

耕作制度对川中丘陵区冬灌田 CH_4 和 N_2O 排放的影响

江长胜^{1,3}, 王跃思^{1*}, 郑循华¹, 朱波², 黄耀¹

(1. 中国科学院大气物理研究所, 北京 100029; 2. 中国科学院成都山地灾害与环境研究所, 成都 610041; 3. 中国科学院研究生院, 北京 100039)

摘要: 采用静态暗箱/气相色谱法连续 2 a 田间原位测定, 研究川中丘陵区冬灌田 CH_4 和 N_2O 的排放特征和不同耕作制度对冬灌田 CH_4 和 N_2O 排放的影响. 结果表明, 1a 只种 1 季中稻冬季灌水休闲的冬灌田 (PF), 在水稻生长期, CH_4 平均排放通量为 $(21.44 \pm 1.77) \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$, 非水稻生长期为 $(3.77 \pm 0.99) \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$, 分别大大低于以前文献报道的在西南其它地方观测值; 全年 CH_4 排放量以水稻生长期 CH_4 排放量为主, 非水稻生长期 CH_4 排放量仅占全年总排放量的 23.2%. 冬灌田 N_2O 排放通量年均值为 $(0.051 \pm 0.008) \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$, 且主要集中在水稻生长季, 非水稻生长期 N_2O 排放量仅占全年总排放量的 8.1%. 在采用水旱轮作制后, 冬灌田 CH_4 排放量大大降低, 稻-麦轮作 (RW) 和稻-油菜轮作 (RR) 全年 CH_4 排放量分别为 PF 的 43.8% 和 40.6%. 但冬灌田改为水旱轮作制后, N_2O 排放量显著增大, RW 和 RR 的 N_2O 年排放量分别是 PF 的 3.7 倍和 4.5 倍. 综合考虑冬灌田在采用不同耕作制度后排放 CH_4 和 N_2O 的全球增温潜势 (GWP), 无论是短时间尺度还是长时间尺度, 采用 3 种耕作制度全年所排放的 CH_4 和 N_2O 所产生的综合 GWP 都为: $\text{PF} \gg \text{RW} \approx \text{RR}$. 在 20a、100a 和 500a 时间尺度上, PF 分别约是 RW 和 RR 的 2.6、2.1 和 1.7 倍. 冬灌田改为水旱轮作制度后能大大减少 CH_4 和 N_2O 所产生的综合 GWP.

关键词: 耕作制度; 冬灌田; CH_4 ; N_2O ; 排放通量

中图分类号: X511, S153 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2006)02-0207-07

Effects of Tillage-Cropping Systems on Methane and Nitrous Oxide Emissions from Permanently Flooded Rice Fields in a Central Sichuan Hilly Area of Southwest China

JIANG Chang-sheng^{1,3}, WANG Yue-si¹, ZHENG Xun-hua¹, ZHU Bo², HUANG Yao¹

(1. Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China; 2. Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610041, China; 3. Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

Abstract: Using the static opaque chamber method, a field experiment was conducted *in situ* for two years to study the effects of three cultivation systems on CH_4 and N_2O emissions from permanently flooded rice fields in a hilly area in Southwest China. The results show that the average CH_4 fluxes from a permanently flooded rice field with a single middle rice crop and flooded with no winter crop (PF) were $(21.44 \pm 1.77) \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$ and $(3.77 \pm 0.99) \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$ during rice growing and non-rice growing periods, respectively, where both values were much lower than many previous reports from similar regions in Southwest China. The annual CH_4 emission was mainly occurred in the rice growing period, being only 23.2% of the total annual CH_4 flux emitted from the non-rice growing period, though the latter occupied two thirds of a year. The annual average flux of nitrous oxide was $(0.051 \pm 0.008) \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$ and the N_2O emission also intensive in the rice growing period. However, being only 8.1% of total annual N_2O flux emitted from the non-rice growing period. After implementing the rice-wheat rotation (RW) and rice oil-seed rape rotation (RR), the CH_4 emissions were reduced substantially, only 43.8% and 40.6% of those of PF, respectively. However, the N_2O emissions were increased after conducting RW and RR systems, which were 3.7 and 4.5 times larger than those of PF. The global warming potentials (GWPs) of the CH_4 and N_2O emissions under the three tillage-cropping systems were assessed in an integrated way. The results show that the integrated GWPs of the CH_4 and N_2O emissions are in the following sequence: $\text{PF} \gg \text{RR} \approx \text{RW}$. Within 20, 100 and 500 years spans, the GWPs of the CH_4 and N_2O emissions of PF were 2.6, 2.1 and 1.7 times larger than those of RW (or RR), respectively. After introducing rice-wheat or rice oil-seed rape rotation systems into the permanently flooded rice fields, the integrated GWPs of the CH_4 and N_2O emissions were decreased largely.

Key words: tillage-cropping systems; permanently flooded paddy fields; CH_4 emission; N_2O emission

CH_4 和 N_2O 是大气中 2 种长寿命的温室气体, 对全球变暖的贡献约为 25%, 而且过去几十年中这 2 种气体的浓度一直在不断增加^[1]. 大气中新增加的 CH_4 和 N_2O 约 70% ~ 90% 来自于生物源, 其中

收稿日期: 2005-03-09; 修订日期: 2005-05-30

基金项目: 中国科学院知识创新工程重大项目 (KZCX1-SW-01); 国家自然科学基金项目 (40331014, 40175030)

作者简介: 江长胜 (1974~), 男, 博士研究生, 主要研究方向为大气化学和生态学, E-mail: Jiangcs@126.com

* 通讯联系人

相当一部分来自于农田生态系统^[2]. 稻田土壤作为大气中 CH_4 和 N_2O 的重要来源受到国内外的普遍关注^[3-9]. 有文献报道, 我国西南地区冬灌田 CH_4 排放通量在全国乃至世界上已有的稻田 CH_4 排放速率观测数据中是最高的^[10-14]. 冬灌田是水稻长期种植过程中形成的一种特殊稻田, 这种稻田在中稻收割后继续保持淹水并空闲等到来年再栽种水稻, 大量分布于我国西南和南方山区, 在全国该类稻田面积达 $2.7 \sim 4.0 \times 10^6 \text{ hm}^2$ ^[15]. 已有研究表明, 只有我国稻田面积 12% 的冬灌田排放的 CH_4 占全国稻田 CH_4 排放总量的 45%^[16]. 这种冬灌田中 CH_4 有如此高的排放速率, 那另一种主要温室气体 N_2O 的排放特征如何? 改变耕作制度后, 这种稻田 CH_4 排放有所减少^[14], 但 N_2O 的排放如何? 这 2 种温室气体的综合温室效应又如何? 笔者以我国川中丘陵区中科院盐亭农业生态站为对象进行了相关实验研究.

1 材料与方法

1.1 实验处理

实验点位于中国科学院盐亭紫色土农业生态实验站($\text{E}105^\circ 27'$, $\text{N}31^\circ 16'$), 海拔 420m, 土壤以钙质紫色土为主, 中亚热带季风气候, 年均气温 17.3°C , 多年平均降雨量 826mm. 土壤为侏罗纪蓬莱镇组(J_3P) 紫色砂页岩风化物发育的棕紫泥, 耕作层土壤的基本理化特征为: 机械组成: 粘粒($< 0.002\text{mm}$) 占 8.4%, 粉粒($0.002 \sim 0.05\text{mm}$) 69.3%, 砂粒($> 0.05\text{mm}$) 22.3%; pH ($1: 2.5$) 值 8.13; 有机质 $21.03 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, TN $1.22 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, TP $0.54 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, TK $17.4 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$; 有效 N $89.22 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 有效 P $7.66 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 有效 K $72.96 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$.

本实验是在紫色水稻土肥力演变长期定位实验田上进行的. 选用上下相邻的 2 块稻田, 面积都大于 0.13 hm^2 , 实验时将上面 1 块田人为的从中间对开分为 2 块田. 共作 3 种处理: 将下面 1 块田作为冬灌田, 一年只种一季中稻, 冬季灌水休闲(PF); 上面 2 块田分别固定种植水稻-油菜轮作(RR) 和 水稻-小麦轮作(RW). 各处理按当地习惯栽入水稻, 水稻品种为 II 优 162 号. 2002-05-08 移栽, 09-14 收割; 2003-05-09 移栽, 09-07 收割; 2004-05-14 栽秧, 09-21 收割. 移栽前均施底肥量为: 碳酸氢铵(N) $133 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 普通过磷酸钙(P_2O_5) $90 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 氯化钾(K_2O) $142 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 3 种肥料混合后 1 次性均匀

撒播, 以后不追肥(当地习惯). 小麦为撒播, 品种为雅农 117, 播种量为 $188 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$. 油菜为行种, 行距为 40cm. 小麦和油菜播种前均施底肥量为: 尿素(N) $100 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 普通过磷酸钙(P_2O_5) $72 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 氯化钾(K_2O) $45 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 3 种肥料混合后均匀撒播, 小麦在拔节期, 油菜在蕾薹期各追肥 1 次, 追肥量为尿素(N) $50 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$. 实验分别在各处理田间按“品”型埋入 3 个 $50\text{cm} \times 50\text{cm} \times 20\text{cm}$ 的不锈钢箱底座, 2 底座间的距离在 2.0m 以上, 底座上有深、宽各 30cm 的凹槽, 测定时注水密封, 埋入地下深度以凹槽底端贴在地表上为宜.

1.2 气样采集与分析

实验用的采样箱由顶箱、加长箱组成. 箱壁用 1mm 厚 304K 薄不锈钢板制成, 加长箱和顶箱容积相同, 几何尺寸为 $50\text{cm} \times 50\text{cm} \times 50\text{cm}$, 根据作物生长需要可适时安装加长箱. 采样时底座或加长箱水槽内加水密封, 顶箱和加长箱外包有保温层, 采样期间箱内温度变化幅度控制在 3°C 以下. 顶箱上端装有 2 个空气搅拌风扇和气体样品采集口. 扣箱后立刻用 60mL 注射器采集第 1 次样品, 每隔 10min 取样 1 次, 罩箱时间为 30min, 共取 4 次样品. 采样后立即将样品带回该站实验室分析.

样品采用文献[17]所描述的气相色谱方法进行分析. 标准气体由国家标准物质研究中心提供(浓度分别为: CH_4 $10.3 \times 10^{-6} \text{ mol} \cdot \text{mol}^{-1}$ 和 N_2O $360 \times 10^{-9} \text{ mol} \cdot \text{mol}^{-1}$). 全年测定结果表明, 30min 内密闭观测箱内每次观测的 CH_4 排放浓度均呈显著线性积累($p < 0.05$), 但仅 89% 的 N_2O 浓度呈显著线性积累($p < 0.05$). 本研究中视呈线性累积的浓度计算的排放通量为有效排放通量观测值, 其它值视为无效数据, 无效数据不参与计算季节或年排放总量或平均排放通量.

1.3 采样频率和相关量测定

在各观测点每周 1 和周 4 分别进行 1 次观测, 采样时间为当地时间 09:00~11:00. 为了尽量减少扰动, 采样时通过插入采样箱内的 F46 采气管线站在离采样箱 2m 外, 距水面 40cm 高的木桥上. 采样时, 同时测定采样开始和结束时的气温、地表温度、箱内温度和 5cm 深土壤温度, 温度由 JM624 型便携式测温计测定(天津立文电子有限公司生产). 根据 4 个气样浓度随采样时间的变化率计算排放通量^[18,19]. 通过线性内插累加求得全年 CH_4 和 N_2O 的季节排放总量.

2 结果与讨论

2.1 冬灌田 CH₄ 和 N₂O 的排放通量

表 1 是 2002-11-01~ 2004-11-02 冬灌田 CH₄ 和 N₂O 排放通量的测定结果. 此类稻田常年淹水, 1a 只种 1 季中稻, 水稻收获后稻草移走, 冬季休闲期灌水. 由表 1 可知, 2003 年和 2004 年水稻生长期 CH₄ 排放通量分别为 (20.95 ± 2.58) 和 (21.93 ± 2.66) mg • (m² • h)⁻¹, 平均为 (21.44 ± 1.77) mg • (m² • h)⁻¹. 大大低于陈德章等^[11] 在四川乐山的观测值 53.72~ 79.12 mg • (m² • h)⁻¹, 也低于 Khalil 等^[12, 13] 和魏朝富等^[14] 分别在乐山和重庆的观测值 30.0 和 33.9 mg • (m² • h)⁻¹, 这可能是因为本实验稻田没有施加有机肥, 而报道的同类稻田都不同程度地施加了有机肥或稻草. 实际上, 现在川中丘陵区稻田中已很少施加有机肥了. 如果现在仍用以前的通量数据估算我国西南地区稻田 CH₄ 的排放量, 笔者认为是不合适的. 不过, 参照 Khalil^[13] 和王明星^[23] 著的《中国稻田 CH₄ 排放》所列出的中国各地稻田 CH₄ 排放通量可知, 本研究测定的 (21.44 ± 1.77) mg • (m² • h)⁻¹ 的稻田 CH₄ 排放通量在仅施加化肥的稻田中仍属于较高的一类. 另外, 冬灌田不仅在水稻生长期排放 CH₄, 而且在长达 230~ 250d 的休闲期内仍排放 CH₄. 2002-11-01~ 2004-11-02 期间, 休闲期内 CH₄ 排放通量平均为 (3.77 ± 0.99)

mg • (m² • h)⁻¹, 大大低于魏朝富等^[14] 报道的 13.31 mg • (m² • h)⁻¹. 2003 年和 2004 年休闲期 CH₄ 排放量分别占全年总 CH₄ 排放量的 13.4% 和 32.9%, 说明稻田 CH₄ 排放主要集中在水稻生长季. 冬季 CH₄ 排放通量低与冬季气温低、产 CH₄ 所需要的底物少、淹水深和无植株排放通道等有关^[23].

从表 1 还可以看出, 2003 年和 2004 年全年 N₂O 的平均排放通量分别为 (0.038 ± 0.010) 和 (0.064 ± 0.009) mg • (m² • h)⁻¹, 2a 的平均为 (0.051 ± 0.008) mg • (m² • h)⁻¹. 水稻生长期和冬闲期 N₂O 通量, 用 2a 均值计算分别为 (0.126 ± 0.023) 和 (0.011 ± 0.007) mg • (m² • h)⁻¹, 前者是后者的 11.3 倍. 其可能原因: ①水稻生长期间施基肥和追肥引起的; ②温度差异, 水稻生长期间地表均温为 25.1℃, 而冬闲期地表均温为 13.2℃; ③植株的作用, 一方面植株能作为通道排放 N₂O^[8, 27], 另一方面是植株本身释放 N₂O^[4], 再就是植株的参与能增加土壤中 N₂O 的产生和释放. Mosier 等^[28] 在田间及温室条件下通过直接测定 N₂+ N₂O 的释放也发现, 水稻植株可以促进 N₂+ N₂O 从土壤向大气释放, 植稻土壤含 N 气体在土壤中的滞留远低于未植稻土壤. 就排放总量而言, 2a 水稻生长期 N₂O 排放量均值为 (3.830 ± 0.741) kg • hm⁻², 占全年总 N₂O 排放量的 85.6%, 这说明冬灌田 N₂O 排放量主要集中在水稻生长季.

表 1 不同时期冬灌田 CH₄ 和 N₂O 排放通量

Table 1 CH₄ and N₂O emissions from permanently flooded paddy field during different periods

日期/年-月-日	时间/d	采样次数(n)	气体	排放通量/ mg • (m ² • h) ⁻¹		排放量/ kg • hm ⁻²
				变幅	平均值	
2002-11-01~ 2003-10-31 (1a)	365	94	CH ₄	0.04~ 54.37	8.02 ± 1.05 ¹⁾	702.67 ± 92.34
			N ₂ O	- 0.107~ 0.510	0.038 ± 0.010	3.354 ± 0.908
	121	41	CH ₄	0.10~ 54.37	20.95 ± 2.58	608.26 ± 74.93
			N ₂ O	- 0.107~ 0.510	0.090 ± 0.011	2.615 ± 0.328
休闲期 (11-01~ 05-08, 09-07~ 10-31)	244	53	CH ₄	0.04~ 27.01	1.61 ± 0.37	94.41 ± 21.87
			N ₂ O	- 0.091~ 0.125	0.013 ± 0.013	0.740 ± 0.752
2003-10-31~ 2004-11-02 (1a)	365	97	CH ₄	0.49~ 47.18	11.61 ± 0.86	1 019.90 ± 75.93
			N ₂ O	- 0.203~ 0.380	0.064 ± 0.009	5.592 ± 0.789
	130	45	CH ₄	0.79~ 47.17	21.93 ± 2.66	684.35 ± 83.01
			N ₂ O	- 0.043~ 0.380	0.162 ± 0.034	5.046 ± 1.075
休闲期 (11-01~ 05-13, 09-22~ 11-02)	235	52	CH ₄	0.49~ 30.26	5.92 ± 0.36	335.55 ± 20.12
			N ₂ O	- 0.203~ 0.150	0.010 ± 0.007	0.546 ± 0.395

1) 平均值 ± 标准误差, 下同

2.2 耕作制度对冬灌田 CH₄ 和 N₂O 排放的影响

2.2.1 CH₄ 排放

图 1 为 2a 来 3 种耕作制度下处理冬灌田 CH₄ 排放通量的变化趋势图. 从总体上看, 3 种处理下稻

田的 CH₄ 排放都有较大的季节变化. 在旱作和冬闲期稻田 CH₄ 排放速率明显较低, 移栽水稻后, CH₄ 排放速率不断增大, 分别在水稻分蘖盛期、拔节期和抽穗期出现明显的排放峰值, 其中抽穗期 CH₄ 排放

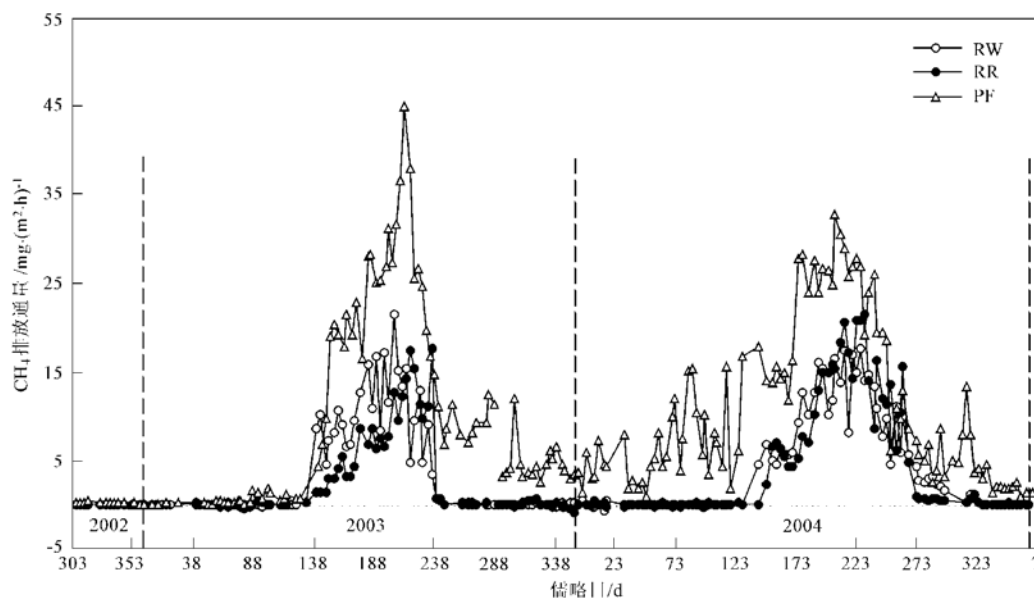


图 1 不同耕作制稻田 CH_4 排放通量 (2002-11-01~2004-12-31, 四川盐亭, $n=3$)

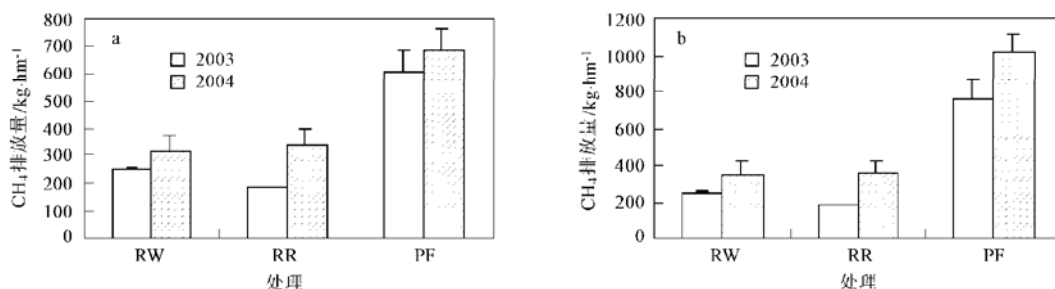
Fig. 1 Seasonal variations in CH_4 fluxes from rice paddy fields under the three tillage-cropping systems between 2002 and 2005

峰值最大, 随后 CH_4 排放速率不断降低。

单因素方差分析表明, 3 种处理下稻田 CH_4 排放速率存在显著差异 ($p < 0.05$)。在水稻生长期, PF、RW 和 RR 的 CH_4 平均排放通量分别为: 22.26 、 9.74 和 $9.04 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$; 全年度, 3 种处理 CH_4 排放通量年均值分别为: 10.13 、 3.43 和 $3.11 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$ 。说明冬灌田采用水旱轮作处理后, 无论在水稻生长期还是在全年 CH_4 排放速率均有大幅度的降低。

图 2a 为不同耕作制稻田水稻生长期 CH_4 排放量连续 2a 的测定结果。与 PF 处理比较, 采用 RW 和 RR 处理水稻生长期 CH_4 排放量明显降低。以处理 PF 平均排放量为 100% 计, 2a 平均结果, 处理 RW 降为 43.8%, 处理 RR 降为 40.6%。这是因为水旱轮作水稻收获后排水种植小麦和油菜等旱地作

物, 土壤暴露在空气中, 土壤氧化还原电位提高, 一些还原性物质通过各种氧化过程而被转化为氧化态, 如铵态氮通过硝化过程而转变为硝态氮, 低价 Mn^{2+} 和 Fe^{2+} 被氧化为高价 Mn 和 Fe , 二价硫被氧化成硫酸根, 土壤连续干燥的时间越长, 这些还原物质的氧化就越彻底, 第二年淹水还原这些物质所需的时间也就越长, 土壤 Eh 下降到适合产甲烷菌活动范围的时间越长, 从而延缓了稻田 CH_4 的排放; 相反, 长时间淹水土壤, 土壤的氧化还原状况已经适合产甲烷菌生命活动的需要, 只要有合适的温度、有机基质和其它营养物质的供应即可产生 CH_4 [31]。此外, 常年冬灌田排水困难, 在水稻生长期间一直淹水, 而水旱轮作处理水稻生长前期实行淹灌, 后期实行间歇灌溉, 这种水分管理能减少 CH_4 排放, 这与国内外相关研究的结论是一致的 [20~23]。



a: 水稻生长期 CH_4 排放量; b: 全年度 CH_4 排放量 (从 day 1 到 day 365 或 366)

图 2 2003 和 2004 年不同耕作制稻田 CH_4 平均排放量 (线段表示重复标准误差, $n=3$)

Fig. 2 Average CH_4 emission and standard error in 2003 and 2004 from rice paddy fields under the three tillage-cropping systems

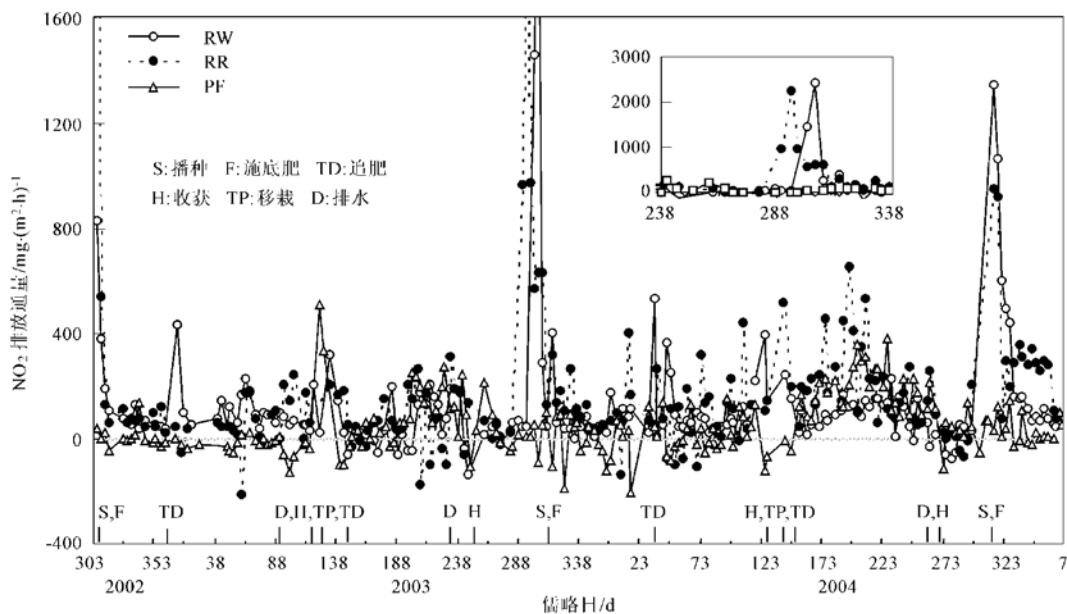
图 2b 为不同耕作制度下冬灌田全年度 CH_4 排放量连续 2a 的测定结果. 由图可以看出, 2003 年和 2004 年全年度稻田 CH_4 排放量均为: $\text{PF} \gg \text{RW} > \text{RR}$, 2a 平均 CH_4 排放量 RW 和 RR 处理分别只有 PF 处理的 33.9% 和 30.7%. 对比图 2a 得知, 冬灌田 PF 在冬季休闲期依然排放 CH_4 , 2003 年和 2004 年排放量分别为 $153.14 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 和 $331.76 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 而采用 RW 和 RR 处理, 相同期间 CH_4 排放微弱甚至表现为对 CH_4 的吸收, 这对冬灌田 CH_4 减排具有重要作用.

2.2.2 N_2O 排放

图 3 为冬灌田采用 3 种耕作制度处理后 N_2O 排放通量 2a 来的变化趋势图. 从总体上看, N_2O 排放特征与 CH_4 排放特征完全不同, N_2O 排放通量较 CH_4 小得多, 但不断也有较大通量的 N_2O 脉冲排放, N_2O 排放的通量范围为 $-0.268 \sim 2.412 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$. 由图 3 可以看出, 稻田在施基肥、追肥、后期排水等农作措施后的随后几天里, 分别都检

测到 N_2O 明显的脉冲排放, 这是因为稻田 N_2O 排放通量受 N 肥水平、土壤湿度和土壤温度等的影响^[24~26], 而在除此外的持续淹水期间 N_2O 排放通量非常微弱.

用 2a 的数据, 分别对 PF、RW 和 RR 的 N_2O 排放通量作相关分析, 发现 RW 和 RR 极显著相关 ($p < 0.001$, $n = 189$). 而 RW 和 RR 分别与 PF 无明显相关关系 (p 值分别为 0.979 和 0.698), 但如果仅用水稻生长期数据对 PF、RW 和 RR 作相关分析, 发现 PF 与 RW 和 RR 也分别呈正相关关系 ($p = 0.038$ 和 0.011 , $n = 65$). 这表明采用同种耕作制度和稻田管理措施, 稻田 N_2O 排放的模式相同. 就水旱轮作而言, 由图 3 可见, 在播种小麦或油菜后, 发现都有一个全年最强且集中的 N_2O 排放峰值, 通过计算发现播种 20d 后的 N_2O 排放量 RW 和 RR 分别占全年的 22.1% 和 24.8%, 这可能是因为小麦或油菜苗期主要靠消耗自身种子的养分来供应生长, 对土壤中 N 肥的吸收很少, 土壤中施入的基



S: 播种 F: 施底肥 TD: 追肥 H: 收获 TP: 移栽 D: 排水
图 3 不同耕作制稻田 N_2O 排放通量 (2002-11-01~2004-12-31, 四川盐亭, $n = 3$)

Fig. 3 Seasonal variations in N_2O fluxes from rice paddy fields under the three tillage cropping systems between 2002 and 2005

肥 N 以 NH_3 或硝化产生 N_2O 损失^[29].

表 2 列出了川中丘陵区冬灌田采用不同耕作制度后稻田全年的 N_2O 排放量. 由表 2 可以看出, 采用水旱轮作耕作制度后, 稻田 N_2O 排放大量增加, 全年 RW 和 RR 的排放量分别是 PF 的 3.7 倍和 4.5 倍. 在水稻生长期, 采用水旱轮作措施后, N_2O

排放量有微弱增加, 表 2 中 RW 排放量相对 RR 少的原因可能是由于 RW 处理后期排水不畅造成的. 在非水稻生长期, 旱地 (种植小麦和油菜) N_2O 排放显著比冬季灌水的冬闲田高, 在此期间 N_2O 排放量 RW 和 RR 处理分别是 PF 处理的 19.1 和 15.6 倍. 虽然旱作期间持续时间长且气温较低, 但 RW 和

RR 的平均排放速率仍较水稻生长期间分别增大了 79.7% 和 59.8%, 而 PF 在冬闲期排放速率却只有水稻生长期间的 11.3%. 由此可见, 冬灌田在采用

水旱轮作耕作制度后, 虽然少量减少了 CH₄ 的排放, 但却大大增加了 N₂O 的排放量. 但就 N₂O 排放速率而言, 排放速率几乎都比同类稻田 CH₄ 排放速

表 2 不同耕作制稻田 N₂O 排放通量

Table 2 Fluxes of nitrous oxide emission from rice paddy fields under the three tillage cropping systems

日期/年-月-日	处理	时间/d	采样次数(n)	平均排放通量/ $\mu\text{g}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{h})^{-1}$	排放量/ $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$
2003-05-09~ 2004-05-08 (1a)	PF	365	97	29.01±3.81	3.10±0.68
	RW	365	98	126.45±10.49	11.48±0.92
	RR	365	98	159.05±2.87	13.93±0.25
水稻生长期 (05-09~ 09-05)	PF	124	36	85.38±11.23	2.54±0.33
	RW	119	37	82.26±15.35	2.75±0.44
	RR	119	37	113.34±15.24	3.24±0.44
非水稻生长期 (2003-09-06~ 2004-05-08)	PF	241	61	9.69±7.30	0.56±0.42
	RW	246	61	147.83±8.32	8.73±0.49
	RR	246	61	181.16±11.41	10.69±0.67

率小 2 个数量级.

2.3 不同耕作制度冬灌田排放 CH₄ 和 N₂O 的全球增温潜势(GWP)

根据 IPCC^[30] 报告提供的数据, 在 20a 时间尺度上, 单位质量 CH₄ 和 N₂O 的 GWP 分别为 CO₂ 的 62 和 275 倍; 100a 时间尺度上, 分别对应为 CO₂ 的 23 和 296 倍; 500a 时间尺度上, 分别为 CO₂ 的 7 和 156 倍. 表 3 为 2a 来不同耕作制度下冬灌田所排放的 CH₄ 和 N₂O 换算为等 GWP 的平均 CO₂ 量. 由表

3 可以看出, 无论是短时间尺度还是长时间尺度, 冬灌田采用 3 种耕作制度全年所排放的 CH₄ 和 N₂O 所产生的综合 GWP 都为 PF >RR ≈ RW, 在 20a、100a 和 500a 时间尺度上, PF 分别约都是 RW 和 RR 的 2.6 2.1 和 1.7 倍. 说明冬灌田改为水旱轮作制度后能大大降低 CH₄ 和 N₂O 所产生的综合 GWP. 对于不同的水旱轮作制度, RW 和 RR 二者所排放的 CH₄ 和 N₂O 所产生的综合 GWP 效应几乎相等, 不过随着时间的延长, RR 排放的 CH₄ 和 N₂O

表 3 不同耕作制稻田排放的 CH₄ 和 N₂O 的 GWP (CO₂ 量)/ $\text{mg}\cdot\text{a}^{-1}$

Table 3 Corresponding CO₂ equivalents of the CH₄ and N₂O emissions from rice paddy fields under the three tillage cropping systems

时间尺度/a	PF				RW				RR			
	CH ₄	N ₂ O	CH ₄ + N ₂ O	$\frac{\text{N}_2\text{O}}{\text{N}_2\text{O}+\text{CH}_4}$	CH ₄	N ₂ O	CH ₄ + N ₂ O	$\frac{\text{N}_2\text{O}}{\text{N}_2\text{O}+\text{CH}_4}$	CH ₄	N ₂ O	CH ₄ + N ₂ O	$\frac{\text{N}_2\text{O}}{\text{N}_2\text{O}+\text{CH}_4}$
20	55.10	1.34	56.44	0.02	18.68	3.40	22.08	0.15	16.91	4.04	20.94	0.19
100	20.44	1.44	21.89	0.07	6.93	3.66	10.59	0.35	6.27	4.35	10.62	0.41
500	6.22	0.76	6.98	0.11	2.11	1.93	4.04	0.48	1.91	2.29	4.20	0.55

所产生的综合 GWP 有比 RW 增大的趋势.

从表 3 中 N₂O 与 CH₄+ N₂O 的比值来看, 冬灌田 PF 中 N₂O 所引起的 GWP 相对 CH₄ 是很低的, 500a 尺度考虑也不过是 CH₄+ N₂O 产生的 GWP 的 11%. 对于水旱轮作来说, 短时间尺度(例如 20a), RW 和 RR 排放 N₂O 所引起的 GWP 也分别不过 CH₄+ N₂O 产生的 GWP 的 15% 和 19%, 可是随着时间的延长, 其对环境的影响不断加大, 最终超过 CH₄ 所引起的 GWP. 总的来说, 冬灌田在川中丘陵区传统的一年只种一季中稻冬季灌水改为稻-麦或稻-油轮作制度后, 不仅能增加稻田的利用效率, 增加农民收入, 而且对保护环境, 降低温室气体的排放所引起全球变暖的影响具有重要作用.

3 结论

(1) 川中丘陵区冬灌田稻田 CH₄ 排放速率虽然很高, 但所测得通量结果年均 CH₄ 排放通量尤其是休闲期排放通量远低于以前文献报道的在西南其它地方测定值. 冬灌田全年 CH₄ 排放量以水稻生长期 CH₄ 排放量为主, 非水稻生长期 CH₄ 排放量仅占全年总排放量的 23.2%. 冬灌田 N₂O 排放量非常低, 且主要集中在水稻生长季.

(2) 川中丘陵区冬灌田在采用水旱轮作制后, CH₄ 排放量大大降低, 稻-麦轮作和稻-油轮作全年 CH₄ 排放量分别为常年冬灌田 CH₄ 排放量的 43.8% 和 40.6%. 但在冬灌田采用水旱轮作制后,

N_2O 排放量显著增大, 全年稻-麦轮作和稻-油轮作 N_2O 排放量分别是常年冬灌田 N_2O 排放量的 3.7 倍和 4.5 倍。

(3) 综合考虑不同耕作制度冬灌田排放 CH_4 和 N_2O 的全球增温潜势(GWP), 结果表明, 无论是短时间尺度还是长时间尺度, 冬灌田采用 3 种耕作制度全年所排放的 CH_4 和 N_2O 所产生的综合 GWP 都为 $\text{PF} \gg \text{RR} \approx \text{RR}$, 在 20a、100a 和 500a 时间尺度上, PF 分别约是 RW 和 RR 的 2.6、2.1 和 1.7 倍。冬灌田改为水旱轮作制度后能大大降低 CH_4 和 N_2O 所产生的综合 GWP。

致谢: 感谢中国科学院大气物理所刘广仁高级工程师、张文研究员、郝庆菊、徐仲均、孙扬和王迎红等博士, 中国科学院盐亭紫色土农业生态站罗贵生副站长和韩广轩、张中杰、马秀梅及王艳强等硕士对本实验的大力支持和帮助。

参考文献:

- [1] Mosier A R, Delgado J A, Keller M. Methane and nitrous oxide fluxes in an acid oxisol in western Puerto Rico: effects of tillage, liming and fertilization[J]. *Soil Biol. Biochem.*, 1998, **30**(14): 2087~2098.
- [2] Iserman K. Agriculture's share in the emission of trace gases affecting the climate and some cause oriented proposal for reducing this share[J]. *Environ. Pollut.*, 1994, **83**: 95~111.
- [3] 蔡祖聪, 谢德体, 徐华, 等. 冬灌田影响水稻生长期甲烷排放量的因素分析[J]. *应用生态学报*, 2003, **14**(5): 705~709.
- [4] Chen G X, Huang B, Yu K W, *et al.* Nitrous oxide and methane emissions from soil-plant systems[J]. *Nutr. Cycl. Agroecosyst.*, 1997, **49**: 41~45.
- [5] Ghosh S, Majumdar D, Jain M C. Methane and nitrous oxide emissions from an irrigated rice of North India[J]. *Chemosphere*, 2003, **51**: 181~192.
- [6] 侯爱新, 陈冠雄, 吴杰. 稻田 CH_4 和 N_2O 排放关系及其微生物学机理和一些影响因子[J]. *应用生态学报*, 1997, **8**(3): 270~274.
- [7] 熊正琴, 邢光熹, 施书莲, 等. 轮作制度对水稻生长季节稻田氧化亚氮排放的影响[J]. *应用生态学报*, 2003, **14**(10): 1761~1764.
- [8] 徐慧, 张秀君, 韩士杰, 等. 自然状态下树木排放 N_2O 的研究[J]. *环境科学*, 2001, **22**(5): 7~11.
- [9] Yagi K, Tsuruta H, Minamik K. The Effect of water management on methane emission from a Japanese rice paddy field: Automate methane monitoring[J]. *Glob. Biogeochem. Cycl.*, 1996, **10**(2): 255~267.
- [10] Cai Z C, Tsuruta H and Gao M, *et al.* Options for mitigating methane emission from a permanently flooded paddy field[J]. *Glob. Change Biol.*, 2003, **9**: 37~45.
- [11] 陈德章, 王明星, 上官行健, 等. 我国西南地区的稻田甲烷排放[J]. *地球科学进展*, 1993, **8**(5): 47~54.
- [12] Khalil M A K, Rasmussen R A, Shearer M J, *et al.* Factors affecting methane emissions from paddy fields[J]. *J. Geophys. Res.*, 1998, **103**(D19): 25219~25231.
- [13] Khalil M A K, Rasmussen R A, Shearer M J, *et al.* Measurements of methane emissions from paddy fields in China[J]. *J. Geophys. Res.*, 1998, **103**(D19): 25181~25210.
- [14] 魏朝富, 高明, 黄勤, 等. 耕作制度对西南地区甲烷排放规律的研究[J]. *土壤学报*, 2000, **37**(2): 157~165.
- [15] 李庆远著. 中国水稻土[M]. 北京: 科学出版社, 1992. 1~50.
- [16] 蔡祖聪. 中国稻田甲烷排放研究进展[J]. *土壤*, 1999, **3**: 266~269.
- [17] Wang Y S, Wang Y H. Quick measurement of CH_4 , CO_2 and N_2O emissions from a short-plant ecosystem[J]. *Adv. Atmos. Sci.*, 2003, **20**: 842~844.
- [18] 黄耀, 蒋静燕, 宗良纲, 等. 种植密度和降水对冬小麦田 N_2O 排放的影响[J]. *环境科学*, 2001, **22**(6): 20~23.
- [19] 郑循华, 徐仲均, 王跃思, 等. 开放式空气 CO_2 浓度增高影响稻田-大气 CO_2 净交换的静态暗箱法观测研究[J]. *应用生态学报*, 2002, **13**(10): 1240~1244.
- [20] Miyata A, Leuning R, Denmead O T, *et al.* Carbon dioxide and methane fluxes from an intermittently flooded paddy field[J]. *Agric. For. Meteorol.*, 2000, **102**: 287~303.
- [21] Fitzgerald G J, Scow K M, Hill J E. Fallow season straw and water management effects on methane emissions in California rice[J]. *Glob. Biogeochem. Cycl.*, 2000, **14**(3): 767~776.
- [22] Yagi K, Tsuruta K, Minami K. Possible options for mitigating methane emission from rice cultivation[J]. *Nutr. Cycl. Agroecosyst.*, 1997, **49**: 213~220.
- [23] 王明星著. 中国稻田甲烷排放[M]. 北京: 科学出版社, 2001. 142~173.
- [24] Davidson E A, Matson P A, Brooks P D. Nitrous oxide emission controls and inorganic nitrogen dynamics in fertilized tropical agricultural soils[J]. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 1996, **60**: 1145~1152.
- [25] 李楠, 陈冠雄. 植物释放 N_2O 速率及施肥的影响[J]. *应用生态学报*, 1993, **4**(3): 295~298.
- [26] 郑循华, 王明星, 王跃思, 等. 稻麦轮作生态系统中土壤湿度对 N_2O 产生与排放的影响[J]. *应用生态学报*, 1996, **7**(3): 273~279.
- [27] Lensi R, Chalamet A. Absorption of nitrous oxide by shoots of maize[J]. *Plant and Soil*, 1981, **59**: 91~98.
- [28] Mosier A R, Mohanty S K, Bhadrachalam A, *et al.* Evolution of dinitrogen and nitrous oxide from the soil to the atmosphere through rice plants[J]. *Biol. Fertil. Soils*, 1990, **9**: 61~67.
- [29] Kaiser E A, Kohrs K, Kucke M, Schnug E, *et al.* Nitrous oxide release from arable soil: Importance of N-fertilization, crops and temporal variation[J]. *Soil Biol. Biochem.*, 1998, **30**(12): 1553~1563.
- [30] Boucher O, Haigh J, Hauglustaine D, *et al.* Radiative forcing of climate [A]. In: *Climate Change, IPCC Scientific Assessment 2001* [C]. Cambridge: Cambridge University Press., 2001. 388~389.
- [31] 蔡祖聪, 徐华, 卢维盛, 等. 冬季水分管理方式对稻田 CH_4 排放量的影响[J]. *应用生态学报*, 1998, **9**(2): 171~175.