

季铵盐改性秸秆阻控养殖肥液灌溉土壤氮淋失

张理胜, 赵迪, 薄录吉, 张克强, 王风

引用本文:

张理胜, 赵迪, 薄录吉, 等. 季铵盐改性秸秆阻控养殖肥液灌溉土壤氮淋失[J]. 农业环境科学学报, 2021, 40(11): 2582–2588.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11654/jaes.2021-1028>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

硝化抑制剂阻控养殖肥液灌溉土壤氮素淋失

杨涵博, 赖睿特, 张克强, 沈丰菊, 李佳佳, 高文萱, 罗艳丽, 王风

农业环境科学学报. 2019, 38(8): 1751–1758 <https://doi.org/10.11654/jaes.2018-1572>

养殖肥液灌溉土壤磷淋失阻控: 铜改性生物炭

赵迪, 张理胜, 罗元, 张克强, 王风

农业环境科学学报. 2021, 40(11): 2574–2581 <https://doi.org/10.11654/jaes.2021-1027>

养殖肥液不同灌溉强度下硝化-脲酶抑制剂-生物炭联合阻控氮淋溶的研究

杨涵博, 罗艳丽, 赵迪, 赖睿特, 张克强, 梁军锋, 沈丰菊, 王风

农业环境科学学报. 2020, 39(10): 2363–2370 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0471>

玉米秸秆生物炭对土壤无机氮素淋失风险的影响研究

盖霞普, 刘宏斌, 翟丽梅, 王洪媛

农业环境科学学报. 2015(2): 310–318 <https://doi.org/10.11654/jaes.2015.02.015>

潮土设施油麦菜田灌施猪场肥液的适宜模式研究

石亚楠, 张克强, 薛长亮, 赵君怡, 乔斌, 王风

农业环境科学学报. 2015(9): 1747–1753 <https://doi.org/10.11654/jaes.2015.09.017>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

张理胜, 赵迪, 薄录吉, 等. 季铵盐改性秸秆阻控养殖肥液灌溉土壤氮淋失[J]. 农业环境科学学报, 2021, 40(11): 2582–2588.

ZHANG L S, ZHAO D, BO L J, et al. The control of nitrogen leaching loss in soil irrigated with quaternary ammonium-salt-modified straw [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2021, 40(11): 2582–2588.



开放科学 OSID

季铵盐改性秸秆阻控养殖肥液灌溉土壤氮淋失

张理胜¹, 赵迪¹, 薄录吉², 张克强¹, 王凤^{1*}

(1. 农业农村部环境保护科研监测所, 天津 300191; 2. 山东省农业科学院农业资源与环境研究所, 济南 250100)

摘要:为探究养殖肥液灌溉条件下, 季铵盐改性秸秆对土壤氮素淋失的影响及阻控效果, 通过室内土柱模拟试验, 研究了季铵盐改性秸秆不同施用量(质量分数为0%、1%、2%、4%)和施用方式(0~10 cm混合、0~20 cm混合、10 cm处作为隔层)对不同形态氮素(总氮、硝态氮和有机氮)的影响。结果表明:在试验施用量范围内, 季铵盐改性秸秆施加量越大对氮素淋失阻控的效果越好, 2%和4%季铵盐改性秸秆施加处理的淋溶液中总氮、硝态氮、有机氮淋失量分别比对照(仅施用养殖肥液)降低了47.1%、51.8%、24.7%和78.7%、83.2%、57.6%, 且两处理间均达到5%显著差异水平。3种施用方式对土壤氮素淋失的影响不显著, 但0~10 cm混合与0~20 cm混合处理与对照相比, 季铵盐改性秸秆的施加能抑制养殖肥液灌溉过程中铵态氮向硝态氮的转化, 从而降低氮素淋失风险。此外养殖肥液灌溉氮素淋失以硝态氮为主。研究表明, 季铵盐改性秸秆施用是阻控养殖肥液灌溉土壤氮淋失的有效措施。

关键词:季铵盐改性秸秆; 养殖肥液; 氮素; 淋失

中图分类号: S141; X71 文献标志码: A 文章编号: 1672-2043(2021)11-2582-07 doi:10.11654/jaes.2021-1028

The control of nitrogen leaching loss in soil irrigated with quaternary ammonium-salt-modified straw

ZHANG Lisheng¹, ZHAO Di¹, BO Luji², ZHANG Keqiang¹, WANG Feng^{1*}

(1. Agro-Environment Protection Institute, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Tianjin 300191, China; 2. Shandong Academy of Agricultural Sciences Institute of Agricultural Resources and Environment, Jinan 250100, China)

Abstract: To explore the effect of quaternary ammonium-salt-modified straw on soil nitrogen leaching under the condition of aquaculture fertilizer liquid-irrigation and the control effect, indoor soil-column simulation tests were performed by adding different amounts of quaternary ammonium-salt-modified straw (mass fractions of 0%, 1%, 2%, or 4%) under various addition methods (0~10 cm mixing, 0~20 cm mixing, or 10 cm as an interlayer) for different forms of nitrogen (total nitrogen, nitrate nitrogen, and organic nitrogen). The results showed that the control effect of nitrogen leaching improved with an increase in the amount of quaternary ammonium-salt-modified straw. The total nitrogen, nitrate nitrogen, and organic nitrogen leaching losses of the leaching solution were treated with 2% and 4% quaternary ammonium-salt-modified straws, respectively. Compared with the control, the total nitrogen, nitrate nitrogen, and organic nitrogen leaching losses decreased by 47.1%, 51.8%, and 24.7%, respectively, in the 2% treatment, and by 78.7%, 83.2%, and 57.6%, respectively, in the 4% treatment, reaching a significant level of 5% between the treatments. The effects of the three application methods on soil nitrogen leaching were not significant; however, compared with the control, the application of quaternary ammonium-salt-modified straw could inhibit ammonium in the irrigation process of the aquaculture fertilizer solution. The conversion of nitrogen from nitrogen to nitrate nitrogen reduced the risk of nitrogen leaching. In addition, the nitrogen leaching loss of the aquaculture fertilizer solution was mainly as nitrate

收稿日期: 2021-09-06 录用日期: 2021-09-23

作者简介: 张理胜(1998—), 男, 山东临沂人, 硕士研究生, 从事农业废弃物处理与利用研究。E-mail: 1443964714@qq.com

*通信作者: 王凤 E-mail: wangfeng_530@163.com

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFD0800403); 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项(Y2021XC18); 云南省重大科技专项计划项目(202102AE090011)

Project supported: The National Key Research and Development Program of China (2017YFD0800403); Central Public-interest Scientific Institution Basal Research Fund (Y2021XC18); Major Science and Technology Special Plan of Yunnan Province (202102AE090011)

nitrogen. The application of quaternary ammonium-salt-modified straw is an effective measure for controlling the nitrogen leaching loss of soil irrigated with aquaculture fertilizer solution.

Keywords: quaternary ammonium-salt-modified straw; biogas slurry; nitrogen; leaching loss

氮素是设施蔬菜生长所必需的营养元素之一,蔬菜种植过程常因大水大肥的生产方式而导致大量氮素通过淋溶进入地下水体,从而造成环境污染^[1-2]。有效阻控种植过程中氮淋失,成为推进农业绿色发展亟需解决的突出问题^[3-4]。

第二次污染源普查结果显示,我国每年产生农作物秸秆8.05亿t,除被用于制浆造纸、制作饲料外^[5],仍有大量秸秆被闲置浪费或燃烧。为促进秸秆资源化利用,实现“以废治废”的目标,将其用于水体阴离子的脱除是一种良好的途径。但秸秆存在缺乏功能位点和吸附性能低的问题,通过改性可明显提升其吸附性能^[6-8],改性秸秆吸附水体阴离子的机制主要是静电吸引和离子交换作用。通过改性的方式不仅可以脱除水体中的阴离子,而且可同时回收有价值的元素。其中,季铵盐改性方法由于吸附效率高、性能好等优点而成为研究热点,如WANG等^[9]用季铵盐改性秸秆吸附废水中的硝态氮,去除率高达82.4%;FAN等^[10]以玉米秸秆为原料制备季铵盐改性秸秆,试验结果表明其对水体中硝态氮的最大吸附量达60.1 mg·g⁻¹;张涛^[11]的研究发现,在有其他阴离子干扰的情况下,改性秸秆对水体硝态氮仍有较好的吸附效果,吸附量可达51.7 mg·g⁻¹;王林^[12]的研究表明,pH在2~11范围内时,改性秸秆对硝态氮的吸附效果变化较小。以上研究均表明季铵盐改性秸秆作为阴离子吸附剂,对水体硝态氮具有良好的吸附效果。但是,将其用于阻控土壤氮素损失的研究还鲜有报道。

养殖肥液因肥效高、易吸收等优点而被广泛用于蔬菜和大田作物^[13]。养殖肥液施用后可通过硝化作用,使大量的铵态氮转化为硝态氮,硝态氮向下迁移到土壤深层后就很难被作物利用^[14-16]。阻控养殖肥液施用过程中的氮素损失十分重要。本研究通过温室内土柱淋溶模拟试验,探究季铵盐改性秸秆施用量和施用方式对养殖肥液灌溉后土壤氮素淋失的影响,以为高效阻控土壤硝态氮淋溶,促进养殖肥液安全利用提供技术支撑。

1 材料与方法

1.1 试验材料与装置

1.1.1 供试土壤及养殖肥液

供试土壤取自天津市东丽区大毕庄作物耕作0~

20 cm土壤,土壤质地为壤土。新鲜土样经自然风干,挑拣出肉眼可见的作物根茎及石块,过2 mm筛,混匀风干后备用。供试土壤基本理化性质:pH 7.71、总氮(TN)含量为1.40 g·kg⁻¹、硝态氮(NO₃⁻-N)含量为3.01 mg·kg⁻¹、铵态氮(NH₄⁺-N)含量为8.00 mg·kg⁻¹、有机质含量为24.35 g·kg⁻¹。养殖肥液取自天津市益利来养殖有限公司常年运转的塞流式厌氧反应器,原料为猪粪。养殖肥液pH 7.92,TN浓度为533.26 mg·L⁻¹,NH₄⁺-N浓度为360.74 mg·L⁻¹,NO₃⁻-N浓度为2.21 mg·L⁻¹。

1.1.2 改性秸秆的制备

季铵盐改性秸秆由山东省农业科学院提供,制备过程如下:将8 g秸秆分散于80 mL乙醇中,依次加入6.0 mL浓度为2%的NaOH溶液和16.0 g 3-氯-2-羟丙基三甲基氯化铵,将混合物于45℃水浴搅拌3 h,并将体系pH调至中性(用冰醋酸和氢氧化钠调节溶液初始pH值),抽滤,依次用甲醇和乙醇充分洗涤样品,并于60℃烘干至恒质量。

1.1.3 试验装置

土柱淋溶模拟装置为PVC材质,内径为19 cm,高度为30 cm。试验前在柱体内壁涂抹一层凡士林以减少边缘效应,将改性秸秆与土样按比例混合均匀填充至土柱中,土壤质量约为7 kg,容重1.26 g·cm⁻³,装好的土柱置于稳定的钢架上与地面保持垂直。柱体底部铺设100目尼龙网及2 cm厚的石英砂,以防止底层土的流失,柱体出水管中塞满脱脂棉花,以深度过滤水样。

1.2 试验方法

1.2.1 试验设计

试验设6个处理。处理1:养殖肥液(CK);处理2:养殖肥液+1%改性秸秆,上部混合施用(0~10 cm,1%US);处理3:养殖肥液+2%改性秸秆,上部混合施用(0~10 cm,2%US);处理4:养殖肥液+4%改性秸秆,上部混合施用(0~10 cm,4%US);处理5:养殖肥液+4%改性秸秆,全土层混合施用(0~20 cm,4%HS);处理6:养殖肥液+4%改性秸秆,隔层施用(10 cm隔层,4%GS)。每个处理设3次重复,共18个土柱。每隔3 d施用养殖肥液300 mL,共施用5次,施氮总量为300 kg·hm⁻²。

1.2.2 淋溶模拟试验

试验于农业农村部环境保护科研监测所温室内进行,试验前土柱每日加去离子水 800 mL 连续淋洗 3 d,以减少由于装土过程所造成的差异。之后每隔 3 d 施用养殖肥液 1 次,共施用 5 次。随后收集淋溶液,带回实验室立即进行各项指标的测定。施用试验结束后,将土柱中的土壤按照 0~10 cm 和 10~20 cm 分层取样,密封冰箱保鲜保存。

1.2.3 测定指标及方法

土壤 pH 用 pH 计测定(水土比为 5:1),含水量用烘干法测定, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 $\text{NO}_3^+\text{-N}$ 含量用 KCl 浸提-比色法测定^[17],养殖肥液及淋溶液 TN 浓度采用碱性过硫酸钾-紫外分光光度法测定, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度采用全自动流动注射分析仪(FIA-6000+)测定; $\text{NO}_3^+\text{-N}$ 浓度采用紫外分光光度法测定^[18]。

1.3 数据处理

试验数据采用 Excel 2010、Origin 2017 和 SPSS 19.0 软件进行处理和统计分析。处理间差异显著性采用单因素方差分析法(One-way ANOVA),显著性水平为 0.05。

2 结果与分析

2.1 淋溶液 TN 浓度变化特征

季铵盐改性秸秆施用下土壤淋溶液 TN 浓度变化特征如图 1 所示,各处理 TN 浓度呈现 $\text{CK} > 1\% \text{US} > 2\% \text{US} > 4\% \text{HS} > 4\% \text{GS} > 4\% \text{US}$ 的趋势。随灌溉次数的增加,各处理淋溶液 TN 浓度逐渐降低,至第 3 次或第 4 次灌溉时浓度达到最低值,第 5 次灌溉时浓度有所上升。施加季铵盐改性秸秆处理淋溶液中 TN 浓度均显著低于 CK 处理($P < 0.05$),与 CK 处理相比,1%US、2%US 和 4%US 处理淋溶液 TN 浓度分别降低了 14.7%、43.9% 和 76.3%,改性秸秆施加量越多, TN 淋失阻控效果越好。改性秸秆施加量相同的条件下,5 次灌溉过程 HS、GS 和 US 处理相对于 CK 处理的 TN 浓度减少了 60.5%、63.9% 和 76.3%,3 个处理间的差异不显著($P > 0.05$)。

2.2 淋溶液 $\text{NO}_3^+\text{-N}$ 浓度变化特征

季铵盐改性秸秆施用下土壤淋溶液 $\text{NO}_3^+\text{-N}$ 浓度变化特征如图 2 所示,土壤淋溶液 $\text{NO}_3^+\text{-N}$ 浓度的变化规律与 TN 浓度的变化规律基本一致。灌溉前 3 次淋溶液中 $\text{NO}_3^+\text{-N}$ 浓度降低趋势明显,同一处理中第 5 次 $\text{NO}_3^+\text{-N}$ 浓度较第 3 次和第 4 次浓度略高。不同处理间相比较,CK 处理 $\text{NO}_3^+\text{-N}$ 浓度在整个灌溉期间均处于

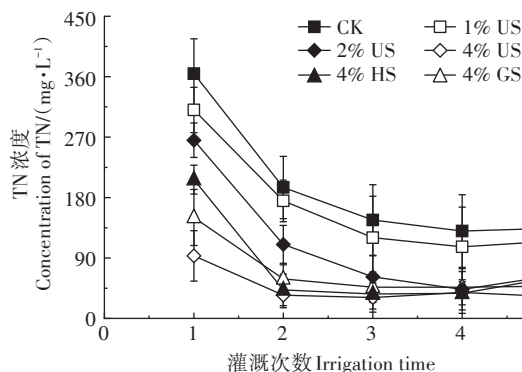


图1 各处理土壤淋溶液 TN 浓度

Figure 1 Total nitrogen concentrations in leaching water

最高水平,改性秸秆不同施加量下 $\text{NO}_3^+\text{-N}$ 浓度比 CK 处理降低 15.9%~82.3%,随改性秸秆施加量增加浓度呈下降趋势,且降低幅度逐渐增加,4%US 处理最低,浓度比 CK 处理显著降低了 82.3% ($P < 0.05$)。同一施加量下,US 处理较 HS 处理和 GS 处理 $\text{NO}_3^+\text{-N}$ 浓度分别降低 16.4% 和 4.8%,但各处理间差异不显著 ($P > 0.05$)。

2.3 淋溶液有机氮浓度变化特征

季铵盐改性秸秆施用下土壤淋溶液有机氮浓度变化特征如图 3 所示。各处理土壤淋溶液有机氮浓度均呈先降低后趋于稳定的趋势,对淋溶液有机氮的阻控效果大小顺序为 $4\% \text{US} > 4\% \text{GS} > 4\% \text{HS} > 2\% \text{US} > 1\% \text{US}$ 。第 1 次灌溉使有机氮浓度显著降低,其中 4%US 处理有机氮浓度比其他两个施加量(1% 和 2%)更低,不同施加方式中 4%US、4%GS 和 4%HS 处理较 CK 处理分别显著降低了 75.4%、51.1% 和 34.4% ($P < 0.05$)。后 4 次灌溉过程中秸秆各处理与 CK 处理均无显著差异 ($P > 0.05$)。

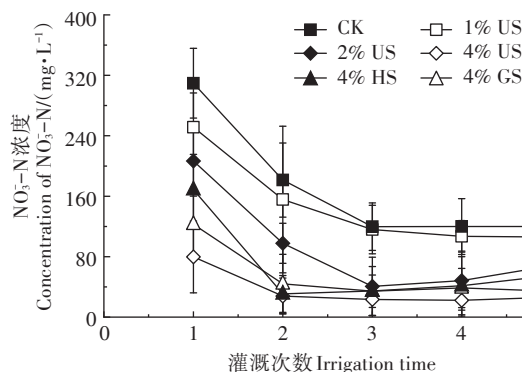


图2 各处理土壤淋溶液 $\text{NO}_3^+\text{-N}$ 浓度

Figure 2 Nitrate nitrogen concentrations in leaching water

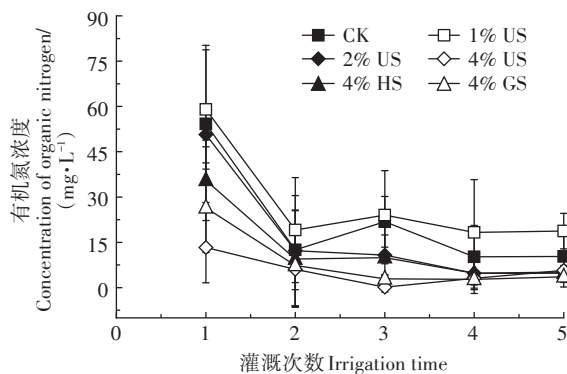


图3 各处理土壤淋溶液有机氮浓度

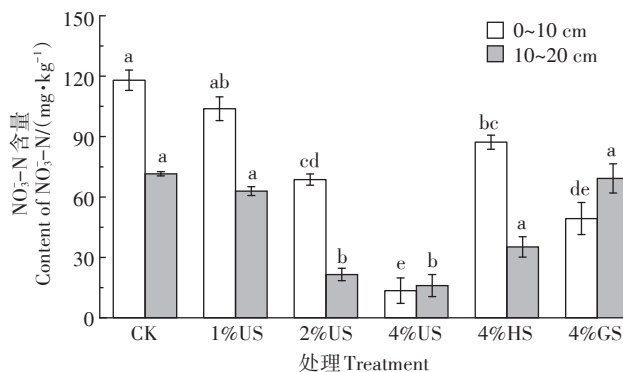
Figure 3 Organic nitrogen concentrations in leaching water

2.4 氮素累积淋溶量

季铵盐改性秸秆施用下淋溶液氮素累积淋失量如表1所示,不同处理TN淋失量为19.4~91.2 kg·hm⁻²,是施氮量的6.4%~30.3%。与CK处理相比,1%US、2%US、4%US、4%HS和4%GS处理TN累积淋失量分别降低了13.9%、47.1%、78.7%、77.9%和78.5%,除1%US处理外,其余处理均达到显著水平;NO₃⁻-N累积淋失量分别显著降低15.7%、51.8%、83.2%、83.1%和82.5% ($P<0.05$)。TN和NO₃⁻-N累积淋失量变化趋势基本一致,均随秸秆施加量的增加而降低。不同施加量及不同施加方式秸秆处理中NH₄⁺-N累积淋失量变化较小,均与CK处理间差异不显著 ($P>0.05$)。有机氮累积淋失量随秸秆施加量的增加而降低,施用4%的季铵盐改性秸秆能显著降低其累积淋失量 ($P<0.05$),降幅达57.6%,不同施加方式下累积淋失量差异不显著 ($P>0.05$)。

2.5 土壤NO₃⁻-N含量

季铵盐改性秸秆施用下土壤NO₃⁻-N含量如图4所示。与CK处理相比,施加秸秆均降低了0~10 cm

不同小写字母表示处理间差异显著 ($P<0.05$)。下同Different lowercase letters indicate significant differences among treatments ($P<0.05$). The same below图4 土壤中NO₃⁻-N含量Figure 4 The content of NO₃⁻-N in soil

土层NO₃⁻-N含量,1%US、2%US和4%US处理分别降低11.9%、41.8%和88.5%,其中2%和4%处理均与CK处理有显著差异 ($P<0.05$);对于不同施加方式,土壤NO₃⁻-N含量呈4%HS>4%GS>4%US的趋势,且处理间差异显著 ($P<0.05$)。在10~20 cm土层中,各处理土壤NO₃⁻-N含量总体趋势为CK>4%GS>1%US>4%HS>2%US>4%US;与CK相比,1%US、4%HS和4%GS处理NO₃⁻-N含量均有一定程度的降低,但处理间差异不显著;2%US和4%US处理与CK处理相比NO₃⁻-N含量显著降低 ($P<0.05$),分别降低了69.9%和77.6%。

2.6 土壤NH₄⁺-N含量

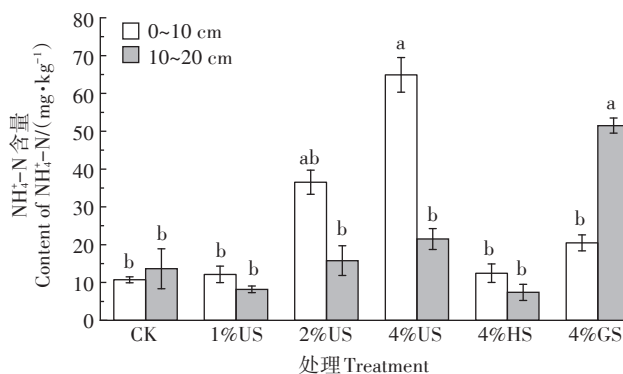
季铵盐改性秸秆施用下土壤NH₄⁺-N含量如图5所示。上层混合(US)处理中,0~10 cm土层NH₄⁺-N含量均高于10~20 cm,且NH₄⁺-N含量随秸秆施加量增加而增加。0~10 cm土层中,土壤NH₄⁺-N含量整体趋势为4%US>2%US>4%GS>4%HS>1%US>CK,其中

表1 各处理土壤淋溶液氮素累积淋失量(kg·hm⁻²)Table 1 The nitrogen accumulation in the leaching water(kg·hm⁻²)

处理 Treatment	总氮 TN	硝态氮 NO ₃ ⁻ -N	铵态氮 NH ₄ ⁺ -N	有机氮 Organic nitrogen
CK	91.18±9.00a	76.10±6.41a	0.47±0.70a	14.61±5.73a
1%US	78.50±6.30a	64.10±2.10b	0.55±0.18a	13.85±2.86a
2%US	48.15±6.19b	36.66±5.39c	0.49±0.04a	11.00±3.67a
4%US	19.36±3.63c	12.74±0.83d	0.53±0.07a	6.19±1.51b
4%HS	20.06±3.28c	12.79±2.89d	0.55±0.10a	6.72±2.09b
4%GS	19.57±0.47c	13.28±2.60d	0.46±0.01a	5.83±1.02b

注: 同列不同字母表示处理间差异显著 ($P<0.05$)。

Note: Different letters in a column indicate significant differences among treatments at $P<0.05$ levels, respectively.

图5 土壤中NH₄⁺-N含量Figure 5 The content of NH₄⁺-N in soil

4%US处理与CK处理相比, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量显著增加了505.4% ($P<0.05$),其他处理与CK处理相比虽然 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量有所增加,但处理间差异不显著。10~20 cm土层中,4%GS处理 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量最高,与其他处理之间存在显著差异 ($P<0.05$),其他各处理呈现4%US>2%US>CK>1%US>4%HS的趋势,但各处理之间差异不显著。

3 讨论

3.1 季铵盐改性秸秆不同施加量和施用方式对淋溶液氮素浓度以及累积淋失量的影响

试验结果发现,施加改性秸秆能明显降低养殖肥液灌溉土壤淋溶液中TN、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 的浓度和累积淋失量,且阻控效果随改性秸秆施加量增加而提高。首先是因为养殖肥液在灌溉后,大量 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 被转化为 $\text{NO}_3^-\text{-N}$,季铵盐改性秸秆可以通过静电吸引或离子交换作用吸附土壤中的 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ ^[10];其次,秸秆的富碳性可提高土壤TC含量并使其维持在一定的水平,不仅提高了对养分的吸附作用,而且为微生物提供了丰富的营养物质和良好的生存环境,促进微生物对氮素的利用,增强土壤的吸附性能,降低氮素淋失风险^[19-20];再次,秸秆的分解过程还会产生有机酸阻止少量 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 转化为 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ ^[21-22]。前3次灌溉过程中 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量显著降低,后2次灌溉过程中 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 浓度趋向于稳定,这可能与多次灌溉后土壤达到饱和状态,土壤氧化还原电位下降有关。杨涵博等^[23]的研究也表明多次灌溉后淋溶液 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 浓度显著下降,与本研究的结论一致。此外,随着灌溉次数的增加,土壤中 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量增加,但施加的季铵盐改性秸秆达到最大吸附量后吸附性能下降^[24],也使得施加4%季铵盐改性秸秆的处理后2次灌溉中淋溶液 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 浓度不再下降。施用4%季铵盐改性秸秆的淋溶液有机氮累积量显著降低,主要是因为秸秆添加后给土壤微生物提供了更多的碳源,使微生物大量繁殖,促进有机氮向无机氮的转化,从而减少了有机氮的淋溶损失^[25-27]。3种不同施用方式的淋溶液中氮素浓度和累积量差别并不显著,可见3种施用方式对于阻控氮素淋失效果基本一致。

本试验数据证明,养殖肥液中氮素主要以 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 形式存在,约占TN的67.6%,此外还含有有机态氮和少量的 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 。杨涵博等^[23]的试验证明猪场养殖肥液中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度约占TN的67%;赖睿特^[28]等的试验证明猪场肥水中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度占TN浓度的72%;而本研

究的数据表明淋溶液中 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 浓度约占TN的70%左右,成为淋溶液中主要的氮素形态。这是因为养殖肥液中的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 可被土壤颗粒迅速吸附,土壤中的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 在一定条件下还会发生硝化作用转化为 $\text{NO}_3^-\text{-N}$, $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 带负电荷不易被土壤吸附,而是随多次灌溉被冲刷下去^[29-30]。

3.2 季铵盐改性秸秆不同施加量和施加方式对土壤 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 和 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量的影响

0~10 cm和10~20 cm土层中 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量均随季铵盐改性秸秆施加量的增加而降低,与CK处理相比,施加量为4%时 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量显著降低。首先,因为季铵盐改性秸秆会吸附 $\text{NO}_3^-\text{-N}$,在灌溉过程中 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 被吸附^[31],导致土壤中 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量减少;其次,在测定土壤(含有少量季铵盐改性秸秆)中 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量时,是通过KCl浸提出土壤中的 $\text{NO}_3^-\text{-N}$,而被秸秆吸附的 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 不易被浸提^[10]。对比3种不同的施加方式,0~10 cm土层中隔层处理、全混合处理与上层混合处理相比,土壤 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量显著增多,可能是因为土壤中季铵盐改性秸秆含量相对较少,与季铵盐改性秸秆含量高的4%US处理相比,4%HS和4%GS的吸附总量少^[32];10~20 cm土层中上层施用方式下 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量降低最为显著,隔层处理下含量较高,原因是隔层处理中季铵盐改性秸秆堆积在一层,与土壤混合不均匀,因此与混合均匀的处理相比吸附 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 效果较差。

在施加4%季铵盐改性秸秆后,0~10 cm层土壤中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量与CK处理相比显著增加,说明秸秆的加入抑制了养殖肥液中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 向 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 的转化,使硝化作用减弱。有研究表明^[33-34]添加秸秆可以增加反硝化潜势,这也从侧面支持了本试验的结论。3种不同的施加方式下,4%US处理0~10 cm层土壤 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量最高,可能与土壤中季铵盐改性秸秆的含量有关。10~20 cm土层中4%GS处理 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量最高,且与其他处理有显著差异,可能是因为秸秆作为隔层具有保肥与稳肥的作用,对 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 挥发形成了物理阻隔^[35-36]。

4 结论

(1)季铵盐改性秸秆对总氮淋失的阻控效率达13.9%~78.7%,且随秸秆添加量的增加而升高,施加4%季铵盐改性秸秆最有利于养殖肥液灌溉土壤氮素淋溶阻控。

(2)施加季铵盐改性秸秆后,土壤 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量降低,秸秆的施用能够有效降低 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 淋溶。

(3)养殖肥液灌溉后氮素淋失以 $\text{NO}_3\text{-N}$ 为主,约占氮素总淋失量的70%。

参考文献:

- [1] 张亦涛, 刘宏斌, 王洪媛, 等. 农田施氮对水质和氮素流失的影响[J]. 生态学报, 2016, 36(20): 6664–6676. ZHANG Y T, LIU H B, WANG H Y, et al. A bibliometric analysis of status and trend of international research on field nitrogen application effects on nitrogen losses and water quality[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2016, 36(20): 6664–6676.
- [2] 张万锋, 杨树青, 孙多强, 等. 秸秆覆盖与氮减施对土壤氮分布及地下水氮污染影响[J]. 环境科学, 2021, 42(2): 786–795. ZHANG W F, YANG S Q, SUN D Q, et al. Effects of straw mulching and nitrogen reduction on the distribution of soil nitrogen and groundwater nitrogen pollution[J]. *Environmental Science*, 2021, 42(2): 786–795.
- [3] 孙晓姝. 设施菜地氮磷负荷及秸秆调控氮磷淋洗的研究[D]. 太原: 山西大学, 2020: 1–5. SUN X S. N and P accumulation status in greenhouse and their leaching regulated by straw[D]. Taiyuan: Shanxi University, 2020: 1–5.
- [4] 黄梓柳, 刘善江, 孙昊, 等. 我国蔬菜肥料利用率现状与提高对策[J]. 蔬菜, 2021(7): 43–50. HUANG Z C, LIU S J, SUN H, et al. Current situation and improvement countermeasures of fertilizer utilization rate in vegetables of China[J]. *Vegetables*, 2021(7): 43–50.
- [5] 于法稳, 杨果. 农作物秸秆资源化利用的现状、困境及对策[J]. 社会科学家, 2018(2): 33–39. YU F W, YANG G. The status quo, predicament and countermeasures of crop straw resource utilization[J]. *Social Scientist*, 2018(2): 33–39.
- [6] AHMED M, HAMEED B, HUMMADI E. Insight into the chemically modified crop straw adsorbents for the enhanced removal of water contaminants: A review[J]. *Journal of Molecular Liquids*, 2021, 330: 115616.
- [7] GOODMAN B A. Utilization of waste straw and husks from rice production: A review[J]. *Journal of Bioresources and Bioproducts*, 2020, 5(3): 143–162.
- [8] 韩珏, 李佳欣, 崔红艳, 等. 改性玉米秸秆吸附磷的动力学和热力学特征研究[J]. 农业环境科学学报, 2020, 39(9): 2008–2014. HAN J, LI J X, CUI H Y, et al. Kinetic and thermodynamic characteristics of phosphorus adsorption by modified corn straw[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2020, 39(9): 2008–2014.
- [9] WANG L, XU Z, FU Y, et al. Comparative analysis on adsorption properties and mechanisms of nitrate and phosphate by modified corn stalks[J]. *RSC Advances*, 2018, 8(64): 36468–36476.
- [10] FAN C, ZHANG Y. Adsorption isotherms, kinetics and thermodynamics of nitrate and phosphate in binary systems on a novel adsorbent derived from corn stalks[J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 2018, 188: 95–100.
- [11] 张涛. 磁改性农用秸秆吸附联用反硝化脱氮去除水源水中硝酸盐的研究[D]. 济南: 济南大学, 2017: 35–36. ZHANG T. The application research of nitrate removal from water sources using modified magnetic agricultural straw combined with denitrification[D]. Jinan: University of Jinan, 2017: 35–36.
- [12] 王林. 改性玉米秸秆吸附剂去除水中硝酸盐和磷酸盐研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2019: 13–25. WANG L. Study on removal of nitrate and phosphate from water by modified corn straw adsorbent[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2019: 13–25.
- [13] 付莉. 化肥减施与养殖肥水替代对设施菜地土壤氮磷平衡的影响[D]. 北京: 中国农业科学院, 2020: 1–2. FU L. Effects of chemical fertilizer reduction and slurry substituted on nitrogen and phosphorus balance in protected vegetable fields[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2020: 1–2.
- [14] 杜会英, 冯洁, 郭海刚, 等. 麦季牛场肥水灌溉对冬小麦-夏玉米轮作土壤氮素平衡的影响[J]. 农业工程学报, 2015, 31(3): 159–165. DU H Y, FENG J, GUO H G, et al. Effects of dairy effluents irrigation on N balance in soil under winter wheat–summer maize rotation system[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2015, 31(3): 159–165.
- [15] 张鹏翔. 设施农业施肥存在的问题与对策[J]. 农民致富之友, 2017(22): 50. ZHANG P X. Problems and countermeasures of fertilization in facility agriculture[J]. *Friends of Farmers Getting Rich*, 2017(22): 50.
- [16] TEI F, DE NEVE S, DE HAAN J, et al. Nitrogen management of vegetable crops[J]. *Agricultural Water Management*, 2020, 240: 13.
- [17] 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: 146–163. LU R K. Soil agricultural chemical analysis method[M]. Beijing: China Agriculture Science and Technique Press, 2000: 146–163.
- [18] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法[M]. 四版. 北京: 中国环境科学出版社, 2002: 254–281. State Environmental Protection Administration. Methods for monitoring and analysis of water and wastewater[M]. 4th Edition. Beijing: China Environmental Science Press, 2002: 254–281.
- [19] 张宏威, 康凌云, 梁斌, 等. 长期大量施肥增加设施菜田土壤可溶性有机氮淋溶风险[J]. 农业工程学报, 2013, 29(21): 99–107. ZHANG H W, KANG L Y, LIANG B, et al. Long-term heavy fertilization increases leaching risk of soil soluble organic nitrogen in vegetable greenhouse[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2013, 29(21): 99–107.
- [20] 陈尚洪. 还田秸秆腐解特征及其对稻田土壤碳库的影响研究[D]. 雅安: 四川农业大学, 2007: 18–35. CHEN S H. Study on decomposition characteristics of straw return to soil and its effect on different available carbons[D]. Ya'an: Sichuan Agricultural University, 2007: 18–35.
- [21] 张一. 不同外源添加物质对土壤氮磷素淋溶特征的影响[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2017: 27–33. ZHANG Y. Effects of different external materials on the leaching characteristics of soil nitrogen and phosphorus[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2017: 27–33.
- [22] 张静, 王德建, 王灿. 用原状土柱研究太湖地区稻麦轮作农田养分淋溶量[J]. 土壤, 2008, 40(4): 591–595. ZHANG J, WANG D J, WANG C. On Nutrient leaching amount of rice–wheat rotation field with monolith lysimeter in Taihu Lake area[J]. *Soils*, 2008, 40(4): 591–595.

- 591-595.
- [23] 杨涵博, 赖睿特, 张克强, 等. 硝化抑制剂阻控养殖肥液灌溉土壤氮素淋失[J]. 农业环境科学学报, 2019, 38(8): 1751-1758. YANG H B, LAI R T, ZHANG K Q, et al. Nitrification inhibitors prevent nitrogen leaching in soil irrigated by biogas slurry[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2019, 38(8): 1751-1758.
- [24] KALARUBAN M, LOGANNATHAN P, SHIM W, et al. Enhanced removal of nitrate from water using amine-grafted agricultural wastes[J]. *Science of the Total Environment*, 2016, 565: 503-510.
- [25] GEISSELER D, JOERGENSEN R G, LUDWING B. Temporal effect of straw addition on amino acid utilization by soil microorganisms[J]. *European Journal of Soil Biology*, 2012, 53: 107-113.
- [26] 杨立杰, 张丽莉, 李东坡, 等. 硝化抑制剂和秸秆对潮棕壤碳氮转化和微生物群落特征的短期影响[J]. 中国土壤与肥料, 2017(1): 86-91. YANG L J, ZHANG L L, LI D P, et al. Short-term effects of nitrification inhibitor and straw on aquic brown soil carbon and nitrogen mineralization and microbial community structure[J]. *Soil and Fertilizer Sciences*, 2017(1): 86-91.
- [27] 汪东炎. 华北潮褐土区露地菜地氮磷淋溶特征及阻控措施研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2019: 11-38. WANG D Y. Leaching Characteristics of nitrogen and phosphorus and control practices from an open field used for vegetable planting in meadow cinnamon soil of north China[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2019: 11-38.
- [28] 赖睿特, 杨涵博, 张克强, 等. 硝化/脲酶抑制剂和生物炭联合施用对养殖肥液滴灌土壤氮淋失及油菜品质的影响[J]. 农业环境科学学报, 2019, 38(12): 2808-2815. LAI R T, YANG H B, ZHANG K Q, et al. Effects of combined application of nitrification / urease inhibitor and biochar on soil nitrogen leaching and quality of *Brassica campestris* after digested slurry drip irrigation[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2019, 38(12): 2808-2815.
- [29] 张震, 唐华, 郭彦军. 不同环境温度下沼液养分在土壤中的淋失模拟研究[J]. 草业学报, 2015, 24(4): 57-65. ZHANG Z, TANG H, GUO Y J. Simulation study of nutrient leaching from soils irrigated with biogas slurry under different environmental temperatures[J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2015, 24(4): 57-65.
- [30] LIU J, MA L Y, JIA Z K, et al. Leaching characteristics of nitrogen in fluvo-aquic soil after applying urea[J]. *Journal of Northeast Forestry University*, 2010, 38(5): 71-73.
- [31] STJEPANOVIC M, VELIC N, LONCARIC A, et al. Adsorptive removal of nitrate from wastewater using modified lignocellulosic waste material[J]. *Journal of Molecular Liquids*, 2019, 285: 535-544.
- [32] 隋欣恬. 改性玉米秸秆去除水中硝酸根和磷酸根的特性和机理研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2017: 30-39. SUI X T. Study on the removal of nitrate and phosphate from water by modified corn straw: Characteristics and mechanism[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2017: 30-39.
- [33] 赵鹏, 陈阜. 秸秆还田配施氮肥对夏玉米氮利用及土壤硝态氮的影响[J]. 河南农业大学学报, 2009, 43(1): 14-18. ZHAO P, CHEN F. Effects of straw mulching and nitrogen fertilizer application on nitrogen use in summer maize and soil nitrate content[J]. *Journal of Henan Agricultural University*, 2009, 43(1): 14-18.
- [34] 董怡华, 张玉革, 孙树林, 等. 不同尿素配施处理下土壤氨挥发特性[J]. 生态学杂志, 2014, 33(11): 2943-2949. DONG Y H, ZHANG Y G, SUN S L, et al. Soil ammonia volatilization under different urea combined fertilization treatments[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2014, 33(11): 2943-2949.
- [35] 腾珍珍, 袁磊, 王鸿雁, 等. 免耕秸秆覆盖条件下尿素来源铵态氮和硝态氮的累积与垂直运移过程[J]. 土壤通报, 2018, 49(4): 919-928. TENG Z Z, YUAN L, WANG H Y, et al. Vertical migration characteristics of ammonium nitrogen and nitrate nitrogen derived from urea nitrogen affected by corn stover mulching quantity in no-tillage system[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2018, 49(4): 919-928.
- [36] 贾树龙, 唐玉霞, 孟春香, 等. 土壤铵态氮固定的调控措施及其效果[J]. 河北农业科学, 2002(2): 12-17. JIA S L, TANG Y X, MENG C X, et al. Regulation and control measures of soil ammonium nitrogen fixation and their effects[J]. *Journal of Hebei Agricultural Sciences*, 2002(2): 12-17.