

牛场粪水添加外源添加物施用后对土壤氨挥发的影响

刘沐衡, 王贵云, 张彦东, 杜艳芹, 翟中葳, 刘福元, 杜会英, 张克强

引用本文:

刘沐衡, 王贵云, 张彦东, 等. 牛场粪水添加外源添加物施用后对土壤氨挥发的影响[J]. 农业环境科学学报, 2021, 40(11): 2568–2573.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11654/jaes.2021-1037>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

玉米秸秆生物炭及其老化对石灰性农田土壤氨挥发的影响

王朝旭, 陈绍荣, 张峰, 崔建国

农业环境科学学报. 2018, 37(10): 2350–2358 <https://doi.org/10.11654/jaes.2017-1727>

牛场粪水施用对华北小麦/玉米产量及氮损失的影响

赵自超, 付龙云, 李彦, 姚利, 田忠红, 井永苹, 仲子文, 王艳芹

农业环境科学学报. 2021, 40(11): 2544–2550 <https://doi.org/10.11654/jaes.2021-1161>

抑制剂NBPT/DCD不同组合对灌区碱性灌淤土中氨挥发及有效氮积累量的影响

张惠, 王志国, 张晴雯, 丁金英, 尹爱军, 左莹

农业环境科学学报. 2015(3): 606–612 <https://doi.org/10.11654/jaes.2015.03.026>

沼液在稻田的精确施用及其环境效应研究

杨润, 孙钦平, 赵海燕, 邹国元, 刘本生, 李恋卿

农业环境科学学报. 2017, 36(8): 1566–1572 <https://doi.org/10.11654/jaes.2016-1617>

不同表面分子膜材料抑制稻田氨挥发的效果及其作用途径

王梦凡, 俞映惊, 杨棋, 谢斐, 侯朋福, 杨林章, 薛利红, 孙庆业

农业环境科学学报. 2019, 38(8): 1685–1695 <https://doi.org/10.11654/jaes.2019-0657>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

刘沐衡, 王贵云, 张彦东, 等. 牛场粪水添加外源添加物施用后对土壤氨挥发影响[J]. 农业环境科学学报, 2021, 40(11): 2568–2573.

LIU M H, WANG G Y, ZHANG Y D, et al. Effects of exogenous additives in cattle farm slurry on soil ammonia volatilization after application[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2021, 40(11): 2568–2573.



开放科学 OSID

牛场粪水添加外源添加物施用后对土壤氨挥发的影响

刘沐衡¹, 王贵云¹, 张彦东², 杜艳芹², 翟中葳¹, 刘福元³, 杜会英^{1*}, 张克强¹

(1. 农业农村部环境保护科研监测所, 天津 300191; 2. 保定市徐水区农业农村局, 河北 保定 072550; 3. 新疆农垦科学院畜牧兽医研究所, 新疆 石河子 832000)

摘要: 为了控制并且减少牛场粪水还田氨挥发的产生量, 采取室内培养的方法, 研究牛场粪水添加不同外源添加物(腐植酸、硫酸、生物炭、柠檬酸)施用后对土壤氨挥发影响, 通过硼酸吸收法监测土壤氨挥发量, 筛选牛场粪水还田最优添加物以减弱土壤氨挥发。结果表明, 牛场粪水添加酸性外源添加物后施用于碱性土壤, 会降低土壤氨挥发损失, 酸性添加物对氨挥发抑制效果为柠檬酸>腐植酸>硫酸; 牛场粪水中添加腐植酸处理土壤氨挥发量降低幅度达46.62%, 且在培养的第14 d全氮含量高于其他处理; 高脲酶活性可促进氨挥发增加, 增加土壤硝态氮含量。研究表明, 腐植酸作为外源添加物添加于牛场粪水还田后有利于降低土壤氨挥发量。

关键词: 牛场粪水; 添加物; 土壤; 氨挥发

中图分类号: S141 文献标志码: A 文章编号: 1672-2043(2021)11-2568-06 doi:10.11654/jaes.2021-1037

Effects of exogenous additives in cattle farm slurry on soil ammonia volatilization after application

LIU Muheng¹, WANG Guiyun¹, ZHANG Yandong², DU Yanqin², ZHAI Zhongwei¹, LIU Fuyuan³, DU Huiying^{1*}, ZHANG Keqiang¹

(1. Agro-Environmental Protection Institute, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Tianjin 300191, China; 2. Agricultural and Rural Bureau of Xushui District, Baoding, Baoding 072550, China; 3. Institute of Animal Husbandry and Veterinary Medicine, Xinjiang Academy of Agricultural Sciences, Shihezi 832000, China)

Abstract: In this study, the method of indoor cultivation was adopted to study the addition of different exogenous additives (humic acid, sulfuric acid, biochar, and citric acid) to the slurry of cattle farms. The boric acid absorption method was used to monitor the ammonia volatilization in the soil to determine the best slurry additives to reduce ammonia volatilization. The results showed that the addition of acidic exogenous additives to cattle farm slurry under alkaline soil conditions reduced the loss of ammonia in the soil. The inhibitory effect of acid additives on ammonia volatilization was in the order of citric acid>humic acid>sulfuric acid. The ammonia volatilization decreased by 46.62% and the total nitrogen content on the 14th day of culture in the humic acid treatment was higher than that of other treatments. High urease activity could promote the increase in ammonia volatilization and increase the soil nitrate nitrogen content. Studies have shown that adding humic acid as an exogenous additive in cattle farm slurry application to the field is beneficial to reduce the amount of soil ammonia volatilization, and plays an important role in protecting the soil ecological environment and improving soil fertility.

Keywords: cattle farm slurry; additives; soil; ammonia volatilization

收稿日期: 2021-09-07 录用日期: 2021-10-08

作者简介: 刘沐衡(1997—), 男, 内蒙古赤峰人, 硕士研究生, 从事农业资源利用研究。E-mail: 604279783@qq.com

王贵云与刘沐衡同等贡献。

*通信作者: 杜会英 E-mail: duhuiying@caas.cn

基金项目: 兵团重点领域科技攻关计划项目(2019AB028); 天津市奶牛(肉羊)产业技术体系创新团队建设项目(ITTCRS2021000); 中国农业科学院科技创新工程

Project supported: The XPCC Plans to Tackle Key Science and Technology Problems in Key Areas (2019AB028); Innovation Team of Tianjin Cattle Research System(ITTCRS2021000); Science and Technology Innovation Project of Chinese Academy of Agricultural Sciences

养殖粪水还田是促进种养结合、合理利用畜禽废弃物的关键。近年来在我国畜牧业快速发展的进程中,粪水资源综合利用率低、施用不合理造成二次污染问题逐渐显现。畜禽养殖粪水中的氮素是作物生长的关键养分限制因子。牛场粪水由于含有丰富的有机物料及氮素,施用后可以使作物氮表观利用率提高2.8倍,产量提高24.5%,同时降低土壤硝态氮含量,减少污染,有利于土壤氮素的转化,提高土壤的供肥能力^[1-2]。但粪水一般呈碱性,且其中含有大量铵态氮,施用于农田后会导致氨气挥发的问题^[3-4]。农田氨气挥发在造成经济损失的同时,还会在大气中与二氧化硫、氮氧化物等进行反应造成二次污染^[5-6]。降低粪水还田后所产生的氨挥发问题,对解决农业面源污染、提高粪污还田利用率有重大意义。

牛场粪水添加外源添加物再进行施用,通过促进施肥后土壤和牛场粪水中铵态氮生成铵盐,或加强土壤对铵态氮的固持作用,来减少粪水还田后产生的氨挥发量。DAVID等^[7]的研究表明,牛场粪水添加酸性添加物可显著促进土壤中铵态氮生成以及植物表观氮利用率的提升。生物炭的吸附性可以在一定程度上限制反硝化作用,与粪肥混合后可对氨挥发产生抑制,研究表明动物粪便在贮存过程中添加10%生物炭可使氨累积挥发量降低36.3%^[4],但也有研究表明由于生物炭呈碱性,会造成氨气挥发量增加^[8-9]。不同添加物添加至肥水施用于土壤可使其供肥能力、供肥强度产生不同的变化。李梦瑶等^[10]的研究指出腐植酸的固氮作用也可减少施肥后土壤氨气的挥发量。

国外研究多集中于全量贮存后的粪浆酸化技术。已证明粪浆酸化技术可显著降低粪水施用过程中氨排放^[11-13],但经酸化后的粪水由于无机盐含量极大增加,施用后同时会出现一定的“烧苗”现象。而对于我国奶牛场普遍使用的粪污固液分离、分别贮存的肥料化方式^[14],如何降低还田后产生的氨挥发鲜有研究。本研究采取室内培养的方法,在牛场粪水中添加不同物质(生物炭、腐植酸、稀硫酸、柠檬酸),探究其对土壤氨挥发和土壤养分的影响,为粪水还田外源添加物提供技术支撑,实现粪水的高效资源化利用。

1 材料与方法

1.1 供试材料

供试土壤采自奶牛养殖废弃物循环利用示范基地,土壤为潮土,0~20 cm土壤理化状况为:有机质含

量13.12 g·kg⁻¹, pH 8.45,全氮含量380 mg·kg⁻¹,铵态氮含量50.03 mg·kg⁻¹,硝态氮含量20.98 mg·kg⁻¹,有效磷含量30.02 mg·kg⁻¹。

供试粪水取自基地厌氧贮存池。试验开始前一次性取出,置于PVC桶中贮存。粪水主要指标为:pH 7.97,全氮含量1 243 mg·L⁻¹,铵态氮含量714.86 mg·L⁻¹,硝态氮含量1.33 mg·L⁻¹,总磷含量121.85 mg·L⁻¹,总钾含量1 009.59 mg·L⁻¹。

1.2 试验设计

共设置7个处理,分别为:CK(不施肥处理, pH 8)、U(施用尿素, pH 8)、BS(牛场粪水, pH 8)、BSHA(牛场粪水+腐植酸, pH 8)、BSS(牛场粪水+硫酸, pH 8)、BSB(牛场粪水+生物炭, pH 8)、BSCA(牛场粪水+柠檬酸, pH 6),各处理氮带入量均为90 kg·hm⁻²,培养温度设定为25℃,含水率为60%,粪水中磷钾不足用化学肥料补齐,磷肥用过磷酸钙补齐,钾肥用氯化钾补齐。每个处理重复6次,3个重复用于计算氨挥发损失量;其他3个重复的鲜土用于测定土壤含水率、铵态氮、硝态氮含量,部分风干土用于测定pH、全氮含量。

1.3 样品采集与数据分析

本试验共培养14 d,分别在培养的第1、2、4、7、14 d取样。

氨挥发用硫酸标准溶液滴定,其计算公式为^[15]:

$$F_i = C_s \times (V_s - V_0) \times M \times 10^{-2} \times 24 / (3.14 \times r^2 \times t)$$

$$R = \sum F \times 100 / N_F$$

式中: F_i 为氨挥发速率, kg·hm⁻²·d⁻¹; C_s 为硫酸标准液的浓度, 0.005 mol·L⁻¹; V_s 为样品吸收液所需的硫酸标准液的体积, mL; V_0 为硼酸指示剂所需的稀硫酸体积, mL; M 为氮的摩尔质量, 14 g·mol⁻¹; r 为培养装置半径, m; t 为氨挥发收集时间, h; R 为氨挥发累计损失率, %; $\sum F$ 为氨挥发累积量, kg·hm⁻²; N_F 为施氮量, kg·hm⁻²。

土壤pH采用电位法,用pH计测定。土壤铵态氮和硝态氮浓度采用2 mol·L⁻¹氯化钾(KCl)浸提-比色法测定;土壤全氮采用水杨酸法,均用流动注射分析仪(FIA-6000+,北京吉天仪器有限公司)测定。土壤脲酶活性采用苯酚钠-次氯酸钠比色法,在紫外分光光度计578 nm波长处比色测定^[16]。

2 结果与分析

2.1 对土壤氨挥发速率的影响

各处理氨挥发速率如图1所示。CK处理试验期

间均无氨挥发,施肥处理均在试验第1 d后氨挥发速率达到最高,随后降低趋势迅速平缓。试验期间,施用牛场粪水处理下氨挥发量显著高于施用尿素处理。施肥后第1 d,BS、BSB处理显著高于BSHA、U、BSS、BSCA处理。试验第2 d,BSB处理仍保持较高的氨挥发量,达 $1.31 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$,其他施肥处理氨挥发速率均产生显著下降趋势。试验第4 d,BSHA及BS处理氨挥发速率在归零后出现了上涨。试验第7 d和第14 d,各施肥处理间无显著差异。除BS处理外,其他处理在第14 d均无氨挥发。

由表1可知,随着培养时间增加,施肥处理氨挥发累积量先增加后趋于稳定。在试验期间,CK处理无氨挥发。U处理仅在试验第1 d产生氨挥发;BSCA处理和BSHA处理在试验第4 d氨挥发累积量出现拐点,并且显著低于其他添加物处理。

2.2 土壤全氮含量随时间的变化

由图2可知,各施肥处理中,除BSS和BSCA处理外,U、BS、BSHA、BSB处理全氮含量均有所增加。在培养的第1 d,BSS处理和BSCA处理的全氮含量显著

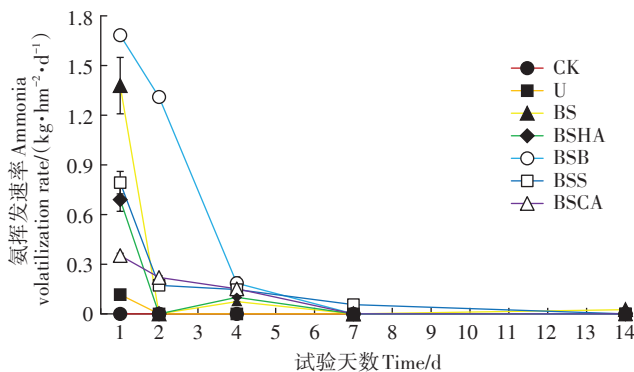


图1 不同添加物的牛场粪水施用后氨挥发速率的变化

Figure 1 Changes in ammonia volatilization rate of cattle farm manure water added with different additives after application

表1 不同添加物的牛场粪水施用后氨挥发累积排放量($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)

Table 1 Accumulated emission of ammonia volatilization after application of cattle farm slurry with different additives($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)

处理 Treatment	第1 d First day	第2 d Second day	第4 d Fourth day	第7 d Seventh day	第14 d Fourteenth day
CK	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
U	0.12	0.12	0.12	0.12	0.12
BS	1.38	1.38	1.45	1.45	1.48
BSHA	0.69	0.69	0.79	0.79	0.79
BSB	1.67	2.98	3.16	3.16	3.16
BSS	0.79	0.97	1.11	1.17	1.17
BSCA	0.35	0.57	0.72	0.72	0.72

增加,分别为 $76.78 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $76.35 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,在培养的第14 d显著低于BSHA处理。说明硫酸、柠檬酸施用初期影响了脲酶活性而减少了氮素通过氨挥发的方式流失;试验后期BSHA处理相较于BSS处理及BSCA处理两个酸性添加物处理,可显著减少氮素流失,发挥固氮作用。

2.3 土壤铵态氮和硝态氮含量的变化

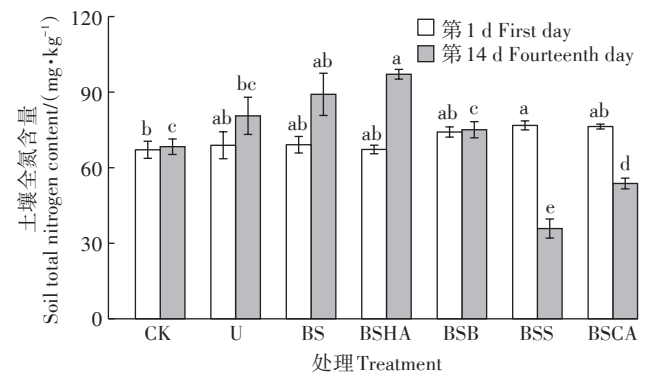
由图3(a)可知,粪水施用后第1 d,除BSS、BSCA处理外,其他施肥处理土壤铵态氮含量降低。试验第2 d,BSHA处理铵态氮含量降低不明显。试验第4 d BSS处理的铵态氮含量达到最大值,随后逐渐降低,其他处理开始趋于平稳,无显著差别。

由图3(b)可知,第2 d,除添加硫酸处理,其他处理硝态氮含量显著增加,达最大值;BSS处理在第4 d达到峰值,说明硫酸在降低pH的同时会增加土壤硝态氮含量;第4 d后各处理硝态氮含量显著降低并趋于相对稳定。到培养的第14 d,各处理的铵态氮和硝态氮含量均达最低值。

相关性分析结果如表2所示。整体氨挥发速率与土壤铵态氮和硝态氮含量呈现正相关关系($r_{\text{铵}}=0.741$ 、 $r_{\text{硝}}=0.674$),达到显著水平。

2.4 土壤pH和脲酶活性的变化

各处理pH值如图4所示,CK处理总体pH呈下降趋势,其他施肥处理在试验前后均有不同程度的上升。U处理为连续上升,施用粪水处理组土壤pH在试验中均有短暂下降现象发生。在试验第14 d,BSS处理pH值显著高于其他处理,说明在相同初始pH值条件下,施用硫酸不会显著降低土壤pH。



不同字母表示处理间差异显著($P<0.05$)。下同
Different letters indicate significant differences among different treatments ($P<0.05$). The same below

图2 不同添加物的牛场粪水施用对土壤全氮的影响

Figure 2 Effects of cattle farm slurry application with different additives on soil total nitrogen

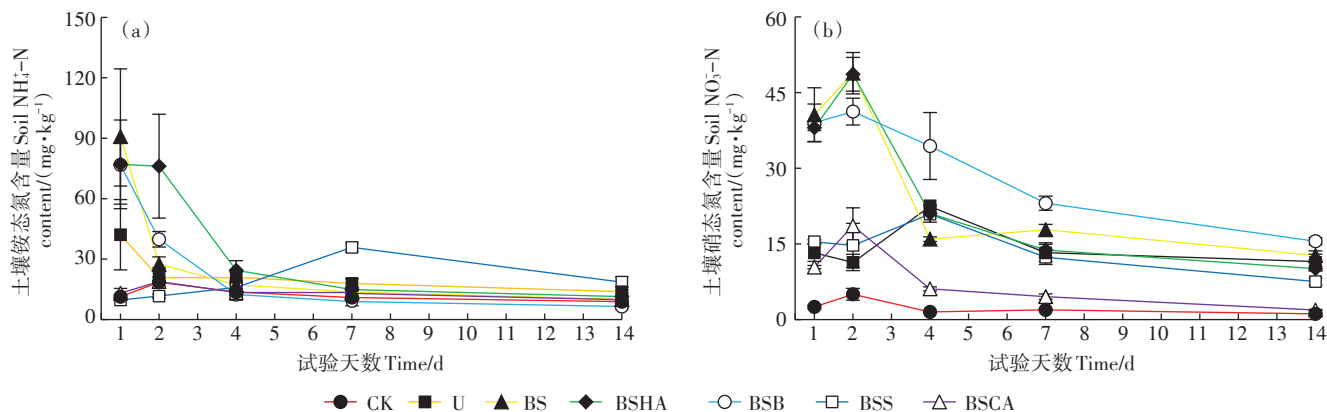


图3 土壤铵态氮及硝态氮的变化特征

Figure 3 Variation characteristics of soil $\text{NH}_4^+\text{-N}$ and $\text{NO}_3^-\text{-N}$

表2 土壤氨挥发速率与铵态氮、硝态氮的相关性

Table 2 Correlation between soil ammonia volatilization rate and

 $\text{NH}_4^+\text{-N}$, $\text{NO}_3^-\text{-N}$ content

项目 Item	铵态氮 $\text{NH}_4^+\text{-N}$	硝态氮 $\text{NO}_3^-\text{-N}$
相关系数 Correlation coefficient	0.741**	0.674**

注:**表示在 $P<0.01$ 水平显著相关。Note:** indicates a significant correlation at the $P<0.01$ level.

脲酶活性通过影响尿素分解来影响土壤氨挥发损失,是土壤氨挥发损失的一大重要驱动因素。各处理土壤脲酶活性如图5所示。在试验培养期间,随着培养天数的增加,土壤脲酶活性逐渐降低。培养试验第1 d,BSB及BSS处理脲酶活性相较其他施肥处理更高。U、BS及BSB处理在施肥后第2 d达到峰值。在培养的第14 d,施肥处理的脲酶活性稳定在 $1.82 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ 。粪水处理组的脲酶活性高于尿素施用处理。

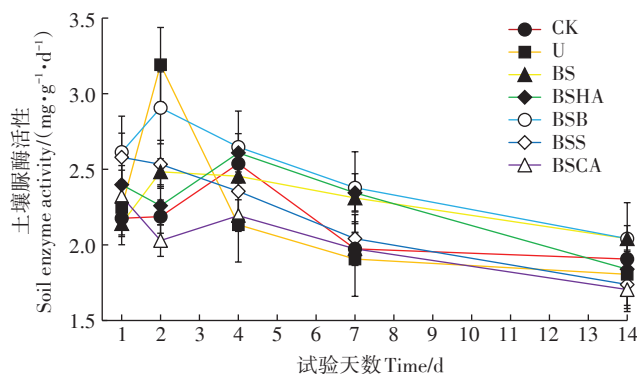


图5 土壤脲酶活性的变化趋势

Figure 5 Change trend of soil urease activity

3 讨论

牛场粪水中含有大量的氮磷营养元素,尿素分解产生的氨挥发受外界水分、pH以及微生物的影响较大^[17]。前人研究表明,由于生物炭具有丰富的孔隙结构及良好的吸附性,施用生物炭可以减少40.49%的

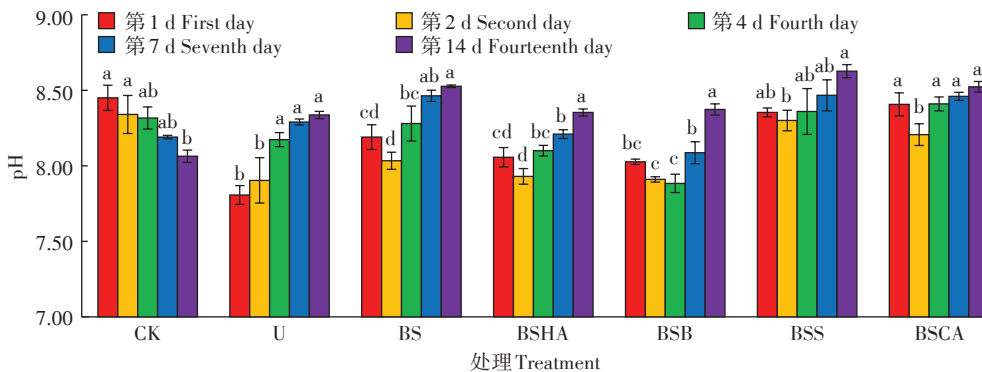


图4 不同添加物的牛场粪水施用对土壤pH的影响

Figure 4 Effects of cattle farm slurry application with different additives on soil pH

土壤氨挥发^[18],且由于较大的比表面积和表面吸附能,生物炭具有较好的营养元素吸附能力和养分有效性的提升作用^[19]。添加生物炭处理的土壤在试验初期氨挥发量较高,这与WEI等^[8]和FAN等^[9]的研究结果一致,生物炭的碱性性质是试验初期促进氨挥发的主要影响因素,试验中后期由于生物炭对氮素吸附作用,土壤氨挥发量减少,这与张水清等^[20]和杨文娜等^[21]的研究结果一致。

研究表明,肥料中添加腐植酸具有良好的固氮效应,会显著降低氨挥发损失^[10,22],本研究结果与其一致,添加腐植酸的BSHA处理的土壤全氮含量在培养的第14 d显著高于其他处理,说明牛场粪水添加腐植酸相对于其他添加物会减少土壤中的氮素损失,其氨挥发的损失也会降低。在试验第4 d,添加腐植酸处理氨挥发速率与土壤脲酶活性出现了一次峰值,与王平^[23]的研究结果一致,在培养后期腐植酸可通过增加脲酶活性而使得氨挥发速率再次出现峰值(图1、图5),但本研究中氨挥发速率及脲酶活性第二次峰值出现较早,推测因为牛场粪水成分复杂,为脲酶提供了丰富的反应底物。腐植酸分子中含有苯环及各种杂环,通过桥键相连形成腐植酸的主体结构,支链上有羟基、酚羟基、羧基、酮基、甲氧基等官能团,可降低氮淋溶速度和比例,降低脲酶活性^[24-26]。腐植酸还能够影响植物的多种生理生长指标,包括植物的氮磷钾等元素的吸收、叶片生长发育、光合作用等^[27],在提高植物的抗倒伏、改善土壤品质、提高化肥农药利用率等方面都有影响。

土壤进行试验后pH值变化量为0.11~0.74,氨挥发量的变化为0~1.68 kg·hm⁻²·d⁻¹,二者相关性不显著。其主要原因在于氨挥发量同时受土壤脲酶活性、铵态氮存量、施用肥料类型、添加剂类型等多种重要因素交叉作用,对氨挥发量的贡献不一而足。

土壤中氮素存量的主要影响因素有施肥、降雨及作物吸收利用等,故施肥后产生的硝态氮残余不可避免。根据前人的研究,有机肥也可增加土壤团聚体粒径以及有机碳含量,从而提高阳离子交换量,使土壤的硝态氮固持能力提升^[28]。在本研究中,除牛场粪水添加生物炭的处理外,第14 d土壤各处理硝态氮含量均低于仅施用牛场粪水处理。证明牛场粪水添加不同添加物会增加土壤中硝态氮利用率。而在生物炭添加牛场粪水处理中,由于生物炭的多孔结构及其吸附性^[18],可以更好地调控土壤中氮素的供应及固持,土壤中硝态氮含量时间分布较为均匀。

4 结论

牛场粪水添加不同外源添加物施用后对土壤氨挥发速率产生了显著影响。添加柠檬酸处理及腐植酸处理累积氨挥发量最小,与仅施用牛场粪水处理下的土壤对比氨挥发量分别减少了51.35%和46.62%,添加生物炭处理在施入初期氨挥发量明显增加,随着时间延长氨挥发趋于稳定,但氨挥发累积量最高,达3.16 kg·hm⁻²。添加腐植酸的牛场粪水施用土壤后较同样添加酸性添加物的硫酸及柠檬酸处理土壤总氮含量分别提高了170.82%和80.70%。

参考文献:

- [1] AI P, JIN K, ALENGEBAWY A, et al. Effect of application of different biogas fertilizer on eggplant production: Analysis of fertilizer value and risk assessment[J]. *Environmental Technology & Innovation*, 2020, 19: 101019.
- [2] 刘泰, 王洪媛, 杨波, 等. 粪肥增施对水稻产量和氮素利用效率的影响[J]. 农业资源与环境学报, 2021, doi: 10. 13254/j. jare. 2021. 0096. LIU T, WANG H Y, YANG B, et al. Effect of additional applications of manure on rice crop yield and nitrogen use efficiency[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2021, doi: 10. 13254 /j. jare. 2021. 0096.
- [3] 李银坤, 武雪萍, 武其甫, 等. 水氮用量对设施栽培蔬菜地土壤氨挥发损失的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2016, 22(4): 949-957. LI Y K, WU X P, WU Q F, et al. Effects of irrigation and nitrogen application on ammonia volatilization loss from vegetable fields under greenhouse cultivation[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2016, 22(4): 949-957.
- [4] 雷鸣, 程于真, 苗娜. 黄土及其他添加物对猪粪贮存过程氨气和温室气体排放的影响[J]. 环境科学学报, 2019, 39(12): 4132-4139. LEI M, CHENG Y Z, MIAO N, et al. Effects of mixing loess and other additives with pig manure on ammonia and greenhouse gas emissions during storage[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2019, 39(12): 4132-4139.
- [5] WANG S X, XING J, JANG C, et al. Impact assessment of ammonia emissions on inorganic aerosols in east China using response surface modeling technique[J]. *Environmental Science & Technology*, 2011, 45(21): 9293-9300.
- [6] KIRKBY J, CURTIUS J, ALMEIDA J, et al. Role of sulphuric acid, ammonia and galactic cosmic rays in atmospheric aerosol nucleation[J]. *Nature*, 2011, 476(7361): 429-433.
- [7] DAVID F, JOSÉ L P, SOFIA M, et al. Surface application of acidified cattle slurry compared to slurry injection: Impact on NH₃, N₂O, CO₂ and CH₄ emissions and crop uptake[J]. *Geoderma*, 2017, 306: 160-166.
- [8] WEI W L, YANG H Q, FAN M S, et al. Biochar effects on crop yields and nitrogen loss depending on fertilization[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 702: 134423.
- [9] FAN Y, CAO X, GAO B, et al. Short-term effects of rice straw biochar

- on sorption, emission, and transformation of soil NH_4^+-N [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2015, 22(12):9184-9192.
- [10] 李梦瑶,王旭刚,徐晓峰,等.生活污水尾水灌溉对秸秆还田稻田氨挥发的影响[J]. 农业环境科学学报, 2020, 39(7):1623-1632. LI M Y, WANG X G, XU X F, et al. Effects of treated domestic sewage irrigation on ammonia volatilization in straw-returning paddy fields[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2020, 39(7):1623-1632.
- [11] JOANA P, JOÃO C, ANABELA R, et al. Bio-acidification and enhanced crusting as an alternative to sulphuric acid addition to slurry to mitigate ammonia and greenhouse gases emissions during short term storage[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 263:121443.
- [12] DAVID F, MAIBRITT H, FABRIZIO G. Acidification of animal slurry: A review[J]. *Journal of Environmental Management*, 2015, 149:46-56.
- [13] BASTAMI M S, JONES D L, CHADWICK D R. Microbial diversity dynamics during the self-acidification of dairy slurry[J]. *Environmental Technology*, 2021, 42(16):2562-2572.
- [14] 施正香,王盼柳,张丽,等.我国奶牛场粪污处理现状与综合治理技术模式分析[J]. 中国畜牧杂志, 2016, 52(14):62-66. SHI Z X, WANG P L, ZHANG L, et al. State of dairy waste treatment and comprehensive management mode in China[J]. *Chinese Journal of Animal Science*, 2016, 52(14):62-66.
- [15] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京:中国农业科技出版社, 2000. LU R K. Soil agrochemical analysis method[M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2000.
- [16] 付莉,王贵云,杜会英,等.养殖肥水施用对土壤氨挥发的影响及响应因素[J]. 农业资源与环境学报, 2020, 37(6):931-938. FU L, WANG G Y, DU H Y. Effect of slurry application on soil ammonia volatilization and response factors[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2020, 37(6):931-938.
- [17] 刘遵奇,孟军,陈温福.玉米秸秆生物炭对尿素分解的影响[J]. 农业环境科学学报, 2015, 34(6):1142-1148. LIU Z Q, MENG J, CHEN W F. Effect of corn stalk biochar on urea hydrolysis[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2015, 34(6):1142-1148.
- [18] 李琦,廖娜,张妮,等.棉花秸秆及其生物炭对滴灌棉田氨挥发的影响[J]. 农业环境科学学报, 2014, 33(10):1987-1994. LI Q, LIAO N, ZHANG N, et al. Effects of cotton stalk and its biochar on ammonia volatilization from a drip irrigated cotton field[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2014, 33(10):1987-1994.
- [19] DAVID L, PIERCE F, WANG B Q, et al. Biochar impact on nutrient leaching from a Midwestern agricultural soil[J]. *Geoderma*, 2010, 158(3):436-442.
- [20] 张水清,张博,岳克,等.生物质炭对华北平原4种典型土壤冬小麦生育前期氨挥发的影响[J]. 农业资源与环境学报, 2021, 38(1):127-134. ZHANG S Q, ZHANG B, YUE K, et al. Effects of biochar on NH_3 volatilization from four typical soils during early growth stage of winter wheat in the North China Plain[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2021, 38(1):127-134.
- [21] 杨文娜,邓正昕,李娇,等.生物炭与化肥混合对氨挥发和磷固定的影响[J]. 环境科学, 2021, 42(1):467-476. YANG W N, DENG Z X, LI J, et al. Effect of biochar and chemical fertilizer mixture on ammonia volatilization and phosphorus fixation[J]. *Environmental Science*, 2021, 42(1):467-476.
- [22] AHMED O H, AMINUDDIN H, HUSNI M. Reducing ammonia loss from urea and improving soil-exchangeable ammonium retention through mixing triple superphosphate, humic acid and zeolite[J]. *Soil Use & Management*, 2010, 22(3):315-319.
- [23] 王平. 腐植酸对氮肥转化、损失及油菜生长的影响[D]. 泰安:山东农业大学, 2018:34-35. WANG P. Effects of humic acid on nitrogen transformation, losses and the growth of rape[D]. Tai'an: Shandong Agricultural University, 2018:34.
- [24] BAI Y, WU F C, XING B S, et al. Isolation and characterization of Chinese standard fulvic acid sub-fractions separated from forest soil by stepwise elution with pyrophosphate buffer[J]. *Scientific Reports*, 2015, 5(5):8723.
- [25] NEBBIOSO A, PICCOLO A. Basis of a humeomics science: Chemical fractionation and molecular characterization of humic biosuprastructures[J]. *Biomacromolecules*, 2011, 12(4):1187-1199.
- [26] 刘增兵,赵秉强,林治安.腐植酸尿素氨挥发特性及影响因素研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2010, 16(1):208-213. LIU Z B, ZHAO B Q, LIN Z A. Ammonia volatilization characteristics and related affecting factors of humic acid urea[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2010, 16(1):208-213.
- [27] STAEHELIN C, FORSBERG L S, D'HAEZE W, et al. Exo-oligosaccharides of *Rhizobium* sp. strain NGR234 are required for symbiosis with various legumes[J]. *Journal of Bacteriology*, 2006, 188(17):6168-6178.
- [28] YIN F, FU B, MAO R. Effects of nitrogen fertilizer application rates on nitrate nitrogen distribution in saline soil in the Hai River Basin, China[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2007, 7(3):136-142.