

# 土壤—作物系统钾素动力学模型 及其参数研究\*

章明清 彭嘉桂 杨杰 林琼 颜明娟

(福建省农业科学院土壤肥料研究所, 福州 350013)

**摘要** 基于生态学的 Lotka-Volterra 模型, 在土壤—作物系统中提出一个新的土壤钾素动力学方程。盆栽试验表明, 该模型能很好地拟合花生一个生长周期内土壤缓效钾和速效钾的动态变化。吸钾量实测结果表明, 花生不同生育期吸钾量符合 Logistic 模型。结合上述 2 个模型, 分别求出矿物钾最大释放速率常数  $K_{mm}$ 、缓效钾最大释放速率常数  $K_m$  和速效钾最大供钾速率常数  $K_{am}$ 。相关分析表明,  $K_{am}$  与花生当季吸钾量、生物学产量和荚果产量以及  $K_m$  与花生当季吸钾量有显著水平以上的对数正相关。 $K_m$  和  $K_{am}$  可作为评价土壤当季供钾能力的速率指标。

**关键词** 土壤, 钾素, 模型, 动力学, 速率常数

**中图分类号** S154.4

土壤钾素释放速率是评价土壤供钾能力的重要指标。国内外学者对土壤交换性钾的吸附和解吸动力学、非交换性钾和矿物钾的释放动力学等方面进行了深入研究<sup>[1-3]</sup>。近年来, 国内的金继运、程明芳、薛宏泉等人研究了土壤钾素动力学及其供钾特征<sup>[4-7]</sup>, 吕晓男等人研究了土壤钾素释放速率及其与作物反应的关系<sup>[8,9]</sup>, 国外的 Martin、Havlin、Rao、Boruah 等人也对土壤钾素动力学或与作物的反应做了研究<sup>[10-14]</sup>。目前, 这一领域的研究都是用粘土矿物或土壤在严格控制的实验室条件下, 应用化学试剂或电磁场连续提取含钾矿物或土壤中可释放的钾素, 从而获得供试样品的钾素动力学参数, 为评价土壤的供钾特性和供钾能力提供科学依据。但这种研究方法不能反映土壤钾素释放的真实情况, 动力学参数与作物生长发育的相关性也有待于进一步探讨。德国学者 Reichenbach 在总结这方面的研究情况时指出:“如何将实验室得到的结果用到复杂的土壤体系中去仍不明确”<sup>[15]</sup>。谢建昌最近指出, 由于土壤系统的复杂性, “采用什么方法来研究钾的动力学, 以确定钾的释放速率指标, 仍有待于未来的进一步研究”<sup>[16]</sup>。因此, 本研究在总结前人工作基础上, 应用盆栽试验方法, 在土壤—作物系统下研究土壤钾素动力学模型及其参数。

## 1 材料与方 法

1997 年采集 5 种代表性土壤自然风干, 农化性状见表 1。土壤 pH 用 1:2.5 土水质量比浸提测定, 有机质用重铬酸钾容量法—外加热法测定, 碱解氮用扩散法, 土壤全磷用  $HClO_4-H_2SO_4$  消煮分光光度法测定, 有效磷则用  $NaHCO_3$  浸提分光光度法测定。

用上述 5 种供试土壤进行盆栽试验, 每盆装风干土 2.5 kg, 每种土壤分装 30 盆, 每盆种植 4 株花生。在花生生长发育期间, 分 10 次取不同时期的土壤和植株样品, 每次取 3 盆, 直到花生完成一个生长周期。每次取样时, 分别测定植株鲜重、烘干重和含钾量以及土壤缓效钾和速效钾的含量。植株含钾量测定方法为  $H_2SO_4-H_2O_2$  消煮火焰光度计法, 土壤不同形态钾测定方法则分别用 NaOH 熔融火焰光度法测定土壤全钾, 用  $1\text{ mol L}^{-1}$  热  $HNO_3$  煮沸火焰光度法测定缓效钾和  $1\text{ mol L}^{-1}$   $NH_4OAc$  浸提火焰光度法测定速效钾。每盆用 N 素 0.2 g、 $P_2O_5$  0.12 g 和其他必要的中微量元素, 做基肥施用。不施钾肥, 用无离子水灌溉。

\* 福建省自然科学基金项目(D97012), 加拿大钾磷研究所提供资助

收稿日期: 2001-03-01; 收到修改稿日期: 2001-11-23

表 1 供试土壤基本农化性状

Table 1 Agrochemical properties of soils used for experiment

代号 No.	土壤 Soil	母岩 Parent material	pH	有机质 O.M. (%)	全 N Total N (%)	碱解 N Alkal+ hydrolyzable N (mg kg <sup>-1</sup> )	全 P Total P (%)	有效 P Rapidly available P (mg kg <sup>-1</sup> )
A	赤沙土	花岗岩	5.00	0.70	0.035	88.2	0.020	9.6
B	紫色土	紫色沙页岩	6.42	2.76	0.166	191.8	0.075	29.7
C	灰赤沙土	玄武岩	5.00	2.34	0.140	158.9	0.150	16.1
D	黄泥田	花岗岩	5.10	2.57	0.128	194.6	0.055	26.9
E	灰黄泥田	花岗岩	7.67	1.77	0.106	158.6	0.065	36.6

## 2 结果与讨论

### 2.1 在花生连续吸收钾素下, 土壤缓效钾和速效钾的动态变化特征

土壤中矿物钾、缓效钾和速效钾处于动态平衡中。但在土壤—作物系统中, 这种平衡状况受作物连续吸收土壤钾素的影响。图 1 是紫色土在当季花生连续吸收钾素下缓效钾和速效钾动态的实测结果。表明二种形态钾的变化历程并非按直线或指数曲线等简单形式下降或增加; 在花生不同生长时期, 土壤缓效钾和速效钾含量出现彼消此长, 时而上升时而下降的动态特征。土壤—作物系统是生态系统, 缓效钾和速效钾的这种动态行为与生态学中 Lotka-Volterra 模型<sup>[17]</sup>描述的种群竞争、捕食如海洋鱼类生存竞争等生态现象的动力学机制<sup>[17, 18]</sup>十分相似。

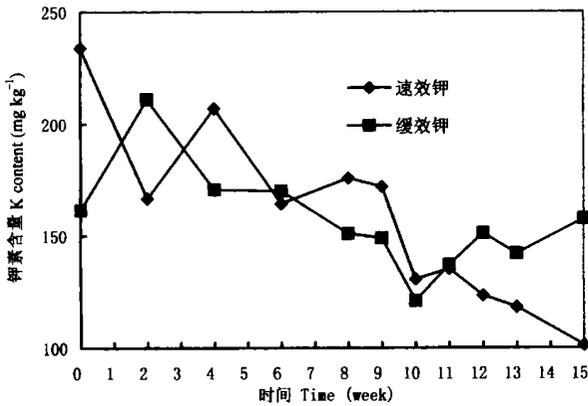


图 1 紫色土缓效钾和速效钾的动态变化

Fig. 1 The dynamics of rapidly available K and slowly available K in purple soil

### 2.2 土壤缓效钾和速效钾的非线性动力学模型

土壤三种形态钾在作物吸收速效钾的驱动力下, 平衡向速效钾方向移动。因此, 土壤中不同形态钾的简化动态平衡模型可用图 2 表达。许多研究均指出, 矿物钾占了土壤全钾的 90%~98%<sup>[19]</sup>。本文的 5 个供试土壤的基础土样分析结果(表 2)表明, 矿物钾平均占土壤全钾的 97.3%。矿物钾释放极为缓慢, 经过一季作物吸收, 虽然速效钾甚至缓效钾发生了明显变化(表 2), 但其变化是极小的, 可将矿物钾浓度(mg kg<sup>-1</sup>)假设为一个常数(A)。土壤速效钾可直接提供给植物(P)吸收, 虽然在作物生长过程中根系会分泌少量钾素返回土壤, 但与作物吸钾量相比可忽略不计。因此, 作物吸收进体内的钾就不再参与土壤缓效钾和速效钾的动力学行为。以上的分析表明, 在土壤—作物系统中, 在不施钾肥情况下, 土壤矿物钾含量(A)和作物吸钾量(P)可假设是恒定的, 土壤系统中只有缓效钾(含量设为 X)和速效钾(含量设为 Y)是可变量, 符合生态学的 Lotka & Volterra 模型<sup>[17]</sup>的应用条件。

为便于理解, 可将图 2 简化动态模型写成如下等价化学式:



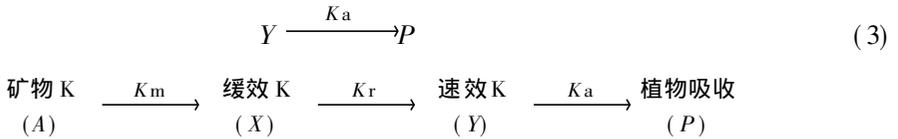


图 2 土壤钾素简化动态模型

Fig. 2 A simplified dynamic model of potassium in soil

(1) 式表示土壤矿物钾释放形成缓效钾, 释放速率常数设为  $K_m$ ; (2) 式表示土壤缓效钾释放形成速效钾, 释放速率常数设为  $K_r$ ; (3) 式表示土壤速效钾直接供给作物吸收, 供钾速率常数设为  $K_a$ 。由上述 3 个化学式可以写出任一时刻土壤缓效钾和速效钾变化速率的动力学微分方程组:

$$\begin{aligned} \frac{dX}{dt} &= K_m A X - K_r X Y \\ \frac{dY}{dt} &= K_r X Y - K_a Y \end{aligned} \quad (4)$$

其中,  $dX/dt$  表示土壤缓效钾释放速率,  $dY/dt$  表示土壤速效钾供钾速率。经过积分和化简, 可得到有关  $X$  和  $Y$  的动力学模型:

$$K_r Y + K_r X - K_m A \ln Y - K_a \ln X = C \quad (5)$$

(5) 式可通过数学方法经严格推导而得到,  $A$ 、 $K_m$ 、 $K_r$ 、 $K_a$  的物理意义如前所述;  $C$  是由土壤—作物系统特性决定的积分常数。

### 2.3 供试土壤缓效钾和速效钾动力学模型的盆栽试验验证

为了评价(5)式土壤钾素动力学模型的可靠性, 开展了在花生一个生长周期中, 土壤钾素转化规律的盆栽试验。一个生长周期取样 10 次, 分别测定土壤缓效钾和速效钾含量, 结果见表 2。令  $K_m A / K_r = a_1$ ;  $K_a / K_r = a_2$ ;  $C / K_r = a_0$ , 则(2)式进一步转化为:

$$Y + X = a_0 + a_1 \ln Y + a_2 \ln X \quad (6)$$

表 2 在花生连续吸收钾素下土壤缓效钾和速效钾的动态变化

Table 2 Dynamics of readily available K and slowly available K in soil when K was absorbed by peanut continuously

土壤 Soil	矿物钾 Mineral K (%)	项目 Items	取样时间 Sampling time (week)												
			0	2	4	6	8	9	10	11	12	13	14	15	
A	0.18	缓效钾 (X)	42.5	51.2	50.2	60.4	35.8	38.6	42.4	47.1	73.7	54.9	—	59.2	
		速效钾 (Y)	32.0	20.2	20.2	14.1	22.1	21.2	21.1	20.2	18.0	18.0	—	15.2	
B	1.37	缓效钾 (X)	161.5	211.0	170.7	150.9	149.0	121.0	136.9	151.1	142.0	142.0	—	157.6	
		速效钾 (Y)	234.0	166.8	207.1	164.4	175.9	172.1	130.6	135.2	123.3	118.3	—	101.3	
C	0.67	缓效钾 (X)	127.4	113.9	134.6	120.0	97.8	92.9	95.0	100.7	120.8	133.3	—	114.3	
		速效钾 (Y)	149.4	106.8	82.2	68.0	55.0	52.4	48.5	42.8	45.8	39.9	—	42.5	
D	3.18	缓效钾 (X)	122.1	—	113.2	112.1	112.6	114.7	104.4	117.8	110.7	113.9	116.0	119.2	
		速效钾 (Y)	49.7	—	38.1	30.1	26.2	22.5	22.5	16.8	17.9	17.9	17.9	17.9	
E	3.10	缓效钾 (X)	350.8	—	273.1	311.3	269.9	313.9	275.0	311.2	282.8	280.9	294.2	300.1	
		速效钾 (Y)	384.4	—	332.0	293.8	231.1	204.8	197.3	133.3	123.5	166.9	163.2	166.9	

根据表 2 的实测结果, 对(6)式方程进行多元回归分析, 结果见表 3。5 个供试土壤的回归方程的  $F$  值检验均达到极显著水平以上, 表明上述的土壤钾素动力学模型是符合在作物生长条件下土壤钾素真实动

态变化规律的。

表 3 土壤钾素动力学模型及其参数

Table 3 K kinetic model of soil potassium and their parameters

代号 No.	土壤 Soil	土壤钾素动力学模型 Soil K kinetic model	F
A	赤砂土	$Y = 23.376 \ln Y + 53.5521 \ln X - X - 207.958$	185.460**
B	紫色土	$Y = 157.059 \ln Y + 163.1359 \ln X - X - 1319.035$	572.822**
C	灰赤砂土	$Y = 77.635 \ln Y + 120.822 \ln X - X - 709.358$	190.479**
D	黄泥田	$Y = 28.392 \ln Y + 140.055 \ln X - X - 613.879$	405.307**
E	灰黄泥田	$Y = 223.746 \ln Y + 384.204 \ln X - X - 2861.900$	246.922**

#### 2.4 供试土壤的当季花生钾素动态吸收模型

盆栽试验的实测结果(表 4)表明,扣除花生种子带入的  $20.1 \text{ mg pot}^{-1}$  的钾,花生钾净吸收量的动态变化规律可用 Logistic 模型<sup>[20]</sup>来描述:

$$\frac{dP}{dt} = rP \frac{M-P}{M} \quad (7)$$

对(7)式进行积分化简,可转化为:

$$P = \frac{M}{1 + \left( \frac{M}{N_0} - 1 \right) e^{(-rt)}} \quad (8)$$

其中,  $P$  表示花生在时间  $t$  时的钾吸收量,  $r$  为花生吸钾能力,  $M$  则表示花生最大吸钾量,  $N_0$  表示起始钾量即花生种子带入的钾量。

表 4 花生不同生长发育时期的钾素净吸收量

Table 4 Net K absorption by peanut in different growing periods

取样时间 Time (week)	土壤 Soil ( $\text{mg pot}^{-1}$ )				
	A	B	C	D	E
0	0	0	0	0	0
2	4.1	40.8	25.7	—	—
4	15.4	88.6	77.6	20.1	60.3
6	34.8	168.6	114.6	35.2	107.6
8	39.5	200.7	178.0	56.6	182.9
9	34.2	195.1	162.6	62.1	265.9
10	41.9	312.4	192.6	66.9	293.6
11	43.6	299.2	197.2	72.2	400.0
12	38.7	309.5	190.7	72.7	429.8
13	36.3	318.4	181.0	91.2	400.3
14	—	—	—	84.3	451.2
15	36.9	341.9	205.5	94.5	437.8

(5) 式不能转化成线性方程,应用非线性参数估计方法,根据表 4 的实测结果,建立供试土壤的花生吸钾模型(表 5)。结果表明,回归方程的复相关系数  $R$  均达到显著水平以上,说明 Logistic 模型能反映花生钾素吸收规律。

表 5 供试土壤的花生吸钾模型参数

Table 5 Parameters of model for K absorption by peanut in different soils

代号 No.	$M$	$N_0$	$r$	复相关系数 $R$
A	48.565 5	20.1	0.1604	0.893 3**
B	353.428 9	20.1	0.4013	0.981 4**
C	203.336 5	20.1	0.4397	0.984 5**
D	153.235 0	20.1	0.1571	0.953 3**
E	517.431 4	20.1	0.3602	0.985 3**

## 2.5 供试土壤不同形态钾的动力学参数及其相关性分析

**2.5.1 供试土壤不同形态钾最大释放速率常数** 土壤钾素动力学的传统研究方法忽略了作物和生态环境条件的影响。图 2 的土壤钾素简化动态模型表明, 土壤速效钾是作物吸收钾素的给源。在土壤—作物系统下, 基础土壤的速效钾供钾速率即单位时间内基础土壤能够提供给作物吸收并且已被作物吸收的钾量 ( $dP/dt$ ), 在数量上等于不施钾肥时作物钾素吸收速率。因此, 把 Lotka-Volterra 模型和 Logistic 模型结合起来研究土壤钾素动力学行为, 可以克服传统研究方法的局限性。

从 Logistic 方程可知, 花生不同生育期的吸钾量 ( $P$ ) 不同, 其吸钾速率也不同, 即:

$$\frac{dy}{dt} = \frac{dP}{dt} = rP \frac{M-P}{M} = rP \left( 1 - \frac{P}{M} \right),$$

但可进一步转化为:

$$\frac{dy}{dt} = \frac{dP}{dt} = -\frac{r}{M} \left( P - \frac{M}{2} \right)^2 + \frac{rM}{4} \leq \frac{rM}{4}.$$

表明  $rM/4$  是花生最大吸钾速率, 和花生已吸收的钾量无关, 是一个由土壤—花生系统本身特性决定的常数。因此, 可将  $rM/4$  定义为土壤速效钾的最大供钾速率常数  $K_{am}$ , 即:  $K_{am} = rM/4$ 。根据 (5) 式和 (6) 式的关系和  $K_{am} = rM/4$ , 则可分别求出各个供试土壤的矿物钾最大释放速率常数  $K_{mm}$ 、缓效钾的最大释放速率常数  $K_{m}$  (表 6)。

表 6 供试土壤不同形态钾的最大供钾速率常数

Table 6 Constants of maximum release rates of K in different forms in selected soils

代号 No.	土壤 Soil	$K_{mm}$	$K_m$	$K_{am}$
A	赤砂土	$4.72 \times 10^{-4}$	$3.64 \times 10^{-2}$	1.95
B	紫色土	$24.92 \times 10^{-4}$	$21.73 \times 10^{-2}$	35.46
C	灰赤砂土	$21.44 \times 10^{-4}$	$18.50 \times 10^{-2}$	22.35
D	黄泥田	$0.38 \times 10^{-4}$	$4.30 \times 10^{-2}$	6.02
E	灰黄泥田	$8.75 \times 10^{-4}$	$12.13 \times 10^{-2}$	46.59

结果表明, 就当季土壤供钾能力而言, 5 个供试土壤的  $K_{am}$ 、 $K_m$ 、 $K_{mm}$  有很大的差异, 最大值和最小值分别相差 23.9 倍、5.9 倍和 65.6 倍。计算结果还表明, 土壤三种形态钾的最大供钾速率常数大致相差  $10^2$  倍。不同成土母岩发育的耕作土壤, 供钾能力有明显的差异, 紫色砂页岩发育的紫色土的  $K_{mm}$ 、 $K_m$ 、 $K_{am}$  值均较大, 玄武岩发育的灰赤砂土则居其次; 花岗岩发育的赤砂土和黄泥田, 土壤不同形态钾的最大释放速率常数都较小; 供试的灰黄泥田耕作管理水平较高, 土壤速效钾含量达  $384.4 \text{ mg kg}^{-1}$ ,  $K_{am}$  在 5 个供试土壤中最高, 但  $K_m$ 、 $K_{mm}$  均小于紫色砂页岩和玄武岩发育的土壤。

**2.5.2 土壤钾素动力学参数与花生吸钾量的相关性**  $K_{mm}$ 、 $K_m$ 、 $K_{am}$  只有与作物生长发育有密切相关性才能用来评价土壤供钾能力。盆栽试验条件下, 花生一个生长周期的吸钾量、生物学产量和荚果

产量见表7。对表6的土壤钾素动力学参数  $K_{am}$ 、 $K_{rm}$  和  $K_{mm}$  取自然对数后,与花生生物学指标进行相关性分析(表7),结果表明,  $K_{am}$  与花生净吸钾量、生物学产量和荚果产量都有显著水平以上的正相关;  $K_{mm}$  与花生净吸钾量的相关系数也达显著水平以上;但  $K_{mm}$  与3个生物学指标均无显著相关性,可能是由于  $K_{mm}$  值太小,其释放速率完全不能满足花生生长需要之故;相关分析还表明,  $K_{am}$  与花生当季净吸钾量有极显著水平以上的线性正相关( $r = 0.976^{**}$ )。因此,  $K_{am}$  和  $K_{rm}$  可作为评价土壤当季供钾能力的速率指标。

表7 花生生物学指标及其与土壤钾素释放速率常数的相关性

Table 7 Relationship between biological index for peanut and constants of soil maximum K release rates

花生生物学指标 Biological index for peanut	土壤 Soil					土壤最大供钾速率常数 Soil maximum K release rate constants		
	A	B	C	D	E	$K_{am}$	$K_{rm}$	$K_{mm}$
吸钾量( $mg\ pot^{-1}$ )	36.0	328.4	282.0	82.3	394.4	0.978 <sup>**</sup>	0.884 <sup>*</sup>	0.680
生物量( $g\ pot^{-1}$ )	5.6	25.6	24.3	22.6	27.0	0.898 <sup>*</sup>	0.723	0.207
荚果产量( $g\ pot^{-1}$ )	0.3	9.4	8.9	8.7	12.7	0.895 <sup>*</sup>	0.643	0.156

## 参考文献

- Munson主编. 范钦桢, 郑文钦等译. 农业中的钾. 北京: 科学出版社, 1995. 219~ 227
- 周健民. 土壤钾素的动力学研究. 谢建昌等编译. 土壤钾素的动态. 南京: 江苏科学技术出版社, 1986. 34~ 48
- 金继运. 土壤钾素研究进展. 土壤学报, 1993, 30(1): 94~ 101
- 金继运, 高广领, 王泽良, 等. 不同土壤钾素释放动力学及其供钾特征的研究. 植物营养与肥料学报, 1994, 试刊(1): 39~ 48
- 程明芳, 金继运, 黄绍文. 我国北方主要土壤非交换性钾释放速率的研究. 土壤学报, 1997, 36(2): 218~ 224
- 薛泉宏, 马博虎, 尉庆丰. 陕西几种土壤非交换性钾释放动力学研究. 西北农业大学学报, 1999, 27(3): 66~ 71
- 薛泉宏, 尉庆丰, 李宝安, 等. 黄土性土壤  $K^+$  吸附和解吸动力学研究. 土壤学报, 1997, 34(2): 113~ 122
- 吕晓男, 陆允甫. 土壤钾解吸的动力学方程和大麦反应的关系. 土壤学报, 1995, 32(1): 69~ 76
- 吕晓男, 陆允甫. 土壤钾释放速率参数的理论计算及其实际应用. 土壤学报, 1998, 35(2): 155~ 161
- Martin H W, Sparks D L. Kinetics of non-exchangeable potassium release from two coastal plains soils. Soil Sci. Soc. Am. J., 1983, 47: 883~ 887
- Havlin J L, Westfall D G. Mathematical models for potassium release kinetics in calcareous soil. Soil Sci. Soc. Am. J., 1985, 49: 371~ 376
- Havlin J L, Westfall D G. Potassium release kinetics and plant response in calcareous soils. Soil Sci. Soc. Am. J., 1985, 49: 366~ 370
- Rao C S, Bansal S K, Rao A S, et al. Kinetics of potassium desorption from important benchmark soils of India. Journal of the Indian Society of Soil Science, 1998, 46(3): 357~ 362
- Boruah H C, Boruah T C, Nath A K. Response of rice to potassium in relation to its kinetics of release. Journal of Potassium Research, 1993, 9(2): 113~ 121
- 谢建昌等编译. 土壤钾素的动态. 南京: 江苏科学技术出版社, 1986. 1~ 13
- 谢建昌主编. 钾与中国农业. 南京: 河海大学出版社, 2000. 79~ 80
- 马世骏主编. 现代生态学透视. 北京: 科学出版社, 1990. 113~ 114
- 沈小峰, 胡岗等编著. 耗散结构论. 上海: 上海人民出版社, 1987. 84~ 86
- 鲁如坤等著. 土壤-植物营养学原理和施肥. 北京: 化学工业出版社, 1998. 217~ 218
- 尚玉昌, 蔡小明编著. 普通生态学(上册). 北京: 北京大学出版社, 1992. 85~ 95

## KINETIC MODEL AND PARAMETERS OF POTASSIUM IN SOIL-CROP SYSTEM

Zhang Ming-qing Peng Jia-gui Yang Jie Lin Qiong Yan Ming-juan  
(Soil and Fertilizer Institute, Fujian Academy of Agricultural Sciences, Fuzhou 350013, China)

### Summary

This paper puts forward a new kinetic model of potassium based on Lotka-Volterra model in ecology. A pot-culture experiment was conducted showing that with the model, dynamic trends could be simulated of readily available potassium and slowly available potassium of soil in the growing period of peanut. The test of potassium absorption indicated that the change in K absorption in different growing periods of peanut accorded with the Logistic model. From the above two models, constants of the maximum release rates for mineral K ( $K_{mm}$ ), slowly-available K ( $K_{rm}$ ) and rapidly available K ( $K_{am}$ ) could be got. Correlation analyses showed that the relationship was obvious of  $K_{am}$  with K absorption of the current crop, its biomass yield and its peanut yield, and between  $K_{rm}$  and K absorption by the current crop. Therefore,  $K_{am}$  and  $K_{rm}$  could be used as index of potassium release rates in soil.

**Key words** Soil, Potassium, Model, Kinetics, Release rate constant