



郝小雨. 硝化/脲酶抑制剂在玉米上的增产、增效及提质效应研究进展[J]. 黑龙江农业科学, 2022(10):103-108, 118.

# 硝化/脲酶抑制剂在玉米上的增产、增效及提质效应研究进展

郝小雨

(黑龙江省黑土保护利用研究院/农业农村部黑土地保护与利用重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150086)

**摘要:** 为了提高玉米产量和氮肥利用率, 采用硝化抑制剂和脲酶抑制剂是调控土壤氮素转化及阻控农田土壤氮素损失有效措施。通过文献分析, 明确了常用硝化抑制剂 Nitrapyrin (2-氯-6-三氯甲基吡啶)、DCD(双氰胺)、DMPP(3,4-二甲基吡唑磷酸盐)和脲酶抑制剂 NBPT(N-丁基硫代磷酰三胺)的抑制机理, 阐述了硝化/脲酶抑制剂与氮肥单独配施或组合配施对玉米产量、品质和氮肥利用率的作用效应。分析表明, 硝化/脲酶抑制剂配合施用的协同增效作用显著, 能够延长氮素释放周期, 促进玉米氮素吸收, 既可提高玉米产量和氮肥利用效率, 又可改善玉米籽粒品质。未来建议针对不同生态类型和不同土壤类型区域, 在施用方法、影响机制、创新工艺等方面加强研究。

**关键词:** 玉米; 硝化抑制剂; 脲酶抑制剂; 产量; 品质; 氮肥利用率

玉米在世界范围内广泛种植, 是集食用、饲用、工业用和药用等多种用途于一身的高产作物, 对于保障全球粮食安全具有重要意义<sup>[1]</sup>。据美国农业部 2022 年 6 月《世界农产品供需预测报告》预测, 2022—2023 年度世界玉米产量预计达到 11.86 亿 t, 是全球最主要消费的粮食作物<sup>[2]</sup>。玉米是高产作物, 科学施肥是维持玉米稳产/高产的重要手段。有研究指出, 在玉米产量为  $6.5 \sim 9.5 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$  时, 合理施氮量(N)范围在  $150 \sim 250 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ , 但许多田块氮肥施用量达到了  $250 \sim 300 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ <sup>[3]</sup>, 过量施用氮肥不仅浪费资源、增加成本, 而且会导致土壤氮素大量累积, 造成氮肥利用率降低, 这些盈余的氮素部分以气体氮损失或以  $\text{NO}_3^- \text{-N}$  的形式通过淋溶、径流等途径损失到环境中, 从而污染环境。因此, 减施增效已成为降低玉米种植成本、减少农业生态环境污染、提高玉米竞争力的重要手段<sup>[4]</sup>。

近年来, 采用氮肥增效剂(如硝化抑制剂和脲酶抑制剂)调控土壤氮素转化及阻控农田土壤氮素损失成为提高作物产量和氮肥利用率的有效措施。研究指出, 硝化抑制剂可通过选择性抑制土壤硝化微生物的活动, 有效减缓土壤中  $\text{NH}_4^+ \text{-N}$  向  $\text{NO}_3^- \text{-N}$  的转化, 是农业生产中常用的提高氮肥利用率和

减少硝化作用负面效应的一种有效管理方式<sup>[5]</sup>; 脲酶抑制剂与尿素一起施用可以延缓酰胺态氮向  $\text{NH}_4^+ \text{-N}$  的转化进程  $7 \sim 14 \text{ d}$ , 从而减少氮素损失, 提高氮肥利用率<sup>[6]</sup>。目前, 在国际市场上流通的抑制剂品种十分丰富, 但是只有硝化抑制剂 Nitrapyrin、DCD、DMPP 和脲酶抑制剂 NBPT 在农业上应用较为广泛。因此, 本文以上述 4 种氮肥增效剂为例, 阐述硝化/脲酶抑制剂与氮肥单独配施或组合配施对玉米产量、品质和氮肥利用率的影响, 并分析影响抑制剂施用效果的原因, 以期对硝化/脲酶抑制剂合理施用及玉米增产、提质、增效提供科学依据。

## 1 硝化/脲酶抑制剂的作用机制

### 1.1 硝化抑制剂的作用机制

硝化抑制剂可以抑制土壤中  $\text{NH}_4^+ \text{-N}$  向  $\text{NO}_3^- \text{-N}$  的转化, 使多数氮素以  $\text{NH}_4^+ \text{-N}$  的形式留存于土壤中(图 1)。

施入土壤后的 DCD 可高效抑制 AOB(氨氧化细菌)的活性<sup>[7]</sup>, 其抑制机理可能为(1)竞争性抑制: DCD 中的氨基( $-\text{NH}_2$ )和亚氨基( $=\text{NH}$ )具有与  $\text{NH}_3$  相似的结构, 它们会结合氨单加氧酶(AMO)上氧化  $\text{NH}_3$  的活性位点, 使其失去吸收和利用  $\text{NH}_3$  的能力<sup>[8]</sup>。(2)干扰 AOB 呼吸: DCD 中的功能团  $\text{C} \equiv \text{N}$  可能与菌体呼吸酶中的巯基或重金属基团发生反应从而抑制其活性, 抑制 AOB 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而影响硝化作用<sup>[9]</sup>。

收稿日期: 2022-07-29

基金项目: 省级黑土地保护利用-典型地区耕地监测评价项目(2022-22-2); 科技基础资源调查专项(2021FY100404-1); 黑龙江省农业科学院“农业科技创新跨越工程”专项(HNK2019CX1310)。

作者简介: 郝小雨(1981—), 男, 博士, 副研究员, 从事农田养分循环研究。E-mail: xiaoyuhao1981@sina.com。

Nitrpyrin 作用机理主要为:(1)Nitrpyrin 利用其氧化产物 6-氯嘧啶羧酸螯合 AMO 活性位点上的 Cu 组分来抑制催化氧化过程<sup>[10]</sup>; (2)Nitrpyrin 的三氯甲基可结合于 AMO 的活性位点,进而还原  $O_2$  并阻碍  $NH_3$  的硝化作用<sup>[11]</sup>; (3)Nitrpyrin 通过影响氨氧化细菌(AOB)和氨氧化古菌(AOA)的活性来抑制  $NH_4^+-N$  向  $NO_3^--N$  的转化过程,从而抑制整个硝化过程<sup>[12-13]</sup>。

DMPP 抑制机理存在争议,多数研究认为:DMPP 能够通过螯合 AMO 中的 Cu 来阻碍 AOB 对  $NH_3$  的氧化反应,高效抑制 AOB 生长和相关 *amoA* 基因的表达,进而抑制硝化反应进行<sup>[14-16]</sup>,即抑制氨氧化作用,延长  $NH_4^+-N$  在土壤中停留时间,刺激微生物活性,利用微生物的固持作用,使得更多的  $NH_4^+-N$  被固定在土壤中<sup>[16]</sup>。

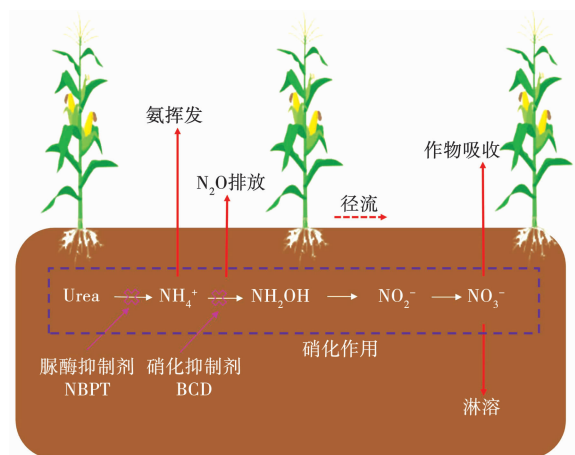


图 1 玉米田硝化/脲酶抑制剂作用过程

## 1.2 脲酶抑制剂的作用机制

脲酶抑制剂通过抑制土壤脲酶活性来减缓尿素向  $NH_4^+-N$  转化,进而延长肥效<sup>[17]</sup>。土壤脲酶是一类含 Ni 的金属钛酶,其活性位点包含由氨基甲酸酯桥连在一起的两个 Ni 原子<sup>[18]</sup>。NBPT 并不直接抑制脲酶活性,而是在有氧条件下先迅速转化为氧化产物 NBPTO,阻断脲酶的 3 个活性位点,形成了一个具有三齿性质的键,降低尿素到达 Ni 原子的概率,进而减缓尿素被脲酶水解的速率<sup>[19]</sup>。

## 2 硝化/脲酶抑制剂与氮肥配施对玉米产量、品质和氮肥利用率的影响

### 2.1 硝化抑制剂施用效果

国内外学者在氮肥中添加硝化抑制剂对玉米产量、品质和氮肥利用率的影响方面进行了较多的研究,最终结果主要表现为以下 3 个方面,即正效应(促进作用)、无明显效果和负效应。

2.1.1 正效应 Ren 等<sup>[20]</sup>在棕壤夏玉米田渍水条件下施用 Nitrpyrin,玉米产量增加 22%~33%,氮肥利用率增加 9%~13%,氮肥偏生产力增加 24%~33%。在伊朗传统耕作模式下,施用 Nitrpyrin 玉米生物量增加 13%,氮肥偏生产力增加 8.7%<sup>[21]</sup>。何浩等<sup>[22]</sup>发现,在新疆灌溉灰钙土并添加 Nitrpyrin 能够促进玉米的生长,增加不同生育期的玉米株高和茎粗,有效改善玉米穗部性状和产量构成,玉米产量、氮肥回收率、偏生产力和农学利用效率分别增加 6.5%、23.1%、15.4%和 21.9%。Warren 等<sup>[23]</sup>在美国印第安纳州的试验表明,秋季氮肥添加 Nitrpyrin 既可增加玉米产量,又能提升玉米籽粒蛋白质含量。

DCD 对玉米的促进作用主要体现在玉米籽粒产量、氮肥利用率、光合性能及籽粒品质上。相关研究表明,在江西红壤上添加 DCD,玉米籽粒产量、吸氮量和氮肥吸收利用率较不添加处理分别提高 4.1 倍、6.3 倍和 4.4 倍<sup>[24]</sup>。在黄土高原小麦-玉米轮作体系下,添加 DCD 可促进玉米生长、提升玉米产量,氮肥利用率由 27%增加到 33%<sup>[25]</sup>。宋以玲等<sup>[26]</sup>指出,棕壤添加 DCD 能显著增强玉米后期的光合性能,提高玉米叶片内抗氧化物酶的活性和可溶性蛋白含量,同时降低叶片内丙二醛含量,改善玉米的农艺性状,玉米产量提高 24.0%~35.8%,并可提高玉米籽粒中淀粉、蛋白质和维生素 C 含量。

Liu 等<sup>[27]</sup>发现,施用 DCD、DMPP 显著提高了土壤无机氮含量,可将土壤无机氮由  $NO_3^--N$  转化为  $NH_4^+-N$ ,并增加了玉米产量、地上生物量和地上植株氮素吸收量。Cui 等<sup>[28]</sup>利用玉米盆栽试验研究了 Nitrpyrin、DCD、DMPP 三种硝化抑制剂单施和配施在棕壤和褐土的效果,指出单施或配施硝化抑制剂均可增加玉米产量和氮肥利用率,尤其以 DMPP + DCD 和 Nitrpyrin + DCD 处理效果最佳,玉米产量提高 1.84 倍~2.31 倍。

2.1.2 无明显效果 Chatterjee 等<sup>[29]</sup>2012—2014 年在美国达科他州玉米田施用尿素和硝酸铵时发现,添加 Nitrpyrin 对玉米产量没有影响。郝小雨等<sup>[30]</sup>发现,在黑土中连续 2 年施用 Nitrpyrin 和 DCD,均不影响玉米产量以及氮肥表观利用率和氮肥偏生产力。Chen 等<sup>[31]</sup>同样发现,黑土中分别添加 Nitrpyrin、DCD 和 DMPP 均未影响玉米籽粒产量及地上部生物量。Luo 等<sup>[32]</sup>的研究指出,牛粪与 Nitrpyrin 配施不影响玉米生物量

及养分吸收。在川中丘陵区小麦-玉米轮作制度下,施用 DMPP 对玉米产量无显著影响<sup>[33]</sup>。Migliorati 等<sup>[34]</sup>的研究指出,在澳大利亚亚热带小麦-玉米轮作系统中,添加 DMPP 并未增加玉米产量。在西班牙地中海气候条件下施用 DMPP 对玉米籽粒产量和干物质无显著影响<sup>[35]</sup>。

2.1.3 负效应 硝化抑制剂施用导致玉米产量、品质和氮肥利用率下降的报道较少。Blackmer 等<sup>[36]</sup>在美国爱荷华州的试验表明,玉米田施用无水氨并添加 Nitrapiyin 会对玉米产量产生负效应,他们认为添加 Nitrapiyin 后,增加了植物对氮胁迫或  $\text{NH}_4^+$  毒性的敏感性,从而导致玉米产量下降。Burzaco 等<sup>[37]</sup>进一步分析了硝化抑制剂使玉米减产原因,主要概括为以下 3 个方面:(1)较为复杂的环境-基因型-管理措施交互作用影响土壤氮素动力学和 Nitrapiyin 的有效性;(2)试验灵敏度不足;(3)Nitrapiyin 抑制作用持续时间短。同时 Reeves 等<sup>[38]</sup>也报道了 DCD 过量施用的毒害效应,随着 DCD 用量的增加,玉米植株干重和叶绿素浓度随之降低,而且氮素回收率呈曲线下降趋势(103%~4%)。

综合来看,硝化抑制剂添加后对玉米的影响不一致的原因可能是:(1)在没有施用硝化抑制剂的情况下,施用的氮肥可满足玉米对氮的需求<sup>[39]</sup>;(2)硝化抑制剂通过抑制硝化作用维持土壤表层较高的  $\text{NH}_4^+$  浓度,导致氮流失较多,尤其是氨挥发,剩余的氮素可能不足以满足玉米生长<sup>[40]</sup>;(3)氮可能不是产量限制因素,进而添加硝化抑制剂不会对产量等造成影响<sup>[41]</sup>;(4)受环境、土壤条件、施肥管理等因素影响,硝化抑制剂在土壤中前期分解快,后期作用降低或无效<sup>[42-44]</sup>。

## 2.2 脲酶抑制剂施用效果

脲酶抑制剂在玉米的施用效果主要表现为正效应和无明显效果,鲜见负效应的报道。

2.2.1 正效应 王甄烨等<sup>[45]</sup>在吉林省黑土区春玉米田的研究显示,与常规尿素相比,添加 NBPT 玉米产量、植株吸氮量和氮肥利用效率分别增加 25.7%、42.3%和 23.6%。在甘肃凉州灌区玉米田添加 NBPT,可增加春玉米百粒重、降低秃尖长,玉米产量显著提高了 15.5%,氮肥农学效率、氮肥利用率分别提高了 120.3%和 33.5%<sup>[46]</sup>。在宁夏灌淤土的盆栽试验显示,普通尿素或包膜尿素配施 NBPT 均能提高春玉米株高、地上部生物量、根系生物量,尤以施用 1% NBPT 效果最

佳<sup>[47]</sup>。在美国伊利诺伊州南部施用 NBPT,13 个田间试验(撒施尿素)玉米产量平均提高  $525 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$  (增产 9%),9 个田间试验(条施尿素)玉米产量平均提高  $750 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$  (增产 14%)<sup>[48]</sup>。Trenkel<sup>[49]</sup>总结了美国 400 多个田间试验的结果,NBPT 与尿素或硝酸铵配施平均分别增产 0.89 和  $0.56 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。Muhaymin 等<sup>[50]</sup>指出,在马来西亚高风化土壤施用 NBPT 包膜尿素( $\text{N } 96 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ )可以减缓脲酶分解时的水解过程,减少氨挥发损失,进而提高玉米叶绿素含量、植株干重、作物产量和氮素利用效率。Martins 等<sup>[51]</sup>利用  $^{15}\text{N}$  示踪技术,发现在玉米 V5 时期与尿素同时添加 NBPT,玉米氮素吸收增加 23%、产量增加 10%。Gou 等<sup>[52]</sup>发现,玉米叶面喷施尿素和 NBPT 可以通过保护玉米光合器官、激活抗氧化防御系统和改善渗透调节,显著增强玉米的耐旱性,并可提高玉米可溶性蛋白和可溶性糖的含量。

脲酶抑制剂正效应机理原因可能是:NBPT 的添加延迟了尿素向  $\text{NH}_4^+$  的转化<sup>[53]</sup>,从而减少了  $\text{NH}_3$  的挥发,使尿素有更多的时间在土壤中垂直和水平扩散,抑制了尿素快速水解后导致的 pH 上升,促进了矿质氮向深层土壤的迁移<sup>[54]</sup>。

2.2.2 无明显效果 Zhang 等<sup>[55]</sup>利用  $^{15}\text{N}$  标记方法分析了 NBPT 在吉林黑土玉米田上的应用效果,发现添加 NBPT 比不添加处理玉米产量无显著变化。在巴西热带气候条件下,不同施氮水平上添加 NBPT 均未显著影响玉米产量和氮肥农学利用率,意味着添加或不添加 NBPT,尿素的氮素损失量相同<sup>[56]</sup>。Besen 等<sup>[57]</sup>和 Cancellier 等<sup>[58]</sup>研究发现,在巴西免耕玉米田中施用 NBPT 不会影响玉米产量。Liu 等<sup>[59]</sup>在华北平原夏玉米田的研究指出,与习惯施肥( $\text{N } 225 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ )相比,减施氮肥( $\text{N } 180 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ )并配施 1.5% NBPT,并未显著增加玉米籽粒和秸秆产量。

施用 NBPT 对玉米和氮肥利用率影响不显著的主要原因可能是:(1)NBPT 降低  $\text{NH}_3$  挥发,损失的效率较低且不能充分影响作物产量<sup>[60]</sup>;(2)如果土壤初始矿质氮水平较高,NBPT 对土壤 N 转化利用影响较小,进而对作物产量也影响甚微<sup>[60]</sup>;(3)受环境(温度、降水)、土壤条件(pH、土壤质地、微生物活动)、田间管理措施(施肥、灌溉)影响,NBPT 的有效作用时间可能较短,不能同步协调氮素转化和作物需氮时间,进而影响作物氮素吸收、产量和品质<sup>[61-62]</sup>。

### 2.3 硝化/脲酶抑制剂配合施用效果

硝化抑制剂的作用效果取决于尿素氮的水解产物在土壤中的累积进程与数量,脲酶抑制剂的有效作用时间较短,仅能延缓氨挥发的生成时间,而不能减少其总损失,因此将这两类抑制剂配合使用,发挥其协同作用,才能有效调节尿素氮在土壤中转化的整个进程,从而减少尿素氮的多种途径的损失,使农业生产和环境保护有效平衡<sup>[62-63]</sup>。国内外众多研究证实,硝化/脲酶抑制剂配合施用可有效提升玉米产量、品质和氮肥利用率。研究指出,DCD 与 NBPT 配施可增加辽宁棕壤春玉米的成粒数,提高玉米单株产量和籽粒的蛋白质和淀粉含量<sup>[64]</sup>。王玲莉等<sup>[65]</sup>在三江平原白浆土玉米田的研究发现,等氮量配施 NAM 肥料(增效成分为 DCD 与 NBPT)处理使土壤  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  在较长时间内维持较高的水平,并显著提高了作物后期的土壤总有效氮供应水平,从而使作物吸氮量增加了 6.8%,增产 3.1%,并可提高氮肥利用率。孙磊<sup>[66]</sup>在黑龙江省北部黑土区也证实,应用 NAM 肥料添加剂使玉米产量和氮肥利用率分别增加 10.88% 和 46.45%。在黑土中氮肥添加 DMPP+NBPT 或 Nitrapyrin+NBPT 可以有效抑制  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  向  $\text{NO}_3^--\text{N}$  的转化,增加玉米氮素吸收量,较施普通尿素处理的玉米籽粒产量分别增加 1.64 倍和 2.18 倍,氮素表现利用率分别提高 3.02 倍和 3.34 倍<sup>[67]</sup>。Martins 等<sup>[51]</sup>发现, Nitrapyrin 和 NBPT 与尿素在不同时期配合使用(玉米播期施 Nitrapyrin, V5 期施 NBPT)可显著提高玉米籽粒产量、氮素吸收和尿素  $^{15}\text{N}$  回收率,分别比单施尿素处理提高 23%、47% 和 53%。Zhang 等<sup>[55]</sup>指出,减施氮肥 30% 并配施 DMPP 和 NBPT,在提升玉米产量、品质的同时,可增加土壤肥力、节约肥料及保护环境。总之,硝化/脲酶抑制剂分别对尿素转化某一特定过程起作用,两者协同可有效延缓尿素水解,使土壤  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  在一定时间内保持更高水平,保证氮素持续供应,满足玉米的养分需求,促进植株氮素累积,从而有效提高氮肥利用率和玉米产量<sup>[62, 67-68]</sup>。

### 3 结论与展望

受环境(温度、降水)、土壤条件(pH、土壤质地、微生物活动)、田间管理措施(施肥、灌溉)、抑制剂类型等影响,硝化/脲酶抑制剂对玉米产量、品质和氮肥利用率的影响结果不一。综合来看,硝化/脲酶抑制剂配合施用的协同增效作用显著,

能够延长氮素释放周期,促进玉米氮素吸收,既可提高玉米产量、氮肥利用效率,又可改善玉米籽粒品质。

硝化/脲酶抑制剂在玉米生产的具体应用中还应避免抑制剂残留或富集、硝化抑制剂诱导的氮素损失增加(如  $\text{NH}_3$  挥发)、成本较高等问题。未来建议针对不同生态类型和不同土壤类型区域,结合氮肥减施增效技术,精准研究硝化/脲酶抑制剂单施或配施的用量。明确不同抑制剂及其配伍对氮素调控、作物生长、环境效应的影响机制,筛选经济、高效、绿色的硝化/脲酶抑制剂。创建提高硝化/脲酶抑制剂稳定性、延长有效期的方法技术,创新硝化/脲酶抑制剂与肥料复配的工艺方法,最终科学、合理、高效地应用硝化/脲酶抑制剂。

#### 参考文献:

- [1] 彭东,沈玮因,宋树柏,等. 肥料增效剂对夏玉米植物学性状、产量构成及土壤中  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  和  $\text{NO}_3^--\text{N}$  的动态影响[J]. 玉米科学, 2018, 26(2): 110-117.
- [2] 梁勇. 2022 年 6 月世界农产品供需形势预测简报[J]. 世界农业, 2022(7): 124-129.
- [3] 巨晓棠,张翀. 论合理施氮的原则和指标[J]. 土壤学报, 2021, 58(1): 1-13.
- [4] 米国华,伍大利,陈延玲,等. 东北玉米化肥减施增效技术途径探讨[J]. 中国农业科学, 2018, 51(14): 2758-2770.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] 郝小雨,周宝库,马星竹,等. 氮肥管理措施对黑土玉米田温室气体排放的影响[J]. 中国环境科学, 2015, 35(11): 3227-3238.
- [8] ZHANG L M, HU H W, SHEN J P, et al. Ammonia-oxidizing archaea have more important role than ammonia-oxidizing bacteria in ammonia oxidation of strongly acidic soils[J]. The ISME Journal, 2012, 6: 1032-1045.
- [9] AMBERGER A. Research on dicyandiamide as a nitrification inhibitor and future outlook [J]. Communications in Soil Science and Plant Analysis, 1989, 20: 1933-1955.
- [10] VANNELLI T, HOOPER A B. Oxidation of nitrapyrin to 6-chloropicolinic acid by the ammonia-oxidizing bacterium nitrosomonas europaea [J]. Applied and Environmental Microbiology, 1992, 58(7): 2321-2325.
- [11] VANNELLI T, HOOPER A B. Reductive dehalogenation of the trichloromethyl group of nitrapyrin by the ammonia-oxidizing bacterium Nitrosomonas europaea [J]. Applied and Environmental Microbiology, 1993, 59(11): 3597-3601.

- [12] 武志杰,史云峰,陈利军. 硝化抑制剂作用机理研究进展[J]. 土壤通报,2008,39(4):962-970.
- [13] DI H J, CAMERON K C, JUPEI S, et al. Ammonia-oxidizing bacteria and archaea grow under contrasting soil nitrogen conditions[J]. FEMS Microbiology Ecology, 2010, 72: 386-394.
- [14] KLEINEIDAM K, KOŠMRLJ K, KUBLIK S, et al. Influence of the nitrification inhibitor 3,4-dimethylpyrazole phosphate (DMPP) on ammonia-oxidizing bacteria and archaea in rhizosphere and bulk soil[J]. Chemosphere, 2011, 84(1): 182-186.
- [15] FLORIO A, CLARK I M, HIRSCH P R, et al. Effects of the nitrification inhibitor 3,4-dimethylpyrazole phosphate (DMPP) on abundance and activity of ammonia oxidizers in soil[J]. Biology and Fertility of Soils, 2014, 50: 795-807.
- [16] 疏晴,王香琪,齐永波,等. 尿素与缓释尿素配施添加 DMPP 对砂姜黑土氮素转化的影响[J]. 土壤, 2021, 53(5): 945-951.
- [17] 郝小雨,马星竹,陈苗苗,等. 氮肥配施增效剂实现寒地水稻增产、提质与增效[J]. 水土保持学报, 2019, 33(4): 175-179, 307.
- [18] 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.
- [19] MANUNZA B, DEIANA S, PINTORE M, et al. The binding mechanism of urea, hydroxamic acid and N-(N-butyl)-phosphoric triamide to the urease active site. A comparative molecular dynamics study[J]. Soil Biology and Biochemistry, 1999, 31(5): 789-796.
- [20] REN B Z, ZHANG J W, DONG S T, et al. Nitrapyrin improves grain yield and nitrogen use efficiency of summer maize waterlogged in the field[J]. Agronomy Journal, 2017, 109(1): 185-192.
- [21] BORZOU EI A, MANDER U, TEEMUSK A, et al. Effects of the nitrification inhibitor nitrapyrin and tillage practices on yield-scaled nitrous oxide emission from a maize field in Iran[J]. Pedosphere, 2021, 31(2): 314-322.
- [22] 何浩,张宇彤,危常州,等. 不同有机替代减肥方式对玉米生长及土壤肥力的影响[J]. 水土保持学报, 2019, 33(5): 281-287.
- [23] WARREN H L, HUBER D M, TSAI C Y, et al. Effect of nitrapyrin and N fertilizer on yield and mineral composition of corn[J]. Agronomy Journal, 1980, 72(5): 729-732.
- [24] 崔磊,李东坡,武志杰,等. 不同硝化抑制剂对红壤氮素硝化作用及玉米产量和氮素利用率的影响[J]. 应用生态学报, 2021, 32(11): 3953-3960.
- [25] RAZA S, CHEN Z J, AHMED M, et al. Dicyandiamide application improved nitrogen use efficiency and decreased nitrogen losses in wheat-maize crop rotation in Loess Plateau[J]. Archives of Agronomy and Soil Science, 2019, 65(4): 450-464.
- [26] 宋以玲,贺明荣,张吉旺,等. 硝化抑制剂型包膜肥料对玉米生理特性、产量、品质的影响[J]. 河北科技师范学院学报, 2015, 29(1): 6-11, 80.
- [27] 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.
- [28] CUI L, LI D P, WU Z J, et al. Effects of combined nitrification inhibitors on nitrogen transformation, maize yield and nitrogen uptake in two different soils[J]. Communications in Soil Science and Plant Analysis, 2022, 53(8): 1039-1049.
- [29] CHATTERJEE A, CATTANACH N, AWALE R, et al. Can we reduce rainfed maize (*Zea mays* L.) nitrogenous fertilizer application rate with addition of nitrapyrin? [J]. Communications in Soil Science and Plant Analysis, 2016, 47(4): 527-532.
- [30] 郝小雨,马星竹,高中超,等. 氮肥管理措施对黑土春玉米产量及氮素利用的影响[J]. 玉米科学, 2016, 24(4): 151-159.
- [31] CHEN Z M, LI Y, XU Y H, et al. Spring thaw pulses decrease annual N<sub>2</sub>O emissions reductions by nitrification inhibitors from a seasonally frozen cropland[J]. Geoderma, 2021, 403, 115310.
- [32] LUO Y, BENKE M B, HAO X. Nutrient uptake and leaching from soil amended with cattle manure and nitrapyrin[J]. Communications in Soil Science and Plant Analysis, 2017, 48(12): 1438-1454.
- [33] 郭松,喻华,陈琨,等. 稳定性尿素对川中丘陵区小麦/玉米轮作制度下作物产量及氮肥利用率的影响[J]. 西南农业学报, 2018, 31(5): 1006-1012.
- [34] MIGLIORATI M D A, SCHEER C, GRACE P R, et al. Influence of different nitrogen rates and DMPP nitrification inhibitor on annual N<sub>2</sub>O emissions from a subtropical wheat-maize cropping system[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2014, 186: 33-43.
- [35] DIEZ-LÓPEZ J A, HERNÁIZ-ALGARRA P, SÁNCHEZ M A, et al. Effect of a nitrification inhibitor (DMPP) on nitrate leaching and maize yield during two growing seasons[J]. Spanish Journal of Agricultural Research, 2008(2): 294-303.
- [36] BLACKMER A M, SANCHEZ C A. Response of corn to nitrogen-15-labeled anhydrous ammonia with and without nitrapyrin in Iowa[J]. Agronomy Journal, 1988, 80(1): 95-102.
- [37] BURZACO J P, CIAMPITTI I A, VYN T J. Nitrapyrin impacts on maize yield and nitrogen use efficiency with spring-applied nitrogen: Field studies vs. meta-analysis comparison [J]. Agronomy Journal, 2014, 106(2): 753-760.
- [38] REEVES D W, TOUCHTON J T. Relative phytotoxicity of dicyandiamide and availability of its nitrogen to cotton, corn, and grain sorghum[J]. Soil Science Society of America Journal, 1986, 50(5): 1353-1357.
- [39] THAPA R, CHATTERJEE A. Wheat production, nitrogen transformation, and nitrogen losses as affected by nitrification and double inhibitors[J]. Agronomy Journal, 2017, 109(5): 1825-1835.

- [40] KAWAKAMI E M, OOSTERHUIS D M, SNIDER J L, et al. Physiological and yield responses of field-grown cotton to application of urea with the urease inhibitor NBPT and the nitrification inhibitor DCD [J]. *European journal of agronomy*, 2012, 43: 147-154.
- [41] DELL C J, HAN K, BRYANT R B, et al. Nitrous oxide emissions with enhanced efficiency nitrogen fertilizers in a rainfed system [J]. *Agronomy Journal*, 2014, 106 (2): 723-731.
- [42] FISK L M, MACCARONE L D, BARTON L, et al. Nitrapyrin decreased nitrification of nitrogen released from soil organic matter but not *amoA* gene abundance at high soil temperature [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2015, 88: 214-223.
- [43] HU Y, SCHRAML M, VON TUCHER S, et al. Influence of nitrification inhibitors on yields of arable crops: A meta-analysis of recent studies in Germany [J]. *International Journal of Plant Production*, 2014, 8(1): 33-50.
- [44] 张忠庆, 高强, 硝化抑制剂 2-氯-6-三氯甲基吡啶在农业中应用研究进展及其影响因素 [J]. *中国土壤与肥料*, 2022, (4): 249-258.
- [45] 王甄烨, 焉莉, 蒋富琛, 等. 脲酶/硝化抑制剂配施氮肥对春玉米农田氨排放的影响 [J]. *玉米科学*, 2022, 30(1): 138-143.
- [46] 李春玲, 李国山, 于亦忠, 等. 减氮施肥及氮肥添加脲酶抑制剂对凉州灌区春玉米产量和氮肥利用的影响 [J]. *干旱地区农业研究*, 2021, 39(2): 31-36.
- [47] 周丽娜, 金建新, 李凤霞, 等. 尿素配施脲酶抑制剂对春玉米株高和生物量的影响 [J]. *宁夏农林科技*, 2017, 58(12): 53-55.
- [48] CHIEN S H, PROCHNOW L I, CANTARELLA H. Recent developments of fertilizer production and use to improve nutrient efficiency and minimize environmental impacts [J]. *Advances in Agronomy*, 2009, 102: 267-322.
- [49] TRENKEL M E. Controlled-release and stabilized fertilizers in agriculture [M]. Paris: International Fertilizer Industry Association, 1997.
- [50] MUHAYMIN M Z M, NORAINI M J, ZAHARAH S S, et al. N-(n-Butyl) thiophosphoric triamide (NBPT)-coated urea (NCU) improved maize growth and nitrogen use efficiency (NUE) in highly weathered tropical soil [J]. *Sustainability*, 2020, 12(21): 8780.
- [51] MARTINS M R, SANT'ANNA S A C, ZAMAN M, et al. Strategies for the use of urease and nitrification inhibitors with urea: Impact on  $N_2O$  and  $NH_3$  emissions, fertilizer- $^{15}N$  recovery and maize yield in a tropical soil [J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2017, 247: 54-62.
- [52] GOU W, ZHENG P F, TIAN L, et al. Exogenous application of urea and a urease inhibitor improves drought stress tolerance in maize (*Zea mays* L.) [J]. *Journal of Plant Research*, 2017, 130(3): 599-609.
- [53] TURNER D A, EDIS R B, CHEN D, et al. Determination and mitigation of ammonia loss from urea applied to winter wheat with N-(n-butyl) thiophosphoric triamide [J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2010, 137 (3): 261-266.
- [54] DEMPSEY R J, SLATON N A, ROBERTS T L, et al. Rice grain yield and nitrogen uptake as affected by urea amendment and rainfall timing [J]. *Agronomy Journal*, 2017, 109 (6): 2966-2973.
- [55] ZHANG L, WU Z, JIANG Y, et al. Fate of applied urea  $^{15}N$  in a soil-maize system as affected by urease inhibitor and nitrification inhibitor [J]. *Plant, Soil and Environment*, 2010, 56(1): 8-15.
- [56] LUCAS F T, BORGES B M M N, COUTINHO E L M. Nitrogen fertilizer management for maize production under tropical climate [J]. *Agronomy Journal*, 2019, 111 (4): 2031-2037.
- [57] BESEN M R, RIBEIRO R H, MINATO E A, et al. Modelling of  $N_2O$  emissions from a maize crop after the application of enhanced-efficiency nitrogen fertilisers [J]. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 2021, 52(14): 1645-1656.
- [58] CANCELLIER E L, SILVA D R G, FAQUIN V, et al. Ammonia volatilization from enhanced-efficiency urea on no-till maize in brazilian cerrado with improved soil fertility [J]. *Ciência E Agrotecnologia*, 2016, 40: 133-144.
- [59] LIU G Y, YANG Z P, DU J, et al. Adding NBPT to urea increases N use efficiency of maize and decreases the abundance of N-cycling soil microbes under reduced fertilizer-N rate on the North China Plain [J]. *PloS One*, 2020, 15(10): e0240925.
- [60] AMDADUL H M, ZAHARAH S S, PHEBE D, et al. Foliar urea with N-(n-butyl) thiophosphoric triamide for sustainable yield and quality of pineapple in a controlled environment [J]. *Sustainability*, 2021, 13(12): 6880.
- [61] FAN D J, HE W T, SMITH W N, et al. Global evaluation of inhibitor impacts on ammonia and nitrous oxide emissions from agricultural soils: A meta-analysis [J]. *Global Change Biology*, 2022, 28(17): 5121-5141.
- [62] 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.
- [63] ZAMAN M, ZAMAN S, ADHINARAYANAN C, et al. Effects of urease and nitrification inhibitors on the efficient use of urea for pastoral systems [J]. *Soil Science and Plant Nutrition*, 2013, 59(4): 649-659.
- [64] 柯福来, 黄瑞冬, 马兴林, 等. 化学抑制型氮素释放延缓剂对玉米产量和品质的影响 [J]. *玉米科学*, 2007, 15(2): 111-113.
- [65] 王玲莉, 古慧娟, 石元亮, 等. 尿素配施添加剂 NAM 对三江平原白浆土氮素转化和玉米产量的影响 [J]. *中国土壤与肥料*, 2012(2): 34-38.
- [66] 孙磊. NAM 肥料添加剂在寒地玉米上的应用效果 [J]. *黑龙江农业科学*, 2017(7): 22-24.
- [67] 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.
- [68] 张蕾, 王玲莉, 房娜娜, 等. 稳定性肥料在中国不同区域的施用效果及施用量 [J]. *植物营养与肥料学报*, 2021, 27(2): 215-230.

- [12] 黄日辉,廖向宜,韦柳红,等. 红香稻 823 的选育研究[J]. 安徽农业科学,2011,39(19):11407-11408.
- [13] 刘立超,谢树鹏,门龙楠,等. 黑香稻品种绥 098038 的选育及栽培技术[J]. 黑龙江农业科学,2021(11):138-140.
- [14] 徐建龙,石瑜敏,陈志坚,等. 优质富铁香稻新品种中广香 1 号的选育及高产栽培技术[J]. 中国稻米,2011,17(1):71-72.
- [15] 杨庆,马文东,李大林,等. 早熟优质长粒香稻龙梗 1525 的特征特性及栽培技术[J]. 现代化农业,2021(2):30-31.
- [16] 曾宪楠,王麒,孙羽,等. 优质水稻新品种龙稻 21 选育及高产栽培技术[J]. 黑龙江农业科学,2017(8):138-140.
- [17] 王俊河. 优质香稻新品种龙香稻 2 号选育及栽培技术[J]. 北方水稻,2011,41(2):57-57,59.

## Breeding Process and Cultivation Technology of A New Fragrant Rice Variety Longdao 209 with High Quality

ZENG Xian-nan, SUN Yu, SONG Qiu-lai, WANG Qi

(Institute of Crop Cultivation and Tillage, Heilongjiang Academy of Agricultural Sciences, Harbin 150023, China)

**Abstract:** In order to promote the popularization of new fragrant rice (*Oryza saliva* subsp. Geng) varieties with high quality, this paper briefly introduced the breeding process, characteristics, yield performance and cultivation techniques of Longdao 209, a new fragrant rice variety. Longdao 209 is a high-quality fragrant rice variety selected by the Institute of Farming and Cultivation of Heilongjiang Academy of Agricultural Sciences through the pedigree method of female parent Longdao 21 and male parent Longxiangdao 2 from 2020 to 2021, the average yield of the regional test was  $7\,698.0\text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ , which was 6.6% higher than that of the control variety Hagengdao 2; The average yield of the production test in 2021 was  $7\,869.8\text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ , which was 6.5% higher than that of the control variety Hagengdao 2. On February 3, 2021, Longdao 209 obtained the plant variety right application number (20211001119); On June 20, 2022, it was approved by the Heilongjiang Provincial Crop Variety Approval Committee, and the approval number was Heishen 20220047. The growth days of this variety are about 142 days, and the active accumulated temperature of  $\geq 10\text{ }^{\circ}\text{C}$  is about  $2\,700\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

**Keywords:** Longdao 209; fragrant rice; breeding; characteristic

(上接第 108 页)

## Research Progress on Yield Increase, Efficiency Increase and Quality Improvement of Nitrification/Urease Inhibitors in Maize

HAO Xiao-yu

(Heilongjiang Academy of Black Soil Conservation and Utilization/Laboratory of Black Soil Protection and Utilization, Ministry of Agriculture and Rural Areas, Harbin 150086, China)

**Abstract:** In order to improve maize yield and nitrogen use efficiency, nitrification inhibitors and urease inhibitors are effective measures to regulate soil nitrogen transformation and control soil nitrogen loss in farmland. Through literature analysis, the inhibition mechanisms of commonly used nitrification inhibitors Nitrapyrin [2-chloro-6-(trichloromethyl) pyridine], DCD (Dicyandiamide), DMPP (3,4-dimethylpyrazole phosphate) and urease inhibitor NBPT [N-(n-butyl) thiophosphoric triamide] were summarized, and the effects of nitrification/urease inhibitor combined with nitrogen application alone or in combination on maize yield, quality and nitrogen use efficiency were expounded. The analysis showed that the synergistic effect of nitrification/urease inhibitor combined application was obvious, which could prolong the nitrogen release cycle and promote the nitrogen absorption of maize. It could not only improve maize yield and nitrogen use efficiency, but also improve maize grain quality. In the future, it is recommended to strengthen research on application methods, impact mechanisms, and innovative processes for different ecological types and different soil types.

**Keywords:** maize; nitrification inhibitor; urease inhibitor; production; quality; nitrogen use efficiency