

# 磷在潮土肥际微域中的迁移和转化\*

杜振宇<sup>1</sup> 王清华<sup>1</sup> 周健民<sup>2†</sup> 王火焰<sup>2</sup>

(1 山东省林业科学研究院, 济南 250014)

(2 土壤与农业可持续发展国家重点实验室(中国科学院南京土壤研究所), 南京 210008)

**摘 要** 采用室内土柱实验研究了磷在潮土肥际微域中的迁移和形态转化。结果表明,磷在潮土中的移动距离很短,经过 7 d 和 28 d 的迁移,磷的迁移距离仅为 8~14 mm。施入的磷主要固定在紧靠施肥点 2 mm 土体范围内,随距施肥点距离的增加,土壤水溶性磷、酸溶性磷和有效磷的含量呈指数曲线迅速降低。磷在施肥后 7 d 内的迁移量较大,迁移进入土壤的磷绝大部分被吸附固定。施肥量对不同形态磷在肥际微域中的迁移量产生显著影响;但培养时间只明显影响了水溶性磷的迁移量。

**关键词** 磷;潮土;肥际微域;迁移;转化

**中图分类号** S153.3 **文献标识码** A

磷肥在施入土壤后,经过吸水溶解,磷酸离子会从施肥点向土壤中迁移,主要是通过扩散和质流方式,而扩散是磷向作物根系迁移的最重要机制。在酸性土壤中,铁铝水合氧化物会对磷产生很强的固定作用,而在石灰性土壤中,磷酸离子则易与钙镁离子反应而发生沉淀<sup>[1-2]</sup>。由于磷与土壤组分的快速反应,大量的磷会被固定在很短距离内。很多研究表明,磷肥在集中施用,短期内(几天或几周)的垂直迁移距离只有 3~5 cm<sup>[3-5]</sup>, Zerkoune<sup>[6]</sup> 观测到磷的侧向迁移距离不超过 5 cm。关于磷在土壤中扩散迁移的研究很多,多数集中在长期田间淋溶、扩散模型、影响扩散因素等方面<sup>[7-9]</sup>,但关于磷在土壤肥际微域中形态变化的研究鲜见报道。

潮土是发育于河流沉积物受地下水运动和耕作活动影响而形成的一种半水成土壤,在我国主要分布于黄淮海平原和长江中下游平原,多富含碳酸钙,对磷的固定能力很强<sup>[10]</sup>。在上述地区的农业生产中,多采用条施或穴施的方式

集中施用磷肥,过磷酸钙是常用的磷肥品种,所含磷酸盐为磷酸二氢钙。本研究采用室内土柱培养实验,通过施用磷酸二氢钙,研究了不同施用量和培养时间下磷在潮土肥际微域中的迁移和转化,以期为田间合理施用磷肥提供理论依据。

## 1 材料与amp;方法

### 1.1 供试材料

供试土壤为潮土(潮湿锥形土),采自中国科学院封丘生态实验站,为耕层(0~15 cm)表土,基本理化性状如下:pH8.60(土水比1:2.5);阳离子交换量(CEC)8.44 cmol kg<sup>-1</sup>,NH<sub>4</sub>OAc 法测定;CaCO<sub>3</sub>含量 82.4 g kg<sup>-1</sup>,HCl 滴定法测定;有机质含量 13.7 g kg<sup>-1</sup>,K<sub>2</sub>CrO<sub>7</sub>氧化法测定;有效磷含量 5.6 mg kg<sup>-1</sup>,Olsen 法测定<sup>[11]</sup>。供试肥料为分析纯磷酸二氢钙试剂(以下简称 MCP),烘干后磨细并过 20 目筛。

\* 国家 973 计划项目(2007CB109301)、国际植物营养研究(IPNI)项目资助

† 通讯作者, E-mail: jmzhou@issas.ac.cn

作者简介:杜振宇(1973—),男,山东枣庄人,博士,高级工程师,主要从事土壤肥力、植物营养和森林生态方面的研究。

E-mail: zydu@qq.com

收稿日期:2011-04-19;收到修改稿日期:2011-10-22

## 1.2 研究方法

本研究采用室内土柱实验,所用培养容器为内圆外方的蜡筒,高 150 cm,内径 5 cm,将石蜡和凡士林按 2:1 比例在水浴中熔化并混匀后,倒入模具浇铸而成。蜡筒一端用两张圆形滤纸封口,均匀装土 360 g,使容重为  $1.22 \text{ g cm}^{-3}$ 。在圆形土柱上面放置一片略小于蜡筒直径的滤纸圆片,放置滤纸是为了将肥料与土壤隔开,并可以让肥料溶液能均匀向土壤中扩散。将装好的土柱垂直放置在细砂盘上,向细砂盘中加入蒸馏水,利用毛细作用使土柱均匀吸水至饱和持水量,此时含水量为  $332 \text{ g kg}^{-1}$ 。然后,去掉蜡筒下端的封口滤纸,两端用 Parafilm 膜封口,以防水分损失<sup>[12]</sup>。将蜡筒垂直放于 25 °C 室内平衡 48 h。

实验共设 4 个施肥处理,MCP 施用量分别为 0.2 g 和 0.5 g,培养时间分别为 7 d 和 28 d,每处理重复 3 次。同时以不施肥的空白土柱为对照。土柱平衡后,将 MCP 均匀撒放于土柱顶面上的滤纸圆片上,然后再次用 Parafilm 膜封口,在 25 °C 室内培养。分别在培养 7 d 或 28 d 时,去除顶部滤纸片,用自行设计的切土装置将蜡筒从顶端依次切出 15 片 2 mm 厚的薄片,取其中的土样用于分析测定。测定土样的含水量、水溶性磷、酸溶性磷和有效磷含量,切土装置、切土方法和分析方法参见文献[13-15],有效磷采用 Olsen 法测定。

## 1.3 数据分析

在本实验中,土壤样品中磷含量用干基表示,

数据的统计分析通过 STATISTICA 6.0 统计软件完成。

## 2 结果与分析

### 2.1 水溶性磷在肥际微域中的含量分布

磷酸二氢钙施入土壤后,除自身进行异成分溶解外,还迅速与土壤物质发生反应,绝大部分磷酸根被土壤吸附或发生沉淀反应变为非水溶态。水溶性磷在土壤中含量很低,但却是植物吸收利用磷的最主要的形态。

水溶性磷在潮土肥际微域中的含量分布如图 1 所示,当 MCP 施用量为 0.2 g 时,磷在培养 7 d 和 28 d 时的迁移距离分别为 8 mm 和 10 mm;而当 MCP 施用量为 0.5 g 时,磷在 7 d 和 28 d 时的迁移距离分别为 12 mm 和 14 mm。在本实验条件下,从 7 d 至 28 d 磷在潮土肥际微域中的迁移距离仅仅增加了 2 mm,表明磷在土壤中的迁移主要发生在施肥后的短时间内。随距施肥点距离的增加,水溶性磷的含量迅速下降。在迁移范围内,培养 7 d 时的水溶性磷含量明显高于培养 28 d 时含量。采用配对法 *t* 检验对 4 个施肥处理水溶性磷含量分布进行差异显著性检验,结果表明,施肥量和培养时间均显著地影响了潮土肥际微域中的水溶性磷含量 ( $p < 0.05$ )。

将 4 个施肥处理的水溶性磷含量分别与迁移距离进行非线性拟合,结果表明,水溶性磷在潮土中的含量分布呈极显著的指数曲线关系,拟合方程的各个参数见表 1。

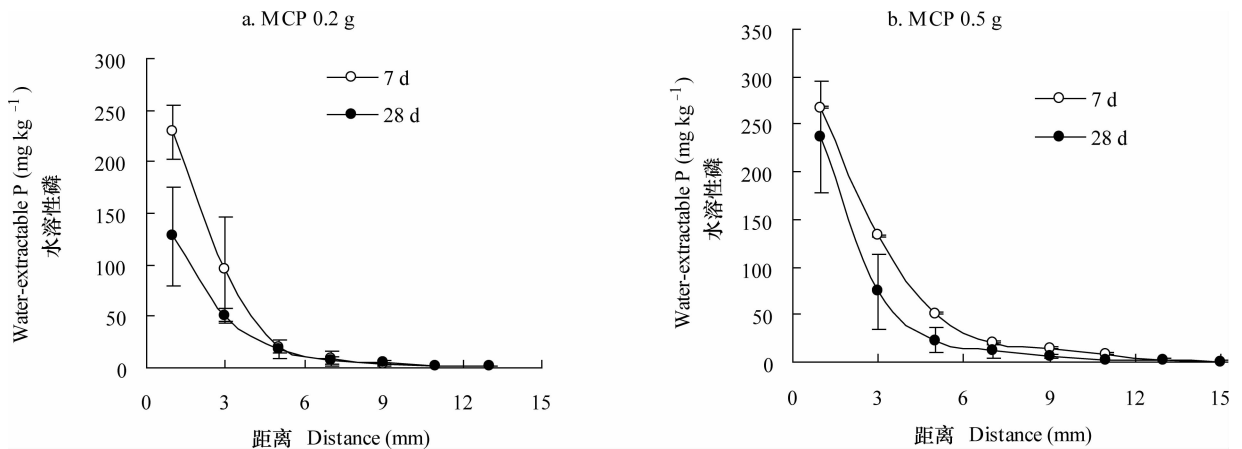


图 1 水溶性磷在潮土肥际微域中的含量变化

Fig. 1 Distribution of water-extractable P in fertilizer microsites in the fluvo-aquic soil

表 1 潮土肥际微域水溶性磷 ( $y$ ,  $\text{mg kg}^{-1}$ ) 与距离 ( $x$ ,  $\text{mm}$ ) 间的指数回归分析 ( $y = b_0 e^{b_1 x}$ )Table 1 Regression analysis ( $y = b_0 e^{b_1 x}$ ) of the relationship of water-extractable P ( $y$ ,  $\text{mg kg}^{-1}$ ) with distance from the fertilizer site ( $x$ ,  $\text{mm}$ ) in the fluvo-aquic soil

施肥量 MCP application rate	培养时间 Incubation time	$b_0$	$b_1$	$r$	$n$
0.2 g	7 d	378.34	-0.49	0.993 7 **	5
0.2 g	28 d	204.11	-0.47	0.999 1 **	5
0.5 g	7 d	278.76	-0.39	0.996 6 **	7
0.5 g	28 d	329.42	-0.65	0.999 3 **	7

注: \*\* 表示相关极显著 Note: \*\* means significant difference at  $p < 0.01$  level

## 2.2 酸溶性磷在肥际微域中的含量分布

在施肥点附近,由于土壤溶液中的磷含量很高,磷的固定主要以沉淀反应为主,在短时间内沉淀以无定形态存在,尚未转化为不能被酸浸提的结晶态,因此酸溶性磷包含了这部分磷,此外也包括吸附态磷和部分土壤原有的磷,反映了土壤固相中的磷状态<sup>[16]</sup>。在潮土肥际微域中,距施肥点不同距离处的酸溶性磷含量有很大幅度的变化。由图 2 可以看出,在距肥料

0 ~ 2 mm 距离内,酸溶性磷含量远远高于 2 mm 以后的其他距离处含量,表明施入的磷在紧靠施肥点 2 mm 范围内的固定非常严重。当施用 MCP 0.2 g 时,培养 28 d 的酸溶性磷含量显著高于培养 7 d 时的含量;而在施用量 0.5 g 时,培养时间对酸溶性磷含量没有显著影响。酸溶性磷在潮土中的含量分布模式与水溶性磷的分布相似,也呈极显著的指数曲线关系(表 2)。

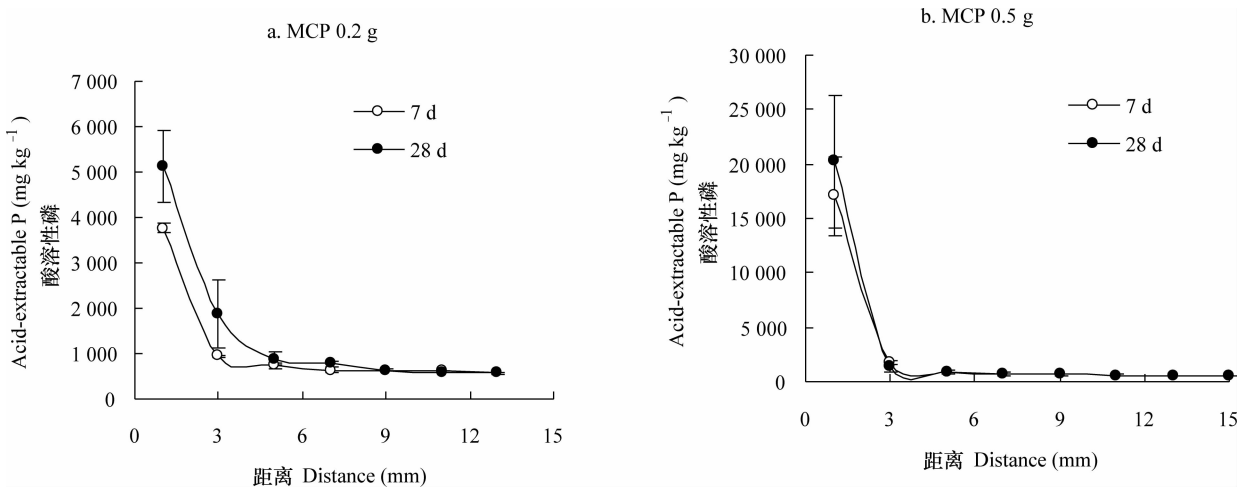


图 2 酸溶性磷在潮土肥际微域中的含量变化

Fig. 2 Distribution of water-extractable P in fertilizer microsites in the fluvo-aquic soil

表 2 潮土肥际微域酸溶性磷 ( $y$ ,  $\text{mg kg}^{-1}$ ) 与距离 ( $x$ ,  $\text{mm}$ ) 间的指数回归分析 ( $y = b_0 e^{b_1 x}$ )Table 2 Regression analysis ( $y = b_0 e^{b_1 x}$ ) of the relationship of acid-extractable P ( $y$ ,  $\text{mg kg}^{-1}$ ) with distance from the fertilizer site ( $x$ ,  $\text{mm}$ ) in the fluvo-aquic soil

施肥量 MCP application rate	培养时间 Incubation time	$b_0$	$b_1$	$r$	$n$
0.2 g	7 d	5 897.2	-0.48	0.932 3 **	5
0.2 g	28 d	7 675.6	-0.42	0.976 8 **	5
0.5 g	7 d	50 371.3	-1.08	0.997 8 **	7
0.5 g	28 d	74 370.1	-1.30	0.998 4 **	7

注: \*\* 表示相关极显著 Note: \*\* means significant difference at  $p < 0.01$  level

### 2.3 有效磷在肥际微域中的含量分布

潮土的有效磷测定采用 Olsen 法,即用  $0.5 \text{ mol L}^{-1} \text{ NaHCO}_3$  提取的方法,所提取的磷包括水溶性磷和一部分固定态磷,被广泛用于评价中性和碱性土壤中磷的生物有效性。在本实验中,水溶性磷含量较低,大部分有效磷来自于土壤固相,占了酸溶性磷的绝大部分,这是由于被沉淀吸附的磷在短时间内尚未转化为难以被作物利用的结晶态,新形成的无定形化合物对作物仍有一定的有效性,

但随着时间的推移,其有效性会明显降低。

从图 3 可以看出,有效磷在土柱垂直剖面上的含量分布模式同酸溶性磷相似,在  $0 \sim 4 \text{ mm}$  内的含量随距离增加急剧下降,其在迁移距离内与距施肥点距离也呈明显的指数曲线变化。配对法  $t$  检验结果表明,在相同施肥量下,培养 7 d 和培养 28 d 时的有效磷含量在潮土肥际微域中的分布没有显著性差异;但同一培养时间下,施用 MCP 0.5 g 处理有效磷含量显著高于施用 MCP 0.2 g 处理。

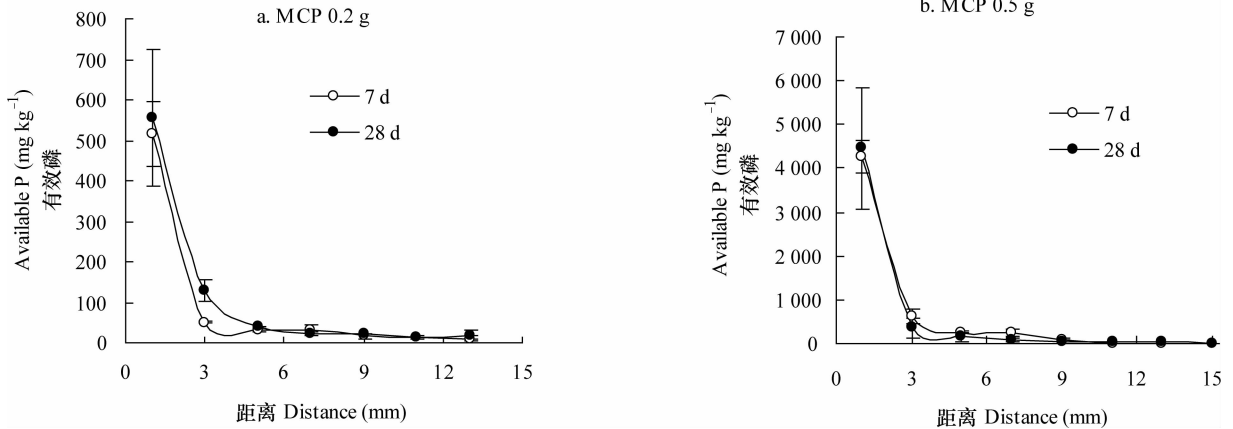


图 3 有效磷在潮土肥际微域中的含量变化

Fig. 3 Distribution of available P in fertilizer microsites in the fluvo-aquic soil

### 2.4 不同形态磷在肥际微域中的迁移量

为比较不同处理肥料磷扩散进入土壤中的量及分布,计算了各处理肥料磷以不同形态存在于土柱中的重量。以每一土柱所浸提磷量(水溶性磷与酸溶性磷浸提量之和)减去空白处理土柱的浸提磷量作为来自于肥料中的总磷量<sup>[12, 17]</sup>。由表 3 结果可知,施用 MCP 0.5 g 时,在培养 7 d 和 28 d 时磷的迁移率(总磷迁移量占施肥量的百分数)分别为 76.0% 和 84.6%,二者相差不大;而施用 MCP 0.2 g 时的迁移率则明显低于施用 MCP 0.5 g 时的迁移率,培养 7 d 和 28 d 时分别为 39.8% 和 64.1%,表明施磷量低时迁移入潮土中的磷的百分率也较低,可能是由于土壤溶液中  $\text{Ca}^{2+}$  含量高,与肥料中的磷在未迁移前就快速形成沉淀,使本就不多的磷迁入土体的比例减少。相同施磷量下,在培养 7 d 时迁移进入潮土肥际微域的总磷量低于 28 d 时的迁移量,但没有显著性差异。

性磷迁移量有显著影响。相同时间下,施用 MCP 0.5 g 的水溶性磷迁移量明显大于施用 MCP 0.2 g 的水溶性磷迁移量;相同施磷量时,培养 7 d 时的水溶性磷量则明显大于培养 28 d 时的量。施用 MCP 0.5 g 时酸溶性磷迁移量和有效磷迁移量均显著大于施用 MCP 0.2 g 时的量,表明施肥量对它们的迁移量有显著影响;相比之下,培养 7 d 和 28 d 时有效磷的迁移量则没有显著性差异。土壤水溶性养分是植物可直接利用的养分形态,其含量决定着土壤对植物养分的供应强度。培养 7 d 和 28 d 时,潮土肥际微域中的有效磷量虽然没有显著变化,但水溶性磷量却明显降低。提示在田间施用磷肥应合理选择施肥时间,不宜施用过早,具体的施肥措施应结合田间实验确定。

各形态磷占肥际微域总磷迁移量的百分数如图 4 所示,从该图可以很直观地看出磷迁移进入土壤肥际微域后的形态分配。磷扩散入土壤后,仅有极少量以水溶态存在,绝大部分被土壤吸附固定,仅 10.7% ~ 27.7% 是以有效态存在。

由表 3 结果可知,施磷量和培养时间对水溶

表 3 肥料磷在潮土肥际微域中的迁移量

Table 3 Movement of P from fertilizer in fertilizer microsites in the fluvo-aquic soil

施肥量 MCP application rate	培养时间 Incubation time	施磷量 P application rate (mg)	迁移量 Movement amount (mg)			
			水溶性磷 Water-extractable P	酸溶性磷 Acid-extractable P	有效磷 Available P	总磷量 Total P
			0.2 g	7 d	49.2	1.69 ab
0.2 g	28 d	49.2	0.97 b	30.58 b	3.36 b	31.54 b
0.5 g	7 d	123.0	2.35 a	91.13 a	25.93 a	93.48 a
0.5 g	28 d	123.0	1.66 ab	102.36 a	24.44 a	104.02 a

注：同一列中不同字母表示在  $p < 0.05$  水平下差异显著 Note: Different letters in the same column mean significant difference at  $p < 0.05$  level by LSD test

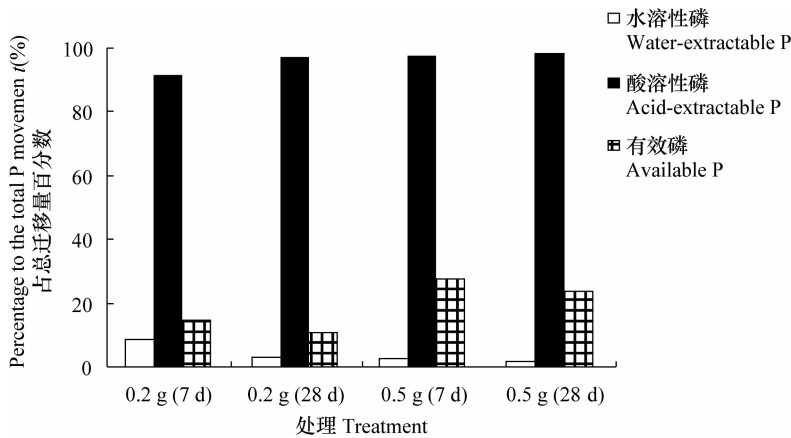


图 4 不同形态磷在潮土中的迁移量百分数

Fig. 4 Proportions of various P fractions moved from fertilizer in the fluvo-aquic soil

### 3 结 论

1) 磷在潮土中的移动距离很短,在本实验条件下,经过 7 d 和 28 d 的迁移,磷的迁移距离仅为 8 ~ 14 mm。

2) 随距施肥点距离的增加,土壤水溶性磷、酸溶性磷和有效磷的含量呈指数曲线迅速降低,施入的磷主要固定在紧靠施肥点 2 mm 范围土体内。施肥量对不同形态磷在肥际微域中的含量分布有显著影响;但培养时间仅对水溶性磷含量分布有显著影响。

3) 磷在施肥 7 d 内的迁移量较大,然后只有少量的迁移。迁移进入土壤的磷绝大部分磷被吸附固定,只有少部分仍以有效态存在。与培养 7 d 相比,培养 28 d 时存在于肥际微域中的有效磷量没有明显变化,但水溶性磷量显著下降。

### 参 考 文 献

- [ 1 ] Tisdale S L, Nelson W L, Beaton J D, et al. Soil fertility and fertilizers. New York: Macmillan Publishing Company, 1993
- [ 2 ] Richards J E, Bélanger G. Movement to the sub-soil of P applied to an acidic soil cropped to timothy-grass for twenty-six years. Can J Soil Sci, 1989, 69: 875—878
- [ 3 ] Heslep J M, Black C A. Diffusion of fertilizer phosphorus in soils. Soil Science, 1954, 78: 389—401
- [ 4 ] Blanchar R W, Caldwell A C. Phosphate-ammonium-moisture relationships in soil; II. Ion concentrations in static fertilizer zones and effects on plants. Soil Sci Soc Am Proc, 1966, 30: 43—48
- [ 5 ] Eghball B, Sander D H. Distance and distribution effects of phosphorus fertilizer on corn. Soil Sci Soc Am J, 1989, 53: 282—287
- [ 6 ] Zerkoune M A. Residual P from single and repeated bands in no-till systems as evaluated by crop response and sampling strategies. Lincoln, NE: University of Nebraska, 1996
- [ 7 ] Williams C H. Reaction of surface-applied superphosphate with

- soil. II. Movement of the phosphorus and sulphur into the soil. *Aust J Soil Res*, 1971, 9:95—106
- [ 8 ] Cho C M. Phosphate transport in Calcium-saturated systems; I. Theory. *Soil Sci Soc Am J*, 1991, 55:1 275—1 281
- [ 9 ] Sharma P K, Sinha A K, Chaudhary T N. Movement of surface and deep-placed phosphorus in a sandy loam soil in relation to initial soil wetness, amount of water applied, and evaporation potentials. *Soil Science*, 1984, 140:256—263
- [ 10 ] 林培. 区域土壤地理学:北方本. 北京:中国农业大学出版社, 1993. Lin P. Regional pedogeography: Northern version. Beijing: China Agricultural University Press, 1993
- [ 11 ] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法. 北京:中国农业科技出版社, 2000. Lu R K. Analytical methods for soil and agricultural chemistry (In Chinese). Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2000
- [ 12 ] Fan M X, MacKenzie A F. Interaction of urea with triple superphosphate in a simulated fertilizer band. *Fert Res*, 1993, 36: 35—44
- [ 13 ] Du Z Y, Zhou J M, Wang H Y, et al. Potassium movement and transformation in an acid soil as affected by phosphorus. *Soil Sci Soc Am J*, 2006, 70:2 057—2 064
- [ 14 ] Du Z Y, Zhou J M, Wang H Y, et al. Effects of nitrogen fertilizers on movement and transformation of phosphorus in an acid soil. *Pedosphere*, 2005, 15(4):424—431
- [ 15 ] 杜振宇, 周健民, 王火焰, 等. 氮钾肥对磷在红壤肥际微域中迁移转化的影响. *土壤学报*, 2010, 47(3):497—502. Du Z Y, Zhou J M, Wang H Y, et al. Phosphorus movement and transformation in fertilizer microsites in red soil as affected by nitrogen and potassium application (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2010, 47(3):497—502
- [ 16 ] Hao X, Cho C M, Racz G J, et al. Chemical retardation of phosphate diffusion in an acid soil as affected by liming. *Nutr Cycl Agroecosys*, 2002, 64:213—224
- [ 17 ] Benbi D K, Gilkes R J. The movement into soil of P from superphosphate grains and its availability to plants. *Fert Res*, 1987, 12:21—36

## MOVEMENT AND TRANSFORMATION OF PHOSPHORUS IN FERTILIZER MICROSITES IN A FLUVO-AQUIC SOIL

Du Zhenyu<sup>1</sup> Wang Qinghua<sup>1</sup> Zhou Jianmin<sup>2†</sup> Wang Huoyan<sup>2</sup>

(<sup>1</sup> Shandong Academy of Forestry Science, Jinan 250014, China)

(<sup>2</sup> State Key Laboratory of Soil and Sustainable Agriculture, Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China)

**Abstract** Movement and transformation of phosphorus (P) in fertilizer microsites in fluvo-aquic soil were studied through an indoor incubation experiment using soil columns. Results show that fertilizer P did not move far, only 8 ~ 14 mm, after 7 and 28 days of transportation. Most of the applied P was fixed by the soil within the radius of 0 ~ 2 mm of the site of fertilizer placement. The concentrations of water-extractable P, acid-extractable P and available P decreased rapidly with the increase in distance from the site, showing an exponential curve. P movement occurred mainly within the first 7 days after application and most of the P that moved into the soil was fixed by the soil through adsorption. P application rate significantly affected the movements of various fractions of P within the fertilizer microsite, whereas duration of the incubation had significant effect only on the movement of water-extractable P.

**Key words** Phosphorus; Fluvo-aquic soil; Fertilizer microsite; Movement; Transformation