

陈岩,朱先芳,季宏兵,等. 2014. 北京市得田沟和崎峰茶金矿周边土壤中重金属的粒径分布特征[J]. 环境科学学报, 34(1): 219-228

Chen Y, Zhu X F, Ji H B, et al. 2014. Particle size distribution of heavy metals in soils around the Gold Mine of Detiangou-Qifengcha, Beijing [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 34(1): 219-228

北京市得田沟和崎峰茶金矿周边土壤中重金属的粒径分布特征

陈岩¹, 朱先芳¹, 季宏兵^{1,2,3,*}, 乔敏敏¹

1. 首都师范大学 资源环境与旅游学院 首都圈生态环境过程实验室 北京 100048

2. 北京科技大学 土木与环境工程学院 北京 100083

3. 中国科学院地球化学研究所 环境地球化学国家重点实验室 贵阳 550002

收稿日期: 2013-03-21

修回日期: 2013-04-22

录用日期: 2013-04-22

摘要: 以北京市得田沟和崎峰茶金矿周边土壤为研究对象, 运用斯托克斯沉降法研究土壤颗粒组成及重金属在不同粒径中的分布特征. 结果表明, 土壤颗粒主要以 >0.15 mm 粒级为主, 含量达到 51.19% ~ 79.75%, 其次为 0.15 ~ 0.05 mm 粒级土壤, 含量为 14.67% ~ 38.99%, 粒级 0.05 ~ 0.01 mm 土壤含量为 0.18% ~ 7.6%, 粒级 <0.01 mm 的土壤含量仅占 1.71% ~ 5.95%. 除 Ti 和 V 外, 其它金属元素的含量具有明显的粒级效应, 随着土壤粒径的减小而增大, 但大多数金属元素不在最细粒级上达到最大值, 而是在 0.002 ~ 0.001 mm 粒级上最大. 金属元素在不同粒级上的累积效应与粒级上的含量相一致, 金属元素在较细粒级上的累积作用明显强于粗粒级. 细粒级土壤含有较高的金属含量, 对人类健康危害极大, 应积极采取有效措施防止极细粒级土壤进入空气和水源.

关键词: 土壤; 重金属; 粒径分布; 累积系数

文章编号: 0253-2468(2014)01-219-10

中图分类号: X53

文献标识码: A

Particle size distribution of heavy metals in soils around the Gold Mine of Detiangou-Qifengcha, Beijing

CHEN Yan¹, ZHU Xianfang¹, JI Hongbing^{1,2,3,*}, QIAO Minmin¹

1. Laboratory of Metropolitan Eco-Environmental Processes, College of Resource Environment and Tourism, Capital Normal University, Beijing 100048

2. Civil & Environmental Engineering School, University of Sciences & Technology Beijing, Beijing 100083

3. State Key Laboratory of Environmental Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550002

Received 21 March 2013;

received in revised form 22 April 2013;

accepted 22 April 2013

Abstract: The particulate composition of soils by Stokes sedimentation method and the concentrations of heavy metals in these soils were investigated around the gold mine of Detiangou-Qifengcha in Beijing. The result showed that soil particles were mainly with size fractions >0.15 mm and 0.05 ~ 0.15 mm, and the content of <0.01 mm was very low. The content of metals (except of Ti and V) increased as the particle size decreased, however, the maximum content of most metals in particle size was at 0.002 ~ 0.001 mm, instead of <0.001 mm. The accumulative effect of metals in different particle sizes was similar as the content of metals, and the accumulation of metals in finer fractions was stronger than the coarser sizes. As finer particles are more detrimental to human health, effective measures should be adopted to prevent finer soils from entering the air and water.

Keywords: soil; heavy metals; particle size distribution; accumulation factor

1 引言 (Introduction)

土壤是由不同粒径颗粒组成的混合物, 粒径和粒级分布是土壤的一个基本性质参数. 研究发现, 土壤颗粒大小会影响重金属元素的含量、分布及迁

移转化规律(邵明安等, 2006). 土壤颗粒与重金属污染物相结合, 经过雨水的冲刷进入河流或地下水中, 可能引起水体的重金属污染(汤志云等, 2009). 同时, 重金属与土壤微细颗粒以不同方式结合还会给环境和人体健康带来潜在风险. 研究表明, 土壤

基金项目: 国家自然科学基金项目(No. 41173113)

Supported by the National Natural Science Foundation of China(No. 41173113)

作者简介: 陈岩(1986—), 女, E-mail: zuiaichiyu0914@163.com; * 通讯作者(责任作者), E-mail: jih_0000@126.com

Biography: CHEN Yan(1986—), female, E-mail: zuiaichiyu0914@163.com; * Corresponding author, E-mail: jih_0000@126.com

中的细微颗粒通过风力作用悬浮于大气中,通过人体呼吸道进入体内,并经消化系统进入各种器官,进而诱发各种疾病(Banerjee, 2003; Ljung *et al.*, 2006; Yamamoto *et al.*, 2006). 土壤粒度分析是对土壤各粒径含量的定量分析,是评价土壤质量的重要依据(徐馨等, 1992). 目前,获得不同土壤颗粒的方法主要有比重计法、筛分法、显微镜法、沉降法、马尔文激光粒度分析法等(侯雨乐等, 2010). 而研究土壤不同粒径中的重金属含量和累积系数,有助于认识重金属元素在土壤中的迁移转化特征和污染水平.

随着我国黄金提炼技术的高速发展,金矿的开采数量和规模日益增大,随之而来的尾矿量也越来越多. 但我国目前仍以粗放型开发方式为主,造成金矿及有用金属的大量流失,同时给环境带来了极大的危害. 尾矿砂不仅容易使土壤沙化,且尾矿砂中的各种重金属还会对土壤造成污染(廖海军, 2007). 研究表明,金矿关闭后的几十年甚至几百年,采矿废石和尾矿等固体废弃物的堆放和淋溶对环境生态系统的影响依然存在(Hochella *et al.*, 1990; 张汉波等, 2003). 因此,对金矿周边土壤重金属的污染状况进行深入研究显得尤为重要,特别是对重金属在不同粒径土壤中的含量分布研究. 目前,国内外学者对城市土壤和灰尘不同颗粒中重金属分布特征的研究较多(李士杏等, 2011; 刘春华等, 2007; Al-Rajhi *et al.*, 1996; Ajmone-Marsan *et al.*, 2008; Deletic *et al.*, 2005), 但运用斯托克斯沉降法对矿区及周边土壤进行极细粒度分级颗粒重金属含量分析的研究较少.

因此,本文以北京市地表水水源地密云水库上游的得田沟-崎峰茶金矿周边土壤为研究对象,在对总量分布特征、生物有效性、风险评价等方面进行研究的基础上,运用筛分法和斯托克斯沉降法(淘洗法)相结合的方法对土壤粒度分级,揭示不同粒级土壤重金属元素分布状况,研究重金属元素在不同粒级下的富集和污染情况,以期为我国矿区土壤中重金属的污染修复和治理提供科学依据.

2 材料与方法(Materials and methods)

2.1 研究区概况

得田沟-崎峰茶金矿(现已关闭)位于密云水库主要支流白河上游,该矿床是华北地块北缘巨型EW向金矿带的组成部分,金矿以含金石英脉型为

主,次为蚀变岩型(王平安等, 1998). 矿区主要以露天和井工联合开采为主,矿区大部分矿石被运到外地进行选矿和冶炼,但金矿区内由于矿山开采在地表堆放了大量的矿石和废渣等固体废弃物,在风化淋溶等作用下会引起土壤重金属污染.

2.2 样品采集与分析测定

于2011年7月采集了北京市得田沟-崎峰茶金矿及尾矿石周边土壤,共计23个表层土壤样品(Z1~Z23),采样深度为0~20 cm,所有采样点用GPS定位,具体采样点如图1所示. 采集后的土壤样品于55℃下干燥直至恒重,将样品保存备用.

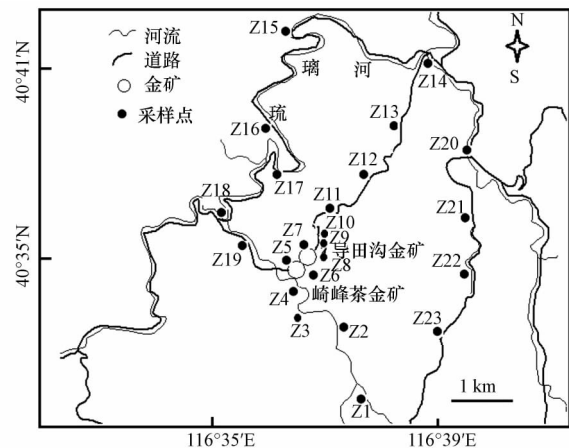


图1 得田沟和崎峰茶金矿周围表层土壤采样点位

Fig. 1 Map of sampling sites around Detiangou-Qifengcha

全土壤和各粒组中重金属含量根据国家地质实验测试中心标准《Q/GD001—2002 岩石、土壤、水系沉积物中微量元素密闭溶样-电感耦合等离子体发射光谱法(ICP-OES)》测定,用ICP-OES(Varian 720ES, USA)测定Cu、Zn、Cr、Mn、Ni、Ti、V、Pb和Cd含量. 取一定量风干土壤,用1.6%盐酸除去无机碳,然后经烘箱60℃烘干后,用带有固体模块的Liqui TOC仪(Elementar, Germany)测定土壤总有机碳含量(Tang *et al.*, 2007). 称取5 g土壤样品,加入25 mL KCl(1 mol·L⁻¹)溶液形成悬浊液,静置30 min,用pH计测定pH值(International Standard Organization 2005; Wen *et al.*, 2007).

2.3 斯托克斯沉降法实验方案

本文根据前苏联卡庆斯基土粒分级法(秦耀东等, 2002)进行分级,对于>0.15 mm的颗粒采用筛分法,即用100目筛子筛分;对于<0.15 mm的土壤颗粒部分采用淘析法进行分级,按照土壤颗粒大小分为>0.15 mm、0.15~0.05 mm、0.05~0.01 mm、

0.01~0.005 mm、0.005~0.002 mm、0.002~0.001 mm、<0.001 mm 7 个粒组。粒径 <0.001 mm 属于粘粒, 0.001~0.05 mm 属于粉粒, 0.05~3 mm 属于砂粒。淘析法实验装置如图 2 所示, 具体操作为: 称 50~100 g 待淘析的干试样(矿浆亦可)放入一小烧杯内, 加水润湿, 将气泡赶走; 然后倒进 1 个 2~5 L 的透明、带毫米刻度的器皿内, 加水至标明的刻度 h 处, 并用带橡皮头的玻璃棒强烈搅拌, 使试料悬浮, 待矿液面基本平静后即开始按秒表计时。经过时间 t (由淘析出的粒级大小决定) 后打开虹吸管夹子, 将高为 h 的矿浆全部吸出至溢流收集器中。

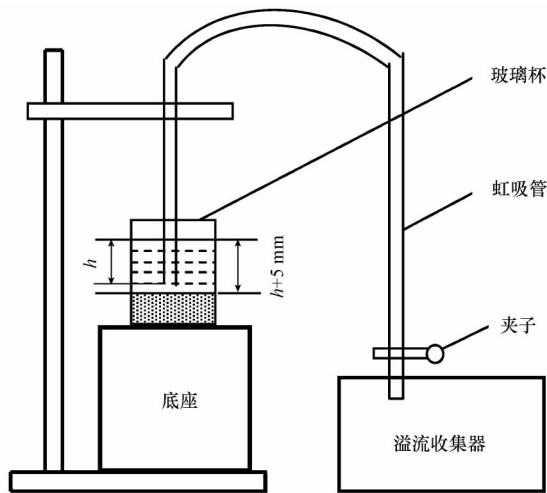


图 2 淘析法实验装置

Fig. 2 Experimental apparatus of elutriation

淘析法是利用在固定沉降高度条件下, 逐步缩短沉降时间, 由细至粗, 逐步将较细颗粒自试料中淘洗出来的原理, 从而达到对土壤进行粒度分级测定的目的(左可胜等 2009)。其中, 粒度 D 的一般计算公式为:

$$D = \sqrt{h/545(\rho_s - 1000)t} \quad (1)$$

式中 h 为沉降距离(m), ρ_s 为土壤密度($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$), t 为沉降距离为 h 时的沉降时间(s)。本研究设置沉降距离 h 为 0.17 m, 土壤密度 ρ_s 为 $2.65 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ 。根据公式(1)可计算出不同粒级对应的沉降时间: <0.001 mm 约为 52.5 h, 0.002~0.001 mm 约为 13 h, 0.005~0.002 mm 约为 2 h, 0.01~0.005 mm 约为 30 min, 0.05~0.01 mm 约为 2 min。

3 结果(Results)

3.1 金矿周边土壤粒径分布特征

根据斯托克斯沉降法获得的土壤粒级结果如

图 3 所示。由图可知, 研究区内土壤样品质地普遍较粗, 土壤粒径质量分布总体趋势相同。粒径 >0.15 mm 土壤所占比重最大, 含量达到 51.19%~79.75%; 其次为 0.15~0.05 mm 土壤, 含量为 14.67%~38.99%; 0.05~0.01 mm 粒径土壤含量为 0.18%~7.6%, 粒径 <0.01 mm 的土壤含量仅占 1.71%~5.95%。在堆放过尾矿石处(Z8、Z9、Z10), 粒径 <0.001 mm、0.002~0.001 mm 和 0.005~0.002 mm 土壤的含量明显高于其它区域, 这可能与此处有尾矿石的人为粉碎有关。金矿周边土壤总体为粒级越细含量越低, 这是由于该研究区位于北京怀柔的北部山区, 地势较高, 土壤质地普遍较粗, 主要为粉砂土、粉砂壤土、砂壤土、壤砂土、砂土(曾宪勤等 2008)。

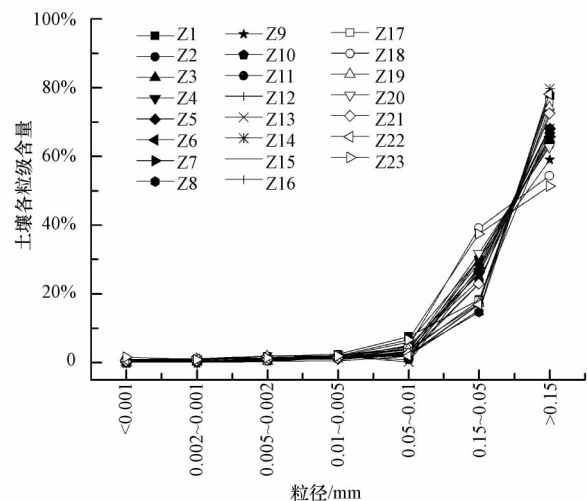


图 3 土壤各粒径分布

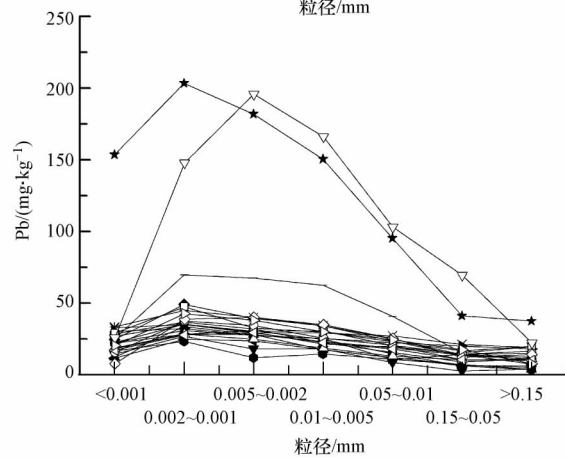
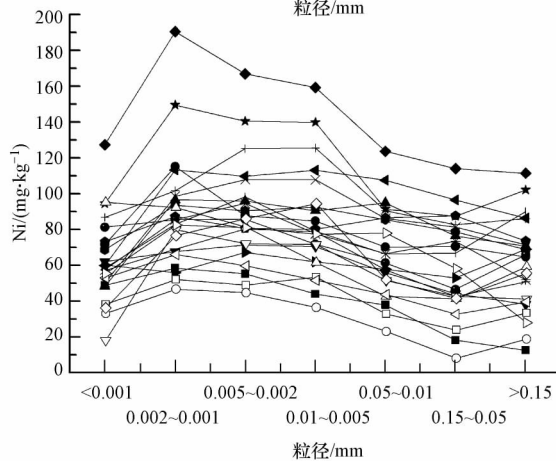
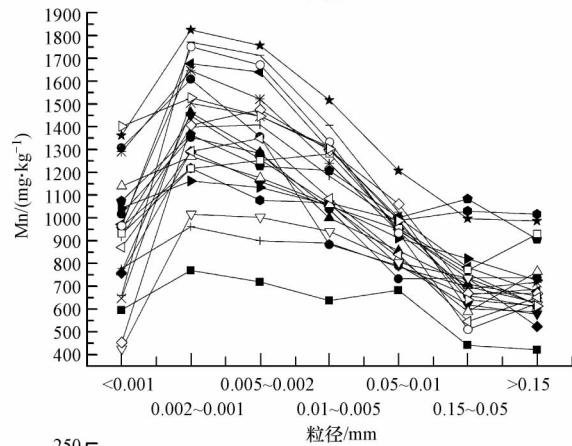
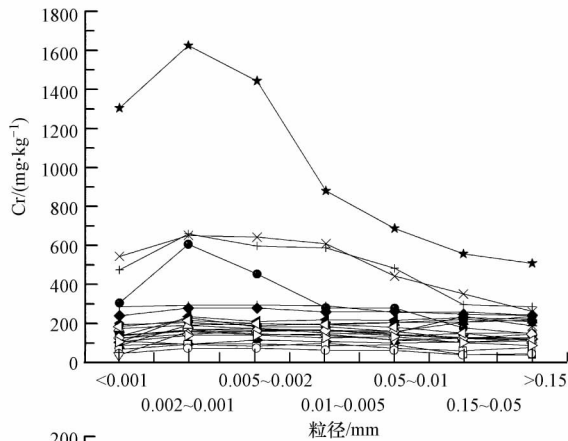
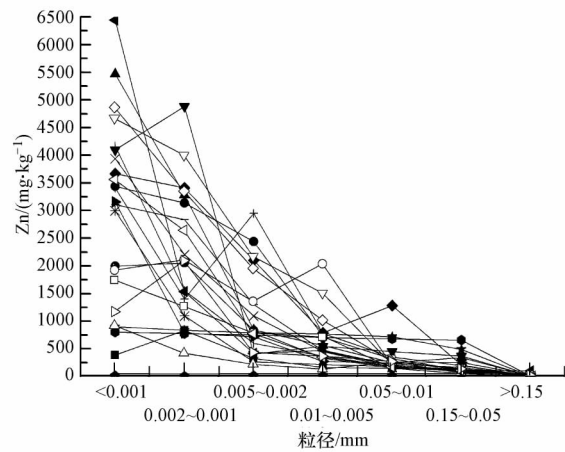
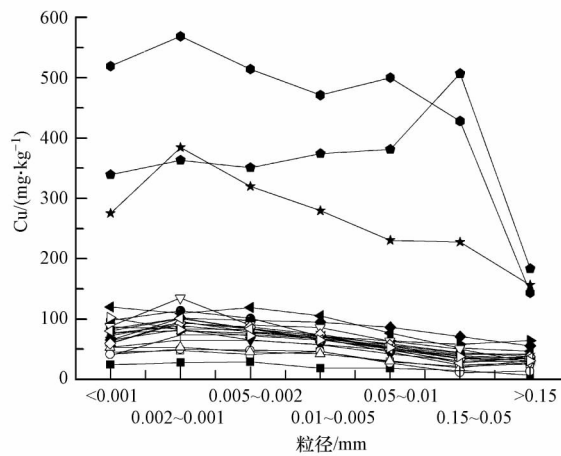
Fig. 3 Distribution of heavy metals in different particle size fractions

3.2 金属元素在不同土壤粒径中的分布

从图 4 和表 1 可以看出, 不同粒级土壤中金属元素的含量差异较大, 金属元素平均含量总体上随着土壤粒级的减小而呈增大的趋势(Ti 和 V 具有相反的趋势), 其中, Cu、Cr、Mn、Ni、Pb 平均含量的最大值均在 0.002~0.001 mm 粒级土壤上, 分别为 130.30、302.92、1386.51、89.03 和 $48.01 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 且该粒级土壤上 Cu 和 Cr 的平均含量分别为北京土壤背景值的 6.97 倍和 10.16 倍。而 Zn 和 Cd 平均含量的最大值出现在 <0.001 mm 粒级土壤上, 分别为 $2938.39 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $1.03 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 是北京土壤背景值的 51.1 倍和 8.55 倍。Ti 平均含量的最大值则出现在 0.01~0.005 mm 粒级土壤上, 为 $5024.67 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 在极细粒级土壤上的平均含量相对低于

较高粒级土壤. Ti 和 V 的含量最小值则都在 <0.001 mm 粒级土壤上, 分别为 $2912.64 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $115.99 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$. Cr、Ni、V 的平均含量在各粒级土壤上无显著变化. Zn 在各个粒级土壤上的平均含量则有明显的差异. Cu 和 Mn 在 <0.001 mm 粒级土壤上的平均含量分别是 >0.15 mm 粒级土壤上的 2.55 倍和 2.00 倍, 其它相邻粒级土壤上的含量没有显著性变化. Cd 在 <0.001 mm 粒级土壤上的平均含量明显大于其它粒级上的平均含量, 而 Ti 在

<0.001 mm 粒级土壤上的平均含量明显小于其它粒级上的平均含量, 但这两种元素在其它粒级土壤上的平均含量无明显差异. Pb 在 $0.15 \sim 0.05$ mm 和 >0.15 mm 粒级土壤上的平均含量相似, 且明显低于其他粒级土壤上的平均含量. 总体上看, 大部分金属元素在较小粒级土壤上含量高于较大粒级土壤, 这与其它研究中重金属在土壤粒级上的分布相似(Ljung *et al.*, 2006; 张慧敏等, 2007; 陈景辉等, 2011; 康丹等, 2010).



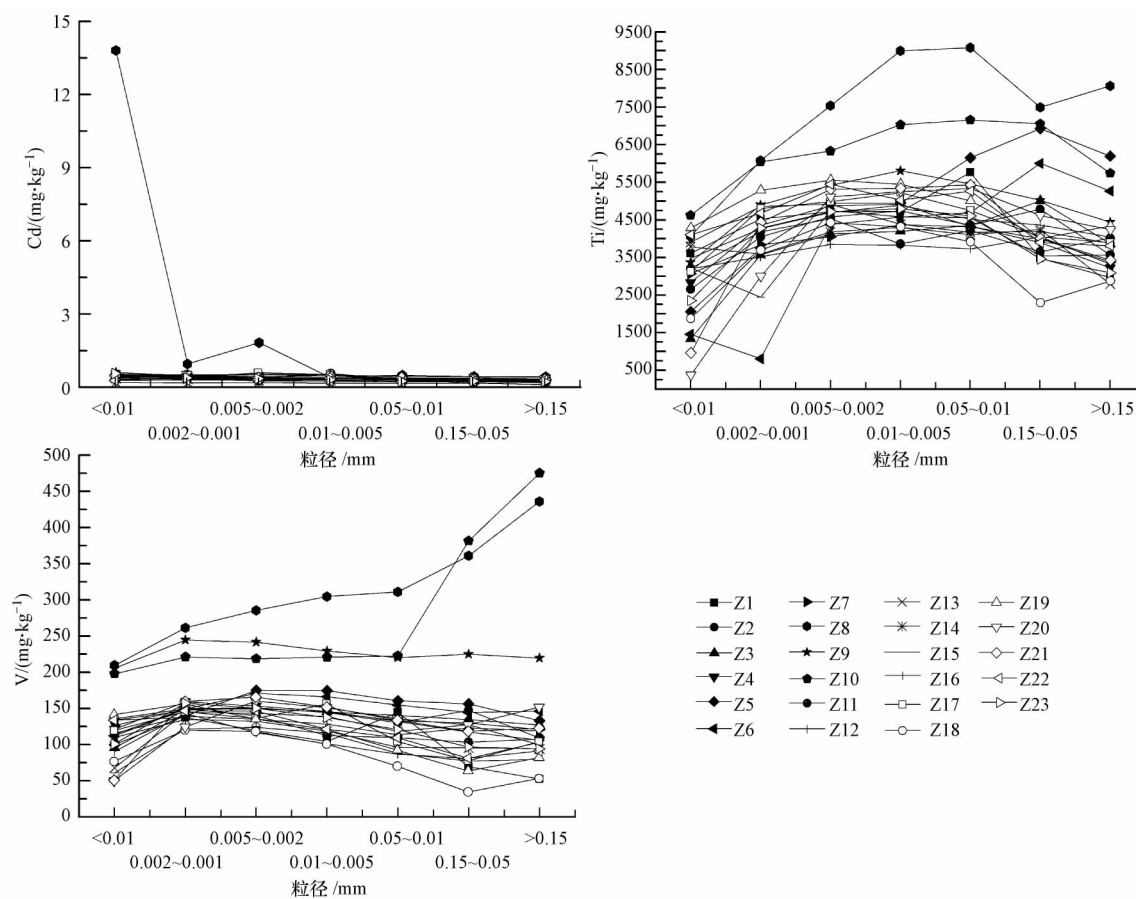


图4 土壤重金属在不同粒径中的分布

Fig. 4 Contents of Heavy metals in different particle size fractions

表1 重金属在不同粒径土壤中的平均含量

Table 1 Mean value in different soil particle sizes

元素	数据类型	不同粒径土壤中的平均含量/($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)							北京市土壤背景值
		< 0.001	0.002 ~ 0.001	0.005 ~ 0.002	0.01 ~ 0.005	0.05 ~ 0.01	0.15 ~ 0.05	> 0.15	
Cu	平均值	109.77	130.30	116.93	106.26	92.48	81.82	51.01	18.70
	最大值	519.26	568.50	514.16	471.09	500.29	506.69	183.61	
	最小值	24.28	28.04	28.81	18.20	18.39	11.12	7.01	
Zn	平均值	2938.39	2077.66	1060.18	624.76	334.82	194.49	14.86	57.50
	最大值	6441.63	4881.73	2947.84	2022.91	1281.09	657.88	101.93	
	最小值	385.42	405.97	205.54	119.59	150.38	51.80	2.94	
Cr	平均值	217.74	302.92	264.40	233.73	202.70	183.94	172.78	29.80
	最大值	1304.55	1625.59	1443.00	880.30	687.61	557.02	508.18	
	最小值	32.99	68.92	69.58	59.37	58.02	34.69	37.74	
Mn	平均值	923.38	1386.51	1313.24	1134.77	910.70	715.26	691.89	571.00
	最大值	1401.68	1821.89	1752.94	1513.67	1203.90	1080.66	1013.35	
	最小值	425.94	766.43	716.75	634.80	680.41	439.61	419.34	
Ni	平均值	62.44	89.03	88.37	83.67	68.02	59.54	60.44	26.80
	最大值	127.39	190.48	166.89	159.31	123.67	113.99	111.41	
	最小值	18.28	46.77	44.82	36.63	23.21	8.18	12.56	
Pb	平均值	27.20	48.01	45.08	38.01	26.12	15.83	12.77	24.60
	最大值	153.57	203.45	195.13	165.44	102.47	68.77	37.50	
	最小值	7.24	23.38	11.96	14.56	8.66	2.63	3.48	

续表 1

元素	数据类型	不同粒径土壤中的平均含量/(mg·kg ⁻¹)							北京市土壤背景值
		< 0.001	0.002 ~ 0.001	0.005 ~ 0.002	0.01 ~ 0.005	0.05 ~ 0.01	0.15 ~ 0.05	> 0.15	
Cd	平均值	1.03	0.46	0.46	0.40	0.36	0.33	0.31	0.12
	最大值	13.85	1.00	1.87	0.61	0.54	0.48	0.47	
	最小值	0.25	0.22	0.24	0.20	0.21	0.20	0.15	
Ti	平均值	2912.64	4128.39	4932.92	5024.67	5012.79	4524.71	4088.20	-
	最大值	4622.29	6078.45	7540.15	8996.82	9081.41	7494.05	8066.15	
	最小值	381.30	806.92	3844.89	3821.26	3726.70	2303.61	2785.88	
V	平均值	115.99	156.55	157.23	149.31	135.94	133.60	140.30	-
	最大值	209.67	261.47	285.49	304.80	311.31	381.75	475.28	
	最小值	49.29	119.73	116.56	100.28	69.62	34.14	52.51	

虽然国内外对土壤粒径划分的标准不同,但结论相似.大多数研究表明,重金属元素优先向细粒级土壤富集(Al-Rajhi *et al.*, 1996; Deletic *et al.*, 2005).这主要是因为细粒级土壤的比表面积较大,能吸附较多的重金属,粗粒级土壤的表面积较小,对重金属的固定作用较弱(伍光和等, 2007).有研究表明, <0.001 mm 粒级颗粒上因为发生凝聚,表面积减小,重金属含量反而低于 0.002 ~ 0.001 mm 粒级土壤(Deflaun *et al.*, 1983; Schoer *et al.*, 1985).因此,本研究中大部分重金属优先富集在 0.002 ~ 0.001 mm 粒级土壤上.由于受到温度、pH、离子强度等因素的影响,不同粒级土壤对重金属的吸附量发生变化,土壤中重金属元素含量并不完全随粒径减小而增加(Fu *et al.*, 1992; Srivastava *et al.*, 1990).金矿周边金属元素在不同采样点同一粒级中的含量也不同.在不同采样点,金属含量最大值并不全部出现在相同的细粒级上或较细粒级土壤上,有的则出现在较粗粒级土壤上,这表明金属元素在土壤中的分布不仅与土壤粒级有关,也与土壤的矿物组成有关.在粗颗粒中,所含原生矿物成分不同,更多地反映了沉积环境原始的地球化学组成;同时原生矿物中本身含有金属元素,因此,并不一定总出现重金属在最小粒径范围含量最高的现象(陈景辉等, 2011).大部分金属元素在各粒级土壤中的含量在堆放过尾矿石处(Z8、Z9、Z10)较高,并高于北京市土壤背景值,出现明显的富集,而向四周逐渐减小.表明堆放过尾矿石处各粒级土壤中金属元素受到尾矿石的影响,还没有造成金属元素向四周扩散.张慧敏等(2007)在对杭州和绍兴城市不同粒组土壤中重金属分布的研究表明,土壤重金

属元素主要在细粒级(<0.002 mm 和 0.05 ~ 0.002 mm)中富集.常静等(2008)对上海市地表灰尘重金属污染粒级效应的研究表明,重金属元素主要集中在灰尘颗粒物的细粒级(<0.075 mm)中.Wang等(1998)对香港和伦敦地表灰尘的研究也表明,颗粒物粒级较细,重金属富集能力越强.Sager等(2012)对克罗地亚海生沉积物和周边土壤的研究表明,重金属元素主要集中在较细粒级(0.2 ~ 0.063 mm)颗粒物上,而不是划分的最细粒级(<0.063 mm)颗粒物上.得田沟和崎峰茶金矿周边土壤金属元素在不同粒级土壤中具有明显的富集规律,大部分金属元素在较细粒级(0.002 ~ 0.001 mm)土壤中富集程度最高,其次为粒级 0.005 ~ 0.002 mm 和 <0.001 mm 土壤上,在 >0.15 mm 粒级土壤上富集程度最小.

3.3 金属总量与不同土壤粒级土壤金属含量的相关性

由表2可以看出,土壤中Cu、Ni、V、Pb的总量与各粒级土壤中的含量呈正相关;在0.05 ~ 0.01 mm、0.15 ~ 0.05 mm 和 >0.15 mm 粒级上,Cr、Mn和Ti也表现出显著的相关性;Zn在0.15 ~ 0.05 mm 和 >0.15 mm 粒级上表现出显著的相关性,而在其它粒级上则没有相关性;Cd只在<0.001 mm 粒级上显著相关性,与其它粒级重金属含量则没有相关性.表明土壤中的重金属在不同粒级上所占的比例不同,较粗粒级土壤对重金属的吸附量较少,但由于其在土壤中所占的比例大,因此,对土壤重金属总量的贡献较大.而较细粒级土壤对重金属吸附量较大,但由于其在土壤中所占比例小,因此,对土壤重金属总量贡献较小.说明不同粒级的分配比例影响土壤重金属的污染.

表2 金属元素总量与不同粒级金属含量的相关性

Table 2 Correlation coefficient between the content of heavy metals in soils and different particle sizes

粒度划分/mm	重金属总量与各粒级金属含量的相关系数								
	Cu	Zn	Cr	Mn	Ni	Ti	V	Pb	Cd
< 0.001	0.891 **	-0.155	0.238	0.351	0.662 **	0.366	0.681 **	0.683 **	0.512 *
0.002 ~ 0.001	0.898 **	-0.251	0.286	0.131	0.816 **	0.338	0.845 **	0.849 **	0.291
0.005 ~ 0.002	0.914 **	-0.048	0.313	0.153	0.854 **	0.377	0.860 **	0.837 **	0.400
0.01 ~ 0.005	0.939 **	0.121	0.361	0.255	0.855 **	0.483 *	0.871 **	0.849 **	0.211
0.05 ~ 0.01	0.920 **	0.510 *	0.418 *	0.607 **	0.777 **	0.510 *	0.860 **	0.860 **	0.223
0.15 ~ 0.05	0.969 **	0.764 **	0.499 *	0.917 **	0.806 **	0.611 **	0.971 **	0.807 **	0.245
> 0.15	0.986 **	0.168	0.498 *	0.820 **	0.823 **	0.640 **	0.966 **	0.916 **	0.143

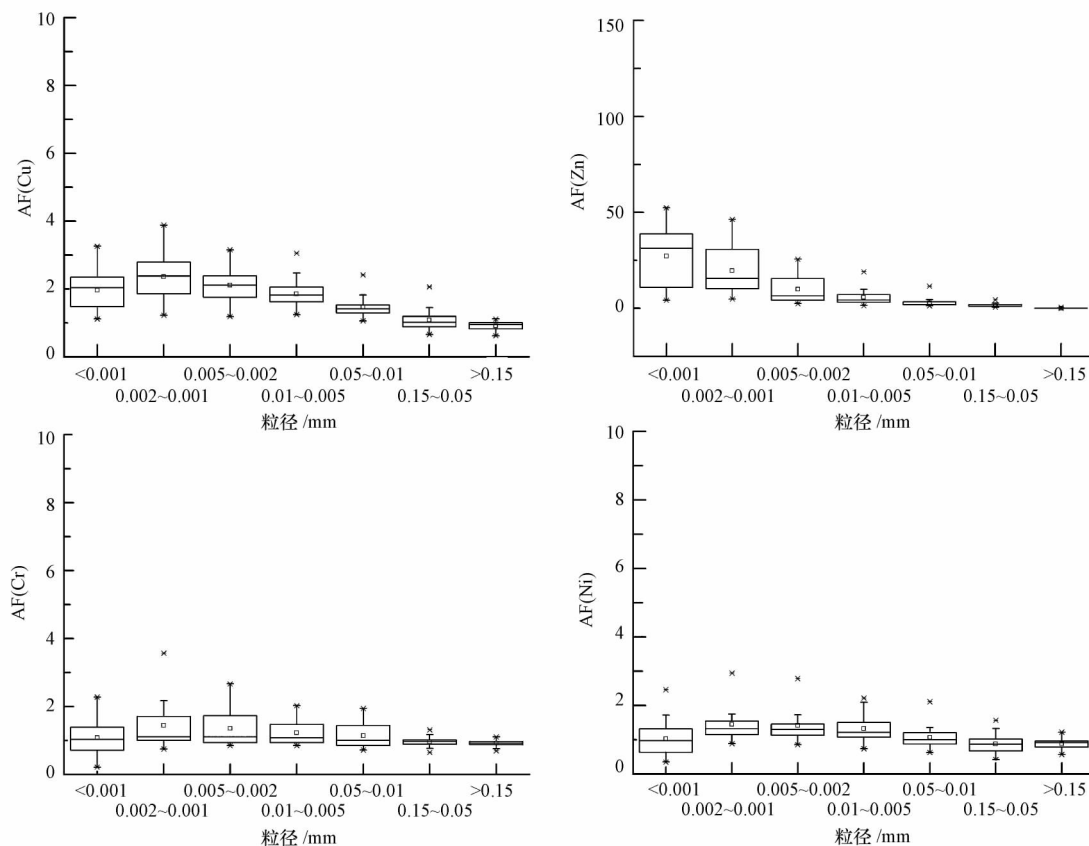
注: ** $p < 0.01$, * $p < 0.05$ (2-tailed).

3.4 金属元素的累积系数

Sheppard 和 Evenden 提出把各粒级中金属元素含量与总量的比例作为金属元素累积的一个重要因素 (Sheppard *et al.*, 1992), 定义为金属累积系数 AF, 计算公式为: $AF = X_{\text{fraction}} / X_{\text{bulk}}$, 其中 X_{fraction} 为各粒级重金属含量 ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$), X_{bulk} 为重金属总量 ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$). 目前, 累积系数已经被更多的学者所应用 (Ferguson *et al.*, 1998; Ajmone-Marsan *et al.*, 2008).

金属元素在各粒级土壤中的累积状况如图 5 所示. 由图可知, 在所有金属元素中 Zn 的累积系数随

着粒级的减小而显著增大, 在 $< 0.005 \text{ mm}$ 粒级土壤上平均累积系数超过了 10, 且在 $< 0.001 \text{ mm}$ 粒级土壤上达到 27.55, 而在最大粒级土壤上平均累积系数仅为 0.13, 表明 Zn 在较细粒级土壤上有强烈的累积作用, Zn 极易被细粒级土壤吸附. Cu 和 Pb 在 $0.002 \sim 0.001 \text{ mm}$ 和 $0.005 \sim 0.002 \text{ mm}$ 粒级土壤上的平均累积系数都大于 2, 具有中度程度的累积. 金属元素在 $> 0.15 \text{ mm}$ 粒级土壤上的平均累积系数都小于 1, 表明在粗粒级土壤上没有出现元素累积. Ti 和 V 在 $< 0.001 \text{ mm}$ 的极细粒级土壤上的累积系数小于 1, 说明这两种元素在极细粒级土壤



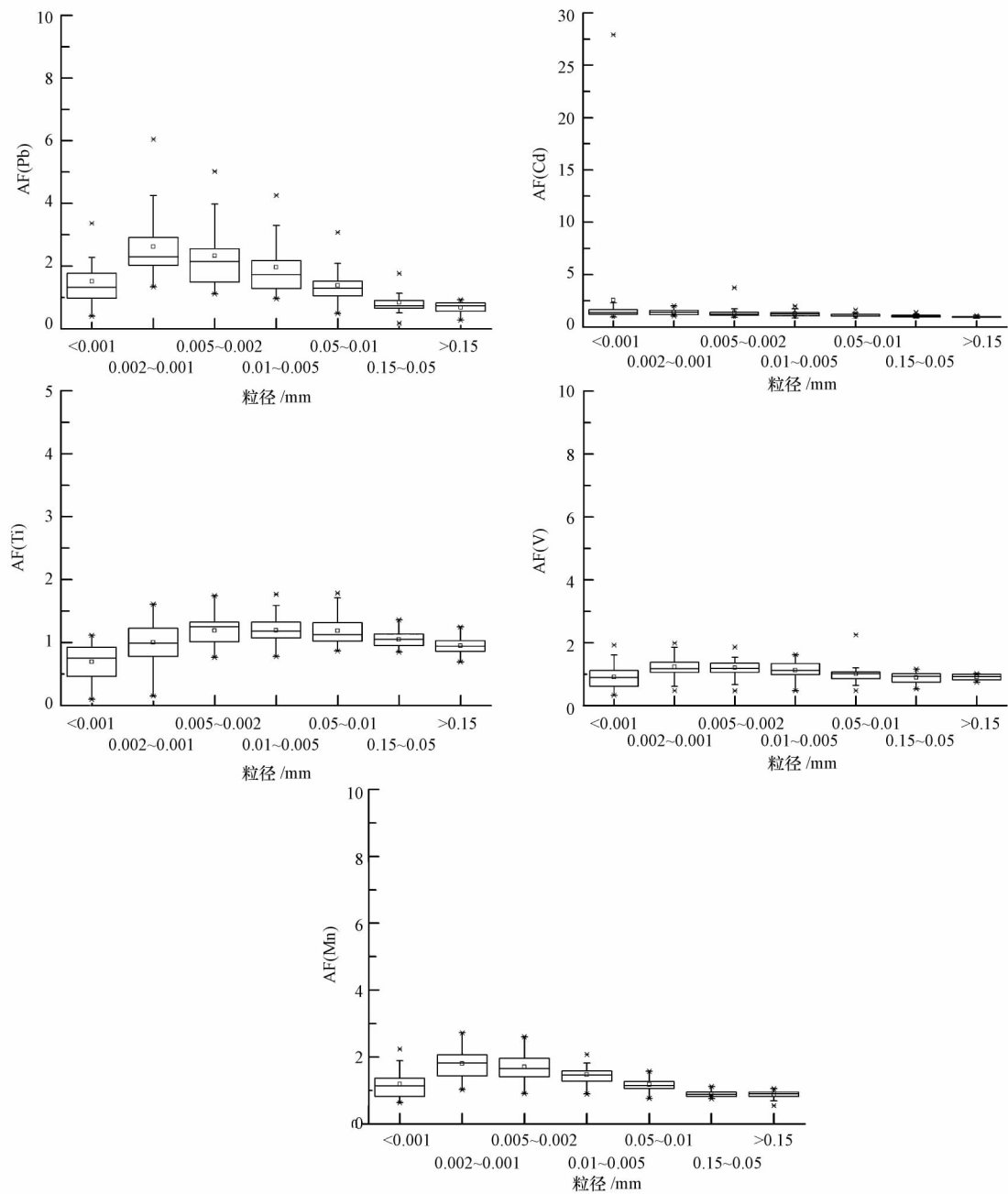


图5 金属元素在不同粒径上的累积系数

Fig. 5 AF for metals in different particle sizes

上没有累积行为,这主要可能与其主要来源于原生矿物有关.大多数金属元素在 0.002 ~ 0.001 mm 粒级土壤上累积系数最大,且在 0.002 ~ 0.001 mm 粒级土壤上的平均累积系数由大到小依次为: Zn > Cd > Pb > Cu > Mn > Cr > Ni > V > Ti. 金属元素的累积系数在不同采样点其值不同,但金属元素的 AF 值变化趋势与不同粒径土壤中重金属的含量特征相一致.

对这 9 种金属元素的累积系数(AF) 进行聚类

分析结果如图 6 所示.由图可知,重金属元素可以分为 4 大组: Mn、Pb、Ni、Cr、V 为第一组,表现为元素在各粒级土壤上没有强烈的富集作用,在最大和最小粒级土壤上的富集相对较小,而在中间粒级土壤上的富集作用较大. Cu 为第二组,在 > 0.15 mm 粒级土壤上富集系数小于 1,在 0.002 ~ 0.001 mm 和 0.005 ~ 0.002 mm 粒级土壤上的累积系数大于 2,在这两个粒级土壤上的累积作用较大. Ti 为第三组,在 < 0.001 mm、0.002 ~ 0.001 mm 和 > 0.15 mm

粒级土壤上的富集系数都小于 1,其它粒级土壤上的含量与原土总量近似。Cd、Zn 为第四组,表现为金属含量的累积作用随粒级的减小而增加,在 >0.15 mm 粒级土壤上的累积系数小于 1,而在 <0.001 mm 粒级土壤上的累积系数最大,富集最强,这两种元素的累积作用具有明显的粒级效应,在最细粒级土壤上的累积作用最强。

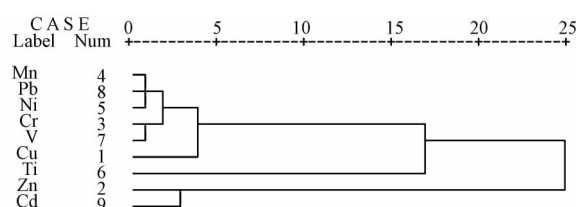


图6 金属元素累积系数的聚类分析

Fig.6 Cluster analysis among soils by AF for metals

4 结论(Conclusions)

北京市得田沟和崎峰茶金矿周边土壤主要以 >0.15 mm 粒级颗粒为主,其次为 0.05~0.15 mm 粒级颗粒,而极易形成扬尘的细粒级颗粒含量极低。金属元素在土壤中的分布具有明显的粒级效应,金属元素平均含量总体上随着土壤粒级的减小而呈增大的趋势(Ti 和 V 具有相反的趋势),Cu、Cr、Mn、Ni、Pb 和 V 平均含量的最大值均在 0.002~0.001 mm 粒级土壤上,Zn 和 Cd 平均含量的最大值出现在 <0.001 mm 粒级土壤上,Ti 平均含量的最大值则出现在 0.01~0.005 mm 粒级土壤上。Zn 在较细粒级土壤上有强烈的累积作用,其它元素在各粒级土壤上没有显著性富集。大多数金属元素在 0.002~0.001 mm 粒级土壤上的累积系数最大,且在 0.002~0.001 mm 粒级土壤上的平均累积系数由大到小依次为:Zn > Cd > Pb > Cu > Mn > Cr > Ni > V > Ti。尽管细粒级土壤中金属元素含量较高,但由于极细粒级土壤本身含量极低,不会对土壤形成明显的金属富集,但应预防土壤中极细粒级随雨颗粒水在低洼处富集和进入大气,进而危害人类和生物健康。

责任作者简介:季宏兵(1966—),研究员,博士生导师,中国科学院百人计划人员。主要从事化学风化与元素循环、重金属的生物地球化学过程与植物修复研究。

参考文献(References):

Ajmone-Marsan F, Biasioli M, Kralj T, et al. 2008. Metals in particle-

size fractions of the soils of five European cities [J]. *Environmental Pollution*, 152: 73-81

Al-Rajhi M A, Al-Shayeb S M, Seaward M R D, et al. 1996. Particle size effect for metal pollution analysis of atmospherically deposited dust [J]. *Atmospheric Environment*, 30(1): 145-153

Banerjee A D K. 2003. Heavy metal levels and solid phase speciation in street dusts of Delhi, India [J]. *Environmental Pollution*, 123: 95-105

常静,刘敏,李先华,等. 2008. 上海城市地表灰尘重金属污染粒级效应与生物有效性 [J]. *环境科学*, 29(12): 3489-3495

陈景辉,卢新卫. 2011. 西安城市路边土壤重金属粒级效应与污染水平 [J]. *环境化学*, 30(7): 1370-1371

Deflaun M F, Mayer L M. 1983. Relationships between bacteria and grain surface in intertidal sediments [J]. *Limnol Oceanogr*, 18: 873-881

Deletic A B, Orr D W. 2005. Pollution buildup on road surfaces [J]. *Journal of Environmental Engineering*, 131(1): 49-59

Ferguson C, Darmendrail D, Freier K, et al. 1998. Risk assessment for contaminated sites in Europe (Volume 1) [M]. Nottingham: LQM Press. 165

Fu G, Allen H E. 1992. Cadmium adsorption by oxic sediment [J]. *Water Res*, 26(1): 225-233

Hochella M F, White A F. 1990. Mineral-water interface geochemistry: An overview [J]. *Review in Mineralogy*, 23(3): 1-16

侯雨乐. 2010. 青海省刚察县南部土壤含水量研究 [D]. 西安: 陕西师范大学

孟静静. 2011. 青海省刚察县南部土壤重金属含量特征与质量评价研究 [D]. 西安: 陕西师范大学. 33-34

ISO. 2005. No. 10390—2005. Soil quality: determination of pH [S]. Geneva: International Standard Organization

康丹,卢新卫,罗大成,等. 2010. 西安市公园土壤重金属粒级分布特征与污染水平 [J]. *陕西师范大学学报(自然科学版)*, 38(4): 104-108

李士杏,骆永明,章海波,等. 2011. 红壤不同粒级组分中砷的形态——基于连续分级提取和 XANES 研究 [J]. *环境科学学报*, 31(12): 2733-2739

廖海军. 2007. 北京市密云水库上游土壤重金属污染调查评价 [J]. *城市地质*, 2(3): 31-34

刘春华,岑况. 2007. 北京市街道灰尘粒度特征及其来源探析 [J]. *环境科学学报*, 27(6): 1006-1012

Ljung K, Selinus O, Otabbong R, et al. 2006. Metal and arsenic distribution in soil particle sizes relevant to soil ingestion by Children [J]. *Applied Geochemistry*, 21: 1623-1624

Ljung K, Selinus O, Otabbong R, et al. 2006. Metal and arsenic distribution in soil particle sizes relevant to soil ingestion by Children [J]. *Applied Geochemistry*, 21: 1623-1624

秦耀东. 2002. 土壤物理学 [M]. 北京: 高等教育出版社. 7-8

Sager M, Kralik M. 2012. Environmental impact of historical harbour city Zadar (Croatia) on the composition of marine sediments and soils [J]. *Environ Geochem Health*, 34: 83-93

邵明安,王全九,黄明斌,等. 2006. 土壤物理学 [M]. 北京: 高等教育出版社. 19-21

Schoer J. 1985. Iron-oxo-hydroxides and their significance to the behavior

- of heavy metals in estuaries [J]. *Environ Technol Letters*, 6(1/11) : 189-202
- Sheppard S C , Evenden W G. 1992. Concentration enrichment of sparingly soluble contaminants (U , Th and Pb) by erosion and by soil adhesion to plants and skin [J]. *Environmental Geochemistry and Health* , 14: 121-131
- Srivastava A , Srivastava P C. 1990. Adsorption-desorption behaviour of Zinc(II) at Iron(III) hydroxide-aqueous solution interfaced as influenced by pH and Temperature [J]. *Environmental Pollution* , 68(1) : 171-180
- 汤志云 , 吴龙华 , 骆永明. 2009. 土壤粒级中重金属元素的形态分析与环境风险评价 [J]. *地质学刊* , 33(2) : 164-169
- Tang Z , Yang Z , Shen Z , *et al.* 2007. Distribution and sources of organochlorine pesticides in sediments from typical catchment of the Yangtze River , China [J]. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology* , 53: 303-312
- 王平安 , 李中坚 , 董法先 , 等. 1998. 北京怀柔崎峰茶-得田沟金矿田稀土元素地球化学特征 [J]. *地质力学学报* , 4(2) : 30-38
- Wang W H , Wong M H , Lehame S , *et al.* 1998. Fractionation and biotoxicity of heavy metals in urban dusts collected from Hong Kong and London [J]. *Environmental Geochemistry and Health* , 20(4) : 185-198
- Wen H C , Hu C Y. 2007. Difference between international and domestic methods in determining soil pH [J]. *Soils* , 39(3) : 488-491
- 伍光和 , 王乃昂 , 胡双熙 , 等. 2007. 自然地理学 [M]. 北京: 高等教育出版社. 318-319
- 徐馨 , 何才华 , 沈志达 , 等. 1992. 第四纪环境研究方法 [M]. 贵阳: 贵阳科技出版社. 74-75
- Yamamoto N , Takahashi Y , Yoshinaga J , *et al.* 2006. Size distributions of soil particles adhered to children' s hands [J]. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology* , 51: 157-163
- 曾宪勤 , 刘和平 , 路炳军. 2008. 北京山区土壤粒径分布分形维数特征 [J]. *山地学报* , 26(1) : 65-70
- 张汉波 , 段昌群 , 胡斌 , 等. 2003. 不同年代废弃的铅锌矿渣堆中重金属的动态变化 [J]. *农业环境科学学报* , 22(1) : 67-69
- 张慧敏 , 王丽平 , 章明奎. 2007. 城市土壤不同颗粒中重金属的分布及其对人体吸入重金属的影响 [J]. *广东微量元素科学* , 14(7) : 14-19
- 左可胜 , 刘建朝 , 孟鹏飞. 2009. 膨润土与石英的粒度分析方法优选 [J]. *地球科学与环境学报* , 31(3) : 277-280