

尿素肥斑扩散过程中的土壤特性变化

王曙光, 侯彦林

(中国科学院生态环境研究中心, 北京 100085)

摘要: 采用特制容器, 模拟尿素的立体扩散, 观察了尿素扩散过程中肥斑内土壤特性的变化。结果表明, 越靠近肥料的微域, 土壤含水量越低, 而土壤 pH、脲酶和过氧化氢酶的活性越高。尿素颗粒水解及其产生的 $\text{NH}_3 - \text{NH}_4^+$ 平衡移动是肥斑内土壤水分和 pH 变化的主要原因。土壤酶活性主要受底物浓度变化的影响。硝化细菌数量在 1~3 cm 范围内较低, 在 7 cm 处范围最高; 反硝化细菌数量也在 1~3 cm 范围较低, 但随微域离肥料距离增加有增加趋势, pH 值和 NO_2^- 、 NO_3^- 浓度是影响硝化和反硝化细菌数量的关键因素。

关键词: 尿素; 含水量; pH 值; 微生物; 酶

中图分类号: X131.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2043(2004)02-0263-04

Changes of Soil Properties in the Courses of Urea Patch Diffusion

WANG Shu-guang, HOU Yan-lin

(Research Center for Eco-Environmental Science, CAS, Beijing 100085, China)

Abstract: Fertilization can result in sharp changes of soil properties in the local point, which will affect fertilizer transformation, environmental behavior and plant responses. Special designed container was employed to simulate vertical diffusion of urea patch and investigate changes of soil properties in the diffusion of urea patch. The experimental results indicated that, the closer the microzone was to fertilizer, the lower the water content was, and the higher the pH and activity of urease and catalase were. Hydrolysis of urea granules and shift in the balance of $\text{NH}_3 - \text{NH}_4^+$ were the main reasons that water content of soil and pH value changed. Soil enzyme activity was mostly affected by substrate concentration. Nitrobacteria number was the lowest in the zone 1~3 cm distances from urea and the highest in the microzone 7cm distance from urea. Denitrobacteria number was also the lowest in the zone 1~3cm distances from urea but increased with increasing distance from urea. pH value and concentrations of NO_2^- and NO_3^- were the key factors affecting nitrobacteria and denitrobacteria.

Keywords: urea; water content; pH value; microbes; enzyme

“肥斑”(或称“营养斑”)是自然和农业土壤中普遍存在的一种养分微域现象, 呈不规则的立体形状, 由动植物有机残体降解、微生物活动和一些人为因素等引起。在斑内, 养分离子浓度、水分含量、生物活性和整个土壤微环境等都不同于一般土体, 这些变化对根系形态和建成、养分循环、土壤质量及肥料环境行为的影响已引起了大家的注意, 尤其在化肥用量日益增加的情况下, 这些影响更为大家关注。目前, 针对肥斑的研究主要集中在肥斑的形成及模拟^[1, 2]、肥斑内

根系生长行为变化及其机理²个方面^[3, 4], 对肥斑内生物变化虽有少量研究, 但仅以微动物(线虫)为主^[5], 很少涉及与养分转化密切相关的微生物。其实, 肥斑内土壤微环境的变化可能使部分土壤性质(如 pH、土壤酶和微生物)发生改变, 进而影响到整个微域的养分形态转化和行为。土壤性质变化可能是肥斑土壤不同于一般土体的原因和基础。基于此, 我国学者率先提出了“肥际”的概念, 对肥际(即肥斑)的土壤性质变化和其生态学意义作了展望^[6]。但这方面的实际研究几乎还处于空白状态。

尿素是最为常用的氮肥之一, 其在土壤中的转化易受土壤条件影响, 环境行为深受大家重视, 尽管尿素扩散存在转化快、滞留时间短等不足, 但它的易扩

收稿日期: 2003-07-08; 修订日期: 2003-09-21

基金项目: 国家自然科学基金项目(40071053); 中国科学院农办项目

作者简介: 王曙光(1973—), 男, 山东东明人, 在读博士, 主要从事农业生态工程研究。E-mail: shgwang2002@yahoo.com.cn

散和易转化也为肥斑形成、取样带来了方便,是比较合适的研究对象。本文以尿素肥斑作为研究对象,对其扩散过程中土壤水分、pH、酶活性和硝化-反硝化细菌数量变化进行了观察。

1 材料和方法

1.1 供试土壤

供试土壤为潮土,取自中国科学院禹城开放实验站(山东禹城),土壤基本理化性质如下:pH 7.90,有机质 1.12%,全 N 0.089%,全 P 0.067%,全 K 2.05%,碱解氮 $64 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,速效 P $3.2 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,速效 K $144 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,CEC $13.12 \text{ cmol} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。风干后过 2 mm 筛,使用前,土壤水分含量调至田间持水量的 60%。

1.2 肥料

所用肥料为尿素,使用前经研钵磨成粉末状。肥料用量为常用田间施肥量 ($400 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$) 的 10 倍。增大施肥量是为了充分形成营养斑,取得足够供分析的土样量和减少因不均质土壤造成的肥斑扩散误差。

1.3 实验容器

实验容器如图 1,由 A 和 B 2 部分组成(有机玻璃)。A 容器底端缚有 40 目尼龙网,用于装肥料(即形成肥斑)和少量覆盖土。B 容器带底(有 6 个直径为 0.5 cm 的孔),装供肥斑扩散的土壤,其内不锈钢网(孔径 1 cm)是为了取样时除掉边际效应。具体操作为:先把调匀水分的土壤均匀地装入 B 内,使容重达 $1.1 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$,整平 B 容器上土表面,把 A 容器放在 B 上,使两者充分接触,再把处理过的尿素均匀撒入 A 内,覆盖 200 g 土。最后,在 A、B 衔接处套上保鲜膜筒(保鲜膜筒两端分别用橡皮筋固定在 A、B 容器上),并在接口周围和保鲜膜筒间填入同样湿度的土壤,以免接口处土壤受水分蒸发、光照等影响肥斑扩散和尿素形态转化。同时,在 A 容器上端和 B 容器底部也罩上保鲜膜,防止水分损失。培养期间不添加水分。

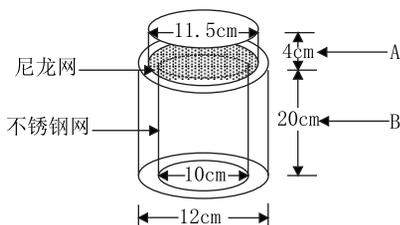


图 1 实验装置示意图

Figure 1 Schematic diagram of experimental system

1.4 取样

试验持续 49 d,每 7 d 破坏性取样一次,每次收获 3 个重复。取样时,取掉保鲜膜筒和里面的填充土壤,拿掉 A 容器,轻轻扫去 B 容器表面的浮土,在不锈钢网内以 1 cm 厚度为单位逐层采样,每层为一个微域,即 0~1 cm 为 1 cm 处微域,1~2 cm 为 2 cm 处微域,依次类推,直至 19~20 cm (20 cm 处微域)。样品保存在 4 °C 冰箱中。

1.5 样品分析

pH 的测定采用 CaCl_2 溶液提取(1:2.5,鲜土样);比色法测脲酶活性;滴定法测过氧化氢酶活性;硝化细菌和反硝化细菌数量测定用最大或然数法。所有方法的具体操作参考《土壤微生物分析方法》^[7]。

2 结果与分析

对所有收获的试验样品进行分析,发现随培养时间的变化,土壤性质变化相似。本文以培养 21 d 时土壤性质变化为例,阐述土壤性质变化与肥料扩散的关系。其中,仅选择 NH_4^+ 、 NO_2^- 和 NO_3^- 浓度有明显变化的微域,测定它们的土壤酶活性和硝化、反硝化细菌数量。

2.1 尿素肥斑中土壤水分含量的变化

尿素施入土壤后,被脲酶水解为 NH_3 和 CO_2 , NH_3 遇到水转化为 NH_4^+ 保持在土壤中,这些反应都需要水分的参与,所以,越接近肥料,肥料分子浓度越高,产生的 $\text{NH}_3 - \text{NH}_4^+$ 越多,土壤水分含量越低,见图 2。随离肥料的距离增加,水分含量也增加,并在 7cm 处微域含水量最高,可能由于此处 NH_4^+ 、 NO_3^- 和 NO_2^- 离子浓度最高,耦合了大量水分子。土壤水分含量下降,肥料离子浓度增加,显然增大了土壤渗透势,这对微生物生存是不利的,可能会产生局部的灭菌作用^[8]。同时,也会影响肥料的形态转化,因为不仅硝化和反硝化作用同土壤水分含量有很大关系^[9],而且 NH_3 挥发也与土壤水分含量密切相关^[10]。

2.2 尿素肥斑中土壤 pH 值变化

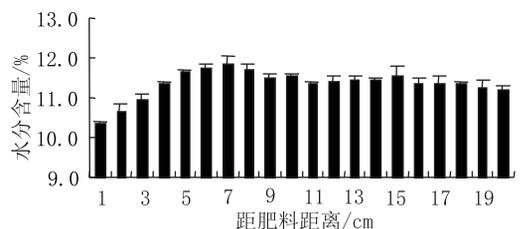


图 2 尿素肥斑中土壤含水量的变化

Figure 2 Change of soil water content in the diffusion of urea patch

尿素肥斑土壤 pH 变化主要由尿素溶解产生的 $\text{NH}_3 - \text{NH}_4^+$ 平衡及其移动引起的, 尤其穴施、条施变化较为明显, 所以, 越靠近肥料, $\text{NH}_3 - \text{NH}_4^+$ 浓度越高, 土壤 pH 越高。随着远离肥料, pH 下降, 并在 9 cm 处降至最低, 见图 3, 这可能是由于 NH_4^+ 被转化或以 NH_3 挥发, 多余 H^+ 使土壤酸化所致。pH 是影响 NH_3 挥发的一个十分重要的因素, pH 升高使土壤溶液中氨态氮在铵态和氨态氮总量中所占比例增加, 氨挥发潜力随之增大, 氮损失增加。此外, 土壤脲酶活性、硝化-反硝化作用和微生物活性等也都受 pH 的影响。

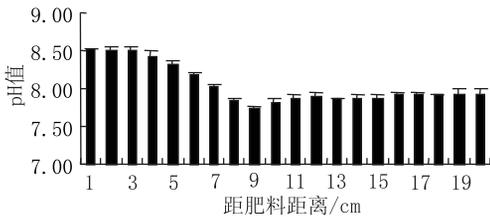


图 3 尿素肥斑中土壤 pH 的变化

Figure 3 Change of soil pH in the diffusion of urea patch

2.3 脲酶和过氧化氢酶活性的变化

脲酶是直接参与尿素形态转化的土壤酶, 其活性通常与微生物数量、土壤有机质、全 N 和速效氮相关, 也受土壤 pH、含水量的影响。图 4 表明, 微域越靠近肥料, 其脲酶活性越高, 这可能有 2 个原因: (1) 微域越接近肥料, 脲酶反应底物的浓度越高; (2) 微域越靠近肥料, 氢氧化铵浓度越高, 溶解或水解土壤有机质增加, 提高了水溶性有机质含量, 而脲酶活性随有机质含量的增加而增加^[8]。尽管在碱性条件下, 游离氨增加可能抑制脲酶活性^[8], 尤其在本试验中 1 cm 处微域的 pH 高达 8.5, 但脲酶活性仍以靠近肥料为最高。随着微域远离肥料, 脲酶活性呈下降趋势, 尤其在 8 cm 处微域下降最为明显, 这可能与底物浓度和微生物数量下降有关。

过氧化氢酶是反映土壤氧化还原能力的酶, 跟微生物数量、土壤有机质含量等有很大关系。在本实验

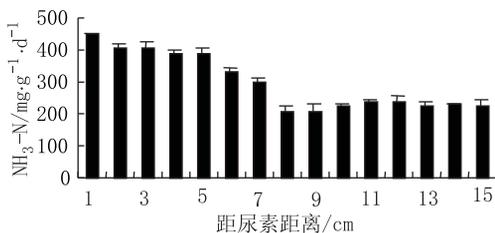


图 4 尿素肥斑中土壤脲酶活性的变化

Figure 4 Change of urease activity in the diffusion of urea patch

中, 过氧化氢酶活性变化与脲酶相似, 见图 5, 说明肥料扩散能提高土壤的氧化还原水平, 这在很大程度上可能是由于施肥造成的水溶性有机质含量增加的缘故。

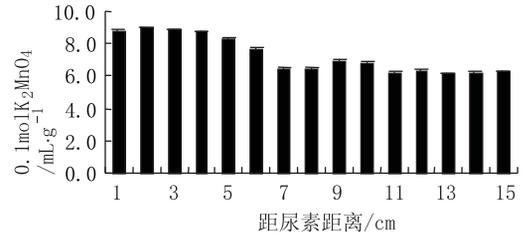


图 5 尿素肥斑中土壤过氧化氢酶活性的变化

Figure 5 Change of catalase activity in the diffusion of urea patch

2.4 硝化反和硝化细菌的变化

由表 1 可以看出, 硝化细菌数量在 1 cm 处微域最低, 在 7 cm 处微域最高, 可能是由于紧邻肥料的土壤 pH 较高, 见图 3, 明显高于主要硝化细菌——自养硝化细菌的最适 pH 值 6.6~8.0^[11], 高 pH 造成游离氨增加也可能对硝化细菌产生毒害作用。此外, 水分含量过低(图 2), 不利于硝化细菌的生存^[12]。7 cm 处微域 NO_2^- 、 NO_3^- 和 NH_4^+ 离子浓度较高的区域, 尤以 NO_2^- 浓度较高, 满足了硝化细菌生长的物质条件, 再加上 pH 也降至 8 左右 (8.02), 接近硝化细菌的最适生长环境, 所以, 此微域硝化细菌大量增加。在 1~7 cm 范围内, 硝化细菌数量随离肥料距离的增加而增加, 这与该区域内 pH 连续下降呈显著负相关 ($r^2 = -0.986$), 表明 pH 值可能是影响硝化细菌的主要因素。当然, 尿素产生过高浓度 NO_2^- 对硝化细菌也可能产生毒害作用。

反硝化细菌不是细菌分类学上的词汇, 而是功能上具有将 NO_3^- 还原为 NO_2^- 、 NO 、 N_2O 和 N_2 的微生物生理群总称, 所以, 种类多, 数量大, 生理反应复杂。但 O_2 含量、pH 和反应底物 (NO_3^-) 是影响反硝化微生物

表 1 尿素肥斑中硝化和反硝化细菌的变化

Table 1 Changes of nitrobacteria and denitrobacteria in the diffusion of urea patch

距肥料距离 /cm	硝化细菌 / $\times 10^4$ 个 $\cdot \text{g}^{-1}$	反硝化细菌 / $\times 10^5$ 个 $\cdot \text{g}^{-1}$
1	0.67	1.28
3	3.39	2.43
5	9.06	6.80
7	22.7	3.98
8	6.22	5.66
9	6.79	22.6
11	6.21	18.6
13	5.65	68.0

的主要因子, 在本实验中, 后 2 者又是主要的。1~3 cm 区域的反硝化细菌数量较低可能与过高的 pH 有关, 有报道指出, 反硝化作用的最适 pH 范围为 7~8^[13], 1~3 cm 区域的 pH 显然高于这个范围。但在 pH 低于 8 的 7~8 cm 区域反硝化细菌数量也没明显增加, 可能是由于受反应底物的影响, NO_3^- 存在是反硝化作用的前提, 而 NO_3^- 浓度在该区域只有 $800 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, NO_2^- 浓度却超过 $4000 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 明显不利于反硝化的进行和反硝化细菌的生存。9 cm 以外微域的 NO_2^- 急剧下降 (9, 11, 13 cm 处微域的 NO_2^- 浓度分别为 924, 17, 16 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$), pH 也继续下降, 适合反硝化细菌的生存, 所以, 反硝化细菌数量又呈现增加趋势。

3 小结

有关肥料对土壤性质影响的研究已进行很多, 不同肥料对土壤各种性质 (物理、化学、生物) 的影响都得到了充分的认识。但是, 大多研究都是从长期施肥或有机无机肥配施角度进行的, 而施肥也可以使多种土壤特性短时间内发生急剧变化, 并且这种变化对养分转化与循环、肥料环境行为和作物反应等有显著影响。所以, 研究肥斑内的土壤特性变化有重要意义。本实验结果也证实了尿素肥斑局部土壤性质尤其是 pH 值发生的变化。但要评价肥料对土壤的影响, 目前的测试指标还远远不够, 像有机质、土壤颗粒组成、土壤酶和微生物等还需要进行深入研究。

参考文献:

[1] Agrell D, Oscarson P and Larsson C M. Translocation of N to and from

- barley roots: its dependence on local nitrate supply in split - root culture [J]. *Physiologia plantarum*, 1994, 90: 467 - 474.
- [2] Wijesinghe D K and Hutchings M J. The effects of spatial scale of environmental heterogeneity on the growth of a clonal plant: an experimental study with *Glechoma hederacea* [J]. *Journal of Ecology*, 1997, 85: 17 - 28.
- [3] Hodge A, Stewart J, Robinson D, et al. Root proliferation, soil fauna and plant nitrogen capture from nutrient - rich patches in soil [J]. *New phytologist*, 1998, 139: 479 - 494.
- [4] Zhang H M and Forde B G. An arabidopsis MADs box gene that controls nutrient - induced changes in root architecture [J]. *Science*, 1998, 279: 407 - 409.
- [5] Bonkowski M, Griffiths B and Scrimgeour C. Substrate heterogeneity and microfauna in soil organic 'hotspots' as determinants of nitrogen capture and growth of ryegrass [J]. *Applied Soil Ecology*, 2000, 14: 37 - 53.
- [6] 鲁如坤. 微域土壤学——一个可能的土壤学新分支 [J]. *土壤学报*, 1999, 36(2): 287 - 288.
- [7] 中国科学院南京土壤研究所微生物室主编. 土壤微生物研究方法 [M]. 北京: 科学出版社, 1985.
- [8] 金继运, 刘荣乐, 等译. 土壤肥力与肥料 [M]. 北京: 中国农业科技出版社, 1998, 95 - 155.
- [9] 范晓晖, 朱兆良. 旱地土壤中的硝化 - 反硝化作用 [J]. *土壤通报*, 2002, 33(5): 385 - 391.
- [10] Ferguson R B and Kissel D E. Effect of soil drying on ammonia volatilization from surface - applied urea [J]. *Soil Sci Soc Am J*, 1986, 50: 485 - 490.
- [11] Walker N. *Soil Microbiology, A critical review* [M]. Butter/Worths/ London and Boston, 1981. 133 - 146.
- [12] 朱兆良, 文启孝. 中国土壤氮素 [M]. 南京: 江苏科学技术出版社, 1992.
- [13] 江得爱, 唐懿达, 马益辉, 等. 不同条件对土壤反硝化作用的影响 [J]. *环境科学*, 1989, 10: 13 - 19.