

不同生态条件下长期施钾对土壤钾素固定影响的机理*

张会民^{1,2,3} 徐明岗^{2**} 吕家珑¹ 刘红霞³

(¹ 西北农林科技大学资源环境学院, 陕西杨凌 712100; ² 中国农业科学院农业资源与农业区划研究所, 北京 100081; ³ 河南科技大学农学院, 河南洛阳 471003)

摘要 采用 X 射线衍射分析技术和室内模拟法, 研究了长期施钾对不同生态条件和不同轮作制度下黑土、塿土和灰漠土钾素固定的影响机理. 结果表明, 长期施钾对水云母含量较低土壤的钾素固定能力影响较大. 与不施钾土壤相比, 水云母含量较低的黑土和含量较丰富的塿土在外源钾加入浓度在 400 ~ 4000 mg · kg⁻¹ 范围内, 对外源钾的固定量分别降低了 75 ~ 747 mg · kg⁻¹ 和 16 ~ 238 mg · kg⁻¹, 而水云母含量丰富的灰漠土的固钾能力无明显变化. 长期施钾主要通过影响土壤含钾矿物组成对土壤固钾能力产生影响, 即延缓或阻止水云母向云母-蒙脱石混层间矿物的转化, 使土壤对外源钾的固定能力降低; 另外, 长期施钾使土壤缓效钾含量和 K⁺ 饱和度增加, 土壤固钾能力降低.

关键词 生态条件 长期施钾 钾素固定

文章编号 1001-9332(2007)05-1009-06 **中图分类号** S158.3 **文献标识码** A

Effects of long-term potassium fertilization on potassium fixation in soils under different ecological conditions: A mechanism study. ZHANG Hui-min^{1,2,3}, XU Ming-gang², LÜ Jia-long¹, LIU Hong-xia³ (¹ College of Resource and Environment, Northwest A & F University, Yangling 712100, Shaanxi, China; ² Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China; ³ College of Agronomy, Henan University of Science and Technology, Luoyang 471003, Henan, China). -Chin. J. Appl. Ecol., 2007, 18(5): 1009–1014.

Abstract: By using X-ray diffraction and laboratory simulation, this paper studied the effects of long-term potassium (K) fertilization on K fixation in black soil, loess soil, and grey desert soil under different ecological conditions and cropping systems. The results showed that long-term K fertilization had greater effects on the K fixation capacity of soils with lower hydromica content. When the K application rate was 400 to 4 000 mg · kg⁻¹, the K fixation capacity of black soil and loess soil, whose hydromica contents were low or relatively low, decreased by 75–747 mg · kg⁻¹ and 16–238 mg · kg⁻¹, respectively, compared with no K application, while no change was observed in grey desert soil whose hydromica content was high. Long-term K application could affect the changes of soil K-bearing minerals, *i. e.*, slowing down or holding back the transformation of hydromica into mixed-layered mica-smectite, and consequently, decreased the K fixation capacity of soil. The increase of soil slow-available K content and K⁺ saturation owing to the long-term K application also induced the decrease of the K fixation capacity.

Key words: ecological condition; long-term potassium fertilization; potassium fixation.

1 引言

土壤施肥长期定位试验具有长期性和气候代表

性(即能克服气候的年变化对肥效的影响)等特点, 信息量丰富, 它能系统地研究不同生态环境和不同耕作制度下土壤肥力的演变, 预测土壤的承载能力, 为农业的可持续发展提供决策依据^[4,9]. 在长期定位施肥条件下对土壤钾素的研究能探明土壤钾素肥力的演变特征, 具有重要的实践价值和理论意义. 但以往的研究主要集中在长期施肥条件下土壤钾素含

* 国家“十一五”科技支撑计划资助项目 (2006BAD05B09, 2006BAD02A14).
** 通讯作者. E-mail: mgxu@caas.ac.cn
2006-11-20 收稿, 2007-02-25 接受.

量的变化和钾素的平衡^[1,6-8,11-12,19,21-23],而对不同生态环境和不同轮作制度下土壤钾素的固定特征研究较少,尤其是不同生态条件下长期施钾对土壤钾素固定的影响机理尚不清楚. 本文采用 X 射线衍射分析技术和室内模拟法,研究了长期施肥条件下,半湿润半干旱气候和一年一熟轮作制度下的黑土、干旱半干旱气候和一年两熟轮作制度下的壤土,以及干旱气候和一年一熟轮作制度下的灰漠土 3 种土壤对外源钾固定能力的变化特征,为合理施用钾肥和提高土壤钾素肥力提供依据.

2 材料与方法

2.1 供试土壤

黑土、壤土和灰漠土土壤样品于 2005 年分别采自吉林公主岭、陕西杨凌和新疆乌鲁木齐长期肥料定位试验站,均为 NP(不施钾)和 NPK(施钾)两个处理. 这 3 个长期定位试验均开始于 1990 年,它们的分布地点、年均气温、耕作制度和施肥量等,以及试验前土壤的基本理化性质情况见表 1 和表 2^[20].

2.2 土壤钾素含量及矿物组成的测定

土壤速效钾浓度用 1 mol · L⁻¹ 中性醋酸铵 (NH₄OAC) 溶液提取测定^[13];缓效钾浓度用 1 mol · L⁻¹ 硝酸煮沸 10 min 浸提钾浓度减去速效钾浓度测定^[13];全钾浓度用氢氟酸-高氯酸 (HF-HClO₄) 消煮,火焰光度计法测定^[13];土壤阳离子交换量 (CEC) 用乙酸铵法和氯化铵-乙酸铵法测定^[13];土壤有机碳 (SOC) 浓度用高温外热重铬酸钾-容量

法^[13]测定. 土壤矿物组成采用 Mg 饱和,然后用乙二醇处理制成定向薄片, X 射线衍射分析^[10,14,16].

2.3 土壤钾素固定试验

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、400、800、1 600、2 400、3 200、4 000 mg · kg⁻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 mol · L⁻¹ 醋酸铵浸提液,振荡 30 min 后过滤,用火焰分光光度计 (FP640, 上海) 测定滤液中的钾浓度^[5],固钾量和固钾率按下列公式计算:

固钾量(mg · kg⁻¹) = 外源钾加入量 - (加外源钾 NH₄OAC 浸提钾量 - 未加外源钾 NH₄OAC 浸提钾量)

(1)

固钾率 = 固钾量/外源钾加入量 × 100%

(2)

3 结果与分析

3.1 不同生态条件下长期施钾对土壤钾素固定的影响

长期施钾条件下,3 种土壤均表现出随外源钾加入浓度的增加,固钾量增加,而固钾率降低的趋势 (表 3). 无论施钾与否,灰漠土土壤的固钾量和固钾率均最低,黑土最高,壤土介于二者之间. 不同生态条件下土壤固钾能力的这种变化规律与黄绍文等^[5]的研究结果一致. 长期施钾后,3 种土壤固钾量和固钾率的变化特征存在明显差异,在外源钾加入浓度在 400 ~ 4 000 mg · kg⁻¹ 范围内,灰漠土土壤的

表 1 3 个长期定位试验基本情况

Tab. 1 Basic status of three long-term experiments

土壤类型 Soil type	北 纬 North latitude	东 经 East longitude	年均气温 Mean annual temperature (°C)	年降雨量 Annual precipitation (mm)	年蒸发量 Annual evaporation (mm)	耕作制度 Cropping system	施肥量 Fertilization rate (kg · hm ⁻² · a ⁻¹)		
							N	P	K
黑土 Black soil	43°30′	124°48′	4. 5	450 ~ 600	1200 ~ 1600	一年一熟: 玉米 One crop per year: Corn	165	36	68
壤土 Loess soil	34°17′	108°00′	13. 0	550 ~ 600	993	一年两熟: 小麦-玉米 Two crops per year: Wheat-corn	353	82	146
灰漠土 Gray desert soil	43°57′	87°46′	7. 7	150 ~ 200	1600 ~ 2200	一年一熟: 小麦或玉米 One crop per year: Wheat or corn	242	60	47

表 2 长期定位试验前(1990 年)土壤基本理化性质

Tab. 2 Basic physical and chemical properties of the soil at beginning(1990)of the long-term experiments

土壤类型 Soil type	有机碳 SOC (g · kg ⁻¹)	全氮 TN (g · kg ⁻¹)	全磷 TP (g · kg ⁻¹)	全钾 TK (g · kg ⁻¹)	有效氮 AN (mg · kg ⁻¹)	速效磷 AP (mg · kg ⁻¹)	速效钾 AK (mg · kg ⁻¹)	缓效钾 SAK (mg · kg ⁻¹)	pH
黑土 Black soil	12. 2	1. 53	1. 41	23. 1	102. 0	20. 6	190. 1	982. 4	7. 6
壤土 Loess soil	5. 7	0. 83	0. 61	25. 2	61. 3	9. 6	191. 4	1380. 0	8. 6
灰漠土 Gray desert soil	8. 0	0. 87	0. 67	23. 0	55. 2	3. 4	288. 0	1764. 0	8. 1

SOC: Soil organic C; TN: Total N; TP: Total P; TK: Total K; AN: Available N; AP: Available P; AK: Available K; SAK: Slow available K. 下同
The same below.

表 3 不同生态条件下长期施钾土壤的固钾量和固钾率
Tab.3 K fixation capacities and K fixation rates in the soil after long-term K fertilization application under different ecological conditions

土壤类型 Soil type	处 理 Treatment	外源钾加入浓度 Added K concentration (mg · kg ⁻¹)											
		400		800		1600		2400		3200		4000	
		固钾量 ¹⁾	固钾率 ²⁾	固钾量	固钾率	固钾量	固钾率	固钾量	固钾率	固钾量	固钾率	固钾量	固钾率
黑土	NP	366	91	670	84	1243	78	1646	69	1754	55	1988	50
Black soil	NPK	290	73	514	64	911	57	1151	48	1196	37	1241	31
壤土	NP	306	76	527	66	867	54	1050	44	1116	35	1149	29
Loess soil	NPK	290	73	409	51	672	42	812	34	909	28	1006	25
灰漠土	NP	157	39	259	32	387	24	491	20	494	15	498	12
Gray desert soil	NPK	165	41	251	31	365	23	518	22	497	16	526	13

1) K fixation capacity (mg · kg⁻¹); 2) K fixation rate (%).

固钾量和固钾率与不施钾土壤相比无明显差异,而黑土和壤土土壤均有所降低,其中黑土下降幅度较大,固钾量和固钾率分别下降了 75 ~ 747 mg · kg⁻¹ 和 17% ~ 21%,平均下降 394 mg · kg⁻¹ 和 19%,而壤土土壤仅分别下降了 16 ~ 238 mg · kg⁻¹ 和 3% ~ 15%,平均下降 153 mg · kg⁻¹ 和 9%. 上述结果表明,长期施钾使土壤的固钾能力降低,Tening 等^[17] 对尼日利亚不同母质土壤钾素的有效性研究也得出了类似的结论.但长期施钾后,不同生态条件的土壤固钾能力的降低幅度存在较大差异,这可能与土壤含钾矿物组成和粘粒含量的变化有关,也可能与土壤有机碳(SOC)含量、各种形态钾素含量、阳离子交换量(CEC)或 K⁺ 饱和度等的变化有关.

3.2 不同生态条件下长期施钾对土壤钾素固定的影响机理

3.2.1 长期施钾对土壤含钾矿物组成的影响 X 射线衍射分析结果表明,长期施钾后,除黑土土壤含钾矿物组成略有变化外,壤土和灰漠土均无明显变化(图 1 和表 4).从黑土的 X 射线衍射图谱可以看出,与施钾(NPK)处理相比,长期不施钾(NP)处理的衍射图谱在 1.0 nm 处的水云母峰强度略有减弱,而在 1.7 nm 处的蒙脱石和云母-蒙脱石混层层间矿物峰略有增强,这可能是由于作物的不断吸收导致土壤钾素出现亏缺^[20],使土壤粘土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(形成云母-蒙脱石混层层间矿物),而长期施用钾肥延缓和并减少了这种转化.这与 Shaimukhametov 等^[16]关于长期施肥对俄罗斯典型土壤钾素状况的影响研究结果一致.Tributh 等^[18]通过对德国的一些长期定位试验研究发现,土壤钾素耗竭导致土壤粘土矿物中伊犁石含量降低的同时,蒙脱石和伊犁石-蒙脱石混层层间矿物的含量有所增加;Nielsen 等^[15]对长期定位试验的研究结果表明,土壤钾素耗竭导致伊犁石逐渐向蒙脱石转化;范钦桢等^[3]对中

国的一些长期定位试验研究发现,长期不施钾可使土壤中的水云母向蛭石转化,而施用足量的钾可延缓或阻止这种转化.

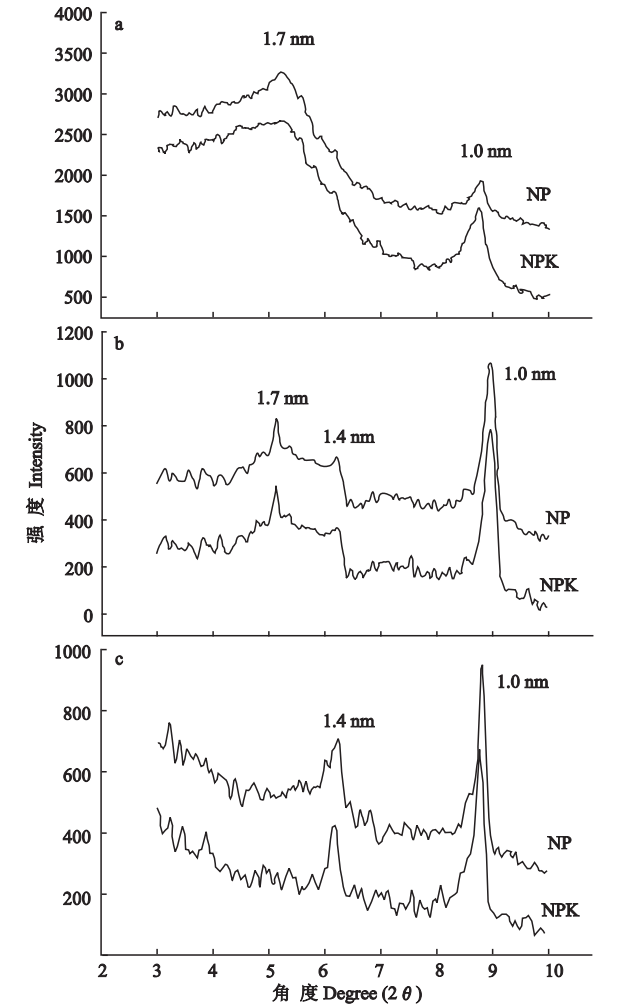


图 1 不同生态条件下长期施钾后黑土(a)、壤土(b)和灰漠土(c)土壤的含钾矿物组成
Fig.1 K-bearing minerals in the black soil (a), loess soil (b) and gray desert soil (c) after under long-term K fertilization application differentecological conditions .
1.0 nm: 水云母 Hydromica;1.4 nm: 绿泥石 Chlorite;1.7 nm: 蒙脱石和云母-蒙脱石混层层间矿物 Smectite and mixed-layered mica-smectite component.

不施钾与施钾处理相比, 塬土和灰漠土的土壤含钾矿物组成没有明显变化, 这是因为这两种土壤含钾矿物均以水云母为主, 无论施钾与否均没有对土壤水云母含量产生明显影响, 绿泥石和蒙脱石的含量也没有发生明显的变化, 所以长期施钾条件下这两种土壤的固钾能力均无明显变化. 表明长期施钾条件下土壤含钾矿物组成的变化是影响土壤钾素固定的决定性因素, 而长期施钾后灰漠土和塬土间固钾能力变化的差异可能还与土壤钾素含量和 K^+ 饱和度等的变化有关.

3.2.2 长期施钾对土壤钾素含量的影响 与不施钾处理(NP)相比, 黑土、塬土和灰漠土3种土壤施钾处理(NPK)的速效钾含量均有所升高, 升高幅度为 $68.0 \sim 115.8 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 其中塬土升高最多, 年均升高 $7.7 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 黑土升高最少, 年均升高 $4.5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ (表4). 3种土壤施用钾肥处理的缓效钾含量也均有升高, 升高幅度为 $11.3 \sim 107.4 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 其中黑土升高最多, 年均升高 $7.2 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 灰漠土升高最少, 年均升高 $0.8 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$. 长期施钾后, 灰漠土和塬土的NP和NPK处理间土壤全钾含量均无明显差异, 黑土NPK比NP处理平均高 $1.3 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$.

土壤全钾含量的变化与土壤含钾矿物组成密切相关, 而土壤速效钾和缓效钾含量的变化除与土壤含钾矿物组成有关外, 可能还与轮作方式和钾肥施用量有关. 如长期施钾后一年两熟条件下的塬土土壤速效钾含量升高幅度比一年一熟条件下的灰漠土和黑土土壤高, 但其施钾量也最高, 这是由其土壤特性、轮作方式不同, 还是由于施钾量高所造成的尚难以确定, 因此仅根据土壤速效钾含量的变化难以解释土壤固钾特性的变化, 还要进一步分析土壤全钾和含钾矿物组成的变化情况. 土壤全钾和缓效钾含量的变化与土壤含钾矿物组成有关. 灰漠土释钾矿物水云母(1.0 nm峰)的含量丰富, 而固钾矿物蒙脱石的含量较少(图1和表3), 其土壤全钾和缓效钾

含量均非常高, 所以无论施钾与否, 均未对其全钾和缓效钾含量产生显著影响; 塬土以水云母和蒙脱石或云母-蒙脱石混层层间矿物(1.7 nm峰)为主要含钾粘土矿物, 缓效钾含量也非常高, 但较灰漠土低, 而施钾量却远远高于灰漠土, 每年施入的钾的一部分都要被土壤里膨胀性的粘土矿物固定, 所以长期施钾后土壤缓效钾含量比不施钾土壤有所增加; 黑土以蒙脱石或云母-蒙脱石混层层间矿物为主要粘土矿物, 水云母含量相对较少, 所以长期不施钾肥土壤钾素严重亏缺^[20], 而施入的钾又极易被固定, 所以即使长期施用钾肥(年均钾肥施用量又远远低于塬土)仍然不能阻止其土壤全钾和缓效钾含量下降的趋势.

在外源钾加入浓度为 $400 \sim 4\,000 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 范围内, 3种土壤固钾率与缓效钾含量均呈显著($P < 0.05$ 或 $P < 0.01$)负相关, 外源钾加入浓度为 400、800、1 600、2 400、3 200 和 $4\,000 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时相关系数(r)依次为 -0.832 、 -0.903 、 -0.932 、 -0.938 、 -0.930 和 -0.916 ; 与土壤速效钾含量也呈负相关, 但没有达到显著水平, 相关系数(r)依次为 -0.432 、 -0.626 、 -0.633 、 -0.635 、 -0.620 和 -0.598 ; 3种土壤的平均固钾率与缓效钾和速效钾含量的相关系数(r)分别为 -0.8394 和 -0.3527 . 黄绍文等^[5]对我国北方一些土壤钾素固定的研究也得到了类似的结论.

上述结果表明, 在土壤含钾矿物组成没有明显变化的前提下, 土壤缓效钾含量的变化是影响土壤固钾能力的主要因素, 速效钾含量的变化对土壤固钾能力没有显著影响, 即长期施钾条件下塬土和灰漠土缓效钾含量变化的差异决定了它们固钾能力变化的差异. 但究竟是由于土壤特性不同, 还是轮作方式或施钾量不同导致土壤缓效钾含量的变化尚需做深入研究.

3.2.3 长期施钾对土壤 CEC、SOC、粘粒含量和 K^+ 饱和度的影响 由表5可知, 长期施钾与不施钾相

表 4 不同生态条件下长期施钾土壤钾素含量和含钾矿物组成(平均值 \pm 标准差)
Tab. 4 Potassium contents and mineral composition in the soils after long-term K fertilization application under different ecological conditions (mean \pm SD)

土壤类型 Soil type	全钾 TK ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)		缓效钾 SAK ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)		速效钾 AK ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)		矿物组成 Mineral composition	
	NP	NPK	NP	NPK	NP	NPK	主要的 Main	次要的 Minor
黑土 Black soil	22.6 \pm 0.3	23.9 \pm 0.4	867.1 \pm 3.5	974.5 \pm 3.7	117.5 \pm 3.2	185.5 \pm 4.1	Sm, H, Mi-Sm	V, K, Q
塬土 Loess soil	25.6 \pm 0.5	25.8 \pm 0.4	1418.2 \pm 5.3	1486.0 \pm 5.5	161.7 \pm 3.4	277.5 \pm 4.2	H, Sm	V, Ch, K, Q
灰漠土 Gray desert soil	22.1 \pm 0.3	22.6 \pm 0.3	1692.7 \pm 6.7	1704.0 \pm 7.4	166.4 \pm 3.3	270.4 \pm 3.8	H, Ch	V, K, Q

H: 水云母 Hydromica; Ch: 绿泥石 chlorite; Sm: 蒙脱石 smectite; Mi-Sm: 云母-蒙脱石混层层间矿物 Mixed-layered mica-smectite component; V: 蛭石 Vermiculite; K: 高岭石 Kaolinite; Q: 石英 Quartz.

表 5 不同生态条件下长期施钾土壤的有机碳(SOC)、阳离子交换量(CEC)、粘粒含量和 K⁺ 饱和度
Tab.5 SOC, CEC, clay contents and K⁺ saturation in the soils after long-term K fertilization application under different ecological conditions

土壤类型 Soil type	土壤有机碳 SOC (g · kg ⁻¹)		阳离子交换量 CEC (cmol(+) · kg ⁻¹)		<0.002 mm 粘粒 <0.002 mm clay (g · kg ⁻¹)		K ⁺ 饱和度 K ⁺ saturation*(%)	
	NP	NPK	NP	NPK	NP	NPK	NP	NPK
黑土 Black soil	12.3 ± 0.4	12.4 ± 0.4	20.6 ± 0.6	21.6 ± 0.5	34.7 ± 0.5	33.8 ± 0.6	1.5 ± 0.1	2.2 ± 0.2
塬土 Loess soil	8.9 ± 0.3	9.3 ± 0.4	12.5 ± 0.4	12.8 ± 0.4	30.3 ± 0.5	30.4 ± 0.4	3.3 ± 0.3	5.5 ± 0.3
灰漠土 Gray desert soil	7.8 ± 0.3	7.5 ± 0.3	9.2 ± 0.2	9.1 ± 0.3	21.3 ± 0.4	22.0 ± 0.4	4.6 ± 0.3	7.6 ± 0.4

K⁺ saturation =(K⁺/CEC) × 100% .

比,3 种土壤的 SOC、CEC 和 <0.002 mm 粘粒含量均无明显差异. 土壤 K⁺ 饱和度的高低反映土壤钾素的丰缺状况,K⁺ 饱和度小于 2% 的土壤一般都缺钾^[13]. 本试验中,从土壤 K⁺ 饱和度的高低可以看出,即使长期不施用钾肥,塬土和灰漠土土壤钾素含量仍较丰富,与此相反,即使长期施钾黑土土壤的钾素含量仍较缺乏(K⁺ 饱和度仅为 2%). 与不施钾相比,施钾黑土、塬土和灰漠土的 K⁺ 饱和度分别增加了 47%、67% 和 65%. 这与土壤速效钾含量的变化有关,从前面土壤速效钾含量变化的分析可知,不施钾肥条件下,以水云母为主要含钾矿物的灰漠土和塬土土壤钾素亏缺程度较轻,而黑土亏缺程度较高,所以长期施用钾肥后灰漠土和塬土土壤速效钾含量显著高于不施钾土壤,而黑土升高最少. 另外,虽然试验开始时(1990 年)塬土和黑土土壤速效钾含量比较接近,但黑土每年的施钾量却远远低于塬土(表 1),这也可能是黑土 K⁺ 饱和度增加幅度最小的原因之一.

回归分析表明,在外源钾施入浓度在 400 ~ 4 000 mg · kg⁻¹ 范围内,土壤平均固钾率的变化与土壤 K⁺ 饱和度的变化呈显著(*P* < 0.05)负相关(图 2),

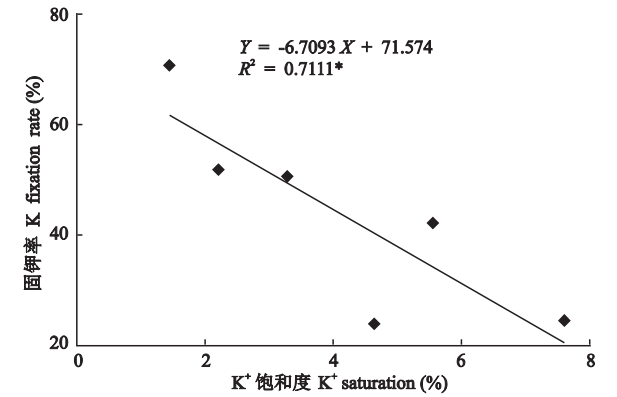


图 2 土壤 K⁺ 饱和度与固钾率的相关关系
Fig.2 Correlation between K⁺ saturation and K fixation rate in soils.
固钾率为不同外源钾加入量下固钾率的平均值 K fixation rate was average value over different K fixation rates under different K additions.

这与 Conti 等^[2]对阿根廷农业土壤固钾因素的研究结果一致. 说明长期施钾引起土壤 K⁺ 饱和度的变化,从而影响土壤固钾能力的变化. 但是,尽管长期施钾后灰漠土土壤 K⁺ 饱和度显著增加,但其土壤固钾能力并没有因此降低. 笔者认为,长期施钾对土壤固钾能力的影响首先是影响土壤含钾矿物组成的变化,其次影响土壤缓效钾含量的变化,再次才影响土壤 K⁺ 饱和度的变化. 所以,长期施钾条件下,即使灰漠土土壤 K⁺ 饱和度显著增加,但其含钾矿物组成和缓效钾含量均无明显变化决定其固钾能力无明显变化.

4 结 论

不同生态条件下,长期施钾对土壤钾素固定影响的机理主要是通过影响土壤含钾矿物组成、缓效钾含量和 K⁺ 饱和度的变化而影响土壤固钾能力的变化.

首先,长期施钾下,土壤固钾能力变化的程度主要取决于土壤含钾矿物组成变化的程度,即水云母向膨胀性的云母-蒙脱石混层层间矿物转化的程度,转化程度越高,土壤固钾能力提高越多. 长期施钾与不施钾土壤相比,水云母含量较低的黑土固钾能力显著降低,水云母含量较丰富的塬土固钾能力略有降低,而水云母含量丰富的灰漠土固钾能力没有发生明显变化. 其次,长期施钾下土壤缓效钾含量增加,则土壤固钾能力降低,而土壤速效钾含量的变化对土壤固钾能力没有显著影响. 除含钾丰富的灰漠土外,长期施钾引起土壤 K⁺ 饱和度的增加,也是使土壤固钾能力降低的原因之一. 长期施钾对 3 种土壤 SOC、CEC 和 <0.002 mm 粘粒含量没有显著影响. 此外,轮作方式(包括同一土壤类型上不同轮作方式和同一轮作方式下的不同土壤)和钾肥施用量(包括同一土壤类型上不同的钾肥用量和同一钾肥用量下不同土壤)是否影响土壤对外源钾的固定,还有待深入研究.

参考文献

- [1] Chen F (陈 防), Lu J-W (鲁剑魏), Wan Y-F (万运帆), *et al.* 2000. Effect of long term potassium application on soil potassium content and forms. *Acta Pedologica Sinica* (土壤学报), **37**(2): 233–241 (in Chinese)
- [2] Conti ME, de la Horra AM, Effron D, *et al.* 2001. Factors affecting potassium fixation in Argentine agricultural soils. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, **32**: 2679–2690
- [3] Fan Q-Z (范钦桢), Xie J-C (谢建昌). 2005. Variation of potassium fertility in soil in the long-term stationary experiment. *Acta Pedologica Sinica* (土壤学报), **42**(4): 591–599 (in Chinese)
- [4] Fu G-M (傅高明), Li C-Z (李纯忠). 1989. Long-term experiment on soil and fertilizer. *World Agriculture* (世界农业), (12): 22–25 (in Chinese)
- [5] Huang S-W (黄绍文), Jin J-Y (金继运). 1996. Potassium fixation in different soils from North China. *Plant Nutrition and Fertilizer Science* (植物营养与肥料学报), **2**(2): 131–138 (in Chinese)
- [6] Jiang Z-S (姜子绍), Yu W-T (宇万太). 2006. Research advance in potassium cycling in agroecosystems. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), **17**(3): 545–550 (in Chinese)
- [7] Kong H-M (孔宏敏), He Y-Q (何圆球), Wu D-F (吴大付), *et al.* 2004. Effect of long-term fertilization on crop yield and soil fertility of upland red soil. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), **15**(5): 782–786 (in Chinese)
- [8] Lei Y-Z (雷永振), Qiu W-W (邱卫文), Wang X-Z (王祥珍), *et al.* 2003. Changes in corn yield and soil K content under long term fertilization. *Liaoning Agricultural Sciences* (辽宁农业科学), (4): 1–3 (in Chinese)
- [9] Leigh RA, Johnston AE. 1994. Long-Term Experiments in Agricultural and Ecological Sciences. Harpenden, UK: Rothamsted Experimental Station.
- [10] Li X-Y (李学垣). 1997. Soil Chemistry and Experiment Instruction. Beijing: China Agricultural Press. (in Chinese)
- [11] Liu H-X (刘鸿翔), Wang D-L (王德禄), Wang S-Y (王守宇), *et al.* 2002. Changes of crop yield and soil fertility under long-term application of fertilizer and recycled nutrients in manure on a black soil. III. Soil nutrient budget. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), **13**(11): 1410–1412 (in Chinese)
- [12] Liu S-T (刘树堂), Liu P-L (刘培利), Wang F (王锋), *et al.* 2005. Study of soil potassium changes to long-term located fertilization in winter wheat-summer corn rotation. *Hebei Agricultural Sciences* (河北农业科学), **9**(1): 10–14 (in Chinese)
- [13] Lu R-K (鲁如坤). 1999. Analytical Methods of Soil Agricultural Chemistry. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press. (in Chinese)
- [14] Moore DM, Reynolds RC. 1989. X-ray Diffraction and the Identification and Analysis of Clay Minerals. New York: Oxford University Press.
- [15] Nielsen J, Moberg JP. 1984. The influence of K-depletion on mineralogical changes in Pedons from two field experiments and in soils from four pot experiments. *Acta Agriculturae Scandinavica*, **34**: 391–399
- [16] Shaimukhametov MSH, Mamadaliev GN. 2003. The effect of long-term fertilization on the potassium status and mineralogy of clay particles in typical Serozem. *Eurasian Soil Science*, **36**: 994–1002
- [17] Tening AS, Omueti JAI. 2000. Potassium availability in soils from different parent materials in the subhumic zone of Nigeria. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, **31**: 509–519
- [18] Tributh H, Boguslawski EV, Lieres AV, *et al.* 1987. Effect of potassium removal by crops on transformation of illitic clay minerals. *Soil Science*, **147**: 404–409
- [19] Xiong M-B (熊明彪), Lei X-Z (雷孝章), Hu H (胡恒), *et al.* 2003. Effects of long term K application on rice wheat yield and soil K in purple soil. *Southwest Journal of Agricultural Sciences* (西南农业学报), **16**(3): 53–56 (in Chinese)
- [20] Xu M-G (徐明岗), Liang G-Q (梁国庆), Zhang F-D (张夫道), *et al.* 2006. Variation of Soil Fertility in China. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press. (in Chinese)
- [21] Yao Y-X (姚源喜), Liu S-T (刘树堂), Huan H-F (郇恒福). 2004. Effect of long term fertilization on the status of potassium in noncalcareous fluvo aquic soil. *Plant Nutrition and Fertilizer Science* (植物营养与肥料学报), **10**(3): 241–244 (in Chinese)
- [22] Zhang A-J (张爱君), Ma F (马 飞), Zhang M-P (张明普). 2000. Long-term stationary experiments on the status of soil K and the effect of K fertilizer on Yellow Fluvo-aquic soil. *Jiangsu Journal of Agricultural Sciences* (江苏农业学报), **16**(4): 237–241 (in Chinese)
- [23] Zhang Y-M (张玉铭), Hu C-S (胡春胜), Mao R-Z (毛任钊), *et al.* 2003. Nitrogen, phosphorus and potassium cycling and balance in farmland ecosystem at the piedmont of Taihang. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), **13**(11): 1863–1867 (in Chinese)

作者简介 张会民, 男, 1969年生, 博士研究生, 副教授. 主要从事作物营养与土壤肥力研究, 发表论文 20 余篇. E-mail: zhbm2007@163.com

责任编辑 张凤丽