

## 钾在红壤肥际微域中的迁移\*

杜振宇<sup>1,2</sup> 周健民<sup>1</sup>

(1 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)

(2 中国科学院研究生院, 北京 100039)

## MOVEMENT OF POTASSIUM IN FERTILIZER MICROSITES IN RED EARTH

Du Zhenyu<sup>1,2</sup> Zhou Jianmin<sup>1</sup>

(1 State Key Laboratory of Soil and Sustainable Agriculture, Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China)

(2 Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

关键词 钾; 红壤; 迁移; 转化; pH

中图分类号 S153.3 文献标识码 A

钾是植物生长必需的大量元素, 施入土壤中的钾主要通过扩散作用与作物根系接触而被吸收利用, 其在土壤中的扩散受水分、温度、质地等多种因素的影响<sup>[1]</sup>。研究钾在土壤中的迁移距离和形态变化有助于了解钾的土壤化学行为, 从而指导合理施肥。肥料施入土壤后, 特别在集中施用(条施、穴施、带施等)都会在肥料附近造成一个特殊的环境, 在这一微域内, 肥料养分的浓度数倍或十几倍于整个土体, 它必然会引起一系列特殊的物理、化学、物理化学和生物学的反应。这些反应常常对土壤生产力和植物营养会产生很大影响, 研究这一区别于整个土体的特殊区域的特殊反应必然有着巨大的理论和实际意义, 鲁如坤把这一微域称为肥际微域<sup>[2]</sup>。养分通常是在这一区域内迁移至作物根系而被吸收利用。以往关于钾扩散迁移的研究多数是集中在田

间土壤剖面上的淋溶迁移<sup>[3-5]</sup>, 关于钾在肥际微域中迁移和转化的报道很少。董元彦利用室内培养实验研究了在施用  $\text{KH}_2\text{PO}_4$  时钾在红壤中的迁移及扩散系数<sup>[6]</sup>, 但没有涉及钾在土壤中的形态转化和有效性。本研究采用室内土柱培养实验, 研究了不同施用量和培养时间下钾在红壤肥际微域中的迁移和转化, 为田间合理施用钾肥提供理论依据。

## 1 材料与方法

## 1.1 材料

供试土壤为红壤, 采自江西鹰潭中国科学院红壤生态实验站, 为耕层表土(0~15 cm), 其基本理化性状见表 1。土壤样品风干磨碎并过 20 目筛备用。供试肥料为分析纯 KCl 试剂, 磨细并过 20 目筛。

表 1 土壤基本理化性状

pH ( $\text{H}_2\text{O}$ , 1:2.5)	CEC ( $\text{cmol kg}^{-1}$ )	有机质 ( $\text{g kg}^{-1}$ )	速效钾 ( $\text{mg kg}^{-1}$ )	缓效钾 ( $\text{mg kg}^{-1}$ )
4.6	9.88	10.8	49.25	96.80

## 1.2 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 15 cm, 直径 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

\* 国家自然科学基金项目(No. 40071051)和国家重点基础研究发展规划项目(G1999011802)资助

作者简介: 杜振宇(1973~), 男, 山东枣庄人, 山东省林业科学院高级工程师, 博士研究生, 主要从事土壤肥力、植物营养和新型肥料开发方面的研究。E-mail: zdy@issas.ac.cn; zhenyu.du@163.com

收稿日期: 2004-10-28; 收到修改稿日期: 2005-03-25

铸而成<sup>[7]</sup>。蜡筒一端用两张圆形滤纸封口,均匀装土 360 g,使容重为  $1.22 \text{ g cm}^{-3}$ 。在蜡筒另一端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,向细砂盘中加入去离子水,利用毛细管作用使土柱均匀吸水至饱和持水量,此时含水量为  $370 \text{ g kg}^{-1}$ 。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>[8]</sup>,将蜡筒垂直放于  $25 \text{ }^\circ\text{C}$  室内平衡 48 h。

实验共设 4 个施肥处理: (1) KCl 0.2 g, 培养 7 d; (2) KCl 0.2 g, 培养 28 d; (3) KCl 0.5 g, 培养 7 d; (4) KCl 0.5 g, 培养 28 d。KCl 施用量 0.2 g 和 0.5 g 分别含 K 0.10 g 和 0.26 g, 这相当于在田间分

别按施钾量(以  $\text{K}_2\text{O}$  计)  $64 \text{ kg hm}^{-2}$  和  $160 \text{ kg hm}^{-2}$ , 以宽 5 cm、间距 45 cm 的肥料带条施 KCl 肥。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实验为对照。土柱平衡后,将 KCl 均匀撒放于土柱顶面上的滤纸圆片上,然后再次用 Parafilm 膜封口以保持水分,在  $25 \text{ }^\circ\text{C}$  室内培养。分别在 7 d 或 28 d 后,去除顶部滤纸片,用自行设计的切土装置(图 1)将蜡筒从顶端依次切成 25 片 2 mm 厚和 20 片 5 mm 的薄片,取其中的土样供分析化验。为了精确地取得厚度为 2 mm 的土样,切土装置采用螺纹为 2 mm 的螺杆推动蜡筒,转动一圈螺杆,蜡筒被推出 2 mm,用锋利的不锈钢刀片连同蜡筒一起切下,切取 5 mm 时需转动螺杆两圈半。

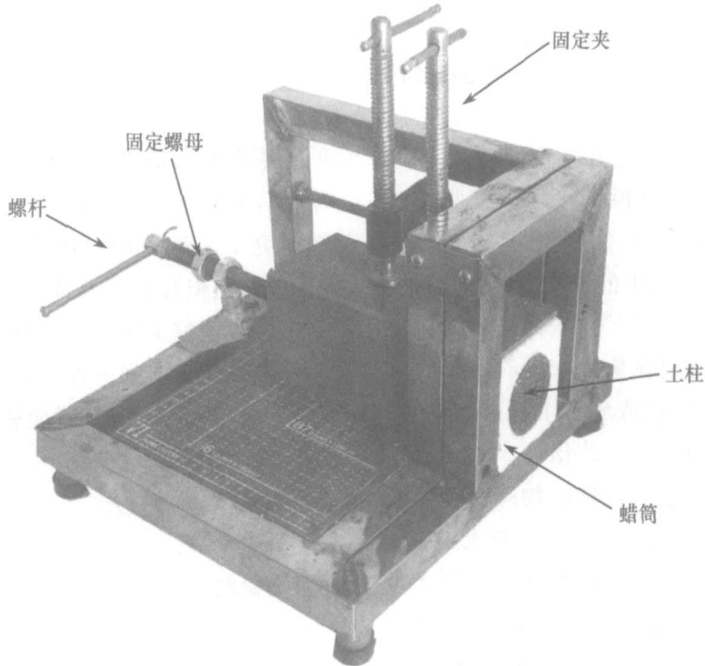


图 1 切土装置图

测定土样的含水量和不同形态钾含量。取 1.37 g 湿土样(约相当于 1 g 干土重)放于具塞塑料离心管中,加入 5 ml 去离子水,振荡 10 min,离心,取上清液,然后再同样提取一次,两次离心液混合,该提取液中的钾含量为水溶性钾含量<sup>[9]</sup>。向分离水溶性钾后的离心管中加入 10 ml  $1 \text{ mol L}^{-1}$  中性  $\text{NH}_4\text{OAc}$  溶液,振荡 30 min 后离心分离,上清液用于测定交换性钾含量。然后将离心管中的土壤残渣用 10 ml  $1 \text{ mol L}^{-1}$   $\text{HNO}_3$  溶液转移至 50 ml 高型烧杯中,煮沸 10 min 以提取非交换性钾。提取溶液中的钾用火焰光度计测定。取 1 g 湿土样放于离心管中,按水土比 1:2.5 加入去离子水,经涡旋仪充分混合

后,用微型 pH 电极测定土样 pH 值。

在本实验中,土壤样品中钾含量用干基表示,数据的统计分析通过 STATISTICA 6.0 统计软件完成。

## 2 结果与讨论

### 2.1 水溶性钾和交换性钾在肥际微域中的含量分布

当 KCl 施用量为 0.2 g 时,钾在培养时间 7 d 和 28 d 时的迁移距离分别为 6 cm 和 9 cm; 而当 KCl 施用量为 0.5 g 时的迁移距离分别为 6 cm 和 11 cm(见图 2、图 3),前期移动较快。据 Hao 报道<sup>[9]</sup>,在含水

量 13% 和容重  $1.86 \text{ g cm}^{-3}$  的土柱表面施加  $\text{KH}_2\text{PO}_4$ , 钾在加拿大的一种酸性土中的迁移距离低于 6 cm。董元彦的研究表明<sup>[6]</sup>, 经过 3~14 d 培养, 钾在红壤中的迁移距离为 1.8~3.4 cm, 供试土壤的

含水量为 15%, 容重  $1.6 \text{ g cm}^{-3}$ 。不同试验结果存在较大差异, 原因在于供试土壤和土壤理化性状不同所致, 而土壤的理化性质及粘土矿物组成对钾在土壤中的迁移存在着很大影响<sup>[10]</sup>。

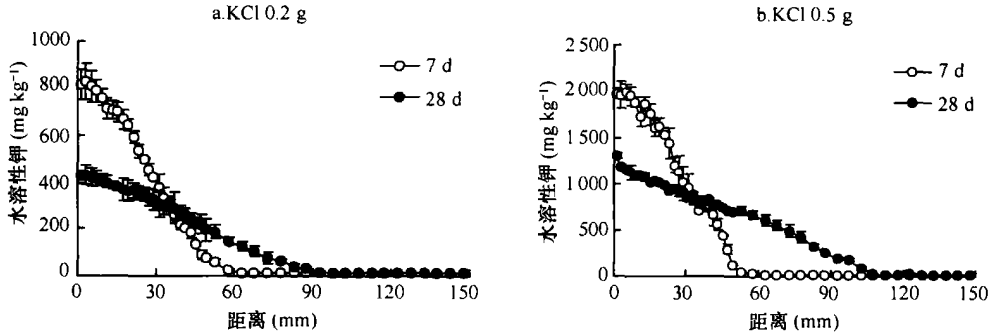


图 2 水溶性钾在肥际微域中的含量变化

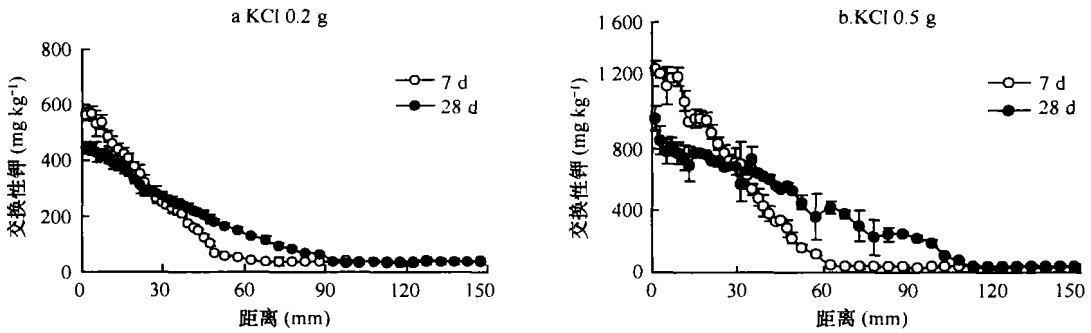


图 3 交换性钾在肥际微域中的含量变化

水溶性钾和交换性钾在肥际微域中的分布模式相似, 从图 2 和图 3 可以看出, 随着距施肥点距离的增加, 水溶性钾和交换性钾的含量均逐渐降低, 在迁移范围内, 两者与距离之间均呈极显著的线性关系(表 2)。在施肥点附近, 培养 7 d 时的水溶性钾和交换性钾含量分别显著大于培养 28 d 时的水溶性钾(交换性钾)含量, 然后随着距离的增加, 则显著小于

培养 28 d 时的含量。以施用  $\text{KCl} 0.5 \text{ g}$  为例, 在距施肥点 0~30 mm 距离内, 培养 7 d 时的水溶性钾和交换性钾含量分别显著高于培养 28 d 时的水溶性钾和交换性钾含量, 而在 30~90 mm 距离内的含量则显著低于培养 28 d 时的含量。这种变化趋势表明, 随着时间增加, 水溶性钾和交换性钾由土柱上部向下部进行迁移。

表 2 水溶性钾和交换性钾( $y, \text{mg kg}^{-1}$ )与迁移距离( $x, \text{mm}$ )间的线性回归分析( $y = b_0 + b_1x$ )

KCl 用量 (g)	培养时间 (d)	水溶性钾( $\text{mg kg}^{-1}$ )			交换性钾( $\text{mg kg}^{-1}$ )		
		$b_0$	$b_1$	$r^2$	$b_0$	$b_1$	$r^2$
0.2	7	901 c	-16.48 b	0.986**	571 c	-10.05 b	0.986**
0.2	28	458 d	-5.08 d	0.992**	430 d	-4.77 d	0.966**
0.5	7	2225 a	-39.72 a	0.962**	1354 a	-22.44 a	0.986**
0.5	28	1217 b	-10.61 c	0.982**	847 b	-7.47 c	0.960**

注: 同一列不同字母表示在  $p < 0.05$  水平下差异显著(LSD 检验), \*\* 表示相关极显著

将4个施肥处理的水溶性钾(交换性钾)含量分别与迁移距离进行线性拟合( $y = b_0 + b_1x$ ),截距( $b_0$ )代表肥料与土壤界面处的钾含量,回归系数( $b_1$ )则代表钾含量随距离的变化率。对回归方程的系数进行方差分析和多重比较,用来考察施肥量和培养时间对水溶性钾(交换性钾)含量的影响。根据表2分析结果,4个回归方程的 $b_0$ 及 $b_1$ 间均存在显著性差异,表明施肥量和培养时间对水溶性钾和交换性钾含量均存在显著影响。

2.2 非交换性钾在肥际微域中的含量分布

在相同施钾量下,不同培养时间时非交换性钾

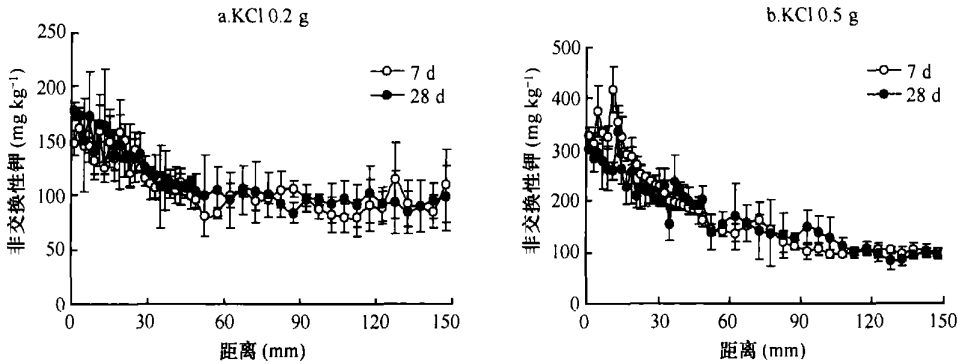


图4 非交换性钾在肥际微域中的含量变化

所固定的钾,因此我们以施钾处理土样中水溶性钾、交换性钾和非交换性之和,减去未施肥(空白)处理土样中此三种形态钾的总量作为来自肥料中的总钾量<sup>[12]</sup>。水溶性钾与交换性钾二者之和为有效钾。

表3结果表明,所施入钾的回收率在87.2%~97.8%之间,回收的总钾量稍低于所施入的钾量,可能是由于少量钾进入土壤晶格内部而不能被

在肥际微域中的分布没有显著性差异(图4),随着距施肥点越近,非交换性钾含量有逐渐增加的趋势。威尔科克森配对检验(Wilcoxon matched pairs test)表明,相同培养时间下,施钾量对非交换性钾含量有显著的影响( $p < 0.05$ ),施用0.5 g KCl时,在肥际微域中被固定的钾也越多。红壤中所含粘土矿物以高岭石为主,2:1粘土矿物很少,因此固钾能力较低<sup>[11]</sup>,但在距施肥点较近微域内,仍能观测到明显的固钾现象。

2.3 不同形态钾在肥际微域中的迁移量

由于 $1 \text{ mol L}^{-1}$ 沸 $\text{HNO}_3$ 能够比较完全地提取出

$1 \text{ mol L}^{-1}$ 沸 $\text{HNO}_3$ 提取。王火焰研究发<sup>[11]</sup>,当土样加入已知量钾肥后再测定土样缓效钾的变化值,通常测得的缓效钾变化值总会略小于施入钾的理论值,并命名为深层固定钾。另外,放置于土柱顶部的滤纸片也会吸附少量的钾,但数量很少(0.5 mg,实验室测定值)。

表3 所施入钾在肥际微域中的迁移量

KCl用量 (g)	培养时间 (d)	迁移量(mg)				
		水溶性钾	交换性钾	非交换性钾	有效钾	总钾量
0.2	7	57.76 c	34.06 b	3.70 b	91.81 b	95.51 b
0.2	28	46.50 d	39.99 b	4.79 b	86.48 b	91.27 b
0.5	7	147.2 a	87.77 a	20.22 a	234.9 a	255.1 a
0.5	28	135.4 b	93.75 a	27.04 a	229.2 a	256.2 a

注:同一列不同字母表示在 $p < 0.05$ 水平下差异显著(LSD检验)

所施入的钾只有少部分被土壤固定为非交换性钾,而绝大部分(89.5%~96.1%)以有效态形式存在,这是因为红壤中所含粘土矿物以高岭石为主,

2:1粘土矿物很少,因此固定钾能力也较低。这与夏威夷高度风化的热带土壤和巴西的氧化土中,几乎所有施入的钾以水溶性钾或交换性钾存在<sup>[13]</sup>的结

(1) 王火焰. NPK 肥料在土壤中的交互作用与养分的形态转化. 中国科学院南京土壤研究所博士后研究报告. 2001

果一致。由表 3 可以看出, 施肥量对各形态钾的迁移量均有显著影响, 而培养时间为 7 d 和 28 d 时不同形态钾的迁移量则没有显著性差异。施入的钾在 7 d 内就全部扩散入进入土壤中, 随时间增加, 由于固定, 有效性略有下降, 这就提示我们在田间施用钾肥时应合理选择施肥时间, 不宜过早施用, 具体的施肥措施应结合田间实验确定。

## 2.4 施用 KCl 对肥际微域土壤 pH 值的影响

KCl 是生理酸性肥料, 施入红壤后由于钾离子

会置换出土壤中的氢和一部分交换态铝, 因而能增加土壤的酸度<sup>[14]</sup>。钾自肥源向土壤迁移的过程中, 对土壤 pH 的影响也有一定变化。由图 5 可知, 在施肥点附近微域, 施用 KCl 显著降低了土壤 pH 值, 随着距施肥点距离的增加, 土壤 pH 值也逐渐增加, 直至接近土壤的本底 pH 值。相关分析表明, 土壤微域 pH 值与水溶性钾或交换性钾含量呈极显著负相关( $p < 0.01$ )。

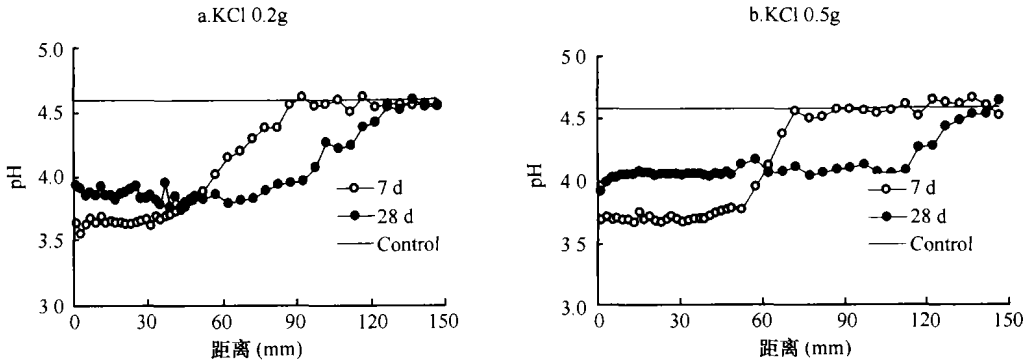


图 5 施钾对肥际微域土壤 pH 值的影响

## 3 结 论

在本实验条件下, 经过 7 d 和 28 d 的扩散, 钾在红壤中的迁移距离为 6~11 cm, 前期移动较快。施肥量和培养时间对水溶性钾、交换性钾和非交换性钾含量在肥际微域中的分布有显著影响。施入的钾在肥际微域中绝大部分仍以有效态存在。施用 KCl 显著降低了肥际微域土壤 pH 值, 随着距施肥点距离的增加, 土壤 pH 值也逐渐增加。

## 参 考 文 献

[ 1 ] Barber S A. Potassium availability at the soil-root interface and factors influencing potassium uptake. In: Munson R D. ed. Potassium in Agriculture. Madison, Wisconsin, USA: ASA-CSSA-SSSA, 1985. 309~324.

[ 2 ] 鲁如坤. “微域土壤学”——一个可能的土壤学新分支. 土壤学报, 1999, 36(2): 287~288

[ 3 ] 鲁如坤, 时正元, 赖庆旺. 红壤长期施肥养分的下移特征. 土壤, 2000, 22(1): 27~29

[ 4 ] Ganeshamurthy A N, Biswas C R. Movement of potassium in an Ustochrept Soil profile in a long-term fertilizer experiment. Journal of Agricultural Science, 1983, 102: 393~397

[ 5 ] 范闻捷, 介晓磊. 潮土区小麦-玉米轮作周期内土壤钾素动态研究: ③. 施钾对作物产量及土壤钾素动态的影响. 华中农业大学学报, 1999, 18(5): 427~430

[ 6 ] 董元彦. 磷钾在红壤中的迁移及扩散系数. 华中农业大学学报, 1995, 14(3): 247~252

[ 7 ] Khasawneh F E, Soileau J M. Soil preparation and sampling for studying ion movement. Soil Sci. Soc. Am. Proc., 1969, 33: 476~477

[ 8 ] Fan M X, MacKenzie A F. Interaction of urea with triple superphosphate in a simulated fertilizer band. Fert. Res., 1993, 36: 35~44

[ 9 ] 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

[ 10 ] Tisdale S L, Nelson W L, Beaton J D, et al. Soil Fertility and Fertilizers. 5th Ed. USA: Macmillan Publishing Company, 1993. 230~265

[ 11 ] 谢建昌. 钾与中国农业. 南京: 河海大学出版社, 2000. 53~71

[ 12 ] Malavolta E. Potassium status of tropical and subtropical region. In: Munson R D. ed. Potassium in Agriculture. Madison, Wisconsin, USA: ASA-CSSA-SSSA, 1985. 163~200

[ 13 ] McLean E O, Watson M E. Soil Measurements of plant-available potassium. In: Munson R D. ed. Potassium in Agriculture. Madison, Wisconsin, USA: ASA-CSSA-SSSA, 1985. 277~308

[ 14 ] Wang H Y, Zhou J M, Chen X Q, et al. Interaction of NPK fertilizers during their transformation in soils: I. Dynamic changes of soil pH. Pedosphere, 2003, 13(3): 257~262