

DOI: 10.7524/AJE.1673-5897.20240827001

蔡莎, 陈德翼, 潘俊, 等. 广州市城市公园绿地土壤重金属污染特征及健康风险评估[J]. 生态毒理学报, 2025, 20(1): 344-355

CAI S, CHEN D Y, PAN J, et al. Pollution characteristics and health risk assessment of heavy metals in soils of urban parks in Guangzhou [J]. Asian journal of ecotoxicology, 2025, 20(1): 344-355

广州市城市公园绿地土壤重金属污染特征及健康风险评估

蔡莎^{1,2}, 陈德翼³, 潘俊^{1,2}, 罗豪杰², 丁平², 李歆², 党垚², 张六一^{1, #}, 胡国成^{1,2, *}

1. 重庆三峡学院环境与化学工程学院, 重庆 404130

2. 生态环境部华南环境科学研究所, 生态环境部环境污染健康风险评估重点实验室, 广州 510655

3. 广西壮族自治区产品质量检验研究院, 南宁 530004

收稿日期: 2024-08-27 录用日期: 2024-11-04

摘要: 为了解广州市不同类型城市公园绿地土壤中重金属污染特征、健康风险水平及污染来源, 本研究于广州市 24 个不同类型城市公园采集 118 个土壤样品, 采用地累积指数法分析公园土壤中重金属污染程度, 利用美国环境保护局(US EPA)推荐的健康风险评估模型进行健康风险评估; 运用主成分分析(PCA)和绝对主成分分析-多元线性回归法(APCS-MLR)解析公园土壤中重金属污染来源。结果表明: 儿童公园绿地土壤的 Pb、Cd、Cr、Zn、Mn、Ni、Cu、V、Mo、Sb、Co、Ti 含量平均值分别为 45.91、0.12、30.84、85.53、302.60、10.50、40.90、61.26、5.94、2.76、0.58 和 458.18 mg·kg⁻¹; 其他公园的相应重金属的含量平均值分别为 56.02、0.19、28.83、70.51、263.72、9.06、41.68、61.02、5.63、2.74、0.45 和 320.27 mg·kg⁻¹。儿童公园土壤中 Mo、Sb、Cu、Zn, 其他公园土壤中 Pb、Cu、Mo、Sb 和 Cd 均超过广州市土壤背景值。地累积指数结果显示儿童公园中的 Sb 和 Mo 为偏中度污染, 其余元素整体上为无-轻度污染; 其他公园的中的 Mo、Sb、Cd、Cu、V 和 Zn 处于偏中度污染水平, 其余重金属整体上为无-轻度污染。APCS-MLR 模型提取了 4 种污染源及其贡献率, 生活、交通和农业混合源贡献率为 31.81%, 主要贡献重金属包括 Cd、Cu、Ni、Pb 和 Zn, 工业源贡献率为 31.97%, 主要贡献重金属包括 Cr、Mo、Sb 和 V, 母质源贡献率为 17.23%, 主要贡献重金属包括 Co、Mn 和 Ti。广州市儿童公园和其他公园绿地土壤中重金属对儿童和成人产生的非致癌健康风险水平均在可接受范围内。以污染源为导向的非致癌健康风险评估表明, 4 种污染源对成人和儿童造成的非致癌健康风险水平均在可接受范围内。本研究结果可为城市公园土壤环境风险管控提供理论依据。

关键词: 重金属; 污染特征; 健康风险评估; 来源解析; 公园土壤

文章编号: 1673-5897(2025)1-344-12 中图分类号: X171.5 文献标识码: A

Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of Heavy Metals in Soils of Urban Parks in Guangzhou

CAI Sha^{1,2}, CHEN Deyi³, PAN Jun^{1,2}, LUO Haojie², DING Ping², LI Xin², DANG Yao², ZHANG Liuyi^{1, #}, HU Guocheng^{1,2, *}

1. School of Environmental and Chemical Engineering, Chongqing Three Gorges University, Chongqing 404130, China

2. Key Laboratory of Environmental Pollution Health Risk Assessment, Ministry of Ecology and Environment, South China Institute of

基金项目: 国家重点研发计划课题(2022YFC3902102)

第一作者: 蔡莎(2000—), 女, 硕士研究生, 研究方向为环境污染毒理学, E-mail: 1985391435@qq.com

* 通信作者 (Corresponding author), E-mail: huguocheng@scies.org

共同通信作者 (Co-corresponding author), E-mail: zhang.liuyi@163.com

Environmental Sciences, Guangzhou 510655, China

3. Guangxi Zhuang Autonomous Region Product Quality Inspection Research Institute, Nanning 530004, China

Received 27 August 2024 **accepted** 4 November 2024

Abstract: To assess the pollution characteristics and the health risk, and identify the sources of heavy metals in soils of different types of urban parks in Guangzhou, 118 soil samples were collected from 24 urban parks in Guangzhou from June to July 2023. Heavy metals pollution in different types of soils was investigated using geo-accumulation index methods, and the associated health risk was assessed using the US EPA model. Principal component analysis (PCA) and absolute principal component score-multiple linear regression model (APCS-MLR) were used to identify the sources of heavy metals. Our results indicated that the average concentrations of Pb, Cd, Cr, Zn, Mn, Ni, Cu, V, Mo, Sb, Co, and Ti were respectively 45.91, 0.12, 30.84, 85.53, 302.60, 10.50, 40.90, 61.26, 5.94, 2.76, 0.58, and 458.18 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ in the surface soil of children's parks, while the concentrations in other urban parks were 56.02, 0.19, 28.83, 70.51, 263.72, 9.06, 41.68, 61.02, 5.63, 2.74, 0.45, and 320.27 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$. The concentrations of Mo, Sb, Cu, and Zn in the soil of children's parks, and Pb, Cu, Mo, Sb, and Cd in other urban parks, exceeded the soil background values of this city. The geo-accumulation index indicated that the pollution levels of Sb and Mo in children's parks were moderate, while mild for other elements. In other parks, Mo, Sb, Cd, Cu, V, and Zn showed moderate pollution levels, while unpolluted to mildly polluted levels for other elements. Four sources of heavy metal contaminations were identified using APCS-MLR. The mixed domestic/traffic sources accounted for 31.81% with Cd, Cu, Ni, Pb, and Zn as the dominant elements, 31.97% for industrial sources with Cr, Mo, Sb, and V, 17.23% for natural sources with Co, Mn and Ti, and 18.98% for unknown sources. The non-carcinogenic health risk indices for heavy metals in all the samples were within the acceptable range for both children and adults. Similarly, source-oriented non-carcinogenic health risk assessment showed that the non-carcinogenic health risk levels for both adults and children from the four sources were within permissible limits. These outcomes will provide a theoretical basis for soil environmental risk management in urban parks.

Keywords: heavy metals; pollution characteristics; health risk assessment; source apportionment; park soil

0 引言

随着工业化和城市化的快速发展,重金属通过工业排放、交通运输和城市生活等人类活动进入城市土壤^[1],在土壤中具有隐蔽性、持久性和不可逆性等特性^[2-3]。城市公园作为城市居民日常休闲活动的重要场所,其土壤环境质量对城市绿色发展和城市居民健康均有重要影响,对儿童的影响更显著。研究发现,部分城市公园绿地土壤中重金属的含量高于环境背景值,如安江梅朵等^[4]发现北京市城市公园土壤中 Pb 的浓度水平是背景值的 1.48 倍;刘玥等^[5]发现山西大同市公园表层土壤中的 Cr、Mn、Co、Ni、Cu、Zn、As、Cd、Pb 的含量均高于山西省土壤背景值。居民在城市公园进行休闲和娱乐活动时,可能会通过环境暴露接触到土壤中的重金属。土壤重金属可通过手-口接触、呼吸吸入和皮肤接触等途径进入人体,对人体健康产生影响^[6],包括损害中枢神经系统和免疫系统以及降低儿童智力等^[7]。当人体摄入大于承受剂量的重金属时,会产生不可逆的

危害,如 Pb 会导致肝硬化或坏死;Cd 会诱导 DNA 损伤或致突变;Cr 可能会积蓄在肝和肾等组织,引起肝组织退化,肾小管坏死^[8]。广州市作为粤港澳大湾区最具代表性的城市,据 2022 年统计数据显示,城镇化率高达 86.48%。城市公园作为城市生态系统和公共空间的重要组成部分,截至 2020 年,广州市已拥有 270 个城市公园。现针对广州市城市公园土壤重金属的研究中,林雯等^[9]发现广州市城市林地土壤中 Hg 污染最严重,其次是 Pb、Cu、Zn 和 As。谢邵文等^[10]的研究表明广州市城市公园土壤中 Cd 的污染程度较高,Zn 和 Cu 的污染程度为中等,而 Cd 的生态风险显著高于其他重金属。另外,李永杰和张宽义^[11]也发现广州市城市公园土壤中 Cd 的生态风险高于其他重金属。众多学者围绕广州市城市公园土壤重金属的含量、形态分布和生态风险评估进行诸多研究,但并未将来源解析和健康风险评估相结合,以分析不同污染源对成人和儿童引起的健康风险,准确评估广州市城市公园绿地土

壤重金属对人体的潜在危害。

本研究选取广州市城市公园为研究对象,将其分为儿童公园和其他公园,采用地累积污染指数法和健康风险评价模型综合评估绿地土壤重金属污染状况,采用绝对主成分分析-多元线性回归模型(APCS-MLR)探讨广州市城市公园绿地土壤中重金属的来源,并结合 APCS-MLR 和健康评估模型,评估土壤重金属不同污染源对成人和儿童的健康风险,以期为城市公园生态环境保护及公众健康防护提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 样品采集

在广州市区抽取了 24 个公园进行采样,其中包括儿童公园 11 个,其他公园 13 个(社区公园 6 个,综合公园 7 个),如图 1 所示。采集样品时,选择具有代表性且受外源土壤影响较小的区域以及草地覆盖均匀绿地设置采样点。每一个公园在草地中采集 4~8 个样品,共计 118 个样品。土壤样品的采集选择在天气晴朗时进行,每个采样点设置 1 m×1 m 样方,采用五点混合采样法对 0~20 cm 表层土壤进行采集,按四分法留下 1 kg 左右的土壤作为一个样品,聚乙烯袋密封带回实验室-20℃保存。

1.2 样品前处理与分析

采集的土壤样品放入冷冻干燥机中干燥,去除动植物残体、石块等杂物,研钵粉碎后过 100 目尼龙

筛,充分混匀备用。根据《土壤和土壤 12 种金属元素的测定-王水提取-电感耦合等离子质谱法》中电热板消解法对土壤样品进行前处理,使用电感耦合等离子体发射光谱仪(ICP-OES-700, Agilent, 美国)测定土壤样品中 Pb、Cd、Cr、Zn、Mn、Ni、Cu、V、Mo、Sb、Co、Ti 的含量。实验所用试剂均为优级纯(上海国药集团,中国)。选择空白、平行和国家标准土壤样品(GBW07405 和 GBW07407)进行质量控制。每 10 个样品加入 1 个空白样、1 个平行样和 1 个标准品。空白样品符合质量控制和质量保证要求,平行样品标准差均小于 12%,有证标准物质的回收率为 85%~113%。本实验在生态环境部华南科学研究所国家环境保护环境污染健康风险评价重点实验室展开。

1.3 数据分析

采用 Excel 2021 和 IBM SPSS Statistics 27 进行数据处理,利用 Origin 2021 和 ArcGIS10.0 绘制图形。

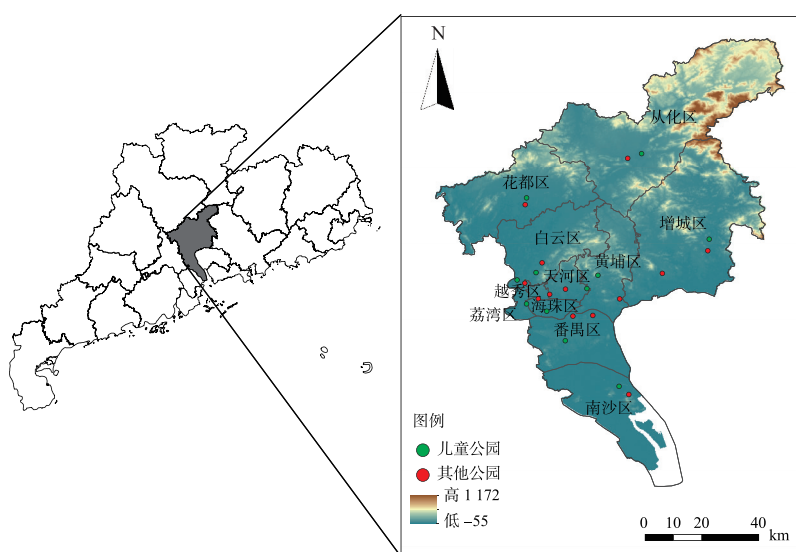
1.4 评价方法

1.4.1 地累积指数

地累积指数(geo-accumulation index, I_{geo})通过结合当地土壤重金属背景值,综合考虑自然地质活动引起的背景值变动,可以直观地体现重金属对土壤的污染程度^[12]。

计算方法如下:

$$I_{geo} = \log_2 \left(\frac{C_n}{K \times BE_n} \right)$$



注:审图号为 GS(2019)1822 号,底图无修改。

图1 广州市公园采样点示意图

Fig. 1 Schematic of park sampling sites from Guangzhou City

式中: C_n 为土壤样品中实际测出的重金属含量($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$); BE_n 为土壤中重金属的背景值($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$); K 为修正指数, 一般为 1.5; 本研究重金属背景值来自于广州市土壤重金属背景值^[13]。根据 I_{geo} 数值可将重金属污染划分为 7 个等级(表 1)^[14]。

1.4.2 来源解析

1.4.2.1 主成分分析(PCA)

主成分分析(principal component analysis, PCA) 是识别土壤中重金属来源的常用模型, PCA 通过减少因子个数, 识别出重金属分布成分, 并为每个成分提供重金属的权重。本研究采用 Kaiser-Meyer-Olkin(KMO)测量来决定适当的保留因子数, 然后进行最大方差旋转。

1.4.2.2 绝对主成分-多元线性回归法(APCS-MLR)

本研究采用 THURSTON 和 SPENGLER^[15]提出的绝对主成分-多元线性回归法(absolute principal component score-multiple linear regression, APCS-MLR)分析土壤中重金属来源。该方法是通过因子得分和绝对零值因子得分的差值得到真实因子得分, 进而得到每个因子贡献率的方法^[16]。首先对数据进行标准化处理, 其次通过因子分析将主成分因子转化为绝对主成分得分, 随后进行多元线性回归分析, 确定各重金属的含量, 并进一步计算各因子对污染源的贡献率^[17]。

1.4.3 健康风险评价

土壤中的重金属主要通过手-口摄入、皮肤接触和呼吸吸入 3 种暴露途径进入人体^[18], 从而引起人

群健康风险。Pb、Cd、Cr、Zn、Mn、Ni、Cu、V、Mo、Sb、Co 具有非致癌健康风险。3 种非致癌暴露途径(成人和儿童)重金属的日均暴露量计算公式如下。

人体经口摄入的日均暴露剂量计算公式如下^[4,19]:

$$\text{ADD}_{\text{ing}} = C \times \frac{I_{\text{ngR}} \times \text{EF} \times \text{ED}}{\text{BW} \times \text{AT}} \times 10^{-6}$$

人体经呼吸道吸入的日均暴露剂量计算公式如下:

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

人体经皮肤接触的日平均暴露剂量计算公式如下:

$$\text{ADD}_{\text{der}} = C \times \frac{\text{SA} \times \text{AF} \times \text{ABS} \times \text{EF} \times \text{ED}}{\text{BW} \times \text{AT}} \times 10^{-6}$$

上述计算公式中暴露参数见表 2。

表 1 地累积指数等级划分
Table 1 Enrichment factor and geo-accumulation index classification

分级 Grade	污染级别 Pollution levels	污染程度 Contamination degrees
0	<0	无
1	0 ~ 1	轻度
2	1 ~ 2	偏中度
3	2 ~ 3	中度
4	3 ~ 4	偏重度
5	4 ~ 5	重度
6	>5	严重

表 2 公园土壤重金属健康风险评价暴露参数
Table 2 Exposure factors of health risk assessment for heavy metals in park soil samples

参数 Parameters	含义 Meaning	单位 Unit	取值(成人) Data (Adults)	取值(儿童) Data (Children)	参考文献 Reference
C	土壤/尘中污染物的浓度	$\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	95% UCL	95% UCL	[20-21]
I_{nhR}	呼吸摄入量	$\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$	15.6	12.6	[20-21]
I_{ngR}	土壤/尘日均摄入量	$\text{mg} \cdot \text{d}^{-1}$	50	66	[20-21]
EF	暴露频率	$\text{d} \cdot \text{a}^{-1}$	350	350	[22]
ED	暴露持续时间	a	25	6	[22]
BW	体质量	kg	59.5	33.6	[20-21]
AT	生命期望值	d	73.27×365	73.27×365	[20-21]
SA	与污染介质接触的的皮肤表面积	cm^2	16 000	11 600	[20-21]
AF	皮肤渗透系数	$\text{mg} \cdot \text{cm}^{-2}$	0.133	0.133	[20-21]
PEF	颗粒排放因子	$\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$	1.36E+09	1.36E+09	[19]
ABS	皮肤吸收系数	量纲为 1	0.001	0.001	[20-21]

注:“95% UCL”表示 95% 置信上限。

非致癌风险一般采用危害商(HQ)来度量,HQ 表示单个重金属在不同途径下的非致癌风险的危害指数,重金属的危害指数(HI)是通过与每种接触途径相关的 HQ 值相加而得出的^[23-24]。表达式:

$$HQ=\frac{ADD}{RfD}$$
$$HI=\sum HQ_i=\sum \frac{ADD_{ij}}{RfD_{ij}}$$

式中:*i* 为重金属的数量;*j* 为暴露途径(土壤摄入、皮肤接触和呼吸吸入);RfD 为不同暴露途径下每个金属的参考剂量(mg·kg⁻¹·d⁻¹)(表 3)。

2 结果与讨论

2.1 污染特征

不同类型城市公园绿地土壤重金属含量见表 4。儿童公园土壤中 Mo、Sb、Cu 和 Zn 含量平均值高于广州市土壤重金属背景值,分别是背景值的 4.95 倍、2.51 倍、1.86 倍和 1.20 倍。儿童公园绿地土

表 3 土壤中重金属不同暴露途径的 RfD
Table 3 RfD of soil heavy metals in different exposure pathways

元素 Element	RfD (mg·kg ⁻¹ ·d ⁻¹)		
	手-口途径 Ingestion	呼吸吸入 Inhalation	皮肤接触 Dermal
Pb	3.50E-03	3.52E-03	5.25E-04
Cd	1.00E-03	1.00E-03	1.00E-05
Cr	3.00E-03	2.86E-05	6.00E-05
Zn	3.00E-01	3.00E-01	6.00E-02
Mn	4.60E-02	1.43E-05	1.84E-03
Ni	2.00E-02	2.06E-02	5.40E-03
Cu	4.00E-02	4.00E-02	1.20E-02
V	7.00E-03		7.00E-05
Mo	5.00E-03		1.90E-03
Sb	4.00E-04		8.00E-06
Co	2.00E-02	5.71E-06	1.60E-02
Ti			

表 4 广州市不同类型城市公园绿地土壤重金属含量
Table 4 Heavy metal concentrations in soil samples of two types of parks from Guangzhou City

公园类型 Type of park	指标 Index	Pb	Cd	Cr	Zn	Mn	Ni	Cu	V	Mo	Sb	Co	Ti
儿童公园 Children's parks	最大值/(mg·kg ⁻¹) Maximum value/(mg·kg ⁻¹)	69.43	0.36	57.55	137.34	475.98	16.33	60.62	113.56	7.83	4.67	2.61	1 309.47
	最小值/(mg·kg ⁻¹) Minimum value/(mg·kg ⁻¹)	23.77	—	10.46	37.48	117.45	4.41	24.91	36.04	4.24	1.33	—	95.49
	平均值/(mg·kg ⁻¹) Average value/(mg·kg ⁻¹)	45.91	0.12	30.84	85.53	302.60	10.50	40.90	61.26	5.94	2.76	0.58	458.18
	标准差/(mg·kg ⁻¹) Standard deviation/(mg·kg ⁻¹)	15.74	0.13	11.37	33.68	120.62	4.23	11.78	26.24	1.11	1.18	0.78	345.75
	变异系数/% Coefficient of variation/%	0.34	1.06	0.37	0.39	0.40	0.40	0.29	0.43	0.19	0.43	1.36	0.75
	最大值/(mg·kg ⁻¹) Maximum value/(mg·kg ⁻¹)	134.09	0.86	50.45	227.22	613.70	21.38	93.39	260.95	15.94	7.63	3.04	741.37
	最小值/(mg·kg ⁻¹) Minimum value/(mg·kg ⁻¹)	28.84	—	9.81	14.03	79.12	3.14	20.57	18.55	2.66	0.52	—	56.48
其他公园 Other urban parks	平均值/(mg·kg ⁻¹) Average value/(mg·kg ⁻¹)	56.02	0.19	28.83	70.51	263.72	9.06	41.68	61.02	5.63	2.74	0.45	320.27
	标准差/(mg·kg ⁻¹) Standard deviation/(mg·kg ⁻¹)	29.79	0.24	13.29	55.28	143.65	5.27	21.77	63.13	3.42	2.02	0.85	169.44
	变异系数/% Coefficient of variation/%	0.53	1.27	0.46	0.78	0.54	0.58	0.52	1.03	0.61	0.74	1.91	0.53
	参考值(广州市)/(mg·kg ⁻¹) Reference point (Guangzhou City)/(mg·kg ⁻¹)	47.00	0.15	44.00	71.00	310.00	16.00	22.00	77.00	1.20	1.10	8.00	3 995.00

注:“—”表示低于检出限。

壤中 Cd、Cu、Zn 和 Ni 的含量平均值与前人的研究呈现相似的结果^[10],其他公园平均值大小排序与儿童公园一致,其中有 7 种重金属的含量平均值低于广州市土壤重金属背景值,分别为 Ti、Mn、Zn、V、Cr、Ni、Co,其余的重金属(Pb、Cu、Mo、Sb、Cd)平均值均不同程度超过广州市城市土壤背景值,其中 Mo 是背景值的 4.69 倍,其次 Sb 达到了背景值的 2.49 倍,最低的是 Cd、Cu 和 Pb,分别是背景值的 1.28 倍、1.89 倍和 1.19 倍。

变异系数是用于描述采样点数据变异性的参数^[25]。变异系数越大,变异性和分散性越大,表明人类活动对土壤重金属输入的影响越强烈^[26]。变异水平根据变异系数可划分为低变异($CV \leq 0.10$)、中等变异($0.10 < CV \leq 1.00$)、高变异($CV > 1.00$)^[27],儿童公园土壤 Cd 和 Co 的变异系数大于 1,表明这 2 种重金属在儿童公园土壤中的空间分布不均匀,可能受到人为活动影响较为显著。相似的结果也出现在其他公园土壤中(如 Cd、Co 和 V),其余重金属均属于中等变异。总体上,儿童公园土壤中的所有重金属的变异系数均小于其他公园土壤中相应重金属的变异系数。

2.2 地累积指数

广州市儿童公园和其他公园土壤重金属地累积指数如图 2 所示。儿童公园土壤中 12 种重金属的地累积指数从高到低顺序为:Mo、Sb、Cu、Cd、Zn、Mn、Pb、V、Co、Cr、Ni、Ti。根据表 1 的等级划分,Cu、Cd、Zn、Mn、Pb、V、Co、Cr、Ni 和 Ti 重金属处于无污染和轻度污染之间,仅 Sb 和 Mo 的污染较为严重,Sb 整体属于无-轻度-偏中度污染,占比分别为 27.28%(无污染)、36.36%(轻度污染)和 36.36%(偏中度污染)。对于 Mo 而言,81.82%的土壤样品处于偏中度污染,18.18%的土壤样品处于中度污染。

其他公园 12 种重金属地累积指数从高到低顺序为:Mo、Sb、Cu、Cd、Pb、Mn、V、Zn、Co、Cr、Ni、Ti,污染程度较高的是 Mo、Sb 和 Cu。Co、Cr、Ni、Ti、Mn 和 Pb 处于无-轻度污染,但 V、Zn、Cd、Cu、Sb 和 Mo 存在一定程度的污染。其中,Mo 处于偏重度污染的样品占比为 7.69%,Sb 和 Mo 处于中度污染的样品占比均为 7.69%,V、Zn、Cd、Cu、Sb 和 Mo 处于偏中度污染的占比分别为 7.69%、7.69%、7.69%、15.38%、23.08% 和 61.54%。

2.3 土壤重金属来源解析

图 3(b)中主成分分析(PCA)解析重金属成分结

果显示 KMO 为 0.687,大于 0.5, Bartlett's 球度检验 $P < 0.01$,说明变量之间存在相关性且可以进行因子分析^[28]。用 APCS-MLR 模型对 PCA 的结果进行验证,如图 3(a)所示,APCS-MLR 的分析结果与 PCA 在整体上具有一致性。再采用相关性分析,判断同一因子的重金属是否具有相似来源^[29]。

通过主成分分析提取了 3 个主成分(特征值大于 1),累计方差贡献率为 68.23%,可对大部分数据进行解释。成分 1(PC1)的贡献率为 34.25%,主要贡献重金属为 Cd、Cu、Ni、Pb 和 Zn;根据图 3(d)中的相关性分析,Cd、Cu、Ni、Pb 和 Zn 相互之间呈显著相关关系。成分 2(PC2)的贡献率为 22.09%,主要贡献重金属为 Cr、Mo、Sb 和 V;成分 3(PC3)的贡献率为 11.88%,主要贡献重金属为 Co、Mn 和 Ti。

源 1 载荷较大的重金属为 Cd、Cu、Ni、Pb 和 Zn,贡献率分别为 42.21%、53.04%、54.46%、62.52% 和 78.08%。Zn、Pb 和 Cu 在相对繁华市区的公园中含量较高,已有研究发现,垃圾颗粒中 Cd、Zn 和 Cu 的含量相对较高^[30],公园垃圾塑料微粒中的稳定剂、着色剂等,含有 Pb、Zn、Cd 等重金属会进入土壤。由于公园通常承载着大量人流,因此导致生活垃圾大量产生,从而增加公园绿地土壤重金属含量。除此之外,Ni、Pb、Cu 和 Zn 是交通排放的典型重金属^[31-32];汽车轮胎的添加剂中含有 Zn,轮胎与路面摩擦产生的粉末,通过沉降到表层土壤增加其含量,汽车尾气排放可导致 Pb 富集^[33]。广州市民用车辆拥有量较大,公路的货运量和货物周转量较高,采样区域周围有较多交通干道和公共交通设施;Cd、Cu 和 Zn 被确认为农药化肥的标志性元素^[34-35]。公园会采取喷洒农药和施肥等措施保障植物的正常生长发育。然而,残留的农药和化肥可能会迁移至公园土壤中,从而导致土壤中的 Cd、Cu 和 Zn 含量增加。因此,源 1 可判断为生活、交通和农业混合来源。

源 2 载荷 Cr、Mo、Sb 和 V 的贡献率分别为 48.44%、82.39%、56.34% 和 71.47%。在电子和机械行业,Sb 可作为金属合金和焊料的重要组成部分^[36],Mo 常用于钢铁工业生产和电子设备制造,V 的污染主要与燃料消耗和石油化工装置相关^[37],故 Sb、Mo 和 V 可能会在工业生产过程中释放并进入环境。研究表明,环境中的 Cr 主要来源于自然环境^[38],但钢铁生产和金属加工等工业活动同样会向环境中释放 Cr^[37]。广州市金属制造加工、机械和设

备修理等与重金属相关的企业数量较多,高值点附近存在汽配产业园、加油站和建筑安装工程等汇集的工业区。工业活动过程释放的重金属可能是城市公园绿地土壤中 Cr、Mo、Sb 和 V 的重要来源之一。因此,源 2 可判断为工业源。

源 3 载荷 Co、Mn 和 Ti,贡献率分别为 49.13%、35.27% 和 56.66%。Co 和 Ti 化学性质较稳定^[39],且土壤中的浓度未超过背景值,表明其受污染程度较轻。研究表明,土壤中 Mn 的含量会受到土壤成土母质的影响^[40-41]。因此,源 3 可判断为土壤母质源。

利用 APCS-MLR 模型计算贡献率,如图 3(c)所示,生活、交通和农业混合源、工业源、母质源和未知源的平均贡献率分别为 31.81%、31.97%、17.23% 和 18.98%。生活和交通源以 Zn(78.08%)、Pb(62.52%)、Ni(54.46%)贡献为主;工业源中以 Mo(82.39%)贡献为主;母质源中以 Ti(56.66%)贡献为主。

2.4 健康风险评价

2.4.1 以浓度为导向的健康风险评估

儿童公园与其他公园的土壤重金属对成人和儿

童造成健康风险评价结果列于表 5。研究结果显示,3 种暴露途径的非致癌健康风险依次为:手-口途径>皮肤接触>呼吸吸入,表明土壤重金属暴露途径主要是通过手-口途径,与已报道的研究结果一致^[42]。Pb、Mn、Zn、Ni、Cu、Mo 和 Co 通过手-口途径

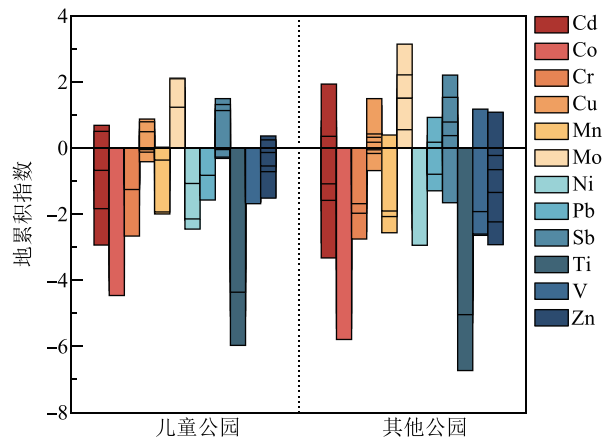
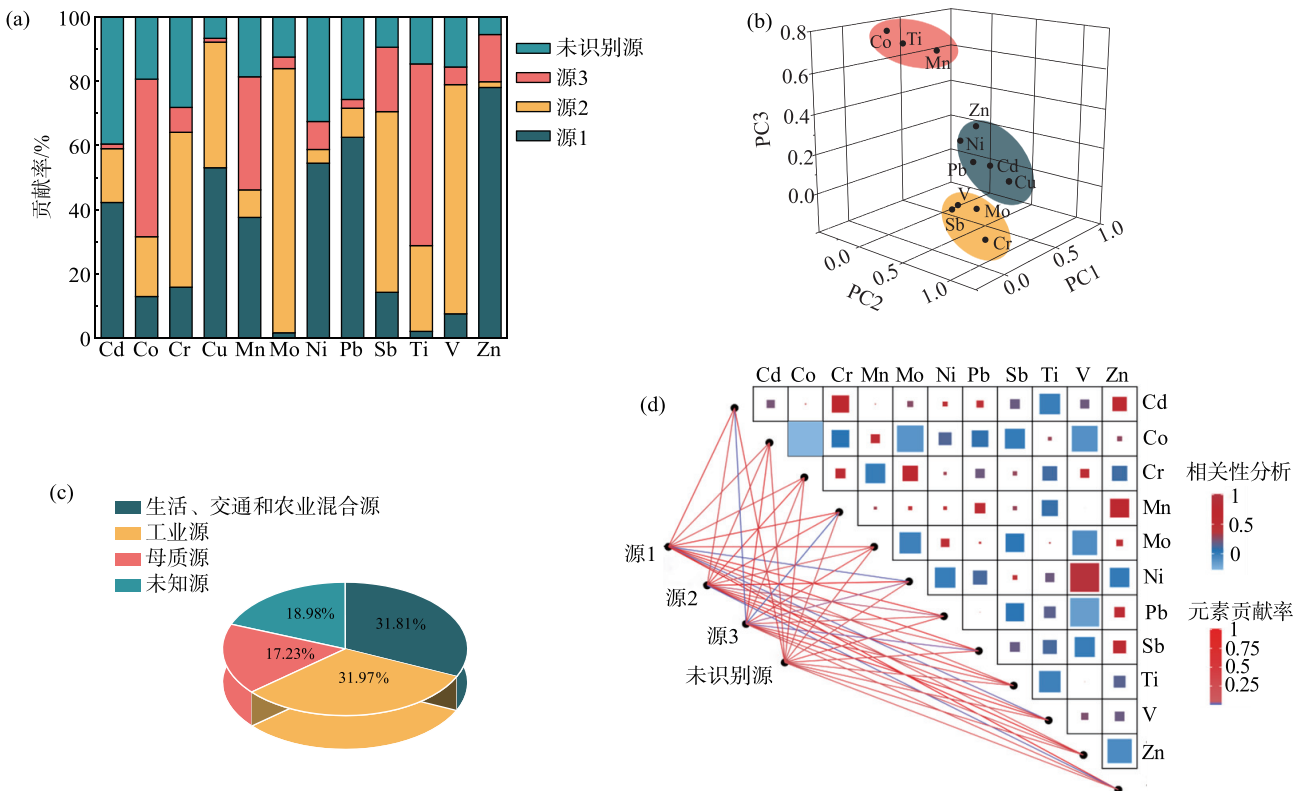


图 2 其他公园与儿童公园土壤重金属地累积指数

Fig. 2 Soil heavy metal geo-accumulation index of non-children's parks and children's parks



注:(a)基于 APCS-MLR 源解析的贡献率;(b)主成分分析;(c)基于 APCS-MLR 的重金属来源贡献;(d)公园土壤重金属的相关性热图。

图 3 研究区域公园土壤重金属的来源解析

Fig. 3 Source apportionment of heavy metals in park soils of the study area

表 5 公园土壤重金属风险指数
Table 5 Soil heavy metal risk index in park

公园类型 Type of park	元素 Element	HQ _{ing}		HQ _{inh}		HQ _{der}		HI	
		成人 Adults	儿童 Children	成人 Adults	儿童 Children	成人 Adults	儿童 Children	成人 Adults	儿童 Children
儿童公园 Children's parks	Pb	3.98E-03	2.23E-03	9.08E-07	3.12E-07	1.13E-03	3.48E-04	5.11E-03	2.58E-03
	Cd	5.50E-05	3.08E-05	1.26E-08	4.33E-09	2.34E-04	7.21E-05	2.89E-04	1.03E-04
	Cr	3.15E-03	1.77E-03	7.59E-05	2.61E-05	6.71E-03	2.07E-03	9.94E-03	3.86E-03
	Zn	9.04E-05	5.07E-05	2.07E-08	7.12E-09	1.92E-05	5.93E-06	1.10E-04	5.67E-05
	Mn	2.06E-03	1.16E-03	1.52E-03	5.22E-04	2.19E-03	6.75E-04	5.77E-03	2.35E-03
	Ni	1.64E-04	9.22E-05	3.66E-08	1.26E-08	2.59E-05	7.99E-06	1.90E-04	1.00E-04
	Cu	2.71E-04	1.52E-04	6.21E-08	2.13E-08	3.84E-05	1.18E-05	3.09E-04	1.64E-04
	V	2.73E-03	1.53E-03			1.16E-02	3.57E-03	1.43E-02	5.10E-03
	Mo	3.52E-04	1.97E-04			3.94E-05	1.21E-05	3.91E-04	2.10E-04
	Sb	1.59E-03	8.91E-04			3.38E-03	1.04E-03	4.97E-03	1.93E-03
	Co	1.26E-05	7.10E-06	1.02E-05	3.49E-06	6.73E-07	2.07E-07	2.35E-05	1.08E-05
其他公园 Other urban parks	Pb	5.20E-03	2.92E-03	1.19E-06	4.07E-07	1.48E-03	4.55E-04	6.68E-03	3.37E-03
	Cd	2.14E-04	1.20E-04	4.92E-08	1.69E-08	9.13E-04	2.81E-04	1.13E-03	4.02E-04
	Cr	3.01E-03	1.69E-03	7.25E-05	2.49E-05	6.41E-03	1.98E-03	9.50E-03	3.69E-03
	Zn	8.13E-05	4.56E-05	1.87E-08	6.40E-09	1.73E-05	5.33E-06	9.86E-05	5.10E-05
	Mn	1.87E-03	1.05E-03	1.38E-03	4.75E-04	1.99E-03	6.14E-04	5.25E-03	2.14E-03
	Ni	1.47E-04	8.22E-05	3.26E-08	1.12E-08	2.31E-05	7.12E-06	1.70E-04	8.93E-05
	Cu	3.39E-04	1.90E-04	7.77E-08	2.67E-08	4.80E-05	1.48E-05	3.87E-04	2.05E-04
	V	3.09E-03	1.73E-03			1.32E-02	4.05E-03	1.62E-02	5.79E-03
	Mo	3.65E-04	2.05E-04			4.08E-05	1.26E-05	4.05E-04	2.17E-04
	Sb	1.45E-03	8.14E-04			3.09E-03	9.51E-04	4.54E-03	1.76E-03
	Co	1.51E-06	8.48E-07	1.22E-06	4.17E-07	8.04E-08	2.48E-08	2.81E-06	1.29E-06

产生的非致癌健康风险较大,Cr、Cd、V 和 Sb 通过皮肤接触途径产生的非致癌健康风险较大。成人的 3 种暴露途径的危害商值均高于儿童,可能是因为成人的暴露时间较长以及皮肤表面积较大。成人和儿童摄入绿地土壤中重金属的非致癌健康风险指数均小于 1(HI<1),说明研究区绿地土壤重金属对人体非致癌健康风险可以忽略不计。

2.4.2 以来源为导向的健康风险评估

因此,为了降低环境中重金属对人体的不利影响,我们应该督促企业改善生产工艺,采用更环保的生产技术,有效处理和回收工业废物,以减少重金属的排放。同时,应该完善相关政策,并加强监管,确保工业活动符合环保法规。

本研究结合 APCS-MLR 模型和健康风险模型来量化城市公园绿地土壤重金属污染源对成人和儿童产生的非致癌健康风险。特定源-非致癌健康风险评价模型的结果如表 6 所示。4 种污染源对成人和儿童的总 HI 值均小于阈值 1,表明不同污染源下

的绿地土壤重金属对人体健康不存在非致癌健康风险。4 种污染来源对成人和儿童的非致癌健康风险的变化趋势相同,工业源的非致癌健康风险最高,主要由 Cr、Mo、Sb 和 V 贡献,其次是生活、交通和农业混合源、未知源和母质源。马杰等^[43]的研究表明工业源是健康风险的首要污染源,对致癌和非致癌风险的贡献率最高;潘泳兴等^[44]发现 Cr 和 As 对人体健康风险的贡献最大。因此,为了降低环境中重金属对人体的不利影响,应督促企业改善生产工艺,采用更环保的生产技术,有效处理和回收工业废物,以减少重金属的排放。同时,应该完善相关政策,并加强监管,确保工业活动符合环保法规。

本研究健康风险评价中涉及的暴露参数主要依据中国人群暴露参数手册来选取,并参考已有研究来确定暴露频率和持续暴露时间,以确保参数选择的科学性。尽管如此,重金属的人体健康风险评价工作仍面临一定的不确定性。虽然本研究的健康风险评价主要基于污染介质中的重金属含量,但为了

获得更精确的评价结果,污染物的生物可利用度是一个不可忽视的关键因素^[45]。这意味着,污染物在环境中的实际可吸收和利用程度对于评估其对人体

的影响至关重要。因此,未来的研究需要更多地关注污染物的生物可利用度,从而提升健康风险评价的准确性。

表 6 不同来源重金属对成人和儿童的特定源-健康风险评价 (HI)

Table 6 Source-specific health risks of heavy metals from different sources for adults and children (HI)

元素 Element	生活、交通和 农业混合源 Mixed sources	成人 Adults			生活、交通和 农业混合源 Mixed sources	儿童 Children		
		工业源 Industrial source	母质源 Parent material source	未知源 Unidentified source		工业源 Industrial source	母质源 Parentmaterial source	未知源 Unidentified source
Pb	3.62E-03	5.26E-04	1.58E-04	1.49E-03	1.83E-03	2.66E-04	7.98E-05	7.50E-04
Cd	1.34E-04	5.32E-05	4.62E-06	1.25E-04	4.77E-05	1.89E-05	1.65E-06	4.47E-05
Cr	1.48E-03	4.54E-03	7.27E-04	2.64E-03	5.75E-04	1.76E-03	2.83E-04	1.03E-03
Zn	7.72E-05	1.77E-06	1.45E-05	5.36E-06	3.99E-05	9.16E-07	7.51E-06	2.77E-06
Mn	1.98E-03	4.52E-04	1.86E-03	9.78E-04	8.05E-04	1.84E-04	7.56E-04	3.99E-04
Ni	9.35E-05	7.50E-06	1.50E-05	5.59E-05	4.92E-05	3.95E-06	7.88E-06	2.94E-05
Cu	1.93E-04	1.42E-04	4.25E-06	2.40E-05	1.02E-04	7.53E-05	2.25E-06	1.27E-05
V	1.10E-03	1.06E-02	8.14E-04	2.30E-03	3.93E-04	3.76E-03	2.90E-04	8.18E-04
Mo	6.13E-06	3.20E-04	1.40E-05	4.83E-05	3.28E-06	1.72E-04	7.51E-06	2.59E-05
Sb	1.01E-03	4.03E-03	1.44E-03	6.70E-04	3.95E-04	1.57E-03	5.59E-04	2.61E-04
Co	2.44E-06	3.54E-06	9.32E-06	3.67E-06	1.12E-06	1.63E-06	4.28E-06	1.69E-06
Total HI	9.70E-03	2.06E-02	5.05E-03	8.33E-03	4.24E-03	7.81E-03	2.00E-03	3.37E-03

3 结束语

综上所述,本研究表明:

(1) 广州儿童公园土壤中 Pb、Cd、Cr、Zn、Mn、Ni、Cu、V、Mo、Sb、Co 和 Ti 的平均值分别为 45.91、0.12、30.84、85.53、302.60、10.50、40.90、61.26、5.94、2.76、0.58 和 458.18 mg·kg⁻¹;其他公园土壤相应重金属的平均值分别为 56.02、0.19、28.83、70.51、263.72、9.06、41.68、61.02、5.63、2.74、0.45 和 320.27 mg·kg⁻¹。儿童公园土壤中 Mo、Sb、Cu 和 Zn 以及其他公园土壤中 Pb、Cu、Mo、Sb 和 Cd 均超过广州市土壤背景值。

(2) 地累积指数评价结果表明,儿童公园土壤重金属处于无污染水平的包括 Pb、V、Co、Cr、Ni 和 Ti,处于偏中度污染水平的包括 Sb 和 Mo;其他公园土壤重金属无污染水平的包括 Co、Cr、Ni、Ti,处于偏中度污染水平的重金属包括 Mo、Sb、Cd、Cu、V 和 Zn。

(3) 重金属来源解析表明,公园绿地土壤中重金属 Cd、Cu、Ni、Mn、Pb 和 Zn 主要源于生活和交通,Cr、Mo、Sb 和 V 主要源于工业,Co、Mn 和 Ti 主要来源于自然背景。

(4) 以浓度为导向的非致癌健康风险评估表明,

2 种不同类型的公园绿地土壤重金属对儿童和成人产生的非致癌健康风险处于可接受水平(HI>1)。以不同污染源为导向的非致癌健康风险评估表明,4 种污染源对成人和儿童的总 HI 值均小于阈值 1,表明不同污染源下的绿地土壤重金属对人体健康不存在非致癌健康风险。

通信作者简介:胡国成(1978—),男,博士,正高级工程师,主要研究方向为环境健康与环境毒理学。

共同通信作者简介:张六一(1986—),男,博士,正高级实验师,主要研究方向为环境污染与健康。

4 参考文献

[1] 桂晨露. 焦作市公园土壤重金属生物可给性及健康风险评估[D]. 焦作: 河南理工大学, 2018: 1-4.

[2] 张娟, 王明君, 郭掌珍. 朔州东部农田土壤-农作物重金属富集及健康风险评估[J]. 环境化学, 2024, 43 (4): 1315-1329.

ZHANG J, WANG M J, GUO Z Z. Evaluation of heavy metal enrichment and health risks in agricultural soils-crops in eastern Shuozhou, Shanxi Province, China[J].

- Environmental chemistry, 2024, 43(4): 1315-1329.
- [3] 冯亚亮, 张明鑫. 银川市城区城市表层土壤6种有害重金属分布规律及其来源分析[J]. 国外医学(医学地理分册), 2017, 38(4): 321-324.
- FENG Y L, ZHANG M X. The distribution of six harmful heavy metals in the surface soil of Yinchuan City[J]. Foreign medical sciences (section of medgeography), 2017, 38(4): 321-324.
- [4] 安江梅朵, 张瑞卿, 郭广慧, 等. 北京市城市公园土壤铅累积特征、来源及健康风险[J]. 环境科学, 2023, 44(11): 6287-6296.
- AN J, ZHANG R Q, GUO G H, et al. Accumulation characteristics, sources, and health risks of soil lead of urban parks in Beijing[J]. Environmental science, 2023, 44(11): 6287-6296.
- [5] 刘玥, 郭文强, 武晔秋. 大同市城区公园表层土壤重金属污染特征和健康风险及来源解析[J]. 土壤通报, 2023, 54(1): 180-191.
- LIU Y, GUO W Q, WU Y Q. Pollution characteristics, health risks and source analysis of surface soil heavy metals in urban parks of Datong City[J]. Chinese journal of soil science, 2023, 54(1): 180-191.
- [6] RYAN-FOGARTY Y, BALDÉ C P, WAGNER M, et al. Uncaptured mercury lost to the environment from waste electrical and electronic equipment (WEEE) in scrap metal and municipal wastes[J]. Resources, conservation and recycling, 2023, 191: 106881.
- [7] HAN Q, WANG M S, CAO J L, et al. Health risk assessment and bioaccessibilities of heavy metals for children in soil and dust from urban parks and schools of Jiaozuo, China[J]. Ecotoxicology and environmental safety, 2020, 191: 110157.
- [8] 杨雅茹, 钟瑶, 李帅东, 等. 水产品中重金属对人体的危害研究进展[J]. 农业技术与装备, 2020(10): 55-56.
- YANG Y R, ZHONG Y, LI S D, et al. Research progress on the harm of heavy metals to human body in aquatic products[J]. Agricultural technology & equipment, 2020(10): 55-56.
- [9] 林雯, 李吉跃, 粟娟. 广州市城市林地土壤重金属污染研究[J]. 广东林业科技, 2012, 28(1): 25-29.
- LIN W, LI J Y, SU J. Study on urban forest soil heavy metal pollutions in Guangzhou[J]. Guangdong forestry science and technology, 2012, 28(1): 25-29.
- [10] 谢邵文, 郭晓淞, 杨芬, 等. 广州市城市公园土壤重金属累积特征、形态分布及其生态风险[J]. 生态环境学报, 2022, 31(11): 2206-2215.
- XIE S W, GUO X S, YANG F, et al. Accumulation characteristics, geochemical fractions distribution and ecological risk of heavy metals in soils of urban parks in Guangzhou, China [J]. Ecology and environmental sciences, 2022, 31(11): 2206-2215.
- [11] 李永杰, 张宽义. 广州市公园土壤重金属含量特征及潜在生态危害评价[J]. 中国园艺文摘, 2012, 28(11): 43-45.
- LI Y J, ZHANG K Y. Character of content and contamination evaluation for heavy metal in the soil of Guangzhou parks [J]. Chinese horticulture abstracts, 2012, 28(11): 43-45.
- [12] ABDULLAH M I C, SAH A S R M, HARIS H. Geoaccumulation index and enrichment factor of arsenic in surface sediment of Bukit Merah Reservoir, Malaysia [J]. Tropical life sciences research, 2020, 31(3): 109-125.
- [13] 成杭新, 李括, 李敏, 等. 中国城市土壤化学元素的背景值与基准值[J]. 地学前缘, 2014, 21(3): 265-306.
- CHENG H X, LI K, LI M, et al. Geochemical background and baseline value of chemical elements in urban soil in China[J]. Earth science frontiers, 2014, 21(3): 265-306.
- [14] 胡国成, 许振成, 彭晓武, 等. 广东长潭水库表层沉积物重金属污染特征与潜在生态风险评价研究[J]. 农业环境科学学报, 2011, 30(6): 1166-1171.
- HU G C, XU Z C, PENG X W, et al. Pollution characteristics and potential ecological risk assessment of heavy metals in surface sediment from Changtan Reservoir, Guangdong Province, China[J]. Journal of agro-environment science, 2011, 30(6): 1166-1171.
- [15] THURSTON G D, SPENGLER J D. A quantitative assessment of source contributions to inhalable particulate matter pollution in metropolitan Boston[J]. Atmospheric environment (1967), 1985, 19(1): 9-25.
- [16] LI H B, YU S, LI G L, et al. Contamination and source differentiation of Pb in park soils along an urban-rural gradient in Shanghai[J]. Environmental pollution, 2011, 159(12): 3536-3544.
- [17] DONG C Y, ZHANG H, YANG H C, et al. Quantitative source apportionment of potentially toxic elements in Baoshan soils employing combined receptor models [J]. Toxics, 2023, 11(3): 268.
- [18] ZHENG N, LIU J S, WANG Q C, 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.
- [19] 彭驰, 何亚磊, 郭朝晖, 等. 中国主要城市土壤重金属累积特征与风险评价[J]. 环境科学, 2022, 43(1): 1-10.
- PENG C, HE Y L, GUO Z H, et al. Characteristics and

- risk assessment of heavy metals in urban soils of major cities in China[J]. *Environmental science*, 2022, 43(1): 1-10.
- [20] 环境保护部. 中国人群暴露参数手册, 成人卷[M]. 北京: 中国环境出版社, 2013: 57-683.
- [21] 环境保护部. 中国人群暴露参数手册(儿童卷: 6~17岁)[M]. 北京: 中国环境出版社, 2016: 268-868.
- [22] 叶脉, 张景茹, 张路路, 等. 广东鼻咽癌高发区土壤-作物系统重金属迁移特征及健康风险评估[J]. *环境科学*, 2020, 41(12): 5579-5588.
- YE M, ZHANG J R, ZHANG L L, et al. Transfer factor and health risk assessment of heavy metals in a soil-crop system in a high incidence area of nasopharyngeal carcinoma, Guangdong [J]. *Environmental science*, 2020, 41(12): 5579-5588.
- [23] 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估[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.
- [24] 李有文, 王晶, 巨天珍, 等. 白银市不同功能区土壤重金属污染特征及其健康风险评估[J]. *生态杂志*, 2017, 36(5): 1408-1418.
- LI Y W, WANG J, JU T Z, et al. Heavy metal pollution characteristics and human health risk assessment in soils from different functional areas of Baiyin, Gansu, China[J]. *Chinese journal of ecology*, 2017, 36(5): 1408-1418.
- [25] 杨宇, 郭婷婷, 刘孝利, 等. 南方典型矿区农业小流域耕地土壤重金属空间分布特征及污染评价[J]. *环境科学*, 2023, 44(3): 1602-1610.
- YANG Y, GUO T T, LIU X L, et al. Spatial distribution characteristics and assessment of heavy metal pollution in cultivated soil of agricultural small watershed in typical mining area in South China[J]. *Environmental science*, 2023, 44(3): 1602-1610.
- [26] 罗豪杰, 潘俊, 陈小霞, 等. 基于 Monte-Carlo 模拟的湖南省典型工厂周边农田土壤重金属区域潜在生态风险特征及来源解析[J]. *环境科学*, 2024, 45(2): 1038-1048.
- LUO H J, PAN J, CHEN X X, et al. Potential ecological risk characteristics and source apportionment of heavy metals in farmland soils around typical factories in Hunan Province based on Monte-Carlo simulation[J]. *Environmental science*, 2024, 45(2): 1038-1048.
- [27] BAI Y R, WANG Y K. Spatial variability of soil chemical properties in a jujube slope on the Loess Plateau of China [J]. *Soil science*, 2011, 176(10): 550-558.
- [28] BHARDWAJ R, GUPTA A, GARG J K. Evaluation of heavy metal contamination using environmetrics and indexing approach for River Yamuna, Delhi stretch, India[J]. *Water science*, 2017, 31(1): 52-66.
- [29] 万梦雪, 焦文涛, 胡文友, 等. 城市工业区土壤重金属累积特征与来源解析——以上海市闵行区典型工业区为例[J]. *环境化学*, 2023, 42(6): 1886-1898.
- WAN M X, JIAO W T, HU W Y, et al. Accumulation and source apportionment of heavy metals in urban-industrial soils—A case study in Minhang District of Shanghai[J]. *Environmental chemistry*, 2023, 42(6): 1886-1898.
- [30] GYABAAH D, AWUAH E, ANTWI-AGYEI P, et al. Physicochemical properties and heavy metals distribution of waste fine particles and soil around urban and peri-urban dumpsites [J]. *Environmental challenges*, 2023, 13: 100785.
- [31] GUNAWARDANA C, GOONETILLEKE A, EGODA-WATTA P, et al. Source characterisation of road dust based on chemical and mineralogical composition [J]. *Chemosphere*, 2012, 87(2): 163-170.
- [32] 张旭峰, 冯韶华, 尚婷婷, 等. 平原河网地区农田土壤重金属污染特征及来源解析[J]. *农业环境科学学报*, 2024, 43(4): 835-844.
- ZHANG X F, FENG S H, SHANG T T, et al. Pollution characteristic and source apportionment of heavy metals in farmland soil from a plain river network region [J]. *Journal of agro-environment science*, 2024, 43(4): 835-844.
- [33] CAI L M, WANG Q S, WEN H H, et al. Heavy metals in agricultural soils from a typical township in Guangdong Province, China: occurrences and spatial distribution [J]. *Ecotoxicology and environmental safety*, 2019, 168: 184-191.
- [34] KANG D J, ZHENG G Y, YU J H, et al. Hydropower reservoirs enhanced the accumulation of heavy metals towards surface sediments and aggravated ecological risks in Jiulong River Basin, China[J]. *Journal of soils and sediments*, 2021, 21(10): 3479-3492.
- [35] 何臻, 李婷, 骆虹伶, 等. 地球化学元素高背景农作区土壤剖面重金属来源解析及污染评价[J]. *环境化学*, 2023, 42(12): 4253-4263.
- HE Z, LI T, LUO H L, et al. Source identification and pollution assessment of heavy metals in soil profile of agricultural area with high background of geochemical elements[J]. *Environmental chemistry*, 2023, 42(12): 4253-4263.

- [36] LI X P, ZHANG M, GAO Y, et al. Urban street dust bound 24 potentially toxic metal/metalloids (PTMs) from Xining Valley-City, NW China: spatial occurrences, sources and health risks[J]. *Ecotoxicology and environmental safety*, 2018, 162: 474-487.
- [37] GUAN Q Y, WANG F F, XU C Q, et al. Source apportionment of heavy metals in agricultural soil based on PMF: a case study in Hexi Corridor, Northwest China[J]. *Chemosphere*, 2018, 193: 189-197.
- [38] ANAMAN R, PENG C, JIANG Z C, et al. Identifying sources and transport routes of heavy metals in soil with different land uses around a smelting site by GIS based PCA and PMF[J]. *Science of the total environment*, 2022, 823: 153759.
- [39] 段慧敏, 朱丽东, 李凤全, 等. 浙江省永康城市土壤重金属元素富集特征[J]. *土壤通报*, 2012, 43(4): 956-961.
- DUAN H M, ZHU L D, LI F Q, et al. Heavy metals' enrichment and their sources of urban soils in Yongkang [J]. *Chinese journal of soil science*, 2012, 43(4): 956-961.
- [40] LIANG J, FENG C T, ZENG G M, et al. Spatial distribution and source identification of heavy metals in surface soils in a typical coal mine city, Lianyuan, China[J]. *Environmental pollution*, 2017, 225: 681-690.
- [41] ZHANG Z X, LU Y, LI H P, et al. Assessment of heavy metal contamination, distribution and source identification in the sediments from the Zijiang River, China[J]. *Science of the total environment*, 2018, 645: 235-243.
- [42] 范刘丹, 王明仕, 宋党育, 等. 部分中国城市公园重金属生态风险及健康风险评估[J]. *环境化学*, 2019, 38(4): 793-804.
- FAN L D, WANG M S, SONG D Y, et al. Ecological risk assessment and health risk assessment of heavy metals in some China urban parks [J]. *Environmental chemistry*, 2019, 38(4): 793-804.
- [43] 马杰, 王胜蓝, 秦启荧, 等. 基于源导向的锰矿尾矿库周边土壤重金属风险评估[J]. *环境科学*, 2024, 45(12): 7166-7176.
- MA J, WANG S L, QIN Q Y, et al. Risk assessment of heavy metals in soil surrounding manganese tailings pond based on source-oriented analysis[J]. *Environmental science*, 2024, 45(12): 7166-7176.
- [44] 潘泳兴, 陈盟, 王橧橧. 基于源导向的土壤重金属风险评估及管控因子分析[J]. *环境科学*, 2024, 45(2): 1026-1037.
- PAN Y X, CHEN M, WANG X T. Quantifying the contribution of soil heavy metals to ecological and health risk sources[J]. *Environmental science*, 2024, 45 (2): 1026-1037.
- [45] 张迪, 周明忠, 熊康宁, 等. 贵州遵义下寒武统黑色页岩区土壤重金属污染和人体健康风险评估[J]. *环境科学研究*, 2021, 34(5): 1247-1257.
- ZHANG D, ZHOU M Z, XIONG K N, et al. Assessment of pollution and human health risk from heavy metals in soils and crops in the lower Cambrian Black Shale Area, Zunyi, Guizhou Province[J]. *Research of environmental sciences*, 2021, 34(5): 1247-1257. ◆