

doi: 10.11838/sfsc.1673-6257.21345

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

刘发波^{1, 2}, 郎明^{1, 2}, 马笑^{1, 2}, 程泰鸿^{1, 2}, 张芬^{1, 2}, 郭广正^{1, 2},
陈新平^{1, 2, 3}, 王孝忠^{1, 2, 3*}

(1. 西南大学资源环境学院, 重庆 400716; 2. 西南大学农业科学研究院, 重庆 400716;
3. 西南大学长江经济带农业绿色发展中心, 重庆 400716)

摘要: 氮肥配施硝化抑制剂是提高氮肥利用率、减少活性氮损失和降低环境代价风险的有效措施。为探讨不同硝化抑制剂类型和剂量对不同类型土壤硝化作用的机理, 采用室内土壤培养试验, 对3种硝化抑制剂[双氰胺(DCD)、3, 4-二甲基吡啶磷酸盐(DMPP)和2-氯-6-(三氯甲基)吡啶(NP)]设置不同剂量, 研究其对我国不同区域典型土壤(红壤、水稻土、潮土)硝化过程无机氮含量、土壤pH值及土壤表观硝化率变化特征的影响。结果表明, 与单施硫酸铵处理相比, 3种硝化抑制剂均能抑制水稻土和潮土中铵态氮向硝态氮的转化, 且对潮土铵态氮向硝态氮转化抑制效果优于水稻土, 而对红壤硝化作用的抑制效果均不明显, 3种土壤pH值差异是影响硝化抑制剂作用效果的主因。此外, DCD和NP随着用量的增加, 对水稻土和潮土的硝化抑制效果越明显, 而DMPP对2种土壤硝化抑制作用无明显的剂量效应。在水稻土中, NP的抑制效果强于DMPP和DCD; 在潮土中, DCD的抑制效果优于NP和DMPP, 这可能是由于不同硝化抑制剂类型硝化抑制机理性的差异以及其自身特性的差异导致的。综上, 针对特定土壤类型筛选适宜的硝化抑制剂类型和用量对农业优化氮肥管理、提高氮肥利用率尤为重要。

关键词: 红壤; 水稻土; 潮土; 硝化抑制剂; 表观硝化率

氮素是保证作物正常生长发育必需的营养元素之一, 也是对作物产量和品质形成起重要作用的元素^[1]。2010年以来, 我国氮肥生产量年均4396万t, 农用氮肥施用量年均2320万t, 单位面积施用量远高于美国和欧盟水平, 但氮素利用效率低于世界平均水平^[2]。过量施用氮肥会造成其通过硝化-反硝化等途径损失进入环境, 导致N₂O排放、NO₃⁻-N淋溶损失、氨挥发、土壤酸化等一系列生态环境问题, 加剧了环境污染的风险并威胁人体健康^[3-5]。因此, 如何减少氮肥的施用, 降低环境代价风险, 同时促进农作物稳产增收已经成为我国集约化农业绿色生产亟待解决的难题。

硝化抑制剂(NIs)是一类能够延缓土壤中铵态氮向硝态氮转化的化合物, 延长铵态氮在土壤中存留的时间, 增加土壤对铵态氮生物吸收和吸附^[6-7], 因而被认为是提高氮肥利用率和减少活性氮损失的有效调控手段。尽管硝化抑制剂种类很多, 但在目前的农业系统中, 双氰胺(DCD)、3, 4-二甲基吡啶磷酸盐(DMPP)和2-氯-6-(三氯甲基)吡啶(NP)是广泛使用的商业化硝化抑制剂^[8]。科学家通过Meta分析表明, NIs可以提高氮肥利用率(NUE)4%~18%, 减少37%~48%的氮淋洗损失以及38%~57%的N₂O和NO排放^[9-12]。硝化抑制剂受硝化抑制剂类型及用量、自身的理化特性、土壤与环境条件、田间管理等因素影响, 不同土壤类型施用效果变异较大^[13-14]。因此, 要取得理想的硝化抑制效果需要适宜的硝化抑制剂类型和剂量。然而, 目前的研究主要集中于针对一种土壤类型比较不同硝化抑制剂类型、不同剂量的硝化抑制效果或者针对不同土壤类型比较同种硝化抑制剂不同剂量的硝化抑制效果^[15-18]。对从

收稿日期: 2021-06-17; 录用日期: 2021-08-22

基金项目: 三峡库区多尺度多介质污染物与水体环境互馈机制及防控机理研究(U20A2047); 西南大学博士启动基金项目(SWU118077)。

作者简介: 刘发波(1997-), 硕士研究生, 主要从事养分资源管理与调控。E-mail: 981381250@qq.com。

通讯作者: 王孝忠, E-mail: wxz20181707@swu.edu.cn。

类型和剂量上把目前几种主要硝化抑制剂对不同类型土壤的硝化作用机理进行系统比较的研究还尚不多见。

红壤、水稻土是我国南方地区主要的土壤类型, 约占全国耕地面积的 2/5^[19-20], 潮土是我国华北地区主要的土壤类型之一, 潮土区是我国冬小麦-夏玉米作物的主要产区^[21]。本研究选取了全国典型酸性土(广西红壤、安徽水稻土)、碱性土(河北潮土)开展为期 28 d 的静态土壤培养试验, 通过比较 DCD、DMPP 和 NP 3 种硝化抑制剂及不同剂量对不同类型土壤(红壤、水稻土、潮土)硝化作用的影响, 为不同土壤类型硝化抑制剂的合理应用和氮素优化管理提供理论基础和科学依据。

1 材料和方法

1.1 供试材料

供试肥料: 硫酸铵 (ASN), 分析纯, 含量 99.0%, 白色晶体。

供试硝化抑制剂: 双氰胺 (DCD)、3, 4-二甲基吡啶磷酸盐 (DMPP)、2-氯-6-(三氯甲基)吡啶 (NP)。

供试土壤: 广西红壤、安徽水稻土和河北潮土, 以上 3 种类型土壤均取自农田耕作表层土壤 (0 ~ 30 cm)。试验所用新鲜土样剔除杂物及残留根系, 经自然风干后过 2 mm 筛备用, 土壤基本理化性质见表 1。

表 1 供试土壤基本理化性质

土壤类型	取样地点	pH 值	有机质 ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	全氮 ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	硝态氮 ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	铵态氮 ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)
红壤	广西	4.52	9.97	0.96	48.13	0.88
水稻土	安徽	5.31	23.67	1.34	42.8	11.6
潮土	河北	8.28	16.46	0.94	79.2	0.6

1.2 研究方法

试验于 2019 年 10 ~ 11 月在国家紫色土肥力与肥料效益监测站进行, 采用室内土壤培养方法, 供试氮源为硫酸铵 $[(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4]$, 补充含氮量, 用量为 $\text{N } 200 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 每种土壤类型设置以下处理: 对照 (CK), 不施氮 (硫酸铵); 单施 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 处理 (ASN); ASN+DCD 处理, 设置 4 个 DCD 用量水平, 分别为施氮量的 2.5%、5%、10% 和 15%; ASN+NP 处理, 设置 4 个 NP 用量水平, 分别为施氮量的 0.25%、0.5%、1%、3%; ASN+DMPP 处理, 设置 4 个 DMPP 用量水平, 分别为施氮量的 0.5%、1%、2.5%、5%, 其中添加硝化抑制剂处理施氮量与单施硫酸铵处理施氮量相同, 每个处理 4 次重复。培养开始前将风干后过 2 mm 筛的土壤调节水分至 40% 田间持水量, 而后用黑色塑料布遮盖以防止土壤水分散失, 置于恒温培养箱中 25 °C、无光条件下预培养两周, 使土壤活化。预培养结束后测定土壤含水量, 根据土壤水分状况添加去离子水溶解硫酸铵和硝化抑制剂, 均匀喷洒于土壤表面并充分混匀, 装入 100 mL 白色塑料瓶 (口径 5 cm) 中, 每瓶装 50 g, 每个处理装 28 瓶。置于 25 °C 的恒温培养箱培养, 培

养周期 28 d。培养期间, 每个处理都用 parafilm 保水透气膜包好, 用针扎数个小孔以创造好气环境, 相对含水量均匀保持在田间持水量的 65%, 风干土含水量 3% 计。采样 7 次, 分别在培养后的第 0、2、4、7、14、21 和 28 d 破坏性取样。培养期间每周采用称重法补水 2 次, 使土壤含水量保持在田间持水量的 65%, 并使补水后土壤充分混匀。

1.3 测定方法及数据分析

土壤 pH 值采用电位法测定 (土水比 1 : 2.5); 土壤含水量测定采用烘干法测定; 土壤有机质采用重铬酸钾氧化-容量法测定; 土壤全氮采用凯氏定氮法测定; 土壤中铵态氮、硝态氮采用 $0.01 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1} \text{ CaCl}_2$ 溶液浸提在 $180 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 振荡器中振荡 1 h, 浸提液使用 3-AA3 型 (Auto-Analyzer III, Bran + Luebbe, Norderstedt, Germany) 连续流动分析仪测定土壤铵态氮和硝态氮含量。

土壤表观硝化率根据下式计算: 土壤表观硝化率 (%) = 硝态氮含量 / (硝态氮含量 + 铵态氮含量) $\times 100$ 。

对试验结果采用双因素方差分析, 分析土壤类型和硝化抑制剂类型对表观硝化率、无机氮

含量、铵硝比的交互作用和主要影响；采用主成分分析 (PCA) 确定硝化抑制剂对土壤硝化作用抑制效果的主导因素；所有数据均采用 Excel 2010、SPSS 18.0、Origin 2018 进行统计分析，采用 Duncan 最小显著极差法进行差异显著性检验 ($P < 0.05$)。

2 结果与分析

2.1 不同类型和用量的抑制剂对不同土壤 pH 值的影响

由图 1 可知，随着培养时间的延长，ASN 处

理的水稻土和潮土土壤 pH 值明显下降，培养前后土壤 pH 值分别下降了 1.30 和 0.16 个单位。3 种硝化抑制剂均能够延缓水稻土和潮土土壤 pH 值的下降，且随着硝化抑制剂浓度的增加，延缓土壤 pH 值下降的效果越好，至培养结束时，各剂量 DCD、NP、DMPP 处理水稻土的土壤 pH 值分别比 ASN 处理高 0.29 ~ 0.81、0.37 ~ 0.65、0.39 ~ 0.44 个单位。3 种硝化抑制剂在潮土中延缓酸化的作用总体表现为：DCD > NP > DMPP。与 ASN 处理相比，3 种硝化抑制剂对于红壤 pH 值影响差异均不显著。

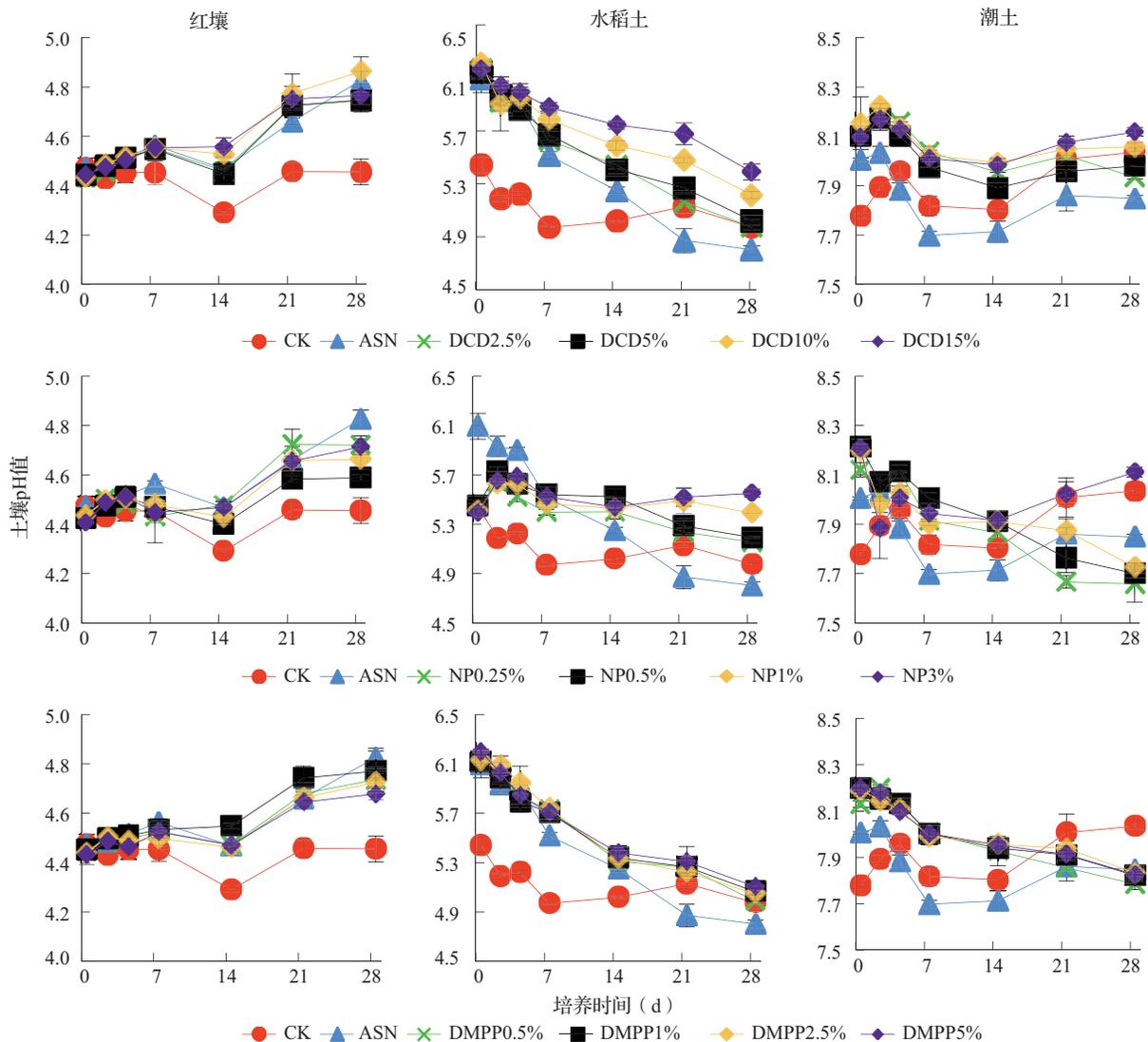


图 1 不同硝化抑制剂类型和剂量对土壤 pH 值的影响

2.2 不同抑制剂对不同土壤无机氮转化的影响

由图 2 可知，随着培养时间的延长，添加 ASN 处理的水稻土和潮土硝态氮含量显著增加

($P < 0.05$)，红壤硝态氮含量培养前后无显著差异 ($P > 0.05$)。至培养的第 14 d，潮土的硝态氮含量达到峰值，而后不再增加，水稻土至培养结束时硝化

作用仍在进行,表明潮土硝化作用强于水稻土。在水稻土和潮土上,添加硝化抑制剂的培养期间硝态氮含量均不同程度低于 ASN 处理;此外,随着 DCD 和 NP 剂量的增加,硝态氮含量明显降低,而 DMPP 处理无明显剂量效应。然而,在红壤中 3 种硝化抑制剂处理培养前后硝态氮含量无显

著差异,各剂量处理之间也无显著差异。DCD、NP、DMPP 各剂量处理的水稻土在第 21 d 时硝态氮的平均含量分别为 56.1、46.4、69.6 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,较 ASN 处理分别降低了 42.8%、52.7%、29.1%,在潮土中的平均含量分别为 207.3、224.8、231.8 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,较 ASN 处理分别降低了 40.5%、35.5%、33.5%。

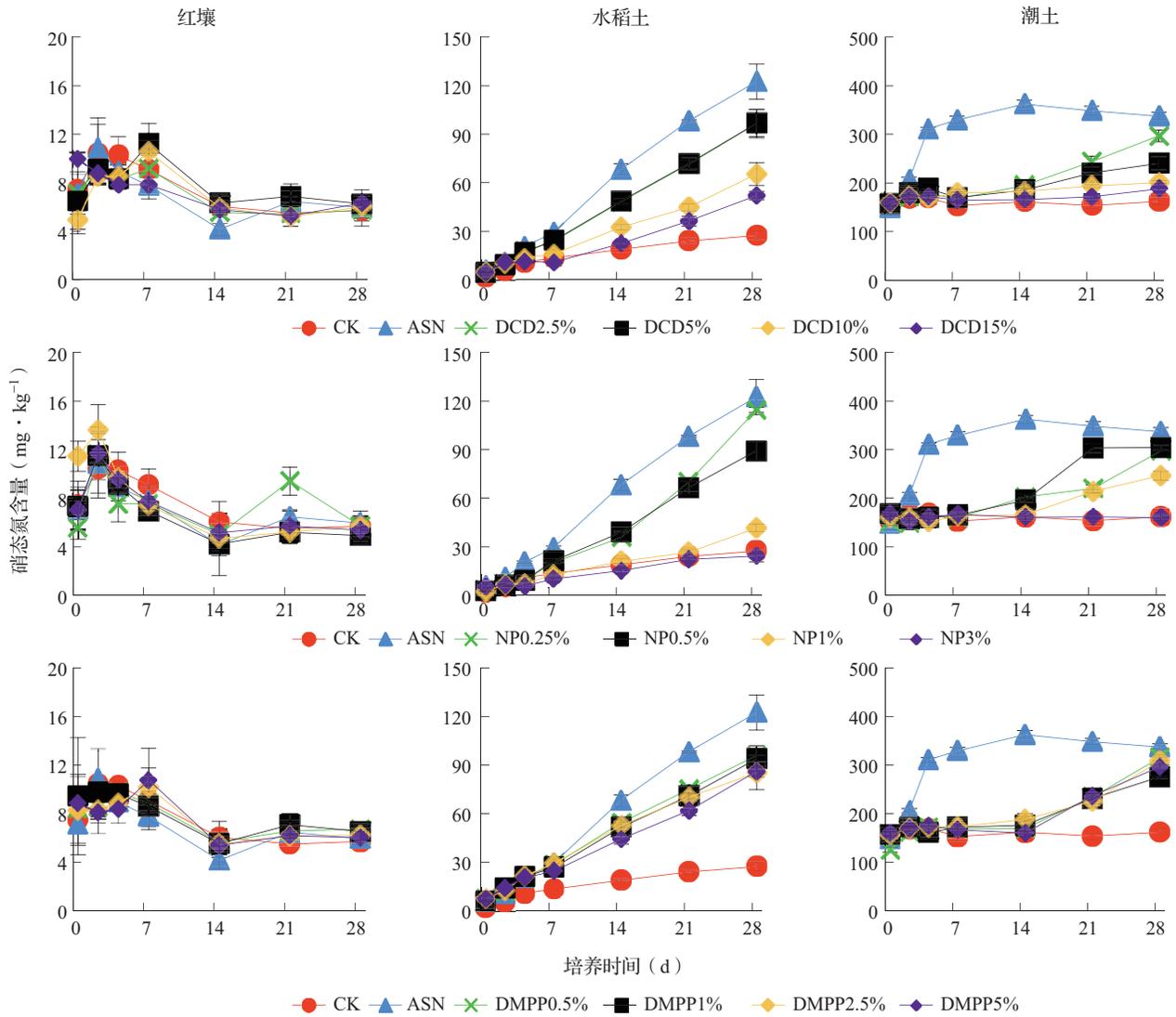


图 2 不同硝化抑制剂类型和剂量条件下红壤、水稻土、潮土中硝态氮含量的动态变化

由图 3 可知,添加 ASN 处理的水稻土和潮土铵态氮含量迅速增加,而后随着培养时间的延长,水稻土中的铵态氮逐渐下降,培养结束时仍保持较高水平;而潮土中的铵态氮第 4 d 迅速下降到 $1.2 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,第 14 d 时则完全转化为其他氮形态,红壤则随着时间的延长显著增加,且不同剂量之间无明显差异。各剂量硝化抑制剂处理的水稻土和潮土铵态氮含量均不同程度高于 ASN 处理,而各剂量硝化

抑制剂处理红壤与 ASN 处理无显著差异 ($P>0.05$)。同一时间点,添加 DCD 和 NP 处理的水稻土和潮土铵态氮含量随着硝化抑制剂剂量的增大而增加,而 DMPP 不同剂量处理间水稻土和潮土铵态氮含量差异不显著 ($P>0.05$)。相较于 ASN 处理,在第 14 d 时,各剂量 DCD、NP、DMPP 处理的水稻土铵态氮平均含量分别增加了 17.6、3.9、8.4 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,潮土的铵态氮平均含量分别增加了 40.3、37.5、43.2 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$;

至培养的第 28 d 时, DCD、NP、DMPP 各剂量处理的水稻土铵态氮平均含量较第 14 d 分别为 67.3、

72.9、57.4 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 潮土的铵态氮平均含量分别为 29.14、12.2、2.67 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

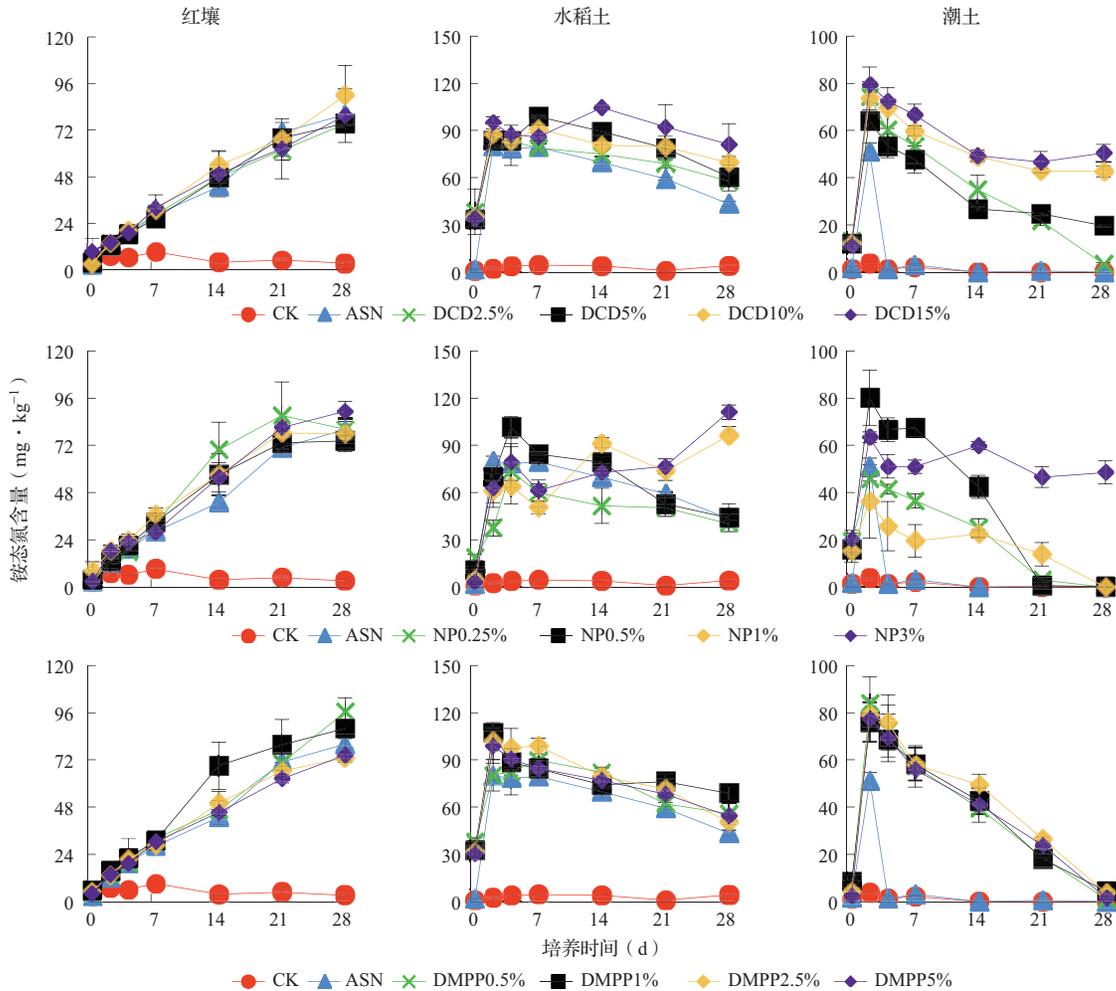


图 3 不同硝化抑制剂类型和剂量条件下红壤、水稻土、潮土中铵态氮含量的动态变化

2.3 不同抑制剂对不同土壤表观硝化率的影响

由图 4 可知, ASN 处理的水稻土、潮土硝化作用发生强烈, 在培养期间表观硝化率分别可增加到 86.5%、100%, 而各硝化抑制剂均可显著降低水稻土和潮土的表观硝化率。DCD 和 NP 处理对水稻土和潮土表观硝化率均表现出较为明显的剂量效应, 然而, DMPP 对这 2 种土壤的表观硝化率均无明显的剂量效应。DCD、NP、DMPP 各剂量处理的水稻土和潮土在第 14 d 的表观硝化率平均值分别为 30.3%、82.0%、27.7% 和 83.0%、39.3% 和 80.1%。然而, 在红壤上, 各剂量处理 3 种硝化抑制剂间与 ASN 处理各培养时期土壤表观硝化速率没有显著变化。

由表 2 可知, 土壤类型和硝化抑制剂类型显著影响了土壤硝化作用。在水稻土中, DCD 和 NP 处

理的表观硝化率平均值显著低于 DMPP 处理, 而 NP 处理的铵硝比显著高于 DCD 和 DMPP 处理, 说明 NP 处理在水稻土中延缓铵态氮向硝态氮转化的能力强于 DMPP 和 DCD 处理。在潮土中, DCD 处理的表观硝化率显著低于 NP 和 DMPP 处理, 铵硝比显著高于 NP 和 DMPP 处理, 表明 DCD 处理对潮土硝化作用的抑制效果优于 NP 和 DMPP 处理。利用主成分分析 (PCA) 分析了土壤理化性质 (pH 值、无机氮含量、有机质含量和碳氮比) 和硝化抑制剂浓度等主要因素与土壤表观硝化率的关系 (图 5)。主成分分析筛选出 2 个主成分, 累积方差达 83.8%。土壤 pH 值、硝态氮含量与土壤表观硝化率存在较强的正相关, 而碳氮比、有机质含量与表观硝化率相关性较弱, 硝化抑制剂浓度、铵硝比与土壤表观硝化率存在负相关性。

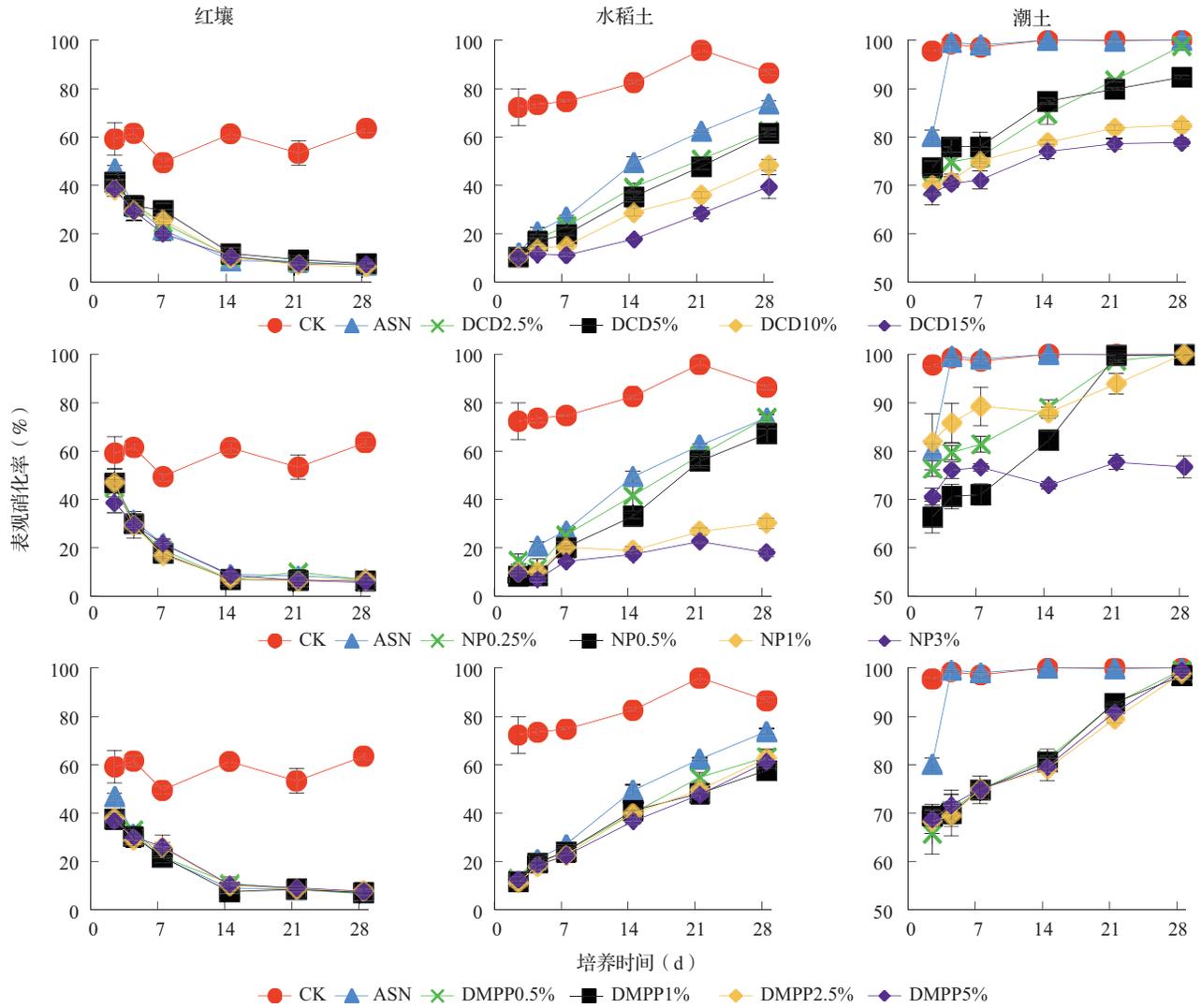


图 4 不同硝化抑制剂类型和剂量对土壤表观硝化率的影响

表 2 不同土壤类型和硝化抑制剂类型对土壤硝化作用的影响 (第 21 d)

土壤类型	硝化抑制剂类型	表观硝化率 (%)	硝态氮 ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	铵态氮 ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	铵硝比 (%)
红壤	DCD	8.0ab	5.7a	64.8b	1249.1a
	NP	7.3b	6.4a	79.9a	1328.9a
	DMPP	8.6b	6.5a	69.7b	1077.3a
水稻土	DCD	40.8b	56.1b	79.9a	159.4b
	NP	40.8b	46.4b	63.4b	192.7a
	DMPP	50.0a	69.6a	69.6b	100.6c
潮土	DCD	85.5b	207.2a	34.1a	17.4a
	NP	92.5a	224.8a	16.1b	9.2b
	DMPP	91.4a	231.8a	21.8b	9.4b
土壤类型 (S)		***	***	***	***
硝化抑制剂类型 (N)		**	*	**	*
S × N		*	*	***	ns

注: 同一土壤类型每列相同字母表示差异不显著 ($P>0.05$)。* 代表 0.05 水平差异显著, ** 代表 0.01 水平差异显著, *** 代表 0.001 水平差异显著, ns 代表没有显著性差异 ($P>0.05$)。

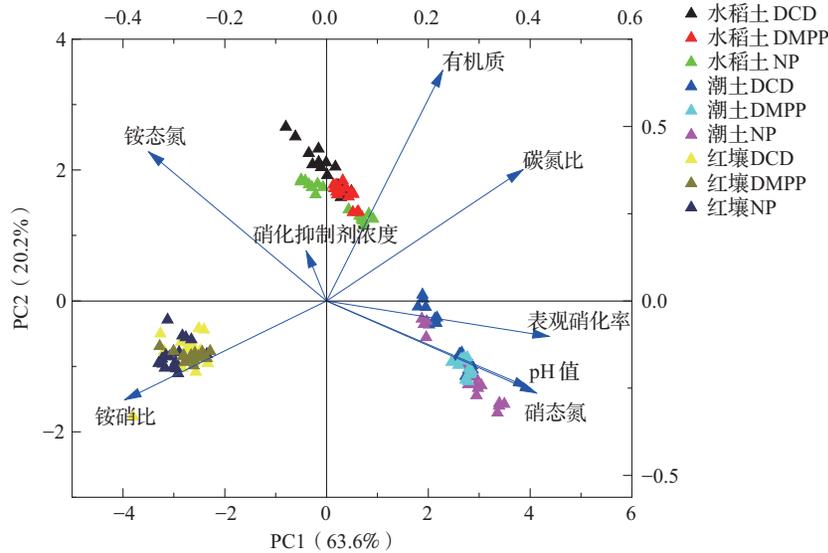


图5 土壤表观硝化率与土壤理化性质、硝化抑制剂浓度的主成分分析

3 讨论

土壤 pH 值是调控土壤硝化过程的关键因素, 先前研究表明, 在 pH 为 5.0 ~ 8.0 的范围内, 硝化速率与土壤 pH 值呈正相关^[22]。土壤 pH 值是调控硝化抑制剂抑制硝化作用效果的主要因素(图 5), 在一定范围内, 随着土壤 pH 值的增大, 硝化抑制剂的作用效果越明显^[23]。本研究的 3 种土壤中, 碱性潮土的硝化作用强于水稻土和红壤, 其中红壤的硝化能力最弱, 进而导致 3 种硝化抑制剂整体上对潮土和水稻土的硝化抑制剂作用强于酸性红壤。与之前的研究结果一致^[24]。在第 14 d 时, 与 ASN 处理相比, 各硝化抑制剂处理的水稻土、潮土表观硝化率分别降低 10.1% ~ 21.8%、17.0% ~ 18.0%, 而红壤中各硝化抑制剂处理间的表观硝化率均无显著差异。导致这一差异可能的原因是土壤 pH 值主导着氨氧化微生物的生态位, 研究表明^[25], 氨氧化古菌(AOA)主导着酸性土壤的硝化作用, 氨氧化细菌(AOB)主导着中性和碱性土壤的硝化作用。Beeckman 等^[26]基于文献总结发现, DCD、DMPP 和 NP 这 3 种硝化抑制剂对 AOB 的抑制效果显著高于 AOA。一方面是由于 AOB 的丰度随着土壤环境 pH 值的增大被显著抑制, 另一方面可能是由于基本代谢和细胞之间的差异, 细菌相对古菌更容易受到抑制的影响^[20], 硝化抑制剂主要通过抑制环境中主导硝化微生物菌群的生长, 从而抑制硝化过程。这也可能是本研究中 3 种硝化抑制剂在潮土和水稻土的抑制效果要强于红壤的

原因。

硝化抑制剂类型对不同土壤类型的表观硝化率和铵硝比有显著影响(表 2), 导致不同硝化抑制剂类型的抑制效果存在显著差异。本研究中, 在水稻土中, NP 的抑制效果强于 DMPP 和 DCD; 在潮土中, DCD 的抑制效果优于 NP 和 DMPP。这与赖晶晶等^[27]研究结果一致, 其研究表明, 不同硝化抑制剂类型对不同 pH 值紫色土硝化过程的抑制效果不一致。导致此差异的主要原因在于: 一方面, 大多数硝化抑制剂通过抑制硝化作用过程中第一个步骤(氨氧化过程)的氨单加氧酶(AMO)活性以实现延缓硝化作用的目的, 不同的硝化抑制剂类型具有不同的硝化抑制机理^[13], 因此对氨氧化微生物的作用效果也有所差异。有研究表明, DCD 和 DMPP 属于金属螯合抑制剂, 能与氨 AMO 中 *amoB* 亚基的活性位点铜螯合, 使氨氧化微生物中 AMO 活性降低, 进而影响氨氧化微生物的丰度和群落结构, 最终抑制氨氧化过程, 且该 2 种硝化抑制剂对 AOB 丰度的抑制效果强于对 AOA 丰度的抑制效果^[26, 28]。NP 可直接与 AMO 结合产生不可逆失活的氨氧化产物, 从而抑制氨氧化过程, 对 AOA 和 AOB 丰度都有抑制作用, 其抑制效果强弱主要取决于硝化过程主导的氨氧化微生物种群^[26, 28-29]。另外, 硝化抑制剂的自身结构特点也是影响抑制效果的关键因素。DCD 的水溶性较大, 在含水量较大且保水能力较弱的土壤中, 一旦遭遇强降雨会随水流失, 抑制效果降低^[30-31]; NP 在光照条件下易于分解, 造成挥发导致抑制效果不理

想,不宜表施^[32]; DMPP 迁移性较小,不易与土壤剖面中的铵态氮分离,低剂量 DMPP 也能保持较好的抑制效果^[30]。

硝化抑制剂用量是影响土壤硝化作用抑制效果的重要因素(图5),总体而言,随着剂量的增大,对硝化作用的抑制效果越明显^[33-34]。DCD 和 NP 对水稻土和潮土的硝化抑制作用表现出明显的剂量效应。然而,DMPP 对水稻土和潮土的硝化抑制作用无明显的剂量效应。当 DCD 和 NP 用量分别为纯氮用量的 5%~10% 和 0.5%~1.0% 时,即可有效抑制水稻土和潮土硝态氮向铵态氮的转化。与刘倩等^[34]和管西林等^[35]研究结果一致。有研究表明,DMPP 不同用量在大宗土壤中硝化作用的抑制效果无明显差异^[33,36],与本研究结果一致,可能的原因是 DMPP 在土壤中比较容易被土壤胶体吸附^[30],且在土壤剖面中不易与铵态氮分离^[37]。本研究结果显示,在水稻土和潮土中 DCD、NP 的硝化抑制剂效果均优于 DMPP,然而,一项基于全球土壤数据的整合分析表明,DMPP 在中性或碱性土壤上对由硝化作用导致的硝酸盐淋洗损失降低效果要好于 DCD 和 NP^[25],这可能与土壤质地、有机质含量等理化性质关系强烈。由于红壤 pH 值较低,土壤硝化作用比较弱,不同硝化抑制剂不同用量对红壤的硝化作用抑制效果均不显著,Wang 等^[38]的结果显示,酸性紫色土的硝化作用强度显著低于中性、碱性紫色土,而随着土壤 pH 值的降低,硝化抑制剂对硝化过程的抑制效果随之降低^[39]。张昊青等^[20]研究表明,适宜量的石灰和硝化抑制剂结合施用,不仅能够减缓酸性红壤的酸化,而且能够抑制硝化作用,降低硝态氮的潜在环境风险。

大量研究证实,在我国蔬菜^[40]、水稻^[41]、玉米^[42]等不同作物生产系统中,氮肥配施硝化抑制剂能够提高氮肥利用率的同时增加作物产量。然而,因地域环境、气候条件的差异导致我国土壤类型众多,而硝化抑制剂的作用效果因土壤类型而大有差异,因此,要结合当地的气候条件、生态环境因地制宜的选择最佳硝化抑制剂类型,同时还应考虑剂量的大小带来的环境效益。今后的研究中应结合我国农业生产特性加强室内培养试验和大田示范性研究的结合,从微观角度进一步揭示硝化抑制剂的作用机理,加快硝化抑制剂在我国推广应用的进程。

4 结论

3 种硝化抑制剂均可延缓水稻土和潮土的酸化作用,对红壤 pH 值影响不显著。由于潮土和水稻土硝化能力强,3 种硝化抑制剂均可显著抑制潮土和水稻土硝化过程中的铵态氮向硝态氮转化过程,对该 2 种土壤硝化作用抑制效果好,且在碱性潮土中的硝化抑制效果要优于偏中性水稻土,由于酸性红壤自身硝化能力弱而在酸性红壤中的抑制效果均不明显。DCD 和 NP 对潮土和水稻土中硝化作用的效果有明显的剂量效应,当 DCD 和 NP 用量分别为纯氮用量的 5%~10% 和 0.5%~1.0% 时,作用效果最佳。硝化抑制剂类型对土壤表观硝化率有显著影响进而导致不同硝化抑制剂类型的抑制效果存在显著差异,在水稻土中,NP 的抑制效果强于 DMPP 和 DCD; 在潮土中,DCD 的抑制效果优于 NP 和 DMPP,这些差异可能是由不同硝化抑制剂类型硝化抑制机理的差异以及其自身特性的差异导致的。

参考文献:

- [1] 冯伟,朱艳,姚霞,等. 小麦氮素积累动态的高光谱监测[J]. 中国农业科学, 2008, 41(7): 1937-1946.
- [2] 中华人民共和国统计局. 中国统计年鉴-2019[M]. 北京: 中国统计出版社, 2020.
- [3] Li Y, Xu J, Liu S, et al. Salinity-induced concomitant increases in soil ammonia volatilization and nitrous oxide emission [J]. *Geoderma*, 2020, 361: 114053.
- [4] Wang X, Liu B, Wu G, et al. Environmental costs and mitigation potential in plastic-greenhouse pepper production system in China: a life cycle assessment [J]. *Agricultural Systems*, 2018, 167: 186-194.
- [5] Hu H, Chen D, He J. Microbial regulation of terrestrial nitrous oxide formation: understanding the biological pathways for prediction of emission rates [J]. *FEMS Microbiology Reviews*, 2015, 39(5): 729-749.
- [6] Ma Q, Wu Z, Shen S, et al. Responses of biotic and abiotic effects on conservation and supply of fertilizer N to inhibitors and glucose inputs [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2015, 89: 72-81.
- [7] Rehcigl J E, Teel M R, Sparks D L. Ammonium fixation from urea as influenced by nitrapyrin [J]. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 1988, 19(14): 1583-1591.
- [8] Di H J, Cameron K C D. Ammonia oxidisers and their inhibition to reduce nitrogen losses in grazed grassland: a review [J]. *Journal of the Royal Society of New Zealand*, 2018, 48(2-3): 127-142.

- [9] Sha Z, Ma X, Wang J, et al. Effect of N stabilizers on fertilizer-N fate in the soil-crop system: a meta-analysis [J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2020, 290: 106763.
- [10] Liu S, Lin F, Wu S, et al. A meta-analysis of fertilizer-induced soil NO and combined NO+N₂O emissions [J]. *Global Change Biology*, 2017, 23 (6): 2520-2532.
- [11] Qiao C, Liu L, Hu S, 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.
- [12] Abalos D, Jeffery S, Sanz-Cobena A, et al. Meta-analysis of the effect of urease and nitrification inhibitors on crop productivity and nitrogen use efficiency [J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2014, 189: 136-144.
- [13] 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.
- [14] 宋涛, 尹俊慧, 胡兆平, 等. 脲酶/硝化抑制剂减少农田土壤氮素损失的作用特征 [J]. *农业资源与环境学报*, 2021, 38 (4): 585-597.
- [15] 宁建凤, 崔理华, 艾绍英, 等. 两种硝化抑制剂对土壤氮转化的影响 [J]. *农业工程学报*, 2015, 31 (4): 144-151.
- [16] 石美, 梁东丽, 满楠, 等. 不同浓度 DMPP 和 DCD 对石灰性土壤中氮素转化的影响 [J]. *中国农业科学*, 2012, 45 (22): 4635-4642.
- [17] 李兆君, 宋阿琳, 范分良, 等. 几种吡啶类化合物对土壤硝化的抑制作用比较 [J]. *中国生态农业学报*, 2012, 20 (5): 561-565.
- [18] 张妹婷. 石灰性土壤中不同硝化抑制剂的抑制效果及其机理探讨 [D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2010.
- [19] 董一漩, 屠乃美, 魏征. 不同基础肥力水稻土对施肥响应的差异性研究进展 [J]. *中国稻米*, 2019, 25 (5): 19-23.
- [20] 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.
- [21] 张英鹏, 李洪杰, 刘兆辉, 等. 农田减氮调控施肥对华北潮土区小麦-玉米轮作体系氮素损失的影响 [J]. *应用生态学报*, 2019, 30 (4): 1179-1187.
- [22] Peter M K, Alfred M B, Jason W E, et al. Soil pH effects on nitrification of fall-applied anhydrous ammonia [J]. *Soil Sci Soc Am J*, 2004, 68: 545-551.
- [23] Cui P, Fan F, Yin C, et al. Urea- and nitrapyrin-affected N₂O emission is coupled mainly with ammonia oxidizing bacteria growth in microcosms of three typical Chinese arable soils [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2013, 66: 214-221.
- [24] Yang M, Fang Y, Sun D, et al. Efficiency of two nitrification inhibitors (dicyandiamide and 3, 4-dimethylpyrazole phosphate) on soil nitrogen transformations and plant productivity: a meta-analysis [J]. *Scientific Reports*, 2016, 6 (1): 22075.
- [25] Li Y, Chapman S J, Nicol G W, et al. Nitrification and nitrifiers in acidic soils [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2018, 116: 290-301.
- [26] Beeckman F, Motte H, Beeckman T. Nitrification in agricultural soils: impact, actors and mitigation [J]. *Current Opinion in Biotechnology*, 2018, 50: 166-173.
- [27] 赖晶晶, 兰婷, 王启, 等. 硝化抑制剂对紫色土硝化作用及 N₂O 排放的影响 [J]. *农业环境科学学报*, 2019, 38 (6): 1420-1428.
- [28] Ruser R, Schulz R. The effect of nitrification inhibitors on the nitrous oxide (N₂O) release from agricultural soils: a review [J]. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 2015, 178: 171-188.
- [29] Woodward E E, Edwards T M, Givens C E, et al. Widespread use of the nitrification inhibitor nitrapyrin: assessing benefits and costs to agriculture, ecosystems, and environmental health [J]. *Environmental Science & Technology*, 2021, 55: 1345-1353.
- [30] Barth G, von Tucher S, Schmidhalter U, et al. Performance of nitrification inhibitors with different nitrogen fertilizers and soil textures [J]. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 2019, 182 (5): 694-700.
- [31] Marsden K A, Marín-Martínez A J, Vallejo A, et al. The mobility of nitrification inhibitors under simulated ruminant urine deposition and rainfall: a comparison between DCD and DMPP [J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2016, 52 (4): 491-503.
- [32] Sahrawat K L, Keeney D R, Adams S S. Ability of nitrapyrin, dicyandiamide and acetylene to retard nitrification in a mineral and an organic soil [J]. *Plant and Soil*, 1987, 101 (2): 179-182.
- [33] 王雪薇, 刘涛, 褚贵新. 三种硝化抑制剂抑制土壤硝化作用比较及用量研究 [J]. *植物营养与肥料学报*, 2017, 23 (1): 54-61.
- [34] 刘倩, 褚贵新, 刘涛, 等. DCD 在不同质地土壤上的硝化抑制效果和剂量效应研究 [J]. *中国生态农业学报*, 2011, 19 (4): 765-770.
- [35] 管西林, 王孝忠, 刘彬, 等. 三类土壤不同酰硝比供应下的辣椒产量、品质和氮素损失 [J]. *植物营养与肥料学报*, 2017, 23 (3): 730-739.
- [36] Yin S, Zhang X, Jiang Z, et al. Inhibitory effects of 3, 4-dimethylpyrazole phosphate on CH₄ and N₂O emissions in paddy fields of subtropical China [J]. *Int J Environ Res Public Health*, 2017, 14 (10): 1177.
- [37] Azam F, Benckiser G, Miiler C, et al. Release, movement and recovery of 3, 4-dimethylpyrazole phosphate (DMPP), ammonium, and nitrate from stabilized nitrogen fertilizer granules in a silty clay soil under laboratory conditions [J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2001, 34 (2): 118-125.
- [38] Wang Z, Meng Y, Zhu-Barker X, et al. Responses of nitrification and ammonia oxidizers to a range of background and adjusted pH in purple soils [J]. *Geoderma*, 2019, 334: 9-14.

- [39] Shi X, Hu H, He J, et al. Effects of 3, 4-dimethylpyrazole phosphate (DMPP) on nitrification and the abundance and community composition of soil ammonia oxidizers in three land uses [J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2016, 52 (7): 927–939.
- [40] 郭娇, 刘巧, 郭艳杰, 等. 氮肥与硝化抑制剂配施对冷棚芹菜氮素吸收及产量和品质的影响 [J]. *河北农业大学学报*, 2020, 43 (5): 54–61.
- [41] Fan X, Yin C, Chen H, et al. The efficacy of 3, 4-dimethylpyrazole phosphate on N₂O emissions is linked to niche differentiation of ammonia oxidizing archaea and bacteria across four arable soils [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2019, 130: 82–93.
- [42] 油伦成, 李东坡, 崔磊, 等. 不同硝化抑制剂组合对铵态氮在黑土和褐土中转化的影响 [J]. *植物营养与肥料学报*, 2019, 25 (12): 2113–2121.

Study on the mechanism of nitrification inhibitor type and dosage in different soils

LIU Fa-bo^{1, 2}, LANG Ming^{1, 2}, MA Xiao^{1, 2}, CHENG Tai-hong^{1, 2}, ZHANG Fen^{1, 2}, GUO Guang-zheng^{1, 2}, CHEN Xin-ping^{1, 2, 3}, WANG Xiao-zhong^{1, 2, 3*} (1. College of Resources and Environment, Southwest University, Chongqing 400716; 2. Academy of Agricultural Sciences, Southwest University, Chongqing 400716; 3. Interdisciplinary Research Center for Agriculture Green Development in Yangtze River Basin, Southwest University, Chongqing 400716)

Abstract: Combined application of nitrogen fertilizers with nitrification inhibitors is an effective measure to increase the nitrogen efficiency, reduce the reactive nitrogen loss and decrease the risk of environmental costs. To explore the mechanism of nitrification of different types and dosages of nitrification inhibitor in different soils, laboratory incubation experiments were used to set different dosages of three nitrification inhibitor types [dicyandiamide (DCD), 3, 4-dimethylpyrazole phosphate (DMPP) and 2-chloro-6-(trichloromethyl) pyridine (NP)] to study their effects on inorganic nitrogen content, soil pH and soil apparent nitrification rate of soils (red soil, paddy soil, fluvo-aquic soil) in different regions of China. The results showed that compared with ammonium sulfate treatment, the three kinds of nitrification inhibitors could inhibit the conversion of ammonium nitrogen to nitrate nitrogen in both paddy soil and fluvo-aquic soil, and the inhibitory effect on the nitrification process in fluvo-aquic soil was better than that in paddy soil. The three kinds of nitrification inhibitors had no obvious inhibitory effect on the nitrification of red soil, and the difference in soil pH was the main reason that affected the effect of nitrification inhibitor. In addition, as the dosage of DCD and NP increased, the inhibitory effect of nitrification in paddy soil and fluvo-aquic soil became more obvious, while DMPP had no obvious dosage effect on the inhibition of nitrification in the two kinds of soils. In paddy soil, the inhibitory effect of NP was stronger than that of DMPP and DCD; in the fluvo-aquic soil, the inhibitory effect of DCD was better than that of NP and DMPP, which was caused by the differences in their inhibitory mechanism and characteristics of different nitrification inhibitors. In summary, it was particularly important to select suitable nitrification inhibitor types and dosages for specific soil types for optimizing nitrogen fertilizer management and improving nitrogen use efficiency in agriculture.

Key words: red soil; paddy soil; fluvo-aquic soil; nitrification inhibitor; apparent nitrification rate