

太湖流域不同再生稻品种的温室气体排放强度

樊迪, 李若林, 马静, 张广斌, 徐华

引用本文:

樊迪, 李若林, 马静, 张广斌, 徐华. 太湖流域不同再生稻品种的温室气体排放强度[J]. 农业环境科学学报, 2022, 41(9): 2082–2090.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11654/jaes.2022-0219>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

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

农业环境科学学报. 2021, 40(8): 1829–1838 <https://doi.org/10.11654/jaes.2021-0181>

有机无机肥配施对苹果园温室气体排放的影响

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

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

水稻品种对稻田CH₄和N₂O排放的影响

孙会峰, 周胜, 陈桂发, 付子轼, 刘国兰, 宋祥甫

农业环境科学学报. 2015, 34(8): 1595–1602 <https://doi.org/10.11654/jaes.2015.08.024>

川中丘陵区覆膜再生稻田N₂O排放规律研究

宋开付, 于海洋, 张广斌, 徐华, 吕世华, 马静

农业环境科学学报. 2019, 38(6): 1381–1387 <https://doi.org/10.11654/jaes.2018-1368>

厢作免耕下生态种养对稻田CH₄和N₂O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>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

樊迪, 李若林, 马静, 等. 太湖流域不同再生稻品种的温室气体排放强度[J]. 农业环境科学学报, 2022, 41(9): 2082–2090.

FAN D, LI R L, MA J, et al. Greenhouse gas intensity from different cultivars of ratoon rice fields in Taihu Lake region, China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2022, 41(9): 2082–2090.



开放科学 OSID

太湖流域不同再生稻品种的温室气体排放强度

樊迪^{1,2}, 李若林^{1,2}, 马静¹, 张广斌¹, 徐华^{1*}

(1. 土壤与农业可持续发展国家重点实验室, 江苏常熟农田生态系统国家野外科学观测研究站, 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:为明确太湖流域种植再生稻的可行性及其对温室气体排放的影响,于2021年4—10月采用静态箱-气相色谱法观测了早优73、甬优2640、丰两优香1号、两优6326和C两优华占5个品种再生稻的CH₄和N₂O排放通量以及产量。结果表明:稻季观测期内,CH₄排放峰分别出现在中稻季分蘖期和抽穗前后以及再生季前期;两季CH₄累积排放量为209~289 kg·hm⁻²,再生季占比为8.3%~23.0%,其中两优6326的值最高,显著高于早优73、甬优2640和丰两优香1号($P<0.05$)。N₂O排放峰主要出现在肥料施用后和土壤水分发生剧烈变化时;两季N₂O累积排放量为0.386~0.548 kg·hm⁻²,再生季占比为0.5%~2.4%,5个品种间N₂O排放量无显著差异。不同处理两季水稻总产量为6.12~12.62 t·hm⁻²,再生季占比为23.8%~36.7%,其中甬优2640和丰两优香1号的两季总产量相对较高。不同处理的温室气体排放强度为0.50~1.35 t CO₂e·t⁻¹,其中甬优2640最低,两优6326最高($P<0.05$)。研究表明,甬优2640和丰两优香1号的两季总产量较高,且温室气体排放强度相对较低。

关键词:太湖流域;再生稻;温室气体排放强度;产量;水稻品种

中图分类号:X16;S511 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2022)09-2082-09 doi:10.11654/jaes.2022-0219

Greenhouse gas intensity from different cultivars of ratoon rice fields in Taihu Lake region, China

FAN Di^{1,2}, LI Ruolin^{1,2}, MA Jing¹, ZHANG Guangbin¹, XU Hua^{1*}

(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: To clarify the feasibility of ratoon rice cultivation in the Taihu Lake region and its effect on greenhouse gas emissions, a field experiment was conducted from April to October in 2021, using the static chamber-gas chromatography technique and adopting five cultivars of ratoon rice [Hanyou 73 (H73), Yongyou 2640 (Y2640), Fengliangyouxiang 1 (F1), C Liangyouhuazhan (CZ), and Liangyou 6326 (L6326)]. The results showed that the CH₄ fluxes reached peak during the tillering and heading of main rice crop season and early ratoon season. Seasonal cumulative CH₄ emissions ranged from 209 to 289 kg·hm⁻², of which 8.3%~23.0% was attributed to the ratoon season. Total CH₄ emission from L6326 was the highest, which was obviously higher than that from H73, Y2640, and F1 ($P<0.05$). The N₂O flux peaks were mainly measured during the periods of nitrogen fertilization and soil moisture drastic changes. The seasonal N₂O emissions ranged from 0.386 to 0.548 kg·hm⁻², with 0.5%~2.4% in ratoon season. There was no significant difference in N₂O emissions among the five rice cultivars. Total rice yield was 6.12~12.62 t·hm⁻², and the ratoon rice contributed 23.8%~36.7%. The yields of Y2640 and F1 were

收稿日期:2022-03-04 录用日期:2022-05-11

作者简介:樊迪(1997—),女,山西运城人,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:fandi@issas.ac.cn

*通信作者:徐华 E-mail:hxu@issas.ac.cn

基金项目:江苏省碳达峰碳中和科技创新专项资金项目(BE2022311);国家自然科学基金项目(41877325,42177233);中国科学院青年创新促进会项目(2018349)

Project supported: The Scientific and Technological Innovation Special Fund Project of Carbon Peak and Carbon Neutrality in Jiangsu Province (BE2022311); The National Natural Science Foundation of China (41877325, 42177233); The Youth Innovation Promotion Association of Chinese Academy of Sciences (2018349)

relatively higher than those of other three rice cultivars. As a whole, the greenhouse gas intensity ranged from 0.50 to 1.35 t CO₂ e·t⁻¹, with the lowest and highest values observed in Y2640 and L6326, respectively. Based on these findings, the Y2640 and F1 rice cultivars could be potentially planted in Taihu Lake region owing to their relatively higher yields and lower greenhouse gas intensity.

Keywords: Taihu Lake region; ratoon rice; greenhouse gas intensity; yield; rice cultivar

再生稻是一种特殊的水稻耕作模式,即采取一定的栽培措施,在头季水稻收割后,使原有稻桩上的休眠芽重新萌发生长成穗,从而收获新一季的水稻^[1]。再生稻适宜种植在单季稻种植热量有余、双季稻种植热量不足的地区,它可以充分利用秋季热光资源,提高稻田综合生产力。再生稻具有生育期短、日产量较高、省种、省工、节水、调节劳力、生产成本低和效益高等优点^[1]。再生稻在我国的种植历史十分悠久,目前种植面积约为124万hm²,主要分布在四川、重庆、湖北和福建等地,我国适宜种植再生稻的区域面积可达340万hm²^[2],与之对应的稻谷增产潜力约为每年2000万t^[3]。全球气候变暖导致热量资源增多,造成水稻潜在种植界限北移^[4-5],为再生稻扩大种植面积提供了有利的气候条件^[6]。在未来农业现代化进程中因地制宜发展再生稻,对适应全球气候变化、提高粮食产量和保障国家粮食安全具有重要意义。

太湖流域作为我国重要的商品粮生产基地,主要种植模式是稻麦轮作,但这一模式具有耕作强度大、小麦品质较低的缺点^[7]。早在2016年,我国就开始在江苏、江西等稻谷低质、低效区推行稻肥轮作,这种方式虽然在一定程度上有利于耕地休养生息、保耕保育,但放弃一季小麦种植可能会对该地区粮食产量造成影响。若在该区域种植再生稻,再生季水稻产量可在一定程度上弥补小麦的产量损失,因此在太湖流域尝试种植再生稻具有重要的切实需求。事实上,太湖流域曾有过种植再生稻的历史;近年来,再生稻种植已在江苏溧阳、常熟、句容以及浙江杭州等地初步恢复,其中溧阳和杭州再生稻的总产量高达12.8 t·hm⁻²和15.6 t·hm⁻²^[8-9]。太湖流域与四川、重庆、湖北等省市同样地处中纬度地区,水热条件充足,再生稻发展潜力巨大,但在太湖流域改种再生稻究竟能增产多少,哪些再生稻品种更具优势尚未可知。

种植再生稻较常规中稻需要提前移栽、收获以保证再生季有充足的光热资源,因而对水稻品种具有较高要求,且水稻生育期、田间水肥管理时间及施肥模式与单季稻作模式完全不同,这必然会影响稻田的温室气体排放规律与排放量。王天宇等^[10]在安徽巢湖流域稻麦轮作转为再生稻模式的研究表明,种植再生

稻不仅能提高水稻产量,而且能大幅减少水稻生长季CH₄和N₂O排放总量和温室气体排放强度。目前,在我国再生稻发展迅猛的地区(如湖北、湖南、四川等地)已有再生稻田的温室气体排放通量观测报道^[11-13],而再生稻发展相对缓慢的太湖流域尚未开展相关研究。因此本研究于江苏宜兴试验基地开展田间原位观测实验,分析了5个再生稻品种的生长状况、稻谷产量及CH₄和N₂O排放通量,同步测定了土壤氧化还原电位(Eh)、土壤铵态氮(NH₄⁺-N)和硝态氮(NO₃⁻-N)浓度,以期明确太湖流域种植再生稻的可行性以及CH₄和N₂O排放规律,为太湖流域推广种植再生稻提供数据参考。

1 材料和方法

1.1 实验设计

大田实验于2021年4—10月在江苏省宜兴市丁蜀镇漳渎村(119.91°E, 31.28°N)开展。该地区属于亚热带季风气候,年平均气温15.5℃,多年平均降水量为1391 mm,日照充足,生长期可达250 d左右,传统的种植制度是稻麦轮作。供试的土壤类型为黄泥土,土壤全碳含量为26.2 g·kg⁻¹,全氮含量为1.1 g·kg⁻¹,pH为6.32。

实验共选取5个再生稻品种:早优73、甬优2640、丰两优香1号、C两优华占和两优6326。每个处理设置4次重复,采用随机区组设计。每个实验小区的面积为7.5 m²(2.5 m×3 m),水稻于4月20日移栽,株行距为25 cm×20 cm,每穴移栽2棵;8月10日早优73、丰两优香1号和两优6326中稻季收获,18日甬优2640和C两优华占中稻季收获;10月26日所有水稻再生季收获。尿素157 kg·hm⁻²、过磷酸钙(以P₂O₅计)60 kg·hm⁻²和氯化钾(以KCl计)45 kg·hm⁻²作为基肥于4月20日施用;尿素209、157 kg·hm⁻²和150 kg·hm⁻²分别作为分蘖肥、穗肥和促芽肥于5月10日、6月20日和8月1日施用;尿素150 kg·hm⁻²作为再生季发苗肥施用,其中早优73、丰两优香1号和两优6326处理的发苗肥于8月9日施用,甬优2640和C两优华占于8月18日施用。中稻季的水分管理为前期淹水、中期烤田,烤田后复水直至头季稻收割前一周排水落

干。再生季在头季稻收割后立刻灌水,浅水勤灌,灌浆期转为干湿交替模式。

1.2 田间样品采集

CH₄和N₂O的排放通量通过静态箱法采集,箱体由有机玻璃制成,箱高0.5 m,中稻或再生稻生长后期加高至1.1 m以保证植株正常生长,覆盖面积为0.25 m²(0.5 m×0.5 m)。底座于水稻移栽前埋入各小区内,底座规格为0.5 m×0.5 m×0.15 m,底座中移栽6茼水稻,上方有3 cm深的凹槽。每次采样时,需向凹槽中注入一定量的水,以保证静态箱放入底座凹槽后具有良好的密闭性。采样时间为上午8:30—11:00。采样时,用两通针将静态箱内气体导入事先抽好真空的20 mL玻璃瓶中,各采样点每20 min采样一次,共采集4次。水稻生长季每4 d采样1次,烤田及施肥前后加密采样^[10]。

采集气体样品的同时,用数字温度计记录气温、箱温及10 cm处土温;用Eh计测定氧化还原电位。此外,在水稻不同生育期采集土壤样品测定土壤中NH₄⁺-N和NO₃⁻-N的含量。头季稻、再生稻收割后,分别按小区脱粒、晾晒称质量,计算水稻产量。

1.3 样品分析

气体样品浓度使用安捷伦气相色谱(Agilent 7890B)测定,其中CH₄浓度用氢火焰离子化检测器(FID)测定,N₂O浓度用⁶³Ni电子捕获检测器(ECD)测定。CH₄和N₂O混合标准气体由中国计量科学研究院提供。

土壤样品分析:称取10 g土壤于250 mL的聚乙烯瓶中,加入50 mL的KCl浸提液(浓度为2 mol·L⁻¹),300 r·min⁻¹振荡1 h,经0.45 μm滤膜过滤,过滤液用连续流动分析仪(Skalar, Netherlands)测定NH₄⁺-N和NO₃⁻-N含量。土壤样品在105 ℃下烘干8 h,测定土壤含水率。

1.4 数据处理

CH₄和N₂O排放通量的计算公式^[14]:

$$F = \rho \times \frac{V}{A} \times \frac{dc}{dt} \times \frac{273}{T}$$

式中: F 为CH₄或N₂O排放通量,mg·m⁻²·h⁻¹或μg·m⁻²·h⁻¹(以N₂O-N计,下同); ρ 为标准状态下CH₄或N₂O-N密度,0.714 kg·m⁻³或1.25 kg·m⁻³; V 为采样箱内有效体积,m³; A 为采样箱所覆盖的土壤面积,m²; dc/dt 为单位时间内采样箱内CH₄或N₂O浓度变化,μL·L⁻¹·h⁻¹或nL·L⁻¹·h⁻¹; T 为采样箱温度,K。

CH₄和N₂O的季节排放总量的计算公式^[14]:

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

式中: T 为CH₄或N₂O的季节总排放量,g·m⁻²或mg·m⁻²(以N₂O-N计,下同); F_i 和 F_{i+1} 分别为第 i 次和第 $i+1$ 次采样时CH₄或N₂O排放通量,mg·m⁻²·h⁻¹或μg·m⁻²·h⁻¹; D_i 和 D_{i+1} 分别为第 i 和 $i+1$ 次的采样时间,d。CH₄和N₂O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,处理间用4个重复的平均值进行方差分析和多重比较。

根据单位质量的CH₄和N₂O在100 a时间尺度上的全球增温潜势分别为CO₂的28倍和265倍^[15],计算不同处理排放CH₄和N₂O的温室气体全球增温潜势,公式如下:

$$TGHG = T_{CH_4} \times 28 + T_{N_2O} \times 265$$

式中: $TGHG$ 为CH₄和N₂O的温室气体总量,t CO₂ e·hm⁻²; T_{CH_4} 和 T_{N_2O} 为CH₄和N₂O的季节排放总量,t·hm⁻²。

温室气体排放强度(Greenhouse gas intensity, GHGI)是农业生产中综合评价温室效应的指标^[16],公式如下:

$$GHGI = \frac{TGHG}{Y}$$

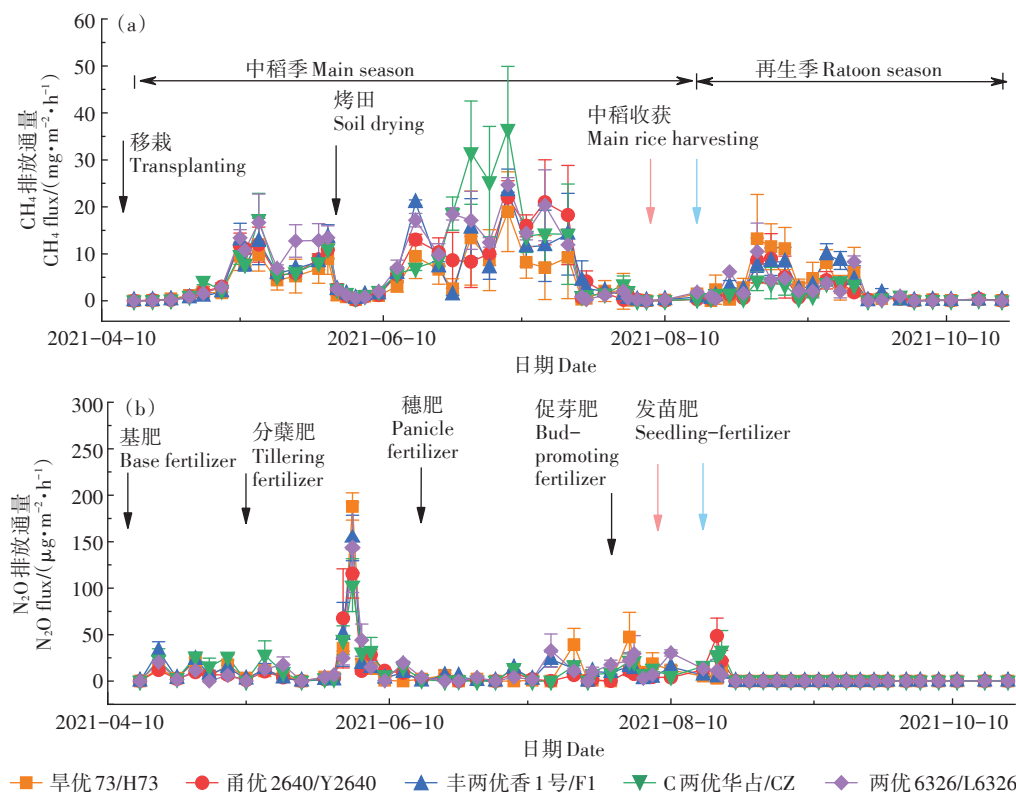
式中: $GHGI$ 为温室气体排放强度,t CO₂ e·t⁻¹, $TGHG$ 为CH₄和N₂O的温室气体排放总量,t CO₂ e·hm⁻²; Y 为作物产量,t·hm⁻²。

2 结果与分析

2.1 CH₄排放

稻季CH₄排放通量如图1a所示,从图中可以看出,各品种再生稻CH₄的季节排放规律大体相同,CH₄排放峰依次出现在中稻季的分蘖期和抽穗前后以及再生季的前期,其中中稻季抽穗前后的峰值最高,这段时期里排放的CH₄量占稻季CH₄排放总量的43.5%~69.2%,再生季前期的排放峰值比中稻季抽穗前后低39.2%~88.5%;中稻季分蘖期和抽穗前后的CH₄排放峰值按从大到小依次为C两优华占>两优6326>丰两优香1号>甬优2640>早优73,而再生季前期各品种CH₄排放峰值从大到小依次为两优6326>早优73>甬优2640>丰两优香1号>C两优华占。

5个再生稻品种的CH₄排放都集中在中稻季,变化范围是161~233 kg·hm⁻²(表1),占稻季排放总量的77.0%~91.7%,其中C两优华占中稻季的占比最大,早优73的占比最小;再生季的CH₄排放量占稻季CH₄排放总量的8.3%~23.0%,其中早优73的占比最大,C



红色箭头表示旱优 73、丰两优香 1 号和两优 6326 中稻收获/发苗肥施用;蓝色箭头表示甬优 2640 和 C 两优华占中稻收获/发苗肥施用
Red arrows mean main rice harvesting/seedling fertilization in H73, F1, and L6326, while blue arrows mean main rice harvesting/seedling fertilization in Y2640 and CZ

图 1 CH₄和N₂O排放通量的季节变化

Figure 1 Seasonal variations of CH₄ and N₂O fluxes during the rice-growing season

表 1 稻季 CH₄和 N₂O 排放量、温室气体排放总量、产量和温室气体排放强度

Table 1 CH₄ and N₂O emissions, *TGHG*, rice grain yield, and *GHGI* during the rice-growing season

品种 Cultivar		旱优 73	甬优 2640	丰两优香 1 号	C 两优华占	两优 6326
CH ₄ 排放量 CH ₄ emission/ (kg·hm ⁻²)	中稻季 Main season	161±9b	191±22ab	182±27ab	233±37a	229±8a
	再生季 Ratoon season	48±4a	29±13b	44±3a	21±6b	60±5a
	总计 Total	209±10b	220±15b	226±25b	254±42ab	289±11a
N ₂ O 排放量 N ₂ O emission/ (kg·hm ⁻²)	中稻季 Main season	0.477±0.029a	0.378±0.039b	0.476±0.039a	0.496±0.033a	0.545±0.027a
	再生季 Ratoon season	0.004±0.002a	0.008±0.004a	0.003±0.001a	0.012±0.008a	0.003±0.001a
	总计 Total	0.481±0.028a	0.386±0.115a	0.479±0.079a	0.508±0.012a	0.548±0.154a
温室气体总排放量 <i>TGHG</i> / (t CO ₂ e·hm ⁻²)	中稻季 Main season	4.56±0.24b	5.46±0.62ab	5.21±0.74ab	6.68±1.03a	6.58±0.23a
	再生季 Ratoon season	1.34±0.11ab	0.81±0.37bc	1.23±0.07b	0.58±0.17c	1.68±0.14a
	总计 Total	5.90±0.24b	6.27±0.44ab	6.44±0.70ab	7.26±1.16ab	8.26±0.30a
产量 Yield/ (t·hm ⁻²)	中稻季 Main season	6.65±0.48b	8.28±0.56a	6.58±0.12b	6.79±0.44b	4.53±0.81c
	再生季 Ratoon season	3.13±0.47c	4.34±0.10a	3.82±0.99b	2.15±0.74d	1.59±0.14e
	总计 Total	9.78±0.95b	12.62±2.66a	10.40±1.11b	9.04±1.28b	6.12±0.95c
温室气体排放强度 <i>GHGI</i> / (t CO ₂ e·t ⁻¹)	中稻季 Main season	0.68±0.03bc	0.66±0.07c	0.79±0.11bc	0.97±0.15b	1.45±0.05a
	再生季 Ratoon season	0.43±0.04b	0.19±0.09c	0.33±0.02bc	0.27±0.08bc	1.06±0.08a
	总计 Total	0.62±0.05b	0.50±0.06c	0.62±0.10b	0.80±0.22b	1.35±0.11a

注:表中数据为平均值±标准差(n=4),同一列不同字母代表品种间存在显著差异(P<0.05)。下同。

Note: The data were presented as the mean ± standard deviation (n=4). Different lowercase letters within the same column indicate significant differences among cultivars (P<0.05). The same below.

两优华占的占比最小。整个稻季的 CH_4 累积排放量从大到小依次为两优6326>C两优华占>丰两优香1号>甬优2640>早优73(表1),其中两优6326的排放总量最高,显著高于早优73、甬优2640和丰两优香1号($P<0.05$),其他各品种间不存在显著差异($P>0.05$)。

2.2 N_2O 排放

不同品种再生稻的 N_2O 季节排放规律也基本相同,整体呈现波动状态, N_2O 排放峰主要出现在施肥和水分改变以后(图1b)。其中,中稻季烤田期的峰值最高,这段时期里排放的 N_2O 量占稻季 N_2O 排放总量的20.9%~30.4%,促芽肥和发苗肥施用后的 N_2O 排放峰值分别比中稻季烤田期低79.5%~93.4%和57.8%~98.4%。烤田期 N_2O 排放峰值按从大到小依次为早优73>丰两优香1号>两优6326>甬优2640>C两优华占。

不同品种再生稻的 N_2O 排放也主要集中在中稻季,其变化范围是 $0.378\sim 0.545\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ (表1)。中稻季占稻季 N_2O 排放总量的97.6%~99.5%,其中两优6326的占比最高;再生季 N_2O 排放量占稻季 N_2O 排放总量的0.5%~2.4%,其中C两优华占占比最大,两优6326占比最低(表1)。稻季 N_2O 累积排放总量从大到小依次为两优6326>C两优华占>早优73>丰两优香1号>甬优2640,各品种间的 N_2O 排放总量均不存在显著性差异($P>0.05$,表1)。

2.3 产量、温室气体排放总量和温室气体排放强度

由表1可知,不同品种再生稻两季总产量从大到小依次为甬优2640>丰两优香1号>早优73>C两优华占>两优6326。中稻季产量是再生季产量的1.7~3.2倍,在总产量中占比为63.3%~75.1%。

稻季温室气体排放总量从大到小依次为两优6326>C两优华占>丰两优香1号>甬优2640>早优73,早优73的排放总量显著低于两优6326($P<0.05$,表1)。5个再生稻品种的温室气体排放强度为 $0.50\sim 1.35\text{ t CO}_2\text{ e}\cdot\text{t}^{-1}$,其中甬优2640的温室气体排放强度最低,显著低于其他品种($P<0.05$,表1)。

3 讨论

3.1 CH_4 排放

稻田 CH_4 排放是土壤中 CH_4 产生、氧化和传输的净效应。严格厌氧环境和易降解有机物质是稻田土壤 CH_4 产生的两个最基本要素^[14,17-18],因此与之密切相关的田间水分管理和有机肥施用对 CH_4 排放的影响

也最显著。整个稻季共出现了3个排放峰,依次在中稻季分蘖期和抽穗前后以及再生季前期(图1a)。其中,分蘖期和再生季前期由于稻田均处于淹水状态,而抽穗前后的总降水量多达610 mm,占整个稻季总降水量的45%。因此,中稻季的前期和抽穗前后以及再生季的前期,土壤的氧化还原电位均为负值(图2a),有利于 CH_4 的产生和排放。中稻季抽穗前后的 CH_4 排放峰值高于分蘖期(图1a),原因可能是抽穗前后的土壤温度高于分蘖期(图3),且水稻植株发育更完全,根系分泌物和凋落物增多,有利于 CH_4 的产生和排放^[18-19]。

整个稻季的土壤温度呈先上升后下降的趋势(图3),相关性分析显示, CH_4 排放通量与土壤温度存在极显著正相关关系($P<0.01$,表2)。再生季的平均土壤温度较中稻季低 $1.2\text{ }^\circ\text{C}$ (图3),地上生物量仅是中稻的一半左右,较低的土温和较少的植株可能影响土壤产甲烷菌的活性以及 CH_4 向大气传输的速率^[20],从而导致再生季 CH_4 排放峰值较低(图1a)。两季 CH_4 排放总量范围为 $209\sim 289\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,与SONG等^[13]在四川的研究结果相当,但比张浪等^[12]在湖南的研究结果低54.1%~65.7%,比王天宇等^[10]在安徽的结果低73.2%~79.9%。这可能是由于本研究的磷肥施用量较低($60\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$),磷的添加会促进土壤中碳的矿化,从而影响产 CH_4 底物水平^[21]。再生季的 CH_4 排放量仅占稻季排放总量的8.3%~23.0%(表1),与以往研究结果相当^[11,13,22]。

水稻品种是土壤 CH_4 产生、氧化和传输的一个重要影响因素^[17-18]。水稻根系分泌物和脱落物是稻田土壤中重要的产 CH_4 前体,不同水稻品种根系分泌物量和组成成分各不相同,从而影响 CH_4 的产生。植株的通气组织是稻田 CH_4 排放的主要途径^[23],不同水稻品种通气组织的发育情况不同,传输 CH_4 的能力也存在差异。5个再生稻品种中,两优6326的 CH_4 排放量较大(表1),可能是因为植株生长发育较好,其根系分泌物和脱落物多于其他品种,植株传输能力也强于其他品种,武茹等^[24]在湖北的研究中,同样观察到生长较好的再生稻品种具有较大的 CH_4 排放量。另一方面,5种再生稻稻季土壤平均Eh从大到小依次为早优73(-63.06 mV)>丰两优香1号(-65.98 mV)>甬优2640(-69.51 mV)>两优6326(-70.60 mV)>C两优华占(-73.89 mV),与品种间稻季 CH_4 排放量大小排序相同;相关分析也显示, CH_4 排放通量与土壤Eh存在极显著负相关关系($P<0.01$,表2),由此可知,土壤

Eh不同也是再生稻品种间存在CH₄排放差异的原因。

3.2 N₂O 排放

N₂O主要是通过硝化作用和反硝化作用产生,再经植株通气组织、气泡和液相扩散进入大气中^[14]。氮肥的施用为硝化和反硝化反应提供了底物^[25],土壤水分的剧烈变化加快了硝化和反硝化速率^[25],因此,土壤水分和氮肥施用是影响N₂O排放的关键因素。本研究中,整个稻季N₂O的峰值均出现在施肥或土壤水分发生剧烈变化时,与丁紫娟等^[26]在湖北的研究结果相同。其中,烤田期间的N₂O排放峰值最高,可能是由于此期间土壤水分变化最为剧烈,且此时土壤温度最高(图3),均有利于N₂O的产生和排放。施用促芽肥和发苗肥后也出现排放峰,但峰值较小,邓桥江^[11]在湖北观测到N₂O排放量为3.28 kg·hm⁻²,再生季占比为49.1%,均远高于本研究结果,这可能与稻田再

生季始终保持浅水层,水分变化不大有关。

水稻品种同样也影响土壤N₂O的产生、转化和传输过程。不同水稻植株对氮肥吸收利用程度不同,从而影响参与硝化反硝化作用的底物数量^[27];植株根系分泌物和凋落物为微生物提供有机碳,增强微生物活性^[28];植株是稻田N₂O排放的重要通道^[29],水稻品种不同,气体传输效率也存在差异。但SIMMOND等^[30]的研究发现水稻品种间N₂O排放量没有显著差异,与本实验结果一致。值得注意的是,两优6326所处的稻田土壤中平均NH₄⁺和NO₃⁻含量高于其他品种(图2b和图2c),且相关性分析表明,N₂O排放通量与土壤中NH₄⁺-N存在正相关关系($P>0.05$,表2)。NH₄⁺和NO₃⁻是土壤硝化作用和反硝化作用产生N₂O的基质,因此两优6326的N₂O排放量比其他品种高7.9%~42.0%(表1)。FENG等^[27]的研究发现,7Y88和7Y370两种水稻

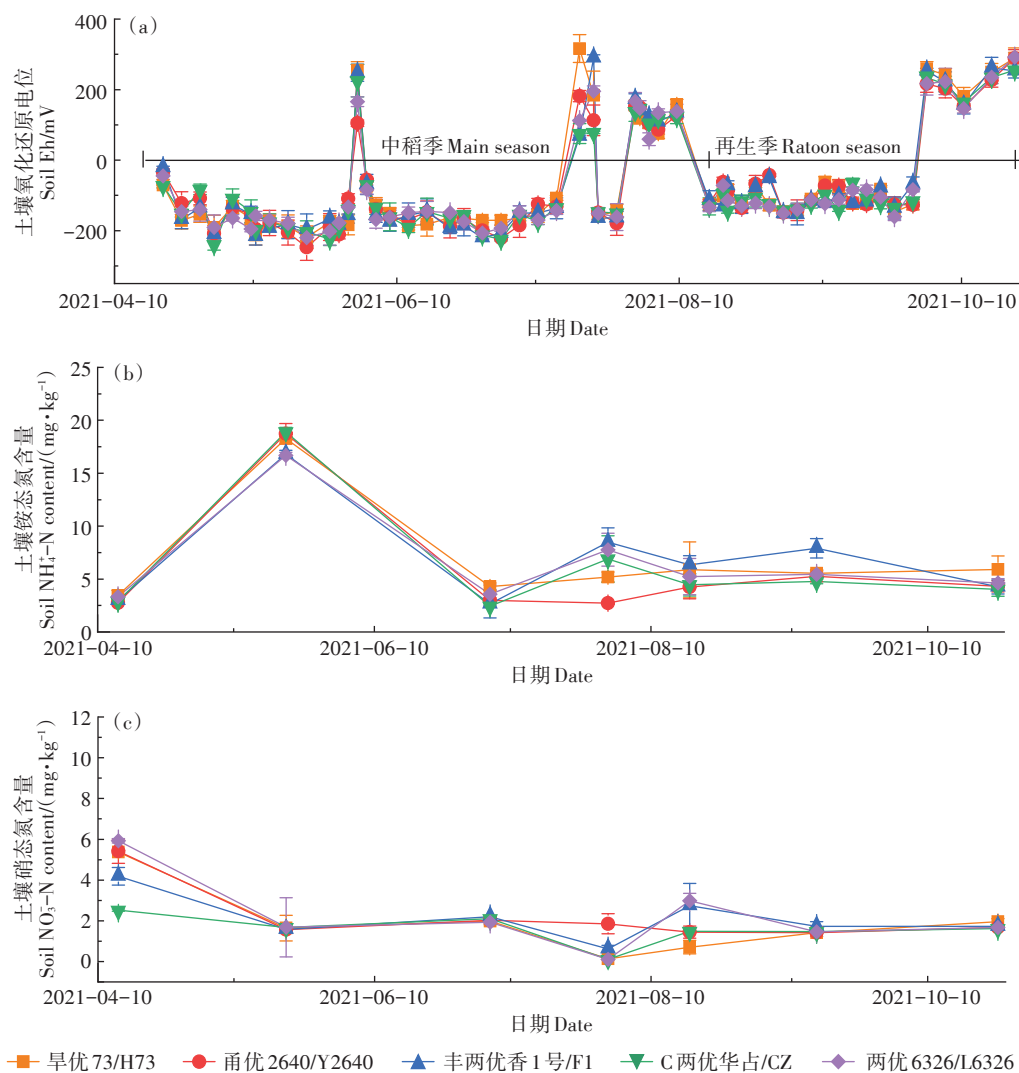


图2 稻季土壤Eh、NH₄⁺-N和NO₃⁻-N动态变化

Figure 2 Dynamic changes of soil Eh, NH₄⁺-N, and NO₃⁻-N during the rice-growing season

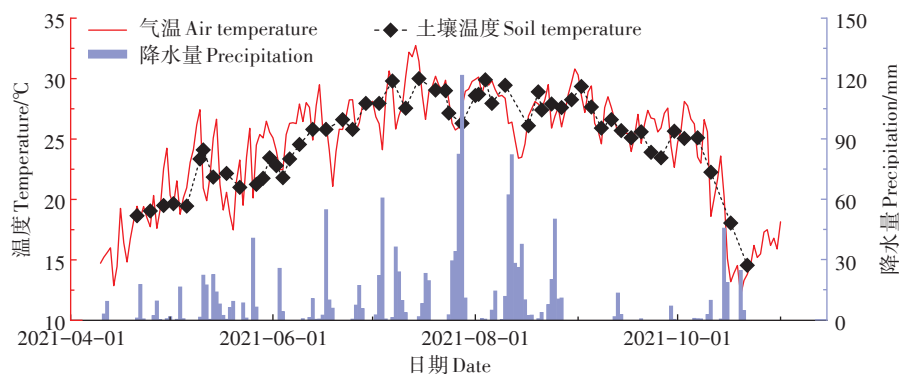


图3 稻季气温、降水量及土壤温度的动态变化

Figure 3 Dynamic changes of air temperature, precipitation, and soil temperature during the rice-growing season

表2 稻季CH₄和N₂O排放通量与土壤温度、Eh、NH₄⁺-N、NO₃⁻-N的相关系数Table 2 Correlation coefficients of CH₄ and N₂O fluxes with soil temperature (T), Eh, NH₄⁺-N, and NO₃⁻-N during the rice-growing season

品种 Cultivar	CH ₄ -T	CH ₄ -Eh	CH ₄ -NH ₄ ⁺ -N	CH ₄ -NO ₃ ⁻ -N	N ₂ O-T	N ₂ O-Eh	N ₂ O-NH ₄ ⁺ -N	N ₂ O-NO ₃ ⁻ -N
早优73	0.510**	-0.374**	-0.350	-0.215	-0.112	-0.104	0.412	-0.574
甬优2640	0.474**	-0.375**	-0.644**	-0.387	-0.123	-0.097	0.872*	-0.061
丰两优香1号	0.489**	-0.396**	-0.744**	-0.319	-0.120	-0.097	0.564	-0.123
C两优华占	0.413**	-0.374**	-0.632*	-0.319	-0.080	-0.031	0.123	-0.239
两优6326	0.465**	-0.432**	-0.291	-0.097	-0.047	-0.049	0.239	-0.432

注: *表示在 $P<0.05$ 水平的显著相关性, **表示在 $P<0.01$ 水平上的显著相关性。

Note: * indicates significant correlation at $P<0.05$ level, ** indicates significant correlation at $P<0.01$ level.

吸收同化了更多的氮素,减少了硝化和反硝化作用的基质,降低了N₂O的排放,由此推测两优6326有较大N₂O排放可能是由于与其他品种相比,吸收利用的氮素较少。其他可能影响再生稻N₂O排放的原因和机制还需深入研究。

3.3 温室气体排放强度

统计分析结果表明,我国再生稻中稻季、再生季及两季总的平均产量分别为8.26、3.64和11.69 t·hm⁻²。5个水稻品种中,总产量从大到小的排序为甬优2640>丰两优香1号>早优73>C两优华占>两优6326。其中,甬优2640和丰两优香1号的两季总产量分别达到12.62 t·hm⁻²和10.40 t·hm⁻²(表1),与我国平均值相当,且这两种再生稻再生季的产量(4.34 t·hm⁻²和3.82 t·hm⁻²)略高于全国再生季平均值以及狄田荣^[8]在溧阳的研究结果(3.76 t·hm⁻²),说明甬优2640和丰两优香1号这两种再生稻在太湖流域有较好的发展潜力。本研究的中稻季产量低于溧阳^[8]和杭州^[9]报道的产量,这可能与栽插密度和施肥量略低有关,后期可以考虑适当调整栽插密度和施肥措施,并加强田间管理,以进一步挖掘太湖流域再生稻的产量潜力。

各处理的温室气体排放总量为5.90~8.26 t CO₂ e·hm⁻²,与SONG等^[13]在四川的研究结果(6.39 t CO₂ e·hm⁻²)相当。通常情况下,CH₄排放量对温室气体排放总量起决定性影响^[24],与其他两个水稻品种相比,早优73、丰两优香1号和甬优2640的CH₄排放量较小,导致温室气体总排放量也较低。温室气体排放强度是温室气体排放总量与产量的比值,代表单位产量的温室气体排放量,可以以此为依据筛选再生稻品种。各处理温室气体排放强度从大到小依次为两优6326>C两优华占>早优73=丰两优香1号>甬优2640,与再生稻两季总产量的排序相反,表明产量对于温室气体排放强度的影响可能更大。甬优2640的温室气体排放强度显著低于其他品种,原因在于该品种再生稻的产量比其他品种高21.3%~106.2%,且温室气体总排放量低-6.3%~24.1%。SONG等^[32]在四川种植的再生稻品种晶两优华占,与其他4个品种相比,温室气体排放强度最低、产量最高,但温室气体排放总量却仅低于渝香203,也说明产量对温室气体排放强度的影响较大。此外,本研究中所有品种再生季温室气体排放强度均显著低于中稻季,与SONG等^[32]的研究结果相反,这是由于再生季的水稻产量相对较高,

而温室气体排放较低。因此,在太湖流域种植再生稻可一定程度上降低温室气体排放强度。综合来看,甬优2640和丰两优香1号的产量较高,温室气体排放强度较低,在太湖流域种植再生稻时可优先考虑这两个品种。

4 结论

(1)不同再生稻品种间的产量和温室气体排放总量存在较大差异,其中甬优2640和丰两优香1号的两季产量最高,两优6326的最低;早优73的温室气体排放总量最小,两优6326的最大。

(2)从温室气体排放强度来看,甬优2640和丰两优香1号的最小,说明这两个水稻品种蓄留再生稻具有减排丰产潜力,推荐在太湖流域种植。在碳达峰、碳中和背景下,需进一步挖掘高产低排的、适于在太湖流域种植的再生稻品种,并配套相应的水肥管理措施,以期在保障国家粮食安全的同时有效控排稻田温室气体,推动气候变化下韧性农业种植新模式的建立。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] XU F X, ZHANG L, ZHOU X B, et al. The ratoon rice system with high yield and high efficiency in China: Progress, trend of theory and technology[J]. *Field Crops Research*, 2021, 272: 108282.
- [3] 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.
- [4] 赵锦, 杨晓光, 刘志娟, 等. 全球气候变暖对中国种植制度可能影响. II 南方地区气候要素变化特征及对种植制度界限可能影响[J]. 中国农业科学, 2010, 43(9): 1860-1867. ZHAO J, YANG X G, LIU Z J, et al. The possible effect of global climate changes on cropping systems boundary in China. II The characteristics of climatic variables and the possible effect on northern limits of cropping systems in south China[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2010, 43(9): 1860-1867.
- [5] 李克南, 杨晓光, 刘志娟, 等. 全球气候变化对中国种植制度可能影响分析. III 中国北方地区气候资源变化特征及其对种植制度界限的可能影响[J]. 中国农业科学, 2010, 43(10): 2088-2097. LI K N, YANG X G, LIU Z J, et al. Analysis of the potential influence of global climate change on cropping systems in China. III The change characteristics of climatic resources in northern China and its potential influence on cropping systems[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2010, 43(10): 2088-2097.
- [6] CHEN C Q, GROENIGEN K J, YANG H Y, et al. Global warming and shifts in cropping systems together reduce China's rice production[J]. *Global Food Security*, 2020, 24: 100359.
- [7] 于格, 刘爱民. 我国小麦供求平衡研究[J]. 中国粮食经济, 2003(11): 9-11. YU G, LIU A M. Research on the balance of supply and demand for wheat[J]. *China Grain Economy*, 2003(11): 9-11.
- [8] 狄田荣, 陆伟英. 溧阳市杂交籼稻再生栽培技术初步研究[J]. 上海农业科技, 2020(1): 46-47, 49. DI T R, LU W Y. A preliminary study on the regeneration and cultivation techniques of hybrid indica rice in Liyang City[J]. *Shanghai Agricultural Science and Technology*, 2020(1): 46-47, 49.
- [9] 方文英, 李连松, 戴水高. 浙北地区再生稻栽培技术探讨与效益分析[J]. 中国稻米, 2019, 25(3): 132-134. FANG W Y, LI L S, DAI S G. Techniques of ratoon rice in northern Zhejiang Province and its benefit[J]. *China Rice*, 2019, 25(3): 132-134.
- [10] 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.
- [11] 邓桥江. 栽培模式对再生稻稻田土壤肥力、温室气体排放与产量的影响研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2019: 25-28. DENG Q J. Effects of cultivation modes on soil fertility, greenhouse gases emission and yield in ratoon rice fields[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2019: 25-28.
- [12] 张浪, 徐华勤, 李林林, 等. 再生稻和双季稻田CH₄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 CH₄ emission from ratoon rice and double-cropping rice fields[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2019, 52(12): 2101-2113.
- [13] SONG K F, ZHANG G B, YU H Y, et al. Evaluation of methane and nitrous oxide emissions in a three-year case study on single rice and ratoon rice paddy fields[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2021, 297(1): 126650.
- [14] 蔡祖聪, 徐华, 马静. 稻田生态系统CH₄和N₂O排放[M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2009. CAI Z C, XU H, MA J. Methane and nitrous oxide emissions from rice-based ecosystems[M]. Hefei: University of Science and Technology of China Press, 2009.
- [15] IPCC. Summary for policymakers. Climate changes 2013: The physical science basis. Contribution of working group I to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2013: 714.
- [16] 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.
- [17] 贾仲君, 蔡祖聪. 水稻植株对稻田甲烷排放的影响[J]. 应用生态学报, 2003, 14(11): 2049-2053. JIA Z J, CAI Z C. Effects of rice plants on methane emission from paddy fields[J]. *Chinese Journal of*

- Applied Ecology*, 2003, 14(11):2049–2053.
- [18] LIN C W, BOLLIKH P K, DELAUNE R D. Effect of rice variety on methane emission from Louisiana rice[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 1995, 54(1/2):109–114.
- [19] WIN E P, WIN K K, KIMURA S D, et al. Influence of rice varieties, organic manure and water management on greenhouse gas emissions from paddy rice soils[J]. *PLoS One*, 2021, 16(6):e0253755.
- [20] 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 CH₄ emission from rice field[J]. *Agro-Environmental Protection*, 1999, 18(4):145–149.
- [21] FISK M, SANTANGELO S, MINICK K. Carbon mineralization is promoted by phosphorus and reduced by nitrogen addition in the organic horizon of northern hardwood forests[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2015, 81:212–218.
- [22] 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 CH₄ 和 N₂O 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 CH₄ and N₂O emission under the ratoon rice system[J]. *Hubei Agricultural Sciences*, 2020, 59(15):60–65.
- [23] 李思宇. 稻田温室气体排放水稻品种间差异及其机理研究[D]. 扬州:扬州大学, 2020:36–40. LI S Y. Greenhouse gas emission from paddy field in different rice cultivars and its possible mechanism[D]. Yangzhou: Yangzhou University, 2020:36–40.
- [24] 武茹, 王姣梅, 夏胜明, 等. 长江中下游地区杂交中稻再生稻品种适应性的综合评价与筛选[J]. 华中农业大学学报, 2020, 39(3):19–27. WU R, WANG J M, XIA S M, et al. Comprehensive evaluation and screening of adaptability of mid-season hybrid rice ratooning varieties in the middle-lower reaches of Yangtze River[J]. *Journal of Huazhong Agricultural University*, 2020, 39(3):19–27.
- [25] XIONG Z Q, XING G X, ZHU Z L. Nitrous oxide and methane emissions as affected by water, soil and nitrogen[J]. *Pedosphere*, 2007, 17(2):146–155.
- [26] 丁紫娟, 徐洲, 田应兵, 等. 再生稻干湿交替灌溉与根区分层施氮减少温室气体排放[J]. 灌溉排水学报, 2021, 40(7):51–58. DING Z J, XU Z, TIAN Y B, et al. Reducing gas emissions from ratooning rice field using controlled nitrogen fertilization and alternate wetting-drying irrigation[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2021, 40(7):51–58.
- [27] FENG Z Y, QIN T, DU X Z, et al. Effects of irrigation regime and rice variety on greenhouse gas emissions and grain yields from paddy fields in central China[J]. *Agricultural Water Management*, 2021, 250:106380.
- [28] 伍玉鹏, 彭其安, SHAABAN M, 等. 秸秆还田对土壤微生物影响的研究进展[J]. 中国农学通报, 2014, 30(29):175–183. WU Y P, PENG Q A, SHAABAN M, et al. Research progress of effect of straw returning on soil microorganism[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2014, 30(29):175–183.
- [29] YAN X Y, SHI S, XING G. Pathways of N₂O emission from rice paddy soil[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2000, 32(3):437–440.
- [30] SIMMONDS M B, ANDERS M, ADVIENTO-BORBR M A, et al. Seasonal methane and nitrous oxide emissions of several rice cultivars in direct-seeded systems[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2015, 44(1):103–114.
- [31] 曹玉贤, 朱建强, 侯俊. 中国再生稻的产量差及影响因素[J]. 中国农业科学, 2020, 53(4):707–719. CAO Y X, ZHU J Q, HOU J. Yield gap of ratoon rice and their influence factors in China[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2020, 53(4):707–719.
- [32] SONG K F, ZHANG G B, MA J, et al. Greenhouse gas emissions from ratoon rice fields among different varieties[J]. *Field Crops Research*, 2022, 277:108423.

(责任编辑:宋潇)