 基因丰度显著大于 CON 处理, 分别增加了 96.0% 和 152% ( $P < 0.05$ )。各处理的 *pmoA* 基因丰度在早稻生长期出现逐渐降低的趋势 (图 4b), 但在晚稻生长期会保持上升趋势; 整体而言, LS 和 HS 处理的 *pmoA* 基因丰度与 CON 处理相比显著增加了 12.7% 和 34.8% ( $P < 0.05$ )。各处理的 *mcrA/pmoA* 丰度比值在早稻生长期呈逐渐上升的变化动态 (图 4c), 但在晚稻生长期会保持逐渐降低的趋势; 整体而言, LS 和 HS 处理的 *mcrA/pmoA* 基因丰度比值与 CON 处理相比, 分别增加 73.9% 和 85.8% ( $P < 0.05$ )。

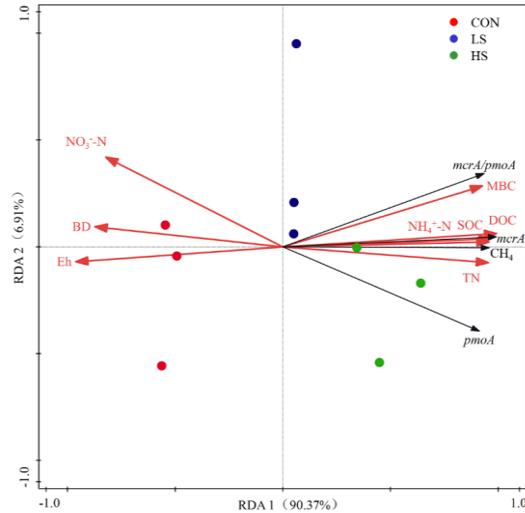


注：柱形图不同字母表示相同生长期不同处理间在 0.05 水平差异显著。Note: Different letters in the bar graph indicate significant differences between treatments at the 0.05 level for the same growing stage.

图 4 2022 年水稻不同生长期土壤 CH<sub>4</sub> 相关微生物功能基因拷贝数与比值

Fig. 4 Copy number and ratio of CH<sub>4</sub>-related microbial functional genes in different growth periods of rice in 2022

通过对与 CH<sub>4</sub> 排放相关的土壤因子进行冗余分析 (RDA)，降维后发现 (图 5)，轴 1 很好地解释了秸秆还田第 11 年 CH<sub>4</sub> 排放量及其相关微生物功能基因丰度与土壤因子的相关性 (90.4%)，其中 SOC、DOC、Eh、NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N、TN、MBC、BD 和 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 对响应变量的综合解释度分别达到了 89.1%、84.5%、83.7%、82.9%、82.4%、78.3%、69.0% 和 62.5% (P < 0.05)，响应变量与 SOC、DOC、MBC、TN、NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 呈正相关关系，与 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N、Eh 和 BD 呈负相关关系；CH<sub>4</sub> 的排放量与 *mcrA* 丰度和 *mcrA*/*pmoA* 比值具有显著正相关关系 (P < 0.05)。



注：黑色箭头为响应变量，CH<sub>4</sub>：甲烷累积排放量；*mcrA*：*mcrA* 基因拷贝数；*pmoA*：*pmoA* 基因拷贝数；*mcrA/pmoA*：*mcrA* 与 *pmoA* 基因拷贝数比值。红色箭头为解释变量。Note: Black arrows are response variables, CH<sub>4</sub>: cumulative methane emissions; *mcrA*: *mcrA* gene copy number; *pmoA*: *pmoA* gene copy number; *mcrA/pmoA*: *mcrA* to *pmoA* gene copy number ratio. Red arrows are explanatory variables.

图 5 2022 年田间 CH<sub>4</sub> 累积排放量及其相关微生物功能基因与土壤因子的冗余分析 (RDA)

Fig 5 Redundancy analysis (RDA) of cumulative CH<sub>4</sub> emissions and the associated microbial functional genes with soil factors in 2022

## 3 讨论

### 3.1 秸秆还田对土壤性质和微生物因子的长期效应

在本研究初期<sup>[10-13]</sup>，秸秆还田对土壤性质的主要影响在于额外的碳输入，并起到“以碳促氮”的效果，能在短期内增加土壤中 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 和 DOC 浓度，在长期处理下能显著增加土壤 SOC 和 TN 含量（表 3）；刘玲等<sup>[17]</sup>的研究结果表明：随着秸秆施用年份的增加土壤有机碳和全氮分别显著增加 22.13%~100.15% 和 28.98%~84.29%；黄琼等<sup>[18]</sup>的研究也指出秸秆添加能促进土壤固碳，但固碳速率或所降低，本研究的长期结果（表 2）与之相类似。以往的研究表明，土壤 SOC 的增加有利于土壤大团聚体 (>2 mm) 的形成，进而增加土壤孔隙，降低土壤 BD<sup>[19]</sup>。在本研究中，土壤在经过连续 11 年的秸秆还田后，土壤 BD 相较 CON 显著降低（表 3），但在秸秆还田相关的短期 (<5 a) 研究中，土壤 BD 可能并不会发生显著改变<sup>[20]</sup>，这可能是由于水稻土 SOC 积累量与土壤大团聚体颗粒的增加量存在明显的正相关关系，SOC 需与土壤矿物质结合才具有更强的稳定性和络合力<sup>[21]</sup>；秸秆还田初期虽然显著增加了 SOC 含量，但 SOC 含量增幅较小，且未能充分形成稳定的矿物质-SOC 结合态，所以未能对土壤大团聚体和 BD 产生显著影响。前人的研究表明，土壤 BD 的降低，能够增加土壤孔隙和含氧量，提升土壤 Eh<sup>[22]</sup>，这与本研究结果（表 3，图 3）相符。

*mcrA* 与 *pmoA* 功能基因几乎分别存在于所有的产甲烷菌和甲烷氧化菌中<sup>[16]</sup>，被广泛运用于 CH<sub>4</sub> 相关的研究。在本研究中的秸秆还田初期，CH<sub>4</sub> 排放量与 *mcrA/pmoA* 之间呈显著正相关关系，添加秸秆和淹水会迅速激发产甲烷菌生长，但秸秆还田与常规施肥之间 *pmoA* 基因丰度无显著差异<sup>[10-14]</sup>。在连续秸秆还田第 11 年，田间 CH<sub>4</sub> 排放与 *mcrA/pmoA* 之间具有较为一致的动态变化特征和显著正相关关系（图 4，图 5）；此外，长期秸秆还田整体上显著增加了 *pmoA* 丰度（图 4），王彬浩等<sup>[23]</sup>从甲烷氧化菌关键物种丰度显著升高角度证实：长期秸秆还田有利于增加土壤 *pmoA* 基因丰度，并降低 *mcrA/pmoA* 比值。其中的原因可能是，长期秸秆还田从增加土壤的氮养分含量、促进水稻根系生长、降低土壤 BD、改善土壤通气性、促进氧气

输送等方面, 导致甲烷氧化菌快速增长<sup>[24]</sup>。

### 3.2 长期秸秆还田下稻田 CH<sub>4</sub> 增排效应的变化及影响机制

通过与本研究秸秆还田初期 LS 和 HS 处理相对 CON 处理的 CH<sub>4</sub> 累积特征<sup>[10-13]</sup>进行对比, 发现 LS 和 HS 随着秸秆还田的年限增加, 其相对 CON 处理下 CH<sub>4</sub> 的排放增幅和单位产量下 CH<sub>4</sub> 排放强度呈现下降的趋势 (表 2), 且 CON、LS 和 HS 处理之间始终保持显著 ( $P < 0.05$ ) 的差异。这与 Jiang 等<sup>[24]</sup>的相关研究结果是相符的: 秸秆还田短期 (5 a 及以内) 相对常规施肥的 CH<sub>4</sub> 排放量的比值会显著高于长期 (大于 5 a) ( $P < 0.05$ ), 黄琼等<sup>[18]</sup>的研究也发现稻田 CH<sub>4</sub> 排放量在长期 (13 a) 与短期 (2 a) 虽然均与秸秆还田量正相关, 但长期还田下 CH<sub>4</sub> 的促排效应有所降低。

在秸秆还田初期, 处理间 Eh 的差异是导致各处理间 CH<sub>4</sub> 排放存在差异的主要原因<sup>[11]</sup>, 而连续秸秆还田后 CH<sub>4</sub> 排放量的相对增幅降低 (表 2) 的原因可能是: (1) 土壤孔隙的数量、大小和形态等直接影响土壤中水分和气体的运动, 水稻土的 CH<sub>4</sub> 排放与土壤的大孔隙度呈显著负相关关系, 气体在大孔隙土壤中能够快速扩散, 使土壤中甲烷氧化菌等好氧微生物利用更多的氧气, 从而减少 CH<sub>4</sub> 的排放<sup>[25]</sup>。在长期秸秆还田后, 土壤中 SOC 的含量得到显著提升 (表 3), 有利于土壤大团聚体 (>2 mm) 的形成, 并增加土壤通气性和含氧量<sup>[26]</sup>, 与之相符的是本研究中土壤 BD 实现了降低, 土壤 Eh 得到了提升 (表 3), 利好甲烷氧化菌的生长和 *pmoA* 功能基因表达<sup>[27]</sup>; 稻田土壤甲烷氧化过程中 I 型甲烷氧化菌起主导作用, 秸秆还田后土壤 SOC 的增加能改变土壤团聚体、孔隙度等, 进而改变土壤微域中 CH<sub>4</sub> 和 O<sub>2</sub> 浓度, 为 I 型甲烷氧化菌提供充分的底物 (如 CH<sub>4</sub> 和 O<sub>2</sub> 浓度、氮素营养) 条件, 使其更容易获得生长优势<sup>[28]</sup>, 从而在一定程度上减少了 CH<sub>4</sub> 的排放。(2) 长期秸秆还田可能从增加土壤 TN 和 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 的含量及促进田间水中藻类的生长进而增加 DO 浓度两个方面, 促进土壤 *pmoA* 功能基因的表达, 提升土壤的甲烷氧化潜力, 从而减少 CH<sub>4</sub> 的排放<sup>[24]</sup>; 本研究结果 (图 1, 表 2, 表 3, 图 3) 与之类似。(3) 在低 SOC 含量的土壤中微生物的碳利用效率低, 激发效应强, 在高 SOC 含量土壤中则反之<sup>[29]</sup>, 表明随着秸秆还田的持续进行, CH<sub>4</sub> 中由激发效应而产生的部分可能减弱。

综合而言, 长期秸秆还田 CH<sub>4</sub> 排放降低是多因素共同影响的结果, 虽然最终排放通量相对常规施用化肥依然是显著增加, 但其相对于第一年的 CH<sub>4</sub> 排放和单位产量下排放强度的增幅降低, 说明连续秸秆还田有着增产减排的潜力。因此, 以往相关 CH<sub>4</sub> 排放预测模型中, 将 CH<sub>4</sub> 的农业排放用固定因子进行预测, 或认为高 SOC 土壤中产生更多的 CH<sub>4</sub> 等是有待商榷的<sup>[30]</sup>。今后有必要深入研究长期秸秆还田下土壤性质改变与 CH<sub>4</sub> 排放量的定量关系, 从而提高稻田 CH<sub>4</sub> 排放量估算的准确性。

## 4 结论

本研究发现连续秸秆还田能够显著改变稻田土壤理化性质, 导致 CH<sub>4</sub> 排放量相对常规施用化肥增加, 但秸秆还田相较于常规施用化肥下对 CH<sub>4</sub> 排放增强的幅度有所降低, 长期连续还田后受土壤中 SOC 含量增加的影响, 土壤 BD 降低和 Eh 上升, 导致 *pmoA* 丰度上升和 *mcrA/pmoA* 丰度比值降低, 从而减弱了秸秆还田导致的稻田 CH<sub>4</sub> 增排效应。本研究的秸秆施加是基于当地还田习惯设置的, 说明按当前模式进行长期的秸秆还田, 能够改善稻田土壤养分, 具有缓解温室气体排放的潜力, 未来需要针对秸秆还田的方式 (还田的模式、秸秆的改性等) 和 CH<sub>4</sub> 排放预测参数进行科学合理的改进, 使得秸秆还田能够具有长期稳定生态效益, 并提高 CH<sub>4</sub> 排放量评估的准确性。

参考文献 (References)

- [1] IPCC. Climate change 2021: The physical science basis: Working group I contribution to the sixth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change[R]. New York: Cambridge University Press, 2021.
- [2] Zhang B W, Tian H Q, Ren W, et al. Methane emissions from global rice fields: Magnitude, spatiotemporal patterns, and environmental controls[J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2016, 30(9): 1246-1263..
- [3] Jiang M D, Yang N P, Zhao J S, et al. Crop straw incorporation mediates the impacts of soil aggregate size on greenhouse gas emissions[J]. *Geoderma*, 2021, 401: 115342.
- [4] Dai X L, Liu Y H, Sun J P, et al. Combined effects of straw return and reduced nitrogen fertilizer application on greenhouse gas emissions and nitrogen use efficiency in a coastal saline paddy field[J]. *Chinese Journal of Applied and Environmental Biology*, 2023, 29(4): 994-1005. [戴相林, 刘雅辉, 孙建平, 等. 秸秆还田和氮肥减施对滨海盐渍土稻田温室气体排放及氮肥利用率的影响[J]. *应用与环境生物学报*, 2023, 29(4): 994-1005.]
- [5] Hu N J, Wang B J, Gu Z H, et al. Effects of different straw returning modes on greenhouse gas emissions and crop yields in a rice-wheat rotation system[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2016, 223: 115-122.
- [6] Hu Q Y, Liu T Q, Jiang S S, et al. Combined effects of straw returning and chemical N fertilization on greenhouse gas emissions and yield from paddy fields in northwest Hubei Province, China[J]. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 2020, 20(2): 392-406.
- [7] Li Y H, Shahbaz M, Zhu Z K, et al. Oxygen availability determines key regulators in soil organic carbon mineralisation in paddy soils[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2021, 153: 108106.
- [8] Huang J Y, Nie T Z, Li T C, et al. Effects of straw incorporation years and water-saving irrigation on greenhouse gas emissions from paddy fields in cold region of Northeast China[J]. *Agriculture*, 2022, 12(11): 1878.
- [9] Okiobe S T, Augustin J, Mansour I, et al. Disentangling direct and indirect effects of mycorrhiza on nitrous oxide activity and denitrification[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2019, 134: 142-151.
- [10] Liu J, Jiang B S, Shen J L, et al. Contrasting effects of straw and straw-derived biochar applications on soil carbon accumulation and nitrogen use efficiency in double-rice cropping systems[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2021, 311: 107286.
- [11] Shen J L, Tang H, Liu J Y, et al. Contrasting effects of straw and straw-derived biochar amendments on greenhouse gas emissions within double rice cropping systems[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2014, 188: 264-274.
- [12] Chen D, Wang C, Shen J L, et al. Response of CH<sub>4</sub> emissions to straw and biochar applications in double-rice cropping systems: Insights from observations and modeling[J]. *Environmental Pollution*, 2018, 235: 95-103.
- [13] Wang C, Shen J L, Tang H, et al. Greenhouse gas emissions in response to straw incorporation, water management and their interaction in a paddy field in subtropical central China[J]. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 2017, 63(2): 171-184.
- [14] Wu N, Hou H J, Tang Y F, et al. Methane-related microbe influenced by water management and rille straw returning in paddy soil[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2016, 32(S2): 69-76. [吴讷, 侯海军, 汤亚芳, 等. 稻田水分管理和秸秆还田对甲烷排放的微生物影响[J]. *农业工程学报*, 2016, 32(S2): 69-76.]
- [15] Singh J S, Singh S, Raghubanshi A S, et al. Methane flux from rice/wheat agroecosystem as affected by crop phenology, fertilization and water level[J]. *Plant and Soil*, 1996, 183(2): 323-327.
- [16] Liebner S, Svenning M M. Environmental transcription of mmoX by methane-oxidizing Proteobacteria in a subarctic Palsa Peatland[J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 2013, 79(2): 701-706.
- [17] Liu L, Cui J F, Yang H W, et al. Effects of exogenous organic materials on soil nutrients and organic carbon components in hilly region of central Sichuan, China[J]. *Soils*, 2023, 55(5): 991-1000. [刘玲, 崔俊芳, 杨红薇, 等. 长期外源有机物料添加对川中丘陵区农田土壤养分和有机碳组分的影响[J]. *土壤*, 2023, 55(5): 991-1000.]
- [18] Huang Q, Zhu X L, Shen W Y, et al. Effects of straw incorporation years and rates on net global warming potential in paddy fields[J]. *Soils*, 2022, 54(5): 912-919. [黄琼, 朱小莉, 沈皖豫, 等. 秸秆还田年限及还田量对稻田净温室效应的影响[J]. *土壤*, 2022, 54(5): 912-919.]
- [19] Sheng H J, Niu D, Sun G Y, et al. Research progress of effect of direct straw returning on soil microorganism, physical and chemical characteristics and enzyme activities[J]. *Hans Journal of Soil Science*, 2016, 4(2): 19-26.
- [20] Wen M J, Yang S C, Wang C B, et al. Effects of different tillage and straw returning on soil physicochemical properties, enzyme activities in sierozem, and maize yield[J/OL]. *Chinese Journal of Ecology*, 2024: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/21.1148.Q.20240314.1803.012.html>.

- [温美娟, 杨思存, 王成宝, 等. 不同耕作和秸秆还田方式对灰钙土土壤理化性状、酶活性及玉米产量的影响[J/OL]. 生态学杂志, 2024: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/21.1148.Q.20240314.1803.012.html>.]
- [21] Zhou P, Song G H, Pan G X, et al. SOC enhancement in three major types of paddy soils in a long-term agro-ecosystem experiment in South China ii. chemical binding and protection in micro-aggregate size fractions[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2009, 46(2): 263-273. [周萍, 宋国茵, 潘根兴, 等. 三种南方典型水稻土长期试验下有机碳积累机制研究II. 团聚体内有机碳的化学结合机制[J]. *土壤学报*, 2009, 46(2): 263-273.]
- [22] Tian C, Cheng S, Xing Z P, et al. Effects of wheat straw returning and land preparation on rice yield and quality under mechanical transplanting[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2023, 39(15): 46-56. [田超, 程爽, 邢志鹏, 等. 麦秸秆全量还田下耕整地方式对机插水稻产量和品质的影响[J]. *农业工程学报*, 2023, 39(15): 46-56.]
- [23] Wang B H, Wu Y P, Chen Y B, et al. Effects of straw returning on soil microbial functional genes and functional groups[J/OL]. *Journal of Zhejiang University (Agriculture & Life Sciences)*, 2024: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/33.1247.S.20240110.1436.002.html>. [王彬浩, 吴愉萍, 陈彦博, 等. 秸秆还田对土壤微生物功能基因和功能类群的影响[J/OL]. *浙江大学学报(农业与生命科学版)*, 2024: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/33.1247.S.20240110.1436.002.html>.]
- [24] Jiang Y, Qian H Y, Huang S, et al. Acclimation of methane emissions from rice paddy fields to straw addition[J]. *Science Advances*, 2019, 5(1): eaau9038.
- [25] Sun Y X, Zhang G B, Fang H, et al. Effects of pore structure on greenhouse gas emission of paddy soils[J]. *Soils*, 2021, 53(1): 154-160. [孙钰翔, 张广斌, 房焕, 等. 孔隙结构对水稻土温室气体排放的影响[J]. *土壤*, 2021, 53(1): 154-160.]
- [26] Dong J X, Cong P, Liu N, et al. Effects of deep straw incorporation on subsoil physical properties and aggregate distribution in black soil[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2021, 58(4): 921-934. [董建新, 丛萍, 刘娜, 等. 秸秆深还对黑土亚耕层土壤物理性状及团聚体分布特征的影响[J]. *土壤学报*, 2021, 58(4): 921-934.]
- [27] Hu X Y, Xiang Q J, Mu Z J. Effects of gypsum on CH<sub>4</sub> emission and functional microbial communities in paddy soil[J]. *Environmental Science*, 2018, 39(8): 3894-3900. [胡翔宇, 向秋洁, 木志坚. 脱硫石膏对稻田 CH<sub>4</sub> 释放及其功能微生物种群的影响[J]. *环境科学*, 2018, 39(8): 3894-3900.]
- [28] Lee J, Oh Y, Lee S T, et al. Soil organic carbon is a key determinant of CH<sub>4</sub> sink in global forest soils[J]. *Nature Communications*, 2023, 14(1): 3110.
- [29] Liu B J, Bei Q C, Wang X J, et al. Microbial metabolic efficiency and community stability in high and low fertility soils following wheat residue addition[J]. *Applied Soil Ecology*, 2021, 159: 103848.
- [30] He C M, Chi Y Y, Xiang P P, et al. CH<sub>4</sub> emission scenario analysis for China: IPAC results[J]. *Transactions of Atmospheric Sciences*, 2022, 45(3): 414-427. [贺晨旻, 迟远英, 向翩翩, 等. 我国甲烷排放情景分析: IPAC 模型结果[J]. *大气科学学报*, 2022, 45(3): 414-427.]

(责任编辑: 陈荣府)