

裴自伟, 陈意超, 李伏生, 等. 不同灌水模式和施氮处理下稻田 N_2O 排放通量及其与硝化-反硝化细菌数量的关系[J]. 农业环境科学学报, 2017, 36(12):2561–2568.

PEI Zi-wei, CHEN Yi-chao, LI Fu-sheng, et al. The relationship between N_2O emission flux from paddy fields and nitrifying–denitrifying bacteria under different irrigation methods and nitrogen treatments[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2017, 36(12): 2561–2568.

不同灌水模式和施氮处理下稻田 N_2O 排放通量及其与硝化-反硝化细菌数量的关系

裴自伟^{1,2,3}, 陈意超^{1,2,3}, 李伏生^{1,2,3*}, 黄忠华⁴, 罗维刚⁴

(1. 广西大学农学院, 南宁 530004; 2. 广西喀斯特地区节水农业新技术院士工作站, 南宁 530004; 3. 广西高校作物栽培学与耕作学重点实验室, 南宁 530004; 4. 南宁市灌溉试验站, 南宁 530001)

摘要:为获得减少稻田 N_2O 排放的合适灌溉模式和施氮管理, 通过大田试验, 研究了不同灌溉方式和施氮处理对生育期内稻田 N_2O 排放通量和不同时期土壤无机氮含量和硝化-反硝化细菌数量的影响, 并分析了采样当天稻田 N_2O 排放通量与无机氮含量和硝化-反硝化细菌数量的关系。试验设 3 种灌溉方式, 即常规灌溉(CI)、“薄浅湿晒”灌溉(TI)和干湿交替灌溉(DI), 以及 2 种施氮处理, 即全部施用尿素(RN1)和 50%尿素+50%猪粪(RN2), 2 种施氮处理氮用量相同。相同施氮处理下, TI 模式可以降低稻田 N_2O 排放; DI 和 TI 模式土壤无机氮含量、硝化细菌数量和亚硝化细菌数量较 CI 方式高, 而 CI 和 TI 模式土壤反硝化细菌数量较 DI 模式高。相同灌水模式下, RN1 处理可显著降低稻田 N_2O 排放, 且 RN1 处理土壤无机氮含量、硝化细菌数量、亚硝化细菌数量和反硝化细菌数量较 RN2 处理低。稻田 N_2O 排放通量与土壤反硝化细菌、硝化细菌数量和 NH_4^+-N 含量之间均呈极显著正相关关系($r \geq 0.309, P < 0.01$), 且土壤 NH_4^+-N 含量与硝化细菌数量和反硝化细菌数量之间也均呈极显著正相关关系($r \geq 0.555, P < 0.01$)。因此, “薄浅湿晒”灌溉和尿素处理可以降低稻田 N_2O 排放, 且稻田 N_2O 排放通量受到土壤 NH_4^+-N 含量、反硝化细菌数量和硝化细菌数量的综合影响。

关键词:灌水模式; 有机无机氮肥配施; N_2O 排放; 排放通量

中图分类号: X511 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-2043(2017)12-2561-08 doi:10.11654/jaes.2017-0749

The relationship between N_2O emission flux from paddy fields and nitrifying–denitrifying bacteria under different irrigation methods and nitrogen treatments

PEI Zi-wei^{1,2,3}, CHEN Yi-chao^{1,2,3}, LI Fu-sheng^{1,2,3*}, HUANG Zhong-hua⁴, LUO Wei-gang⁴

(1. College of Agriculture, Guangxi University, Nanning 530004, China; 2. Guangxi Academician Work Station of the New Technology of Water-saving Agriculture in Karst Region, Nanning 530004, 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: To develop a suitable irrigation method and nitrogen (N) management approach for reducing N_2O emissions from paddy fields, the effect of different irrigation methods and N treatments on the N_2O emission flux from paddy fields over an entire growth period was investigated. To achieve this, the inorganic N content and number of nitrifying–denitrifying bacteria in the soil at different growth stages were determined using field experiments. The relationship between the N_2O emission flux from paddy fields and the inorganic N content as well as the number of nitrifying and denitrifying bacteria was analyzed for each sampling day. The field experiment included three irrigation methods, namely, conventional irrigation (CI), "thin–shallow–wet–dry" irrigation (TI), and alternate drying and wetting irrigation (DI). Two N

收稿日期: 2017-05-25 录用日期: 2017-08-15

作者简介: 裴自伟(1991—), 女, 河南郑州人, 硕士, 主要从事水土资源利用与环境方面的研究。E-mail: 1187990741@qq.com

* 通信作者: 李伏生 E-mail: zhenz@gxu.edu.cn; lpfu6@163.com

基金项目: 国家自然科学基金项目(51469003)

Project supported: The National Natural Science Foundation of China(51469003)

treatments, namely, 100% urea(RN1) and 50% urea + 50% pig manure(RN2) were also used at the same N application rate. For the same N application, the TI method was found to reduce the N_2O emission flux from paddy fields. The DI and TI methods were found to have a higher number of nitrate and nitrite bacteria as well as inorganic N content than the CI method. The CI and TI methods were found to increase the number of denitrifying bacteria compared to the DI method. Under the same irrigation method, the RN1 treatment was found to decrease the N_2O emission flux significantly, and the RN1 treatment decreased the number of nitrate, nitrite, and denitrifying bacteria, as well as the inorganic N content compared to the RN2 treatment. There were significant positive correlations between the N_2O emission flux from paddy fields and the NH_4^+-N content, as well as the number of nitrate bacteria and denitrifying bacteria in the soil. Significant positive correlations were also observed between the NH_4^+-N content and the number of nitrate bacteria and denitrifying bacteria in the soil. Therefore, it is shown that the "thin-shallow-wet-dry" irrigation method and urea treatment can reduce the N_2O emission flux from paddy fields, and the N_2O emission flux was affected by the NH_4^+-N content and number of nitrate bacteria and denitrifying bacteria in the soil.

Keywords: irrigation methods; combined application of organic and inorganic N fertilizers; N_2O ; emission flux

稻田作为氧化亚氮(N_2O)排放的源头之一备受关注,而合理的水氮管理是降低稻田 N_2O 排放途径之一。前人研究表明,稻田 N_2O 排放主要集中在晒田完成复水之后及成熟期稻田水分落干时^[1],这是因为水分管理可以改变土壤氧化还原电位(Eh),影响 N_2O 排放,只有选择合适的灌溉模式才能有效地降低稻田 N_2O 的产生^[2]。“薄浅湿晒”灌溉和干湿交替灌溉模式是我国南方地区稻田应用较广的节水灌溉模式,研究发现,晚稻、早稻孕穗期和乳熟期“薄浅湿晒”和干湿交替灌溉模式土壤 N_2O 排放通量比常规灌溉模式显著提高^[3],这是因为土壤干湿交替使得硝化作用和反硝化作用交替进行,从而促进了 N_2O 的产生^[4]。 N_2O 的排放会随着氮肥用量的增加而增加^[5]。除了施用氮肥对 N_2O 的排放有影响外,施用有机肥同样会影响 N_2O 排放^[6],如施用沼液后 N_2O 排放量显著高于施用化肥,且 N_2O 排放量随着沼液替代量的降低而呈现降低的趋势^[7]。此外,稻田 N_2O 排放通量和土壤硝化、反硝化细菌数量也有着密切联系^[8],其他微生物代谢活动为反硝化作用提供可用的碳源,在硝化、反硝化细菌的共同作用下稻田大量排放 N_2O ^[9]。目前“薄浅湿晒”和干湿交替灌溉模式下稻田硝化-反硝化细菌数量变化及其与 N_2O 排放之间的关系尚不清楚,有必要深入研究这方面的问题。因此本文通过大田试验,研究了不同灌溉方式与施氮处理对生育期内稻田 N_2O 排放通量,以及不同时期土壤无机氮含量和硝化-反硝化细菌数量的影响,并分析采样当天稻田 N_2O 排放通量与土壤无机氮含量和硝化-反硝化细菌数量的关系,以阐明土壤无机氮含量和硝化-反硝化细菌数量的变化对稻田 N_2O 排放通量的影响,并获得降低稻田 N_2O 排放的灌溉模式和施氮管理。

1 材料与方法

1.1 试验地点和材料

田间试验在南宁市灌溉试验站进行。该试验站年平均日照时数为 1906 h,年平均气温 22.3 °C,试验期间降雨量为 613.4 mm。试验土壤为第四纪红色黏土发育的水稻土,其背景值如下:pH 7.02,有机质 28.64 g·kg⁻¹,碱解氮 109.08 mg·kg⁻¹,速效磷 64.21 mg·kg⁻¹,速效钾 128.46 mg·kg⁻¹。供试有机肥为腐熟猪粪,其有机质含量 14.87%,N 含量 0.49%,无机氮含量 0.32%, P_2O_5 含量 0.53%, K_2O 含量 0.37%,水分含量 71.23%。试验用尿素含 N 46%,过磷酸钙含 P_2O_5 12%,氯化钾含 K_2O 60%。供试水稻品种为中浙优 8 号。

1.2 试验方法

田间试验设 3 种灌水模式,包括常规灌溉(CI):移栽返青期以及分蘖期到乳熟期田间均保持 20~30 mm 水层,分蘖末期和成熟期保持土壤湿润;干湿交替灌溉(DI):移栽后 10 d 内田间保持 10~20 mm 水层,7 d 后进行干湿交替灌溉,即当土壤水势为-15 kPa(张力计,TEN45 南京土壤研究所工厂)时,灌水 20 mm 后自然落干至土壤水势为-15 kPa,再灌水 20 mm,如此循环,至水稻成熟结束;“薄浅湿晒”灌溉(TI),其水分控制可参考本课题组董艳芳等^[1]。水稻生育期内 3 种灌溉方式土壤水分变化情况:除分蘖末期,CI 模式整个生育期保持 2~4 cm 水层,移栽返青期保持浅水层(1~2 cm),黄熟期自然落干;DI 模式在水稻移栽后 10 d 内保持浅水层,以后按照田间张力计水势变化控水,即自然落干至水势为-15 kPa 时灌水 1~2 cm,再自然落干再灌水,如此循环至水稻成熟;TI 模式返青前保持浅水层,分蘖前土壤保持湿润(0.9~1 cm 水层),分蘖后期晒田,拔节至孕穗期保持浅

水层,乳熟期湿润,黄熟期晒田。2种施氮处理,包括100%尿素(RN1)和50%尿素+50%猪粪(RN2)。所有处理N、P₂O₅和K₂O用量分别为150、75 kg·hm⁻²和150 kg·hm⁻²。其中RN1处理全部过磷酸钙和50%的尿素、氯化钾作基肥,RN2处理全部过磷酸钙、有机肥和50%氯化钾作基肥,均在插秧前一天耕地时施入土壤中。两施肥处理余下50%的尿素和氯化钾平均在分蘖期和孕穗期施入土壤中。

试验按完全方案设计,共6个处理,每个处理设3个重复,共18个小区,每小区面积25 m²。随机区组排列。小区周围用25~26 cm厚红砖水泥墙壁隔开,以防小区之间水分相互侧渗和降雨多时排水。各小区安装水表计量每次灌水量。

田间试验于2015年3月19日进行水稻催芽,露白后播种育秧,培育至3叶1心期,选取长势壮硕基本一致的幼苗于4月22日进行移栽。每穴双株栽培,行距20 cm,株距20 cm。水稻秧苗移栽后各小区保持20~30 mm水层利于秧苗返青。不同灌水处理从5月2日秧苗返青后开始,至8月15日水稻黄熟后结束,8月20日试验收获完毕,全生育期大约154 d。此外,试验期间各处理其他田间管理措施一致。

1.3 样品采集与测定

气体采集用静态封闭箱法,参考本课题组董艳芳等^[1],把装有风扇和温度计的箱子放于底座,用50 mL注射器(美国BD)采气,每隔5 min采气1次共计7次,选取其中4次,确保N₂O浓度-时间线性回归曲线的决定系数R²大于0.9。限于实验室条件和人力,每周采样1次,全生育期共测定13次。N₂O排放通量用气相色谱仪(Agilent 7890A GC)测定(检测器为ECD,将装有载气的高压瓶、氢气发生器、纯净空气泵、气体进样系统和主机打开,当检测器温度升至350℃和主机基线稳定后开始分析样品)。根据仪器测出的N₂O标准气体峰面积、箱体体积与底座面积,由下式计算排放通量。

$$F = \rho \times \frac{V}{A} \times \frac{P}{P^0} \times \frac{273}{273+T} \times \frac{dC}{dt}$$

式中:F为N₂O排放通量,μg N₂O·m⁻²·h⁻¹;ρ为标准状况下N₂O的密度,μg N₂O·m⁻³;V表示采气箱的体积,m³;A为采气箱所覆盖面积,m²;P为密闭静态箱内的气压,Pa;P⁰为标准大气压,为1.013×10⁵ Pa,试验地区和标准大气压相近,两者比值约为1。T为密闭静态箱内温度,℃。dC/dt表示密闭静态箱内N₂O浓度在单位时间内的变化量,μL·m⁻³·h⁻¹。

分别于移栽后第20(分蘖期)、56(孕穗期)、84 d(乳熟期)和104 d(成熟期)采集土样,每次采样时间为灌水处理后第2 d上午,在每个试验小区进行多点采样,用土钻采集0~20 cm土样装入保鲜袋并混匀,带回实验室后立刻用新鲜土壤测定硝化细菌、亚硝化细菌和反硝化细菌数量,同时用烘干法测定土壤含水率(质量百分数),以计算每克干土中微生物数量,其余土壤进行风干处理后用于测定土壤无机氮含量。

土壤无机氮用2 mol·L⁻¹ KCl溶液提取后,硝态氮含量用0.45 μm滤膜过滤后采用双波长比色法测定^[10],铵态氮含量用靛酚蓝比色法测定^[5]。土壤硝化细菌、亚硝化细菌和反硝化细菌数量的测定所用培养基见参考文献[10],均用MPN计数法^[11-12]测定。

1.4 统计分析

试验数据用Excel 2003和SPSS 17.0软件分析。方差分析用SPSS程序中通用线性模型单变量多因素法,不同处理各指标平均值的比较用Duncan法。并分析采样当日稻田N₂O排放通量与土壤无机氮含量和硝化-反硝化细菌数量的关系。

2 结果与分析

2.1 不同灌水模式与施氮处理稻田N₂O排放通量的变化

由图1a可知,RN1下,3种灌水模式在水稻分蘖末期和成熟期落干与晒田期间都有N₂O排放峰。CI模式下分蘖末期晒田期间N₂O排放最大峰值为165.6 μg N₂O·m⁻²·h⁻¹;TI模式土壤N₂O排放峰出现时间没有太大变化,但排放时间缩短、排放通量降低;DI模式稻田土壤N₂O排放通量有3次较大的峰值,最高达到150.0 μg N₂O·m⁻²·h⁻¹,而此时CI和TI模式稻田处于N₂O吸收时期,说明在相同施氮条件下DI模式的干湿交替阶段能促进N₂O排放。CI、DI与TI模式在整个生育期N₂O平均排放通量分别为20.63、52.32、12.91 μg N₂O·m⁻²·h⁻¹,TI模式N₂O排放通量较低。说明RN1下通气条件较差的CI和TI可降低整个生育期内N₂O排放。

图1b显示RN2下不同灌水模式在追肥后分蘖末期N₂O排放通量均出现最大值。CI与TI模式下整个生育期N₂O排放存在两次较大峰值,分别出现在分蘖末期和成熟期落干、晒田阶段;DI模式下出现了3个依次递减的峰值,在分蘖期追肥后出现最高峰值为686.35 μg N₂O·m⁻²·h⁻¹,其余两次出现在旺盛生长期。与CI模式相比,DI模式土壤N₂O排放通量增加

239.34%,而TI模式降低3.65%。说明在RN2下TI模式可以达到N₂O减排的目的。

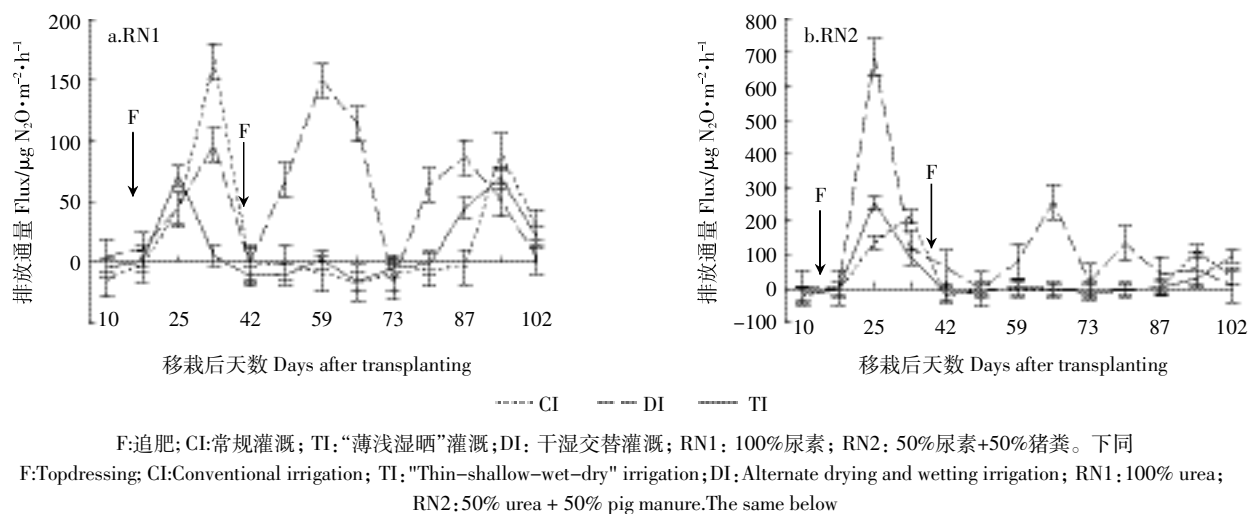
CI、DI和TI模式下,与RN1相比,RN2整个生育期土壤N₂O排放通量平均分别增加62.28%、117.13%和149.80%,表明上述3种灌水模式下有机无机氮肥配施处理均不同程度上促进整个生育期内采样期间土壤N₂O的排放。

2.2 不同灌水模式与施氮处理对稻田土壤无机氮含量的影响

由表1可知,在整个生育期内不同处理土壤NH₄⁺-N含量都呈下降趋势。CI、DI和TI模式下,在分蘖期

RN2土壤NH₄⁺-N含量较RN1分别下降21.24%、22.75%与15.16%,而在孕穗期、乳熟期和成熟期RN2土壤NH₄⁺-N含量较RN1有所上升。整个生育期内,RN1下TI和DI模式土壤NH₄⁺-N平均含量较CI模式分别提高12.70%和18.00%,RN2下TI和DI模式土壤NH₄⁺-N含量较CI模式分别提高15.47%和22.65%。说明在相同灌水模式下,RN2有利于氮素矿化为NH₄⁺-N;而在相同施氮条件下,DI和TI模式有利于土壤NH₄⁺-N的保存。

不同处理土壤NO₃⁻-N含量在分蘖期最低而成熟期达到最高。CI、DI和TI模式下,在分蘖期RN2土壤



F:追肥; CI:常规灌溉; TI:“薄浅湿晒”灌溉; DI: 干湿交替灌溉; RN1: 100%尿素; RN2: 50%尿素+50%猪粪。下同
F:Topdressing; CI:Conventional irrigation; TI: "Thin-shallow-wet-dry" irrigation; DI: Alternate drying and wetting irrigation; RN1: 100% urea; RN2: 50% urea + 50% pig manure. The same below

图1 不同灌水模式和施氮处理下稻田土壤N₂O排放通量变化

Figure 1 Changes of N₂O emission flux in paddy soil under different irrigation methods and nitrogen treatments

表1 不同灌水模式和施氮处理对土壤无机氮含量的影响(mg·kg⁻¹)

Table 1 Effect of different irrigation methods and nitrogen treatments on the mineral N content in the paddy soil (mg·kg⁻¹)

无机氮 Inorganic N	灌水模式 Irrigation method	施氮处理 N treatment	分蘖期 Tillering	孕穗期 Booting	乳熟期 Milky	成熟期 Ripening
铵态氮 NH ₄ ⁺ -N	CI	RN1	37.40±3.41ab	20.36±1.52c	13.25±1.08d	8.06±0.49c
		RN2	29.45±1.55c	23.29±1.79bc	14.32±1.17cd	11.34±1.49b
	DI	RN1	42.01±4.28a	25.41±2.41ab	17.03±1.16b	8.85±0.47c
		RN2	35.64±3.62abc	28.60±2.39a	19.78±1.25a	12.14±0.39ab
	TI	RN1	39.85±3.05a	23.81±1.26bc	16.35±1.03bc	9.10±0.68c
		RN2	30.79±1.92bc	26.98±1.85ab	19.30±1.63a	13.46±1.09a
硝态氮 NO ₃ ⁻ -N	CI	RN1	0.31±0.03c	0.72±0.08b	0.52±0.04c	3.39±0.33c
		RN2	0.14±0.02c	0.28±0.03b	0.64±0.05c	4.00±0.24abc
	DI	RN1	2.56±0.31a	3.38±0.30a	2.82±0.38a	3.83±0.27bc
		RN2	2.13±0.25b	3.67±0.36a	2.53±0.29a	4.53±0.32a
	TI	RN1	0.26±0.04c	0.49±0.06b	1.73±0.17b	3.66±0.33bc
		RN2	0.11±0.02c	0.39±0.04b	1.41±0.16b	4.25±0.18ab

注:表中数值为平均值±标准差(n=3),同一列不同字母表示差异显著(P<0.05)。下同。

Note: Values are means±standard deviations(n=3), Different letters in the same column indicate a significant difference at P<0.05 level. The same below.

NO_3^- -N 含量较 RN1 分别下降 54.84%、16.80% 和 57.69%；在成熟期 RN2 土壤 NO_3^- -N 含量较 RN1 分别提高 17.99%、18.28% 和 16.12%；整个生育期 RN2 土壤 NO_3^- -N 平均含量比 RN1 有所提高。整个生育期内, RN1 下 DI 模式土壤 NO_3^- -N 平均含量较 CI 和 TI 模式分别增加 154.86% 和 105.05%, RN2 下 DI 模式土壤 NO_3^- -N 平均含量较 CI 和 TI 分别增加 154.15% 和 108.77%, 这表明 RN2 与 DI 模式结合土壤 NO_3^- -N 含量较高。

2.3 不同灌水模式和施氮处理对稻田土壤硝化-反硝化细菌数量的影响

由表 2 可知, 不同处理土壤硝化细菌数量在整个生育期内呈下降趋势。CI、DI 和 TI 模式下, 在分蘖期 RN2 土壤硝化细菌数量较 RN1 分别降低 40.18%、16.73% 和 24.49%；而在孕穗期、乳熟期和成熟期, RN2 土壤硝化细菌数量一般比 RN1 高。整个生育期内, 与 CI 模式相比, RN1 下 DI 和 TI 模式土壤硝化细菌平均数量分别增加 77.20% 和 27.80%, RN2 下分别增加 102.02% 和 78.09%, 说明 DI 和 TI 与 RN2 结合有利于土壤硝化细菌的生存。

所有处理土壤亚硝化细菌数量以分蘖期为最多, 而成熟期较少(表 2)。CI、DI 和 TI 模式下, 在分蘖期

RN2 土壤亚硝化细菌数量较 RN1 分别降低 31.90%、13.07% 和 20.95%, 而在孕穗期、乳熟期和成熟期 RN2 比 RN1 有所提高。整个生育期内, 与 CI 模式相比, RN1 下 DI 和 TI 模式土壤亚硝化细菌平均数量分别增加 48.61% 和 30.32%, RN2 下分别增加 46.81% 和 24.57%, 说明 DI 和 TI 模式与 RN1 处理结合更接近土壤亚硝化细菌的生存环境。

由表 2 可以看出, 土壤反硝化细菌数量在孕穗期较高, 而在成熟期最低。CI、DI 和 TI 模式下, 整个生育期内 RN2 土壤反硝化细菌平均数量比 RN1 分别增加 65.71%、75.69% 和 53.03%。与 DI 相比, RN1 下 CI 和 TI 土壤反硝化细菌平均数量分别增加 22.21% 和 23.74%, RN2 下分别增加 15.27% 和 7.78%, 说明 RN2 处理与 CI 或 TI 模式结合更适于土壤反硝化细菌活动。

2.4 稻田无机氮含量和硝化-反硝化细菌数量对 N_2O 排放通量的影响

由表 3 可知, 稻田 N_2O 排放通量与土壤反硝化细菌数量、硝化细菌数量和 NH_4^+ -N 含量之间呈极显著正相关关系; 土壤 NH_4^+ -N 含量与硝化细菌数量、亚硝化细菌数量和反硝化细菌数量之间也呈极显著正相关关系。此外, 土壤 NO_3^- -N 含量与 NH_4^+ -N 含量和反

表 2 不同灌水模式和施氮处理对稻田土壤硝化-反硝化微生物数量的影响

Table 2 The effect of different irrigation methods and nitrogen treatments on the number of nitrifying-denitrifying bacteria in paddy soil

细菌 Bacteria	灌水模式 Irrigation method	施氮处理 N treatment	分蘖期 Tillering	孕穗期 Booting	乳熟期 Milky	成熟期 Ripening
硝化细菌 Nitrate bacteria/ $10^3 \text{ cfu} \cdot \text{g}^{-1}$ 干土	CI	RN1	10.08±1.27c	5.36±0.64d	3.37±0.46c	2.81±0.38b
		RN2	6.03±0.96d	4.16±0.63d	3.89±0.46bc	3.22±0.23b
	DI	RN1	16.74±2.18a	14.20±2.35b	4.45±0.49bc	2.92±0.45b
		RN2	13.94±2.28ab	20.15±2.87a	6.08±0.65a	3.78±0.46ab
	TI	RN1	11.84±1.26bc	7.57±1.07d	4.93±0.83b	3.29±0.55b
		RN2	8.94±1.34c	10.82±1.88c	6.74±0.76a	4.31±0.45a
亚硝化细菌 Nitrite bacteria/ $10^3 \text{ cfu} \cdot \text{g}^{-1}$ 干土	CI	RN1	36.39±5.10bc	26.70±2.62d	15.45±2.04c	9.89±1.38c
		RN2	24.78±3.09c	40.02±3.09bc	19.80±2.21bc	14.78±2.02ab
	DI	RN1	56.25±8.75a	44.86±6.86ab	20.21±2.10bc	10.10±1.24c
		RN2	48.90±5.02b	54.00±6.07a	29.99±2.50a	13.01±2.09bc
	TI	RN1	44.82±4.79ab	31.74±4.93cd	24.83±2.44ab	13.85±1.33abc
		RN2	35.43±4.47bc	41.17±6.17bc	29.7±3.20a	17.50±2.37a
反硝化细菌 Denitrifying bacteria/ $10^4 \text{ cfu} \cdot \text{g}^{-1}$ 干土	CI	RN1	69.97±8.49c	97.27±10.34bc	68.29±7.34bc	30.31±5.03bc
		RN2	133.09±18.41b	147.12±17.55a	110.52±11.86a	49.80±5.58a
	DI	RN1	59.65±8.95c	82.21±7.47c	55.30±7.46c	20.37±3.02d
		RN2	164.91±15.67a	102.85±16.81bc	80.12±8.02b	34.29±4.17bc
	TI	RN1	70.81±10.39c	104.04±15.52bc	69.59±9.38bc	24.73±3.30cd
		RN2	149.49±17.57ab	132.38±19.32ab	90.44±13.08b	39.61±5.03b

表3 不同灌水模式与施氮处理下稻田 N_2O 排放通量与硝化-反硝化细菌数量和无机氮含量的关系Table 3 Correlation between the N_2O emission flux and the number of nitrifying-denitrifying bacteria and inorganic N content for different irrigation methods and nitrogen treatments

指标 Item	硝态氮 NO_3^--N	铵态氮 NH_4^+-N	反硝化细菌 Denitrifying bacteria	亚硝化细菌 Nitrite bacteria	硝化细菌 Nitrate bacteria
铵态氮 NH_4^+-N	-0.466**				
反硝化细菌 Denitrifying bacteria	-0.631**	0.555**			
亚硝化细菌 Nitrite bacteria	-0.280*	0.682**	0.597**		
硝化细菌 Nitrate bacteria	-0.042	0.733**	0.398**	0.791**	
排放通量 Emission flux	0.018	0.331**	0.382**	0.291*	0.309**

注: * 显著; $r_{0.05}=0.232, n=72$; ** 极显著; $r_{0.01}=0.302, n=72$.Note: *Significance; $r_{0.05}=0.232, n=72$; **Markedly significance; $r_{0.01}=0.302, n=72$.

硝化细菌数量之间呈极显著负相关关系。

3 讨论

RN1 下, 3 种灌溉模式稻田都有 N_2O 排放峰, 不同的是孕穗期前后只有 DI 模式稻田出现 N_2O 排放峰 (图 1), 而此时 DI 模式稻田处于水层剧烈变化阶段, CI 和 TI 模式是淹水期, 说明晒田相对于持续淹水极大促进稻田 N_2O 排放^[13-15]。有研究表明相对于持续淹水, 晒田及干湿交替使各处理平均 N_2O 排放通量分别增加 47 倍和 23 倍^[16]。DI、CI 和 TI 模式稻田 N_2O 平均排放通量依次降低, 表明 DI 模式下干湿交替可促进土壤 N_2O 的排放, 这与前人研究结果^[16]一致。可能由于 N_2O 主要是排水增加了土壤通气性和微生物活性, 加之淹水期未用的氮肥硝化作用增强, 而硝化作用是土壤 N_2O 排放的主要原因^[17-18]。本实验在 RN2 下也有相似规律, 与 CI 模式相比, DI 模式稻田 N_2O 排放通量增加了 239.34%, 而 TI 模式降低了 3.65%, 这表明 RN2 下 DI 模式对稻田 N_2O 的排放具有明显促进作用。CI 模式稻田 N_2O 排放峰较 DI 与 TI 模式出现了推迟的现象, 主要原因在于该灌水模式下 RN2 处理水稻在生长过程出现了贪青迟熟的症状, 导致晒田时间有所靠后。与 RN1 相比, CI、DI 和 TI 模式下 RN2 稻田 N_2O 排放量分别平均增加 62.28%、117.13% 与 149.80%, 这是因为有机肥中存在更多可分解的有机碳 (约为 8.63%), 从而土壤还原强度提高, NH_4^+-N 被氧化成 NO_3^--N 后在反硝化作用下生成 N_2O ^[19], 说明上

述 3 种灌水模式采用有机无机氮配施处理均会不同程度提高水稻整个生育期内采样期间土壤 N_2O 的排放, 这与前人研究结果^[3]一致。相同施氮处理下, 本研究结果与董艳芳等^[1]发现早稻 N_2O 的排放通量规律一致, 只是数值偏高, 可能是因为本实验施氮量为 $150 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 而该研究是 $135 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 由此可得出, 低氮水平可有效减少 N_2O 的排放。

在相同施氮处理下, DI 和 TI 模式土壤 NH_4^+-N 含量较 CI 模式高, 因为 DI 模式下干湿交替灌溉与 TI 模式下落干湿润过程能加剧有机氮的矿化分解, 更有利于土壤 NH_4^+-N 的释放, 这与刘靖雯等^[3]的结果相似。相同灌水模式下, 水稻生育后期 RN2 土壤 NH_4^+-N 含量较 RN1 显著或极显著提高, 可能是因为有机氮矿化所致^[20-21], 表明有机无机氮肥配施可提高土壤 NH_4^+-N 含量。相同灌水模式下, RN2 土壤 NO_3^--N 含量前期要比 RN1 低, 可能因为有机无机氮肥配施能显著降低土壤 NO_3^--N 含量^[22], 后期有机氮分解影响变小, 含量增加。在相同施氮处理下, DI、TI 和 CI 模式土壤 NO_3^--N 含量依次降低, 说明 DI 和 TI 模式通过控水提高土壤 NO_3^--N 含量^[23], 这是因为间歇性氧气供应提高微生物活性, 促进土壤 NH_4^+-N 转化为 NO_3^--N 。由表 1 和表 3 可知, 整个生育期内土壤 NO_3^--N 含量与 NH_4^+-N 含量之间极显著负相关 ($r=-0.466$, $r_{0.01}=0.302, n=72$), 可能是因为微生物作用下土壤 NH_4^+-N 硝化为 NO_3^--N ^[24], 两者存在相互消长关系。

由表 2 可知, 相同灌水模式下, 除分蘖期外 RN2 土壤硝化细菌数量、亚硝化细菌数量和反硝化细菌数量都较 RN1 显著提高, 说明 RN2 可比 RN1 显著提高微生物活性, 可能是受到有机肥带入的有机质和微生物的影响^[25]。相同施氮处理下, DI 和 TI 模式土壤硝化细菌数量和亚硝化细菌数量高于 CI 模式, 而 CI 模式更有利于反硝化细菌生存, 即处于淹水条件的 CI 适合厌氧微生物生长, 而浅、湿、间歇灌溉适于好气性微生物的生长^[26], 因灌水方式不同造成的土壤通气性差异可能是导致土壤硝化细菌数量、亚硝化细菌数量和反硝化细菌数量不同的原因。在氮循环过程中, 硝化作用是反硝化作用的基础, 而亚硝化作用是硝化作用中的限速步骤^[24]。本实验中可能是因为稻田保持一定湿润度或持续淹水状态下, 土壤中 O_2 浓度降低, 不能为土壤亚硝酸细菌提供充足的碳源和氮源, 致使土壤亚硝酸细菌数量减少^[3]。反硝化作用受多方面因素影响^[24], 本实验所有处理反硝化细菌数量在黄熟期较少, 可能是黄熟期水层逐渐减少直至晒田, 导致土壤中氧

气增加,不利于反硝化细菌的生存,抑制反硝化作用的发生^[18]。在 RN1 下,DI 模式孕穗期稻田 N_2O 排放出现峰值,而相对应的土壤反硝化细菌数量达最大值;RN2 下,DI 模式分蘖期稻田 N_2O 排放达峰值,此时土壤反硝化细菌数量较多,表明干湿交替下 N_2O 排放通量和反硝化细菌数量正相关,土壤以反硝化作用为主。

由表 3 可知,采土当日稻田 N_2O 排放通量与土壤硝化细菌数量、亚硝化细菌数量和反硝化细菌数量以及 NH_4^+-N 含量之间极显著正相关,这是因为在分蘖期和孕穗期土壤硝化细菌、亚硝化细菌和反硝化细菌数量以及 NH_4^+-N 含量较高, N_2O 排放通量也达到峰值;而在乳熟期和黄熟期土壤硝化细菌、亚硝化细菌和反硝化细菌数量以及 NH_4^+-N 含量都较低, N_2O 排放通量也较低所致。 N_2O 是氮肥在硝化细菌、亚硝化细菌和反硝化细菌等微生物作用下经硝化和反硝化作用生成, NH_4^+-N 在硝化细菌和亚硝化细菌作用下生成 NO_3^--N ,而 NO_3^--N 的生成会对硝化细菌和亚硝化细菌有一定的抑制作用; NH_4^+-N 作为底物对微生物则有一定促进作用; NO_3^--N 在反硝化细菌作用下生成 N_2O ,气体可直接排放出去,对反应无抑制作用,可促进其发生,即稻田 N_2O 排放量与土壤 NH_4^+-N 含量、硝化细菌数量和反硝化细菌数量之间呈正相关关系。

本研究结果显示,在相同施氮处理下,除了反硝化细菌外,CI 模式土壤 NH_4^+-N 含量、硝化细菌和亚硝化细菌数量都比 TI 模式低,同时考虑到节水,故采用 TI 模式相对较好。虽然 TI 模式土壤反硝化细菌较 CI 和 DI 模式多,但在 N_2O 生成的过程中硝化细菌、亚硝化细菌的硝化作用在反硝化作用前,有可能成为反硝化作用的限速步骤,所以综合考虑“薄浅湿晒”灌溉(TI)较好。而在相同灌水模式下,有机无机氮肥配施(RN2)都较全尿素(RN1)的 N_2O 排放量高,所以施用全尿素可有效抑制 N_2O 排放。

4 结论

(1)“薄浅湿晒”灌溉与全尿素处理结合可有效降低稻田 N_2O 排放通量。

(2)稻田 N_2O 排放通量与土壤 NH_4^+-N 含量和反硝化细菌、硝化细菌数量呈极显著正相关关系。

参考文献:

- [1] 董艳芳,黄景,李伏生,等.不同灌溉模式和施氮处理稻田 CH_4 和 N_2O 排放和增温潜势研究[J].植物营养与肥料学报,2017,23(3):578-588.
- [2] 康新立,华银锋,田光明,等.土壤水分管理对甲烷和氧化亚氮排放的影响[J].中国环境管理干部学院学报,2013(2):43-46.
KANG Xin-li, HUA Yin-feng, TIAN Guang-ming, et al. Effects of soil moisture management on methane and nitrous oxide emissions[J]. *Journal of China Environmental Management College*, 2013(2):43-46.
- [3] 刘靖雯,李伏生,董艳芳,等.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[J].华中农业大学学报,2017,36(4):8-15.
LIU Jing-wen, LI Fu-sheng, DONG Yan-fang, et al. Effects of ammonia oxidation bacteria and promoted nitrogen on N_2O emission from paddy field under different irrigation patterns and nitrogen application[J]. *Journal of Huazhong Agricultural University*, 2017, 36(4):8-15.
- [4] 张威,张旭东,何红波,等.干湿交替条件下土壤氮素转化及其影响研究进展[J].生态学杂志,2010,29(4):783-789.
ZHANG Wei, ZHANG Xu-dong, HE Hong-bo, et al. Advances in soil nitrogen translocation and its effects under dry and wet alternation[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2010, 29(4):783-789.
- [5] 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.
HUANG Shu-hui, JIANG Wen-wei, LÜ Jun, et al. Effects of nitrogen fertilizer and phosphate fertilizer on N_2O emission from paddy field[J]. *Chinese Journal of Environmental Science*, 2005, 25(5):540-543.
- [6] Rütting T, Boeckx P, Müller C, et al. Assessment of the importance of dissimilatory nitrate reduction to ammonium for the terrestrial nitrogen cycle[J]. *Biogeosciences*, 2011, 8(7):1779-1791.
- [7] 黄红英,曹金留,靳红梅,等.猪粪沼液施用对稻麦轮作系统土壤氧化亚氮排放的影响[J].农业环境科学学报,2011,30(11):2353-2361.
HUANG Hong-ying, CAO Jin-liu, JIN Hong-mei, et al. Effects of pig manure biogas application on soil nitrous oxide emission from rice-wheat rotation system[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2011, 30(11):2353-2361.
- [8] 岳进,黄国宏,梁巍,等.不同水分管理下稻田土壤 CH_4 和 N_2O 排放与微生物菌群的关系[J].应用生态学报,2003,14(12):2273-2277.
YUE Jin, HUANG Guo-hong, LIANG Wei, et al. The relationship between CH_4 and N_2O emissions and microbial bacteria in paddy soils under different water control[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2003, 14(12):2273-2277.
- [9] 侯爱新,陈冠雄,吴杰,等.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.
HOU Ai-xin, CHEN Guan-xiong, WU Jie, et al. Characteristics of CH_4 and N_2O emission in paddy field and its microbiological mechanism and some influencing factors[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 1997, 8(3):270-274.
- [10] 黄树辉.裂缝条件下稻田土壤中 N_2O 的释放和氮溶质运移的机理研究[D].杭州:浙江大学,2005.

- HUANG Shu-hui. Release of N_2O and mechanism of nitrogen solute transport in paddy soils under fracture condition[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2005.
- [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.
- XU Guang-hui, ZHENG Hong-yuan. Soil microbiological analysis method manual[M]. Beijing: Agriculture Press, 1986: 110–118.
- [12] 南京土壤所. 土壤农化分析方法[M]. 北京: 中国农业出版社, 1999: 234–241.
- Nanjing Soil Institute. Soil agrochemical analysis method[M]. Beijing: China Agricultural Press, 1999: 234–241.
- [13] 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): 59–61.
- XU Hua, XING Guang-xi, CAI Zu-cong, et al. Effects of soil water status and nitrogen fertilizer application and varieties on N_2O emission from paddy field[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 1999, 10(2): 59–61.
- [14] Cai Z C, Xing G X, Yan X Y, et al. Methane and nitrous oxide from rice paddy fields as affected by nitrogen fertilizers and water management [J]. *Plant and Soil*, 1997, 196(1): 7–14.
- [15] 蔡祖聪, Mosier A R. 土壤水分状况对 CH_4 氧化, N_2O 和 CO_2 排放的影响[J]. 土壤学报, 1999, 31(6): 289–298.
- CAI Zu-cong, Mosier A R. Effects of soil moisture on CH_4 oxidation, N_2O and CO_2 emissions[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 1999, 31(6): 289–298.
- [16] Opdyke M R, Ostrom N E, Ostrom P H. Evidence for the predominance of denitrification as a source of N_2O in temperate agricultural soils based on isotopologue measurements[J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2009, 23(4): GB4018, doi: 10.1029/2009GB003523.
- [17] Kool D M, Dolfing J, Wrage N, et al. Nitrifier denitrification as a distinct and significant source of nitrous oxide from soil[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2011, 43(1): 174–178.
- [18] 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 Xiao-bo, LI Yu-e, LIU Ke-ying, et al. Characteristics of methane and nitrous oxide emission from paddy field under different fertilization treatments[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2006, 22(7): 143–148.
- [19] 韩鹏飞, 郭 敏. 不同肥料的施用对稻田 CH_4 和 N_2O 排放的影响及其减排措施[J]. 安徽农业科学, 2009, 37(17): 8153–8155.
- HAN Peng-fei, GUO Min. Effects of different fertilizers on CH_4 and N_2O emissions from paddy fields and their emission reduction measures [J]. *Anhui Agricultural Sciences*, 2009, 37(17): 8153–8155.
- [20] Kuikman E B. Influence of competition for nitrogen in soil on net mineralization of nitrogen[J]. *Plant and Soil*, 1997, 190: 119–126.
- [21] Kuikman P J, Van Veen J A. The impacts of protozoa on the availability of bacterial nitrogen to plants[J]. *Biology Fertility Soils*, 1989, 8(1): 13–18.
- [22] 胡 玮, 邸 青, 刘吉振, 等. 不同施肥方式对毕节烟田土壤硝态氮淋失的影响[J]. 天津农业科学, 2017, 23(1): 36–39, 43.
- HU Wei, DI Qing, LIU Ji-zhen, et al. Effects of different fertilization modes on nitrate leaching in soil of Bijie tobacco field[J]. *Tianjin Agricultural Sciences*, 2017, 23(1): 36–39, 43.
- [23] 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.
- JIAO Yan, HUANG Yao. Soil factors affecting nitrous oxide emissions from farmland[J]. *Climate and Environment Studies*, 2003, 8(4): 457–466.
- [24] 贺纪正, 张丽梅. 土壤氮素转化的关键微生物过程及机制[J]. 微生物学通报, 2013, 40(1): 98–108.
- HE Ji-zheng, ZHANG Li-mei. Key microbial process and mechanism of soil nitrogen transformation[J]. *Microbiology Bulletin*, 2013, 40(1): 98–108.
- [25] 余江敏, 李伏生, 韦彩会, 等. 根区局部灌溉对有机无机肥配施土壤微生物和玉米水分利用的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2008, 26(6): 63–69.
- YU Jiang-min, LI Fu-sheng, WEI Cai-hui, et al. Effects of local irrigation on soil microbial and maize water use in organic-inorganic fertilizers[J]. *Agricultural Research in Arid Areas*, 2008, 26(6): 63–69.
- [26] 王秋菊, 李明贤, 赵宏亮, 等. 不同灌溉模式对稻田土壤微生物数量的影响[J]. 中国农学通报, 2008, 24(9): 114–116.
- WANG Qiu-ju, LI Ming-xian, ZHAO Hong-liang, et al. Effects of different irrigation patterns on soil microbial quantity in paddy field[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2008, 24(9): 114–116.