

保护性耕作下双季稻农田甲烷排放特征及温室效应

伍芬琳¹, 张海林¹, 李琳¹, 陈阜¹, 黄凤球², 肖小平²

(¹中国农业大学农学与生物技术学院/农业部作物栽培与耕作学重点开放实验室, 北京 100193; ²湖南省农业科学院土壤肥料研究所, 长沙 410125)

摘要: 【目的】传统耕作方式和秸秆焚烧造成土壤有机质的大量损失, 使农田成为温室气体一个重要排放源, 本文旨在研究保护性耕作对稻田 CH₄ 排放通量及其温室效应的影响, 为评价耕作措施对土壤固碳潜力和温室气体减排影响提供依据。【方法】通过对翻耕秸秆不还田 (CT)、翻耕秸秆还田 (CTS)、旋耕秸秆还田 (RTS)、免耕秸秆还田 (NTS) 处理的稻田 CH₄ 排放进行连续观测, 分析稻田 CH₄ 排放特征及其温室效应。【结果】在秸秆还田情况下, 早稻生长季旋耕和翻耕的 CH₄ 排放量差异不大, 但显著高于免耕; 晚稻生长季旋耕 CH₄ 排放量显著高于翻耕和免耕; 冬闲季节各处理 CH₄ 排放量较小, 翻耕 CH₄ 排放量显著高于旋耕和免耕。在翻耕情况下, 秸秆还田处理和秸秆不还田处理全年 CH₄ 排放特征基本相同。秸秆还田主要增大晚稻生长季和冬闲季节的 CH₄ 排放, 对早稻生长季 CH₄ 排放影响较小。全年 CH₄ 排放导致的温室效应为 RTS > CTS > NTS > CT, 且差异均达显著水平。各处理全年 CH₄ 排放主要来自早晚稻生长季, 冬闲季节占的比重很小均不到 1%。与翻耕相比, 旋耕对温室效应的贡献是翻耕的 1.98 倍, 而免耕减小温室效应, 约减排 15%。与秸秆还田相比, 秸秆不还田减小温室效应, 约减排 42%。【结论】目前双季稻区推行保护性耕作的主要措施旋耕秸秆还田对温室效应的贡献最大, 秸秆不还田和免耕均有利于减小温室效应。但考虑到秸秆还田有利于提升地力, 且秸秆以其它方式处理导致的温室效应还有待于研究, 建议在长江中下游双季稻区推广以免耕秸秆还田为主的保护性耕作。

关键词: 保护性耕作; 稻田; CH₄ 气体; 排放通量; 温室效应

Characteristics of CH₄ Emission and Greenhouse Effects in Double Paddy Soil with Conservation Tillage

WU Fen-lin¹, ZHANG Hai-lin¹, LI Lin¹, CHEN Fu¹, HUANG Feng-qiu², XIAO Xiao-ping²

(¹Agronomy and Biotechnology Department of China Agriculture University/Key Laboratory of Crop Cultivation & Farming System, Ministry of Agriculture, Beijing 100193; ²Soil and Fertilizer Institute, Hunan Academy of Agricultural Sciences, Changsha 410125)

Abstract: 【Objective】The conventional tillage and burning straw caused much losses of soil organic matter, which made cropland be an emission source of greenhouse gas. The research has been conducted to study the effects of conservation tillage on CH₄ emission from paddy soil and explore the greenhouse effect. Further theoretical guide for forecasting carbon sequestration potential of soil and reducing emission of greenhouse are to be provided. 【Method】The analysis of greenhouse gas emission character and greenhouse effect is based on observing greenhouse gas emission from treatments of CT, CTS, RTS and NTS.

【Result】When refer to the different tillages, the difference in CH₄ emission flux between CTS and RTS was little during the early rice growth, but they were much more than NTS. During the late rice growth the CH₄ emission flux of RTS was much more than CTS and NTS. In winter-fallowed season the CH₄ emission flux of each treatment was relative small, and CTS was almost bigger than RTS and NTS. When refer to the straw return, the seasonal emission characters of CH₄ from CT and CTS were the same, and in the monitoring period the CH₄ emission flux of CTS was a little more than CT. Returning straw mainly increased the CH₄ emission of late rice field and winter-fallowed field, and had less influence on early rice field. The greenhouse effect of the whole year was RTS > CTS > NTS > CT, and they were significantly different. The greenhouse effect of paddy soil mainly attributed to CH₄

收稿日期: 2007-10-08; 接受日期: 2008-01-11

基金项目: 国家科技支撑计划 (2006BAD15B01); 农业部重点项目“保护性耕作技术模式及其对农业可持续发展影响”

作者简介: 伍芬琳 (1984-), 女, 重庆永川人, 硕士研究生, 研究方向为保护性耕作和农田生态环境。Tel: 010-62733376; E-mail: 5cents@163.com.
通讯作者陈阜 (1964-), 男, 山西浑源人, 教授, 研究方向为农作制度与区域农业。Tel: 010-62733316; E-mail: chenfu@cau.edu.cn

emission from early rice field and late rice field, and little attributed to CH₄ emission from winter-fallow field. Comparing to CTS, RTS increased the CH₄ emission, and almost 1.98 times of CTS, and NTS released by 15%. Comparing to CTS, CT released CH₄ emission by 42%. **【Conclusion】** RTS was the main way of tillage in the double cropping paddy soil area, and it also lead to the most CH₄ emission. This research also showed results that no straw returning soil and no tillage were attributed to release CH₄ emission. Straw return to soil is good for soil nutrient and the greenhouse effect of straw in other ways needs to be further researched, so it is suggested that the double-cropping paddy soil area should use conservation tillage and return the straw to soil.

Key words: Conservation tillage; Paddy soil; CH₄ gas; Emission flux; Greenhouse effect

0 引言

【研究意义】 由于大气中温室气体浓度的增加, 在 1975 至 2000 年间, CH₄ 温室气体的辐射效应增加了 0.48 W·m⁻², 是列 CO₂ 后的第二主要温室气体^[1]。稻田是大气 CH₄ 的重要生物学来源之一^[2,3], 据研究每年约有 (20~100) × 10¹² g 的 CH₄ 从水稻田排放到大气中, 约占全球总排放量的 4%~19%^[4]。中国稻田面积占世界水稻种植面积的 23%, 因此稻田 CH₄ 排放也是目前国内农田生态环境的研究热点。**【前人研究进展】** 保护性耕作是以少耕、免耕及残茬覆盖还田为核心技术的土壤耕作措施^[5]。土壤耕作对农田温室气体排放具有重要影响^[6-8], 大规模的翻耕和秸秆燃烧造成了土壤有机质大量损失, 使农田成为温室气体一个重要排放源。发达国家由于实行少耕、免耕等保护性耕作措施, 使农业土壤碳库呈稳定增长的趋势, 在较显著水平上弥补了其它领域的碳排放^[9,10]。20 世纪 80 年代以来中国农田土壤有机碳库基本上呈增长趋势, 这种增长趋势的主导因素是秸秆还田、少免耕和其它措施的配合^[6]。**【本研究切入点】** 国内关于保护性耕作的研究多集中在土壤理化性状的变化及作物的产量效应上, 对稻田 CH₄ 排放影响的研究较少^[11], 以稻田水分管理和施肥类型对 CH₄ 排放影响研究较多, 并多集中在季节和日变化及其影响因素上^[12,13]; 对耕作方式和种植方式研究得较少, 且主要是对某个时间段稻田 CH₄ 排放的研究^[14,15], 而缺乏对全年的稻田 CH₄ 排放的系统研究。**【拟解决的关键问题】** 本文拟通过研究以少、免耕和秸秆还田为主要内容的保护性耕作对稻田 CH₄ 气体排放通量的影响及其温室效应, 为评估保护性耕作的土壤固碳潜力和温室气体减排提供依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验设在湖南宁乡保护性耕作试验示范基地 (112°18'E, 28°07'N), 于 2005 年晚稻生长季开始。

该地区属中亚热带向北亚热带过渡的大陆性季风湿润气候, 年日均气温 16.8℃, 年均降水量 1 358.3 mm, 是典型的双季稻三熟农作区。试验土壤为水稻土, 河沙泥土种。种植制度为冬闲-早稻-晚稻, 肥力中等, 排灌条件良好。试验土壤 0~10 cm 层有机碳为 24.65 g·kg⁻¹、碱解氮 224.10 mg·kg⁻¹、速效磷 13.40 mg·kg⁻¹、速效钾 44.00 mg·kg⁻¹ 和 pH (H₂O) 6.26。

1.2 试验设计

试验设 4 个处理, 每个处理 3 次重复, 试验小区为 66.7 m², 田间随机排列。4 个处理分别为: (1) 翻耕秸秆不还田 (CT): 水稻收获后秸秆全部移出田间, 水稻抛秧前用铧式犁翻地 1 遍, 再用旋耕机旋地 2 遍, 耕深约 15 cm; (2) 翻耕秸秆还田 (CTS): 水稻收获后秸秆全量还田, 水稻抛秧前用铧式犁翻地 1 遍, 再用旋耕机旋地 2 遍, 耕深约 15 cm; (3) 旋耕秸秆还田 (RTS): 水稻收获后秸秆全量还田, 水稻抛秧前用旋耕机旋地 4 遍, 耕深约 8 cm; (4) 免耕秸秆还田 (NTS): 水稻收获后秸秆全量还田, 不进行整地, 水稻免耕抛秧。

水稻在用联合收割机收获的同时将秸秆粉碎, 早稻收获后 CT、CTS 和 RTS 处理的秸秆在耕地时被翻压还田, NTS 处理秸秆为地表覆盖还田, 晚稻收获后 4 个处理的秸秆均为地表覆盖还田, 各处理秸秆年还田量约为 12 500 kg·ha⁻¹。早稻供试品种为益早 9 号, 晚稻为晚稻品种为湘晚粳 13 号。早稻于 4 月 15 日耕地, 4 月 17 日施基肥后抛秧, 5 月 18 日开始晒田, 5 月 23 日晒田结束, 7 月 6 日收获。晚稻于 7 月 8 日耕地, 7 月 9 日施基肥后插秧, 8 月 11 日开始晒田, 8 月 16 日晒田结束, 10 月 10 日晚稻收获。

1.3 测定项目

1.3.1 气体采集及测定 气体检测时间为 2006 年 4 月 7 日至 2007 年 3 月 9 日, 每隔 10 d 进行 1 次采样, 其中早稻期间在耕作后, 晒田前后和晒田期间各增加 1 次气体采集, 每次采集均在上午 9: 00~10: 00 点完成。

CH₄ 气体采用静态箱法测定, 采样箱为有机玻璃制成, 箱底 30 cm×30 cm, 高 50 cm。气体取样时采样箱垂直安放在底座凹槽内并用水密封, 保证箱内气体与大气不进行交换。采样之前将箱内顶部风扇打开, 使箱内气体混合均匀。在罩箱瞬间及之后的 10、20 和 30 min 用 50 ml 注射器从箱中抽取气体, 通过旋转三通阀转移到 0.5 L 气体采样袋备测。气体测定用气相色谱 (HP 6890) 分析, 原理及计算公式参阅文献[16]。

1.3.2 秸秆腐解率测定 土壤秸秆腐解率的测定采用尼龙袋法。2005 年早稻收获后将风干稻草秸秆剪作 5 cm 长的小段, 充分混匀后装入尼龙袋并封口, 每袋 20 g。各处理内分别选 3 处, 每处埋置 15 只尼龙袋, 按耕深不同在 CTS 和 RTS 处理将秸秆分别埋入 15 cm 和 8 cm 深土壤内, 在 NTS 处理将秸秆置于地表覆盖还田。每处理均在晚稻生育期每 30 d 取出 1 次, 在来年早稻整地前 (3 月 20 日) 和早稻收获后 (7 月 20 日) 各进行一次取样, 共 5 次。洗去泥土用烘干失重法 (洗干净的秸秆放进烘箱, 75℃ 下烘 24 h) 测未分解秸秆剩余量。

2 结果与分析

2.1 不同耕作措施对早稻生长季 CH₄ 排放的影响

早稻生长季 CH₄ 排放具有明显的季节性特征, 在整地和早稻插秧后的 CH₄ 排放通量很低 (图 1), 均低于 10 mg·m⁻²·h⁻¹, 从分蘖期开始快速增加, 5 月 21

日晒田时达到最低点, 晒田结束后略有回升。各处理在早稻生长季 CH₄ 排放均呈单峰变化, CT (翻耕秸秆不还田) 在耕地后 14 d 最先达到排放峰值, CTS (翻耕秸秆还田) 和 RTS (旋耕秸秆还田) 在耕地 24 d 后出现峰值, 而 NTS (免耕秸秆还田) 则最晚在晒田前达到峰值。晒田开始后各处理 CH₄ 排放通量持续偏低, 一方面由于晒田期间田间土壤处于较强的氧化状态, 产 CH₄ 菌活性受损, 复水后也没能很好地恢复, 导致土壤中 CH₄ 的产生较少; 另一方面水稻生长后期, 水稻生理活动减弱, 对 CH₄ 的传输能力下降, 导致 CH₄ 排放较少^[17]。

比较 CTS、RTS 和 NTS 这三个仅在耕作方式上存在差异的处理, 发现耕作方式对早稻生长季 CH₄ 排放通量影响较大 (图 1)。在晒田前各 CH₄ 排放通量以 NTS 最低, 而晒田后则以 NTS 的 CH₄ 排放通量最高, 且与 CTS 和 RTS 的差异基本都达到显著水平。CTS 和 RTS 在整个早稻生育期 CH₄ 排放通量差异不显著。比较早稻生育期 CH₄ 排放量, RTS>CTS>NTS, 分别为 239.35、229.18、174.70 kg·ha⁻¹, RTS 和 CTS 分别比 NTS 高 37% 和 31%, 差异达显著水平。

比较 CT 和 CTS 这两个秸秆还田方式不同的处理, 发现秸秆还田对早稻 CH₄ 排放通量有一定的影响 (图 1), 除 5 月 1 日外各测定时期均表现为 CTS 处理 CH₄ 排放通量高于 CT 处理, 但差异不显著 (除 4 月 21 日外)。本研究得出秸秆腐解主要集中在前 8 周, 8 周以后腐解相当缓慢, 仅为 0.02 左右。上一季

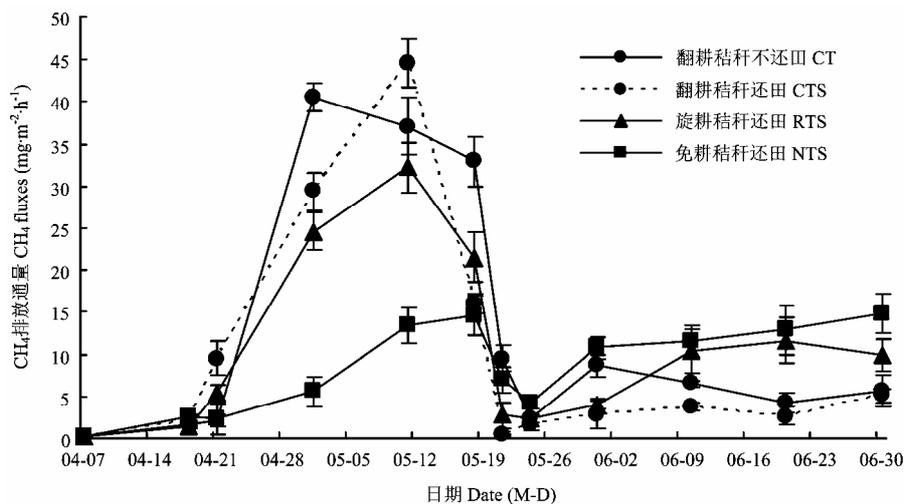


图 1 不同耕作措施对早稻生长季 CH₄ 排放的影响

Fig. 1 Effects of different soil tillages on emission flux of CH₄ early rice field

晚稻收获后秸秆直接还田, 经过了冬闲期近 6 个月的时间, 秸秆基本腐烂, 因此秸秆是否还田对早稻生长季的 CH_4 排放通量的影响随之减小。对整个早稻生育期 CH_4 排放量进行估计, CTS 为 $229.18 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$, CT 为 $220.62 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$, CTS 略大于 CT, 但差异不显著。

2.2 不同耕作措施对晚稻生长季 CH_4 排放的影响

晚稻生长季 CH_4 排放高峰期出现在晚稻抛秧后 1 个月内 (图 2), 8 月 10 日晚稻达到分蘖盛期, 由营养生长转为生殖生长, 田间开始晒田, 晒田后各处理 CH_4 排放通量持续降低。CTS 和 RTS, CT 的季节变化规律较一致, 前期 CH_4 排放均出现双峰, 分别在 7 月 20 日和 8 月 10 日, 而在 7 月 30 日有一个小低谷, 这可能是由于降雨温度降低造成的。NTS 处理的 CH_4 排放在整个生育期呈先升高, 晒田后降低的变化趋势, CH_4 排放高峰出现在 8 月 10 日晒田前。

在整个晚稻测定时期 CH_4 排放通量基本表现为 RTS 大于 CTS, 与早稻生长季测定结果相同, 原因在于旋耕更有利于秸秆的腐解。本研究得出在早稻秸秆

埋入土壤的第 1 个月秸秆腐解率最大, 翻耕、旋耕和免耕的秸秆腐解率分别为 0.29、0.31 和 0.25, 各处理间差异均达到显著水平; 第 2 月内秸秆腐解率开始下降, 翻耕、旋耕和免耕的秸秆腐解率分别为 0.09、0.11 和 0.09, 旋耕显著高于翻耕和免耕。对晚稻整个生育期 CH_4 排放通量进行平均, $\text{RTS} > \text{CTS} > \text{NTS}$, 分别为 34.72 、 12.90 和 $12.04 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ 。RTS 晚稻生育期 CH_4 平均排放通量显著高于 CTS 和 NTS, 且分别高出 169% 和 188%。

如图 2 所示, 比较 CT 和 CTS 两个处理得到秸秆是否还田对晚稻生长季 CH_4 排放规律影响很大, 在整个生育期无论秸秆是否还田, CH_4 排放都表现为前期较高, 呈倒“W”型, 而晒田后就一直保持较低排放水平。其中在整个生育期晚稻生长季 CH_4 排放均表现为秸秆还田高于秸秆不还田, CT 和 CTS 晚稻生长季平均 CH_4 排放通量分别为 3.97 和 $12.90 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$, 秸秆还田比秸秆不还田提高了 225.06%, 差异达显著水平。

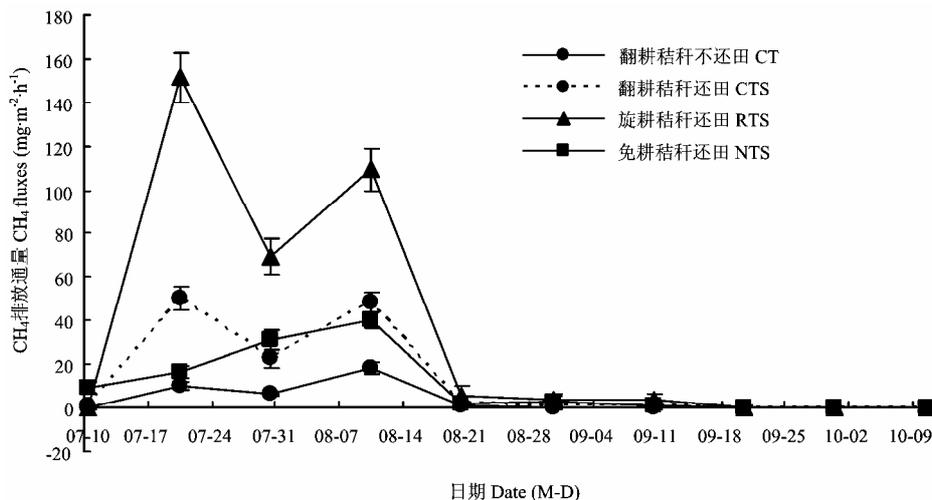


图 2 不同耕作措施对晚稻生长季 CH_4 排放的影响

Fig. 2 Effects of different soil tillages on emission flux of CH_4 from late rice field

2.3 不同耕作措施对冬闲季节 CH_4 排放的影响

耕作方式对冬闲季节 CH_4 排放仍然具有一定的影响 (图 3)。其中 CTS 和 NTS 均随温度变化呈先降低后升高的变化趋势, 而 RTS 在早春出现了降低的趋势。CTS 冬闲季节 CH_4 排放通量基本上都高于 NTS 和 RTS, 而 RTS 在 1 月 10 日以前 CH_4 排放通量高于 NTS, 1 月 10 日以后则相反。估算整个冬闲季节 CH_4

排放量, CTS 显著高于 RTS 和 NTS, 分别为 4.45、0.14 和 $0.25 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ 。

秸秆是否还田对冬闲季节 CH_4 的排放也有一定的影响, 从图 3 可以看出, 在整个冬闲期除 12 月 10 日以外其它各测定时期都是 CH_4 排放通量均为 CTS 大于 CT。计算整个冬闲期 CH_4 排放量 CT 为 $0.73 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$, CTS 为 $4.45 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$, 差异达显著水平。

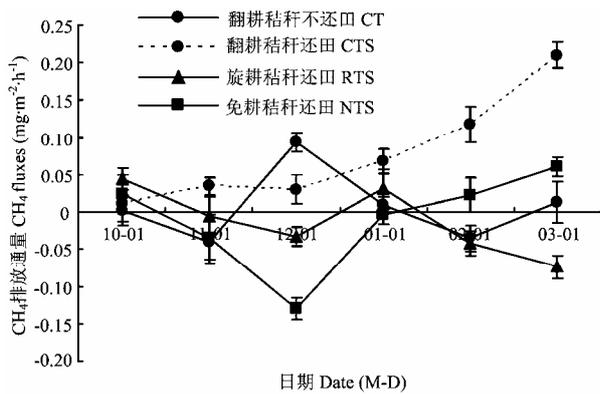


图 3 不同耕作措施对冬闲季节土壤 CH₄ 排放的影响

Fig. 3 Effects of different soil tillages on emission flux of CH₄ from winter fallow field

2.4 不同耕作措施下双季稻农田 CH₄ 温室效应

按照国际衡量温室气体效应的方法, 根据 CH₄ 在 100 年尺度上相对 CO₂ 的增温潜势 (GWP)^[18]: CO₂ 为 1, CH₄ 为 21, 将 CH₄ 的排放量乘以 21, 转化为

表 不同耕作措施下稻田 CH₄ 排放的全年温室效应

Table The CH₄ greenhouse effect from rice field under different soil tillages

处理 Treatments	CH ₄ (kg·ha ⁻¹)			CO ₂ 当量 E-CO ₂ (kgCO ₂ ·ha ⁻¹)			总 CO ₂ 当量 Total E-CO ₂ (kgCO ₂ ·ha ⁻¹)
	早稻田	晚稻田	冬闲田	早稻田	晚稻田	冬闲田	
	Early rice field	Late rice field	Winter-fallowed field	Early rice field	Late rice field	Winter-fallowed field	
翻耕秸秆不还田 CT	220.62b	97.14a	0.73b	4632.92b	2039.97a	15.32b	6688.21a
翻耕秸秆还田 CTS	229.18b	315.77b	4.45c	4812.81b	6631.07b	93.36c	11537.24c
旋耕秸秆还田 RTS	239.35b	849.97c	0.14a	5026.40b	17849.42c	2.85a	22878.67d
免耕秸秆还田 NTS	174.70a	294.63b	0.25a	3668.71a	6187.24b	5.23a	9861.19b

同一栏内不同字母的平均值表示方差分析差异显著 ($P < 0.05$)

Average value with different letter in column represent significant differences at 5% level

3 讨论

本研究得到的 CH₄ 季节排放规律和前人研究结论基本一致^[16,17]。一般认为土壤中 CH₄ 的排放随水分含量的增加而增加, 国内外研究认为晒田和间歇灌溉是稻田 CH₄ 减排的重要措施之一^[19], 本试验也证实了这一点, 晒田期间稻田排放量降低。有人认为耕作方式在耕作初期对 CH₄ 排放的影响最大^[20], 且晒田也显著影响温室气体排放, 因此应在耕作后、晒田期增加气体采集频率, 以便更准确的描述其排放规律和排放量。

一般认为少耕 (旋耕) 和免耕会减少温室气体的排放^[6,7], 耕作破坏了土壤原有结构, 减少了土壤 CH₄

CO₂ 的排放量, 得出 CH₄ 排放量的二氧化碳当量 (E-CO₂), 从而计算出各处理稻田 CH₄ 的温室效应 (kg-CO₂ 当量)。如下表所示, 4 个处理全年 CH₄ 排放导致的温室效应为 RTS (旋耕秸秆还田) > CTS (翻耕秸秆还田) > NTS (免耕秸秆还田) > CT (翻耕秸秆不还田), 且差异均达显著水平。全年总 CO₂ 当量 RTS 最高为 22 878.67 kg CO₂·ha⁻¹, CT 为 6 688.21 kgCO₂·ha⁻¹, RTS 是 CT 的 3.42 倍。比较全年排放的 CO₂ 当量, CT 主要来自早稻生长季的排放, 占全年的 69%, CTS、RTS 和 NTS 主要来自晚稻生长季的排放, 分别占全年的 57%, 78% 和 73%, 而冬闲季节占的比重很小均不到 1%。

CTS、RTS 和 NTS 3 个不同耕作方式处理与翻耕 (CTS) 相比, 旋耕 (RTS) 对温室效应的贡献是翻耕的 1.98 倍, 而免耕 (NTS) 减小温室效应, 约减排 15%。CT 和 CTS 两个秸秆还田方式不同的处理与秸秆还田 (CTS) 相比, 秸秆不还田 (CT) 减小温室效应, 约减排 42%。

氧化程度, 对未扰动土壤进行耕作可大大降低土壤 CH₄ 汇集的强度^[21]。Lal 也指出免耕可以减少温室气体排放, 有利于生态环境的改善^[22]。本研究得出在秸秆均还田的情况下, 相对于传统的翻耕耕作方式, 旋耕增加 CH₄ 排放, 免耕减少 CH₄ 排放, 是对前人研究结果的一个补充。旋耕的排放通量最高, 原因可能是旋耕 8 cm 以下土壤未受扰动, 与翻耕相比可产生厌氧环境或产生更多厌氧微境, 另外旋耕的秸秆腐解率在还田前两个月内都显著高于翻耕和免耕, 对土壤产生 CH₄ 提供了更多了反应基质, 这也是晚稻生长季旋耕的 CH₄ 排放通量远高于翻耕和免耕的主要原因。秸秆的腐解主要靠土壤中的微生物作用^[23], 土壤微生物主

要集中在 0~10 cm 的土层,免耕处理下秸秆直接覆盖表面还田,秸秆富集土壤表层,土壤内部产甲烷基质供应能力的下降是其甲烷排放量最小的主要原因。

目前国内研究认为,有机物料和根茬较多的高产田土壤呼吸也高,并且土壤呼吸随秸秆量的增加而增加^[24],秸秆还田增加温室气体排放。本研究结果显示在翻耕情况下,秸秆还田在一定程度上增加了温室气体排放。秸秆还田一方面作为氮肥投入可以抑制甲烷的吸收,另一方面秸秆还田增加了产甲烷的基质,抑制吸收和促进生成的双重作用使得秸秆还田显著增加 CH₄ 排放。秸秆不还田有利于减少稻田 CH₄ 排放,但不还田的秸秆因焚烧、饲用、丢弃等方式导致的温室气体释放还有待于研究。

对温室效应贡献最大的旋耕秸秆还田是目前双季稻区推行保护性耕作的主要措施。本研究得出秸秆不还田和免耕都有利于减小温室效应,但考虑到秸秆还田有利于提升地力,且秸秆以其它方式处理导致的温室效应还有待于进一步研究,建议在长江中下游双季稻区推广以免耕秸秆还田为主的保护性耕作。

4 结 论

(1) 在秸秆还田情况下,比较早稻生长季 CH₄ 排放量为旋耕>翻耕>免耕,旋耕和翻耕分别比免耕高 37%和 31%,差异达显著水平。晚稻生长季 CH₄ 排放通量为旋耕>翻耕>免耕,旋耕显著高于翻耕和免耕,且分别高出 169%和 188%。冬闲季节 CH₄ 排放量很小,翻耕显著高于旋耕和免耕。

(2) 在翻耕情况下,秸秆还田与不还田两种处理下的 CH₄ 全年排放特征基本相同,各测定时期均表现为秸秆还田 CH₄ 排放通量高于秸秆不还田。秸秆还田主要增大晚稻生长季和冬闲季节的 CH₄ 排放,对早稻生长季的影响较小。

(3) 稻田全年 CH₄ 排放导致的温室效应为旋耕秸秆还田>翻耕秸秆还田>免耕秸秆还田>翻耕秸秆不还田,且差异均达显著水平。各处理全年 CH₄ 排放主要来自早晚稻生长季,而冬闲季节占的比重很小均不到 1%。与翻耕相比,旋耕对温室效应的贡献是翻耕的 1.98 倍,而免耕减小温室效应,约减排 15%。与秸秆还田相比,秸秆不还田对温室气体有减排效应,约减排 42%。

致谢:湖南省农业科学院土壤肥料研究所杨光立和罗尊长研究员给予了诸多支持和指导,湖南省宁乡县农业局胡清

和李永农艺师参与取样工作并给予诸多帮助,特此感谢!

References

- [1] IPCC WGI. *Climate Change 2001: The Scientific Basis*. Contribution of working group I to the third assessment report of the intergovernmental panel on climate change. UK: Cambridge University Press, 2001.
- [2] Cai Z C, Kang G D, Tsuruta H, Mosier A. Estimate of CH₄ emissions from year-round flooded rice fields during rice growing season in China. *Pedosphere*, 2005, 15(1): 66-71.
- [3] Cai Z C, Tsuruta H, Gao M, Xu H, Wei C F. Options for mitigating methane emission from a permanently flooded rice field. *Global Change Biology*, 2003, 9: 37-45.
- [4] Mer J L, Roger P. Production, oxidation, emission and consumption of methane by soils: a review. *European Journal of Soil Biology*, 2001, 37: 25-50.
- [5] 张海林, 高旺盛, 陈 阜, 朱文珊. 保护性耕作研究现状、发展趋势及对策. 中国农业大学学报, 2005, 10(1): 16-20.
Zhang H L, Gao W S, Chen F, Zhu W S. Prospects and present situation of conservation tillage. *Journal of China Agricultural University*, 2005, 10(1): 16-20. (in Chinese)
- [6] 王小彬, 蔡典雄, 华 璐, Hoogmoed W B, Oenema O, Perdok U D. 土壤保持耕作——全球农业可持续发展优先领域. 中国农业科学, 2006, 39(4): 741-749.
Wang X B, Cai D X, Hua L, Hoogmoed W B, Oenema O, Perdok U D. Soil conservation tillage—the highest priority for global sustainable agriculture. *Scientia Agricultura Sinica*, 2006, 39(4): 741-749. (in Chinese)
- [7] Lal R. Carbon emission from farm operations. *Environment International*, 2004, 30: 981-990.
- [8] Lee J, Six J, King A P, Kessel C V, Rolston D E. Tillage and field scale controls on greenhouse gas emissions. *Journal of Environmental Quality*, 2006, 35(3): 714-725.
- [9] King J A, Bradley R I, Harrison R, Carter A D. Carbon sequestration and saving potential associated with changes to the management of agricultural soils in England. *Soil Use and Management*, 2004(20): 394-402.
- [10] West T O, Post W M. Soil organic carbon sequestration rates by tillage and crop rotation: a global data analysis. *Soil Science Society of America Journal*, 2002, 66(6): 1930-1946.
- [11] 魏朝富, 高 明, 黄 勤, 车福才, 杨剑虹, 谢德体, 蔡祖聪, 徐 华. 耕种制度对西南地区冬水田甲烷排放的影响. 土壤学报, 2000, 37(2): 157-165.

- Wei C F, Gao M, Huang Q, Che F C, Yang J H, Xie D T, Cai Z C, Xu H. Effects of tillage-cropping systems on methane emissions from year-round flooded paddy field in southwest China. *Acta Pedologica Sinica*, 2000, 37(2): 157-165. (in Chinese)
- [12] 蔡祖聪, 沈光裕, 颜晓元, 鹤田治雄, 八木一行, 阳捷行. 土壤质地、温度和 Eh 对稻田甲烷排放的影响. *土壤学报*, 1998, 35(2): 145-154.
- Cai Z C, Shen G Y, Yan X Y, Tsuruta H, Yagi K, Minami K. Effects of soil texture, soil temperature and Eh on methane emissions from rice paddy fields. *Acta Pedologica Sinica*, 1998, 35(2): 145-154. (in Chinese)
- [13] 蔡祖聪. 水分类型对土壤排放的温室气体组成和综合温室效应的影响. *土壤学报*, 1999, 36(4): 484-491.
- Cai Z C. Effects of water regime on CO₂, CH₄ and N₂O emissions and overall potential for greenhouse effect caused by emitted gases. *Acta Pedologica Sinica*, 1999, 36(4): 484-491. (in Chinese)
- [14] 马秀梅, 朱波, 杜泽林, 郑循华. 冬水田休闲期温室气体排放通量的研究. *农业环境科学学报*, 2005, 24(6): 1199-1202.
- Ma X M, Zhu B, Du Z L, Zheng X H. CH₄, CO₂ and N₂O emissions from the year-round flooded paddy field at fallow season. *Journal of Agro-Environment Science*, 2005, 24(6): 1199-1202. (in Chinese)
- [15] 刘惠, 赵平, 林永标, 饶兴权. 华南丘陵地区农林复合生态系统晚稻田甲烷和氧化亚氮排放. *热带亚热带植物学报*, 2006, 14(4): 269-274.
- Liu H, Zhao P, Lin Y B, Rao X Q. CH₄ and N₂O emission from paddy field of an agroforestry ecosystem in the hilly area of south China. *Journal of Tropical and Subtropical Botany*, 2006, 14(4): 269-274. (in Chinese)
- [16] 李琳, 胡立峰, 陈阜, 肖小平, 杨光立. 长期不同施肥类型对稻田甲烷和氧化亚氮排放速率的影响. *农业环境科学学报*, 2006, 25(增刊): 707-710.
- Li L, Hu L F, Chen F, Xiao X P, Yang G L. Effects of different long-term fertilization on emission of CH₄ and N₂O from paddy soil. *Journal of Agro-Environment Science*, 2006, 25(Suppl.): 707-710. (in Chinese)
- [17] 秦晓波, 李玉娥, 刘克樱, 万运帆. 不同施肥处理稻田甲烷和氧化亚氮排放特征. *农业工程学报*, 2006, 22(7): 143-148.
- Qin X B, Li Y E, Liu K Y, Wan Y F. Methane and nitrous oxide emission from paddy field under different fertilization treatments. *Transactions of the CSAE*, 2006, 22(7): 143-148. (in Chinese)
- [18] Ramaswamy V, Boucher O, Haigh J. Radiative forcing of climate change. In: IPCC. *Climate Change 2001: The Scientific Basis* (IPCC Third Assessment Report). UK and New York, NY, USA: Cambridge University Press, 2001: 212.
- [19] 王明星. 中国稻田甲烷排放. 北京: 科学出版社, 2001: 167-168.
- Wang M X. *Methane Emission from Rice Field in China*. Beijing: Science Press, 2001: 167-168. (in Chinese)
- [20] 万运帆, 林而达. 翻耕对冬闲农田 CH₄ 和 CO₂ 排放通量的影响初探. *中国农业气象*, 2004, 25(3): 8-10.
- Wan Y F, Lin E D. The influence of tillage on CH₄ and CO₂ emission flux in winter fallow cropland. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2004, 25(3): 8-10. (in Chinese)
- [21] Prieme A, Christensen S. Seasonal and spatial variation of methane oxidation in a Danish spruce forest. *Soil Biology & Biochemistry*, 1997, 29(8): 1165-1172.
- [22] Lal R. Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security. *Science*, 2004, 304(11): 1623-1627.
- [23] 李新举, 张志国, 李贻学. 土壤深度对还田秸秆腐解速度的影响. *土壤学报*, 2001, 38(1): 135-138.
- Li X J, Zhang Z G, Li Y X. Effects of soil depth on decay speed of straw. *Acta Pedologica Sinica*, 2001, 38(1): 135-138. (in Chinese)
- [24] 崔玉亭, 韩纯儒, 卢进登. 集约高产农业生态系统有机物分解及土壤呼吸动态研究. *应用生态学报*, 1997, 8(1): 59-64.
- Cui Y T, Han C R, Lu J D. Dynamics of organic material decomposition and soil respiration in intensive and high yield agroecosystem. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 1997, 8(1): 59-64. (in Chinese)

(责任编辑 吴晓丽, 郭银巧)