

冬季秸秆还田对冬灌田水稻生长期 CH₄产生、氧化和排放的影响^①

张广斌^{1,2}, 张晓艳^{1,2}, 纪洋^{1,2}, 马静¹, 李小平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: 有机肥施用和土壤水分管理是影响稻田CH₄排放最重要的2个因素。本文通过室内培养和田间试验研究了冬季秸秆还田对冬灌田水稻生长期CH₄的产生、氧化和排放的影响。结果表明: 淹水混施处理CH₄产生潜力在水稻移栽后35和51天显著大于淹水不施肥处理($p < 0.05$), 其余时间则无显著差异($p > 0.05$); 冬季秸秆还田对CH₄氧化潜力无显著影响($p > 0.05$), 水稻生长期土温和稻田施用氮肥可能是较其更重要的影响因素; 淹水混施处理CH₄平均排放通量(CH₄ 26.7 mg/(m²·h))显著大于淹水不施处理(CH₄ 20.3 mg/(m²·h))($p < 0.05$)。

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

中图分类号: X511

全球气候变暖已是不争事实, 其主要原因是大气温室气体浓度的增加^[1]。2005年, 大气中CH₄浓度已由工业革命前0.715 μL/L增加到1.774 μL/L^[2]。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^[2]。大气CH₄的主要来源是厌氧环境的生物过程(生物源), 而非生物过程产生的大气CH₄(非生物源)只占20%左右, 生物源主要包括草食反刍动物、稻田、天然湿地和生物体燃烧等^[3]。稻田是CH₄的重要排放源, 其CH₄排放量占全球总排放量的15%~20%^[4-5]。我国是稻米生产大国, 稻田CH₄排放量大, 约占全球稻田总排放量的25%^②。旨在减少温室气体排放的《京都议定书》已于2005年2月16日生效, 其中将CH₄列为重要的管制温室气体, 因此, 加强我国稻田CH₄排放规律及减排措施的研究十分必要。

秸秆还田是我国秸秆资源综合利用、促进农田生态系统良性循环的主要方式。稻田施用堆肥, 或在稻麦轮作地区提倡麦季秸秆还田是既能增加土壤有机质含量又可减少稻田CH₄排放量的有效措施^[6]。水稻生长期秸秆还田显著增加稻田CH₄排放量已是学界共识。有关非水稻生长期施用秸秆对水稻生长期稻田CH₄排放影响的研究也已有大量文献报道^[6-10], 但关于

究国内外鲜见报道。笔者设置冬季淹水加秸秆和不加秸秆(淹水混施和淹水不施)两个处理, 通过田间原位试验观测水稻生长期的CH₄排放通量, 并结合室内培养试验研究其CH₄产生潜力和氧化潜力, 以探讨冬季秸秆还田对持续淹水稻田水稻生长期CH₄产生、氧化及排放的影响。

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)。供试土壤为发育于下蜀黄土的爽水性水稻土, 有机质含量为11.2 g/kg, 全N含量为1.0 g/kg, pH(H₂O)为6.9。

1.2 试验设计

大田试验设置2个处理: ①淹水混施: 稻田冬季(2007年11月19日至2008年6月20日)持续淹水闲置, 淹水前一天(2007年11月18日)按4800 kg/hm²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淹水不施: 稻田冬季持续淹水闲置, 不施用稻秆。每处理设置3个重复。

稻季(2008年6月21日至11月2日)各试验小

①基金项目: 科技部科技支撑计划项目(2007BAD89B18)、国际科技合作项目(2008DFA21330)和中国科学院重大创新项目(KSCX1-YW-09-08)资助。

* 通讯作者(hxu@issas.ac.cn)

作者简介: 张广斌(1983—), 男, 湖南邵阳人, 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: gbzhang@issas.ac.cn

②许黎, 张莉, 李灿. 我国稻田温室气体排放的评估. 气候变化科学与对策特别评估报告. 北京: 中国气象局国家气候中心, 中国IPCC办公室, 2004

施用, 磷钾肥分别为 450 kg/hm²的过磷酸钙和 225 kg/hm²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。试验小区施行持续淹水管理, 6 月 21 日至 10 月 7 日稻田持续淹水。

1.3 样品采集与测定

田间CH₄气样用静态箱采集。水稻生长期每隔 4~7 天采样 1 次, 采样时间为上午 8:00~12:00。采样时将静态箱罩在事先埋入田间的约 15 cm 深的塑料底座上, 密封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。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 (E_h), 用数字温度计 (Model 2455, Yokogawa, Japan) 记录箱温及 5、10 cm 深处土温。样品CH₄浓度用带有氢离子火焰检测器的气相色谱 (岛津GC-12A) 分析。用 2 mol/L 的 KCl 提取新鲜土样中的矿质氮 (NH₄⁺-N、NO₃⁻-N 和 NO₂⁻-N), 水土比为 5:1, 然后用连续流动分析仪 (Skalar, Holland) 测定。

田间CH₄排放通量观测试验结束后, 于试验小区中各取约 50 g (干土重) 新鲜土样, 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。所有处理均取 3 次重复。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 (水稻移栽后 19 天)、7 月 27 日 (35 天)、8 月 12 日 (51 天)、8 月 27 日 (66 天)、9 月 10 日 (80 天)、9 月 24 日 (94 天)、10 月 8 日 (108 天)。

1.4 CH₄ 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N₂及气体取样口。培养瓶经反复 6 次抽真空、充N₂ (最后充N₂至 1 atm) 后, 参照田间实测土温置于暗箱培养。CH₄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CH₄浓度的变化获得。在较小时间尺度内, 培养瓶中CH₄浓度与培养时间呈线性变化, 采用该方法测量土壤的CH₄产生潜力, 能够代表田间土壤的实际产生潜力^[3]。

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 μl/L 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 r/min)。第 1 天的 8 h 内每隔 2~3 h 测定瓶内CH₄的浓度, 第 2 天每隔 2 h 测定瓶内CH₄的浓度。CH₄氧化潜力根据密闭培养第 1 天内CH₄浓度的变化做线性回归得到的CH₄氧化潜力和第 2 天内CH₄浓度的变化做线性回归所得的CH₄氧化潜力然后取平均值获得。高浓度的CH₄能促进甲烷细菌的生长和它们的氧化活性^[11-12], 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 CH₄ 产生率及氧化率的计算

CH₄的产生率及氧化率由以下公式计算:

$$P = \frac{dc}{dt} \times V_H / W_S \times M_W / M_V \times 273 / T \quad (1)$$

式中, P 为CH₄产生率 (氧化率) (CH₄ μg/(g·d)); dc/dt 为培养瓶内气相CH₄浓度单位时间的变化 (mg/(L·d)); V_H 为培养瓶内上部空间体积 (L); W_S 为干土重量 (g); M_W 为CH₄的摩尔质量 (g); M_V 为标准状态下 1 mol 气体的体积 (L); T 为培养温度 (K)。

CH₄产生率取培养 50 h 后所得CH₄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。

1.7 CH₄ 排放通量计算

CH₄排放通量由下式计算:

$$F = \frac{dc}{dt} \times 0.714 \times h \times 273 / T \quad (2)$$

式中, F 为CH₄排放通量 (CH₄ mg/(m²·h)); 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 (mg/(L·h)); T 为采样时密闭箱内温度 (K)。

CH₄排放通量用 3 个重复的每次观测平均值及标准偏差表示, CH₄的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。

1.8 数据处理与分析

数据处理与分析均采用 Microsoft Excel 2003 和 SPSS 10.0 完成。线性回归系数 $R^2 \geq 0.9$ 的分析结果才予以保留, 反之, 则舍去。

2 结果与讨论

2.1 冬季稻秆还田对冬灌田稻季CH₄产生潜力的影响

水稻全生育期内淹水不施和淹水混施处理CH₄产

生潜力具有相似的季节变化趋势(图1), CH₄产生潜力在水稻移栽后35天都达到最大值, 分别为CH₄ 4.0和8.4 $\mu\text{g}/(\text{g}\cdot\text{d})$, 随后逐渐减小。水稻全生育期内淹水混施处理CH₄产生潜力在水稻移栽后35和51天时较淹水不施处理显著增大, 统计分析达显著性差异($p < 0.05$), 其余时间里两处理间CH₄产生潜力差异较小($p > 0.05$) (图1)。

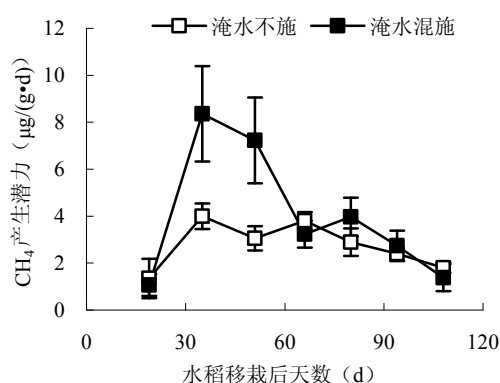


图1 CH₄产生潜力的季节变化

Fig. 1 Seasonal variation of CH₄ production potentials

CH₄是严格厌氧条件下产甲烷细菌作用于产甲烷底物的结果, 适宜的产甲烷环境和充足的产甲烷基质是产生大量CH₄的前提条件和物质基础^[13-14]。水稻生长前期, 两处理土壤Eh处于很低或较低的适宜产CH₄的水平(图2), 土壤Eh已不是CH₄产生的限制因子, 所以稻秆还田为产甲烷细菌提供了大量的产甲烷底物, 有利于土壤中CH₄的产生; 此时正值7、8月份, 土温相对较高(图3), 有利于稻秆的迅速分解, 从而促进产甲烷细菌产生CH₄, 所以淹水混施处理CH₄产生潜力在水稻移栽后35和51天显著大于淹水不施处理($p < 0.05$)。由于前期产甲烷细菌消耗了大量稻秆,

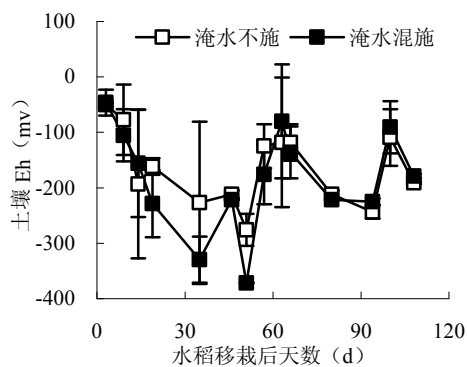


图2 土壤 Eh 的季节变化

Fig. 2 Seasonal variation of soil Eh

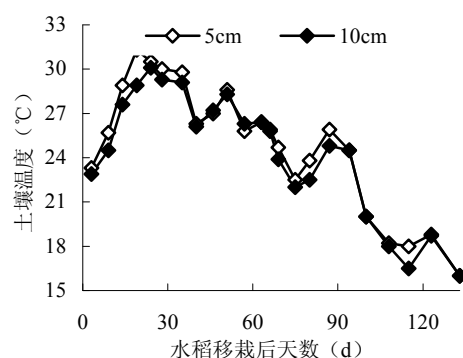


图3 土温的季节变化

Fig. 3 Seasonal variation of soil temperature

使得随后时间里可供产甲烷的底物大大减少, 因此, 水稻生长后期两处理CH₄产生潜力无显著差异($p > 0.05$)。

2.2 冬季秸秆还田对冬灌田稻季CH₄氧化潜力的影响

水稻全生育期内淹水不施和淹水混施处理CH₄氧化潜力具有很明显的季节变化趋势: 水稻生长前期CH₄氧化潜力最大, 分别为CH₄ 17.2和16.2 $\mu\text{g}/(\text{g}\cdot\text{d})$, 随后逐渐减小直到水稻生长后期(图4)。虽然两处理CH₄氧化潜力具有一定差异(图4), 但在统计上并不显著($p > 0.05$), 这一结果表明: 冬季秸秆还田对水稻生长期CH₄氧化潜力的影响较小。

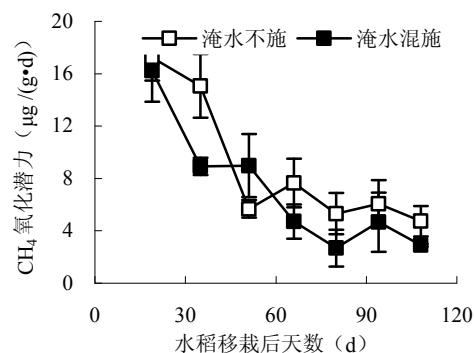


图4 CH₄氧化潜力的季节变化

Fig. 4 Seasonal variation of CH₄ oxidation potentials

稻田土壤的CH₄氧化能力受CH₄浓度、氧气的供应、N肥的施用、土壤水分状况及土温等诸多因素影响^[15]。目前还没有关于秸秆施用对土壤CH₄氧化能力影响的文献报道, 但有研究发现, 在一定条件下产CH₄潜力大的土壤, 其氧化CH₄的能力也较大^[16]。为此我们推测, 秸秆施用也许通过影响土壤的CH₄产生能力来间接影响其CH₄氧化能力。但是, 从本试验获得的

结果来看, 尽管淹水混施处理 CH_4 产生潜力在水稻移栽后 35 和 51 天显著大于淹水不施处理, 但其 CH_4 氧化潜力在水稻移栽后 35 天却明显小于淹水不施处理 (图 4), 与以往研究结果恰好相反。这表明水稻生长期 CH_4 氧化能力可能受其他因素而不是冬季稻秆还田的影响。

对比图 3 和图 4 可知, 水稻生长期随着土温的下降, CH_4 氧化潜力逐渐减小, 统计分析发现, 水稻生长期 5、10 cm 处土温均温和淹水混施处理 CH_4 氧化潜力呈显著正相关 ($r = 0.817$, $p < 0.05$), 而与淹水不施处理无显著相关性 ($r = 0.751$, $p > 0.05$)。此外, 有研究表明^[17-19], 随着土壤中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量的季节性减少, 甲烷氧化细菌的生长和活性受到抑制, 从而降低了土壤氧化 CH_4 的能力。遗憾的是, 笔者并没有测定与好氧培养试验时间对应的土壤中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量, 但根据水稻生长期土壤中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量的季节变化可以看出, CH_4 氧化潜力与土壤中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量有相似的季节变化趋势 (图 4、5)。综上可见, 水稻生长期土壤 CH_4 氧化潜力受冬季稻秆还田的影响较小, 而可能受水稻生长期土温和 N 肥施用的影响较大, 但它们对 CH_4 氧化潜力影响的程度还有待深入研究查明。

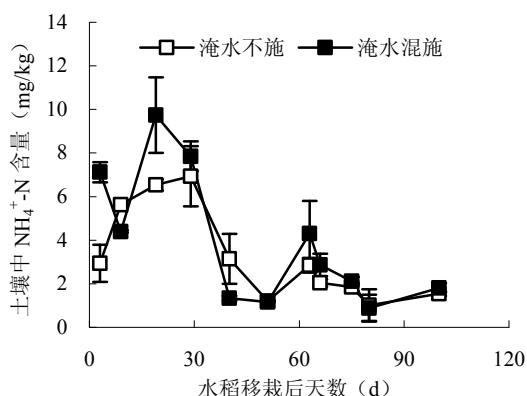


图 5 土壤 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量的季节变化

Fig. 5 Seasonal variation of soil $\text{NH}_4^+\text{-N}$ contents

2.3 冬季稻秆还田对冬灌田稻季 CH_4 排放的影响

淹水不施和淹水混施处理 CH_4 排放通量的季节变化趋势比较相似, 水稻生长初期两处理 CH_4 排放通量迅速增大, 并在水稻移栽后 14 天和 9 天出现最大排放峰, 分别为 80.3 和 93.8 $\text{mg}/(\text{m}^2\cdot\text{h})$, 随后逐渐减小 (图 6), 水稻生长末期出现一个较大的 CH_4 排放峰。这可能是由于稻田在收割之前排水落干, 导致大量闭蓄态 CH_4 从土壤释放到大气^[20]。

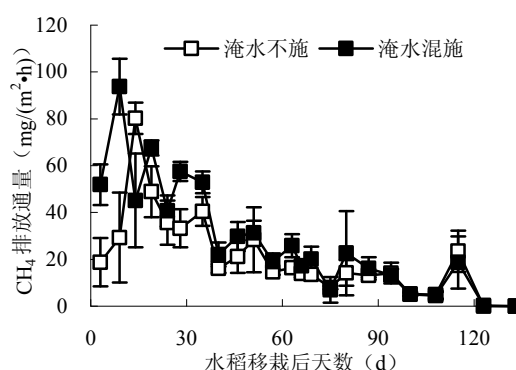


图 6 CH_4 排放通量的季节变化

Fig. 6 Seasonal variation of CH_4 fluxes

两处理稻田持续淹水, 土壤始终保持强还原状态 (图 2), 适宜产甲烷细菌产生 CH_4 。两处理在水稻全生育期内都有较高的 CH_4 排放, 水稻生长期 CH_4 平均排放通量分别为 20.3 和 26.7 $\text{mg}/(\text{m}^2\cdot\text{h})$ 。从图 6 中不难看出两处理 CH_4 排放都主要发生在水稻生长前期, 水稻移栽后 3~35 天的 CH_4 排放量分别占水稻全生育期排放总量的 51.1% 和 55.4%。方差分析表明, 水稻生长期淹水混施处理 CH_4 平均排放通量显著高于淹水不施处理 ($p < 0.05$)。稻田 CH_4 排放是土壤中 CH_4 的产生、氧化和传输的净效应, 水稻生长期秸秆还田显著增加稻田 CH_4 排放已是学界共识, 有关冬季稻田休闲和种麦秸秆还田也已有不少研究报道^[6-9], 并认为秸秆在经历整个冬季好氧分解后, 残余下来供后续稻季产 CH_4 的基质大大减少, 稻田再淹水后, 其促进 CH_4 排放的效应将大幅度降低, 并不增加稻田 CH_4 排放^[6]。但根据本研究结果可知, 冬季淹水条件下秸秆还田显著增加了稻季 CH_4 排放, 这一方面说明由于冬季稻田持续淹水, 土壤保持强还原状态, 有助于产甲烷细菌产生 CH_4 ; 另一方面也暗示冬季稻田持续淹水, 可能不利于秸秆分解, 且冬季气温较低, 不适宜土壤微生物进行厌氧分解活动, 使得大量秸秆未分解而残留下来, 在随后的高温天气下迅速被消耗而产生大量 CH_4 (图 6)。

3 总结

(1) 冬季秸秆还田对冬灌田水稻生长期的 CH_4 产生潜力影响较大, 淹水混施处理 CH_4 产生潜力在水稻移栽后 35 和 51 天显著大于淹水不施处理 ($p < 0.05$), 但其余时间无显著差异 ($p > 0.05$)。

(2) 水稻生长期两处理间 CH_4 氧化潜力无显著差异 ($p > 0.05$)。冬季秸秆还田对冬灌田水稻生长期 CH_4 氧化潜力影响较小, 而水稻生长期的土温和 N 肥施用可

能对其影响更加明显。

(3) 冬季秸秆还田显著增加冬灌田水稻生长期的 CH₄ 排放。水稻生长期淹水混施处理 CH₄ 平均排放通量显著高于淹水不施处理 ($p < 0.05$)。

参考文献:

- [1] IPCC. Climate change 2007: Understanding and Attributing Climate Change[R/OL]. [2009-3-12]. <http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar4/wg1/ar4-wg1-chapter9.pdf>
- [2] IPCC. Climate change 2007: Changes in Atmospheric Constituents and in Radiative Forcing[R/OL]. [2009-3-12]. <http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar4/wg1/ar4-wg1-chapter2.pdf>
- [3] 王明星. 中国稻田甲烷排放. 北京: 科学出版社, 2001: 5-10, 84
- [4] Aulakh MS, Wassmann R, Rennenberg H. Methane emissions from rice fields-quantification, mechanisms, role of management, and mitigation options. *Advances in Agronomy*, 2001, 70: 193-260
- [5] Sass RL, Fisher FM. Methane emissions from rice paddies: A process study summary. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 1997, 49(1/3): 119-127
- [6] 徐华, 蔡祖聪, 贾仲君, 鹤田治雄. 前茬季节稻草还田时间对稻田 CH₄ 排放的影响. *农业环境保护*, 2001, 20(5): 289-292
- [7] 徐华, 蔡祖聪, 李小平, 鹤田治雄. 冬作季节土地管理对水稻土 CH₄ 排放季节变化的影响. *应用生态学报*, 2000, 11(2): 215-218
- [8] Xu H, Cai ZC, Jia ZJ, Tsuruta H. Effect of land management in winter crop season on methane emission during the following flooded and rice-growing period. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2000, 58(1/3): 327-332
- [9] Xu H, Cai ZC, Li XP, Tauruta H. Effect of antecedent soil water regime and rice straw application time on CH₄ emission from rice cultivation. *Australian Journal of Soil Research*, 2000, 38(1): 1-12
- [10] Yagi K, Minami K. Effect of organic matter application on methane emission from some Japanese paddy fields. *Soil Science and Plant Nutrition*, 1990, 36(4): 599-610
- [11] Arif MAS, Houwen F, Verstraete W. Agricultural factors affecting methane oxidation in arable soil. *Biology and Fertility of Soils*, 1996, 21(1/2): 95-102
- [12] Bender M, Conrad R. Effect of CH₄ concentrations and soil conditions on the induction of CH₄ oxidation activity. *Soil Biology and Biochemistry*, 1995, 27(12): 1 517-1 527
- [13] 陈怀满. 环境土壤学. 北京: 科学出版社, 2005: 133
- [14] Conrad R. Microbial ecology of methanogens and methanotrophs. *Advances in agronomy*, 2007, 96: 1-63
- [15] 蔡祖聪, 徐华, 马静. 稻田生态系统 CH₄ 和 N₂O 排放. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2008: 144
- [16] 颜晓元, 蔡祖聪. 水稻土中 CH₄ 氧化的研究. *应用生态学报*, 1997, 8(6): 589-594
- [17] Krüger M, Frenzel P, Conrad R. Microbial processes influencing methane emission from rice fields. *Global Change Biology*, 2001, 7(1): 49-63
- [18] Krüger M, Eller G, Conrad R, Frenzel P. Seasonal variation in pathways of CH₄ production and in CH₄ oxidation in rice fields determined by stable carbon isotopes and specific inhibitors. *Global Change Biology*, 2002, 8(3): 265-280
- [19] Krüger M, Frenzel P. Effects of N-fertilization on CH₄ oxidation and production, and consequences for CH₄ emissions from microcosms and rice fields. *Global Change Biology*, 2003, 9(5): 773-784
- [20] Makoto K, Jun M, Lu YH. Carbon cycling in rice field ecosystems in the context of input, decomposition and translocation of organic materials and the fates of their end products (CO₂ and CH₄). *Soil Biology and Biochemistry*, 2004, 36(9): 1 399-1 416

Effects of Rice Straw Application in Winter on CH₄ Production, Oxidation, and Emission from Continuously Flooded Rice Field During the Rice-growing Season

ZHANG Guang-bin^{1,2}, ZHANG Xiao-yan^{1,2}, JI Yang^{1,2}, MA Jing¹, LI Xiao-ping¹, 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: Both organic fertilizer application and water management are the most important factors that affect CH₄ emission from rice field. Incubation and field experiment were carried out to study the effects of rice straw application in winter on CH₄ production, oxidation, and emission from continuously-flooded rice field during the rice-growing season. Results showed that significant difference was observed between the Treatments flooded with and without rice straw incorporation (FS and CK) in CH₄ production potential after rice transplanting 35 and 51 days ($p < 0.05$), while no significant difference was observed in the rest of rice period ($p > 0.05$). The soil temperature and N-fertilizer application were the more important influencing factors than rice straw application in winter which did not significantly affect CH₄ oxidation potential during the rice growth season ($p > 0.05$). Compared with the treatment CK (CH₄ 20.3 mg/(m²·h)) in the mean CH₄ flux, the treatment FS (CH₄ 26.7 mg/(m²·h)) was significantly higher ($p < 0.05$).

Key words: CH₄ production potential, CH₄ oxidation potential, CH₄ flux, Rice straw incorporation, Permanently flooded rice field