DOI: 10.20103/j.stxb.202307021406

吴健成,刘卿,汪翠存,陆汝华,刘艳,曹强,田永超,朱艳,曹卫星,刘小军.秸秆还田与氮肥施用对稻田温室气体排放的影响.生态学报,2024,44(12):5328-5339.

Wu J C, Liu Q, Wang C C, Lu R H, Liu Y, Cao Q, Tian Y C, Zhu Y, Cao W X, Liu X J.Effects of straw returning and nitrogen fertilizer application on greenhouse gas emissions in rice paddy fields and research on fertilizer recommendation.Acta Ecologica Sinica,2024,44(12):5328-5339.

秸秆还田与氮肥施用对稻田温室气体排放的影响

吴健成[1,2,3,4,5],刘 卿[1,2,3,4,5],汪翠存[1,2,3,4,5],陆汝华[1,2,3,4,5],刘 艳[1,2,3,4,5],曹 强[1,2,3,4,5],田永超[1,2,3,4,5],朱 艳[1,2,3,4,5],曹卫星[1,2,3,4,5],刘小军[1,2,3,4,5,*]

1 南京农业大学国家信息农业工程技术中心, 南京 210095

2 智慧农业教育部工程研究中心, 南京 210095

3 农业农村部农作物系统分析与决策重点实验室, 南京 210095

4 江苏省信息农业重点实验室, 南京 210095

5 现代作物生产省部共建协同创新中心,南京 210095

摘要:秸秆还田与氮肥施用是农田生态系统中碳氮元素的两大主要补给途径,其在调控稻田甲烷(CH_4)和氧化亚氮(N_2O)排放以及水稻产量方面具有重要作用。以往的研究主要关注秸秆还田或氮肥施用单因素对稻田温室气体排放的影响,而双因素互作对甲烷和氧化亚氮排放的影响尚未明确。同时,在秸秆还田条件下如何进行合理的氮肥施用鲜有深入研究。本研究基于 3 个氮肥处理(0、180、360 kg N/hm^2)和 3 个秸秆还田处理(0、2.25、3.75 t/hm^2)进行多年水稻田间定位试验,研究结果表明:CH_4 季节累积排放随秸秆还田量增加而增加,与施氮量无显著正相关关系;N_2O 季节累积排放随施氮量增加而增加,与秸秆还田量无显著正相关关系;秸秆还田对于产量的影响具有不确定性,两年均在秸秆不还田+不施氮处理(S0N0)出现最低产量,2021 与 2022 年最低产量分别为 5740.64 和 4903.75 kg/hm^2。2021 与 2022 年最高产量分别在秸秆不还田+高氮(S0N2)和高量秸秆还田+高氮(S2N2)出现,分别为 10938.48 和 10384.83 kg/hm^2。同时,本研究发现在低量秸秆还田条件下,在碳足迹(*CF*, Carbon Footprint)方面,施氮量为 251 kg N/hm^{2}时碳足迹达到最低点,为 1.01 kg C/kg;而在生态经济净收益(NEEB, Net Ecosystem Economic Benefits)方面,施氮量为 294 kg N/hm^{2}时生态经济净收益达到最高点,为 11778.15 元/hm^2。为协同生态经济净收益与碳排放,在低量秸秆还田(S1)下,配合 251—294 kg N/hm^{2}的施氮量为最优施肥方案。研究结果为指导稻田温室气体减排、实现稻田碳中和以及农田管理提供了理论支撑,为实现水稻的高产稳产与低碳生产科学依据。

关键词:水稻;温室气体;秸秆还田;氮肥;推荐施肥

Effects of straw returning and nitrogen fertilizer application on greenhouse gas emissions in rice paddy fields and research on fertilizer recommendation

WU Jiancheng[1,2,3,4,5],LIU Qing[1,2,3,4,5],WANG Cuicun[1,2,3,4,5],LU Ruhua[1,2,3,4,5],LIU Yan[1,2,3,4,5],CAO Qiang[1,2,3,4,5],TIAN Yongchao[1,2,3,4,5],ZHU Yan[1,2,3,4,5],CAO Weixing[1,2,3,4,5],LIU Xiaojun[1,2,3,4,5,*]

1 *National Engineering and Technology Center for Information Agriculture*, *Nanjing* 210095, *China*

2 *Engineering and Research Center for Smart Agriculture*, *Ministry of Education*, *Nanjing* 210095, *China*

3 *Key Laboratory for Crop System Analysis and Decision Making*, *Ministry of Agriculture and Rural Affairs*, *Nanjing* 210095, *China*

4 *Jiangsu Key Laboratory for Information Agriculture*, *Nanjing* 210095, *China*

5 *Collaborative Innovation Center for Modern Crop Production Co-sponsored bu Province and Ministry*, *Nanjing* 210095, *China*

Abstract: The incorporation of straw residues into fields and the application of nitrogen fertilizers represent two primary

基金项目:上海市农业科技创新项目(I2023005);国家重点研发专项 (2023YFD1701002, 2022YFD2301402);国家自然科学基金(32071903)

收稿日期:2023-07-02; **网络出版日期**:2024-04-10

* 通讯作者 Corresponding author.E-mail: liuxj@ njau.edu.cn

avenues for the supplementation of carbon and nitrogen elements in agricultural ecosystems. These practices play crucial roles in regulating greenhouse gas emissions, specifically methane (CH_4) and nitrous oxide (N_2O), as well as influencing rice crop yields. Previous research has predominantly focused on examining the individual im<acts of straw incorporation or nitrogen fertilizer application on greenhouse gas emissions in rice fields, while the interactive effects of these dual factors on CH_4 and N_2O emissions remain insufficiently elucidated. Simultaneously, there exists a dearth of in-depth investigations into the judicious application of nitrogen fertilizers under condition of straw incorporation. This study, based on multi-year in-field experiments in rice paddies, implemented three nitrogen fertilizer treatments (0, 180, and 360 kg N/hm^2) and three straw incorporation treatments (0, 2.25, and3.75 t/hm^2). Results revealed a positive correlation between the increased levels of straw incorporation and elevated seasonal cumulative CH_4 emissions, with no statistically significant positive correlation observed with nitrogen fertilizer levels. Conversely, the seasonal cumulative N_2O emissions demonstrated an increase commensurate with elevated nitrogen application levels, lacking a statistically significant positive correlation with straw incorporation levels. The impact of returning straw to the field on yield was uncertain, with the lowest yield observed in S0N0 treatment over two years. The lowest yields in 2021 and 2022 were 5740.64 and 4903.75 kg/hm^2, respectively. The highest production in 2021 and 2022 occurred in the treatments of S0N2 and S2N2, with 10938.48 and 10384.83 kg/hm^2, respectively. In the case of low straw incorporation, the carbon footprint (*CF*) of 251 kg N/hm^2 corresponded to the lowest carbon footprint, 1.01 kg C/kg; In terms of net ecosystem economic benefits (NEEB), the highest ecological and economic benefit was corresponding to the nitrogen application rate of 294 kg N/hm^2, which was 11778.15 CNY/hm^2. To optimize the ecological economic benefits and reduce carbon emissions under condition of low straw incorporation, the study recommended nitrogen application rate ranging from 251—294 kg N/hm^2 as the optimal fertilization scheme. The research results provide theoretical foundations for guiding mitigation strategies related to greenhouse gas emission in rice paddy fields, achieving carbon neutrality in paddy fields and farmland management, and informing agronomic practices for attaining high and stable rice yields with low-carbon production.

Key Words: rice; greenhouse gases; straw incorporation; nitrogen fertilizer; fertilizer recommendation

全球气候变暖和人口增长是世界各国面临的两大挑战[1]。中国是主要的水稻生产和需求国之一,稻田灌溉形成的淹水厌氧环境会导致 CH_4 等温室气体的产生。在我国农业生产过程中,CH_4 排放占全国 CH_4 排放总量的 40.5%,稻田排放的 CH_4 占农业 CH_4 总排放量的 38.9%,是重要的温室气体排放源[2]。N_2O 是主要的农田温室气体之一,对全球变暖造成影响[3]。水稻的生长发育易受气候变化影响,同时水稻生长过程产生多种温室气体,对稻田温室气体排放的深入研究有助于评估其对全球气候的长期影响,从而为农田精确管理提供科学依据。

为缓解秸秆焚烧导致的环境问题,秸秆还田已被广泛推荐用于中国的农业生态系统[4]。中国农业每年生产约 9 亿 t 的农作物秸秆,年增长率为 2.9%,目前约有 25%的秸秆返回农田,对稻田生态系统有显著影响[5]。秸秆还田对产量的影响存在不确定性,有研究表明秸秆还田显著提高水稻产量,半量与全量还田较不还田而言分别增产 12.4%和 17.9%[6]。而朱利群等研究表明,秸秆还田相比秸秆不还田其产量显著降低了 7.68%[7];秸秆还田对于稻田温室气体的影响较为复杂[8—9]。有研究表明秸秆还田显著增加了 CH_4 排放量,与对照组相比,秸秆还田下的 CH_4 排放量显著增加 121.9%, GWP 显著增加 87.1%[10]。与此同时,中国是世界上最大的氮肥消费国[11]。氮肥对稻田生态系统存在显著影响。对于水稻产量而言,在一定范围内随施氮量的增加而增加,当施氮量超过其阈值后不再增加[12];有研究表明在低氮水平(79 kg/hm^2)下,CH_4 排放量显著增加 18%。在中氮水平下(164 kg/hm^2),添加氮肥对 CH_4 排放没有显著影响,但在高施氮量(249 kg/hm^2)下,CH_4 排放量显著减少 15%。随着施氮量的增加,N_2O 排放量显著增加。不同施氮量的化肥排放系数相似,平均为 0.22%[13]。前人已针对秸秆还田、氮肥施用等单因素进行了大量试验研究,但如何明确双因素互作对

稻田温室气体排放的影响,如何针对实现粮食安全和减少温室气体排放的协同提出田间优化方案,对于农业生产实践显得尤为重要。因此,本研究基于多年田间定位试验,阐明秸秆还田与氮肥施用措施对温室气体排放与产量的影响,并从稻田碳足迹与生态经济净收益的角度提出施肥优化方案。本研究的结果对指导我国稻田温室气体减排与水稻产量的协同,在保证粮食安全的基础上,实现低碳生产提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

本研究于 2021—2022 年在江苏省南通市如皋市(120°33′E, 32°23′N)进行两年的水稻试验。供试土壤理化性质如表 1 所示。

表 1 土壤理化性质

Table 1 Soil properties

土壤质地 Soil texture	土壤 pH Soil pH	土壤有机碳 SOC/(g/kg)	土壤全氮 TN/(g/kg)	土壤速效磷 AP/(mg/kg)	土壤速效钾 AK/(mg/kg)
沙壤土 Sandy loam	8.2	13.41	1.38	13.6	92.6

SOC: 土壤有机碳 Soil organic carbon; TN: 土壤全氮 Soil total nitrogen; AP: 土壤速效磷 Soil available phosphorus; AK: 土壤速效钾 Soil available potassium

1.2 研究方法

1.2.1 试验设计

试验为秸秆还田与氮肥两因素试验,小区设计为裂区试验,秸秆还田处理为主区,施氮处理为副区。本研究供试品种为南粳 9108,行株距为 0.3 m × 0.15 m,小区面积为 36 m^2(6 m × 6 m)。氮肥基追比为,基肥:分蘖肥:穗肥=4:3:3;另外配施磷肥 135 kg/hm^2,钾肥 225 kg/hm^2,磷钾肥作基肥一次施入。田埂宽为 1 m,小区埂以塑料薄膜包覆,独立排灌,灌溉模式采用间歇灌溉,中期晒田至田间土壤硬化,然后继续保持淹水状态,直到水稻收获前一周落干水分。在作物生长阶段及时除草防治病虫害,其他栽培措施同当地农户一致。每个试验小区均划分为两半,一半为测试区,一半为测产区。试验为秸秆还田与氮肥两因素试验,小区设计为裂区,秸秆还田水平为主区,施氮水平为副区。试验共计设置了 3 个氮肥(纯氮)梯度处理,N0=0 kg/hm^2, N1=180 kg/hm^2, N2=360 kg/hm^2;3 种秸秆还田方式,S0=0 t/hm^2,S1=2.25 t/hm^2,S2=3.75 t/hm^2,共 9 个处理,每个处理 3 个重复,共 27 个小区。试验详细情况见表 2。

表 2 试验设计

Table 2 Experiment design

年份 Year	品种 Varieties	秸秆还田量 Straw returned rates/(t/hm^2)	施氮量 Nitrogen rates/(kg/hm^2)	移栽日期 Transplanting date
2021	南粳 9108	S0 (0)	N0 (0)	6 月 13 日
		S1 (2.25)	N1 (180)	
		S2 (3.75)	N2 (360)	
2022	南粳 9108	S0 (0)	N0 (0)	6 月 13 日
		S1 (2.25)	N1 (180)	
		S2 (3.75)	N2 (360)	

1.2.2 气体采集与分析

本研究使用静态箱——气相色谱法测定温室气体数据,所使用的静态箱为暗箱,由 PVC 材料制成,包括箱体、底座、增高架三个部分。静态箱箱体的大小为 0.5 m×0.5 m×0.5 m,箱体表面及增高架包裹有海绵与锡箔,起保温和避光的作用,保证箱体环境稳定,箱体内部顶上方安置风扇混匀箱内气体,箱体还包括一个橡皮塞抽气孔和一个可以安装温度计的橡皮塞孔。底座的面积为 0.5 m×0.5 m,在移栽前固定到田间 20 cm 深度,

底座上端有深度为 5 cm 的凹槽,可在测试时加满水以达到密封条件。增高架的大小同箱体,为 0.5 m×0.5 m×0.5 m,四面连接,上下开放,开放的两端都有凹槽用来连接箱体和底座,并加水形成密封条件,拔节期后增设增高架,避免水稻叶片因取气受挤压。

水稻移栽后每 5—7 d 进行一次气体采集,施肥前后和晒田期连取 3 d,水稻成熟期采气频率下降为每 10 d一次。气体样品的采集时间为上午的 8:00—11:00,间隔时间为 5min,共采集 4 次,在采集气体的同时,记录箱体温度计的温度并测量静态箱的有效高度,有效高度指箱顶到稻田水面的高度。气体排放通量(flux)是指单位面积上单位时间内的气体排放量,排放通量有正值也有负值,正值表示排放状态,负值则表示吸收状态。排放通量可由以下公式计算得到:

$$F = \rho \times \frac{V}{A} \times \frac{\mathrm{d}C}{\mathrm{d}t} \times \frac{273}{273 + T} \tag{1}$$

式中,F 为气体排放通量(mg m^{-2} h^{-1}),ρ 为标准状况下气体密度(kg/m^3),V 为箱体的体积(m^3),A 为箱体的横截面积(m^2),dC/dt 为温室气体浓度随时间变化的回归曲线斜率,T 为同步获取的采样箱内的平均温度(℃)。

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

式中,n 为采样总次数,i 为采样次数,($t_{i+1} - t_i$)为两次采样间隔时间。

1.2.3　碳足迹与生态经济净收益

本研究直接温室气体排放为试验中 CH_4和 N_2O 季节累积排放量,间接温室气体排放为水稻季的农资投入(机械、种子、化肥、农药等)所产生的,单位产量碳足迹由以下公式计算:

$$CF = CE_{\text{total}} \div Y \tag{3}$$

$$CE_{\text{total}} = CE_{\text{indirect}} + CE_{\text{direct}} \tag{4}$$

$$CE_{\text{indirect}} = \sum_{i=0}^{n} Q_i \times M_i \tag{5}$$

$$CE_{\text{direct}} = CE_{N_2O} \times 273 + CE_{CH_4} \times 27 \tag{6}$$

式中,CF 为单位产量碳足迹(kg CO_2-eq kg^{-1});CE_{total}为整个生产过程中产生的温室气体排放总量(kg CO_2-eq/kg);Y 为产量(kg/hm^2);CE_{indirect}为整个生产过程中农资投入造成的间接温室气体排放量(kg CO_2-eq/kg);CE_{direct}为 CH_4和 N_2O 的直接排放造成的碳排放量。Q_i代表生产过程中某种农资的消耗量(kg/hm^2);M_i代表所消耗的农资投入对应的温室气体排放系数(kg CO_2-eq/kg);CE_{N_2O}和 CE_{CH_4}代表生产过程中 N_2O 和 CH_4的累积排放量(kg/hm^2);27 和 273 分别是 CH_4和 N_2O 相对于 CO_2的 100 年增温潜势的倍数,以换算为 CO_2当量。粮食产量成本根据当前粮食价格(2630 元/hm^2)和粮食产量计算。全球变暖潜能值成本是碳贸易价格(53 元 kg CO_2-eq kg^{-1} hm^{-2})与全球变暖潜能的乘积。

$$\mathrm{NEEB} = \mathrm{Profit} - \mathrm{Cost} - \mathrm{GWP}_{\text{cost}} \tag{7}$$

$$\mathrm{GWP}_{\text{cost}} = \mathrm{GWP} \times \mathrm{Price}_{\text{carbon}} \tag{8}$$

式中,水稻收益(Profit)为水稻产量乘以当地谷价;投入成本(Cost)包括机械、种子、化肥、农药等等成本;GWP_{cost}为生产过程中直接产生的温室气体的碳成本;碳价($Price_{\text{carbon}}$)从碳交易网(http://m.tanpaifang.com)查得为 53 元/t CO_2-eq。

1.2.4　数据处理

本研究利用 IBM SPSS Statistic 26(SPSS Inc, Chicago, Illinois, USA)软件进行数据统计分析,用最小显著差异法(LSD)比较处理间的差异显著性($P<0.05$),相关关系采用 Pearson 相关统计进行分析,利用 Origin 2021(OriginLab Corporation, Northampton, MA, USA)进行绘图。

2 结果与分析

2.1 秸秆还田与氮肥施用对 CH_4 排放的影响

由图 1 可见,CH_4 随生育期变化的排放特征相似,分蘖期由于长期淹水出现排放第一次高峰,中期晒田导致 CH_4 排放迅速减少,复水后,CH_4 排放逐步上升出现第二次高峰,收获前 10 d 断水 CH_4 排放量再次下降。两次排放高峰分别是分蘖期及灌浆期前后,其中 2022 年较 2021 年相比,灌浆期排放高峰相对提前。

2021 年水稻季,在秸秆不还田处理下,N0、N1、N2 处理对应的峰值分别为 14.54、39.76、17.44 mg m^{-2} h^{-1},排放通量随氮肥投入先上升后下降;在 S1 还田水平下,N0、N1、N2 处理对应的峰值分别为 31.53、38.53、42.78 mg m^{-2} h^{-1},排放通量随氮肥投入增加而上升;在 S2 还田水平下,N0、N1、N2 处理对应的峰值分别为 67.38、56.08、30.23 mg m^{-2} h^{-1},排放通量随氮肥投入增加而下降。2022 年水稻季,在 S0 还田水平下,N0、N1、N2 处理对应的峰值分别为 13.80、24.06、20.66 mg m^{-2} h^{-1},排放通量随氮肥投入先上升后下降;在 S1 还田水平下,N0、N1、N2 处理对应的峰值分别为 43.05、62.64、59.71 mg m^{-2} h^{-1},排放通量随氮肥投入先上升后下降;在 S2 还田水平下,N0、N1、N2 处理对应的峰值分别为 61.06、65.51、74.07 mg m^{-2} h^{-1},排放通量随氮肥投入增加而上升。

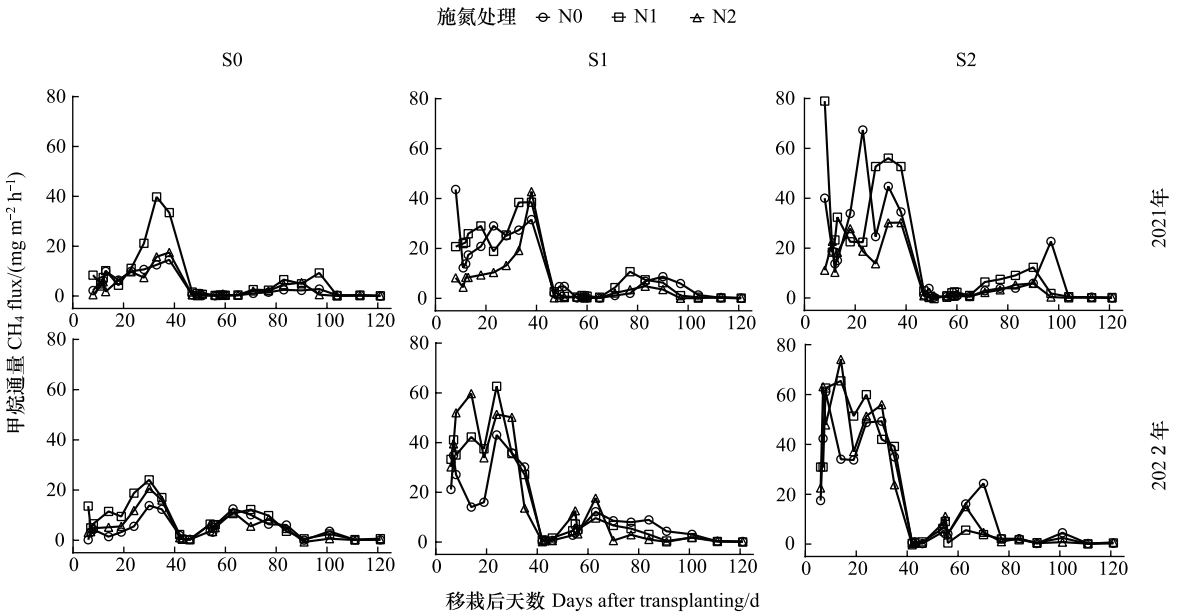


图 1 不同处理对稻田 CH_4 排放的影响

Fig.1 Effect of different treatments on methane emissions in paddy rice field

S0: 秸秆不还田 No straw incorporation; S1: 低量还田 Low straw incorporation; S2: 全量还田 High straw incorporation; N0: 不施氮 No nitrogen application; N1: 低氮 Low nitrogen application; N2:高氮 High nitrogen application

由图 2 可见,2021 年水稻季 CH_4 季节累积排放随秸秆还田水平上升而增加,与氮肥水平不存在正相关关系,在不同还田处理下,N1 水平的 CH_4 季节累积排放量均为最高,不同秸秆处理下 S0、S1、S2 还田水平对应最大累计排放量分别为 209.22、294.76、407.83 kg/hm^2,除 S0N0 与 S0N2,S1N0 与 S1N1 之间差异不显著,其余各处理间均表现出显著差异。2022 年水稻季 CH_4 季节累积排放随秸秆还田水平上升而增加,与氮肥水平不存在正相关关系,在不同还田处理下,N1、N2 水平的 CH_4 季节累积排放量最高,不同秸秆处理下 S0、S1、S2 还田水平对应最大累计排放量分别为 243.21、406.51、549.35 kg/hm^2,同一秸秆还田水平下,不同氮肥处理间差异不显著,而在同一施氮水平下,秸秆不还田与低量、高量秸秆还田处理间差异显著,低量还田与高量还田处理间未表现出显著差异。

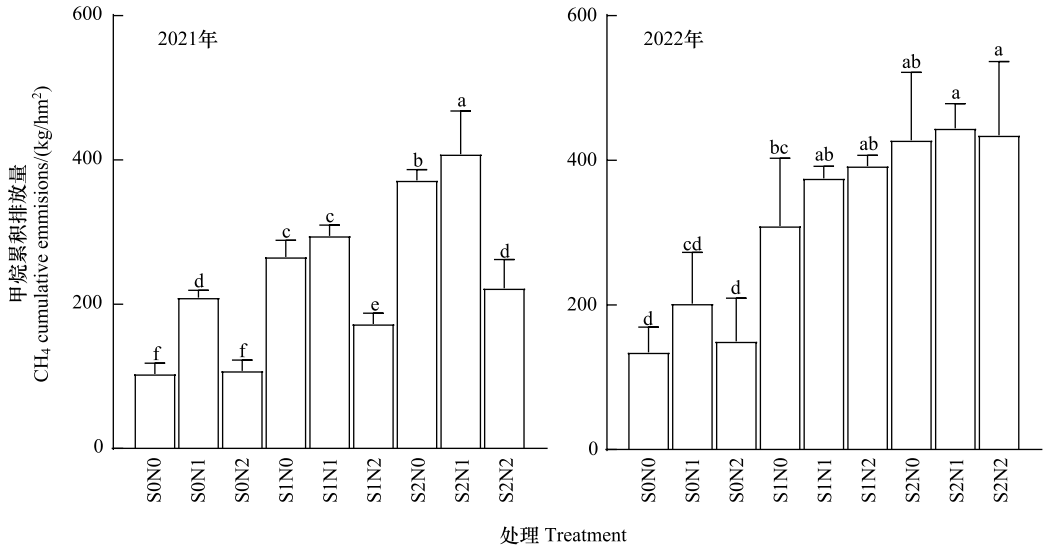


图 2　不同处理对 CH_4 季节累积排放的影响

Fig.2　Effect of different treatments on methane cumulative emissions in paddy rice field

小写字母 abcdef 被用于指示不同组之间的显著性差异,小写字母为 $P<0.05$ 水平的差异显著;当两组均值没有显著差异时,它们被标记为相同的字母;相反,若两组之间存在显著差异,则被标记为不同的小写字母,以表明它们在统计学上具有显著差异;S0N0: 秸秆不还田+不施氮 No straw incorporation+no nitrogen application; S0N1: 秸秆不还田+低氮 No straw incorporation+low nitrogen application; S0N2: 秸秆不还田+高氮 No straw incorporation+high nitrogen application; S1N0: 低量秸秆还田+不施氮 Low straw incorporation+no nitrogen application; S1N1: 低量秸秆还田+低氮 Low straw incorporation+low nitrogen application; S1N2: 低量秸秆还田田+高氮 Low straw incorporation+high nitrogen application; S2N0: 高量秸秆还田+不施氮 High straw incorporation+no nitrogen application; S2N1: 高量秸秆还田+低氮 High straw incorporation+low nitrogen application; S2N1: 高量秸秆还田+高氮 High straw incorporation+high nitrogen application

2.2　秸秆还田与氮肥施用对 N_2O 排放的影响

由图 3 可见,两年 N_2O 排放整体趋势较为一致,整体排放低,在拔节期出现小高峰。2021 年水稻季,在 S0 还田水平下,N0、N1、N2 处理对应的峰值分别为 0.38、0.54、2.22 mg m^{-2} h^{-1},排放通量随氮肥投入的增加而上升;在 S1 还田水平下,N0、N1、N2 处理对应的峰值分别为 0.19、0.79、3.42 mg m^{-2} h^{-1},排放通量随氮肥投入的增加而上升;在 S2 还田水平下,N0、N1、N2 处理对应的峰值分别为 0.21、0.87、3.78 mg m^{-2} h^{-1},排放通量随氮肥投入的增加而上升。2022 年水稻季,在 S0 还田水平下,N0、N1、N2 处理对应的峰值分别为 0.21、0.27、1.39 mg m^{-2} h^{-1};在 S1 还田水平下,N0、N1、N2 处理对应的峰值分别为 0.23、0.97、1.31 mg m^{-2} h^{-1};在 S2 还田水平下,N0、N1、N2 处理对应的峰值分别为 0.22、0.57、1.31 mg m^{-2} h^{-1},与前一年相似,排放通量随氮肥投入增加而上升,但上升幅度有所减缓。

由图 4 可见,2021 年 N_2O 季节累积排放随秸秆还田水平上升而增加,与氮肥水平不存在正相关关系,在不同还田处理下,N2 水平的 N_2O 季节累积排放量均为最高,不同秸秆处理下 S0、S1、S2 对应最大 N_2O 累计排放量分别为 7.91、7.03、7.65 kg/hm^2,随秸秆还田量的投入先减少后增加,同一秸秆还田水平下,不同氮肥处理间差异显著,而在同一施氮水平下,不同秸秆还田处理间未表现出显著差异。2022 年 N_2O 季节累积排放随施氮水平上升而增加,与秸秆还田水平不存在正相关关系,在不同还田处理下,与前一年类似,N2 水平的 N_2O 季节累积排放量均为最高,不同秸秆处理下 S0、S1、S2 对应最大 N_2O 累计排放量分别为 4.07、4.81、4.77 kg/hm^2,随秸秆还田量的投入先增加后减少。同一秸秆还田水平下,未施氮处理与施氮处理间差异显著,但低氮与高氮处理间差异不显著,而在同一施氮水平下,不同秸秆还田处理间未表现出显著差异。N_2O 季节累积排放随施氮水平上升而增加,与秸秆处理无明显差异。在不同秸秆处理下,N2 水平的 N_2O 季节累积排放最高,2021 年 S0、S1、S2 对应峰值分别为 7.72、6.74、7.34 kg/hm^2;2022 年 S0、S1、S2 对应峰值分别为 4.46、4.16、

4.44 kg/hm^2,两年间累计排放量差异显著。

综上所述,随施氮量的增加,稻田 N_2O 的排放通量与季节累积排放量均与之呈正相关关系,与秸秆还田量无明显规律。

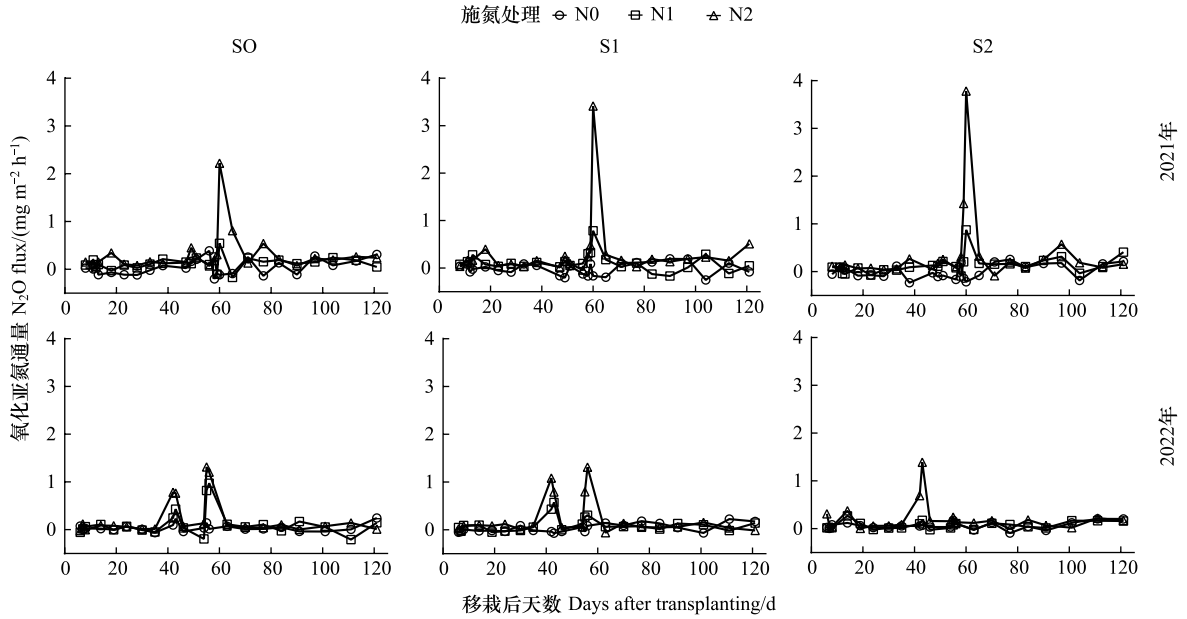


图 3 不同处理对稻田 N_2O 排放的影响

Fig.3 Effect of different treatments on nitrous oxide emissions in paddy rice field

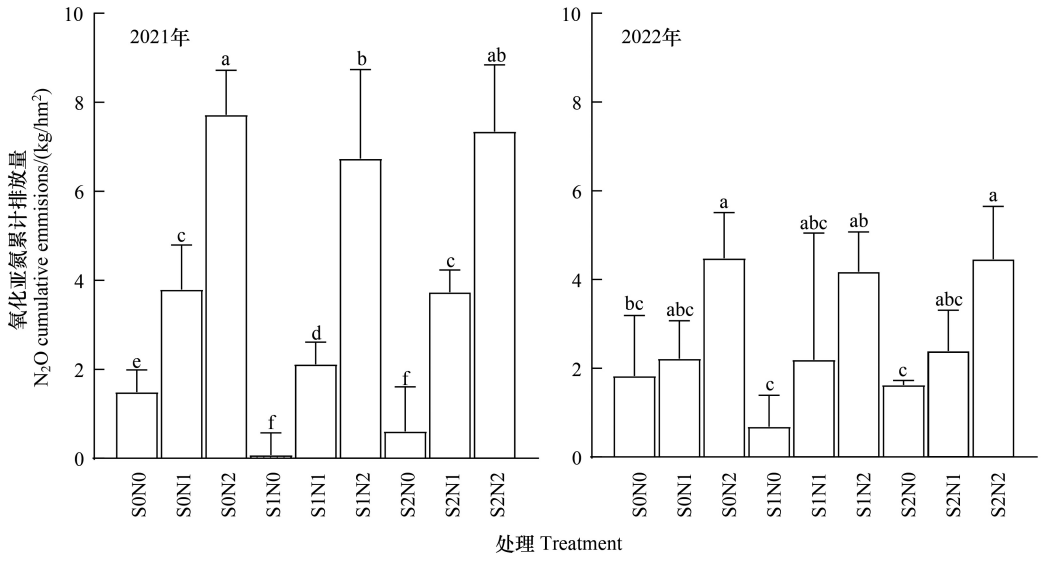


图 4 不同处理对稻田 N_2O 季节累积排放的影响

Fig.4 Effect of different treatments on nitrous oxide cumulative emissions in paddy rice field

2.3 秸秆还田与氮肥施用对产量的影响

由图 5 可见,在不同秸秆还田水平下,水稻产量随施氮量的变化呈现显著差异,产量随施氮量增加而增加。两年产量变化趋势较为一致。

秸秆还田对于产量的影响具有不确定性,可以发现 N0 处理下,随秸秆还田量增加,产量有小幅度提升;

在 N2 处理下,产量关系为:S0>S2>S1;在 N1 处理下,秸秆还田的影响并不一致。两年均在 S0N0 处理出现最低产量,2021 与 2022 年最低产量分别为 5740.64 和 4903.75 kg/hm^2。2021 与 2022 年最高产量分别在 S0N2 和 S2N2 出现,分别为 10938.48 和 10384.83 kg/hm^2。由表 3 可见,方差分析结果表明,除有效穗数外,各产量构成因素年际间存在显著性差异;秸秆处理对产量构成因素的影响不显著;氮肥对水稻产量构成因素的影响均达到极显著性水平;年份 × 氮肥的交互作用仅对结实率和千粒重有显著影响,年份 × 秸秆、秸秆 × 氮肥、年份 × 秆 × 氮肥的交互作用对产量构成因素的影响无显著性差异。

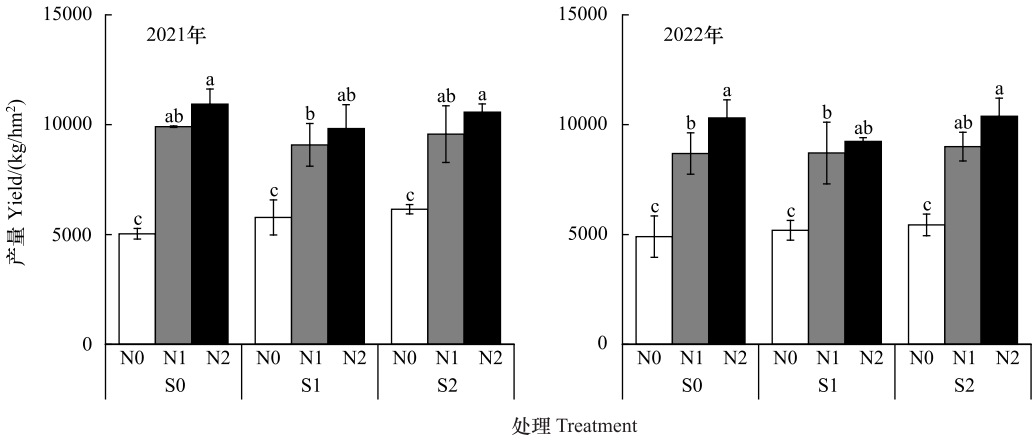


图 5　不同处理对水稻产量的影响

Fig.5　Effect of different treatments on rice yield

表 3　不同秸秆还田与氮肥施用对水稻产量及产量构成因素的影响

Table 3　Effects of different straw returning and nitrogen fertilization on yield and yield component

年份 Year	处理 Treatment		有效穗数 Spike numbers/(× 10^4/hm^2)	穗粒数 Grains spike	结实率 Seed setting rate	千粒重 1000 grains weight/(g)	产量 Yield/(kg/hm^2)
2021	S0	N0	194.73±24.14c	151.02±7.71b	0.89±0.05bc	26.54±0.41c	5740.64±241.90c
		N1	254.57±5.88b	168.14±15.08ab	0.96±0.01a	28.18±0.79a	9911.89±32.85ab
		N2	289.77±8.33a	167.27±7.58ab	0.94±0.02a	27.26±0.65bc	10938.48±687.97a
	S1	N0	189.72±15.09c	155.61±14.43ab	0.89±0.01bc	26.48±0.62c	5776.04±798.28c
		N1	249.75±19.14b	156.61±13.21ab	0.94±0.04ab	28.06±0.29ab	9625.74±970.25b
		N2	291.63±14.50a	163.37±11.83ab	0.93±0.02abc	27.35±0.21abc	9825.36±1084.70ab
	S2	N0	188.98±11.57c	153.30±14.70ab	0.88±0.05c	26.62±0.79c	6153.63±210.50c
		N1	246.23±14.54b	171.04±6.89ab	0.95±0.01a	28.14±0.15ab	9567.73±1289.84ab
		N2	288.66±5.70a	173.87±6.22a	0.93±0.02abc	27.15±0.32c	10574.65±370.35a
2022	S0	N0	195.83±18.55d	160.37.06±1.98b	0.86±0.04cd	24.52±1.00b	4903.75±940.91c
		N1	247.17±17.48c	182.57±7.63a	0.89±0.01abc	26.57±0.23a	8688.44±940.76b
		N2	278.33±13.36ab	191.92±7.60a	0.91±0.01ab	26.61±1.00a	10308.17±825.85a
	S1	N0	192.00±13.29d	158.87±7.17a	0.85±0.03d	24.40±0.56b	5195.00±448.74c
		N1	247.67±30.18c	184.56±14.21a	0.90±0.06ab	26.96±1.04a	8711.37±1405.68b
		N2	264.83±14.43bc	182.40±13.03a	0.89±0.01abc	26.04±0.49a	9242.41±170.48ab
	S2	N0	197.67±9.75d	161.17±7.28b	0.85±0.02d	24.36±0.23b	5439.74±489.78c
		N1	268.83±18.15abc	184.07±3.11a	0.89±0.02abc	26.53±0.73a	9000.39±655.27ab
		N2	294.67±2.55a	187.27±13.90a	0.92±0.02a	27.06±1.35a	10384.83±819.35a

S0: 秸秆不还田, no straw incorporation; S1: 低量还田, low straw incorporation; S2: 全量还田, high straw incorporation; N0: 不施氮, no nitrogen application; N1: 低氮, low nitrogen application; N2: 高氮, high nitrogen application;表中数据为 3 次重复平均值 ± 标准误 (means ± SE);同一列数据标有不同字母表述处理间差异显著(P<0.05)

2.4 基于碳足迹与生态经济净收益的优化施肥

由表 4, 5 可见,根据田间试验获取的气体排放与产量数据构建温室气体排放累积量与产量关于施氮量的经验模型。由图 6 可见,基于稻田碳足迹分析,在稻田碳足迹方面,*CF* 随施氮量呈现先降后升的趋势,S0 对应曲线在正常施氮区间内处于最低点.在生态经济净收益方面,NEEB 随施氮量呈现先升后降的趋势。结果表明 S0 处理下稻田碳排放最低,碳足迹随秸秆还田量的增加相应增加,高量秸秆还田处理下,其碳足迹曲线位于最高点,主要为以下关系:S2>S1>S0,在不还田下,稻田碳足迹最低在 0.69—0.74 kg C/kg,在低量还田下,251 kg N/hm^{2}的施氮量对应最低碳足迹,为 1.01 kg C/kg;在生态净收益方面,主要为以下关系:S1>S2>S0,在低量还田下,294 kg N/hm^{2}的施氮量对应最高的生态经济收益,为 11778.15 元/hm^2。

综上所述,协同生态经济净收益与碳排放,在低量还田下,配合 251—294 kg N/hm^{2}的施氮量为最优施肥方案。

表 4 CH_4、N_2O 排放以及产量的经验模型构建

Table 4 Modeling of the effects of natural factors on methane, nitrous oxide and grain yield

处理 Treatment	甲烷 CH_4/(kg/hm^2)		氧化亚氮 N_2O/(kg/hm^2)		产量 Yield/(t/hm^2)
	线性模型	指数模型	线性模型	指数模型	二次模型
秸秆不还田 S_0	$y=0.027x+146.13$	$y=138.44e^{0.0001x}$	$y=0.0123x+1.3656$	$y=1.4686e^{0.0038x}$	$y=-0.0512x^2+29.677x+5322.2$
低量秸秆还田 S_1	$y=-0.014x+303.98$	$y=301.96e^{-2E-04x}$	$y=0.0141x+0.3436$	$y=0.2133e^{0.0099x}$	$y=-0.0559x^2+33.061x+5485.5$
高量秸秆还田 S_2	$y=-0.0598x+412.06$	$y=412.55e^{-3E-04x}$	$y=0.0133x+0.9669$	$y=1.0235e^{0.005x}$	$y=-0.0526x^2+30.325x+5796.7$

表 5 稻田碳足迹与生态经济净收益

Table 5 *CF* and NEEB of rice yield

模型 Model	秸秆不还田 S_0		低量秸秆还田 S_1		高量秸秆还田 S_2	
	施氮量/(kg N/hm^2)	生态经济净收益/(元/hm^2)	施氮量/(kg N/hm^2)	生态经济净收益/(元/hm^2)	施氮量/(kg N/hm^2)	生态经济净收益/(元/hm^2)
基于线性模型的最大生态经济净收益 Linear-$NEEB_{max}$	289	9992.99	295	11746.10	288	11050.08
基于指数模型的最大生态经济净收益 Exponent-$NEEB_{max}$	289	10018.59	294	11778.15	288	11082.94
	施氮量/(kg N/hm^2)	碳足迹/(kg C/kg)	施氮量/(kg N/hm^2)	碳足迹/(kg C/kg)	施氮量/(kg N/hm^2)	碳足迹/(kg C/kg)
基于线性模型的最小碳足迹 Linear-CF_{min}	237	0.74	268	1.07	275	1.37
基于指数模型的最小碳足迹 Exponent-CF_{min}	233	0.69	251	1.01	273	1.31

3 讨论

3.1 秸秆还田与氮肥施用对稻田温室气体排放的影响机制

前人研究表明,CH_4的排放通量和季节累积排放量与秸秆还田量呈正相关关系[14],氮肥的影响不明显,N_2O 的排放通量和季节累积排放与施氮量呈正相关关系[15—16],本研究结果与前人一致。有大量研究表明,秸秆还田显著增加了水稻 CH_4排放量[17],这与本研究结果一致。在本研究中,除 2022 年 S1 处理外,不同秸秆还田水平下 CH_4的季节累积排放量随氮肥投入先上升后下降,这是因为含氮量高的土壤理化环境影响秸秆分解速度,导致 CH_4的排放相对减少[18]。随着秸秆投入的增加,CH_4排放量增加。这种现象可能是由于大量秸秆的输入导致产甲烷菌底物的增加,从而土壤还原反应占主导,抑制 CH_4氧化进而导致更多的 CH_4排放[19]。本研究秸秆还田显著降低了 N_2O 季节累积排放量,这与大量前人研究相符。Li 等发现,秸秆还田可以减少土壤 N_2O 排放,秸秆的分解可以消耗土壤中的 O_2,增加土壤厌氧条件,从而促进脱氮过程中 N_2O 转化为 N_2,并进一步减少 N_2O 的排放[20]]。秸秆的 C/N 比是影响土壤 N_2O 排放的一个重要因素,本研究获取的秸秆 C/N

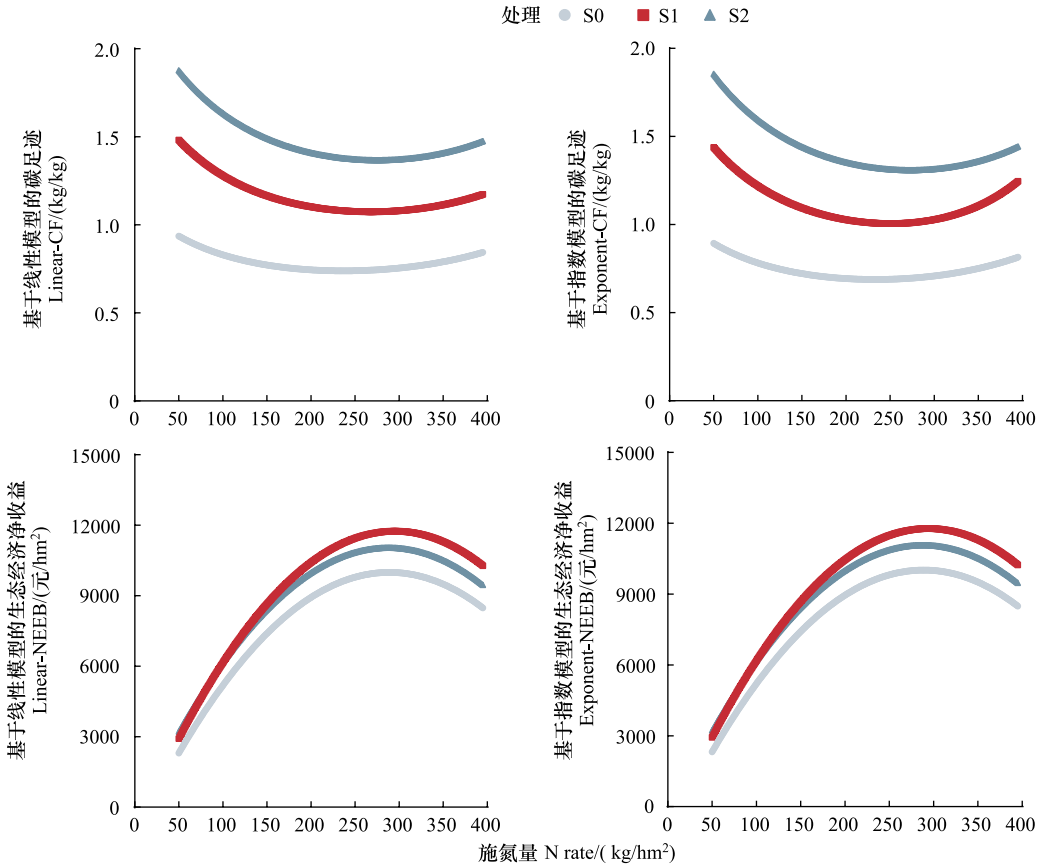


图 6　不同秸秆还田水平下 CF 与 NEEB 对施氮量的响应

Fig.6　Response of CF and NEEB to N rate under different straw rate

Linear-CF: 基于线性模型的碳足迹 Carbon footprint based on linear function; Linear -NEEB: 基于线性模型的生态经济净收益 Net ecosystem economic benefits based on linear function; Exponet-CF: 基于指数模型的碳足迹 Carbon footprint based on exponential function; Exponet -CF: 基于线性模型的生态经济净收益 Net ecosystem economic benefits based on exponential function

比为 86.3,Benckiser 等研究表明,当返回的作物残留物的 C/N 比超过 40 时,微生物可以暂时固定土壤氮,导致硝化和反硝化的氮有效性降低,从而减少 N_2O 的产生[21]。在本研究中,除 2022 年 S1 处理外,不同氮肥水平下 N_2O 的季节累积排放量随秸秆投入先下降后上升,这是由于随时间推进大量秸秆分解出现肥料效应,间接增加氮肥投入,从而增加 N_2O 排放的增加。然而,也有一些研究结果与本研究相矛盾,他们研究表明了秸秆还田导致的 N_2O 排放量增加[22]。相对于单因素,秸秆还田与氮肥施用交叉作用对稻田温室气体排放的影响主要体现在氮肥施用对秸秆还田处理下 CH_4 排放量的影响,以及秸秆还田对氮肥处理下 N_2O 排放量的影响。如在不同秸秆还田水平下,CH_4 的季节累积排放量随氮肥投入先上升后下降,这主要是因为氮肥的施用可能改变秸秆的分解速率,从而影响 CH_4 和 N_2O 的生成。与此同时,不同氮肥水平下 N_2O 的季节累积排放量随秸秆投入先下降后上升,这主要是因为秸秆的分解也会出现肥料效应,从而影响 N_2O 的排放。秸秆还田和氮肥施用之间存在相互作用,其影响并非简单相加的关系。

3.2　秸秆还田与氮肥施用对水稻产量的影响机制

大量研究表明,产量随施氮量增加而增加[23—24],秸秆还田对于产量的影响具有不确定性,有研究表明秸秆还田可以实现增产,也有研究表明秸秆还田下产量较不还田出现下降的现象[25—28]。Guo 等证实了秸秆还田可以增加土壤肥力,改善土壤孔隙度,刺激微生物活动,从而促进作物生长[29]。一些研究表明,秸秆还田可能会降低作物产量。显然,秸秆还田对水稻产量的影响是复杂多变的。有研究认为秸秆还田能提高水稻的千

粒重、每穗粒数、结实率以及产量。也有研究指出,秸秆还田是一种见效缓慢的措施,短期的秸秆还田无法体现增产效应,必须进行长期的还田措施才能看出作物产量的增加。在本研究的两年田间试验中,不同施氮水平下,秸秆还田处理与秸秆不还田处理间的水稻产量没有显著差异;不同秸秆还田水平下,施肥与不施肥处理间的水稻产量存在显著差异,N1 和 N2 处理之间的产量无显著差异。

3.3 秸秆还田背景下的推荐施肥可行性方案

NEEB 可用于全面评估作物生产带来的经济效益[30]。一些学者调查了稻田中不同耕作方式[31]、秸秆管理和氮肥来源[32]以及生态育种[33]下的 NEEB。这些研究表明 NEEB 可以用来评估农艺成本和环境成本之间的联系。我国农业在提高粮食产量的同时仍然面临巨大挑战——降低投入成本和环境成本。提高或至少保持当前的作物生产水平,同时降低或保持当前的投入成本,在水稻种植中也非常重要。

本研究通过构建稻田碳足迹与生态经济净收益模型,分析发现在低量秸秆还田下,配合 251—294 kg N/hm^2的施氮量为最优生态经济效益施肥方案,在此方案下,尽管产量增幅较高还田量略低,但可以相对减少稻田的温室气体排放。基于指数模型发现,在 S1 还田模式下,NEEB 在 294 kg N/hm^2的施氮量处达到最大值 11118.15 元/hm^2,后逐渐降低,*CF* 在 251 kg N/hm^2的施氮量处达到最小值 1.01 kg C/kg,后逐渐升高。S1 还田模式与 S0 还田模式相比,其碳足迹增加约 0.3 kg C/kg,但生态经济净收可提高 14.9%,这主要是因为随着秸秆还田量的增加,CH_4排放量增加,进而提高稻田的全球增温潜势,从而导致总体碳足迹的提高,而秸秆还田对水稻产量有一定的增产作用,提高经济收益,进而提高 NEEB。S1 还田模式与 S2 还田模式相比,其碳足迹减少约 0.3 kg C/kg,生态经济净收可提高 6.3%。这主要是由于随着秸秆还田量的增加,CH_4排放量增加,进而提高稻田的全球增温潜势,排放成本增加,而秸秆还田提升产量的额外收益低于提高的排放成本。

4 结论

两年 CH_4排放整体趋势较为一致,分蘖期长期淹水出现排放第一次高峰,中期晒田导致 CH_4排放迅速减少,复水后,CH_4排放逐步上升出现第二次高峰,收获前 10 d 断水 CH_4排放量再次下降。CH_4季节累积排放量与排放通量随秸秆还田水平上升而增加,与氮肥水平不存在正相关关系。两年 N_2O 排放整体趋势较为一致,整体排放低,在拔节期出现小高峰。N_2O 季节累积排放量与排放通量随施氮水平上升而增加,与秸秆还田水平不存在正相关关系。秸秆还田对于产量的影响具有不确定性。在秸秆还田背景下,其中在低量还田情况下,251 kg N/hm^2的施氮量对应最低碳足迹,为 1.01 kg C/kg,294 kg N/hm^2的施氮量对应最高的生态经济收益,为 11778.15 元/hm^2,协同生态经济净收益与碳排放,在低量秸秆还田下,配合 251—294 kg N/hm^2的施氮量为最优施肥方案。因此,在农业生产实践中以低于 3.75 t/hm^2的还田量进行适量秸秆还田,配合最优施肥方案可实现产量最大化以及碳排放相对最低,达到水稻丰产与低碳生产的平衡。

参考文献(References):

[1] Meinshausen M, Jeffery L, Guetschow J, Robiou du Pont Y, Rogelj J, Schaeffer M, Höhne N, den Elzen M, Oberthür S, Meinshausen N. National post-2020 greenhouse gas targets and diversity-aware leadership. Nature Climate Change, 2015, 5(12): 1098-1106.

[2] Zhao X, Liu S L, Pu C, Zhang X Q, Xue J F, Zhang R, Wang Y Q, Lal R, Zhang H L, Chen F. Methane and nitrous oxide emissions under no-till farming in China: a meta-analysis. Global Change Biology, 2016, 22(4): 1372-1384.

[3] Carlson K M, Gerber J S, Mueller N D, Herrero M, MacDonald G K, Brauman K A, Havlik P, O'Connell C S, Johnson J A, Saatchi S, West P C. Greenhouse gas emissions intensity of globalcroplands. Nature Climate Change, 2017, 7(1): 63-68.

[4] Hu N J, Wang B J, Gu Z H, Tao B R, Zhang Z W, Hu S J, Zhu L Q, Meng Y L. Effects of different straw returning modes on greenhouse gas emissions and crop yields in a rice - wheat rotation system. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2016, 223: 115-122.

[5] Xia L L, Wang S W, Yan X Y. Effects of long-term straw incorporation on the net global warming potential and the net economic benefit in a rice - wheat cropping system in China. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2014, 197: 118-127.

[6] Swain J, Paikaray R K, Nayak R K, Panda R K. Effects of paddy straw incorporation on growth and yield attributes of low land rice. Bangladesh Journal of Botany, 2022, 51(4): 713-719.

[7] 朱利群, 王春杰, 杨曼君, 李静, 陈利根. 施肥对长江中下游稻田温室气体排放的影响——基于 Meta 分析. 资源科学, 2017, 39(1): 105-115.

[8] Liu G, Yu H Y, Ma J, Xu H, Wu Q Y, Yang J H, Zhuang Y Q. Effects of straw incorporation along with microbial inoculant on methane and nitrous oxide emissions from rice fields. Science of the Total Environment, 2015, 518: 209-216.

[9] Liang S, Zhang H. Different responses of greenhouse gas emissions to straw application at different seasons in Northeast China. Sains Malaysiana, 2019, 48(7): 1347-1355.

[10] Wang X D, He C, Cheng H Y, Liu B Y, Li S S, Wang Q, Liu Y, Zhao X, Zhang H L. Responses of greenhouse gas emissions to residue returning in China's croplands and influential factors: a meta-analysis. Journal of Environmental Management, 2021, 289: 112486.

[11] Fu Z P, Zhang R, Zhang J Y, Zhang K, Cao Q, Tian Y C, Zhu Y, Cao W X, Liu X J. Potential of establishing the universal critical nitrogen dilution curve for Japonica rice. Plant Phenomics, 2023, 5: 0036.

[12] 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. Paddy and Water Environment, 2020, 18(1): 139-151.

[13] Linquist B A, Adviento-Borbe M A, Pittelkow C M, van Kessel C, van Groenigen K J. Fertilizer management practices and greenhouse gas emissions from rice systems: a quantitative review and analysis. Field Crops Research, 2012, 135: 10-21.

[14] Li S H, Guo L J, Cao C G, Li C F. Effects of straw returning levels on carbon footprint and net ecosystem economic benefits from rice-wheat rotation in central China. Environmental Science and Pollution Research, 2021, 28(5): 5742-5754.

[15] Iqbal M M, Goheer M A. Greenhouse gas emissions from agro-ecosystems and their contribution to environmental change in the Indus Basin of Pakistan. Advances in Atmospheric Sciences, 2008, 25(6): 1043-1052.

[16] Jiang J Y, Jiang S S, Xu J Y, Wang J, Li Z L, Wu J, Zhang J S. Lowering nitrogen inputs and optimizing fertilizer types can reduce direct and indirect greenhouse gas emissions from rice-wheat rotation systems. European Journal of Soil Biology, 2020, 97: 103152.

[17] Hou P F, Li G H, Wang S H, Jin X, Yang Y M, Chen X T, Ding C Q, Liu Z H, Ding Y F. Methane emissions from rice fields under continuous straw return in the middle-lower reaches of the Yangtze River. Journal of Environmental Sciences, 2013, 25(9): 1874-1881.

[18] Bhattacharyya P, Dash P K, Swain C K, Padhy S R, Roy K S, Neogi S, Berliner J, Adak T, Pokhare S S, Baig M J, Mohapatra T. Mechanism of plant mediated methane emission in tropical lowland rice. Science of the Total Environment, 2019, 651: 84-92.

[19] Lehtinen T, Schlatter N, Baumgarten A, Bechini L, Krüger J, Grignani C, Zavattaro L, Costamagna C, Spiegel H. Effect of crop residue incorporation on soil organic carbon and greenhouse gas emissions in European agricultural soils. Soil Use and Management, 2014, 30(4): 524-538.

[20] Li X L, Ma J, Yao Y J, Liang S L, Zhang G B, Xu H, Yagi K. Methane and nitrous oxide emissions from irrigated lowland rice paddies after wheat straw application and midseason aeration. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 2014, 100(1): 65-76.

[21] Benckiser G. Ants and sustainable agriculture. A review. Agronomy for Sustainable Development, 2010, 30(2): 191-199.

[22] Guo L J, Zhang L, Liu L, Sheng F, Cao C G, Li C F. Effects of long-term no tillage and straw return on greenhouse gas emissions and crop yields from a rice-wheat system in central China. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2021, 322: 107650.

[23] Sapkota T B, Majumdar K, Jat M L, Kumar A, Bishnoi D K, McDonald A J, Pampolino M. Precision nutrient management in conservation agriculture based wheat production of Northwest India: profitability, nutrient use efficiency and environmental footprint. Field Crops Research, 2014, 155: 233-244.

[24] Emran S A, Krupnik T J, Kumar V, Ali M Y, Pittelkow C M. Agronomic, economic, and environmental performance of nitrogen rates and source in Bangladesh's coastal rice agroecosystems. Field Crops Research, 2019, 241: 107567.

[25] Liu L Y, Li H Y, Zhu S H, Gao Y, Zheng X Q, Xu Y. The response of agronomic characters and rice yield to organic fertilization in subtropical China: a three-level meta-analysis. Field Crops Research, 2021, 263: 108049.

[26] Qin X, Lu Y H, Wan Y, Wang B, Nie J, Li Y J, Liao Y. Rice straw application improves yield marginally and increases carbon footprint of double cropping paddy rice (Oryza sativa L.). Field Crops Research, 2023, 291: 108796.

[27] Xu Y Z, Nie L X, Buresh R J, Huang J L, Cui K H, Xu B, Gong W H, Peng S B. Agronomic performance of late-season rice under different tillage, straw, and nitrogen management. Field Crops Research, 2010, 115(1): 79-84.

[28] Yuan L, Zhang Z C, Cao X C, Zhu S C, Zhang X, Wu L H. Responses of rice production, milled rice quality and soil properties to various nitrogen inputs and rice straw incorporation under continuous plastic film mulching cultivation. Field Crops Research, 2014, 155: 164-171.

[29] 郭保卫, 胡雅杰, 钱海军, 曹伟伟, 邢志鹏, 张洪程, 戴其根, 霍中洋, 许轲, 魏海燕. 秸秆还田下适宜施氮量提高机插稻南粳9108产量和群体质量. 中国水稻科学, 2015, 29(5): 511-518.

[30] Li B, Fan C H, Zhang H, Chen Z Z, Sun L Y, Xiong Z Q. Combined effects of nitrogen fertilization and biochar on the net global warming potential, greenhouse gas intensity and net ecosystem economic budget in intensive vegetable agriculture in southeastern China. Atmospheric Environment, 2015, 100: 10-19.

[31] Zhang Z S, Guo L J, Liu T Q, Li C F, Cao C G. Effects of tillage practices and straw returning methods on greenhouse gas emissions and net ecosystem economic budget in rice – wheat cropping systems in central China. Atmospheric Environment, 2015, 122: 636-644.

[32] Zhang Z S, Chen J, Liu T Q, Cao C G, Li C F. Effects of nitrogen fertilizer sources and tillage practices on greenhouse gas emissions in paddy fields of central China. Atmospheric Environment, 2016, 144: 274-281.

[33] Sheng F, Cao C G, Li C F. Integrated rice-duck farming decreases global warming potential and increases net ecosystem economic budget in central China. Environmental Science and Pollution Research, 2018, 25(23): 22744-22753.