

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¹, 王志国¹, 张晴雯^{2*}, 丁金英¹, 尹爱军¹, 左 莹¹

(1.宁夏职业技术学院/宁夏广播电视大学, 银川 750021; 2.中国农业科学院农业环境与可持续发展研究所/农业清洁流域团队, 北京 100081)

摘要:脲酶抑制剂 N-丁基硫代磷酰三胺(NBPT)和硝化抑制剂双氰胺(DCD)对抑制尿素土壤氨挥发损失和提高土壤有效氮积累量有很大潜力,但 2 种抑制剂配合施用对灌区强碱性灌淤土尿素施用后氨挥发损失和有效氮积累量的抑制作用尚不明确。为此,选取灌区碱性灌淤土为研究对象开展室内试验,设置 NBPT 与不同浓度 DCD 组合下的 6 个处理,对照为单施尿素,研究 NBPT 及其与不同浓度 DCD 组合下的尿素土壤氨挥发和有效氮积累量的变化特征及作用效果。结果表明,在没有添加抑制剂的碱性灌淤土中,尿素施用后短期内(3 d 左右)土壤氨挥发速率和 NH_4^+-N 积累量达最大值;在施肥后第 8 d 土壤氨挥发总量和 NO_3^--N 积累量达最大值;添加抑制剂 NBPT/DCD 可显著降低施肥初期(5 d 内)氨挥发速率,且有效减少施肥初期累积氨挥发量;单独添加相当于尿素氮量 0.1% 的 NBPT,累积氨挥发量较 CK 降低了 64%,施肥初期土壤 NH_4^+-N 和 NO_3^--N 积累量显著低于 CK。NBPT 和 DCD 组合研究结果表明,在 NBPT 添加浓度为尿素氮量的 0.1%,DCD 为 1% 的低浓度水平下,土壤累积氨挥发量较 CK 降低了 16.7%,同时土壤 NH_4^+-N 积累量增加趋势缓慢,但硝化抑制率在施肥的第 5 d 后快速下降,土壤 NO_3^--N 积累量快速增加,氮素淋溶损失的风险加大;随着 DCD 添加浓度增加(2%~5%),其硝化抑制率显著增加,土壤 NO_3^--N 积累量显著降低,但氨挥发损失量显著增大;相关性分析得出,土壤氨挥发速率与 NH_4^+-N 积累量呈正相关,与 NO_3^--N 积累量呈负相关。综合分析得出,0.1% NBPT 配施 2%~3% 的 DCD 时,土壤氨挥发损失量相对较低,土壤有效态氮积累量较高,且在土壤中滞留时间相对较长,可推荐为灌区碱性灌淤土尿素氮肥与 2 种抑制剂配施的最佳组合。

关键词:碱性灌淤土;NBPT;DCD;氨挥发; NH_4^+-N 积累量; NO_3^--N 积累量

中图分类号:X53 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2015)03-0606-07 doi:10.11654/jaes.2015.03.026

Effects of Different NBPT/DCD Combinations on Ammonia Volatilization and Available-N in Alkaline Anthropogenic-alluvial Soil in Irrigated Area

ZHANG Hui¹, WANG Zhi-guo¹, ZHANG Qing-wen^{2*}, DING Jin-ying¹, YIN Ai-jun¹, ZUO Ying¹

(1.Ningxia Polytechnic, Ningxia Radio & TV University, Yinchuan 750021, China; 2.Agricultural Clean Watershed Research Group, Institute of Environment and Sustainable Development in Agriculture, CAAS, Beijing 100081, China)

Abstract: Urease inhibitor, N-(n-butyl)thiophosphoric triamide (NBPT), has potential to reduce urea nitrogen losses via ammonia volatilization (AV), while nitrification inhibitor, dicyandiamide (DCD), could reduce nitrogen loss through leaching, both increasing available-N in soils. A laboratory experiment was conducted to study AV loss and ammonium-N (NH_4^+-N) and nitrate-N (NO_3^--N) accumulations in alkaline anthropogenic-alluvial soil under different ratios of two inhibitors (NBPT/DCD). Six different rate combinations of NBPT/DCD and CK (without inhibitor) were employed. Results showed that AV rates and NH_4^+-N accumulation were relatively high in the first a few days after fertilizer application, compared with CK. Addition of NBPT alone at 0.1% reduced AV by 64%. Soil NO_3^--N and NH_4^+-N accumulations were significantly lower in NBPT treatments than CK during 5 days after urea application. However, such inhibiting effect of

收稿日期:2014-10-27

基金项目:宁夏自然科学基金项目(批准号“NZ12215”);宁夏职业技术学院技术创新中心实验室资助

作者简介:张 惠(1967—),女,博士,教授,从事农业面源污染相关研究。E-mail:zhanghs@126.com

*通信作者:张晴雯 E-mail:ellenzhq@163.com

NBPT lasted only about 8 days. Combined applications of NBPT and DCD significantly reduced AV loss and $\text{NH}_4^+\text{-N}$ accumulation in soil while increased $\text{NO}_3^-\text{-N}$ accumulation in soil. Compared with CK, applying 0.1% NBPT and 1% DCD reduced AV loss by 16.7%, and $\text{NH}_4^+\text{-N}$ accumulation in soil slowed down while $\text{NO}_3^-\text{-N}$ accumulation in soil increased after 5 days of fertilization. At 0.1% NBPT, increasing DCD from 2% to 5% decreased soil $\text{NO}_3^-\text{-N}$ concentrations while gradually increased soil NH_3 volatilization. These findings suggest that optimized combined application of inhibitors would be 2%~3% DCD and 0.1% NBPT for reducing nitrogen loss via AV and maintaining higher available-N in alkaline anthropogenic-alluvial soil in irrigated area.

Keywords: alkaline anthropogenic-alluvial soil; NBPT; DCD; ammonia volatilization loss; $\text{NO}_3^-\text{-N}$ accumulation; $\text{NH}_4^+\text{-N}$ accumulation

近年来,脲酶抑制剂和硝化抑制剂对减缓尿素氮肥损失的作用效果备受关注。已有研究表明,通过添加脲酶抑制剂或硝化抑制剂调控尿素氮土壤转化进程,是减少尿素氮肥损失、实现氮肥高效利用的有效手段^[1-3]。脲酶抑制剂 N-丁基硫代磷酰三胺(NBPT)受土壤 pH 的影响最小,适用范围较广,是目前最有效且商品化的土壤脲酶抑制剂之一。硝化抑制剂双氰胺(DCD)因其降解完全性、经济高效性、水可溶性及毒性小等特点在农业生产中应用较广,被广泛用作控缓释肥料的主要原料。

但二者单独使用不能对尿素氮转化的全过程进行有效调控,单独添加 DCD 抑制了土壤中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的硝化作用,增加了耕层土壤中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的浓度,在有效降低土壤中 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 浓度的同时,会相应增加土壤氨挥发损失;脲酶抑制剂 NBPT 的施用通过抑制土壤脲酶活性来延缓尿素氮水解,从而有效减少土壤氨挥发损失;但由于 NBPT 的作用时间较短,对尿素 N 转化成氨以后的行为影响较少^[4-6]。已有研究表明,农田尿素施用添加脲酶抑制剂 NBPT 和硝化抑制剂 DCD 对减少氨挥发损失和 NO_3^- 淋溶损失及氮氧化物排放有显著作用^[6-9],但 2 种抑制剂 NBPT 和 DCD 的作用效果受气候和土壤条件(土壤类型、pH 值、温度和水分等)的影响较大,且关于土壤中添加抑制剂对氨挥发影响的研究报道还存在较大争议,特别是土壤 pH 值对抑制剂作用效果的影响较为复杂,二者配合施用的抑制效果及协同效应还有待研究。

研究表明,在灌区强碱性稻田灌淤土中,尿素氮施入土壤后很快经水解、氨化及氨氧化作用发生氮素形态转化,在尿素氮的这一转化过程中大量的氮素通

过氨挥发和硝态氮淋溶等途径损失,加大了环境氮素污染的风险^[10-11]。关于 NBPT 和 DCD 配施对灌区强碱性灌淤土的抑制效果及协同效应尚不明确。

本研究以宁夏黄灌区稻田碱性灌淤土为研究对象,研究抑制剂 NBPT 和不同浓度 DCD 组合与尿素配合施用后土壤累积氨挥发量动态变化特征及硝态氮积累量变化特征,探明添加 2 种抑制剂对抑制灌区稻田碱性灌淤土尿素氮损失的作用效果及协同效应,为进一步研究降低灌区碱性土壤氮素损失技术途径和提高尿素有效利用率提供科学理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

供试土壤为灌淤土,采自宁夏青铜峡灌区灵武农场试验区。土壤基本理化性状见表 1。供试尿素含氮量为 46%,脲酶抑制剂 NBPT 和硝化抑制剂 DCD 均为分析纯试剂。供试土壤为试验区水稻收获后的稻田耕层 0~30 cm 的土样,新鲜土壤采回实验室后风干、剔除杂物及根茬,过 2 mm 土样筛备用。

1.2 试验设计

尿素(含氮 46%)用量为 $600 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 风干土,在脲酶抑制剂 NBPT 的最适添加浓度确定为尿素氮量的 0.1%,且保持不变的前提下,设置硝化抑制剂 DCD 的添加浓度分别为尿素氮量的 1%、2%、3%、4% 和 5%。试验共设置 7 个处理,分别为(1)单施尿素(CK);(2)尿素+0.1%NBPT(N-D0);(3)尿素+0.1%NBPT+1%DCD(N-D1);(4)尿素+0.1%NBPT+2%DCD(N-D2);(5)尿素+0.1%NBPT+3%DCD(N-D3);(6)尿素+0.1%NBPT+4%DCD(N-D4);(7)尿素+0.1%NBPT+

表 1 供试土壤基本理化性状

Table 1 Basic properties of soil

pH	全盐量 T-sale/ $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$	容重 U-weight/ $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$	有机质 OM/ $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$	全氮 Ttotal-N/ $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$	速效氮 Available-N/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	全磷 Ttotal-P/ $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$	有效磷 Available-P/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	有效钾 Available-K/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$
8.62	1.13	1.57	13.87	1.19	95.33	0.89	30.10	152.72

5% DCD(N-D5)。

1.3 试验方法

试验前取稻田耕层 0~30 cm 土壤适量,测定土壤容重、全盐量、pH 值、有机质、全氮、全磷、速效氮、有效磷和有效钾含量。每个重复取过 2 mm 筛的风干土 300 g,平铺于直径为 180 mm 的干燥器底部。为了保证尿素及抑制剂与供试土壤的均匀混合,按照不同处理组合浓度(见表 2)将尿素、NBPT 及 DCD 溶于一定体积的水中,充分溶解后缓慢注入装有风干土的干燥器中,保持土壤呈湿润状态,使其含水量达 20%。在每个干燥器内分别放入内盛 10 mL 3% 的硼酸混合指示剂溶液的培养皿,用于吸收土壤释放的气态氨,干燥器密封室温(25~30 ℃)下培养。每个处理设 6 个重复,取每个处理其中的 3 个重复分别于试验开始的第 2、3、4、5、6、7、8、9、10、11、13、15、19、25、31 d 取出干燥器内的培养皿,用浓度为 0.01 mol·L⁻¹ 硫酸标准液滴定,通过计算得出氨气的挥发量^[10]。分别在试验开始的当天,第 3、6、9、12、15 d 从每个处理的另外 3 个重复中分别取土样测定 NH₄⁺-N 及 NO₃⁻-N 浓度。

1.4 分析测定方法

土壤在每次取土样后,用 2 mol·L⁻¹ 的氯化钾溶液浸提,然后用流动注射仪(型号为 FLAstar™ 5000)测定土壤 NH₄⁺-N 和 NO₃⁻-N 含量。硝化抑制率计算方法如下^[9]:

$$\text{硝化抑制率}(\%) = \frac{(A-B)}{A} \times 100$$

式中:A 代表 CK 处理的土壤 NO₃⁻-N 含量,mg·kg⁻¹;B 代表各不同处理的土壤 NO₃⁻-N 含量,mg·kg⁻¹。

氨挥发速率计算方法如下^[10]:

$$\text{氨挥发速率}(\text{mgN} \cdot \text{d}^{-1}) = \frac{[(V - V_0) \times C \times M]}{d}$$

式中:V 为样品滴定消耗硫酸标液量,mL;V₀ 为空白滴定消耗硫酸标液量,mL;C 为硫酸标液的浓度,0.01 mol·L⁻¹;M 指氮的摩尔质量,14 g·mol⁻¹;d 指测定天数,d^[11]。

1.5 数据分析

采用 Excel 2007 和 SPSS13.0 统计分析软件对试验数据进行统计分析。

2 结果与分析

2.1 不同处理组合下 NH₄⁺-N 积累量动态变化

各处理土壤 NH₄⁺-N 含量动态变化特征如图 1 所示。CK 处理土壤 NH₄⁺-N 积累量短期内增加较快,最

大峰值出现在试验开始的第 3 d,但其峰值较低,仅为 46.13 mg·kg⁻¹,较其他处理峰值差异显著;N-D0 处理土壤 NH₄⁺-N 含量在施肥后 5 d 左右变化不大,与 CK 比较相对较低,差异显著,之后积累量快速增加,在第 8 d 达最大值,其峰值为 61.09 mg·kg⁻¹;N-D0 在施肥后 11 d 左右 NH₄⁺-N 积累量与 CK 都表现出下降到较低水平,表明 N-D0 处理的 NH₄⁺-N 在土壤中滞留时间相对较短。

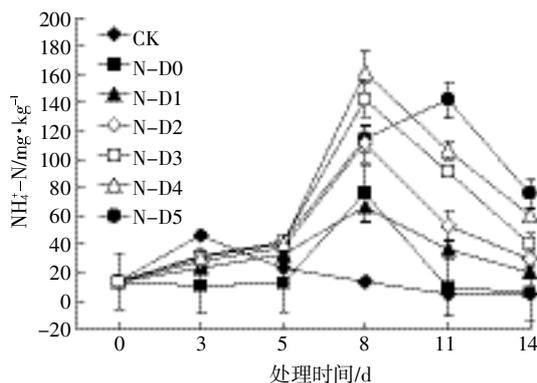


图 1 不同处理土壤 NH₄⁺-N 含量的动态变化
Figure 1 Dynamics of soil NH₄⁺-N contents under different treatments

2 种抑制剂 NBPT/DCD 组合施用的各处理在尿素施肥初期(5 d 内)土壤 NH₄⁺-N 积累量增加相对缓慢,第 5 d 后各组合处理土壤 NH₄⁺-N 积累量开始快速增加,N-D1 至 N-D4 处理在第 11 d 达最大值,且随着 DCD 浓度增加,其峰值依次增大,增加量差异显著;N-D5 处理的峰值后延 3 d 左右,且峰值相对较低;各组合处理 NH₄⁺-N 积累量峰值较 CK 推迟 5~7 d 左右,且表现出随着 DCD 浓度增加,土壤中 NH₄⁺-N 积累量维持较高水平持续时间依次延长。相关性分析得出,土壤氨挥发速率与 NH₄⁺-N 积累量变化值呈正相关,其相关系数为 0.73~0.95(n=7,P<0.05)。

2.2 不同处理组合下土壤 NO₃⁻-N 积累量动态变化

如图 2 所示,尿素施用后 CK 土壤 NO₃⁻-N 积累量迅速增加,在第 8 d 达最大值,其峰值为 360.92 mg·kg⁻¹;处理 N-D0 在施肥初期土壤 NO₃⁻-N 含量增加趋势较 CK 明显放缓,在第 8 d 达最大值,其峰值较 CK 减少了 24.72%,第 8 d 后 CK 和 N-D0 处理的土壤 NO₃⁻-N 积累量快速降低,在第 14 d 两个处理的 NO₃⁻-N 积累量趋于一致。2 种抑制剂组合各处理 NO₃⁻-N 含量在施肥初期相对稳定,之后呈不同程度上升趋势;各组合处理土壤 NO₃⁻-N 积累量随着 DCD 添加浓度增加而降低。其中 DCD 低浓度 N-D1 处理土

壤 NO_3^- -N 积累量在施肥 5 d 后快速增加, 在 11 d 前后达最大值, 其峰值较 CK 和 N-D0 明显降低, 差异显著; DCD 高浓度处理 N-D4 和 N-D5 土壤 NO_3^- -N 含量变化相对稳定, 比较施肥后第 14 d 土壤 NO_3^- -N 积累量得出, N-D2 和 N-D3 积累量偏低, 且差异显著。相关性分析得出, 土壤氨挥发速率与土壤 NO_3^- -N 积累量变化值呈负相关, 其相关系数为 0.53~0.83 ($n=7, P<0.05$)。

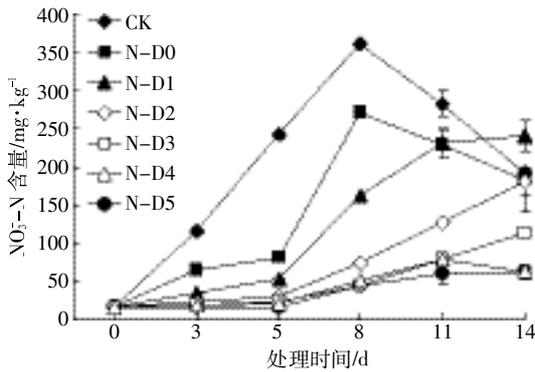


图 2 不同处理土壤 NO_3^- -N 含量变化

Figure 2 Dynamics of soil NO_3^- -N contents under different treatments

2.3 两种抑制剂不同处理组合的硝化抑制率变化

如图 3 可见, 不同处理组合下的硝化抑制率动态变化总体表现为先增加, 后逐渐降低的特征, 均表现在施肥后第 5 d 出现峰值; 其中 N-D0 处理的硝化抑制率较其它处理低, 且在第 5 d 达最大值后呈快速降低趋势。2 种抑制剂组合施用的各处理表现为随着 DCD 添加浓度的增加, 各处理组合的硝化抑制率相应增大, 较单施 NBPT 处理的明显增加, 差异显著。其中 DCD 添加浓度为 1%~2% 的低浓度处理 N-D1 和 N-D2 的硝化抑制率在施肥后 5 d 左右开始快速下

降, N-D1 处理的硝化抑制率在施肥后第 11 d 左右为 0, N-D2 处理在第 14 d 即下降到 7% 以下, N-D3、N-D4 和 N-D5 处理也分别在施肥后第 11 d 下降趋势明显。

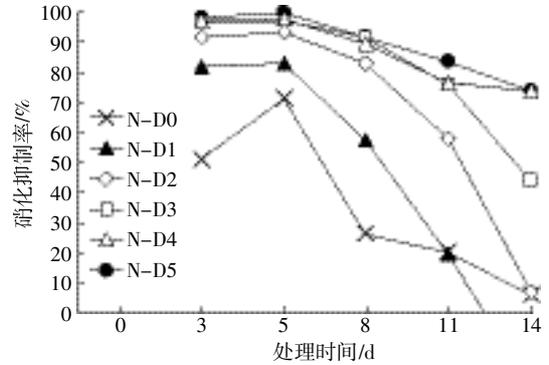


图 3 不同处理下的硝化抑制率变化

Figure 3 Dynamics of nitrification inhibitory rates under different treatments

2.4 不同处理组合下氨挥发动态变化特征

2.4.1 土壤氨挥发速率变化特征

不同处理组合土壤氨挥发特征动态变化见图 4。CK 处理在尿素施肥后第 3 d 氨挥发速率达最大值, 氨挥发持续时间为 8 d 左右。N-D0 处理氨挥发速率在第 6 d 达最大值, 较 CK 推迟 3 d; 且氨挥发速率最大值较 CK 低 67%, 氨挥发持续时间与 CK 相同, 为 8 d 左右。NBPT 与不同浓度 DCD 组合各处理在施肥初期氨挥发速率显著低于 CK, N-D1 处理氨挥发速率变化相对稳定, 氨挥发持续时间较 CK 和 N-D0 处理延长 4 d 左右; N-D2 至 N-D5 组合处理在第 5 d 后氨挥发速率快速增加, 且在施肥后第 9 d 达最大值, 各处理之间随着 DCD 添加浓度的增加, 其氨挥发速率峰值依次增大, 氨挥发持续时间也相应延长。

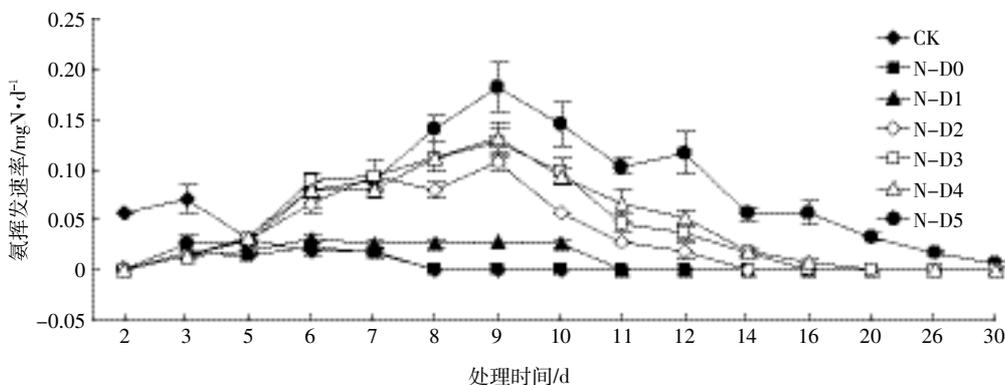


图 4 不同处理土壤氨挥发特征

Figure 4 Soil ammonia volatilization under different treatments

2.4.2 土壤累积氨挥发量变化特征

不同处理组合土壤氨挥发特征动态变化见图5。比较各处理不同阶段累积氨挥发量得出,CK处理在施肥后7d左右累积氨挥发量达最大值,其他各处理在第7d前土壤累积氨挥发量显著低于CK;第7d后N-D0处理的累积氨挥发量不再增加,其累积总量较CK减少了64.6%;N-D1在第10d后累积氨挥发量不再增加,累积总量较CK减少了16.7%,但较N-D0增加了56.3%;N-D2、N-D3、N-D4和N-D5在第7d后累积氨挥发量快速增大,各处理随着DCD浓度的增加累积氨挥发总量依次增多,且增加量差异显著。

3 讨论

已有研究表明,在灌区大田生产中,碱性灌淤土中尿素氮在其转化过程中,大量的氮素通过氨挥发和硝态氮淋溶等途径损失严重^[10-11]。本试验结果与大田试验结果一致^[10],即在灌区碱性灌淤土中尿素单独施用后短期内(3d左右)土壤 NH_4^+-N 积累量和氨挥发速率达最大值;同时土壤氨挥发积累量和 NO_3^--N 积累量快速增加,在施肥后8d左右达最大值。 NO_3^--N 积累量快速增加,加大了土壤氮素淋溶损失的风险。

添加脲酶抑制剂NBPT可适当延缓尿素水解,降低土壤 NH_4^+-N 浓度,从而减少土壤氨挥发量和 NO_3^--N 的积累量^[12-20]。张文学等^[20]研究表明尿素和NBPT配合施用可以增加土壤有效氮的积累量,提高氮素植物回收率。本研究也得出,单独添加相当于尿素氮量0.1%的脲酶抑制剂NBPT,可有效降低土壤氨挥发速率及累积氨挥发总量,同时可有效抑制施肥初期土壤 NH_4^+-N 和 NO_3^--N 积累量的增加。但在碱性灌淤土中NBPT抑制作用时间较短,致使施肥5d后,土壤 NH_4^+-N 和 NO_3^--N 的积累量较快增加,且有效氮维

持较高积累量的时间相对较短,仅为5~6d(图1、2所示)。有效氮在土壤中滞留时间相对较短,不利于植物有效回收利用;同时在灌区碱性灌淤土中, NO_3^--N 积累量的增加,直接导致氮素淋溶损失的风险加大^[12]。

尿素施用添加NBPT和DCD对减少氨挥发损失和 NO_3^--N 淋溶损失有显著作用^[6-9]。苏壮^[21]研究也表明,NBPT+DCD配合施用能有效降低土壤 NH_4^+-N 的转化速率,使 NH_4^+-N 最大积累量延后14d左右,并且延缓了 NO_3^--N 的释放高峰达60d以上,其作用效果较DCD单独施用好。傅丽等^[9]研究得出,NBPT与DCD组合施用能减缓尿素水解,并且可推迟尿素水解5d,同时增加了土壤有效N含量;张文学等^[20]研究得出,稻田添加脲酶抑制剂NBPT与硝化抑制剂DMPP组合可以显著减少氨挥发损失。但Gioacchini等^[22]研究尿素同时配施脲酶抑制剂NBPT和硝化抑制剂DCD对土壤 NO_3^--N 淋溶损失的影响时发现,该种模式并不能减少肥料来源氮的淋失,反而显著增加了来源于土壤部分的氮淋溶。本研究结果得出,NBPT与不同浓度DCD组合时,在NBPT添加浓度为尿素氮量0.1%,且DCD浓度为1%的低浓度水平下,可有效降低氨挥发速率和累积氨挥发量,土壤 NH_4^+-N 积累量也相对较低,且在施肥后第8d达最大值后很快下降到较低水平;同时抑制剂硝化抑制率也表现为快速下降,在第11d降到20%以下,但此时土壤 NO_3^--N 积累量快速增加。当DCD添加浓度增加到2%~5%的较高浓度水平时,各处理在施肥第5d后氨挥发速率、累积氨挥发量及土壤中 NH_4^+-N 积累量很快增加,但其硝化抑制率也随着DCD添加浓度增加明显提高,土壤 NO_3^--N 积累量随着DCD添加浓度增加而减小。在施肥第14d后,DCD添加浓度为2%~3%的土壤 NO_3^--N 积累量仍表现为上升趋势,而DCD添加浓

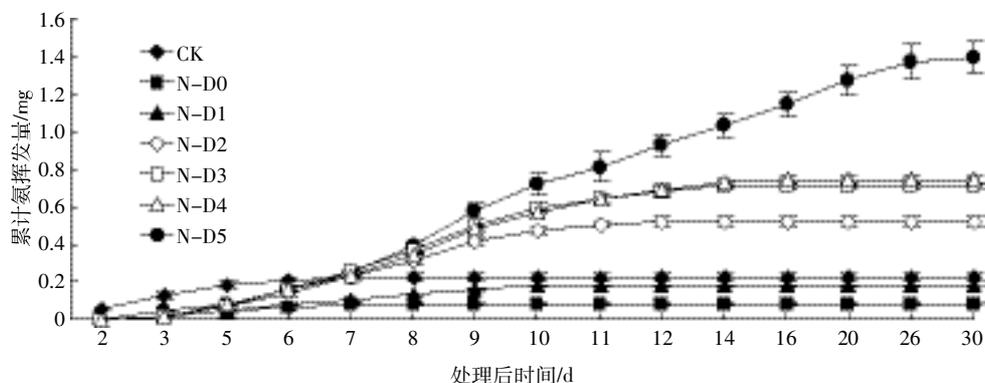


图5 不同处理土壤累积氨挥发量

Figure 5 Cumulative amounts of soil ammonia volatilization under different treatments

度在 4%~5% 时,其硝化抑制率相对较高,土壤 NO_3^- -N 积累量增量较小,且在施肥后的 11 d 前后即表现为降低趋势。表明 DCD 添加浓度的增加,对降低碱性灌淤土中 NO_3^- -N 积累量抑制效果显著,但土壤通过氨挥发损失的氮显著增加。综合分析得出,在脲酶抑制剂 NBPT 添加浓度为尿素氮的 0.1%,硝化抑制剂 DCD 添加浓度为 2%~3% 时,其土壤累积氨挥发损失相对较低,且有效态氮滞留土壤时间较长,为有效提高尿素氮植物回收利用率提供了可能的途径,是实现碱性灌淤土尿素与 2 种抑制剂配合施用的最佳组合。关于 2 种抑制剂组合施用后尿素损失量、有效氮作物回收率的估算和 2 种抑制剂协同抑制效果的评价,还需要通过配合植物生长进行较为全面的研究和探索。

4 结论

(1) 在灌区碱性灌淤土中施用尿素后,短期内(3 d 左右)土壤氨挥发速率和 NH_4^+ -N 积累量达最大值;在施肥后第 8 d 土壤氨挥发总量和 NO_3^- -N 积累量达最大值。

(2) 单独添加相当于尿素氮量 0.1% 的 NBPT,可有效降低土壤氨挥发速率及累积氨挥发总量,同时可有效抑制施肥初期土壤 NH_4^+ -N 和 NO_3^- -N 积累量的快速增加。

(3) NBPT 与不同浓度 DCD 组合时,在 NBPT 添加浓度为尿素氮的 0.1%,且 DCD 添加量为 1% 的低浓度水平下,对降低氨挥发速率和累积氨挥发量抑制效果显著,同时可有效减少施肥初期土壤 NH_4^+ -N 积累量,但土壤中 NO_3^- -N 积累量相对较大,相应会增大随灌溉退水淋溶损失的风险。

(4) 当 DCD 添加浓度增加到 2%~5% 的较高浓度水平时,随着 DCD 添加浓度的增加,土壤中有效氮(NH_4^+ -N 和 NO_3^- -N)积累量增加,且滞留时间相应延长,但土壤累积氨挥发量也依次增加。

(5) 综合分析得出,0.1% NBPT 配施 2%~3% 的 DCD 时,土壤氮素硝化抑制率较高,且土壤氨挥发损失量也相对较低,可推荐为灌区碱性灌淤土尿素氮肥与 2 种抑制剂配施的最佳组合。

参考文献:

- [1] 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[J].应用生态学报,2005,16(2):238-242.
CHEN Zhen-hua, CHEN Li-jun, WU Zhi-jie. Effects of urease and nitrification inhibitors on alleviating the oxidation and leaching of soil urease hydrolyzed product ammonium[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2005, 16(2):238-42.
- [2] Clough T J, Di H J, Cameron K C, et al. Accounting for the utilization of a N_2O mitigation tool in the IPCC inventory methodology for agricultural soils[J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2007, 78:1-14.
- [3] Moir J L, Cameron K C, Di H J. Effects of the nitrification inhibitor dicyandiamide on soil mineral N, pasture yield, nutrient uptake and pasture quality in a grazed pasture system[J]. *Soil Use and Management*, 2007, 23:111-120.
- [4] Sanz-Cobena A, Misselbrook T H, Arce A, et al. An inhibitor of urease activity effectively reduces ammonia emissions from soil treated with urea under Mediterranean conditions[J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2008, 126(3/4):243-249.
- [5] 刘瑜,串丽敏,安志装,等.硝化抑制剂双氰胺对褐土中尿素转化的影响[J].农业环境科学学报,2011,30(12):2496-2502.
LIU Yu, CHUAN Li-mei, AN Zhi-zhuang, et al. Effects of the nitrification inhibitor dicyandiamide on ammonium and nitrogen transformations in Camon soil[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2011, 30(12):2496-2502.
- [6] 徐星凯,周礼恺, Oswald V C.脲酶抑制剂硝化抑制剂对植稻土壤中尿素 N 行为的影响[J].生态学报,2001,21(10):1682-1686.
XU Xing-kai, ZHOU Li-kai, Oswald V C. Effect of urease/nitrification inhibitors on the behavior of urea-N in the soil planted to rice[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2001, 21(10):1682-1686.
- [7] 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[J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2005, 109:202-212.
- [8] Di H J, Cameron K C. Effects of the nitrification inhibitor dicyandiamide on potassium, magnesium and calcium leaching in grazed grassland[J]. *Soil Use and Management*, 2004, 20(1):2-7.
- [9] 傅丽,苏壮,石元亮,等.脲酶抑制剂(NBPT)与不同硝化抑制剂组合对土壤尿素氮转化的影响[J].沈阳农业大学学报,2010,41(3):339-341.
FU Li, SU Zhuang, SHI Yuan-liang, et al. Effects of urease inhibitors (NBPT) and nitrification inhibitors on urea transformation[J]. *Journal of Shenyang Agricultural University*, 2010, 41(3):339-341.
- [10] 张惠,杨正礼,罗良国,等.黄河上游灌区稻田氨挥发损失研究[J].植物营养与肥料学报,2011,17(5):1131-1139.
ZHANG Hui, YANG Zheng-li, LUO Liang-guo, et al. Study on the ammonia volatilization from paddy field in irrigation area of the Yellow River[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2011, 17(5):1131-1139.
- [11] 张晴雯,张惠,易军,等.青铜峡灌区水稻田化肥氮去向研究[J].环境科学学报,2010,30(8):1707-1714.
ZHANG Qin-wen, ZHANG Hui, YI Jun, et al. The fate of fertilizer derived nitrogen in a rice field in the Qingtongxia irrigation area[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2010, 30(8):1707-1714.
- [12] 凌莉,李世清,李生秀.石灰性土壤氨挥发损失的研究[J].土壤侵蚀与水土保持学报,1999,5(6):119-122.
LING Li, LI Shi-qing, LI Sheng-xiu. Study on ammonia volatilization from calcareous soil[J]. *Journal of Soil Erosion and Soil and Water*

- Conservation*, 1999, 5(6):119-122.
- [13] 杜建军, 毋永龙, 田吉林, 等. 控缓释肥料减少氨挥发和氮淋溶的效果研究[J]. 水土保持学报, 2007, 21(2):49-52.
DU Jian-jun, WU Yong-long, TIAN Ji-lin, et al. Effect of several controlled/slow-release fertilizers on decreasing ammonia volatilization and N leaching[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2007, 21(2):49-52.
- [14] 张惠. 黄河上游灌区稻田系统氮素气态损失及平衡研究[D]. 北京: 中国农业科学院研究生院, 2011:28-40.
ZHANG Hui. Gaseous loss and balance of nitrogen from paddy field in irrigation area of the upper yellow river[D]. Beijing: Graduate School of Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2011:28-40.
- [15] 王永生, 杨世琦. 宁夏黄灌区稻田冬春休闲期硝态氮淋失量[J]. 生态学报, 2011, 31(16):4653-4660.
WANG Yong-sheng, YANG Shi-qi. The nitrate nitrogen leaching amount in paddy winter spring fallow period[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, 31(16):4653-4660.
- [16] Thompson R B, Meisinger J J. Gaseous nitrogen losses and ammonia volatilization measurement following land application of cattle slurry in the mid-Atlantic region of the USA[J]. *Plant and Soil*, 2004, 266(1/2):231-246.
- [17] Rawluk C D L, Grant C A, Racz G J. Ammonia volatilization from soils fertilized with urea and varying rates of urease inhibitor NBPT[J]. *Can J Soil Sci*, 2001, 81(2):239-246.
- [18] Saggarr S, Singh J, Giltrap D L, et al. Quantification of reductions in ammonia emissions from fertilizer urea and animal urine in grazed pastures with urease inhibitors for agriculture inventory: New Zealand as a case study[J]. *Science of the Total Environment*, 2013, 465:136-146.
- [19] Turnera D A, Edisa R B, Chen D, et al. Determination and mitigation of ammonia loss from urea applied to winter wheat with N-(n-butyl) thiophosphorictriamide[J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2010, 137(3/4):261-266.
- [20] 张文学, 孙刚, 何萍, 等. 脲酶抑制剂与硝化抑制剂对稻田氨挥发的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2013, 19(6):1411-1419.
ZHANG Wen-xue, SUN Gang, HE Ping, et al. Effects of urease and nitrification inhibitors on ammonia volatilization from paddy fields[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2013, 19(6):1411-1419.
- [21] 苏壮. 脲酶/硝化抑制剂对土壤中尿素氮转化及其生物有效性的影响[J]. 沈阳农业大学学报, 2005, 36(2):230-232.
SU Zhuang. Effects of urease/nitrification inhibitor on soil urea-N transformation and bio-availability of urea[J]. *Journal of Shenyang Agricultural University*, 2005, 36(2):230-232.
- [22] Gioacchini P, Claudio A N, Giovannini C M C. Influence of urease and nitrification inhibitors on N losses from soils fertilized with urea[J]. *Biol Fert Soils*, 2002, 36(2):129-135.