

DOI: 10.7524/j.issn.0254-6108.2018082802

柴育红, 王明新, 赵兴青. 重工业区户外灰尘重金属含量水平及其生态和健康风险评估[J]. 环境化学, 2019, 38(6): 1375-1384.

CHAI Yuhong, WANG Mingxin, ZHAO Xingqing. Levels, ecological and health risk assessments of heavy metals in outdoor dust of a heavy industrial area[J]. Environmental Chemistry, 2019, 38(6): 1375-1384.

重工业区户外灰尘重金属含量水平及其生态和健康风险评估*

柴育红^{1,2} 王明新² 赵兴青²

(1. 常州大学 怀德学院, 靖江, 214513; 2. 常州大学 环境与安全工程学院, 常州, 213164)

摘要 以常州的一个重工业区为例, 2018 年 4 月采集了工业区内居住区、学校、公园、超市等 4 个区域的户外灰尘样品共 31 份, 并对其重金属 Cd、Cr、Cu、Mn、Ni 和 Pb 的含量进行测定, 以探究灰尘重金属污染的潜在生态和健康风险. 结果表明, 灰尘中 Cu、Zn、Pb、Ni、Cd 和 Cr 含量均值分别为 203.49、1184.52、442.21、124.51、4.82、289.24 mg·kg⁻¹, 均大于江苏省土壤背景值, Ni、Cr 含量略高于土壤背景值, Cu、Zn、Pb 含量为背景值的 8.7—20.1 倍, Cd 含量为背景值的 56.7 倍. 灰尘中 Cd 的富集程度为强烈, 富集系数为 25.47, Pb 和 Zn 为显著富集, Cu 为中度富集, 其影响可能来自于自然源、交通源和区域工业源, Ni 和 Cr 富集系数较小, 影响可能主要是自然源. 潜在生态风险评价结果表明, Cd 的潜在生态风险极强, 对生态风险起主导作用, 其它重金属潜在生态风险为轻微. 健康风险评价结果表明, Cr 和 Pb 对儿童的非致癌健康风险值超过 1, 其它重金属对成人与儿童非致癌风险和致癌风险均低于安全阈值.

关键词 工业区, 户外灰尘, 重金属, 潜在生态风险, 健康风险.

Levels, ecological and health risk assessments of heavy metals in outdoor dust of a heavy industrial area

CHAI Yuhong^{1,2} WANG Mingxin² ZHAO Xingqing²

(1. Huaide College, Changzhou University, Jingjiang, 214513, China;

2. School of Environmental & Safety Engineering, Changzhou University, Changzhou, 213164, China)

Abstract: In order to investigate potential ecological and health risks of heavy metals in outdoor dusts, 31 outdoor dust samples were collected from the residential areas, schools, parks and supermarkets in a heavy industrial district in Changzhou in April, 2018. The concentrations of Cu, Zn, Pb, Ni, Cd and Cr in the samples were determined. The results showed that the average contents of Cu, Zn, Pb, Ni, Cd and Cu were 203.49, 1184.52, 442.21, 124.51, 4.82 and 289.24 mg·kg⁻¹ respectively. The determined values were all above the soil background value of the elements in Jiangsu Province. The contents of Ni and Cr were slightly higher, but the contents of Cu, Zn, and Pb were 8.7—20.1 times, and the content of Cd was 56.7 times, than the soli background values. The enrichment degree was extremely high for Cd with the enrichment value of 25.47, significant for Zn and Pb, moderate for Cu, and slight for Ni and Cr. The possible sources of Cu, Zn, Pb and Cd were from nature, transportation and regional industry. Ni and Cr might be mainly

2018 年 8 月 28 日收稿 (Received: August 28, 2018).

* 国家自然科学基金 (41641032, 41541016) 资助.

Supported by the National Natural Science Foundation of China (41641032, 41541016).

* 通讯联系人, Tel: 1381215619, E-mail: cimuhong@163.com

Corresponding author, Tel: 1381215619, E-mail: cimuhong@163.com

from natural source. The assessment on potential ecological risk showed that the risk of Cd was extremely strong, and it plays a leading role in potential ecology risk. The ecological risk of other metals was slight. The non-carcinogenic risks of Cr and Pb on children were above 1, but non-carcinogenic risks and carcinogenic risks of other metals on human were all below the safety threshold.

Keywords: industrial area, outdoor dust, heavy metal, potential ecological risk, health risk.

重金属是环境中很重要的一类污染物,具有难降解性、可累积性等特点,绝大多数重金属具有潜在危害或致癌作用^[1]. As、Cd、Cr、Ni 和 Hg 有较强的致癌性^[2-4], Pb 影响儿童智力发育并导致行为表现异常等^[5]. Cu、Zn 是人体必须的微量元素,但过量摄入也会对人体消化系统、肝肾和大脑等器官产生健康危害^[6]. 重金属广泛存在于城市灰尘中,灰尘重金属能通过多种暴露途径进入人体,对人体健康带来危害^[7-8].

目前已有较多专家学者对城市灰尘重金属含量、来源、环境风险和健康风险等进行了深入研究. 相关研究主要关注城市城区、街道、学校、公园和交通枢纽等区域的城市灰尘污染问题^[9-14],结果显示城市灰尘重金属累积较严重,具有不同程度的环境风险和健康风险,而且不同城市、不同区域之间城市灰尘重金属含量变化较大,影响因素各不相同. 城市重工业区是城市灰尘重金属污染较为严重的区域,已经引起了学者的重点关注,任春辉等^[15]对宝鸡市长青镇工业园区(电厂、铅锌厂)周围灰尘重金属污染特征及健康风险进行了研究;杨孟等^[16]对南京市工业区(电厂、钢铁、石化)户外儿童游乐场地表灰尘重金属污染水平进行了研究;徐素娟^[17]等对葫芦岛市有色冶金区街道灰尘中 As 和 Pb 的污染水平及生态风险进行了研究;张丽等^[18]对黄石市有色冶炼厂周边地表灰尘中重金属污染特征及健康风险进行了研究;张文超等^[19]对宣威市电厂周边灰尘重金属污染特征进行了研究. 重工业区的行业类型不同,灰尘重金属的污染情况也不同,因此,有必要对重工业区户外灰尘重金属污染问题开展深入研究.

常州市某重工业区地处北纬 31°43′—31°47′,东经 120°00′—120°05′,属于苏南中部经济发达区域. 此地区平均风速为 $2.9 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,平均气温 20 ℃,春夏盛行东南风,秋冬盛行西北风,工业区内主要有钢铁厂、热电厂、机车厂、橡胶厂和印染厂等众多企业,随着工业的发展,交通运输量也随之增加,道路扬尘和工业粉尘已成为当地大气污染的主要来源. 本研究以该重工业区为研究对象,选择工业区内人群活动较多的居民区、超市、公园和学校等 4 个区域,采集户外窗台或矮墙上的灰尘,分析重金属含量,计算富集系数,并进行潜在生态风险评价和健康风险评价,旨在为重工业区灰尘重金属污染治理提供科学依据.

1 材料与方法 (Materials and methods)

1.1 样品采集

本研究采样时间为 2018 年 4 月,样品采集工作选择在一周前无降雨,晴朗、无风的日子进行. 为获取积累一定时间段的灰尘,本文选择在户外窗台或矮墙上采集长时间未清扫的灰尘. 采样点位设置见图 1,共选择了 24 个居民区、2 个学校、2 个公园和 3 个超市. 在每个采样点使用纸片和塑料刷随机采集 3 份 1 g 左右灰尘,混合起来形成 3 g 左右的混合样,装于自封样品袋中,并贴上标签,记录采样时间、地点、风向、附近污染源等信息后贴在对应样品袋上,带回实验室. 全部采样点共计采集灰尘样品 31 个.

1.2 分析项目

1.2.1 重金属含量测定

带回实验室的灰尘样品进行自然风干,过 35 目筛子除去杂质,取其中一部分样品细磨,过 200 目筛子后,称取 0.2 g 灰尘(精确到 0.0001 g)置于消解罐中,采用 6 mL 65% HNO_3 、0.25 mL H_2O_2 、3 mL HCl 的酸体系,用上海新仪微波消解仪(MDS-8G)程序升温进行消解,采用德国耶拿火焰原子吸收分光光度计(novAA300)测定样品中 Cu、Zn、Ni、Cr 的含量. 采用德国耶拿石墨炉原子吸收分光光度计(novAA400)测定样品中 Pb、Cd 的含量. 重金属标准溶液($1 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$)购自国家标准物质信息中心,用 5% 的硝酸稀释配制不同浓度梯度的系列标准使用液,绘制标准曲线.

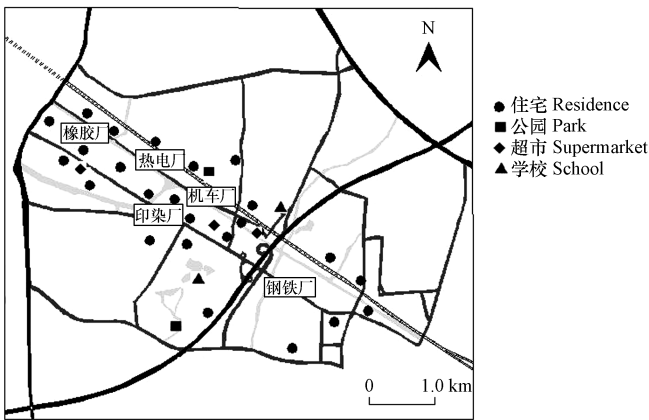


图 1 户外灰尘采样点分布图
Fig.1 Sampling location of outdoor dust

1.2.2 实验质量控制

本研究样品测定中进行严格的质量控制.实验器皿用 10%硝酸溶液浸泡 24h,再用自来水、去离子水清洗 3 遍.每个灰尘样品测定设 2 个平行样,取平均值为测定值.样品测定时,均测定试剂空白样,加标样用高纯的 $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$ 、 $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$ 、 $\text{Zn}(\text{NO}_3)_2$ 、 $\text{Ni}(\text{NO}_3)_2$ 、 $\text{Cd}(\text{NO}_3)_2$ 、 $\text{Cr}(\text{NO}_3)_3$ 和 $\text{Mn}(\text{NO}_3)_2$ 配置.平行实验偏差控制在 8% 以内,加标样的加标回收率均在 90%—105% 之间,保证测试数据的可靠性和准确性.

1.3 富集系数分析

富集系数 (EF) 是一种广泛应用于沉积物、土壤或灰尘等环境介质中,评价重金属污染程度的评价指标^[20],适用于表征某个区域微量元素的富集、浓缩程度,也可用来判别重金属污染来源,是自然源,还是人为源,参比元素一般选择迁移过程中性质比较稳定的元素,例如 Al、Fe、Mn 等^[21],本研究选取 Mn 作为参比元素. EF 的计算公式如下:

$$EF = [C_i / C_{Mn}]_{\text{sample}} / [C_i / C_{Mn}]_{\text{background}} \tag{1}$$

式中,分子的 C_i 为样品中重金属元素含量;分子的 C_{Mn} 为样品中参比元素 Mn 含量;分母的 C_i 为样品中重金属元素的背景值;分母的 C_{Mn} 为样品中参比元素 Mn 的背景值,以江苏省土壤背景值^[22] 为参照标准. EF 可以用来判断重金属污染源是人为源还是自然源(若 EF 值约为 1 则认为是自然源,若 EF 值大于 10 则认为主要来自人为污染源),其数值越大说明人为污染越严重.此外,根据 EF 大小又可将重金属的富集程度分为 5 种级别^[23], $EF < 2$, 1 级、轻微富集, $2 < EF < 5$, 2 级、中度富集, $5 < EF < 20$, 3 级、显著富集, $20 < EF < 40$, 4 级、强烈富集, $EF > 40$, 5 级、极强富集.

1.4 潜在生态风险评价

潜在生态风险评价法广泛应用于沉积物、土壤或灰尘等环境介质中,评价重金属污染程度及其潜在生态危害,计算公式为:

$$E_r^i = T_r^i C_s^i / C_n^i \tag{2}$$

$$RI = \sum E_r^i \tag{3}$$

式中, E_r^i 为土壤中第 i 种重金属的潜在生态危害系数; C_s^i 为样品中第 i 种重金属的实测含量 ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$); C_n^i 为第 i 种重金属的背景参比含量 ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$),一般以国家土壤环境标准值作为参比含量; T_r^i 为第 i 种重金属的毒性系数,本研究采用的毒性系数分别为: Zn(1)、Cr(2)、Cu(5)、Ni(5)、Pb(5)、Cd(30)^[24]. 根据文献^[25], E_r 值分级标准的第一级(轻微生态风险)上限值由非污染的污染系数(系数为 1)与所研究的污染物中最大毒性响应系数(T_r)相乘而得到,其他风险级别的上限分别用上级的分级值乘 2 得到.

本研究的 6 种金属中,最大的 T_r 为 30 (Cd),由此得到 E_r 的 5 级分级标准为: $E_r < 30$, 轻微生态风险, $30 \leq E_r < 60$, 中等生态风险, $60 \leq E_r < 120$, 强生态风险, $120 \leq E_r < 240$, 很强生态风险, $E_r \geq 240$, 极强生态风险. RI 为土壤中多项重金属的综合潜在生态危害指数,其为所有单项金属潜在生态危害系数 E_r^i 的加和. 1980 年 Hakanson^[26] 研究了 8 种污染物 (PCBs、Hg、Cd、As、Pb、Cu、Cr、Zn), 提出了 RI 的 4 级分级标

准,由式(2)和式(3)可看出,RI 的大小与污染物的数量和种类有关,污染物的数量越多,毒性越大,则 RI 值就越大.

本研究只研究了 6 种重金属污染物,因此需对 Hakanson 的分级标准进行相应调整,根据文献[25]的调整方法得到 RI 的 4 级分级标准:RI<54,轻微生态风险,54≤RI<108,中等生态风险,108≤RI<216,强生态风险,216≤RI<432,很强生态风险.

1.5 健康风险评价

1.5.1 评价模型

本研究以美国环保署(US EPA) [27] 提出的土壤健康风险模型为来评价重工业区居民暴露在户外灰尘重金属的健康风险.灰尘中 Cu、Zn、Pb、Cd、Ni 和 Cr 都具有慢性非致癌健康风险,而 Ni、Cd 和 Cr 具有致癌风险.模型假设工业区的儿童和成年人主要通过以下 3 种暴露途径摄入户外灰尘重金属:直接摄食、呼吸吸入和皮肤接触.参考国内外有关研究成果以及我国场地环境评价导则[28],模型中日均暴露量计算参数如表 1 所示.简化认为整个非致癌暴露风险可以通过所有重金属在 3 种暴露途径的风险加和得出,不考虑各种金属污染物的毒性差异以及进入人体后的相互作用.

表 1 重金属暴露量计算模型参数含义及其取值
Table 1 Parameters and values for exposure dose calculation of heavy metals

因素 Factor	定义 Definition	单位 Unit	取值 Value			文献 Reference
			儿童 Children	成年男性 Adult men	成年女性 Adult female	
C	暴露点金属浓度	mg·kg ⁻¹			几何平均值	本文
IngR	摄食灰尘量	mg·d ⁻¹	200	100	100	[29]
EF	暴露频率	d·y ⁻¹			350	[29]
ED	暴露年限	Year	6	24	24	[29]
BW	平均体重	kg	15	67	58	[5,30]
AT(非致癌)	平均暴露时间	d			365×ED	[31]
AT(致癌)	平均暴露时间	d			365×70	[31]
InhR	空气摄入量	m ³ ·d ⁻¹	7.6	19	14	[10,30]
PEF	颗粒排放因子	m ³ ·kg ⁻¹			1.32E+09	[28]
SA	皮肤暴露面积	cm ²	1800	5000	5000	[28]
SL	皮肤附着因子	mg·(cm ² ·d) ⁻¹	0.2	0.07	0.07	[29]
ABS	皮肤吸收因子				0.001	[28]

1.5.2 日均暴露剂量

环境介质中的灰尘重金属可通过皮肤接触、直接摄食、呼吸吸入吸收这 3 种暴露途径进入人体,各种途径的暴露量按公式(4)—(6)计算[7-8].金属污染物暴露量以单位体重、单位时间人体暴露的污染物量来表示.

$$D_{ing} = \frac{C \times IngR \times EF \times ED}{BW \times AT} \times 10^{-6}$$

(4)

$$D_{inh} = \frac{C \times InhR \times EF \times ED}{PEF \times BW \times AT}$$

(5)

$$D_{derm} = \frac{C \times SA \times SL \times ABS \times EF \times ED}{BW \times AT} \times 10^{-6}$$

(6)

式中, D_{ing} 为摄食途径的重金属日均暴露量,mg·(kg·d)⁻¹, D_{inh} 为吸入途径的重金属日均暴露量,mg·(kg·d)⁻¹, D_{derm} 为皮肤接触途径的重金属日均暴露量,mg·(kg·d)⁻¹.在重金属非致癌和致癌暴露量计算中的 AT 的取值不同,在计算非致癌重金属暴露量时,AT= 365×ED d,在计算致癌重金属暴露量时,AT= 365×70 d.

1.5.3 风险评价

本研究中 6 种灰尘重金属 Cu、Zn、Pb、Cd、Ni 和 Cr 均具有慢性非致癌健康风险,对于非致癌风险,

使用非致癌风险商(HQ)和风险指数(HI)来衡量^[5],具体表达如式(7)、式(8)所示.

$$HQ=D/RfD$$

(7)

$$HI=\sum HQ_i$$

(8)

式中,HQ表示单项重金属通过某一暴露途径的非致癌风险,即风险商;*D*表示单项重金属通过某一暴露途径的日均暴露量, $\text{mg}\cdot(\text{kg}\cdot\text{d})^{-1}$;RfD为单项重金属的某一暴露途径的参考剂量, $\text{mg}\cdot(\text{kg}\cdot\text{d})^{-1}$,即摄取单项重金属不会引起人体不良反应的污染物最大量;HI为单项重金属通过3种暴露途径的非致癌风险指数.HI_总为所有重金属非致癌风险指数的加和.当HI或HI_总>1时,表明重金属存在非致癌健康风险,其值越大,风险就越大.当HI或HI_总<1时,表明重金属没有非致癌健康风险.

本研究中3种灰尘重金属Cd、Ni和Cr均具有致癌健康风险.对于致癌健康风险使用致癌风险指数(CR)来量度,其表示单位数量人口癌症发生的概率,一般采用终生日均暴露量与致癌斜率因子的乘积来计算^[31],从现有的研究资料中仅可获取呼吸途径的致癌斜率因子,缺乏直接摄食和皮肤摄入的致癌斜率因子,故本研究中仅考虑重金属通过呼吸途径的致癌风险.致癌风险指数(CR)表达式如下:

$$CR=D_{inh}\cdot SF_{inh}$$

(9)

式中CR为致癌风险指数,是指1个人一生中暴露于呼吸途径的致癌的概率;*D_{inh}*表示单项重金属通过呼吸途径的终生日暴露量, $\text{mg}\cdot(\text{kg}\cdot\text{d})^{-1}$;SF_{inh}为单项重金属通过呼吸途径的致癌斜率因子, $[\text{mg}\cdot(\text{kg}\cdot\text{d})^{-1}]^{-1}$,表示人体暴露于一定剂量单项重金属产生致癌效应的最大概率;CR_总是多项重金属的致癌风险指数总和.通常认为CR或CR_总<10⁻⁶,人体无致癌风险,10⁻⁶<CR或CR_总<10⁻⁴,人体有可耐受的致癌风险,CR或CR_总>10⁻⁴,人体有致癌风险.

不同重金属不同暴露途径的参考剂量RfD和斜率因子SF见表2^[32].

表2 重金属不同暴露途径的参考剂量和斜率因子

Table 2 Reference doses and slope factors of different exposure pathways of heavy metals

项目 Items	单位 Unit	Pb	Cu	Zn	Ni	Cd	Cr
食入参考剂量(RfD _{ing})	$\text{mg}\cdot(\text{kg}\cdot\text{d})^{-1}$	3.50×10^{-3}	4.00×10^{-2}	3.00×10^{-1}	2.00×10^{-2}	1.00×10^{-3}	3.00×10^{-3}
吸入参考剂量(RfD _{inh})	$\text{mg}\cdot\text{kg}\cdot\text{d})^{-1}$	3.52×10^{-3}	4.02×10^{-2}	3.00×10^{-1}	2.06×10^{-2}	1.00×10^{-3}	2.86×10^{-5}
接触参考剂量(RfD _{derm})	$\text{mg}\cdot(\text{kg}\cdot\text{d})^{-1}$	5.25×10^{-4}	1.20×10^{-2}	6.00×10^{-2}	5.40×10^{-3}	1.00×10^{-5}	6.00×10^{-5}
斜率因子(SF _{inh})	$[\text{mg}\cdot(\text{kg}\cdot\text{d})^{-1}]^{-1}$	—	—	—	8.40×10^{-1}	6.3	4.20×10^{-1}

2 结果与讨论(Results and discussion)

2.1 重金属含量分布特征

常州重工业区户外灰尘样品的重金属含量测定结果及变异系数见表3.从表3可以看出,灰尘中Cu、Zn、Pb、Ni、Cd、Cr等6种重金属含量平均值均超过江苏省土壤背景值,其含量超出背景值的倍数分别为8.70、18.28、20.10、3.80、56.7、3.83,Cd超标最多,Pb和Zn次之,说明户外灰尘中重金属污染严重.

变异系数反映了样本的平均变异程度,变异系数越大,表示样本分布差异越大^[4].由表3可以看出,变异系数较大的是Pb、Cd、Cr,分别达到55.64%、50.83%、45.30%,表明灰尘中这3种金属的分布差异较大,可能是采样点距周围人为污染源的远近不同所致^[33];Cu、Zn、Ni等3种重金属元素的变异系数较小,在23.53%—27.16%之间,表明这3种重金属元素分布比较均匀,受人为污染源的影响相似.

不同区域户外灰尘重金属几何平均值有差异(表3),4个区域中的Cu和Ni均值相差不大,居住区和超市的Zn均值都高于其它两个区域,居住区和公园的Pb均值都高于其它两个区域,公园的Cd和Cr均值都高于其他区域,显示不同区域多种金属含量存在显著性差异,受周围人为污染源的影响不同.

2.2 与国内不同城市重工业区灰尘重金属含量比较

与国内不同城市重工业区户外灰尘重金属含量相比(表4),常州市重工业区灰尘重金属污染明显比西安和南京严重,比宣威、宝鸡、黄石较轻,葫芦岛只有Pb含量数据,不参与总体比较.Cu和Cd均低

于宣威和黄石而高于其他几个城市;Zn 和 Pb 均高于南京和西安而低于其他几个城市;Ni 的含量明显高于除宣威外的其他所有城市;Cr 高于黄石和南京而低于其它几个城市。

表 3 户外灰尘重金属含量($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, $n=31$)
Table 3 Concentrations of heavy metals in outdoor dust

指标 Index	Cu	Zn	Pb	Ni	Cd	Cr
最大值	340.99	2017.12	1268.60	186.14	10.07	528.65
最小值	147.04	720.12	156.70	80.69	1.16	40.08
平均值	203.49	1184.52	442.21	124.51	4.82	289.24
标准偏差	53.95	321.72	246.06	29.3	2.45	131.02
变异系数/%	26.51	27.16	55.64	23.53	50.83	45.30
江苏省土壤重金属背景值	23.40	64.80	22.00	32.80	0.085	75.60
工业区几何平均值($n=31$)	197.26	1145.97	391.71	121.14	4.11	254.53
居住区几何平均值($n=24$)	193.60	1169.66	402.46	120.01	3.67	247.61
学校几何平均值($n=2$)	174.74	776.09	275.48	112.01	5.49	328.70
超市几何平均值($n=3$)	231.78	1144.71	287.95	108.79	6.41	201.85
公园几何平均值($n=2$)	193.94	897.78	449.05	159.15	8.20	501.92

表 4 不同城市重工业区地表灰尘重金属含量
Table 4 Concentrations of heavy metals in industrial areas of different cities

城市 City	重金属 Heavy metals /($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)						相关工业 Related industry	文献 Reference
	Cu	Zn	Pb	Ni	Cd	Cr		
宝鸡	178.2	1918.8	1586.2	40.2	—	1591.8	电厂、冶炼、焦化	[15]
南京	94.25	428.40	84.66	35.70	1.20	70.27	电厂、钢铁、石化	[16]
葫芦岛	—	—	533.2	—	—	—	有色冶金、化工	[17]
黄石	5381.39	3971.72	1754.00	80.92	120.76	150.87	冶炼	[18]
宣威	433.39	1271.09	460.98	182.02	33.57	1377.15	电厂	[19]
西安	69.3	278.8	223.9	37.2	1.4	314.6	电厂	[34]
常州	203.49	1184.52	442.21	124.51	4.82	289.24	电厂、钢铁、机车、化工	本文

2.3 重金属富集系数分布特征

6 种重金属富集系数均值从小到大依次为: $\text{Cr}<\text{Ni}<\text{Cu}<\text{Zn}<\text{Pb}<\text{Cd}$ (表 5).Cd 的富集系数为 25.47,富集程度最高,达到了强烈级别,受污染源影响大,与喻超等^[35]研究成果相似;Zn 和 Pb 富集系数分别为 8.78、9.14,富集程度为显著,Cu 的富集系数 4.21,富集程度为中度,3 种金属受一定程度的污染源影响;而 Ni 和 Cr 的富集程度为轻微,表明受污染源影响较小。

由表 5 可以看出,重金属富集系数的变异系数较大的是 Cd、Pb、Cr,分别达到 31.96%、30.74%、25.86%,表明户外灰尘中这 3 种金属的富集程度差异较大;而 Cu、Zn、Ni 等 3 种重金属富集系数的变异系数较小,在 3.82%—9.50%之间,说明这 3 种重金属的富集程度比较均匀。

表 5 户外灰尘重金属富集系数
Table 5 Enrichment factors of heavy metals in outdoor dust

指标 Index	项目 Items	Cu	Zn	Pb	Ni	Cd	Cr
重金属富集系数	平均值	4.21	8.78	9.14	1.83	25.47	1.74
	富集等级	中度	显著	显著	轻微	强烈	轻微
	标准偏差	0.40	0.59	2.81	0.07	8.14	0.45
	变异系数/%	9.50	6.72	30.74	3.82	31.96	25.86

2.4 重金属潜在生态危害评价

从单项重金属潜在生态危害系数 E_i^p 来看(表 6),Cd 的危害系数最高,平均值为 481.99, $E_i^p\geq 240$ 的采样点数占了总样点数的 79.31%,表现出极强的生态危害风险,天津市大港工业区生态危害最严重的也同样是 Cd^[36];其它重金属 Cu、Zn、Pb、Ni 和 Cr 的潜在生态危害系数平均值分别为 20.35、5.92、8.84、15.56 和

3.86,生态危害程度为轻微.从变异系数来看,Pb、Cd 和 Cr 的变异系数较大,分别为 55.66%、50.84%和 45.34%,表明工业区内灰尘中 Pb、Cd 和 Cr 的生态危害变化幅度大,与工业区污染源的分布有关.

从多项重金属综合潜在生态危害指数 RI 来看(表 6),重金属的潜在生态危害指数平均值为 536.53,表现为很强的生态危害程度;危害指数最大值为 1106.82,最小值为 148.45,变异系数为 48.78%,表明重金属的危害指数具有较大差异性,主要贡献因子是 Pb、Cd 和 Cr.

表 6 潜在生态危害系数和危害指数
Table 6 Potential ecological risk factors and indexes

项目 Items	E_r^i						RI
	Cu	Zn	Pb	Ni	Cd	Cr	
最大值	34.10	10.54	25.37	23.27	1006.50	7.05	1106.82
最小值	14.70	3.60	3.13	10.09	116.39	0.53	148.45
平均值	20.35	5.92	8.84	15.56	481.99	3.86	536.53
标准偏差	5.39	1.61	4.92	3.66	245.06	1.75	261.70
变异系数/%	26.49	27.20	55.66	23.52	50.84	45.34	48.78

2.5 重金属健康风险评价

2.5.1 重金属日均暴露量

本研究使用几何均值进行计算.根据公式(4)、(6)和表 1 中的参数值,计算了各重金属 3 种途径的日平均暴露量,结果如表 7.各重金属的日均暴露量的排序为 Zn > Pb > Cr > Cu > Ni > Cd,灰尘中重金属含量与此顺序一致.成年女性的日暴露量均高于成年男性(呼吸途径除外);儿童暴露量均高于成人,其总暴露量为成年男性的 8.91 倍,为成年女性的 7.74 倍.从暴露量途径来看,呈现直接摄食途径> 皮肤接触途径> 呼吸吸入途径,直接摄食是户外灰尘重金属暴露的主要途径^[15,37].

表 7 户外灰尘重金属不同途径暴露剂量
Table 7 Average daily doses for each metal and exposure pathway from outdoor dust

金属 Metals	成年男性 Adult men			成年女性 Adult female			儿童 Children		
	D_{ing}	D_{inh}	D_{derm}	D_{ing}	D_{inh}	D_{derm}	D_{ing}	D_{inh}	D_{derm}
Cu	2.82×10^{-4}	4.06×10^{-8}	9.88×10^{-7}	3.25×10^{-4}	3.45×10^{-8}	1.14×10^{-6}	2.52×10^{-3}	7.26×10^{-8}	4.54×10^{-6}
Zn	1.64×10^{-3}	2.36×10^{-7}	5.74×10^{-6}	1.89×10^{-3}	2.01×10^{-7}	6.63×10^{-6}	1.47×10^{-2}	4.22×10^{-7}	2.64×10^{-5}
Pb	5.60×10^{-4}	8.07×10^{-8}	1.96×10^{-6}	6.46×10^{-4}	6.85×10^{-8}	2.27×10^{-6}	5.01×10^{-3}	1.44×10^{-7}	9.01×10^{-6}
Ni	1.73×10^{-4}	2.49×10^{-8}	6.07×10^{-7}	2.00×10^{-4}	2.12×10^{-8}	7.01×10^{-7}	1.55×10^{-3}	4.46×10^{-8}	2.79×10^{-6}
Cd	5.88×10^{-6}	8.47×10^{-10}	2.06×10^{-8}	6.78×10^{-6}	7.19×10^{-10}	2.38×10^{-8}	5.26×10^{-5}	1.51×10^{-9}	9.45×10^{-8}
Cr	3.64×10^{-4}	5.24×10^{-8}	1.27×10^{-6}	4.20×10^{-4}	4.45×10^{-8}	1.47×10^{-6}	3.26×10^{-3}	9.37×10^{-8}	5.85×10^{-6}
总计	3.04×10^{-3}			3.50×10^{-3}			2.71×10^{-2}		

2.5.2 重金属暴露的健康风险

根据表 3 和表 7 数据利用公式(7)—(9)计算出重工业区户外灰尘中 6 种重金属元素对人体的健康风险,其评价结果如图 2 所示.

从图 2(a)、(b)可以看出,对于 6 种重金属的非致癌风险的排序为 Pb > Cr > Ni > Cd > Cu > Zn, Pb 和 Cr 的非致癌风险远高于其它 4 种重金属;而对于 3 种重金属的致癌风险的排序为 Cr > Ni > Cd, Cr 的致癌风险指数远高于 Zn、Pb,这与姚静波等^[3]和李如忠等^[38]的结论相似,主要是 Cr 的致癌斜率因子较大,致癌风险较高.对于人群来说,儿童的 $HI_{总}$ 高达 2.89,非致癌健康风险明显;成年女性的风险高于成年男性,两者的 $HI_{总}$ 均小于 1,没有非致癌健康风险.相比成人来说,儿童体质对风险更加敏感,所以应多关注儿童,对儿童的非致癌健康风险进行防治.成人的致癌风险高于儿童,成年男性的风险高于成年女性,三者的 CR 均小于 10^{-6} ,人体无致癌风险.

从图 2(c)、(d)可以看出,在区域的健康风险上,公园的非致癌风险和致癌风险均高于其它 3 个区域,引起对公园健康风险的思考,由于公园是人群空余时间的休闲场所,因此对此结果应给予重视,尤其是应加强 Cr 和 Pb 污染的管理和防治.

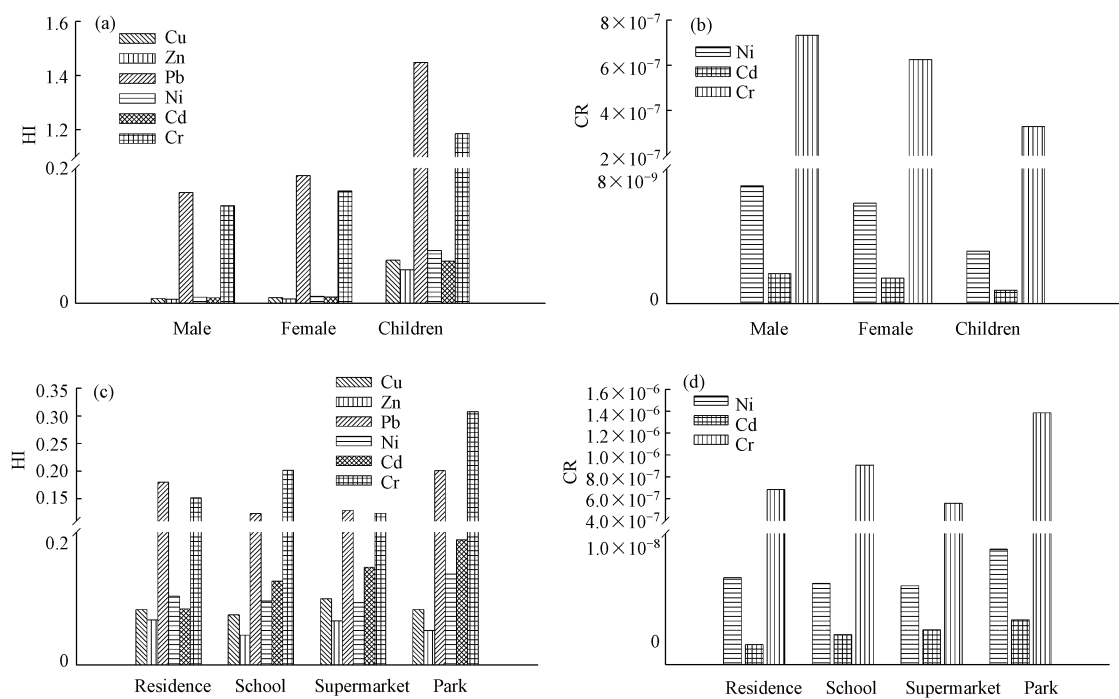


图2 人群和地区健康风险
(a) 人群非致癌健康风险, (b) 人群致癌健康风险, (c) 地区非致癌健康风险, (d) 地区致癌健康风险

Fig.2 Health risk of populations and regions

(a) Non-carcinogenic risk of populations, (b) Carcinogenic risk of populations,
(c) Non-carcinogenic risk of regions, and (d) Carcinogenic risk of regions

在致癌风险评估中,缺少直接摄食和皮肤摄入的相关数据,本研究中仅考虑呼吸途径的致癌风险,而前面日均暴露量的计算结果表明,直接摄食是户外灰尘重金属暴露的主要途径,所以致癌风险的评价结果并不能说明实际的致癌风险,仅做参考,重工业区重金属的致癌风险还有待于进一步评估。

3 结论 (Conclusion)

- (1) 重工业区户外灰尘中重金属 Cu、Zn、Pb、Ni、Cd、Cr 的含量平均值分别为 203.49、1184.52、442.21、124.51、4.82、289.84 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,均超过江苏省土壤背景值。Pb、Cd 和 Cr 变异系数较大,可能与采样点周围人为污染源的分布有关,Cu、Zn 和 Ni 的变异系数较小,可能是单一污染源所致.不同区域重金属含量存在差异,Zn 含量在居住区和超市较高,Pb 含量在居住区和公园较高,Cd 和 Cr 含量在公园较高。
- (2) 重工业区户外灰尘中重金属除 Ni 和 Cr 外富集程度均达到中度以上,人为污染严重,Cd 的富集程度最高.Cd、Pb 和 Cr 的富集程度差异较大,Cu、Zn 和 Ni 的富集程度均匀。
- (3) 潜在生态风险评价结果表明,Cd 的潜在生态风险极强,其它重金属潜在生态风险均处于轻微,Pb、Cd 和 Cr 的潜在生态风险具有较大差异性。
- (4) 健康风险评价结果表明,儿童的非致癌风险大于成人,且超过 1;成年女性风险大于成年男性,都没有非致癌风险;成人的致癌风险大于儿童,且成年男性的致癌风险大于成年女性,但均不存在致癌风险;公园的健康风险高于其它区域.健康风险的主要贡献者是 Pb 和 Cr。

参考文献 (References)

[1] ZHENG N, LIU J H, WANG Q C. 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.

[2] PAN L B, WANG Y, MA J, et al. A review of heavy metal pollution levels and health risk assessment of urban soils in Chinese cities[J].

- Environmental Science and Pollution Research, 2018, 25:1055-1069.
- [3] 姚静波,王明新,齐今迪,等. 高架道路周边建筑物灰尘重金属污染风险:以常州市为例[J]. 环境科学,2017,38(5):1807-1816.
YAO J B, WANG M X, QI J D, et al. Pollution risk of heavy metal in dust from the building along elevated highway: A case study in Changzhou[J]. Environmental Science, 2017, 38(5):1807-1816(in Chinese).
- [4] 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 Y M, HUANG H S, REN L L, 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(in Chinese).
- [5] 唐荣莉,马克明,张育新,等. 北京城市道路灰尘重金属污染的健康风险评价[J]. 环境科学学报,2012,32(8):2006-2015.
TANG R L, MA K M, ZHANG Y X, et al. Health risk assessment of heavy metals of street dust in Beijing [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2012, 32(8):2006-2015(in Chinese).
- [6] 尤汉虎,庞智锋,梁雅慧,等. 佛山市某城区饮用水重金属健康危害风险初步评估[J]. 华南预防医学,2011,37(3):32-36.
YOU H H, PANG Z F, LIANG Y H, et al. Health risk assessment of heavy metals in drinking water a certain district of Foshan City[J]. South China Journal of Preventive Medicine, 2011, 37(3):32-36(in Chinese).
- [7] MANASH GOPE, REGINALD EBHIN MASTO, JOSHY GEORGE, et al. Bioavailability and health risk of some potentially toxic elements (Cd, Cu, Pb and Zn) in street of Asansol, India [J]. Ecotoxicology and Environmental Safety environment, 2017, 138: 231-241.
- [8] 谷阳光,高富代. 我国省会城市土壤重金属含量分布与健康风险评价[J]. 环境化学,2017,36(1): 62-71.
GU Y G, GAO F D. Spatial distribution and health risk assessment of heavy metals in provincial capital cities, China[J]. Environmental Chemistry, 2017, 36(1): 62-71(in Chinese).
- [9] 李晓燕,张舒婷. 城市区域近地表灰尘及重金属沉降垂向季节变化[J]. 环境科学,2015,36(6): 2274-2282.
Li X Y, Zhang S T. Seasonal provincial characteristics of vertical distribution of dust loadings and heavy metals near surface in city[J]. Environmental Science, 2015, 36(6): 2274-2282(in Chinese).
- [10] 徐玮,吕宾,储金字,等. 镇江市老城区不同功能区地表灰尘重金属污染评价[J]. 环境化学,2012,31(2): 182-188.
XU W, LU B, CHU J Y, et al. Assessment of heavy metal contamination in road-deposited sediment from different functional district of Zhenjiang[J]. Environmental Chemistry, 2012, 31(2): 182-188(in Chinese).
- [11] 潘新星,高琪,王明新,等. 常州市道路两侧户外灰尘重金属分布、形态及环境风险[J]. 环境化学,2015,34(7): 1374-1376.
PAN X X, GAO Q, WANG M X, et al. Distribution, specification and environmental risk of roadside outdoor dust in Changzhou[J]. Environmental Chemistry, 2015, 34(7): 1374-1376(in Chinese).
- [12] 段恒轶,吴亚涛,王珏,等. 北京市幼儿园地面尘中有毒金属浓度及其健康风险[J]. 环境科学,2014,35(8):3060-3065.
DUAN H Y, WU Y T, WANG Y, et al. Concentration and health risks of toxic metals in surface dust in kindergartens of Beijing[J]. Environmental Science, 2014, 35(8):3060-3065(in Chinese).
- [13] 赵珀,卢新卫,黄丽,等. 西安市公园灰尘重金属污染及其健康风险评价[J]. 城市环境与城市生态,2015,28(6):5-9.
ZHAO P, LU X W, HUANG L, et al. Pollution level and health risk of heavy metals in dust from city parks of Xi'an[J]. Urban Environment & Urban Ecology, 2015, 28(6):5-9(in Chinese).
- [14] 邵莉,肖化云,李南,等. 高速公路沿线路面灰尘及土壤中重金属污染特征研究[J]. 地球与环境,2013,41(6): 661-668.
SHAO L, XIAO H Y, LI N, et al. Pollution characterization of heavy metals inroad dusts and soils near expressways[J]. Earth and Environment, 2013, 41(6): 661-668(in Chinese).
- [15] 任春辉,卢新卫,李晓雪,等. 宝鸡长青镇工业园区周围灰尘重金属污染特征及健康风险[J]. 地球与环境,2012,40(3):367-374.
REN C H, LU X W, LI X X, et al. Pollution level and health risk of heavy metals in dust from the surrounding environment of the industrial park in Changqing town of Baoji[J]. Earth and Environment, 2012, 40(3):367-374(in Chinese).
- [16] 杨孟,李慧明,李凤英,等. 工业区户外儿童游乐场地表灰尘重金属污染的磁学响应[J]. 环境科学,2017,38(12):5282-5291.
YANG M, LI H M, LI F Y, et al. Magnetic response of heavy metal pollution in playground dust of an industrial area[J]. Environmental Science, 2017, 38(12):5282-5291(in Chinese).
- [17] 徐素娟,郑娜,刘景双,等. 有色冶金区街道灰尘中As和Pb的空间分布特征及其生态风险[J]. 环境科学,2011,32(5):1441-1446.
XU S J, ZHEN N, LIU J S, et al. Spatial distribution and environmental risk of As and Pb from street dust in non-ferrous metals smelting areas[J]. Environmental Science, 2011, 32(5):1441-1446(in Chinese).
- [18] 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):11-16,25.
ZHANG L, YUAN P, WANG H Q, 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):11-16,25(in Chinese).
- [19] 张文超,吕森林,刘丁彧,等. 宣威街道尘中重金属的分布特征及其健康风险评估[J]. 环境科学,2015,36(5):1810-1817.
ZHANG W C, LU S L, LIU D Y, et al. Distribution characteristics of heavy metals in the street dusts in Xuanwei and their healthrisk assessment[J]. Environmental Science, 2015, 36(5):1810-1817(in Chinese).
- [20] RA S. A comparison of geochemical information obtained from two fluvial bed sediment fractions[J]. Environmental Geology, 2000, 39(3-4): 330-341.
- [21] HAN Y M, DU P X, CAO J J, et al. Multivariate analysis of heavy metal contamination in urban dusts of Xi'an, Central China [J]. Science of the Total Environment, 2006, 355(1): 176-186.
- [22] 廖启林,刘聪,许艳,等. 江苏省土壤元素地球化学基准值[J]. 中国地质,2011,38(5):1363-1378.
LIAO Q X, LIU C, XU Y, et al. Geochemical baseline values of soil elements in Jiangsu Province [J]. Geology in China, 2011, 38(5): 1363-1378(in Chinese).

- [23] 韩君,徐应明,温兆飞,等. 重庆某废弃电镀工业园农田土壤重金属污染调查与生态风险评价[J]. 环境化学,2014,33(3): 432-439.
HAN J, XU Y M, WEN Z F, et al. Investigation and ecological risk assessment of heavy metal pollution in agriculture soil of an abandoned electroplating industrial park of Chongqing, China[J]. Environmental Chemistry, 2014, 33(3): 432-439(in Chinese).
- [24] 徐争启,倪师军,度先国,等. 潜在生态危害指数法评价中重金属毒性系数计算[J]. 环境科学与技术, 2008,31(2):112-115.
XU Z Q, NI S J, DU X G, et al. Calculation of heavy metal's toxicity coefficient in the evaluation of potential ecological risk index[J]. Environmental Science & Technology, 2008, 31(2):112-115(in Chinese).
- [25] 马建华,王晓云,侯千,等. 某城市幼儿园地表灰尘重金属污染及潜在生态风险[J]. 地理研究,2011,30(3):486-495.
MA J H, WANG X Y, HOU Q, et al. Pollution and potential ecological risk of heavy metals in surface dust on urban kindergartens[J]. Geographical Research, 2011, 30(3):486-495(in Chinese).
- [26] HAKANSON L. An ecological risk index for aquatic pollution control: A sediment-logical approach[J]. Water Research, 1980, 14(8): 975-1001.
- [27] US EPA. Supplemental guidance for developing soil screening level for superfund sites [R]. Washington, DC: Office of Solid Waste and Emergency Response, 2001.
- [28] 北京市环境保护科学研究院. DB11/T 656-2009. 场地环境评价导则[S]. 北京:北京市质量技术监督局,2009.
Beijing Municipal Research institute of Environmental Protection. DB11/T 656-2009. Environmental site assessment guideline[S]. Beijing: Beijing Municipal administration of Quality and Technology Supervision, 2009(in Chinese).
- [29] 中华人民共和国环保部. HJ 25.3-2014. 污染场地风险评估技术导则[S]. 北京:中国环境科学出版社,2014.
Ministry of Environmental Protection of the People's Republic of China. HJ 25.3-2014. Technical guidelines for risk assessment of contaminated sites[S]. Beijing: China Environmental Science Press, 2014(in Chinese).
- [30] 杨彦,于云江,李定龙,等. 太湖流域人群呼吸暴露参数研究[J]. 环境与健康杂志,2013,30(1):36-39.
YANG Y, YU Y J, LI D L, et al. Study on respiratory exposure parameters of people in Taihu Lake basin[J]. Journal of Environmental and Health, 2013, 30(1):36-39(in Chinese).
- [31] US EPA. Risk Assessment Guidance for Superfund, Vol. I: Human Health Evaluation Manual [R]. Washington, DC: Office of Solid Waste and Emergency Response, 1989: 15-28.
- [32] 常静,刘敏,李先华,等. 上海地表灰尘重金属污染的健康风险评价[J]. 中国环境科学,2009,29(5):548-554.
CHANG J, LIU M, LI X H, et al. Primary research on health risk assessment of heavy metals in road dust of Shanghai[J]. China Environmental Science, 2009, 29(5):548-554(in Chinese).
- [33] 李晓燕,刘艳青. 我国城市不同功能区地表灰尘重金属分布及来源[J]. 环境科学,2013,34(9):3648-3653.
LI X Y, LIU Y Q. Heavy metals and their sources in outdoor settled dusts in different function areas of cities [J]. Environmental Science, 2013, 34(9):3648-3653(in Chinese).
- [34] 朱媛婕. 西安市灞桥燃煤电厂周边土壤和灰尘介质中重金属污染特征研究[D]. 西安:陕西师范大学,2016.
ZHU Y J. Pollution characteristics of heavy metals in soil and dust from the surrounding environment of the Coal-fired power plant in Baqiao of Xi'an[D]. Xi'an:Shanxi Normal University, 2016(in Chinese).
- [35] 喻超,凌其聪,彭振宇,等. 城市工业区环境系统中的 Cd 污染循环及其健康风险—以杭州市半山工业区为例[J]. 环境科学学报, 2011,31(11):2474-2484.
YU C, LING Q C, PENG Z Y, et al. Behaviors and potential health risks of Cd in urban environment of industrial area: A case study in Banshan industrial area of Hangzhou [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2011, 31(11):2474-2484(in Chinese).
- [36] 张倩,陈宗娟,彭昌盛,等. 大港工业区重金属污染及生态风险评价[J]. 环境科学,2015,36(11):4232-4240.
ZHANG Q, CHEN Z J, PENG C S, et al. Heavy metal pollution in topsoil from Dagang industry area and its ecological risk assessment[J]. Environmental Science, 2015, 36(11):4232-4240(in Chinese).
- [37] FERREIRA-BAPTISTA L, DE MIGUEL E. Geochemistry and risk assessment of street dust in Luanda, Angola: A tropical urban environment [J]. Atmospheric Environment, 2005, 39:4501-4512.
- [38] 李如忠,潘成荣,陈婧,等. 铜陵市区表土与灰尘重金属污染健康风险评估[J]. 中国环境科学,2012,32(12):2261-2270.
LI R Z, PAN C R, CHEN J, et al. Heavy metal contamination and health risk assessment for urban topsoil and dust in Tongling[J]. China Environmental Science, 2012, 32(12):2261-2270(in Chinese).