

# 稀土对玉米根际土壤 N 形态分布及生物有效性的影响

徐星凯<sup>1</sup>, 王子健<sup>2</sup>

(1.中国科学院大气物理研究所 LAPC 室, 北京 100029; 2.中国科学院生态环境研究中心, 北京 100085)

**摘要:**以潮土为例,采用混合氯化稀土和氯化镧,利用根袋法进行盆栽试验,探讨稀土对玉米根际土壤 N 形态分布及生物有效性的影响。无论是氯化镧或混合氯化稀土,随施用量增加,根际与非根际土壤铵态 N、硝态和亚硝态 N 量均显著降低;根际土壤铵态 N、硝态和亚硝态 N 量高于非根际的差异显著削弱。这与根际和非根际土壤脲酶活性和 N 净矿化量相一致。在高剂量混合稀土或镧(>10 mg·kg<sup>-1</sup> 风干土)作用时,根际与非根际土壤中有机 N 矿化量和有效矿质 N 量显著降低。玉米根系和地上部分 N 累积量均随稀土剂量增加而降低。在稀土对土壤有效矿质 N、脲酶活性和有机 N 矿化以及植株 N 吸收的影响方面,混合稀土和镧具有相似性。

**关键词:**稀土元素; 根际; 无机氮; 有机氮矿化; 脲酶; 玉米; 氮素吸收

**中图分类号:**S143.7      **文献标识码:**A      **文章编号:**1672-2043(2005)06-1104-05

## Effect of Rare Earth Elements on the Distribution of N Forms in the Rhizosphere Soil and N Uptake by Maize Plant

XU Xing-kai<sup>1</sup>, WANG Zi-jian<sup>2</sup>

(1. LAPC, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China; 2. Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China)

**Abstract:** Pot experiments were carried out to study the effect of lanthanum and mixtures of rare earths(RES) on the distribution of N forms in the rhizosphere soil and N uptake by maize plant. When adding lanthanum (LaCl<sub>3</sub>) and mixtures of REs chlorides to the soil (luvisol), NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N and (NO<sub>3</sub><sup>-</sup>+NO<sub>2</sub><sup>-</sup>)-N concentrations reduced significantly in the maize rhizosphere and bulk soil, and this reduction increased with the increasing amount of RE(s) application. The concentration difference of either N form in the rhizosphere and bulk soil decreased with the increasing amount of RE(s) application, which corresponded with the change of urease activity and net mineralization of N in the rhizosphere and bulk soil treated with La alone and with mixtures of REs. At dosages more than 10 mg·kg<sup>-1</sup> dry soil, the net N mineralization, the concentrations of NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N and (NO<sub>3</sub><sup>-</sup>+NO<sub>2</sub><sup>-</sup>)-N reduced significantly in the rhizosphere and bulk soil. N concentrations in the roots and shoots of maize both decreased with the increasing amount of La alone and mixtures of REs. It could be concluded that REs in the mixtures and La alone showed similar effects on the distribution of mineral N forms, net N mineralization and urease activity in the soil as well as on N uptake by plant.

**Keywords:** rare earth elements; rhizosphere; mineral N; mineralization; urease activity; maize; N uptake

与重金属相似<sup>[1-3]</sup>,高剂量稀土可抑制土壤铵态 N 氧化和有机 N 矿化<sup>[4]</sup>,同时也会抑制土壤脲酶活性<sup>[5]</sup>,

从而影响尿素水解及其产物的行为<sup>[6]</sup>。尽管如此,很少涉及稀土对根际 N 行为的作用,况且根际土壤中的 N 直接关系植物 N 的吸收。目前稀土微肥主要以土施为主。因此,研究稀土对根际 N 形态分布、转化及其有效性的影响,将有利于评价农用稀土对农田土壤 N 行为的作用,结合植株稀土和重金属含量的变化<sup>[7,8]</sup>,可为农用稀土安全性提供依据。

收稿日期:2005-03-02

基金项目:国家自然科学基金重大项目(29890280);中国科学院引进国外杰出人才项目

作者简介:徐星凯(1969—),男,研究员,博士,从事陆地碳氮行为和重金属环境化学的研究。E-mail:xingkai\_xu@yahoo.com.cn

本文利用根袋法进行盆栽试验,采用氯化镧和混合氯化稀土,研究不同剂量下根际内外土壤矿质 N、总 N、脲酶活性、有机 N 矿化和植株 N 含量,并比较单一稀土和混合稀土的差异。

## 1 材料与方法

### 1.1 土壤采集和保存

供试土壤采自北京市北郊昌平农业基地旱田表层(0~20 cm),属主要农业区平原潮土,按常规方法<sup>[9]</sup>测定主要土壤属性并列于文献[6]。室内自然风干鲜土,混匀、磨碎过 1 mm 筛备用。

### 1.2 混合氯化稀土和氯化镧溶液配置

混合稀土由中国稀土农用中心提供,商品名“常乐”,主要由轻稀土组成的硝酸稀土。根据文献[8]程序去除混合物中硝态氮,制备混合氯化稀土溶液;由氧化镧制备氯化镧溶液<sup>[8]</sup>。

### 1.3 根际试验布置及样品采集

将混合稀土和镧储备液稀释成含不同浓度的系列溶液,并调节 pH 为 5.5。按稀土剂量为 1、5、10、50 和 100 mg·kg<sup>-1</sup> 风干土,分别加入同体积稀土溶液于 1.5 kg 土壤,拌匀后装入盆中;以添加同体积的去离子水作对照。采用根袋法(尼龙网纤维直径 15 μm)区分根际与非根际土壤,每盆装土 2.5 kg,其中根袋内 500 g;每盆施加 0.5 gKH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub> 和 1.0 g 尿素为基肥。其他培养和管理条件见文献[8]。生长 45 d 后,收割植株分茎叶和根系。将根袋内土壤分离,同时采集根袋外(非根际)土壤,过 2 mm 筛后部分样品贮于 4℃,准备用于有机 N 矿化培养和有效 N 测定,另一部分风干、磨碎测定总 N 量。采集后的植株样品按文献[8]方法处理后,粉碎、过筛待测。

### 1.4 土壤有机 N 矿化培养

根据 Polglase 等<sup>[10]</sup>,采用好气培养测定土壤有机 N 矿化潜势。取新鲜土 25.0 g,调节土壤含水量 25%,加塞后 37℃ 下培养。每隔 2 d 给样品通气,调节含水量 25%。20 d 后测定土壤中矿质 N 量<sup>[9]</sup>。根据培养前后土壤矿质 N 量的变化,计算培养 20 d 后土壤已矿化的 N 量。

### 1.5 土壤和植株 N 含量及土壤脲酶活性测定

按常规方法测定土壤铵态 N、硝态和亚硝态 N 量,HClO<sub>4</sub>-H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 消化土壤和植株样品,蒸馏法测定消化液总 N 量<sup>[9]</sup>。在郑洪元等<sup>[11]</sup>基础上进行改进,测定土壤脲酶活性。取 5.0 g 风干土于 100 mL 塑料瓶中,加 1 mL 甲苯,15 min 后加入 10 mL(pH6.7)磷酸缓冲

液和 10 mL 尿素溶液(10%),混匀后置于 37℃ 恒温箱中培养 24 h。培养结束后按常规方法浸提土壤,靛酚蓝比色法<sup>[9]</sup>测滤液中铵态 N 量。土壤脲酶活性用 1 g 烘干土,37℃ 时培养 24 h 释放出 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 毫克数表示。

## 1.6 数据处理与分析

以烘干土壤/植株为基准,计算平均数和标准差。利用 SATISTICA 统计软件(4.5 版本)进行平均数显著性检验,可信度为 95%。

## 2 结果与讨论

### 2.1 稀土对根际和非根际土壤 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N、(NO<sub>3</sub><sup>-</sup>+NO<sub>2</sub><sup>-</sup>)-N 的影响

混合稀土和镧施加后玉米根际和非根际土壤 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 和 (NO<sub>3</sub><sup>-</sup>+NO<sub>2</sub><sup>-</sup>)-N 含量如图 1 和图 2 所示。随混合稀土剂量增加,根际和非根际土壤 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 和 (NO<sub>3</sub><sup>-</sup>+NO<sub>2</sub><sup>-</sup>)-N 含量逐渐降低;当施用量增至 5mg·kg<sup>-1</sup> 时,与对照相比差异均达显著水平( $P<0.05$ )。所有处理根际土壤中 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 和 (NO<sub>3</sub><sup>-</sup>+NO<sub>2</sub><sup>-</sup>)-N 含量均高于非根际;随混合稀土剂量增加,根际与非根际土壤中 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 和 (NO<sub>3</sub><sup>-</sup>+NO<sub>2</sub><sup>-</sup>)-N 含量的差异呈减小趋势。经  $t$  检验,当混合稀土剂量增至 100 mg·kg<sup>-1</sup> 时,根际两种 N 形态的富集效应均显著减弱( $P<0.05$ )。

施氯化镧时所得结果与混合氯化稀土的处理相似。随镧施用量增加,根际与非根际土壤 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 和 (NO<sub>3</sub><sup>-</sup>+NO<sub>2</sub><sup>-</sup>)-N 含量呈降低趋势;在镧剂量为 1 mg·kg<sup>-1</sup> 时,与对照相比,根际与非根际土壤 2 种 N 形态含量

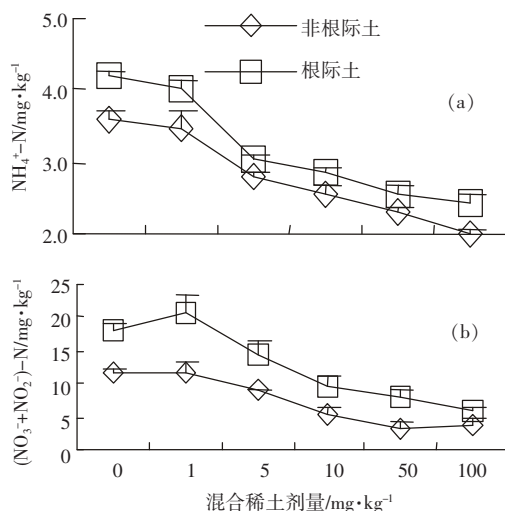


图 1 施混合稀土土壤 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N (a)和(NO<sub>3</sub><sup>-</sup>+NO<sub>2</sub><sup>-</sup>)-N (b)含量  
Figure 1 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N (a) and (NO<sub>3</sub><sup>-</sup>+NO<sub>2</sub><sup>-</sup>)-N (b) contents in the soils treated with mixtures of rare earths

均显著性降低( $P<0.05$ )。为此,根际和非根际 2 种 N 形态含量出现显著降低时镧施用剂量可能低于混合稀土处理。在单施镧处理中,随剂量增加,根际土壤中  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  和  $(\text{NO}_3^-+\text{NO}_2^-)\text{-N}$  含量降低程度明显高于非根际。这有别于混合稀土处理。在所有处理中根际土壤  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  和  $(\text{NO}_3^-+\text{NO}_2^-)\text{-N}$  含量均高于非根际;与混合稀土处理相似,随镧剂量增加,根际与非根际两种 N 形态含量的差异减小,  $t$  检验显示镧剂量增至  $50\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  时,玉米根际 2 种 N 形态的富集效应显著减弱( $P<0.05$ )。

随混合稀土或镧施用量增加,根际与非根际土壤  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  硝化率呈降低趋势,同时根际土壤  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  氧化作用较非根际强,见表 1。有报道表明,在耕作土壤中活根能刺激硝化作用<sup>[12]</sup>。由于铵氧化细菌数量与根生物量有正相关性,导致根层中铵的潜在氧化作用增强<sup>[13]</sup>。混合稀土或镧对土壤铵态 N 氧化的抑制效应,非根际比根际土壤更明显(表 1)。外源稀土对根系

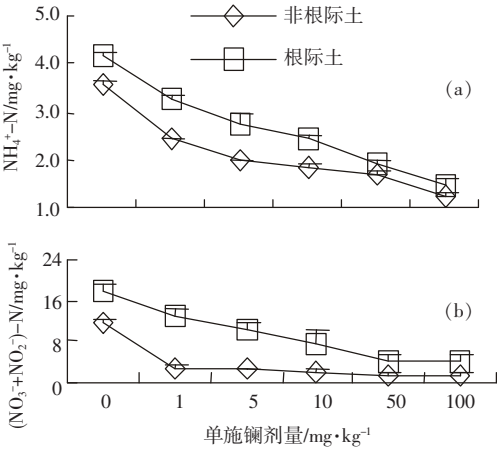


图 2 单施镧土壤  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  (a)和 $(\text{NO}_3^-+\text{NO}_2^-)\text{-N}$  (b)含量  
Figure 2  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  (a) and  $(\text{NO}_3^-+\text{NO}_2^-)\text{-N}$  (b) contents in the soils treated with La alone

生长以及根际微生物的影响,可引起高剂量时 2 种 N 形态在根际的效应显著降低。

表 1 稀土施加后土壤铵态 N 硝化率(%)

| 稀土剂量<br>/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ | 混合氯化稀土                 |                         | 氯化镧                     |                         |
|------------------------------------------|------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|
|                                          | 非根际土壤                  | 根际土壤                    | 非根际土壤                   | 根际土壤                    |
| 0                                        | $76.54\pm0.92\text{a}$ | $81.13\pm1.55\text{a}$  | $76.54\pm0.92\text{a}$  | $81.13\pm1.55\text{a}$  |
| 1                                        | $77.78\pm2.00\text{a}$ | $83.87\pm1.35\text{a}$  | $55.01\pm5.85\text{b}$  | $79.67\pm1.24\text{a}$  |
| 5                                        | $76.77\pm0.64\text{a}$ | $82.49\pm2.24\text{a}$  | $57.24\pm3.90\text{b}$  | $79.23\pm3.67\text{a}$  |
| 10                                       | $67.71\pm4.39\text{b}$ | $76.46\pm4.55\text{ab}$ | $50.53\pm4.76\text{bc}$ | $74.29\pm6.54\text{ab}$ |
| 50                                       | $59.37\pm5.05\text{b}$ | $76.75\pm1.49\text{ab}$ | $47.02\pm5.29\text{bc}$ | $68.66\pm5.64\text{b}$  |
| 100                                      | $65.05\pm6.18\text{b}$ | $71.05\pm0.68\text{b}$  | $42.69\pm3.31\text{c}$  | $65.87\pm3.39\text{b}$  |

注:表中数据为平均值±标准差,同列中跟不同字母的平均数差异达显著水平( $P<0.05$ ),下同。

2.2 稀土对根际与非根际土壤有机 N 矿化的影响

重金属污染时土壤有机 N 矿化与污染水平呈负相关,即使轻度污染时也明显抑制土壤有机 N 矿化<sup>[1,3]</sup>。好气培养后,稀土处理的土壤铵态 N 和有效矿质 N 量的变化量见表 2 和表 3。由矿化培养后铵态 N 和有效矿质 N 量与培养前的差值可计算土壤有机 N 矿化所产生的  $\Delta$ 铵态 N 和  $\Delta$ 有效 N。随混合稀土施用量增加,根际与非根际土壤  $\Delta$ 铵态 N 和  $\Delta$ 有效 N 呈降低趋势,当施用量增至  $10\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  时,根际和非根际土壤  $\Delta$ 铵态 N 较对照显著减少( $P<0.05$ )。根际土壤有机 N 矿化所产生的  $\Delta$ 有效 N 比非根际高,但随混合稀土剂量增加此差异趋减小,当施用量增至  $100\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  时,未见矿化培养后根际内外土壤净有机 N 矿化量存在差异。这可部分解释高剂量稀土作用可使  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  和  $(\text{NO}_3^-+\text{NO}_2^-)\text{-N}$  根际的富集效应显著降低。与

混合稀土相似,随氯化镧施用量增加,根际与非根际土壤  $\Delta$ 铵态 N 和  $\Delta$ 有效 N 呈显著性降低。单施镧时根际和非根际土壤  $\Delta$ 有效 N 的差异明显低于对照,各处理根际内外土壤  $\Delta$ 铵态 N 和  $\Delta$ 有效 N 无明显差异。

2.3 稀土对根际与非根际土壤脲酶活性的影响

图 3 反映了不同剂量稀土施加后根际和非根际土壤脲酶活性的变化。不论单施镧或混合稀土,在施用量为  $1\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  时,玉米根际和非根际土壤脲酶活性均显著高于对照( $P<0.05$ ),随施用量增加呈降低趋势。根际土壤脲酶活性高于非根际,并随施用量增加,与非根际的差异显著减弱( $P<0.05$ )。

$t$  检验显示:当混合稀土和镧施用量分别为 5 和  $10\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  时,玉米根际内外土壤脲酶活性显著低于施用量为  $1\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  时处理。因此,无论单施镧或混合

表 2 混合稀土施加后土壤有机 N 的好气净矿化量(mg·kg<sup>-1</sup>)

Table 2 Net N mineralization in the aerobically incubated soils treated with mixtures of rare earths (mg N·kg<sup>-1</sup>)

| 混合稀土剂量<br>/mg·kg <sup>-1</sup> | 根际土壤        |              | 非根际土壤      |            |
|--------------------------------|-------------|--------------|------------|------------|
|                                | △铵态 N       | △有效 N        | △铵态 N      | △有效 N      |
| 0                              | 2.36±0.37a  | 14.03±5.08a  | 2.47±0.11a | 8.07±1.93a |
| 1                              | 2.38±0.14a  | 10.25±2.76ab | 2.73±0.41a | 7.22±1.25a |
| 5                              | 1.92±0.38ab | 9.73±3.30ab  | 2.18±0.03a | 6.50±0.48a |
| 10                             | 1.36±0.27b  | 7.96±2.73b   | 0.78±0.05b | 6.36±1.11a |
| 50                             | 1.40±0.16b  | 7.29±0.82b   | 0.88±0.01b | 6.88±0.78a |
| 100                            | 0.83±0.04c  | 5.05±1.15b   | 1.01±0.06b | 6.46±1.98a |

表 3 单施镧后土壤有机 N 的好气净矿化量(mg·kg<sup>-1</sup>)

Table 3 Net N mineralization in the aerobically incubated soils treated with La alone (mg N·kg<sup>-1</sup>)

| 单施镧剂量<br>/mg·kg <sup>-1</sup> | 根际土壤        |             | 非根际土壤       |             |
|-------------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
|                               | △铵态 N       | △有效 N       | △铵态 N       | △有效 N       |
| 0                             | 2.36±0.37a  | 14.03±5.08a | 2.47±0.11a  | 8.07±1.93ab |
| 1                             | 1.95±0.20ab | 9.72±1.42ab | 2.02±0.09ab | 10.47±0.41a |
| 5                             | 1.93±0.17ab | 9.21±2.04ab | 1.84±0.12b  | 9.90±1.01ab |
| 10                            | 1.63±0.15b  | 7.88±2.53b  | 1.71±0.11bc | 7.71±0.28b  |
| 50                            | 1.69±0.19b  | 6.63±1.97bc | 1.59±0.08bc | 6.79±1.85b  |
| 100                           | 1.31±0.06c  | 4.21±3.35c  | 1.51±0.01c  | 6.04±2.27b  |

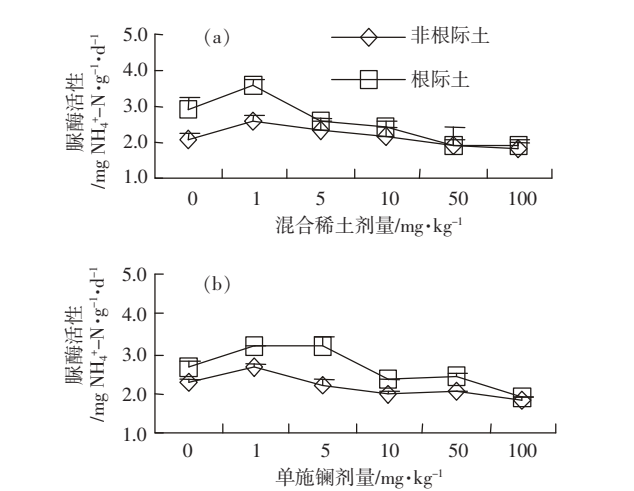


图 3 混合稀土(a)和镧(b)施加后土壤脲酶活性  
Figure 3 Activities of urease in the soils treated with mixtures of rare earths (a) and with La alone (b)

稀土，在剂量小于 1 mg·kg<sup>-1</sup> 时可促进玉米根际内外土壤脲酶活性增加；随施用量增加，根际和非根际土壤脲酶活性显著降低并且根际内外差异显著削弱。

2.4 稀土对苗期玉米 N 吸收的影响

图 4 表明各处理苗期玉米茎叶含 N 量远高于根。随稀土剂量增加，玉米根系和茎、叶中 N 量呈降低趋势。混合稀土剂量在 10 mg·kg<sup>-1</sup> 时，茎叶和根系中 N 含量显著低于对照。然而，在混合稀土剂量为 1 mg·kg<sup>-1</sup> 时，根系和茎、叶中 N 量比对照高，尤其是茎

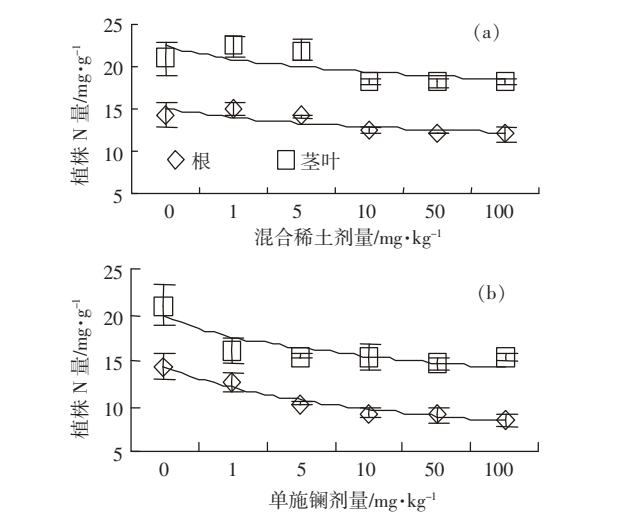


图 4 混合稀土(a)和镧(b)施加后玉米 N 含量  
Figure 4 Total N concentrations in the maize treated with mixtures of rare earths (a) and with La alone (b)

叶。尽管差异不显著，却显示低剂量稀土可利于促进作物生长。在单施镧剂量为 1 mg·kg<sup>-1</sup> 时，茎叶和根系中 N 量均比对照显著降低，并随剂量增加，茎、叶和根系中 N 量呈降低趋势，尤其是根系。施混合稀土的植株总 N 量均高于单施镧的处理，具体原因有待研究。

3 结论

(1)随混合稀土或镧施用量增加，根际与非根际

土壤  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  和  $(\text{NO}_3^- + \text{NO}_2^-)\text{-N}$  含量显著降低, 2 种 N 形态的根际富集效应显著削弱。土壤有机 N 矿化形成的  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  和有效 N 量呈降低趋势, 且根际内外土壤的差异明显削弱; 在高剂量稀土 ( $>10\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ) 作用时, 根际与非根际有机 N 矿化量显著抑制。

(2) 低剂量稀土可增强根际与非根际土壤脲酶活性, 但在高剂量作用时却显著降低, 且脲酶活性根际增加的效应显著削弱。

(3) 在稀土对土壤矿质 N 和植株 N 吸收、脲酶活性及 N 矿化的影响方面, 稀土具有相似性。

参考文献:

[1] Liang C N, Tabataba M A. Effects of trace elements on nitrogen mineralization in soils[J]. *Environ Pollut*, 1977, 12: 141–147.

[2] Liang C N, Tabataba M A. Effects of trace elements on nitrification in soils[J]. *J Environ Qual*, 1978, 7(2): 291–293.

[3] Wilke B M. Long-term effects of different inorganic pollutants on nitrogen transformations in a sandy cambisol[J]. *Biol Fertil Soils*, 1989, 7: 254–258.

[4] Xu X K, Wang Z J. Effects of lanthanum and mixtures of rare earths on ammonium oxidation and mineralization of nitrogen in soil[J]. *Eur J Soil Sci*, 2001, 2:323–329.

[5] 陈自在, 王新民. 稀土对土壤酶活性的影响及其与小麦根际营养的关系[J]. *安徽农学院学报*, 1986, 17–22.

[6] Xu X K, Wang Z J, Wang Y S, et al. Urea hydrolysis and inorganic N in a luvisol after application of fertilizer containing rare-earth elements [J]. *Aust J Soil Res*, 2003, 41:741–748.

[7] Xu X K, Zhu W Z, Wang Z J, et al. Distributions of rare earths and heavy metals in field-grown maize after application of rare earth-containing fertilizer[J]. *Sci Total Environ*, 2002, 293: 97–105.

[8] Xu X K, Zhu W Z, Wang Z J, et al. Accumulation of rare earth elements in maize plants (*Zea mays* L.) after application of mixtures of rare earth elements and lanthanum[J]. *Plant Soil*, 2003, 252: 267–277.

[9] Kim H T. Soil Sampling, Preparation and Analysis[M]. New York: Marcel Dekker, Inc.1995.

[10] Polglase P J, Comerford N B, Jokela E J. Mineralization of nitrogen and phosphorus from soil organic matter in southern pine plantations [J]. *Soil Sci Soc Am J*, 1992, 56: 921–927.

[11] 郑洪元, 张德生. 土壤动态生物化学研究法[M]. 北京: 科学出版社, 1982.

[12] Berg P, Rosswall T. Seasonal variations in abundance and acitivity of nitrifiers in four arable cropping systems[J]. *Microbial Ecol*, 1987, 13: 75–87.

[13] 郭朝晖, 张杨珠, 黄子蔚. 根际微域营养研究发展[J]. *土壤通报*, 1999, 30(1): 46–49.