

张应鹏, 王 莉, 叶小梅, 等. 粪肥还田模式对麦田温室气体和氨排放及土壤固碳的影响[J]. 江苏农业学报, 2024, 40(9): 1643-1652.

doi: 10.3969/j.issn.1000-4440.2024.09.008

## 粪肥还田模式对麦田温室气体和氨排放及土壤固碳的影响

张应鹏<sup>1</sup>, 王 莉<sup>1</sup>, 叶小梅<sup>1</sup>, 朱 飞<sup>1</sup>, 徐 芳<sup>2</sup>, 杨梁洁<sup>2</sup>

(1.江苏省农业科学院畜牧研究所/农业农村部种养结合重点实验室, 江苏 南京 210014; 2.高邮市农业技术综合服务中心, 江苏 高邮 225600)

**摘要:** 为明确不同类型粪肥还田和水稻秸秆还田对麦田温室气体和氨排放及土壤固碳量的影响,本研究设置化肥+水稻秸秆还田、堆肥配施化肥+水稻秸秆还田、沼液配施化肥+水稻秸秆还田、粪浆配施化肥+水稻秸秆还田和沼液配施化肥+水稻秸秆离田 5 种处理,分析不同粪肥还田模式对麦田碳氮气体排放、全球增温潜势(*GWP*)、净全球增温潜势(*NGWP*)和土壤固碳量的影响。结果表明:粪肥还田处理的累积  $\text{CO}_2$ 、 $\text{CH}_4$ 、 $\text{N}_2\text{O}$ 、 $\text{NH}_3$  排放量较化肥+水稻秸秆还田处理基本都有不同程度的增加。不同处理麦田 *GWP* 均以  $\text{N}_2\text{O}$  排放为主,贡献率为 67.4%~74.9%,其中粪浆配施化肥+水稻秸秆还田处理的 *GWP* 最高。堆肥配施化肥+水稻秸秆还田处理的麦田  $\text{NH}_3$  累积排放量和气态氮( $\text{NH}_3\text{-N}$  和  $\text{N}_2\text{O-N}$ )排放总量最大。沼液配施化肥+水稻秸秆还田处理麦田的 *GWP* 和耕层土壤固碳量分别比沼液配施化肥+水稻秸秆离田处理增加 20.6%和 2.87 倍,*NGWP* 由正转负。与化肥+水稻秸秆还田处理相比,粪肥配施化肥+水稻秸秆还田处理可以大幅提高麦田耕层土壤固碳量,且 *NGWP* 为负值,其中,粪浆配施化肥+水稻秸秆还田模式的效果最好。本研究结果可为粪肥利用和农田减排固碳提供依据。

**关键词:** 粪肥还田; 温室气体排放; 氨排放; 固碳

**中图分类号:** S181      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1000-4440(2024)09-1643-10

## Effects of manure returning methods on greenhouse gas and ammonia emissions and soil carbon sequestration in wheat fields

ZHANG Yingpeng<sup>1</sup>, WANG Li<sup>1</sup>, YE Xiaomei<sup>1</sup>, ZHU Fei<sup>1</sup>, XU Fang<sup>2</sup>, YANG Liangjie<sup>2</sup>

(1. Institute of Animal Science, Jiangsu Academy of Agricultural Sciences/ Key Laboratory of Crop and Animal Integrated Farming, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Nanjing 210014, China; 2. Gaoyou Center of Agricultural Technology Comprehensive Service, Gaoyou 225600, China)

**Abstract:** In order to clarify the effects of different types of manure returning and rice straw returning on greenhouse gas and ammonia emissions and soil carbon sequestration in wheat fields, five treatments were set up in this study, including chemical fertilizer + rice straw returning, compost combined with chemical fertilizer + rice straw returning, biogas slurry combined with chemical fertilizer + rice straw returning, manure slurry combined with chemical fertilizer + rice straw

returning and biogas slurry combined with chemical fertilizer + off-site utilization of rice straw. The effects of different manure returning modes on carbon and nitrogen gas emissions, global warming potential (*GWP*), net global warming potential (*NGWP*) and soil carbon sequestration in wheat fields were analyzed. The results showed that the cumulative  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{N}_2\text{O}$  and  $\text{NH}_3$  emissions of manure returning treatment were basically increased to differ-

收稿日期: 2024-07-16

基金项目: 江苏省农业科技自主创新基金项目[ CX22(3009) ]; 江苏现代农业产业技术体系建设专项[ JATS(2023)397 ]

作者简介: 张应鹏(1991-), 男, 安徽寿县人, 硕士, 助理研究员, 主要从事养殖污染控制与资源化利用研究。(E-mail) 793379912@qq.com

通讯作者: 叶小梅, (E-mail) yexiaomei@jaas.ac.cn

ent degrees compared with chemical fertilizer + rice straw returning treatment. The *GWP* of wheat fields under different treatments was dominated by  $\text{N}_2\text{O}$  emission, with a contribution rate of 67.4%–74.9%, and the *GWP* of manure slurry combined with chemical fertilizer + rice straw returning was the highest. The cumulative emission of  $\text{NH}_3$  and the total emission of gaseous nitrogen ( $\text{NH}_3\text{-N}$  and  $\text{N}_2\text{O-N}$ ) were the highest in the wheat field treated with compost combined with chemical fertilizer + rice straw returning. The *GWP* and the carbon sequestration of topsoil in wheat field under the treatment of biogas slurry combined with chemical fertilizer + rice straw returning were 20.6% and 2.87 times higher than those in the treatment of biogas slurry combined with chemical fertilizer + rice straw leaving the field, respectively, and the *NGWP* changed from positive to negative. Compared with the treatment of chemical fertilizer + rice straw returning, the treatment of manure combined with chemical fertilizer + rice straw returning could significantly increase the amount of carbon sequestration in the topsoil of wheat field, and the *NGWP* was negative. Among them, the effect of manure slurry combined with chemical fertilizer + rice straw returning method was the best. The results of this study provide a basis for manure utilization, emission-reduction and carbon sequestration in farmland.

**Key words:** manure returning; greenhouse gas emissions; ammonia emission; carbon sequestration

农业生态系统既是温室气体和  $\text{NH}_3$  的主要排放源,也是最重要的碳汇之一<sup>[1-3]</sup>。农业非  $\text{CO}_2$  温室气体排放量占全球人为温室气体排放总量的 10%~12%<sup>[4]</sup>。其中,种植业  $\text{N}_2\text{O}$  和  $\text{CH}_4$  排放量分别占农业总排放量的 45% 和 16%<sup>[5]</sup>。全球农业年均  $\text{NH}_3$  排放总量约为 16.11 Tg<sup>[6]</sup>。同时,农田土壤固碳量约占土壤碳汇总量的 35%,而中国农田年均土壤固碳潜力约 390 Tg,可以抵消工业温室气体排放总量的 50% 左右<sup>[7-8]</sup>。影响农田温室气体排放的主要因素有肥料使用类型与方式、耕作方式、作物品种及土壤质地等<sup>[9-10]</sup>。

近年来,畜禽粪肥还田已成为畜禽养殖污染治理及粪污资源化利用的重要途径,又是减少农业化肥施用量、实现绿色种养循环发展的有效措施<sup>[11-13]</sup>。由于粪污处理工艺不同,粪肥按照含水量由低至高可分成堆肥(固体型)、粪浆(固液混合型)、沼液(液体型)等 3 种类型。畜禽粪肥还田在减少农田化肥施用量、提高种植效益的同时,还会对农田温室气体和  $\text{NH}_3$  排放及土壤固碳带来重要影响。Xia 等<sup>[14]</sup>的研究结果表明粪肥部分替代化肥可以显著提高农田表层土壤固碳速率;马文林等<sup>[15]</sup>研究发现玉米田连续 5 年施用堆肥, $\text{CH}_4$ 、 $\text{N}_2\text{O}$  排放量分别减少了 14.55% 和 75.55%, $\text{CO}_2$  排放量增加了 73.49%;李燕青等<sup>[16]</sup>和翟振等<sup>[17]</sup>发现等氮条件下施用堆肥能显著降低玉米田  $\text{N}_2\text{O}$  排放量,而黄容等<sup>[18]</sup>发现堆肥配施化肥处理会显著增加  $\text{N}_2\text{O}$  排放量;Dong 等<sup>[19]</sup>和 Yang 等<sup>[20]</sup>研究发现有机物料配施化肥可产生有机酸,进而导致土壤 pH 降低和  $\text{NH}_3$  挥发量减少。Matsushima 等<sup>[21]</sup>研究发现堆肥的高

脲酶活性会刺激尿素水解,堆肥配施化肥会导致  $\text{NH}_3$  挥发量的增加;靳红梅等<sup>[22]</sup>和杨润等<sup>[23]</sup>研究发现沼液施用初期农田  $\text{NH}_3$  排放量显著增加;王小非等<sup>[24]</sup>研究发现施用沼液能明显增加麦田  $\text{N}_2\text{O}$  的排放量,而孙国峰等<sup>[25]</sup>研究发现沼液替代化肥处理能明显降低麦田  $\text{N}_2\text{O}$  排放量,并降低全球增温潜势。从上述研究结果看,粪肥还田模式对农田碳氮气体排放和土壤固碳的影响存在较大差别,这可能与粪肥类型、研究对象及区域等因素有关。

近年来,秸秆还田作为一种地力培肥措施在生产中得到大面积推广,其在化肥减量和土壤改良、农田土壤固碳能力提高<sup>[26-28]</sup>等方面发挥着重要作用。同时,秸秆还田还对农田温室气体排放有一定影响<sup>[29-30]</sup>。目前,秸秆还田和粪肥还田模式对农田碳氮气体排放与土壤固碳的综合效应尚无研究报道。基于此,本研究在前茬水稻秸秆还田和离田情景下,开展堆肥、粪浆、沼液等不同类型粪肥还田模式对麦田温室气体和氨排放及土壤固碳效果的监测与分析,为优化粪肥还田模式、促进农田减排固碳提供借鉴。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验地概况

试验于江苏省高邮市雅源家庭农场(32°52′40.18″N, 119°27′58.13″E)进行。试验点位于北亚热带季风气候区,海拔 15~20 m,常年平均气温 15.3℃,无霜期约 220 d,年均降水量 1 036.6 mm,年日照时数 1 850 h。试验地块平坦、齐整,远离主干道路和堆肥场所,前期未施用畜禽粪肥、未发生土传病害,总面积为 0.14 hm<sup>2</sup>。试验地块种植制度为

稻麦轮作,土壤类型为黏土,耕作层(0~20 cm)有机质含量 28.37 g/kg,全氮含量 1.91 g/kg,碱解氮含量 150.64 mg/kg,全磷含量 0.93 g/kg,速效磷含量 22.99 mg/kg,全钾含量 14.49 g/kg,速效钾含量 225.88 mg/kg,土壤电导率 170.28  $\mu\text{S}/\text{cm}$ 。

1.2 供试肥料

供试肥料包括化学肥料和畜禽粪肥。化学肥料有三元复合肥(N、 $\text{P}_2\text{O}_5$ 、 $\text{K}_2\text{O}$  含量均为 15%),尿素(N 含量为 46%)、过磷酸钙( $\text{P}_2\text{O}_5$  含量为 12%)和氯化钾( $\text{K}_2\text{O}$  含量为 60%)。畜禽粪肥有堆肥、沼液和粪浆,其中堆肥为江苏高邮鸭发展集团有限公司以鸭粪为原料,经过槽式堆肥工艺处理后得到的固体粪肥,沼液为扬州邮都园农业开发有限公司以猪粪为原料,经过厌氧发酵、固液分离工艺处理后得到的液体粪肥,粪浆为扬州市海兴生物质发展有限公司以鸡粪为主要原料,经过厌氧发酵工艺处理后得到的固液混合型粪肥。供试粪肥理化性质见表 1。

表 1 粪肥理化性质

Table 1 Chemical properties of manures

粪肥类型	有机碳含量 (g/kg)	全氮含量 (g/kg)	全磷含量 (g/kg)	全钾含量 (g/kg)
堆肥	241.6	23.2	11.1	22.0
沼液	1.7	1.2	0.3	1.1
粪浆	4.9	3.2	0.2	3.0

表 2 不同处理的施肥情况

Table 2 Fertilization of different treatments

处理	化肥用量( $\text{kg}/\text{hm}^2$ )				畜禽粪肥用量( $\text{t}/\text{hm}^2$ )		
	复合肥	尿素	过磷酸钙	氯化钾	堆肥	沼液	粪浆
FRS	240	480	—	45	—	—	—
CRS	—	390	—	—	3.3	—	—
BSRS	—	280	—	—	—	107.0	—
BS	—	280	—	—	—	107.0	—
SMRS	—	280	145	—	—	—	40.1

FRS:化肥+水稻秸秆还田;CRS:堆肥配施化肥+水稻秸秆还田;BSRS:沼液配施化肥+水稻秸秆还田;BS:沼液配施化肥+水稻秸秆离田;SMRS:粪浆配施化肥+水稻秸秆还田。堆肥用量以干重计。

1.4 样品采集与测定

1.4.1 土壤样品采集与测定 于小麦播种前和收获后,使用取土器采用“S”形多点取样法采集耕作层(0~20 cm)土壤样品。样品经四分法处理后用自封袋封装带回实验室,经自然风干后研磨过 0.15 mm 筛,采用重铬酸钾容量法测定土壤有机碳含量。采用环刀法取原状土测定土壤容重。

1.3 试验设计

试验于小麦季进行,共设置 5 个处理,分别为化肥+水稻秸秆还田处理(FRS)、堆肥配施化肥+水稻秸秆还田处理(CRS)、沼液配施化肥+水稻秸秆还田处理(BSRS)、沼液配施化肥+水稻秸秆离田处理(BS)、粪浆配施化肥+水稻秸秆还田处理(SMRS)。每个处理 3 个重复。根据试验点小麦常规管理方案,本试验设置施肥量为 N 257  $\text{kg}/\text{hm}^2$ 、 $\text{P}_2\text{O}_5$  36  $\text{kg}/\text{hm}^2$ 、 $\text{K}_2\text{O}$  63  $\text{kg}/\text{hm}^2$ 。参考相关文献报道<sup>[31-32]</sup>,以氮为基准,设置堆肥与化肥的配施比例为 3:7,沼液与化肥的配施比例及粪浆与化肥的配施比例均为 5:5,若畜禽粪肥处理的磷钾不足则添加过磷酸钙和氯化钾进行补充,各处理施肥情况见表 2。前茬水稻用联合收割机收获后切碎秸秆,按照各试验处理设置分别将秸秆收集离田或旋耕入土全量还田。分别于 2022 年 12 月 9 日、2023 年 2 月 10 日和 2023 年 3 月 23 日施用基肥和 2 次追肥,其中堆肥采用人工撒施方式全部作基肥施用;沼液、粪浆采用人工浇灌方式作基肥和追肥分 3 次施用,比例为 3:1:1;复合肥全部作基肥施用,尿素基肥和 2 次追肥的施用比例为 2:1:2。试验小区面积为 32  $\text{m}^2$ (4 m $\times$ 8 m),各小区之间预留 1 m 宽的缓冲带,并在中部位置开沟,便于降雨期排水和避免相互干扰,除施肥外的其他农事作业均按照农场常规管理方式进行。

耕作层土壤固碳量采用式(1)计算:

$$M_{20} = (SOC_1 \times BD_1 - SOC_0 \times BD_0) \times 20 \times 100 \quad (1)$$

式中: $M_{20}$ 为 0~20 cm 耕层土壤固碳量( $\text{kg}/\text{hm}^2$ ); $SOC_0$ 、 $SOC_1$ 分别为小麦播种前和收获后的土壤有机碳含量( $\text{g}/\text{kg}$ ); $BD_0$ 、 $BD_1$ 分别为小麦播种前和收获后的土壤容重( $\text{g}/\text{cm}^3$ );20 和 100 分别为土壤深度(cm)和单位换算系数。

1.4.2 气体样品采集与测定 采用静态箱采集温室气体  $\text{CH}_4$ 、 $\text{CO}_2$  和  $\text{N}_2\text{O}$ 。静态箱为圆柱体聚氯乙烯(PVC)材质,由密闭顶箱(高 50 cm、内径 30 cm)和底座组成,顶箱上部安装小风扇以便混匀气体。小麦播种后,将静态箱底座固定埋于土壤表面。采样时在底座上部凹槽中注满水,随后将顶箱放置于凹槽中以避免内外空气流通。顶箱放置时与放置后 10 min、20 min、30 min 利用抽气泵抽取箱内气体 200 mL 转移至铝箔集气袋中密封避光保存,同时记录采样时的气温,采样结束后尽快带回实验室分析。采样时间固定在 9:00–11:00。小麦播种前 1 d 采样 1 次,其后每隔 15 d 左右采样 1 次,且在每次施肥后第 2 d 补测 1 次,持续至小麦抽穗期。采集的气体利用 GC-2014 型气相色谱仪(日本岛津公司产品)测定温室气体浓度,色谱柱为岛津 Hayasep-D 色谱柱,采用氢火焰离子检测器(FID)分析  $\text{CH}_4$ 、 $\text{CO}_2$  浓度,采用电子捕获检测器(ECD)分析  $\text{N}_2\text{O}$  浓度,色谱柱、FID、ECD 温度分别设置为 50 °C、250 °C、300 °C。

采用静态箱-硫酸吸收法采集  $\text{NH}_3$ ,采样前将装有 50 mL 0.01 mol/L 硫酸吸收液的蒸发皿稳定放置于静态箱底座中央,随后将底座上部凹槽中注满水并盖上密闭顶箱,吸收 30 min,采样结束后尽快带回实验室使用 5B-6D 型氨氮快速测定仪(北京连华科技有限公司产品)检测吸收液氨氮浓度。 $\text{NH}_3$  采样时间与温室气体采样时间保持一致。

$\text{CH}_4$ 、 $\text{CO}_2$  和  $\text{N}_2\text{O}$  的排放速率采用式(2)计算<sup>[33]</sup>:

$$F = \rho \times (dc/dt) \times H \times 273 / (273 + T) \times k \quad (2)$$

式中: $F$  为温室气体排放速率,其中  $\text{CO}_2$  排放速率单位为  $\text{kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{d})$ ,  $\text{CH}_4$ 、 $\text{N}_2\text{O}$  排放速率单位为  $\text{g}/(\text{hm}^2 \cdot \text{d})$ ;  $\rho$  为标准状态下温室气体的密度( $\text{kg}/\text{m}^3$ );  $dc/dt$  为 30 min 采气时间段静态箱内温室气体浓度变化率 [ $\text{mL}/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$ ];  $H$  为箱高(m);  $T$  为采样时的温度(°C);  $k$  为单位换算系数,其中  $\text{CO}_2$  为 0.24,  $\text{CH}_4$ 、 $\text{N}_2\text{O}$  为 240。

$\text{NH}_3$  排放速率采用式(3)计算:

$$F = \frac{C_{\text{NH}_3} \times V}{A \times t} \times 0.24 \times (17/14) \quad (3)$$

式中: $F$  为  $\text{NH}_3$  排放速率 [ $\text{g}/(\text{hm}^2 \cdot \text{d})$ ];  $C_{\text{NH}_3}$  为吸收液中氨氮质量浓度( $\text{mg}/\text{L}$ );  $V$  为吸收液体积( $\text{mL}$ );  $A$  为动态箱底面积( $\text{m}^2$ );  $t$  为吸收时间

(h); 0.24 和 17/14 分别为单位换算系数和 N 至  $\text{NH}_3$  的换算系数。

$\text{CH}_4$ 、 $\text{CO}_2$ 、 $\text{N}_2\text{O}$  和  $\text{NH}_3$  的累积排放量采用式(4)计算<sup>[33]</sup>:

$$E = \sum (F_{i+1} + F_i) / 2 \times (t_{i+1} - t_i) \times k \quad (4)$$

式中: $E$  为气体累积排放量 ( $\text{kg}/\text{hm}^2$ );  $F$  为  $\text{CH}_4$ 、 $\text{CO}_2$ 、 $\text{N}_2\text{O}$  和  $\text{NH}_3$  排放速率;  $t_{i+1} - t_i$  为采样间隔天数;  $i$  为采样次数;  $k$  为单位换算系数,其中  $\text{CO}_2$  为 1,  $\text{CH}_4$ 、 $\text{N}_2\text{O}$  和  $\text{NH}_3$  为  $10^{-3}$ 。

全球增温潜势采用式(5)计算<sup>[34]</sup>:

$$GWP = E_{\text{CH}_4} \times 28 + E_{\text{N}_2\text{O}} \times 265 + E_{\text{NH}_3} \times (14/17) \times 1\% \times (44/28) \times 265 \quad (5)$$

式中: $GWP$  为全球增温潜势 ( $\text{kg}/\text{hm}^2$ ),以二氧化碳当量表示;  $E_{\text{CH}_4}$ 、 $E_{\text{N}_2\text{O}}$  和  $E_{\text{NH}_3}$  分别为  $\text{CH}_4$ 、 $\text{N}_2\text{O}$  和  $\text{NH}_3$  的累积排放量; 14/17 为  $\text{NH}_3$  至 N 的换算系数; 1% 为挥发  $\text{NH}_3$  沉积间接产生  $\text{N}_2\text{O}$  的比例,以 N 计; 44/28 为 N 至  $\text{N}_2\text{O}$  的换算系数; 28 和 265 分别为 100 年尺度下  $\text{CH}_4$  和  $\text{N}_2\text{O}$  的增温潜势。

净全球增温潜势采用式(6)计算:

$$NGWP = GWP - M_{20} \times (44/12) \quad (6)$$

式中: $NGWP$  和  $GWP$  分别为净全球增温潜势和全球增温潜势 ( $\text{kg}/\text{hm}^2$ ),以二氧化碳当量表示;  $M_{20}$  为 0~20 cm 耕层土壤固碳量 ( $\text{kg}/\text{hm}^2$ ); 44/12 为 C 至  $\text{CO}_2$  的换算系数。

## 1.5 数据统计分析

利用 Excel、Origin 等软件进行数据处理、图表绘制;利用 SPSS 软件,采用单因素方差分析检验处理间的差异( $\alpha = 0.05$ )。

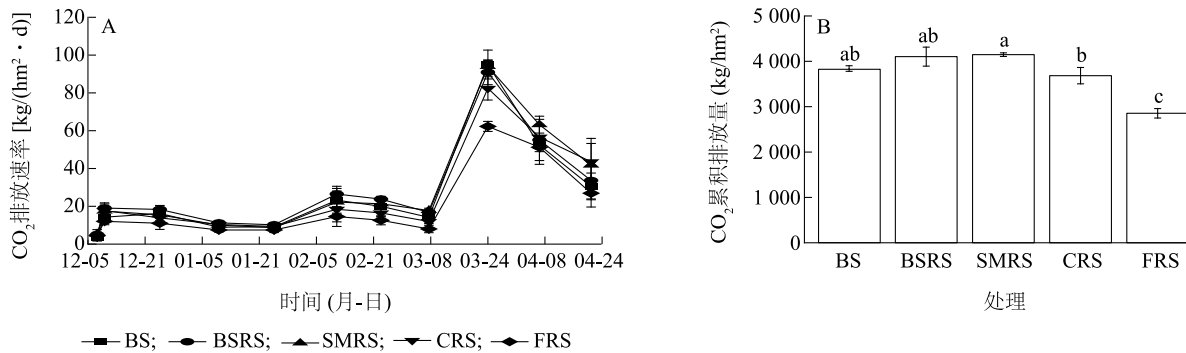
## 2 结果与分析

### 2.1 粪肥还田模式对麦田 $\text{CO}_2$ 排放的影响

粪肥还田模式对麦田  $\text{CO}_2$  排放速率的影响如图 1A 所示。从图中可以看出,5 个处理  $\text{CO}_2$  排放速率变化趋势基本一致。各处理越冬前及越冬期,  $\text{CO}_2$  排放速率一般低于  $20 \text{ kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{d})$ ,越冬后随着返青肥的施用,  $\text{CO}_2$  排放速率有所提高,拔节后随着穗肥的施用及小麦群体的快速增大,  $\text{CO}_2$  排放速率于 3 月下旬达到峰值,随后各处理  $\text{CO}_2$  排放速率呈现下降趋势。不同处理播种至抽穗期  $\text{CO}_2$  累积排放量见图 1B。粪肥配施化肥处理的  $\text{CO}_2$  累积排放量比单独施用化肥处理高 29.1%~45.3%,其中 SMRS 处理

CO<sub>2</sub>累积排放量最高,达到4 147 kg/hm<sup>2</sup>。不同粪肥配施化肥处理间亦有一定的差异,SMRS 处理 CO<sub>2</sub>

累积排放量显著高于 CRS 处理,增幅达 12.6%,但与 BS 和 BSRS 处理 CO<sub>2</sub>累积排放量无显著差异。



FRS、CRS、BSRS、BS、SMRS 见表 2 注。柱上不同小写字母表示处理间差异显著 ( $P < 0.05$ )。

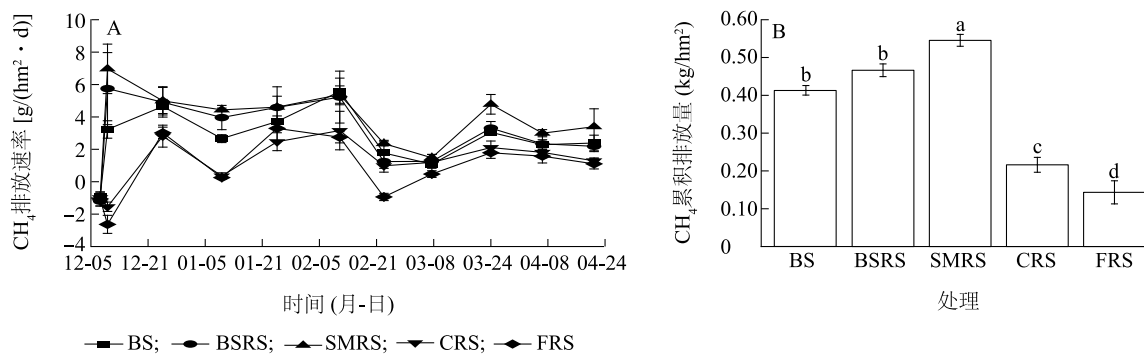
图 1 不同处理 CO<sub>2</sub>排放情况

Fig.1 CO<sub>2</sub> emissions of different treatments

## 2.2 粪肥还田模式对麦田 CH<sub>4</sub>排放的影响

粪肥还田模式对麦田 CH<sub>4</sub>排放速率的影响如图 2A 所示。从图中可以看出,SMRS 处理的 CH<sub>4</sub>排放速率总体上高于其他处理,FRS 处理的 CH<sub>4</sub>排放速率相对较低,各处理 CH<sub>4</sub>排放速率峰值出现时间不完全一致。不同处理播种至抽穗期 CH<sub>4</sub>累积排放量如图 2B 所示。BS、BSRS 和 SMRS 处理的 CH<sub>4</sub>累积

排放量显著高于 CRS 和 FRS 处理,其中 SMRS 处理达到 0.55 kg/hm<sup>2</sup>,分别是 CRS 和 FRS 处理的 2.5 倍和 3.8 倍。不同处理的 CH<sub>4</sub>累积排放量总体较低,表现为 CH<sub>4</sub>的弱排放源。上述结果说明,与堆肥配施化肥和单独施用化肥相比,沼液或粪浆配施化肥会增加麦田 CH<sub>4</sub>排放量,其中,粪浆配施化肥与稻秸还田互作处理的 CH<sub>4</sub>排放量增加得最为显著。



FRS、CRS、BSRS、BS、SMRS 见表 2 注。柱上不同小写字母表示处理间差异显著 ( $P < 0.05$ )。

图 2 不同处理 CH<sub>4</sub>排放情况

Fig.2 CH<sub>4</sub> emissions of different treatments

## 2.3 粪肥还田模式对麦田 N<sub>2</sub>O 和 NH<sub>3</sub>排放的影响

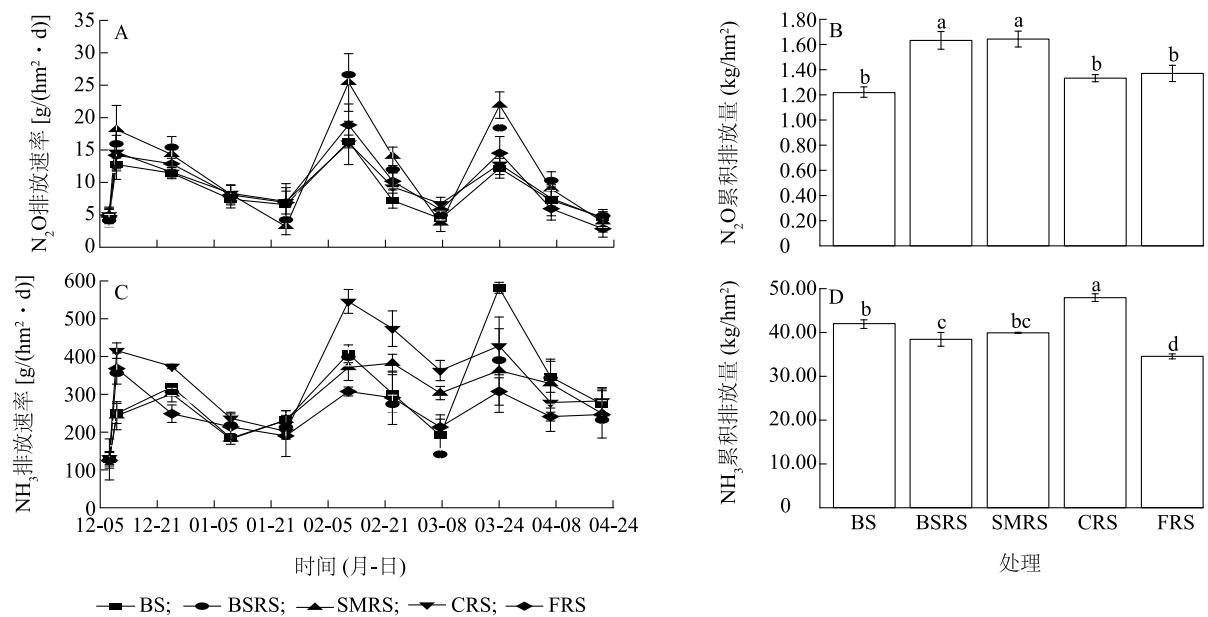
粪肥还田模式对麦田 N<sub>2</sub>O 和 NH<sub>3</sub>排放的影响如图 3 所示。从图中可以看出,5 个处理的 N<sub>2</sub>O 排放速率变化趋势基本一致,各处理 N<sub>2</sub>O 排放速率的峰值均出现在返青期施肥后。BSRS 和 SMRS 处理的 N<sub>2</sub>O 累积排放量较高,分别为 1.63 kg/hm<sup>2</sup> 和 1.64 kg/hm<sup>2</sup>,比其他处理高出 19.2%~34.5%。5 个处理 NH<sub>3</sub>排放速率亦总体表现为施肥后较高,其后缓慢下

降的趋势。5 个处理 NH<sub>3</sub>排放速率峰值出现时间存在一定的差异。CRS 处理的 NH<sub>3</sub>累积排放量最高,达到 47.96 kg/hm<sup>2</sup>,比其他处理高出 14.4%~38.8%,FRS 处理最低。

## 2.4 粪肥还田模式对麦田气态氮排放总量的影响

粪肥还田模式对麦田气态氮排放总量的影响如表 3 所示。气态氮主要以 NH<sub>3</sub>-N 的形式排放,占比达到 96%以上。CRS 处理的气态氮排放总量最大,达到 40.34 kg/hm<sup>2</sup>,比其他处理高出 14.3%~37.5%,而 FRS

处理的气态氮排放总量最低,仅为 29.33 kg/hm<sup>2</sup>,显著低于其他处理。上述结果说明,与单独施用化肥相比,粪肥配施化肥均会增加麦田气态氮排放量,其中堆肥配施化肥处理的气态氮排放量增加得最为明显。



FRS、CRS、BSRS、BS、SMRS 见表 2 注。柱上不同小写字母表示处理间差异显著 ( $P<0.05$ )。A: N<sub>2</sub>O 排放速率; B: N<sub>2</sub>O 累积排放量; C: NH<sub>3</sub> 排放速率; D: NH<sub>3</sub> 累积排放量。

图 3 不同处理 N<sub>2</sub>O 和 NH<sub>3</sub> 的排放情况  
Fig.3 N<sub>2</sub>O and NH<sub>3</sub> emissions of different treatments

表 3 不同处理气态氮排放总量

Table 3 Total gaseous nitrogen emissions of different treatments

处理	NH <sub>3</sub> -N 排放量 (kg/hm <sup>2</sup> )	N <sub>2</sub> O-N 排放量 (kg/hm <sup>2</sup> )	NH <sub>3</sub> -N + N <sub>2</sub> O-N 排放量 (kg/hm <sup>2</sup> )
BS	34.51±0.81b	0.78±0.03b	35.29±0.82b
BSRS	31.66±1.30c	1.04±0.04a	32.70±1.27c
SMRS	32.88±0.10bc	1.05±0.04a	33.93±0.07bc
CRS	39.50±0.73a	0.85±0.02b	40.34±0.74a
FRS	28.46±0.47d	0.87±0.04b	29.33±0.51d

FRS、CRS、BSRS、BS、SMRS 见表 2 注。同一列数据后不同字母表示处理间差异显著 ( $P<0.05$ )。

2.5 粪肥还田模式对麦田全球增温潜势 (*GWP*) 的影响

粪肥还田模式对全球增温潜势的影响如表 4 所示。N<sub>2</sub>O 直接排放对麦田 *GWP* 的贡献最高,占比达到 67.4%~74.9%,而 CH<sub>4</sub> 排放的贡献率仅为 0.8%~2.6%。SMRS 处理的 *GWP* 达到 587.64 kg/hm<sup>2</sup>,与 BSRS 处理无显著差异,但显著高于 BS、CRS 和 FRS 处理,增幅分别达到 22.7%、12.2%和 21.0%;BSRS 处理的 *GWP* 比 BS 处理增加 20.6%,而 BS 处理与 FRS 处理较低且两者无显著差异。上述结果说明,与其他处理相比,粪浆或沼液配施化肥与水稻秸秆还田互作处理会增加麦田的 *GWP*。

表 4 不同处理 CH<sub>4</sub>、N<sub>2</sub>O、NH<sub>3</sub> 排放对全球增温潜势 (*GWP*) 的贡献

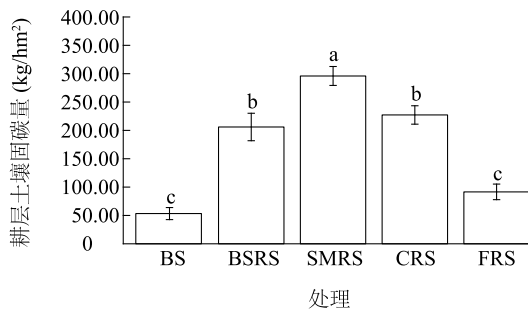
Table 4 Contributions of CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O, NH<sub>3</sub> emissions to global warming potentials (*GWP*) of different experimental treatments

处理	CH <sub>4</sub> 排放量 (kg/hm <sup>2</sup> )	N <sub>2</sub> O 排放量 (kg/hm <sup>2</sup> )	NH <sub>3</sub> 排放量 (kg/hm <sup>2</sup> )	<i>GWP</i> (kg/hm <sup>2</sup> )
BS	11.57±0.35b	323.79±10.99b	143.73±3.39b	479.09±11.96b
BSRS	13.05±0.47b	432.64±18.63a	131.86±5.41c	577.55±15.86a
SMRS	15.27±0.44a	435.42±16.61a	136.94±0.40bc	587.64±16.25a
CRS	6.05±0.55c	353.07±7.47b	164.48±3.03a	523.59±10.77b
FRS	4.02±0.86d	363.04±17.09b	118.50±1.96d	485.56±19.49b

FRS、CRS、BSRS、BS、SMRS 见表 2 注。同一列不同字母表示处理间差异显著 ( $P<0.05$ )。

## 2.6 粪肥还田模式对麦田土壤固碳量的影响

粪肥还田模式对麦田土壤固碳量的影响如图4所示。从图中可以看出,固碳量从大到小的处理依次为 SMRS、CRS、BSRS、FRS、BS。其中 SMRS、CRS 和 BSRS 处理的固碳量分别为 295.95 kg/hm<sup>2</sup>、227.21 kg/hm<sup>2</sup>和 205.96 kg/hm<sup>2</sup>,分别是 FRS 处理的 3.23、2.48 和 2.25 倍;BSRS 处理的固碳量则是 BS 处理的 3.87 倍,固碳量增加 152.68 kg/hm<sup>2</sup>。上述结果说明,与单独施用化肥和稻秆离田处理相比,粪肥配施化肥和稻秆还田处理均可以增加麦田耕层土壤固碳量,且施用粪浆比施用堆肥或沼液有更好的固碳效果。



FRS、CRS、BSRS、BS、SMRS 见表 2 注。柱上不同小写字母表示处理间差异显著 ( $P < 0.05$ )。

图4 不同处理耕层土壤固碳量情况

Fig.4 Soil carbon sequestration in the plough layer of different treatments

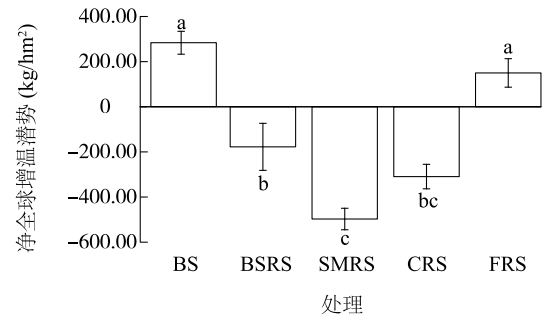
## 2.7 粪肥还田模式对麦田净全球增温潜势 (NGWP) 的影响

粪肥还田模式对麦田 NGWP 的影响如图5所示。BSRS、SMRS、CRS 处理的 NGWP 为负值,表现为“碳汇”,BS、FRS 处理的 NGWP 为正值,表现为“碳源”,这说明在粪肥配施化肥和稻秆还田的综合措施下,可以促进麦田减排固碳,而单一措施则有可能造成温室气体净排放。BSRS 处理的 NGWP 比 BS 处理减少 461.38 kg/hm<sup>2</sup>,SMRS 处理的 NGWP 最低,仅为-497.52 kg/hm<sup>2</sup>,分别比 BSRS 和 CRS 处理减少 319.89 kg/hm<sup>2</sup>和 188.03 kg/hm<sup>2</sup>,且与 BSRS 处理差异显著,这表明粪浆与堆肥、沼液相比,可以增强麦田减排固碳能力。

## 3 讨论

### 3.1 粪肥还田模式对麦田碳氮气体排放的影响

(1)粪肥配施化肥模式的 CO<sub>2</sub> 累积排放量比单独



FRS、CRS、BSRS、BS、SMRS 见表 2 注。柱上不同小写字母表示处理间差异显著 ( $P < 0.05$ )。

图5 不同处理净全球增温潜势 (NGWP) 情况

Fig.5 Net global warming potentials (NGWP) of different treatments

施用化肥处理高29.1%~45.3%,这与王晓娇等<sup>[35]</sup>利用 Meta 分析法得出的施用有机肥的农田土壤 CO<sub>2</sub> 排放量比施用无机肥平均提高 36.3%的结论基本一致;而沼液配施化肥的模式下,稻秆还田与稻秆离田处理的 CO<sub>2</sub> 累积排放量无显著差异,这与其他学者研究得出的稻秆还田明显促进 CO<sub>2</sub> 排放的结论有所区别<sup>[36-38]</sup>。原因在于农田 CO<sub>2</sub> 排放受到植物呼吸作用、土壤呼吸作用以及含碳物质化学氧化作用等多重因素的综合影响<sup>[39-44]</sup>,本研究中秸秆腐解过程产生的 CO<sub>2</sub> 占比可能较小。(2)不同粪肥还田处理下播种至抽穗期麦田 CH<sub>4</sub> 累积排放量最大为 0.55 kg/hm<sup>2</sup>,比靳红梅等<sup>[29]</sup>研究的稻秆还田下麦田 CH<sub>4</sub> 累积排放量为 0.45 kg/hm<sup>2</sup>的结果略高,但远低于稻田 CH<sub>4</sub> 排放量 (73.7~387.2 kg/hm<sup>2</sup>)<sup>[45]</sup>。其中,沼液或粪浆还田+稻秆还田处理的 CH<sub>4</sub> 排放量要高于其他方式,这可能与土壤有机碳源增加和土壤氧化还原电位降低有关<sup>[38]</sup>。(3)堆肥配施化肥处理的 NH<sub>3</sub> 累积排放量和气态氮 (NH<sub>3</sub>-N + N<sub>2</sub>O-N) 排放总量均高于其他处理,这可能与固体粪肥在土壤中的下渗率低于液体粪肥有关<sup>[46-47]</sup>。(4)本研究中不同粪肥处理下 N<sub>2</sub>O 累积排放量为1.22~1.64 kg/hm<sup>2</sup>,这与刘高远等<sup>[48]</sup>研究的有机肥替代化肥试验麦田 N<sub>2</sub>O 排放量(0.99~1.61 kg/hm<sup>2</sup>)基本一致。本研究中沼液或粪浆还田+稻秆还田处理的 N<sub>2</sub>O 排放量显著高于其他方式,这可能与沼液或粪浆还田既能促进硝化作用又能促进反硝化作用,同时秸秆还田方式的碳氮比更易促进 N<sub>2</sub>O 的形成与排放有关<sup>[29,49]</sup>。

### 3.2 粪肥还田模式对麦田 GWP 的影响

农田在排放 CO<sub>2</sub> 的同时,由于光合作用,存在植物对 CO<sub>2</sub> 的固定吸收,使得农田 CO<sub>2</sub> 净排放量相对

较低,因此计算农田  $GWP$  时一般不考虑  $CO_2$  [8,50]。本研究结果表明, $N_2O$  是计算麦田  $GWP$  中影响最大的温室气体,占比达到 67.4%~74.9%,而  $CH_4$  排放量影响可以忽略不计,这是因为试验区具有较好的排水措施,农田较少出现厌氧环境,因而  $CH_4$  排放较低, $N_2O$  排放较高 [51-52]。此外,本研究发现,沼液或粪浆配施化肥+稻秸还田处理的麦田  $GWP$  较高,分别达到 577.55 kg/hm<sup>2</sup> 和 587.64 kg/hm<sup>2</sup>,这可能是因为秸秆还田增加了土壤可降解有机碳源并调节了碳氮比,增强了  $CH_4$  排放量,同时沼液或粪浆还田处理一定程度上提高了土壤含水量,增强了反硝化作用,进而导致  $N_2O$  排放量的增加 [53]。

### 3.3 粪肥还田模式对麦田耕层土壤固碳量与 $NGWP$ 的影响

Xia 等 [14] 的研究结果显示,当粪肥替代化肥氮比例为 25%~50% 时,土壤周年固碳量为 268~496 kg/hm<sup>2</sup>。本研究不同粪肥处理下麦田耕层土壤固碳量达到 53.28~295.95 kg/hm<sup>2</sup>。本研究还发现,粪肥配施化肥+水稻秸秆还田处理可以大幅提高麦田耕层土壤固碳量,这与前人研究结果 [54-56] 一致,且粪肥配施化肥+水稻秸秆还田处理还能减少麦田  $NGWP$ 。其中,粪浆配施化肥+水稻秸秆还田模式的麦田减排固碳效果最好。虽然粪肥配施化肥+水稻秸秆还田处理下,麦田  $N_2O$ 、 $CH_4$  等温室气体排放量有所增加,但这些处理下土壤固碳量有更大幅度的增加,因此,综合来看,粪肥配施化肥+水稻秸秆还田处理仍有利于温室气体减排。

然而,由于本研究仅为不同类型粪肥还田模式对麦田碳氮气体排放与土壤固碳影响的初步结果,粪肥还田的长期效应仍需进一步开展定位跟踪监测和验证。本研究中麦田全生长季的温室气体排放量是由 11 次监测结果估算得到的,没有考虑天气情况对温室气体排放的影响、温室气体排放的日变化等,以后的研究中在这些方面需要进一步完善。

## 4 结论

粪浆配施化肥+水稻秸秆还田处理下麦田  $CH_4$  排放量最大,但仍远低于稻田  $CH_4$  排放量。堆肥配施化肥+水稻秸秆还田模式的麦田  $NH_3$  累积排放量和气态氮( $NH_3-N + N_2O-N$ ) 排放总量分别比其他模式高 14.4%~38.8% 和 14.3%~37.5%。不同粪肥还田模式下麦田  $GWP$  以  $N_2O$  排放的贡献为主,贡献率为 67.4%~74.9%,其中,粪浆配施化肥+水稻秸秆还田

处理的麦田  $GWP$  最高。沼液配施化肥模式下,水稻秸秆还田处理的  $GWP$  比不还田处理增加 20.6%,但麦田耕层土壤固碳量却增加了 2.87 倍,因而  $NGWP$  显著降低。与化肥+水稻秸秆还田处理相比,粪肥配施化肥+水稻秸秆还田模式可以大幅提高麦田耕层土壤固碳量,促进麦田减排固碳,其中粪浆配施化肥+水稻秸秆还田处理的效果最好。

### 参考文献:

- [1] 丁也璐,赵娜娜,黎明,等. 陕北农田作物生产碳源/汇及碳足迹空间特征[J]. 生态学报, 2024, 44(11): 4574-4583.
- [2] 张慧,张力文,何正弘. 东北农区农业净碳汇时空分布及驱动因素[J]. 农业资源与环境学报, 2024, 41(3): 505-517.
- [3] 刘伯顺,黄立华,黄金鑫,等. 我国农田氮挥发研究进展与减排对策[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2022, 30(6): 875-888.
- [4] 程琨,潘根兴. 农业与碳中和[J]. 科学, 2021, 73(6): 8-12, 4.
- [5] United States Environmental Protection Agency. Global anthropogenic non- $CO_2$  greenhouse gas emissions: 1990-2030[R]. Washington, DC.: Office of Atmospheric Programs, Climate Change Division, USEPA, 2012.
- [6] MA R, ZOU J, HAN Z, et al. Global soil-derived ammonia emissions from agricultural nitrogen fertilizer application: a refinement based on regional and crop-specific emission factors[J]. Global Change Biology, 2021, 27(4): 855-867.
- [7] PIAO S L, FANG J Y, CIAIS P, et al. The carbon balance of terrestrial ecosystems in China[J]. Nature, 2009, 458(7241): 1009-1013.
- [8] 王小彬,武雪萍,赵全胜,等. 中国农业土地利用管理对土壤固碳减排潜力的影响[J]. 中国农业科学, 2011, 44(11): 2284-2293.
- [9] TAO F, PALOSUO T, VALKAMA E, et al. Cropland soils in China have a large potential for carbon sequestration based on literature survey[J]. Soil and Tillage Research, 2019, 186: 70-78.
- [10] 韩冰,王效科,逯非,等. 中国农田土壤生态系统固碳现状和潜力[J]. 生态学报, 2008, 28(2): 612-619.
- [11] 国务院办公厅. 国务院办公厅关于加快推进畜禽养殖废弃物资源化利用的意见[EB/OL]. (2017-05-31) [2024-04-07]. [https://www.gov.cn/gongbao/content/2017/content\\_5204889.htm](https://www.gov.cn/gongbao/content/2017/content_5204889.htm).
- [12] 农业农村部,财政部. 农业农村部办公厅财政部办公厅关于开展绿色种养循环农业试点工作的通知[EB/OL]. (2021-05-26) [2024-04-07]. [http://www.moa.gov.cn/xw/bmdt/202105/t20210526\\_6368443.htm](http://www.moa.gov.cn/xw/bmdt/202105/t20210526_6368443.htm).
- [13] 董红敏,左玲玲,魏莎,等. 建立畜禽废弃物养分管理制度促进种养结合绿色发展[J]. 中国科学院院刊, 2019, 34(2): 180-189.
- [14] XIA L, LAM S K, YAN X, et al. How does recycling of livestock manure in agroecosystems affect crop productivity, reactive nitro-

- gen losses, and soil carbon balance? [J]. *Environmental Science & Technology*, 2017, 51(13): 7450-7457.
- [15] 马文林, 吴淑勋, 朱法江, 等. 玉米田长期施粪肥的温室气体排放研究[J]. *中国农机化学报*, 2020, 41(10): 168-175.
- [16] 李燕青, 唐继伟, 车升国, 等. 长期施用有机肥与化肥氮对华北夏玉米  $N_2O$  和  $CO_2$  排放的影响[J]. *中国农业科学*, 2015, 48(21): 4381-4389.
- [17] 翟振, 王立刚, 李虎, 等. 有机无机肥料配施对春玉米农田  $N_2O$  排放及净温室效应的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2013, 32(12): 2502-2510.
- [18] 黄容, 高明, 黎嘉成, 等. 有机物料等氮量施用对紫色土氮形态及温室气体排放的影响[J]. *中国农业科学*, 2018, 51(21): 4087-4101.
- [19] DONG W X, HU C S, ZHANG Y M, et al. Ammonia volatilization from urea incorporation with wheat and maize straw on a loamy soil in China [EB/OL]. UC Davis: The Proceedings of the International Plant Nutrition Colloquium XVI, 2009. <http://escholarship.org/uc/item/8db6h5cr>.
- [20] YANG Q L, LIU P, DONG S T, et al. Combined application of organic and inorganic fertilizers mitigates ammonia and nitrous oxide emissions in a maize field [J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2020, 117(1): 13-27.
- [21] MATSUSHIMA M, LIM S S, KWAK J H, et al. Interactive effects of synthetic nitrogen fertilizer and composted manure on ammonia volatilization from soils [J]. *Plant and Soil*, 2009, 325: 187-196.
- [22] 靳红梅, 常志州, 郭德杰, 等. 追施猪粪沼液对菜地氨挥发的影响[J]. *土壤学报*, 2012, 49(1): 86-95.
- [23] 杨润, 孙钦平, 赵海燕, 等. 沼液在稻田的精确施用及其环境效应研究[J]. *农业环境科学学报*, 2017, 36(8): 1566-1572.
- [24] 王小非, 沈仕洲, 尹高飞, 等. 沼液灌溉对冬小麦-夏玉米轮作农田  $CO_2$ 、 $N_2O$  排放规律的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2017, 36(4): 783-792.
- [25] 孙国峰, 郑建初, 陈留根, 等. 沼液替代化肥对麦季  $CH_4$ 、 $N_2O$  排放及温室效应的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2012, 31(8): 1654-1661.
- [26] 王海候, 金梅娟, 陆长婴, 等. 秸秆还田模式对农田土壤碳库特性及产量的影响[J]. *自然资源学报*, 2017, 32(5): 755-764.
- [27] ZHAO Y C, WANG M Y, HU S J, et al. Economics-and policy-driven organic carbon input enhancement dominates soil organic carbon accumulation in Chinese croplands [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2018, 115(16): 4045-4050.
- [28] LU F. How can straw incorporation management impact on soil carbon storage? A meta-analysis [J]. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 2015, 20: 1545-1568.
- [29] 靳红梅, 沈明星, 王海候, 等. 秸秆还田模式对稻麦两熟农田麦季  $CH_4$  和  $N_2O$  排放特征的影响[J]. *江苏农业学报*, 2017, 33(2): 333-339.
- [30] LIU C, LU M, CUI J, et al. Effects of straw carbon input on carbon dynamics in agricultural soils: a meta-analysis [J]. *Global Change Biology*, 2014, 20(5): 1366-1381.
- [31] 潘飞飞, 唐蛟, 孙壮, 等. 沼液替代化肥对冬小麦产量的影响[J]. *作物杂志*, 2022, 38(3): 174-180.
- [32] 薛鹏英. 肉鸭粪肥对果蔬质量及土壤环境的影响研究 [D]. 北京: 中国农业科学院, 2022.
- [33] 高尚洁, 刘杏认, 李迎春, 等. 施用生物炭和秸秆还田对农田温室气体排放及增温潜力的影响[J]. *中国农业科学*, 2024, 57(5): 935-949.
- [34] WANG S, WANG W, CUI Y, et al. Impacts of liquid fractions from two solid-liquid separation technologies on the soil porosity, ammonia, and greenhouse gas emissions [J]. *Agronomy*, 2024, 14(1): 186.
- [35] 王晓娟, 张仁陟, 齐鹏, 等. Meta 分析有机肥施用对中国北方农田土壤  $CO_2$  排放的影响[J]. *农业工程学报*, 2019, 35(10): 99-107.
- [36] 李新华, 朱振林, 董红云, 等. 玉米秸秆不同还田方式下麦田温室气体排放特征[J]. *农业资源与环境学报*, 2016, 33(2): 176-181.
- [37] 盛海君, 牛东, 张菡茜, 等. 稻秸秆还田与腐熟剂对小麦当季温室气体排放的影响[J]. *扬州大学学报(农业与生命科学版)*, 2018, 39(2): 29-34.
- [38] 李新华, 董红云, 朱振林, 等. 秸秆还田方式对黄淮海区域小麦-玉米轮作制农田土壤周年温室气体排放的影响[J]. *土壤与作物*, 2019, 8(3): 280-287.
- [39] 张玉铭, 胡春胜, 张佳宝, 等. 农田土壤主要温室气体 ( $CO_2$ 、 $CH_4$ 、 $N_2O$ ) 的源/汇强度及其温室效应研究进展[J]. *中国生态农业学报*, 2011, 19(4): 966-975.
- [40] 赵培华. 河南省农业碳排放与经济增长的脱钩分析[J]. *江苏农业科学*, 2023, 51(22): 245-249.
- [41] 李圆圆, 何平, 茅桁. 稻田水肥管理研究进展及思考[J]. *排灌机械工程学报*, 2023, 41(8): 825-832.
- [42] 何振嘉, 贺伟, 罗林涛, 等. 基于碳中和背景的耕地质量提升路径[J]. *排灌机械工程学报*, 2023, 41(7): 723-730.
- [43] 贾明军, 夏鹏亮, 黄勇, 等. 农业碳排放研究进展及烟草农业碳计量研究展望[J]. *江苏农业科学*, 2023, 51(16): 9-17.
- [44] 谢晴, 饶旭东, 周聪, 等. 夜间增温条件下施硅稻田  $N_2O$  还原对外源氮的响应[J]. *江苏农业学报*, 2022, 38(1): 87-93.
- [45] 国家发展和改革委员会应对气候变化司. 省级温室气体清单编制指南(试行) [EB/OL]. 2011 [2021-12-11]. <http://www.cbcsd.org.cn/sjk/nengyuan/standard/home/20140113/download/shengjiwenshiqiti.pdf>.
- [46] HUIJSMANS J F M, HOL J M G, HENDRIKS M M W B. Effect of application technique, manure characteristics, weather and field conditions on ammonia volatilization from manure applied to grassland [J]. *NJAS-Wageningen Journal of Life Sciences*, 2001, 49(4): 323-342.
- [47] VANDERZAAG A, AMON B, BITTMAN S, et al. Ammonia abatement with manure storage and processing techniques [M]// REIS S, HOWARD C, SUTTON M A. Costs of ammonia abatement and the climate co-benefits. Dordrecht, Netherlands: Springer, 2015: 75-112.

- [48] 刘高远,和爱玲,杜 君,等. 有机肥替代化肥对砂姜黑土区小麦-玉米轮作系统  $\text{N}_2\text{O}$  排放的影响[J]. 中国农业科学,2023,56(16):3156-3167.
- [49] 谢立勇,叶丹丹,张 贺,等. 旱地土壤温室气体排放影响因子及减排增汇措施分析[J]. 中国农业气象,2011,32(4):481-487.
- [50] SMITH P, MARTINO D, CAI Z, et al. Policy and technological constraints to implementation of greenhouse gas mitigation options in agriculture[J]. Agriculture Ecosystems & Environment,2007,118(1):6-28.
- [51] 杨小兵,江 波,殷寒旭,等. 冬小麦田间控水对土壤  $\text{CH}_4$  和  $\text{N}_2\text{O}$  排放的影响[J]. 土壤通报,2015,46(2):471-476.
- [52] LI L, LI F, DONG Y. Greenhouse gas emissions and global warming potential in double-cropping rice fields as influenced by two water-saving irrigation modes in south China[J]. Journal of Soil Science and Plant Nutrition,2020,20(4):2617-2630.
- [53] WRAGE N, VELTHOF G L, BEUSICHEM M L V, et al. Role of nitrifier denitrification in the production of nitrous oxide[J]. Soil Biology and Biochemistry,2001,33(12):1723-1732.
- [54] ZHAO Y, ZHANG Y, LIU X, et al. Carbon sequestration dynamic, trend and efficiency as affected by 22-year fertilization under a rice-wheat cropping system[J]. Journal of Plant Nutrition and Soil Science,2016,179(5):652-660.
- [55] 常乃杰. 气候变化背景下施肥管理措施对环渤海区域主要粮食作物产量和固碳减排的影响[D]. 北京:中国农业科学院,2020.
- [56] 万小楠,赵珂悦,吴雄伟,等. 秸秆还田对冬小麦-夏玉米农田土壤固碳、氧化亚氮排放和全球增温潜能的影响[J]. 环境科学,2022,43(1):569-576.

(责任编辑:石春林)