

DOI: 10.13718/j.cnki.xdzk.2017.05.004

长期不同施肥方式对紫色土稻-麦 轮作麦季 N_2O 排放的影响^①

王 法^{1,2}, 张旦麒³, 木志坚^{1,2}, 倪九派^{1,2}, 王 强^{1,2},
石孝均^{1,2}, 郭 涛^{1,2}, 张跃强^{1,2}, 雷玉春¹

1. 西南大学 资源环境学院, 重庆 400716;
2. 教育部三峡库区生态环境重点实验室/重庆市三峡库区农业面源污染控制工程技术研究中心, 重庆 400716;
3. 重庆市自来水有限公司职工学校, 重庆 400013

摘要: 依据位于重庆北碚始于 1991 年的国家紫色土肥力与肥效监测基地上长期不同施肥定位试验, 选取其中不施肥+秸秆不还田、不施肥+秸秆还田、施 PK 肥+秸秆不还田、施 N 肥+秸秆不还田、NPK 正常施肥量+秸秆不还田、NPK 正常施肥量+秸秆还田和 1.5 倍 NPK 施肥量+秸秆还田等 7 个处理, 采用静态箱法对土壤 N_2O 排放开展了连续 2a 小麦生长期的田间原位观测. 结果表明: 两麦季 4 个施氮处理 N_2O 排放波动幅度均较大, 且基肥和追肥后出现较强排放, 3 个未施氮处理 N_2O 排放波动较平缓, 并均明显低于施氮处理. N_2O 排放第二季较第一季要弱, 年际差异较大, 其原因主要是土壤 WFPS 第二季要明显低于第一季, 而同一麦季不同处理下 N_2O 排放差异主要是由土壤 NO_3^- -N 质量分数不同造成的. 秸秆还田增加了 N_2O 排放, 单施氮肥对 N_2O 增排效果相比之下则更明显, 而秸秆还田与化学氮肥协同作用同样促进了 N_2O 生成与排放. 平衡施肥较偏施氮肥 N_2O 排放量低, 实际生产中考虑 N_2O 减排应尽量选择平衡施肥. 两麦季化肥或秸秆 N 来源下农田 N_2O 排放系数均值分别为 0.85%, 0.61%, 综合考虑外源输入 N 时均值为 0.69%, 均低于 IPCC 推荐值(1%), 可见估算 N_2O 排放量时针对不同 N 来源农田应选用相对应 N 素 N_2O 排放系数.

关键词: 紫色土; 麦季; N_2O ; 长期施肥; 秸秆还田; 排放系数

中图分类号: S143

文献标志码: A

文章编号: 1673-9868(2017)05-0022-09

由于人类活动引起的温室气体大量排放导致了气候变化和全球变暖等一系列重大的全球性环境问题, 是当今备受关注的全球变化研究主要课题之一, CO_2 , N_2O 和 CH_4 是大气中 3 种最主要的温室气体, 对全球增温的贡献率达到了 80%, 其中 N_2O 全球增温潜势(GWP)最大, 且能破坏臭氧层增强紫外辐射从而危害人类健康^[1-2]. 农业土壤作为 N_2O 最主要的人为排放源, 受农业管理措施影响强烈, 不同地区及农业生态系统由于 N_2O 排放的时空变异性, 排放系数差异较大. IPCC(2006)^[3]对确定污染排放的两大关键因子: 排放因子及活动水平数据要求越来越严, 编制排放清单时尤其要求应尽量使用当地排放系数, 因此长期定位监测不同区域较为典型的农业生态系统尤为必要. 我国紫色土(主要为耕地)集中分布在川渝盆地地区, 面积约为 2 198.8 万 hm^2 , 约占全国的 51%^[4], 对紫色土 N_2O 排放进行连续的田间原位监测对建立该区域乃至中国温室气体排放清单都具有重要意义. 目前对于紫色土 N_2O 排放已经有了一定研究, 但已有研究主

① 收稿日期: 2015-03-11

基金项目: 国家自然科学基金项目(41371211, 31471944); “十二五”农村领域国家科技计划课题项目(2012BAD15BO4-3).

作者简介: 王 法(1991-), 男, 安徽合肥人, 博士研究生, 主要从事土壤温室气体排放与肥料研究.

通信作者: 木志坚, 副教授, 硕士研究生导师.

要侧重于不同耕作系统和方式^[5-6]、氮肥类型^[7-8]等对 N₂O 排放的影响, 秸秆还田作为重要的农业生产方式目前被大力推行, 但其对 N₂O 排放的影响却鲜有报道, 关于不同施肥方式下土壤 N₂O 的排放研究也比较匮乏. 本研究在位于重庆北碚 18 a 长期不同施肥处理的国家紫色土肥力与肥效监测基地内, 对不同施肥、秸秆还田方式下紫色土 N₂O 排放进行了连续 2a 稻麦轮作麦季的原位监测, 探讨水分、肥料施用以及秸秆管理等对紫色土 N₂O 排放的影响, 并进一步估算与化肥施用和秸秆还田相关的 N₂O 排放系数, 以期对紫色土 N₂O 减排措施及川渝地区温室气体排放清单编制提供参考和依据.

1 材料与方 法

1.1 试验地概况与试验设计

试验地(106°26'E, 30°26'N)位于重庆市北碚区国家紫色土肥力与肥效长期监测基地, 海拔 266.3 m, 属于亚热带季风气候, 年平均降水为 1 105 mm, 降雨主要分布在 5 月—9 月, 多年平均气温 18.4 °C, 日照 1 276.7 h. 该区域土壤为侏罗系沙溪庙组紫色泥、页岩发育的灰棕紫泥, 是重庆市以及紫色土中分布面积较为广泛的一个土属, 具有代表性.

试验地于 1991 年秋季开始长期肥力与肥效试验, 施行水稻—小麦轮作制度, 共设 12 个不同处理小区, 小区面积 120 m² (10 m×12 m), 各小区独立排灌且互不渗漏. 本试验选取其中 7 个处理小区: ① 不施肥+秸秆不还田(R₋); ② 不施肥+秸秆还田(R₊); ③ 施 PK 肥+秸秆不还田(PKR₋); ④ 施 N 肥+秸秆不还田(NR₋); ⑤ NPK 正常施肥量+秸秆不还田(FnR₋); ⑥ NPK 正常施肥量+秸秆还田(FnR₊); ⑦ 1.5 倍 NPK 施肥量+秸秆还田(FhR₊). 氮肥用尿素(N), 磷肥和钾肥分别用过磷酸钙(P₂O₅)和硫酸钾(K₂O), 施肥管理为当季生长季内施用一次基肥和一次追肥, N 肥的 60% 及全部 P, K 肥做基肥, N 肥的 40% 于 3~4 叶期做追肥, 本试验两个麦季施肥、追肥时间均为当年度的 11 月 1 日、12 月 15 日; 还田秸秆选用前茬作物水稻秆, 其中水分质量分数为 20%, 养分质量分数折合成 N, P(P₂O₅), K(K₂O)分别为 0.64%, 0.039% 和 1.78% (干基), 方式为将切成约 10 cm 的稻秆均匀撒在小区土壤表面并翻耕. 各处理施肥、秸秆还田量及土壤基本理化性质(试验前即 2008 年 11 月份测定)如表 1 所示.

表 1 试验处理施肥及秸秆还田量及各处理 0~20 cm 土壤基本理化性质

处理	秸秆还田量/ [t·(hm ² ·季) ⁻¹]	化肥用量/[kg·(hm ² ·季) ⁻¹]			有机碳/ (g·kg ⁻¹)	总氮/ (g·kg ⁻¹)	pH 值
		N	P ₂ O ₅	K ₂ O			
R ₋	0	0	0	0	11.79	2.11	7.16
R ₊	7.5	0	0	0	14.26	2.53	6.75
PKR ₋	0	0	60	60	14.50	1.59	6.13
NR ₋	0	135	0	0	14.42	1.97	5.86
FnR ₋	0	135	60	60	12.21	2.15	5.89
FnR ₊	7.5	135	60	60	17.41	2.71	6.47
FhR ₊	7.5	202	90	90	12.34	1.19	6.17

1.2 样品采集与分析

1.2.1 样品采集

于 2008—2010 年的麦季(11 月—次年 5 月), 每隔约 10 d 采样 1 次, 时间控制在上午 9:00~11:00. 将采样箱(内径 20 cm, 高 25 cm)底端插入植株行间土壤中至 3 cm 深处(以避免底部漏气)并放置约 10 min 使箱内外空气达到扩散平衡. 罩箱 20 min, 共采集 3 个气体样品, 按扣箱时间 0, 10, 20 min 的间隔用 60 mL 聚丙烯注射针筒抽取箱内气体, 来回抽动 3 次混匀气体后抽取 50 mL 保存于 Tedlar 气体采样袋后迅速带回实验室测定. 每个试验小区设置 3 个平行采样点作为重复, 并定期对采样点地表杂草进行清理. 每次采样同时每个试验小区 S 型多点采集表层(0~10 cm)土样, 除去其中的植物根系、残渣和石头后混合均匀放入样品袋中密封标记, 带回实验室后于 4 °C 冰箱冷藏储存进行测定分析.

1.2.2 测定方法

气体样品 N₂O 排放通量测定采用电子捕获检测器(ECD)(GC-2014, 岛津公司). 每次采样同时通过数

显温度计(JM624, 中国)测定采样点附近地下 5 cm 处土壤温度. 土壤重量含水量测定采用铝盒烘干法, 取土样于烘箱 105 °C 下烘干至恒质量, 求前后差值. 小麦收割后通过环刀法测定土壤容质量, 土壤充水空隙度(WFPS)按照公式 $WFPS(\%) = (\text{土壤质量含水量} \times \text{土壤容质量}) / (1 - \text{土壤容质量} / 2.65)$ 来计算. 土壤 $NO_3^- - N$ 质量分数采用去离子水浸提(土、水比 1 : 5), 25 °C 下振荡 30 min 后离心 10 min(4 000 r/min), 将上层清液真空抽滤过 0.22 μm 醋酸纤维滤膜后用离子色谱仪(DX-120 型, 戴安公司)进行测定.

土壤 N_2O 瞬时排放通量计算公式为:

$$F_{N_2O} = \rho \times (d_c/d_i) \times V/A \times 273/(273 + T) \quad (1)$$

式中: F 为 N_2O 瞬时排放通量 [$\mu\text{gN}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$]; ρ 为 N_2O 标准状态下的密度 ($1.26 \times 10^{-9} \mu\text{g}/\text{m}^3$); d_c/d_i 为 N_2O 排放速率; V 为静态箱有效空间体积 (m^3); A 为静态箱底面积 (m^2); T 为采样时静态箱内空气温度 ($^{\circ}\text{C}$).

土壤 N_2O 累积排放量计算公式为:

$$C_{i+1} = \sum (F_{i+1} + F_i) / 2 \times 24 \times D \quad (2)$$

式中: C_{i+1} 为第 i 次和第 $i+1$ 次采样期间的 N_2O 累积排放量 ($\text{kg N}/\text{hm}^2$); F_i 为第 i 次采样时 N_2O 瞬时排放通量; i 为采样次数; D 为两次采样间隔天数.

1.2.3 数据处理

数据统计分析采用 Excel 2003 和 SPSS 13.0, 用 Origin8.0 作图.

2 结果与分析

2.1 N_2O 排放通量的动态变化

如图 1, 第一季(2008—2009 年麦季), 4 个施氮处理(NR₋, FnR₋, FnR₊ 和 FhR₊) N_2O 排放幅度在 3.15~289.25 $\mu\text{g N}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 之间, 排放峰和排放最大值均主要出现在基肥后的 11 月中旬和追肥后的 12 月底, 1 月中旬后降低到 60 $\mu\text{g N}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 以下, 此后除 NR₋ 外, 均在不超过 60 $\mu\text{g N}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 的范围小幅波动. 小麦生长前半期(11 月—1 月) N_2O 平均排放通量约为后半期(2 月—4 月)的 2~6 倍. 3 个未施氮处理(R₋, R₊ 和 PKR₋) N_2O 排放通量则在 3.15~54.24 $\mu\text{g N}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 范围变化且波动较小, 并均明显低于施氮处理($p < 0.01$).

第二季(2009—2010 年麦季), 4 个施氮处理 N_2O 排放幅度在 4.90~127.36 $\mu\text{g N}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 之间, NR₋, FnR₊ 和 FhR₊ 处理随时间变化动态规律与第一季相似, 表现为在 11 月—12 月出现较大排放并出现最大值, 不同的是在 4 月上中旬仍出现了不同程度增长, 而观测期内 FnR₋ 处理 N_2O 排放波动幅度较小(均 $< 60 \mu\text{g N}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$), 未出现明显峰值(图 1). 小麦生长前半期各施氮处理 N_2O 平均排放量高于后半期. 3 个未施氮处理 N_2O 排放变化趋势与第一季相似, 在 0.68~28.05 $\mu\text{g N}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 范围小幅波动且均明显小于施氮处理($p < 0.01$). 由各处理两麦季生长期 N_2O 排放得, 除 FnR₊ 外各处理 N_2O 平均排放通量第二季均较第一季低.

2.2 土壤环境因子的动态变化

2.2.1 土壤温度

图 2 显示的是不同处理下环境因子的变化动态. 由图 2a 可得, 前后两麦季生长期各不同处理土壤地下 5 cm 温度分别介于 7.00~26.27 °C, 5.97~23.97 °C, 总体均呈现出先下降后上升趋势, 小麦生长前半期的平均温度明显低于后半期. 不同的是各处理地下 5 cm 温度第二季均略低于第一季.

2.2.2 土壤 WFPS

从图 2b 可以看出, 前后两麦季生长期各不同处理处理土壤 WFPS 分别介于 40%~98.75%, 44.29%~94.37%. 第一季土壤 WFPS 总体上均较高, 除 R₋ 处理外各处理除了在 2 月中下旬到 4 月初出现单峰近似凹谷型, 此外均长期保持在大于 70% 的范围波动. 年际变化上, 各处理第二季 WFPS 均明显低于第一季($p < 0.01$), 低于 60% 低谷出现 3 次, 分别在 1 月初、3 月底和 4 月底.

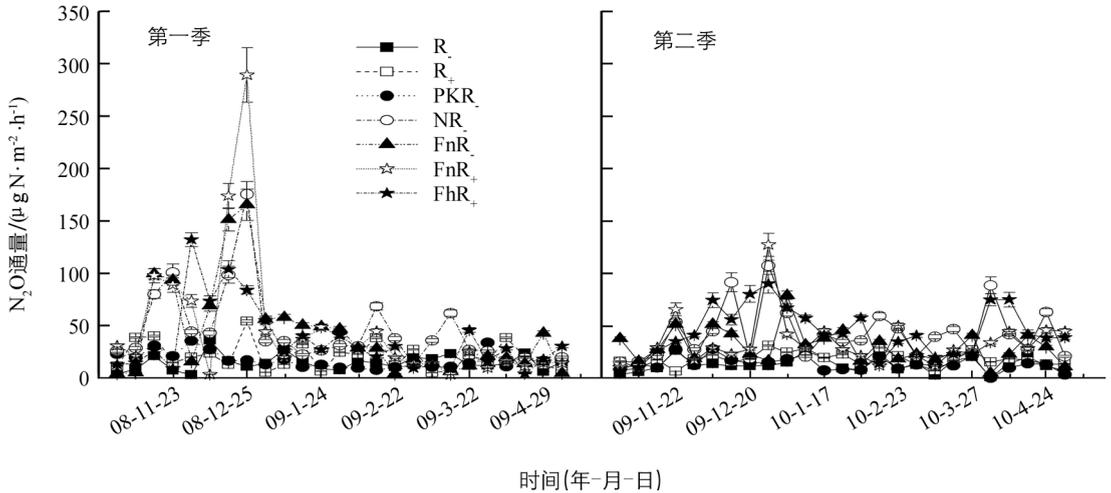


图 1 不同处理下土壤 N_2O 排放通量的变化动态

2.2.3 土壤 NO_3^- -N 质量分数

第一季, 4 个施氮处理土壤 NO_3^- -N 质量分数介于 $0.01 \sim 201.94$ mg N/kg, 均在施基肥和追肥后出现峰值, 此后逐渐降低至 30 mg N/kg 以下并长期在此范围小幅震荡波动(图 2c). 各施氮肥处理土壤 NO_3^- -N 质量分数平均值介于 $23.67 \sim 59.45$ mg N/kg, 其中 NR- 处理最高且明显高于其他施氮处理. 3 个未施氮处理土壤 NO_3^- -N 质量分数则变化平缓, 均在低于 30 mg N/kg 范围小幅波动, 平均值介于 $6.81 \sim 9.48$ mg N/kg. 第二季, 各施氮处理 NO_3^- -N 质量分数介于 $0.003 \sim 732.30$ mg N/kg, 平均值介于 $52.2 \sim 97.02$ mg N/kg, 变化趋势与第一季相似, 生长季前 2 个月出现 NO_3^- -N 质量分数峰值及最大值, 但下降速度较缓慢, 3 月初才降至 30 mg N/kg 以下. 各未施氮处理 NO_3^- -N 质量分数平均值介于 $9.62 \sim 18.17$ mg N/kg, 与第一季变化类似. 对比两小麦季得各处理 NO_3^- -N 质量分数第一季均低于第二季, 施氮处理 NO_3^- -N 质量分数均明显高于未施氮处理 ($p < 0.01$), 小麦生长前半期 NO_3^- -N 平均值均高于后半期.

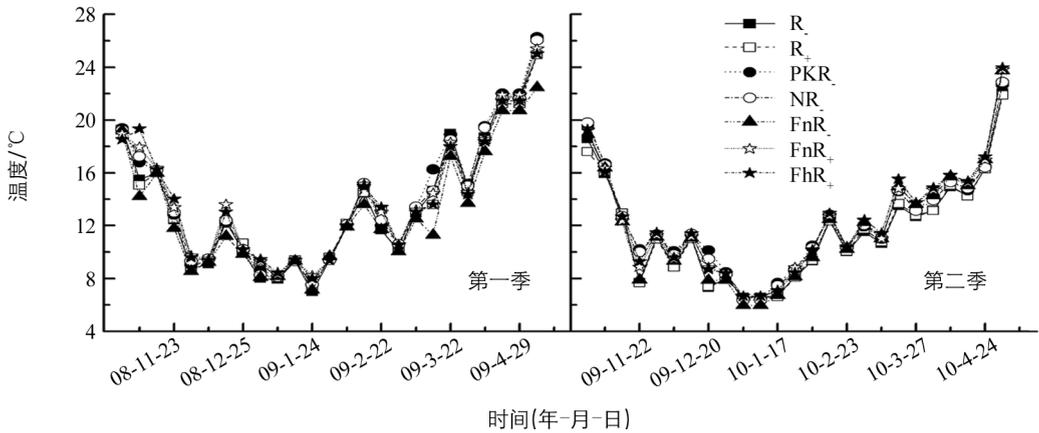
2.3 环境因子对 N_2O 排放影响

不同处理 N_2O 平均和累计排放量除 FhR+ 外第二季均低于第一季, 土壤地下 5 cm 温度没有明显年际差异, 土壤 WFPS 第二季则较第一季要高. 有研究表明土壤温度、水分是影响土壤 N_2O 的产生和排放的重要因素, 可以通过影响微生物活性和土壤生化反应中相关酶的活性等进而影响土壤硝化、反硝化作用过程, 土壤水分变化还将影响土壤微生物群落结构^[9]. 推测正是由于第二季土壤 WFPS 偏低抑制了土壤反硝化反应和 N_2O 产生, 是 N_2O 排放量年际差异的主要因素. 许多研究都发现 N_2O 排放与土壤水分成正相关^[10-11], 本试验 N_2O 平均排放通量与土壤 WFPS 有一定的正相关性, 进一步表明土壤水分较高能促进 N_2O 排放(表 2).

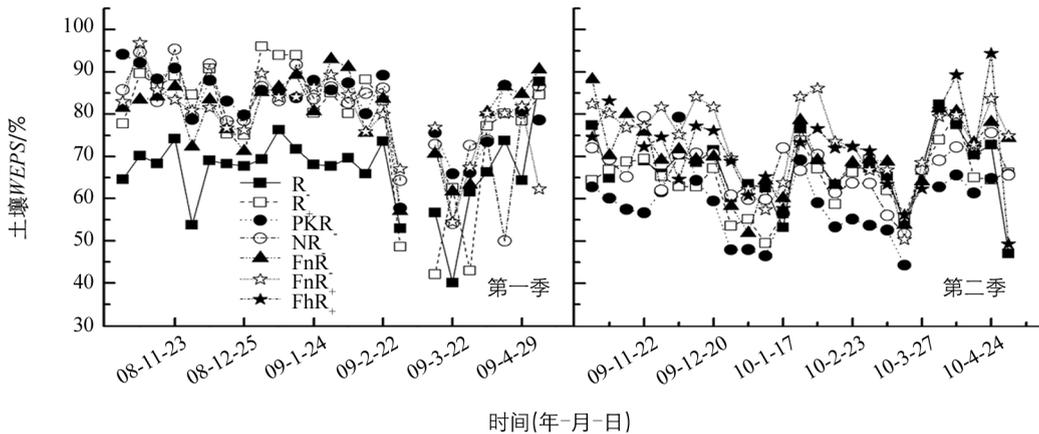
表 2 土壤环境因子与 N_2O 排放通量相关性分析

时间	土壤环境因素	处 理						
		R-	R+	PKR-	NR-	FnR-	FnR+	FhR+
第一季	地下 5 cm 温度	-0.098	0.043	0.048	-0.163	-0.341	-0.240	-0.396
	WFPS	0.182	-0.118	0.05	0.250	0.054	0.147	-0.024
	NO_3^- -N	-0.147	-0.06	0.113	-0.076	0.654**	0.639**	0.279
第二季	地下 5 cm 温度	-0.315	-0.442*	-0.493*	-0.256	-0.253	-0.324	-0.431*
	WFPS	-0.347	-0.332	-0.330	-0.113	-0.213	-0.183	0.139
	NO_3^- -N	0.124	0.33	0.225	0.114	0.598**	-0.106	0.324

注: * 表示 $p < 0.05$, 分析具有统计学意义, ** 表示 $p < 0.01$, 分析具统计学意义.



(a) 不同处理下土壤地下 5 cm 温度变化动态



(b) 不同处理下土壤 WFPS 变化动态

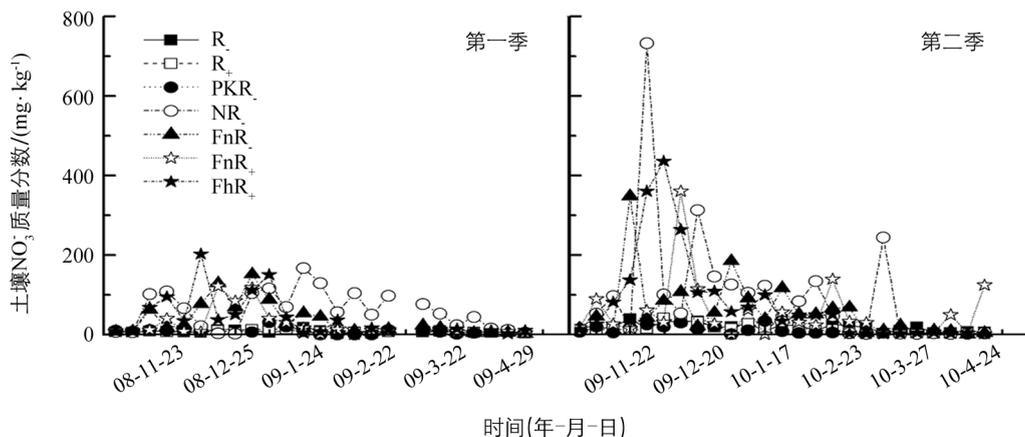
(c) 不同处理下土壤 $NO_3^- -N$ 变化动态

图 2 不同处理下环境因子变化动态

表 2 中仅第二季 R_+ , PKR_- 以及 FhR_+ 处理地下 5 cm 温度与 N_2O 排放负相关分析具有统计学意义 ($p < 0.05$), 且两季不同处理土温与 N_2O 排放相关性分析无统计学意义 ($p > 0.05$). 马静^[10]等研究发现麦季 N_2O 排放与不同深度土温均无显著相关性, 其 N_2O 排放变化动态及基肥、追肥时间与本试验相似, 推测正是不同施肥掩盖了温度对 N_2O 排放的效应. 邹建文^[11]等研究发现稻麦轮作下麦季土壤温度升高促进了 N_2O 排放, 本研究并未发现两者有明显相关关系, 且小麦生长前半期的 N_2O 排放量要高于后半期恰与邹建文的观测结果相反. 本试验于 11 月—12 月小麦生长前期施基肥和追肥, 此时土壤氮素质量分数较高,

而随着植物体吸收、地表径流及渗漏损失等到了小麦生长期后期其质量分数逐渐降低,而土壤矿质氮等反应底物的浓度显著制约土壤硝化、反硝化作用,邹建文的研究于 2 月底至 3 月初的小麦生长中后期追肥,这也解释了两研究间排放量高低的时间差异。

由表 2 得,第一季 F_nR_+ 处理以及两麦季 F_nR_- 处理土壤 NO_3^- -N 质量分数与 N_2O 排放通量正相关相关性分析具有统计学意义($p < 0.01$),且两麦季不同处理土壤 NO_3^- -N 质量分数与 N_2O 平均排放通量相关性分析均有统计学意义($p < 0.05$ 或 < 0.01),可见不同处理下 N_2O 排放差异主要是由于不同的土壤 NO_3^- -N 质量分数.反硝化反应是土壤产生 N_2O 的重要过程,而 NO_3^- -N 是反硝化反应底物并能直接促进反硝化速率,且能够抑制 N_2O 被还原,当土壤中质量分数较低时反硝化速率将受到限制从而抑制 N_2O 生成^[12].

2.4 不同施肥对 N_2O 排放影响

由图 3 得 R_+ 处理 N_2O 两季累积排放量分别高出对照 R_- 处理 46.7%,38.3%,表明秸秆还田促进了土壤 N_2O 生成与排放; NR_- 及 F_nR_- 处理两季较对照 R_- 处理分别高了 103%,133%,105%,62%,平均高出 118%,84%,可知施用化肥较秸秆还田对 N_2O 排放促进更明显. N_2O 两季累积排放量 F_nR_+ 及 F_hR_+ 处理较对照 R_+ 处理分别高了 119%,77%,67%,130%,平均高出 98%; F_nR_+ 较 F_nR_- 处理分别高了 6.7%,9.4%,平均高出 8.1%; F_hR_+ 处理虽第一季较 F_nR_- 处理低了 19%,但第二季高出 44%,综合来看高出 13%,表明秸秆与化肥配施对 N_2O 生成与排放具有一定协同促进效应,其原因可能是外源氮添加降低了土壤 C/N 比并有利于微生物对秸秆的利用.本研究中施氮较未施氮明显促进了土壤 N_2O 生成与排放($p < 0.01$),推测氮肥正是造成土壤 N_2O 排放差异的主要因素.外源氮添加提高了土壤供氮水平,为微生物硝化、反硝化过程提供了充足的底物,盈余的氮刺激小麦及其根系生长,其根系分泌物也提高了土壤硝化、反硝化微生物活性.而施用秸秆提高了土壤 C,N 水平,同时刺激土壤硝化、反硝化细菌繁殖与活动并增加反应所需能量和底物^[13],本研究中秸秆还田处理明显促进了土壤 N_2O 排放($p < 0.01$),熊明彪^[14]等在同一地点的研究也发现秸秆与氮磷钾肥配施促进了小麦根系的生长发育并加快根系代谢与呼吸速率,进而增加土壤 N_2O 排放。

N_2O 累积排放量 NR_- 处理较 F_nR_- , F_nR_+ 处理第一季相差均不大($p < 0.05$),但第二季分别高出 44%,32%,两季平均高出 21%,12%;较 F_hR_+ 处理第一季高出 21%,第二季差异不大,两季平均高出 11%,表明农田偏施氮肥较平衡施肥促进了 N_2O 排放,平衡施肥更有利于植物生长并吸收利用更多氮,生成 N_2O 可利用氮相应降低,这与刘运通^[15]等的研究结果基本一致.但并非平衡施肥均降低了 N_2O 排放,蔡延江^[16]等研究发现施用中量有机肥时 NP 配施较单施 N 肥处理促进了 N_2O 排放,黄树辉^[17]等研究结果表明施氮量 360 kg/hm^2 时无明显差异而低于 270 kg/hm^2 时 NP 配施则降低了 N_2O 排放.本研究仅探讨了单施和偏施化肥对 N_2O 排放影响,对于不同化肥类型及施用量下 N_2O 的排放还有待进一步研究。

2.5 N_2O 排放系数估算

N_2O 背景排放量是许多地区 N_2O 排放核算最敏感因子之一^[18].本研究中不施氮处理(R_- 和 PKR_-) N_2O 两季累积排放量分别为 $0.66, 0.60 \text{ kg N/hm}^2$ 和 $0.77, 0.63 \text{ kg N/hm}^2$,两季均值分别为 0.72 和 0.62 kg N/hm^2 ,处理间及年际间显著性分析均无统计学意义($p > 0.05$),小区长期无氮肥施用(截至试验开始已 18 a), N_2O 排放量年际差异较小,可认为不确定范围较小.关于紫色土 N_2O 排放已开展了一定的研究,但 N_2O 背景排放量结果差异较大.江长胜^[5]对小麦—紫色土体系 N_2O 背景排放量 3 a 观测结果为 $1.08, 4.07$ 和 2.46 kg N/hm^2 ,通过对紫色土玉米季的研究,项虹艳等^[7]得到的 N_2O 的

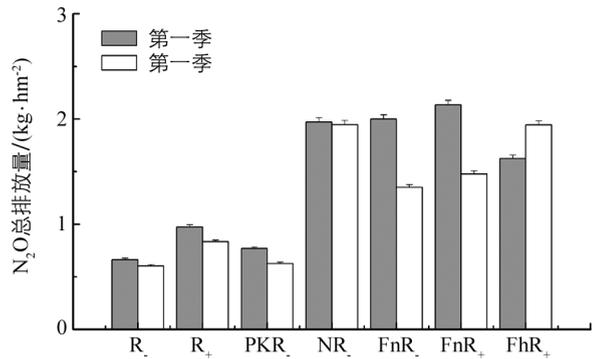


图 3 不同处理下土壤 N_2O 累积排放量

背景排放量观测值为 0.88 kg N/hm^2 , 与本研究观测结果接近, 而张中杰^[8]等的研究其麦季紫色土 N_2O 背景排放量为 0.4 kg N/hm^2 . 稻麦轮作下麦季各地区不同类型土壤 N_2O 背景排放量介于 $0.13 \sim 4.01 \text{ kg N/hm}^2$ ^[5, 19-21], 本试验观测结果在此范围内.

作物生长期 N_2O 排放通量估算方程为 $E = E_0 + EF \times N$, 式中 E_0 为背景排放值, EF 为排放系数, N 为氮素用量. IPCC^[3] 推荐使用的化学 N 肥 N_2O 排放系数为 1%, 也适用于对有机物如植物残体等作用下的土壤 N_2O 排放估算. 以不施氮处理(R_- 和 PKR_-) 为无氮对照, 将其 N_2O 累积排放量两季均值计算施氮处理外源 N 素 N_2O 排放系数(表 3). 两季秸秆 N 素 N_2O 排放系数分别为 0.66%, 0.56%, 均值为 0.61%, 化肥 N 素 N_2O 排放系数介于 0.54%~0.98%, 均值为 0.85%, N_2O 排放系数均值化肥 N 素是秸秆 N 素的 1.4 倍, 说明不同 N 素来源 N_2O 排放系数具有差异性, 估算不同来源 N 素引起的 N_2O 排放却采取相同的排放系数是不准确的. 石生伟等^[22] 研究发现不同施肥下双季稻化肥 N 素 N_2O 排放系数高达 0.85%, 而稻秆+化肥 N 素 N_2O 排放系数仅为 0.24%; 邹建文^[19] 的研究同样表明, 稻麦轮作下冬小麦季秸秆 N_2O 排放系数介于 0.15%~0.59%, 而化肥 N 素 N_2O 排放系数却高达 1.49%. 以无氮处理为对照本研究两麦季外源输入 N 素 N_2O 排放系数分别为 0.75%, 0.63%, 均值为 0.69%, 较 IPCC 推荐值(1%)低, 若直接选用 IPCC 推荐排放系数对本研究区域 N_2O 排放进行估算其结果将远远大于该区域实际值. 而秸秆 N 素 N_2O 两季排放系数以 FnR_- 为对照计算分别为 0.35%, 0.33%, 平均为 0.34%; 化肥 N 素 N_2O 排放系数以 R_+ 为对照计算分别为 0.86%, 0.48%, 平均为 0.67%, 以无氮处理为对照所得计算结果分别为上述结果的 1.8, 1.3 倍, 可知估算农田土壤 N_2O 排放量时针对于不同来源 N 素选择不同对照计算结果差异较大.

表 3 不同对照下 N_2O 排放系数

%

处理	以无氮处理(R_- , PKR_-) 为对照			以 FnR_- 为对照			以 R_+ 为对照		
	第一季	第二季	两季平均	第一季	第二季	两季平均	第一季	第二季	两季平均
R_+	0.66	0.56	0.61	—	—	—	—	—	—
NR_-	0.93	0.98	0.96	—	—	—	—	—	—
FnR_-	0.95	0.54	0.75	—	—	—	—	—	—
FnR_+	0.82	0.50	0.66	0.35	0.33	0.34	0.86	0.48	0.67
FhR_+	0.38	0.55	0.47	—	—	—	0.32	0.55	0.44

3 结 论

1) 两麦季施氮处理(NR_- , FnR_- , FnR_+ 和 FhR_+) N_2O 排放波动幅度较大, 小麦生长前半期均出现较强 N_2O 排放并明显高于后半期, 未施氮处理(R_- , R_+ 和 PKR_-) N_2O 排放波动较平缓, 两麦季变化趋势相似并均明显低于施氮处理. 土壤 N_2O 排放第二季较第一季要弱, 年际差异较大.

2) 不同施肥是引起 N_2O 排放差异的主要原因. 同一小麦生长期不同处理下 N_2O 排放差异主要是由土壤 NO_3^- -N 质量分数不同造成的; 土壤 $WFPS$ 第二季明显低于第一季, 主要导致了 N_2O 排放情况年际不同.

3) 秸秆还田处理增加了农田土壤 N_2O 排放, 单施氮肥与之相比增排效果更明显, 秸秆还田与化学氮肥协同作用下同样促进了 N_2O 生成与排放. 平衡施肥较单施氮肥处理 N_2O 排放量总体上要少, 在实际农业生产中, 若考虑农田 N_2O 减排应多选择平衡施肥而减少偏施氮肥.

4) 化肥或秸秆 N 来源下农田 N_2O 排放系数不同(两麦季下均值分别为 0.85%, 0.61%), 可见在估算 N_2O 排放量时针对不同 N 素来源农田应选用相对应的 N_2O 排放系数. 综合考虑输入的肥料 N 得本试验区外源输入 N(化肥和秸秆)农田 N_2O 排放系数均值为 0.69%, 较 IPCC 推荐值(1%)低, 因此估算川渝地区乃至全国农田 N_2O 排放量时应尽量采用适合所在区域的 N_2O 排放系数.

参考文献:

- [1] 孙凡,袁红叶,朱波,等.紫色土丘陵区典型林地土壤温室气体释放研究[J].重庆师范大学学报(自然科学版),2008,25(4):16-21.
- [2] 廖秋实,郝庆菊,江长胜,等.不同耕作方式下农田油菜季土壤温室气体的排放研究[J].西南大学学报(自然科学版),2013,35(9):111-118.
- [3] IPCC. 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories [M]. Kanagawa: IGES, 2006.
- [4] 熊靖,张旦麒,石孝均,等.长期不同施肥与秸秆管理对紫色土水稻田 CH_4 排放的影响[J].西南师范大学学报(自然科学版),2013,38(5):98-102.
- [5] 江长胜.川中丘陵区农田生态系统主要温室气体排放研究[D].北京:中国科学院大气物理研究所,2005.
- [6] 于亚军,高美荣,朱波.小麦—玉米轮作田与菜地 N_2O 排放的对比研究[J].土壤学报,2012,49(1):96-103.
- [7] 项虹艳,朱波,况福虹,等.氮肥施用对紫色土—玉米根系系统 N_2O 排放的影响[J].环境科学学报,2007,27(3):413-420.
- [8] 张中杰,朱波,江长胜,等.川中丘陵区旱地小麦生态系统 CO_2 、 N_2O 和 CH_4 排放特征[J].生态学杂志,2005,24(2):131-135.
- [9] 石永莲,倪九派,木志坚.岩溶槽谷区黄壤菜地土壤呼吸动态变化及其对肥料施用的响应[J].水土保持学报,2014,28(5):247-252.
- [10] 马静,徐华,蔡祖聪,等.稻季施肥管理措施对后续麦季 N_2O 排放的影响[J].土壤,2006,38(6):687-691.
- [11] 邹建文,黄耀,宗良纲,等.稻田灌溉和秸秆施用对后季麦田 N_2O 排放的影响[J].中国农业科学,2003,36(4):409-414.
- [12] 罗天相,胡锋,李辉信.施加秸秆和蚯蚓活动对麦田 N_2O 排放的影响[J].生态学报,2013,33(23):7545-7552.
- [13] HUANG Y, ZOU J W, ZHENG X H, et al. Nitrous Oxide Emissions as Influenced by Amendment of Plant Residues with Different C: N Ratios [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2004, 36(6): 973-981.
- [14] 熊明彪,田应兵,宋光煜,等.紫色土施肥对冬小麦根系生长及产量品质的影响[J].西南农业学报,2005,18(4):413-416.
- [15] 刘运通,李玉娥,万运帆,等.不同氮磷肥施用对春玉米农田 N_2O 排放的影响[J].农业环境科学学报,2011,30(7):1468-1475.
- [16] 蔡延江,王连峰,温丽燕,等.培养实验研究长期不同施肥制度下中层黑土氧化亚氮的排放特征[J].农业环境科学学报,2008,27(2):617-621.
- [17] 黄树辉,蒋文伟,吕军,等.氮肥和磷肥对稻田 N_2O 排放的影响[J].中国环境科学,2005,25(5):540-543.
- [18] YAN X Y, AKIMOTO H, OHARA T. Estimation of Nitrous Oxide, Nitric Oxide and Ammonia Emissions from Croplands in East, Southeast and South Asia [J]. Global Change Biology, 2003, 9(7): 1080-1096.
- [19] 邹建文.稻麦轮作生态系统温室气体 CO_2 、 CH_4 、 N_2O 排放研究[D].南京:南京农业大学,2005.
- [20] 王海云,邢光熹.不同施氮水平对稻麦轮作农田氧化亚氮排放的影响[J].农业环境科学学报,2009,28(12):2631-2636.
- [21] 陈书涛,黄耀,郑循华,等.轮作制度对农田氧化亚氮排放的影响及驱动因子[J].中国农业科学,2005,38(10):2053-2060.
- [22] 石生伟,李玉娥,李明德.不同施肥处理下双季稻田 CH_4 和 N_2O 排放的全年观测研究[J].大气科学,2011,35(4):707-720.

Effect of Long-Term Differentiated Fertilization on N_2O Emission from a Rice-Wheat Rotated Purple Soil During Wheat Growing Seasons

WANG Fa^{1,2}, ZHANG Dan-qi³, MU Zhi-jian^{1,2}, NI Jiu-pai^{1,2},
WANG Qiang^{1,2}, SHI Xiao-jun^{1,2}, GUO Tao^{1,2},
ZHANG Yao-qiang^{1,2}, LEI Yu-chun¹

1. School of Resources and Environment, Southwest University, Chongqing 400716, China;
2. Key Laboratory of Eco-Environment in Three Gorges Reservoir Region of Ministry of Education, Engineering Research Center for Agricultural Non-Point Source Pollution Control in the Three-Gorges Reservoir Area, Chongqing 400716, China;
3. Workers School of Chongqing Waterworks Limited, Chongqing 400013, China

Abstract: The changes of nitrous oxide (N_2O) emissions of different fertilization level treatments from the National Purple Soil Fertility Monitored Base (Beibei, Chongqing, China) were investigated in situ, using the static chamber-based method during two wheat growing seasons from 2008 to 2010. Seven treatments were made as follows: no fertilization + no crop residue (no straw incorporation into the field), no fertilization + crop residue, PK fertilization + no crop residue, N fertilization + no crop residue, NPK normal fertilization + no crop residue, NPK normal fertilization + crop residue and NPK high fertilization + crop residue. The N_2O transient emission fluxes of nitrogen treatments showed a large fluctuations during the first half of the growing season, and strong emissions following basal fertilization and topdressing were also observed, while the N_2O transient emission fluxes of no nitrogen treatments basically remained the same during the two wheat seasons, and were significantly lower than those of the nitrogen treatments. The N_2O emission fluxes and the annual variable rules of soil moisture (water filled pore space, *WFPS*) in the second wheat season were lower in general than those in the first wheat season, which were responsible for the suppression of N_2O emission. Moreover, N_2O emission differences among different treatments during the same wheat growing season were mainly caused by the difference in NO_3^- -N content in the soil. Straw returning was in favor of N_2O emission, and the promoting effects of chemical nitrogen fertilizer on soil N_2O emission was more obvious than straw. In contrast, the combined application of chemical N fertilizer and straw had a synergistic interaction on N_2O emission. Treatments of chemical fertilizer and straw tended to have a lower N_2O emission than the partial nitrogen treatment. Therefore, from the practical point of view of reducing N_2O emission, we should try to use the balanced fertilization in agricultural production. The mean values of N_2O emission factors of farmland under the chemical nitrogen fertilizer and straw in the two wheat seasons were 0.85% and 0.61%, respectively, while the mean value of emission factors of the exogenous input of N (including N fertilizer and straw) were 0.69%, both of which were lower than the recommended value of IPCC (1%). Accordingly, in the view of the N_2O emission estimation of farmland under different sources of nitrogen, the corresponding N_2O emission factor should be used.

Key words: purple soil; wheat-growing season; N_2O ; long-term fertilization; straw returning; emission factor

