

# 汇水区地表灰尘重金属健康风险评估

——以济南市东泺河汇水区为例<sup>①</sup>

代 静, 王丽雪, 赵玉强, 刘善军, 王冬莹

水和生态研究所 济南市环境研究院, 济南 250100

**摘要:** 选取济南市东泺河城市汇水区为研究对象, 分采暖季和非采暖季, 采集 30 个点位的地表灰尘, 测定了 Cd, Cr, Cu, Pb, Zn, Hg, As 等 7 种重金属质量分数, 评估了其健康风险水平. 结果表明: 儿童和成人两季致癌健康风险均小于最大可接受风险值. 成人两季非致癌风险均可忽略. 儿童非致癌风险在非采暖季存在, 采暖季可忽略. 非致癌风险贡献前三位的重金属为: Cr>Pb>Cu, 这 3 种重金属占到总非致癌风险的 95% 左右. Cr 致癌风险占总致癌风险的 99.5% 以上. 风险较高的区域均集中在研究区的西北方向. 重金属污染来源主要为交通源和小型建材企业.

**关键词:** 重金属; 汇水区; 地表灰尘; 健康风险评估

**中图分类号:** X513; X820.4

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1000-5471(2020)11-0140-09

城市是人类活动最为强烈的地区, 其环境受到人类活动的深刻影响. 城市不透水地面的迅速增加改变了地表污染物的累积和冲刷规律, 使非点源污染的“源”“过程”“汇”都发生了变化<sup>[1]</sup>. 城市地表灰尘在一定外力条件下较易扬起, 污染物通过呼吸吸入和皮肤接触等途径进入人体, 从而影响公众健康; 另外, 由于不透水地面具有强烈的水文活动, 灰尘中携带的大量污染物质在径流的搬运下进入地表水, 恶化城市水环境.

在城市地表灰尘中, 重金属是富集较为明显且研究较多的一类有毒有害物质, 重金属元素具有难降解性和持久性. 很多学者对国内部分大城市地表灰尘重金属污染及健康风险进行了研究<sup>[2-4]</sup>, 但对于济南市的相关研究鲜有报道. 仅有陈青林等<sup>[5]</sup>对济南市地表灰尘重金属污染进行评价, 但未开展健康风险评估的工作.

本研究选取济南市东泺河城市汇水区为研究区域, 一方面济南市东泺河有泉水补充, 为常年性河流, 入小清河, 地表灰尘重金属可能随降雨径流进入河道, 成为河道底泥重金属的来源之一. 另一方面, 研究区域穿过城市主城区, 其汇水区为城市中心区, 人口密度高. 因此, 旨在为小清河水环境质量改善和城市路面灰尘污染治理提供依据, 本研究分析该区地表灰尘中 Cd, Cr, Cu, Pb, Zn, Hg, As 7 种重金属的污染状况, 并对研究区居民暴露在道路灰尘环境中的潜在健康风险进行评估. 以期对济南市街道扬尘管理和河道水环境质量改善提供技术支撑.

## 1 材料与方法

### 1.1 采样和分析

据东泺河周边地形地貌、雨水口调查排查及老城区雨污分流改造规划等资料, 确定东泺河雨水汇水区

<sup>①</sup> 收稿日期: 2020-01-15

基金项目: 济南市环境保护课题研究专项项目(2110199); 山东省自然科学基金培养基金项目(ZR2019PD007).

作者简介: 代 静(1987-), 女, 硕士研究生, 工程师, 主要从事环境管理服务研究.

为以东泇河为中心,北至滨海南路,南至泇源大街,西至水屯路,东至历山路,面积约 10.8 km<sup>2</sup>. 覆盖所有的用地类型,包括工业区(虽无工业用地,但有不锈钢和建材加工企业)、商业区、文教区、医院集中区、公园、绿地、交通区、道路等. 在该区域内均匀布置约 30 个采样点(图 1),分采暖季和非采暖季两次进行样品采集,采集工作至少在雨后 3 天后进行. 采样时间为 2016 年 12 月 2 日和 2017 年 5 月 18 日. 每个样点根据情况,在距路缘石 0.5 m 范围内取 0.5 m 宽,适当长度的样区,用干净的毛刷来回清扫 3 次,收集大概 30 g 以上灰尘至塑料密封袋,研究区各监测点位介绍如表 1 所示.

检测样品中 Cd, Cr, Cu, Pb, Zn, Hg, As 等 7 种重金属质量分数监测方法为: Cd 和 Pb 依据 GB/T 17141-1997、Cr 依据 HJ 491-2009、Cu 和 Zn 依据 GB/T 17138-1997、Hg 依据 HJ 680-2013、As 依据土壤元素的近代分析方法 5.1.4. 数据质量控制严格按照相关标准开展了样品空白、平行样、标样、加标回收等质控措施.

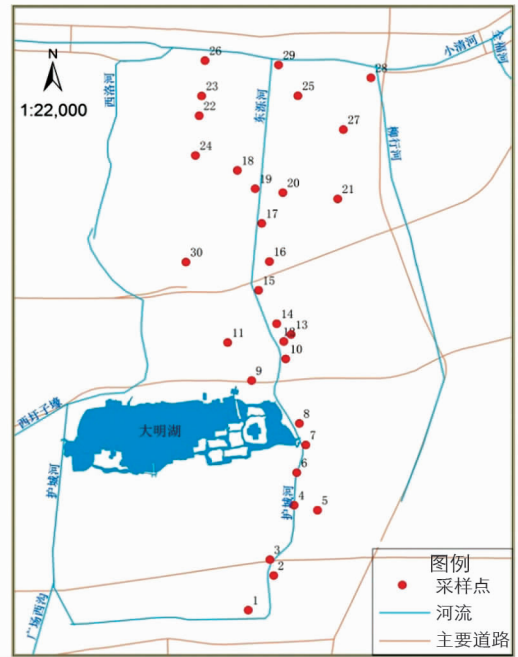


图 1 研究区域和监测点位分布图

表 1 研究区各监测点位介绍

点位序号	点位介绍	点位序号	点位介绍
1	船站	16	恒鼎大厦
2	解放阁商务中心	17	天桥北路园诊所
3	泉城路与解放路交汇处	18	明湖小学
4	济南市解放路第二小学门口	19	黄桥工业园
5	青龙街小学东门	20	梁府小区
6	和谐妇科医院	21	山大第二医院
7	大明湖与东关大街交口处	22	水屯北路桥
8	爱容医院西边护河岸	23	水屯路加油站
9	大明湖东门	24	白鹤装饰材料批发市场
10	汇波小学	25	鑫苑名家
11	济南东站	26	不锈钢城
12	大众浴池南	27	丰汇小区
13	泉馨居小区内	28	商务大厦
14	铁路北桥(东侧)	29	滨河南路
15	幸福 SPA 门口	30	杨庄社区

## 1.2 健康风险评估方法

本研究采用美国环境保护署(USEPA)提出的健康风险评估模型对研究区地表灰尘重金属暴露剂量进行估算. 该模型仅考虑重金属通过手口、吸入和皮肤 3 种途径,没有考虑重金属通过食物富集、饮用水等其他途径摄入量. 本研究仅考虑 7 种重金属对人体的影响,未涉及重金属的化学形态.

### 1.2.1 暴露量模型

地表灰尘重金属进入人体的途径主要有 3 种,即经手口途径直接摄入、呼吸系统吸入和皮肤接触. 本研究的 7 种重金属对人体均有非致癌风险, Cd, Cr, As 3 种重金属还有致癌风险.

非致癌风险暴露量计算模型见公式(1)–(3), 致癌重金属吸入途径终身日平均暴露量计算模型见公式(4)<sup>[6]</sup>.

$$ADD_{ing} = C \times \frac{R_{ing} \times EF \times ED \times 10^{-6}}{BW \times AT_{nc}} \quad (1)$$

$$ADD_{inh} = C \times \frac{R_{inh} \times EF \times ED}{PEF \times BW \times AT_{nc}} \quad (2)$$

$$ADD_{dermal} = C \times \frac{SA \times SL \times ABS \times EF \times ED \times 10^{-6}}{BW \times AT_{nc}} \quad (3)$$

$$LADD_{inh} = C \times \frac{EF}{PEF \times AT_{ca}} \times \left( \frac{R_{inh}^{child} \times ED_{child}}{BW_{child}} + \frac{R_{inh}^{adult} \times ED_{adult}}{BW_{adult}} \right) \quad (4)$$

式中:  $ADD_{ing}$  为手-口摄食途径的灰尘颗粒日平均暴露量 [ $\text{mg}/(\text{kg} \cdot \text{d})$ ];  $ADD_{inh}$  为吸入途径的灰尘颗粒日平均暴露量 [ $\text{mg}/(\text{kg} \cdot \text{d})$ ];  $ADD_{dermal}$  为皮肤接触途径的灰尘颗粒日平均暴露量 [ $\text{mg}/(\text{kg} \cdot \text{d})$ ];  $LADD_{inh}$  为致癌重金属吸入途径的终身日平均暴露量 [ $\text{mg}/(\text{kg} \cdot \text{d})$ ], 其他参数如表 2 所示。

表 2 地表灰尘重金属日平均暴露量计算参数含义及其取值<sup>[7-10]</sup>

参数	含义	单位	儿童取值	成人取值
$EF$	暴露频率	$\text{d} \cdot \text{a}^{-1}$	350	350
$ED$	暴露年限	a	6	24
$AT_{nc}$	非致癌平均暴露时间	d	2 190	8 760
$AT_{ca}$	致癌平均暴露时间	d	26 280	26 280
$BW$	平均体重	kg	15.9	56.8
$R_{ing}$	摄食灰尘速率	$\text{mg} \cdot \text{d}^{-1}$	200	100
$R_{inh}$	呼吸速率	$\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$	7.5	14.5
$PEF$	颗粒物排放因子	$\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$	1 360 000 000	1 360 000 000
$SL$	皮肤黏着度	$\text{mg} \cdot (\text{cm}^2 \cdot \text{d})^{-1}$	0.2	0.07
$SA$	暴露皮肤面积	$\text{cm}^2$	1 800	5 000
$ABS$	皮肤吸收因子	无量纲	0.001	0.001

### 1.2.2 风险值模型

对于非致癌风险, 通常利用危害商来度量, 模型见公式 5 和 6。

$$HI = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n HQ_{ij} \quad (5)$$

$$HQ_{ij} = \frac{ADD_{ij}}{RfD_{ij}} \quad (6)$$

式中:  $HI$  为多种污染物多种暴露途径下总的非致癌风险, 为所有途径所有污染物总非致癌风险的加和;  $HQ_{ij}$  为第  $i$  种污染物第  $j$  种暴露途径的非致癌风险商, 表征单种污染物通过某一途径的非致癌风险;  $ADD_{ij}$  为第  $i$  种污染物第  $j$  种暴露途径非致癌暴露量;  $RfD_{ij}$  为第  $i$  种污染物第  $j$  种暴露途径的参考剂量, 表示在单位时间、单位体质量摄取的不会引起人体不良反应的污染物最大量 [ $\text{mg}/(\text{kg} \cdot \text{d})$ ], 如表 3 所示。

对于致癌风险, 一般采用终生日暴露量与致癌斜率因子的乘积来度量, 模型见公式 7 和 8。

$$R_{Total} = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n R_{ij} \quad (7)$$

$$R_{ij} = LADD_{ij} \times SF_{ij} \quad (8)$$

式中:  $R_{Total}$  为多种污染物多暴露途径的致癌风险, 表示癌症发生的概率;  $LADD_{ij}$  为第  $i$  种污染物在第  $j$  种暴露途径下的终生日均暴露量 [ $\text{mg}/(\text{kg} \cdot \text{d})$ ];  $SF_{ij}$  为第  $i$  种污染物在第  $j$  种暴露途径下致癌斜率因子<sup>[11-14]</sup>。

表 3 地表灰尘重金属不同暴露途径  $RfD$  和  $SF$

	Cd	Cr	Cu	Pb	Zn	Hg	As
$RfD_{ing}$	1.00E-03	3.00E-03	4.00E-02	3.50E-03	3.00E-01	3.00E-04	3.00E-04
$RfD_{inh}$	1.00E-03	2.86E-05	4.02E-02	3.52E-03	3.00E-01	8.57E-05	3.01E-04
$RfD_{derm}$	1.00E-05	6.00E-05	1.20E-02	5.25E-04	6.00E-02	2.10E-05	1.23E-04
$SF$	6.30E+00	4.20E+01					1.51E+01

### 1.2.3 风险标准

$HI < 1$ , 认为风险较小或可以忽略; 当  $HI > 1$  时, 认为存在非致癌风险, 需引起重视。尽管目前国内外对

于致癌风险还没有统一、公认的评价标准, 但从已有研究来看, 一般都是采用美国国家环保局 (USEPA) 推荐值  $10^{-6} \sim 10^{-4}$  或国际辐射防护委员会 (ICRP) 的最大可接受风险值  $5 \times 10^{-5}$  作为健康风险的判别依据<sup>[15]</sup>.

## 2 结果与讨论

### 2.1 质量分数特征

采用 SPSS 软件, 对地表灰尘重金属质量分数进行统计分析 (表 4). 从各点位平均值来看各种金属的富集情况, Hg 和 As 低于背景值, Cd, Cr, Cu, Pb, Zn 高于背景值, 两季均值是背景值的 11.17, 3.91, 5.60, 2.82, 4.31 倍. 从各点位平均值来看各种金属超标情况, Cr 和 Zn 无标准值, Cd, Cu, Pb, Hg, As 低于土壤标准值. Cd, Zn 和 As 的重金属质量分数采暖季大于非采暖季, 采暖季分别是非采暖季的 2.38, 1.02, 4.37 倍. 这可能与采暖季大气降尘有关<sup>[16]</sup>. Cr, Cu, Pb, Hg 的重金属质量分数采暖季小于非采暖季, 采暖季分别是非采暖季的 0.37, 0.53, 0.32, 0.31 倍. 这可能是非采暖期人类生产及交通活动频繁所致<sup>[16]</sup>.

表 4 地表灰尘重金属的参数统计

mg · kg<sup>-1</sup>

	Cd		Cr		Cu		Pb		Zn		Hg		As		
	采暖季	非采暖季	采暖季	非采暖季	采暖季	非采暖季	采暖季	非采暖季	采暖季	非采暖季	采暖季	非采暖季	采暖季	非采暖季	
最大值	1.35	0.75	487	1791	196	459	54.4	180	445	301	0.02	0.08	1.21	0.32	
最小值	0.21	0.2	36.6	118	20.8	52.6	20.6	42.6	99.6	144	0.001	0.001	0.25	0.01	
总体	0.74	0.31	111.2	301.23	71.98	134.83	31.52	99.2	251.59	247.17	0.004	0.0129	0.3838	0.0877	
平均值	A 类点位	0.7578	0.3107	94.1852	196.0741	72.5074	121.5852	31.7444	97.2556	255.9852	244.7037	0.0043	0.0132	0.3823	0.0964
	B 类点位	0.6267	0.3	264.3333	1247.6667	67.2667	254	29.5	116.6667	212	269.3333	0.001	0.0103	0.3973	0.0097
标准差	总体	0.31	0.09	76.74	350.1	41.65	96.03	9.61	29.28	83.81	39.6	0.0040	0.0184	0.1750	0.1054
	A 类点位	0.86	0.34	139.85	431.96	87.54	170.69	35.11	110.13	282.88	261.95	0.0055	0.0198	0.4492	0.1271
95%UCL 上限	A 类点位	0.89	0.35	104.43	218.29	89.61	152.12	35.62	109.17	289.22	260.79	0.0059	0.0209	0.4551	0.139
	B 类点位	1.05	0.38	745.93	2473.01	138.67	702.35	51.86	144.14	426.80	319.78	0.001	0.0249	0.5321	0.02
土壤背景值 <sup>[17]</sup>	0.047		52.7		18.45		23.18		57.87		0.016		8.79		
土壤标准 <sup>[18]</sup>	20				2000		400				8		20		

不同土地利用方式下重金属的积累也不同<sup>[19]</sup>, 因研究区域各类用地交错, 难以按照工业区、商业区、文教区等进行分类, 现利用 SPSS 软件, 依据各点位的两季地表灰尘重金属质量分数数据, 对 30 个点位进行聚类分析, 结果如图 2 所示. 结果表明, 点位 20, 26, 23 重金属污染状况异于其他点位. 为便于分析, 将点 20, 26, 23 定义为 B 类点位, 其他点位定义为 A 类点位.

从表 4 可以看出, 除 Hg 和 As 外, A 类和 B 类点位的均值和 95% UCL 差别较大的重金属为 Cr 和 Cu, 其他重金属差别较小. Cr 主要在电镀、染料、制药、皮革、颜料等化合物制造企业和建材活动中质量分数较丰富<sup>[20]</sup>, Cr, Cu 主要来源于汽车金属部件的磨损<sup>[21-22]</sup>. B 类点位中, 点 20 附近为某小区停车位, 点 26 附近曾有小型不锈钢和建材加工企业, 点 23 附件有一处加油站. 这导致 B 类点位 Cr, Cu 质量分数远大于 A 类点位. 这说明车辆、建材企业和加油站等对地表灰尘重金属质量分数影响较大.

### 2.2 暴露量计算

暴露量计算采用的重金属质量分数选取 95% UCL 置信上限进行计算 (表 5). 各重金属两季平均的非

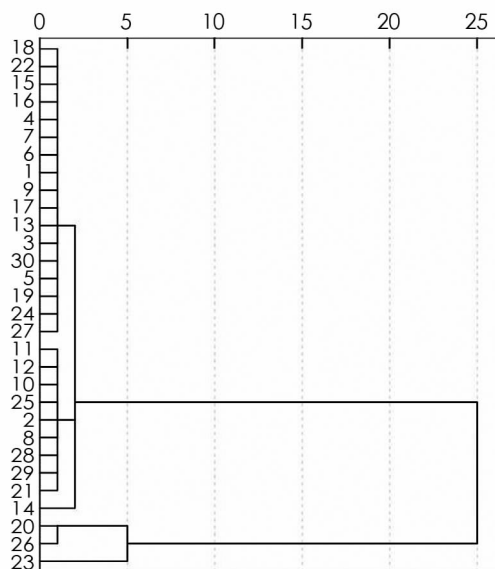


图 2 各点位聚类分析树状图

致癌风险暴露量由大到小依次为: Cr, Zn, Cu, Pb, Cd, As, Hg, 重金属质量分数越大, 暴露量越大. 3 种非致癌暴露途径的暴露量由大到小依次为: 非致癌手口、非致癌皮肤、非致癌呼吸, 其中各重金属儿童和成人非致癌手口途径分别占各自总非致癌暴露量的 99.82% 和 99.64%. 儿童的暴露量高于成人, 儿童非致癌手口、非致癌皮肤、非致癌呼吸、总非致癌的暴露量分别是成人的 7.14, 1.85, 3.67, 7.13 倍.

表 5 地表灰尘重金属不同途径暴露量

mg · (kg · d)<sup>-1</sup>

		ADD <sub>ing</sub>		ADD <sub>inh</sub>		ADD <sub>dermal</sub>		ADD		LADD <sub>inh</sub>
		儿童	成人	儿童	成人	儿童	成人	儿童	成人	
Cd	采暖季	1.04E-05	1.45E-06	2.86E-10	1.55E-10	1.87E-08	5.09E-09	1.04E-05	1.46E-06	7.55E-11
	非采暖季	4.16E-06	5.82E-07	1.15E-10	6.20E-11	7.48E-09	2.04E-09	4.17E-06	5.84E-07	3.02E-11
Cr	采暖季	1.69E-03	2.36E-04	4.65E-08	2.52E-08	3.04E-06	8.26E-07	1.69E-03	2.37E-04	1.23E-08
	非采暖季	5.21E-03	7.29E-04	1.44E-07	7.78E-08	9.38E-06	2.55E-06	5.22E-03	7.32E-04	3.79E-08
Cu	采暖季	1.06E-03	1.48E-04	2.91E-08	1.58E-08	1.90E-06	5.17E-07	1.06E-03	1.48E-04	
	非采暖季	2.06E-03	2.88E-04	5.68E-08	3.07E-08	3.71E-06	1.01E-06	2.06E-03	2.89E-04	
Pb	采暖季	4.23E-04	5.93E-05	1.17E-08	6.32E-09	7.62E-07	2.07E-07	4.24E-04	5.95E-05	
	非采暖季	1.33E-03	1.86E-04	3.66E-08	1.98E-08	2.39E-06	6.51E-07	1.33E-03	1.87E-04	
Zn	采暖季	3.41E-03	4.78E-04	9.41E-08	5.09E-08	6.14E-06	1.67E-06	3.42E-03	4.79E-04	
	非采暖季	3.16E-03	4.42E-04	8.71E-08	4.71E-08	5.69E-06	1.55E-06	3.17E-03	4.44E-04	
Hg	采暖季	6.63E-08	9.29E-09	1.83E-12	9.90E-13	1.19E-10	3.25E-11	6.65E-08	9.32E-09	
	非采暖季	2.39E-07	3.34E-08	6.59E-12	3.56E-12	4.30E-10	1.17E-10	2.39E-07	3.35E-08	
As	采暖季	5.42E-06	7.58E-07	1.49E-10	8.09E-11	9.75E-09	2.65E-09	5.43E-06	7.61E-07	3.94E-11
	非采暖季	1.53E-06	2.15E-07	4.23E-11	2.29E-11	2.76E-09	7.51E-10	1.54E-06	2.15E-07	1.11E-11

### 2.3 健康风险计算

如表 6 所示, 非致癌健康风险结果为: 成人两季可忽略, 儿童采暖季可忽略, 非采暖季存在非致癌风险. 成人两季和儿童采暖季 *HI* 均小于 1, 儿童非采暖季 *HI* 为 2.36. 儿童风险高于成人, 儿童两季平均 *HI* 是成人的 6.68 倍. 致癌风险结果为: 两季风险均小于最大可接受风险值.

表 6 研究区地表灰尘重金属健康风险

重金属	季	非致癌儿童				非致癌成人				致癌
		非致癌手一口	非致癌呼吸	非致癌皮肤	总非致癌儿童	非致癌手一口	非致癌呼吸	非致癌皮肤	总非致癌成人	
Cd	采暖季	1.04E-02	2.86E-07	1.87E-03	1.23E-02	1.45E-03	1.55E-07	5.09E-04	1.96E-03	4.76E-10
	非采暖季	4.16E-03	1.15E-07	7.48E-04	4.91E-03	5.82E-04	6.20E-08	2.04E-04	7.86E-04	1.90E-10
Cr	采暖季	5.62E-01	1.63E-03	5.06E-02	6.15E-01	7.87E-02	8.80E-04	1.38E-02	9.34E-02	5.15E-07
	非采暖季	1.74E+00	5.02E-03	1.56E-01	1.90E+00	2.43E-01	2.72E-03	4.25E-02	2.88E-01	1.59E-06
Cu	采暖季	2.64E-02	7.24E-07	1.58E-04	2.66E-02	3.69E-03	3.92E-07	4.31E-05	3.74E-03	
	非采暖季	5.15E-02	1.41E-06	3.09E-04	5.18E-02	7.20E-03	7.64E-07	8.40E-05	7.29E-03	
Pb	采暖季	1.21E-01	3.32E-06	1.45E-03	1.22E-01	1.69E-02	1.80E-06	3.95E-04	1.73E-02	
	非采暖季	3.80E-01	1.04E-05	4.55E-03	3.84E-01	5.31E-02	5.63E-06	1.24E-03	5.44E-02	
Zn	采暖季	1.14E-02	3.14E-07	1.02E-04	1.15E-02	1.59E-03	1.70E-07	2.79E-05	1.62E-03	
	非采暖季	1.05E-02	2.90E-07	9.48E-05	1.06E-02	1.47E-03	1.57E-07	2.58E-05	1.50E-03	
Hg	采暖季	2.21E-04	2.13E-08	5.69E-06	2.27E-04	3.10E-05	1.16E-08	1.55E-06	3.25E-05	
	非采暖季	7.96E-04	7.68E-08	2.05E-05	8.17E-04	1.11E-04	4.16E-08	5.57E-06	1.17E-04	
As	采暖季	1.81E-02	4.96E-07	7.93E-05	1.81E-02	2.53E-03	2.69E-07	2.16E-05	2.55E-03	5.95E-10
	非采暖季	5.11E-03	1.40E-07	2.24E-05	5.13E-03	7.15E-04	7.60E-08	6.11E-06	7.21E-04	1.68E-10
合计	采暖季	7.50E-01	1.63E-03	5.43E-02	8.06E-01	1.05E-01	8.83E-04	1.48E-02	1.21E-01	5.16E-07
	非采暖季	2.19E+00	5.04E-03	1.62E-01	2.36E+00	3.06E-01	2.73E-03	4.41E-02	3.53E-01	1.59E-06

健康风险非采暖季高于采暖季, 非采暖季 *HI* 和  $R_{Total}$  约为采暖季的 3 倍. 但是分别在采暖季和非采暖

季仅采样一次, 存在偶然性. 非致癌风险各金属的贡献前三位的均为:  $Cr > Pb > Cu$ . 以成人两季平均占比为例, 3 种重金属占总非致癌风险的 79.42%, 14.86%, 2.58%, 三者共占总非致癌风险的 95% 以上. 致癌风险中,  $Cr$  占总致癌风险的 99.5% 以上, 为主要贡献的金属.

研究区健康风险空间分布如图 3 所示. 风险较高的区域均集中在研究区的西北方向. 这主要是因为 B 类点位全部位于西北方向, 重金属质量分数较高, 导致暴露量和风险均较高. 从表 7 可以看出, A 类点位风险低于总体情况, A 类点位两季平均的儿童非致癌风险、成人非致癌风险、致癌风险分别是总体两季平均值得 0.65, 0.65, 0.57 倍. B 类点位风险明显高于总体情况, B 类点位两季平均的儿童非致癌风险、成人非致癌风险、致癌风险分别是总体两季平均值的 4.79, 4.84, 5.63 倍. A, B 类点位致癌风险均小于最大可接受风险值. A 类点位在非采暖季存在儿童非致癌风险, 其他风险可忽略. B 类点位在采暖季和非采暖季均存在儿童非致癌风险, 其他风险可忽略. 3 个 B 类点位拉高了研究区域的风险水平.

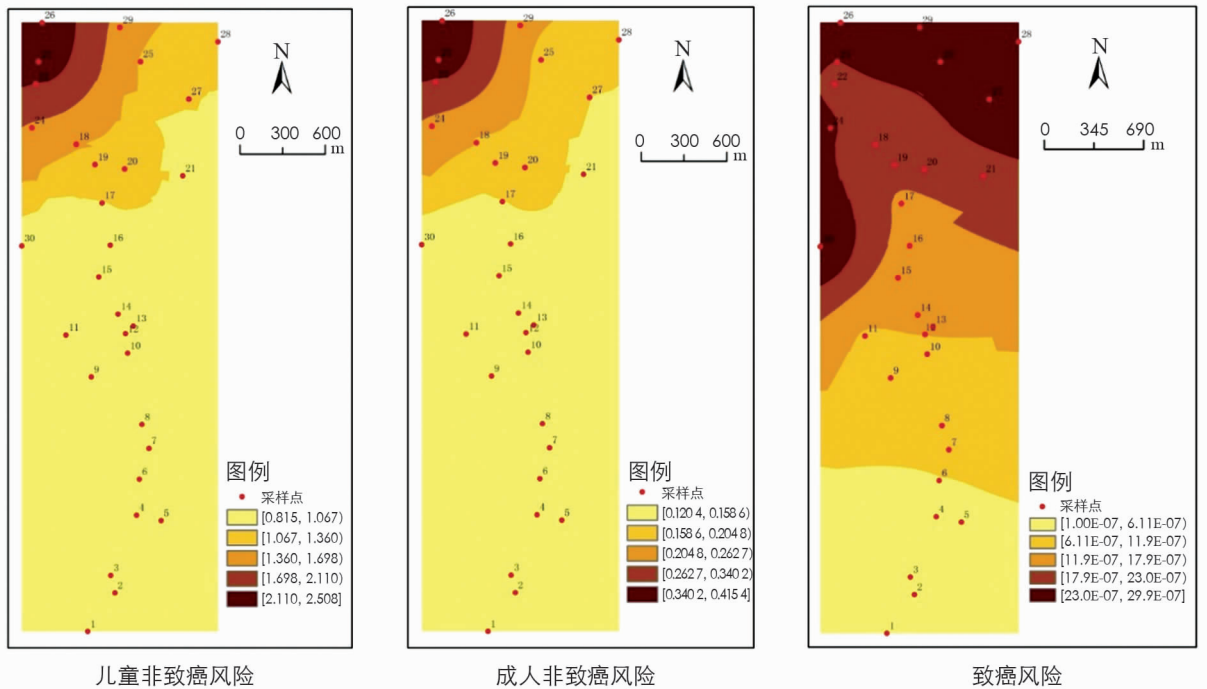


图 3 研究区非致癌和致癌风险空间分布图

表 7 地表灰尘重金属健康风险

点位	季	非致癌儿童	非致癌成人	致癌
总体	采暖季	0.81	0.12	5.16E-07
	非采暖季	2.36	0.35	1.59E-06
	两季平均	1.58	0.24	1.05E-06
A 类	采暖季	0.65	0.10	3.86E-07
	非采暖季	1.41	0.21	8.05E-07
	两季平均	1.03	0.15	5.95E-07
B 类	采暖季	3.55	0.54	2.75E-06
	非采暖季	11.60	1.75	9.11E-06
	两季平均	7.58	1.15	5.93E-06

由表 8 可以看出, 研究区健康风险较其他城市属于中等偏高水平. 非致癌风险低于西安市, 高于保定市、北京市、合肥市等. 致癌风险低于开封市、保定市, 高于北京市、合肥市、兰州市等. 研究区 A 类点位健康风险较其他城市属于中等水平. 非致癌风险与合肥市、开封市和兰州市水平基本一致, 低于西安市. 致癌风险与北京市、合肥市、兰州市、芜湖市、西安市水平基本一致.

表 8 本研究与其他区域健康风险对比表

城市	区域	重金属种类	非致癌儿童	非致癌成人	致癌	文献来源	
济南市	东泺河城市汇水区	Cd, Cr, Cu, Pb, Zn, Hg, As 7 种	1.58	0.24	1.05E-06	本研究	
	A 类点位		1.03	0.15	5.95E-07		
保定市	城区	Cd, Cr, Cu, Pb, Zn 5 种	0.124		1.25E-05	[23]	
北京市	城市道路	Cd, Cr, Cu, Mn, Ni, Pb 6 种	0.66	0.14	3.59E-07	[6]	
合肥市	城区	Cd, Cr, Zn, Pb, Cu 5 种	1.26	0.21	3.24E-07	[2]	
开封市	公园	Cr, Cu, Zn, Pb, Ni, Cd 6 种			0.15	3.58E-06	[24]
莱芜市	街道	Hg, As, Cr, Pb, Zn, Cu 6 种	0.51	0.055	3.12E-09	[12]	
兰州市	城关区	Cu, Zn, Pb, Cr, Cd 5 种	0.97	0.13	3.62E-07	[25]	
芜湖市	市区	Zn, Cu, V, Pb, Mn, Cr, Cd, Co, Ni 9 种	0.82		1.29E-07	[26]	
西安市	城市道路	Pb, Zn, Cu, V, Ba, Cr, Cd, Ni, As 9 种	2.75	0.37	4.06E-07	[11]	

## 2.4 来源分析

采用 Pearson 相关系数法, 分析研究区地表灰尘中重金属之间的相关性. 判断标准: 置信度小于 0.05, 表明相关系数有统计学意义, 否则就是无统计学意义; 相关系数 $[0.8, 1.0)$ 为极强相关,  $[0.6, 0.8)$ 为强相关,  $[0.4, 0.6)$ 为中等程度相关,  $[0.2, 0.4)$ 为弱相关,  $[0.0, 0.2)$ 为极弱相关或无相关. 本研究认为弱相关、极弱相关和无相关均为无统计学意义. 从表 9 可以看出, 相关有统计学意义的组合为 Cd-Pb, Cd-As, Cr-Cu, Cr-Pb, Cu-Pb, Cu-Hg, Pb-As.

表 9 Pearson 相关性分析

	Cd	Cr	Cu	Pb	Zn	Hg	As
Cd	1	-0.260*	-0.151	-0.536**	0.391**	-0.218	0.704**
Cr		1	0.501**	0.416**	0.044	0.126	-0.311*
Cu			1	0.430**	0.306*	0.538**	-0.219
Pb				1	0.130	0.192	-0.511**
Zn					1	0.148	0.198
Hg						1	-0.321*
As							1

\*\*  $P < 0.01$ , 极有统计学意义; \*  $P < 0.05$  有统计学意义.

对地表灰尘中重金属进行主成分分析. 提取前两个主成分, 解释总方差为 64.11%. KMO 统计量为 0.625, 小于 0.7, Bartlett 球形检验统计量的  $sig < 0.01$ , 由此否定相关矩阵为单位矩阵的零假设, 即认为各变量之间的相关性有统计学意义. 第一主成分贡献率为 40.58%, Cr, Cu, Pb, Hg 在第一主成分上有较高载荷. 第二主成分贡献率为 23.53%, Cd, As, Zn 在第二主成分上有较高载荷.

因 Hg 和 As 质量分数不高于背景值, 暂不讨论这两类重金属. 从相关性分析可以看出, Cd, Cr, Cu 和 Pb 污染源可能相似. 从主成分分析可以看出, Cr, Cu, Pb 污染源可能相似, 为第一主成分. Cd, Zn 污染源可能相似, 为第二主成分.

Cr 和 Cu 的来源在前文 2.1 中已讨论. Cu, Pb 为亲铜成矿元素组合, 污染可能主要源于交通<sup>[21]</sup>, Pb 主要来自汽车尾气和煤炭燃烧等. 第一主成分可能为交通源. Cd 可能来自电镀冶金等行业三废排放<sup>[27]</sup>, Zn 主要来源于轮胎的磨损、润滑剂等<sup>[21]</sup>. 第二主成分可能为小型建材企业, 如不锈钢城等.

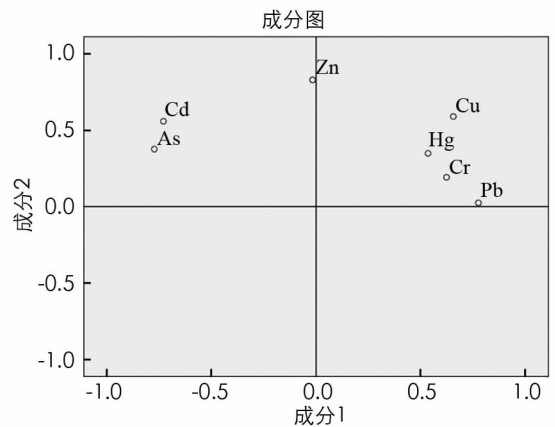


图 4 主成分分析

### 3 结 论

研究区地表灰尘中 Hg 和 As 低于背景值, Cd, Cr, Cu, Pb, Zn 质量分数高于背景值. Cr 和 Zn 无标准值, Cd, Cu, Pb, Hg, As 低于土壤标准值. 除儿童非致癌风险外, 健康风险均可忽略. 非致癌健康风险结果为: 成人两季可忽略, 儿童采暖季可忽略, 非采暖季存在非致癌风险; 各金属的贡献前三位为: Cr>Pb>Cu, 三者共占总非致癌风险的 95% 以上. 致癌风险结果为: 两季风险均小于最大可接受风险值, Cr 占总致癌风险的 99.5% 以上, 为主要贡献的金属. 风险较高的区域均集中在研究区的西北方向. Cr, Cu, Pb 污染源可能为交通源, Cd, Zn 污染源可能为历史上或是现存小型建材企业. 研究区域地表灰尘通过降雨等途径进入东泺河, 将增加东泺河的重金属污染负荷, 从而影响水质和底泥质量. 已有研究表明该区域表层沉积物中存在重金属超标现象<sup>[28]</sup>. 但本研究未对地表灰尘重金属对东泺河和小清河的环境影响进行定量分析.

### 参考文献:

- [1] 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.
- [2] 李如忠, 周爱佳, 童 芳, 等. 合肥市城区地表灰尘重金属分布特征及环境健康风险评估 [J]. 环境科学, 2011, 32(9): 2661-2668.
- [3] 于 洋, 马俊花, 宋宁宁, 等. 北京市地表灰尘中 Cu 的分布及健康风险评估 [J]. 生态毒理学报, 2014, 9(4): 744-750.
- [4] 李海燕石安邦. 城市地表颗粒物重金属分布特征及其影响因素分析 [J]. 生态环境学报, 2014, 23(11): 1852-1860.
- [5] 陈青林, 王 惠, 杨宝山, 等. 济南市地表灰尘重金属含量及其污染评价 [J]. 济南大学学报(自然科学版), 2013, 27(4): 428-432.
- [6] 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估 [J]. 环境科学学报, 2012, 32(8): 2006-2015.
- [7] 中华人民共和国生态环境部. 污染场地风险评估技术导则: HJ 25.3—2014[S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2014.
- [8] AGENCY E P. Risk Assessment Guidance for Superfund; Volume II Environmental Evaluation Manual, Interim Final [J]. Saúde Pública, 1989, 804(7): 636-640.
- [9] 邹 曦, 丁世敏, 吴易雯, 等. 汉丰湖入湖支流健康评价指标体系构建和应用 [J]. 三峡生态环境监测, 2018, 3(4): 1-7.
- [10] 北京市质量技术监督局. 场地环境评价导则: DB11/T 656—2009 [S/OL]. (2020-01-01)[2009-10-14]. <https://wenku.baidu.com/view/ab4239147e21af45b307a884.html>.
- [11] 陈 莹, 孙 璐, 云中来, 等. 西安市城市道路灰尘重金属污染及健康风险评估 [J]. 安全与环境学报, 2016, 16(2): 370-376.
- [12] 张梦月, 张智博, 刘 涛, 等. 莱芜市城区街道灰尘重金属含量及其健康风险评估 [J]. 河南师范大学学报(自然科学版), 2019, 47(2): 47-54.
- [13] 李良忠, 张丽娟, 胡国成, 等. 西南某矿区家庭灰尘中重金属的暴露及其健康风险评估 [J]. 生态毒理学报, 2017, 12(5): 235-242.
- [14] 朱兰保, 盛 蒂, 马 莉, 等. 安徽省城市地表灰尘重金属污染及人体健康风险评估 [J]. 地球与环境, 2019, 47(1): 97-104.
- [15] 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.
- [16] 王冬莹, 庄 涛, 李迎霞, 等. 济南市东泺河底泥及其雨水汇水区地表灰尘中重金属的污染特征研究 [J]. 安全与环境学报, 2018, 18(4): 1586-1592.
- [17] 孙玉琳. 济南地区土壤背景值 [J]. 环境科学, 1983, 4(1): 5-12.
- [18] 生态环境部, 国家市场监督管理总局. 土壤环境质量 建设用地土壤污染风险管控标准: GB 36600—2018[S]. 北京: 中国标准出版社, 2018.
- [19] 贾中民, 冯汉茹, 鲍丽然, 等. 渝西北土壤重金属分布特征及其风险评估 [J]. 西南大学学报(自然科学版), 2018, 40(7): 106-114.
- [20] FACCHINELLI A, SACCHI E, MALLEN L. Multivariate Statistical and GIS-based Approach to Identify Heavy Metal



Sources in Soils [J]. Environmental Pollution Barking, Essex, 2001, 114(3): 313-324.

- [21] 刘春华, 岑 况. 北京市街道灰尘的化学成分及其可能来源 [J]. 环境科学学报, 2007, 27(7): 1181-1188.
- [22] 钱 鹏, 郑祥民, 周立旻, 等. 312 国道沿线土壤、灰尘重金属污染现状及影响因素 [J]. 环境化学, 2010, 29(6): 1139-1146.
- [23] 郑小康, 李春晖, 黄国和, 等. 保定城区地表灰尘污染物分布特征及健康风险评价 [J]. 环境科学学报, 2009, 29(10): 2195-2202.
- [24] 段海静, 蔡晓强, 阮心玲, 等. 开封市公园地表灰尘重金属污染及健康风险 [J]. 环境科学, 2015, 36(8): 2972-2980.
- [25] 白泽琳, 赵梦竹, 李 萍, 等. 兰州市城关区地表灰尘重金属污染健康风险评价 [J]. 环境污染与防治, 2014, 36(5): 54-58.
- [26] 方凤满, 蒋炳言, 王海东, 等. 芜湖市地表灰尘中重金属粒径效应及其健康风险评价 [J]. 地理研究, 2010, 29(7): 1193-1202.
- [27] 吕建树, 张祖陆, 刘 洋, 等. 日照市土壤重金属来源解析及环境风险评价 [J]. 地理学报, 2012, 67(7): 971-984.
- [28] 于晓霞, 赵学强, 孙滨峰, 等. 济南市小清河流域表层沉积物中重金属的空间分布、生态风险及源解析 [J]. 西南师范大学学报(自然科学版), 2017, 42(2): 78-84.

## Health Risk Assessment of Heavy Metals in Surface Dust in Catchment Areas ——A Study on Jinan Dongluo River Catchment Area

DAI Jing, WANG Li-xue,  
ZHAO Yu-qiang, LIU Shan-jun, WANG Dong-ying

*Institute of Water and Ecology, Jinan Environmental Research Academy, Jinan 250100, China*

**Abstract:** Catchment area of the Dongluo River in Jinan was selected as the research object, and 30 samples were selected to analyze the contents of seven heavy metals(Cd, Cr, Cu, Pb, Zn, Hg, and As)in two seasons. The health risk level of surface dust in the region was assessed. The results show that the risk of cancer in children and adults was less than the maximum acceptable risk. The non carcinogenic risk of adults can be ignored in two seasons. Children's non carcinogenic risk exists in non heating season, which can be ignored in heating season. The top three non-carcinogenic risk contributions are  $Cr > Pb > Cu$ , and the non-carcinogenic risk of three heavy metals accounts for about 95 % of the total non-carcinogenic risk. The carcinogenic risk of Cr is more than 99.5 % of the total carcinogenic risk. High risk areas are concentrated in the northwest of the study area. Heavy metal pollution sources may be traffic sources and small-scale building materials enterprises.

**Key words:** heavy metals; water catchment areas; surface dust; health risk assessment

责任编辑 包 颖