长期施肥条件下土壤钾素固定影响因素分析

张会民^{*}, 徐明岗^{*}, 张文菊^{*}, 何新华

农业部作物营养与施肥重点开放实验室, 中国农业科学院农业资源与农业区划研究所, 北京 100081;

河南科技大学农学院, 洛阳 471003;

School of Plant Biology (M084), University of Western Australia, Perth, WA 6009, Australia

^{*} 联系人, E-mail: mgxu@caas.ac.cn

2008-07-28 收稿, 2009-02-04 接受

国家“十一五”重点科技支撑计划(编号: 2006BAD02A14, 2006BAD05B09, 2006BAD25B07)、国家基础性工作专项(编号: 2007FY220400)和河南科技大学博士科研启动基金资助项目

摘要 为探索长期不同施肥对土壤钾素固定的影响, 采用室内模拟试验对中国主要农田土壤, 即红壤、水稻土、灰漠土、塿土、潮土、黑土和紫色土对外源钾固定能力的差异性进行了研究, 并对长期施肥条件下土壤钾素固定的影响因素进行了因子分析和逐步回归分析. 结果表明, 施肥 15 年后, 不同土壤固钾能力大小顺序为: 黑土>紫色土>塿土>潮土>水稻土>灰漠土>红壤. 土壤主要黏土矿物类型明显影响其固钾能力, 此外, 对以 2:1 型黏土矿物为主的土壤而言, 其固钾能力还受两个主要因子的影响: 因子 1 包括土壤速效钾、缓效钾和 K^+ 饱和度 3 个因素, 因子 2 包括土壤阳离子交换量(CEC)、土壤有机质(SOM)和<0.002 mm 黏粒含量 3 个因素. 在外源钾加入浓度较低($0.4\sim 1.6\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$)时, 因子 1 和因子 2 分别主要通过土壤 K^+ 饱和度和 CEC 的变化影响土壤的固钾能力; 在外源钾加入浓度较高($2.4\sim 4.0\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$)时, 因子 1 和因子 2 分别主要通过土壤 K^+ 饱和度和<0.002 mm 黏粒含量的变化影响土壤的固钾能力.

关键词
影响因素
长期施肥
固钾量
固钾率

钾是植物必需的营养元素之一, 如果土壤中钾素缺乏, 植物的生长将受到抑制, 土壤中的物理、化学和生物学等许多过程影响钾素的有效性. 土壤钾素被固定就是其中重要过程之一, 即钾被牢固地束缚在 2:1 型层状铝硅酸盐的层间位置, 钾被束缚以后, 钾肥的施用效率降低, 被固定钾的量取决于土壤类型和性质^[1,2]. 尽管刚被土壤固定的钾不能马上被作物吸收, 但在条件适合时可能会缓慢释放, 在作物生长期间被吸收^[3], 而被作物吸收的这一部分钾素往往不能用标准的土壤测定方法测出. 所以搞清长期施肥对土壤钾素固定的影响显得非常重要, 这也是可持续农业发展的重要组成部分.

土壤钾素固定过程受矿物层间点位保持的钾和相对而言对植物有效的矿物晶格表面和边缘交换点位吸附的钾或土壤溶液中钾的平衡所控制, 黏土矿

物类型、pH、土壤有机质(SOM)、羟基铝、土壤水分状况、阳离子交换量(CEC)和土壤培肥与耕作方式是影响这一平衡的主要因素^[4~13]. 基于短期试验的土壤钾素固定影响因素研究较多, 如Ningappa等人^[14]研究发现, 印度某些土壤的固钾能力与土壤pH呈极显著相关关系. 李学垣^[15]认为, 在黏土矿物层间存在的非交换性羟基铝可以降低黏粒的负电荷量, 从而减少钾离子的固定量. 土壤干湿交替变化可引起黏土矿物的收缩或膨胀而影响土壤钾素固定, 而且湿润和淹水时间持续的长短也是影响钾素固定的重要因素, 徐国华等人^[16]的研究表明, 无论施钾或不施钾, 把钾素受到耗竭的风干土壤经过恒湿和淹水处理以后, 交换性钾均有下降. 然而, 基于肥料长期定位试验的土壤钾素固定影响因素研究报道较少, Shaimukhametov等人^[17,18]的研究表明, 长期定位施肥(63 a)及轮作影响俄

引用格式: 张会民, 徐明岗, 张文菊, 等. 长期施肥条件下土壤钾素固定影响因素分析. 科学通报, 2009, 54: 2574~2580

Zhang H M, Xu M G, Zhang W J, et al. Factors affecting potassium fixation in seven soils under 15-year long-term fertilization. Chinese Sci Bull, 2009, 54, doi: 10.1007/s11434-009-0164-9

<https://engine.scichina.com/doi/10.1360/csb2009-54-17-2574>

罗斯典型的Serozem土壤钾素的固定量, 其中NPK处理和有机肥处理的土壤钾素固定率小于不施肥处理, 轮作处理的土壤钾素固定量最高. 不难看出, 这些研究仅局限于施肥对土壤固钾量和固钾率的影响, 较少涉及对土壤钾素固定影响因素的综合分析. 所以, 长期定位施肥条件下影响土壤钾素固定的主导因子究竟是什么? 目前尚缺乏系统研究. 本文选择中国 7 种长期定位试验的典型农田土壤, 采用室内模拟试验, 通过主成分分析和逐步回归分析, 对长期施肥土壤钾素固定的影响因素进行了研究, 本研究在揭示土壤质量演变特征及机理方面具有重要的学术价值, 可为土壤肥力(钾素)培育提供重要的技术支撑.

1 材料与方法

1.1 供试土壤

供试的红壤、水稻土、灰漠土、塿土、潮土、黑

土和紫色土土壤样品(耕层土壤 0~20 cm)(表 1)于 2005 年分别采自湖南祁阳、浙江杭州、新疆乌鲁木齐、陕西杨凌、河南郑州、吉林公主岭和重庆北碚长期肥料定位试验站. 这 7 个土壤肥料长期定位试验均开始于 1990 年. 处理包括 5 个, 即不施肥(CK)、氮(N)、氮磷(NP)、氮磷钾(NPK)、氮磷钾+有机肥(NPKM, M代表有机肥). 40%左右的化学氮肥作追肥, 60%左右的化学氮肥及全部化学磷、钾肥和有机肥作基肥, 所有施氮处理(N, NP, NPK和NPKM)的施氮总量相同, 其中NPKM处理中化肥氮和有机氮分别占全氮的 30%和 70%; 红壤和水稻土中施用的有机肥为猪粪, 灰漠土中为羊粪, 塿土中为牛粪, 紫色土中为厩肥, 黑土中为猪粪或牛粪, 潮土中 1990~1998 施用马粪, 1999, 2001 和 2003~2005 年为牛粪, 2000 和 2002 年为厩肥^[19]. 试验前(1990 年)耕层土壤基本理化性质和黏土矿物组成见表 2 和 3.

表 1 长期定位试验基本情况

土壤	纬度(N)	经度(E)	年均气温/	年降雨量/mm	年蒸发量/mm	施肥量/kg·(hm ² ·a) ⁻¹		
						N	P	K
红壤	26°45'	111°52'	18.0	1250	1470	300	53	100
水稻土	30°26'	120°25'	16.5	1550	1050	315	69	132
灰漠土	43°57'	87°46'	7.7	150~200	1600~2200	242	60	47
塿土	34°17'	108°00'	13.0	550~600	993	353	82	146
潮土	34°47'	113°40'	14.0	645	1450	353	77	147
黑土	43°30'	124°48'	4.5	450~600	1200~1600	165	36	68
紫色土	30°26'	106°26'	18.3	1106	990	285	52	100

表 2 试验前(1990 年)肥料长期定位试验土壤基本理化性质

土壤	有机质 /g·kg ⁻¹	全氮/g·kg ⁻¹	全磷/g·kg ⁻¹	全钾/g·kg ⁻¹	有效氮 /mg·kg ⁻¹	速效磷 /mg·kg ⁻¹	速效钾 /mg·kg ⁻¹	缓效钾 /mg·kg ⁻¹	pH
红壤	11.4±0.4	1.07±0.06	0.45±0.03	13.3±0.2	79.0±4.1	4.7±0.3	104.0±4.2	267.0±4.6	5.7±0.2
水稻土	28.6±0.8	1.67±0.09	1.10±0.05	15.0±0.3	128.0±5.4	16.3±1.2	67.5±3.1	550.0±5.1	6.6±0.3
灰漠土	15.2±0.5	0.87±0.05	0.67±0.04	23.0±0.3	55.2±2.8	3.4±0.3	288.0±6.8	1764.0±11.5	8.1±0.4
塿土	10.8±0.4	0.83±0.05	0.61±0.04	25.2±0.4	61.3±3.5	9.6±0.5	191.4±5.7	1380.0±10.3	8.6±0.4
潮土	11.4±0.4	0.67±0.04	0.64±0.05	17.7±0.3	76.6±3.6	6.5±0.4	74.0±4.1	670.7±5.7	8.3±0.4
黑土	23.1±0.7	1.53±0.09	1.41±0.07	23.1±0.4	102.0±4.7	20.6±1.8	190.1±5.3	982.4±7.7	7.6±0.3
紫色土	23.9±0.6	1.25±0.08	0.67±0.04	21.1±0.3	93.0±4.5	4.3±0.3	88.4±4.5	609.2±6.4	7.7±0.3

表 3 肥料长期定位试验土壤黏土矿物组成^{a)}

土壤	矿物组成	土壤	矿物组成
红壤	K ¹ , Ch ³ , Q ³ , H ³ , V ³	潮土	H ¹ , Sm ² , Mi-Sm ² , Ch ³ , K ³ , Q ³
水稻土	H ¹ , K ¹ , V ² , Ch ² , Sm ³ , Q ³	黑土	Sm ¹ , H ¹ , Mi-Sm ¹ , V ² , K ³ , Q ³
灰漠土	H ¹ , Ch ¹ , V ² , K ³ , Q ³	紫色土	Sm ¹ , Mi-Sm ¹ , H ² , K ³ , Q ³
塿土	H ¹ , Sm ² , Mi-Sm ² , Ch ³ , K ³ , Q ³		

a) H, 水云母; Ch, 绿泥石; Sm, 蒙脱石; Mi-Sm, 云母-蒙脱石混层层间矿物; V, 蛭石; K, 高岭石; Q, 石英; 右上角数字 1, 2 和 3 分别表示土壤矿物相对含量为丰富、较丰富和较少

1.2 测定方法

土壤有机质用重铬酸钾容量法,全N用凯氏法,全P用碱熔-钼锑抗比色法,全K用NaOH熔融-火焰光度法,碱解N用扩散法,速效P用Olsen法,速效K用 $1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1} \text{ NH}_4\text{OAc}$ 浸提-火焰光度法,非交换性钾用 $1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 硝酸煮沸 10 min浸提钾减去速效钾,土壤pH用电位法,黏粒含量用吸管法,土壤阳离子交换量(CEC)用乙酸铵法和氯化铵-乙酸铵法^[20],土壤矿物组成采用Mg饱和,用乙二醇处理制成定向薄片,X射线衍射分析^[17,21].

土壤钾素固定试验方法如下. 每种土壤样品分别称取7份,每份5 g,分别加入5 mL浓度为0, 0.4, 0.8, 1.6, 2.4, 3.2, 4.0 $\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ 的含钾溶液,2次重复,使其充分混匀,在室内干燥以模拟田间条件下发生的干湿交替过程. 样品风干后,加入50 mL $1.0 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 醋酸铵浸提液,振荡30 min后过滤,用火焰分光光度计和原子吸收分光光度计测定滤液中的钾浓度,固钾量和固钾率按下列公式计算^[22]:

固钾量(mg/kg)=外源钾加入量

-(加外源钾 NH_4OAc 浸提钾量

-未加外源钾 NH_4OAc 浸提钾量),

固钾率(%) = (固钾量 $\times 100$)/外源钾加入量.

2 结果与讨论

2.1 长期施肥对土壤固钾能力影响的差异性

从图1可以看出,无论施钾与否,在外源钾加入浓度 $0.4\sim 4.0 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 的范围内,黑土和紫色土固钾能力最高(27.9%~91.4%和 25.6%~84.0%),其中,黑土高于紫色土;壤土和潮土固钾能力次之(20.3%~76.4%和 17.9%~52.4%),其中壤土高于潮土;再次是水稻土和灰漠土(15.6%~51.8%和 11.8%~41.2%),其中水稻土高于灰漠土;红壤固钾能力最低(0.8%~13.7%).

除紫色土长期不施肥(CK)和施 NPK 土壤固钾能力比较接近外,均表现出不施钾(CK, N 和 NP)土壤固钾能力高于施钾(NPK 和 NPKM)的土壤,施 NPK 土壤固钾能力又略高于施 NPKM 的土壤,但长期施钾对不同土壤固钾能力的影响差异很大. 不同土壤不施钾比施钾土壤固钾能力增加的幅度不同,黑土和紫色土增加最多,分别为 17.4%~24.0%和 14.3%~19.8%;壤土和潮土次之,分别为 4.7%~18.1%和 6.8%~12.9%;再次是红壤和灰漠土,分别为 2.3%~8.5%和 5.1%~

7.3%;灰漠土施钾与不施钾土壤固钾能力无明显差异.

不同土壤固钾能力的差异性与其矿物组成有关. 一般而言,2:1型黏土矿物的固钾能力大于1:1型黏土矿物,土壤中2:1型胀缩性黏土矿物的固钾次序为:蛭石>拜来石>水云母>蒙脱石^[23,24]. 黑土和紫色土水云母和蒙脱石类矿物含量均丰富,壤土和潮土水云母含量丰富而蒙脱石类矿物含量较丰富,水稻土和灰漠土水云母含量丰富而蒙脱石类矿物含量很低,红壤以1:1型的高岭石为主要矿物,这是以上土壤固钾能力依次降低的重要原因之一. 长期不施钾土壤固钾能力高于施钾土壤,可能与长期不施钾肥而种植作物,使云母矿物层间的非交换性钾不断释放,从而使云母矿物出现膨胀性的层间结构而逐渐向云母-蒙脱石混层层间矿物转化,黏土矿物可固定钾的层间点位数量增加有关^[25],另外,还可能与土壤理化性质如土壤速效钾、缓效钾、阳离子交换量(CEC)、 K^+ 饱和度、 $<0.002 \text{ mm}$ 黏粒含量和土壤有机质(SOM)含量等的变化有关.

施NPKM比施NPK土壤固钾能力略有降低,与有机质影响钾的固定有关,但其影响的机理尚不清楚^[26]. Evangelou等人^[27]提出,有机质的羧基功能团与 Ca^{2+} 络合后,对黏粒表面外边缘的层间固定点位有一种堵塞效应,这种效应也能抑制钾肥施入土壤后的固定作用. 另外,随有机质含量增加,矿物分解和钾的释放增加,有机分子中的氮与交换性钾或矿物晶格层间钾的交换作用也增加^[28]. Shaimukhametov等人^[18,29]的研究表明,长期不施肥土壤施入钾肥后,土壤固钾量增加,而且固钾量随施钾量($0\sim 2.5 \text{ cmol} \cdot \text{kg}^{-1}$)的增加而增加,但固钾率随施钾量的增加而降低. Dhaliwal等人^[29]研究发现,无论土壤黏土矿物类型和剖面层次深度如何,土壤固钾量均随施钾量的增加而增加,富钾土壤的固钾率(18%~42%)小于低钾土壤的固钾率(45%~86%).

2.2 土壤钾素固定影响因素的因子分析

长期不同施肥土壤速效钾、缓效钾、 K^+ 饱和度、阳离子交换量(CEC)、土壤有机质(SOM)和 $<0.002 \text{ mm}$ 黏粒含量不同(表4),这可能导致土壤固钾能力不同,但这些因素对土壤固钾能力的影响并不是等同的,他们之间是否存在内在的联系,以及哪些影响因素起主导作用需要做进一步分析.

图1 施肥15年后土壤固钾率的变化

采用方差最大正交旋转法(varimax with kaiser normalization)对可能影响土壤固钾能力的因素(土壤速效钾, 缓效钾, K^+ 饱和度, CEC, SOM 和 $<0.002 \text{ mm}$ 黏粒含量等)进行了因子分析(factor analysis), 见表5. 需要说明的是, 黏土矿物以高岭石为主的红壤固钾能力非常低, 故对红壤固钾能力影响因素的研究可以特殊考虑. 因此, 表5中仅对水稻土、黑土、壤土、

灰漠土、潮土和紫色土6类土壤固钾能力的影响因素进行了因子分析, 抽取到2个主因子. 从表5旋转后主成分负荷矩阵可以看出, 土壤速效钾、缓效钾和 K^+ 饱和度3个影响因素在第一个因子上具有大的正负荷, 负荷在0.890~0.959之间, 在第二个因子上具有小的正负荷(0.187)或负负荷(-0.083 ~ -0.240); 相反, CEC, SOM 和 $<0.002 \text{ mm}$ 黏粒含量3个影响因素

表 4 施肥 15 年后土壤钾素含量、K⁺饱和度、阳离子交换量、有机质和<0.002 mm 黏粒含量

土壤	处理	速效钾/mg·kg ⁻¹	缓效钾/mg·kg ⁻¹	阳离子交换量 /cmol·kg ⁻¹	K ⁺ 饱和度 (%)	<0.002 mm 黏粒 /g·kg ⁻¹	有机质 /g·kg ⁻¹
红壤	CK	29.4±1.6	135.4±2.2	9.42±0.35	0.80±0.13	405.0	11.9±0.3
	N	16.9±1.5	152.4±2.6	8.58±0.29	0.50±0.07	427.5	11.0±0.2
	NP	21.0±1.6	163.8±3.1	7.98±0.31	0.67±0.10	420.9	12.7±0.3
	NPK	85.7±2.7	213.6±3.8	10.76±0.38	2.04±0.27	419.9	14.7±0.4
	NPKM	190.1±3.8	371.0±4.1	12.63±0.41	3.85±0.38	453.6	22.4±0.7
水稻土	CK	130.0±3.4	714.7±6.1	9.00±0.37	3.69±0.32	266.9	31.0±1.2
	N	110.0±3.5	721.9±6.4	9.58±0.29	2.94±0.30	276.9	28.0±1.0
	NP	95.0±3.1	622.4±5.5	9.19±0.36	2.65±0.29	273.3	25.6±1.1
	NPK	170.0±3.7	776.4±6.8	8.68±0.32	5.01±0.37	261.0	27.5±1.0
	NPKM	250.0±4.0	861.9±7.3	9.35±0.31	6.84±0.45	317.1	30.8±1.2
灰漠土	CK	180.6±3.2	1690.3±6.8	8.71±0.28	5.30±0.36	209.2	11.7±0.4
	N	204.2±3.6	1686.6±7.1	9.36±0.37	5.58±0.39	222.7	14.5±0.5
	NP	166.4±3.3	1692.7±6.7	9.25±0.24	4.60±0.31	213.1	14.8±0.5
	NPK	270.4±3.8	1704.0±7.4	9.14±0.33	7.57±0.44	220.2	13.2±0.5
	NPKM	437.0±4.7	1776.4±8.5	10.04±0.40	11.14±0.68	245.8	23.6±0.9
壤土	CK	156.9±3.5	1451.1±6.1	12.29±0.52	3.27±0.31	319.6	13.7±0.4
	N	180.6±3.8	1453.0±5.6	12.93±0.48	3.57±0.32	297.4	17.6±0.5
	NP	161.7±3.4	1418.2±5.3	12.46±0.44	3.32±0.30	303.1	16.8±0.5
	NPK	277.5±4.2	1486.0±5.5	12.76±0.42	5.56±0.34	303.8	17.7±0.7
	NPKM	338.9±5.6	1583.6±5.8	13.11±0.52	6.61±0.46	353.3	24.8±1.0
潮土	CK	56.5±2.1	568.6±4.5	6.33±0.23	2.29±0.25	133.8	10.2±0.3
	N	55.5±2.2	587.3±4.7	6.32±0.27	2.25±0.27	135.2	11.6±0.4
	NP	62.4±2.4	562.3±4.8	6.37±0.20	2.50±0.24	144.0	12.1±0.3
	NPK	100.2±2.7	912.2±5.1	6.58±0.23	3.89±0.33	140.2	12.9±0.3
	NPKM	168.0±3.6	906.0±5.6	7.08±0.38	6.07±0.51	175.2	16.6±0.4
黑土	CK	138.0±3.5	910.2±4.6	20.63±0.57	1.71±0.17	321.0	24.2±0.7
	N	123.8±3.1	848.1±3.8	20.34±0.66	1.56±0.13	337.1	23.6±0.6
	NP	117.5±3.2	867.1±3.5	20.59±0.64	1.46±0.14	347.0	22.8±0.7
	NPK	185.5±4.1	974.5±3.7	21.58±0.56	2.20±0.24	338.2	23.6±0.7
	NPKM	191.1±4.3	1026.1±5.8	21.88±0.61	2.23±0.25	374.0	38.0±1.3
紫色土	CK	76.5±2.6	537.2±4.6	18.63±0.56	1.05±0.14	210.9	22.1±0.5
	N	64.9±2.5	507.8±5.1	19.68±0.62	0.84±0.13	207.7	26.7±0.6
	NP	60.2±2.5	498.2±4.2	17.91±0.61	0.86±0.11	224.8	24.0±0.5
	NPK	73.5±2.6	543.9±4.5	19.05±0.55	0.99±0.14	218.6	25.5±0.7
	NPKM	103.8±3.1	608.1±5.4	20.09±0.65	1.32±0.17	260.3	26.3±0.7

表 5 长期施肥土壤钾素固定影响因素的因子分析^{a)}

影响因素	旋转前主成分负荷 矩阵		旋转后主成分负荷 矩阵	
	因子 1	因子 2	因子 1	因子 2
速效钾/mg·kg ⁻¹	0.853	0.477	0.959	0.187
缓效钾/mg·kg ⁻¹	0.871	0.199	0.890	-0.083
阳离子交换量/cmole·kg ⁻¹	-0.552	0.686	-0.310	0.824
K ⁺ 饱和度(%)	0.949	0.059	0.920	-0.240
<0.002 mm 黏粒/g·kg ⁻¹	0.012	0.928	0.302	0.878
有机质/g·kg ⁻¹	-0.354	0.762	-0.098	0.834

a) 提取方法为主成分分析, 旋转方法为方差最大正交旋转

在第一个因子上具有小的正负荷(0.302)或负负荷(-0.098~-0.310), 在第二个因子上具有大的正负荷, 负荷在 0.824~0.878 之间. 两个因子对所有 6 个影响因素的共同度都很大, 在 0.706~0.955 之间. 所以, 第一个因子包括土壤速效钾、缓效钾和 K⁺饱和度 3 个影响因素, 第二个因子包括 CEC, SOM 和<0.002 mm

黏粒含量 3 个影响因素.

2.3 土壤固钾率与其影响因素的关系

采样逐步回归(stepwise regression)法对水稻土、黑土、壤土、灰漠土、潮土和紫色土 6 类土壤固钾率与其影响因素的相关关系进行了分析(表 6). 从表 6 可以看出, 在外源钾加入浓度为 0.4 g·L⁻¹ 时, 只有 CEC 与土壤固钾率的回归系数达到显著水平, 而与土壤速效钾、缓效钾、K⁺饱和度、SOM 和<0.002 mm 黏粒含量的回归系数均未达到显著水平, 此时的线性回归方程能解释土壤固钾率 51%的变化; 在外源钾加入浓度为 0.8 g·L⁻¹ 时, 土壤 CEC, K⁺饱和度、<0.002 mm 黏粒含量和 SOM 与土壤固钾率的回归系数达到显著水平, 此时的线性回归方程能解释土壤固钾率 76%的变化; 在外源钾加入浓度为 1.6 g·L⁻¹ 时, 只有土壤 CEC 和 K⁺饱和度与土壤固钾率的回归

表 6 不同外源钾加入浓度下土壤固钾率与其影响因素的线性回归方程

外源钾加入浓度/ $\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$	线性回归方程 ^{a)}	R^2 ^{b)}	P 值 ^{b)}
0.4	KFR=2.356($t=5.368$, $P<0.001$) $\times$ CEC+28.260($t=4.573$, $P<0.001$) KFR=1.096($t=2.108$, $P=0.045$) $\times$ CEC-3.820($t=-4.097$, $P<0.001$) $\times$ KS	0.507	<0.001
0.8	+0.114($t=3.162$, $P=0.004$) $\times$ CL-0.829($t=-2.638$, $P=0.014$) $\times$ SOM +38.084($t=4.984$, $P<0.001$)	0.759	<0.001
1.6	KFR=1.498($t=3.591$, $P=0.001$) $\times$ CEC-3.359($t=-3.552$, $P=0.001$) $\times$ KS +36.500($t=4.536$, $P<0.001$)	0.675	0.001
2.4	KFR=0.082($t=3.477$, $P=0.002$) $\times$ CL-4.444($t=-6.582$, $P<0.001$) $\times$ KS +32.005($t=4.807$, $P<0.001$)	0.673	0.002
3.2	KFR=0.058($t=3.124$, $P=0.004$) $\times$ CL-3.525($t=-6.641$, $P<0.001$) $\times$ KS +28.486($t=5.442$, $P<0.001$)	0.666	0.004
4.0	KFR=0.057($t=3.274$, $P=0.003$) $\times$ CL-3.033($t=-6.104$, $P<0.001$) $\times$ KS +22.495($t=4.590$, $P<0.001$)	0.640	0.003

a) 括号中的数值指数或回归系数的 t 值和 P 值 KFR, 固钾率; CEC, 阳离子交换量; KS, K^+ 饱和度; CL, <0.002 mm 黏粒; SOM, 土壤有机质; b) 指回归方程的 R^2 和 P 值

系数达到显著水平, 此时的线性回归方程能解释土壤固钾率 68% 的变化; 在外源钾加入浓度较高 (2.4~4.0 $\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$) 时, 只有土壤 K^+ 饱和度和 <0.002 mm 黏粒含量与土壤固钾率的回归系数达到显著水平, 线性回归方程能解释土壤固钾率 64%~67% 的变化。

总体而言, 在外源钾加入浓度较低时, 第一因子 (土壤速效钾、缓效钾和 K^+ 饱和度) 主要是通过土壤 K^+ 饱和度的变化、第二因子 (CEC, SOM 和 <0.002 mm 黏粒含量) 主要是通过土壤 CEC 的变化影响土壤的固钾能力, 如在外源钾加入浓度 0.8 $\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, 土壤固钾率分别与土壤 K^+ 饱和度、CEC 的一元线性相关均达到了显著水平, 相关系数 (r) 分别为 -0.676 ($P<0.001$) 和 0.727 ($P<0.001$); 在外源钾加入浓度较高时, 第一因子仍然主要是通过土壤 K^+ 饱和度的变化、第二因子主要是通过土壤 <0.002 mm 黏粒含量的变化影响土壤的固钾能力, 如在外源钾加入浓度 2.4 $\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, 土壤固钾率分别与土壤 K^+ 饱和度、<0.002 mm 黏粒含量的一元线性相关均达到了显著水平, 相关系数 (r) 分别为 -0.705 ($P<0.001$) 和 0.379 ($P=0.039$)。国内外相关研究也得出了类似的结论^[2,22,30], Conti 等人^[2]的研究结果表明, 土壤固钾率与土壤有机碳含量、交换性钾含量和 K^+ 饱和度均呈显著 ($P<0.01$) 的相关关系, 而 Shaimukhametov 等人^[18]认为, 无论施钾量 (0~2.5 $\text{cmol} \cdot \text{kg}^{-1}$) 高低, 壤质土均比砂壤质土固定更多的钾。

根据以上分析, 黑土和紫色土含钾矿物组成相近, 但前者的固钾能力高于后者, 是因为黑土 CEC 和 <0.002 mm 黏粒含量高于紫色土的缘故; 同样, 含钾矿物组成相近的壤土固钾能力高于潮土, 与壤土 CEC 和 <0.002 mm 黏粒含量高于潮土有关; 以水云母和高岭石为主要矿物的水稻土固钾能力高于以水云

母和绿泥石为主要矿物的灰漠土, 与水稻土 <0.002 mm 黏粒含量高于灰漠土、 K^+ 饱和度低于灰漠土有关。另外, 长期施钾较不施钾土壤固钾能力降低, 与施钾土壤 K^+ 饱和度升高、CEC 或 <0.002 mm 黏粒含量增加有关。

以上两个因子主要通过其各自某一因素影响土壤的固钾率, 但这些因素在影响钾素固定过程中可能存在交互作用, 而且在不同的试验期限内其主导因素可能存在差异。因为, 因子 1 中的 3 个因素 (土壤速效钾、缓效钾和 K^+ 饱和度) 本身存在一定的关系, Shaimukhametov 等人^[18]认为, 土壤钾素被固定而转化成缓效钾形式, 可以看作是速效钾的缓冲容量, 后来被固定钾又比先前被固定的钾对作物有更高的有效性。同样, 因子 2 中 3 个因素 (CEC, SOM 和 <0.002 mm 黏粒含量) 间也有相互影响, 土壤 CEC 与土壤有机质和黏粒含量存在高度的相关性^[31,32], Gao 等人^[32]的研究也表明, 连续 18 年施用饲牛场有机肥, 土壤 (0~15 cm) 总有机碳 (TOC) 含量和 CEC 均明显增加, 并且随有机肥用量增加而增加。所以, 这些因素可能随着试验年份的进一步延长以及试验样本数 (如土壤类型个数) 继续扩大, 而对土壤固钾能力的影响程度发生变化, 相关研究尚需深入进行。

3 结论

长期施钾较不施钾土壤固钾率降低, 尤其黑土和紫色土表现最为突出, 而红壤施钾后土壤固钾能力无明显变化。

土壤黏土矿物类型和含量明显影响土壤的固定能力。2:1 型的水云母矿物和蒙脱石或云母-蒙脱石混层层间矿物含量高则土壤固钾能力高, 以 1:1 型高岭

石为主要矿物的红壤固钾能力极低, 尽管其 <0.002 mm 黏粒含量较高. 不同土壤固钾能力大小顺序为: 黑土>紫色土>塿土>潮土>水稻土>灰漠土>红壤. 长期不同施肥条件下, 土壤 K^+ 饱和度、土壤 CEC 或 <0.002 mm 黏粒含量与土壤固钾能力密切相关, 分别与土壤固钾率呈极显著负相关、显著正相关.

致谢 本研究在祁阳农田生态系统国家野外试验站完成. 感谢红壤、水稻土、灰漠土、塿土、潮土、黑土和紫色土长期肥力监测基地研究人员的支持和提供土壤样品.

参考文献

- Liu Y J, Laird D A, Barak P. Release and fixation of ammonium and potassium under long-term fertility management. *Soil Sci Soc Am J*, 1997, 61: 310—314
- Conti M E, de la Horra A M, Effron D, et al. Factors affecting potassium fixation in Argentine agricultural soils. *Comm Soil Sci Plant Anal*, 2001, 32: 2679—2690[DOI]
- Mengel K, Kirkby E A. Potassium in crop production. *Adv Agron*, 1980, 33: 59—110[DOI]
- 彭千涛, 范钦祯. 水分和温度对土壤钾素释放、固定的初步研究. *土壤学报*, 1984, 21: 385—394
- 钱晓晴, 彭永欣, 封克, 等. 沿江高沙土钾的固定与释放. *土壤通报*, 1996, 27: 168—169
- 于群英, 段立珍, 李孝良, 等. 土壤对钾素的固定及其影响因素研究. *安徽农业技术师范学院学报*, 1996, 10: 1—4
- Ross G J. Potassium exchange and fixation in some southern Ontario soils. *Can J Soil Sci*, 1989, 69: 649—661
- Schneider A. Release and fixation of potassium by a loamy soil as affected by initial water content and potassium status of soil samples. *Eur J Soil Sci*, 1997, 48: 263—271[DOI]
- Volk N T. The fixation of potash in difficulty available forms in soils. *Soil Sci*, 1934, 37: 267—287
- Pannu R P S, Singh Y, Singh B. Effect of long-term application of organic materials and inorganic N fertilizers on potassium fixation and release characteristics of soil under rice-wheat cropping system. *J Potassium Res*, 2003, 19: 1—10
- Bouabid R, Badraoui M, Bloom P R. Potassium fixation and charge characteristics of soil clays. *Soil Sci Soc Am J*, 1991, 55: 1493—1498
- Pal D K, Dudge S L. Potassium release and fixation reactions in some benchmark Vertisols of India in relation to their mineralogy. *Pedologie*, 1987, 37: 103—116
- 陈防. 长期施钾对土壤钾素固定释放特性的影响. 博士学位论文. 武汉: 华中农业大学, 1997. 1—20
- Ningappa N, Vasuki N. Potassium fixation in acid soils of Karnatak. *J Ind Soc Soil Sci*, 1989, 37: 391—392
- 李学垣. 土壤化学. 北京: 高等教育出版社, 2001. 55—99
- 徐国华, 鲍士旦, 史瑞和. 生物耗竭土壤的层间钾自然释放及固定特性. *土壤*, 1995, 27: 182—185
- Shaimukhametov M S H, Mamadaliev G N. The effect of long-term fertilization on the potassium status and mineralogy of clay particles in typical Serozem. *Eur Soil Sci*, 2003, 36: 994—1002
- Shaimukhametov M S H, Petrofanov V. Effect of long-term fertilization on the K-fixing capacity of soils. *Eur Soil Sci*, 2008, 41: 441—451[DOI]
- 徐明岗, 梁国庆, 张夫道. 中国土壤肥力演变. 北京: 中国农业科技出版社, 2006
- 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法. 北京: 中国农业科技出版社, 1999
- 李学垣. 土壤化学及实验指导. 北京: 中国农业出版社, 1997. 247—249
- 黄绍文, 金继运. 中国北方一些土壤对外源钾的固定. *植物营养与肥料学报*, 1996, 2: 131—138
- 罗家贤, 包梅芬. 几种粘土矿物和土壤的钾固定. *土壤学报*, 1988, 25: 377—386
- 蒋梅茵, 罗家贤. 土壤中钾的固定与释放. 见: 熊毅, 陈家坊, 编. 土壤胶体. 北京: 科学出版社, 1990. 442—486
- 张会民, 徐明岗, 吕家珑, 等. 长期施钾下中国 3 种典型农田土壤钾素固定及其影响因素研究. *中国农业科学*, 2007, 40: 749—756
- Olk D C, Cassman K G. Reduction of potassium fixation by two humic acid fractions in vermiculitic soils. *Soil Sci Soc Am J*, 1995, 59: 1250—1258
- Evangelou V P, Blevins R L. Effect of long-term tillage systems and nitrogen addition on potassium quantity-intensity relationships. *Soil Sci Soc Am J*, 1988, 52: 1047—1054
- Mortland M M, Lawton K, Uehara V. Alteration of biotite to vermiculite by plant growth. *Soil Sci*, 1956, 82: 477—481
- Dhaliwal A K, Gupta R K, Yadavinder S, et al. Potassium fixation and release characteristics of some benchmark soil series under rice-wheat cropping system in the indo-gangetic plains of Northwestern India. *Comm Soil Sci Plant Anal*, 2006, 37: 827—845[DOI]
- Khaled E M, Stucki W. Iron oxidation state effects on cation fixation in smectite. *Soil Sci Soc Am J*, 1991, 55: 550—554
- Manrique L A, Jones C A, Dyke P T. Predicting cation exchange capacity from soil physical and chemical properties. *Soil Sci Soc Am J*, 1991, 55: 787—794
- Gao G, Chang C. Changes in CEC and particle size distribution of soils associated with long-term annual applications of cattle feedlot manure. *Soil Sci*, 1996, 161: 115—120[DOI]