

长期肥料定位试验中土壤钾素肥力的演变

范钦桢 谢建昌

(中国科学院南京土壤研究所, 南京 210008)

摘要 利用 18 个长期定位试验的不施钾和施钾处理土壤, 探讨了土壤含钾矿物、 Q/I 关系和对外源钾固定能力的变化。结果表明: (1) 施钾处理的速效钾和缓效钾含量均高于不施钾的, 以水云母、蒙皂石为主的土壤, 缓效钾含量年均均可高 7.67 mg kg^{-1} ; (2) 长期不施钾, 由于作物吸收消耗了土壤钾, 可使水云母 \rightarrow 蛭石转化, 施用足量的钾可延缓或阻止水云母 \rightarrow 蛭石转化; (3) 长期不施钾土壤的 ΔK° 和 AR_k^k 降低, PBC^k 值提高, 即土壤易释放钾库变小, 土壤对钾的吸附能力增强, 土壤供钾能力降低, 若要提高土壤溶液中钾素的浓度需要施用较大的钾; (4) 长期不施钾, 土壤钾素被消耗, 可提高土壤对外源钾的固定能力, 不过, 一旦土壤中有大量 NH_4^+-N 积累时, 可降低土壤对外源钾的固定能力。

关键词 土壤钾素; 粘土矿物; Q/I ; 固钾能力
中图分类号 S158 **文献标识码** A

土壤钾素肥力的演变是普遍关心的问题, 许多科研工作者研究了不同土壤钾素含量、形态、转化及其有效性, 不少科研工作者利用肥料长期定位试验研究了土壤各种形态钾素含量的变化。本文则以分布在全国各地的 18 个长期定位试验的不施钾 (NP) 和施钾 (NPK) 处理土壤, 来探讨土壤含钾矿物、 Q/I 关系和固钾能力等的变化, 并与 34 个盆栽耗竭试验土壤的固钾能力作比较, 以期对土壤钾素肥力的变化有进一步的认识, 为合理施用钾肥, 保持和提高土壤钾素肥力提供依据。

1 材料与方法

1.1 供试土壤

本研究的供试样本是来自全国 18 个长期定位试验的 NP 和 NPK 处理土样。这 18 个长期定位试验的分布地点、土壤类型、种植制、试验已延续时间等基本情况列于表 1。

1.2 土壤速效钾、缓效钾和土壤矿物组成测定

土壤速效钾, 缓效钾分别用 1 mol L^{-1} 的中性 NH_4OAc 法和 1 mol L^{-1} 的 HNO_3 煮沸法提取, 火焰光度计法测定。土壤矿物组成用 Mg -甘油水溶液制成定向薄片, X 光衍射分析。

1.3 Q/I 测定

称取 5.00 g 过 1 mm 筛的风干土样共 10 份, 置于 100 ml 塑料瓶中, 分别加入含 CaCl 0.01 mol L^{-1} , KCl $0, 0.02, 0.05, 0.10, 0.20, 0.50, 0.70, 1.00, 1.50, 2.00 \text{ mmol L}^{-1}$ 的混合液 50 ml , 加盖在 25°C 下振荡 1 h , 平衡 22 h , 过滤。用火焰光度计法测定平衡液中的 K^+ 浓度, EDTA 络合滴定法测定 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 的总量。按 Deby-Hunkel 公式计算离子平均活度系数, 计算出不同溶液的 AR_k^k 值, 根据溶液平衡前后钾浓度计算土壤获得或失去的钾量 ΔK , ΔK 对 AR_k^k 作图得 Q/I 曲线, 并求得 ΔK° 、 AR_k^k 和 PBC^k 值。

1.4 土壤固钾试验

称取 5.00 g 过 1 mm 筛的风干土, 加 $1000 \mu\text{g}$ K , 土壤含水量保持在 60% , 置于室温下平衡一周, 风干, 然后用 1 mol L^{-1} 的中性 NH_4OAc 提取, 火焰光度计法测定土壤钾。重复 3 次。土壤固钾量用下式计算: 土壤固定的钾量 = 施入钾量 - (施钾土壤提取钾量 - 不施钾对照土壤提取钾量)。

2 结果与讨论

2.1 施钾与不施钾处理土壤速效钾与缓效钾含量的差异

2.1.1 速效钾含量的差异 除只施藁秆不施化

表1 长期定位试验基本情况

Table 1 Basic conditions of the long-term stationary experiment

土样 编号 Soil No	地点 Locality	土壤 Soil	耕作制 Cropping system	试验年数 ¹⁾ Year (a)	施肥量 Fertilization rate		
					N	P ₂ O ₅	K ₂ O
					(kg hm ⁻² a ⁻¹)		
1	广西柳州 Liuzhou, Guangxi	水稻土 Paddy soil	稻稻闲	15	272~ 330	108	225
2	浙江金华 Jinhua, Zhejiang	水稻土 Paddy soil	稻稻麦	15	360	126~ 158	338~ 487
3	江西进贤 Jinxian, Jiangxi	水稻土 Paddy soil	稻稻闲	18	180	90	150
4	湖南望城 Wangcheng, Hunan	水稻土 Paddy soil	稻稻闲	18	330	180	120
5	四川遂宁 Suining, Sichuan	水稻土 Paddy soil	稻麦	17	120	120	120
6	江苏徐州 Xuzhou, Jiangsu	潮土 Fluvo-aquic soil	小麦玉米	17	300	150	225
7	山东齐河 Qihe, Shandong	潮土 Fluvo-aquic soil	小麦玉米	16	300	300	300
8	山东长清 Changqing, Shandong	棕壤 Brown earth	小麦玉米	16	300	300	300
9	山东济南 Jinan, Shandong	褐土 Cinnamon soil	小麦玉米	16	300	300	300
10	河南封丘 Fengqiu, Henan	黄潮土 Yellow fluvo-aquic soil	小麦玉米	9	300	135	300
11	山东莱阳 Laiyang, Shandong	非石灰性潮土 Non-calcareous fluvo-aquic soil	小麦玉米	20	276	90	135
12	河南郑州 Zhengzhou, Henan	黄潮土 Yellow fluvo-aquic soil	小麦玉米	18	240~ 300	120~ 150	120
13	天津 Tianjing	潮土 Fluvo-aquic soil	小麦玉米	19	474	133.5	75
14	吉林双辽 Shuangliao, Jilin	冲积土 Fluvisol	玉米	12	225	150	75
15	吉林伊通 Yitong, Jilin	白浆土 Albic bleached soil	玉米	12	225	150	75
16	吉林公主岭 Gongzhuling, Jilin	风砂土 Aeolian sandy soil	玉米	12	225	150	75
17	甘肃平凉 Pingliang, Gansu	黑垆土 Dark loessial soil	小麦 ²⁾ 玉米	20	90	75	3750 ³⁾
18	新疆阜康 Fukang, Xinjiang	灰漠土 Gray desert soil	小麦	7	150	75	60

1) 至取样时的试验连续年数 the ordinal number of the year in the experiment when soil samples were gathered;

2) 为秸秆用量 Application rate of straws

学钾肥的 17 号黑垆土外, NPK 处理土壤速效钾均高于 NP 处理, 其幅度在 2~ 128 mg kg⁻¹ (表 2), 年均 (加权平均, 下同) 高 2.0 mg kg⁻¹。

2.1.2 缓效钾含量的差异 从表 2 可见, 经过较长时间的定位试验, 18 个试验 NPK 处理土壤的缓效钾均高于 NP 处理, 高幅在 6~ 328 mg kg⁻¹, 年均高 5.8 mg kg⁻¹。

土壤缓效钾含量的变化与土壤矿物组成、粘粒含量有关。以水云母为主的 5~ 15、17 和 18 号土, NPK 处理的缓效钾比 NP 处理高 18~ 328 mg kg⁻¹, 年均高 7.67 mg kg⁻¹, 而以高岭为主要矿物的 1, 2 号土, NPK 处理缓效钾仅比 NP 处理高 6~ 8 mg kg⁻¹, 年均只高 0.47 mg kg⁻¹。这可能是由于高岭持钾能力差之故。

施肥量和土壤质地对土壤缓效钾的变化也有明显影响。年施 K₂O 300 kg hm⁻² 的 10 号土 (轻壤), NPK 处理的缓效钾比 NP 处理高 132 mg kg⁻¹, 年均高出 14.7 mg kg⁻¹。而同样以水云母为主要矿物的

12 号土 (砂壤), 年施 K₂O 120 kg hm⁻² 其 NPK 处理的缓效钾比 NP 处理只高了 72 mg kg⁻¹, 年均仅高 4 mg kg⁻¹。

2.2 长期定位试验土壤含钾矿物的变化

土壤中缓效钾的消耗会导致含钾矿物中钾的释放, 从而使矿物发生变化, 如水云母脱钾向蛭石转化。我们对 18 个试验的 NP、NPK 处理土壤进行了 X 射线衍射分析, 主要结果如下:

从图 1 的 X 射线衍射图谱可以看到, 以水云母为主要粘土矿物的 8 号土, NP 处理土壤的蛭石峰尖细, 强度大, 水云母峰细高; 而 16 年来大量施钾, 与原始土比缓效钾有所提高的 NPK 处理土壤^[1], 水云母峰宽而高, 蛭石峰则宽, 强度较弱。9 号土的情况与 8 号土很相似, 与 NPK 处理相比, NP 土壤的蛭石峰加强, 而水云母峰有所减弱。表明长期不施钾, 作物主要吸收来自水云母中的钾, 出现了水云母[→]蛭石转化。

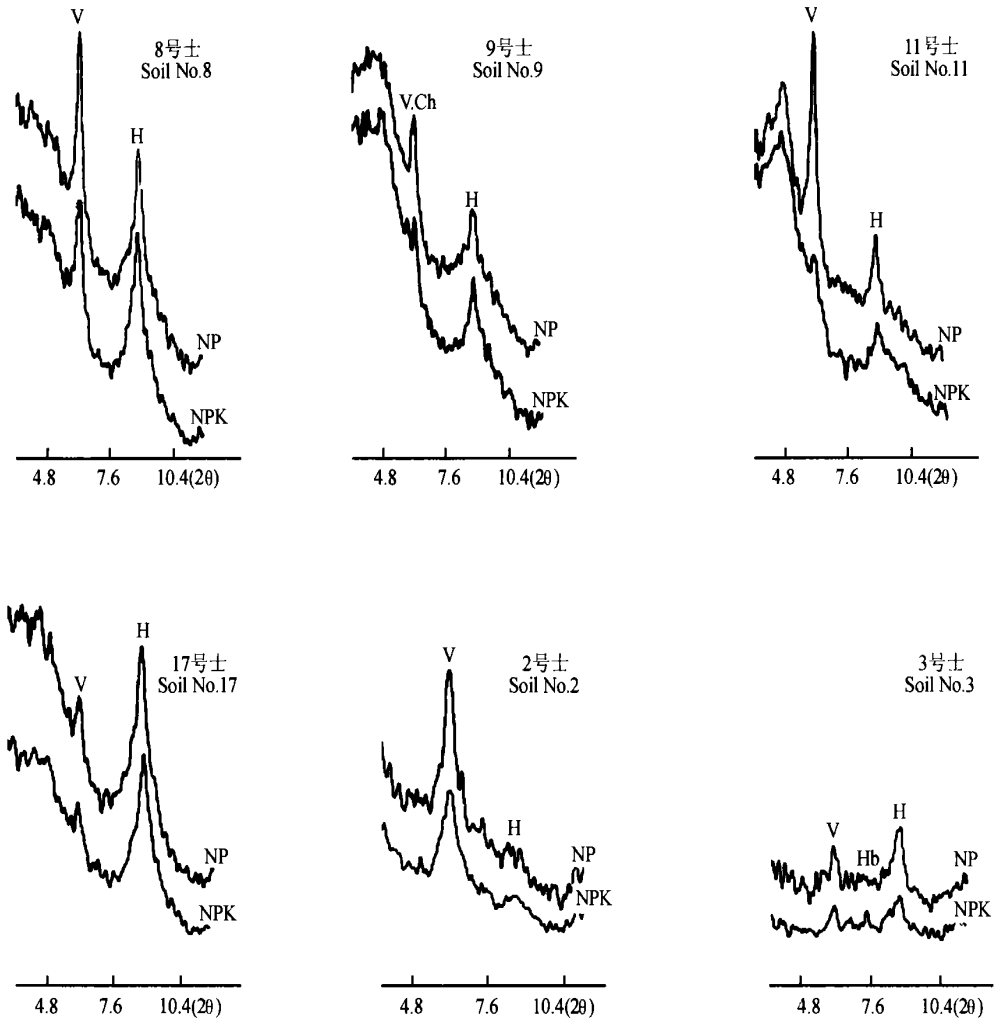
11 号土长达 20 年连续施钾的 NPK 处理土样,

表 2 长期施钾与不施钾处理土壤钾素含量的差异

Table 2 Difference in soil potassium content between K treatments and zero K treatment

土样编号 Soil No.	速效钾 (mg kg ⁻¹) Avail. K			缓效钾 (mg kg ⁻¹) Solw-Avail. K			矿物组成 ¹⁾ Mineral composition	
	NP	NPK	NPK-NP	NP	NPK	NPK-NP	主要的 Main	次要的 Minor
1	36	38	2	52	58	6	Kao, Sm	H
2	48	104	56	104	112	8	Kao, V	H, Q
4	46	56	10	189	204	15	Kao, H	V, Q
3	38	42	4	112	128	16	Kao, H	V, Q
16	42	46	4	408	424	16	Sm, H	V, Ch, Kao, Q
13	96	108	12	724	742	18	H, Sm	Ch, Kao, Q
14	50	60	10	300	320	20	H, Sm	Ch, Kao, Q
17	171	165	- 6	1 194	1 217.5	23.5	H	Ch, Sm, Kao
5	82	108	26	488	542	54	H	Sm, Kao, V
15	136	172	36	864	930.5	66.5	H	Sm, Ch, Kao, Q
12	50	78	28	510	582	72	H, Sm	Ch, Kao, Q
11	36	42	6	692	786	94	H, V, Sm	Ch, Kao
7	36	84	48	554	666	112	H, Sm	Ch, Kao
6	44	62	18	556	683	127	H, Sm	Kao, Ch, Q
10	62	190	128	588	720	132	H, Sm, Ch	Kao
18	270	291	21	1 637.5	1 774	136.5	H, Ch	Sm
9	70	160	90	660	810	150	H, Sm	V, Ch, Kao, Q
8	76	148	72	784	1112	328	H, V	Sm

1) Kao: 高岭石 Kaolinite; H: 水云母 Hydromica; Sm: 蒙皂石 Smectite; V: 蛭石 Vermiculite; Ch: 绿泥石 Chlorite; Q: 石英 Quartz



H: 水云母 hydromica; Hb: 水化黑云母 hydrobiotite; V: 蛭石 vermiculite; Ch: 绿泥石 Chlorite

图1 不同处理土壤含钾矿物的差异

Fig. 1 Difference in soil K-bearing minerals between treatments in the long-term stationary experiment

蛭石峰小, 强度弱, 水云母峰宽, 而 NP 处理的蛭石峰变得非常尖细, 强度明显增强, 水云母峰也较尖细, 表明 NP 处理土壤水云母 \rightarrow 蛭石转化十分明显。

17号土虽经20年连续种植, 由于1年只种1季, 种植强度不如8、9、11号土强, NP处理土壤年均亏缺 K_2O 57.2 kg hm^{-2} [2], 而该土壤的速效性钾, 缓效钾和水云母含量都较高(表2), 因而NP处理土壤的水云母峰仅略比NPK处理的低, 尚没有达到蛭石化的程度。

2号土虽以高岭石为主, 但从图1仍可看到, 年施入 K_2O 达 487.5 kg hm^{-2} , 农田钾素略有盈余[3]的NP处理土壤, 经15年连续种植45季作物后仍保留有水云母峰, 而不施钾肥的NP处理土壤, 水云母峰基乎消失, 蛭石峰反而加强, 表明水云母 \rightarrow 蛭石转化。

同以高岭石为主的3号土18年来一直1年种

植2季水稻, 年施 K_2O 150 kg hm^{-2} 的NPK土壤有水化黑云母峰, 而钾素亏缺量比NPK处理高1倍[4]的NP处理上见不到此峰, 表明水稻吸收了水化黑云母的钾, 使水化黑云母变成蛭石类矿物。从图上还可清楚看出, NPK处理的蛭石峰很平滑, 而NP的蛭石峰有肩形, 这可能是不施钾后水化黑云母变成蛭石的结果。

以上结果表明, 长期只施氮磷肥不施钾肥, 由于作物吸收, 土壤有效钾下降, 致使土壤含钾矿物中的钾释放, 导致水云母 \rightarrow 蛭石转化; 施用足量的钾, 土壤钾素亏缺减少甚至有所积累, 可延缓或阻止这种转化发生。

其余12个长期定位试验土壤的X射线衍射图表明, 二处理间差异不显著, 这与供试土壤粘土矿物组成, 试验延续时间较短, 种植强度弱或是施钾量低

等有关。

2.3 长期不施钾对 Q/I 关系的影响

对长期试验后土壤矿物发生变化的 8、9、11、17、2、3 号土和土壤矿物尚无明显变化的 10 号土的 NPK 和 NP 处理土壤的 Q/I 关系进行了测定, Q/I 曲线的主要参数列于表 3。

AR_e^k 是土壤易释放钾有效性或强度 I 的指标。当 AR_e^k 低于 $0.001(\text{mol L}^{-1})^{1/2}$ 时, 大部分钾吸附在晶格层间; AR_e^k 在 0.001 和 $0.1(\text{mol L}^{-1})^{1/2}$ 之间时吸附在边缘位; $> 0.1(\text{mol L}^{-1})^{1/2}$ 时吸附在平面位^[5], 也就是说, AR_e^k 值越大, 土壤吸持的钾越容易解吸, 钾的有效性就越高。从表 3 结果可以看到, 除 17 号土两处理间没有多少差别外, 所有试验 NPK 处理土壤的 AR_e^k 值均高于 NP 处理的, 即钾的有效性比 NP 处理的高。NP 处理 AR_e^k 值低与土壤的水云母 \rightarrow 蛭石转化, 致使层间和边缘吸附位增加有关。

ΔK° 是容量 (Q) 因子, 可衡量土壤中有效或交换性钾的水平, $-\Delta K^\circ$ 值大, 则土壤易释放钾库也大。供试土壤的 $-\Delta K^\circ$ 值与速效钾含量间有极显著

的相关 ($r = 0.923\ 3$)。从表 3 结果可以看到, 除 17 号黑垆土外, 所有 NPK 处理土壤的 $-\Delta K^\circ$ 值都比 NP 的高, 即 NPK 处理有较大的易释放钾库, 特别是施钾量高的 8、9、10、2 号土, NPK 处理的 $-\Delta K^\circ$ 分别是 NP 处理的 2.6、3.9、5.3 和 2.5 倍。

PBC^k 反映了土壤潜在缓冲容量, 即表示了一种土壤在土壤溶液中保持 K^+ 强度的能力。比较不同土壤的 PBC^k 值可以看到, 以水云母为主要矿物的 8、9、10、11、17 号土的 PBC^k 值显著高于以高岭为主要矿物的 2、3 号土 (表 3), 这表明前者的土壤钾缓冲能力较后者强, 这与邢世和^[6], 胡全才^[7] 等报道的以 2:1 型矿物为主的土壤 PBC^k 值较高相一致。当对同一土壤不同处理土样的 PBC^k 值作比较时可以看到, 8、9、10、11、17 号土 NP 处理的 PBC^k 值均比 NPK 处理的高, 这就是说, 对于同一土壤而言, 维持一个低溶液钾浓度的能力比维持一个高溶液钾浓度的能力强, 同时表明要提高 NP 处理土壤溶液中钾的浓度则需要施用较大的钾才行。2、3 号土两处理间 PBC^k 没有差异应与土壤是以 1:1 型矿物为主有关。

表 3 土壤 Q/I 曲线的主要参数

Table 3 Major parameters of the soil Q/I curve

土样编号 Soil No.	$-\Delta K^\circ (\text{mol kg}^{-1})$		$AR_e^k [(\text{mol L}^{-1})^{1/2}]$		$PBC^k (\text{mol kg}^{-1}) / (\text{mol L}^{-1})^{1/2}$	
	NP	NPK	NP	NPK	NP	NPK
9	0.104 6	0.270 3	0.001 7	0.004 8	62.31	56.80
8	0.072 0	0.315 7	0.001 0	0.005 0	73.09	63.72
10	0.088 8	0.470 5	0.001 7	0.010 0	52.28	46.84
11	0.086 3	0.141 8	0.000 9	0.001 6	95.80	87.36
17	0.290 7	0.257 6	0.004 3	0.004 1	68.00	62.99
2	0.105 8	0.264 8	0.003 1	0.007 4	34.39	35.55
3	0.062 7	0.080 7	0.002 0	0.002 6	30.79	30.66

总之, 对以 2:1 型层状粘土矿物为主的土壤, 长期不施钾, 土壤的 $-\Delta K^\circ$ 、 AR_e^k 值降低, 而 PBC^k 值升高, 即土壤易释放钾库变小, 钾素的有效性降低, 表明土壤供钾能力下降。

2.4 长期不施钾对土壤固钾的影响

18 个长期定位试验施钾与不施钾土壤固钾能力的测定结果表明, 其中有 12 个试验 (占 67%) 的 NP 处理对外源钾的固定量较 NPK 都有提高, 增幅在 $2.7\sim 36\text{ mg kg}^{-1}$ 。3 个试验固钾无变化, 还有 3 个试验固钾量有所下降 (表 4)。相关统计表明, NP 处理固钾量增加与土壤速效钾、缓效钾降低量相关显著 (γ 分别为 $0.486\ 9^*$ 和 $0.484\ 1^*$), 这与 NP 处理

长期不施钾, 土壤原有钾素被作物携走, 土壤粘粒有较多原为钾所占据的层间位空出, 因而增加了对外源钾的固定能力。

为进一步了解钾素耗竭对土壤固钾能力的影响, 测定了 34 种连续 3 季种植水稻的盆栽耗竭试验土壤的固钾能力。盆栽耗竭后土壤缓效钾 (K_2O) 降低了 $35\sim 120.2\text{ mg kg}^{-1}$, 矿物钾 (K_2O) 的释放量为 $13.8\sim 375.0\text{ mg kg}^{-1}$ ^[8], 可是从表 5 结果可以看到, 34 种土中有 26 个土壤 NP 处理的固钾量比 NPK 处理低 $4.0\sim 41.4\text{ mg kg}^{-1}$, 有 23 个土壤 NP 处理的固钾量甚至比试前土还低, 这与大田长期定位试验结果正相反。

表4 长期施钾与不施钾, 土壤固钾能力的差异($K, mg\ kg^{-1}$)

Table 4 Difference in soil K fixation capacity between K treatments and zero K treatment in the long-term experiment

土样编号 Soil No.	固钾量 Fixed K			土样编号 Soil No.	固钾量 Fixed K		
	NP	NPK	NP-NPK		NP	NPK	NP-NPK
6	160	124	36	4	24	20	4
12	132	96	36	7	84	80	4
10	118.7	84	34.7	13	150.7	148	2.7
5	172	150.7	21.3	2	36	36	0
9	104	84	20	3	24	24	0
8	118.7	100	18.7	15	72	72	0
11	192	184	8	1	85.4	86.7	-1.3
17	100	92	8	14	44	52	-8
18	90	85	5	16	45.4	80	-34.6

表5 钾素耗竭对土壤固钾能力的影响($K, mg\ kg^{-1}$)

Table 5 Effect of soil K depletion on soil K fixation capacity

土样 编号 Soil No.	地点 Locality	土壤 Soil	固钾量 Fixed K			增加 Incre.	
			试前土	NP	NPK	NP-试前土	NP-NPK
			Before experiment			NP-before experiment	
5	广东中山 Zhongshan, Guangdong	水稻土 Paddy soil	82.7	45.3	88.0	-37.4	-42.3
22	江苏南京 Nanjing, Jiangsu	黄棕壤 Yellow-brown earth	176.0	88.0	129.4	-88.0	-41.4
4	广东广州 Guangzhou, Guangdong	水稻土 Paddy soil	24.0	20.0	53.5	-4.0	-33.5
21	江苏无锡 Wuxi, Jiangsu	水稻土 ¹⁾ Paddy soil	129.4	60.0	92.0	-69.4	-32.0
2	广东化州 Huazhou, Guangdong	赤红壤 Lateritic red earth	8.0	8.0	38.6	0.0	-30.6
9	重庆 Chongqing	紫色土 Purplish soil	104.0	40.0	68.0	-64.0	-28.0
34	陕西汉中 Hanzhong, Shaanxi	黄棕壤 Yellow-brown earth	129.4	53.3	80.0	-76.0	-26.7
10	湖南衡阳 Hengyang, Hunan	紫色土 Purplish soil	109.3	112.0	137.4	2.7	-25.4
27	山东青岛 Qingdao, Shandong	棕壤 Brown earth	88.0	36.0	60.0	-52.0	-24.0
3	广东恩平 Enping, Guangdong	水稻土 Paddy soil	24.0	12.0	32.0	-12.0	-20.0
20	江苏无锡 Wuxi, Jiangsu	水稻土 ²⁾ Paddy soil	113.4	56.0	76.0	-57.4	-20.0
32	黑龙江爱晖 Aihui, Heilongjiang	黑钙土 Chernozem	80.0	50.7	69.4	-29.3	-18.7
13	江西宜春 Yichun, Jiangxi	水稻土 Paddy soil	52.0	24.0	40.0	-28.0	-16.0
1	广东徐闻 Xuwen, Guangdong	砖红壤 Latosol	8.0	16.0	30.7	8.0	-14.7
18	浙江绍兴 Shaoxin, Zhejiang	水稻土 Paddy soil	64.0	30.7	44.0	-33.3	-13.3
6	广西柳州 Liuzhou, Guangxi	水稻土 Paddy soil	32.0	20.0	32.0	-12.0	-12.0
12	福建光泽 Guangze, Fujian	水稻土 Paddy soil	28.0	22.6	30.6	-5.4	-8.0
19	上海 Shanghai	水稻土 Paddy soil	80.0	84.0	92.0	4.0	-8.0
29	内蒙呼和浩特 Huhehaote, Neimenggu	淡栗钙土 Light chestnut soil	94.7	72.0	80.0	-22.7	-8.0
11	湖南湘潭 Xiangtan, Hunan	水稻土 Paddy soil	56.0	36.0	42.7	-20.0	-6.7
14	江西丰城 Fengcheng, Jiangxi	水稻土 Paddy soil	29.4	16.0	21.4	-13.4	-5.4
17	浙江金华 Jinhua, Zhejiang	水稻土 Paddy soil	32.0	20.0	25.4	-12.0	-5.4

续表

土样 编号 Soil No	地点 Locality	土壤 Soil	固钾量 Fixed K			增加 Incre	
			试前土	NP	NPK	NP-试前土	NP-NPK
			Before experiment			NP-before experiment	
23	安徽霍丘 Huoqiu, Anhui	水稻土 Paddy soil	101.3	88.0	92.0	- 13.3	- 4.0
30	辽宁沈阳 Shenyang, Liaoning	棕壤 Brown earth	129.3	96.0	100.0	- 33.3	- 4.0
31	吉林安图 Antu, Jilin	泥炭土 Peat soil	36.0	24.0	28.0	- 12.0	- 4.0
7	贵州福泉 Fuquan, Guizhou	灰泡土 Huipao soil	56.0	48.0	48.0	- 8.0	0.0
15	江西进贤 Jimxian, Jiangxi	水稻土 Paddy soil	16.0	16.0	16.0	0.0	0.0
16	江西余江 Yujiang, Jiangxi	水稻土 Paddy soil	21.3	18.7	16.0	- 2.6	2.7
28	山西太谷 Taigu, Shanxi	褐土 Cinnamon soil	88.0	88.0	85.3	0.0	2.7
8	云南曲靖 Qujing, Yunnan	水稻土 Paddy soil	88.0	92.0	82.6	4.0	9.4
25	河南新乡 Xinxiang, Henan	粘质潮土 Clayey fluvo-aquic soil	80.0	100.0	88.0	20.0	12.0
26	河南开封 Kaifeng, Henan	粘质砂土 Clayey sand	116.0	120.0	100.0	4.0	20.0
33	陕西武功 Wugong, Shaanxi	土 Lou soil	84.0	108.0	88.0	24.0	20.0
35	新疆阜康 Fukang, Xinjiang	灰漠土 Gray desert soil	90.0	105.0	85.0	15.0	20.0

1) 高肥力 High fertility; 2) 低肥力 Low fertility

土壤对钾的固定受一系列因素的影响, 如粘土矿物类型、土壤干湿程度、pH、有机质和钾肥的种类及其用量等。此外, 对于同一土壤铵离子应是主要的影响因子。NH₄⁺ 与 K⁺ 性质相近, 被土壤固定的机理相同, 据报道在钾素耗竭后施入等量的铵和钾时, 土壤对铵的固定作用强于对钾的固定作用; 当施入的铵量高于钾量时, 固定 NH₄⁺ 远远大于固定 K⁺

的数量^[9]; 在铵钾施用次序上, 先施铵后施钾时施入钾的固定量最少^[10], 这表明 NH₄⁺ 进入晶格孔穴, 成为固定态铵离子, 影响了土壤对外源钾的固定。测定了 34 个土壤中的部分土壤的固定态铵含量, 结果表明除供钾能力高, 水稻生长较好的 19、25 的 35 号土外, NP 处理的固定态铵含量都高于 NPK 处理的, 甚至高于试前土(表 6)。这是由于盆栽耗竭试验施

表 6 盆栽耗竭试验不同处理土壤的固定态铵含量(N, mg kg⁻¹)Table 6 Contents of fixed NH₄⁺ in soils under different treatments in the nutrient depletion experiment (pot culture)

土样编号 Soil No.	固定态铵含量 Fixed NH ₄ ⁺			增加 Incre	
	试前土 Before experiment	NP	NPK	NP-试前土 NP-before experiment	NP-NPK
2	11.6	25.0	16.5	13.4	8.4
5	363.4	457.6	361	94.2	96.6
9	144.4	351.8	134	207.4	217.8
10	413.4	436.1	411.7	22.7	24.4
12	35.1	119.7	68.5	84.6	51.2
17	109.4	126.9	94.5	17.5	32.4
19	311.4	284.3	291.3	- 27.1	- 7.0
22	252.3	483.0	218.5	230.7	264.5
25	205.7	195.6	202.1	- 10.1	- 6.5
32	143.7	235.0	152.5	91.3	82.5
35	561.9	542.4	562.2	- 19.5	- 19.8

N 量高, 但 NP 处理水稻大多生长差, 供钾能力低的土壤甚至连续种植 1~2 季后植株就死亡^[8], 因此有大量铵态氮积聚在土壤中, 这些铵离子抢先占据了原为钾所占据的层间位, 因而 NP 处理土壤的固钾量低于 NPK 处理的。长期定位试验 16 号土 NP 处理固钾量明显比 NPK 低(低 34.6 mg kg^{-1}) 也与该试验施氮量高(表 1), 氮在土壤中积累有关, 这可从该土壤 NP 处理的固定态铵含量比 NPK 处理高 $127.3 \text{ N mg kg}^{-1}$ 来证明。

综上所述可知, 在农业生产中长期透支土壤钾库, 土壤钾素含量下降, 土壤含钾矿物水云母、水化黑云母因脱钾向蛭石转化, 土壤固定钾的能力增强。而长期重施氮肥, 一旦氮素在土壤中大量积累, 也会降低土壤对肥料钾的固定, 肥料易于流失。因此, 为了农业持续高产稳产, 必须施用足量的钾肥, 实施平衡施肥, 以提高和保持土壤钾素肥力。

致谢 杜承林、何才富、赖庆旺、刘克樱、钦绳武、王周琼、杨铁成、姚炳贵、姚源喜、张连佳、张明普、张淑茗、周广业和朱洪勋等同志为本研究提供长期定位试验土样, 特此致谢!

参考文献

- [1] 张淑茗, 于淑芳, 刘光栋, 等. 连续施肥对土壤磷钾组分变化的影响. 见: 周健民主编. 农田养分平衡与管理. 南京: 河海大学出版社, 2000. 347~354. Zhang S M, Yu S F, Liu G D, *et al.* Effect of continuous fertilization on change of P and K compose (In Chinese). In: Zhou J M. ed. Nutrient Cycling and Management in Agro-ecosystems. Nanjing: Publishing House of Hohai University, 2000. 347~354
- [2] 周广业, 丁宁平, 王宏凯, 等. 平凉地区农田施肥现状及对土壤养分平衡的影响. 见: 周健民主编. 农田养分平衡与管理. 南京: 河海大学出版社, 2000. 134~139. Zhou G Y, Ding N P, Wang H K, *et al.* The status quo of fertilization and effect on soil nutrient balance in farmland in pingliang region (In Chinese). In: Zhou J M. ed. Nutrient Cycling and Management in Agro-ecosystems. Nanjing: Publishing House of Hohai University, 2000. 134~139
- [3] 姜丽娜, 詹长庚, 符建荣, 等. 施肥对红壤稻田氮磷钾硫平衡的影响. 见: 周健民主编. 农田养分平衡与管理. 南京: 河海大学出版社, 2000. 289~295. Jiang L N, Zhan C G, Fu J R, *et al.* Effect of fertilization on balance of N, P, K and S in red soil paddy field (In Chinese). In: Zhou J M. ed. Nutrient Cycling and Management in Agro-ecosystems. Nanjing: Publishing House of Hohai University, 2000. 289~295
- [4] 赖庆旺, 李茶苟, 赖涛, 等. 红壤性稻田养分平衡的定位研究. 见: 周健民主编. 农田养分平衡与管理. 南京: 河海大学出版社, 2000. 284~288. Lai Q W, Li C G, Lai T, *et al.* Stationary researches of nutrient balance of paddy field of red earth (In Chinese). In: Zhou J M. ed. Nutrient Cycling and Management in Agro-ecosystems. Nanjing: Publishing House of Hohai University, 2000. 284~288
- [5] Van Schouwenburg J C, Schuffelen A C. Potassium-exchange behavior of an illite. *N. e. J. Agric. Sci.*, 1963, 11: 13~22
- [6] 邢世和, Dufey J, 王果, 等. 利用 Q/I 测定评价一些耕作土壤的钾素状况. 福建农学院学报, 1991, 20(1): 90~95. Xing S H, Dufey J, Wang G, *et al.* Evaluation of soil potassium by Q/I measurement in some cultivated soils (In Chinese). Journal of Fujian Agricultural College, 1991, 20(1): 90~95
- [7] 胡全才, 卢朝东, Syers J K. 我国不同土壤 Q/I 特性及其供钾能力研究. 山西农业科学, 2000, 28(1): 35~39. Hu Q C, Lu C D, Syers J K. Study Q/I Characteristics and K-supplying power in different chinese soils (In Chinese). Journal of Shanxi Agricultural Sciences, 2000, 28(1): 35~39
- [8] 谢建昌, 杜承林. 土壤钾素的有效性及其评定方法的研究. 土壤学报, 1988, 25(3): 269~280. Xie J C, Du C L. Studies on availability of potassium in soils and its evaluating methods (In Chinese). Acta Pedologica Sinica, 1988, 25(3): 269~280
- [9] 鲍士旦, 于军. 钾耗竭后土壤对铵钾离子的固定竞争. 土壤, 1994, 26(6): 301~304, 309. Bao S D, Yu J. NH_4^+ and K^+ Ions competition for fixation by K-exhausted soils (In Chinese). Soils, 1994, 26(6): 301~304, 309
- [10] 范钦桢. 铵对土壤钾素释放、固定影响的研究. 土壤学报, 1993, 30(3): 245~251. Fan Q Z. Influence of ammonium on release and fixation of potassium in soil (In Chinese). Acta Pedologica Sinica, 1993, 30(3): 245~251

VARIATION OF POTASSIUM FERTILITY IN SOIL IN THE LONG-TERM STATIONARY EXPERIMENT

Fan Qinzhen Xie Jianchang

(*Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China*)

Abstract To study variations of soil potassium-bearing minerals, Q/I relation and soil capacity of fixing extraneous K, data from 18 long-term stationary field experiments with K treatments and zero K treatment were cited. The results show that (1) readily available K and slowly available K were higher in Treatment NPK than Treatment NP, with the latter being on average $7.67 \text{ mg kg}^{-1} \text{ a}^{-1}$ higher in hydromica- or smectite-dominated soils. (2) Due to long-term zero K application, crops depleted soil K, thus making hydromica weather and turn into vermiculite. Application of adequate K could defer or stop the process. (3) As a result of long-term zero K application, soil $-\Delta K^{\circ}$ and AR_k^k were declining while PBC^k ascending, which means that the pool of readily releasable K in soil was getting smaller, K adsorption capacity of the soil higher, and soil K supply capacity lower. A higher rate of K should be applied if K concentration in the soil solution was to be increased. (4) As a result of long-term zero K application, soil K was depleted, which led to strengthened soil K fixation capacity for extraneous K. However, once NH_4^+-N was accumulated in soil to a certain level, soil K fixation capacity for extraneous K would be reduced.

Key words Soil K; Clay mineral; Q/I relation; K fixation capacity