



请通过网上投稿系统投稿 网址:http://www.aes.org.cn

## 不同遮阴处理下施肥对稻田CH4和N20排放的影响

王坤, 娄运生, 邢钰媛, 刘健

引用本文:

王坤,娄运生,邢钰媛,等.不同遮阴处理下施肥对稻田CH<sub>4</sub>和N<sub>2</sub>O排放的影响[J].农业环境科学学报,2021,40(2):464-472.

在线阅读 View online: https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0953

## 您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

## 清液肥对滴灌棉田NH3挥发和N2O排放的影响

王方斌,刘凯,殷星,廖欢,孙嘉璘,闵伟,侯振安 农业环境科学学报. 2020, 39(10): 2354-2362 https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0067

## 京津冀化肥投入特征与污染防控对策研究

串丽敏,郑怀国,王爱玲,赵静娟,颜志辉,齐世杰 农业环境科学学报.2021,40(1):54-61 https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0737

## 不同改良剂对旱地苹果园温室气体排放的影响

李钊, 刘帅, 丁艳宏, 孙文浩, 高晓东, 赵西宁 农业环境科学学报. 2021, 40(1): 227-236 https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0846

## 不同水稻品种甲烷排放与土壤酶的关系

周文涛, 戈家敏, 王勃然, 龙攀, 徐莹, 傅志强 农业环境科学学报. 2020, 39(11): 2675-2682 https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0517

## 生物炭折流湿地对生活污水的净化效果

王若凡, 汪文飞, 王煜钧, 孙鹤洲, 刘傲展 农业环境科学学报. 2020, 39(9): 2001-2007 https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0258



关注微信公众号,获得更多资讯信息

#### 农业环境科学学报 Journal of Agro-Environment Science

王坤, 娄运生, 邢钰媛, 等. 不同遮阴处理下施肥对稻田 CH<sub>4</sub>和 N<sub>2</sub>O 排放的影响[J]. 农业环境科学学报, 2021, 40(2): 464-472. WANG Kun, LOU Yun-sheng, XING Yu-yuan, et al. Effect of fertilization on CH<sub>4</sub> and N<sub>2</sub>O emissions from paddy soils under shading conditions[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2021, 40(2): 464-472.



# 不同遮阴处理下施肥对稻田 CH4和 N2O 排放的影响

# 王坤1,2,娄运生1,2\*,邢钰媛2,刘健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:太阳辐射减弱是气候变化的主要特征之一。太阳辐射减弱下不同肥料种类和施用量对水稻生产、稻田甲烷(CH4)和氧化 亚氮(N<sub>2</sub>O)排放的影响尚不明确。通过田间模拟试验研究了不同生育期遮阴条件下施用氮磷钾复合肥和硅肥对水稻产量、稻田 土壤 CH4和N<sub>2</sub>O 排放的影响。采用3因素3水平正交试验设计,遮阴设3水平,即不遮阴(S<sub>0</sub>,遮阴率为0)、水稻开花-成熟遮阴(S<sub>1</sub>,遮阴率为64%)和分蘖-成熟遮阴(S<sub>2</sub>,遮阴率为64%);氮磷钾复合肥设3水平,即100 kg·hm<sup>-2</sup>(F<sub>1</sub>)、200 kg·hm<sup>-2</sup>(F<sub>2</sub>)和300 kg·hm<sup>-2</sup>(F<sub>3</sub>);硅肥设3水平,即不施硅(R<sub>0</sub>)、钢渣200 kg·hm<sup>-2</sup>(R<sub>1</sub>)和钢渣400 kg·hm<sup>-2</sup>(R<sub>2</sub>)。结果表明,遮阴明显降低水稻产量,与S<sub>0</sub>相比, S<sub>1</sub>和S<sub>2</sub>分别降低了43.33%和48.51%。遮阴极显著降低CH4累积排放量,与S<sub>0</sub>相比,S<sub>1</sub>和S<sub>2</sub>分别降低了7.46%和57.71%;氮磷钾复合肥可显著提高CH4和N<sub>2</sub>O累积排放量,与F<sub>1</sub>相比,F<sub>2</sub>和F<sub>3</sub>CH4累积排放量分别增加了48.34%和57.03%,N<sub>2</sub>O累积排放量分别增加了85.81%和192.98%;施钢渣硅肥显著影响CH4累积排放量,与R<sub>0</sub>相比,R<sub>1</sub>降低了20.42%,R<sub>2</sub>增加了17.56%。所有处理CH4增温潜势占总温室效应的比例均高于91%,稻田CH4排放在稻田总温室效应中起主导作用。研究表明,太阳辐射减弱背景下,保证产量的同时控制氮磷钾复合肥和钢渣硅肥施用量可有效降低CH4和N<sub>2</sub>O综合温室效应和排放强度,最适组合为复合肥100 kg·hm<sup>-2</sup>(F<sub>1</sub>)和钢渣硅肥400 kg·hm<sup>-2</sup>(R<sub>2</sub>)。

关键词:遮阴;施肥;施硅;水稻;温室气体排放强度

中图分类号:S511;S154.1 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2021)02-0464-09 doi:10.11654/jaes.2020-0953

#### Effect of fertilization on CH4 and N2O emissions from paddy soils under shading conditions

WANG Kun<sup>1,2</sup>, LOU Yun-sheng<sup>1,2\*</sup>, XING Yu-yuan<sup>2</sup>, LIU Jian<sup>2</sup>

(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**: The decrease in solar radiation is one of the main issues of climate change. Few reports on the effects of decreased solar radiation and fertilization on methane (CH<sub>4</sub>) and nitrous oxide (N<sub>2</sub>O) emissions under paddy field conditions are available. A field experiment was conducted to investigate the effects of compound fertilizer and silicate fertilization on rice yield and the emissions of CH<sub>4</sub> and N<sub>2</sub>O under shading conditions. An orthogonal experimental design was adopted with 3 factors and 3 levels. Shading conditions were set at three levels: No shading (S<sub>0</sub>, 0% shading rate), from flowering period to maturity period shading (S<sub>1</sub>, 64% shading rate), and from tillering period to maturity period shading (S<sub>2</sub>, 64% shading rate). NPK compound fertilizer was set at three levels: 100 kg  $\cdot$  hm<sup>-2</sup>(F<sub>1</sub>), 200 kg  $\cdot$  hm<sup>-2</sup>(F<sub>2</sub>), and 300 kg  $\cdot$  hm<sup>-2</sup>(F<sub>3</sub>); silicate fertilizer was set at three levels: No silicate fertilizer (R<sub>0</sub>), slag fertilizer 200 kg  $\cdot$  hm<sup>-2</sup>(R<sub>1</sub>), and slag fertilizer 400 kg  $\cdot$  hm<sup>-2</sup>(R<sub>2</sub>). Results showed that shading significantly reduced rice yield. Compared with S<sub>0</sub>, S<sub>1</sub> and S<sub>2</sub> reduced rice yield by 43.33% and

收稿日期:2020-08-13 录用日期:2020-10-15

作者简介:王坤(1996—),男,山西大同人,硕士研究生,从事气候变化与农业研究。E-mail:wangkuntc@163.com

<sup>\*</sup>通信作者:娄运生 E-mail:yunshlou@163.com

基金项目:国家自然科学基金项目(41875177,41375159)

Project supported : The National Natural Science Foundation of China (41875177, 41375159)

465

48.51%, respectively. Shading significantly reduced the cumulative amount of CH<sub>4</sub> emissions. Compared with S<sub>0</sub>, S<sub>1</sub> and S<sub>2</sub> reduced the cumulative amount of CH<sub>4</sub> emissions by 7.46% and 57.71%, respectively. NPK compound fertilization significantly increased the cumulative amounts of CH<sub>4</sub> and N<sub>2</sub>O emissions. Compared with F<sub>1</sub>, F<sub>2</sub> and F<sub>3</sub> increased the cumulative amounts of CH<sub>4</sub> emissions by 48.34% and 57.03%, respectively and increased the cumulative amounts of N<sub>2</sub>O emissions by 85.81% and 192.98%, respectively. Compared with control (R<sub>0</sub>), R<sub>1</sub> decreased by 20.42%, while R<sub>2</sub> increased by 17.56%. CH<sub>4</sub> warming potential accounted for more than 91% of the total greenhouse effect. CH<sub>4</sub> emissions in rice fields played a major role in the total greenhouse effect of rice fields. This study suggests that the control of fertilization amount is helpful in decreasing sustained–flux global warming potential (SGWP) and greenhouse gas emission intensity (GHGI), while ensuring rice yield production under decreased solar radiation. The optimal combination in this study is 100 kg · hm<sup>-2</sup>(F<sub>1</sub>) and 400 kg · hm<sup>-2</sup>(R<sub>2</sub>).

Keywords: shading; fertilization; silicate supply; rice; greenhouse gas emission intensity

云、气溶胶和温室气体等引起的辐射强迫已成为 国际关注的热点问题,据统计,1750—2011年间由气 溶胶引起的辐射强迫为-0.9 W·m<sup>-2</sup>,使到达地表的太 阳辐射减弱<sup>[1]</sup>。1961—2008年我国东南部太阳辐射 以10.17 MJ·m<sup>-2</sup>·a<sup>-1</sup>速率下降<sup>[2]</sup>,江苏南京及周边地区 太阳辐射以0.2 MJ·m<sup>-2</sup>·d<sup>-1</sup>速率下降<sup>[3]</sup>。

太阳辐射是光合作用能量来源,对作物生产具有 重要作用。水稻为喜光作物,光强减弱影响水稻株 高、分蘖数、叶片和根系发育,降低干物质积累,导致 产量下降<sup>[4-5]</sup>。传统农业通过施用氮磷钾肥可促进水 稻生长发育,提高产量<sup>[6]</sup>,然而却显著提高了稻田 CH4 和 N<sub>2</sub>O 排放<sup>[7]</sup>。而施硅肥能有效增加水稻有效穗数、 千粒重和结实率,提高产量,并可降低稻田 CH4排放, 促进 N<sub>2</sub>O 排放,降低稻田 CH4和 N<sub>2</sub>O 排放综合温室效 应<sup>[8-9]</sup>。稻田是 CH4和 N<sub>2</sub>O 温室气体的重要排放源之 一,土壤 CH4和 N<sub>2</sub>O 排放量分别占农业总排放量 5%~ 19%和 11.4%<sup>[10-11]</sup>,其浓度每年分别以 1%和 0.2%~ 0.3% 速度增加<sup>[12]</sup>。近年来由于化肥的合理施用,稻田 温室气体排放量由 1980 年的 0.13 Gt CO<sub>2</sub>-eq 下降至 2016年的 0.10 Gt CO<sub>2</sub>-eq<sup>[13]</sup>。

太阳辐射减弱、施用氮磷钾肥或硅肥单因子或两 因子对水稻生产和稻田土壤CH4和N2O排放的影响 已有研究,通过覆盖遮阳网模拟辐射强迫,发现遮阴 处理使水稻叶面积指数和叶绿素含量显著下降,物候 期明显延迟,CH4排放量显著减小<sup>[14-15]</sup>。水稻抽穗后 光合产物占籽粒产量的90%<sup>[16]</sup>,CH4和N2O排放分别 集中在分蘖期至拔节期和拔节期至抽穗期<sup>[8]</sup>。然而, 水稻遮阴模拟太阳辐射减弱研究多局限于某个生育 期,对不同生育期或整个生育期遮阴研究尚不多见。 在太阳辐射减弱背景下,氮磷钾肥和硅肥的施用对水 稻生产及稻田土壤CH4和N2O排放的影响尚不明确。 本文通过大田模拟试验,研究在不同水稻生育期遮阴 条件下不同氮磷钾肥和硅肥施用量对水稻产量及 CH4、N2O排放的影响,旨在阐明太阳辐射减弱下通过 施肥调控能否在稳定水稻产量的同时,实现稻田温室 气体减排,为区域水稻可持续生产和粮食安全及应对 气候变化提供科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验地概况

田间模拟试验于2019年5—11月在南京信息工 程大学农业气象试验站进行(32.0°N,118.8°E)。该 站地处亚热带湿润气候区,年均降水量1100 mm,年 均气温15.6 ℃。供试土壤为潴育型水稻土,灰马肝土 属,有机碳含量19.4 g·kg<sup>-1</sup>,全氮含量1.5 g·kg<sup>-1</sup>,有效 磷含量16.2 mg·kg<sup>-1</sup>,速效钾含量112.6 mg·kg<sup>-1</sup>,质地 为壤质黏土,黏粒含量26.1%,pH值6.2(1:1土水比)。 供试氮磷钾肥料为高浓度氮磷钾复合肥(15:15:15, 俄罗斯产)。供试硅肥为钢渣粉,含有效硅(SiO<sub>2</sub>) 14.21%,铁氧化物(Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)含量为22.89%,pH值8.09 (土水比1:10)。供试水稻品种为南粳5055,该品种 株高适中,抗倒伏性强,适宜在江苏沿江及苏南地区 种植。

#### 1.2 试验设计

采用3因素3水平正交试验设计(表1),遮阴设3 水平,即不遮阴(S<sub>0</sub>,遮阴率为0)、开花-成熟期遮阴 (S<sub>1</sub>,遮阴率为64%)和分蘖-成熟期遮阴(S<sub>2</sub>,遮阴率为 64%)。小区面积=2 m×2 m=4 m<sup>2</sup>。采用普通黑色遮阳 网覆盖水稻冠层,根据生长进程及时调整遮阳网高度, 使遮阳网与冠层间距离保持0.3 m以上,以保持冠层良 好通风,便于田间观测和采样。氮磷钾复合肥设3水 平,施肥量分别为158、315 g和473 g,相当于田间施用 量 100 kg·hm<sup>-2</sup>(F<sub>1</sub>)、200 kg·hm<sup>-2</sup>(F<sub>2</sub>)和 300 kg·hm<sup>-2</sup> (F<sub>3</sub>)。硅肥设3水平,即不施硅(R<sub>0</sub>)、钢渣 200 kg·hm<sup>-2</sup>

www.aer.org.cn

AGS 466

Table 1 Schedule of $L_{9}(3^{4})$ orthogonal test						
试验号	因素 Factors					
No.	S(遮阴)	F(复合肥)	R(硅肥)	D		
1	$1(S_0)$	$1(F_1)$	$1(R_0)$	1		
2	$1(S_0)$	$2(F_2)$	$2(R_1)$	2		
3	$1(S_0)$	$3(F_3)$	$3(R_2)$	3		
4	$2(S_1)$	$1(F_1)$	$2(R_1)$	3		
5	$2(S_1)$	$2(F_2)$	$3(R_2)$	1		
6	$2(S_1)$	$3(F_3)$	$1(R_0)$	2		
7	$3(S_2)$	$1(F_1)$	$3(R_2)$	2		
8	$3(S_2)$	$2(F_2)$	$1(R_0)$	3		
9	$3(S_2)$	3(F <sub>3</sub> )	$2(R_1)$	1		

表1 正交试验设计方案表[L<sub>9</sub>(3<sup>4</sup>)]

(R<sub>1</sub>)和钢渣400 kg·hm<sup>-2</sup>(R<sub>2</sub>),R<sub>1</sub>和R<sub>2</sub>每小区分别施钢 渣粉634g和1268g。试验共设9个处理,按照L<sub>6</sub>(3<sup>4</sup>) 正交表安排试验处理。水稻2019年5月10日育苗,5 月23日翻耕,6月13日将各处理所需肥料施入,6月 14日移栽,7月28日至8月12日排水晒田,10月4日 停止灌溉。株行距为20 cm×20 cm,水稻生长期水层 保持大约10 cm,大田病虫害防治根据实际情况处理。 1.3 产量测定

水稻成熟后,在每小区中间区域选取样方(50 cm×50 cm),将所选样方内水稻穗收割,使用脱粒机 将谷粒从谷穗上脱下,测定选定样方脱粒后的产量 (单位:t·hm<sup>-2</sup>)。

## 1.4 气体采集与分析

采用密闭静态箱-气相色谱法,测定稻田CH4和 N<sub>2</sub>O 排放通量。从水稻分蘖期开始到成熟期结束,每 周采集气体样品1次,每次采样时间为上午8:00-11:00。采样前将圆柱状密闭静态箱(PVC)置于事先 固定于土壤的底座上,底座内均移栽水稻植株2株, 底座水槽内注水确保静态箱密封,而后接通蓄电池电 源使固定于采样箱顶部的微型直流电风扇运转20s, 以混匀箱内气体,分别于封箱后0、15、30 min 用带有 三通阀的塑料注射器通过采样孔采集箱内气体,将所 采气样注入事先抽成真空的估算 50 mL硬质玻璃采 样瓶中,采样结束将气样带回实验室,用气相色谱仪 (Agilent 7890B GC)检测 CH4和 N2O 的浓度,色谱柱型 号为 P/N 19091J-413, 柱箱温度为 50 ℃; FID 检测器 温度为250℃,高纯H<sub>2</sub>(99.999%),干燥无油压缩空 气,流量分别为50 mL·min<sup>-1</sup>和450 mL·min<sup>-1</sup>;镍转化 炉温度为375 ℃;载气 N<sub>2</sub>(99.999%)或高纯 He (99.999%).

### 农业环境科学学报 第40卷第2期

CH<sub>4</sub>和N<sub>2</sub>O排放通量计算公式<sup>[17]</sup>: *F=p×H*×60×[273/(273+T)]×dc/dt

式中:F为气体排放通量, $mg \cdot m^{-2} \cdot h^{-1}$ ; $\rho$ 为标准状态下 气体密度, $CH_4 \pi N_2 O$ 气体密度分别为 $0.714 \text{ kg} \cdot m^{-3} \pi$ 1.25 kg·m<sup>-3</sup>,H为采样箱气室高度,m;T为采样时箱内 平均温度, $\mathbb{C}$ ;dc/dt为箱内单位时间内气体浓度变化 率, $mg \cdot kg^{-1} \cdot h^{-1}$ 。

水稻各生育期CH4和N2O累积排放量计算公式:

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

式中:T为气体累积排放总量, $mg \cdot m^{-2}$ ; $F_i 和 F_{i+1}$ 分别为 第i次和i+1次采样时气体平均排放通量, $mg \cdot m^{-2} \cdot$ h<sup>-1</sup>; $D_i 和 D_{i+1}$ 分别是第i次和i+1次采样时的时间,d。

## 1.5 增温潜势及碳排放强度估算

1.5.1 增温潜势计算

采用持续变化全球增温潜势(Sustained-flux global warming potential, SGWP)和持续变化冷却潜势(Sustained-flux global cooling potential, SGCP)反映 CH4和N<sub>2</sub>O对气候变化的影响能力。以百年尺度计,当气体排放通量为正值时,将稻田全生育期CH4累积排放量乘以45与N<sub>2</sub>O累积排放量乘以270求和得到增温潜势;当气体排放通量为负值时,将稻田全生育期CH4累积排放量乘以203与N<sub>2</sub>O排放通量乘以349求和得到冷却潜势,公式分别为<sup>1181</sup>:

 $SGWP(kg CO_2-eq \cdot hm^{-2})=45 \times CH_4+270 \times N_2O$ 

 $SGCP(kg CO_2-eq \cdot hm^{-2})=203 \times CH_4+349 \times N_2O$ 

Total  $_{SGWP/SGCP}(kg CO_2-eq \cdot hm^{-2})=SGWP-SGCP$ 

1.5.2 气体排放强度计算

稻田CH<sub>4</sub>和N<sub>2</sub>O的排放/吸收强度(碳强度),即单 位水稻产量的SGWP/SGCP,计算公式为<sup>19</sup>:

 $GHGI_{SWGP}=SWGP/Y$ 

GHGI<sub>SWCP</sub>=SWCP/Y

式中:GHGI为气体排放强度,kg CO<sub>2</sub>-eq·t<sup>-1</sup>;Y为单位 面积的水稻产量,t·hm<sup>-2</sup>。

## 1.6 数据处理与分析

试验数据通过Excel 2019软件进行录入、整理、 编辑、绘图,使用 SPSS 25.0统计软件 Orthogonal Design 生成正交试验表,使用 General Linear Model 模块 进行方差分析。

## 2 结果与分析

#### 2.1 不同遮阴及施肥处理对水稻产量的影响

极差大小可反映各因素对试验结果的影响程度, 一般极差越大表明影响程度越大。极差分析表明, K(S)>K(F)>K(R),即遮阴对产量影响最大,其次为 施用复合肥,施硅对产量影响最小(表2)。S<sub>0</sub>F<sub>2</sub>R<sub>1</sub>处 理产量最大,为14.49 t·hm<sup>-2</sup>,S<sub>2</sub>F<sub>3</sub>R<sub>1</sub>处理产量最小,为 5.70 t·hm<sup>-2</sup>。遮阴S<sub>0</sub>水平产量最高,为36.53 t·hm<sup>-2</sup>,S<sub>2</sub> 水平最小,为18.81 t·hm<sup>-2</sup>;氮磷钾复合肥处理F<sub>2</sub>水平 最大,为27.70 t·hm<sup>-2</sup>,F<sub>3</sub>水平最小,为23.70 t·hm<sup>-2</sup>;硅 肥处理R<sub>1</sub>水平最大为26.93 t·hm<sup>-2</sup>,R<sub>2</sub>水平最小,为 23.41 t·hm<sup>-2</sup>。

随遮阴时间延长,水稻产量逐渐减小,遮阴处理 S<sub>1</sub>和S<sub>2</sub>产量分别比S<sub>0</sub>降低43.33%和48.51%(图1)。 随氮磷钾及硅肥施用量增加,水稻产量先增加后减 小,复合肥F<sub>2</sub>比F<sub>1</sub>增加12.37%,F<sub>3</sub>比F<sub>1</sub>降低3.85%;硅 肥R<sub>1</sub>比R<sub>0</sub>增加4.79%,R<sub>2</sub>比R<sub>0</sub>降低8.91%。遮阴、施 硅和施复合肥量对产量没有显著性影响,遮阴对产量 的影响未达显著水平(P>0.05)(表3)。

### 2.2 不同遮阴及施肥处理对CH4排放通量的影响

水稻生长季,各处理CH4排放通量呈现"单峰型" 季节性变化特点(图2)。水稻移栽第22d(分蘖前 期),CH4排放通量较低,随后逐渐增大,稻田随淹水 时间延长形成严格厌氧条件,同时分蘖数增加,有机 物分解,有利于产甲烷菌活动,从而CH4排放通量不

试验号		因素 Factor		产量
No.	S	F	R	$\frac{1}{10000000000000000000000000000000000$
1	$S_0$	$\mathbf{F}_1$	$R_0$	11.52
2	$S_0$	$\mathbf{F}_2$	$R_1$	14.49
3	$S_0$	$F_3$	$R_2$	10.52
4	$\mathbf{S}_1$	$\mathbf{F}_1$	$R_1$	6.73
5	$S_1$	$\mathbf{F}_2$	$R_2$	6.49
6	$\mathbf{S}_1$	$\mathbf{F}_3$	$\mathrm{R}_{\mathrm{0}}$	7.47
7	$S_2$	$\mathbf{F}_1$	$R_2$	6.39
8	$S_2$	$\mathbf{F}_2$	$\mathrm{R}_{\mathrm{0}}$	6.71
9	$S_2$	$F_3$	$R_1$	5.70
$T_1$	36.53	24.65	25.70	
$T_2$	20.70	27.70	26.93	
$T_3$	18.81	23.70	23.41	
$\overline{T}_{1}$	12.18	8.22	8.57	
$\overline{\mathrm{T}}_{2}$	6.90	9.23	8.98	
$\overline{\mathrm{T}}_{3}$	6.27	7.90	7.80	
К	5.91	1.33	1.18	

表2 产量试验结果及极差分析表

Table 2 Results and analysis of extreme difference in yield

注: $T_i(i=1,2,3)$ 为各因素水平产量之和; $\overline{T}_i(i=1,2,3)$ 为各因素水平产量平均值;K为极差。下同。

Note:  $T_i(i=1,2,3)$  is sum of factor level;  $\overline{T}_i(i=1,2,3)$  is mean factor level; K is extreme difference. The same below.



Figure 1 Factors trend diagram of yield

#### 表3 产量和CH4与N2O累积排放量及总温室效应的 方差分析(F值)

Table 3 Variance analysis for yield, CH<sub>4</sub> and N<sub>2</sub>O accumulated emission and total SGWP(*F* value)

处理 Treatments	产量 Yield	CH4累积排放量 CH4 accumulated emission	N <sub>2</sub> O 累积排放量 N <sub>2</sub> O accumulated emission	总温室效应 Total SGWP
遮阴	13.85	202.86**	4.57	188.78**
复合肥量	0.64	65.14*	22.6*	69.92*
施硅量	0.47	46.44*	3.54	44.92*

注:\*P<0.05;\*\*P<0.01。

Note: \* indicates *P*<0.05; \*\* indicates *P*<0.01.

断升高。移栽后第38d排放通量达峰值,之后逐渐降低,到移栽第44d进入晒田期,CH4排放通量急剧降低,晒田结束后,CH4排放通量略微上升,随后逐渐降低趋近于零,直至成熟期收获。

## 2.3 不同遮阴及施肥处理对CH4累积排放量的影响

水稻 CH4 排放主要集中在分蘖期, 晒田期后 CH4 排放通量维持在较低水平。极差分析表明, K(S)>K (F)>K(R), 即遮阴处理对 CH4 累积排放影响最大; 其 次是施复合肥和施硅肥量(表4)。S<sub>0</sub>F<sub>3</sub>R<sub>2</sub>处理 CH4 累 积排放量最大, 为15.13 g·m<sup>-2</sup>, S<sub>2</sub>F<sub>1</sub>R<sub>2</sub>处理 CH4 累积排 放量最小, 为4.67 g·m<sup>-2</sup>。CH4 累积排放量随遮阴时间 增长而减小, 随施复合肥量增加而增大, 随施硅肥量 增加先减小后增大, 施用 200 kg·hm<sup>-2</sup> 钢渣粉时, CH4 累积排放量最小(图 3)。

遮阴对水稻全生育期 CH<sub>4</sub>累积排放有极显著影 响(P<0.01),施复合肥量和施硅量对水稻全生育期累 积排放影响显著(P<0.05)(表3)。极差分析表明,遮 阴处理下,S<sub>2</sub>水平累积排放量最小,排放量为15.36 g·m<sup>-2</sup>,S<sub>0</sub>和S<sub>1</sub>两个水平累积排放量值分别为36.32 g·m<sup>-2</sup> 和33.61 g·m<sup>-2</sup>,S<sub>1</sub>水平比S<sub>0</sub>水平降低了7.46%,S<sub>2</sub>水平 比S<sub>1</sub>降低了54.30%,表明随遮阴生育期增加,CH<sub>4</sub>累

www.aer.org.cn



日期Date

#### 图 2 不同遮阴处理下施肥对水稻 CH4 排放季节性变化的影响

Figure 2 Effect of fertilizer on seasonal variation of CH4 emission flux from paddy field under different shading treatments

表4 全生育期 CH<sub>4</sub>累积排放量试验结果及极差分析表

468

() CAS

Table 4 Results and analysis of extreme difference in CH<sub>4</sub> accumulated emission from whole growth period

试验号	I	因素 Facto	r	累积排放量Accumulated
No.	S	F	R	emission/ $(g \cdot m^{-2})$
1	$S_0$	$\mathbf{F}_1$	$\mathbf{R}_{0}$	9.78
2	$S_0$	$\mathbf{F}_2$	$R_1$	11.42
3	$S_0$	$F_3$	$\mathbf{R}_2$	15.13
4	$S_1$	$\mathbf{F}_1$	$R_1$	6.59
5	$\mathbf{S}_1$	$\mathbf{F}_2$	$\mathbf{R}_2$	13.94
6	$S_1$	$F_3$	$\mathbf{R}_{0}$	13.08
7	$S_2$	$\mathbf{F}_1$	$\mathbf{R}_2$	4.67
8	$S_2$	$\mathbf{F}_2$	$\mathbf{R}_{0}$	5.85
9	$S_2$	$F_3$	$R_1$	4.83
$T_1$	36.32	21.04	28.70	
$T_2$	33.61	31.21	22.84	
$T_3$	15.36	33.04	33.74	
$\overline{\mathrm{T}}_{1}$	12.11	7.01	9.57	
$\overline{\mathrm{T}}_{2}$	11.20	10.40	7.61	
$\overline{\mathrm{T}}_{3}$	5.12	11.01	11.25	
К	6.99	4.00	3.63	

积排放量减小,呈现明显的负相关关系。施复合肥  $F_2$ 水平相较  $F_1$ 水平  $CH_4$ 排放量增加了 48.34%,  $F_3$ 水平相较  $F_1$ 水平  $CH_4$ 排放量增加了 57.03%。施硅肥 3 个水平中,  $R_1$ 水平累积排放量为 22.84 g·m<sup>-2</sup>, 为最低水平, 比  $R_0$ 水平降低了 20.42%,  $R_2$ 水平比  $R_0$ 水平增加了 17.56%。

#### 2.4 不同遮阴及施肥处理对N2O排放通量的影响

N<sub>2</sub>O与CH<sub>4</sub>排放通量季节变化趋势明显不同,水稻 N<sub>2</sub>O排放主要集中在晒田期以及成熟期后期(图4)。在 分蘖期至晒田前,稻田处于持续淹水状态,N<sub>2</sub>O排放 通量接近于零,部分处理N<sub>2</sub>O排放出现负值。移栽第



Figure 3 Factors trend diagram of CH4 accumulated emission

45 d开始排水晒田,部分处理在第49 d时 N<sub>2</sub>O 排放通 量出现峰值,移栽60 d时结束晒田开始灌溉覆水,各 处理 N<sub>2</sub>O 排放通量降低并保持至接近零值的排放水 平,成熟期后 N<sub>2</sub>O 排放通量逐渐升高。N<sub>2</sub>O 排放出现 负值可能是由于田间保持淹水状态,以及此段时间降 雨频繁造成的。晒田结束后,田间处于淹水状态,直 到生育后期才出现无水层,导致 N<sub>2</sub>O 排放长期保持在 较低水平,生育后期 N<sub>2</sub>O 排放通量才出现上升趋势。

## 2.5 不同遮阴及施肥处理对N<sub>2</sub>O累积排放量的影响

极差分析表明,K(F)>K(S)>K(R),即施复合肥 量对全生育期N<sub>2</sub>O累积排放量影响最大,其次为遮 阴,施硅量对N<sub>2</sub>O累积排放影响较小(表5)。S<sub>2</sub>F<sub>3</sub>R<sub>1</sub> 处理N<sub>2</sub>O累积排放量最大,为77.49 mg·m<sup>-2</sup>,S<sub>0</sub>F<sub>1</sub>R<sub>0</sub>处 理N<sub>2</sub>O累积排放量最小,为-1.96 mg·m<sup>-2</sup>。

施用复合肥对水稻全生育期N<sub>2</sub>O累积排放量影响显著(P<0.05),遮阴和施硅肥对N<sub>2</sub>O排放影响不显著,表明复合肥施用量是影响水稻N<sub>2</sub>O排放的主要因素(表3)。N<sub>2</sub>O累积排放量随遮阴时长增加、施复合肥量和施硅肥量增加均呈增长趋势,增长幅度不同,



图4 不同遮阴处理下施肥对 N<sub>2</sub>O 排放通量的影响

Figure 4 Effect of fertilizer on seasonal variation of N2O emission flux from paddy field under different shading treatments

表5 全生育期 N<sub>2</sub>O 累积排放量试验结果及极差分析表 Table 5 Results and analysis of extreme difference in N<sub>2</sub>O accumulated emission from whole growth period

试验号	因素 Factor		r	累积排放量 Accumulated
No.	S	F	R	emission/(mg·m <sup>-2</sup> )
1	$S_0$	$\mathbf{F}_1$	$\mathbf{R}_{0}$	-1.96
2	$S_0$	$\mathbf{F}_2$	$R_1$	41.24
3	$S_0$	$F_3$	$R_2$	66.77
4	$S_1$	$\mathbf{F}_1$	$\mathbf{R}_1$	27.86
5	$\mathbf{S}_1$	$\mathbf{F}_2$	$R_2$	44.24
6	$S_1$	$F_3$	$\mathbf{R}_{0}$	61.79
7	$S_2$	$\mathbf{F}_1$	$\mathbf{R}_2$	44.43
8	$S_2$	$\mathbf{F}_2$	$\mathbf{R}_0$	45.20
9	$S_2$	$F_3$	$R_1$	77.49
$T_1$	106.05	70.33	105.03	
$T_2$	133.89	130.68	146.59	
$T_3$	167.12	206.05	155.44	
$\overline{T}_{1}$	35.35	23.44	35.01	
$\overline{\mathrm{T}}_{2}$	44.63	43.56	48.86	
$\overline{\mathrm{T}}_{3}$	55.71	68.68	51.81	
К	20.36	45.24	16.80	

施复合肥处理下增长较为明显(图5)。施复合肥处 理下 $F_2$ 水平比 $F_1$ 水平增加85.81%, $F_3$ 水平比 $F_1$ 水平 增加192.98%;遮阴处理 $S_1$ 比 $S_0$ 增加26.25%, $S_2$ 比 $S_0$ 增加57.59%。施硅肥处理 $R_1$ 比 $R_0$ 增加39.57%, $R_2$ 比  $R_0$ 增加48.00%。

## 2.6 综合温室效应与排放强度

各处理的总温室效应值大小与CH4增温潜势值 相近,除9号处理下,CH4增温潜势占总温室效应 91.22%,其他处理下,CH4增温潜势均占总温室效应 97%以上(表6),原因在于CH4累积排放量远高于 N<sub>2</sub>O累积排放量。遮阴处理对总温室效应有极显著



Figure 5 Factors trend diagram of N2O accumulated emission

影响(P<0.01),施复合肥量和施硅量对总温室效应有显著影响(P<0.05)(表3)。CH<sub>4</sub>累积排放量最低的处理为S<sub>2</sub>F<sub>1</sub>R<sub>2</sub>,即分蘖-成熟遮阴、复合肥和硅肥施用量分别为100 kg·hm<sup>-2</sup>和400 kg·hm<sup>-2</sup>。就CH<sub>4</sub>和N<sub>2</sub>O排放强度而言,S<sub>1</sub>F<sub>2</sub>R<sub>2</sub>排放强度最大,为984.14 kg CO<sub>2</sub>-eq·t<sup>-1</sup>,S<sub>2</sub>F<sub>1</sub>R<sub>2</sub>排放强度最小,为347.68 kg CO<sub>2</sub>-eq·t<sup>-1</sup>,S<sub>1</sub>比S<sub>0</sub>增加59.51%,S<sub>2</sub>比S<sub>0</sub>减少16.44%;F<sub>2</sub>和F<sub>3</sub>分别比F<sub>1</sub>增加48.78%和60.20%;R<sub>1</sub>比R<sub>0</sub>减少23.08%,R<sub>2</sub>比R<sub>0</sub>增加24.63%。

### 3 讨论

水稻 CH4 排放通量的季节性变化呈单峰型(图 2)。CH4 排放主要集中在分蘖期,晒田开始直至成 熟,CH4 排放通量维持较低水平。N<sub>2</sub>O 排放通量随季 节变化各处理变化不一,呈零星的脉冲峰型(图4), 排放主要集中在晒田期间和成熟后期田间无水层状 况下<sup>[7]</sup>,不难看出 CH4和 N<sub>2</sub>O 排放存在消长关系,移栽 至分蘖期稻田处于淹水状态,厌氧环境有利于产甲烷 菌活动,引起 CH4大量排放<sup>[20]</sup>。淹水厌氧环境不利于

www.aer.org.cn

农业环境科学学报 第40卷第2期

		Table 6 G	reenhouse effect of CI	$H_4$ and $N_2O$ emission		
试验号 No.	CH₄累积排放量 CH₄accumulated emission/(g•m <sup>-2</sup> )	N <sub>2</sub> O 累积排放量 N <sub>2</sub> O accumulated emission/(mg·m <sup>-2</sup> )	CH₄温室效应 CH₄ SGWP/ (kg CO₂-eq•hm <sup>-2</sup> )	N <sub>2</sub> O温室效应 N <sub>2</sub> O SGWP/ (kg CO <sub>2</sub> -eq·hm <sup>-2</sup> )	总温室效应 Total SGWP/ (kg CO <sub>2</sub> -eq・hm <sup>-2</sup> )	排放强度 GHGI/ (kg CO <sub>2</sub> -eq·t <sup>-1</sup> )
1	9.78	-1.96	4 398.66	-6.80	4 391.82	381.38
2	11.42	41.24	5 137.34	111.35	5 248.68	362.12
3	15.13	66.77	6 809.02	180.28	6 989.29	664.26
4	6.59	27.86	2 967.63	75.22	3 042.86	451.81
5	13.94	44.24	6 272.32	119.45	6 391.76	984.14
6	13.08	61.79	5 883.83	166.83	6 050.66	809.56
7	4.67	44.43	2 103.34	119.96	2 223.35	347.68
8	5.85	45.20	2 633.09	122.04	2 755.13	410.65
9	4.83	77.49	2 174.31	209.22	2 383.54	417.96

表6 CH<sub>4</sub>和 N<sub>2</sub>O 排放的温室效应

N<sub>2</sub>O 排放<sup>[21]</sup>,排水晒田水分急剧减少,导致 N<sub>2</sub>O 出现排 放高峰。晒田结束,CH<sub>4</sub>保持在较低排放水平,原因 可能是排水晒田使田间水分干涸,破坏了之前的厌氧 环境,抑制了 CH<sub>4</sub>产生,CH<sub>4</sub>排放通量几乎为零。晒田 结束重新灌溉覆水,CH<sub>4</sub>排放通量仍然保持较低排 放,原因可能是晒田改变了土壤通气性,土壤氧化还 原电位仍处于较高水平,从而抑制了产甲烷菌产生 CH<sub>4</sub>,土壤通气性改变,土壤闭蓄氧浓度升高,从而促 进 CH<sub>4</sub>氧化而减少 CH<sub>4</sub>排放,使 CH<sub>4</sub>排放保持一个相 对较低水平<sup>[22]</sup>。

稻田CH4排放主要集中在分蘖期,分蘖-成熟遮 阴和开花-成熟遮阴与对照(不遮阴)相比,CH4累积 排放量分别降低 57.71% 和 7.46%, 与前人研究一 致<sup>19]</sup>。遮阴使作物分蘖数、地下部生物量降低,光合 作用减弱,根系分泌物减少,抑制产甲烷菌活性[23-24], 这可能是导致CH4排放量较低的原因。随复合肥施 用量增加,稻田CH4累积排放量增大,过量铵态氮抑 制CH4氧化菌活性,使CH4排放量升高[25-26]。N2O排放 随复合肥用量增加而增加,氮肥是影响稻田N2O排放 的主要因素之一<sup>[27]</sup>。施硅肥使CH4排放降低,N2O排 放升高,与前人研究结果一致<sup>181</sup>,施硅能提高植株根 系氧化,改善植株通气性,抑制产甲烷菌活性,促进硝 化作用,这可能是导致 $CH_4$ 排放量降低、 $N_2O$ 排放量增 加的原因;而随施硅量增加CH4排放量增大,与前人 研究结果不一致[28],原因可能在于,钢渣硅肥中含有 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>,大量铁氧化物会使稻田导电性增强,促进CH<sub>4</sub> 排放<sup>[29]</sup>;过量硅肥可能存在毒理作用,使水稻产量减 小的同时还会抑制水稻植株根系生长,从而影响通气 性,导致CH4排放增加;试验条件的差异可能也会带 来不同的试验结果。因此,过量硅肥对稻田CH4排放 影响还需进一步研究。

遮阴处理对总温室效应有极显著影响,施复合肥 和施硅对总温室效应影响显著(表3)。N<sub>2</sub>O排放量虽 少,但温室气体排放系数值大,其对总温室效应有着 不可忽视的作用,但稻田CH4温室效应与N2O温室效 应不在一个数量级,总温室效应主要取决于CH4温室 效应大小,CH4排放量在总温室效应中起主导作用。 相比不遮阴(S₀),开花-成熟期遮阴(S₁)使排放强度 增加,而分蘖-成熟期遮阴(S<sub>2</sub>)则降低排放强度。原 因可能在于,GHGI是单位水稻产量的SGWP,遮阴降 低水稻产量,同时也降低水稻SGWP,相比开花-成熟 期遮阴 $(S_1)$ ,分蘖-成熟期遮阴 $(S_2)$ SGWP降低幅度远 大于水稻产量。施氮磷钾复合肥和施硅肥对产量影 响不显著,而对温室效应影响显著,施复合肥和施硅 肥对排放强度的影响,取决于总温室效应大小。本研 究中稻田CH4排放量在稻田总温室效应中起主导作 用,因此,在太阳辐射减弱背景下控制CH4排放是降 低稻田温室效应和排放强度的有效途径[30]。各处理 对产量影响均不显著,即在遮阴模拟太阳辐射减弱条 件下,通过合理施肥可在保证稻田产量的同时达到温 室气体减排的作用。

#### 4 结论

(1)稻田 CH4和 N2O 排放存在消长关系,遮阴显 著降低 CH4累积排放量,施用复合肥显著提高 CH4排 放量,施硅肥对 CH4累积排放也有显著影响,随硅肥 量增加,CH4累积排放量先降低后升高;随着遮阴时 间延长、复合肥和硅肥施用量增加,N2O 累积排放量 增大,施复合肥对 N2O 累积排放量影响显著。

(2)遮阴、施复合肥和施钢渣硅肥均对总温室效

应影响显著,影响效果大小依次为遮阴>复合肥>钢渣 硅肥。CH4累积排放量在总温室效应中起主导作用。

(3)在太阳辐射减弱背景下,施复合肥100 kg·hm<sup>-2</sup>、硅肥400 kg·hm<sup>-2</sup>,在保证产量的同时,能有效降低稻田CH<sub>4</sub>和N<sub>2</sub>O总温室效应和排放强度。

#### 参考文献:

- 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: Cambridge University Press, 2014.
- [2] 汪凯, 叶红, 陈峰, 等. 中国东南部太阳辐射变化特征、影响因素及 其对区域气候的影响[J]. 生态环境学报, 2010, 19(5):1119-1124.
  WANG Kai, YE Hong, CHEN Feng, et al. Long-term change of solar radiation in southeastern China: Variation, factors, and climate forcing [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2010, 19(5):1119-1124.
- [3] Wang X, Li T, Yang X, et al. Rice yield potential, gaps and constraints during the past three decades in a climate-changing Northeast China [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2018, 259:173-183.
- [4] Wang Y, Lu Y Y, Chang Z Y, et al. Transcriptomic analysis of fieldgrown rice(Oryza sativa L.) reveals responses to shade stress in reproductive stage[J]. Plant Growth Regulation, 2018, 84(3):1-10.
- [5] 杜彦修,季新,张静,等.弱光对水稻生长发育影响研究进展[J].中 国生态农业学报,2013,21(11):5-15. DU Yan-xiu, JI Xin, ZHANG Jing, et al. Research progress on the impacts of low light intensity on rice growth and development[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2013,21(11):5-15.
- [6] 田秀英, 石孝均. 定位施肥对水稻产量与品质的影响[J]. 西南大学 学报(自然科学版), 2005, 27(5):725-728. TIAN Xiu-ying, SHI Xiao-jun. Effects of long - term fertilization at fixed location on the yield and quality of rice[J]. Journal of Southwest Agricultural University (Natural Science), 2005, 27(5):725-728.
- [7] 易琼, 逢玉万, 杨少海, 等. 施肥对稻田甲烷与氧化亚氮排放的影响 [J]. 生态环境学报, 2013, 22(8):1432-1437. YI Qiong, PANG Yuwan, YANG Shao-hai, et al. Methane and nitrous oxide emissions in paddy field as influenced by fertilization[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2013, 22(8):1432-1437.
- [8] 肇思迪, 娄运生, 张祎玮, 等. UV-B 增强下施硅对稻田 CH<sub>4</sub>和 N<sub>2</sub>O 排放及其增温潜势的影响[J]. 生态学报, 2017, 37(14):4715-4724. ZHAO Si-di, LOU Yun-sheng, ZHANG Yi-wei, et al. Effect of silicate supply on CH<sub>4</sub> and N<sub>2</sub>O emissions and their global warming potentials in a Chinese paddy soil under enhanced UV-B radiation[J]. Acta Ecologica Sinica, 2017, 37(14):4715-4724.
- [9] 郑泽华, 娄运生, 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 Ze-hua, LOU Yun-sheng, ZUO Hui-ting, et al. Effect of silicate application on rice physiological properties under nighttime warming[J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2017, 38(10):663-671.
- [10] IPCC. Climate change 2007: The physical sciences basis: Working

group I contribution to the fourth assessment report of the IPCC[R]. New York : Cambridge University Press, 2007.

- [11] 黄满堂, 王体健, 赵雄飞, 等. 2015年中国地区大气甲烷排放估计 及空间分布[J]. 环境科学学报, 2019, 39(5):3-12. HUANG Mantang, WANG Ti-jian, ZHAO Xiong-fei, et al. Estimation of atmospheric methane emissions and its spatial distribution in China during 2015[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2019, 39(5):3-12.
- [12] Vergé X P C, Kimpe C D, Desjardins R L. Agricultural production, greenhouse gas emissions and mitigation potential[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2007, 142(2/3/4):255-269.
- [13] 李阳, 陈敏鹏. 长江经济带农业源非二氧化碳温室气体排放的时空特征[J]. 中国环境科学, 2020, 40(5): 2030-2039. LI Yang, CHEN Min-peng. Spatial and temporal characteristics of non-carbon dioxide greenhouse gas emissions from agricultural sources in the Yangtze River Economic Belt[J]. *China Environmental Science*, 2020, 40(5):2030-2039.
- [14] 马莉, 娄运生, 李君, 等. 太阳辐射对稻田甲烷排放的影响[J]. 应用 生态学报, 2019, 30(8):2725-2736. MA Li, LOU Yun-sheng, LI Jun, et al. Effects of solar radiation on CH<sub>4</sub> emission in paddy field[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2019, 30(8):2725-2736.
- [15] 李睿, 娄运生, 张震, 等. 节水灌溉和遮光强度对水稻生长发育的 耦合影响[J]. 中国农业气象, 2018, 39(11):4-26. LI Rui, LOU Yun-sheng, ZHANG Zhen, et al. Coupling effects of water-saving irrigation and shading intensity on growth and development for rice[J]. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2018, 39(11):4-26.
- [16] Dong C, Hu D, Fu Y, et al. Analysis and optimization of the effect of light and nutrient solution on wheat growth and development using an inverse system model strategy[J]. *Computers & Electronics in Agriculture*, 2014, 109:221–231.
- [17] 周文鳞, 娄运生. 控释氮肥对抗除草剂转基因水稻田土壤甲烷排 放的影响[J]. 生态学报, 2014, 34(16):4555-4560. ZHOU Wenlin, LOU Yun-sheng. Effect of controlled-release nitrogen fertilizer on CH<sub>4</sub> emission in transgenic rice from a paddy soil[J]. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34(16):4555-4560.
- [18] Neubauer S C, Megonigal J P. Moving beyond global warming potentials to quantify the climatic role of ecosystems[J]. *Ecosystems*, 2015, 18(6):1000-1013.
- [19] 刘晓雨, 李志鹏, 潘根兴, 等. 长期不同施肥下太湖地区稻田净温 室效应和温室气体排放强度的变化[J]. 农业环境科学学报, 2011, 30(9):93-100. LIU Xiao-yu, LI Zhi-peng, PAN Gen-xing, et al. Greenhouse gas emission and C intensity for a long -term fertilization rice paddy in Tai Lake region, China[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2011, 30(9):93-100.
- [20] 熊丽萍, 吴家梅, 纪雄辉, 等. 水旱轮作系统中土壤 CH4和 N2O 排放 研究进展[J]. 农业环境科学学报, 2020, 39(4):863-871. XIONG Li-ping, WU Jia-mei, JI Xiong-hui, et al. A review on soil CH4 and N2O emissions from paddy - upland rotation systems[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2020, 39(4):863-871.
- [21] Johnson B S E, Angeles O R, Alberto M C R, et al. Simultaneous minimization of nitrous oxide and methane emission from rice paddy soils is improbable due to redox potential changes with depth in a green-

house experiment without plants[J]. *Geoderma*, 2009, 149(1/2):45-53.

- [22] 杨丹, 张玉龙, 杨东伟, 等. 酸性和中性水田土壤施用硅肥的效应 研究Ⅱ. 对水稻吸收硅素及产量的影响[J]. 农业环境科学学报, 2012, 31 (4): 764-767. YANG Dan, ZHANG Yu-long, YANG Dong-wei, et al. Effect of silicon fertilizer in acid and neutral paddy field soils Ⅱ. Effect on silicon uptake andyield of rice[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2012, 31(4): 764-767.
- [23] Jiang Y, Guan D, Zhang W. The effect of rice plant traits on methane emissions from paddy fields: A review[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2018, 26(2):175–181.
- [24] Dong Y, Liu S D, Huan X, et al. Ecological Effect of pre-flowering light deficit on the rhizosphere soil microbes of rice[J]. Science & Technology Review, 2011, 29(7):26-30.
- [25] Cicerone R J, Shetter J D. Sources of atmospheric methane: Measurements in rice paddies and a discussion[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1981, 86(C8):7203.

- [26] Xie L Y, Xu J, Guo L P. Impact of water fertilizer management on methane emission in paddy fields and on global warming potential[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2017, 25(7):958–967.
- [27] Meng L, Ding W, Cai Z. Long-term application of organic manure and nitrogen fertilizer on N<sub>2</sub>O emissions, soil quality and crop production in a sandy loam soil[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2005, 37(11): 2037–2045.
- [28] Zhong J, Fu Z Q, Liu L. Correlation analysis of methane transport capacity and root characteristics in rice[J]. Crops, 2017(4):105–112.
- [29] Kato S, Hashimoto K, Watanabe K. Methanogenesis facilitated by electric syntrophy via(semi) conductive iron-oxide minerals[J]. *Envi*ronmental Microbiology, 2012, 14(7):1646-1654.
- [30] 刘燕, 娄运生, 杨蕙琳, 等. 施硅对增温稻田 CH4和 N<sub>2</sub>O 排放的影响 [J]. 生态学报, 2020, 40(18):1-12. LIU Yan, LOU Yun-sheng, YANG Hui-lin, et al. Effects of silicate supply on the emissions of methane and nitrous oxide in paddy field under nighttime warming[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2020, 40(18):1-12.