

## · 监测与检验 ·

## 某工业区居民铅内外暴露相关性研究

## Study on the correlation between internal and external lead exposure in residents of an industrial area

李盛<sup>1</sup>, 王金玉<sup>2</sup>, 牛乐宇<sup>3</sup>, 吴允萍<sup>1</sup>, 滕铁楠<sup>1</sup>, 丁知音<sup>1</sup>

(1. 兰州市第一人民医院, 兰州 730050; 2. 兰州大学基础医学院; 3. 兰州市疾病预防控制中心)

**摘要:** 通过环境中铅的多途径暴露健康风险评估及居民体内铅负荷水平检测, 探讨某工业区居民铅内外暴露的相关性及内暴露的影响因素。结果显示, 该工业区环境中铅的总非致癌风险为 0.08, 低于非致癌风险可接受水平 1; 居民尿铅、血铅几何均数分别为 0.81、18.43  $\mu\text{g/L}$ , 年龄和吸烟对人体内铅负荷有影响。提示铅的内暴露水平与外暴露健康风险无显著相关性。

**关键词:** 铅; 健康风险评价; 内暴露; 相关性; 影响因素

中图分类号: R135.11 文献标识码: B

文章编号: 1002-221X(2021)02-0162-04

DOI: 10.13631/j.cnki.zggyyx.2021.02.024

工业生产是环境中铅的主要来源之一。研究发现, 工业区土壤中铅的非致癌风险值为 1.7, 超过非致癌风险可接受水平 1, 增加居民健康风险<sup>[1]</sup>。健康风险评价是将环境污染与人体健康联系起来的有效手段, 暴露评估是核心环节。目前常用外暴露评估法<sup>[2,3]</sup>, 即通过测定环境介质中某污染物的含量, 结合区域人群接触特征(接触途径、接触频率等), 估算可能存在的健康风险。该方法对个体的暴露量估算精确性较低。内暴露评估是通过测定尿液等标记物中的污染物或其代谢产物的含量来确定污染物进入人体内的暴露量, 使评价结果更精准<sup>[4]</sup>。大范围开展内暴露检测在采样时存在人力、财力上的诸多困难。因此, 将内外暴露评估相结合, 探讨污染物健康风险及主要暴露途径和影响因素, 对提高健康风险评估的精准性和降低内暴露检测难度有着积极意义。

某区是兰州市老工业基地, 大量的工业企业在为区域经济发展做出巨大贡献的同时, 也使该区域环境介质中累积了大量的污染物, 可能存在潜在的健康隐患。目前, 关于该区大气环境铅污染及健康风险评价

已有报道<sup>[5,6]</sup>, 但尚缺乏铅的多途径外暴露评估及内暴露研究。因此, 本研究通过对该区环境中铅的多途径暴露健康风险评估、居民体内铅负荷水平及其影响因素调查、铅的内外暴露评估的相关性分析, 探讨该区居民铅内暴露水平状况, 提出健康促进的防护对策。

## 1 资料与方法

### 1.1 环境中铅的健康风险评估

**1.1.1 采样与分析** (1) 大气  $\text{PM}_{2.5}$ : 2017 年在该区  $\text{PM}_{2.5}$  年均浓度最高监测站覆盖的社区区域进行滤膜采样。环境空气采样点设置符合《环境空气质量监测规范(试行)》(2007 年第 4 号) 相关要求, 按照《环境空气质量手工监测技术规范》(HJ/T 194—2017) 中颗粒物采样要求执行。每月采样 1 次, 每次连续采样 7 d。共采集 84 份样品, 采集的滤膜夹置于密闭袋中避光干燥送达实验室, 经预处理后, 制备成测试样, 采用电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS) 测定铅含量。(2) 饮用水: 按照《生活饮用水标准检验方法》(GB/T 5750—2006), 分别于 2017 年枯水期和丰水期采集、分析该区城市饮用水中铅质量浓度, 共 108 件水样。(3) 土壤: 按照《土壤环境监测技术规范》(HJ 166—2004) 要求, 2017 年采集该区菜地土壤样品 40 份, 按照《土壤质量 铅、镉的测定 石墨炉原子吸收分光光度法》(GB/T17141—1997) 测定铅; 采用电位法测定土壤 pH 值。

**1.1.2 铅污染评判标准** 大气  $\text{PM}_{2.5}$  中铅污染判定根据《国家大气环境质量二级标准》(GB3095—2012), 限值为  $500 \text{ ng/m}^3$ 。饮用水中铅污染判定根据《生活饮用水卫生标准》(GB/T 5749—2006), 限值为  $0.01 \text{ mg/L}$ 。土壤中铅污染判定根据《土壤环境质量标准》(GB 15618—2008), 限值为  $50 \text{ mg/kg}$ 。

**1.1.3 铅的日均暴露量** 采用美国国家环境保护局(USEPA) 推荐的暴露评估模型 [公式 (1) — (5)] 进行不同暴露途径铅的日均暴露量计算。饮水量、涉

**基金项目:** 甘肃省科技计划资助项目 (20YF8FA075); 兰州市人才创新创业项目 (2019-RC-70)

**作者简介:** 李盛 (1976—), 男, 主任医师, 主要从事预防医学研究工作。

水活动时间采用本课题组前期研究结果<sup>[7,8]</sup>, 皮肤表面积根据本次调查结果参照文献[8]计算获得, 其它暴露参数均参照 USEPA 《exposure factors handbook》和相关文献<sup>[9-12]</sup>。见表 1。

空气吸入途径慢性暴露量

$$ADD_{inh} = (C_a \times IR_a \times EF \times ED) / (BW \times AT) \quad (1)$$

饮用水经口摄入途径暴露量

$$ADD_{oral-w} = (C_w \times IR_w \times EF \times ED) / (BW \times AT) \quad (2)$$

经涉水活动皮肤摄入暴露量

$$ADD_{der-w} = (C_w \times A_w \times KP \times T \times EF \times ED) / (BW \times AT) \quad (3)$$

土壤经口摄入途径慢性暴露量

$$ADD_{oral-s} = (C_s \times IR_s \times CF \times EF \times ED) / (BW \times AT) \quad (4)$$

土壤经皮肤接触摄入慢性暴露量

$$ADD_{der-s} = (C_s \times A_s \times AF \times CF \times ABS \times EF \times ED) / (BW \times AT) \quad (5)$$

式中,  $ADD_{inh}$ 、 $ADD_{oral-w}$ 、 $ADD_{der-w}$ 、 $ADD_{oral-s}$ 、 $ADD_{der-s}$ : 铅日均暴露量 [mg/(kg·d)];  $C_a$ 、 $C_w$ 、 $C_s$ : 介质中铅的浓度 (mg/m<sup>3</sup>、mg/L、mg/kg);  $IR_a$ : 日均呼吸量 (m<sup>3</sup>/d);  $IR_w$ : 日均饮水量 (L/d);  $IR_s$ : 日均土壤经口摄入量 (mg/d);  $EF$ : 暴露频率 (d/年);  $ED$ : 暴露周期 (年);  $BW$ : 体重 (kg);  $AT$ : 平均作用时间 (d) ( $AT = ED \times 365$ );  $A_w$ 、 $A_s$ : 暴露皮肤表面积 (cm<sup>2</sup>);  $KP$ : 皮肤渗透系数 (0.001 cm/h);  $T$ : 涉水活动时间 (h/d);  $AF$ : 皮肤表面土壤粘附系数 [mg/(m<sup>2</sup>·d)];  $CF$ : 转化系数 (无量纲, 10<sup>-6</sup>);  $ABS$ : 皮肤接触吸收效率因子 (无量纲, 0.001)。

表 1 工业区居民铅的日平均暴露计算参数

年龄 (岁)	性别	$IR_a$ (m <sup>3</sup> /d)	$IR_w$ (L/d)	$IR_s$ (mg/d)	$EF$ (d/年)	$ED$ (年)	$BW$ (kg)	$A_w$ (cm <sup>2</sup> )				$T$ (h/d)	$AF$ [mg/(m <sup>2</sup> ·d)]	
								全身	头部	手部	足部		面部	手部
3~5	—	10.90	0.80	35	243	3	19.60	7 808	584	402	528	0.62	0.012	0.11
>5~10	—	12.40	0.80	38	266	5	29.51	10 498	779	540	706	0.62	0.012	0.11
>10~15	—	15.10	0.80	20	255	5	50.25	14 820	1 106	764	1 002	0.62	0.012	0.11
>15	男	19.02	2.40	20	269	50	67.49	18 470	1 441	960	1 293	0.95	0.031 4	0.133 6
	女	14.17	2.14	20	269	50	58.31	16 440	1 167	838	1 069	1.61	0.031 4	0.133 6

1.1.4 铅的非致癌健康风险评估  $HQ = ADD/RfD$ ;

$$HI = \sum HQ_i$$

式中,  $HQ$ : 某暴露途径的非致癌风险的危险商;  $HI$ : 多暴露途径总的非致癌风险;  $ADD$ : 铅的日均慢性暴露量;  $RfD$ : 非致癌参考剂量 [经呼吸:  $3.52 \times 10^{-3}$  mg/(kg·d); 经口:  $3.5 \times 10^{-3}$  mg/(kg·d); 经皮肤:  $5.25 \times 10^{-3}$  mg/(kg·d)]。当  $HQ$  或  $HI \leq 1$  时, 认为风险较小或可忽略; 当  $HQ$  或  $HI > 1$  时, 存在非致癌风险。

1.2 铅的内暴露水平

1.2.1 研究对象 采用随机整群分层抽样的方法, 使用随机数字在该区所辖的 8 个街道中选择 2 个街道, 在所选每个街道使用随机数字选择 1 个社区, 将该社区以每 30 户为一组进行分组, 使用随机数字选择每个社区的 3 组作为调查对象, 通过问卷调查筛选研究对象。研究对象纳入条件: (1) 现居住地居住  $\geq 3$  年; (2) 无职业铅接触史者; (3) 无慢性消耗性疾病者; (4) 3 个月内未服用过复合微量元素类药物和保健品者; (4) 按性别和年龄共分为 3~、6~、12~、19~、40~、60~79 岁 12 个组, 年龄和性别构成均衡。最终共选择该区常住居民 135 人作为研究对象, 其中男 67 人、女 68 人, 儿童青少年 66 人、

成人 69 人。研究对象均知情同意。

1.2.2 问卷调查 由通过统一培训的调查员入户面询收集资料。问卷内容包括年龄、性别、民族等基本信息, 环境、职业危险因素, 吸烟、饮酒情况等生活习惯, 近半年患病及治疗情况、家族史等健康状况。

1.2.3 健康检查 检查项目包括身高、体重、内科、外科等项目; 其中, 血压检查仅针对  $\geq 12$  岁, 共 91 人。儿童青少年肥胖和超重根据文献[13]判定。成人体重过轻、正常、超重、肥胖按照文献[14]推荐的标准划分, 超重、肥胖合并为超重肥胖组。高血压诊断参考《中国医师协会关于我国高血压诊断标准及降压目标科学声明》<sup>[15]</sup>。

1.2.4 样品采集及处理

1.2.4.1 血样  $>12$  岁者采集空腹静脉血 4 管, 每管 4 ml, 其中抗凝全血 1 管。6~12 岁儿童采集空腹静脉血 3 管, 每管 4 ml, 其中抗凝全血 1 管。 $<6$  岁的儿童采集抗凝全血 1 管, 4 ml。对  $\geq 6$  岁的研究对象, 抗凝全血进行现场血常规检测后剩余按每份 1 ml 分装; 非抗凝全血现场分离血清, 至实验室先分装 0.8 ml 用于临床生化检测, 剩余按每份 0.5 ml 分装。对  $<6$  岁儿童, 抗凝全血现场检测血常规后, 取 1.5 ml 离心分离血浆后用于生化检测, 剩余样本至实验

室按每份 1 ml 分装。

1.2.4.2 尿样 ≥6 岁者采集随机尿样 ≥80 ml, <6 岁的儿童采集随机尿样 ≥50 ml。采集的尿样现场应用“苦味酸分光光度法”进行尿肌酐测定后,根据检测需求按照每份 10 ml 分装。所有分装后的样本通过冷链运输至专业机构进行铅含量检测。

1.3 质量控制 采样所用器具、容器均由兰州市疾病预防控制中心统一配发。样品分析由专业人员按照相关要求进行分析,分析过程设置空白实验。为满足研究对象样本性别和年龄均衡需要,每天均进行调查对象年龄和性别分布分析,对不同年龄或性别缺少的研究对象进行及时补充。调查问卷由调查员逐项面询填写,年龄较小的研究对象由其监护人代为回答。问卷资料由现场调查负责人及时审核后确定。研究对象健康检查、尿样和血样采集及分析均由具备资质的专业机构承担。

1.4 统计分析 采用 Excel 2007 整理数据,统计分析使用 SPSS 18.0 软件进行。铅不同途径日均暴露量、健康风险评估结果采用算术均数表示,尿铅、血铅浓度采用几何均数表示。两组间差异分析采用 Mann-Whitney *U* 检验,多组间差异分析采用 Kruskal-Wallis *H* 检验,相关性采用 Spearman 等级相关分析;以  $P < 0.05$  为差异有统计学意义。统计过程中原始检测数据低于方法检出限的数值以检出限的 1/2 替代。

## 2 结果

### 2.1 环境中铅的健康风险评估

2.1.1 铅污染情况 大气 PM<sub>2.5</sub>、饮用水和土壤中铅的平均质量浓度分别为 45.14 ng/m<sup>3</sup>、0.002 8 mg/L、14.72 mg/kg,均低于相关国家标准限值(500 ng/m<sup>3</sup>、0.01 mg/L、50 mg/kg)。

2.1.2 铅的日均暴露量 呼吸、饮用水经口、土壤经口、饮用水经皮肤、土壤经皮肤等途径摄入的铅,日均暴露量分别为  $1.37 \times 10^{-5}$ 、 $9.80 \times 10^{-5}$ 、 $4.48 \times 10^{-6}$ 、 $2.42 \times 10^{-4}$ 、 $4.52 \times 10^{-8}$  mg/kg。

2.1.3 铅的非致癌健康风险评估 铅的 *HI* 为 0.08,低于非致癌风险可接受水平 1。其中以呼吸、饮用水经口、土壤经口、饮用水经皮肤、土壤经皮肤等途径摄入铅的 *HQ* 分别为  $3.43 \times 10^{-3}$ 、 $2.95 \times 10^{-2}$ 、 $1.37 \times 10^{-3}$ 、 $4.59 \times 10^{-2}$ 、 $1.57 \times 10^{-5}$ 。

2.2 尿肌酐检测结果 135 份尿样肌酐浓度平均值 1 216.18 mg/L。其中,男性 1 319.17 mg/L、女性 1 114.71 mg/L,儿童青少年 1 109.17 mg/L、成年人 1 318.54 mg/L,体重过轻、正常和超重肥胖者分别为 1 483.90、1 150.73、1 256.58 mg/L,高血压、非高血压者分别为 1 260.61、1 377.85 mg/L,吸烟、非吸烟者分别为 1 557.05、1 146.19 mg/L。

2.3 铅的内暴露水平及影响因素 135 名研究对象肌酐校正前后的尿铅几何均数分别为 0.81、0.75 μg/L,血铅几何均数为 18.43 μg/L。成人肌酐校正前后的尿铅、血铅水平均高于儿童青少年,吸烟者血铅水平高于不吸烟者(均  $P < 0.05$ )。Spearman 等级相关分析结果显示,肌酐校正后尿铅与血铅水平无相关性( $r = 0.068$ ,  $P = 0.435$ )。见表 2。

表 2 研究对象尿铅、血铅水平分布

因素	组别	人数	尿铅 (肌酐校正前)		尿铅 (肌酐校正后)		血铅	
			几何均数	范围	几何均数	范围	几何均数	范围
总体		135	0.81	BDL~6.26	0.75	0.02~4.20	18.43	6.99~47.77
性别	男	67	0.84	0.13~2.95	0.73	0.08~2.16	19.20	8.08~47.77
	女	68	0.78	BDL~6.26	0.77	0.02~4.20	17.70	6.99~43.77
年龄	儿童青少年	66	0.64	BDL~6.26	0.66	0.02~3.43	16.37	8.08~34.16
	成人	69	1.02 <sup>a</sup>	0.13~3.96	0.85 <sup>a</sup>	0.08~4.20	20.65 <sup>a</sup>	6.99~47.77
BMI	过轻	10	0.67	BDL~2.54	0.48	0.02~1.50	18.21	6.99~43.77
	正常	73	0.83	0.13~6.26	0.84	0.10~3.43	17.77	8.08~42.45
	超重肥胖	52	0.81	0.09~3.96	0.70	0.08~4.20	19.44	11.77~47.77
高血压	是	14	1.01	0.54~1.90	0.92	0.54~1.82	20.27	13.09~31.09
	否	77	0.95	0.09~6.26	0.75	0.08~4.20	19.29	6.99~47.77
吸烟	是	23	0.99	0.14~2.95	0.70	0.08~1.82	23.18	11.77~47.77
	否	112	0.78	BDL~6.26	0.76	0.02~4.20	17.58 <sup>b</sup>	6.99~43.77

注: BDL 表示测定样本中铅浓度低于仪器检测线。a, 与儿童青少年比较,  $P < 0.05$ ; b, 与吸烟者比较,  $P < 0.05$ 。

2.4 铅的内外暴露相关性分析 由表3可见,尿铅、血铅水平与不同暴露途径的非致癌健康风险均无显著相关性。

表3 铅的内暴露水平与外暴露健康风险评估结果相关性 ( $r$  值)

内暴露水平	HI	HQ(呼吸)	HQ(口)	HQ(皮肤)
尿铅(肌酐校正后)	0.119	0.044	0.091	0.118
血铅	0.016	0.167	0.015	0.007

### 3 讨论

环境铅污染与人体健康密切相关。本研究结果显示,兰州市某工业区大气、饮用水和土壤中铅的质量浓度均在国家标准限值以下,多暴露途径的HI(0.08)低于非致癌风险可接受水平1,说明工业区环境中铅的健康风险较小。

本研究常住居民的尿铅和血铅水平检测结果显示,工业区人群校正后尿铅、血铅几何均数(0.75、18.43  $\mu\text{g/L}$ )均低于我国八省份一般人群水平(1.05、34.9  $\mu\text{g/L}$ )和辽宁省调查结果(3.22、29.04  $\mu\text{g/L}$ )<sup>[16,17]</sup>。说明不同地区居民铅负荷水平不同,该工业区人群尿铅、血铅水平相对较低。本研究成人尿铅、血铅水平显著高于儿童和青少年,可能与铅在体内的蓄积作用有关。吸烟者血铅水平显著高于非吸烟者。据文献报道<sup>[18]</sup>,1支香烟含有0.6~2.0  $\mu\text{g}$ 铅,吸烟时至少吸入其含量的1/10,吸烟与体内铅含量呈正相关<sup>[19,20]</sup>。因此,应提倡健康的生活方式,积极做好控烟工作。尿铅、血铅水平与不同暴露途径的非致癌健康风险均无显著相关性,未发现工业区居民主要的铅暴露风险途径,与韩玉婷的研究报道不一致<sup>[21]</sup>,可能与研究区域、对象等因素不同有关。具体原因还待进一步研究探讨。

### 参考文献

[1] 张承中,李勇,吴曼莉,等.城市老工业区土壤重金属污染状况与健康风险评估[J].工业安全与环保,2015,41(6):25-29.

[2] Ahmed N, Bodrud DM, Hossain S, *et al.* Appraising spatial variations of As, Fe, Mn and NO<sub>3</sub> contaminations associated health risks of drinking water from Surma basin, Bangladesh [J]. Chemosphere, 2019, 218 (11): 726-740.

[3] Fakhri Y, Saha N, Ghanbari S, *et al.* Carcinogenic and non-carcinogenic health risks of metal (oid)s in tap water from Ilam city, Iran [J]. Food and Chemical Toxicology, 2018 (118): 204-211.

[4] Razak NH, Praveena SM, Aris AZ, *et al.* Drinking water studies: A review on heavy metal, application of biomarker and health risk assess-

ment (a special focus in Malaysia) [J]. Journal of Epidemiology and Global Health, 2015, 5 (4): 297-310.

[5] 魏巧珍,李盛,贾清,等.兰州市大气PM<sub>2.5</sub>中重金属的污染特征及健康风险评估[J].中华预防医学杂志,2018,52(6):25-29.

[6] Uwamungu JY, 蒋煜峰,孙航,等.兰州市西固区蔬菜重金属污染现状及健康风险评估研究[J].环境科学与管理,2016,41(11):107-111.

[7] 李盛,王金玉,冯亚莉,等.兰州市西固区居民饮水量调查[J].环境卫生学杂志,2018,8(4):302-306.

[8] 王金玉,李盛,冯亚莉,等.兰州市城区成年居民涉水活动的皮肤暴露参数研究[J].中国预防医学杂志,2019,20(4):316-320.

[9] USEPA. Exposure factors handbook [S]. Washington DC, 2011.

[10] 马志孝,任婉侠,薛冰,等.老工业搬迁区街道灰尘重金属污染物的人体健康风险评估[J].生态科学,2014,33(5):963-971.

[11] 张纯淳,何池全.上海市某区域PM<sub>2.5</sub>及其重金属对居民健康的影响[J].上海大学学报(自然科学版),2016,22(6):784-792.

[12] 周睿婧,陈敏健,夏彦恺.南京市某区中小学生学习水重金属含量及健康风险评估[J].南京医科大学学报(自然科学版),2016,36(7):886-892.

[13] 赵静.1991—2011年中国2—18岁儿童青少年超重和肥胖患病率及流行趋势研究[D].石家庄:河北医科大学,2015.

[14] 中国肥胖问题工作组数据汇总分析协作组.我国成人体重指数和腰围对相关疾病危险因素异常的预测价值:适宜体重指数和腰围切点的研究[J].中华流行病学杂志,2002,23(1):5-10.

[15] 孙英贤.中国医师协会关于我国高血压诊断标准及降压目标科学声明[J].中华高血压杂志,2018,26(2):107-109.

[16] 丁春光,潘亚娟,张爱华,等.中国八省份一般人群血和尿液中铅、镉水平及影响因素调查[J].中华预防医学杂志,2014,48(2):91-96.

[17] 田昊渊,庞妍,阎波,等.辽宁省一般人群血和尿中铅水平研究[J].中国工业医学杂志,2016,29(1):8-11.

[18] 窦建瑞,朱宝立,仲立新,等.蓄电池厂工人血铅水平的相关因素研究[J].中国工业医学杂志,2011,24(1):12-15.

[19] Clark NA, Teschke K, Rideout K, *et al.* Trace element levels in adults from the west coast of Canada and associations with age, gender, diet, activities, and levels of other trace elements [J]. Chemosphere, 2007, 70 (1) : 155-164.

[20] Richter PA, Bishop EE, Wang J, *et al.* Tobacco smoke exposure and levels of urinary metals in the US youth and adult population: The national health and nutrition examination survey (NHANES) 1999—2004 [J]. Int J Environ Res Public Health, 2009, 6 (7) : 1930-1946.

[21] 韩玉婷.脆弱人群重金属污染暴露解析与影响因素分析[D].南京:南京大学,2014.