

免耕条件下稻草还田方式对温室气体排放强度的影响

秦晓波¹, 李玉娥^{1*}, 万运帆¹, 石生伟¹, 廖育林², 刘运通¹, 李勇³

(1. 农业部农业环境与气候变化重点开放实验室, 中国农业科学院农业环境与可持续发展研究所, 北京 100081; 2. 湖南省土壤肥料研究所, 长沙 410125; 3. 中国科学院亚热带农业生态过程重点实验室, 中国科学院亚热带农业生态研究所, 长沙 410125)

摘要: 为探讨免耕条件下的稻草高茬和覆盖还田对双季稻田温室气体排放强度 (GHGI) 的影响, 该研究利用静态箱-气相色谱法, 对免耕稻草不还田 (NWS)、免耕高茬还田 (HN) 和免耕覆盖还田 (SN) 3 处理稻田 GHGI 进行了连续 2 a 的观测。结果表明, 在各处理水稻产量差异不显著时, 双季稻田的 GHGI 主要由温室气体排放量决定; 在稻草用量相同的情况下, 2 种稻草还田方式均增加了稻田的 GHGI, 且高茬还田的增加幅度大于覆盖还田, 说明高茬还田增强了温室气体通过水稻体内通气组织传输的能力。在 20 和 100 a 尺度上, 甲烷的 GHGI 均远大于氧化亚氮, 在 20 a 尺度上, 早稻各处理甲烷的 GHGI 平均为 N₂O 的 109 倍, 晚稻为 14 倍, 而在 100 a 尺度上, 这个倍数有所下降, 分别只有 35 倍和 3.77 倍, 可见, 减少甲烷排放是减缓稻田温室气体排放强度的首要目标。在等稻草量的前提下, 相比留高茬还田, 覆盖还田能有效控制稻田 GHGI。该研究可为中国华中地区双季稻田碳增汇和温室气体减排研究提供参考。

关键词: 稻草, 温室气体, 试验, 免耕, 高茬, 甲烷, 氧化亚氮

doi: 10.3969/j.issn.1002-6819.2012.06.034

中图分类号: S344; S511.4⁺²; X511

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2012)-06-0210-07

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 Xiaobo, Li Yu'e, Wan Yunfan, et al. Effects of straw mulching on greenhouse gas intensity under on-tillage conditions[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2012, 28(6): 210-216. (in Chinese with English abstract)

0 引言

甲烷 (CH₄) 和氧化亚氮 (N₂O) 是仅次于二氧化碳 (CO₂) 的最重要温室气体, 水稻 (*Oryza sativa* L.) 田是 CH₄ 的重要排放源, 其 N₂O 排放总量也较大。但研究表明, 只要措施得当, 水稻田具有较大的温室效应减缓潜力^[1]。温室气体排放强度 (greenhouse gas intensity, GHGI) 是一个温室效应综合评价指标^[2-3], 其数值为温室气体排放当量与作物经济产出的比值^[4], 是一个将环境效益与经济效益相协调统一的综合评价指标^[5]。

耕作措施是其它田间操作的基础, 决定了生长季田间土壤通气和养分交流状况。免耕作为有机农业的一个组成部分, 正被越来越多的推广使用。相比翻耕, 免耕可有效减少稻田 CH₄ 的排放^[6-7]。耕作措施对 CH₄ 排放的影响也主要通过对其产生和再氧化 2 个过程的影响而产生。关于免耕对 N₂O 排放的影响, 目前的研究认为有 3 种情况: 免耕能抑制 N₂O 排放^[8-9]和促进

N₂O 排放^[10-11], 另外有少数研究认为传统翻耕和免耕不会导致 N₂O 的排放差异^[12]。稻草还田是稻田重要的有机质补充形式, 作为有机肥的一种形式, 研究发现稻草还田可导致温室气体排放的增加^[13-16], 但不同的还田方式对温室气体排放的影响不同, 通过适当的调整, 即可满足土壤有机质的补充, 还能实现有效控制温室气体排放。

目前对基于免耕的高茬还田和覆盖还田 2 种方式对稻田温室气体排放强度影响的研究还较少。因此, 本研究目的在于通过长期试验, 对水稻经济产量与温室气体排放量综合分析, 探讨免耕基础上稻草高茬和覆盖 2 种还田方式对稻田温室气体排放强度的影响。

1 材料和方法

1.1 试验设计

试验设置在湖南省长沙县干杉乡农技站 (113°11'E, 28°8'N), 属中亚热带季风湿润气候区。年平均气温 17.5℃, ≥10℃积温 5 450℃·d, 年日照 1 700 h, 全年降雨量 1 300~1 400 mm, 且集中在 4—6 月, 此间降雨量约占全年的 50%~60%。供试土壤为第四纪红壤发育的红黄泥田, 质地为砂质黏土。试验前土壤本底值详见表 1。早晚稻全部采用抛秧的方式移栽。供试早稻品种为常规稻一湘早籼 24, 晚稻为杂交稻一丰源 191, 耕作制度是早稻—晚稻—冬闲。早稻于 4 月初播种, 4 月底施基肥后移栽, 7 月中旬收获; 晚稻于 6 月初播种, 7 月中上旬施基肥后移栽, 10 月中旬收获。

收稿日期: 2011-06-09 修订日期: 2012-02-21

基金项目: 公益性行业 (农业) 科研专项经费资助 (201103039); 国家“973”计划 (2012CB417106)。

作者简介: 秦晓波 (1977—), 男, 山东泰安人, 助理研究员, 博士, 主要从事农田温室气体减排观测及模拟研究。北京 中国农业科学院农业环境与可持续发展研究所, 100081。Email: chinayrh@gmail.com

*通信作者: 李玉娥 (1963—), 女, 河北衡水人, 研究员, 中国农业科学院农业环境与可持续发展研究所气候变化研究室主任, 主要从事气候变化对农业的影响、适应性和脆弱性研究。北京 中国农业科学院农业环境与可持续发展研究所, 100081。Email: yueli@ami.ac.cn

表 1 供试土壤基本理化特性

Table 1 Basic physical and chemical Properties of experimental soil

总氮质量分数 (g·kg ⁻¹)	土壤有机质质量分数 (g·kg ⁻¹)	水解氮质量分数 (mg·kg ⁻¹)	有效磷质量分数 (mg·kg ⁻¹)	速效钾质量分数 (mg·kg ⁻¹)	pH (水:土=2.5:1, 质量比)
2.14	32.7	233.3	11.1	122.0	5.3

试验设 3 处理 3 重复，随机区组排列，小区面积 15.6 m²，随机区组排列。3 个处理分别为：1) 免耕稻草不还田 (NWS)；2) 免耕高茬还田 (HN) 和 3) 免耕覆盖还田 (SN)。各处理均采用当地常规间歇灌溉管理，每季末收获前田面自然晒干。氮肥为尿素，磷肥为过磷酸钙 (普钙)，钾肥为氯化钾，各处理肥料设计详见表 2，表中数据为根据肥料养分含量换算后的纯养

分用量。2008 年至 2009 年试验点气象要素变化趋势见图 1。

表 2 试验处理设计

Table 2 Designs of experiment treatments

处理	kg hm ⁻²							
	N		P ₂ O ₅		K ₂ O		高茬留茬稻草用量*	稻草覆盖稻草用量*
	早稻	晚稻	早稻	晚稻	早稻	晚稻	早稻	晚稻
NWS 免耕稻草不还田	150	180	90	45	90	112.5		
HN 免耕高茬还田	97.8	127.8	76.05	31.2	32.55	54.9	4500	4500
SN 免耕覆盖还田	97.8	127.8	76.05	31.2	32.55	54.9		4500 4500

注：*稻草氮磷钾质量分数分别为：N 1.16%，P₂O₅ 0.31%和 K₂O 1.28%。

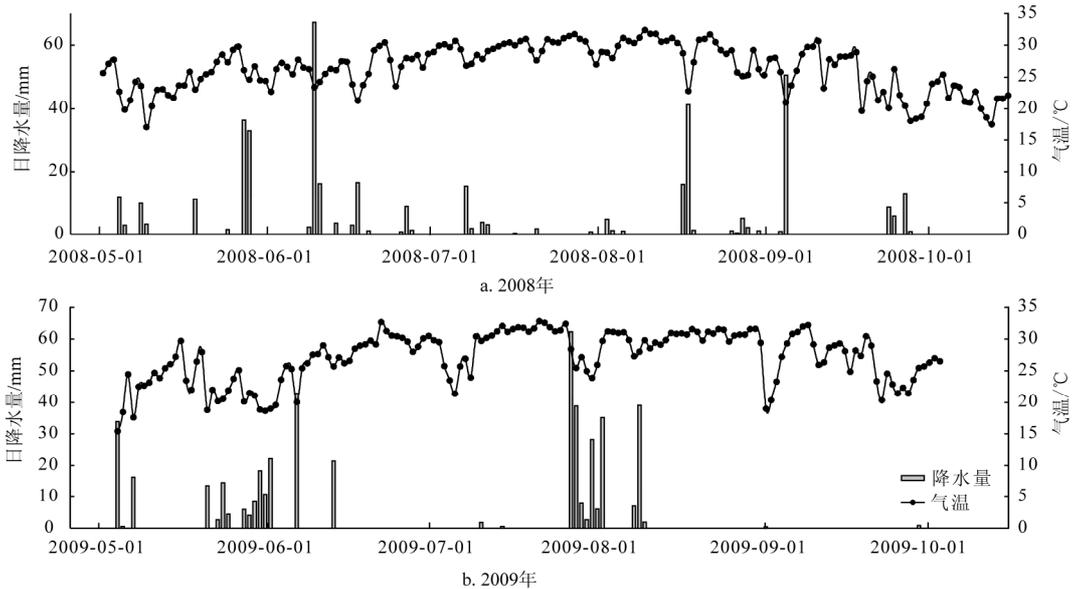


图 1 2008~2009 年气温和降水日变化

Fig.1 Variation of daily air temperature and precipitation in 2008~2009

1.2 温室气体排放通量观测

在水稻生育期内每 4 d 采集一次温室气体样品，温室气体排放通量观测采用手动静态箱一气相色谱法，采样箱设计、具体取样过程和浓度测定及通量计算方法参考

有关文献^[17-18]。

自制手动采样箱主体由聚碳酸酯板 (PC 板) 构成^[19]，用不锈钢和硅胶压条固定、密封，底座由不锈钢材料做成。采样箱尺寸示意图见图 2。在每季移栽后将底座插入

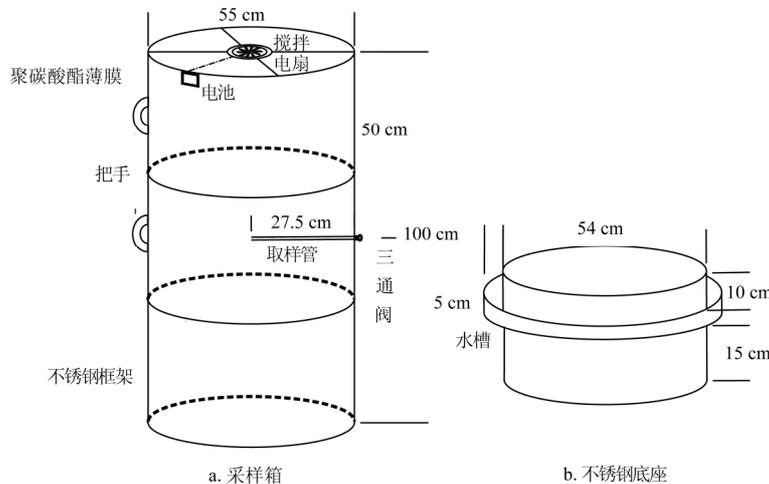


图 2 温室气体采样箱示意图

Fig.2 Schematic map of sampling chambers for greenhouse gas

田中，每小区一个底座，内罩4 蔸水稻植株，每次试验前，将底座水槽内注入淡水以密封箱内空气。每次采样时间为当天 09:00~11:00^[20]。每次罩箱后 30 min 内共取 4 次气样，分别是 0, 10, 20 和 30 min，通过 4 次浓度值的斜率计算气样的通量，如果 4 次浓度线性拟合决定系数 R^2 小于 0.88 则舍弃这次取样数据。用 60 mL 注射器取出气体后，将大约 30 mL 气样移入 12 mL 预抽真空采样瓶，在几小时内送到实验室由自动进样器按序列送入气相色谱 (Agilent 7890A, Agilent Inc., USA, 2007) 分析。气相色谱设置 1 次进样 2 种气体同时分析的气路，配置氢火焰离子化检测器 (FID) 和电子捕获检测器 (ECD)，分别用以检测气样中 CH_4 和 N_2O 的浓度，2 个检测器的温度分别设为 200 和 330℃。分析柱长 3 m，采用 80~100 目 Porapak Q 填充柱，柱温 70℃。所用载气为高纯氮气，流速 30 mL/min， CH_4 和 N_2O 标准气体由国家标准物质研究中心提供。

温室气体排放通量用公式 (1) 计算^[21-22]。

$$F = \rho \cdot h \cdot (dC/dt) \cdot 273 / (273 + T) \quad (1)$$

其中， F 是温室气体排放通量 (以 CH_4 计时，为 $mg/(m^2 \cdot h)$ ，以 N_2O 计时，为 $\mu g/(m^2 \cdot h)$)； ρ 是被测气体标准状况下的密度， kg/m^3 ； T 是采样过程中密闭箱内的平均温度， $^{\circ}C$ ； h 是采样箱的高度， m ； C 是温室气体的体积混合比； t 是采样箱的密闭时间， h ， dC/dt 是采样过程中密闭箱内温室气体的浓度变化率。

1.3 温室气体排放强度计算

根据各温室气体在不同时间尺度上的相对全球增温

潜势 (global warming potential, GWP)，可计算其温室气体排放二氧化碳当量 (carbon dioxide equivalent, CDE，单位： kg ，以 CO_2 计)，在 20 和 100 a 尺度上 CH_4 的相对 GWP 分别为 CO_2 的 72 倍和 25 倍，而 N_2O 分别为 289 倍和 298 倍^[23]。由此可计算二者的总二氧化碳当量。

$$TCDE = CDE(CH_4) + CDE(N_2O) \quad (2)$$

式中， $TCDE$ 为 CH_4 和 N_2O 二者排放量的总二氧化碳当量， kg ，以 CO_2 计。

Timothy 等^[4]给出温室气体排放强度 (GHGI) 的计算方法 (公式 3)。根据 GHGI 值的相对大小判断各处理的综合温室效应。

$$GHGI = TCDE / \text{水稻产量} \quad (3)$$

式中， $GHGI$ 为温室气体排放强度， $kg/(kg \cdot a)$ 。

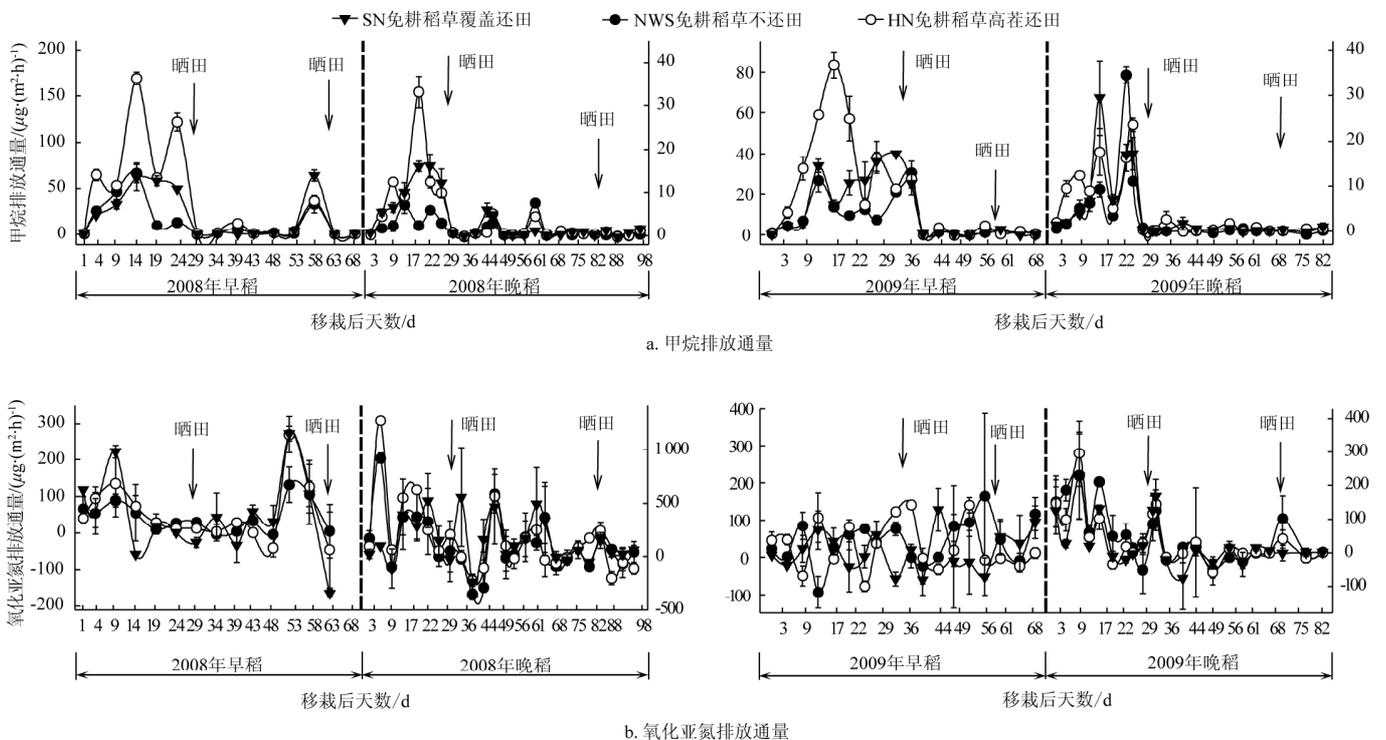
1.4 数据分析

温室气体排放通量季节变化的连续观测数据方差分析利用 SAS PROC MIXED^[24] 模块进行。所有分组数据利用 R 软件^[25] 进行正态性检验 (Shapiro 检验)；均值之间的多重比较利用 SAS JMP^[24] 软件的 Tukey-Kramer HSD 配对检验和 R 软件 Wilcox 符号秩检验。

2 结果与分析

2.1 稻田温室气体排放通量的季节变异

受不同稻草还田方式的影响，不同处理 CH_4 排放通量具有明显的、相一致的季节和年际变化规律 (图 3)，



注：图中通量值为平均值加减标准误差。

图 3 免耕条件下不同稻草还田处理的温室气体排放通量

Fig.3 Seasonal variations of greenhouse gases fluxes with different straw mulching treatments under the no tilling conditions

各处理间的差异表现在峰值大小和出峰时间的微小不同。2008 年早稻和晚稻和 2009 年早稻最大峰值均出现在 HN 处理，分别为： (169.33 ± 7.07) ， (33.12 ± 3.64) 和 $(83.44$

$\pm 6.30) mg/(m^2 \cdot h)$ ，而 2009 年晚稻最大值则出现在 NWS 处理，值为 $(34.57 \pm 1.81) mg/(m^2 \cdot h)$ 。从图 3 可以看出稻田 CH_4 排放主要出现在晒田前，复水后除非遇大雨 (2008

年早稻和晚稻), 水稻生长后期几乎没有 CH_4 排放。统计分析表明, 2008 年和 2009 年两季早稻, HN 处理 CH_4 排放通量显著大于 SN 和 NWS 处理 ($p < 0.01$), 而两季晚稻 HN 和 SN 处理间 CH_4 排放通量差异不显著 ($p > 0.05$), 且只有 2008 年晚稻均显著高于 NWS 处理 ($p < 0.05$), 2009 年不显著。早稻和晚稻不同水稻品种的生理生长特性导致了上述不同季节温室气体排放量差异的变异情况, 而温室气体排放年际间的变化影响因素主要是年际间的气候条件 (图 1)。

对于 N_2O 排放通量, 其季节变化规律不如 CH_4 明显, 并且出现了较多吸收通量, 而且其排放通量变异性比较大 (图 3)。统计分析表明, 2008 年、2009 年早稻和晚稻 4 个生长季 HN 和 SN 这 2 个处理间 N_2O 排放通量均未出现显著差异 ($p > 0.05$), 这也说明了其排放变异性较大, 但 2 个还田处理 2008 年 2 季 N_2O 排放均高于 NWS 处理, 只是由于其变异性较大未达到 5% 的显著水平 (p

> 0.05), 而 2009 年 2 季则低于 NWS 处理。这说明受年际间具体气候条件的影响 (图 1), 稻田 N_2O 排放年际变异也较大, 导致处理间差异不显著。

2.2 稻田温室气体排放强度

结合各处理水稻产量 (表 3), 我们计算了各处理各生长季在 20 和 100 a 尺度上的温室气体排放强度 (表 4)。

表 3 各处理水稻产量

Table 3 Rice yield of different straw mulching treatments

	kg·hm ⁻²		
	免耕稻草不还田 NWS	翻耕高茬还田 HN	免耕覆盖还田 SN
2008 年早稻	6260.69±305.69	6752.14±408.04	5854.70±332.86
2009 年早稻	4615.39±318.37	5074.79±349.26	5128.21±228.64
2008 年晚稻	7019.23±494.69	6655.98±199.49	6356.83±532.12
2009 年晚稻	6965.81±319.20	7275.64±94.36	6997.86±302.69

注: 统计分析结果表明, 各生长季各处理间水稻产量均没达到显著差异 ($p > 0.05$)。

表 4 各处理 4 个生长季稻田甲烷和氧化亚氮排放强度

Table 4 Emission intensity of methane and nitrous oxide under different straw mulching treatments in rice field during 4 growing seasons

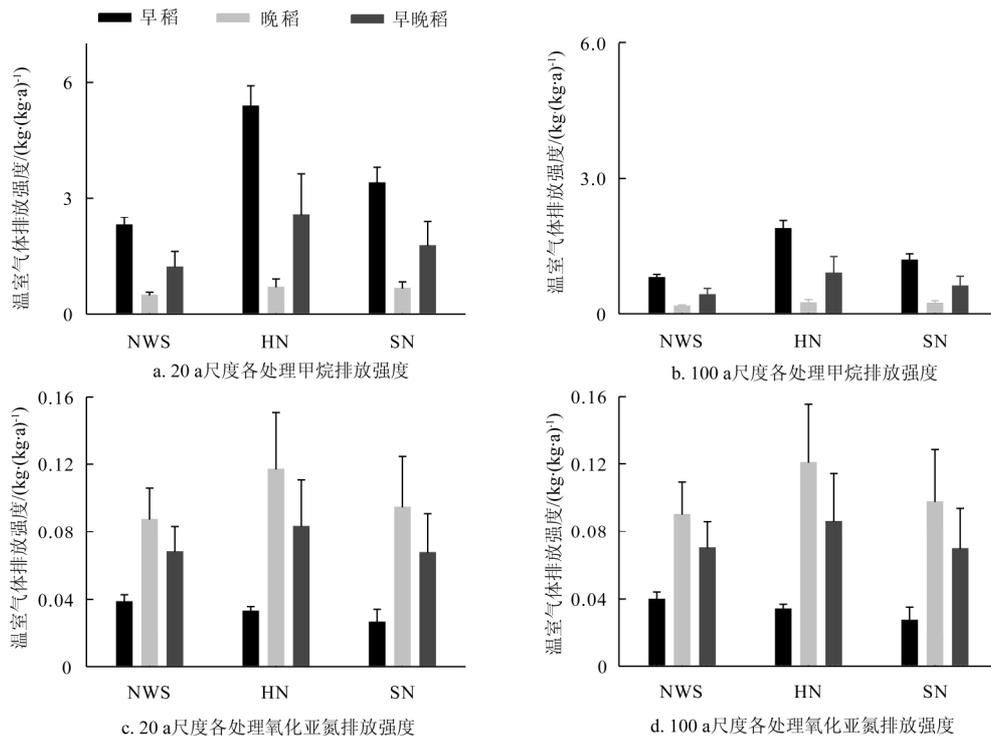
时间尺度	气体	处理	kg·(kg·a) ⁻¹			
			2008 早稻	2008 晚稻	2009 早稻	2009 晚稻
20 a	CH_4	免耕稻草不还田 NWS	2.58±0.48 b	0.37±0.07 b	1.99±0.33 b	0.68±0.09 a
		免耕高茬还田 HN	6.13±0.43 a	0.98±0.12 a	4.65±0.56 a	0.92±0.16 a
		免耕覆盖还田 SN	3.96±0.45 b	0.90±0.17 a	2.82±0.47 b	0.83±0.19 a
	N_2O	免耕稻草不还田 NWS	0.03±0.02 a	0.11±0.10 a	0.04±0.04 a	0.04±0.03 a
		免耕高茬还田 HN	0.04±0.02 a	0.15±0.06 a	0.03±0.01 a	0.03±0.02 a
		免耕覆盖还田 SN	0.04±0.02 a	0.15±0.16 a	0.02±0.04 a	0.03±0.02 a
100 a	CH_4	免耕稻草不还田 NWS	0.90±0.17 b	0.13±0.03 b	0.69±0.11 b	0.24±0.03 a
		免耕高茬还田 HN	2.13±0.15 a	0.34±0.04 a	1.61±0.19 a	0.32±0.06 a
		免耕覆盖还田 SN	1.38±0.16 b	0.31±0.06 a	0.98±0.16 b	0.29±0.07 a
	N_2O	免耕稻草不还田 NWS	0.03±0.03 a	0.11±0.10 a	0.05±0.05 a	0.04±0.03 a
		免耕高茬还田 HN	0.04±0.02 a	0.16±0.06 a	0.03±0.02 a	0.04±0.02 a
		免耕覆盖还田 SN	0.04±0.02 a	0.16±0.16 a	0.02±0.04 a	0.03±0.02 a

注: 同一列中同一时间尺度、同一种气体标记相同字母的处理间在 5% 显著水平上不显著 ($p > 0.05$)。

从表 4 中数据可以看出, 2 个时间尺度上稻田 CH_4 的 GHGI 明显高于 N_2O , 减少 CH_4 排放是稻田温室效应减缓的首要目标。在 20a 尺度上, 早稻各处理 CH_4 的 GHGI 最高达 2008 年 HN 处理的 (6.13±0.43) kg/(kg·a), 最小为 2009 年 NWS 的 (1.99±0.33) kg/(kg·a), 两季早稻 3 处理 CH_4 平均 GHGI 均显著大于 N_2O , 2008 年早稻和 2009 年早稻, CH_4 的 GHGI 平均为 N_2O 的 GHGI 的 114 倍和 104 倍; 晚稻 CH_4 的 GHGI 较早稻低, 最高为 2008 年 HN 处理的 (0.98±0.12) kg/(kg·a), 最小为 2008 年 NWS 处理的 (0.37±0.07) kg/(kg·a), 两季晚稻 3 处理平均 CH_4 的 GHGI 分别为 N_2O 的 GHGI 的 4 倍和 23 倍。而在 100 a 尺度上, 由于 N_2O 相对 GWP 和 CDE 的增加, 这个倍数有所下降, 早晚稻 CH_4 的 GHGI 分别只有 N_2O 的 35 倍和 3.77 倍, 这说明在较长时间尺度上 N_2O 的 CDE 增加, 其对稻田温室气体排放强度的贡献率也相对增加。

对于稻田综合温室气体排放强度, 将 CH_4 和 N_2O

GHGI 相加后, 得到各处理各时间尺度上早稻、晚稻和 4 个生长季平均 GHGI (图 4)。就 4 季平均值而言, 在两个时间尺度上, 各处理 GHGI 从大到小的顺序均为: HN>SN>NWS, 而早晚稻 2 季平均值也是这个顺序。可以看出, 在稻草总量相同的前提下, 高茬还田处理的温室气体排放强度明显大于覆盖还田和不还田处理, 还田量和还田方式明显影响了温室气体排放强度。在 20 a 尺度上, 早稻 HN 处理 GHGI 比 NWS 处理高 69%, 比 SN 处理也高了 42%, 晚稻有所不同, HN 比 NWS 高了 52%, 而只比 SN 提高了 4%。而在 100 a 尺度上, 早稻 HN 处理 GHGI 比 NWS 高 65%, 比 SN 高 42%, 晚稻则比 NWS 提高了 60%, 比 SN 也高出 13%。可见, 2 种稻草还田方式均显著提高了稻田 GHGI, 特别是 HN 高茬处理, 由于上季水稻植株没有移除, 其通气组织形成了一个 CH_4 排放途径, 增强了土壤 CH_4 向大气的传输能力, 因此产生了比覆盖还田更高的 GHGI。



注：图中误差线为标准误差；温室气体排放强度以单位产量 CO₂ 排放当量计；NWS 为免耕稻草不还田，HN 为免耕稻草高茬还田，SN 为免耕稻草覆盖还田。

图4 各处理早稻、晚稻各时间尺度上温室气体排放强度

Fig.4 Emission intensity of greenhouse gases under different treatments of early and late rice during four growing seasons on different time scales

另外，我们对各处理水稻产量进行了分析，发现处理间水稻产量并没有统计上的显著差异 ($p > 0.05$)。因此，各处理间 GHGI 差异由温室气体排放量决定，由上分析可知，CH₄ 贡献了稻田绝大部分的温室气体当量，因此 CH₄ 的排放总量控制了稻田 GHGI 的总量。

3 讨论

温室气体排放强度是一个温室效应综合评价指标，相比全球增温潜势和其它评价标准，其突出优势在于将温室效应与作物经济产出相结合，通过平衡系统的环境效应与经济效益，帮助决策者制定相关政策。这一指标可用于评价稻田 CH₄ 和 N₂O 的综合温室效应。我们发现，稻田 GHGI 主要由 CH₄ 贡献，在各时间尺度上其值远大于由 N₂O 产生的值，有研究认为水稻田 N₂O 排放极低^[19]甚至可以忽略不计^[26-27]。我们认为在较短时间尺度上，N₂O 综合温室效应极低（表 4 和图 4），但随着时间尺度的延长，N₂O 对稻田综合温室效应的贡献率上升，主要是因为 N₂O 在大气中存活时间较长，并且其全球增温潜势远高于 CH₄。虽然水稻田 N₂O 观测有较大的不确定性，但通过观测系统和方法的改进，并经过长期田间试验，可以提高 N₂O 观测的精度并降低其不确定性，得到客观的观测结果，在这种前提下才能制定更科学的稻田减排措施。

作物残茬与无机肥混施是农业生产可持续发展的良好选择之一，这种有机肥无机肥混施的方式即能够充分利用稻草资源，又有利于降低氮素损失^[28-29]。我们的试验为稻草和尿素混施，有研究认为相比单施化肥，混施

有机肥能抑制土壤 N₂O 的排放^[28-29]，也有研究得出了相反的结论，认为混施后土壤 N₂O 排放大于单施化肥^[15-16]，我们 2 a 的试验发现各处理间 N₂O 排放统计上的差异不显著（表 4），可能原因有两个，第一，受气候和水分条件的影响，N₂O 排放年际间的变异较大^[19,30]；第二，水稻田 N₂O 排放观测有较大的不确定性^[22]。另外，N₂O 排放更多地取决于氮素总量的输入，我们各处理纯氮施用量是相同的，虽然 2 个还田处理的有机肥形式不同，但其与不还田处理的总氮输入量是相同的，因此，N₂O 排放对 3 个处理的响应相似。

绝大多数研究发现有机肥能促进 CH₄ 的排放^[13-14, 19]，但在有机肥施用总量相同的情况下，其施用方式对水稻生产系统的经济和环境效应有较大的影响。针对高茬和覆盖还田的对比分析，以往研究较少。我们发现在免耕条件下，相比不还田，2 种稻草还田方式均能促进 CH₄ 排放（图 3 和表 4）。2 种稻草还田处理间也有差异，相比 SN，HN 处理的 GHGI 均有一定程度提高。这说明，施加总量相同的外源有机肥，留高茬有利于根系有机质的补充，也更有利于 CH₄ 向大气的传输，因而导致较高的温室气体排放；而在免耕条件下，稻草覆盖还田，表层有机质不易渗入水稻根系产 CH₄ 区，因此相比留高茬处理，CH₄ 产生总量较少，造成 CH₄ 排放量的减少。另外，我们试验早晚稻品种不同，而且对各生长季水稻产量的分析没发现处理间的显著差异（表 3），因此，综合 GHGI 的差异主要来源于温室气体总排放当量的差异，因此在没进行水稻品种产量差异对比试验的前提下，CH₄

排放总量解释了观测到的稻田 GHGI 的变化趋势。

我们的试验 2 个还田处理稻草用量相同, 差别只在还田方式, 由此造成的温室气体排放通量和排放强度的差异均来自高茬和覆盖还田两种方式, 可见, 不同的稻草还田方式对水稻生态系统造成了较大的影响。如果结合水稻还田量的差异, 进行还田量和方式的交叉研究, 则可为稻田增碳减排政策的制定提供更多选择, 这是我们下一步研究的重点。为避免稻草还田巨大的 CH_4 排放强度, 应采取更科学的措施处理水稻残茬, 比如覆盖代替留高茬。Smith 等^[31]指出, 农业系统温室气体减排遵循以下 3 个机制: 1) 减少排放; 2) 加强移除; 3) 替代(避免) 排放。水稻系统秸秆数量巨大, 在不还田或者部分还田时, 其它部分可直接或间接用来生产酒精或柴油, 达到移出系统, 避免直接排放的目的。

4 结 论

1) 在稻草用量相同的前提下, 基于免耕的 2 种稻草还田方式均显著提高了稻田温室气体排放强度。相比高茬还田, 覆盖还田在补充土壤有机质的同时, 有效减缓了稻田温室气体排放强度。

2) 双季稻田温室气体排放强度主要由温室气体排放量决定, 减缓温室气体排放是减缓温室气体排放强度的前提。各时间尺度上稻田温室气体排放强度主要由 CH_4 贡献, 减少 CH_4 排放是稻田温室气体排放强度减缓的主要目标。

[参 考 文 献]

- [1] Parry M L, Canziani O F, Palutikof J P, et al. Intergovernmental Panel on Climate Change Fourth Assessment Report[M]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2007: 104.
- [2] Qin Y, Liu S, Guo Y, et al. Methane and nitrous oxide emissions from organic and conventional rice cropping systems in Southeast China[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2010, 46(8): 825—834.
- [3] Shang Q, Yang X, Gao C, et al. Net annual global warming potential and greenhouse gas intensity in Chinese double rice-cropping systems: A 3-year field measurement in long-term fertilizer experiments[J]. *Global Change Biology*, 2011, 17(6): 2196—2210.
- [4] Timothy H, Jonathan P, Kevin B. Target—intensity: an analysis of greenhouse gas intensity targets[M]. World Resources Institute, Washington D.C., USA, 2006: 37.
- [5] 邹建文, 黄耀, 宗良纲, 等. 不同种类有机肥施用对稻田 CH_4 和 N_2O 排放的综合影响[J]. *环境科学*, 2003, 24(4): 7—21. Zou Jianwen, Huang Yao, Zong Lianggang, et al. Integrated effect of incorporation with different organic manures on CH_4 and N_2O emissions from rice paddy[J]. *Environmental Science*, 2003, 24(4): 7—21. (in Chinese with English abstract)
- [6] Harada H, Hitomi K, Hayato S. 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.
- [7] Ahmad S, Li C, Dai G, et al. Greenhouse gas emission from direct seeding paddy field under different rice tillage systems in central China[J]. *Soil and Tillage Research*, 2009, 106(1): 54—61.
- [8] Elder J W, Lal R. Tillage effects on gaseous emissions from an intensively farmed organic soil in North Central Ohio[J]. *Soil and Tillage Research*, 2008, 98(1): 45—55.
- [9] Gregorich E G, Rochette P, St-Georges P, et al. Tillage effects on N_2O emissions from soils under corn and soybeans in eastern Canada[J]. *Canadian Journal of Soil Science*, 2008, 88(2): 153—161.
- [10] Ball B C, Crichton I, Horgan G W. Dynamics of upward and downward N_2O and CO_2 fluxes in ploughed or no-tilled soils in relation to water-filled pore space, compaction and crop presence[J]. *Soil and Tillage Research*, 2008, 101(1/2): 20—30.
- [11] Rochette P. No-till only increases N_2O emissions in poorly-aerated soils[J]. *Soil and Tillage Research*, 2008, 101(1/2): 97—100.
- [12] Choudhary M A, Akramkhanov A, Saggat S. Nitrous oxide emissions from a New Zealand cropped soil: Tillage effects, spatial and seasonal variability[J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2002, 93(1/3): 33—43.
- [13] Bronson K F, Neue H U, Abao E B, et al. Automated chamber measurements of methane and nitrous oxide flux in a flooded rice soil: I. residue, nitrogen, and water management[J]. *Soil Science Society of American Journal*, 1997, 61(3): 981—987.
- [14] Kanno T, Miura Y, Tsuruta H, et al. Methane emission from rice paddy fields in all of Japanese prefecture[J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 1997, 49(1): 147—151.
- [15] Frimpong K A, Baggs E M. Do combined applications of crop residues and inorganic fertilizer lower emission of N_2O from soil[J]. *Soil Use and Management*, 2010, 26(4): 412—424.
- [16] Toma Y, Hatano R. Effect of crop residue C:N ratio on N_2O emissions from Gray Lowland soil in Mikasa, Hokkaido, Japan[J]. *Soil Science and Plant Nutrition*, 2007, 53(2): 198—205.
- [17] 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 Xiaobo, Li Yue, Liu Keying, et al. Methane and nitrous oxide emission from paddy field under different fertilization treatments[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2006, 22(7): 143—148. (in Chinese with English abstract)
- [18] 秦晓波, 李玉娥, 刘克樱, 等. 长期施肥对湖南稻田甲烷排放的影响[J]. *中国农业气象*, 2006, 27(1): 19—22. Qin Xiaobo, LiYu'e, Liu Keying, et al. The effect of long-term fertilization treatment on methane emission from rice fields in Hunan[J]. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2006, 27(1): 19—22. (in Chinese with English abstract)
- [19] 秦晓波. 减缓华中典型双季稻田温室气体排放强度措施的研究[D]. 中国农业科学院博士学位论文, 2011, pp. 144.
- [20] Hou A X, Chen G X, Wang Z P, et al. Methane and nitrous oxide emissions from a rice field in relation to soil redox and

- microbiological processes[J]. *Soil Sci Soc Am J*, 2000, 64(11/12): 2180—2186.
- [21] 王庚辰. 陆地生态系统温室气体排放(吸收)测量方法简评[J]. *气候与环境研究*, 1997, 2(3): 251—263.
Wang Gengchen. A view on measurement methods for greenhouse gases emission from terrestrial ecosystem[J]. *Climatic and Environmental Research*, 1997, 2(3): 251—263. (in Chinese with English abstract)
- [22] 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.
- [23] Metz B, Davidson O R, Bosh P R, et al.. *Climate Change 2007: Mitigation of climate change. contribution of working group III to the fourth assessment report of the intergovernmental panel on climate change*[M]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2007: 499—532.
- [24] SAS Institute, Inc. *SAS Procedures Guide Version 8*. SAS Institute, Inc., Cary, NC, U.S.A, 1999.
- [25] R development core team. *R: A language and environment for statistical computing*. <http://www.R-project.org/>.
- [26] Zou J, Huang Y, Jiang J, et al. A 3-year field measurement of methane and nitrous oxide emissions from rice paddies in China: Effects of water regime, crop residue, and fertilizer application[J]. *Global Biogeochemical Cycles*, doi: 10.1029/2004GB002401.
- [27] Liu S, Qin Y, Zou J, et al. Effects of water regime during rice-growing season on annual direct N₂O emission in a paddy rice-winter wheat rotation system in southeast China[J]. *Science of the Total Environment*, 2010, 408(4): 906—913.
- [28] Kirchmann H, Thorvaldsson G. Challenging targets for future agriculture[J]. *European Journal of Agronomy*, 2000, 12(3/4): 145—161.
- [29] Vanlauwe B, Wendt J, Diels J. Combined application of organic matter and fertiliser[C]// *Sustaining Soil Fertility in West Africa*. Madison: Soil Science Society of America and American Society of Agronomy, 2001: 247—279.
- [30] Akiyama H, Yagi K, Yan X. Direct N₂O emissions from rice paddy fields: Summary of available data[J]. *Global Biogeochemical Cycles*, doi: 10.1029/2004GB002378.
- [31] Smith P, Martino D, Cai Z, et al. Greenhouse gas mitigation in agriculture[J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society, B: Biological Sciences*, 2008, 363: 789—813.

Effects of straw mulching on greenhouse gas intensity under on-tillage conditions

Qin Xiaobo¹, Li Yu'e^{1*}, Wan Yunfan¹, Shi Shengwei¹, Liao Yulin², Liu Yuntong¹, Li Yong³

(1. *The Key Laboratory for Agro-Environment and Climate Change, Institute of Environment and Sustainable Development in Agriculture, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Ministry of Agriculture, Beijing 100081, China;*

2. *Soils and Fertilizer Institute of Hunan Province, Changsha 410125, China;* 3. *Key Laboratory of Agro-ecological Processes in Subtropical Region, Institute of Subtropical Agriculture, Chinese Academy of Sciences, Changsha 410125, China)*

Abstract: To investigate the effects of straw mulching on greenhouse gas intensity (GHGI) under the no tilling conditions, a two-year (2008-2009) observation of greenhouse gas emissions with different treatments of NWS (no till + no residue), HN (no till + high stubble) and SN (no till + straw mulching) was conducted by using the static chamber—GC (gas chromatography) method. The results indicated that the two treatments of HN and SN at the same rate of straw mulching had no difference in rice yield and increased GHGI compared to the NWS treatment. The GHGI of SN was lower than that of HN, which indicated that the HN treatment enhanced the ability of GHGI transportation by rice aerenchyma. On a 20-year scale, the average GHGI of methane was 109 times and 14 times greater than nitrous oxide for early and late rice, respectively, while on a 20-year scale, the value was lower, but still was 35 times and 3.77 times. In conclusion, the GHGI of the double-rice field will be affected by different practices of retaining rice residue determined. Compared with the HN treatment, straw mulching (SN) will be a reasonable choice for straw mulching. This study provides references for the enhancement of carbon sequestration and mitigation of GHGI emissions in a double-rice field in the Central China Region.

Key words: straw, greenhouses gases, experiments, no tillage, high stubble, covering, CH₄, N₂O