

# 典型地区居民金属环境 总暴露研究报告

(汞、镉、砷、铅、铬)

Total human environmental exposure study of  
heavy metals for residents in typical areas China

中国环境科学研究院 著

中国环境出版集团

# 典型地区居民金属环境总暴露 研究报告（汞、镉、砷、铅、铬）

中国环境科学研究院 著

中国环境出版集团·北京

图书在版编目 (CIP) 数据

典型地区居民金属环境总暴露研究报告. 汞、镉、砷、  
铅、铬/中国环境科学研究院著. —北京: 中国环境出版集团,  
2019.8

ISBN 978-7-5111-3891-0

I. ①典… II. ①中… III. ①居住区—重金属污染物—  
研究报告—中国 IV. ①X503.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2018) 第 300165 号

出版人 武德凯  
责任编辑 孟亚莉  
责任校对 任 丽  
封面设计 彭 杉



更多信息, 请关注  
中国环境出版集团  
第一分社

出版发行 中国环境出版集团  
(100062 北京市东城区广渠门内大街 16 号)  
网 址: <http://www.cesp.com.cn>  
电子邮箱: [bjgl@cesp.com.cn](mailto:bjgl@cesp.com.cn)  
联系电话: 010-67112765 (编辑管理部)  
010-67112735 (第一分社)  
发行热线: 010-67125803, 010-67113405 (传真)

印 刷 北京盛通印刷股份有限公司  
经 销 各地新华书店  
版 次 2019 年 8 月第 1 版  
印 次 2019 年 8 月第 1 次印刷  
开 本 787×1092 1/16  
印 张 12.25  
字 数 200 千字  
定 价 98.00 元

【版权所有。未经许可, 请勿翻印、转载、违者必究。】

如有缺页、破损、倒装等印装质量问题, 请寄回本社更换

# 前 言

在过去的三十多年里，我国经济快速发展，长期积累下来的生态环境问题当前正日益显现，目前已进入高发、频发阶段，生态环境问题已成为我国当下亟待解决的重要民生问题之一。习近平总书记在 2018 年全国生态环境保护大会上指出：“生态文明建设正处于压力叠加、负重前行的关键期，已进入提供更多优质生态产品以满足人民日益增长的优美生态环境需要的攻坚期，也到了有条件有能力解决生态环境突出问题的窗口期。”

生态环境部以提高国家环境风险防控能力与保障公众健康为目标，在“十三五”期间组织中国环境科学研究院等单位开展了我国首次大规模人群环境总暴露研究工作。该项工作于 2016 年启动，是继“十二五”中国人群环境暴露行为模式研究工作之后，为了解我国居民污染物环境总暴露特征，提高环境与健康风险评估能力而开展的又一项十分重要的基础性环境与健康专项调查研究工作，填补了国内此项工作的空白。

环境总暴露反映了人群污染物多介质、多途径的暴露水平及其贡献比，是表征暴露介质浓度和人群环境暴露特点的综合性指标，在以保障公众健康为目的确定环境风险防控重点及优先序中具有更强的针对性，可为环境健康基准制修订提供科学依据。美国、日本、韩国和欧盟等国家和地区结合本国环境管理的需要，陆续组织开展了人群环境总暴露研究工作，

为其国家环境健康基准的制修订及有针对性的污染防治措施及政策的出台提供了重要的基础数据。基于我国典型地区居民金属环境总暴露研究第一阶段工作撰写完成的《典型地区居民金属环境总暴露研究报告（汞、镉、砷、铅、铬）》和《典型地区居民金属环境总暴露量及贡献比手册（汞、镉、砷、铅、铬）》，系统反映了典型地区居民汞、镉、砷、铅、铬经饮用水、土壤、空气和膳食的环境总暴露水平及暴露介质贡献比，同时揭示了我国与国外人群环境总暴露水平的一致性规律及其存在的差异。

研究成果可为我国现阶段开展以风险防控为导向、综合考虑多途径、多介质环境综合暴露特征的环境健康基准的制修订工作提供最为直接的数据保障；助力改变当前国家和地方重大环境治理与食品安全监管工程中居民环境暴露风险评估面临的关键、客观、有效暴露参数缺失的现状；同时服务我国原有宏观导向性环境健康风险防控指导方式的基础上，助力开辟面向暴露空间、暴露行为、暴露防护措施的个人全方位、全周期时空精准化环境暴露风险防控新格局；推动我国环境保护管理工作从污染治理提升至风险防控的新阶段，为我国人群环境精细化暴露评价、精准化污染风险防控及评估体系的建立奠定基础。

本书旨在为相关科研和管理人员提供参考和借鉴。由于时间和经验所限，在编制过程中难免存在不足之处，敬请广大读者批评指正。

编委会

2018年11月

# 摘要



为了解我国居民污染物环境总暴露特征,获得居民环境总暴露基础数据,为制定环境健康基准、明确污染物优先防控次序提供科学依据,生态环境部(原环境保护部)将开展人群污染物环境总暴露调查纳入《国家环境保护“十三五”环境与健康工作规划》(环科技〔2017〕30号)重点任务,委托中国环境科学研究院于“十三五”期间选择典型地区针对金属组织开展了人群环境总暴露研究。2016—2017年,中国环境科学研究院完成了典型地区居民汞、镉、砷、铅、铬环境总暴露研究并形成本报告。

## 一、基本情况

本次调查选取太原市、大连市、上海市、武汉市、成都市和兰州市的15个区/县18岁及以上居民3876人作为调查对象(有效样本3855人),采用环境暴露行为模式调查和环境暴露监测相结合的方式,调查了居民与金属相关的环境暴露行为模式,采集分析了调查对象日常暴露的空气、饮用水、土壤和膳食中汞、镉、砷、铅和铬的含量,估算了居民环境总暴露水平及环境暴露介质贡献比。

## 二、主要结论

(1) 调查居民汞、镉、砷、铅、铬的环境总暴露水平分别为  $0.0472 \mu\text{g}/(\text{kg}\cdot\text{d})$ 、 $0.1215 \mu\text{g}/(\text{kg}\cdot\text{d})$ 、 $1.4135 \mu\text{g}/(\text{kg}\cdot\text{d})$ 、 $0.8452 \mu\text{g}/(\text{kg}\cdot\text{d})$  和  $3.7596 \mu\text{g}/(\text{kg}\cdot\text{d})$ ，暴露来源以膳食为主，其次为饮用水、土壤和空气，贡献比分别为  $61.23\% \sim 99.77\%$ 、 $0.16\% \sim 30.69\%$ 、 $0.03\text{‰} \sim 17.21\%$  和  $0.01\text{‰} \sim 1.67\%$ 。

(2) 调查居民汞、镉、砷、铅、铬微环境暴露（膳食、室内空气、饮水和用水）贡献比为  $96.90\% \sim 99.93\%$ ，高于大环境暴露（室外空气、交通空气、土壤）。饮食习惯、烹饪燃料类型、供暖方式及饮用水类型等是影响微环境暴露水平的重要因素。

(3) 调查居民汞、镉、砷、铅、铬环境总暴露水平存在地区、城乡、性别和年龄差异。自然环境、社会经济、产业布局等是导致调查居民环境总暴露水平地区、城乡差异的重要因素；人群环境暴露行为模式是导致同一地区调查居民环境总暴露水平性别和年龄差异的重要因素。

(4) 本研究填补了我国暴露评估领域基础数据的空白，了解了不同调查地区居民汞、镉、砷、铅、铬环境总暴露的特点，揭示了我国与国外人群环境总暴露水平的一致性规律及其存在的差异，研究成果可为我国环境健康基准制修订提供科学数据支撑。

(5) 环境总暴露水平可以反映人群污染物多暴露途径的暴露量和贡献比，是表征暴露介质浓度和人群环境暴露特点的综合指标，在以保障公众健康为目的确定环境风险防控重点及优先序中具有更强的针对性。

### 三、建议

(1) 加强环境总暴露相关基础研究,重点开展环境总暴露调查技术规范、评价标准及应用服务研究,在一般地区与人群基础上,着重加强污染地区和敏感人群调查,推动环境总暴露调查成果在环境基准制修订、环境健康风险防控等工作中的应用。

(2) 结合全国生态环境监测网络建设工作,优化人群环境总暴露调查监测方案,开展与健康密切相关的污染物的补充监测,为开展全国范围常态化居民环境总暴露调查、监测和风险评估,以及以健康风险防控为导向的环境管理工作奠定基础。

(3) 加大公众环境与健康宣教力度,增强居民环境健康风险防范意识,提高公民环境与健康素养水平,营造爱护生态环境、倡导健康生活的良好风气。

# 目 录

<b>第一章 概述</b> .....	1
一、背景.....	1
二、目的.....	2
三、调查对象.....	2
四、研究方法.....	2
(一) 抽样设计.....	2
(二) 环境暴露行为模式调查.....	5
(三) 暴露介质监测.....	5
(四) 环境总暴露估算.....	7
五、数据管理.....	7
(一) 数据采集与上报.....	7
(二) 数据审核与清洗.....	7
六、统计分析与结果表达.....	8
(一) 统计分析.....	8
(二) 结果表达.....	8
七、质量控制和质量评价.....	8
(一) 质量控制.....	8
(二) 质量评价.....	9
<b>第二章 暴露参数</b> .....	12
一、人群分布.....	12
二、身体特征.....	16
(一) 身高.....	16
(二) 体重.....	16
(三) 皮肤表面积.....	17

三、摄入量.....	18
(一) 长期呼吸量.....	18
(二) 膳食摄入量.....	19
(三) 饮水摄入量.....	20
四、时间—活动模式.....	20
(一) 与空气相关的时间—活动模式.....	20
(二) 与土壤相关的时间—活动模式.....	23
(三) 与水相关的时间—活动模式.....	24
五、综合暴露系数.....	26
(一) 与空气相关综合暴露系数.....	26
(二) 与饮用水相关综合暴露系数.....	28
(三) 与土壤相关综合暴露系数.....	30
(四) 与膳食相关综合暴露系数.....	32
<b>第三章 暴露介质</b> .....	<b>33</b>
一、样本分布.....	33
二、浓度水平.....	34
(一) 汞.....	34
(二) 镉.....	36
(三) 砷.....	37
(四) 铅.....	38
(五) 铬.....	40
<b>第四章 环境总暴露水平</b> .....	<b>42</b>
一、汞.....	44
(一) 空气.....	45
(二) 饮用水.....	48
(三) 土壤.....	50
(四) 膳食.....	53
二、镉.....	54
(一) 空气.....	55
(二) 饮用水.....	57
(三) 土壤.....	60

(四) 膳食.....	63
三、砷.....	63
(一) 空气.....	64
(二) 饮用水.....	67
(三) 土壤.....	69
(四) 膳食.....	72
四、铅.....	73
(一) 空气.....	74
(二) 饮用水.....	76
(三) 土壤.....	79
(四) 膳食.....	82
五、铬.....	82
(一) 空气.....	83
(二) 饮用水.....	86
(三) 土壤.....	88
(四) 膳食.....	91
<b>第五章 暴露介质贡献比.....</b>	<b>93</b>
一、汞.....	94
(一) 空气.....	95
(二) 饮用水.....	98
(三) 土壤.....	101
(四) 膳食.....	103
二、镉.....	104
(一) 空气.....	105
(二) 饮用水.....	108
(三) 土壤.....	110
(四) 膳食.....	113
三、砷.....	113
(一) 空气.....	114
(二) 饮用水.....	117
(三) 土壤.....	120

(四) 膳食.....	122
四、铅.....	123
(一) 空气.....	124
(二) 饮用水.....	127
(三) 土壤.....	129
(四) 膳食.....	132
五、铬.....	132
(一) 空气.....	133
(二) 饮用水.....	136
(三) 土壤.....	138
(四) 膳食.....	141
<b>第六章 讨论</b> .....	143
一、与国外相关研究的比较.....	143
二、环境总暴露水平差异性分析.....	147
(一) 居民汞、镉、砷、铅和铬环境总暴露水平地区、城乡 差异明显.....	147
(二) 居民汞、镉、砷、铅和铬环境总暴露水平性别和年龄 差异明显.....	148
(三) 供暖方式、烹饪燃料类型以及饮水类型是影响各介质暴露 水平的重要因素.....	150
三、环境总暴露研究结果的应用.....	151
<b>第七章 结论和建议</b> .....	154
一、主要结论.....	154
二、局限性.....	155
三、建议.....	155
<b>参考文献</b> .....	156
<b>附件 1 典型地区居民金属环境总暴露行为模式调查问卷</b> .....	159
<b>附件 2 暴露参数计算方法</b> .....	171
<b>附件 3 暴露量估算方法</b> .....	175

# 第一章 概述

## 一、背景

环境总暴露是指空气、饮用水、土壤和膳食等介质中的单一污染物经人体消化道、呼吸道和皮肤等多途径暴露的总量<sup>[1,2]</sup>，主要受人群环境暴露行为模式和暴露介质中污染物浓度的影响。1979年，美国环境保护局启动了为期6年的环境总暴露研究<sup>[3]</sup>，建立了环境总暴露研究方法及相关评估模型。2001年，美国加利福尼亚大学利用环境监测数据和美国人群暴露参数，针对砷开展了全国范围的人群环境总暴露研究<sup>[4]</sup>。进入21世纪，基于美国环境保护局建立的环境总暴露研究方法和相关评估模型，结合本国环境管理需要，日本<sup>[5-7]</sup>、韩国<sup>[8]</sup>和欧盟<sup>[9]</sup>等国家和地区陆续组织开展了人群环境总暴露研究。这些研究极大地推动了暴露科学的发展，研究获得的居民污染物环境总暴露水平及各暴露介质的贡献比，为各国制定环境健康基准<sup>[10,11]</sup>、有针对性地开展污染防治<sup>[3,12-16]</sup>提供了重要的基础数据。

针对我国该领域长期缺乏系统性研究、基础数据不足的问题，生态环境部（原环境保护部）将开展人群环境总暴露调查纳入《国家环境保护“十三五”环境与健康工作规划》（环科技〔2017〕30号）重点任务，委托中国环境科学研究院牵头组织，于“十三五”期间选择部分地区开展15种金属环境总暴露研究。2016—2017年，中国环境科学研究院首先完成了典型地区居民汞、镉、砷、铅和铬环境总暴露研究并形成本报告。

## 二、目的

了解我国居民汞、镉、砷、铅和铬的环境总暴露水平及其主要影响因素，为修订环境健康基准、开展污染防治、确定环境健康风险管理重点提供科学依据。

## 三、调查对象

太原市、大连市、上海市、武汉市、成都市和兰州市的 15 个区/县 18 岁及以上常住居民（在调查地居住 6 个月以上）3876 人。

## 四、研究方法

本研究主要包括抽样设计、环境暴露行为模式调查、暴露介质监测、环境总暴露估算 4 个部分。

### （一）抽样设计

#### 1. 样本量计算

以地区（华北、东北、华东、华南、西南、西北）、城乡（城市、农村）、性别（男、女）和年龄（18~44 岁、45~59 岁、60 岁及以上）为主要分层因素进行抽样，以体重<sup>a</sup>为基本暴露参数进行样本量估算。根据式（1-1）和式（1-2），得出每层所需最小样本量为 35 人，总样本量为 3150 人。本次实际调查人数为 3876 人，有效样本量为 3855 人，满足调查样本量的要求。

$$n = \left( \frac{U_{\alpha/2} \times \sigma}{\delta \times \mu} \right)^2 \times \text{deff} \quad (1-1)$$

$$N = \frac{n \times q}{1 - p} \quad (1-2)$$

<sup>a</sup> 体重为计算污染物经各介质暴露量所需的共有参数，且以体重为基本参数进行样本量估算获得的样本量相对较大，因此本研究以体重为基本参数进行样本量估算。

式中： $n$ ——每层最小样本量；

$U_{\alpha/2}$ ——显著性水平为 95% 时相应的标准正态差，取 1.96；

$\sigma$ ——中国 18 岁及以上人群体重的标准差，取 11.7；

$\delta$ ——允许误差，取 10%；

$\mu$ ——中国 18 岁及以上人群体重的算术均数，取 61.9<sup>b</sup>；

deff——设计效应值，取 2.5。

$N$ ——总样本量；

$q$ ——分层因素的乘积，取 72<sup>c</sup>；

$p$ ——失访率，取 20%。

## 2. 抽样步骤和方法

第一步：抽取调查地区。综合分析自然地理、资源环境、产业结构、社会经济、生活方式等状况，基于方便抽样原则在华北、东北、华东、华南、西南和西北各选择 1 个城市作为调查地区（表 1-1）。

第二步：抽取调查点位。每个调查地区随机抽取城市和农村调查点位各 1 个，在每个城市调查点位随机抽取不少于 3 个街道，农村调查点位随机抽取不少于 3 个乡镇。要求调查点位不处于国家或地方重金属重点防控区，调查街道和乡镇周边 5 km 范围内无涉重企业。

第三步：抽取调查人群。在调查街道和乡镇随机抽取调查户，每户抽取 1 人，要求年龄 18 岁及以上、在调查地区居住 6 个月以上、无长期服药史。调查人群城乡、男女各半。

## 3. 调查对象置换

入户调查时，遇失访（调查对象搬家、住房拆除、无人居住，经调查员尝试三次后仍联系不上）和拒访（包括拒绝填写问卷、问卷填写或调查时中途退出）情况，按就近原则置换家庭户和调查对象并记录置换情况。置换率不应超过 10%。

b 环境保护部. 中国人群暴露参数手册（成人卷）. 北京：中国环境出版社，2013：750.

c 分层因素：地区 6 层、城乡 2 层、性别 2 层、年龄 3 层， $q=6 \times 2 \times 2 \times 3$ 。

表 1-1 调查地区及调查人群基本情况

城市类型		环境暴露场景相关信息	调查样本量/人	备注
内陆煤烟型城市	城市	内陆能源型北方城市，属暖温带半干旱性季风型大陆性气候，四季分明；冬季集中供暖；主食以面和米为主；集中式供水	360	山西省太原市
	农村	内陆能源型北方农村，属暖温带半干旱性季风型大陆性气候，四季分明；冬季分散式供暖，多采用固体燃料；主食以面为主；分散式供水和小型集中式供水并存	336	
沿海工业型城市	城市	沿海工业型北方城市，属海洋性特点的暖温带大陆性季风气候，四季分明；冬季集中供暖；主食以米为主，海产品使用比例较高；集中式供水	287	辽宁省大连市
	农村	沿海工业港口型北方农村，属海洋性特点的暖温带大陆性季风气候，四季分明；冬季分散式供暖，多采用固体燃料；主食以米为主；分散式供水和小型集中式供水并存	334	
一线商业型大城市	城市	一线商业型大城市，属亚热带季风气候；冬季无集中式供暖；部分存在电供暖；主食以米为主；集中式供水，且部分存在分户式净化设施	298	上海市
	农村	一线商业型大城市农村，属亚热带季风气候；冬季无集中式供暖；主食以米为主；分散式供水和小型集中式供水并存	301	
沿江港口型城市	城市	沿江港口工业型城市，属亚热带季风气候；冬季无集中式供暖，存在少量电供暖；主食以米为主；集中式供水	355	湖北省武汉市
	农村	沿江港口型农村，属亚热带季风气候；冬季无集中供暖；主食以米为主；小型集中式供水和分散式供水并存	265	
盆地工业型城市	城市	盆地腹地工业型城市，属亚热带湿润季风气候；冬季不集中供暖；主食以米为主；集中式供水	335	四川省成都市
	农村	盆地腹地工业型农村，属亚热带湿润季风气候；冬季不集中供暖，存在少量固体燃料供暖；主食以米为主；农村小型集中式供水和分散式供水并存	296	
内陆沙尘型城市	城市	内陆沙尘型西北城市，属温带半干旱气候，大陆性气候十分显著；冬季集中供暖；主食以面为主；集中式供水	347	甘肃省兰州市
	农村	内陆沙尘型西北农村，属温带半干旱气候，大陆性气候十分显著；冬季分散式供暖，多采用固体燃料；主食以面为主；分散式供水（以井水和窖水为主）和小型集中式供水并存	341	

## (二) 环境暴露行为模式调查

包括调查对象的基本情况、身体特征、摄入量 and 时间—活动模式 (表 1-2), 其中身高和体重采用现场实测, 皮肤表面积和呼吸量采用模型估算, 其余各参数采用问卷调查 (附件 1 和附件 2)。

表 1-2 调查内容及方法

类别	调查内容	调查方法	
基本情况	性别、年龄、民族、文化程度、职业等	问卷调查	
环境暴露行为模式	身体特征	身高、体重	现场实测
		皮肤表面积	模型估算
	摄入量	膳食摄入量、饮水摄入量	问卷调查
		呼吸量	模型估算
	时间—活动模式	室内活动时间、室外活动时间、交通出行时间、洗澡时间、游泳时间、土壤接触时间	问卷调查

## (三) 暴露介质监测

在每个调查地区, 以城乡、性别和年龄为分层因素, 随机抽取 10% 调查对象, 对其所暴露的空气 (室内、室外和交通)、饮用水、土壤和膳食中汞、镉、砷、铅和铬的浓度水平, 监测点位布设、采样和检测分析方法见表 1-3。

表 1-3 暴露介质监测内容及方法

暴露介质	布点原则	采样频次	采样方法	检测分析
饮用水	末梢龙头水或分散式供水上层清水	采暖季和非采暖季各 1 次	《生活饮用水标准检验方法 水样的采集与保存》(GB/T 5750.2—2006)	《生活饮用水标准检验方法 金属指标》(GB/T 5750.6—2006)、《水质 汞、砷、硒、铋和锑的测定 原子荧光法》(HJ 694—2014)