

硝化抑制剂双氰胺对褐土中尿素转化的影响

刘 瑜^{1,2}, 串丽敏², 安志装², 赵同科^{2*}, 赵丽平², 高忠义³, 李 英⁴

(1.河北农业大学资源与环境科学学院, 河北 保定 071000; 2.北京市农林科学院植物营养与资源研究所, 北京 100097; 3.北京市密云县太师屯镇农业服务中心, 北京 101504; 4.北京市密云县农业技术推广站, 北京 101503)

摘 要:采用好气土壤培养法,研究北京地区典型褐土中添加不同浓度水平硝化抑制剂双氰胺(Dicyandiamide, DCD)条件下土壤中铵态氮、硝态氮变化规律。结果表明,44 d 培养期内,DCD 施用显著提高土壤中 NH_4^+-N 浓度,降低 NO_3^--N 浓度,1%、2%、3%、4%和 5%DCD 用量处理条件土壤 NH_4^+-N 平均浓度比单施尿素对照处理分别升高 29.50%、71.84%、99.73%、98.90%和 139.69%, NO_3^--N 平均浓度降低 3.71%、15.61%、21.07%、33.57%和 37.90%。综合反映 NO_3^--N 和 NH_4^+-N 变化规律的土壤表观硝化率指标变化结果表明,1%、2%、3%、4%和 5%DCD 用量处理比对照分别降低 12.18%、35.35%、44.82%、48.18%和 59.93%;1%、2%、3%和 4%DCD 处理达到平衡时间分别延迟 7 d、14 d、14 d 和 21 d,5%DCD 处理表观硝化率一直较低,直到培养结束仍呈升高的趋势;2%、3%、4%DCD 处理表观硝化率升高速率显著下降(分别降低 39.32%、40.00%和 52.27%)。综合考虑作物氮素需求规律、环境效应和使用经济效益,4%DCD 用量效应最佳,具有较好的土壤铵氧化抑制效果,有助于提高氮素利用率,减少环境流失。

关键词:DCD 用量; 好气培养; NH_4^+-N ; NO_3^--N ; 表观硝化率

中图分类号:S143.91 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2011)12-2496-07

Effects of Nitrification Inhibitor Dicyandiamide on Ammonium and Nitrate Nitrogen Transformations in Cinnamon Soil

LIU Yu^{1,2}, CHUAN Li-min², AN Zhi-zhuang², ZHAO Tong-ke^{2*}, ZHAO Li-ping², GAO Zhong-yi³, LI Ying⁴

(1.College of Resources and Environmental Sciences, Agricultural University of Hebei, Baoding 071000, China; 2.Institute of Plant Nutrition and Resources, Beijing Academy of Agriculture and Forestry Sciences, Beijing 100097, China; 3.Taishitun Town of Miyun County Centre for Agricultural Service, Beijing 101504, China; 4.Miyun County Agrotechnique Extension Station, Beijing 101503, China)

Abstract: An aerobic soil incubation experiment was carried out to study the effects of different levels of the nitrification inhibitor dicyandiamide(Dicyandiamide, DCD) on the transformations of nitrate nitrogen and ammonia nitrogen in Beijing cinnamon soil. The results showed that during the 44 days incubation period, the application of DCD resulted in significantly higher concentrations of soil NH_4^+-N and lower concentrations of NO_3^--N in the soil. When the application rate of DCD was 1%, 2%, 3%, 4% and 5%, the average soil NH_4^+-N concentration was increased by 29.50%, 71.84%, 99.73%, 98.90% and 139.69%, the average NO_3^--N concentration was decreased by 3.71%, 15.61%, 21.07%, 33.57% and 37.90%, compared with the urea control respectively. The comprehensive index of soil apparent nitrification rate, reflecting the change rule for NO_3^--N and NH_4^+-N , was decreased by 12.18%, 35.35%, 44.82%, 48.18% and 59.93%, respectively. And the reaching balance date of them delayed 7 days, 14 days, 14 days and 21 days at the levels of 1%, 2%, 3% and 4%, respectively. It has showed a rising trend until the incubation end at the level of 5%, always lower than the control, and the increase rate was significantly decreased by 39.32%, 40.00%, 52.27% at the levels of 2%, 3%, 4%, respectively. Based on a combination of crop N requirements, environmental benefits and economic factors, the optimum rate of DCD was 4%, with a good inhibitory effect of ammonium oxidation, whilst helping to improve nitrogen use efficiency, and reducing environmental impacts.

Keywords: DCD level; aerobic soil incubation; NH_4^+-N ; NO_3^--N ; apparent nitrating rate

收稿日期:2011-04-08

基金项目:沿湖地区农业面源污染阻控关键技术研究(2007BAD87B01);国家科技支撑计划:沿密云官厅水库集约化种养殖农业面源污染防控技术研究与示范(2007BAD87B02);中国-加拿大 IPNI 国际合作项目:北京市菜园土壤养分优化管理研究与示范;农业部环境保护项目:华北地区大中城市郊区农业生产区域地下水硝酸盐监测与评价

作者简介:刘 瑜(1985—),女,河北保定人,在读硕士,主要从事农业非点源污染方面的研究。E-mail:liuyuzengyong1314@126.com

* 通讯作者:赵同科 E-mail:tkzhao@126.com

尿素是我国农业生产中应用最广泛的氮肥品种,它具有含氮量高、价格相对便宜、使用方便等特点^[1-2],但其利用率低和肥效短也是不容忽视的问题。大量实践证明,表施尿素常温 4~5 d 后,因通过挥发或淋溶损失进入环境,导致其利用率只有 30% 左右。因此,寻找提高氮素利用率的途径是目前农业生产中亟待解决的问题之一。

化学氮肥中添加生化抑制剂调控氮素在土壤中的转化进程以提高肥料氮的利用率、降低其对环境的污染是一项很有发展潜力的氮肥管理技术^[3-4],如在氮肥中加入硝化抑制剂或将二者一起造粒等^[5],施入土壤中可以起到减少氮肥的淋溶和反硝化损失,提高氮肥的利用率,调整氮肥的供应量、供应形式和供应时间等 3 个方面的作用^[6-7],从而减少氮肥用量和降低环境污染风险。双氰胺(Dicyandiamide, DCD)因其价格较低、毒性小、水溶性较强等特性在农业生产中应用相对广泛。许多研究表明,双氰胺作用效果受土壤质地、有机质含量、土壤温度、土壤 pH 和土壤水分等多种因素影响^[8-11],但其在降低硝酸盐淋溶、减少温室气体排放和提高蔬菜品质等方面均表现出显著效果。在壤砂土上以玉米为研究对象,结果表明施用双氰胺土壤 NO_3^- -N 淋溶损失量平均减少 $21 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,降低 48.8%^[12]。稻田是大气中 CH_4 和 N_2O 的重要来源,徐星凯等^[13]研究表明,DCD 与脲酶抑制剂氢醌配合施用,可使来源于土壤中的 N_2O 和 CH_4 排放总量分别下降 47.4% 和 53.1%。傅柳松等^[14]报道,与只施尿素相比,添加 DCD 可使青菜叶中硝酸盐含量降低 6.5%~39.7%,菠菜茎叶中硝酸盐含量降低 11.7%~25.9%。

目前国内外对不同土壤条件下双氰胺用量差异研究较少,尤其在北京地区典型褐土上添加双氰胺对氮肥在土壤中转化的影响报道更少。本文通过添加不同浓度水平双氰胺,室内模拟好气培养条件下,研究其对土壤中铵态氮和硝态氮转化特征的影响,寻找最佳用量,以期为北京地区农业生产经济效益和环境效益最大化提供理论依据,并为下一步开展复合调控产品调控氮肥高效利用奠定基础。

1 材料与方法

1.1 供试土壤

供试土壤为中壤质褐土,采自北京市房山区农科所 0~20 cm 表层土,基本理化性质为 pH (土水比 1:2.5) 8.28,有机质 $12.50 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,全氮 $1.02 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, NO_3^- -N $29.39 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, NH_4^+ -N $2.07 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,速效磷 $29.71 \text{ mg} \cdot$

kg^{-1} ,速效钾 $89.75 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。新鲜土样剔除杂物及残留根系后,风干过 2 mm 筛备用。

1.2 试验设计

试验设 6 个处理:施氮磷钾肥对照处理和 5 个 DCD 用量处理,每个处理重复 3 次,具体处理见表 1。氮肥为尿素,用量为 $0.27 \text{ g N} \cdot \text{kg}^{-1}$ 干土;磷肥为过磷酸钙,用量为 $0.20 \text{ g P}_2\text{O}_5 \cdot \text{kg}^{-1}$ 干土;钾肥为硫酸钾,用量为 $0.20 \text{ g K}_2\text{O} \cdot \text{kg}^{-1}$ 干土。按上述处理用量称取所需肥料,每盆装风干土 0.80 kg ,固体肥料磨细与风干土充分混匀后装入塑料盆中,塑料盆直径 10 cm、高 17 cm,灌水保持田间持水量的 60%~70%,置于温度为 20~25 °C 人工气候室内培养。培养期间,每日称重法补水 1 次,保持土壤稳定湿度,培养试验开始后的第 2、4、6、8、13、16、20、23、30、37、44 d 取样,直到土壤中 NH_4^+ -N 浓度接近本底值为止。

表 1 试验处理

Table 1 Experiment treatments

编号 Symbol	处理 Treatment	DCD 用量 DCD addition rate
U	氮磷钾肥	纯氮 0%
U+D1	氮磷钾肥+DCD	纯氮 1%
U+D2	氮磷钾肥+DCD	纯氮 2%
U+D3	氮磷钾肥+DCD	纯氮 3%
U+D4	氮磷钾肥+DCD	纯氮 4%
U+D5	氮磷钾肥+DCD	纯氮 5%

1.3 测定方法

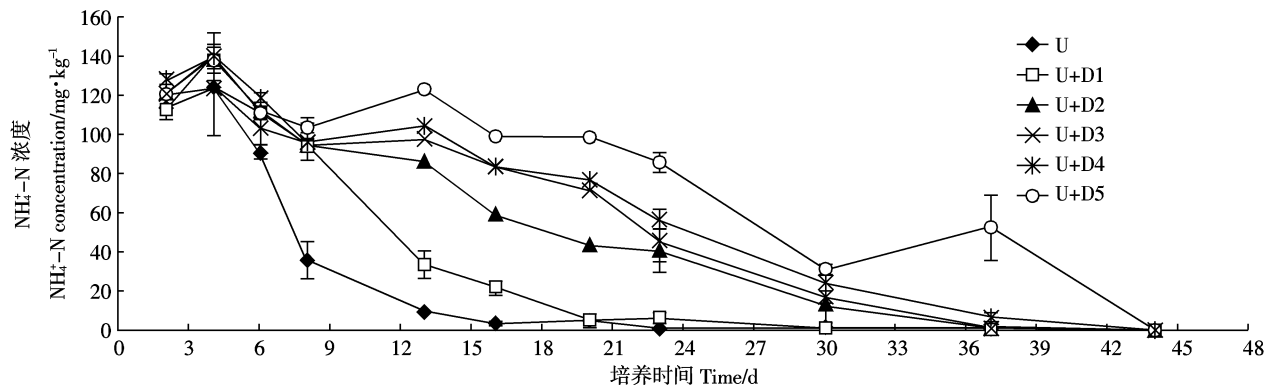
土壤 NH_4^+ -N 用 $2 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ KCl 浸提,靛酚蓝比色法测定;土壤 NO_3^- -N 用 $2 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ KCl 浸提,紫外分光光度法测定^[15]。试验数据采用 Excel 2007 和 SAS 8.1 进行统计分析。

2 结果与分析

2.1 土壤铵态氮浓度动态变化

总体来看,随着尿素在土壤中的水解,释放形成 NH_4^+ -N 在土壤中累积,浓度相应增加,2~4 d 内, NH_4^+ -N 浓度达到最高;随着培养时间的延长,各处理 NH_4^+ -N 浓度呈下降趋势,培养至第 44 d 时都接近于本底值;添加不同水平 DCD 各处理 NH_4^+ -N 浓度始终都高于未添加对照 U 处理(图 1)。

培养 4~8 d 内, U 处理 NH_4^+ -N 浓度迅速下降,添加 DCD 各处理下降速度较缓慢,显著低于 U 处理,但不同添加 DCD 处理之间没有显著性差异。在第 13 d 时,不同 DCD 添加量间差异性显现, U+D5 处理 NH_4^+ -N 浓度最高,为 $123.19 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,是 U 处理的

图 1 不同处理土壤 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量动态变化Figure 1 Dynamics of soil $\text{NH}_4^+\text{-N}$ concentration under different treatments

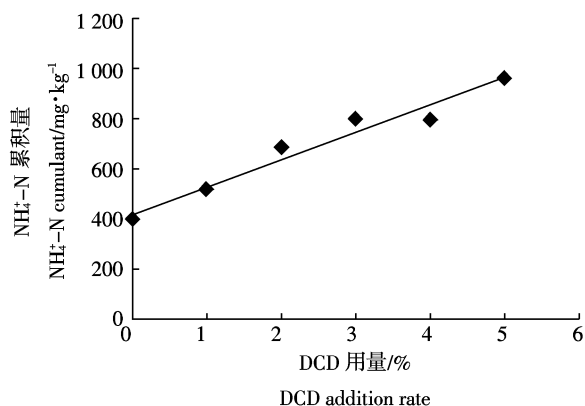
13.14 倍;较 U+D1、U+D2、U+D3 和 U+D4 处理分别高 265.92%、44.29%、26.28%和 15.14%;此时 U+D2、U+D3 和 U+D4 处理间作用差异不明显。直至第 20 d 时,这 3 个处理间开始出现差异显著性,此时 U 处理 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度接近土壤本底值,U+D1、U+D2、U+D3 和 U+D4 和 U+D5 处理 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度分别是 U 处理的 1.78、14.60、23.87、25.61 倍和 32.91 倍。在第 30 d 时,U+D1 处理 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度接近土壤本底值,比 U 处理延迟了 10 d,其他 DCD 处理均保持较高的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度。试验第 37 d 时,U+D5 处理 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度为 $52.53 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,显著高于其他处理,这种高浓度趋势一直保持到培养结束。从整个变化趋势来看,U+D1 处理与 U 处理 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度变化趋势相似,下降较快,其他 DCD 处理变化较缓慢。U+D2、U+D3 和 U+D4 处理分别比 U 处理延迟了 12、12 d 和 17 d 达到土壤本底值,U+D5 处理 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度呈现波动式下降,可为作物后期提供丰富的氮源。

试验结果表明,随着 DCD 添加量的增加,土壤中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度逐渐升高,下降速度缓慢,作用效果呈现 $\text{U+D5} > \text{U+D4} > \text{U+D3} > \text{U+D2} > \text{U+D1}$ 的特征,随施用量的增加,抑制效果明显,作用时间延长。添加 DCD 抑制了土壤中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 向 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 的氧化过程 [16-18],使 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度在较长时间内保持较高水平。

本研究发现,不同 DCD 用量对土壤硝化作用影响不同,包括作用的强度和作用时间均不同(图 2)。培养 44 d 内土壤 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 累积量与 DCD 用量呈极显著正相关关系:

$$y = 10\,725x + 427.77 \quad (R^2 = 0.98, n = 5)$$

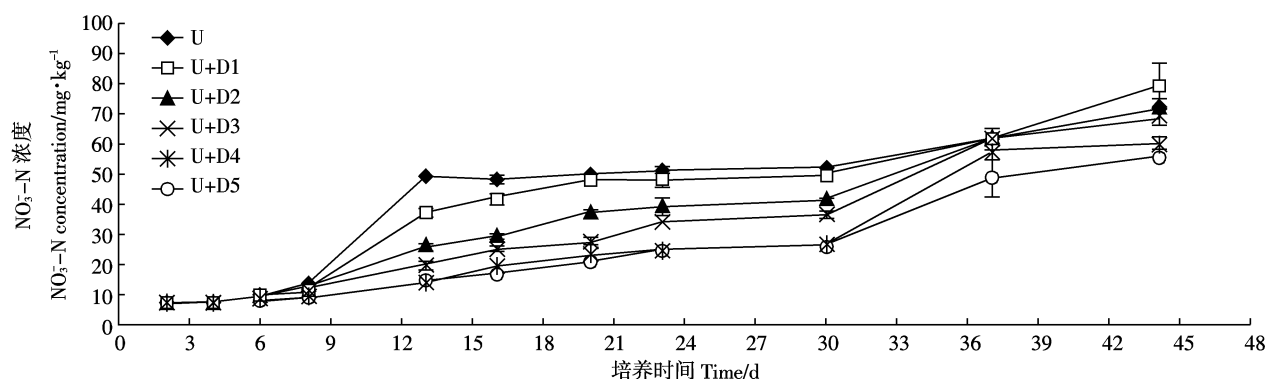
同样也证明了随着硝化抑制剂用量的增加抑制效果更加显著。

图 2 土壤中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 累积量与 DCD 用量相关性Figure 2 Correlation between soil $\text{NH}_4^+\text{-N}$ cumulant and DCD application rate

2.2 土壤硝态氮浓度动态变化

整个培养过程中,各处理 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 浓度随培养时间的延长而升高,且至培养的 44 d,仍有增加的趋势,不同 DCD 处理在不同时期变化趋势呈现差异性(图 3)。

培养 2~4 d 内,各处理 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 浓度缓慢上升,处理间无显著差异。第 6 d,U 处理 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 浓度迅速上升,为 $13.31 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,显著高于添加 DCD 各处理,但不同 DCD 添加量间未表现出差异显著。培养第 8 d 时,U+D5 处理 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 浓度为 $8.86 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,较 U、U+D1、U+D2、U+D3 和 U+D4 处理分别低 37.57%、21.09%、25.07%、20.05%和 11.44%,但 U+D1、U+D2、U+D3 和 U+D4 处理间差异不显著。试验第 13 d,不同 DCD 用量间作用效果差异开始显现,至第 16 d 时,不同 DCD 添加量间抑制效果均呈现显著差异,U+D1、U+D2、U+D3、U+D4 和 U+D5 处理 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 浓度分别比 U 处理分别低 13.61%、38.80%、47.50%、58.74%和

图3 不同处理土壤 NO₃-N 含量动态变化Figure 3 Dynamics of soil NO₃-N concentration under different treatments

65.46%。培养第 20 d 时, U+D1 处理 NO₃-N 浓度与对照处理接近, U+D2、U+D3 和 U+D4 处理作用持续至培养第 30 d。培养 37~44 d 期间, 除 U+D5 处理保持较低 NO₃-N 浓度外, 其他处理间均无显著性差异, 且接近对照处理。分析整个变化趋势, U 处理 NO₃-N 浓度在培养 15 d 内迅速上升, 添加 DCD 各处理增加较缓慢, 30 d 后 DCD 各处理 NO₃-N 浓度还保持较高水平, 可以为作物生长中后期提供较充足的氮肥供应, 保证作物生长需求^[19-20]。

试验结果表明, 随着 DCD 用量的增加, 土壤中 NO₃-N 浓度降低, 且作用总体表现为 U+D5 > U+D4 > U+D3 > U+D2 > U+D1, 从而能有效降低肥料氮施入土壤后因 NO₃-N 累积而产生的淋溶及反硝化损失, 提高氮肥利用率。

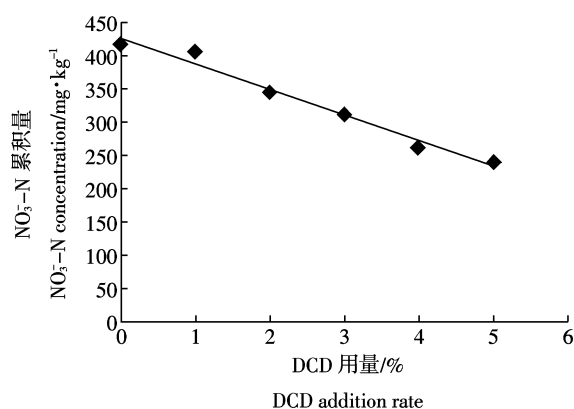
与铵态氮不同 (图 4), DCD 施用量与培养 44 d 内土壤 NO₃-N 累积量呈极显著负相关关系:

$$y = -3\,858.4x + 427.49, (R^2 = 0.99, n = 5)$$

随着 DCD 用量的增加, 土壤中 NO₃-N 累积量减少, 降低了土壤中因 NO₃-N 淋溶而造成氮素损失及环境污染。

2.3 施用 DCD 对土壤表观硝化率的影响

土壤表观硝化率 ($\text{NO}_3^-/\text{N}/(\text{NO}_3^- + \text{NH}_4^+ - \text{N})$)^[16,21] 能反映土壤硝化反应的状况。由图 5 可以看出, 随着培养时间的延长, 各处理表观硝化率呈逐渐上升的趋势, 添加硝化抑制剂各处理显著低于 U 处理, 说明硝化抑制剂显著抑制了 NH₄⁺-N 向 NO₃⁻-N 的氧化^[22-24]。在整个培养过程中, DCD 表现出了较好的硝化抑制效果。培养 2~8 d 内, 各处理间表观硝化率缓慢上升, 无显著差异。培养第 13 d, 抑制效果最明显, 添加抑制剂量由少到多各处理的表现硝化率较 U 处理分别降低了 13.54%、39.58%、58.33%、61.46% 和 62.50%, 各

图4 土壤中 NO₃-N 累积量与 DCD 用量相关性Figure 4 Correlation between soil NO₃-N cumulant and DCD application rate

处理间也呈现出显著差异。试验第 16 d 时, U+D1 处理作用减弱, 表观硝化率与 U 处理无显著差异, U+D3 和 U+D4 处理二者之间在培养 23~30 d 内差异不显著, 但始终低于 U 处理; 培养第 37 d 时, 与对照处理无显著性差异。

分析表观硝化率变化趋势, U 处理在试验第 16 d 内, 硝化作用进行较快, 从而使得尿素在短时间内释放, 难以被作物吸收利用。而添加 DCD 明显延缓了铵氧化作用, DCD 通过影响硝化细菌群落的活性^[16,24], 抑制了土壤中 NH₄⁺-N 向 NO₃⁻-N 的氧化过程。U+D1 处理较 U 处理表观硝化率上升缓慢, 且硝化作用延缓 1 周, U+D2、U+D3 和 U+D4 处理在培养 37 d 时, 表观硝化率接近 U 处理, 而 U+D5 处理至试验结束时表观硝化率仍有上升的趋势。整个培养过程中, 综合分析表观硝化率上升的速率可知, 添加抑制剂各处理分别比 U 处理低 24.77%、39.32%、40.00%、52.27% 和 49.32%。研究结果表明, 添加 DCD 明显延长了硝化作用进程, 且随添加量的增加抑制效果显著, U+D3 和

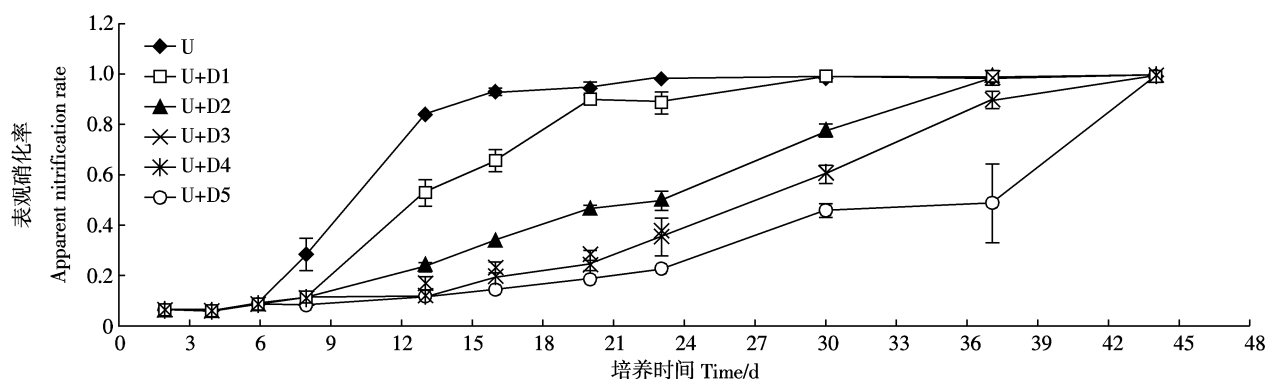


图 5 不同处理土壤表观硝化率动态变化

Figure 5 Dynamics of soil apparent nitrification rate under different treatments

U+D4 处理作用趋势相似,U+D5 处理对铵氧化作用抑制最显著,适合于生长期较长的作物。

3 讨论

农业生产中长期过量施用氮肥不仅造成了经济效益的降低,而且存在很大的环境污染风险。硝化抑制剂通过抑制土壤微生物及其酶的活性,调控土壤氮素转化形态,使土壤中可提取的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 库较长时间保持在较高水平,因而硝化抑制剂在保存土壤氮素、延长肥效、减少硝化和反硝化损失方面起到了很好的作用^[19,25]。

尿素与硝化抑制剂混施是目前农业生产中提高氮素利用率的对策之一。皮荷杰等^[19]研究了双氰胺在两种碱性土壤中对铵态氮转化的影响。结果表明,硝化抑制剂的添加能使两种碱性土壤中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的释放时间延长 3 d 左右。熊国华等^[26]采用室内培养试验研究双氰胺与尿素配施对土壤 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量变化影响,发现尿素与双氰胺配施延缓硝化作用的进行,有效地降低土壤中 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 的累积和维持土壤中较高的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量。本试验在 44 d 培养时间内,添加不同浓度抑制剂的各处理 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 累积量分别减少 3.64%、18.18%、25.38%、37.54% 和 42.51%, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 累积量分别增加 29.49%、71.84%、99.70%、98.92% 和 139.70%,同时延缓了硝化反应进程 5~10 d。

目前,国内外对双氰胺研究较多,但通过添加不同抑制剂水平研究其在不同土壤上最佳用量的研究较少。商照聪等^[22]通过添加纯氮用量 5% 和 10% 的双氰胺研究其对碳酸氢铵中铵态氮在土壤中动态变化影响,结果表明,添加双氰胺使土壤中保持较高的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 贮量,增加土壤中无机氮含量,且随添加量的增加而增加,与本试验结果一致。本试验以北京地区

典型褐土为研究对象,施用不同浓度双氰胺(纯氮用量的 1%、2%、3%、4% 和 5%),研究土壤中氮素迁移转化状况。结果表明,除纯氮用量 1% 与只施尿素处理差异不显著外,其他用量均不同程度提高土壤中铵态氮含量,这说明,双氰胺能在氮肥施入后较长时间内维持均匀较高的可利用氮供应强度,并能调节氮素供应形态。纯氮用量 4% 和 5% 处理之间差异不显著,综合考虑环境和经济效益,纯氮 4% 双氰胺用量为本试验条件下的最佳用量。

综上所述,添加硝化抑制剂对土壤氮素形态的调控是显而易见的,随着双氰胺用量的增加,硝化抑制效果越显著,但当用量达到该土壤类型最佳用量时,过多的施入抑制剂只会造成浪费。已有研究表明,双氰胺作用效果受到土壤质地、有机质含量、土壤温度、土壤 pH 和土壤水分等多种因素影响^[8-11],因而在众多不同土壤类型上根据不同作物需肥特性寻找适宜氮肥和硝化抑制剂用量组合,是目前农业生产提高经济效益和降低环境污染的有效途径,并有待于进一步深入研究。

4 结论

(1) 硝化抑制剂双氰胺显著提高了土壤中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度,并随着施用量的增加而增加。培养 44 d 内,U+D1、U+D2、U+D3、U+D4 和 U+D5 处理 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 平均浓度比对照处理分别提高 29.50%、71.84%、99.73%、98.90% 和 139.69%;U+D5 处理 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度始终高于其他处理,U+D2 和 U+D3 处理在整个培养过程中的变化趋势基本一致,U+D1 处理变化趋势与对照处理相似,仅在培养 6~13 d 时高于对照。

(2) 硝化抑制剂双氰胺显著降低了土壤中 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 浓度,随用量的增加抑制效果增强。培养 44 d 内,U+

D1、U+D2、U+D3、U+D4 和 U+D5 处理 NO_3^- -N 平均浓度比对照处理分别降低 3.71%、15.61%、21.07%、33.57% 和 37.90%。U+D1 处理作用至 20 d 时, NO_3^- -N 浓度与对照处理无显著差异, U+D4 和 U+D5 处理变化趋势基本一致, 仅在培养 16 d 时表现出显著性差异, U+D3 抑制效果较 U+D2 处理明显。

(3) 硝化抑制剂 DCD 降低了土壤表观硝化率, 不同浓度 DCD 各处理间差异显著。U+D1 作用持续时间较短, 仅在培养 8~13 d 内作用显著; U+D3 和 U+D4 间表观硝化率差异不显著; U+D5 处理表观硝化率始终低于其他处理。U+D1、U+D2、U+D3、U+D4 处理分别较对照处理硝化作用延缓 7 d、14 d、14 d 和 21 d, U+D5 处理表观硝化率一直较低, 直到培养结束仍有上升的趋势。

(4) 添加硝化抑制剂 DCD 提高了土壤中 NH_4^+ -N 浓度, 降低了 NO_3^- -N 浓度, 不同 DCD 用量作用效果有差异, 其中 4% 和 5% 用量在提高 NH_4^+ -N 浓度方面效果较佳, 4% 用量有效降低了土壤中 NO_3^- -N 浓度, 且与 5% 用量间差异不显著。综合考虑作物氮素需求规律、环境效应和使用经济效益, 4% DCD 用量为本试验最佳用量, 具有较好的土壤铵氧化抑制效果, 有助于提高氮素利用率, 减少环境流失。

参考文献:

- [1] 皮荷杰, 曾清如, 蒋朝晖, 等. 两种硝化抑制剂对不同土壤中氮素转化的影响[J]. 水土保持学报, 2009, 2(1): 68-72.
PI He-jie, ZENG Qing-ru, JIANG Zhao-hui, et al. Effects of nitrification on transformation of urea in different soils[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2009, 2(1): 68-72.
- [2] 余光辉, 张杨珠, 王大娟. 几种硝化抑制剂对土壤和小白菜硝酸盐含量及产量的影响[J]. 应用生态学报, 2006, 17(2): 247-250.
YU Guang-hui, ZHANG Yang-zhu, WAN Da-juan. Effects of nitrification inhibitor on nitrate content in soil and pakchoi and pakchoi yield[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2006, 17(2): 247-250.
- [3] 朱兆良, 文启孝. 中国土壤氮素[M]. 南京: 江苏科技出版社, 1992: 32-58.
ZHU Zhao-liang, WEN Qi-xiao. Soil nitrogen in China[M]. Nanjing: Jiangsu Science and Technology Press, 1992: 32-58.
- [4] 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.
- [5] Trenkel M. Improving fertilizer use efficiency controlled release and stabilized fertilizers in agriculture[M]. *International Fertilizer Industry Association. Pairs*, 1997.
- [6] 黄益宗, 冯宗炜, 王效科, 等. 硝化抑制剂在农业上应用的研究进展[J]. 土壤通报, 2002, 33(4): 310-315.
HUANG Yi-zong, FENG Zong-wei, WANG Xiao-ke, et al. Research progress of nitrification inhibitors in agriculture[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2002, 33(4): 310-315.
- [7] 武志杰, 史云峰, 陈利军. 硝化抑制作用机理研究进展[J]. 土壤通报, 2008, 39(4): 962-970.
WU Zhi-jie, SHI Yun-feng, CHEN Li-jun. Research progress of the mechanisms of nitrification inhibitor[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2008, 39(4): 962-970.
- [8] 孙志梅, 武志杰, 陈利军, 等. 土壤硝化作用的抑制剂调控及其机理[J]. 应用生态学报, 2008, 19(6): 1389-1395.
SUN Zhi-mei, WU Zhi-jie, CHEN Li-jun, et al. Regulation of soil nitrification with nitrification inhibitors and related mechanisms[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2008, 19(6): 1389-1395.
- [9] Di H J, Cameron K C. Treating grazed pasture soil with a nitrification-inhibitor, eco-hTM, to decrease nitrate leaching under spray irrigation-lysimeter study[J]. *New Zealand Journal of Agricultural Research*, 2004, 47: 351-361.
- [10] 徐星凯, 周礼恺, Oswald Van Cleemput. 脲酶抑制剂/硝化抑制剂对植稻土壤中 N 行为的影响[J]. 生态学报, 2001, 21(10): 1683-1686.
XU Xing-kai, ZHOU Li-kai, Oswald Van Cleemput. Effect of urease/nitrification inhibitors on the behavior urea-N in the soil planted to rice[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2001, 21(10): 1683-1686.
- [11] 许超, 吴良欢, 郑旭颖, 等. 硝化抑制剂 DMPP 对菜园土供肥特性的影响[J]. 农业环境科学学报, 2007, 26(1): 269-272.
XU Chao, WU Liang-huan, ZHENG Xu-ying, et al. Effect of nitrification inhibitor DMPP (3, 4-dimethylpyrazole phosphate) on nutrient-supplying vegetable soil[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2007, 26(1): 269-272.
- [12] Ball-Coelho BR, Roy RC. Enhanced ammonium sources to reduce nitrate leaching[J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 1999, 54: 73-80.
- [13] XU Xing-kai, Boeckx P, Wang YS. Nitrous oxide and methane emission during rice growth and through rice plants: Effect of dicyandiamide and hydroquinone[J]. *Biology and Fertilizer of Soils*, 2002, 36: 53-58.
- [14] 傅柳松, 刘超, 吴方正. 钼和双氰胺降低蔬菜硝酸盐积累的效应研究[J]. 环境污染与防治, 1994, 16(3): 4-6.
FU Liu-song, LIU Chao, WU Fang-zheng. Effects of dicyandiamide (DCD) and molybdenum on reducing nitrate accumulation in vegetables[J]. *Environmental Pollution & Control*, 1994, 16(3): 4-6.
- [15] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 1999: 49-56.
BAO Shi-dan. Analysis of soil characteristics[M]. Beijing: China Agriculture Press, 1999: 49-56.
- [16] 史云峰, 武志杰, 陈利军, 等. 3, 5-二甲基吡唑磷酸盐 (DMPZP) 对土壤硝化作用的影响[J]. 应用生态学报, 2007, 18(5): 1033-1037.
SHI Yun-feng, WU Zhi-jie, CHEN Li-jun, et al. Effects of 3, 5-dimethylpyrazole phosphate (DMPP) on soil nitrification[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2007, 18(5): 1033-1037.
- [17] 李香兰, 马静, 徐华, 等. DCD 不同施用时间对水稻生长期 CH_4 和 N_2O 的影响[J]. 生态学报, 2008, 28(8): 3676-3681.

- LI Xiang-lan, MA Jing, XU Hua, et al. Effect of different application time of DCD on methane and nitrous oxide emissions during rice growth period[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28(8):3676-3681.
- [18] Shi W, Norton J M. Effect of long-term, biennial, fall-applied anhydrous ammonia and Nitrapyrin on soil nitrification[J]. *Soil Science of America Journal*, 2000, 64:228-234.
- [19] 孙志梅, 武志杰, 陈利军, 等. 硝化抑制剂的施用效果、影响因素及其评价[J]. 应用生态学报, 2008, 19(7):1611-1618.
- SUN Zhi-mei, WU Zhi-jie, CHEN Li-jun, et al. Application effect, affecting factors, and evaluation of nitrification inhibitor[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2008, 19(7):1611-1618.
- [20] 串丽敏, 赵同科, 安志装, 等. 土壤硝态氮淋溶及氮素利用研究进展[J]. 中国农学通报, 2010, 26(11):200-205.
- CHUAN Li-min, ZHAO Tong-ke, AN Zhi-zhuang, et al. Research advancement in nitrate leaching and nitrogen use in soil[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2010, 26(11):200-205.
- [21] 俞巧钢, 陈英旭. 3, 4-二甲基吡唑磷酸盐对菜地土壤氮素形态转化的影响[J]. 水土保持学报, 2010, 24(3):123-126.
- YU Qiao-gang, CHEN Ying-xu. Effect of nitrification inhibitor 3, 4-dimethylpyrazole phosphate on nitrogen transformation in vegetable soil[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2010, 24(3):123-126.
- [22] 商照聪, 高子勤. 双氰胺对碳酸氢铵在土壤中氮素转化的影响[J]. 应用生态学报, 1999, 10(2):183-185.
- SHANG Zhao-cong, GAO Zi-qin. Effect of dicyandiamide on nitrogen transformation of ammonium bicarbonate in soil[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 1999, 10(2):183-185.
- [23] 巨晓棠, 刘学军, 张福锁. 尿素与 DCD 和有机物料配施条件下氮素的转化和去向[J]. 中国农业科学, 2002, 35(2):181-186.
- JU Xiao-tang, LIU Xue-jun, ZHANG Fu-suo. Nitrogen transformation and fate in soil under the conditions of mixed application of urea with DCD or different organic materials[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2002, 35(2):181-186.
- [24] 黄益宗, 冯宗炜, 张福珠. 硝化抑制剂硝基吡啉在农业和环境保护中的应用[J]. 土壤与环境, 2001, 10(4):323-326.
- HUANG Yi-zong, FENG Zong-wei, ZHANG Fu-zhu. Application of nitrapyrin in agriculture and environmental protection[J]. *Soil and Environmental Sciences*, 2001, 10(4):323-326.
- [25] Drury CF, Beauchamp EG. Ammonium fixation, release, nitrification, and immobilization in high-and-low fixing soils[J]. *Soil Science Society of America of Journal*, 1991, 55:125-129.
- [26] 熊国华, 林咸永, 罗建庭, 等. 钾肥、尿素与有机物料或双氰胺配施对菜园土中氮素分解转化特征的研究[J]. 土壤通报, 2008, 39(3):566-571.
- XIONG Guo-hua, LIN Xian-yong, LUO Jian-ting, et al. Effect of combined application of potassium, urea with DCD or different organic materials on nitrogen transformation and decomposition in vegetable soils[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2008, 39(3):566-571.