

陶永刚, 马鹏程, 陈棉彪, 等. 铁合金厂周边室内积尘中重金属污染特征及健康风险评价[J]. 农业资源与环境学报, 2019, 36(6): 829-838.

TAO Yong-gang, MA Peng-cheng, CHEN Mian-biao, et al. Pollution characteristics and potential health risk assessment of heavy metals in household dusts around ferroalloy factory[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2019, 36(6): 829-838.

铁合金厂周边室内积尘中重金属污染特征及健康风险评价

陶永刚^{1,2,3}, 马鹏程^{1,2,3}, 陈棉彪^{2,3}, 黄楚珊^{2,3}, 张丽娟^{2,3}, 于云江^{2,3}, 柳晓琳¹, 许群⁴, 胡国成^{1,2,3*}

(1. 锦州医科大学公共卫生学院, 辽宁 锦州 121001; 2. 生态环境部华南环境科学研究所, 广州 510535; 3. 国家环境保护环境与健康风险评估重点实验室, 广州 510535; 4. 中国医学科学院基础医学研究所, 北京 100005)

摘要:为了解冶炼厂周边地区室内积尘中重金属的污染特征,掌握室内积尘中重金属暴露的健康风险,对辽宁锦州铁合金厂周边6个村庄(A村、B村、C村、D村、E村、F村)及对照区2个村庄(G村、H村)室内积尘中7种重金属(Zn、Cd、As、Cr、Cu、Ni、Pb)的含量水平进行分析,采用地累积指数评价室内积尘中重金属的污染特征,利用健康风险评估模型评估成人和儿童通过室内积尘暴露重金属的潜在健康风险。结果表明:污染区6个村庄室内积尘中Zn、Cd、As、Cr、Cu、Ni、Pb的平均含量分别为980.23、7.98、17.48、164.65、118.87、39.82、154.06 mg·kg⁻¹,显著高于对照区2个村庄室内积尘重金属平均含量;地累积指数评价结果表明污染区室内积尘中Cd的污染程度较强;主成分分析表明辽宁锦州污染区和对照区室内积尘中的重金属来源于铁合金厂冶炼活动、大气沉降、燃煤等;健康风险评估结果表明锦州铁合金厂周边居民通过室内积尘暴露Cd、Cr、Ni和As的致癌风险均超出可接受风险水平。研究表明,锦州铁合金厂周边区域室内积尘中重金属污染及健康风险应予以重点关注。

关键词:室内积尘;重金属;地累积指数法;健康风险评价

中图分类号:X501

文献标志码:A

文章编号:2095-6819(2019)06-0829-10

doi: 10.13254/j.jare.2018.0253

Pollution characteristics and potential health risk assessment of heavy metals in household dusts around ferroalloy factory

TAO Yong-gang^{1,2,3}, MA Peng-cheng^{1,2,3}, CHEN Mian-biao^{2,3}, HUANG Chu-shan^{2,3}, ZHANG Li-juan^{2,3}, YU Yun-jiang^{2,3}, LIU Xiao-lin¹, XU Qun⁴, HU Guo-cheng^{1,2,3*}

(1. School of Public Health, Jinzhou Medical University, Jinzhou 121001, China; 2. South China Institute of Environment Sciences, Ministry of Ecology and Environment, Guangzhou 510535, China; 3. State Environmental Protection Key Laboratory of Environmental Pollution Health Risk Assessment, Guangzhou 510535, China; 4. Institute of Basic Medical Sciences, Chinese Academy of Medical Sciences, Beijing 100005, China)

Abstract: Pollution characteristics and health risk assessment were evaluated for heavy metals (Zn, Cd, As, Cr, Cu, Ni, and Pb) in household dust samples in regions of Jinzhou, Liaoning Province. Sixty-two household dust samples were collected from eight villages around the

收稿日期:2018-09-28 录用日期:2019-01-14

作者简介:陶永刚(1993—),男,甘肃民勤人,硕士研究生,主要从事环境卫生与劳动卫生研究。E-mail: 1169208509@qq.com

*通信作者:胡国成 E-mail: huguocheng@scies.org

基金项目:生态环境部部门预算项目;国家环境保护公益性行业科研专项(201309049)

Project supported: The Item of Ministry of Ecology and Environment; National Environmental Protection Public Welfare Industry Targeted Research Fund (201309049)

Jinzhou ferroalloy factory. Polluted areas included A, B, C, D, E, and F villages, while control areas included G and H villages. The results showed that the average concentrations of Zn, Cd, As, Cr, Cu, Ni, and Pb in household dust samples from polluted areas around the Jinzhou ferroalloy factory were 980.23, 7.98, 17.48, 164.65, 118.87, 39.82, and 154.06 mg·kg⁻¹, respectively. The concentrations of heavy metals in household dusts of polluted area were significantly higher than those of control areas. Analysis of the geoaccumulation index indicated that Cd in household dust samples was at serious pollution levels. Principal component analyses indicated that the potential source of heavy metals in household dusts was industry activities of nonferrous metallurgy, atmospheric deposition, combusting coal, and so on. The potential cancer risk to adult and children exposed to heavy metals (Cd, Cr, Ni, and As) by household dust was above the accept risk level. Contamination of heavy metals in household dust and health risk assessment should be given attention.

Keywords: household dust; heavy metal; index of geoaccumulation; health risk assessment

室内积尘中重金属富集较为明显,积尘是人类暴露于重金属的重要载体之一^[1]。重金属是一类毒性较强的污染物,在环境中难降解,进入人体后,可导致机体丧失或者改变原有的生理生化功能,引起病变^[2]。在自然风力、人群活动等作用下积尘再次悬浮进入空气,积尘中的重金属进入人体后,会对健康产生危害^[3-4]。因此,研究室内积尘中重金属污染水平及其来源对人体健康有重要意义。目前,国内外对室内积尘中重金属的污染问题已有大量研究^[5-16],主要集中在含量水平、来源分析、空间分布和风险评估等方面。

有色冶金工业被公认是其周围环境中重金属的重要污染源。对尤溪某铅锌矿区的研究发现,冶炼厂周边土壤中重金属污染严重,其重金属来源于含重金属的烟尘^[17];对蓝田某冶炼厂周围地区土壤和农作物研究表明,周边土壤中Pb和Cd污染严重,小麦籽粒中Pb含量超标^[18];对宝鸡铅锌冶炼厂周围地区研究显示,积尘中Cu、Pb、Zn、Cr均存在不同程度的污染^[19]。目前对于冶炼厂周边环境重金属污染已有大量的研究,但对于冶炼厂周边地区室内积尘的研究相对较少。

锦州铁合金厂位于锦州市西南部,拥有金属、化工、合金、建材四大类产品。铁合金产业是产生废气、废渣和废水较多的行业。蔡艳荣等^[20]发现该铁合金厂周边土壤受到严重的Cd污染。王猛^[21]调查发现该铁合金厂周围地区曾受到严重的铬污染。本研究选取了锦州某铁合金厂周边区域作为研究区,采集该铁合金厂周边8个村庄居民家庭室内积尘样品,并测定其中Zn、Cd、As、Cr、Cu、Ni、Pb的含量,利用地累积指数法和健康风险评价方法评价室内积尘中重金属的污染程度及其暴露风险,同时,应用主成分分析法揭示锦州铁合金厂周边室内积尘中重金属的来源,解释金属冶炼活动对周边地区居民家庭室内积尘中重金

属污染的影响,为室内积尘中重金属污染的防控及居民的健康防护工作提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 样品采集

2016年12月,以辽宁锦州某铁合金厂周边区域作为污染区,该铁合金厂位于锦州市的西南部,常年主导风向为西北风与东南风。在污染区设置6个采样点,包括A村、B村、C村、D村、E村和F村,其中A村位于铁合金厂西部,距铁合金厂1.5 km,B村、C村、D村位于铁合金厂东部,距离铁合金厂分别为2、3、6 km,而E村、F村位于铁合金厂西北方向,距离分别为6、7 km;另外在距离锦州铁合金厂约60 km的位置设置对照区,包括G村和H村,对照区位于大凌河沿岸,其三面环山,且附近无污染企业(图1)。本研究共采集62个样品,其中,A村10个、B村7个、C村9个、D村6个、E村5个、F村6个、G村12个、H村7个。全部样品均来自居民室内易累积灰尘的场所,如室内桌面、柜顶等。用小刷子和小塑料簸箕采集表面积尘(避开厨房和卫生间等有大量生活垃圾的位置),每个家庭采集积尘样品约2~5 g,放入密封袋内保存,带回实验室后放置于干燥、阴凉处。所有样品干燥后过100目筛,于密封袋内保存。

1.2 样品前处理

在Teflon试管中加入0.500 0 g待测样品,加入10 mL王水,盖上垫片,旋紧外盖,放置于微波消解仪(MARS6 CLASSIC)中,微波消解30 min,冷却后用1%硝酸定容至100 mL,待测。

1.3 重金属含量测定

使用电感耦合等离子体发射光谱仪(ICP-OES, Agilent)测定室内积尘中的Zn、Cd、Cr、Cu、Ni、Pb的含量;使用原子荧光法测定室内积尘中As的含量。在样品测定过程中采用10%的平行样品与10%的空白

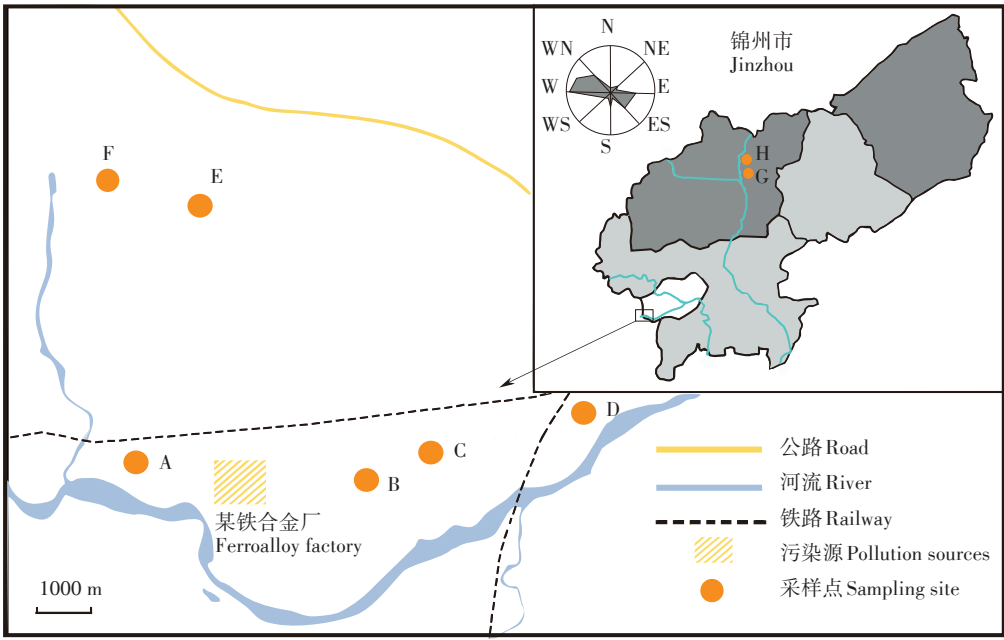


图1 污染区与对照区室内积尘样品采样点示意图

Figure 1 Sampling sites of household dusts in polluted area and control area

对照,同时采用国家土壤标准物质(GBW07407和GBW07447,中国地质科学院廊坊地球物理地球化学勘查研究所提供)进行质量控制。各元素的回收率范围在81.24%~104.20%之间,符合重金属分析质量控制的要求。

1.4 地累积指数的计算

地累积指数法(Index of geoaccumulation, I_{geo})^[22-23]可应用于评价由人类活动产生的土壤重金属污染。其计算公式为:

$$I_{geo} = \log_2 \left[\frac{C_i}{1.5 \times B_i} \right]$$

式中: C_i 为样品中元素*i*的实测浓度; B_i 为土壤中元素*i*的背景值;重金属的地累积指数分级标准见表1。

1.5 健康风险评价方法

1.5.1 暴露剂量

参考美国环保署(USEPA)推荐的健康风险评价

模型以及国内外相关研究^[24-27],对锦州铁合金厂周边污染区居民家庭室内积尘中的重金属进行健康风险评价。三种暴露途径的长期暴露剂量计算公式如下:

$$ADD_{\text{摄食}} = \frac{C \times \text{IngR} \times \text{EF} \times \text{ED} \times \text{CF}}{\text{BW} \times \text{AT}}$$

$$ADD_{\text{呼吸}} = \frac{C \times \text{InhR} \times \text{EF} \times \text{ED}}{\text{PEF} \times \text{BW} \times \text{AT}}$$

$$ADD_{\text{皮肤}} = \frac{C \times \text{SA} \times \text{AF} \times \text{ABS} \times \text{EF} \times \text{ED} \times \text{CF}}{\text{BW} \times \text{AT}}$$

式中:ADD_{摄食}、ADD_{呼吸}、ADD_{皮肤}分别为经消化道摄入、经呼吸吸入、经皮肤表面接触的日均暴露剂量,mg·kg⁻¹·d⁻¹;C为室内积尘中重金属平均含量,mg·kg⁻¹;其他参数含义以及取值见表2^[24]。

1.5.2 健康风险表征

非致癌风险商(HQ)与致癌风险指数(RISK)计算公式如下^[24-27]:

$$HQ = \text{ADD}_{\text{非}} / \text{RfD}, HI = \sum HQ_i$$

$$\text{RISK} = \text{ADD}_{\text{致癌}} \times \text{SF}, \text{RISK}_T = \sum \text{RISK}_i$$

式中:ADD_非为慢性日平均暴露量,mg·kg⁻¹·d⁻¹;RfD为参考剂量,mg·kg⁻¹·d⁻¹;SF为各暴露途径致癌风险斜率,kg·d⁻¹·mg⁻¹。重金属不同暴露途径的RfD和SF见表3^[25-27]。

评价标准:HI、HQ小于1,表明非致癌风险较小或者可以忽略;HI、HQ大于1,表明存在非致癌风险。RISK、RISK_T小于1×10⁻⁶时,表明致癌风险可接受;RISK、RISK_T大于1×10⁻⁶时,表明存在致癌风险,处于

表1 地累积指数分级

Table 1 Classification of index of geoaccumulation

I_{geo}	污染等级 Class of pollution	污染程度 Pollution degree
$I_{geo} \leq 0$	0	清洁
$0 < I_{geo} \leq 1$	1	轻度污染
$1 < I_{geo} \leq 2$	2	偏中度污染
$2 < I_{geo} \leq 3$	3	中度污染
$3 < I_{geo} \leq 4$	4	偏重度污染
$4 < I_{geo} \leq 5$	5	严重污染
$I_{geo} > 5$	6	极重污染

表2 室内积尘重金属日平均暴露剂量计算参数取值

Table 2 Parameters of average daily exposure of heavy metals in household dusts

参数 Parameters	含义 Signification	取值 Values	
		儿童 Children	成人 Adults
IngR/mg·d ⁻¹	经消化道摄入	200	100
InhR/m ³ ·d ⁻¹	空气摄入	5	20
PEF/m ³ ·kg ⁻¹	颗粒物排放	1.32×10 ⁹	1.32×10 ⁹
SA/cm ² ·d ⁻¹	暴露皮肤表面积	1600	4530
AF/mg·cm ⁻² ·d ⁻¹	皮肤吸附系数	0.20	0.07
ABS	皮肤吸收系数	0.001	0.001
EF/d·a ⁻¹	暴露频率	350	350
ED/a	暴露年限	6	24
BW/kg	平均体质量	15.0	55.9
AT/d	平均作用时间(非致癌)	365×6	365×24
	平均作用时间(致癌)	365×70	365×70
CF/kg·mg ⁻¹	转换系数	1×10 ⁻⁶	1×10 ⁻⁶

表3 不同重金属的参考剂量(RfD)和致癌风险斜率(SF)

Table 3 Reference doses(RfD) and slope factors(SF) of heavy metal for exposure

元素 Elements	RfD _{呼吸} / mg·kg ⁻¹ ·d ⁻¹	RfD _{摄食} / mg·kg ⁻¹ ·d ⁻¹	RfD _{皮肤} / mg·kg ⁻¹ ·d ⁻¹	SF/ kg·d ⁻¹ ·mg ⁻¹
Zn	3.00×10 ⁻¹	3.00×10 ⁻¹	6.00×10 ⁻²	
Cd	1.00×10 ⁻³	1.00×10 ⁻³	5.00×10 ⁻⁵	6.4
As	1.23×10 ⁻⁴	3.00×10 ⁻⁴	3.00×10 ⁻⁴	1.5
Cr	2.86×10 ⁻⁵	5.00×10 ⁻³	2.50×10 ⁻⁴	42
Cu	4.02×10 ⁻²	3.70×10 ⁻²	1.90×10 ⁻³	
Ni	2.06×10 ⁻²	2.00×10 ⁻²	1.00×10 ⁻³	0.84
Pb	3.52×10 ⁻³	3.50×10 ⁻³	5.25×10 ⁻³	

不可接受水平。

2 结果与讨论

2.1 重金属含量水平

正态性检验表明,所有室内积尘中重金属的含量全部符合对数正态分布,因此以几何均值来表示各重金属元素的含量水平。室内积尘重金属含量水平如表4所示,其中污染区室内积尘中Zn、Cd、As、Cr、Cu、Ni、Pb的平均含量分别为980.23、7.98、17.48、164.65、118.87、39.82、154.06 mg·kg⁻¹,上述7种重金属的平均含量均超过辽宁省土壤重金属背景值^[28],分别为背景值的15.44、73.89、1.99、2.84、6.53、1.56、7.20倍;对照区室内积尘中7种重金属的含量分别为辽宁省土壤重金属背景值的6.07、31.85、1.42、0.82、4.38、1.10、2.44倍。污染区室内积尘中Zn、As、Cd、Cr、Cu、Ni、Pb

的含量显著高于对照区($P<0.05$),分别为对照区的2.54、2.32、1.40、3.49、1.49、1.41、2.96倍。污染区采样家庭附近分布铁合金厂等金属冶炼企业,有色金属冶炼等工业活动可能导致该地区的重金属污染较为严重。对照区三面环山,工业污染源等工业活动相对较少,环境污染相对较轻。与四川成都^[29]、安徽淮南^[30]、贵州贵阳^[14]、重庆^[14]等城市以及安徽省^[31]农村地区室内积尘中重金属的含量相比,本研究室内积尘中Zn、Cd、Cr、Cu和Pb的含量较高(表5)。Wan等^[32]研究西安工业区室内积尘中重金属含量水平发现,密集工业活动造成当地室内积尘中Ni、Cu、Zn、Pb的含量较高;税玥等^[13]研究上海地区室内积尘中重金属水平时发现,受老工业区的影响上海地区室内积尘Zn、Cd、Cr、Cu、Pb的含量处于较高水平。在本研究中,对照区室内积尘中Zn、Cd的含量略高于安徽淮南、贵州贵阳等地,Cr、Cu、Ni、Pb的含量与贵州贵阳、重庆等地含量相近。对照区室内积尘中Zn、Cd、Cr、Cu、Ni、Pb的含量低于污染严重的上海、西安等地。在四川成都、安徽淮南、贵州贵阳和重庆等研究区域中均无工业企业存在,室内积尘中重金属污染较轻。相关研究表明:室内积尘中重金属主要来源于室外交通、工业污染以及室内污染等。本研究中对照区周边无工业企业存在,机动车流量较少,因此,对照区室内积尘中重金属主要来源于室内环境,如室内燃煤、室内重金属器具的磨损、含重金属油漆的脱落等。综上所述,本研究中污染区积尘中重金属的含量与国内其他地区相比处于较高浓度水平,重金属污染较为严重。污染区室内重金属来源可能与有色金属冶炼活动有关。

2.2 积尘重金属空间分布特征

室内积尘中重金属含量箱式图(图2)清晰地反映出锦州铁合金厂周围室内积尘中重金属含量在水平方向的变化特征。从图2可以看出,铁合金厂周围室内积尘中7种重金属含量在水平方向上具有明显的变化,根据变化规律可将其分为三类:第一类,由于B村、C村、D村位于锦州铁合金厂主导风向的下游,重金属在有色金属冶炼过程中排出烟尘的携带作用下沉降,导致铁合金厂周边地区室内积尘中重金属含量表现出空间差异,重金属污染物向东迁移,Zn、Cr、As、Cd、Cu、Ni、Pb等7种元素表现出随着距离增加含量先增加后降低的趋势;第二类,E村、F村不在铁合金厂主导风向上,因此,E村、F村室内积尘中Zn、As、Cd、Cu、Pb含量低于同等距离的D村,由于F村东南方有小型有色冶金企业存在,F村处于其主导风向,从而

表4 室内积尘中重金属含量(mg·kg⁻¹)

Table 4 The concentrations of heavy metals in household dusts(mg·kg⁻¹)

研究区 Areas	元素 Elements	最小值 Minimum	最大值 Maximum	标准差 Standard deviation	均值 Mean	几何均值 Geometric mean	背景值 ^[28] Background values ^[28]
污染区(n=43)	Zn	200.7	3 454.02	791.00	1 187.64	980.23*	63.5
	Cd	1.68	21.32	5.59	9.57	7.98*	0.108
	As	8.60	39.48	6.69	18.55	17.48*	8.80
	Cr	53.74	861.16	165.11	205.64	164.65*	57.90
	Cu	30.58	446.78	79.29	136.62	118.87*	18.20
	Ni	17.89	305.96	42.97	46.21	39.82*	25.60
	Pb	37.65	1 104.66	68.83	189.54	154.06*	21.40
对照区(n=19)	Zn	111.66	2 197.73	575.37	522.44	386.01	63.5
	Cd	1.04	6.66	1.55	3.79	3.44	0.108
	As	6.57	25.21	19.45	13.13	12.49	8.80
	Cr	22.31	62.37	10.99	48.81	47.24	57.90
	Cu	31.96	520.11	104.21	98.61	79.74	18.20
	Ni	10.74	40.89	7.85	29.59	28.24	25.60
	Pb	27.78	104.96	20.86	55.71	52.11	21.40

注: *表示污染区与对照区存在显著差异(P<0.05)。
Notes: *indicates significant difference between the polluted area and the control area(P<0.05).

表5 不同地区积尘中重金属含量(mg·kg⁻¹)

Table 5 Contents of heavy metals in household dusts in different regions(mg·kg⁻¹)

地区 Regions	Zn	Cd	As	Cr	Cu	Ni	Pb
成都 ^[29]	675.00	2.37	—	82.70	19.00	52.60	123.00
淮南 ^[30]	335.29	1.69	—	102.29	67.54	21.08	114.03
安徽省 ^[31]	396.97	2.66	—	78.38	73.96	52.33	124.34
上海 ^[13]	1 664.56	5.50	—	221.10	292.70	—	235.40
贵阳 ^[14]	322.00	2.25	—	47.50	58.20	33.90	72.90
重庆 ^[14]	219.00	0.80	—	63.50	72.70	23.60	74.40
西安 ^[32]	621.10	—	—	94.00	100.70	157.50	148.40
本研究 (污染区)	1 187.64	9.57	18.55	205.64	136.62	46.21	189.54
本研究 (对照区)	522.44	3.79	13.13	48.81	98.61	29.59	55.71

导致F村积尘中Zn、As、Cu含量略高于E村;第三类,A村的Cr含量较高,这可能与铁合金厂在历史上曾将铬渣堆放在女儿河河床中所致的残留有关。

2.3 室内积尘重金属污染评价

根据辽宁省土壤重金属背景值计算7种重金属的地累积指数(I_{geo}),如表6所示。可以看出,在污染区和对照区平均地累积指数大小顺序分别为Cd>Zn>Pb>Cu>Cr>As>Ni和Cd>Zn>Cu>Pb>As>Ni>Cr。对于污染区室内积尘,Cd处于极重度污染,Zn处于偏重度污染,Cu和Pb处于中度污染,Cr处于偏中度污染,As

和Ni处于轻度污染。对于对照区室内积尘,Cd处于严重污染,Zn处于中度污染,Cu处于偏中度污染,Pb处于轻度污染,As、Cr与Ni处于无污染状态。污染区室内积尘中7种重金属的地累积指数均高于对照区,这可能与铁合金厂冶炼活动有关。铁合金厂东面B村、C村和D村的室内积尘中Zn、Cd、Cu、Cr、As、Ni的地累积指数显示,其污染程度随着距离的增大呈现先上升后下降的趋势,表明该区域的重金属污染主要由于铁合金厂排放的烟尘在大气中沉降造成。

2.4 室内积尘重金属健康风险评价

根据采样点积尘各重金属含量及参考值(RfD),按照健康风险评价模型计算污染区与对照区室内积尘中重金属的平均日暴露量及其健康风险,结果如表7、表8所示。7种重金属的非致癌风险值的顺序:消化道摄入途径>皮肤接触途径>呼吸道摄入途径,表明在污染区与对照区室内积尘中重金属暴露以消化道摄入途径为主。在污染区与对照区室内积尘中重金属三种暴露途径日平均暴露量均表现为儿童经消化道摄入途径的非致癌风险值高于成人,其余两种途径的非致癌风险值显示为成人高于儿童。

从表7可以得出,在污染区与对照区不同元素三种暴露途径非致癌风险均表现为HQ<1。在污染区成人与儿童不同元素的总非致癌风险指数(HI)大小分别依次为As>Cr>Pb>Cd>Cu>Zn>Ni、As>Pb>Cr>Cd>

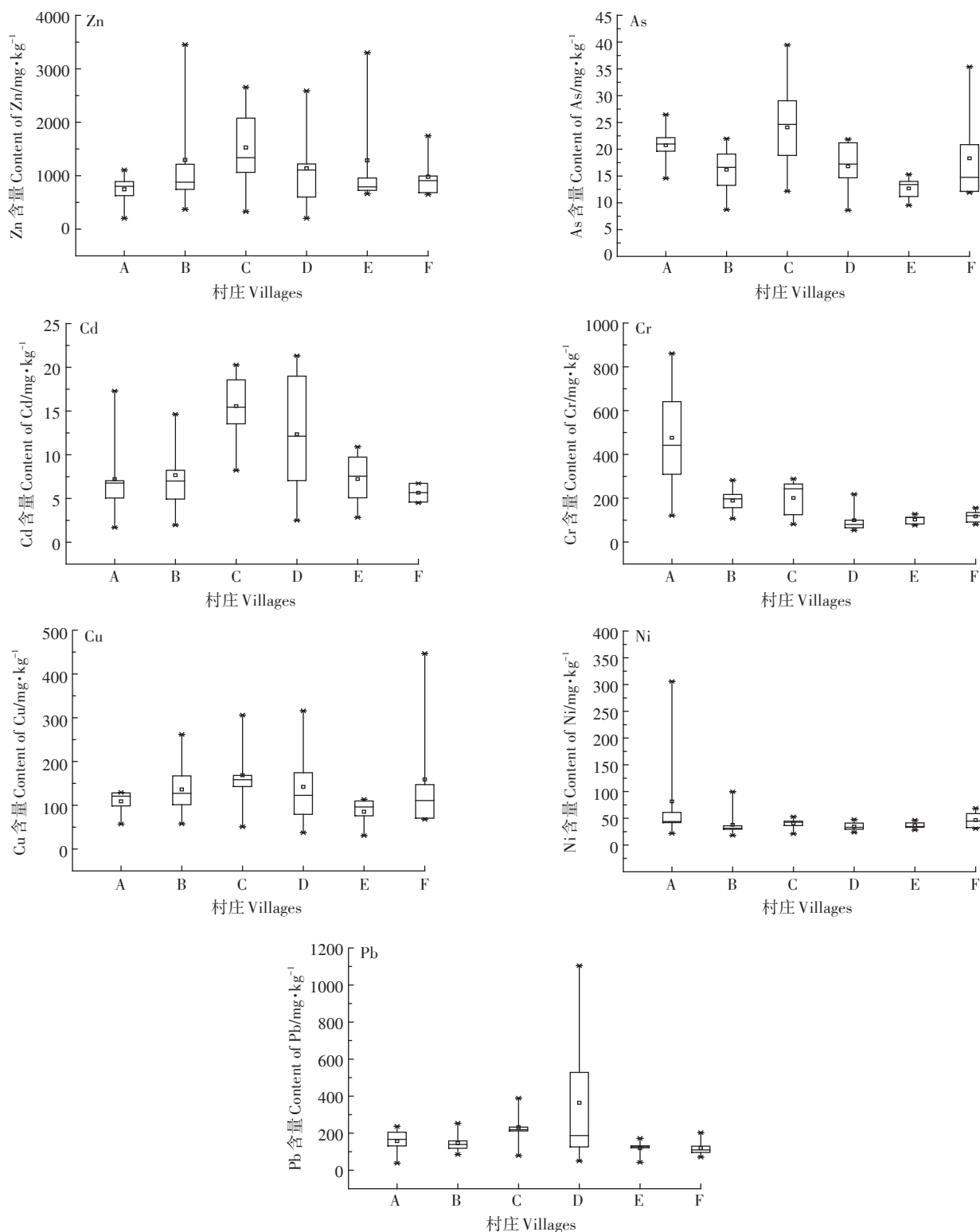


图2 污染区室内积尘中重金属分布

Figure 2 Distribution of heavy metals in household dusts in polluted area

$\text{Cu} > \text{Zn} > \text{Ni}$, 其中重金属元素对儿童的 HI 明显高于成人。在污染区与对照区各重金属元素对成人与儿童的非致癌风险值均未超过 1, 非致癌风险较小。

在本次研究中, Cr、Cd、Ni、As 具有致癌风险, 在污染区与对照区成人和儿童 4 种重金属致癌风险均依次为 $\text{Cd} > \text{Cr} > \text{Ni} > \text{As}$ 。污染区和对照区室内积尘中 Cd、Cr、

表6 室内积尘中重金属的地累积指数(I_{geo})

Table 6 The index of geoaccumulation(I_{geo}) of heavy metals in household dusts

元素 Elements	污染区 The contaminated areas							对照区 The control areas		
	A村	B村	C村	D村	E村	F村	均值	G村	H村	均值
Zn	2.97	3.76	4.55	3.58	3.76	3.36	3.64	2.79	1.60	2.46
Cd	5.48	6.25	6.59	5.56	5.48	5.12	5.88	4.66	4.32	4.55
As	0.65	0.29	1.23	0.35	-0.06	0.47	0.49	0.07	-0.16	-0.01
Cr	2.45	1.12	1.76	0.20	0.24	0.43	1.24	-0.84	-0.83	-0.83
Cu	2.00	2.32	3.10	2.38	1.64	2.54	2.32	2.09	1.33	1.85
Ni	1.09	-0.02	0.59	-0.15	-0.06	0.28	0.27	-0.36	-0.40	-0.38
Pb	2.29	2.19	3.34	3.50	1.89	1.90	2.56	0.88	0.64	0.80

表7 室内积尘中重金属非致癌风险

Table 7 Non-carcinogenic risk of heavy metals in household dusts

研究区 Areas	元素 Elements	成人 Adults				儿童 Children			
		HQ _{呼吸}	HQ _{摄食}	HQ _{皮肤}	HI	HQ _{呼吸}	HQ _{摄食}	HQ _{皮肤}	HI
污染区	Zn	8.49×10^{-7}	5.60×10^{-3}	8.53×10^{-4}	6.46×10^{-3}	7.91×10^{-7}	4.18×10^{-2}	3.34×10^{-4}	4.21×10^{-2}
	Cd	2.07×10^{-6}	1.37×10^{-2}	8.34×10^{-3}	2.20×10^{-2}	1.93×10^{-6}	1.02×10^{-1}	3.26×10^{-3}	1.05×10^{-1}
	As	3.69×10^{-5}	1.00×10^{-1}	3.04×10^{-3}	1.03×10^{-1}	3.44×10^{-5}	7.45×10^{-1}	1.19×10^{-3}	7.46×10^{-1}
	Cr	1.50×10^{-3}	5.65×10^{-2}	3.44×10^{-2}	9.24×10^{-2}	1.39×10^{-3}	4.21×10^{-1}	1.35×10^{-2}	4.36×10^{-1}
	Cu	7.69×10^{-7}	5.51×10^{-3}	3.27×10^{-3}	8.78×10^{-3}	7.16×10^{-7}	4.11×10^{-2}	1.28×10^{-3}	4.24×10^{-2}
	Ni	5.02×10^{-7}	3.42×10^{-3}	2.08×10^{-3}	5.50×10^{-3}	4.68×10^{-7}	2.55×10^{-2}	8.15×10^{-4}	2.63×10^{-2}
	Pb	1.14×10^{-5}	7.55×10^{-2}	1.53×10^{-3}	7.71×10^{-2}	1.06×10^{-5}	5.63×10^{-1}	6.00×10^{-4}	5.63×10^{-1}
对照区	Zn	3.34×10^{-7}	2.21×10^{-3}	3.36×10^{-4}	2.54×10^{-3}	3.12×10^{-7}	1.65×10^{-2}	1.32×10^{-4}	1.66×10^{-2}
	Cd	8.94×10^{-7}	5.90×10^{-3}	3.59×10^{-3}	9.50×10^{-3}	8.33×10^{-7}	4.40×10^{-2}	1.41×10^{-3}	4.54×10^{-2}
	As	2.64×10^{-5}	7.14×10^{-2}	2.17×10^{-3}	7.36×10^{-2}	2.46×10^{-5}	5.32×10^{-1}	8.52×10^{-4}	5.33×10^{-1}
	Cr	4.29×10^{-4}	1.62×10^{-2}	9.87×10^{-3}	2.65×10^{-2}	4.00×10^{-4}	1.21×10^{-1}	3.87×10^{-3}	1.25×10^{-1}
	Cu	5.16×10^{-7}	3.70×10^{-3}	2.19×10^{-3}	5.89×10^{-3}	4.80×10^{-7}	2.76×10^{-2}	8.59×10^{-4}	2.84×10^{-2}
	Ni	3.56×10^{-7}	2.42×10^{-3}	1.48×10^{-3}	3.90×10^{-3}	3.32×10^{-7}	1.81×10^{-2}	5.78×10^{-4}	1.86×10^{-2}
	Pb	3.85×10^{-6}	2.55×10^{-2}	5.18×10^{-4}	2.61×10^{-2}	3.58×10^{-6}	1.90×10^{-1}	2.03×10^{-4}	1.91×10^{-1}

Ni和As的总致癌风险水平均大于 1×10^{-6} ,处于不可接受风险水平。污染区与对照区成人与儿童Cd的致癌风险较高,均大于 1×10^{-4} ,表明污染区与对照区室内积尘中Cd对成人与儿童具有显著的致癌风险。成人与儿童Cd、Cr、Ni、As的致癌风险均表现为污染区高于对照区,其中污染区成人与儿童暴露4种重金属的复合致癌风险指数RISK_T分别是对照区的2.32倍和2.32倍(表8)。上述分析表明,在污染区与对照区室内积尘中Cd、Cr、Ni、As的污染对成人与儿童健康均有一定影响。

2.5 室内积尘中重金属来源分析

室内积尘中7种重金属 Pearson相关性分析结果表明,在污染区除 $w(\text{Cr})$ 与 $w(\text{Zn})$ 、 $w(\text{Cd})$ 以及 $w(\text{Ni})$ 与 $w(\text{Zn})$ 之间无相关关系外($P>0.05$),其他元素之间均为显著正相关($P<0.05$),表明它们之间可能具有相

同来源。

为进一步研究铁合金厂周边室内积尘的重金属主要来源,对污染区室内积尘中7种重金属的含量水平进行主成分分析,如表9所示。7种重金属的全部信息可以由2个主成分(PC1和PC2)反映69.07%,即对前两个主成分分析已经能够反映全部数据的大部分信息。PC1的方差贡献率为54.23%,Zn、Cd、Cu、Pb在PC1上具有较高载荷;PC2的方差贡献率为14.85%,Cr、As、Ni在PC2上具有较高载荷。已有资料显示,室内积尘的45%~50%来自于土壤和室外积尘,2%~3%来自于轮胎磨损和汽车尾气^[33]。有色金属冶炼排放的粉尘是室内积尘重金属的主要来源之一^[34]。研究发现,Zn、Cd、Cu、Pb等几种元素具有相似的地球化学性质,在矿石中经常以硫化物的形式存

表8 室内积尘中重金属致癌风险
Table 8 Carcinogenic risk of heavy metals in household dusts

研究区 Areas	元素 Elements	成人 Adults				儿童 Children			
		RISK _{呼吸}	RISK _{摄食}	RISK _{皮肤}	RISK	RISK _{呼吸}	RISK _{摄食}	RISK _{皮肤}	RISK
污染区	Cd	5.59×10^{-7}	3.69×10^{-3}	1.12×10^{-4}	3.80×10^{-3}	1.30×10^{-7}	6.88×10^{-3}	1.10×10^{-5}	6.89×10^{-3}
	As	1.07×10^{-9}	7.04×10^{-6}	2.14×10^{-7}	7.26×10^{-6}	2.48×10^{-1}	1.31×10^{-5}	2.10×10^{-8}	1.31×10^{-5}
	Cr	6.54×10^{-8}	4.32×10^{-4}	1.31×10^{-5}	4.45×10^{-4}	1.52×10^{-8}	8.05×10^{-4}	1.29×10^{-6}	8.06×10^{-4}
	Ni	8.90×10^{-9}	5.87×10^{-5}	1.79×10^{-6}	6.05×10^{-5}	2.07×10^{-9}	1.09×10^{-4}	1.75×10^{-7}	1.10×10^{-4}
	RISK _T				4.32×10^{-3}				7.81×10^{-3}
对照区	Cd	2.20×10^{-7}	1.45×10^{-3}	4.42×10^{-5}	1.50×10^{-3}	5.13×10^{-8}	2.71×10^{-3}	4.33×10^{-6}	2.71×10^{-3}
	As	4.60×10^{-1}	3.03×10^{-6}	9.24×10^{-8}	3.13×10^{-6}	1.07×10^{-1}	5.65×10^{-6}	9.05×10^{-9}	5.66×10^{-6}
	Cr	4.67×10^{-8}	3.09×10^{-4}	9.39×10^{-6}	3.18×10^{-4}	1.09×10^{-8}	5.75×10^{-4}	9.20×10^{-7}	5.76×10^{-4}
	Ni	5.97×10^{-9}	3.94×10^{-5}	1.20×10^{-6}	4.06×10^{-5}	1.39×10^{-9}	7.34×10^{-5}	1.17×10^{-7}	7.35×10^{-5}
	RISK _T				1.86×10^{-3}				3.37×10^{-3}

表9 污染区室内积尘中重金属主成分分析
Table 9 Principal component analysis of heavy metals in household dusts

项目 Items	PC1	PC2
特征根	3.80	1.04
贡献率/%	54.23	14.85
累积贡献率/%	54.23	69.07
Zn	0.35	-0.19
As	0.06	0.29
Cd	0.41	-0.20
Cr	-0.22	0.53
Cu	0.18	0.12
Ni	-0.18	0.49
Pb	0.34	-0.07

在,Zn、Cd、Pb这三种元素在矿石形成过程中常伴生存在^[35]。结合相关性分析发现Zn、Cd、Cu、Pb之间具有显著相关性($P < 0.05$),因此,污染区的室内积尘中Zn、Cd、Cu、Pb主要与铁合金厂的冶炼活动有关,冶炼过程中产生的含有Zn、Cd、Cu、Pb的烟尘会附着在颗粒物表面,悬浮扩散进入室内积尘。污染区Cr的平均含量高于背景值,根据相关调查发现,在污染区内曾经发生过严重的Cr污染^[21],由于土壤对重金属元素具有吸附固定作用,曾经进入污染区环境中的Cr元素会在土壤表层累积,随着外力的作用再次悬浮进入室内沉积,因此,污染区室内积尘中Cr主要与曾经受到的Cr污染有关。而As与Ni污染主要来源于砷、镍矿石^[18],且As与Ni之间具有显著相关性($P < 0.05$)。因此,污染区的室内积尘中As与Ni的污染,主要与铁合金厂的冶炼活动有关。

对照区室内积尘重金属主成分分析表明:As、Cd、Cr、Ni、Pb在PC1上具有较高荷载(71.06%),Zn、Cu在PC2上具有较高荷载(16.90%)。对照区地理位置相对偏远,受到交通、工业活动影响较小,室内积尘中重金属主要来源于室内污染。有研究表明在燃煤过程中As、Cd、Pb主要集中于煤尘中,Ni主要集中于煤灰中^[14]。对照区家庭主要依靠燃煤进行取暖、做饭,因此对照区室内积尘中As、Cd、Cr、Ni、Pb主要来源于室内燃煤。室内环境比较复杂,不少家具以及用具中含有重金属,比如铜制、镀锌、镀铬的器具的磨损也会导致重金属颗粒进入室内积尘中,另外在乳胶漆的抗菌防霉剂中含有Zn、Cu等重金属,墙体的脱落也会造成室内积尘中重金属含量的增加。因此对照区室内积尘中重金属主要来源于室内燃煤以及室内含重金属的器具、抗菌防霉剂的磨损。

3 结论

(1)辽宁锦州铁合金厂周边污染区居民家庭室内积尘中重金属含量显著高于对照区;Zn、Cd、As、Cr、Cu、Ni、Pb的平均含量均高于辽宁省土壤重金属背景值。

(2)锦州铁合金厂周边地区居民家庭室内积尘中重金属分布与当地主导风向和距污染源企业距离有关,在主导风向上随着距离增加积尘中重金属含量呈现先增加后降低的趋势。

(3)地累积指数评价结果表明辽宁锦州铁合金厂周边污染区居民家庭室内积尘中Cd的污染程度最强,应重点加强室内积尘Cd污染的关注。

(4)健康风险评价结果表明辽宁锦州铁合金厂周

边污染区和对照区室内积尘中Cd、Cr、Ni和As的总致癌风险水平高于 1×10^{-6} ,处于不可接受风险水平。

(5)辽宁锦州铁合金厂周边居民家庭室内积尘中Zn、As、Cd、Cu、Ni、Pb主要与有色金属冶炼活动、大气沉降、燃煤等因素有关。

参考文献:

- [1] Tan S Y, Praveena S M, Abidin E Z, et al. A review of heavy metals in indoor dust and its human health-risk implications[J]. *Reviews on Environmental Health*, 2016, 31(4):447-456.
- [2] 时圣刚. 重金属对环境与人体健康影响浅议[J]. *安徽农业科学*, 2013, 14(14):6425-6426.
- SHI Sheng-gang. Discussion about effects of heavy metal on environment and human health[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2013, 14(14):6425-6426.
- [3] 张 菊. 上海城市街道灰尘重金属污染研究[D]. 上海:华东师范大学, 2005.
- ZHANG Ju. Heavy metal pollution analyse of street dust in Shanghai [D]. Shanghai:East China Normal University, 2005.
- [4] 王学良. 重庆市主城区街道灰尘的污染分析研究[D]. 重庆:西南大学, 2008.
- WANG Xue-liang. Pollution analyse of street dust in core district of Chongqing[D]. Chongqing:Southwest University, 2008.
- [5] 李章平. 重庆市主城区街道灰尘的污染与风险特征研究[D]. 重庆:西南大学, 2012.
- LI Zhang-ping. Distribution and ecological risk assessment of heavy metals in urban street dust from Chongqing City, China[D]. Chongqing: Southwest University, 2012.
- [6] Na Z, Liu J, Wang Q, et al. Heavy metals exposure of children from stairway and sidewalk dust in the smelting district, northeast of China [J]. *Atmospheric Environment*, 2010, 44(27):3239-3245.
- [7] Ordóñez A, Álvarez R, De M E, et al. Spatial and temporal variations of trace element distribution in soils and street dust of an industrial town in NW Spain: 15 years of study[J]. *Science of the Total Environment*, 2015, 524/525:93-103.
- [8] 段海静,蔡晓强,阮心玲,等. 开封市公园地表灰尘重金属污染及健康风险[J]. *环境科学*, 2015, 36(8):2972-2980.
- DUAN Hai-jing, CAI Xiao-qiang, RUAN Xin-ling, et al. Assessment of heavy metal pollution and its health risk of surface dusts from parks of Kaifeng, China[J]. *Environmental Science*, 2015, 36(8):2972-2980.
- [9] Yoshinaga J, Yamasaki K, Yonemura A, et al. Lead and other elements in house dust of Japanese residences—source of lead and health risks due to metal exposure[J]. *Environmental Pollution*, 2014, 189(12):223-228.
- [10] 张舒婷,李晓燕. 城市室内灰尘重金属的水平及来源[J]. *环境化学*, 2014, 33(7):1201-1207.
- ZHANG Shu-ting, LI Xiao-yan. Concentrations and sources of heavy metals in indoor dust of cities[J]. *Environmental Chemistry*, 2014, 33(7):1201-1207.
- [11] 张 丽,袁 攀,王浩泉,等. 有色冶炼厂周边地表灰尘中重金属污染特征及健康风险评价[J]. *湖北理工学院学报*, 2016, 32(4):11-16.
- ZHANG Li, YUAN Pan, WANG Hao-quan, et al. Characteristics and health risk assessment of heavy metal in the surface dust around the nonferrous smeltery[J]. *Journal of Hubei Polytechnic University*, 2016, 32(4):11-16.
- [12] 金 丹. 沈阳市室内灰尘重金属暴露的人体健康风险评价[D]. 沈阳:沈阳大学, 2016.
- JIN Dan. Assessing heavy metals contamination and potential health risk from indoor dust in Shenyang, China[D]. Shenyang: Shenyang University, 2016.
- [13] 税 玥,张新悦,蔡怡薇,等. 上海居民室内灰尘重金属水平及环境评价[J]. *能源与节能*, 2016, 21(3):119-134.
- SHUI Yue, ZHANG Xin-yue, CAI Yi-wei, et al. Heavy metal concentration and environmental risk assessment in household dust in Shanghai[J]. *Energy and Energy Conservation*, 2016, 21(3):119-134.
- [14] 李晓燕,谢馨洁. 我国西南三市家庭灰尘重金属水平及差异[J]. *中国环境科学*, 2013, 33(2):365-371.
- LI Xiao-yan, XIE Xin-jie. A study on heavy metals in household dusts in 3 cities in southwestern China[J]. *China Environmental Science*, 2013, 33(2):365-371.
- [15] 邹梦遥,周遗品,邓金川,等. 某铅锌矿周边地区室内灰尘中重金属的生态风险评价[J]. *安徽农学通报*, 2015, 21(16):83-87.
- ZOU Meng-yao, ZHOU Yi-pin, DENG Jin-chuan, et al. The ecological risk assessment of heavy metals in household dust from a lead-zinc core mine[J]. *Anhui Agricultural Science Bulletin*, 2015, 21(16):83-87.
- [16] 梁桂云,陈志明,魏艳红,等. 西南某矿区周围环境尘中砷的分布特征分析[J]. *环境科学与技术*, 2015, 38(S1):100-103.
- LIANG Gui-yun, CHEN Zhi-ming, WEI Yan-hong, et al. Arsenic distribution of dust surrounding the mine in southwest of China[J]. *Environmental Science & Technology*, 2015, 38(Suppl 1):100-103.
- [17] 张骁勇. 尤溪铅锌矿区重金属的迁移和分布研究[D]. 福州:福建农林大学, 2012.
- ZHANG Xiao-yong. Distribution and transport of heavy metal in Youxi[D]. Fuzhou:Fujian Agriculture and Forestry University, 2012.
- [18] 张素娟. 蓝田冶炼厂周边农田土壤及小麦籽粒重金属复合污染分析与评价[D]. 西安:陕西师范大学, 2009.
- ZHANG Su-juan. Analysis and evaluation of heavy metal pollution in soil and wheat grain around Lantian metallurgical plant[D]. Xi'an: Shaanxi Normal University, 2009.
- [19] 张丽慧. 宝鸡市东岭铅锌冶炼厂周边地区植物及土壤中重金属含量研究[D]. 西安:陕西师范大学, 2011.
- ZHANG Li-hui. Study on heavy metal content in plants and soil around Dongling lead-zinc smelting plant in Baoji City[D]. Xi'an: Shaanxi Normal University, 2011.
- [20] 蔡艳荣,黄宏志. 锦州铁合金厂周围土壤金属污染状况调查分析[J]. *科学技术与工程*, 2010, 10(3):831-834.
- CAI Yan-rong, HUANG Hong-zhi. Investigation and analysis on the metal of the soil near the Jinzhou ferroalloy factory[J]. *Science Technology and Engineering*, 2010, 10(3):831-834.

- [21] 王 猛. 辽宁锦州工业铬污染对居民健康的影响研究[D]. 北京: 北京协和医学院, 2015.
- WANG Meng. Study on the effects of industrial chromium pollution on background residents' health in Jinzhou, Liaoning[D]. Beijing: Peking Union Medical College, 2015.
- [22] 赵庆令, 李清彩, 谢江坤, 等. 应用富集系数法和地累积指数法研究济宁南部区域土壤重金属污染特征及生态风险评价[J]. 岩矿测试, 2015, 34(1): 129-137.
- ZHAO Qing-ling, LI Qing-cai, XIE Jiang-kun, et al. Characteristics of soil heavy metal pollution and its ecological risk assessment in south Jining District using methods of enrichment factor and index of geoaccumulation[J]. *Rock and Mineral Analysis*, 2015, 34(1): 129-137.
- [23] Loska K, Wiechula D, Korus I. Metal contamination of farming soils affected by industry[J]. *Environment International*, 2004, 30(2): 159-165.
- [24] 北京市环境保护科学研究院. 场地环境评价导则 DB11/T 656—2009[S]. 北京: 北京市质量技术监督局, 2009.
- Environmental Protection Science Research Institute in Beijing. Environmental site assessment guidelines DB11/T 656—2009[S]. Beijing: Beijing Bureau of Quality and Technical Supervision, 2009.
- [25] 陈 耿, 刘 军, 杨立辉, 等. 燃煤电厂周边地区积尘重金属污染特征与健康风险评价[J]. 中山大学学报(自然科学版), 2016, 55(1): 107-113.
- CHEN Geng, LIU Jun, YANG Li-hui, et al. Pollution characteristics and health risk assessment of heavy metals in dust surrounding a coal-fired power plant[J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni*, 2016, 55(1): 107-113.
- [26] 蔡云梅, 黄涵书, 任露陆, 等. 珠三角某高校室内灰尘重金属含量水平、来源及其健康风险评价[J]. 环境科学, 2017, 38(9): 3620-3627.
- CAI Yun-mei, HUANG Han-shu, REN Lu-lu, et al. Levels, sources, and health risk assessments of heavy metals in indoor dust in a college in the Pearl River Delta[J]. *Environmental Science*, 2017, 38(9): 3620-3627.
- [27] 孙宗斌, 周 俊, 胡蓓蓓, 等. 天津城市道路灰尘重金属污染特征[J]. 生态环境学报, 2014, 23(1): 157-163.
- SUN Zong-bin, ZHOU Jun, HU Bei-bei, et al. Characteristics of heavy metal pollution in urban street dust of Tianjin[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2014, 23(1): 157-163.
- [28] 中国环境监测总站. 中国土壤元素背景值[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1990: 329-481.
- China National Environmental Monitoring Centre. Background values of Chinese soil elements[M]. Beijing: China Environmental Science Press, 1990: 329-481.
- [29] Cheng Z, Chen L J, Li H H, et al. Characteristics and health risk assessment of heavy metals exposure via household dust from urban area in Chengdu, China[J]. *Science of the Total Environment*, 2017, 619/620: 621-629.
- [30] 武家园, 方风满, 姚有如, 等. 淮南小学校园不同活动场所灰尘重金属区域分异及生物可给性[J]. 环境科学学报, 2017, 37(4): 1287-1296.
- WU Jia-yuan, FANG Feng-man, YAO You-ru, et al. Bioaccessibility and spatial distribution of heavy metals in dust from different activity areas of elementary schools in Huainan City[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2017, 37(4): 1287-1296.
- [31] 王 菲. 安徽省农村室内灰尘重金属生物可给性及健康风险评估[D]. 芜湖: 安徽师范大学, 2015.
- WANG Fei. Bioaccessibility and health risk assessment of heavy metal in household dust from Anhui rural areas[D]. Wuhu: Anhui Normal University, 2015.
- [32] Wan D J, Han Z X, Liu D W, et al. Pollution levels and spatial distribution of heavy metals in house dust from an industrial area in Xi'an, Central China[J]. *Fresenius Environmental Bulletin*, 2016, 25(3): 839-851.
- [33] 林跃胜. 淮南市居民区室内灰尘重金属分布特征、来源及其健康风险评价[D]. 芜湖: 安徽师范大学, 2016.
- LIN Yue-sheng. Distribution characteristic, sources and health risk assessment of heavy metals in indoor dust in residential areas of Huainan City[D]. Wuhu: Anhui Normal University, 2016.
- [34] 李晓燕, 汪 浪, 张舒婷. 城市室内灰尘重金属水平、影响因素及健康风险: 以贵阳市为例[J]. 环境科学, 2016, 37(8): 2889-2896.
- LI Xiao-yan, WANG Lang, ZHANG Shu-ting. Level and the courses of heavy metals and its risk assessment in indoor dust of city: Take Guiyang as a case[J]. *Environmental Science*, 2016, 37(8): 2889-2896.
- [35] Li X, Thornton I. Chemical partitioning of trace and major elements in soils contaminated by mining and smelting activities[J]. *Applied Geochemistry*, 2001, 16(15): 1693-1706.