

临汾市主城区路面尘中重金属污染特征及其环境健康风险

卫志强,康逸晴,李紫莹,阴思琪,刘平,魏海英*

(山西大学 环境与资源学院,山西 太原 030006)

摘要:为了研究临汾市主城区重金属的污染特征及其生态健康风险,本研究分别采用电感耦合等离子质谱技术(ICP-MS)和原子荧光光度法(AFS)对路面尘中Cr、Ni、Cu、Zn、Pb、Cd、As 7种重金属的含量进行测定,采用潜在生态危害指数法和美国环境保护署(United States Environmental Protection Agency, USEPA)健康风险评估模型对7种重金属的生态和健康风险进行了评价。研究表明,临汾市主城区路面尘中Cr、Ni、Cu、Zn、Pb、Cd和As的平均含量分别为88.38、30.7、46.69、319.83、43.89、0.53和7.94 mg·kg⁻¹,除As外均高于山西土壤背景值。其中Zn受人类活动影响较大且富集较为严重。生态风险评估表明,除Cd是强生态危害外,其余均为轻微危害,研究区重金属生态危害总体处于中等水平。7种重金属对儿童和成人总非致癌指数分别为0.034和0.001 5, Cr、Ni、Cd、As的总致癌指数小于10⁻⁶,表明临汾市主城区重金属不存在健康风险。主成分分析结果表明,临汾市主城区路面尘中重金属来源主要为金属冶炼、燃煤(炼焦)和交通。

关键词:潜在有毒元素;路面尘;环境健康风险;临汾市

中图分类号:X508 文献标志码:A 文章编号:0253-2395(2024)06-1318-08

Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of Heavy Metals in the Road Dust of Central Downtown of Linfen City

WEI Zhiqiang, KANG Yiqing, LI Zixuan, YIN Siqu, LIU Ping, WEI Haiying*

(School of Environment and Resource Sciences, Shanxi University, Taiyuan 030006, China)

Abstract: The aims of this study were to examine the distribution character, ecological and health risk of heavy metals in the central downtown of Linfen City. The concentrations of heavy metals including Cr, Ni, Cu, Zn, Pb, Cd, and As in the road dust were determined by inductively coupled plasma mass spectrometry (ICP-MS) and atomic fluorescence spectrophotometry (AFS). The method of potential ecological risk index and the model of U.S. Environmental Protection Agency (USEPA) health risk assessment were used to assess the ecological and health risks. The results showed that the mean concentrations of Cr, Ni, Cu, Zn, Pb, Cd, and As were 88.38, 30.7, 46.69, 319.83, 43.89, 0.53 and 7.94 mg·kg⁻¹, respectively, all of which were higher than those of the soil background of Shanxi Province except for As. Among them, Zn was greatly affected by human activities and severely enriched. Ecological risk analysis suggested that all elements examined were at low ecological risk except for Cd, and the central downtown of Linfen city was at middle ecological risk. The total non-carcinogenic index of 7 heavy metals for children and adults were 0.034 and 0.001 5, and the total carcinogenic index of Cr, Ni, Cd, As was less than 10⁻⁶. Therefore, there was no health risk to children and adults. Principal component analysis showed that the sources of heavy metals in the central downtown road dust of Linfen city were metal smelting, coal combustion (coking) and traffic.

Key words: potentially toxic element; road dust; environmental health risk; Linfen city

收稿日期:2023-04-13;接受日期:2023-10-12

基金项目:山西省自然科学基金(201901D111005);山西大学第十八期本科生科研训练计划项目(2020018391)

作者简介:卫志强(2000—),男,山西运城人,硕士研究生,研究方向为土壤污染与修复。E-mail: 18835917083@163.com

* 通信作者:魏海英(WEI Haiying),E-mail: weihaiying@sxu.edu.cn

引文格式:卫志强,康逸晴,李紫莹,等.临汾市主城区路面尘中重金属污染特征及其环境健康风险[J].山西大学学报(自然科学版),2024,47(6):1318-1325. DOI:10.13451/j.sxu.ns.2023162

0 引言

城市路面尘是室外不透水地面固体颗粒物的混合物,其来源有自然源和人为源^[1],影响因素较为广泛,除气候、岩石等自然因素外,人类活动也会影响路面尘的组成^[2]。城市化和工业化的发展过程中,工业排放使得环境中含有重金属或类重金属的粉尘颗粒不断积累^[3],城市道路网和机动车数量的迅速增加,也是路面尘沉积的一个主要因素^[4]。路面尘中的化学成分可以反映一个地区的环境状况^[5],因此常被作为环境污染的指示物^[6]。路面尘可转化为大气中的颗粒物,在地表径流的冲刷过程中,吸附在颗粒物上的污染物迁移至城市流域,造成潜在的生态风险。道路粉尘通过吸入、皮肤接触和摄入进入人体,其中的重金属Pb、Cd、Cu、Zn、As、Cr等对人类健康造成潜在威胁^[7],已经引起广泛的关注^[8]。

作为山西省能源重化工基地,临汾市有着较多的煤、焦、铁等产业,其重金属污染程度相对比较严重^[9]。目前针对临汾市城市重金属污染的研究较少,缺少对重金属污染特征的调查研究和整体认识。前期研究表明,临汾地区土壤中含有较高浓度的Ni、Zn、As、Pb和Mn^[10],表层土壤中Pb和As含量较高,造纸厂、钢铁厂污染较为严重;临汾市污灌农田土壤中Ni的污染最为严重,达到轻度污染^[11]。临汾市主城区

为人们日常活动较为集中的区域,相关重金属的调查研究还鲜见报道。因此,开展临汾市主城区路面尘中重金属污染调查,明确该区域内重金属污染现状,找出污染物的来源,对临汾市环境污染的防治、环境质量评价等具有重要的现实意义。

本研究测定分析了路面尘中Cr、Ni、Cu、Zn、Pb、Cd、As 7种重金属的浓度及其污染特征,对重金属的生态风险和人类健康风险进行了评价,并采用主成分分析法结合Pearson相关性分析探究了重金属的主要来源,确定需要控制的关键要素。研究结果将为临汾市重金属污染控制及人类健康风险防范提供一定的科学依据。

1 材料与方法

1.1 样点设置及分布

临汾市位于山西省西南部,临汾市主城区位于北纬35°23′~36°57′,东经110°22′~112°34′,地处汾河谷地,属于温带大陆性气候,季节分明,年均降水量550 mm,年平均气温14.1℃。为了研究临汾市主城区重金Cr、Ni、Cu、Zn、Pb、Cd、As的污染特征及健康风险水平,围绕临汾市主城区国控监测点的分布确定6个采样区,每个采样区设3个采样点,共18个采样点进行采样,具体分布见图1。

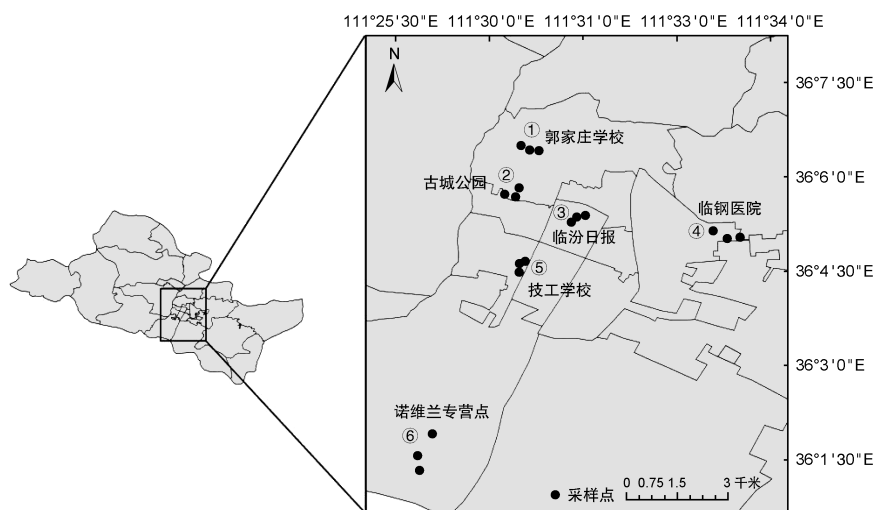


图1 采样点分布示意图

Fig. 1 Distribution of sampling sites

1.2 样品采集与处理

1.2.1 路面尘样品采集及处理

本实验于2020—2021年冬季进行采样,2020年11月—2021年2月每月采样一次,共四次。采样时使用塑料毛刷在各采样点附近10 m²范围内随机采集5个点的样品(约200 g),混合后装入聚乙烯(Polyethylene, PE)袋备用。采集过程中考虑避开容易造成干扰的地方,如垃圾投放点、公交站台、建筑用地等^[12]。采回后将路面尘去除杂质,研磨并且过筛(200目),烘干至恒重备用。

1.2.2 样品消解

在盛有12.0 mL HNO₃-HCL(4:1)的微波消解管中加入0.5 g样品高温消解(HNO₃,优级纯,德国默克公司;HCL,优级纯,国药集团化学试剂有限公司),消解后分别采用ICP-MS(安捷伦7700e,美国)测定Cd、Cr、Pb、Cu、Zn、Ni的含量、原子荧光光度仪(AFS-230E)测定As的含量。为保证结果的准确度,四次采集的样品每个重复检测3次,结果中显示值均为平均值±标准差。

1.3 污染程度评价方法

地积累指数法(Index of Geoaccumulation)是用于研究重金属污染程度的定量标准,在20世纪60年代末由德国科学家Muller提出。为了评价路面尘重金属污染程度,分别计算各种元素的地积累指数,公式见式(1)。

$$I_{geo} = \log_2 [C_s / (K \times C_n^i)] \quad (1)$$

式中: C_s 为样品中实际重金属含量(mg·kg⁻¹), C_n^i 为元素的区域背景值(mg·kg⁻¹),文中采用山西省土壤背景值^[13], K 为基于背景值的常数(本文中取1.5),地积累指数具体分级见表1。

表1 地积累指数和污染程度分级

Table 1 Index of geoaccumulation (I_{geo}) and classification of pollution degree

地积累指数(I_{geo})	级数	污染程度
$I_{geo} \leq 0$	0	无污染
$0 < I_{geo} \leq 1$	1	轻度-中等污染
$1 < I_{geo} \leq 2$	2	中等污染
$2 < I_{geo} \leq 3$	3	中等-强污染
$3 < I_{geo} \leq 4$	4	强污染
$4 < I_{geo} \leq 5$	5	强-极严重污染
$5 < I_{geo} \leq 10$	6	极严重污染

1.4 潜在生态风险评价方法

潜在生态风险指数主要用于表征土壤或沉积物中重金属的污染程度,已经广泛应用于沉积物风险评价^[14]。计算方法见公式(2)。

$$RI = \sum_{i=1}^n E_r^i = \sum_{i=1}^n T_r^i \times C_f^i = \sum_{i=1}^n T_r^i \times \frac{C_s^i}{C_n^i} \quad (2)$$

式中: RI 为多元素潜在生态风险指数, E_r^i 为单个元素风险指数, C_f^i 为某一种元素相对参比值的污染系数, C_s^i 为某一种重金属浓度实际值, C_n^i 为对应重金属元素的土壤背景值, T_r^i 为重金属的毒性系数,Cd、Cr、Zn、Pb、Cu、As、Ni的毒性系数分别为30、2、1、5、5、10、5,潜在生态风险指数与程度分级见表2。

表2 潜在生态危害指数与危害程度分级

Table 2 Ecological risk index and classification of risk intensity

单元素风险指数(E_r^i)	多元素潜在生态风险指数(RI)	生态危害程度
$E_r^i < 40$	$RI < 150$	轻微生态危害
$40 \leq E_r^i < 80$	$150 \leq RI < 300$	中等生态危害
$80 \leq E_r^i < 160$	$300 \leq RI < 600$	强生态危害
$160 \leq E_r^i < 320$	$RI \geq 600$	很强生态危害
$E_r^i \geq 320$		极强生态危害

1.5 健康风险评价方法

污染物对人体健康造成危害一般有三种方式:手-口摄入、呼吸摄入和皮肤接触^[15],同样适用于路面尘。路面尘中重金属对人体健康风险利用USEPA(United States Environmental Protection Agency)健康风险评价模型^[16]进行评价。根据公式(3)—(5)计算不同暴露途径下的日平均暴露量。由于儿童与成人存在生理结构的差异,在对他们进行健康风险评价时需要不同的参数^[17]。再根据公式(6)—(8)计算致癌与非致癌风险。

$$ADD_{\text{摄入}} = \frac{C \times R_{\text{摄入}} \times EF \times ED}{BW \times AT} \times 10^{-6} \quad (3)$$

$$ADD_{\text{吸入}} = \frac{C \times R_{\text{吸入}} \times EF \times ED}{PEF \times BW \times AT} \times 10^{-6} \quad (4)$$

$$ADD_{\text{皮肤}} = \frac{C \times SA \times SL \times ABF \times EF \times ED}{BW \times AT} \times 10^{-6} \quad (5)$$

$$HQ_i = \frac{ADD_i}{RfD} \quad (6)$$

表3 临汾市主城区路面尘中重金属含量

Table 3 The concentrations of heavy metals in the road dust of central downtown of Linfen City

重金属	最小值/(mg·kg ⁻¹)	最大值/(mg·kg ⁻¹)	平均值/(mg·kg ⁻¹)	变异系数	土壤背景值 ^[13] /(mg·kg ⁻¹)
Cr	67.2	146	88.38±24.24	0.27	73.26
Ni	19.1	48.8	30.70±9.30	0.30	25.72
Cu	27.7	64.8	46.69±10.39	0.22	26.15
Zn	164	756	319.83±201.47	0.63	71.86
Cd	0.286	0.956	0.53±0.20	0.38	0.11
Pb	27.4	65.2	43.89±12.94	0.29	23.83
As	5.93	9.26	7.94±1.03	0.13	10.65

$$HI = \sum_{i=1}^n HQ_i, \quad (7)$$

$$TCR = \sum_{i=1}^n CR_i = \sum_{i=1}^n ADD_i \times SF, \quad (8)$$

式中: HQ_i 为单个重金属的非致癌风险指数, HI 为总非致癌风险指数, 当 HI 大于 1.0 时, 表明存在非致癌健康风险, 当 HI 小于 1.0 时, 则表示非致癌健康风险在可以接受的范围内。 ADD 为每种重金属单位时间单位体重的日平均暴露量, RfD 为参考剂量, TCR 为总致癌风险, SF 为致癌斜率因子。 EPA 推荐的风险阈值范围为 $10^{-6} \sim 10^{-4}$ 。

2 结果与讨论

2.1 路面尘中重金属污染特征分析

临汾市主城区不同采样点路面尘中 Cu、Zn、Cd、Pb、Cr、Ni、As 7 种重金属含量如表 3 所示。对比山西省土壤背景值可知, 路面尘中 7 种元素的含量值除 As 外, 均高于土壤背景值。Cu、Zn、Cd、Pb、Cr、Ni 含量分别为环境背景值的 1.79、4.45、4.82、1.84、1.20 和 1.19 倍。7 种元素平均含量依次为 Zn>Cr>Cu>Pb>Ni>As>Cd。

变异系数 (Coefficient of variation, CV) 是反映样品受人为因素影响程度的常用参数^[18-19], 其值等于标准差与平均值的比值。变异系数小于 0.10 为弱变异, 大于等于 0.10 且小于等于 0.30 为中等变异, 大于 0.30 为强变异^[20]。由表 3 可以看出, Zn 的变异系数较高为 0.63, 其余依次为 Cd、Ni、Pb、Cr、Cu、As, 表明 Zn 受人类活动影响较大。

2.2 地积累指数及生态风险评价

如表 4 所示, Zn、Cd 在路面尘中的 I_{geo} 分别为 1.75、1.78, 处于中等污染水平; Cr、Cu、Pb 的 I_{geo} 分别为 0.09、0.44、0.99, 处于轻度-中等污染

水平, Ni、As 无污染。各种重金属污染程度依次为 Cd>Zn>Pb>Cu>Cr>Ni>As。

地积累指数法侧重于体现重金属含量与背景值之间的对比, 表征各元素的富集程度。而 Hankanson 潜在生态风险评价则在探究不同重金属含量, 同时还充分考虑到生物毒性差异^[21]。因此, 本研究对路面尘中的各种重金属进行了潜在生态风险评价。

表4 临汾市主城区路面尘重金属的地积累指数(I_{geo})分级

Table 4 The classification of heavy metals based on the index of geoaccumulation (I_{geo}) in the road dust of central downtown of Linfen City

重金属	地积累指数(I_{geo})	污染程度
Cr	0.09	轻度-中等污染
Ni	-0.55	无污染
Cu	0.44	轻度-中等污染
Zn	1.75	中等污染
Cd	1.78	中等污染
Pb	0.99	轻度-中等污染
As	-0.78	无污染

路面尘中 7 种重金属在不同区域的单元素风险指数 (E_i^r) 和潜在生态危害综合指数 (RI) 如表 5 所示。从单一元素污染评价结果来看, 临汾市主城区路面尘样品中 Cd 的平均风险指数为 136.86, 处于强生态危害。Cr、Ni、Cu、Zn、Pb、As 均处于轻微危害, 各元素风险指数大小依次为 Cd>Pb>Cu>As>Ni>Zn>Cr。7 种重金属的生态危害综合指数为 202.41, 表明临汾市主城区重金属生态危害处于中等水平。

2.3 健康风险评价

本研究分别对儿童、成人 3 种暴露途径下重金属日暴露剂量进行了计算, 结果如表 6 所示。儿童在重金属不同暴露途径的暴露量大于成人, 表明重金属对儿童的危害大于成人。不同

表5 各采样区路面尘重金属潜在生态风险程度分级

Table 5 The classification of heavy metals potential ecological risk in different sampling sites

采样区	单元素风险指数(E_i^r)							多元素潜在生态风险指数(RI)
	Cr	Ni	Cu	Zn	Cd	Pb	As	
1	2.59	4.58	6.25	3.50	88.24	9.50	9.97	124.62
2	2.55	4.87	9.26	3.68	161.76	12.96	9.29	204.36
3	3.20	3.51	11.51	11.73	138.24	12.09	9.42	189.69
4	2.75	3.78	10.58	2.72	123.53	13.84	8.40	165.60
5	3.10	6.35	13.17	5.15	266.76	19.71	8.63	322.88
6	4.99	7.71	10.39	3.44	152.65	21.46	6.65	207.29
平均值	2.24	5.13	10.19	3.84	136.86	13.50	8.72	202.41

表6 重金属不同暴露途径下的日均暴露量

Table 6 Daily average exposure to heavy metals under different exposure pathways

人群	重金属	摄入日均暴露量($ADD_{\text{摄入}}$)	吸入日均暴露量($ADD_{\text{吸入}}$)	皮肤日均暴露量($ADD_{\text{皮肤}}$)
儿童	Cr	3.96×10^{-5}	1.12×10^{-15}	9.36×10^{-8}
	Ni	1.38×10^{-5}	3.91×10^{-16}	3.25×10^{-8}
	Cu	2.09×10^{-5}	5.94×10^{-16}	4.95×10^{-8}
	Zn	1.43×10^{-4}	4.07×10^{-15}	3.39×10^{-7}
	Cd	2.35×10^{-7}	6.69×10^{-18}	5.57×10^{-10}
	Pb	1.97×10^{-5}	5.59×10^{-16}	4.65×10^{-8}
	As	3.56×10^{-6}	1.01×10^{-16}	8.41×10^{-9}
成人	Cr	1.75×10^{-6}	1.92×10^{-16}	5.99×10^{-9}
	Ni	6.08×10^{-7}	6.68×10^{-17}	2.08×10^{-9}
	Cu	9.25×10^{-7}	1.02×10^{-16}	3.16×10^{-9}
	Zn	6.33×10^{-6}	6.96×10^{-16}	2.17×10^{-8}
	Cd	1.04×10^{-8}	1.14×10^{-18}	3.56×10^{-11}
	Pb	8.69×10^{-7}	9.55×10^{-17}	2.97×10^{-9}
	As	1.57×10^{-7}	1.73×10^{-17}	5.38×10^{-10}

暴露途径下,儿童和成人都表现为摄入量>皮肤接触量>吸入量。

非致癌风险评价如表7所示,对于儿童和成人,7种重金属非致癌风险指数依次为Cr>As>Pb>Ni>Cu>Zn>Cd,3种暴露途径的危害程度为手-口摄入>皮肤接触>呼吸吸入。研究表明,7种重金属中具有潜在致癌风险的主要有Cr、Ni、Cd、As,因此本研究对这4种重金属的致癌风险进行了评价,致癌风险指数(TCR)依次为As>Cd>Cr>Ni。临汾市主城区儿童和成人总非致癌指数分别为0.034和0.0015,均小于1.0,总致癌风险指数小于 10^{-6} 。因此,临汾市主城区重金属既不存在直接危害风险,也不存在致癌风险。

2.4 重金属来源解析

2.4.1 相关性分析

相关性分析是对土壤重金属污染源进行分

析的有效手段,可以用来推测土壤重金属污染源的相似程度,该方法对于路面尘同样适用。如果两种重金属之间存在显著相关性,则表明二者可能具有相似的污染源^[22]。本研究使用SPSS 25.0对路面尘中的重金属进行了相关性分析,结果见表8。可以看出,在 $P<0.01$ 水平上,Cr与Ni呈极显著正相关;Ni与As呈极显著负相关;Cu与Pb、Cd呈极显著正相关;Pb与Cd呈现极显著正相关。在 $P<0.05$ 水平上,Cr与Pb呈显著正相关,与As呈现显著负相关;Ni与Pb呈显著正相关;Pb与As呈现显著负相关。综上所述,Cr、Pb、Ni和As两两之间存在高度的相关性,说明这4种重金属可能具有相似的来源。Cu和Cd两者显著相关,说明两者来源相近,而Zn与其他元素相关性不显著。

2.4.2 主成分分析

主成分分析可以清楚地反映变量之间的关

表7 重金属非致癌和致癌健康风险指数

Table 7 Health risk index of heavy metals non-carcinogenic and carcinogenesis

人群	重金属	摄入非致癌风险指数 ($HQ_{摄入}$)	吸入非致癌风险指数 ($HQ_{吸入}$)	皮肤非致癌风险指 数($HQ_{皮肤}$)	非致癌风险指数 (HI)	致癌风险指数 (TCR)
儿童	Cr	1.32×10^{-2}	3.93×10^{-11}	1.25×10^{-3}	1.44×10^{-2}	3.73×10^{-15}
	Ni	6.88×10^{-4}	1.90×10^{-14}	4.07×10^{-5}	7.28×10^{-4}	2.59×10^{-17}
	Cu	5.23×10^{-4}	1.49×10^{-14}	1.24×10^{-6}	5.24×10^{-4}	
	Zn	4.78×10^{-4}	1.36×10^{-14}	1.13×10^{-6}	4.79×10^{-4}	
	Pb	5.62×10^{-3}	1.60×10^{-13}	8.77×10^{-5}	5.71×10^{-3}	
	Cd	2.35×10^{-4}	6.69×10^{-15}	2.23×10^{-5}	2.58×10^{-4}	7.08×10^{-9}
	As	1.19×10^{-2}	3.37×10^{-13}	2.80×10^{-5}	1.19×10^{-2}	4.22×10^{-7}
	Σ				3.40×10^{-2}	4.29×10^{-7}
成人	Cr	5.83×10^{-4}	6.72×10^{-12}	7.98×10^{-5}	6.63×10^{-4}	8.07×10^{-15}
	Ni	3.04×10^{-5}	3.24×10^{-15}	2.60×10^{-6}	3.30×10^{-5}	5.61×10^{-17}
	Cu	2.31×10^{-5}	2.54×10^{-15}	7.91×10^{-8}	2.32×10^{-5}	
	Zn	2.11×10^{-5}	2.32×10^{-15}	7.22×10^{-8}	2.12×10^{-5}	
	Pb	2.48×10^{-4}	2.73×10^{-14}	5.61×10^{-6}	2.54×10^{-4}	
	Cd	1.04×10^{-5}	1.14×10^{-15}	1.42×10^{-6}	1.18×10^{-5}	3.97×10^{-9}
	As	5.24×10^{-4}	5.76×10^{-14}	1.79×10^{-6}	5.26×10^{-4}	2.37×10^{-7}
	Σ				1.53×10^{-3}	2.41×10^{-7}

表8 路面尘中重金属的相关性

Table 8 Correlation coefficients among different heavy metals in road dust

重金属	Cr	Ni	Cu	Zn	Pb	As	Cd
Cr	1						
Ni	0.760**	1					
Cu	0.270	0.207	1				
Zn	0.001	-0.386	0.388	1			
Pb	0.763*	0.861*	0.638**	-0.196	1		
As	-0.876*	-0.746**	-0.393	0.307	-0.868*	1	
Cd	0.127	0.482	0.788**	0.069	0.676**	-0.246	1

**表示 $P < 0.01$, *表示 $P < 0.05$ 。

系^[23]。为了进一步明确临汾市主城区路面尘中重金属的来源,在相关性分析的基础上,对Cr、Ni、Cu、Zn、Cd、Pb、As 7种元素进行了主成分分析,结果见表9。按照特征值大于1的原则,共有3个主成分因子被提取,贡献率分别是57.22%、24.45%、13.28%,解释了全部变量的94.95%。

第一主成分中, Cr、Ni、Pb和As具有较高正载荷,并且这四种元素在相关性分析中也存在显著相关,所以Cr、Ni、Pb和As均与第一因子显著相关。采样区内分布有东风冶炼厂等金属冶炼企业、多家汽车维修厂,同时临汾市的东南钢铁厂也位于采样区正东方向,认为本研究区Cr、Ni、Pb、As主要来源于金属冶炼。另

表9 路面尘重金属在3个主成分的载荷因子

Table 9 The load factor of heavy metals in road dust on the three principal components

重金属	主成分1 (57.22%)	主成分2 (24.45%)	主成分3 (13.28%)
Cr	0.988	0.007	0.125
Ni	0.787	0.315	-0.401
Cu	0.241	0.847	0.391
Zn	-0.139	0.119	0.961
Pb	0.79	0.591	-0.157
Cd	0.117	0.978	-0.066
As	0.929	-0.177	0.146

外108国道环绕研究区,该国道为连接青兰高速的重要交通线,货车日通行量较大,Pb可能还来源于交通污染源。

第二主成分中Cu和Cd具有较高正载荷,

主要反映 Cu 和 Cd 的来源,且 Cu 和 Cd 显著相关。采样区存在四通焦化煤业有限公司、海姿焦化、金尧焦化煤矿等多家焦化企业,燃煤也会产生一定浓度的 Cd、Cu。因此第二主成分可以认定为燃煤(炼焦)。

第三主成分中 Zn 具有较高的正载荷,贡献率为 13.28%,且与其他元素关系不紧密,表明 Zn 可能与其他元素来源不同。研究表明,Zn 常常以 ZnS 的形式存在于汽车轮胎中^[24],结合城市地面尘中 Zn 含量的空间分布来看^[25],城市灰尘中 Zn 含量较高的点主要集中在交通繁忙路段,其可能来源于汽车轮胎的老化磨损^[24]。研究区内 Zn 含量较高的点主要位于临汾日报社采样点,该采样点位于主城区中心,日常交通繁忙,汽车轮胎因老化磨损产生的颗粒物可能通过沉降在道路两旁的灰尘中积累,成为 Zn 的可能来源。因此认为交通为第三个污染因子。

3 结论

通过对临汾市主城区路面尘进行调查和采样分析,测定路面尘中 7 种重金属的含量并进行污染特征分析、生态和健康风险评价,得出以下结论:

(1)不同采样点路面尘中同一种重金属含量差异较大,其中 Zn 元素变异系数最大。7 种重金属的含量均高于土壤背景值,其中,Zn、Cd 富集较为严重。

(2)临汾市主城区重金属生态危害处于中等水平。其中,Cd 和 Zn 为中等污染,Cr、Cu、Pb 为轻度-中等污染,Ni 和 As 为无污染。

(3)非致癌和致癌风险评价表明该研究区路面尘重金属暂不存在健康风险。

(4)主成分分析表明,研究区重金属来源主要包括金属冶炼,交通和燃煤(炼焦)。

(5)本研究设置的采样点有限,在今后的研究中扩大采样范围,对诠释研究区域重金属的污染特征将更全面和科学。

参考文献:

[1] VERMA A, KUMAR R, YADAV S. Distribution, Pollution Levels, Toxicity, and Health Risk Assessment of Metals in Surface Dust from Bhiwadi Industrial Area in North India [J]. *Hum Ecol Risk Assess Int J*, 2020, **26**(8): 2091–2111.

DOI: 10.1080/10807039.2019.1650328.

[2] TOU F Y, NABI M M, WANG J J, *et al.* Multi-method Approach for Analysis of Road Dust Particles: Elemental Ratios, SP-ICP-TOF-MS, and TEM[J]. *Environ Sci Nano*, 2022, **9**(10): 3859–3872. DOI: 10.1039/D2EN00409G.

[3] WI E, PARK E, SHIN H, *et al.* Overall Distribution of Tire-wear Particles, Nano-Carbon Black, and Heavy Metals in Size-fractionated Road Dust Collected from Steel Industrial Complexes[J]. *Sci Total Environ*, 2023, **884**: 163878. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2023.163878.

[4] KLÖCKNER P, SEIWERT B, WEYRAUCH S, *et al.* Comprehensive Characterization of Tire and Road Wear Particles in Highway Tunnel Road Dust by Use of Size and Density Fractionation[J]. *Chemosphere*, 2021, **279**: 130530. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2021.130530.

[5] KIM E A, KOH B. Utilization of Road Dust Chemical Profiles for Source Identification and Human Health Impact Assessment[J]. *Sci Rep*, 2020, **10**: 14259. DOI: 10.1038/s41598-020-71180-x.

[6] LOGIEWA A, MIAZGOWICZ A, KRENNHUBER K, *et al.* Variation in the Concentration of Metals in Road Dust Size Fractions Between 2 μm and 2 mm: Results from Three Metallurgical Centres in Poland[J]. *Arch Environ Contam Toxicol*, 2020, **78**(1): 46–59. DOI: 10.1007/s00244-019-00686-x.

[7] GWENZI W, MANGORI L, DANHA C, *et al.* Sources, Behaviour, and Environmental and Human Health Risks of High-technology Rare Earth Elements as Emerging Contaminants[J]. *Sci Total Environ*, 2018, **636**: 299–313. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2018.04.235.

[8] DUAN X C, YU H H, YE T R, *et al.* Geostatistical Mapping and Quantitative Source Apportionment of Potentially Toxic Elements in Top- and Sub-soils: A Case of Suburban Area in Beijing, China[J]. *Ecol Indic*, 2020, **112**: 106085. DOI: 10.1016/j.ecolind.2020.106085.

[9] 曹丽婉, 胡守云, APPEL E, 等. 临汾市树叶磁性的时空变化特征及其对大气重金属污染的指示[J]. *地球物理学报*, 2016, **59**(5): 1729–1742. DOI: 10.6038/cjg20160517.

CAO L W, HU S Y, APPEL E, *et al.* The Spatio-temporal Variation of Magnetic Properties of Tree Leaves in Linfen, China and Its Indication to the Atmospheric Pollution of Heavy Metals[J]. *Chin J Geophys*, 2016, **59**(5): 1729–1742. DOI: 10.6038/cjg20160517.

[10] 史浩圆, 杨萍果, 周进财, 等. 临汾市不同功能区土壤重金属分布特征及污染评价[J]. *干旱区资源与环境*, 2018, **32**(8): 135–140. DOI: 10.13448/j.cnki.jalre.2018.247.

SHI H Y, YANG P G, ZHOU J C, *et al.* Distribution Characteristics and Assessment of Soil Heavy Metal

- Pollutions in Different Functional Areas of Linfen[J]. *J Arid Land Resour Environ*, 2018, **32**(8): 135-140. DOI: 10.13448/j.cnki.jalre.2018.247.
- [11] 董苗, 张永清. 临汾市刘村镇污灌农田土壤重金属污染评价与分布特征[J]. *节水灌溉*, 2014(12): 40-44. DOI: 10.3969/j.issn.1007-4929.2014.12.011.
- DONG M, ZHANG Y Q. Soil Heavy Metal Distribution Characteristics and Pollution Assessment of Wastewater Irrigation Farmland in Liucun Towns of LinFen City, Shanxi Province[J]. *Water Sav Irrigation*, 2014(12): 40-44. DOI: 10.3969/j.issn.1007-4929.2014.12.011.
- [12] 陈勤, 方炎明, 颜赟, 等. 泰州市区重金属污染的藓袋法与路尘法评价研究[J]. *环境科学*, 2014, **35**(5): 1901-1908. DOI: 10.13227/j.hjcx.2014.05.038.
- CHEN Q, FANG Y M, YAN Y, *et al.* Assessment of Heavy Metal Contamination by Moss-bag Method and Road-dust Method for Taizhou Urban Area[J]. *Environ Sci*, 2014, **35**(5): 1901-1908. DOI: 10.13227/j.hjcx.2014.05.038.
- [13] 陈慧选, 吴家华, 白增森, 等. 太原市南郊区土壤8种重金属元素背景值的研究[J]. *山西农业科学*, 1994(2): 32-35. DOI: 10.7666/d.y1137824.
- CHEN H X, WU J H, BAI Z S, *et al.* Environmental Background Data for Agricultural Soil in Taiyuan South-suburban[J]. *J Shanxi Agric Sci*, 1994(2): 32-35. DOI: 10.7666/d.y1137824.
- [14] ZHAO Z J, LIU Q, LIAO Y B, *et al.* Ecological Risk Assessment of Trace Metals in Sediments and Their Effect on Benthic Organisms from the South Coast of Zhejiang Province, China[J]. *Mar Pollut Bull*, 2023, **187**: 114529. DOI: 10.1016/j.marpolbul.2022.114529.
- [15] 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. DOI: 10.7524/j.issn.0254-6108.2017.01.2016051705.
- GU Y G, GAO F D. Spatial Distribution and Health Risk Assessment of Heavy Metals in Provincial Capital Cities, China[J]. *Environ Chem*, 2017, **36**(1): 62-71. DOI: 10.7524/j.issn.0254-6108.2017.01.2016051705.
- [16] KARIMIAN S, SHEKOOHIYAN S, MOUSSAVI G. Health and Ecological Risk Assessment and Simulation of Heavy Metal-contaminated Soil of Tehran Landfill [J]. *RSC Adv*, 2021, **11**(14): 8080-8095. DOI: 10.1039/D0RA08833A.
- [17] 曹炜琦, 崔云霞, 赵修齐, 等. 南京市道路积尘重金属污染特征及健康风险评价[J]. *环境生态学*, 2022, **4**(6): 1-8. DOI: 10.11654/jaes.2018-1491.
- CAO W Q, CUI Y X, ZHAO X Q Z Z, *et al.* Characteristics of Heavy Metal Pollution and Evaluation of Health Risks from Road Dust in Nanjing[J]. *Environ Ecol*, 2022, **4**(6): 1-8. DOI: 10.11654/jaes.2018-1491.
- [18] 谢小进. 上海地区土壤重金属空间分布特征及其成因分析[D]. 上海: 上海师范大学, 2010.
- XIE X J. Spatial Distribution Characteristics and Genetic Analysis of Soil Heavy Metals in Shanghai Area[D]. Shanghai: Shanghai Normal University, 2010.
- [19] 谢小进, 康建成, 李卫江, 等. 上海宝山区农用土壤重金属分布与来源分析[J]. *环境科学*, 2010, **31**(3): 768-774.
- XIE X J, KANG J C, LI W J, *et al.* Analysis on Heavy Metal Concentrations in Agricultural Soils of Baoshan, Shanghai[J]. *Chin J Environ Sci*, 2010, **31**(3): 768-774.
- [20] 林俊杰, 刘丹, 方伟, 等. 万州道路灰尘重金属空间分布及污染评价[J]. *环境科学与技术*, 2011, **34**(10): 89-92. DOI: 10.3969/j.issn.1003-6504.2011.10.020.
- LIN J J, LIU D, FANG W, *et al.* Spatial Distribution and Pollution Assessment of Heavy Metal in Street Dust of Wanzhou[J]. *Environ Sci Technol*, 2011, **34**(10): 89-92. DOI: 10.3969/j.issn.1003-6504.2011.10.020.
- [21] RUTH A, ANNING ALEXANDER K. Heavy Metal Enrichment and Potential Ecological Risks from Different Solid Mine Wastes at a Mine Site in Ghana[J]. *Environ Adv*, 2021, **3**: 100028-100035. DOI: 10.1016/j.enadv.2020.100028.
- [22] GUO G H, WU F C, XIE F Z, *et al.* Spatial Distribution and Pollution Assessment of Heavy Metals in Urban Soils from Southwest China[J]. *J Environ Sci*, 2012, **24**(3): 410-418. DOI: 10.1016/s1001-0742(11)60762-6.
- [23] MEN C, LIU R M, XU L B, *et al.* Source-specific Ecological Risk Analysis and Critical Source Identification of Heavy Metals in Road Dust in Beijing, China[J]. *J Hazard Mater*, 2020, **388**: 121763. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2019.121763.
- [24] 杨忠平, 卢文喜, 刘新荣, 等. 长春市城市近地表灰尘重金属污染来源解析[J]. *干旱区资源与环境*, 2010, **24**(12): 155-160. DOI: 10.3969/j.issn.1001-6996.2004.01.011.
- YANG Z P, LU W X, LIU X R, *et al.* Heavy Metal Identification for Near-surface Urban Dust in Changchun City [J]. *J Arid Land Resour Environ*, 2010, **24**(12): 155-160. DOI: 10.3969/j.issn.1001-6996.2004.01.011.
- [25] 杨忠平. 长春市城市重金属污染的生态地球化学特征及其来源解析[D]. 长春: 吉林大学, 2008.
- YANG Z P. Eco-geochemical Characteristics and Sources Identification of Heavy Metal Contamination in Changchun City, China[D]. Changchun: Jilin University, 2008.