

## 坡缕石包膜对尿素氮行为的影响\*

刘学周 蔺海明\*\* 王蒂 邱黛玉 金浩 张鹏飞

(甘肃农业大学 兰州 730070)

**摘要** 采用静态吸收和土柱淋溶试验方法,分析对比了3种不同用量坡缕石包膜尿素与普通尿素施入土壤后对尿素氮行为的影响,结果表明:在土壤中施用坡缕石包膜尿素较普通尿素减少10.38%~26.24%的氨挥发损失,减少5.88%~27.74%的氮素( $\text{NO}_3^-$ -N+ $\text{NH}_4^+$ -N)淋溶损失,20%的坡缕石包膜尿素能显著提高土柱土壤 $\text{NH}_4^+$ -N含量,3种坡缕石包膜尿素都能极显著提高土柱土壤 $\text{NO}_3^-$ -N含量。坡缕石包膜后能减少尿素氮的挥发,降低 $\text{NH}_4^+$ -N和 $\text{NO}_3^-$ -N的淋失,提高土壤 $\text{NH}_4^+$ -N和 $\text{NO}_3^-$ -N含量,以20%的坡缕石包膜尿素的综合生态效应最好。

**关键词** 坡缕石 包膜尿素 氮行为 氮淋溶 氮挥发 生态效应

中图分类号:TB321; S143.1 文献标识码:A 文章编号:1671-3990(2009)03-0443-05

## Effect of palygorskite coating on various forms of nitrogen urea

LIU Xue-Zhou, LIN Hai-Ming, WANG Di, QIU Dai-Yu, JIN Hao, ZHANG Peng-Fei

(Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, China)

**Abstract** Static absorption and soil column leaching methods were used to study and analyze the difference of N form between from applied urea coated with three different thicknesses of palygorskite and uncoated urea. The results show that coating urea with palygorskite decreases ammonia volatilization by 10.38%~26.24% compared with uncoated urea. Coating also reduces N ( $\text{NO}_3^-$ -N+ $\text{NH}_4^+$ -N) leaching by 5.88%~27.74%. With 20% palygorskite coating treatment, urea significantly increases the  $\text{NH}_4^+$ -N in column soil. The three different palygorskite coatings lead to a significant increase in  $\text{NO}_3^-$ -N in column soil. Urea coated with palygorskite decreases ammonia volatilization and N ( $\text{NO}_3^-$ -N+ $\text{NH}_4^+$ -N) leaching, increases  $\text{NH}_4^+$ -N and  $\text{NO}_3^-$ -N in the soil. More importantly, palygorskite coating of 20% induces optimal ecological conditions.

**Key words** Palygorskite, Coated urea, Nitrogen form, Nitrogen leaching, Ammonia volatilization, Ecological condition  
(Received Nov. 9, 2008; accepted Jan. 10, 2009)

我国是世界上氮肥施用量最多的国家,2004年我国施氮量占到世界氮肥用量的25%<sup>[1]</sup>,但我国的氮肥利用率较低,约为30%~35%,损失率平均达45%<sup>[2]</sup>。氮肥损失不仅造成能源的极大浪费,还会引发水体富营养化、温室气体排放、大气污染等诸多生态环境问题<sup>[3]</sup>。目前,除改进施肥技术外,开发研制高效增产的新型肥料如添加硝化抑制剂或脲酶抑制剂的氮肥、有机合成氮肥、包膜肥料等也是解决上述问题的有效措施<sup>[4]</sup>。其中包膜控/缓释肥料可使肥料养分在作物生育期内逐渐释放并与作物吸收基本同步,实现养分供应和植物吸收的平衡和协调,

不但减少了化肥损失,提高了肥料利用率,而且减轻了施肥对环境的污染,因此包膜控/缓释肥料的研制和应用已成为国内外研究的热点<sup>[5,6]</sup>。近年来对包膜控/缓释肥料的研究主要集中在新型控/缓释肥料的开发和使用效果方面,而对使用控/缓释肥料后产生的环境效应研究较少<sup>[7-11]</sup>。本试验采用甘肃省储量丰富的生态功能材料坡缕石作为包膜缓释剂,研究其对尿素氮的流失及运移规律的影响。

坡缕石又称凹凸棒石,因其具层、链、纤维状晶体结构和纳米级孔穴通道微观构造而具吸附性、缓释性、分散性、悬浮性和离子强交换性等性质,在

\* 教育部博士点基金项目(200807330006)和国家科技支撑计划项目(2006BAD21B05)资助

\*\* 通讯作者: 蔺海明(1953-),男,研究员,博士生导师,主要从事生态农业的研究。E-mail: linhm@gsau.edu.cn

刘学周(1978-),男,在读博士,主要从事药用植物资源利用与规范化种植的研究。E-mail: lxzh99402001@163.com

收稿日期:2008-11-09 接受日期:2009-01-10

农作物上试验初步表明, 坡缕石可降低农药和重金属残留, 具有节水、改良土壤和缓释肥料的作用, 可提高肥料利用率和作物产量<sup>[12-15]</sup>。目前关于坡缕石控/缓释肥的应用和研究方面的报道甚少, 尤其是其施入土壤后对肥料养分的流失及运移规律的影响尚未见报道。本试验采用静态吸收和土柱淋溶的方法, 研究了坡缕石包膜尿素施入土壤后氨的挥发损失和氮素淋溶态势, 并探讨了坡缕石包膜氮肥氮的形态转化和迁移规律, 不仅为明确坡缕石控/缓释肥料的生态效应, 也为坡缕石控/缓释肥料的研制和在大田中的应用提供科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料

供试肥料为大颗粒尿素(Urea), 含 N 46.4%; 不同包膜厚度的坡缕石包膜尿素(CU)在实验室制作, 包膜厚度采用质量比(即包膜材料占包膜肥总量的百分比)表示, 有 15%、20%和 25% 3 种规格, 分别以 CU1、CU2、CU3 表示。坡缕石(PAL)由甘肃凯迪生态农业科技有限公司提供, 其原料来自甘肃临泽的坡缕石黏土矿。

试验用土壤采自甘肃省陇西县中药材种植示范园, 为黄绵土, pH 7.83, 速效磷 18.35 mg · kg<sup>-1</sup>, 速效钾 185.22 mg · kg<sup>-1</sup>, 全氮 0.98 g · kg<sup>-1</sup>, 碱解氮 40.89 mg · kg<sup>-1</sup>。

### 1.2 试验方法

氨挥发量的测定采用静态吸收法<sup>[4]</sup>: 试验设 5 处理, 分别为单施尿素(Urea)、坡缕石用量 15%的包膜尿素(CU1)、坡缕石用量 20%的包膜尿素(CU2)和坡缕石用量 25%的包膜尿素(CU3), 各处理 N 用量均为 400 mg · kg<sup>-1</sup> (土), 以不施任何材料为空白对照(CK), 每处理 3 次重复。先称取过 2 mm 筛风干土 250 g, 放入大口瓶中, 加入 50 mL 水, 再称取 250 g 土壤与包膜尿素[CU1 用量 1.01 g · kg<sup>-1</sup>(土)、CU2 用量 1.08 g · kg<sup>-1</sup>(土)、CU3 用量 1.15 g · kg<sup>-1</sup>(土)]、尿素[用量 0.86 g · kg<sup>-1</sup>(土)]混匀后放入 3 000 mL 大口瓶中土壤上部, 对照只加土, 然后加入 50 mL 水, 使瓶中土壤含水量保持在 20%, 连续密闭室温培养。取 25 mL 小烧杯装入 2%的硼酸和定氮指示剂溶液 10 mL 放在瓶中土壤上吸收挥发的氨。分别于试验的第 2 d、3 d、4 d、5 d、6 d、7 d、10 d、13 d、21 d、28 d 取出烧杯用 0.005 mol · L<sup>-1</sup> 硫酸滴定, 然后更换新的 硼酸吸收液, 每次取放硼酸后盖上大口瓶盖并用保鲜膜扎紧密封。

对氮素在土壤中的运移规律测定采用土柱淋溶法<sup>[8]</sup>: 试验处理和用量同上, 用 PVC 管制作土柱,

内径 5.0 cm, 高 30 cm, 以垫有滤纸的纱布封底, 模拟耕层按 1.4 g · cm<sup>-3</sup> 容重先装入过 2 mm 筛风干土 250 g, 再按处理设计用量将肥料与另外 250 g 土壤混合装入土柱, 表面放一层滤纸, 以防止水分蒸发和土壤层次被水打乱。先加水 150 mL 使土壤水分接近饱和, 并平衡 24 h, 再以 150 mL 水淋溶土柱, 收集淋溶液。淋溶结束后以刺有小孔的保鲜膜封闭土柱上口, 室温下培养 3 d 后, 用 150 mL 水进行第 2 次淋溶, 以后各次均同样操作, 在培养的第 2 d、6 d、10 d、14 d、18 d、22 d、26 d、30 d 时进行淋溶, 收集淋溶液测定 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N、NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 含量, 淋溶结束后, 对土柱分成 2~7 cm(为防止残留肥料颗粒影响测定结果, 去掉了表层 2 cm 土壤)、7~14 cm、14~22 cm 3 层取样, 分别测定其土壤 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N、NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 和全氮含量。文中各处理淋溶液和土壤中 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 和 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 含量, 以不施肥处理土壤作对照, 用差减法计算净含量。

### 1.3 分析测定方法

土壤基本农化性状按常规分析方法测定, 淋溶液中的 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N、NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 用蒸馏法测定; 土壤中 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N、NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 用 2 mol · L<sup>-1</sup> KCl 浸提, 蒸馏法测定; 土壤全氮用半微量开氏法测定<sup>[16]</sup>。

## 2 结果与分析

### 2.1 坡缕石包膜尿素与普通尿素氨挥发比较

尿素施入土壤后, 由于很快溶解并在脲酶作用下水解, 土体内氨浓度升高, 在短时间内造成氨挥发损失。图 1a 表明, 坡缕石包膜尿素和普通尿素施入土壤后, 氨挥发的大体趋势相同, 均在第 4 d 达到挥发高峰, 普通尿素的氨挥发始终高于坡缕石包膜尿素。在处理的第 2 d, Urea、CU1、CU2 和 CU3 的氨初始挥发速率分别为 1.58 mg · kg<sup>-1</sup> · d<sup>-1</sup>、1.36 mg · kg<sup>-1</sup> · d<sup>-1</sup>、1.26 mg · kg<sup>-1</sup> · d<sup>-1</sup> 和 1.16 mg · kg<sup>-1</sup> · d<sup>-1</sup>, 坡缕石包膜尿素氨挥发速率低于普通尿素, 包膜尿素表现出坡缕石厚度越厚氨初始挥发速率越低的现象。

由图 1b 可知, 普通尿素的氨挥发累积量一直远大于包膜尿素, 而包膜尿素则很有规律地表现出氨累积挥发总量随坡缕石包膜厚度的增加而增加的现象。至培养结束时, 各处理的挥发总量 Urea 为 13.87 mg · kg<sup>-1</sup>(土)、CU3 为 12.43 mg · kg<sup>-1</sup>(土)、CU2 为 11.57 mg · kg<sup>-1</sup>(土)、CU1 为 10.23 mg · kg<sup>-1</sup>(土)。氨挥发总量占施氮量的百分率 Urea 为 3.47%、CU3 为 3.11%、CU2 为 2.89%、CU1 为 2.56%。坡缕石包膜尿素较普通尿素减少氨挥发 CU3 为 10.38%、CU2 为 16.58%、CU1 为 26.24%。坡缕石是 2:1 型的层链

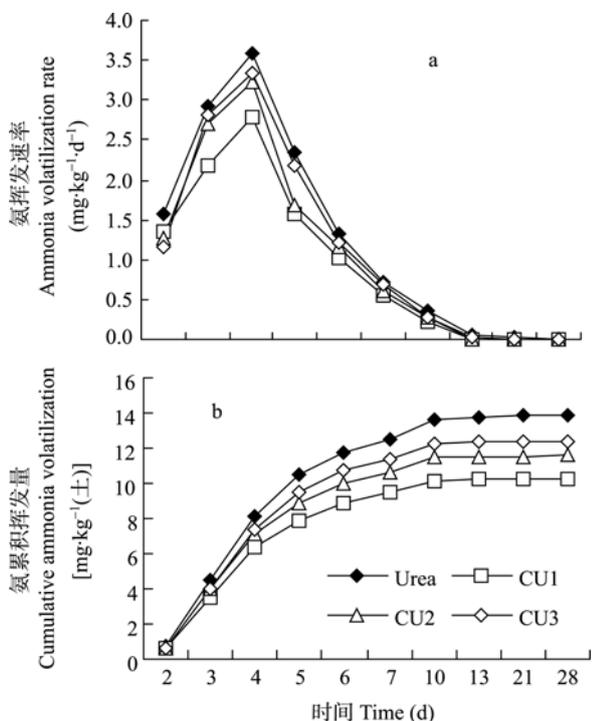


图 1 包膜尿素与普通尿素氨挥发速率(a)及氨累积挥发量(b)

Fig. 1 Contrast of the ammonia volatilization rate (a), the cumulative amount of ammonia volatilization (b) between coated urea and un-cated urea

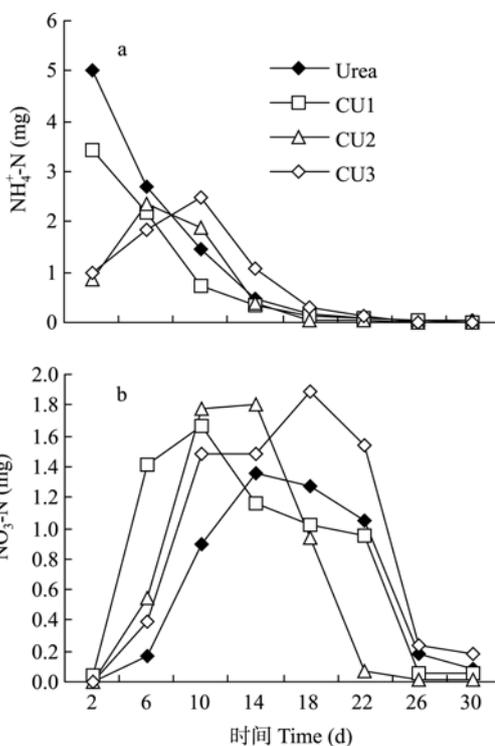


图 2 包膜尿素与普通尿素 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N(a)、NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N(b)淋溶动态

Fig. 2 Dynamic of NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N(a), NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N(b) leaching from coated urea and un-coated urea

状硅酸盐黏土矿物, 具有较高的阳离子交换量<sup>[13,17]</sup>和良好的吸附性能<sup>[18,19]</sup>, 因此, 坡缕石包膜后不仅因包膜的物理阻隔有效延缓了尿素的溶解和释放, 还会吸持尿素分子及其水解产物 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>, 进而减少尿素氮的挥发损失。对于包膜尿素表现出坡缕石厚度越厚氨初始挥发速率越低, 但随后包膜越厚的处理氨挥发速率却加快, 并在最终表现为坡缕石包膜厚度越厚氨累积挥发总量也越高的现象, 需进一步验证和探讨。

### 2.2 坡缕石包膜尿素与普通尿素氮素的转化及溶出量比较

一般而言, 尿素施入土壤先转化成 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N, 大概 1 周后生成的 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 才会大量转变为 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>或其他形态, 其中 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 能被土壤胶体吸附, 不易流失, 而 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 不被土壤胶体吸收易流失<sup>[20]</sup>。图 2a 是各处理下 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 随时间的淋溶动态, 从中可看出, Urea 和 CU1 处理 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 淋溶量在初始时最高, 之后逐渐降低, Urea 和 CU1 在第 1 次淋溶时 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 淋出量为 5.01 mg 和 3.41 mg, 分别占 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 总淋溶量的 50.37%和 49.36%, 而 CU2 和 CU3 处理 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 淋溶量在初始时并不高, 然后逐渐升高, 再缓慢降低, 其第 1 次淋溶出的 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 量仅占总淋溶量的 15.51%和 14.27%, 说明 CU2 和 CU3 处理能有效延缓尿素水解, 避免 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 在初期就被大量淋

失。至淋溶结束时, Urea、CU1、CU2 和 CU3 处理的 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 淋出总量分别为 9.94 mg、6.92 mg、5.63 mg 和 6.84 mg, CU1、CU2 和 CU3 处理分别比普通尿素处理减少 30.39%、43.36%和 31.14%的淋失, 说明不同厚度的坡缕石包膜都能降低尿素的 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 溶出率, 以 CU2 效果最好。

图 2b 是各处理下 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 随时间的淋溶动态, 其趋势均为先增大再减小, 呈“几”字型, 但不同处理其峰值出现的时间不同, CU1 在第 10 d 达到峰值, 而 CU2 和 Urea 峰值都在第 14 d 出现, CU3 峰值出现的最晚, 在第 18 d。至淋溶结束时, 各处理 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 的淋出总量 Urea 为 4.99 mg, CU1 为 6.37 mg, CU2 为 5.52 mg, CU3 为 7.20 mg, 不同坡缕石包膜厚度的尿素 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 淋出量都高于普通尿素。

图 3 是各处理淋溶液中的矿质氮(NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N+NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N)累积淋出量, 从中可看出, 整个过程中 Urea、CU1 和 CU2 处理的矿质氮累积淋出量表现为 CU2 < CU1 < Urea, CU3 处理的全氮累积淋出量在前期较低, 但在后期急剧增加, 甚至超过 CU1 和 CU2 处理。说明在一定范围内, 氮素的累积淋出量会随坡缕石包膜量的增加而减少, 但包膜时坡缕石用量过高却会降低对氮素淋溶的抑制效果。至淋溶结束时, 各处理的矿质氮淋出总量 Urea 为 14.92 mg, CU1 为 13.28 mg, CU2 为 10.78 mg, CU3 为 14.05 mg,

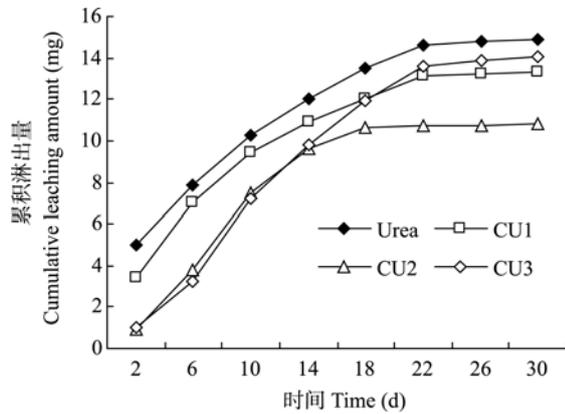


图 3 包膜尿素与普通尿素矿质氮累积淋出量对比  
Fig.3 Contrast of the cumulative amount of mineral N leaching between coated urea and un-coated urea

分别占施氮总量的 7.46%、6.64%、5.39% 和 7.02%，CU1、CU2 和 CU3 比普通尿素的氮淋溶量减少 11.00%、27.74% 和 5.88%。

综合分析，尿素施入土壤后首先生成  $\text{NH}_4^+\text{-N}$ ，大约一周后才转化为  $\text{NO}_3^-\text{-N}$ ，而普通尿素生成的  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  尚未转化为  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  即被大量淋出，故其生成的  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  量少，进而  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  的淋出量也就少，说明普通尿素施入土壤后，在有足量水分淋洗的条件下十分易于淋溶损失，因此难以有效持久地供给作物利用。对于坡缕石包膜尿素而言，尿素的水解主要是在尿素分子透过包膜、进入土壤后发生的，坡缕石包膜延缓了尿素的溶解和水解，减少了  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  的淋溶损失，使之更多地转化为  $\text{NO}_3^-$  或其他形态，这也说明坡缕石包膜尿素因减少了  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  的淋失而降低了氮素的损失。

### 2.3 坡缕石包膜尿素与普通尿素土柱不同层次氮的存在形态及含量

从氮在土柱中的分布看(表 1)，经过 8 次淋洗后，CU1、CU2 和 CU3 处理在土柱中的  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  含量依次为  $0.99 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $1.11 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  和  $0.96 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ，分别比 Urea 处理的  $0.84 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  高 0.15  $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、0.27  $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  和 0.12  $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ，且 CU2 处理与 Urea 处理相比差异达显著水平。CU1、CU2 和 CU3 处理的  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  含量依次为  $3.94 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $4.29 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  和  $3.70 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ，分别比 Urea 处理的  $0.98 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  高 2.96  $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、3.31  $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  和 2.72  $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ，坡缕石包膜尿素的  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  含量比普通尿素极显著增加，CU2 处理含量最高。

从  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  和  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  在土柱中的分布看， $\text{NH}_4^+\text{-N}$  主要存在于中层，而  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  则分散在上中下 3 层中，但在中下层的含量要高于上层，Urea 处理在表层中的  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  和  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  含量明显少于 CU1、CU2 和 CU3 处理。

土壤全氮可以表示土壤氮素的基础肥力，由表 1 可知，加入坡缕石后土壤全氮含量较施肥对照增加  $0.02\sim 0.04 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ，但各处理差异并不显著。

### 3 结论与讨论

包膜尿素通过膜控制氮的释放，减缓了尿素在土壤中的释放分解、挥发和淋溶速度，使尿素氮挥发损失大为减少；同时，包膜后可使养分释放量前期不致过多，后期不致太少，能够较好地满足作物各阶段的需求，有利于作为种肥或基肥一次施入。施

表 1 包膜尿素与普通尿素土柱不同层次的  $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$  和全氮含量  
Tab.1 Contents of  $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$  and total N in the soil columns at different depths with coated urea and un-coated urea

项目 Item	层次 Soil layer (cm)	Urea	CU1	CU2	CU3
$\text{NH}_4^+\text{-N}$ ( $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ )	2~7	0.05	0.57	0.24	0.29
	7~14	2.10	1.36	2.51	1.39
	14~22	0.38	1.05	0.59	1.19
	平均 Average	0.84Ab	0.99Aab	1.11Aa	0.96Aab
$\text{NO}_3^-\text{-N}$ ( $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ )	2~7	0.01	2.30	2.42	2.48
	7~14	1.06	5.30	4.71	3.19
	14~22	1.86	4.22	5.76	5.45
	平均 Average	0.98Dd	3.94Bb	4.29Aa	3.70Cc
全氮 Total N ( $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ )	0~7	0.94	0.99	1.04	1.05
	7~14	0.94	0.97	0.95	0.95
	14~22	1.03	1.02	1.03	0.96
	平均 Average	0.97Aa	0.99Aa	1.01Aa	0.99Aa

同行不同大写字母表示 0.01 水平差异显著，小写字母表示 0.05 水平差异显著(Duncan 法)。Different capital letters after numerical values indicate significant difference at 0.01 level, different small letters indicate significant difference at 0.05 level (Duncan).

用坡缕石包膜尿素后比普通尿素最多可减少 26.24% 的氨挥发、27.74% 的氮素淋溶, 同时还能提高土壤中  $0.11\sim 0.27 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1} \text{NH}_4^+-\text{N}$  含量、 $3.70\sim 4.29 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  的  $\text{NO}_3^--\text{N}$  含量。表明坡缕石控/缓释肥能降低尿素的损失率, 提高其利用率, 具有环保和生态效益。

从试验结果可初步得出, 20% 的坡缕石包膜尿素减少氮素淋溶的效果最好, 且使用 20% 的坡缕石包膜尿素后, 土柱土壤中的矿质氮含量显著提高, 表明并不是包膜量越多效果越好, 这对于坡缕石包膜肥料的制作有重要意义, 但对于坡缕石包膜用量越高对尿素氮挥发的抑制功能却越低的结果还需进一步试验验证。坡缕石用量增加后可能会增强土壤微生物和酶的活性, 进而导致氨挥发的增多以及保肥效果的降低, 今后应在坡缕石对土壤微生物、酶等的影响方面作进一步研究。

### 参考文献

- [1] 中国农业年鉴编委会. 中国农业年鉴[M]. 北京: 中国农业出版社, 2005
- [2] 李庆逵, 朱兆良, 于天仁. 中国农业持续发展中的肥料问题[M]. 南昌: 江西科学技术出版社, 1998
- [3] 朱兆良. 我国土壤供氮和化肥氮去向研究的进展[J]. 土壤, 1985, 17(1): 2-9
- [4] 杜建军, 毋永龙, 田吉林, 等. 控/缓释肥料减少氨挥发和氮淋溶的效果研究[J]. 水土保持学报, 2007, 21(2): 49-52
- [5] 樊小林, 廖宗文. 控释肥料与平衡施肥和提高肥料利用率[J]. 植物营养与肥料学报, 1998, 4(3): 219-223
- [6] 赵先贵, 肖玲. 控释肥料的研究进展[J]. 中国生态农业学报, 2002, 10(3): 95-97
- [7] 许秀成, 李萍, 王好斌. 包裹型缓释/控制释放肥料专题报告. 第二报. 世界缓释/控制释放肥料生产、消费现状[J]. 磷肥与复肥, 2000, 15(4): 5-7
- [8] 杜建军, 廖宗文, 毛小云, 等. 控/缓释肥在不同介质中的氮素释放特性及其肥效评价[J]. 植物营养与肥料学报, 2003, 9(2): 165-169
- [9] Shoji S., Kanno H. Use of polyolefin-coated fertilizers for increasing fertilizer efficiency and reducing nitrate leaching and nitrous oxide emissions[J]. Fert. Res., 1994, 39: 147-152
- [10] Shaviv A. Plant response and environmental aspects as affected by rate and pattern of nitrogen release from controlled release N fertilizers[C]. Progress in Nitrogen Cycling Studies. The Netherlands: Kluwer Academic Publishers, 1996: 285-291
- [11] Shaviv A., Mikkelsen R. L. Slow release fertilizers to increase efficiency of nutrient use and minimize environmental degradation [J]. A review. Fert. Res., 1993, 35: 1-12
- [12] 蔺海明, 邱黛玉. 坡缕石在生态修复及绿色农业中应用研究进展[J]. 甘肃农业, 2007 (9): 61-63
- [13] 魏荣道, 崔娇. 甘肃临泽凹凸棒石黏土矿开发应用研究[J]. 甘肃科学学报, 2005, 17(3): 45-46
- [14] 刘玉琳, 张友义, 妙凌云, 等. 甘肃含碘凹凸棒石矿的发现及其应用前景初探[J]. 岩石矿物学杂志, 2001 (4): 504-506
- [15] 杨秀红, 胡振琪, 高爱林, 等. 凹凸棒石修复铜污染土壤[J]. 辽宁工程技术大学学报, 2006, 25(4): 629-631
- [16] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000
- [17] 陈浩, 王爱勤. 改性凹凸棒黏土悬浮稳定性的研究[J]. 中国矿业, 2007, 16(4): 98-101
- [18] Murray H. H. Traditional and new applications for kaolin, smectite, and palygorskite: a general overview [J]. Appl. Clay Sci., 2000, 17(5/6): 207-221
- [19] Alvarez-ayuso E., Garcia-sanchez A. Palygorskite as a feasible amendment to stabilize heavily metal polluted soils [J]. Environ. Pollu., 2003, 125(3): 337-344
- [20] 王荫槐. 土壤肥科学[M]. 北京: 中国农业出版社, 1992: 171-186