

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 Han-bo, LAI Rui-te, ZHANG Ke-qiang, et al. Nitrification inhibitors prevent nitrogen leaching in soil irrigated by biogas slurry[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2019, 38(8): 1751-1758.

硝化抑制剂阻控养殖肥液灌溉土壤氮素淋失

杨涵博^{1,2}, 赖睿特², 张克强², 沈丰菊², 李佳佳², 高文萱², 罗艳丽^{1*}, 王 风^{2*}

(1. 新疆农业大学草业与环境科学学院, 乌鲁木齐 830052; 2. 农业农村部环境保护科研监测所, 天津 300191)

摘要:为考察硝化抑制剂伴施养殖肥液灌溉条件下土壤氮素的淋溶特征和阻控效果, 采用土柱模拟淋溶试验, 设置尿素溶液单施、养殖肥液单施、以及养殖肥液分别伴施双氰胺(DCD, 5%、10%和15%)和氯甲基吡啶(Nitrapyrin, 0.25%、0.5%和1%)处理, 连续监测了5个灌溉周期土壤淋溶液中铵态氮(NH₄⁺-N)、硝态氮(NO₃⁻-N)、总氮(TN)和溶解性有机碳(DOC)淋失特征。养殖肥液单施比尿素溶液单施显著减少碳氮的淋失浓度和淋失量。养殖肥液伴施 DCD 和 Nitrapyrin 淋溶液中 TN、NH₄⁺-N、NO₃⁻-N、DOC 浓度分别比单施养殖肥液降低 27.19%、35.69%、45.89%、53.69% 和 24.86%、30.87%、21.10%、64%, 处理间均达到 5% 显著水平。从抑制效果及经济节约角度, 推荐 5% DCD 伴施养殖肥液是优化的养分淋溶阻控模式。此外, 发现养殖肥液连续饱和灌溉条件下土壤淋溶液硝态氮浓度与氧化还原电位间存在显著的相关性($R^2=0.6028^*$, $n=34$)。养殖肥液伴施硝化抑制剂是抑制养分淋失、提高养分利用效率和控制硝态氮淋溶污染的有效措施, 但抑制剂的作用效果、抑制时间与施用方式之间的关系还需要进一步研究。

关键词: 养殖肥液; 双氰胺; 氯甲基吡啶; 氮素; 淋失

中图分类号: X712 文献标志码: A 文章编号: 1672-2043(2019)08-1751-08 doi:10.11654/jaes.2018-1572

Nitrification inhibitors prevent nitrogen leaching in soil irrigated by biogas slurry

YANG Han-bo^{1,2}, LAI Rui-te², ZHANG Ke-qiang², SHEN Feng-ju², LI Jia-jia², GAO Wen-xuan², LUO Yan-li^{1*}, WANG Feng^{2*}

(1. College of Grass and Environmental Sciences, Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830052, China; 2. Agro-Environmental Protection Institute, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Tianjin 300191, China)

Abstract: The aim of this study is to investigate the control efficiency of soil nitrogen leaching by nitrification inhibitors under biogas slurry irrigation conditions. Laboratory simulation tests were performed, including urea solution treatment, biogas slurry treatment, and nitrification inhibitors treatments. The concentrations of nitrification inhibitors were 5%, 10%, and 15% of DCD and 0.25%, 0.5%, and 1% of nitrapyrin. Ammonium nitrogen (NH₄⁺-N), nitrate nitrogen (NO₃⁻-N), total nitrogen (TN), and dissolved organic carbon content (DOC) in the soil leaching solution were monitored for five continuous irrigation cycles. Compared with urea solution group, the application of biogas slurry could reduce the leaching loss of nitrogen and DOC. The concentrations of TN, NH₄⁺-N, NO₃⁻-N, and DOC in leachate in DCD group were reduced by 27.19%, 35.69%, 45.89%, 53.69%, and in nitrapyrin group by 24.86%, 30.87%, 21.10%, 64%, respectively, with 5% level of significance for various treatments. Considering the cost and control effects, application of DCD at 5% with biogas slurry was recommended as an optimized control mode for preventing nutrient leaching. In addition, a significant correlation was found between nitrate concentration in soil leaching solution and redox potential under continuous saturated biogas irrigation ($R^2=0.6028^*$, $n=34$). The application of nitrification inhibitor in biogas slurry is an effective measure to restrict nutrient leaching, improve nutrient utilization efficiency, and control nitrate nitrogen leaching pollution. However, the relationship among the control efficiency, inhibition time, and application methods requires further investigation.

Keywords: biogas slurry; DCD; nitrapyrin; nitrogen; leaching loss

收稿日期: 2018-12-11 录用日期: 2019-05-17

作者简介: 杨涵博(1995—), 女, 河北沧州人, 硕士研究生, 研究方向为农业废弃物循环利用。E-mail: wxhxr520@163.com

*通信作者: 罗艳丽 E-mail: luoyanlimail@sina.com; 王 风 E-mail: wangfeng_530@163.com

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFD0800403); 天津自然科学基金项目(16JCYBJC29700); 农业农村部财政项目; 博士后基金(2018M640209)

Project supported: The National Key R&D Program of China(2017YFD0800403); The Natural Foundation of Tianjin(16JCYBJC29700); Finance Projects of the Ministry of Agriculture and Rural Affairs; China Postdoctoral Science Foundation(2018M640209)

2016年我国设施蔬菜面积达到391.5万 hm^2 ,预计到2020年将稳定增长到410.5万 hm^2 。设施蔬菜因高产量、高品质与高效益等特点,已经发展成为我国农业的主体产业^[1]。但是,设施蔬菜因大水大肥的管理方式也造成了土壤养分大量淋失,在灌溉作用下约有30%~50%的氮素通过淋溶损失^[2-4]。山东设施蔬菜集中生产区地下水硝态氮浓度为49.6~78.0 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,超过国家地下水饮用标准^[5]。

配施硝化抑制剂作为一种有效降低氮素损失的技术,已被广泛研究并得以实际应用^[6-7]。硝化抑制剂通过抑制氮肥氨氧化作用和亚硝化作用^[8],降低亚硝化细菌和硝化细菌的活性,从而抑制土壤中的 NH_4^+ 被氧化为 NO_3^- ,减少硝态氮在土壤中的生成和累积^[9-10],进而减少氮肥以硝态氮形式的淋溶损失及对生态环境的影响。目前应用最为广泛的硝化抑制剂是双氰胺(DCD)和氯甲基吡啶(Nitrapyrin)^[11-12]。研究表明,DCD的施入对 NH_4^+ -N累积有一定效果,设施番茄配施DCD后0~30 cm土层 NO_3^- -N含量降低了63.70%~80.53%^[13],而DCD施加量在施氮量的1%~5%时,氮素淋失量显著降低了23.68%~37.94%^[14]。Owens发现施用Nitrapyrin可使土壤氮素淋溶损失减少13%^[15]。也有研究发现DCD和Nitrapyrin均可显著抑制土壤铵态氮向硝态氮的转化,两种抑制剂处理的土壤铵态氮含量分别较不施加抑制剂处理增加了46.2~256.1 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和3.68~372.9 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ^[16]。

然而,国内外对硝化抑制剂阻控土壤氮素淋失的研究大多数是基于化肥施用条件下进行的,总体结论为硝化抑制剂有利于减少硝态氮的淋溶损失。但是以养殖肥液为主体的新型肥料在设施农业中得到越来越广泛的应用,而养殖肥液作为一种养分浓度比较高的有机态氮和无机态氮混合肥料,氮素的浓度及其形态的复杂程度远超过化肥。正因为养殖肥液具有以上特性,在农田灌溉过程中单独施用会加剧氮素的淋失^[17]。因此,阻控养殖肥液灌溉土壤的氮素淋溶损失十分重要。本研究拟通过土柱模拟试验,研究两种硝化抑制剂伴施养殖肥液灌溉土壤氮素淋失特征与效果,为养殖肥液在设施蔬菜上的安全利用提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料与装置

1.1.1 供试土壤

供试土壤采自天津市宁河区设施蔬菜大棚0~20

cm表层土壤,土壤质地类型为壤土。新鲜土样经自然风干后,拣出作物残根及石块,过2 mm筛后混匀,备用。土样pH值8.61,铵态氮(NH_4^+ -N)含量7.40 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,硝态氮(NO_3^- -N)含量2.18 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,总氮(TN)含量0.71 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$,土壤有机质含量22.81 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。

1.1.2 供试硝化抑制剂及肥料

DCD生产厂家为上海麦克林生化科技有限公司,分析纯,纯度99%。Nitrapyrin生产厂家为北京百灵威科技有限公司,分析纯,纯度98%。尿素生产厂家为天津市津科精细化工研究所,分析纯,纯度99%。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,原料为猪场粪污,养殖肥液pH值8.30, NH_4^+ -N浓度464.80 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, NO_3^- -N浓度2.11 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,TN浓度692.55 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,溶解性有机碳(DOC)浓度100.18 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。

1.1.3 土壤淋溶模拟装置与填装过程

淋溶模拟装置(图1)为PVC材质,内径19 cm,高40 cm。柱体内部下端铺有100目的尼龙网,起到初步过滤作用,柱体底部的出水管内装满脱脂棉花,深度过滤水样。将土柱固定在稳定的钢架上,所有土柱保持与地面垂直,柱体出水口处接有容器收集土壤淋溶液,收集容器与淋溶柱口紧密相连以隔绝空气。所有处理均按照1.26 $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 的自然土壤容重模拟填装,同时将DCD和Nitrapyrin分别按照各处理设置伴施量溶于水后与土壤均匀混合后一并填装。填装时在PVC管内壁均匀涂抹一层凡士林减小边缘效应,将风干过筛的土样分两层(每层高10 cm)依次填装压实、再填装压实^[18]。土壤填装高度设计为20 cm,柱体上部空

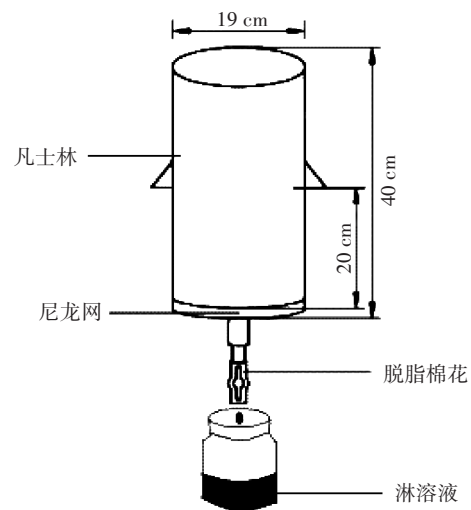


图1 试验用土壤养分淋溶模拟装置

Figure 1 Soil nutrients leaching simulator

间用于灌溉。

1.2 试验方法

1.2.1 试验设计

试验设置8个处理,单施尿素、单施肥液、3个DCD施用水平、3个Nitrapyrin施用水平,DCD和Nitrapyrin的用量均为施氮量的百分比。其中单施尿素处理将尿素与水混匀,逐次灌溉。处理如下,处理1(CK1):单施尿素,处理2(CK2):单施肥液,处理3(5%DCD):5%DCD+肥液,处理4(10%DCD):10%DCD+肥液,处理5(15%DCD):15%DCD+肥液,处理6(0.25%Nitra):0.25%Nitra+肥液,处理7(0.5%Nitra):0.5%Nitra+肥液,处理8(1%Nitra):1%Nitra+肥液。每个处理3次重复,共24个土柱。本试验所有处理的土柱单次施氮量和灌水量均为 $60\text{ kg N}\cdot\text{hm}^{-2}$ 和 250 mL ,每间隔3 d进行一次灌溉,5个灌溉淋溶周期施氮量共 $300\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,灌水量共 1250 mL 。

1.2.2 淋溶模拟试验

对土柱进行预处理,每日早8:00用去离子水 800 mL 淋洗1次,连续淋洗3 d,以减少由于土柱装填所造成的差异。稳定2 d后开始试验,试验开始后,在第1 d早晨8:00灌施 250 mL 肥液或去离子水,每次灌水后收集淋溶液直到不再渗出为止,每次灌施完成后,在土柱顶部用保鲜膜封好,间隔3 d进行一次灌溉,一共5个周期。每次淋溶液收集结束后,立即带回实验室进行养分浓度测定。

1.2.3 测定指标与方法

基础土壤样品pH值用pH计测定(水土比为5:1),含水量用烘干法测定,土壤总氮、 $\text{NH}_4\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3\text{-N}$ 含量用比色法测定^[19]。淋溶液总氮浓度采用碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法、 $\text{NH}_4\text{-N}$ 浓度用纳氏试剂法、 $\text{NO}_3\text{-N}$

浓度用紫外分光光度法、pH值用pH计测定,DOC浓度用TOC仪测定,ORP用氧化还原电位计测定^[20]。

1.3 数据处理

试验数据采用Excel 2010和SPSS 19.0软件进行统计分析。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 淋溶液铵态氮浓度变化特征

两种硝化抑制剂伴施养殖肥液灌溉土壤淋溶液铵态氮浓度见图2。如图所示,随尿素溶液灌溉次数增加,CK1淋溶液铵态氮浓度快速增加,在灌溉第5次浓度增加到 $14\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。养殖肥液单施和两种硝化抑制剂伴施处理,随灌溉次数增加淋溶液铵态氮总体变化较小,基本在第3次灌溉时达到铵态氮浓度极大值,该数值在 $1.8\sim 3.4\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 之间,随后铵态氮浓度降低。灌溉的第2至第5次,CK2和硝化抑制剂伴施处理与CK1处理相比铵态氮浓度均显著降低($P<0.05$)。虽然施用硝化抑制剂处理淋溶液中铵态氮浓度比CK2平均降低28.69%,但仅在第3次灌溉中10%DCD、15%DCD和0.25%Nitra 3个处理铵态氮浓度与CK2之间达到显著性水平($P<0.05$)。在灌溉的第1次、第3次和第5次DCD与氯甲基吡啶表现出显著差异($P<0.05$),DCD的抑制效果更好。

2.2 淋溶液硝态氮浓度变化特征

两种硝化抑制剂伴施养殖肥液灌溉土壤淋溶液硝态氮浓度见图3。如图所示,随灌溉次数增加CK1和CK2处理淋溶液硝态氮浓度快速降低,并从第3次灌溉起趋于平稳,随灌溉次数增加,硝化抑制剂伴施处理淋溶液硝态氮浓度先降低并均在第3次灌溉时

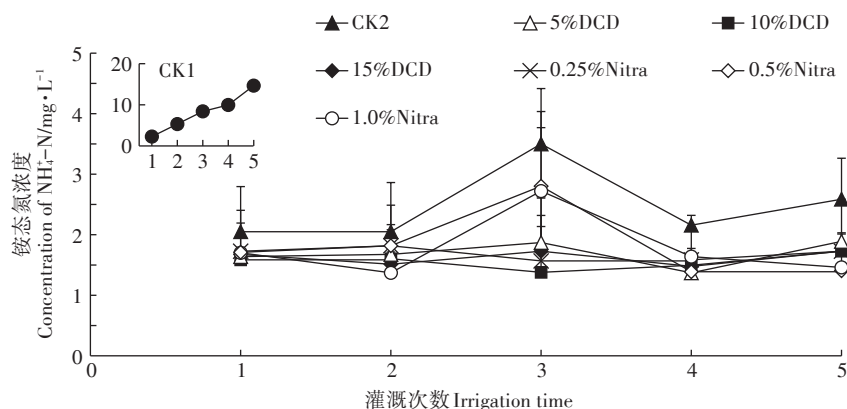


图2 两种硝化抑制剂伴施养殖肥液灌溉土壤淋溶液铵态氮浓度

Figure 2 Ammonium nitrogen concentrations in leaching water

达到极低值,随后浓度有增加趋势。在第3次灌溉前,CK2和硝化抑制剂伴施处理(除15%DCD处理外)淋溶液硝态氮浓度均比CK1显著降低($P<0.05$)。在第1次灌溉中,硝化抑制剂伴施处理淋溶液硝态氮浓度均比CK2降低了27.4%~78%,均达到显著水平($P<0.05$)。第2次灌溉过程中,两种硝化抑制剂不同施用量处理淋溶液硝态氮浓度比CK2处理降低了15.9%~78.9%,其中5%DCD处理达到显著水平($P<0.05$)。第1次和第2次灌溉中,淋溶液硝态氮浓度呈现5%DCD<10%DCD<15%DCD趋势,而0.5%Nitra处理硝态氮浓度比其他两个剂量更低。第3次灌溉中硝化抑制剂伴施处理与养殖肥液单施处理间差异不显著。

8个处理在5次灌溉过程中,土壤淋溶液硝态氮浓度与溶液ORP相关分析结果为:

$$y=2.3249x-314.57(R^2=0.6028^*,n=34)$$

土壤淋溶液硝态氮浓度与溶液氧化还原电位间存在显著相关关系($P<0.05$)。

2.3 淋溶液总氮浓度变化特征

两种硝化抑制剂伴施养殖肥液灌溉土壤淋溶液总氮浓度见图4。总氮浓度变化特征与硝态氮浓度相似,随灌溉次数的增加,各处理淋溶液总氮浓度逐渐下降,至第3次灌溉硝化抑制剂添加处理总氮浓度达到极小值,随后浓度略有增加,而CK1和CK2处理总氮浓度基本稳定直至整个灌溉过程。前2次灌溉中,CK2和硝化抑制剂伴施处理淋溶液总氮浓度比CK1显著降低($P<0.05$),施用硝化抑制剂处理淋溶液中总氮浓度比CK2平均降低47%,淋溶液总氮浓度呈现5%DCD<10%DCD<15%DCD趋势,而0.5%Nitra处理总氮浓度比其他两个剂量更低。

2.4 淋溶液DOC浓度变化特征

两种硝化抑制剂伴施养殖肥液灌溉土壤淋溶液DOC浓度见图5。如图所示,随灌溉次数的增加,各处理淋溶液DOC浓度逐渐下降,处理间DOC浓度总体呈现CK1>CK2>硝化抑制剂处理,CK2处理DOC浓度比CK1降低了19.3%~44.8%,硝化抑制剂处理DOC浓度比CK2降低了37.5%~66.35%,三大类处理间每

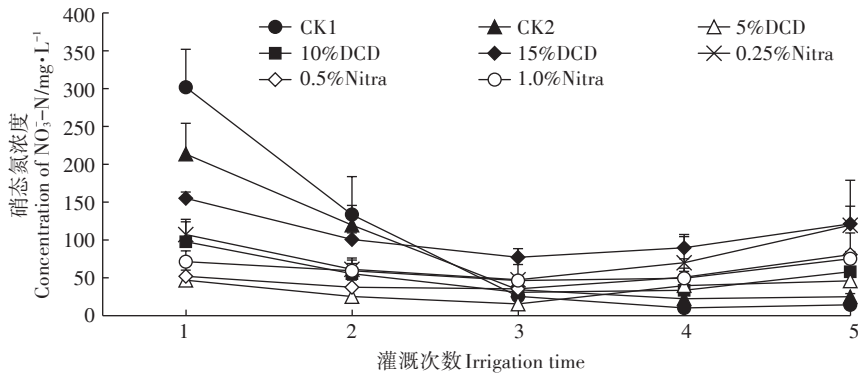
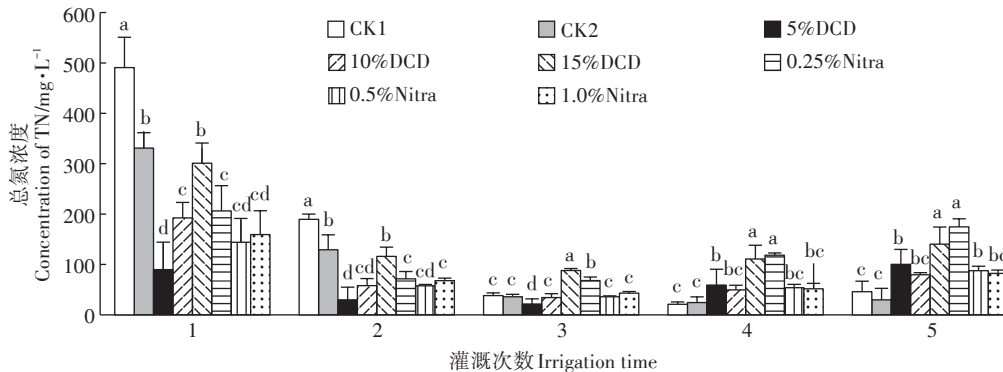


图3 两种硝化抑制剂伴施养殖肥液灌溉土壤淋溶液硝态氮浓度
Figure 3 Nitrate nitrogen concentrations in leaching water



柱上不同字母表示单次灌溉时处理间差异显著($P<0.05$)。下同
Different letters on the column indicate significant differences between different treatments for single irrigation ($P<0.05$). The same below

图4 两种硝化抑制剂伴施养殖肥液灌溉土壤淋溶液总氮浓度
Figure 4 Total nitrogen concentrations in leaching water

次灌溉后淋溶液 DOC 浓度均达到 5% 显著水平。但是两种硝化抑制剂之间以及不同施用剂量间淋溶液 DOC 浓度差异不显著。

2.5 不同处理养分淋失量

两种硝化抑制剂伴施养殖肥液灌溉土壤养分淋失量见表 1。不同处理总氮淋失量为 220.62~570.16 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, 除 15%DCD 和 0.25%Nitra 处理外, 其余处理均显著低于 CK1。5%DCD 总氮淋失量比 CK2 处理降低了 42%。施加养殖肥液和两种抑制剂伴施处理铵态氮淋失量比 CK1 显著减少 ($P<0.05$), 但不同剂量的 DCD 和 Nitra 间差异不显著。5%DCD 硝态氮淋失量比其他处理降低 36%~73%。CK2 处理 DOC 淋失量显著低于 CK1 处理, 抑制剂伴施处理 DOC 淋失量比 CK2 处理显著降低 ($P<0.05$)。

3 讨论

3.1 两种硝化抑制剂伴施养殖肥液灌溉土壤对淋溶液氮素浓度的影响

试验结果表明, 尿素溶液连续灌溉导致淋溶液铵

态氮浓度持续增加, 而养殖肥液灌溉处理淋溶液铵态氮浓度保持在较低水平。主要原因是尿素溶液在土壤中易随饱和和水分迁移至下部土层^[21-22], 而存留在下部土层的尿素分子一般经过 3~5 d 就能在土壤脲酶作用下转化成铵态氮^[18, 23], 由于间歇性饱和和水分灌溉使铵态氮淋溶出土层^[21, 24-25], 这也是试验过程随灌溉次数增加土壤淋溶液铵态氮浓度持续增加的原因。养殖肥液氮素形态以铵态氮和有机态氮素为主, 其中铵态氮通常占总氮 70% 左右, 灌溉后铵态氮可以被土体颗粒迅速吸附^[26-27], 从而降低淋溶液中铵态氮浓度。

所有处理淋溶液硝态氮和总氮浓度在前 3 次灌溉过程显著降低, 伴施两种硝化抑制剂处理的后 3 次灌溉浓度普遍升高趋势, 尿素单施和肥液单施处理的后 3 次灌溉浓度略有降低或基本稳定。随灌溉次数增加土壤淋溶液硝态氮浓度逐渐降低, 因为尿素和养殖肥液中氮素主要形态均不是硝态氮, 硝态氮是通过有机氮脲酶水解转化和铵态氮硝化作用形成的^[23], 而在含水量饱和的土壤中氧化还原电位可能是控制铵

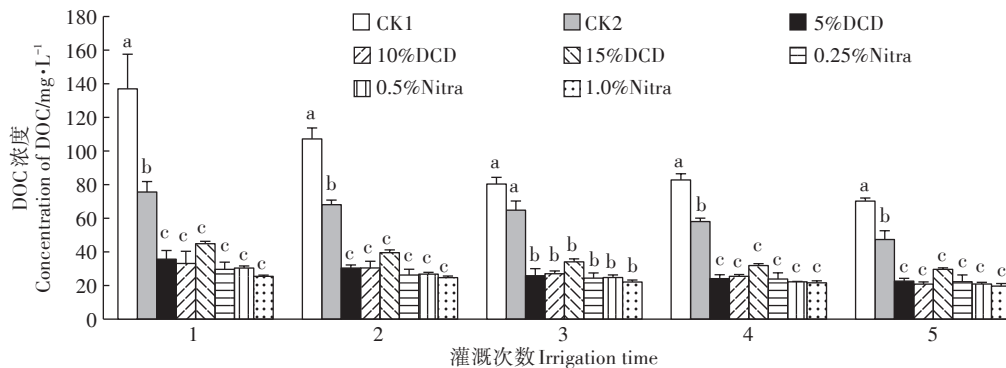


图 5 两种硝化抑制剂伴施养殖肥液灌溉土壤淋溶液 DOC 浓度

Figure 5 DOC concentrations in leaching water

表 1 不同处理养分淋失量 ($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)

Table 1 Nutrient loss in different treatments ($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)

处理 Treatments	总氮 TN 淋溶量 TN content of leaching	铵态氮 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 淋溶量 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ content of leaching	硝态氮 $\text{NO}_3^+\text{-N}$ 淋溶量 $\text{NO}_3^+\text{-N}$ content of leaching	DOC 淋溶量 DOC content of leaching
CK1	570.16±76.27a	37.74±0.63a	370.13±55.36a	368.86±7.79a
CK2	381.97±51.28bcd	9.77±0.60b	292.02±50.36ab	251.52±60.43b
5%DCD	220.62±51.27d	6.04±0.06b	101.63±20.07c	106.71±8.77c
10%DCD	335.58±43.62cd	5.93±0.03b	223.36±39.51abc	110.25±5.34c
15%DCD	551.31±34.93ab	5.58±0.01b	334.84±17.03a	132.47±1.58c
0.25%Nitra	427.98±50.16abc	5.15±0.12b	221.29±19.44abc	86.70±4.54c
0.5%Nitra	274.36±27.03cd	6.79±0.06b	159.97±16.12bc	93.10±8.77c
1%Nitra	264.42±43.28cd	6.06±0.17b	178.50±14.83abc	80.07±7.34c

注: 同列不同小写字母表示处理间差异显著 ($P<0.05$)。

Note: Different letters in the same column mean significant differences among different treatments ($P<0.05$).

态氮转化成硝态氮的关键因素,本研究表明土壤淋溶液硝态氮浓度与其氧化还原电位显著相关,且随饱和灌溉次数增加,淋溶液硝态氮浓度逐渐降低。长期淹水的稻田土壤中以铵态氮形态为主且硝态氮含量极低的现象^[28]也侧面支持了试验结论。此外,本试验发现淋溶液中硝态氮浓度占总氮的70%以上,表明硝态氮仍然是淋溶液氮素的主要形态,与化肥施用条件下研究结果一致^[29]。同时也说明,养殖肥液灌溉条件下淋溶液中除速效氮形态外,仍然存在其他形态的氮素,如有机氮^[30],可能与养殖肥液中较高的有机氮浓度有关。

试验结果发现 DCD 和 Nitrapyrin 能够有效降低养殖肥液灌溉土壤淋溶液硝态氮、铵态氮和总氮浓度。同时 5%DCD 和 0.25%Nitra 剂量处理的淋溶液养分浓度较低,抑制效果最好。但是随灌溉过程持续的氮素投入,抑制剂的抑制效果有所降低。已有研究表明施加 DCD 和 Nitrapyrin 能显著抑制施肥条件下土壤中 NH_4^+ 的氧化,减少硝酸盐的形成^[31-32],本试验证实硝化抑制剂在养殖肥液施用条件下仍然能够发挥抑制铵态氮氧化的作用,而且较低剂量的硝化抑制剂就能发挥较好的淋溶阻控效果。施加硝化抑制剂处理在第 3 次灌溉时淋溶液硝态氮浓度有升高的趋势,可能因为随着试验周期的增加,不同处理土壤硝化过程的底物累积差异导致其浓度不同,另一方面可能因为抑制剂溶于水特征会随试验周期的增加抑制效果逐渐减弱^[13],所以在实际应用中应考虑及时追施抑制剂或者将抑制剂土壤施用改为与养殖肥液混合施用。

3.2 两种硝化抑制剂伴施养殖肥液灌溉土壤对淋溶液碳素浓度的影响

本试验表明尿素溶液灌溉淋溶液 DOC 浓度显著高于养殖肥液单施处理。尿素溶液灌溉淋溶液 DOC 浓度最高,主要因为尿素溶于水,尿素分子含有的碳元素会直接随尿素分子淋溶出土体,而此处理淋溶液 DOC 的来源也主要是尿素。灌溉养殖肥液增加了微生物生长所需的碳源和能源^[33],有研究表明施加沼液比施加尿素明显提高了土壤微生物数量和酶活性^[34],养殖肥液中有有机碳可能被微生物截留而存在于土壤中,从而降低了 DOC 的淋失。

试验结果发现两种硝化抑制剂伴施养殖肥液淋溶液中 DOC 浓度削减显著,可能是硝化抑制剂影响了肥液施加的土壤碳氮循环,起到抑制有机碳分解的作用^[35]。有研究表明,在同时含有有机碳和无机碳的石灰性土壤中加入硝化抑制剂后,土壤 CO_2 释放量降

低了 11.0%~13.9%^[35]。

4 结论

(1)与尿素溶液灌溉相比,养殖肥液可以显著降低淋溶液中总氮、铵态氮、硝态氮和 DOC 的淋失,平均降低 33.01%、65.79%、38.03% 和 31.82%。

(2)硝化抑制剂伴施养殖肥液灌溉有利于养分淋溶的阻控,DCD 和 Nitrapyrin 伴施淋溶液中总氮、铵态氮、硝态氮、DOC 比养殖肥液灌溉平均降低 27.19%、35.69%、45.89%、53.69% 和 24.86%、30.87%、21.10%、64%。

(3)从抑制效果及经济角度推荐 5%DCD 伴施养殖肥液作为优化的养分淋溶阻控模式,但抑制剂的作用效果、抑制时间与施用方式之间的关系还需要进一步研究。

参考文献:

- [1] 王富强,傅常智,刘鲁江,等. 浅析设施蔬菜高效栽培特点及在我国发展的必要性[J]. 蔬菜, 2018(6):25-31.
WANG Fu-qiang, FU Chang-zhi, LIU Lu-jiang, et al. Analysis on the characteristics of high efficient cultivation of facility vegetable and the necessity of its development in China[J]. *Vegetable*, 2018(6):25-31.
- [2] 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 Peng-xiang. Problems and countermeasures of fertilization in protected agriculture[J]. *Friends of Farmers Becoming Rich*, 2017(22):50.
- [3] RB Thompson C, Martinez-Gaitan M, Gallardo C, et al. Identification of irrigation and N management practices that contribute to nitrate leaching loss from an intensive vegetable production system by use of a comprehensive survey[J]. *Agricultural Water Management*, 2007, 89(3):261-274.
- [4] 李卓瑞,韦高玲. 不同生物炭添加量对土壤中氮磷淋溶损失的影响[J]. 生态环境学报, 2016, 25(2):333-338.
LI Zhuo-ru, WEI Gao-ling. Effects of biochar with different additive amounts on the leaching loss of nitrogen and phosphorus in soils[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2016, 25(2):333-338.
- [5] 王春燕. 济南市郊设施蔬菜氮肥施用及硝态氮淋失状况研究[J]. 中国果菜, 2017, 37(2):22-25.
WANG Chun-yan. Study on nitrogen and nitrate leaching of greenhouse vegetable in outskirts of Jinan City[J]. *China Fruit Vegetable*, 2017, 37(2):22-25.
- [6] 王凤霞,刘旭,杨俊,等. 硝化抑制剂研究概况[J]. 云南化工, 2018, 45(2):69-71.
WANG Feng-xia, LIU Xun, YANG Jun, et al. Research overview of nitrification inhibitors[J]. *Yunnan Chemical Technology*, 2018, 45(2):69-71.
- [7] Mccarty G W, Bremner J M. Laboratory evaluation of dicyandiamide as

- a soil nitrification inhibitor[J]. *Communications in Soil Science & Plant Analysis*, 1989, 20(19/20):2049-2065.
- [8] 刘倩. 硝化抑制剂对土壤的硝化抑制效应及其微生物作用机理[D]. 石河子:石河子大学, 2011.
LIU Qian. Effect of different NIs on soil nitrification inhibition and its microbial mechanism[D]. Shihezi: Shihezi University, 2011.
- [9] 倪秀菊. 几种抑制剂对尿素水解和土壤硝化作用的影响[D]. 北京: 中国农业科学院, 2010.
NI Xiu-ju. Effects of inhibitors on urea hydrolysis and soil nitrification [D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2010.
- [10] 伍延正, 张苗苗, 秦红灵, 等. 双氰胺对冬闲稻田和油菜地 N_2O 排放的影响[J]. *环境科学*, 2017, 38(5):2084-2092.
WU Yan-zheng, ZHANG Miao-miao, QIN Hong-ling, et al. Effect of dicyandiamide on N_2O emission in fallow paddy field and rape cropping[J]. *Environmental Science*, 2017, 38(5):2084-2092.
- [11] 郭艳杰, 王小敏, 牛翠云, 等. 2种氮源与双氰胺配施对温室芹菜氮素吸收和营养品质的影响[J]. *水土保持学报*, 2016, 30(2):149-154.
GUO Yan-jie, WANG Xiao-min, NIU Cui-yun, et al. Effects of 2 kind of nitrogen sources with DCD application on nitrogen uptake and nutritional quality of greenhouse celery[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2016, 30(2):149-154.
- [12] 许超, 邝丽芳, 吴启堂, 等. 2-氯-6(三氯甲基)吡啶对菜地土壤氮素转化和径流流失及菜心品质的影响[J]. *水土保持学报*, 2013, 27(6):26-30.
XU Chao, KUANG Li-fang, WU Qi-tang, et al. Effects of nitrification inhibition nitrapyrin on nitrogen transformation and nitrogen loss and quality of *Brassica parachinensis* in vegetable soil[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2013, 27(6):26-30.
- [13] 杨威. 氮肥与双氰胺配施对温室番茄生长及氮素损失的影响研究[D]. 保定:河北农业大学, 2013.
YANG Wei. Effects of nitrogen fertilizer and DCD application on tomato growth and nitrogen losses in greenhouse[D]. Baoding: Hebei Agricultural University, 2013.
- [14] 洪瑜, 刘锦霞, 刘越, 等. 不同双氰胺用量对稻田土壤氮素淋失的影响[J]. *水土保持学报*, 2015, 29(1):116-120.
HONG Yu, LIU Jin-xia, LIU Yue, et al. Effects of different dicyandiamide rates on rice soil nitrogen leaching loss[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2015, 29(1):116-120.
- [15] Owens L B. Effects of nitrapyrin on nitrate movement in soil columns [J]. *Journal of Environmental Quality*, 2001, 10(3):308-310.
- [16] 王雪薇, 刘涛, 褚贵新. 三种硝化抑制剂抑制土壤硝化作用比较及用量研究[J]. *植物营养与肥料学报*, 2017, 23(1):54-61.
WANG Xue-wei, LIU Tao, CHU Gui-xin. Inhibition of DCD, DMPP and nitrapyrin on soil nitrification and their appropriate use dosage[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2017, 23(1):54-61.
- [17] 谢红梅, 朱波. 农田非点源氮污染研究进展[J]. *生态环境学报*, 2003, 12(3):100-103.
XIE Hong-mei, ZHU Bo. Research progress of non-point source nitrogen pollution in farmland[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2003, 12(3):100-103.
- [18] 邢英, 李心清, 王兵, 等. 生物炭对黄壤中氮淋溶影响:室内土柱模拟[J]. *生态学杂志*, 2011, 30(11):2483-2488.
XING Ying, LI Xin-qing, WANG Bing, et al. Effects of biochar on soil nitrogen leaching: A laboratory simulation test with yellow soil column[J]. *Journal of Ecology*, 2011, 30(11):2483-2488.
- [19] 杨剑虹, 王陈林, 代亨林. 土壤农化分析与环境监测[M]. 北京: 中国大地出版社, 2008:18-75.
YANG Jian-hong, WANG Chen-lin, DAI Heng-lin. Soil agrochemical analysis and environmental monitoring[M]. Beijing: China Earth Press, 2008:18-75.
- [20] 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.
- [21] 刘秋丽. 灌溉条件下尿素在土壤中的迁移转化规律研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2012.
LIU Qiu-li. Migration and transformation of urea in soil under the condition of irrigation and fertilization[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2012.
- [22] Abdelsabour M F, Massoud M A, Baveye P. The effect of water movement on the transport of dicyandiamide, ammonium and urea in unsaturated soils[J]. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 2010, 153(4):245-247.
- [23] 王薇, 李东坡, 王术, 等. 缓/控释尿素在稻田土壤中养分释放与转化特点及脲酶响应[J]. *水土保持学报*, 2010, 24(2):116-121, 145.
WANG Wei, LI Dong-po, WANG Shu, et al. Nutrient release and transformation characteristics of slow/controlled release urea fertilizers and response of urease in paddy soil[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2010, 24(2):116-121, 145.
- [24] 代文才, 高明, 王子芳, 等. 施氮对砖红壤铵态氮淋失特征的影响[J]. *西南师范大学学报(自然科学版)*, 2015, 40(9):162-167.
DAI Wen-cai, GAO Ming, WANG Zi-fang, et al. Effects of nitrogen application on ammonium leaching in latosol[J]. *Journal of Southwest China Normal University (Natural Science Edition)*, 2015, 40(9):162-167.
- [25] Azam F, Benckiser G, Muller C, et al. Release, movement and recovery of 3, 4-dimethylpyrazole phosphate (DMPP), ammonium, and nitrate from stabilized nitrogen fertilizer granules in a silty clay soil under laboratory conditions[J]. *Biology & Fertility of Soils*, 2001, 34(2):118-125.
- [26] 薛瑞祥, 周桂官, 苏生平. 大棚西瓜沼液滴灌施肥技术[J]. *中国瓜菜*, 2013, 26(1):54-55.
XUE Rui-xiang, ZHOU Gui-guan, SU Sheng-ping. Drip irrigation and fertilization technique of watermelon biogas liquid in greenhouse [J]. *Chinese Cucurbits and Vegetables*, 2013, 26(1):54-55.
- [27] 邓蓉, 陈玉成, 史秋萍. 模拟沼液淋溶灌溉对土壤下渗水的影响[J]. *水土保持学报*, 2013, 27(3):68-71.
DENG Rong, CHEN Yu-cheng, SHI Qiu-ping. Effects of simulated biogas slurry leaching irrigation on soil infiltration[J]. *Journal of Soil*

- and Water Conservation, 2013, 27(3):68-71.
- [28] 高翠民. 氮素形态影响水稻幼苗抗旱特性及根系通气组织形成机理的研究[D]. 南京:南京农业大学, 2015.
- GAO Cui-min. Effect of nitrogen forms on characteristics of drought resistance and mechanism of root aerenchyma formation of rice seedlings [D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2015.
- [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 Zhen, TANG Hua, GUO Yan-jun. Simulation study on leaching loss of biogas liquid nutrients in soil at different ambient temperatures[J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2015, 24(4):57-65.
- [30] Liu J, Ma L, 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] Chalk P M, Victoria R L, Muraoka T, et al. Effect of a nitrification inhibitor on immobilization and mineralization of soil and fertilizer nitrogen[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 1990, 22(4):533-538.
- [32] Zerulla W, Barth T, Dressel J, et al. 3, 4-Dimethylpyrazole phosphate (DMPP): A new nitrification inhibitor for agriculture and horticulture: An introduction[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2001, 34:79-84.
- [33] 李正, 敬海霞, 解昌盛, 等. 翻压绿肥对植烟土壤理化性状及烤烟常规化学成分的影响[J]. 华北农学报, 2012, 27(S1):275-280.
- LI Zheng, JING Hai-xia, XIE Chang-sheng, et al. Effects of green manure application on soil physical and chemical properties and chemical composition of flue-cured tobacco leaves[J]. *Acta Agriculturae Boreal-Sinica*, 2012, 27(S1):275-280.
- [34] 郑学博, 樊剑波, 何园球, 等. 沼液化肥全氮配比对土壤微生物及酶活性的影响[J]. 农业工程学报, 2015, 31(19):142-150.
- ZHENG Xue-bo, FAN Jian-bo, HE Yuan-qiu, et al. Effect of total nitrogen ratio of biogas slurry/chemical fertilizer on microflora and enzyme activities of soil[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2015, 31(19):142-150.
- [35] 李雪松, Sajjad Raza, 刘占军, 等. 氮肥及硝化抑制剂配合施用对石灰性土壤二氧化碳释放的影响[J]. 农业环境科学学报, 2017, 36(8):1658-1663.
- LI Xue-song, Sajjad R, LIU Zhan-jun, et al. Effects of application of nitrogen fertilizer and nitrification inhibitor on carbon dioxide emissions from calcareous soil[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2017, 36(8):1658-1663.