

稻季施肥管理措施对后续麦季 N₂O 排放的影响

马 静^{1,3}, 徐 华^{1*}, 蔡祖聪¹, 八木一行²

(1 土壤与农业可持续发展国家重点实验室 (中国科学院南京土壤研究所), 南京 210008;

2 日本国立农业环境技术研究所, 日本筑波 305; 3 中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘 要: 2003—2004 年选用江苏省宜兴市稻-麦轮作试验田, 研究了水稻生长季秸秆 (0 和 $3.75 \times 10^3 \text{ kg/hm}^2$ 两个水平) 和 N 肥施用 (N 0、200 和 270 kg/hm^2 3 个水平) 对后续麦季 N₂O 排放的影响。结果表明: 稻季秸秆施用显著减少了后续麦季 N₂O 的排放, 这些减少量主要体现在小麦播种-返青期, 方差分析达显著水平 ($P < 0.05$)。稻季施用 N 肥, 后续麦季 N₂O 排放减少, 但 N 200 和 270 kg/hm^2 N 肥施用水平的处理间无显著差异。麦季土壤水分情况与 N₂O 排放通量存在显著正相关 ($P < 0.05$)。

关键词: N₂O 排放; 秸秆还田; 氮肥施用; 冬小麦

中图分类号: S131; X511

我国秸秆资源丰富, 其总产量在 2002 年已达 7.945 亿 t, 并以 0.125 亿 t/年的速度递增^[1]。秸秆还田是秸秆综合利用、促进农田生态系统良性循环的主要方式。秸秆还田通常配合施用化学 N 肥, 以调节 C、N 平衡, 保证作物高产稳产。对稻-麦轮作系统来说, 稻季不同的秸秆和 N 肥施用必然改变土壤自身的 C、N 循环, 这种改变对其后续麦季 N₂O 的排放也有影响。邹建文等^[2]的大田试验结果表明常规灌溉方式下, 稻季施用秸秆可减少后续麦季 N₂O 的排放, 其减少量主要体现在小麦生长的中后期 (返青后); 焦燕等^[3]的盆栽试验结果认为稻季秸秆施用对后续麦季 N₂O 排放的影响不尽相同, 视土壤特性而异。总体来说, 稻季秸秆施用对后续麦季 N₂O 排放的影响还存在一些不确定性因素, 尚需进一步的研究证实。稻季不同的秸秆和 N 肥配施对后续麦季 N₂O 排放的影响还未见报道。本试验试图通过设计大田稻-麦轮作系统中稻季的秸秆和 N 肥施用, 观测后续麦季的 N₂O 排放, 以探讨前季施肥管理措施对后续麦季 N₂O 排放的影响。

1 材料与方法

1.1 试验设计

大田试验于 2003—2004 年在江苏省宜兴市大

浦镇 ($31^{\circ}17'N$, $119^{\circ}54'E$) 的水稻-冬小麦轮作田上实施。稻季施肥管理措施包括 N 0、200 和 270 kg/hm^2 3 个 N 肥施用水平, 以及 0 和 $3.75 \times 10^3 \text{ kg/hm}^2$ 两个麦秆施用水平。表 1 为稻季的处理方案, 共计 6 个处理, 每个处理 3 个重复。各处理麦季的田间管理措施相同, 并按当地常规措施进行田间管理。

表 1 稻季田间试验设计与处理

Table 1 Experimental design in rice-growing season

处理	N 肥施用量 (N, kg/hm^2)	麦秆施用量 (kg/hm^2)
N0	0	0
N1	200	0
N2	270	0
S0	0	3.75×10^3
S1	200	3.75×10^3
S2	270	3.75×10^3

1.2 施肥管理

小麦品种为宁麦 9 号。小麦于 2003 年 11 月 1 日播种, 2004 年 5 月 26 日收割。2003 年 11 月 1 日施基肥, 其施用量为 300 kg/hm^2 复合肥 (N-P₂O₅-K₂O: 15-10-15, 5% 的 P₂O₅ 用过磷酸钙补足) 及 100 kg/hm^2 尿素; 2003 年 11 月 2 日在麦田上铺放整株稻草, 施用量为 $3.75 \times 10^3 \text{ kg/hm}^2$; 2003 年 11 月

①基金项目: 国家自然科学基金重大项目 (40371068) 和中国科学院全国优秀博士学位论文专项基金共同资助。

* 通讯作者 (hxu@issas.ac.cn)

作者简介: 马静 (1974—), 女, 四川南充人, 博士研究生, 主要从事农田温室气体排放研究。E-mail: jma@issas.ac.cn

25 日追施越冬肥 300 kg/hm² 尿素；2004 年 2 月 27 日追施返青肥 150 kg/hm² 尿素。

1.3 采样和测定

N₂O 气体样品用静态箱采集，箱高 1 m，底面为 50 cm × 50 cm。间隔 7 天采 1 次样，其中每次施肥后 10 天内加密采样，1—2 月份低温期间隔 10 天采 1 次样。采样时间为上午 7:30—11:00。各采样点每次采 4 个样，间隔 10 min 采 1 个样。在气样采集的同时，测定箱温及 5、10、15 cm 处土壤温度。样品 N₂O 浓度用岛津气相色谱分析仪（Shimadzu GC-14B）测定，检测器为 ⁶³Ni 电子捕获检测器。N₂O 标准气体由日本国家农业环境研究所提供。通过标准气体和待测气体峰面积来计算待测气体的浓度。

间隔 7 天取表层 0~15 cm 的土样，用 2 mol/L KCl 提取新鲜土样的 NO₃⁻-N 和 NH₄⁺-N，土水比 1:5，然后用 Skalar 流动分析仪测定；取新鲜土样在 105℃ 下烘干 8 h 测定土壤水分。

1.4 数据分析

N₂O 排放通量按下式计算^[4]：

$$F = \rho \times V/A \times \Delta c / \Delta t \times 273 / (273 + T)$$

式中 F 为 N₂O 排放通量 (μg/(m²·h))； ρ 为标准状态下 N₂O 密度 (1.25 kg/m³)； V 为采气箱内有效空

间体积 (m³)； A 为采气箱覆盖的土壤面积 (m²)； Δc 为气体浓度差 (μg/kg)； Δt 为时间间隔 (h)； T 为采样时箱温 (℃)。

N₂O 排放通量用每次观测 3 个重复的平均值及标准偏差表示。N₂O 季节平均排放量是将 3 个重复的每次观测值按时间间隔加权平均后再平均。处理间比较以 3 个重复的平均值进行方差分析及多重比较。相关性分析用全部观测值进行直线回归相关分析。

2 结果与分析

2.1 麦季 N₂O 排放通量的季节变化

图 1 为不同处理 N₂O 排放的季节变化。由图 1 可见，不同处理 N₂O 排放的季节变化趋势基本相同：在小麦播种后的第 11、22、43、78 和 120 天观测到 N₂O 排放高峰，这些高峰均出现在降雨或降雪后。原因在于土壤干湿交替激发了 N₂O 的产生与排放，这与前人的研究结果一致^[5-6]。小麦播种-返青期间，N₂O 的排放量占整个生长季排放总量的 75% 以上，表明这段期间，小麦生长速度慢，对 N 素的利用率低，气态 N 的损失大。黄耀等^[5]研究也发现冬小麦田 N₂O 排放的总趋势是播种-越冬阶段内的排放高于返青-成熟阶段。

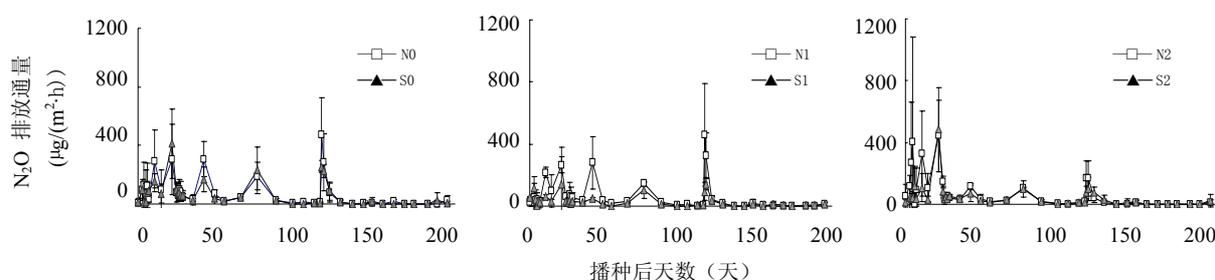


图 1 麦季 N₂O 排放的季节变化

Fig. 1 Temporal variations of N₂O flux during wheat-growing period

2.2 稻季秸秆和 N 肥施用对后续麦季 N₂O 平均排放通量的影响

图 2 为各处理在小麦不同生长时期内的 N₂O 平均排放通量。由图 2 可见，稻季秸秆施用显著减少了后续麦季 N₂O 的排放，这些减少量主要体现在小麦播种-返青期，方差分析达显著水平 (P<0.05)。在 N 肥施用量分别为 N 0、200 和 270 kg/hm² 水平下，秸秆施用与无秸秆施用的处理相比，全生育期

N₂O 平均排放通量分别减少了 18.2%、54.4% 和 23.4%，其中小麦播种-返青期 N₂O 平均排放通量分别减少了 17.0%、56.3% 和 27.2%。而邹建文等^[2]的试验结果表明施用秸秆对后续麦季 N₂O 排放的抑制效应主要体现在小麦返青-成熟期，这种差异可能是由于不同试验条件下小麦的生长情况不同，N₂O 在不同时期内排放的总量也有差别。本试验中，麦田表面铺放了稻秆，以达到保水、保肥和缓解表层

土壤温度变化的目的^[7]。土壤温度在冬季低温期内的变化减小，低温对 N₂O 排放的影响也相应减弱，使得播种-返青期 N₂O 的排放较高。

稻季施用 N 肥，后续麦季 N₂O 排放减少，但 N 200 和 270 kg/hm² N 肥施用水平的处理间无显著差异 (图 2)。全生育期内，不施秸秆的条件下，施用 N 200 和 270 kg/hm² N 肥比不施 N 肥的处理 N₂O 平均排放通量分别减少了 21.9% 和 23.1%；而配施秸秆的条件下，施用 N 200 和 270 kg/hm² N 肥比不施 N 肥的处理 N₂O 平均排放通量分别减少了 56.5% 和 28.0%，配施秸秆促进了稻季 N 肥施用对麦季 N₂O 排放的抑制效应 (P<0.05)。

2.3 影响麦季 N₂O 排放的因素

2.3.1 土壤水分 相关分析表明，各处理麦季土壤水分情况与 N₂O 排放通量均存在显著正相关 (P<0.05)，其相关系数列于表 2。以往大量研究发现，旱作农田土壤 N₂O 产生途径取决于土壤水分状况，

土壤水分含量是影响 N₂O 产生和排放的重要因素。适宜的土壤含水量范围内，N₂O 排放随土壤含水量的增加而增加^[8-10]。本试验也证实土壤水分状况对麦田 N₂O 排放起决定性作用。

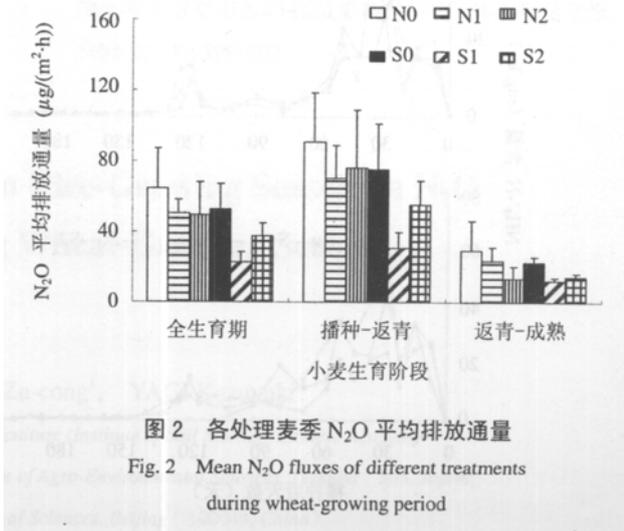


表 2 N₂O 排放通量与麦季土壤水分、土壤温度、土壤矿质 N 的相关系数

Table 2 Correlation coefficients between N₂O flux and soil water content, soil temperature or soil mineral nitrogen

处理	相关系数					
	Flux-SWC	Flux-ST _{5cm}	Flux-ST _{10cm}	Flux-ST _{15cm}	Flux-NH ₄ ⁺ -N	Flux-NO ₃ ⁻ -N
N0	0.534**	-0.173	-0.170	-0.164	0.445*	0.190
N1	0.572**	-0.244	-0.236	-0.230	0.190	0.119
N2	0.478**	0.092	0.074	0.080	0.279	0.182
S0	0.476**	-0.206	-0.200	-0.189	0.341	0.136
S1	0.537**	-0.052	-0.063	-0.054	0.188	0.170
S2	0.360*	-0.063	-0.080	-0.073	0.239	0.154

*和**分别表示在 P<0.05 和 P<0.01 水平上的显著相关性；Flux：N₂O 排放通量；SWC：土壤水份；ST：土壤温度。

2.3.2 土壤温度 由图 3 可见，5、10 和 15 cm 处的土壤温度季节变化趋势相同，整个季节内各层土温均在 1 ~ 22 °C 之间变化，季节平均土温为 11 °C。相关分析表明，不同深度的土温与 N₂O 排放通量无显著相关性 (表 2)，土温不是 N₂O 排放的限制因素。谢军飞和李玉娥^[11] 研究也表明在 10 ~ 30 °C 的温度范围内，旱地 N₂O 排放与土壤温度不呈明显的线性相关关系。

2.3.3 土壤矿质 N 含量 由图 4 可见，小麦播种-返青期，土壤 NH₄⁺-N 和 NO₃⁻-N 含量均较高。这个时期内，N 素供应充足，而小麦生长速度慢，对 N 素利用率低，残留在土壤中的 N 含量较高。小麦返青后生长迅速，N 素利用率提高，土壤 NH₄⁺-N

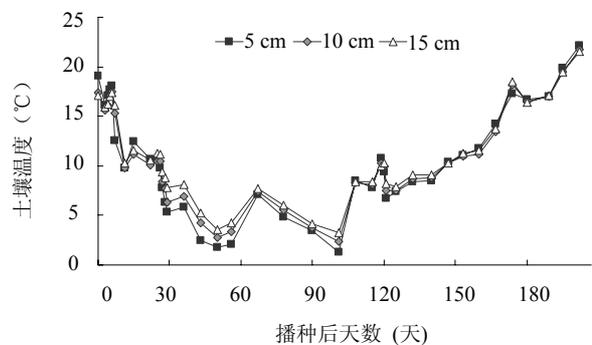


图 3 5、10 和 15 cm 土壤温度的季节变化
Fig. 3 Temporal variations of soil temperature at 5 cm, 10 cm and 15 cm depths during wheat-growing period

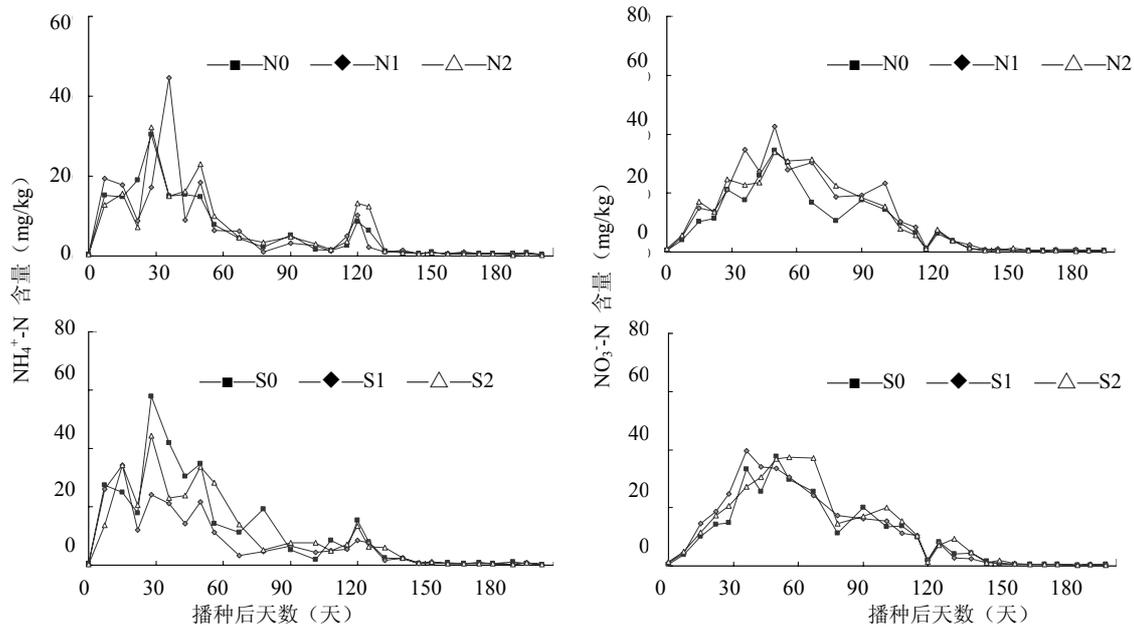


图 4 土壤矿质 N 含量的季节变化

Fig. 4 Temporal variations of soil $\text{NH}_4^+\text{-N}$, $\text{NO}_3^-\text{-N}$ content during wheat-growing period

和 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量很快下降, 在 30 天内下降到接近零水平。相关分析表明, 土壤 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量与 N_2O 排放通量无显著相关性(表 2)。全生育期内, 不施秸秆条件下, 施 N 处理比不施 N 处理麦季土壤矿质 N 总含量提高约 20% 左右。

3 结论与讨论

稻季秸秆施用显著减少了后续麦季 N_2O 的排放, 这些减少量主要体现在小麦播种-返青期, 方差分析达显著水平 ($P < 0.05$)。稻季施入秸秆, 土壤 C/N 比提高, 引起后续麦季土壤有效 N 素的微生物同化固定, 从而减少了 N_2O 排放。小麦播种-返青期内, N 素供应充足, 土壤温度适宜, 而小麦生长速度慢, N 素利用率低, 气态 N_2O 损失量大。

稻季施用 N 肥, 后续麦季 N_2O 排放减少, 但 N 200 和 270 kg/hm^2 N 肥施用水平的处理间无显著差异。黄耀等^[12]研究发现, 季节性 N_2O 平均排放量与土壤全 N 含量呈显著负相关。施 N 处理的麦季矿质 N 总含量高于不施 N 处理, 可能是稻季 N 肥施用减少后续麦季 N_2O 排放的主要原因, 其作用机理尚需进一步研究。

麦季土壤水分情况与 N_2O 排放通量存在显著正相关 ($P < 0.05$)。

参考文献:

- [1] 钟华平, 岳燕珍, 樊江文. 中国作物秸秆资源及其利用. 资源科学, 2003, 25 (4): 62-67
- [2] 邹建文, 黄耀, 宗良纲, 蒋静艳, 郑循华, 王跃思. 稻田灌溉和秸秆施用对后季麦田 N_2O 排放的影响. 中国农业科学, 2003, 36 (4): 409-414
- [3] 焦燕, 黄耀, 宗良纲, 周权锁. 不同水稻土水稻生长季施用秸秆对后季麦田 N_2O 排放的影响. 南京农业大学学报, 2004, 27 (1): 36-40
- [4] Xing GX, Shi SL, Shen GY, Du LJ, Xiong ZQ. Nitrous oxide emissions from paddy soil in three rice-based cropping systems in China. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2002, 64: 135-143
- [5] 黄耀, 蒋静艳, 宗良纲, 周权锁, Sass RL, Fisher FM. 种植密度和降水对冬小麦田 N_2O 排放的影响. 环境科学, 2001, 22 (6): 20-23
- [6] 梁东丽, 同延安, Emteryd O, 李生秀, 方日尧, 张树兰. 灌溉和降水对旱地土壤 N_2O 气态损失的影响. 植物营养与肥料学报, 2002, 8 (3): 298-302
- [7] 王爱玲, 高旺盛, 黄进勇. 秸秆直接还田的生态效应. 中国农业资源与区划, 2000, 21 (2): 41-45
- [8] 郑循华, 王明星, 王跃思, 沈壬兴, 龚宴邦, 骆冬梅, 张文, 金继生, 李老土. 稻麦轮作生态系统中土壤湿度

- 对 N₂O 产生与排放的影响. 应用生态学报, 1996, 7 (3): 285-289
273-279
- [9] 黄国宏, 陈冠雄, 韩冰. 土壤含水量与 N₂O 产生途径研究. 应用生态学报, 1999, 10 (1): 53-56
- [10] 韩建刚, 李占斌, 朱永莉, 白红英, 李世清. 农田土壤中 N₂O 释放的水温特征研究. 土壤通报, 2004, 35 (3): 285-289
- [11] 谢军飞, 李玉娥. 土壤温度对北京旱地农田 N₂O 的影响. 中国农业气象, 2005, 26 (1): 7-10
- [12] 黄耀, 焦燕, 宗良纲, 周权锁, 郑循华, Sass RL. 土壤理化特性对麦田 N₂O 排放影响的研究. 环境科学学报, 2002, 22 (5): 598-602

Effect of Fertilizer Application in Rice-Growing Season on N₂O Emissions from Following Wheat-Growing Season

MA Jing^{1,3}, XU Hua¹, CAI Zu-cong¹, YAGI Kazuyuki²

(1 State Key Laboratory of Soil and Sustainable Agriculture (Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences), Nanjing 210008, China; 2 National Institute of Agro-Environmental Sciences, Tsukuba 305, Japan; 3 Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: A field experiment was conducted in rice-wheat rotation system to study effect of application of wheat straw and nitrogen fertilizer in rice-growing season on N₂O emission from following wheat-growing season at Yixing of Jiangsu province in 2003—2004. Two levels of wheat straw application (0 and 3.75×10^3 kg/hm²) and three levels of nitrogen fertilizer application (N 0, 200 and 270 kg/hm²) were adopted in experiment. Results from variance analyses indicated that application of wheat straw in rice-growing season significantly reduced N₂O emission from following wheat-growing season, which happened mainly between wheat-sowing and returning-green periods ($P < 0.05$). Application of nitrogen fertilizer in rice-growing season significantly decreased N₂O emission from following wheat-growing season, while no significant differences in N₂O emissions were observed between N 200 kg/hm² treatment and N 270 kg/hm² treatment. Significant positive correlation between N₂O flux and soil water content was found during wheat-growing period ($P < 0.05$).

Key words: N₂O emission, Wheat straw, Nitrogen fertilizer, Winter wheat