

不同稻草还田模式下双季稻田周年 CH_4 排放特征及温室效应

彭 华^{1,2,3}, 纪雄辉^{2,3*}, 吴家梅^{1,2,3}, 朱 坚^{1,2,3}, 黄 涓^{1,3}

(1.中南大学隆平分院, 长沙 410125; 2.湖南省土壤肥料研究所, 长沙 410125; 3.农业部长江中游平原农业环境重点实验室, 长沙 410125)

摘 要:采用静态箱-气相色谱法对南方双季稻田稻季无草翻耕冬季休闲(CK)、周年稻草焚烧还田翻耕(BST)、稻季稻草覆盖免耕冬季高桩(SNTH)、稻季稻草覆盖免耕冬季翻埋(SNTB)和稻季稻草翻耕还田冬季稻草翻埋(STB)5种稻草还田模式下双季稻田周年 CH_4 排放进行观测, 分析双季稻田周年 CH_4 排放特征及其温室效应, 旨在探索双季稻田 CH_4 减排最佳的稻草还田方式及土壤耕作调控技术模式。结果表明: 早、晚稻季 CH_4 排放总量分别占全年 CH_4 排放总量的 43.9% 和 52.1%, 冬闲季 CH_4 排放比例很小, 仅为 4.0%; 稻草还田显著增加了周年 CH_4 排放总量 ($P<0.05$), 增加幅度为 25.9%~92.8% ($P<0.05$), 与 STB 处理相比, SNTH 处理和 SNTB 处理均能显著降低 CH_4 排放 ($P<0.05$); 不同稻草还田处理周年 CH_4 温室效应大小顺序为: STB>BST>SNTB>SNTH>CK。可以看出, 双季稻田稻季稻草覆盖免耕还田、冬季翻埋稻草还田或留桩还田能显著减缓因稻草直接还田 CH_4 排放引起的温室效应, 在南方双季稻区是一项可行的 CH_4 周年减排的稻草还田调控技术模式。

关键词: 双季稻; 稻田; 稻草还田; 甲烷

中图分类号: X16 文献标志码: A 文章编号: 1672-2043(2015)03-0585-07 doi:10.11654/jaes.2015.03.023

Annual CH_4 Emission and Greenhouse Effects in Double Cropping Rice Fields with Different Rice Straw Returning Methods

PENG Hua^{1,2,3}, JI Xiong-hui^{2,3*}, WU Jia-mei^{1,2,3}, ZHU Jian^{1,2,3}, HUANG Juan^{1,3}

(1. Longping Branch of Graduate School of Central South University, Changsha 410125, China; 2. Institute of Soil and Fertilizer, Hunan Academy of Agricultural Sciences, Changsha 410125, China; 3. Ministry of Agriculture Key Laboratory of Agriculture Environment in Middle Reach Plain of Yangtze River, Changsha 410125, China)

Abstract: Returning rice straw directly to soil may increase CH_4 emissions from rice fields. However, it is unclear how different straw returning methods influence CH_4 emissions. In this work, a static chamber-gas chromatography technique was used to investigate CH_4 emissions from double cropping rice (*Oryza sativa* L.) fields with different rice straw returning methods with or without soil tillage, namely tillage without straw returning (CK), tillage with incinerated rice straw returning (BST), no-tillage with rice straw covering in the growing season and high stakes in winter fallow (SNTH), no-tillage with rice straw covering in growing season and buried rice straw in winter fallow (SNTB), and tillage with straw returning and buried straw in winter fallow (STB). Results showed that CH_4 emissions from early rice and late rice seasons accounted for 43.9% and 52.1% of the annual total emissions, respectively, while only 4.0% of CH_4 emissions was from winter fallow season. Straw soil returning increased the total annual CH_4 emissions by 25.9%~92.8% ($P<0.05$), compared with the CK. The STB treatment produced less CH_4 emissions than SNTH and SNTB did. The greenhouse effects of different treatments were STB>BST>SNTB>SNTH>CK. In conclusion, the greenhouse effects would be mitigated to some extent by straw covering and no-tillage in rice growth season or stubble or straw burying in winter fallow season compared to straw direct returning to soil. Therefore, SNTH and SNTB could effectively reduce the annual CH_4 emission in double cropping rice system.

Keywords: double cropping rice field; paddy soil; rice straw returning to soil; CH_4

收稿日期: 2014-10-23

基金项目: 国家自然科学基金(31300413); 国家科技支撑计划项目(2013BAD11B02)

作者简介: 彭 华(1982—), 男, 博士研究生, 主要研究方向为农田固碳减排。E-mail: phlove10@163.com

* 通信作者: 纪雄辉 E-mail: jixionghui@sohu.com

甲烷(CH_4)是与全球气候变化关系密切的痕量温室气体,其对温室效应的贡献仅次于二氧化碳(CO_2)。稻田是大气 CH_4 重要的生物排放源,年排放量为 3100 万 t~11 200 万 t,占全球总排量的 5%~19%^[1]。中国稻田面积约占世界水稻种植总面积的 23%,水稻播种面积位居世界第二^[2],中国稻田 CH_4 排放受到国际社会的普遍关注。双季稻在我国具有广泛的种植面积,其播种面积占我国水稻总播种面积的 64.7%^[3],因而双季稻区温室气体 CH_4 排放的研究也是近年来国内农田生态环境的研究热点。

周年的观测数据是准确估算稻田 CH_4 排放量的重要依据。前人对稻田温室气体排放的观测主要集中在水稻生长季,而包含休闲期或非水稻生长季的完整观测资料仅有少数研究报道^[4-5],南方双季稻田 CH_4 排放周年的观测资料相对较为缺乏(观测年份 ≥ 1 年)。因此,对南方双季稻区稻田 CH_4 周年排放进行观测是对中国稻田 CH_4 排放数据库的重要补充。

我国农作物秸秆资源相当丰富,被燃烧和废弃的秸秆高达 45%~60%^[6],不仅浪费了有机物资源,同时也污染了环境。稻草还田是稻草资源综合利用、促进农田生态系统良性循环的一种重要方式,也是稻田有机碳重要的补充形式,但稻草还田显著增加稻田 CH_4 排放^[7-8]。已有研究表明,通过适当调整稻季不同耕作模式^[9-10]、稻草还田方式^[11-13]可显著降低稻田 CH_4 排放,但冬闲季稻草还田对稻田 CH_4 排放的影响研究鲜有报道,周年稻草还田和耕作调控措施对双季稻田 CH_4 排放及其综合温室效应的影响也有待进一步研究。因此,采用田间试验研究双季稻田不同稻草还田方式及耕作模式下对全年 CH_4 排放及其温室效应的影响,为探索双季稻田 CH_4 减排的稻草还田和耕作综合调控模式提供理论基础。

1 材料与方法

1.1 试验地点

试验地点位于湖南省长沙县干杉乡大屋组水稻田(28°08'18"N,113°12'0"E),当地海拔 42 m,年平均温度为 17.1 °C,年降水量 1500 mm,年积温(≥ 10 °C) 5300~6500 °C,为南方典型的双季稻种植区。土壤类型为第四纪红壤发育的红黄泥水稻土,土壤 pH(H_2O) 6.1,有机碳 15.7 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$,全氮 1.56 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$,全磷 0.61 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$,全钾 8.7 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$,碱解氮 146 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,有效磷 7.1 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,速效钾 53 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。

1.2 试验处理

大田试验始于 2011 年 4 月,共设置 5 个处理,每个处理 3 次重复,试验小区为 24 m^2 ,田间随机排列。5 个处理分别为:

(1)无草翻耕(CK)处理:水稻翻耕且周年稻草不还田;(2)焚烧翻耕(BST)处理:早稻翻耕稻草不还田,晚稻翻耕焚烧稻草还田,冬季休闲焚烧稻草还田;(3)稻草覆盖(SNTH)处理:早稻免耕稻草不还田,晚稻免耕覆盖早稻草还田,冬季休闲稻草高桩还田;(4)冬埋稻免(SNTB)处理:早稻免耕稻草不还田,晚稻免耕覆盖早稻草还田,冬季休闲稻草翻埋还田;(5)冬埋稻翻(STB)处理:早稻翻耕稻草不还田,晚稻翻耕稻草还田,冬季休闲稻草翻埋还田。

各处理早、晚稻季施用化肥量保持一致,均按照当地农民习惯进行施肥(表 1)。氮肥 80%做基肥与磷肥、钾肥一次性施入,另外 20%的氮肥做分蘖期肥施入。稻草还田量:晚稻季稻草还田量为 3675 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$;休闲季稻草还田量 6750 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。稻草切割成约 30 cm 长均匀撒施土表(覆盖还田)、利用耕作与土混匀(翻耕还田)、翻埋在土壤 15 cm 处(翻埋还田)、机收后保留高桩并将碎草撒于表面(高桩还田)。水稻品种为湘早籼 24 号(早稻)和岳优 9113(晚稻)。早稻和晚稻分别于 3 月 26 日和 6 月 18 日播种,4 月 27 日和 7 月 20 日移栽,5 月 30 日和 8 月 15 日开始晒田,6 月 11 日和 8 月 25 日覆水,6 月 25 日和 9 月 8 日田面落干,7 月 10 日和 10 月 23 日收获。

表 1 不同处理施肥情况($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)

Table 1 Fertilizer rates for different treatments

处理	冬闲季 早稻	早稻				晚稻			
		N	P_2O_5	K_2O	稻草	N	P_2O_5	K_2O	稻草
CK	—	150	90	90	—	180	60	135	—
BST	6750	150	90	90	—	180	60	135	3675
SNTH	6750	150	90	90	—	180	60	135	3675
SNTB	6750	150	90	90	—	180	60	135	3675
STB	6750	150	90	90	—	180	60	135	3675

1.3 气体采集及分析测定

从 2011 年晚稻收获后至 2012 年晚稻收割后对周年 CH_4 排放进行田间原位观测, CH_4 气体采用密闭静态箱法,采样箱箱底直径 55 cm,高 120 cm。每周采集气体样品 1 次,每次采集均在上午 9:00—11:00 完成。分别在罩箱后的 0、10、20、30 min 用 50 mL 注射器从箱中抽取气体。气体样品采用 Agilent 7890A 气

相色谱仪进行分析,检测器 FID,检测温度 250 ℃,柱温 50 ℃,标准气体由国家标准物质中心提供。稻田 CH₄ 排放通量计算公式参阅文献[14]。增温潜势计算:在 100 a 尺度上 CH₄ 的相对增温潜势(Global warming potential,GWP)为 CO₂ 的 25 倍,由此计算出 CH₄ 的二氧化碳当量。甲烷增温潜势:GWP=25×CH₄;GWP 表示温室气体增温潜势,单位 kg CO₂·hm⁻²。

1.4 数据统计与分析

运用 Excel 软件和 SPSS 17.0 软件进行数据统计与分析,多重比较的显著性检验均采用 Fisher's LSD 法。

2 结果与分析

2.1 不同稻草还田模式对冬闲季 CH₄ 排放通量变化的影响

不同稻草还田模式冬闲季 CH₄ 排放通量情况如图 1 所示。晚稻收割后稻田开始休闲,CH₄ 排放强度逐渐减弱,CH₄ 排放较少,2012 年早春各处理 CH₄ 排放有所上升,但升高幅度并不大,而 STB 和 SNTB 处理从 3 月开始 CH₄ 排放通量迅速增加,这种较高的 CH₄ 排放通量一直持续到早稻移栽后。冬闲季不同处理 CH₄ 平均排放通量范围在 0.17~0.38 mg·m⁻²·h⁻¹ 之间,稻草还田的 STB、SNTB、SNTH 和 BST 处理 CH₄ 平均排放通量较 CK 处理分别显著($P<0.05$)增加 126.7%、95.8%、22.2%和 28.4%,而 STB 与 SNTB 处理排放通量差异不显著,但均比 SNTH 和 BST 处理 CH₄ 平均排放通量显著($P<0.05$)增加 43.4%和 46.1%。该结果表明冬闲季翻埋稻草增加 CH₄ 排放通量,在早稻移栽前期尤其明显。

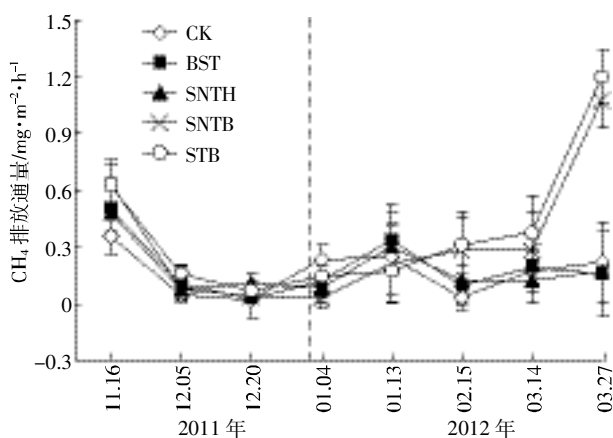


图 1 不同稻草还田模式下冬闲季 CH₄ 排放通量变化

Figure 1 CH₄ fluxes of rice fields under different rice straw returning during winter fallow

2.2 不同稻草还田模式对稻季 CH₄ 排放通量季节变化的影响

不同模式对双季稻 CH₄ 排放通量季节变化的影响如图 2 所示。可以看出,水稻生长季 CH₄ 排放具有明显的季节性特征,呈先增后降的单峰型排放规律。

早稻移栽后各处理 CH₄ 排放迅速升高,20 d 左右,除 STB 和 SNTB 处理外,其他各处理 CH₄ 排放通量降低,而 STB 和 SNTB 处理 CH₄ 排放通量持续增加直至最高峰,但 SNTB 处理 CH₄ 排放通量持续升高时间至水稻移栽后 30 d 左右(开始晒田)有所降低,STB 处理持续时间更长,至水稻移栽后的 47 d 左右各处理 CH₄ 排放通量达到峰值,排放峰值大小顺序为:STB(22.92 mg·m⁻²·h⁻¹)>CK(17.51 mg·m⁻²·h⁻¹)>SNTH(17.07 mg·m⁻²·h⁻¹)>BST(15.93 mg·m⁻²·h⁻¹)>SNTB(14.86 mg·m⁻²·h⁻¹)。不同处理的 CH₄ 平均排放通量范围在 5.73~10.65 mg·m⁻²·h⁻¹ 之间,与 CK 处理相比,STB、BST 和 SNTB 处理 CH₄ 平均排放通量显著($P<0.05$)增加 85.9%、15.1%、17.2%,而 SNTH 处理较 CK 处理 CH₄ 排放通量增加不显著,晚稻季 CH₄ 平均排放通量在 4.55~8.97 mg·m⁻²·h⁻¹ 之间。与 CK 处理相比,稻草还田显著增加 CH₄ 排放,增加幅度为 43.2%~97.1%($P<0.05$),与 STB 处理相比,BST、SNTH 和 SNTB 处理的 CH₄ 排放显著($P<0.05$)降低 27.3%、25.9%和 27.2%。

2.3 不同稻草还田模式双季稻各生育期 CH₄ 累积排放贡献率

不同稻草还田模式下双季稻各生育期 CH₄ 累积排放贡献率见表 2。早稻不同生长时期 CH₄ 累积排放量,除 SNTB 处理分蘖期 CH₄ 累积排放量占季节排放总量比例最大外,其他各处理均以孕穗乳熟期 CH₄ 累积排放量占季节排放总量比例最大,占排放总量的 53.5%~63.1%,返青期和成熟期 CH₄ 排放量均较小。晚稻季水稻分蘖期则是 CH₄ 排放的主要时期,各处理分蘖期排放占季节累积排放总量的 68.4%~76.0%,稻草还田分蘖期 CH₄ 排放量是稻草不还田处理的 1.3~1.8 倍,除稻草直接还田外,其他稻草还田方式各处理之间分蘖期 CH₄ 累积排放量差异不显著,但均较稻草不还田显著增加 CH₄ 排放,表现出增加稻田外源有机质对 CH₄ 排放的显著刺激作用。

2.4 不同稻草还田模式下 CH₄ 排放总量及其增温潜势

不同稻草还田模式 CH₄ 排放总量及增温潜势见表 3。双季稻季 CH₄ 排放总量大小顺序为 STB>SNTB>BST>SNTH>CK,其中 SNTH、BST 和 SNTB 处

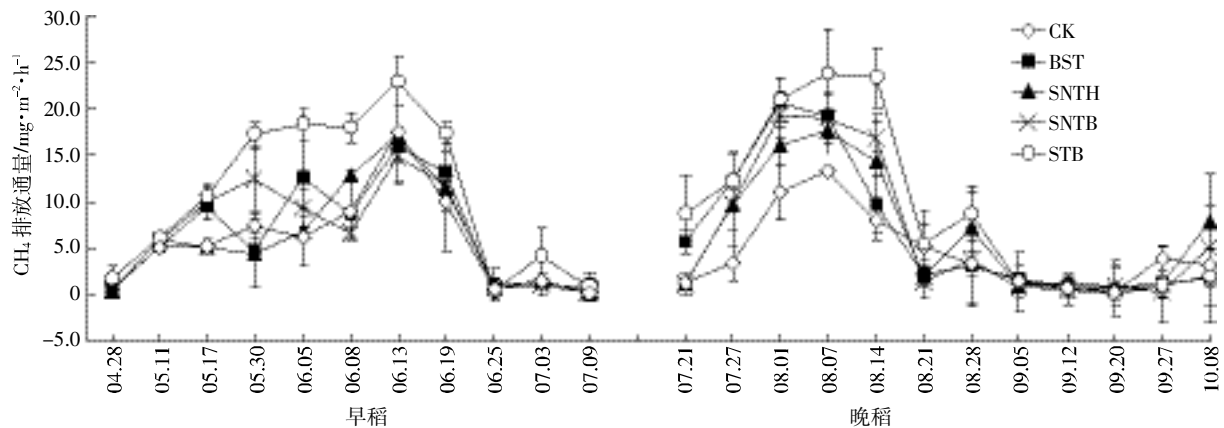


图 2 不同稻草还田模式下双季稻 CH₄ 排放通量季节变化

Figure 2 CH₄ fluxes of double cropping rice fields under different straw returning during rice growth

表 2 双季稻各生育期 CH₄ 累积排放量的贡献率

Table 2 Percentages of cumulative CH₄ fluxes of different growth stages in double cropping rice fields

稻季	处理	返青期/ kg·hm ⁻²	百分比/%	分蘖期/ kg·hm ⁻²	百分比/%	孕穗乳熟期/ kg·hm ⁻²	百分比/%	成熟期/ kg·hm ⁻²	百分比/%
早稻	CK	2.42c	2.4	41.34c	40.1	58.30c	56.6	1.01b	1.0
	BST	3.06b	2.6	45.34c	38.2	69.07b	58.2	1.12b	1.0
	SNTH	1.66d	1.5	37.32cd	34.4	68.57b	63.1	1.04b	1.0
	SNTB	1.94d	1.6	61.82b	51.9	54.74c	45.9	0.73c	0.6
	STB	7.47a	3.9	78.47a	41.0	102.57a	53.5	3.13a	1.6
晚稻	CK	9.16c	8.8	77.99c	75.2	11.35	10.9	5.28b	5.1
	BST	33.66a	22.6	101.65b	68.4	11.28	7.6	2.06d	1.4
	SNTH	21.40b	14.1	103.28b	68.1	20.2	13.3	6.74a	4.5
	SNTB	20.74b	13.9	113.21b	76.0	11.12	7.5	3.87c	2.6
	STB	39.02a	19.1	143.75a	70.3	19.79	9.7	2.03d	1.0

注:同一栏内不同字母的平均值表示方差分析差异显著($P<0.05$)。下同。
Note: Data with different letters in the same column mean significant difference at 0.05 level. The same below.

表 3 不同稻草还田模式 CH₄ 周年排放量及其增温潜势

Table 3 Annual CH₄ emission and GWP of double cropping rice fields with different rice straw returning

处理	休闲季 CH ₄ 排放量/kg·hm ⁻²	双季稻 CH ₄ 排放量/kg·hm ⁻²			周年 CH ₄ 排放量/kg·hm ⁻²	100 a CH ₄ 增温潜势/kg CO ₂ ·hm ⁻²		
		早稻	晚稻	排放总量		休闲季	双季稻	周年
CK	7.54d	103.07c	103.78c	206.86c	214.40c	188.56d	5 171.41c	5 359.98c
BST	9.21c	118.60b	148.65b	267.24b	276.46b	230.36c	6 681.08b	6 911.44b
SNTH	9.68c	108.59c	151.62b	260.21b	260.21b	242.11c	6 505.36b	6 747.47b
SNTB	14.77b	119.23b	148.94b	268.17b	282.95b	369.30b	6 704.33b	7 073.63b
STB	17.10a	191.64a	204.58a	396.22a	413.32a	427.39a	9 905.56a	10 332.95a

理间差异不显著。稻草还田均显著($P<0.05$)增加 CH₄ 排放,增幅为 25.9%~92.8%,各处理周年 CH₄ 排放量范围在 214.40~413.32 kg·hm⁻²,与 STB 处理相比,BST、SNTH 和 SNTB 处理分别降低了 136.86、143.42、130.37 kg·hm⁻² 的 CH₄ 排放,差异均达显著水平。冬闲季 CH₄ 累积排放量占全年总排放量的 3.3%~5.2%,平

均值为 4.0%,而双季稻田早、晚稻季 CH₄ 排放量占全年 CH₄ 排放总量比例平均为 43.9%和 52.1%。
各处理 CH₄ 周年温室效应大小顺序为 STB>BST>SNTB>SNTH>CK。与 CK 处理相比,各稻草还田处理 CH₄ 增温潜势较稻草不还田显著增加 1.2~1.9 倍,与 STB 处理相比,BST、SNTH 和 SNTB 处理温室

效应显著($P<0.05$)降低 33.1%、34.7%和 31.5%。结果表明焚烧稻草还田、稻季稻草覆盖还田和冬季留桩或翻埋稻草处理能够显著降低 CH_4 排放引起的温室效应,但是焚烧稻草还田可能会引起其他环境问题,该方法不可取,而覆盖免耕还田和稻季免耕覆盖稻草,加上冬闲季翻埋稻草则可以作为双季稻田的稻草还田并减排 CH_4 的稻草利用模式。

3 讨论

3.1 稻季 CH_4 排放特征

本研究得出双季稻田早、晚稻 CH_4 季节排放均呈单峰型。无论早稻、晚稻,在水稻移栽后 CH_4 排放迅速,形成排放高峰,晒田期由于田面水迅速落干,导致 CH_4 排放迅速降低至最低点,随后覆水 CH_4 排放略有回升;水稻成熟期,田面落干,土壤通气性增强,厌氧环境被破坏,因此 CH_4 排放减少,与其他研究结果基本一致^[14-15]。晚稻分蘖期 CH_4 排放占稻季累积排放总量比例最大,与前人研究^[16]结果一致。早稻季节以孕穗乳熟期 CH_4 累积排放量占排放总量比例最大,可能原因是冬闲季稻草还田对后续季稻田 CH_4 排放产生了影响:(1)稻田 CH_4 排放与土壤有机物含量具有密切关系,稻草还田为微生物活动提供了大量的碳源,促进微生物生长,有机物在分解过程中消耗 O_2 ,创造厌氧环境,土壤 Eh 迅速下降,加剧 CH_4 产生的发酵过程;(2)不同稻草还田方式及其分解速率存在差异^[17],本研究中冬季稻草还田为焚烧、留桩和翻埋还田,不同稻草还田方式稻草腐解情况及对早稻季 CH_4 产生提供有机底物的贡献有待进一步研究;(3)早稻季节降雨丰富,田面淹水形成厌氧环境或厌氧微区,增加了 CH_4 排放。

3.2 冬闲季 CH_4 排放特征

冬闲季 CH_4 排放整体呈现高-低-高的变化趋势,主要是 2011 年 11—12 月 CH_4 排放通量相对较高,可能水稻收获后长势良好的再生稻出现,增加了 CH_4 的排放,2012 年 1—2 月,由于气温较低,微生物活性减弱, CH_4 排放降低,3 月开始由于温度升高, CH_4 排放通量又逐渐加大,与马秀梅等^[18]研究四川冬闲季 CH_4 排放和余佳等^[19]研究江西冬水田 CH_4 排放规律基本一致。冬闲季平均排放通量范围在 0.17~0.38 $\text{mg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ 之间,与白小琳等^[20]研究结果一致,而与江长胜等^[21]研究川中丘陵区冬灌田 CH_4 平均排放通量为 1.43~5.82 $\text{mg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ 相比,两者相差 8~15 倍。这主要是因为本研究中冬季田没有淹水环境,且

气温较低,微生物活性弱导致 CH_4 排放较低。冬闲季排放总量与唐海明等^[16]的结果相似,而比余佳等^[19]的结果高近 10 倍,与刘惠等^[22]研究得出的华南地区冬闲稻田是大气 CH_4 的汇以及白小琳等^[20]研究冬闲季稻田 CH_4 排放接近于零的结论相悖,主要原因可能是地域、气候条件、土壤结构存在差异,另外冬闲季稻田是否淹水对 CH_4 排放影响很大。

3.3 稻草还田对 CH_4 排放的影响

稻草还田一方面可作为氮肥投入抑制 CH_4 的吸收,另一方面,稻草还田增加了产 CH_4 的基质,这种抑制吸收和促进生成的双重作用使得稻草还田显著增加 CH_4 排放^[23]。在施入等量有机肥时,施用方式会对水稻生产系统的经济和环境效应有一定的影响。本研究表明,稻季稻草还田较稻草不还田显著增加 CH_4 排放,稻草直接还田 CH_4 排放最高,可能是因为翻耕还田稻草与土壤接触完全,处于还原状态,产生 CH_4 的可能性较大。这与前人研究^[9,13]结果一致。翻耕稻草焚烧还田较免耕稻草覆盖还田的 CH_4 排放较高,可能是因为稻草焚烧灰分里仍含有一定量的有机碳,有机碳的快速分解加速了土壤淹水后氧化还原电位的下降^[12]。覆盖还田稻草主要在农田表面,同时采取免耕措施,减少了稻草与土壤的接触,部分稻草在土壤表层进行有氧降解,其降解产物在土壤氧化层中还原产生 CH_4 的可能性较小,主要以最终分解产物 CO_2 形式排放,降低了因施稻草 CH_4 排放的增加值^[24]。冬闲季稻草翻埋较留桩或稻草焚烧还田显著增加 CH_4 排放,主要是增加了早稻移栽前的 CH_4 排放通量。其原因是冬闲季稻田温度较低,微生物活性减弱,翻埋于土壤中的稻草腐解和矿化作用十分缓慢,保留了大量的有机物料,为产甲烷细菌提供了丰富了基质,另外冬闲季稻草翻埋,导致耕层土松动,土壤孔隙较多,土壤还原层与土表的通气性增强,因此 CH_4 排放较其他处理显著升高。与冬季焚烧稻草还田相比,高桩还田增加了 CH_4 排放量,表明高桩有利于根系有机质的补充,更有利于 CH_4 向大气的传输,再生稻的生长也是增加 CH_4 排放的原因,而焚烧稻草还田的土壤表层稻草灰分等有机质不易渗入水稻根系产 CH_4 区,导致 CH_4 排放相对较小。

不同稻草还田方式中,焚烧稻草或稻草覆盖还田方式均较稻草直接还田显著降低了 CH_4 排放,稻草焚烧还田,其稻草含有的大部分有机碳在燃烧过程中以气体形式损失掉^[25],带来了新的环境问题,故稻草覆盖免耕才是降低双季稻田 CH_4 排放的有效措施。

3.4 耕作措施对稻田 CH₄ 排放的影响

耕作方式对土壤的生态环境有重要的影响,通过影响土壤的物理性质、化学性质和生物学过程直接或间接地影响 CH₄ 排放^[26]。本研究表明,稻田免耕能够显著降低 CH₄ 排放,与前人研究结论一致^[20,27]。原因可能是翻耕破坏了土壤原有结构,降低了土壤对 CH₄ 的氧化^[28],免耕则增加了 CH₄ 的氧化,降低土壤 CH₄ 汇集强度^[29],同时稻田免耕使得更多的毛孔连贯在一起,更多的有利甲烷氧化菌繁殖的生态位使得免耕稻田对 CH₄ 吸收强于翻耕稻田^[30],免耕稻草覆盖于土壤表面导致土壤不能接收太阳辐射而升温较慢,产生的 CH₄ 相应较少^[31]。土壤微生物主要集中在 0~10 cm 的土层,免耕处理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下降时 CH₄ 排放量小。研究表明,稻季稻草覆盖免耕,冬闲季翻埋稻草比冬闲季留桩周年 CH₄ 排放量高,但两者差异不显著,冬闲季留桩不利于充分利用晚稻收获后的稻草资源,故冬闲季翻埋稻草是一种合理的稻草还田方式。在输入等量外源有机质前提下,稻季免耕显著降低 CH₄ 排放,而长期免耕对水稻生态系统的生态和经济的综合效应评价有待进一步研究,双季稻免、翻耕周年的调控模式也有待继续研究,这些研究将为今后稻田增碳减排政策的制定提供更多选择。如需减少稻草还田引起的 CH₄ 显著排放,应采取科学的措施处理水稻残茬。双季稻稻季免耕稻草覆盖还田,减少了将稻草移除的用工,结合良好的现代农机作业,在晚稻收获后冬闲季稻草翻埋于土壤深层或留桩还田,将有利于充分利用稻草资源,并减少 CH₄ 排放引起的温室效应,其中冬闲季翻埋稻草更有效。

4 结论

双季稻田早、晚稻季 CH₄ 排放量占全年 CH₄ 排放总量比例平均为 43.9%和 52.1%,冬闲季 CH₄ 排放比例很小,仅为 4.0%;稻草还田显著增加了周年 CH₄ 排放总量,增加幅度为 25.9%~92.8%,与稻草直接还田相比,稻季免耕覆盖稻草还田,结合冬闲季稻草留桩和翻埋稻草显著降低 CH₄ 排放。周年温室效应大小顺序为 STB>BST>SNTB>SNTH>CK,双季稻田稻季稻草覆盖免耕还田、冬季翻埋稻草还田或留桩还田处理能显著减缓稻草直接还田下 CH₄ 排放引起的温室效应,其在南方双季稻区是一项可行的 CH₄ 周年减排的稻草还田调控技术模式。

参考文献:

- [1] IPCC. Climate change: Synthesis report. Contribution of working groups I, II, III and the fourth assessment report of the intergovernmental panel on climate change[R]. Switzerland: IPCC, 2007.
- [2] 金梅香. 优质水稻生产现状与发展趋势[J]. 农业科技通讯, 2011(1): 13-15.
JIN Mei-xiang. Production situation and development trend of high quality rice[J]. *Agricultural Science and Technology Communication*, 2011(1): 13-15.
- [3] 辛良杰, 李秀彬. 近年来我国南方双季稻区复种的变化及其政策启示[J]. 自然资源学报, 2009, 24(1): 58-65.
XIN Liang-jie, LI Xiu-bin. Changes of multiple cropping in double cropping rice area of Southern China and its policy implications[J]. *Journal of Natural Resources*, 2009, 24(1): 58-65.
- [4] Nishimura S, Sawamoto T, Akiyama H, et al. Methane and nitrous oxide emission from a paddy field with Japanese conventional water management and fertilizer application[J]. *Global Biogeochem Cycles*, 2004, 18: 1-10.
- [5] 石生伟, 李玉娥, 李明德, 等. 不同施肥处理下双季稻田 CH₄ 和 N₂O 排放的全年观测研究[J]. 大气科学, 2011, 35(4): 707-720.
SHI Sheng-wei, LI Yu-e, LI Ming-de, et al. Annual CH₄ and N₂O emissions from double rice cropping systems under various fertilizer regimes in Hunan Province, China[J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2011, 35(4): 707-720.
- [6] 包雪梅, 张福锁, 马文奇. 我国作物秸秆资源及养分循环研究[J]. 中国农业科技导报, 2003, 5(增刊): 14-17.
BAO Xue-mei, ZHANG Fu-suo, MA Wen-qi. The resources of crop straw and their recycling nutrient in China[J]. *Review of China Agric Sci Tech*, 2003, 5(Suppl): 14-17.
- [7] 刘金剑, 吴萍萍, 谢小立, 等. 长期不同施肥制度下湖南红壤晚稻田 CH₄ 的排放[J]. 生态学报, 2008, 28(6): 2878-2886.
LIU Jin-jian, WU Ping-ping, XIE Xiao-li, et al. Methane emission from later rice fields in Hunan red soil under different long-term fertilizing systems[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28(6): 2878-2886.
- [8] 逯非, 王效科, 韩冰, 等. 稻田秸秆还田: 土壤固碳与甲烷增排[J]. 应用生态学报, 2010, 21(1): 99-108.
LU Fei, WANG Xiao-ke, HAN Bin, et al. Straw return to rice paddy: Soil carbon sequestration and increased methane emission[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2010, 21(1): 99-108.
- [9] 肖小平, 伍芬琳, 黄凤球, 等. 不同稻草还田方式对稻田温室气体排放影响研究[J]. 农业现代化研究, 2007, 28(5): 629-632.
XIAO Xiao-ping, WU Fen-lin, HUANG Feng-qiu, et al. Greenhouse air emission under different pattern of rice-straw returned to field in double rice area[J]. *Research of Agricultural Modernization*, 2007, 28(5): 629-632.
- [10] Li D M, Liu M Q, Cheng Y H, et al. Methane emission from double-rice cropping system under conventional and no tillage in Southeast China[J]. *Soil and Tillage Research*, 2011, 113: 77-81.
- [11] 王丙文, 迟淑筠, 田慎重, 等. 不同留茬高度秸秆还田冬小麦田甲烷吸收及影响因素[J]. 农业工程学报, 2013, 29(5): 170-178.

- WANG Bing-wen, CHI Shu-jun, TIAN Shen-zhong, et al. CH_4 uptake and its affecting factors in winter wheat field under different stubble height of straw returning[J]. *Transactions of the CSAE*, 2013, 29(5): 170–178.
- [12] 马 静, 徐 华, 蔡祖聪, 等. 焚烧麦秆对稻田 CH_4 和 N_2O 排放的影响[J]. 中国环境科学, 2008, 28(2): 107–110.
- MA Jing, XU Hua, CAI Zu-cong, et al. Influence of wheat straw burning on CH_4 and N_2O emissions from rice fields[J]. *China Environmental Science*, 2008, 28(2): 107–110.
- [13] 彭 华, 纪雄辉, 吴家梅, 等. 生物黑炭还田对晚稻 CH_4 和 N_2O 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 CH_4 and N_2O emission by biochar incorporated to paddy field on late rice[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2011, 20(11): 1620–1625.
- [14] Zheng X H, Wang M X, Wang Y S. Comparison of manual and automatic methods for measurement of methane emission from rice paddy fields[J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 1998, 15(4): 569–579.
- [15] 代光照, 李成芳, 曹凑贵, 等. 免耕施肥对稻田甲烷与氧化亚氮排放及其温室效应的影响[J]. 应用生态学报, 2009, 20(9): 2166–2172.
- DAI Guang-zhao, LI Cheng-fang, CAO Cou-gui, et al. Effects of no-tillage and fertilization on paddy soil CH_4 and N_2O emission and their greenhouse effect in central China[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2009, 20(9): 2166–2172.
- [16] 唐海明, 肖小平, 汤文光, 等. 双季稻区冬季覆盖作物残茬还田对稻田甲烷和氧化亚氮排放的影响[J]. 作物学报, 2011, 37(9): 1666–1675.
- TANG Hai-ming, XIAO Xiao-ping, TANG Wen-guang, et al. Effects of straw recycling of winter covering crop on methane and nitrous oxide emissions in paddy field[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2011, 37(9): 1666–1675.
- [17] 李逢雨, 涂仕华, 王昌全, 等. 不同还田方式下稻草的腐解速率及养分释放规律[J]. 山地学报, 2006, 24(增刊): 92–97.
- LI Feng-yu, TU Shi-hua, WANG Chang-quan, et al. Decomposition rates and nutrient release patterns of rice straw in the field with different returning methods[J]. *Journal of Mountain Science*, 2006, 24(Suppl): 92–97.
- [18] 马秀梅, 朱 波, 杜泽林, 等. 冬水田休闲期温室气体排放通量的研究[J]. 农业环境科学学报, 2005, 24(6): 1199–1202.
- MA Xiu-mei, ZHU Bo, DU Ze-lin, et al. CH_4 , CO_2 , and N_2O emissions from the year-round flooded paddy field at fallow season[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2005, 24(6): 1199–1202.
- [19] 余 佳, 刘 刚, 马 静, 等. 红壤丘陵区冬闲稻田 CH_4 和 N_2O 排放通量的研究[J]. 生态环境学报, 2012, 21(1): 55–58.
- YU Jia, LIU Gang, MA Jing, et al. CH_4 and N_2O fluxes from winter fallow paddy fields in a hilly area of Southeast China[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2012, 21(1): 55–58.
- [20] 白小琳, 张海林, 陈 阜, 等. 耕作措施对双季稻田 CH_4 和 N_2O 排放的影响[J]. 农业工程学报, 2010, 26(1): 282–289.
- BAI Xiao-lin, ZHANG Hai-lin, CHEN Fu, et al. Tillage effects on CH_4 and N_2O emission from double cropping paddy field[J]. *Transactions of the CSAE*, 2010, 26(1): 282–289.
- [21] 江长胜, 王跃思, 郑循华, 等. 耕作制度对川中丘陵区冬灌田 CH_4 和 N_2O 排放的影响[J]. 环境科学, 2006, 27(2): 207–213.
- JIANG Chang-sheng, WANG Yue-si, ZHENG Xun-hua, et al. CH_4 and N_2O emissions from a winter-time flooded paddy field in a hilly area of Southwest China[J]. *Environmental Science*, 2006, 27(2): 207–213.
- [22] 刘 惠, 赵 平, 孙谷畴, 等. 华南丘陵区冬闲稻田二氧化碳、甲烷和氧化亚氮的排放特征[J]. 应用生态学报, 2007, 18(1): 57–62.
- LIU Hui, ZHAO Ping, SUN Gu-chou, et al. Characters of CO_2 , CH_4 and N_2O emissions from winter-fallow paddy fields in hilly areas of South China[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2007, 18(1): 57–62.
- [23] 伍芬琳, 张海林, 李 琳, 等. 保护性耕作下双季稻农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 CH_4 emission and greenhouse effects in double paddy soil with conservation tillage[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2008, 41(9): 2703–2709.
- [24] 焦 艳, 黄 耀. 影响农田氧化亚氮排放过程的土壤因素[J]. 气候与环境研究, 2003, 8(4): 457–466.
- JIAO Yan, HUANG Yao. Influence of soil properties on N_2O emissions from farmland[J]. *Climatic and Environmental Research*, 2003, 8(4): 457–466.
- [25] Heard J, Cavers C, Adrian G. Up in smoke—nutrient loss with straw burning[J]. *Better Crops*, 2006, 90(3): 10–11.
- [26] Oorts K, Merckx R, Grehan E, et al. Determinants of annual fluxes of CO_2 and N_2O in long-term no-tillage and conventional tillage system in Northern France[J]. *Soil and Tillage Research*, 2007, 53(5): 133–148.
- [27] 秦晓波, 李玉娥, 万运帆, 等. 免耕条件下稻草还田方式对温室气体排放强度的影响[J]. 农业工程学报, 2012, 28(6): 210–216.
- QIN Xiao-bo, LI Yu-e, WAN Yun-fan, et al. Effects of straw mulching on greenhouse gas intensity under no-tillage conditions[J]. *Transactions of the CSAE*, 2012, 28(6): 210–216.
- [28] Ball B C, Scott A, Parker J P, et al. Field N_2O , CO_2 and CH_4 fluxes in relation to tillage, compaction and soil quality in Scotland[J]. *Soil and Tillage Research*, 1999, 53(1): 29–39.
- [29] Harada H, Kobayashi H, Shindo H. Reduction in greenhouse gas emissions by no-tilling rice cultivation in Hachirogata polder, northern Japan: Life-cycle inventory analysis[J]. *Soil Science and Plant Nutrition*, 2007, 53(5): 668–677.
- [30] Hutsch B W. Tillage and land use effects on methane oxidation rates and their vertical profiles in soil[J]. *Biology and Fertility of Soil*, 1998, 27(3): 284–292.
- [31] 丁维新, 蔡祖聪. 土壤甲烷氧化菌及水分状况对其活性的影响[J]. 中国生态农业学报, 2003, 11(1): 94–97.
- DING Wei-xin, CAI Zu-cong. Effect of temperature on methane production and oxidation in soils[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2003, 11(1): 94–97.