

脲酶抑制剂对石灰性土壤尿素转化及 N_2O 排放的影响

李 君, 刘 涛, 褚贵新*

(新疆生产建设兵团绿洲生态农业重点实验室, 石河子大学农学院资源环境科学系, 新疆 石河子 832000)

摘 要:通过研究脲酶抑制剂对土壤中尿素转化的影响,揭示土壤各形态氮对 N_2O 的贡献,为控制石灰性土壤氮素损失及提高氮肥利用率提供理论依据。在室内恒温培养条件下(25 °C),研究了正丁基硫代磷酸三胺(NBPT)、醋酸棉酚、硫代硫酸铵 3 种脲酶抑制剂对石灰性土壤各形态氮素转化与脲酶抑制率的影响,同时在人工气候室(昼夜)通过 Unisense N_2O 微电极法对各处理土壤 N_2O 浓度进行了原位实时监测。结果表明:尿素施入土壤 1 d 后 50%已迅速水解,3 d 后完全水解。1~14 d 各脲酶抑制剂均可显著抑制尿素水解,尿素+NBPT 处理的土壤尿素残留量显著高于其他处理,其脲酶抑制率为 33.6%;NBPT 处理的土壤 NH_4^+-N 含量低于其他各处理($P<0.05$),在第 7 d 分别比尿素、尿素+硫代硫酸铵、尿素+醋酸棉酚处理的降低了 64.8%、63.5%、70.9%。土壤 N_2O 浓度在第 1~4 d 较低,第 4 d 后迅速上升,第 6 d 升至峰值,随后呈明显下降趋势(第 6~9 d)。第 9~14 d 各处理 N_2O 的排放表现为尿素>尿素+醋酸棉酚>尿素+硫代硫酸铵≥尿素+NBPT。各形态氮与 N_2O 浓度的通径系数分别为 $NO_3^--N(0.641)>NH_4^+-N(0.356)>Urea-N(0.255)$,通径相关和线性相关均表明 NO_3^--N 含量与 N_2O 浓度呈显著正相关,是制约 N_2O 排放的主导因素。石灰性土壤施用脲酶抑制剂可抑制土壤尿素水解转化,有效降低土壤 N_2O 浓度,3 种脲酶抑制剂中 NBPT 效果最佳。

关键词:石灰性土壤; N_2O 浓度; Unisense N_2O 微电极; 脲酶抑制剂; 尿素

中图分类号: X511 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-2043(2014)09-1866-07 doi:10.11654/jaes.2014.09.027

Responses of Urea Transformation Dynamics and Nitrous Oxide to Three Urease Inhibitors in Calcareous Soil

LI Jun, LIU Tao, CHU Gui-xin*

(Xinjiang Production and Construction Group Oasis Eco-agriculture Key Laboratory, Department of Resources and Environmental Science, Agronomy College, Shihezi University, Shihezi 832000, China)

Abstract: Understanding the effects of urease inhibitors on urea hydrolysis and soil nitrous oxide (N_2O) emissions may help improve fertilizer N utilization efficiency and mitigate soil N_2O production in calcareous soil. In the present research, the effects of three different urease inhibitors, N-(N-butyl)thiophosphoric triamide (NBPT), ammonium thioisulfate (ATS) and gossypol acetate (GA), on urea hydrolysis dynamics and soil ammonium and nitrate transformations were examined in a soil culture experiment under greenhouse conditions. Soil N_2O concentrations were also determined in situ using Unisense N_2O micro-sensor. Fifty percent of applied urea was hydrolyzed within one day, and almost all applied urea hydrolyzed within three days after amendment. During 14 day period, urea hydrolysis was obviously inhibited by NBPT, ATS and GA. In the NBPT amendment, the inhibition rate was greatest, with 33.6%, and urea residue in soil was the highest. Soil NH_4^+-N content was statistically lower in NBPT supply than in other treatments ($P<0.05$). Soil N_2O concentrations maintained very low during of the first 4 day, then increased sharply, until the peak occurring on the 6th day, and then decreased obviously during 6th~9th day. Soil N_2O concentrations were in order: urea>urea+GA>urea+ATS≥urea+NBPT. Furthermore, N_2O concentrations were higher during the day than at night, with diurnal variation ranging from 0.25~3.15 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$. The path coefficients between N_2O concentration and different forms of soil mineral N were: $NO_3^--N(0.641)>NH_4^+-N(0.356)>Urea-N(0.255)$. There was a significant positive relationship between soil NO_3^--N and N_2O contents, indicating that soil nitrate would be one of key factors influencing soil N_2O emission. In conclusion, applying NBPT, ATS and GA inhibits urea hydrolysis and decreases soil N_2O generation in calcareous soil, with NBPT as a promising urease inhibitor.

Keywords: calcareous soil; N_2O concentration; Unisense N_2O microsensor; urease inhibitor; urea nitrogen

收稿日期: 2014-02-25

基金项目: 国家十二五科技支撑计划(2012BAD42B02)

作者简介: 李 君(1988—),女,新疆且末人,硕士研究生,主要从事新型肥料与技术研究。E-mail: lijun11042@126.com

* 通信作者: 褚贵新 E-mail: chuguixinshu@163.com

尿素作为农业生产中最大宗施用的氮肥品种,在脲酶催化作用下可迅速转化为 NH₄⁺,石灰性土壤下4 d 内完全水解^[1-2]。据鲍俊丹等^[3]研究报道,一般农田土壤具有较强的硝化势,尿素水解为 NH₄⁺后易发生强硝化反应,使土壤中氮以硝态氮为主,增加了 N₂O 通过反硝化途径损失的几率^[4]。近年来研究表明,脲酶抑制剂与硝化抑制剂同时施用可减缓尿素水解和硝化作用^[5-6],实现提高氮肥利用率并达到减少 N₂O 损失的目的^[7-8]。脲酶抑制剂(Urease inhibitor, UI)是抑制脲酶活性并延缓尿素水解的一类有机或无机化合物^[9-10],自 20 世纪 30 年代被认识,迄今已发现的天然和人工合成的 UI 有近百种,但仅 70 多种具有实用意义^[11]。正丁基硫代磷酰三胺(NBPT)作为有效的土壤脲酶抑制剂,施用 1% 可显著减缓尿素水解速率^[12],降低氨挥发 8%~15%^[13-14],使玉米穗粒数增加 29%^[15]。研究证明 1% 醋酸棉酚(GA)可明显抑制尿素的水解,是一种天然的脲酶抑制剂^[16];雋英华等^[17]研究表明作为石化工业副产品的硫代硫酸铵(ATS)也具有明显的脲酶抑制效果。

在新疆膜下滴灌农业生产中,水氮一体化施肥可使氮肥利用效率提高到 40% 以上^[18],但与发达国家的 51%~60% 相比^[19-20]仍有很大提升空间。研究表明新疆滴灌农田通过氨挥发、淋溶、硝化-反硝化的损失量分别占氮肥的 0.39%~1.23%、4.4%、17.9%^[21-22],可见硝化与反硝化脱氮损失仍可能是滴灌下氮素损失的主要途径。新疆 GA 和 ATS 两种原材料资源尤其丰富,本试验对 GA、ATS 和 NBPT 3 种脲酶抑制剂对尿素水解的抑制效果进行了对比研究,同时采用 Unisense N₂O 微电极原位实时监测土壤 N₂O 浓度,以此遴选最佳剂型,旨在为滴灌农田氮素养分资源高效利用,降低农田 N₂O 排放提供技术途径。

1 材料与方法

1.1 供试材料

供试土壤为灌耕灰漠土(灌淤旱耕人为土,Calcaric fluvisols),土样采自石河子大学农学院试验站,过 2 mm 筛备用。土壤基本理化性质:有机质 14.93 g·kg⁻¹,全氮 0.92 mg·kg⁻¹,有效氮 64.3 mg·kg⁻¹,速效磷 15.9 mg·kg⁻¹,速效钾 138.2 mg·kg⁻¹,pH 7.76。脲酶抑制剂分别为:正丁基硫代磷酰三胺(NBPT,湖北恒硕化工有限公司,97%),醋酸棉酚(GA,陕西慈缘生物技术有限公司,98%),硫代硫酸铵(ATS,天津市福晨化学试剂厂,分析纯)。供试肥料为尿素(Urea, N≥46%)。

1.2 试验设计与方法

本试验为室内培养试验,将 0.6 kg 风干土(过 2 mm 筛)与所需尿素及脲酶抑制剂充分混匀后放入大号营养钵中(高度×底径×口径:15 cm×10 cm×14 cm),加水至土壤田间持水量的 60%,置于 25 ℃ 培养箱中,黑暗条件下恒温恒湿培养 70 d。试验共设置 5 个处理:①CK;②单施尿素;③尿素+硫代硫酸铵,硫代硫酸铵用量为尿素的 1%,同时单施硫代硫酸铵,消除试剂中铵的干扰(作为同一个处理);④尿素+醋酸棉酚,醋酸棉酚用量为尿素的 1%;⑤尿素+NBPT, NBPT 用量为尿素的 0.5%。除 CK 外,各处理尿素(纯氮)施用量均为 0.35 g·kg⁻¹,每个处理重复 4 次。在人工气候室使用 Unisense N₂O 微电极(Unisense A/S. Aarhus, Denmark)原位实时测定土壤中 N₂O 浓度。人工气候室白昼(8:00—23:00)恒温 25 ℃,夜间(23:00—8:00)恒温 20 ℃,培养期间每天采用称重法定时补水 1 次,使土壤含水量保持在田间持水量的 60%。N₂O 浓度为该天昼夜 24 h 每小时 N₂O 浓度平均值(每 20 min 测定 1 次)。

1.3 样品采集及测定

培养期间分别在第 1、2、3、5、7、14、21、28、35、42、49、56、63、70 d 取样,取样量(20.0±0.5)g。每次取样后立即用 2.0 mol·L⁻¹ KCl 溶液浸提土样。铵态氮与硝态氮用 AA3-HR 连续流动分析仪(Bran-Luebbe Inc., Germany)测定,同时用烘干重量法测定土壤含水量。尿素态氮采用 KCl-乙酸苯汞浸提,二乙酰一肟比色法测定^[23]。Unisense N₂O 微电极(Unisense A/S. Aarhus, Denmark)原位实时测定 N₂O 浓度。土壤 pH 采用电位法,水土比 2.5:1 测定。其他理化性质参照常规分析方法^[24]。

1.4 数据处理

数据处理采用 Excel 和 SPSS 19.0 统计分析软件,绘图由 GraphPad Prim5(Inc., USA)软件完成。

脲酶活性抑制率=(M_0-M_1)/ M_0 ×100%^[16]

式中: M_0 为不加脲酶抑制剂处理的尿素水解量; M_1 为添加脲酶抑制剂处理的尿素水解量。

尿素水解量由尿素加入量减去测定的尿素剩余量求得。

2 结果与分析

2.1 土壤尿素残留量的动态变化

单位时间内土壤中尿素残留量是衡量脲酶抑制剂的重要指标。由图 1(A)可知,各处理土壤尿素残留

量均随培养时间而明显降低。尿素施入土壤 1 d 即有 50% 被水解, 施肥 3 d 后单施尿素处理的残留量降低至与 CK 相同水平 ($10.7 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$), 表明尿素已完全水解。培养 28 d 内, 尿素配施 NBPT 处理的尿素残留量显著高于其他各处理 ($P < 0.05$), 且其随培养时间延长下降最缓慢。而尿素配施硫代硫酸铵和醋酸棉酚处理均在 7 d 内降低至较低水平, 与尿素配施 NBPT 处理的尿素残留量相比分别低 74.7%、80.9%。尿素配施硫代硫酸铵处理的尿素残留量在第 1~5 d 显著低于尿素配施醋酸棉酚处理, 随后均显著高于尿素配施醋酸棉酚处理, 直至培养 28 d 后与 CK、尿素处理无差异。各处理脲酶抑制率均随培养时间延长而降低 (图 1B)。如在培养第 1 d, NBPT、醋酸棉酚和硫代硫酸铵处理的脲酶抑制率表现为 NBPT (33.6%) > 醋酸棉酚 (30.6%) > 硫代硫酸铵 (11.8%), 第 5 d 后醋酸棉酚和硫代硫酸铵处理的脲酶抑制率已下降至 10% 以下, NBPT 在前 14 d 脲酶抑制率保持在 30% 左右, 在第 21 d 脲酶抑制率大幅度降低。由此说明各脲酶抑制剂

在一定时间内均可抑制尿素水解, 而 NBPT 效果显著优于其他处理, 其高效抑制期可持续作用 14 d。

2.2 土壤铵态氮、硝态氮含量的变化

图 2 反映了土壤中 NH_4^+-N 、 NO_3^--N 含量消长动态变化过程 (70 d), 在培养的第 1~7 d, 各施肥处理 NH_4^+-N 含量明显升高并达到峰值, 第 7~28 d 均迅速下降, 第 29~70 d 土壤 NH_4^+-N 处于低含量稳定水平 (图 2A)。培养期间 (第 1~21 d) 尿素+NBPT 处理 NH_4^+-N 含量显著低于其他各施肥处理 ($P < 0.05$), 其在第 7 d 分别比尿素、尿素+硫代硫酸铵、尿素+醋酸棉酚处理 NH_4^+-N 含量降低了 64.8%、63.5%、70.9%; 在培养期第 8~21 d, 各施肥处理 NH_4^+-N 含量均大幅下降, 而尿素+硫代硫酸铵处理 NH_4^+-N 含量明显高于其他抑制剂处理, 表明硫代硫酸铵兼有抑制硝化过程的作用。施肥 28 d 后, 各处理均降至极低水平与 CK 相差不多。

土壤 NO_3^--N 含量动态表现为迅速升高 (第 1~14 d)、缓慢升高 (第 15~35 d) 和缓慢下降 (第 36~70 d) 3

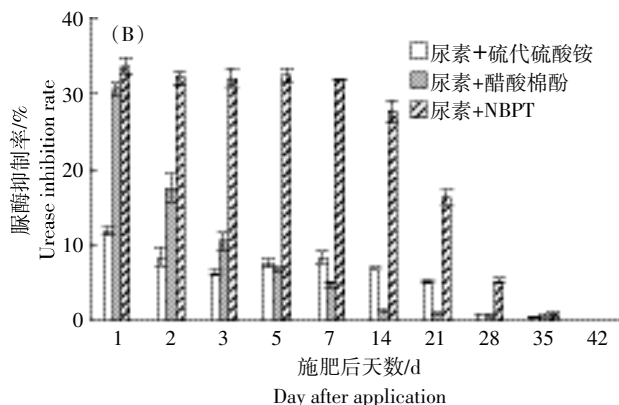
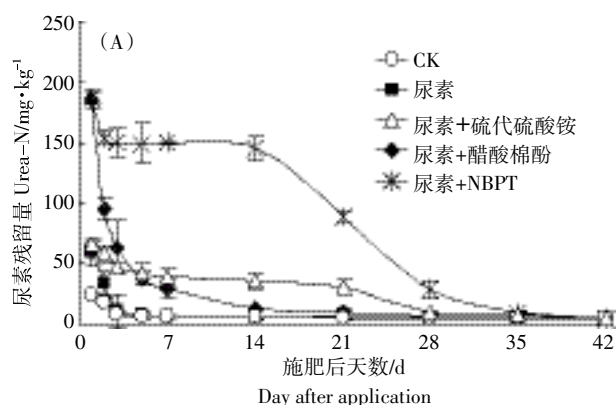


图 1 不同脲酶抑制剂对土壤尿素水解的影响

Figure 1 Effects of urease inhibitors (NBPT, GA and ATS) on urea hydrolysis

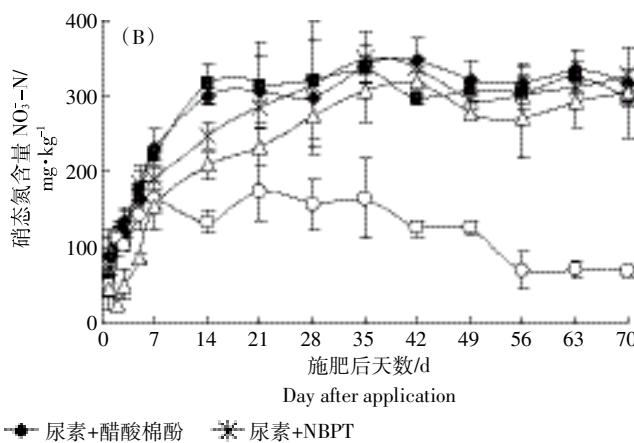
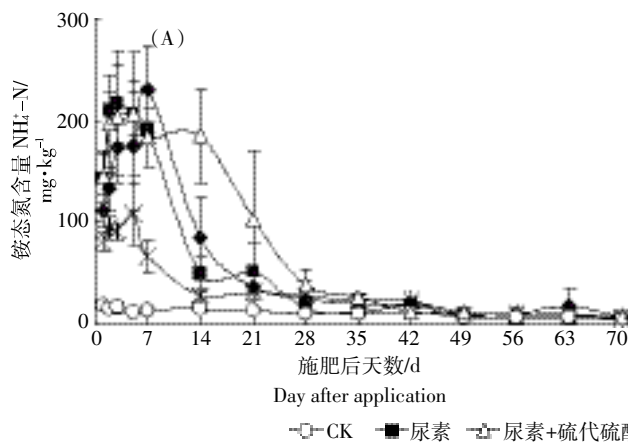


图 2 土壤铵态氮、硝态氮含量变化

Figure 2 Dynamics of soil NH_4^+-N and NO_3^--N concentrations

个阶段(图2B)。尿素处理 NO_3^- -N含量在培养的第14 d上升至峰值,各处理间差异显著($P<0.05$)。各施肥处理 NO_3^- -N含量在第14~21 d表现为尿素 $\approx$ 尿素+醋酸棉酚 $>$ 尿素+NBPT $>$ 尿素+硫代硫酸铵,随后各培养时间内不同抑制剂处理的 NO_3^- -N含量无显著差异。由此表明施用脲酶抑制剂抑制了尿素水解,可以减缓尿素向铵态氮转化的速率,但对硝态氮影响不大。

2.3 不同脲酶抑制剂对土壤 N_2O 排放的影响

图3(A)表示培养期内前14 d土壤 N_2O 浓度动态变化过程。各施肥处理前4 d土壤 N_2O 浓度均较低,从第4 d开始迅速上升,到第6 d升至峰值,第6~9 d明显下降,第9~14 d各处理 N_2O 浓度呈现上升-下降交替的波动性变化。土壤 N_2O 浓度动态变化特点总体与土壤 NH_4^+ -N、 NO_3^- -N含量消长的动态有紧密关系(图2),如尿素水解主要发生在第1~4 d,尿素态氮与 NH_4^+ -N此消彼长,因此 N_2O 浓度处于低值,从第4 d开始土壤铵态氮、硝态氮含量急剧上升,土壤 N_2O 浓度也随着升高直至第6 d的峰值;培养9 d之后,土壤氮素以硝态氮为主,各处理 N_2O 浓度表现为持续缓慢降低。第9 d后 N_2O 排放浓度趋势为尿素 $>$ 尿素+醋酸棉酚 $>$ 尿素+硫代硫酸铵 $\geq$ 尿素+NBPT,在第9 d醋酸棉酚、NBPT、硫代硫酸铵3种脲酶抑制剂处理相比单施尿素 N_2O 排放浓度依次减少53%、40%、73%,表明施用脲酶抑制剂处理可减少 N_2O 排放。

图3(B)表示第9 d N_2O 浓度日变化动态(随机抽取,每天 N_2O 浓度日变化相似),每个点 N_2O 浓度代

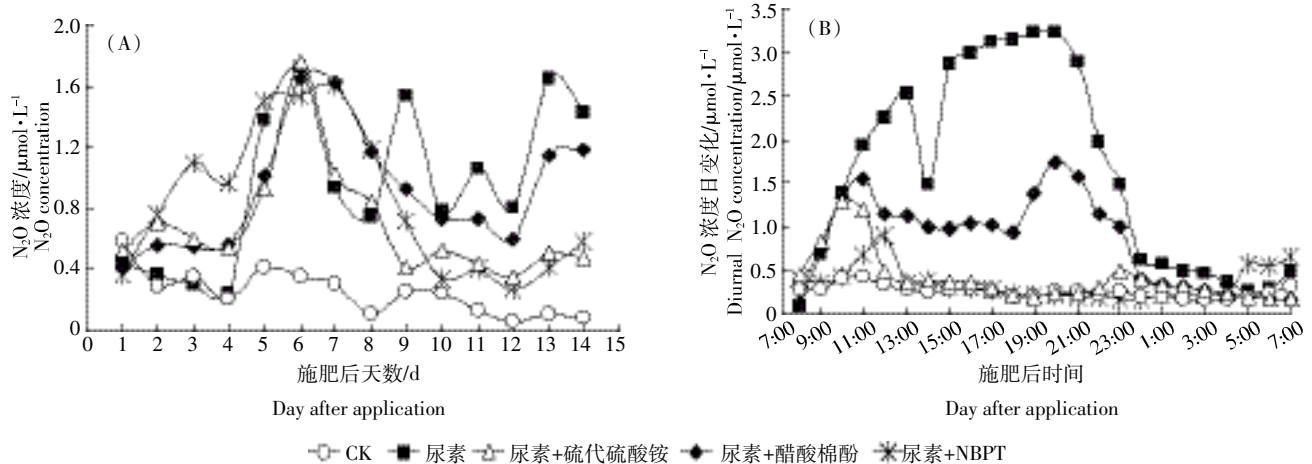
表该天每小时实时监测的 N_2O 浓度值。培养期间各处理峰值出现时间不同,夜间(23:00—8:00)排放量低于白天(8:00—23:00),表明温度对 N_2O 排放有很大的影响($R^2=0.85$, $P<0.05$),且尿素水解速率越快, N_2O 排放损失越多。各处理 N_2O 日排放浓度差值在 $0.25\sim 3.15\ \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 之间,其中单施尿素差值最大,具体表现为尿素 $>$ 尿素+醋酸棉酚 $>$ 尿素+硫代硫酸铵 $\geq$ 尿素+NBPT。

2.4 土壤 N_2O 排放及其与各形态氮的通径分析、相关性分析

N_2O 主要通过土壤硝化过程和反硝化过程产生,二者分别以 NH_4^+ -N和 NO_3^- -N作为底物,因此土壤 NH_4^+ -N、 NO_3^- -N含量与 N_2O 浓度关系密切。通径分析结果表明(表1),3种形态氮素对 N_2O 排放浓度的直接重要性(通径系数)依次为 NO_3^- -N(0.641) $>$ NH_4^+ -N(0.356) $>$ Urea-N(0.255), NO_3^- -N含量对 N_2O 浓度的作用最大且显著相关($P<0.05$),而Urea-N、 NH_4^+ -N含量对 N_2O 浓度影响的相关性差异不显著。 NO_3^- -N的间接通径系数分别为-0.044和-0.042,表示每增加一个单位的Urea-N、 NH_4^+ -N可分别减少0.044个和0.042个单位的 N_2O 浓度。这从反面证实 NO_3^- -N与土壤 N_2O 浓度含量的关系远大于 NH_4^+ -N、Urea-N。

通过线性相关分析可知,Urea-N、 NH_4^+ -N、 NO_3^- -N含量与 N_2O 浓度的相关系数为 NO_3^- -N(0.555) $>$ NH_4^+ -N(0.254) $>$ Urea-N(0.108),且 NO_3^- -N含量与 N_2O 浓度显著性相关($P<0.05$,表1)。

以上两种分析方法均表明土壤 NO_3^- -N含量与



(A) 培养期间 N_2O 浓度; (B) N_2O 浓度日变化(从第9 d早上8:00至次日凌晨7:00)

(A) Soil N_2O concentrations during 14 days of soil culture;

(B) Diurnal variation of soil N_2O concentrations on the 9th day (start at 8 o'clock on 9th day and end at 7 o'clock the next morning)

图3 土壤排放 N_2O 浓度的变化

Figure 3 Dynamics of soil N_2O concentrations as influenced by NBPT, GA and ATS

表1 土壤 N₂O 浓度与各形态氮的通径分析及相关性分析Table 1 Correlation and path analysis between N₂O concentrations and soil NH₄⁺-N, NO₃⁻-N, Urea-N contents in surface soil(0~20 cm)

自变量 Independents	相关系数 R	通径系数 Path coefficients	间接通径系数 Indirect path coefficients				三元回归方程 Regression equation
			Urea-N(X ₁)	NH ₄ ⁺ -N(X ₂)	NO ₃ ⁻ -N(X ₃)	SUM	
Urea-N(X ₁)	0.108	0.255	—	-0.037	-0.110	-0.147	$Y = -0.021 + 0.02X_1 + 0.03X_2 + 0.04X_3$
NH ₄ ⁺ -N(X ₂)	0.254	0.356	-0.026	—	-0.075	-0.102	
NO ₃ ⁻ -N(X ₃)	0.555*	0.641*	-0.044	-0.042	—	-0.085	

注:* 表示该指标与 N₂O 排放浓度达显著性水平。

Note: * indicates significant correlation.

N₂O 浓度关系最紧密,因此石灰性土壤 NO₃⁻-N 含量增加是 N₂O 排放升高的主要因素。

3 讨论

本研究结果表明,3种脲酶抑制剂均可抑制尿素水解,以NBPT效果最优,李莉等^[25]在白浆土上研究表明,NBPT的有效时间为10d,本研究表明其高效作用时间可持续14d。这验证了通气良好的非酸性土壤NBPT抑制尿素水解效果是最优的^[26]。由表2可知,培养结束后土壤中添加脲酶抑制剂NBPT的残留无机氮含量显著高于其他施肥处理($P<0.05$)。进一步分析脲酶抑制剂对土壤中各形态氮素转化的影响得知,培养结束后脲酶抑制剂均提高了铵态氮、硝态氮含量,使土壤中持有的无机氮总量增加,其中铵态氮含量大幅增加,硝态氮含量增幅相比铵态氮稍小但差异显著。脲酶抑制剂NBPT的施用使培养结束后土壤中铵态氮含量较多,减少了培养时短期内大量积聚硝态氮造成的损失,延长了尿素的肥效期,提高了土壤对无机氮固持。本试验为纯土培养而未种植作物,一部分是在转化过程中以NH₃和N₂O损失导致的^[27],另一部分铵由土壤固定与微生物固持而未检测。因此,施入的总氮量与70d后的土壤矿质氮含量有出入(表2)。

NH₃和N₂O作为氮肥主要的气态损失形态,越来越

受到关注。本试验添加脲酶抑制剂在一定时期内使铵态氮含量处于较低水平,尤其是NBPT效果最佳,可减少氨挥发的潜在损失。而土壤N₂O排放的测定是通过Unisense微电极实时监测测得,本试验条件下氮素形态与N₂O的排放有密切关系,N₂O排放在第4d呈上升趋势,此时期是土壤中铵态氮迅速向硝态氮转化阶段。Law等^[28]研究表明,N₂O排放速率与氨氧化速率呈指数正相关,因此施肥4d后N₂O排放呈增加趋势。在此阶段脲酶抑制剂虽然减缓了铵态氮含量的增加,对N₂O排放没有影响。第6d出现N₂O排放峰值,是由于施肥后第4~6d铵态氮与硝态氮均大量存在,为硝化与反硝化作用提供了底物进而产生大量的N₂O,在此过程中硝化细菌在有机碳含量低且含水量高、有铵态氮的环境中更易发生反硝化作用^[28]。本试验条件下添加脲酶抑制剂延缓了铵态氮含量的降低,进而减少了反硝化作用的底物硝态氮含量(图2),降低了由反硝化作用产生的N₂O排放。

硝化作用与反硝化作用均可产生N₂O排放,然而究竟是哪种作用为主造成N₂O损失,尚未得到论证。本研究通过分析土壤各形态氮与N₂O浓度的关系,证明NO₃⁻-N含量对N₂O排放起主导作用(表1)。虽然硝态氮的含量与硝化过程及反硝化过程均关系紧密,但硝态氮大量的增加是导致N₂O排放的主要因素。综上所述,石灰性土壤上N₂O排放是硝化与反硝化作用产

表2 几种脲酶抑制剂对土壤氮素含量的影响(第70d)

Table 2 Effects of different urease inhibitors on soil nitrogen contents(on the 70th day)

处理 Treatments	残留无机氮 Residual Nmin/mg N·kg ⁻¹	残留无机氮/总氮 Residual Nmin/N _{total} /%	残留无机氮差值 Nmin difference/%	铵态氮差值 NH ₄ ⁺ -N difference/%	硝态氮差值 NO ₃ ⁻ -N difference/%
尿素(Urea)	52.2±1.9d	24.8±0.9d	—	—	—
尿素+硫代硫酸铵(U+ATS)	54.8±0.8c	26.1±1.1c	3.2±0.4c	64.7±0.5a	2.4±0.4c
尿素+醋酸棉酚(U+GA)	57.6±1.0b	27.4±1.5b	8.6±1.6b	62.6±6.5a	7.9±1.7b
尿素+NBPT(U+NBPT)	60.1±0.6a	28.6±1.3a	13.3±0.7a	66.9±4.7a	12.6±0.7a

注:残留无机氮=(NH₄⁺-N)+(NO₃⁻-N);(无机氮/铵/硝态氮)差值=[(UI-U)/U]×100,UI为脲酶抑制剂、U为单施尿素;表中同列不同小写字母表示在0.05水平差异显著。

Note: Different lowercase letters in the same column indicate significant difference at $P<0.05$.

生的,而反硝化过程土壤 N₂O 浓度升高的贡献大于硝化作用。

4 结论

(1)施用脲酶抑制剂可以有效抑制石灰性土壤尿素水解,减缓氮素转化过程,减少氮素损失。3种脲酶抑制剂对尿素水解抑制效应依次为 NBPT>醋酸棉酚>硫代硫酸铵。

(2)施用脲酶抑制剂均可降低土壤 N₂O 浓度,其中 NBPT 效果最好。土壤 NO₃-N 含量与 N₂O 浓度相关性最高,对石灰性土壤上 N₂O 排放有显著影响。

参考文献:

- [1] Vlek P L G, Stumpe J M, Byrnes B H. Urease activity and inhibition in flooded soils systems[J]. *Fertilizer Research*, 1980, 1(3): 191-202.
- [2] Dawar K, Zaman M, Rowarth J S, et al. Urea hydrolysis and lateral and vertical movement in the soil: Effects of urease inhibitor and irrigation [J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2011, 47(2): 139-146.
- [3] 鲍俊丹, 石 美, 张妹婷, 等. 中国典型土壤硝化作用与土壤性质的关系[J]. 中国农业科学, 2011, 44(7): 1390-1398.
BAO Jun-dan, SHI Mei, ZHANG Mei-ting, et al. Nitrification of main soils in China and its relationship with soil properties[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2011, 44(7): 1390-1398.
- [4] 张中杰, 朱 波, 项红艳. 氮肥施用对西南地区紫色土冬小麦 N₂O 释放和反硝化作用的影响[J]. 农业环境科学学报, 2010, 29(10): 2033-2040.
ZHANG Zhong-jie, ZHU Bo, XIANG Hong-yan. Effect of nitrogen fertilizer for wheat on N₂O emission and denitrification in purple soil[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2010, 29(10): 2033-2040.
- [5] Gioacchini P, Nastri A, Marzadori C. Influence of urease and nitrification inhibitors on N losses from soils fertilized with urea[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2002, 36(2): 129-135.
- [6] Xu X K, Zhou L K, Van C O. Fate of urea-¹⁵N in a soil-wheat systems influenced by urease inhibitor hydroquinone and nitrification dicyandiamide[J]. *Plant and Soil*, 2000, 220(1-2): 261-270.
- [7] 纪 洋, 刘 刚, 马 静, 等. 控释肥施用对小麦生长期 N₂O 排放的影响[J]. 土壤学报, 2012, 49(3): 526-532.
JI Yang, LIU Gang, MA Jing, et al. Effect of controlled-release fertilizer (CRF) on nitrous oxide emission during the wheat growing period[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2012, 49(3): 526-532.
- [8] 白 雪, 夏宗伟, 郭彦玲, 等. 硝化抑制剂对不同旱地农田土壤 N₂O 排放的影响[J]. 生态学杂志, 2012, 31(9): 2319-2329.
BAI Xue, XIA Zong-wei, GUO Yan-ling, et al. Effects of nitrification inhibitors on N₂O emission from different upland agricultural soils[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2012, 31(9): 2319-2329.
- [9] Byrnes B H, Amberger A. Fate of broadcast urea in a flood soil when treated with N-(n-butyl)thiophosphoric triamide, a urease inhibitor[J]. *Fertilizer Research*, 1989, 18(3): 221-231.
- [10] Dawar K, Zaman M, Rowarth J S, et al. The impact of urease inhibitor on the bioavailability of nitrogen in urea and in comparison with other nitrogen sources in ryegrass (*Lolium perenne* L.) [J]. *Crop and Pasture Science*, 2010, 61(3): 214-221.
- [11] 何威明, 保万魁, 王 旭. 氮肥增效剂及其效果评价的研究进展[J]. 中国土壤与肥料, 2011(3): 1-6.
HE Wei-ming, BAO Wan-kui, WANG Xu. Research advances on nitrogen fertilizer synergist and its effect evaluation[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2011(3): 1-6.
- [12] 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.
ZHAO Lue, SUN Qing-yuan. Effect of urease inhibitor NBPT on bacteria of soil urease and urease activity[J]. *Journal of Dalian Polytechnic University*, 2007, 26(1): 24-27.
- [13] 傅 丽, 苏 壮, 石元亮, 等. 脲酶抑制剂(NBPT)与不同硝化抑制剂组合对土壤尿素氮转化的影响[J]. 沈阳农业大学学报, 2010, 41(3): 339-341.
FU Li, SU Zhuang, SHI Yuan-liang, et al. Effects of urease inhibitors and nitrification inhibitors on urea transformation[J]. *Journal of Shenyang Agricultural University*, 2010, 41(3): 339-341.
- [14] Li J, Shi Y, Luo J, et al. Use of nitrogen process inhibitors for reducing gaseous nitrogen losses from land-applied farm effluents[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2014, 50(1): 133-145.
- [15] 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.
KE Fu-lai, HUANG Rui-dong, MA Xing-lin, et al. Effects of the N slow/controlled release fertilizers on yield and nutritional quality of maize[J]. *Journal of Maize Sciences*, 2007, 15(2): 111-113.
- [16] 陈铁雄, 陈 敏, 张宗毅, 等. 醋酸棉酚对土壤脲酶活性的抑制作用[J]. 水土保持学报, 2012, 26(1): 219-222.
CHEN Yi-xiong, CHEN Min, ZHANG Zong-yi, et al. Inhibition of gossypol acetate on soil urease activity[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2012, 26(1): 219-222.
- [17] 隗英华, 陈利军, 武志杰. 硫代硫酸铵对尿素氮形态转化的影响[J]. 土壤通报, 2008, 39(6): 1331-1335.
JUAN Ying-hua, CHEN Li-jun, WU Zhi-jie. Effects of ammonium thiosulfate on the transformation of soil urea-N[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2008, 39(6): 1331-1335.
- [18] 李雪琴. 石河子垦区棉花膜下滴灌施肥技术研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2005.
LI Xue-qin. Studies on applying fertilizer technique in cotton with the drip irrigation under mulch in Shihezi[D]. Beijing: China Agricultural University, 2005.
- [19] Dobermann A. Nutrient use efficiency-measurement and management[R]. Brussels, Belgium; IFA International Workshop on Fertilizer Best Management Practices, 2007.
- [20] Fixen P E, Jin J Y, Tiwari K N, et al. Capitalizing on multi-element interactions through balanced nutrition pathway to improve nitrogen use efficiency in China, India and North America[J]. *Science in China (Series C: Life Sciences)*, 2005, 48(Suppl2): 780-790.
- [21] 徐万里, 刘 骅, 张云舒, 等. 新疆灰漠土区不同肥料配比土壤氮挥发原位监测[J]. 生态学报, 2009, 29(8): 4565-4571.

- XU Wan-li, LIU Hua, ZHANG Yun-shu, et al. In situ monitoring of ammonia volatilization from grey desert soil under different in Xin-jiang[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2009, 29(8):4565-4571.
- [22] 王肖娟, 危常州, 张 君, 等. 灌溉方式和施氮量对棉田氮肥利用率及损失的影响[J]. *应用生态学报*, 2012, 23(10):2751-2758.
- WANG Xiao-juan, WEI Chang-zhou, ZHANG Jun, et al. Effects of irrigation mode and N application rate on cotton field fertilizer N use efficiency and N losses[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2012, 23(10):2751-2758.
- [23] 鲁如坤. 土壤农业化学分析[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 1999: 163-164.
- LU Ru-kun. Chemical analysis of soil agricultural[M]. Beijing: China Agriculture S&T Press, 1999:163-164.
- [24] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3 版. 北京: 中国农业出版社, 2007:3.
- BAO Shi-dan. Chemical analysis of soil agricultural[M]. 3rd ed. Beijing: China Agriculture Press, 2007:3.
- [25] 李 莉, 李东坡, 武志杰, 等. 脲酶/硝化抑制剂对尿素氮在白浆土中转化的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2011, 17(3):646-650.
- LI Li, LI Dong-po, WU Zhi-jie, et al. Effect of urease/nitrification inhibitors on transformation of urea-N in albic soil[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2011, 17(3):646-650.
- [26] 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.
- ZHANG Yu-lan, CHEN Li-jun, ZHANG Li-li. Enzymological indicators of soil quality[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2005, 36(4):598-604.
- [27] 丁 洪, 王跃思, 秦胜金, 等. 控释肥对土壤氮素反硝化损失和 N_2O 排放的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2010, 29(5):1015-1019.
- DING Hong, WANG Yue-si, QIN Sheng-jin, et al. Effect of controlled release fertilizers on nitrogen loss by denitrification and N_2O emission [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2010, 29(5):1015-1019.
- [28] Law Y Y, Ni B J, Lant P, et al. N_2O production rate of an enriched ammonia-oxidizing bacteria culture exponentially correlates to its ammonia oxidation rate[J]. *Water Research*, 2012, 46(10):3409-3419.