

## 巢湖圩区再生稻田甲烷及氧化亚氮的排放规律研究

王天宇, 樊迪, 宋开付, 张广斌, 徐华, 马静

### 引用本文:

王天宇, 樊迪, 宋开付, 等. 巢湖圩区再生稻田甲烷及氧化亚氮的排放规律研究[J]. 农业环境科学学报, 2021, 40(8): 1829–1838.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11654/jaes.2021-0181>

## 您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

### 厢作免耕下生态种养对稻田 $\text{CH}_4$ 和 $\text{N}_2\text{O}$ 排放的影响

陈璐, 陈灿, 黄璜, 任勃, 王忍, 梁玉刚, 周晶

农业环境科学学报. 2021, 40(6): 1354–1365 <https://doi.org/10.11654/jaes.2021-0015>

### 生物基包膜抑制型尿素对土壤温室气体排放及小青菜产量的影响

刘楚桐, 陈松岭, 邹洪涛, 叶旭红, 陈春羽, 雷洋, 张玉龙

农业环境科学学报. 2021, 40(3): 677–684 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0658>

### 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>

### 水氮耦合对设施土壤 $\text{N}_2\text{O}$ 和 $\text{NO}$ 排放的影响

吕金东, 张丽媛, 虞娜, 邹洪涛, 张玉玲, 张玉龙

农业环境科学学报. 2021, 40(6): 1366–1376 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-1217>

### 不同遮阴处理下施肥对稻田 $\text{CH}_4$ 和 $\text{N}_2\text{O}$ 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>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

王天宇, 樊迪, 宋开付, 等. 巢湖圩区再生稻田甲烷及氧化亚氮的排放规律研究[J]. 农业环境科学学报, 2021, 40(8): 1829–1838.  
WANG T Y, FAN D, SONG K F, et al. Reduced methane and nitrous oxide emissions from ratoon rice paddy in Chaohu polder area, China [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2021, 40(8): 1829–1838.



开放科学 OSID

# 巢湖圩区再生稻田甲烷及氧化亚氮的排放规律研究

王天宇<sup>1,2</sup>, 樊迪<sup>1,2</sup>, 宋开付<sup>1,2</sup>, 张广斌<sup>1</sup>, 徐华<sup>1</sup>, 马静<sup>1\*</sup>

(1. 土壤与农业可持续发展国家重点实验室, 中国科学院南京土壤研究所, 南京 210008; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘要:**为明确巢湖圩区再生稻田甲烷(CH<sub>4</sub>)及氧化亚氮(N<sub>2</sub>O)的排放规律,采用静态箱-气相色谱法对比观测了巢湖圩区2019—2020年再生稻田(RR)和稻麦轮作田(SW)的CH<sub>4</sub>和N<sub>2</sub>O排放通量,测定了土壤氧化还原电位(Eh)、土壤溶解性有机碳(DOC)、土壤铵态氮(NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N)和硝态氮(NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N)。研究结果表明:SW处理在水稻返青期和分蘖期出现较大CH<sub>4</sub>排放峰,RR处理的CH<sub>4</sub>排放峰不仅出现在中稻季返青期和分蘖期,还出现在成熟期和再生季前期。SW处理N<sub>2</sub>O排放峰主要出现在麦季降雨之后、稻季烤田及排水落干时,而RR处理N<sub>2</sub>O排放峰主要出现在促苗肥施用后。与SW处理相比,RR处理的全年CH<sub>4</sub>排放量、N<sub>2</sub>O排放量、总温室气体排放量(TGHG)和温室气体排放强度(GHG1)分别降低了22.3%、86.5%、36.3%和15.9%(*P*<0.05)。RR处理无小麦产量,但水稻产量增加了16.2%(*P*<0.05)。稻季CH<sub>4</sub>排放通量与土壤Eh呈显著负相关(*P*<0.01),但与土壤DOC含量无显著相关性(*P*>0.05)。RR处理的稻季N<sub>2</sub>O排放通量与土壤NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N浓度呈显著正相关(*P*<0.05)。综合来看,在巢湖圩区种植再生稻不仅能提高水稻产量,还大幅减少总温室气体排放量和温室气体排放强度。

**关键词:**再生稻;稻麦轮作;温室气体排放;巢湖圩区

中图分类号:X16;S511 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2021)08-1829-10 doi:10.11654/jaes.2021-0181

## Reduced methane and nitrous oxide emissions from ratoon rice paddy in Chaohu polder area, China

WANG Tianyu<sup>1,2</sup>, FAN Di<sup>1,2</sup>, SONG Kaifu<sup>1,2</sup>, ZHANG Guangbin<sup>1</sup>, XU Hua<sup>1</sup>, MA Jing<sup>1\*</sup>

(1.State Key Laboratory of Soil and Sustainable Agriculture, Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China; 2.University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** A field experiment was conducted from 2019 to 2020 to compare the differences in methane (CH<sub>4</sub>) and nitrous oxide (N<sub>2</sub>O) emissions between ratoon rice (RR) fields and rice-wheat rotation (SW) fields in Chaohu polder using the static chamber-gas chromatograph technique. CH<sub>4</sub> and N<sub>2</sub>O fluxes from the RR and SW fields were observed, while the soil redox potential (Eh), soil dissolved organic carbon (DOC), soil ammonium (NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N), and soil nitrate (NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N) contents were determined during the rice-growing season. The study results revealed that larger CH<sub>4</sub> flux peaks appeared in the SW treatment during the rice greening and tillering stages. However, CH<sub>4</sub> flux peaks of the RR treatment appeared at the regreening and tillering stages in the main season, and at the ripening stage of the main season, and in the first half of the ratoon season. The N<sub>2</sub>O flux peaks of the SW treatment primarily appeared after precipitation in the wheat season and during drainage periods, while N<sub>2</sub>O flux peaks for the RR treatment mainly appeared after fertilizer application for bud promotion. Compared with SW, the annual total CH<sub>4</sub> emissions, total N<sub>2</sub>O emissions, total greenhouse gas emissions, and greenhouse gas emission intensities of RR were reduced by 22.3%, 86.5%, 36.3%, and 15.9%, respectively (*P*<0.05). No wheat grain was produced in the RR treatment, and rice yield increased by 16.2% (*P*<0.05). The seasonal variation in CH<sub>4</sub> flux during the rice-growing season for each

收稿日期:2021-02-16 录用日期:2021-04-26

作者简介:王天宇(1996—),男,山东滨州人,硕士研究生,主要从事农田温室气体排放及减排对策研究。E-mail:wangtianyu@issas.ac.cn

\*通信作者:马静 E-mail:jma@issas.ac.cn

基金项目:国家重点研发计划项目(2017YFD0300105);国家自然科学基金项目(41877325, 41671241);中国科学院青年创新促进会项目(2018349)

Project supported: National key R&D Program of China (2017YFD0300105); The National Natural Science Foundation of China (41877325, 41671241); The Youth Innovation Promotion Association of Chinese Academy of Sciences (2018349)

treatment was significantly negatively correlated with soil Eh ( $P<0.01$ ), but no significant correlation was found between  $\text{CH}_4$  flux and soil DOC concentration ( $P>0.05$ ). The seasonal variation of  $\text{N}_2\text{O}$  flux for RR treatment during the rice-growing season was significantly positively correlated with soil  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  content ( $P<0.05$ ). In conclusion, planting ratooning rice in the Chaohu polder area increases rice yield and dramatically reduces the comprehensive greenhouse effect and greenhouse gas emission intensity.

**Keywords:** ratoon rice; rice-wheat rotation; greenhouse gas emission; Chaohu polder

甲烷( $\text{CH}_4$ )和氧化亚氮( $\text{N}_2\text{O}$ )是两种重要的温室气体,百年尺度上单位质量 $\text{CH}_4$ 和 $\text{N}_2\text{O}$ 的全球增温潜势分别为 $\text{CO}_2$ 的34倍和298倍<sup>[1]</sup>。稻田处于淹水还原状态时,土壤中大量的有机物转化为 $\text{CH}_4$ ,因此稻田被认为是大气中 $\text{CH}_4$ 的重要来源之一<sup>[2]</sup>。由于氮肥的大量施用以及干湿交替的水分管理,稻田的 $\text{N}_2\text{O}$ 排放也相当可观<sup>[3]</sup>。

中国是世界上最大的水稻(*Oryza sativa* L.)生产国,2019年播种总面积为2 970万 $\text{hm}^2$ 。长期以来,我国耕地开发利用强度过大,造成了土壤退化、农业面源污染等环境问题,成为了农业可持续性发展的限制因素。自“十三五”以来,我国对耕地轮休制度展开了试点探索,将长江流域的小麦(*Triticum aestivum* L.)、稻谷低质低效区纳入试点范围,实行稻油、稻菜、稻肥等轮作,以改良土壤、提高地力。

再生稻,即种一茬收获两次的水稻。头季水稻收割后,水稻植株利用稻桩重新发苗、长穗,再收一季。再生季水稻收割后通常种植绿肥进行养地。再生稻栽培模式是一种经济高效、增产增收的水稻管理措施<sup>[4]</sup>。在温、光、热资源充足的稻麦轮作区和双季稻区改种再生稻既能响应耕地轮休的国家政策、减轻土地耕作强度、缓解土壤退化,还能增加水稻产量、提升稻米品质,因此近年来得到了大面积的推广应用<sup>[5-6]</sup>。巢湖流域是典型的稻麦轮作区,气候温和、雨量适中、光照充分、热量条件较好,流域内多个县市已进行了5~7 a的再生稻种植试点示范,且推广面积有望进一步增加<sup>[7]</sup>。

目前已有部分再生稻栽培模式和轮作方式影响温室气体排放的报道。张浪等<sup>[8]</sup>在湖南的研究发现,相比于双季稻,再生稻的 $\text{CH}_4$ 排放量降低33.89%,单位产量 $\text{CH}_4$ 排放量降低23.23%。SONG等<sup>[9]</sup>在四川的研究发现,相比于覆膜单季稻,覆膜再生稻的 $\text{CH}_4$ 和 $\text{N}_2\text{O}$ 排放量分别增加了8.01%和109.92%。邓桥江等<sup>[10]</sup>和吕泽芳等<sup>[11]</sup>在湖北的研究中比较了不同的再生稻栽培模式和轮作方式,发现通过对绿肥、肥料运筹、水分管理与稻桩留桩高度等方面进行优化可降低再生稻田 $\text{CH}_4$ 排放,从而降低总温室气体排放量,同

时还可提高水稻产量。FIROUZI等<sup>[12]</sup>通过模型估算得出,相比于单季稻农作系统,再生稻农作系统降低了每功能单位(100 kg蛋白质)下 $\text{CH}_4$ 和 $\text{N}_2\text{O}$ 的排放量。而有关稻麦轮作转变为再生稻的温室气体排放规律变化未见报道。

本研究进行了大田试验以及实验室试验,观测了巢湖圩区两种轮作方式(稻麦轮作和再生稻)下全年的 $\text{CH}_4$ 和 $\text{N}_2\text{O}$ 排放通量,测定了土壤氧化还原电位(Eh)、土壤溶解性有机碳(DOC)、土壤铵态氮( $\text{NH}_4^+-\text{N}$ )和硝态氮( $\text{NO}_3^--\text{N}$ )的含量及其季节变化,以期揭示稻麦轮作转变为再生稻后温室气体排放规律的变化及其影响因素。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验设计

大田试验于2019年10月至2020年10月在安徽省合肥市庐江县白湖农场(117°26'47"E, 31°18'05"N)开展。该地区属于北亚热带湿润性季风气候,年平均气温16℃,多年平均降水量为1 215 mm,活动积温在4 500℃以上,无霜期超过200 d,传统种植制度为冬小麦-水稻轮作。供试土壤类型为底潜铁聚水耕人为土,由湖相沉积物发育而成。土壤有机碳含量为17.38  $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,全氮含量为1.69  $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,土壤pH为4.81,阳离子交换量为12.2  $\text{cmol}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,黏粒、粉粒、砂粒含量分别为23.75%、66.65%、9.70%。

试验共设置稻麦轮作(SW)和再生稻(RR)2个处理,试验小区面积为25  $\text{m}^2$ (5 m×5 m),每个处理3次重复。水稻生长季,两处理田间水分管理均为间歇灌溉,即前期淹水,中期烤田,后期干湿交替,最后排水落干;小麦生长季或紫云英季,两处理田间不进行人工灌溉,所有水分均来自降水。SW处理由冬小麦与单季稻轮作构成,水稻收获后秸秆不还田,小麦收获后秸秆翻耕还田,还田量为5.63  $\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}$ ,麦秆碳氮比为77.65。RR处理由紫云英(*Astragalus sinicus* L.)、中稻和再生稻轮作构成,紫云英于水稻移栽前15 d翻耕还田,还田量为3.28  $\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}$ ,植株碳氮比为11.35,RR处理中稻季收割时,收割部分秸秆表面还田,还田量

为  $6.19 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ , 稻秆碳氮比为 19.43。

SW 处理小麦供试品种为苏麦 11, 于 2019 年 10 月 27 日播种, 2020 年 5 月 22 日收获, 全生育期共 208 d。麦季氮肥施用量为  $154 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$  (以 N 计), 磷肥施用量为  $98 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$  (以  $\text{P}_2\text{O}_5$  计), 钾肥施用量为  $98 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$  (以  $\text{K}_2\text{O}$  计)。水稻供试品种为皖垦糯 2 号, 于 2020 年 6 月 5 日移栽, 2020 年 10 月 24 日收获, 全生育期共 141 d。稻季氮肥施用量为  $194 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$  (以 N 计), 磷肥施用量为  $90 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$  (以  $\text{P}_2\text{O}_5$  计), 钾肥施用量为  $90 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$  (以  $\text{K}_2\text{O}$  计)。

RR 处理紫云英于 2019 年 11 月 5 日播种, 2020 年 4 月 4 日收获, 全生育期共 151 d。紫云英季的氮肥施用量为  $17 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$  (以 N 计), 磷肥施用量为  $17 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$  (以  $\text{P}_2\text{O}_5$  计), 钾肥施用量为  $17 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$  (以  $\text{K}_2\text{O}$  计)。水稻供试品种为丰两优香一号, 于 2020 年 4 月 17 日移栽, 2020 年 8 月 14 日中稻季收获, 2020 年 10 月 26 日再生季收获, 全生育期共 192 d。稻季氮肥施用量为  $252 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$  (以 N 计), 磷肥施用量为  $79 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$  (以  $\text{P}_2\text{O}_5$  计), 钾肥施用量为  $79 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$  (以  $\text{K}_2\text{O}$  计)。具体的农田管理情况如表 1 所示。

## 1.2 田间样品采集

人工静态箱-气相色谱法测定  $\text{CH}_4$  和  $\text{N}_2\text{O}$  排放通量: 静态箱高 0.6 m, 水稻或小麦生长后期加高至 1.2 m 以保证其正常生长, 长×宽为  $0.5 \text{ m} \times 0.5 \text{ m}$ , 静态箱底座规格为  $0.5 \text{ m} \times 0.5 \text{ m} \times 0.15 \text{ m}$ , 底座上部有 3 cm 深的凹槽, 采样时先向槽内注入适量的水以保证采样时箱体内部的密封性。底座于 2019 年 10 月水稻收获后埋入各试验小区, 底座顶端与小区土壤表面齐平, 底座内小麦或紫云英播种量、水稻移栽密度、水分与施肥管理与底座外保持一致。采样时, 将静态箱放置在底座加满水的凹槽上, 用两通针将静态箱内气体导入 20 mL 真空玻璃瓶中, 各采样点以 10 min 为间隔进行采样, 共采集 4 次。水稻生长季采样频率为 2~4 d·

次<sup>-1</sup>, 非水稻生长季采样频率为 4~7 d·次<sup>-1</sup>, 采样时间为上午 9:00—11:00。

采集气样的同时, 用 DMP-2 数字式 mV/pH/温度计测定 10 cm 深处土壤氧化还原电位 (Eh), 用数字温度计 (Model 2455, Yokogawa, Japan) 记录箱温。此外, 每 8~12 d 采集一次土壤样品并测定土壤中 DOC、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$  和  $\text{NO}_3^+\text{-N}$  的含量。在植株的成熟期, 随机选取小区内 3 处样点, 取  $1 \text{ m}^2$  内植株的全部地上部分, 测定谷物产量和植株生物量。

## 1.3 样品分析

### 1.3.1 气体样品分析

$\text{CH}_4$  和  $\text{N}_2\text{O}$  浓度使用安捷伦气相色谱 (Agilent 7890B) 测定。色谱柱为 80/100 目的 Porapak Q 填充柱, 柱箱温度  $60 \text{ }^\circ\text{C}$ 。 $\text{CH}_4$  浓度使用氢火焰离子化检测器 (FID) 检测, 检测器温度  $300 \text{ }^\circ\text{C}$ , 载气为氮气, 流量  $5 \text{ mL} \cdot \text{min}^{-1}$ , 空气为助燃气, 流量  $400 \text{ mL} \cdot \text{min}^{-1}$ , 氢气为燃气, 流量  $45 \text{ mL} \cdot \text{min}^{-1}$ ;  $\text{N}_2\text{O}$  浓度使用  $^{63}\text{Ni}$  电子捕获检测器 (ECD) 检测, 检测器温度  $300 \text{ }^\circ\text{C}$ , 载气为 95% 氩气+5% 甲烷, 流量  $5 \text{ mL} \cdot \text{min}^{-1}$ 。

### 1.3.2 土壤样品分析

用土钻采集 0~20 cm 表层土壤样品, 每小区分点采集 4 份土壤样品后均匀混合, 存储在冰盒中, 尽快运送至实验室进行理化性质分析。称取 20 g 新鲜土样, 加入  $0.5 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$  的  $\text{K}_2\text{SO}_4$  浸提液 (土水比为 1:4),  $300 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$  振荡 1 h 提取土壤 DOC, 然后通过自动 TOC 分析仪 (Multi N/C 3000, Jena, Germany) 进行分析。称取 20 g 新鲜土样, 加入  $2 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$  的 KCl 浸提液 (土水比为 1:5),  $300 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$  振荡 1 h 提取土壤中的  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  和  $\text{NO}_3^+\text{-N}$ , 然后通过连续流动分析仪 (Skalar, Netherlands) 进行测定。土样在  $105 \text{ }^\circ\text{C}$  下烘干 8 h 测定土壤含水量。

## 1.4 数据处理

$\text{CH}_4$  和  $\text{N}_2\text{O}$  排放通量的计算公式为:

表 1 农田管理情况

Table 1 Management practice of different treatments from 2019 to 2020

| 农田管理措施<br>Management practice | 稻麦轮作 SW                                              |                                                      | 再生稻 RR                                              |                                                      |
|-------------------------------|------------------------------------------------------|------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------|------------------------------------------------------|
|                               | 小麦 Wheat                                             | 水稻 Rice                                              | 紫云英 Milk vetch                                      | 水稻 Rice                                              |
| 播种/水稻移栽日期                     | 2019-10-27                                           | 2020-06-05                                           | 2019-11-05                                          | 2020-04-17                                           |
| 收割日期                          | 2020-05-22                                           | 2020-10-24                                           | 2020-04-04                                          | 2020-08-14; 2020-10-26                               |
| 氮肥施用日期及施用量 (以 N 计)            | 基肥 2019-10-27; $56 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$  | 基肥 2020-05-30; $68 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$  | 基肥 2019-11-05; $17 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ | 基肥 2020-04-13; $68 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$  |
|                               | 返青肥 2020-01-28; $98 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ | 分蘖肥 2020-06-21; $69 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ |                                                     | 分蘖肥 2020-05-04; $80 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ |
|                               |                                                      | 穗肥 2020-07-31; $57 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$  |                                                     | 促芽肥 2020-07-30; $52 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ |
|                               |                                                      |                                                      |                                                     | 促苗肥 2020-08-16; $52 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ |



$$F = \rho \times \frac{V}{A} \times \frac{dc}{dt} \times \frac{273}{T} \times \frac{P}{P_0} \quad (1)$$

式中:  $F$  为  $\text{CH}_4$  或  $\text{N}_2\text{O}$  排放通量,  $\text{mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$  ( $\text{CH}_4$ ) 或  $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$  ( $\text{N}_2\text{O}$ );  $\rho$  为标准状态下  $\text{CH}_4$  或  $\text{N}_2\text{O}$  密度,  $0.71 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$  ( $\text{CH}_4$ ) 或  $1.96 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$  ( $\text{N}_2\text{O}$ );  $V$  为采样箱内有效体积,  $\text{m}^3$ ;  $A$  为采样箱所覆盖的土壤面积,  $\text{m}^2$ ;  $dc/dt$  为单位时间内采样箱内  $\text{CH}_4$  或  $\text{N}_2\text{O}$  浓度的变化,  $\mu\text{L} \cdot \text{L}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$  ( $\text{CH}_4$ ) 或  $\text{nL} \cdot \text{L}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$  ( $\text{N}_2\text{O}$ );  $T$  为采样箱内温度,  $\text{K}$ ;  $P$  为采样箱内大气压,  $\text{kPa}$ ;  $P_0$  为标准状态下大气压力,  $\text{kPa}$ 。由于试验田地区气压与标准大气压相当,因此  $P/P_0$  值等于 1。

$\text{CH}_4$  和  $\text{N}_2\text{O}$  季节排放量或总排放量的计算公式为:

$$T_{\text{总}} = \sum [(F_{i+1} + F_i)/2] \times (D_{i+1} - D_i) \times 24/1\,000 \quad (2)$$

式中:  $T_{\text{总}}$  为  $\text{CH}_4$  或  $\text{N}_2\text{O}$  季节总排放量,  $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ;  $F_i$  和  $F_{i+1}$  分别为第  $i$  次和第  $i+1$  次采样时  $\text{CH}_4$  或  $\text{N}_2\text{O}$  平均排放通量,  $\text{mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ ;  $D_i$  和  $D_{i+1}$  分别为第  $i$  次和第  $i+1$  次的采样时间,  $\text{d}$ 。 $\text{CH}_4$  和  $\text{N}_2\text{O}$  季节排放总量是将每次的观测值按时间间隔加权求和后再平均,用 3 个重复的平均值进行处理间的方差分析和多重比较。

根据单位质量的  $\text{CH}_4$  和  $\text{N}_2\text{O}$  在 100 年时间尺度上的全球增温潜势(Global warming potential, GWP)分别

是  $\text{CO}_2$  的 34 倍和 298 倍<sup>[1]</sup>, 计算出不同处理排放  $\text{CH}_4$  和  $\text{N}_2\text{O}$  产生的总温室气体排放量(TGHG), 公式如下:

$$\text{TGHG} = 34 \times T_{\text{CH}_4} + 298 \times T_{\text{N}_2\text{O}} \quad (3)$$

式中: TGHG 为总温室气体排放量,  $\text{t CO}_2\text{e} \cdot \text{hm}^{-2}$ ;  $T_{\text{CH}_4}$  和  $T_{\text{N}_2\text{O}}$  分别为  $\text{CH}_4$  和  $\text{N}_2\text{O}$  的排放量,  $\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。

温室气体排放强度(GHGI)是农业生产温室效应的综合评价指标<sup>[13]</sup>, 计算公式为:

$$\text{GHGI} = \frac{\text{TGHG}}{Y} \quad (4)$$

式中: GHGI 为温室气体排放强度,  $\text{t} \cdot \text{t}^{-1}$ ;  $Y$  为农作物产量,  $\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。

## 2 结果与分析

### 2.1 $\text{CH}_4$ 和 $\text{N}_2\text{O}$ 排放

两处理的  $\text{CH}_4$  排放均集中在水稻生长季, 且排放通量变化幅度较大(图 1)。RR 处理的  $\text{CH}_4$  排放峰出现在中稻季返青期、分蘖期、成熟期以及再生季前期, 中稻季和再生季  $\text{CH}_4$  排放通量分别为  $0 \sim 268 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$  和  $0 \sim 36 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ , 中稻季平均  $\text{CH}_4$  排放通量为  $32.19 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ , 是再生季的 3.96 倍。SW 处理的  $\text{CH}_4$  排放峰则出现在水稻返青期、分蘖期, 其稻季  $\text{CH}_4$  排放通量为  $0 \sim 217 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ , 水稻生长季平均  $\text{CH}_4$

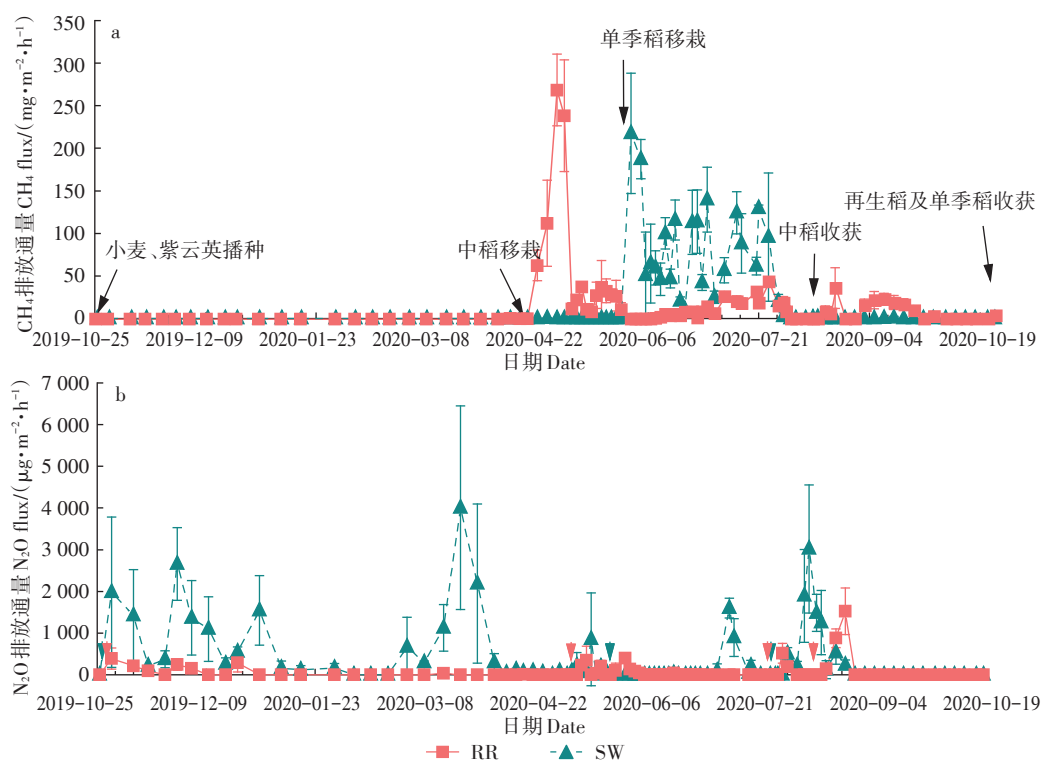


图1 2019—2020年各处理  $\text{CH}_4$  和  $\text{N}_2\text{O}$  排放通量的季节变化

Figure 1 Seasonal variation of  $\text{CH}_4$  and  $\text{N}_2\text{O}$  fluxes throughout the experimental period of 2019—2020

排放通量为  $39.06 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ , 高于 RR 处理两季平均  $\text{CH}_4$  排放通量  $23.08 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ 。

RR 和 SW 处理在非水稻生长季的  $\text{CH}_4$  排放均较少(表2), 其累积排放量仅占全年总排放量的 0.05% 和 0.04%。水稻生长期间, RR 处理中稻季  $\text{CH}_4$  排放量占全年总排放量的 86.30%, 是再生季的 6.32 倍。轮作方式显著影响了  $\text{CH}_4$  排放量, RR 处理全年、中稻季  $\text{CH}_4$  累积排放量分别显著低于 SW 处理 22.30% 和 32.92% ( $P < 0.05$ )。

两处理  $\text{N}_2\text{O}$  排放的季节变化规律并不一致(图1)。RR 处理紫云英季、中稻季和再生季的  $\text{N}_2\text{O}$  排放通量分别为  $0 \sim 390$ 、 $0 \sim 517 \text{ } \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$  和  $0 \sim 1\,526 \text{ } \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ ,  $\text{N}_2\text{O}$  排放峰主要出现在促苗肥施用后; RR 处理紫云英季、中稻季和再生稻季平均  $\text{N}_2\text{O}$  排放通量分别为  $49.02$ 、 $45.48 \text{ } \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$  和  $143.46 \text{ } \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ 。SW 处理的麦季和稻季  $\text{N}_2\text{O}$  排放通量分别为  $0 \sim 4\,004 \text{ } \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$  和  $0 \sim 3\,019 \text{ } \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ ,  $\text{N}_2\text{O}$  排放峰主要出现在麦季降雨后、稻季烤田及排水落干时; SW 处理麦季平均  $\text{N}_2\text{O}$  排放通量为  $683.44 \text{ } \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ , 是其稻季的 2.86 倍。RR 处理全年平均  $\text{N}_2\text{O}$  排放通量为  $64.76 \text{ } \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ , 低于 SW 处理的  $497.70 \text{ } \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$  ( $P < 0.05$ )。

两处理的土壤  $\text{N}_2\text{O}$  累积排放量分布也并不一致(表2)。RR 处理  $\text{N}_2\text{O}$  排放主要集中在水稻生长季, 其中再生季的  $\text{N}_2\text{O}$  累积排放量最大, 占全年排放的

41.54%, 是中稻季的 1.84 倍, 紫云英季的 1.16 倍; SW 处理  $\text{N}_2\text{O}$  排放主要集中在小麦生长季, 占全年排放的 80.43%, 是中稻季的 4.11 倍。轮作方式显著影响  $\text{N}_2\text{O}$  累计排放量, RR 处理  $\text{N}_2\text{O}$  全年总排放量仅为 SW 处理的 13.51%。

## 2.2 水稻产量、总温室气体排放量和温室气体排放强度

由表3可知, RR 处理在非水稻生长季的 TGHG 较小, 仅占全年的 1.71%。RR 处理全年、稻季 TGHG 分别显著低于 SW 处理 36.31% 和 24.05% ( $P < 0.05$ )。RR 处理的水稻产量比 SW 处理高 16.19% ( $P < 0.05$ ), 但全年总谷物产量比 SW 处理低 24.33% ( $P < 0.05$ )。与 SW 处理相比, RR 处理全年、稻季 GHGI 降低 15.85% 和 35.51% ( $P < 0.05$ )。

## 2.3 水稻生长季环境因素

轮作方式显著影响了土壤 Eh(图2a)。RR 处理在淹水期间平均土壤 Eh 为  $-164 \text{ mV}$ , 在干湿交替时期及再生季平均土壤 Eh 为  $-21 \text{ mV}$ 。SW 处理在淹水期间平均土壤 Eh 为  $-182 \text{ mV}$ , 干湿交替时期平均土壤 Eh 为  $101 \text{ mV}$ 。

水稻生长季, RR 处理土壤 DOC 含量为  $44.41 \sim 64.61 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 平均值为  $52.44 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 其中中稻季平均值为  $50.44 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 再生季平均值为  $56.04 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。SW 处理土壤 DOC 为  $45.39 \sim 76.50 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 平均值为  $57.15 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ (图2b)。

RR 和 SW 处理的土壤  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  含量在中稻季水稻

表2 2019—2020年各处理  $\text{CH}_4$  和  $\text{N}_2\text{O}$  季节排放量及年排放总量( $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ )

Table 2 Total seasonal  $\text{CH}_4$  and  $\text{N}_2\text{O}$  emission throughout the experimental period of 2019—2020( $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ )

| 处理<br>Treatments | CH <sub>4</sub> 排放 CH <sub>4</sub> emission |                                |                      |                                | N <sub>2</sub> O 排放 N <sub>2</sub> O emission |                         |                      |                           |
|------------------|---------------------------------------------|--------------------------------|----------------------|--------------------------------|-----------------------------------------------|-------------------------|----------------------|---------------------------|
|                  | 麦季/紫云英季<br>Wheat/milk<br>vetch season       | 中稻季<br>Main season             | 再生季<br>Ratoon season | 总计<br>Total                    | 麦季/紫云英季<br>Wheat/milk vetch<br>season         | 中稻季<br>Main season      | 再生季<br>Ratoon season | 总计<br>Total               |
| SW               | $0.56 \pm 0.19\text{a}$                     | $1\,331.17 \pm 159.22\text{a}$ | —                    | $1\,331.72 \pm 159.26\text{a}$ | $34.11 \pm 8.97\text{a}$                      | $8.30 \pm 1.80\text{a}$ | —                    | $42.41 \pm 10.70\text{a}$ |
| RR               | $0.56 \pm 0.41\text{a}$                     | $892.95 \pm 63.06\text{b}$     | $141.23 \pm 61.71$   | $1\,034.74 \pm 3.57\text{b}$   | $2.06 \pm 0.20\text{b}$                       | $1.29 \pm 0.39\text{b}$ | $2.38 \pm 0.69$      | $5.73 \pm 0.46\text{b}$   |

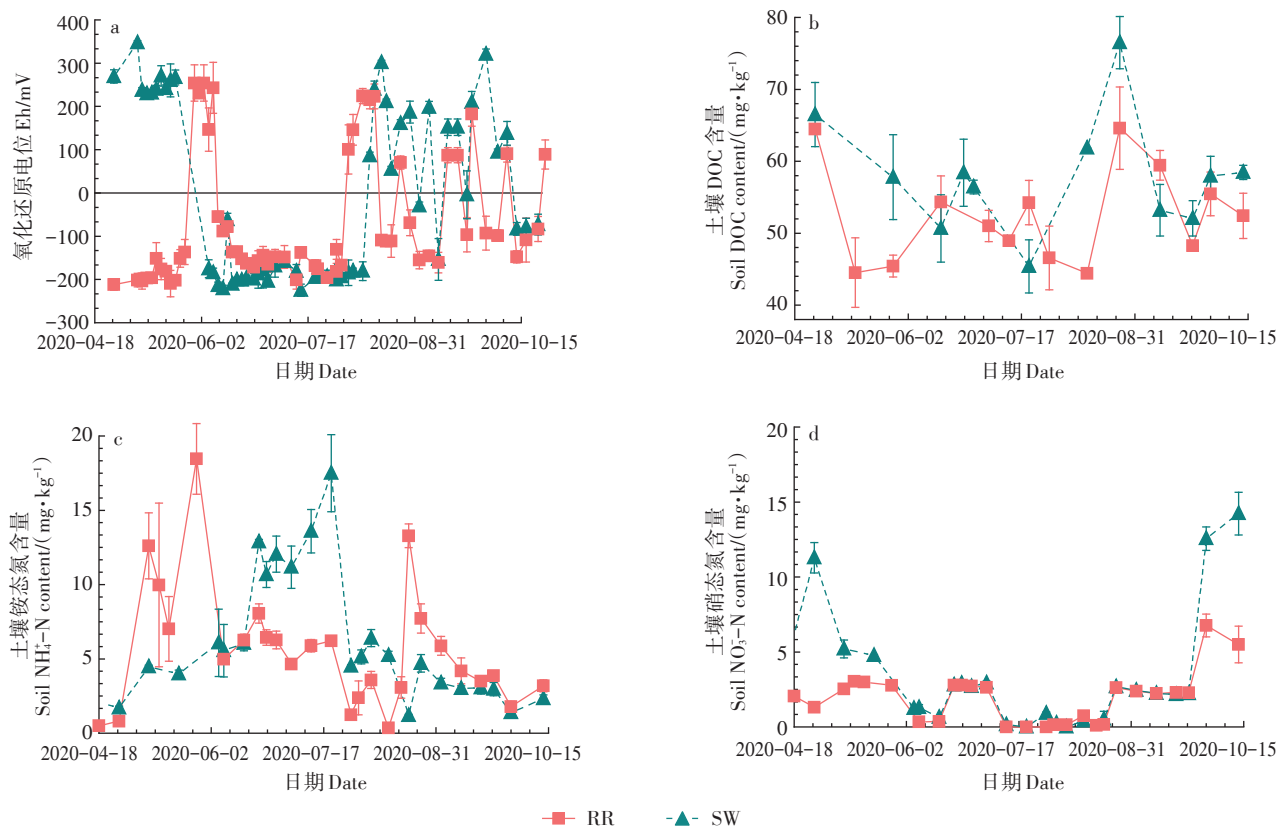
注: 文中数据为平均值±标准差。同一列不同小写字母表示处理间存在显著性差异( $P < 0.05$ ), 样品重复数  $n=3$ 。下同。

Note: The data are presented as the mean ± standard deviation. Different lowercase letters within the same column indicate significant differences between treatments ( $P < 0.05$ ,  $n=3$ ). The same below.

表3 2019—2020年各处理  $\text{CH}_4$  和  $\text{N}_2\text{O}$  的总温室气体排放量、产量及温室气体排放强度

Table 3 Total greenhouse gas emissions, grain yield and GHGI throughout the experimental period of 2019—2020

| 处理<br>Treatments | 总温室气体排放量 TGHG/( $\text{t CO}_2\text{e} \cdot \text{hm}^{-2}$ ) |                                 |                          | 产量 Yield/( $\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$ ) |                          |                          | 温室气体排放强度 GHGI/( $\text{t} \cdot \text{t}^{-1}$ ) |                                 |                         |
|------------------|----------------------------------------------------------------|---------------------------------|--------------------------|----------------------------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------------------------------|---------------------------------|-------------------------|
|                  | 非水稻生长季<br>Non-rice growing<br>season                           | 水稻生长季<br>Rice growing<br>season | 总计<br>Total              | 小麦<br>Wheat                                  | 水稻<br>Rice               | 总计<br>Total              | 非水稻生长季<br>Non-rice growing<br>season             | 水稻生长季<br>Rice growing<br>season | 全年<br>Annual            |
| RR               | $0.63 \pm 0.06\text{b}$                                        | $36.25 \pm 0.02\text{b}$        | $36.89 \pm 0.04\text{b}$ | —                                            | $12.63 \pm 0.32\text{a}$ | $12.63 \pm 0.32\text{b}$ | —                                                | $2.87 \pm 0.07\text{b}$         | $2.92 \pm 0.08\text{b}$ |
| SW               | $10.18 \pm 2.68\text{a}$                                       | $47.73 \pm 5.61\text{a}$        | $57.92 \pm 7.66\text{a}$ | $5.98 \pm 0.43$                              | $10.71 \pm 0.19\text{b}$ | $16.69 \pm 0.62\text{a}$ | $1.70 \pm 0.44$                                  | $4.45 \pm 0.47\text{a}$         | $3.47 \pm 0.46\text{a}$ |

图2 2020年稻季土壤Eh、DOC、NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N、NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N的动态变化Figure 2 Dynamic changes of soil Eh, DOC, NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N during rice growing in 2020

相同生育期内变化趋势相似,均在移栽后第40 d左右达到峰值(图2c),经短暂波动后最终降回各自初始水平。在水稻生长季,RR处理土壤NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N含量为0.35~18.46 mg·kg<sup>-1</sup>,平均值为5.64 mg·kg<sup>-1</sup>,其中中稻季平均值为5.87 mg·kg<sup>-1</sup>,再生季平均值为5.17 mg·kg<sup>-1</sup>。SW处理的土壤NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N含量为1.20~17.49 mg·kg<sup>-1</sup>,平均值为6.61 mg·kg<sup>-1</sup>。

两处理的稻季土壤NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N含量在相同生育期内变化趋势相似(图2d),RR处理在0~6.77 mg·kg<sup>-1</sup>内波动,平均值为1.92 mg·kg<sup>-1</sup>,相较于中稻季,其再生季平均土壤NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N含量增加了77.87%;而SW处理在0~14.23 mg·kg<sup>-1</sup>内波动,平均值为2.63 mg·kg<sup>-1</sup>。

#### 2.4 稻季CH<sub>4</sub>和N<sub>2</sub>O排放通量与环境因素相关性分析

相关性分析(表4)表明,两处理的稻季CH<sub>4</sub>排放通量均与土壤Eh呈显著负相关( $P<0.01$ ),但与土壤DOC浓度无显著相关性( $P>0.05$ );SW处理的稻季CH<sub>4</sub>排放通量还与土壤NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N含量呈显著正相关( $P<0.01$ )。RR处理的稻季N<sub>2</sub>O排放通量与土壤NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N含量呈显著正相关( $P<0.05$ );SW处理的稻季N<sub>2</sub>O排放通量与土壤Eh呈显著正相关( $P<0.01$ )。除SW处

理N<sub>2</sub>O排放通量与箱温呈显著正相关( $P<0.05$ )外,其他温室气体排放通量与箱温无显著相关性。

### 3 讨论

本试验中,再生稻再生季生育期共73 d(表1),占水稻生长季的38.02%,而再生季CH<sub>4</sub>排放量仅占稻季CH<sub>4</sub>总排放量的13.66%。本研究发现,两处理CH<sub>4</sub>排放通量与土壤DOC无显著相关性,这与邓桥江等<sup>[10]</sup>的研究结果一致,说明土壤DOC的供应不是限制CH<sub>4</sub>排放的主要因素。不同地区的再生稻研究结果(表5)显示,再生季的CH<sub>4</sub>排放量占稻季CH<sub>4</sub>总排放量的2.02%~35.24%。SONG等<sup>[9]</sup>认为再生季CH<sub>4</sub>排放量较少可能与土壤温度和水稻植株的生物量有关。再生稻是利用头季稻收割后稻桩上存活的休眠芽再生形成的一季水稻,再萌发的水稻矮于头季稻<sup>[4,14]</sup>,植株生物量明显减少,进而植株排放的CH<sub>4</sub>减少<sup>[15-16]</sup>。同时,再生季较低的土壤温度,降低了土壤产甲烷菌的活性、土壤有机质分解速率及土壤CH<sub>4</sub>产生和向大气传输的速率<sup>[17]</sup>。本研究两处理稻季CH<sub>4</sub>排放通量与箱温无显著相关性,可能是由于水分管理对土壤温度有

表4 稻季CH<sub>4</sub>和N<sub>2</sub>O排放通量与土壤理化性质的相关关系

| Table 4 Correlation coefficients of CH <sub>4</sub> and N <sub>2</sub> O flux with soil properties in rice paddies under different ecosystems |                      |                     |                      |                                               |                                               |                              |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------|---------------------|----------------------|-----------------------------------------------|-----------------------------------------------|------------------------------|
| 处理<br>Treatments                                                                                                                              | 指标<br>Parameter      | 土壤氧化还原电位<br>Soil Eh | 土壤溶解性有机质<br>Soil DOC | 土壤铵态氮<br>Soil NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N | 土壤硝态氮<br>Soil NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N | 箱温<br>Temperature in chamber |
| RR                                                                                                                                            | CH <sub>4</sub> 排放通量 | -0.33**             | 0.23                 | -0.10                                         | -0.20                                         | 0                            |
|                                                                                                                                               | N <sub>2</sub> O排放通量 | 0.17                | -0.64                | 0.40*                                         | 0.08                                          | 0.19                         |
| SW                                                                                                                                            | CH <sub>4</sub> 排放通量 | -0.48**             | 0.29                 | 0.50**                                        | -0.09                                         | 0.17                         |
|                                                                                                                                               | N <sub>2</sub> O排放通量 | 0.37**              | 0.02                 | 0.06                                          | -0.16                                         | 0.29*                        |

注:\*表示在  $P<0.05$  水平上的显著相关性,\*\*表示在  $P<0.01$  水平上的显著相关性。  
Note:\* indicates significant correlations at  $P<0.05$  level,\*\* indicates significant correlations at  $P<0.01$  level.

表5 不同地区种植再生稻对稻季CH<sub>4</sub>和N<sub>2</sub>O排放量、总温室气体排放量、产量和温室气体排放强度的影响

Table 5 Effects of different rotation systems on CH<sub>4</sub> and N<sub>2</sub>O emissions, total greenhouse gas emissions, yield and GHGI during rice growing season

| 地区<br>Areas | 时间<br>Periods               | 处理<br>Treatments | CH <sub>4</sub> 排放量CH <sub>4</sub> emission/(kg·hm <sup>-2</sup> ) |                                         |                                               |             | N <sub>2</sub> O排放量N <sub>2</sub> O emission/(kg·hm <sup>-2</sup> ) |                                         |                                               |             | 总温室气体<br>排放量<br>TGHG/<br>(t·hm <sup>-2</sup> ) | 水稻产量<br>Yield/<br>(t·hm <sup>-2</sup> ) | 温室气体<br>排放强度<br>GHGI/(t·t <sup>-1</sup> ) | 参考文献<br>References |
|-------------|-----------------------------|------------------|--------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------|-----------------------------------------------|-------------|---------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------|-----------------------------------------------|-------------|------------------------------------------------|-----------------------------------------|-------------------------------------------|--------------------|
|             |                             |                  | 中稻季/早稻<br>Main season/<br>early season                             | 再生季/晚稻<br>Ratoon season/<br>late season | 再生季所占比例<br>Contribution of<br>ratoon season/% | 总计<br>Total | 中稻季/早稻<br>Main season/<br>early season                              | 再生季/晚稻<br>Ratoon season/<br>late season | 再生季所占比例<br>Contribution of<br>ratoon season/% | 总计<br>Total |                                                |                                         |                                           |                    |
|             |                             |                  |                                                                    |                                         |                                               |             |                                                                     |                                         |                                               |             |                                                |                                         |                                           |                    |
| 四川          | 2016—<br>2018年 <sup>a</sup> | 覆膜单季稻            | 218.5                                                              | —                                       | —                                             | 218.5       | 2.42                                                                | —                                       | —                                             | 2.42        | 8.15                                           | 8.24                                    | 0.99                                      | [9]                |
|             |                             | 覆膜再生稻            | 193.9                                                              | 42.2                                    | 17.88                                         | 236.00      | 3.61                                                                | 1.47                                    | 28.94                                         | 5.08        | 9.54                                           | 9.78                                    | 0.98                                      |                    |
| 湖南          | 2017年                       | 双季稻              | 506.00                                                             | 416.34                                  | —                                             | 922.35      | —                                                                   | —                                       | —                                             | —           | —                                              | 14.19                                   | —                                         | [8]                |
|             |                             | 再生稻              | 550.34                                                             | 59.40                                   | 9.74                                          | 609.74      | —                                                                   | —                                       | —                                             | —           | —                                              | 12.22                                   | —                                         |                    |
| 湖北          | 2017年                       | 常规栽培再生稻          | 882                                                                | 60                                      | 6.37                                          | 942         | 1.67                                                                | 1.61                                    | 49.09                                         | 3.28        | 33.01                                          | 14.09                                   | 2.20                                      | [10]               |
|             |                             | 优化栽培再生稻          | 397                                                                | 216                                     | 35.24                                         | 613         | 3.04                                                                | 2.34                                    | 43.49                                         | 5.38        | 22.45                                          | 17.67                                   | 1.27                                      |                    |
| 湖北          | 2018—<br>2019年              | 再生稻-冬闲           | 95.08                                                              | 3.38                                    | 3.43                                          | 98.46       | 2.11                                                                | 0.87                                    | 29.19                                         | 2.98        | 4.24                                           | —                                       | —                                         | [11]               |
|             |                             | 再生稻-油菜           | 119.33                                                             | 2.47                                    | 2.02                                          | 121.80      | 1.9                                                                 | 1.09                                    | 36.58                                         | 2.99        | 5.05                                           | —                                       | —                                         |                    |
|             |                             | 再生稻-紫云英          | 31.89                                                              | 5.24                                    | 13.93                                         | 37.13       | 1.43                                                                | 0.74                                    | 34.10                                         | 2.17        | 1.93                                           | —                                       | —                                         |                    |
| 安徽          | 2019—<br>2020年              | 稻-麦轮作            | 1 331.17                                                           | —                                       | —                                             | 1 331.17    | 8.30                                                                | —                                       | —                                             | 8.30        | 47.73                                          | 10.87                                   | 4.45                                      | 本研究                |
|             |                             | 再生稻-紫云英          | 892.95                                                             | 141.23                                  | 13.66                                         | 1 034.18    | 1.29                                                                | 2.38                                    | 64.85                                         | 3.67        | 36.25                                          | 12.63                                   | 2.87                                      |                    |

注:\*列出数据为3年平均值得。  
Note:\* The data listed is a three-year average.

较强影响,因此箱温未能很好地反映实际的土壤温度。张浪等<sup>[8]</sup>认为,再生季期间水稻植株从收割部位重新抽穗,进而减少了由水稻分蘖造成的CH<sub>4</sub>排放;此外,水稻生长后期生理活性下降,从而降低了对CH<sub>4</sub>的传输力。与再生季不同,中稻季氮肥施用量大,较高的土壤NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N抑制了甲烷氧化菌的活性,导致了较高的CH<sub>4</sub>排放<sup>[11]</sup>。另外,中稻季分蘖盛期水稻生长旺盛,通气组织发达<sup>[17]</sup>,此时较高的气温和较大的降水量促进了产甲烷菌的活性<sup>[18-19]</sup>,进而增大了中稻季的CH<sub>4</sub>排放量。

本研究结果显示,稻麦轮作改为再生稻种植,其稻季CH<sub>4</sub>排放量可降低22.31%(表2)。两处理CH<sub>4</sub>排放主要集中在水稻生长季,占全年总排放的99.95%~99.96%,再生稻处理中稻季CH<sub>4</sub>排放占稻季CH<sub>4</sub>排放的86.30%(表2)。因此,中稻季CH<sub>4</sub>排放量的差异是

全年CH<sub>4</sub>排放总量差异的主要原因。稻麦轮作制度下,小麦收割后实施秸秆全量还田,大量还田的麦秆为土壤产甲烷菌提供了丰富的产甲烷基质,同时加速土壤Eh的下降(图2a),为产甲烷菌的生长提供适宜的环境条件,从而显著促进稻田CH<sub>4</sub>的产生和排放<sup>[20-21]</sup>。而再生稻处理冬季栽种的是紫云英,与麦秆相比,紫云英还田量小,碳氮比也小,其还田后土壤Eh下降幅度低于麦秆还田(图2a),因而其CH<sub>4</sub>排放量也相应较小(表2)。添加高生物量、高碳氮比的秸秆比添加低生物量、低碳氮比的绿肥产生了更多的CH<sub>4</sub>排放,在其他研究中也有报道<sup>[22-25]</sup>。不同轮作方式下,种植再生稻对CH<sub>4</sub>排放的影响不同,CH<sub>4</sub>排放量为37.13~1 034.18 kg·hm<sup>-2</sup>(表5)。吕泽芳等<sup>[11]</sup>通过对比3种不同冬半年覆盖植被的再生稻田发现,与冬季休闲相比,冬半年种植紫云英降低再生稻CH<sub>4</sub>排



放量61.87%。邓桥江等<sup>[10]</sup>发现,在优化栽培模式下,再生稻减少了CH<sub>4</sub>排放量的34.93%。本研究轮作方式和再生稻栽培模式与上述两研究试验设置相似,结果一致。

本研究中,再生季N<sub>2</sub>O排放量占稻季N<sub>2</sub>O总排放量的64.8%,略高于文献报道<sup>[8-11]</sup>。施用氮肥是保障再生稻高产的关键措施,其中,施用促芽肥可促进再生稻休眠芽的萌发,施用促苗肥可改善再生稻株碳氮代谢,提高结实率和穗实粒数<sup>[26]</sup>。促芽肥和促苗肥的施用为土壤硝化和反硝化作用提供了充足的底物,进而促进N<sub>2</sub>O的产生和排放<sup>[9]</sup>。另外,再生季期间稻田仅保持浅水或无水层,此时的土壤水分状况有利于硝化和反硝化作用的进行,从而促进N<sub>2</sub>O的产生和排放<sup>[27]</sup>。冬作紫云英还田对中稻季N<sub>2</sub>O排放有明显抑制作用,一方面,紫云英腐解消耗土壤中的氧气,较低的土壤氧气分压不利于硝化作用的进行,从而减少N<sub>2</sub>O产生;另一方面,紫云英还田后稻田长期处于淹水状态,使N<sub>2</sub>O进一步还原为N<sub>2</sub>,进而减少反硝化过程所产生的N<sub>2</sub>O<sup>[11]</sup>。本研究中,紫云英在中稻移栽前还田,导致中稻季N<sub>2</sub>O排放量较小,再生季N<sub>2</sub>O排放量在整个稻季N<sub>2</sub>O排放量中的占比较高。不同地区的再生稻研究结果(表5)显示,再生季的N<sub>2</sub>O排放量占水稻生长季N<sub>2</sub>O总排放量的28.94%~49.09%。

本研究结果显示,稻麦轮作制度下非水稻生长季N<sub>2</sub>O排放量占全年总排放量的80.43%,对全年N<sub>2</sub>O排放量有决定性影响,稻麦轮作改为再生稻种植,非水稻生长季的N<sub>2</sub>O排放量显著降低93.96%(表2),这是造成两处理全年N<sub>2</sub>O排放总量差异的主要原因。尽管由于氮肥施用和水分管理使水稻生长季观测到相当数量的N<sub>2</sub>O排放,但稻田大部分时间处于淹水状态,N<sub>2</sub>O闭蓄于土壤中被进一步还原为N<sub>2</sub>,因而稻田稻季的N<sub>2</sub>O排放量显著低于其旱作季节的N<sub>2</sub>O排放量<sup>[28-29]</sup>。旱作种植冬小麦,其N<sub>2</sub>O排放量远高于旱作种植紫云英处理(表2),这与前人研究结果相同<sup>[30]</sup>。除小麦和紫云英植株之间存在差异可能影响N<sub>2</sub>O排放外,冬小麦的施氮量明显高于紫云英,也有利于N<sub>2</sub>O的产生与排放<sup>[30-33]</sup>。稻麦轮作改为再生稻种植,稻季N<sub>2</sub>O排放量降低(表2),这可能与再生稻中稻季未施穗肥有关,观测到的再生稻田土壤NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N和NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N含量的平均值也低于单季稻田(图2c、图2d)。轮作方式也影响稻田N<sub>2</sub>O排放(表5)。吕泽芳等<sup>[11]</sup>的研究结果表明:与再生稻-休闲和再生稻-紫云英轮作方式相比,再生稻-油菜处理冬半年和全年的N<sub>2</sub>O排放量最高。氮肥施用量

的不同必然导致温室气体排放的差异,而再生稻和稻麦轮作这两种制度的氮肥施用量存在天然差异。本研究稻麦轮作处理非水稻生长季总施氮量为154 kg·hm<sup>2</sup>,水稻生长季为194 kg·hm<sup>2</sup>;再生稻处理非水稻生长季总施氮量为17 kg·hm<sup>2</sup>,水稻生长季为252 kg·hm<sup>2</sup>,总体上符合安徽省农田氮肥施用量水平<sup>[34-35]</sup>,两处理在施肥设置方面具有一定代表性,可在一定程度上代表安徽省这两种轮作制度的温室气体排放。

据报道,安徽省适宜发展再生稻的面积为4.0×10<sup>5</sup>~6.0×10<sup>5</sup> hm<sup>2</sup><sup>[7]</sup>。以本试验得到的研究结果进行初步估算,安徽省全部适宜面积种上再生稻,可减少农田排放CH<sub>4</sub>和N<sub>2</sub>O的总温室气体排放量8.41×10<sup>6</sup>~1.26×10<sup>7</sup> t CO<sub>2</sub>e。此外,冬季种植紫云英代替小麦,还可以降低土壤耕作强度、改善土壤结构、提高土壤肥力。因此,在安徽省推广种植再生稻具有良好的应用前景。

种植再生稻对稻田温室气体排放的影响可能是一个长期过程,未来研究应对再生稻制度下的CH<sub>4</sub>和N<sub>2</sub>O排放进行长期观测,确定种植再生稻对稻田CH<sub>4</sub>和N<sub>2</sub>O排放的长期影响、年际变化以及影响因素。目前,再生稻田温室气体排放相关微生物的研究仍然较少,从分子生物学水平上揭示温室气体排放规律的变化也是值得研究的方向。

## 4 结论

(1)再生稻的种植改变了稻田的CH<sub>4</sub>和N<sub>2</sub>O排放规律,稻麦轮作处理与再生稻处理全年CH<sub>4</sub>排放均集中在水稻生长季,与稻麦轮作处理相比,再生稻处理降低了全年CH<sub>4</sub>排放量;两处理N<sub>2</sub>O排放集中在不同作物生长季,再生稻处理的N<sub>2</sub>O排放主要集中在再生季,而稻麦轮作处理的N<sub>2</sub>O排放主要集中在小麦生长季,与稻麦轮作处理相比,再生稻处理降低了全年N<sub>2</sub>O排放量。

(2)与稻麦轮作处理相比,再生稻处理减少了全年总谷物产量,但同时降低了全年温室气体排放强度。

## 致谢:

感谢白湖农场为本研究提供的试验场地以及帮助。感谢中国科学院南京土壤研究所分析测试中心为本研究部分指标测定提供的科研设施仪器。

## 参考文献:

- [1] IPCC. Summary offer for policymakers. Climate change 2013: The physical science basis. Contribution of working group I to the fifth assess-

- ment report of the intergovernmental panel on climate change[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2013: 714.
- [2] CAI Z C, XING G X, YAN X Y, et al. Methane and nitrous oxide emissions from rice paddy fields as affected by nitrogen fertilisers and water management[J]. *Plant and Soil*, 1997, 196(1): 7-14.
- [3] NISHIMURA S, SAWAMOTO T, AKIYAMA H, et al. Methane and nitrous oxide emissions from a paddy field with Japanese conventional water management and fertilizer application[J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2004, 18(2): GB2017.
- [4] 徐富贤, 熊洪, 张林, 等. 再生稻产量形成特点与关键调控技术研究进展[J]. 中国农业科学, 2015, 48(9): 1702-1717. XU F X, XIONG H, ZHANG L, et al. Progress in research of yield formation of ratooning rice and its high-yielding key regulation technologies[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2015, 48(9): 1702-1717.
- [5] ZISKA L H, FLEISHER D H, LINScombe S. Ratooning as an adaptive management tool for climatic change in rice systems along a north-south transect in the southern Mississippi Valley[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2018, 263: 409-416.
- [6] 费震江, 董华林, 武晓智, 等. 湖北省再生稻发展的现状及潜力[J]. 湖北农业科学, 2013, 52(24): 5977-5978, 6002. FEI Z J, DONG H L, WU X Z, et al. The development status and potential of ratoon rice in Hubei Province[J]. *Hubei Agricultural Sciences*, 2013, 52(24): 5977-5978, 6002.
- [7] 我省示范推广水稻“一种两收”[N]. 安徽日报, 2018-11-14. Demonstration and promotion of ratoon rice in Anhui Province[N]. *Anhui Daily*, 2018-11-14.
- [8] 张浪, 徐华勤, 李林林, 等. 再生稻和双季稻田CH<sub>4</sub>排放对比研究[J]. 中国农业科学, 2019, 52(12): 2101-2113. ZHANG L, XU H Q, LI L L, et al. Comparative study on CH<sub>4</sub> emission from ratoon rice and double-cropping rice fields[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2019, 52(12): 2101-2113.
- [9] SONG K, ZHANG G, YU H, et al. Methane and nitrous oxide emissions from a ratoon paddy field in Sichuan Province, China[J]. *European Journal of Soil Science*, 2020, 72: 1478-1491.
- [10] 邓桥江, 曹凑贵, 李成芳. 不同再生稻栽培模式对稻田温室气体排放和产量的影响[J]. 农业环境科学学报, 2019, 38(6): 1373-1380. DENG Q J, CAO C G, LI C F. Effects of different ratooning cultivation modes on greenhouse gas emissions and grain yields in paddy fields[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2019, 38(6): 1373-1380.
- [11] 吕泽芳, 高珍珍, 刘章勇, 等. 再生稻栽培模式下冬半年覆盖植被对土壤CH<sub>4</sub>和N<sub>2</sub>O排放的影响[J]. 湖北农业科学, 2020, 59(15): 60-65. LÜ Z F, GAO Z Z, LIU Z Y, et al. Effects of cover plant in winter on soil CH<sub>4</sub> and N<sub>2</sub>O emission under the ratoon rice system[J]. *Hubei Agricultural Science*, 2020, 59(15): 60-65.
- [12] FIROUZI S, NIKKHAH A, AMINPANAH H. Rice single cropping or ratooning agro-system: Which one is more environment-friendly?[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2018, 25(32): 32246-32256.
- [13] MOSIER A R, HALVORSON A D, REULE C A, et al. Net global warming potential and greenhouse gas intensity in irrigated cropping systems in northeastern Colorado[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2006, 35(4): 1584-1598.
- [14] 林文雄, 陈鸿飞, 张志兴, 等. 再生稻产量形成的生理生态特性与关键栽培技术的研究与展望[J]. 中国生态农业学报, 2015, 23(4): 392-401. LIN W X, CHEN H F, ZHANG Z X, et al. Research and prospect on physio-ecological properties of ratoon rice yield formation and its key cultivation technology[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2015, 23(4): 392-401.
- [15] DING A, WILLIS C R, SASS R L, et al. Methane emissions from rice fields: Effect of plant height among several rice cultivars[J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 1999, 13(4): 1045-1052.
- [16] HOLZAPFEL-PSCHORN A, CONRAD R, SEILER W. Effects of vegetation on the emission of methane from submerged paddy soil[J]. *Plant and Soil*, 1986, 92(2): 223-233.
- [17] 徐华, 蔡祖聪, 李小平. 土壤Eh和温度对稻田甲烷排放季节变化的影响[J]. 农业环境保护, 1999, 18(4): 145-149. XU H, CAI Z C, LI X P. Effect of soil Eh and temperature on seasonal variation of CH<sub>4</sub> emission from rice[J]. *Agro-environmental Protection*, 1999, 18(4): 145-149.
- [18] 孙会峰, 周胜, 付子轼, 等. 高温少雨对不同品种水稻CH<sub>4</sub>和N<sub>2</sub>O排放量及产量的影响[J]. 中国环境科学, 2016, 36(12): 3540-3547. SUN H F, ZHOU S, FU Z S, et al. Effects of high temperature and low precipitation on CH<sub>4</sub> and N<sub>2</sub>O emission and yield of different rice varieties[J]. *China Environmental Science*, 2016, 36(12): 3540-3547.
- [19] ALLEN L H, ALBRECHT S L, COLÓN-GUASP W, et al. Methane emissions of rice increased by elevated carbon dioxide and temperature[J]. *Journal of Environment Quality*, 2003, 32(6): 1978.
- [20] MA J, MA E D, XU H, et al. Wheat straw management affects CH<sub>4</sub> and N<sub>2</sub>O emissions from rice fields[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2009, 41(5): 1022-1028.
- [21] THANGARAJAN R, BOLAN N S, TIAN G L, et al. Role of organic amendment application on greenhouse gas emission from soil[J]. *Science of the Total Environment*, 2013, 465(1): 72-96.
- [22] 刘威. 冬种绿肥和稻草还田对水稻生长、土壤性质及周年温室气体排放影响的研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2015: 63-77. LIU W. Studies on the effects of winter green manure cultivation and rice straw retention on rice growth, soil properties and annual greenhouse gas emissions[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2015: 63-77.
- [23] 胡安永, 孙星, 刘勤. 太湖地区不同轮作模式对稻田温室气体(CH<sub>4</sub>和N<sub>2</sub>O)排放的影响[J]. 应用生态学报, 2016, 27(1): 99-106. HU A Y, SUN X, LIU Q. Effects of different rotation systems on greenhouse gas (CH<sub>4</sub> and N<sub>2</sub>O) emissions in the Taihu Lake region, China[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2016, 27(1): 99-106.
- [24] 张丽. 南方典型稻作系统绿肥和秸秆还田对温室气体排放特征和环境效应的影响[D]. 南京: 南京农业大学, 2018: 37-48. ZHANG L. Integrative effects of green manure and straw incorporation on greenhouse gas emissions and environmental performance under the typical rice cropping systems in southern China[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2018: 37-48.
- [25] 刘少文, 殷敏, 褚光, 等. 长江中下游稻区不同水旱轮作模式和氮肥水平对稻田CH<sub>4</sub>排放的影响[J]. 中国农业科学, 2019, 52(14):

- 2484–2499. LIU S W, YIN M, CHU G, et al. Effects of various paddy–upland crop rotations and nitrogen fertilizer levels on  $\text{CH}_4$  emission in the middle and lower reaches of the Yangtze River[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2019, 52(14): 2484–2499.
- [26] 宋开付, 张广斌, 徐华, 等. 中国再生稻种植的影响因素及可持续性研究进展[J]. 土壤学报, 2020, 57(6): 1365–1377. SONG K F, ZHANG G B, XU H, et al. A review of research on influencing factors and sustainability of ratoon rice cultivation in China[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2020, 57(6): 1365–1377.
- [27] 颜晓元, 施书莲, 杜丽娟, 等. 水分状况对水田土壤  $\text{N}_2\text{O}$  排放的影响[J]. 土壤学报, 2000, 37(4): 482–489. YAN X Y, SHI S L, DU L J, et al.  $\text{N}_2\text{O}$  emission from paddy soil as affected by water regime[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2000, 37(4): 482–489.
- [28] Xing G X.  $\text{N}_2\text{O}$  emission from cropland in China[J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 1998, 52(2): 249–254.
- [29] 黄明蔚. 稻麦轮作农田生态系统温室气体排放及机制研究[D]. 上海: 华东师范大学, 2007: 21–29. HUANG M W. Emission process of greenhouse gases and its mechanism from the paddy–wheat rotation agro–ecosystem[D]. Shanghai: East China Normal University, 2007: 21–29.
- [30] 张岳芳, 郑建初, 陈留根, 等. 水旱轮作稻田旱作季种植不同作物对  $\text{CH}_4$  和  $\text{N}_2\text{O}$  排放的影响[J]. 生态环境学报, 2012, 21(9): 1521–1526. ZHANG Y F, ZHENG J C, CHEN L G, et al. Effects of different upland crops cultivation on  $\text{CH}_4$  and  $\text{N}_2\text{O}$  emissions during upland–growing season from paddy rice–upland crop rotation field[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2012, 21(9): 1521–1526.
- [31] 李昕, 孙文娟, 黄耀, 等. 中国小麦和玉米农田  $\text{N}_2\text{O}$  减排措施及潜力[J]. 气候变化研究进展, 2017, 13(3): 273–283. LI X, SUN W J, HUANG Y, et al. Options and potentials to mitigate  $\text{N}_2\text{O}$  emissions from wheat and maize fields in China[J]. *Climate Change Research*, 2017, 13(3): 273–283.
- [32] 许宏伟, 李娜, 冯永忠, 等. 氮肥和秸秆还田方式对麦玉轮作土壤  $\text{N}_2\text{O}$  排放的影响[J]. 环境科学, 2020, 41(12): 5668–5676. XU H W, LI N, FENG Y Z, et al. Effects of nitrogen fertilizer and straw returning methods on  $\text{N}_2\text{O}$  emissions in wheat–maize rotational soils[J]. *Environmental Science*, 2020, 41(12): 5668–5676.
- [33] 朱永官, 王晓辉, 杨小茹, 等. 农田土壤  $\text{N}_2\text{O}$  产生的关键微生物过程及减排措施[J]. 环境科学, 2014, 35(2): 792–800. ZHU Y G, WANG X H, YANG X R, et al. Key microbial processes in nitrous oxide emissions of agricultural soil and mitigation strategies[J]. *Environmental Science*, 2014, 35(2): 792–800.
- [34] 余欢欢. 安徽省化肥利用现状、存在问题及对策建议[D]. 合肥: 安徽农业大学, 2019: 11–20. YU H H. The current situation, existing problems and countermeasures of fertilizer utilization in Anhui Province[D]. Hefei: Anhui Agricultural University, 2019: 11–20.
- [35] 孔令娟, 潘广元. 安徽省再生稻生产现状与发展[J]. 中国稻米, 2020, 26(4): 47–50. KONG L J, PAN G Y. Present situation and development countermeasures of ratoon rice production in Anhui Province[J]. *China Rice*, 2020, 26(4): 47–50.