

# 固、液态磷源在石灰性土壤中的移动性及其对土壤有效磷含量影响的研究

叶壮<sup>1</sup>, 褚贵新<sup>1\*</sup>, 冶军<sup>1</sup>, 胡云才<sup>2</sup>, 梁永超<sup>1</sup>, 谭崇文<sup>1</sup>

(1 新疆生产建设兵团绿洲生态农业重点实验室, 石河子大学农学院资源环境系, 新疆石河子 832000;

2 德国慕尼黑工业大学植物营养研究所, 慕尼黑, 德国 D-85350)

**摘要:** 采用同心圆扩散法对固体和酸性液体磷肥在石灰性土壤中的移动性与有效性进行研究。结果表明, 土壤 Olsen-P 含量随施肥点圈层由内向外层而递减, 液肥处理的 Olsen-P 量在施肥点以外的 3 个土壤圈层中均高于固肥处理。固体肥料大部分停留在距施肥点 0~7.5 mm 圈层, 占施磷总量的 55%~70%; 液体肥料虽在 0~7.5 mm 层的含量低于固体肥料(约占 15%~40%), 但在远离施肥点的后 3 个圈层(7.5~43 mm)中均高于固体肥料处理, 其中 7.5~13.5 mm 最为明显(液肥占 35%, 固肥占 20%)。3 种施磷量在砂土、壤土及粘土上均表现出一致的变化规律。肥料对土壤 pH 值的影响仅限制在距施肥点最近的 0~7.5 mm 范围, 该层的 pH 值显著低于后层。本研究说明在石灰性土壤中液体磷的移动性、有效性明显高于固体磷, 但对土壤 pH 值无显著影响。

**关键词:** 石灰性土壤; 液态和固态磷肥; 磷的移动性; 磷的有效性

中图分类号: S153.6<sup>+</sup>1; S143.2 文献标识码: A 文章编号: 1008-505X(2010)06-1433-06

## A comparison of mobility and availability of granular and fluid phosphate fertilizers in calcareous soils under laboratory conditions

YE Zhuang<sup>1</sup>, CHU Gui-xin<sup>1\*</sup>, YE Jun<sup>1</sup>, HU Yun-cai<sup>2</sup>, LIANG Yong-chao<sup>1</sup>, TAN Chong-wen<sup>1</sup>

(1 Xinjiang Production and Construction Group Oasis Ecological Agriculture Key laboratory/Department of Resources and Environmental Science, Agronomy College, Shihezi University, Shihezi, Xinjiang 832000, China;

2 Institute of Plant Nutrition, Department of Plant Science, Technical University of Munich, Munich D-85350, Germany)

**Abstract:** Phosphorus fixation in a calcareous soil is a major factor limiting mobility and availability of P fertilizer. This work employed Petridish to investigate the differences between granular and fluid forms of P fertilizers placed in three calcareous soils. The results indicate that Olsen-P is decreased with increasing distance from the central section where the fertilizer is applied. The contents of soil Olsen-P under the fluid fertilization in all sections are higher than those of the granular fertilization except the 0-7.5 mm section. Almost 55%-70% of the fertilizer P remains within 7.5 mm section from the granule fertilizer, but in other three sections, this value is lower than that of the fluid fertilizers, especially in 7.5-13.5 mm section (fluid 35% > granular 20%). The three fertilizer amounts show the same diversification in three soil types. Changes in pH caused by the fertilization are small and limit to the soil section where the fertilizer is applied. Soil pH is significantly low in the 0-13.5 mm section across all soil types ( $p < 0.05$ ). When apply different forms of P fertilizers to the calcareous soils, the fluid fertilization can provide a greater diffusion, availability compared with the granular fertilizers.

**Key words:** calcareous soil; fluid and granular fertilizer; phosphorus diffusion; phosphorus availability

收稿日期: 2010-01-11 接受日期: 2010-04-29

基金项目: 教育部“春晖计划”项目(z2005-2-83003); 新疆兵团农业科技攻关项目(04GG03)资助。

作者简介: 叶壮(1985—), 男, 新疆奎屯市人, 硕士研究生, 主要从事土壤与植物营养生理生态研究。

\* 通讯作者 Tel: 0993-2057993, E-mail: chuguixin@gmail.com

石灰性土壤中可溶性磷易发生沉淀反应或被粘土矿物吸附固定,导致磷在土壤中移动性小,生物有效性低。大量研究表明,磷肥当季利用率仅有 10%~25%<sup>[1]</sup>。如何减小土壤对磷的固定,提高所施磷肥的有效性和利用率一直是磷肥高效利用的研究热点。国内外从磷肥的施用方式<sup>[2-4]</sup>、土壤磷库的活化<sup>[5]</sup>、不同磷源肥料的生物学效应<sup>[6-7]</sup>、磷在土壤中的分级与各形态磷转化等物理化学变化机制<sup>[8-10]</sup>等方面进行了大量研究。

近期,围绕不同固、液磷源在石灰性土壤的移动性、溶解性、有效性及在土壤中物理化学反应机制等进行了较系统的对比研究,如 Holloway 等<sup>[11]</sup>研究表明,在石灰性土壤上施用等量的液体磷与固体磷,前者能显著提高小麦对磷的吸收和产量,并使小麦增产 4~15 倍; Bertrand 等<sup>[12]</sup>利用 <sup>32</sup>P 示踪技术研究固体磷 (MAP、DAP、TSP) 和液体磷 (TG-MAP、APP、H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>) 在石灰性土壤上的施用效果表明,液体磷有效性和小麦 <sup>32</sup>P (% Pdf) 吸收均显著高于固体磷; Lombi 等<sup>[13-14]</sup>利用 X-ray CT 技术对固、液两种形态磷施肥点及其周围区域进行分层成像图示分析发现,与固体磷相比液体肥料受水流的影响小,被固定的几率小。

新疆是全国最大的节水灌溉地区,膜下滴灌施肥已成为一种主要的施肥方式。应用液体磷滴灌施肥

以改变传统的磷肥以基肥为主的施肥方式,探索减少土壤对磷肥的固定,提高磷在作物根区土壤生物有效性的途径,对在干旱区滴灌条件下磷素养分资源高效利用具有一定的理论和实践意义。为此,通过对固体、液体磷在 3 种不同类型石灰性上的移动性和有效性的研究,旨在为滴灌条件下提高磷肥在石灰性土壤的肥效与磷肥施用技术提供新的思路与途径。

## 1 材料与方法

### 1.1 供试材料

试验在石河子大学绿洲生态农业重点实验室内进行。供试的砂土、壤土、粘土分别在漠索湾垦区 149 团、石河子大学农学实验站和 147 团采集,属灌耕灰漠土(灌淤旱耕人为土, Calcaric fluvisals)。土壤经自然风干,充分混匀,过 2 mm 孔筛后使用。其基础性状见表 1。

供试的固体磷肥为重过磷酸钙 (TSP, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> = 46%), 液体磷肥为酸性液体滴灌专用肥 (N ≥ 20%, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> ≥ 6%, K<sub>2</sub>O ≥ 6%, pH 为 3.9, 总养分量 ≥ 32%)。为保持不同磷源施入土壤氮磷钾比例的一致,固体磷肥施入时补充与液体磷肥等量的氮、钾养分,所补充的氮、钾肥源分别为尿素 (N 46%) 和氯化钾 (K<sub>2</sub>O 62%)。

表 1 供试土壤主要性状

Table 1 Selected properties of the test soils

供试土壤 Soil	pH	有机质 OM (g/kg)	全磷 Tot. P (g/kg)	Olsen-P (mg/kg)	速效钾 Avail. K (mg/kg)
砂土 Sandy soil	8.3	6.7	0.51	18.8	171
壤土 Loam soil	8.1	15.1	0.81	17.4	451
粘土 Clay soil	8.3	17.0	0.95	17.8	338

### 1.2 试验设计

试验设 4 个处理: 1) 固体磷肥 (Granular Phosphate Fertilizer, GF) 从培养皿土壤表层中心加入; 2) 液体磷肥 (Fluid Phosphate Fertilizer, FF) 溶于水后 (小于每个培养皿总含水量的 1%) 用注射器从培养皿中央注入, 为了保证液体肥料处理的水分加入量与固体肥料的一致, 在液体肥料加入时要扣除液肥自身所带水分; 3) 固体肥料与土壤充分混匀, 之后再加水 (FM); 4) 对照, 不加入任何肥料 (CK)。施肥量设计为大田施肥量的 3 倍, 各处理肥料加入的磷量又分为 3 个水平, 即: P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 9.36、18.72、37.44 mg/dish, 每个水平重复 3 次。

土壤在装入之前充分混匀, 取风干过 2 mm 孔筛

的土壤 78 g 装入皮氏培养皿 (高 1.1 cm, 直径 8.7 cm), 控制土壤容重在 1.25~1.35 g/cm<sup>3</sup>。加入肥料前, 用蒸馏水湿润土壤, 保证土壤田间持水量的 70%, 砂土、壤土和粘土的总水分加入量分别为 9.83、12.56 和 16.38 mL/dish。加水之后立即用帕拉胶 (Parafilm) 密封培养皿并静置 24 h, 使水分在土壤中平衡。次日打开培养皿, 施入不同磷肥。肥料加入完毕后, 把培养皿盖好, 用帕拉胶密封、固定。放置于黑暗控温培养箱中培养 5 周, 培养期间昼夜温差为昼 25℃, 16 h; 夜 20℃, 8 h。

### 1.3 测定项目及方法

培养结束以后, 用不同内径的中空圆筒状取样器对不同圈层的土壤进行取样, 以获得离施肥点不

同距离的土样,土样距施肥点的间隔距离分别为:0~7.5、7.5~13.5、13.5~25.5和25.5~43.0 mm。待测土壤样品风干后磨碎,按照常规方法测定土壤 pH 值(水土比 5:1)、全磷、Olsen-P<sup>[15]</sup>。

各圈层中肥料磷所占百分比( $\% P_f S_i$ )按照下式计算:

$$\% P_f S_i = ([P_f] S_i \times W_i) / \sum_{i=1-4} ([P_f] S_i \times W_i)$$

式中:  $i$  代表 4 个土壤圈层;  $[P_f] S_i$  和  $W_i$  分别代表各圈层土壤的全磷浓度和土重;  $[P_f] S_i$  由各圈层全磷量减去未施肥的对照处理全磷量得到。

数据用 SPSS11.5 统计软件进行 One-way ANOVA 统计分析,并用 Duncan 法多重比较。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同磷源对土壤有效磷含量的影响

由于磷在土壤中移动性差,所以固肥处理与液肥处理 Olsen-P 含量在 4 个土壤圈层均表现为从内层向外依次降低,而固态磷与土壤混匀处理各圈层之间 Olsen-P 含量无显著差异。

图 1 看出,固、液态磷施肥处理间土壤 Olsen-P 含量存在明显差异。固态磷处理的各圈层土壤 Olsen-P 含量表现为第一层(0~7.5 mm)明显大于其它三层(7.5~43.0 mm),且 0~7.5 mm 层的含量高于液肥处理;而液肥处理的 Olsen-P 含量表现为前两层大于后两层,且 Olsen-P 含量从内层向外递减的幅度明显小于固肥处理。如施磷量为  $P_2O_5$  18.72 mg/dish 的壤土,固态磷处理的 Olsen-P 含量在 0~7.5、7.5~13.5、13.5~25.5 和 25.5~43.0 mm 4 个土层分别为 750.18、109.66、20.02 和 16.63 mg/kg;而液体磷处理则分别为 181.17、152.86、50.40 和 17.49 mg/kg。液体磷处理 Olsen-P 含量在施肥点以外圈层均高于固态磷处理,尤其在 7.5~13.5 mm 层最为显著;但随着施磷量的增大,液肥处理 7.5~13.5 mm 层的这一“优势”有减小的趋势,如:施磷量为  $P_2O_5$  37.44 mg/dish 的砂土,固肥处理 7.5~13.5 mm 层 Olsen-P 含量为 732.72 mg/kg,明显高于液肥处理的 313.41 mg/kg (图 1C)。这可能与砂土的土壤质地与液体肥料的流动性有关。

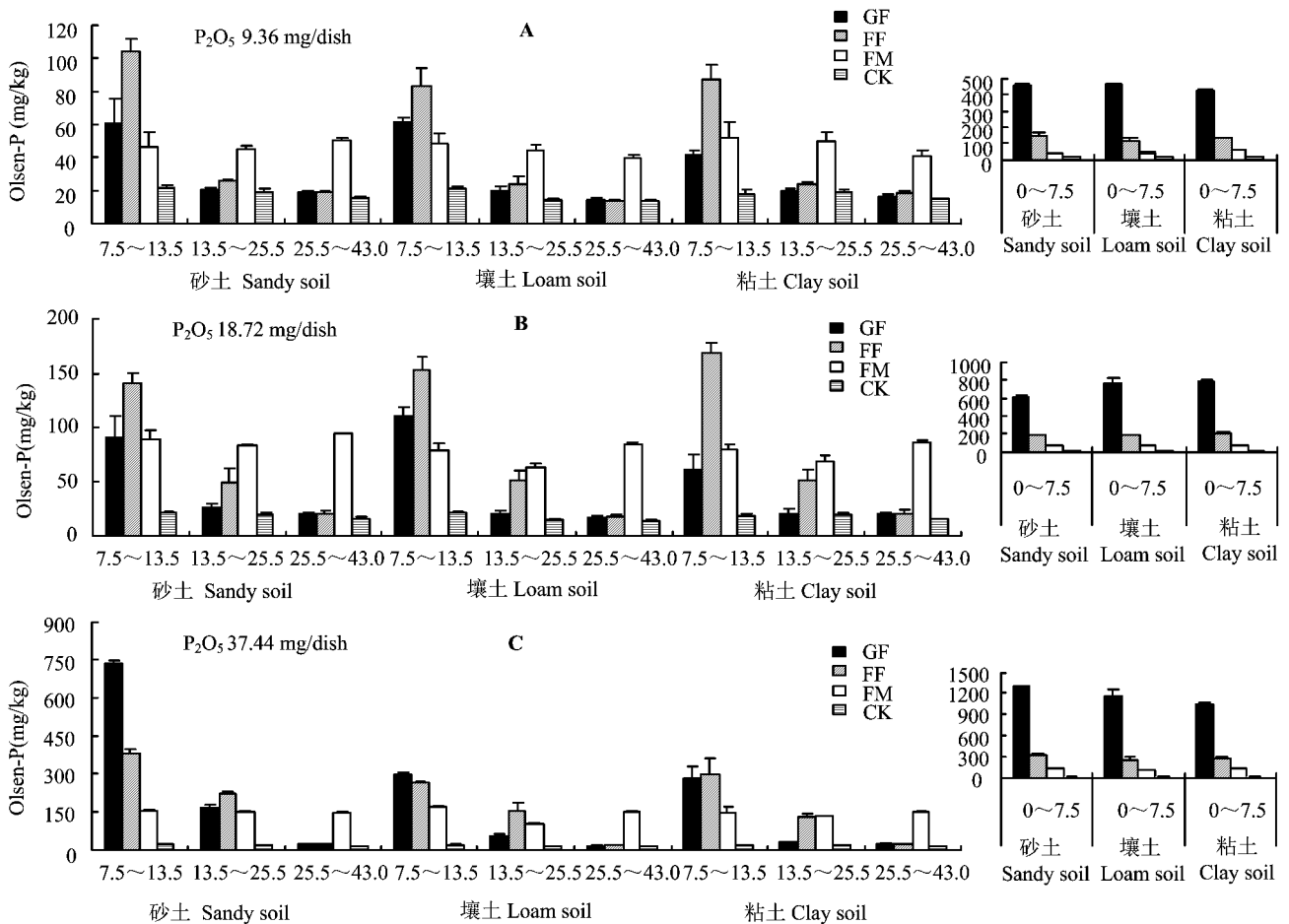


图 1 距肥料施入点不同距离土层的 Olsen-P  
Fig. 1 Contents of Olsen-P in different soil sections

## 2.2 不同形态磷肥在各圈层土壤的分布

在3个施磷水平条件下,砂土、壤土、粘土上的外加磷源在不同圈层的分布上均存在显著差异(图2)。固态磷处理的大部分肥料磷保留在最内层,外加肥料磷在各土壤圈层所占的含量百分比从内层向外递减。如粘土(图2C)在施磷量1( $P_2O_5$  9.36 mg/dish)下,肥料在0~7.5、7.5~13.5、13.5~25.5、25.5~43.0 mm层所占比例分别为:60%、17%、12%、9%;砂土(图2A)与壤土(图2B)中的分布规律与粘土类似,3个施磷量之间在土壤圈层上的分布规律也基本一致。

液体肥料在各层的百分比同样表现为随着层数的递增而减小,但是与固体肥料相比,除了0~7.5 mm层低于固肥处理外,其余7.5~13.5、13.5~25.5、25.5~43.0 mm层都高于固肥处理。如粘土在施磷量1下,液体肥料在4个土层所占的百分比分别为:40%、31%、15%、12%(图2C)。3种施磷量也表现出一致的变化规律。

## 2.3 不同肥料处理对各圈层土壤pH值变化的影响

由表2可以看出,固态(GF)与液态(FF)肥料中,3种施磷量水平下,土壤的最低pH值都出现在0~7.5与7.5~13.5 mm两层。如施磷量1( $P_2O_5$  9.36

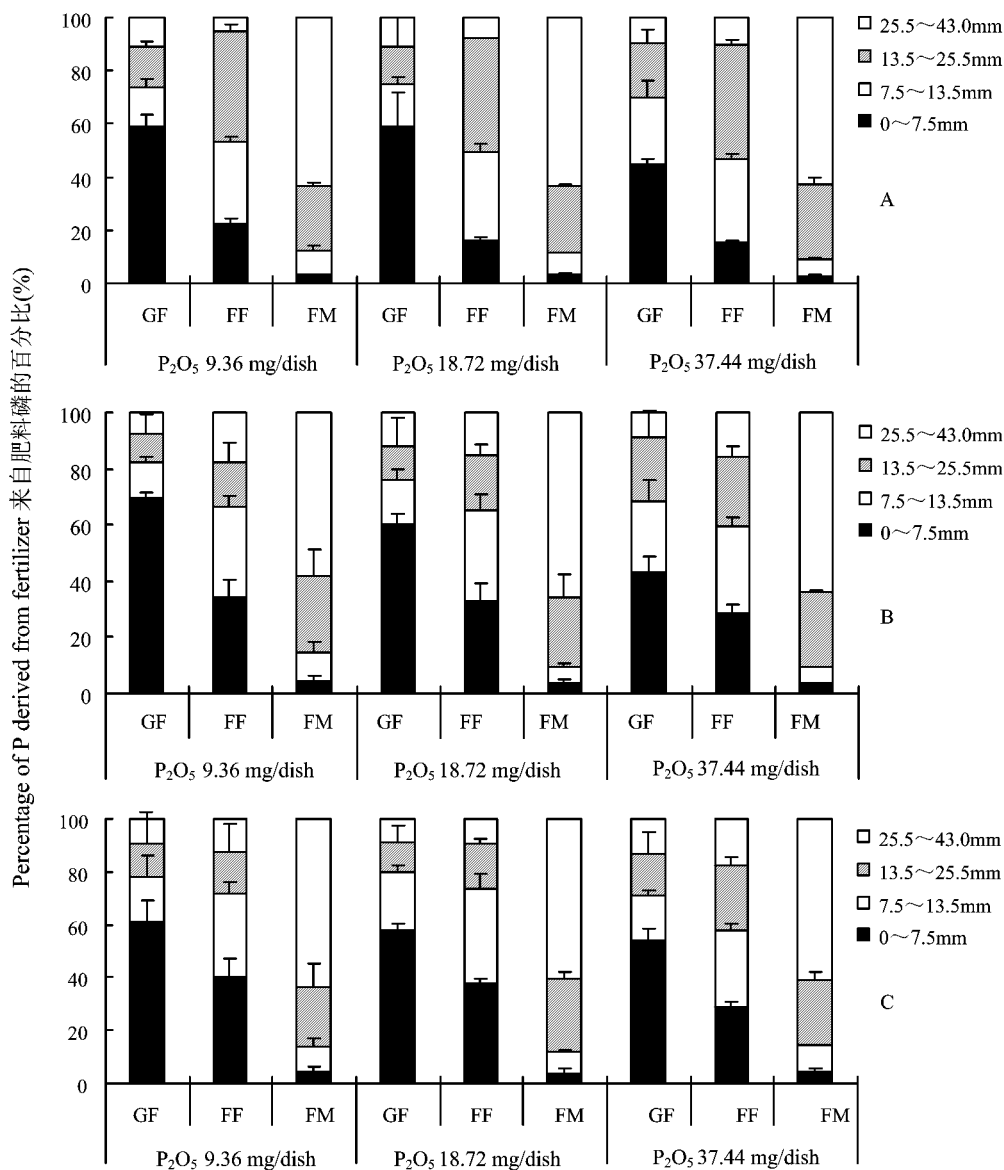


图2 来自肥料中磷在各圈层土壤所占的百分比

Fig. 2 Percentage of P derived from fertilizer in each soil section

[注(Notes): A—砂土 Sandy soil; B—壤土 Loam soil; C—粘土 Clay soil; GF—固体肥料 Granular fertilizer; FF—液体肥料 Fluid fertilizer; FM—固体肥料与土壤混匀 Granular and soil mixed.]

表 2 三种土壤距施肥点不同距离土层 pH 值  
Table 2 Soil pH at different distances from the point of fertilizer application

磷浓度 P concentration ( $P_2O_5$ mg/dish)	土壤层 Soil section (mm)	砂土 Sandy soil			壤土 Loam soil			粘土 Clay soil		
		GF	FF	FM	GF	FF	FM	GF	FF	FM
9.36	0~7.5	7.66 d	7.60 d	8.26 a	7.67 d	7.62 cd	8.01 ab	7.92 c	7.63 d	8.25 a
	7.5~13.5	8.06 b	7.85 c	8.26 a	7.78 bcd	7.81 abcd	8.03 ab	7.97 c	7.71 d	8.27 a
	13.5~25.5	8.15 ab	8.23 a	8.26 a	7.98 ab	7.83 abcd	8.08 a	8.21 ab	8.02 bc	8.28 a
	25.5~43.0	8.27 a	8.26 a	8.27 a	8.05 ab	7.95 abc	8.06 ab	8.24 a	8.12 abc	8.27 a
	平均值 Avg.	8.04 B	7.99 B	8.26 A	7.88 B	7.82 B	8.05 A	8.09 B	7.87 C	8.27 A
18.72	0~7.5	7.77 cd	7.58 d	8.23 a	7.52 c	7.59 c	7.99 ab	7.74 b	7.88 b	8.24 a
	7.5~13.5	7.97 abc	7.86 bcd	8.27 a	7.62 c	7.80 bc	8.02 ab	8.23 a	7.93 b	8.25 a
	13.5~25.5	8.07 ab	8.21 a	8.22 a	7.99 ab	8.08 ab	8.04 ab	8.23 a	8.29 a	8.29 a
	25.5~43.0	8.26 a	8.23 a	8.28 a	8.14 a	8.09 ab	8.12 ab	8.22 a	8.34 a	8.25 a
	平均值 Avg.	8.02 B	7.97 B	8.25 A	7.82 B	7.89 B	8.05 A	8.11 B	8.11 B	8.26 A
37.44	0~7.5	7.68 b	7.57 b	8.23 a	7.89 b	7.47 c	7.97 ab	7.72 c	7.73 c	8.22 a
	7.5~13.5	8.18 a	7.85 b	8.24 a	8.12 ab	8.01 ab	8.00 ab	8.12 ab	7.88 bc	8.24 a
	13.5~25.5	8.26 a	8.22 a	8.24 a	8.19 a	8.04 ab	8.02 ab	8.29 a	8.03 ab	8.25 a
	25.5~43.0	8.25 a	8.21 a	8.27 a	8.16 ab	8.07 ab	8.03 ab	8.29 a	8.09 ab	8.24 a
	平均值 Avg.	8.09 B	7.96 B	8.24 A	8.09 A	7.90 B	8.00 AB	8.10 B	7.93 C	8.24 A

注(Note): GF—固体肥料 Granular phosphate fertilizer, FF—液体肥料 Fluid phosphate fertilizer, FM—固体肥料与土壤混匀 Granular fertilizer mixed. 数据后不同小写字母表示处理间差异达 5% 显著水平 Values followed by different small letters are significant at 5% levels among different treatments. 平均值后不同大写字母分别表示差异达 5% 显著水平 Average values followed by different capital letters are significant at 5% levels.

mg/dish), GF 处理 0~7.5 mm 层的 pH 比未施肥的 CK 处理平均降低了 0.63(砂土)、0.40(壤土)、0.38(粘土)个单位;液肥处理降低了 0.69(砂土)、0.45(壤土)、0.67(粘土)个单位。离施肥点较远的 13.5~25.5、25.5~43.0 mm 两层 pH 值没有产生明显的变化,肥料对土壤的酸化主要体现在内层,说明施用固、液肥有一定的酸化效应,但仅对施肥点土层 pH 有影响,而对施肥点以外土层 pH 的影响不显著。

### 3 讨论

#### 3.1 不同磷源对土壤磷的移动性、有效性的影响

固、液肥在土壤中的移动性、有效性不同是由多因素综合造成的。固体肥料施入土壤后,首先进行湿润过程,土壤毛细水进入肥料磷酸盐,此时水分运动方向与肥料中  $H_2PO_4^-$  的扩散方向相反,抑制了磷的扩散,使得施肥点微域的  $H_2PO_4^-$  浓度高,从而造成以沉淀反应为主导机制的磷固定<sup>[16]</sup>。另外,土壤毛细水进入肥料颗粒而溶解的一部分磷,会在该微域与土壤中丰富的石灰质形成大量的磷酸钙盐沉淀,导致磷的移动性与有效性降低(图 1,图 2)。液体肥料由于其较好的流动性,能在施肥点周围迅速

扩散,施入的磷在土壤中分布较均匀(图 2),如在 0~7.5 mm 圈层液态磷的百分含量显著小于固态磷(图 1)。因此,磷的固定机制可能是以吸附固定为主,较少的磷被土壤固定。Lombi 等<sup>[17]</sup>利用同位素示踪研究表明,液体肥料处理下土壤水溶性磷浓度显著高于固体肥料处理( $P \leq 0.001$ )便证明了这一点。固、液态磷肥在施肥点区域的固定机制、水分运动等方面的不同可能是造成不同形态磷在土壤中移动性、有效性差异的根本原因。

#### 3.2 不同磷源对土壤 pH 的影响

固、液态肥处理的土壤 pH 值均表现为由内层向外逐渐增加,pH 值的最低值出现在 0~7.5 mm 层。虽然固、液肥本身的 pH 不同,但二者对土壤 pH 值降低上却无明显差异。一些报道认为,酸性液体磷肥因其自身的酸性,可以通过酸化施肥点周围的土壤从而达到提高石灰性土壤磷的有效性的目的<sup>[18-19]</sup>;酸性液体肥料能够显著降低土壤 pH,但仅仅限制在与肥料相毗邻的土壤范围<sup>[20-21]</sup>。本研究也表明,无论是砂土、壤土还是粘土,酸性磷肥仅能影响到施肥点 0~7.5 mm 范围土壤的 pH 值;在另外一个大田试验也证实酸性液肥对土壤 pH 无显著影响<sup>[7]</sup>,这与石灰性土壤较高的缓冲性有关。由此

推断,试图通过酸性肥料降低石灰性土壤的 pH 值来增加土壤磷的溶解性与减少磷的固定从而提高磷肥利用率是不可行的。

总之,在石灰性土壤上,液体肥料处理在 7.5 ~ 43.0 mm 的 3 个圈层中的 Olsen-P 含量均明显高于固体肥料处理。在距施肥点较远处,液体磷肥与固体磷肥相比,能显著提高土壤有效磷水平。液体磷肥能显著提高磷在土壤中的移动性,在施肥点以外的各土壤圈层,液体肥料含量高于固体肥料。

### 参考文献:

- [1] 张宝贵,李贵桐. 土壤生物在土壤磷有效化中的作用[J]. 土壤学报,1998,36(1): 104-111.  
Zhang B G, Li G T. Roles of soil organisms on the enhancement of plant availability of soil phosphorus[J]. Acta Pedol. Sin., 1998, 36(1): 104-111.
- [2] Bengal A, Dudley L M. Phosphorus availability under continuous point source irrigation[J]. Soil Sci. Soc. Am., 2003, 67: 1449-1456.
- [3] 娄运生,李忠佩,张桃林. 不同水分状况及施磷量对水稻土中速效磷含量的影响[J]. 土壤,2005,37(6): 640-644.  
Lou Y S, Li Z P, Zhang T L. Change in available P content in paddy soils as affected by phosphate fertilization and soil moisture regime[J]. Soils, 2005, 37(6): 640-644.
- [4] 曲均峰,李菊梅,徐明岗,戴建军. 长期不施肥条件下几种典型土壤全磷和 Olsen-P 的变化[J]. 植物营养与肥料学报,2008, 14(1): 90-98.  
Qu J F, Li J M, Xu M G, Dai J J. Total-P and Olsen-P dynamics of long-term experiment without fertilization[J]. Plant Nutr. Fert. Sci., 2008, 14(1): 90-98.
- [5] 李俊艳,胡红青,李荣纪,等. 改性磷矿粉对油菜幼苗生长和土壤性质的影响[J]. 植物营养与肥料学报,2009,15(2): 441-446.  
Li J Y, Hu H Q, Li R J *et al.* Modified phosphate rock by  $\gamma$ -poly glutamic acid and its effects on the growth of rapeseed seedlings and soil properties[J]. Plant Nutr. Fert. Sci., 2009, 15(2): 441-446.
- [6] 刘世亮,介晓磊,李有田,等. 不同磷源对作物根际效应影响的研究[J]. 土壤,2003,35(4): 325-329.  
Liu S L, Jie X L, Li Y T *et al.* Effect of sources of P on crop rhizosphere[J]. Soils, 2003, 35(4): 325-329.
- [7] 褚贵新,李明发,危常州,等. 固体磷肥和液体磷肥对石灰性土壤不同形态无机磷及磷肥肥效影响的研究[J]. 植物营养与肥料学报,2009,15(2): 358-365.  
Chu G X, Li M F, Wei C Z *et al.* Influence of liquid and granular phosphate fertilizer on soil inorganic phosphorus fractions and fertilizer efficiency in calcareous soil[J]. Plant Nutr. Fert. Sci., 2009, 15(2): 358-365.
- [8] Bertrand I, Holloway R E, Armstrong R D, McLaughlin M J. Chemical characteristics of phosphorus in alkaline soils from southern Australia[J]. Aust. J. Soil Res., 2003, 41: 61-76.
- [9] 李寿田,周健民,王火焰,等. 不同土壤磷的固定特征及磷释放量和释放率的研究[J]. 土壤学报,2003,40(6): 908-914.  
Li S T, Zhou J M, Wang H Y *et al.* Characteristics of fixation and release of phosphorus in three soils[J]. Acta Pedol. Sin. 2003, 40(6): 908-914.
- [10] 慕韩锋,王俊,刘康,等. 黄土旱塬长期施磷对土壤磷素空间分布及有效性的影响[J]. 植物营养与肥料学报,2008,14(3): 424-430.  
Mu H F, Wang J, Liu K *et al.* Effect of long-term fertilization on spatial distribution and availability of soil phosphorus in Loess Plateau[J]. Plant Nutr. Fert. Sci., 2008, 14(3): 424-430.
- [11] Holloway R E, Bertrand I, Frischke A J *et al.* Improving fertilizer efficiency on calcareous and alkaline soils with fluid sources of P, N and Zn[J]. Plant Soil, 2001, 236: 209-219.
- [12] Bertrand I, McLaughlin M J, Holloway R E *et al.* Changes in P bioavailability induced by the application of liquid and powder sources of P, N and Zn fertilizers in alkaline soils[J]. Nutr. Cycl. Agroecosys., 2006, 74: 27-40.
- [13] Lombi E, McLaughlin M J, Johnston C *et al.* Mobility and liability of phosphorus from granular and fluid monoammonium phosphate differs in a calcareous soil[J]. Soil. Sci. Soc. Am., 2004, 68: 682-689.
- [14] Hettiarachchi G M, Lombi E, McLaughlin M J *et al.* Density changes around phosphorus granules and fluid bands in a calcareous soil[J]. Soil Sci. Soc. Am., 2006, 70: 960-966.
- [15] 鲍士旦. 土壤农化分析(第2版)[M]. 北京: 中国农业出版社,2000.  
Bao S D. Soil and agricultural chemistry analysis (2nd ed.) [M]. Beijing: China Agricultural Press, 2000.
- [16] Hedley M, McLaughlin M J. Reactions of phosphate fertilizers and by-products in soils[A]. Sims J T, Sharpley AN (eds.). Phosphorus: agriculture and the environment [M]. Madison, Wisconsin, USA: Monogr. Agron. NO. 46. ASA, CSSA, SSSA, 2005. 181-252.
- [17] Lombi E, McLaughlin M J, Johnston C *et al.* Mobility, solubility and liability of fluid and granular forms of P fertilizer in calcareous and non-calcareous soils under laboratory conditions[J]. Plant Soil, 2004, 269: 25-34.
- [18] 王改兰,郭堃梅,黄学芳. 酸性物质对石灰性土壤磷的活化效应[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版),2004,30(2): 120-122.  
Wang G L, Guo K M, Huang X F. Effect of acid materials on phosphate activation in calcareous soil[J]. J. Hunan Agric. Univ. (Nat. Sci.), 2004, 30(2): 120-122.
- [19] 姚晓芹,马文奇,楚建周. 磷酸对石灰性土壤 pH 及微量元素有效性的影响[J]. 土壤肥料,2005,(2): 14-16.  
Yao X Q, Ma W Q, Chu J Z. Effect of phosphoric acid on pH and micronutrient availability in calcareous soil[J]. Soils Fert., 2005, (2): 14-16.
- [20] Sample E C, Khasawneh F E, Hashimoto I. Reactions of ammonium ortho- and polyphosphate fertilizers in soil III. Effect of associated cations[J]. Soil. Sci. Soc. Am., 1979, 43: 58-65.
- [21] McLaughlin M J. New fertilizer formulations for highly calcareous soils of South Australia[C]. Waite Campus, Adelaide, Australia: CSIRO Land and Water and SARDI, 2002. 11-13.