

湖南不同母质植烟土壤供钾能力及钾释放特性

严红星, 罗建新*, 欧阳志标, 田 飞

(湖南农业大学资源环境学院, 植物营养湖南省普通高等学校重点实验室, 长沙 410128)

摘要:为探明湖南不同母质植烟土壤供钾能力及钾释放特性,对4种主要成土母质植烟土壤进行了调查研究。结果表明,4种母质植烟土壤主要释放易解吸的特殊吸附钾,非交换性钾的释放量相对较小;土壤水溶性钾、特殊吸附钾含量与初始释钾速率和半释钾速率均达显著正相关。第四纪红土母质土壤虽然钾容量和供钾潜力有限,但却有较高的初始释钾速率及有效钾水平;石灰岩母质土壤拥有较高的特殊吸附钾含量,能为土壤提供较稳定的有效钾,土壤供钾能力较强;而紫色页岩与板页岩母质土壤虽然钾库容量大,供钾潜力也大,但有效钾含量相对较低,土壤供钾强度有限。不同母质土壤的供钾强弱为:石灰岩>第四纪红土>板页岩>紫色页岩。

关键词:湖南;成土母质;植烟土壤;供钾能力;钾释放

中图分类号:S572.01

文章编号:1007-5119(2017)03-0020-06

DOI:10.13496/j.issn.1007-5119.2017.03.004

Potassium Supply Capacity and Release Characteristics of Tobacco-planting Soils Originated from Different Parent Materials in Hunan

YAN Hongxing, LUO Jianxin*, OUYANG Zhibiao, TIAN Fei

(College of Resources and Environment, Hunan Agricultural University, Hunan Provincial Key Laboratory of Plant Nutrition in Common University, Changsha 410128, China)

Abstract: In order to explore the potassium supply capacity and releasing characteristics of different tobacco-planting soils originated from different parent materials in Hunan Province, tobacco-planting soils originated from 4 representative parent materials were surveyed. The results showed that: the release amount of potassium mainly depends on the specially absorbed potassium, and is relatively less from non-exchangeable potassium; There are significantly positive correlations between soluble potassium and the initial release rate or the rate of semi release potassium, and between absorbed potassium and the initial release rate or the rate of semi release potassium. In despite of the limited soil potassium supplying capacity, soils derived from the Quaternary Red Soil parent material maintained high potassium initial rates and available potassium levels, and soils originated from the limestone parent material showed higher specially absorbed potassium which provides relatively stable potassium sources and has better potassium capacity; By comparison, soils originated from the purple slate and plate shale parent materials have larger potassium storage capacity and potassium supplying potential, but the available potassium content is relatively low, and the amount and supply intensity level of potassium is limited. Soils derived from the limestone parent material were top ranked in potassium supplying capacity, followed by Quaternary Red Soil, late shale, and purple slate.

Keywords: Hunan; parent material; tobacco-planting soil; K supply capacity; K release

钾是烟草吸收最多的元素之一^[1]。钾能促进烟草的代谢与生长,影响烟草品质^[2-3]。钾在土壤中以多种形态存在,土壤供钾能力与成土母质和钾的存在形态关系密切,成土母质是钾的主要来源^[4]。孟霖等^[5]研究表明,成土母质影响土壤的本质特性,

在影响土壤供钾能力上比其他因素重要;王允白等^[6]、李军等^[7]和 LUEBS 等^[8]研究表明,成土母质是影响土壤供钾能力的重要原因,不同成土母质土壤的供钾能力及速效钾的水平差异较大,石灰岩母质和页岩母质土壤供钾能力大于花岗岩母质和砂

基金项目:湖南中烟工业有限责任公司项目“基地植烟土壤综合改良技术推广与应用”(2011130085)

作者简介:严红星(1992-),男,硕士研究生,主要从事植烟土壤改良与培肥研究。E-mail:352948503@qq.com。*通信作者,E-mail:hndljx@sina.com

投稿日期:2016-10-31

修回日期:2017-01-11

岩母质土壤。黄绍文等^[9]把土壤钾的形态分为水溶性钾、非特殊吸附钾、特殊吸附钾、非交换性钾与矿物钾，并表明，有效性最高的为水溶性钾和非特殊吸附钾，其次为特殊吸附钾，非交换性钾与矿物钾只有在土壤钾素水平较低时才会缓慢释放出来。土壤不同形态钾之间可以相互转化，始终处于动态平衡^[10-12]，土壤对钾的吸附、解吸和转化的速率成为评价土壤供钾能力的重要因素之一^[13]。土壤钾的动态转化过程及其动力学特征受到众多土壤科技工作者的关注^[14-16]。国内外对土壤钾转化速率的研究主要是应用动力学理论^[17]，采用不同的提取方法^[18]，结合零级、一级、二级以及 Elovich 等动力学模型，通过理论计算获得土壤钾素的吸附、解吸速率。但由于土壤性质十分复杂，土壤钾形态、含量、有效性与各种土壤条件有关^[19]，对土壤钾素转化特性的差异研究表明^[20-24]，土壤钾素的转化过程受多种因素影响。章明清等^[25]研究表明，成土母质对土壤钾素的转化特性及动力学特征具有较大影响。本研究采用连续浸提法，利用二级动力学模型研究湖南不同母质植烟土壤的供钾能力与钾素释放特征，以期为烟区不同母质植烟土壤合理施用钾肥提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 供试土壤

2013 年 12 月至 2014 年 1 月，在湖南主产烟区的浏阳、宁乡、衡南、常宁、宁远、嘉禾、桂阳、慈利、桑植、龙山等 10 个县（市）采用“S”型多点取样法，采集 4 种主要成土母质的 14 个具有代表性的植烟土壤样本（表 1），每个样本约 1 kg；土样经风干、磨细、过筛后充分混匀、装袋备用，供土壤相关指标分析。

1.2 测定方法

土壤水溶性钾用去离子水按土液比 1:10 提取，非特殊吸附钾=0.5 mol/L 醋酸镁浸提钾-水溶性钾，特殊吸附钾=1 mol/L 中性醋酸铵浸提钾-0.5 mol/L 醋酸镁浸提钾，非交换性钾=1 mol/L 热硝酸提取钾

-1 mol/L 中性醋酸铵提取钾，矿物钾=全钾-1 mol/L 热硝酸提取钾，土壤全钾采用氢氧化钠熔融法提取，各提取液中的钾均用火焰光度法测定^[9]。

表 1 土壤样品信息

Table 1 Information of soil samples

序号	地点	成土母质	海拔高度/m
1	衡南向阳金台村	紫色板页岩	78.0
2	龙山湾塘小河村	紫色板页岩	556.0
3	宁乡横市合金村	板页岩	53.2
4	宁乡横市横市村	板页岩	55.6
5	常宁罗桥柏树园村	板页岩	121.8
6	桂阳流峰板桥村	板页岩	251.0
7	衡南宝盖宝盖村	第四纪红土	82.0
8	浏阳淳口大屋村	第四纪红土	81.0
9	嘉禾普满桃源坪村	石灰岩	241.9
10	桂阳敖泉兴塘村	石灰岩	240.5
11	宁远保安石坎村	石灰岩	295.0
12	桑植官地坪双桥村	石灰岩	556.0
13	慈利高峰郑坪村	石灰岩	605.0
14	龙山召市兴龙村	石灰岩	683.0

土壤钾素释放动态：采用 2 mol/L 冷硝酸恒温连续浸提法，称 2 g 土样于已知重量的 50 mL 离心管中，加入 2 mol/L HNO₃ 溶液 20 mL，在 20 °C 恒温条件下振荡提取 0、10、20、30、60、90、120、180、240、300、420、540、660、840、1020、1200、1440 min 后取出离心管离心分离上清液，再加入 2 mol/L HNO₃ 溶液 20 mL，继续振荡提取，如此反复，直至最后提取液中钾含量很少且恒定为止。土壤连续提取均设 2 次重复，各提取时间的累积释钾量以 2 次重复的平均值表示；提取液用原子吸收分光光度计法测定其钾含量^[18]。

释钾二级动力学模型及其参数计算^[21]。

模型表达式为：

$$dK_t/dt=k(K_0-K_t)^2 \quad (1)$$

式中 K_t 为 t 时间的土壤累积释钾量 (mg/kg)， t 为解吸时间 (min)， K_0 为土壤最大释钾量 (mg/kg)， k 为速率常数。对 (1) 式进行积分，并代入初始条件 $t=0$ 时， $K_t=0$ 得：

$$K_t=K_0 \times t / (t+1/k \times K_0) \quad (2)$$

引入解吸半时间 ($t_{1/2}$)，即土壤累积释钾量达到最大释钾量一半 ($K_t=K_0/2$) 所需的时间，由 (2)

式得 $t_{1/2}=1/k \times K_0$ ，代入(2)式得：

$$K_t = K_0 \times t / (t + t_{1/2}) \quad (3)$$

将(3)式进一步对 t 求导数即可得土壤钾素释放速率方程：

$$V = dK_t / dt = K_0 \times t_{1/2} / (t + t_{1/2})^2 \quad (4)$$

方程(4)经线性变换后得：

$$t / K_t = t_{1/2} / K_0 + t / K_0 \quad (5)$$

从线性方程(5)的斜率和截距可求得速率方程中的常数 K_0 和 $t_{1/2}$ 。

土壤钾素累积释放量标准差根据下式计算：

$$S = [\sum (K_t - K_t')^2 / (n-2)]^{1/2} \quad (6)$$

式中 S 为钾素累积释放量标准差， K_t 和 K_t' 分别为 t 时间的土壤非交换性钾累积释放量实测值和模型计算值 (mg/kg)， n 为测定次数。

1.3 数据处理

采用 Microsoft Excel 2003 进行原始数据处理，用 DPS v7.05 对数据进行统计分析和模型拟合。

2 结果

2.1 不同母质土壤钾素形态特征

4 种不同母质植烟土壤各形态钾的含量及比例见表 2。结果表明，不管何种母质土壤，矿物钾的比例最高，占全钾的 95.63%~97.49%；非交换性钾

占全钾的 1.18%~2.51%，特殊吸附钾与水溶性钾仅占全钾的 0.60%~1.49%和 0.22%~0.69%，非特殊吸附钾含量最低，仅占全钾的 0.20%~0.51%。

不同母质植烟土壤的水溶性钾和非特殊吸附钾含量差异不显著，但其占全钾的比例变幅较大。第四纪红土和石灰岩母质土壤与板页岩母质土壤的特殊吸附钾含量差异显著，其占全钾的比例相差 1 倍左右；4 种成土母质土壤之间非交换性钾含量差异顺序为：紫色页岩>石灰岩>板页岩>第四纪红土，其中紫色页岩、石灰岩与第四纪红土母质土壤之间差异达到极显著水平，紫色页岩、板页岩与石灰岩母质土壤之间差异不显著；代表土壤母质特性的矿物钾含量差异较大，第四纪红土母质土壤与紫色页岩和板页岩土壤差异达到极显著水平，其中紫色页岩和板页岩土壤矿物钾含量是第四纪红土母质土壤的 2 倍。

2.2 不同母质土壤钾素释放的动力学参数

2.2.1 土壤钾素释放的 t/k_t-t 线性方程及其参数
表 3 的方程拟合结果表明，二级动力学模型对 4 种母质土壤钾素释放方程拟合的相关系数均达到极显著水平 ($r_{0.01}=0.626$)，说明该模型对不同母质土壤均有较好的拟合效果，但不同母质土壤模拟方程的特征参数具有差异，土壤最大释钾量表现为：石

表 2 土壤各形态钾的含量及比例

Table 2 Contents and proportions of potassium in soils

母质	样本数	水溶性钾		非特殊吸附钾		特殊吸附钾		非交换性钾		矿物钾	
		含量/ (mg·kg ⁻¹)	占全钾 比例/%	含量/ (mg·kg ⁻¹)	占全钾 比例/%	含量/ (mg·kg ⁻¹)	占全钾 比例/%	含量/ (mg·kg ⁻¹)	占全钾 比例/%	含量/ (mg·kg ⁻¹)	占全钾 比例/%
紫色页岩	2	34.86±13.68 Aa	0.22	31.73±1.06 Aa	0.20	93.46±21.25 Aab	0.60	311.84±17.85 Aa	2.00	15.13±0.60 Aa	96.99
板页岩	4	44.33±16.30 Aa	0.34	37.20±7.09 Aa	0.28	83.78±14.75 Ab	0.64	188.12±57.36 ABab	1.43	12.83±2.74 Aab	97.49
第四纪红土	2	49.59±3.16 Aa	0.69	36.58±8.65 Aa	0.51	107.54±16.64 Aa	1.49	84.60±5.95Bb	1.18	6.91±0.02 Bc	95.97
石灰岩	6	45.38±15.45 Aa	0.45	43.88±6.86 Aa	0.44	116.02±11.90 Aa	1.15	253.22±90.23 Aa	2.51	9.63±2.47 ABbc	95.63

注：同列大写和小写字母不同分别表示在 0.05 和 0.01 水平上差异显著。

灰岩 > 第四纪红土 > 板页岩 > 紫色页岩；第四纪红土母质土壤的钾半解吸时间 ($t_{1/2}$) 最短，仅为 17.38 min，这表明第四纪红土母质土壤在钾素消耗情况下，能够以较快的速度将其一半的有效钾容量释放到土壤溶液中。其他母质土壤的 $t_{1/2}$ 相对较大，变化在 22.76~25.99 min，且差异较小。

表 3 土壤钾素释放的 t/k_t-t 线性方程及其参数

Table 3 The t/k_t-t equations and their parameters of K release

成土母质	二级动力学模型				
	方程	r	K_0 (mg·kg ⁻¹)	$t_{1/2}$ /min	s
紫色页岩	$t/k_t=0.1109+0.0043t$	0.9994	234.4	25.99	0.068
板页岩	$t/k_t=0.1011+0.0042t$	0.9994	240.8	24.34	0.069
第四纪红土	$t/k_t=0.0711+0.0041t$	0.9998	244.5	17.38	0.043
石灰岩	$t/k_t=0.0866+0.0038t$	0.9996	262.7	22.76	0.051

2.2.2 土壤释钾速率与时间的关系 由图 1 可知，4 种不同母质土壤的释钾速率随时间的变化趋势基本一致，前 30 min 释钾速率大幅下降，之后减缓至趋于稳定。但不同母质土壤释钾速率下降的幅度与速度明显不同：第四纪红土母质土壤的释钾速率下降速度最快、幅度最大，其初始释钾速率最高，但 30 min 时的释钾速率仅为 1.89 mg/(kg·min)，为同期其他母质土壤中最低，并且 30 min 后，各时间段释钾速率均低于其他母质土壤；经计算，释钾持续时间也仅有 840 min。石灰岩、板页岩和紫色页岩母质土壤释钾速率的差异主要表现在前 120 min，120 min 后趋于相近水平；紫色土母质土壤前 120 min 各时期的释钾速率均最小，但其释钾速率下降速度最慢，幅度最小，120 min 时的释钾速率已达同期最高水平；石灰岩母质土壤的释钾速率在全期内始终保持较高水平，除 V_0 与 V_{10} 低于第四纪红土母质土壤外，其它时期释钾速率均为最高，说明其对土壤溶液中钾素的补充能力可能较强，而板页岩母质土壤各时期释钾速率均处于中下水平，土壤短期与长期供钾能力可能都较差。

2.2.3 土壤钾素累积释放量与时间的关系 从图 2 可看出，石灰岩母质土壤初期的释钾量并不多，但能保持相对较高的释钾速率和较长的持续时间，其最终释钾量明显高于其他土壤；而第四纪红土母质土壤初期的释钾量虽然最高，但后期释钾减缓，释钾速率与持续时间均较小，导致最终释钾量不高。紫色土和板页岩母质土壤初期具有相对较低的释钾量，这也决定了其释钾量最终也较低。

2.3 土壤释钾特征参数与各形态钾素的关系

根据二级动力学模型拟合的土壤释钾方程与速率方程，可计算任意时刻的土壤累积释钾量与释钾速率，其中能代表土壤供钾能力的有：最大释钾量 K_0 、初始释钾速率 V_0 、半解吸时间 ($t_{1/2}$) 和半释钾速率 ($V_{t_{1/2}}$)。相关分析结果 (表 4) 表明，供试土壤的初始释钾速率、半释钾速率与水溶性

钾、非特殊吸附钾及特殊吸附钾含量均呈正相关关系，其中与水溶性钾、特殊吸附钾达显著相关；而非交换性钾、矿物钾、全钾含量呈负相关，但相关性不显著；土壤最大释钾量与特殊吸附钾含量呈极显著正相关，与水溶性钾、非特殊吸附钾含量呈显著正相关，与其他形态钾的相关性则未达显著水平；半解吸时间与各形态钾含量的相关性也均不显著。

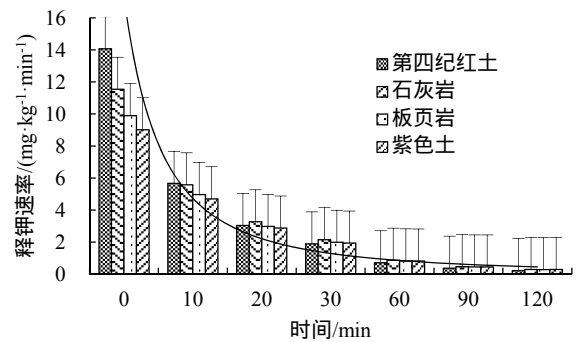


图 1 土壤释钾速率与时间的关系

Fig. 1 Relationship between velocity and time

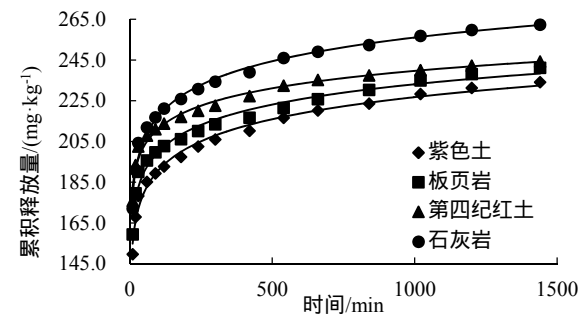


图 2 土壤钾素累积释放量与时间的关系

Fig. 2 Relationship between the quantity of K released and time

表 4 钾素形态与释钾参数的相关性

Table 4 Relationship between the parameter of K released and potassium forms

钾形态	K_0	V_0	$t_{1/2}$	$V_{t_{1/2}}$
水溶性钾	0.59*	0.60*	-0.42	0.60*
非特殊吸附钾	0.61*	0.32	-0.03	0.32
特殊吸附钾	0.81**	0.59*	-0.23	0.59*
非交换性钾	0.16	-0.22	0.3	-0.22
矿物钾	0.01	-0.25	0.3	-0.25
全钾	0.02	-0.25	0.31	-0.25

注：*表示相关显著，**表示相关极显著。

3 讨论

土壤钾素释放受多种外部因素影响^[26-27],而成土母质作为土壤的本质特性对释钾过程具有至关重要的作用^[28]。不同母质土壤的钾素形态、含量与供应能力都具有较大差异,因此,在制定钾肥施用方案时,应考虑不同母质土壤的特点。本研究结果表明,土壤释钾量、释钾速率与非交换性钾含量相关性不显著,这与邢世和等^[18]的研究结果吻合,但与廖育林等^[16]的结果相悖,这可能与选用的动力学方程模型及所用的方法不同有关。

紫色页岩与板页岩母质土壤各形态钾素含量及比例、释钾速率、释钾量均比较接近,土壤水溶性钾、非特殊吸附钾含量较低,这与王晖等^[29]、张会民等^[30]的研究结果类似。较低的水溶性钾含量限制了土壤初始释钾速率,含量较低的特殊吸附钾则影响了土壤的释钾总量;丰富的交换性钾与矿物钾,则表明土壤释钾潜力巨大。如何充分利用土壤丰富的钾库资源,促使非交换性钾和矿物钾快速有效化,可能是缓解这两类土壤供钾能力不足的有效途径。

由于第四纪红土母质土壤的矿物养分、盐基离子长期淋失^[31-32],保水、保肥力差,有酸、粘、瘦的特性,其较高的水溶性钾含量可能与长期的耕作施肥有关,从而导致土壤释钾过程的初始释钾速率明显较高;特殊吸附钾含量虽然也较高,但层间钾的释放、非交换性钾和矿物钾含量过低,导致其释钾后期速率减缓,持续时间较短,后期钾素释放量也明显较低。这类土壤对短期钾素的缺乏具有较好的补给能力,但长期缺钾条件下的供钾能力脆弱,烟草生产中对钾肥的需求较大,与李成亮等^[33]的研究结论吻合。

石灰岩母质土壤对多种盐分吸附作用较强^[34],使盐分淋失缓慢。含钾矿物在风化过程中形成较多对钾离子具有特殊吸附作用的楔形带,使得这类土壤特殊吸附钾含量较高^[9],为释钾的持续时间与释钾后期的释钾速率提供了可靠支撑。而较高的土壤水溶性钾与非特殊吸附钾总量,对初始释钾速率有利。因此,石灰岩母质土壤的平均释钾速率与释钾

总量均最大。这类土壤钾素有效性、供钾能力均高于其他土壤,在土壤缺钾条件下,依然能够较好地维持稳定的钾源提供。

由于不同母质植烟土壤的供钾能力及钾释放特性也会受到其成土过程中的气候、生物等因素的综合影响,而且其本身性质也多样,本研究仅对其形态、含量与释钾能力作了初步探讨,如能有进一步的生物试验予以验证,可能结果会更加完善。

4 结论

土壤钾素形态、含量及比例与成土母质关系密切,紫色页岩与板页岩母质土壤对有效钾的保持能力可能有限;石灰岩母质土壤供钾强度不高,但供钾持续时间较长;第四纪红土母质土壤供钾能力有限,在钾库容量和自身补给潜力有限的情况下,土壤有效钾水平的维持可能主要与钾肥的施用有关。

不同母质土壤释钾速率、释钾量及各形态钾素含量的差异明显,4种不同母质植烟土壤的供钾能力为:石灰岩>第四纪红土>板页岩>紫色页岩。

参考文献

- [1] 刘金,李进平,涂书新,等. 几种缓释钾肥对烤烟钾含量及产量产值的影响[J]. 中国烟草科学, 2014, 35(3): 17-22.
- [2] 介晓磊,化党领,谭金芳,等. 中国烟草钾营养研究现状分析()烟草钾营养的各学科研究进展[J]. 中国农学通报, 2005, 21(10): 212-217.
- [3] 代晓燕,郭春燕,王海波,等. 钾肥施用方式对豫西烤烟钾含量及产质量的影响[J]. 中国烟草学报, 2012, 18(3): 42-49.
- [4] 高林,董建新,武可峰,等. 土壤类型对烟草生长发育的影响研究进展[J]. 中国烟草科学, 2012, 33(1): 98-101.
- [5] 孟霖,宋文静,王程栋,等. 贵州中部山区植烟土壤微量元素分布特征[J]. 中国烟草科学, 2015, 36(3): 57-62.
- [6] 王允白,王宝华,计玉,等. 山东沂水植烟土壤类型与烟叶品质关系的调查研究[J]. 中国烟草科学, 2000, 21(2): 11-15.
- [7] 李军,梁洪波,宛祥,等. 烟田土壤养分状况及其与成土母质的关系研究[J]. 中国烟草科学, 2013, 34(3): 21-25.

- [8] LUEBS R E, STANFORD G, SCOTT A D. Relation of available potassium to soil moisture[J]. Soil Science Society of America Journal, 1956, 20: 45-50.
- [9] 黄绍文, 金继运. 北方主要土壤钾形态及其植物有效性研究[J]. 植物营养与肥料学报, 1998, 4(2): 156-164.
- [10] 游翔, 朱波, 谢尚春, 等. 紫色土的钾素形态转化[J]. 山地学报, 2001, (Z1): 46-49.
- [11] 李小坤, 鲁剑巍, 吴礼树, 等. 土壤钾素固定和释放机制研究进展[J]. 湖北农业科学, 2008, 47(4): 473-477.
- [12] 姜子绍, 宇万太. 农田生态系统中钾循环研究进展[J]. 应用生态学报, 2006, 17(3): 545-550.
- [13] 王定勇, 石孝均, 毛知耘, 等. 长期水旱轮作条件下紫色土养分供应能力的研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2004, 10(2): 120-126.
- [14] 章明清, 颜明娟, 林琼, 等. 土壤钾素解吸模型及其特征值的作物效应[J]. 土壤学报, 2008, 45(1): 120-129.
- [15] 程明芳, 金继运. 我国北方主要土壤吸附外源钾的动力学[J]. 植物营养与肥料学报, 1999, 5(3): 214-220.
- [16] 廖育林, 郑圣先, 聂军, 等. 长期施用化肥和稻草对红壤性水稻土非交换性钾释放动力学的影响[J]. 土壤, 2011, 43(6): 941-947.
- [17] 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[J]. 土壤学报, 1998, 35(2): 155-161.
- [18] 邢世和, 周碧青. 不同提取方法土壤非交换性钾释放动力学及其速率的研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2000, 6(3): 273-279.
- [19] 占丽平, 李小坤, 鲁剑巍, 等. 水旱轮作条件下不同类型土壤供钾能力及其动态变化研究[J]. 土壤学报, 2013, 50(3): 591-599.
- [20] 薛泉宏, 尉庆丰, 李宝安, 等. 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.
- [21] 邢世和, 周碧青, 林世进, 等. 耕作土壤钾速率及其与钾有效性的关系研究[J]. 土壤通报, 2000, 31(3): 132-134, 144.
- [22] 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[J]. 植物营养与肥料学报, 1994, 试刊(1): 39-48.
- [23] 王箐, 鲁剑巍, 张文君, 等. 田间土壤钾素有效性影响因素及其评估[J]. 土壤, 2012, 44(6): 898-904.
- [24] 王瑾, 李小坤, 鲁剑巍, 等. 小分子有机酸和阳离子对含钾矿物钾素释放的影响[J]. 华中农业大学学报, 2013, 32(3): 67-71.
- [25] 章明清, 颜明娟, 林琼, 等. 土壤钾素解吸模型及其特征值的作物效应[J]. 土壤学报, 2008, 45(1): 120-129.
- [26] 梁成华, 罗磊, 杜立宇, 等. 腐殖酸对耕地棕壤固钾与释钾作用的影响研究[J]. 土壤学报, 2005, 42(3): 468-472.
- [27] 崔德杰, 刘永辉, 郑庆柱, 等. 长期定位施肥对不同粒级非石灰性潮土钾素释放的影响[J]. 土壤学报, 2008, 45(3): 573-576.
- [28] 高淑涛, 李华兴, 郭庆荣, 等. 广东不同母质发育水稻土钾素的固定与释放[J]. 土壤通报, 2006, 37(1): 88-91.
- [29] 王晖, 邢小军, 许自成, 等. 攀西烟区紫色土 pH 值与土壤养分的相关分析[J]. 中国土壤与肥料, 2007(6): 19-22, 49.
- [30] 张会民, 徐明岗, 吕家珑, 等. 长期施肥对水稻土和紫色土钾素容量和强度关系的影响[J]. 土壤学报, 2009, 46(4): 640-645.
- [31] 刘晓利, 何园球, 李成亮, 等. 不同利用方式旱地红壤水稳性团聚体及其碳、氮、磷分布特征[J]. 土壤学报, 2009, 46(2): 255-262.
- [32] 梁音, 张斌, 潘贤章, 等. 南方红壤丘陵区水土流失现状与综合治理对策[J]. 中国水土保持科学, 2008, 6(1): 22-27.
- [33] 李成亮, 何园球, 王艳玲, 等. 氮磷钾肥对红壤区水稻增产效应的影响[J]. 中国水稻科学, 2007, 21(2): 179-184.
- [34] 陆欣春, 田雷鸿, 杨习文, 等. 氮钾配施对石灰性土壤锌形态及肥效的影响[J]. 土壤学报, 2010, 47(6): 1202-1213.