

## 土壤脲酶抑制剂和硝化抑制剂的研究进展

倪秀菊,李玉中,徐春英,李巧珍

(中国农业科学院农业环境与可持续发展研究所,农业部旱作节水重点实验室,北京 100081)

**摘要:**氮素是农作物生长必不可少的元素,在促进农作物生长,提高产量方面起到了不可忽视的作用。所以,土壤中氮肥的施用成为控制高产的主要因素。但是随着氮肥施用量的增加,土壤过多累积的硝态氮又导致了环境污染方面的问题。为了解决这种污染问题,许多学者在对脲酶抑制剂和硝化抑制剂的研究上取得了很好的进展,利用脲酶抑制剂和硝化抑制剂可以很好的抑制土壤中铵态氮的硝化作用,控制硝态氮的大量积累所导致的环境污染。

**关键词:**土壤;硝态氮;脲酶抑制剂;硝化抑制剂

**中图分类号:**S145.9 **文献标识码:**A

### Advance of Research on Urease Inhibitor and Nitrification Inhibitor in Soil

Ni Xiuju, Li Yuzhong, Xu Chunying, Li Qiaozhen

(Institute of Environment and Sustainable Development in Agriculture, CAAS;

Key Laboratory of Dryland Farming and Water-Saving Agriculture, MOA, Beijing 100081)

**Abstract:** Nitrogen is essential to the plant. It makes important effects which promote the growth of the plant, increase the yield. So the nitrogen fertilizer became one of the limiting factors which control the yield. However, if too much nitrogen fertilizer is applied into the soil, it will result some problems. Nitrate residue in the soil produces many problems to the environment. So many scientists made some good processes on the urease inhibitor and nitrification inhibitor. They used the inhibitors to reduce the pollution which the nitrate residue existed in the soil.

**Key words:** soil, nitrate, urease inhibitor, nitrification inhibitor

硝态氮肥和铵态氮肥是植物吸收氮素的两种主要形式。目前世界上施用的全部氮肥品种中,铵态氮肥和酰胺态氮肥数量占到90%以上<sup>[1]</sup>。但是施入土壤中的铵态氮只有30%~50%被作物吸收,其余的部分因种种原因而损失,其中最主要的原因是在硝化细菌的作用下转化为硝态氮。北方旱作土壤中施入的铵态氮肥和酰胺态氮肥在土壤中1~2周后就会转化为硝态氮<sup>[2]</sup>,淋洗到深层土壤和地下水中,进而造成地下水污染。因此,研究如何控制土壤中铵态氮的硝化作用对减少土壤过量硝态氮残留所造成的污染具有重要意义。

### 1 土壤硝态氮累积对环境的影响及硝化作用的抑制机理

#### 1.1 土壤硝态氮累积对环境的影响

过量的硝态氮积累在土壤中,如果不能被及时地利用,形成的硝酸盐容易造成土壤的次生盐渍化。硝酸盐是土壤主要的致盐因子,它对盐渍化的贡献可达到60%~70%<sup>[3]</sup>。所以,硝态氮的积累会造成土壤结构的破坏。

土壤中残留的硝态氮,在雨水冲刷和地表水下渗的作用下,会淋失到地下水,使得地下水硝酸盐含量过

**基金项目:**国家重大专项课题“华北村镇地下饮用水安全保障技术与示范”(2008ZX07425-001);国家科技支撑课题“北方农业干旱调控技术研究”(2006BAD04B06)。

**第一作者简介:**倪秀菊,女,1983年出生,汉族,河北张家口人,在读硕士研究生。通信地址:100081北京市海淀区中关村南大街12号,中国农业科学院农业环境与可持续发展研究所309室,E-mail: bessie986@163.com。

**通讯作者:**李玉中,男,1964年出生,研究员,主要从事水环境与农业干旱方面的研究。通信地址:100081北京市海淀区中关村南大街12号,中国农业科学院农业环境与可持续发展研究所,E-mail: liyz@cjac.org.cn。

**收稿日期:**2009-02-08, **修回日期:**2009-03-08。

高,造成地下水的污染。陈晓群等的研究表明,设施蔬菜地耕作层和下层土壤中硝态氮含量显著提高,浅层地下水中的硝态氮含量也大幅度增加,超过二级标准<sup>[4]</sup>。硝态氮同样会污染地表水,使水体发生富营养化作用。硝态氮在地表水和地下水中的富集,使得日常饮用水中硝态氮浓度不断升高<sup>[5]</sup>。

此外,土壤中残留的硝酸盐易发生反硝化作用进入大气,氨气及氮氧化物会污染大气,也是酸雨的主要成分。

### 1.2 硝化作用的抑制机理

硝化过程是指从铵态氮到硝态氮的转化过程,此过程包括亚硝化反应和硝化反应两个步骤。第一个步骤是 $\text{NH}_4^+$ 转化为 $\text{NO}_2^-$ ,反应式为 $\text{NH}_4^++3/2\text{O}_2\rightarrow\text{NO}_2^-+2\text{H}^++\text{H}_2\text{O}$ 。在此过程中,亚硝化细菌起到了主要作用。第二个步骤是 $\text{NO}_2^-$ 转化为 $\text{NO}_3^-$ ,反应式为 $\text{NO}_2^-+1/2\text{O}_2\rightarrow\text{NO}_3^-$ ,在此过程中,硝化细菌起到了主要作用。Abbassi和Adams也称这两种细菌为氨氧化细菌和亚硝酸氧化细菌<sup>[6]</sup>。在这两步反应中,只要有一步被抑制,整个硝化过程就能够被抑制。研究结果也不尽相同,Zerull和Irigoyen就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<sup>[7-8]</sup>。

## 2 脲酶抑制剂和硝化抑制剂

基于越来越多的硝酸盐污染问题,以及硝化作用的机理,许多科学工作者都将硝化抑制剂和脲酶抑制剂加入肥料施入土壤,以提高氮肥利用率。

### 2.1 脲酶抑制剂

脲酶是在土壤中水解尿素的一种酶。当尿素施入土壤后,脲酶将其水解为铵态氮,才能被作物吸收利用。脲酶抑制剂可以抑制尿素的水解速度,减少铵态氮的挥发和硝化。

2.1.1 脲酶抑制剂的作用机理及适用条件 能够抑制土壤脲酶活性的有机和无机化合物有许多种,其主要是对脲酶催化过程中起重要作用的巯基发生影响<sup>[9]</sup>。据国内外资料报道,脲酶抑制剂的作用机理有5方面<sup>[10]</sup>。

(1)脲酶抑制剂堵塞了土壤脲酶对尿素水解的活性位置,使脲酶的活性降低。

(2)脲酶抑制剂本身是还原剂,可以改变土壤中微生物的氧化还原条件,降低土壤脲酶的活性。

(3)疏水性物质作为脲酶抑制剂,可以降低尿素的水溶性,减慢尿素水解速率。

(4)抗代谢物质类脲酶抑制剂打乱了能产生脲酶的微生物的代谢途径,使合成脲酶的途径受阻,降低了脲酶在土壤中分布的密度,从而使尿素的分解速度降低。

(5)脲酶抑制剂本身是一些与尿素物理性质相似的化合物,在土壤中与尿素分子一起同步移动,保护尿素分子,使尿素分子免遭脲酶催化分解。在使用尿素的同时施加一定量的脲酶抑制剂,使脲酶的活性受到一定限制,尿素分解的速度变慢,就能减少尿素的无效降解。但是不能将土壤脲酶全部杀灭,应保持其一定的活性,否则,会影响土壤对植物的供氮。

脲酶抑制剂在土壤中存在需要一定的环境条件。影响脲酶抑制剂的因素包括土壤pH、水分状况、通气条件、加入的有机物质以及尿素的浓度等。但是因脲酶抑制剂的种类不同,所适合的环境条件也不尽相同。nBPT受土壤pH的影响最小,表明脲酶抑制剂nBPT不但适用于酸性而且适用于碱性土壤。PPD是一种有潜力的脲酶抑制剂,但易于分解形成酚,而酚是一种较弱的脲酶抑制剂<sup>[11]</sup>。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,效果不如nBPT和PPD;在嫌气条件下施用,效果不及PPD;土壤脲酶活性随着HQ用量的增加而减弱<sup>[12]</sup>。所以,各种脲酶抑制剂所需的条件是不一样的,但是有一点可以肯定的是,在脲酶活性高的土壤上施用脲酶抑制剂,会发挥比较好的抑制作用。因此,在选用合适的脲酶抑制剂时了解土壤特点及环境特点是非常有必要的。

2.1.2 脲酶抑制剂的研究现状 因为尿素是在土壤中广泛施用的氮肥,脲酶将其水解为铵态氮才能被作物吸收利用,为了延缓脲酶的水解作用,人们已经在脲酶抑制剂上做了许多研究。N-丁基硫代磷酰三胺(nBPT)和氢醌(HQ)是研究较多的两种脲酶抑制剂。

早在1992年周礼恺等人就研究了HQ对尿素的水解,氮的释放、硝化、反硝化作用以及生物固持的影响。结果表明,HQ的作用不仅在于延缓尿素的水解和随之而来的铵的挥发,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<sup>[12]</sup>。

王小彬等研究发现当尿素表施时,nBPT用量为0.25%更有利于减少 $\text{NH}_3$ 的挥发损失和提高尿素氮的有效性;当尿素种旁施用,由于 $\text{NH}_3$ 的挥发已受到抑制,因而nBPT用量为0.15%时对促进作物氮吸收效果较好<sup>[13]</sup>。

赵略等研究了脲酶抑制剂nBPT对土壤中脲酶活性和细菌、放线菌生长及发酵产酶的影响。结果表明,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)nBPT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,且随着nBPT浓度增大而增强。nBPT对细菌、放线菌发酵产酶有明显的抑制作用,最大抑制率分别达55.4%和67.1%<sup>[14]</sup>。

当然,除了以上两种脲酶抑制剂外,还有其他品种的研究,比如醌氢醌等。

在目前的这些研究当中,有些侧重于脲酶抑制剂对农作物的效果,有些则侧重于其机制上的作用,但不管哪一种,都表明已经研究了很多关于脲酶抑制剂的东西,当然其最重要的作用还是在抑制脲酶水解方面。

**2.1.3 脲酶抑制剂的局限性** 脲酶抑制剂是化学试剂,所以存在着不可避免的缺点,如价格昂贵、毒性和污染。氢醌不仅价格较贵,而且有毒,人食用5g即可致死<sup>[15]</sup>。另外,因脲酶抑制剂受环境影响比较大,所以在选择合适的脲酶抑制剂时,需要了解土壤的状况和周围环境的情况,有一定的局限性。所以,寻找一种既可以起到抑制脲酶活性,抑制尿素水解,而又适用于任何土壤,对环境友好的物质成为一种需要。

## 2.2 硝化抑制剂

硝化抑制剂可以抑制土壤铵态氮向硝态氮的转化,减少硝态氮在土壤中的累积,从而减少铵态氮硝化所造成的各种污染问题。在硝化作用的两个阶段中,有些硝化抑制剂对铵氧化细菌产生毒性,导致 $\text{NH}_4^+$ 氧化为 $\text{NO}_2^-$ 过程被抑制;有些硝化抑制剂可抑制硝化杆菌属细菌的活动,即抑制硝化反应过程中 $\text{NO}_2^-$ 氧化为 $\text{NO}_3^-$ 这一步;有些还可以抑制反硝化作用<sup>[16]</sup>。

**2.2.1 国内外硝化抑制剂简介** 硝化抑制剂过去也称氮肥增效剂,根据其作用得名。很早以前人们就通过施用硝化抑制剂而对其有了一些初步的了解。中国旅大轻化工所在国内首先进行对硝化抑制剂的研究,取得了良好的效果。在国外,20世纪50年代以来,为了控制硝化作用,国外学者就一直致力于硝化抑制剂的研究。在提高氮肥利用率方面也有一定的效果。美国一家公司研制的2-氯-6-三氯甲基吡啶是第一个硝化抑制剂品种,日本对均三嗪衍生物曾有系统的研究,之后又把硫脲和氨基-4-氯-6-甲基嘧啶加入复合肥中研究,苏联也作过双氰胺、硫脲等方面的试验。

在国内外几十年的研究中,农业上应用氮肥增效剂已经收到了多方面的效果:(1)减少氮肥损失,提高氮肥利用率。据了解,日本在肥料中添加硝化抑制剂,大约占肥料含氮量的0.5%~5%左右,可以提高大概20%的利用率。(2)提高植株的分蘖数,增加株高,提高产量。国外研究显示,加入硝化抑制剂的氮肥在水稻土上施用,水稻产量最高提高86.2%。(3)改造土壤性

能,调节土壤酸碱度,降低变酸速度,有利于农作物生长。(4)化肥加入增效剂,可以减少盐类和毒气的生成,减轻对农作物的要害,因此,可防止烂秧根,促进农作物生长。(5)氮肥增效剂除了能够抑制硝化作用以外,有些品种还有杀菌、杀虫等功效。

前人对于硝化抑制剂的考虑已经比较全面,但他们更重视硝化抑制剂在氮肥利用率上的作用,如何提高氮肥利用率以获得高产成为他们追求的目标。但是就目前而言,提高氮肥利用率是很重要,更重要的是不要对环境造成影响,所以在前面几条的基础上应该再增加一条就是环境友好型。

**2.2.2 硝化抑制剂的研究现状** 自从知道了硝化抑制剂的功效以后,人们在各种硝化抑制剂上做了大量的研究,以阐述它们的作用。赵劲松的研究结果表明<sup>[17]</sup>如果土壤中不加硝化抑制剂, $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 的铵态氮( $\text{NH}_4^+$ )全部硝化。而加了MP或其衍生物的,铵态氮仅硝化了10%,保留了90%。

有人也专门针对某种硝化抑制剂进行研究,比如DMPZP在培养的第7天到第14天抑制效果高过DCD,且可以减缓土壤pH的降低速度<sup>[18]</sup>。3,5-二甲基吡唑磷酸盐的硝化抑制效果在试验后期劣于DMPP。室内培养试验21天后,施加3,5-二甲基吡唑磷酸盐的土壤中硝态氮含量明显高于施加DMPP的土壤,铵态氮含量明显低于施加DMPP的土壤<sup>[19]</sup>。DMPP抑制剂施入土壤具有显著的氨氧化抑制作用,延缓蔬菜地土壤氨氮向硝态氮的转化,减轻氮素向水体迁移的风险<sup>[20]</sup>。Chim Weiske等的研究表明,DCD对 $\text{N}_2\text{O}$ 扩散的抑制率平均为26%,与DCD相比,DMPP对 $\text{N}_2\text{O}$ 扩散的抑制率平均49%<sup>[21]</sup>。但是DCD应用相对比较广泛,这是因为其价格比较低,且毒性较小,在水中相对可溶性强一些<sup>[22]</sup>。

硝化抑制剂能抑制硝化作用,硝化反应过程被硝化抑制剂抑制后,氮肥将长时间以氮的形式保持在土壤中,避免高浓度 $\text{NO}_2^-$ 和 $\text{NO}_3^-$ 的出现。达到减少 $\text{NO}_2^-$ 和 $\text{NO}_3^-$ 的淋溶损失以及减少 $\text{NO}_3^-$ 释放的目的<sup>[16,23]</sup>。

在硝化抑制机理上也有一定的研究。薛知文等在1985年就曾研究到几种硝化抑制剂对亚硝化细菌的抑制作用,结果表明,2-氯-6-三氯甲基吡啶,2,3,5-三氯-三氯甲基吡啶,2-甲基-4,6-双(三氯甲基)均三嗪这3种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<sup>[24]</sup>。Li Hua等研究表明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氨还原酶活性没有影响<sup>[25]</sup>。

DMPP能够延缓硝化,有很好的硝化抑制作用,使土壤中 $\text{NO}_3\text{-N}$ 含量维持在较低水平,目前已经得到了大家的公认,不仅如此,许超等还研究出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的作用<sup>[26-27]</sup>。

有些硝化抑制剂可以抑制反硝化作用,减少硝态氮转化为氮氧化物而污染环境,王改玲等研究表明,低水分时施用N-Serve可抑制硝化反应;高水分时施用砂子或砂子与N-Serve配合,可有效抑制N、O排放<sup>[28]</sup>。

**2.2.3 硝化抑制剂的局限性** 硝化抑制剂在减少氮素损失,提高氮肥利用率,保护环境方面确实起到了很大的作用,但虽然研究了许多的硝化抑制剂,实际应用于农业的还是少数几种,而且应用并不十分广泛。这大概有两方面的原因,其一是作为一种人工合成的化学试剂,硝化抑制剂本身存在着一些问题。硝化抑制剂抑制硝化细菌的活性,它们需要有较强的专一性,而且要对土壤中动物和微生物没有危害,能够随着肥料和水分移动。硝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<sup>[29]</sup>。 $\text{C}_2\text{H}_2$ 虽是一种有效的硝化抑制剂,但 $\text{C}_2\text{H}_2$ 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<sup>[30]</sup>。2-氯-6-(三氯甲基)吡啶易于被土壤胶体吸附、易水解、光解和挥发,导致其硝化抑制效果降低。其二是因为外界环境的影响。

总之,硝化抑制剂这一方法的应用起到了很好的效果,但是,由于大多数硝化抑制剂在工艺、污染、价格等方面的原因而未能广泛应用<sup>[31]</sup>。黄益宗等研究总结出硝化抑制剂未能得到广泛应用的几点原因,包括:(1)许多硝化抑制剂在试验研究阶段效果很好,但是在在大田中应用的效果很低;(2)某些硝化抑制剂自身的特点使其在推广应用时受到限制,比如由于乙炔是一种气体,当其导入土壤后容易从土壤孔隙中逸出,从而影响其硝化抑制作用;(3)有些硝化抑制剂的毒性很大,会对土壤动物和土壤微生物产生毒害作用;(4)有些硝化抑制剂有残留,会污染土壤环境<sup>[18]</sup>。因此,寻找一种在效果上对硝化作用有很好的抑制作用而又不致于对环境造成污染的物质成为提高氮素利用率和保护环境的必要。

### 2.3 脲酶抑制剂和硝化抑制剂配合施用

目前,越来越多的研究侧重于脲酶抑制剂/硝化抑制剂配合使用。许多研究也表明二者配合使用在作物

的整个生长季起到了很大的作用,脲酶抑制剂不仅能延缓尿素的水解,还能在一定程度上抑制尿素水解后的硝化过程。二者配合使用调节了尿素氮的转化过程,效果较单独使用要好<sup>[32-35]</sup>。陈利军等早在1995年就得出配合使用氢醌和双氰胺既能延缓土壤中尿素的水解并使水解后释出的氨在土壤中得以更多和更长时间的保持,还能减少土壤中硝酸盐的累积,氨挥发的损失及 $\text{N}_2\text{O}$ 的生成<sup>[36]</sup>。Xu Xingkai等研究表明HQ和DCD配合施用,与单独施用相比,在植物和土壤中的氨的损失是最小的,而修复的能力是最大的<sup>[37]</sup>。最近几年,也有很多研究报道脲酶抑制剂和硝化抑制剂配合施用在土壤中发挥了更大的作用<sup>[38-39]</sup>。

### 3 展望

到目前为止,人们虽然对土壤脲酶抑制剂和硝化抑制剂进行了比较详细的研究,且在试验中也得到了很好的效果,但是在在大田中却得不到广泛的应用。原因主要是这些抑制剂本身存在着不可避免的局限性,使用这些抑制剂能对土壤的硝化作用有很好的抑制效果,但同时也给环境增加了新的危害。所以,寻找一种既可以抑制硝化作用,又对环境无害甚至是有益的物质成为一种需要,在今后的工作中研究这种环境友好型物质将对改善环境有重大贡献。

### 参考文献

- [1] Xi Z B. Approach to slow release nitrogen fertilizer and its agrochemical evaluation. *Phosphate and Compound Fertilizer*, 2003, 18(5):1-5.
- [2] 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. *生态环境*,2003,12(1):24-28.
- [3] 薛继澄,毕德义,李家金,等.保护地栽培蔬菜生理障碍的土壤因子与对策. *土壤肥料*,1994(1):4-9.
- [4] 陈晓群,姚军.设施蔬菜地土壤硝态氮的变化及其对环境的影响. *宁夏农林科技*,2004(5):4-5.
- [5] 江福英,翁伯琦.农田硝态氮的污染及其防治对策. *福建农业学报*, 2003,18(3):196-200.
- [6] Abbasi M K, Adams W A. Loss of nitrogen in compacted grassland soil by simultaneous nitrification and denitrification. *Plant Soil*, 1998(200):265-277.
- [7] Zerulla W, Barth T, Dressel J, et al. 3, 4-dimethylpyrazole phosphate: a new nitrification inhibitor for agriculture and horticulture. *Biol Fert Soils*, 2001(34):118-125.
- [8] Irigoyen I, Muro J, Azpilikueta M, et al. Ammonium oxidation kinetics in the presence of nitrification inhibitors DCD and DMPP at various temperatures. *Aust J Soil Res*, 2003 (41):1177-1183.
- [9] 王小彬.关于几种土壤脲酶抑制剂的作用条件. *植物营养与肥料学报*,1998,4(3):211-218.
- [10] 王天元,宋雅君,滕鹏起.土壤脲酶及脲酶抑制剂. *化学工程师*,2004

- (8):22-24.
- [11] Brenner JM. Recent research on problems in the use of urea as an nitrogen fertilizer. *Fret. Res.*, 1995 (42):321-329.
- [12] 周礼恺,赵小燕.脲酶抑制剂氢醌对土壤尿素氮转化的影响.应用生态学报,1992,3(1):36-41.
- [13] 王小彬,辛景峰.尿素与脲酶抑制剂联用对春小麦植株氮吸收的影响.干旱地区农业研究,1998,16(3):6-9.
- [14] 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.大连轻工业学院学报,2007,26(1):24-27.
- [15] 陆欣,王申贵.新型脲酶抑制剂的试验研究.土壤学报,1997,34(4):461-466.
- [16] 黄益宗,冯宗炜.硝化抑制剂在农业上的研究进展.土壤通报,2002,33(4):310-315.
- [17] 赵劲松.3(5)-甲基吡唑-一氮肥硝化抑制剂.国内外新技术,1998(3):57-59.
- [18] 史云峰,武志杰.3,5-二甲基吡唑磷酸盐对硝化作用的影响.应用生态学报,2007,18(5):1033-1037.
- [19] 于淑萍,尹小燕,姜婷.硝化抑制剂吡唑磷酸盐硝化抑制作用初探.环境科学与管理,2006,31(7):87-95.
- [20] 俞巧刚,陈英旭.DMPP对菜地土壤氮素淋失的影响研究.水土保持学报,2006,20(4):40-43.
- [21] Achim Weiske, Gero Benckiser, Johannes C.G. Ottow. 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. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*,2001(60):57-64.
- [22] M Zaman , M L Nguyen , J D Blennerhassett, et al. Reducing NH<sub>3</sub>, N<sub>2</sub>O and NO<sub>3</sub>-N losses from a pasture soil with urease or nitrification inhibitors and elemental S-amended nitrogenous fertilizers. *Biol Fertil Soils*, 2008(44):693-705.
- [23] 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.应用生态学报,2006,17(2):248-231.
- [24] 薛知文,陶树兴.几种硝化抑制剂对亚硝酸细菌的抑制作用.陕西师大学报,1985(3):70-74.
- [25] Li Hua, Lisng Xinqiang, Chen Yingxu, et al. Effect of nitrification inhibitor DMPP on nitrogen leaching, nitrifying organisms, and enzyme activities in a rice-oilseed rape cropping system. *Journal of Environmental Sciences*, 2008(20):149-155.
- [26] 许超,吴良欢.硝化抑制剂DMPP对菜园土供肥特性的影响.农业环境科学学报,2007,26(1):269-272.
- [27] 许超,吴良欢.硝化抑制剂DMPP对菜园土壤铵态氮与硝态氮含量的影响.湖南农业大学学报,2003,29(5):388-390.
- [28] 王改玲,郝明德,陈德立.硝化抑制剂和通气调节对土壤N<sub>2</sub>O排放的影响.植物营养与肥料学报,2006,12(1):32-36.
- [29] 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.土壤与环境,2001,10(4):323-326.
- [30] 左秀锦,曹建明.乙炔抑制型基质氮肥养分释放模式初探.农业环境科学学报,2008,27(2):648-65.
- [31] 闫双堆,刘利军.腐植酸-尿素络合物对尿素转化及氮素释放的影响.中国农业生态学报,2008,16(1):109-112.
- [32] 隽英华,陈利军.脲酶/硝化抑制剂在土壤N转化过程中的作用.土壤通报,2007,38(4):773-780.
- [33] 华建峰,蒋倩.脲酶/硝化抑制剂对土壤脲酶活性、有效态氮及春小麦产量的影响.土壤通报,2008,39(1):94-99.
- [34] GIOACCHINI P, NASTRI A, MARZADORI C, et al. Influence of urease and nitrification inhibitors on N losses from soils fertilized with urea. *Biology and Fertility of Soils*, 2002(36):129-135.
- [35] 徐星凯,周礼恺,Oswald Van Cleemput.脲酶抑制剂/硝化抑制剂对植稻土壤中尿素N行为的影响.生态学报,2001,21(10):1682-1686.
- [36] 陈利军,史奕.脲酶抑制剂和硝化抑制剂的协同作用对尿素氮转化和N<sub>2</sub>O排放的影响.应用生态学报,1995,6(4):368-372.
- [37] Xingkai Xu, Likai Zhou, Oswald Van Cleemput, Zijian Wang. Fate of urea-15N in a soil-wheat system as influenced by urease inhibitor hydroquinone and nitrification inhibitor dicyandiamide. *Plant and Soil*, 2000,(220):261-270.
- [38] 焦晓光,梁文举.脲酶/硝化抑制剂对土壤有效态氮、微生物量氮和小麦氮吸收的影响.应用生态学报,2004,15(10):1903-1906.
- [39] 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.应用生态学报,2005,16(2):238-240.