



农田管理对夜间增温稻-麦农田 CH_4 和 N_2O 排放强度的影响

陈佳义, 李君, 娄运生, 张震, 马莉, 李睿

引用本文:

陈佳义, 李君, 娄运生, 张震, 马莉, 李睿. 农田管理对夜间增温稻-麦农田 CH_4 和 N_2O 排放强度的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2023, 42(5): 1166–1180.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11654/jaes.2022-0922>

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>

[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>

[秸秆还田条件下灌溉方式对双季稻产量及农田温室气体排放的影响](#)

成臣, 杨秀霞, 汪建军, 程慧煌, 罗亢, 曾勇军, 石庆华, 商庆银

农业环境科学学报. 2018, 37(1): 186–195 <https://doi.org/10.11654/jaes.2017-0893>

[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, 娄运生, 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>

[不同水旱轮作模式全生命周期温室效应及经济效益评价](#)

岳骞, 吴思远, 张岳芳, 盛婧, 郭智, 陈丹艳, 汪超, 徐向瑞, 王鑫, 宗焦

农业环境科学学报. 2022, 41(8): 1825–1835 <https://doi.org/10.11654/jaes.2021-1433>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

陈佳义, 李君, 娄运生, 等. 农田管理对夜间增温稻-麦农田 CH_4 和 N_2O 排放强度的影响[J]. 农业环境科学学报, 2023, 42(5): 1166–1180.
CHEN J Y, LI J, LOU Y S, et al. Effects of management practices on the emission intensity of CH_4 and N_2O in a rice-wheat rotated field under nighttime warming[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2023, 42(5): 1166–1180.

农田管理对夜间增温稻-麦农田 CH_4 和 N_2O 排放强度的影响

陈佳义^{1,3}, 李君², 娄运生^{1,2*}, 张震², 马莉², 李睿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; 3.江苏省淮安市淮阴区气象局, 江苏 淮安 223300)

摘要:为研究夜间增温下农田管理(节水灌溉/晚播)对稻-麦轮作农田作物产量及 CH_4 和 N_2O 排放的影响,采用2因素2水平试验设计进行田间模拟试验。夜间温度设2水平,即常温对照(CK)和夜间增温(NW),用铝箔膜夜间(19:00—次日6:00)覆盖植株冠层模拟夜间增温。水稻季水分管理设2水平,即常规灌溉(F,间歇淹水,5 cm水层)和节水灌溉(M,湿润,无水层);冬小麦季播期设2水平,即正常播期(NS)和晚播(LS)。结果表明:与对照相比,夜间增温或湿润灌溉均降低水稻生物量和产量,降幅分别为14.69%~18.16%和7.27%~9.14%;而增温下适度晚播则使冬小麦产量增加0.71%。与常温淹水灌溉相比,夜间增温或湿润灌溉均显著降低稻田 CH_4 排放通量,但湿润灌溉下夜间增温则显著提高稻田 CH_4 排放通量。常温对照下,与淹水灌溉相比,湿润灌溉使稻田 CH_4 累积排放量降低79.46%,而使 N_2O 累积排放量增加97.21%。夜间增温下,与淹水灌溉相比,湿润灌溉使稻田 CH_4 和 N_2O 的累积排放量分别增加39.98%和45.62%。晚播使麦田 N_2O 累积排放量降低21.46%~53.77%。用持续变化全球增温/冷却潜势(SGWP/SGCP)评估稻田和麦田温室气体排放对稻麦系统增温潜势的贡献,各处理稻田 CH_4 排放的贡献均为主导作用。夜间增温显著降低淹水/正常播期稻麦轮作系统温室气体排放强度(GHGI),显著增加湿润/晚播稻麦轮作系统的GHGI。研究认为,综合考虑产量和环境效益,水稻季采用常规灌溉和冬小麦季正常播种是长江下游稻麦轮作农田应对气候变暖的有效技术措施。

关键词:夜间增温;稻麦轮作;甲烷;氧化亚氮;排放强度

中图分类号:X71; X16 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2023)05-1166-15 doi:10.11654/jaes.2022-0922

Effects of management practices on the emission intensity of CH_4 and N_2O in a rice-wheat rotated field under nighttime warming

CHEN Jiayi^{1,3}, LI Jun², LOU Yunsheng^{1,2*}, ZHANG Zhen², MA Li², LI Rui²

(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; 3. Huai'an Huaiyin District Meteorological Bureau, Huai'an 223300, China)

Abstract: Climate change and water shortage are the two important drivers of food insecurity. It is a common concern of humankind to improve the food production potential to cope with climate change by adopting the best management practices (e.g., irrigation methods and sowing date). A field-scale simulation experiment was performed to quantify the effects of management practices (water-saving irrigation and late sowing) on yield and greenhouse gas emissions (CH_4 and N_2O) in a rice-wheat rotated field in response to nighttime warming. An

收稿日期:2022-09-19 录用日期:2023-01-09

作者简介:陈佳义(1990—),男,江苏淮安人,硕士研究生,主要从事农业气象与气候变化研究。E-mail:1011257274@qq.com

*通信作者:娄运生 E-mail:yslou@nuist.edu.cn

基金项目:国家自然科学基金项目(41875177)

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

experimental design with three factors and with two levels per factor was adopted in this study. The two levels of nighttime temperature were set as ambient temperature(CK, control) and nighttime warming(NW). The crop canopy was covered with aluminum foil film at night(19:00 to 6:00) to simulate nighttime warming. The two levels of irrigation in rice-growing season were set as conventional irrigation(F, intermittent flooding with a 5-cm water layer) and water-saving irrigation(M, moistening without water layer). The two levels of sowing date of winter wheat were set as normal sowing date(NS) and late sowing date(LS). Results showed that, compared with that of the control, nighttime warming or water-saving irrigation reduced rice biomass and yield by 14.69%–18.16% and 7.27%–9.14%, respectively, whereas late sowing increased wheat yield by 0.71%. Compared with the CH₄ efflux with ambient temperature and flooding irrigation, CH₄ efflux from rice field significantly declined with nighttime warming or water-saving irrigation but significantly rose with nighttime warming under water-saving irrigation. Under ambient temperature, compared with that of flooding irrigation, water-saving irrigation significantly reduced the cumulative CH₄ emission by 79.46% but significantly promoted the cumulative N₂O emission by 97.21%. Under nighttime warming, water-saving irrigation significantly increased the cumulative CH₄ and N₂O emissions by 39.98% and 45.62%, respectively, compared with that of flooding irrigation. Compared with that of the control, late sowing significantly reduced the cumulative N₂O emission by 21.46%–53.77% in wheat field. Global warming/cooling potential(SGWP/SGCP) was used to evaluate the contribution of the greenhouse gas emissions during the rice- and wheat-growing seasons to global warming potential in the rice-wheat rotation field. The contribution of CH₄ emissions from the rice field was dominant in all the treatments. Nighttime warming significantly decreased the greenhouse gas emission intensity(GHGI) of the rice-wheat rotated field with flooding irrigation and normal sowing but significantly increased GHGI of the field with water-saving irrigation and late sowing. Given the increased yield and environmental benefits, this study suggests that conventional irrigation(intermittent flooding) for rice and normal sowing for wheat are the effective management practices for the rice-wheat rotation field to cope with global warming in the lower reaches of the Yangtze River.

Keywords: nighttime warming; rice-wheat rotation; methane; nitrous oxide; greenhouse gas emission intensity

IPCC第六次评估报告指出,未来20年全球平均温度增幅预计将达到或超过1.5℃^[1]。气候变暖表现为昼夜不对称增温,即夜间温度增幅大于白天^[2]。大气中甲烷(CH₄)和氧化亚氮(N₂O)等温室气体浓度升高是气候变暖的主要原因。工业革命以来,全球CH₄和N₂O的排放量分别增加了67%和20%,其中农业CH₄和N₂O的排放量分别占排放总量的67%和60%^[3-5]。我国农业排放的CH₄和N₂O各占总排放量的57%和90%^[6-7]。夜间增温使长江中下游地区水稻、冬小麦生育期缩短^[8-10],水稻穗粒数、结实率、千粒质量和产量下降^[11],冬小麦千粒质量和穗实粒数减少,导致产量降低^[12-13]。也有研究认为,夜间增温可明显提高东北地区水稻产量^[14],增加小麦穗粒数、千粒质量和产量^[15-16]。这些差异可能与试验区气候条件、土壤条件及供试品种等有关。

夜间增温可通过影响土壤性质,如土壤温度、含水量、养分含量以及微生物活性,也可通过影响水稻植株生长,进而影响CH₄排放^[17-20]。水稻植株生长显著影响稻田CH₄排放,60%~90%的稻田CH₄通过植株通气组织排入大气^[21-22]。研究认为,温度升高可增强土壤硝化反硝化相关微生物及酶活性,促进农田N₂O产生与排放^[23-25]。但也有研究认为,温度升高可通过促进植株生长和根系吸收土壤氮素,减少农田N₂O排

放^[26-27]。淹水灌溉的稻田土壤处于厌氧环境,氧化还原电位下降,产甲烷菌活性较高,有利于CH₄排放,但N₂O排放量较低^[28-29],而间歇灌溉或湿润灌溉等节水灌溉,均可显著降低稻田CH₄排放,但增加N₂O排放^[30-32]。冬小麦生长季受降水、灌溉和施肥等影响,麦田表现为N₂O排放和CH₄弱排放或吸收^[33-36]。

稻-麦轮作是长江中下游典型的水旱轮作方式。气候变化及极端天气气候事件对稻-麦粮食生产造成很大不确定性,如极端高温干旱造成水资源短缺,严重威胁水稻可持续生产。气候变暖使冬小麦冬前生长期延长,生长生育进程加快,影响冬小麦生产^[37-38]。因此,节水灌溉和适时晚播可作为稻-麦农田粮食生产应对气候变化的重要管理措施。有关夜间增温影响水稻或冬小麦生长、生理、产量及节水灌溉或冬小麦延迟播种的研究已较多,但大多集中于单一因子对单一作物生长季(水稻或冬小麦)的影响,而多因子耦合作用对稻-麦轮作农田粮食生产、温室气体排放及排放强度有何影响尚不清楚。因此,本研究通过田间模拟增温试验,探讨了湿润灌溉/晚播对增温稻-麦轮作农田粮食产量及温室气体排放的影响,为保障长江下游地区稻-麦轮作粮食生产稳定、减缓温室气体排放及应对气候变化提供试验依据。

1 材料与方法

田间模拟试验于2017年5月至2018年5月在南京市浦口区农业科研试验站(32.0°N, 118.8°E)进行。该站地处亚热带湿润季风气候区, 年均降水量约为1 100 mm, 年均气温15.6 °C。供试土壤为潴育型水稻土, 土壤质地为壤质黏土, 土壤全碳、全氮含量分别为19.4 g·kg⁻¹和1.45 g·kg⁻¹, 黏粒含量261 g·kg⁻¹, pH为6.2(1:1水土比)。供试水稻为南粳5055, 供试冬小麦为苏麦188。

1.1 试验设计

水稻田间模拟试验于2017年5—10月进行。采用2因素2水平完全区组试验设计, 环境温度设2水平, 即夜间增温(NW, Nighttime warming)和常温对照(CK, 不增温); 灌溉设2水平, 即常规灌溉(F, 间歇淹水, 5 cm水层)和节水灌溉(M, 湿润, 无水层)。水稻试验处理为: ①淹水+常温对照(F+CK), ②湿润+常温对照(M+CK), ③淹水+夜间增温(F+NW), ④湿润+夜间增温(M+NW)。夜间增温采用开放式被动增温方法, 夜间将铝箔反光膜置于高度可调的钢架上, 以覆盖水稻冠层(19:00至次日6:00), 根据作物生长进程及时调整铝箔膜高度, 使铝箔膜与作物冠层间距保持在0.3 m左右。被动式增温原理: 地面和空气夜间存在温差, 物体放出的热能以红外线方式向外辐射, 反光膜将红外线反射回地面, 减少热量损失, 达到升温目的。在降雨或大风(风速>10 m·s⁻¹)等恶劣天气时不覆盖铝箔膜, 以免恶劣天气对增温设施造成破坏。采用自动温度记录仪测定记录冠层温度, 数据记录间隔为30 min。传统淹水灌溉的稻田小区保持5~10 cm水层, 采用田间自动水位仪记录水层厚度变化。节水灌溉的稻田小区无水层, 保持土壤湿润, 除晒田阶段, 节水灌溉总观测时期土壤含水量为47.63%~54.74%。每处理重复3次, 随机排列。每个小区面积4 m²。小区间通过田埂、塑料薄膜和保护行间隔, 避免水肥侧渗及边际效应干扰。

水稻种子经10% H₂O₂(V/V)消毒、洗涤和浸泡后, 于2017年5月7日育苗, 6月7日移栽, 株行距为15 cm×20 cm。移栽前1天, 施入氮磷钾复合肥(15-15-15)200 kg·hm⁻²作为基肥。此外, 水稻分蘖期和孕穗期分别追施尿素20 kg·hm⁻²(以N计)。自水稻分蘖期开始, 进行夜间增温处理, 直至成熟收获。2017年8月1日至12日排水晒田。采用大田常规管理, 依据实际情况进行除草和病虫害防治。

冬小麦田间模拟试验于2017年11月至2018年5月进行。采用2因素2水平完全区组试验设计, 环境温度设2水平, 即夜间增温(NW)、常温对照(CK, 不增温); 播期设2水平, 即正常播期(NS, Normal sowing, 11月6号), 适时晚播(LS, Late sowing, 11月13号)。试验处理为: ①正常播期+常温对照(NS+CK), ②晚播+常温对照(LS+CK), ③正常播期+夜间增温(NS+NW), ④晚播+夜间增温(LS+NW)。夜间增温方式和装置与水稻田间试验保持一致。小区随机排列, 重复3次。每个小区面积均为2 m×2 m, 冬小麦分别于2017年11月6日和11月13日播撒种子, 撒播量为25 g·m⁻²。小麦播种前, 施入氮磷钾复合肥(15-15-15)200 kg·hm⁻²作为基肥。根据田间实际情况, 进行除草和病虫害防治。

1.2 测定方法

1.2.1 排放通量测定

农田CH₄和N₂O排放通量采用密闭静态箱-气相色谱法测定。自水稻分蘖期至成熟期和冬小麦分蘖期至成熟期, 根据天气(气温、降水)及施肥等情况调整采样时间, 一般3~7 d采集气样1次, 时间为上午8:00—11:00。密闭静态箱由透明PVC材料制成。采样时将静态箱底部置于事先固定于土壤的底座上, 通过向底座水槽加水密封保证静态箱气密性。抽气前接通采样箱顶部内置微型直流风扇电源20 s, 以混匀采样箱内气体。用带有三通阀的注射器于封箱后0、15、30 min采集50 mL气样, 注入事先抽成真空的采样瓶中。所采气样带回实验室, 用气相色谱仪(Agilent 7890B GC)检测CH₄和N₂O浓度。气相色谱仪检测条件为: 色谱柱型号为P/N 19091J-413, 柱箱温度50 °C, 载气为N₂, FID温度250 °C, ECD温度300 °C, 高纯H₂(99.999%)和干燥无油压缩空气的流量分别为50 mL·min⁻¹和450 mL·min⁻¹, 载气为高纯N₂(99.999%)或高纯He(99.999%)。

气体排放通量计算公式^[39]:

$$F = \rho \times H \times 60 \times \frac{273.15}{273.15 + T} \times \frac{dc}{dt} \quad (1)$$

式中: F为气体排放通量, mg·m⁻²·h⁻¹; ρ为标准状态下气体密度, CH₄和N₂O的气体密度分别为0.714 kg·m⁻³和1.25 kg·m⁻³; H为采样箱的净高度, m; $\frac{dc}{dt}$ 为单位时间内采样箱内气体的浓度变化率; T为采样过程中采样箱内的平均温度, °C。

各生育期CH₄和N₂O的累积排放通量计算公式:

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

式中: E_t 为气体累积排放总量,mg·m⁻²; F_i 和 F_{i+1} 分别为第*i*次和第*i+1*次采样时气体平均排放通量,mg·m⁻²·h⁻¹; D_i 和 D_{i+1} 分别是第*i*次和第*i+1*次采样时的采样时间,d。

1.2.2 生物量及产量测定

在水稻和冬小麦成熟期采样,每小区随机选取代表性植株3株,植株按叶片、茎鞘、穗和根分装,置于烘箱中105℃杀青30 min,然后80℃烘干至质量恒定,干燥冷却至室温后,测定植株各部位干物质量。作物成熟后,每小区取0.5 m×0.5 m范围内作物,用常规方法进行脱粒、风干并对产量进行测算。

1.2.3 持续变化的全球增温/冷却潜势计算

全球变暖背景下,考虑到温室气体对全球辐射效应的影响,实际上是大气中持续存在的温室气体影响,而不是一次脉冲产生的温室气体影响,本文采用Neubauer和Megonigal提出的持续变化的全球增温潜势(SGWP)和持续变化的全球冷却潜势(SGCP)来评估CH₄和N₂O对气候的影响^[40]。当气体排放通量为正时,表现为持续变化的全球增温潜势(SGWP);当气体排放通量为负时,表现为持续变化的全球冷却潜势(SGCP)。

SGWP和SGCP计算公式^[41-42]:

$$SGWP_{CH_4}=45 \times T_{CH_4}$$

$$SGWP_{N_2O}=270 \times T_{N_2O}$$

$$SGCP_{CH_4}=203 \times T_{CH_4}$$

$$SGCP_{N_2O}=349 \times T_{N_2O}$$

$$Total_{SGWP/SGCP} = \begin{cases} SGWP_{CH_4} \\ \text{或} \\ SGCP_{CH_4} \end{cases} + \begin{cases} SGWP_{N_2O} \\ \text{或} \\ SGCP_{N_2O} \end{cases} \quad (3)$$

式中: $SGWP_{CH_4}$ 和 $SGWP_{N_2O}$ 分别表示CH₄和N₂O导致的全球增温潜势,kg CO₂e·hm⁻²; $SGCP_{CH_4}$ 和 $SGCP_{N_2O}$ 分别表示CH₄和N₂O导致的全球冷却潜势,kg CO₂e·hm⁻²; T_{CH_4} 和 T_{N_2O} 分别为CH₄和N₂O的累积排放总量,kg·hm⁻²;45和270分别为CH₄和N₂O累积排放通量为正时所乘系数;203和349分别为CH₄和N₂O累积排放通量为负时所乘系数; $Total_{SGWP/SGCP}$ 为各处理的总SGWP/SGCP,kg CO₂e·hm⁻²。

1.2.4 排放强度计算

为综合评价各处理的温室效应,本文采用温室气体排放强度(GHGI)评价农业生产对作物产量和温室气体排放的双重影响。

GHGI计算公式^[43]:

$$GHGI=\frac{Total_{SGWP/SGCP}}{Yield} \quad (4)$$

式中:GHGI为温室气体排放强度,kg CO₂e·t⁻¹;Total_{SGWP/SGCP}为各处理的总SGWP/SGCP,kg CO₂e·hm⁻²;Yield为各处理单位面积平均产量,t·hm⁻²。

1.2.5 环境因子测定

常规气象要素(气温、降水等)通过常规气象观测系统自动记录采集。

1.3 数据处理与分析

用Microsoft Excel和Origin 9软件进行试验数据分析处理并绘制图表,用SPSS 20统计分析软件进行统计分析。用最小差异显著法(LSD法)进行显著性分析。

2 结果与分析

2.1 环境条件

2.1.1 日均气温和降水量

如图1所示,水稻生育期内日均气温呈现为先波动上升,而后波动下降趋势,水稻生育期平均气温为26.52℃。水稻分蘖期至拔节期(2017年7月11日至31日)持续21 d日均气温高于30℃,其中,最高日均气温为35.05℃,出现于7月27日。另外,还有几段短期持续高温和几天零散高温。水稻生育期内日均气温超过30℃的天数共有30 d。水稻生育期内累积降水量为695.9 mm,降水集中于晒田和生长后期,其中,晒田期(2017年8月1日至12日)累积降水量为204.8 mm,占全生育期累积降水量的29.43%;水稻生长后期(2017年9月20日至10月13日)累积降水量为279.5 mm,占全生育期累积降水量的40.16%。全生育期单日最高累积降水量为105 mm,出现于8月8日。

如图1所示,冬小麦生育期内日均气温表现为先波动下降,而后波动上升趋势。冬小麦生育期平均气温为10.81℃,共有14 d日均气温低于0℃,2018年1月25日至31日持续7 d日均气温低于0℃,其中,最低日均气温为-3.77℃,出现于1月30日。冬小麦生育期内日最高气温大于30℃的天数持续6 d(2018年5月13日至18日),大于35℃的天数持续3 d(2018年5月14日至16日)。冬小麦生育期内累积降水量为446.9 mm,降水集中于冬小麦生育后期,2018年5月6日至23日累积降水量为163.3 mm,占全生育期累积降水量的36.54%。全生育期单日最高累积降水量为103.5 mm,出现于5月7日,此时,冬小麦处于成熟期。

2.1.2 冠层气温及活动积温

如表1所示,水稻淹水灌溉下,与常温对照相比,夜间增温使水稻冠层夜间平均温度在分蘖期、拔节

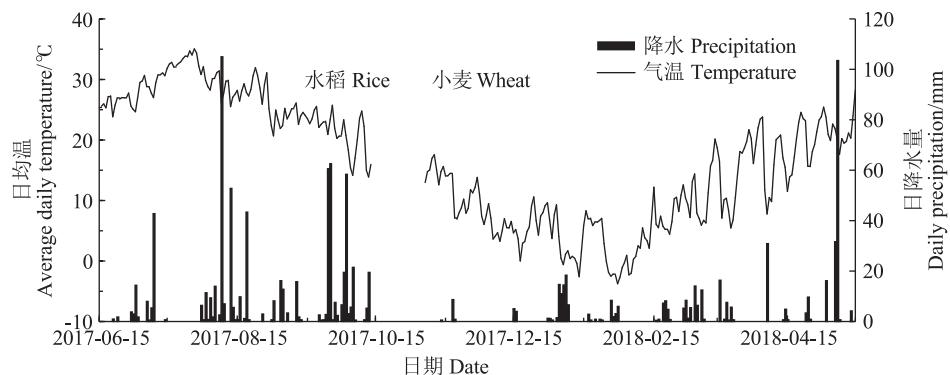


图1 稻、麦生育期内日均气温和降水量变化

Figure 1 The variations of average daily temperature and precipitation during rice and wheat growth periods

期、开花期、灌浆期和成熟期分别增加 0.58、1.29、0.58、2.04 °C 和 1.34 °C；湿润灌溉下，与常温对照相比，夜间增温使冠层夜间平均温度在水稻分蘖期、拔节期、开花期、灌浆期和成熟期分别增加 0.70、1.47、0.79、1.91 °C 和 1.29 °C。两种灌溉方式下，夜间增温与常温对照处理间的差异，均在水稻灌浆期最高。两种温度下，湿润灌溉下水稻冠层夜间平均温度在上述生育期中均高于淹水灌溉。水稻冠层夜间平均温度在各生育期的变化趋势均呈现为夜间增温+湿润灌溉>夜间增温+淹水灌溉>湿润灌溉>淹水灌溉。

如表 1 所示，冬小麦正常播期下，与常温对照相比，夜间增温使冬小麦冠层夜间平均温度在分蘖期、拔节期、开花期、灌浆期和成熟期分别增加 0.37、0.47、0.42、0.43 °C 和 1.89 °C；适时晚播下，与常温对照相比，夜间增温使冬小麦冠层夜间平均温度在分蘖期、拔节期、开花期、灌浆期和成熟期分别增加 0.29、0.52、0.72、0.50 °C 和 1.59 °C。两种温度条件下，适时晚播冬小麦冠层夜间平均温度在分蘖期-灌浆期均高于正常播期。

如表 2 所示，常规灌溉下，夜间增温使水稻不同生育期(分蘖期、拔节期、开花期、灌浆期和成熟期)夜间冠层活动积温($\geq 10^{\circ}\text{C}$)分别较常温对照增加 12.5、46.9、28.5、61.6 °C 和 42.3 °C；湿润灌溉下，夜间增温使水稻上述生育期夜间冠层活动积温分别较常温对照增加 20.0、68.0、42.7、107.2 °C 和 61.8 °C；两种灌溉情况下活动积温的最大增幅均在灌浆期。相同灌溉方式下(常规灌溉或湿润灌溉)，夜间增温使总观测期内冠层活动积温分别较常温对照增加 191.8 °C 和 299.0 °C。

如表 2 所示，正常播期下，夜间增温使冬小麦不

表1 夜间增温对稻、麦主要生育期夜间冠层平均温度的影响
Table 1 Effects of nighttime warming on mean nighttime canopy temperature in rice and wheat during main growth periods

作物 Crop	处理 Treatment	分蘖期 Tillering	拔节期 Jointing	开花期 Flowering	灌浆期 Filling	成熟期 Maturity
水稻 Rice	F+CK	24.7	27.0	24.7	21.2	19.6
	F+NW	25.3	28.3	25.2	23.3	21.0
	M+CK	24.8	27.5	24.9	22.0	20.4
	M+NW	25.5	29.0	25.7	23.9	21.7
小麦 Wheat	NS+CK	1.5	10.5	11.7	17.8	22.0
	NS+NW	1.9	11.0	12.2	18.3	23.9
	LS+CK	1.9	11.2	13.9	18.1	20.5
	LS+NW	2.2	11.7	14.6	18.6	22.1

同生育期(分蘖期、拔节期、开花期、灌浆期和成熟期)夜间冠层活动积温($\geq 10^{\circ}\text{C}$)分别较常温对照增加 12.3、4.1、2.8、3.3 °C 和 37.5 °C；适时晚播下，夜间增温使上述生育期夜间冠层活动积温分别增加 14.6、12.7、8.2、6.7 °C 和 51.0 °C。相同播期下(正常播期或适时晚播)夜间增温使总观测期内冬小麦冠层活动积温分别较常温对照增加 60.1 °C 和 92.9 °C。与常温对照相比，夜间增温下冬小麦各生育期及总观测期内冠层活动积温增幅，适时晚播均高于正常播期。

2.1.3 稻田水层变化

水稻幼苗移栽后，常规灌溉处理的稻田处于淹水状态，日均水层厚度基本保持 5~10 cm(图 2)。晒田期间(2017 年 8 月 1 日至 12 日)灌溉停止，期间降水较多，但经及时排水，加之气温较高，稻田无积水层。晒田结束，稻田开始灌溉覆水，日均水层厚度保持在 5 cm 左右。进入成熟期(2017 年 9 月 21 日前后)，灌溉减少，进入排水晒田状态。

表2 夜间增温对稻、麦主要生育期夜间冠层活动积温的影响

Table 2 Effects of nighttime warming on canopy nighttime active accumulated temperature in rice and wheat during main growth periods

作物 Crop	处理 Treatment	分蘖期 Tillering	拔节期 Jointing	开花期 Flowering	灌浆期 Filling	成熟期 Maturity	总观测期 Total observation period
水稻 Rice	F+CK	774.6	1 000.3	422.7	483.4	511.5	3 192.5
	F+NW	787.1	1 047.2	451.2	545.0	553.8	3 384.3
	M+CK	754.9	933.0	401.3	431.6	477.3	2 998.0
	M+NW	774.9	1 001.0	444.0	538.8	539.1	3 297.8
小麦 Wheat	NS+CK	141.1	192.5	205.0	337.4	621.6	1 497.6
	NS+NW	153.4	196.6	207.8	340.7	659.1	1 557.7
	LS+CK	143.6	199.0	235.2	349.0	552.4	1 479.4
	LS+NW	158.2	211.7	243.4	355.7	603.4	1 572.3

注:活动积温分别为水稻 $\geq 10^{\circ}\text{C}$,小麦 $\geq 0^{\circ}\text{C}$ 。

Note: The active accumulated temperature is based on $\geq 10^{\circ}\text{C}$ for rice and $\geq 0^{\circ}\text{C}$ for wheat, respectively.

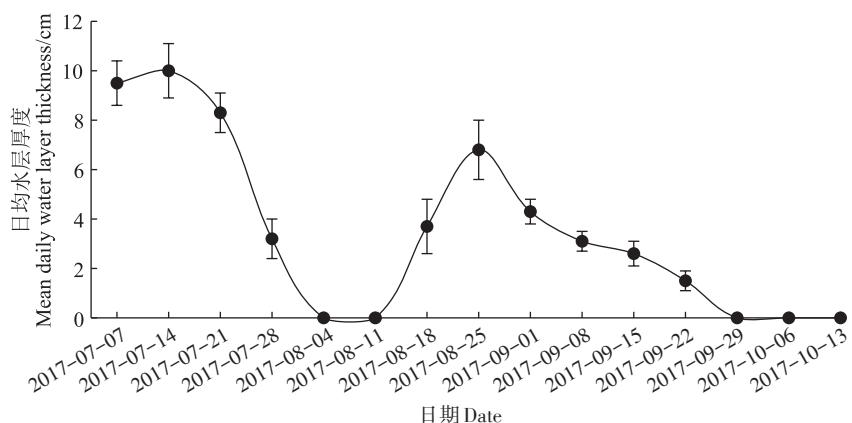


图2 水稻生长季常规灌溉稻田水层厚度变化

Figure 2 Variation of water layer thickness in paddy field under flooding irrigation in rice growing season

2.2 不同水分管理下夜间增温对稻田CH₄和N₂O排放影响

2.2.1 稻田CH₄和N₂O排放通量

不同处理下稻田CH₄季节性排放特点基本一致,排放呈多峰变化趋势(图3A)。水稻分蘖期(7月7日至14日),稻田CH₄排放通量均呈下降趋势,随后除湿润灌溉下常温对照处理外,其他3种处理稻田CH₄排放通量均呈上升态势,各处理于晒田前(7月28日)达到峰值。随晒田进行,各处理稻田CH₄排放通量迅速下降;晒田结束后重新灌溉覆水,稻田CH₄排放通量又呈现上升趋势,并于8月25日达到第二个峰值,然后直至水稻成熟,各处理CH₄排放通量均表现为波动下降趋势。与常温对照或淹水灌溉相比,夜间增温或湿润灌溉均显著降低稻田CH₄排放通量,但湿润灌溉下,夜间增温则显著提高稻田CH₄排放通量。

不同处理下稻田N₂O季节性排放均呈多峰变化趋势,而且与农田CH₄排放通量存在互为消长关系(图

3B)。水稻分蘖期,稻田N₂O排放通量基本呈上升趋势,随持续灌溉时间延长,稻田N₂O排放通量下降,并于晒田前降至低值。随晒田进行,稻田N₂O排放通量迅速上升至峰值;晒田结束后,随农田重新灌溉覆水,稻田N₂O排放通量迅速下降,随水稻进入成熟期,灌溉强度减弱,稻田N₂O排放通量又逐渐波动上升。

2.2.2 稻田CH₄和N₂O累积排放量

表3表明,水稻生长前期,即分蘖期-拔节期,稻田CH₄累积排放量最高,各处理稻田CH₄累积排放量均占其总观测期总排放量的60%以上。淹水灌溉下,夜间增温使稻田分蘖期、拔节期、成熟期CH₄累积排放量减少,抽穗开花期和灌浆期CH₄累积排放量升高,总观测期CH₄累积排放量减少57%,处理间差异均达显著水平($P<0.05$);湿润灌溉下,夜间增温使稻田各生长期CH₄累积排放量均升高,总观测期CH₄累积排放量升高192.90%,除分蘖期和灌浆期外,处理间差异均达显著水平($P<0.05$);夜间增温下,湿润灌

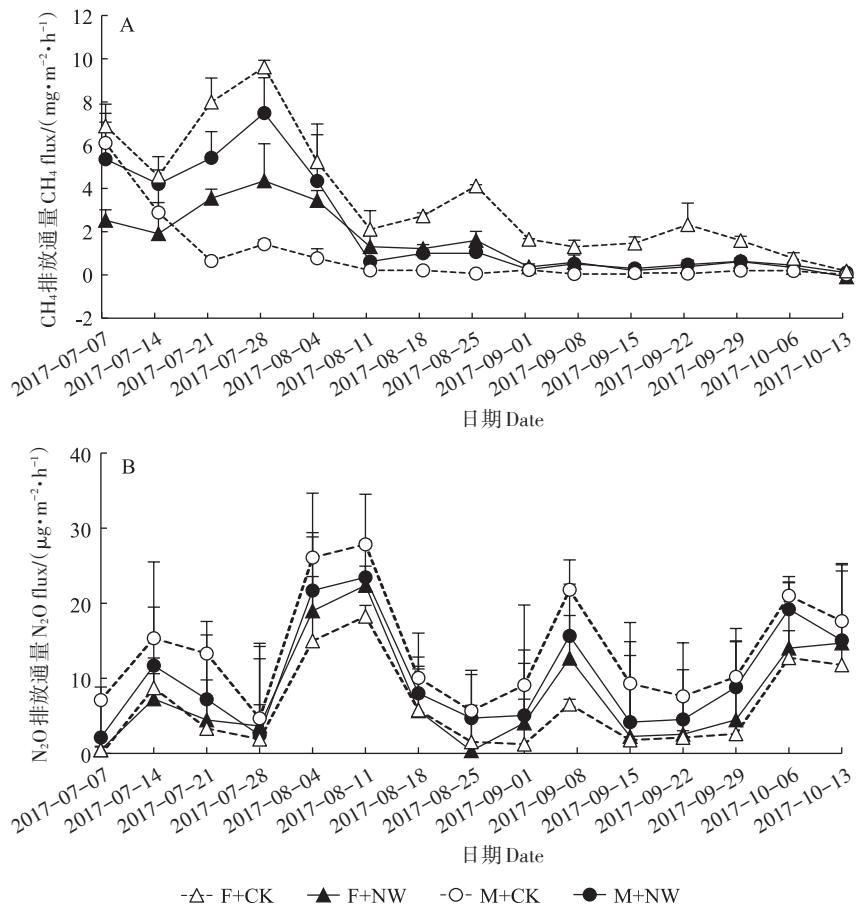


图3 不同水分管理下夜间增温对稻田CH₄和N₂O排放通量的影响

Figure 3 Effects of nighttime warming on CH₄ and N₂O fluxes in rice field under different water management

表3 不同水分管理下夜间增温对稻田CH₄累积排放量的影响

Table 3 Effects of water management on cumulative CH₄ emissions from rice field under nighttime warming

处理 Treatment	分蘖期 Tillering		拔节期 Jointing		抽穗开花期 Heading to flowering		灌浆期 Filling		成熟期 Maturity		总观测期 Total observation periods
	排放量 Emission/ (mg·m ⁻²)	占比 Percentage/%									
	F+CK	963±25.9a	11.7	4 806±148a	58.4	1 059±6.5a	12.9	212±23.8b	2.6	1 191±56.2a	14.5
F+NW	372±115b	10.5	1 776±171c	50.2	611±64.8b	17.3	402±44.3a	11.4	379±20.4b	10.7	3 539±831c
M+CK	755±190a	44.7	737±54d	43.6	58.6±9.9c	3.5	24.8±15.5c	1.5	116±5.2c	6.9	1 691±262d
M+NW	803±207a	16.2	2 887±252b	58.3	553±70.0b	11.2	173±33.7bc	3.5	538±15.3b	10.9	4 954±995b

注:同一列不同小写字母表示处理间在0.05水平差异显著。下同。

Note: Different lowercase letters in a column indicate the significant difference between treatments at 0.05 level. The same below.

溉使稻田分蘖期、拔节期、成熟期CH₄累积排放量升高,抽穗开花期、灌浆期CH₄累积排放量降低,总观测期CH₄累积排放量升高39.98%。常温对照下,湿润灌溉使稻田各生育期CH₄累积排放量降低,总观测期CH₄累积排放量降低79.46%。

表4表明,水稻成熟期稻田N₂O累积排放量占主

导地位,成熟期各处理稻田N₂O累积排放量占其总观测期总排放量的40%左右,分蘖期和灌浆期最少,仅占总排放量的5%左右。淹水条件下,夜间增温使稻田分蘖期、抽穗开花期、灌浆期和成熟期N₂O累积排放量增多,拔节期N₂O累积排放量减少,总观测期N₂O累积排放量增多30.52%,除分蘖期和灌浆期外,

表4 不同水分管理下夜间增温对稻田N₂O累积排放量的影响
Table 4 Effects of water management on cumulative N₂O emissions from rice field under nighttime warming

处理 Treatment	分蘖期 Tillering		拔节期 Jointing		抽穗开花期 Heading to flowering		灌浆期 Filling		成熟期 Maturity		总观测期 Total observation periods
	排放量 Emission/ (mg·m ⁻²)	占比 Percentage/ (%)	排放量 Emission/ (mg·m ⁻²)								
	0.72±1.30a	4.90	7.68±1.84b	52.32	0.85±1.29c	5.79	0.56±0.38a	3.81	4.87±1.32d	33.17	14.68±3.74b
F+CK	0.97±0.42a	5.06	3.89±0.64c	20.30	5.83±0.71a	30.43	0.88±2.59a	4.59	7.59±1.33c	39.61	19.16±2.64ab
M+CK	1.89±1.19a	6.53	10.25±1.21a	35.41	3.57±0.74b	12.33	1.08±2.09a	3.73	12.16±1.14b	42.00	28.95±7.08a
M+NW	1.16±3.62a	4.16	4.43±1.13c	15.88	6.21±0.81a	22.26	0.84±1.58a	3.01	15.26±1.11a	54.70	27.90±3.54a

处理间差异均达显著水平($P<0.05$)；湿润条件下,夜间增温使稻田分蘖期、拔节期和灌浆期N₂O累积排放量降低,抽穗开花期和成熟期N₂O累积排放量升高,总观测期N₂O累积排放量降低3.63%,除分蘖期和灌浆期外,处理间差异均达显著水平($P<0.05$)。

常温对照下,湿润灌溉使稻田总观测期N₂O累积排放量增加97.21%,除分蘖期和灌浆期外,处理间差异均达显著水平($P<0.05$);夜间增温下,湿润灌溉使稻田总观测期N₂O累积排放量升高45.62%,仅成熟期处理间差异达显著水平($P<0.05$)。

2.3 不同播期下夜间增温对麦田CH₄和N₂O排放的影响

2.3.1 麦田CH₄和N₂O排放通量

不同处理下麦田CH₄季节性排放特点基本一致,排放呈多峰变化趋势(图4A)。拔节期到灌浆期,各处理麦田基本表现为CH₄吸收,CH₄吸收通量呈波动状态,其中两个较高吸收峰分别出现于2018年3月6日(拔节期)和4月15日(抽穗期或开花期);4月15日后麦田CH₄吸收通量逐渐减少,随冬小麦成熟,各处理麦田CH₄排放通量均表现为迅速上升趋势。4月15日的吸收峰,与常温对照相比,夜间增温使麦田CH₄吸收量在正常播期和晚播两种条件下均升高;与正常播期相比,晚播使麦田CH₄吸收通量在夜间增温条件下降低。5月3日的排放峰,与常温对照相比,夜间增温使麦田CH₄排放通量在正常播期和晚播两种条件下均升高;与正常播期相比,晚播使麦田CH₄排放通量在常温对照和夜间增温两种条件下分别升高和降低。可见,相同播期下,当麦田表现为CH₄汇时,夜间增温促进麦田对CH₄的吸收;当麦田表现为CH₄源时,夜间增温也会促进麦田CH₄的排放。相同温度条件下,当麦田表现为CH₄汇时,常温播期对麦田CH₄吸收的影响不明显,夜间增温下晚播降低麦田CH₄吸收;当麦田表现为CH₄源时,播期对不同温度条件下

麦田CH₄的排放影响相反。

不同处理下麦田N₂O季节性排放也呈现多峰变化趋势(图4B)。拔节期麦田N₂O排放呈先升后降趋势,出现第一个峰值后麦田N₂O排放一直处于小幅波动状态,直至4月25日出现第二个排放高峰,随后急剧下降,最后于成熟期(5月10日至15日)再次升高。正常播期下,夜间增温麦田N₂O平均排放通量为28.60 μg·m⁻²·h⁻¹,比常温对照处理高29.12%;晚播条件下,夜间增温麦田N₂O平均排放通量为13.68 μg·m⁻²·h⁻¹,比常温对照处理低23.58%。与正常播期相比,晚播使麦田N₂O平均排放通量在常温对照和夜间增温两种条件下均降低。

2.3.2 麦田CH₄和N₂O累积排放量

表5表明,冬小麦拔节期、孕穗期、抽穗期、开花期和灌浆期,各处理麦田CH₄累积排放量均为负值,即麦田均表现为对CH₄的吸收;冬小麦成熟期,晚播条件下常温对照麦田CH₄累积排放量为负值,表现为对CH₄的吸收,其余3种处理麦田CH₄累积排放量为正值,即向大气排放CH₄。正常播期下,夜间增温使冬小麦拔节期、孕穗期、开花期和灌浆期麦田CH₄吸收量增加,抽穗期和成熟期CH₄吸收量减少,仅拔节期和开花期,处理间差异达显著水平($P<0.05$);晚播条件下,夜间增温使冬小麦拔节期、灌浆期和成熟期麦田CH₄吸收量减少,孕穗期、抽穗期、开花期麦田CH₄吸收量增加,仅拔节期处理间差异达显著水平($P<0.05$)。常温对照下,除抽穗期外,晚播使麦田各生育期CH₄吸收量增加,仅拔节期处理间差异达显著水平($P<0.05$);夜间增温下,除抽穗期和成熟期外,晚播使麦田各生育期CH₄吸收量降低,仅拔节期和开花期处理间差异达显著水平($P<0.05$)。

表6表明,冬小麦田N₂O排放主要集中于冬小麦生育后期,即灌浆期和成熟期,这两个时期各处理麦

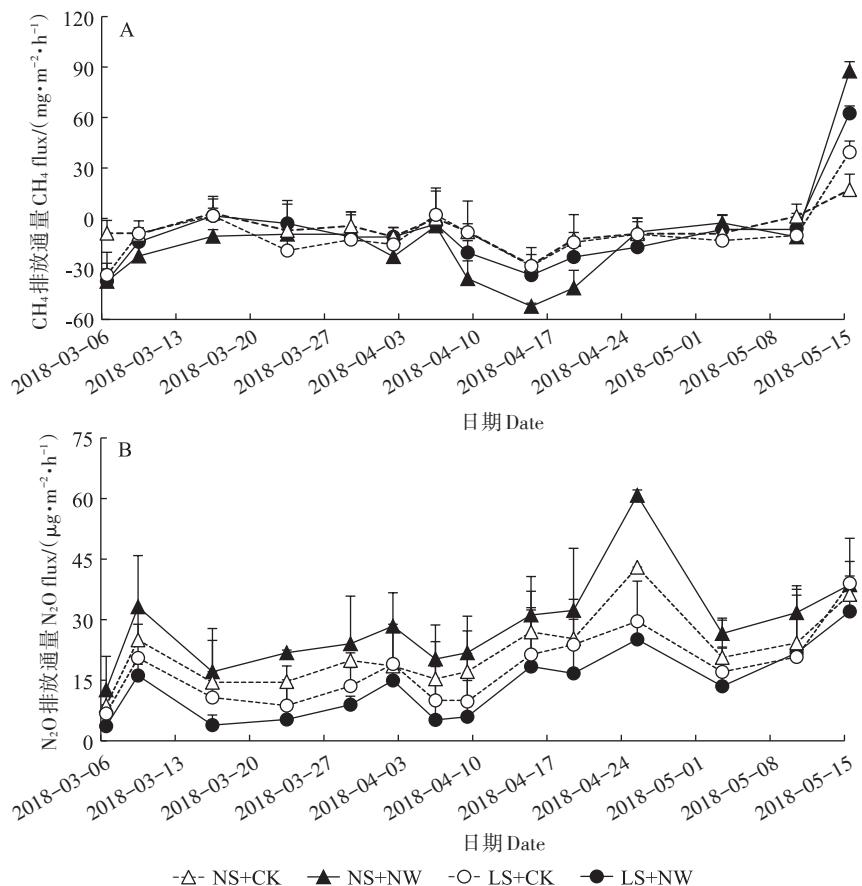


图4 不同播期下夜间增温对麦田CH₄和N₂O排放通量的影响

Figure 4 Effects of nighttime warming on CH₄ and N₂O fluxes in wheat field under different sowing dates

表5 不同播期下夜间增温对麦田CH₄累积排放量的影响(mg·m⁻²)

Table 5 Effects of nighttime warming on cumulative CH₄ emissions from wheat field under different sowing dates (mg·m⁻²)

处理	拔节期	孕穗期	抽穗期	开花期	灌浆期	成熟期	总观测期
Treatment	Jointing	Booting	Heading	Flowering	Filling	Maturity	Total observation periods
NS+CK	-1.53±0.66a	-2.09±1.00a	-2.85±4.50a	-1.93±5.71a	-3.26±2.75a	0.48±2.13a	-11.18±2.25a
NS+NW	-6.59±1.17c	-2.87±0.73a	-2.75±0.92a	-10.83±1.86b	-3.56±2.94a	2.42±2.30a	-24.18±2.40c
LS+CK	-5.90±0.83c	-2.20±0.83a	-2.62±1.00a	-2.04±2.32a	-3.86±1.97a	-0.20±1.92a	-16.82±0.29b
LS+NW	-4.00±0.75b	-2.59±0.79a	-6.60±0.99a	-2.88±2.18a	-2.26±0.97a	2.35±2.32a	-17.04±5.13b

表6 不同播期下夜间增温对麦田N₂O累积排放量的影响

Table 6 Effects of nighttime warming on cumulative N₂O emissions from wheat field under different sowing dates

处理	拔节期		孕穗期		抽穗期		开花期		灌浆期		成熟期		总观测期	
	Jointing		Booting		Heading		Flowering		Filling		Maturity			
	排放量	占比												
	Emission/ (mg·m ⁻²)	Percentage/ %												
NS+CK	6.98±0.66ab	18.26	5.96±0.25a	15.59	4.34±1.62a	11.37	2.51±1.62b	6.56	11.02±0.10a	28.86	7.40±1.28b	19.36	38.21±0.95ab	
NS+NW	9.14±0.72a	18.32	5.82±0.59a	11.67	3.85±1.67a	7.72	6.86±0.61a	13.75	6.70±1.43ab	13.44	17.51±4.07a	35.10	49.88±0.95a	
LS+CK	6.84±1.45b	22.80	3.67±0.73b	12.22	2.24±0.93a	7.46	2.17±0.89b	7.23	8.33±1.51ab	27.75	6.76±1.29b	22.54	30.01±4.22b	
LS+NW	4.19±1.65c	18.18	2.51±0.43c	10.90	3.44±1.29a	14.91	3.01±2.53b	13.06	3.71±5.14b	16.08	6.19±2.34b	26.87	23.05±1.38b	

田N₂O累积排放量均占6个生育期总排放量50%左右。正常播期下,夜间增温使冬小麦拔节期、开花期和成熟期麦田N₂O累积排放量增多,孕穗期、抽穗期和灌浆期麦田N₂O累积排放量减少,N₂O总累积排放量增多30.54%,仅开花期和成熟期的处理间差异达显著水平($P<0.05$);晚播条件下,夜间增温使冬小麦拔节期、孕穗期、灌浆期和成熟期麦田N₂O累积排放量降低,抽穗期和开花期麦田N₂O累积排放量升高,N₂O总累积排放量降低23.16%,其中仅拔节期和孕穗期的处理间差异达显著水平($P<0.05$)。常温对照下,晚播使麦田总观测期N₂O累积排放量降低21.46%,仅孕穗期的处理间差异达显著水平($P<0.05$);夜间增温下,晚播使麦田总观测期N₂O累积排放量降低53.77%,除抽穗期和灌浆期外,处理间差异均达显著水平($P<0.05$)。可见,相同温度下,晚播均显著降低麦田N₂O累积排放量。

2.4 不同农田管理对稻、麦生物量及产量的影响

相同灌溉条件下夜间增温显著降低水稻生物量,降低幅度为14.69%~18.16%($P<0.05$)(表7)。正常播期条件下,夜间增温使冬小麦生物量降低19.81%;晚播条件下,夜间增温使冬小麦生物量提高5.63%,但处理间差异均未达显著水平。

淹水灌溉下夜间增温使水稻产量显著降低9.14%($P<0.05$);湿润灌溉下夜间增温使水稻产量明显降低7.27%,但处理间差异未达显著水平。正常播期下夜间增温使冬小麦产量降低18.26%,晚播条件下夜间增温使冬小麦产量略有提高,增幅为0.72%,但处理间差异均未达显著水平。

2.5 不同农田管理对稻-麦轮作碳排放强度的影响

不同农田管理下稻田和麦田CH₄和N₂O全球增温潜势和温室气体排放强度表现各异(表8)。在水稻生长季,淹水灌溉下,夜间增温显著降低稻田SGWP_{CH₄}、Total_{SGWP}和GHGI($P<0.05$),但提高稻田SGWP_{N₂O};湿润灌溉下,夜间增温显著提高稻田SGWP_{CH₄}、Total_{SGWP}和GHGI($P<0.05$),但降低稻田SGWP_{N₂O}。两种温度条件下,湿润灌溉均增加稻田SGWP_{N₂O},但对稻田SGWP_{CH₄}、Total_{SGWP}和GHGI的影响有差异。常温对照下,湿润灌溉显著降低稻田SGWP_{CH₄}、Total_{SGWP}和GHGI;夜间增温条件下,湿润灌溉增加稻田SGWP_{CH₄}、Total_{SGWP}、SGWP_{N₂O}和GHGI。

在冬小麦生长季,正常播期下,夜间增温降低麦田SGWP_{CH₄},但增加麦田SGWP_{N₂O}、Total_{SGWP/SGCP}和GHGI;晚播条件下,夜间增温增加麦田SGWP_{CH₄},降低了麦田SGWP_{N₂O}、Total_{SGWP/SGCP}和GHGI。两种温度条件

表7 不同农田管理下稻、麦生物量及产量的比较

Table 7 Comparison of biomass and yield in rice and wheat under different field management

处理 Treatment	全株干质量 Total plant dry weight/g		产量 Yield/(t·hm ⁻²)	
	水稻 Rice	小麦 Wheat	水稻 Rice	小麦 Wheat
F/NS+CK	23.69±0.55a	14.03±2.12a	9.19±0.16a	8.16±0.43ab
F/NS+NW	20.21±1.15b	11.25±1.62a	8.35±0.70b	6.67±0.63b
M/LS+CK	24.34±0.69a	11.73±1.98a	8.53±0.47ab	8.37±0.21a
M/LS+NW	19.92±0.71b	12.39±1.65a	7.91±0.46b	8.43±0.67a

表8 不同农田管理下夜间增温对稻-麦系统SGWP/SGCP和GHGI的影响(kg CO₂e·t⁻¹)

Table 8 Effects of nighttime warming on SGWP/SGCP and GHGI in rice and wheat system under field management(kg CO₂e·t⁻¹)

项目 Item	F/NS+CK	F/NS+NW	M/LS+CK	M/LS+NW
稻田 Rice field	SGWP _{CH₄}	3 703.96±328.62a	1 592.73±374.07b	761.13±117.93c
	SGWP _{N₂O}	39.61±14.80b	51.71±16.06ab	78.13±19.15a
	Total _{SGWP}	3 743.57±343.36a	1 644.44±382.67b	839.27±104.97c
	GHGI	406.86±33.98a	200.65±53.10c	100.05±15.84d
麦田 Wheat field	SGWP _{CH₄}	-22.68±34.94a	-49.05±12.26a	-34.14±15.58a
	SGWP _{N₂O}	103.16±20.69ab	134.06±25.28a	81.02±23.22b
	Total _{SGWP/SGCP}	80.48±59.39a	85.61±27.88a	46.87±17.91a
	GHGI	9.23±2.16ab	12.42±3.04a	5.67±2.27bc
稻-麦系统	GHGI	416.09±28.03a	213.07±51.69c	105.72±17.81d

下,晚播均降低麦田 $SGWP_{N_2O}$ 、 $Total_{SGWP/SCCP}$ 和 $GHGI$ 。

不同农田管理下夜间增温对稻-麦系统 $GHGI$ 的影响不同。淹水灌溉/正常播期下,夜间增温显著降低稻-麦系统的 $GHGI$ ($P<0.05$),湿润灌溉/晚播下,夜间增温显著提高稻-麦系统的 $GHGI$ ($P<0.05$)。稻田 $GHGI$ 对稻-麦轮作系统农田 $GHGI$ 的贡献更大。

3 讨论

稻田 CH_4 排放量与土壤产甲烷菌数量存在显著正相关关系,因此,控制稻田产甲烷菌数量可有效减少 CH_4 排放量^[44]。不同水分管理及水稻不同生育期土壤中 CH_4 相关微生物的数量和活性均有差异。本研究中,水稻生长前期,随水稻生长,土壤处于淹水状态的时间逐渐延长,产甲烷菌的数量和活性不断提高,使晒田前稻田 CH_4 排放达到最大值;随晒田进行,土壤通气性增强,产甲烷菌的生存环境受到破坏,产甲烷菌数量下降,甲烷氧化菌的活性上升,促进 CH_4 的氧化,稻田 CH_4 排放量急剧下降^[45-46];晒田结束,稻田重新灌溉覆水,产甲烷菌适宜生境逐渐恢复, CH_4 排放量又逐渐上升,随温度降低和植株通气组织衰老退化, CH_4 排放量处于波动下降趋势(图3)。冬小麦拔节-开花阶段(2018年3月6日至4月25日),麦田 CH_4 排放量基本为负值,可能在于该时期环境温度较低,降水较少(图1),土壤通气良好,不利于土壤有机质分解,产甲烷菌活性较弱,但甲烷氧化菌活性较强,导致麦田 CH_4 吸收量增加;冬小麦灌浆-成熟期,麦田 CH_4 排放量迅速增加,可能在于该时期温度升高,降水增多(图1),土壤局部形成厌氧环境,产甲烷菌活性增强^[20,47],有利于 CH_4 产生并排放(图4)。

与常温对照相比,淹水灌溉下夜间增温显著降低稻田 CH_4 排放,湿润灌溉下夜间增温显著促进稻田 CH_4 排放(图3、表3)。淹水灌溉下夜间增温引起水稻植株分蘖数和干物质积累量降低,导致有机底物减少^[19,48-49],产甲烷菌活性降低,引起 CH_4 产生量及排放量下降;湿润灌溉下夜间增温可促进稻田地表热量向下传递,下层土温升高,使 CH_4 产生菌活性增强,促进 CH_4 产生并排放^[44-45,50];此外,湿润灌溉下夜间增温处理的水稻植株冠层温度较高(表1),高温胁迫可刺激植株体内活性氧自由基累积,活性氧自由基与果胶、木质素等细胞壁组分的甲氧基作用产生 CH_4 ^[51]。冬小麦两种播期下夜间增温均提高成熟期麦田 CH_4 排放(图4、表5),冬小麦生长后期环境温度升高,降水增多(图1),土壤形成局部厌氧环境,增温加速植株

衰老凋落,土壤有机底物增加,提高了产甲烷菌活性^[47];夜间增温可提高冬小麦植株冠层温度及土壤温度,温度升高促进土壤呼吸,消耗土壤氧气,产生厌氧环境,促进麦田 CH_4 产生并排放^[52-53](表1)。

N_2O 主要来自土壤相关微生物介导的硝化和反硝化过程^[25]。本试验中(图3、表4),水稻生长前期 N_2O 排放量较低,稻田前期处于淹水或湿润饱和状态,土壤厌氧还原条件较强,反硝化过程的产物主要为 N_2 ;中期晒田改变了土壤厌氧还原条件,通气性改善,硝化和反硝化作用同时进行,促进了 N_2O 产生并排放;晒田结束,重新灌溉覆水使 N_2O 排放量迅速降低;而后出现二次峰值(2017年9月8日),这与中期追施穗肥有关,稻田好氧层及土壤中的闭蓄氧有利于硝化及反硝化过程进行,促进土壤 N_2O 产生并排放^[36,45];水稻生长后期,临近收获,灌溉停止,干湿交替提高了硝化和反硝化细菌活性,导致 N_2O 产生量及排放量增加^[54]。长江中下游冬小麦整个生育期的降水可满足植株生长需要,麦田土壤水分状况和通气性主要受降水影响。温度和降水的变化是影响麦田 N_2O 产生及排放的重要环境因素^[55]。冬小麦返青后气温较低,麦田 N_2O 排放呈小幅波动状态,生长后期温度升高,降水增多,干湿交替引起麦田 N_2O 排放量增加^[45,54](图1、图4、表6)。

相同水分管理下,与常温对照相比,夜间增温对水稻生长前期稻田 N_2O 排放无明显促进作用,甚至降低分蘖-拔节期稻田 N_2O 排放,但显著增加成熟期稻田 N_2O 排放(图3、表4)。夜间增温促进了水稻生长前期植株分蘖及生物量积累^[19],提高植株对速效氮吸收利用,硝化和反硝化作用底物减少,抑制了 N_2O 产生及排放^[56-57];硝化和反硝化细菌活性需要适宜的土壤水、气、热条件。水稻生长后期,夜间增温加速了植株衰老退化,使土壤有机残体增加,后期气温下降(图1),增温则促进土壤微生物活性,且后期灌溉停止(图2),稻田干湿交替使硝化和反硝化作用交替进行,从而促进 N_2O 产生及排放^[45,48]。与常规淹水灌溉相比,湿润灌溉促进稻田 N_2O 排放。淹水灌溉的稻田水层限制大气中氧气向土壤传输,使土壤形成厌氧还原环境,硝化作用受到抑制,反硝化产物以 N_2 为主, N_2O 产生量及排放量较低^[45];湿润灌溉的稻田没有水层阻挡,有利于大气中氧气向土壤输送,土壤通气性改善,土壤硝化和反硝化过程同时进行,有利于 N_2O 产生及排放^[54-56]。与正常播期相比,晚播可明显降低麦田 N_2O 排放,其中夜间增温下晚播麦田各生育期 N_2O 排

放量几乎均显著低于正常播期(图4、表6)。不同播期麦田N₂O排放量的差异,可能与前作稻田灌溉方式有关,常规灌溉稻田持续厌氧还原条件,降低土壤有机氮矿化,导致有机氮累积,而正常播期麦田土壤通气性改善,促进有机氮矿化形成较多无机氮,促进麦田N₂O产生及排放^[58];而夜间增温下晚播冬小麦植株蒸腾速率较高,引起土壤含水量下降^[12,19],抑制土壤硝化和反硝化细菌活性,导致N₂O产生量及排放量降低。

温度和水分是影响作物干物质积累和产量形成的重要因素。本试验中,相同灌溉条件下夜间增温显著降低水稻产量;相同温度条件下湿润灌溉使水稻产量下降,但差异不显著(表7)。原因可能与夜间增温引起水稻主要生育期夜间冠层温度升高及活动积温增加有关(表1、表2),其使生育期提前,加剧高温热害的发生,不利于产量形成^[8-9,59]。本试验中,两种灌溉方式下夜间增温均提高水稻冠层平均温度和活动积温,最大增幅均在灌浆期(表1、表2),这可能引起籽粒灌浆过程中光合产物转运量减少,导致籽粒灌浆受抑,千粒质量降低^[60];夜间增温降低水稻植株净光合速率,增加荧光耗散,使呼吸作用增强,光合产物净积累量减少,降低植株有效穗数、每穗实粒数和结实率,引起产量下降^[19];此外,湿润灌溉可促使光合产物向地下部根系运输分配,促进根系生长,根系过于冗余和呼吸消耗增多,引起产量下降^[40]。

气候变暖在冬、春季尤为明显,而长江中下游稻-麦轮作冬小麦生长期在11月至翌年6月,因此受影响较大^[1-2,13]。正常播期下夜间增温降低冬小麦产量,适时晚播下夜间增温提高产量;无论常温对照或夜间增温下,适时晚播均可明显提高冬小麦产量(表7)。积温是影响作物生长发育的重要热量指标。与常温对照相比,夜间增温可明显提高冬小麦主要生育期夜间冠层活动积温,适时晚播积温增幅均高于正常播期,晚播冬小麦积温可满足其生长需要(表2)。正常播期下夜间增温促使冬小麦植株生长加快,生育期缩短,孕穗期光合作用减弱,穗粒数和千粒质量下降,引起产量降低^[12-13,61];晚播下夜间增温使冬小麦叶片净光合速率提高,荧光耗散减小,光合产物净积累量增多,穗粒数和千粒质量增加,从而使产量增加^[62-63]。气候变化背景下极端天气气候事件频发,如高温热害、低温冷害等^[12-13]。正常播种的冬小麦因冬前气温较高,幼苗易出现徒长,进入冬季气温较低(图1),低温胁迫导致叶面积指数和光合速率下降,小蘖穗高降低,穗长缩短,小花败育甚至小穗冻死,引起穗粒数、

千粒质量和产量下降^[64-66]。冬小麦中后期高温热害对产量形成有极为不利影响。本试验正常播种的冬小麦在灌浆-成熟期遭遇持续高温天气(图1),持续高温可导致灌浆期缩短,籽粒灌浆速率和千粒质量降低,引起产量下降^[67-68]。适时晚播使冬小麦出苗及生育期延迟,冬季幼苗生长缓慢,有利于安全越冬。适时晚播可提高同化物向穗部的转运量,提高小花成活率,增加穗粒数,提高氮素吸收效率,使产量增加^[69-71]。

4 结论

(1) 夜间增温或湿润灌溉均降低水稻生物量和产量,而晚播则增加冬小麦产量。

(2) 稻-麦轮作农田稻季CH₄排放量占主导地位,远大于N₂O排放量。与常温淹水灌溉相比,湿润灌溉显著降低稻田CH₄排放,显著增加稻田N₂O排放;而与夜间增温淹水灌溉相比,湿润灌溉则增加稻田CH₄排放。夜间增温下晚播显著降低N₂O排放。

(3) 稻季温室气体排放强度(GHGI)对稻-麦轮作农田总GHGI的贡献最大,其中稻田CH₄排放均起决定作用。夜间增温显著降低淹水/正常播期稻-麦轮作农田GHGI,显著增加了湿润/晚播稻麦轮作系统的GHGI。研究认为,综合考虑产量和环境效益,水稻采用常规灌溉(间歇灌溉)和冬小麦正常播种是长江下游稻-麦轮作农田应对气候变暖的有效技术措施。

参考文献:

- [1] IPCC. Climate change 2021: The physical science basis[M]//LEE J Y, MAROTZKE J, BALA G, et al. Future global climate: scenario-42 based projections and near-term information. Cambridge: Cambridge University Press, 2021:1-195.
- [2] 丁一汇,任国玉,石广玉,等.气候变化国家评估报告(I):中国气候变化的历史和未来趋势[J].气候变化研究进展,2006,2(1):1-5.
DING Y H, REN G Y, SHI G Y, et al. National assessment report on climate change(I): historical and future trends of climate change in China[J]. *Advances in Climate Change Research*, 2006, 2(1):1-5.
- [3] BOUSQUET P, CIAIS P, MILLER J B, et al. Contribution of anthropogenic and natural sources to atmospheric methane variability[J]. *Nature*, 2006, 443(7110):439-443.
- [4] MONTZKA S A, DLUGOKENCKY E J, BUTLER J H. Non-CO₂ greenhouse gases and climate change[J]. *Nature*, 2011, 476(7358):43-50.
- [5] TIAN H, REN W, TAO B, et al. Climate extremes and ozone pollution: a growing threat to China's food security[J]. *Ecosystem Health and Sustainability*, 2016, 2(1):1-10.
- [6] YAN X, YAGI K, AKIYAMA H, et al. Statistical analysis of the major variables controlling methane emission from rice fields[J]. *Global*

- Change Biology*, 2010, 11(7):1131–1141.
- [7] 田展,牛逸龙,孙来祥,等.基于DNDC模型模拟气候变化影响下的中国水稻田温室气体排放[J].应用生态学报,2016,26(3):793–799. TIAN Z, NIU Y L, SUN L X, et al. Simulation of greenhouse gas emissions in paddy fields of China under climate change based on DNDC model[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2016, 26 (3) : 793–799.
- [8] 董文军,邓艾兴,张彬,等.开放式昼夜不同增温对单季稻影响的试验研究[J].生态学报,2010,31(8):2169–2177. DONG W J, DENG A X, ZHANG B, et al. An experimental study on the effects of different diurnal warming regimes on single cropping rice with Free Air Temperature Increased(FATI) facility[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, 31(8):2169–2177.
- [9] 侯雯嘉,耿婷,陈群,等.近20年气候变暖对东北水稻生育期和产量的影响[J].应用生态学报,2015,26(1):249–259. HOU W J, GENG T, CHEN Q, et al. Effects of climate warming on growth period and yield of rice in northeast China in recent 20 years[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2015, 26(1):249–259.
- [10] LI K, YANG X, TIAN H, et al. Effects of changing climate and cultivar on the phenology and yield of winter wheat in the North China Plain[J]. *International Journal of Biometeorology*, 2016, 60(1):21–27.
- [11] ZHAO C, PIAO S, WANG X, et al. Plausible rice yield losses under future climate warming[J]. *Nature Plants*, 2016, 3(1):16202.
- [12] 房世波,谭凯炎,任三学,等.气候变暖对冬小麦生长和产量影响的大田实验研究[J].中国科学:地球科学,2012,42(7):1069. FANG S B, TAN K Y, REN S X, et al. Fields experiments in North China show no decrease in winter wheat yields with night temperature increased by 2.0–2.5 °C[J]. *Science China Earth Sci*, 2012, 55: 1021–1027.
- [13] TAO F, ZHANG Z, XIAO D, et al. Responses of wheat growth and yield to climate change in different climate zones of China, 1981–2009[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2014, 189/190:91–104.
- [14] 张佳华,张健南,姚凤梅,等.开放式增温对东北稻田生态系统作物生长与产量的影响[J].生态学杂志,2013,32(1):15–21. ZHANG J H, ZHANG J N, YAO F M, et al. Effects of free air temperature increasing on the rice growth and grain yield in northeast China [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2013, 32(1):15–21.
- [15] 石姣姣,江晓东,邱思齐.昼夜不同增温处理对小麦生长发育和产量的影响[J].江苏农业科学,2015,43(1):82–84. SHI J J, JIANG X D, QIU S Q. Effects of different day-night warming treatments on growth, development and yield of wheat[J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2015, 43(1):82–84.
- [16] CHEN J, TIAN Y, ZHANG X, et al. Nighttime warming will increase winter wheat yield through improving plant development and grain growth in north China[J]. *Journal of Plant Growth Regulation*, 2014, 33(2):397–407.
- [17] 唐海明,肖小平,汤文光,等.长期施肥对双季稻田甲烷排放和关键功能微生物的影响[J].生态学报,2017,37(22):7668–7678. TANG H M, XIAO X P, TANG W G, et al. Effects of long-term fertilizer treatments on CH₄ fluxes and key functional microorganisms in a double-cropping paddy field[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, 37(22): 7668–7678.
- [18] MILLS R T E, DEWHIRST N, SOWERBY A, et al. Interactive effects of depth and temperature on CH₄ and N₂O flux in a shallow podzol[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2013, 62:1–4.
- [19] ZHANG Z, LOU Y, LI J, et al. Impacts of nighttime warming on rice growth, physiological properties and yield under water saving irrigation[J]. *International Journal of Global Warming*, 2020, 21(2): 105–119.
- [20] ZHANG N, XIA J, YU X, et al. Soil microbial community changes and their linkages with ecosystem carbon exchange under asymmetrically diurnal warming[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2011, 43(10): 2053–2059.
- [21] TOKIDA T, CHENG W, ADACHI M, et al. The contribution of entrapped gas bubbles to the soil methane pool and their role in methane emission from rice paddy soil in free-air [CO₂] enrichment and soil warming experiments[J]. *Plant and Soil*, 2013, 364(1/2): 131–143.
- [22] ZHANG G, YU H, FAN X, et al. Carbon isotope fractionation reveals distinct process of CH₄ emission from different compartments of paddy ecosystem[J]. *Scientific Reports*, 2016, 6(1):27065.
- [23] 胡正华,周迎平,崔海羚,等.昼夜增温对大豆田土壤N₂O排放的影响[J].环境科学,2013,34(8):2961–2967. HU Z H, ZHOU Y P, CUI H L, et al. Effects of diurnal warming on soil N₂O emission in soybean field[J]. *Environmental Science*, 2013, 34(8):2961–2967.
- [24] AVRAHAMI S, CONRAD R. Patterns of community change among ammonia oxidizers in meadow soils upon long-term incubation at different temperatures[J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 2003, 69(10):6152–6164.
- [25] HU Y, CHANG X, LIN X, et al. Effects of warming and grazing on N₂O fluxes in an alpine meadow ecosystem on the Tibetan Plateau[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2010, 42(6):944–952.
- [26] COTRUFO M F, INESON P, SCOTT A. Elevated CO₂ reduces the nitrogen concentration of plant tissues[J]. *Global Change Biology*, 2010, 4(1):43–54.
- [27] MOSIER A R, MORGAN J A, KING J Y, et al. Soil-atmosphere exchange of CH₄, CO₂, NO_x, and N₂O in the Colorado shortgrass steppe under elevated CO₂[J]. *Plant and Soil*, 2002, 240(2):201–211.
- [28] TYAGI L, KUMARI B, SINGH S N. Water management–A tool for methane mitigation from irrigated paddy fields[J]. *Science of the Total Environment*, 2010, 408(5):1085–1090.
- [29] 熊正琴,邢光熹,施书莲,等.轮作制度对水稻生长季节稻田氧化亚氮排放的影响[J].应用生态学报,2003,14(10):1761–1764. XIONG Z Q, XING G X, SHI S L, et al. Effects of cropping system on nitrous oxide emissions from paddy soils during the rice growing season[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2003, 14 (10) : 1761–1764.
- [30] 商庆银,杨秀霞,成臣,等.秸秆还田条件下不同水分管理对双季稻田综合温室效应的影响[J].中国水稻科学,2015,29(2):181–190. SHANG Q Y, YANG X X, CHENG C, et al. Effects of different water management on comprehensive greenhouse effect of double

- cropping rice field under straw returning condition[J]. *Chinese Journal of Rice Science*, 2015, 29(2):181–190.
- [31] 谢立勇, 许婧, 郭李萍, 等. 水肥管理对稻田CH₄排放及其全球增温潜势影响的评估[J]. 中国生态农业学报, 2017, 25(7):958–967. XIE L Y, XU J, GUO L P, et al. 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.
- [32] XU Y, GE J, TIAN S, et al. Effects of water-saving irrigation practices and drought resistant rice variety on greenhouse gas emissions from a no-till paddy in the central lowlands of China[J]. *Science of the Total Environment*, 2015, 505:1043–1052.
- [33] ALI S A, TEDONE L, VERDINI L, et al. Effect of different crop management systems on rainfed durum wheat greenhouse gas emissions and carbon footprint under Mediterranean conditions[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2017, 140(2):608–621.
- [34] TU C, LI F. Responses of greenhouse gas fluxes to experimental warming in wheat season under conventional tillage and no-tillage fields [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2017, 54(4):314–327.
- [35] 宋利娜, 张玉铭, 胡春胜, 等. 华北平原高产农区冬小麦农田土壤温室气体排放及其综合温室效应[J]. 中国生态农业学报, 2013, 21(3):297–307. SONG L N, ZHANG Y M, HU C S, et al. Greenhouse gas emission and comprehensive greenhouse effect of winter wheat farmland in high yield agricultural area of North China Plain[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2013, 21(3):297–307.
- [36] ZHANG Y, SHENG J, WANG Z, et al. Nitrous oxide and methane emissions from a Chinese wheat-rice cropping system under different tillage practices during the wheat-growing season[J]. *Soil and Tillage Research*, 2015, 146:261–269.
- [37] KUNDZEWICZ Z W, KRYSANNOVA V, BENESTAD R E, et al. Uncertainty in climate change impacts on water resources[J]. *Environmental Science and Policy*, 2018, 79:1–8.
- [38] REZAEI E E, SIEBERT S, EWERT F. Intensity of heat stress in winter wheat-phenology compensates for the adverse effect of global warming[J]. *Environmental Research Letters*, 2015, 10(2):24012–24020.
- [39] 王明星. 中国稻田甲烷排放[M]. 北京: 科学出版社, 2001:47–48. WANG M X. Methane emissions from rice fields in China[M]. Beijing: Science Press, 2001:47–48.
- [40] 王婷婷, 祝贞科, 朱捍华, 等. 施氮和水分管理对光合碳在土壤-水稻系统间分配的量化研究[J]. 环境科学, 2017, 38(3):1227–1234. WANG T T, ZHU Z K, ZHU H H, et al. Effects of nitrogen and water management on the distribution of photosynthetic carbon in soil-rice system[J]. *Environmental Science*, 2017, 38(3):1227–1234.
- [41] 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.
- [42] TANGEN B A, FINOCCHIARO R G, GLEASON R A, et al. Greenhouse gas fluxes of a shallow lake in South-Central North Dakota, USA[J]. *Wetlands*, 2016, 36(4):779–787.
- [43] HERZOG T, BAUMERT K A, PERSHING J. Target-Intensity: an analysis of greenhouse gas intensity targets[M]. Washington: World Resources Institute, 2006.
- [44] 李大明, 成艳红, 刘满强, 等. 双季稻田甲烷排放与土壤产甲烷菌群落结构和数量关系研究[J]. 农业环境科学学报, 2013, 32(4):866–873. LI D M, CHENG Y H, LIU M Q, et al. Relationship between methane emission and the community structure and abundance of methanogens under double rice cropping system[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2013, 32(4):866–873.
- [45] 蔡祖聪, 徐华, 马静, 著. 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.
- [46] JIANG M, XU P, WU L, et al. Methane emission, methanogenic and methanotrophic communities during rice-growing seasons differ in diversified rice rotation systems[J]. *Science of the Total Environment*, 2022, 842:156781.
- [47] WU G, LING J, XU Y, et al. Effects of soil warming and straw return on soil organic matter and greenhouse gas fluxes in winter wheat seasons in the North China Plain[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2022, 356:131810.
- [48] 刘燕, 娄运生, 杨蕙琳, 等. 施硅对增温稻田CH₄和N₂O排放的影响[J]. 生态学报, 2020, 40(18):6621–6631. LIU Y, LOU Y S, YANG H L, et al. Effects of silicate supply on the emissions of methane and nitrous oxide in a paddy field under nighttime warming[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2020, 40(18):6621–6631.
- [49] GAIHRE Y K, WASSMANN R, PANGGA G V. Impact of elevated temperatures on greenhouse gas emissions in rice systems: interaction with straw incorporation studied in a growth chamber experiment[J]. *Plant and Soil*, 2013, 273:857–875.
- [50] 韩雪, 陈宝明. 增温对土壤N₂O和CH₄排放的影响与微生物机制研究进展[J]. 应用生态学报, 2020, 31(11):3906–3914. HAN X, CHEN B M. Progress in the effects of warming on soil N₂O and CH₄ emission and the underlying microbial mechanisms[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2020, 31(11):3906–3914.
- [51] VIGANO I, WEELDEN H V, HOLZINGER R, et al. Effect of UV radiation and temperature on the emission of methane from plant biomass and structural components[J]. *Biogeosciences*, 2008, 5(3):937–947.
- [52] 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 Z H, LOU Y S, ZUO H T, et al. Effects of silicon application on physiological characteristics of rice leaves under nighttime warming conditions[J]. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2017, 38(10):663–671.
- [53] DEVÈVRE O C, HORWÁTH W R. Decomposition of rice straw and microbial carbon use efficiency under different soil temperature and moisture[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2000, 32(11):1773–1785.
- [54] 刘杰云, 邱虎森, 张文正, 等. 节水灌溉对农田土壤温室气体排放的影响[J]. 灌溉排水学报, 2019, 38(6):1–7. LIU J Y, QIU H S, ZHANG W Z, et al. Effects of water-saving irrigation on greenhouse gas emissions from farmland soils[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2019, 38(6):1–7.
- [55] 杨小兵, 江波, 殷寒旭, 等. 冬小麦田间控水对土壤CH₄和N₂O排

- 放的影响[J]. 土壤通报, 2015, 46(2): 471–476. YANG X B, JIANG B, YIN H X, et al. Effects of field water control on soil CH₄ and N₂O emission in winter wheat[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2015, 46(2): 471–476.
- [56] TOWPRAYOON S, SMAKGAHN K, POONKAEW S. Mitigation of methane and nitrous oxide emissions from drained irrigated rice fields [J]. *Chemosphere*, 2005, 59(11): 1547–1556.
- [57] KREYE C, DITTERT K, ZHENG X, et al. Fluxes of methane and nitrous oxide in water-saving rice production in north China[J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2007, 77(3): 293–304.
- [58] 侯会静, 陈慧, 杨士红, 等. 水稻控制灌溉对稻麦轮作农田N₂O排放的调控效应[J]. 农业工程学报, 2015, 31(12): 125–131. HOU H J, CHEN H, YANG S H, et al. Regulation effect of rice controlled irrigation on N₂O emission in rice-wheat rotation farmland[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2015, 31(12): 125–131.
- [59] XU Y, CHU C, YAO S. The impact of high-temperature stress on rice: challenges and solutions[J]. *The Crop Journal*, 2021, 9: 963–976.
- [60] REHMANI M I S, WEI G, HUSSAIN N, et al. Yield and quality responses of two indica rice hybrids to post-anthesis asymmetric day and night open-field warming in lower reaches of Yangtze River delta [J]. *Field Crops Research*, 2014, 156: 231–241.
- [61] 卞晓波, 陈丹丹, 王强盛, 等. 花后开放式增温对小麦产量及品质的影响[J]. 中国农业科学, 2012, 45(8): 1489–1498. BIAN X B, CHEN D D, WANG Q S, et al. Effects of open temperature warming after anthesis on yield and quality of wheat[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2012, 45(8): 1489–1498.
- [62] 杨锦浩, 李宇星, 张月, 等. 夜间增温对小麦干物质积累、转运、分配及产量的影响[J]. 核农学报, 2022, 36(11): 2295–2306. YANG J H, LI Y X, ZHANG Y, et al. Effects of nighttime warming on dry matter accumulation, transport, distribution and yield of wheat[J]. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 2022, 36(11): 2295–2306.
- [63] KAWAKITA S, ISHIKAWA N, TAKAHASHI H, et al. Interactions of cultivar, sowing date, and growing environment differentially alter wheat phenology under climate warming[J]. *Agronomy Journal*, 2021, 113: 4982–4992.
- [64] 岳俊芹, 张素瑜, 李向东, 等. 低温胁迫对小麦叶绿素荧光参数及产量的响应[J]. 麦类作物学报, 2021, 41(1): 105–110. YUE J Q, ZHANG S Y, LI X D, et al. Response of low temperature stress to chlorophyll fluorescence parameters and yield of wheat[J]. *Acta Triticeae Crops*, 2021, 41(1): 105–110.
- [65] XIAO L, ASSENG S, WANG X, et al. Simulating the effects of low-temperature stress on wheat biomass growth and yield[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2022, 326: 109191.
- [66] 李向东, 张德奇, 王汉芳, 等. 越冬前增温对小麦生长发育和产量的影响[J]. 应用生态学报, 2015, 26(3): 839–846. LI X D, ZHANG D Q, WANG H F, et al. Effects of pre-winter warming on growth, development and yield of wheat[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2015, 26(3): 839–846.
- [67] MISHRA D, SHEKHAR S, CHAKRABORTY S, et al. High temperature stress responses and wheat: impacts and alleviation strategies[J]. *Environmental and Experimental Botany*, 2021, 190: 104589.
- [68] ZHAO K, TAO Y, LIU M, et al. Does temporary heat stress or low temperature stress similarly affect yield, starch, and protein of winter wheat grain during grain filling? [J]. *Journal of Cereal Science*, 2022, 103: 103408.
- [69] ZHU Y, CHU J, DAI X, et al. Delayed sowing increases grain number by enhancing spike competition capacity for assimilates in winter wheat[J]. *European Journal of Agronomy*, 2019, 104: 49–62.
- [70] YIN L, DAI X, HE M. Delayed sowing improves nitrogen utilization efficiency in winter wheat without impacting yield[J]. *Field Crops Research*, 2018, 221: 90–97.
- [71] 吴金芝, 黄明, 王志敏, 等. 极端晚播对小麦籽粒产量、氮素吸收利用和籽粒蛋白质含量的影响[J]. 应用生态学报, 2018, 29(1): 185–192. WU J Z, HUANG M, WANG Z M, et al. Effects of extreme late sowing on grain yield, nitrogen absorption and utilization and grain protein content in wheat[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2018, 29(1): 185–192.