

不同硝化抑制剂对尿素转化的影响

张妹婷, 石 美, 梁东丽, 沈 锋, 党虎玲

(西北农林科技大学 资源环境学院, 陕西 杨凌 712100)

【摘 要】 【目的】比较不同硝化抑制剂在石灰性土壤上对氮素转化的抑制效果,旨在选择石灰性土壤上较理想的硝化抑制剂,为进一步提高氮素利用率、减少环境污染提供依据。【方法】以单纯施用尿素为对照,采用室内土壤培养试验法,将硝化抑制剂 3,4-二甲基吡唑磷酸(DMPP)、双氰胺(DCD)、2-氨基-4-氯-6-甲基嘧啶(AM)和硫脲(TU)施入土壤,在培养一定时间(1~50 d)后采样,测定土壤的 NH_4^+-N 、 NO_3^--N 、 NO_2^--N 含量及 pH 和电导率(EC)。【结果】硝化抑制剂 DMPP、DCD 和 AM 不仅能够有效延缓尿素的水解,显著抑制土壤中 NH_4^+-N 的氧化作用,而且能够较长时间保持较高的 NH_4^+-N 含量,使硝化作用延滞 35~38 d。各硝化抑制剂(TU 除外)处理明显推迟了 NO_3^--N 的释放高峰期,对硝化过程均表现出明显的抑制作用。各硝化抑制剂处理的 NO_3^--N 、 NH_4^+-N 、电导率和 pH 之间有显著的相关性,土壤 NO_3^--N 含量与 EC 值呈显著正相关($P<0.05$),而与 pH 值呈显著负相关($P<0.05$);土壤 NH_4^+-N 含量与 EC 值和 pH 值的相关性则与 NO_3^--N 相反。【结论】在本试验条件下,TU 未表现出对石灰性土壤氮损失的抑制效果,其他 3 种硝化抑制剂的抑制能力强弱顺序为 $\text{DMPP}>\text{DCD}>\text{AM}$ ($P<0.05$)。

【关键词】 硝化抑制剂; NH_4^+-N ; NO_3^--N ; NO_2^--N ; 硝化抑制率

【中图分类号】 S143.1

【文献标识码】 A

【文章编号】 1671-9387(2011)02-0178-07

Effects of different nitrification inhibitors on urea transformation

ZHANG Mei-ting, SHI Mei, LIANG Dong-li, SHEN Feng, DANG Hu-ling

(College of Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: 【Objective】 The research compared inhibitory effects of different nitrification inhibitors in calcareous soil to select ideal nitrification inhibitors in calcareous soil, improve further nitrogen utilization and prevent environmental pollution from N fertilization in crop production. 【Method】 This study was designed to compare the efficiency of four compounds, namely 3,4-dimethylpyrazole phosphate (DMPP), dicyandiamide (DCD), 2-amino-4-chloro-6-methoxy-pyrimidine (AM) and thiourea (TU) for inhibiting soil nitrification in laboratory incubation experiment. EC, pH and the content of NH_4^+-N , NO_3^--N and NO_2^--N were measured at different incubation time. 【Result】 Nitrification inhibitor DMPP, DCD and AM effectively slowed down the hydrolysis of urea, significantly inhibited NH_4^+-N oxidation in soil, maintained a high NH_4^+-N content for a long time and reduced possibilities of NO_3^- leaching and NO_2^--N accumulation. The inhibitor treatment significantly postponed the NO_3^--N release peak (except TU), and showed obvious inhibition effects for nitrification and improved the utilization of urea. Soil nitrate content, ammonium content, electronic conductivity and pH in soil of all treatments had a close relationship with each other. Soil nitrate content increased with the increase of EC values, while decreased with the increase of soil pH. Changes of soil ammonium nitrogen content and EC value, pH with incubation time were in the opposite trend

* 【收稿日期】 2010-08-02

【基金项目】 国家科技支撑计划项目(2008BADA4809);小麦现代农业产业技术体系建设专项资助项目

【作者简介】 张妹婷(1985—),女,河南洛阳人,在读硕士,主要从事土壤氮环境化学转化研究。E-mail: zhang-meiting@163.com

【通信作者】 梁东丽(1963—),女,陕西铜川人,副教授,博士,硕士生导师,主要从事土壤环境化学和环境监测研究。

E-mail: dongliliang2005@yahoo.com

with the nitrate nitrogen content.【Conclusion】The order of the inhibition rate of tested nitrification inhibitors is DMPP>DCD>AM($P<0.05$).

Key words: nitrification inhibitor; NH_4^+-N ; NO_3^--N ; NO_2^--N ; nitrification inhibitory rate

氮是植物生长发育所必需的营养元素之一,也是植物从土壤中吸收量最大的矿质元素。土壤氮的转化过程包括矿化、硝化、硝酸盐淋溶、反硝化、气体挥发和微生物固持等^[1]。氮肥施用为促进现代农业生产快速发展的同时,也给人类赖以生存的环境带来了巨大风险。全世界施用的氮肥中一半以上都是尿素^[2],尿素作为农业生产中广泛应用的氮肥,其在土壤中的转化过程具有重要的研究价值。尿素施入土壤后,在脲酶的作用下水解,水解产物除增加土壤中的铵态氮外,其余都在硝化及反硝化过程中以气体挥发、淋溶与径流等途径损失,不仅造成了氮肥的大量浪费,而且还成为环境氮污染的主要途径^[3]。因此,如何加强农业生产中的氮素管理,一直是土壤肥料领域和环境领域关注的热点。

许多国家已经将抑制剂应用到实际生产中以减少氮素损失^[4],抑制剂可分为脲酶抑制剂和硝化抑制剂 2 类,前者可以用来减缓尿素在土壤中由酰胺态氮转化为铵态氮的水解过程,后者则能抑制铵态氮至硝态氮的氧化,以减少 NH_3 挥发、硝酸盐淋溶或 N_2 与 N_2O 等氮的损失^[5-7]。研究表明,从氮素在土壤中的生物化学转化过程入手,通过施用抑制剂来调控氮素转化、减缓硝化过程的进行,是实现氮肥高效管理与利用的有效手段^[8-10],特别是在减少硝酸盐淋溶损失和氮氧化物排放方面具有显著作用^[11-13],其在提高氮肥利用率、减轻环境污染方面显示出了广阔的应用前景。

但由于各地土壤条件的差异,各种硝化抑制剂的作用效果和机理不同;同时,筛选新材料也是亟待解决的问题。为此,本试验研究了不同硝化抑制剂对石灰性土壤中尿素的转化作用,旨在选择石灰性土壤上较理想的硝化抑制剂,为进一步加强氮素管理、提高氮肥利用率、减少环境污染提供依据。

1 材料与方法

1.1 供试土壤

供试土壤为塿土,采自陕西杨凌西北农林科技大学南校区试验田 0~20 cm 耕层土壤,采样方法为多点取样法。将样品风干,剔除其中的石块、草根等杂物后充分混匀,过孔径 2 mm 筛备用。供试土壤的基本理化性质为:pH 8.26,有机质含量 17.90

g/kg,阳离子交换量(CEC)16.48 cmol/kg,黏粒含量 395.0 g/kg,全 N 含量 0.853 g/kg,全 P 含量 0.772 g/kg,全 K 含量 16.948 g/kg,速效 N 含量 39.18 mg/kg,速效 P 含量 19.10 mg/kg,速效 K 含量 157.30 mg/kg。

1.2 试验方法

供试尿素和硝化抑制剂均为分析纯试剂。硝化抑制剂选择常用的 3,4-二甲吡唑磷酸盐(以下简称 DMPP)、双氰胺(DCD)、2-氨基-4-氯-6-甲基吡啶(AM)和硫脲(TU)共 4 种。

试验具体方法是:称取 6 kg 风干土于干净的塑料盆中,用喷壶均匀喷洒一定量的蒸馏水使土壤水分保持为田间最大持水量(WHC)的 60%,风干土含水量按 3% 计。分别施入尿素(对照,CK)和供试硝化抑制剂+尿素,充分混匀。尿素用量为每 kg 土 0.5 g,各硝化抑制剂用量均为施入氮量的 5%。培养时,称取相当于 100 g 风干土的新鲜土样放入 150 mL 三角瓶中,重复 4 次,瓶口用塑料薄膜(Parafilm)封闭,并在上面用针均匀地戳小眼以保证培养过程中的氧气供给,在培养箱(ZPW-280B 智能植物培养箱)中于 25℃ 下培养 50 d^[14]。分别在培养后的 1,3,5,8,11,14,17,21,25,29,34,39,44,50 d 取样,测定土壤中的 NH_4^+-N 、 NO_3^--N 、 NO_2^--N 含量,同时测定土壤 pH、电导率(EC)。在培养期间每隔 2 d 通过称质量法用蒸馏水补足培养过程中损失的水分。

1.3 测定项目及方法

在 5 g(干基)土壤样品中加入 1 mol/L KCl 50 mL($m(\text{KCl}):m(\text{土})=10:1$)振荡 30 min,过滤后,取滤液分别测定 NH_4^+-N 、 NO_3^--N 、 NO_2^--N 的含量, NH_4^+-N 含量用纳氏试剂比色法测定^[15], NO_3^--N 含量用铬柱还原的盐酸奈乙二胺比色法测定^[15], NO_2^--N 含量用盐酸奈乙二胺比色法测定^[15]。称取一定质量土样,用无二氧化碳蒸馏水($m(\text{蒸馏水}):m(\text{土})=1:1$)浸提 1 min 后,静置 0.5 h 用 pH 计测定土壤 pH 值;同时用蒸馏水($m(\text{蒸馏水}):m(\text{土})=5:1$)振荡浸提 5 min 过滤后,用电导率仪测定土壤电导率^[16]。

1.4 数据处理

土壤硝化速率/%= $[\text{NO}_3^--\text{N} \text{ 含量}/(\text{NH}_4^+-\text{N}$

含量+NO₂⁻-N 含量+NO₃⁻-N 含量)]×100。

硝化抑制率按下式计算:硝化抑制率/%=(A-B)×100/A,其中 A 为不添加硝化抑制剂处理的土壤培养前后 NO₃⁻-N 含量之差(mg/kg),B 为添加硝化抑制剂处理的土壤培养前后 NO₃⁻-N 含量之差(mg/kg)。

数据采用 Excel 2003 和 DPS 7.55 进行处理。

2 结果与分析

2.1 不同硝化抑制剂对尿素转化过程中不同形态氮含量的影响

2.1.1 土壤 NH₄⁺-N

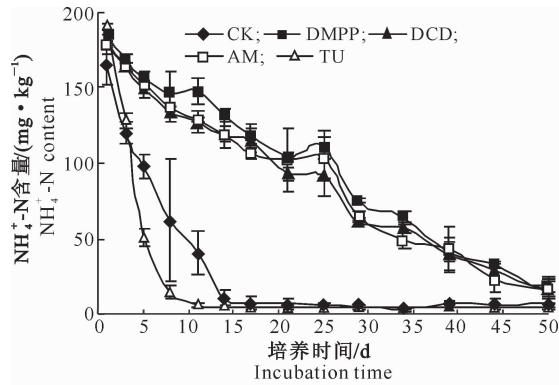


图 1 不同硝化抑制剂对土壤 NH₄⁺-N 含量的影响
Fig.1 Effect of different nitrification inhibitors on concentration of NH₄⁺-N in soil

2.1.2 土壤 NO₃⁻-N 图 2 显示,在培养过程中,5 个处理土壤中 NO₃⁻-N 含量的变化趋势与 NH₄⁺-N 正好相反。在培养初期(1~14 d),CK 和 TU 处理土壤 NO₃⁻-N 含量随培养时间的延长急速上升,在 14 d 时 NO₃⁻-N 含量分别达到 222.6 和 225.2 mg/kg,之后 NO₃⁻-N 含量处于波动状态。随着培养时间的延长(1~50 d),添加硝化抑制剂处理(TU 除外)的土壤中 NO₃⁻-N 含量整体呈逐渐增加的趋势。

2.1.3 土壤 NO₂⁻-N 从图 3 可以看出,在培养 1~14 d,只有 CK 和 TU 处理土壤在培养过程中有 NO₂⁻-N 的累积,在培养第 3 天时,二者的 NO₂⁻-N 含量均达到峰值,此时 CK 比 TU 处理土壤高 37.63%,差异达到极显著水平(P<0.01);而其他 3 个硝化抑制剂(DMPP、DCD 和 AM)处理土壤除在培养的前 14 d 测定到极少量的 NO₂⁻-N 外,在 14~50 d 均未检测出 NO₂⁻-N。由此可见,DMPP、DCD 和 AM 3 种硝化抑制剂均可以有效抑制硝化过程中 NO₂⁻-N 的累积,减少了亚硝酸盐对环境的危害。

养期的 50 d 内,除 TU 外,添加其他硝化抑制剂处理土壤的 NH₄⁺-N 含量均显著高于 CK,CK 和 TU 处理的土壤 NH₄⁺-N 含量在第 15 天就下降至最小,说明硝化过程已经完成,而添加其他硝化抑制剂处理土壤的 NH₄⁺-N 含量在第 50 天才趋于 0。值得注意的是,在培养的第 11 天,添加 DMPP 处理土壤的 NH₄⁺-N 含量显著高于添加抑制剂 DCD 和 AM 处理的土壤(P<0.05),说明在培养前期,DMPP 的抑制效果优于 DCD 和 AM;之后,DMPP、DCD 和 AM 处理土壤的 NH₄⁺-N 含量相近,无显著性差异,但均显著高于 CK(P<0.05)。

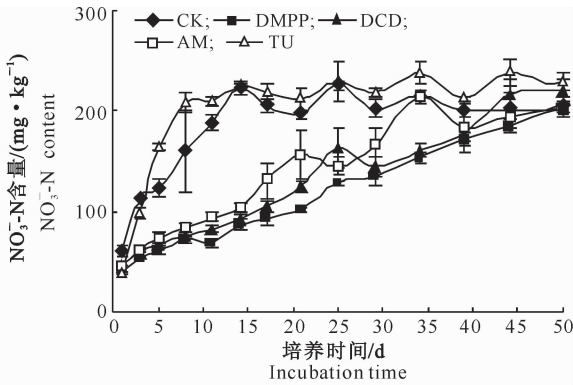


图 2 不同硝化抑制剂对土壤 NO₃⁻-N 含量的影响
Fig.2 Effect of different nitrification inhibitors on concentration of NO₃⁻-N in soil

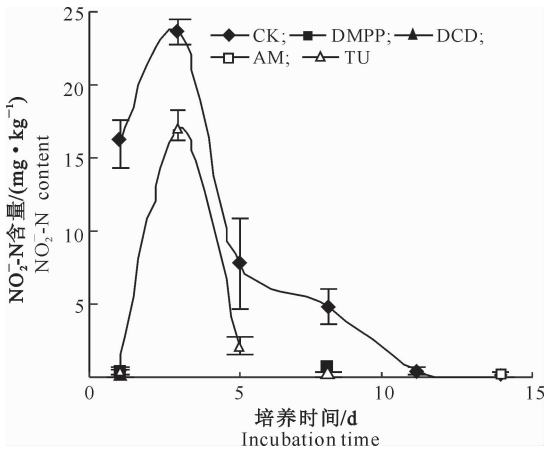


图 3 不同硝化抑制剂对土壤 NO₂⁻-N 含量的影响
Fig.3 Effect of different nitrification inhibitors on concentration of NO₂⁻-N in soil

2.2 不同硝化抑制剂对尿素转化过程中土壤 pH 和电导率的影响

2.2.1 土壤 pH 图 4 显示,CK 和不同硝化抑制剂处理土壤的 pH 都较高(>7.5),这与供试土壤的 pH 本底值较高有关。随着培养时间的延长,所有

处理土壤的 pH 均呈先降低后升高,波动一段时间后又迅速降低的变化趋势。在培养 1~17 d,由于硝化作用的进行,CK 土壤的 pH 从 8.36 骤降为 7.79, pH 降低幅度为 0.57;17~25 d,CK 土壤 pH 又逐渐升高;之后随着培养时间的延长,pH 保持相对稳定之后又迅速降低。在培养 1~11 d,TU 处理的土壤 pH 迅速下降,且下降幅度(0.88)明显高于 CK, pH 的急剧变化可能导致了 TU 处理土壤 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量的急速下降,但 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量快速增加(图 1 和图 2)。与 CK 和 TU 处理土壤相比,DMPP、DCD 和 AM 处理土壤的 pH 值下降幅度明显较小,在培养的 3~25 d,DMPP、DCD 和 AM 处理的土壤 pH 值均极显著高于 CK($P<0.01$)。

究其原因,是因为在培养初期(前 10 d)向土壤中添加 DMPP、DCD、AM 后,抑制了 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的氧化;此外,尿素的水解导致土壤 pH 维持在高于 8 的水平,而土壤硝化作用适宜的 pH 为 6~8^[17],从而又进一步加剧了对硝化作用的抑制程度。统计分析(表 1)表明,各处理土壤 pH 与 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量呈显著

负相关($P<0.05$),与土壤 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量呈显著正相关($P<0.05$)。

2.2.2 土壤电导率 由图 5 可以看出,土壤电导率的变化规律与 pH 基本相反,随着培养时间的延长,土壤电导率总体呈增加趋势。在整个培养期间,CK 和 TU 处理的土壤电导率值均明显高于 DMPP、DCD 和 AM 处理,进一步说明硝化抑制剂对硝化作用有明显的抑制效果。统计结果(表 1)表明,所有处理土壤的电导率与 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量均呈显著负相关,而与 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量呈显著正相关。究其原因,是因为土壤 NO_3^- 与土壤胶体的吸附能力较弱^[18],而 NH_4^+ 不仅可吸附在土壤表面,还可进入黏土矿物的晶体中,成为固定态 NH_4^+ ,所以 NO_3^- 对土壤电导率的贡献较大^[19]。由于 TU 和 CK 处理土壤硝化作用进程较快,导致土壤中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量显著低于 DMPP、DCD 和 AM 处理(图 1),而 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量却显著高于后者(图 2),故 TU 和 CK 处理土壤的电导率也明显高于 DMPP、DCD 和 AM 处理。

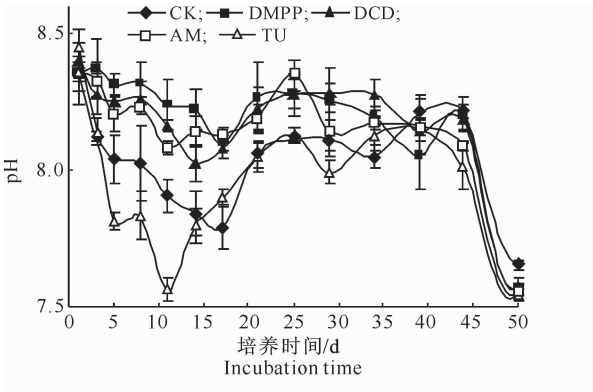


图 4 不同硝化抑制剂对土壤 pH 的影响
Fig. 4 Effect of different nitrification inhibitors on pH in soil

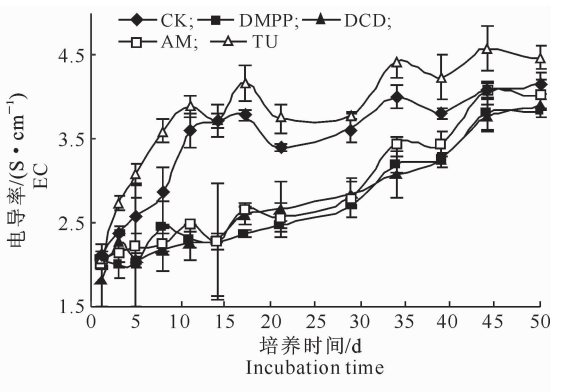


图 5 不同硝化抑制剂对土壤电导率的影响
Fig. 5 Effect of different nitrification inhibitors on EC in soil

表 1 不同硝化抑制剂处理尿素转化期间土壤各参数件的相关系数(n=56)

Table 1 Correlation between parameters of soil treated with different nitrification inhibitors

处理 Treatment	$\text{NH}_4^+\text{-N-pH}$	$\text{NH}_4^+\text{-N-EC}$	$\text{NH}_4^+\text{-N-NO}_3^-\text{-N}$	$\text{NO}_3^-\text{-N-pH}$	$\text{NO}_3^-\text{-N-EC}$	EC-pH
CK	0.432*	-0.822*	-0.971*	-0.483*	0.776*	-0.481*
DMPP	0.673*	-0.901*	-0.979*	-0.665*	0.874*	-0.652*
DCD	0.506*	-0.826*	-0.957*	-0.498*	0.776*	-0.521*
AM	0.626*	-0.809*	-0.934*	-0.528*	0.772*	-0.640*
TU	0.556*	-0.781*	-0.976*	-0.496*	0.790*	-0.484*

注: * 表示在 $P<0.05$ 水平上显著相关。
Note: Correlation is significant at the 95% level.

2.3 不同硝化抑制剂对土壤硝化速率的影响

图 6 显示,随着培养时间的延长,CK 与 TU 处理土壤的硝化速率逐渐增大,并于 14 d 达到最大

值,之后保持恒定;其他 3 个处理土壤的硝化速率呈现逐渐上升的趋势。与 CK 和 TU 处理相比,加入 DMPP、DCD 和 AM 3 个硝化抑制剂后,土壤的硝化

速率极显著降低 ($P < 0.01$), 说明硝化抑制剂 DMPP、DCD、AM 显著抑制了 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 向 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 的氧化进程。在培养的第 11~25 天, 与 CK 相比, DMPP、DCD 和 AM 处理土壤的硝化速率分别降低 44.92%, 34.35% 和 39.69%。在培养的前 34 d,

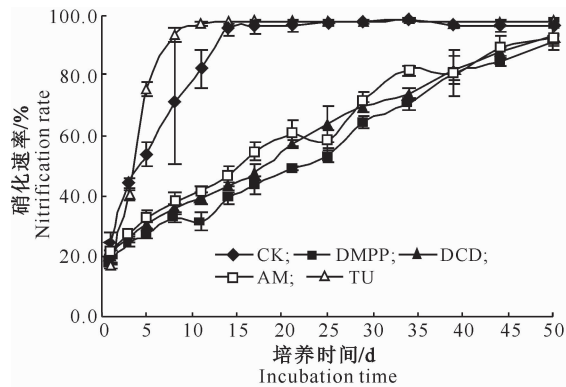


图 6 不同硝化抑制剂对土壤硝化速率的影响
Fig. 6 Variation of soil nitrification rate under different treatments

2.4 不同硝化抑制剂对土壤硝化抑制率的影响

由于 TU 在整个培养阶段未表现出强烈的硝化抑制作用, 故在此对其不予分析。图 7 表明, DMPP、DCD 和 AM 处理土壤的硝化抑制率均呈先增加后降低再增加后又降低的变化趋势。在培养 3~29 d, 各硝化抑制剂的抑制能力较强, 抑制能力强弱顺序为 $\text{DMPP} > \text{DCD} > \text{AM}$ ($P < 0.05$)。培养第 3 天, DMPP 的硝化抑制率达到 52.57%; 在之后的培养过程中, 其硝化抑制率也一直较高且稳定, 并于第 11 天时达到峰值 (63.91%)。

3 讨论

因为硝化抑制剂抑制了尿素的转化, 故其抑制作用首先表现为土壤 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量的缓慢下降或 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量的缓慢增加^[20-21]。从本研究不同硝化抑制剂对土壤 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量的影响中可以看出, 添加硝化抑制剂 DMPP、DCD 和 AM 抑制了土壤中 NH_4^+ 向 NO_3^- 的氧化过程, 从而使得硝化过程滞后了 35~38 d 才完成。这与陈振华等^[22]在尿素土柱中添加 DCD 的试验结果一致。从本研究不同硝化抑制剂对土壤 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量的影响中可以看出, 添加 3 种硝化抑制剂 (DMPP、DCD 和 AM) 的处理中, 在培养的第 11 天, DMPP 处理土壤的 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量较 DCD 和 AM 处理土壤分别降低了 17.46% 和 27.54%, 且差异均达到极显著水平 ($P < 0.01$); 在培养第 25 天时, DMPP 与 DCD 处理土壤的 $\text{NO}_3^-\text{-N}$

DMPP 处理的硝化速率低于 DCD 和 AM 处理, 且在培养的第 11~25 天差异达到极显著水平 ($P < 0.01$); 从培养的第 35 天开始, 以上 3 个处理的硝化速率基本保持一致; 表明 DMPP 对硝化作用有明显的抑制作用。

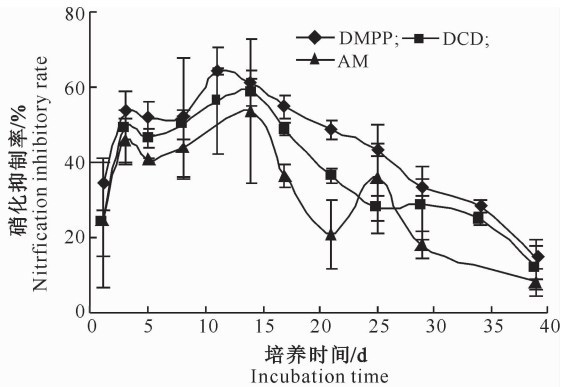


图 7 不同硝化抑制剂对硝化帽率的影响
Fig. 7 Dynamics of nitrification inhibitory rate of treatments added nitrification inhibitors

含量差异也达到了极显著水平 ($P < 0.01$)。这与邢卫等^[23]添加 DMPP 的尿素培养试验结果一致。比较本研究中 4 种硝化抑制剂的抑制效果, 可知 DMPP 的抑制效果最好, DCD 和 AM 次之, TU 效果最差。

尿素水解后由于 NH_4^+ 的累积和 pH 的上升, 会引起亚硝酸盐的累积, 进一步会引起硝酸盐的生成, $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 作为硝化和反硝化作用的中间产物^[24], 长期以来被大多数学者认为是瞬间产物可以不予考虑^[25-26], 但鲍俊丹等^[27]的试验结果表明, 在石灰性土壤的尿素转化过程中伴随着 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 的累积。硝化过程是在亚硝化细菌和硝化细菌共同作用下将 NH_4^+ 氧化成 NO_3^- 的过程, 是土壤氮转化中的一个重要过程。而土壤中将 NO_2^- 氧化成 NO_3^- 的硝化细菌 (NO_2^- 氧化细菌), 在 NH_4^+ 浓度较高的碱性条件下比亚硝化细菌 (NH_4^+ 氧化细菌) 更为敏感^[28]。因此, 硝化抑制剂不仅抑制了土壤中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的氧化, 而且也限制了亚硝酸盐的累积和硝酸盐的形成。

从土壤化学角度分析, 对于整个土体而言, 当施用硝化抑制剂后, 土壤较长时间保持较高的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量和较低的 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量, 这必然会造成土壤 pH 的升高。如 Cookson 等^[29]研究表明, 在单独施用尿素 35 d 后, 由于硝化作用的进行, 放牧草场土壤 pH 显著降低, 而尿素和 DCD 配合施用则可使土壤 pH 值提高约 1.7。本研究结果表明, 向土壤中添加硝化抑制剂后, 土壤 pH 较 CK 显著提高。

许超等^[30-31]研究发现,作为硝化抑制剂,DMPP具有使用剂量少、植物相容性好、抑制温室气体排放效率高等优点。降解动力学试验显示,DCD的降解速率比DMPP快10倍,在3个月内,DCD快速降解,而DMPP降解速率缓慢,存留量高^[32]。因此,与本试验中其他3种硝化抑制剂相比,DMPP是一种最为理想的硝化抑制剂。

4 结 论

1)硝化抑制剂DMPP、DCD和AM能够有效延缓尿素的水解、显著抑制土壤中 NH_4^+ -N的氧化作用,能够较长时间保持较高的 NH_4^+ -N含量,且能降低 NO_3^- -N淋溶及 NO_2^- -N累积的可能性。经各硝化抑制剂处理后,明显推迟了 NO_3^- -N的释放高峰期(TU除外),其中DMPP对硝化作用有明显的抑制作用,效果最好。

2)与CK相比,硝化抑制剂(TU除外)处理土壤的pH值下降速度明显减缓,EC值则显著降低,说明添加硝化抑制剂可明显减缓土壤的酸化速率。

3)不同硝化抑制剂处理土壤的 NO_3^- -N、 NH_4^+ -N、电导率和pH之间有显著的相关性,土壤 NO_3^- -N含量与EC值呈显著正相关,而与pH值呈显著负相关;土壤 NH_4^+ -N与EC值和pH值的关系,则与 NO_3^- -N相反。

4)从不同硝化抑制剂对土壤硝化速率和硝化抑制率的影响来看,除TU外,其他3种硝化抑制剂的抑制能力表现为 $\text{DMPP} > \text{DCD} > \text{AM}$ ($P < 0.05$)。在培养期间,添加DMPP处理的硝化抑制率高于30%的时间达25d,可有效延缓尿素水解的时间达35d以上,表明DMPP是一种较理想的硝化抑制剂。

【参考文献】

- [1] 张金波,宋长春.土壤氮素转化研究进展[J].吉林农业学报,2004,29(1):38-43,46.
Zhang J B, Song C C. Research progress of soil nitrogen transformation [J]. Journal of Jilin Agricultural Sciences, 2004, 29(1): 38-43, 46. (in Chinese)
- [2] International Fertilizer Industrial Association (IFA). Total fertilizer consumption statistics by region from 1970/1971 to 2005/2006 [EB/OL]. [2007-09-01]. <http://www.fertilizer.org/ifa/statistics/indicators/taflen.asp>.
- [3] 董燕,王正银.尿素在土壤中的转化与植物利用效率[J].磷肥与复肥,2005,20(2):76-78.
Dong Y, Wang Z Y. Conversion of urea in soil and its plant use efficiency [J]. Phosphate & Compound Fertilizer, 2005, 20(2): 76-78. (in Chinese)
- [4] 刘常珍,胡正义,赵言文,等.元素硫和双氰胺对菜地土壤铵态氮硝化抑制协同效应研究[J].植物营养与肥科学报,2008,14(2):334-338.
Liu C Z, Hu Z Y, Zhao Y W, et al. Synergistic nitrification-inhibiting effect of elemental sulfur and dicyandiamide in a typical vegetable soil [J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2008, 14(2): 334-338. (in Chinese)
- [5] Byrnes B H, Freney J R. Recent developments on the use of urease inhibitors in the tropics [J]. Fertil Res, 1995, 42(1/3): 251-259.
- [6] Freney J R, Chen D L, Mosier A R, et al. Use of nitrification inhibitor to increase fertilize nitrogen recovery and lint yield in irrigated cotton [J]. Fertil Res, 1993a, 34(1): 37-44.
- [7] Freney J R, Keerthisinghe D G, Chaiwanakupt P, et al. Use of urease inhibitor storeduce ammonia loss following application of urea to flooded fields [J]. Plant Soil, 1993(155/156): 371-373.
- [8] 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 Z H, Chen L J, Wu Z J. Effects of urease and nitrification inhibitors on alleviating the oxidation and leaching of soil urea's hydrolyzed product ammonium [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2005, 16(2): 238-242. (in Chinese)
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] Di H J, Cameron K C. Nitrous oxide emissions from two dairy pasture soils as affected by different rates of a fine particle suspension nitrification inhibitor, dicyandiamide [J]. Biology and Fertility of Soils, 2005, 42: 472-480.
- [12] 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.
- [13] Menendez S, Merino P, Pinto M, et al. 3, 4-dimethylpyrazole phosphate effect on nitrous oxide, nitric oxide, ammonia, and carbon dioxide emissions from grasslands [J]. Journal of Environmental Quality, 2006, 35: 973-981.
- [14] 曹建明,左秀锦,武志杰,等.几种吡唑类化合物的硝化抑制作用比较[J].中国土壤与肥料,2008(4):53-56.
Cao J M, Zuo X J, Wu Z J, et al. Effects of different pyrazoles compounds on soil nitrification [J]. Chinese Soil and Fertilizer, 2008(4): 53-56. (in Chinese)
- [15] Mulvaney R L. Nitrogen-inorganic forms [M]//Sparks D L. Methods of soil analysis: Part 3 chemical methods. Madison,

- WI; Soil Sci Soc Am, 1996; 1123-1184.
- [16] 鲍士旦. 土壤农化分析 [M]. 北京: 中国农业出版社, 2000: 432-437.
 Bao S D. Analysis of soil and agricultural chemistry [M]. Beijing: China Agricultural Press, 2000; 432-437. (in Chinese)
- [17] Lavelle P, Spain A V. Soil ecology [M]. Amsterdam: Kluwer Academic Publishers, 2002; 1-684.
- [18] 李春俭. 高级植物营养学 [M]. 北京: 中国农业大学出版社, 2008; 164-165.
 Li C J. Advanced plant nutrition [M]. Beijing: China Agricultural University Press, 2008; 164-165. (in Chinese)
- [19] 李海云, 王秀峰. 不同阴离子化肥对设施土壤理化性状的影响研究 [J]. 中国生态农业学报, 2004, 12(4): 124-128.
 Li H Y, Wang X F. The effect of fertilizer with different anions on the physiological and chemical characteristics of solar greenhouse soil [J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2004, 12(4): 124-128. (in Chinese)
- [20] Shi W, Norton J M. Effect of long-term, biennial, fall-applied anhydrous ammonia and nitrapyrin on soil nitrification [J]. Soil Science Society of America Journal, 2000, 64: 228-234.
- [21] 武志杰, 陈利军. 缓释/控释肥料: 原理与应用 [M]. 北京: 科学出版社, 2003; 1-6.
 Wu Z J, Chen L J. Principle and utility of slow/controlled release fertilizer [M]. Beijing: Science Press, 2003; 1-6. (in Chinese)
- [22] 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 Z H, Chen L J, Wu Z J. Effects of urease and nitrification inhibitors on alleviating the oxidation and leaching of soil urea's hydrolyzed product ammonium [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2005, 16(2): 238-242. (in Chinese)
- [23] 邢卫, 陈利军, 陈振华, 等. NBPT 与 DMPP 不同剂量组合对尿素氮转化的影响 [J]. 土壤通报, 2008, 39(4): 896-899.
 Xing W, Chen L J, Chen Z H, et al. Synergistic effect of different doses of NBPT and DMPP on urea-N transformation [J]. Chinese Journal of Soil Science, 2008, 39(4): 896-899. (in Chinese)
- [24] Trenkel M. Improving fertilizer use efficiency controlled release and stabilized fertilizers in agriculture [M]. International Fertilizer Industry Association, 1997; 11-12.
- [25] Serna M D, Nanuls J, Quinones A, et al. Evaluation of 3, 4-dimethylpyrazole phosphate as a nitrification inhibitor in a citrus-cultivated soil [J]. Biol Fertil Soils, 2000, 32: 42-46.
- [26] Irigoyen I, Lamsfus C, Aparicio T P, et al. The influence of 3, 4-dimethylpyrazole phosphate and dicyandiamide on reducing nitrate accumulation in spinach under mediterranean conditions [J]. The Journal of Agricultural Science, 2006, 144: 555-562.
- [27] 鲍俊丹, 吴雄平, 张妹婷, 等. 石灰性土壤中亚硝态氮的累积机理和条件 [J]. 西北农林科技大学学报: 自然科学版, 2009, 37(6): 146-149.
 Bao J D, Wu X P, Zhang M T, et al. Mechanisms and conditions of nitrite accumulation occurring in calcareous soil [J]. Journal of Northwest A&F University: Nat Sci Ed, 2009, 37(6): 146-149. (in Chinese)
- [28] Aleem M L H, Aleocander M. Nutrition and physiology nitrobacter agibis [J]. Appl Microbial, 1960, 8: 80-84.
- [29] Cookson W R, Cornforth I S. Dicyandiamide slows nitrification in dairy cattle urine patches: Effects on soil solution composition, soil pH and pasture yield [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2002, 34: 1461-1465.
- [30] 许超, 吴良欢, 巨晓棠, 等. 田间施用硝化抑制剂 DMPP 对小青菜贮藏过程中硝酸盐与 V_C 含量的影响 [J]. 农业环境科学学报, 2004, 23(4): 630-632.
 Xu C, Wu L H, Ju X T, et al. Effect of nitrification inhibitor DMPP (3, 4-dimethylpyrazole phosphate) on nitrate and vitamin C (V_C) concentrations in greengrocery during storage [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2004, 23(4): 630-632. (in Chinese)
- [31] 许超, 吴良欢, 张立民, 等. 含硝化抑制剂 DMPP 氮肥对小白菜硝酸盐累积和营养品质的影响 [J]. 植物营养与肥料学报, 2005, 11(1): 137-139.
 Xu C, Wu L H, Zhang L M, et al. Effect of nitrogen fertilizer with nitrification inhibitor DMPP on nitrate accumulation and nutritional quality of *Brassica campestris* L. ssp. [J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2005, 11(1): 137-139. (in Chinese)
- [32] Weiske A, Benckiser G, Herbert T. Influence of the nitrification inhibitor 3, 4-dimethylpyrazole phosphate (DMPP) in comparison to dicyandiamide (DCD) on nitrous oxide emissions, carbon dioxide fluxes and methane oxidation during 3 years of repeated application in field experiments [J]. Biol Fertil Soils, 2001, 34: 109-117.