

有机酸影响矿物钾释放的室内 试验与数学模拟*

崔建宇 任理 王敬国 张福锁

(中国农业大学资源与环境学院, 北京 100094)

摘要 在生物试验的基础上, 利用连续流动法, 模拟植物根系分泌有机酸的种类和数量, 研究了不同有机酸对矿物钾释放的影响。结果表明, 有机酸能够明显地促进矿物中钾的释放, 浓度越高, 释钾作用越明显; 此外, 其释钾能力还与有机酸的种类、矿物类型密切相关。对试验结果进行了随机数学模拟, 表明所采用的传递函数模型能够较好地仿真矿物钾的释放过程。

关键词 有机酸, 矿物钾, 钾释放, 传递函数模型, 随机模拟

中图分类号 S143.3

土壤中的钾含量较为丰富, 特别是在我国北方地区, 但大部分钾是矿物态的, 多数植物很难在短期内加以利用。鉴于我国肥料钾资源的短缺, 开辟新的钾素资源、提高植物对土壤钾素资源的利用效率, 将成为解决植物钾营养需要的一个有效途径。胁迫条件下植物根系会分泌出大量有机酸类物质^[1, 2], 通过这些有机物质的作用, 包括质子参与置换和水解作用或者有机阴离子的螯合作用等来活化土壤中的钾, 以满足植物生长对该养分的需求。有关磷胁迫条件下植物根系分泌有机酸的种类和数量以及对磷活化作用的研究已取得了很多有效的结果。同时也有一些研究资料表明, 植物能够直接利用金云母等矿物中的钾^[3, 4], 而且有机酸能够促进矿物钾的释放^[5, 6], 但以往的试验没能较好地反映钾释放的动态过程。采用连续流动法, 模拟植物根系分泌有机酸的种类和数量, 研究不同浓度有机酸对两种纯矿物(钾长石和白云母)中钾释放的影响, 可以阐明有机酸在植物活化利用矿物钾方面的作用, 并探讨应用传递函数模型对钾释放动态进行随机模拟的可行性。

1 物理原型

1.1 材料与方法

供试植物: 肥田萝卜 (*Raphanus sativus* L.); 油菜(五月慢) (*Brassica campestris* L. ssp. *chinensis* (L.) Moki-na Var. *cammunis* Tsen et Lee, cv. Wuyuean)。

供试矿物: 白云母(1mm)。

液培试验装置系由 Hinsinger(1992)所用的装置改进而来(见图 1), 分为内环、外环两部分; 内环又可

* 国家重点基础研究发展规划项目(G1999011707)和国家自然科学基金资助项目(39570418)

收稿日期: 2000-08-18; 收到修改稿日期: 2000-12-07

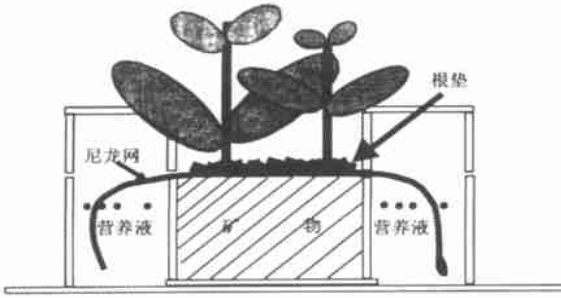


图 1 用于模拟一维宏观根际的培养装置示意图(纵切面)

Fig. 1 A schematic drawing of the culture device used to simulate a one-dimensional macroscopic rhizosphere, adapted from Hinsinger(1992)

分为上、下两部分,下部装入矿物,上部种植物,植物根系与培养介质之间由一层根系无法穿过的 400 目尼龙筛网相隔;外环底部盛放营养液,尼龙网浸入营养液中,做为导体把营养液导向植物。

植物始终在缺钾营养液中培养,而以纯矿物(白云母)作为其惟一钾源,在试验后期进行短期的缺磷处理,以刺激植物根系大量分泌有机酸,从而研究有机酸对矿物钾释放的影响。具体培养方法、钾的分析方法和矿物钾净释放量的计算方法参见文献[4]。本试验的短期缺磷处理从播种后 15 天开始,共处理 20 天。

1.2 结果与讨论

植物对钾的吸收导致土壤溶液中钾离子浓度降低,打破了土壤水溶性钾、交换性钾、非交换性钾和矿物结构钾之间的平衡关系,从而促进矿物钾向非交换性钾、非交换性钾向交换性钾以及交换性钾向水溶性钾的转化。除此之外,植物对土壤矿物钾也会产生直接的活化作用,其中根系分泌的有机酸类物质是产生这种直接活化作用的重要原因。例如,缺磷条件下玉米、油菜、肥田萝卜等植物能够大量分泌有机酸类物质,包括苹果酸、酒石酸、柠檬酸等。以这些植物为供试材料,通过对植物进行短期的缺磷处理,可以初步探讨这些有机酸类物质对矿物钾释放的影响。

根据植物吸钾总量和白云母的速效钾、缓效钾含量的变化,可以计算出矿物钾的净释放量,结果见表 1。可以看到,在试验后期进行短期的缺磷处理能够促进白云母中矿物钾的净释放量显著增加,这是缺磷诱导植物根系分泌有机酸的数量增多所致。这一结论与 Wang 等人^[6]以钾长石为供试材料的试验结果相一致。比较可知,两种植物对白云母中矿物钾的利用能力存在差异,这可能是由于磷胁迫条件下肥田萝卜与油菜分泌的有机酸种类不同所引起,其中肥田萝卜根系释放的有机酸主要是酒石酸,而油菜根系释放的主要是苹果酸。

表 1 不同磷处理白云母中矿物钾的净释放量

Table 1 Net release of K from muscovite as affected by P application (mg pot^{-1})

不同处理	肥田萝卜	油菜
Treatments	Radish	Pak-choi
加磷处理	2.03	1.86
缺磷处理	3.29	2.40

2 物理模型

植物根系分泌的有机酸对根际土壤中养分释放的影响是一个动态过程,以往的研

究^[7,8]除少数采用间歇法外,大多数研究者采用的化学热力学方法(平衡法)没能较好地反映钾释放的动态过程。与热力学法和间歇法相比,流动法具有较小的水土比、能模拟植物根系不断分泌有机酸及根系不断吸收养分的过程,试验周期较短等优点,该方法能较好地模拟根系分泌的有机酸对根际土壤钾释放的作用,特别适用于土壤钾的交换研究^[9]。因此,在前人研究的基础上,利用流动法的试验装置研究不同浓度有机酸对两种纯矿物(钾长石和白云母)中钾释放的影响,以阐明有机酸在植物活化利用矿物钾方面的作用,并探讨数学模拟的可能性。

2.1 材料与方

供试有机酸:草酸、苹果酸、酒石酸(三者均为优级纯试剂);

供试矿物:钾长石、白云母(< 75 μm),矿物的化学组成见表 2,洗涤后两种矿物的速效钾、缓效钾含量见表 3。

表 2 两种矿物的化学组成

Table 2 Chemical composition of K-bearing primary minerals

	SiO ₂ %	Al ₂ O ₃ %	Fe ₂ O ₃ %	FeO%	MgO%	CaO%	Na ₂ O%	K ₂ O%	MnO%
钾长石	65.97	19.66	0.014	0.432	0.107	0.487	1.97	10.93	0.0016
白云母	45.44	34.61	1.81	1.16	2.35	0.092	0.509	8.90	0.018

表 3 洗涤后两种矿物的速效钾、缓效钾含量(mg kg⁻¹)

Table 3 Exchangeable and nonexchangeable K contents of the two minerals after washing

矿物种类	速效钾	缓效钾
Mineral	Exchangeable K	Nonexchangeable K
钾长石	50.6	567.6
白云母	172.2	1558.3

试验处理:有机酸浓度分别为 0、1 和 5(mol L⁻¹),重复 3 次。

试验方法:动力学(流动法)装置采用林玉锁和薛家骅^[10]设计的方法。实验装置主要由以下几部分组成:(A)恒温控制器;(B)盛液器;(C)流动柱;(D)蠕动泵;(E)自动部分收集仪共五个部分组成,其连接方式见图 2 所示。

实验在恒温条件下进行,温度为 25.05。将准确称取的 1.0000g 矿物样品装入流动柱中,热平衡后,开启蠕动

泵,使高纯水或有机酸溶液以 1.0 ml min⁻¹ 的流速通过矿物,每隔 10 分钟用自动部分收集仪收集淋洗液,实验时间为 500 分钟。其体积由称重法求得,用火焰光度法测定收集液中钾的浓度。根据收集液中钾的浓度和收集液的体积,求出矿物中钾的释放量随时间变化的动力学曲线。

计算方法:释放量计算公式:

$$S_t = C_t \cdot v / m$$

式中: S_t 为 t 时间段内矿物钾的释放量, mg kg⁻¹; C_t 为 t 时的收集液中钾的浓度, mg L⁻¹; v 为收集

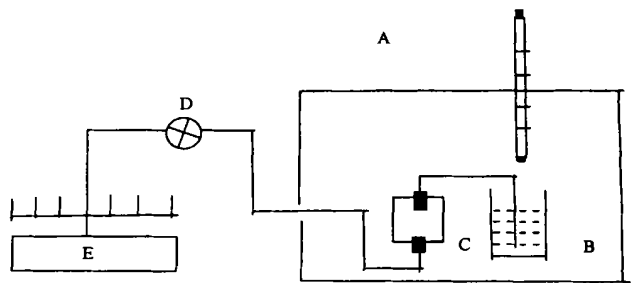


图 2 试验装置示意图
Fig 2 Sketch map of the experiment apparatus

液体积, ml; m 为矿物重量, g。

2.2 结果与讨论

2.2.1 不同浓度有机酸对矿物钾释放的影响 有机酸能够明显地促进两种矿物中钾的释放, 并且释钾量随着时间的增加而呈现累积趋势。

表 4 不同种类和浓度有机酸对矿物钾累积释放量的影响(mmol kg^{-1} , $t=500\text{min}$)

Table 4 Effect of different organic acids on K released from minerals

处理 Treatment	钾长石 Feldspar	白云母 Muscovite
CK	2.41ccb	4.41ccc
草 酸 1 mmol L^{-1}	6.12b	18.88b
5 mmol L^{-1}	7.05a	24.05a
苹果酸 1 mmol L^{-1}	4.43b	15.07b
5 mmol L^{-1}	5.71a	19.01a
酒石酸 1 mmol L^{-1}	5.42a	17.63b
5 mmol L^{-1}	5.76a	23.29a

注: 字母的显著性代表 5% 的显著水平, 而且是同一种酸与 CK 比较

表 4 比较了在 500 分钟时两种矿物中钾的累积释放量。结果表明, 与 CK 相比, 1 mmol L^{-1} 、 5 mmol L^{-1} 草酸释放钾长石中的钾量分别增加了 153.9% 和 192.5%, 苹果酸的释钾量分别增加了 83.82% 和 136.9%, 酒石酸的释钾量分别增加了 124.9% 和 139.0%; 对于白云母, 1 mmol L^{-1} 、 5 mmol L^{-1} 草酸释放的钾量分别比对照增加了 328.1% 和 445.4%, 苹果酸的相应值为 241.7% 和 331.1%, 酒石酸的释钾量分别增加了 299.8% 和 428.1%。统计结果表明, 除不同浓度酒石酸对钾长石的释钾量无差异以外, 其余均表现为高浓度有机酸释放的钾量显著高于低浓度有机酸处理, 增加比例大约在 15.2% ~ 32.9% 之间。

总之, 不同浓度的有机酸在活化和释放矿物钾方面作用很大, 效率很高, 甚至在低浓度(1 mmol L^{-1}) 下作用也很明显。这是有机酸溶液中解离的 H^+ 和有螯合能力的有机配位体的作用结果^[5]。在有机酸溶液中, 邻位带羟基和羧基的小分子有机酸很容易与矿物结构中的金属离子形成金属-有机复合体^[11], 因此加速了矿物的分解。Stumm 等^[12] 认为: 矿物表面羟基的质子化以及矿物内表面有机配位复合体的形成必然导致金属-氧键不断变弱, 因此促进了矿物的分解。有机酸对矿物钾释放作用的强弱是与溶液中 H^+ 和有配位体的数量多少密切相关的。在本试验中, 所用的各种有机酸溶液均未调节其 pH 值, 主要是为了研究供试有机酸的结构和性能对有机配位体的酸度、解离以及对不同矿物中钾释放的影响。初始有机酸溶液中解离的 H^+ 和有配位体的浓度可以通过各有机酸的电离常数和初始溶液的浓度计算出来, 结果见表 5。

表 5 有机酸溶液中初始 H^+ 和有机配位体的浓度($mol L^{-1}$)Table 5 Concentrations of H^+ and organic ligands in organic acid solutions

有机酸	H^+ 浓度	有机配位体浓度
Organic acid	H^+ concentration	Concentration of organic ligands
1 mmol L^{-1} 草酸	7.68×10^{-3}	6.98×10^{-3}
1 mmol L^{-1} 苹果酸	5.89×10^{-4}	5.17×10^{-4}
1 mmol L^{-1} 酒石酸	7.76×10^{-4}	6.68×10^{-4}
5 mmol L^{-1} 草酸	1.72×10^{-2}	1.62×10^{-2}
5 mmol L^{-1} 苹果酸	1.32×10^{-3}	1.21×10^{-3}
5 mmol L^{-1} 酒石酸	1.73×10^{-3}	1.57×10^{-3}

从表 5 可以看出, 高浓度有机酸溶液中 H^+ 和有机配位体的浓度都远高于低浓度有机酸溶液, 前者比后者高一个数量级, 而前者的释钾量约为后者的 1.06~1.33 倍, 由此可见, 在有机酸活化矿物钾的过程中, H^+ 和有机配位体的浓度起着很重要的作用, 浓度越高, 矿物钾的释放量越大。

2.2.2 不同种类有机酸对矿物钾释放的影响 有机酸的种类不同会影响矿物中钾的释放。1 mmol L^{-1} 有机酸对钾长石中钾释放强弱的顺序为草酸 > 酒石酸 > 苹果酸, 不同种类有机酸之间差异显著; 而在 5 mmol L^{-1} 时其顺序为草酸 > 酒石酸 > 苹果酸, 草酸的作用显著强于酒石酸和苹果酸, 后两种有机酸之间无差异。对于白云母, 1 mmol L^{-1} 有机酸作用的强弱顺序为草酸 > 酒石酸 > 苹果酸, 草酸与酒石酸之间无差别, 苹果酸的作用显著弱于其它二种有机酸; 在高浓度(5 mmol L^{-1}) 时有机酸的作用趋势与低浓度时一致。

Song 和 Huang^[5]认为是由于有机酸所产生的 H^+ 和有机配位体数量不同以及有机配位体的螯合能力不同导致了有机酸在活化释放矿物钾方面的差异。从表 5 可以看出, 不同种类有机酸溶液中 H^+ 和有机配位体的浓度高低顺序均为草酸 > 酒石酸 > 苹果酸, 而酒石酸螯合金属离子的能力也大于苹果酸^[13]。长石类含钾矿物的分解主要是水解过程, H^+ 首先与矿物表面的 $Si-O-Si$ 或 $Al-O-Al$ 反应, 使其水解并释放出钾, H^+ 中和了矿物结构中由同晶代换产生的电荷, 使得原来平衡电荷的 K^+ 释放出来, 进入到土壤溶液中。草酸对钾长石中钾的释放作用明显强于酒石酸和苹果酸, 这与其溶液中 H^+ 数量较高相一致。云母类矿物中钾的释放主要包括两个过程: 层间钾的置换作用和矿物的分解作用。对白云母和金云母来说, 酒石酸与草酸的释钾作用相近, 这可能是由于酒石酸溶液中除了 H^+ 浓度较高以外, 还具有较强的螯合能力的结果, 而苹果酸的释钾作用在三者中最差, 这是因为在苹果酸溶液中 H^+ 浓度最低, 且其螯合能力较差。这一结论与生物试验结果相一致。以白云母作为植物生长的惟一钾源时, 肥田萝卜对矿物钾的利用能力强于油菜, 这与磷胁迫条件下两种植物根系分泌有机酸的种类不同有关, 肥田萝卜以酒石酸为主, 而油菜以苹果酸为主。

3 数学模型

3.1 随机数学模拟原理

传递函数模型(Transfer Function Model,TFM)是基于线性系统控制理论和概率论与数理统计原理而建立起来的随机数学模型。它是一种非机理模型。国内有关它在盐分运移、硝态氮淋失方面的应用研究近年来已有多篇报道^[14-16]。TFM广泛地用于描述土壤溶质运移中的线性过程。在溶质运移的情况下,在出口处具有依赖性的溶质浓度,随着进入土壤运移体积的溶质浓度(具有独立性)的变化而变化。当TFM用于模拟有机酸作用下土壤中矿物钾的释放过程时,是将释放现象视为随机(Stochastic)过程,用释放时钾迁移时间的概率密度函数(Probability density function, pdf)来描述。

3.1.1 概率密度函数的建立 实测值的计算采用如下公式^[15]:

$$g(t) = \frac{Q_{ex}(t)}{\int_0^t Q_{ex}(t) dt} = \frac{C(t_i) (V_{ex})_i / t_i}{\sum_{i=1}^n C(t_i) (V_{ex})_i} \quad (1)$$

式中: $g(t)$ 为概率密度函数; $Q_{ex}(t)$ 为出口口钾的释放速率; $C(t_i)$ 为 i 时刻收集液中钾的浓度; $(V_{ex})_i$ 为 i 时刻收集液的体积; t_{i+} 为观测时间的间隔; t 为观测时间。

为考察实测的概率密度函数的偏态性,用如下公式^[17]计算偏态系数 C_s , 即:

$$C_s = \frac{n}{(n-1)(n-2)} \frac{\sum_{i=1}^n (g_i - \bar{g})^3}{s^3} \quad (2)$$

式中: $\bar{g} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n g_i$ 为样本均值; $s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (g_i - \bar{g})^2}$ 为样本的标准差; g_i 为样本。

模拟值的计算采用如下对数正态分布函数^[14-16]:

$$g(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} t} \exp[-(\ln t - \mu)^2 / 2\sigma^2] \quad (3)$$

式中: 模型参数 μ 和 σ^2 分别为 $\ln t$ 的均值和方差。采用矩法(Moment method)来估计参数,计算公式如下^[14,16]:

$$\mu = 2 \ln E(t) - \frac{1}{2} \ln E(t^2) \quad (4)$$

$$\sigma^2 = \ln E(t^2) - 2 \ln E(t) \quad (5)$$

式中 $E(t)$ 和 $E(t^2)$ 分别表示变量 t 和 t^2 的数学期望。这里,一阶和二阶原点矩可由下式近似计算^[16]:

$$E(t) = \sum_{i=0}^{n-1} \left[\frac{t_i + t_{i+1}}{2} \frac{g(t_i) + g(t_{i+1})}{2} t_i \right] \quad (6)$$

和

$$E(t^2) = \sum_{i=0}^{n-1} \left[\frac{(t_i + t_{i+1})^2}{2} \frac{g(t_i) + g(t_{i+1})}{2} t_i \right] \quad (7)$$

3.1.2 累积释放量的仿真 在获得参数的估计值后,运用如下方程对钾的累积释放动态进行数学仿真^[15]:

$$M = \frac{k}{2} \left[1 + \operatorname{erf} \left(\frac{\ln t - \mu}{\sqrt{2}} \right) \right] \quad (8)$$

式中: M 为累积释放量; k 是归一化常数, 由下式计算^[15, 16]:

$$k = \frac{Q_{\text{ex}}(t) dt}{\int_0^n C(t_i) (V_{\text{ex}})_i} \quad (9)$$

3 2 结果与分析

3 2 1 概率密度函数实测值的求取 对两种矿物的试验结果进行随机数学模拟, 首先根据公式(1)求取概率密度函数的实测值, 钾长石和白云母的计算结果见图 3, 通过计算它们的偏态系数发现, 所有处理均大于零(表 6), 这说明实测概率密度函数符合正偏态分布, 可用对数正态分布来描述。

表 6 不同处理钾长石和白云母概率密度函数的偏态系数

Table 6 Coefficient of skewing in probability density function

处理 Treatment	钾长石 Feldspar	白云母 Muscovite
草 酸 1 mmol L ⁻¹	4.22	2.51
5 mmol L ⁻¹	4.47	2.44
苹果酸 1 mmol L ⁻¹	3.98	1.98
5 mmol L ⁻¹	5.76	4.27
酒石酸 1 mmol L ⁻¹	4.37	3.41
5 mmol L ⁻¹	5.76	3.91

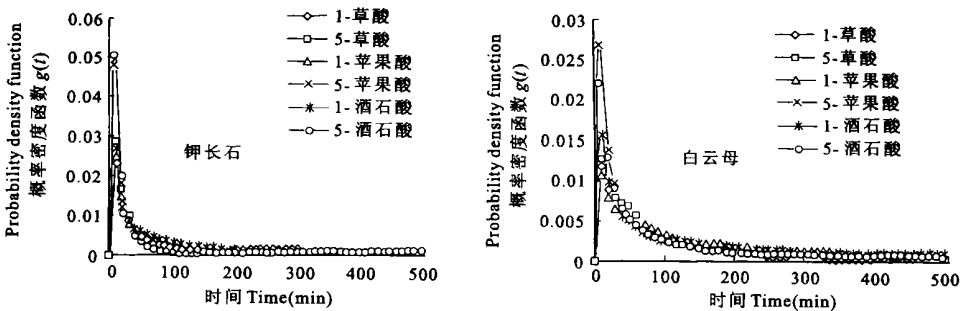


图 3 钾长石和白云母的概率密度函数

Fig 3 Probability density function of feldspar and muscovite

3 2 2 概率密度函数模拟的计算 根据公式(3)~(7), 模型参数 μ 与 σ^2 的估算结果如表 7。

表 7 钾长石和白云母的模式参数

Table 7 Parameter of feldspar and muscovite in the model

处理 Treatment	钾长石 (Feldspar)		白云母 (Muscovite)	
	值	σ^2 值	值	σ^2 值
草 酸 1 mmol L ⁻¹	3.75	1.46	4.15	1.36
	5 mmol L ⁻¹	3.49	1.73	4.02
苹果酸 1 mmol L ⁻¹	3.54	1.70	4.18	1.31
	5 mmol L ⁻¹	2.78	2.10	3.44
酒石酸 1 mmol L ⁻¹	3.43	1.54	4.11	1.43
	5 mmol L ⁻¹	2.82	2.02	3.74

值表示峰值出现的时间，值越小，最大释放速率到达的时间越早，正偏态的程度越大。从表 7 中可知，无论是钾长石还是白云母，高浓度有机酸的 值均小于低浓度有机酸，这说明有机酸浓度越高，达到最大释放速率所需的时间就越短。白云母的 值比相应的钾长石的 值大，说明白云母中钾最大释放速率到达的晚，反映了白云母中钾的释放能力强于钾长石。

σ^2 值反映释放时间落在 值附近的概率， σ^2 值越小表明钾越集中释放，即峰型越窄。从表 7 中可以看出，对两种矿物，高浓度有机酸的 σ^2 值都大于低浓度有机酸，可见有机酸浓度越低时矿物中钾的释放越集中。

比较相同浓度条件下不同种类有机酸的 σ^2 值发现，对钾长石来说，在 1mmol L⁻¹、5mmol L⁻¹时， σ^2 值大小排列均为苹果酸> 酒石酸> 草酸；对白云母而言，在 1mmol L⁻¹时排列为酒石酸> 草酸> 苹果酸，在 5mmol L⁻¹时顺序为酒石酸 苹果酸> 草酸。有机酸对矿物钾释放能力的强弱基本上与 σ^2 值的大小呈相反趋势。

概率密度函数的模拟结果见图 4。

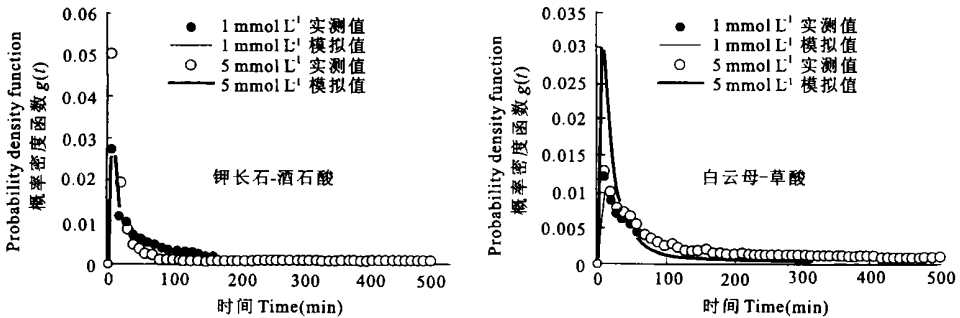


图 4 钾长石和白云母概率密度函数的模拟结果

Fig 4 Comparison between the measured data and the simulated data of probability density function(M: measured;S: simulated)

比较见图 5。可见二者吻合得很好, 它们的相对偏差均小于 5%, 这表明所采用的随机传递函数模型能够仿真钾长石和白云母中的钾在有机酸作用下的释放过程。至于该模型能否模拟土壤矿物钾的释放, 以及模型参数在不同类型土壤中是否存在差异等均有待于进一步的深入研究。

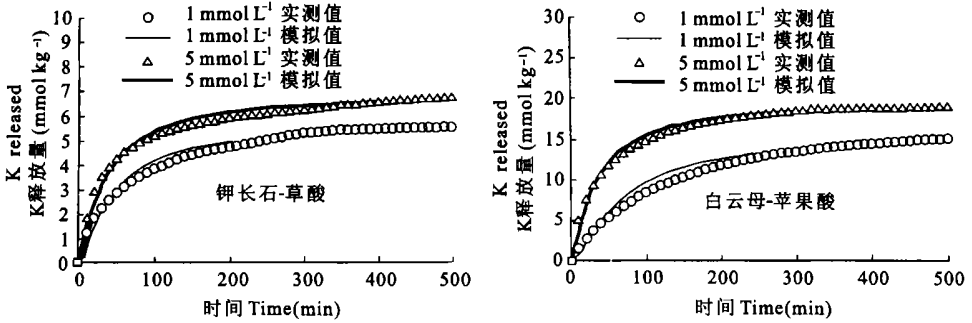


图 5 钾长石和白云母的模拟结果

Fig 5 Comparison between the measured data and the simulated data of the total K released (M: measured; S: simulated)

4 结 论

1 以纯矿物白云母作为植物的惟一钾源时, 植物能够利用其中的矿物钾。磷胁迫条件下植物根系引起矿物钾的净释放量显著增加, 这与磷胁迫条件下植物根系分泌有机酸的数量增多有关。

2 有机酸能明显地促进矿物钾的释放, 其释放量除了受有机酸的浓度、种类影响以外, 还与矿物的结构特性密切相关。

3 对钾长石和白云母的试验结果进行了随机数学模拟, 模拟结果与实测结果之间吻合得很好, 表明所采用的传递函数模型能够仿真钾长石和白云母中钾的释放。

参 考 文 献

- Gerieron P F Organic acids in the rhizosphere of *Banksia integrifolia* L F Plant and Soil, 1992, 144: 259~ 265
- Zhang F S, Ma J, Cao Y P Phosphorus deficiency enhances root exudation of low-molecular weight organic acids and utilization of sparsely soluble inorganic phosphates by radish (*Raphanus sativus* L.) and rape (*Brassica napus* L.) plants Plant and Soil, 1997, 196: 261~ 264
- Hinsinger Ph, Dufey J E, Jaillard B Biological weathering of micas in the rhizosphere as related to potassium absorption by plant roots In Michael B L Mc, Persson, H eds Plant Roots and Their Environment Elsevier Science Publishers, Oxford 1991, 98~ 105
- 崔建宇, 王敬国, 张福锁 肥田萝卜、油菜对金云母中矿物钾的活化与利用 植物营养与肥料学报, 1999, 5(4): 328~ 334
- Song S K, Huang P M, Dynamics of potassium release from potassium-bearing minerals as influenced by oxalic and citric acids. Soil Science Society of America Journal, 1988, 52: 383~ 390
- Wang J G, Zhang F S, Zhang X L, Cao Y P. Release of potassium from K-bearing minerals: Effect of plant roots under P deficient

- cy. *Nutrient Cycling in Agroecosystem*, 2000, 56:45~ 52
- 7 Martin H W, Sparks D L. Kinetics of nonexchangeable potassium release from two coastal plain soils. *Soil Science Society of America Journal*, 1983, 47(5) : 883~ 887
- 8 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
- 9 薛泉宏, 尉庆丰, 李宝安, 赵羽中 黄土性土壤 K^+ 吸附、解吸动力学研究 土壤学报, 1997, 34(2) : 113~ 122
- 10 林玉锁, 薛家骅 几种动力学方程用于描述土壤中钾吸持动力学特性的比较 南京农业大学学报, 1989, 12: 111 ~ 117
- 11 Konomova M M, Aleksandrova I V, Titova N A. Decomposition of silicates by organic substances in the soil. *Soviet Soil Sci.*, 1964. 1005~ 1014
- 12 Stumm W, Furrer G, Wieland E, Zinder B. The effects of complex-forming ligands on the dissolution of oxides and aluminosilicates. In Drever J I. ed. *The Chemistry of Weathering*. D. Reidel Publishing Co., Boston. 1985. 55~ 74
- 13 Robert M, Berthelin J. Role of biological and biochemical factors in soil mineral weathering. In Huang P M, Schnitzer M. eds. *Interaction of Soil Minerals with Natural Organics and Microbes*, SSSA Spec. Pub. No. 17, Madison, USA, 1986. 453~ 496
- 14 任理, 李保国, 叶素萍, 杨立国 稳定流场中饱和均质土壤盐分迁移的传递函数解 水科学进展, 1999, 10(2) : 107 ~ 112
- 15 任理, 刘兆光, 李保国 非稳定流条件下非饱和均质土壤溶质运移的传递函数解 水利学报, 2000, (2) : 7~ 15
- 16 任理, 袁福生, 张福锁 土壤中硝态氮淋洗的传递函数模拟和预报 水利学报, 2001, (4) : 21~ 27
- 17 数学手册编写组 数学手册 北京: 高等教育出版社, 1979 809~ 810

EFFECT OF ORGANIC ACIDS ON MOBILIZATION OF K FROM K-BEARING MINERALS AND STOCHASTIC SIMULATION OF DYNAMIC K RELEASE

Cui Jian-yu Ren Li Wang jing-guo Zhang Fu-suo

(College of Agricultural Resource and Environmental Science, China Agricultural University, Beijing 100094)

Summary

Based on the culture experiments, the mechanism of K mobilization from minerals has been studied with flow extraction technique by simulating the types and the concentrations of organic acids that plant roots excretes under P deficiency. The results showed that organic acids significantly stimulated K release from minerals, and the release of K increased with the concentration of organic acids. Moreover, the mobilizing ability was closely correlated to the type of the organic acids and minerals. The release of K from feldspar and muscovite was simulated by a transfer function model. The simulated data was correlated with the measured data. It indicated that the transfer function model is useful in studying mobilization of structural K in K-bearing minerals.

Key Words Organic acids, Structural K, K released, Transfer function model, Stochastic simulation