滴施磷酸二氢钾后土壤中磷的移动和分布①

邓兰生[1]， 毛丰伟[2]， 涂攀峰[1]， 龚 林[1]， 黄兰芬[3]， 张承林[1*]

（1 华南农业大学资源环境学院植物营养系，广州 510642； 2 东莞市保得生物工程有限公司，广东东莞 523087；
3 广东省惠州市农科所，广东惠州 516008）

摘 要： 在室内采用土柱模拟滴灌施P肥，研究了P在土壤中的移动和分布。试验结果表明：①滴施含P量 200 mg/L的KH_2PO_4后P在砂壤土、轻壤土、重壤土中分别纵向移动了 22、16、14 cm。横向和纵向移动的距离基本相同。②随着滴施P浓度的增加，P的移动距离增大，P的主要累积层加深。赤红壤中滴施P 浓度 200、400、800、1 000 mg/L时，P分别移动了 12、16、20、22 cm，而且有效P和全P含量增加显著的土层深度分别为 0~8、0~12、0~18、0~20 cm。在相同质地情况下，滴施高浓度P肥溶液可以明显增加P的移动距离。

关键词： 滴灌；土壤；磷；移动

中图分类号： S275.6；S143.2

近 30 年来，滴灌的迅速发展带动了滴灌施肥技术的发展。目前在大田滴灌施肥实践中，主要滴施N肥和K肥，而滴施P肥相对较少。通过滴灌施用P肥一直存在争议。普遍认为P肥易累积在滴头周围，移动性小[1-3]。土壤中P的扩散距离一般为 3~4 cm[4-5]。如此小的扩散距离可能使滴灌施P不能被根系有效利用，另外，当灌溉水的硬度较高时，P可能与灌溉水中Ca、Mg等阳离子产生化学反应而生成沉淀，从而导致滴头堵塞。故建议P肥在滴灌系统中作基肥施用。有关滴灌施P后P移动距离的报导相差很大，从几厘米至几十厘米不等[6-9]。移动距离的差别主要与土壤质地、P肥种类、灌水时间等有关。研究表明，滴施P肥后，P在不同质地土壤中的移动性大小为砂壤土＞壤土＞黏土[10-11]。在土壤中P的移动性差异主要是受土壤对P的吸附固定的影响，但P的固定需要一定的时间。当采用高浓度P肥滴灌时，部分P被吸附固定，其余P会在滴灌过程中随水流移动更远距离。本文用KH_2PO_4作P源，研究了P的浓度对P移动距离的影响。同时比较了滴施P肥后P在砂壤土、轻壤土和重壤土中移动性的差别。研究结果将为田间滴灌施P肥提供理论指导。

1 材料与方法

1.1 供试土壤与肥料

研究土壤质地对P移动性差异的土壤为水稻土，取自广州市郊稻田，质地分别为重壤土、轻壤土和砂壤土（后面以质地来指代各土壤）。研究P浓度对P移动性影响的土壤为赤红壤，质地为壤土，取自广州市郊茶园。几种土壤的理化性质见表 1。供试肥料为磷酸二氢钾（KH_2PO_4，含P_2O_5 52.0%）。

表 1 供试土壤理化性质

Table 1 Soil physical and chemical properties

土壤	pH	有效 P（mg/kg）	全 P（g/kg）	＜0.01 mm物理性黏粒含量（g/kg）	EC（mS/cm）
重壤土	5.26	29.70	0.94	474.6	0.372
轻壤土	5.50	26.46	0.64	327.0	0.256
砂壤土	6.05	20.84	0.34	161.7	0.155
赤红壤	5.40	2.15	0.09	378.0	0.340

注：pH 与 EC 测定的水土比为 2.5∶1；有效 P 及全 P 测定方法见 1.4 试验方法。

① 基金项目：广东省教育部产学研结合项目（2009B090300332）和农业部公益性行业（农业）科研专项经费项目（200803030）资助。

* 通讯作者（clzhang@scau. edu. cn）

作者简介：邓兰生（1971—），男， 江西兴国人，硕士，讲师，主要从事作物营养与灌溉施肥方面的教学与科研工作。E-mail: lshdeng@scau. edu. cn

1.2 试验装置

P的纵向移动试验采用有机玻璃土柱，土柱总长61.5 cm，半径 2.5 cm。土柱由不同长度的玻璃节管组合而成，有机玻璃柱自上而下由 1 节长为 4.5 cm，21节长 2 cm和 2 节长 4.5 cm和 1 节长 6 cm的有机玻璃管组成。上部第一节管不装土，最后一节管中间有一个多孔的渗漏隔层并且底部密封。装土时在渗漏隔层铺上滤纸，从下往上逐节装土，保持土壤体积质量为砂壤土 1.37 g/cm^3，轻壤土 1.25 g/cm^3，重壤土 1.12 g/cm^3，赤红壤 1.48 g/cm^3。P的横向移动试验与P的纵向移动试验采用同一装置，不同的是将土柱上表面封住，土柱由竖立转为平放，滴灌时将滴头插入土壤中。P肥溶液装在 10 L的试剂瓶中，用医用塑料输液管与试剂瓶连接，滴头流量通过调整胶管上的孔夹松紧度来控制。

1.3 试验方案

共设置 2 个试验，试验一内容为P的横向和纵向移动：分别在砂壤土、轻壤土、重壤土上滴施KH_2PO_4，浓度为含P量 200 mg/L。试验二共设 4 个处理，分别在赤红壤上滴施KH_2PO_4 浓度为含P量 200、400、800、1 000 mg/L。两个试验每处理均重复 3 次。

1.4 试验方法

用KH_2PO_4配制不同浓度的P溶液（200、400、800、1 000 mg/L）盛于玻璃瓶中。由于不同质地土壤水的入渗速率不同，为保持土壤表面无积水，在 4 种土壤上设定了不同的滴头流量。砂壤土、轻壤土、重壤土和赤红壤滴头流量分别为 170、55、36 和 46 ml/h。滴头置于土柱中心。当土柱底部开始渗水时停止滴灌，平衡 5 h开始取样。进行P的横向移动试验时，由于水的横向运动不像纵向运动存在重力作用，而仅靠土壤吸持力横向扩散，因此要调整滴头流量。砂壤土、轻壤土和重壤土滴头流量分别为 75、25 和 16 ml/h。当土柱另一端开始渗水时停止滴灌。由于土柱是由多节有机玻璃管迭加的，前 21 节土柱每节长度为 2 cm，以后每节长度为 4.5 cm，取样时按节进行，即前 42 cm每层土壤厚度为 2 cm，42 cm以后为 4.5 cm。将每层土样风干过筛，采用盐酸-氟化铵浸提-钼锑抗比色法测定有效P含量，酸溶-钼锑抗比色法测定全P含量。本文应用土壤P净增加量来反映P在土壤中的移动，其计算公式为：

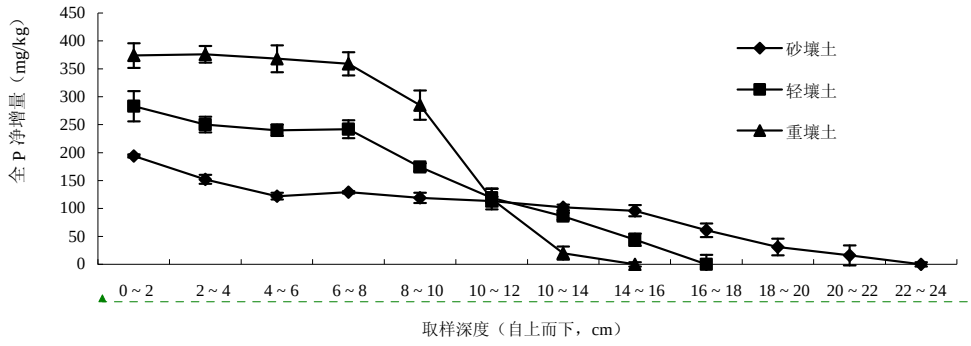
有效P净增加量（mg/kg）＝处理后有效P含量-本底值

全P净增加量（mg/kg）＝处理后全P含量-本底值

2 结果与分析

2.1 滴施KH_2PO_4后磷在不同质地土壤中的移动和分布

从图 1 可以看出，滴施P肥时，3 种类型土壤中P的纵向增量都随取样深度增加而逐渐减少。砂壤土中全P增量递减的幅度最小，取样深度至 22 cm时全P净增量为 0。轻壤土中 0~8 cm的全P增量递减幅度较小，8 cm后至 16 cm全P增量迅速递减至 0。重壤土中P递减规律与轻壤土相似，不同的是，当取样深度到达 14 cm的时候，全P增量递减至 0。



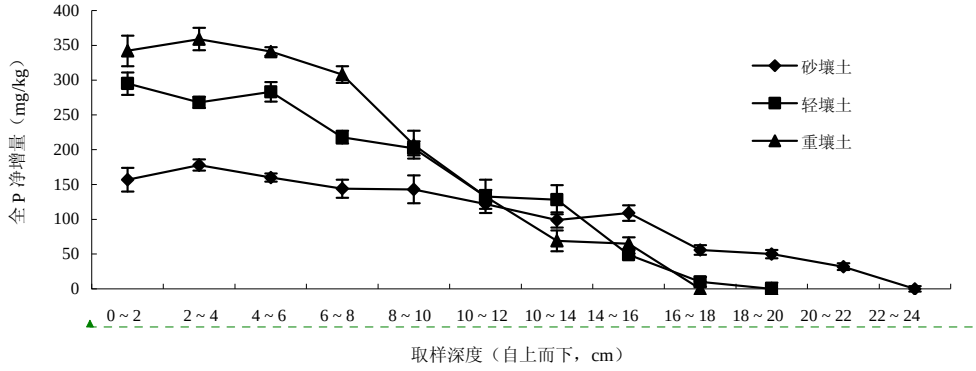
带格式的：字体：六号

带格式的：行距：固定值 13 磅

图 1 滴施KH_2PO_4后P在不同质地土壤中的纵向分布

Fig. 1 Vertical distributions of P in various-texture soils under drip P fertigation

图 2 表明，滴施P后P的横向移动规律与纵向相似，随着水平距离的增加，全P增量逐渐减少。砂壤土中全P增量一直以较恒定的梯度递减，直至取样深度达到 22 cm时全P增量变为 0 为止。轻壤土和重壤土中全P增量的变化幅度均比砂壤土的大，分别在 18 cm和 16 cm的深度全P增量变为 0。



带格式的：字体：六号

带格式的：行距：固定值 13 磅

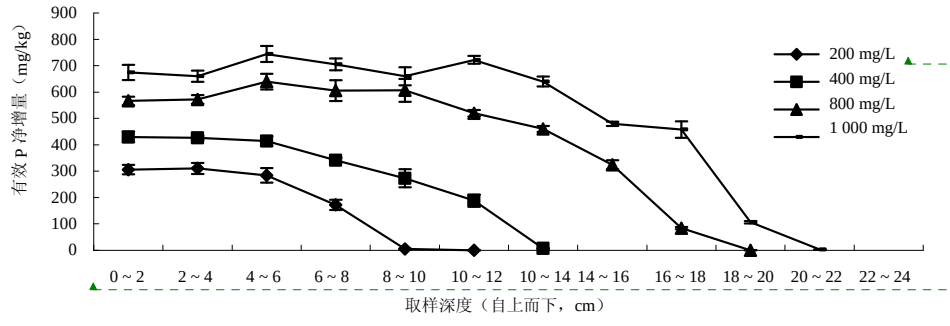
图 2　滴施KH_2PO_4后P在不同质地土壤中的横向分布

Fig. 2　Horizontal distributions of P in various-texture soils under drip P fertigation

在不同质地的土壤中P的移动性存在差异。在本试验条件下砂壤土中P纵向和横向移动的最大距离为 22 cm，轻壤土中P纵向移动的最大距离为 16 cm，横向移动的最大距离为 18 cm；重壤土中P纵向移动的最大距离为 14 cm，横向移动的最大距离为 16 cm。表明P纵向和横向移动的距离大致相同。另外，从 3 种土壤各个深度全P净增加量（图 1 与图 2）可知，在土壤表层，即靠近滴头的区域，土壤全P增加量为砂壤土最小，重壤土最大，轻壤土介于两者之间。随着距滴头距离的增加，砂壤土、轻壤土与重壤土之间土壤全P净增量逐渐接近，10～12 cm土层砂壤土纵向增量为 113 mg/kg，横向增量为 122 mg/kg；轻壤土纵向增量为 119 mg/kg，横向增量为 133 mg/kg；重壤土纵向增量为 117 mg/kg，横向增量为 133 mg/kg。12 cm以下 3 种土壤全P净增量逐渐减少，砂壤土减小缓慢，轻壤土次之，重壤土最快。总的来说，砂壤土中P移动性最强，P在各深度之间分布最均匀，轻壤土次之，重壤土最差，重壤土中P主要在表层累积。

2.2　滴施不同浓度的磷后磷在赤红壤中的移动和分布

图 3 表明，相同灌溉量下滴施P肥时，在同一深度土壤有效P的净增量与滴施浓度成正比，浓度越大，净增量越大。滴施含P量 200 mg/L KH_2PO_4时，在 0～2、2～4、4～6、6～8、8～10 和 10～12 cm土层有效P的净增量分别为 305.7、310.3、284.2、172.0、5.0 和 0.3 mg/kg，12 cm以后有效P的净增量为 0。滴施含P量 400、800、1 000 mg/L的KH_2PO_4时得到相同的规律，即在同一浓度下，随着土壤深度增加，有效P净增量显著减少。但在不同浓度下，随土壤深度增加，高浓度滴灌时P的移动距离要明显大于低浓度滴灌。在 0 ～ 2 cm土层滴施 200、400、800、1 000 mg/L KH_2PO_4时有效P净增量分别为 305.7、429.8、566.5、674.4 mg/kg。



带格式的：字体：六号

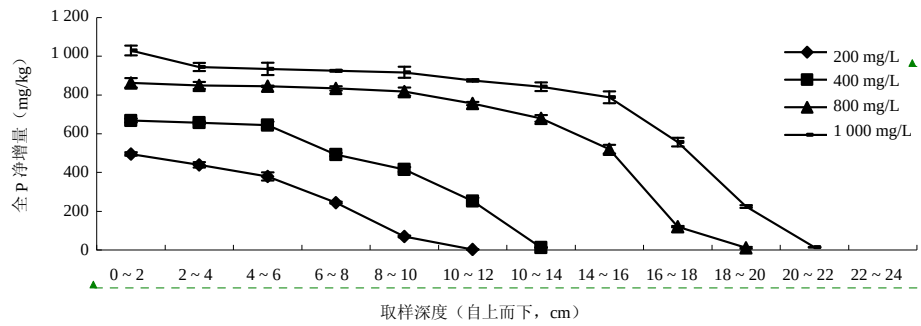
带格式的：字体：六号

带格式的：行距：固定值 13 磅

图 3　滴施不同浓度的 P 后有效 P 在赤红壤中的纵向分布

Fig. 3　Vertical distributions of available P at various P concentrations in lateritic soil

图 4 表明，全P的移动和分布与有效P的移动和分布相似。滴施 200 mg/L的KH_2PO_4时，在 0~2、2~4、4~6、6~8、8~10 和 10~12 cm土层全P净增量分别为 495.6、439.3、379.3、244.8、69.5 和 2.7 mg/kg，12 cm以后全P的净增量为 0，自上而下基本呈递减趋势。滴施 400、800、1 000 mg/L的KH_2PO_4时也呈相同的规律。在 0 ~ 2 cm土层滴施 200、400、800 和 1 000 mg/L的KH_2PO_4时全P净增量分别为 495.6、668.5、862.9 和 1 029.9 mg/kg，表明随着滴施P浓度的增加，同一深度全P增量显著增加。



带格式的：右，缩进：左侧： 2.85 磅，行距：固定值 11 磅

带格式的：字体：六号

带格式的：字体：六号

带格式的：行距：固定值 13 磅

图 4 滴施不同浓度的 P 后全 P 在赤红壤中的纵向分布

Fig. 4 Vertical distributions of total P at various P concentrations in laterite soil

3 讨论与结论

P在酸性土壤中的移动受很多因素的影响，主要有黏粒含量，有机质含量，活性Fe、Al和Mn的含量以及土壤本身P的含量和土壤pH值等。在滴灌条件下还受土壤体积质量[12]、滴头流量[13-14]、土壤初始含水量和每次灌水量等的影响[15-16]。本试验结果表明P的移动性与土壤质地和滴施的P浓度有关。土壤越黏重，P的移动性越小；在不同质地土壤中滴施含P量 200 mg/L的KH_2PO_4时，P在重壤土、轻壤土和砂壤土中的移动距离分别为 14、16 和 22 cm。本试验结果与甘润明等[10]的相似，他们研究黏土、壤土、砂壤土膜下滴灌施肥后P在土壤中的分布后发现 0 ~ 20 cm土层有效P的含量显著增加。金亮等[17]的研究表明，土壤中游离出的Al^{3+}、Fe^{3+} 和Ca^{2+} 会固定施入的P肥，从而降低P的迁移距离，而且在施入磷酸二氢钙后，石灰性土壤中肥料P的迁移性较差，90% 以上集中在不到一半的距离内。

土壤对P的吸附和解吸的原理表明，P的迁移距离、速率和迁移量主要是受土壤中P固定位点的影响，当溶液中供P量大于土壤中P固定位点的数量或速率，则P不能被完全固定，会进一步迁移[18-19]。不同质地土壤P的吸附固定动力学速率不同，P的最大固定量或饱和吸附量，是决定P迁移距离不同的原因。温林钦等[20]对不同质地土壤中P动态变化研究表明，黑钙土的固P能力明显高于潮土，两者的敏感P临界点对应的土壤Olsen-P含量分别为 88.9 和 142.5 mg/kg。

刘洪亮等[7]在研究中壤土膜下滴灌施肥时发现，P的横向和纵向移动主要发生在 0 ~ 10 cm范围。与他们试验结果有差别的主要原因可能是试验所采用的土壤质地不同。本试验验证了P浓度对P的移动性存在显著影响。即随着滴施P溶液浓度的增高，P在土壤中的移动性增大。在赤红壤中滴施含P量 200、400、800、1 000 mg/L的KH_2PO_4时P的纵向移动距离分别为 12、14、20 和 22 cm。对赤红壤的等温吸附曲线测定表明，常温下平衡 48 h赤红壤对P的最大吸附值是 833 mg/kg，而本试验滴施 51 cm长的土柱需要时间为 9 h左右。因此当用高浓度的P溶液进行滴施时，大部分P没有被土壤吸附固定而随水下移，从而增加了P在土壤中的移动距离。

在生产实践中，蔬菜等浅根系作物的根系主要分布在 0~20 cm土层，滴施 200 mg/L的P溶液，P就可移动到作物根系的主要分布区，从而满足作物对P的需求。但对于深根系的木本植物来说（如果树），根系主要分布在 0 ~ 30 cm甚至更深，需要增加滴施溶液的P浓度，来增大P的移动距离，从而促进P的吸收。对于不同质地的土壤，可以通过调节滴施P肥溶液的浓度，来增加P的移动距离。土壤越黏重，需要滴施P的浓度越高。对于作物来说，土壤中有效P的含量在 30 ~ 40 mg/kg就可以满足作物对P的需要。在本试验中赤红壤滴施含P量 1 000 mg/L的KH_2PO_4时，在不同深度土层

（0～20 cm）有效P的净增量都高于 100 mg/kg。因此，在生产实践中，针对不同的土壤应该滴施不同浓度的P来满足作物的生长需要。

参考文献：

[1] Klein I, Spieler G. Fertigation of apples with nitrate or ammonium nitrogen under drip irrigation: II Nutrient distribution in the soil. Communication in Soil Science and Plant Analysis, 1987, 18(3): 323−339

[2] 陈顺辉, 李文卿, 谢昌发. 烟田土壤养分移动规律研究: I 氮、磷、钾的移动规律. 中国烟草学报, 2003, 9(2): 13−17

[3] 王小龙. 喷灌条件下沙土地速效养分移动特性研究. 河南职技师院学报, 2001, 29(4): 28−30

[4] White EM. Surface banding phosphorus to increase movement into soils. Communication in Soil Science and Plant Analysis, 1996, 27(9/10): 2 005−2 016

[5] Nayakekorola H, Woodard HJ. Profile distribution of extractable phosphorus following a knife-applied subsurface phosphorus fertilizer band. Communication in Soil Science and Plant Analysis, 1995, 26(19/20): 3 193−3 203

[6] Bharambe PR, Mungal MS, Shelke DK. Effect of soil moisture regimes with drip on spatial distribution of moisture，salts，nutrient availability and water use efficiency of banana. Journal of the Indian Society of Soil Science, 2001, 49(4): 658−665

[7] 刘洪亮, 曾胜河, 施敏, 赵凤梅, 黄琴. 棉花膜下滴灌施肥技术的研究. 土壤肥料, 2004(2): 30−34

[8] 付明鑫, 王广友, 鲍明运, 李南民. 氮磷钾在滴灌棉田土壤中的移动性研究. 新疆农业科学, 2005, 42(6): 426−429

[9] 尹飞虎, 康金花, 黄子蔚, 曾德超. 棉花滴灌随水施滴灌专用肥中磷素的移动和利用率的^{32}P研究. 西北农业学报, 2005, 14(6): 199−204

[10] 甘润明, 鲍柏洋, 孙孝贵. 膜下滴灌棉花不同施肥方式试验. 新疆农垦科技, 2002(5): 24−26

[11] Bar-Yosef B, Sheikholslami MR. Distribution of water and ions in soils irrigated and fertilized from a trickle source. Soil Science Society of American Journal, 1976, 40: 575−582

[12] Jury WA, Earl KD. Water movement in bare and cropped soil under isolated trickle emitters: I Analysis of bare soil experiments. Soil Science Society of American Journal, 1977, 41: 852−856

[13] 刘晓英, 杨振刚, 王天俊. 滴灌条件下土壤水分运动规律的研究. 水利学报, 1990(4): 11−21

[14] 王虎, 王旭东. 滴灌施肥条件下土壤水分和速交磷的公布规律. 西北农林科技大学学报 (自然科学版), 2007, 35(5): 141−146

[15] 陈渠昌, 吴忠渤, 佘国英, 荣浩. 滴灌条件下沙地土壤水分分布与运移规律. 灌溉排水, 1999, 18(1): 28−31

[16] 张振华, 蔡焕杰, 郭永昌. 滴灌土壤湿润体影响因素的实验研究. 农业工程学报, 2002, 18(2): 17−20

[17] 金亮, 周健民, 王火焰, 陈小琴, 杜昌文. 石灰性土壤肥际磷酸一钙的转化及肥料磷的迁移. 土壤, 2009, 41(1): 28−30

[18] 王道涵, 陈新, 梁成华. 水田土壤剖面磷素吸附－解吸特征. 中国农学通报, 2006, 22(6) : 249−251

[19] 邹强, 刘芳, 杨剑虹. 紫色土中砷、磷的吸附－解吸和竞争吸附. 应用生态学报, 2009, 20(6): 1 383−1 389

[20] 温林钦, 赵牧秋, 牛明芬, 陈欣, 鲁彩艳. 施磷对不同质地土壤Olsen-P和$CaCl_2$-P动态变化的影响. 生态学杂志, 2009, 28(5): 872−878

Movement and Distribution of Phosphorus in Soil Under Drip Fertigation of KH_2PO_4 Solution

DENG Lan-sheng[1], MAO Feng-wei[2], TU Pan-feng[1], GONG Lin[1], HUANG Lan-fen[3], ZHNAG Cheng-lin[1]

(1 *Department of Plant Nutrition, College of Nature Resources and Environment, South China Agricultural University, Guangzhou* 510642,*China;*

2 *Dongguan Baode Biological Engineering Co., Ltd, Dongguan, Guangdong* 523087, *China;*

3 *Huizhou Institute of Agricultural Science, Huizhou, Guangdong* 516008,*China*)

Abstract： In order to evaluate the movement and distribution of phosphorus fertilizers in soils under drip fertigation, a soil column experiment was conducted to simulate drip fertigation. The results indicated that: (1) KH_2PO_4 moved vertically 22 cm in sandy loam soil, 16 cm in light loam soil and 14 cm in clay loam soil, respectively; P moved similar distance both in vertical and horizontal direction. (2) In lateritic soil, the higher P concentration was, the longer distance P moved in vertical direction. In terms of available P, vertical P movement in treatments of 200, 400, 800 and 1 000 mg/L were 12, 14, 20 and 22 cm, respectively; Both of total P and available P were significantly concentrated in the layer of 0-8, 0-12, 0-18 and 0-20 cm in the treatments of 200, 400, 800 and 1 000 mg/L, respectively. It is concluded that drip fertigation with high P concentration solution could increase the distance of P movement

Key words： Drip fertigation, Soil, Phosphorus, Movement