

氮肥增效剂及其效果评价的研究进展

何威明, 保万魁, 王旭*

(中国农业科学院农业资源与农业区划研究所, 北京 100081)

摘要: 从肥料增效技术发展的必要性、作用机理、作用效果和评价研究等方面, 综述了国内外的应用和评价研究的现状。针对氮肥增效剂的特点, 总结了对其评价研究中存在的主要问题, 并探讨了今后氮肥增效剂评价研究的主要方向。

关键词: 氮肥增效剂; 评价; 进展

中图分类号: S143.1+6

文献标识码: A

文章编号: 1673-6257(2011)03-0001-07

氮是植物必需的营养元素, 也是影响作物产量最重要的因子之一。我国的氮肥施用量占世界氮肥施用量的 30% 以上, 2007 年我国氮肥的表观消费量达 3 965 万 t, 其中农业消费量约 3 500 万 t, 居世界首位^[1]。但长期以来, 施用氮肥在增加产量效益的同时, 也出现一系列的问题^[2]: 一是利用率低。据统计, 我国小麦、玉米、水稻的氮肥当季利用率只有 8.9%~78.0%, 平均仅有 28.7%; 二是损失率高, 经济损失巨大。肥料的肥效期短, 很难满足作物整个生育期的需肥特性, 并且肥料的损失率很高, 相当于年损失尿素 2 050 万 t; 三是造成环境污染。由于过量施肥造成的地表水富营养化、湖泊污染、地下水污染等环境问题, 蔬菜中硝酸盐含量严重超标等社会健康问题愈来愈引起人们的关注。提高肥料利用率成为解决上述问题的关键。

目前, 除了改进施肥方法、优化配方施肥技术和加强田间管理外, 通过添加氮肥增效剂以提高氮肥施肥效果的新技术, 越来越成为国内外提高氮肥利用率研究的热点。

1 氮肥增效剂的主要种类及作用机理

美国植物养分管理联合会 (AAPFCO) 在 1995 年明确提出了稳定肥料的概念^[3]。氮肥增效剂是进入土壤后能够影响土壤生化环境, 调节某些土壤酶活性, 影响土壤微生物对氮肥作用, 降低氮素损失的一类物质^[3,4]。目前, 国内外氮肥增效剂种类近百余种。按作用方式可主要分为硝化抑制剂、脲酶

抑制剂和氨稳定剂 3 类^[5], 其中研究最多的是硝化抑制剂和脲酶抑制剂。

1.1 硝化抑制剂

硝化抑制剂 (Nitrification inhibitor) 的特点是能够抑制土壤中亚硝化细菌等微生物的活性, 具有抑制土壤中亚硝化细菌作用, 减少 NH_4^+ 向 NO_2^- 、 NO_3^- 转化, 适合与各种铵态氮肥或尿素配合施用^[6,7]。主要硝化抑制剂包括氯甲基吡啶 (Nitrapyrin)、双氰胺 (DCD)、1-甲基吡啶-1-羧酰胺 (CMP)、3-甲基吡啶 (MP)、4-氨基三唑 (AM/AT/ATC)、硫脲 (TU) 等^[8]。

土壤的硝化过程包括亚硝化反应和硝化反应两个步骤。第一个步骤是 NH_4^+ 转化为 NO_2^- , 反应式为 $\text{NH}_4^+ + 3/2\text{O}_2 \rightarrow \text{NO}_2^- + 2\text{H}^+ + \text{H}_2\text{O}$ 。此过程中亚硝化细菌起到主要作用。第二个步骤是 NO_2^- 转化为 NO_3^- , 反应式为 $\text{NO}_2^- + 1/2\text{O}_2 \rightarrow \text{NO}_3^-$, 此过程中硝化细菌起到了主要作用。这两种细菌也被称为氨氧化细菌 (亚硝化单胞菌属为代表) 和亚硝酸氧化细菌 (硝化杆菌属为代表)^[9]。只要两个过程之一被抑制, 整个硝化过程就能够被抑制, 即硝化抑制剂通过抑制氨氧化细菌和亚硝酸氧化细菌, 就可以延缓土壤中的铵态氮向硝态氮的转化, 从而增加作物吸收、利用矿化态氮的时间, 减少亚硝态氮、硝态氮的直接或间接损失^[6,10]。

1.2 脲酶抑制剂

脲酶抑制剂 (Urease Inhibitor) 能够抑制土壤脲酶活性, 减缓尿素水解, 专门与尿素配合施用。国内外研究涉及的主要脲酶抑制剂有重金属盐类脲酶抑制剂和有机物小分子类脲酶抑制剂两类^[11]。重金属盐类脲酶抑制剂主要是分子量大于 50 的化

收稿日期: 2010-05-28; 最后修订日期: 2010-07-05

作者简介: 何威明 (1983-), 男, 在读硕士, 主要从事氮肥增效剂评价的研究。王旭为通讯作者。

合物,如 Cu、Ag、Co、Ni 等元素的不同价态离子构成的化合物; 有机物小分子类脲酶抑制剂主要包括 N-丁基硫代磷酰三胺 (NBPT)、苯基磷酰二胺 (PPD)、硫代磷酰三胺 (TPT)、磷酰三胺 (PT)、氢醌 (HQ)、硫脲 (TU)、P-苯醌等^[12]。

脲酶抑制剂控制尿素水解的作用机理存在 3 种观点^[13-15]: 一是通过在脲酶催化过程中扮演主要角色的巯基发生作用,来延缓土壤中尿素的水解速度,减少氨的挥发损失。通常土壤脲酶的活性都比较强,施入土壤的尿素只需 1~7 d 就全部转化。脲酶是一种分子量约为 48 万的含镍金属酶,它有约 77 个甲硫氨酰基,129 个半胱氨酸,47 个巯基(半胱氨酰残基),其中有 4~8 个巯基(-SH)对酶的活性有重要作用。二是争夺配位体,降低脲酶活性。Manunza 等^[13]解释了尿素、氧肟酸、酰胺类脲酶抑制剂(NBPT)竞争脲酶活性部位的机制,认为脲酶抑制剂是通过与尿素竞争脲酶活性部位起作用的。三是脲酶抑制剂能通过影响微生物等过程影响脲酶的形成,阻滞了酰胺态氮向氢氧化铵和氨的转化,降低尿素的水解速度。

1.3 氨稳定剂

目前,氨稳定剂研究涉及的种类有无机酸类、有机酸类、无机盐类、Ca 盐类化合物,应用最多的是腐植酸、沸石和麦饭石。其主要作用机理在于改善土壤理化性状,提高土壤对氮素的吸附性能,减少氮素的氨挥发损失和淋溶损失。氨稳定剂较少单独作为氮肥增效剂使用,在实际生产中主要与抑制剂类增效剂混合施用或与肥料结合生产其主要用于开发基质复合与胶粘型缓/控释肥料^[16],而非化学抑制型缓效肥料(即稳定性肥料)。随着植物性脲酶抑制剂的研究不断深入^[17-19],具有多种功效的腐植酸、木质素等高分子有机化合物成为新的脲酶抑制剂种类受到重视。

2 氮肥增效剂的发展

2.1 硝化抑制剂

国际上对硝化抑制剂的研究起步较早,迄今为止,已发现有数百种化合物显示了或强或弱的硝化抑制效应^[8 20 21]。许多硝化抑制剂申请了专利并注册了商标在市场上流通,其中只有 Nitrapyrin(氯甲基吡啶)、DCD(双氰胺)和 CMP(1-甲基吡啶-1 羧酰胺)硝化抑制剂在农业上得到大量的应用^[22]。

20 世纪 50 年代中期美国率先开展了人工合成硝化抑制剂的研究。1962 年 Goring^[23]首次报道氯甲基吡啶具有硝化抑制特性,1973 年美国 DOW 化学公司利用氯甲基吡啶开发生产出一种硝化抑制剂产品,1975 年美国环保局正式批准其在农业生产中应用。进入 80 年代初,它已在玉米、小麦、水稻等作物上应用,使 N 素利用率提高 23%~35%,美国每年有超过 100 万 hm² 的农田应用这个产品。Wolt^[24]通过对大量的试验数据得出:一般情况下,氯甲基吡啶的施用可使各种作物产量提高 7%,根际土壤中氮的存留量增加 28%,而 N 的淋失减少 16%,温室气体排放降低 51%。

双氰胺(DCD)的硝化抑制特性于 1918 年被首次报道^[25],但是直到 20 世纪 80 年代美国才开始把它当作一种商品在农业上推广;日本对硝化抑制剂也深入地进行了研究,提出应用的品种有 Thiourea(硫脲)、AM(2-氨基-4-氯-9-甲基吡啶)、MBT(2-巯基-苯并噻唑)、ATC(4-氨基-1,2,4-三唑盐酸盐)、ST(2-磺胺噻唑)等^[6]。

近几年,德国研制了一种新型的硝化抑制剂 3,4-二甲基吡啶磷酸盐(DMPP),在铵态氮肥或尿素中添加 1%(相对于 NH₄⁺-N)的 DMPP,生产出的氮肥注册商标而投放市场。DMPP 是一种高效的硝化抑制剂,目前在德国应用效果很好。

我国对硝化抑制剂的研究始于 20 世纪 60 年代末,首先进行了当时影响较大的氯甲基吡啶试验研究,随后陆续进行了 23 个品种的筛选试验,其中包括脲基硫脲、双氰胺、均三嗪、2,5-二氯硝基苯等。到 1981 年我国正式通过全面鉴定的硝化抑制剂有氯甲基吡啶、脲基硫脲和双氰胺 3 个品种。在 90 年代初,中科院沈阳应用生态研究所在已有研究的基础上,解决了在碳酸氢铵生产过程中加入硝化抑制剂的工艺及技术问题。将我国硝化抑制剂应用进程向前大大地推进了一步,解决了抑制剂应用成本高、工艺复杂的问题。

针对硝化抑制剂的作用效果做了很多研究。大量田间试验显示,添加抑制剂 DCD 的氮肥能提高氮肥的利用率,并且在不同作物上表现出不同的有效性^[25 26]。于淑萍等^[27]在室内培养试验中证实 DMPP 处理能够显著提高土壤中的铵态氮含量,降低土壤中的硝态氮含量;俞巧刚等^[28]研究指出 DMPP 具有显著的氨氧化抑制作用,延缓蔬菜地土

壤铵态氮向硝态氮的转化,减轻氮素向水体迁移的风险。DMPP能够延缓硝化,有很好的硝化抑制作用,使土壤中硝态氮含量维持在较低水平,不仅如此,DMPP能够增加土壤无机氮含量,能在氮肥施入后较长时间内维持较高的可利用氮的供应强度,并能调节氮素供应形态;能减弱土壤因施氮造成的pH下降幅度;对土壤速效磷含量的影响不大;降低了土壤速效钾含量等作用^[29]。

对硝化机理的研究方面,薛知文等^[30]在1985年就研究了几种硝化抑制剂对亚硝化细菌的抑制作用,结果表明,3种吡啶类硝化抑制剂在不同土壤中对硝化细菌均有不同程度的抑制作用;不同硝化抑制剂作用机理不尽相同。概括来讲,一般硝化抑制剂是通过释放毒性化合物,直接影响硝化细菌群落及硝化活性来抑制土壤的硝化作用^[31],但亚硝化单胞菌属(*Nitrosomonas*)的不同菌株对同一抑制剂反应的敏感程度不同^[32]。Zerull和Irigoyen指出,硝化抑制剂只能抑制氨氧化细菌的活性,而对亚硝酸氧化细菌没有影响^[33,34]。而Li Hua等^[35]研究表明,DMPP的加入使得氨氧化细菌的数量减少,硝化细菌和反硝化酶的活性降低,但对亚硝酸氧化细菌和羟基还原酶活性没有影响。

2.2 脲酶抑制剂

对脲酶和脲酶抑制剂的认识和研究始于20世纪30年代,到1971年Bremner等^[36]人已经对130多种化合物进行了抑制剂的筛选。进入80年代,国际上已开发了近70多种有实用意义的脲酶抑制剂,主要包括醌类、多羟酚类、磷酰胺类、重金属类及五氯硝基苯等。从抑制效果看:有机化合物中的二元酚和醌类,如氢醌、邻苯二酚和P-苯醌的效果最好;无机化合物中,金属抑制剂的Ag盐和Hg盐效果最好;磷酰胺类化合物,效果最好的是NBPT和PPD;气体中乙炔效果最好。目前在世界肥料市场上已经申请了专利并施用于农业生产的脲酶抑制剂有很多,但是只有NBPT和HQ两种脲酶抑制剂已经得到实际的应用和作为商品在市场流通^[22]。

1996年美国IMC-Agrico公司在市场上销售固体尿素和硝铵尿素液体肥料的添加剂,其活性成分是NBPT(浓度24%以上)。该产品在土壤中降解成N、P、S等各种营养成分,其推荐使用量为0.45 kg/hm²^[37],其主要施用集中在美国,主要作物为玉米。

我国进行的研究主要集中在醌类。由于HQ价格成本较低,在我国受到极大的关注^[38,39]。周礼凯、张志明等人通过大量实验室培养和田间试验,研究了HQ对尿素的水解、氨的释出和挥发、硝化、反硝化、生物固持作用以及HQ和硝化抑制剂DCD在尿素氮转化行为的协同作用的影响和环境效应评价^[40-42]。

脲酶抑制剂的作用效果受土壤环境影响显著,张玉兰等^[43]对目前研究较多的4种脲酶抑制剂的作用效果与环境条件的关系进行了研究,发现脲酶抑制剂的有效性受环境条件的影响。通常脲酶抑制剂在脲酶活性较高的土壤中作用效果最好。在非酸性土壤,且通气性良好的条件下,脲酶抑制剂对尿素的抑制作用依次为NBPT>PPD>HQ;PPD在酸性条件(pH=5.6)时对尿素水解的抑制效果好于中性(pH=7.4)土壤;而NBPT在碱性土壤中的作用效果较好;HQ受土壤环境因素如pH值和通气性的影响较小;在通气不良的条件下,HQ的作用效果优于NBPT,但不及PPD。周礼凯等^[44]研究表明,HQ受土壤环境因素如pH和通气性的影响较小,HQ在通气性良好的条件下使用时,效果不及NBPT和PPD,在嫌气条件下施用,效果不及PPD;土壤脲酶活性随HQ用量的增加而减弱;HQ的作用不仅在于延缓尿素的水解和随之而来的氨的挥发,更重要的是影响了尿素水解产物进一步的进程,增强了尿素氮对作物的有效持续供应和减少了它的损失。

Bremner的研究^[45]表明,PPD是一种有潜力的脲酶抑制剂,易于分解形成酚,而酚是一种较弱的脲酶抑制剂。赵略等^[46]的研究表明,NBPT用量在0.1%~0.5%之间对土壤脲酶活性影响较小;当浓度达到1%时,抑制作用最为显著。低浓度(0.1 mg/mL)对细菌、放线菌生长有一定的促进作用;中等浓度和高浓度处理对其生长则表现出抑制作用,随用量增大抑制作用增强。

随着研究的深入,鉴于化学抑制剂昂贵的价格和其对土壤微生物明显的毒害作用,研究者着力寻找价格低廉、环境友好的氮肥抑制剂^[47]。在过去的四、五年里,几种试验室、温室和大田试验证明,绿薄荷油能够有效地抑制尿素水解和土壤硝化作用,提高氮肥利用率^[48-50]。利用薄荷素油、松脂、丁香油萜3种天然产物包被尿素,均能显著抑制尿素的水解和硝化作用,均能显著抑制土壤脲酶

活性, 并且不存在残留和环境污染现象^[51]。国内对植物性脲酶抑制剂的研究进展, 使得具有多种功效的腐植酸、木质素等高分子有机化合物成为新的脲酶抑制剂物质受到重视^[17-19]。

3 氮肥增效剂的应用和评价研究

3.1 应用效果和局限性

3.1.1 氮肥增效剂应用效果

研究表明, 与传统肥料相比, 合理施用氮肥增效剂对土壤尿素氮转化、氨的挥发、硝化和反硝化作用以及作物产量、环境效益等方面起到积极作用^[7, 22]: (1) 可以抑制尿素水解、减少氨气挥发损失; (2) 节省尿素肥料的用量, 减轻尿素肥料对幼苗的伤害; (3) 减少了硝酸根离子的淋失和反硝化引起的 N_2O 的排放, 减轻氮肥施用对水体的污染和对温室效应的贡献; (4) 降低农产品中的硝态氮含量, 这对于保证食品安全生产是非常重要的; (5) 由于氮损失的减少, 增加氮供应浓度, 可提高作物产量, 改善农产品品质; (6) 由于有效地保持了土壤氮素供应, 延长了肥效, 从而减少了施肥次数, 降低农民的劳动强度。

3.1.2 氮肥增效剂应用的局限性

脲酶抑制剂和硝化抑制剂种类复杂, 存在着不可避免的缺点, 如价格昂贵、毒性和污染。陆欣等^[48]1997年指出氢醌不仅较贵而且有毒, 人食用5g即可致死; Maftoun等^[52, 53]早在1981年即发现硝化抑制剂氯甲基吡啶同样具有一定的毒性, 其致毒症状在豇豆上表现为叶片萎黄, 鹰嘴豆上表现为间歇性失绿, 绿豆上表现为叶片的卷曲, 当其施用量仅为10mg/kg时, 就会因为致毒作用导致豆类植株根系和地上部生长受到严重抑制, 植株干物质累积量下降约50%; 国内黄益宗等^[54]在2001年指出, 氯甲基吡啶用量过多就会对植物产生毒害作用, 影响作物根系、叶片, 不同的用量对不同的作物产生的毒害作用不同。McCarty等^[55]1989年指出, 发现DCD在高温环境下降解较快, 认为在热带地区, DCD不是合适的硝化抑制剂; 有些硝化抑制剂有残留, 会污染土壤环境^[56]; 部分增效剂虽然效果明显, 但是由于不利于保存和施用, 因此不便于在农业生产中应用。如乙炔虽是一种有效的硝化抑制剂, 但乙炔在常温常压下是气体, 土壤对其吸附固持能力较弱, 因此在土壤中的滞留时间很短, 很难在农业生产的田间实际应用^[57]。

总之, 虽然氮肥增效剂的施用效果明显, 但是, 由于氮肥增效剂在污染、价格等方面的原因限制其应用。国内外研究总结氮肥增效剂在应用中存在以下问题^[10, 37, 58-60]: (1) 抑制剂的作用效果受外界环境因素(如水分、气候、土壤特性)的影响显著, 作用效果不稳定。如在不同土壤类型上抑制剂的作用效果差异明显, 在轻质土壤上硝化抑制剂的作用效果更加明显; 部分增效剂在试验研究阶段效果很好, 但是在大田中应用的效果很不稳定; 在高温、高湿条件下, 抑制剂易于降解失效。(2) 自身特点限制, 抑制剂的挥发特性、在土壤中的迁移特性、自身的分解速度等特性影响了其作用时间和作用效果, 如常温下是气态的乙炔, 极易从土壤中逸出失去作用; 而重金属对环境危害巨大, 不能农业应用; 吡唑类物质易于被土壤胶体吸附、水解、光解等而失效。(3) 抑制剂的价格较高, 添加抑制剂使肥料生产成本增加是限制其推广应用的最主要因素。(4) 有些抑制剂毒性大, 对作物、土壤微生物和动物产生毒害作用; 土壤微生物活性不仅受到抑制, 甚至被杀死。(5) 生产中施用的增效剂在土壤中有残留, 会污染土壤环境。因此, 不断有研究者提出新硝化抑制剂和脲酶抑制剂类型, 而对其筛选及使用效果试验、环境效应试验、抑制剂的协同作用研究及添加抑制剂生产技术研究等, 仍在推陈出新。

3.2 评价研究概述

在缓效性评价研究方面, 目前国内外鲜有报道, 研究主要集中在氮肥增效剂对土壤氮素转化的影响, 对作物产量、环境效应的影响上。与肥料的缓效性能评价相关联的缓/控释肥料的评价方法国内外则已经有大量研究^[61-63]。见诸于报道的主要有水或盐溶液浸泡法、淋溶法、扩散和渗透率法、同位素法, 均是针对肥料本身的测定方法。而对氮肥增效剂的评价研究仅针对产品本身, 不足以反映出其作用效果。这是因为, 首先, 氮肥增效剂的主要作用对象为土壤微生物和土壤相关酶的活性, 常规检测方法检测肥料指标不能用来衡量含增效剂肥料的实际作用效果。其次, 氮肥增效剂施用后受环境(温度、水分、土壤理化性状)影响大, 不同土壤、不同环境条件其作用效果表现不稳定。再次, 氮肥增效剂种类很多, 包括有机物和无机物, 而实际生产中应用的增效剂则多为不同类型增效剂的组合, 作用机理不尽相同。

目前国内采用的缓释肥标准为水溶法,没有考虑土壤因素对肥料的影响。Shaviv^[64]认为,测试控释氮肥调控氮素营养能力,应当考虑土壤因素对肥料的影响。杜建军等^[65]指出客观地评价缓/控释肥料的作用效果,应该考虑作物的营养特性、肥料性能、土壤性质和环境因子,在肥料-土壤-作物系统中考虑。董燕等^[63]指出供试非包膜缓/控释复合肥料不同形态氮素养分在水溶液和土壤两种介质中的释放特性差异较大,以土壤培养条件下,不同时段释放的各形态氮素的组合量比,更符合植物氮素营养需要,表明以化学、生物机制为主的非包膜缓/控释肥料应主要考虑采用土壤培养方法进行评价。综上所述,评价氮肥增效剂应在土壤体系中进行,找出矿质氮素转化规律特点,必要时还应结合环境和作物营养做综合评价;不同于缓/控释肥料,可以通过肥料产品本身来评价其释放特性。

在毒性评价研究方面,Amberger在^[25]1989年指出DCD在土壤中可代谢生成铵态氮和硝态氮,并且完全转化而不留残余物,即DCD本身具有抑制功效同时也是氮肥肥源。赵晓燕等^[66,67]通过系统的试验证明施入土壤中的氢醌在一个生长周期后,在土壤中无残留、也没有累积;极少淋洗出土体,不污染大气和水体;对土壤微生物的数量组成和土壤酶活性状况无明显的不利影响。郑福丽等^[15]指出NBPT、PPD和HQ作为脲酶抑制剂,其本身在土壤中的降解并不污染环境,对环境的影响极小。选择不含重金属物质且可降解的有机物用于氮肥增效(如植物提取物、造纸黑素、废茶等),无残留、无污染地进入土壤生态循环,具有较好的环境友好特性。而重金属盐类和难降解化合物(如汞盐、砷盐、高级烃类等)则具有直接或间接的应用风险,尽管其作用效果明显,但在生产应用前应研究设定严格的限量要求。因此,对氮肥增效剂进行残留与毒性方面的研究极为重要,低毒、少残留、高效、廉价的氮肥增效剂是较为理想的选择。

4 展望

尽管氮肥增效剂的应用还存在不少问题,但其对提高氮肥利用率、减少环境胁迫的贡献是显著而有效的。这也是人们不断研究新的氮肥增效剂品种,探求其作用效果和规律的重要原因。目前,适合于不同地区、不同农业生产条件下的理想氮肥增效剂品种还非常有限,相关的基础研究还相对滞

后。筛选出适合农业生产、环境无害甚至是有利的氮肥增效剂仍然是目前的研究重点。通过对氮肥增效剂作用效果的研究,可以明确探讨氮肥增效剂在土壤中的变化规律是评价其作用效果的核心环节。今后对理想氮肥增效剂品种的筛选及其施用效果的评价,应注意结合不同地区的气候和土壤条件等方面进行评价。

参考文献:

- [1] 张智峰,张卫峰. 我国化肥施用现状及趋势 [J]. 磷肥与复肥, 2008, 23 (6): 9-12.
- [2] 闫湘,金继运,何萍,等. 提高肥料利用率技术研究进展 [J]. 中国农业科学, 2008, 41 (2): 450-459.
- [3] Trenkel M E. Improving fertilizer use efficiency controlled-release and stabilized fertilizers in agriculture [M]. Paris: International Fertilizer Industry Association, 1997.
- [4] 贾树龙. 氮肥增效剂的作用与应用技术 [J]. 河北农业科技, 1998, (3): 25.
- [5] 石元亮,孙爱文,孙桂芳,等. 氮肥增效剂在农业中的应用 [A]. 中国土壤学会第十次全国会员代表大会暨第五届海峡两岸土壤肥料学术交流研讨会论文集(面向农业与环境的土壤科学综述篇) [C]. 北京: 科学技术出版社, 2004. 402-411.
- [6] 陈笃生(编译). 硝化抑制剂 [J]. 化肥设计, 1998, (36): 62-63.
- [7] Slangen J H G, Kerkhoff P. Nitrification inhibitors in agriculture and horticulture: A literature review [J]. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 1984, 5: 1-76.
- [8] McCarty G W. Modes of action of nitrification inhibitors [J]. Biology and Fertility of Soils, 1999, 29: 1-9.
- [9] Abbassi M K, Adams W A. Loss of nitrogen in compacted grassland soil by simultaneous nitrification and denitrification [J]. Plant Soil, 1998, 200: 265-277.
- [10] 黄益宗,冯宗炜,王效科,等. 硝化抑制剂在农业上的研究进展 [J]. 土壤通报, 2002, 33 (4): 310-314.
- [11] Edmeades D C. Nitrification and urease Inhibitors [M]. Whakatane: Environment Bay of Plenty, Environmental Publication, 2004. 1-32.
- [12] 陈举鸣. 国内外脲酶抑制剂研究动态 [J]. 国外农学-土壤肥料, 1987, (3): 1-2.
- [13] 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: 789-796.
- [14] 王天元,宋雅君,滕鹏起. 土壤脲酶及脲酶抑制剂 [J]. 化学工程师, 2004, 8: 22-24.
- [15] 郑福丽,李彬,李晓云,等. 脲酶抑制剂的作用机理与效应 [J]. 吉林农业科学, 2006, 31 (6): 25-28.
- [16] 赵秉强,张福锁,廖宗文,等. 我国新型肥料发展战略研

- 究 [J]. 植物营养与肥料学报, 2004, 10 (5): 536-545.
- [17] 陆欣, 王海洪, 陶运平, 等. 应用煤炭腐植酸作为脲酶抑制剂的试验研究初探 [J]. 腐植酸, 1994, (1): 11-18.
- [18] 穆环珍, 曾文, 黄衍初, 等. 木素氮肥增效剂研制与增产效应研究 [J]. 农业环境保护, 1999, 18 (6): 251-253.
- [19] 田秀英, 张艳梅, 王正银. 植物性氮肥增效剂作用条件的研究 [J]. 西南农业大学学报 (自然科学版), 2006, 28 (3): 402-405.
- [20] Prasad R, Power J F. Nitrification inhibitors for agriculture, health, and the environment [J]. Advances in Agronomy, 1995, 54: 233-281.
- [21] Subbarao G V, Rondon M, Ito O, et al. Biological nitrification inhibition (BNI) - Is it a widespread phenomenon? [J]. Plant and Soil, 2007, 294: 5-18.
- [22] Martin E T. Improving fertilizer use efficiency controlled-release and stabilized fertilizer in agriculture [M]. Paris: International Fertilizer Industry Association, 1997.
- [23] Goring, Cleve A I. Control of nitrification by 2-chloro-6-(trichloro-methyl) pyridine [J]. Soil Science, 1962, 93: 211-218.
- [24] Wolt J D. A meta-evaluation of nitrapyrin agronomic and environmental effectiveness with emphasis on corn production in the Midwestern USA [J]. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 2004, 69: 23-41.
- [25] Amberger A. Research on dicyandiamide as a nitrification inhibitor and future outlook [J]. Commun. Soil Sci. Plant Anal, 1989, 20: 1933-1955.
- [26] Chalk P M, Victoria R L, Muraoka T, et al. Effect of a nitrification inhibitor on immobilization and mineralization of soil and fertilizer nitrogen [J]. Soil Biol. Biochem, 1990, 22 (4): 533-538.
- [27] 于淑萍, 尹小燕, 姜婷. 硝化抑制剂吡啶磷酸盐硝化抑制作用初探 [J]. 环境科学与管理, 2006, 31 (7): 87-95.
- [28] 俞巧刚, 陈英旭. DMPP 对菜地土壤氮素淋洗的影响研究 [J]. 水土保持学报, 2006, 20 (4): 40-43.
- [29] 许超, 吴良欢. 硝化抑制剂 DMPP 对菜园土供肥特性的影响 [J]. 农业环境科学学报, 2007, 26 (1): 269-272.
- [30] 薛知文, 陶树兴. 几种硝化抑制剂对亚硝酸细菌的抑制作用 [J]. 陕西师大学报, 1985, (3): 70-74.
- [31] Bending G D, Lincoln S D. Inhibition of soil nitrifying bacteria communities and their activities by glucosinolate hydrolysis products [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2000, 32: 1261-1269.
- [32] Neufeld J D, Knowles R. Inhibition of nitrifiers and methanotrophs from an agricultural humisol by allylsulfide and its implications for environmental studies [J]. Applied and Environmental Microbiology, 1999, 65: 2461-2465.
- [33] Zerulla W, Barth T, Dressel J, et al. 3, 4-dimethylphosphazoles: a new nitrification inhibitor for agriculture and horticulture [J]. Biol Fert Soils, 2001, (34): 118-125.
- [34] Irigoyen I, Muro J, Azpilikueta M, et al. Ammonium oxidation kinetics in the presence of nitrification inhibitors DCD and DMPP at various temperatures [J]. Aust J Soil Res, 2003, (41): 1177-1183.
- [35] Li H, Liang X Q, Chen Y X, et al. Effect of nitrification inhibitor DMPP on nitrogen leaching, nitrifying organisms, and enzyme activities in a rice-oilseed rape cropping system [J]. Journal of Environmental Sciences, 2008, (20): 149-155.
- [36] Bremner J M, Douglas L A. Inhibition of urease activity in soils [J]. Soil Biology and Biochemistry, 1971, 3 (4): 297-307.
- [37] 孙爱文, 石元亮, 张德生, 等. 硝化/脲酶抑制剂在农业中的应用 [J]. 土壤通报, 2004, 35 (3): 357-361.
- [38] 陆欣, 王申贵, 王海洪, 等. 新型脲酶抑制剂的试验研究 [J]. 土壤学报, 1997, 34 (1): 461-466.
- [39] 宁国辉, 刘树庆, 张笑归. 脲酶抑制剂的研究进展 [J]. 河北农业大学学报, 2003, 11 (4): 30-34.
- [40] 陈利军, 史奕, 李荣华, 等. 脲酶抑制剂和硝化抑制剂的协同作用对尿素转化和 N₂O 排放的影响 [J]. 应用生态学报, 1995, 6 (4): 369-372.
- [41] 徐星凯, 周礼恺, Oswald V C. 脲酶抑制剂/硝化抑制剂对植稻土壤中尿素 N 行为的影响 [J]. 生态学报, 2001, 21 (10): 1682-1686.
- [42] 陈振华, 陈利军, 武志杰. 脲酶/硝化抑制剂对减缓尿素转化产物氧化及淋溶的作用 [J]. 应用生态学报, 2005, 16 (2): 238-240.
- [43] 张玉兰, 陈利军, 张丽莉. 土壤质量的酶学指标研究 [J]. 土壤通报, 2005, 36 (4): 598-604.
- [44] 周礼恺, 赵晓燕. 脲酶抑制剂氢醌对土壤尿素氮转化的影响 [J]. 应用生态学报, 1992, 3 (1): 36-41.
- [45] Bremner J M. Recent research on problems in the use of urea as a nitrogen fertilizer [J]. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 1995, (42): 321-329.
- [46] 赵略, 孙庆元. 脲酶抑制剂 nBPT 对土壤脲酶活性和脲酶产生菌的影响 [J]. 大连轻工业学院学报, 2007, 26 (1): 24-27.
- [47] Prasad R. Fertilizer urea, food security, health and the environment [J]. Curr Sci, 1998, 75: 677-683.
- [48] Patra D D, Anwar M, Chand S, et al. Nimin and Mentha spicata oil as nitrification inhibitors for optimum yield of Japanese mint (Mentha arvensis) [J]. Commun Soil Sci Plant Anal, 2002, 33: 451-460.
- [49] Patra D D, Kiran U, Pandey P. Urease and nitrification retardation properties in natural essential oils and their by-products [J]. Commun Soil Sci Plant Anal, 2006, 37: 1663-1673.
- [50] Kiran U, Patra D D. Medicinal and aromatic plant material as nitrification inhibitors for augmenting yield and nitrogen uptake of Japanese mint (Mentha arvensis L Var Piperascens) [J]. Bioresour Technol, 2003, 86: 267-276.
- [51] Dharani D, Patra, Usha K, et al. Use of urea coated with natural products to inhibit urea hydrolysis and nitrification in soil [J]. Biol Fert Soils, 2009, 45: 617-621.
- [52] Maftoun M, Yasrebi J, Darbeheshti M. Comparative phytotox-

- icity of nitrapyrin and ATC to several leguminous species [J]. *Plant and Soil*, 1981, 63: 303 - 306.
- [53] Thomson C J, Marschner H, Romheld V. Effect of nitrogen fertilizer form on pH of the bulk soil and rhizosphere, and on the growth, phosphorus, and micronutrient uptake by bean [J]. *Journal of Plant Nutrition*, 1993, 16: 493 - 506.
- [54] 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, 10 (4): 323 - 326.
- [55] McCarty G W, Bremner J M. Laboratory evaluation of dicyandiamide as a soil nitrification inhibitor [J]. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 1989, 20: 2049 - 2065.
- [56] 史云峰, 武志杰, 陈利军, 等. 3, 5 - 二甲基吡唑磷酸盐 (DMPP) 对土壤硝化作用的影响 [J]. *应用生态学报*, 2007, 18 (5): 1033 - 1037.
- [57] 左秀锦, 曹建明. 乙炔抑制型基质氮肥养分释放模式初探 [J]. *农业环境科学学报*, 2008, 27 (2): 648 - 650.
- [58] 闫双堆, 刘利军. 腐殖酸 - 尿素络合物对尿素转化及氮素释放的影响 [J]. *中国农业生态学报*, 2008, 16 (1): 109 - 112.
- [59] Sahrawat K L. Control of urea hydrolysis and nitrification in soil by chemicals prospects and problems [J]. *Plant and Soil*, 1980, 57: 335 - 352.
- [60] Malzer G L. Performance of dicyandiamide in the north central states [J]. *Soil Sci. Plant Anal*, 1989, 20 (19&20): 2001 - 2022.
- [61] 崔静, 古思玉, 李菊梅, 等. 缓/控释肥养分释放特性的评价方法概述 [J]. *化肥工业*, 2009, 36 (1): 23 - 27.
- [62] 廖宗文, 杜建军, 宋波, 等. 肥料养分控释的技术、机理和质量评价 [J]. *土壤通报*, 2003, 34 (2): 106 - 110.
- [63] 董燕, 王正银. 缓/控释复合肥料不同形态氮肥释放特性研究 [J]. *中国农业科学*, 2006, 39 (5): 960 - 967.
- [64] Shaviv A. Plant response and environmental aspects as affected by rate and pattern of nitrogen release from controlled release N fertilizers [A]. In: Van Cleemput. *Progress in nitrogen cycling studies* [C]. The Netherlands: Kluwer Academic Publishers, 1996. 285 - 291.
- [65] 杜建军, 廖宗文, 毛小云, 等. 控/缓释肥在不同介质中的氮素释放特性及其肥效评价 [J]. *植物营养与肥料学报*, 2003, 9 (2): 165 - 169.
- [66] 赵晓燕, 周礼恺, 谢重阁. 脲酶抑制剂氢醌的环境效应评价 (1) [J]. *农业环境保护*, 1988, 7 (6): 18 - 20.
- [67] 赵晓燕, 周礼恺, 武冠山. 脲酶抑制剂氢醌的环境效应评价 (2) [J]. *农业环境保护*, 1989, 8 (4): 28 - 30.

Research advances on nitrogen fertilizer synergist and its effect evaluation

HE Wei-ming, BAO Wan-kui, WANG Xu* (Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, CAAS, Beijing 100081)

Abstract: The paper focused on research advances of technologies of fertilizer efficiency in term of development background, roles of principles, effects of applications and evaluations. Through current situation overviews of characteristics of nitrogen fertilizer synergist, future research trends and main problems were summarized and discussed.

Key words: nitrogen fertilizer synergist; effect evaluations; research advance