

ISSN 0564-3929

Acta Pedologica Sinica 土壤学报

Turang Xuebao



中国土壤学会
科学出版社

主办
出版

2015

第52卷 第5期

Vol.52 No.5



土壤学报

(Turang Xuebao)



第 52 卷 第 5 期 2015 年 9 月

目次

综述与评论

- 基于文献计量分析的近30年国内外土壤科学发展过程解析 宋长青 谭文峰 (957)
土壤生态系统服务的概念、量化及其对城市化的响应 吴绍华 虞燕娜 朱江等 (970)

研究论文

- 基于土壤系统分类的河南省土壤有机质时空变异 李玲 张少凯 吴克宁等 (979)
皖南第四纪红土伊利石结晶度值与风化强度的关系 刘莉红 胡雪峰 叶玮等 (991)
青海民和官亭盆地喇家遗址古耕作土壤层微形态研究 张玉柱 黄春长 庞奖励等 (1002)
基于成像光谱技术预测氮素在土壤剖面中的垂直分布 李硕 汪善勤 史舟 (1014)
基于探地雷达的典型喀斯特坡地土层厚度估测 王升 陈洪松 付智勇等 (1024)
淮河流域地表干湿变化的时空分布特征 曹永强 徐丹 曹阳 (1031)
神府矿区弃土弃渣体侵蚀特征及预测 郭明明 王文龙 李建明等 (1044)
砂石条形覆盖下土壤水分蒸发动态研究 赵丹 李毅 冯浩 (1058)
pH和三种阴离子对紫色土亚硒酸盐吸附-解吸的影响 周鑫斌 于淑慧 谢德体 (1069)
土壤非交换性钾释放动力学特征及其生物有效性 李婷 王火焰 陈小琴等 (1078)
生物质灰对红壤酸度的改良效果 时仁勇 李九玉 徐仁扣等 (1088)
小麦秸秆生物炭对高氯代苯的吸附过程与机制研究 李洋 宋洋 王芳等 (1096)
不同温度玉米秸秆生物炭对萘的吸附动力学特征与机理 张默 贾明云 卞永荣等 (1106)
十溴联苯醚对秀丽隐杆线虫毒性研究 王赢利 陈建松 阳宇翔等 (1116)
稻草和三叶草分解对微型土壤动物群落的影响 王慧 桂娟 刘满强等 (1124)
沿海区土壤线虫对海水入侵土壤盐渍化的响应 王诚楠 张伟东 王雪峰等 (1135)
土壤团聚体N₂O释放与反硝化微生物丰度和组成的关系 周汉昌 张文钊 刘毅等 (1144)
基于产量、氮效率和经济效益的春玉米控释氮肥掺混比例 王寅 冯国忠 张天山等 (1153)

问题讨论

- 中国土壤系统分类基层单元土族建设现状与命名上存在的问题 易晨 马渝欣 杨金玲等 (1166)

研究简报

- 干旱与重吸水对人工藻结皮光合特性的影响 吴丽 杨红 兰书斌等 (1173)
咸水灌溉对沙漠防护林植物根系分布及风沙土演变的影响 李从娟 唐俊妍 高培等 (1180)
不同NaNO₃浓度下可变电荷土壤铜离子解吸率的分配及影响因素 张政勤 罗文贱 陈勇等 (1188)

封面图片: 不同浓度十溴联苯醚对秀丽隐杆线虫的毒性 (由王赢利提供)

DOI: 10.11766/trxb201412140651

土壤非交换性钾释放动力学特征及其生物有效性*

李 婷^{1, 2, 3} 王火焰^{1†} 陈小琴¹ 周健民¹

(1 土壤与农业可持续发展国家重点实验室(中国科学院南京土壤研究所), 南京 210008)

(2 四川农业大学资源环境学院, 成都 611130)

(3 中国科学院大学, 北京 100049)

摘 要 采用生物耗竭法和 0.2 mol L⁻¹ 四苯硼钠化学浸提法, 利用不同动力学模型对我国 8 种主要土壤非交换性钾的释钾特性及其生物有效性进行定量评估。结果表明, 供试土壤非交换性钾释放分为快速释放和稳定释放两个阶段, 一级动力学模型、Elovich 模型、双常数模型和扩散模型均能描述土壤非交换性钾的释放过程。根据双常数模型中参数 (a) 所表征的土壤非交换性钾释放速率常数, 供试 8 种土壤的释钾能力按取土地区存在着自西向东、自北向南渐减的趋势。盆栽耗钾试验中, 在累积释钾量高且释放速率快的土壤上, 不施钾处理黑麦草累积生物量、累积吸钾量和相对含钾量较高, 表现出强的供钾能力; 与此相反, 累积释放量低且释放速率慢的土壤上, 其各项指标偏低, 供钾能力较弱。四种动力学模型所表征的土壤非交换性钾释放速率与不施钾处理黑麦草含钾量及吸钾量极显著相关。以黑麦草钾素丰缺临界值 34.0 g kg⁻¹ 和土壤非交换性钾释放速率 396 mg kg⁻¹ h⁻¹ 作为评价指标, 供试 8 种土壤中, 仅取自新疆的干旱土、陕西和黑龙江的均腐土在短期不施用钾肥的情况下能保证黑麦草丰产且不出缺钾症状。

关键词 非交换性钾; 释钾特性; 动力学模型; 供钾特性; 生物有效性

中图分类号 S153.6 **文献标识码** A

钾是植物生长所必需的大量营养元素之一, 随着吸钾量大的高产作物品种的推广、复种指数的增加和农业集约化程度的提高, 作物收获所带走的钾量远高于投入量, 导致土壤钾素耗竭日趋严重^[1-4]。在钾素耗竭情况下, 土壤非交换性钾是作物钾素吸收的主要来源^[5-7]。然而, 非交换性钾含量相同并不代表土壤具有相同的供钾能力, 这是由于在速效钾被作物吸收利用后, 其非交换性钾释放速率不同所致。因而在农业生产中, 非交换性钾的释放动力学在土壤供钾能力评价中有着更为重要的作用^[8-10]。

目前, 常将生物耗竭法与化学分析法相结合用于评价土壤非交换性钾的释放特性及其生物有效性^[2]。早期较多利用阳离子树脂袋法^[5, 11-13]、电超滤法^[14-15]或连续流动交换仪法^[16-17]建立其非

交换性钾释放动力学参数与生物吸钾量、含钾量及产量之间的关系, 评估不同土壤的供钾能力及其有效性; 部分学者利用不同浓度酸^[18-20]或四苯硼钠 (NaTPB) 法^[20-22], 根据其提取量与作物生长指数间相关性比较土壤的供钾潜力。然而基于不同土壤钾素化学测定方法及多种作物的研究结果差异明显, 不利于不同土壤类型间的平行比较, 且现有研究大多仅探讨了非交换性钾释放速率与作物吸钾量或含钾量之间的相关关系, 较少利用其相关关系定量评估非交换性钾的生物有效性。

本研究拟采用生物耗竭法和 0.2 mol L⁻¹ 的四苯硼钠化学浸提法, 并利用不同动力学模型对我国 8 种主要土壤的释钾特性及其生物有效性进行定量评估, 以期为我国合理分配、施用钾肥提供理论依据。

* 公益性行业 (农业) 科研专项 (201203013) 和国家自然科学基金项目 (NSFC40971176) 资助

† 通讯作者, Tel: 025-86881569, E-mail: hywang@issas.ac.cn

作者简介: 李 婷 (1982—), 女, 四川广元人, 博士研究生, 副教授, 研究方向为土壤肥力。E-mail: lt_sicau@163.com

收稿日期: 2014-12-14; 收到修改稿日期: 2015-02-04

1 材料与方法

1.1 供试材料

供试8种耕层土样(0~20 cm)于2013年采自全国7个主要农业生态区。其基本理化性质如表1所示,采用常规分析方法进行测定^[23]。其中土壤pH采用电位法,用pH计测定(水土比2.5:1);土壤有机质采用重铬酸钾容量法测定;土壤机械组成用吸管法测定;土壤全钾用X-荧光法测定;土壤沸硝酸钾按10:1水土比用1.0 mol L⁻¹的热HNO₃浸提,速效钾按10:1水土比用1.0 mol L⁻¹中性NH₄OAc浸提,过滤后用火焰光度法测定;土壤矿物组成采用去除有机质和氧化铁的黏粒定向片,X射线衍射法测定。供试作物品种为一年生黑麦草(*Lolium perenne* L.)。

1.2 盆栽黑麦草耗钾试验

盆栽试验采用18 cm×20 cm(直径×高)的塑料桶,每桶中装入风干土5 kg。每种土壤设施钾(K 200 mg kg⁻¹)和不施钾(CK)两个处理,重复3次。每茬开始时每kg土施入N 0.20 g、P₂O₅ 0.15 g、K₂O 0.20 g(施钾处理)或0 g(不施钾处理)、MgSO₄·7H₂O 0.25 g、CaCl₂ 0.10 g。其中氮、磷、钾肥拌匀后装盆,中微量元素养分以营养液的方式施入。每桶中撒播黑麦草种子2.0 g,30 d后收获地上部。每茬收获后,将盆土重新压碎过筛,并与剪碎为0.5~1 cm的植株地下部混匀后装盆,重新施肥播种下一茬黑麦草,连续种植8茬。

黑麦草样品的处理及分析:105℃烘箱中杀青30 min后于60℃烘48 h至恒重,采用浓H₂SO₄-H₂O₂消化,火焰光度法测定植物钾含量。黑麦草相对生物量、相对含钾量、吸钾量和相对吸钾量的计算采用如下公式:

$$\text{相对生物量}(\%) = \frac{\text{不施钾处理黑麦草生物量}}{\text{施钾处理黑麦草生物量}} \times 100 \quad (1)$$

$$\text{相对含钾量}(\%) = \frac{\text{不施钾处理黑麦草含钾量}}{\text{施钾处理黑麦草含钾量}} \times 100 \quad (2)$$

$$\text{吸钾量}(\text{mg kg}^{-1}) = \text{黑麦草生物量} \times \text{黑麦草含钾量} \quad (3)$$

$$\text{相对吸钾量}(\%) = \frac{\text{不施钾处理黑麦草吸钾量}}{\text{施钾处理黑麦草吸钾量}} \times 100 \quad (4)$$

1.3 土壤非交换性钾释放动力学特征

土壤非交换性钾浸提采用Cox^[21]和Wang^[22]等的方法。称取0.50 g风干土样(过60目筛)于

50 ml的离心管中,准确加入3 ml 0.2 mol L⁻¹ NaTPB与0.01 mol L⁻¹ EDTA的混合剂,在分别振荡0.5 h、1 h、1.5 h、2 h、4 h、12 h、24 h、48 h和96 h后,加入25 ml终止剂(0.5 mol L⁻¹ NH₄Cl + 0.14 mol L⁻¹ CuCl₂),摇匀后置于沸水浴中煮沸60 min,离心管冷却后于5 000 r min⁻¹离心5 min,上清液过滤后加入3滴6 mol L⁻¹的HCl,用火焰光度计测定。

采用一级动力学模型、Elovich模型、双常数模型和扩散模型描述土壤中非交换性钾的释放特征,并通过决定系数(R²)和离回归标准误(SE)的大小来比较各模型的适用性程度^[24-25],R²越大,SE越小,则拟合越好。一级动力学模型中的参数K_d、Elovich模型中的参数b、双常数模型中的参数a和扩散模型中的参数b表征非交换性钾的释放速率常数。各模型表达式如下:

$$\text{一级动力学模型(First order): } \ln(C_0 - C_t) = \ln C_0 - K_d t$$

$$\text{Elovich模型(Elovich): } C_t = a + b \ln t$$

$$\text{双常数模型(Power function): } C_t = a t^b$$

$$\text{扩散模型(Parabolic diffusion): } C_t/C_0 = a + b t^{1/2}$$

式中,t为时间(h),C₀为土壤非交换性钾累积释放总量(mg kg⁻¹),a、b为动力学模型的参数(在不同模型中其含义不同),C_t为t时刻时土壤非交换性钾释放累积量(mg kg⁻¹),K_d为一级反应动力学的表观速率常数。

1.4 数据处理与分析

试验数据统计分析和作图利用SPSS Statistics 19.0软件和Excel软件。试验数据的差异显著性水平(p<0.05)通过最小显著法(LSD)进行检验。

2 结果与讨论

2.1 土壤非交换性钾释放特性

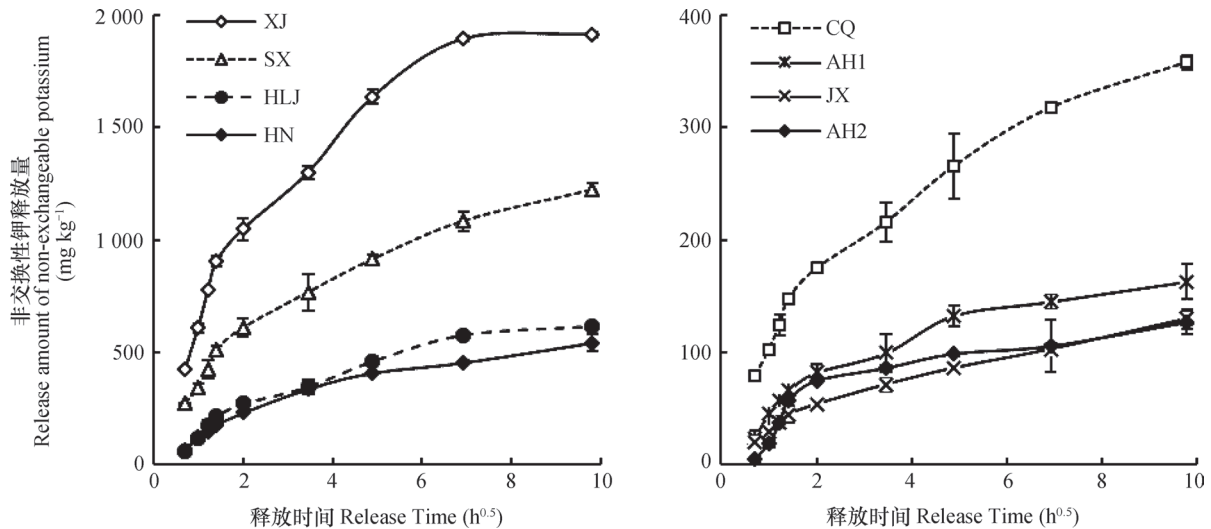
不同类型土壤非交换性钾释放量差异显著。四苯硼钠浸提0.5 h时,其释放量为5.36~423.4 mg kg⁻¹,平均136.4 mg kg⁻¹;浸提96 h时,其累积释放量为126.6~1 914 mg kg⁻¹,平均661.2 mg kg⁻¹。以土壤非交换性钾累积释放量与对应释放时间做图得到的释放曲线表明(图1),土壤非交换性钾释放分为快速释放(0~2 h)和稳定释放(2~96 h)两个

表1 供试土壤基本理化性质

Table 1 Physical and chemical properties of tested soils

土样代码 Soil code	采土地点 Soil location	土壤类型 Soil Taxonomy	pH	有机质		全钾 TK	沸硝酸钾		砂粒 Sand	粉粒 Silt	黏粒 Clay	主要矿物组成 Main minerals
				OM	— (g kg ⁻¹) —		HNO ₃ -K	AK				
XJ	新疆石河子 Shihezi, Xinjiang	正常干旱土 Orthic Aridosol	8.19	27.7	27.4	1 310	319.7	14.84	60.96	24.20	I, Sm, K, Ch	
SX	陕西长武 Changwu, Shaanxi	干润均腐土 Ustic Isohumosol	8.28	15.6	25.2	1 431	180.7	6.08	76.20	17.72	I, Ch, K	
HLJ	黑龙江哈尔滨 Harbin, Heilongjiang	湿润均腐土 Udric Isohumosol	6.84	38.6	27.2	1 175	223.6	13.16	68.40	18.44	I, Sm, K, Ch	
HN	河南封丘 Fengqiu, Henan	湿润锥形土 Udric Cambosol	8.53	13.6	23.1	681.8	88.7	60.08	28.80	11.12	I, K, Ch, Sm,	
CQ	重庆南岸 Nanan, Chongqing	湿润淋溶土 Udric Argosol	7.48	33.7	18.6	357.9	96.0	20.32	47.20	32.48	K, I, Ch	
AH1	安徽蒙城 Mengcheng, Anhui	潮湿变性土 Aquic Vertosol	7.12	12.5	17.5	542.5	110.1	8.24	76.60	15.16	Sm, Ch, K, V	
JX	江西高安 Gaoan, Jiangxi	湿润富铁土 Udric Ferrosol	5.82	39.2	26.2	829.7	99.5	18.12	60.44	21.44	K, Ch, I	
AH2	安徽广德 Guangde, Anhui	水耕人为土 Stagnic Anthrosols	6.51	6.5	16.3	351.2	33.6	22.72	64.16	13.12	K, I, Ch, Sm	

注: I, 伊利石; Sm, 蒙脱石; K, 高岭石; Ch, 绿泥石; V, 蛭石。下同 Note: I, illite; Sm, smectite; K, kaolinite; Ch, chlorite; V, vermiculite. The same below



注：XJ，新疆干旱土；SX，陕西均腐土；HLJ，黑龙江均腐土；HN，河南锥形土；CQ，重庆淋溶土；AH1，安徽变性土；JX，江西富铁土；AH2，安徽人为土。下同 Note: XJ, Aridosol in Xinjiang; SX, Isohumosol in Shaanxi; HLJ, Isohumosol in Heilongjiang; HN, Cambosol in Henan; CQ, Argosol in Chongqing; AH1, Vertosol in Anhui; JX, Ferrosol in Jiangxi; AH2, Anthrosols in Anhui. The same below

图1 土壤非交换性钾动态累积释放量

Fig.1 Dynamic cumulative release of soil non-exchangeable potassium

阶段，这是因为释放初期，土壤非交换性钾主要为黏土矿物层间靠近外缘部位的 K^+ （外缘K）通过扩散离开黏土矿物晶格束缚进入液相，释放后期，黏土矿物层间外缘钾越来越少，层间内部钾扩散距离长，阻力大，从而导致其扩散释放速度不断降低^[26-29]。

采用一级动力学模型、Elovich 模型、双常数模型和扩散模型对土壤非交换性钾释放过程进行拟合（表2），结果表明，4种模型均能描述土壤非交换性钾的释放过程，根据拟合决定系数（ R^2 ）和离回归标准误（SE），以Elovich模型拟合程度最好，一级动力学模型拟合程度最差，其余模型的拟合性介于其间。土壤非交换性钾的释放符合Elovich模型和扩散模型，表明其释放以扩散控制过程为主^[11, 24]，然而，Allen^[30]、Cox和Joern^[8]等的研究表明Elovich模型难以很好地表述土壤非交换性钾早期释放情况，扩散模型表征的土壤非交换性钾有多种释放速率，因此这两种模型均不适用于描述土壤的供钾潜力，双常数模型中的参数（a）所表征的释放速率常数是评价土壤供钾能力最好的指标。

根据双常数模型中参数（a）所表征的土壤非交换性钾释放速率常数和张洋洋等^[20]所建立的土壤钾素分级指标，取自西北以伊利石和蒙脱石为主的干旱土和均腐土释钾最快，释钾量也最高，取自

东北的均腐土释钾力较高，取自华中以伊利石和高岭石为主的锥形土和西部的淋溶土释钾力中等，取自华东以高岭石和绿泥石为主的变性土、富铁土和人为土释钾力低。供试8种土壤的释钾能力按取土地区存在着自西向东、自北向南渐减的趋势，这与黄绍文^[31]、谢建昌^[2]等的研究结果较为一致。

2.2 土壤供钾特性

盆栽不施钾连续耗竭状态下，黑麦草在供试8种土壤上累积生物量、累积吸钾量、相对含钾量和相对吸钾量差异显著（表3）。新疆干旱土上黑麦草累积生物量和吸钾量最高，达到 60.4 g 盆^{-1} 和 558.4 mg kg^{-1} ；陕西和黑龙江均腐土、河南锥形土、重庆淋溶土及安徽变性土上黑麦草累积生物量和吸钾量中等，其值分别为 $52.4 \sim 55.1 \text{ g 盆}^{-1}$ 和 $170 \sim 419 \text{ mg kg}^{-1}$ ；江西富铁土和安徽人为土上黑麦草累积生物量和吸钾量最低。黑麦草相对含钾量和相对吸钾量在供试8种土壤中变化趋势与累积生物量及吸钾量基本一致（表3），且随着种植茬数增加，其相对含钾量和相对吸钾量呈下降趋势，但在释钾能力较差的土壤上，其下降至一定幅度后会在一定范围内波动。

盆栽试验中黑麦草表征的各类型土壤的供钾特征与相应土壤的钾素释放动力学研究的结果较为一致。在钾素释放特性研究中，累积释钾量高且释放

表2 供试土壤非交换性钾释放动力学特征
 Table 2 Kinetic characteristic of non-exchangeable K release from test soils

土样代码 Soil code	一级动力学模型 First order			Elovich模型			双常数模型 Power function			扩散模型 Parabolic diffusion		
	速率常数 Rate constants (mg kg ⁻¹ h ⁻¹)	R ²	SE (mg kg ⁻¹)	速率常数 Rate constants (mg kg ⁻¹ h ⁻¹)	R ²	SE (mg kg ⁻¹)	速率常数 Rate constants (mg kg ⁻¹ h ⁻¹)	R ²	SE (mg kg ⁻¹)	速率常数 Rate constants (mg kg ⁻¹ h ⁻¹)	R ²	SE (mg kg ⁻¹)
	XJ	1 683	0.867	215.1	297.2	0.987	66.9	709.2	0.953	127.8	163.3	0.871
SX	1 001	0.838	144.1	181.3	0.993	30.3	397.5	0.985	43.8	102.8	0.933	92.7
HLJ	534.8	0.887	71.3	107.1	0.988	23.5	158.5	0.962	41.4	60.3	0.916	61.3
HN	453.8	0.909	53.1	89.5	0.997	10.0	143.5	0.972	29.6	50.4	0.922	49.2
CQ	290.3	0.817	44.7	52.7	0.989	11.1	114.5	0.988	11.5	30.1	0.942	25.1
AH1	137.1	0.876	18.0	26.0	0.992	4.6	51.1	0.960	10.3	14.4	0.896	16.5
JX	100.4	0.821	16.5	29.3	0.979	5.7	33.0	0.990	3.9	11.4	0.963	7.5
AH2	106.2	0.926	11.9	21.8	0.952	9.6	37.1	0.869	16.0	11.6	0.790	20.2
平均值 Mean		0.868	71.8		0.985	20.2		0.960	35.5		0.904	60.5

表3 耗竭过程中不施钾处理黑麦草生长指数

Table 3 Growth indices of ryegrass without K fertilizer application in the K depletion experiment

土样代码 Soil code	累积生物量 Cumulative biomass (g pot ⁻¹)	累积吸钾量 Cumulative K uptake (mg kg ⁻¹)	相对含钾量 Relative K content (%)			相对吸钾量 Relative K uptake (%)		
			第1茬 First cropping	第4茬 Fourth cropping	第8茬 Eighth cropping	第1茬 First cropping	第4茬 Fourth cropping	第8茬 Eighth cropping
			XJ	60.4a	558a	101.0	73.1	64.1
SX	53.9ab	377abc	99.5	50.0	49.6	97.8	41.4	41.3
HLJ	54.0ab	419ab	106.1	49.5	38.5	100.0	48.4	30.1
HN	52.4ab	265bcd	93.0	37.6	33.3	89.4	28.3	25.5
CQ	54.6ab	180bcd	71.1	19.9	22.6	66.4	16.1	14.1
AH1	55.1ab	170cd	72.8	17.4	21.2	47.1	13.6	17.3
JX	42.7c	117d	47.4	10.7	24.4	37.8	4.82	8.13
AH2	37.3d	78.1d	72.0	7.67	9.93	48.9	4.70	3.82

注：同一列不同字母表示不同土壤间存在显著差异 ($p < 0.05$) Note: Different lower case letters in the same row indicate the significant differences between soils ($p < 0.05$)

速率快的是新疆干旱土、陕西和黑龙江均腐土，其上生长的黑麦草累积生物量、累积吸钾量和相对含钾量也高，表现出强的供钾能力；与此相反，累积释放量低且释放速率慢的是安徽变性土、江西富铁土和安徽人为土，其黑麦草各项指标也偏低，供钾能力弱。这与谢建昌和杜承林^[5]、金继运^[16]等的研究结果一致。

2.3 土壤非交换性钾生物有效性评估

目前，常采用生物和化学方法评价土壤非交换性钾的生物有效性。然而，现有研究更多的是将

生物耗竭和化学浸提两种方法的结果进行简单的对比，仅揭示其供钾特性与释钾特性较为一致，而较少将两者结合起来评价土壤非交换性钾的生物有效性。四种动力学模型所表征的土壤非交换性钾释放速率常数与黑麦草生长指数相关性分析表明（表4），8茬黑麦草平均相对生物量与四种动力学模型所表征的土壤非交换性钾释放速率常数均不相关 ($p > 0.05$)，然而，8茬黑麦草平均含钾量、平均相对含钾量及平均相对吸钾量与四种动力学模型表征的释放速率常数呈极显著相关关系 ($p < 0.01$)。

表4 动力学模型表征的土壤非交换性钾释放速率与不施钾处理黑麦草生长指数间相关性分析

Table 4 Correlation coefficients between non-exchangeable K release rates described by kinetic models and growth indices of ryegrass without K fertilizer application

不同模型所表征的释放速率 Release rate described by various kinetic model	累积生长指数 Cumulative growth indices		平均生长指数 Mean growth indices			
	生物量 Biomass yield	吸钾量 K uptake	相对生物量 Relative biomass yield	含钾量 K content	相对含钾量 Relative K content	相对吸钾量 Relative K uptake
Elovich模型 Elovich	0.649	0.929**	0.661	0.906**	0.928**	0.903**
双常数模型 Power function	0.634	0.879**	0.590	0.845**	0.874**	0.842**
扩散模型 Parabolic diffusion	0.661	0.933**	0.685	0.913**	0.936**	0.913**

注：黑麦草累积生长指数数值为第1-8茬合计值，平均生长指数为第1-8茬平均值；**表示在0.01水平上相关性显著 ($n=8$)
Note: The cumulative and mean values of ryegrass growth indices are the sums and means of the eight croppings, respectively. ** signifies significant correlation at 0.01 levels ($n=8$)

因此,不施钾处理黑麦草含钾量更能体现土壤中钾素的盈亏状况。四种动力学模型中以扩散模型和Elovich模型表征的土壤非交换性钾释放速率常数与黑麦草生长指数相关性更好,但因Elovich模型难以很好地表述土壤非交换性钾早期释放情况,扩散模型表征的土壤非交换性钾有多种释放速率,由此本文选用双常数模型所表征的释放速率常数来探讨其与不施钾处理黑麦草含钾量间的相关性,以此评价土壤非交换性钾的生物有效性。

盆栽耗竭试验结果表明黑麦草相对生物量及其含钾量极显著相关($p < 0.0001$),即黑麦草缺钾与否是影响其生物量的关键因素。根据黑麦草相对生物量和不施钾处理黑麦草含钾量的关系(图2a),以黑麦草相对生物量90%时的钾素含量作为土壤养分丰缺临界值指标^[32],其叶片中钾素丰缺临界值为 34.0 g kg^{-1} ,高于Cox等^[21]在美国中西部11种土壤(黑麦草钾素丰缺临界值为 19.0 g kg^{-1})和Wang等^[22]在中国东部4种土壤(黑麦草钾素丰缺临界值为 18.88 g kg^{-1})上的盆栽耗钾试验结果,但

与Westfall等^[33]在田间小麦上的研究结果较为一致(其钾素丰缺临界值为 $32 \sim 40 \text{ g kg}^{-1}$)。

土壤非交换性钾释放速率常数与不施钾处理黑麦草生长指数相关性分析表明,不施钾处理黑麦草含钾量更能体现土壤中钾素盈亏状况,且四种动力学模型中双常数模型最适宜用于评估土壤供钾特性。因此,建立了不施钾处理黑麦草平均含钾量(y)与双常数模型所表征不同土壤非交换性钾释放速率常数(x)间的相关关系: $y = 45.16x / (130.09 + x)$, $R^2 = 0.847$ ($p = 0.0012$) (图2b),以此综合评估土壤非交换性钾的生物有效性。当黑麦草钾素丰缺临界值为 34.0 g kg^{-1} 时,土壤中非交换态钾释放速率需高于 $396 \text{ mg kg}^{-1} \text{ h}^{-1}$,该土壤才能维持作物生长且不会出现明显的减产和缺钾症状。由此,供试8种土壤中,仅新疆干旱土、陕西和黑龙江均腐土在短期不施用钾肥的情况下能保证黑麦草丰产且不会出现缺钾症状,其可被作物利用且不会出现缺钾症状的非交换性钾量占四苯硼钠提取钾量的47.3%、22.4%和26.3%。

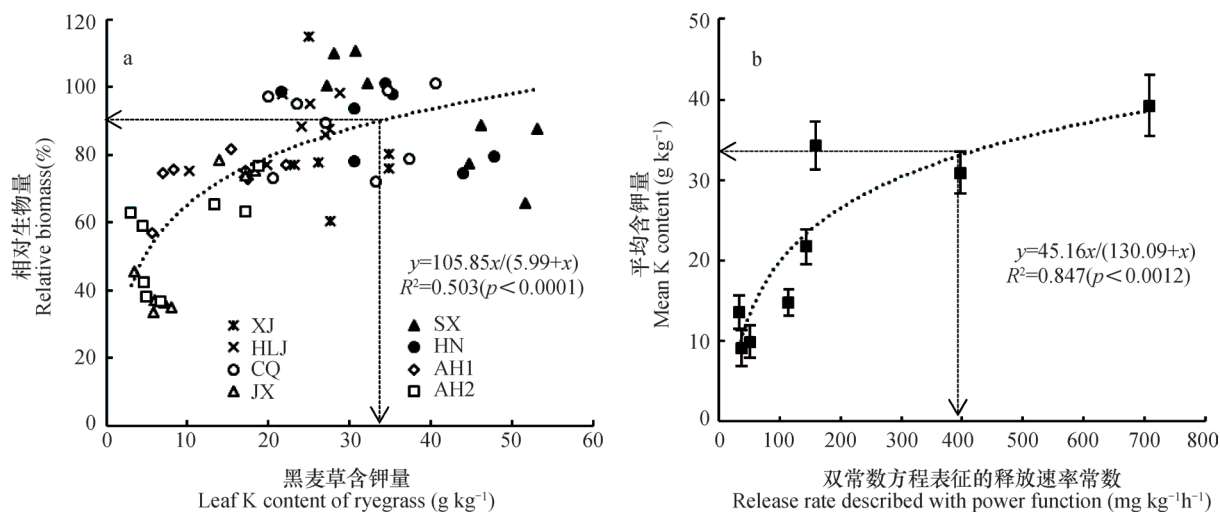


图2 不施钾处理黑麦草含钾量与相对生物量关系(a)及其平均含钾量与双常数表征的土壤非交换性钾释放速率之间的关系(b)

Fig.2 Relationship between K content and relative biomass of ryegrass without K fertilizer application (a) and relationship between mean K content of ryegrass without K fertilizer application and soil NEK release rate described with the power function model (b)

3 结论

土壤中非交换性钾释放可利用动力学模型中的速率常数进行表征,且该速率常数与作物含钾量、吸钾量极显著相关。利用该相关关系,可对土壤中非交换性钾的生物有效性进行评价。然而,同一土

壤中非交换性钾因在含钾矿物中所处部位的不同,导致其释放分为快速释放和稳定释放两个阶段,研究不同释放阶段与作物钾素有效性的关系,建立起适用于各类土壤的非交换性钾生物有效性分级指标和不同等级非交换性钾含量的测定方法将是未来研究的重要内容。

参 考 文 献

- [1] 金继运. 土壤钾素研究进展. 土壤学报, 1993, 30 (1) : 94—101. Jin J Y. Advances in soil potassium research (In Chinese) . Acta Pedologica Sinica, 1993, 30 (1) : 94—101
- [2] 谢建昌, 周健民, Hardter R. 钾与中国农业. 南京: 河海大学出版社, 2000. Xie J C, Zhou J M, Hardter R. Potassium in Chinese agriculture (In Chinese) . Nanjing: Hohai University Press, 2000
- [3] Römheld V, Kirkby E A. Research on potassium in agriculture: Needs and prospects. Plant and Soil, 2010, 335: 155—180
- [4] Zorb C, Senbayram M, Peiter E. Potassium in agriculture—status and perspectives. Journal of Plant Physiology, 2014, 171: 656—669
- [5] 谢建昌, 杜承林. 土壤钾素的有效性及其评定方法研究. 土壤学报, 1988, 25 (2) : 132—134. Xie J C, Du C L. Studies on availability of potassium in soils and its evaluating methods (In Chinese) . Acta Pedologica Sinica, 1988, 25 (2) : 132—134
- [6] Carey P L, Curtin D, Scott C L. An improved procedure for routine determination of reserve-K in pastoral soils. Plant and Soil, 2011, 341: 461—472
- [7] Holland J, Conyers M, Orchard B, et al. Soil potassium relationships, uptake efficiency and availability for six distinctive soils in central and southern New South Wales, Australia. Soil Research, 2014, 52: 129—139
- [8] Cox A E, Joern B C. Release kinetics of nonexchangeable potassium in soils using sodium tetraphenylboron. Soil Science, 1997, 162 (8) : 588—598
- [9] Srinivasarao C, Kundu S, Ramachandrapa B K, et al. Potassium release characteristics, potassium balance, and finger millet (*Eleusine coracana* G.) yield sustainability in a 27-year long experiment on an Alfisol in the semi-arid tropical India. Plant and Soil, 2014, 374: 315—330
- [10] 梁成华, 魏丽萍, 罗磊. 土壤固钾与释钾机制研究进展. 地球科学进展, 2002, 17 (5) : 679—684. Liang C H, Wei L P, Luo L. Advance in research on mechanisms of potassium releasing and fixing in soils (In Chinese) . Advance in Earth Sciences, 2002, 17 (5) : 679—684
- [11] Havlin J L, Westfall D G. Potassium release kinetics and plant response in calcareous soils. Soil Science Society of America Journal, 1985, 49 (2) : 366—370
- [12] Rahmatullah, Mengel K. Potassium release from mineral structures by H⁺ ion resin. Geoderma, 2000, 96 (4) : 291—305
- [13] 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. 植物营养与肥料学报, 2000, 6 (3) : 273—279. Xing S H, Zhou B Q. Study on the kinetics and rate of soil nonexchangeable K release by three various extraction (In Chinese) . Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2000, 6 (3) : 273—279
- [14] Mengel K, Uhlenbecker K. Determination of available interlayer potassium and its uptake by ryegrass. Soil Science Society of America Journal, 1993, 57 (3) : 761—766
- [15] 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. Lv X N, Lu Y F. Theoretical calculation of K release rates from soils and their application (In Chinese) . Acta Pedologica Sinica, 1998, 35 (2) : 155—161
- [16] 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 (1) : 39—48. Jin J Y, Gao G L, Wang Z L, et al. Kinetics of native potassium release and potassium supplying characteristics in selected soils (In Chinese) . Plant Nutrition and Fertilizer Science, 1994 (1) : 39—48
- [17] 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, 1999, 36 (2) : 218—224. Cheng M F, Jin J Y, Huang S W. Release rates of non-exchangeable potassium in selected soils from northern China (In Chinese) . Acta Pedologica Sinica, 1999, 36 (2) : 218—224
- [18] 杨振明, 周文佐, 鲍士旦, 等. 我国主要土壤供钾能力的综合评价. 土壤学报, 1999, 36 (3) : 377—386. Yang Z M, Zhou W Z, Bao S D, et al. Comprehensive evaluation on potassium supplying potential of main soils in China (In Chinese) . Acta Pedologica Sinica, 1999, 36 (3) : 377—386
- [19] Hosseinpur A R, Motaghian H R, Salehi M H. Potassium release kinetics and its correlation with pinto bean (*Phaseolus vulgaris*) plant indices. Plant Soil and Environment, 2012, 58 (7) : 328—333
- [20] 张洋洋, 鲁剑巍, 王笋, 等. 不同提取方法测定的土壤钾的有效性比较研究. 土壤学报, 2014, 51 (3) : 600—608. Zhang Y Y, Lu J W, Wang Z, et al. Comparison between soil potassium determination methods in availability of the potassium they extracted (In Chinese) . Acta Pedologica Sinica, 2014, 51 (3) : 600—608
- [21] Cox A E, Joern B C, Brouder S M, et al. Plant-available potassium assessment with a modified sodium

- tetraphenylboron method. *Soil Science Society of America Journal*, 1999, 63: 902—911
- [22] Wang H Y, Sun H X, Zhou J M, et al. Evaluation plant-available potassium in different soils using a modified sodium tetraphenylboron method. *Soil Science*, 2010, 175 (11): 544—551
- [23] 鲍士旦. 土壤农化分析. 第3版. 北京: 中国农业出版社, 2000. Bao S D. *Soil and agricultural chemistry analysis (In Chinese)*. 3rd ed. Beijing: China Agriculture Press, 2000
- [24] Sparks D L, Jardine P M. Comparison of kinetic-equations to describe potassium-calcium exchange in pure and in mixed systems. *Soil Science*, 1984, 138 (2): 115—122
- [25] Jalali M, Khanlari Z V. Kinetics of potassium release from calcareous soils under different land use. *Arid Land Research and Management*, 2014, 28 (1): 1—13
- [26] 江长胜, 杨剑虹, 魏朝富, 等. 低分子量有机酸对紫色母岩中钾释放的影响. *植物营养与肥料学报*, 2002, 8 (4): 441—446. Jiang C S, Yang J H, Wei C F, et al. Effect of low-molecular-weight organic acids on potassium release from purple rock (In Chinese). *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2002, 8 (4): 441—446
- [27] Meyer D, Jungk A. A new approach to quantify the utilization of non-exchangeable soil potassium by plants. *Plant and Soil*, 1993, 149: 235—243
- [28] Hosseinpour A R, Motaghian H R. Application of kinetic models in describing soil potassium release characteristics and their correlations with potassium extracted by chemical methods. *Pedosphere*, 2013, 23 (4): 482—492
- [29] Sarkar G K, Chattopadhyay A P, Sanyal S K. Release pattern of non-exchangeable potassium reserves in Alfisols, Inceptisols and Entisols of West Bengal, India. *Geoderma*, 2013, 207/208: 8—14
- [30] Allen E R, Hossner L R, Ming W, et al. Release rates of phosphorus, ammonium, and potassium in clinoptilolite-phosphate rock systems. *Soil Science Society of America Journal*, 1996, 60: 1467—1472
- [31] 黄绍文, 金继运, 王泽良, 等. 北方主要土壤钾形态及其植物有效性研究. *植物营养与肥料学报*, 1998, 4 (2): 156—164. Huang S W, Jin J Y, Wang Z L, et al. Native potassium form sand plant availability in selected soils from Northern China (In Chinese). *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 1998, 4 (2): 156—164
- [32] Cate R B, Nelson L A. A simple statistical procedure for partitioning soil test correlation data into two classes. *Soil Science Society of America Journal*, 1971, 35 (4): 658—660
- [33] Westfall D G, Whitne D A, Brandon D M. Plant analysis as an aid in fertilizing small grains//Westerman R L. *Soil testing and plant analysis*. 3rd ed. Madison, Wisconsin, USA: Soil Science Society of America, Inc., 1990: 495—519

RELEASE KINETICS AND BIOAVAILABILITY OF NONEXCHANGEABLE POTASSIUM IN SOIL

Li Ting^{1, 2, 3} Wang Huoyan^{1†} Chen Xiaoqin¹ Zhou Jianmin¹

(1 *State Key Laboratory of Soil and Sustainable Agriculture, Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China*)

(2 *College of Resources and Environment, Sichuan Agricultural University, Chengdu 611130, China*)

(3 *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*)

Abstract Release of non-exchangeable potassium (NEK) in soil is closely related to bioavailability of the potassium. The aim of this study was to characterize release and bioavailability of NEK in 8 soils, using pot K depletion experiments, 0.2 mol L⁻¹ sodium tetraphenylboron (NaTPB) extraction method and kinetic models. From each soil, 3 portions, 0.5 g each as replicate, were taken out for incubation in 3 ml of extracting solution (0.01 mol L⁻¹ EDTA and 0.2 mol L⁻¹ NaTPB) separately for a period varying from 0.5 to 96 h. Four kinetic models (First-order, Elovich, power function and parabolic diffusion) were used to describe

NEK release characteristics. Results show that NEK release rate in soil varied sharply with the agro-ecological region, being the highest in Northwest and Northeast China, and the lowest in Central and East China. NEK release in soil could be divided into two phases, fast and slow ones. The fast phase occurred at the beginning of the release, when NEK at the edges and wedge zones of clay mineral inter lattices broke up bondage of the minerals by diffusion, while the slow phase came late when NEK inside the inter lattices became the major source of K release. All the four models, the first-order ($R^2=0.817 \sim 0.926$, $SE=11.9 \sim 215.1$), Elovich equations ($R^2=0.952 \sim 0.997$, $SE=4.6 \sim 66.9$), power function ($R^2=0.869 \sim 0.990$, $SE=3.9 \sim 127.8$) and parabolic diffusion ($R^2=0.790 \sim 0.963$, $SE=7.5 \sim 211.4$), were good enough to describe NEK release kinetics. However, in choosing a proper one, it is essential not only to compare them in fitting degree, but also take into account their practicality and physical significance of the information they may provide. The Elovich equation failed to describe the early period of NEK release adequately, while the parabolic diffusion model yielded more than one NEK release rates. Thus, the NEK release rate described by the power function model might be a good indicator of NEK potential of soil. By such an indicator, the 8 soils were found to be declining in NPK release potential from west to east and from north to south of the country. Ryegrass were grown for 8 harvests in a pot experiment to evaluate K supplying capacity of the 8 soils. It was found that soil K supplying potential consisted with soil K release capacity, and that in soils high in K release amount and rate, the ryegrass without any K fertilizer applied was still quite high in relative and cumulative biomasses, cumulative K uptake and relative K content; and vice versa. The soil NEK release rates described with the four kinetic models was significantly related to K content and K uptake of the ryegrass without K fertilizer applied. In order to judge whether K supply of a soil was adequate or not, relationships between relative biomass and K content of the ryegrass without K fertilizer applied and between K content of the ryegrass and soil NEK release rate were determined. Based on the relationships, 90% of the relative biomass of the ryegrass without K fertilizer applied was set as threshold of the index of soil K nutrition, equaling to 34.0 g kg^{-1} in soil K content and $396 \text{ mg kg}^{-1} \text{ h}^{-1}$ in soil NEK release rate. It is, therefore, concluded that out of the 8 soils, only Aridosol in Xinjiang and Isohumosol in Shaanxi and Heilongjiang can ensure ryegrass a good yield without showing any potassium deficiency symptom in a short term without K fertilizer application.

Key words Nonexchangeable potassium (NEK); Potassium release characteristic; Kinetic model; Potassium supplying characteristic; Bioavailability

(责任编辑：卢 萍)

CONTENTS

Reviews and Comments

- The historical venation of soil science in the past 30 years—Based on the bibliometric analysis Song Changqing, Tan Wenfeng (968)
 Soil ecosystem services: Concept, quantification and response to urbanization Wu Shaohua, Yu Yanna, Zhu Jiang, et al. (977)

Research Articles

- Analysis on spatial-temporal variability of soil organic matter in Henan Province based on Soil Taxonomy Li Ling, Zhang Shaokai, Wu Kening, et al. (989)
 Relationship between illite crystallinity (IC) value and weathering degree of Quaternary Red Clay in southern Anhui Province, Southeast China Liu Lihong, Hu Xuefeng, Ye Wei, et al. (1000)
 Micromorphology of ancient plow layer of paleosol in the Lajia Ruins in the Guanting Basin, Minhe County, Qinghai Province Zhang Yuzhu, Huang Chunchang, Pang Jiangli, et al. (1013)
 Prediction of vertical distribution of soil nitrogen content in soil profile using spectral imaging technique Li Shuo, Wang Shanqin, Shi Zhou (1022)
 Estimation of thickness of soil layer on typical karst hillslopes using a ground penetrating radar Wang Sheng, Chen Hongsong, Fu Zhiyong, et al. (1030)
 Spatio-temporal distribution of dry-wet alteration in surface soil layer of the Huaihe River Basin Cao Yongqiang, Xu Dan, Cao Yang (1042)
 Erosion on dunes of overburden and waste slag in Shenfu coalfield and prediction Guo Mingming, Wang Wenlong, Li Jianming, et al. (1056)
 Dynamics of soil water evaporation from soil mulched with sand-gravels in stripe Zhao Dan, Li Yi, Feng Hao (1067)
 Effect of pH and three kinds of anions on selenium absorption and desorption in purple soil Zhou Xinbin, Yu Shuhui, Xie Deti (1076)
 Release kinetics and bioavailability of nonexchangeable potassium in soil Li Ting, Wang Huoyan, Chen Xiaoqin, et al. (1086)
 Effects of bio-ash ameliorating red soil in acidity Shi Renyong, Li Jiuyu, Xu Renkou, et al. (1095)
 Effect of wheat straw biochar on high chlorinated benzene sorption process and mechanism Li Yang, Song Yang, Wang Fang, et al. (1104)
 Sorption kinetics and mechanism of naphthalene on corn-stalk-derived biochar with different pyrolysis temperature Zhang Mo, Jia Mingyun, Bian Yongrong, et al. (1114)
 Toxicity of deca-brominated diphenyl ether to *Caenorhabditis elegans* Wang Yingli, Chen Jiansong, Yang Yuxiang, et al. (1122)
 Effects of clover and straw decomposition on soil microfaunal community Wang Hui, Gui Juan, Liu Manqiang, et al. (1133)
 Response of soil nematodes to soil salinization induced by seawater intrusion in coastal areas Wang Chengnan, Zhang Weidong, Wang Xuefeng, et al. (1142)
 Relationships of N₂O emission with abundance and composition of denitrifying microorganisms in soil aggregates Zhou Hanchang, Zhang Wenzhao, Liu Yi, et al. (1151)
 Optimizing blending ratio of controlled release N fertilizer for spring maize based on grain yield, N efficiency, and economic benefit Wang Yin, Feng Guozhong, Zhang Tianshan, et al. (1164)

Communications and Comments

- Status quo and problems in setting-up and naming of basic taxon-Soil family in Chinese Soil Taxonomy Yi Chen, Ma Yuxin, Yang Jinling, et al. (1172)

Research Notes

- Effects of drought and rehydration on photosynthetic characteristics of artificial algal crusts Wu Li, Yang Hong, Lan Shubin, et al. (1179)
 Effect of irrigation with saline water on plant root distribution and evolution of aeolian sandy soil in shelterbelts along desert highways Li Congjuan, Tang Junyan, Gao Pei, et al. (1186)
 Distribution of Cu (II) desorption rate in variable charge soils relative to concentrations of NaNO₃ and its affecting factors Zhang Zhengqin, Luo Wenjian, Chen Yong, et al. (1194)

Cover Picture: Toxicity of deca-brominated diphenyl ether (BDE-209) to *Caenorhabditis elegans* (by Wang Yingli)

《土壤学报》编辑委员会

主 编: 史学正

执行编委: (按姓氏笔画为序)

丁维新	巨晓棠	王敬国	王朝辉	史 舟	宇万太	朱永官
李永涛	李芳柏	李保国	李 航	吴金水	沈其荣	张玉龙
张甘霖	张福锁	陈德明	邵明安	杨劲松	杨明义	杨林章
林先贵	依艳丽	周东美	周健民	金继运	逢焕成	胡 锋
施卫明	骆永明	赵小敏	贾仲君	徐国华	徐明岗	徐建明
崔中利	常志州	黄巧云	章明奎	蒋 新	彭新华	雷 梅
窦 森	廖宗文	蔡祖聪	蔡崇法	潘根兴	魏朝富	

编辑部主任: 陈德明

责任编辑: 汪枳生 卢 萍 檀满枝

土 壤 学 报

Turang Xuebao

(双月刊, 1948年创刊)

第 52 卷 第 5 期 2015 年 9 月

ACTA PEDOLOGICA SINICA

(Bimonthly, Started in 1948)

Vol. 52 No. 5 Sep., 2015

编 辑 《土壤学报》编辑委员会
地址: 南京市北京东路 71 号 邮政编码: 210008
电话: 025 - 86881237
E-mail: actapedo@issas.ac.cn

Edited by Editorial Board of Acta Pedologica Sinica
Add: 71 East Beijing Road, Nanjing 210008, China
Tel: 025 - 86881237
E-mail: actapedo@issas.ac.cn

主 编 史 学 正
主 管 中 国 科 学 院
主 办 中 国 土 壤 学 会
承 办 中国科学院南京土壤研究所

Editor-in-Chief Shi Xuezheng
Superintended by Chinese Academy of Sciences
Sponsored by Soil Science Society of China
Undertaken by Institute of Soil Science,
Chinese Academy of Sciences

出 版 科 学 出 版 社
地址: 北京东黄城根北街 16 号 邮政编码: 100717

Published by Science Press
Add: 16 Donghuangchenggen North Street,
Beijing 100717, China

印刷装订 北京中科印刷有限公司
总发行 科 学 出 版 社
地址: 北京东黄城根北街 16 号 邮政编码: 100717
电话: 010 - 64017032
E-mail: journal@mail.sciencep.com

Printed by Beijing Zhongke Printing Limited Company
Distributed by Science Press
Add: 16 Donghuangchenggen North Street,
Beijing 100717, China
Tel: 010 - 64017032
E-mail: journal@mail.sciencep.com

国外发行 中国国际图书贸易总公司
地址: 北京 399 信箱 邮政编码: 100044

Foreign China International Book Trading Corporation
Add: P. O. Box 399, Beijing 100044, China

国内统一刊号: CN 32-1119/P

国内邮发代号: 2-560

国外发行代号: BM45

定价: 60.00 元

国 内 外 公 开 发 行



ISSN 0564-3929



9 770564 392156