氮肥增效剂的研究进展与展望

曹　鹏[1,2]，王国栋[1]，张　星[1]，杨盛景[1]，肖秋芸[1]

（1. 云南云天化股份有限公司 研发中心，云南 昆明　650600；2. 云南大学 农学院，云南 昆明　650599）

［摘　要］在农业生产中氮肥投入和产品产出长期以来处于不合理位置，生产投入高、代价大，氮肥利用效率低。如何提高肥料利用率，减少农田氮素损失和污染是当前农业发展的重要问题。汇总近年来氮肥增效剂的研究进展基础上，系统综述氮肥增效剂的类型、作用机制，以及生物类氮肥增效剂的种类和施用量。指出氮肥增效剂未来的发展方向，为其应用研究和产品开发提供一定的参考。

［关键词］氮肥增效剂；类型；作用机制；氮肥利用率；发展方向

［中图分类号］TQ449+.4　　［文献标志码］A　　［文章编号］2097-4566（2025）12-0057-06

Research progress and prospects of nitrogen fertilizer enhancers

CAO Peng[1,2], WANG Guodong[1], ZHANG Xing[1], YANG Shengjing[1], XIAO Qiuyun[1]

(1. *Research and Development Center, Yunnan Yuntianhua Co.,Ltd., Kunming* 650600, *China*;
2. *College of Agriculture, Yunnan University, Kunming* 650599, *China*)

Abstract: In agriculture production, the input and product of nitrogen fertilizers have long been in an unreasonable position, with high production inputs, substantial costs, and low nitrogen fertilizer efficiency. How to improve fertilizer utilization rate, reduce nitrogen loss and pollution in farmland is an important issue for current agricultural development. A systematic review of the types, action mechanisms of nityogen fertilizer enhancers, and various kinds and application rates of biological nitrogen fertilizer enhancers is provided, based on a summary of recent research progress in nitrogen fertilizer efficiency. The development trends of nitrogen fertilizer enhancers in the future are put forward, providing a scientific reference for application research and product development of nitrogen fertilizer enhancers.

Key words: nitrogen fertilizer enhancer; types; action mechanisms; nitrogen fertilizer utilization rate; development trends

0　引言

氮素是植物生长所需的三大营养元素之一，与农作物的产量和品质有着直接的联系。据联合国粮食及农业组织统计，尿素是全球氮肥使用的主要形式，用量约占全球氮肥总用量的74%；世界上超过50%的人口营养供应依赖氮肥，到2050年全球人口将增加20亿~30亿，这势必会加大氮肥的使用量[1]。土壤中能被植物利用的氮元素主要以硝态氮和铵态氮的形式存在。铵态氮带正电荷，易被土壤黏粒等带负电荷的物质吸附，移动性较弱，是水田作物氮素的主要来源；硝态氮带负电荷，不易被土壤固定，移动性强，易通过质流到达根系，是旱地作物氮素的主要来源[2-3]。未被农作物吸收的氮素通过多种途径进入环境：其中氨挥发是雾霾形成的重要前体物质之一，而硝化与反硝化过程产生的氧化亚氮（N_2O）温室效应强度可达CO_2的265倍[4]。这种“高投入-低效率-高污染”的恶性循环已成为制约农业可持续发展的瓶颈问题[5]。

在这一背景下，氮肥增效剂作为提高氮肥利用效率的功能物质应运而生。氮肥增效剂是指添加到氮肥中或与氮肥配合施用，通过调控氮素在土壤中的转化过程，减少损失、提高农作物吸收效率的一类功能物质。从20世纪60年代第一代氢醌类抑制剂问世至今，增效剂技术已发展出多种作用机制、多种应用形式的系统性解决方案[6]。特别是近年来，随着微生物组学和材料科学的进步，氮肥增效剂技术进入了快速发展阶段，展现出巨大的应用潜力。

［收稿日期］2025-08-22

［作者简介］曹　鹏（2000-），男，河南信阳人，在读硕士研究生，研究方向为氮肥增效剂的筛选及效果评价。

［通信作者］肖秋芸，副研究员，长期从事微生物工程、微生物肥料研发工作。

笔者旨在系统梳理氮肥增效剂的研究进展，从技术分类、作用机制、应用效能 3 个维度展开分析，并探讨未来发展方向。通过综述生物氮肥增效剂的最新研究成果与实际应用案例，为氮肥增效剂的科学研究与推广应用提供参考。

1 氮肥增效剂的定义与分类体系

氮肥增效剂根据其作用机制和成分特点，主要可分为三大类型：抑制剂类、生物类和功能材料类。这种分类体系反映了不同的科学原理和技术路线，但共同目标是优化氮素在土壤–农作物系统中的转化与利用效率。

1.1 抑制剂类氮肥增效剂

抑制剂类氮肥增效剂是研发历史最长、应用最广泛的类型，主要通过特异性抑制土壤中关键氮转化酶的活性来发挥作用[7]。

脲酶抑制剂（UI）：延缓尿素水解为铵态氮的过程。早期代表产品为正丁基硫代磷酰三胺（NBPT），其分子结构与尿素相似，通过与脲酶活性中心的镍离子结合，竞争性抑制酶活性[8]。

硝化抑制剂（NI）：抑制氨氧化过程，阻止铵态氮向硝态氮转化。传统 NI 如双氰胺（DCD）和 3,4–二甲基吡唑磷酸盐（DMPP）通过干扰氨单加氧酶（AMO）功能起作用[9]。

1.2 生物类氮肥增效剂

生物类氮肥增效剂利用功能微生物菌群、微生物代谢产物以及生物基来调控土壤氮循环，主要涵盖三大功能类型：（1）固氮微生物，将大气中的氮气转化为植物可利用的铵态氮，如固氮菌属（*Azotobacter*）和固氮螺菌属（*Azospirillum*）[10]；（2）解磷、解钾微生物，通过分泌有机酸活化土壤中的固定态磷、钾，促进养分协同吸收，如芽孢杆菌属（*Bacillus*）物种[11]；（3）根际促生菌（PGPR），通过产生植物激素、抑病物质等间接促进氮吸收，如假单胞菌属（*Pseudomonas*）物种[12]。

1.3 功能材料类氮肥增效剂

功能材料类氮肥增效剂主要利用物理包裹或化学吸附的机制控制氮素释放。这类增效剂通常是将氮肥制作成缓释肥料（Slow-release fertilizers，简称 SRFs），即能延缓或控制养分释放速率的新型肥料[13]。

2 作用机制

2.1 脲酶抑制剂的作用机制

脲酶抑制剂主要通过 3 种方式来抑制脲酶活性，达到阻止脲酶水解尿素的目的（见图 1）。第一类是底物类似或者活性位点导向抑制类，具有与尿素相似的结构，通过竞争性结合脲酶双镍活性位点（与尿素相同的结合模式），阻断底物催化（如硫脲、羟肟酸类）；第二类是机制导向抑制剂类，结构与尿素无关，通过干扰催化机制或共价修饰酶关键残基实现对脲酶不可逆抑制（如磷酰二胺类、咪唑类）；第三类抑制剂无特定抑制作用位点，抑制剂发生共效通常在特定场景下（如磺化菲羧酸钠盐类，只在酸性条件下起抑制效果）。表 1 列出了常见的 UI 和作用机制。

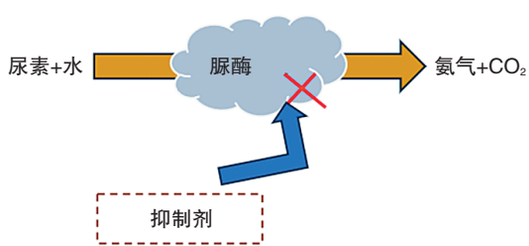


图 1 脲酶抑制原理

Fig. 1 Inhibition principle of urease

表 1 常见的脲酶抑制剂

Table 1 Common urease inhibitors

类型	代表化合物	作用机制	参考文献
尿素类似物	硫脲、羟基尿素	作为竞争性抑制剂与脲酶作用，初期抑制效果明显，但脲酶恢复活性后其抑制效果会下降	［14］
磷腈类	单/双苯氧基环三磷腈	通过膦酰基氧与镍离子结合抑制脲酶活性	［15］
磷酰二胺类	NBPT、NPPT（正丙基硫代磷酰三铵）、PPD（苯基磷酰二胺）、NLT（苄胺基硫代磷酰三胺）	苯基磷酰二胺等被脲酶水解为二氨基磷酸盐（DAP），其四面体结构与尿素水解过渡态相似，强效螯合双镍中心	［16–17］
咪唑类	咪唑乙烟酸、奥美拉唑	与脲酶半胱氨酸残基形成二硫键，不可逆抑制酶活性	［18］

2.2 硝化抑制剂的作用机制

氮肥施入土壤后通过硝化作用从铵态氮转变为硝态氮，亚硝酸盐（NO_2^-）经亚硝酸盐氧化还原酶（NXR）（存在于亚硝酸盐氧化细菌中）氧化为硝酸盐（NO_3^-）[19]。农作物无法短时间吸收大量的硝态氮，随着硝态氮的累积，土壤启动反硝化作用。反硝化作用可看作是硝化反应的逆推，这是一个由好氧细菌在缺氧条件下，将硝酸盐（NO_3^-）或亚硝酸盐（NO_2^-）逐步还原为气态氮氧化物（NO、N_2O）或氮气（N_2）的过程，是造成土壤氮损失（损失量

可达施肥量的50%~73%）、降低肥料利用率的主要原因[20]。通过在氮肥中添加0.5%~5.0%的硝化抑制剂，可显著提高肥料利用率[21]。

土壤中硝化作用由微生物主导，NI通过直接影响硝化微生物的酶活性从而抑制土壤中氨氧化或亚硝化过程，其抑制途径主要有以下几种[22]：（1）竞争性抑制，许多化合物与NH_3竞争AMO的活性位点，阻碍底物结合（例如含硫醚类化合物）；（2）不可逆抑制，部分化合物（如乙炔、三氯乙烯等）被AMO氧化后，生成活性中间体（如环氧衍生物），共价修饰AMO导致AMO不可逆失活；（3）金属螯合机制，含硫化合物（如硫脲、二硫化碳）通过螯合AMO活性位点的Cu，阻断其催化功能。常见的NI见表2。

表2　常见的硝化抑制剂

Table 2　Common nitration inhibitors

类型	代表化合物	作用机制	参考文献
竞争性抑制	甲烷、乙烯、CO	可作为AMO的竞争性底物	[23]
不可逆抑制	硝吡啶、乙炔、三氯乙烯	生成中间体导致AMO不可逆失活	[24]
金属螯合机制	DCD、DMPP、DMPSA（3,4–二甲基吡唑琥珀酸）、硫脲、CS_2	含有与氨结构类似的氨基和亚氨基底物，使AMO中心的铜被螯合，抑制氨氧化微生物的活性	[25]

相较于传统的NI开发依赖化学合成或修饰，生物硝化抑制剂（BNI）是植物根系分泌的天然化合物，能够特异性抑制土壤微生物的硝化作用，减少氮流失，具有更环保、无残留风险的优点。大多数NI只是抑制硝化过程中的第一步（AMO），而BNI可以同时抑制AMO和羟胺氧化还原酶（HAO），可阻断NH_4^+向NO_3^-的直接转化，如植物合成的亚麻酸、亚油酸、樱花素、能同时抑制AMO和HAO，且有的抑制作用可长达数月[26]。

2.3　生物类氮肥增效剂的作用途径

生物类氮肥增效剂通过多种生物学途径提高植物对氮肥的利用效率，从而减少环境污染。其核心作用途径可分为以下3类。

1）　直接促进养分吸收与转化

部分PGPR（如固氮螺菌属*Azospirillum*、伯克霍尔德菌*Burkholderia*）含有nif基因簇，可以产生固氮酶，将大气中的N_2转变为铵（NH_4^+），促进植物对氮的吸收，降低土壤中硝酸盐淋失和N_2O排放[27]。除氮元素外，它们还能活化磷、钾等其他元素，例如：丛枝菌根真菌（AMF）和PGPR分泌酸性/碱性磷酸酶，水解土壤有机磷（如植酸），释放可溶性磷酸盐；解钾菌（如*B.mucilaginosus*）分泌有机酸溶解含钾矿物（云母、长石）；PGPR产生铁载体（siderophores），螯合Fe^{3+}，供植物吸收（如水稻接种根瘤菌后铁含量提升）[28]。

2）　促进根系生长

PGPR分泌植物激素（如生长素、细胞分裂素），刺激根毛增生和侧根发育，扩大根系吸收表面积。AMF可形成“菌丝桥”，直接连接土壤养分库与植物根系，缩短养分迁移距离，提高对氮肥的利用率[29]。

3）　减轻环境胁迫与共生保护

微生物代谢产物诱导植物积累脯氨酸等，维持渗透压平衡，保障养分吸收（如生菜在水分胁迫下仍保持较高氮磷吸收率）。相关微生物竞争性抑制病原菌定殖，减少根系病害导致的养分吸收障碍；菌丝网络形成物理屏障，阻挡重金属等污染物进入植株[27]。

3　生物类氮肥增效剂的研究近况

生物类氮肥增效剂主要通过引入或促进特定有益微生物的活动，利用微生物代谢产物以及生物基材料来提高农作物对氮肥（尤其是化学氮肥）的吸收利用效率，减少氮素损失，并促进植物生长。其增效机制和作用具有多样性，核心在于利用微生物与植物或土壤的相互作用。

3.1　氨基酸类增效剂

氨基酸作为蛋白质的基本组成单元，是植物生长、发育、抵抗逆境的关键调节物质。近年来研究发现，在氮肥中添加氨基酸可显著提高氮肥的综合利用效率。杨乾贵等[30]发现高量氮肥（5 g/株）与聚谷氨酸（450 mg/L）配施使辣椒根系铁含量和锌含量最大，同时研究发现添加了聚谷氨酸的处理组辣椒株高、茎粗、叶片形态指标和根系指标均有所提高，进一步说明了聚谷氨酸作为氮肥增效剂可促进辣椒根系对微量元素铁和锌的吸收。孙克刚等[31]将尿素与聚天冬氨酸配施，聚天冬氨酸添加量分别为常量尿素的4%、3%，氮肥利用率提高6.13~7.99百分点，进一步证明在保证夏花生不减产的前

提下，采用尿素和聚天冬氨酸配施可减少氮肥的使用量。李艳艳[32]发现甘氨酸和尿素以质量比7∶3混合施加，可以促进桃树株高、茎粗、叶面积的增加，促进毛桃实生苗的生理生长，同时也会进一步提高土壤抗逆等相关酶的活性，促进营养元素的释放，满足植株生长对速效养分含量的需求。李南等[33]发现向尿素添加3.75%的γ-聚谷氨酸，与对照相比显著提高了土壤的碱解氮、有效磷、速效钾含量，尤其是对碱解氮、速效钾影响显著，有助于土壤中氮磷钾养分的积累，提高土壤肥力，同时还提高了芝麻对氮肥的利用率，相关农艺性状也有所改善。

3.2 腐植酸类增效剂

腐植酸作为天然的土壤有机质，是动植物残体经微生物分解再聚合形成，占土壤有机质质量的60%～80%，可改良土壤结构、增强保水保肥能力、促进植物生长代谢、提高植株抗逆性等。高兵阳[34]在大田试验中发现，以每千克氮肥配施15.19 g腐植酸效果最佳，提高了土壤有机质、全氮和全磷含量，显著提高小麦群体数、玉米株高和茎粗、地上部生物量和氮素积累量，四季度平均增产5.7%～6.7%。赖细巧等[35]研究新型腐植酸氮肥对再生稻和氮肥利用率的影响，结果发现施用添加5%腐植酸的氮肥能够显著提高再生稻产量、地上部干物质量和氮素吸收量。肖富容等[36]将腐植酸与生化抑制剂添加到尿素中，发现腐植酸的添加能够提高供试黑土中无机氮的含量，抑制尿素中酰胺态氮向铵态氮的转化，有效抑制土壤中脲酶活性；与单一添加生化抑制剂NBPT相比，6%腐植酸的添加可显著提高NBPT的硝化抑制效果，对DMPP、CP（2-氯-6（三氯甲基）-吡啶）等同样会提高其抑制效果。肖富荣等[1]还发现，在黄土和黑土中施用含6%腐植酸的氮肥，可促进玉米植株对土壤氮素吸收，提高尿素氮素利用率。

3.3 其他生物类增效剂

天然生物大分子类、有机质类、微生物类等可作为氮肥增效剂的核心成分，通过提高土壤养分转化效率、促进作物吸收及改善土壤环境，实现氮肥增效的目标。其核心机制是微生物的固氮、解磷、释钾等代谢活动，以及分泌的激素、有机酸等活性物质对作物生长的直接调控[27]。孟凡龙等[37]研究发现2.5%海藻酸增效尿素的施用可使供试夏玉米平均增产5.04%，氮素积累量平均增加13.55 kg/hm^2，氮肥利用率平均提高7.16%，同时还发现海藻酸增效尿素可显著减少氧化亚氮排放和淋失等其他途径导致的氮损失，氮肥损失率平均降低6.16%。商启寰[38]发现，添加了海藻多糖的肥料可提高矮株番茄的抗逆性，具体表现为在冷害和热害的胁迫下，矮株番茄对温度胁迫的抵御效果优于未添加海藻多糖的肥料处理。张艺籍等[39]在尿素中添加6%的浒苔多糖，结果发现相比于单施尿素，浒苔多糖可以显著提高水稻分蘖期土壤铵态氮含量，促进水稻植株生长发育，显著提高籽粒产量、氮肥利用率。将微生物添加到氮肥中也是目前常用的一种增效手段，李瑞超[40]发现，在氮肥中添加根瘤菌剂（2 mL/hm^2），可提高大豆品质和产量，减少肥料用量，提高氮肥利用率，大豆籽粒产量增加38.3%，增收7 531.35元/hm^2。

4 展望

氮肥增效剂的发展代表着农业从高投入、高消耗、高污染向资源节约、环境友好、产出高效转型。面对粮食安全、环境保护和气候变化的巨大挑战，加大对氮肥增效剂的研发创新、推广应用和政策支持，是未来构建可持续农业的关键战略举措。未来，针对氮肥增效剂可以从以下几个方面进行探究：（1）研发更高效、更低剂量的增效剂，目标是在复杂田间条件下保持稳定活性，减少因环境因素（温度、湿度、土壤pH、微生物群落）导致的效果波动；（2）开发出具有特定功能的增值肥料，如抗病/抗逆型肥料（添加生物刺激素）、保水型肥料（添加保水剂+增效剂）、土壤改良型肥料（添加有机质/有益微生物+增效剂）等；（3）深入研究不同增效剂（如抑制剂+生物类增效剂，不同增效剂组合）之间的协同效应，开发复合增效剂配方，实现对氮素转化多个环节（氨挥发、硝化、反硝化、淋失）的更全面控制。

［参考文献］

［1］ 肖富容，李东坡，武志杰，等.添加生化抑制剂和腐植酸的稳定性增效尿素在黄土中的施用效果[J].应用生态学报，2021，32(12)：4419-4428.
XIAO F R，LI D P，WU Z J，et al. Application effects of high efficiency and stability urea added with biochemical inhibitors and humic acid in loess[J]. Chinese Journal of Applied Ecology，2021，32(12)：4419-4428.

［2］ 段文静，马彤彤，张永江，等.氮肥中不同硝化抑制剂DCD添加比例对棉花生长发育及产量的影响[J].植物营养与肥料学报，2020，26(11)：2095-2106.
DUAN W J，MA T T，ZHANG Y J，et al. Effects of different nitrification inhibitor DCD addition rations in nitrogen fertilizer

on growth and yield [J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2020, 26(11): 2095-2106.

[3] ZHANG C, LI Z B, MIAO Y L, et al. Combining effects of nitrogen fertilizer and biochar on soil N_2O emissions and microbial community in a subtropical rapeseed-soybean rotation [J].European Journal of Soil Biology,2025,126:103750.

[4] SHERZAD Z, NAWAKHT N A, SHERZAD F. Plant growth-promoting endophytic bacteria: a sustainable solution for climate change and environmental stresses in agriculture [J].Discover Applied Sciences,2025,7(8):894.

[5] 梁玉伟,张世文,胡睿鑫,等.不同氮源对芦苇好氧堆肥中温室气体排放及碳氮损失的影响[J].中国土壤与肥料,2025(1):107-117.
LIANG Y W, ZHANG S W, HU R X, et al. Effects of Different Nitrogen Sources on Greenhouse Gas Emissions and Carbon-Nitrogen Losses in Aerobic Composting of Reeds [J]. Soil and Fertilizer Sciences in China, 2025 (1): 107-117.

[6] 黄铂轩,郑苍松,孙淼,等.氮素抑制剂研究进展[J].河南农业科学,2024,53(8):1-10.
HUANG B X, ZHENG C S, SUN M, et al. Research Progress of Nitrogen Inhibitors [J]. Journal of Henan Agricultural Sciences, 2024, 53(8): 1-10.

[7] 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.
MA F, YANG R Q, GUO L P. Decrease the emission of active nitrogen fertilizer application: Research progresses and perspectives of urease/nitrification inhibitors [J]. Journal of Agro- Environment Science, 2020, 39(4): 908-922.

[8] 郭延轲,赵长盛,刘伟,等.硝化/脲酶抑制剂和生物炭对设施农业土壤微生物及碳氮循环影响的研究进展[J].江苏农业科学,2024,52(9):1-11.
GUO Y K, ZHAO C S, LIU W, et al. Research progress on influnces of nitrification/urease inhibitors and biochar on soil microorganisms and carbon-nitrogen cycles in protected agriculture [J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2024, 52(9): 1-11.

[9] 叶扬,侯振安,闵伟,等.添加脲酶/硝化抑制剂对棉花养分吸收和产量的影响[J].新疆农业科学,2024,61(4):814-822.
YE Y, HOU Z A, MIN W, et al. Effects of urease/nitrification inhibitors on nutrient absorption and yield of cotton[J]. Xinjiang Agricultural Sciences, 2024, 61(4): 814-822.

[10] 郭强,韩子琛,夏允,等.土壤微生物固碳机理及其影响因素研究进展[J].植物生态学报,2024,48(11):1406-1421.
GUO Q, HAN Z S, XIA Y, et al. Study advances on the mechanism of soil microbial carbon fixation and associated influencing factors [J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2024, 48(11): 1406-1421.

[11] 焦荟颖,刘立强,杨佳鑫,等.新疆野苹果自然种群根际固氮菌、解磷菌及解钾菌对叶片养分和生理指标的影响[J].植物生态学报,2024,48(7):930-942.
JIAO H Y, LIU L Q, YANG J X, et al. Effects of rhizosphere nitrogen-fixing, phosphate-solubilizing and potassium-solubilizing, bacteria on leaf nutrients and physiological traits in different natural populations of Malus sieversii [J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2024, 48(7): 930-942.

[12] 廖建杰,覃叶欣,李宗俊,等.植物根际促生菌缓解农作物非生物胁迫和生物胁迫的研究进展[J].江苏农业科学,2025,53(11):9-15.
LIAO J J, QIN Y X, LI Z J, et al. Research progress on plant growth-promoting rhizobacteria alleviating abiotic and biotic stresses of crops [J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2025, 53(11): 9-15.

[13] JALOMO C A ,SCHROEDER A G,HERNANDEZ E M , et al. Copper-Cross-Linked Alginate-Based Hydrogel Nanoparticles for Sustainable Slow-Release Fertilizer Applications [J]. Langmuir : the ACS Journal of Surfaces and Colloids,2025,41(28):18463-18470.

[14] SHAHRIARYNEJAD D, DASTYAFTEH N, NAZ F, et al. Synthesis of piperazine-based benzimidazole derivatives as potent urease inhibitors and molecular docking studies [J]. Scientific Reports,2025,15(1):29220.

[15] JAIN I,MALIK P. Advances in urea and thiourea catalyzed ring opening polymerization: A brief overview [J]. European Polymer Journal,2020, 133:109791.

[16] 康丽霞,胡丹,罗维贵,等.脲酶抑制剂大蒜素和NBPT对石灰性土壤氮转化及其关键微生物的影响差异[J].植物营养与肥料学报,2025,31(3):470-484.
KANG L X, HU D, LUO W G, et al. Differen effects of urease inhibitors allicin and NBPT on nitrogen transformation and key microbes in calcareous soil [J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer Sscience, 2025, 31(3): 470-484.

[17] CASSIM B M A R , LISBOA I P, DEGRYSE F, et al. Combined use of NBPT and micronutrients in granulated or coated urea: A new approach to reduce ammonia volatilization losses from soil [J].Soil Use and Management, 2024, 40(4): e13148.

[18] YANG W,FENG Q Q, PENG Z Y,et al. An overview on the synthetic urease inhibitors with structure-activity relationship and molecular docking [J]. European Journal of Medicinal Chemistry, 2022, 234: 114273.

[19] OLUWATOBI E A, OLUBUKOLA O B. Factors influencing soil nitrification process and the effect on environment and health [J]. Frontiers in Sustainable Food Systems. 2022, 6: 821994.

[20] BERNI D M M, GARCIA S B, ORESTI E. Ammonia diffusivity in biofilm reactors: impact of polyurethane foam hickness and pore clogging on simultaneous nitrification and denitrification. [J].Bioprocess and Biosystems Engineering, 2025, 48(11):1-10.

[21] 张雪彬,孟磊,曹明,等.氮肥配施硝化抑制剂对海南鲜食玉米生长及N_2O排放的影响[J].南方农业学报,2024,55(11):3265-3274.
ZHANG X B, MENG L, CAO M, et al. Effects of nitrogen fertilizer combined with nitrification inhibitor on growth and N_2O emission of fresh maize in Hainan[J]. Journal of Southern Agricultural Science, 2024, 55(11): 3265-3274.

[22] 黄勇,黄文慧,顾晓丹,等.城市污水中部分亚硝化-厌氧氨氧化工艺NOB抑制策略的研究进展[J].环境工程学报,2023,17(4):1075-1083.

HUANG Y, HUANG W H, GU X D, et al. Research Progress on NOB Inhibition Strategy of Partial Nitrosation-Anammox process in municipal Wastewater [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2023, 17(4): 1075-1083.

[23] WANG S J, ZUO Q Q, GAO Q B, et al. Acceleration of soil N_2O flux and nitrogen transformation during tropical secondary forest succession after slash-and-burn agriculture [J].Soil & Tillage Research,2021,208:104868.

[24] YANG X H, WANG B Q, ZHANG Q, et al. Nitration of Derivatives of Imidazo [1, 5-a] pyridine via C—H Functionalization with $Fe(NO_3)_3 \cdot 9H_2O$ as a Promoter and a Nitro Source[J]. ChemistrySelect,2024,9(23): e202401114.

[25] BYRNE M P, TOBIN J T, FORRESTAL P J, et al. Urease and nitrification inhibitors—As mitigation tools for greenhouse gas emissions in sustainable dairy systems: A review [J]. Sustainability, 2020, 12(15): 6018.

[26] MA H Z, JIA X Y, ZHANG X S, et al. Effect of biological nitrification inhibitors from sorghum, rice, and signal grass on N_2O emission: A multilevel meta-analysis [J].Environmental Research,2025,283:122159.

[27] 王景超,于晓菲,商姗姗.我国微生物肥料研究现状及其在作物上的应用进展[J].农业与技术,2022,42(1):34-37.
WANG J C, YU X F, SHANG S S. Current Research Status of Microbial Fertilizers in China and Their Application in Crops [J]. Agriculture and Technology, 2022, 42(1): 34-37.

[28] KHOSO M A, WAGAN S, ALAM I, et al. Impact of plant growth-promoting rhizobacteria (PGPR) on plant nutrition and root characteristics: Current perspective [J].Plant Stress, 2024, 11:100341.

[29] 郑豪,匙占库,杨芸岫,等.两种根际促生菌对板蓝根生长及品质的影响[J].绿色科技,2025,27(9):67-72.
ZHENG H,SHI Z K,YANG Y X,et al. Study on the Effects of Plant Growth-Promoting Rhizobacteria on the Growth and Quality of *Isatis tinctoria* L.[J].Journal of Green Science and Technology,2025,27(9):67-72.

[30] 杨乾贵,彭海兰,许灵杰,等.氮肥与聚谷氨酸配施对辣椒生长及养分吸收的影响[J].北方园艺,2025(15):49-56.
YANG Q G, PENG H L, XU L J, et al. Effects of Combined Application of Nitrogen Fertilizer and Polyglutamic Acid on the Growth and Nutrient Absorption of Capsicum anmuum L.[J]. Northern Horticulture,2025(15):49-56。

[31] 孙克刚,张琨,杜君,等.尿素和聚天门冬氨酸配施对夏花生生长及氮素利用的影响[J].腐植酸,2025(2):54-60.
SUN K G, ZHANG K, DU J, et al. Effects of Urea Combined with Polyaspartic Acid on Summer Peanut Growth and Nitrogen Utilization[J]. Humic Acid,2025(2):54-60.

[32] 李艳艳.尿素配施甘氨酸对桃树氮素吸收利用及果实品质的影响[D].泰安:山东农业大学,2021.
LI Y Y.Effects of Urea Combined with Glycine on Nitrogen Absorption and Utilization and Fruit Quality of Peach[D].Tai An:Shandong Agricultural University,2021.

[33] 李南,司贤宗,党静,等.γ-聚谷氨酸与氮肥配施对芝麻产质量及氮利用的影响[J].安徽农业科学,2025,53(8):147-149,161.
LI N, SI X Z, DANG J, et al. Effects of γ-polyglutamic Acid and Nitrogen on the Yield, Quality and Nitrogen Utilization of Sesame [J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2025, 53 (8):147-149,161.

[34] 高兵阳.氮肥与腐植酸配施对小麦/玉米氮素吸收和土壤理化性质的影响[D].郑州:河南农业大学,2024.
GAO B Y.Effects of Nitrogen Fertilizer Combined with Humic Acid on Nitrogen Uptake and Soil Physicochemical Properties of Wheat/Maize [D]. Zhengzhou: Henan Agricultural University, 2024.

[35] 赖细巧,田贵生,干轶,等.腐植酸氮肥对再生稻产量及氮肥利用率的影响[J].腐植酸,2025 (2):37-41,60.
LAI X Q, TIAN G S, GAN Y, et al. Effects of Humic Acid Nitrogen Fertilizers on Yield and Nitrogen Use Efficiency of Ratoon Rice[J].Humic Acid,2025(2):37-41,60.

[36] 肖富容,李东坡,薛妍,等.添加腐植酸与生化抑制剂的稳定性增效尿素在黑土中的施用效果[J].中国土壤与肥料,2022(8):47-55.
XIAO F R,LI D P,XUE Y,et al. Effect of high efficiency and stability urea added with humic acid and biochemical inhibitors in black soil[J].Soil and Fertilizer Sciences in China,2022(8):47-55.

[37] 孟凡龙,李絮花,王韬虎,等.海藻酸增效尿素对夏玉米氮素吸收利用及氮肥损失的影响[J].农业资源与环境学报,2024,41(3):549-557.
MENG F L, LI X H, WANG T H, et al. Effects of alginic acid-enhanced urea on nitrogen absorption , utilization and loss of summer maize [J]. Journal of Agricultural Resources and Environment, 2024, 41(3): 549-557.

[38] 商启寰.多肽类肥料和海藻多糖肥料对矮株番茄抵御和缓解温度胁迫的影响[D].泰安:山东农业大学,2024.
SHANG Q H. Effects of Peptide Fertilizers and Algal Polysaccharide Fertilizers on the Resistance and Stress Mitigation of Dwarf Tomato Plants to Temperature Stress [D]. Taian:Shandong Agricultural University, 2024.

[39] 张艺籍,李东坡,肖富容,等.生化抑制剂和浒苔多糖配施的稳定性尿素在黑土中的肥料效果[J].华北农学报,2023,38(5):139-147.
ZHANG Y J,LI D P,XIAO F R,et al. Fertilization Effect of Stable Urea Formulated with Biochemical Inhibitors and Enteromorpha Polysaccharide in Black Soil [J]. Acta Agriculturae Boreali-Sinica,2023,38(5):139-147.

[40] 李瑞超.减施氮肥接种根瘤菌对大豆生长及氮肥利用率的影响[J].安徽农学通报,2025,31(10):1-5.
LI R C. Effects of nitrogen reduction combined with rhizobium inoculation on soybean growth and nitrogen fertilizer utilization rate[J]. Anhui Agricultural Science Bulletin,2025,31(10):1-5.