

增温条件下施硅对稻田CH₄厌氧氧化过程的影响

谢晴, 薛梦琪, 周聪, 张耀鸿, 姜运生, 高霄鹏, 贾仲君

引用本文:

谢晴, 薛梦琪, 周聪, 张耀鸿, 姜运生, 高霄鹏, 贾仲君. 增温条件下施硅对稻田CH₄厌氧氧化过程的影响[J]. 农业环境科学学报, 2023, 42(2): 472-480.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11654/jaes.2022-0505>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

不同遮阴处理下施肥对稻田CH₄和N₂O排放的影响

王坤, 姜运生, 邢钰媛, 刘健

农业环境科学学报. 2021, 40(2): 464-472 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0953>

施用生物炭和硅肥对增温水稻叶片光合及荧光特性的影响

邢钰媛, 姜运生, 王坤, 刘健

农业环境科学学报. 2021, 40(2): 451-463 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0879>

有机无机肥配施对苹果园温室气体排放的影响

马艳婷, 赵志远, 冯天宇, SOMPOUVISETThongsouk, 孔旭, 翟丙年, 赵政阳

农业环境科学学报. 2021, 40(9): 2039-2048 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-1477>

延长烤田时间减少紫云英翻压稻田甲烷排放

王赢, 林余涛, 杨文斌, 王家嘉, 左双宝, 宋朝辉, 周楠楠

农业环境科学学报. 2022, 41(8): 1836-1845 <https://doi.org/10.11654/jaes.2021-1448>

不同水分对半干旱地区砂壤土温室气体排放的短期影响

李平, 魏玮, 郎漫

农业环境科学学报. 2021, 40(5): 1124-1132 <https://doi.org/10.11654/jaes.2021-1377>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

谢晴, 薛梦琪, 周聪, 等. 增温条件下施硅对稻田 CH_4 厌氧氧化过程的影响[J]. 农业环境科学学报, 2023, 42(2): 472–480.

XIE Q, XUE M Q, ZHOU C, et al. Effects of silicon application on anaerobic CH_4 oxidation in a paddy field under nighttime warming[J].

Journal of Agro-Environment Science, 2023, 42(2): 472–480.



开放科学 OSID

增温条件下施硅对稻田 CH_4 厌氧氧化过程的影响

谢晴¹, 薛梦琪^{1,2}, 周聪^{1,2}, 张耀鸿^{1*}, 姜运生¹, 高霄鹏³, 贾仲君²

(1. 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, 南京 210044; 2. 中国科学院南京土壤研究所土壤与农业可持续发展国家重点实验室, 南京 210008; 3. 加拿大曼尼托巴大学土壤科学系, 加拿大 温尼伯 R3T2N2)

摘要: 硅是水稻生长的有益元素, 为研究施硅对稻田 CH_4 厌氧氧化过程的影响以及是否会改变夜间增温对该过程的影响效应, 本试验设置夜间常温不施硅(CK)、夜间增温不施硅(NW)、夜间常温施硅(Si)和夜间增温施硅(NW+Si)4个处理。采集上述田间处理4 a后的耕层土壤, 采用 $^{13}\text{CH}_4$ 同位素标记法研究稻田土壤 CH_4 厌氧氧化速率和固碳特征及其对氮输入的响应。结果表明: NW处理的 CH_4 厌氧氧化速率为 $6.23 \text{ nmol} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ (以 $^{13}\text{CO}_2$ 计), 显著低于CK处理; 与NW处理相比, NW+Si处理的 CH_4 厌氧氧化速率提高了22%。NW处理土壤中 CH_4 氧化驱动的 ^{13}C 有机碳净增量(^{13}C -SOC)为 $0.31 \mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1}$, 与NW+Si无明显差异, 这表明增温条件下施硅对稻田土壤 CH_4 厌氧氧化的固碳量无明显影响。添加N条件下4个稻田土壤的 CH_4 厌氧氧化速率总体上明显减小, 其中以Si处理土壤最为突出, 下降29%~50%。相反, N添加提高了 CH_4 厌氧氧化的固碳效率 ^{13}C -SOC/ $(^{13}\text{C}$ -SOC+ $^{13}\text{CO}_2)$ 。研究表明, 施硅可缓解夜间增温对稻田 CH_4 氧化速率的抑制作用, 但对其固碳量无明显影响; 外源N可提高增温/施硅稻田土壤 CH_4 厌氧氧化的固碳效率, 有利于将较高比例的 ^{13}C - CH_4 碳源固定到土壤有机碳中。

关键词: 甲烷; 厌氧氧化; 夜间增温; 施硅; 固碳效率; 稻田; 土壤

中图分类号: X71; S154.1 文献标志码: A 文章编号: 1672-2043(2023)02-0472-09 doi:10.11654/jaes.2022-0505

Effects of silicon application on anaerobic CH_4 oxidation in a paddy field under nighttime warming

XIE Qing¹, XUE Mengqi^{1,2}, ZHOU Cong^{1,2}, ZHANG Yaohong^{1*}, LOU Yunsheng¹, GAO Xiaopeng³, JIA Zhongjun²

(1. Collaborative Innovation Center for Forecast and Evaluation of Meteorological Disasters / Jiangsu Provincial Key Laboratory of Agricultural Meteorology, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China; 2. State Key Laboratory of Soil and Sustainable Agriculture, Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China; 3. Department of Soil Science, University of Manitoba, Winnipeg R3T2N2, Canada)

Abstract: Si is a beneficial element for rice growth. The effects of Si application on the CH_4 oxidation process in paddy fields and whether it will change the effect of nighttime warming on this process are still unclear. In this study, the four treatments included no Si application at ambient nighttime temperature (CK) and at nighttime warming (NW), and silicon application at ambient nighttime temperature (Si) and at nighttime warming (NW+Si). The surface soils were collected after four years of the above-mentioned treatments, and the $^{13}\text{CH}_4$ isotope labeling method was used to study the anaerobic CH_4 oxidation rates, its ^{13}C sequestration, and its response to nitrogen (N) fertilization. The results showed that the anaerobic CH_4 oxidation rate under NW treatment, which was $6.23 \text{ nmol} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ (in terms of $^{13}\text{CO}_2$), was significantly lower than that under CK treatment. The rate of NW treatment significantly increased by 22% under NW+Si treatment. The net

收稿日期: 2022-05-19 录用日期: 2022-08-16

作者简介: 谢晴(1997—), 女, 湖南长沙人, 硕士研究生, 主要从事农业气象学研究。E-mail: 448399165@qq.com

*通信作者: 张耀鸿 E-mail: yhzhang@nuist.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金项目(42175138, 91751204, 41875177); 江苏省研究生科研创新计划项目(KYCX22_1222)

Project supported: The National Natural Science Foundation of China (42175138, 91751204, 41875177); The Postgraduate Research & Practice Innovation Program of Jiangsu Province (KYCX22_1222)

increment of ¹³C soil organic carbon (¹³C-SOC) driven by ¹³CH₄ oxidation under NW treatment, which was 0.31 μmol·g⁻¹ and significantly lower than that in CK paddy soils, was not significantly different than that in NW+Si paddy field. This indicated that Si application had no significant effect on the carbon sequestration of CH₄ anaerobic oxidation in the nighttime warming paddy field. The anaerobic CH₄ oxidation rates of paddy fields substantially decreased 29%–50% under N fertilization, especially in paddy soils under Si treatment. In contrast, N fertilization remarkably increased the carbon sequestration efficiency [¹³C-SOC/(¹³C-SOC + ¹³CO₂)] of CH₄ anaerobic oxidation. In conclusion, silicon application could alleviate the inhibitory effect of nighttime warming on the CH₄ oxidation process in paddy fields but had no significant effect on carbon sequestration. N fertilization could improve the carbon sequestration efficiency of CH₄ anaerobic oxidation in paddy fields, which favored fixing a higher proportion of ¹³C-CH₄ into soil organic carbon in the process of CH₄ oxidation.

Keywords: methane; anaerobic oxidation; nighttime warming; silicon application; carbon sequestration efficiency; paddy field; soil

甲烷(CH₄)是一种重要的温室气体,其全球增温潜势(GWP)在百年尺度上是CO₂的28倍,且每年以1.2%的速度持续增加^[1],约占每年人为温室气体排放总量的16%,对全球变暖的贡献达到30%^[2]。稻田是陆地生态系统重要的CH₄排放源,据估算,稻田CH₄排放约占全球CH₄总排放量的17%^[3]。稻田土壤中产生的CH₄气体在进入大气之前大部分被氧化消耗,厌氧氧化过程是CH₄消减的最主要过程;CH₄厌氧氧化作用在整个稻田剖面的厌氧环境中普遍发生,该过程由厌氧甲烷氧化细菌/古菌催化完成。CH₄厌氧氧化对稳定大气CH₄含量,减缓全球温室效应具有重要意义。

IPCC第五次报告显示,近半个世纪以来全球平均地表温度持续变暖,且近地气温增幅呈现明显的昼夜不对称性,即夜间增幅显著高于白天^[4]。夜间增温对稻田CH₄厌氧氧化过程的影响受到普遍关注。关于微生物CH₄厌氧过程对温度的适应性,不同的研究有不同的结论。有研究者发现反硝化型CH₄厌氧氧化菌属中温微生物的最适温度为30~35℃^[5],也有研究者认为该微生物对低温环境具有较好的适应性^[6];Ettwig等^[7]发现,随着温度从25℃增加至30℃,反硝化型CH₄厌氧氧化细菌富集培养物的活性明显提高,但古菌却逐渐减少直至完全消失。硅是植物的有益元素之一,且是水稻的必需营养元素。叶片的硅化细胞对于散射光的透过量为绿色细胞的10倍,使其吸收更多的光源,促进光合作用;而且可促进碳水化合物长距离转运,协调植物的库-源关系^[8-9]。有研究发现,施硅显著降低了稻田CH₄的排放^[10-11],而对CH₄厌氧氧化过程影响的研究鲜有报道。增温和施硅二者耦合对稻田土壤CH₄厌氧氧化过程的影响及其对氮肥的响应特征,目前尚不清楚,有待深入研究。

为此,本试验采用田间开放式夜间增温系统提供增温环境,开展增温和施硅处理的田间试验,采集耕层稻田土壤,运用¹³CH₄稳定性同位素标记法研究夜间增

温和施硅对稻田土壤CH₄厌氧氧化过程的影响,为探索稻田温室气体减排措施提供理论依据和实践途径。

1 材料与方法

1.1 田间试验设计

田间试验在南京信息工程大学(32.0°N, 118.8°E)农业气象试验站进行。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℃。试验站的土壤为潴育型水稻土,灰马肝土属,质地为壤质黏土。种植制度为当地典型的稻麦轮作制。

试验站于2016年6月采用田间开放式增温系统开展增温试验。试验共设4个处理:常温对照+不施硅(CK)、夜间增温+不施硅(NW)、夜间增温+施硅(NW+Si)及常温对照+施硅(Si)。采用随机区组试验设计,每个处理重复3次。小区面积为4 m²(2 m×2 m)。稻麦轮作过程中水稻移栽/小麦播种前,在每个处理试验区内施入高浓度的氮磷钾复合肥(15-15-15),施用量完全一致,N-P₂O₅-K₂O均为200 kg·hm⁻²。施硅处理的试验区(Si和NW+Si)内施入钢渣硅肥,用量为200 kg·hm⁻²。该粉状矿渣型硅肥取自南京钢铁集团有限公司,pH值为8.9,含有效硅(SiO₂)13.8%、铁16.4%、磷2.1%、钾3.8%。各肥料用量均为一次性施入。在水稻和小麦生长期,田间管理、病虫害防治均依据大田实际情况进行。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。夜间增温采用被动式增温方式进行,即在试验小区四周搭设不锈钢管支架,将铝箔反光膜架设于支架上,在农作物(水稻/小麦)生长期,夜间(19:00—6:00,随日长有所增减)用铝箔反光膜覆盖农作物冠层,白天将铝箔反光膜卷起。随农作物生长发育进程,及时调整支架高度,使反光膜与农作物冠层始终保持在0.3 m左右。为了保持各个试验小区植物受光度的一致性,在常温对照区内也搭设不锈钢管支架,而无反

光膜覆盖。采用温度记录仪自动记录作物冠层和土壤 5 cm 处全生育期温度,数据记录间隔为 30 min。前期试验结果表明,与常温对照区相比,水稻冠层和 5 cm 土层的全生育期平均夜温分别提高了 1.21 °C 和 0.62 °C,增温效果明显^[10]。

1.2 土壤样品采集

2020年9月在水稻抽穗期从稻田中采集0~10 cm的耕层土壤。一部分鲜土用于测定土壤的养分特征指标;另一部分鲜土用于培养试验,测定稻田土壤的CH₄厌氧氧化速率及其固碳量。土壤养分特征分析过程中,土壤有机碳(SOC)采用H₂SO₄消煮-FeSO₄滴定法测定,可溶性有机碳(DOC)采用TOC分析仪测定,土壤总氮(TN)采用凯氏定氮法测定,铵态氮(NH₄⁺-N)和硝态氮(NO₃⁻-N)采用KCl提取-流动分析仪测定,土壤有效磷(AP)采用钼蓝比色法测定,土壤速效钾(AK)采用火焰光度计测定。

1.3 CH₄厌氧氧化速率及¹³C土壤有机碳分析

称取2.000 g鲜土放入12 mL的Labco顶空瓶,加入2 mL的灭菌去离子水,密封后抽真空-充氩气重复3次以达到严格厌氧状态。室温25 °C避光条件下预培养3 d,以尽可能去除残余O₂的影响。预培养结束后,再次对培养瓶抽真空-充氩气3次,置换1 mL等量的¹³CH₄气体(¹³CH₄的原子百分比为99%)进行正式厌氧培养。同时进行3种不同形态N添加处理,分别为NH₄⁺-N、NO₃⁻-N和尿素(Urea),使瓶中最终N浓度为5 mmol·L⁻¹。每个稻田土壤设置4个N添加培养处理:①无N处理,仅添加¹³CH₄;②添加¹³CH₄和NH₄⁺-N;③添加¹³CH₄和NO₃⁻-N;④添加¹³CH₄和Urea,每个处理3次重复。在第1天和第66天采用气相色谱仪(Agilent 7890B)和同位素质谱仪(Isoprime 100)测定厌氧培养过程中培养瓶顶空气体的CO₂浓度和¹³C-CO₂原子百分比,根据¹³CO₂的产生量,计算出CH₄厌氧氧化速率。

培养结束后,打开瓶盖加入2 mol·L⁻¹的HCl溶液

进行土壤酸化处理(去除无机碳),然后将土壤泥浆冷冻干燥后测定SOC含量及其¹³C-SOC丰度值。

1.4 数据处理与分析

试验数据用Microsoft Excel 2016 进行整理,用统计软件SPSS 21.0 进行方差分析(One-way ANOVA)和多重比较(Duncan法),*P*<0.05表示差异显著。用Origin 2021 软件绘制图表。

2 结果与分析

2.1 稻田土壤的养分特征

经过4年多的增温和施硅处理后,各试验小区耕层土壤的肥力养分特征发生较大变化。由表1可知,Si处理稻田耕层土壤的SOC、DOC、TN、NH₄⁺-N、NO₃⁻-N、AK含量均显著高于CK处理,且NW+Si处理稻田土壤的SOC、DOC、TN、NO₃⁻-N、AK含量均显著高于NW处理,表明施加硅肥有利于稻田耕层土壤SOC和TN的增加,以及NO₃⁻-N和AK含量的提升。NW处理稻田土壤的SOC、DOC、TN、AK含量均显著低于CK处理稻田土壤,且NW+Si处理稻田土壤的SOC、DOC、TN、NH₄⁺-N、NO₃⁻-N、AK含量显著低于Si处理稻田土壤,表明夜间增温促进稻田表层土壤的SOC、TN含量降低,AK含量减小。与CK处理稻田土壤相比,NW+Si处理稻田土壤的SOC和TN含量分别下降8.1%和2.1%,而DOC和NO₃⁻-N含量分别增加16.4%和19.5%,表明夜间增温条件下施加硅肥的综合效应是促进了稻田土壤的矿化过程,进一步导致土壤SOC和TN含量下降。

2.2 ¹³C-CO₂丰度变化及CH₄厌氧氧化速率

经过66 d的厌氧培养后,培养瓶顶空气体中的¹³CO₂原子百分比发生了很大变化。由图1A可知,顶空气体的¹³C-CO₂丰度值均超过了3.0%,远高于¹³C的自然背景值(1.08%),证实培养瓶内进行了¹³CH₄厌氧氧化,使得¹³C-CO₂丰度值增加。其中,NW+Si处理的¹³C-CO₂丰度值为4.05%,显著高于NW处理的丰度值(3.16%),说明夜间增温条件下,施硅提高了¹³CH₄

表1 试验处理下稻田土壤的养分特征变化

Table 1 Variations of nutrient characteristics of paddy soil under experimental treatments

处理 Treatment	有机碳 SOC/(g·kg ⁻¹)	水溶性有机碳 DOC/(mg·kg ⁻¹)	总氮 TN/(g·kg ⁻¹)	铵态氮 NH ₄ ⁺ -N/ (mg·kg ⁻¹)	硝态氮 NO ₃ ⁻ -N/ (mg·kg ⁻¹)	有效磷 AP/ (mg·kg ⁻¹)	速效钾 AK/ (mg·kg ⁻¹)
CK	21.0±0.5b	171.0±2.7c	1.41±0.01b	15.8±1.1b	11.8±0.7c	20.7±0.8ab	85.5±0.7c
NW	18.5±0.2d	154.0±2.7d	1.22±0.01d	14.5±0.8b	10.8±0.8c	19.3±1.4b	81.1±0.8d
NW+Si	19.3±0.1c	199.0±4.6b	1.38±0.02c	16.3±0.9b	14.1±0.6b	20.9±0.8ab	91.4±0.8b
Si	23.2±0.4a	216.7±5.1a	1.46±0.01a	18.0±0.9a	16.3±0.2a	22.3±0.8a	95.6±1.6a

注:不同小写字母表示同一理化性质不同土壤间存在显著差异(*P*<0.05)。

Note: Different lowercase letters indicate significant differences among soils at *P*<0.05 level.

厌氧氧化驱动的¹³C-CO₂丰度值。值得注意的是,CK处理稻田土壤的¹³C-CO₂丰度值为4.46%,显著高于其他3种处理稻田土壤。

根据培养结束时顶空气体CO₂浓度及¹³C-CO₂丰度值,可计算出¹³CO₂产生量用来表征稻田CH₄厌氧氧化速率。由图1B可知,4个处理的CH₄厌氧氧化速率差异显著,其中,NW+Si、Si处理的稻田土壤CH₄厌氧氧化速率分别为7.60、7.33 nmol·g⁻¹·d⁻¹(以¹³CO₂计,下同),显著高于NW处理稻田土壤的氧化速率(6.23 nmol·g⁻¹·d⁻¹),但三者均显著低于CK处理稻田土壤的氧化速率(8.97 nmol·g⁻¹·d⁻¹)。CH₄厌氧氧化速率与¹³C-CO₂丰度值的变化特征一致,说明顶空气中¹³CO₂的原子百分比,而非CO₂浓度,是导致4个稻田土壤CH₄厌氧氧化速率产生差异的主要原因。

2.3 土壤有机碳的¹³C丰度值及¹³C-SOC净增量

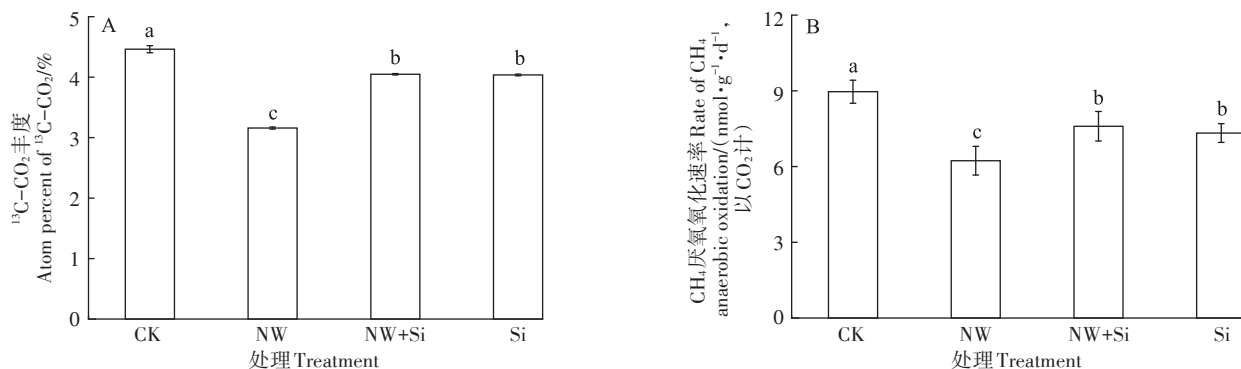
稻田土壤CH₄厌氧氧化过程中,其功能微生物先将¹³CH₄作为碳源进行同化,在呼吸代谢过程中将其一部分异化为¹³CO₂,其余部分以微生物碳及其代谢

物的形式固存在SOC中。从图2A可知,所试稻田土壤的¹³C-SOC丰度值均超过了1.10%,高于¹³C的自然背景值,说明稻田土壤在¹³CH₄厌氧氧化过程中,部分¹³C-CH₄被同化进入SOC中,使其¹³C丰度值增加。其中,NW处理稻田土壤的¹³C-SOC丰度值为1.138%,显著高于NW+Si处理稻田土壤的丰度值。CK处理稻田土壤的¹³C-SOC丰度值为1.158%,显著高于Si处理稻田土壤。

根据培养结束时SOC的含量及¹³C丰度值,可计算出¹³C-SOC净增量用来表征稻田土壤CH₄厌氧氧化驱动的固碳特征。由图2B可知,4个处理稻田的土壤¹³C-SOC净增量差异显著。其中,Si处理稻田土壤的¹³C-SOC净增量为0.38 μmol·g⁻¹,显著高于其他3个处理的稻田土壤。CK处理稻田土壤的¹³C-SOC净增量为0.34 μmol·g⁻¹,显著高于NW处理和NW+Si处理稻田土壤的¹³C-SOC净增量。

2.4 CH₄厌氧氧化的¹³C总转化量及固碳效率

底物¹³CH₄在微生物的代谢作用下一部分同化后



不同小写字母表示处理间存在显著差异($P < 0.05$)。下同

Different lowercase letters indicate significant difference among treatments at $P < 0.05$. The same below

图1 顶空气中¹³C-CO₂丰度和稻田土壤的CH₄厌氧氧化速率

Figure 1 Atom percentage of ¹³C-CO₂ and rates of CH₄ anaerobic oxidation in different treatments

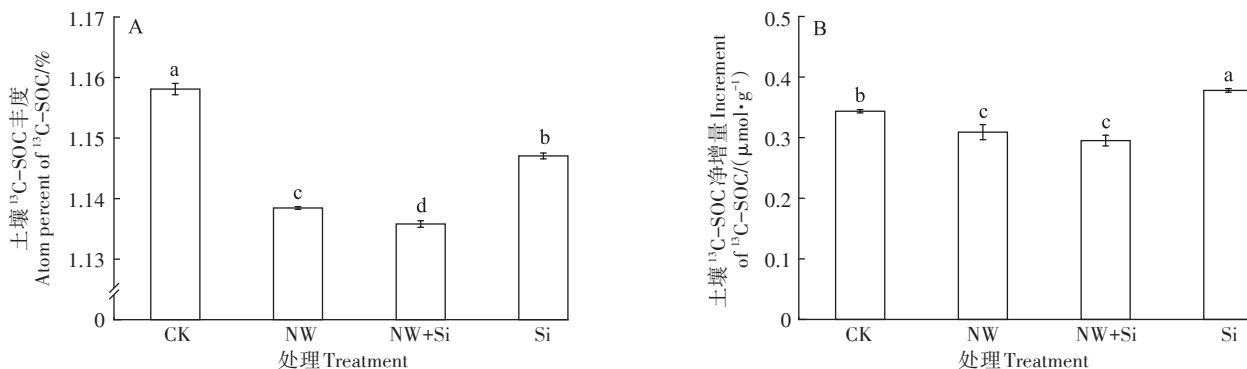


图2 不同处理下稻田土壤¹³C-SOC的丰度值和净增量

Figure 2 Atom percentage and net increment of ¹³C-SOC in different treatments

进入SOC组分中固存为 ^{13}C -SOC,一部分异化为 ^{13}C - CO_2 ,两者之和可表征 CH_4 氧化的 ^{13}C 总转化量(^{13}C -SOC+ ^{13}C - CO_2), ^{13}C -SOC与 ^{13}C 总转化量之比可表征 CH_4 厌氧氧化的固碳效率。由图3A可见,4个稻田土壤 CH_4 厌氧氧化的 ^{13}C 总转化量差异显著。其中,Si处理稻田土壤的 ^{13}C 总转化量为 $0.86 \mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}$,显著高于NW+Si处理的稻田土壤。NW处理稻田土壤的 ^{13}C 总转化量为 $0.71 \mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}$,显著低于CK处理的稻田土壤。由图3B可见,4个处理稻田土壤 CH_4 厌氧氧化的固碳效率范围为37%~45%。其中,Si处理稻田土壤的固碳效率为45%,显著高于CK处理稻田土壤;NW+Si处理稻田土壤的固碳效率为37%,显著低于NW处理稻田土壤。

2.5 增温/施硅稻田土壤 CH_4 厌氧氧化速率对N输入 的响应

在测定 CH_4 厌氧氧化速率的培养试验中,分别添加 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 和Urea进行培养,以模拟增温和施硅稻田在田间施加化学N肥情景下 CH_4 氧化过程的变化特征。由图4可知,3种形态的N输入对所试稻田土壤 CH_4 厌氧氧化速率的影响效应各异。其中,添加 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 条件下,Si处理稻田土壤的 CH_4 氧化速率为

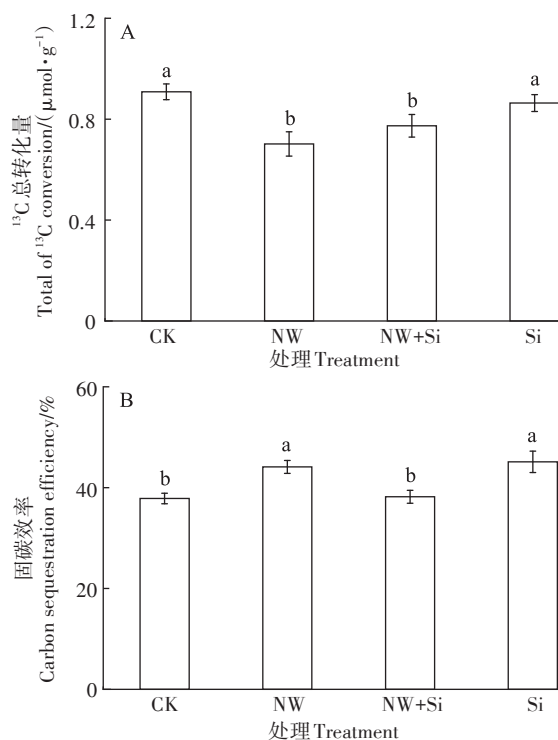


图3 不同处理下稻田土壤 CH_4 氧化的 ^{13}C 总转化量及固碳效率
Figure 3 Total conversion of ^{13}C - CH_4 and carbon sequestration efficiency in different treatments

$3.68 \text{ nmol}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$,显著低于NW+Si处理稻田土壤的氧化速率($4.91 \text{ nmol}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$)。CK处理稻田土壤的 CH_4 氧化速率为 $7.08 \text{ nmol}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$,显著高于NW+Si处理的稻田土壤。添加 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 条件下,NW处理稻田土壤的 CH_4 氧化速率为 $4.93 \text{ nmol}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$,显著高于Si处理稻田土壤的氧化速率($3.12 \text{ nmol}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$),而显著低于NW+Si处理稻田土壤的氧化速率($6.53 \text{ nmol}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$)。CK处理稻田土壤的 CH_4 氧化速率则与NW+Si处理稻田土壤无显著差异。添加Urea条件下,Si处理稻田土壤的 CH_4 氧化速率为 $5.21 \text{ nmol}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$,显著低于NW+Si处理稻田土壤;NW处理稻田土壤的 CH_4 氧化

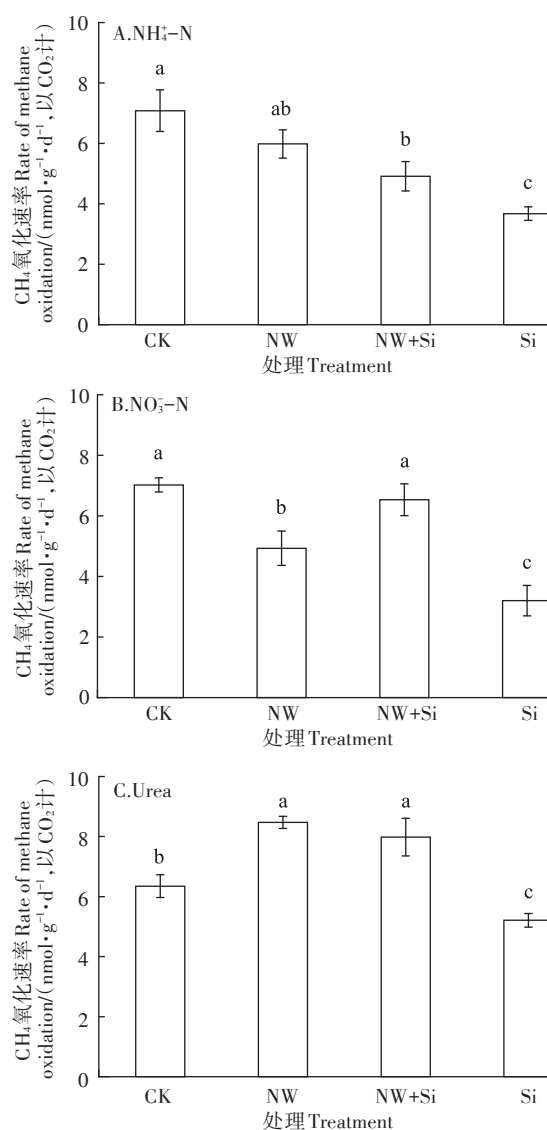


图4 添加 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 、尿素条件下稻田土壤的 CH_4 厌氧氧化速率变化

Figure 4 The rate of CH_4 anaerobic oxidation under addition of $\text{NH}_4^+\text{-N}$, $\text{NO}_3^-\text{-N}$, and Urea

速率为 $8.47 \text{ nmol} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$,显著高于CK处理稻田土壤。

综合来看,与无N添加相比,4个处理的稻田土壤CH₄厌氧氧化速率均有不同程度的下降(添加Urea的NW处理稻田除外),说明施加N肥对所试增温和施硅稻田土壤CH₄厌氧氧化过程呈一定的抑制效应,其中以Si处理的稻田土壤最为明显,CH₄氧化速率下降29%~50%。

2.6 CH₄氧化过程驱动的¹³C-SOC净增量对N输入的响应

由图5可知,3种形态的氮输入对所试稻田土壤CH₄厌氧氧化驱动的¹³C-SOC净增量的影响效应各异。其中,添加NH₄⁺-N条件下,NW+Si处理稻田土壤的¹³C-SOC净增量为 $0.41 \mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1}$,显著高于Si处理稻田土壤的净增量($0.29 \mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1}$),而显著低于NW处理稻田土壤。添加NO₃⁻-N条件下,NW+Si处理稻田土壤的¹³C-SOC净增量为 $0.35 \mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1}$,显著高于NW处理稻田土壤的净增量($0.24 \mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1}$),而Si处理稻田土壤的净增量最低。添加Urea条件下,NW+Si处理和Si处理稻田土壤的¹³C-SOC净增量均显著高于NW处理稻田土壤。

整体来看,与无N添加相比,添加NH₄⁺-N条件下4个处理稻田土壤的¹³C-SOC净增量均有不同程度的增加,说明施加NH₄⁺-N肥可促进所试增温和施硅稻田土壤CH₄厌氧氧化过程的固碳量。相反,与无N添加相比,添加NO₃⁻-N和Urea条件下4个处理稻田土壤的¹³C-SOC净增量没有发生明显增减,说明这两种形态的N输入对稻田土壤CH₄厌氧氧化驱动的固碳量无明显影响作用。与无N添加相比,添加NO₃⁻-N条件下4个处理稻田土壤¹³CH₄总转化量的平均值明显减小,尤其以Si处理稻田土壤最为突出,下降了39%;而添加NH₄⁺-N和Urea条件下4个稻田土壤¹³CH₄总转化量的变化较小。

2.7 CH₄氧化过程驱动的固碳效率对N输入的响应

由图6可见,4个处理的稻田土壤CH₄厌氧氧化驱动的固碳效率差异显著。其中,添加NH₄⁺-N条件下,CK处理稻田土壤的固碳效率为49%,显著高于其他3个处理土壤。添加NO₃⁻-N条件下,Si处理稻田土壤的固碳效率为51%,显著高于其他3个处理稻田土壤。添加Urea条件下,NW处理稻田土壤的固碳效率为29%,显著低于其他3个处理稻田土壤;Si处理稻田土壤的固碳效率为54%,显著高于其他3个处理稻田土壤。

综合来看,与无N添加相比,添加NH₄⁺-N、NO₃⁻-N和Urea条件下(添加Urea的NW处理稻田土壤除

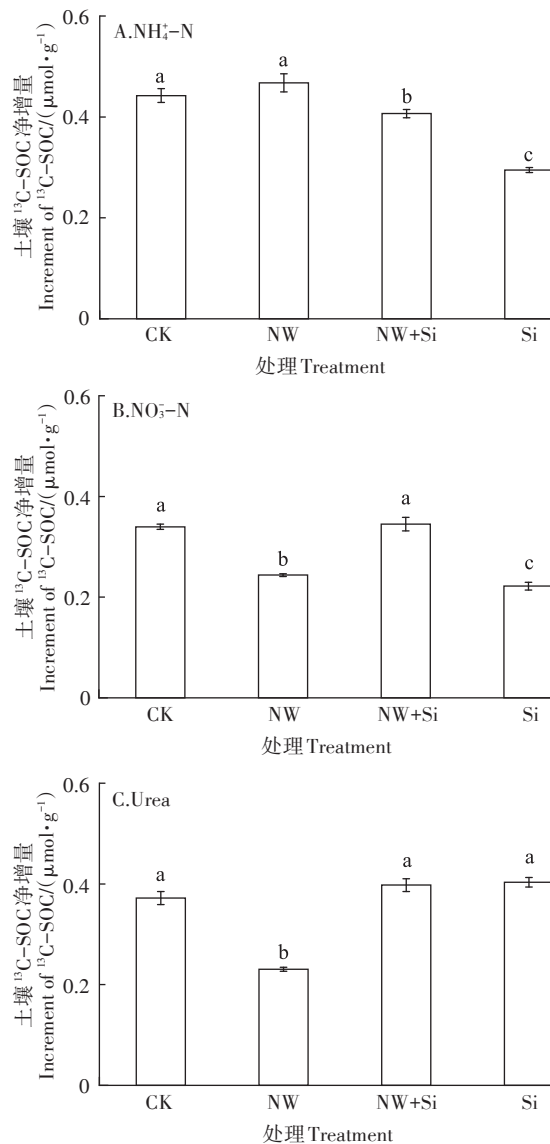


图5 添加NH₄⁺-N、NO₃⁻-N、尿素条件下稻田土壤¹³C-SOC的净增量

Figure 5 The net increment of ¹³C-SOC under the addition of NH₄⁺-N, NO₃⁻-N, and Urea

外),4个处理稻田土壤CH₄厌氧氧化驱动的固碳效率均有不同程度的上升,说明所试稻田在CH₄厌氧氧化过程中,施加这3种N肥均可促进更高比例的¹³C-CH₄被同化代谢为¹³C-SOC。其中,以Si处理稻田土壤最为明显,添加N条件下其固碳效率均超过50%,高于无N条件下的固碳速率(45%)。

3 讨论

CH₄厌氧氧化作用是稻田土壤CH₄消减的重要途径。本试验中,厌氧培养结束后顶空气体中¹³CO₂的丰度值均大于3.0%,远高于¹³C自然丰度值(1.08%),

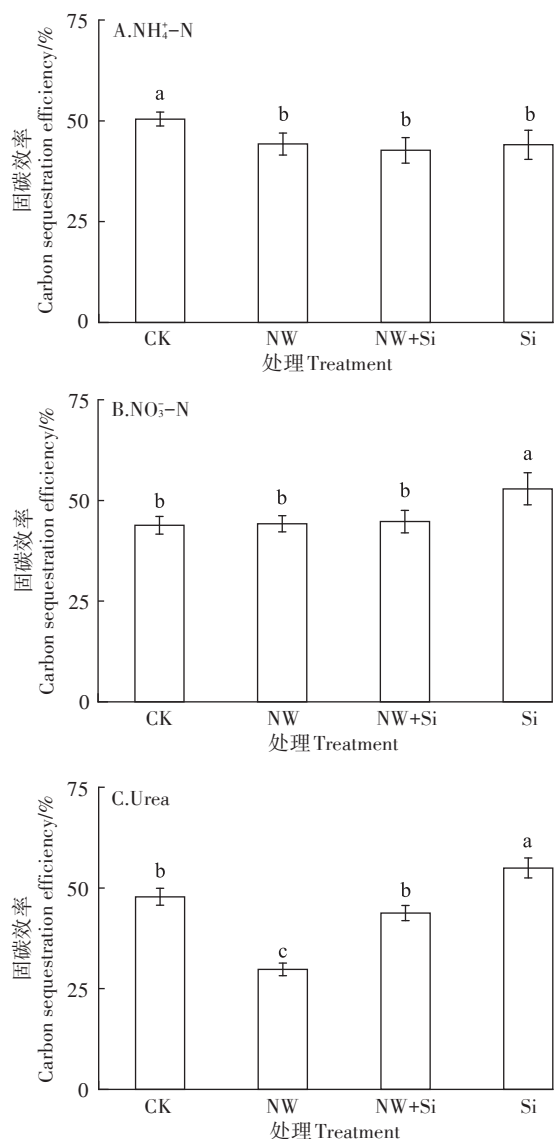


图6 添加 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 、尿素条件下土壤 CH_4 氧化的固碳效率

Figure 6 The carbon sequestration efficiency under addition of $\text{NH}_4^+\text{-N}$, $\text{NO}_3^-\text{-N}$, and Urea

说明培养土壤中确实发生了 CH_4 厌氧氧化过程。其氧化速率范围为 $6.23\sim 8.97\text{ nmol}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$,与其他湿地的研究结果基本一致^[12]。 CH_4 厌氧氧化作用主要由其功能微生物在厌氧条件下以 CH_4 为唯一碳源和电子供体,以 O_2 分子之外的其他氧化性物质为电子受体,进行氧化还原反应完成 CH_4 的转化^[13]。这些氧化性物质包括 SO_4^{2-} 、 $\text{NO}_2^-/\text{NO}_3^-$ 、 $\text{Fe}^{3+}/\text{Mn}^{4+}$ 和胡敏酸等^[14]。Et-tiwig等^[15]报道,以 NO_2^- 为电子受体的*M.oxylfera*细菌可将 CH_4 转化为 CO_2 ,再通过卡尔文循环同化 CO_2 。Hu等^[16]的报道指出,以 NO_3^- 为电子受体的ANME-2d古菌可通过逆向产 CH_4 途径将 CH_4 氧化为甲基- H_4MPT ,其既可进入乙酰辅酶A途径合成微生物生物量,又可

经过一系列的酶促反应最终转化为 CO_2 。本试验发现,所试稻田土壤 CH_4 厌氧氧化驱动的固碳效率为29%~54%,低于Zhang等^[17]的研究中滨海围垦稻田 CH_4 厌氧氧化的固碳效率为65%的结果。Shen等^[18]报道河道沉积物中*M.oxylfera*细菌的固碳效率仅为9%。有研究认为^[19],*M.oxylfera*细菌在碳同化过程中,既可以同化 CH_4 转化而来的 CO_2 ,也可以同化土壤环境中的体外 CO_2 ,从而造成其对底物 CH_4 的碳同化效率较低。相对而言,ANME-2d古菌与*M.oxylfera*细菌的碳同化路径不同,前者碳同化效率高于后者^[20]。本试验中 CH_4 厌氧氧化速率及碳同化量是土壤中各种不同电子受体共同参与的综合结果,从固碳效率来看,*M.oxylfera*细菌应该不是所试稻田土壤 CH_4 碳同化的主要贡献者,其较高的固碳效率也说明稻田土壤 CH_4 厌氧氧化过程是微生物固碳、提高SOC的一个有效途径。

本试验发现,不施加硅肥条件下夜间增温稻田土壤 CH_4 厌氧氧化速率显著低于夜间常温稻田土壤,受此影响, $^{13}\text{CH}_4$ 总转化量也显著降低,说明夜间增温抑制了稻田 CH_4 厌氧氧化过程。本试验不同稻田土壤均在25℃条件下厌氧培养,通过 $^{13}\text{CO}_2$ 产生量和 ^{13}C -SOC净增量分别表征氧化速率和碳同化量。因此,培养温度不应是造成两种稻田 CH_4 厌氧氧化特征产生显著差异的原因。事实上,经过4年多的增温处理后,表层土壤的理化性质发生了较大改变,表现为其总有机碳、活性有机碳、矿质态氮、AP和AK均显著低于常温对照稻田。这种土壤养分元素的普遍下降会严重抑制土壤微生物的活性,包括 CH_4 厌氧氧化微生物^[21]。Shen等^[22]报道,*M.oxylfera*细菌的活性与土壤全N、活性N含量显著正相关。Lou等^[23]报道ANME-2d古菌的活性与SOC、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量密切相关。Valenzuela等^[24]报道土壤胡敏酸可充当 CH_4 厌氧氧化的电子受体和电子传递体,两者之间存在显著正相关。因此,本试验中,夜间增温处理下土壤养分的普遍匮乏可能是导致 CH_4 厌氧氧化速率减小的主要原因,这将对稻田 CH_4 排放通量产生影响。刘燕等^[11]报道,夜间增温条件下,田间 CH_4 排放通量增大,认为其原因之一是 CH_4 氧化速率下降。

本试验还发现,夜间增温条件下施加硅肥显著提高了稻田土壤的 CH_4 厌氧氧化速率,而对 ^{13}C -SOC净增量则无明显影响。据刘燕等^[11]报道,施硅降低了增温稻田土壤的 CH_4 排放通量,推测可能是 CH_4 氧化速率增大所致。有研究认为施用的钢渣硅肥中含有的

丰富铁元素,可作为电子受体促进CH₄厌氧氧化过程^[25-26]。前期试验发现,施硅和增温均显著影响水稻生长。与对照处理相比,施硅可使水稻成熟期地上部和地下部生物量分别增加14.2%和6.5%,夜间增温则使这两项指标分别减少8.2%和3.3%^[10],秸秆还田后这些不同数量的有机物质对稻田SOC含量变化将产生重要影响。而且,水稻植株在合成植硅体过程中会包裹部分有机碳而形成植硅体闭蓄态碳,其具有很强的抗氧化性和稳定性。因此,施硅处理下,水稻合成较多的植硅体,有利于SOC的累积。本试验发现夜间增温条件下,施硅稻田耕层土壤SOC、DOC、TN、NO₃-N和AK等含量大幅提升,均显著高于不施硅稻田土壤。这种土壤养分特征的变化非常有利于土壤CH₄厌氧氧化微生物的活性和生长。另外,这种养分提升驱动的土壤环境变化对不同微生物的影响效应各异。本试验发现,Si处理的稻田土壤CH₄厌氧氧化速率显著低于CK处理稻田。CH₄厌氧氧化微生物属于严格厌氧型,以CH₄为唯一碳源和能源,其养分竞争能力低,生长代谢速率极其缓慢,极易被快速生长且养分竞争能力强的微生物所抑制^[21]。Shi等^[27]报道稻田土壤中NO₂/NO₃优先被反硝化微生物利用,而*M. oxyfera*细菌和ANME-2d古菌难以获得充分的电子受体而被抑制。另外,钢渣硅肥属于碱性肥料,施用后土壤pH值上升,对*M. oxyfera*细菌和ANME-2d古菌也会造成不利影响^[26]。这种养分改善驱动的其他微生物对CH₄厌氧氧化微生物的抑制效应可能远高于养分匮乏对CH₄厌氧氧化微生物的抑制效应,从而导致Si处理的稻田土壤CH₄厌氧氧化速率低于CK处理稻田土壤。

外源N肥对增温/施硅稻田的CH₄厌氧氧化过程有重要的影响。整体来看,施加3种不同形态N条件下,稻田CH₄厌氧氧化速率均明显下降,固碳效率却增加,以Si处理稻田最为明显。施加N素降低了土壤的C/N,有利于提高土壤微生物的活性,如有机质矿化微生物、反硝化细菌、厌氧氨氧化菌等^[21,27],这对CH₄厌氧氧化菌会产生竞争性抑制作用^[28]。在Si稻田中因土壤养分含量高,其对CH₄厌氧氧化菌的这种抑制作用更为明显。不同的N形态对CH₄厌氧氧化过程影响也各异^[29-30]。例如,添加NH₄⁺-N促进了增温/施硅稻田的¹³C-SOC净增量,而添加NO₃⁻-N则降低了稻田的¹³C-CH₄总转化量。这可能是因为NH₄⁺-N作为微生物喜好N源,促进了CH₄厌氧氧化菌的生长繁殖,促使更多的¹³CH₄底物被同化固定在土壤微生物

碳中,有利于SOC的积累。另外,添加NO₃⁻-N可能极大促进了以有机酸为碳源的经典反硝化过程,从而对CH₄厌氧氧化过程产生了强烈抑制^[21],其中Si处理稻田土壤中活性有机碳含量高,其抑制效应更为明显。因此,总体而言,外源N肥降低了所试稻田的CH₄厌氧氧化速率,提高了其固碳效率;在4种处理稻田中Si处理稻田土壤对外源N肥的响应度最高。这为通过合理施肥来缓解稻田CH₄排放提供了一个可能的有效途径。

4 结论

(1)夜间增温抑制了稻田土壤的CH₄厌氧氧化速率,施硅可极大缓解这种抑制效应,这与增温/施硅促使土壤养分特征发生改变密切相关。

(2)外源N降低了增温/施硅稻田的CH₄厌氧氧化速率,却提高了其固碳效率,有利于土壤有机碳积累。

参考文献:

- [1] CONRAD R. The global methane cycle: Recent advances in understanding the microbial processes involved[J]. *Environmental Microbiology Reports*, 2009, 1(5):285-292.
- [2] BRIDGHAM S D, CADILLO-QUIROZ H, KELLER J K, et al. Methane emissions from wetlands: Biogeochemical, microbial, and modeling perspectives from local to global scales[J]. *Global Change Biology*, 2013, 19(5):1325-1346.
- [3] 董文军, 来永才, 孟英, 等. 稻田生态系统温室气体排放影响因素的研究进展[J]. 黑龙江农业科学, 2015(5):145-148. DONG W J, LAI Y C, MENG Y, et al. Research progress of greenhouse gases emission in paddy field ecosystems[J]. *Heilongjiang Agricultural Sciences*, 2015(5):145-148.
- [4] 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: Cambridge University Press, 2014:1-32.
- [5] LUESKEN F A, VAN ALLEN T A, VAN DER BIEZEN E, et al. Diversity and enrichment of nitrite-dependent anaerobic methane oxidizing bacteria from wastewater sludge[J]. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 2011, 92(4):845-854.
- [6] DEUTZMANN J S, SCHINK B. Anaerobic oxidation of methane in sediments of Lake Constance, an oligotrophic freshwater lake[J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 2011, 77(13):4429-4436.
- [7] ETTWIG K F, SHIMA S, VAN DE PAS-SCHOONEN K T, et al. Denitrifying bacteria anaerobically oxidize methane in the absence of Archaea[J]. *Environmental Microbiology*, 2008, 10(11):3164-3173.
- [8] 高臣, 刘俊渤, 常海波, 等. 硅对水稻叶片光合特性和超微结构的影响[J]. 吉林农业大学学报, 2011, 33(1):1-4. GAO C, LIU J B, CHANG H B, et al. Effects of silicon on rice leaf photosynthesis and ultrastructure[J]. *Journal of Jilin Agricultural University*, 2011, 33(1):

- 1-4.
- [9] DADA L S O. 水稻蔗糖合成相关酶活性和基因表达及产量对硅营养的响应[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2016. DADA L S O. Rice silicon nutrition influence on sucrose synthesis related enzyme activity, gene expression and production[D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2016.
- [10] 郑泽华, 姜运生, 左慧婷, 等. 施硅对夜间增温条件下水稻叶片生理特性的影响[J]. 中国农业气象, 2017, 38(10): 663-671. ZHENG Z H, LOU Y S, ZUO H T, et al. Effect of silicate application on rice physiological properties under nighttime warming[J]. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2017, 38(10): 663-671.
- [11] 刘燕, 姜运生, 杨惠琳, 等. 施硅对增温稻田CH₄和N₂O排放的影响[J]. 生态学报, 2020, 40(18): 6621-6631. LIU Y, LOU Y S, YANG H L, et al. Effects of silicate supply on the emissions of methane and nitrous oxide in paddy field under night time warming[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2020, 40(18): 6621-6631.
- [12] SHEN L D, LIU S, HE Z F, et al. Depth-specific distribution and importance of nitrite-dependent anaerobic ammonium and methane-oxidizing bacteria in an urban wetland[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2015, 83: 43-51.
- [13] SMEMO K A, YAVITT J B. Evidence for anaerobic CH₄ oxidation in freshwater peatlands[J]. *Geomicrobiology Journal*, 2007, 24(7): 583-597.
- [14] 沈李东. 亚硝酸盐型甲烷厌氧氧化微生物生态学研究进展[J]. 土壤学报, 2015, 52(4): 713-722. SHEN L D. A review of study on microbial ecology of nitrite-dependent anaerobic methane oxidation[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2015, 52(4): 713-722.
- [15] ETTWIG K F, BUTLER M K, PASLIER D L, et al. Nitrite-driven anaerobic methane oxidation by oxygenic bacteria[J]. *Nature*, 2010, 464(7288): 543-548.
- [16] HU B L, SHEN L D, LIAN X, et al. Evidence for nitrite-dependent anaerobic methane oxidation as a previously overlooked microbial methane sink in wetlands[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2014, 111(12): 4495-4500.
- [17] ZHANG Y H, WANG F Y, XIA W W, et al. Anaerobic methane oxidation sustains soil organic carbon accumulation[J]. *Applied Soil Ecology*, 2021, 167: 104021.
- [18] SHEN L D, OUYANG L, ZHU Y Z, et al. Active pathways of anaerobic methane oxidation across contrasting riverbeds[J]. *The ISME Journal*, 2019, 13: 752-766.
- [19] RASIGRAF O, KOOL D M, JETTEN M S, et al. Autotrophic carbon dioxide fixation via the Calvin-Benson-Bassham cycle by the denitrifying methanotroph "*Candidatus Methyloirabilis oxyfera*"[J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 2014, 80(8): 2451-2460.
- [20] KURTH J M, SMIT N T, BERGER S, et al. Anaerobic methanotrophic archaea of the ANME-2d clade feature lipid composition that differs from other ANME archaea[J]. *FEMS Microbiology Ecology*, 2019, 95(7): fiz082.
- [21] YU H, KASHIMA H, REGAN J M, et al. Kinetic study on anaerobic oxidation of methane coupled to denitrification[J]. *Enzyme and Microbial Technology*, 2017, 104: 47-55.
- [22] SHEN L D, TIAN M H, CHENG H X, et al. Different responses of nitrite- and nitrate-dependent anaerobic methanotrophs to increasing nitrogen loading in a freshwater reservoir[J]. *Environmental Pollution*, 2020, 263: 114623.
- [23] LOU J Q, LÜ J, YANG D Y. Effects of environmental factors on nitrate-DAMO activity[J]. *Water, Air, & Soil Pollution*, 2020, 231: 263.
- [24] VALENZUELA E I, CERVANTES F J. The role of humic substances in mitigating greenhouse gases emissions: Current knowledge and research gaps[J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 750: 141677.
- [25] 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.
- [26] ALI M A, OH J H, KIM P J. Evaluation of silicate iron slag amendment on reducing methane emission from flood water rice farming[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2008, 128(1/2): 21-26.
- [27] SHI Y, HU S, LOU J, et al. Nitrogen removal from wastewater by coupling anammox and methane-dependent denitrification in a membrane biofilm reactor[J]. *Environmental Science & Technology*, 2013, 47: 11577-11583.
- [28] 沈李东, 金靖昊, 刘心. 内陆湿地与水体甲烷厌氧氧化功能微生物研究进展[J]. 生态学报, 2022, 42(9): 3842-3855. SHEN L D, JIN J H, LIU X. Research progress on anaerobic methanotrophs in inland wetlands and freshwater aquatic systems[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2022, 42(9): 3842-3855.
- [29] ZHANG Y H, ZHANG X L, WANG F Y, et al. Exogenous nitrogen addition inhibits sulfate-mediated anaerobic oxidation of methane in estuarine coastal sediments[J]. *Ecological Engineering*, 2020, 158: 106021.
- [30] BEAL E J, HOUSE C H, ORPHAN V J. Manganese- and iron-dependent marine methane oxidation[J]. *Science*, 2009, 325: 184-187.

(责任编辑: 朱晓昱)