

DOI: 10.5846/stxb201907151495

刘燕, 娄运生, 杨蕙琳, 周东雪. 施硅对增温稻田 CH_4 和 N_2O 排放的影响. 生态学报, 2020, 40(18): 6621-6631.

Liu Y, Lou Y S, Yang H L, Zhou D X. Effects of silicate supply on the emissions of methane and nitrous oxide in paddy field under nighttime warming. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(18): 6621-6631.

施硅对增温稻田 CH_4 和 N_2O 排放的影响

刘 燕^{1,2}, 娄运生^{1,2,*}, 杨蕙琳², 周东雪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, 南京 210044

2 南京信息工程大学江苏省农业气象重点实验室, 南京 210044

摘要: 夜间增温幅度大于白天是气候变暖的显著特征。夜间增温影响水稻生产及 CH_4 和 N_2O 排放。硅是作物有益元素, 施硅可提高产量, 减少稻田 CH_4 排放。增温或施硅单因子对稻田 CH_4 和 N_2O 排放影响已有报道, 但二者耦合如何影响水稻生产及稻田 CH_4 和 N_2O 排放, 尚不清楚。通过田间模拟试验, 研究了夜间增温下施硅对稻田 CH_4 和 N_2O 综合增温潜势和排放强度的影响。增温设 2 水平, 即常温对照 (CK) 和夜间增温 (NW), 采用铝箔反光膜夜间 (19:00—6:00) 覆盖水稻冠层模拟夜间增温; 施硅量设 2 水平, 即 Si0 (不施硅) 和 Si1 (钢渣硅肥, 200 $\text{kgSiO}_2/\text{hm}^2$)。结果表明, 施硅可缓解夜间增温对水稻根系活力的抑制作用, 降低夜间增温对水稻地上部、地下部干重和产量的抑制作用。夜间增温显著提高 CH_4 累计排放量, 而施硅显著降低 CH_4 累计排放量。夜间增温下施硅处理稻田 CH_4 累计排放量在分蘖期、拔节期、抽穗-扬花期和灌浆成熟期比未施硅处理分别低 48.12%、49.16%、61.59% 和 39.13%。夜间增温或施硅均促进稻田 N_2O 排放, 夜间增温下施硅在上述生育期及全生育期 N_2O 的累计排放量依次比对照高 78.17%、51.45%、52.01%、26.14% 和 40.70%。研究认为, 施硅可缓解夜间增温对稻田 CH_4 和 N_2O 综合增温潜势和排放强度的促进作用。

关键词: 稻田; 施硅; 夜间增温; 甲烷; 氧化亚氮

Effects of silicate supply on the emissions of methane and nitrous oxide in paddy field under nighttime warming

LIU Yan^{1,2}, LOU Yunsheng^{1,2,*}, YANG Huilin², ZHOU Dongxue²

1 Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of Meteorological Disasters, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China

2 Jiangsu Key Laboratory of Agricultural Meteorology, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China

Abstract: Asymmetric diurnal warming is one of the main features of global climate warming. Nighttime warming clearly impacts rice productions as well as methane (CH_4) and nitrous oxide (N_2O) emissions in paddy field. Silicon is beneficial element for crop growth. Silicate supply obviously increased yield, simultaneously decreased CH_4 emission in paddy field. Some reports have been available concerning nighttime warming or silicate supply effects on CH_4 and N_2O emissions in rice fields, but it is still unclear regarding the effects of both coupling on the emissions in paddy field. Field simulation experiment was conducted to investigate the effects of silicate supply on rice growth, yield and CH_4 and N_2O global warming potentials and emission intensity under nighttime warming. An aluminum foil reflective film was used to cover rice canopy at night (19:00—6:00) for nighttime warming excluding strong windy and rainy days under field conditions. The experiment was designed with two nighttime warming levels, i.e. nighttime warming (NW) and control (CK, ambient temperature), and two silicate supply levels, i.e. control (Si0) and Si1 (slag fertilizer, 200 $\text{kgSiO}_2/\text{hm}^2$). The results showed that

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41875177, 41375159)

收稿日期: 2019-07-15; 网络出版日期: 2020-07-11

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: yunshlou@163.com

silicate application could alleviate the inhibitory effect of nighttime warming on root activity, the dry weight of aboveground and belowground as well as yield in rice. Nighttime warming significantly increased CH_4 cumulative emission, in contrast, silicate application significantly reduced CH_4 cumulative emission. The CH_4 cumulative emission in the treatment with silicate application under nighttime warming was 48.12%, 49.16%, 61.59% and 39.13% lower than that without silicate application at tillering stage, jointing stage, heading-flowering stage, and filling stage. Night warming or silicate application could promote N_2O emission in the field. Under nighttime warming, N_2O cumulative emission in the treatment with silicate application at the above-mentioned growth stages and the whole growth period was 78.17%, 51.45%, 52.01%, 26.14%, and 40.70% higher than that in the control (without silicate application). This findings suggest that silicate application was helpful in alleviating the stimulative effects of nighttime warming on the warming potential and emission intensity in the paddy field.

Key Words: paddy field; silicate application; nighttime warming; methane; nitrous oxide

气候变暖是气候变化的主要特征之一。IPCC 第五次评估报告显示,1880—2012 年全球地表平均温度升高了 0.85°C ,1951—2012 年全球平均地表温度的升温速率($0.12^\circ\text{C}/10\text{a}$)几乎是 1880 年以来升温速率的两倍,未来仍将持续变暖^[1]。在气温上升的同时,其增幅还呈现明显的季节和昼夜不对称性,即冬春季增幅显著高于夏秋季,夜间增幅显著高于白天^[2]。大气中温室气体浓度的持续增长是引起全球气候变暖的主要原因^[3-5]。甲烷(CH_4)和氧化亚氮(N_2O)是两种主要温室气体,稻田是 CH_4 和 N_2O 的重要排放源^[6-8]。据估算,稻田 CH_4 排放约占全球 CH_4 总排放的 17%^[9],稻田 N_2O 排放约占农田 N_2O 总排放的 10%^[10]。我国是水稻种植大国,种植面积占全球的 20%,总产量占全球 30%^[4]。因此,在稳定粮食生产的情况下,减少稻田温室气体排放已成为水稻生产应对气候变化的研究热点。

夜间增温对水稻生产及 CH_4 和 N_2O 的排放的影响日益受到人们关注。夜间增温导致热带、亚热带地区水稻分蘖数减少,生育期缩短,叶片衰老加快,净光合速率下降,有效穗数和穗粒数减少,导致籽粒产量下降^[11-13]。温度不仅影响 CH_4 产生及其向大气的传输效率,还影响产甲烷菌的数量和活性。培养试验发现,在 $25-35^\circ\text{C}$ 内 CH_4 产生量随温度升高而增加。温度升高有利于有机物分解,提高产甲烷菌活性,促进 CH_4 产生排放^[14]。田间模拟试验表明,温度升高显著增加稻田土层 CH_4 和 N_2O 浓度,提高稻田 CH_4 和 N_2O 排放通量和累计排放量^[15-17]。硅是植物生长有益元素,施硅可促进水稻植株生长,提高产量,增强对重金属毒害、高温、病虫害等逆境胁迫的抗性^[18-20]。同时,施硅可显著减少稻田 CH_4 的排放^[21-22],但对 N_2O 排放影响研究结果不一^[23-24]。培养试验发现,施用钢渣硅肥可抑制稻田 N_2O 产生^[22],也有发现可促进 N_2O 排放^[25],也有认为对 N_2O 排放没有影响^[24, 26]。

有关增温或施硅单因子对水稻生产及稻田土壤 CH_4 、 N_2O 排放影响的已有报道,但二者耦合对水稻生产、增温潜势及温室气体强度的影响,目前尚不清楚。而且,以往报道大多基于盆栽或培养试验,不能代表大田试验的情况,在盆栽或培养试验基础上开展大田试验是必要的。因此,通过田间模拟试验阐明施硅能否缓解夜间增温对水稻生产的不利影响,实现环境和经济效益的统一,以提高水稻生产应对和适应气候变化的能力有积极意义。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

田间模拟试验于 2018 年 6 月到 2018 年 11 月在南京信息工程大学农业气象试验站(32.0°N , 118.8°E)进行。该站地处亚热带湿润气候区,年均降水量为 1100 mm,年均气温为 15.6°C 。供试水稻品种为超级稻南粳 9108。供试土壤为潴育型水稻土,灰马肝土属,质地为壤质粘土,有机碳、全氮的含量分别为 19.4、1.45 g/kg,

粘粒含量为 26.1%, pH 为 6.2(土水比 1:1)。供试氮磷钾肥料为高浓度复合肥(15-15-15)。供试硅肥为钢渣硅肥, 含有效硅(SiO₂)为 13.8%, 含铁 16.4%(总铁, Fe), 含锰 2.8%(MnO), 含磷(P₂O₅)2.1%。

1.2 试验设计

采用两因素 2 水平随机区组试验设计, 夜间增温设 2 水平, 即常温对照(CK)和夜间增温(NW); 施硅量设 2 水平, 即不施硅(Si0, 0 kgSiO₂/hm²)和施硅(Si1, 200 kgSiO₂/hm²)。试验共设 4 个处理, 即常温对照+不施硅(CK+Si0)、增温+不施硅(NW+Si0)、增温+施硅(NW+Si1)及常温对照+施硅(CK+Si1)。夜间增温处理从水稻分蘖期开始, 在小区四周搭设不锈钢管支架, 将铝箔反光膜固定于支架顶端, 夜间(19:00—6:00)用铝箔反光膜覆盖水稻冠层, 白天将铝箔反光膜揭开。随水稻生长发育进程, 及时调整不锈钢管支架, 使铝箔反光膜与水稻冠层保持 0.3 m 左右。每处理重复 3 次。小区面积为 2 m×2 m。

水稻种子经消毒、浸种, 在 35℃培养箱中催芽, 于 2018 年 5 月 10 日育苗, 6 月 9 日移栽, 株行距为 20 cm×20 cm。试验田经耕作、整地, 幼苗移栽前 1d 施肥, 每小区施入复合肥料(15-15-15)315 g, 相当于氮磷钾(N-P₂O₅-K₂O)施用量均为 200 kg/hm², 施硅处理的每小区(Si1)施钢渣硅肥 818 g, 相当于施硅量为 200 kg/hm²。为减少肥料损失, 在每小区内挖 4 条施肥沟(深 20 cm), 根据施肥处理要求将肥料均匀撒入施肥沟中, 覆土掩埋, 氮磷钾复合肥和硅肥均作为基肥一次性施入。水稻生长期保持水层厚度 5 cm, 根据水层变化及降雨情况进行合理灌溉。7 月 27 日至 8 月 10 日晒田, 而后灌溉复水, 9 月 22 日停止灌溉直到收获。大田常规管理, 病虫害防治依据田间实际情况进行。

1.3 测定方法

1.3.1 根系活力

在水稻分蘖期(1—43 d)、拔节期(44—63 d)、抽穗-扬花期(64—76 d)及灌浆-成熟期(77—142 d), 分别采集预先移植于尼龙根袋(300 目)中的植株, 连同根袋将完整植株从稻田土壤中拔出, 用剪刀剪开尼龙根袋, 先用自来水而后用去离子水, 将待测水稻根系冲洗干净, 用吸水纸吸干水分。而后, 称取 0.5 g 根系鲜样, 放入 25mL 三角瓶中, 加入 5mL 的 0.4% TTC 和 5mL 0.1mol/L 的磷酸缓冲液(pH=7.0)混合均匀, 放入水浴锅(37℃暗保温)浸泡 3 h 至红色, 之后加入 1mol/L 硫酸 2mL 终止反应。擦干水分后, 加入 3—5mL 的乙酸乙酯和少量石英砂研磨, 补充乙酸乙酯定容至 10mL, 用分光光度计于 485nm 处比色, 记录吸光度值, 查标准曲线, 求出 TTC 的还原量。

根系活力计算公式如下:

$$\text{根系活力} = C / (1000 \times m \times t) \quad (1)$$

式中, C 为四氮唑还原量(μg); m 为根质量(g); t 为保温时间(h); 根系活力单位为 $\text{mg}/(\text{g} \cdot \text{h})$ 。

1.3.2 生物量及产量

在水稻成熟期采样测定生物量, 每小区随机选取有代表性的 3 株植株, 采集地上部, 同时将根系从土壤中挖出, 用自来水洗净。将根、茎、叶、穗分别放入牛皮纸袋中, 置入 105℃烘箱内, 杀青 20 min, 而后在 70℃下烘干至恒重并称量。在水稻成熟收获期, 每小区中部选取 0.5 m×0.5 m 的长势均一的稻株采集稻穗, 用常规方法进行脱粒、风干、称重, 计算单位产量。

1.3.3 气体采集、分析与计算

用静态箱-气相色谱法测定稻田土壤 CH₄和 N₂O 的排放通量。水稻移栽后幼苗植株较小, 采样会干扰幼苗生长, 因而在移栽 4 周左右开始采样^[14, 23]。每周采样 1 次, 时间为上午 8:00—11:00。幼苗移栽前将采样箱底座固定于小区中间土壤内, 而后将长势一致的一丛幼苗(2 株)移入底座内。采样时, 将圆柱状 PVC 静态箱($H \times D = 130 \text{ cm} \times 17 \text{ cm}$)下端置于预先固定于土壤中的底座上, 通过水层密封保证箱体的气密性。密封后, 接通电源驱动固定于静态箱顶部的小风扇转动 15s 以混匀箱内气体, 而后分别于封箱后 0、15、30 min 用带有三通阀的 PVC 注射器采集箱内气体, 采集的气样转入预先抽成真空的玻璃采样瓶中, 带回实验室, 用气相色谱仪(Agilent 7890B)测定气样中 CH₄和 N₂O 浓度。色谱测定条件为: FID 检测器温度 200℃, 柱箱温度

50℃,载气 N₂(流量校正不会影响尾吹气或燃气流量),空气和 H₂流量分别为 400 mL/min 和 45 mL/min;测定一个气样需要 4.5 min,至 3.8 min 时注入下一管待测样品。在气样采集的同时,记录静态箱内气温。

CH₄和 N₂O 的排放通量计算如下:

$$F = \rho \times H \times 60 \times \frac{273}{273 + T} \times \frac{dc}{dt} \quad (2)$$

式中, F 为气体排放通量($\text{mg m}^{-2} \text{h}^{-1}$), ρ 为标准状态下气体密度(kg/m^3), H 为采样箱的高度, T 为采样箱内的温度($^{\circ}\text{C}$), dc/dt 为采样箱内气体随时间的变化率。

水稻各生育期累计排放量根据公式(3)计算:

$$Q = \sum [(F_{i+1} + F_i)/2] \times (D_{i+1} - D_i) \times 24 \quad (3)$$

式中, Q 为水稻生育期累计排放量(mg/m^2), F_{i+1} 、 F_i 分别为第 $i+1$ 次和 i 次采样时气体平均排放通量($\text{mg m}^{-2} \text{h}^{-1}$), D_{i+1} 和 D_i 分别时第 $i+1$ 次和 i 次的采样时间(d)。

全球增温潜势的计算,以 CO₂作为参考气体(CO₂的 GWP 值为 1),以百年尺度计算,CH₄和 N₂O 的 GWP 值分别是 CO₂的 28 倍和 265 倍^[1],其综合增温潜势的计算如公式(4)所示:

$$\text{SGWP} = T_c \times 28 + T_N \times 265 \quad (4)$$

式中,SGWP 为 CH₄和 N₂O 的综合增温潜势(CO₂ kg/hm^2), T_c 和 T_N 分别为 CH₄和 N₂O 的累计排放量(mg/m^2)。

CH₄和 N₂O 的排放强度(即产量尺度下的全球增温潜势)计算如公式(5)所示:

$$\text{GHGI} = \text{SGWP}/p \quad (5)$$

式中,GHGI 为气体排放强度(CO₂ kg/t),SGWP 为气体综合增温潜势(CO₂ kg/hm^2), p 为水稻产量(t/hm^2)。

1.4 数据处理与分析

试验数据用 Microsoft Excel 2016 进行整理,以平均值±标准差表示,用统计软件(SPSS 21.0)进行方差分析(One-way ANOVA)和多重比较(Duncan 法)。

2 结果与分析

2.1 夜间增温下施硅对水稻生长及产量的影响

由图 1 可知,随水稻生长进程,植株根系活力呈现逐渐降低趋势,即:分蘖期>拔节期>抽穗期>灌浆-成熟期。在分蘖期,无论施硅与否,夜间增温对水稻根系活力均无显著影响;但无论是否进行夜间增温,施硅均能显著促进根系活力;在常温对照下,施硅的水稻植株根系活力比不施硅升高 31.25%,在夜间增温下,施硅的根系活力比不施硅升高 39.47%。在拔节期,无论是否进行夜间增温,施硅对水稻根系活力均无显著影响。在不施硅情况下,夜间增温显著降低水稻的根系活力,比常温对照降低 40.51%;但施硅情况下,夜间增温对根系活力无显著影响。在抽穗期,各处理间水稻根系活力均无显著差异,数值也较低(0.18—0.22 $\text{mg g}^{-1} \text{h}^{-1}$)。在灌浆-成熟期,夜间增温引起水稻根系活力下降,但未达显著水平($P>0.05$),而施硅可显著提高根系活力,比不施硅升高 149.10%,在夜间增温情况下,施硅处理水稻根系活力比不施硅升高 70.40%。可见,在水稻拔节期和灌浆-成熟期,施硅能有效缓解夜间增温对水稻根系活力的抑制作用。

施硅可提高水稻地下部干重、地上部干重和全株干重(表 1)。常温对照下施硅水稻上述干重指标依次比不施硅提高 134.05%、13.87%和 19.92%;夜间增温下施硅水稻上述干重指标比不施硅提高 38.35%、64.19%和 60.61%。

夜间增温引起水稻地下部干重下降(表 1)。在不施硅情况时,夜间增温处理的水稻植株地下部、地上部干重及全株干重比常温对照分别降低 8.23%、26.94%和 24.81%;在施硅情况下,夜间增温处理的水稻地下部干重比常温对照降低 45.75%。

夜间增温导致水稻产量下降,而施硅可提高水稻产量,但处理间差异未达显著水平。可见,施硅可有效缓

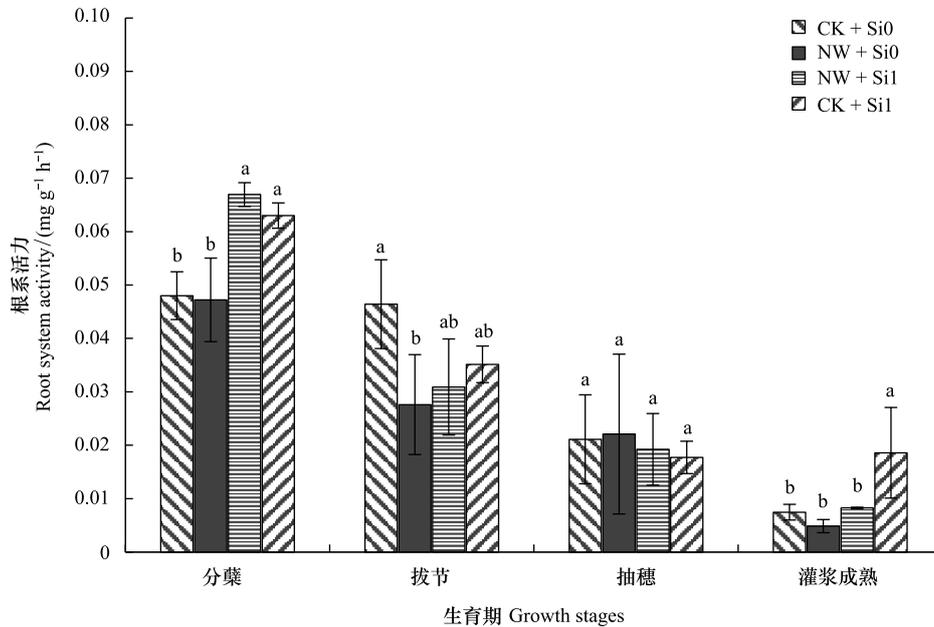


图 1 夜间增温下施硅对水稻根系活力的影响

Fig.1 Effect of silicate application on rice root activity under nighttime warming

CK: 常温对照 normal temperature control; NW: 夜间增温 nighttime warming; Si0: 不施硅 no silicate application; Si1: 施硅 silicate application; 同一生育期间不同小写字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$)

解夜间增温对水稻干物质积累和产量的抑制作用。

表 1 夜间增温下施硅对水稻地上部干重、地下部干重及产量的影响

Table 1 Effect of silicate application on shoot dry weight, root dry weight and yield in rice under nighttime warming

处理 Treatment	地下部干重 Root dry weight/g	地上部干重 Shoot dry weight/g	全株干重 Total plant dry weight/g	产量 Rice yield/(t/hm ²)
CK+Si0	3.32±0.97b	25.93±6.09ab	29.25±5.93ab	10.89±1.74a
NW+Si0	3.04±1.06b	18.95±5.24b	21.99±6.15b	10.43±1.56a
NW+Si1	4.21±1.49b	31.11±5.93a	35.32±5.05a	11.17±1.64a
CK+Si1	7.76±2.46a	29.53±2.22a	35.07±6.78a	12.48±0.46a

同一列数据后不同小写字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$); CK: 常温对照 normal temperature control; NW: 夜间增温 nighttime warming; Si0: 不施硅 no silicate application; Si1: 施硅 silicate application

2.2 夜间增温下施硅对稻田 CH₄和 N₂O 排放通量的影响

由图 2 可看出,不同处理的稻田土壤 CH₄排放通量变化趋势基本一致,即在分蘖期(1—43 d)呈稳步上升趋势,在第 43 d(分蘖末期或拔节初期)CH₄排放通量达峰值;而后从拔节期(44—63 d)开始,呈逐渐下降趋势;移栽后第 49 d 至第 64 d 为晒田阶段,晒田开始后,CH₄排放通量急剧下降直到晒田结束;灌溉覆水后,CH₄排放通量逐渐升高,在抽穗-灌浆期(64—114 d),呈小幅度波动,在第 77 d 和 106 d 时出现两次的排放峰值;在成熟期(115—142 d)停止灌水后,CH₄排放通量接近 0 值。

四种处理的 CH₄排放通量高低顺序依次是: NW+Si0>CK+Si0>NW+Si1>CK+Si1。无论夜间增温与否,施硅均降低 CH₄排放。在常温对照条件下,施硅稻田平均 CH₄排放通量在分蘖期、拔节期、抽穗期和灌浆-成熟期分别比不施硅低 27.85%、52.86%、60.41%和 10.79%;在夜间增温条件下,施硅稻田的 CH₄排放通量在上述生育期比不施硅分别低 41.87%、47.28%、57.15%和 37.08%。

无论施硅与否,夜间增温均提高 CH₄排放通量。在不施硅情况下,夜间增温处理稻田的方法 CH₄排放通

量比常温对照在上述生育期分别升高 36.36%、46.48%、22.40% 和 123.80%。而在施硅条件下,上述生育期夜间增温处理比常温对照处理的 CH_4 排放通量分别升高 9.87%、63.83%、32.49% 和 57.85%。可见,施硅可抑制 CH_4 排放通量,而夜间增温则促进 CH_4 排放通量,施硅能缓解夜间增温对 CH_4 排放通量的促进作用。

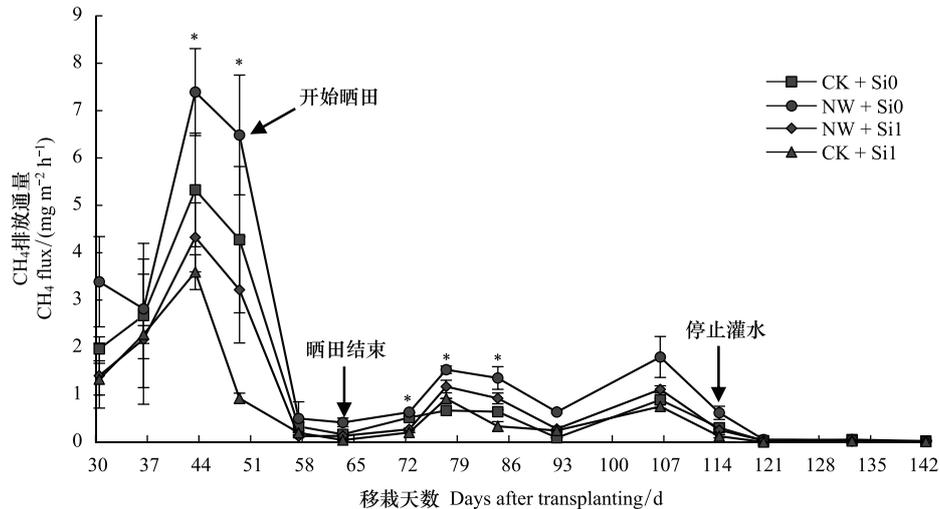


图 2 夜间增温下施硅对稻田 CH_4 排放通量的影响

Fig.2 Effect of silicate application on CH_4 emission flux in paddy field under nighttime warming

* 表示处理间差异显著 ($P < 0.05$)

由图 3 可知,四种处理的 N_2O 排放通量的变化趋势相似。在水稻分蘖期(1—43 d), N_2O 的排放较低;晒田后, N_2O 排放通量急速上升,在第 63 d,四种处理的 N_2O 排放通量均达到峰值;晒田结束覆水后, N_2O 排放通量迅速下降,之后在抽穗-灌浆期(64—114 d)呈波动变化,除对照在第 72 天和第 92 天出现接近 0 的负值之外,其他处理的变化幅度均在 $0—0.15 \text{ mg m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ 之间;停止灌水后, N_2O 排放通量开始有所波动回升,但数值要远低于晒田期间,约在 $0.1—0.2 \text{ mg m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ 间波动。

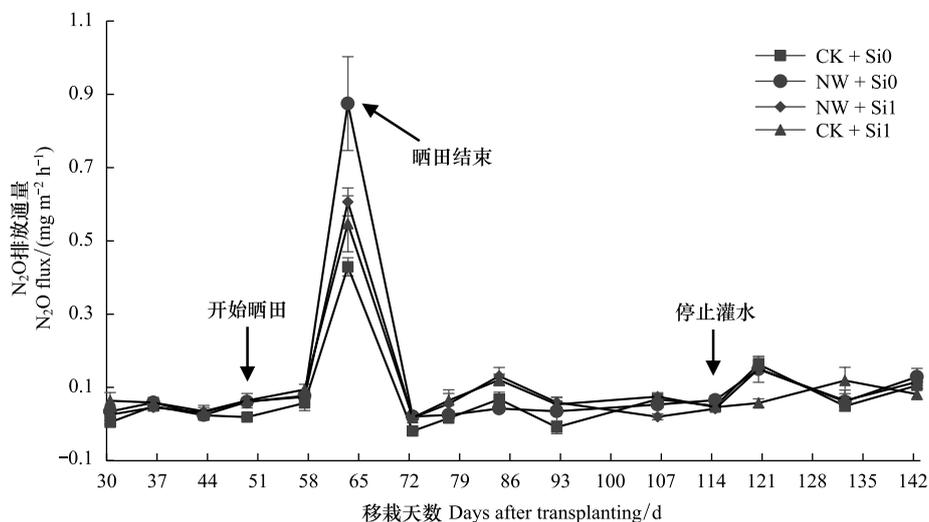


图 3 夜间增温下施硅对稻田 N_2O 排放通量的影响

Fig.3 Effect of silicate application on N_2O emission flux in paddy field under nighttime warming

从整个生育期来看,与对照相比,其他三种处理均能促进 N_2O 的排放。在分蘖期,增温、增温+施硅及施

硅处理的 N₂O 排放通量分别比对照增加 50.79%、32.98%和 102.04%;在拔节期,这三种处理分别比对照升高 100.33%、46.82%和 39.49%;在灌浆成熟期,三种处理分别比对照升高 9.98%、24.96%和 21.20%。从全生育期 N₂O 平均排放通量来看,夜间增温处理的稻田对 N₂O 排放通量的促进最高,比对照高出 59.31%,夜间增温+施硅处理的次之,比对照高出 39.64%;只进行施硅处理相比对照高出 39.41%。可见,施硅和夜间增温均促进 N₂O 的排放,两者耦合也促进 N₂O 的排放,三种处理对 N₂O 的促进程度依次是 NW+Si0>NW+Si1>CK+Si1。

2.3 夜间增温下施硅对稻田 CH₄和 N₂O 各生育期累计排放量的影响

由表 2 可看出,在水稻四个生育期中,不同处理的 CH₄ 累计排放量均在分蘖期最高,约占全生育期排放量的 50%左右;其次是拔节孕穗期和灌浆成熟期,约占 20%—30%;抽穗-扬花期最低,只占整个生育期排放量的 1%—2%。无论施硅与否,夜间增温下 CH₄ 的累计排放量均较高。在不施硅条件下,夜间增温处理的 CH₄ 累计排放量,在分蘖期、拔节期、抽穗-扬花期和灌浆成熟期及全生育期,分别比对照增加 47.07%、48.41%、53.66%、120.75%和 59.71%,各处理与对照间差异均达显著水平;在施硅条件下,夜间增温处理的 CH₄ 累计排放量在上述生育期及全生育期,分别比对照处理升高 6.40%、95.79%、60.82%、55.91%和 36.51%,除分蘖期外,各处理与对照间差异均达显著水平($P<0.05$)。

无论增温与否,施硅均降低 CH₄ 的累计排放量。在常温对照条件下,施硅处理的 CH₄ 累计排放量在上述生育期及全生育期,分别比对照降低 28.28%、61.46%、63.30%、13.81%和 37.61%,除灌浆-成熟期外,各处理与对照间差异均达显著水平($P<0.05$);在夜间增温条件下,施硅处理的 CH₄ 累计排放量在上述生育期,分别比不施硅处理的降低 48.12%、49.16%、61.59%和 39.13%,全生育期的 CH₄ 累计排放量比不施硅的降低 46.67%,差异均达显著水平。可见,夜间增温提高 CH₄ 累计排放量,施硅则降低 CH₄ 累计排放量,施硅可缓解夜间增温对 CH₄ 排放的促进作用。

表 2 夜间增温下施硅对稻田 CH₄ 各生育期累计排放量的影响

Table 2 Effect of silicon application on CH₄ cumulative emissions in rice paddy field at different growth stages under nighttime warming

处理 Treatment	分蘖期 Tillering stage		拔节孕穗期 Jointing-booting stage		抽穗扬花期 Heading-flowering stage		灌浆成熟期 Grain filling-maturity stage		全生育期 Whole growth period
	排放量 Emission/ (mg/m ²)	占比 Percent/%	排放量 Emission/ (mg/m ²)						
CK+Si0	1715.71±110.84b	48.49	1169.31±56.02b	33.05	73.84±3.37b	2.09	579.24±12.51c	16.37	3538.09±168.73b
NW+Si0	2523.33±43.85a	44.65	1735.38±34.85a	30.71	113.4±10.63a	2.01	1278.68±166.58a	22.63	5650.86±156.45a
NW+Si1	1309.18±58.23c	43.45	882.30±4.62c	29.28	43.58±1.50c	1.45	778.35±45.24b	25.83	3013.41±99.19c
CK+Si1	1230.48±92.90c	55.74	450.63±2.84d	20.41	27.10±1.06d	1.23	499.22±14.25c	22.62	2207.43±80.37d

同一列数据后不同小写字母表示处理间差异显著($P<0.05$)

由表 3 可看出,在水稻四个生育期,各处理均在灌浆-成熟期 N₂O 排放量最高,占全生育期的 35%—50%,拔节-孕穗期和抽穗-扬花期次之,约占 20%—30%,分蘖期最低,仅全生育期的 5%—15%。夜间增温或施硅均能促进稻田 N₂O 在各生育期的累计排放量,只施硅的稻田 N₂O 累计排放量,在上述生育期及全生育期分别比对照升高 237.25%、50.73%、37.50%、29.80%和 48.44%,且与对照间差异均达显著水平;只进行夜间增温处理的 N₂O 累计排放量,分别比对照高 121.64%、93.43%、118.28%、12.81%和 60.97%,除灌浆-成熟期外,各处理与对照间差异均达显著水平。夜间增温下施硅促进稻田 N₂O 累计排放量,在上述生育期和全生育期分别比对照升高 78.17%、51.45%、52.01%、26.14%和 40.70%,且除分蘖期外,均和对照间达显著差异。可见,施硅或夜间增温均提高 N₂O 累计排放量,夜间增温下施硅可增加稻田 N₂O 累计排放量。从全生育期来看,三种处理对稻田 N₂O 累计排放量的促进程度,依次为 NW+Si0>CK+Si1>NW+Si1>CK+Si0。

2.4 夜间增温下施硅对稻田增温潜势及排放强度的影响

从表 4 看出,常温对照(CK+Si0),只进行夜间增温(NW+Si0)和夜间增温下施硅(NW+Si1)处理的稻田

CH₄的增温潜势和排放强度占比较高,约占 53%—65%,而只进行施硅处理(CK+Si1)的稻田,N₂O 则占比较高,为 55.94%。无论增温与否,施硅均显著降低 CH₄的增温潜势和排放强度。常温对照条件下,施硅处理(Si1)稻田 CH₄增温潜势和排放强度比不施硅(Si0)低 37.61%和 45.56%;夜间增温条件下,Si1 处理的 CH₄增温潜势和排放强度比 Si0 处理的低 46.67%和 50.22%。无论施硅与否,夜间增温均显著提高 CH₄的增温潜势和排放强度。在 Si0 条件下,NW 处理的稻田增温潜势和排放强度比常温对照(CK)高 59.71%和 66.83%;在 Si1 条件下,NW 处理的增温潜势和排放强度比常温对照(CK)的高 36.51%和 52.55%。

表 3 夜间增温下施硅对稻田 N₂O 各生育期累计排放量的影响

Table 3 Effect of silicon application on N₂O cumulative emission in paddy field under nighttime warming

处理 Treatment	分蘖期 Tillering stage		拔节孕穗期 Jointing-booting stage		抽穗扬花期 Heading-flowering stage		灌浆成熟期 Grain filling-maturity stage		全生育期 Whole growth period
	排放量 Emission/ (mg/m ²)	占比 Percent/%	排放量 Emission/ (mg/m ²)						
CK+Si0	11.71±2.40c	5.87	45.41±2.17c	22.76	44.29±2.72c	22.20	98.08±5.98c	49.16	199.49±9.84c
NW+Si0	25.95±7.89b	8.08	87.84±10.13a	27.35	96.68±13.09a	30.11	110.64±3.08bc	34.46	321.11±25.89a
NW+Si1	20.86±3.21bc	7.43	68.77±1.69b	24.50	67.33±4.22b	23.99	123.71±11.67ab	44.08	280.67±18.05b
CK+Si1	39.48±8.85a	13.33	68.44±11.85b	23.11	60.90±8.05b	20.57	127.30±9.48a	42.99	296.13±22.82ab

同一列数据后不同小写字母表示处理间差异显著($P<0.05$)

与不施硅常温对照处理相比(CK+Si0),其他三种处理均显著促进 N₂O 的增温潜势和排放强度。Si1 处理稻田增温潜势和排放强度,分别比 Si0 处理高 60.97%和 68.13%,而 NW 处理的增温潜势和排放强度,分别比常温对照高 48.44%和 29.52%;夜间增温下施硅处理(NW+Si1)的增温潜势和排放强度,比不施硅常温对照(CK+Si0)高 40.70%和 37.18%。

总体上,夜间增温可显著促进 CH₄和 N₂O 的综合增温潜势和排放强度,施硅可降低 CH₄和 N₂O 的综合增温潜势和排放强度,施硅可有效缓解夜间增温对 CH₄和 N₂O 综合增温潜势和排放强度的促进作用。

表 4 夜间增温下施硅对稻田 CH₄和 N₂O 增温潜势和排放强度的影响

Table 4 Effect of silicon application on the warming potential and emission intensity of CH₄ and N₂O in paddy field under nighttime warming

处理 Treatment	全球增温潜势 GWP/(kg CO ₂ eq/hm ²)			温室气体排放强度 GHGI/(kg CO ₂ eq/t)			占比 Percent/%	
	CH ₄	N ₂ O	合计 Total	CH ₄	N ₂ O	合计 Total	CH ₄	N ₂ O
CK+Si0	990.67±47.24b	528.64±26.08 c	1519.31±26.80bc	90.96±4.34b	48.54±2.39c	139.50±2.46b	65.21	34.79
NW+Si0	1582.24±43.81a	850.93±68.61a	2433.17±59.41a	151.74±4.20a	81.61±6.58a	233.35±5.70a	65.03	34.97
NW+Si1	843.75±27.77c	743.78±47.82b	1587.53±75.12b	75.53±2.49c	66.58±4.28b	142.12±6.73b	53.15	46.85
CK+Si1	618.08±22.50d	784.74±60.48ab	1402.82±48.50c	49.52±1.80d	62.87±4.84b	112.38±3.89c	44.06	55.94

同一列数据后不同小写字母表示处理间差异显著($P<0.05$); GWP:全球增温潜势 Global warming potential;GHGI:温室气体排放强度 Greenhouse gas intensity

3 讨论

3.1 夜间增温下施硅对稻田 CH₄和 N₂O 排放的影响

CH₄排放主要受土壤中产甲烷菌和甲烷氧化菌的影响^[27]。稻田 CH₄产生必须在严格厌氧环境下进行^[28],但 CH₄氧化在有氧和厌氧环境下均可进行,其中有氧氧化较强,厌氧氧化较弱^[29]。有氧氧化主要是植株通气组织传输大气氧进入根际环境氧化甲烷^[30],厌氧氧化则是在氧气缺乏的条件下,以 NO₃⁻、Mn⁴⁺、Fe³⁺和 SO₄²⁻作为主要电子受体,对电子供体甲烷进行氧化^[31]。当稻田处于淹水厌氧环境时,有利于产 CH₄菌活动^[32],而排水晒田引起土壤含氧量增加,氧化还原电位(Eh)升高,产 CH₄菌活性受抑制,甲烷氧化菌活性增强,导致 CH₄排放明显降低(图 2)。夜间增温明显促进稻田 CH₄排放(图 2、表 2),原因在于:(1)夜间增温降

低水稻根系活力(图 1),使根际土壤甲烷氧化减弱,温度升高使较多根系分泌物释放到土壤中,为产 CH₄菌提供较多可利用性碳源^[33],从而促进 CH₄排放;(2)稻田 CH₄排放量与水稻生物量成反比^[34],夜间增温降低水稻地下部生物量和产量(表 1),降低植株对碳的固定,为 CH₄产生提供较多碳源。施硅抑制 CH₄排放,原因可能在于:(1)CH₄氧化菌生长的最适 pH 值为 6.6—6.8,供试稻田土壤 pH 为 6.2,施入的钢渣硅肥为碱性肥料,引起土壤 pH 升高趋于中性,有助于甲烷氧化^[35];且施硅提高了土壤盐度,盐度的增加会抑制产 CH₄菌的活性,从而抑制 CH₄的产生^[36];(2)钢渣硅肥中含铁、锰等元素,铁锰在淹水环境下作为电子受体,促进甲烷厌氧氧化,从而降低 CH₄排放^[37];(3)施硅可促进水稻根系生长,提高根系活力(表 1、图 1),改善根系通气性和氧化力,提高根际甲烷氧化菌活性,促进 CH₄氧化,从而抑制 CH₄排放^[38-39]。

田间土壤含水量是影响 N₂O 排放的主要因素。稻田处于淹水条件下,N₂O 排放相对较低,与厌氧环境有利于 NO₃⁻完全脱氮形成氮气(N₂)有关^[40-41];而稻田排水晒田期间,土壤通气良好,土壤中 NH₄⁺-N 和 NO₃⁻-N 含量较高,有利于 N₂O 产生和排放^[42]。因此,N₂O 的排放峰值主要在晒田期间,淹水条件下 N₂O 排放量较低,接近于 0(图 3)。本试验 N₂O 累计排放量高于一般稻田,原因可能在于:(1)本试验采用淹水-中期晒田-淹水的水分管理方式,干湿交替改善根系活性,促进有机碳分解转化,为土壤硝化反硝化微生物提供较多有效碳氮^[43],从而促进 N₂O 产生排放;(2)本试验田间观测采样时间较长,水稻进入成熟期,停止灌水后继续观测 4 周才收获,停止灌水有利于 N₂O 排放,因此,观测时间延长增加 N₂O 累计排放量。稻田 N₂O 主要来自于土壤微生物硝化和反硝化过程^[44]。夜间增温可显著促进 N₂O 排放(表 3),原因在于:(1)稻田 N₂O 排放与气温、土温呈正相关^[45],温度升高有利于土壤微生物活动,促进硝化和反硝化作用,从而增加 N₂O 产生排放;(2)夜间增温降低水稻生物量和产量(表 1),生物量和产量下降,植株吸收氮素减少,土壤残留氮素较多^[46],为 N₂O 产生提供了较多氮源。施硅可明显促进稻田 N₂O 排放,原因可能在于:(1)施硅可促进植株地上部和地下部干物质量形成(表 1),为硝化和反硝化微生物提供丰富的含碳有机物,同时含碳有机物分解不仅可提供电子,还消耗氧气,促进厌氧环境的形成,进一步促进反硝化作用,从而促进 N₂O 排放^[47];(2)水稻植株对 N₂O 排放起重要作用^[48],淹水条件下,稻田排放的 N₂O 有 80%以上是通过水稻植株排放进入大气的^[49],而施硅可提高水稻根系活力,从而提高水稻植株输送 N₂O 能力(图 1)。

3.2 夜间增温下施硅对稻田 CH₄和 N₂O 增温潜势和排放强度的影响

本研究结果表明,夜间增温下施硅稻田 CH₄和 N₂O 对增温潜势和排放强度的贡献基本相当,各占 50%左右(表 4),原因可能在于,虽然 CH₄的累计排放量要远大于 N₂O,但单位质量的 N₂O 所产生的温室效应却是 CH₄的 20 倍。农田生态系统净 GHGI 的大小与土壤固碳量、作物产量、农田向大气释放 CH₄和 N₂O 量有直接的关系^[50]。夜间增温可显著促进 CH₄和 N₂O 的增温潜势和排放强度,原因可能在于:(1)夜间增温能直接促进 CH₄和 N₂O 的排放量,从而促进增温潜势和排放强度;(2)GHGI 是指单位产量的 GWP,夜间增温降低了水稻产量,减少了土壤固碳量,从而提高 CH₄和 N₂O 的排放强度。施硅可显著降低 CH₄的增温潜势和排放强度,却增加 N₂O 的增温潜势和排放强度(表 4),原因可能在于:施硅虽然可提高水稻产量,但处理间差异并不显著,因而 CH₄和 N₂O 的增温潜势和排放强度受 CH₄和 N₂O 排放量的影响更大,施硅对 CH₄排放的抑制和对 N₂O 排放的促进作用,直接反映到其增温潜势和排放强度上。但是,前人研究发现,施入铁炉渣、钢渣硅肥对 CH₄和 N₂O 的增温潜势均起降低作用^[51],原因可能在于:(1)本试验施入的钢渣硅肥含有效硅(SiO₂)13.8%,而后者施入的铁炉渣和钢渣硅肥中含有效硅(SiO₂)含量分别是 40.7%和 27.72%,且富含钙、磷、钾等营养物质;(2)稻田土壤的速效钙、速效硅会提高 CH₄的氧化量^[37],但对不同途径 N₂O 通量的影响并不一致,对扩散途径的 N₂O 通量表现为抑制作用,对气泡与植物体途径的 N₂O 通量表现为促进作用^[52]。

从稻田综合增温潜势和排放强度来看,施硅有效缓解夜间增温对稻田 CH₄和 N₂O 综合增温潜势和排放强度的促进作用(表 4),但施硅对 CH₄和 N₂O 综合增温潜势和排放强度的影响,与前人研究有所不同。未来研究需进一步关注硅肥种类、有效含量及施用量,是否对 CH₄和 N₂O 综合增温潜势和排放强度产生不同的影

响(促进或抑制),进一步确定如何施硅、施何种硅肥,才能更有效地缓解夜间增温对稻田温室效应的促进作用。

4 结论

在拔节期和灌浆成熟期,施硅可缓解夜间增温对水稻根系活力的抑制作用,其他生育期缓解作用不明显。夜间增温可降低水稻的地上部、地下部以及全株干重和产量;而施硅可提高水稻地上部、地下部及全株干重和产量;施硅可有效缓解夜间增温对水稻的干重及产量的抑制作用。

在水稻生长季,从排放通量的变化看,4种处理的稻田 CH_4 排放通量排序为: $\text{NW} + \text{Si0} > \text{CK} + \text{Si0} > \text{NW} + \text{Si1} > \text{CK} + \text{Si1}$ 。相反,4种处理间 N_2O 排放通量的差异大多不明显,仅在中期晒田时 N_2O 排放达峰值,其余淹水时期的排放值均较低,接近于0。从累计排放量看, CH_4 的贡献远大于 N_2O ,夜间增温可明显促进 CH_4 排放,施硅可明显降低 CH_4 排放,施硅可有效缓解夜间增温对 CH_4 排放的促进作用;与 CH_4 不同的是,与对照相比,其他处理均促进 N_2O 的排放。从全球增温潜势和排放强度看,夜间增温下施硅稻田 CH_4 和 N_2O 的贡献基本相当,大约各占 50% 左右;总体上,夜间增温可显著促进 CH_4 和 N_2O 的综合增温潜势和排放强度,而施硅可降低其综合增温潜势和排放强度,施硅可缓解夜间增温对综合增温潜势和排放强度的促进作用。

参考文献(References):

- [1] Intergovernmental Panel on Climate Change (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. Cambridge: Cambridge University Press, 2013.
- [2] Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Climate Change 2007: Mitigation of Climate Change: Working Group III Contribution to the Fourth Assessment Report of the IPCC. New York: Cambridge University Press, 2007.
- [3] Jiang J Y, Chen L M, Sun Q, Sang M M, Huang Y. Application of herbicides is likely to reduce greenhouse gas (N_2O and CH_4) emissions from rice-wheat cropping systems. *Atmospheric Environment*, 2015, 107: 62-69.
- [4] Ma J, Ji Y, Zhang G B, Xu H, Yagi K. Timing of midseason aeration to reduce CH_4 and N_2O emissions from double rice cultivation in China. *Soil Science and Plant Nutrition*, 2013, 59(1): 35-45.
- [5] Weller S, Janz B, Jörg L, Kraus D, Racela H S U, Wassmann R, Butterbach-Bahl K, Kiese R. Greenhouse gas emissions and global warming potential of traditional and diversified tropical rice rotation systems. *Global Change Biology*, 2016, 22(1): 432-448.
- [6] 钟川, 杨滨娟, 张鹏, 李萍, 黄国勤. 基于冬种不同作物的水旱轮作模式对水稻产量及稻田 CH_4 、 N_2O 排放的影响. *核农学报*, 2019, 33(2): 379-388.
- [7] IPCC. Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press, 2007: 95-123.
- [8] Zhang Z S, Cao C G, Guo L J, Li C F. Emissions of CH_4 and CO_2 from paddy fields as affected by tillage practices and crop residues in central China. *Paddy and Water Environment*, 2016, 14(1): 85-92.
- [9] 董文军, 来永才, 孟英, 唐傲, 张喜娟, 冷春旭. 稻田生态系统温室气体排放影响因素的研究进展. *黑龙江农业科学*, 2015, (5): 145-148.
- [10] 王长明, 张忠学, 吕纯波, 郑恩楠, 贞宁啥. 不同灌溉模式寒地稻田 CH_4 和 N_2O 排放特征及增温潜势分析. *灌溉排水学报*, 2019, 38(1): 14-20, 68-68.
- [11] 郑泽华, 娄运生, 左慧婷, 石一凡, 王颖. 施硅对夜间增温条件下水稻生长和产量的影响. *中国农业气象*, 2018, 39(6): 390-397.
- [12] 董文军, 邓艾兴, 张彬, 田云录, 陈金, 杨飞, 张卫建. 开放式昼夜不同增温对单季稻影响的试验研究. *生态学报*, 2011, 31(8): 2169-2177.
- [13] 张鑫, 陈金, 江瑜, 邓艾兴, 宋振伟, 郑成岩, 张卫建. 夜间增温对江苏不同年代水稻主栽品种生育期和产量的影响. *应用生态学报*, 2014, 25(5): 1349-1356.
- [14] 蔡祖聪, 徐华, 马静. 稻田生态系统 CH_4 和 N_2O 排放. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2009.
- [15] Yang B, Chen Z Z, Zhang M, Zhang H, Zhang X H, Pan G X, Zou J W, Xiong Z Q. Effects of elevated atmospheric CO_2 concentration and temperature on the soil profile methane distribution and diffusion in rice-wheat rotation system. *Journal of Environmental Sciences*, 2015, 32: 62-71.
- [16] 王颖, 娄运生, 石一凡, 郑泽华, 左慧婷. 夜间增温对稻田甲烷排放的影响及其高光谱估算. *生态学报*, 2018, 38(14): 5099-5018.
- [17] Gaihre Y K, Wassmann R, Tirol-Padre A, Villegas-Pangga G, Aquino E, Kimball B A. Seasonal assessment of greenhouse gas emissions from irrigated lowland rice fields under infrared warming. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2014, 184: 88-100.
- [18] 龚金龙, 张洪程, 龙厚元, 胡雅杰, 戴其根, 霍中洋, 许轲, 魏海燕, 高辉. 水稻中硅的营养功能及生理机制的研究进展. *植物生理学报*, 2012, 48(1): 1-10.
- [19] Song A L, Li P, Li Z J, Fan F L, Nikolic M, Liang Y C. The alleviation of zinc toxicity by silicon is related to zinc transport and antioxidative

- reactions in rice. *Plant and Soil*, 2011, 344(1/2): 319-333.
- [20] Tripathi P, Tripathi R D, Singh R P, Dwivedi S, Goutam D, Shri M, Trivedi P K, Chakrabarty D. Silicon mediates arsenic tolerance in rice (*Oryza sativa* L.) through lowering of arsenic uptake and improved antioxidant defence system. *Ecological Engineering*, 2013, 52: 96-103.
- [21] Ali M A, Oh J H, Kim P J. Evaluation of silicate iron slag amendment on reducing methane emission from flood water rice farming. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2008, 128(1/2): 21-26.
- [22] Wang W, Sardans J, Lai D Y F, Wang C, Zeng C, Tong C, Liang Y, Peñuelas J. Effects of steel slag application on greenhouse gas emissions and crop yield over multiple growing seasons in a subtropical paddy field in China. *Field Crops Research*, 2015, 171: 146-156.
- [23] Lou Y S, Ren L X, Zhao S D, Shi Y F, Zhang Y W, Zhu H W. Effects of silicate application on CH₄ and N₂O emissions and global warming potentials in paddy soil under enhanced UV-B radiation. *Energy Science & Engineering*, 2019, 7(5): 1784-1794.
- [24] Wang W Q, Neogi S, Lai D Y F, Zeng C S, Wang C, Zeng D P. Effects of industrial and agricultural waste amendment on soil greenhouse gas production in a paddy field in Southeastern China. *Atmospheric Environment*, 2017, 164: 239-249.
- [25] Liu S W, Zhang L, Liu Q H, Zou J W. Fe(III) fertilization mitigating net global warming potential and greenhouse gas intensity in paddy rice-wheat rotation systems in China. *Environmental Pollution*, 2012, 164: 73-80.
- [26] Singla A, Inubushi K. Effect of slag-type fertilizers on N₂O flux from komatsuna vegetated soil and CH₄ flux from paddy vegetated soil. *Paddy Water Environ*, 2015, 13(1): 43-50.
- [27] 唐海明, 肖小平, 汤文光, 孙继民, 刘杰, 汪柯, 李超, 程凯凯, 李微艳, 孙耿. 长期施肥对双季稻田甲烷排放和关键功能微生物的影响. *生态学报*, 2017, 37(22): 7668-7678.
- [28] 徐华, 蔡祖聪, 八木一行. 水稻土甲烷产生、氧化和排放过程的相互影响——以水分历史处理为例. *土壤*, 2006, 38(6): 671-675.
- [29] 王明星, 李晶, 郑循华. 稻田甲烷排放及产生、转化、输送机理. *大气科学*, 1998, 22(4): 600-612.
- [30] 贾仲君, 蔡祖聪. 水稻植株对稻田甲烷排放的影响. *应用生态学报*, 2003, 14(11): 2049-2053.
- [31] Beal E J, House C H, Orphan V J. Manganese- and iron-dependent marine methane oxidation. *Science*, 2009, 325(5937): 184-187.
- [32] 张玉铭, 胡春胜, 张佳宝, 董文旭, 王玉英, 宋利娜. 农田土壤主要温室气体 (CO₂、CH₄、N₂O) 的源/汇强度及其温室效应研究进展. *中国生态农业学报*, 2011, 19(4): 966-975.
- [33] Sun H F, Zhou S, Fu Z S, Chen G F, Zou G Y, Song X F. A two-year field measurement of methane and nitrous oxide fluxes from rice paddies under contrasting climate conditions. *Scientific Reports*, 2016, 6: 28255.
- [34] 李香兰, 徐华, 蔡祖聪. 稻田 CH₄ 和 N₂O 排放消长关系及其减排措施. *农业环境科学学报*, 2008, 27(6): 2123-2130.
- [35] 谢军飞, 李玉娥. 农田土壤温室气体排放机理与影响因素研究进展. *中国农业气象*, 2002, 23(4): 47-52.
- [36] 王妙莹, 许旭萍, 王维奇, 王广磊, 苏程举. 炉渣与生物炭施加对稻田土壤产甲烷菌群落结构的影响. *生态学报*, 2018, 38(8): 2816-2828.
- [37] 王维奇, 李鹏飞, 曾从盛, 王纯, 林芳. 铁炉渣施加对稻田甲烷产生、氧化与排放的影响. *生态学报*, 2013, 33(5): 1578-1583.
- [38] 王丽丽, 闫晓君, 江瑜, 田云录, 邓艾兴, 张卫建. 超级稻宁粳 1 号与常规粳稻 CH₄ 排放特征的比较分析. *中国水稻科学*, 2013, 27(4): 413-418.
- [39] 田婷, 张青, 蒋华伟, 靖晶, 姜红卫, 李欣, 江君, 徐君. 水稻植株对稻田甲烷排放影响的研究进展. *江苏农业科学*, 2017, 45(20): 28-31.
- [40] Zou J W, Huang Y, Zheng X H, Wang Y S. Quantifying direct N₂O emissions in paddy fields during rice growing season in mainland China: dependence on water regime. *Atmospheric Environment*, 2007, 41(37): 8030-8042.
- [41] Liu H F, Liu G H, Li Y, Wu X, Liu D, Dai X Q, Xu M, Yang F T. Effects of land use conversion and fertilization on CH₄ and N₂O fluxes from typical hilly red soil. *Environmental Science and Pollution Research*, 2016, 23(20): 20269-20280.
- [42] 孙丽英, 马煜春, 郭明伟, 饶旭东, 张宇, 刘文秀. 有机-无机氮肥施用对滨海盐土稻田 CH₄ 和 N₂O 排放及综合温室效应的影响. *生态环境学报*, 2018, 27(11): 2065-2072.
- [43] 邹建文, 刘树伟, 秦艳梅, 冯得胜, 徐永忠, 朱会林. 不同水分管理方式下水稻生长季 N₂O 排放量估算: 模型应用. *环境科学*, 2009, 30(4): 949-955.
- [44] 王肖娟, 王永强, 赵双玲, 李丽, 苏天潮, 刘小武. 不同灌溉方式及施肥量对稻田土壤 N₂O 排放的影响. *大麦与谷类科学*, 2018, 35(3): 1-4, 21-21.
- [45] 邹建文, 黄耀, 宗良纲, 郑循华, 王跃思. 稻田 CO₂、CH₄ 和 N₂O 排放及其影响因素. *环境科学学报*, 2003, 23(6): 758-764.
- [46] 夏仕明, 陈洁, 蒋玉兰, 陈璐, 刘贺, 刘立军. 稻田 N₂O 排放影响因素与减排研究进展. *中国稻米*, 2017, 23(2): 5-9.
- [47] 秦红灵, 陈安磊, 盛荣, 张文钊, 邢肖毅, 魏文学. 稻田生态系统氧化亚氮 (N₂O) 排放微生物调控机制研究进展及展望. *农业现代化研究*, 2018, 39(6): 922-929.
- [48] 傅志强, 黄璜, 朱华武, 陈灿. 水稻 CH₄ 和 N₂O 的排放及其与植株特性的相关性. *湖南农业大学学报: 自然科学版*, 2011, 37(4): 356-360.
- [49] Yan X, Shi S, Du L, Xing G. Pathways of N₂O emission from rice paddy soil. *Soil Biology and Biochemistry*, 2000, 32(3): 437-440.
- [50] 成臣, 曾勇军, 杨秀霞, 黄山, 罗亢, 石庆华, 潘晓华, 商庆银. 不同耕作方式对稻田净增温潜势和温室气体强度的影响. *环境科学学报*, 2015, 35(6): 1887-1895.
- [51] 曾冬萍. 外源物质施加对福州平原水稻田温室气体排放的影响[D]. 福州: 福建师范大学, 2015.
- [52] 林芳, 王纯, 王维奇, 林德华. 铁炉渣施加对稻田不同途径氧化亚氮通量的影响. *实验室研究与探索*, 2014, 33(8): 26-28, 52-52.