

延长烤田时间减少紫云英翻压稻田甲烷排放

王赢, 林余涛, 杨文斌, 王家嘉, 左双宝, 宋朝辉, 周楠楠

引用本文:

王赢, 林余涛, 杨文斌, 王家嘉, 左双宝, 宋朝辉, 周楠楠. 延长烤田时间减少紫云英翻压稻田甲烷排放[J]. 农业环境科学学报, 2022, 41(8): 1836–1845.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11654/jaes.2021-1448>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

紫云英还田对早稻直播稻田温室气体排放的影响

聂江文, 王幼娟, 吴邦魁, 刘章勇, 朱波

农业环境科学学报. 2018, 37(10): 2334–2341 <https://doi.org/10.11654/jaes.2018-0195>

不同水旱轮作模式全生命周期温室效应及经济效益评价

岳骞, 吴思远, 张岳芳, 盛婧, 郭智, 陈丹艳, 汪超, 徐向瑞, 王鑫, 宗焦

农业环境科学学报. 2022, 41(8): 1825–1835 <https://doi.org/10.11654/jaes.2021-1433>

巢湖圩区再生稻田甲烷及氧化亚氮的排放规律研究

王天宇, 樊迪, 宋开付, 张广斌, 徐华, 马静

农业环境科学学报. 2021, 40(8): 1829–1838 <https://doi.org/10.11654/jaes.2021-0181>

稻草还田和冬种绿肥对华南双季稻产量及稻田CH₄排放的影响

田卡, 张丽, 钟旭华, 黄农荣, 张卫建, 潘俊峰

农业环境科学学报. 2015(3): 592–598 <https://doi.org/10.11654/jaes.2015.03.024>

绿肥配施减量化肥对土壤固氮菌群落的影响

方宇, 王飞, 贾宪波, 林陈强, 张慧, 陈龙军, 陈济琛

农业环境科学学报. 2018, 37(9): 1933–1941 <https://doi.org/10.11654/jaes.2018-0509>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

王赢, 林余涛, 杨文斌, 等. 延长烤田时间减少紫云英翻压稻田甲烷排放[J]. 农业环境科学学报, 2022, 41(8): 1836–1845.

WANG Y, LIN Y T, YANG W B, et al. Increasing the drainage period to reduce methane emissions from Chinese milk vetch (*Astragalus sinicus* L.) ploughed paddy field[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2022, 41(8): 1836–1845.



开放科学 OSID

延长烤田时间减少紫云英翻压稻田甲烷排放

王赢^{1,3}, 林余涛¹, 杨文斌¹, 王家嘉², 左双宝⁴, 宋朝辉¹, 周楠楠^{1*}

(1. 安徽师范大学生态与环境学院, 皖江流域退化生态系统的恢复与重建省部共建协同创新中心, 安徽 芜湖 241003; 2. 安徽省农业科学院土壤肥料研究所, 安徽养分循环与资源环境省级实验室, 合肥 230001; 3. 安徽师范大学化学与材料科学学院, 分子基材料安徽省重点实验室, 安徽 芜湖 241003; 4. 巨石集团有限公司, 巨石复合材料研究院, 浙江 桐乡 314500)

摘 要:为明确紫云英翻压还田模式对稻田甲烷(CH_4)排放的影响,同时通过延长烤田时间的优化水分管理措施减少该模式下 CH_4 的排放,开展了连续5 a的田间定位试验(2016—2020年),设置4种处理:不施化肥+传统水分管理(分蘖末期排水烤田7 d, CK)、常规单施化肥+传统水分管理(CF)、紫云英翻压+氮肥减施+传统水分管理(MF)、紫云英翻压+氮肥减施+优化水分管理(在传统基础上提前并增加5 d烤田时间, MFW)。结果显示:5 a间MF处理下水稻生长期 CH_4 排放量为 $542\sim 658\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$,年均排放量相较CK和CF处理分别增加了156%~231%和133%~196%。与MF处理相比,MFW处理使2016、2017年和2019年的第一个 CH_4 排放高峰期(分蘖期)提前衰减,增加了2018年和2020年 CH_4 排放的衰减速率,年排放量显著下降了16.2%~28.5%($P<0.05$)。与CF处理相比,MF处理下2018、2019、2020年的年产量分别显著增加了6.85%、10.25%和9.79%($P<0.05$),并且MF处理明显降低了产量变异系数并提高了产量可持续性指数。MF和MFW处理下水稻产量没有显著差异。研究表明,紫云英翻压还田具有增产稳产的积极作用,但同时增加了 CH_4 的排放,而优化后的水分管理措施在保障水稻产量的基础上能够有效减少紫云英翻压稻田 CH_4 的排放。

关键词:紫云英;水稻;甲烷排放;水分管理

中图分类号:S142 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2022)08-1836-10 doi:10.11654/jaes.2021-1448

Increasing the drainage period to reduce methane emissions from Chinese milk vetch (*Astragalus sinicus* L.) ploughed paddy field

WANG Ying^{1,3}, LIN Yutao¹, YANG Wenbin¹, WANG Jiajia², ZUO Shuangbao⁴, SONG Zhaohui¹, ZHOU Nannan^{1*}

(1. Center of Cooperative Innovation for Recovery and Reconstruction of Degraded Ecosystem in Wanjiang City Belt, School of Ecology and Environment, Anhui Normal University, Wuhu 241003, China; 2. Anhui Provincial Key Laboratory of Nutrient Recycling, Resources and Environment, Soil and Fertilizer Research Institute, Anhui Academy of Agricultural Sciences, Hefei 230001, China; 3. Anhui Laboratory of Molecule-Based Materials, School of Chemistry and Materials Science, Anhui Normal University, Wuhu 241003, China; 4. Jushi Institute of Composite Materials, Jushi Group Co., Ltd., Tongxiang 314500, China)

收稿日期:2021-12-15 录用日期:2022-02-09

作者简介:王赢(1984—),男,安徽安庆人,博士,副教授,主要从事农田养分循环及其环境效应研究。E-mail:gleaner@foxmail.com

*通信作者:周楠楠 E-mail:nannanzh@ahnu.edu.cn

基金项目:国家重点研发计划项目(2016YFD0300906);安徽省自然科学基金项目(1708085QD88, 2008085QD162);安徽省高校自然科学基金项目(KJ2018A0316, KJ2019A0492);安徽高校协同创新项目(GXXT-2020-075);分子基材料安徽省重点实验室开放基金项目(fzj19012);养分循环与资源环境安徽省重点实验室开放基金项目;安徽师范大学校立项目(2018XJJ55, 2018XJJ56, 2018XJJ81, 2018XJJ94);安徽省留学人员创新项目择优资助计划项目

Project supported: The National Key Research and Development Program of China (2016YFD0300906); The Natural Science Foundation of Anhui Province, China (1708085QD88, 2008085QD162); The University Natural Science Research Project of Anhui Province (KJ2018A0316, KJ2019A0492); Project of Collaborative Innovation in Anhui Colleges and Universities (GXXT-2020-075); The Foundation of Anhui Laboratory of Molecule-Based Materials (fzj19012); The Foundation of Anhui Provincial Key Laboratory of Nutrient Recycling; The Foundation of Anhui Normal University (2018XJJ55, 2018XJJ56, 2018XJJ81, 2018XJJ94); The Anhui Provincial Foundation for Overseas Students

Abstract: To clarify the effects of the Chinese milk vetch (*Astragalus sinicus* L., CMV) returning model on methane (CH_4) emissions from paddy fields and to optimize water management by increasing the drainage period to reduce CH_4 emissions, a five-year *in-situ* field experiment was carried out from 2016 to 2020. Four treatments were designed, including non-fertilization + traditional water management (draining and drying the field at the late tillering stage for seven days, CK), conventional chemical fertilizer + traditional water management (CF), CMV + reduced nitrogen fertilizer + traditional water management (MF), and CMV + reduced nitrogen fertilizer + optimized water management (advancing and increasing five days on the basis of traditional water management, MFW). The results showed that the CH_4 emissions under MF treatment ranged from $542 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ to $658 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ during the rice-growing season in the five years, and the average emissions increased by 156%~231% and 133%~196% compared with those under CK and CF treatments, respectively. Compared to those under the MF treatment, the first peak of CH_4 emission (tillering stage) decayed earlier (2016, 2017, and 2019) or faster (2018 and 2020), and the annual emission significantly decreased by 16.2%~28.5% ($P<0.05$). Compared to those under the CF treatment, the yield from 2018 to 2020 significantly increased by 6.85%, 10.25%, and 9.79% under the MF treatment ($P<0.05$). The variation coefficient of yield under the MF treatment decreased, and the sustainability index increased. There was no significant difference between the yields of the MF and MFW treatments. The above results indicated that CMV return had positive effect on increasing and stabilizing rice yield, but it also increased CH_4 emissions. Optimized water management could effectively decrease CH_4 emissions caused by the return of CMV and simultaneously maintain the yield.

Keywords: Chinese milk vetch; paddy rice; methane emissions; water management

大量施用人工合成肥料解决了人口增长带来的粮食短缺问题,但同时也造成了一系列环境污染,如水体富营养化^[1]、大气污染^[2]、土壤状况恶化^[3]、温室气体排放^[4]等。在此背景下,能够部分替代化肥的传统绿肥重新得到重视^[5-6]。紫云英是我国南方稻田常见的豆科绿肥作物,其在稻田固氮、提供养分、培肥地力、丰富土壤碳库、水稻增产和保障粮食安全等方面具有巨大潜力^[7]。

甲烷(CH_4)作为主要的温室气体之一,其增温效应仅次于 CO_2 ^[8],而水稻种植过程中排放的 CH_4 约占全球人为 CH_4 排放总量的17%^[9]。有文献指出紫云英还田会增加稻田 CH_4 排放。周炜等^[10]开展1 a田间试验,对比了长江下游地区紫云英-水稻种植模式与传统种植模式下稻田的温室气体排放,结果表明紫云英还田显著增加了稻田 CH_4 排放。周国朋^[11]通过盆栽试验发现,紫云英配施化肥处理下的 CH_4 排放系数明显高于单施化肥处理。当前相关研究多基于盆栽或短期田间试验(1~2 a),缺乏多年田间定位试验数据的支撑,无法为上述论断提供充足证据。

中期排水烤田是我国水稻种植的传统措施,其初衷在于缓解持续淹水造成的极端还原条件,减小对水稻生长的不良影响和控制无效分蘖^[12]。近年来相继有研究表明中期排水烤田具有降低稻田 CH_4 排放的作用。CAI等^[13]研究发现,排水烤田后的 CH_4 排放通量显著低于排水烤田处理前。钱浩宇^[14]研究了不同水分条件下稻田 CH_4 的排放,结果指出较传统淹水处理,多次“烤田-复水”的间歇灌溉处理显著抑制了 CH_4 排放。

一项在日本北海道开展的田间小区试验结果表明,排水烤田处理下的 CH_4 排放量比持续淹水处理低21%~91%^[15]。但是上述研究中排水烤田前 CH_4 的排放通量已达到较高强度,排水烤田的减排潜力未得到充分发掘,烤田时机有待改善。SOUZA等^[16]通过模型研究指出,可以通过优化排水烤田的时机来减少稻田 CH_4 排放,但是缺乏田间试验数据的对比验证。综上所述,在紫云英还田可能增加稻田 CH_4 排放风险的背景下,如何优化排水烤田措施、减少 CH_4 排放,值得深入研究。

为将绿肥紫云英的环境友好效应最大化,本研究拟通过连续5 a的田间定位试验,探明不同施肥条件下稻田 CH_4 的排放特征和排放量,明确紫云英还田对稻田 CH_4 排放的影响,并通过设置不同排水烤田时间,探索合适的水分管理措施,以期在保障水稻产量的同时,抑制紫云英翻压稻田 CH_4 的排放,为我国实现“双碳”目标提供理论依据和技术支持。

1 材料与方法

1.1 试验点概况

本研究试验区域位于长江下游南岸,安徽省池州市梅陇镇桐梓山村,该地属亚热带季风性湿润气候区,年均气温 16°C ,年均日照时间约1900 h,年均降雨量约1600 mm,无霜期242 d。当地种植方式以单季稻为主。供试土壤为水稻土,质地中壤,耕层土壤(0~20 cm)基本理化性质:pH值6.27,有机质 $23.5 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,总氮 $1.82 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,有效磷 $36.9 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,速效钾 $151.6 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

1.2 试验设计

在水稻分蘖末期进行排水烤田是当地传统水分管理措施。本研究于2016—2020年开展,共设置4种处理:不施化肥+传统水分管理(CK),常规单施化肥+传统水分管理(CF),紫云英翻压+氮肥减施+传统水分管理(MF),紫云英翻压+氮肥减施+优化水分管理(MFW)。每种处理重复3次,小区面积为30 m²(5 m×6 m)。传统水分管理为分蘖末期排水烤田7 d,优化水分管理是在传统管理基础上提前并增加5 d烤田时间,烤田共持续12 d。烤田结束后保持淹水状态(水深30~55 mm),直至水稻收获前2周。常规单施化肥代表当地农民施肥习惯,施用的化肥分别为尿素、过磷酸钙和氯化钾,氮肥按照基肥50%、蘖肥30%、穗肥20%分3次施用,磷肥和钾肥全部作基肥施用,各处理组的施用量见表1。MF、MFW处理组于每年水稻收割后开始种植紫云英,盛花期全部翻压还田,采用当地常见翻压量,即22 500 kg·hm⁻²。前期研究发现该翻压量下紫云英的固氮量约为53.2 kg·hm⁻²,为确保氮输入量与单施化肥处理(220 kg·hm⁻²)基本一致,紫云英还田配施的氮肥量为165 kg·hm⁻²。水稻品种为昌两优8号,5月下旬播种培秧,6月中旬移栽,10月中旬收获,秸秆不还田,水稻收割测产后全部带走。

表1 各处理中紫云英和化肥的施用量(kg·hm⁻²)

Table 1 Applying amounts of Chinese milk vetch and chemical fertilizer under each treatment(kg·hm⁻²)

处理 Treatment	紫云英还田量 Applying amounts of CMV	氮肥 (以N计) Nitrogen fertilizer(in N)	磷肥 (以P ₂ O ₅ 计) Phosphate fertilizer (in P ₂ O ₅)	钾肥 (以K ₂ O计) Potash fertilizer (in K ₂ O)
CK	0	0	0	0
CF	0	220	80	120
MF	22 500	165	80	120
MFW	22 500	165	80	120

1.3 样品采集与分析

1.3.1 水稻产量测定及可持续性分析

每年水稻成熟期对各个试验小区单独收割计产,并采用公式(1)和公式(2)计算水稻产量变异系数(CV,%)和可持续性指数(SYI):

$$CV = \sigma / \bar{x} \times 100\% \quad (1)$$

$$SYI = (\bar{x} - \sigma) / x_{\max} \quad (2)$$

式中: σ 为各处理5 a产量的标准差,kg·hm⁻²; $\bar{x}$ 为各处理5 a产量均值,kg·hm⁻²; $x_{\max}$ 为各处理5 a产量中的

最高值,kg·hm⁻²。CV值越大,说明水稻产量稳定性越差;SYI越大,则稻田产量可持续程度越好(0<SYI<1)。

1.3.2 CH₄的采集与分析

使用密闭静态箱法收集水稻生长期内的CH₄气体样品,采样箱底面积为0.25 m²(0.5 m×0.5 m),箱体高度随作物高度而增加,外部包有泡沫板和铝箔纸以防止箱内温度变化过大。每个田块固定采样底座3个,底座上部有5 cm深的凹槽,采样时加水密封,采样箱内顶部装12 V电池,内接小风扇用于混匀箱内气体,每隔10 min采一次样,共采4次,将抽出的50 mL气体混匀后注入到顶空瓶中进行实验室分析,记录采样期间静态箱内温度。CH₄样品每周采集一次,采集时间为8:00—10:00。CH₄气体浓度由气相色谱仪(Agilent 7890A,安捷伦科技有限公司,美国)测定,CH₄气体检测器为火焰离子化检测器(FID),检测温度300 ℃,柱温55 ℃,载气为99.999%高纯氮气,流速40 mL·min⁻¹。

CH₄排放通量计算公式:

$$F = \rho \times h \times \frac{\Delta c}{\Delta t} \times \frac{273}{T + 273} \quad (3)$$

式中: F 表示CH₄气体排放通量,mg·m⁻²·h⁻¹; ρ 表示标准状态下气体的密度,kg·m⁻³; h 表示采样箱的净高度,m; $\Delta c / \Delta t$ 表示单位时间内采样箱内气体浓度变化率; T 为采样过程中箱内的平均温度,℃。

CH₄排放总量计算公式:

$$E = \sum_{i=1}^n F_i \times 24 \times D_i \quad (4)$$

式中: E 表示CH₄排放总量,kg·hm⁻²; F_i 为两次相邻采样日CH₄排放通量的平均值,mg·m⁻²·h⁻¹; D_i 为两次采样间隔时间,d。

1.4 数据分析

使用SPSS Statistics 25软件对数据进行多重比较(LSD, $P < 0.05$ 表示处理间差异显著),使用Origin 2018制图。

2 结果与分析

2.1 不同处理下CH₄排放通量

由图1可知,不同处理下水稻生长期CH₄排放量变化趋势大致相同,CH₄排放的高峰分别出现于水稻分蘖期和成熟期,且第一个高峰期的排放通量明显高于第二个高峰期,表明本研究中分蘖期的CH₄排放对稻田整体排放量贡献较大。在水稻分蘖末期,各处理CH₄排放通量均出现明显下降趋势。CK和CF处

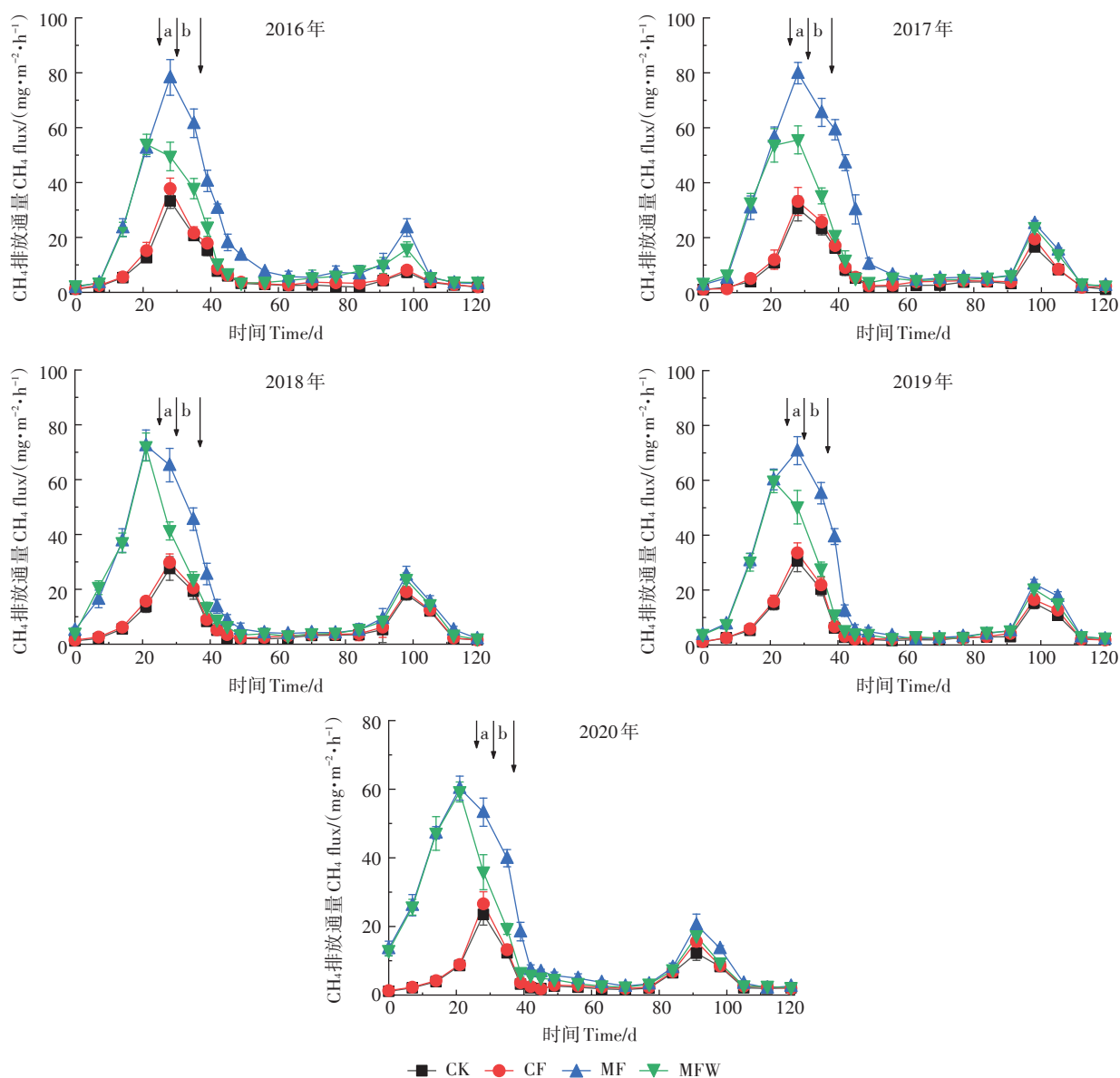
理CH₄排放通量的变化基本一致。在水稻分蘖期, MF处理CH₄排放通量峰值(2016—2020年分别为78.3、79.9、72.5、70.8、60.3 mg·m⁻²·h⁻¹)和持续时间等均高于CK、CF处理。与MF处理相比, MFW处理下2016、2017年和2019年第一个CH₄排放高峰期提前衰减, 2018年和2020年的衰减速率增加。

2.2 不同处理下各时期CH₄排放量及累积排放总量

CF和CK处理间各年CH₄累积排放总量无显著差异(图2)。MF处理CH₄累积排放总量的范围为

542~658 kg·hm⁻²·a⁻¹, 年排放量较CK和CF处理分别增加了156%~231%和133%~196%, 表明与传统单施化肥相比, 翻压紫云英显著增加了稻田CH₄的排放。MFW处理CH₄累积排放总量的范围为455~531 kg·hm⁻²·a⁻¹, 年排放量与MF处理相比显著下降了16.2%~28.5% ($P < 0.05$), 表明优化后的水分管理措施能有效减少翻压紫云英后稻田的CH₄排放, 但其累积排放总量仍然偏高。

在不同时期的排放量方面, 与CF处理相比, MF



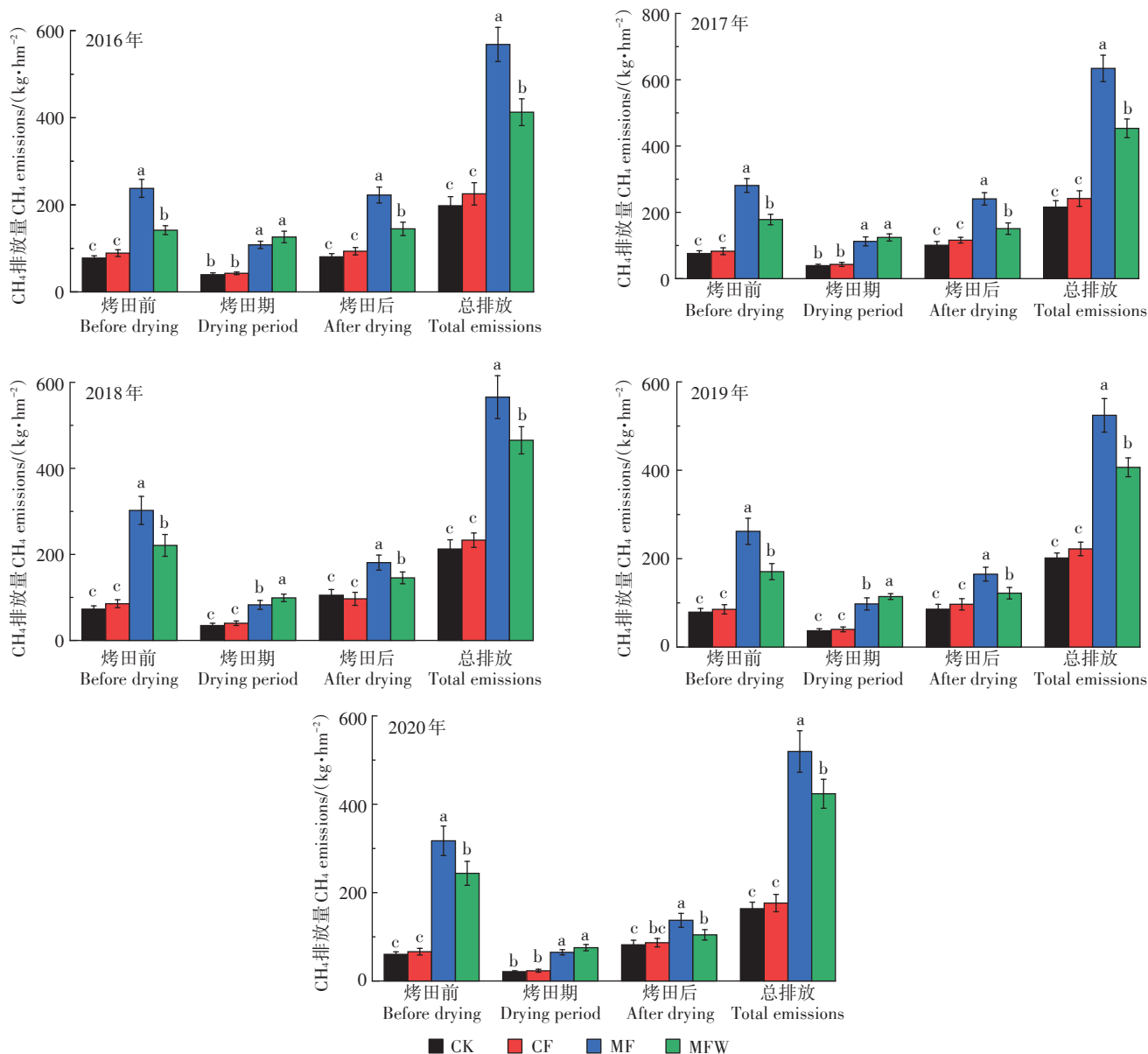
CK、CF、MF处理: 常规烤田, 持续时间b=7 d; MFW处理: 提前并增加烤田时间5 d(a), 合计a+b=12 d

CK, CF, and MF treatments: traditional draining and drying the field for 7 days(b)

MFW treatment: advancing and increasing 5 days(a) based on traditional management(b), total lasting for 12 days(a+b)

图1 不同处理水稻生长期CH₄的排放通量

Figure 1 CH₄ flux under different treatments during rice growing season



不同小写字母表示处理间差异显著($P < 0.05$)

Different lowercase letters indicate significant difference among treatments at $P < 0.05$

图2 不同处理各时期CH₄排放量及累积排放总量

Figure 2 CH₄ emissions in different periods and total cumulative emissions under different treatments

处理导致烤田前CH₄排放量增加148.7~250.9 kg·hm⁻²,烤田期增加41.7~69.5 kg·hm⁻²,烤田后增加50.5~129.1 kg·hm⁻²,分别占累积排放总量增幅的43.3%~73.1%、12.1%~19.1%和14.7%~37.6%,说明翻压紫云英导致CH₄排放增加的主要阶段为烤田前期,也表明该时期具有一定的减排潜力。MFW处理的烤田期多出5 d,但与MF处理相比,MFW处理2016、2017、2020年烤田期的CH₄排放量无显著变化,而2018年和2019年仅分别增加了16.3 kg·hm⁻²和16.5

kg·hm⁻²,说明尽管优化水分管理后烤田期时间延长,但是这一时期的CH₄排放量并没有大幅增加;MFW处理增加的烤田时间被前置到烤田前,致使原本的烤田前期缩短了5 d,烤田前期的CH₄排放量相较于MF处理减少了73.6~102.7 kg·hm⁻²;烤田后期CH₄排放量较MF处理减少了32.8~89.9 kg·hm⁻²;烤田前和烤田后两个时期的CH₄排放减少量分别占累积排放总量降幅的56.8%~81.0%和34.2%~49.9%,说明优化排水烤田措施主要在这两个时期减少了紫云英翻压稻田的CH₄排

放,其中烤田前的贡献更大。

2.3 不同处理下水稻产量及其稳定性和可持续性

由表2可知,CF处理5 a的水稻产量均显著高于CK处理($P<0.05$)。相较于CF处理,2016、2017年MF处理水稻产量未出现显著变化,而2018、2019、2020年则分别显著增加了6.85%、10.25%和9.79% ($P<0.05$),说明持续翻压紫云英对水稻有一定的增产效果。所有年份中MFW和MF两个处理的水稻产量均未呈现显著差异,表明在同样翻压等量紫云英下,与传统排水烤田相比,优化后的水分管理措施并未影响水稻产量。

为研究不同处理对水稻产量稳定性和可持续性的影响,本研究统计后计算出各处理的产量CV及SYI(表3)。4个处理中CK的CV值最高、SYI值最低,说明不施肥处理的水稻产量稳定性和可持续性差。MF处理的CV值明显低于CF处理,而SYI值高于CF处理,说明与传统单施化肥相比,翻压紫云英不仅能够增产,还具有稳产的效果。与MF处理相比,MFW处理的CV值稍有增加,SYI值略有减少,但是仍明显优于CF处理。

3 讨论

3.1 紫云英还田对CH₄排放的影响及潜在机制

本研究的稻田CH₄排放通量变化规律与前人研究结果相似^[17-18]。稻田CH₄排放是由CH₄产生、氧化消耗和传输释放3个过程共同作用的结果^[19],而传输

释放的途径可分为土壤直接排放和植株通气组织排放,其中通过植株释放的CH₄不容忽视^[20]。本研究第一个CH₄排放峰值出现在分蘖期末期,可能是因为水稻移栽后的淹水措施为产甲烷菌创造了良好的厌氧环境,而水稻分蘖期通气组织发育完全、通气性强,促进了CH₄的排放^[21]。第二个排放通量峰值出现在成熟期前,可能是因为水稻植株的根系腐殖物质为土壤中产甲烷菌提供了大量的产甲烷基质^[22]。

本研究5 a的田间试验显示,在水稻的实际种植过程中翻压紫云英有增加稻田CH₄排放的风险,这一结论与其他研究结果一致。如KIM等^[23]的研究表明紫云英还田配施化肥处理相较于传统施化肥处理会增加63%的稻田CH₄排放量。ZHOU等^[24]通过盆栽试验发现,紫云英还田处理水稻生长期CH₄排放量为单施化肥处理的2.7倍。

本研究中,紫云英还田增加CH₄排放的潜在机制可能是该措施影响了土壤产甲烷菌及其生长环境。有研究指出紫云英翻压增加了外源有机碳的输入,并且在未被彻底分解的条件下,其会为产甲烷菌提供丰富的产甲烷基质,从而使得稻田CH₄排放量增加^[25]。MA等^[26]发现紫云英还田增加了产甲烷菌相对数量,影响根际微生物群落结构,进而促进了稻田CH₄排放。另外,紫云英还田增加了稻田有效态碳源和氮源,提高了微生物活性,进而加速土壤氧的消耗并降低土壤氧化还原电位,为CH₄的产生创造了适宜的环境条件^[27]。

表2 不同处理水稻产量(kg·hm⁻²)

Table 2 Rice yields under different treatments(kg·hm⁻²)

处理 Treatment	2016年	2017年	2018年	2019年	2020年
CK	6 146±1 086b	5 893±1 970b	6 220±1 104c	6 153±669c	5 929±1 259c
CF	9 163±1 663a	8 862±1 679a	9 064±1 053b	8 833±716b	8 986±820b
MF	9 598±104a	9 689±1 035a	9 685±293a	9 738±117a	9 866±353a
MFW	9 542±503a	9 622±175a	9 870±1 286a	9 775±361a	9 876±172a

注:数值为均值±标准差($n=3$);同一列中不同小写字母表示处理间差异显著($P<0.05$)。

Note: The data are presented as mean ± standard error ($n=3$); Different lowercase letters in a column indicate significant difference among treatments at $P<0.05$.

表3 不同处理水稻产量变异系数和可持续性指数

Table 3 CV and SYI values of rice yield under different treatments

处理 Treatment	最高产量 Highest yield/(kg·hm ⁻²)	最低产量 Lowest yield/(kg·hm ⁻²)	变异系数(CV) Coefficient of variation/%	可持续性指数(SYI) Sustainability yield index
CK	7 957.6	4 034.6	17.5	0.629
CF	10 627.5	7 285.9	11.7	0.744
MF	10 683.5	8 825.6	4.4	0.861
MFW	11 282.7	8 373.2	5.8	0.857

在CH₄排放的年际差别方面,连年施用生物质可能会提高土壤有机碳含量,从而增加土壤本底的CH₄排放。如CHEN等^[28]通过连续3 a的田间试验发现,稻草还田处理下稻田的CH₄排放量处于逐年递增状态。而本研究中连续5 a翻压紫云英处理并未出现上述情况,可能是因为秸秆还田对土壤有机碳的累积效果优于翻压紫云英。吴红玉等^[29]的研究指出,相比单施紫云英,紫云英配施秸秆处理对稻田土壤活性有机碳和有机碳的增幅更加明显。然而另外一项持续时间更长(7 a)的研究表明,紫云英配施化肥处理能够显著增加土壤溶解性有机碳含量,因此对于持续翻压紫云英是否会通过积累土壤有机碳进而增加CH₄年累积排放量,还需要继续开展相关试验予以观测^[30]。

3.2 水分管理对稻田CH₄排放的影响及潜在机制

中期排水烤田为传统的稻田农艺措施,有研究表明,与持续淹水相比,中期排水烤田能减少稻田CH₄排放。如LIU等^[31]通过Meta分析研究了季中排水对CH₄排放的影响,结果发现中期排水减少了52%的CH₄排放。本研究中各处理组的CH₄排在分蘖后期出现明显的衰减趋势,这应该是受中期排水烤田的影响。其内在机制可能为:一方面排水烤田增强了稻田土壤通透性,提高了土壤氧化还原电位,破坏土壤极端还原状况,影响了产甲烷菌的数量或活性,进而抑制CH₄的形成^[32]。如有研究通过分析相关功能基因*mcrA*发现烤田抑制了产甲烷菌的生长^[33]。另一方面,O₂进入土壤,使CH₄氧化的潜力增强^[34]。如吴讷等^[35]研究发现相比全生育期淹水,干湿交替处理能够改变甲烷氧化菌的群落结构,增加CH₄消耗能力。

传统中期排水烤田多在分蘖末期开展,而此时稻田CH₄排放已达到一定的强度,为进一步削减其排放量,本研究尝试适当提前并增加烤田时间。从CH₄排放特征和排放总量的结果分析可知,在传统中期排水烤田的基础上适当提前并增加烤田时间能够有效降低CH₄排放。需要指出的是,本研究在烤田阶段的CH₄采样频次偏低,一定程度上降低了CH₄总排放量评估的精确性,后续研究应加以改善。种植紫云英等绿肥可以改善稻田氮循环,降低氮素流失引发的环境风险^[36],而本研究中翻压紫云英增加了CH₄排放(MF处理对比CF处理),尽管通过优化水分管理时机减少了部分CH₄排放(MFW处理对比MF处理),但是CH₄排放量仍然较高。因此为了充分发挥紫云英的绿色生态效应,应综合采用其他措施,如筛选CH₄排放低的水稻品种^[37]、通过养分管理减少产甲烷菌的营养基

质^[38]、改善土壤性状(如Eh、pH、土壤质地、温度、湿度等)^[39-40]及采用合适的栽培耕作制度(如少耕或免耕、适当降低栽插密度、冬季排水种植旱作作物等)^[41]。

自CAI等^[13]首次指出稻田CH₄和N₂O的排放存在消长关系(trade-off,即两者呈负相关)后,陆续有研究证明了这一观点。王永明等^[42]发现间隙灌溉在降低CH₄排放的同时提高了N₂O的排放量。本研究的水分管理措施在减少CH₄排放的同时,可能会通过影响硝化-反硝化作用增加N₂O排放。多项研究指出尽管中期烤田增加了N₂O排放,但是与持续淹水相比,中期烤田对稻田CH₄的减排效应远大于对N₂O排放的促进效应,因此能够有效降低稻田温室气体的全球增温潜势(GWP)^[43-44]。

3.3 紫云英翻压和水分管理对产量的影响

紫云英还田是一种为作物提供养分、保障粮食产量的传统农艺措施^[45]。张成兰等^[46]通过10 a的田间试验研究了减量化肥配施紫云英对水稻产量的影响,结果指出紫云英还田能明显提高水稻产量、肥料贡献率和产量稳定性等。CHEN等^[47]研究发现紫云英还田能显著增加早稻和晚稻产量。本试验中紫云英还田的前两年(2016、2017年),其水稻产量较CF处理无差异,从研究的第3年开始翻压紫云英才表现出显著的增产效果,这与唐杉等^[48]的研究结果基本一致。紫云英对水稻的高产、稳产效应,与其具有增加土壤肥力^[49]、改善土壤理化性质^[50]、减少稻田养分损失^[51]、改善与养分循环相关的微生物及酶活性等特点有关^[52-53]。

选择合适的排水烤田时机,除了要考虑CH₄排放规律,还应考虑水稻对水分的敏感度。如TOW-PRAYOON等^[54]在水稻抽穗期进行一次排水烤田,尽管CH₄排放量减少27%,但是水稻减产6.9%。本研究中,相较于传统排水烤田的MF处理,优化后的水分管理措施在不影响产量的基础上减少了16.2%~28.5%的CH₄排放量,为提高绿肥紫云英的环境效益提供了一种有效的方法。在其他地区选择合适的水分管理措施时,还需综合考虑CH₄排放规律、土壤湿度和气候等因素。

4 结论

(1)与常规单施化肥相比,持续翻压紫云英并配施减量氮肥可增加水稻产量,并可提高产量稳定性和可持续性。

(2)连续5 a的田间定位试验结果表明紫云英翻

压还田显著增加了稻田CH₄排放量。

(3)在当地传统排水烤田基础上优化水分管理可以在不影响水稻产量的前提下,有效减少CH₄排放。

参考文献:

- [1] GUO X X, ZHAO D, ZHUANG M H, et al. Fertilizer and pesticide reduction in cherry tomato production to achieve multiple environmental benefits in Guangxi, China[J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 793:148527.
- [2] LI D T, CHENG Y Q, LI T L, et al. Co-application of biogas slurry and hydrothermal carbonization aqueous phase substitutes urea as the nitrogen fertilizer and mitigates ammonia volatilization from paddy soil[J]. *Environmental Pollution*, 2021, 287:117340.
- [3] DAL MOLIN S J, ERNANI P R, GERBER J M. Soil acidification and nitrogen release following application of nitrogen fertilizers[J]. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 2020, 51 (20): 2551-2558.
- [4] ZHANG G B, SONG K F, MIAO X, et al. Nitrous oxide emissions, ammonia volatilization, and grain-heavy metal levels during the wheat season: Effect of partial organic substitution for chemical fertilizer[J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2021, 301:10730.
- [5] 王强盛, 薄雨心, 余坤龙, 等. 绿肥还田在稻作生态系统的效应分析及研究展望[J]. 土壤, 2021, 53(2):243-249. WANG Q S, BO Y X, YU K L, et al. Analysis and research prospect of effect of green manure returning on rice cropping ecosystem[J]. *Soils*, 2021, 53(2):243-249.
- [6] LI Z Q, ZHANG X, XU J, et al. Green manure incorporation with reductions in chemical fertilizer inputs improves rice yield and soil organic matter accumulation[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2020, 20(7): 2784-2793.
- [7] 林新坚, 曹卫东, 吴一群, 等. 紫云英研究进展[J]. 草业科学, 2011, 28(1):135-140. LIN X J, CAO W D, WU Y Q, et al. Advance in *As-tragalus sinicus* research[J]. *Pratacultural Science*, 2011, 28(1):135-140.
- [8] IPCC. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2021.
- [9] WUEBBLES D J, HAYHOE K. Atmospheric methane and global change[J]. *Earth-Sciences Reviews*, 2002, 57(3):177-210.
- [10] 周炜, 张岳芳, 朱普平, 等. 种植制度对长江下游稻田温室气体排放的影响[J]. 江苏农业学报, 2017, 33(2):340-345. ZHOU W, ZHANG Y F, ZHU P P, et al. Effects of different cropping patterns on greenhouse gases emissions from rice fields in the lower reaches of Yangtze River[J]. *Jiangsu Journal of Agricultural Science*, 2017, 33(2):340-345.
- [11] 周国朋. 双季稻田稻草与豆科绿肥联合还田下土壤碳、氮转化特征[D]. 北京:中国农业科学院, 2017:21-22. ZHOU G P. The characteristics of carbon and nitrogen transformation under the co-incorporation of rice straw and leguminous green manures in double rice field in southern China[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2017:21-22.
- [12] 商庆银, 杨秀霞, 成臣, 等. 秸秆还田条件下不同水分管理对双季稻田综合温室效应的影响[J]. 中国水稻科学, 2015, 29(2):181-190. SHANG Q Y, YANG X X, CHENG C, et al. Effects of water regime on yield-scaled global warming potential under double rice-cropping system with straw returning[J]. *Chinese Journal of Rice Science*, 2015, 29(2):181-190.
- [13] CAI Z C, XING G X, YAN X Y, et al. Methane and nitrous oxide emissions from rice paddy fields as affected by nitrogen fertilizers and water management[J]. *Plant and Soil*, 1997, 196(1):7-14.
- [14] 钱浩宇. 大气二氧化碳与主要农艺措施对水稻生长及稻田甲烷排放的综合效应[D]. 北京:中国农业科学院, 2021:66-67. QIAN H Y. Integrated effects of atmospheric CO₂ and main agronomic practice on rice growth and methane emission from paddy soil[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2021:66-67.
- [15] NISHIMURA S, KIMIWADA K, YAGIOKA A, et al. Effect of intermittent drainage in reduction of methane emission from paddy soils in Hokkaido, northern Japan[J]. *Soil Science and Plant Nutrition*, 2020, 66(2):360-368.
- [16] SOUZA R, YIN J, CALABRESE S. Optimal drainage timing for mitigating methane emissions from rice paddy fields[J]. *Geoderma*, 2021, 394:114986.
- [17] KIM S Y, GUTIERREZ J, KIM P J. Considering winter cover crop selection as green manure to control methane emission during rice cultivation in paddy soil[J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2012, 161:130-136.
- [18] 魏永霞, 冀俊超, 刘慧, 等. 水分管理对旱直播稻温室气体排放与土壤无机氮的影响[J]. 农业机械学报, 2021, 52(11):305-314. WEI Y X, JI J C, LIU H, et al. Effects of water management on greenhouse gas emission and soil inorganic nitrogen of dry direct seeding rice[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2021, 52(11):305-314.
- [19] SHAW G, ATKINSON B, MEREDITH W, et al. Quantifying ^{12/13}CH₄ migration and fate following sub-surface release to an agricultural soil [J]. *Journal of Environmental Radioactivity*, 2014, 133:18-23.
- [20] 江瑜, 管大海, 张卫健. 水稻植株特性对稻田甲烷排放的影响及其机制的研究进展[J]. 中国生态农业学报, 2018, 26(2):175-181. JIANG Y, GUAN D H, ZHANG W J. The effect of rice plant traits on methane emissions from paddy fields: A review[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2018, 26(2):175-181.
- [21] 崔荣阳, 刘宏斌, 毛昆明, 等. 洱海流域稻鸭共作对稻田温室气体排放和水稻产量的影响[J]. 环境科学学报, 2019, 39(7):2306-2314. CUI R Y, LIU H B, MAO K M, et al. Effects of rice-duck mutualism on greenhouse gas emissions and rice yields from paddy fields in Erhai basin[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2019, 39(7):2306-2314.
- [22] 刘少文, 殷敏, 褚光, 等. 长江中下游稻区不同水旱轮作模式和氮肥水平对稻田CH₄排放的影响[J]. 中国农业科学, 2019, 52(14):2484-2499. LIU S W, YIN M, CHU G, et al. Effects of various paddy-upland crop rotations and nitrogen fertilizer levels on CH₄ emission in the middle and lower reaches of the Yangtze River[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2019, 52(14):2484-2499.

- [23] KIM S Y, LEE C H, GUTIERREZ J, et al. Contribution of winter cover crop amendments on global warming potential in rice paddy soil during cultivation[J]. *Plant and Soil*, 2013, 366(1):273-286.
- [24] ZHOU G P, GAO S J, XU C X, et al. Co-incorporation of Chinese milk vetch (*Astragalus sinicus* L.) and rice (*Oryza sativa* L.) straw minimizes CH₄ emissions by changing the methanogenic and methanotrophic communities in a paddy soil[J]. *European Journal of Soil Science*, 2020, 71(5):924-939.
- [25] 唐海明, 汤文光, 帅细强, 等. 不同冬季覆盖作物对稻田甲烷和氧化亚氮排放的影响[J]. *应用生态学报*, 2010, 21(12):3191-3199. TANG H M, TANG W G, SHUAI X Q, et al. Effects of winter cover crop on methane and nitrous oxide emission from paddy field[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2010, 21(12):3191-3199.
- [26] MA Q Y, LI J W, AAMER M, et al. Increasing methane (CH₄) emissions and altering rhizosphere microbial diversity in paddy soil by combining Chinese milk vetch and rice straw[J]. *PeerJ*, 2020, 8:e9653.
- [27] LI J, WANG S, SHI Y L, et al. Do fallow season cover crops increase N₂O or CH₄ emission from paddy soils in the mono-rice cropping system? [J]. *Agronomy*, 2021, 11(2):199.
- [28] CHEN D, WANG C, SHEN J, et al. Response of CH₄ emissions to straw and biochar applications in double-rice cropping systems: Insights from observations and modeling[J]. *Environmental Pollution*, 2018, 235:95-103.
- [29] 吴玉红, 王吕, 崔月贞, 等. 轮作模式及秸秆还田对水稻产量、稻米品质及土壤肥力的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2021, 27(11):1926-1937. WU Y H, WANG L, CUI Y Z, et al. Rice yield, quality, and soil fertility in response to straw incorporation and rotation pattern [J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2021, 27(11):1926-1937.
- [30] 周国朋, 曹卫东, 白金顺, 等. 多年紫云英-双季稻下不同施肥水平对两类水稻土有机质及可溶性有机质的影响[J]. *中国农业科学*, 2016, 49(21):4096-4106. ZHOU G P, CAO W D, BAI J S, et al. Effects of different fertilization levels on soil organic matter and dissolved organic matter in two paddy soils after multi-years' rotation of Chinese milk vetch and double-cropping rice[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2016, 49(21):4096-4106.
- [31] LIU X Y, ZHOU T, LIU Y, et al. Effect of mid-season drainage on CH₄ and N₂O emission and grain yield in rice ecosystem: A meta-analysis[J]. *Agricultural Water Management*, 2019, 213:1028-1035.
- [32] 丁维新, 蔡祖聪. 土壤有机质和外源有机物对甲烷产生的影响[J]. *生态学报*, 2002, 22(10):1672-1679. DING W X, CAI Z C. Effects of soil organic matter and exogenous organic materials on methane production in and emission from wetlands[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2002, 22(10):1672-1679.
- [33] 纪洋, 于海洋, CONRAD RALF, 等. 间隙灌溉和控释肥施用对稻田土壤产甲烷微生物的影响[J]. *土壤*, 2017, 49(6):1132-1139. JI Y, YU H Y, CONRAD R, et al. Effect of intermittent irrigation and controlled-release fertilizer on methanogenic microbial communities in paddy soil[J]. *Soil*, 2017, 49(6):1132-1139.
- [34] 张岳芳, 陈留根, 张传胜, 等. 水稻机械化播栽对稻田甲烷和氧化亚氮排放的影响[J]. *农业工程学报*, 2015, 31(14):232-241. ZHANG Y F, CHEN L G, ZHANG C S, et al. Influence of rice mechanical planting methods on methane and nitrous oxide emissions from paddy field[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2015, 31(14):232-241.
- [35] 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(增刊2):69-76. WU N, HOU H J, TANG Y F, et al. Methane-related microbe influenced by water management and rle straw returning in paddy soil[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2016, 32(Suppl 2):69-76.
- [36] HU A Y, TANG T T, LIU Q. Nitrogen use efficiency in different rice-based rotations in southern China[J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2018, 112(1):75-86.
- [37] 周文涛, 戈家敏, 王勃然, 等. 不同水稻品种甲烷排放与土壤酶的关系[J]. *农业环境科学学报*, 2020, 39(11):2675-2682. ZHOU W T, GE J M, WANG B R, et al. Relationship between methane emissions and soil enzymes of different rice varieties[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2020, 39(11):2675-2682.
- [38] BHARALI A, BARUAH K K, BARUAH G S, et al. Impacts of integrated nutrient management on methane emission, global warming potential and carbon storage capacity in rice grown in a northeast India soil[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2018, 25(6):5889-5901.
- [39] XU X Y, ZHANG M M, XIONG Y S, et al. The influence of soil temperature, methanogens and methanotrophs on methane emissions from cold waterlogged paddy fields[J]. *Journal of Environmental Management*, 2020, 264:110421.
- [40] SRIPHIROM P, CHIDTHAISONG A, YAGI K, et al. Effects of biochar on methane emission, grain yield, and soil in rice cultivation in Thailand[J]. *Carbon Management*, 2021, 12(2):109-121.
- [41] 成臣, 曾勇军, 杨秀霞, 等. 不同耕作方式对稻田净增温潜势和温室气体强度的影响[J]. *环境科学学报*, 2015, 35(6):1887-1895. CHENG C, ZENG Y J, YANG X X, et al. Effect of different tillage methods on net global warming potential and greenhouse gas intensity in double rice-cropping systems[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2015, 35(6):1887-1895.
- [42] 王永明, 徐永记, 纪洋, 等. 节水灌溉和控释肥施用耦合措施对单季稻田 CH₄ 和 N₂O 排放的影响[J]. *环境科学*, 2021, 42(12):6025-6037. WANG Y M, XU Y J, JI Y, et al. Coupling effects of water-saving irrigation and controlled-release fertilizer (CRF) application on CH₄ and N₂O emission in single cropping paddy field[J]. *Environmental Science*, 2021, 42(12):6025-6037.
- [43] HAQUE M M, KIM G W, KIM P J, et al. Comparison of net global warming potential between continuous flooding and midseason drainage in monsoon region paddy during rice cropping[J]. *Field Crops Research*, 2016, 193:133-142.
- [44] 夏龙龙, 颜晓元, 蔡祖聪. 我国农田土壤温室气体减排和有机碳固定的研究进展及展望[J]. *农业环境科学学报*, 2020, 39(4):834-841. XIA L L, YAN X Y, CAI Z C. Research progress and prospect of greenhouse gas mitigation and soil carbon sequestration in crop-

- lands of China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2020, 39(4): 834–841.
- [45] 高嵩涓, 曹卫东, 白金顺, 等. 长期冬种绿肥改变红壤稻田土壤微生物生物量特性[J]. *土壤学报*, 2015, 52(4): 902–910. GAO S J, CAO W D, BAI J S, et al. Long-term application of winter green manures changed the soil microbial biomass properties in red paddy soil[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2015, 52(4): 902–910.
- [46] 张成兰, 吕玉虎, 刘春曾, 等. 减量化肥配施紫云英对水稻产量稳定性的影响[J]. *核农学报*, 2021, 35(3): 704–713. ZHANG C L, LÜ Y H, LIU C Z, et al. Effects of combination of reduced chemical fertilizer and Chinese milk vetch on rice yield stability[J]. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 2021, 35(3): 704–713.
- [47] CHEN J R, QIN W J, CHEN X F, et al. Application of Chinese milk vetch affects rice yield and soil productivity in a subtropical double-rice cropping system[J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2020, 19(8): 2116–2126.
- [48] 唐杉, 王允青, 赵决建, 等. 紫云英还田对双季稻产量及稳定性的影响[J]. *生态学杂志*, 2015, 34(11): 3086–3093. TANG S, WANG Y Q, ZHAO J J, et al. Effects of milk vetch application on double cropping rice yield and yield stability[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2015, 34(11): 3086–3093.
- [49] 王赞, 徐昌旭, 周国朋, 等. 连续种植翻压紫云英减施化肥对江西早稻产量、品质及土壤肥力的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2021, 27(10): 1735–1745. WANG Y, XU C X, ZHOU G P, et al. Effects of long-term incorporation of milk vetch combined with reduction of chemical fertilizer on yield, quality and soil fertility of early rice in Jiangxi[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2021, 27(10): 1735–1745.
- [50] 柳开楼, 韩天富, 李文军, 等. 紫云英不同翻压年限下驱动水稻产量变化的土壤理化因子分析[J]. *中国水稻科学*, 2021, 35(3): 291–302. LIU K L, HAN T F, LI W J, et al. Analysis on the key factors of soil physicochemical properties responsible for changes in rice yield with Chinese milk vetch turned over for different years[J]. *Chinese Journal of Rice Science*, 2021, 35(3): 291–302.
- [51] QIAO J, ZHAO D, ZHOU W, et al. Sustained rice yields and decreased N runoff in a rice-wheat cropping system by replacing wheat with Chinese milk vetch and sharply reducing fertilizer use[J]. *Environmental Pollution*, 2021, 288: 117722.
- [52] 郭乾坤, 梁国庆, 周卫, 等. 长期有机培肥提高红壤性水稻土生物学特性及水稻产量的微生物学机制[J]. *植物营养与肥料学报*, 2020, 26(3): 492–501. GUO Q K, LIANG G Q, ZHOU W, et al. Microbiological mechanism of long-term organic fertilization on improving soil biological properties and double rice yields in red paddy soil[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2020, 26(3): 492–501.
- [53] 谢志坚. 填闲作物紫云英对稻田氮素形态变化及其生产力的影响机理[D]. 武汉: 华中农业大学, 2016: 105–107. XIE Z J. Nitrogen transformation and productivity of paddy field influenced by catch crop (*Astragalus sinicus* L.) [D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2016: 105–107.
- [54] TOWPRAYOON S, SMAKGAHN K, POONKAEW S. Mitigation of methane and nitrous oxide emissions from drained irrigated rice fields[J]. *Chemosphere*, 2005, 59(11): 1547–1556.

(责任编辑: 李丹)