

DOI:10.7524/j.issn.0254-6108.2023122501

CSTR:32061.14.hjhx.2023122501

袁蒙飞, 赵静, 汪瑜, 等. 上海市不同微环境灰尘中重金属污染特征及健康风险评价[J]. 环境化学, 2025, 44(4): 1281-1291.

YUAN Mengfei, ZHAO Jing, WANG Yu, et al. The pollution characteristics and health risk assessment of heavy metals in dust from different microenvironments in Shanghai[J]. Environmental Chemistry, 2025, 44 (4): 1281-1291.

上海市不同微环境灰尘中重金属污染特征及健康风险评价*

袁蒙飞¹ 赵 静^{1,2 **} 汪 瑜¹ 顾卫华^{1,2} 白建峰^{1,2}

(1. 上海第二工业大学资源与环境工程学院, 上海, 201209; 2. 上海电子废弃物资源化协同创新中心, 上海, 201209)

摘 要 以灰尘为研究对象, 探究上海市 8 种微环境包括商场、街边商铺、地铁站、写字楼、高校教室、宿舍、家庭等 7 种室内环境及其周边道路等室外环境灰尘中重金属 (Cr、Ni、Cu、Zn、As、Cd 和 Pb) 的污染特征和污染程度; 在此基础上, 整合工作/学习和生活等 2 类室内暴露情景以及室外暴露情景, 综合评估室内外灰尘中重金属对不同职业人群的健康风险. 研究表明, 不同微环境灰尘中重金属污染普遍存在, 其中 Zn 的含量远高于其他重金属, 而 Cd 和 Zn 的污染程度最为严重; 与其他微环境相比, 街边商铺室内灰尘重金属的含量最高, 污染程度最严重; 室外灰尘中重金属的含量和污染程度均与绝大多数室内环境基本相当. 手-口摄入是 5 种职业人群对灰尘中重金属的主要暴露途径, 但是不同职业人群的主要暴露源存在一定差异, 其中家庭室内灰尘是地铁站、写字楼、商场工作人员的主要暴露源, 商铺室内灰尘是街边商铺工作人员的主要暴露源, 而宿舍和教室均是高校学生的主要暴露源; 5 种职业人群的重金属致癌风险均在可接受范围内, 但是不存在非致癌风险.

关键词 重金属, 室内外灰尘, 污染特征, 健康风险评价.

中图分类号 X-1; O6 文献标识码 A

The pollution characteristics and health risk assessment of heavy metals in dust from different microenvironments in Shanghai

YUAN Mengfei¹ ZHAO Jing^{1,2 **} WANG Yu¹ GU Weihua^{1,2} BAI Jianfeng^{1,2}

(1. School of Resources and Environmental Engineering, Shanghai Polytechnic University, Shanghai, 201209, China;

2. Shanghai Collaborative Innovation Centre for WEEE Recycling, Shanghai, 201209, China)

Abstract Taking the dust as the research object, the pollution characteristics and pollution degree of heavy metals (Cr, Ni, Cu, Zn, As, Cd and Pb) in dust from eight microenvironments in Shanghai have been investigated, including seven indoor environments (shopping malls, shops, subway stations, office buildings, classrooms and dormitories of a university and houses) and outdoor environments of surrounding road. Based on this, two indoor exposure scenarios of working/studying, living, and outdoor exposure environments were integrated to comprehensively assess the health risks of different occupations exposure to heavy metals in dust. The results showed that heavy metal pollution was widespread in dust from different microenvironments. The content of Zn was much higher than other heavy metals, while Cd and Zn were the most polluted heavy metals. Compared to other microenvironments, the content of heavy metals in indoor dust from shops was

2023 年 12 月 25 日收稿(Received: December 25, 2023).

* 国家重点研发计划项目(2019YFC1906101)和长江水环境教育部重点实验室开放课题(YRWEF202106)资助.

Supported by National Key Research and Development Program of China (2019YFC1906101) and Foundation of Key Laboratory of Yangtze River Water Environment, Ministry of Education (Tongji University), China (YRWEF202106).

** 通信联系人 **Corresponding author**, E-mail: zhaojing@sspu.edu.cn

the highest, so was the pollution degree of heavy metals. The content of heavy metals in outdoor dust was basically as the same as that in most indoor dust. The hand-to-mouth ingestion was the primary exposure pathway of 5 different occupations exposure to heavy metals in dust. However, the main exposure source of heavy metals varied among different occupations. Indoor dust from houses was the primary exposure source for the staffs in subway stations, offices, and shopping malls. Indoor dust from shops was the main exposure source for the shop staff, while indoor dust from classrooms and dormitories was the primary exposure sources for undergraduates. Carcinogenic risks of different occupations exposure to heavy metals in dust of indoor (working/studying, living) and outdoor environments were within acceptable thresholds, but there were no non-carcinogenic risks.

Keywords heavy metals, indoor and outdoor dusts, pollution characteristics, health risk assessment.

重金属是普遍存在于环境中的一类污染物,其具有持久性、难降解性和生物富集性等污染特点^[1].日常生活中接触到的家具、装修涂料、电子产品等都会伴随着重金属的释放^[2-4],释放到环境中的重金属通过各种途径进入人体,随着重金属在人体内不断富集,会影响人体呼吸系统、消化系统、神经系统等系统的正常功能,造成不可逆性损伤^[5-7].

灰尘是分布最为广泛的污染物载体之一,其往往附着大量的重金属等有害物质^[8-9],在外力条件的影 响下灰尘会悬浮进入空气环境中,成为危害生态环境和人体健康的重要环境介质^[10].学者对室内外灰尘重金属的研究中发现,各类微环境灰尘中均存在不同程度的重金属污染,包括家庭^[11-13]、地铁^[14-15]、教学楼^[1]和办公楼^[16]等.成都^[11]、济南^[12]和贵阳^[13]等家庭室内灰尘重金属普遍高于当地土壤背景值,不同城市之间存在明显差异,贵阳的家庭室内灰尘总重金属含量最高,其次为成都和济南.郑州^[14]和北京^[15]地铁站内灰尘重金属数据显示,Pb 均达到严重污染水平;Cd 在郑州地铁站内污染水平为中度-重度,在北京为中度.佛山高校^[1]室内灰尘中重金属含量均高于广东省土壤背景值,除教工区个别样点 Cr 存在明显非致癌风险外,教工区其他样点及学习区室内灰尘重金属均未对人体造成健康危害.上海市研究主要集中在单一环境中,对多种环境重金属含量、污染水平和健康风险评估的比较相对较少,因此通过展开对不同微环境灰尘重金属的研究,比较不同微环境重金属污染状况,明确重金属在不同微环境的风险水平及造成的健康风险,以期在城市环境健康监测和环境风险管理提供依据.

本文以灰尘为研究对象,探究上海市 8 种微环境包括商场、街边商铺、地铁站、写字楼、高校教室、宿舍和家庭等 7 种室内环境及其周边道路等室外环境灰尘中重金属(Cr、Ni、Cu、Zn、As、Cd 和 Pb)的污染特征和污染程度;在此基础上,整合工作/学习和生活等 2 类室内暴露情景以及室外暴露情景,综合评估室内外灰尘中重金属对不同职业人群的健康风险.

1 材料与方法(Materials and methods)

1.1 样品采集

2020 年 12 月—2021 年 2 月在上海市采集了 8 种微环境共 39 个灰尘样品,其中 21 个室内灰尘样品采集于 7 种室内环境,包括商场、街边商铺、地铁站、写字楼、高校教室、宿舍和家庭等各 3 个样品;18 个室外灰尘样品采集于周边道路.灰尘采用主动采样法,用软毛刷采集地面、家具、货架和闲置物品等表面的灰尘,同一采样点不同位置的灰尘混合后用锡箔纸包裹装入自封袋,于-20 ℃ 冰箱避光保存.

1.2 重金属含量测定

参考先前研究^[11,17]对灰尘样品进行预处理.待测样品过 200 目尼龙筛后,准确称取样品(0.2000 ± 0.0002)g,置于聚四氟乙烯消解罐中,加入 5 mL HNO_3 、3 mL HF 和 1 mL H_2O_2 ,放入微波消解仪消解,完成后加入 2 mL HClO_4 赶酸,最后用 1% 的 HNO_3 稀释定容到 20 mL,过滤后待测.

采用电感耦合等离子体发射光谱仪(ICP-OES)测定样品中 Cr、Ni、Cu、Zn、As、Cd 和 Pb 等 7 种重金属的含量.标准工作溶液设置为 0.1、1、2、5、10 $\mu\text{g}\cdot\text{mL}^{-1}$,线性相关系数(R^2)均大于 0.999. Cr、Ni、

Cu、Zn、As、Cd、Pb 的仪器检出限分别为 0.0090、0.0030、0.0100、0.0060、0.0410、0.0020、0.0250 mg·kg⁻¹; 仪器定量限分别为 0.0296、0.0099、0.0329、0.0197、0.1349、0.0066、0.0823 mg·kg⁻¹; 方法检出限分别为 0.0172、0.0057、0.0191、0.0115、0.0783、0.0038、0.0477 mg·kg⁻¹; 方法定量限分别为 0.0565、0.0188、0.0628、0.0377、0.2575、0.0126、0.1570 mg·kg⁻¹. 为确保实验的准确性, 每批实验均做溶剂空白和程序空白实验, 结果表明其中各元素均低于仪器检出限. 各元素回收率范围在 99%—118% 之间, 测试结果相对偏差均小于 10%, 符合重金属分析质量控制要求.

1.3 灰尘重金属污染评价方法

采用地累积指数法(Geoaccumulation Index, I_{geo})评价灰尘中重金属污染程度. I_{geo} 计算公式如下:

$$I_{\text{geo}}=\log_2\left(\frac{C_i}{1.5B_i}\right)$$

(1)

式中, C_i 表示灰尘中重金属 i 的含量(mg·kg⁻¹), B_i 为重金属 i 的土壤背景值(mg·kg⁻¹). 本文采用上海市土壤背景值^[18], Cr、Ni、Cu、Zn、As、Cd 和 Pb 的土壤背景值分别为 75、40、28.6、86.11、9.11、0.133、25.48 mg·kg⁻¹. 地累积指数评价灰尘中重金属污染的分级标准见表 1.

表 1 地累积指数分级标准
Table 1 Classification standard of geoaccumulation index

污染指数(I_{geo}) Pollution index	分级 Grade	污染程度 Pollution degree
$5 < I_{\text{geo}} \leq 10$	6	极度污染 Extremely polluted
$4 < I_{\text{geo}} \leq 5$	5	重度-极度污染 Strongly to extremely polluted
$3 < I_{\text{geo}} \leq 4$	4	重度污染 Strongly polluted
$2 < I_{\text{geo}} \leq 3$	3	中度-重度污染 Moderately to strongly polluted
$1 < I_{\text{geo}} \leq 2$	2	中度污染 Moderately polluted
$0 < I_{\text{geo}} \leq 1$	1	轻度-中度污染 Unpolluted to moderately polluted
$I_{\text{geo}} \leq 0$	0	无污染 Unpolluted

1.4 健康风险评价

1.4.1 人体暴露评价模型

本研究采用美国环境保护署(USEPA)提出的健康风险评价模型^[19], 评估灰尘中重金属通过手-口摄入、呼吸吸入和皮肤接触 3 种暴露途径对不同职业人群(包括高校学生、商场工作人员、写字楼工作人员、地铁工作人员和商铺工作人员)的暴露水平和健康风险. 本文所研究的 Cr、Ni、Cu、Zn、As、Cd 和 Pb 对人体都具有非致癌健康风险, 其中 Cd、Cr、Ni 和 As 还具有致癌风险^[20]. 不同暴露途径下日均暴露量计算公式如下所示.

手-口摄入途径日平均暴露量(ADD_{ing}):

$$\text{ADD}_{\text{ing}} = \frac{C \times \text{EF} \times \text{ED}}{\text{BW} \times \text{AT}} R_{\text{ing}} \times \text{CF}$$

(2)

呼吸吸入途径日平均暴露量(ADD_{inh}):

$$\text{ADD}_{\text{inh}} = \frac{C \times \text{EF} \times \text{ED}}{\text{BW} \times \text{AT}} \times \frac{R_{\text{inh}}}{\text{PEF}}$$

(3)

皮肤接触途径日平均暴露量(ADD_{der}):

$$\text{ADD}_{\text{der}} = \frac{C \times \text{EF} \times \text{ED}}{\text{BW} \times \text{AT}} \text{AF} \times \text{SA} \times \text{ABS} \times \text{CF}$$

(4)

总日均暴露量 ADD:

$$\text{ADD} = \sum \text{ADD}_{\text{w}} + \sum \text{ADD}_{\text{R}} + \sum \text{ADD}_{\text{O}}$$

(5)

式中, ADD_{ing} 、 ADD_{inh} 和 ADD_{der} 的单位为 $mg \cdot (kg \cdot d)^{-1}$; ΣADD_w 、 ΣADD_R 和 ΣADD_o 分别为不同职业人群在室内外环境(工作/学习、生活)中总日均暴露量,单位为 $mg \cdot (kg \cdot d)^{-1}$. 其他暴露参数的取值见表 2.

表 2 暴露参数的取值

Table 2 Exposure parameters for the health risk assessment models				
参数 Parameter	含义 Meaning	单位 Unit	取值 Value	参考文献 Reference
C	灰尘中重金属含量	$mg \cdot kg^{-1}$	—	本文
EF	人体暴露频率	$d \cdot a^{-1}$	91.25/121.67/116.8/174.9/121.67 223.26/192.84/197.71/139.61/192.84	[21]
ED	暴露持续时间	a	45.88 ^a 4/24 ^b	[21 – 22]
BW	体重	kg	63.5	[21]
R_{ing}	经口途径摄入率	$mg \cdot d^{-1}$	50	[21]
CF	换算系数	$kg \cdot mg^{-1}$	10×10^{-6}	
R_{inh}	呼吸摄入率	$m^3 \cdot d^{-1}$	16.3	[21]
AF	皮肤吸附因子	$mg \cdot cm^{-2} \cdot d^{-1}$	0.07	[23]
SA	暴露皮肤面积	cm^2	2100	[21,23]
PEF	颗粒释放因子	$m^3 \cdot kg^{-1}$	1.36×10^9	[24]
ABS	皮肤吸收因子	无量纲	0.001/0.03 ^c	[24]
AT	平均暴露时间	d	1460/8760/29294.9 ^d	[21 – 22]

注: a, 地铁工作人员、写字楼工作人员、高校学生、商铺工作人员和商场工作人员工作/学习中分别取91.25、121.67、116.8、174.9和121.67, 生活中分别取223.26、192.84、197.71、139.61和192.84, 室外环境中为45.88; b. 高校学生取4, 其他职业取24; c. As为0.03, 其余元素为0.001; d. 高校学生非致癌平均暴露时间取1460, 其他职业取8760, 致癌终生暴露时间取29294.9.

1.4.2 人体健康风险评价模型

非致癌风险的评估采用非致癌危害指数法, 致癌风险的评估采用致癌风险指数法^[1]. 非致癌风险商数(HQ)、非致癌危险指数(HI)和致癌风险指数(CR)的计算公式如下所示.

$HQ = ADD_{非致癌} / RfD$ (6)

$HI = \sum HQ$ (7)

$CR = ADD_{致癌} \times SF$ (8)

$CR_T = \sum CR$ (9)

式中, $ADD_{非致癌}$ 为 3 种暴露途径下重金属日均暴露量, $ADD_{致癌}$ 是 3 种暴露途径下终生平均日暴露量, 单位均是 $mg \cdot (kg \cdot d)^{-1}$; RfD 表示污染物的参考剂量, 单位是 $mg \cdot (kg \cdot d)^{-1}$; SF 为致癌斜率因子, 单位为 $(kg \cdot d) \cdot mg^{-1}$. 各重金属元素不同的 RfD 和 SF 具体见表 3.

表 3 重金属非致癌参考剂量(RfD)和致癌斜率因子(SF)

	RfD/($mg \cdot (kg \cdot d)^{-1}$)			SF/(($kg \cdot d$)· mg^{-1})		
	RfD_{ing}	RfD_{inh}	RfD_{der}	SF_{ing}	SF_{inh}	SF_{der}
As	1.23×10^{-4}	3.00×10^{-4}	3.00×10^{-4}	1.50	1.50	7.50
Cd	1.00×10^{-4}	1.00×10^{-3}	4.00×10^{-5}	6.10	6.40	6.10
Cr	2.86×10^{-5}	3.00×10^{-3}	6.00×10^{-5}	0.50	42.0	20.0
Ni	2.06×10^{-2}	2.06×10^{-2}	5.04×10^{-2}	0.84	0.84	0.84
Cu	4.00×10^{-2}	4.00×10^{-2}	1.20×10^{-2}			
Pb	3.52×10^{-3}	3.50×10^{-3}	5.25×10^{-3}			
Zn	3.00×10^{-1}	3.00×10^{-1}	6.99×10^{-2}			

非致癌风险评价标准: 若 $HI < 1$, 认为风险较小或可以忽略; 若 $HI > 1$, 则认为存在非致癌风险. 致癌风险评价标准: 当 CR_T 值在 10^{-6} — 10^{-4} 范围内时认为是人体可接受致癌风险范围; 当 $CR_T < 10^{-6}$ 时, 认为不存在致癌风险; 当 $CR_T > 10^{-6}$ 时, 认为存在明显致癌风险, 且数值越大说明风险越高.

2 结果与讨论(Results and discussion)

2.1 灰尘中重金属含量及分布特征

上海市不同微环境灰尘中各重金属的含量见图 1. 上海市不同微环境灰尘中重金属含量存在一定差异, 街边商铺重金属的含量最高($5161\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$), 其次为家庭($1971\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)、教室($1917\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)、商场($1679\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)、写字楼($1506\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)、宿舍($1149\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$), 地铁站重金属含量最低($945\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$), 比其他微环境低 1 个数量级. 此外, 本研究室外灰尘中重金属含量为 $1664\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 与绝大多数室内灰尘基本相当. 先前研究发现, 成都家庭($1646\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)^[25] 和重庆家庭($1694\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)^[26], 略低于本研究, 但是均高于安徽农村家庭($1040\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)^[27]. 鉴于重金属来源的不同, 室内灰尘重金属含量在不同区域、城市和农村之间均存在显著的空间差异^[28]. 采矿和冶炼活动、电子废物回收和工业生产均能提高室内灰尘中重金属含量^[28-29]. 例如, 电子废物拆解车间室内重金属含量(上海 $29527\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ^[17]、华南 $24694\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ^[30] 和华东 $24662\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ^[31])显著高于其对照区.

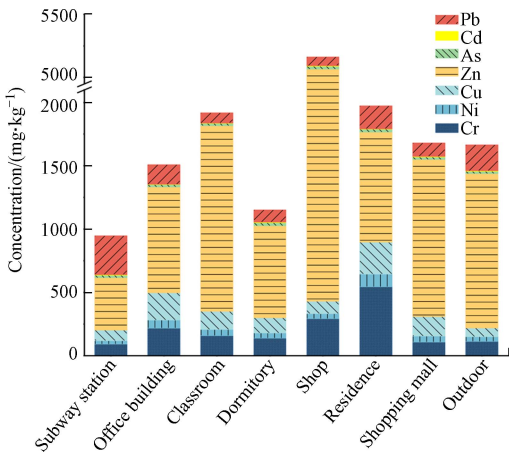


图 1 上海市不同微环境灰尘中重金属含量

Fig.1 Heavy metals content in dust from different microenvironments in Shanghai

上海市不同微环境灰尘中 Zn 的含量(413 — $4636\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)远高于其他重金属, 占比为 43.70% — 89.83% . 大量研究均已证实中国室内外灰尘中 Zn 的含量最高^[28-29], 本研究结果与其相一致. 汽车尾气排放、润滑油泄露、汽车轮胎磨损以及城市建设等可能是室外灰尘中 Zn 的主要来源^[8,32]; 地毯底衬橡胶、电子设备、建筑材料和乳胶漆等的使用可能是室内灰尘中 Zn 的主要来源^[11,26,33-34], 也可能来源于通过门窗或人群活动等途径的室外灰尘. 此外, 与其他微环境(7.8 — $178\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)相比, 地铁站内灰尘中 Pb($304\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)的含量最高, 这与北京地铁站研究结果相一致^[15], 这可能源自列车与轨道间的摩擦及刹车磨损所形成的含 Pb 颗粒物^[35-36]. 家庭室内灰尘中 Cr($546\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)和 Cu($252\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)的含量最高, 可能源自室内金属制品、家具和生活器具等使用过程中受到的磨损^[16,26].

2.2 灰尘中重金属污染程度评价

上海市不同微环境灰尘中各重金属的地累积指数值见图 2. 上海市不同微环境灰尘均存在不同程度的重金属污染, 尤其是 Cd(3.70 — 4.45)均处于重度污染水平以上, Zn(2.60 — 5.17)均处于中度-重度污染水平以上(地铁站除外), 需要重点关注. 研究表明, 合肥市^[6] 和豫北地区^[37] 室内灰尘 Cd 的污染程度达到了重度污染水平以上; 珠三角城市^[38] 和香港^[39] 道路灰尘中 Zn 处于重度污染水平, 与本研究一致. 与其他微环境相比, 街边商铺室内灰尘中 Cd(4.45)和 Zn(5.17)的污染程度最为严重, 分别处于重度-极度污染和极度污染水平. 与 Cd 和 Zn 相比, 不同微环境室内灰尘中其余 5 种重金属的污染程度均较轻, 其中 Cu(0.97 — 2.56)和 Pb(0.8 — 3.00)均处于轻度-中度污染至中度-重度污染水平; Cr(-1.13 —

2.28)处于无污染至中度-重度污染水平; As(0.45—0.84)处于轻度-中度污染水平; Ni(-1.13—0.11)处于无污染至轻度-中度污染水平. 此外, 室外灰尘重金属污染程度与绝大多数室内灰尘基本相当.

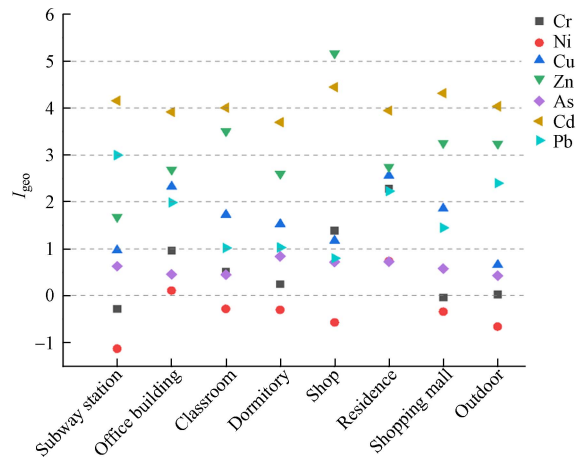


图 2 上海市不同微环境灰尘中重金属地累积指数值

Fig.2 I_{geo} of heavy metals in dust from different microenvironments in Shanghai

2.3 灰尘中重金属健康风险评价

2.3.1 不同职业人群暴露水平

表 4 列出了高校学生、商场工作人员、写字楼工作人员、地铁工作人员和商铺工作人员等 5 种不同职业人群通过手-口摄入、呼吸吸入和皮肤接触 3 种暴露途径对重金属的平均日暴露量. 结果表明, 手-口摄入是对灰尘重金属的主要暴露途径, ADD_{ing} 比 ADD_{der} 和 ADD_{inh} 的暴露量高 2—4 个数量级, 与 Li 等^[1] 研究结果一致. 不同职业人群暴露量由大到小的顺序为商铺工作人员($2.72\times10^{-3}\text{ mg}\cdot(\text{kg}\cdot\text{d})^{-1}$)>商场工作人员($1.43\times10^{-3}\text{ mg}\cdot(\text{kg}\cdot\text{d})^{-1}$)>写字楼工作人员($1.38\times10^{-3}\text{ mg}\cdot(\text{kg}\cdot\text{d})^{-1}$)>地铁工作人员($1.30\times10^{-3}\text{ mg}\cdot(\text{kg}\cdot\text{d})^{-1}$)>高校学生($1.14\times10^{-3}\text{ mg}\cdot(\text{kg}\cdot\text{d})^{-1}$).

表 4 不同职业人群对室内环境(工作/学习、生活)和室外环境灰尘中重金属的平均日暴露量($\text{mg}\cdot(\text{kg}\cdot\text{d})^{-1}$)

Table 4 ADD of different occupations exposure to heavy metals in dusts of indoor and outdoor environments		Cr	Ni	Cu	Zn	As	Cd	Pb	$\Sigma_7\text{HM}$
地铁 工作人员 Subway station staff	ADD_{inh}	7.01×10^{-8}	1.37×10^{-8}	3.47×10^{-8}	1.49×10^{-7}	4.04×10^{-9}	6.02×10^{-10}	3.97×10^{-8}	3.12×10^{-7}
	ADD_{ing}	2.93×10^{-4}	5.73×10^{-5}	1.45×10^{-4}	6.21×10^{-4}	1.69×10^{-5}	2.51×10^{-6}	1.65×10^{-4}	1.30×10^{-3}
	ADD_{der}	4.03×10^{-7}	8.48×10^{-8}	2.14×10^{-7}	1.10×10^{-6}	9.20×10^{-7}	4.80×10^{-9}	3.38×10^{-7}	3.06×10^{-6}
	ΣADD	2.93×10^{-4}	5.74×10^{-5}	1.45×10^{-4}	6.22×10^{-4}	1.78×10^{-5}	2.52×10^{-6}	1.66×10^{-4}	1.30×10^{-3}
写字楼 工作人员 Office staff	ADD_{inh}	7.09×10^{-8}	1.49×10^{-8}	4.03×10^{-8}	1.68×10^{-7}	3.87×10^{-9}	5.75×10^{-10}	3.20×10^{-8}	3.31×10^{-7}
	ADD_{ing}	2.96×10^{-4}	6.23×10^{-5}	1.68×10^{-4}	7.02×10^{-4}	1.61×10^{-5}	2.40×10^{-6}	1.34×10^{-4}	1.38×10^{-3}
	ADD_{der}	6.24×10^{-7}	1.38×10^{-7}	3.80×10^{-7}	1.67×10^{-6}	1.12×10^{-6}	5.66×10^{-9}	3.12×10^{-7}	4.25×10^{-6}
	ΣADD	2.97×10^{-4}	6.25×10^{-5}	1.68×10^{-4}	7.04×10^{-4}	1.73×10^{-5}	2.40×10^{-6}	1.34×10^{-4}	1.38×10^{-3}
高校学生 Undergraduate	ADD_{inh}	2.67×10^{-8}	8.07×10^{-9}	2.26×10^{-8}	1.92×10^{-7}	4.06×10^{-9}	7.67×10^{-10}	1.90×10^{-8}	2.73×10^{-7}
	ADD_{ing}	1.11×10^{-4}	3.37×10^{-5}	9.41×10^{-5}	7.99×10^{-4}	1.69×10^{-5}	3.20×10^{-6}	7.91×10^{-5}	1.14×10^{-3}
	ADD_{der}	2.56×10^{-7}	7.79×10^{-8}	2.15×10^{-7}	1.98×10^{-6}	1.12×10^{-6}	6.92×10^{-9}	1.85×10^{-7}	3.84×10^{-6}
	ΣADD	1.12×10^{-4}	3.37×10^{-5}	9.43×10^{-5}	8.02×10^{-4}	1.81×10^{-5}	3.21×10^{-6}	7.93×10^{-5}	1.14×10^{-3}
商铺 工作人员 Shop staff	ADD_{inh}	6.87×10^{-8}	1.18×10^{-8}	2.86×10^{-8}	5.11×10^{-7}	4.10×10^{-9}	6.95×10^{-10}	2.37×10^{-8}	6.49×10^{-7}
	ADD_{ing}	2.87×10^{-4}	4.91×10^{-5}	1.19×10^{-4}	2.13×10^{-3}	1.71×10^{-5}	2.90×10^{-6}	9.87×10^{-5}	2.71×10^{-3}
	ADD_{der}	9.65×10^{-7}	1.67×10^{-7}	4.07×10^{-7}	6.46×10^{-6}	1.66×10^{-6}	9.21×10^{-9}	3.30×10^{-7}	1.00×10^{-5}
	ΣADD	2.88×10^{-4}	4.93×10^{-5}	1.20×10^{-4}	2.14×10^{-3}	1.88×10^{-5}	2.91×10^{-6}	9.91×10^{-5}	2.72×10^{-3}
商场 工作人员 Shopping mall Staff	ADD_{inh}	6.40×10^{-8}	1.38×10^{-8}	3.65×10^{-8}	1.94×10^{-7}	3.97×10^{-9}	6.35×10^{-10}	2.91×10^{-8}	3.42×10^{-7}
	ADD_{ing}	2.67×10^{-4}	5.78×10^{-5}	1.52×10^{-4}	8.08×10^{-4}	1.66×10^{-5}	2.65×10^{-6}	1.21×10^{-4}	1.43×10^{-3}
	ADD_{der}	5.39×10^{-7}	1.25×10^{-7}	3.34×10^{-7}	1.98×10^{-6}	1.15×10^{-6}	6.39×10^{-9}	2.76×10^{-7}	4.42×10^{-6}
	ΣADD	2.68×10^{-4}	5.79×10^{-5}	1.53×10^{-4}	8.10×10^{-4}	1.77×10^{-5}	2.65×10^{-6}	1.22×10^{-4}	1.43×10^{-3}

不同职业人群摄入重金属的主要暴露源存在一定差异(图 3). 地铁站、写字楼和商场工作人员对灰尘中重金属的主要暴露源为家庭室内灰尘, 这 3 种职业人群对家庭室内灰尘中重金属的摄入量占 3 种环境灰尘重金属总暴露量的比重分别为 73.0%、59.4% 和 57.5%. 商铺工作人员对灰尘中重金属的主要暴露源为商铺室内灰尘, 占灰尘重金属总暴露量的比重为 71.9%. 高校学生对灰尘中重金属的主要暴露源为宿舍和教室室内灰尘, 两者所占比重相近, 分别为 42.4% 和 43.1%.

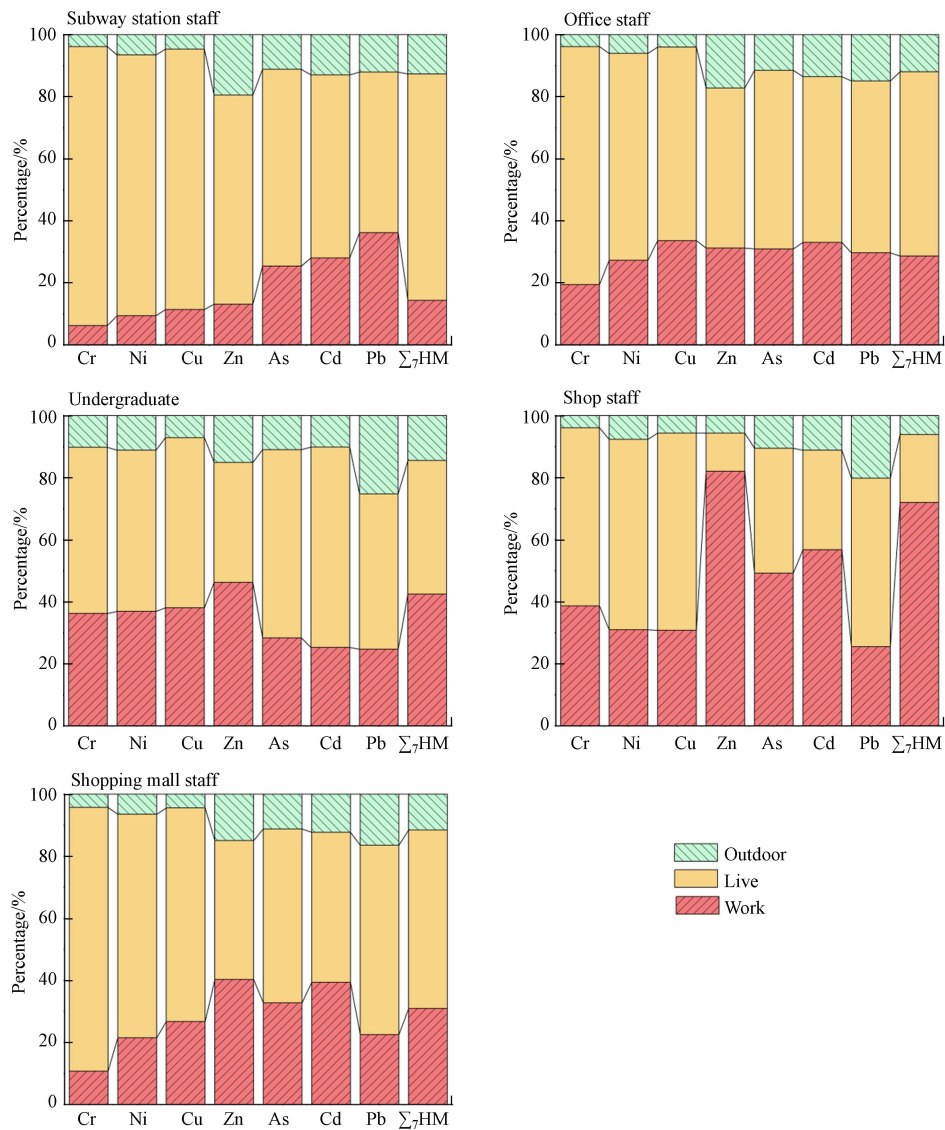


图 3 不同职业人群在室内环境(工作/学习、生活)和室外环境中对灰尘重金属日暴露量占比

Fig.3 The percent of ADD of different occupations exposure to heavy metals in dust of indoor (working/studying, living) and outdoor environments

2.3.2 非致癌风险评价

5 种职业人群不同暴露途径的 HQ 值排序为 $HQ_{ing} > HQ_{der} > HQ_{inh}$ (图 4). 在 7 种重金属中, Cr 是对非致癌风险的主要贡献者, Cr 的 HI 值比其他金属元素高出 1—2 个数量级. 5 种职业人群暴露于室内环境(工作/学习、生活)和室外环境灰尘的 HI 值的顺序为: 地铁工作人员(2.24×10^{-1})>商铺工作人员(2.20×10^{-1})>写字楼工作人员(2.19×10^{-1})>商场工作人员(2.06×10^{-1})>高校学生(1.35×10^{-1}). 可见, 整合室内外灰尘暴露情境, 不同职业人群重金属暴露的非致癌风险均小于 1, 表明上海市 5 种职业人群的非致癌风险可忽略不计. Liu 等^[40] 研究表明, 全国 11 个省份 33 个城市的室内灰尘重金属的非致癌风险均小于 1, 非致癌风险可忽略不计, 与本研究结果相一致.

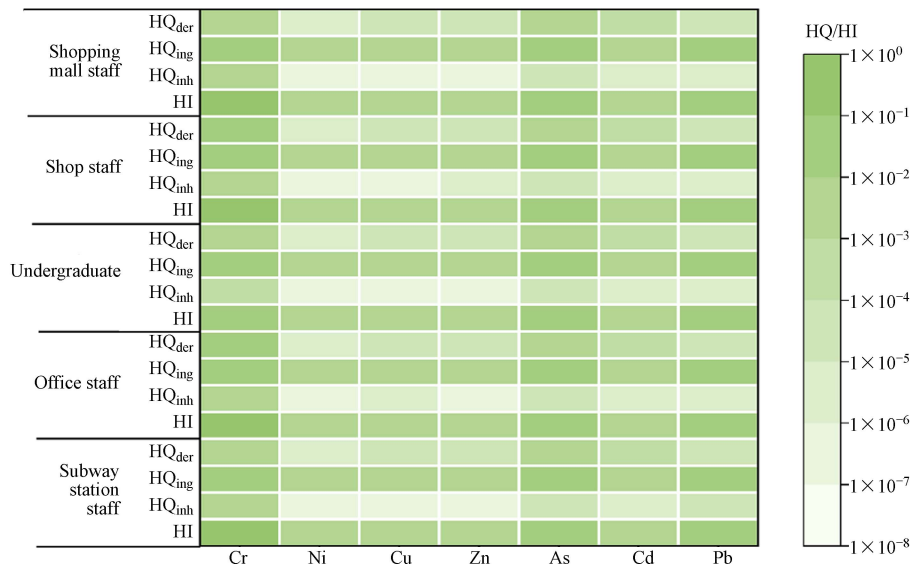


图 4 不同职业人群暴露于室内环境(工作/学习、生活)和室外环境灰尘重金属的非致癌风险

Fig.4 The non-carcinogenic risk of different occupations exposure to heavy metals in dust of indoor (working/studying, living) and outdoor environments

2.3.3 致癌风险评价

5 种职业人群不同暴露途径的 CR 值排序为 $CR_{ing}>CR_{der}>CR_{inh}$ (图 5). 在 7 种重金属中, 致癌风险贡献最大的为 Cr, 接近阈值 10^{-4} . Zhou 等^[6]的研究也证实在合肥行政区、商业区室内灰尘中致癌风险贡献最大的为 Cr. 5 种职业人群暴露于室内环境(工作/学习、生活)和室外环境灰尘的总致癌风险指数排序为: 写字楼工作人员(7.90×10^{-5})>商铺工作人员(7.88×10^{-5})>地铁工作人员(7.59×10^{-5})>商场工作人员(7.36×10^{-5})>高校学生(4.31×10^{-5}). 可见, 整合室内外灰尘暴露情境, 不同职业人群重金属的致癌风险 CR_T 值均在可接受水平范围内(10^{-6} — 10^{-4}), 表明上海市 5 种职业人群的致癌风险均相对较低, 处于可接受水平. 合肥非工业区^[6]室内灰尘重金属的致癌风险也处于可接受水平, 与本研究结果相一致.

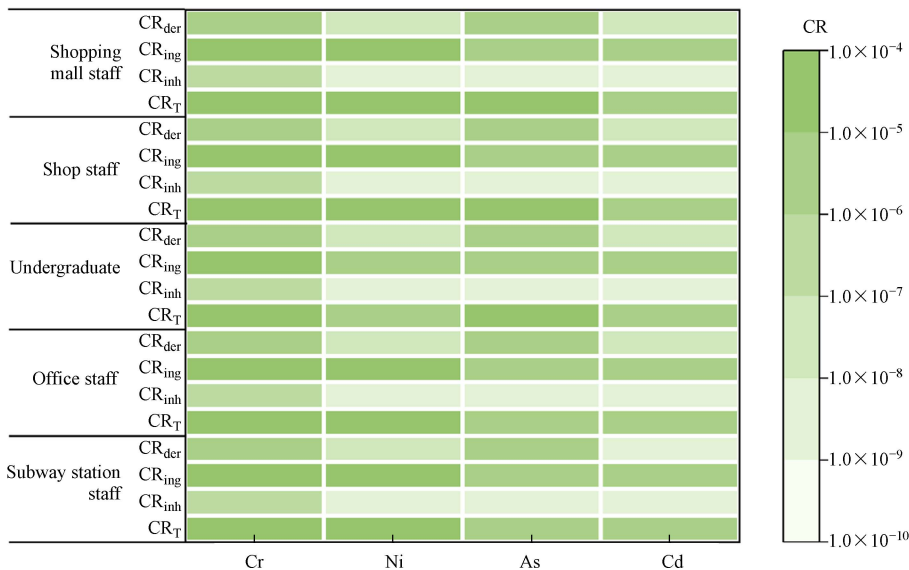


图 5 不同职业人群暴露于室内环境(工作/学习、生活)和室外环境灰尘重金属的致癌风险

Fig.5 The carcinogenic risk of different occupations exposure to heavy metals in dust of indoor (working/studying, living) and outdoor environments

3 结论(Conclusion)

(1)上海市不同微环境灰尘中重金属污染现象普遍存在,但是重金属的含量存在一定差异,其中 Zn 的含量远高于其他重金属;与其他微环境相比,街边商铺重金属的含量最高;室外灰尘重金属含量与绝大多数室内灰尘基本相当。

(2)地累积指数评价结果显示,上海市不同微环境灰尘均存在不同程度的重金属污染,其中 Cd 和 Zn 的污染程度最为严重;与其他微环境相比,街边商铺室内灰尘重金属污染程度最为严重;室外灰尘重金属污染程度和绝大多数室内灰尘基本相当。

(3)健康风险评价结果表明,整合工作/学习和生活等 2 类室内暴露情景以及室外暴露情景,手-口摄入是 5 种职业人群对不同微环境灰尘中重金属的主要暴露途径,但是不同职业人群的主要暴露源存在一定差异,家庭室内灰尘是地铁站、写字楼、商场工作人员的主要暴露源,商铺室内灰尘是街边商铺工作人员的主要暴露源,宿舍和教室均是高校学生的主要暴露源;5 种职业人群的重金属致癌风险均在可接受范围内,但是不存在非致癌风险。

参考文献 (References)

[1] 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).

[2] CHATTOPADHYAY G, LIN K C P, FEITZ A J. Household dust metal levels in the Sydney metropolitan area[J]. Environmental Research, 2003, 93(3): 301-307.

[3] QUAN S X, YAN B, YANG F, et al. Spatial distribution of heavy metal contamination in soils near a primitive e-waste recycling site[J]. Environmental Science and Pollution Research International, 2015, 22(2): 1290-1298.

[4] 张昱,胡君利,白建峰,等.电子废弃物拆解区周边农田土壤重金属污染评价及成因解析 [J]. 生态环境学报, 2017, 26(7): 1228-1234.

ZHANG Y, HU J L, BAI J F, et al. Contamination assessment and genesis analysis of heavy metals in farmland soils around A waste electrical and electronic equipments disassembling area[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2017, 26(7) : 1228-1234 (in Chinese).

[5] CHEN P F, BI X H, ZHANG J Q, et al. Assessment of heavy metal pollution characteristics and human health risk of exposure to ambient PM_{2.5} in Tianjin, China[J]. Particuology, 2015, 20: 104-109.

[6] ZHOU L, LIU G J, SHEN M C, et al. Characteristics and health risk assessment of heavy metals in indoor dust from different functional areas in Hefei, China[J]. Environmental Pollution, 2019, 251: 839-849.

[7] 窦红宾,郭唯.重金属污染及其对水土的危害 [J]. 生态经济, 2022, 38(11): 5-8.

DOU H B, GUO W. Heavy metal pollution and its harm to soil and water[J]. Ecological Economy, 2022, 38(11): 5-8 (in Chinese).

[8] 颜钰,李盼盼,陶军,等.北京高校校园道路灰尘重金属污染特征及健康风险评价 [J]. 环境污染与防治, 2016, 38(1): 58-63,81.

YAN Y, LI P P, TAO J, et al. Pollution characteristics and health risk assessment of heavy metals in road dusts of universities in Beijing[J]. Environmental Pollution & Control, 2016, 38(1) : 58-63,81 (in Chinese).

[9] 常静,刘敏,李先华,等.城市地表灰尘-降雨径流系统重金属生物有效性研究 [J]. 环境科学, 2009, 30(8): 2241-2247.

CHANG J, LIU M, LI X H, et al. Bioavailability of heavy metals in urban surface dust and rainfall-runoff system[J]. Environmental Science, 2009, 30(8): 2241-2247 (in Chinese).

[10] 常静,刘敏,侯立军,等.城市地表灰尘的概念、污染特征与环境效应 [J]. 应用生态学报, 2007, 18(5): 1155-1160.

CHANG J, LIU M, HOU L J, et al. Concept, pollution character and environmental effect of urban surface dust[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2007, 18(5): 1155-1160 (in Chinese).

[11] 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]. The Science of the Total Environment, 2018, 619/620: 621-629.

[12] 胡宇楠,刘艳玲.济南市室内降尘中重金属污染特征及来源解析 [J]. 环境科学与技术, 2022, 45(6): 179-184.

HU Y N, LIU Y L. Pollution characteristics and source appointment of heavy metals contained in indoor dust-fall of Jinan city[J]. Environmental Science & Technology, 2022, 45(6): 179-184 (in Chinese).

[13] 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 X Y, WANG L, ZHANG S T. 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 (in Chinese).
- [14] 顾家伟. 郑州市地铁灰尘重金属污染特征与健康风险评价[J]. *信阳师范学院学报(自然科学版)*, 2018, 31(4): 592-598.
- GU J W. Characteristics of heavy metal contamination and health risk assessment in the outer and inner subway system of Zhengzhou city[J]. *Journal of Xinyang Normal University (Natural Science Edition)*, 2018, 31(4): 592-598 (in Chinese).
- [15] 杨孝智, 陈扬, 徐殿斗, 等. 北京地铁站灰尘中重金属污染特征及健康风险评价[J]. *中国环境科学*, 2011, 31(6): 944-950.
- YANG X Z, CHEN Y, XU D D, et al. Characteristics of heavy metal pollution and health risk assessment in subway dust in Beijing[J]. *China Environmental Science*, 2011, 31(6): 944-950 (in Chinese).
- [16] 曹治国, 余刚, 吕香英, 等. 北京市典型室内外灰尘中重金属的粒径和季节变异特征及人体暴露评估[J]. *环境科学*, 2016, 37(4): 1272-1278.
- CAO Z G, YU G, LYU X Y, et al. Particle size distribution, seasonal variation characteristics and human exposure assessment of heavy metals in typical settled dust from Beijing[J]. *Environmental Science*, 2016, 37(4): 1272-1278 (in Chinese).
- [17] 万千, 赵静, 韦旭, 等. 电子废弃物拆解车间灰尘中重金属污染特征及职业人群健康风险评价[J]. *环境化学*, 2022, 41(3): 883-892.
- WAN Q, ZHAO J, WEI X, et al. Pollution characteristics of heavy metals in the dust from e-waste dismantling workshop and health risk assessment of occupational population[J]. *Environmental Chemistry*, 2022, 41(3): 883-892 (in Chinese).
- [18] 赵一先. 环境影响评价中选取上海地区土壤重金属含量背景值的合理范围[J]. *科技创新与应用*, 2016(7): 158.
- ZHAO Y X. Reasonable range for selecting background values of soil heavy metal content in Shanghai area in environmental impact assessment[J]. *Technology Innovation and Application*, 2016(7): 158 (in Chinese).
- [19] USEPA. Exposure factors handbook [R]. EPA/600/P-95/002Fa-c. Washington, DC: Environmental Protection Agency, Office of Research Development, 1997.
- [20] MD ABUSAYED J, AYENUDDIN M, FERDOUSHI Z, et al. Carcinogenic and non-carcinogenic human health risk from exposure to heavy metals in surface water of padma river[J]. *Research Journal of Environmental Toxicology*, 2018, 12(1): 18-23.
- [21] 赵秀阁, 段小丽. 中国人群暴露参数手册, 成人卷 [M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2013.
- ZHAO X G, DUAN X L. Manual of exposure parameters for Chinese population, Adults [M]. Beijing: China Environmental Science Press, 2013 (in Chinese).
- [22] 周佳敏, 赵静, 韦旭, 等. 上海市不同微环境室内灰尘中有机磷酸酯污染特征及健康风险评价[J]. *环境化学*, 2023, 42(7): 2317-2327.
- ZHOU J M, ZHAO J, WEI X, et al. The pollution characteristics and health risk assessment of organophosphate esters in indoor dust from different microenvironments in Shanghai[J]. *Environmental Chemistry*, 2023, 42(7): 2317-2327 (in Chinese).
- [23] USEPA. Supplemental guidance for developing soil screening levels for superfund sites [R]. OSWER 9355/4-24. Washington, DC: Office of Emergency and Remedial Response, 2002.
- [24] LU X W, ZHANG X L, LI L Y, et al. Assessment of metals pollution and health risk in dust from nursery schools in Xi'an, China[J]. *Environmental Research*, 2014, 128: 27-34.
- [25] LI Y W, PI L, HU W L, et al. Concentrations and health risk assessment of metal(loid)s in indoor dust from two typical cities of China[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2016, 23(9): 9082-9092.
- [26] 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 X Y, XIE X J. A study on heavy metals in household dusts in 3 cities in Southwestern China[J]. *China Environmental Science*, 2013, 33(2): 365-371 (in Chinese).
- [27] LIN Y S, FANG F M, WANG F, et al. Pollution distribution and health risk assessment of heavy metals in indoor dust in Anhui rural, China[J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2015, 187(9): 565.
- [28] SUN J, WANG J Z, FENG Y X, et al. Heavy metals in indoor dust in China: Occurrence, source, and health risk[J]. *Current Pollution Reports*, 2023, 9(4): 798-807.
- [29] WANG S Y, WANG L Q, HUAN Y Z, et al. Concentrations, spatial distribution, sources and environmental health risks of potentially toxic elements in urban road dust across China[J]. *The Science of the Total Environment*, 2022, 805: 150266.
- [30] ZHENG J, CHEN K H, YAN X, et al. Heavy metals in food, house dust, and water from an e-waste recycling area in South China and the potential risk to human health[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2013, 96: 205-212.
- [31] DENG J J, GUO J, ZHOU X Y, et al. Hazardous substances in indoor dust emitted from waste TV recycling facility[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2014, 21(12): 7656-7667.
- [32] 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 S T, LI X Y. Concentrations and sources of heavy metals in indoor dust of cities[J]. *Environmental Chemistry*, 2014, 33(7): 1201-1207 (in Chinese).

[33] 李颜颜, 曹佳晨, 张浩杰, 等. 河南某高校不同环境室内灰尘重金属污染特征及生态健康风险评价 [J]. *环境化学*, 2023, 42(10): 3368-3380.
 LI Y Y, CAO J C, ZHANG H J, et al. Pollution characteristics and ecological health risk assessment of heavy metals in indoor dust in different environmental areas of a university in Henan Province[J]. *Environmental Chemistry*, 2023, 42(10): 3368-3380 (in Chinese).

[34] 黄浩, 徐子琪, 严俊霞, 等. 太原市城乡居民区采暖季室内灰尘中重金属的污染特征及其生态风险评价 [J]. *环境科学*, 2021, 42(5): 2143-2152.
 HUANG H, XU Z Q, YAN J X, et al. Characteristics of heavy metal pollution and ecological risk evaluation of indoor dust from urban and rural areas in Taiyuan city during the heating season[J]. *Environmental Science*, 2021, 42(5): 2143-2152 (in Chinese).

[35] SYSALOVA J, SZAKOVA J. Mobility assessment and validation of toxic elements in tunnel dust samples: Subway and road using sequential chemical extraction and ICP-OES/GF AAS measurements[J]. *Environmental Research*, 2006, 101(3): 287-293.

[36] JUNG H J, KIM B, RYU J, et al. Source identification of particulate matter collected at underground subway stations in Seoul, Korea using quantitative single-particle analysis[J]. *Atmospheric Environment*, 2010, 44(19): 2287-2293.

[37] 沈墨海, 王世华, 董文静, 等. 冬季河南省若干城市室内灰尘中重金属的健康风险 [J]. *环境化学*, 2018, 37(10): 2171-2180.
 SHEN M H, WANG S H, DONG W J, et al. Pollution characteristics and health risks of heavy metals in indoor dust from Henan Province[J]. *Environmental Chemistry*, 2018, 37(10): 2171-2180 (in Chinese).

[38] HUANG C S, ZHANG L J, MENG J L, et al. Characteristics, source apportionment and health risk assessment of heavy metals in urban road dust of the Pearl River Delta, South China[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2022, 236: 113490.

[39] LI X D, POON C S, LIU P S. Heavy metal contamination of urban soils and street dusts in Hong Kong[J]. *Applied Geochemistry*, 2001, 16(11/12): 1361-1368.

[40] LIU B L, HUANG F, YU Y, et al. Heavy metals in indoor dust across China: Occurrence, sources and health risk assessment[J]. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, 2021, 81(1): 67-76.