

长期定位施肥对非石灰性潮土 K^+ 解吸动力学的影响

崔德杰^{1,2}, 刘永辉², 隋方功², 张玉龙^{1*}

(1 沈阳农业大学土地与环境学院, 辽宁沈阳 110061; 2 莱阳农学院农学系, 山东莱阳 265200)

摘要: 采用连续液流法研究了长期定位施肥潮土 K^+ 解吸的动力学特性。结果表明, 1) 不同处理的土壤 K^+ 解吸的平衡时间和平衡解吸量有很大差异, 平衡解吸量的变化与 CEC 和粘土中高岭石的含量密切相关; 2) 长期施肥使 K^+ 解吸速率产生了差异, 解吸速率也与 CEC、粘粒含量和高岭石的变化密切相关; 3) 不同处理在不同的反应阶段其解吸率差异很大, 粘粒含量高的处理在反应初期解吸较快; 4) 平衡前不同阶段的解吸速率和解吸率与反应时间 $\ln t$ 有极显著的线性相关, 且与土壤粘粒含量密切相关; 5) 一级动力学方程是描述潮土中 K^+ 解吸过程的最优模型, 该过程是扩散控制过程。

关键词: 长期施肥; 钾解吸; 潮土; 化学动力学

中图分类号: S147.2

文献标识码: A

文章编号: 1008-505X(2006)02-0213-06

Effect of long-term fertilization on K^+ desorption kinetics of noncalcareous fluvo-aquic soil

CUI De-jie^{1,2}, LIU Yong-hui², SUI Fang-gong², ZHANG Yu-long^{1*}

(1 College of Land and Environmental Sciences, Shenyang Agricultural University, Shenyang 110061, China;

2 Department of Agronomy, Laiyang Agricultural College, Laiyang, Shandong 265200, China)

Abstract: The characteristics of K^+ desorption kinetics on noncalcareous fluvo-aquic soil under long-term fertilization condition were studied using the liquid flow technique. The results indicated that: 1) There were great differentia on K^+ equilibrium desorption time and quantity among the different treatment, respectively. K^+ equilibrium desorption quantity was closely related with CEC and kaolinite content; 2) Long-term fertilization caused a discrepancy on desorbing velocity, which were also related with clay content, CEC and kaolinite content; 3) There exist differentia in different reaction phases on K^+ desorbing percentage, e.g. whose desorbing percentage rose fast at initial phase, but with high clay content; among different treatments; 4) There was a linear relationship between desorption velocity and the reaction time ($\ln t$), and desorption velocity was closely related with soil clay content; 5) First-order kinetic equation was the best model for K^+ desorption and the K^+ desorption was controlled by the diffusion process.

Key words: long-term fertilization; K^+ desorption; fluvo-aquic soil; kinetics

K^+ 在固液相间的转化速率与数量取决于 K^+ 与土壤固相表面的作用方式, 并决定着肥料 K^+ 进入土壤中的去向和土壤的供钾能力。研究 K^+ 在固液相间转化的动力学性质对了解阳离子型养分在土壤固相表面的作用机理及评价土壤保持、供应钾素能力有重要的理论与实践意义。不同种类的土壤其解吸性质差异很大。有研究指出, 钾的解吸与 CEC 和粘粒含量密切相关, 该过程是扩散控制步骤, 以快、中、慢不同速率进行; K^+ 解吸反应可以用动力学方程进行模拟^[1-3]。还有研究认为, 土壤对钾的固定

与释放与土壤的粘土矿物组成有关^[4]。长期施肥对南方紫色土中钾离子吸附、解吸特性的影响已有研究^[3], 然而不同施肥方式(特别是多年连续不同施肥)对土壤钾离子吸附、解吸特性是否有影响尚少有报道, 为此, 本试验开展了这一方面的探讨。

1 材料与方法

1.1 材料

试验设在山东莱阳农学院试验站, 土壤系非石灰性潮土, 发育于冲积母质, 表土质地均一, 为砾质

砂壤土。长期定位试验始于1978年,共设12个处理(表1),各处理小区面积为33.3 m²,重复3次,随机排列。试验地基础理化性状见表2。无机氮肥用尿素,有机肥用猪圈粪(有机质含量为20~50 g/kg、全氮为2~3 g/kg,全P为0.5~2 g/kg,全K 5~10

g/kg)。磷肥用过磷酸钙,钾肥用氯化钾,一年两作即小麦与玉米轮作,氮肥作冬小麦种肥和起身拔节期的追肥及夏玉米拔节肥和穗期追肥,磷钾肥全部作基肥。

表1 试验设计

Table 1 Design of the experiment

项目 Item	施肥处理 Fertilization treatments (kg/hm ²)												
	CK	N ₁	N ₂	M ₁	M ₁ N ₁	M ₁ N ₂	M ₂	M ₂ N ₁	M ₂ N ₂	N ₂ PK	N ₂ P	N ₂ K	
有机肥 Manure	0	0	0	3 × 10 ⁴	3 × 10 ⁴	3 × 10 ⁴	6 × 10 ⁴	6 × 10 ⁴	6 × 10 ⁴	0	0	0	
无机肥 Fertilizers	N	0	138	276	0	138	276	0	138	276	276	276	276
	P ₂ O ₅	0	0	0	0	0	0	0	0	0	90	90	0
	K ₂ O	0	0	0	0	0	0	0	0	0	135	0	135

表2 供试土壤理化性质

Table 2 Basic physico-chemical properties of soil for tested

处理 Treat.	粘粒含量 Clay (%)	交换性钾 EK (mg/kg)	有机质 OM (g/kg)	阳离子交换量 CEC (cmol/kg)	粘土矿物相对含量(%) Clay mineral relative content			
					Mt	Vt	Hm	Kt
CK	5.91	39.85	8.18	10.69	22.36	22.01	37.39	18.24
N ₁	5.48	40.31	10.81	10.05	20.72	29.05	34.03	16.20
N ₂	6.5	45.21	10.71	10.34	18.09	25.60	38.09	18.23
M ₁	5.48	46.14	20.39	13.57	22.88	19.38	42.80	14.94
M ₁ N ₁	5.85	48.25	20.49	14.81	17.62	19.15	46.01	17.22
M ₁ N ₂	5.81	41.38	17.27	13.82	20.27	19.67	43.17	16.89
M ₂	7.98	72.79	23.88	17.77	19.97	18.85	45.93	15.25
M ₂ N ₁	7.34	54.34	25.74	15.79	18.45	19.21	46.95	15.39
M ₂ N ₂	7.67	64.51	28.03	17.11	16.71	6.66	67.61	9.02
N ₂ PK	5.92	39.80	9.38	9.96	17.92	18.38	45.17	18.52
N ₂ P	6.16	37.65	9.36	10.45	20.78	29.80	29.61	19.81
N ₂ K	6.01	50.15	8.91	8.89	22.95	19.37	43.43	14.25

注(Note): EK—交换性钾 Exchangeable K; Mt—蒙脱石 Montmorillonite; Vt—蛭石 Vermiculite; Hm—水云母 Hydromica; Kt—高岭石 kaolinite; 下同 Same as follows.

1.2 方法

钾饱和土样的制备:用1 mol/L KCl反复处理(搅拌、离心、弃去上清液)通过1 mm筛的风干土,至上清液无Ca²⁺(铬黑T法检验)时,用去离子水淋洗至无Cl⁻(AgNO₃检验),风干磨碎过1 mm筛后即成钾饱和土样。

K⁺解吸试验用连续液流法测定,溶液中钾用火焰光度计测定。

K⁺解吸测定:称2.000 g钾饱和土样与4.000 g无K⁺的石英砂,混匀后装入有机玻璃交换柱。用0.03 mol/L的CaCl₂在恒流泵的推动下以1 mL/min的恒定流速自下而上通过交换柱,液相Ca²⁺与固定吸附态K⁺在25 ± 0.5℃下进行交换。待第一滴滤

出液流出时开始计时,先以每2 min收集一个滤样的速度在20 min内连续收集10个滤样,然后再以每4 min收集一个滤样的速度收集20个滤样。

各段时间的解析量用下式计算:

$$\Delta q (\text{cmol/kg}) = \frac{\Delta C \times V \times \Delta t}{W}$$

式中 ΔC 、 Δt 、 V 及 W 分别为交换前后溶液K⁺浓度差(mg/kg)、滤液收集时间(min)、恒流泵流速(mL/min)及土样重(g)。按时间顺序将各段时间的解吸量(Δq)逐一累加即得到供试土样在2、4、6、8...24、28、32...96及100 min时间的解吸量。

土壤粘粒含量采用比重计法测定;阳离子交换量采用EDTA—醋酸铵快速法测定;交换性钾用醋

酸铵浸提,有机质采用重铬酸钾外加热法进行测定^[5];粘土矿物组成由 x 射线衍射测定^[6]。

2 结果与分析

2.1 长期施肥对 K⁺解吸的平衡时间、平衡解析量的影响

由图 1 可知,钾饱和土样的解吸过程随着时间的延长假解吸量逐渐地增加,钾素逐渐地被释放。在反应前期解吸量增加得很快,到了一定时间以后解吸量缓慢增加,当解吸量增加幅度很小或不再增加时就到了所谓的平衡。在本试验期间,当解吸速度降至 0.01 cmol/(kg·min)时,各个处理的解吸量增加的已经非常小或不再增加,因此把这个时间作为解吸平衡的确定标准。平衡解吸时间的长短反应了土壤持续供钾能力的强弱,平衡解吸量的大小反应了土壤供钾能力的高低。

钾饱和土壤解吸至平衡需要较长时间(60 min 左右)。26 年不同施肥对土壤解吸 K⁺的平衡时间的变幅为 48~80 min; M₁N₁ 处理平衡时间最长为 80 min,其次为 M₁N₂ 处理需 76 min 达到平衡,最低的为 M₂N₂ 和 N₂P 处理,仅需要 48 min。其他处理和 CK 相比差异不大,其大小依次为: N₁、N₂ 和 N₂K 需要 64 min; M₁ 和 M₂ 与 CK 相同,都为 60 min 达到平衡; M₂N₁ 和 N₂PK 需 56 min 达平衡。

从图 1 还可以看出,各个处理的平衡解吸量(平

衡前各段时间的 Δq 逐一累加,得到的累积解吸量)差异也很大,最大的是处理 M₂N₂ 为 11.68 cmol/kg,最小的为处理 N₂K,仅为 5.26 cmol/kg。除了处理 N₂K 外,其余各个处理都比对照高,但增加的幅度却有很大的差异,最高的处理 M₂N₂ 与 CK 相比提高了 1 倍,增加 0.5 倍以上的还有处理 M₁ 和 M₂。说明长期施肥的土壤固相表面负电点的数量多,在制备钾饱和土样时,吸附有较多的 K⁺,因此被固定的钾素能更多地从土壤中解吸出来,以便为作物提供较多的钾素营养。

无肥处理(CK)在长时间的解吸后仍然能释放出钾素来,可能是因为经过 26 年耗竭吸收,土壤中的水云母风化后形成蛭石,使粘土矿物组成中蛭石含量偏高(表 2),在制备钾饱和土样时,土壤中的蛭石能吸附较多的 K⁺,因此在经过长时间的解吸后,仍有部分被蛭石吸附的 K⁺ 被持续释放出来。

有研究指出,土壤阳离子交换量 CEC 和粘粒含量是影响平衡解吸量的重要因素^[3]。在该项研究中,粘粒含量和 CEC 与平衡解吸量的相关系数分别为 $r = 0.437$ 及 $r = 0.678^*$,而与平衡时间的相关性未达到显著水平,说明还有其他因素影响钾的解吸过程。在该研究中还发现,平衡解吸量高的处理高岭石的相对含量偏低,进行相关分析后可知二者呈显著负相关($r = -0.607^*$),说明粘土中的高岭石不利于潮土中钾素的释放,这可能与高岭石的同晶置换能力低,阳离子交换量低有关。也进一步说明长期施肥的潮土其粘土矿物各组分的相对含量发生了变化,尤其是高岭石含量的变化,引起不同施肥处理中钾素解吸动力学参数平衡解吸量的变化。

2.2 长期施肥对钾解吸速率的影响

解吸速率指单位时间内单位质量土壤解吸的钾量。

$$\bar{v} = \frac{\Delta q}{\Delta t}$$

式中 Δq 为某段时间内 K⁺解吸量(cmol/kg), \bar{v} 为相应时段的平均解吸速率[cmol/(kg·min)], Δt 为反应时间(min)。

试验表明,解吸过程先快后慢,随解吸平衡状态趋近,反应速率不断下降。反应速率与反应时间的关系符合方程 $\bar{v} = A + B \ln t$, 式中 t 为时间, A、B 为常数,其中 B 反映了反应速率随时间降低的快慢趋势, A 反映了反应初期的解吸速率(如 $t = 1$ min), \ln 为自然对数。

由表 3 可知,反应速度与时间的自然对数 $\ln t$ 间

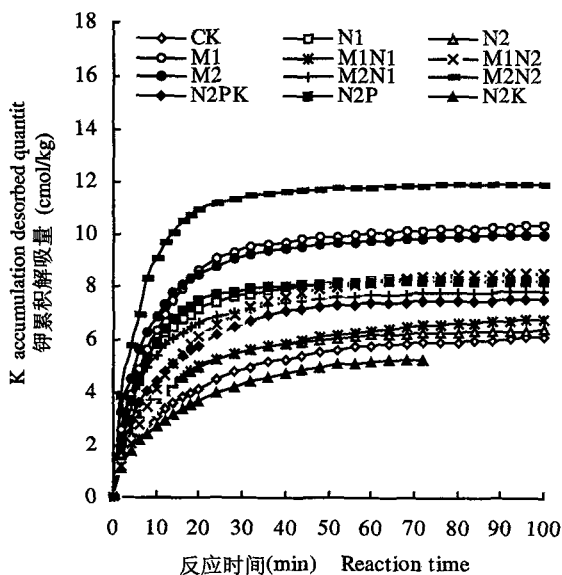


图 1 K⁺解吸动力学曲线

Fig.1 Kinetic curves of K⁺ desorbing

存在良好的线形关系,在解吸反应中,其相关系数为 $-0.839 \sim -0.953$ 。 $r < 0$ 表示解吸速率与 $\ln t$ 呈负相关。不同施肥处理,其回归参数直线截距(常数 A)和斜率(常数 B)变化很大。B 值介于 -0.122 和 -0.508 之间, $B < 0$ 表示随着解吸时间的延长,解吸速率在降低。B 值产生了差异说明不同施肥的土壤钾解吸的速率随时间降低的趋势不同,解吸速率降低最快的是处理 M_2N_2 (B 值为 0.508),降低最慢的是处理 N_2K (B 值为 0.122)。从中不难看出,除了处理 N_2K 之外,其余的各个处理和 CK 相比其 B 值都明显地偏大。说明通过施肥使钾解吸速率的降低过程加快,尤其是施高量有机肥的 3 个处理 (M_2 、 M_2N_1 、 M_2N_2) 其 B 值分别是 CK 的 2.45、1.95、3.59 倍。同时不同施肥处理其直线截距(常数 A)也产生了差异。除了处理 N_2K 略低于 CK 之外,其余的各个处理和 CK 相比其 A 值都明显地偏大,说明长期施用有机肥提高了土壤的供钾强度,能快速为作物提供钾素营养,提高钾素的利用率(表 3)。

表 3 解吸反应速率与反应时间 ($\ln t$) 的回归方程
Table 3 Regression equations of velocity versus time ($\ln t$) for desorption reaction

处理 Treatment	A	B	$r^{1)}$
CK	0.543	-0.142	-0.918**
N_1	0.970	-0.261	-0.927**
N_2	0.661	-0.175	-0.901**
M_1	1.142	-0.308	-0.932**
M_1N_1	0.643	-0.164	-0.839**
M_1N_2	0.664	-0.162	-0.984**
M_2	1.253	-0.347	-0.867**
M_2N_1	0.985	-0.276	-0.904**
M_2N_2	1.735	-0.508	-0.914**
N_2PK	0.837	-0.230	-0.855**
N_2P	1.109	-0.318	-0.953**
N_2K	0.474	-0.122	-0.912**
r 粘粒 Clay	0.593*	0.610*	—
CEC	0.618*	0.596*	—
Kt	-0.621*	-0.619*	—

1) $n = 12$, $r_{0.05} = 0.576$; $r_{0.01} = 0.708$, 下同 Same as follow.

通过施肥的潮土为什么其解吸性质发生了这么大的改变,这可以通过回归方程的两个常量(A 和 B)与土壤主要性质间的相关性来找到差异的原因。直线截距(常数 A)与 CEC 及粘粒含量的相关性表明,反应初期(如 $t = 1 \text{ min}$) K^+ 解吸速率取决于土壤固相表面负电点的数量(CEC)及粘粒含量高低。B 值与粘粒含量和 CEC 的显著相关性表明,粘粒越

多,CEC 越大,B 值就越大,即反应速率降低的越快。同时,在分析了回归参数与粘土矿物组成之间的相关性可知,A 和 B 与高岭石含量之间呈现显著的负相关性。说明长期施肥对粘土矿物各组分的相对含量产生了影响,高岭石含量增加者,其解吸速率降低慢。由此可知,由于土壤的粘粒含量、CEC 和粘土矿物相对含量等土壤的主要理化性状发生了变化,不同施肥处理中土壤钾的解吸速率才会发生了变异。

2.3 长期施肥对 K^+ 解吸率的影响

某个时间段内 K^+ 解吸量占平衡解吸量的比率称为 K^+ 的解吸率。本试验在前 4 min 内 K^+ 的解吸量为平衡解吸量的 24.66%~49.49%,说明在反应初期各个处理的解吸率差异很大。处理 M_2N_2 在前 4 min 内,已经有一半的钾被解吸了出来,其余施高量有机肥的两个处理在前 4 min 之内的解吸率也在 47% 左右;而处理 M_1N_2 在前 4 min 内只有 25% 的钾素释放了出来,明显低于 CK。其余的各处理和 CK 相比,在前 4 min 之内的解吸率也都明显偏高,说明在反应初期,施肥的各个处理其解吸率加快。

解吸率达到 90% 以上所需要的时间差异也很大。处理 N_2P 和 M_2N_2 的解吸率上升得最快,在 20 min 时就分别达到了 93.41%、91.96%,其余各个处理的解吸率在 28 min 后才达到 90% 以上。各个施肥处理在反应前期钾解吸率增加很快,中期增幅减缓,后期解吸率增加的幅度最慢。

表 4 看出, K^+ 解吸率与反应时间 $\ln t$ 间存在良好的线形关系,其线性关系式为: $P = A + B \ln t$ 。 K^+ 解吸率直线随时间的上升趋势因不同施肥处理而异,其斜率 B 变化在 0.199~0.261 之间,粘粒含量与 B 负相关,说明粘粒含量高的处理其解吸率上升慢。A 与粘粒及 CEC 相关性表明,粘粒含量高的处理在反应初期解吸较快(表 4)。如 CK 和 M_2 处理在 4 min 时的解吸率分别为 32.65% 和 46.70%,而后者具有较高的粘粒含量。但直线斜率 B 与粘粒含量和 CEC 之间的相关性未达到显著水平,说明还有其它因素影响潮土中 K^+ 解吸率的上升。

2.4 K^+ 解吸动力学模型的适用性比较

经常用来描述土壤钾解吸动力学的方程主要有以下几种:

1) Elovich 方程 $q_t = a + b \ln t$

2) 双常数方程(指数方程)

$$q_t^i = at^b \text{ 或 } \ln q_t = \ln a + b \ln t$$

3) 抛物线扩散方程 $q_t = a + bt^{1/2}$ 或 $q_t = a + b \sqrt{t}$

4) 一级动力学方程 $\ln(1 - q_t/q_\infty) = -k_d t$

表 4 K⁺解吸率与反应时间(ln_t)的回归方程Table 4 The regression equation of K⁺ desorbing percentage and reaction time (ln_t)

处理 Treatment	A	B	r
CK	-0.012	0.249	0.997**
N ₁	0.185	0.211	0.976**
N ₂	0.095	0.227	0.995**
M ₁	0.112	0.232	0.985**
M ₁ N ₁	0.131	0.203	0.998**
M ₁ N ₂	-0.079	0.261	0.992**
M ₂	0.239	0.199	0.985**
M ₂ N ₁	0.206	0.210	0.987**
M ₂ N ₂	0.248	0.213	0.971**
N ₂ PK	0.097	0.231	0.996**
N ₂ P	0.163	0.236	0.976**
N ₂ K	-0.015	0.246	0.996**
r 粘粒 Clay	0.614*	-0.530	—
CEC	0.525	-0.555	—

式中 t 为时间, q_t 为 t 时间内累积解吸量, a 、 b 为动力学方程的参数(在不同方程中其含义不同), k_a 为一级反应动力学的表观速率常数, q_∞ 为表观平衡解吸量。

抛物线方程认为, K⁺解吸附反应的速度由钾离子在土壤矿物表面与土壤矿物内层之间的扩散(颗粒内扩散)或钾离子在土壤溶液与土粒表面之间的膜扩散所控制。Sparks 等证明, 当反应主要受控于前一扩散形式时, 抛物线方程可以非常成功地描述整个过程; 而当反应发生在 p 位上时, 反应主要受控于膜扩散形式时, 抛物线方程不能成功地描述整个过程。Elovich 方程最早是用来描述气体在固体表面的化学吸附过程, 被引入到土壤钾的吸附、解吸附动力学后, 在大部分情况下, 它所反映的将不再是单纯的吸附或解吸附过程, 而是反映包含了土体膨胀、吸附位活化、表面扩散等许多因素的复杂过程。指数方程同样是用来描述复杂过程的^[7]。

有研究指出, 在连续液流条件下, 潮土中钾的吸附过程适于用一级动力学方程来描述^[7-9]。而潮土中钾解吸的动力学模型很少有报道。本研究就潮土中钾素解吸动力学方程进行了模拟, 结果可知, 四种动力学方程对钾解吸过程的拟合性不同, 模型拟合性常用相关系数(r)和标准误(Se)来判定, r 越大,

Se 越小, 该模型越优。从表 5 可以看出, 一级动力学方程和抛物线扩散方程分别是描述潮土 K⁺解吸反应的最优和最差模型, Elovich 方程和指数方程介于二者之间。可见潮土对钾的解吸过程如同钾的吸附一样也是个简单的过程。从表 5 还可以看出, 同一动力学模型对不同施肥处理的拟合性不同。从 $\ln(1 - q_t/q_\infty) - K_a t$ 曲线可以看出, 不同处理其反应过程差异很大, 而且曲线不是呈现出一条很好的直线, 而是有一个向下弯曲的部分(图 2), 说明潮土对钾的解吸过程是个扩散过程。钾离子在土壤矿物表面与土壤矿物内层之间的扩散过程是速率控制步骤^[10]。

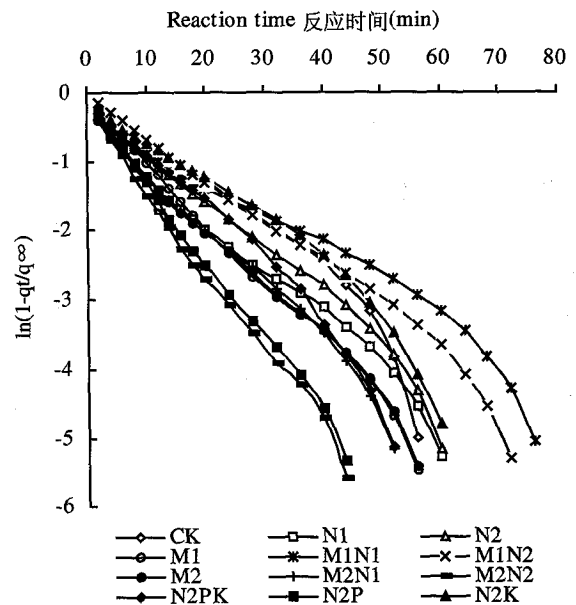


图 2 不同施肥处理钾饱和土样一级动力学方程拟合曲线
Fig.2 Curves of first-order kinetic equations on soil sample saturated by potassium of different treatments

3 结论

非石灰性潮土中钾素的解吸动力学模型可以用一级动力学方程很好地描述, 其次为 Elovich 方程; 而指数方程和抛物线扩散方程则不适合描述此过程, 该过程与钾素的吸附过程一样也是个简单的过程。不同施肥处理其平衡解吸量、平衡时间、解吸速率和解吸率差异很大。除了 N₂K 处理, 其余各处理和 CK 相比, 其平衡解吸量都明显地增加了。CEC 是

表5 四种模型的相关系数(r)、标准误(Se)及参数

Table 5 Correlation coefficient(r), standard errors(Se) and parameters of four kinetic models

处理 Treat.	Elovich 方程 Elovich equation $q = a + blnt$				指数方程 Exponent equation $lnq = a + blnt$				抛物线扩散方程 Parabolic diffusion equation $q = a + bt^{1/2}$				一级动力学方程 First-order equation $ln(1 - q_t/q_\infty) = -k_d t$		
	a	b	r	Se	a	b	r	Se	a	b	r	Se	ka	r	Se
CK	0.146	1.354	0.995**	0.025	0.243	0.368	0.973**	0.016	1.563	0.521	0.956**	0.030	0.0704	0.990**	0.0023
N ₁	2.129	1.504	0.963**	0.080	1.003	0.276	0.901**	0.025	3.915	0.544	0.870**	0.058	0.0839	0.994**	0.0021
N ₂	0.948	1.271	0.986**	0.040	0.571	0.307	0.955**	0.018	2.356	0.476	0.923**	0.038	0.0765	0.997**	0.0015
M ₁	1.995	1.961	0.969**	0.095	1.112	0.295	0.930**	0.022	4.275	0.717	0.885**	0.071	0.0918	0.998**	0.0013
M ₁ N ₁	0.970	1.316	0.997**	0.019	0.644	0.297	0.977**	0.012	2.356	0.504	0.955**	0.030	0.0577	0.994**	0.0014
M ₁ N ₂	-0.323	2.054	0.987**	0.063	0.328	0.436	0.949**	0.027	1.910	0.776	0.931**	0.057	0.0641	0.997**	0.0010
M ₂	3.056	1.632	0.969**	0.079	1.324	0.235	0.931**	0.017	4.970	0.594	0.881**	0.060	0.0923	0.996**	0.0020
M ₂ N ₁	2.250	1.328	0.968**	0.065	1.034	0.249	0.921**	0.020	3.814	0.483	0.878**	0.050	0.0939	0.996**	0.0020
M ₂ N ₂	4.522	1.794	0.928**	0.136	1.604	0.215	0.882**	0.022	6.776	0.629	0.813**	0.085	0.1260	0.997**	0.0023
N ₂ PK	1.247	1.478	0.984**	0.050	0.802	0.292	0.965**	0.015	2.871	0.555	0.924**	0.043	0.0869	0.996**	0.0019
N ₂ P	2.572	1.386	0.932**	0.101	1.086	0.254	0.876**	0.026	4.305	0.487	0.819**	0.065	0.1196	0.999**	0.0016
N ₂ K	0.06	1.23	0.990**	0.022	0.116	0.373	0.977**	0.0155	1.335	0.477	0.961**	0.026	0.0671	0.993**	0.0018
Average	—	—	0.972**	0.065	—	—	0.936**	0.020	—	—	0.900**	0.051	—	0.996**	0.0018

是影响平衡解吸量的主要因素,同时还发现平衡解吸量与粘土中的高岭石含量显著负相关。不同施肥处理其解吸速率差异很大,而且解吸速率的差异与CEC、粘粒含量、高岭石的变化密切相关。不同处理在不同的反应阶段其解吸率差异也很大,粘粒含量高的处理在反应初期解吸较快。由此可见,长期施肥影响了粘粒含量、CEC、高岭石含量等土壤的理化性质,从而使潮土中K⁺平衡解吸量、解吸速率和解吸率等动力学性质发生了变化。

参考文献:

- [1] 薛泉宏,尉庆丰,李宝安.黄土性土壤K⁺吸附、解吸动力学研究[J].土壤学报,1997,34(2): 113-122.
Xue Q H, Wei Q F, Li B A. Study of K⁺ adsorbing-desorbing kinetics of loessial soil[J]. Acta Pedologica Sinica, 1997, 34(2): 113-122.
- [2] 付明鑫,刘骅,张小玲.新疆几种耕地土壤钾吸附与解吸特性研究[J].西北农业学报,2002,10(3): 45-50.
Fu M X, Liu H, Zhang X L. The research on the adsorption and desorption kinetics characteristics of potash in some cropland soils of Xinjiang [J]. Acta Agriculturae Boreal-occidentalis Sinica, 2002, 10(3): 45-50.
- [3] 熊明彪,田应兵,宋光煜.紫色土K⁺吸附解吸动力学研究[J].土壤学报,2004,41(3): 354-361.
Xiong M B, Tian Y B, Song G Y. Study of K⁺ adsorption-desorption kinetics of purple soil [J]. Acta Pedologica Sinica, 2004, 41(3): 354-361.
- [4] 刘淑霞,赵明东,赵兰坡,等.吉林省主要耕作土壤中钾的固定与释放[J].水土保持学报,2002,16(4): 98-101.
Liu S X, Zhao M D, Zhao L P *et al.* K fixation and release of main cultivated soils in Jilin province [J]. J. of Soil and Water Conservation, 2002, 16(4): 98-101.
- [5] 中国科学院南京土壤研究所.土壤理化分析[M].上海:上海科学技术出版社,1978.
Inst of Soil Sci. CAS. Analyse of soil physical and chemical properties [M]. Shanghai: Shanghai Sci. and Tech. Press, 1978.
- [6] 李学垣.土壤化学及试验指导[M].北京:中国农业出版社,1997.
Li X Y. Soil chemistry and experiment guide [M]. Beijing: China Agricultural Press, 1997.
- [7] 龙怀玉,蒋以超,李韵珠.褐土和潮土K⁺吸附动力学研究[J].土壤学报,2000,37(4): 563-568.
Long H Y, Jiang Y C, Li Y Z. Study of K⁺ adsorption kinetics of chao and cinnamon soils [J]. Acta Pedologica Sinica, 2000, 37(4): 563-568.
- [8] 龙怀玉,李韵珠,蒋以超.K⁺浓度对潮土和褐土钾吸附动力学的影响[J].土壤学报,2001,38(5): 226-234.
Long H Y, Li Y Z, Jiang Y C. K⁺ adsorption kinetics of fluvo aquic and cinnamon soil under different K⁺ concentrations [J]. Acta Pedologica Sinica, 2001, 38(5): 226-234.
- [9] 熊明彪,雷孝章,田应兵,等.钾离子在土壤中吸附和解吸动力学研究进展[J].生态环境,2003,12(1): 115-118.
Xiong M B, Lei X Z, Tian Y B *et al.* Research progress of K⁺ adsorbing-desorbing kinetics in soils [J]. Ecology and Environment. 2003, 12(1): 115-118.
- [10] 李航,薛家骅.离子扩散与交换的一级动力学方程中平衡吸附量的讨论与确定[J].土壤学报,1997,34(4): 353-358.
Li H, Xue J H. Determination of the adsorbed quantity at equilibrium about the first-order kinetic equation of ion adsorption [J]. Acta Pedologica Sinica, 1997, 34(4): 353-358.