

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

邓姣¹, 李心雨¹, 朱杰², 杨伟¹, 李成伟¹, 蒋梦蝶¹, 朱波¹, 聂江文^{1*}, 刘章勇^{1*}

(1 长江大学农学院主要粮食作物产业化湖北省协同创新中心, 湖北荆州 434200;

2 湖北省襄阳市农业科学院, 湖北襄阳 441100)

摘要:【目的】探究不同水旱轮作模式下, 冬季作物秸秆还田对后茬水稻季作物产量和温室气体排放的影响, 为长江中游稻田选择适宜的秸秆还田方式和农业可持续生产提供科学依据。【方法】田间试验在湖北荆州进行, 设置水稻-小麦(稻麦)、水稻-油菜(稻油)和水稻-紫云英(稻肥)3种水旱轮作模式, 每个模式下设置冬季作物收获后秸秆还田和不还田处理。在秸秆还田后的水稻季, 采用静态暗箱-气相色谱法连续监测稻田中甲烷(CH₄)和氧化亚氮(N₂O)排放量, 在水稻分蘖期、抽穗期、成熟期采集0—5、5—10、10—20 cm土层样品, 测定微生物量碳(MBC)、可溶性有机碳(DOC)、铵态氮(NH₄⁺-N)和硝态氮(NO₃⁻-N)含量, 收获期测定水稻产量。

【结果】秸秆还田和不同轮作模式对后茬水稻产量均无显著影响。与稻肥轮作相比, 在秸秆还田条件下稻油和稻麦轮作水稻季土壤CH₄和N₂O排放分别高出44%~58%和17%~30%, 在秸秆不还田条件下则分别高出58%~72%和15%~22%。与秸秆不还田相比, 秸秆还田条件下3种轮作模式平均CH₄和N₂O排放分别增加26%~39%和20%~29%。秸秆还田条件下, 稻油和稻麦轮作水稻季土壤全球增温潜势(GWP)和温室气体排放强度(GHGI)分别比稻肥轮作高出14%~19%和12%~19%, 秸秆不还田条件下分别高出18%~23%和15%~24%。与秸秆不还田相比, 秸秆还田条件下3种轮作模式水稻季土壤平均GWP和GHGI高出31%和32%, 同时土壤硝态氮、微生物量碳和可溶性有机碳含量均显著提高。此外, 稻麦轮作土壤微生物量碳和可溶性有机碳含量显著高于稻肥、稻油轮作。相关性分析表明, 秸秆还田条件下, CH₄和N₂O排放与NO₃⁻-N呈极显著正相关($P < 0.01$), 而秸秆不还田条件下CH₄排放与NO₃⁻-N呈极显著正相关($P < 0.01$), N₂O排放与NH₄⁺-N呈极显著正相关($P < 0.01$)。【结论】水稻季土壤CH₄和N₂O的排放与土壤可利用性碳氮浓度的升高密切相关。前茬作物秸秆还田导致水稻季温室气体排放显著增加, 与稻麦、稻油轮作相比, 水稻-紫云英轮作水稻季土壤的温室气体排放量最低, 是较为生态环境友好型的种植制度。

关键词: 轮作模式; 秸秆还田; 增温潜势; 排放强度; 土壤可溶性有机碳; 微生物量碳; 有效氮

Greenhouse gas emissions of rice season soils under different paddy-upland rotation systems

DENG Jiao¹, LI Xin-yu¹, ZHU Jie², YANG Wei¹, LI Cheng-wei¹, JIANG Meng-die¹, ZHU Bo¹,
NIE Jiang-wen^{1*}, LIU Zhang-yong^{1*}

(1 Hubei Collaborative Innovation Center for Industrialization of Major Grain Crops, College of Agronomy, Yangtze University, Jingzhou, Hubei 434200, China; 2 Hubei Xiangyang Academy of Agricultural Sciences, Xiangyang, Hubei 441100, China)

Abstract: 【Objective】The research investigated the greenhouse gas emissions in the subsequent rice season under different paddy-upland rotation systems and straw (green manure) return condition, to propose an environmental friendly rotation mode in the middle reaches of the Yangtze River. 【Method】A field experiment was conducted in Jingzhou of Hubei Province. The rice-wheat (RW), rice-rape (RR) and rice - Chinese milk vetch (RC) rotation systems were arranged, and under each rotation system, the upland crop straws were returned to or

收稿日期: 2023-09-07 接受日期: 2023-12-29

基金项目: 国家重点研发计划项目(2022YFE0209200-04); 国家自然科学基金项目(31870424); 长江大学湿地生态与农业利用教育部工程研究中心开放基金项目(KF202309, KF202308)。

联系方式: 邓姣 E-mail: 2051749426@qq.com

* 通信作者 聂江文 E-mail: 13437203646@163.com; 刘章勇 E-mail: lyz1331@hotmail.com

removed out of the field. In the following rice season, the methane (CH_4) and nitrous oxide (N_2O) emissions in paddy fields were continuously monitored using static dark box-gas chromatography. At the tillering, heading and maturing stages of rice, soil samples were collected at 0–5 cm, 5–10 cm, and 10–20 cm layers for the determination of microbial biomass carbon (MBC), dissolved organic carbon (DOC), $\text{NH}_4^+\text{-N}$ and $\text{NO}_3^-\text{-N}$ content, and rice yield were investigated at harvest. **【 Results 】** Straw return and rotation patterns did not affect rice yield significantly, but did in CH_4 and N_2O emissions. Compared with no straw return, the CH_4 and N_2O emissions in the three rotation systems under straw return increased by 26%–39% and 20%–29% on average, respectively. Compared with RC rotation, the CH_4 and N_2O emissions in RR and RW rotation systems were increased by 44%–58% and 17%–30% under straw return, and by 58%–72% and 15%–22% under no straw return, respectively. The global warming potential (GWP) and greenhouse gas emission intensity (GHGI) of RR and RW rotation systems were 14%–19% and 12%–19% higher than those of RC rotation system, respectively. Regardless of the effect of rotation system, the GWP and GHGI of subsequent rice under straw returning were 31% and 32% higher than those under no straw returning, respectively. On average, the contents of $\text{NO}_3^-\text{-N}$, MBC and DOC in three rotation systems in different soil layers under no straw returning were higher than those under no straw returning. The MBC and DOC in RW were higher than in RC and RR. Correlation analysis showed that the emissions of CH_4 and N_2O were positively correlated with $\text{NO}_3^-\text{-N}$ under straw return ($P<0.01$). While the CH_4 emissions were positively correlated with $\text{NO}_3^-\text{-N}$ ($P<0.01$), and N_2O emissions were positively correlated with $\text{NH}_4^+\text{-N}$ ($P<0.01$) under no straw returning. **【 Conclusions 】** The field CH_4 and N_2O emissions in rice season are related to the increased soil available carbon and nitrogen concentration. Straw return could significantly increase the greenhouse gas emission as the increased MBC and DOC content. Among the three rotation modes, rice-milk vetch rotation exhibits the lowest greenhouse gas emission, so is an ecologically friendly paddy-upland rotation system in the middle reaches of Yangtze River.

Key words: rotation systems; straw return; GWP; GHGI; dissolved organic carbon; microbial biomass carbon; nitrate nitrogen

大气中温室气体浓度的增加是导致气候变化的主要原因之一。甲烷(CH_4)和氧化亚氮(N_2O)是大气中两种重要的温室气体^[1],其全球增温潜势(global warming potential, GWP)分别是二氧化碳(CO_2)的29.8和273倍^[2]。稻田是农业温室气体排放的主要来源之一,分别占全球农田 CH_4 和 N_2O 总排放量的50%和10%^[3]。因此,探索稻田温室气体的减排措施,对缓解气候变化和农田可持续发展意义重大。

合理的秸秆还田能够改善土壤理化性质,提高土壤有机质含量,减少农药和化肥的施用,促进农田土壤的良性循环。然而,秸秆添加会增加农田土壤中 CH_4 排放,其主要原因是秸秆还田可以提供有机物质和养分,为产甲烷细菌的生长和繁殖提供大量的底物,从而促进 CH_4 排放^[4]。此外,秸秆还田释放的氮促使稻田水土环境中的微生物氮循环过程发生变化,影响稻田土壤硝化-反硝化过程,从而影响 N_2O 的产生与排放^[5]。然而,当前秸秆还田对于 N_2O 排放的影响还存在争议^[6],即存在促进^[7]、抑制^[8]和无影响^[9]3种矛盾结果,这种差异主要取决于秸秆本身

的碳氮比。如紫云英作为一种丰富的自然资源,其根系的根瘤菌能固定大气中的氮素,紫云英在分解过程中是缓慢释放氮素,从而降低 N_2O 的排放^[10];小麦秸秆通过氮素保持、微生物作用和水管理等措施,减少土壤中氮素的流失和淋溶,降低 N_2O 的生成和排放^[11];油菜秸秆可以促进土壤中的微生物活动,包括参与氮循环的微生物,通过增加土壤中的微生物数量和活性,提高氮素的利用效率,减少氮素在硝化和反硝化过程中产生 N_2O ^[12]。另外,大量研究证实,稻田土壤 N_2O 和 CH_4 的排放存在此消彼长的关系^[10-13]。因此,需采用GWP综合评估秸秆还田下稻田 N_2O 和 CH_4 排放导致的增温效应。

水旱轮作是我国长江中下游地区主要的稻作模式,主要包括稻麦、稻油和稻肥等不同模式。不同水旱轮作下 CH_4 和 N_2O 排放存在一定差异^[13]。研究表明,水旱轮作中不同旱季作物 N_2O 排放量表现为油菜>冬小麦>休闲>紫云英轮作^[14]。然而,张岳芳等^[15]研究则表明在水旱轮作下对稻季 N_2O 排放影响为紫云英>油菜>小麦,对 CH_4 排放影响为紫云英>小麦>

油菜。总的来看,轮作方式的改变对于温室气体排放的影响,主要通过改变土壤物理和化学特性^[6],进而影响产甲烷菌、甲烷氧化菌、硝化细菌和反硝化细菌的活性,最终影响 CH_4 和 N_2O 的产生和排放^[17]。尽管如此,以往的研究多关注于某单一轮作模式下秸秆还田对温室气体排放的影响,忽略了不同轮作模式下秸秆还田对温室气体排放的影响及差异。

水旱轮作模式(水稻-紫云英,水稻-小麦和水稻-油菜)为研究对象,设置秸秆还田与不还田两种处理,采用静态箱—气相色谱法监测水稻季 CH_4 和 N_2O 的排放规律,同时监测土壤环境因子的动态变化,阐明秸秆还田对不同水旱轮作模式温室气体排放的影响及原因,明确秸秆还田条件下不同水旱轮作模式综合温室效应的差异,以期为稻田轮作方式的选择及农业绿色发展提供科学指导。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验地点位于湖北省荆州市长江大学农业科技示范基地(30°21'N; 112°09'E),该地属亚热带湿润季风气候,近10年的年平均气温16.5℃,年平均降水量1095 mm,有效积温5094.9℃~5204.3℃,无霜期200天。试验期间水稻季(2022-06-01—2022-09-05)逐日降水及气温变化见图1。本研究土壤类型为长江冲积潮土,pH 6.8,碱解氮106.2 mg/kg,速效磷25 mg/kg,速效钾105.5 mg/kg,有机质18.5 g/kg。

1.2 试验设计与管理

采用裂区试验,主因素为3种水旱轮作模式:水稻-小麦(RW)、水稻-油菜(RR)和水稻-紫云英(RC),副因素为秸秆还田(S+)和秸秆不还田(S-),

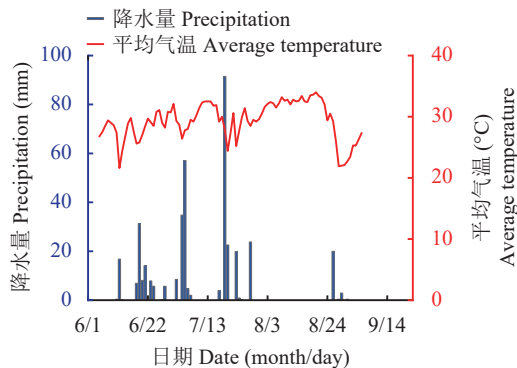


图1 试验期间逐日降雨量和平均气温

Fig. 1 Daily precipitation and average temperature during the test period

每个处理3次重复,小区面积为50 m²。相邻小区间设有水泥田埂以防串水串肥。水稻生长期间水分管理采取前期淹水,中期晒田,后期干湿交替的方式。

供试小麦品种为‘鄂麦26’,于11月初进行人工条种,次年5月中旬收获;播种前基施600 kg/hm²复合肥(N-P₂O₅-K₂O为16-10-22)。供试油菜品种为‘华油杂50’,于9月底育秧,11月初移栽,次年5月中旬收获;移栽前基施600 kg/hm²复合肥(N-P₂O₅-K₂O为16-10-22)。紫云英品种为‘闽紫一号’,播种量为30 kg/hm²,紫云英在10月初撒播。在水稻种植前一周左右翻耕入土。

秸秆还田处理下,小麦、油菜和紫云英收获后实行秸秆粉碎翻耕全量还田,油菜秸秆还田量约为7.61 t/hm²,小麦秸秆还田量约为5.05 t/hm²,紫云英(鲜草)还田量约为22.5 t/hm²。

供试水稻品种为‘隆两优华占’,水稻于5月初育秧,6月初采用人工插秧方式进行移栽,水稻种植密度为26.7 cm×16.7 cm,9月中旬收获;水稻整个生育期氮肥施用量为N 225 kg/hm²(基肥:分蘖肥:穗肥=4:3:3),钾肥施用量为K 180 kg/hm²(基肥:穗肥=1:1),磷肥施用量为P 75 kg/hm²,作基肥一次性施入。

1.3 气体采集与测定

CH_4 和 N_2O 排放速率采用人工静态箱—气相色谱法测定。采气箱由箱体和底座组成,箱体规格为45 cm×45 cm×100 cm,箱体外层用锡箔纸包裹以防止箱内升温过快;底座规格为45 cm×45 cm×20 cm,底座上端装有2 cm的凹槽。水稻移栽后,在各小区中心区域将底座安放牢固。气体采集前将一定的水注入底座上部深槽内用于保证箱体的密封性。在箱体密封后立即用100 mL注射器采集气体样品,分别在箱体密封后0、10、20、30 min时采集气体样品。采气时间为上午9:00—11:00,气体采集频率为1周1次,气体样品采集完成后,带回实验室用Agilent 7890B气相色谱仪测定样品中 CH_4 和 N_2O 浓度。其中, CH_4 用FID检测器进行测定,检测温度为250℃,柱温50℃; N_2O 用ECD检测器测定,检测温度为330℃,柱温50℃。

1.4 土壤和水稻植株样品采集与分析

在水稻分蘖期、抽穗期和成熟期,采用“五点取样法”在各小区采集0—20 cm土样,用于测定土壤铵态氮($\text{NH}_4^+\text{-N}$)和硝态氮($\text{NO}_3^+\text{-N}$)含量;同时采集

0—5、5—10 和 10—20 cm 土层土壤样品用于测定微生物量碳 (MBC) 和可溶性有机碳 (DOC) 含量。土壤 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 采用靛酚蓝比色法测定, 土壤 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 采用双波长紫外分光光度法测定。土壤 MBC 含量采用氯仿熏蒸法测定, 土壤可溶性有机碳含量采用重铬酸钾外加热法测定^[18]。水稻收获时, 在每个小区选取 3 个 1 m^2 长势均匀的区域进行收割, 测定水稻产量。

1.5 数据处理

CH_4 和 N_2O 排放速率计算公式:

$$F = \rho \times H \times \Delta C / \Delta t \times 273 / (273 + \theta) \quad (1)$$

式中: F —排放速率, CH_4 、 N_2O 排放速率单位分别为 $\text{mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 、 $\mu\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$; ρ —标准状态下气体密度 (N_2O 为 $1.964\text{ kg}/\text{m}^3$; CH_4 为 $0.714\text{ kg}/\text{m}^3$); H —采样箱高度 (m); $\Delta C/\Delta t$ —静态箱内气体浓度单位时间内的变化; θ —静态箱内温度 ($^\circ\text{C}$); 273—绝对温度。

CH_4 和 N_2O 累积排放量的计算公式:

$$E = \sum [(F_{n+1} + F_n) / 2] \times (t_{n+1} - t_n) \times 24 \quad (2)$$

式中: E — CH_4 或 N_2O 季节总排放量 (kg/hm^2); F_n 和 F_{n+1} —第 n 次和第 $n+1$ 次采样时 CH_4 或 N_2O 平均排放通量 [$\text{mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 或 $\mu\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$]; t_n 和 t_{n+1} —第 n 次和第 $n+1$ 次的采样时间 (d)。

全球增温潜势 (GWP): 采用 IPCC 推荐的计算方法, 即在 100 年尺度上, 分别以 CH_4 和 N_2O 排放量的 29.8 和 273 倍计算^[2], 得到 CO_2 的排放当量, 相加即为温室气体的增温潜势。计算公式:

$$N_{\text{GWP}} = E_{\text{CH}_4} \times 29.8 + E_{\text{N}_2\text{O}} \times 273 \quad (3)$$

式中: N_{GWP} — CH_4 和 N_2O 的综合增温潜势 ($\text{t CO}_2\text{-eq}/\text{hm}^2$); E_{CH_4} 、 $E_{\text{N}_2\text{O}}$ — CH_4 和 N_2O 的累积排放量。

温室气体排放强度 (GHGI) 计算公式^[19]如下:

$$\text{GHGI} = N_{\text{GWP}} / Y \quad (4)$$

式中: N_{GWP} — CH_4 和 N_2O 的综合增温潜势 ($\text{t CO}_2\text{-eq}/\text{hm}^2$); Y —作物籽粒产量 (t/hm^2)

1.6 数据分析

所有数据用 Excel 进行分析整理, 用 Origin 2021 作图, 通过 SPSS 19 进行统计分析。采用双因素方差分析评价秸秆还田、水旱轮作模式及其交互作用对水稻产量、 CH_4 、 N_2O 累积排放量、GWP 和 GHGI 的影响, 并采用最小显著法 (LSD) 分析处理间差异的显著性。采用 Pearson 相关性分析探究 CH_4 和 N_2O 排放与土壤理化性质的关系。数据呈现方式为均值 \pm 标准差, 样本数为 3。

2 结果与分析

2.1 水稻季 CH_4 和 N_2O 排放

各处理 CH_4 排放通量随时间的变化趋势基本一致。 CH_4 排放峰值出现在水稻分蘖前期 (图 2A), 随后降低并趋于平稳状态。其中, 在 CH_4 排放峰期间, 秸秆还田下稻麦、稻油模式的 CH_4 通量高于秸秆不还田, 而稻肥模式秸秆不还田处理前期排放较高, 后期明显降低。与秸秆不还田相比, 秸秆还田增加 3 种轮作模式 CH_4 累计排放量 (图 2B)。其中, 秸秆还田下稻油、稻麦和稻肥模式的 CH_4 累计排放量分别比秸秆不还田下高出 36.36%、25.83% 和 39.49%。秸秆还田下, 稻油模式具有最高的 CH_4 累计排放量 ($610.3\text{ kg}/\text{hm}^2$), 分别比稻麦和稻肥高 13.76% 和 58.06%; 秸秆不还田下, 稻麦具有最高的 CH_4 累计排放量 ($319.8\text{ kg}/\text{hm}^2$), 分别比稻油和稻肥高了 14.09% 和 72.08%。与稻肥轮作相比, 稻油和稻麦轮作水稻季土壤 CH_4 排在秸秆还田下高出 44%~58%, 在秸秆不还田下则高出 58%~72%。

在水稻生长期, N_2O 排放峰值出现在移栽后到水稻分蘖前 (图 2C), 随后开始逐渐降低并趋于平稳状态。3 种轮作模式下, 秸秆还田处理 N_2O 排放峰值均高于秸秆不还田处理。秸秆还田条件下稻油、稻麦和稻肥模式的 N_2O 累计排放量分别比秸秆不还田下高 29.14%、20.45% 和 21.99% (图 2D)。秸秆还田下, 稻油具有最高的 N_2O 累积排放量 ($4.2\text{ kg}/\text{hm}^2$), 分别比稻麦和稻肥高 12.97% 和 30.30%; 秸秆不还田下, 稻麦 N_2O 累计排放量最高 ($2.4\text{ kg}/\text{hm}^2$), 分别比稻油和稻肥高 6.89% 和 21.66%。与稻肥轮作相比, 稻油和稻麦轮作水稻季土壤 N_2O 排在秸秆还田下高出 17%~30%, 在秸秆不还田下则高出 15%~22%。

2.2 秸秆还田和轮作模式对水稻季综合增温潜势和温室气体排放强度的影响

水旱轮作模式和秸秆还田对水稻季综合增温潜势 (GWP) 均有显著影响 (表 1, $P < 0.05$)。秸秆还田下 3 种轮作模式平均 GWP 较秸秆不还田显著增加 31% ($P < 0.01$)。秸秆还田条件下, 稻油和稻麦轮作 GWP 分别比稻肥模式高 18.77% 和 14.20%, 而在秸秆不还田条件下的增幅分别为 18.25% 和 22.76%。

秸秆还田、轮作模式对 GHGI 的影响分别达到 0.01、0.05 显著水平, 秸秆还田的效应大于轮作模式, 二者对 GHGI 交互作用不显著。秸秆还田下, 稻油和稻麦轮作的 GHGI 分别比稻肥模式高 19.43%

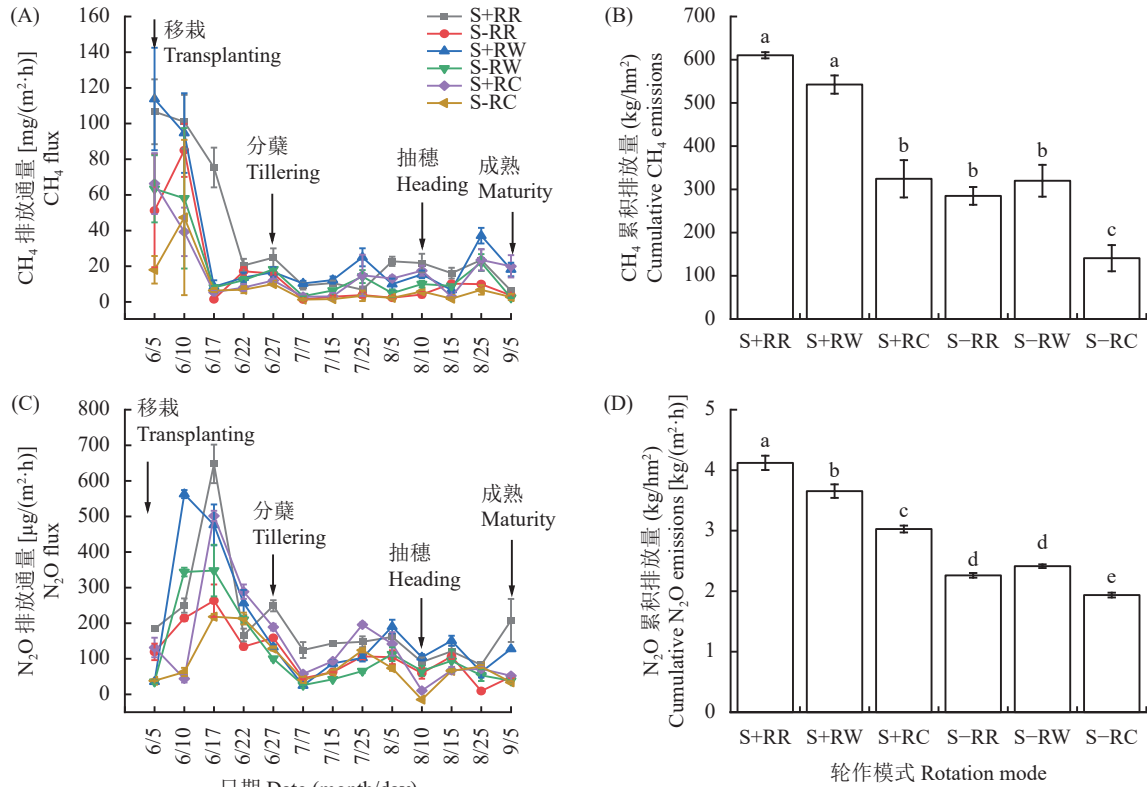


图 2 不同处理下土壤 CH_4 、 N_2O 的排放通量和累积排放量

Fig. 2 Emission fluxes and cumulative emissions of CH_4 and N_2O in soil under different treatments

注：处理中 S+、S- 分别表示秸秆还田、不还田，RR、RW、RC 分别代表稻油、稻麦和稻肥（水稻-紫云英）轮作模式。柱上不同小写字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$)。

Note: In treatment, the S+ and S- represent straw return and straw return, respectively; the RR, RW, and RC represent rotation mode rice-rape, rice-wheat and rice-Chinese milk vetch, respectively. Different lowercase letters above the bars indicate significant differences among treatments ($P < 0.05$).

和 11.93%；秸秆不还田下，稻油和稻麦模式的 GHGI 分别比稻肥模式高 14.54% 和 23.72%。秸秆还田下 3 种轮作模式稻季土壤平均 GHGI 较秸秆不还田高出 32%。秸秆还田与不同轮作模式对后茬水稻产量均无显著影响 (表 1, $P > 0.05$)。

2.3 水稻季土壤温度、含水量、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量的变化

土壤温度随着气温的升高而升高，种植到分蘖期间温度稳定在 30°C 以下，抽穗期间随着温度上升土温也保持在 30°C 以上，在成熟期降低 (图 3A)。土壤含水量在水稻成熟期前保持在 30% 左右，成熟期的晒田措施导致土壤含水量在该时期呈现出下降的趋势 (图 3B)。

不同处理下土壤 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的变化趋势基本一致，在分蘖期间出现较大的峰值，在水稻成熟期出现相对较小的峰值 (图 3C)。秸秆还田下稻麦、稻油、稻肥模式的土壤 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量高于秸秆不还田。秸秆还田处理中，稻油 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量均值最高 (5.31 mg/kg)；秸

秆不还田下，稻肥 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量均值最高 (4.86 mg/kg)。

土壤 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量的变化趋势和土壤 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量的变化趋势基本一致，峰值出现在移栽—分蘖期，整体呈现出先增加后降低的趋势，随后在穗期—成熟期出现较小峰值 (图 3D)。另外秸秆还田处理下稻麦、稻油模式的 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量要高于秸秆不还田，稻肥模式 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量则呈现出相反的趋势。秸秆还田下，稻麦 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量均值最高 (1.11 mg/kg)。秸秆不还田下，稻肥 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量均值最高 (1.14 mg/kg)。

2.4 水稻季土壤微生物量碳和可溶性碳含量的变化

水稻季土壤微生物量碳 (MBC) 含量波动较大 (图 4)。在 0—5 cm 土层中，分蘖期、抽穗期微生物量碳含量表现为稻麦 > 稻油 > 稻肥，成熟期则呈现相反趋势。在 5—10 cm 土层中，稻肥轮作土壤微生物量碳含量分蘖期低，抽穗期和成熟期高，稻油、稻麦轮作土壤微生物量碳无明显变化规律。在 10—20 cm 土层中，稻肥轮作土壤微生物量碳分蘖期和抽穗期高，成熟期低，在成熟期，秸秆还田条件下稻

表 1 不同处理下温室气体累积排放量、增温潜势和单位产量排放强度

Table 1 Total greenhouse gas (GHG) emissions, global warming potential (GWP), and GHG emission intensity (GHGI) under different treatments

处理 Treatment	甲烷累积排放量 Cumulative CH ₄ emission (t/hm ²)	氧化亚氮累积排放量 Cumulative N ₂ O emission (t/hm ²)	增温潜势 N _{GWP} (t CO ₂ -eq/hm ²)	产量 Yield (t/hm ²)	排放强度 GHGI (t CO ₂ -eq/t)
S+RR	18.19±0.30 a	1.13±0.05 a	19.31±0.35 a	8.59±1.60 a	2.29±0.36 a
S+RW	16.17±0.89 a	1.00±0.04 b	17.17±0.92 a	9.36±1.73 a	1.89±0.45 a
S+RC	9.67±1.84 b	0.83±0.02 c	10.49±1.85 b	8.59±1.82 a	1.24±0.18 b
S+平均 Mean	14.76 A	0.98 A	15.66 A	8.85 A	1.81 A
S-RR	8.49±0.81 b	0.62±0.02 d	9.10±0.81 b	9.10±0.59 a	1.01±0.14 bc
S-RW	9.53±1.46 b	0.66±0.01 d	10.19±1.45 b	8.08±0.38 a	1.27±0.24 b
S-RC	4.19±1.17 c	0.53±0.01 e	4.72±1.18 c	8.10±1.63 a	0.59±0.12 c
S-平均 Mean	7.40 B	0.60 B	8.01 B	8.43 A	0.96 B
RR平均 Mean	13.34±0.56 a	0.87±0.03 a	14.21±0.58 a	8.85±1.09 a	1.65±0.25 a
RW平均 Mean	12.85±1.17 a	0.83±0.03 b	13.68±1.19 a	8.72±1.06 a	1.58±0.35 a
RC平均 Mean	6.93±1.50 b	0.68±0.02 c	7.61±1.51 b	8.35±1.73 b	0.92±0.15 b
方差分析 ANOVA					
秸秆还田 Straw return (S)	145.72**	735.72**	158.33**	0.37	36.53**
轮作模式 Rotation mode (R)	46.78**	69.60**	48.52**	0.19	11.04*
S×R	4.38*	20.87**	4.74*	0.56	2.39

注: N_{GWP}—CH₄和N₂O综合增温潜势; S+、S-分别表示秸秆还田、不还田处理; RR、RW、RC 分别代表稻油、稻麦和稻肥(水稻-紫云英)轮作模式。同列数据后不同小写字母表示轮作模式间差异显著 ($P<0.05$), 不同大写字母表示秸秆处理间差异显著 ($P<0.05$), *, **分别表示变量影响效应达到0.05、0.01显著水平。

Note: N_{GWP}—CH₄+N₂O comprehensive emission potential. S+, and S- represent straw return, and no straw return, respectively; the RR, RW, and RC represent rotation mode of rice-rape, rice-wheat and rice-Chinese milk vetch, respectively. Difference lowercase letters after data indicate significant difference among rotation modes, and different uppercase letters indicate significant difference between two straw treatments ($P<0.05$). *, and ** indicate the variable effect reaching 0.05 and 0.01 significant levels, respectively.

麦、稻油、稻肥轮作土壤微生物量碳依次降低。总体来看, 秸秆还田下 3 种轮作模式各土层微生物量碳含量均高于秸秆不还田处理, 而且稻麦轮作土壤微生物量碳含量高于稻肥、稻油轮作。

水稻季土壤可溶性有机碳含量随着土层深度的增加而降低(图 4), 在秸秆还田下, 0—5 cm 土层中稻油、稻麦、稻肥轮作土壤可溶性有机碳含量随水稻生长而降低, 稻肥轮作整个水稻生育期 0—5、5—10 cm 土层可溶性有机碳含量均高于秸秆不还田, 而稻麦、稻油轮作只在分蘖期、抽穗期可溶性有机碳含量大于秸秆不还田。10—20 cm 土层可溶性有机碳含量变化无明显规律。总的来看, 稻麦轮作 0—5、5—10 cm 土层可溶性有机碳含量与稻油、稻肥轮作的差异主要出现在秸秆还田条件下的分蘖期和抽穗期。

2.5 稻田 CH₄ 和 N₂O 排放与土壤理化因子的关系

相关分析(图 5)显示, 秸秆还田条件下土壤 CH₄

和 N₂O 排放与 NO₃⁻-N 含量正相关 ($P<0.01$), 秸秆不还田条件下, CH₄ 排放与 NO₃⁻-N 正相关 ($P<0.01$), 而 N₂O 排放与 NH₄⁺-N 正相关 ($P<0.01$)。无论秸秆还田与否, CH₄ 和 N₂O 排放与土壤可溶性有机碳和微生物量碳均呈正相关 ($P<0.05$)。秸秆还田处理下, 5—10 cm 土层可溶性有机碳与 0—5 cm 土层可溶性有机碳正相关 ($P<0.01$), 与 10—20 cm 土层可溶性有机碳呈负相关 ($P<0.01$)。0—5、5—10 cm 土层可溶性有机碳和微生物量碳间呈正相关 ($P<0.01$)。秸秆不还田条件下, 各土层微生物量碳和可溶性有机碳间均呈正相关 ($P<0.01$)。

3 讨论

3.1 秸秆还田对不同水旱轮作模式下水稻季 CH₄ 排放的影响

在水稻-油菜、水稻-小麦和水稻-紫云英 3 种轮作模式下, 前茬旱作秸秆还田均显著增加了水稻季

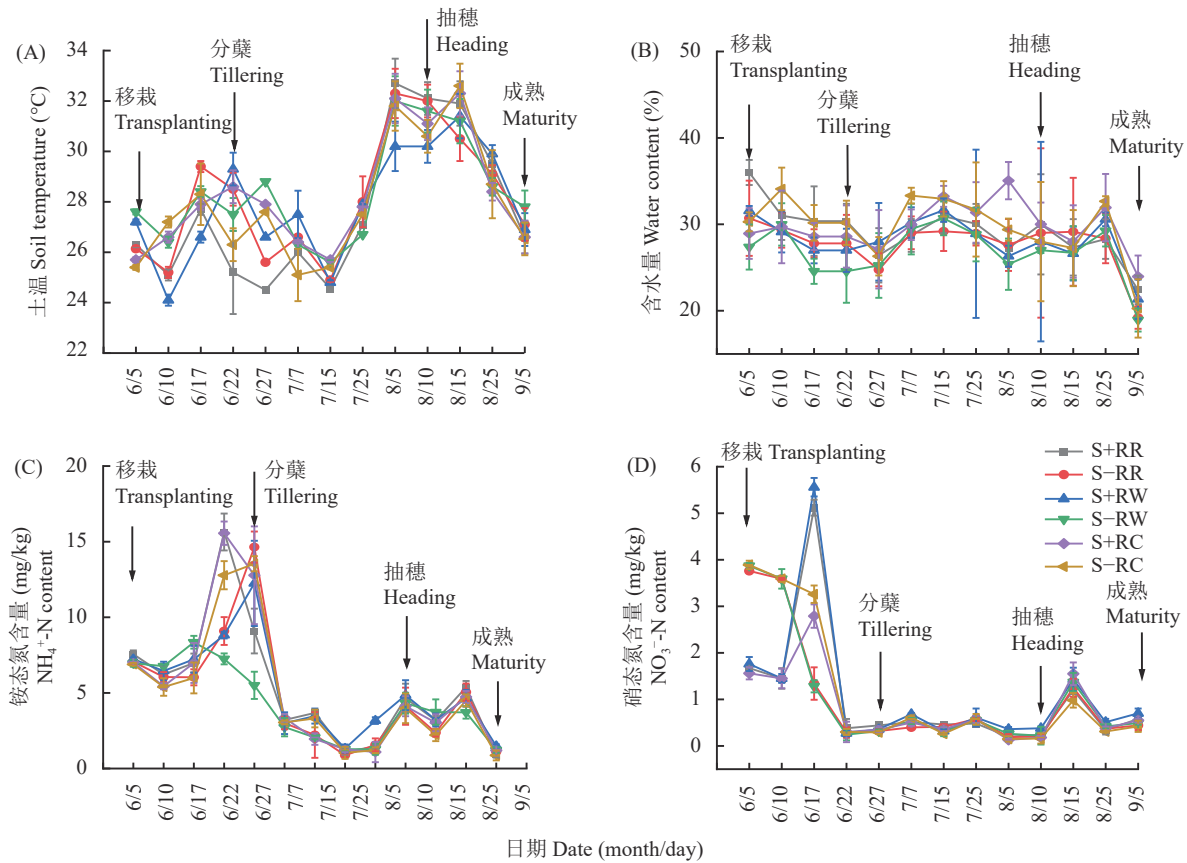


图 3 不同处理下水稻季土壤温度、水分、铵态氮和硝态氮含量的动态变化

Fig. 3 Dynamic changes of soil temperature, moisture, ammonium nitrogen and nitrate nitrogen contents in rice season under different treatments

注：处理中 S+、S- 分别表示秸秆还田、不还田，RR、RW、RC 分别代表稻油、稻麦和稻肥（水稻-紫云英）轮作模式。

Note: In treatment, the S+ and S- represent straw return and no straw return, respectively; the RR, RW, and RC represent rotation mode of rice-rape, rice-wheat and rice-Chinese milk vetch, respectively.

CH₄ 排放 (图 2)，这与陈乾^[20]的研究结果一致。土壤中的产甲烷菌和甲烷氧化菌在 CH₄ 产生和氧化过程中起着重要作用，它们的繁殖需要充足的底物和适宜的环境条件。而秸秆还田后释放了大量的活性碳，提高了土壤微生物量碳和可溶性有机碳含量，为产甲烷菌提供了大量的含碳底物，进而促进了 CH₄ 排放^[21]。另一方面，本研究结果显示无论秸秆是否还田，稻油和稻麦模式 CH₄ 排放均显著高于稻肥模式 (表 1)。其原因可能归结于以下几点：首先，相比于小麦和油菜，紫云英绿肥的秸秆还田生物量更少，继而导致秸秆还田下在水稻季产生了较少的 CH₄；此外，紫云英是一种豆科绿肥，其秸秆碳氮比较低，更易于被微生物利用，也更有助于植物吸收，从而降低了土壤中碳底物的可用性^[22]，如 MBC 和 DOC (图 4)，导致无秸秆还田下稻肥模式的 CH₄ 排放量最低。总之，3 种水旱轮作模式下稻肥具有较低的 CH₄ 排放，而秸秆还田处理会增加 CH₄ 排放。

3.2 秸秆还田对不同水旱轮作模式下水稻季 N₂O 排放的影响

本研究结果表明，N₂O 排放峰值出现在水稻移栽至分蘖期间。这主要是因为土壤 N₂O 的排放与 NO₃⁻-N 和 NH₄⁺-N 呈正相关 (图 5)，而移栽前基肥的施用增加了土壤 NO₃⁻-N、NH₄⁺-N 含量，为土壤硝化和反硝化作用提供了更多的反应底物，从而增加了 N₂O 的排放^[23]；另一方面，水稻生长期间土壤长期处于淹水状态，其氧化还原电位较低，不利于硝化过程的进行^[24]，而分蘖前稻田排水晒田改善了土壤的好氧状况，促进了硝化作用，例如，前人有研究表明淹水落干和干湿交替能显著增加 N₂O 排放^[25]，因此我们在晒田期间同样观测到了 N₂O 的排放峰值。此外，本研究还发现，在稻油、稻麦和稻肥 3 种模式下秸秆还田均增加了水稻季 N₂O 排放，主要原因在于 N₂O 产生主要来自于微生物的硝化和反硝化过程，而秸秆分解产生的活性碳可为反硝化菌提供电

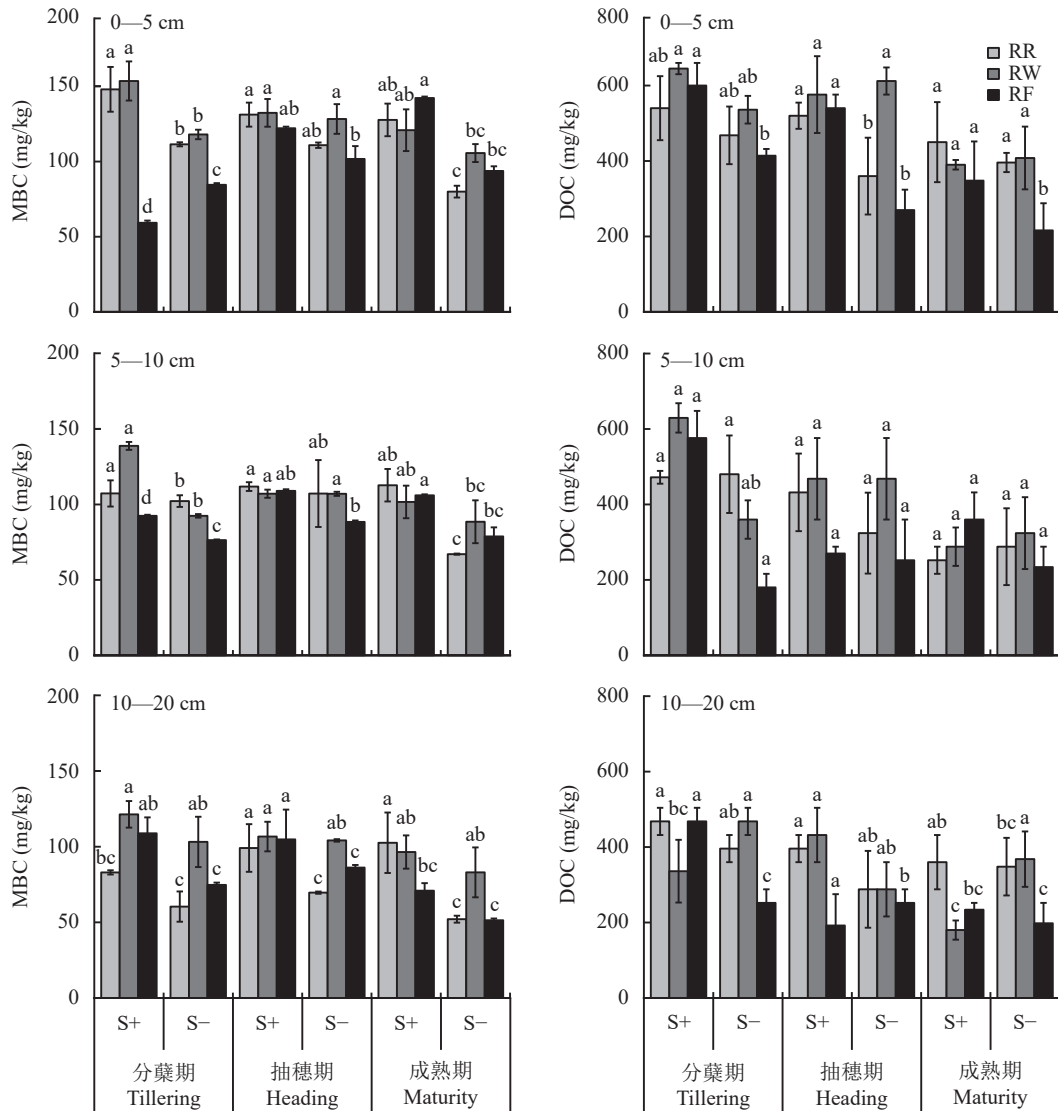


图 4 不同处理各土层土壤微生物量碳 (MBC) 和可溶性有机碳 (DOC) 含量

Fig. 4 Microbial mass carbon (MBC) and dissolvable organic carbon (DOC) content in different soil layers under different treatments

注: 处理中 S+、S- 分别表示秸秆还田、不还田, RR、RW、RC 分别代表稻油、稻麦和稻肥 (水稻-紫云英) 轮作模式。柱上不同小写字母表示同一生育期不同处理间差异显著 ($P < 0.05$)。

Note: In treatment, the S+ and S- represent straw return and no straw return, respectively; the RR, RW, and RC represent rotation mode of rice-rape, rice-wheat and rice-Chinese milk vetch, respectively. Different lowercase letters above the bars indicate significant difference among treatments at the same growth stage ($P < 0.05$).

子受体, 促进 N_2O 的产生^[26]; 此外, 秸秆分解过程中释放的有效氮可为硝化和反硝化菌提供能量, 进而刺激 N_2O 的产生^[27]。

稻油和稻麦轮作水稻季 N_2O 排放高于稻肥模式 (图 2)。主要原因在于, 首先冬季作物收获后, 油菜和小麦收获后根茬仍然保留在稻田里, 进行翻耕后增加了稻田土壤有机物含量, 为硝化和反硝化微生物提供了大量底物^[28], 而稻肥虽然也有紫云英根茬留在土中, 但经过冬季的腐解, 可为水稻季 N_2O 排放提

供的底物有限^[29], 继而无秸秆还田下稻肥模式具有较低的 N_2O 排放。其次, 与 CH_4 排放类似, 受限于可利用底物 (如硝态氮和铵态氮) 供应水平, 相比于小麦和油菜秸秆还田, 紫云英绿肥的秸秆还田生物量更少, 继而导致秸秆还田下在水稻季产生了较少的 N_2O ^[28-29]。尽管如此, 以往的研究却表明短期内秸秆还田与不还田温室气体排放变化不大^[30], 因而对于秸秆还田对温室气体排放的影响应进行长期的试验验证。

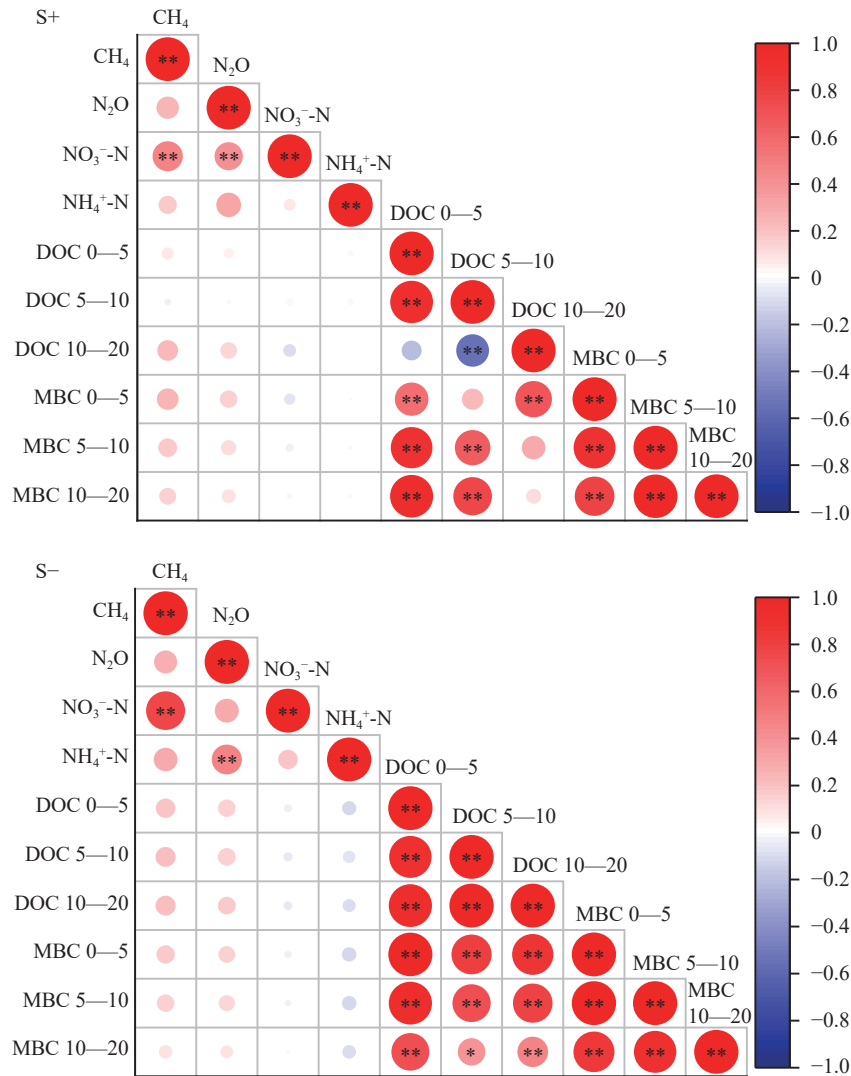


图 5 秸秆还田 (S+) 和不还田 (S-) 条件下稻田甲烷和氧化亚氮排放及各土层养分因子间的相关性
 Fig. 5 Correlation among methane and nitrous oxide emissions and soil nutrient factors in various soil layers under straw return (S+) and no straw return (S-) conditions

注: DOC—可溶性有机碳; MBC—微生物量碳; 0—5、5—10、10—20 分别表示 0—5、5—10、10—20 cm 土层。

Note: DOC—Dissolved organic carbon; MBC—Microbial biomass carbon; 0—5, 5—10, 10—20 indicate 0—5, 5—10, 10—20 cm soil layers.

3.3 秸秆还田对不同水旱轮作模式下水稻季 GWP 和 GHGI 的影响

本研究结果表明, 秸秆还田对产量有一定的影响, 但差异并不显著, 主要因为秸秆还田在短期内提高土壤养分含量的物质有限, 因而对作物产量的提升效果有限, 这一结果与刘丽华等^[31]研究相符。秸秆还田显著增加了 3 种水旱轮作模式下单位面积的温室气体排放 (GWP), 这主要由于秸秆还田增加了 CH₄ 和 N₂O 的排放^[32], 然而由于这两种温室气体的增加幅度高于产量的增幅, 因此导致单位产量的温室气体排放 (GHGI) 增加。与稻麦和稻油模式相比, 由于稻肥模式的稻季 CH₄ 和 N₂O 排放均较低, 因此产生了更低的 GWP, 这说明水稻种植过程中引起的

温室效应受轮作模式影响。由于 3 种轮作模式水稻产量差异不明显, 因此, 稻肥模式较低的 GWP 导致该模式的 GHGI 最低, 表明水稻-紫云英轮作在平衡水稻季环境和经济效益中具有一定的优势。

4 结论

秸秆还田显著增加了 3 个轮作模式水稻季的 N₂O 和 CH₄ 排放, 进而增加了 3 个轮作体系的综合增温潜势 (GWP) 和温室气体排放强度 (GHGI)。不论秸秆还田与否, 稻麦和稻油轮作由于较高的 CH₄ 和 N₂O 累积排放量, 其水稻季单位面积和单位产量温室气体的增温潜势均显著高于稻肥轮作。相关性分析表明, CH₄ 和 N₂O 的排放与土壤可利用性碳、氮浓度

的升高有关。综合分析, 水稻-紫云英轮作是一种相对生态环境友好型的种植制度。

参 考 文 献:

- [1] Zhao Z, Yue Y B, Sha Z M, *et al.* Assessing impacts of alternative fertilizer management practices on both nitrogen loading and greenhouse gas emissions in rice cultivation[J]. *Atmospheric Environment*, 2015, 119: 393–401.
- [2] IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). Climate change 2021: The physical science basis: Working group I contribution to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change[J]. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2021.
- [3] Wang H, Zhang Y, Zhang Y, *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] 王书伟, 吴正贵, 孙永泉, 等. 太湖地区典型轮作与休耕方式对稻田水稻季 N_2O 和 CH_4 排放量的影响[J]. *生态环境学报*, 2021, 30(1): 63–71.
Wang S W, Wu Z G, Sun Y Q, *et al.* Effects of typical crop rotation systems and land fallow on paddy soil N_2O and CH_4 emissions in Taihu Lake Region of China[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2021, 30(1): 63–71.
- [5] Ma E D, Zhang G B, Ma J, *et al.* Effects of rice straw returning methods on N_2O emission during wheat-growing season[J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2010, 88(3): 463–469.
- [6] Zhu B, Yi L X, Hu Y G, *et al.* Effects of Chinese milk vetch (*Astragalus sinicus* L.) residue incorporation on CH_4 and N_2O emission from a double-rice paddy soil[J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2012, 11(9): 1537–1544.
- [7] Xia L L, Lan S K, Wolf B, *et al.* Trade-offs between soil carbon sequestration and reactive nitrogen losses under straw return in global agroecosystems[J]. *Global Change Biology*, 2018, 24(12): 5919–5932.
- [8] Yao Z S, Yan G X, Zheng X H, *et al.* Straw return reduces yield-scaled N_2O plus NO emissions from annual winter wheat-based cropping systems in the North China Plain[J]. *Science of the Total Environment*, 2017, 590/591: 174–185.
- [9] John K, Janz B, Kiese R, *et al.* Earthworms offset straw-induced increase of greenhouse gas emission in upland rice production[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 710: 136352.
- [10] 熊丽萍, 吴家梅, 纪雄辉, 等. 水旱轮作系统中土壤 CH_4 和 N_2O 排放研究进展[J]. *农业环境科学学报*, 2020, 39(4): 863–871.
Xiong L P, Wu J M, Ji X H, *et al.* A review on soil CH_4 and N_2O emissions from paddy-upland rotation systems[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2020, 39(4): 863–871.
- [11] Jing Y, Guo J L, Hai Y T, *et al.* Trade-offs between wheat soil N_2O emissions and C sequestration under straw return, elevated CO_2 concentration, and elevated temperature[J]. *The Science of the Total Environment*, 2023, 892: 164508.
- [12] Shun T Z, Tao R, Xu K Y, *et al.* Biochar returns 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.
- [13] 元生朝. 合理的复种轮作与湖北省稻田耕作制度改革[J]. *作物学报*, 1981, 7(3): 211–216.
Yuan S C. The suitable crop rotation and the improvement of the cropping system on rice field in Hubei Province[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 1981, 7(3): 211–216.
- [14] 刘少文, 殷敏, 褚光, 等. 长江中下游稻区不同水旱轮作模式和氮肥水平对稻田 CH_4 排放的影响[J]. *中国农业科学*, 2019, 52(14): 2484–2499.
Liu S W, Yin M, Chu G, *et al.* Effects of various paddy-upland crop rotations and nitrogen fertilizer levels on CH_4 emission in the middle and lower reaches of the Yangtze River[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2019, 52(14): 2484–2499.
- [15] 张岳芳, 周炜, 陈留根, 等. 太湖地区不同水旱轮作方式下稻季甲烷和氧化亚氮排放研究[J]. *中国生态环境学报*, 2013, 21(3): 290–296.
Zhang Y F, Zhou W, Chen L G, *et al.* Methane and nitrous oxide emission under different paddy-upland crop rotation systems during rice growth season in Taihu Lake Region[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2013, 21(3): 290–296.
- [16] 侯朋福. 秸秆还田对稻麦生产力和农田温室气体排放的影响[D]. 江苏南京: 南京农业大学博士学位论文, 2014.
Hou P F. Effects of straw return on rice and wheat productivity and greenhouse gas emissions from farmland[D]. Nanjing, Jiangsu: PhD Dissertation of Nanjing Agricultural University, 2014.
- [17] 王志强, 黄国勤, 赵其国. 新常态下我国轮作休耕的内涵、意义及实施要点简析[J]. *土壤*, 2017, 49(4): 651–657.
Wang Z Q, Huang G Q, Zhao Q G. Brief analysis on connotation, significance and implementing essentials of rotation fallow under new normal in China[J]. *Soils*, 2017, 49(4): 651–657.
- [18] Blair G, Lefroy R, Lisle L. Soil carbon fractions based on their degree of oxidation, and the development of a carbon management index for agricultural systems[J]. *Australian Journal of Agricultural Research*, 1995, 46(7): 1459–1466.
- [19] 郭腾飞, 梁国庆, 周卫, 等. 施肥对稻田温室气体排放及土壤养分的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2016, 22(2): 337–345.
Guo T F, Liang G Q, Zhou W, *et al.* Effect of fertilizer management on greenhouse gas emission and nutrient status in paddy soil[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2016, 22(2): 337–345.
- [20] 陈乾. 增温和秸秆还田对北方稻田水稻生长及温室气体排放的影响[D]. 辽宁沈阳: 沈阳农业大学硕士学位论文, 2023.
Chen Q. Effects of warming and straw return on rice growth and greenhouse gas emissions in northern paddy fields[D]. Shenyang, Liaoning: MS Thesis of Shenyang Agricultural University, 2023.
- [21] 王钧美, 张莉, 徐桃元, 等. 不同灌溉稻田产甲烷菌与甲烷产生率的变化规律[J]. *灌溉排水学报*, 2014, 33(4/5): 360–363.
Wang J M, Zhang L, Xu T Y, *et al.* Methanogens and methane production rate in paddy soil under different irrigation treatments[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2014, 33(4/5): 360–363.
- [22] Quan Z, Peng Z, Wang Z Q, *et al.* Winter crop rotation intensification to increase rice yield, soil carbon, and microbial diversity[J]. *Heliyon*, 2023, 9(1): e12903.

- [23] 孔德杰, 李娜, 任成杰, 等. 不同施肥水平对长期麦豆轮作体系土壤氮素及产量的影响[J]. *西北农业学报*, 2022, 31(6): 729–740.
Kong D J, Li N, Ren C J, *et al.* Effects of different N fertilization levels on soil nitrogen and yield in long-term wheat bean rotation system[J]. *Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica*, 2022, 31(6): 729–740.
- [24] 李思宇, 陈云, 李婷婷, 等. 水分养分管理对稻田温室气体排放影响的研究进展[J]. *扬州大学学报(农业与生命科学版)*, 2019, 40(6): 16–23.
Li S Y, Chen Y, Li T T, *et al.* Effects of water and nutrient management on greenhouse gas emissions in paddy fields[J]. *Journal of Yangzhou University (Agriculture and Life Sciences)*, 2019, 40(6): 16–23.
- [25] 刘畅, 迟道才, 张丰, 等. 稻草生物炭对干湿交替稻田CH₄和N₂O排放的影响[J]. *农业工程学报*, 2023, 39(14): 232–242.
Liu C, Chi D C, Zhang F, *et al.* Effects of rice straw biochar on CH₄ and N₂O emissions in alternating wetting and drying rice fields[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2023, 39(14): 232–242.
- [26] Köster R J, Cárdenas L, Senbayram M, *et al.* rapid shift from denitrification to nitrification in soil after biogas residue application as indicated by nitrous oxide isotopomers[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2011, 43(8): 1671–1677.
- [27] Hu X K, Su F, Ju X T, *et al.* Greenhouse gas emissions from a wheat-maize double cropping system with different nitrogen fertilization regimes[J]. *Environmental Pollution*, 2013, 176: 198–207.
- [28] 马小婷, 隋玉柱, 朱振林, 等. 秸秆还田对农田土壤碳库和温室气体排放的影响研究进展[J]. *江苏农业科学*, 2017, 45(6): 14–20.
Ma X T, Sui Y Z, Zhu Z L, *et al.* Research progress on the impact of straw return on soil carbon pool and greenhouse gas emissions in farmland[J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2017, 45(6): 14–20.
- [29] 李成伟, 刘章勇, 龚松玲, 等. 稻作模式改变对稻田CH₄和N₂O排放的影响[J]. *生态环境学报*, 2022, 31(5): 961–968.
Li C W, Liu Z Y, Gong S L, *et al.* Effects of changing rice cropping patterns on CH₄ and N₂O emissions from paddy fields[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2022, 31(5): 961–968.
- [30] 夏梓泰, 程伟威, 李永梅, 等. 轮作休耕模式对土壤团聚体及有机碳含量的影响[J]. *水土保持研究*, 2022, 29(3): 31–37.
Xia Z T, Cheng W W, Li Y M, *et al.* Effects of crop rotation and fallow pattern on soil aggregates and organic carbon content[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2022, 29(3): 31–37.
- [31] 刘丽华, 秦猛, 翟玲霞, 等. 秸秆还田形态和还田量对水稻氮素积累与转运及产量品质的影响[J]. *干旱地区农业研究*, 2023, 41(3): 218–228.
Liu L H, Qin M, Zhai L X, *et al.* Effects of straw returning form and amount on nitrogen accumulation and translocation as well as yield and quality of rice[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2023, 41(3): 218–228.
- [32] 胡锦涛, 薛利红, 钱聪, 等. 增氧对不同秸秆还田稻田田面水养分动态及温室气体排放的影响[J]. *环境科学*, 2023, 44(4): 2348–2355.
Hu J H, Xue L H, Qian C, *et al.* Effects of aeration on surface water nutrient dynamics and greenhouse gas emission in different straw returning paddy fields[J]. *Environmental Science*, 2023, 44(4): 2348–2355.