

针叶林岩—土—植系统中毒害元素赋存规律研究

陈文德^{1,2}, 彭培好¹, 李贤伟², 王会秋¹

(1. 成都理工大学 旅游与城乡规划学院, 成都 610059; 2. 四川农业大学 林学院, 四川 雅安 625014)

摘要:以成都天台山及其周边区域马尾松、柳杉、杉木林为研究对象,通过野外调查、室内测试分析,开展了针叶林岩—土—植系统中毒害元素赋存规律研究,结果表明:3 种针叶林立地 As、Hg 元素岩石库风化对土壤地质潜在输入次序为杉木林地、马尾松林地、柳杉林地;5 种毒害元素中 As、Hg、Cd、Pb 4 种元素均表现出在土壤表层有累积态势;而 As 元素在马尾松、柳杉等植物体运移能力强;Hg 元素在杉木体内容易迁移;Al 元素在杉木、柳杉内部的运输能力高;Pb 元素在柳杉、马尾松中有较高的迁移能力;Cd 在马尾松内容易发生转移;3 种针叶树种对 Pb、Hg、Cd 的赋存能力高,而对 Al、As 两种元素的赋存能力较低。

关键词:毒害元素; 赋存规律; 岩—土—植系统; 针叶林

中图分类号:X53

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2012)02-0101-05

Study on Occurrence Regularity of Poisonous Elements in Rock—Soil—Plant System of Coniferous Forest

CHEN Wen-de^{1,2}, PENG Pei-hao¹, LI Xian-wei², WANG Hui-qi¹

(1. College of Tourism and Urban-Rural Planning, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China; 2. College of Forestry, Sichuan Agricultural University, Ya'an, Sichuan 625014, China)

Abstract: This paper studies the *Pinus massoniana*, *Cryptomeria fortunei*, and *Cunninghamia lanceolata* forests in and nearby Tiantai Mountain in Chengdu economic area. Through field survey and laboratory test, a study on occurrence regularity of poisonous elements in rock—soil—plant system of coniferous forest was carried out. The conclusions were drawn as follows: in the three kinds of coniferous forest sites, the potential input order of As, Hg from rock to soil by weathering is *Cunninghamia lanceolata*, *Pinus massoniana*, *Cryptomeria fortunei*; among five poisonous elements, four elements, As, Hg, Cd, Pb, have a accumulative trend in the soil surface; As has a strong migration ability in *Pinus massoniana* plants and *Cryptomeria fortunei* plants; Hg migrates easily in *Cunninghamia lanceolata* plants; Al migrates easily in *Cunninghamia lanceolata* plants and *Cryptomeria fortunei* plants; Pb migrates easily in *Cryptomeria fortunei* plants and *Pinus massoniana* plants; Cd migrates easily in *Pinus massoniana* plants; the three kinds of coniferous species have high ability on Pb, Hg, Cd occurrence, but low ability on Al, As occurrence. This paper has theoretical and practical significance on choosing plants with high poisonous elements remediation and enrichment ability, on finding out the geochemical background, on guiding agriculture and forestry production.

Key words: poisonous element; occurrence regularity; rock—soil—plant system; coniferous forest

进入 21 世纪以来,人类生活环境越来越受到区域环境的污染和破坏而带来的威胁,因此,环境问题是本世纪重点关注对象,各国学者纷纷集中精力开展相关领域的研究^[1]。通过大量资料查阅并整理归纳,许多学者研究表明:稳定生存环境的获得,必须深入了解岩—土—植大系统(The Rock—Soil—Plant

System,简称为 RSPS)中各个次级系统的物流、能流转换关系,把握大生态环境物质、能量运动和传递的客观规律,在全面掌握自然规律的实质和内涵基础上开展针对性环境治理,能获得理想效果。

随着工业化进程、城镇化建设和人口聚集带来的诸如面源污染、植被退化等由毒害元素引发的生态问

收稿日期:2010-12-10

修回日期:2011-02-28

资助项目:四川省科技厅应用基础项目(2008JY0122-1)和四川省教育厅自然科学青年项目(08ZB064)联合资助。

作者简介:陈文德(1975—),男,四川通江人,博士(后),副教授,主要研究方向:环境生态、生态工程。E-mail:cwdwlh@yahoo.com.cn

通信作者:彭培好(1963—),男,山东潍坊人,博士后,教授,主要研究方向:全球变化、生态环境。E-mail:peihaop@163.com

题日益突出,土壤污染、水质恶化直接作用于有机体,严重违背了生命的生存法则^[2-3]。毒害元素对岩—土—植生态系统的影响程度与作用强度、持续时间以及系统中最敏感成分或反应有关,每一生态系统类型对不同重金属元素所产生的反应不同,单种重金属元素也可能导致生态系统产生不同的反应,重金属元素在生态系统各组分成分中的分布、归宿以及它们对生态系统结构和功能的影响一直是国内外关注的热点^[4-5]。因此本文将岩石、土壤和植物结合起来研究,突破了传统将系统孤立的研究界线,诠释其作用机制和生态过程,对于植物毒害修复、高富集植物体的筛选以及根据地球化学背景指导农林业生产具有理论和实践意义,同时能够加快试验研究区的环境治理和建设“抗污染生态屏障”进程。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验区地处四川盆地西部(101°55′—105°43′E, 28°25′—33°03′N),包括成都市、德阳市、绵阳市、眉山市全部及乐山市、雅安市东部地区,即成都经济区。该区由东部丘陵、中部平原及西部山区组成,以平原及低山为主。总体的地貌景观是西高东低、北高南低。西部和北部为龙门山—茶坪山—天台山中山山地,海拔800~5400 m,本次试验研究调查样线、样地设置在天台山及其周边。调查区气候属偏湿性亚热带东南季风气候,特殊的地形、地貌、气候和土壤等条件导致区内动物和森林植物分布呈现出区域性与特殊性。年平均温度为16~18℃; >10℃的年平均积温为4700~5300℃。全年无霜期大于337 d,冬无严寒,最低月平均气温为5℃(1月),年平均日照950~1500 h,年降水量1000~1400 mm^[2]。

1.2 供试材料与样地概况

马尾松林(*Pinus massoniana*)、柳杉林(*Cryptomeria fortunei*)和杉木林(*Cunninghamia lanceolata*)是本次参试的主要树种类型,三种针叶树种均生长在由砂岩发育成的黄壤上。其主要参试的三种针叶树林地概况如下:马尾松林,25 a生,郁闭度0.6,平均树高11.6 m,平均胸径14.8 cm。乔木层主要为马尾松,灌木层以桉木、青杠(*Cyclobalanopsis*)、乌饭、异叶榕、铁仔和寒梅等为主,覆盖度0.4,高度0.3~1.5 m,草本层以铁芒箕、淡竹叶、乌蕨和茅等为主,覆盖度0.6,高度0.15~0.50 m。母岩为紫色页岩,土壤为黄壤。柳杉林,人工林,18 a生,郁闭度0.9,平均树高13.9 m,平均胸径14.8 cm。乔木层主要为柳杉,灌木层以野鸦椿、茶树、乌饭、异叶榕(*F.*

heteromorpha Hemsl)、老鼠刺、扒契和寒梅等为主,覆盖度0.10,高度0.05~1.5 m,草本层以鳞毛蕨、糯米草、铁线蕨和冷水花为主,覆盖度0.2,高度0.05~0.30 m。母岩为砂岩,土壤为黄壤。杉木林,13 a生,郁闭度0.9,平均树高10.1 m,平均胸径9.69 cm。乔木层主要为杉木,灌木层以桉木、悬钩子等为主,覆盖度0.2,高度0.2~0.5 m,草本层以鳞毛蕨、巴茅等为主,覆盖度0.08,高度0.10~0.30 m。母岩为紫色页岩,土壤为黄壤。在样地内调查植物、枯枝落叶、土壤和岩石母质,并在每个样地内采集整套岩石、土壤和植物样品,土壤样品为多点混合的组合样品^[2-3,6]。

1.3 试验方法

1.3.1 样地调查 在成都经济区天台山及其周边地区,针对马尾松、柳杉、杉木这三个不同的物种,设立典型调查样地,数量在30个以上,符合统计学规律。其中,乔木样地面积20 m×20 m(或10 m×10 m),灌木林(或灌丛)5 m×5 m,草丛2 m×2 m(或1 m×1 m);同一类型调查3个样地,样地内按对角线方向均匀布设3个灌木样方和3个草本样方。样地调查内容包括林分物种组成、郁闭度及乔木种的高度、密度和胸径,灌木和草本植物的分种盖度、高度和生物产量等,并详细填写相应的样地调查表。

1.3.2 岩石、土壤样品采集 在布设的典型样地内采集岩石、土壤样品,采样深度根据林木生物学特性确定,同一物种种类中的同一样地采集土壤样品0—20 cm,20—40 cm,40—80 cm三层;重1~1.5 kg,岩石样品重300 g,分别用聚乙烯塑料袋盛装,系紧袋口,以防止污染。

1.3.3 植物样品采集 采样植株应为健康、无病虫害样株,采集部位主要是作为考察的相应器官,采集当年生枝条与叶片各500 g,分装于布袋里,记录种名、部位采样点和日期;树皮应在树木胸径处采集,样品重100 g,用聚乙烯塑料袋包好;树干用生长锥法或年轮法采集,单样品重50~100 g,分装于布袋。最后详细填写植物样品采集登记表。

1.3.4 岩石、土壤样品处理与测试分析 岩石、土壤与植物样品中元素分析方法和检出限以国标执行(中国科学院南京土壤研究所,1978)^[7]。As——原子荧光法,检出限0.50;Cd——无焰原子吸收法,检出限0.003;Hg——原子荧光法,检出限0.003;Pb——发射光谱法,检出限2.00;Al——X荧光法,检出限0.05;其中,有毒、有害元素的单位为μg/g。

1.3.5 数据整理及分析 将样地野外调查以及室内测试分析资料回笼、分类、整理,并录入计算机,建立

了翔实的基础数据库。利用 SPSS 等数据处理软件对收集的数据进行汇总。

2 结果与分析

2.1 母岩风化潜在输出特征

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。本研究中 As、Hg 元素岩石库风化对土壤地质潜在输入次序为杉木、马尾松、柳杉;Al、Pb、Cd 元素岩石库风化对土壤地质潜在输入最高的是柳杉林地。表 1 表明不同林地对岩石的生物、环境作用各异,其元素输出的贡献量呈现出不同的水平。

2.2 土壤毒害元素背景比较分析

表层土壤毒害元素的富集状况能够反映人为干扰和自然风化所造成的危险。通过表 2 可以得知:马尾松林地表层土壤 Al_2O_3 、As 均低于成都经济区、中

国背景值,而 Cd、Hg、Pb 则均高出成都经济区和中国背景值,表征土体不同程度地受到污染。柳杉林地土壤 Al_2O_3 低于成都经济区、中国背景值,As 元素低于全国背景,而高于成都经济区背景,Cd、Hg、Pb 则均高出成都经济区和中国背景值。杉木林地表层土壤 Al_2O_3 、As 低于全国背景和成都经济区背景,Cd、Hg、Pb 高于中国背景值而低于成都经济区背景。由此可见,Al、As 两种毒害元素在成都经济区森林林地内含量适可,但是 Cd、Hg、Pb 元素则高出背景,应加强田间管理。

表 1 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 $g/(hm^2 \cdot a)$

立地类型	岩石类型	As	Hg	Pb	Al	Cd
马尾松	紫色页岩	263.4	1.02	3.0	2559000	435
柳杉	砂岩	195.6	0.63	7.5	3231000	657
杉木	紫色页岩	263.4	1.02	3.0	2559000	435

表 2 针叶林表层土壤元素平均值与全国平均水平的比较

元素	成都经济区		四川省		中国		调查区		
	含量范围	背景值	含量范围	背景值	含量范围	背景值	马尾松	柳杉	杉木
$Al_2O_3/\%$	0.44~25.82	13.85	3.16~19.16	14.86	0.005~27.3	15.974	12.63	10.65	13.71
$As/(\mu g \cdot g^{-1})$	0.764~1662	9.11	—	10.1	0.010~626	11.2	9.87	9.19	7.88
$Cd/(\mu g \cdot g^{-1})$	0.06~20.70	0.25	—	—	0.001~13.4	0.097	0.31	0.52	0.16
$Hg/(\mu g \cdot g^{-1})$	0.01~62.77	0.08	—	0.038	0.001~45.9	0.065	0.16	0.10	0.067
$Pb/(\mu g \cdot g^{-1})$	7.06~44800	30.32	—	—	0.68~1143	26	65.20	41.10	26.90

2.3 土壤毒害元素垂直分布规律

目前,针对 As 元素在土壤中垂直分布特征研究结论各不相同,有表层化富集,也有在土壤中层或底层富集的现象。笔者研究表明:马尾松、柳杉林地土壤中 As 元素随着土壤层厚度的增加而降低,即呈现出递减态势;杉木林(杉木)随着土壤厚度的增加而呈现出增加态势,即表现出递增趋势(图 1)。这与前人研究的结果是一致的。研究表明 As 元素有在表层或底层富集的特征规律。

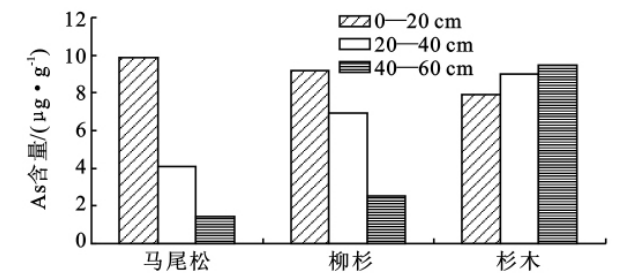


图 1 针叶林立地土壤 As 元素垂直分布

土壤中 Hg 元素以多种形态存在,在土壤各层位间的分布各异。通过图 2 看出,马尾松、柳杉林地土壤中 Hg 元素随着土壤层厚度的增加而降低,即呈现出递减态势;杉木林(杉木)随着土壤厚度的增加而呈现出增加态势,但土壤 20—40 cm 层含量略高于

40—60 cm 层,即在土壤中下层富集。

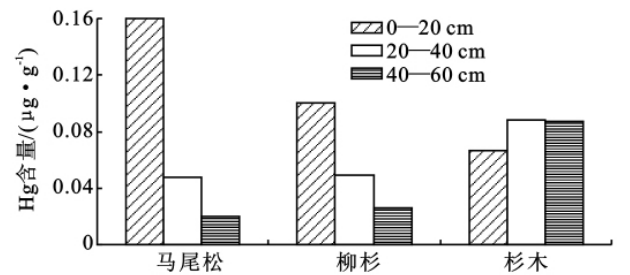


图 2 针叶林立地土壤 Hg 元素垂直分布

Cd 元素在土壤中属于累积性污染物,迁移活性强,许多学者研究认为 Cd 元素在表层容易累积。笔者研究认为无论是马尾松林、柳杉林,还是杉木林,土壤中 Cd 元素在表层富集,与大多学者研究结论相同,即 Cd 元素在表层富集(图 3)。Al 元素整体平均趋势表现出:0—20 cm 层<20—40 cm 层<40—60 cm 层,即表现为底层富集化现象(图 4),并且各层之间的数据差异不大,这可能与该元素的移动差,土壤的“脱硅富铝化”过程密切相关,其相关内容还有待深入研究。

在三种针叶林马尾松、柳杉、杉木立地土壤中,Pb 元素同 Cd 一样,在森林土壤中属于累积性污染物,即平均值分布规律为 0—20 cm 层>20—40 cm 层>40—60 cm 层(图 5),即 Pb 元素在土壤表层富集。

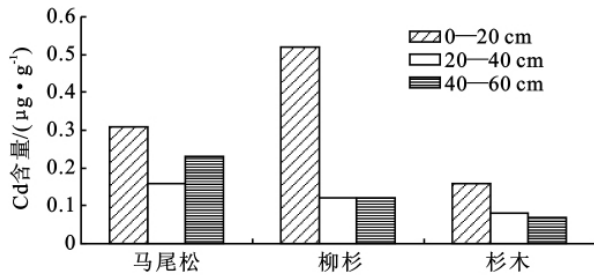


图 3 针叶林立地土壤 Cd 元素垂直分布

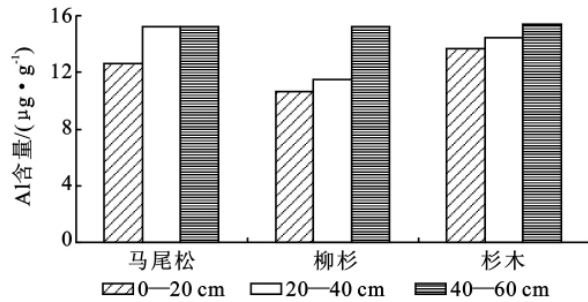


图 4 叶林立地土壤 Al 元素垂直分布

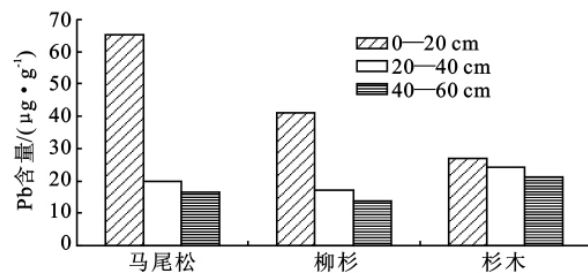


图 5 针叶林立地土壤 Pb 元素垂直分布

2.4 针叶树对毒害元素的吸收富集规律

用树种相同器官各毒害元素的富集量/土壤中相应的毒害量作为植物各器官的富集系数(CF_i)来判断对某一元素或者化合物的富集能力。用综合富集系数($CF = \sum CF_i$)来判断各树种不同器官富集毒害元素能力的大小。富集系数高表明植物修复功能强,富集系数低则表明物种的重金属修复功能低下。由表 3 表明:就针叶树不同器官来说,杉木富集系数表现为一年生枝>一年生根>一年生皮>多年生枝>多年生干;柳杉表现出:多年生皮>多年生枝>多年生根>一年生枝>一年生干;马尾松富集系数表现为:叶>枝条>皮>根>干。由此可见这些元素进入植物体内的再分配过程,与不同植物的生长特性有着密切联系,但在参试的物种中,植株干的富集系数小,均表现出低富集特性。就元素富集能力来看,柳杉林富集趋势为:Pb>Hg>Cd>Al>As;马尾松林的富集趋势为:Pb>Cd>Hg>Al>As;杉木林的富集趋势为:Pb>Cd>Hg>Al>As。综合上述可知,三种针叶树种对 Pb, Hg, Cd 的富集能力高,而对 Al, As 两种元素的富集能力较低。通过三种针叶树种的富集系数测算表明:针叶树种新生能力较强的器官叶、一年生枝条的富集功能强,干等老化器官相对富集能力比较弱,而毒害元素修复总体趋势为杉木>马尾松>柳杉。

表 3 三种针叶树种不同器官富集系数

物种	器官	CF_{As}	CF_{Hg}	CF_{Pb}	CF_{Al}	CF_{Cd}	$\sum CF_i$	备注
柳杉	多年生枝	0.0020	0.0226	0.3270	0.0021	0.0395	0.3932	污染区 山区
	多年生干	0.0016	0.0119	0.0183	0.0004	0.0216	0.0538	
	多年生根	0.0057	0.0204	0.0740	0.0145	0.0407	0.1552	
	多年生皮	0.0020	0.0717	0.2942	0.0021	0.0392	0.4092	
柳杉	一年生枝	0.0034	0.0555	0.0062	0.0008	0.0150	0.0809	清洁区 山区
	一年生干	0.0016	0.0050	0.0181	0.0181	0.0159	0.0587	
	一年生根	0.0064	0.0250	0.0486	0.0486	0.0169	0.1455	
	一年生皮	0.0030	0.0300	0.0288	0.0288	0.0136	0.1042	
杉木	一年生叶	0.0029	0.0177	0.0029	0.0029	0.0057	0.0320	黄壤 丘陵 清洁区
	多年生枝	0.0017	0.0155	0.0041	0.0012	0.0558	0.0783	
	多年生干	0.0012	0.0069	0.0041	0.0003	0.0508	0.0633	
	多年生根	0.0119	0.0320	0.2954	0.0413	0.1810	0.5615	
杉木	多年生皮	0.0027	0.0369	0.0041	0.0011	0.0623	0.1072	污染区 山区
	一年生枝	0.0045	0.0710	0.4119	0.0023	0.0851	0.5748	
	一年生干	0.0019	0.0043	0.0030	0.0003	0.0480	0.0575	
	一年生根	0.0069	0.0287	0.0278	0.0167	0.0630	0.1430	
马尾松	一年生皮	0.0030	0.0322	0.0257	0.0052	0.0814	0.1476	污染区 山区
	一年生叶	0.0084	0.0542	0.2548	0.0013	0.0900	0.4088	
	一年生枝	0.0023	0.0070	0.1571	0.0015	0.0870	0.2549	

注:清洁区、过渡区和污染区的界定以四川省成都经济区多目标区域地球化学调查资料为基础筛选的结果。

2.5 毒害元素在植物体内的位移规律

位移系数(Translocation Factor, TF)是表征某种毒害元素或化合物从植物根部转移到地上部分的能力高低,位移系数大说明植物由根部向地上部运输毒害元素或化合物的能力越强,位移系数大有利于植物对毒害元素的提取和修复作用^[5]。表 4 表明,As 在各种植物中的位移系数大小序列为:马尾松(0.310 3)、柳杉(0.292 2)、杉木(0.141 0);Hg 的大小序列为:杉木(0.521 2)、柳杉(0.381 7)、马尾松(0.197 8);对 Pb 而言,大小顺序为:柳杉(0.765 4)、马尾松(0.602 4)、杉木(0.124 2);Al 的位移系数排列大小是:杉木(0.158 2)、柳杉(0.148 5)、马尾松(0.025 5);Cd 的位移系数排列大小是:柳杉(0.948 8)、马尾松(0.808 3)、杉木(0.306 3)。由此可见,As 元素在马尾松、柳杉等植物体运移能力强;Hg 元素在杉木体内容易迁移;Al 元素在杉木、柳杉内部的运输能力高;Pb 元素在柳杉、马尾松中有高迁移能力;Cd 在马尾松内容易发生转移。从总体上看,柳杉对 5 种毒害元素的迁移运移能力强,可作为抗污染生态屏障建设中的净化树种。

表 4 主要树种的地化元素位移系数

树种类型	TF _{As}	TF _{Hg}	TF _{Pb}	TF _{Al}	TF _{Cd}
马尾松	0.3103	0.1978	0.6024	0.0255	0.8083
杉木	0.1410	0.5212	0.1242	0.1582	0.3063
柳杉	0.2922	0.3817	0.7654	0.1485	0.9488

3 结 论

(1)3 种针叶林立地 As, Hg 元素岩石库风化对土壤地质潜在输入次序是:杉木、马尾松、柳杉;Al, Pb, Cd 元素岩石库风化对土壤地质潜在输入最高的是柳杉林地。马尾松林地表层土壤 Al₂O₃, As 均低于成都经济区、中国背景值,而 Cd, Hg, Pb 则均高出成都经济区和中国背景值,表征土体不同程度地受到污染。柳杉林立地土壤 Al₂O₃ 低于成都经济区、中国背景值,As 元素低于全国背景,而高于成都经济区背景, Cd, Hg, Pb 则均高出成都经济区和中国背景值。杉木林地表层土壤 Al₂O₃, As 低于全国背景和成都经济区背景, Cd, Hg, Pb 高于中国背景值而低于成都经济区背景。

(2)在针叶林壤中 5 种毒害元素元素中除去 Al 外, As, Hg, Cd, Pb 这 4 种元素均表现出在土壤表层有累积态势,尤其是马尾松土壤中,变化差异大,距离均值水平远。柳杉林林富集趋势为: Pb>Hg>Cd>Al>As; 马尾松林的富集趋势为: Pb>Cd>Hg>Al>As; 杉木林的富集趋势为: Pb>Cd>Hg>Al>As。综合上述可知,三种针叶树种对 Pb, Hg, Cd 的富集能力高,而对 Al, As 两种元素的富集能力较低。通过三种针叶树种的富集系数测算表明,针叶树种新生能力较强的器官叶、一年生枝条的富集功能强,干等老化器官相对富集能力比较弱,而毒害元素修复总体趋势为杉木、马尾松、柳杉。

(3)As 在各种植物中的位移系数大小序列为: 马尾松、柳杉、杉木; Hg 的大小序列为: 杉木、柳杉、马尾松; 对 Pb 而言,大小顺序为: 柳杉、马尾松、杉木; Al 的位移系数排列大小是: 杉木、柳杉、马尾松; Cd 的位移系数排列大小是: 柳杉、马尾松、杉木。由此可见, As 元素在马尾松、柳杉等植物体运移能力强; Hg 元素在杉木体内容易迁移; Al 元素在杉木、柳杉内部的运输能力高; Pb 元素在柳杉、马尾松中有高迁移能力; Cd 在马尾松内容易发生转移。

参考文献:

[1] 李正积. 岩土植物大系统研究[M]. 北京: 科学出版社, 1996.

[2] 陈文德. 森林土壤中五种毒害元素(As、Hg、Cd、Pb、Al)的迁聚、植物修复及其评价[D]. 四川雅安: 四川农业大学, 2007.

[3] 陈文德, 李贤伟, 彭培好. 马尾松对土壤重金属的修复进程[J]. 林业科学, 2008, 44(5): 6-10.

[4] 王宏镔, 束文圣, 蓝崇钰. 重金属污染生态学研究现状与展望[J]. 生态学报, 2005, 25(3): 596-605.

[5] 周启星, 宋玉芳. 污染土壤修复原理与方法[M]. 北京: 科学出版社, 2004.

[6] 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.

[7] 中国科学院南京土壤研究所. 土壤理化分析[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1978.