

麦季稻秆施用对后续稻季 CH₄ 产生 氧化及排放的影响

张晓艳^{1,2}, 马二登^{1,2}, 张广斌^{1,2}, 马 静¹, 徐 华¹, 蔡祖聪¹

(1.土壤与农业可持续发展国家重点实验室 中国科学院南京土壤研究所, 南京 210008; 2.中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘 要:通过室内培养和田间试验研究了 2007 年麦季稻秆施用对 2008 年稻季 CH₄ 产生潜力、氧化潜力和排放通量的影响。结果表明,水稻生长前期,稻秆还田处理的 CH₄ 氧化潜力仅在水稻移栽后 19 d 时表现为显著高于稻秆不还田处理,而两处理的 CH₄ 产生潜力与排放通量均无显著差异;水稻生长中期,两处理的 CH₄ 氧化潜力无显著差异,稻秆还田处理的 CH₄ 产生潜力及排放通量均显著高于稻秆不还田处理,其中稻秆还田处理的 CH₄ 产生潜力是稻秆不还田处理的 2~4 倍;水稻生长后期,两处理的 CH₄ 产生潜力、氧化潜力和排放通量均无显著差异。CH₄ 排放主要发生在水稻生长中期。水稻全生育期内,稻秆还田处理的 CH₄ 排放总量为稻秆不还田处理的 1.4 倍。

关键词:秸秆还田; CH₄ 产生潜力; CH₄ 氧化潜力; CH₄ 排放通量

中图分类号: X511 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-2043(2010)09-1827-07

Effects of Rice Straw Application in Wheat Season on Production, Oxidation and Emission of CH₄ During the Following Rice-Growing Season

ZHANG Xiao-yan^{1,2}, MA Er-deng^{1,2}, ZHANG Guang-bin^{1,2}, MA Jing¹, XU Hua¹, CAI Zu-cong¹

(1.State Key Laboratory of Soil and Sustainable Agriculture, Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China;

2.Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Laboratory incubations and field experiments were carried out to study the effects of rice straw application in wheat season in 2007 on CH₄ production potential, CH₄ oxidation potential, and CH₄ flux from the paddy field during the following rice-growing season in 2008. The results indicated that CH₄ oxidation potential in treatment SA (straw application) was significantly higher than that in treatment NS (no straw) at 19th day after rice transplantation, while no significant differences were observed in CH₄ production potential and CH₄ flux between the two treatments at the early rice growth stage. During the middle rice growth stage, no significant difference in CH₄ oxidation potential was observed between the two treatments, both CH₄ production potential and CH₄ flux in treatment SA were significantly higher than those in treatment NS. The CH₄ production potential in treatment SA was 2~4 times that in treatment NS. At the end of the rice growth stage, there were no significant differences were observed between the two treatments in production, oxidation, and emission of CH₄. The CH₄ emissions mainly occurred in the middle rice growth stage. The total CH₄ emission in treatment SA was 1.4 times that in treatment NS in the whole rice season.

Keywords: rice straw incorporation; CH₄ production potential; CH₄ oxidation potential; CH₄ flux

CH₄ 是大气中仅次于 CO₂ 的重要温室气体,单位质量 CH₄ 的增温效应是 CO₂ 的 7.6~72 倍^[1]。2005 年,

大气中 CH₄ 浓度已由工业革命前的 0.715 μL·L⁻¹ 增加到 1.774 μL·L⁻¹。稻田是大气 CH₄ 的重要排放源,据 IPCC 第四次评估报告,稻田 CH₄ 的年排放量为 31~112 Tg,占全球 CH₄ 总排放的 5%~19%^[2]。我国是水稻生产大国,水稻种植面积居全世界第二位,稻田 CH₄ 年排放量为 6.02、7.67 Tg^[3-4]。2005 年 2 月 16 日,《京都议定书》正式生效,我国作为温室气体排放大国,减排压力日益增大。

农作物秸秆是农田生态系统中重要的有机肥源

收稿日期:2010-03-21

基金项目:国家自然科学基金项目(40971154);中国科学院知识创新重要方向项目群项目(KZCX2-YW-Q1-07);科技部国际科技合作项目(2008DFA21330)

作者简介:张晓艳(1986—),女,山东临沂人,博士研究生,主要从事农田温室气体排放规律及其机理研究。

E-mail: zhangxy@issas.ac.cn

通讯作者:徐 华 E-mail: hxu@issas.ac.cn

之一, 秸秆还田是 C、N 等营养元素物质循环和秸秆资源再利用的良好形式。以往大量研究发现, 秸秆还田显著增加稻田 CH_4 排放, 而秸秆还田方式及时间的不同对稻田 CH_4 排放的影响也差异显著^[5-10]。相对于水稻移栽前施用稻秆, 前季稻秆还田既能增加土壤有机质含量, 又显著减少后续稻季 CH_4 排放量^[10-11]。但系统地研究前季稻秆还田对后续稻季 CH_4 产生、氧化和排放的影响尚未见报道。因此, 本试验设置麦季施用及不施用稻秆两个处理, 田间原位观测后续稻季 CH_4 排放通量, 并结合室内培养试验研究稻田土壤 CH_4 产生潜力、氧化潜力, 以探讨麦季稻秆施用对后续稻季 CH_4 产生、氧化及排放的影响, 试图从机理上阐明前季秸秆施用对后续稻季 CH_4 排放的影响。

1 材料与方法

1.1 供试土壤

试验小区位于江苏省句容市白兔镇 (31°58'N, 119°18'E)。该地位于环太湖地区典型稻麦轮作区, 属北亚热带季风气候。年平均气温为 15.1℃, 年平均降水量为 1 018.6 mm。供试土壤为发育于下蜀黄土的爽水性水稻土, 土壤(0~15 cm 土层)有机碳含量为 11.2 g·kg⁻¹, 全氮含量为 1.0 g·kg⁻¹, 土壤 pH(H₂O) 为 6.9。

1.2 试验设计

2007 年麦季大田试验设置 2 个处理: (1) 稻秆还田: 小麦播种前, 于当日按 4 800 kg·hm⁻² 计将长约 10 cm 的稻秆(C/N 为 36)与表层(0~15 cm)土壤均匀混合; (2) 稻秆不还田: 不施用稻秆。每处理设置 3 个重复。各试验小区按当地惯用耕作方式种植冬小麦, 品种为镇麦 5 号, 于 2007 年 11 月 19 日播种, 2008 年 5 月 31 日收割。肥料的施用方式: 尿素 300 kg N·hm⁻², 60% 作为基肥于 2007 年 11 月 21 日施用, 40% 作为返青肥于 2008 年 3 月 12 日施用。磷肥和钾肥作为基肥, 一次性施入, 用量为过磷酸钙 450 kg·hm⁻², 氯化钾 225 kg·hm⁻²。

2008 年稻季, 两处理的田间管理措施完全相同。各试验小区施用尿素 300 kg N·hm⁻², 按基肥: 分蘖肥: 穗肥=2:1:1 施用, 磷钾肥分别为 450 kg·hm⁻² 的过磷酸钙和 225 kg·hm⁻² 的氯化钾, 作为基肥一次性施入。基肥、分蘖肥、穗肥分别于 6 月 22 日、7 月 8 日、8 月 22 日施用。水稻品种为华粳 3 号, 于 5 月 16 日育苗, 6 月 22 日移栽, 11 月 2 日收割。水稻生长期各试验小区实行持续淹水管理, 6 月 21 日至 10 月 8 日稻田一直保持有水层。

1.3 样品采集与测定

田间 CH_4 气体样品用 6 个静态箱分别于各试验小区采集。采样箱高 1 m, 底面积为 0.25 m² (0.5 m × 0.5 m)。采样箱底座(0.5 m × 0.5 m × 0.15 m)由硬塑料制成, 上端带有 4 cm 深的水槽, 于水稻移栽前埋设于各小区中间, 其顶端与土面齐平, 底座内水稻种植密度与整个小区保持一致, 整个水稻生长季底座保持不动。采样时将静态箱放置在底座上端的水槽里, 水槽中加水确保密封, 底座内的植株位于采样箱内, 然后用两通针将气体导入 18 mL 预先抽真空的玻璃瓶中, 每 15 min 采样 1 次, 共采 4 次, 采样结束后移走采样箱。水稻生长期每隔 4~7 d 采样 1 次, 采样时间为上午 8:00—12:00。样品 CH_4 浓度用带有氢离子火焰检测器的气相色谱 (岛津 GC-12A) 分析。根据瓶内 CH_4 浓度与时间的关系曲线计算稻田 CH_4 排放通量。

采集气样的同时, 用氧化还原电位计 (ToaPRN-41, Hirose Rika Co. Ltd., Japan) 测定 10 cm 深处土壤氧化还原电位 (*Eh*), 用直尺测定水层厚度, 用数字温度计 (Model 2455, Yokogawa, Japan) 记录箱温及 5 cm 深处土温。

田间 CH_4 排放通量观测试验结束后, 于各试验小区中取 2 份约 50 g (干土重) 新鲜土样, 分别迅速转移到 2 个体积均为 250 mL 的培养瓶中。加入无氧去离子水, 使得瓶内土水比为 1:1, 并搅拌成泥浆状。其中一个培养瓶充氮气后再用硅橡胶塞密封, 另外一个培养瓶则直接用硅橡胶塞密封。立即带回室内进行厌氧和好氧培养试验。培养试验观测时间为: 2008 年 7 月 11 日 (19 DAT, 水稻移栽后 19 d)、7 月 27 日 (35 DAT)、8 月 12 日 (51 DAT)、8 月 27 日 (66 DAT)、9 月 24 日 (94 DAT)、10 月 8 日 (108 DAT)。

1.4 CH_4 产生潜力的厌氧培养试验

田间充氮气后用硅橡胶塞密封的培养瓶进行厌氧培养试验。硅橡胶塞中间有一小孔, 内插玻璃管, 管外套有一段硅橡胶软管, 再以硅胶塞塞紧硅橡胶软管通气口使之密封, 并以此硅胶塞作为抽真空、充 N_2 及气体取样口。培养瓶经反复 6 次抽真空、充 N_2 (最后充 N_2 至 1 atm) 后, 参照田间实测土温置于暗箱培养。 CH_4 产生潜力通过测定密闭培养 1 h (作为初始值) 和 50 h (作为最终值) 后瓶内 CH_4 浓度的变化获得。在较小时间尺度内, 培养瓶中 CH_4 浓度与培养时间呈线性变化, 采用该方法测量土壤的 CH_4 产生潜力, 能够代表田间土壤的实际产生潜力^[12]。

1.5 CH₄ 氧化潜力的好氧培养试验

田间直接用硅橡胶塞密封的培养瓶进行好氧培养试验,试验装置与厌氧培养试验的相同。通过取样口向培养瓶中加入 2.5 mL 纯 CH₄, 使瓶内 CH₄ 的浓度在 10 000 $\mu\text{L}\cdot\text{L}^{-1}$ 左右,30 min 后(瓶内气体均匀混合后)测定瓶内 CH₄ 的浓度,并参照田间实测土温置于暗箱振荡培养(120 $\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$)。第 1 d 的 8 h 内每隔 2~3 h 测定瓶内 CH₄ 的浓度,第 2 d 每隔 2 h 测定瓶内 CH₄ 的浓度。CH₄ 氧化潜力根据密闭培养第 1 d 瓶内 CH₄ 浓度的变化做线性回归得到的 CH₄ 氧化潜力和第 2 d 瓶内 CH₄ 浓度的变化做线性回归所得的 CH₄ 氧化潜力然后取两者平均值获得。高浓度的 CH₄ 能促进甲烷细菌的生长和它们的氧化活性^[13-14],因此,为获得能代表田间土壤的实际氧化潜力,培养时间不宜过长,一般为 36 h。

1.6 数据处理与分析

根据 CH₄ 浓度与时间的关系曲线计算排放通量,用公式表示为:

$$F=dc/dt\times0.714\times h\times273/T \quad (1)$$

式中: F 为 CH₄ 排放通量, $\text{mg CH}_4\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$; h 为静态采样箱顶部至水面的高度, m ; dc/dt 为单位时间内密闭箱内 CH₄ 浓度的变化, $\mu\text{L}\cdot\text{L}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$; $T(K)$ 为采样时密闭箱内温度。

CH₄ 的产生率及氧化率由以下公式计算:

$$P=dc/dt\times V_H/W_s\times M_w/M_v\times273/T \quad (2)$$

式中: P 为 CH₄ 产生率(氧化率), $\mu\text{g CH}_4\cdot\text{g}(\text{soil})^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$; dc/dt 为培养瓶内气相 CH₄ 浓度单位时间的变化, $\mu\text{L}\cdot\text{L}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$; V_H 为培养瓶内上部空间的体积, L ; W_s 为干土重量, g ; M_w 为 1 mol CH₄ 的质量, g ; M_v 为标准状态下 1 mol 气体的体积, L ; $T(K)$ 为培养温度。

CH₄ 排放通量用 3 个重复的每次观测平均值表示,CH₄ 季节平均排放通量是将每次观测值按时间间隔加权平均后再取 3 个重复的平均值。CH₄ 产生率取培养 50 h 后所得产生率 3 个重复的平均值,CH₄ 氧化率用 3 个重复的平均值表示。处理间比较以 3 个重复的平均值进行方差分析。

数据处理与分析均采用 Microsoft Excel 2003 software for windows 和 SPSS15.0 software for windows (SPSS Inc., Chicago) 完成。

2 结果与分析

2.1 麦季稻秆还田对后续稻季 CH₄ 产生潜力的影响

图 1 为室内培养条件下麦季稻秆还田对后续稻

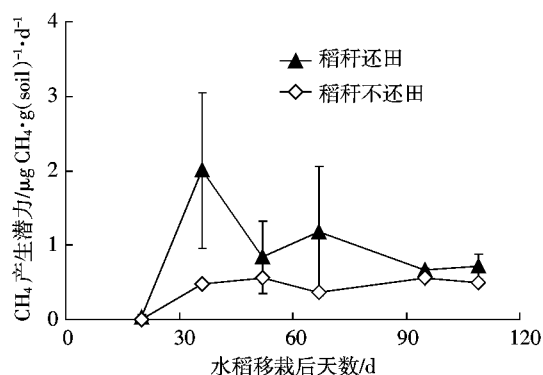


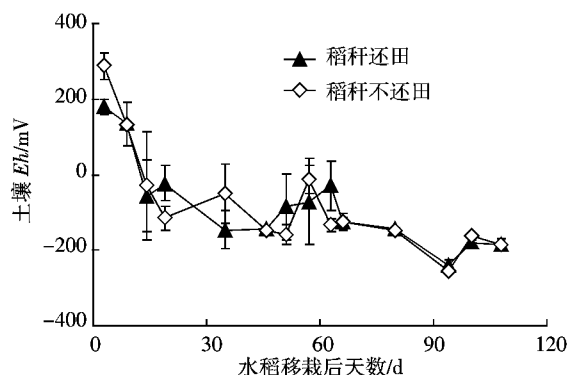
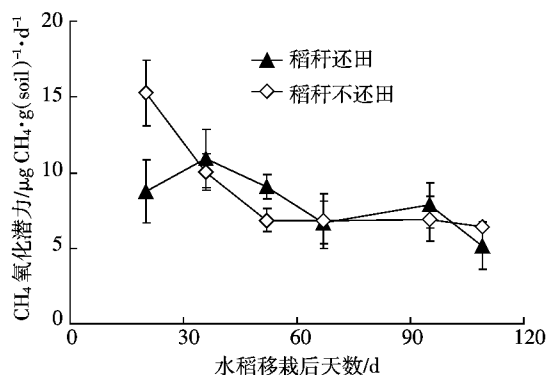
图 1 水稻生长期 CH₄ 产生潜力的季节变化(室内培养)

Figure 1 Seasonal variation of CH₄ production potentials during the rice-growing period (Laboratory incubations)

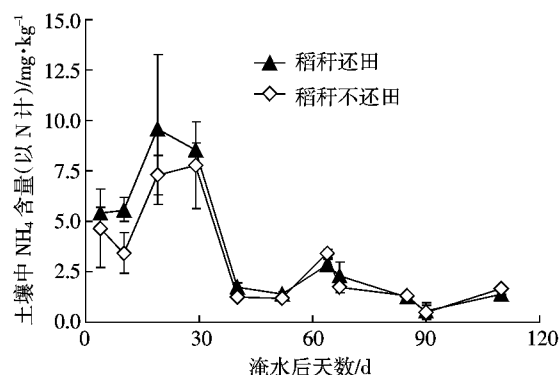
季 CH₄ 产生潜力的影响。水稻移栽后初期,两处理的 CH₄ 产生潜力均较小。水稻移栽后第 35 d,稻秆不还田处理的 CH₄ 产生潜力开始上升,第 51 d 出现最大值,在此后的水稻生长季里其变化十分平缓;稻秆还田处理 CH₄ 产生潜力在水稻移栽后第 35 d 出现最大峰值,随后有所下降,水稻生长后期 CH₄ 产生潜力变化趋于平缓。由于 CH₄ 是极端还原条件下产甲烷菌作用于产甲烷基质的结果,充足的产甲烷基质和适宜的产甲烷菌生长环境是 CH₄ 产生的先决条件。水稻生长初期,土壤 E_h 仍处于较高状态(图 2),不利于土壤产 CH₄,使得两处理几乎没有 CH₄ 产生(图 1)。水稻生长中期,一方面土壤 E_h 逐渐下降至适宜产 CH₄ 的水平(图 2),另一方面稻秆还田处理可能仍存在一些尚未分解的秸秆,这为土壤产甲烷菌提供了丰富的产 CH₄ 基质和适宜的产 CH₄ 环境,从而促进了稻田 CH₄ 的产生。水稻移栽后 35~66 d,两处理的 CH₄ 产生潜力明显增大。水稻生长后期,土壤 E_h 已不是 CH₄ 产生的限制因子(图 2)。随着稻秆还田处理中秸秆的不断消耗,CH₄ 产生潜力逐渐减小并最终趋于平稳(图 1);稻秆不还田处理由于没有秸秆的有机物质补充,只在土壤 E_h 下降至适宜产 CH₄ 水平时 CH₄ 产生潜力有所上升,此后一直保持在一个相对稳定的水平(图 1)。

2.2 麦季稻秆还田对后续稻季 CH₄ 氧化潜力的影响

图 3 为室内培养条件下麦季稻秆还田对后续稻田 CH₄ 氧化潜力的影响。水稻生长初期 CH₄ 氧化潜力较高,随着淹水时间的延长 CH₄ 氧化潜力逐渐降低,水稻生长后期保持平稳。这是由于稻田土壤产生的 CH₄ 在从土壤向大气的排放过程中,相当大一部分被根土界面和土水界面的甲烷氧化菌氧化,而大量研究表明甲烷氧化菌的活性受多种因素的影响^[14-18],使

图2 水稻生长期土壤 E_h 的季节变化(野外观测)Figure 2 Seasonal variation of soil E_h during the rice-growing period(field experiments)图3 水稻生长期 CH_4 氧化潜力的季节变化(室内培养)Figure 3 Seasonal variation of CH_4 oxidation potentials during the rice-growing period(Laboratory incubations)

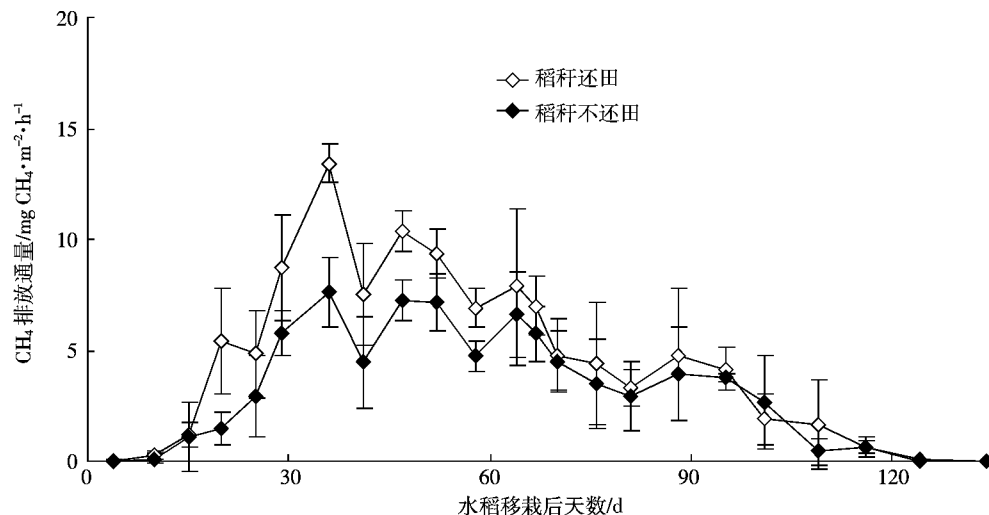
得土壤 CH_4 氧化能力在水稻生长期呈现一定变化。土壤中 NH_4^+-N 含量也是影响 CH_4 氧化潜力的重要因素。图4为水稻生长期土壤中 NH_4^+-N 含量的季节变

图4 水稻生长期土壤中 NH_4^+-N 含量的季节变化(野外采样)Figure 4 Seasonal variation of soil NH_4^+-N contents during the rice-growing period(field experiments)

化,两处理在水稻生长期初期后均表现为 NH_4^+-N 含量逐渐减少。

2.3 麦季稻秆还田对后续稻季 CH_4 排放通量的影响

水稻全生育期内两处理 CH_4 排放通量均呈现明显的季节变化(图5)。水稻生长初期 CH_4 排放通量较小,随后逐渐增大,水稻移栽后 35 d 出现最大排放峰,第 46 d 出现第二排放峰,随后逐渐减小直到水稻收获。 CH_4 排放主要发生在水稻生长中期,水稻移栽后 28~63 d,稻秆还田和不还田处理 CH_4 排放量分别高达 130 d 观测期总排放量的 55.3%和 51.9%。结合水稻生长期 CH_4 产生潜力和氧化潜力与对应阶段的 CH_4 排放通量(图1,图3,图5)可知,水稻生长初期, CH_4 产生潜力小而氧化潜力高,且水稻植株、气泡和扩散途径排放 CH_4 的能力又相对较弱,因此 CH_4 排放通量较低;水稻生长中期, CH_4 产生潜力明显增大

图5 水稻生长期 CH_4 排放通量的季节变化(野外观测)Figure 5 Seasonal variation of CH_4 fluxes during the rice-growing period(field experiments)

而氧化潜力逐渐降低,且此时水稻根系和植株通气组织逐渐发达,有利于 CH_4 从土壤中的排放,致使 CH_4 排放通量出现排放峰;水稻生长后期,随着 CH_4 产生潜力的显著降低, CH_4 排放通量也呈现逐渐降低趋势。

3 讨论

3.1 麦季稻秆还田对后续稻季 CH_4 产生潜力的影响

对比稻秆还田与不还田两处理的 CH_4 产生潜力发现,水稻生长初期两处理 CH_4 产生潜力均较小;在水稻移栽后的第 35 d,稻秆不还田处理上升至 $0.478 \mu\text{g CH}_4 \cdot \text{g}(\text{soil})^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$,而稻秆还田处理上升为 $2.00 \mu\text{g CH}_4 \cdot \text{g}(\text{soil})^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$,是稻秆不还田处理的4倍,此后虽表现为逐渐减小的趋势,但仍为稻秆不还田处理的2~3倍;水稻生长后期,两处理的 CH_4 产生潜力无显著差异。结合图1,图2可知,在土壤 Eh 下降至适宜产 CH_4 水平时期,稻秆还田处理的 CH_4 产生潜力显著高于稻秆不还田处理,这是由于稻秆还田处理仍存在一些尚未分解的秸秆,其中的有机物质就成为产甲烷前体的基质和质子来源,即为土壤产甲烷菌提供了丰富的产 CH_4 基质和适宜的环境条件^[9],从而促进了稻田 CH_4 的产生。在水稻生长后期稻秆还田处理的秸秆被分解完全,此时两处理 CH_4 产生潜力趋于一致。这一现象充分表明,在水稻移栽初期土壤 Eh 是 CH_4 产生的限制因子,稻秆还田对 CH_4 产生影响较小,水稻移栽中期和后期,土壤 Eh 已达到适宜产 CH_4 的水平,稻秆还田则显著影响土壤中 CH_4 的产生。

另有研究表明, CH_4 产生量与土壤有机碳和全氮含量呈显著正相关^[20-22]。本试验麦季结束后稻秆不还田处理与稻秆还田处理土壤(0~15 cm 土层)有机碳含量分别为 $12.3 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $13.6 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,全氮含量分别为 $1.5 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $1.6 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。稻秆还田处理土壤有机碳和全氮含量高于稻秆不还田处理,与前人研究相一致。

3.2 麦季稻秆还田对后续稻季 CH_4 氧化潜力的影响

在水稻生长初期,水稻植株、气泡和扩散途径排放 CH_4 的能力相对较弱,导致高浓度的 CH_4 在土壤中积累^[23],通过刺激甲烷氧化细菌生长来促进 CH_4 的氧化^[13-14];随着水稻根系及植株通气组织逐渐发达, CH_4 不易在土壤中积累,此外,土壤中 NH_4^+-N 被水稻生长大量消耗(图4),甲烷氧化菌的生长活动受到抑制^[24-25],降低了甲烷氧化菌的活性从而降低 CH_4 氧化。这与 Krüger 等^[26-27]研究结果相一致。

通过对比麦季稻秆还田与否对后季稻田 CH_4 氧化潜力的影响(图3)可知,水稻生长初期,稻秆不还田处理 CH_4 氧化潜力显著高于稻秆还田处理。这可能是由于稻秆还田处理残留秸秆的分解会加速消耗土壤闭蓄的氧气和水层中的氧气^[28],从而导致可供甲烷氧化细菌生长的氧气快速减少,进而明显降低甲烷氧化细菌的活性,使得 CH_4 氧化潜力显著低于稻秆不还田处理(图3)。水稻生长中后期,两处理的 CH_4 氧化潜力无明显差异(图3)。

3.3 麦季稻秆还田对后续稻季 CH_4 排放通量的影响

对比水稻全生育期内两处理 CH_4 排放通量的季节变化(图5)可知,虽然稻秆还田和稻秆不还田处理的季节变化趋势相一致,但在水稻生长中期稻秆还田处理 CH_4 排放通量显著高于稻秆不还田处理。水稻移栽后 35 d CH_4 排放通量出现最大排放峰,稻秆还田和不还田处理分别为 $13.4 \text{ mg CH}_4 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ 和 $7.6 \text{ mg CH}_4 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$,前者是后者的1.8倍,第46 d 均出现第二排放峰 $10.3 \text{ mg CH}_4 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ 和 $7.3 \text{ mg CH}_4 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$,前者是后者的1.4倍。水稻生长中期,稻秆还田处理 CH_4 氧化潜力与稻秆不还田处理无明显差异(图3),但其 CH_4 产生潜力显著高于稻秆不还田处理,使得其 CH_4 排放通量明显高于稻秆不还田处理(图5)。

以往研究发现,在排水落干的非水稻生长季节还田的作物秸秆在稻季淹水前有相当长的时间可以进行好氧分解,当土壤为水稻移栽或播种淹水时,易分解的有机物质已被大量分解,从而可以显著降低淹水期 CH_4 的排放^[10,32-33]。本试验也表明,稻秆还田后经过整个麦季的好氧分解,虽然对水稻生长中期 CH_4 排放通量仍有一定促进作用,但在水稻生长后期对 CH_4 排放通量已不再有显著的影响(图5);水稻全生育期内,稻秆还田处理的 CH_4 排放量是稻秆不还田处理的1.4倍。我们通过扣除相同条件下稻秆不还田处理的 CH_4 排放总量,计算单位稻秆 CH_4 排放量,计算公式为:

单位稻秆 CH_4 排放量 = (稻秆还田 CH_4 排放总量 - 稻秆不还田 CH_4 排放总量) / 稻秆施用量

比较文献及本试验的计算结果(表1)可知,前季稻秆还田的单位稻秆 CH_4 排放量为 $0.001 \sim 0.017 \text{ g CH}_4 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{g}(\text{稻秆})^{-1}$,仅占当季稻秆还田单位稻秆 CH_4 排放量的 $0.31\% \sim 26.15\%$ 。前季稻秆还田既能增加土壤有机质含量,又显著减少后续稻季 CH_4 排放量,因而是一种非常有效的稻秆还田方式,值得大力推广。

表 1 稻秆施用对 CH₄ 排放量的影响对比

Table 1 Comparison of CH₄ emissions obtained per unit of rice straw application under different conditions

地点	水稻种植	稻秆施用时间	稻秆施用量/ g·m ⁻²	CH ₄ 排放总量/ gCH ₄ ·m ⁻²	单位稻秆 CH ₄ 排放量/ gCH ₄ ·m ⁻² ·g(稻秆) ⁻¹	参考文献
湖南宁乡	早稻	前季	0	22.1	—	伍芬琳等,2008[29]
			1 250	22.9	0.001	
	晚稻	前季	0	9.71	—	
湖南望城	早稻	当季	1 250	31.6	0.017	秦晓波等,2006[30]
			0	20.1	—	
	晚稻	当季	262.5	52.7	0.124	
台湾桃源	早稻	当季	0	21.5	—	Yang and Chang,1997[31]
			262.5	107.3	0.327	
	晚稻	当季	0 ^a	29.5	—	
Luzon Philippines	旱季稻	当季	600 ^a	91.5	0.103	Corton et al.,2000[8]
			1 200 ^a	201.2	0.143	
	雨季稻	当季	0 ^a	7.60	—	
江苏句容	单季稻	前季	600 ^a	51.8	0.074	本试验
			1 200 ^a	133.1	0.105	
	单季稻	前季	0	16.0	—	
Luzon Philippines	旱季稻	当季	400	42.0	0.065	Corton et al.,2000[8]
			0	27.2	—	
	雨季稻	当季	400	95.2	0.170	
江苏句容	单季稻	前季	0	10.1	—	本试验
			480	14.1	0.008	

注 a. 盆栽试验。

4 结论

麦季稻秆还田,大部分秸秆被好氧分解,使得水稻生长期可供产 CH₄ 的秸秆大大减少。水稻生长初期,两处理均表现为基本没有 CH₄ 产生。水稻生长中期,两处理 CH₄ 产生潜力明显增大,稻秆还田处理表现为显著高于稻秆不还田处理,是秸秆不还田处理的 2~4 倍。水稻生长后期,随着秸秆的消耗,两处理间 CH₄ 产生潜力则无显著差异。麦季稻秆还田对稻季 CH₄ 氧化潜力与 CH₄ 产生潜力有不同的影响,CH₄ 氧化潜力在第 19 d 时,稻秆还田处理显著高于稻秆不还田处理,此后两处理之间无显著差异。两处理的 CH₄ 排放主要发生在水稻生长中期。水稻全生育期内,稻秆还田处理的 CH₄ 排放总量为稻秆不还田处理的 1.4 倍。

麦季稻秆还田对后续稻季 CH₄ 排放无显著影响,表明冬季稻秆还田既能增加土壤有机质含量,提高土壤肥力,又不会造成稻田水稻生长季 CH₄ 排放量的显著增加,是一种值得大力推广的秸秆还田方式。

参考文献:

[1] IPCC. Climate change 2007: Changes in atmospheric constituents and in

radiative forcing[R/OL]/http://www. ipcc. ch/pdf/assessment-report/ar4/wg1/ar4-wg1-chapter2. pdf

[2] IPCC. Climate change 2007: Couplings between changes in the climate system and biogeochemistry[R/OL]/http://www. ipcc. ch/pdf/assessment-report/ar4/wg1/ar4-wg1-chapter7. pdf.

[3] 蔡祖聪. 中国稻田甲烷排放研究进展[J]. 土壤, 1999, 5:266-269. CAI Zu-cong. Advances on methane emission from paddy fields in China[J]. Soils, 1999, 5:266-269.

[4] 黄耀, 张稳, 郑循华, 等. 基于模型和 GIS 技术的中国稻田甲烷排放估计[J]. 生态学报, 2006, 26(4):980-988. HUANG Yao, ZHANG Wen, ZHENG Xun-hua, et al. Estimates of methane emissions from Chinese rice paddies by linking a model to GIS database[J]. Acta Ecologica Sinica, 2006, 26(4):980-988.

[5] 蒋静艳, 黄耀, 宗良纲. 水分管理与秸秆施用对稻田 CH₄ 和 N₂O 排放的影响[J]. 中国环境科学, 2003, 23(5):552-556. JIANG Jing-yan, HUANG Yao, ZONG Liang-gang. Influence of water controlling and straw application on CH₄ and N₂O emissions from rice field[J]. China Environmental Science, 2003, 23(5):552-556.

[6] Naser HM, 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, 53:95-101.

[7] Yagi K, Minami K. Effect of organic matter application on methane emission from some Japanese paddy fields[J]. Soil Science and Plant Nutrition, 1990, 36:599-610.

- [8] Corton T M, Bajita J B, Grospe F S, et al. Methane emission from irrigated and intensively managed rice fields in central Luzon(Philippines)[J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2000, 58:37-53.
- [9] Ma J, Xu H, Yagi K, et al. Methane emission from paddy soils as affected by wheat straw returning model[J]. *Plant Soil*, 2008, 313:167-174.
- [10] Xu H, Cai Z C, Li X P, et al. Effect of antecedent soil water regime and rice straw application time on CH₄ emission from rice cultivation[J]. *Australian Journal of Soil Research*, 2000, 38:1-12.
- [11] Lu W F, Chen W, Duan B W, et al. Methane emissions and mitigation options in irrigated rice fields in southeast China[J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2000, 58:65-73.
- [12] 王明星. 中国稻田甲烷排放[M]. 北京:科学出版社, 2001:84.
WANG Ming-xing. Methane emission from Chinese paddy fields[M]. Beijing: Science Press, 2001:84.
- [13] Arif M A S, Houwen F, Verstraete W. Agricultural factors affecting methane oxidation in arable soil[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 1996, 21:95-102.
- [14] Bender M, Conrad R. Effect of CH₄ concentrations and soil conditions on the induction of CH₄ oxidation activity[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 1995, 27(12):1517-1527.
- [15] Jia Z J, Cai Z C, Xu H, et al. Effect of rice plants on CH₄ production, transport, oxidation and emission in rice paddy soil[J]. *Plant and Soil*, 2001, 230:211-221.
- [16] Jia Z J, Cai Z C, Tsuruta H. Effect of rice cultivar on CH₄ production potential of rice soil and CH₄ emission in a pot experiment[J]. *Soil Science and Plant Nutrition*, 2006, 52:341-348.
- [17] Wang B J, Neue H U, Samonte H P. Effect of cultivar difference ('IR72', 'IR65598' and 'Dular') on methane emission[J]. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 1997, 62:31-40.
- [18] 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.
- [19] 徐 华, 蔡祖聪, 李小平. 土壤 Eh 和温度对稻田甲烷排放季节变化的影响[J]. 农业环境保护, 1999, 18(4):145-149.
XU Hua, CAI Zu-cong, LI Xiao-ping. Effect of soil Eh and temperature on seasonal variation of CH₄ emission from rice field [J]. *Agro-environmental Protection*, 1999, 18(4):145-149.
- [20] Wang B, Xu Y, Wang Z, et al. Methane production potentials of twenty-eight rice soils in China[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 1999, 29:74-80.
- [21] Xu H, Cai Z C, Tsuruta H. Soil moisture between rice-growing seasons affects methane emission, production and oxidation[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2003, 67:1147-1157.
- [22] 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, 45(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, 45(1):98-104.
- [23] Schütz H, Seiler W, Conrad R. Processes involved in formation and emission of methane in rice paddies[J]. *Biogeochemistry*, 1989, 7:33-53.
- [24] Bodelier PLE, Hahn AP, Arth I, et al. Effects of ammonium-based fertilization on microbial processes involved in methane emission from soils planted with rice[J]. *Biogeochemistry*, 2000, 51, 225-257.
- [25] Bodelier PLE, Roslev P, Henckel T, et al. Ammonium stimulates methane oxidation in rice soil[J]. *Nature*, 2000, 403:421-424.
- [26] Krüger M, Eller G, Conrad R, et al. Seasonal variation in pathways of CH₄ production and in CH₄ oxidation in rice fields determined by stable carbon isotopes and specific inhibitors[J]. *Global Change Biology*, 2002, 8:265-280.
- [27] Krüger M, Frenzel P. Effects of N-fertilization on CH₄ oxidation and production, and consequences for CH₄ emissions from microcosms and rice fields[J]. *Global Change Biology*, 2003, 9:773-784.
- [28] 戴晓琴, 李运生, 欧阳竹. 免耕系统土壤氮素有效性及其管理[J]. 土壤通报, 2009, 40(3):691-696.
DAI Xiao-qin, LI Yun-sheng, OUYANG Zhu. Availability of nitrogen and its management in no-till system[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2009, 40(3):691-696.
- [29] 伍芬琳, 张海林, 李 琳, 等. 保护性耕作下双季稻田甲烷排放特征及温室效应[J]. 中国农业科学, 2008, 41(9):2703-2709.
WU Fen-lin, ZHANG Hai-lin, LI Lin, et al. Characteristics of CH₄ emission and greenhouse effects in double paddy soil with conservation tillage[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2008, 41(9):2703-2709.
- [30] 秦晓波, 李玉娥, 刘克樱, 等. 不同施肥处理稻田甲烷和氧化亚氮排放特征[J]. 农业工程学报, 2006, 22(7):143-148.
QIN Xiao-bo, LI Yu-e, LIU Ke-ying, et al. Methane and nitrous oxide emission from paddy field under different fertilization treatments [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2006, 22(7):143-148.
- [31] Yang S S, Chang E H. Effect of fertilizer application on methane emission/production in the paddy soils of Taiwan[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 1997, 25:245-251.
- [32] Watanabe A, Kimura M. Effect of rice straw application on CH₄ emission from paddy fields IV. Influence of rice straw incorporated during the previous cropping period[J]. *Soil Science and Plant Nutrition*, 1998, 44(4):507-512.
- [33] 徐 华, 蔡祖聪, 贾仲君, 等. 前茬季节稻草还田时间对稻田 CH₄ 排放的影响[J]. 农业环境保护, 2001, 20(5):289-292.
XU Hua, CAI Zu-cong, JIA Zhong-jun, et al. Effect of rice straw application time in previous crop season on CH₄ emission from rice paddy field[J]. *Agro-environmental Protection*, 2001, 20(5):289-292.