中国生态农业学报(中英文)
Chinese Journal of Eco-Agriculture

**缓释氮肥减量替代对水稻产量和稻田温室气体排放的影响**

康治东，徐　飞，卢　恒，钟志勉，章力干，李　硕

**Effects of slow-release nitrogen fertilizer reduction substitution on rice yield and greenhouse gas emissions in paddy fields**

KANG Zhidong, XU Fei, LU Heng, ZHONG Zhimian, ZHANG Ligan, and LI Shuo

在线阅读 View online: https://doi.org/10.12357/cjea.20240802

---

**您可能感兴趣的其他文章**

**Articles you may be interested in**

施氮量对太湖流域再生稻产量和温室气体排放的影响

The impact of nitrogen application rate on rice yield and greenhouse gas emissions of ratoon rice in the Taihu Lake region

中国生态农业学报(中英文). 2024, 32(12): 2045–2055

中国油料作物能源利用效率与温室气体排放

Energy use efficiency and greenhouse gas emissions of oil crops in China

中国生态农业学报(中英文). 2023, 31(12): 1984–1996

中国食物系统温室气体排放与吸收研究进展

Research progress of greenhouse gas emissions and sequestration of the Chinese food system

中国生态农业学报(中英文). 2023, 31(2): 177–193

施石膏对水稻产量和甲烷排放影响的荟萃分析

Effects of gypsum application on grain yield and methane emissions in rice paddies: a global meta–analysis

中国生态农业学报(中英文). 2023, 31(2): 280–289

生物炭对盐渍化土壤周年温室气体排放及冻融效应的影响

Effects of biochar on annual greenhouse gas emissions and freeze–thaw effects in saline soil

中国生态农业学报(中英文). 2022, 30(10): 1565–1576

基于DNDC模型评估湖北省不同稻作系统不同管理措施温室气体排放的周年变化

Assessment of the annual greenhouse gases emissions under different rice–based cropping systems in Hubei Province based on the denitrification–decomposition (DNDC) model

中国生态农业学报(中英文). 2021, 29(9): 1480–1492

关注微信公众号，获得更多资讯信息

中国生态农业学报(中英文) 2025 年 2 月 第 33 卷 第 9 期
Chinese Journal of Eco-Agriculture, Feb. 2025, 33(9): 1−11

**DOI:** 10.12357/cjea.20240802

**CSTR:** 32371.14.cjea.20240802

康治东, 徐飞, 卢恒, 钟志勉, 章力干, 李硕. 缓释氮肥减量替代对水稻产量和稻田温室气体排放的影响[J]. 中国生态农业学报 (中英文), 2025, 33(9): 1−11

KANG Z D, XU F, LU H, ZHONG Z M, ZHANG L G, LI S. Effects of slow-release nitrogen fertilizer reduction substitution on rice yield and greenhouse gas emissions in paddy fields[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2025, 33(9): 1−11

# 缓释氮肥减量替代对水稻产量和稻田温室气体排放的影响*

康治东[1†], 徐 飞[1†], 卢 恒[1], 钟志勉[2], 章力干[1], 李 硕[1**]

(1. 农田生态保育与养分资源高效利用安徽省重点实验室/自然资源部江淮耕地资源保护与生态修复重点实验室/安徽农业大学资源与环境学院 合肥 230036; 2. 茂施农业科技有限公司 池州 242800)

**摘 要:** 明确缓释氮肥减量施用最佳比例及其对水稻产量和温室气体排放的影响, 可为稻田缓释氮肥施用方案的选择及其农业绿色可持续生产提供理论依据。本文以长江中下游平原秸秆还田条件下的稻田为研究对象, 定量研究缓释氮肥减量替代常规氮肥对水稻产量和水稻季温室气体 [ 二氧化碳 ($CO_2$)、氧化亚氮 ($N_2O$) 和甲烷 ($CH_4$)] 排放的影响。试验包括 6 个处理: 不施肥对照 (CK)、常规施肥 (CN)、缓释氮肥等氮替代常规氮肥 (SRN) 以及在 SRN 基础上减氮 20% (−20% SRN)、减氮 40% (−40% SRN) 和减氮 60% (−60% SRN)。与 CK 处理相比, 各施肥处理均能显著提高水稻产量, 其中 SRN 处理水稻产量最高 (9.78 t·hm$^{-2}$), −20% SRN 与 SRN 处理无显著差异; 与 CN 处理相比, SRN 和−20% SRN 处理水稻产量分别显著增加 10.1% 和 7.7% ($P$<0.05), 而−60% SRN 处理显著降低 11.2% ($P$<0.05)。与 CK 处理相比, 各施肥处理均能显著增加 $CO_2$、$N_2O$ 和 $CH_4$ 累积排放量及稻田全球增温潜势 (GPW), 且具有相似趋势: CN≈SRN>−20% SRN>−40% SRN>−60% SRN>CK。相较于 CK 处理, CN 和 SRN 处理亦可显著增加温室气体排放强度, 其增幅为 10.3~34.0% ($P$<0.05)。与 CN 处理相比, 缓释氮肥等氮替代常规氮肥各处理均可显著降低稻田温室气体排放强度, 其降幅为 8.9%~17.7% ($P$<0.05)。缓释氮肥减氮 20% 替代常规氮肥是该区稻田缓释氮肥减量施用最佳比例, 对提高土壤肥力和水稻产量、降低温室气体排放和发展可持续农业具有重要意义。

**关键词:** 缓释氮肥; 水稻产量; 温室气体排放; 全球增温潜势; 温室气体排放强度

**中图分类号:** S143.1

# Effects of slow-release nitrogen fertilizer reduction substitution on rice yield and greenhouse gas emissions in paddy fields*

KANG Zhidong[1†], XU Fei[1†], LU Heng[1], ZHONG Zhimian[2], ZHANG Ligan[1], LI Shuo[1**]

(1. Anhui Province Key Lab of Farmland Ecological Conservation and Nutrient Utilization / Key Laboratory of JiangHuai Arable Land Resources Protection and Eco-restoration, Ministry of Natural Resources / College of Resources and Environment, Anhui Agricultural University, Hefei 230036, China; 2. Moith Agricultural Tech Co., Ltd., Chizhou 242800, China)

* 国家重点研发计划 (2021YFD1700201, 2023YFD1902300) 资助

** 通信作者: 李硕, 主要研究方向为农业生态学与养分资源管理。E-mail: muzishiye9011@163.com

† 共同第一作者: 康治东, 主要研究方向为农业生态学与养分资源管理, E-mail: 1759173767@qq.com; 徐飞, 主要研究方向为农业生态学与养分资源管理, E-mail: 2768751639@qq.com

收稿日期: 2024-12-11 接受日期: 2025-02-16

* This study was supported by the National Key Research & Development Program of China (2021YFD1700201, 2023YFD1902300).

** Corresponding author, E-mail: muzishiye9011@163.com

† Equivalent contributors

Received Dec. 11, 2024; accepted Feb. 16, 2025

**Abstract:** In this study, to provide a theoretical basis for the selection of slow-release nitrogen fertilizer application schemes in rice fields and for green and sustainable agricultural production, we sought to determine the optimal proportion of slow-release nitrogen fertilizer application and its effects on rice yield and greenhouse gas emissions. The effects of slow-release nitrogen fertilizer reducing substitution for conventional nitrogen fertilizer on rice yield and greenhouse gas ($CO_2$, $N_2O$, and $CH_4$) emissions during rice cropping season were quantitatively assessed in paddy fields under straw return in the middle and lower reaches of the Yangtze River Basin. The study included the following six treatments: no fertilizer control (CK), conventional fertilizer (CN), slow-release nitrogen fertilizer substitution for conventional nitrogen fertilizer based on the same nitrogen input (SRN), and 20%, 40%, and 60% nitrogen reductions (−20% SRN, −40% SRN, and −60% SRN) based on SRN. The results revealed that compared with the CK treatment, the highest rice yield (9.78 $t \cdot hm^{-2}$) was obtained in plots receiving the SRN treatment, and that there were no significant differences between the −20% SRN and SRN treatments. Compared with CN treatment, the SRN and −20% SRN treatments were found to promote significant increases of 10.1% and 7.7% in the yields of rice, respectively ($P$<0.05), whereas the −60% SRN treatment contributed to a significant 11.2% reduction ($P$<0.05). Furthermore, compared with the CK treatment, all the other fertilization treatments were found to promote significant increases in the cumulative emissions of $CO_2$, $N_2O$ and $CH_4$, as well as in the global warming potential of paddy field soils, with a similar trend of CN ≈ SRN > −20% SRN > −40% SRN > −60% SRN > CK. In addition, compared with CK treatment, the CN and SRN treatments contributed to significant increases of 10.3%−34.0% in greenhouse gas emission intensity ($P$<0.05), whereas compared with the CN treatment, treatments with slow-release nitrogen fertilizer substitution for conventional nitrogen fertilizer were found to be associated with significant reduction in greenhouse gas emission intensity ranging from 8.9% to 17.7% in paddy fields ($P$<0.05). Overall, our findings indicate that 20% reduction in slow-release nitrogen fertilizer substitution for conventional nitrogen fertilizer is the optimal proportion of slow-release nitrogen fertilizer reduction applied in paddy field in this area. Adopting such practices could contribute to substantially enhancing soil fertility and rice yield, reduce greenhouse gas emissions, and promote sustainable agricultural development.

**Keywords:** slow-release nitrogen fertilizer; rice yield; greenhouse gas emissions; global warming potential; greenhouse gas emission intensity

温室气体浓度升高能够直接引发气候变暖[1]。作为重要的温室气体, 氧化亚氮 ($N_2O$) 和甲烷 ($CH_4$) 的全球增温潜势 (GWP) 分别为二氧化碳 ($CO_2$) 的 273 和 29.8 倍[2]。稻田温室气体排放占全球农田 $N_2O$ 和 $CH_4$ 总排放量的 10% 和 50%[3]。作为世界第一大水稻 (*Oryza sativa*) 生产国, 我国水稻种植面积占全国耕地面积的 23%, 亦占全球水稻种植总面积的 19%[4]。因此, 在保证水稻产量的前提下, 探究稻田增效减排模式, 对减缓气候变暖和确保水稻可持续生产具有重要意义。

氮肥施用是确保水稻优质高产/稳产的基础, 亦是影响稻田温室气体排放的一项重要因素[5-6]。研究表明, 在一定范围内, 随着氮肥施用量的增加, 水稻产量逐渐增加; 然而, 当氮肥施用量超过其阈值后, 水稻产量将维持在一定水平, 甚至有所下降[7-8]。研究表明, 稻田 $N_2O$ 排放量随着施氮量的增加而显著增加[9]。然而, 在不同氮水平下, 稻田 $CH_4$ 排放量对施氮的响应有所不同。研究表明, 在低氮水平下, 施氮可显著提高 $CH_4$ 排放量; 在中氮水平下, $CH_4$ 排放量与施氮并无明显相关关系; 在高氮水平下, 施氮却可显著降低 $CH_4$ 排放量[10-11]。因此, 在高氮水平下, 稻田 $N_2O$ 和 $CH_4$ 排放可能存在此消彼长的关系[12-13]。基于此, 为了更为准确地综合评估氮肥施用条件下稻田 $N_2O$ 和 $CH_4$ 排放所引发的温室效应, 采用 GWP 评估法很有必要[4-6]。针对氮肥施用, 前人已进行了大量试验研究, 但在水稻高产/稳产前提下如何通过温室气体排放量的有效降低来减轻其 GWP, 仍是农艺工作者的关注焦点[6,9,14]。作为一种新型肥料, 缓释氮肥在作物高产/稳产、减少施肥次数和降低温室气体排放等方面已展现出显著优势[14-16]。然而, 在水稻高产/稳产基础上, 缓释氮肥减量施用最佳比例及其是否亦能进一步降低温室气体排放, 尚不清楚。基于此, 本研究以长江中下游平原秸秆还田条件下的稻田为研究对象, 采用静态箱-气相色谱法, 监测缓释不同减量比例 (20%、40% 和 60%) 替代常规氮肥条件下水稻季 $CO_2$、$N_2O$ 和 $CH_4$ 的排放规律, 同时监测土壤环境因子的动态变化, 阐明缓释氮肥减量替代常规氮肥对稻田温室气体排放的影响及其原因, 并明确其稻田综合温室效应差异, 以期为稻田缓释氮肥施用方案的选择及其农业绿色可持续生产提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验地概况

试验于 2023 年 6 月—10 月在安徽省合肥市肥东县古城镇大胡村 (32°7′14″N, 117°45′58″E) 进行。

该试验区属于亚热带湿润性季风气候。试验期间, 日平均气温 26.2 ℃, 累积降水量 408.7 mm (图 1)。该试验区土壤肥力均一, 灌溉和排水均便捷, 且区域代表性较强。供试土壤为潴育型水稻土。试验开始时, 耕作层 (0~20 cm) 土壤理化性质分别为: 土壤有机碳 (SOC) 14.05 g·kg$^{-1}$, 全氮 (TN) 1.14 g·kg$^{-1}$, 硝态氮 ($NO_3^-$-N) 8.15 mg·kg$^{-1}$, 铵态氮 ($NH_4^+$-N) 7.86 mg·kg$^{-1}$, 速效磷 20.92 mg·kg$^{-1}$, 速效钾 177.35 mg·kg$^{-1}$, pH 6.62。

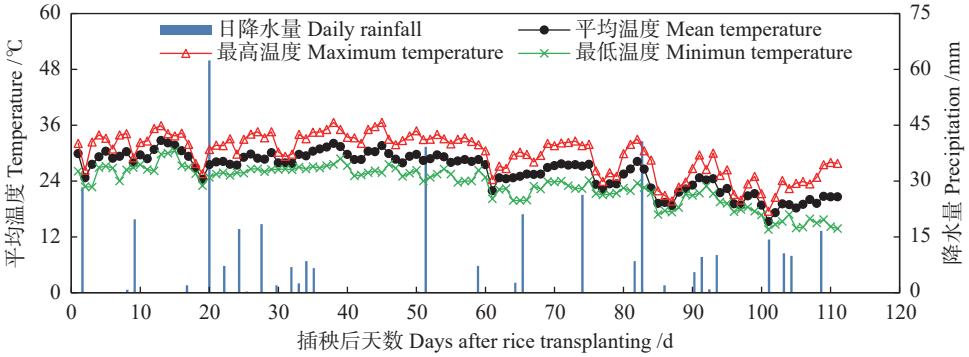



**图 1　试验地水稻生长季平均温度和日降水量**

Fig. 1　The average temperature and daily precipitation during the rice growing season in experimental fields

### 1.2　试验设计

试验小区一直实行小麦 (*Triticum aestivum*)-水稻一年两熟制, 水稻于 6 月中下旬插秧, 10 月中旬收获; 小麦于当年 10 月中下旬播种, 翌年 6 月上旬收获。本研究主要集中于水稻生长季。试验采用随机区组设计, 共设 6 个处理: 不施肥对照 (CK)、常规施肥 (CN)、缓释氮肥等氮替代常规氮肥 (SRN) 以及在 SRN 基础上减氮 20% (−20% SRN)、减氮 40% (−40% SRN) 和减氮 60% (−60% SRN)。水稻行株距为 0.3 m×0.15 m, 小区面积为 92 m$^2$ (20 m×4.6 m), 重复 3 次。

供试水稻品种为‘粤两优 19 香’。CN 和 SRN 处理中, 水稻季肥料施用量为 225 kg(N)·hm$^{-2}$、120 kg($P_2O_5$)·hm$^{-2}$ 和 120 kg($K_2O$)·hm$^{-2}$; 在 −20% SRN、−40% SRN 和−60% SRN 处理中, 氮肥用量分别在 SRN 基础上减施 20%、40% 和 60%, 磷肥和钾肥施用量同 SRN 处理。CN 处理中, 供试肥料分别为尿素 (含 N 46%)、过磷酸钙 (含 $P_2O_5$ 12%) 和硫酸钾 (含 $K_2O$ 60%); 在缓释肥施用各处理中, 供试肥料分别为缓释氮肥 (含 N 46%)、过磷酸钙 (含 $P_2O_5$ 12%) 和硫酸钾 (含 $K_2O$ 60%)。缓释氮肥为安徽茂施肥料有限公司生产的水稻缓释氮专用肥, 其养分结构为普通尿素: 60 d 释放期缓释尿素: 90 d 释放期缓释尿素=6∶2∶2。CN 处理中, 氮肥施用时期分别为水稻插秧期和分蘖期, 其基追比为 6∶4; 其他各处理缓释氮肥全部用于基肥; 所有处理中磷肥和钾肥均用作基肥。所有小区田埂均用农膜覆盖, 防止灌水后小区间串水串肥。于插秧后第 22 天, 所有处理开始排水晒田 1 周。其余田间管理措施同当地常规管理。

### 1.3　温室气体测定

温室气体采用静态箱−气相色谱法测定。静态箱是由 PVC 材料制作而成的圆柱形暗箱, 包括底座和箱体。箱体内面积 0.196 m$^2$, 高 1.0 m。箱体表面由海绵与锡箔包裹, 具有避光和保温效果。箱内顶部装有风扇, 可维持箱内气体处于混匀状态; 箱体上方装有一个可安装温度计的橡皮塞孔和一个用于抽气的橡皮塞抽气孔。水稻移栽前, 将底座固定在田间, 深度为 20 cm, 底座上有一个深度为 10 cm 的凹槽。在气体采集前, 将凹槽装满水, 使箱体达密封状态。

在水稻移栽后第 1、3、5、7、12、17、24、26、28、30、32、37、43、49、56、63、68、72、78、83、90、97、104 和 111 天进行气体采集。气体采集时间为上午 8: 00−11: 00, 采集 4 次, 间隔时间为 15 min。气体采集完毕, 立即运回实验室, 采用配有火焰离子化检测器 (FID) 和电子捕获检测器 (ECD) 的 Agilent 7890B 气相色谱仪, 测定样品 $CO_2$、$N_2O$ 和 $CH_4$ 浓度, 并采用连续样品气体浓度的线性回归斜率计算其排放通量。

### 1.4　土壤理化性质测定

在水稻分蘖期, 采用土钻在每个小区内随机采集 8 个具有代表性的土样 (0~20 cm), 混合均匀, 装入灭菌自封袋, 带回实验室。经略微风干后挑去石砾和有机残体, 并将土样分为两份, 一份过 2 mm 筛, 并保存于 4 ℃ 条件, 用于测定 $NO_3^-$-N 和 $NH_4^+$-N 含量; 一份继续风干, 过 2 mm 和 0.15 mm 筛, 分别用于测定土壤pH 以及SOC 和TN 含量。土壤$NO_3^-$-N 和$NH_4^+$-N

含量的测定采用 1 mol·L$^{-1}$ KCl 溶液浸提 (水土比=5∶1), 并采用流动分析仪 (OI, 美国) 测定; 土壤 pH 的测定采用玻璃电极酸度计 (FiveEasy FE20, 瑞士) 测定 (水土比=2.5∶1); 土壤 SOC 和 TN 含量分别采用重铬酸钾氧化-外加热法和凯氏定氮法测定[5]。

### 1.5 水稻产量及产量构成

水稻成熟后, 每个小区随机选取 3 个采样区 (1 m$^2$), 测定其单位面积和每穴有效穗数, 并测定其产量; 根据平均每穴有效穗数, 选取 6 穴水稻进行拷种, 测定其穗粒数和千粒重, 并计算其结实率。千粒重和产量依据籽粒含水量 14% 计算。

### 1.6 指标计算

温室气体排放通量 ($F$, mg m$^{-2}$ h$^{-1}$) 计算公式如下:

$$F=\rho\times\frac{V}{A}\times\frac{dC}{dt}\times\frac{273}{273+T} \tag{1}$$

式中: $\rho$ 为标准状况下气体 (如 $CO_2$、$N_2O$ 或 $CH_4$) 密度 (kg·m$^{-3}$); $V$ 为箱内容积 (m$^3$); $A$ 为箱内横截面积 (m$^2$); $\frac{dC}{dt}$ 为气体 (如 $CO_2$、$N_2O$ 或 $CH_4$) 浓度随时间 ($t$) 变化的回归曲线斜率 (mg·kg$^{-1}$·h$^{-1}$); $T$ 为箱内平均温度 (℃)。

$$f=\sum_{i=1}^{n}\left(\frac{F_i+F_{i+1}}{2}\right)\times(t_{i+1}-t_i)\times 24 \tag{2}$$

式中: $f$ 为气体 (如 $CO_2$、$N_2O$ 或 $CH_4$) 累积排放量; $F_i$ 和 $F_{i+1}$ 为第 $i$ 次和第 $i$+1 次采样时气体平均排放通量; $n$ 为气体 (如 $CO_2$、$N_2O$ 或 $CH_4$) 采样总次数, 本研究中为 24; ($t_{i+1}$−$t_i$) 为采样间隔天数; 24 为时间转换系数。

全球增温潜势 [GWP, t($CO_2$-eq)·hm$^{-2}$] 计算公式如下:

$$\mathrm{GWP}=\frac{f_{CO_2}+f_{N_2O}\times 273+f_{CH_4}\times 29.8}{1000} \tag{3}$$

式中: $f_{CO_2}$、$f_{N_2O}$ 和 $f_{CH_4}$ 分别为水稻生产过程中 $CO_2$、$N_2O$ 和 $CH_4$ 的累积排放量; 273 和 29.8 分别是 $N_2O$ 和 $CH_4$ 在 100 年尺度上相对于 $CO_2$ 的全球增温潜势倍数[2]。

温室气体排放强度 (GHGI) 计算公式如下:

$$\mathrm{GHGI}=\frac{\mathrm{GWP}}{Y} \tag{4}$$

式中: $Y$ 为水稻产量。

### 1.7 数据分析

试验数据整理和绘图采用 Microsoft Excel 2019 进行, 统计分析采用 SPSS 25 进行。试验处理间差异显著性 ($P$<0.05) 分析采用最小显著差异法 (LSD) 进行, $CO_2$、$N_2O$ 和 $CH_4$ 排放量以及 GWP 与土壤理化性质的关系采用 Pearson 相关性分析来探究。

## 2 结果与分析

### 2.1 水稻产量及其产量构成因素

与 CK 处理相比, 常规施肥和各个缓释氮肥替代常规氮肥处理均可显著提高水稻产量, 其增幅为 16.4%~44.4% ($P$<0.05), 且表现为 CK<−60% SRN<−40% SRN<CN<−20% SRN<SRN (表 1)。与 CN 处理相比, SRN 和−20% SRN 处理均可显著提高水稻产量, 其增幅分别为 10.1% 和 7.7% ($P$<0.05), 而−60% SRN 处理却显著降低了水稻产量,其降幅为 11.2% ($P$<0.05)。同时, 水稻产量在−40% SRN 与 CN 处理间无显著差异。与 SRN 相比, −40% SRN 和−60% SRN 可显著降低水稻产量, 其降幅分别为 12.7% 和 19.4%, 而−20% SRN 与 SRN 无显著差异。

**表 1 不同氮肥处理对水稻产量及产量构成的影响**

Table 1 Effects of different nitrogen fertilizer treatments on rice yield and yield components

| 处理 Treatment | 穗数 Spike number /(×10$^4$ hm$^{-2}$) | 穗粒数 Grain number per spike | 结实率 Seed setting rate /% | 千粒重 1 000-grain weight /g | 产量 Yield /(t·hm$^{-2}$) |
|---|---|---|---|---|---|
| CK | 252.81±6.36c | 180.64±1.04c | 69.78±0.79b | 21.27±0.19b | 6.77±0.13d |
| CN | 288.61±6.88a | 209.47±3.32ab | 75.46±0.72a | 22.12±0.22a | 8.88±0.28b |
| SRN | 292.93±5.01a | 223.39±3.24a | 74.95±1.59a | 22.02±0.42a | 9.78±0.25a |
| −20% SRN | 285.97±15.89a | 222.34±4.95a | 74.19±1.55ab | 21.95±0.23ab | 9.56±0.08a |
| −40% SRN | 279.53±5.46ab | 213.58±5.84ab | 73.93±1.86ab | 22.01±0.11ab | 8.54±0.16b |
| −60% SRN | 255.29±4.60bc | 199.42±13.83bc | 71.59±2.23ab | 21.59±0.11ab | 7.88±0.19c |

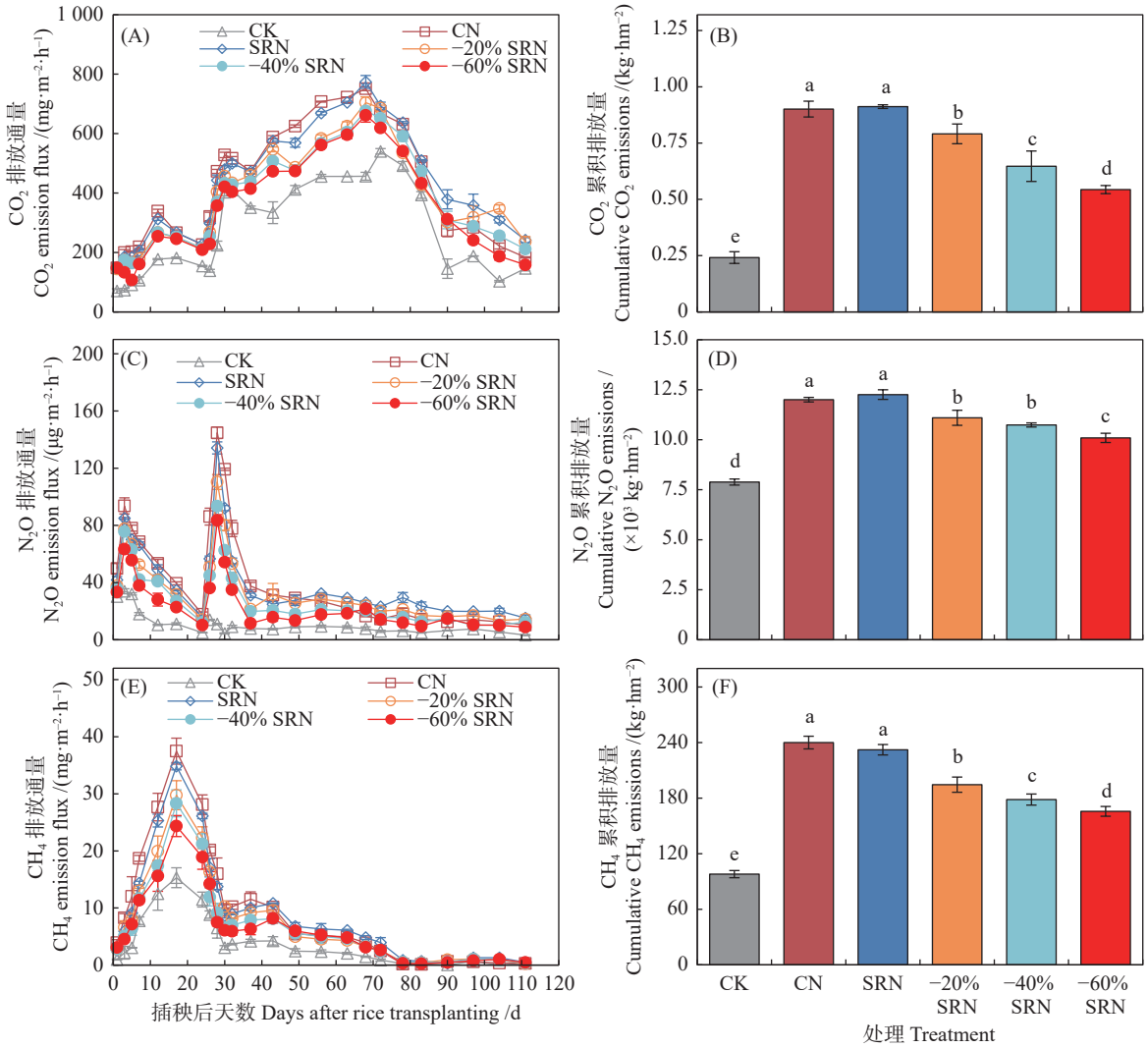
CK: 不施肥对照; CN: 常规施肥; SRN: 缓释氮肥等氮替代常规氮肥; −20% SRN: 在SRN基础上减氮20%; −40% SRN: 在SRN基础上减氮40%; −60% SRN: 在SRN基础上减氮60%。同列不同小写字母表示不同处理间差异显著($P$<0.05)。CK: no fertilizer control; CN: conventional fertilizer; SRN: slow-release nitrogen fertilizer substitution for conventional nitrogen fertilizer based on the same nitrogen input; −20% SRN: 20% nitrogen reduction based on SRN; −40% SRN: 40% nitrogen reduction based on SRN; −60% SRN: 60% nitrogen reduction based on SRN. Different lowercase letters in the same column indicate significant differences among different treatments at $P$<0.05 level.

与 CK 处理相比, CN 和 SRN 处理水稻有效穗数分别显著提高 14.2% 和 15.9% ($P$<0.05), 穗粒数分别显著提高 16.0% 和 23.7% ($P$<0.05), 结实率分别显著提高 8.1% 和 7.4% ($P$<0.05), 千粒重分别显著提高 4.0%

和 3.5% ($P$<0.05), −20% SRN 和−40% SRN 处理亦可显著提高 13.1% 和 10.6% ($P$<0.05) 的有效穗数以及 23.1% 和 18.2% ($P$<0.05) 的穗粒数 (表 1)。与 CN 处理相比, −60% SRN 处理显著降低了水稻有效穗数, 其降幅可达 11.5% ($P$<0.05), 其他处理 (CK 处理除外) 水稻有效穗数与 CN 处理间无显著差异。同时, 常规施肥和缓释氮肥替代常规氮肥各处理之间的穗粒数、结实率和千粒重均无显著差异。

### 2.2　温室气体排放通量动态变化特征及其累积排放量

常规施肥和缓释氮肥替代常规氮肥各处理稻田 $CO_2$ 排放通量动态变化趋势基本一致 (图 2A)。在插秧 63 天前, CN 处理 $CO_2$ 排放通量通常均高于其余各处理 (第 1、17 和 24 天除外); 在插秧 68 天后, 各处理 $CO_2$ 排放通量逐渐降低, 且 CN 处理 $CO_2$ 排放通量低于 SRN 处理, 部分时间甚至低于−20% SRN 和−40% SRN。同时, 在整个生育期, CK 处理 $CO_2$ 排放通量均低于其余各处理, 且各处理 $CO_2$ 排放通量出现 2 次明显峰值。第 1 次明显峰值出现于插秧第 12 天, 其中 CN 处理峰值高达 339.12 $mg \cdot m^{-2} \cdot h^{-1}$, 其次为 SRN、−20% SRN 和−40% SRN; 第 2 次明显峰值出现于插秧第 68 天 (CK 处理除外), 其中 SRN 处理峰值高达 773.78 $mg \cdot m^{-2} \cdot h^{-1}$, 其次为 CN、−20% SRN、−40% SRN 和−60% SRN。就整个生育期而言, 相较




CK: 不施肥对照; CN: 常规施肥; SRN: 缓释氮肥等氮替代常规氮肥; −20% SRN: 在 SRN 基础上减氮 20%; −40% SRN: 在 SRN 基础上减氮 40%; −60% SRN: 在 SRN 基础上减氮 60%。小写字母表示不同处理间差异显著 ($P$<0.05)。CK: no fertilizer control; CN: conventional fertilizer; SRN: slow-release nitrogen fertilizer substitution for conventional nitrogen fertilizer based on the same nitrogen input; −20% SRN: 20% nitrogen reduction based on SRN; −40% SRN: 40% nitrogen reduction based on SRN; −60% SRN: 60% nitrogen reduction based on SRN. Different lowercase letters indicate significant differences among different treatments at $P$<0.05 level.

**图 2　不同氮肥处理对稻田 $CO_2$、$N_2O$ 和 $CH_4$ 排放通量及其累积排放量的影响**

Fig. 2　Effects of different nitrogen fertilizer treatments on the flux and cumulative emissions of $CO_2$, $N_2O$ and $CH_4$ from rice paddy field

于 CK 处理, 常规施肥和缓释氮肥替代常规氮肥各处理均可显著提高 $CO_2$ 累积排放量, 其增幅为 28.0~55.4% ($P$<0.05), 且表现为 CK<−60% SRN<−40% SRN<−20% SRN<CN<SRN; $CO_2$ 累积排放量在 SRN 与 CN 间以及−20% SRN 与−40% SRN 间均无显著差异 (图 2B)。

由图 2C 可知, 常规施肥和缓释氮肥替代常规氮肥各处理稻田 $N_2O$ 排放通量也具有相似趋势, 均出现 2 次明显峰值。第 1 次峰值出现在插秧第 3 天, 且常规施肥和缓释氮肥替代常规氮肥各处理稻田 $N_2O$ 排放通量较 CK 处理增加 86.9%~175.9%, 而 SRN、−20% SRN、−40% SRN 和−60% SRN 处理的 $N_2O$ 排放通量较 CN 处理可降低 9.3%, 17.1%, 19.2% 和 32.3%。第 2 次峰值出现在插秧第 28 天, 且常规施肥和缓释氮肥替代常规氮肥各处理稻田 $N_2O$ 排放通量较 CK 处理可增加 660.4%~1 217.4%, 而 SRN、−20% SRN、−40% SRN 和−60% SRN 处理的 $N_2O$ 排放通量较 CN 可降低 7.3%, 23.8%, 35.4% 和 42.3%。就整个生育期而言, 常规施肥和缓释氮肥替代常规氮肥各处理较 CK 处理均可显著提高 $N_2O$ 累积排放量, 其增幅为 125.0~277.6% ($P$<0.05), 且表现为 CK<−60% SRN<−40% SRN<−20% SRN<CN<SRN, 且稻田 $N_2O$ 累积排放量在 SRN 与 CN 间无显著差异 (图 2D)。同时, 与 SRN 处理相比, −20% SRN、−40% SRN 和−60% SRN 处理稻田 $N_2O$ 累积排放量可显著降低 13.3%, 29.0% 和 40.4% ($P$<0.05)。

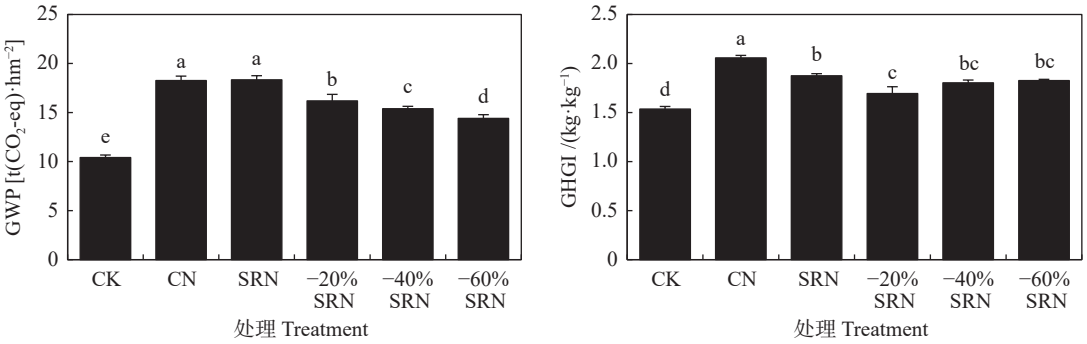
与 $CO_2$ 和 $N_2O$ 排放不同, 在整个生育期, 各处理 $CH_4$ 排放通量仅出现 1 次明显峰值, 且出现在插秧第 17 天 (图 2E), 与 CK 处理相比, 常规施肥和缓释氮肥替代常规氮肥各处理稻田 $CH_4$ 排放通量较 CK 处理增加 59.1%~144.8%, 而 SRN、−20% SRN、−40% SRN 和−60% SRN 处理 $CH_4$ 排放通量较 CN 处理可降低 7.0%, 20.6%, 24.4% 和 35.0%。就整个生育期而言, 常规施肥和缓释氮肥替代常规氮肥各处理稻田 $CH_4$ 累积排放量与 $N_2O$ 具有相似趋势, 各处理较 CK 显著增加 69.2%~145.0% ($P$<0.05, 图 2F), −20% SRN、−40% SRN 和−60% SRN 处理的 $N_2O$ 累积排放量较 SRN 分别显著降低 16.2%, 23.2% 和 28.6% ($P$<0.05)。

### 2.3 全球增温潜势和温室气体排放强度

由图 3 可知, 常规施肥和缓释氮肥替代常规氮肥各处理的 GWP 较 CK 处理显著增加 38.4%~76.2% ($P$<0.05), 而−20% SRN、−40% SRN 和−60% SRN 处理的 GWP 较 SRN 处理分别显著降低 11.7%, 16.1% 和 21.5% ($P$<0.05), 但 SRN 和 CN 处理的 GWP 无显著差异。同样, 与 CK 处理相比, 常规施肥和缓释氮肥替代常规氮肥各处理的温室气体排放强度较 CK 处理显著增加 10.3%~34.0% ($P$<0.05), 且表现为 CK<−20% SRN CK<−40% SRN<−60% SRN<SRN<CN; SRN、−20% SRN、−40% SRN 和−60% SRN 处理的温室气体排放强度较 CN 处理显著降低 8.9%、17.7%、12.4% 和 11.2% ($P$<0.05); −20% SRN 处理的温室气体排放强度较 SRN 显著降低 9.6% ($P$<0.05), 而−40% SRN 和−60% SRN 处理的温室气体排放强度与 SRN 处理间无显著差异。

### 2.4 土壤理化性质

由表 2 可知, 常规施肥和缓释氮肥替代常规氮肥




CK: 不施肥对照; CN: 常规施肥; SRN: 缓释氮肥等氮替代常规氮肥; −20% SRN: 在 SRN 基础上减氮 20%; −40% SRN: 在 SRN 基础上减氮 40%; −60% SRN: 在 SRN 基础上减氮 60%。小写字母表示不同处理间差异显著 ($P$<0.05)。CK: no fertilizer control; CN: conventional fertilizer; SRN: slow-release nitrogen fertilizer substitution for conventional nitrogen fertilizer based on the same nitrogen input; −20% SRN: 20% nitrogen reduction based on SRN; −40% SRN: 40% nitrogen reduction based on SRN; −60% SRN: 60% nitrogen reduction based on SRN. Different lowercase letters indicate significant differences among different treatments at $P$<0.05 level.

**图 3 不同氮肥处理对稻田全球增温潜势 (GWP) 和温室气体排放强度 (GHGI) 的影响**

Fig. 3 Effects of different nitrogen fertilizer treatments on the global warming potential (GWP) and greenhouse gas emission intensity (GHGI) of rice paddy field

**表 2　不同氮肥处理对稻田土壤理化性质的影响**

Table 2　Effects of different nitrogen fertilizer treatments on physicochemical properties of paddy soil

| 处理 Treatment | pH | 土壤有机碳含量 Soil organic carbon content /(g·kg$^{-1}$) | 全氮含量 Total nitrogen content /(g·kg$^{-1}$) | 硝态氮含量 Nitrate nitrogen content /(mg·kg$^{-1}$) | 铵态氮含量 Ammonium nitrogen content /(mg·kg$^{-1}$) |
|---|---|---|---|---|---|
| CK | 6.64±0.07a | 14.04±0.11a | 0.95±0.05d | 7.34±0.53d | 8.08±1.33e |
| CN | 6.58±0.04a | 14.10±0.10a | 1.22±0.04b | 11.69±0.31a | 19.53±1.53b |
| SRN | 6.67±0.11a | 14.25±0.07a | 1.33±0.02a | 10.67±0.41ab | 22.76±1.42a |
| −20% SRN | 6.69±0.13a | 14.18±0.04a | 1.18±0.01bc | 10.19±0.66b | 17.61±1.76bc |
| −40% SRN | 6.74±0.06a | 14.14±0.04a | 1.12±0.03c | 9.83±0.36b | 15.16±0.33cd |
| −60% SRN | 6.63±0.11a | 14.07±0.05a | 1.10±0.01c | 8.68±0.38c | 13.77±1.58d |

CK: 不施肥对照; CN: 常规施肥; SRN: 缓释氮肥等氮替代常规氮肥; −20% SRN: 在SRN基础上减氮20%; −40% SRN: 在SRN基础上减氮40%; −60% SRN: 在SRN基础上减氮60%。同列不同小写字母表示不同处理间差异显著($P$<0.05)。CK: no fertilizer control; CN: conventional fertilizer; SRN: slow-release nitrogen fertilizer substitution for conventional nitrogen fertilizer based on the same nitrogen input; −20% SRN: 20% nitrogen reduction based on SRN; −40% SRN: 40% nitrogen reduction based on SRN; −60% SRN: 60% nitrogen reduction based on SRN. Different lowercase letters in the same column indicate significant differences among different treatments at $P$<0.05 level.

各处理对土壤 pH 和土壤有机碳含量 (SOC) 均无显著影响。常规施肥和缓释氮肥替代常规氮肥各处理土壤全氮含量较 CK 处理显著增加 15.3~40.5% ($P$<0.05), 且表现为 CK<−60% SRN<−40% SRN<−20% SRN<CN<SRN。与 CN 处理相比, SRN 处理土壤全氮含量显著增加 9.0% ($P$<0.05), 而−40% SRN 和−60% SRN 处理的土壤全氮含量分别显著降低 8.4% 和 10.5% ($P$<0.05)。同理, 常规施肥和缓释氮肥替代常规氮肥各处理较 CK 处理均显著增加了土壤硝态氮和氨态氮含量, 其增幅分别为 18.2%~59.2% 和 70.5%~181.8% ($P$<0.05)。与 CN 处理相比, SRN 处理显著提高了土壤氨态氮含量, 但对土壤硝态氮含量无显著影响。

### 2.5　温室气体排放与土壤理化性质间的相关性

由表 3 可知, $CO_2$、$N_2O$ 和 $CH_4$ 累积排放量以及 GWP 均不同形态土壤氮含量 (全氮、硝态氮和氨态氮) 之间存在极显著正相关关系 ($P$<0.001), $CO_2$ 和 $N_2O$ 累积排放量以及 GWP 与土壤有机碳间也存在显著正相关关系 ($P$<0.05)。$CO_2$、$N_2O$ 和 $CH_4$ 累积排放量之间均呈极显著正相关 ($P$<0.001)。然而, $CO_2$、$N_2O$ 和 $CH_4$ 累积排放量以及 GPW 均与土壤 pH 均无显著相关关系。

**表 3　温室气体累积排放量与土壤理化性质的相关性**

Table 3　Correlations between the cumulative emissions of greenhouse gases and soil physicochemical properties

| | pH | SOC | TN | $NO_3^-$-N | $NH_4^+$-N | $CO_2$ | $N_2O$ | $CH_4$ | GWP |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| pH | 1.00 | 0.05 | 0.00 | 0.03 | 0.09 | −0.01 | −0.02 | −0.07 | −0.03 |
| SOC | | 1.00 | 0.40 | 0.27 | 0.53** | 0.42* | 0.47* | 0.39 | 0.41* |
| TN | | | 1.00 | 0.77*** | 0.89*** | 0.91*** | 0.91*** | 0.91*** | 0.91*** |
| $NO_3^-$-N | | | | 1.00 | 0.81*** | 0.89*** | 0.91*** | 0.90*** | 0.90*** |
| $NH_4^+$-N | | | | | 1.00 | 0.90*** | 0.92*** | 0.89*** | 0.90*** |
| CO2 | | | | | | 1.00 | 0.99*** | 0.98*** | 1.00*** |
| N2O | | | | | | | 1.00 | 0.98*** | 0.99*** |
| CH4 | | | | | | | | 1.00 | 0.99*** |
| GWP | | | | | | | | | 1.00 |

SOC: 土壤有机碳含量; TN: 全氮含量; $NO_3^-$-N: 硝态氮含量; $NH_4^+$-N: 铵态氮含量; $CO_2$: $CO_2$累积排放量; $N_2O$: $N_2O$累积排放量; $CH_4$: $CH_4$累积排放量; GPW: 全球增温潜势。*、**和***分别表示在$P$<0.05、$P$<0.01和$P$<0.001水平显著相关。SOC: soil organic carbon content; TN: total nitrogen content; $NO_3^-$-N: nitrate nitrogen content; $NH_4^+$-N: ammonium nitrogen content; $CO_2$: cumulative emissions of carbon dioxide; $N_2O$: cumulative emissions of nitrous oxide; $CH_4$: cumulative emissions of methane; GPW: global warming potential. *, ** and *** indicate significant correlations at $P$<0.05, $P$<0.01 and $P$<0.001 levels, respectively.

## 3　讨论

### 3.1　缓释氮肥减量替代常规氮肥的产量效应

研究表明, 缓释氮肥可通过氮素释放速率和释放时期的调控来控制和/或延迟氮释放, 使其氮素供应较速效氮肥更能吻合水稻氮素需求规律, 从而促进作物氮利用, 提高水稻产量[17-18]。本研究中, SRN 处理较 CN 处理可显著提高水稻产量, 其增幅高达 10.1% (表 1), 表明在长江中下游平原秸秆还田条件下, 利用缓释氮肥替代常规氮肥, 稻田亦可在一定程度上起到稳产/增产作用。然而, 本研究缓释氮肥替代常规氮肥的增产效应低于 Lan 等[19] 在福建省开展的相关研究, 其增产效应为 15.8%~21.0%, 但高于

Liu 等[14] 采用荟萃分析开展中国大陆稻田缓释氮肥替代常规氮肥的平均增产效应 (6.0%)。导致这一差异的原因可能是: 缓释氮肥的氮素释放速率和释放时期受到缓释氮肥类型、工艺材料、气候条件、土壤类型和田间管理措施等因素影响[19-23]。在本研究中, 与 CN 处理相比, −20% SRN 处理亦可增产 7.7%, 且−40% SRN 处理在一定程度上亦可起到一定的稳产效应 (表 1)。−20% SRN 和−40% SRN 处理氮素释放特征与水稻吸氮规律较为吻合, 既能保证水稻关键生育期的氮素供应, 又能保持水稻生长后期的不脱肥效应[19]。Lan 等[19] 和 Hu 等[24] 在田间试验中也发现, 与常规肥料相比, 缓释氮肥减量 15%~30% 替代常规氮肥, 不会降低水稻产量, 甚至存在一定增产效益。在本研究中, SRN 处理水稻产量显著高于其余各处理 (−20% SRN 处理除外), 这是因为 SRN 处理有效穗数和穗粒数的明显增加 (表 1)。缓释氮肥替代常规氮肥可明显降低土壤 $NH_3$ 挥发和 $N_2O$ 排放, 从而在耕层土壤中保留大量有效氮素被水稻吸收利用[24-25]。耕层土壤的富营养状态有助于作物根系增殖和养分吸收能力的增强[26]。研究表明, 水稻生产前期的持续高氮供应, 可促进分蘖数、穗粒数和地上生物量增加[19]。此外, 水稻生长后期的持续养分供应可有效延长叶片功能寿命, 利于水稻光合作用的碳同化产物积累和运输, 进而促进水稻籽粒灌浆和产量提高[25,27]。然而, −60% SRN 处理水稻产量均显著低于其余各施肥处理, 这主要是因为其有效穗数和穗粒数较低 (表 1)。研究表明, 水稻生育期有效氮供应不足, 可导致光合产物积累减少和水稻产量下降[10,19]。因此, 就本研究而言, 缓释氮肥替代常规氮肥, 甚至缓释氮肥减量 20%~40% 替代常规氮肥, 在长江中下游平原秸秆还田条件下可起到明显的稳产/增产效应。

### 3.2 缓释氮肥减量替代常规氮肥对温室气体排放的影响

稻田 $CO_2$ 排放主要源自土壤动物、微生物和植株根系呼吸以及土壤有机质分解[5]。本研究中, 各施肥处理较 CK 处理均可显著提高稻田土壤 $CO_2$ 累积排放量, 且 SRN 处理土壤 $CO_2$ 累积排放量最高, 随着施氮量的降低, 稻田 $CO_2$ 累积排放量逐渐减少 (图 2B)。其原因可能是, 通过施肥而增加的耕层土壤矿质养分可促进土壤微生物活性和水稻根系呼吸作用, 且施肥后土壤 C/N 比降低, 亦可促进土壤有机质分解, 进而提高土壤 $CO_2$ 排放[5,9]。以往研究表明, 在等氮条件下, 缓释氮肥替代常规氮肥可显著降低土壤 $CO_2$ 累积排放量[28]。然而, 在本研究中, SRN 处理稻田 $CO_2$ 累积排放量较 CN 处理并未显著降低, 甚至存在一定增加趋势 (图 2B)。这可能与肥料类型、土壤性质和气候条件等环境因素的不同有关。缓释氮肥减量替代常规氮肥并不能明显影响土壤 SOC 含量和 pH 值, 但可显著影响土壤 TN、$NO_3^-$-N 和 $NH_4^+$-N 含量 (表 2), 进而影响水稻生育期土壤 C/N 比、土壤有机质降解、微生物活性和土壤 $CO_2$ 排放。从稻田土壤 $CO_2$ 通量变化规律可以看出, 各处理 $CO_2$ 通量变化规律相似, 且在水稻移栽初期土壤 $CO_2$ 排放通量相对较小; 随着水稻生长进入分蘖盛期, 土壤 $CO_2$ 排放通量逐渐增大, 且均在水稻插秧 68 天 (CK 处理除外) 达最大峰值 (图 2A)。其原因在于: 在水稻移栽初期, 水稻根系不发达且呼吸作用较弱, 对土壤微生物活动影响也较小, 进而导致相对较低的土壤 $CO_2$ 排放通量; 当水稻生长进入分蘖盛期, 水稻根系发育迅速, 根系分泌物增加, 可为土壤微生物新陈代谢提供良好基础, 进而导致稻田土壤 $CO_2$ 排放通量增加; 在水稻插秧 68 天以后, 缓释肥施用处理部分氮素逐渐释放, 导致 SRN 处理处理土壤部分有效态氮含量高于 CN 处理, 利于水稻根系和土壤微生物的生长和代谢, 进而增加土壤 $CO_2$ 排放通量。

缓释氮肥替代常规氮肥亦显著影响着稻田 $N_2O$ 排放, 且稻田 $N_2O$ 累积排放量随着施氮量的降低显著降低 (图 2C 和 2D)。究其原因, 稻田 $N_2O$ 排放主要源自耕层土壤微生物的硝化与反硝化作用, 而土壤活性氮的可利用性是稻田 $N_2O$ 排放的主要驱动因素[10,19]。研究表明, 稻田土壤多余活性氮不能被水稻吸收利用, 其水解产生的 $NH_4^+$-N 可直接参与硝化反应, 而其产物 $NO_3^-$-N 可作为反硝化微生物催化底物, 进而导致 $N_2O$ 的快速排放[5]。然而, 缓释氮肥可通过控制和/或延迟肥料氮释放来抑制稻田土壤中过量无机氮向 $N_2O$ 的转化, 进而在一定程度上减少稻田气态氮的排放[29]。另一方面, 稻田耕层土壤氮的滞留亦会促进 *nosz* 型反硝化微生物的增殖, 利于 $N_2O$ 的进一步还原和转化以及稻田 $N_2O$ 减排[19]。同时, 也有研究表明, 在前茬作物秸秆还田条件下, 缓释氮肥替代常规氮肥可明显提高稻田 $N_2O$ 累积排放量[25]。在本研究中, 稻田 $N_2O$ 排放通量存在两个明显峰值, 分别为插秧后第 3 和 28 天 (图 2C)。究其原因, 水稻插秧后, 淹水层可抑制土壤硝化和反硝化细菌新陈代谢以及土壤有机氮矿化, 且能阻碍 $N_2O$ 向大气排放, 进而抑制稻田 $N_2O$ 排放。然而, 经过晒田, 稻田耕层土壤水分和通气条件利于土壤硝化和反硝化细菌的

繁殖, 可极大地刺激稻田 $N_2O$ 排放[9]。

与稻田 $N_2O$ 排放相似, 缓释氮肥替代常规氮肥亦显著影响稻田 $CH_4$ 排放, 且稻田 $CH_4$ 累积排放量随着施氮量的降低而显著降低 (图 2F)。这与马艳芹等[9] 和 Lan 等[19] 研究结果一致。缓释氮肥替代常规氮肥可通过可持续和稳定的氮释放来提高氮素利用效率, 而稻田 $CH_4$ 排放与氮肥利用效率呈显著负相关关系, 因此, 缓释氮肥减量替代常规氮肥可显著降低稻田 $CH_4$ 排放[10]。研究表明, 肥料氮素在水稻营养生长期过早释放可引起水稻过度生长和分蘖数增加, 而分蘖数增加可为 $CH_4$ 运输提供更多扩散途径, 进而刺激 $CH_4$ 排放[17,30]。同时, 水稻光合产物的地下运输可促进耕层土壤产甲烷细菌的繁殖和生长, 进而引发 $CH_4$ 排放的增加[31]。正因如此, 各处理水稻生长前期稻田 $CH_4$ 排放通量急剧增加, 且均在插秧后第 17 天 (即分蘖盛期) 达峰 (图 2E); 进入晒田期后, 稻田 $CH_4$ 排放通量急剧降低 (图 2E)。究其原因, 晒田导致的稻田曝气状态可提高土壤氧化还原电位, 破坏土壤产甲烷细菌的生存条件, 进而抑制产甲烷菌的新陈代谢; 稻田的曝气状态可活跃好氧的甲烷氧化细菌, 使其能够较快地利用土壤中存在的少量 $CH_4$, 从而使得晒田期 $CH_4$ 排放通量处于较低水平。晒田期过后, 各处理稻田 $CH_4$ 排放通量仍处于较低水平, 其原因可能是通过水稻根系的良好发育提高根际氧有效性, 促进土壤 $CH_4$ 氧化, 进而减少稻田 $CH_4$ 排放[26,32-33]。

由图 3 可知, 施氮量越高, 全球增温潜势越高, 且 SRN 处理全球增温潜势与 CN 无显著差异; 然而, SRN 处理温室气体排放强度却较 CN 处理显著降低 8.9% ($P$<0.05), 且−20% SRN 处理温室气体排放强度较 SRN 处理进一步降低, 其降幅可达 9.6%。尽管 CK 处理温室气体排放强度显著低于其他处理, 但其水稻产量亦显著低于其他处理 (表 1; 图 3)。因此, 缓释氮肥替代常规氮肥, 特别是缓释氮肥减量 20% 替代常规氮肥, 不仅可以维持甚至提高水稻产量, 还可以降低温室气体排放, 有利于稻田农业的可持续发展。

### 3.3 缓释氮肥减量替代常规氮肥对稻田土壤理化性质的影响

与 CK 处理相比, 常规施肥和缓释氮肥替代常规氮肥均可显著提高土壤 TN、$NO_3^-$-N 和 $NH_4^+$-N 含量, 且随着施氮量的增加, 土壤 TN、$NO_3^-$-N 和 $NH_4^+$-N 含量均可维持在较高水平 (表 2)。研究表明, 土壤微生物量碳、微生物量氮与土壤 TN、$NO_3^-$-N 和 $NH_4^+$-N 含量具有显著的正相关关系[5,31]。本研究相关性分析结果也显示, $CO_2$、$N_2O$ 和 $CH_4$ 累积排放量与土壤 TN、$NO_3^-$-N 和 $NH_4^+$-N 含量亦均存在极显著正相关关系 ($P$<0.001, 表 3)。因此, 土壤 TN、$NO_3^-$-N 和 $NH_4^+$-N 可在促进土壤微生物新陈代谢的同时, 激发土壤有机质降解, 进而导致土壤 $CO_2$ 排放量的升高。同时, 前茬小麦秸秆的降解可消耗部分氧, 形成微厌氧区, 结合土壤 TN、$NO_3^-$-N 和 $NH_4^+$-N 含量的提高, 可为土壤反硝化微生物提供微厌氧区和充足碳底物, 进而利于反硝化反应的进行, 促进 $N_2O$ 排放; 土壤活性氮含量的提高利于水稻分蘖数的增加和产甲烷细菌的繁殖和生长, 进而引发 $CH_4$ 排放的增加[17, 30-31]。然而, 稻田土壤 $N_2O$ 和 $CH_4$ 生成环境不同。研究表明, 淹水条件下, 稻田土壤过多的 $NH_4^+$-N 会抑制甲烷氧化菌和硝化细菌氨单加氧酶的活性, 进而导致 $CH_4$ 排放量的增加和 $N_2O$ 排放量的减少[5]。

## 4 结论

缓释氮肥等氮替代常规氮肥能够显著提高水稻产量, 降低温室气体排放强度, 但对稻田 $CO_2$、$N_2O$ 和 $CH_4$ 累积排放量以及全球增温潜势无显著影响。缓释氮肥减量 20% 替代常规氮肥可在显著提高水稻产量的同时, 显著降低稻田 $CO_2$、$N_2O$ 和 $CH_4$ 累积排放量、全球增温潜势以及温室气体排放强度, 利于稻田增效减排、气候变暖趋势的减缓以及水稻的可持续生产。

## 参考文献 References

[1] 郭亚丽, 贾俊松, 何珊. 温室气体与空气污染物协同减排健康效应研究热点及趋势分析[J]. 中国环境科学, 2024, 44(7): 4101−4116
GUO Y L, JIA J S, HE S. Research hotspots and trends of the health effects of synergistic emission reduction of greenhouse gases and air pollutants[J]. China Environmental Science, 2024, 44(7): 4101−4116

[2] Intergovernmental Panel on Climate Change. Climate Change 2021 — The Physical Science Basis[M]. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2023

[3] WANG H, ZHANG Y, ZHANG Y J, et al. Water-saving irrigation is a ‘win-win’ management strategy in rice paddies – With both reduced greenhouse gas emissions and enhanced water use efficiency[J]. Agricultural Water Management, 2020, 228: 105889

[4] 李桂花, 周吉祥, 张建峰, 等. 有机肥和缓控肥替代部分化肥降低双季稻田综合净温室效应[J]. 植物营养与肥料学报, 2020, 26(6): 1017−1024
LI G H, ZHOU J X, ZHANG J F, et al. Decreasing net global warming potential through partial substitution of urea with manure and slow-release fertilizer in a double-rice system[J].

Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2020, 26(6): 1017−1024

[5] 曹开勋, 赵坤, 金王飞飞, 等. 水氮互作对稻田温室气体排放的影响[J]. 土壤学报, 2022, 59(5): 1386−1396
CAO K X, ZHAO K, JIN W F F, et al. Effects of water-nitrogen interaction on greenhouse gas emissions in a paddy soil[J]. Acta Pedologica Sinica, 2022, 59(5): 1386−1396

[6] 吴健成, 刘卿, 汪翠存, 等. 秸秆还田与氮肥施用对稻田温室气体排放的影响[J]. 生态学报, 2024, 44(12): 5328−5339
WU J C, LIU Q, WANG C C, et al. Effects of straw returning and nitrogen fertilizer application on greenhouse gas emissions in rice paddy fields and research on fertilizer recommendation[J]. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(12): 5328−5339

[7] THAKUR A K, MANDAL K G, RAYCHAUDHURI S. Impact of crop and nutrient management on crop growth and yield, nutrient uptake and content in rice[J]. Paddy and Water Environment, 2020, 18(1): 139−151

[8] KANTHILANKA H, RAMILAN T, FARQUHARSON R J, et al. Optimal nitrogen fertilizer decisions for rice farming in a cascaded tank system in Sri Lanka: An analysis using an integrated crop, hydro-nutrient and economic model[J]. Agricultural Systems, 2023, 207: 103628

[9] 马艳芹, 钱晨晨, 孙丹平, 等. 施氮水平对稻田土壤温室气体排放的影响[J]. 农业工程学报, 2016, 32(S2): 128−134
MA Y Q, QIAN C C, SUN D P, et al. Effect of nitrogen fertilizer application on greenhouse gas emissions from soil in paddy field[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2016, 32(S2): 128−134

[10] LINQUIST B A, ADVIENTO-BORBE M A, PITTELKOW C M, et al. Fertilizer management practices and greenhouse gas emissions from rice systems: A quantitative review and analysis[J]. Field Crops Research, 2012, 135: 10−21

[11] 谢先芝, 刘奇华, 李新华, 等. 稻田甲烷产生与排放的影响因素及减排措施研究进展[J]. 中国水稻科学, 2024, 38(5): 475−494
XIE X Z, LIU Q H, LI X H, et al. Research progress in influencing factors of methane production and emission as well as emission reduction measures in paddy fields[J]. Chinese Journal of Rice Science, 2024, 38(5): 475−494

[12] 邓姣, 李心雨, 朱杰, 等. 秸秆还田和水旱轮作模式对稻季土壤温室气体排放的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2024, 30(2): 268−278
DENG J, LI X Y, ZHU J, et al. Greenhouse gas emissions of rice season soils under different paddy-upland rotation systems[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2024, 30(2): 268−278

[13] ZHANG S T, REN T, YANG X K, et al. Biochar return in the rice season and straw mulching in the oilseed rape season achieve high nitrogen fertilizer use efficiency and low greenhouse gas emissions in paddy-upland rotations[J]. European Journal of Agronomy, 2023, 148: 126869

[14] LIU Y D, MA C, LI G H, et al. Lower dose of controlled/slow release fertilizer with higher rice yield and N utilization in paddies: Evidence from a meta-analysis[J]. Field Crops Research, 2023, 294: 108879

[15] 王云翔, 咸云宇, 赵灿, 等. 缓控释氮肥施用技术在水稻上应用研究进展与展望[J]. 中国稻米, 2023, 29(4): 20−26
WANG Y X, XIAN Y Y, ZHAO C, et al. Research progress and prospect of slow and controlled release fertilizer application technology in rice[J]. China Rice, 2023, 29(4): 20−26

[16] 王强, 姜丽娜, 潘建清, 等. 缓释氮肥一次性施肥对单季稻氮素吸收和产量的影响[J]. 中国农业科学, 2018, 51(20): 3951−3960
WANG Q, JIANG L N, PAN J Q, et al. Yield and nitrogen adsorption of single-cropping rice as influenced by one-off fertilization of slow-released nitrogen fertilizer[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2018, 51(20): 3951−3960

[17] LI J L, LI Y E, WAN Y F, et al. Combination of modified nitrogen fertilizers and water saving irrigation can reduce greenhouse gas emissions and increase rice yield[J]. Geoderma, 2018, 315: 1−10

[18] 曹兵, 丁紫娟, 侯俊, 等. 控释掺混肥结合增密对水稻氮肥利用效率和氨挥发的影响[J]. 农业工程学报, 2022, 38(13): 56−63
CAO B, DING Z J, HOU J, et al. Effects of the blends of controlled-release and conventional nitrogen fertilizers combined with dense planting on nitrogen use efficiency and ammonia volatilization in a paddy field[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2022, 38(13): 56−63

[19] LAN C J, ZOU J N, LI J Y, et al. Slow-release fertilizer deep placement increased rice yield and reduced the ecological and environmental impact in SouthEast China: A life-cycle perspective[J]. Field Crops Research, 2024, 306: 109224

[20] DING W C, XU X P, HE P, et al. Improving yield and nitrogen use efficiency through alternative fertilization options for rice in China: A meta-analysis[J]. Field Crops Research, 2018, 227: 11−18

[21] WEI H Y, CHEN Z F, XING Z P, et al. Effects of slow or controlled release fertilizer types and fertilization modes on yield and quality of rice[J]. Journal of Integrative Agriculture, 2018, 17(10): 2222−2234

[22] ZHANG G X, ZHAO D H, LIU S J, et al. Can controlled-release urea replace the split application of normal urea in China? A meta-analysis based on crop grain yield and nitrogen use efficiency[J]. Field Crops Research, 2022, 275: 108343

[23] NAZ M Y, SULAIMAN S A. Slow release coating remedy for nitrogen loss from conventional urea: A review[J]. Journal of Controlled Release, 2016, 225: 109−120

[24] HU K B, ZHAO P, WU K X, et al. Reduced and deep application of controlled-release urea maintained yield and improved nitrogen-use efficiency[J]. Field Crops Research, 2023, 295: 108876

[25] SUN H F, ZHOU S, ZHANG J N, et al. Effects of controlled-release fertilizer on rice grain yield, nitrogen use efficiency, and greenhouse gas emissions in a paddy field with straw incorporation[J]. Field Crops Research, 2020, 253: 107814

[26] 陈浩田, 秦缘, 钟笑涵, 等. 水稻根系和土壤性状与稻田甲烷排放关系的研究进展[J]. 中国水稻科学, 2024, 38(3): 233−245
CHEN H T, QIN Y, ZHONG X H, et al. Research progress on

the relationship between rice root, soil properties and methane emissions in paddy fields[J]. Chinese Journal of Rice Science, 2024, 38(3): 233−245

[27] LI W W, AHMAD S, LIU D, et al. Subsurface banding of blended controlled-release urea can optimize rice yields while minimizing yield-scaled greenhouse gas emissions[J]. The Crop Journal, 2023, 11(3): 914−921

[28] 周君玺, 翟晓芳, 孙浩然, 等. 控释氮肥配施对不同覆盖旱作农田 $CO_2$ 排放的影响[J]. 农业环境科学学报, 2019, 38(10): 2429−2438

ZHOU J X, ZHAI X F, SUN H R, et al. Effects of controlled-release urea on $CO_2$ emission from dry farmland under different mulching patterns[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2019, 38(10): 2429−2438

[29] TIAN C, ZHOU X, DING Z L, et al. Controlled-release N fertilizer to mitigate ammonia volatilization from double-cropping rice[J]. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 2021, 119(1): 123−137

[30] MOHANTY S, SWAIN C K, SETHI S K, et al. Crop establishment and nitrogen management affect greenhouse gas emission and biological activity in tropical rice production[J]. Ecological Engineering, 2017, 104: 80−98

[31] BARUAH K K, GOGOI B, GOGOI P. Plant physiological and soil characteristics associated with methane and nitrous oxide emission from rice paddy[J]. Physiology and Molecular Biology of Plants, 2010, 16(1): 79−91

[32] GAIHRE Y K, SINGH U, MOFIJUL ISLAM S M, et al. Impacts of urea deep placement on nitrous oxide and nitric oxide emissions from rice fields in Bangladesh[J]. Geoderma, 2015, 259: 370−379

[33] LIU T Q, LI S H, GUO L G, et al. Advantages of nitrogen fertilizer deep placement in greenhouse gas emissions and net ecosystem economic benefits from no-tillage paddy fields[J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 263: 121322