

DOI: 10.5846/stxb201706091047

周旋, 吴良欢, 董春华, 贾磊. 氮肥配施生化抑制剂组合对黄泥田土壤氮素淋溶特征的影响. 生态学报, 2019, 39(5): - .
Zhou X, Wu L H, Dong C H, Jia L. Effects of nitrogen fertilization combined with biochemical inhibitors on leaching characteristics of soil nitrogen in yellow clayey soil. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(5): - .

氮肥配施生化抑制剂组合对黄泥田土壤氮素淋溶特征的影响

周旋^{1,2,3}, 吴良欢^{2,3,*}, 董春华¹, 贾磊⁴

1 湖南省农业科学院土壤肥料研究所, 长沙 410125

2 教育部环境修复与生态健康重点实验室 / 浙江大学环境与资源学院, 杭州 310058

3 浙江省农业资源与环境重点实验室 / 浙江大学环境与资源学院, 杭州 310058

4 上海市农业科学院农业科技信息研究所, 上海 201403

摘要:揭示尿素类肥料添加生化抑制剂组合后,在黄泥田土壤中硝态氮(NO_3^- -N)和铵态氮(NH_4^+ -N)的淋溶损失规律。采用室内土柱淋溶培养试验,研究脲酶抑制剂 N-丁基硫代磷酰三胺(NBPT)和硝化抑制剂 2-氯-6-(三氯甲基)吡啶(CP)单独添加及配合施用对尿素和尿素硝铵(300 kg N/hm²)中氮(N)素在土体中淋溶损失的影响。结果表明:尿素和尿素硝铵处理淋溶液中 NH_4^+ -N 和 NO_3^- -N 浓度均呈先升后降的变化趋势,而出峰时间不一。 NH_4^+ -N 和 NO_3^- -N 淋失量随着时间的延长,处理间差异逐渐变大。NBPT 处理可以减缓尿素水解,有效抑制 NH_4^+ -N 生成,延缓其出峰时间,减少 NH_4^+ -N 流失;CP 处理可以有效抑制 NH_4^+ -N 向 NO_3^- -N 转化,减少 NO_3^- -N 流失。与单独添加 NBPT 和 CP 处理相比,两者配施对 N 素淋溶损失有明显的协同抑制效果在黄泥田土壤中,既能减缓尿素水解,保持土壤中较高 NH_4^+ -N 含量,又能降低淋溶液中 NO_3^- -N 浓度。培养结束时(第 72 天),UAN 处理中 NO_3^- -N、 NH_4^+ -N、矿质态 N 淋失总量及硝化率较 U 处理高 34.39%、5.32%、31.72% 和 15.71%。U+NBPT、U+CP 和 U+NBPT+CP 处理较 U 处理分别显著降低 NO_3^- -N 淋失总量达 15.58%、114.77% 和 73.45%;UAN+NBPT、UAN+CP 和 UAN+NBPT+CP 处理较 UAN 处理分别显著降低达 15.88%、54.87% 和 37.46%。不同处理 NO_3^- -N 淋失总量大小表现为:UAN>UAN+NBPT>U>UAN+NBPT+CP>U+NBPT>UAN+CP>U+NBPT+CP>U+CP>CK。在一定施肥量条件下,NBPT 和 CP 单独施用或配施均可降低黄泥田土壤中 NO_3^- -N 累积淋失量。对各处理淋溶液中 NO_3^- -N 淋失量(y)随时间(x)的变化进行拟合,其中以线性方程($y=ax+b$)的拟合度较高,且各抑制剂处理 a、b 值均存在明显差异。总体认为,在黄泥田土壤中施用 CP 及其与 NBPT 配施可以显著降低土壤 NO_3^- -N 淋溶损失,减少 N 素淋失风险,提高肥料利用率。

关键词:黄泥田;尿素;尿素硝铵;脲酶抑制剂;硝化抑制剂;硝酸盐;淋溶损失

Effects of nitrogen fertilization combined with biochemical inhibitors on leaching characteristics of soil nitrogen in yellow clayey soil

ZHOU Xuan^{1,2,3}, WU Lianghuan^{2,3,*}, DONG Chunhua¹, JIA Lei⁴

1 Soil and Fertilizer Institute, Hunan Academy of Agricultural Sciences, Changsha 410125, China

2 Key Laboratory of Environmental Remediation and Ecosystem Health, Ministry of Education, College of Environmental and Resource Sciences, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China

3 Zhejiang Provincial Key Laboratory of Agricultural Resources and Environment, College of Environmental and Resource Sciences, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China

基金项目:“十二五”国家科技支撑计划(2015BAD23B03); 苕溪流域农村污染治理技术集成与规模化工程示范(2014ZX07101-012); 国家重点基础研究发展计划项目(2015CB150502); 浙江省“三农六方”科研协作计划项目和浙江大学—浙江奥复托化工有限公司合作项目资助

收稿日期:2017-06-09; **网络出版日期:**2018-00-00

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: finm@zju.edu.cn.

4 Agricultural Information Institute of Science and Technology, Shanghai Academy of Agricultural Sciences, Shanghai 201403, China

Abstract: The objective of this study was to determine the effects of combined biochemical inhibitors on the transformation and leaching loss of NO_3^- -N and NH_4^+ -N from urea-based fertilizer in yellow clayey soil. A soil column leaching experiment was conducted in a greenhouse to observe nitrogen (N) transformation and leaching loss following the application of urea and UAN ($300 \text{ kg N} \cdot \text{hm}^{-2}$) with a urease inhibitor *N*-(*n*-butyl) thiophosphoric triamide (NBPT), a nitrification inhibitor 2-chloro-6-(trichloromethyl) pyridine (CP), or both. The results showed that the contents of NH_4^+ -N and NO_3^- -N from the leachate of urea and UAN both rose first and then fell with different peak times. The differences in the leaching loss of NH_4^+ -N and NO_3^- -N across treatments increased over time. NBPT can slow urea hydrolysis, and effectively inhibit the generation of NH_4^+ -N to retard the peak time and reduce NH_4^+ -N loss. CP can effectively inhibit the transformation of NH_4^+ -N to NO_3^- -N to reduce NO_3^- -N loss. Compared with the application of NBPT and CP alone, their combination exhibited a synergistic inhibition effect on N leaching loss in yellow clayey soil, namely not only did it slow down urea hydrolysis and maintain high NH_4^+ -N content in the soil, but it also reduced NO_3^- -N content in the leachate. At the end of the incubation (72 days), the leaching loss of NO_3^- -N, NH_4^+ -N, and mineral N, and nitrification rate from UAN treatment were higher than those from the U treatment by 34.39%, 5.32%, 31.72%, and 15.71%, respectively. Compared with the U treatment, U+NBPT, U+CP, and U+NBPT+CP treatments significantly reduced the leaching loss of NO_3^- -N by 15.58%, 114.77%, and 73.45%, respectively. Compared with UAN treatment, UAN+NBPT, UAN+CP, and UAN+NBPT+CP treatments significantly reduced leaching loss by 15.88%, 54.87%, and 37.46%, respectively. The leaching loss of NO_3^- -N from different treatments ranked $\text{UAN} > \text{UAN+NBPT} > \text{U} > \text{UAN+NBPT+CP} > \text{U+NBPT} > \text{UAN+CP} > \text{U+NBPT+CP} > \text{U+CP} > \text{CK}$. Within a certain range of fertilizer rate, adding NBPT and CP alone or both can reduce NO_3^- -N leaching loss in yellow clayey soil. Equation models were used to describe the relationship between NO_3^- -N leaching loss (y) and time (x). The linear equation ($y = ax + b$) fit well, a and b values in adding inhibitor treatments were obviously different. In conclusion, application of NBPT in yellow clayey soil combined with CP can significantly reduce the leaching loss of soil NO_3^- -N and N leaching risk, to improve fertilizer use efficiency.

Key Words: yellow clayey soil; urea; UAN; urease inhibitor; nitrification inhibitor; nitrate; leaching loss

农业生产过程中过量氮(N)肥施用及不合理的管理措施都将导致氨挥发、硝酸盐(NO_3^-)淋溶及反硝化等途径的N素损失,造成利用率下降^[1]。其中,土壤 NO_3^- 淋失是N素损失的重要途径之一,约占2%—10%^[2],也是导致地下水 NO_3^- 污染的重要原因^[3-5]。因此,控制或减缓铵态氮(NH_4^+ -N)向硝态氮(NO_3^- -N)转化有助于减少土壤中N素向水体的迁移^[2]。影响农田N素淋溶损失的主要因素有降雨和灌溉、施肥状况、土壤性质、耕作方式、作物种类和种植方式等方面^[6]。

目前,改进施肥方式、优化N肥管理、推广缓释N肥及改善土地利用方式等是提高N肥利用率、减少N素淋溶损失的重要措施^[6]。通过添加硝化抑制剂,或与脲酶抑制剂配施来延缓尿素的水解及水解产物 NH_4^+ 的氧化过程,可以高效利用尿素N、减轻农田N肥污染^[7-8]。硝化抑制剂可以对氨单加氧酶(AMO)进行竞争性抑制,从而抑制硝化作用的第一步反应(NH_4^+ 氧化为 NO_2^- 过程)^[9],使土壤中 NH_4^+ -N库较长时间保持在较高水平,相应地促进作物对 NH_4^+ -N的吸收和微生物固持^[2,10],减少 NO_3^- 的淋失风险^[11]。而脲酶抑制剂可以抑制土壤脲酶活性,延缓尿素水解,降低土壤中 NH_4^+ -N生成,减少淋溶液中N素水平^[12]。

相关研究表明,土壤吸附程度和肥料溶解度是肥料N淋失数量和形式的主要影响因素^[13]。 NH_4^+ -N肥中N素能被土壤胶体吸附,淋失的可能性甚小;经硝化作用形成 NO_3^- -N后,易发生淋失^[14-15]。此外,抑制剂对N素的作用受不同试验条件如土壤类型、温度、降雨量及土壤质地等的影响^[16-17]。单独添加硝化抑制剂2-氯-6-(三氯甲基)吡啶(CP)或脲酶抑制剂N-丁基硫代磷酰三胺(NBPT)在土壤中N素转化方面的研究较多^[18],但

CP 与 NBPT 两者配施对土壤 N 素迁移淋溶的研究鲜有报道。目前,我国黄泥田水稻生产大多采用常规尿素, N 肥利用率较低^[19]。因此,通过间歇淋溶模拟实验,在不同 N 肥种类条件下开展 NBPT、CP 及其配施对黄泥田土壤中 N 素垂直迁移转化及降低淋溶损失影响的研究,以期为减少农田 N 素淋失和防治水环境污染提供科学理论依据。

1 材料与方 法

1.1 试验材料

供试土壤为黄泥田水稻土,于 2013 年 10 月采自浙江省金华市婺城区琅琊镇金朱村(29°01'19"N,119°27'96"E)的 0—20 cm 耕层土壤。该地区基本情况详见参考文献[20-21]。新鲜土样采回后剔除杂物及根系,风干后过 2 mm 筛备用。供试土壤基本理化性质为 pH 5.24,CEC 7.32 cmol/kg,有机质和全 N 分别为 26.20 g/kg 和 1.25 g/kg,碱解 N、NH₄⁺-N 和 NO₃⁻-N 分别为 132.3、53.40 mg/kg 和 17.81 mg/kg,有效磷和速效钾分别为 4.43 mg/kg 和 79.00 mg/kg,砂粒、粉粒和黏粒分别为 32.82%、44.13% 和 23.05%。

供试尿素(含 N 46%)、过磷酸钙(含 P₂O₅ 12%)、氯化钾(含 K₂O 60%)为分析纯,由国药集团化学试剂有限公司生产;尿素硝铵(含 N 32%;硝酸铵:尿素:水=47:37:16)为分析纯,由中化作物营养有限公司生产;N-丁基硫代磷酰三胺(NBPT)和 2-氯-6-(三氯甲基)吡啶(CP)24%乳油剂型为分析纯,由浙江奥复托化工有限公司生产。

1.2 试验装置

模拟土柱装置由 PVC 圆柱管制成,内径 10 cm,高度 40 cm^[22];底部铺粒径 1—2 mm 的干燥石英砂,2 cm 厚;管柱底部开一个 2 cm 的孔,由塑料管连接,以便收集渗滤液;管底及砂粒与土壤接触面均铺有一层 200 目的尼龙滤布。以 1.25 g/cm³土壤容重将已处理好的风干土样装入 PVC 圆柱管中,形成模拟土柱,高约 30 cm。

1.3 试验设计

试验于 2015 年 4—6 月在浙江省杭州市浙江大学紫金港校区实验室内进行,室内温度基本保持在 25—35℃,不种任何作物。试验共设置 9 个处理,3 次重复,如表 1 所示。肥料施用方法参照文献[20-21]。N 用量为 300 kg/hm²,P₂O₅和 K₂O 用量均为 150 kg/hm²。

表 1 土柱试验处理

Table 1 Experimental treatments of soil column

处理 Treatment	N 肥种类 N source	施 N 量 N rate/ (kg/hm ²)	抑制剂类型 Inhibitor Type	添加量(以 N 为基础) Inhibitor Rate/ (%) N
CK	CK	—	—	—
U	尿素 Urea	300	—	—
U+NBPT	尿素 Urea	300	NBPT	0.5
U+CP	尿素 Urea	300	CP	0.3
U+NBPT+CP	尿素 Urea	300	NBPT+CP	0.5+0.3
UAN	尿素硝铵 UAN	300	—	—
UAN+NBPT	尿素硝铵 UAN	300	NBPT	0.5
UAN+CP	尿素硝铵 UAN	300	CP	0.3
UAN+NBPT+CP	尿素硝铵 UAN	300	NBPT+CP	0.5+0.3

* U:尿素,Urea;UAN:尿素硝铵,Urea-ammonium nitrate;NBPT:N-丁基硫代磷酰三胺,N-(n-butyl) thiophosphoric triamide;CP:2-氯-6-(三氯甲基)吡啶,2-chloro-6-(trichloromethyl) pyridine

1.4 试验方法

1.4.1 样品采集

土柱安装好后参照当地平均降雨量 25.5 mm,每天从顶部用注射器缓慢注入 200 mL 水。待有淋洗液流出时,从第 6 天开始采用间歇淋溶法进行模拟降雨,每 6 天一次 200 mL 的降水,共 13 次。并于试验开展的第 1、6、12、18、24、30、36、42、48、54、60、66、72 天收集淋溶液,并记录淋溶液量。

1.4.2 测定项目与方法

土壤基本理化性质采用常规方法测定^[23]。将淋溶液过滤后,立即低温保存。 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度采用靛酚蓝比色法测定, $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 浓度采用紫外分光光度法测定。

1.5 数据分析

采用 Excel 2003 和 SPSS 17.0 数据分析软件进行统计分析,采用邓肯氏新复极差检验法进行处理间差异显著性比较。

2 结果与分析

2.1 土柱淋溶液中 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 的动态变化

2.1.1 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 淋失浓度

由图 1 可知,培养期间土柱淋溶液中 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 浓度整体上呈先升后降的变化趋势;CK 处理呈较低水平,保持平稳。培养前期各处理土柱淋溶液中 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 浓度均较高,这与供试土壤质地和含 N 背景值有关。U 和 UAN 处理淋溶液中 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 浓度分别于第 54 天(51.00 mg/L)和第 66 天(62.39 mg/L)达到峰值。尿素中淋溶液 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 浓度 U 处理整体上最高,于第 66 天起较 U+NBPT 处理开始降低;添加 CP 处理整体保持较低水平。尿素硝铵中淋溶液 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 浓度 UAN 处理整体上最高;添加 CP 处理整体保持较低水平。说明不同种类 N 肥中添加 CP 均能有效延缓淋溶液中 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 峰值的出现,减少 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 淋溶损失。第 54 天,尿素中淋溶液 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 浓度大小表现为 $U > U+NBPT > U+NBPT+CP > U+CP$,其中 U+NBPT、U+CP 和 U+NBPT+CP 处理较 U 处理分

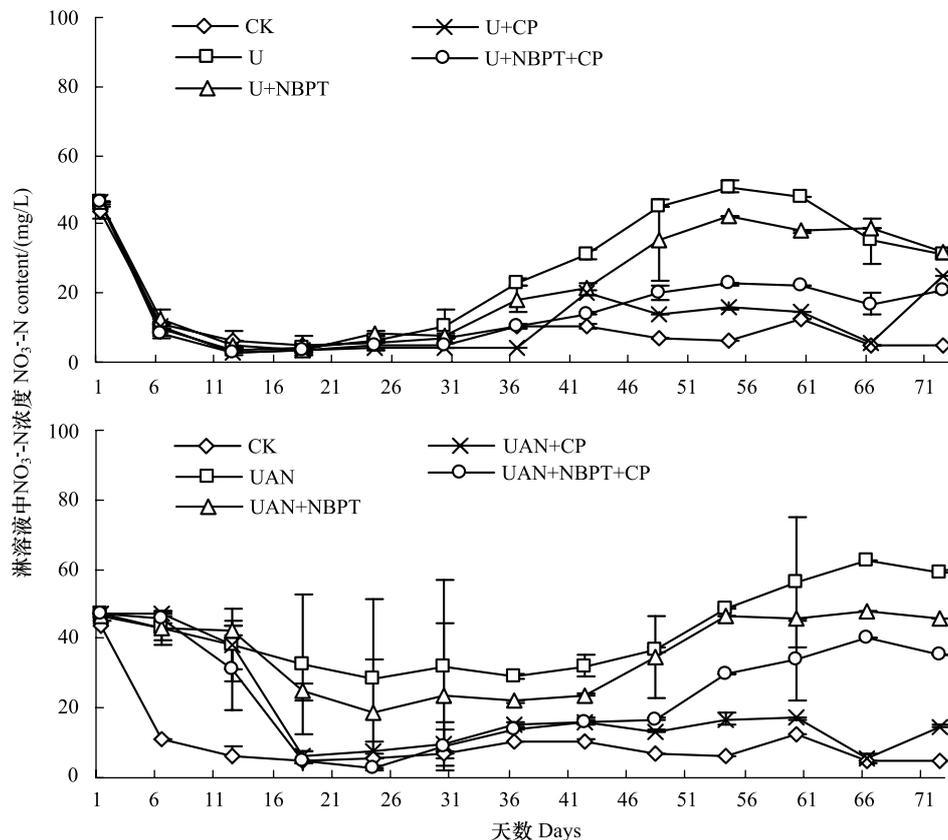


图 1 不同处理下土柱淋溶液中 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 浓度

Fig.1 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ content in the leachate of soil columns under different treatments

* U: 尿素, Urea; UAN: 尿素硝铵, Urea-ammonium nitrate; NBPT: N-丁基硫代磷酰三胺, N-(n-butyl) thiophosphoric triamide; CP: 2-氯-6-(三氯甲基)吡啶, 2-chloro-6-(trichloromethyl) pyridine

别降低 17.12%、68.46%和 55.69%。第 66 天,尿素硝铵中淋溶液 NO_3^- -N 浓度大小表现为 $\text{UAN} > \text{UAN} + \text{NBPT} > \text{UAN} + \text{NBPT} + \text{CP} > \text{UAN} + \text{CP}$, 其中 $\text{UAN} + \text{NBPT}$ 、 $\text{UAN} + \text{CP}$ 和 $\text{UAN} + \text{NBPT} + \text{CP}$ 处理较 UAN 处理分别降低 23.33%、91.01%和 35.42%。说明添加 NBPT 能有效延缓尿素水解,从而降低淋溶液中 NO_3^- -N 浓度;添加 CP 能有效抑制 NH_4^+ -N 向 NO_3^- -N 转化;NBPT+CP 组合较 NBPT 单独施用作用效果更好。

2.1.2 NO_3^- -N 淋失累积量

由图 2 可知,培养期间土柱淋溶液中 NO_3^- -N 淋失累积量整体上呈上升趋势;CK 处理呈较低水平,平稳增加。尿素和尿素硝铵淋溶液中 NO_3^- -N 淋失累积量前期增长缓慢,分别于第 42 天和第 24 天开始急剧增加,这与不同种类 N 肥形态和尿素水解时间有关。培养结束时(第 72 天),UAN 处理 NO_3^- -N 淋失累积量较 U 处理增加 34.39%。尿素中淋溶液 NO_3^- -N 累积量大小表现为 $\text{U} > \text{U} + \text{NBPT} > \text{U} + \text{NBPT} + \text{CP} > \text{U} + \text{CP}$, 其中 $\text{U} + \text{NBPT}$ 、 $\text{U} + \text{CP}$ 和 $\text{U} + \text{NBPT} + \text{CP}$ 处理较 U 处理分别降低 15.58%、114.77%和 73.45%。尿素硝铵中淋溶液 NO_3^- -N 累积量大小表现为 $\text{UAN} > \text{UAN} + \text{NBPT} > \text{UAN} + \text{NBPT} + \text{CP} > \text{UAN} + \text{CP}$, 其中 $\text{UAN} + \text{NBPT}$ 、 $\text{UAN} + \text{CP}$ 和 $\text{UAN} + \text{NBPT} + \text{CP}$ 处理较 UAN 处理分别降低 15.88%、54.87%和 37.46%。说明添加 CP 和 NBPT 能显著降低黄泥田土壤中 NO_3^- -N 的淋失;尿素中添加 CP 较尿素硝铵作用效果更好,可能与尿素水解时间有关。

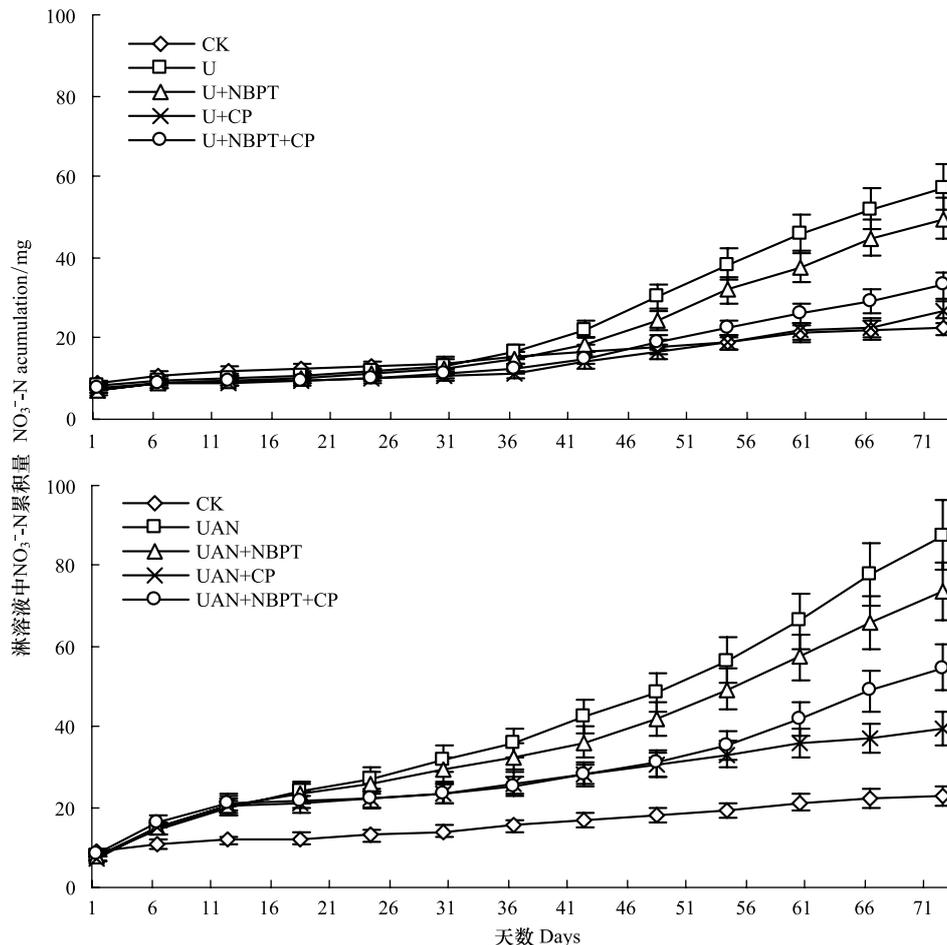


图 2 不同处理下土柱淋溶液中 NO_3^- -N 淋失累积量

Fig.2 Accumulation losses of NO_3^- -N in the leachate of soil columns under different treatments

2.2 土柱淋溶液中 NH_4^+ -N 的动态变化

2.2.1 NH_4^+ -N 淋失浓度

由图 3 可知,培养期间土柱淋溶液中 NH_4^+ -N 浓度整体上呈先升后降的趋势;CK 处理呈较低水平,平稳降

低。U 和 UAN 处理淋溶液中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度分别于第 42 天 (37.47 mg/L) 和第 24 天 (36.70 mg/L) 达到峰值。说明尿素较尿素硝铵在黄泥田土壤中水解转化慢。尿素中淋溶液 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度 U 处理始终最高, 添加 NBPT 处理整体保持较低水平; 尿素硝铵中淋溶液 UAN 处理 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度于第 54 天起开始降低, 而添加抑制剂处理峰值较 UAN 处理延缓 12 天。说明添加抑制剂能有效延缓淋溶液中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 峰值的出现。第 24 天, 尿素硝铵中淋溶液 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度大小表现为 $\text{UAN} > \text{UAN} + \text{NBPT} + \text{CP} > \text{UAN} + \text{CP} > \text{UAN} + \text{NBPT}$, 其中 UAN+NBPT 处理较 UAN 处理降低 32.90%; 第 42 天, 尿素中淋溶液 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度大小表现为 $\text{U} > \text{U} + \text{NBPT} + \text{CP} > \text{U} + \text{CP} > \text{U} + \text{NBPT}$, 其中 U+NBPT 处理较 U 处理降低 30.75%。说明添加 NBPT 能有效延缓尿素水解, 降低淋溶液中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度; 添加 CP 不会过多提高淋溶液中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度; NBPT+CP 配施较单施 NBPT 或 CP 处理可能增加土壤中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的淋溶损失。

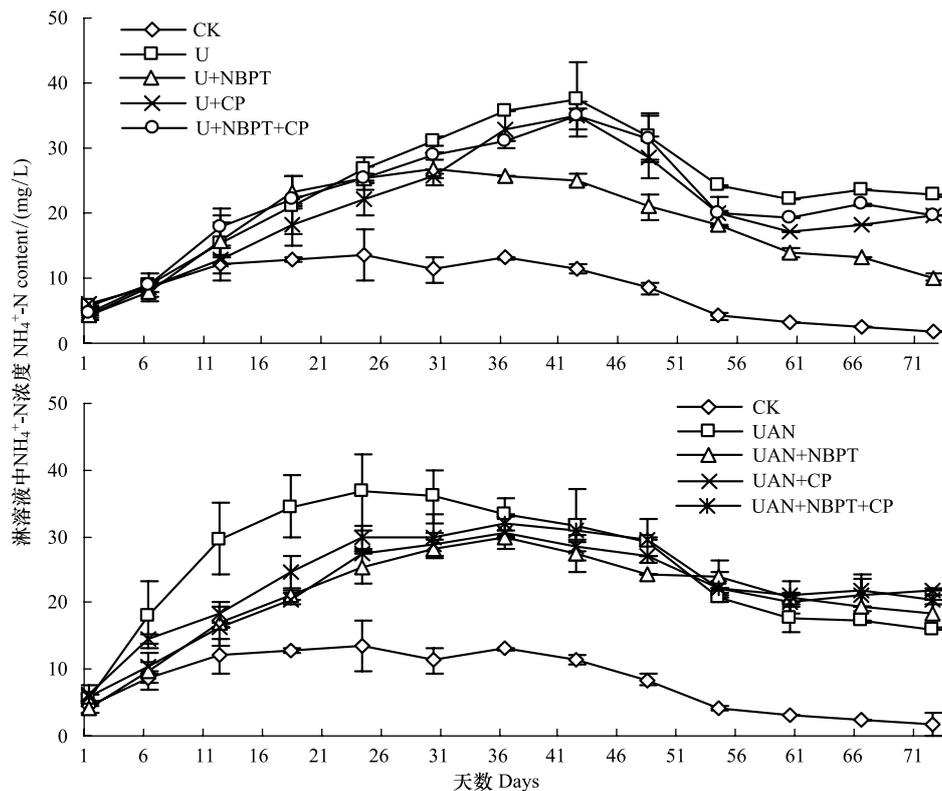


图 3 不同处理下土柱淋溶液中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度

Fig.3 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ content in the leachate of soil columns under different treatments

2.2.2 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 淋失累积量

由图 4 可知, 培养期间土柱淋溶液中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 淋失累积量整体上呈上升趋势; CK 处理呈较低水平, 平稳增加。尿素和尿素硝铵中淋溶液 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 淋失累积量前期增长缓慢, 分别于第 30 天和第 12 天开始急剧增加, 这与不同种类 N 肥形态和尿素水解时间有关。培养结束时 (第 72 天), UAN 处理 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 淋失累积量较 U 处理增加 5.32%。尿素中淋溶液 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 累积量大小表现为 $\text{U} > \text{U} + \text{NBPT} + \text{CP} > \text{U} + \text{CP} > \text{U} + \text{NBPT}$, 其中 U+NBPT、U+CP 和 U+NBPT+CP 处理较 U 处理分别降低 25.45%、16.90% 和 6.34%。尿素硝铵中淋溶液 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 累积量大小表现为 $\text{UAN} > \text{UAN} + \text{NBPT} + \text{CP} > \text{UAN} + \text{CP} > \text{UAN} + \text{NBPT}$, 其中 UAN+NBPT、UAN+CP 和 UAN+NBPT+CP 处理较 UAN 处理分别降低 19.59%、16.42% 和 8.66%。说明添加 CP 和 NBPT 能显著降低土壤中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的淋失, 而 NBPT+CP 组合对降低土壤中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的淋失作用不显著。可能是由于 NBPT+CP 组合在培养期间土壤中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度较高, 超过土壤胶体的吸附范围, 导致过多的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 淋失出来。

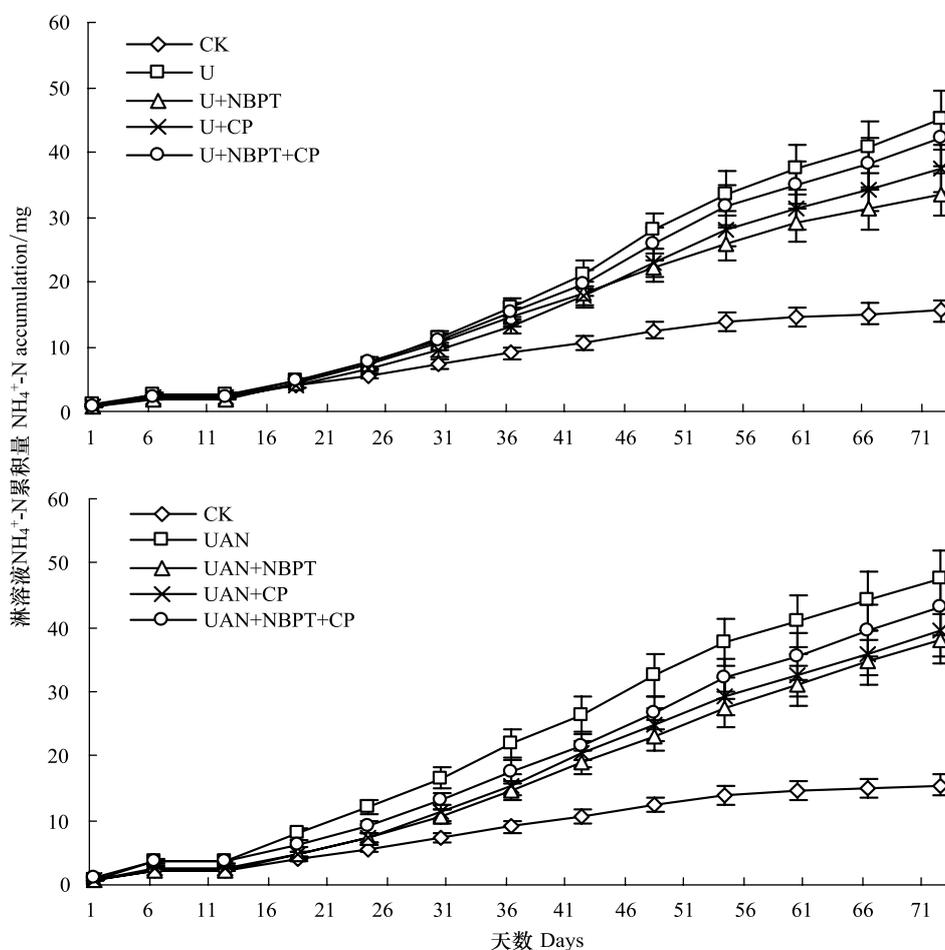


图 4 不同处理下土柱淋溶液中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 淋失累积量

Fig.4 Accumulation losses of $\text{NH}_4^+\text{-N}$ in the leachate of soil columns under different treatments

2.3 矿质态 N 淋失累积量

由图 5 可知,培养期间土柱淋溶液中矿质态 N ($\text{NH}_4^+\text{-N} + \text{NO}_3^-\text{-N}$) 淋失累积量整体上呈上升趋势;CK 处理呈较低水平,平稳增加。尿素和尿素硝铵中淋溶液矿质态 N 淋失累积量前期增长缓慢,分别于第 36 天和第 24 天开始急剧增加,这与不同种类 N 肥形态有关。培养结束时(第 72 天),UAN 处理矿质态 N 淋失累积量及硝化率较 U 处理增加 31.72% 和 15.71%。尿素中淋溶液矿质态 N 累积量大小表现为 $U > U + \text{NBPT} > U + \text{NBPT} + \text{CP} > U + \text{CP}$,硝化率大小表现为 $U + \text{NBPT} > U > U + \text{NBPT} + \text{CP} > U + \text{CP}$,其中 $U + \text{NBPT}$ 、 $U + \text{CP}$ 和 $U + \text{NBPT} + \text{CP}$ 处理矿质态 N 累积量较 U 处理分别降低 18.74%、37.38% 和 26.53%,硝化率分别降低 -6.47%、25.64% 和 21.53%。尿素硝铵中淋溶液矿质态 N 累积量大小表现为 $\text{UAN} > \text{UAN} + \text{NBPT} > \text{UAN} + \text{NBPT} + \text{CP} > \text{UAN} + \text{CP}$,硝化率大小表现为 $\text{UAN} + \text{NBPT} > \text{UAN} > \text{UAN} + \text{NBPT} + \text{CP} > \text{UAN} + \text{CP}$ 。其中 $\text{UAN} + \text{NBPT}$ 、 $\text{UAN} + \text{CP}$ 和 $\text{UAN} + \text{NBPT} + \text{CP}$ 处理矿质态 N 累积量较 UAN 处理分别降低 17.18%、41.37% 和 27.34%,硝化率分别降低 -1.57%、23.03% 和 13.92%。

2.4 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 淋溶特征曲线拟合

对黄泥田土壤各处理淋溶液中 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 累积量(y)随时间(x)的变化,分别以 $y = ax + b$, $y = a \ln x + b$, $y = ax^b$, $\ln y = ax + b$ 方程进行回归分析(表 2)。各拟合方程 R^2 值均达到极显著水平($P < 0.01$),说明各处理 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 淋失量均随时间的延长而增加。对于 U 和 UAN 各处理均以直线方程 $y = ax + b$ 拟合效果较好,说明 $y = ax + b$ 能较好地描述不同 N 肥种类淋溶液中 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 淋失量随培养时间的动态变化特征。其中, a 表示 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 淋失量随时间

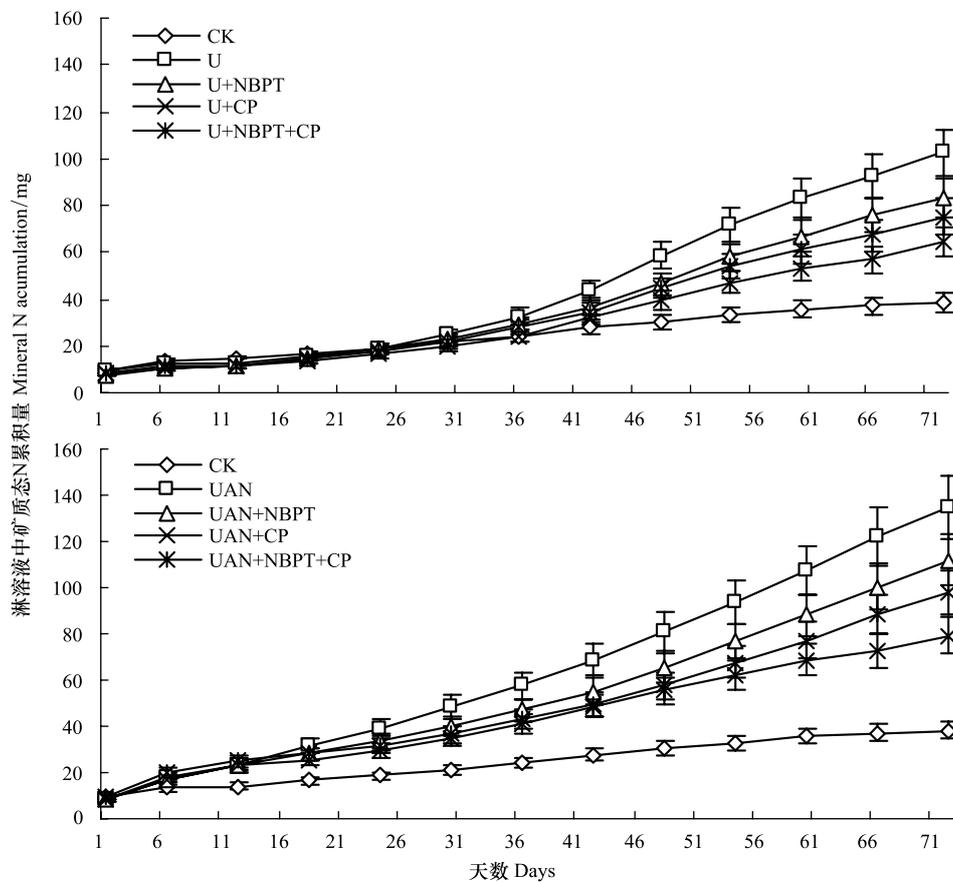


图5 不同处理下土柱淋溶液中矿质态N淋失累积量

Fig.5 Accumulation losses of mineral N in the leachate of soil columns under different treatments

变化的速率。U 和 UAN 各处理 a 值大小表现为 $U(UAN) > U(UAN)+NBPT > U(UAN)+NBPT+CP > U(UAN)+CP$ 。 b 表示 NO_3^- -N 初始淋失量。U 和 UAN 各处理 b 值大小表现为 $U(UAN)+CP > U(UAN)+NBPT+CP > U(UAN)+NBPT > U(UAN)$ 。说明黄泥田土壤中 NO_3^- -N 淋失量与时间变化密切相关;添加抑制剂可以改变土壤中 NO_3^- -N 的存在时间,从而影响 NO_3^- -N 的吸附与解析。

表2 不同处理下 NO_3^- -N 淋失量(y , kg/hm^2) 与时间(t , d) 的拟合方程Table 2 The fitting equations between the leaching loss of NO_3^- -N (y , kg/hm^2) and time (t , d) under different treatments

处理 Treatment	$y=ax+b$			$y=a\ln x+b$			$y=ax^b$			$\ln y=ax+b$		
	a	b	R^2	a	b	R^2	a	b	R^2	a	b	R^2
CK	0.20	8.81	0.99**	3.24	5.53	0.73**	7.43	0.23	0.83**	0.01	9.64	0.98**
U	0.72	-0.77	0.89**	10.29	-7.69	0.49**	4.49	0.47	0.63**	0.03	6.82	0.96**
U+NBPT	0.60	0.16	0.88**	8.56	-5.68	0.49**	4.19	0.45	0.66**	0.03	6.35	0.97**
U+CP	0.26	4.82	0.92**	3.97	1.70	0.55**	5.08	0.30	0.68**	0.02	6.77	0.97**
U+NBPT+CP	0.35	3.78	0.90**	5.14	0.11	0.51**	5.04	0.33	0.64**	0.02	6.82	0.97**
UAN	1.05	3.78	0.97**	16.67	-11.70	0.66**	5.69	0.56	0.92**	0.03	11.8	0.95**
UAN+NBPT	0.84	6.39	0.96**	13.72	-6.97	0.68**	6.11	0.51	0.93**	0.03	12.1	0.92**
UAN+CP	0.39	11.85	0.96**	7.27	2.84	0.87**	7.10	0.38	0.98**	0.02	12.62	0.80**
UAN+NBPT+CP	0.54	9.65	0.92**	8.86	0.84	0.66**	7.73	0.38	0.88**	0.02	12.83	0.89**

* U: 尿素, Urea; UAN: 尿素硝酸铵, Urea-ammonium nitrate; NBPT: N-丁基硫代磷酰三胺, N-(n-butyl) thiophosphoric triamide; CP: 2-氯-6-(三氯甲基)吡啶, 2-chloro-6-(trichloromethyl) pyridine; ** $P < 0.01$

3 讨论

3.1 N 肥种类对土壤 N 素淋溶损失的影响

通常土壤中不同形态 N 素的淋溶损失强度由大到小依次为 NO_3^- -N、 NO_2^- -N、 NH_4^+ -N、有机 N^[6]。在各种常规 N 肥中 N 素淋失量:硝酸钾> 尿素> 硫酸铵和碳铵^[24]。 NO_3^- -N 在土壤中不易被胶体吸附、移动性强,成为 N 素淋失的主要形式,其淋失量随施肥量的增加而显著增加^[25]; NH_4^+ -N 在土壤中易被胶体吸附和被矿物晶格固定,其淋溶损失不如 NO_3^- -N 强烈,但由于土壤胶体吸附阳离子的能力有限,当施肥量超过吸附容量时, NH_4^+ -N 也存在明显的淋溶损失^[26-27]。本研究,从淋失 N 素形态来看,尿素和尿素硝酸铵中淋失 N 素均以 NO_3^- -N 为主。尿素中 NO_3^- -N 淋溶会伴随尿素的水解过程出现一定的滞后效应。不同 N 肥种类淋溶液中 NO_3^- -N 累积量(y)随培养时间(x)的变化均可用线性方程进行描述。

N 素淋失量会随 N 肥品种和用量而发生变化^[6]。陈子明等^[28]研究发现,硝铵和硝酸钾的淋失量远高于尿素和硫酸铵,而控释性肥料较普通化肥的淋失量大为降低。齐英杰等^[29]采用室内模拟研究运动场砂基坪床中 N 肥类型与 N 素水平的淋洗迁移发现,同种类型肥料的淋失量随施 N 量的增加而增加;等 N 条件下,控释 N 肥较普通尿素显著降低养分淋失;不同施肥处理淋失 N 素均以尿素态 N 为主,其次为 NO_3^- -N, NH_4^+ -N 最少。本研究中,UAN 处理中 NO_3^- -N 和 NH_4^+ -N 淋失量较 U 处理高 34.39% 和 5.32%,这主要取决于不同种类 N 肥的 N 素存在形态。

3.2 抑制剂对 N 素淋溶损失的影响

硝化抑制剂能有效抑制 NH_4^+ -N 向 NO_3^- -N 的转化,使土壤中 NH_4^+ -N 含量保持较高水平,显著降低 NO_3^- -N 在土壤中累积,从而减少 N 素淋溶损失^[30-31]。俞巧钢等^[32]采用原状土柱模拟发现,小粉土施用尿素(400 kg/hm²) 60 天后,10—40 cm 土壤中 NO_3^- -N 浓度达 12.97—16.22 mg/L,而配施 DMPP 处理 30—40 cm 土壤中仅为 0.32—4.44 mg/L。Di 等^[33]研究发现,尿素与牛尿添加 DCD 同施牧草能使砂壤土淋滤液中 NO_3^- -N 浓度降低 60 mg/L,淋失总量由 85 kg/hm²/a 下降至 20—22 kg/hm²/a,减少 74%—76%。Chaves 等^[34]比较蔬菜残渣添加抑制剂发现,配施 DCD 和 DMPP 减少 NO_3^- -N 淋失分别达 45% 和 64%,且 DMPP 未影响 N 的矿化作用;其抑制效果分别持续 50 天和 95 天。Wolt 等^[35]总结多种作物和土壤应用 CP 发现, NO_3^- -N 淋溶损失量降低 16%。李兆君等^[36]研究指出,培养 27 天内吡啶类硝化抑制剂能显著抑制土壤铵氧化过程,明显降低 NO_3^- -N 垂直迁移,深层土壤地下水 NO_3^- -N 浓度显著降低。本研究结果表明,CP 处理可以有效抑制 NH_4^+ -N 向 NO_3^- -N 转化,减少土壤 NO_3^- -N 流失。同时,CP 会降低土壤 N 素矿化,进而减轻培养期间淋溶风险,但后期会表现出更高的总矿化速率^[37]。添加 CP 处理淋溶液 NH_4^+ -N 浓度仍低于施 N 处理,可能是由于土壤对有效态 N 素的固持,引起土壤 pH 上升,从而增加氨挥发潜势,最终使 NH_4^+ -N 淋失量降低。配施 NBPT 能延长尿素水解时间,而一旦硝化过程发生,可能因增加参与硝化作用的 N 量,导致 N 素淋溶损失^[12]。本研究结果表明,NBPT 处理可以减缓尿素水解,有效抑制 NH_4^+ -N 生成,延缓其出峰时间,减少 NH_4^+ -N 流失。同时, NH_4^+ -N 可能被土壤固持吸附,或增加 N 素在土壤中的残留量和有机 N 流失的可能性。Gioacchini 等^[14]研究发现,尿素配施 NBPT+DCD 未减少肥料中 N 的淋失,反而使土壤中部分 N 的淋溶显著增加。陈振华等^[15]研究发现,相同环境条件下总硝化率随着培养时间的延长而增加,而 HQ+DCD 组合的淋溶潜势较小。本研究结果表明,与单独添加 NBPT 和 CP 处理相比,两者配施表现出对 N 素淋溶损失有明显的协同抑制效果。既减缓尿素水解速率,又抑制 NH_4^+ -N 转化为 NO_3^- -N,加之土壤对 NH_4^+ -N 的强吸附特性,迁移总量低,有效减轻对地下水造成污染的风险。而淋溶后期可能会随着 NO_3^- -N 流失的增多,而增加 NH_4^+ -N 淋溶的可能性。

3.3 黄泥田土壤中 NO_3^- -N 淋溶特征

土壤理化性质不同,如土壤质地、通气性及有机质含量等,对农田 N 素淋溶损失的影响很大^[6]。质地粗的沙质土较质地细的黏质土淋失 N 素严重^[38-39]。Zhou 等^[40]研究发现,黏壤土中 N 素淋失量仅为施 N 量的

5.7%—9.6%,而砂壤土中可达 16.2%—30.4%。习金根等^[41]采用滴灌进行土柱模拟发现,3 种 N 肥在 2 种质地土壤中淋失量均表现为硝态氮肥> 尿素> 铵态氮肥,且砂壤土中 N 素的淋失量明显高于黏壤土。Yu 等^[42]采用原状土柱模拟发现,粉砂壤土和重黏土中配施 DMPP 60 天后, NH_4^+ -N 淋失量分别增加 9.7%和 6.7%,但 NO_3^- -N 淋失量分别降低 66.8%和 69.5%,无机 N 淋失总量降幅达 59.3%—63.1%。本研究中,黄泥田土壤淋溶前期不同施肥处理均出现一定的养分损失,这与其自身土壤性质有关。培养结束时(第 72 天),UAN 处理中矿质态 N 淋失总量及硝化率较 U 处理高 31.72%和 15.71%。相关研究表明,在降雨量大、渗透性高、阳离子交换量低的土壤中,淋失易导致化肥利用率低^[43]。黄泥田土壤黏粒含量过高,土壤质地黏重,田面板结,透水性差,犁耙困难;土壤有机质含量低,多为酸性至弱酸性,易造成土壤养分流失^[44]。本研究结果表明,在一定施肥量条件下,NBPT 和 CP 两者单施或配施均可降低黄泥田土壤中 NO_3^- -N 累积淋失量。U+NBPT、U+CP 和 U+NBPT+CP 处理较 U 处理 NO_3^- -N 累积淋失量显著降低 15.58%—114.77%;UAN+NBPT、UAN+CP 和 UAN+NBPT+CP 处理较 UAN 处理显著降低 15.88%—54.87%。

4 结论

本试验条件下,UAN 处理中 NO_3^- -N、 NH_4^+ -N、矿质态 N 淋失总量及硝化率较 U 处理高 34.39%、5.32%、31.72%和 15.71%。不同处理 NO_3^- -N 淋失总量大小表现为:U> U+NBPT> U+NBPT+CP> U+CP> CK;UAN> UAN+NBPT> UAN+NBPT+CP> UAN+CP> CK。在一定施肥量条件下,NBPT 和 CP 两者单施或配施均可降低黄泥田土壤中 NO_3^- -N 累积淋失量。目前结果是从室内模拟中得出,NBPT+CP 组合在田间的应用效果还有待进一步研究。

参考文献(References):

- [1] 巨晓棠,张福锁.关于氮肥利用率的思考.生态环境,2003,12(2):192-197.
- [2] 串丽敏,安志装,杜连凤,赵同科,李顺江.脲酶/硝化抑制剂对壤质潮土氮素淋溶影响的模拟研究.中国农业科学,2011,44(19):4007-4014.
- [3] 陈效民,潘根兴,沈其荣,康燕.太湖地区农田土壤中硝态氮垂直运移的规律.中国环境科学,2001,21(6):481-484.
- [4] 胡克林,李保国,陈德立,White R E.预测农田水分渗漏和氮素淋失的两种模型比较.水科学进展,2004,15(1):87-93.
- [5] 王荣萍,余炜敏,黄建国,袁玲,李淑仪.田间条件下氮的矿化及硝态氮淋溶研究.水土保持学报,2006,20(1):80-82,107-107.
- [6] 左海军,张奇,徐力刚.农田氮素淋溶损失影响因素及防治对策研究.环境污染与防治,2008,30(12):83-89.
- [7] 陈利军,史奕,李荣华,胡连生,周礼恺.脲酶抑制剂和硝化抑制剂的协同作用对尿素氮转化和 N_2O 排放的影响.应用生态学报,1995,6(4):368-372.
- [8] Snyder C S, Bruulsema T W, Jensen T L, Fixen P E. Review of greenhouse gas emissions from crop production systems and fertilizer management effects. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2009, 133(3/4): 247-266.
- [9] 周旋,吴良欢,戴锋.土壤温度和含水量互作对抑制剂抑制氮素转化效果的影响.农业工程学报,2017,33(20):106-115.
- [10] Di H J, Cameron K C. Reducing environmental impacts of agriculture by using a fine particle suspension nitrification inhibitor to decrease nitrate leaching from grazed pastures. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2005, 109(3/4): 202-212.
- [11] 赵言文,刘常珍,胡正义,高义民,王彩绒,毕冬梅.元素硫和双氰胺对蔬菜地土壤硝态氮淋失的影响.应用生态学报,2005,16(3):496-500.
- [12] 郑福丽,李彬,李晓云,石元亮.脲酶抑制剂的作用机理与效应.吉林农业科学,2006,31(6):25-28.
- [13] 王朝辉,李生秀,王西娜,苏涛.旱地土壤硝态氮残留淋溶及影响因素研究.土壤,2006,38(6):676-681.
- [14] Gioacchini P, Nistri A, Marzadori C, Giovannini C, Antisari L V, Gessa C. Influence of urease and nitrification inhibitors on N losses from soils fertilized with urea. Biology and Fertility of Soils, 2002, 36(2): 129-135.
- [15] 陈振华,陈利军,武志杰.脲酶-硝化抑制剂对减缓尿素转化产物氧化及淋溶的作用.应用生态学报,2005,16(2):238-242.
- [16] 傅涛,倪九派,魏朝富,谢德体.双氰胺在四川 3 种主要土壤上的硝化抑制作用.土壤与环境,2001,10(3):210-213.
- [17] 孙志梅,武志杰,陈利军,马星竹.硝化抑制剂的施用效果、影响因素及其评价.应用生态学报,2008,19(7):1611-1618.
- [18] 周旋,吴良欢,戴锋.生化抑制剂组合对黄泥田土壤尿素态氮转化的影响.水土保持学报,2015,29(5):95-100,123-123.
- [19] 周旋,吴良欢,戴锋.生化抑制剂组合与施肥模式对黄泥田水稻养分累积及利用率的影响.中国生态农业学报,2017,25(10):

1495-1507.

- [20] 周旋, 吴良欢, 董春华. 氮肥配施生化抑制剂对黄泥田土壤钾素淋溶特征的影响. 中国生态农业学报, 2018, 26(5): 737-745.
- [21] 周旋. 生化抑制剂组合对黄泥田土壤氮素转化的影响及其环境生态效应[D]. 杭州: 浙江大学, 2017.
- [22] 高德才, 张蕾, 刘强, 荣湘民, 张玉平, 田昌. 生物黑炭对旱地土壤 CO₂、CH₄、N₂O 排放及其环境效益的影响. 生态学报, 2015, 35(11): 3615-3624.
- [23] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法. 北京: 中国农业科技出版社, 2000.
- [24] 张庆利, 张民, 田维彬. 包膜控释和常用氮肥氮素淋溶特征及其对土水质量的影响. 土壤与环境, 2001, 10(2): 98-103.
- [25] 李丹, 孙志梅, 王艳群, 薛世川, 王小雪. 有机组分对 N 素在砂壤土中淋溶运移的影响. 水土保持学报, 2010, 24(3): 23-26.
- [26] 林清火, 罗微, 屈明, 茶正早, 林钊沐. 尿素在砖红壤中的淋失特征 II—NO₃-N 的淋失. 农业环境科学学报, 2005, 24(4): 638-642.
- [27] 邢承华, 章永松, 林咸永, 都韶婷, 于承燕. 饱和铵贮库施肥法对降低土壤氮素挥发和淋失的作用研究. 浙江大学学报: 农业与生命科学版, 2006, 32(2): 155-161.
- [28] 陈子明, 袁锋明, 姚造华, 周春生, 付高明, 李小平, 王丽霞. 氮肥施用对土体中氮素移动利用及其对产量的影响. 土壤肥料, 1995, (4): 36-42.
- [29] 齐英杰, 陈为峰, 郑磊, 牟信刚, 张志华, 田素娟. 氮素在运动场砂基坪床中的淋溶和迁移模拟研究. 水土保持学报, 2009, 23(1): 59-63.
- [30] 徐星凯, 周礼恺, Van Cleemput O. 脲酶抑制剂/硝化抑制剂对土壤中尿素氮转化及形态分布的影响. 土壤学报, 2000, 37(3): 339-345.
- [31] Fettweis U, Mittelstaedt W, Schimansky C, Führ F. Lysimeter experiments on the translocation of the carbon-14-labelled nitrification inhibitor 3, 4-dimethylpyrazole phosphate (DMPP) in a gleyic cambisol. *Biology and Fertility of Soils*, 2001, 34(2): 126-130.
- [32] 俞巧钢, 陈英旭. DMPP 对稻田田面水氮素转化及流失潜能的影响. 中国环境科学, 2010, 30(9): 1274-1280.
- [33] Di H J, Cameron K C. Treating grazed pasture soil with a nitrification inhibitor, eco-nTM, to decrease nitrate leaching in a deep sandy soil under spray irrigation—a lysimeter study. *New Zealand Journal of Agricultural Research*, 2004, 47(3): 351-361.
- [34] Chaves B, Opoku A, De Neve S, Boeckx P, Van Cleemput O, Hofman G. Influence of DCD and DMPP on soil N dynamics after incorporation of vegetable crop residues. *Biology and Fertility of Soils*, 2006, 43(1): 62-68.
- [35] Wolt J D. A meta-evaluation of nitrapyrin agronomic and environmental effectiveness with emphasis on corn production in the Midwestern USA. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2004, 69(1): 23-41.
- [36] 李兆君, 宋阿琳, 范分良, 梁永超. 新型硝化抑制剂对外源铵态氮在土壤中迁移转化及淋溶损失的影响. 西南农业学报, 2011, 24(3): 995-998.
- [37] 章燕, 徐慧, 夏宗伟, 郭彦玲. 硝化抑制剂 DCD、DMPP 对褐土氮总矿化速率和硝化速率的影响. 应用生态学报, 2012, 23(1): 166-172.
- [38] Di H J, Cameron K C. Nitrate leaching in temperate agroecosystems: sources, factors and mitigating strategies. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2002, 64(3): 237-256.
- [39] Silva R G, Cameron K C, Di H J, Smith N P, Buchan G D. Effect of macropore flow on the transport of surface-applied cow urine through a soil profile. *Australian Journal of Soil Research*, 2000, 38(1): 13-24.
- [40] Zhou J B, Xi J G, Chen Z J, Li S X. Leaching and transformation of nitrogen fertilizers in soil after application of N with irrigation: A soil column method. *Pedosphere*, 2006, 16(2): 245-252.
- [41] 习金根, 周建斌, 赵满兴, 陈竹君. 滴灌施肥条件下不同种类氮肥在土壤中迁移转化特性的研究. 植物营养与肥料学报, 2004, 10(4): 337-342.
- [42] Yu Q G, Chen Y X, Ye X Z, Zhang Q L, Zhang Z J, Tian P. Evaluation of nitrification inhibitor 3, 4-dimethyl pyrazole phosphate on nitrogen leaching in undisturbed soil columns. *Chemosphere*, 2007, 67(5): 872-878.
- [43] 罗微, 林清火, 茶正早, 林钊沐. 氮肥品种对砖红壤中钾素淋溶特征的影响. 水土保持学报, 2005, 19(6): 74-77, 81-81.
- [44] 张宣. 南方中低产黄泥田科学施肥技术研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2014.