

硝化抑制剂与不同氮肥配施对土壤硝化过程的抑制效果^①

马 丽^{1,2}, 梁雄英³, 李冬佳^{2,4*}, 董汶卿⁴, 唐智萍⁴, 郝杏中^{2,5}, 陈 骏^{2,5}, 喻海峰^{2,5},
王孝忠^{1,2}, 刘 蕊^{2,4}, 张卫峰^{2,4}

(1 西南大学资源环境学院/西南大学长江经济带农业绿色发展研究中心, 重庆 400716; 2 绿色智能复合肥研究院, 合肥 230001; 3 哈尔滨工业大学环境学院, 哈尔滨 150090; 4 中国农业大学资源与环境学院/中国农业大学国家绿色农业发展研究院, 北京 100193; 5 中盐安徽红四方肥业股份有限公司, 合肥 230001)

摘要: 为明确硝化抑制剂 DMPP(3,4-二甲基吡唑磷酸盐)在不同土壤条件下与不同氮肥配施的作用效果, 通过室内土壤培养试验, 研究了 DMPP 分别与脲铵氮肥、复合肥、硫硝酸铵、草酰胺配施对不同酸碱性(pH 5.48 和 8.25)土壤中氮素转化及氨挥发的影响。结果表明: DMPP 与不同类型氮肥配施, 在不同 pH 土壤条件下均可抑制土壤 NH_4^+ -N 向 NO_3^- -N 的转化, 并且在碱性土中的效果优于酸性土。配施肥料不同对 DMPP 作用效果的影响也有不同, 培养结束时, 在酸性土壤条件下, DMPP 与不同肥料配施的硝化抑制效果表现为复合肥>脲铵氮肥>草酰胺>硫硝酸铵, 硝化抑制率分别为 64.5%、54.1%、40.4%、13.2%; 在碱性土壤条件下的硝化抑制效果表现为脲铵氮肥>复合肥>草酰胺>硫硝酸铵, 硝化抑制率分别为 69.6%、58.3%、49.9%、26.2%。不同肥料处理在碱性土壤条件下累积氨挥发量均显著高于酸性土壤, 且在不同土壤条件下 DMPP 与复合肥配施均会显著增加土壤累积氨挥发量, 但 DMPP 与脲铵氮肥、硫硝酸铵、草酰胺配施时对土壤累积氨挥发量影响不显著。总体来看, 不同氮肥与 DMPP 配施均有抑制土壤硝化过程的作用, 且在碱性土中的作用效果更好。然而, DMPP 与普通平衡性复合肥配施会显著增加土壤氨挥发风险, 这也与肥料类型和 DMPP 添加量以及土壤 pH 有关, 使用时需注意土壤与肥料本身性质或适量降低 DMPP 添加浓度。综上, 针对不同土壤条件选择不同含氮肥料与硝化抑制剂配施可以更好地发挥硝化抑制剂的作用, 这对基于不同氮素形态的稳定性肥料生产具有重要指导意义。

关键词: 硝化抑制剂; 氮肥类型; 土壤类型; 硝化抑制率; 氨挥发

中图分类号: S143.1+6 文献标志码: A

Inhibitory Effects of Nitrification Inhibitors Combined with Different Nitrogen Fertilizers on Soil Nitrification Process

MA Li^{1,2}, LIANG Xiongying³, LI Dongjia^{2,4*}, DONG Wenqing⁴, TANG Zhiping⁴, HAO Xingzhong^{2,5}, CHEN Jun^{2,5}, YU Haifeng^{2,5}, WANG Xiaozhong^{1,2}, LIU Rui^{2,4}, ZHANG Weifeng^{2,4}

(1 College of Resources and Environment, Southwest University / Interdisciplinary Research Center for Agriculture Green Development in Yangtze River Basin, Southwest University, Chongqing 400716, China; 2 Academy of Green Intelligent Compound Fertilizer, Hefei 230001, China; 3 School of Environment, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, China; 4 College of Resources and Environment, China Agricultural University / National Academy of Agriculture Green Development, China Agricultural University, Beijing 100193, China; 5 CNSIG Anhui Hongsifang Fertilizer Co., Ltd., Hefei 230001, China)

Abstract: To clarify the effects of DMPP (3,4-dimethylpyrazole phosphate) combined with different nitrogen fertilizers under different soil conditions, the effects of nitrification inhibitor DMPP combined with urea-ammonium nitrogen fertilizer, compound fertilizer, ammonium sulfate-nitrate and oxalamide on nitrogen conversion and ammonia volatilization in soils with pH 5.48 (south paddy soil) and pH 8.25 (north salinized fluvo-aquic soil) were studied via soil microcosm incubation in the laboratory. The results showed that the combined applications of DMPP with different types of nitrogen fertilizer could inhibit the conversion of soil NH_4^+ -N to NO_3^- -N under different soil conditions, and the effects in alkaline soil were better than those in acidic soil. At the end of culture, in acidic soil, the nitrification inhibition effects of DMPP with different fertilizers were of compound fertilizer >

①基金项目: 国家自然科学基金面上项目(42277234)和绿色智能肥料产品创制与应用研究项目资助。

* 通讯作者(ldjlg@sina.com)

作者简介: 马丽(1998—), 女, 甘肃定西人, 硕士研究生, 主要研究方向为“双碳”目标下的氮肥损失控制及增效关键技术。E-mail: mary070919@sina.com

urea-ammonium nitrogen fertilizer > oxalamide > ammonium sulfate-nitrate, with nitrification inhibition rates of 64.5%, 54.1%, 40.4% and 13.2%, respectively, while in alkaline soil were of urea-ammonium nitrogen fertilizer (69.6%) > compound fertilizer (58.3%) > oxalamide (49.9%) > ammonium sulfate-nitrate (26.2%). The accumulated ammonia volatilization in alkaline soil was significantly higher than that in acidic soil under different fertilizer treatments, and the combined application of DMPP with compound fertilizer significantly increased the accumulated ammonia volatilization under different soil conditions, but the combined applications of DMPP with urea-ammonium nitrogen fertilizer, ammonium sulfur nitrate and oxalamide had no significant effect on soil accumulated ammonia volatilization. In general, the combined applications of different nitrogen fertilizers with DMPP can inhibit soil nitrification process, and the effects were better in alkaline soil, but the combined application of DMPP with conventional balanced compound fertilizer would significantly increase the risk of soil ammonia volatilization, which is also related to fertilizer type, DMPP added amount and soil pH. In conclusion, the combination applications of different fertilizers with nitrification inhibitors according to different soil conditions can better play the role of nitrification inhibitors, which has guiding significance for stabilized fertilizers production based on different nitrogen forms.

Key words: Nitrification inhibitors; Type of nitrogen fertilizer; Soil types; Nitrification inhibition rate; Ammonia volatilization

氮素是植物生长的必需元素,氮肥在全球农业生产中发挥着重要作用。国际肥料协会(IFA)的评估显示^[1],中国的作物氮肥消耗量约占全球的1/4,而氮肥利用率为40%左右,相比发达国家低10%~20%^[2-3]。在大量使用氮肥的情况下,大部分的氮素并没有被作物有效吸收,而是以氨挥发、硝酸盐淋洗等形式损失^[4],给大气和水体环境带来了严重污染^[5]。为了降低环境污染风险,提高氮肥利用率变得至关重要,也是推动农业绿色可持续发展的重要举措。

目前,施用硝化抑制剂是提高氮肥利用率的有效途径之一^[6]。硝化抑制剂可以抑制土壤中铵态氮(NH₄⁺-N)向硝态氮(NO₃⁻-N)的转化,延长NH₄⁺-N在土壤中的留存时间,减少由硝化作用产生的氮素损失。李学文等^[7]研究发现,添加硝化抑制剂处理能减少约17.30%总氮和5.13%NO₃⁻-N的淋失。硝化抑制剂施入土壤60 d后,小粉土和青紫泥土壤中NH₄⁺-N含量分别提高了52.70%和57.50%,NO₃⁻-N含量分别降低了58.30%和65.90%,添加硝化抑制剂处理的氮肥利用率比对照提高了1.78倍和2.23倍^[8]。当前市场上的硝化抑制剂种类较多,其中DMPP(3,4-二甲基吡唑磷酸盐)因其微量高效、绿色无毒无污染的作用特点,被广泛应用于稳定性肥料生产。与其他硝化抑制剂相比,DMPP可以在更少的用量下达到较好的硝化抑制效果。有研究结果表明,DMPP的用量只需DCD(双氰胺)的1/10,抑制效果就可超过DCD,且DMPP的抑制持续时间更长^[9]。但添加硝化抑制剂在某些环境条件下会有增加氨挥发的风险^[10]。如有研究表明,使用DMPP将增加5.30%的氨挥发^[11]。但也有学者发现,DMPP对土壤氨挥发损失没有显著影响^[12]。这可能是由于DMPP的作用效果会受土壤

类型及氮肥含量等多种因素的影响。刘发波等^[13]研究表明,土壤中的氮素施用量和土壤pH是影响硝化抑制剂DMPP调节氮素转化的主要因素。另外,多形态氮素配施对于提高氮肥利用率同样具有重要意义。研究表明,与尿素相比,一次性施用同等氮量的草酰胺可以显著提高粮食作物产量^[14-15]。新型脲铵氮肥的施用也能有效减少氮素的挥发,并对土壤起到一定的调节作用^[16]。然而,不同形态氮肥在不同土壤中的转化过程和速率可能导致与DMPP配施后效果不同。因此,综合利用不同土壤条件,选择硝化抑制剂和不同形态氮素配施,对于提高氮肥利用率、降低环境污染风险具有重要意义。这些举措也将有助于实现农业的绿色可持续发展,从而促进社会、经济和生态的全面发展。

综上,本研究选取硝化抑制剂DMPP分别与不同氮素形态的肥料(脲铵氮肥、复合肥、硫硝酸铵、草酰胺)进行配施,通过土壤培养试验,研究了不同pH土壤中NH₄⁺-N、NO₃⁻-N、氨挥发浓度的动态变化,以明确DMPP在不同土壤条件下与不同氮肥配施的作用效果,为基于不同氮素形态的稳定性肥料产业化提供理论支持。

1 材料与方法

1.1 供试土壤

供试土壤为南方水稻土和北方小麦土。南方水稻土采自安徽省北灵村(31°32'32" N, 117°23'20" E),土壤类型属潴育型水稻土;北方小麦土采自中国农业大学曲周实验站(36°51'50" N, 115°0'58" E),土壤类型属盐化潮土。以上2种类型土壤均取自农田耕作表层(0~20 cm)。采用“五点取样法”进行取样,将新鲜

土样带回实验室混合均匀, 经人工筛除杂物(如石块、植物和植物根系等)后, 自然风干研磨, 过 2 mm 筛装袋备用。土壤基本理化性质测定方法参照鲁如坤《土壤农化分析》进行处理与测定^[17]。供试土壤基本理化性质见表 1。

表 1 供试土壤基本理化性质
Table 1 Basic physiochemical properties of tested soil

供试土壤	pH	有机质 (g/kg)	全氮 (g/kg)	碱解氮 (mg/kg)	有效磷 (mg/kg)	速效钾 (mg/kg)	质地
南方水稻土	5.48	24.90	1.30	55.70	17.70	36.00	粉砂壤土
北方小麦土	8.25	13.20	1.01	25.50	38.00	125.00	壤土

1.2 供试肥料

供试硝化抑制剂为 DMPP, 由武威金仓生物科技有限公司提供, 有效成分含量≥99.0%。供试氮肥分别为复合肥(CF, 含 N 量 150 g/kg)、硫硝酸铵(ASN, 分析纯, 含 N 量 260 g/kg)、脲铵氮肥(UA, 含 N 量

280 g/kg)、草酰胺(OA, 分析纯, 含 N 量 320 g/kg)。

1.3 试验设计

采用室内土壤培养方法, 称取 50.00 g 风干土壤于培养瓶(250 mL)中, 调节土壤含水量为 60% WFPS (water filled pore space, 土壤孔隙含水量), 室温预培养 4 d 后进行肥料处理。每种土壤设置 8 个处理, 试验设计见表 2。肥料添加量为 N 0.10 g/kg, DMPP 添加量根据行业推荐标准 NY/T 3504—2019 《肥料增效剂 硝化抑制剂及使用规程》^[18]对 DMPP 的使用量要求, 设置为所施肥料中酰胺态氮和铵态氮总量的 0.80%, 每个处理重复 3 次。土壤培养在室温条件下持续 10 d。培养期间, 每 2 d 采用称重法补充水分, 使土壤含水量保持在 60%WFPS。

氨挥发采用“静态吸收法”测定^[19], 试验设计与处理设置和上述土壤培养相同, 肥料添加量为 N 0.50 g/kg。室温下培养 10 d, 每隔 12 h 记录一次 NH₃ 挥发量。

表 2 试验设计
Table 2 Experimental design

氮肥	土壤	处理及编号	DMPP 占氮肥中铵态氮或酰胺态氮比例(%)	肥料类型
脲铵氮肥(UA)	南方酸性水稻土	单施脲铵氮肥 (S-UA)	0	铵态氮+酰胺态氮
	DMPP 与脲铵氮肥配施 (S-UA+DMPP)	0.80		
	单施脲铵氮肥 (J-UA)	0		
	DMPP 与脲铵氮肥配施 (J-UA+DMPP)	0.80		
	单施复合肥 (S-CF)	0	酰胺态氮+磷钾肥	
	DMPP 与复合肥配施 (S-CF+DMPP)	0.80		
复合肥(CF)	南方酸性水稻土	单施复合肥 (J-CF)	0	
	DMPP 与复合肥配施 (J-CF+DMPP)	0.80		
	单施复合肥 (S-ASN)	0	硝态氮+铵态氮	
	DMPP 与硫硝酸铵配施 (S-ASN+DMPP)	0.80		
	单施硫硝酸铵 (J-ASN)	0		
	DMPP 与硫硝酸铵配施 (J-ASN+DMPP)	0.80		
草酰胺(OA)	南方酸性水稻土	单施草酰胺 (S-OA)	0	新型酰胺态氮
	DMPP 与草酰胺配施 (S-OA+DMPP)	0.80		
	单施草酰胺 (J-OA)	0		
	DMPP 与草酰胺配施 (J-OA+ DMPP)	0.80		

1.4 样品采集及测定

NH₃ 采集与测定: 累积氨挥发量采用氨检测管检测^[20]。在密封的橡胶塞上打孔, 连接氨检测管(NH₃-100, 华安气体检测科技有限公司, 鹤壁)。未与氨气反应时, 检测管内指示粉为桔黄色, 使用时用开管器将气体检测管的两端打开, 指示粉与氨气反应变成灰黑色, 直接读数即为从培养开始到读数时间内的累积氨挥发量。

土壤样品采集与测定: 分别在培养 1、3、5、10 d,

对土壤培养试验各处理进行破坏性取样, 称取 10.0 g 土于 100 mL 离心管中, 加入 50 mL 的 1 mol/L 的 KCl 溶液, 在室温条件下振荡 1 h 后过滤, 采用流动分析仪(AA3, 中通科技发展有限公司, 天津)测定滤液中 NH₄⁺-N、NO₃⁻-N 含量, 同时测定土壤含水量, 用于土

壤 NH_4^+ -N、 NO_3^- -N 含量的计算。

1.5 数据处理与统计分析

采用 Excel 2016 进行数据基础整理; 利用 SPSS 26.0 进行统计分析, 包括进行 Pearson 相关系数的计算、运用单因素方差分析(One-way ANOVA)检验处理间的差异性; 采用 Origin 2022 进行图表制作。

2 结果与分析

2.1 DMPP 与不同氮肥配施对不同土壤无机氮动态变化的影响

由图 1 可知, DMPP 与不同氮肥配施对不同土壤中 NH_4^+ -N 的含量变化表现出不同的影响。对于脲铵氮肥和复合肥处理(图 1A、1B), 培养期间 NH_4^+ -N 的含量变化趋势基本一致, 未添加 DMPP 的处理土壤 NH_4^+ -N 的含量呈下降趋势, 且在碱性土壤下下降速度更快。整个培养周期内, 未添加 DMPP 的脲铵氮肥处理酸性土壤中 NH_4^+ -N 含量减少 55%, 碱性土壤中 NH_4^+ -N 含量降低 97%; 未添加 DMPP 的复合肥处

理酸性土壤中 NH_4^+ -N 含量减少了 40%, 碱性土壤中 NH_4^+ -N 含量减少了 84%, 是酸性土壤的两倍。添加 DMPP 后土壤 NH_4^+ -N 的含量下降趋势明显趋于平缓, 且在酸性土壤中培养 5 d 后 NH_4^+ -N 的含量突然回升, 显著高于未添加 DMPP 的处理。硫硝酸铵与草酰胺处理的 NH_4^+ -N 含量变化与脲铵氮肥和复合肥处理表现出显著不同的趋势。硫硝酸铵处理中(图 1C), 在整个培养期间酸性土壤中 NH_4^+ -N 含量几乎无明显变化; 在碱性土壤中呈现先下降后趋于平稳的趋势, 且添加 DMPP 的处理 NH_4^+ -N 平均含量显著高于不添加 DMPP 的处理。DMPP 与草酰胺配施时(图 1D), 土壤 NH_4^+ -N 含量在两种土壤条件下各处理均呈现先升高后降低的趋势, 不同的是酸性土中在培养 5 d 时出现峰值, 碱性土中土壤 NH_4^+ -N 含量峰值则提前至培养 3 d 时出现, 可能是碱性条件下, 施用草酰胺处理的土壤硝化强度在培养 3 d 后快速增强, 导致 3 d 后 NH_4^+ -N 含量快速降低。

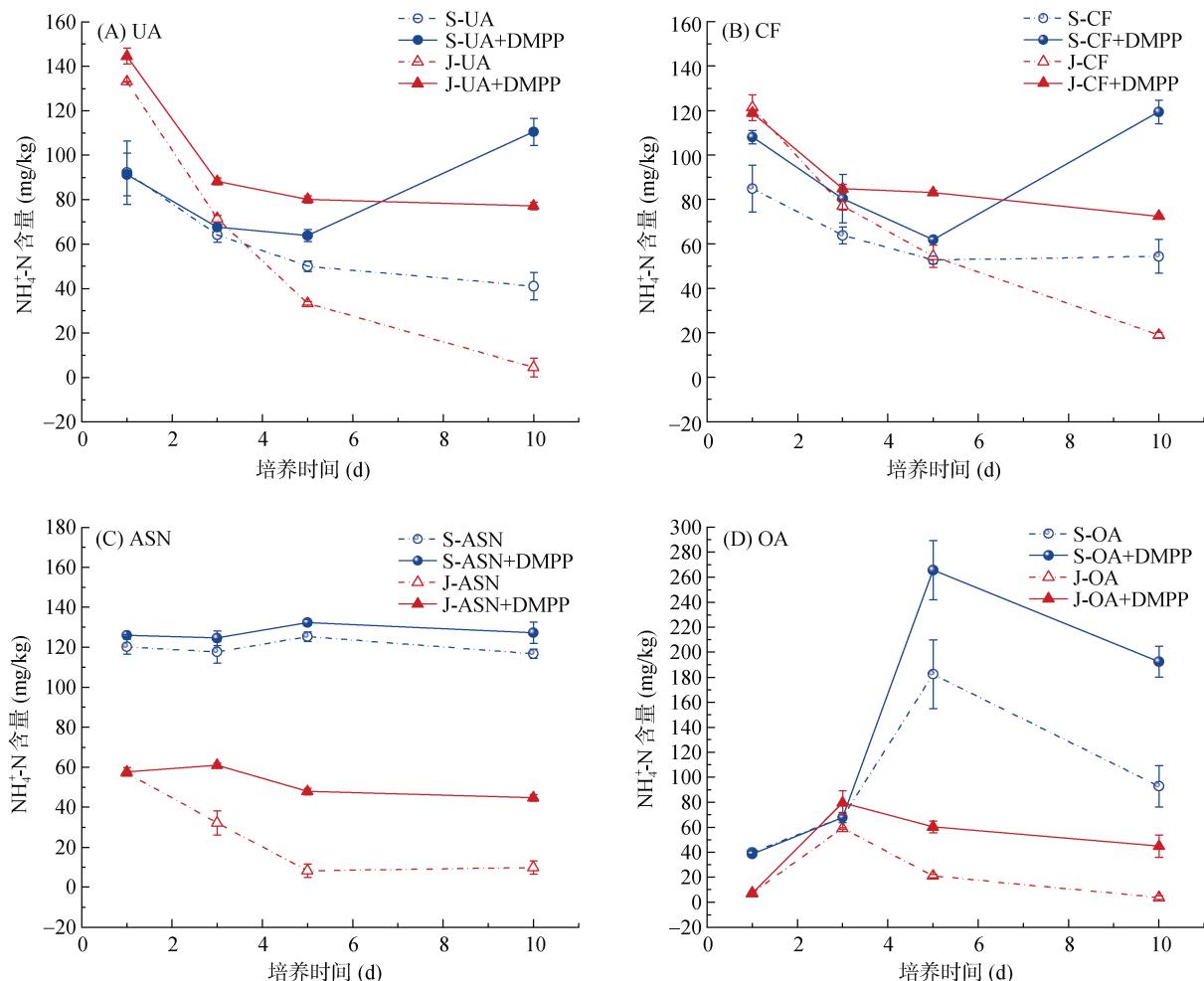


图 1 DMPP 与不同氮肥配施处理下不同土壤 NH_4^+ -N 含量变化过程

Fig. 1 NH_4^+ -N contents in soils under combined applications of DMPP with different nitrogen fertilizers

由图 2 可知, DMPP 与不同氮肥配施可显著降低土壤中 NO_3^- -N 的含量。各处理土壤 NO_3^- -N 含量均表现为随着培养时间增加而逐渐升高的趋势, 但添加 DMPP 后增速显著放缓。未添加 DMPP 的脲铵氮肥处理(图 2 A) NO_3^- -N 含量在酸性土与碱性土中均以培养 5~10 d 时增加速度最快; 在酸性土中, 培养结束时未添加 DMPP 的处理 NO_3^- -N 含量相比培养开始时增加了 5.06 倍, 而添加 DMPP 的处理 NO_3^- -N 含量相

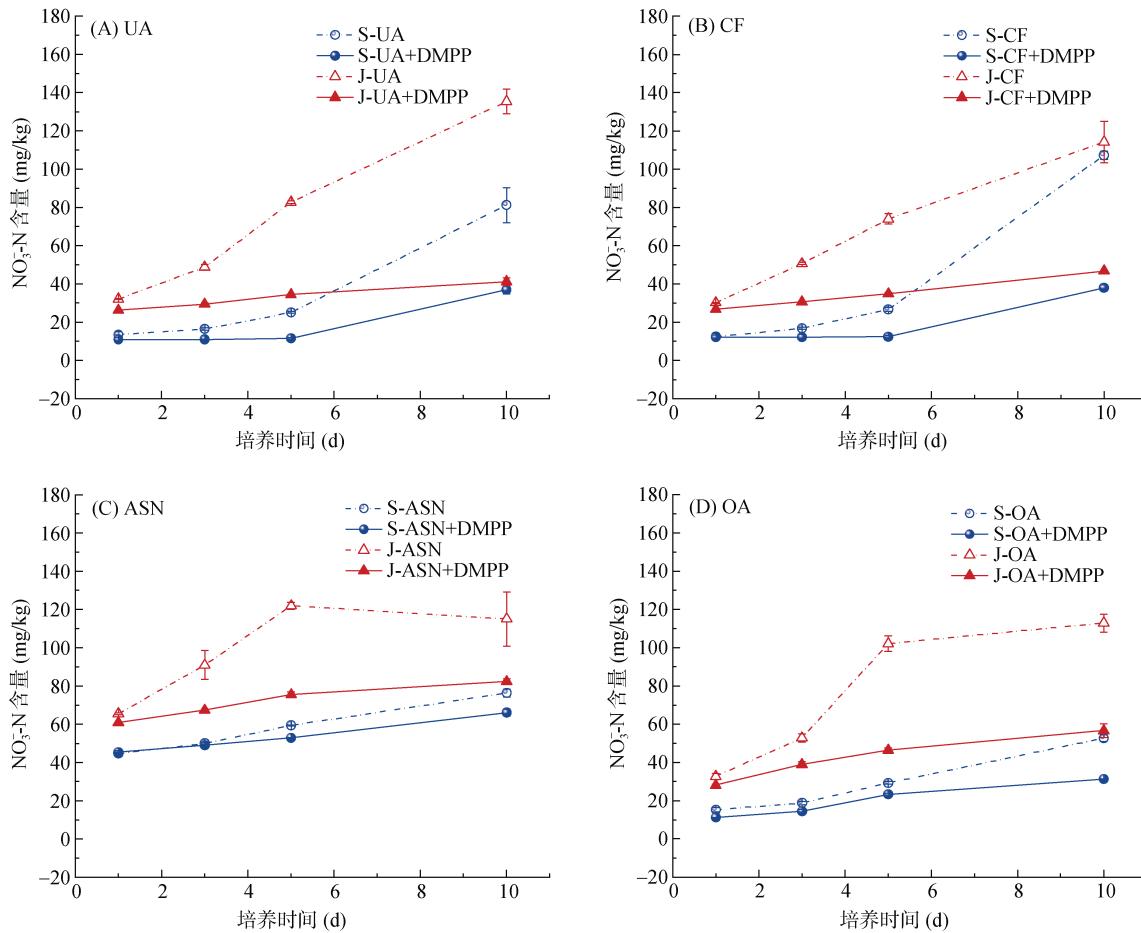


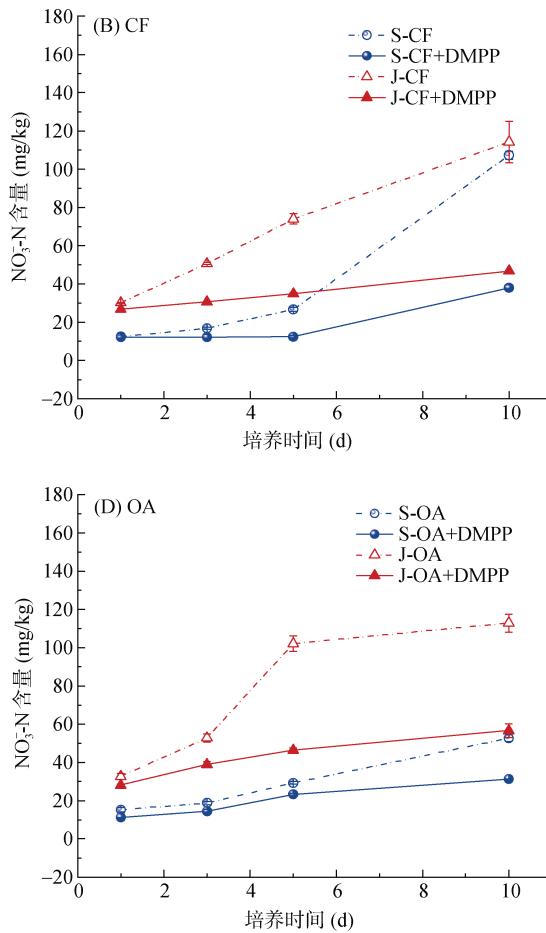
图 2 DMPP 与不同氮肥配施处理下不同土壤 NO_3^- -N 含量变化过程

Fig. 2 NO_3^- -N contents in soils under combined applications of DMPP with different nitrogen fertilizers

2.2 DMPP 与不同氮肥配施对不同土壤硝化作用的影响

DMPP 与不同氮源配施所表现出的硝化抑制效果有显著差异(表 3)。在酸性土中, DMPP 与脲铵氮肥、复合肥和硫硝酸铵配施处理的硝化抑制率随培养时间逐渐上升, 说明 DMPP 的作用效果逐渐增强。而 DMPP 与草酰胺配施处理则先降低后升高, 5 d 时硝化抑制能力最弱, 但培养期间硝化抑制率均在 20% 以上。培养结束(10 d)时, 酸性土中添加 DMPP 处理的硝化抑制效果为复合肥>脲铵氮肥>草酰胺>硫硝酸铵, 复合肥添加 DMPP 处理最高硝化抑制率为

比培养开始时只增加了 2.38 倍, DMPP 添加显著降低了 NH_4^+ -N 向 NO_3^- -N 的转化速度。DMPP 与不同氮肥配施在培养后期, NO_3^- -N 含量增加速度以酸性条件下未添加 DMPP 的复合肥处理最快。在培养期间, 不含 DMPP 的处理 NH_4^+ -N 快速转化成 NO_3^- -N, 特别是在酸性土壤中培养 5~10 d 时增长迅速, 而在碱性土壤中快速增长时间则提前至培养 3~5 d 时, 说明碱性土壤中硝化作用相对于酸性土壤中更加剧烈。



64.5%, 约为硫硝酸铵添加 DMPP 处理的 5 倍。

在碱性土壤中, DMPP 与脲铵氮肥和复合肥配施处理的硝化抑制率同样呈现出随培养时间推移逐渐升高的趋势。而 DMPP 与硫硝酸铵配施和草酰胺配施处理的硝化抑制率则表现出先升高后降低的变化趋势, 硝化抑制活性在培养 5 d 时最强, 此时, 除硫硝酸铵处理外, 其他各处理的硝化抑制率均达到 50% 以上。整体上, 在整个培养周期结束时, 碱性土中 DMPP 与不同氮肥配施的硝化抑制率表现为脲铵氮肥>复合肥>草酰胺>硫硝酸铵, 脲铵氮肥添加 DMPP 处理最高硝化抑制率为 69.6%。

表3 DMPP与不同氮肥配施对不同土壤硝化作用的影响
Table 3 Nitrifications in soils under combined applications of DMPP with different nitrogen fertilizers

土壤	处理	硝化抑制率(%)			
		1 d	3 d	5 d	10 d
南方酸性水稻土	S-UA+DMPP	18.1 ± 7.4 a	33.4 ± 4.1 a	54.5 ± 1.4 a	54.1 ± 2.6 b
	S-CF+DMPP	0.8 ± 12.9 a	28.0 ± 6.7 a	53.5 ± 4.2 a	64.5 ± 2.0 a
	S-ASN+DMPP	-1.6 ± 3.1 a	1.9 ± 0.8 b	11.0 ± 0.3 c	13.2 ± 4.4 d
	S-OA+DMPP	27.3 ± 5.9 a	23.1 ± 3.6 a	20.6 ± 2.3 b	40.4 ± 2.2 c
北方碱性小麦土	J-UA+DMPP	18.3 ± 0.0 a	39.8 ± 0.0 a	58.4 ± 0.0 a	69.6 ± 0.0 a
	J-CF+DMPP	11.0 ± 1.6 ab	39.7 ± 1.2 a	52.7 ± 1.5 a	58.3 ± 4.1 ab
	J-ASN+DMPP	7.1 ± 0.6 b	24.7 ± 7.2 b	38.1 ± 2.1 b	26.2 ± 9.4 c
	J-OA+DMPP	13.5 ± 5.4 ab	26.0 ± 4.2 ab	54.4 ± 3.1 a	49.9 ± 1.0 b

注: 同列数据后不同小写字母表示同一时间同一土壤上不同处理间差异显著($P<0.05$)。

2.3 DMPP与不同氮肥配施对不同土壤氨挥发动态变化的影响

DMPP与不同氮肥配施对土壤氨挥发动态变化的影响在碱性土中相似(图3), 氨挥发量均表现为随培养时间持续增加的趋势。而在酸性土中表现则有所不同, 与碱性土中相比, 除草酰胺处理外, 其余处理

的氨挥发现象非常微弱, 对于硫酸铵处理(图3C), 未添加DMPP处理在整个培养期间几乎无氨挥发现象, 添加DMPP处理检测到微弱的氨挥发现象; 脲铵氮肥与复合肥处理(图3A、3B)在培养3 d后才检测到氨挥发, 且添加DMPP处理比未添加DMPP处理出现氨挥发现象更早, DMPP的使用使脲铵氮肥和复

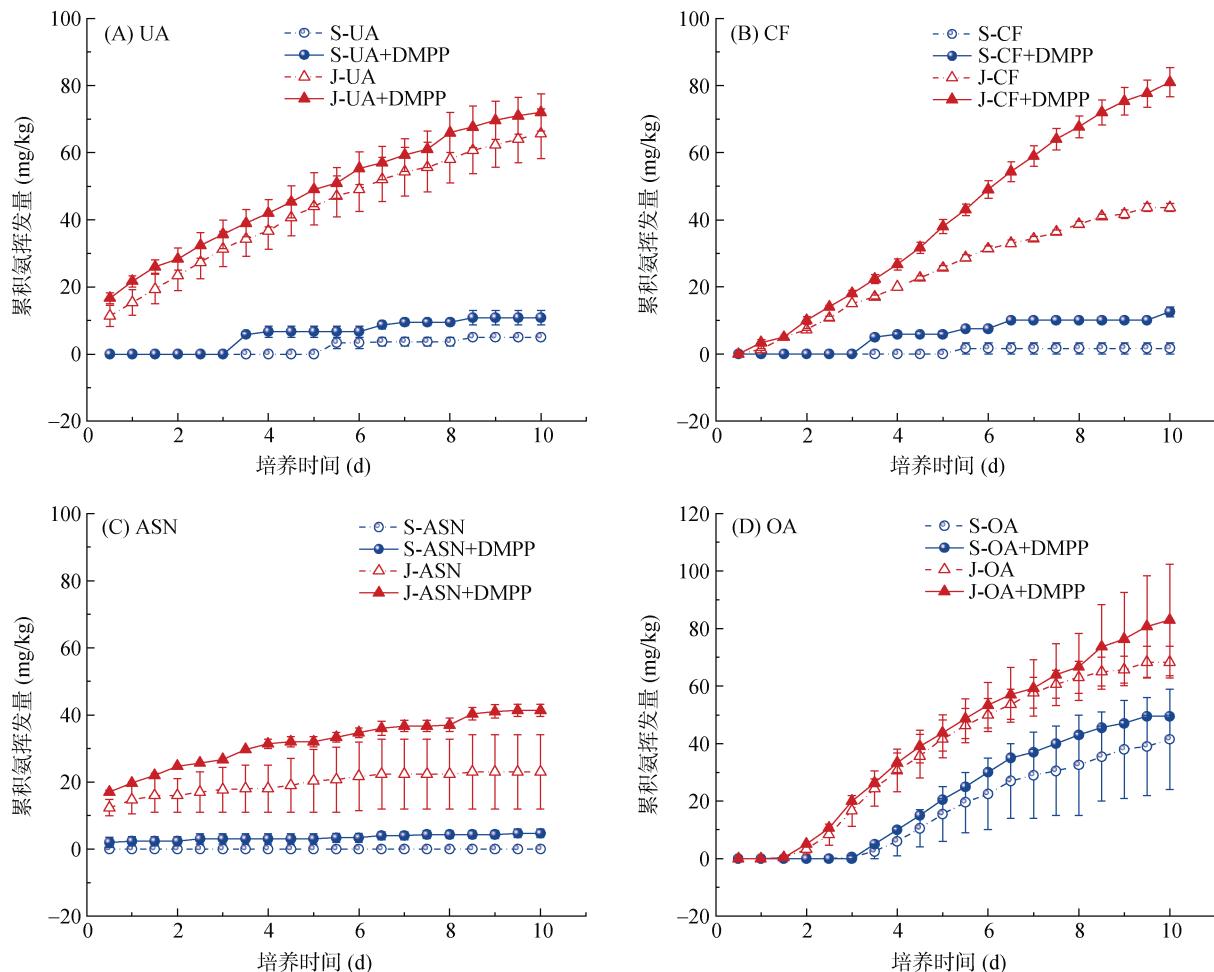
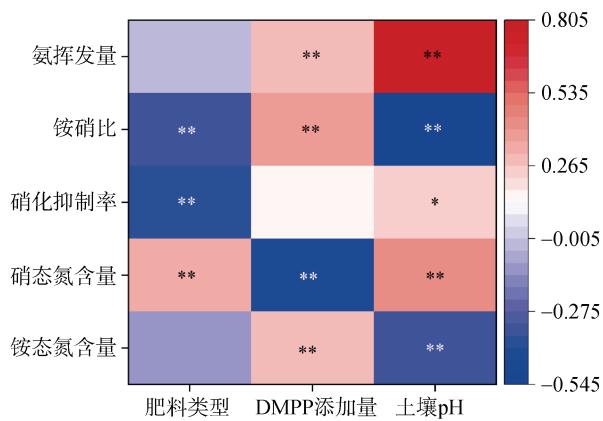


图3 硝化抑制剂与不同氮肥配施对不同土壤氨挥发的影响

Fig. 3 Ammonia volatilization in soils under combined applications of DMPP with different nitrogen fertilizers

合肥处理的氨挥发出现时间提前了 60 h。培养试验结束时, 各肥料处理中, 碱性土条件下氨挥发累积量均显著高于酸性土。在脲铵氮肥、硫硝酸铵和草酰胺处理中, 相同土壤条件下添加 DMPP 处理与未添加 DMPP 处理间累积氨挥发量差异均不显著; 但在复合肥处理中, 不同土壤条件下添加 DMPP 处理累积氨挥发量均显著高于未添加 DMPP 处理。与酸性土相比, 碱性土中氮肥的氨挥发现象较为显著, 与未添加 DMPP 处理相比, DMPP 的施用平均提高 13.38% ~ 63.38% 氨挥发量。

对所有处理的土壤 NH_4^+ -N 含量、 NO_3^- -N 含量、硝化抑制率、铵硝比、氨挥发量与肥料类型、DMPP 添加量、土壤 pH 进行 Pearson 相关性分析(图 4)发现, 本试验条件下, 土壤 NH_4^+ -N 含量与 DMPP 添加量呈极显著正相关($P<0.01$), 与土壤 pH 呈极显著负相关。而土壤 NO_3^- -N 含量与肥料类型和土壤 pH 表现为极显著正相关, 与 DMPP 添加量则呈极显著负相关。DMPP 对土壤的硝化抑制活性与配施的肥料类型呈极显著负相关, 与土壤 pH 呈显著正相关($P<0.05$)。铵硝比与肥料类型和土壤 pH 呈极显著负相关, 与 DMPP 添加量呈极显著正相关。氨挥发量与 DMPP 添加量和土壤 pH 呈极显著正相关。



(图中*、**分别表示在 $P<0.05$ 、 $P<0.01$ 水平显著相关)

图 4 氮素转化与不同变量之间的 Pearson 相关性
Fig. 4 Pearson correlations between nitrogen conversion and different variables

3 讨论

3.1 DMPP 与不同氮肥配施对土壤硝化过程抑制效果的影响

本研究结果表明, DMPP 与氮肥配施显著抑制了土壤硝化过程, 这与前人的研究结果相似。Lan 等^[21]研究表明, 1% 的 DMPP 可减缓土壤总硝化速率 50.30% ~ 56.60%; 赵宇晴等^[22]的研究也指出, DMPP

与氮肥配施显著降低了土壤中 NO_3^- -N 的累积量, 降幅在 13.07% ~ 62.32%; 李学红等^[23]亦指出, 与尿素合用的 DMPP 能有效抑制 NH_4^+ -N 硝化, 从而减少氮素的损失。因此, 结合硝化抑制剂的氮肥施用策略被证实是有效抑制土壤硝化作用的途径。本试验中, 在酸性土壤条件下施用 DMPP 与尿素和复合肥的处理显示, 至培养 5 d 时 NH_4^+ -N 含量上升, NO_3^- -N 含量亦相应增加, 这可能是由于在本试验条件下, DMPP 与脲铵氮肥和复合肥配施刺激了土壤微生物群落活性变化, 促进了土壤中有机氮的矿化, 从而转化出更多的 NH_4^+ -N 和 NO_3^- -N。

从研究结果来看, DMPP 与硫硝酸铵配施对土壤硝化过程的抑制效果最差, 这可能是由于 DMPP 的使用量受肥料中酰胺态氮和 NH_4^+ -N 总量的影响, 而硫硝酸铵中除含有部分 NH_4^+ -N 外, 还有一部分氮素为 NO_3^- -N, DMPP 对 NO_3^- -N 不发挥作用, 外加肥料本身 NO_3^- -N 含量的加持, 导致测定结果中 DMPP 与硫硝酸铵配施的整体硝化抑制效果最差^[24]。因此, 在稳定性肥料生产过程中要充分考虑肥料所含氮素形态, 并选择适宜的肥料类型以最大限度地发挥 DMPP 的优势。

本研究进一步表明, 在碱性土壤环境中, 各类氮肥配施 DMPP 的硝化抑制效果优于酸性土壤中, 这与已有文献报道相吻合, 可能是由于碱性土壤中硝化细菌活性较强、土壤本底硝化速率较高所导致的^[25-26]。DMPP 的作用效率不仅受土壤 pH 影响, 而且与配施氮肥的氮素形态相关。不同形态氮素在土壤中的转化机制不同, 这或许解释了 DMPP 与不同类型氮肥配施所展示的差异化作用效果。在碱性土壤中, 酰胺态氮和 NH_4^+ -N 在转化过程中受硝化作用影响较大, 而 NO_3^- -N 因不易被土壤吸附而易被淋失^[27-28]。因此, 向酰胺态氮肥与铵态氮肥中添加 DMPP 在碱性土壤条件下能更为有效地抑制硝化作用, 减少氮肥流失。综合以上因素, 硝化抑制剂与不同氮肥配施在不同土壤条件下将展现不同的作用效果。

3.2 DMPP 与不同氮肥配施对土壤氨挥发的影响

DMPP 对硝化过程的抑制作用可能导致铵态氮肥或酰胺态氮肥更多地以氨的形式挥发损失, 加剧氨挥发损失的风险^[11]。在高珊等^[29]的研究中, 60% 田间持水量条件下, 施用 DMPP 使土壤累积氨挥发量显著增加 9.60% ~ 20.70%。然而, 本研究结果发现, DMPP 与硫硝酸铵配施时对氨挥发的影响较小。苏芳等^[30]研究也发现, 在尿素和硫硝酸铵的对比中,

硫硝酸铵的氨挥发损失比尿素少 8.30%。这可能是由于硫硝酸铵属生理酸性肥料, 施用后能降低土壤 pH, 减弱了土壤 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 的氨挥发趋势。在氨挥发较强的碱性土壤中, 或进行肥料配方设计时, 可以考虑使用硫硝酸铵替代常用氮肥, 以降低氨挥发损失。

本研究显示, 草酰胺处理的土壤在培养前 3 d 氨挥发现象不明显, 在培养 3~10 d 时氨挥发量迅速增加。这可能与草酰胺中的酰胺态氮需要先经过土壤中脲酶以及微生物的作用, 水解成碳酸铵或碳酸氢铵等 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 有关^[27]。沈晓忆等^[31]研究发现, 单施尿素会促进主导土壤硝化过程的氨氧化细菌(AOB)迅速繁殖, 加快硝化作用的发生, 而硝化抑制剂与尿素配施则抑制了 AOB 的生长, 对反硝化细菌的影响则相反, 有轻微促进作用。因此, 使用硝化抑制剂时最好与其他氨挥发减排措施相结合, 以更好地发挥其增效减排作用。

土壤 pH 对硝化抑制剂作用效果的影响较为复杂。一般来说, 在 pH 较高的土壤上, 硝化活性也较高, 有利于 DMPP 硝化抑制效果的发挥。但此时土壤微生物的活性也较高, 可能对 DMPP 的作用效果产生影响, 也可能增加土壤氨挥发的风险。本研究结果表明, 在碱性环境下, 铵态氮肥的氨挥发损失更为严重, 这可能是由于在碱性土壤条件下, 肥料中的 NH_4^+ 会与更多的 OH^- 反应生成 NH_3 , 加剧氨挥发损失^[32]。在徐丽萍等^[33]的氨挥发试验中, 土壤 pH 由大到小为潮土>灰漠土>红壤, 培养 28 d 时的累积氨挥发量大小与 pH 一致, 潮土累积氨挥发量最大, 为 0.53 mg/kg, 红壤仅为 0.10 mg/kg。本研究结果表明, 土壤 pH 与氨挥发量呈极显著的正相关关系($r=0.803$), 这表明土壤 pH 越高, 氨挥发量越大, 这与前人研究结果一致^[34]。因此, 在添加硝化抑制剂的稳定性肥料生产和推广过程中, 需要综合考虑氮素形态、土壤条件等因素的影响, 因地制宜选用硝化抑制剂与氮肥配施。

4 结论

DMPP 与不同类型的氮肥配施均能有效抑制土壤中 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 向 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 的转化, 从而减少 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 的淋洗损失风险, 且在碱性土壤中的效果优于在酸性土壤中的效果。然而, DMPP 的添加会增加土壤氨挥发的风险, 不过这也与肥料类型、DMPP 添加量以及土壤 pH 等条件有关。碱性土壤中的氨挥发量显著高于酸性土壤。草酰胺处理中以酰胺态氮为主的情况下, 氨挥发的增加最为显著。另外, DMPP 与以 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 为

主的酸性氮肥硫硝酸铵配施时, 对土壤氨挥发的影响并不显著。肥料类型对土壤中铵硝变化有显著影响, 而 DMPP 的添加量和土壤的 pH 也对土壤中铵硝的变化和氨挥发产生重要影响。因此, 未来的研究应该在多种氮源养分供应的背景下, 基于硝化抑制剂进行氮阻控研究, 以更好地评估硝化抑制剂的有效性, 并推动其推广和应用。

参考文献:

- Heffer P, Gruère A, Roberts T. Assessment of fertilizer use by crop at the global level 2014-2014/15[R]. International Fertilizer Industry Association, 2017.
- 任科宇, 段英华, 徐明岗, 等. 施用有机肥对我国作物氮肥利用率影响的整合分析[J]. 中国农业科学, 2019, 52(17): 2983-2996.
- 巨晓棠, 张福锁. 关于氮肥利用率的思考[J]. 生态环境, 2003, 12(2): 192-197.
- 巨晓棠. 氮肥有效率的概念及意义——兼论对传统氮肥利用率的理解误区[J]. 土壤学报, 2014, 51(5): 921-933.
- 周伟, 吕腾飞, 杨志平, 等. 氮肥种类及运筹技术调控土壤氮素损失的研究进展[J]. 应用生态学报, 2016, 27(9): 3051-3058.
- 贾树龙. 氮肥增效剂的作用与应用技术[J]. 河北农业科技, 1998(3): 25.
- 李学文, 李树营, 王齐龙, 等. 减氮配施脲酶/硝化抑制剂对冬瓜品质、产量和土壤氮磷淋失的影响[J]. 中国瓜菜, 2021, 34(1): 55-59.
- 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.
- 曾祥明, 肖焱波, 段慧明. 硝化抑制剂 DMPP 在肥料上的应用[J]. 长江蔬菜, 2015(7): 64-65.
- Qiao C L, Liu L L, Hu S J, et al. How inhibiting nitrification affects nitrogen cycle and reduces environmental impacts of anthropogenic nitrogen input[J]. Global Change Biology, 2015, 21(3): 1249-1257.
- 马芬, 杨荣全, 郭李萍. 控制氮肥施用引起的活性氮气体排放: 脲酶/硝化抑制剂研究进展与展望[J]. 农业环境科学学报, 2020, 39(4): 908-922.
- Pan B B, Lam S K, Mosier A, et al. Ammonia volatilization from synthetic fertilizers and its mitigation strategies: A global synthesis[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2016, 232: 283-289.
- 刘发波, 马笑, 张芬, 等. 硝化抑制剂对我国蔬菜生产产量、氮肥利用率和氧化亚氮减排效应的影响: Meta 分析[J]. 环境科学, 2022, 43(11): 5140-5148.
- 李俊, 陈驰, 张弘, 等. 缓释肥料草酰胺合成工艺及其性能[J]. 江苏农业科学, 2019, 47(21): 290-293.
- 段付岗, 段勤国. 草酰胺和尿素的相似性与差异性研究及建议[J]. 中氮肥, 2021(6): 1-6.
- 胡波. 脲铵氮肥是提高氮肥利用率的有效途径[J]. 中国农资, 2013(13): 25.
- 鲁如坤. 土壤农化分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 1999.

- [18] 中华人民共和国农业农村部. 肥料增效剂 硝化抑制剂 使用规程: NY/T 3504—2019[S]. 北京: 中国标准出版社, 2019.
- [19] 孙克君, 毛小云, 卢其明, 等. 几种控释氮肥减少氨挥发的效果及影响因素研究[J]. 应用生态学报, 2004, 15(12): 2347–2350.
- [20] 吴艳香. 土壤氨挥发方法优选及不同 pH 值的影响[J]. 贵州科学, 2017, 35(5): 85–90.
- [21] Lan T, Li M X, He X Q, et al. Effects of synthetic nitrification inhibitor (3, 4-dimethylpyrazole phosphate; DMPP) and biological nitrification inhibitor (methyl 3-(4-hydroxyphenyl) propionate; MHPP) on the gross N nitrification rate and ammonia oxidizers in two contrasting soils[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2022, 58(3): 333–344.
- [22] 赵宇晴, 杨迎, 田晓楠, 等. 减氮配施硝化抑制剂与菌剂对温室黄瓜产量品质和土壤氮素损失的影响[J]. 水土保持学报, 2023, 37(4): 367–277.
- [23] 李学红, 李东坡, 武志杰, 等. 添加 NBPT/DMPP/CP 的高效稳定性尿素在黑土和褐土中的施用效应[J]. 植物营养与肥料学报, 2021, 27(6): 957–968.
- [24] 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(10): 1461–1465.
- [25] 刘发波, 郎明, 马笑, 等. 硝化抑制剂类型和剂量对不同类型土壤硝化抑制作用机理的研究[J]. 中国土壤与肥料, 2022(8): 66–75.
- [26] 张昊青, 赵学强, 张玲玉, 等. 石灰和双氰胺对红壤酸化和硝化作用的影响及其机制[J]. 土壤学报, 2021, 58(1): 169–179.
- [27] 段付岗. 草酰胺缓释氮肥的特性分析及建议[J]. 磷肥与复肥, 2021, 36(5): 18–20.
- [28] 张庆利, 张民, 杨超越, 等. 碳酸氢铵和尿素在山东省主要土壤类型上的氨挥发特性研究[J]. 土壤通报, 2002, 33(1): 32–34.
- [29] 高珊, 郭艳杰, 张丽娟, 等. 温室土壤不同含水量下施用 DCD 和 DMPP 对 N_2O 排放及 NH_3 挥发的影响[J]. 河北农业大学学报, 2019, 42(4): 95–101.
- [30] 苏芳, 黄彬香, 丁新泉, 等. 不同氮肥形态的氨挥发损失比较[J]. 土壤, 2006, 38(6): 682–686.
- [31] 沈晓忆, 夏周围, 张洁, 等. 硝化抑制剂与尿素配施对旱地土壤温室气体排放及硝化微生物的影响[J]. 土壤, 2021, 53(3): 512–521.
- [32] 田光明, 蔡祖聪, 曹金留, 等. 镇江丘陵区稻田化肥氮的氨挥发及其影响因素[J]. 土壤学报, 2001, 38(3): 324–332.
- [33] 徐丽萍, 王旭, 侯晓娜, 等. 脲酶抑制剂 NBPT 对三种类型土壤中 UAN 氮溶液氮素转化和氨挥发的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2022(3): 126–136.
- [34] Gao J C, Luo J F, Lindsey S, et al. Effects of soil properties on urea-N transformation and efficacy of nitrification inhibitor 3, 4-dimethylpyrazole phosphate (DMPP)[J]. *Soil Science and Plant Nutrition*, 2022, 68(1): 228–237.