

## 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

油伦成<sup>1,5</sup>, 李东坡<sup>1\*</sup>, 崔磊<sup>1,2</sup>, 武志杰<sup>1</sup>, 李学红<sup>1,2</sup>, 肖富容<sup>1,2</sup>, 李永华<sup>3</sup>,  
闫增辉<sup>4</sup>, 郑野<sup>4</sup>, 张金明<sup>4</sup>, 高波<sup>4</sup>, 崔永坤<sup>4</sup>

(1 中国科学院沈阳应用生态研究所, 辽宁沈阳 110016; 2 中国科学院大学, 北京 100049; 3 北方华锦化学工业集团有限公司, 辽宁盘锦 124021; 4 锦西天然气化工有限责任公司, 辽宁葫芦岛 125001;  
5 中国农业大学资源与环境学院, 北京 100193)

**摘要:**【目的】添加硝化抑制剂和氮肥增效剂是提高氮肥利用率的有效方法。研究不同硝化抑制剂和氮肥增效剂组合对不同性质土壤中铵态氮转化特征的影响, 为科学合理选择抑制剂提供理论依据。【方法】供试生化抑制剂包括 2-氯-6(三氯甲基)-吡啶 (Nitrapyrin, CP)、3,4-二甲基吡啶磷酸盐 (DMPP)、1-甲氨基胍-3-甲基吡啶 (CMP)、3-甲基吡啶 (MP)、2-氨基-4-氯-6-甲基嘧啶 (AM)、N-guard、二氰二胺 (DCD)。供试土壤为黑土和褐土, 以氯化铵为氮肥, 按照常用量添加各生化抑制剂制备稳定性肥料, 用于室内恒温、恒湿土壤培养试验。试验设不施肥 (CK)、氯化铵 (N)、N + CP、N + CP + AM、N + CP + DCD、N + CP + N-guard、N + CP + DMPP、N + CP + CMP、N + CP + MP 等 9 个处理。在培养第 1、4、7、11、15、22、30、45、60、75、90、105、120 天取土样, 测定土壤含水量、土壤  $\text{NH}_4^+$ -N 和  $\text{NO}_3^-$ -N 含量, 并计算硝化抑制率。【结果】在黑土和褐土两种类型土壤中, 铵态氮转化特征具有显著差异, 在弱酸性黑土中硝化反应速率显著低于碱性褐土。在黑土中, 不同硝化抑制剂组合 N + CP、N + CP + N-guard、N + CP + DMPP、N + CP + DCD、N + CP + CMP、N + CP + AM、N + CP + MP 都表现出较好的硝化抑制效果, 可以维持黑土中较高的铵态氮含量超过 4 个月以上。其中 N + CP、N + CP + DCD、N + CP + N-guard 处理在 120 天时, 其硝化抑制率为 37%~40%。而 N + CP + AM、N + CP + MP、N + CP + DMPP 为 32%~36%, N + CP + CMP 为 26%。在褐土中, N + CP + DCD 组合硝化抑制效果最大, 在培养 120 天, 其硝化抑制率为 20%; 其次是 N + CP、N + CP + AM, 其硝化抑制率在培养第 105 天时分别为 23%、12%, 在培养第 90 天时分别为 63%、60%; N + CP + N-guard、N + CP + DMPP、N + CP + MP、N + CP + CMP 在培养第 75 天时硝化抑制率分别为 43%、42%、37%、35%, 有效硝化抑制作用时间可维持 75 天左右。【结论】在黑土和褐土 2 种不同类型土壤中施用氯化铵氮肥, 应添加专一硝化抑制剂或组合制成高效稳定性铵态氮肥。在湿润地区 pH 较低的酸性土壤上, 例如黑土, 适宜的硝化抑制剂较多, 其中 N + CP 或 N + CP + N-guard、N + CP + DCD 组合的硝化抑制效果显著且持续时间长。在干旱半干旱的碱性土壤上, 例如褐土, N + CP + DCD 组合的硝化抑制效果和持续时间优于其他组合, 可用于褐土上施用的高效稳定性氯化铵氮肥的生产。

**关键词:** 硝化抑制剂; 硝化反应; 铵态氮; 硝态氮

## Effects of different nitrification inhibitor combinations on the transformation of ammonium nitrogen in black soil and cinnamon soil

YOU Lun-cheng<sup>1,5</sup>, LI Dong-po<sup>1\*</sup>, CUI Lei<sup>1,2</sup>, WU Zhi-jie<sup>1</sup>, LI Xue-hong<sup>1,2</sup>, XIAO Fu-rong<sup>1,2</sup>, LI Yong-hua<sup>3</sup>,  
YAN Zeng-hui<sup>4</sup>, ZHENG Ye<sup>4</sup>, ZHANG Jin-ming<sup>4</sup>, GAO Bo<sup>4</sup>, CUI Yong-kun<sup>4</sup>

(1 Institute of Applied Ecology, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China; 2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3 North Huajin Chemical Industries Group Corporation, Panjin, Liaoning 124021, China; 4 Jinxi Natural Gas Chemical Co. Ltd, Huludao, Liaoning 125001, China; 5 College of Resources and Environmental Sciences, China Agricultural University, Beijing 100193, China)

收稿日期: 2019-08-16 接受日期: 2019-10-14

基金项目: 国家重点研发计划 (2017YFD0200707)。

联系方式: 油伦成 E-mail: youluncheng@126.com; \* 通信作者 李东坡 E-mail: lidp@iae.ac.cn

**Abstract: [ Objectives ]** Adding nitrification inhibitors and nitrogenous fertilizer synergist is an effective way to improve the utilization rate of nitrogenous fertilizer. The effects of different nitrification inhibitors and nitrogenous fertilizer synergist on the transformation of ammonium nitrogen in soil with different properties were studied for the choice of available inhibitors in different soils. **[ Methods ]** The tested biochemical inhibitors included 2-chloro-6 (trichloromethyl) -pyridine (CP), 3, 4-dimethyl-pyrazole phosphate (DMPP), 1-methoxyl-3-methylpyrazole (CMP), 3-methylpyrazole (MP), 2-amino-4-chloro-6-methylpyrimidine (AM), N-guard, dicyandiamide (DCD). The tested soils were black soil and cinnamon soil, and ammonium chloride was used as nitrogen fertilizer. The stable fertilizer was prepared by adding above mentioned individual or several biochemical inhibitors according to the usual dosage. A indoor culture experiment was conducted at constant temperature. The contents of  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  and  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  in soil were measured at 1, 4, 7, 11, 15, 22, 30, 45, 60, 75, 90, 105, 120 days since the beginning of culture experiment, and the inhibition rates of nitrification were calculated. **[ Results ]** In the black soil and the cinnamon soil, the transformation characteristics of ammonium nitrogen were significantly different, and the nitrification rate in the weakly acidic black soil was significantly lower than that in the alkaline cinnamon soil. In black soil, nitrification inhibitor treatments of N+CP, N+CP+N-guard, N+CP+DMPP, N+CP+DCD, N+CP+MP, N+CP+AM and N+CP+N-guard all showed good inhibition effect, which could maintain high  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  content in black soil for more than 120 days. At the 120 days, the nitrification inhibition rates of N+CP, N+CP+DCD and N+CP+N-guard were 37%–40%, while those of N+CP+AM, N+CP+MP, N+CP+DMPP were 32%–36% and that of N+CP+MP was 26%. In the cinnamon soil, the N+CP+DCD combination had the most effective nitrification inhibition. At 120 days of cultivation, the nitrification inhibition rate was 20%. The nitrification inhibition rates of N+CP and N+CP+AM were 23% and 12% respectively at the 105 days, 63% and 60% respectively at the 90th day. The nitrification inhibition rates of N+CP+N-guard, N+CP+DMPP, N+CP+MP, and N+CP+MP were 43%, 42%, 37% and 35% respectively at the 75th day of culture, and the effective nitrification inhibition time could last for about 75 days. **[ Conclusions ]** Specific nitrification inhibitors or combinations should be added to make efficient and stable ammonium nitrogen fertilizer when using ammonium chloride as nitrogen fertilizer in soils with different pH values. The nitrification inhibitor CP alone or CP+N-guard and CP+DCD combination perform significant and long inhibition on the transformation of ammonia nitrogen in acidic black soil. The CP+DCD combination works well on arid and semi-arid alkaline cinnamon soil.

**Key words:** nitrification inhibitor; ammonium chloride; ammonium nitrogen; nitrate nitrogen

在水稻追肥和复混肥料加工过程中大量使用铵态氮肥, 主要为氯化铵、硫酸铵<sup>[1-4]</sup>。目前对改善这部分肥料的性能, 提高其稳定性和长效性并没有引起充分的重视<sup>[5-7]</sup>。为提高我国整体氮肥利用率, 减少氮肥施用量<sup>[8]</sup>, 高效稳定性铵态氮肥的研制不容忽视<sup>[9-11]</sup>。

为提高作物产量和减少环境代价, 在作物的营养临界期和营养最大效率期精准施肥尤为重要, 如小麦的分蘖和孕穗期, 玉米的孕穗期。但由于传统氮肥转化速率过快, 氮素通过各种途径过早损失, 不但无法为作物提供充足的氮素, 而且严重污染环境。一般在 4 个月内, 作物对氮素需求最大, 因此筛选出可以维持 4 个月以上硝化抑制效果的抑制剂配方尤为重要, 硝化抑制率一般应维持在 20%~

60% 为宜, 可提高作物产量 10% 以上<sup>[12]</sup>。如果抑制率过高, 则会增加氨挥发强度, 造成空气污染; 如果抑制率过低, 则无法保证氮素的持续供应, 并会增加硝态氮淋洗, 污染水体。

对硝化抑制剂的研究早在 20 世纪中后期就已经开始<sup>[13]</sup>。1974 年, 美国 DOW 公司开发 CP (Nitrapyrin) 产品, 并广泛应用于农业生产中。在施用等氮量情况下, 在石灰性土壤中添加 CP 的水稻种植中, 其硝化率为不添加 CP 的 30%, 在微酸性或酸性黏土中, 其硝化率比不添加 CP 减少 10%, 在强碱性土壤中硝化率也明显减小, 但由于强碱性土壤中易造成氨挥发, 因此在强碱性土壤中对减少氮素损失效果不佳。一般情况下, 添加 CP 的土壤中铵态氮存留时间延长 40 天以上。但由于铵态氮在土壤中长时间存

留, 也会增加氨挥发损失<sup>[14]</sup>。一般在最大田间持水量的 60% 左右, 温度在 25℃ 左右, pH 处于中性或弱碱性时, CP 能发挥最好的抑制效果。除此之外, 还有一种抑制剂—3,4-二甲基吡唑磷酸盐 (DMPP) 被广泛应用, 并取得较好的效果<sup>[15]</sup>。DMPP 可以有效控制氮素流失和改变农作物对氮素的吸收方式。添加化肥纯氮量 1% 的 DMPP, 即可达到较好的硝化抑制效果, 其硝化抑制作用可持续 1~3 个月时间。不同的土壤类型中 DMPP 作用效果不同<sup>[16]</sup>。另外, 还有我们所熟知的抑制剂—二氰二胺 (DCD)。氮肥中加入 DCD 后, 淋溶造成的氮素损失有效减少 40% 左右<sup>[17]</sup>。近年来, 研究表明 DCD 在蔬菜、水果、茶叶、药材等领域都起到良好的作用, 因此被大范围快速推广使用。另外, 由德国 SKW 公司开发的硝化抑制剂 1-甲胺甲酰-3-甲基吡唑 (CMP), 也具有硝化抑制效果。研究表明, CMP 可以有效抑制土壤硝化反应, 使铵态氮在土壤中长期稳定存在, 有效抑制硝态氮的生成<sup>[15]</sup>。

土壤质地、孔隙度、有机质含量、酸碱度等因素影响硝化抑制剂的效果<sup>[18-20]</sup>。在 pH 低于 6 的土壤中, 硝化反应不明显, 在 pH 处于中性或者偏碱性土壤中, 硝化反应较为明显, 要取得理想的硝化抑制效果需要适宜的硝化抑制剂类型<sup>[21-25]</sup>和浓度<sup>[26-30]</sup>。然而, 针对我国不同类型土壤<sup>[31-34]</sup>、不同种类铵态氮肥 (如硫酸铵、氯化铵) 的专用高效生化抑制剂配方的系统研究工作相对较少。由于一些硝化抑制剂单一施用有效作用时间较短, 不能有效减少铵态氮肥总损失量, 而将两种或者多种抑制剂配合使用可以解决这一问题<sup>[35]</sup>, 达到更好的抑制效果, 同时会降低生产成本<sup>[36]</sup>。另外, 一些硝化抑制剂虽然可以有效抑制硝化反应进行, 但是其成本高、合成工艺复杂、对环境造成一定的污染, 因此, 筛选针对不同种类铵态氮肥、适应我国典型土壤的成本低廉、高效、专用, 并且对环境友好的抑制剂或组合配方十分必要。

## 1 材料与方法

### 1.1 供试材料

供试肥料: 氯化铵 (分析纯), 由天津永大化学试剂有限公司生产。

供试硝化抑制剂: 2-氯-6 (三氯甲基)-吡啶 (CP), DMPP, CMP, 3-甲基吡唑 (MP), 2-氨基-4-氯-6-甲基嘧啶 (AM), 均为分析纯试剂, 纯度  $\geq 98.0\%$ , 由 Maya Reagent 生物技术公司生产; N-guard, 油状液体, 由 Solvay S. A. 公司提供; DCD, 二氰二胺, 为分析纯试剂, 纯度  $\geq 84.0\%$ , 由 Macklin 生物技术公司生产。

供试土壤: 黑土, 采自吉林省长春市农安县 (125°49'E、43°51'N), 属于中温带大陆性气候。土壤保水能力强, 肥力高。褐土, 采自辽宁省朝阳市朝阳县 (119°50'E、41°25'N), 属于北温带大陆性季风气候。以上 2 种类型土壤分别取自旱地农田耕层 0—20 cm。试验所用土壤经过自然风干后过 2 mm 筛, 备用。土壤基本理化性质见表 1。

### 1.2 试验设计

采用室内土壤培养方法。以氯化铵为研究对象, 添加单一或者组合抑制剂, 制备稳定性氯化铵, 氯化铵氮添加量均为 N 0.50 g/kg 干土。具体试验处理包括: 1) 不施肥对照 (CK); 2) 施用氯化铵肥料 (N); 3)~9) 处理为氯化铵添加了不同抑制剂, 依次为 N + CP、N + CP + N-guard、N + CP + DMPP、N + CP + DCD、N + CP + CMP、N + CP + AM、N + CP + MP。单一抑制剂 CP、N-guard、DMPP、DCD、CMP、AM、MP 的添加量分别为氯化铵氮量的 0.5%、1.5%、1.0%、4.0%、0.2%、4.0%、1.0%, 抑制剂组合的添加量为抑制剂单独添加量的 50%。

培养试验采用 4 号敞口塑料盆 (12 cm 口径), 每盆装干土 1 kg, 加入 150 mL 左右去离子水, 盆口盖一层塑料保鲜膜, 在无光照的恒温室中放置一周, 使土壤活化。将各处理肥料与活化后的土壤充分混

表 1 供试土壤基本理化性质

Table 1 Physicochemical properties of tested soil

土壤类型 Soil type	有机质 (g/kg) Organic matter	全氮 (g/kg) Total N	铵态氮 (mg/kg) NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N	硝态氮 (mg/kg) NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N	有效磷 (mg/kg) Available P	速效钾 (mg/kg) Available K	pH
黑土 Black soil	17.44	1.80	24.83	34.61	10.66	336.36	6.34
褐土 Cinnamon soil	10.00	0.96	19.93	12.05	2.08	235.70	8.57

匀后,再装回盆内,盆口盖一层扎眼的塑料保鲜膜,每一处理3次重复。

室内恒温培养试验,温度保持在 $(25 \pm 2)^\circ\text{C}$ ,土壤湿度为田间最大持水量的60%。分别在培养第1、4、7、11、15、22、30、45、60、75、90、105、120天取土样,测定土壤含水量、土壤 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量,并计算硝化抑制率。

### 1.3 测定及计算方法

土壤铵态氮、硝态氮用2.00 mol/L氯化钾浸提,用3-AA3型流动分析仪测定。硝化抑制率(DN)计算公式:  $\text{DN}(\%) = (\text{C} - \text{D})/\text{C} \times 100$ ,式中,C和D分别为普通氯化铵和添加抑制剂氯化铵培养后土壤硝态氮浓度测定值(mg/L)。

### 1.4 统计与分析

采用Microsoft Excel 2010和SPSS 16.0软件对数据进行统计分析。采用Duncan最小显著极差法进行多重比较,差异显著水平为 $P < 0.05$ ,利用Origin 8.6软件作图。图中数据为平均值 $\pm$ 标准差。

## 2 结果与分析

### 2.1 添加不同抑制剂的氯化铵在黑土中的转化特征

在黑土中,所有氯化铵氮肥处理的铵态氮含量在整个培养期都呈现下降趋势,硝态氮含量都呈现逐渐增加趋势(图1)。CP单独添加和与其他6种抑制剂混合添加在培养120天内的抑制效果都显著高于无添加抑制剂的N处理( $P < 0.05$ )。在培养第120天时,N处理土壤中铵态氮含量已不足40%,添加抑制剂的7个处理土壤中依然含有65%以上铵态

氮,并且该7个处理间铵态氮含量没有显著差异( $P > 0.05$ ),证明添加硝化抑制剂CP及其组合处理的硝化抑制有效作用时间达到120天以上(图1)。

硝化抑制剂CP单独添加及其6个组合添加处理土壤的硝态氮含量在整个培养期变化趋势基本相同,均显著低于N处理( $P < 0.05$ ),证明添加抑制剂的7个处理都具有较好的硝化抑制效果,并且硝化抑制有效作用时间在4个月以上(图1)。

在0~30天的培养期内,N处理 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量下降较快,而硝化抑制剂处理的下降较慢。在培养第30天时,N处理的剩余 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量为179 mg/kg,硝化抑制剂处理的依然维持在400 mg/kg以上,显著高于N处理( $P < 0.05$ )。培养45~75天,N处理的铵态氮保持相对稳定,铵态氮含量维持在150~200 mg/kg,没有显著下降趋势,而硝化抑制剂处理的铵态氮含量下降较快,铵态氮减少量在100 mg/kg左右;培养75~120天,N处理铵态氮含量依然没有显著下降趋势,铵态氮含量保持在150~200 mg/kg,硝化抑制剂处理也没有显著下降趋势,铵态氮含量保持在300 mg/kg以上,显著高于施N处理(图1)。

在0~45天培养期,N处理硝态氮含量增长较快,在第45天,增加了300 mg/kg,而添加硝化抑制剂的7个处理的硝态氮含量增加较缓慢,增加量小于80 mg/kg,硝化抑制率为63%~75%(表2);在培养45~75天,N处理硝态氮含量增长相对减缓,增长量接近100 mg/kg,而硝化抑制剂处理在此阶段增加最大,增加量由小于100 mg/kg增加到200 mg/kg左右,在培养75天时的硝化抑制率为41%~52%;在培养75~120天,N与添加硝化抑制剂处理土壤的硝态氮含量都增加较为缓慢,增长幅度都在

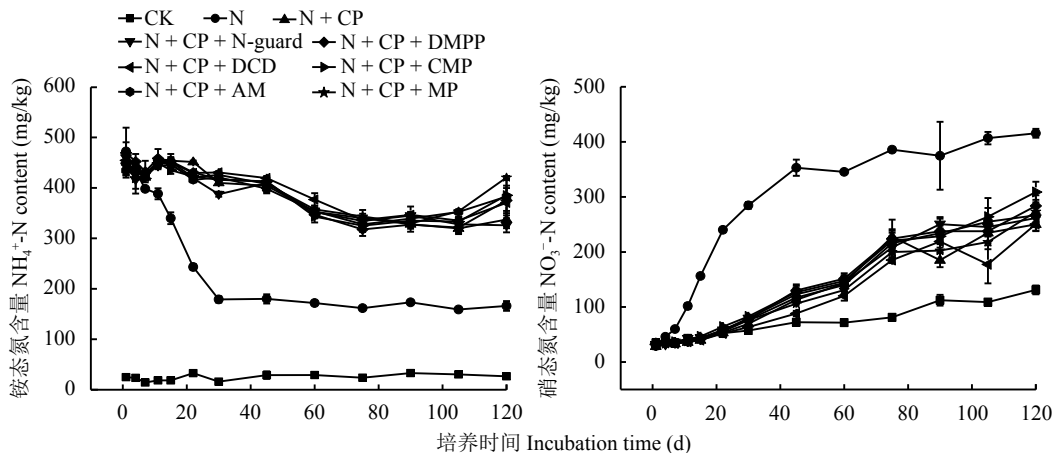


图1 黑土中不同处理铵态氮、硝态氮含量动态变化

Fig. 1 Dynamic changes of soil  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  and  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  contents in black soil under different treatments

表 2 黑土上抑制剂的硝化抑制率 (%)

Table 2 Soil nitrification inhibition rate in black soil in different treatments

培养时间 (d) Incubation day	N + CP	N + CP + N-guard	N + CP + DMPP	N + CP + DCD	N + CP + CMP	N + CP + AM	N + CP + MP
1	2 a	-9 a	-18 a	-9 a	-9 a	-2 a	-1 a
4	24 a	30 a	19 a	24 a	25 a	24 a	24 a
7	45 a	40 a	41 a	44 a	39 a	41 a	43 a
11	65 a	58 a	63 a	64 a	60 a	63 a	64 a
15	75 a	72 bc	73 ab	75 a	70 c	73 ab	73 ab
22	78 ab	76 c	76 c	78 a	73 d	76 c	77 bc
30	76 ab	72 c	73 bc	78 a	71 c	73 bc	73 bc
45	68 b	65 b	63 b	75 a	64 b	67 b	70 ab
60	59 bc	58 bc	56 c	65 a	57 bc	59 bc	62 ab
75	41 a	46 a	42 a	52 a	43 a	44 a	48 a
90	51 a	33 a	37 a	42 a	39 a	37 a	46 a
105	42 a	40 a	42 ab	56 a	35 b	37 a	46 ab
120	40 ab	37 b	32 ab	40 a	26 b	36 b	34 ab

注 (Note): 同行数据后不同字母表示同一培养时间不同处理间差异达到显著水平 ( $P < 0.05$ ) Values followed by different letters in a row indicate significant difference among treatments on the same days of incubation ( $P < 0.05$ ).

50 mg/kg 以内, 在培养第 120 天时的硝化抑制率依然在 26%~40% (表 2)。

## 2.2 添加不同抑制剂的氯化铵在褐土中的转化特征

在褐土中, 所有施氮处理的铵态氮含量在整个培养期都呈现下降趋势, 硝态氮含量都呈现逐渐增加趋势 (图 2)。

在 0~75 天培养期, 添加硝化抑制剂的处理, 铵态氮含量都显著高于无添加抑制剂的 N 处理 ( $P <$

0.05)。在培养 75 天时, N + CP + N-guard、N + CP + DMPP、N + CP + CMP、N + CP + MP 处理土壤硝态氮含量依然显著低于 N 处理 ( $P < 0.05$ ), 硝化抑制率分别为 43%、42%、35%、37% (表 3)。在培养第 90 天时, N + CP、N + CP + AM、N + CP + DCD 处理铵态氮含量介于 100~200 mg/kg, 显著高于 N 处理 ( $P < 0.05$ ), 添加 N + CP + N-guard、N + CP + DMPP、N + CP + CMP、N + CP + MP 处理与 N 处理没有显著差异 ( $P > 0.05$ )。在 90~120 天培养期, N + CP + N-guard、N + CP + DMPP、N + CP + CMP、N +

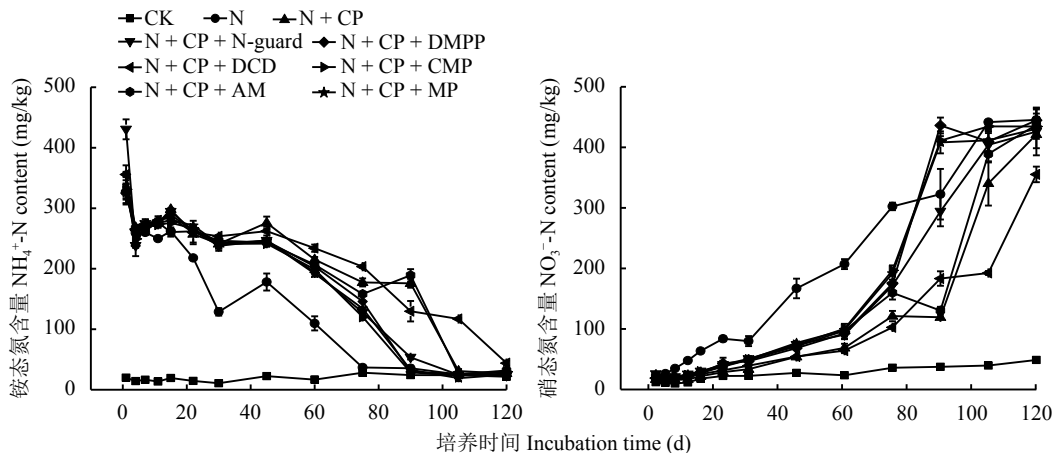


图 2 褐土中不同处理铵态氮、硝态氮含量动态变化

Fig. 2 Dynamic changes of soil  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  and  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  contents in cinnamon soil under different treatment



表 3 褐土上抑制剂的硝化抑制率 (%)

Table 3 Nitrification inhibition rate in cinnamon soil in different treatments

培养时间 (d) Incubation time	N + CP	N + CP + N-guard	N + CP + DMPP	N + CP + DCD	N + CP + CMP	N + CP + AM	N + CP + MP
1	28 a	-9 b	20 a	20 a	22 a	24 a	31 a
4	46 a	31 b	46 a	38 ab	39 ab	36 ab	39 ab
7	54 a	40 cd	47 bc	51 ab	39 d	43 cd	47 bc
11	65 a	47 d	54 bc	58 b	51 cd	52 bcd	54 bc
15	66 a	53 c	58 bc	60 ab	53 c	57 bc	57 bc
22	66 a	51 c	48 c	62 ab	52 c	55 bc	54 c
30	58 a	37 b	42 b	51 ab	38 b	39 b	38 b
45	68 a	56 b	59 ab	67 a	56 b	57 b	54 b
60	67 a	56 b	55 b	69 a	52 b	53 b	53 b
75	60 a	43 bc	42 bc	66 a	35 d	47 b	37 cd
90	63 a	9 c	-5 c	43 b	-7 c	60 a	-7 c
105	23 b	9 c	7 c	56 a	2 c	12 c	7 c
120	5 b	4 b	0 b	20 a	2 b	2 b	3 b

注 (Note): 同行数据后不同字母表示同一培养时间不同处理间差异达到显著水平 ( $P < 0.05$ ) Values followed by different letters in a row indicate significant difference among treatments on the same days of incubation at  $P < 0.05$ .

CP + MP 处理硝态氮含量与 N 处理无显著差异 ( $P > 0.05$ ), 硝化抑制率全部下降为 9% 以下, 说明这些处理在培养 75 天内具有硝化抑制效果。在培养第 105 天时, N + CP、N + CP + AM 的处理铵态氮含量与 N 处理没有显著差异 ( $P > 0.05$ ), 说明这 2 种处理的硝化抑制有效作用时间在 105 天以内; N + CP、N + CP + AM 处理硝态氮含量依然显著低于 N 处理 ( $P < 0.05$ ), 其硝化抑制率分别为 23%、12%, 说明有效硝化抑制时间为 105 天左右。在培养第 120 天时, N + CP + DCD 处理与 N 处理铵态氮含量没有显著差异 ( $P > 0.05$ ), 说明有效作用时间为 120 天左右; 其硝态氮含量都显著低于 N 处理 ( $P < 0.05$ ), 硝化抑制率为 20%, 说明硝化抑制效果可以维持 4 个月以上 (图 2)。

### 3 讨论

#### 3.1 在黑土中不同硝化抑制剂或组合对氯化铵氮素转化的影响

在黑土中, 所有添加氯化铵氮肥的处理都发生较强的硝化反应, 说明土壤中添加铵态氮肥处理显著增加了硝化反应速率, 增加了土壤中铵态氮向硝态氮转化的进程, 这与孙志梅等<sup>[37]</sup>研究结果一致。

在黑土中, 添加硝化抑制剂的所有处理有效硝化抑制作用时间都超过整个培养期, 说明本研究所

用硝化抑制剂或组合, 在整个培养期都显著降低了土壤中硝化作用强度, 有效抑制了土壤中铵态氮向硝态氮转化, 降低土壤中硝化反应速率, 这与李莉等<sup>[33]</sup>研究结果相一致, 这可能与抑制土壤中脲氧化酶、硝酸还原酶、亚硝酸还原酶活性和氨氧化古菌丰度有关。

#### 3.2 在褐土中不同硝化抑制剂或组合对氯化铵氮素转化的影响

在褐土中, 所有添加氯化铵氮肥处理土壤铵态氮含量在整个培养期都处于下降趋势, 说明在整个培养期都发生显著的硝化反应, 土壤中铵态氮含量增加, 显著增加了土壤中硝化反应速率, 这与聂彦霞等<sup>[32]</sup>研究结果一致。

在褐土中, 在培养前 3 个月, 添加硝化抑制剂的处理有效抑制土壤中硝化反应, 可能因为改变了土壤中氨氧化古菌群落结构和丰度以及脲氧化酶活性, 这与张苗苗等<sup>[38]</sup>研究结果一致。处理 N + CP、N + CP + AM、N + CP + DCD 硝化抑制效果显著高于处理 N + CP + N-guard、N + CP + DMPP、N + CP + CMP、N + CP + MP, 说明不同的硝化抑制剂或硝化抑制剂组合, 不但影响硝化抑制作用强度, 而且影响硝化抑制作用时间, 因此研究不同硝化抑制剂或硝化抑制剂组合在不同类型土壤中的作用效果具有

现实意义<sup>[39-40]</sup>。

N + CP、N + CP + AM 处理的有效硝化抑制时间在 105 天以内, 而 N + CP + DCD 处理有效硝化抑制作用时间为 120 天左右, 由此可知, N + CP + DCD 处理抑制硝化作用效果最好, 并且在褐土中有效作用时间最长, 比 CP 单独使用, 明显增加了抑制作用时间与效果。因此在褐土中添加氯化铵态氮肥, 应首先选用添加 CP + DCD 制成高效稳定性铵态氮肥。

### 3.3 在黑土和褐土中同种硝化抑制剂或组合对氯化铵氮素转化的影响

在培养初期, 土壤中加入铵态氮肥, 褐土中微生物固持和土壤固定作用远大于黑土, 造成这种差异的主要因素可能是土壤酸碱度, 因为在碱性土壤中氨氧化相关微生物丰度和酶活性高于酸性土壤中相关微生物和酶指标<sup>[41]</sup>。

在培养第 3~4 周, 在黑土和褐土中仅添加氯化铵处理硝化反应速率最快, 而添加硝化抑制剂处理硝化反应速率较为迟缓, 说明这个阶段在黑土和褐土中发生显著的硝化反应, 并且硝化抑制剂起到较好的抑制效果。

在培养 60~90 天, 黑土中没有发生显著的硝化反应, 而在褐土中硝化反应较显著, 说明碱性褐土具有更优的硝化反应相关微生物群落结构和酶活性, 硝化作用潜力大于黑土。

在培养 90~120 天, 黑土中氯化铵氮肥处理的硝化反应趋于平稳, 说明黑土中硝态氮含量过高, 抑制了土壤中铵态氮向硝态氮转化; 褐土中仅施 N 处理硝化反应已趋于完全, 而添加硝化抑制剂的处理依然有较强的硝化反应, 说明在培养前期褐土的硝化作用受到抑制, 在后期依然继续进行, 添加硝化抑制剂对褐土中的硝化作用起到了削峰填谷的效果, 有利于铵态氮的缓慢氧化, 延长了氯化铵氮肥的效果。

## 4 结论

1) 在湿润地区 pH 较低的酸性土壤上, 硝化抑制剂 CP 或 CP + N-guard、CP + DCD 组合抑制铵态氮转化的作用效果显著, 较高的铵态氮含量可维持 4 个月以上, 有利于作物的吸收和利用。

2) 在碱性褐土中, 硝化抑制剂 CP + DCD 组合的硝化抑制效果较好, 在培养 120 天内, 仍然可以维持褐土中较高的铵态氮含量, 其硝化抑制率为

20%。

3) 在黑土上施用氯化铵时, 可添加 CP 或 CP + N-guard、CP + DCD 组合制备稳定性氮肥; 在褐土上施用氯化铵, 则适宜添加 CP + DCD 组合作为碱性土壤上施用氯化铵时的添加剂。

### 参 考 文 献:

- [1] 葛超楠, 刘荣杰, 罗宝杰, 等. 不同长期施肥方式对淡涂泥土水稻产量和基础地力的影响[J]. 中国农学通报, 2019, 35(3): 1-5.  
Ge C N, Liu R J, Luo B J, *et al.* Effects of long-term fertilization on rice yield and basic soil productivity in coastal paddy[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2019, 35(3): 1-5.
- [2] 王珏, 成贵根, 李龙, 等. 施肥方式对江苏春玉米产量和物质积累转运的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2019, 25(5): 748-755.  
Wang J, Cheng G G, Li L, *et al.* Effects of fertilization modes on grain yield and nutrient accumulation and translocation of spring maize in Jiangsu Province, China[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2019, 25(5): 748-755.
- [3] 贺非, 马友华, 杨书运, 等. 不同施肥技术对单季稻田CH<sub>4</sub>和N<sub>2</sub>O排放的影响研究[J]. 农业环境科学学报, 2013, 32(10): 2093-2098.  
He F, Ma Y H, Yang S Y, *et al.* Effects of different fertilization techniques on the emission of methane and nitrous oxide from single cropping rice[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2013, 32(10): 2093-2098.
- [4] Domingues M V J P. Best management practices from agricultural economics: Mitigating air, soil and water pollution[J]. The Science of the Total Environment, 2019, 688: 346-360.
- [5] 张文学, 孙刚, 何萍, 等. 双季稻田添加脲酶抑制剂NBPT氮肥的最高减量潜力研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2014, 20(4): 821-830.  
Zhang W X, Sun G, He P, *et al.* Highest potential of subtracting nitrogen fertilizer through addition of urease inhibitor NBPT in double-cropping paddy fields[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2014, 20(4): 821-830.
- [6] Sun L, Lu Y F, Yu F W, *et al.* Biological nitrification inhibition by rice root exudates and its relationship with nitrogen-use efficiency[J]. New Phytologist, 2016, 212(3): 646-656.
- [7] 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.
- [8] Rowlings D W, Scheer C, Liu S, *et al.* Annual nitrogen dynamics and urea fertilizer recoveries from a dairy pasture using <sup>15</sup>N; effect of nitrification inhibitor DMPP and reduced application rates[J]. Agriculture, Ecosystems and Environment, 2016, 216: 206-225.
- [9] Prasad M. Evaluation of nitrogen fertilization patterns using DSSAT for enhancing grain yield and nitrogen use efficiency in rice[J]. Communications in Soil Science and Plant Analysis, 2018, 49(12): 1401-1417.
- [10] Bai Z, Caspari T, Gonzalez M R, *et al.* Effects of agricultural management practices on soil quality: A review of long-term experiments for Europe and China[J]. Agriculture, Ecosystems and Environment, 2018, 265: 1-7.

- [11] Ruser R, Schulz R. The effect of nitrification inhibitors on the nitrous oxide release from agricultural soils—a review[J]. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 2015, 178(2): 171–188.
- [12] 孙海军, 闵炬, 施卫明, 等. 硝化抑制剂影响小麦产量、 $N_2O$ 与 $NH_3$ 排放的研究[J]. *土壤*, 2017, 49(5): 876–881.  
Sun H J, Min J, Shi W M, *et al.* Effects of nitrification inhibitor application on wheat grain yield,  $N_2O$  emission and  $NH_3$  volatilization[J]. *Soils*, 2017, 49(5): 876–881.
- [13] Parkin T B, Hatfield J L. Influence of nitrapyrin on  $N_2O$  losses from soil receiving fall-applied anhydrous ammonia[J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2010, 136(1–2): 81–86.
- [14] Wang S W, Shan J, Xia Y Q, *et al.* Different effects of biochar and a nitrification inhibitor application on paddy soil denitrification: A field experiment over two consecutive rice-growing seasons[J]. *Science of the Total Environment*, 2017, 593–594: 347–356.
- [15] Lan T, Han Y, Roelcke M, *et al.* Effects of the nitrification inhibitor dicyandiamide (DCD) on gross N transformation rates and mitigating  $N_2O$  emission in paddy soils[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2013, 67: 174–182.
- [16] Rime T, Niklaus P A. Spatio-temporal dynamics of soil  $CH_4$  uptake after application of N fertilizer with and without the nitrification inhibitor 3,4-dimethylpyrazole phosphate (DMPP)[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2017, 104: 218–225.
- [17] Menéndez S, Barrena I, Setien I, *et al.* Efficiency of nitrification inhibitor DMPP to reduce nitrous oxide emissions under different temperature and moisture conditions[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2012, 53: 82–89.
- [18] Liu R, Hayden H, Suter H, *et al.* The effect of nitrification inhibitors in reducing nitrification and the ammonia oxidizer population in three contrasting soils[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2015, 15(5): 1113–1118.
- [19] 白雪, 夏宗伟, 郭彦玲, 等. 硝化抑制剂对不同旱地农田土壤 $N_2O$ 排放的影响[J]. *生态学杂志*, 2012, 31(9): 2319–2329.  
Bai X, Xia Z W, Guo Y L, *et al.* Effects of nitrification inhibitors on  $N_2O$  emission from different upland agricultural soils[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2012, 31(9): 2319–2329.
- [20] Robinson A, Di H J, Cameron K C, *et al.* The effect of soil pH and dicyandiamide (DCD) on  $N_2O$  emissions and ammonia oxidiser abundance in a stimulated grazed pasture soil[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2014, 14(8): 1434–1444.
- [21] Sahrawat K L. Comparison of Karanjin with other nitrification inhibitors for retardation of nitrification of urea N in soil[J]. *Plant and Soil*, 1981, 59(3): 495–498.
- [22] Zacherl B, Amberger A. Effect of the nitrification inhibitors dicyandiamide, nitrapyrin and thiourea on *Nitrosomonas europaea*[J]. *Fertilizer Research*, 1990, 22(1): 37–44.
- [23] Kiran U, Patra D D. Influence of natural essential oils and their by-products as nitrification retarders in regulating nitrogen utilization for Japanese mint in sandy loam soils of subtropical central India[J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2003, 94(2): 237–245.
- [24] 张文学, 王少先, 夏文建, 等. 脲酶抑制剂与硝化抑制剂对稻田土壤硝化、反硝化功能菌的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2019, 25(6): 897–909.  
Zhang W X, Wang S X, Xia W J, *et al.* Effects of urease inhibitor and nitrification inhibitor on functional nitrifier and denitrifier in paddy soil[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2019, 25(6): 897–909.
- [25] 臧祎娜, 周晓丽, 解东友, 等. 硝化抑制剂DCD和NP对温室菜田土壤氮素转化及 $N_2O$ 、 $CO_2$ 排放的影响[J]. *江苏农业科学*, 2018, 46(20): 333–337.  
Zang W N, Zhou X L, Xie D Y, *et al.* Effects of nitrification inhibitors DCD and NP on nitrogen conversion and  $N_2O$  and  $CO_2$  emissions in greenhouse vegetable fields[J]. *Jiangsu Agricultural Science*, 2018, 46(20): 333–337.
- [26] 孙毅, 杨明, 蒋正德, 等. 不同抑制剂用量的稳定性肥料对玉米产量的影响[J]. *黑龙江农业科学*, 2012, (3): 50–54.  
Sun Y, Yang M, Jiang Z D, *et al.* Effect of the application amounts of stabilized fertilizers added different inhibitors on maize yield[J]. *Heilongjiang Agricultural Sciences*, 2012, (3): 50–54.
- [27] 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 W X, Sun G, He P, *et al.* Effects of urease and nitrification inhibitors on ammonia volatilization from paddy fields[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2013, 19(6): 1411–1419.
- [28] 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.  
Wang X W, Liu T, Chu G X. Inhibition of DCD, DMPP and nitrapyrin on soil nitrification and their appropriate use dosage[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2017, 23(1): 54–61.
- [29] Ming Y, Yunting F, Di S, *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: 22075.
- [30] 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.  
Shi M, Liang D L, Man N, *et al.* Effects of different application rates of DMPP and DCD on nitrogen transformation in calcareous soil[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2012, 45(22): 4635–4642.
- [31] 魏占波, 石元亮, 于阁杰, 等. 硝化抑制剂CMP对于施肥土壤中硝态氮积累的影响[J]. *土壤通报*, 2011, 41(3): 656–659.  
Wei Z B, Shi Y L, Wang G J, *et al.* Effect of nitrification inhibitor CMP on nitrate nitrogen accumulation in fertilized soil[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2011, 41(3): 656–659.
- [32] 聂彦霞, 李东坡, 李莉, 等. NBPT/DMPP对白浆土中尿素态氮转化调控效果研究[J]. *土壤*, 2012, (6): 947–952.  
Nie Y X, Li D P, Li L, *et al.* Study on the effect of NBPT/DMPP on urea nitrogen conversion in white soils[J]. *Soils*, 2012, (6): 947–952.
- [33] 李莉, 李东坡, 武志杰, 等. 脲酶/硝化抑制剂对尿素氮在白浆土中转化的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2011, 17(3): 646–650.  
Li L, Li D P, Wu Z J, *et al.* Effect of urease/nitrification inhibitors on transformation of urea-N in albic soil[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2011, 17(3): 646–650.
- [34] Wang Q, Zhang L M, Shen J P, *et al.* Effects of dicyandiamide and acetylene on  $N_2O$  emissions and ammonia oxidizers in a fluvo-aquic soil applied with urea[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2016, 23(22): 23023–23033.



- [35] 杨剑波, 李学超, 徐晶晶, 等. 两种硝化抑制剂在不同土壤中的效果比较[J]. 土壤, 2014, (2): 319–324.  
Yang J B, Li X C, Xu J J, *et al.* Two nitrification inhibitors were compared in different soils[J]. *Soils*, 2014, (2): 319–324.
- [36] 任灵玲, 李秀玲, 刘灵芝. 不同施肥方式下土壤氨氧化细菌的群落特征[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2019, 27(1): 11–19.  
Ren L L, Li X L, Liu L Z. Community characteristics of soil ammonia oxidizing bacteria after different fertilizer applications[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2019, 27(1): 11–19.
- [37] 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, (6): 1389–1395.  
Sun Z M, Wu Z J, Chen L J, *et al.* Regulation of soil nitrification with nitrification inhibitors and related mechanisms[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2008, (6): 1389–1395.
- [38] 张苗苗, 沈菊培, 贺纪正, 等. 硝化抑制剂的微生物抑制机理及其应用[J]. 农业环境科学学报, 2014, 33(11): 2077–2083.  
Zhang M M, Shen J P, He J Z, *et al.* Microbial mechanisms of nitrification inhibitors and their application[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2014, 33(11): 2077–2083.
- [39] 章燕, 徐慧, 夏宗伟, 等. 硝化抑制剂DCD、DMPP对褐土氮总矿化速率和硝化速率的影响[J]. 应用生态学报, 2012, 23(1): 166–172.  
Zhang Y, Xu H, Xia Z W, *et al.* Effects of nitrification inhibitors DCD and DMPP on cinnamon soil's gross nitrogen mineralization and nitrification rates[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2012, 23(1): 166–172.
- [40] 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, (4): 765–770.  
Li Q, Chu G X, Liu T, *et al.* Nitrification inhibition and dose-dependent effect of dicyandiamide on sandy, loamy and clayey soils[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2011, (4): 765–770.
- [41] 油伦成, 李东坡, 武志杰, 等. 稳定性铵态氮肥在黑土和褐土中的氮素转化特征[J]. 应用生态学报, 2019, 30(4): 1079–1087.  
You L C, Li D P, Wu Z J, *et al.* Nitrogen transformation of stable ammonium fertilizer in black soil and cinnamon soil[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2019, 30(4): 1079–1087.