

# 土壤理化性质与生物活性对持续施用缓/控释 尿素肥料的响应\*

丁济娜<sup>1,2</sup> 李东坡<sup>1\*\*</sup> 武志杰<sup>1</sup> 崔亚兰<sup>1,2</sup> 李会彬<sup>1,2</sup> 李永华<sup>3</sup> 李 擘<sup>3</sup> 焦晓云<sup>3</sup>

(<sup>1</sup>中国科学院沈阳应用生态研究所, 沈阳 110016; <sup>2</sup>中国科学院大学, 北京 100049; <sup>3</sup>锦西天然气化工有限责任公司, 辽宁葫芦岛 125001)

**摘 要** 为了明确连续施用缓/控释尿素肥料对潮棕壤的基本理化性质和生物活性的影响,对持续6年施用不同种缓/控释尿素肥料种植玉米土壤的基本理化性质和生物活性指标进行了测定和分析。结果表明:连续6年施用缓/控释尿素肥料后土壤有机质、全氮、全磷、有效磷、速效钾含量均显著增加,而全钾、碱解氮及pH值下降;持续施用缓/控释尿素可以减缓土壤pH的下降,缓释尿素肥料的pH显著高于包膜尿素的pH;施用缓/控释肥料的土壤脲酶活性高于施用普通尿素肥料,长期施用脲酶抑制剂和硝化抑制剂结合及包膜的尿素肥料硝酸还原酶活性最高,且激活了土壤硝化作用潜势,包膜尿素肥料提高了土壤微生物生物量氮,添加硝化抑制剂类肥料提高了土壤中微生物生物量碳。总体来说,持续6年施用NBPT+DMPP+U和PCU肥料土壤生物活性高于其他处理,考虑到肥料成本和经济效应,NBPT和DMPP配施的尿素肥料更适用于潮棕壤上连续施用。

**关键词** 缓/控释尿素肥料; 持续施肥; 微生物生物量; 硝化作用潜势; 土壤酶活性

**中图分类号** S153.1 **文献标识码** A **文章编号** 1000-4890(2014)7-1769-10

**Responses of soil physicochemical properties and biological activity to continuous application of slow/controlled releasing urea.** DING Ji-na<sup>1,2</sup>, LI Dong-po<sup>1\*\*</sup>, WU Zhi-jie<sup>1</sup>, CUI Ya-lan<sup>1,2</sup>, LI Hui-bin<sup>1,2</sup>, LI Yong-hua<sup>3</sup>, LI Bo<sup>3</sup>, JIAO Xiao-yun<sup>3</sup> (<sup>1</sup>*Institute of Applied Ecology, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China*; <sup>2</sup>*University of Chinese Academy of sciences, Beijing 100049, China*; <sup>3</sup>*Jinxi Natural Gas Chemical Co., Ltd, Huludao 125001, China*). *Chinese Journal of Ecology*, 2014, **33**(7): 1769–1778.

**Abstract:** The effects of six-year continuous applications of different types of slow/controlled release urea on biological activity and physicochemical properties of aquatic brown soil were investigated. The results showed that soil organic matter, total nitrogen, total phosphorus, available phosphorus and available potassium were significantly increased by continuous application of slow/controlled release urea, while total potassium, available nitrogen and pH were significantly decreased. The descent of pH was slowed down by continuous application of slow/controlled release urea compared to the use of normal urea, and the soil pH was higher after application with slow-release urea than with coated urea. Soil urease activity of slow/controlled release fertilizer treatments was higher than CK. Applications of nitrification inhibitors incorporated and coated urea resulted in the highest nitrate reductase activity and accelerated the nitrification potential activity. Application of nitrification inhibitors incorporated urea significantly increased soil microbial biomass carbon. In conclusion, continuous six-year applications of NBPT+DMPP+U and PCU significantly increased biological activity in contrast to the other treatments. Considering the cost and economic effects of the different fertilizers, the urea supplemented with NBPT and DMPP is suitable for continuous application in aquatic brown soil.

**Key words:** slow/controlled releasing fertilizer; continuous fertilization; soil microbial biomass; nitrification potential; soil enzymatic activity.

\* 国家“十二五”科技支撑计划项目(2011BAD11B04, 2012BAD05B01, 2012BAD14B02)、国家“十一五”科技支撑计划项目(2009BAD3B07)和中国科学院知识创新工程重要方向项目(KSCX2-YW-N-078)资助。

\*\* 通讯作者 E-mail: lidp@iae.ac.cn

收稿日期: 2013-11-29 接受日期: 2014-03-16

尿素中添加脲酶抑制剂/硝化抑制剂和包膜尿素等新型肥料是近年来研究的热点(倪秀菊等, 2009; Farmaha *et al.*, 2013; Ye *et al.*, 2013), 短期试验研究表明其具有提高肥料利用率和减轻环境问题等优点(Shaviv & Mikkelsen, 1993)。目前已经确定的生化抑制剂有 110 多种, 其中脲酶抑制剂氢醌(HQ)、丁基硫代磷酰三胺(NBPT)和硝化抑制剂 3,4-二甲基磷酸盐(DMPP)、二氰二胺(DCD)(Zerulla *et al.*, 2001; Soares *et al.*, 2012)是目前既经济又有效的生化抑制剂。

肥料的施入直接而迅速地影响土壤肥力和土壤生产力, 进而影响耕地质量, 耕地土壤质量受肥料、气候、水分、酸碱度、土壤结构和土壤质地等多种因素影响, 土壤质量不仅取决于土壤的理化性质, 而且与土壤的生物学性质密切相关(张丽莉等, 2008)。土壤微生物生物量、酶活性等生物特性比土壤有机质、养分含量等其他理化性状更敏感地对土壤质量的变化做出响应(Doran & Zeiss, 2000)。土壤中一切生化反应都是在土壤微生物与土壤酶的参与下完成的, 土壤酶活性的高低能反映土壤的理化性状、土壤生物活性以及土壤生化反应强度, 脲酶、氨氧化酶、硝酸还原酶是尿素水解、铵态氮氧化、硝态氮还原过程中参与反应的主要酶类(Bandick & Dic, 1999)。脲酶抑制剂和硝化抑制剂分别通过作用于脲酶和氨氧化细菌来减缓土壤中尿素——酰胺态氮至氨态氮的水解以及铵态氮( $\text{NH}_4^+$ )至硝态氮( $\text{NO}_3^-$ )的氧化, 包膜肥料主要通过其表面膜的阻滞作用, 使膜内尿素在较长时间内持续缓慢释放(武志杰和李东坡, 2006), 来控制尿素水解数量, 进而减少  $\text{NH}_3$  的形成与挥发, 减少土壤中  $\text{NO}_3^-$  的浓度和淋溶损失, 以及  $\text{N}_2$  与  $\text{N}_2\text{O}$  等气态损失的元素或化合物的形成(陈振华等, 2005; 倪秀菊等, 2009)。

大量研究表明, 长期施用普通氮肥使土壤中微生物数量以及相关酶活性均增加(李晨华等, 2012), 而微生物生物量氮变化不大(Glendining *et al.*, 1996); 室内培养试验或者当季的大田试验研究表明, 施用抑制剂类肥料能够使土壤中相应的脲酶、硝酸还原酶活性降低(李东坡等, 2006; 张玉兰等, 2008)。已有资料研究的主要是长期施用普通尿素肥料或者短时间内施用缓/控释尿素肥料对土壤理化性质与生物学特性的影响, 本研究为连续多年施用缓/控释尿素肥料对土壤理化性质和生物学活性影响, 将为研制与应用新型肥料以及合理施用缓/控

释尿素肥料提供科学的依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验地概况与试验设计

供试土壤采自位于中国科学院沈阳生态实验站( $43^\circ 31' \text{N}$ ,  $123^\circ 22' \text{E}$ )的长期定位试验田, 土壤类型为典型的潮棕壤。该站位于松辽平原南端, 辽河平原中部偏东, 典型的农业生产区, 气候类型为暖温带半湿润大陆性气候, 年均气温  $7 \sim 8^\circ \text{C}$ ,  $>10^\circ \text{C}$  活动的积温为  $3300 \sim 3400^\circ \text{C}$ , 太阳总辐射量为  $5409.9 \sim 5598.9 \text{ kJ} \cdot \text{cm}^{-2}$ 。年降雨量为  $650 \sim 700 \text{ mm}$ , 干燥度为 0.9, 无霜期为  $147 \sim 164 \text{ d}$ 。

本研究采用脲酶抑制剂 N-丁基硫代磷酰三胺(NBPT)、氢醌(HQ)、硝化抑制剂 3,4-二甲基吡唑磷酸盐(DMPP)、二氰二胺(DCD)制成不同的缓释尿素, 以及硫包膜尿素(SCU)和树脂包膜尿素肥料(PCU)。长期施用缓/控释肥料定位试验研究, 自 2007 年开始, 目前已持续 6 a, 采用玉米连作的耕作制度。试验设置 9 个处理: (1) 普通大颗粒尿素 U (含氮 46.00%, 对照); (2) 1% HQ + U (含氮 45.50%); (3) 0.5% NBPT + U (含氮 45.80%); (4) 3% DCD + U (含氮 44.66%); (5) 1% DMPP + U (含氮 45.50%); (6) 1% HQ + 3% DCD + U (含氮 44.23%); (7) 0.5% NBPT + 1% DMPP + U (含氮 45.30%); (8) SCU (释放期 120 d, 含氮 43.00%); (9) PCU (释放期 120 d, 含氮 43.00%)。每个处理 3 次重复, 试验小区面积为  $30 \text{ m}^2$ , 每小区 5 垄, 随机区组排列。肥料施用量以当地施肥水平为依据, 肥料的施用量分别为每季施纯氮:  $\text{N } 180 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ; 施磷:  $\text{P}_2\text{O}_5 120 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ; 施钾:  $\text{K}_2\text{O } 150 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ , 在播种时采用基肥条施方式一次性施入土壤, 按照当地常规水肥管理方式进行田间管理。玉米品种一直为东单 90, 玉米播种期为在 4 月 25—30 日, 其中 2012 年玉米在 4 月 25 日进行播种, 收获时间为每年的 9 月 25—30 日, 其中 2012 年玉米的收获期是 9 月 28 日。

### 1.2 样品采集及试验方法

土壤样品采集在 2013 年 4 月末(玉米施肥种植之前)进行, 采样深度为  $0 \sim 20 \text{ cm}$  耕层土壤, 每个小区 9 点取样, 然后混合均匀作为代表样, 所取土样去除杂物、细根后过  $2 \text{ mm}$  筛, 部分鲜土样于  $4^\circ \text{C}$  条件下保存, 用于土壤生物学活性的测定; 另一部分风干用于基本理化性质的测定。

土壤的  $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$  在取样后立即用  $2\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$  KCl 浸提,AA3 型流动分析仪测定;土壤的脲酶采用尿素残留法(Tabatabai,1994)测定,硝酸还原酶采用 Kandeler 法(Kandeler *et al.*,1994)测定,硝化作用潜势采用氯酸盐抑制法测定(Hart *et al.*,1994);微生物生物量碳的测定采用熏蒸浸提法,浸提液用 WinhighTOC II 仪测定(陈国潮,1999),微生物生物量氮采用碱性过硫酸钾氧化—比色法(周建斌和李生秀,1998),其余基本理化性质采用常规方法测定。

1.3 数据处理

数据采用 Microsoft Excel 2007 和 SPSS 18.0 进行统计分析,采用 Duncan 最小显著极差法进行多重比较分析。

2 结果与分析

2.1 连续施用不同种缓/控释肥料对土壤基本理化性质的影响

连续施用缓/控释肥料对土壤的基本性质产生显著影响(表1)。与定位试验前土壤相比,不同缓/控释尿素与磷、钾肥料配合连续 6 a 施用后,所有处理土壤有机质含量均显著增加,其增加幅度在 17%~36%,且不同处理间有机质含量不同,其中单施尿素处理的有机质含量显著高于除 DCD+U 尿素肥料处理外的其他处理,而 DMPP+U 尿素肥料处理的有机质含量则最低。土壤全氮与试验初始氮含量  $0.98\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$  相比,连续 6 a 施用尿素后土壤全氮含量显著增加,施用普通尿素肥料土壤全氮含量显著低于硫包衣尿素,而其他肥料间差异不显著。连续 6 a 施用尿素后不同肥料处理间土壤碱解氮含量差异显著,但比试验初始碱解氮含量低,2 种包膜尿素

肥料的碱解氮含量要显著高于其他肥料处理,其中 PCU 肥料最高,而添加抑制剂的尿素肥料的碱解氮含量要低于施用普通尿素,HQ+U 除外,说明连续施用包膜尿素肥料在维持土壤速效氮养分方面是重要的。

长期施肥显著提高了土壤中全磷和有效磷的含量。对于全磷而言,连续 6 a 氮磷钾配合施用土壤磷含量显著增加,其中 DMPP+U 尿素肥料棕壤全磷含量最高,显著高于除 DCD+U 以外的其他处理,NBPT+DMPP+U 尿素肥料的含量最低,HQ+DCD+U、SCU、DCD+U 的全磷含量显著高于 U、HQ+U、NBPT+U 和 NBPT+DMPP+U、PCU,且 HQ+DCD+U、SCU、DCD+U 之间和 U、HQ+U、NBPT+U 和 NBPT+DMPP+U、PCU 之间差异均不显著;连续 6 a 施用不同尿素肥料间有效磷差异显著,且  $\text{DMPP+U、PCU、HQ+U} > \text{DCD+U} > \text{HQ+DCD+U、NBPT+DMPP+U} > \text{SCU} > \text{NBPT+U}$  尿素肥料,单施尿素土壤的有效磷含量最高,而施用缓/控释尿素的较低,说明施用缓/控释尿素能够更好地促进作物对土壤有效磷的吸收,不同缓/控释尿素之间有效磷含量的差异可能受缓/控释尿素的缓/控释效果影响。连续 6 a 缓/控释尿素肥料与磷钾肥配施后,土壤的全钾含量显著低于试验初始钾含量  $19.59\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,而不同施肥处理间差异不显著,说明不同的尿素肥料与磷钾肥配施对土壤全钾含量的影响不大。土壤速效钾含量趋势与有效磷相似,连续施肥后土壤中速效钾含量显著增加,其中施用普通尿素的速效钾含量最高,脲酶抑制剂和硝化抑制剂的尿素肥料次之,包膜尿素肥料的最少。连续施肥后土壤 pH 值降低,添加抑制剂尿素肥料,尤其是脲酶抑制剂和硝化抑制剂配合施用的 HQ+DCD+U 和 NBPT+DMPP+U 肥料处

表 1 土壤基本理化性质  
Table 1 Basic properties of soil

| 处理          | 有机质<br>( $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ) | 全氮<br>( $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ) | 全磷<br>( $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ) | 全钾<br>( $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ) | 碱解氮<br>( $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ) | 有效磷<br>( $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ) | 速效钾<br>( $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ) | pH            |
|-------------|------------------------------------------|-----------------------------------------|-----------------------------------------|-----------------------------------------|-------------------------------------------|-------------------------------------------|-------------------------------------------|---------------|
| 试验前土壤       | 14.65±0.44 f                             | 0.98±0.03 c                             | 0.27±0.02 f                             | 19.59±0.37 a                            | 101.34±0.97 a                             | 8.28±0.23 g                               | 61.94±1.74 g                              | 5.55±0.03 a   |
| U           | 19.92±0.26 a                             | 1.07±0.04 b                             | 0.35±0.02 de                            | 14.40±0.63 b                            | 54.75±0.20 de                             | 28.35±0.72 a                              | 109.83±0.51 a                             | 4.92±0.02 g   |
| HQ+U        | 18.19±0.73 cd                            | 1.10±0.05 ab                            | 0.37±0.02 cd                            | 14.10±1.03 b                            | 56.30±0.02 d                              | 26.72±1.12 ab                             | 87.06±0.73 cd                             | 5.22±0.04 bc  |
| NBPT+U      | 18.56±0.46 bcd                           | 1.09±0.05 ab                            | 0.36±0.04 cde                           | 13.80±0.71 b                            | 54.00±0.45 e                              | 13.81±0.98 f                              | 82.96±1.51 e                              | 5.16±0.04 d   |
| DCD+U       | 19.24±0.34 ab                            | 1.08±0.03 ab                            | 0.43±0.01 ab                            | 14.20±0.41 b                            | 50.81±0.25 f                              | 23.53±0.91 c                              | 85.96±1.48 cd                             | 5.19±0.01 cd  |
| DMPP+U      | 17.13±0.44 e                             | 1.10±0.03 ab                            | 0.47±0.04 a                             | 13.63±0.27 b                            | 54.14±0.13 e                              | 26.00±1.07 b                              | 84.59±1.68 de                             | 5.21±0.02 bcd |
| HQ+DCD+U    | 18.94±0.57 bc                            | 1.08±0.05 ab                            | 0.39±0.05 bcd                           | 13.79±0.05 b                            | 49.67±0.11 f                              | 21.00±0.79 d                              | 92.96±1.45 b                              | 5.24±0.02 bc  |
| NBPT+DMPP+U | 18.58±0.56 bcd                           | 1.08±0.04 ab                            | 0.32±0.02 e                             | 13.90±0.48 b                            | 50.94±0.27 f                              | 20.31±1.00 d                              | 87.27±0.63 c                              | 5.25±0.02 b   |
| SCU         | 18.27±0.53 cd                            | 1.15±0.06 a                             | 0.40±0.03 bc                            | 13.53±0.49 b                            | 59.90±0.08 c                              | 16.26±1.54 e                              | 73.32±1.43 f                              | 5.01±0.03 f   |
| PCU         | 17.78±0.77 de                            | 1.08±0.05 ab                            | 0.36±0.03 cde                           | 13.89±0.41 b                            | 66.13±0.01 b                              | 26.38±0.49 b                              | 73.99±1.49 f                              | 5.10±0.02 e   |

数值为平均值±标准误;同列不同字母表示在 0.05 水平上差异显著。



理,pH 值下降的幅度最小,包膜肥料次之,施用普通尿素肥料 pH 值下降的幅度最大,说明长期施肥能够导致土壤酸化,而施用缓/控释尿素肥料能够减缓 pH 的下降趋势。

2.2 连续施用缓/控释肥料对土壤铵态氮、硝态氮含量的影响

不同肥料处理间  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  和  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  含量差异显著(图 1)。持续施用包膜尿素土壤中  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  的含量显著高于施用普通尿素,其中 PCU 尿素土壤中  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  含量最高,超过了施用普通尿素的 2.5 倍,施用 SCU 尿素土壤中  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  含量次之,高于普通尿素 1.6 倍以上,施用生化抑制剂尿素肥料土壤中  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  含量显著低于普通尿素,其中  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  含量最低的是 NBPT+DMPP+U 尿素肥料,但施用不同生化抑制剂或其组合尿素肥料间差异不显著;同样,持续施用包膜肥料土壤中的  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  含量也显著高于施用普通尿素,施用不同生化抑制剂或其组合尿素肥料的  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  含量与施用普通尿素无显著差异。PCU 肥料的  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  含量显著高于 SCU 肥料的含量,其分别为 29.3 和 18.7  $\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$  干土;在施用不同生化抑制剂或其组合尿素肥料处理中,NBPT+U 和 DCD+U 两种肥料的  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  含量比其他处理高,分别为 8.59 和 8.55  $\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$  干土,而 NBPT+DMPP+U 尿素肥料的  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  含量最低,为 6.95  $\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$  干土;HQ+U、DMPP+U、HQ+DCD+U 和施用普通尿素肥料处理的含量在 7.55 ~ 7.91  $\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$  干土。

2.3 连续施用缓/控释肥料对土壤脲酶活性的影响

持续施用 HQ+U、NBPT+U、HQ+DCD+U 和 PCU 尿素肥料土壤脲酶活性显著高于施用普通尿素土壤脲酶活性;持续施用 DCD+U、DMPP+U、NBPT+DMPP+U 和 SCU 尿素肥料土壤中的脲酶活性显著低于施用普通尿素(图2)。HQ+U、NBPT+U、HQ+

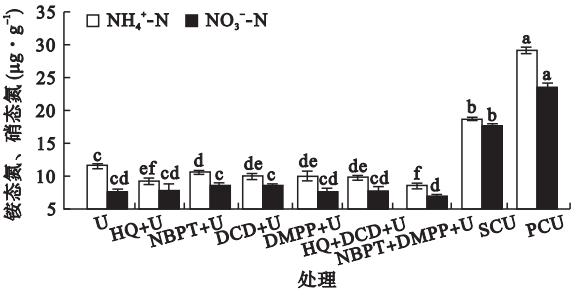


图 1 施用不同尿素肥料土壤  $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$  含量  
Fig. 1 Soil  $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$  contents under different treatments  
不同字母表示处理间差异显著( $P < 0.05$ )。下同。

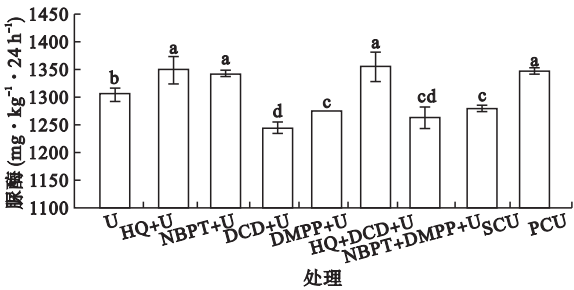


图 2 施用不同尿素肥料土壤脲酶活性  
Fig. 2 Activities of soil urease under different treatments

DCD+U 和 PCU 尿素肥料土壤脲酶活性在 1341.63 ~ 1353.46  $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot 24 \text{ h}^{-1}$ ,彼此差异不显著;DMPP+U、NBPT+DMPP+U 和 SCU 肥料之间土壤脲酶活性差异不显著,在 1261.45 ~ 1277.83  $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot 24 \text{ h}^{-1}$ ,DCD+U 的脲酶活性最低,为 1243.33  $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot 24 \text{ h}^{-1}$ ,其中 DMPP+U 和 SCU 显著高于 DCD+U,NBPT+DMPP+U 和 DCD+U 之间差异不显著。

2.4 连续施用缓/控释肥料对土壤硝化作用潜势的影响

连续 6 a 施用缓控/释肥料后土壤硝化作用潜势比施用普通尿素肥料高(图 3)。其中 NBPT+DMPP+U 处理的硝化作用潜势最高,为 0.72  $\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1} \cdot 5 \text{ h}^{-1}$ ,PCU 处理次之,为 0.66  $\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1} \cdot 5 \text{ h}^{-1}$ ,两者无显著差异,都显著高于其他处理。HQ+DCD+U 和硫包衣尿素的硝化作用潜势也较高,分别为 0.56  $\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1} \cdot 5 \text{ h}^{-1}$  和 0.59  $\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1} \cdot 5 \text{ h}^{-1}$ ,二者无显著差异,均显著高于 U、HQ+U、NBPT+U、DCD+U 和 DMPP+U,U、HQ+U、NBPT+U、DCD+U 和 DMPP+U 的硝化作用潜势在 0.28 ~ 0.39  $\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1} \cdot 5 \text{ h}^{-1}$ ,DMPP+U 与 DCD+U 硝化作用潜势都显著高于 U,NBPT+U、DCD+U、DMPP+U 之间、HQ+U、NBPT+U、DCD+U 之间和 U、HQ+U、NBPT+U 之间硝化作用潜势无显著差异。

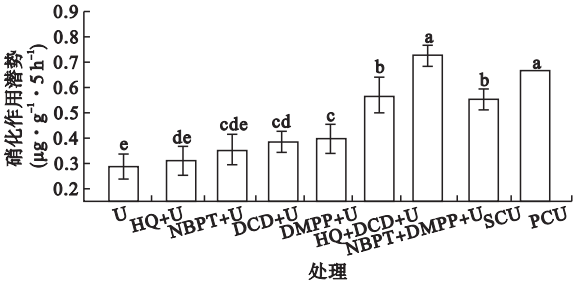


图 3 施用不同尿素肥料土壤硝化作用潜势  
Fig. 3 Activities of soil nitrification potential under different treatments

## 2.5 连续施用缓/控释肥对土壤硝酸还原酶活性的影响

连续6 a 施用不同种缓/控释肥料对土壤的硝酸还原酶活性均产生显著的影响(图4)。施用PCU、NBPT+DMPP+U和HQ+DCD+U尿素肥料的土壤硝酸还原酶活性在 $0.25 \sim 0.34 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot 24 \text{ h}^{-1}$ ,显著高于其他尿素肥料,且 $\text{PCU} > \text{NBPT} + \text{DMPP} + \text{U} > \text{HQ} + \text{DCD} + \text{U}$ ,PCU与NBPT+DMPP+U之间无显著差异,二者硝酸还原酶活性显著高于HQ+DCD+U,HQ+DCD+U显著高于施用另外几种尿素肥料;HQ+U显著高于SCU,而与DMPP+U差异不显著,SCU与NBPT+U、DMPP+U硝酸还原酶活性无显著差异,除NBPT+U外,都显著高于单施尿素;而NBPT+U、DCD+U土壤硝酸还原酶活性与单施尿素差异不显著。

## 2.6 连续施用缓/控释肥对土壤微生物生物量氮的影响

持续6 a 施用2种包膜尿素肥料土壤微生物生物量氮显著高于施用其他尿素肥料,且持续施用PCU尿素土壤微生物生物量氮显著高于SCU尿素土壤微生物生物量氮,分别为 $33.48$ 和 $27.12 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ;持续6 a 施用HQ+U和HQ+DCD+U尿素肥料土壤微生物生物量氮分别为 $19.36$ 和 $18.37 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,显著低于施用普通尿素肥料的微生物生物量氮( $21.33 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ );持续6 a 施用NBPT+U、DCD+U、DMPP+U和NBPT+DMPP+U尿素肥料的微生物生物量氮在 $19.82 \sim 22.77 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,与普通尿素肥料无显著差异(图5)。

## 2.7 连续施用缓/控释肥对微生物生物量碳的影响

持续施用不同肥料间土壤微生物生物量碳存在差异显著(图6)。持续施用DCD+U与DMPP+U尿素肥料土壤微生物生物量碳最高,分别为 $262.01$ 和 $261.97 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,显著高于其他尿素肥料,二者间

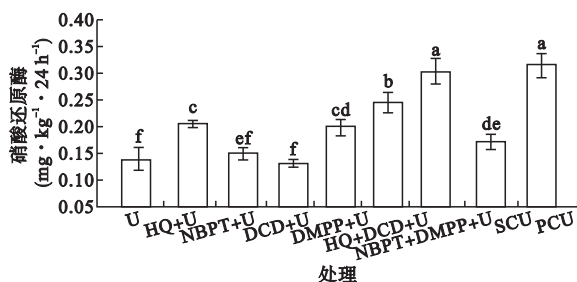


图4 施用不同尿素肥料土壤硝酸还原酶活性  
Fig.4 Activities of soil nitrate reductase under different treatments

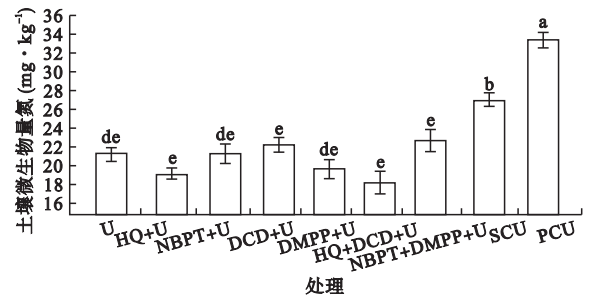


图5 施用不同尿素肥料土壤微生物生物量氮  
Fig.5 Soil microbial biomass nitrogen under different treatments

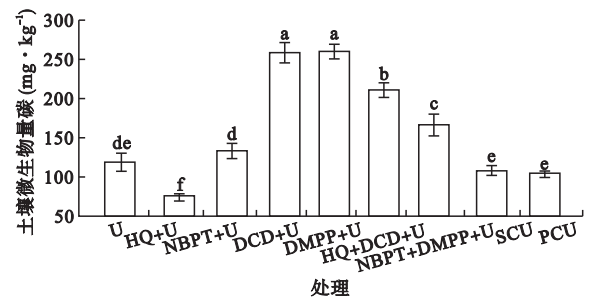


图6 施用不同尿素肥料土壤微生物生物量碳  
Fig.6 Soil microbial biomass carbon under different treatments

无显著差异;HQ+DCD+U和NBPT+DMPP+U2种肥料微生物生物量碳较高,分别为 $212.1$ 和 $165.85 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,且HQ+DCD+U显著高于NBPT+DMPP+U肥料,二者均显著高于U、HQ+U、NBPT+U、SCU和PCU肥料;NBPT+U肥料显著高于HQ+U、SCU和PCU,而与施用普通尿素U间差异不显著;SCU、PCU肥料微生物生物量碳与施用普通尿素间无显著差异,而显著高于HQ+U肥料;持续施用HQ+U尿素肥料土壤微生物生物量碳最低,为 $75.50 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

## 3 讨论

对于土壤养分而言,连续施用缓/控释肥料使土壤有机质、全氮、全磷、有效磷和速效钾含量均显著增加,全钾、碱解氮含量和pH值则下降,这与周卫军等(2010)研究一致。尽管土壤有机质只占土壤总重量的很小一部分,但是它在土壤肥力、环境保护和农业可持续发展等方面起着重要的作用(黄昌勇,2000),其含量的高低受环境与人为管理等方式的影响。与定位试验前相比,不同缓/控释尿素与磷、钾肥料配合连续6 a 施用后,土壤有机质含量均显著增加,这与长期施用化学肥料的研究结果相一

致。徐明岗等 (2006b) 研究发现, 连续 10 a 施用 NPK 肥后褐土的总有机质含量增加, 其中施用普通尿素的土壤有机质含量最高, 与 DCD+U 尿素肥料无显著差异, 但显著高于施用其他肥料, 主要是因为本试验所处地理位置气候较寒冷, 每年适宜于土壤微生物活动的时间相对较短, 有利于土壤有机碳的保持而 NPK 肥配合施用使根茬的归还量较大, 使土壤的有机质含量增加 (徐明岗等, 2006a; 张璐等, 2009); 添加抑制剂肥料或施用包膜肥料后, 土壤中供微生物吸收利用的氮量较高和供应时间相对延长, 土壤微生物数量和活性相对增加和增强, 分解土壤有机质能力增强, 从而导致施用缓/控释尿素肥料的土壤有机质含量比单施尿素低。土壤全氮是土壤供氮的容量和强度指标, 连续 6 a 施用尿素后土壤全氮含量显著增加, 这说明长期施肥可增加土壤供氮容量和强度 (焦晓光等, 2011)。

土壤磷素的研究一直是农田土壤养分研究的热点 (戚瑞生等, 2012)。长期施肥显著提高了土壤中全磷和有效磷的含量, 这与大部分研究结果一致 (刘杏兰和高宗, 1996; 顾益初和钦绳武, 1997)。连续 6 a 施用不同尿素肥料间有效磷差异显著, 且单施尿素土壤的有效磷含量高于施用缓/控释尿素肥料的有效磷含量, 说明施用缓/控释尿素能够更好地促进作物对土壤有效磷的吸收, 不同缓/控释尿素之间有效磷含量的差异可能受缓/控释尿素的缓/控释效果影响, 即控释能力越强; 土壤供给玉米植株有效氮的时间越长, 进而玉米植株吸收土壤氮、磷、钾等养分的时间越长, 土壤有效磷含量就会越低。土壤施用普通尿素的速效钾含量最高, 脲酶抑制剂和硝化抑制剂的尿素肥料次之, 包膜尿素肥料的最少, 说明施用含钾化肥均能提高土壤速效钾的含量, 且施用缓/控释尿素能够促进作物对土壤速效钾的吸收 (周卫军等, 2010)。

连续施肥后土壤 pH 值降低, 添加抑制剂尿素肥料的 pH 值下降的幅度最小, 包膜肥料次之, 施用普通尿素肥料 pH 值下降的幅度最大, 说明长期施肥能够导致土壤酸化, 而施用缓/控释尿素肥料能够减缓 pH 的下降趋势, 这与缓/控释尿素肥料能够保持较高的  $\text{NH}_4^+$  含量, 较低的  $\text{NO}_3^-$  含量有关 (Cookson & Cornforth, 2002); PCU 肥料的 pH 值低与硫元素在土壤中氧化形成亚硫酸根或硫酸根有关, 硫元素在土壤还原作用条件下会形成硫化氢, 进一步形成亚硫酸根或硫酸根导致土壤酸化。

尿素施入土壤后, 在脲酶的作用下, 经由氨基甲酸水解成  $\text{NH}_3$ , 再经质子化转变为  $\text{NH}_4^+$ , 进而氧化为  $\text{NO}_3^-$ -N 可被土壤吸附固定、作物吸收利用和土壤生物固持 (李东坡等, 2004; Farmaha *et al.*, 2013) 且  $\text{NH}_4^+$ -N 和  $\text{NO}_3^-$ -N 含量的高低在一定程度上反应土壤氮素养分供给状况。施用包膜肥料  $\text{NH}_4^+$ -N 和  $\text{NO}_3^-$ -N 含量高说明长期施用包膜尿素肥料能够显著提高土壤中  $\text{NH}_4^+$ -N 和  $\text{NO}_3^-$ -N 含量, 而施用不同生化抑制剂或其组合尿素肥料土壤中  $\text{NH}_4^+$ -N 和  $\text{NO}_3^-$ -N 含量没有显著增加, 这主要是包膜尿素肥料膜的控制作用, 使得包膜尿素肥料中的尿素持续释放与转化, 形成了土壤中相对高的  $\text{NH}_4^+$ -N 和  $\text{NO}_3^-$ -N 含量。

持续施用添加脲酶抑制剂 HQ 和 NBPT 尿素肥料, 土壤脲酶活性显著高于施用普通尿素肥料, 主要是供试土壤样品为在连续施用不同肥料 6 a 后的下一个春季施肥之前, 并经过一个冬季后采集的样品, 脲酶抑制剂已经降解, 从而失去了对土壤脲酶的抑制作用, 尽管氢醌在土壤中降解慢, 比较稳定, 但在持续多年施用添加 HQ 这种肥料的土壤中, 对脲酶的抑制作用并没有体现出它的持续效应; 连续多年施用脲酶抑制剂肥料, 对土壤有机氮的积累可能有显著的促进作用, 因而对土壤脲酶有激发效应, 促进脲酶的产生; 持续施用添加硝化抑制剂 DCD 和 DMPP 尿素肥料, 脲酶活性显著低于施用普通尿素肥料, 说明持续施用硝化抑制剂对脲酶的产生有抑制作用。持续施用添加脲酶抑制剂和硝化抑制剂的尿素肥料, HQ+DCD+U 尿素肥料的脲酶活性显著高于 NBPT+DMPP+U 尿素肥料, 说明添加 DCD 对土壤脲酶活性的激发作用更强, 而 NBPT 和 DMPP 持续配合施用则对土壤脲酶活性的抑制作用更强。持续施用 SCU 尿素肥料, 土壤中积累的硫元素含量较高, 而其他处理中无硫元素的输入, 硫在土壤中的氧化形成亚硫酸根或硫酸根, 如果产生还原作用会导致土壤硫化氢的形成, 较高浓度的亚硫酸根或硫酸根会使土壤酸化和板结, 硫化氢对土壤的微生物活性和土壤脲酶活性产生抑制或毒害作用, 亚硫酸根或硫酸根、硫化氢都会使得土壤中脲酶活性显著低于施用普通尿素肥料。包膜能够很好的控制尿素释放速率, 进而控制尿素水解速度与过程, 使土壤中长时间有尿素存在, 即土壤中脲酶作用底物持续保持相对较高的浓度, 导致持续施入 PCU 肥料土壤中脲



酶活性较高,脲酶保持相对较高活性的时间较长。

硝化作用潜势是土壤处于最优底物、水分、通气等条件时的硝化作用速率(白雪等,2012),因此土壤的硝化作用潜势高低可以反应施用不同肥料土壤的硝化作用能力。持续施用 NBPT+DMPP+U 和 HQ+DCD+U 尿素肥料土壤硝化作用潜势较高,说明连续 6 a 在脲酶抑制剂和硝化抑制剂的共同作用下,虽然施入后短时间内尿素的水解以及氨氧化过程受到了抑制,但是随着每年尿素肥料的连续施入,土壤中与氨氧化相关的微生物的自身调节作用和适应微生态环境能力的增强,反而使与土壤氨氧化功能密切相关的微生物活性和数量有所增加,也就是说由于微生物或酶的作用底物-氮肥浓度的持续稳定的作用,使土壤中产生氨氧化酶的相关微生物数量增加。持续施用 2 种包膜肥料土壤硝化作用潜势较高的原因是尿素氮肥的缓慢释放使氨氧化相关的微生物可利用的土壤氮底物在相当长的时间内保持较高的含量,而且这 2 种肥料的铵态氮和硝态氮含量较高也说明了这一点,再加上肥料中没有生化抑制剂的抑制作用,促进了相关微生物的繁殖与氨氧化酶的大量产生,进而使土壤的硝化作用潜势增高。HQ+U、NBPT+U、DCD+U 和 DMPP+U 处理的硝化作用潜势在  $0.31 \sim 0.39 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1} \cdot 5 \text{ h}^{-1}$ ,连续 6 a 施用这几种生化抑制剂肥料土壤硝化作用潜势总的趋势是比施用普通尿素高。另外,从添加生化抑制剂种类分析表明,施用添加脲酶抑制剂和硝化抑制剂配合尿素肥料土壤硝酸作用潜势显著高于施用添加单一生化抑制剂尿素肥料,而且 NBPT 和 DMPP 配施的硝化作用潜势高于 HQ 和 DCD 配施。

土壤硝酸还原酶是硝酸盐还原为亚硝酸盐过程中一种重要的土壤酶。在嫌气条件下,其催化反硝化作用将硝酸盐还原为亚硝酸盐;而在好气条件下硝酸还原酶则催化硝酸盐还原为亚硝酸盐,但不一定与反硝化作用有直接或重要的关系。持续施用 HQ+U 尿素肥料硝酸还原酶活性高于施用普通尿素主要是由于脲酶抑制剂 HQ 的有效抑制作用时间较长,使得尿素水解相对较慢,从而可以使  $\text{NO}_3^-$  在较长时间内在土壤中保持较高的含量,使硝酸还原酶作用底物相对较多,活性较高,施用普通尿素肥料,由于没有脲酶的作用,水解较快,土壤中硝态氮流失较快,含量较低,使得硝酸还原酶作用底物较少,活性较低。持续施用 DMPP+U 尿素肥料土壤硝酸还原酶活性高于施用普通尿素,说明 DMPP 在抑制氨

氧化的同时,对土壤硝酸还原酶有激活作用。NBPT+DMPP+U 和 HQ+DCD+U 的处理硝酸还原酶活性很高,一方面说明了脲酶抑制剂 NBPT 和硝化抑制剂 DMPP 的协同作用,能够很好地控制尿素的水解以及铵态氮氧化的过程,使得硝酸还原酶作用底物在土壤中能够在较长时间内保持相对较高的浓度,进而保持土壤硝酸还原酶活性较高,另一方面说明两者的配合施用对硝酸还原酶活性有激活作用(李东坡等,2006)。持续施用 PCU 肥料土壤硝酸还原酶活性最高,原因是 PCU 肥料能够较好地控制尿素的释放,尿素连续分解产生的  $\text{NO}_3^-$  在满足作物生长期的需肥量的同时,存留于土壤中一定的量,使得硝酸还原酶作用底物在土壤中能够保持相对较长的时间和较高的浓度,刺激硝酸还原酶的产生和活化,使  $\text{NO}_3^-$  向  $\text{NO}_2^-$  转化。SCU 与 NBPT+U、DMPP+U 硝酸还原酶活性无显著差异且较低,说明 SCU 对尿素转化为铵态氮和硝态氮以及较少硝态氮流失的控释效果与 NBPT+U、DMPP+U 相当,同时也不排除肥料中硫的氧化与还原产物对硝酸还原酶活性降低的影响,也说明了 SCU 肥料的控释效果不如 PCU 肥料。持续施用 DCD+U 硝酸还原酶活性与施用普通尿素肥料土壤硝酸还原酶活性差异不显著,主要是 DCD 有效作用时间与半衰期较短,到第 2 年春天土壤中所含硝酸还原酶作用底物较少,说明连续施用 DCD+U 肥料与普通尿素肥料一样,对硝酸还原酶活性影响不大。

连续 6 a 施用缓/控释尿素肥料后,除 DCD+U 肥料外,土壤硝酸还原酶活性都高于施用普通尿素肥料,其共同原因在于缓/控释尿素肥料的施用为硝酸还原酶的酶促反应创造了最适的 pH 条件。研究表明,硝酸还原酶最适 pH 为 7,本试验供试土壤的 pH 为 5 左右,尿素水解后会使得土壤 pH 升高,而由于受到抑制剂或者膜材料的抑制作用使其水解速度变慢,使其 pH 值可能更接近于硝酸还原酶最适值;而施用普通尿素会使土壤的 pH 值在短时间内迅速升高,其值可能高于硝酸还原酶最适 pH,从而影响该酶活性。

土壤微生物通过自身的新陈代谢参与土壤物质与养分循环,与此同时微生物本身含有的一定数量的氮被认为是土壤有效养分储备库(宋秋华等,2003)。土壤微生物生物量氮受土壤本身氮素形态与肥力高低以及施肥情况的影响(李东坡等,2004)。连续 6 a 施用包膜尿素棕壤微生物生物量

氮很高,说明包膜尿素肥料的氮素缓慢释放使土壤中可利用的氮长期保持在一定范围内,既有利于植物的吸收又有利于微生物对氮的固定,持续施用后,使土壤中长期且稳定地保持一定量或浓度的利于微生物固持的氮素形态,致使土壤微生物生物量氮较高。持续施用 HQ+U 和 HQ+DCD+U 尿素土壤微生物生物量氮显著低于施用普通尿素肥料,可能是由于氢醌本身的毒性在连续施用后对相关的微生物,特别是土壤固氮微生物活性产生抑制或毒害所致。持续施用 NBPT+U 尿素肥料土壤微生物生物量氮与施用普通尿素基本一致,这与脲酶抑制剂 NBPT 的作用时间相对较短有一定的关系(雋英华等,2007),脲酶抑制剂 NBPT 在棕壤中的半衰期大约为 7 d。持续施用添加硝化抑制剂 DCD 尿素肥料后,土壤微生物生物量氮与施用普通尿素无显著差异,可能是由于施用硝化抑制剂 DCD 能使土壤中  $\text{NH}_4^+$  长期维持在较高水平上,而土壤微生物对 N 的固持利用  $\text{NH}_4^+$  优于  $\text{NO}_3^-$ ,有利于微生物对氮的固持(焦晓光,2004),而 DCD 的重复施用,形成微生态区,其本身降解速率加快,从而使持续施用 NBPT+U 尿素肥料对微生物生物量氮的贡献效果减弱(Rajbanshi *et al.*, 1992),致使持续 6 a 施用 2 种肥料的微生物生物量氮差异不显著。持续 6 a 施用 DMPP+U 尿素肥料微生物生物量氮略低于施用普通尿素,与持续施用 DMPP+U 尿素氮肥,使土壤本身的氮含量减少(Gioacchini *et al.*, 2002)和 DMPP 尿素的持续施入对土壤微生态环境产生一定影响,使得土壤中 C/N 高的微生物种群成为优势种群有关,导致棕壤微生物生物量氮较低。持续施用 NBPT+DMPP+U 尿素肥料土壤微生物生物量氮与施用普通尿素差异不显著,可能受肥料的协同作用使土壤微生物数量减少、激发效应以及微生物固持的氮素部分转化成稳定的有机氮的共同作用影响,使土壤中的全氮增加,而微生物生物量氮却降低。

土壤微生物生物量碳是土壤有效碳的重要来源,其含量在一定程度上可表示土壤对速效养分的固持和有效化能力,是评价土壤养分有效性和土壤微生物状况随环境变化的敏感指标(Zelles *et al.*, 1999; 卜洪震等,2010)。持续施用 DCD+U、DMPP+U、HQ+DCD+U 和 NBPT+DMPP+U 肥料土壤微生物生物量碳高与尿素与硝化抑制剂的配合施用有关。化肥的均衡施用能够增加植物生物量,促进植物的光合作用,使从地上转入地下的营养物质增加,从而

促进根系分泌物的释放,增加根系残茬的还田量,多年持续积累于土壤中的碳量不断增多,创造了有利于微生物繁殖与生存的土壤微生态环境(徐明岗等,2006; 芦思佳和韩晓增,2011),另外添加硝化抑制剂使土壤中含有大量的  $\text{NH}_4^+$ ,使土壤中 C/N 更有利于促进微生物的生长繁殖,微生物数量增加,进而使微生物生物量碳增加。持续施用 HQ+DCD+U 和 NBPT+DMPP+U 肥料土壤微生物生物量碳相对 DCD+U 和 DMPP+U 肥料低,一方面是脲酶抑制剂与硝化抑制剂的连续配合施用对微生物生长繁殖的抑制作用大于单一连续施用硝化抑制剂,另一方面,脲酶抑制剂的存在会延缓土壤铵态氮含量或浓度的增加,这也在一定程度上抑制了微生物的繁殖与生长,从而减少了土壤中微生物生物量碳。持续施用 HQ+U 肥料棕壤微生物生物量碳在作物生长的前期由于脲酶的抑制作用,用于微生物生长繁殖的  $\text{NH}_4^+$  相对于较少,而肥料的激发效用,作物生长后期大量的微生物分解为作物提供养分,导致土壤微生物数量减少,微生物生物量碳降低。持续施用 SCU 和 PCU 尿素土壤微生物生物量碳较低,而其土壤微生物生物量氮显著高于其他肥料,说明持续施用包膜尿素肥料的棕壤中形成以 C/N 较低的微生物为主要群落组成。

#### 4 结 论

在潮棕壤上连续 6 a 施用缓/控释尿素肥料种植玉米后,土壤有机质、全氮、全磷、全钾、碱解氮、有效磷、速效钾含量均显著增加,全钾、碱解氮含量和 pH 值则下降。其中,施用缓/控释尿素肥料土壤有机质、有效磷、全钾、速效钾的含量比施用普通尿素的低,而全氮含量正好相反;持续施用缓/控释尿素可以减缓土壤 pH 的下降,其中,添加抑制剂的尿素肥料的 pH 显著高于包膜尿素肥料的 pH。施用包膜尿素肥料土壤  $\text{NH}_4^+$  和  $\text{NO}_3^-$  含量高于其他肥料。

连续 6 a 施用不同种缓/控释尿素肥料后,与氮转化密切相关的土壤酶活的变化较大。连续施用添加 HQ 和 NBPT 的尿素肥料对土壤脲酶有激活作用,而持续施用添加 DCD 和 DMPP 的尿素肥料对土壤脲酶有抑制作用;连续施用缓/控释尿素肥料对土壤的硝化作用潜势有激活作用,尤其是脲酶抑制剂和硝化抑制剂配合施用的协同作用以及包膜尿素的激活作用更强。连续施用添加生化抑制剂尿素肥料与施用普通尿素肥料棕壤中微生物生物量氮变化基



本相同,持续施用添加硝化抑制剂尿素肥料显著增加了棕壤中微生物生物量碳,但持续施用 SCU 和 PCU 尿素肥料对棕壤中微生物生物量碳影响不大。综合分析表明,持续 6 a 施用 NBPT+DMPP+U 和 PCU 肥料,土壤生物活性高于其他尿素肥料处理,但考虑到肥料的成本和经济效应,应首选缓释尿素肥料(稳定性尿素肥料),而非包膜尿素肥料,NBPT 和 DMPP 配施的尿素肥料更适于潮棕壤上连续施用。

## 参考文献

白雪,夏宗伟,郭彦玲,等. 2012. 硝化抑制剂对不同旱地农田土壤  $N_2O$  排放的影响. 生态学杂志, **31**(9): 2319–2329.

卜洪震,王丽宏,尤金成,等. 2010. 长期施肥管理对红壤稻田土壤微生物量碳和微生物多样性的影响. 中国农业科学, **43**(16): 3340–3347.

陈国潮. 1999. 土壤微生物量测定方法现状及其在红壤上的应用. 土壤通报, **30**(6): 284–287.

陈振华,陈利军,武志杰. 2005. 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, **16**(2): 238–242.

顾益初,钦绳武. 1997. 长期施和磷肥条件下潮土中磷素的积累、形态转化和有效性. 土壤, **29**(1): 13–17.

黄昌勇. 2000. 土壤学. 北京: 中国农业出版社.

焦晓光,梁文举,陈利军,等. 2004. 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, **15**(10): 1903–1906.

焦晓光,魏丹,隋跃宇,等. 2011. 长期施肥对黑土和暗棕壤土壤酶活性及土壤养分的影响. 土壤通报, **42**(3): 698–703.

隗英华,陈利军,武志杰,等. 2007. 脲酶/硝化抑制剂在土壤 N 转化过程中的作用. 土壤通报, **38**(4): 773–780.

李晨华,贾仲君,唐立松,等. 2012. 不同施肥模式对绿洲农田土壤微生物群落丰度与酶活性的影响. 土壤学报, **49**(3): 567–574.

李东坡,陈利军,武志杰. 2004. 不同施肥黑土微生物量氮变化特征及相关因素. 应用生态学报, **15**(10): 1891–1896.

李东坡,武志杰,陈利军,等. 2006. 施用缓/控释尿素对玉米苗期土壤生物学活性的影响. 应用生态学报, **17**(6): 1055–1059.

刘杏兰,高宗. 1996. 有机-无机肥配施的增产效应及对土壤肥力影响的定位研究. 土壤学报, **33**(2): 138–147.

芦思佳,韩晓增. 2011. 长期施肥对微生物量碳的影响. 土壤通报, **42**(6): 1355–1358.

倪秀菊,李玉中,徐春英,等. 2009. 土壤脲酶抑制剂和硝化抑制剂的研究进展. 中国农学通报, **25**(12): 145–149.

戚瑞生,党廷辉,杨绍琼,等. 2012. 长期轮作与施肥对农

田土壤磷素形态和吸持特性的影响. 土壤学报, **49**(6): 1136–1146.

宋秋华,李凤民,刘洪升,等. 2003. 黄土地膜覆盖对麦田土壤微生物体碳的影响. 应用生态学报, **14**(9): 1512–1516.

武志杰,李东坡. 2006. 新型包膜肥料研制及其控释效果. 第六届全国绿色环保肥料新技术、新产品交流会: 98–106.

徐明岗,梁国庆,张夫道. 2006a. 中国土壤肥力演变. 北京: 中国农业科学技术出版社.

徐明岗,于荣,孙小凤,等. 2006b. 长期施肥对我国典型土壤活性有机质及碳库管理指数的影响. 植物营养与肥料学报, **12**(4): 459–465.

张璐,张文菊,徐明岗,等. 2009. 长期施肥对中国 3 种典型农田土壤活性有机碳库变化的影响. 中国农业科学, **42**(5): 1646–1655.

张丽莉,陈利军,武志杰,等. 2008. 长期施肥对棕壤氧化还原酶活性和动力学特征的影响. 土壤通报, **39**(4): 845–848.

张玉兰,陈振华,马星竹,等. 2008. 潮棕壤稻田不同氮磷肥配施对土壤酶活性及生产力的影响. 土壤通报, **39**(3): 518–523.

周建斌,李生秀. 1998. 碱性过硫酸钾氧化法测定溶液中全氮含量氧化剂的选择. 植物营养与肥料学报, **4**(3): 299–304.

周卫军,陈建国,谭周进,等. 2010. 不同施肥对退化稻田土壤肥力恢复的影响. 生态学杂志, **29**(1): 29–35.

Bandick AK, Dick RP. 1999. Field management effects on soil enzyme activities. *Soil Biology and Biochemistry*, **31**: 1471–1479.

Cookson WR, Cornforth IS. 2002. Dicyandiamide slows nitrification in dairy cattle urine patches: Effects on soil solution composition, soil pH and pasture yield. *Soil Biology and Biochemistry*, **34**: 1461–1465.

Doran JW, Zeiss MR. 2000. Soil health and sustainability: Managing the biotic component of soil quality. *Applied Soil Ecology*, **15**: 3–11.

Farmaha BS, Sims AL. 2013. The influence of polymer-coated urea and urea fertilizer mixtures on spring wheat protein concentrations and economic returns. *Soil Fertility & Crop Nutrition*, **105**: 1328–1334.

Gioacchini P, Natri A, Marzadori C. 2002. Influence of urease and nitrification inhibitors on N losses from soils fertilized with urea. *Biology and Fertility of Soils*, **36**: 129–135.

Glendinning MJ, Powlson DS, Poulton PR, et al. 1996. The effects of long-term applications of inorganic nitrogen fertilizer on soil nitrogen in the Broadbalk wheat experiment. *Journal of Agricultural Science*, **127**: 347–363.

Hart SC, Stark JM, Davidson EA, et al. 1994. Nitrogen mineralization, immobilization, and nitrification. *Methods of Soil Analysis: Part 2—Microbiological and Biochemical Properties*: 985–1018.

Kandeler E, Eder G, Sobotik M. 1994. Microbial biomass, N mineralization and the activities of various enzymes in rela-

- tion to nitrate leaching and root distribution in a slurry-amended grassland. *Biology and Fertility of Soils*, **18**: 7–12.
- Rajbanshi S, Benckiser G, Ottow JCG. 1992. Effects of concentration, incubation temperature, and repeated applications on degradation kinetics of dicyandiamide (DCD) in model experiments with a silt loam soil. *Biology and Fertility of Soils*, **13**: 61–64.
- Shaviv A, Mikkelsen R. 1993. Controlled-release fertilizers to increase efficiency of nutrient use and minimize environmental degradation: A review. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, **35**: 1–12.
- Soares JR, Cantarella H, Menegale MLC, *et al.* 2012. Ammonia volatilization losses from surface-applied urea with urease and nitrification inhibitors. *Soil Biology and Biochemistry*, **52**: 82–89.
- Tabatabai MA. 1994. Soil enzymes// Weaver RW, Angle JR, Bottomley PS, eds. *Methods of Soil Analysis: Microbiological and Biochemical Properties*. Part 2. Wisconsin: Soil Science Society of America, Inc: 797–801.
- Ye Y, Liang X, Chen Y, *et al.* 2013. Alternate wetting and drying irrigation and controlled-release nitrogen fertilizer in late-season rice: Effects on dry matter accumulation, yield, water and nitrogen use. *Field Crops Research*, **144**: 212–224.
- Zelles L. 1999. Fatty acid patterns of phospholipids and lipopolysaccharides in the characterisation of microbial communities in soil: A review. *Biology and Fertility of Soils*, **29**: 111–129.
- Zerulla W, Barth T, Dressel J, *et al.* 2001. 3,4-Dimethylpyrazole phosphate (DMPP): A new nitrification inhibitor for agriculture and horticulture. *Biology and Fertility of Soils*, **34**: 79–84.
- 
- 作者简介** 丁济娜,女,1987年生,硕士研究生,主要从事植物营养与土壤肥力研究。E-mail: dingjina1217@126.com
- 责任编辑** 李凤芹
-