

# 用于黑土的稳定性氯化铵的适宜硝化抑制剂 和氮肥增效剂组合

崔磊<sup>1,2,5</sup>, 李东坡<sup>1,5\*</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>, 崔永坤<sup>4</sup>, 高波<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 中国科学院沈阳生态实验站, 辽宁沈阳 110107)

**摘要:**【目的】本研究添加不同种类硝化抑制剂的高效稳定性氯化铵氮肥在黑土中的施用效果, 旨在筛选出适合旱作黑土的高效稳定性氯化铵态氮肥。【方法】在氯化铵中分别添加硝化抑制剂 3,4-二甲吡唑磷酸盐(DMPP)、双氰胺(DCD)、2-氯-6-三甲基吡啶(Nitrapyrin, CP)、氨保护剂(N-GD)和1种氮肥增效剂(HFJ)及其组合, 制成9种稳定性氯化铵氮肥。以不施氮肥(CK)和施普通氯化铵(CK-N)为对照, 以9种稳定性氯化铵为处理进行了等氮量盆栽试验。在玉米苗期、大喇叭口期、灌浆期和成熟期测定了土壤中铵态氮和硝态氮含量, 在玉米成熟期测定植株生物量、籽粒产量和氮素含量, 计算铵态氮肥的表观硝化率、硝化抑制率、氮肥农学效率、氮肥偏生产力。【结果】1) 与CK-N处理相比, 9个处理均显著提高玉米的产量, HFJ的效果均为最显著, 可增加玉米籽粒产量3.99倍, 提高氮肥吸收利用率4.98倍, 显著高于8个硝化抑制剂处理( $P < 0.05$ )。CP+DMPP和CP+DCD处理提高玉米籽粒产量1.90~2.11倍, 两个处理之间无显著差异; CP+DMPP玉米生物量显著高于CP处理, 而与DMPP和DCD处理无显著差异; CP+DMPP玉米氮肥吸收利用率显著高于CP和DMPP处理, 显著提高3.71倍( $P < 0.05$ ); 2) CP+DMPP和CP+DCD土壤中铵态氮含量提高2.09~2.42倍, 且显著高于CP、DMPP和DCD处理( $P < 0.05$ ), 而硝态氮含量和土壤表观硝化率均显著降低24%和66%~68%, 与CP和DCD处理存在显著差异( $P < 0.05$ ); 苗期CP+DMPP和CP+DCD硝化抑制率高达23.9%~24.3%, 显著高于CP和DCD( $P < 0.05$ )。【结论】在黑土中, 氯化铵中添加硝化抑制剂组合的硝化抑制率显著高于添加单一抑制剂, 能够有效减缓土壤中铵态氮向硝态氮的转化, 减少土壤中氮素损失, 降低环境污染。CP+DMPP组合玉米的氮肥吸收利用率显著高于CP+DCD组合。氮肥增效剂HFJ显著增加玉米的氮素吸收量, 提高氮肥利用率, 从而使玉米获得高产并获得较高的收获指数和经济系数。因此, 综合考虑产量和抑制硝化作用等因素, 黑土区氯化铵作为玉米生产用氮肥时, 建议首选添加氮肥增效剂HFJ来保证作物的高产和氮肥高利用率, 也可以添加硝化抑制剂组合CP+DMPP, 或者CP+DCD制备稳定性氯化铵来提高氯化铵的增产效果和氮肥利用率, 减少氮素损失, 降低环境污染。

**关键词:** 硝化抑制剂; 氮肥增效剂; 铵态氮; 硝态氮; 氮肥利用率; 经济产量

## Suitable combination of nitrogen-inhibitors and nitrogen synergist for production of stable ammonium chloride applied to black soil

CUI Lei<sup>1,2,5</sup>, LI Dong-po<sup>1,5\*</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>, CUI Yong-kun<sup>4</sup>, GAO Bo<sup>4</sup>

(1 Institute of Applied Ecology, Chinese Academy of Sciences, Shenyang, Liaoning 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 National Field Research Station of Shenyang Agroecosystems, Chinese Academy of Sciences, Shenyang, Liaoning 110107, China)

收稿日期: 2019-07-26 接受日期: 2019-10-14

基金项目: 国家重点研发计划(2017YFD0200707)。

联系方式: 崔磊 E-mail: cuilei0121@163.com; \* 通信作者 李东坡 E-mail: lidp@iae.ac.cn

**Abstract: [ Objectives ]** The effects of nitrogen-inhibitors were compared in this paper to screen efficient synergists for ammonium chloride fertilizer in black soil. **[ Methods ]** Nitrification inhibitors 3,4-dimethylpyrazolate phosphate (DMPP), dicyandiamide (DCD), 2-chloro-6-trimethyl-pyridine (CP), ammonia protectant (N-GD), nitrogen fertilizer synergist (HFJ) and their combination were added into ammonium chloride separately, and nine kinds of stable nitrogen fertilizers were prepared as fertilizer treatment materials. Using no nitrogen fertilizer (CK) and common  $\text{NH}_4\text{Cl}$  (CK-N) as controls, a maize pot experiment was conducted. The soil  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  and  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  contents in the seedling, big flare, grain filling and mature stage of maize were determined across all treatments. The biomass, grain yield and N content in maize plant were investigated at maturity. Apparent nitrification rate, nitrification inhibition rate, agronomic efficiency, and partial productivity of the nitrogen fertilizers were calculated. **[ Results ]** 1) Compared with CK-N treatment, all the nine treatments significantly improved the yields of maize. Among all the nine treatments, HFJ produced the most significant increase in yield and nitrogen absorption efficiency (NAE), which were 3.99 and 4.98 times higher than those in CK-N treatments, and also significantly higher than the other 8 treatments ( $P < 0.05$ ). Among the five nitrification inhibitor treatments, the best two treatments in maize yields were CP + DMPP and CP + DCD, which were 1.90–2.11 times of that in CK-N treatment. The maize biomass in CP + DMPP was significantly higher than that in CP, but similar with those in DMPP and DCD. The N uptake efficiency of CP + DMPP was significantly higher than those of CP and DMPP ( $P < 0.05$ ). 2) The soil  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  contents in CP + DMPP and CP + DCD treatments were significantly higher than those in CP, DMPP and DCD, with a significant increase of 2.09–2.42 times ( $P < 0.05$ ). The soil  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  contents and the apparent nitrification rate of black soil in the two treatments were significantly reduced by 24% and 66%–68%, respectively, which were significantly different from those in CP and DCD treatments ( $P < 0.05$ ). The nitrification inhibition rates of CP + DMPP and CP + DCD at seedling stage were as high as 23.9%–24.3%, which were significantly higher than those of CP and DCD ( $P < 0.05$ ). **[ Conclusions ]** In black soil, the nitrogen fertilizer synergist HFJ shows the most efficient effect in increasing the utilization rate of  $\text{NH}_4\text{Cl}$  fertilizer, yield and harvest index of maize. Nitrification inhibitor can significantly and effectively slow down the transformation of ammonium nitrogen to nitrate nitrogen, and simultaneous use of two nitrification inhibitors produces better effect than single one does. From the results, we recommend HFJ or CP + DMPP combination when using  $\text{NH}_4\text{Cl}$  as nitrogen fertilizer in maize production in black soil. The nitrification inhibitor combination of CP + DCD is also a good choice, depending on the situation.

**Key words:** nitrification inhibitor; nitrogen synergist; ammonium nitrogen; nitrate nitrogen; nitrogen use efficiency; economic output

氮是植物生长最重要的营养元素之一, 氮肥在农业生产中得到广泛应用<sup>[1]</sup>。玉米是中国最主要的粮食作物之一, 其播种面积约 0.42 亿  $\text{hm}^2$ <sup>[2]</sup>。氮肥过量施用造成了一系列环境问题, 如水体富营养化<sup>[3]</sup>、农田土壤酸化<sup>[4]</sup>、温室气体排放等<sup>[1]</sup>。因此, 大幅提高氮肥利用率, 减少环境污染具有重要意义。

目前, 提高氮肥利用率的主要途径是应用新型高效肥料<sup>[5]</sup>、增施有机肥料、改进施肥技术、加强田间水肥管理等措施。通过抑制土壤亚硝化和硝化作用过程, 可以减缓铵态氮向硝态氮的转化, 降低淋溶损失, 提高氮素利用率<sup>[1]</sup>, 添加硝化抑制剂于铵态氮肥是显著提高氮肥利用率、增加作物产量、改善农产品品质和生态环境的有效途径之一<sup>[6-8]</sup>。应用最

为广泛的硝化抑制剂包括 3,4-二甲基吡唑磷酸盐 (DMPP)、双氰胺 (DCD) 和 2-氯-6-三甲基吡啶 (Nitrpyrin, CP) 等<sup>[9]</sup>。研究表明, DCD 和 DMPP 与尿素的配合施用可使农田土壤  $\text{N}_2\text{O}$  年均排放量分别减少 35% 和 38%<sup>[10]</sup>; 添加硝化抑制剂 DMPP 的尿素可以使亚热带草原氨挥发和  $\text{N}_2\text{O}$  排放分别减少 44% 和 15%, 使牧草生物量和氮吸收量增加 22%~36% 和 22%~32%<sup>[11]</sup>; 施用 CP 导致麦季氮素氨挥发量增加 1.46~1.75 倍, 但氨损失绝对量较低, 仅为 2.01~7.31  $\text{kg}/\text{hm}^2$  (占当季投入氮的 0.64%~3.56%), 在生产实践中可以有效控制<sup>[12]</sup>。王雪薇等<sup>[13]</sup>研究表明, 在施用硫酸铵肥料的盆栽试验中, DCD 的硝化抑制率为 49.3%~79.4%, DMPP 的硝化抑制率为 96.7%~

99.4%，CP 的硝化抑制率为 41.7%~99.9%，硝化抑制效果为 CP > DMPP > DCD。然而，对于稳定性氮肥，不同生化抑制剂对于不同作用底物（氮素肥料种类）、不同土壤环境作用效果差异很大，有的甚至无效或效果很低。史云峰等<sup>[14]</sup>和薛妍等<sup>[15]</sup>研究表明，添加 DCD、DMPP 的硝化抑制效果随土壤含水量的降低而增加；Gu 等<sup>[16]</sup>研究表明添加硝化抑制剂 CP 在酸性土壤上效果最好。2017 年，中国农业生产中，氮肥应用约占总化肥（氮、磷、钾和复合肥）应用量的 38% 左右<sup>[2]</sup>，氮肥主要以尿素、氯化铵、硫酸铵为主，以往对于不同硝化抑制剂的作用效果研究多关注氮肥尤其是尿素的添加量及作用机理，而对于铵态氮肥在黑土上的研究很少，因此通过筛选高效生化抑制剂或抑制剂配方，研制适合黑土的高效稳定性氮肥是进一步提高氮肥利用率的重要途径。

本研究以东北主要农业土壤之一的黑土为应用对象，以主栽农作物玉米为供试作物，通过盆栽试验，研究稳定性氯化铵在黑土中的施用效果，以期研制适合东北黑土的高效稳定性氯化铵态氮肥提供科学依据。

## 1 材料与方 法

### 1.1 供试材料

1.1.1 供试土壤 供试土壤为黑土，采自吉林省农安县永安乡农田 0—20 cm 耕层。土壤有机质 31.25 g/kg、全氮 1.59 g/kg、全磷 0.08 g/kg、全钾 5.79 g/kg、铵态氮 9.8 mg/kg、硝态氮 34.2 mg/kg、有效磷 23.5 mg/kg、速效钾 108 mg/kg、pH 6.16。试验所用土壤过 2 mm 筛，备用。

1.1.2 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，含氮量 26%，重过磷酸钙由云天化集团有限责任公司生产，含 P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 43%，氯化钾由俄罗斯生产，含 K<sub>2</sub>O 60%。

1.1.3 供试添加剂 3,4-二甲基吡唑磷酸盐（DMPP）和 2-氯-6-三甲基吡啶（Nitrpyrin, CP）由 Maya Reagent 生物技术公司生产；双氰胺（DCD）由 Macklin 生物技术公司生产；氨保护剂 N-GD 由西班牙生物技术公司提供；氮肥增效剂 HFJ 为化学纯，由北京生物科技公司提供。

1.1.4 供试作物 春玉米，品种为东单 6531。

### 1.2 试验设计

本试验在中国科学院沈阳农田生态实验站进行。试验共设 11 个处理，以只施磷钾肥（CK）和磷钾肥与普通氯化铵为对照（CK-N），在氯化铵中分别

添加 3,4-二甲基吡唑磷酸盐（DMPP）、双氰胺（DCD）、2-氯-6-三甲基吡啶（Nitrpyrin, CP）和氮肥增效剂（HFJ）及其组合，并增加了 CP 与氨保护剂（N-GD）的组合制成 9 种稳定性氯化铵氮肥（表 1），进行了玉米盆栽试验。硝化抑制剂 CP、DMPP、DCD、氨保护剂 N-GD 和氮肥增效剂 HFJ 添加量分别为含氮量的 0.5%、1.0%、4.0%、1.5% 和 35.0%，抑制剂组合添加量在此基础上各减 50%，与氯化铵混合后作为高效稳定性氯化铵肥料。上述各处理，每公斤风干土施 N 0.3 g、P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 0.12 g、K<sub>2</sub>O 0.15 g。将供试土壤摊铺在塑料膜上，将制备的氯化铵肥料倒入土中，充分混匀，然后装入塑料盆中，浇水使土壤含水量达到最大田间持水量的 60% 左右。每盆播种 5 粒玉米种子，三叶期定植，每盆保留 1 株玉米。玉米生长期人工浇水，保证每盆浇水量相同，使土壤水分含量能够保证玉米正常生长，作物整个生长期不追肥。

### 1.3 样品采集

试验于 2018 年 6 月 18 日播种，10 月 18 日收获。分别于玉米苗期（7 月 18 日）、大喇叭口期（8 月 5 日）、灌浆期（9 月 11 日）和成熟期（10 月 18 日）采集土壤样品，每盆 5 点采样，然后混合均匀作为代表样，所取土样去除杂物、细根，过 2 mm 筛备用。在玉米成熟期整株收获，收集盆中玉米秸秆、籽粒、根系，烘干后测定玉米籽粒产量和生物产量，采集秸秆、籽粒、根系进行室内分析。

### 1.4 测定指标与方法

在土壤取样后立即用 2 mol/L 氯化钾溶液浸提（土：液 = 1：10），在 160 r/min 震荡器中震荡 1 h，浸提液使用 3-AA3 型连续流动分析仪测定土壤速效氮（铵态氮和硝态氮）含量。

在玉米成熟期，取每盆玉米的秸秆、穗、根等，置于烘箱，在 65℃ 下烘干至恒重，计算玉米籽粒产量和生物产量。与此同时对玉米进行考种，测定其穗粒数和穗长等生物学指标，将烘干后的玉米植株样品，按秸秆、籽粒和根系分别用粉碎机粉碎过 180 μm 筛，采用 VARIO MACRO 元素分析仪测定植株的全氮含量。

### 1.5 计算方法

$$\text{硝化抑制率 (\%)} = (a-b) / a \times 100$$

式中：a 为氯化铵处理土壤硝态氮含量（mg/kg）；b 为加入抑制剂氯化铵处理土壤硝态氮含量（mg/kg）<sup>[17]</sup>。

$$\text{土壤表观硝化速率 (\%)} = \text{土壤中硝态氮含量} / (\text{土$$

壤中硝态氮含量+土壤中铵态氮含量) × 100<sup>[18]</sup>。

根据葛均筑等<sup>[19]</sup>计算以下指标:

玉米经济系数 = 玉米产量/玉米生物产量;

玉米植株氮素累积吸收量 (g/株) = 玉米植株氮素含量 × 玉米植株干物质量;

玉米氮收获指数 = 玉米籽粒氮素累积量/玉米植株氮素累积吸收量;

玉米氮肥吸收利用率 (%) = (施氮玉米吸氮量-不施氮玉米吸氮量)/施氮量 × 100;

玉米氮肥农学效率 (g/g) = (施氮处理玉米籽粒产量-不施氮处理玉米籽粒产量)/施氮量;

玉米氮肥偏生产力 (g/g) = 施氮处理玉米籽粒产量/氮肥施用量;

肥料氮贡献率 (%) = (施氮玉米产量-不施氮玉米产量)/施氮玉米产量 × 100。

## 1.6 数据统计与分析方法

数据采用 Microsoft Excel 2010、SPSS 20.0 进行统计分析, Origin 9.0 作图, 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 不同处理对玉米生物量、产量和经济系数的影响

与 CK-N 处理相比, 添加硝化抑制剂和氮肥增效剂处理显著提高了玉米籽粒产量 ( $P < 0.05$ ), 平均

增加籽粒产量为 1.96 倍 (表 1)。HFJ 处理玉米籽粒产量最高, 为 176.16 g/盆, 与其他处理存在显著差异 ( $P < 0.05$ ); 其次是 DMPP 和 DCD 处理玉米籽粒产量较高, 显著高于 CP 处理和 CP + N-GD 处理, 而其他处理之间无显著差异 ( $P > 0.05$ ); CP 处理显著高于 CP + N-GD 处理 ( $P < 0.05$ ), CP + N-GD 处理玉米籽粒产量最低, 为 40.29 g/盆。

与 CK-N 处理相比, 添加硝化抑制剂和氮肥增效剂处理显著提高玉米总生物量 ( $P < 0.05$ ), 平均增加总生物量 61% (表 1)。CP + N-GD 处理玉米总生物量与 CK-N 处理无显著差异, CK-N 处理与其他处理存在显著差异 ( $P < 0.05$ )。HFJ 和 CP + DMPP 处理玉米总生物量在统计学上均最高, 在 326 g/盆以上, 两者之间无显著差异, 显著高于 CP、CP + N-GD 和 DMPP + DCD + HFJ 处理; 其次是 DMPP、DCD、CP + DCD 和 DMPP + DCD 处理玉米总生物量较高, 4 个处理之间无显著差异, 均显著高于 CP + N-GD 处理 ( $P < 0.05$ ); CP + N-GD 处理最低, 为 199 g/盆。

与 CK-N 处理相比, 添加硝化抑制剂及氮肥增效剂处理显著提高了玉米经济系数, 平均提高 79% (表 1)。CP + N - GD 处理玉米经济系数与 CK-N 处理无显著差异, CK-N 处理与其他处理存在显著差异 ( $P < 0.05$ )。DCD 和 HFJ 处理经济系数在统计学上均最高, 达到 0.42 以上, 显著高于 CP、CP + DMPP

表 1 不同处理玉米产量、总生物量和经济系数

Table 1 Yield, total biomass and economic coefficient of maize under different treatments

处理 Treatment	籽粒产量 (g/pot) Grain yield	总生物量 (g/pot) Total biomass	经济系数 Economic coefficient
CK	27.87 ± 3.77 d	96.52 ± 3.08 e	0.29 ± 0.03 d
CK-N	35.31 ± 3.85 d	177.46 ± 11.62 d	0.20 ± 0.01 e
CP	76.72 ± 24.37 c	257.36 ± 35.31 c	0.29 ± 0.06 d
DMPP	114.08 ± 10.60 b	292.34 ± 20.02 bc	0.39 ± 0.06 bc
DCD	121.67 ± 0.93 b	288.26 ± 12.63 bc	0.42 ± 0.02 ab
HFJ	176.16 ± 44.90 a	360.43 ± 39.48 a	0.48 ± 0.08 a
CP + DMPP	109.81 ± 16.50 bc	326.17 ± 50.11 ab	0.34 ± 0.02 cd
CP + DCD	102.42 ± 14.59 bc	287.01 ± 25.05 bc	0.36 ± 0.02 bcd
DMPP + DCD	106.93 ± 10.95 bc	279.26 ± 16.12 bc	0.38 ± 0.02 bc
CP + N-GD	40.29 ± 8.58 d	199.01 ± 10.87 d	0.20 ± 0.03 e
DMPP + DCD + HFJ	93.93 ± 6.29 bc	265.36 ± 4.86 c	0.35 ± 0.03 bcd

注 (Note): 同列数据后不同小写字母表示处理间差异显著 ( $P < 0.05$ ) Values followed by different small letters indicate significant difference among treatments ( $P < 0.05$ ).

和 CP + N-GD 处理 ( $P < 0.05$ ); 其次是 DMPP 和 DMPP + DCD 处理玉米经济系数较高, 两者间无显著差异 ( $P > 0.05$ ), 而显著高于 CP 和 CP + N-GD 处理; CP + N-GD 处理经济系数最低, 为 0.20。

分析表明, 添加氮肥增效剂 HFJ 显著提高玉米籽粒产量、总生物量和经济系数, 可能是由于氮肥增效剂增加了土壤肥力, 促进了玉米对氮素的吸收。添加硝化抑制剂 DMPP、DCD 以及组合 CP + DMPP、CP + DCD 和 DMPP + DCD 显著提高了玉米籽粒产量、总生物量和经济系数, 表明其显著提高土壤中氮素含量, 促进玉米对土壤中氮的吸收, 从而增加玉米产量。而 CP + N-GD 的作用效果较弱。

## 2.2 不同处理对玉米植株氮素累积吸收量和氮肥利用效率的影响

### 2.2.1 不同处理对玉米植株氮素累积吸收量的影响

从表 2 可以看出, HFJ 处理的玉米籽粒吸氮量最高, 为 1.35 g/株, 显著高于其他处理 ( $P < 0.05$ ); 其次是 DCD 处理; DMPP 和 CP + DMPP 处理之间无显著差异, 均显著高于 CP 处理 ( $P < 0.05$ ); CP + N-GD 处理玉米籽粒吸氮量最低, 为 0.26 g/株。

除了 CP + N-GD 处理, 添加硝化抑制剂和氮肥增效剂氯化铵与 CK-N 处理之间总吸氮量存在显著差异 ( $P < 0.05$ )。HFJ 处理玉米植株总吸氮量最高, 为 1.71 g/株, 与其他处理存在显著差异 ( $P < 0.05$ );

其次是 DCD 和 CP + DMPP 处理, 其玉米植株总吸氮量较高, 显著高于 CP 和 DMPP 处理; CP + N-GD 处理玉米植株总吸氮量最低, 为 0.50 g/株。

分析表明, 添加氮肥增效剂 HFJ 显著增加玉米籽粒吸氮量, 提高玉米植株总吸氮量。可能是由于氮肥增效剂促进了玉米植株对养分的吸收; CP + N-GD 抑制硝化作用的效果较弱, 添加其他硝化抑制剂均能有效提高玉米秸秆和籽粒吸氮量, 以添加硝化抑制剂 DCD 和 CP + DMPP 的效果最为突出。

### 2.2.2 不同处理对玉米氮素利用效率的影响

由表 2 可知, 在所有处理中以 HFJ 处理的玉米氮素收获指数最高, 为 0.78, 显著高于其他处理 ( $P < 0.05$ ); 其次是 DCD, 显著高于 CP + DMPP、DMPP + DCD、DMPP + DCD + HFJ 和 CP + N-GD 处理, 与 DMPP 和 CP + DCD 无显著差异; 以 CP + N-GD 处理最低, 为 0.52。

与 CK-N 处理相比, 除了 CP + N-GD 处理, 添加硝化抑制剂和氮肥增效剂处理均显著提高玉米氮肥吸收利用率 ( $P < 0.05$ )。HFJ 处理玉米氮肥吸收利用率最高, 达到 55.01% (表 2), 显著高于其他处理 ( $P < 0.05$ ); 其次是 DCD 和 CP + DMPP 处理较高, 均显著高于 CP 和 DMPP 处理 ( $P < 0.05$ ); 以 CP + N-GD 处理最低, 为 6.62%。

与 CK-N 处理相比, HFJ 处理玉米氮肥农学效率

表 2 不同处理玉米植株氮素累积吸收量和氮肥利用率

Table 2 Maize N uptake and utilization efficiency of fertilizer under different treatments

处理 Treatment	籽粒吸氮量 Grain N uptake (g/plant)	总吸氮量 Total N uptake (g/plant)	氮收获指数 NHI	氮肥吸收利用率 NAE (%)	氮肥农学效率 ANUE (g/g)	肥料贡献率 FCR (%)	氮肥偏生产力 NPPF (g/g)
CK	0.19 ± 0.01 f	0.39 ± 0.05 f	0.45 ± 0.02 d				
CK-N	0.27 ± 0.03 f	0.55 ± 0.06 e	0.51 ± 0.00 d	9.20 ± 0.57 e	1.51 ± 0.02 e	35.06 ± 3.38 e	14.71 ± 1.60 e
CP	0.65 ± 0.00 e	0.96 ± 0.05 d	0.68 ± 0.04 bc	23.82 ± 3.59 d	24.65 ± 4.29 d	62.11 ± 7.49 c	26.89 ± 5.08 d
DMPP	0.85 ± 0.03 cd	1.21 ± 0.03 c	0.70 ± 0.04 bc	33.88 ± 2.87 c	35.92 ± 5.99 b	75.22 ± 5.63 ab	47.53 ± 4.41 b
DCD	1.10 ± 0.07 b	1.50 ± 0.06 b	0.74 ± 0.03 ab	46.21 ± 1.11 b	39.08 ± 1.80 b	77.08 ± 3.20 ab	50.69 ± 0.39 b
HFJ	1.35 ± 0.17 a	1.71 ± 0.10 a	0.78 ± 0.05 a	55.01 ± 5.40 a	52.43 ± 7.78 a	83.69 ± 3.21 a	64.04 ± 9.35 a
CP + DMPP	0.94 ± 0.15 c	1.43 ± 0.15 b	0.65 ± 0.04 c	43.29 ± 5.47 b	37.58 ± 5.01 b	74.08 ± 5.95 b	49.19 ± 3.44 b
CP + DCD	0.71 ± 0.03 de	1.02 ± 0.05 d	0.69 ± 0.01 bc	26.34 ± 3.59 d	35.35 ± 1.12 b	72.04 ± 8.02 b	46.18 ± 0.34 b
DMPP + DCD	0.69 ± 0.15 e	1.08 ± 0.14 cd	0.63 ± 0.06 c	28.75 ± 4.87 cd	32.94 ± 3.35 bc	73.96 ± 1.84 b	47.18 ± 2.97 b
CP + N-GD	0.26 ± 0.04 f	0.50 ± 0.06 ef	0.52 ± 0.03 d	6.62 ± 0.73 e	7.75 ± 2.57 e	48.20 ± 2.48 d	18.58 ± 1.79 e
DMPP + DCD + HFJ	0.62 ± 0.06 e	0.97 ± 0.12 d	0.65 ± 0.05 c	23.86 ± 4.13 d	27.52 ± 1.05 cd	70.42 ± 2.04 b	39.14 ± 2.62 c

注 (Note): NHI—Nitrogen harvest index; NAE—Nitrogen absorption efficiency; ANUE—Agronomic efficiency of nitrogen fertilizer; FCR—Fertilizer contribution ratio; NPPF—Nitrogen partial factor productivity. 同列数据后不同小写字母表示处理间差异显著 ( $P < 0.05$ ) Values followed by different small letters indicate significant difference among treatments ( $P < 0.05$ ).

最高, 达到 52.43 g/g (表 2), 显著高于其他处理 ( $P < 0.05$ ); 其次是 DMPP、DCD、CP + DMPP 和 CP + DCD 处理较高, 这 4 个处理之间无显著差异, 显著高于 CP 和 DMPP + DCD + HFJ 处理 ( $P < 0.05$ ); CP + N-GD 处理最低, 为 7.75 g/g。

HFJ 处理的肥料贡献率最高, 达到了 83.69%, 显著高于多数其他处理 ( $P < 0.05$ ); 其次是 DMPP 和 DCD 处理较高, 与 CP + DMPP 和 CP + DCD 处理之间无显著差异, 但显著高于 CP 处理 ( $P < 0.05$ ); CP + N-GD 处理最低, 为 48.20% (表 2)。

HFJ 处理氮肥偏生产力最高, 为 64.04 g/g (表 2), 显著高于其他处理 ( $P < 0.05$ ); 其次是 DMPP 和 DCD 处理玉米氮肥偏生产力较高, 两个处理间无显著差异, 与 CP + DMPP、CP + DCD、DMPP + DCD 间也无显著差异, 显著高于 CP 处理 ( $P < 0.05$ ); 以 CP + N-GD 处理最低, 为 18.58 g/g。

分析表明, 添加氮肥增效剂 HFJ 显著增加玉米氮素收获指数, 提高玉米氮肥利用率、肥料贡献率以及氮肥偏生产力。可能是由于氮肥增效剂增加了土壤中的无机态氮, 促进了玉米植株对氮素的吸收; CP + N-GD 抑制硝化作用的效果较弱, 添加硝化抑制剂 DCD 和组合 CP + DMPP、CP + DCD 均能促进玉米对黑土中氮素的吸收, 从而提高玉米氮素收获指数、氮肥吸收利用率和肥料贡献率。

## 2.3 不同处理对土壤铵态氮和硝态氮含量的影响

### 2.3.1 不同处理对土壤铵态氮的影响

在玉米各生育时期内, 添加硝化抑制剂和氮肥增效剂的氯化铵氮肥显著影响黑土铵态氮含量, 土壤中铵态氮含量总体呈先上升后下降的趋势。从玉米的 4 个生育时期来看, 所有处理苗期黑土中铵态氮含量最高, 且苗期添加硝化抑制剂和氮肥增效剂处理黑土铵态氮含量显著高于 CK 处理和 CK-N 处理, 其他 3 个时期趋于一致, 说明在大喇叭口期、灌浆期和成熟期黑土中已有大量的铵态氮被玉米植株所吸收利用, 且在玉米生育后期硝化抑制剂和氮肥增效剂的作用效果明显减弱。

由表 3 可知, 在玉米苗期, 土壤铵态氮含量以 CP + DCD 处理最高, 为 117.48 mg/kg, 显著高于其他处理 ( $P < 0.05$ ); 其次是 CP + DMPP 和 DMPP + DCD + HFJ 处理, 二者显著高于 CP、DMPP、DCD、HFJ 和 CP + N-GD 处理 ( $P < 0.05$ ); DMPP + DCD 处理显著高于 DMPP 处理; HFJ 处理铵态氮含量最低, 为 54.10 mg/kg。说明在该理化性质的黑土中, 氯化铵

肥料中只添加 CP、HFJ, 其增加土壤铵态氮的效果, 没有添加 CP + DMPP、CP + DCD、CP + N-GD、DMPP + DCD + HFJ 组合的效果显著, 同时也说明了添加硝化抑制剂组合 DMPP + DCD 效果优于只添加硝化抑制剂 DMPP 处理。玉米大喇叭口期是玉米需肥量最大时期, 此时期玉米对铵态氮的吸收量很大, CP + DMPP 和 DMPP + DCD 处理铵态氮含量最高, 在 16.81 mg/kg 以上, 显著高于 DMPP 和 DCD ( $P < 0.05$ ), 而与 CK-N 处理无显著差异, 其他处理均显著低于 CK-N 处理。在玉米灌浆期, CK-N 处理铵态氮含量为 26.18 mg/kg。抑制剂处理中, CP 处理土壤铵态氮含量显著低于 CK-N 处理, 但显著高于其他处理 ( $P < 0.05$ )。原因可能是灌浆期玉米生长吸收的铵态氮较多, 也可能是因为这些硝化抑制剂作用效果已经减弱。在玉米成熟期, 所有处理铵态氮含量趋于一致, 多数处理间铵态氮含量无显著差异 (表 3)。从玉米整个生育期不同处理土壤铵态氮含量变化分析可知, 添加硝化抑制剂组合 CP + DCD、CP + DMPP 和 DMPP + DCD 氯化铵显著提高了黑土铵态氮含量, 其间无显著差异, 表明其硝化抑制效果最佳。

### 2.3.2 不同处理对土壤硝态氮的影响

在玉米的各个生育时期内, 添加硝化抑制剂和氮肥增效剂处理显著影响黑土硝态氮含量, 其变化趋势与黑土铵态氮含量相同, 总体呈先上升后下降的趋势。玉米苗期, 添加硝化抑制剂和氮肥增效剂处理黑土中硝态氮含量最高, 大喇叭口期、灌浆期和成熟期黑土硝态氮含量都很低, 并且有逐渐降低的趋势, 各时期不同处理硝态氮含量基本趋于一致 (表 3), 说明在玉米大喇叭口期已有大量硝态氮被玉米植株吸收利用; 灌浆期和成熟期, 添加硝化抑制剂和氮肥增效剂对氯化铵中铵态氮的转化无显著作用效果。

玉米苗期, 添加硝化抑制剂处理黑土硝态氮含量显著低于 CK-N 处理, 平均降低了 15%, 表明添加氯化铵氮肥处理铵态氮在土壤中很快转化为硝态氮, 添加硝化抑制剂处理明显抑制黑土的硝化作用 ( $P < 0.05$ ); HFJ 处理硝态氮含量最高, 为 22.94 mg/kg (表 3), 与其他处理差异显著 ( $P < 0.05$ ); 其次是 CP 和 DCD 处理硝态氮含量较高, 两个处理间无显著差异, 而显著高于 DMPP、DMPP + DCD、CP + DMPP 和 CP + DCD 处理, 后 4 个处理间无显著差异, 其中最低的是 CP + DMPP 处理, 为 16.14 mg/kg (表 3)。说明添加硝化抑制剂和氮肥增效剂组合处理对抑制黑土铵态氮转化为硝态氮的效果显著高于只

表 3 玉米不同生育时期各处理土壤铵态氮和硝态氮含量 (mg/kg)  
Table 3 Contents of soil ammonium and nitrate nitrogen in different growth stages of maize

处理 Treatment	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N				NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N			
	苗期 Seedling	大喇叭口期 Big flare	灌浆期 Grain-filling	成熟期 Maturity	苗期 Seedling	大喇叭口期 Big flare	灌浆期 Grain-filling	成熟期 Maturity
CK	20.77 ± 0.35 h	15.13 ± 0.12 cde	14.74 ± 0.24 d	11.43 ± 0.25 ab	15.69 ± 1.11 e	5.37 ± 1.05 ab	3.01 ± 0.15 bc	3.96 ± 0.16 a
CK-N	34.32 ± 4.13 g	17.51 ± 1.01 a	26.18 ± 0.24 a	11.64 ± 0.30 ab	21.35 ± 0.49 b	3.79 ± 0.14 c	2.61 ± 0.20 bcd	2.62 ± 0.23 e
CP	57.16 ± 4.95 f	16.19 ± 0.80 bc	19.84 ± 0.10 b	11.50 ± 0.81 ab	20.22 ± 0.30 b	6.46 ± 0.56 a	2.32 ± 0.13 d	2.96 ± 0.27 bcde
DMPP	77.41 ± 0.87 d	14.13 ± 0.48 e	12.48 ± 0.29 g	10.82 ± 0.09 ab	17.12 ± 0.73 cd	5.62 ± 0.62 ab	4.01 ± 0.66 a	2.75 ± 0.49 de
DCD	94.60 ± 0.77 c	15.39 ± 0.10 cd	13.44 ± 0.98 f	11.51 ± 0.47 ab	19.95 ± 0.31 b	6.32 ± 0.23 a	2.81 ± 0.39 bcd	3.31 ± 0.19 bc
HFJ	54.10 ± 0.58 f	15.63 ± 0.05 cd	15.97 ± 0.58 c	10.63 ± 0.42 b	22.94 ± 0.94 a	4.75 ± 0.18 bc	2.74 ± 0.01 bcd	2.98 ± 0.27 bcde
CP + DMPP	105.97 ± 1.02 b	17.71 ± 0.53 a	14.22 ± 0.43 de	11.85 ± 1.07 a	16.14 ± 0.84 de	4.04 ± 0.42 c	2.74 ± 0.51 bcd	3.19 ± 0.18 bcd
CP + DCD	117.48 ± 4.37 a	14.90 ± 0.19 de	15.80 ± 0.14 c	11.69 ± 0.12 ab	16.23 ± 0.61 de	4.78 ± 0.71 bc	3.14 ± 0.17 b	3.13 ± 0.25 bcde
DMPP + DCD	96.04 ± 1.64 c	16.81 ± 0.73 ab	14.51 ± 0.06 d	10.75 ± 0.28 b	17.33 ± 0.35 cd	5.35 ± 1.45 ab	3.17 ± 0.44 b	3.30 ± 0.23 bc
CP + N-GD	66.81 ± 0.73 e	15.77 ± 1.10 bcd	13.67 ± 0.12 ef	11.40 ± 0.86 ab	20.05 ± 0.91 b	3.77 ± 0.67 c	2.47 ± 0.26 cd	2.80 ± 0.21 cde
DMPP + DCD + HFJ	107.62 ± 2.17 b	15.09 ± 0.70 cde	13.17 ± 0.27 f	10.98 ± 0.40 ab	18.48 ± 1.17 c	4.43 ± 0.24 bc	3.85 ± 0.28 a	3.46 ± 0.32 b

注 (Note): 同列数据后不同小写字母表示处理间差异显著 ( $P < 0.05$ ) Values followed by different small letters indicate significant difference among treatments ( $P < 0.05$ ).

添加硝化抑制剂或肥料增效剂处理, 能够显著降低硝态氮含量。大喇叭口期, HFJ、CP + DMPP、CP + DCD 和 DMPP + DCD + HFJ 与 CK-N 处理无显著差异, 4 个处理之间也无显著差异; CP、DMPP 和 DCD 处理黑土硝态氮含量显著高于 CK-N 处理 ( $P < 0.05$ )。灌浆期和成熟期, 所有处理硝态氮含量达到最低, 趋于一致。从玉米整个生育时期不同处理土壤硝态氮含量变化分析可知, 添加硝化抑制剂 DMPP 和硝化抑制剂组合 CP + DMPP、CP + DCD 和 DMPP + DCD 处理黑土硝态氮含量显著降低, 其抑制效果最佳。

从玉米整个生育时期不同处理黑土中铵态氮和硝态氮含量的动态变化可知, 添加硝化抑制剂组合 CP + DCD、CP + DMPP 和 DMPP + DCD + HFJ 处理对铵态氮硝化作用的抑制作用较好, 土壤硝态氮含量保持在较低水平, 说明添加硝化抑制剂 CP 和 DMPP 与 DCD 组合抑制黑土中的硝化作用效果较强, 且作用时间长于其他处理, 添加氮肥增效剂 HFJ 处理硝态氮含量最高, 说明添加氮肥增效剂增加了土壤硝态氮含量, 且在黑土中无抑制硝化作用的效果。

#### 2.4 不同处理土壤表观硝化率变化

由图 1 可知, 玉米苗期, CK 处理的黑土表观硝化率显著高于 CK-N 处理 ( $P < 0.05$ ), 表明黑土发生强烈的硝化作用。与 CK-N 处理相比, 添加硝化抑制剂和氮肥增效剂处理显著降低黑土表观硝化率 ( $P < 0.05$ ), 表明添加硝化抑制剂显著抑制了黑土的硝化作用。HFJ 处理表观硝化率较高, 为 29.8%, 与其他处理差异显著; 其次是 CP 处理, 显著高于 CP + DMPP、CP + DCD 和 CP + N-GD 处理; DMPP 和 DCD 处理之间无显著差异, 显著高于 DMPP + DCD 和 DMPP + DCD + HFJ 处理 ( $P < 0.05$ ); 其中最低的是 CP + DCD 处理, 为 12.15%。说明添加硝化抑制剂和氮肥增效剂组合处理对抑制黑土铵态氮转化为硝态氮的效果显著高于只添加硝化抑制剂和肥料增效剂处理, 能够显著降低黑土表观硝化率。玉米大喇叭口期, CK-N 处理黑土表观硝化率最低, 显著低于 CK 处理 ( $P < 0.05$ )。与 CK-N 处理相比, DCD 处理黑土表观硝化率最高, 达到 29.1% (图 1), 显著高于 CP + DCD、DMPP + DCD 和 DMPP + DCD + HFJ 处理, 而与 CP 和 DMPP 处理无显著差异; 其次是 CP 和 DMPP 处理, 两个处理之间无显著差异, 均显著高于 CP + DMPP 处理; CP + DMPP 处理黑土表观硝化率最低, 为 18.57% (图 1)。表明添加硝化

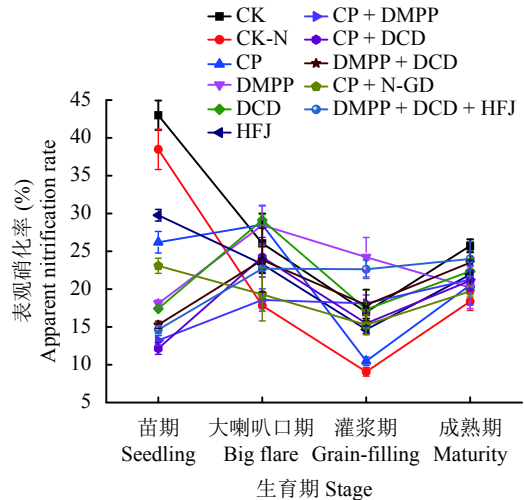


图 1 玉米不同生育时期各处理土壤表观硝化率

Fig. 1 Apparent nitrification rate of soil in treatments at different growth stages of maize

抑制剂组合在黑土中的硝化抑制作用比单独施用硝化抑制剂时间长, 表观硝化率持续较低。玉米灌浆期, CK-N 处理土壤表观硝化率显著低于 CK 处理 ( $P < 0.05$ ); CK-N 处理土壤表观硝化率最低, 为 9.07% ( $P < 0.05$ ), 与其他处理差异显著, 说明只施氯化铵氮肥处理, 玉米吸收利用黑土中的氮较少; 其次是 CP 处理较低, 说明硝化抑制剂 CP 处理固定的铵态氮释放, 黑土中铵态氮增多, 表观硝化率较低; 其余处理土壤表观硝化率趋于一致, 处理间无显著差异。从玉米整个生育时期不同处理土壤表观硝化率变化分析可知, 添加硝化抑制剂组合 CP + DMPP 和 CP + DCD 处理黑土表观硝化率显著降低, 说明其抑制硝化效果最佳。

#### 2.5 玉米苗期不同处理硝化抑制率

硝化抑制率用来表征硝化抑制剂对土壤硝化作用的抑制程度与效果。如图 2 所示, 在玉米苗期, 添加硝化抑制剂和硝化抑制剂组合处理硝化抑制率均较高。CP + DMPP 和 CP + DCD 处理硝化抑制率最高, 均在 23.9% 以上, 显著高于 CP 和 DCD 处理, 而与 DMPP 和 DMPP + DCD 处理无显著差异; CP + N-GD 处理较低, 为 8.2%。由于 HFJ 是氮肥增效剂, 没有硝化抑制作用, 且能促进氮的吸收, 故其硝态氮含量高, 硝化抑制率最低。表明在玉米苗期添加硝化抑制剂 DMPP 和组合 CP + DMPP、CP + DCD、DMPP + DCD 处理抑制硝化作用的效果最好, 可显著减少硝态氮含量, 从而减少硝酸盐的淋溶损失, 减缓土壤酸化、环境污染等问题。



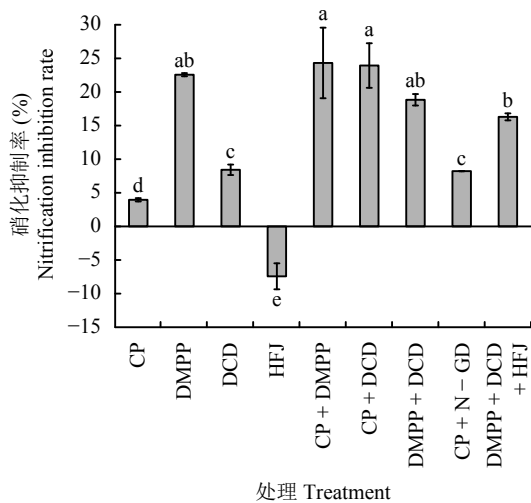


图 2 玉米苗期不同处理硝化抑制率

Fig. 2 Nitrification inhibition rate of different treatments in maize seedling stage

[注 (Notes): 柱上或柱下不同小写字母表示处理间差异显著 ( $P < 0.05$ ) Different small letters above or under the bars indicate significant difference among treatments ( $P < 0.05$ ).]

### 3 讨论

本试验中添加硝化抑制剂和氮肥增效剂显著提高玉米产量, 与 CK-N 处理相比, 提高 0.14~3.99 倍。添加氮肥增效剂 HFJ 产量可以达到 176.16 g/株, 添加硝化抑制剂 DMPP、DCD 和硝化抑制剂组合 CP + DMPP、CP + DCD、DMPP + DCD 产量可以达到 102 g/株以上。氮肥增效剂与硝化抑制剂一同使用, 会降低氮肥增效剂的效果。添加硝化抑制剂和氮肥增效剂在提高玉米产量的同时, 显著提高了玉米的生物量、经济系数和氮肥利用率, 以添加硝化抑制剂 DCD 和 CP + DMPP 的效果最为显著, 这与 Weiske 等<sup>[9]</sup>和 Abalos 等<sup>[20]</sup>研究结果一致, 均表明添加硝化抑制剂能够提高氮肥利用率, 增加作物产量。Liu 等<sup>[10]</sup>研究也表明, 硝化抑制剂 DMPP 与氮肥配施能够提高氮肥利用率和作物产量。

硝化抑制剂能够延缓土壤中的硝化作用, 主要表现为黑土铵态氮含量的增加以及硝态氮含量的降低。本研究中, 在玉米的 4 个生育时期, 从不同种类硝化抑制剂对黑土中铵态氮和硝态氮含量的影响可以看出, 添加硝化抑制剂显著抑制了土壤中的铵态氮向硝态氮的转化过程即硝化作用, 从而使苗期土壤中铵态氮含量保持在较高水平, 此时硝化抑制剂的抑制作用效果较强, 黑土中硝态氮含量保持在较低水平。主要以添加硝化抑制剂组合 CP + DMPP 和 CP + DCD 抑制效果最为明显, 能够减缓土壤中铵

态氮向硝态氮的转化, 保证土壤中的氮素释放与作物氮素需求同步, 减少硝酸盐的淋溶损失, 降低环境污染。后期硝化抑制剂效果减弱, 铵态氮和硝态氮含量趋于一致。这与 Gong 等<sup>[21]</sup>、Zaman 等<sup>[22]</sup>研究结果一致。主要是因为氯化铵氮肥施入黑土后, 铵离子刺激了氨氧化微生物的大量繁殖, 导致其快速被氧化而逐渐减少, 但是随着时间延长, 铵离子逐渐减少且氨氧化细菌不断增加, 导致硝化抑制剂的降解或淋溶<sup>[23-24]</sup>。

DMPP 主要是通过抑制硝化作用的第一步, 即氨氧化过程; DCD 主要是通过影响亚硝化细菌呼吸作用过程中的电子转移和干扰细胞色素氧化酶的功能, 使亚硝化细菌无法进行呼吸, 从而抑制其生长繁殖, 进而抑制铵态氮向硝态氮的转化过程<sup>[25]</sup>。本试验中 DMPP 和 DCD 无论是单独添加还是组合配施, 抑制硝化作用效果都很好, 在玉米生长的 4 个生育时期铵态氮含量达到显著差异, 说明其作用持续时间较长, 为玉米提供更多、持续时间更长的有效态氮, 减少氨挥发和  $N_2O$  排放, 促进作物对氮素的吸收, 提高氮肥利用率, 减少对环境的污染。这与 Di 等<sup>[7]</sup>、Liu 等<sup>[10]</sup>研究结果一致。本试验结果表明, 添加硝化抑制剂 DMPP 以及 CP + DMPP、CP + DCD 和 DMPP + DCD 硝化抑制剂组合处理的硝化抑制率显著高于添加硝化抑制剂 DCD 和 CP 处理的硝化抑制率, 说明在黑土中 DMPP 的抑制效果优于 DCD 和 CP, 可能是由于 DMPP 在土壤中移动性有限, 而且降解速度慢, 不易与  $NH_4^+$  发生分离和淋溶现象, 使得硝化抑制剂 DMPP 效果稳定, 发挥作用时间长<sup>[26]</sup>。硝化抑制剂 DCD 水溶性高, 移动性强, 容易与  $NH_4^+$  在土壤空间分布上发生分离现象, 当遇到强降雨或在保水能力较差的土壤中, 容易发生淋溶损失<sup>[26]</sup>。CP 易见光分解为 6-氯-吡啶甲酸, 造成挥发损失, 不适合表施<sup>[27]</sup>。这与 Chen 等<sup>[28]</sup>研究结果一致。Weiske 等<sup>[9]</sup>研究结果也表明, 在田间试验中, 由于 DMPP 生物降解过程比 DCD 更持久, 故 DMPP 抑制硝化效果优于 DCD。

此外, 研究表明, 硝化抑制剂 DMPP、DCD 以及 CP 与硫酸铵配施在 pH 为 8 的灰漠土中培养 30 天后, 硝化抑制剂的硝化抑制效果表现为  $CP \geq DMPP > DCD$ <sup>[13]</sup>。但是本研究表明在黑土上 CP 的硝化抑制率最低, 可能是由于 CP 对于不同氮肥品种以及不同类型土壤的响应机制不同, 所以抑制效果不同<sup>[29]</sup>。一般低肥力土壤中, 矿物氮损失比较明显, 硝化抑制剂的作用也较好, 土壤有机质含量高, 微生物

物活性也比较强, 促进微生物对抑制剂的降解, 从而使得 CP 的硝化抑制率降低, 而且不同品种的氮肥施入土壤后引起的土壤 pH 变化也会影响抑制剂的抑制效果<sup>[29]</sup>。黑土肥力较高, CP 的抑制效果较差<sup>[30]</sup>, 说明 CP 对土壤肥力的响应比 DMPP 和 DCD 更加敏感。

本试验中, 硝化抑制剂组合 CP + DMPP 和 CP + DCD 处理的硝化抑制率高于 DMPP 和 DCD 处理, 表明不同的硝化抑制剂配合, 可以降低整个玉米生育期铵态氮的转化, 有利于增加玉米的氮素供给, 从而提高玉米产量和氮肥利用率。综合硝化抑制剂在黑土种植玉米所得的产量、氮肥利用率和抑制硝化作用效果来看, 虽然硝化抑制剂 DCD 处理和组合 CP + DMPP、CP + DCD 处理均能显著提高玉米产量和氮肥利用率, 但是硝化抑制剂组合 CP + DMPP 和 CP + DCD 处理硝化抑制率显著高于 DCD 处理, 且在玉米整个生育期显著降低黑土的表现硝化率, 说明硝化抑制剂组合 CP + DMPP 和 CP + DCD 能有效抑制黑土中的硝化作用, 保持土壤中氮素供应与作物需求同步, 促进作物对氮素的吸收, 减少土壤的氮素损失<sup>[31]</sup>, 提高氮肥利用率, 减少环境污染(水体富营养化、全球变暖等问题)。而且硝化抑制剂 CP、DCD 比 DMPP 更廉价<sup>[25]</sup>, 组合 CP + DMPP 和 CP + DCD 施用量均减半, 其性价比高于单独施用硝化抑制剂。由于氮肥增效剂和硝化抑制剂组合鲜有人报道, 故具体的硝化抑制剂组合和氮肥增效剂作用机理有待进一步研究。

## 4 结论

氯化铵中添加硝化抑制剂组合 CP + DMPP 或者 CP + DCD, 硝化抑制率最高, 表现硝化率最低, 显著提高土壤中铵态氮含量, 降低硝态氮含量, 极大地减少硝酸盐的淋溶损失, 降低对环境的污染, 也能够显著提高作物产量和氮肥利用率。添加氮肥增效剂 HFJ 显著增加作物的氮素吸收, 提高氮肥利用率, 从而使玉米获得高产和较高的氮收获指数、经济系数。氮肥增效剂与硝化抑制剂一同使用会降低氮肥增效剂的效果。

### 参考文献:

- [1] Beekman F, Motte H, Beekman T. Nitrification in agricultural soils: impact, actors and mitigation[J]. *Current Opinion in Biotechnology*, 2018, 50: 166–173.
- [2] 中华人民共和国统计局. 中国农业统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2018.
- [3] 巨晓棠, 张福锁. 中国北方土壤硝态氮的累积及其对环境的影响[J]. *生态环境*, 2003, (1): 24–28.
- [4] Ju X T, Zhang F S. Accumulation of soil nitrate nitrogen in northern China and its impact on the environment[J]. *Ecology and Environment*, 2003, (1): 24–28.
- [5] 刘金山, 戴健, 刘洋, 等. 过量施氮对旱地土壤碳、氮及供氮能力的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2015, 21(1): 112–120.
- [6] Liu J S, Dai J, Liu Y, *et al.* Effects of excessive nitrogen fertilization on soil organic carbon and nitrogen and nitrogen supply capacity in dryland[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2015, 21(1): 112–120.
- [7] 卢艳丽, 白由路, 王磊, 等. 华北小麦-玉米轮作区缓控释肥应用效果分析[J]. *植物营养与肥料学报*, 2011, 17(1): 209–215.
- [8] Lu Y L, Bai Y L, Wang L, *et al.* Efficiency analysis of slow controlled release fertilizer on wheat-maize in north China[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2011, 17(1): 209–215.
- [9] 张建军, 樊廷录, 赵刚, 等. 长期定位施不同氮源有机肥替代部分含氮化肥对陇东旱塬冬小麦产量和水分利用效率的影响[J]. *作物学报*, 2017, 43(7): 1077–1086.
- [10] Zhang J J, Fan T L, Zhao G, *et al.* Yield and water use efficiency of winter wheat in response to long-term application of organic fertilizer from different nitrogen resources replacing partial chemical nitrogen in dry land of eastern Gansu Province[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2017, 43(7): 1077–1086.
- [11] Di H J, Cameron K C. How does the application of different nitrification inhibitors affect nitrous oxide emissions and nitrate leaching from cow urine in grazed pastures[J]. *Soil Use and Management*, 2012, 28(1): 54–61.
- [12] Cui P, Fan F, Yin C, *et al.* Urea- and nitrapyrin-affected N<sub>2</sub>O 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.
- [13] Weiske A, Benckiser G, Ottow J C G. Effect of the new nitrification inhibitor DMPP in comparison to DCD on nitrous oxide (N<sub>2</sub>O) emissions and methane (CH<sub>4</sub>) oxidation during 3 years of repeated applications in field experiments[J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2001, 60(1–3): 57–64.
- [14] Liu C, Wang K, Zheng X. Effects of nitrification inhibitors (DCD and DMPP) on nitrous oxide emission, crop yield and nitrogen uptake in a wheat-maize cropping system[J]. *Biogeosciences*, 2013, 10(4): 2427–2437.
- [15] Lam S K, Suter H, Bai M, *et al.* Using urease and nitrification inhibitors to decrease ammonia and nitrous oxide emissions and improve productivity in a subtropical pasture[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 644: 1531–1535.
- [16] 孙海军, 闵炬, 施卫明, 祝介贵. 硝化抑制剂影响小麦产量、N<sub>2</sub>O 与 NH<sub>3</sub> 排放的研究[J]. *土壤通报*, 2017, 49(5): 876–881.
- [17] Sun H J, Min J, Shi W M, Zhu J G. Effects of nitrification inhibitor application on wheat grain yield, N<sub>2</sub>O emission and NH<sub>3</sub> volatilization[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2017, 49(5):

- 876–881.
- [13] 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.
- [14] 史云峰, 赵牧秋, 张丽莉. 双氰胺(DCD)在砖红壤中硝化抑制效果的影响因素研究[J]. *安徽农业科学*, 2011, 39(33): 20437–20440.  
Shi Y F, Zhao M Q, Zhang L L. Research on the factors affecting nitrification inhibition of dicyandiamide (DCD) in Latosol[J]. *Journal of Anhui Agriculture Science*, 2011, 39(33): 20437–20440.
- [15] 薛妍, 武志杰, 张丽莉, 等. 土壤含水量、pH及有机质对DMPP硝化抑制效果的影响[J]. *应用生态学报*, 2012, 23(10): 2663–2669.  
Xue Y, Wu Z J, Zhang L L, *et al.* Inhibitory effect of DMPP on soil nitrification as affected by soil moisture content, pH and organic matter[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2012, 23(10): 2663–2669.
- [16] Gu Y, Wu L H, Hu Z P. Inhibitory effect of soil pH value and moisture on soil nitrification by nitrapyrin application[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2018, 34(8): 132–138.
- [17] 方玉凤. 硝化抑制剂对尿素氮转化及玉米氮素利用和产量的影响[D]. 哈尔滨: 东北农业大学硕士学位论文, 2016.  
Fang Y F. Study on nitrification inhibitor on releasing mechanism of nitrogen nutrition in maize[D]. Harbin: MS Thesis of Northeast Agricultural University, 2016.
- [18] 林江辉, 李辉信, 胡锋, 等. 干土效应对土壤生物组成及矿化与硝化作用的影响[J]. *土壤学报*, 2004, 41(6): 924–930.  
Lin J H, Li H X, Hu F, *et al.* Effects of rewetting on soil biota structure and nitrogen mineralization, nitrification in air-dried red soil[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2004, 41(6): 924–930.
- [19] 葛均筑, 徐莹, 袁国印, 等. 覆膜对长江中游春玉米氮肥利用效率及土壤速效氮素的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2016, 22(2): 296–306.  
Ge J Z, Xu Y, Yuan G Y, *et al.* Effects of film mulching on nitrogen use efficiency of spring maize and soil available nitrogen variations in the middle reaches of Yangtze river[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2016, 22(2): 296–306.
- [20] 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.
- [21] Gong P, Zhang L L, Wu Z J, *et al.* Responses of ammonia-oxidizing bacteria and archaea in two agricultural soils to nitrification inhibitors DCD and DMPP—a pot experiment[J]. *Pedosphere*, 2013, 23(6): 729–739.
- [22] Zaman M, Saggarr S, Blennerhasset J D, *et al.* Effect of urease and nitrification inhibitors on N transformation, gaseous emissions of ammonia and nitrous oxide, pasture yield and N uptake in grazed pasture system[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2009, 41(6): 1270–1280.
- [23] Barth G, Von Tucher S, Schmidhalter U. Effectiveness of 3,4-dimethylpyrazole phosphate as nitrification inhibitor in soil as influenced by inhibitor concentration, application form, and soil matric potential[J]. *Pedosphere*, 2008, 18(3): 378–385.
- [24] Zerulla W, Barth T, Dressel J, *et al.* 3,4-dimethylpyrazole phosphate (DMPP) a new nitrification inhibitor for agriculture and horticulture[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2001, 34(2): 79–84.
- [25] 武志杰, 石元亮, 李东坡, 等. 稳定性肥料发展与展望[J]. *植物营养与肥料学报*, 2017, 23(6): 1614–1621.  
Wu Z J, Shi Y L, Li D P, *et al.* The development and outlook of stabilized fertilizers[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2017, 23(6): 1614–1621.
- [26] Azam F, Benckiser G, Müller 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.
- [27] 黄益宗, 冯宗炜, 张福珠. 硝化抑制剂硝基吡啶在农业和环境保护中的应用[J]. *土壤与环境*, 2001, (4): 323–326.  
Huang Y Z, Feng Z W, Zhang F Z. Application of nitrapyrin in agriculture and environmental protection[J]. *Soil and Environmental Sciences*, 2001, (4): 323–326.
- [28] Chen Q, Qi L, Bi Q, *et al.* Comparative effects of 3,4-dimethylpyrazole phosphate (DMPP) and dicyandiamide (DCD) on ammonia oxidizing bacteria and archaea in a vegetable soil[J]. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 2015, 99(1): 477–487.
- [29] 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 Z M, Wu Z J, Chen L J, *et al.* Application effect, affecting factors, and evaluation of nitrification inhibitor: A review[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2008, 19(7): 1611–1618.
- [30] Chaves B, Opoku A, De Neve S, *et al.* Influence of DCD and DMPP on soil N dynamics after incorporation of vegetable crop residues[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2005, 43(1): 62–68.
- [31] 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, (2): 247–250.  
Yu G H, Zhang Y Z, Wan D J. Effects of nitrification inhibitors on nitrate content in soil and pakchoi and on pakchoi yield[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2006, (2): 247–250.