

稻麦轮作下秸秆不同利用方式还田对稻田甲烷排放的影响

张熙栋, 严玲, 周伟, 吴秋玲, 杨波, 马煜春

引用本文:

张熙栋, 严玲, 周伟, 等. 稻麦轮作下秸秆不同利用方式还田对稻田甲烷排放的影响[J]. 农业环境科学学报, 2021, 40(3): 685-692.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-1003>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

玉米秸秆生物炭对稻油轮作农田磷流失风险的影响

华玲玲, 王洪媛, 翟丽梅, 付斌, 盖霞普, 胡万里

农业环境科学学报. 2016, 35(7): 1376-1383 <https://doi.org/10.11654/jaes.2016.07.021>

小麦秸秆还田条件下钾肥减量对水稻产量及养分利用的影响

朱远芄, 史燕捷, 管浩, 叶新新, 郜红建, 华胜, 王宜坤

农业环境科学学报. 2020, 39(11): 2596-2605 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0289>

生活污水尾水灌溉对秸秆还田稻田氨挥发的影响

李梦瑶, 王旭刚, 徐晓峰, 段婧婧, 薛利红, 杨林章

农业环境科学学报. 2020, 39(7): 1623-1632 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0084>

黑土活性有机碳库与土壤酶活性对玉米秸秆还田的响应

贺美, 王立刚, 王迎春, 朱平, 李强, 沈欣

农业环境科学学报. 2018, 37(9): 1942-1951 <https://doi.org/10.11654/jaes.2017-1725>

稻草还田下添加DCD对稻田CH₄、N₂O和CO₂排放的影响

王国强, 常玉妍, 宋星星, 朱思明, 毛艳玲

农业环境科学学报. 2016, 35(12): 2431-2439 <https://doi.org/10.11654/jaes.2016-0877>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

张熙栋, 严玲, 周伟, 等. 稻麦轮作下秸秆不同利用方式还田对稻田甲烷排放的影响[J]. 农业环境科学学报, 2021, 40(3): 685–692.
ZHANG Xi-dong, YAN Ling, ZHOU Wei, et al. Effects of different straw utilization methods on methane emissions from straw returning to paddy field in a rice-wheat rotation system[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2021, 40(3): 685–692.



开放科学 OSID

稻麦轮作下秸秆不同利用方式还田对稻田甲烷排放的影响

张熙栋¹, 严玲¹, 周伟², 吴秋玲¹, 杨波³, 马煜春^{1,3*}

(1. 南京信息工程大学应用气象学院, 南京 210044; 2. 中国科学院南京土壤研究所土壤与农业可持续发展国家重点实验室, 南京 210008; 3. 农业农村部环境保护科研监测所, 天津 300191)

摘要: 秸秆还田能够促进土壤固碳, 但秸秆不同利用方式还田对稻麦轮作系统中甲烷(CH₄)排放影响的研究结果存在很大不确定性。本研究采用静态暗箱-气相色谱法对太湖地区秸秆不同利用方式一年还田下稻麦轮作系统中CH₄排放规律进行田间原位观测。试验共设置4个处理, 分别是: 常规处理(NPK, 施用氮肥、磷肥、钾肥)、秸秆还田处理(NPK+S, 氮肥、磷肥、钾肥与秸秆均匀混施)、秸秆生物炭处理(NPK+B, 氮肥、磷肥、钾肥与黑炭均匀混施)和秸秆与腐熟剂配施处理(NPK+SDI, 氮肥、磷肥、钾肥、秸秆与腐熟剂均匀混施)。不同处理下CH₄排放主要集中在水稻生长季。与NPK处理相比, NPK+S和NPK+SDI处理均增加CH₄排放, 增幅分别为12.7%和20.9%, NPK+B处理减少了7.5%的CH₄排放。与NPK+S处理相比, NPK+SDI处理CH₄排放显著增加7.3%, 而NPK+B处理CH₄排放显著降低17.9%。除NPK+B处理显著提高了作物产量, 其他处理对产量并无显著影响。与NPK处理相比, NPK+S和NPK+SDI处理显著增加了单位产量甲烷排放, 增幅分别为23.7%和18.4%, NPK+B处理降低了单位产量甲烷排放, 幅度为19.9%。与NPK+S处理比较, NPK+SDI与NPK+B处理单位产量CH₄排放分别降低了4.3%和35.3%。结果说明秸秆配合腐熟剂还田或秸秆炭化还田可减轻由秸秆直接还田所带来的环境损害, 且炭化还田的减排效果更佳。

关键词: 生物炭; 秸秆腐熟剂; 甲烷; 单位产量甲烷排放; 稻田

中图分类号: S154.1; S511 文献标志码: A 文章编号: 1672-2043(2021)03-0685-08 doi:10.11654/jaes.2020-1003

Effects of different straw utilization methods on methane emissions from straw returning to paddy field in a rice-wheat rotation system

ZHANG Xi-dong¹, YAN Ling¹, ZHOU Wei², WU Qiu-ling¹, YANG Bo³, MA Yu-chun^{1,3*}

(1. School of Applied Meteorology, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China; 2. State Key Laboratory of Soil and Sustainable Agriculture, Institute of Soil Science, Chinese Academy of Science, Nanjing 210008, China; 3. Agro-Environmental Protection Institute, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Tianjin 300191, China)

Abstract: Straw returning to paddy field can promote soil carbon sequestration. There is great uncertainty about the effects of different straw utilization methods on methane(CH₄) emissions in rice-wheat rotation systems. Therefore, *in situ* static chamber-gas chromatography was used to observe the effects of different straw utilization methods on CH₄ emissions in a rice-wheat rotation system in the Taihu Lake

收稿日期: 2020-08-28 录用日期: 2021-01-11

作者简介: 张熙栋(1997—), 男, 山西孝义人, 硕士研究生, 从事农业面源污染及温室气体减排研究。E-mail: 15189821667@163.com

*通信作者: 马煜春 E-mail: mayc@nuist.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金项目(41807096, 41601233); 江苏省基础研究计划青年基金项目(BK20140990); 土壤与农业可持续发展国家重点实验室开放基金课题(Y20160034)

Project supported: The National Natural Science Foundation of China(41807096, 41601233); The Natural Science Foundation of Jiangsu Province(BK20140990); The Open Project of State Key Laboratory of Soil and Sustainable Agriculture(Y20160034)

region. Four treatments were set up in the experiment, including NPK (no straw plus fertilizer), NPK+S (wheat straw plus fertilizer), NPK+B (straw-derived biochar plus fertilizer), and NPK+SDI (wheat straw with straw-decomposing microbial inoculants plus fertilizer). The CH₄ emissions under different treatments were mainly concentrated in the rice growing season. Compared with those of the NPK treatment, the NPK+S and NPK+SDI treatments increased the CH₄ emissions by 12.7% and 20.9%, respectively. Conversely, the NPK+B treatment decreased the CH₄ emissions by 7.5% compared with those of NPK. Compared with those of the NPK+S treatment, the CH₄ emissions in the NPK+SDI treatment significantly increased by 7.3%, whereas they decreased significantly by 17.9% in the NPK+B treatment. Biochar amendment (NPK+B) increased the grain yield, but other treatments did not. Compared with those of the NPK treatment, the NPK+S and NPK+SDI treatments significantly increased the yield-scaled methane emissions by 23.7% and 18.4%, respectively. In contrast, the NPK+B treatment reduced the yield-scaled methane emissions by 19.9%. However, compared with those of the NPK+S treatment, both the NPK+SDI and NPK+B treatments reduced the yield-scaled methane emissions by 4.3% and 35.3%, respectively. This study shows that co-application of straw-decomposing microbial inoculants or application of straw-derived biochar are advantageous for reducing the environmental damage caused by straw returning to the field. In addition, the straw-derived biochar is better.

Keywords: biochar; straw-decomposing microbial inoculants; methane; yield-scaled methane emission; paddy field

甲烷(CH₄)是仅次于二氧化碳(CO₂)的最重要的温室气体之一^[1]。单位质量CH₄排放所引起的温室效应是单位质量CO₂排放所引起温室效应的28倍^[2]。稻田CH₄排放对大气CH₄浓度变化起着至关重要的作用^[3]。水稻(*Oryza sativa* L.)是中国的主要粮食作物,目前其种植面积约占中国可耕地总面积的33%^[4]。中国水稻收获后残余秸秆量约为620 Tg·a⁻¹,其中约三分之一被农民直接田间原位焚烧^[5],这不仅造成了秸秆资源的浪费,而且还会造成严重的空气污染。因此,探寻生产和生态效应双赢的秸秆资源化利用手段尤为重要。

土壤CH₄排放涉及到产甲烷菌和甲烷氧化菌的一系列复杂过程,并取决于土壤环境因子和溶解有机碳(DOC)的有效性^[6]。研究表明,作物秸秆还田能维持土壤有机碳水平^[7]。长期田间试验(27 a)证实了将农作物秸秆以2.65 t·hm⁻²·a⁻¹和4.5 t·hm⁻²·a⁻¹的比率施用到稻田中,土壤有机碳储量分别增加0.10 t·hm⁻²·a⁻¹和0.36 t·hm⁻²·a⁻¹,可在一定程度上减缓温室效应。但同时作物秸秆可以为产甲烷菌提供生存必需的营养物质,促进CH₄的产生^[8]。秸秆固碳所减缓的温室效应会被由CH₄排放所增加的温室效应所抵消^[2]。Bossio等^[9]通过1 a的田间试验也发现秸秆还田能显著降低土壤Eh值,引起土壤CH₄剧烈排放。另外,由于秸秆具有较高的碳氮比,在自然状态下微生物很难将其快速分解,严重影响下一季作物的播种和生长,因此,充分利用秸秆对促进作物生长和培肥地力有重要意义^[10]。

生物炭是一种由作物秸秆在缺氧环境中的热分解制得的含碳量较高的物质^[11],是作物秸秆资源化利用的手段之一。它通过提高土壤碳含量来改善土壤

质量和提高作物产量^[12]。此外,生物炭还可以改善土壤的保水性,增加作物对氮的吸收,降低土壤pH,改善土壤物理性质。相关研究发现,生物炭能够改变土壤微生物群落的结构和生物地球化学进程^[13]。然而,关于生物炭对温室气体通量的影响存在意见不一的研究。部分研究表明,生物炭施用增加了甲烷氧化菌数量,产甲烷菌与甲烷氧化菌的比例降低,水稻土CH₄排放减少^[14]。但其他研究证实生物炭施用增加了稻田CH₄排放^[15]。国内外学者对生物炭稻季施用后对当季稻田CH₄排放的影响做了一系列探究。而生物炭在稻季施用后,对后季麦田CH₄排放的影响还不清楚。

近年来为了加速还田秸秆的腐熟,秸秆腐熟剂的推广施用取得了一定的效果。秸秆腐熟剂由细菌、真菌、放线菌和酶组成,其能够加速秸秆内的木质素、纤维素和半纤维素的分解,改善土壤微生物的结构及活性^[16],提高作物产量。同时它还能改善土壤的理化性质,比如有机质的含量、矿化速率、氮磷钾等营养元素的含量以及土壤团聚体的结构等^[16-17],影响农田土壤CH₄的排放。马煜春等^[18]将两种不同腐熟剂配合秸秆还田与秸秆直接还田对稻田CH₄排放影响进行对比,结果表明两种腐熟剂的施用都显著增加了稻田CH₄的排放。盛海君等^[19]报道了秸秆配施腐熟剂还田极显著增加了麦季CH₄排放。但在稻麦轮作系统中当季稻田施用腐熟剂后对后季麦田CH₄排放的影响还缺乏研究。

太湖地区是中国水稻主产区之一,实行稻麦轮作制度^[20]。本研究以秸秆资源化利用为目的,采用静态箱-气相色谱法研究秸秆不同利用方式对稻麦轮作系统中当季稻田和后季麦田CH₄排放的影响,为评估

秸秆不同利用方式对环境的影响提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验地点

田间试验在中国科学院常熟农业生态试验站(31°32'93"N, 120°41'88"E)进行。该地区年平均气温为 15.5 °C, 年平均降雨量为 1 038 mm, 无霜期为 224 d。供试土壤为湖泊沉积物发育而来的人为土壤(RGCST, 2001), 土壤 pH 为 7.35±0.04, 总氮含量为 2.1±0.02 g·kg⁻¹, 土壤有机碳为 20.3±0.03 g·kg⁻¹, 土壤容重为 1.11±0.04 g·cm⁻³。试验期间的日平均气温和降雨量见图 1。

1.2 试验设计

试验于 2016 年 6 月水稻种植开始, 2017 年 6 月小麦收获结束, 为完全随机试验。每个处理小区面积为 5 m×5 m (25 m²), 各小区间设有 0.8 m 保护行。试验设置 4 个处理, 分别是当地常规处理(NPK, 施用氮肥、磷肥、钾肥)、施用 4.8 t·hm⁻²·a⁻¹ 小麦秸秆还田处理(NPK+S, 氮肥、磷肥、钾肥与秸秆均匀混施)、秸秆配施腐熟剂还田处理(NPK+SDI, 氮肥、磷肥、钾肥、4.8 t·hm⁻²·a⁻¹ 小麦秸秆与 30 kg·hm⁻²·a⁻¹ 腐熟剂均匀混施)、秸秆炭化还田处理(NPK+B, 氮肥、磷肥、钾肥、20 t·hm⁻²·a⁻¹ 生物炭均匀混施)。

1.3 田间管理

2016 年 6 月水稻移栽前将小麦秸秆、小麦秸秆制成的生物炭和秸秆腐熟剂均匀混施于稻田表层土壤(0~20 cm), 小麦播种前不再施用。小麦秸秆还田时将其切成 10 cm 的碎片, 均匀地铺在试验田上, 用旋耕机将其均匀翻入耕层中。生物炭购自三立新能源公司(中国河南), 以小麦秸秆为原材料制成(350 °C),

将其研磨并通过 5 mm 筛, 然后均匀地撒在试验田上, 最后使其完全混合到犁层中, 小麦秸秆和生物炭总氮含量分别为 7.6 g·kg⁻¹ 和 10.7 g·kg⁻¹, 总碳含量分别为 377 g·kg⁻¹ 和 490 g·kg⁻¹, 水溶性碳含量分别为 15.1 g·kg⁻¹ 和 5.0 g·kg⁻¹, 灰分含量分别为 22.6% 和 46.7%, pH 值分别为 6.8 和 10.3。秸秆腐熟剂由佛山金葵子植物营养有限公司生产, 含有枯草芽孢杆菌(3.6×10⁸ cell·g⁻¹)、多黏类芽孢杆菌(5.0×10⁷ cell·g⁻¹)、短芽孢杆菌(1.0×10⁸ cell·g⁻¹)和地衣芽孢杆菌(3.0×10⁷ cell·g⁻¹)。试验中选用的水稻品种(南粳 46 号)和小麦品种(扬麦 5 号)均是该地区普遍使用的品种。依据当地的种植习惯, 水稻种植季采用前期淹水、中期烤田、后期间歇性灌溉的水分管理模式, 小麦种植期间以雨水灌溉为主, 不主动灌溉。水稻种植期间共施用尿素(以 N 计) 180 kg N·hm⁻², 2016 年 6 月 18 日施第一次肥, 2016 年 8 月 11 日施第二次肥, 2016 年 8 月 23 日施第三次肥, 氮肥施用比例为 6:1:3, 磷肥(P₂O₅)和钾肥(K₂O)分别施加 75 kg·hm⁻² 和 120 kg·hm⁻², 2016 年 6 月 18 日施用后不再追加。小麦种植期间施用尿素 150 kg N·hm⁻², 2016 年 11 月 7 日施第一次肥(基肥), 2017 年 3 月 23 日施第二次肥, 氮肥施用比例为 2:1; 磷肥(过磷酸钙, P₂O₅ 含量为 120 g·kg⁻¹)和钾肥(氯化钾, KCl 含量为 600 g·kg⁻¹)分别施加 60、80 kg·hm⁻², 均作为基肥施入。

1.4 CH₄ 采样方法

采用静态暗箱-气相色谱法采集测定稻麦轮作周期中 CH₄ 的排放通量。作物生长季节每周采集一次, 降雨、施肥和中期排水期间每 2 d 采一次样。采样箱放置在固定的 PVC 底座上, 每个底座覆盖 0.25 m²。根据采样时的作物高度, 采样箱的高度分别设置为 0.5 m 或 1.1 m。气体采样时间为上午 9:00 至 11:00

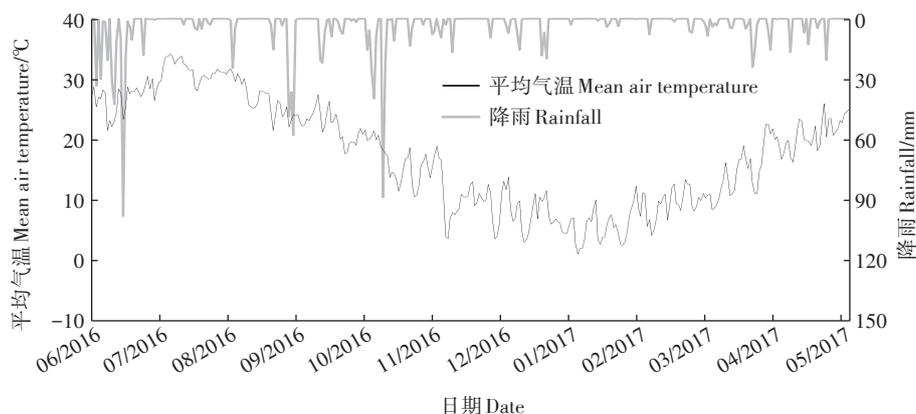


图 1 2016—2017 年稻麦轮作系统平均气温和降雨的季节变化

Figure 1 Seasonal variations of mean air temperature and rainfall during the rice-wheat rotation in 2016—2017

或下午 14:00 至 16:00。采样时在箱体封闭后用 20 mL 注射器在 0、10、20 min 和 30 min 进行采样。24 h 内用 Agilent 7890D 气相色谱仪测定样品浓度。根据样品浓度的线性变化规律分析得到 CH₄ 排放通量。通过 3 次重复计算得出 CH₄ 的平均排放通量和标准偏差,以相邻 2 次采样时间间隔为权重,将各次排放通量进行加权平均计算获得平均排放通量,使用平均排放通量和作物生长时间的乘积来表示累积排放量。

1.5 土壤样品采集与数据统计分析

使用 Eijkelkamp 土壤采样器(直径 5.1 cm)采集 0~20 cm 的土壤样本。试验开始前和试验结束后在每个小区随机采集 4 份土壤样品并将其充分混合,所有土壤样品储存于 4 °C 条件下,并在 7 d 内进行分析。采用半微量凯氏定氮法测定样品总氮^[21]。土壤有机碳用外加热重铬酸钾氧化容量法测定^[21]。用 2 mol·L⁻¹ KCl 溶液浸提土壤样品并过滤(0.45 μm)后使用 SmartChem 140 自动化学分析仪(Westco 科学仪器)测定土壤 NO₃⁻-N 和 NH₄⁺-N 含量。将土壤与水以 1:2.5 比例混合后测定土壤 pH(HI 2221, 中国上海)。将鲜土置于 105 °C 的烘箱中干燥 8 h 后,用质量法测量土壤质量含水量(SW_g)。土壤密度使用环刀法测定。充水孔隙度(WFPS, %)计算公式^[22]为:

$$\text{WFPS} = \frac{\text{SW}_g \times \text{BD}}{1 - (\text{BD}/2.65)} \times 100\%$$

式中:BD 为土壤容重, g·cm⁻³。

数据采用 Microsoft Excel 2010 进行图表制作,采用 SPSS 19.0 进行数据统计分析(LSD 法)。

2 结果与分析

2.1 环境和土壤因子

试验期间稻季日平均气温的变化范围为 11~

34 °C,总降雨量为 1 207 mm;麦季日平均气温的变化范围为 1~26 °C,总降雨量为 367 mm,土壤充水孔隙度介于 53%~97%(图 1~图 2)。4 个处理麦季土壤水分孔隙度最高值与最低值基本相同且在同一日期出现。试验期间,NPK+B 处理的土壤水分孔隙度基本高于其他 3 个处理。NPK、NPK+S、NPK+SDI 3 个处理的土壤充水孔隙度基本保持一致。

2017 年 6 月稻麦轮作周期试验结束后测定各处理土壤理化性质,分析秸秆不同利用方式还田后对土壤各理化性质的影响(表 1)。与 NPK 处理相比,NPK+S 和 NPK+SDI 处理土壤有机碳(SOC)含量提高 10.3% 和 19.2%,达显著水平,pH 显著提高 2.3% 和 3.8%,总氮含量(TN)显著提高 9.3% 和 12.5%,硝态氮(NO₃⁻-N)浓度显著提高 17.9% 和 29.9%,铵态氮(NH₄⁺-N)浓度显著提高 12.6% 和 20.7%。相对于 NPK 处理,NPK+B 处理的 SOC、pH、TN、NO₃⁻-N 和 NH₄⁺-N 分别显著增加了 31.5%、5.4%、19.0%、41.4% 和 37.8%(表 1)。与 NPK 处理相比,NPK+S、NPK+SDI 和 NPK+B 处理均显著降低土壤容重(表 1)。

2.2 CH₄ 排放与单位产量 CH₄ 排放

CH₄ 排放主要出现在水稻生长季。各处理 CH₄ 平均排放通量为 -1.18~90.2 mg·m⁻²·h⁻¹,季节平均排放通量为 6.4~9.2 mg·m⁻²·h⁻¹。CH₄ 的排放峰值约出现在移栽 10 d 后,持续至移栽 27 d 后达到最大值,中期晒田开始迅速下降并一直保持在较低的水平直到水稻收获,此期间 CH₄ 排放量几乎可以忽略不计(图 3)。后季麦田各处理几乎无 CH₄ 排放。与 NPK 处理相比,NPK+B 处理中 CH₄ 平均排放量的增加速度较慢,而晒田期其减少速度较快(图 3)。水稻生长季各处理 CH₄ 排放总量差异很大(表 2),累积排放量 NPK+SDI>NPK+S>NPK>NPK+B。与 NPK 处理相比,NPK+B 处

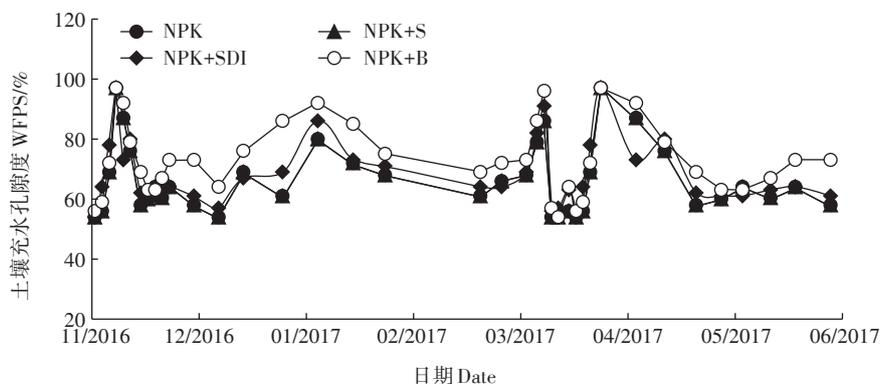


图 2 2016—2017 年小麦生长季节土壤充水孔隙度的变化规律

Figure 2 Variation law of soil water-filled pore space(WFPS) in wheat growing season from 2016 to 2017

理的CH₄累积排放量显著降低8.5%,而NPK+S处理和NPK+SDI处理均显著增加CH₄排放总量,增幅分别为11.7%和20.2%。与NPK+S处理相比,NPK+SDI处理CH₄排放显著增加7.6%,NPK+B处理CH₄排放却显著降低18.1%(表2)。麦季CH₄排放很少(图3和表2)。整个稻麦轮作周期中,CH₄累积排放量变化范围为284~372 kg·hm⁻²·a⁻¹(表2)。与NPK处理相比,NPK+S和NPK+SDI处理的CH₄累积排放量分别增加了12.7%和20.9%,NPK+B处理CH₄累积排放量减少7.5%。与NPK+S处理相比,NPK+SDI处理CH₄排放显著增加7.3%,NPK+B处理CH₄排放却显著降低17.9%(表2)。

不同处理水稻和小麦的产量差异显著(表2)。与NPK处理相比,NPK+SDI处理使粮食产量增加4.5%,使单位产量甲烷排放显著增加18.4%,而NPK+S处理使产量降低了2.8%,使单位产量甲烷排放显著增加了23.7%,NPK+B处理显著增加作物产量,增幅

为16.6%,单位产量甲烷排放降低了19.9%(表2)。而与NPK+S处理比较,NPK+SDI与NPK+B处理使稻麦两季作物产量分别增加12.1%和26.8%,使单位产量甲烷排放降低4.3%和35.3%。

3 讨论

3.1 秸秆不同利用方式还田对土壤性质的影响

已有相关研究表明生物炭添加显著降低土壤容重^[23],在本研究中得到了证实(表1)。秸秆还田后,腐解成为有机质,促进了土壤微粒的团聚作用,土壤结构得到改善,另外,秸秆分解产生的有机胶结剂会促进土壤团聚体形成,从而使土壤容重降低,增加土壤孔隙度^[24-26],本研究中,NPK+S和NPK+SDI处理均显著降低土壤容重。与NPK处理相比,NPK+S、NPK+B和NPK+SDI处理均显著增加了土壤总氮含量(表1),主要原因除秸秆自身携带氮元素外,秸秆还田能减少土壤氮元素矿化,减少土壤氮元素流失^[27]。生物炭施

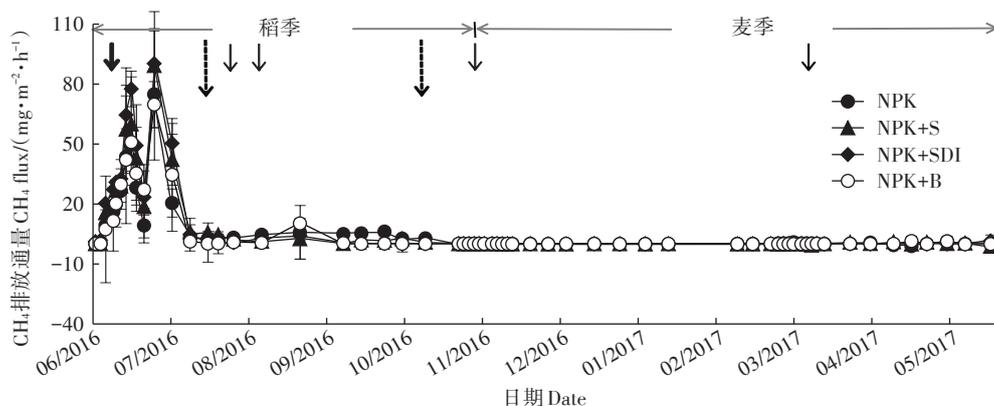
表1 2017年小麦生长季结束后土壤有机碳、pH、容重、总氮、硝态氮和铵态氮含量(0~20 cm)

Table 1 Mean soil organic carbon, soil pH, bulk density, soil total nitrogen, soil NO₃-N and soil NH₄⁺-N concentration(0~20 cm) after the end of wheat-growing season in 2017

处理 Treatments	有机碳 Organic carbon/(g C·kg ⁻¹)	pH	容重 Bulk density/(g·cm ⁻³)	总氮 Total nitrogen/(g N·kg ⁻¹)	硝态氮 NO ₃ -N/(mg N·kg ⁻¹)	铵态氮 NH ₄ ⁺ -N/(mg N·kg ⁻¹)
NPK	20.3±0.05d	7.35±0.03c	1.11±0.03a	2.16±0.05d	5.41±0.02d	1.35±0.02d
NPK+S	22.4±0.06c	7.52±0.02b	1.04±0.01b	2.36±0.02c	6.38±0.02c	1.52±0.01c
NPK+SDI	24.2±0.06b	7.63±0.03ab	1.00±0.01c	2.43±0.01b	7.03±0.01b	1.63±0.03b
NPK+B	26.7±0.03a	7.75±0.05a	0.91±0.01d	2.57±0.04a	7.65±0.03a	1.86±0.01a

注: 同列不同小写字母表示处理间差异显著(P<0.05)。下同。

Note: Different lowercase letters in the same column indicate significant differences among treatments at P<0.05. The same below.



加粗箭头表示秸秆、生物炭、秸秆腐熟剂施入及稻季第一次施肥,实线箭头表示施肥,虚线箭头表示排水
Bold arrows indicate the application of straw, biochar and straw decomposing agent and the first fertilization in rice season, solid arrows indicate fertilization and dotted arrows indicate drainage

图3 秸秆不同利用方式还田下CH₄排放通量的季节变化

Figure 3 Seasonal variations of CH₄ flux under different straw utilization patterns

表2 2016—2017年稻麦轮作系统秸秆不同利用方式还田CH₄排放量、产量和单位产量甲烷排放量Table 2 CH₄ emission, grain yields and yield-scaled methane emission during the rice-wheat growing seasons under different straw utilization patterns in 2016—2017

处理 Treatments	稻季 Rice season		麦季 Wheat season		单位产量甲烷排放量 Yield-scaled methane emission/(kg CH ₄ ·t ⁻¹ yield)
	CH ₄ 排放量 CH ₄ emission/(kg C·hm ⁻²)	产量 Yield/(t·hm ⁻²)	CH ₄ 排放量 CH ₄ emission/(kg C·hm ⁻²)	产量 Yield/(t·hm ⁻²)	
NPK	307±17c	6.41±0.18b	0.44±6.56a	3.46±0.18b	41.57±1.84b
NPK+S	343±26b	5.65±0.40b	3.42±4.48a	3.33±0.14b	51.43±3.00a
NPK+SDI	369±21a	6.53±0.11b	2.82±7.08a	3.54±0.26b	49.22±3.37a
NPK+B	281±14d	7.12±0.10a	3.31±10.01a	4.27±0.24a	33.28±0.97c

用有利于固定氮肥中的无机氮,同时秸秆和生物炭的施用也有助于作物吸收土壤中的NH₄⁺-N^[28]。

3.2 秸秆不同利用方式还田对CH₄排放的影响

严格厌氧环境是产甲烷菌生长发育的合适场所^[27],因此在中期晒田开始稻田CH₄排放量急剧下降,并且后季麦田几乎无CH₄排放。邹建文等^[29]报道称烤田会导致CH₄排放急剧下降,且烤田后复水CH₄排放通量仍然很低且长时间内不能恢复。因此,秸秆不同利用方式还田下CH₄排放主要在水稻季,且主要集中在水稻生长前期。

秸秆不同利用方式还田显著影响CH₄排放的动态变化规律(图3)和累积排放量(表2)。已有研究表明有机物质添加会增加稻田CH₄排放,本研究发现,相对于NPK处理,NPK+S处理和NPK+SDI处理显著增加CH₄排放量(表2)。主要是由于秸秆中含有大量纤维素和半纤维素等不稳定化合物,还田后土壤活性碳含量增加,在厌氧分解过程中容易以CH₄的形式损失^[30]。李新华等^[31]研究发现秸秆还田后土壤中可溶性有机碳、微生物量碳和易氧化态碳的含量分别比不还田土壤显著增加64.6%、28.9%和23.8%。另外,秸秆与腐熟剂配施加快秸秆的腐熟过程,腐熟剂中的微生物能有效地将秸秆分解成为作物所需要的营养元素,同时腐熟剂的加入增加了土壤中微生物的数量,增强了微生物的活性,进一步增强分解有机物质的能力,为产甲烷菌提供基质^[32],腐熟剂的添加促进了CH₄排放。本研究监测到CH₄排放在各处理施入稻田14 d后出现第一次峰值,且NPK+SDI处理第一次CH₄排放峰值比NPK+S处理高29.1%,其后两处理CH₄排放趋势基本一致。李培培等^[33]通过6个月的研究发现秸秆腐熟剂主要促分解效果都出现在早期(前25 d),且配施后秸秆残渣中C/N降低的效果也在早期明显,而后随着时间的推移,其促进效果逐渐减弱。这可能是秸秆配施腐熟剂还田的CH₄增加效应主要集

中在前期的主要原因。

目前,关于生物炭对稻田CH₄排放的影响并不完全一致,前人的研究中生物炭表现为促进、减少或不改变稻田CH₄排放^[34-36]。本试验中,与其他处理相比,NPK+B处理显著降低当季稻田CH₄排放量。虽然秸秆炭化还田后土壤SOC含量相比于其他处理显著增加,但生物炭由稳定性分子组成,几乎不存在不稳定的有机碳,而不稳定的有机碳才是CH₄排放的来源^[30]。生物炭具有多孔结构,对土壤中的活性碳有吸附和保护作用,导致其生物有效性降低,土壤CH₄排放减少^[37]。此外,有研究表明,生物炭的施用会促进水稻根系的生长,水稻根系会向根际分泌更多的O₂,增强甲烷氧化细菌活性并抑制产甲烷菌活性,使稻田CH₄排放降低^[33]。还有报道指出,秸秆炭化还田后土壤pH值升高同样会增强土壤中的甲烷氧化细菌活性,降低CH₄排放^[38]。因此,秸秆炭化还田后CH₄排放降低可能是生物炭稳定成分、多孔结构和甲烷氧化菌活性增强共同驱动的结果。

为系统评估秸秆不同利用方式对稻田CH₄排放的综合效应,本研究采用单位产量甲烷排放这一指标评价了秸秆不同利用方式还田对稻田CH₄排放的综合影响。结果表明,与NPK处理相比,NPK+S处理和NPK+SDI处理显著增加单位产量甲烷排放,但NPK+B处理显著降低单位产量甲烷排放。

3.3 秸秆不同利用方式还田对作物产量的影响

由于秸秆施用时间、秸秆还田方法、作物残余量、土壤特性和施氮量的差异,秸秆不同利用方式对作物产量影响的结论并不完全一致^[39-40]。长期秸秆还田可显著提高作物产量,本研究试验周期仅为1年,因此NPK+S处理与NPK处理的产量差异并不显著。相对于NPK处理,NPK+SDI处理提高作物产量,增幅为4.5%。原因是秸秆和秸秆腐熟剂配合施用加速了作物凋落物和有机碳的分解速度^[16]。NPK+B处理显著

增加了作物产量,原因是生物炭可以作为作物有效养分的直接来源,对土壤阳离子吸附有促进作用^[41],此结果与Zhao等^[36]的研究结论相同。

4 结论

(1) 稻麦轮作系统CH₄排放主要出现在当季稻田中期晒田之前,烤田后复水期间CH₄排放很低,后季麦田几乎无CH₄排放。

(2) 秸秆直接还田或者秸秆与腐熟剂配施还田相对于无秸秆还田来说都增加了CH₄排放,而秸秆炭化还田降低了CH₄排放。

(3) 将CH₄排放量和粮食生产综合考虑,相对于秸秆直接还田,秸秆配施腐熟剂和秸秆炭化还田都可降低单位产量的甲烷排放。因此,将作物秸秆配合腐熟剂还田和将作物秸秆炭化还田均能够在一定程度上实现秸秆还田的生态效应和生产效应的双赢,且以生物炭形式还田效果更佳。

参考文献:

- [1] 徐华,蔡祖聪,八木一行. 水稻土CH₄产生潜力及其影响因素[J]. 土壤学报, 2008(1):98-104. XU Hua, CAI Zu-cong, Yagi K. Methane production potentials of rice paddy soils and its affecting factors[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2008(1):98-104.
- [2] IPCC. Climate Change 2013: The physical science basis: Working Group I contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change[M]. New York: Cambridge University Press, 2013.
- [3] IPCC. Climate change 2014: Mitigation of climate change[M]. New York: Cambridge University Press Cambridge, 2014:816.
- [4] Food and Agriculture Organization. World reference base for soil resources 2014, update 2015 international soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps[R]. Rome: ISSS-ISRIC-FAO, 2015.
- [5] Cao G, Zhang X, Zheng F. Inventory of black carbon and organic carbon emissions from China[J]. *Atmospheric Environment*, 2006, 40(34): 6516-6527.
- [6] Hu N, Wang B, Gu Z, 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.
- [7] Hanafi E M, Khadrawy H H E, Ahmed W M, et al. Some observations on rice straw with emphasis on updates of its management[J]. *World Applied Sciences Journal*, 2013, 16(3): 354-361.
- [8] Wu X, Wang W, Xie K, et al. Combined effects of straw and water management on CH₄ emissions from rice fields[J]. *Journal of Environmental Management*, 2019, 231: 1257-1262.
- [9] Bossio D A, Horwath W R, Mutters R G, et al. Methane pool and flux dynamics in a rice field following straw incorporation[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 1999, 31(9): 1313-1322.
- [10] 黄婷苗. 秸秆还田条件下冬小麦高产高效的氮素管理与调控[D]. 杨凌:西北农林科技大学, 2014:2-4. HUANG Ting-miao. Nitrogen management and regulation for high yield and high efficiency production of winter wheat under straw return to soil[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2014:2-4.
- [11] 陈玉真,王峰,尤志明,等. 添加生物炭对茶园土壤CO₂、N₂O排放的影响[J]. 农业环境科学学报, 2015, 34(5): 1009-1016. CHEN Yu-zhen, WANG Feng, YOU Zhi-ming, et al. Effects of biochar on CO₂ and N₂O emissions from tea garden soils[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2015, 34(5): 1009-1016.
- [12] Major J, Rondon M, Molina D, et al. Maize yield and nutrition during 4 years after biochar application to a Colombian savanna Oxisol[J]. *Plant and Soil*, 2010, 333(1/2): 117-128.
- [13] Singh B P, Cowie A L. Long-term influence of biochar on native organic carbon mineralisation in a low-carbon clayey soil[J]. *Scientific Reports*, 2014, 4(1): 3687.
- [14] 彭华,纪耀辉,吴家梅,等. 生物炭还田对晚稻CH₄和N₂O综合减排影响研究[J]. 生态环境学报, 2011, 20(11): 1620-1625. PENG Hua, JI Xiong-hui, WU Jia-mei, et al. Integrated effect of decreasing CH₄ and N₂O emission by biochar incorporated to paddy field on late rice[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2011, 20(11): 1620-1625.
- [15] Karhu K, Mattila T, Irina Bergström, et al. Biochar addition to agricultural soil increased CH₄ uptake and water holding capacity—results from a short-term pilot field study[J]. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 2011, 140(1): 309-313.
- [16] Liu G, Yu H, Ma J, et al. Effects of straw incorporation along with microbial inoculant on methane and nitrous oxide emissions from rice fields[J]. *Science of the Total Environment*, 2015, 518/519: 209-216.
- [17] 许卫剑,庞娇霞,严菊敏,等. 秸秆腐熟剂的作用机理及应用效果[J]. 现代农业科技, 2011(5): 277-279. XU Wei-jian, PANG Jiao-xia, YAN Ju-min, et al. Mechanism and application effect of straw decomposing agent[J]. *Modern Agricultural Science and Technology*, 2011(5): 277-279.
- [18] 马煜春,周伟,刘翠英,等. 秸秆腐熟剂对秸秆还田稻田CH₄和N₂O排放的影响[J]. 生态与农村环境学报, 2017, 33(2): 159-165. MA Yu-chun, ZHOU Wei, LIU Cui-ying, et al. Effects of straw decomposing inoculants on methane and nitrous oxide emissions in paddy fields incorporated with straw[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2017, 33(2): 159-165.
- [19] 盛海君,牛东,张宸茜,等. 稻秸秆还田与腐熟剂对小麦当季温室气体排放的影响[J]. 扬州大学学报(农业与生命科学版), 2018, 39(2): 29-34. SHENG Hai-jun, NIU Dong, ZHANG Chen-xi, et al. Impacts of microbial inoculants for straw decomposing on greenhouse gas emission in wheat season of the wheat-rice rotation system[J]. *Journal of Yangzhou University (Agricultural and Life Science Edition)*, 2018, 39(2): 29-34.
- [20] 陈秋会,王磊,席运官,等. 太湖地区有机与常规种植方式下稻麦轮作农田温室气体短期排放特征[J]. 农业环境科学学报, 2019, 38(11): 2642-2649. CHEN Qiu-hui, WANG Lei, XI Yun-guan, et al. Short-term greenhouse gas emissions from organic and convention-

- al rice-wheat rotation cropping systems in Taihu Lake region, China [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2019, 38(11):2642-2649.
- [21] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000: 147-149. LU Ru-kun. Methods for agricultural chemical analysis of soil[M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2000: 147-149.
- [22] Linn D M. Effect of water-filled pore space on carbon dioxide and nitrous oxide production in tilled and non-tilled soils[J]. *Soil Sci Soc Am J*, 1984, 48(3):647-653.
- [23] Zhang A, 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*, 2017:45-54.
- [24] 范倩玉, 李军辉, 李晋, 等. 不同作物秸秆还田对潮土结构的改良效果[J]. 水土保持学报, 2020, 34(4):230-236. FAN Qian-yu, LI Jun-hui, LI Jin, et al. Effect of different crop straw mulching on alluvial soil structure improvement[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2020, 34(4):230-236.
- [25] 吴鹏年, 王艳丽, 侯贤清, 等. 秸秆还田配施氮肥对滴灌玉米产量及土壤物理性状的影响[C]//2018中国作物学会学术年会论文摘要集. 北京: 中国作物协会, 2018: 199. WU Peng-nian, WANG Yan-li, HOU Xian-qing, et al. Effects of straw returning combined with nitrogen fertilizer on corn yield and soil physical properties under drip irrigation[C]//Abstract Book of Annual Meeting of China Crop Society, 2018. Beijing: The Crop Science Society of China, 2018: 199.
- [26] 张奇, 陈燊, 陈效民, 等. 不同秸秆还田深度对黄棕壤土壤物理性质及其剖面变化的影响[J]. 土壤通报, 2020, 51(2):308-314. ZHANG Qi, CHEN Can, CHEN Xiao-min, et al. Effects of different depths of straw returning to field on soil physical properties and profile changes of yellow brown soil[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2020, 51(2):308-314.
- [27] 蔡非. 秸秆-生物炭对稻田土壤甲烷排放的影响及机制初探[D]. 杭州: 浙江大学, 2017: 1-2. CAI Fei. Effect of biochar and straw on methane emission in paddy soil[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2017: 1-2.
- [28] Saothongnoi V, Amkha S, Inubushi K, et al. Effect of rice straw incorporation on soil properties and rice yield[J]. *Thai Journal of Agricultural Science*, 2014, 47(1):7-12.
- [29] 邹建文, 黄耀, 宗良纲, 等. 稻田 CO₂, CH₄ 和 N₂O 排放及其影响因素[J]. 环境科学学报, 2003, 23(6):758-764. ZOU Jian-wen, HUANG Yao, ZONG Liang-gang, et al. A field study on CO₂, CH₄ and N₂O emissions from rice paddy and impact factors[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2003, 23(6):758-764.
- [30] Zhang X Y, Zhang G B, Yang J I, et al. Straw application altered CH₄ emission, concentration and ¹³C-isotopic signature of dissolved CH₄ in a rice field[J]. *Pedosphere*, 2012, 22(1):1-21.
- [31] 李新华, 郭洪海, 朱振林, 等. 不同秸秆直接还田模式对土壤有机碳及其活性组分的影响[J]. 农业工程学报, 2016, 32(9):130-135. LI Xin-hua, GUO Hong-hai, ZHU Zhen-lin, et al. Effects of different straw return modes on contents of soil organic carbon and fractions of soil active carbon[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2016, 32(9):130-135.
- [32] 马煜春, 周伟, 刘翠英, 等. 秸秆腐熟剂对秸秆还田稻田 CH₄ 和 N₂O 排放的影响[J]. 生态与农村环境学报, 2017, 33(2):159-165. MA Yu-chun, ZHOU Wei, LIU Cui-ying, et al. Effects of straw decomposing inoculants on methane and nitrous oxide emissions in paddy fields incorporated with straw[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2017, 33(2):159-165.
- [33] 李培培, 张冬冬, 王小娟, 等. 促分解菌剂对还田玉米秸秆的分解效果及土壤微生物的影响[J]. 生态学报, 2012, 32(9):2847-2854. LI Pei-pei, ZHANG Dong-dong, WANG Xiao-juan, et al. Effects of microbial inoculants on soil microbial diversity and degrading process of corn straw returned to field[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2012, 32(9):2847-2854.
- [34] Feng Y, Xu Y, Yu Y, et al. Mechanisms of biochar decreasing methane emission from Chinese paddy soils[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2012, 46:80-88.
- [35] Knoblauch C, Maarifat A A, Pfeiffer E M, et al. Degradability of black carbon and its impact on trace gas fluxes and carbon turnover in paddy soils[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2011, 43(9):1768-1778.
- [36] Zhao X, Wang S, Xing G. Nitrification, acidification, and nitrogen leaching from subtropical cropland soils as affected by rice straw-based biochar: Laboratory incubation and column leaching studies[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2014, 14(3):471-482.
- [37] 刘志伟, 朱孟涛, 郭文杰, 等. 秸秆直接还田与炭化还田下土壤有机碳稳定性和温室气体排放潜力的对比研究[J]. 土壤通报, 2017, 48(6):1371-1378. LIU Zhi-wei, ZHU Meng-tao, GUO Wen-jie, et al. Comparison of soil organic carbon stability and greenhouse gas emissions potential under straw or straw-derived biochar amendment [J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2017, 48(6):1371-1378.
- [38] Abujabbah I S, Doyle R B, Bound S A, et al. Assessment of bacterial community composition, methanotrophic and nitrogen-cycling bacteria in three soils with different biochar application rates[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2018, 18(1):148-158.
- [39] Singh R, Babu J N, Kumar R, et al. Multifaceted application of crop residue biochar as a tool for sustainable agriculture: An ecological perspective[J]. *Ecological Engineering*, 2015, 77:324-347.
- [40] Li S, Li Y, Li X, et al. Effect of straw management on carbon sequestration and grain production in a maize-wheat cropping system in Anthrosol of the Guanzhong Plain[J]. *Soil & Tillage Research*, 2016, 157:43-51.
- [41] Jeffery S, Verheijen F G A, Velde M V D, et al. A quantitative review of the effects of biochar application to soils on crop productivity using meta-analysis[J]. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 2011, 144(1):175-187.