

奶牛养殖粪水还田对风沙土农田 N_2O 和NO排放的影响

杨从, 刘德燕, 黄皓文, 陈雷, 樊俊铭, 王银宏, 石孝东, 田彦锋, 丁维新

引用本文:

杨从, 刘德燕, 黄皓文, 陈雷, 樊俊铭, 王银宏, 石孝东, 田彦锋, 丁维新. 奶牛养殖粪水还田对风沙土农田 N_2O 和NO排放的影响[J]. 农业环境科学学报, 2023, 42(7): 1645–1654.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11654/jaes.2022-1071>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

有机无机肥配施对苹果园温室气体排放的影响

马艳婷, 赵志远, 冯天宇, SOMPOUVISSETThongsouk, 孔旭, 翟丙年, 赵政阳

农业环境科学学报. 2021, 40(9): 2039–2048 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-1477>

水氮耦合对设施土壤 N_2O 和NO排放的影响

吕金东, 张丽媛, 虞娜, 邹洪涛, 张玉玲, 张玉龙

农业环境科学学报. 2021, 40(6): 1366–1376 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-1217>

清液肥对滴灌棉田 NH_3 挥发和 N_2O 排放的影响

王方斌, 刘凯, 殷星, 廖欢, 孙嘉璘, 闵伟, 侯振安

农业环境科学学报. 2020, 39(10): 2354–2362 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0067>

不同遮阴处理下施肥对稻田 CH_4 和 N_2O 排放的影响

王坤, 姜运生, 邢钰媛, 刘健

农业环境科学学报. 2021, 40(2): 464–472 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0953>

厢作免耕下生态种养对稻田 CH_4 和 N_2O 排放的影响

陈璐, 陈灿, 黄璜, 任勃, 王忍, 梁玉刚, 周晶

农业环境科学学报. 2021, 40(6): 1354–1365 <https://doi.org/10.11654/jaes.2021-0015>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

杨从, 刘德燕, 黄皓文, 等. 奶牛养殖粪水还田对风沙土农田 N_2O 和 NO 排放的影响[J]. 农业环境科学学报, 2023, 42(7): 1645–1654.

YANG C, LIU D Y, HUANG H W, et al. Effects of dairy effluent on N_2O and NO emissions in aeolian sandy soil during a maize growing season[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2023, 42(7): 1645–1654.

奶牛养殖粪水还田对风沙土农田 N_2O 和 NO 排放的影响

杨从^{1,2}, 刘德燕¹, 黄皓文³, 陈雷⁴, 樊俊铭⁴, 王银宏⁴, 石孝东⁴, 田彦锋⁴, 丁维新^{1*}

(1. 土壤与农业可持续发展国家重点实验室, 中国科学院南京土壤研究所, 南京 210008; 2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 南京外国语学校, 南京 210008; 4. 内蒙古优然牧业有限责任公司, 呼和浩特 010070)

摘要:为探究规模化奶牛养殖场粪水农田就近消纳的区域适宜方案, 减缓农田温室气体排放, 建立田间原位试验, 研究奶牛养殖场粪水(液体有机肥)对风沙土 N_2O 和 NO 排放及青贮玉米产量的影响。试验设5个处理, 分别为: 不施氮肥对照(CK)、常规化肥(NPK)、奶牛养殖场固体有机肥底肥尿素追肥(SM)、液体有机肥分3次(LMT)和4次施用(LMF)。结果表明: 在氮用量 $250 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 水平下, 与 NPK 处理相比, SM 处理土壤 N_2O 和 NO 累积排放量分别降低 16.58% 和 20.31%, LMT 处理的降低幅度分别达到 39.59% 和 30.02%, LMF 处理则仅降低土壤 NO 排放量而对 N_2O 排放无显著影响。与 LMT 处理相比, 玉米生长季内 LMF 处理土壤 N_2O 和 NO 排放量分别增加了 76.92% 和 13.04%。SM 和 LMT 处理青贮玉米产量和肥料氮利用率与 NPK 处理无显著差异, 而 LMF 处理则显著降低肥料氮的利用率 31.76%。综上, 风沙土农田玉米季奶牛养殖场液体有机肥的推荐施用方案为: $250 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 氮分 1 次基肥和 2 次追肥施用, 基追比为 40%:20%:40%, 追施时间为玉米拔节期和大喇叭口期。这一方案既可以高效消纳奶牛养殖场粪水, 又可降低 N_2O 和 NO 排放, 实现青贮玉米生产与生态环境的双赢。

关键词: 奶牛粪水; 风沙土; N_2O 排放; NO 排放

中图分类号: X713; X144 文献标志码: A 文章编号: 1672-2043(2023)07-1645-10 doi:10.11654/jaes.2022-1071

Effects of dairy effluent on N_2O and NO emissions in aeolian sandy soil during a maize growing season

YANG Cong^{1,2}, LIU Deyan¹, HUANG Haowen³, CHEN Lei⁴, FAN Junming⁴, WANG Yinhong⁴, SHI Xiaodong⁴, TIAN Yanfeng⁴, DING Weixin^{1*}

(1. State Key Laboratory of Soil and Sustainable Agriculture, Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Nanjing Foreign Language School, Nanjing 210008, China; 4. Inner Mongolia Youran Animal Husbandry Co., Ltd., Hohhot 010070, China)

Abstract: In order to explore a suitable regional scheme for the nearby absorption of manure from large-scale dairy farms, and slow down the greenhouse gas emissions from farmlands, field *in-situ* experiments were conducted to investigate the effects of applying dairy effluent (liquid organic fertilizer) on N_2O and NO emissions and corn silage yields from aeolian sandy soil. The field experiment included five treatments: no fertilizer (CK), conventional chemical fertilizer (NPK), dairy manure as basal fertilizer and topdressing urea (SM), dairy effluent applied three times (LMT), and four times (LMF). The results showed that under the nitrogen rate of $250 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, compared with NPK treatment, the cumulative N_2O and NO emissions of SM treatment were reduced by 16.58% and 20.31%, respectively, and the LMT treatment by 39.59% and 30.02%, respectively. However, LMF treatment only reduced soil NO emissions, and had no significant impact on N_2O emissions. Compared with LMT treatment, the N_2O and NO emissions of LMF treatment increased by 76.92% and 13.04%,

收稿日期: 2022-10-26 录用日期: 2023-01-04

作者简介: 杨从(1997—), 女, 河南商丘人, 博士研究生, 主要从事土壤碳氮循环和温室气体排放研究。E-mail: yangcong@issas.ac.cn

*通信作者: 丁维新 E-mail: wxding@issas.ac.cn

基金项目: “科技兴蒙”行动重点专项(2020-科技兴蒙-国创中心-14); 黑土地保护与利用科技创新工程专项(XDA28010302)

Project supported: The Key Program of Action Plan to Revitalize Inner Mongolia through Science and Technology (2020-KJXM-NSTIC-14); Strategic Priority Research Program of the Chinese Academy of Sciences(XDA28010302)

respectively during the maize growing season. The yield and nitrogen use efficiency of silage maize in the SM and LMT treatments were not significantly different from those under NPK, while the nitrogen use efficiency of dairy effluent was significantly reduced by 31.76% under LMF treatment. Overall, the recommended application scheme of liquid organic fertilizer in aeolian sandy soil is as follows: 250 kg·hm⁻² applied once as a base fertilizer and twice as a topdressing, the base to topdressing ratio is 40%:20%:40%, and the topdressing time is maize joint stage and big horn stage. This application mode can not only take advantage of large amounts of effluent from dairy farms, but also reduces N₂O and NO emissions, achieving a win-win situation between silage maize production and the ecological environment.

Keywords: dairy effluent; aeolian sandy soil; N₂O emission; NO emission

养殖场粪污是制约奶牛养殖业发展的重要因素之一。据统计,一头500~600 kg的成年奶牛每日排粪30~50 kg、排尿15~25 kg,产生污水15~20 L^[1],这些粪污可通过径流或下渗污染地下水,若处理不当,将会对大气环境和人类健康造成危害^[2-3]。当前,奶牛养殖场粪污的主要处置方式包括沼气发酵产气、固液分离固体堆肥、固液分离液体达标排放、还田消纳等^[4-7]。其中,粪污就近还田处理成本最低、养分价值最高,但是目前我国粪污还田比例不足40%^[8]。

N₂O是重要的温室气体之一,可导致全球变暖并破坏臭氧层^[9]。NO在大气中易氧化成NO₂,在太阳紫外线照射下二者可与碳氢化合物反应产生光化学烟雾^[10]。农田土壤是氮氧化物的重要排放源^[11],有机肥种类、用量和施肥方式通过影响土壤中硝化和反硝化作用改变N₂O或NO排放^[12]。Pereira等^[13]的室内培养试验发现,与化肥相比,牛粪处理降低土壤NO排放量80%,但对N₂O排放无影响。牛粪块的大小对N₂O排放也有影响,Tang等^[14]发现牛粪块尺寸越小,单位作物产量的N₂O排放量及N₂O累积排放量越低。陈哲等^[15]的田间试验表明,与化肥相比,猪粪与化肥配施处理的N₂O累积排放量增加了23.1%~39.5%,但240 kg·hm⁻²和300 kg·hm⁻²施氮量之间差异不显著。Aguilera等^[16]发现,在相同施氮水平下,与化肥相比,固体猪粪对N₂O排放的降低幅度高于液体猪粪。这些结果表明有机肥类型与施用方式对农田土壤N₂O和NO排放的影响存在很大差异,需要建立针对区域土壤和气候特点的粪污还田技术,实现奶牛养殖粪污部分或全部替代化肥。

第五次全国荒漠化和沙化监测结果显示,我国沙化土地面积约172万km²,占国土面积的18%,但其土壤有机质含量低于1.5%^[17],易跑水跑肥,养分供应严重不足。为提高作物产量,不得不大量施用化肥^[18]。对东北443个农户的入户调查结果表明,玉米季氮肥用量已经达到350 kg·hm⁻²^[19],这不仅增加成本,而且也增加了土壤N₂O和NO排放^[20]。目前,国内外研究

更多关注固体有机肥种类和用量对N₂O排放的影响,而关于养殖场液态粪水还田如何影响含氮气体(N₂O和NO)排放及区域适宜的施用方式为何,已成为需要解决的科学问题。为了实现规模化奶牛养殖场粪污农田就近消纳,减少其对环境的污染,本研究于2021年在辽宁省彰武县阜新优然牧业有限责任公司农场建立田间试验,探究粪污施用方式对土壤N₂O和NO排放、青贮玉米产量等的影响,以期为奶牛养殖场种养一体化提供技术支撑。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

田间试验位于辽宁省彰武县西六家子镇新屯子村的阜新优然牧业有限责任公司农场(42°23′24″N, 122°32′24″E)。彰武县地处科尔沁沙地南缘,海拔57~314 m,属温带季风大陆性气候,年均气温7.4℃,年均降水489 mm,降水主要集中在7—8月。全县风沙土面积占33.90%,耕层(0~20 cm)土壤性质为:pH 6.70、有机碳2.86 g·kg⁻¹、总氮0.29 g·kg⁻¹、有效磷(P₂O₅)96.02 mg·kg⁻¹、速效钾(K₂O)158.98 mg·kg⁻¹、砂粒含量85.06%。种植作物为青贮玉米,一年一熟。

1.2 试验设计

田间试验设5个处理:不施肥对照(CK)、常规化肥(NPK)、固体有机肥+追施化肥(SM)、液体有机肥1次基施2次追施(LMT)、液体有机肥1次基施3次追施(LMF)。小区面积3 m×7 m,每个处理4次重复,随机区组排列。化肥为尿素、过磷酸钙和硫酸钾,液体有机肥是奶牛养殖场固液分离后排入氧化塘发酵后的液态粪水,固体有机肥是固液分离后的固态粪肥经过4个月堆腐发酵而成。氮肥用量为250 kg·hm⁻²、磷肥(P₂O₅)用量为75 kg·hm⁻²、钾肥(K₂O)用量为60 kg·hm⁻²。基施时,固体和液体有机肥中氮含量分别为13.35、0.74 g·kg⁻¹,磷含量分别为3.18、0.06 g·kg⁻¹,钾含量分别为12.76、1.38 g·kg⁻¹。各处理固体和液体有机肥用量见表1。磷肥和钾肥作为基肥一次性施入,

表1 玉米季不同处理肥料施用时间和用量(kg·hm⁻²,以N计)Table 1 Time and amount of fertilizer applied in different treatments in maize season(kg·hm⁻²,calculated by N)

处理 Treatment	基肥 Basal		追肥 Topdressing				N总用量 N total application
	尿素 Urea	有机肥 Organic fertilizer	尿素 Urea	有机肥 Organic fertilizer			
			拔节期	拔节期	大喇叭口期	抽雄期	
			Jointing stage	Jointing stage	Big flare stage	Abstraction stage	
CK	0	0	0	—	—	—	0
NPK	100	0	150	—	—	—	250
SM	0	100	150	—	—	—	250
LMT	0	100	—	50	100	—	250
LMF	0	75	—	50	75	50	250

固体和液体有机肥处理中带入的磷或钾不足时,用过磷酸钙或硫酸钾补充。基肥于播种当日均匀撒入小区,然后立即翻入0~20 cm耕层。液体有机肥则喷洒于土壤表面。施肥和播种时间为2021年7月5日,追肥时间分别为2021年8月6日、8月24日和9月3日。

1.3 N₂O和NO排放通量测定

土壤N₂O和NO排放通量采用静态箱-气相色谱法测定。播种前,将采样底座(60 cm×20 cm)预先埋入10 cm深度土壤。底座上方设有高5 cm、内径5 cm的凹槽,用于储水密封。特制不锈钢采样箱^[21]尺寸为60 cm×20 cm×15 cm,其顶部设有两个端口:一个用于测定气室内温度,用安装有温度计的橡胶塞塞住,并涂上硅胶密封;另一个用于采集气体,连接有长10 cm、内径2 mm的硅胶管,硅胶管另一端安装三通阀,采气时与注射器连接。采集气体样品时,将采样箱轻轻放置于底座凹槽中,并用水密封,于密封后的第0、10、20、30分钟分别用注射器抽取气室内气体样品40 mL,立即注入已抽成真空的钢化玻璃瓶内,带回实验室分析N₂O浓度。在采气箱密封的第0、30分钟,用1 000 mL玻璃注射器抽取2 L气体,注入真空的Teflon气袋中,密封后带回实验室立即分析NO浓度。

N₂O浓度用气相色谱分析仪(Agilent 7890, Shimadzu GC-14B)测定,检测器为⁶³Ni电子捕获检测器(ECD)。色谱柱为80/100目Porapak Q填充柱。进样器、检测器和填充柱的温度分别为100、300℃和65℃。载气为氩甲烷(95%氩气+5%甲烷),流速40 mL·min⁻¹,反吹气为高纯氮气。N₂O标准气体由国家标准物质中心提供。NO气体浓度用化学发光NO_x分析仪(Model 42i, Thermo Fisher Scientific Inc)检测。

1.4 土壤样品采集和参数测定

每次采集气体样品时,记录5 cm和10 cm处土壤

温度,用时域反射仪(TDR)测定5 cm处土壤体积含水量,并换算为土壤孔隙含水率(WFPS,%)^[22]。同时,用直径5 cm的土钻多点采集各小区耕层(0~20 cm)土壤样品,混合均匀后用四分法留出一份代表样,于实验室测定土壤无机氮(NH₄⁺-N、NO₃⁻-N)含量。土壤经2 mol·L⁻¹ KCl提取(土水比1:5),25℃恒温振荡60 min,过滤后用流动注射分析仪(Skalar, 荷兰)测定无机氮含量。

青贮产量和吸氮量测定:玉米生长至蜡熟期时,距地面以上20 cm进行全株收获,称量法获得青贮鲜质量,各小区用五点取样法取5棵植株用于测定株高、茎粗,随机取出3颗代表性植株轧碎烘干至质量恒定,计算干质量。整株粉碎后混合均匀,采用硫酸-混合加速剂-蒸馏法测定总氮含量。

1.5 数据处理

土壤N₂O和NO排放通量用公式(1)计算:

$$F = \rho \times h \times \frac{\Delta c}{\Delta t} \times \frac{273}{273 + T} \times 60 \quad (1)$$

式中: F 为N₂O或NO排放通量(以N计), $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$; ρ 为标准状态下N₂O或NO密度,分别为1.25、1.339 kg·m⁻³; h 为采气箱高度,0.15 m; $\Delta c/\Delta t$ 为采气箱内N₂O或NO气体浓度的变化率,10⁻⁹·h⁻¹; T 为采气箱内温度,℃;60用于单位转换。

土壤N₂O和NO累积排放量采用公式(2)计算:

$$E_c = \sum \left(\frac{F_{i+1} + F_i}{2} \right) \times (t_{i+1} - t_i) \times 24 \times 10^{-5} \quad (2)$$

式中: E_c 为N₂O或NO累积排放量(以N计),kg·hm⁻²; i 为第 i 次气体采样; $t_{i+1}-t_i$ 为两次相邻测定间隔的时间,d;24×10⁻⁵用于单位转换。

肥料氮诱导的N₂O和NO排放系数(F_E ,%)用公式(3)计算:

$$F_E = \frac{F_N - F_{CK}}{U_N} \times 100\% \quad (3)$$

式中: F_N 和 F_{CK} 分别为施肥和对照处理 N_2O 或 NO 的累积排放量, $kg \cdot hm^{-2}$; U_N 为施氮量, $kg \cdot hm^{-2}$ 。

肥料氮利用率($E_N, \%$)用公式(4)计算:

$$E_N = \frac{A_N - A_{CK}}{U_N} \times 100\% \quad (4)$$

式中: A_N 和 A_{CK} 分别为施肥处理和对照处理的作物总吸氮量, $kg \cdot hm^{-2}$; U_N 为施氮量, $kg \cdot hm^{-2}$ 。

使用 Excel 2010 进行数据处理, Origin 2018 进行制图。应用 SPSS 26.0 进行单因素方差分析, 方差分析达到显著性水平 ($P < 0.05$) 后采用 LSD 法进行处理间多重比较。 N_2O 或 NO 排放通量与环境因子间的关系采用 Pearson 相关性分析。

2 结果与分析

2.1 青贮玉米产量和肥料氮利用率

施肥显著提高了青贮玉米产量和氮吸收量(图1)。与 CK 处理相比, NPK、SM、LMT 和 LMF 处理玉米产量分别增加 53.29%、38.10%、51.99% 和 35.92%, 氮吸收量分别为 CK 处理的 2.44、2.22、2.31 倍和 1.98 倍。施氮处理青贮玉米产量变化范围为 $11.67 \sim 13.16 t \cdot hm^{-2}$, 各处理间无显著差异。与 NPK 处理相比, SM 和 LMT 处理玉米氮吸收量无显著变化, 但 LMF 处理显著降低。SM、LMT 与 NPK 处理的肥料氮利用率为 22.30%~26.32%, 各处理间无显著差异, 而 LMF 处理仅为 17.96%。

2.2 N_2O 和 NO 排放量

除 CK 外, 施氮处理 N_2O 排放通量在施肥后出现排放峰值, 随后逐渐降低至下一次施肥再次出现峰值(图2a)。基肥施用后, LMT 处理土壤 N_2O 排放通量最大, 为 $49.62 \mu g \cdot m^{-2} \cdot h^{-1}$, 出现在施肥后第2天; NPK 处理土壤 N_2O 排放通量在施肥后第10天达到峰值, 为 $48.23 \mu g \cdot m^{-2} \cdot h^{-1}$; LMF 处理的 N_2O 排放峰值为 $30.65 \mu g \cdot m^{-2} \cdot h^{-1}$; SM 处理未出现明显 N_2O 排放峰。第一次追肥后, SM 处理的 N_2O 排放通量最大, 达到 $63.98 \mu g \cdot m^{-2} \cdot h^{-1}$ 。第二次追肥后由于 LMT 处理的液态有机肥用量高于 LMF 处理, N_2O 排放通量显著高于 LMF 处理。第三次追肥后 LMF 处理的 N_2O 排放通量达到整个生长季的最大值 $92.60 \mu g \cdot m^{-2} \cdot h^{-1}$ 。

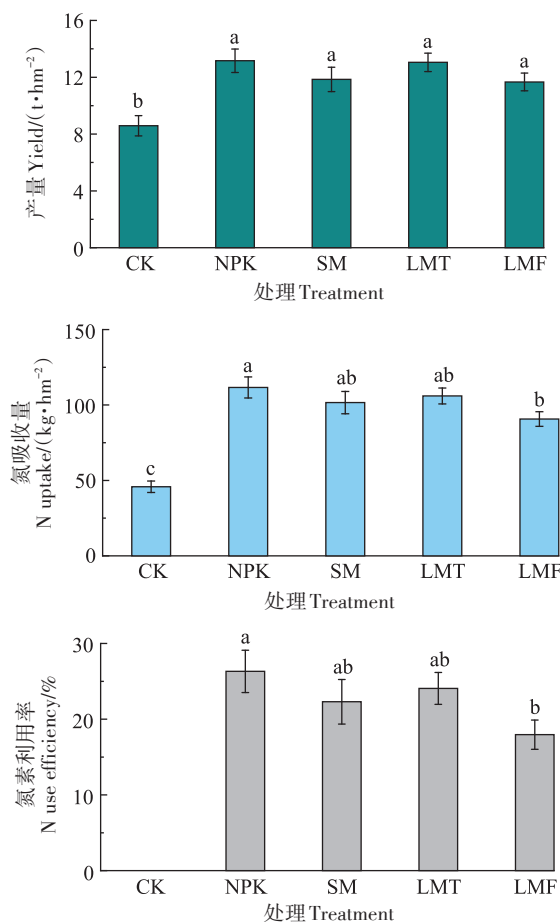
玉米生长季土壤 NO 排放通量的变化特征与 N_2O 相似(图2b)。LMT 和 LMF 处理的 NO 排放峰值出现在基肥施用后第4天, 分别为 $225.57 \mu g \cdot m^{-2} \cdot h^{-1}$ 和 $193.28 \mu g \cdot m^{-2} \cdot h^{-1}$, NPK 处理的 NO 排放峰出现在基肥后第7天, 为 $182.16 \mu g \cdot m^{-2} \cdot h^{-1}$ 。在第一次追肥后的

第3天, LMT 和 LMF 处理出现 NO 排放峰, 而 NPK 和 SM 处理的排放峰出现在第9天, NPK 处理的峰值为 $259.34 \mu g \cdot m^{-2} \cdot h^{-1}$ 。第二次追肥后 LMT 和 LMF 处理的 NO 排放峰相对较低。第三次追肥后 LMF 处理也出现 NO 排放峰值。

各施肥处理的 NO/N_2O 表现为施肥后一周迅速增大, 随后降低到 1 以下直至下一次施肥再高于 1(图2c), 表明施肥后较高的 N_2O 和 NO 排放量主要通过硝化作用产生。LMT 和 LMF 处理的 NO/N_2O 在第二次和第三次追肥后未出现明显增大, 接近 1。

2.3 N_2O 和 NO 累积排放量

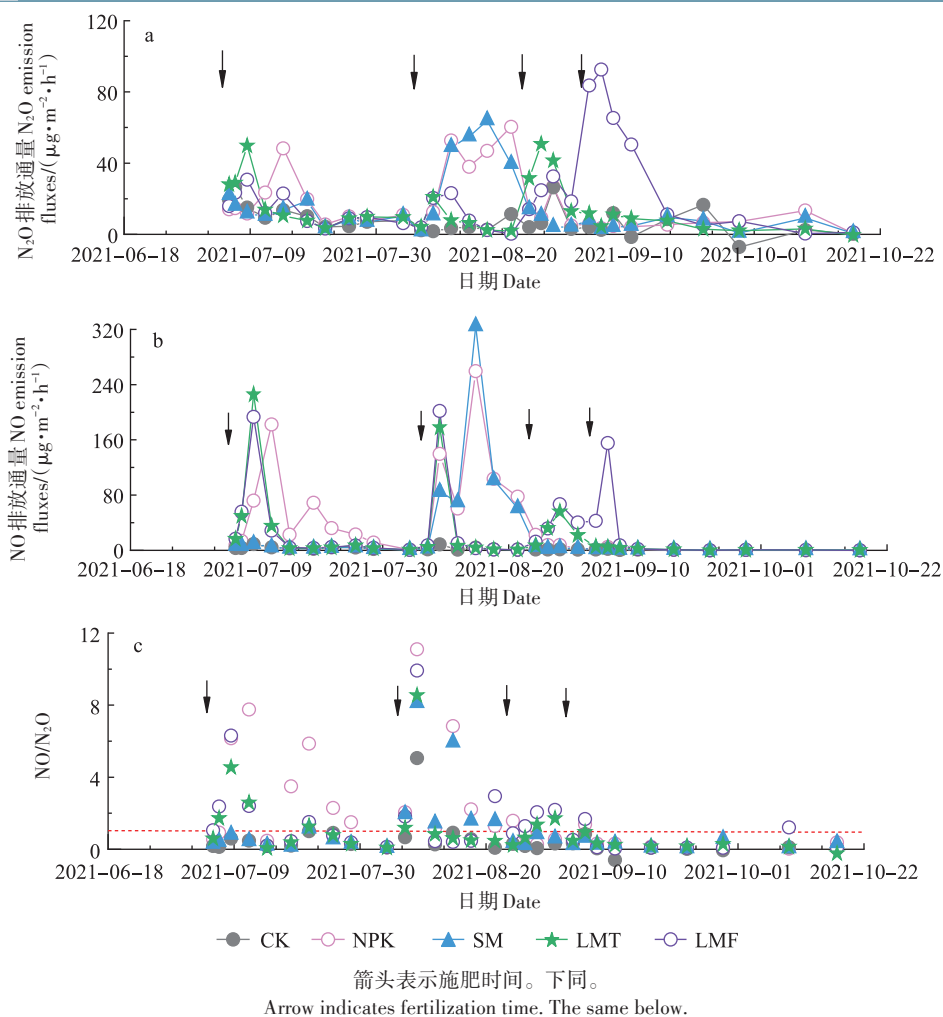
玉米生长季各处理 N_2O 累积排放量变化范围为 $0.15 \sim 0.46 kg \cdot hm^{-2}$ (表2)。LMF 处理的 N_2O 累积排放量最大, 为 $0.46 kg \cdot hm^{-2}$, 但与 NPK 处理无显著差异。LMT 处理的 N_2O 累积排放量最低 ($0.26 kg \cdot hm^{-2}$), 比



不同小写字母表示处理之间差异达到显著水平 ($P < 0.05$)。Different lowercase letters indicate significant differences between treatments ($P < 0.05$).

图1 青贮玉米产量、吸氮量和氮素利用率

Figure 1 Yield, nitrogen uptake and nitrogen use efficiency of silage maize

图2 不同处理土壤 N_2O 和 NO 排放通量Figure 2 Soil N_2O and NO emission fluxes under different treatments

LMF、NPK 和 SM 处理分别降低 43.48%、40.91% 和 29.73%。LMF 处理的 N_2O 排放系数最大,为 0.12%,其次为 NPK 处理,LMT 处理的排放系数仅为 0.04%。

整个玉米生长季各施肥处理 NO 累积排放量为 $0.46\sim 0.65 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,高于相同处理的 N_2O 累积排放量(表2)。NPK 处理 NO 累积排放量最高,达到 $0.65 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。与 NPK 处理相比,SM 处理的 NO 累积排放量降低了 20.00%,而 LMT 和 LMF 处理分别降低了 29.23% 和 20.00%。NPK 处理的 NO 排放系数为 0.24%,LMT 和 LMF 处理分别为 0.17% 和 0.19%。

玉米季各施肥处理单位产量 N_2O 累积排放量为 $20.28\sim 39.43 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,以 LMF 处理最高,比 NPK 处理增加了 18.4%,LMT 处理最低,较 NPK 处理降低了 39.1%,固体有机肥处理的单位产量 N_2O 累积排放量显著高于液体有机肥,SM 处理比 LMT 处理提高了 52.1%。各施肥处理单位产量 NO 累积排放量为

$35.21\sim 50.16 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,NPK 处理的单位产量 NO 累积排放量最高 ($50.16 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$),其次为 LMF 处理 ($44.57 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$),LMT 处理最低 ($35.21 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$)。

2.4 N_2O 和 NO 排放的影响因素

玉米生长季土壤温度变化范围为 $8.4\sim 31.0^\circ\text{C}$,平均为 22.5°C ,最高温度出现在播种后第 24 天,生长季后期温度降至 10°C 以下(图 3a)。各处理 WFPS 在整个玉米生长季的变化为 12.9%~59.1%(图 3b),施肥或降雨后 WFPS 迅速升高,基肥和前两次追肥后 LMT 处理的 WFPS 高于其他处理,3 次施肥后的峰值分别达到 59.1%、54.7% 和 52.9%。LMF 处理进行了第三次追肥,施肥后第 2 天,WFPS 达到 58.6%,显著高于其他处理。

各处理土壤 NH_4^+-N 含量范围为 $1.03\sim 253.03 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,施肥后出现峰值(图 4a)。基肥施用后,NPK 处理土壤 NH_4^+-N 含量显著高于其他处理,第 4 天达到峰

表2 不同处理土壤N₂O和NO累积排放量与排放系数

Table 2 Cumulative emission and emission coefficient of N₂O and NO in soils under different treatments

处理 Treatment	累积排放量 Cumulative emissions/(kg·hm ⁻²)		单位产量累积排放量 Cumulative emissions per unit of yield/(g·kg ⁻¹)		排放系数 Emission factor/%	
	N ₂ O	NO	N ₂ O	NO	N ₂ O	NO
CK	0.15±0.01d	0.05±0.01c	17.73±1.38c	5.71±1.17c	—	—
NPK	0.44±0.04ab	0.65±0.06a	33.30±2.30ab	50.16±5.56a	0.11±0.01ab	0.24±0.02a
SM	0.37±0.04b	0.52±0.04b	30.85±3.33b	44.01±2.17a	0.09±0.01b	0.19±0.02b
LMT	0.26±0.01c	0.46±0.03b	20.28±1.12c	35.21±1.37b	0.04±0.01c	0.17±0.01b
LMF	0.46±0.04a	0.52±0.03b	39.43±3.07a	44.57±1.13a	0.12±0.01a	0.19±0.01b

注:表中数据为平均值±标准误差(n=4);同列不同小写字母表示处理之间差异达到显著水平(P<0.05)。

Note: Data in the table are represented with mean±standard error (n=4); Different letters in the same column indicate significant differences among treatments at P<0.05.

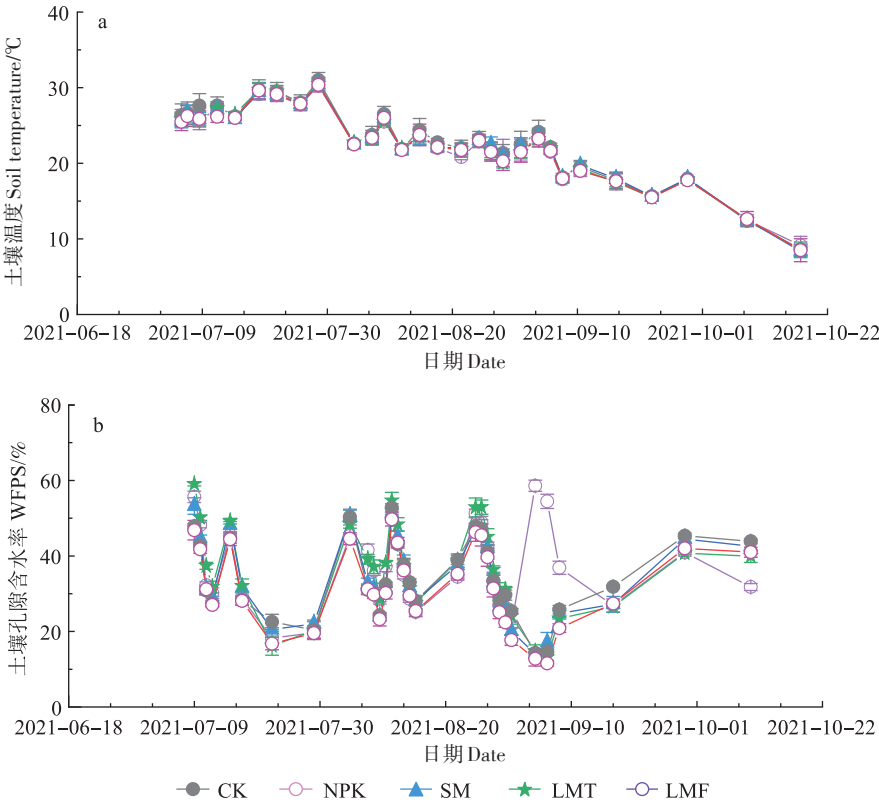


图3 不同处理土壤温度和土壤孔隙含水率

Figure 3 Soil temperature and soil pore water content under different treatments

值(140.19 mg·kg⁻¹)。第一次追肥1 d后,SM处理土壤NH₄⁺-N含量最高,为219.38 mg·kg⁻¹;NPK处理次之,为148.84 mg·kg⁻¹。第二次追肥后第2天,LMT和LMF处理土壤NH₄⁺-N含量显著高于其他处理,分别为200.79 mg·kg⁻¹和147.54 mg·kg⁻¹;第三次追肥后LMF处理土壤NH₄⁺-N含量高于其他处理。NPK和SM处理土壤NH₄⁺-N含量分别平均为47.24 mg·kg⁻¹和39.45 mg·kg⁻¹,显著高于LMT和LMF处理。土壤NO₃⁻-N含量变化范围为0~38.57 mg·kg⁻¹,亦表现为施肥后出现峰值

(图4b),各施肥处理土壤NO₃⁻-N平均含量为8.61~10.88 mg·kg⁻¹,不同施肥处理间无显著差异。

相关分析表明,除CK处理NO排放通量与土壤温度呈显著正相关外,其余各施肥处理N₂O和NO排放通量与土壤温度间无相关关系(表3)。液体有机肥处理的N₂O排放通量与土壤WFPS存在较高相关性,LMF处理达到显著相关。LMT处理的N₂O排放通量与土壤NH₄⁺-N含量显著正相关,CK、SM和LMF处理的N₂O排放通量与土壤NO₃⁻-N存在显著正相关关

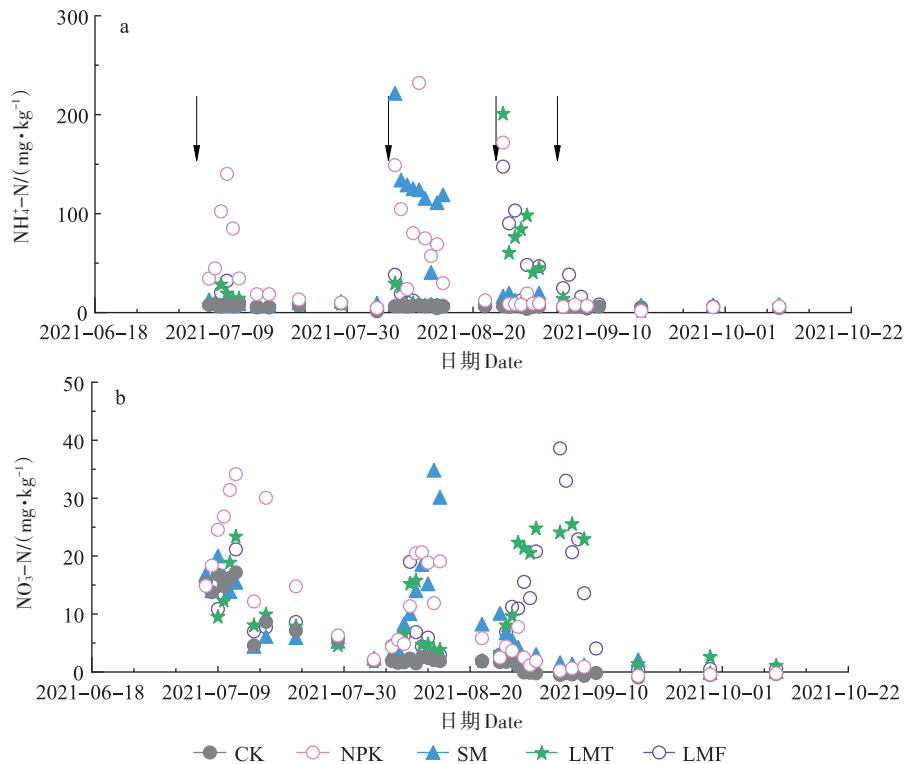


图4 土壤NO₃-N和NH₄-N含量的动态变化
Figure 4 Dynamic changes of NO₃-N and NH₄-N contents in soil

系。NPK和SM处理的NO排放通量与土壤NO₃-N也存在显著正相关关系。

3 讨论

3.1 有机肥对N₂O和NO排放的影响

玉米季常规化肥处理的N₂O排放系数为0.11%，显著低于黑土区玉米种植土壤N₂O排放系数(0.45%)和我国旱地农田土壤N₂O排放系数(0.60%~0.84%)^[23]，更低于IPCC的缺省值(1%)^[24]。本研究的NO排放系数为0.24%，位居我国旱地农田NO排放系数范围的低值区(0.2%~3.5%)^[25]。土壤N₂O主要由硝化和反硝化等过程产生，NO主要来自于硝化过程^[26]。本研究土壤为风沙土，保水保肥性差，N₂O和NO排放峰期主要出现在施用化肥后，并且NO/N₂O比值大于1，表明NO和N₂O主要由硝化作用产生(图2c)，导致排放量较低。

与施化肥相比，固体有机肥处理土壤N₂O与NO累积排放量均有减少，且NO减少更显著。这与Liu等^[27]发现50%的粉状猪粪替代化学氮肥对土壤N₂O的排放无显著影响，但降低了NO排放量27.8%的研究结果一致。王树会等^[28]在华北平原的长期定位试验表明，施用固体牛粪有机肥后土壤N₂O排放量比施

表3 土壤N₂O和NO排放通量与环境因子的相关关系
Table 3 Correlation between soil N₂O and NO emission fluxes and environmental factors

处理 Treatment		5 cm 土壤温度 Temperature of soil(5 cm)	10 cm 土壤温度 Temperature of soil(10 cm)	WFPS	NH ₄ ⁺ -N	NO ₃ ⁻ -N
N ₂ O	CK	0.18	0.22	0.05	-0.26	0.61*
	NPK	0.21	0.23	0.30	0.09	0.40
	SM	0.10	0.09	0.15	0.24	0.72**
	LMT	0.25	0.23	0.43	0.60**	0.17
	LMF	-0.01	0.02	0.55*	-0.05	0.77**
NO	CK	0.61**	0.62**	-0.13	0.22	0.51
	NPK	0.34	0.32	-0.07	0.13	0.63**
	SM	0.09	0.07	-0.09	0.40	0.71**
	LMT	0.24	0.23	0.27	0.03	0.05
	LMF	0.20	0.20	0.29	-0.05	0.29

注:** $P<0.01$; * $P<0.05$ 。
Note:** $P<0.01$; * $P<0.05$ 。

用化肥降低了20%~28%;相反, Hayakawa等^[29]的研究发现, 120 kg·hm⁻²鸡粪处理的土壤N₂O排放量高于化肥处理, 而NO排放量低于化肥处理, 推测可能是鸡粪带入的有机碳刺激了土壤反硝化作用, 促进NO被进一步还原为N₂O。固体有机肥中的氮90%以有机

氮存在,有机氮的存在形态影响着矿化过程和 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的释放^[30]。在本研究中,固体有机肥处理在基肥施用后至追肥前,土壤 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 平均含量仅为 $7.07\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,此时由于硝化作用底物缺乏, N_2O 和 NO 排放峰值明显小于NPK处理,表明固体有机肥分解比较慢,减少了 N_2O 和 NO 排放。与化肥处理相同,尿素追施后土壤 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 丰富,固体有机肥处理 N_2O 排放峰值略高于NPK处理,可能部分弥补了固体有机肥基施后 N_2O 排放的减少量;相反,由于 NO 被进一步还原为 N_2O , NO 排放量相对较低。有研究表明,固体有机肥施用增加了土壤活性碳含量,且其增长速率显著高于常规施肥,当底物充足时 N_2O 排放会增加^[29,31-33],因此,整个生长季内固体有机肥与常规化肥处理的 N_2O 排放量无显著差异,但 NO 排放量显著降低。

然而,施用液体有机肥的LMT处理土壤 N_2O 和 NO 排放量显著减少,分别比常规化肥处理降低了39.59%和30.02%。在第一次拔节期追肥时,玉米生长对氮素的需求量非常大,液体有机肥中的大部分氮以 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 和尿素形态存在^[34],尿素在土壤中也很快水解为 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 被作物吸收利用。因此,从基肥至第二次追肥前土壤 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量比较低,抑制了 N_2O 及 NO 的产生和排放。直至玉米大喇叭口期追施液体有机肥,土壤 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量才有所提高,土壤 N_2O 和 NO 排放量略有增加。因此,整个生长季内,LMT处理土壤 N_2O 和 NO 排放显著低于常规化肥处理。

在氮用量相等的情况下,与LMT处理相比,LMF处理土壤 N_2O 和 NO 排放量分别增加了73.84%和13.04%。其中,基肥、第一次、第二次追肥土壤 N_2O 和 NO 的排放量未出现明显差异,但是玉米抽雄期的第三次追肥显著提高了 N_2O 和 NO 排放量,此时玉米由营养生长向生殖生长转变,对养分的需求量降低^[35],施肥后土壤无机氮含量显著增加(图4)。加上此时施肥后土壤WFPS超过60%, $\text{NO}/\text{N}_2\text{O}$ 比值小于1,表明 N_2O 主要来自于反硝化作用。

3.2 固体和液体有机肥对产量和肥料氮利用率的影响

任科宇等^[36]的数据整合分析表明,化肥配施有机肥处理的作物产量比化肥单施的作物产量平均增加4.7%,其中小麦、玉米和水稻的增产率分别为5.6%、7.6%和4.5%。傅松等^[37]发现,10%有机肥替代化肥增产效果最高。本试验中固体有机肥替代化肥未表现出明显的增产效果,这可能是由于氮素用量相对较大,试验时间较短,且固体有机肥的养分释放具有缓

效性和长效性^[38],需要一定时间才能体现肥效。液体有机肥分1次基施和3次追施(LMF),尽管与常规化肥处理相比青贮玉米产量未出现显著下降,但是氮素吸收量显著减少,肥料氮利用率降低。这可能是由于在玉米抽雄期追施液体有机肥,此时玉米吸收氮素较少,而前3次施用的液体有机肥量造成玉米生长所需氮素不足。淋溶是氮素损失的主要途径之一,肥料的施用会引起地表水或地下水污染,从而带来一系列环境问题^[39-40]。本研究利用田间原位淋溶试验(Lysimeter)同步监测了整个玉米生长季的氮素淋溶量,结果表明等量氮素施用情况下固体和液体有机肥处理的氮素淋溶损失量较仅施化肥处理略有增加,未出现显著差异,这与Fan等^[41]对我国华北平原玉米-小麦轮作系统的研究结果相一致,但氮素淋溶量与之相比显著增加。本研究试验地点的土壤类型为风沙土,砂粒含量超过85%,土壤保水保肥能力差,整个玉米季化肥处理的氮素淋溶量达到 $48.2\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,而仅化肥处理的黏质土壤中氮素淋溶量为 $7.64\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ^[41]。施用液体有机肥处理的氮素淋溶量有所增加,主要是由于液体有机肥自身水分的带入加快了氮素向下迁移^[42]。同时,随着液体有机肥施用次数的增加,氮素淋溶损失量减少,这可能与试验前期液体有机肥施用量少而淋溶量大有关,但目前只开展了一个生长季的田间试验,后续将继续开展相关研究。基于本研究,推荐液体有机肥分为基施及拔节期和大喇叭口期追施,氮用量比例为40%:20%:40%。

4 结论

(1)对青贮玉米产量和含氮气体排放的研究发现,在等氮用量条件下,奶牛养殖场粪污作为有机肥替代化肥施用可发挥化肥的同等肥效,青贮玉米产量与化肥单施相当。

(2)施用固体有机肥显著降低了玉米季土壤 NO 排放量,但 N_2O 排放量降低不显著;液体有机肥分1次基施和2次追施可显著降低土壤 N_2O 和 NO 排放量。

(3)针对风沙土农田,规模化奶牛养殖场液体粪水还田的最优方式是:在氮用量 $250\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 条件下,分基施及玉米拔节期和大喇叭口期追施,氮用量比例为40%:20%:40%。

致谢:衷心感谢阜新优然牧业有限责任公司赵文场长、王祥勇场长等在研究期间给予的支持和帮助。

参考文献:

- [1] 张元, 项勋, 熊海谦, 等. 奶牛粪污资源化利用技术研究[J]. 现代农业科技, 2017(3): 168-170. ZHANG Y, XIANG X, XIONG H Q, et al. Research on cow waste resource utilization technology[J]. *Modern Agricultural Sciences and Technology*, 2017(3): 168-170.
- [2] 丘通强, 马双念, 毛星辰, 等. 奶牛养殖废水处理技术现状及进展[J]. 广东化工, 2021, 48(10): 137-139. QIU T Q, MA S N, MAO X C, et al. Status and progress of wastewater treatment technology for dairy farming wastewater[J]. *Guangdong Chemical Industry*, 2021, 48(10): 137-139.
- [3] 胡天印, 陈玲, 胡玉敏, 等. 奶牛粪便综合利用的技术研究[J]. 宁波大学学报, 2004, 17(3): 357-360. HU T Y, CHEN L, HU Y M, et al. Study report on the technology of synthetical use of excrement of cows[J]. *Journal of Ningbo University*, 2004, 17(3): 357-360.
- [4] 张海涛, 任景明. 我国畜禽养殖业污染防治问题及国外经验启示[J]. 环境影响评价, 2015, 37(6): 30-33. ZHANG H T, REN J M. Pollution prevention issues and foreign experience of livestock production in China[J]. *Environmental Impact Assessment*, 2015, 37(6): 30-33.
- [5] MISHRA U S, PANDEY R C, PRADEEP K S. Effect of integrated use of organic manure and fertilizers on the growth, yield and quality of cabbage (*Brassica oleracea* var. *capitata* L.) cultivars golden acre[J]. *New Agriculturist*, 2013, 23(1): 99-102.
- [6] 刘建华. 牛粪污染的无害化处理和资源化利用[J]. 农产品加工, 2019(6): 77-79. LIU J H. Cow dung pollution and harmless treatment and resource utilization[J]. *Processing of Agricultural Products*, 2019(6): 77-79.
- [7] 朱晓春, 杜晓丹, 贾向春, 等. 规模化奶牛牧场粪污资源化利用标准化研究[J]. 中国标准化, 2019(21): 179-183. ZHU X C, DU X D, JIA X C, et al. Study on standardization of manure pollution resource utilization in large-scale dairy farm[J]. *China Standardization*, 2019(21): 179-183.
- [8] 刘晓永, 李书田. 中国畜禽粪尿养分资源及其还田的时空分布特征[J]. 农业工程学报, 2018, 34(4): 1-14. LIU X Y, LI S T. Temporal and spatial distribution of nutrient resource from livestock and poultry feces and its returning to cropland[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2018, 34(4): 1-14.
- [9] KRAUSE H M, THONAR C, ESCHENBACH W, et al. Long term farming systems affect soils potential for N_2O production and reduction processes under denitrifying conditions[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2017, 114: 31-41.
- [10] ZHOU X H, ZHAO Y, YANG H Y, et al. Transformation of organic nitrogen fractions with different molecular weights during different organic wastes composting[J]. *Bioresource Technology*, 2018, 262: 221-228.
- [11] BAGGS E M, PHILIPPOT L. Microbial terrestrial pathways to nitrous oxide[M]. *Nitrous Oxide and Climate Change*, 2010: 8-39.
- [12] KOPONEN H T, DURAN C E, MALJANEN M, et al. Temperature responses of NO and N_2O emissions from boreal organic soil[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2006, 38(7): 1779-1787.
- [13] PEREIRA J A, TRINDADE H. Impact of the intensity of milk production on ammonia and greenhouse gas emissions in portuguese cattle farms[J]. *Spanish Journal of Agricultural Research*, 2015, 13(4): 21.
- [14] TANG R G, DU Z Y, ZHU G D, et al. Yak dung pat fragmentation decreases yield-scaled growing-season nitrous oxide emissions in an alpine steppe on the Qinghai-Tibetan Plateau[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2021, 57: 1103-1115.
- [15] 陈哲, 陈媛媛, 高霁, 等. 不同施肥措施对黄河上游灌区油菜田土壤 N_2O 排放的影响[J]. 应用生态学报, 2015, 26(1): 129-139. CHEN Z, CHEN Y Y, GAO J, et al. Effects of different fertilization measures on N_2O emission in oil sunflower field in irrigation area of upper Yellow River[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2015, 26(1): 129-139.
- [16] AGUILERA E, LASSALETTA L, SANZ-COBENA A, et al. The potential of organic fertilizers and water management to reduce N_2O emissions in Mediterranean climate cropping systems. A review[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2013, 164(1): 32-52.
- [17] 全国土壤普查办公室. 中国土壤[M]. 北京: 中国农业出版社, 1995. National Soil Census Office. *Soil of China*[M]. Beijing: China Agriculture Press, 1995.
- [18] EDMEADES D C. The long-term effects of manures and fertilizers on soil productivity and quality: a review[J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2003, 66(2): 165-180.
- [19] 高强, 冯国忠, 王志刚. 东北地区春玉米施肥现状调查[J]. 中国农学通报, 2010, 26(14): 229-231. GAO Q, FENG G Z, WANG Z G. Present situation of fertilizer application on spring maize in northeast China[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2010, 26(14): 229-231.
- [20] 巨晓棠, 谷保静. 我国农田氮肥施用现状、问题及趋势[J]. 植物营养与肥料学报, 2014, 20(4): 783-795. JU X T, GU B J. Status-que, problems and trend of nitrogen fertilization in China[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2014, 20(4): 783-795.
- [21] DING W X, CAI Y J, CAI Z C, et al. Diel pattern of soil respiration in amended soil under maize cultivation[J]. *Atmospheric Environment*, 2006, 40: 3294-3305.
- [22] XIANG J, LIU D Y, DING W X, et al. Effects of biochar on nitrous oxide and nitric oxide emissions from paddy field during the wheat growth season[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2015, 104: 52-58.
- [23] 张楠, 苗淑杰, 乔云发, 等. 东北农田黑土 N_2O 排放研究进展[J]. 土壤学报, 2022, 59(4): 899-900. ZHANG N, MIAO S J, QIAO Y F, et al. N_2O emissions from black soils in northeast China[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2022, 59(4): 899-900.
- [24] IPCC. Revised 1996 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories[R]. Switzerland: Intergovernmental Panel on Climate Change, 1996.
- [25] 李明, 梁旺国, 郑循华, 等. 晋南地区典型盐碱地棉田的NO排放特征[J]. 气候与环境研究, 2009, 14(3): 318-328. LI M, LIANG W G, ZHENG X H, et al. Characteristics of NO emission from typical saline soil of southern Shanxi cotton sand[J]. *Climatic and Environmental Research*, 2009, 14(3): 318-328.
- [26] 蔡延江, 丁维新, 朱安宁, 等. 免耕对华北平原潮土 N_2O 和 CO_2 排放

- 的影响[J]. 生态与农村环境学报, 2011, 27(5): 1-6. CAI Y J, DING W X, ZHU A N, et al. Effects of non-tillage on N_2O and CO_2 emissions from sandy loam soil in the North China Plain[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2011, 27(5): 1-6.
- [27] LIU D Y, SUN H Y, LIAO X, et al. N_2O and NO emissions as affected by the continuous combined application of organic and mineral N fertilizer to a soil on the North China Plain[J]. *Agronomy*, 2020, 10(12): 1965.
- [28] 王树会, 陶雯, 梁硕, 等. 长期施用有机肥情景下华北平原旱地土壤固碳及 N_2O 排放的空间格局[J]. 中国农业科学, 2022, 55(6): 1159-1171. WANG S H, TAO W, LIANG S, et al. The spatial characteristics of soil organic carbon sequestration and N_2O emission with long-term manure fertilization scenarios from dry land in North China Plain[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2022, 55(6): 1159-1171.
- [29] HAYAKAWA A, AKIYAMA H, SUDO S, et al. N_2O and NO emissions from an Andisol field as influenced by pelleted poultry manure[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2009, 41(3): 521-529.
- [30] LIU C, WANG K, ZHENG X. Responses of N_2O and CH_4 fluxes to fertilizer nitrogen addition rates in an irrigated wheat-maize cropping system in northern China[J]. *Biogeosciences*, 2012, 9(2): 839-850.
- [31] LIANG B C, GREGORICH E G, SCHNITZER M, et al. Carbon mineralization in soils of different textures as affected by water-soluble organic carbon extracted from composted dairy manure[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 1996, 21(1): 10-16.
- [32] ROCHETTE P, VAN BOCHOVE E, PREVOST D, et al. Soil carbon and nitrogen dynamics following application of pig slurry for the 19th consecutive year II. Nitrous oxide fluxes and mineral nitrogen[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2000, 64(4): 1396-1403.
- [33] DING W X, LUO J F, LI J, et al. Effect of long-term compost and inorganic fertilizer application on background N_2O and fertilizer-induced N_2O emissions from an intensively cultivated soil[J]. *Science of the Total Environment*, 2013, 465: 115-124.
- [34] 王伟帆, 李斐, 红梅, 等. 氮肥用量和脲酶抑制剂对滴灌马铃薯田氧化亚氮排放和氨挥发的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2018, 24(3): 693-702. WAN W F, LI F, HONG M, et al. Effects of nitrogen rate and urease inhibitor on N_2O emission and NH_3 volatilization in drip irrigated potato fields[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2018, 24(3): 693-702.
- [35] 姬景红, 李玉影, 刘双全, 等. 平衡施肥对玉米产量、效益及土壤-作物系统养分收支的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2010(4): 37-41. JI J H, LI Y Y, LIU S Q, et al. The effect of balanced fertilization on yield, benefit of corn and nutrient balance[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2010(4): 37-41.
- [36] 任科宇, 徐明岗, 张露, 等. 我国不同区域粮食作物产量对有机肥施用的响应差异[J]. 农业资源与环境学报, 2021, 38(1): 143-150. REN K Y, XU M G, ZHANG L, et al. Response of grain crop yield to manure application in different regions of China[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2021, 38(1): 143-150.
- [37] 傅松, 傅树斌, 王丁祥, 等. 商品有机肥替代部分化肥对土壤养分和对土壤养分和马铃薯产量的影响[J]. 福建农业科技, 2019(12): 60-64. FU S, FU S B, WANG D X, et al. Effects of partial replacement of fertilizer with organic fertilizer on soil nutrient and potato yield[J]. *Fujian Academy of Agricultural Science*, 2019(12): 60-64.
- [38] 马凡凡, 邢素林, 甘曼琴, 等. 有机肥替代化肥对水稻产量、土壤肥力及农田氮磷流失的影响[J]. 作物杂志, 2019, 35(5): 89-96. MA F F, XING S L, GAN M Q, et al. Effects of organic substituting for chemical fertilizer on rice yield, soil fertilizer and nitrogen and phosphorus loss in farmland[J]. *Crops*, 2019, 35(5): 89-96.
- [39] GIOIA P, BASSO B, PRUNEDDU G, et al. Impact of manure and slurry applications on soil nitrate in a maize-triticale rotation: field study and long term simulation analysis[J]. *European Journal of Agronomy*, 2012, 38: 43-53.
- [40] GU L, LIU T, WANG J, et al. Lysimeter study of nitrogen losses and nitrogen use efficiency of northern Chinese wheat[J]. *Field Crops Research*, 2016, 188: 82-95.
- [41] FAN J L, XIAO J, LIU D Y, et al. Effect of application of dairy manure, effluent and inorganic fertilizer on nitrogen leaching in clayey fluvo-aquic soil: a lysimeter study[J]. *Science of the Total Environment*, 2017, 592: 206-214.
- [42] SORENSEN P, RUBACK G H. Leaching of nitrate and phosphorus after autumn and spring application of separated solid animal manures to winter wheat[J]. *Soil Use and Management*, 2012, 28(1): 1-11.

(责任编辑:李丹)