

不同灌溉模式和施氮处理下稻田氨氧化细菌及无机氮对 N_2O 排放的影响

刘靖雯^{1,2,3} 李伏生^{1,2,3} 董艳芳^{1,2,3}

王楷^{1,2,3} 方泽涛^{1,2,3} 黄忠华⁴ 罗维钢⁴

1. 广西大学农学院, 南宁 530005; 2. 广西喀斯特地区节水农业新技术院士工作站, 南宁 530005;
3. 广西高校作物栽培学与耕作学重点实验室, 南宁 530005; 4. 南宁市灌溉试验站, 南宁 530001

摘要 通过大田试验, 研究不同灌溉方式和施氮处理下早稻、晚稻不同时期稻田 N_2O 的排放通量、氨氧化细菌数量、氨氧化潜势和无机氮含量的变化, 揭示土壤氨氧化细菌数量、氨氧化潜势和无机氮含量对稻田 N_2O 排放的影响。两季试验均设 3 种灌溉模式, 即常规灌溉(CIR)、“薄浅湿晒”(TIR)和干湿交替(DIR), 和 2 种施氮处理, 即 100% 尿素-N(FM1)和 50% 尿素-N+50% 猪粪-N(FM2)。结果表明: 晚稻、早稻分蘖期和成熟期土壤氨氧化细菌数量较低, 而孕穗期和乳熟期数量较高; 晚稻孕穗期、早稻孕穗期和乳熟期土壤氨氧化潜势较高, 而晚稻、早稻分蘖期和成熟期土壤氨氧化潜势较低; 相同施氮处理下, DIR 模式土壤 NH_4^+-N 含量高于 CIR 与 TIR 模式, DIR 与 TIR 模式土壤 $NO_3^- -N$ 含量均显著高于 CIR 模式; 晚稻、早稻孕穗期和乳熟期 DIR 和 TIR 模式土壤 N_2O 排放通量比 CIR 模式显著提高, FM2 处理高于 FM1 处理; 氨氧化细菌和氨氧化潜势与 NH_4^+-N 含量之间呈极显著正相关关系, N_2O 排放通量与氨氧化细菌和氨氧化潜势之间呈极显著正相关关系。因此, N_2O 的排放受到氨氧化细菌和氨氧化潜势的直接影响, 稻田 NH_4^+-N 含量大小会影响氨氧化细菌数量和氨氧化潜势, 从而间接影响 N_2O 的排放。

关键词 氨氧化细菌; N_2O 排放; “薄浅湿晒”灌溉; 干湿交替灌溉

中图分类号 S 511.07 **文献标识码** A **文章编号** 1000-2421(2017)04-0007-08

氧化亚氮(N_2O)是一种重要的温室气体, 稻田土壤作为大气中 N_2O 的重要来源而受到普遍关注^[1]。灌溉和施肥通过影响土壤水分状况、无机氮含量、参与 N_2O 转化的微生物活性等而对稻田 N_2O 的排放产生影响^[2]。水稻传统淹灌方式耗水量大, 目前探索出了多种节灌模式, 如间歇灌溉、控制灌溉、“薄浅湿晒”灌溉和干湿交替灌溉等, 均取得了较好的节水增产效果^[3-5]。现有研究表明, 与淹水灌溉相比, 间歇灌溉稻田 N_2O 累积排放量显著提高, 比淹水灌溉处理增加 51.4 mg/m²^[4]。与淹水灌溉相比, 控制灌溉稻田在水稻全生育期大部分时间段 N_2O 排放通量都高, 较淹水灌溉稻田增加 135.4%^[5]。但是在我国南方地区应用较广的“薄浅湿晒”和干湿交替 2 种灌溉模式对稻田 N_2O 排放的

影响情况如何并不清楚。不同施肥处理对土壤 N_2O 排放的影响结论不一致, 有研究表明, 施用有机肥能显著降低稻田 N_2O 排放通量^[6]; 与有机氮肥相比, 有机氮肥与化学氮肥配施显著减少稻田 N_2O 的排放^[7]; 也有研究指出, 有机氮肥施入对稻田 N_2O 的排放未能造成显著影响^[8]。土壤氨氧化细菌是参与硝化过程的一类重要微生物, 它控制硝化速度的快慢, 其数量受到灌溉方式和施肥等的影响^[9]。目前, 不同节水灌溉方式特别是“薄浅湿晒”和干湿交替灌溉模式下稻田氨氧化细菌数量变化及其与 N_2O 排放之间的关系不清楚。因此, 本研究在不同灌溉模式和施氮处理下探讨早晚稻不同时期土壤 N_2O 排放通量、氨氧化细菌数量、氨氧化潜势和无机氮含量的变化规律, 并分析土壤氨氧化细菌数量、氨氧化潜势和

收稿日期: 2016-12-20

基金项目: 国家自然科学基金项目(51469003)

刘靖雯, 硕士研究生, 研究方向: 植物营养与施肥. E-mail: 523294413@qq.com

通信作者: 李伏生, 博士, 教授, 研究方向: 水土资源利用与环境、植物营养与施肥. E-mail: zhenz@gxu.edu.cn; lpfu6@163.com

无机氮含量对稻田 N_2O 的排放通量的影响,旨在为探索水稻减排栽培技术与模式提供理论依据。

1 材料与amp;方法

1.1 试验地点和材料

2015年8月—2016年7月在广西南宁市灌溉中心试验站(N22°52'58.33", E108°17'38.86")进行晚稻和早稻的大田试验。试验站气候属亚热带季风气候,晚稻生长期8—11月降雨量分别为194.2、198.2、30.5和93.3 mm;早稻生长期4—8月降雨量分别为37.1、153.5、334.1和75.5 mm。试验土壤为第四纪红色黏土发育的潜育性水稻土,其容重为1.25 g/cm³,饱和含水率为42.99%,pH 7.03,有机质含量17.31 g/kg,全氮1.37 g/kg,碱解氮111.72 mg/kg(1 mol/L NaOH 碱解扩散法),速效磷48.88 mg/kg(0.5 mol/L NaHCO₃ 法),速效钾87.98 mg/kg(1 mol/L 中性 NH₄AC 浸提法)。供试水稻品种均为内5优8015,属籼型三系杂交水稻。供试有机肥为广西大学农场的腐熟猪粪(有机质含量14.69%,全N含量0.8%,全P₂O₅含量0.48%,全K₂O含量0.46%,无机氮含量0.17%,水分含量68.75%)。氮肥用尿素(含N 46%),磷肥为过磷酸钙(含P₂O₅ 14%),钾肥为氯化钾(含K₂O 60%)。试验灌溉用水pH值为7.60。

1.2 试验设计

两季田间试验设3种灌溉模式,(1)常规灌溉(CIR):除移栽返青期保持浅水层、分蘖末期晒田和黄熟期自然落干外,分蘖期到乳熟期田间均保持2~4 cm水层。(2)“薄浅晒晒”灌溉(TIR)^[3]:插秧返青期田间保持20~40 mm的浅水层,分蘖前期灌水10 mm,保持90%饱和含水量,分蘖后期晒田,拔节孕穗期田间保持10 mm薄水,抽穗扬花期灌水40 mm,保持10 mm水层;乳熟期灌水10 mm,保持90%饱和含水量;水稻穗部勾头之前保持湿润,成熟后自然落干,不同时期降雨后土壤水层可增加10~40 mm。(3)干湿交替灌溉(DIR):在移栽后10 d内田间保持浅水层(10~20 mm),10 d后进行干湿交替灌溉,安装土壤水分张力计监测土壤水势,当田间自然落干至土壤水势为-15 kPa时,灌水至20 mm,再进行自然落干后灌水,循环至水稻成熟期结束^[10]。2种施氮处理,(1)FM1:100%尿素-N;(2)FM2:50%尿素-N+50%猪粪-N。所有处理N、P₂O₅和K₂O用量分别为135、60和120 kg/hm²。

其中FM1处理中全部过磷酸钙和50%的尿素和KCl作基肥,FM2处理中全部过磷酸钙、腐熟猪粪和50%的KCl作基肥,基肥于插秧前1 d耕地时施入。余下50%的尿素和KCl分别以分蘖肥和穗肥形式按25%的比例施入。由于猪粪的施入,FM2处理过磷酸钙减施288 kg/hm²,KCl减施64 kg/hm²。试验按完全随机区组方案设计,6个处理,每处理3个小区,共18个,随机区组排列。各小区面积为25 m²,四周砌25~26 cm厚的红砖水泥墙,以防小区之间水分互渗,降雨多时单独排水。各小区均用水管引入固定水源,安装水表计量每次灌水量。

1.3 田间管理

晚稻试验于2015年7月24日泡种、催芽、露白后播种育秧,至3叶1心期,选取长势壮硕基本一致的秧苗于8月26日大田移栽,每穴单株栽培,株行距20 cm×20 cm。秧苗移栽后田面保持浅水层(2~3 cm),利于秧苗返青。不同灌水处理从9月2日秧苗返青后进行,11月9日开始成熟后结束,12月1日各小区收割。早稻试验于2016年3月14日泡种,4月13日大田移栽,不同灌水处理从4月20日秧苗返青后进行,7月5日水稻开始成熟后结束,7月20日各小区收割。此外,晚稻或早稻试验期间其他田间管理措施一致。

1.4 土壤样品采集与测定

不同处理晚稻土样采集分别在分蘖期(移栽后20 d)、孕穗期(移栽后54 d)、乳熟期(移栽后76 d)和成熟期(移栽后92 d),早稻分别在移栽后19、61、83和97 d进行。每次采样时间为灌水处理后第2天上午,分别采集0~20 cm土层土壤并混匀,装入保鲜袋,带回实验室用鲜样分析微生物数量,不能及时处理的土样于4℃保存,1周内完成测定;同时用烘干法测定土壤含水率(质量百分数),以便计算每克干土中微生物数量。

土壤氨氧化细菌数量用MPN法测定^[11-13],检测试剂为Griess试剂和二苯胺试剂。土壤氨氧化潜势测定采用悬浮液培养法,后在520 nm波长下用紫外分光光度仪测定^[14-15]。土壤无机氮(铵态氮、硝态氮)含量用氯化钾浸提,后用SEAL-AA3连续流动化学分析仪测定^[16]。

1.5 气体样品采集与测定

田间 N_2O 的采集使用静态封闭箱法,静态封闭箱箱体由厚5 mm不锈钢皮制成,箱体规格50 cm×

50 cm×100 cm,内部安装空气混匀风扇,外部包一层隔热层,侧面开 2 mm 气孔用橡胶软管密封,通过 50 mL 进口注射器(美国 BD)采气,水稻移栽前各处理分别安装不锈钢静态箱底座(50 cm×50 cm),底座入泥 5 cm,底座内含生长水稻。不同生育时期稻田 N₂O 排放通量采样时刻为上午 09:00,同时记录箱温。每个采样点在盖箱后 0、5、10、15、20、25 和 30 min 时用注射器采样,样品量为 100 mL。同时 N₂O 浓度用 Agilent 7890A GC 气相色谱仪测定。N₂O 排放通量计算公式如下:

$$F = \frac{10 - 5\mu P}{R(t + 273.2)} H \frac{dC}{dt} \quad (1)$$

式中, F 为 N₂O 排放通量, $\mu\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$; μ 为气体摩尔质量, 44.013 g/mol; P 为箱内平均气压, 1.01325×10^{-5} Pa; t 为箱内平均气温, $^{\circ}\text{C}$; R 为气体常数, 8.314 41 J/(mol · kg); H 为箱内有效高度, 100 cm; $\frac{dC}{dt}$ 为箱内气体浓度随时间的变化率, $\mu\text{L}/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$ 。文中结果为采土当天 N₂O 排放通量。

1.6 数据分析

试验所有数据均采用 Excel 2003 和 DPS 7.05 软件进行分析。多重比较部分用 LSD 法, 差异显著

性水平为 $P < 0.05$ 。用采土当天 N₂O 排放通量与土壤各测定指标进行相关性分析。

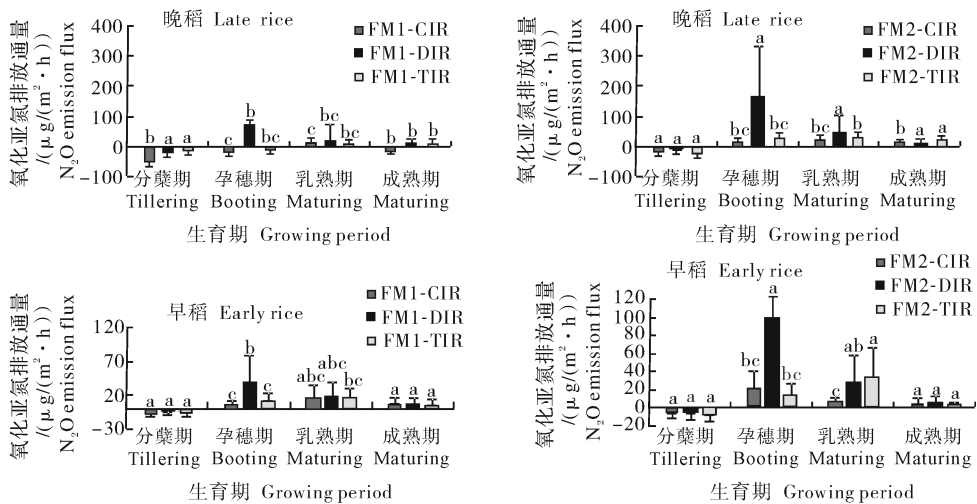
2 结果与分析

2.1 稻田 N₂O 的排放通量

从图 1 可以看出, 晚稻、早稻分蘖期淹水期间, N₂O 排放通量主要为负值, 处于吸收状态, 而孕穗期、乳熟期和成熟期均出现明显的 N₂O 排放。

图 1 中, 除分蘖期, 相同施氮处理下, 晚稻和早稻 DIR 模式下 N₂O 排放通量均显著高于另 2 种灌水模式; 在孕穗期干湿交替变化时 N₂O 排放出现全灌水模式的最大值; 同时 DIR 模式 N₂O 排放通量从孕穗期到乳熟期呈明显下降趋势; 除早稻孕穗期, 晚稻和早稻 TIR 模式下 N₂O 排放通量均高于 CIR 模式; 相对于 DIR 模式, TIR 和 CIR 模式各生育期间的 N₂O 排放通量变化并不显著, 表明土壤通气条件较差的 CIR 与 TIR 模式能有效降低水稻采样时段土壤 N₂O 的排放。

试验结果表明, FM2 处理生育期内各灌水模式下 N₂O 排放通量一般高于 FM1 处理, 表明有机肥的加入对 N₂O 的排放有促进作用。



图中数值为平均值±标准差 ($n=3$), 晚稻或早稻各时期不同小写字母表示差异显著 ($P < 0.05$)。TIR:“薄浅湿晒”灌溉; DIR:干湿交替灌溉; CIR:常规灌溉; FM1: 100% 尿素-N; FM2: 50% 尿素-N+50% 猪粪-N。下同。Values in the figure are mean±standard deviation ($n=3$). Different letters at the same stage of late rice or early rice mean significant difference at $P < 0.05$ level. TIR: Thin-shallow-wet-dry irrigation; DIR: Alternate drying and wetting irrigation; CIR: Conventional irrigation; FM1: 100% urea-N, FM2: 50% urea-N and 50% pig manure-N. The same as below.

图 1 不同处理早晚稻各生育期 N₂O 排放通量

Fig.1 N₂O emission flux during early rice and late rice growing periods for different treatments

2.2 氨氧化细菌数量

从表 1 可知, 晚稻、早稻分蘖期和成熟期土壤氨

氧化细菌数量较低, 而孕穗期和乳熟期土壤氨氧化细菌数量较高。FM1 下, 晚稻分蘖期 DIR 和 TIR

模式土壤氨氧化细菌数量高于 CIR 模式,孕穗期和乳熟期 DIR 模式土壤氨氧化细菌数量显著高于 CIR 和 TIR 模式,而成熟期各处理之间的差异不显著。FM1 处理下,早稻分蘖期、孕穗期和乳熟期 DIR 模式土壤氨氧化细菌数量均显著高于 CIR 和 TIR 模式。FM2 处理下,晚稻分蘖期各灌水模式之间的差异不显著;孕穗期、乳熟期和成熟期 DIR 模式土壤氨氧化细菌数量显著高于 CIR 和 TIR 模式。

早稻除成熟期以外,DIR 模式土壤氨氧化细菌数量显著高于 CIR 和 TIR 模式。

与 FM1 相比,晚稻和早稻分蘖期 FM2 处理土壤氨氧化细菌数量分别下降 59.80% 和 55.53%、21.22% 和 22.89% 以及 38.43% 和 31.82%,表明在生长初期,施用有机肥会降低氨氧化细菌数量。除分蘖期外,FM2 处理土壤氨氧化细菌数量均高于 FM1 处理。

表 1 不同处理下稻田不同生育期土壤氨氧化细菌数量

Table 1 Soil ammonia-oxidizing bacteria content at different growth stages of rice for different treatments

$\times 10^3$

施氮处理 N treatment	灌溉模式 Irrigation mode	晚稻 Late rice				早稻 Early rice			
		分蘖期 Tillering	孕穗期 Booting	乳熟期 Milky	成熟期 Maturing	分蘖期 Tillering	孕穗期 Booting	乳熟期 Milky	成熟期 Maturing
FM1	CIR	29.59± 6.56c	35.17± 1.61c	17.29± 5.99c	2.2± 1.37c	14.1± 5.46cd	8.90± 0.90d	13.33± 0.31e	0.99± 0.10c
	DIR	72.83± 9.11ab	139.86± 8.74ab	59.13± 4.94abc	7.81± 5.23b	136.51± 4.40a	107.12± 4.28a	57.55± 1.20c	1.80± 0.04b
	TIR	95.50± 7.16a	36.19± 1.44c	21.93± 4.57bc	3.22± 1.34c	19.23± 2.49c	20.34± 0.33b	24.73± 0.55d	1.72± 0.04b
FM2	CIR	11.89± 2.00c	48.62± 2.18c	73.37± 8.15ab	1.91± 0.20c	6.27± 0.57d	14.50± 0.60c	35.24± 4.68c	0.95± 0.09c
	DIR	57.37± 3.72b	174.40± 5.44a	95.08± 6.38a	20.89± 2.01a	95.7± 5.17b	128.97± 0.53a	256.09± 7.07a	4.32± 0.42a
	TIR	58.79± 5.35b	71.07± 1.21bc	94.95± 4.27a	1.36± 0.61c	13.11± 3.66cd	12.05± 0.51cd	95.27± 4.57b	0.37± 0.08d

注:表中数值为平均值±标准差($n=3$);同一列不同小写字母表示差异显著($P<0.05$)。下同。Note: Values in the table are mean±standard deviation ($n=3$). Different letters at the same column mean significant difference at $P<0.05$ level. The same as below.

表 2 不同处理下稻田不同生育期土壤氨氧化潜势

Table 2 Soil potential nitrification rate content at different growth stages of rice for different treatments

$\mu\text{g}/(\text{g}\cdot\text{h})$

施氮处理 N treatment	灌溉模式 Irrigation mode	晚稻 Late rice				早稻 Early rice			
		分蘖期 Tillering	孕穗期 Booting	乳熟期 Milky	成熟期 Maturing	分蘖期 Tillering	孕穗期 Booting	乳熟期 Milky	成熟期 Maturing
FM1	CIR	73.19± 6.87c	922.3± 21.76ab	383.38± 8.10b	37.28± 2.40d	59.22± 8.07c	152.5± 8.83b	135.76± 3.45a	69.02± 3.61cd
	DIR	135.25± 8.94a	1412.97± 17.24a	275.72± 1.28c	94.34± 6.00ab	119.77± 8.29a	334.66± 7.57a	512.68± 4.94b	81.95± 1.68c
	TIR	111.34± 7.49b	711.10± 30.28b	342.74± 12.07b	77.93± 4.35bc	82.01± 3.12bc	183.23± 7.14b	253.25± 6.66c	53.25± 1.71de
FM2	CIR	122.93± 4.34ab	517.07± 14.27b	159.23± 5.39c	67.58± 6.09c	35.76± 8.84d	156.57± 6.23b	241.72± 4.92c	64.32± 5.22d
	DIR	129.83± 5.29a	1292.60± 31.37a	639.95± 23.95a	118.29± 5.22a	106.57± 2.42b	354.89± 6.22a	655.67± 9.71a	100.24± 5.03d
	TIR	126.87± 6.86ab	1364.37± 17.18a	260.24± 3.61c	73.83± 6.3bc	90.74± 5.37b	304.59± 9.22a	269.02± 7.61c	41.71± 4.93e

2.3 氨氧化潜势

由表 2 可知,晚稻孕穗期土壤氨氧化潜势较高,

而分蘖期和成熟期较低;早稻孕穗期和乳熟期氨氧化潜势较高,而分蘖期和成熟期较低,这与不同生育

期 N₂O 的排放通量趋势一致。

FM1 处理下,除乳熟期以外,DIR 模式土壤氨氧化潜势均高于 CIR 和 TIR 模式;分蘖期、成熟期 TIR 模式土壤氨氧化潜势高于 CIR 模式,孕穗期和乳熟期 CIR 模式土壤氨氧化潜势和 TIR 模式之间的差异不显著。早稻除成熟期以外,DIR 和 TIR 模式土壤氨氧化潜势均高于 CIR 模式。FM2 下,晚稻各采样生育期 DIR 和 TIR 模式土壤氨氧化潜势均高于 CIR 模式,孕穗期和乳熟期 DIR 模式土壤氨氧化潜势显著高于 CIR 和 TIR 模式。早稻各采样时期灌水模式土壤氨氧化潜势之间的差异呈现与 FM1 处理下相同的规律。与 FM1 处理相比,FM2

处理下不同灌水模式土壤氨氧化潜势有所提高。

2.4 无机氮

表 3 和表 4 分别为不同处理下早稻和晚稻不同时期土壤 NH₄⁺-N 和 NO₃⁻-N 含量的变化。表 3 表明,FM1 处理下,晚稻除成熟期以外,CIR 模式土壤 NH₄⁺-N 含量呈缓慢增长趋势;TIR 模式在采样生育期过程中呈缓慢下降趋势。早稻 CIR 模式土壤 NH₄⁺-N 含量从分蘖期到孕穗期增加,而孕穗期到成熟期呈下降趋势;DIR 模式土壤 NH₄⁺-N 含量从分蘖期到孕穗期呈小幅度下降,而从孕穗期到乳熟期大幅度增加;TIR 模式土壤 NH₄⁺-N 含量在 4 个采样时期呈下降趋势。FM2 处理下,早、晚稻各

表 3 不同处理下稻田不同生育期土壤铵态氮含量

Table 3 Soil NH₄⁺-N content at different growth stages of rice for different treatments

mg/kg

施氮处理 N treatment	灌溉模式 Irrigation mode	晚稻 Late rice				早稻 Early rice			
		分蘖期 Tillering	孕穗期 Booting	乳熟期 Milky	成熟期 Maturing	分蘖期 Tillering	孕穗期 Booting	乳熟期 Milky	成熟期 Maturing
FM1	CIR	67.72± 2.30ab	78.22± 2.96bc	75.52± 1.22ab	13.29± 3.79c	73.89± 1.94c	86.97± 4.16bc	27.49± 2.29cd	15.75± 1.11b
	DIR	104.70± 4.28a	105.49± 1.11ab	21.66± 1.90cd	18.68± 0.78b	102.55± 5.90b	88.64± 6.07bc	193.16± 1.50a	19.82± 2.35b
	TIR	96.85± 0.95ab	59.64± 1.94c	55.48± 5.09bcd	22.32± 1.34ab	126.22± 7.98a	60.50± 5.03d	23.84± 2.49d	14.63± 0.91b
FM2	CIR	71.22± 1.36ab	81.97± 1.33bc	19.16± 2.03d	26.20± 2.04a	21.36± 4.09e	102.94± 8.09a	28.48± 1.93cd	29.14± 1.06a
	DIR	68.09± 1.97ab	136.45± 4.03a	101.67± 7.04a	22.29± 3.47ab	33.16± 3.74d	95.40± 6.49ab	144.01± 4.73b	22.04± 0.59ab
	TIR	56.9± 1.48b	78.50± 2.42ab	57.49± 4.93bc	24.18± 2.92a	84.91± 1.74c	82.47± 4.50c	32.64± 5.70c	17.36± 2.38b

表 4 不同处理下稻田不同生育期土壤硝态氮含量

Table 4 Soil NO₃⁻-N content at different growth stages of rice for different treatments

mg/kg

施氮处理 N treatment	灌溉模式 Irrigation mode	晚稻 Late rice				早稻 Early rice			
		分蘖期 Tillering	孕穗期 Booting	乳熟期 Milky	成熟期 Maturing	分蘖期 Tillering	孕穗期 Booting	乳熟期 Milky	成熟期 Maturing
FM1	CIR	3.39± 0.51bc	0.57± 0.31a	8.91± 0.83b	3.61± 1.42c	7.94± 0.52d	3.25± 0.26b	6.31± 2.87b	1.02± 0.14c
	DIR	6.55± 3.33a	4.64± 2.80a	17.02± 2.50ab	4.19± 1.28bc	13.32± 1.07b	1.16± 0.21c	9.45± 1.43ab	5.33± 2.00ab
	TIR	1.68± 0.71c	1.54± 1.79a	12.57± 1.68ab	6.81± 1.94ab	16.52± 1.48a	0.93± 0.13c	9.32± 2.10ab	3.65± 1.16bc
FM2	CIR	1.70± 0.99c	1.26± 0.12a	11.68± 1.21ab	4.52± 1.53bc	6.07± 1.75d	1.31± 0.55c	6.53± 2.39b	3.32± 1.15bc
	DIR	4.70± 1.26ab	2.06± 0.57a	17.63± 2.15a	7.46± 1.63a	10.56± 1.90c	6.31± 0.96a	11.35± 2.77a	7.75± 2.77a
	TIR	1.03± 0.70c	4.13± 4.72a	14.63± 3.06ab	4.56± 1.23bc	7.99± 0.30d	1.20± 0.25c	10.30± 1.44ab	4.35± 1.14b

灌水模式除分蘖期,土壤 NH_4^+-N 含量均呈下降趋势。表 4 中,FM1 处理下,晚稻、早稻各灌水模式土壤 NO_3^--N 含量从分蘖期到孕穗期下降,而孕穗期到乳熟期增加,到成熟期下降。FM2 处理下,晚稻 CIR 模式土壤 NO_3^--N 含量变化趋势与 FM1 处理相同,TIR 模式土壤 NO_3^--N 含量从分蘖期到孕穗期增加,从孕穗到乳熟期大幅度增加,而成熟期急剧下降;DIR 模式土壤 NO_3^--N 含量从分蘖期到乳熟期大幅度增加,成熟期下降;早稻土壤 NO_3^--N 含量变化趋势与 FM1 处理相同。

相同施氮处理下,DIR 模式土壤 NH_4^+-N 含量高于 CIR 与 TIR 模式,而 CIR 模式与 TIR 模式土壤 NH_4^+-N 含量之间差异不显著;DIR 与 TIR 模式土壤 NO_3^--N 含量均显著高于 CIR 模式。与 FM1 相比,晚稻、早稻各灌水模式下 FM2 处理土壤 NH_4^+-N 含量在孕穗期、乳熟期和成熟期均有提高;土壤 NO_3^--N 含量在乳熟期到成熟期均提高。

2.5 相关性分析

晚稻和早稻土壤无机氮含量、氨氧化细菌数量、氨氧化潜势以及 N_2O 排放通量之间相关性分析结果(表 5)表明:晚稻、早稻土壤氨氧化细菌数量与氨氧化潜势、 NH_4^+-N 含量和 N_2O 排放通量之间呈极显著正相关;氨氧化潜势与 NH_4^+-N 含量和 N_2O 排放通量之间呈极显著正相关;晚稻、早稻土壤无机 N 含量与 N_2O 排放通量之间的关系不显著。因此,稻田 N_2O 排放通量主要受到氨氧化细菌数量与氨氧化潜势的影响。由于土壤 NH_4^+-N 含量影响氨氧化细菌数量和氨氧化潜势,因而土壤 NH_4^+-N 含量也会间接影响稻田 N_2O 排放。

表 5 晚稻、早稻各项指标之间相关性分析

Table 5 Correlation analysis of related indices for late rice and early rice

指标 Indices	氨氧化细菌数量 AOB	氨氧化潜势 PNR	硝态氮 NO_3^--N	铵态氮 NH_4^+-N
氨氧化潜势 PNR	0.54**			
硝态氮 NO_3^--N	0.26	-0.07		
铵态氮 NH_4^+-N	0.57**	0.48**	-0.08	
N_2O 排放通量 N_2O emission flux	0.48**	0.44**	-0.06	0.26

注: * 表示显著($r_{0.05}=0.2845, n=46$), ** 表示极显著($r_{0.01}=0.3683, n=46$)。Note: * shows significant ($r_{0.05}=0.2845, n=46$); ** show extremely significant ($r_{0.01}=0.3683, n=46$).

3 讨论

稻田灌溉模式影响土壤水分状况,从而影响水稻不同生长阶段 N_2O 向大气的排放。本研究发现,早稻和晚稻 TIR、CIR 模式 N_2O 排放通量一般低于 DIR 模式,这与李香兰等^[17]的结论相符合。Davidson 等^[18]发现,土壤淹水期间和湿润状态时,土壤孔隙被水充满或因粘土吸水膨胀而关闭,可减少 N_2O 向大气的排放。本研究还发现,晚稻、早稻分蘖期和成熟期土壤氨氧化细菌数量较低,而孕穗期和乳熟期土壤氨氧化细菌数量较高,这与不同生育期 N_2O 的排放通量趋势一致。这表明持续淹水状态不能为硝化、反硝化作用进行提供适合的环境,减少了 N_2O 的排放;同时降低了土壤中 O_2 浓度,不能为土壤氨氧化细菌活动提供充足的 C 源和 N 源,致使氨氧化细菌数量减少^[19]。本研究结果表明,相同施氮处理下,DIR 模式土壤 NH_4^+-N 含量高于 CIR 与 TIR 模式;DIR 与 TIR 模式土壤 NO_3^--N 含量均显著高于 CIR 模式,这可能是节灌模式通过改变水分含量影响 NH_4^+-N 和 NO_3^--N 的含量的结果^[20]。

本研究发现,相同灌溉模式下,FM2 处理 N_2O 排放通量一般高于 FM1 处理,表明施入猪粪会在一定程度上促进稻田 N_2O 排放,与 Wallenstein 等^[21]研究结果相符。除分蘖期外,FM2 处理土壤氨氧化细菌数量均高于 FM1 处理;FM2 处理土壤氨氧化潜势也比 FM1 处理有所提高。这表明 FM2 处理下有机肥的施用能显著提高初级矿化-同化周转速率且提高微生物利用 NH_4^+-N 和 NO_3^--N 的能力,致使更多的有效态氮被氨氧化细菌同化,从而促进氨氧化潜势、增加氨氧化细菌数量。同时以往研究表明,有机氮肥处理土壤氨氧化细菌数量和氨氧化潜势高于无机氮肥处理^[22-23]。He 等^[24]发现,长期有机无机肥配施可以缓冲红壤 pH 变化,还可为氨氧化细菌提供基质、养分及适宜的生存环境,从而增加土壤氨氧化细菌数量。本研究表明,与 FM1 处理相比,晚稻、早稻 FM2 处理土壤 NH_4^+-N 含量在孕穗期、乳熟期和成熟期和土壤 NO_3^--N 含量在乳熟期和成熟期均有提高。这表明,施用粪肥会提供更多可利用的 NH_4^+-N ^[25],以及施用有机氮肥可以激发自养硝化作用而增加土壤中 NO_3^--N 的浓度^[26]。同时尿素与有机肥施入土壤后在土壤酶的作用下水解为 NH_4^+-N 进而氧化为 NO_2^--N 和 NO_3^--N ,

中间过程释放出 N_2O 。因此, NH_4^+-N 和 $NO_3^- -N$ 作为硝化、反硝化反应的底物是影响稻田土壤 N_2O 排放的重要因素。

本研究相关性分析结果表明,稻田 N_2O 排放通量与土壤氨氧化细菌数量和氨氧化潜势之间呈极显著正相关; $NH_4^+ -N$ 含量与氨氧化细菌及氨氧化潜势呈极显著正相关,这表明 $NH_4^+ -N$ 含量可通过影响氨氧化细菌数量和氨氧化潜势来影响 N_2O 的排放。因此,稻田 N_2O 排放通量主要受到氨氧化细菌数量与氨氧化潜势的影响,且受到 $NH_4^+ -N$ 含量的间接影响。

参 考 文 献

- [1] 郑循华,王明星,王跃思,等.华东稻田 N_2O 和 CH_4 排放[J].大气科学,1997,21(2):231-237.
- [2] 徐华,邢光熹,蔡祖聪,等.土壤水分状况和氮肥施用及品种对稻田 N_2O 排放的影响[J].应用生态学报,1999,10(2):186-188.
- [3] 覃万国.“薄、浅、湿、晒”灌溉技术对杂交水稻的增产效果[J].中国农村水利水电,1996(11):17-18.
- [4] 李香兰,马静,徐华,等.水分管理对水稻生长期 CH_4 和 N_2O 排放季节变化的影响[J].农业环境科学学报,2008,27(2):535-541.
- [5] HOU H J, PENG S J, XU J Z, et al. Seasonal variations of CH_4 and N_2O emissions in response to water management of paddy fields located in Southeast China[J]. Chemosphere, 2012, 89: 884-892.
- [6] 赵峥,岳玉波,张翼,等.不同施肥条件对稻田温室气体排放特征的影响[J].农业环境科学学报,2014,33(11):2273-2278.
- [7] DELGADO J A, MOSIER A R. Mitigation alternatives to decrease nitrous oxides emissions and urea-nitrogen loss and their effect on methane flux[J]. Journal of environmental quality, 1999, 25(6):1105-1111.
- [8] MOSIER A R, MOHANTY S K, BHADRACHALA M A, et al. Evolution of dinitrogen and nitrous oxide from the soil to the atmosphere through rice plants[J]. Biology and fertility of soils, 1990, 9: 61-67.
- [9] NICOLAISEN M H, PETERSEN N R, REVSBECH N P, et al. Nitrification-denitrification dynamics and community structure of ammoniaoxidizing bacteria in high yield irrigated Philippine rice field[J]. Microbiology ecology, 2004, 49: 285-291.
- [10] 张自常,李鸿伟,曹转勤,等.施氮量和灌溉方式的交互作用对水稻产量和品质影响[J].作物学报,2013,39(1):84-92.
- [11] 许光辉,郑洪元.土壤微生物分析方法手册[M].北京:农业出版社,1986:110-118.
- [12] 南京土壤所.土壤农化分析方法[M].北京:中国农业科学出版社,1999:234-241.
- [13] 日本土壤微生物研究会.土壤微生物实验法[M].叶维青,译.北京:科学出版社,1983:63-70.
- [14] BERG P, ROSSWALL T. Ammonium oxidizer numbers, potential and actual oxidation rates in two arable soils[J]. Biological fertility of soils, 1985, 1: 1131-1140.
- [15] 赵爽,胡江,沈其荣.两个水稻品种根际土壤细菌和氨氧化细菌的群落结构差异[J].土壤学报,2010,47(5):939-945.
- [16] SHI W S, LI Y E, LI M D. Annual CH_4 and N_2O 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.
- [17] 李香兰,徐华,曹金留,等.水分管理对水稻生长期 N_2O 排放的影响[J].土壤,2006,38(6):703-707.
- [18] DAVIDSON E A, MATSON P A, VITOUSEK P M, et al. Processes regulation soil emissions of NO and N_2O in a seasonally dry tropical forest[J]. Ecology, 1993, 74(1): 130-139.
- [19] 袁飞,冉炜,胡江,等.变性梯度凝胶电泳法研究我国不同土壤氨氧化细菌群落组成及活性[J].生态学报,2005,25(6):1318-1324.
- [20] 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.
- [21] WALLENSTEIN M D, MYROLD D D, FIRESTONE M, et al. Environmental controls on denitrifying communities and denitrification rates: insights from molecular methods[J]. Ecological applications, 2006, 16(6): 2143-2152.
- [22] INNEREBNER G, KNAPP B, VASARA T, et al. Traceability of ammonia-oxidizing bacteria in compost-treated soils[J]. Soil biology and biochemistry, 2006, 38(5): 1092-1100.
- [23] CHU H Y, FU T, MORIMOTO S, et al. Population size and specific nitrification potential of soil ammonia-oxidizing bacteria under long-term fertilizer management[J]. Soil biology and biochemistry, 2008, 40: 1960-1963.
- [24] HE J Z, SHEN J P, ZHANG L M, et al. Quantitative analyses of the abundance and composition of ammonia-oxidizing bacteria and ammonia-oxidizing archaea of a Chinese upland red soil under long-term fertilization practices[J]. Environment microbiology, 2007, 9(9): 2364-2374.
- [25] WANG J, ZHU B, ZHANG J B, et al. Mechanisms of soil N dynamics following long-term application of organic fertilizers to subtropical rain-fed purple soil[J]. Soil biology and biochemistry, 2015, 91: 222-231.
- [26] DOBBIE K E, SMITH K A. Nitrous oxide emission factors for agricultural soils in Great Britain: the impact of soil water-filled pore space and other controlling variables[J]. Global change biology, 2003, 9(2): 204-218.

Effects of ammonia-oxidizing bacteria and inorganic nitrogen on N₂O emission from paddy soil under different irrigation modes and nitrogen treatments

LIU Jingwen^{1,2,3} LI Fusheng^{1,2,3} DONG Yanfang^{1,2,3} WANG Kai^{1,2,3}
FANG Zetao^{1,2,3} HUANG Zhonghua⁴ LUO Weigang⁴

1. College of Agriculture, Guangxi University, Nanning 530005, China;

2. Guangxi Academician Work Station of the New Technology of Water-saving Agriculture in Karst Region, Nanning 530005, China;

3. Guangxi Colleges and Universities Key Laboratory of Crop Cultivation and Tillage, Nanning 530005, China;

4. Nanning Irrigation Experimental Station, Nanning 530001, China

Abstract Two-season experiments with three irrigation modes including conventional irrigation (CIR), “thin-shallow-wet-dry” irrigation (TIR) and alternate wetting and drying irrigation (DIR), and two N treatments including 100% urea-N (FM1) and 50% urea-N + 50% pig manure N (FM2) were conducted. The changes of N₂O emission flux, the number of ammonia-oxidizing bacteria, potential nitrification rate and inorganic nitrogen content in paddy soil at different growth stages of early rice and late rice were investigated under different irrigation modes and nitrogen (N) treatments to study the effects of ammonia-oxidizing bacteria, potential nitrification rate and inorganic nitrogen content on soil N₂O emission. Results showed that the number of ammonia oxidizing bacteria in paddy soil was lower at the stages of tillering and maturing of early rice and late rice, but higher at the stages of booting and milky. Soil potential nitrification rate was higher at the stages of booting of late rice and the stages of booting and milky of early rice, but lower at the stages of tillering and maturing of early rice and late rice. Under the same N treatment, soil NH₄⁺-N content in DIR mode was higher than that in the CIR and TIR modes. Soil NO₃⁻-N content in the DIR and TIR modes was significantly higher than that in CIR mode. Soil N₂O emission flux at the stages of booting and milky of early rice in the DIR and TIR modes was significantly higher than that in CIR mode. N₂O emission flux under FM2 treatment was higher than that under FM1 treatment. The number of ammonia-oxidizing bacteria and potential nitrification rate was significantly positively correlated with soil NH₄⁺-N content. Soil N₂O emission flux was significantly positively correlated with the number of ammonia-oxidizing bacteria and potential nitrification rate. Paddy soil N₂O emission was mainly affected by ammonia-oxidizing bacteria and potential nitrification rate. It is indicated that soil NH₄⁺-N content directly affects the number of ammonia-oxidizing bacteria and potential nitrification rate, and affects the N₂O emission indirectly.

Keywords ammonia-oxidizing bacteria; N₂O emission; “thin-shallow-wet-dry” irrigation; alternate wetting and drying irrigation