

土壤水分对钾离子固液相分配特征的影响*

朱咏莉^{1,3} 王益权² 吴金水^{1,3}

(1 中国科学院水利部水土保持研究所黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 陕西杨凌 712100)

(2 西北农林科技大学资源环境学院, 陕西杨凌 712100)

(3 中国科学院亚热带农业生态研究所, 长沙 410125)

EFFECT OF SOIL WATER DYNAMIC PROCESS ON THE DISTRIBUTION OF POTASSIUM BETWEEN SOLID AND LIQUID PHASE

Zhu Yongli^{1,3} Wang Yiquan² Wu Jinshui^{1,3}

(1 State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Institute of Water and Soil Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100, China)

(2 College of Resources and Environment Science, Northwestern Sci-Tech University of Agriculture & Forestry, Yangling, Shaanxi 712100, China)

(3 The Institute of Subtropical Agriculture, Chinese Academy of Sciences, Changsha 410125, China)

关键词 土壤水分; 钾离子; 分配系数

中图分类号 S152.7 文献标识码 A

土壤水分状况是影响钾离子在土壤固液相分配转化和作物吸收利用的重要因子^[1-3]。对于植物所必须的钾素来说, 土壤水溶性钾和交换性钾是土壤钾库中最活跃的组分^[4-7]。钾在土壤固、液相间的转化速率与数量分配关系取决于土壤水分的存在形态以及 K^+ 与土壤固液相表面的作用方式, 并反映了土壤固钾能力^[8-11]。在以往的研究中, 通常采用田间持水量或饱和含水量情况下土壤提取液(即土壤溶液)作为平衡溶液^[9-11]。在本研究中以表征土壤水分存在状态的能量指标(基质吸力)为基础, 以不同吸力下的提取液为平衡溶液, 研究不同水分状况钾离子在土壤固液相间的转化和分配特征, 以期揭示阳离子型养分在土壤固相表面的作用机理及评价土壤对钾吸附能力和供钾能力提供一定的理论依据。

1 材料与方法

1.1 供试材料

供试土壤为黄土高原具有代表性的 4 种农业土

壤: 土(Lou soil)、黑垆土(Hei lu soil)、黄绵土(Loessial soil)、风沙土(Aeolian sandy soil), 其中国系统分类名称(土类级)分别为: 土垫旱耕人为土(B2.4)、筒育干润均腐土(J2.5)、黄土状正常新成土(N4.1)和干旱砂质新成土(N2.3)。土壤基本理化性状见表 1。

1.2 研究方法

称取过 2 mm 筛的风干土壤, 按容重为 1.30 g cm^{-3} 均匀装入环刀, 并置入 0.02 mol L^{-1} 的氯化钾溶液中(同时用蒸馏水饱和土样作为对照), 使其吸水饱和, 排去重力水, 然后将环刀装入离心管, 用日本日立公司生产的 Himac CR21 型高速离心机于 25°C 、不同转速(相当于水吸力 $0.1 \times 10^5 \text{ Pa}$ 、 $0.3 \times 10^5 \text{ Pa}$ 、 $0.5 \times 10^5 \text{ Pa}$ 、 $0.7 \times 10^5 \text{ Pa}$ 、 $1.0 \times 10^5 \text{ Pa}$ 、 $1.5 \times 10^5 \text{ Pa}$ 、 $3.0 \times 10^5 \text{ Pa}$ 、 $7.0 \times 10^5 \text{ Pa}$ 和 $10.0 \times 10^5 \text{ Pa}$) 下离心, 收集平衡液, 同时取离心后的土样, 分别测定溶液与土样中有效钾含量。另取一部分土样在 105°C 下烘干测定相应的土壤含水量。每处理重复三次。

* 国家杰出青年基金(49925102)、国家自然科学基金重点基金(40235057)和中国科学院知识创新工程重要方向项目(KZCX3-SW-426)资助

作者简介: 朱咏莉(1976~), 女, 河南新乡人, 博士生, 主要从事土壤有机质和养分循环方面的研究

收稿日期: 2003-04-07; 收到修改稿日期: 2003-09-26

土壤有效钾用 1 mol L^{-1} 中性 NH_4OAc —火焰光度法; pH 用 0.01 mol L^{-1} CaCl_2 浸提, 酸度计测定 (水: 土 = 1: 1); 有机质用 $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ —外加加热法测定; 机械分析用吸管法。

所涉及参数的计算方法如下:

V (平衡液体积): 由离心前后环刀的重量差减法求得

C_s (固相 K^+ 量) = 钾的吸附量 = 离心后用 KCl 溶液处理的土壤有效钾量-对照处理的土壤有效

钾量

$$C_l (\text{液相 } \text{K}^+ \text{ 量}) = V (\text{平衡液体积}) \times C (\text{平衡液 } \text{K}^+ \text{ 浓度})$$

$$K (\text{分配系数}) = C_s (\text{固相 } \text{K}^+ \text{ 量}) \div C_l (\text{液相 } \text{K}^+ \text{ 量})$$

$$C_t (\text{总有效钾量}) = C_s (\text{固相 } \text{K}^+ \text{ 量}) + C_l (\text{液相 } \text{K}^+ \text{ 量})$$

(s : 表示固相; l : 表示液相; V 、 C_s 、 C_l 、 C_t 均是以 1.0 kg 烘干土样为基础的计算值。)

表 1 供试土壤的基本理化性状

土 样	采样地点	有机质 (g kg^{-1})	CEC (mol (+) kg^{-1})	有效钾 (mg kg^{-1})	pH	粒 级			
						1~ 0.05 mm (g kg^{-1})	0.05~ 0.001 mm (g kg^{-1})	< 0.001 mm (g kg^{-1})	< 0.01 mm (g kg^{-1})
土	杨凌	15.6	14.6	126.7	8.17	110.3	700.7	189.0	469.5
黑垆土	洛川	13.1	12.3	105.8	8.21	90.7	751.8	157.5	444.7
黄绵土	米脂	9.3	5.7	68.3	8.10	235.0	680.1	84.9	141.0
风沙土	榆林	6.2	5.1	47.5	8.08	289.1	648.3	62.6	132.7

2 结果与讨论

2.1 土壤溶液中钾离子量(C_l)随水吸力的动态变化

土壤液相离子量是衡量土壤供应养分容量的重要参数之一^[8,9]。从液相钾离子量(C_l)随水吸力的动态变化中可以看出(见图 1), 土壤液相钾离子累计量随水吸力增大而增加。但不同质地土壤的增加速率差异较大。在 $< 1.0 \times 10^5 \text{ Pa}$ 吸力段, 液相钾离子量随水吸力基本呈线性增加, 增加速率为风沙土 $>$ 黄绵土 $>$ 黑垆土 $>$ 土。即土壤粘粒含量越高, 质地越粘重, 其液相钾离子量增加的速率越小。反之, 土壤粘粒含量越低, 增加速率越大。水吸力为

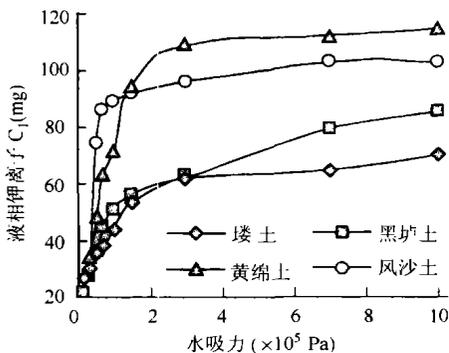


图 1 溶液钾离子累计量随水吸力的动态变化

$3.0 \times 10^5 \text{ Pa} \sim 10.0 \times 10^5 \text{ Pa}$ 时, 风沙土和黄绵土液相钾离子量变化较为平缓, 基本达到最大值; 黑垆土和土仍有较为明显的增加, 但增加速率大大降低。在本实验研究的水吸力范围内, 液相钾离子量的最大值为黄绵土 $>$ 风沙土 $>$ 黑垆土 $>$ 土。这可能与土壤质地及土壤与钾离子的作用有关^[8]。

2.2 土壤固相吸附钾量(C_s)随水吸力的动态变化

土壤固相吸附离子量是衡量养分离子固液相分配比例的另一重要参数。土壤对阳离子钾有较强的吸附作用, 并同样也受水分状态变化的影响^[8,10,11]。图 2 表示 C_s 随水吸力的变化曲线。

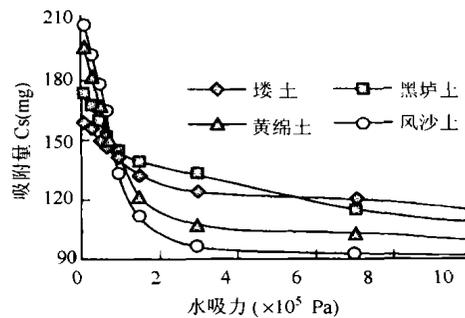


图 2 土壤固相吸附钾离子量随水吸力的动态变化

可以看出, 固相钾离子量随水吸力的增大和水分含量的减少而下降, 但 4 种土壤存在一交叉点 ($1.0 \times 10^5 \text{ Pa}$ 左右)。 $> 1.0 \times 10^5 \text{ Pa}$ 吸力段, 固相钾

含量的大小顺序为 土 > 黑垆土 > 黄绵土 > 风沙土。但当水吸力 < 1.0×10^5 Pa 时, 顺序则完全相反, 即风沙土 > 黄绵土 > 黑垆土 > 土, 该结果可能与水吸力 < 1.0×10^5 Pa 时, 质地较粘的 土和黑垆土在脱水过程中对钾离子的固定量大于较砂的黄绵土和风沙土有关, 这在图 4 中得到一定程度的反映。当水吸力增加到 2.0×10^5 Pa 左右时, 4 种土壤固相吸附钾离子的量随水吸力增加基本达到平衡。由此可见, 质地较轻或较砂的土壤固相钾量受水吸力变化影响较大, 质地较粘的土壤受影响相对较小。

2.3 土壤固液相钾离子分配系数与水吸力的关系

土壤养分离子固液相比比例对其扩散和有效性有直接的影响。K 值较高, 有效性相对较小, 反之则有效性相对较高^[8]。

图 3 为分配系数 K 与水吸力的关系曲线。可以看出, K 随水吸力的增大或含水量的降低呈下降趋势, 并逐渐达到平衡。但不同土壤的变化存在差异。 < 0.3×10^5 Pa 吸力段, 4 种土壤钾离子分配系数为: 风沙土和黄绵土 > 黑垆土和 土; > 0.5×10^5 Pa 范围, 土和黑垆土的 K 值则较高, 黄绵土和风沙土的较低。所以, 质地较轻或较砂的土壤钾离子分配系数受水吸力或含水量变化影响较大, 质地

较粘的土壤受影响相对较小。另外, 质地不同, 钾离子在土壤固液相间转化达到平衡所对应的水分的能量状态也不同, 风沙土在 0.5×10^5 Pa 左右, 黄绵土在 0.7×10^5 Pa 左右, 而黑垆土和 土分别在 1.0×10^5 Pa 和 1.5×10^5 Pa 左右。即土壤质地越轻, 钾离子的分配越易达到平衡。

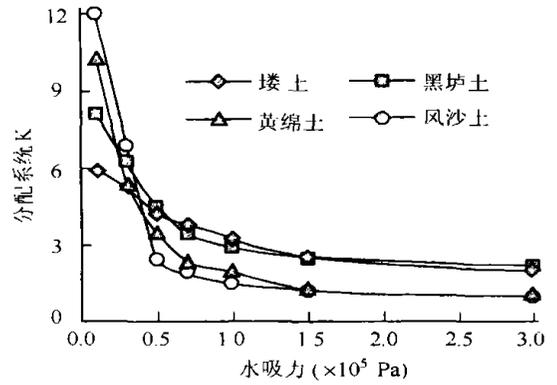


图 3 水分动态变化与土壤固液相钾离子的分配系数

分别用指数方程、对数方程和幂函数方程对 K 与水吸力 S 间的关系进行拟合, 发现 4 种土壤均可用幂函数方程 ($K = AS^B$) 和对数方程 ($K = A + B \ln S$) 很好地模拟, 相关系数均达到极显著水平 (表 2)。

表 2 土壤固液相钾离子分配系数(K)与水吸力(S)($\times 10^5$ Pa) 回归方程的拟合参数

土样	$K = AS^B$			$K = Ae^{BS}$			$K = A + B \ln S$		
	A	B	γ	A	B	γ	A	B	γ
土	3.22	-0.308	0.980**	4.16	-0.111	0.931**	3.53	-1.01	0.968**
黑垆土	3.20	-0.413	0.990**	4.52	-0.149	0.937**	3.79	-1.45	0.942**
黄绵土	2.33	-0.550	0.956**	3.44	-0.173	0.711*	3.32	-1.78	0.864**
风沙土	2.17	-0.572	0.916**	3.15	-0.167	0.629	3.47	-2.08	0.811**

注: $n = 9, r_{0.05} = 0.666, r_{0.01} = 0.793$

2.4 脱水过程中土壤对钾离子的固定

以不同水吸力条件下提取液中的钾离子量与土壤胶体上有效钾离子量之和作为有效钾总量 C_t , 用有效钾总量 C_t 随水吸力的变化过程说明在失水过程中 K^+ 被固定的趋势与程度。结果发现随水吸力的增大, C_t 值有减小的趋势。这说明在土壤失水干燥过程中, 粘土矿物收缩使部分有效钾很快闭蓄在晶格结构中。这与不同温度下干燥过程中有效钾含量变化情况基本一致^[12]。土壤对钾离子的固定与土壤质地密切相关^[9~13]。以水吸力为 0.1×10^5 Pa 时的 C_t 与其他水吸力对应的 C_t 的差值的大小表示不同水吸力下土壤对钾的固定量。从图 4 中可以看

出, 水吸力越大或含水量越低, 土壤对钾的固定量越

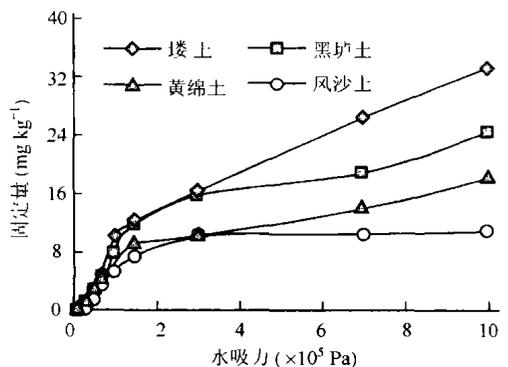


图 4 脱水过程中土壤对有效钾的固定

大。且不同土壤对有效钾的固定能力表现有较大差异, 土的固钾能力最强, 然后依次是黑垆土和黄绵土, 风沙土的固钾能力最弱。4 种土壤的最大固钾量分别达 33.1 mg kg^{-1} 、 24.1 mg kg^{-1} 、 17.9 mg kg^{-1}

和 10.7 mg kg^{-1} 。

2.5 土壤理化性状对钾离子分配系数的影响

影响土壤固液相钾离子平衡的因素有胶体的种类、温度、水分状况和土壤 pH 等^[13]。表 3 列出不同

表 3 分配系数与土壤性状的相关系数

水吸力 ($\times 10^5 \text{ Pa}$)	有机质 (g kg^{-1})	CEC ($\text{cmol}(+) \text{ kg}^{-1}$)	砂粒 1~ 0.05 mm (g kg^{-1})	粉砂 0.05~ 0.001 mm (g kg^{-1})	粘粒 < 0.001 mm (g kg^{-1})	物理性粘粒 < 0.01 mm (g kg^{-1})	有效钾 (mg kg^{-1})
0.3	- 0.653	- 0.441	0.445	- 0.262	- 0.527	- 0.349	- 0.600
0.5	0.951*	0.952*	- 0.958*	0.904	0.950*	0.952*	0.959*
1.0	0.994**	0.978*	- 0.971*	0.789	0.992**	0.965*	0.996**
7.0	0.971*	0.986*	- 0.895	0.626	0.988*	0.951*	0.982*
10.0	0.950*	0.984*	- 0.875	0.597	0.977*	0.951*	0.964*

注: $n=4$, $r_{0.05}=0.950$, $r_{0.01}=0.990$

水吸力下分配系数与土壤各性状的相关系数。

结果表明, 水吸力 $> 0.5 \times 10^5 \text{ Pa}$ 时, 分配系数 K 与土壤有机质、CEC、粘粒含量、物理性粘粒含量, 以及基础土样的有效钾含量呈显著相关性。由此可知, 土壤固液相钾离子的分配系数是土壤各种理化性状的综合体现。

3 结 论

1) 在土壤的脱水过程中, 钾离子分配系数减小。土壤质地不同, 钾离子在固液相转化的平衡点不同。

2) 土壤固液相钾离子分配系数(K) 与水吸力(S) 间的关系可用幂函数方程和对数方程进行拟合, 相关系数达到极显著水平。

3) 在土壤的干燥过程中, 存在明显的钾无效化现象。土、黑垆土、黄绵土和风沙土的最大固钾量分别达 33.1 mg kg^{-1} 、 24.1 mg kg^{-1} 、 17.9 mg kg^{-1} 和 10.7 mg kg^{-1} 。

4) 钾离子分配系数与土壤有机质、CEC、粘粒含量、物理性粘粒含量, 以及基础土样的有效钾含量呈显著相关性。

参 考 文 献

[1] 张福锁. 养分资源利用的问题及其研究重点. 见: 李春俭主编. 土壤与植物营养研究新动态. 北京: 中国农业大学出版社, 2001. 14~ 22. Zhang F S. Focus and problems of nutrition resources utilization. In: Li C J. ed. Progress in Soil and Plant Nutri-

tion (In Chinese). Beijing: China Agricultural University Press, 2001. 14~ 22

- [2] 赵炳梓, 徐富安. 水肥条件对小麦、玉米 N、P、K 吸收的影响. 植物营养与肥料学报, 2000, 6(3): 260~ 266. Zhao B Z, Xu F A. N, P, K uptake by winter wheat and maize as influence by different combinations of irrigation water and nitrogen fertilizer (In Chinese). Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2000, 6(3): 260~ 266
- [3] 樊小林, 廖宗文. 控释肥料与平衡施肥和提高肥料利用率. 植物营养与肥料学报, 1998, 4(3): 219~ 223. Fan X L, Liao Z W. Increasing fertilizer use efficiency by means of controlled release fertilizer (CRF) production according to theory and techniques of balanced fertilization (In Chinese). Plant Nutrition and Fertilizer Science, 1998, 4(3): 219~ 223
- [4] 梁东丽, 李小平, 赵护兵, 等. 陕西省主要土壤养分有效性的研究. 西北农业大学学报, 2000, 28(1): 37~ 42. Liang D L, Li X P, Zhao H B, et al. The absorption characteristics and biological availability of soil nutrients in Shaanxi (In Chinese). Acta Univ. Agric. Boreali occidentis, 2000, 28(1): 37~ 42
- [5] 黄绍文, 金继运, 程明芳, 等. 北方主要土壤对当季作物的供钾能力. 土壤肥料, 1999, (3): 3~ 7, 21. Huang S W, Jin J Y, Cheng M F, et al. Potassium supplying capacity of some soils in North China (In Chinese). Soil Fertilizer, 1999, (3): 3~ 7, 21
- [6] 彭千涛, 范钦桢. 水分和温度对土壤钾素释放、固定影响的初步研究. 土壤学报, 1984, 21(4): 387~ 394. Peng Q T, Fan Q Z. Preliminary study on influence of moisture and temperature on release and fixation of potassium in soils (In Chinese). Acta Pedologica Sinica, 1984, 21(4): 387~ 394
- [7] 谢建昌, 周健民. 我国土壤钾素研究和钾肥使用的进展. 土壤, 1999, 31(5): 244~ 254. Xie J C, Zhou J M. Progress in study on soil potassium and application of potassium fertilizers in China (In Chinese). Soils, 1999, 31(5): 244~ 254
- [8] 薛泉宏, 尉庆丰, 李宝安, 等. 黄土性土壤钾吸附、解吸动力学研究. 土壤学报, 1997, 34(2): 113~ 122. Xue Q H, Wei Q F, Li

- B A, *et al.* Study on K^+ absorbing desorbing kinetics of loessial soil (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 1997, 34(2):113~ 122
- [9] Pretty K M. Potassium in plants and soils. *Progress in Soil Science*, 1984, (1): 30~ 35
- [10] Mengel K. Dynamic changes and availability of soil nutrition. *Progress in Soil Science*, 1987, 15(5): 20~ 27
- [11] 程明芳, 金继运, 林葆. 土壤对施入钾的固定能力研究. *土壤通报*, 1995, 26(3): 125~ 127. Cheng M F, Jin J Y, Lin B. Potassium fixation capacity of soils (In Chinese). *Chinese Journal of Soil Science*, 1995, 26(3): 125~ 127
- [12] 朱咏莉, 刘军, 王益权, 等. 干湿交替过程对黄土高原几种主要土壤钾有效性的影响. *土壤通报*, 2002, 33(6): 435~ 437. Zhu Y L, Liu J, Wang Y Q, *et al.* Effect of alternation of drying and wetting on K fixation capacity of soils in Loess Plateau (In Chinese). *Chinese Journal of Soil Science*, 2002, 33(6): 435~ 437
- [13] 蒂斯代尔, 纳尔逊. 土壤肥力与肥料. 北京: 科学出版社, 1984. 146~ 166. Disdale S L, Nelson W L. *Soil Fertility and Fertilizers* (In Chinese). Beijing: Science Press, 1984. 146~ 166

中国土壤学会第十次全国会员代表大会暨第五届海峡两岸土壤肥料学术交流研讨会将在沈阳举行

中国土壤学会第十次全国会员代表大会与第五届海峡两岸土壤肥料学术交流研讨会将于 2004 年 7 月中下旬在沈阳同时举行。代表大会期间除进行换届改选工作外, 将与两岸会议共同举行以“土壤科学与农业和环境”为主题的综合性学术年会, 并以大会报告、专题报告、分组报告和讨论等多种形式开展学术交流活动。大会无名额限制, 欢迎广大会员、土壤肥料科技工作者、以及关心土壤与肥料科学事业的朋友出席。有意参加会议者可向各省(市、自治区)土壤(肥料)学会报名, 也可与我会办公室直接联系。会议正式通知将于 6 月初发出并在网上发布。

联系人: 臧 双, 罗春侠

通讯地址: 南京市北京东路 71 号

电 话: 025- 86881532

传 真: 025- 86881538

电子邮件: sssc@issas.ac.cn

中国土壤学会办公室