

邛崃山岩—土—植系统重金属元素平衡动态分析

陈文德

(成都理工大学 旅游与城乡规划学院, 成都 610059)

摘要:通过对邛崃山境内的杉木、桢楠、落叶栎类等10余种树种及其立地环境调查,以及岩石、土壤、植物样品的采集,并在室内测试分析的基础上,探索岩—土—植系统中重金属元素之间的相互关系。结果表明:As元素岩石库风化对土壤地质潜在输入最高的是广柑林地,最低的是四川桉木林地,Hg元素最高的是杜仲林地,而最低的是桉木林地;Pb元素最高的是柳杉林地,最低的是桉木林地和柑桔林地;Al,Cd元素岩石库风化对潜在土壤地质输入最高的林地类型是柑桔林地和柚子林地。落叶栎类、杉木、桢楠林内枯枝落叶对As,Hg,Pb,Cd元素归还较大,柑桔、柚类归还偏低,Al元素归还能力较强的为杉木、茶树等,柑桔类和杜仲相对归还能力较小。从单个元素库存来看,茶树、落叶栎类、马尾松等对重金属元素的吸收较大,而柳杉、杉木吸收较小。As,Hg,Al,Cd元素的土壤库变化量均有所增加,表明植物的富集量低于地质背景岩石体的风化输入量,反映了该区土壤中污染物的浓度有增加趋势;而Pb元素则有增有减。

关键词:岩—土—植系统; 重金属; 平衡; 动态; 邛崃山

中图分类号:S154.4; X142

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2015)03-0320-05

Analysis on the Dynamic of Balance of Heavy Metal Elements in Rock-Soil-Plant System in Qionglai Mountain

CHEN Wende

(College of Tourism and Urban-Rural Planning, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China)

Abstract: The growing environments of more than ten tree species (*Cunninghamia lanceolata*, *Phoebe zhen-nan*, *Deciduous oak*) were investigated in Qionglai Mountain. According to the collection of the rock soil and plant samples, based on the lab test, the interactions of heavy metals in rock-soil-plant system were examined. The highest potential input of As element rock weathering on soil geological repository was observed in *Citrus Sinensis* plantation, the lowest was found in *Alnus Cremastogyne* plantation. The highest potential input of Hg element rock weathering on soil geological repository was observed in *Eucommia ulmoides* plantation, the lowest was found in *Alnus Cremastogyne* plantation. The highest potential input of Pb element rock weathering on soil geological repository was observed in *Cryptomeria fortune* plantation, the lowest was found in *Alnus Cremastogyne* and *Citrus reticulate* plantations. The highest potential inputs of Al, Cd element rock weathering on soil geological repository were observed in *Citrus reticulate* and *Citrus grandis* Plantations. The litter pool of *Cunninghamia lanceolata*, *Phoebe zhen-nan*, *Deciduous oak* has a great return of soil As, Hg, Pb, Cd, while the *Citrus reticulate* and *Citrus grandis* have a small return. The litter pools of *Cunninghamia lanceolata* and *Camellian sinensis* have a great return of soil Al, while *Citrus reticulate* and *Eucommia ulmoides* have a relatively smaller return. With respect to the single element inventory, heavy metal uptakes by *Camellian sinensis*, *Deciduous oak* and *Pinus massoniana* are larger, but heavy metal uptakes by *Cunninghamia lanceolata* and *Cryptomeria fortune* are smaller. The soil base change of As, Hg, Al and Cd elements increased, indicating that weathering input enrichment plant is lower than that of the geological background of rock body and reflects that the concentration of pollutants in the soil is increasing. The soil base change of Pb increase or decrease.

Keywords: rock-soil-plant system; heavy metal; balance; dynamic; Qionglai Mountain

地球表层系统是人类赖以生存的空间基础^[1]。工业化革命200年来,区域大面积的污染正在危害着生态系统的安全性:东欧森林大面积突然死亡、西欧农作物大面积减产、农作物中重金属元素含量严重超标、莱茵河流域地下水污染等,这些地区的污染利用现有技术和财力已无法使之清洁,影响社会经济的可持续发展^[2-4]。20世纪70年代,我国有关学者开始强调母岩—土壤—植物是一个不可分割的整体,强调注重岩—土—植的关联性问题,注重岩石体对植物的潜在性、资源性作用^[5-6]。目前对岩—土—植系统(Rock-Soil-Plant System)的研究尚处于探索阶段,多数著作从生物地球化学的角度,从土壤及地下水资源的角度开展区域农业生态地质调查评价和农业生态地质环境的利用、改造与调控等方面的研究;也有的开展名特优农林作物和中药材的道地性与环境背景关系的研究^[6-10]。对岩—土—植关联性、制约性的探究,以原成都理工大学李正积教授为代表的少数专家做了比较系统的研究和相应理论的升华^[5,9,11-12]。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

研究区位于成都平原西缘山地邛崃境内,东连新津和彭山,南与眉山、蒲江、毗邻,西同芦山、雅安接壤,北界大邑,地理位置为103°08′—103°46′E,30°12′—30°33′N。地质构造属于侏罗纪地层分布,成土母岩为砂岩、页岩,森林土壤可以分为三大类:冲积土、紫色土和山地黄壤。该区属亚热带湿润季风气候区,气候温和,冬无严寒、夏无酷热、四季分明。平均气温16.5℃,年平均日照1 107.9 h,年均降雨量1 117.3 mm,无霜期285 d。

1.2 供试材料与样地概况

根据研究区乡土关键植被类型,筛选出杉木林(*Cunninghamia lanceolata*)、柳杉林(*Cryptomeria fortunei*)、马尾松林(*Pinus massoniana*)、慈竹林(*Neosinocalamus affinis*)等成熟林分类型,其中包括重要的经济林类型:茶园(*Camellia sinensis*)、柑桔园(*Citrus reticulata*)、广柑园(*Citrus Sinensis*)等。其样地概况如下:柑橘,8 a生,郁闭度0.7,平均高度2.6 m,平均基径7.9 cm,土壤为页岩紫色土;广柑,6 a生,郁闭度0.6,平均高度3.9 m,平均基径10.94 cm,土壤为砂岩黄壤;杉木,13 a生,郁闭度0.9,平均高度10.1 m,平均基径9.7 cm,土壤为砂岩黄壤;马尾松,25 a生,郁闭度0.6,平均高度11.60 m,

平均基径14.8 cm,土壤为砂岩黄壤;茶园,10 a生,郁闭度0.7,平均高度1.5 m,平均基径2.3 cm,土壤为砂岩黄壤;杜仲(*Eucommia ulmoides*),4 a生,郁闭度0.7,平均高度6.25 m,平均基径4.9 cm,土壤为砂岩黄壤;柚园(*Citrus grandis*),6 a生,郁闭度0.8,平均高度2.32 m,平均基径9.36 cm,土壤为砂岩黄壤;慈竹,15 a生,郁闭度0.9,平均高度12.0 m,平均基径8.20 cm,土壤为坡积母质黄壤;桢南(*Phoebe zhennan*),23 a生,郁闭度0.85,平均高度11.75 m,平均基径20.04 cm,土壤为砂岩黄壤;桤木(*Alnus Cremastogyne*),8 a生,郁闭度0.8,平均高度11.75 m,平均基径16.0 cm,土壤为砂岩黄壤。

1.3 试验方法

1.3.1 样地调查 对生态林、用材林、小径级经济林,调查内容包括地貌(地理坐标、海拔、坡度、坡向、坡位、地形、地貌、小地名等)、林分结构(郁闭度、年龄、保存率、面积、优势种、胸径或基径、高、冠幅、长势等);而对道路、水堤边生长的行道树、护岸护堤树,采用样线调查法,样线长度100 m或200 m,实测树木的胸径、高、冠幅等;对于灌木和草本,在样方内,按照对角线取样法,均匀布设3~5个草本和灌木小样方,灌木样方面积为5 m×5 m,草本样方面积1 m×1 m,调查内容包括种类、茎高、盖度;并设3个1 m×1 m的小样方,收集枯落物,并调查枯落物厚度和盖度,共采集231个植物样品。

1.3.2 土壤样品采集 选择同一地质结构上具有代表性的各类型样地,避免边缘效应,按“S”形布点,挖取土壤剖面,每20 cm采集一个土样,深至60 cm,最终采用样地中分点分层的混合样品测试,供本试验的数据来源。挖掘土壤剖面,长1~2 m、宽0.8 m,深及母质母岩层,根据颜色、质地、结构等性质差异划分A、B、C、D四个层次,分别记载侵入体、新生体、土壤侵蚀、层次、厚度、石砾含量、湿度、母质母岩、紧密度、质地、结构、根系分布深度、颜色、pH值等。每个剖面分层次取土壤样品,每个样重500~1 000 g,用布袋装好编号,共120个样。

1.3.3 植物样品采集 分别测定不同树种生物量,其生物量数据采集方法采用收获法;枯枝落叶的生物量采用1 m×1 m的小样方收获法。对干、根、果(种子)、皮、叶、枝、枯枝落叶进行采样,每个树种每件样品鲜重500 g;灌木、草本和枯枝落叶分析样品取混合样,样品鲜重500 g。经济林取样对象为根、果、皮、叶,样品鲜重500~1 000 g。以上各做3个或3个以上重复。

1.3.4 样品处理与分析 野外采集的土壤样品通过风干、研磨、筛分,植物样品通过及时杀青处理,然后送成都综合岩矿测试分析中心测试分析。完成植物样品测试 124 件,包括叶、枝、干、根、皮、枯枝落叶样,完成测试土壤样品 100 个,包括土壤 A(0—20 cm),B(20—40 cm),C(40—60 cm)层采集的样品和相应样点的成土母质岩石样品。土壤与植物样品中元素分析方法和检出限见表 1,样品测试严格按照《土壤环境监测技术规范》(HJ/T166—2004)有关规定执行。

表 1 土壤与植物样品元素分析方法

元素	方法名称	单位/ (mg · kg ⁻¹)	检出限/ (mg · kg ⁻¹)
As	原子荧光法	10 ⁻⁶	0.50
Cd	无焰原子吸收法	10 ⁻⁶	0.03
Hg	原子荧光法	10 ⁻⁶	0.003
Pb	发射光谱法	10 ⁻⁶	2.00
Al	X 荧光法	10 ⁻⁶	0.000005

1.3.5 计算方法

(1) 土壤库的地质输入量。岩石库是土壤元素来源的基础,土壤的形成主要通过岩石的物理、化学或生物风化等作用进行的,形成的土壤特性很大程度上受到岩石性质的影响,即土壤对岩石具有继承性。其输入量公式为:

$$W_r = C_r \times \rho \times H \times 10000 \quad (1)$$

式中: W_r ——岩石库重金属元素每 hm^2 的输入量(g/hm^2); C_r ——岩石中某种重金属元素的含量($\mu\text{g}/\text{g}$); ρ ——岩石密度,用 $4.586 \text{ g}/\text{cm}^3$ 计; 10000 ——面积换算系数; H ——岩石年风化厚度(cm)。其中,紫色泥岩风化厚度公式为:

$$H = 3.1732e^{-0.1404t} \quad (2)$$

式中: H ——岩层年风化厚度(cm); t ——岩石自然风化的年数。通过测算岩石风化输入率分析土壤中重金属的来源及年输入通量、输出率等。

(2) 枯枝落叶归还量。在生物地球化学循环中,枯枝落叶是元素回归土壤圈的重要形式,假定枯落物完全分解,其归还量公式为:

$$W_l = C_l \times W_{bl} \quad (3)$$

式中: W_l ——枯枝落叶某重金属元素归还量(g/hm^2), C_l ——枯枝落叶中某种重金属元素含量($\mu\text{g}/\text{g}$), W_{bl} ——每年每 hm^2 枯枝落叶的生物量(g/hm^2)。

(3) 植物库元素储量。植物生长依靠从土壤中获取许多大量元素和微量元素,其累积量公式为:

$$W_p = C_p \times W_{PB} \quad (4)$$

式中: W_p ——植物体重金属元素累积量(g/hm^2), C_p ——植物中某种重金属元素的含量($\mu\text{g}/\text{g}$), W_{PB} ——每 hm^2 林木的生物量(g/hm^2)。

(4) 土壤库的元素变化量。根据岩石—土壤—植物系统中的物流关系,在假定各元素含量不变的前提下,构建林木对林地土壤修复效应预测模型如下:

$$\Delta W = W_r + W_s + W_l \quad (5)$$

式中, ΔW —— t 年份林地土壤重金属元素累积变化量(g/hm^2)。

经已有资料查询和概算,枯枝落叶中各元素的归还量占土壤库储量的比例很小,不属于同一数量级,相差多个数量级,故计算过程中 W_l 可忽略不计,则上式变为:

$$\Delta W = W_r + W_s \quad (6)$$

2 结果与分析

根据前苏联地球化学奠基人 B. И. 维尔纳德斯基提出的生物地球化学循环基本原理,在不同地质背景条件下,以某个森林植被生态系统为对象,不考虑外界作用力影响,则其内部的生物地球化学过程可视为:母岩通过风化,将地化元素释放到土壤中,而土壤中的元素通过植物吸收并一定量的富集在体内,再通过枯枝落叶将一部分元素归还给土壤,从而形成岩石—土壤—植物循环系统。通过研究,不同的岩石类型所蕴涵的地球化学元素不同,其对土壤元素含量的潜在供应能力也不尽相同(表 2)。紫色页岩对土壤 Hg 元素含量的潜在供应能力比砂岩强,砂岩对 As, Pb, Al, Cd 元素的风化输入量较页岩高。不同林地对岩石的生物作用各异,其元素贡献量呈现出不同水平。本次研究中 As 元素岩石库风化对土壤地质潜在输入最高的是广柑林地,其次是杉木、桢楠、落叶栎类、茶树、马尾松等林地,最低的是四川桉木林地,仅有 $16.8 \text{ g}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$;Hg 元素岩石库风化对土壤地质潜在输入最高的是杜仲林地,而最低的是桉木;Pb 元素岩石库风化对土壤地质潜在输入最高的是柳杉林地,其次是广柑林地、杜仲等,最低的是四川桉木林地和柑桔林地;Al, Cd 元素岩石库风化对潜在土壤地质输入最高的林地类型是柑桔林地和柚子林地。

由表 3 可知,枯枝落叶库年平均归还给土壤库的元素量总趋势是落叶树种归还高于常绿树种,但是桢楠、马尾松林地的群落结构复杂,物种丰富,枯枝落叶多,分解快,因此归还量也比较大。落叶栎类、杉木、桢楠林内枯枝落叶 As 元素归还较大,柑桔、柚类归

还偏低;Hg 元素的归还突出的类型与 As 元素归还一样是桢楠、杉木和落叶栎类;Pb 元素归还量由大到小顺序为桢楠、落叶栎类、杉木、马尾松、茶树等;Al 元素被植物吸收利用后的归还量表现为:杉木、茶树、桢楠、马尾松等归还量多,柑桔类和杜仲相对归还能力小;Cd 元素通过枯枝落叶归还的移动性与 As 元素具有一致性($p<0.05$)。

植物库是地球化学元素储存量比较大的库,植物库存元素的多少与植物体单位质量所含元素的多少和植物的生长量有密切的关系。由表 4 可以对 As, Cd 库存大的植物有茶树、落叶栎类、马尾松,库存量少的是柳杉、杉木;对 Hg 元素吸收量大的植物是茶树、落叶栎类、马尾松,而吸收少的树种为四川桫木、柳杉、杉木和柚;Pb 元素吸收量由大到小序列为茶树、落叶栎类、广柑、马尾松、杜仲、柚、柑桔、慈竹、四川桫木、柳杉、杉木;对 Al 元素库存丰富的物种主要为茶树、马尾松、广柑,库存中等水平的有四川桫木、

慈竹、杜仲、柑桔、柚;库存比较低的物种有杉木、桢楠、柳杉等树种。

表 2 各森林植被类型立地岩石库风化对土壤库的地质背景

		潜在输入量					g/(hm ² ·a)
立地类型	岩石类型	W _{rAs}	W _{rHg}	W _{rPb}	W _{rAl}	W _{rCd}	
落叶栎类	紫色页岩	263.4	1.02	3.0	2559000	435	
茶树	紫色页岩	263.4	1.02	3.0	2559000	435	
马尾松	紫色页岩	263.4	1.02	3.0	2559000	435	
桫木	紫色页岩	16.8	0.12	2.7	3825000	354	
慈竹	紫色页岩	263.4	1.02	3.0	2559000	435	
杜仲	砂岩	128.4	1.23	3.9	3912000	513	
柑桔	紫色页岩	165.9	0.39	2.4	5181000	1014	
广柑	砂岩	939.0	0.63	4.5	4935000	1038	
柳杉	砂岩	195.6	0.63	7.5	3231000	657	
柚子	紫色页岩	165.9	0.39	2.4	5181000	1014	
杉木	紫色页岩	263.4	1.02	3.0	2559000	435	
桢楠	紫色页岩	263.4	1.02	3.0	2559000	435	

表 3 各森林植被类型枯枝落叶库年平均归还量

物种类型	W _{lAs}	W _{lHg}	W _{lPb}	W _{lAl}	W _{lCd}
落叶栎类	0.011313	0.001091	306.7946	18947.2	0.005499
茶树	0.006511	0.000395	102.2612	46180.59	0.001993
马尾松	0.007766	0.000733	120.0627	35892.12	0.004177
桫木	0.007576	5.37E-05	34.62227	24276.97	0.001025
慈竹	0.007584	0.000441	52.09765	16427.65	0.001750
杜仲	0.002462	0.000249	54.94458	6750.598	0.000627
柑桔	0.001292	0.000154	12.71000	5047.159	0.000305
广柑	0.002049	0.000139	36.74848	6833.928	0.000368
柳杉	0.003497	0.000257	33.78900	14343.000	0.001242
柚子	0.001650	1.52E-05	6.180007	3730.109	0.000317
杉木	0.01449	0.000985	130.6803	50481.57	0.003382
桢楠	0.020122	0.00208	335.4390	38539.80	0.014853

表 4 各森林植被类型植物库地化元素储存量

物种类型	W _{pAs}	W _{pHg}	W _{pPb}	W _{pAl}	W _{pCd}
落叶栎类	1.19737E-02	1.04466E-03	318.75	17427.11	6.46709E-03
茶树	1.10068E-01	5.27083E-03	1997.72	766408.45	4.79842E-02
马尾松	2.20486E-02	1.22228E-03	167.86	37490.41	2.21254E-02
桫木	5.67024E-03	5.60966E-05	18.72	20013.40	1.37272E-03
慈竹	4.43652E-03	1.59227E-04	32.82	16966.59	1.78857E-03
杜仲	5.22315E-03	2.59741E-04	139.72	12633.32	2.33705E-03
柑桔	3.04606E-03	1.90099E-04	37.01	14729.11	1.42800E-03
广柑	7.22303E-03	2.50069E-04	249.00	21528.92	2.70298E-03
柳杉	7.58353E-04	5.90372E-05	9.23	3032.03	3.23838E-04
柚子	7.12366E-03	9.86939E-05	43.61	14042.38	2.31499E-03
杉木	9.90399E-04	6.99896E-05	8.51	3208.44	2.42584E-04
桢楠	4.82473E-03	4.84592E-04	41.45	8371.34	3.73336E-03

污染物在岩石—土壤—植物系统中的物量平衡、输入与输出以及量的增减是研究元素迁移转化的核

心^[13]。如表 5 所示,在各林种立地中,As, Hg, Al, Cd 四元素的土壤库变化量均有所增加,表明植物的

富集量低于地质背景岩石体的风化输入量,反映了该区土壤中污染物的浓度有增加趋势;而 Pb 元素则有增有减,这与物种年龄、生长状况有关;其中柚、马尾松、落叶栎林、茶树、杜仲、柑桔和广柑等林种的土壤库变化量为负值,表明目前阶段这些树种对土壤环境的净化作用很强,其他树种的土壤库变化量为正值,表明它们对土壤环境虽然有净化作用,但其净化速率偏低于岩石风化速率。

表 5 重点调查区各森林植被类型立地土壤库污染元素变化量

立地类型	g/(hm ² ·a)				
	W _{sAs}	W _{sHg}	W _{sPb}	W _{sAl}	W _{sCd}
落叶栎类	263.399	1.020	-8.955	2560520	434.999
茶树	263.296	1.015	-189.246	1838772	434.954
马尾松	263.386	1.020	-44.802	2557402	434.982
桉木	16.802	0.120	18.600	3829264	354.000
慈竹	263.403	1.020	22.281	2558461	435.000
杜仲	128.397	1.230	-80.879	3906117	512.998
柑桔	165.898	0.390	-21.902	5171318	1013.999
广柑	938.995	0.630	-207.748	4920305	1037.998
柳杉	195.603	0.630	32.061	3242311	657.001
柚子	165.895	0.390	-35.032	5170688	1013.998
杉木	263.413	1.021	125.172	2606273	435.003
桢楠	263.415	1.022	296.986	2589168	435.011

3 结论与讨论

(1) 本次研究中 As 元素岩石库风化对土壤地质潜在输入最高的是广柑林地,其次是杉木、桢楠、落叶栎类、茶树、马尾松等林地,最低的是四川桉木林地;Hg 元素岩石库风化对土壤地质潜在输入最高的是杜仲林地,而最低的是桉木;Pb 元素岩石库风化对土壤地质潜在输入最高的是柳杉林地,其次是广柑林地、杜仲等,最低的是四川桉木林地和柑桔林地;Al、Cd 元素岩石库风化对潜在土壤地质输入最高的林地类型是柑桔林地和柚子林地。

(2) 枯枝落叶库年平均归还给土壤库的元素量,总的趋势是落叶树种归还高于常绿树种,但是桢楠、马尾松林地的群落结构复杂,物种丰富,枯枝落叶多,分解快,因此归还量也比较大。落叶栎类、杉木、桢楠林内枯枝落叶 As、Hg、Pb 元素归还较大,柑桔、柚类归还偏低;Al 元素被植物吸收利用后的归还能力较强的为杉木、茶树、桢楠、马尾松等,柑桔类和杜仲相对归还能力较小;Cd 元素通过枯枝落叶归还的移动性与 As 元素具有一致性($p<0.05$)。

(3) 从单个元素库存来看,茶树、落叶栎类、马尾松对 As、Cd 元素的吸收较大,而柳杉、杉木对 As、Cd 元素的吸收较小;对 Hg 元素吸收量较大的植物主要有茶树、落叶栎类、马尾松,而吸收较少的树种为四川桉木、柳杉、杉木和柚;对 Pb 元素吸收大的植物有茶树、落叶栎类、广柑,对其吸收较小的为四川桉木、柳杉、杉木;对 Al 元素吸收大的物种主要为茶树、马尾松、广柑,中等吸收的有四川桉木、慈竹、杜仲、柑桔、柚;吸收较低的物种有杉木、桢楠、柳杉等树种。

(4) 在各林种立地中,As、Hg、Al、Cd 四元素的土壤库变化量均有所增加,表明植物的富集量低于地质背景岩石体的风化输入量,反映了该区土壤中污染物的浓度有增加趋势;而 Pb 元素则有增有减,这可能与物种年龄、生长状况有关。

参考文献:

[1] 刘华霞,张媛. 土壤重金属污染及防治措施[J]. 城市建设理论研究,2011(26):801-810.

[2] 王畅,郭鹏然,陈杭亭,等. 土壤和沉积物中重金属生物可利用性的评估[J]. 岩矿测试,2009,28(2):108-112.

[3] 陈肖鹏,张朝晖. 黔西北两铜矿 4 种蕨类植物重金属元素分析[J]. 武汉植物学研究,2010,28(2):186-190.

[4] 符志友,杨元根,吴丰昌,等. 铅锌矿区地表环境中重金属元素的地空动态变化及生物有效性探讨[J]. 矿物岩石地球化学通报,2008,27(1):89-97.

[5] 汪振立,魏正贵,陶冶,等. 岩石—土壤—铁芒萁系统中稀土元素的分布、迁移和累积[J]. 地质通报,2002,21(12):881-889.

[6] 姜建军,侯春堂. 中国农业地学研究新进展[M]. 北京:中国大地出版社,2003.

[7] 曾群望. 云烟生产的土壤地质背景[M]. 昆明:云南科学技术出版,1993.

[8] 曾群望. 云南生物地质环境研究[M]. 昆明:云南科学技术出版社,2001.

[9] 李正积. 岩土植物大系统研究[M]. 北京:科学出版社,1996.

[10] 李正积. 涪陵榨菜优质的原因[M]. 成都:四川科学技术出版社,1989.

[11] 陈文德,彭培好,李贤伟,等. 岩—土—植系统中重金属元素的迁聚规律研究[J]. 土壤通报,2009,40(2):369-373.

[12] 汪振立,邓通德,王瑞敏,等. 岩石—土壤—脐橙系统中稀土元素迁聚特征[J]. 中国地质,2009,36(6):1382-1394.

[13] 孙铁珩. 土壤污染形成机理与修复技术[M]. 北京:科学出版社,2005.