

## 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

### 引用本文:

杨涵博, 罗艳丽, 赵迪, 等. 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[J]. 农业环境科学学报, 2020, 39(10): 2363-2370.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0471>

## 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>

### 黄腐酸改性膨润土对氮素淋失和氮肥利用率的影响

孔柏舒, 焦树英, 李永强, 沈玉文, 李焯, 张子胥, 付春雨

农业环境科学学报. 2020, 39(10): 2371-2379 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0838>

### 生物炭折流湿地对生活污水的净化效果

王若凡, 汪文飞, 王煜钧, 孙鹤洲, 刘傲展

农业环境科学学报. 2020, 39(9): 2001-2007 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0258>

### 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>

### 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>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

杨涵博, 罗艳丽, 赵迪, 等. 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[J]. 农业环境科学学报, 2020, 39(10): 2363–2370.

YANG Han-bo, LUO Yan-li, ZHAO Di, et al. Nitrification-urease inhibitor-biochar-controlled nitrogen leaching with different biogas slurry irrigation intensities[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2020, 39(10): 2363–2370.



开放科学 OSID

# 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<sup>1,2</sup>, 罗艳丽<sup>2</sup>, 赵迪<sup>1</sup>, 赖睿特<sup>1</sup>, 张克强<sup>1</sup>, 梁军锋<sup>1</sup>, 沈丰菊<sup>1</sup>, 王凤<sup>1\*</sup>

(1. 农业农村部环境保护科研监测所, 天津 300191; 2. 新疆农业大学草业与环境科学学院, 乌鲁木齐 830000)

**摘要:**为考察养殖肥液不同灌溉强度下,硝化-脲酶抑制剂-生物炭技术(Nitrapyrin+NBPT+Biochar)对氮素淋失的抑制效果,本研究采用土柱模拟淋溶试验,测定淋溶液中铵态氮( $\text{NH}_4^+-\text{N}$ )、硝态氮( $\text{NO}_3^--\text{N}$ )、总氮(TN)的浓度以及土壤中 $\text{NH}_4^+-\text{N}$ 、 $\text{NO}_3^--\text{N}$ 的含量,探究养殖肥液不同灌溉强度下Nitrapyrin+NBPT+Biochar技术对氮素淋失的影响。结果表明:硝化-脲酶抑制剂-生物炭阻控技术使淋溶液中 $\text{NH}_4^+-\text{N}$ 、 $\text{NO}_3^--\text{N}$ 、TN浓度降低了25.3%、53.6%、38.2%,累积淋失量减少了34.5%、61.0%、38.6%。该技术在灌溉强度增加30.0%、60.0%和100.0%后,仍使 $\text{NO}_3^--\text{N}$ 淋失量减少了59.3%、55.1%、46.6%,TN淋失量减少了31.7%、27.1%、15.4%,土壤 $\text{NH}_4^+-\text{N}$ 增加86.5%、60.0%、44.5%。该研究中养殖肥液灌溉强度越大土壤氮素淋失风险越大,但是硝化-脲酶抑制剂-生物炭技术明显抑制了氮素淋失,并且在增加一定灌水量范围内仍然有效果。

**关键词:**灌溉强度;硝化抑制剂;脲酶抑制剂;生物炭;养殖肥液

中图分类号:S141;X71 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2020)10-2363-08 doi:10.11654/jaes.2020-0471

## Nitrification-urease inhibitor-biochar-controlled nitrogen leaching with different biogas slurry irrigation intensities

YANG Han-bo<sup>1,2</sup>, LUO Yan-li<sup>2</sup>, ZHAO Di<sup>1</sup>, LAI Rui-te<sup>1</sup>, ZHANG Ke-qiang<sup>1</sup>, LIANG Jun-feng<sup>1</sup>, SHEN Feng-ju<sup>1</sup>, WANG Feng<sup>1\*</sup>

(1. Agro-Environmental Protection Institute, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Tianjin 300191, China; 2. College of Grass and Environmental Sciences, Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830000, China)

**Abstract:** To investigate the effect of nitrapyrin+NBPT+biochar on nitrogen leaching under different biogas slurry irrigation intensities, this study used a soil column simulated leaching test. The ammonium nitrogen ( $\text{NH}_4^+-\text{N}$ ), nitrate nitrogen ( $\text{NO}_3^--\text{N}$ ), and total nitrogen (TN) contents in the soil leaching solution and the contents of  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  and  $\text{NO}_3^--\text{N}$  in the soil were monitored. The results showed that the nitrapyrin+NBPT+biochar reduced the concentrations of  $\text{NH}_4^+-\text{N}$ ,  $\text{NO}_3^--\text{N}$ , and TN in the soil leaching solution by 25.3%, 53.6%, and 38.2%, respectively, and reduced the cumulative leaching loss by 34.5%, 61.0%, 38.6%, respectively; and after the irrigation intensity increased by 30.0%, 60.0%, and 100.0%, the technology still reduced the  $\text{NO}_3^--\text{N}$  leaching volume by 59.3%, 55.1%, and 46.6%, respectively, and the TN leaching volume by 31.7%, 27.1%, and 15.4%, respectively. The soil  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  content increased by 86.5%, 60.0%, and 44.5%, respectively. In this study, the greater the intensity of biogas slurry irrigation, the greater the risk of soil nitrogen leaching. However, the nitrapyrin+NBPT+biochar significantly inhibited nitrogen leaching and still had an effect within a certain range of increasing irrigation.

**Keywords:** irrigation intensity; nitrification inhibitors; urease inhibitors; biochar; biogas slurry

收稿日期:2020-04-25 录用日期:2020-07-09

作者简介:杨涵博(1995—),女,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: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(C2112060302008086)

**Project supported:** National Key R&D Program of China (2017YFD0800403); Special Fund for Basic Scientific Research Business of Central Public Research Institutes (C2112060302008086)

随着“种养结合”养分循环利用技术的发展,养殖粪便和肥液在种植业得以广泛应用。养殖肥液是畜禽粪污在厌氧微生物的作用下厌氧发酵产生沼气后的液态副产品<sup>[1]</sup>,成分复杂,除了含有大量速效氮磷养分,还含有部分有机氮磷,以及微生物和植物所需的微量元素和生长素<sup>[2]</sup>。研究表明施用养殖肥液可以提高作物产量<sup>[3]</sup>、改良土壤性质、提高土壤肥力<sup>[4]</sup>。但长期惯性地片面追求高产和“大水大肥”的管理模式造成了氮磷养分大量淋失,特别是设施蔬菜集中生产区域,地下水污染风险加剧<sup>[5-6]</sup>。研究表明,在灌溉作用下有30%~50%的氮素通过淋溶的形式损失<sup>[7]</sup>。灌溉方式及强度、施肥类型用量及方式、种植模式等会直接影响氮素淋失<sup>[8]</sup>,硝化抑制剂<sup>[9-10]</sup>、脲酶抑制剂<sup>[11-12]</sup>和生物炭<sup>[13]</sup>也能阻控氮素淋失。硝化抑制剂可以通过抑制氨氧化细菌和亚硝酸氧化细菌等微生物活性来减缓 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 向 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 的转化<sup>[14]</sup>;脲酶抑制剂主要是对土壤脲酶活性产生抑制作用,减缓氮素的转化;生物炭由于自身比表面积大、吸附性能好、稳定性高等特点,可以吸附 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ <sup>[15]</sup>、硝酸盐<sup>[16]</sup>等。硝化抑制剂、脲酶抑制剂和生物炭是在化肥施用条件下表现出了较好的抑制效果。

与传统单一养分形态的化肥相比,养殖肥液中氮素形态包括铵态氮、硝态氮和有机氮,各种形态氮素含量组成可能随工程运行而发生变化,因此比化肥养分形态、组成及含量复杂。氮素淋失也是养殖肥水农田利用过程直接面对的问题。课题组前期尝试了配施硝化抑制剂<sup>[17]</sup>、硝化-脲酶抑制剂<sup>[18]</sup>、硝化-脲酶抑制剂-生物炭等<sup>[18]</sup>技术措施,发现在养殖肥液滴灌和漫灌方式下对阻控氮素淋失效果显著,铵态氮、硝态氮、总氮淋失量分别比单施养殖肥液降低24.9%~27.2%、27.6%~35.7%、21.1%~45.9%,以上结论均在相同养殖肥水灌溉浓度和灌溉定额条件下获得的。为了探求优化的淋溶阻控技术在相同氮素输入形态和数量条件下对不同灌溉强度的适应性,以确定该技术模式的应用前景,本试验通过室内土柱模拟试验研究不同灌溉强度的养殖肥液对配施硝化-脲酶抑制剂-生物炭的土壤氮素淋失特征和阻控效果,为养殖肥液的科学合理还田提供技术措施。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料

土壤:取自天津市宁河区设施蔬菜大棚0~20 cm表层土壤,土壤理化性质见表1。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。

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7.91, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度395.1  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 浓度0.1  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ,TN浓度499.4  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。

硝化抑制剂:2-氯-6-(三氯甲基)吡啶简称为Nitrapyrin,生产厂家为浙江奥复托有限公司,24%乳油剂型,纯度98%。

脲酶抑制剂:N-丁基硫代磷酰三胺简称NBPT,生产厂家为上海源叶生物科技有限公司,分析纯,97%。

生物炭:以秸秆作为原料在800 °C高温下烧制4 h制备而成,生产厂家为科力泽华(北京)科技有限公司。

表1 土壤理化性质

Table 1 Physical and chemical properties of the soil

土壤类型 Soil type	pH	$\text{NH}_4^+\text{-N}/$ ( $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ )	$\text{NO}_3^-\text{-N}/$ ( $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ )	TN/ ( $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ )	有机质/ ( $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ )	含水量/%
中壤质潮土	8.24	10.76	1.56	2.42	24.13	1.52

## 1.2 试验方法

### 1.2.1 试验设计

所有处理均按照1.28  $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 的自然土壤容重填装至长25 cm、内径10 cm的PVC管装置中,填装时在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依次填装压实<sup>[19-20]</sup>,约20 cm高,管内上部空间用于灌溉。其中添加抑制剂的处理将Nitrapyrin、NBPT分别按照设计添加量溶于水后与土壤均匀喷施混合后一并填装,添加生物炭的处理先将生物炭研磨过2 mm筛后与0~10 cm土壤混合均匀后填装到装置中。试验共6个处理,每个处理3个重复,每个处理抑制剂类型用量、肥液灌溉量及灌水定额见表2。除CK处理外,其他处理养殖肥液灌溉带入的铵态氮、硝态氮和总氮量均相同,分别为250、0.06、300  $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。

### 1.2.2 淋溶模拟试验

淋溶模拟试验在农业农村部环境保护科研监测所温室进行,从2019年12月开始至2020年1月结束,试验过程日间和夜间平均温度分别为4 °C和-3 °C。土壤填装完成后,先对其进行预处理,连续浇灌200 mL去离子水3 d,使土壤达到稳定状态,减少装填造成的差异。48 h后开始第一次灌溉,按照表2灌施相应肥液或去离子水,收集淋溶液,每间隔3 d进行一次灌溉,共5个周期<sup>[7]</sup>。每次收集完淋溶液带回实验室立即测定 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 浓度,试验结束后将土壤

按照0~10 cm和10~20 cm两层取出后浸提,分别测定土壤 $\text{NH}_4\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3\text{-N}$ 含量。

### 1.2.3 测定指标与方法

基础土壤样品pH用Mettler Toledo实验室pH计测定(水土比为5:1),含水量用烘干法测定,有机质采用水合热重铬酸钾氧化-比色法测定,土壤TN、 $\text{NH}_4\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3\text{-N}$ 含量采用全自动流动注射分析仪(FIA-6000<sup>+</sup>)测定<sup>[21]</sup>。

淋溶液TN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用Mettler Toledo实验室pH计测定。

### 1.3 数据处理

试验数据采用Microsoft Office Excel 2013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 淋溶液体积变化特征

养殖肥液不同灌溉强度土壤淋溶液体积见图1。

总体来看,相同处理下单次灌溉收集的淋溶液体积变化不明显。处理间淋溶液体积呈现 $\text{F4}>\text{F3}>\text{F2}>\text{F1}$ 、 $\text{F}$ 、 $\text{CK}$ 趋势, $\text{F4}$ 处理平均比 $\text{F3}$ 、 $\text{F2}$ 和 $\text{CK}$ 增加47.2%、76.7 mL和110.7 mL,处理间差异达到显著水平( $P<0.05$ ),淋溶液体积直接受灌水定额的影响;在前3次灌溉过程中灌溉量相同的处理( $\text{F1}$ 、 $\text{F}$ 、 $\text{CK}$ )淋溶液体积没有显著性差异( $P>0.05$ )。

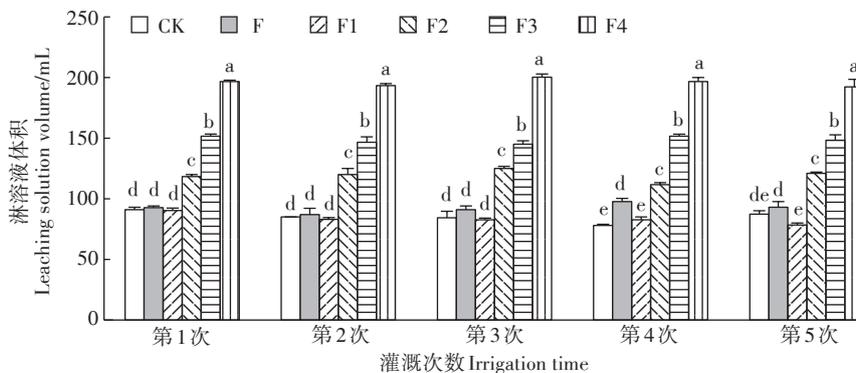
### 2.2 淋溶液 $\text{NH}_4\text{-N}$ 浓度和累积淋失量变化特征

养殖肥液不同灌溉强度土壤淋溶液 $\text{NH}_4\text{-N}$ 浓度如图2(a)。随着灌溉次数的增加各处理淋溶液 $\text{NH}_4\text{-N}$ 浓度先逐渐升高,至第3次灌溉时均达到最大,随后逐渐降低。同次灌溉淋溶液 $\text{NH}_4\text{-N}$ 浓度总体呈现 $\text{CK}$ 最低,浓度范围为 $0.05\sim 0.28\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , $\text{F}$ 处理最高,浓度范围为 $0.31\sim 0.74\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。硝化-脲酶抑制剂-生物炭阻控技术处理居中,并且随灌溉强度增加淋溶液 $\text{NH}_4\text{-N}$ 浓度有所降低, $\text{F2}$ 、 $\text{F3}$ 和 $\text{F4}$ 处理比 $\text{F1}$ 处理 $\text{NH}_4\text{-N}$ 浓度平均减少了9.2%、24.7%、28.9%,与灌溉水氮素浓度直接相关。 $\text{F1}$ 比 $\text{F}$ 处理淋溶液 $\text{NH}_4\text{-N}$ 浓度平均减少了25.3%。处理间淋溶液 $\text{NH}_4\text{-N}$ 浓度差异随灌溉次数增加差距缩小。不同灌溉强度淋溶液 $\text{NH}_4\text{-N}$ 累积淋失量如图2(b)。随灌溉次数增加各处

表2 试验处理灌水定额及组成

Table 2 Single irrigation amount and composition of different treatments

处理符号 Signs	处理 Treatments	养殖肥液 Biogas slurry/mL	水 Water/mL	灌水定额 Irrigation quota/mL	抑制剂用量 Inhibitor dosage/(g·pot <sup>-1</sup> )
CK	不施肥	0	100	100	—
F	单施肥液	100	0	100	—
F1	Nitrapyrin+NBPT+Biochar	100	0	100	Nitrapyrin施用量为总施氮量的0.25%;NBPT施用量为总施氮量的1%;生物炭施用量为风干后土壤质量的2%
F2	Nitrapyrin+NBPT+Biochar	100	30	130	
F3	Nitrapyrin+NBPT+Biochar	100	60	160	
F4	Nitrapyrin+NBPT+Biochar	100	100	200	



柱上不同字母表示同次灌溉不同处理间差异显著( $P<0.05$ )。下同

Different letters on the column indicate significant differences between different treatments for the same irrigation ( $P<0.05$ ). The same below

图1 淋溶液的体积变化

Figure 1 Leaching solution volume

理  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  累积淋失量逐渐增加。各处理  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  淋失量呈现  $\text{F4} > \text{F} > \text{F3} > \text{F2} > \text{F1} > \text{CK}$ , F2 和 F3 处理虽然比 F 增加 30% 和 60% 的灌水量, 但灌溉结束后  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  累积淋失量比 F 处理降低 13.3% 和 5.5%。5 次灌溉结束之后 F1 处理  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  累积淋失量比 F 处理降低了 34.5%, 没有显著性差异 ( $P > 0.05$ )。

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

养殖肥液不同灌溉强度土壤淋溶液  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  浓度见图 3(a)。随灌溉次数增加各处理淋溶液  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  浓度逐渐降低至平稳。同次灌溉 F 处理淋溶液  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  浓度最高, 与其他处理相比差异显著 ( $P < 0.05$ ); CK 处理浓度最低; 硝化-脲酶抑制剂-生物炭阻控技术处理居中, 并且随灌溉强度增加淋溶液  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  浓度略有降低, 如 F4 处理分别比 F1 处理下降了 0.41~1.93  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , 且在前几次灌溉中差异显著 ( $P < 0.05$ )。处理间淋溶液  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  浓度差异随灌溉次数增加差距缩小。不同灌溉强度土壤淋溶液  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  累积淋失量见图 3(b)。各处理  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  累积淋失量随灌溉次数增加逐渐升高, 呈现  $\text{F} > \text{F4} > \text{F3} > \text{F2} > \text{F1} > \text{CK}$  的趋势, 处理间差异显著 ( $P < 0.05$ )。5 次灌溉结束之后 F1 处理  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  累积淋失量比 F 处理显著降低了 61% ( $P < 0.05$ ); F2、F3 和 F4 处理虽然比 F 增加 30%、60% 和 100% 的灌水量

量, 但  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  累积淋失量比 F 处理显著降低了 59.3%、55.1% 和 46.6% ( $P < 0.05$ )。随灌溉强度增加  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  累积淋失风险增大, 阻控技术明显抑制淋溶液  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  淋失, 并且在灌水强度加倍的条件下效果仍然显著。

### 2.4 淋溶液 TN 浓度变化特征

养殖肥液不同灌溉强度土壤淋溶液 TN 浓度见图 4(a)。随着灌溉次数增加各处理淋溶液 TN 浓度逐渐降低至平稳; 同次灌溉呈现 CK 处理 TN 浓度最低、F 处理最高, 硝化-脲酶抑制剂-生物炭阻控技术处理居中, 且随灌溉强度增加淋溶液 TN 浓度下降, F2、F3 和 F4 处理 TN 浓度比 F1 处理平均减少了 19.8%、33.2% 和 39.4%; 与 F 相比 F1 处理 TN 浓度平均减少了 38.2%; 处理间淋溶液 TN 浓度差异随灌溉次数增加差距缩小。不同灌溉强度土壤 TN 累积淋失量见图 4(b)。各处理 TN 累积淋失量随灌溉次数增加逐渐升高, 呈现  $\text{F} > \text{硝化-脲酶抑制剂-生物炭阻控技术处理} > \text{CK}$  的趋势, 处理间差异显著 ( $P < 0.05$ )。5 次灌溉结束之后 F1 处理 TN 累积淋失量比 F 处理显著降低了 38.6% ( $P < 0.05$ ); F2、F3 和 F4 处理虽然比 F 增加 30%、60% 和 100% 的灌水量, 但 TN 累积淋失量比 F 处理显著降低了 31.7%、27.1% 和 15.4% ( $P < 0.05$ )。随灌溉强度增加 TN 累积淋失风险增大, 阻控技术明显抑制淋

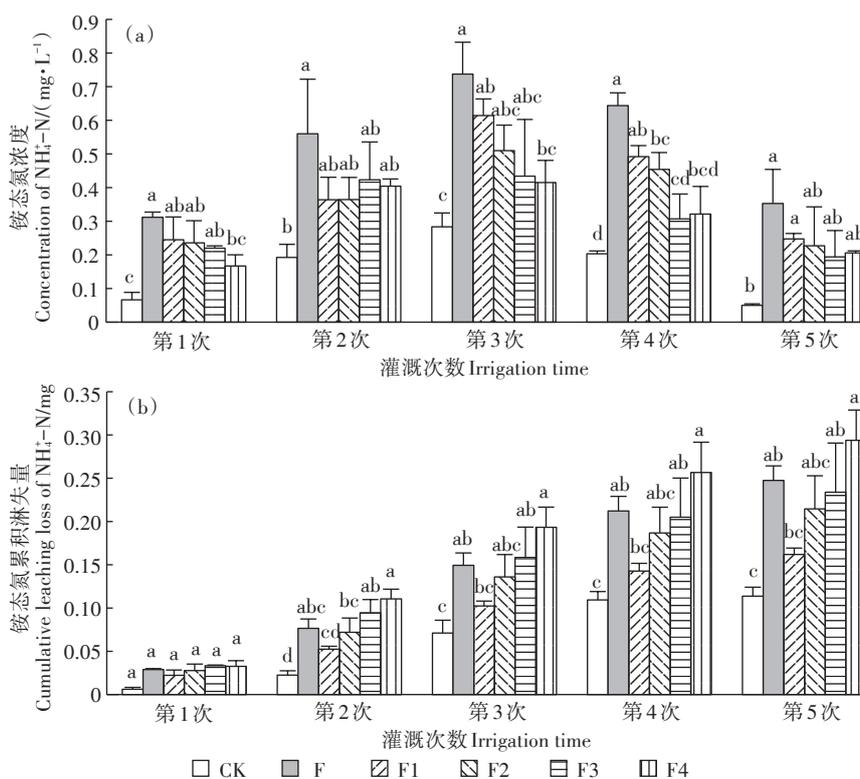
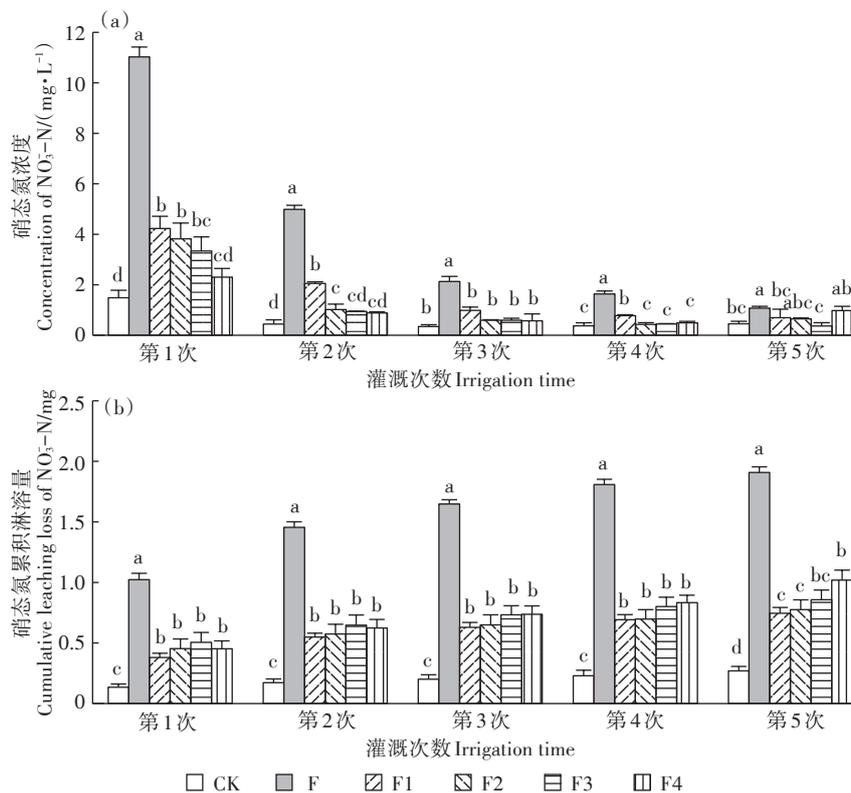


图2 淋溶液  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  浓度和累积淋失量

Figure 2 Concentration of  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  and cumulative leaching loss

图3 淋溶液  $\text{NO}_3\text{-N}$  浓度和累积淋失量Figure 3 Concentration of  $\text{NO}_3\text{-N}$  and cumulative leaching loss

溶液TN淋失,并且在灌水强度加倍的条件下效果仍然显著( $P < 0.05$ )。

### 2.5 土壤中 $\text{NH}_4\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3\text{-N}$ 的含量

养殖肥液灌溉后土壤  $\text{NH}_4\text{-N}$  和  $\text{NO}_3\text{-N}$  含量见图5。与CK相比,养殖肥液灌溉使0~10 cm土层  $\text{NH}_4\text{-N}$  含量显著升高了204.1% ( $P < 0.05$ ),  $\text{NO}_3\text{-N}$  含量升高55.8%;使10~20 cm土层  $\text{NH}_4\text{-N}$  和  $\text{NO}_3\text{-N}$  含量分别升高了39.8%和30.7%,差异均不显著 ( $P > 0.05$ )。硝化-脲酶抑制剂-生物炭阻控技术提高土壤  $\text{NH}_4\text{-N}$  和  $\text{NO}_3\text{-N}$  含量,如F1、F2、F3和F4处理0~10 cm土层  $\text{NH}_4\text{-N}$  含量分别比F处理增加了93.9%、86.5%、60%和44.5%,但差异不显著 ( $P > 0.05$ );F1和F2处理0~10 cm土层和10~20 cm土层  $\text{NO}_3\text{-N}$  含量分别比F处理增加了17.6%、7.6%和35.5%、26.4%,但差异均不显著 ( $P > 0.05$ )。硝化-脲酶抑制剂-生物炭阻控处理随灌溉强度增大土壤  $\text{NH}_4\text{-N}$  和  $\text{NO}_3\text{-N}$  的含量逐渐降低。

## 3 讨论

### 3.1 养殖肥液对土壤氮素淋失的影响

养殖肥液作为水肥资源虽有利于增加土壤铵态氮和硝态氮含量,但也提高了土壤氮素淋失的风险。养殖肥液中氮素以铵态氮为主<sup>[22]</sup>,进入土壤后经硝化

作用被氨氧化细菌和硝化细菌转化为硝态氮,土壤胶体负电荷对  $\text{NO}_3^-$  的吸附作用弱而难以在土壤中固定<sup>[23]</sup>,在灌溉时硝态氮易随灌溉水向下移动,成为氮素淋失的主要形态。随着灌溉进行淋溶液硝态氮浓度越来越低,可能因为土壤持续饱和灌溉导致土壤氧化还原电位持续降低有关,前期的试验结果也得到了验证<sup>[17]</sup>。此外发现本次试验中硝态氮浓度整体较低,可能是由于本次试验环境温度低造成的,之前几次试验在夏秋季,本次试验在冬季,气温比夏季平均降低24℃。有研究表明温度降低和土壤湿度持续增加会减弱土壤硝化作用<sup>[24-25]</sup>。而  $\text{NH}_4^+$  易被土壤颗粒吸附固定到土壤中,但是随着养殖肥液灌溉的进行,养殖肥液本身含有的铵态氮和生成的铵态氮使土壤中  $\text{NH}_4^+$  逐渐达到饱和状态,会使多余的铵态氮向下淋失,所以铵态氮的浓度会在第3次灌溉时出现最大值(图2),随着灌溉的持续进行导致土壤孔隙度增加,对  $\text{NH}_4\text{-N}$  的吸附增大,所以  $\text{NH}_4\text{-N}$  浓度略有下降。淋溶液中硝态氮浓度大于铵态氮浓度,说明淋失主要以硝态氮为主,所以总氮的变化趋势与硝态氮类似(图3、图4)。

### 3.2 硝化-脲酶抑制剂-生物炭阻控技术对土壤氮素淋失的影响

本试验发现硝化-脲酶抑制剂-生物炭阻控技术

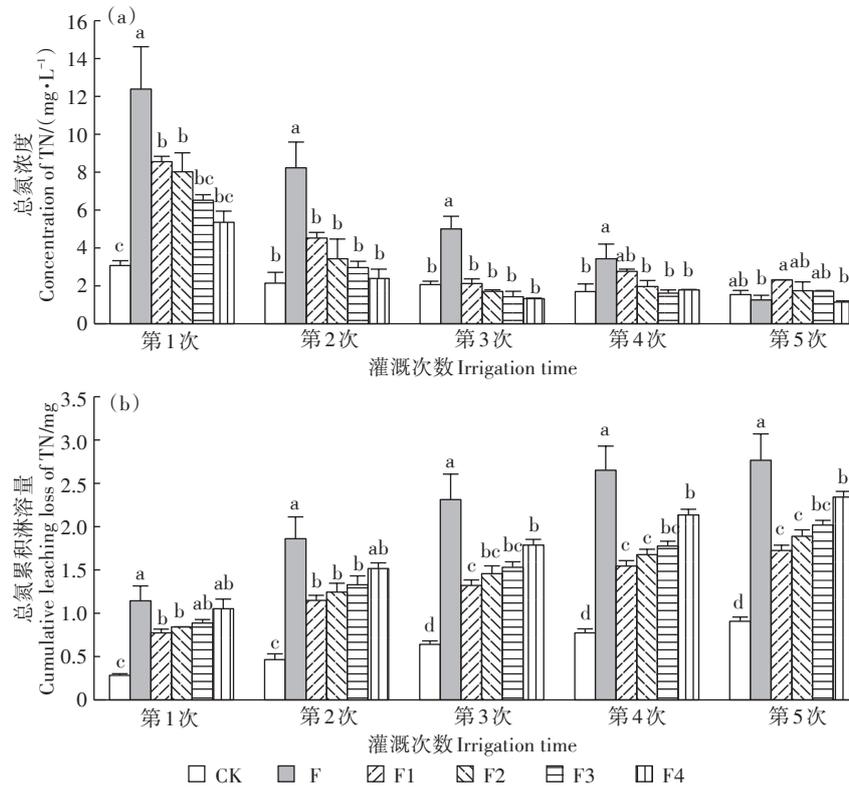
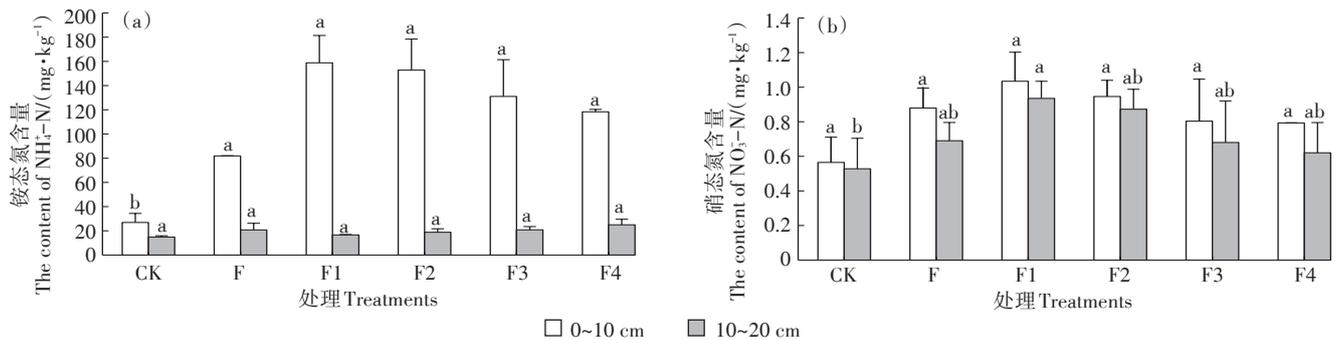


图4 淋溶液TN浓度和累积淋失量

Figure 4 Concentration of TN and cumulative leaching loss

柱上不同字母表示同层土壤不同处理间差异显著( $P<0.05$ )Different letters on the column indicate significant differences between different treatments for the same soil depth ( $P<0.05$ )图5 土壤中NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N、NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N的含量Figure 5 The content of NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N and NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N in soil

使淋溶液 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N、NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 和 TN 浓度分别降低了 25.3%、53.6% 和 38.2%，淋溶液 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N、NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 和 TN 累积淋失量分别减少 34.5%、61% 和 37.6%，但是增加了土壤中 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 和 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 的含量。表明已有的化肥条件下硝化/脲酶抑制剂控制氮素转化的理论，如延缓铵态氮向硝态氮的转化<sup>[26-27]</sup>、抑制土壤脲酶活性<sup>[25]</sup>等，在养殖肥液灌溉方式下仍然适用。此外，课题组前期单独添加 DCD 或 Nitrapyrin 使淋溶液总氮、铵态氮、硝态氮浓度分别降低 27.19%、35.69%、45.89% 和 24.86%、30.87%、21.10%<sup>[17]</sup>，在本试验中发现施用

Nitrapyrin+NBPT+Biochar 这种组合技术比单独施用 Nitrapyrin 效果更好。因为硝化抑制剂、脲酶抑制剂和生物炭的抑制机理都不同，发挥了协同作用，使得抑制氮素淋失的效果更佳。脲酶抑制剂可以减缓铵态氮的生成<sup>[28]</sup>，生物炭不但可以减少铵态氮以挥发的形式损失<sup>[27]</sup>，还增加了土壤阳离子交换量，对于吸附带正电的 NH<sub>4</sub><sup>+</sup> 产生积极作用<sup>[29]</sup>，使铵态氮在土壤中固定。

### 3.3 不同灌溉强度对土壤氮素淋失的影响

土壤氮素淋失量由淋溶液的浓度和体积共同决定。本试验发现在相同养殖肥液添加量前提下，随着

灌溉强度增加土壤淋溶液  $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 、TN 浓度降低,但淋溶液体积增大,导致淋失量增加,即灌溉强度越大淋溶液  $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 、TN 淋失量越大,土壤中  $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$  含量越低,增加了氮素淋失的风险,众多研究在化肥施用和清水灌溉条件下得到类似的结论<sup>[30-31]</sup>。

本试验应用了硝化-脲酶抑制剂-生物炭阻控技术,即使在养殖肥液灌溉强度翻倍的条件下硝态氮和总氮的累积淋失量仍低于单施养殖肥液处理(F),说明硝化-脲酶抑制剂-生物炭阻控技术在较大灌水强度时仍然对氮素淋失阻控有效。唐珧<sup>[30]</sup>以尿素为氮肥得到了类似结论,在施氮量相同、灌水量不同(200 mL 和 400 mL)的条件下,添加硝化抑制剂双氰胺和生物炭的处理硝态氮淋失量最小,抑制硝态氮淋失效果较好。一方面是因为硝化抑制剂和脲酶抑制剂对氮素的转化过程起到了抑制作用,另一方面是因为生物炭本身孔隙较大,有一定的吸水性,生物炭的加入增加了土壤的持水能力<sup>[32]</sup>,减少了淋溶液体积,从而减少了氮素的淋失量。

#### 4 结论

(1) 养殖肥液灌溉土壤增加了  $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 、TN 淋失的风险,同时也增加了土壤中  $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$  的累积。

(2) 同一灌溉强度下,添加 Nitrapyrin+NBPT+Biochar 使淋溶液中  $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 、TN 浓度降低了 25.3%、53.6%、38.2%;  $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 、TN 累积淋失量减少了 34.5%、61%、38.6%; 0~10 cm 土壤中  $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$  增加了 76.89、0.15  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。

(3) 不同灌溉强度下,添加 Nitrapyrin+NBPT+Biochar 处理  $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 、TN 累积淋失量随灌溉强度的增大而增大,养殖肥液灌溉强度的增加会影响优化组合模式的抑制效果。但是在本试验中增加 30%、60% 和 100% 的灌水量后对  $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 、TN 的淋失仍然有抑制效果,  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  累积淋失量分别减少了 59.3%、55.1%、46.6%, TN 累积淋失量分别减少了 31.7%、27.1%、15.4%。

#### 参考文献:

[1] 陈志龙, 陈广银, 李敬宜. 沼液在我国农业生产中的应用研究进展[J]. 江苏农业科学, 2019, 47(8):1-6.  
CHEN Zhi-long, CHEN Guang-yin, LI Jing-yi. Research progress on application of biogas liquid in agricultural production in China[J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2019, 47(8):1-6.

[2] 陈超, 徐凤花, 高立洪, 等. 规模化沼气工程沼液中微生物的细菌种群分析与功能初探[J]. 中国沼气, 2012, 30(6):7-11.  
CHEN Chao, XU Feng-hua, GAO Li-hong, et al. Population structure analysis and function exploration of the bacteria in biogas slurry from large-scale anaero-bic digestion projects[J]. *China Biogas*, 2012, 30(6):7-11.

[3] 王述河. 沼液灌溉对蔬菜产质量及土壤质量的影响[J]. 现代农业科技, 2018(2):67-69.  
WANG Shu-he. Effects of biogas liquid irrigation on vegetable production quality and soil quality[J]. *Modern Agricultural Science and Technology*, 2018(2):67-69.

[4] 李文涛, 冯康, 吕洋. 沼液施肥对土壤肥力特性的影响[J]. 安徽农业科学, 2018, 46(20):108-109.  
LI Wen-tao, FENG Kang, LÜ Yang. The effects of biogas slurry on soil fertility characteristics[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2018, 46(20):108-109.

[5] 段然. 沼肥肥力和施用后潜在污染风险研究与土壤安全性评价[D]. 兰州: 兰州大学, 2008.  
DUAN Ran. Study on the biogas fertilizer fertility, potential pollution risk and safety evaluation of soil after application[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2008.

[6] 田伟, 李刚, 陈秋会, 等. 等氮条件下化学肥料与有机肥连续大量施用下的环境风险[J]. 生态与农村环境学报, 2017, 33(5):440-445.  
TIAN Wei, LI Gang, CHEN Qiu-hui, et al. Environmental risk caused by successive and heavy application of mineral fertilizer and compost with the same amount of nitrogen applied[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2017, 33(5):440-445.

[7] 杨宪龙, 路永莉, 同延安, 等. 施氮和秸秆还田对小麦-玉米轮作农田硝态氮淋溶的影响[J]. 土壤学报, 2013, 50(3):564-573.  
YANG Xian-long, LU Long-li, TONG Yan-an, et al. Effects of application of nitrogen fertilizer and in corporation of straw on nitrate leaching in farmland under wheat-maize rotation system[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2013, 50(3):564-573.

[8] 高薪, 张婷瑜. 农田土壤氮素淋失阻控方法研究进展[J]. 农业工程, 2019, 9(3):99-103.  
GAO Xin, ZHANG Ting-yu. Research progress of nitrogen leaching and control methods in farmland soil[J]. *Agricultural Engineering*, 2019, 9(3):99-103.

[9] 王长军, 李凤霞, 谭松伟, 等. 硝化/脲酶抑制剂对宁夏灌淤土土壤氮含量及其转化的影响[J]. 江苏农业科学, 2019, 47(21):285-289.  
WANG Chang-jun, LI Feng-xia, TAN Song-wei, et al. Effect of nitrification/urease inhibitor on nitrogen content and transformation of soil in Ningxia irrigated silt[J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2019, 47(21):285-289.

[10] 油伦成, 李东坡, 崔磊, 等. 不同硝化抑制剂组合对铵态氮在黑土和褐土中转化的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2019, 25(12):2113-2121.  
YOU Lun-cheng, LI Dong-po, CUI Lei, et al. Effects of different nitrification inhibitor combinations on the transformation of ammonium nitrogen in black soil and cinnamon soil[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2019, 25(12):2113-2121.

[11] Wang H T, Köbke S, Dittert K. Use of urease and nitrification inhibitors to reduce gaseous nitrogen emissions from fertilizers containing

- ammonium nitrate and urea[J]. *Global Ecology and Conservation*, DOI:10.1016/j.gecco.2020.e00933
- [12] 徐丽萍. UAN 氮溶液配施脲酶抑制剂 NBPT 对土壤和玉米中氮的影响研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2019.
- XU Li-ping. Effect of UAN nitrogen solution combined with urease inhibitor NBPT on nitrogen in soil and maize[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural, 2019.
- [13] 王荣荣. 生物炭对设施菜地土壤硝态氮淋失阻控的机制与效应[D]. 晋中: 山西农业大学, 2016.
- WANG Rong-rong. Study on controlled effect and mechanism of biochar to the soil nitrate in greenhouse vegetable soils[D]. Jinzhong: Shanxi Agricultural University, 2016.
- [14] 倪秀菊, 李玉中, 徐春英, 等. 土壤脲酶抑制剂和硝化抑制剂的研究进展[J]. 中国农学通报, 2009, 25(12): 145-149.
- NI Xiu-ju, LI Yu-zhong, XU Chun-ying, et al. Advance of research on urease inhibitor and nitrification inhibitor in soil[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2009, 25(12): 145-149.
- [15] Soil Science: Confronting new realities in the 21st Century[C]. Bangkok: 7th World Congress of Soil Science, 2002.
- [16] Mizuta K, Matsumoto T, Hatate Y, et al. Removal of nitrate nitrogen from drinking water using bamboo powder charcoal[J]. *Bioresource Technology*, 2004, 95: 255-257.
- [17] 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.
- [18] 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 Rui-te, YANG Han-bo, ZHANG Ke-qiang, 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.
- [19] 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.
- [20] 姜玲玲, 赵同科, 杜连凤, 等. 设施菜地氮淋溶研究方法评价[J]. 北方园艺, 2018(23): 156-163.
- JIANG Ling-ling, ZHAO Tong-ke, DU Lian-feng, et al. Evaluation of nitrogen leaching research methods in protected vegetable field[J]. *Northern Horticulture*, 2018(23): 156-163.
- [21] 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.
- [22] 王忠江, 蔡康妮, 王丽丽, 等. 施灌沼肥对土壤氨挥发和氮素下渗规律的影响[J]. 农业机械学报, 2014, 45(5): 139-144.
- WANG Zhong-jiang, CAI Kang-ni, WANG Li-li, et al. Influence of biogas slurry application on ammonia volatilization and nitrogen infiltration[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2014, 45(5): 139-144.
- [23] Ruser R, Flessa H, Russow R, et al. Emission of  $N_2O$ ,  $N_2$  and  $CO_2$  from soil fertilized with nitrate: Effect of compaction, soil moisture and rewetting[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2006, 38: 263-274.
- [24] Agehara S, Warncke D D. Soil moisture and temperature effects on nitrogen release from organic nitrogen sources[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2005, 69(6): 1844-1855.
- [25] 孙海军, 闵炬, 施卫明, 等. 硝化抑制剂影响小麦产量、 $N_2O$  与  $NH_3$  排放的研究[J]. 土壤, 2017, 49(5): 876-881.
- SUN Hai-jun, MIN Ju, SHI Wei-ming, et al. Effects of nitrification inhibitor application on wheat grain yield,  $N_2O$  emission and  $NH_3$  volatilization[J]. *Soils*, 2017, 49(5): 876-881.
- [26] Tao R, Li J, Guan Y, et al. Effects of urease and nitrification inhibitors on the soil mineral nitrogen dynamics and nitrous oxide ( $N_2O$ ) emissions on calcareous soil[J]. *Environmental Science & Pollution Research International*, 2018, 25(9): 1-10.
- [27] 王忠江, 张正, 刘卓, 等. 生物炭配施沼液对淋溶状态下土壤养分的影响[J]. 农业机械学报, 2018, 49(11): 260-267.
- WANG Zhong-jiang, ZHANG Zheng, LIU Zhuo, et al. Effects of biochar with biogas slurry on soil nutrients in the leaching state[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2018, 49(11): 260-267.
- [28] 史云峰, 车志伟, 赵牧秋. 脲酶抑制剂 NBPT 提前施用对尿素水解和氨挥发的影响[J]. 环境保护科学, 2016, 42(5): 107-111.
- SHI Yun-feng, CHE Zhi-wei, ZHAO Mu-qiu. Effects of pre-application of urease inhibitor NBPT on urea hydrolysis and ammonia volatilization[J]. *Environmental Protection Science*, 2016, 42(5): 107-111.
- [29] 刘玉学, 吕豪豪, 石岩, 等. 生物炭对土壤养分淋溶的影响及潜在机理研究进展[J]. 应用生态学报, 2015, 26(1): 304-310.
- LIU Yu-xue, LÜ Hao-hao, SHI Yan, et al. Effects of biochar on soil nutrients leaching and potential mechanisms: A review[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2015, 26(1): 304-310.
- [30] 唐珧. 不同水肥管理对土壤氮素淋溶阻控效果的研究[D]. 太原: 山西大学, 2018.
- TANG Yao. Effects of different irrigation and fertilizer management on nitrogen leaching control in soil[D]. Taiyuan: Shanxi University, 2018.
- [31] 郭全忠. 不同灌水量对设施番茄土壤养分和水分在土壤剖面中迁移的影响[J]. 西北农业学报, 2013, 22(4): 153-158.
- GUO Quan-zhong. Effect of different irrigation amount on the moving of soil water and nutrient in soil profiles of tomato green houses[J]. *Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica*, 2013, 22(4): 153-158.
- [32] 王燕, 庞卓, 贾月, 等. 生物炭对北京郊区砂土持水力和氮淋溶特性影响的土柱模拟研究[J]. 农业环境科学学报, 2017, 36(9): 1820-1828.
- WANG Yan, PANG Zhuo, JIA Yue, et al. Effects of biochar on water holding capacity and nitrogen leaching of sandy soil column from a Beijing suburb[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2017, 36(9): 1820-1828.