



## 硝化/脲酶抑制剂对土壤氮素淋溶影响

串丽敏<sup>1</sup>, 赵同科<sup>2</sup>, 安志装<sup>2</sup>, 何萍<sup>1</sup>

(1 中国农业科学院农业资源与农业区划研究所, 北京 100081;

2 北京市农林科学院植物营养与资源研究所, 北京 100097)

**摘要:** 为揭示尿素中添加脲酶/硝化抑制剂后, 土壤中硝态氮、铵态氮的迁移转化以及淋溶损失规律, 设置温室土柱淋溶培养试验, 研究尿素中单独添加脲酶抑制剂N-丁基硫代磷酸三胺(NBPT)和硝化抑制剂双氰胺(DCD), 以及两者配合施用对氮素在土体中淋溶损失规律的影响。结果表明, 40公斤/亩施肥量条件下, 尿素中添加NBPT、DCD以及DCD与NBPT配合施用, 均可在24天之前显著降低淋溶液硝态氮浓度, 并在30天后达到峰值, DCD、DCD与NBPT配合施用的峰值延缓了7天。整个试验周期中, DCD处理对氮素淋溶表现为较好的抑制效果, NBPT以及DCD与NBPT配合施用, 在培养试验后期抑制效果较好。最终NBPT、DCD、DCD与NBPT配施三种处理可显著降低硝态氮累积淋失量分别达11.6%、13.7%和17.2%。在一定施肥量条件下, 脲酶抑制剂和硝化抑制剂两者单施或配施均可降低硝态氮累积淋失量。

**关键词:** 土壤; 氮素; 脲酶抑制剂; 硝化抑制剂; 淋溶损失

氮是植物生长所必需的大量营养元素之一。农业生产中过量的氮肥施用及不合理的管理措施, 导致氮素以氨挥发、硝酸盐淋溶及反硝化等途径损失, 氮肥利用率下降。其中土壤 $\text{NO}_3^-$ -N淋溶是氮素损失的重要途径之一, 也是导致地下水硝酸盐污染的重要原因。通过尿素中添加脲酶抑制剂或硝化抑制剂, 来控制土壤氮素生物化学转化过程, 为减少氮素环境损失, 减轻环境污染风险提供理论依据和技术支撑。前人已经对其效果有一定的研究, 但是在不同土壤类型、不同质地、不同肥力、不同作物类型和温度等条件下, 尿素中添加脲酶抑制剂或硝化抑制剂对氮素迁移转化、氮素淋失方面, 研究结果不尽相同。DCD的添加对于土壤本身的氮素转化研究较多, 但是对于氮素的迁移淋失还不多见, 脲酶抑制剂NBPT以及DCD与NBPT两者配施对氮素迁移方面的研究也较为鲜见。就目前的研究和应用看, 其研究深度和广度有待进一步加强。针对施肥所造成的地下水体环境污染, 在北方地区特定土壤条件下设计土柱淋溶培养试验, 探讨尿素中添加脲酶抑制剂NBPT和硝化抑制剂DCD, 以及两者配施时的氮素淋溶损失规律。

## 1 材料与方 法

### 1.1 试验时间、地点

试验于2009年3月-8月在北京市农林科学院温室进行, 温室内的最低温和最高温基本保持在 $25^{\circ}\text{C}$ ~ $35^{\circ}\text{C}$ , 其中在90天~95天期间高达 $40^{\circ}\text{C}$ ~ $45^{\circ}\text{C}$ 。

### 1.2 试验材料

供试土壤取自北京市农林科学院内的中壤质潮土, 过2 mm筛, 其理化性状见表1。土柱材料为PVC管, 长110厘米, 内径为10厘米, 共装土90厘米, 下端接底盖漏斗, 外接橡胶管至接收瓶中

以盛接渗滤液。管柱内壁用环己酮粘结土粒，以减少管壁效应。PVC管内底部采用2层200目的尼龙滤布，并用密封胶带封住，上铺5厘米厚的石英砂。石英砂上按容重1.35克/立方厘米，先均匀装土70厘米，然后将表层20厘米土（按容重1.25克/立方厘米）与肥料和抑制剂充分混匀，加入土柱，注意每层压实土壤。

表1 供试土壤基本理化性状

pH (水土比=2.5:1)	有机质 (克/公斤)	全氮	硝态氮	铵态氮	速效磷	速效钾
7.5	35.5	0.9	39.0	3.6	15.4	61.8

### 1.3 试验方法

#### 1.3.1 试验设计

试验采取土柱淋溶培养模拟方法，不种任何作物。设置5个处理，4次重复。各处理分别为：1) CK (只施磷钾肥，不施氮肥)；2) N (施氮肥和磷钾肥)；3) ND (在处理2基础上加入氮素量1%的DCD)；4) NN (在处理2基础上加入氮素量1%的NBPT)；5) NDN (在处理2基础上加入氮素量0.5%的DCD、NBPT)。试验中施N量按40公斤/亩，P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>和K<sub>2</sub>O均按30公斤/亩。

脲酶抑制剂NBPT由百灵威化学技术有限公司提供，硝化抑制剂DCD由北京化学试剂公司提供。每隔3d浇一次水，每次浇水400毫升，保持田间最大持水量的60%。为防止浇水过猛冲击土壤表面，浇水时先用量筒量好，倒入喷壶中慢慢洒在土壤表层。淋溶出的水也被及时低温保存，每3d内淋溶出的水样作为一次完整水样进行硝态氮和铵态氮的测定。

#### 1.3.2 样品的采集

培养150天，每隔3天，取一次淋溶水样，测水样体积以及水样中铵态氮和硝态氮的含量。

#### 1.3.3 监测指标及方法

水样中铵态氮浓度测定采用靛酚蓝比色法，硝态氮测定采用紫外分光光度法<sup>[1]</sup>。

#### 1.3.4 数据处理

试验数据采用基于Windows的Excel和SPSS10统计分析软件处理分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 添加抑制剂对土柱淋溶液硝态氮的影响

#### 2.1.1 硝态氮浓度的变化

不同处理土壤淋溶液中硝态氮浓度在不同培养期变化显著(图1)。不施氮肥(CK)处理淋溶液硝态氮浓度在整个培养期内呈较低水平，没有显著变化，这与供试土壤氮素含量较低有关(表1)；不同生化抑制剂处理淋溶液硝态氮浓度表现出相似规律，呈单峰曲线变化，表现为培养前期逐渐升高，在30天后达到峰值，之后逐渐降低。

氮素施入后第3天时，N处理淋溶液硝态氮浓度开始显著增加，而其它添加抑制剂的处理没有发生显著变化。17天时，N处理硝态氮浓度(25.5毫克/升)超过中国国家地下水饮用标准(20毫克/

升), 且显著高于其它处理。之后, 所有处理淋溶液中硝态氮浓度开始急剧增加, 至24天时, 施用抑制剂的处理硝态氮浓度均低于不施抑制剂的N处理。接着NN处理硝态氮浓度迅速激增, 31天时, 浓度达到峰值(305毫克/升), 显著高于N和ND处理, 而其余处理延缓了峰值的到来时间, 均在第38天时达到峰值。ND处理比N处理峰值显著降低5.1%。38天以后, 所有处理硝态氮浓度开始下降, 施用抑制剂的NN、NDN处理均显著低于N处理。52天时, ND处理硝态氮浓度又高于N处理, 66天以后, 转为低于N处理, 之后一直处于较低浓度, 且普遍低于NN和NDN处理。整体来看, NN处理和NDN处理在59天时已经降到20毫克/升以下, ND处理在66天以后降到20毫克/升以下, 添加抑制剂的所有处理在80天时可降到10毫克/升以下, 而不施抑制剂的N处理在第80天时才降到20毫克/升以下, 到108天时降到10毫克/升以下。这可能是由于DCD在前期和中期抑制剂作用较强, 土壤中铵态氮浓度较高, 淋溶的硝态氮浓度相对较低, 在后期DCD抑制作用减弱, 土壤中铵态氮又转化为硝态氮向下淋失作用所致。

### 2.1.2 硝态氮累积淋失量的变化

试验结果显示(图2), 不施氮肥的CK处理硝态氮淋失累积量一直处于较低水平, 说明氮肥施用是导致硝态氮淋失和地下水污染的重要因素之一。试验中所有处理硝态氮淋失累积量均在前期(17天以前)变幅较小, 中期显著增加, 约在45天左右增加幅度逐渐变小, 之后呈现缓慢增加趋势。

在施肥第17天后, N、NN、NDN处理硝态氮累积量快速增加, 但是ND处理增加相对比较平缓, 能显著降低淋溶液中硝态氮累积。45天以后, 不加抑制剂的N处理硝态氮累积量继续增加, 且增长幅度较大, 而NN、NDN处理增加缓慢, 两者变化趋势极为相近, 并能显著降低硝态氮累积量。ND处理在52天以后, 与NN、NDN处理之间没有显著区别, 但是三者仍能显著降低硝态氮淋失累积量。经过长达150天的淋洗, 不加抑制剂的N处理施入的肥料氮几乎全部淋溶出土体, 甚至还增加了原有土壤氮素的损失。整体看, 在较高量施肥条件下, 硝化抑制剂DCD在整个研究周期都有抑制氮素淋失的效果, 而脲酶抑制剂NBPT以及DCD与NBPT配合施用, 在后期抑制效果较好。至试验结束, 与N处理相比, NBPT、DCD、DCD与NBPT配合施用分别可以减少硝态氮淋失11.6%、13.7%和17.2%。单独施用脲酶抑制剂或硝化抑制剂处理, 以及两种抑制剂配合施用, 均可显著降低硝态氮淋失累积量, 减少氮素淋失风险, 可能会使更多的氮保持在根层有效范围内<sup>[2,3]</sup>。

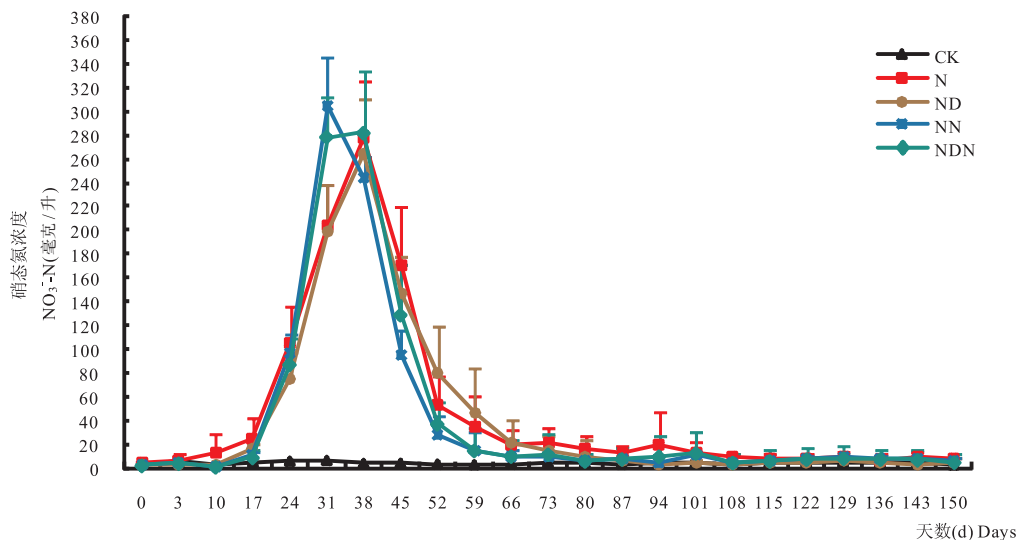


图1 硝态氮浓度随时间的变化

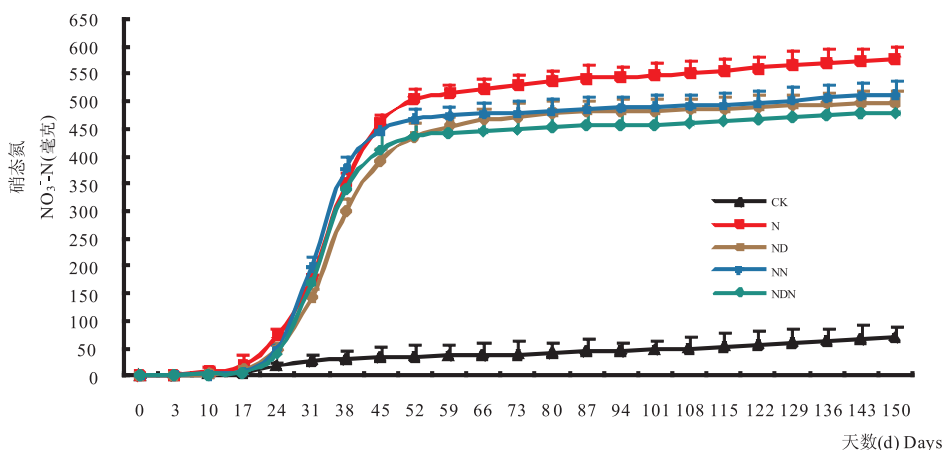


图2 硝态氮淋失累积量

## 2.2 添加抑制剂对土柱淋溶液铵态氮的影响

### 2.2.1 铵态氮浓度的变化

土壤淋溶液铵态氮浓度整体呈波浪式变化。这可能是因为土壤胶体对铵态氮吸附能力较强，当其吸附一定量铵态氮以后，随着土壤铵态氮浓度持续增加，胶体已经达到近似饱和状态，多余的铵态氮随水向下淋失，使得淋溶液中铵态氮浓度呈现出先升高后降低，降低后再次升高的现象。但整体上土壤中铵态氮浓度不高，淋溶液中铵态氮浓度保持较低水平。

结果显示（图3），施肥后3天，不施抑制剂的N处理淋溶液中铵态氮浓度第一次达到峰值，且显著高于施用抑制剂的其它处理，说明尿素在土壤的水解速率很快，DCD可以抑制亚硝化细菌活性，其可能又有避免铵态氮浓度过高的作用，NBPT能够延缓尿素水解，因此，ND、NN、NDN处理在

前期延缓了铵态氮峰值到来的时间,能显著降低铵态氮淋失。10天之后,由于抑制剂的作用,使铵态氮逐渐累积,增加了淋溶液中铵态氮浓度。ND、NN、NDN处理铵态氮浓度在17天时才出现第一个相对较高峰值,且显著高于N处理。之后,ND、NN处理开始下降,而NDN处理仍有小幅度上升,在24天时达到峰值,此时铵态氮浓度又显著高于其他处理。38天以后,添加抑制剂的处理铵态氮浓度仍然显著低于N处理,说明抑制剂并不会过多增加土壤中铵态氮浓度。87天之后,由于温度较高,抑制剂的作用可能受到增强,土壤中硝化细菌等微生物活性可能降低的原因,铵态氮浓度又出现一次峰值。但是ND、NN、NDN处理仍然显著低于N处理。随后,所有处理铵态氮浓度开始下降,处理之间没有显著性差异。

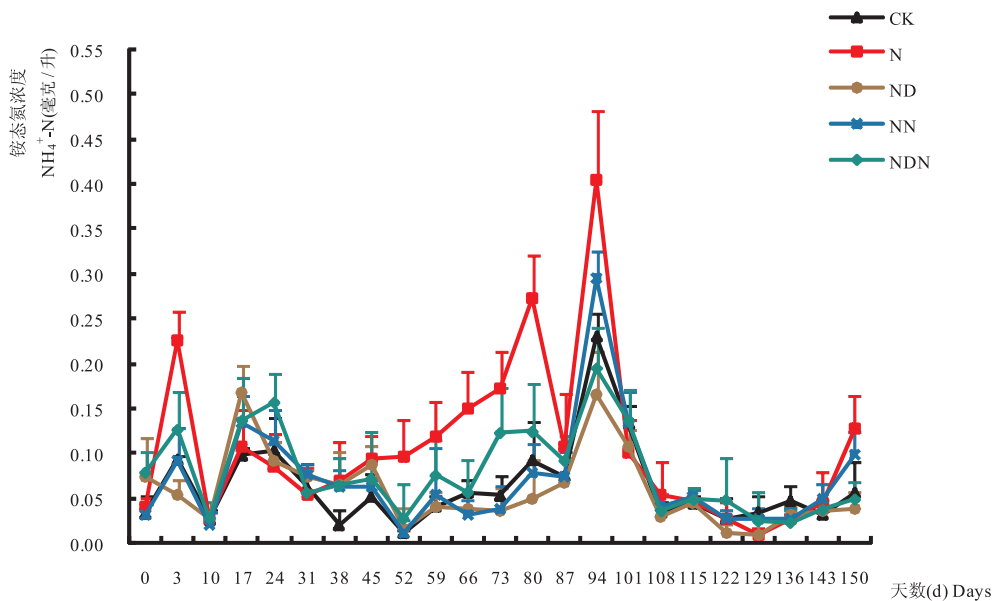


图3 铵态氮浓度随时间变化

### 2.2.2 铵态氮淋失量的变化

研究显示(图4),ND和NN处理可以显著降低土壤铵态氮的淋失,NDN处理对降低土壤铵态氮的淋失效果不显著。在17天以前,ND、NN处理铵态氮淋失累积量小于不施抑制剂的N处理,NDN处理和N处理在该期间无明显区别。17天以后,NDN处理铵态氮淋失累积量增加较快,说明此时土壤中铵态氮浓度较高,过多的铵态氮随水淋失出来。随着N处理铵态氮累积量的增加,NDN处理在59天时,与N处理持平,两者之后变化趋势相近。在45天之后,ND、NN处理增加幅度逐渐减小,开始显著低于N、NDN处理,最终分别减少铵态氮淋失14.9%、18.1%。



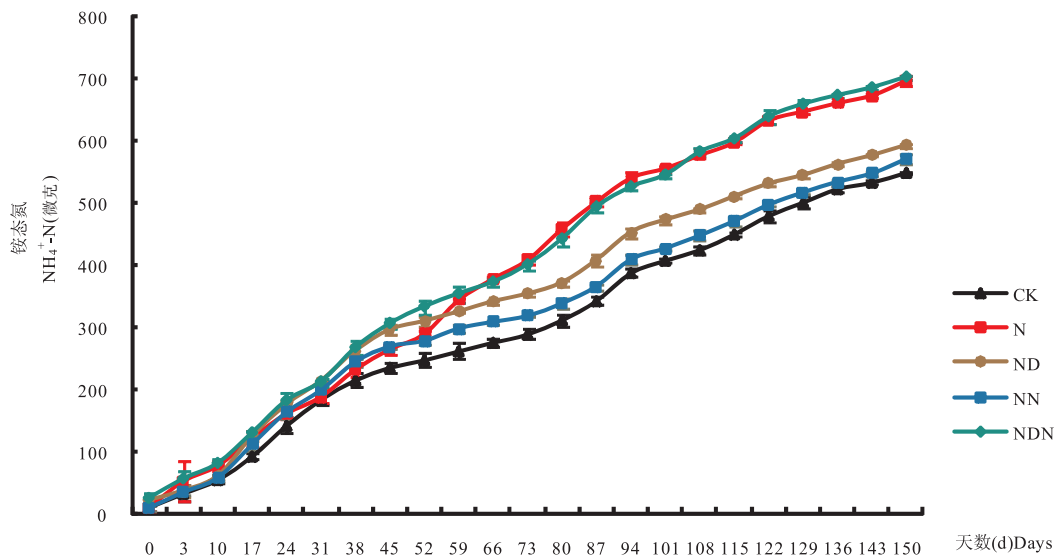


图4 铵态氮淋失累积量

### 3 讨论

本试验在40公斤/亩施肥量条件下,单施脲酶抑制剂NBPT,淋溶液中硝态氮浓度能够在施用后一个月时达到峰值,且峰值较高,单从峰值上来说,并不能降低淋溶液中硝态氮浓度,但后期作用显著。施用硝化抑制剂DCD的处理以及DCD与NBPT混合配施的处理在第38天时浓度才达到峰值,延迟了达到峰值的时间,且DCD的峰值显著降低,同时峰值过后,施用抑制剂的处理能够一定程度上减少淋溶液中硝态氮浓度,减少氮素对环境的威胁,这与Malzer<sup>[4]</sup>, Di<sup>[5]</sup>, 赵言文<sup>[6]</sup>等研究结果相同,主要原因是由于脲酶抑制剂的存在,使尿素水解速率减缓,同时硝化抑制剂能够避免使铵态氮迅速转化为硝态氮所致。另外,Barbara<sup>[7]</sup>研究DCD在花椰菜上的施用效果显示,添加DCD的土壤硝态氮含量在整个试验期间呈现“S”型曲线。土壤中的硝态氮含量变化一定程度上预示着淋溶液中硝态氮的含量变化。本次试验中淋溶液硝态氮浓度呈现出“倒V”型变化趋势,但是随着淋洗时间的延长,土壤中大部分的氮素向下淋失,最终淋溶液中硝态氮的淋溶累积量变化趋势也呈现出“S”型,即先是平缓变化,然后急速上升,最后又变平缓。

在本试验条件下,培养前期,添加抑制剂显著降低了尿素水解产生的铵态氮,之后由于抑制剂的作用,使铵态氮逐渐累积,增加了淋溶液中铵态氮的浓度。在中后期,添加抑制剂的处理铵态氮浓度仍然显著低于N处理,说明脲酶抑制剂和硝化抑制剂并不会过多增加土壤中铵态氮浓度。这可能是由于硝化抑制剂只是抑制铵态氮向亚硝态氮的转化过程,对尿素水解没有抑制作用,尿素水解产生铵态氮后,引起土壤pH值增加,可能加剧了氨的挥发潜势,使土壤溶液中铵态氮浓度较低。另外,脲酶抑制剂具有抑制土壤脲酶活性,延缓尿素水解成氨的作用,致使土壤中的铵态氮浓度不会太高,淋溶水的铵态氮也会保持较低水平有关<sup>[8]</sup>。

农田中的氮素去向一直是科研人员关注的热点问题。有研究表明<sup>[9]</sup>,添加硝化抑制剂DCD能增加土壤氮素的固持,使土壤中的一部分有效态氮转化为固定态氮。但是也有研究指出,DCD会增加土壤氮素矿化<sup>[10-12]</sup>,可能增加淋溶风险。NBPT脲酶抑制剂主要是抑制尿素水解,其效果应是使尿素水解时间延长,但尿素一旦水解,硝化过程仍然发生,并且因可能抑制氨挥发而增加参与硝化的氮

量,导致氮素淋溶损失增加。但本试验条件下,DCD、NBPT以及两者的配合施用都一定程度降低了氮素的淋溶损失。硝化抑制剂的添加,可能由于土壤对有效态氮素的固持以及可能会增加的氨挥发潜势占相对优势,最终使淋溶液的无机氮淋失量降低;脲酶抑制剂能够降低无机氮淋失量,其原因可能一方面是氮素以氮氧化物等气态形式损失,另一方面可能是增加了氮素在土壤中的残留量,或者被土壤固持吸附,或者被土壤中的微生物利用。本试验中,土壤水分充足,推测可能发生了反硝化作用,造成了氮氧化物损失。也有研究指出<sup>[13,14,15]</sup>,不加有机物条件下,脲酶抑制剂NBPT能够一定程度增加氮素的土壤残留率,使施入尿素N的固定增加,这也为土壤中微生物活动提供有效氮源,进而可能被微生物吸收或转化为有机态氮。但抑制剂对氮素的作用受不同具体试验条件如温度、降雨量、土壤质地等诸多环境和土壤因子的影响<sup>[16]</sup>,具体机理还有待于进一步研究。

## 4 结论

4.1 尿素中添加NBPT、DCD以及DCD与NBPT配合施用,均可在24天之前显著降低淋溶液硝态氮浓度,各处理硝态氮浓度均在30天后达到峰值,DCD、DCD与NBPT配合处理的峰值延缓了7天。

4.2 在40公斤/亩施肥量条件下,整个试验周期中,DCD处理对氮素淋溶都表现出较好的抑制效果,NBPT以及DCD与NBPT配合施用,在培养试验后期抑制效果较好。与N处理相比,NBPT、DCD以及DCD与NBPT配合施用均可显著降低硝态氮累积淋失量,降低幅度平均可达13%以上。

### 参考文献:

- [1] 中国土壤学会. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京:中国农业科技出版社,2000:129-130.
- [2] 卢婉芳,陈苇,王德仁.脲酶抑制剂(NBPT)对提高尿素氮利用率的研究[J].中国农学通报,1990,6(2):23-25.
- [3] 薛由保,李双霖,李清禄.脲酶抑制剂对提高尿素利用率的效果[J].福建农学院学报,1991,20(3):333-339.
- [4] Malzer G L, Kelling K A, Schmitt M A, Hoefl R G, Randall G W. Performance of dicyandiamide in the north central states [J]. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 1989, 20 (19&20):2001-2122.
- [5] Di H J, Cameron K C. Reducing environmental impacts of agriculture by using a fine particle suspension nitrification inhibitor to decrease nitrate leaching from grazed pastures[J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2005, 109: 202-212.
- [6] 赵言文,刘常珍,胡正义,高义民,王彩绒,毕冬梅.元素硫和双氰胺对蔬菜地土壤硝态氮淋失的影响[J].应用生态学报,2005,16(3): 496-500.
- [7] Barbara C, Andrews O, Stefaan D N, Pascal B, Cleemput O V, Georges H. Influence of DCD and DMPP on soil N dynamics after incorporation of vegetable crop residues[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2006, 43 (1): 62-68.
- [8] 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.

下接2页