

谢 晴, 饶旭东, 周 聪, 等. 夜间增温条件下施硅稻田 $N_2O$ 还原对外源氮的响应[ J ]. 江苏农业学报, 2022, 38( 1 ): 87-93.  
doi: 10.3969/j.issn.1000-4440.2022.01.010

## 夜间增温条件下施硅稻田 $N_2O$ 还原对外源氮的响应

谢 晴, 饶旭东, 周 聪, 薛梦琪, 张耀鸿

(南京信息工程大学气象灾害预报预警与评估协同创新中心/江苏省农业气象重点实验室, 江苏 南京 210044)

**摘要:** 选用田间开放式长期进行的夜间增温稻田(NW)、夜间常温+施加硅肥稻田(Si)、夜间增温+施硅稻田(NW+Si)以及夜间常温稻田(CK), 分别采集耕层根际土和非根际土, 设置4个氮添加处理, 即 $NH_4^+-N$ 、 $NO_3^--N$ 、酰胺态氮(尿素)和无氮, 研究不同稻田土壤 $N_2O$ 还原潜力对外源氮的响应特征。结果表明, 4种稻田的根际土和非根际土在厌氧培养过程中 $N_2O$ 浓度均随时间增长而下降, 且变化趋势一致。在无氮添加条件下, NW处理稻田和Si处理稻田根际土的 $N_2O$ 还原速率分别为 $19.2 \mu g/(g \cdot d)$ 和 $16.6 \mu g/(g \cdot d)$ , 显著高于CK稻田( $P < 0.05$ ), 而对于非根际土而言三者之间无明显差异( $P > 0.05$ )。在添加 $NH_4^+-N$ 或尿素条件下, Si处理稻田根际土的 $N_2O$ 还原速率显著高于CK稻田( $P < 0.05$ ), 而对于非根际土则无明显差异( $P > 0.05$ )。在添加 $NO_3^--N$ 条件下, Si处理稻田非根际土的 $N_2O$ 还原速率显著高于CK稻田( $P < 0.05$ )。综合来看, 在施加氮肥条件下, 特别在施加尿素条件下NW+Si处理稻田的 $N_2O$ 还原速率显著高于NW处理稻田。因此, 在未来气候变暖情景下, 氮肥特别是尿素与硅肥配施可能是提高稻田土壤 $N_2O$ 还原潜力的一条有效途径。

**关键词:**  $N_2O$ 还原; 夜间增温; 硅肥

中图分类号: S181 文献标识码: A 文章编号: 1000-4440(2022)01-0087-07

## Response of $N_2O$ reduction to exogenous nitrogen in paddy field under night warming and silicon application

XIE Qing, RAO Xu-dong, ZHOU Cong, XUE Meng-qi, ZHANG Yao-hong

(Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of Meteorological Disasters, Nanjing University of Information Science and Technology/Jiangsu Provincial Key Laboratory of Agricultural Meteorology, Nanjing 210044, China)

**Abstract:** In this study, four types of paddy soils in long-term open field experiment, including night warming treatment (NW), normal temperature+silicon fertilizer treatment (Si), night warming + silicon fertilizer treatment (NW+Si) and normal temperature + no silicon fertilizer treatment (CK), were used to collect rhizosphere soil and non-rhizosphere soil. Four nitrogen addition treatments, namely  $NH_4^+-N$ ,  $NO_3^--N$ , amide nitrogen (urea) and no nitrogen, were set up to study the response characteristics of  $N_2O$  reduction potential in the four paddy soils to exogenous nitrogen addition. The results showed that the concentration of  $N_2O$  decreased with the increase of incubation time, and the change trends were consistent. Under the condition of no nitrogen addition,  $N_2O$  reduction rates of the rhizosphere soil in NW and Si paddy fields were  $19.2 \mu g/(g \cdot d)$  and  $16.6 \mu g/(g \cdot d)$ , respectively, which were significantly higher than those in CK paddy field, whereas there was no significant difference in  $N_2O$  reduction rate of non-rhizosphere soil among the three paddy fields. Un-

der the condition of  $NH_4^+-N$  or urea addition, the  $N_2O$  reduction rate of rhizosphere soil in Si paddy field was significantly higher than that in CK paddy field, but there was no significant difference for non-rhizosphere. Under the condition of  $NO_3^--N$  addition, The  $N_2O$  reduction rate of non-rhizosphere soil in Si paddy field was significantly higher than that in CK paddy field. Comprehensively,  $N_2O$

收稿日期: 2021-05-11

基金项目: 国家自然科学基金项目(41671247, 41103039); 江苏省自然科学基金项目(BK20171455); 国家留学基金项目(201908320185)

作者简介: 谢 晴(1997-), 女, 湖南长沙人, 硕士研究生, 主要从事土壤温室气体排放研究。(E-mail) 448399165@qq.com

通讯作者: 张耀鸿, (E-mail) yhzhang@nuist.edu.cn

reduction rate of NW + Si paddy field was significantly higher than that of NW paddy field under nitrogen application, especially under urea application. Therefore, in the future climate warming scenario, the combined application of nitrogen (especially urea) and silicon fertilizer may be an effective way to improve  $N_2O$  reduction potential in paddy soil.

**Key words:**  $N_2O$  reduction; nighttime warming; silicon fertilizer

$N_2O$ 作为三大温室气体之一,其单分子增温潜势比  $CO_2$  高 265 倍<sup>[1]</sup>,是影响全球变暖的关键因素之一。联合国政府间气候变化专门委员会 (IPCC) 第 5 次评估报告指出,近百年来由于人类活动的影响, $N_2O$  浓度持续增加,大气中  $N_2O$  浓度已达 324  $\mu g/L$ ,超过工业革命前水平的 20%<sup>[2]</sup>。农业生态系统是  $N_2O$  重要的源和汇,据统计农业活动人为排放的  $N_2O$  占全球排放的 43% 以上<sup>[2]</sup>。稻田作为农业生态系统的重要组成部分, $N_2O$  排放量占农田总排放量的 11.4%<sup>[3]</sup>,因此,稻田  $N_2O$  排放对全球气候变化具有重要影响作用。

研究结果表明,目前气候变暖的突出特征是夜间气温升高;在过去几十年间,全球平均最低气温(夜间温度)的上升速度快于最高气温(白天温度)<sup>[4-5]</sup>。这一“不对称性”增温对水稻生产过程中的作物生长、土壤微生物活动及气体排放等方面产生重要的影响。农田  $N_2O$  排放主要来自土壤微生物介导的硝化和反硝化过程,其中反硝化作用是  $N_2O$  直接产生的主要途径。反硝化微生物适宜活动温度范围为 5~75  $^{\circ}C$ ,其活性随着土壤温度的升高而增强。许多研究者也发现,温度升高促进了农田、草地、森林等生态系统  $N_2O$  排放<sup>[6-7]</sup>。这个排放通量是土壤  $N_2O$  产生过程和还原过程综合作用的动态净变量<sup>[8]</sup>,无法反映出农田土壤的  $N_2O$  还原潜力。而从土壤  $N_2O$  还原角度研究夜间增温对农田土壤 N 转化过程及其生态效应特征,对深入剖析稻田土壤  $N_2O$  排放通量的温度敏感性及其全球  $N_2O$  减排具有重要意义。

硅作为水稻生长的重要元素,因能促进水稻光合作用、增加产量在农业生产中被广泛应用<sup>[9]</sup>。硅肥施用对稻田土壤的氮素循环及转化过程具有重要的影响。研究发现,施硅可提高水稻光合作用,促进根系生长,提高根系氮素吸收能力,从而降低参与反硝化作用的无机氮量,抑制土壤反硝化速率。而且,吸收到植物体内的硅同化为植硅体可与光合碳形成非常稳定的植硅体碳,降低了土壤微生物对水稻植株有机碳的可利用性,进一步抑制了反硝化微生物的活性<sup>[10]</sup>。Wodarczyk 等<sup>[11]</sup>研究发现,施硅可降低

淹水麦田土壤的  $N_2O/(N_2O+N_2)$  比值,促进完全反硝化过程,抑制  $N_2O$  排放通量。本试验基于田间开放式长期夜间增温系统,采集夜间增温、施硅、夜间增温+施硅等试验区的耕层土壤,在添加不同形态氮条件下,研究硅肥对增温稻田土壤  $N_2O$  还原潜力的影响效应,为未来气候变暖背景下通过施肥措施缓解稻田生态系统的  $N_2O$  排放提供科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 土样采集

试验土样采集于南京信息工程大学农业气象试验站(32.0°N, 118.8°E)。该站点属于亚热带湿润气候区,年均降水量为 1 100 mm,年均气温为 15.6  $^{\circ}C$ 。在此试验站中采用田间开放式增温系统模拟夜间增温,设置了 4 个试验处理:夜间常温 (CK)、夜间增温 (NW)、夜间增温+施硅 (NW+Si)、夜间常温+施硅 (Si)。该试验处理从 2017 年开始一直延续至今。各试验小区内搭设不锈钢管支架,将铝箔反光膜固定于支架顶部。夜间增温试验区中在农作物生长期,于夜间时段 (19:00–6:00) 用铝箔反光膜覆盖植物冠层,白天将铝箔反光膜揭开。增温后水稻冠层和 0~5 cm 土层全生育期夜间平均温度分别提高 1.21  $^{\circ}C$  和 0.41  $^{\circ}C$ 。施硅试验区内施硅肥为钢渣硅肥 ( $SiO_2$  200  $kg/hm^2$ ),含有效硅 ( $SiO_2$ ) 为 13.8%。在每个处理区内采用根袋法,将根际土与非根际土之间用 300 目尼龙袋隔开。2018 年 9 月从上述 4 个试验区内采集 0~10 cm 耕层的根际土与非根际土,进行研究。

### 1.2 土壤 $N_2O$ 还原速率测定

为模拟氮肥对上述 4 个处理区稻田土壤  $N_2O$  还原速率的影响效应,选用 3 种外源氮 [ $NH_4^+-N$ 、 $NO_3^- - N$ 、酰胺态氮 (尿素)] 为 3 个试验处理,最终 N 浓度均为 5 mmol/L,另外设置一个不添加 N 的对照处理 (添加去离子水),每个处理重复 3 次。

土壤  $N_2O$  还原速率的测定方法为:称取 2.000 g 鲜土放入 12 ml 的 Labco 顶空瓶后加入 2 ml 去离子水盖好瓶盖,充分摇晃培养瓶后,抽真空-充氩气重复进行 3 次,使瓶中达到厌氧状态后,室温 25  $^{\circ}C$  下

预培养 3 d,尽可能去除残余氧气。预培养结束后,再进行抽真空-充氩气操作 3 次,之后用进样针向培养瓶中打入 2 ml N<sub>2</sub>O 气体,再打入 20  $\mu$ l 氮储液,使培养瓶中最终氮浓度为 5 mmol/L。充分摇晃培养瓶后,立刻采集 100  $\mu$ l 顶空气体作为起始浓度(第 0 d)进行测定。之后在第 3 d,4 d,7 d 采气测定 N<sub>2</sub>O 浓度。测定仪器为气相色谱仪(Agilent 7890B),测定条件为:前检测器温度 250  $^{\circ}$ C, H<sub>2</sub>、空气和尾吹气 N<sub>2</sub> 流量分别为 50 ml/min、450 ml/min 和 25 ml/min,后检测器温度 250  $^{\circ}$ C,尾吹气流量为 2.000 ml/min,柱箱温度 50  $^{\circ}$ C,镍转化炉温度 375  $^{\circ}$ C。测定方法为单个测定,每个测定时间为 4.5 min。根据测定的 N<sub>2</sub>O 浓度变化除以培养时间计算出 N<sub>2</sub>O 还原速率。

### 1.3 数据处理分析

数据的统计和整理采用 Microsoft Excel 2016 软件,不同处理间的显著性差异用单因素方差分析

表 1 不同处理稻田土壤理化性质

Table 1 Soil physical and chemical properties of paddy fields under different treatments

处理	有机碳 (g/kg)	水溶性有机 碳(DOC) (mg/kg)	总氮(TN) (g/kg)	铵态氮 (NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N) (mg/kg)	硝态氮 (NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N) (mg/kg)	有效磷(P) (mg/kg)	速效钾(K) (mg/kg)	有效硅 Si (mg/kg)	酸碱度 (pH)
CK	20.95±0.46b	171.00±2.65c	1.41±0.01b	15.77±1.13b	11.79±0.70c	20.71±0.80ab	85.47±0.71c	55.09±0.65d	6.32±0.06ab
NW	18.53±0.21d	154.00±2.65d	1.22±0.01d	14.48±0.79b	10.83±0.80c	19.34±1.35b	81.07±0.78d	57.47±0.87c	6.25±0.66b
NW +Si	19.29±0.06c	199.00±4.58b	1.38±0.02c	16.25±0.91b	14.11±0.55b	20.93±0.82ab	91.40±0.82b	66.55±1.06b	6.38±0.11ab
Si	23.22±0.35a	216.67±5.13a	1.46±0.01a	18.04±0.91a	16.34±0.16a	22.31±0.84a	95.60±1.61a	72.12±0.25a	6.44±0.04a

CK: 夜间常温; NW: 夜间增温土; NW+Si: 夜间增温+施硅; Si: 夜间常温+施硅。不同字母表示不同处理间存在显著差异( $P<0.05$ )。

## 2.2 不同稻田土壤厌氧培养过程中 N<sub>2</sub>O 浓度的变化特征

将 CK 稻田、NW 处理稻田、Si 处理稻田、NW+Si 处理稻田的根际土和非根际土厌氧培养 7 d, 分析其 N<sub>2</sub>O 浓度变化情况, 计算 N<sub>2</sub>O 还原速率。由图 1 可知, 在无氮添加的土壤中, 4 种稻田的根际土和非根际土在厌氧培养过程中 N<sub>2</sub>O 浓度均随时间增加而下降, 且变化趋势一致。其中, 在第 0~4 d 下降趋势较为平缓, 第 4~7 d 降低幅度较大, 并在第 7 d 均达到最低值。图 1a 中, CK 稻田根际土壤 N<sub>2</sub>O 浓度降低幅度最小, 为 99  $\mu$ g/g; NW 处理稻田根际土壤 N<sub>2</sub>O 浓度降幅最大, 为 134  $\mu$ g/g; Si 处理稻田、NW+Si 处理稻田根际土壤 N<sub>2</sub>O 浓度的降幅则分别为 116  $\mu$ g/g 和 99  $\mu$ g/g。图 1b 中, 4 种稻田非根际土壤 N<sub>2</sub>O 浓度变化特征与图 1a 基本一致, CK 稻田和 NW+Si 处理稻田非根际土壤的 N<sub>2</sub>O 浓度减少量分别为 98  $\mu$ g/g

(LSD 检验)进行。

## 2 结果分析

### 2.1 不同处理稻田土壤理化性质差异

由表 1 可以看出, 夜间常温+Si 处理稻田除有效磷含量和 pH 值外, 其他物质含量均显著高于其他 3 种土壤( $P<0.05$ )。NW 处理稻田除有效硅含量外各理化性质均低于其他 3 种土壤, 其中有机碳(TOC)、水溶性有机碳(DOC)、总氮(TN)、速效钾含量显著低于其他 3 种土壤( $P<0.05$ )。夜间常温(CK)稻田有机氮(TOC)、总氮(TN)、铵态氮(NH<sub>4</sub><sup>+</sup>)和硝态氮(NO<sub>3</sub><sup>-</sup>)含量均高于 NW+Si 处理稻田, 但是水溶性有机碳(DOC)、速效钾、有效硅含量低于 NW+Si 稻田。处理的 3 种土壤和 CK 土壤的 pH 和有效磷含量没有达到显著差异( $P>0.05$ )。

和 90  $\mu$ g/g, NW 处理稻田和 Si 处理稻田土壤的 N<sub>2</sub>O 浓度减少量分别为 122  $\mu$ g/g 和 112  $\mu$ g/g。

### 2.3 无氮添加条件下稻田土壤的 N<sub>2</sub>O 还原速率

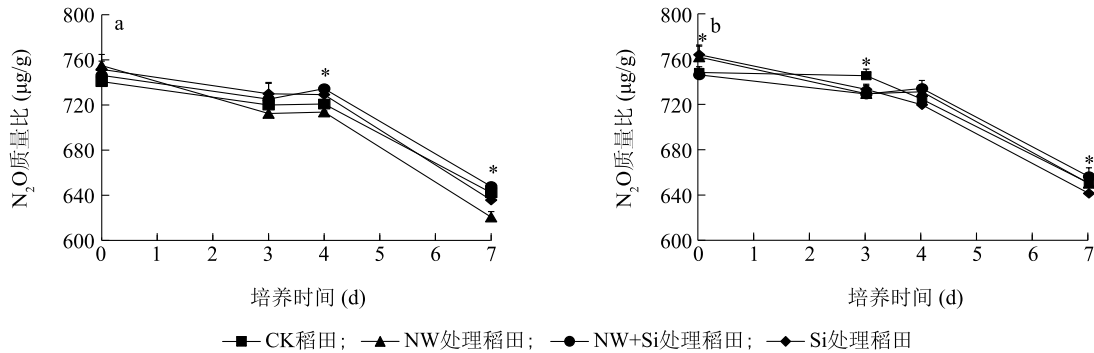
由图 2 可知, 对于根际土壤而言, CK 稻田、NW 处理稻田、NW+Si 处理稻田、Si 处理稻田的 N<sub>2</sub>O 还原速率分别为 14.1  $\mu$ g/(g·d)、19.2  $\mu$ g/(g·d)、14.2  $\mu$ g/(g·d) 和 16.6  $\mu$ g/(g·d)。与 CK 稻田相比, NW 处理稻田和 Si 处理稻田根际土壤的 N<sub>2</sub>O 还原速率均显著增加( $P<0.05$ )。对于非根际土壤而言, CK 稻田、NW 处理稻田、NW+Si 处理稻田、Si 处理稻田的 N<sub>2</sub>O 还原速率分别为 15.7  $\mu$ g/(g·d)、15.9  $\mu$ g/(g·d)、12.8  $\mu$ g/(g·d) 和 17.5  $\mu$ g/(g·d)。与 CK 稻田相比, 其余 3 个稻田非根际土壤的 N<sub>2</sub>O 还原速率均未发生显著变化。

### 2.4 氮添加条件下稻田土壤的 N<sub>2</sub>O 还原速率

由表 2 可知, 在添加 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 条件下, Si 处理稻田

根际土壤的 $\text{N}_2\text{O}$ 还原速率最高,为  $19.54 \mu\text{g}/(\text{g} \cdot \text{d})$ ,显著高于 CK 稻田根际土壤( $P<0.05$ );NW 处理稻田和 NW+Si 处理稻田根际土壤之间则无显著差异。对于非根际土壤而言,NW 处理稻田和 NW+Si 处理稻田非根际土壤的 $\text{N}_2\text{O}$ 还原速率显著低于 CK 稻田,而 Si 处理稻田非根际土壤则与 CK 稻田之间无显著差异。在添加  $\text{NO}_3^-$ -N 条件下,NW+Si 处理稻田根际土

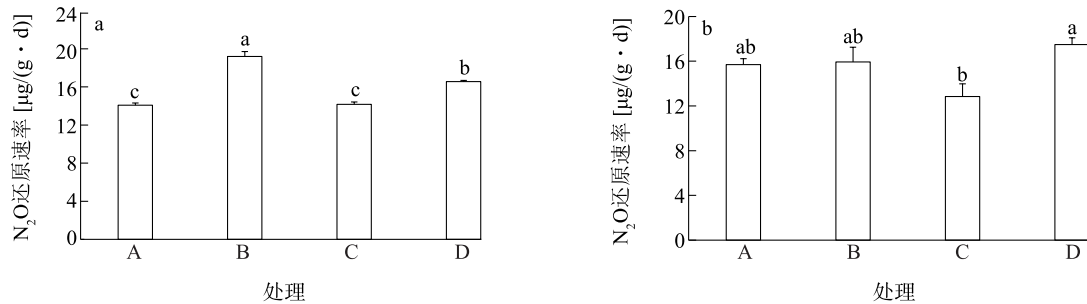
壤的 $\text{N}_2\text{O}$ 还原速率最高,为  $17.24 \mu\text{g}/(\text{g} \cdot \text{d})$ ,显著高于其他 3 种稻田;非根际土壤中, Si 处理稻田的 $\text{N}_2\text{O}$ 还原速率最大,显著高于 CK 稻田。在添加尿素条件下,NW 处理稻田、NW+Si 处理稻田和 Si 处理稻田根际土壤的 $\text{N}_2\text{O}$ 还原速率均显著高于 CK 稻田;非根际土壤中,NW+Si 处理稻田的 $\text{N}_2\text{O}$ 还原速率显著高于 CK 稻田,而 NW 处理稻田则显著低于 CK 稻田。



各处理见表 1 注。

图 1 无氮添加条件下根际土 (a) 和非根际土 (b) 的 $\text{N}_2\text{O}$ 浓度变化

Fig.1 Changes of  $\text{N}_2\text{O}$  concentration in rhizosphere soil (a) and non-rhizosphere soil (b) without nitrogen addition



A: CK 稻田; B: NW 处理稻田; C: NW+Si 处理稻田; D: Si 处理稻田。各处理见表 1 注。不同字母表示处理间差异显著 ( $P<0.05$ )。

图 2 无氮添加条件下稻田根际土壤 (a) 和非根际土壤 (b) 的 $\text{N}_2\text{O}$ 还原速率

Fig.2  $\text{N}_2\text{O}$  reduction rates of rhizosphere soil (a) and non-rhizosphere soil (b) without nitrogen addition

表 2 添加氮条件下稻田土壤的 $\text{N}_2\text{O}$ 还原速率

Table 2  $\text{N}_2\text{O}$  reduction rates of paddy soil under N addition

土壤	处理	添加 $\text{NH}_4^+$ -N 后 $\text{N}_2\text{O}$ 还原速率 [ $\mu\text{g}/(\text{g} \cdot \text{d})$ ]	添加 $\text{NO}_3^-$ -N 后 $\text{N}_2\text{O}$ 还原速率 [ $\mu\text{g}/(\text{g} \cdot \text{d})$ ]	添加尿素后 $\text{N}_2\text{O}$ 还原速率 [ $\mu\text{g}/(\text{g} \cdot \text{d})$ ]
根际土壤	CK	$14.18 \pm 0.44\text{b}$	$12.50 \pm 0.87\text{b}$	$13.46 \pm 1.37\text{c}$
	NW	$14.66 \pm 1.59\text{b}$	$9.81 \pm 2.48\text{b}$	$15.87 \pm 1.97\text{b}$
	NW+Si	$15.79 \pm 1.14\text{b}$	$17.24 \pm 3.57\text{a}$	$17.55 \pm 0.77\text{ab}$
	Si	$19.54 \pm 1.33\text{a}$	$12.55 \pm 1.68\text{b}$	$18.47 \pm 0.24\text{a}$
非根际土壤	CK	$17.30 \pm 1.59\text{a}$	$12.40 \pm 0.36\text{b}$	$14.58 \pm 0.91\text{b}$
	NW	$13.87 \pm 0.73\text{b}$	$14.07 \pm 0.92\text{ab}$	$11.38 \pm 0.94\text{c}$
	NW+Si	$12.29 \pm 0.13\text{b}$	$13.42 \pm 0.54\text{ab}$	$17.43 \pm 1.24\text{a}$
	Si	$16.12 \pm 0.62\text{a}$	$15.47 \pm 2.11\text{a}$	$14.53 \pm 1.15\text{b}$

各处理见表 1 注。同一列同一类型土壤不同小写字母表示不同处理间存在显著差异 ( $P<0.05$ )。

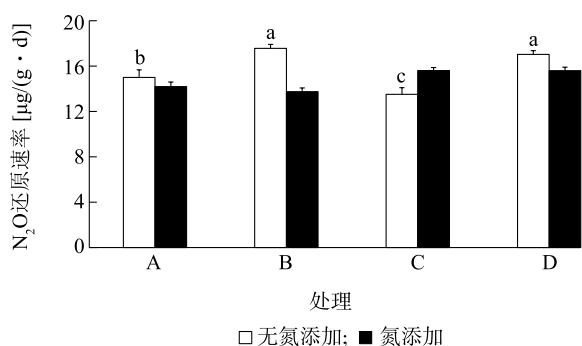
对于同一稻田根际土壤而言,CK 稻田和 NW+Si 处理稻田的 $\text{N}_2\text{O}$ 还原速率在 3 个不同氮添加处理下没有显著差异,且 NW 处理稻田和 Si 处理稻田在添加  $\text{NH}_4^+$ -N 和尿素条件下也无显著差异。对于非根际土而言,除了 Si 处理稻田之外,其他 3 种稻田的 $\text{N}_2\text{O}$ 还原速率在 3 个不同氮添加处理下差异显著。

## 2.5 外源氮对稻田土壤 $\text{N}_2\text{O}$ 还原速率的影响效应

为了综合评价外源氮对 4 种稻田土壤 $\text{N}_2\text{O}$ 还原速率的影响效应,将每种稻田类型的根际土壤和非根际土壤,以及 3 种外源氮添加处理下的 $\text{N}_2\text{O}$ 还原速率进行合并后计算其平均值,研究施加氮肥对稻田 $\text{N}_2\text{O}$ 还原速率影响的综合特征。由图 3 可知,在



无氮添加条件下, NW 处理稻田和 Si 处理稻田的 N<sub>2</sub>O 还原速率均显著高于 CK 稻田, 而 NW+Si 处理稻田则显著低于 CK 稻田; 在添加氮条件下, 与 CK 稻田相比, NW 处理稻田的 N<sub>2</sub>O 还原速率有所降低, Si 处理稻田有所提高, 而 NW+Si 处理稻田则显著高于 CK 稻田, 增加了 15.5%。



A: CK 稻田; B: NW 处理稻田; C: NW+Si 处理稻田; D: Si 处理稻田。各处理见表 1 注。不同小写字母表示无氮添加条件下不同处理间存在显著差异 ( $P < 0.05$ )。

图 3 无氮添加和氮添加条件下稻田 N<sub>2</sub>O 还原速率

Fig.3 N<sub>2</sub>O reduction rates of paddy soils with and without nitrogen addition

## 2.6 N<sub>2</sub>O 还原速率与土壤理化性质的回归分析

将无氮添加条件下稻田土壤的理化性质与 N<sub>2</sub>O 还原速率进行回归分析。如图 4 所示, 稻田 N<sub>2</sub>O 还原速率与土壤 DOC、NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N、NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 含量均呈正相关关系。其中, N<sub>2</sub>O 还原速率与土壤 DOC 含量的回归方程达到显著水平 ( $P < 0.05$ ), 说明土壤 DOC 含量可能是影响 N<sub>2</sub>O 还原速率的重要因素。

## 3 讨论

N<sub>2</sub>O 还原是土壤反硝化作用的最后一个反应步骤, 决定着反硝化过程的 N<sub>2</sub>O 排放量大小。已有大量研究结果表明, 许多环境因素如土壤温度对反硝化过程有着重要的影响<sup>[12-13]</sup>。以往的研究大多选用模拟全天增温方式, 这种增温方式不符合未来气候变暖的增温特征。本试验选择田间开放式夜间增温系统开展研究, 结果表明夜间增温处理促进了稻田根际土的 N<sub>2</sub>O 还原速率。反硝化作用是由微生物介导的酶促反应, 其反硝化微生物的适宜温度范围较大, 为 5~75 °C, 在此范围内其微生物活性随温度升高而增加。不仅如此, 有报道称增温引起土壤水

分中氧气的溶解度减小, 会大大增强土壤反硝化过程的温度依赖性<sup>[13-14]</sup>。大量研究结果显示, 增温促进了农田包括稻田的土壤 N<sub>2</sub>O 排放通量<sup>[15-17]</sup>。究其原因可能是增温对反硝化过程各反应步骤的影响效应不同所致。Tan 等<sup>[18]</sup>发现, 增温条件下, 反硝化过程中 NO→N<sub>2</sub>O 的 N<sub>2</sub>O 产生速率增幅高于 N<sub>2</sub>O→N<sub>2</sub> 的 N<sub>2</sub>O 还原速率增幅, 即 N<sub>2</sub>O 产生速率的  $Q_{10}$  值高于 N<sub>2</sub>O 还原速率的  $Q_{10}$  值。Hallin 等<sup>[19]</sup>还发现, 大多数土壤中介导 N<sub>2</sub>O 产生的 *nirK* 基因通常比介导 N<sub>2</sub>O 还原的 *nosZ* 基因数量高出一个数量级, 且在增温条件下这些基因数量特征与 N<sub>2</sub>O 排放量高度相关。因此, 夜间增温尽管可提高稻田土壤 N<sub>2</sub>O 还原速率, 但可能更会促进 N<sub>2</sub>O 产生速率, 最终导致 N<sub>2</sub>O 净排放量增大<sup>[20]</sup>。不仅如此, 在施加硝态氮肥条件下, 增温稻田根际土壤和非根际土壤的 N<sub>2</sub>O 还原速率均与对照稻田没有差异, 暗示夜间增温情景下, 施加硝态氮肥可能具有更大的 N<sub>2</sub>O 排放风险。

硅是水稻生长的有益元素<sup>[21]</sup>。尽管土壤中硅的总量很高, 但是植物可利用的有效硅含量极低, 许多地区的稻田处于低硅或缺硅水平。本试验点的土壤有效硅含量远低于 100 mg/kg, 属于低硅稻田, 且长期施用硅肥提高了稻田土壤的有效硅含量。本试验发现, 施硅处理提高了稻田土壤 N<sub>2</sub>O 还原速率。Song 等<sup>[10]</sup>报道施用偏硅酸钠后稻田土壤 N<sub>2</sub>O 排放通量降低了 66%, Wang 等<sup>[22]</sup>报道施加 CaSiO<sub>3</sub> 钢渣促使稻田 N<sub>2</sub>O 排量降低了 98%。Richardson<sup>[23]</sup>等和林德华<sup>[24]</sup>认为, 施硅可降低土壤反硝化过程中 N<sub>2</sub>O/N<sub>2</sub> 的比例, 而无硅则有利于农田的不完全反硝化过程, N<sub>2</sub>O 排放量增加。施硅可促进水稻根系生长, 提高根系竞争土壤活性氮能力<sup>[25-26]</sup>, 不利于反硝化过程的进行。同时, 根系快速生长时分泌到土壤中的有机碳会增多, 土壤有机碳/活性氮比值的提高<sup>[27]</sup>, 有利于完全反硝化过程的进行, N<sub>2</sub>O 排放量减少。本试验中, 施硅对 N<sub>2</sub>O 还原速率的影响效应在不施氮稻田根际土中表现更为明显。另一方面, 本试验中施用的钢渣硅肥中铁成分可能参与了 N<sub>2</sub>O 产生/还原过程<sup>[28]</sup>。Song 等<sup>[10]</sup>认为, 施用富含铁的钢渣硅肥显著抑制了稻田土壤 *nirS* 和 *nirK* 基因的数量, 而对 *nosZ* 无明显影响, 导致 N<sub>2</sub>O 排放量下降。因此, 施加硅肥既对水稻生长有益, 又有利于 N<sub>2</sub>O 的减排。

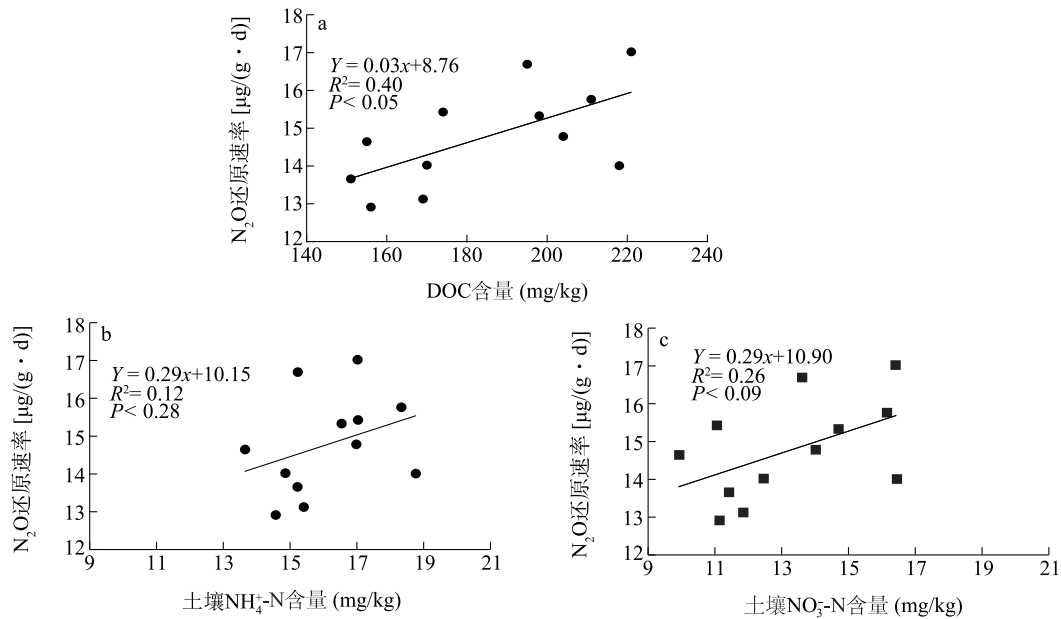


图4  $\text{N}_2\text{O}$ 还原速率与土壤DOC含量(a),  $\text{NH}_4^+\text{-N}$ (b)和 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量(c)的关系

Fig.4 The relationship between  $\text{N}_2\text{O}$  reduction rate and soil DOC content (a),  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  (b) and  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  content (c)

外源氮输入对硅肥促进稻田 $\text{N}_2\text{O}$ 还原的效应具有重要影响。综合来看,施氮条件下,NW+Si稻田的 $\text{N}_2\text{O}$ 还原速率显著高于NW稻田,而在无氮条件下两者速率则正好相反。从不同肥料来看,在稻田非根际土中尿素的促进效应最为显著,而在根际土中硝态氮的促进效应最为明显。这说明在施氮条件下,硅肥可以促进夜间增温稻田的 $\text{N}_2\text{O}$ 还原速率。硝态氮在稻田中易迁移,且是反硝化作用的底物,而尿素需要转化为铵态氮后,才会被植物或微生物吸收利用。比较而言,硅肥对 $\text{N}_2\text{O}$ 还原潜力的促进效应,在施用尿素条件下应更为安全、有效。因此,在未来气候变暖背景下,尿素配施硅肥可能是一个缓解稻田 $\text{N}_2\text{O}$ 排放的有效栽培措施。

本试验仅研究了增温、施硅对稻田 $\text{N}_2\text{O}$ 还原潜力的影响,没有综合考察这2个要素对稻田 $\text{N}_2\text{O}$ 产生潜力的影响,以及反硝化微生物群落结构及功能基因数量特征对此两要素的响应。因此需要采集更多的典型稻田土壤,从 $\text{N}_2\text{O}$ 消长两方面以及功能微生物角度深入研究未来增温背景下施肥方式对稻田 $\text{N}_2\text{O}$ 排放的影响机理。

#### 参考文献:

[1] IPCC. Climate change 2014: Impacts, adaptation, and vulnerability. Part A: Global and sectoral aspects. Contribution of working group II to the fifth assessment report of the intergovernmental

panel on climate change [R]. Cambridge, United Kingdom and New York, USA: Cambridge University Press, 2014: 1-32.

- [2] IPCC. Climate change 2013: The physical science basis: Contribution of working group I to the fifth assessment report of the intergovernmental Panel on climate change [R]. Cambridge, UK, New York, NY, USA: Cambridge University Press, 2013.
- [3] GAO B, JU X T, ZHANG Q, et al. New estimates of direct  $\text{N}_2\text{O}$  emissions from Chinese croplands from 1980 to 2007 using localized emission factors [J]. Biogeosciences Discussions, 2011, 8 (11): 3011-3024.
- [4] ALEXANDER L V, ZHANG X B, PETERSON T C, et al. Global observed changes in daily climate extremes of temperature and precipitation [J]. Journal of Geophysical Research Atmospheres, 2006, 111(D5): 1042.
- [5] SILLMANN J, KHARIN V V, ZHANG X B. Climate extremes indices in the CMIP5 multi-model ensemble: Part 1 [J]. Journal of Geophysical Research Atmospheres, 2013, 118: 1-18.
- [6] WANG Y Y, HU Z H, SHANG D Y, et al. Effects of warming and elevated  $\text{O}_3$  concentrations on  $\text{N}_2\text{O}$  emission and soil nitrification and denitrification rates in a wheat-soybean rotation cropland [J]. Environmental Pollution, 2019, 255: 113556.
- [7] CUI Q, SONG C C, WANG X W, et al. Effects of warming on  $\text{N}_2\text{O}$  fluxes in a boreal peatland of Permafrost region, Northeast China [J]. Science of the Total Environment, 2018 (616/617): 427-434.
- [8] 刘燕, 姜运生, 杨惠琳, 等. 施硅对增温稻田  $\text{CH}_4$  和  $\text{N}_2\text{O}$  排放的影响 [J]. 生态学报, 2020, 40(18): 6621-6631.
- [9] 郑泽华, 姜运生, 左慧婷, 等. 施硅对夜间增温条件下水稻生长和产量的影响 [J]. 中国农业气象, 2018, 39(6): 390-397.

- [10] SONG A L, FAN F L, YIN C, et al. The effects of silicon fertilizer on denitrification potential and associated genes abundance in paddy soil[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2017, 53: 627-638.
- [11] WODARCZYK T, BALAKHNINA T, MATICHENKOV V, et al. Effect of silicon on barley growth and  $\text{N}_2\text{O}$  emission under flooding[J]. *Science of The Total Environment*, 2019, 685: 1-9.
- [12] 焦 燕, 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(4): 457-466.
- [13] DONOSO L, SANTANA R, SANHUEZA E. Seasonal variation of  $\text{N}_2\text{O}$  fluxes at a tropical savannah site: Soil consumption of  $\text{N}_2\text{O}$  during the dry season [J]. *Geophysical Research Letters*, 1993, 20: 1379-1382.
- [14] VERAART A J, KLEIN J, SCHEFFER M. Warming can boost denitrification disproportionately due to altered oxygen dynamics [J]. *PLoS One*, 2011, 6: e18508.
- [15] 韩 雪, 陈宝明. 增温对土壤 $\text{N}_2\text{O}$ 和  $\text{CH}_4$ 排放的影响与微生物机制研究进展 [J]. *应用生态学报*, 2020, 31(11): 3906-3914.
- [16] 胡正华, 周迎平, 崔海玲, 等. 昼夜增温对大豆田土壤 $\text{N}_2\text{O}$ 排放的影响 [J]. *环境科学*, 2013, 34(8): 2961-2967.
- [17] 王 颖. 夜间增温对稻-麦农田  $\text{CH}_4$ 和 $\text{N}_2\text{O}$ 排放影响及其高光谱估算 [D]. 南京:南京信息工程大学, 2018.
- [18] TAN E H, ZOU W B, ZHENG Z Z, et al. Warming stimulates sediment denitrification at the expense of anaerobic ammonium oxidation [J]. *Nature Climate Change*, 2020(10): 349-355.
- [19] HALLIN S, JONES C M, SCHLOTER M, et al. Relationship between N-cycling communities and ecosystem functioning in a 50-year-old fertilization experiment [J]. *ISME Journal*, 2009(3): 597-605.
- [20] PETERSEN D G, BLAZEWCZ S J, FIRESTONE M, et al. Abundance of microbial genes associated with nitrogen cycling as indices of biogeochemical process rates across a vegetation gradient in Alaska [J]. *Environmental Microbiology*, 2012, 14(4): 993-1008.
- [21] 张 军, 刘忠红, 周冬冬, 等. 新型肥料在机插优质梗稻上的应用效果[J]. *江苏农业科学*, 2021, 49(6): 77-81.
- [22] WANG W, SARDANS J, LAI D Y F, et al. Effects of steel slag application on greenhouse gas emissions and crop yield over multiple growing seasons in a subtropical paddy field in China [J]. *Field Crops Research*, 2015, 171: 146-156.
- [23] RICHARDSON D, FELGATE H, WATMOUGH N, et al. Mitigating release of the potent greenhouse gas  $\text{N}_2\text{O}$  from the nitrogen cycle-could enzymic regulation hold the key? [J]. *Trends in Biotechnology*, 2009, 27: 388-397.
- [24] 林德华. 施加铁炉渣对稻田氧化亚氮通量的影响 [D]. 福州: 福建师范大学, 2012.
- [25] 娄金华, 陈猛猛, 张士荣, 等. 磷硅肥配施对盐渍土壤水稻生长及养分吸收的影响 [J]. *水土保持学报*, 2020, 34(4): 263-269.
- [26] 刘 燕. 夜间增温下施硅对稻麦生长、品质及土壤  $\text{CH}_4$ 和 $\text{N}_2\text{O}$ 排放的影响 [D]. 南京:南京信息工程大学, 2020.
- [27] TOBERMAN H, CHEN C R, XU Z H. Rhizosphere effects on soil nutrient dynamics and microbial activity in an Australian tropical lowland rainforest [J]. *Soil Research*, 2011, 49(7): 652-660.
- [28] ZHU X, SILVA L C, DOANE T A, et al. Iron: The forgotten driver of nitrous oxide production in agricultural soil [J]. *PLoS One*, 2013, 8(3): E60146.

(责任编辑:张震林)