

# 重金属污染健康风险评估技术规范

## 编制说明

标准编制组  
二〇二一年三月

# 目 录

|        |                    |    |
|--------|--------------------|----|
| 1      | 工作概况.....          | 1  |
| 1.1    | 任务来源.....          | 1  |
| 1.2    | 工作过程.....          | 1  |
| 2      | 必要性和可行性.....       | 1  |
| 2.1    | 必要性.....           | 1  |
| 2.2    | 可行性.....           | 2  |
| 3      | 国内外健康风险评估研究进展..... | 3  |
| 3.1    | 国内外重点关注的重金属类别..... | 3  |
| 3.2    | 重金属环境健康评估研究进展..... | 4  |
| 4      | 编制原则.....          | 5  |
| 5      | 主要技术内容说明.....      | 6  |
| 5.1    | 层次框架.....          | 6  |
| 5.2    | 技术要点.....          | 6  |
| 5.2.1  | 适用范围.....          | 6  |
| 5.2.2  | 规范性引用文件.....       | 6  |
| 5.2.3  | 术语和定义.....         | 7  |
| 5.2.4  | 评估关键原则及评估程序.....   | 7  |
| 5.2.5  | 评估程序.....          | 8  |
| 5.2.6  | 评估计划制定.....        | 8  |
| 5.2.7  | 暴露评估.....          | 9  |
| 5.2.8  | 危害识别.....          | 10 |
| 5.2.9  | 危害表征.....          | 12 |
| 5.2.10 | 风险表征.....          | 13 |
| 6      | 对实施本标准的建议.....     | 13 |

## 1 工作概况

### 1.1 任务来源

自 2012 年起,生态环境部华南环境科学研究所通过实施环保公益性行业科研专项“电子废弃物溴代阻燃剂和重金属复合污染的人体暴露评价技术研究”,以及生态环境部项目“全国重点地区环境与健康专项调查”、“环境健康风险哨点监测”和“重点地区环境与健康调查、监测和风险评估”等环境健康领域科研项目,建立了一套适用于我国实际的重金属人群健康风险评估技术,指导开展了黑色金属矿采选业(B08)、有色金属矿采选业(B09)、有色金属冶炼和压延加工业(C32)、金属制品业(C33)和废气资源综合利用业(C42)等多个涉重金属污染行业的环境健康风险评估工作,并在实际应用中对该技术方法进行补充和完善。

2020 年,根据《关于开展中国环境科学学会团体标准申报工作的通知》的相关要求,生态环境部华南环境科学研究所牵头起草了本标准并申请立项。根据《中国环境科学学会标准管理办法》的有关规定,经形式审查、专家论证等程序,该标准列入 2020 年中国环境科学学会第二批团体标准立项项目。

### 1.2 工作过程

本标准是“电子废弃物溴代阻燃剂和重金属复合污染的人体暴露评价技术研究”“环境健康风险哨点监测”等多项环境健康工作成果的系统总结:

2012 年~2019 年,在实施“电子废弃物溴代阻燃剂和重金属复合污染的人体暴露评价技术研究”“环境健康风险哨点监测”和“重点地区环境与健康调查、监测和风险评估”等项目过程中,研究建立重金属环境健康风险评估技术;

2020 年 1 月~6 月,生态环境部华南环境科学研究所充分梳理前期研究内容和工作基础,形成《重金属污染健康风险评估技术规范》(草案)。

2020 年 7 月,编制组根据《关于开展中国环境科学学会团体标准申报工作的通知》的相关要求,明确了研究目标、设定了编制原则、确立了实施方案、制订了工作计划和任务分解等,编制完成《重金属污染健康风险评估技术规范》开题报告。

2020 年 9 月 11 日,在北京外国专家大厦二层召开《重金属污染健康风险评估技术规范》团体标准立项论证会,顺利通过专家论证立项。

2020 年 9 月-2021 年 1 月,根据专家意见对标准进行修改完善,形成《重金属污染健康风险评估技术规范》(征求意见稿)。

## 2 必要性和可行性

### 2.1 必要性

随着我国经济快速发展,工业化、城镇化进程中产生的环境污染对我国人群健康威胁问题逐渐凸显。近年来,环境污染重金属污染导致健康损害事件频繁发生。一些重大重金属环境污染事故,如 2008 年云南阳宗海砷污染事件、2012 年广西龙江镉污染事件以及云南会泽、河南济源、湖北武冈、陕西凤翔、广东清远等多地儿童血铅超标事件的发生为我国的环境健

康风险管理敲响了警钟，也对群众健康和社会稳定造成严重威胁，在国内外产生严重影响。

重金属污染具有长期性、累积性、隐蔽性、潜伏性和不可逆性，同时，还存在污染危害大，持续时间长，治理成本高等问题。重金属通过呼吸、皮肤接触摄入、饮食摄入等多种途径进入人体，在人体内能和蛋白质及各种酶发生强烈的相互作用，并在人体内富集，如果超过人体所能耐受的限度，会造成人体急性中毒、亚急性中毒、慢性中毒等，对人体造成很大的危害。

以保护人体健康为目标的环境健康风险受到党和政府的高度重视。《中华人民共和国环境保护法》第 39 条要求“国家建立、健全环境与健康监测、调查和风险评估制度”；《“健康中国 2030”规划纲要》将建设健康环境作为建设健康中国的一个重点；《国家环境保护“十三五”环境与健康工作规划》要求“建立环境与健康基准、标准体系”，“制定、发布环境与健康现场调查、暴露评价、风险评价等管理规范类标准”；《国家环境保护标准“十三五”发展规划》明确提出“推动环境健康风险管理工作，制定环境与健康现场监测、调查、暴露评价、风险评价等系列管理技术规范，科学指导并规范我国环境与健康工作”。环境健康风险评估是从源头预防、对高风险环境污染因素进行主动管理的工作基础，对于提高生态环境管理水平具有重要现实意义。

如何对重金属污染物造成人群健康损害的可能性及其程度做出科学估计，对重金属污染健康风险进行预警管理，是重金属污染的健康风险管理和治理的关键问题。因此，研究建立具有针对性、指导性的重金属污染环境健康风险技术，制定《重金属污染健康风险评估技术规范》具有重要的管理需求和现实意义。

## 2.2 可行性

### （1）《生态环境健康风险评估技术指南 总纲》等为本标准制定奠定基础

目前，《生态环境健康风险评估技术指南总纲》（HJ 1111-2020）作为环境健康风险评估的顶层设计已发布，明确提出“环境健康风险评估技术指南体系由总纲、基础方法类技术指南和应用领域类技术指南组成”，“应用领域类技术指南是针对特定环境管理需要（如区域、流域、行业环境健康风险评估等）而制定的专项技术指南”，《重金属环境健康风险评估技术规范》属于环境健康风险评估应用领域类技术指南。《生态环境健康风险评估技术指南总纲》中有关评估原则、评估程序、评估方法等，为本标准制定提供了重要顶层设计基础。

此外涉及环境与健康调查、环境污染物暴露评估等一系列基础类方法标准，如《建设用地土壤污染风险评估技术导则》（HJ 25.3）、《环境与健康现场调查技术规范 横断面调查》（HJ839）、《环境污染物人群暴露评估技术指南》（HJ875）、《儿童土壤摄入量调查技术规范》（HJ876）、《暴露参数调查技术规范》（HJ877）等也相继发布，对于数据获取及评估、暴露评估模型、暴露参数数据获取等进行了规范，为本标准建立针对重金属污染的环境健康风险评估技术规范奠定了较好基础。

### （2）本标准是多年环境与健康工作成果的系统总结，并在全国范围成功应用

本标准是“全国重点地区环境与健康专项调查”、“环境健康风险哨点监测”和“重点地区环境与健康调查、监测和风险评估”等项目环境健康风险评估成果的系统总结，并在全国范围应用，指导开展了黑色金属矿采选业（B08）、有色金属矿采选业（B09）、有色金属冶炼和压延加工业（C32）、金属制品业（C33）和废气资源综合利用业（C42）多个涉重金属污染行业的环境健康风险评估工作，并在实际应用中对该技术方法进行补充和完善。应用表明，该技术方法具有很好的可行性和实用性。

### 3 国内外健康风险评估研究进展

#### 3.1 国内外重点关注的重金属类别

重金属及其化合物种类繁多，在进行重金属环境健康风险评估时，首先应明确现阶段我国环境管理中应重点关注的重金属污染物，再根据区域环境污染特征以及特定评估目的，选择相应重金属进行评估。

本《规范》对美国国家环保局（USEPA）《金属风险评估框架》中重点关注的 23 种金属及国内《食品安全国家标准 食品中污染物限量》（GB 2762）、《环境空气质量标准》（GB 3095）、《地表水环境质量标准》（GB 3838）、《生活饮用水卫生标准》（GB 5749）、《地下水质量标准》（GB 14848）、《土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准（试行）》（GB 15618）、《土壤环境质量 建设用地土壤污染风险管控标准（试行）》（GB 36600）等标准中所纳入的金属元素及化合物进行了调研，如表 1 所示。

本标准最终确定我国生态环境管理重点关注的重金属共 25 种，分别为：铝、锑、砷、钡、铍、硼、镉、铬、钴、铜、铁、铅、锰、汞、钼、镍、硒、银、锌、钠、钛、钒、铈、锡及甲基汞。在美国国家环保局（USEPA）《金属风险评估框架》中，重点关注金属共 23 种，我国与其相比，减少了锑这一重金属元素，增加了钠、钛 2 种金属元素及甲基汞这一金属化合物。

本《规范》针对上述 25 种重点关注重金属，对其污染环境健康风险评估的一般性原则、内容、程序、方法和技术要求进行规范。

表 1 不同标准中重金属污染物监测指标

| 序号 | CAS 号     | 中文名 | 英文名      | EPA | 地下水 | 地表水 | 建设用地土壤 | 农用地土壤 | 食品安全 | 环境空气 | 生活饮用水 |
|----|-----------|-----|----------|-----|-----|-----|--------|-------|------|------|-------|
| 1  | 7429-90-5 | 铝   | Aluminum | √   | √   |     |        |       |      |      | √     |
| 2  | 7440-36-0 | 锑   | Antimony | √   | √   | √   | √      |       |      |      | √     |
| 3  | 7440-38-2 | 砷   | Arsenic  | √   | √   | √   | √      | √     | √    | √    | √     |
| 4  | 7440-39-3 | 钡   | Barium   | √   | √   | √   |        |       |      |      | √     |

|    |            |     |               |   |   |   |   |   |   |   |   |
|----|------------|-----|---------------|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 5  | 7440-41-7  | 铍   | Beryllium     | √ | √ | √ | √ |   |   |   | √ |
| 6  | 7440-42-8  | 硼   | Boron         | √ | √ | √ |   |   |   |   | √ |
| 7  | 7440-43-9  | 镉   | Cadmium       | √ | √ | √ | √ | √ | √ | √ | √ |
| 8  | 18540-29-9 | 铬   | Chromium      | √ | √ | √ | √ | √ | √ | √ | √ |
| 9  | 7440-48-4  | 钴   | Cobalt        | √ | √ | √ | √ |   |   |   |   |
| 10 | 7440-50-8  | 铜   | Copper        | √ | √ | √ | √ | √ |   |   | √ |
| 11 | 7439-89-6  | 铁   | Iron          | √ | √ | √ |   |   |   |   | √ |
| 12 | 7439-92-1  | 铅   | Lead          | √ | √ | √ | √ | √ | √ | √ | √ |
| 13 | 7439-96-5  | 锰   | Manganese     | √ | √ | √ |   |   |   |   | √ |
| 14 | 7439-97-6  | 汞   | Mercury       | √ | √ | √ | √ | √ | √ | √ | √ |
| 15 | 7439-98-7  | 钼   | Molybdenum    | √ | √ | √ |   |   |   |   | √ |
| 16 | 7440-02-0  | 镍   | Nickel        | √ | √ | √ | √ | √ | √ |   | √ |
| 17 | 7782-49-2  | 硒   | Selenium      | √ | √ | √ |   |   |   |   | √ |
| 18 | 7440-22-4  | 银   | Silver        | √ | √ |   |   |   |   |   | √ |
| 19 | 7440-24-6  | 锶   | Strontium     | √ |   |   |   |   |   |   |   |
| 20 | 7440-28-0  | 铊   | Thallium      | √ | √ | √ |   |   |   |   | √ |
| 21 | 7440-31-5  | 锡   | Tin           | √ |   |   |   |   | √ |   |   |
| 22 | 7440-62-2  | 钒   | Vanadium      | √ |   | √ | √ |   |   |   |   |
| 23 | 7440-66-6  | 锌   | Zinc          | √ | √ | √ |   |   |   |   | √ |
| 24 | 7440-23-5  | 钠   | Sodium        |   | √ |   |   |   |   |   |   |
| 25 | 22967-92-6 | 甲基汞 | Methylmercury |   |   |   | √ |   | √ |   |   |
| 26 | 7440-32-6  | 钛   | Titanium      |   |   | √ |   |   |   |   |   |

### 3.2 重金属环境健康评估研究进展

1983 年美国国家科学院（NAS）提出了健康风险评价的“四步法”，即危害识别、剂量—效应关系评估、暴露评估及风险表征，此方法被许多国家和国际组织采用；20 世纪 80 年代以来，以“四步法”为基础的健康风险评价随着科学技术的进步不断发展与完善，在此期间，美国、欧盟、WHO 等国家或组织不断制定和颁布了有关健康风险评价的一系列技术文件、指南或准则，并开发了用于健康风险评价的数据库、应用程序等工具。针对重金属的健康风险评价，美国环保局（USEPA）于 2007 年发布了《金属风险评估框架》，提出了对 23 种无机金属进行人类健康风险评估时需考虑的影响因素，如金属的自然存在属性、金属形态、毒代动力学及金属混合物存在形式等；国际采矿与金属委员会（ICMM）也于 2007 年发布

了《金属健康风险评估导则》，对重金属环境暴露和职业暴露的健康风险做了说明，并同时发布了金属暴露评价、毒性特征、毒代动力学模型等 8 个“情况说明书”。

美国毒物与疾病登记署（ATSDR）提出了靶器官毒性剂量（target organ toxicity dose, TTD）和二元证据权重模型（binary weight of evidence, BINWOE），发布了《交互作用文件：砷、镉、铬和铅》。TTD 模型将重金属能够产生效应的靶器官考虑在内进行非致癌健康风险评估，但是该模型默认重金属在靶器官中的相互作用为剂量相加作用。BINWOE 模型在 TTD 模型的基础上，将重金属在靶器官内的相互作用考虑在内，进一步修正非致癌健康风险值。TTD 和 BINWOE 模型可对相同环境介质中多种重金属联合毒性作用产生的非致癌健康风险做出更为精确的评价。

我国目前尚无重金属相关的技术规范，但相关学者已开展了较多 Cd、Pb 等重金属的健康风险评估案例研究，主要涉及不同环境介质及经口、呼吸等不同暴露途径的健康风险评估以及冶炼厂、电子拆解场地周边等污染场地和流域的重金属污染健康风险评估，这些研究多借用国外模型，采用危害商法和致癌斜率因子法来表征重金属的健康风险水平。此外，曹红斌、于云江等研究团队根据美国毒物与疾病登记署（ATSDR）的“化学混物联合毒性作用评估导则”及 As、Cd、Cr、Pb、Mn、Zn、Cu 等若干种重金属混合物的相互毒性作用文件，采用基于靶器官毒性剂量的危害指数法（TTD）及证据权重分析法（WOE），充分考虑了多种污染物之间的相互作用，进行了重金属累积健康风险评价。

## 4 编制原则

重金属环境健康风险评估技术规范制订将遵循以下原则：

### （1）科学性原则

标准制定应充分调研总结国内外环境健康风险评估、重金属环境健康风险评估的理论、方法和实践经验，比较不同机构在重金属污染健康风险评估技术规范的异同点，分析其优缺点，充分考虑其理论和方法的科学性，提出本标准的关键技术。

### （2）可行性原则

标准的制定符合我国相关环境保护政策法规、技术导则及标准，并与现行相关标准相结合，互相支持；应根据我国重金属环境污染与健康损害的特征，针对我国环境管理应重点关注的重金属，建立适合我国国情的重金属环境污染健康风险评估技术方法，保证重金属环境污染与健康风险评估技术方法具有科学性、合理性。

### （3）实用性原则

标准的制定应以满足环境健康管理的需求为目标，在构建环境健康风险评估原则、程序和框架的基础上，针对环境管理具体业务需求提出切实可行的技术要求。

### （4）阶段性原则

任何标准都不是一成不变的，应随着重金属环境健康风险评估技术的进步不断完善，定期对标准进行修订。

## 5 主要技术内容说明

### 5.1 层次框架

技术规范由 10 部分组成，包括：

- (1) 适用范围
- (2) 规范性引用文件
- (3) 术语和定义
- (4) 评估关键原则及评估程序
- (5) 评估计划制定
- (6) 暴露评估
- (7) 危害识别
- (8) 危害表征
- (9) 风险表征
- (10) 报告编制要求

### 5.2 技术要点

#### 5.2.1 适用范围

本标准规定了环境中重金属环境健康风险评估的原则、程序、内容、技术要求、质量控制和质量保证措施及调查报告的编制要求。

本标准重点关注的金属元素及化合物共 25 种，分别为铝、镉、砷、钡、铍、硼、镉、铬、钴、铜、铁、铅、锰、汞、钼、镍、硒、银、锌、钠、钛、钒、铊、锡及甲基汞。

#### 5.2.2 规范性引用文件

本标准主要引用了以下 13 个规范性文件，具体引用内容如下：

| 编号 | 文件号      | 规范性引用文件                   | 引用内容                                      |
|----|----------|---------------------------|---|
| 1  | GB 2762  | 食品安全国家标准 食品中污染物限量         | 确定重点关注的金属元素及化合物                           |
| 2  | GB 3095  | 环境空气质量标准                  | 确定重点关注的金属元素及化合物                           |
| 3  | GB 3838  | 地表水环境质量标准                 | 确定重点关注的金属元素及化合物                           |
| 4  | GB 5749  | 生活饮用水卫生标准                 | 确定重点关注的金属元素及化合物                           |
| 5  | GB 14848 | 地下水质量标准                   | 确定重点关注的金属元素及化合物                           |
| 6  | GB 15618 | 土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准（试行）  | 确定重点关注的金属元素及化合物                           |
| 7  | GB 36600 | 土壤环境质量 建设用地土壤污染风险管控标准（试行） | 确定重点关注的金属元素及化合物                           |
| 8  | HJ 1111  | 生态环境健康风险评估技术指南 总纲         | 工作内容与程序框架                                 |
| 9  | HJ 839   | 环境与健康现场调查技术规范 横断面调查       | 数据收集与调查部分，环境空气、室内空气、室内积尘、土壤、食品、饮用水等监测相关要求 |
| 10 | HJ 875   | 环境污染物人群暴露评估技术指南           | 暴露评估                                      |
| 11 | HJ 876   | 儿童土壤摄入量调查技术规范             | 暴露参数数据调查                                  |
| 12 | HJ 877   | 暴露参数调查技术规范                | 暴露参数数据调查                                  |



|    |         |                      |          |
|----|---------|----------------------|----------|
| 13 | HJ 25.3 | 建设用地土壤污染风险评估技术<br>导则 | 土壤暴露评估部分 |
|----|---------|----------------------|----------|

### 5.2.3 术语和定义

标准主要对以下术语进行了定义，其定义的依据主要来自于国家相应标准以及高等教育出版社或人民卫生出版社等出版发行的经典教科书。

#### (1) 暴露介质

借鉴《环境与健康现场调查技术规范 横断面调查》关于“环境暴露调查”的描述：“采集境空气、环境水体、土壤、室内空气、室内积尘、饮用水及农畜水产品”。

本标准将“暴露介质”定义为：指人体接触或摄入环境污染物的介质，包括环境空气、环境水体、土壤、室内空气、室内积尘、饮用水及农畜水产品。

#### (2) 生物可给性

借鉴《土壤学大辞典》中“生物可利用性（bioaccessibility）”定义：“亦称生物可给性，指物质进入生物体并被利用的难易程度。”

本标准将“生物可给性”定义为：亦称生物可利用性，指物质进入生物体并被利用的难易程度。对于重金属而言，生物可给性是指暴露介质中重金属与人体暴露界面（如口、鼻、皮肤等）相互作用并可能被吸收的量。生物可给性最大生物有效性的指示。

#### (3) 生物有效性

借鉴《土壤学大辞典》中“生物有效性（bioavailability）”定义：“从土壤环境学的角度，是指在给定时间内，特定化学物质的总量中可以自由通过生物细胞膜的那部分。”

本标准将“生物有效性”定义为：是指人体接触和摄入重金属后，暴露介质中的重金属能被机体吸收并最终进入体内循环的比例。

### 5.2.4 评估关键原则及评估程序

对于重金属环境健康风险评估，除要遵循区域环境污染健康风险评估的综合性、可行性以及服务管理等原则外，还需结合重金属本身特点，制定有针对性的评估原则。本标准借鉴美国《金属健康风险评估导则》，结合我国现阶段重金属污染环境健康风险管理的需求，提出了重金属环境健康风险评估应考虑的关键原则，主要包括 3 个方面：

#### (1) 评估时应明确环境管理中应重点关注的重金属污染物

本标准重点关注的重金属为 GB 3838-2002、GB 14848-2017、GB 3095-2012、GB 36600-2018、GB 15618-2018、GB5749-2006 以及 GB 2762-2017 等水环境、大气环境、土壤、饮用水及食品标准中纳入的金属元素及化合物共 25 种（见表 1）。

#### (2) 评估时应区分背景水平和特定人类活动的贡献

重金属也是环境中自然存在的成分，人类、动植物等生物体已经在金属元素存在的自然环境中进化并适应了各种金属水平。在开展重金属环境健康风险评估时，应根据不同评估目的，注意区分重金属背景水平以及特定人类活动贡献。

#### (3) 评估时应区分形态、价态差异

重金属的形态和价态会严重影响其生物可给性、生物有效性和毒性效应，因此在开展重金属环境健康风险评估时，应识别不同暴露介质中重金属的形态和价态差异，考虑其对重金属生物有效性和毒性效应的影响。

### 5.2.5 评估程序

本标准主要参考《生态环境健康风险评估技术指南 总纲》（HJ 1111），确定重金属环境健康风险评估的程序。

重金属环境健康风险评估程序包括评估方案制定、暴露评估、危害识别、危害表征和风险表征。其中，危害识别和危害表征共同构成危害评估。

评估计划制定：主要包括明确评估目的、评估范围，确定评估类型及数据获取方法、重金属暴露情景，并进一步明确具体的评估内容和要求，进而确定最终评估方案。

暴露评估：重金属暴露评估与 HJ 1111 要求一致，包括确定暴露情景、建立暴露模型和暴露量估算。但美国《金属健康风险评估导则》，重金属暴露评估需对其背景水平、生物有效性、易感人群、不同暴露途径的差异性、暴露标志物等方面进行定性描述或分析。

危害识别：危害识别一般步骤包括：数据收集、数据质量评价、证据综合、证据集成，具体技术要求可参照 HJ 1111 执行。但重金属重点需识别不同价态、形态重金属的危害特征，在数据资料或证据充分的情况下，风险评估者可以考虑不同重金属之间的相互作用，以增加评估的精确性和科学性。

危害表征：重金属危害表征主要是确定其致癌效应和非致癌效应的毒性参数，本标准推荐采用国内外现有数据库获取。

风险表征：风险表征的工作内容包括暴露评估和危害评估信息汇总、健康风险值估算、敏感性和不确定性分析、风险可接受水平与评估结论

### 5.2.6 评估计划制定

借鉴《生态环境健康风险评估技术指南 总纲》（HJ 1111）中关于评估方案制定的相关要求，同时借鉴美国《金属健康风险评估导则》的相关内容，本标准提出评估计划制定的具体工作内容及要求，主要包括：

（1）明确评估目的：基于不同评估目的可将重金属环境健康风险评估分为两大类：国家/区域/流域评估、特定地点评估

（2）明确评估范围：包括目标因素（重点关注的重金属污染物），空间范围（特定地点、地区或国家等），时间范围（长期、短期等），目标人群（一般人群、敏感人群、高暴露人群等），具体要求参考 HJ 1111 执行。

（3）确定评估类型及数据获取方法：应充分利用现有数据资料，必要时开展实验研究和现场调查。对于重金属的环境健康风险评估，应根据评估目的和范围确定不同的数据获取方法，如对于特定地点的评估，由于仅涉及单个地理区域，可以纳入本土化的重金属背景浓

度、形态/价态以及人群暴露参数等方面数据；对于国家/地区级评估，可采用一般的保守性假设数据。

（4）确定重金属暴露情景：识别重点关注重金属污染物的来源，识别暴露路径和暴露途径，以及最终暴露介质（环境空气、环境水体、土壤、室内空气、室内积尘、饮用水及农畜水产品）。

（5）明确评估内容和要求：明确重金属污染环境健康风险评估中危害识别、危害表征、暴露评估和风险表征各过程的评估内容、方法、技术路线、质量控制和质量保证措施，并充分考虑重金属环境健康风险评估的关键原则，制定重金属环境健康风险评估方案。

（6）确定最终评估方案：经充分征求风险管理者和利益相关方的意见，必要时可组织专家咨询论证，确定最终评估方案。

### 5.2.7 暴露评估

《生态环境健康风险评估技术指南 总纲》（HJ 1111）规定了暴露评估的一般步骤，包括确定暴露情景、建立暴露模型和暴露量估算。除 HJ 875、HJ 1111 一般要求外，重金属暴露评估还应重点考虑以下几个方面问题，并进行定性描述或分析。

#### （1）背景水平

风险评估人员应区分重点关注重金属在不同尺度的自然发生水平、现有背景水平及特点人类活动贡献水平，并重点对人类活动贡献的

#### （2）生物有效性

暴露评估时应充分考虑重金属的生物有效性，收集重点关注重金属的生物可给性或生物有效性信息及数据，并将

#### （3）易感人群

风险评估人员应重点关注重金属暴露易感人群。影响重金属暴露的易感性因素包括生命成长阶段、生活方式、怀孕及哺乳期、并发损害或疾病以及营养状况等，风险评估者在暴露评估及不确定性分析过程中应识别上述因素对风险评估的影响，并进行定性描述。

①生命成长阶段：儿童对重金属暴露的敏感性比成年人高，老人对肾脏靶向的重金属（如镉）更敏感；

②生活方式：生活方式差异会影响重金属暴露，风险评估者应明确关注人群的生活方式，如吸烟会导致某些金属（如镉）的大量暴露，并可能增强其它来源的暴露影响；过量饮酒会加剧重金属暴露影响；某些膳食习惯或民间疗法会导致某些重金属（如铅、砷等）的高暴露。

③怀孕及哺乳期：怀孕和哺乳期增加了对铜、铁和锌等人体必需元素的需求，但怀孕和哺乳期更易受镉、铅、锰、铍等重金属毒性作用。

④并发损害或疾病：有过敏反应的人群或已有疾病的人对重金属暴露的敏感性高于普通人群。

⑤营养状况：不同营养状况会影响重金属吸收，从而改变重金属有效暴露剂量。

#### （4）迁移与归趋

风险评估人员应对重点关注重金属从排放源进入传输介质最终到达暴露受体的环境释放、迁移和归趋行为进行分析。

#### （5）不同暴露途径的差异性

重金属经不同暴露途径进入人体，其生物可给性、生物有效性及靶器官效应存在较大差异，风险评估者应对此方面因素进行识别和分析。如呼吸暴露途径应考虑颗粒物粒径对暴露的影响，膳食暴露应考虑食物消费习惯带来的不确定性，手-口接触暴露应区分室外土壤和室内积尘的差异性等。

#### （6）暴露标志物

在可获得情况下，风险评估者可以考虑纳入重金属暴露标志物，并与其参考水平或基准水平（如最大耐受量等）进行比较评估，以增加暴露评估的全面性。

### 5.2.8 危害识别

#### （1）重金属健康危害特征

参考《生态环境健康风险评估技术指南 总纲》（HJ 1111），危害识别主要针对每一种可能的健康危害或毒性效应，分别判断人体证据和动物证据的证明，集成人体证据、动物证据和作用机制证据等不同证据链的信息，对目标环境因素与每一种可能的健康危害或毒性效应间的因果关联做出总体判断。

通过国内外政府机构或国际组织发布关于重金属的相关毒性参数报告，对这些毒性参数对应的毒作用、靶器官、作用模式等信息总结，见表 2。

表 2 重点关注重金属的人群健康效应特征

| 序号 | 中文名称 | 英文名称           | CAS 编号     | 癌症等级              |                   | 关键效应                             |      |
|----|------|----------------|------------|-------------------|-------------------|----------------------------------|------|
|    |      |                |            | IARC <sup>1</sup> | IRIS <sup>2</sup> | 靶器官及关键效应                         | 资料来源 |
| 1. | 砷    | Arsenic        | 7440-38-2  | 1                 | A                 | 肾癌、肺癌、膀胱癌、皮肤癌、肝癌                 | IRIS |
| 2. | 镉    | Cadmium        | 7440-43-9  | 1                 | B1                | 肺肿瘤，前列腺癌、肾癌、膀胱癌、乳腺癌、子宫癌          | IRIS |
| 3. | 铅    | Lead           | 7439-92-1  | 2B                | B2                | 肾肿瘤、神经胶质瘤                        | IRIS |
| 4. | 三价铬  | Chromium (III) | 16065-83-1 | 3                 | D                 | 生长迟缓、腭裂、骨骼畸形                     | IRIS |
| 5. | 六价铬  | Chromium (VI)  | 18540-29-9 | 1                 | A                 | 肺癌、胃癌                            | IRIS |
| 6. | 汞    | Mercury        | 7439-97-6  | 3                 | D                 | 神经系统：手颤、增加记忆障碍、轻微的主观和客观的证据自主功能障碍 | IRIS |
| 7. | 甲基汞  | Methylmercury  | 22967-92-6 | 2B                | C                 | 神经系统：神经心理学发育障碍                   | IRIS |

|     |   |            |           |    |    |                                      |                    |
|-----|---|------------|-----------|----|----|--------------------------------------|--------------------|
| 8.  | 铝 | Aluminum   | 7429-90-5 | -  | -  | 发育：器官发育时的影响，神经系统                     | ATSDR <sup>3</sup> |
| 9.  | 锑 | Antimony   | 7440-36-0 | -  | -  | 肝组织病理学变化                             | ATSDR              |
| 10. | 钡 | Barium     | 7440-39-3 | -  | -  | 心血管、胃肠道：消化、生殖                        | ATSDR              |
| 11. | 铍 | Beryllium  | 7440-41-7 | 1  | B1 | 小肠病变                                 | IRIS               |
| 12. | 硼 | Boron      | 7440-42-8 | -  | -  | 心血管、发育：在器官发育期间的影响                    | ATSDR              |
| 13. | 钴 | Cobalt     | 7440-48-4 | 2B | -  | 心血管、发育：器官发育期间的影响、血液学：血液形成、呼吸系统：从鼻子到肺 | ATSDR              |
| 14. | 铜 | Copper     | 7440-50-8 | -  | D  | 消化系统：恶心、腹泻                           | IRIS               |
| 15. | 铁 | Iron       | 7439-89-6 | -  | -  | -                                    |                    |
| 16. | 锰 | Manganese  | 7439-96-5 | -  | D  | 神经系统：神经行为功能障碍                        | IRIS               |
| 17. | 钼 | Molybdenum | 7439-98-7 | -  | -  | -                                    |                    |
| 18. | 镍 | Nickel     | 7440-02-0 | 2B | -  | 呼吸：从鼻子到肺、减轻身体和器官的重量                  | ATSDR              |
| 19. | 硒 | Selenium   | 7782-49-2 | 3  | D  | 神经、血液、皮肤：临床硒中毒                       | IRIS               |
| 20. | 银 | Silver     | 7440-22-4 | -  | D  | 皮肤：银质沉着病                             | IRIS               |
| 21. | 钠 | Sodium     | 7440-23-5 | -  | -  | -                                    |                    |
| 22. | 铊 | Thallium   | 7440-28-0 | -  | -  | 心血管、肝脏、神经系统、肾脏：泌尿系统或肾脏、呼吸系统、皮肤：导致脱发  | ATSDR              |
| 23. | 锡 | Tin        | 7440-31-5 | -  | -  | 血液形成、免疫系统                            | ATSDR              |
| 24. | 钒 | Vanadium   | 7440-62-2 | -  | -  | 心血管、胃肠道：消化、泌尿系统、肾脏、生殖、呼吸系统：从鼻子到肺     | ATSDR              |
| 25. | 锌 | Zinc       | 7440-66-6 | -  | D  | 成人红细胞库、锌超氧化物脱氢酶（ESOD）活性的减少、消化        | IRIS               |
| 26. | 钛 | Titanium   | 7440-32-6 | -  | -  | -                                    |                    |

注：IARC<sup>1</sup>：International Agency for Research on Cancer 国际癌症研究中心；IRIS<sup>2</sup>：Integrated Risk Information System 综合风险评估系统；ATSDR<sup>3</sup>：Agency for Toxic Substances and Disease Registry 美国毒物与疾病登记署。

## （2）重金属危害识别应重点考虑问题

危害识别是环境健康风险评估的第一步，也是至关重要的一步。在危害识别方面，主要借鉴国内外政府机构或国际组织发布的相关毒性数据库资料，如国际癌症研究中心（International Agency for Research on Cancer）、美国综合风险评估系统（Integrated Risk Information System）、美国毒物与疾病登记署（Agency for Toxic Substances and Disease

Registry) 等发布的数据或资料。目前,《生态环境健康风险评估技术指南 总纲》(HJ 1111) 规定危害识别一般步骤包括:数据收集、数据质量评价、证据综合、证据集成。但对于重金属来说,还存在如某些重金属是人体必需元素,不同重金属间存在相互作用,不同形态/价态重金属健康危害存在较大差异的问题。

### ①人体必需元素

目前被认为对人体营养至关重要的金属元素是钴,铬(III 价),铜(0、I、II 价),铁(II、III 价),镁(II 价),锰(II、IV 价),钼(IV, VI 价),硒(II、IV、VI 价)和锌(II 价)等。对这些人体必需元素,美国《金属健康风险评估导则》风险评估人员在危害识别和构建剂量-反应关系时,应将人体必需元素剂量作为总体剂量反应关系的一部分进行评估,但对于这一问题,目前还多局限于科学研究阶段,未形成规范性的技术要求。因此,本技术规范中未对人体必需元素的危害表征提出要求。

### ②复合污染相互作用

重金属往往以复合污染的形式存在,混合物中重金属的相互作用包括协同、加和、拮抗或独立。因此,在数据资料或证据充分的情况下,风险评估者可以考虑不同重金属之间的相互作用,以增加评估的精确性和科学性。本标准推荐美国毒物与疾病登记署的靶器官毒性剂量的危害指数法及证据权重分析法。

### ③金属形态

重金属的不同价态、形态,其危害特征存在很大差异,风险评估者应考虑对哪种形式的目标重金属进行评估,并识别其健康危害差异。

## 5.2.9 危害表征

剂量一效应关系评估是健康风险评价的重要部分,目的是为求得污染物的剂量(浓度)与主要的特定健康效应的定量关系,确定暴露水平与健康效应发生概率之间的关系。剂量一效应关系的评估包括有阈化合物剂量一效应评估和无阈化合物剂量一效应评估。剂量一效应关系评估主要通过动物毒性实验和流行病学调查,研究污染物的毒性作用机制,确定对有阈、无阈化合物的参考剂量/参考浓度和致癌斜率因子。

目前在对剂量一效应关系不断深入研究的基础上,一些国家和部门构建了针对环境中各种化学物质的毒理数据库。例如美国环保局的综合风险信息系统(Integrated Risk Information System, IRIS),该系统包含了近 600 种化学物质的致癌效应与非致癌效应毒理数据,并不断更新。

此外,美国能源部的风险评价信息系统(Risk Assessment Information System, RAIS),包含了 1100 多种化学物质的毒性以及物理化学性质数据和资料。

美国加州环保局环境健康危害评估办公室(Office of Environmental Health Hazard Assessment, OEHHA)构建了毒性标准数据库,包含了 400 多种化学物质的毒性资料,并不断更新完善。这些化学物质毒理数据库均包含了各种化学物质的剂量一效应关系数据(参

考剂量和致癌强度系数），这些数据库的构建，极大地方便了健康风险评价和管理工作，已成为世界各国相关部门获取化学物质毒性资料的重要来源。

本标准对 25 种重点关注的金属元素及化合物的毒性参数进行了检索，并作为资料性附件进行推荐，评估人员可根据需求进行检索获取相关数据；对于没有毒性参数的重金属，可根据文献资料推导其毒性参数，具体技术方法见 HJ 1111 和《区域环境污染健康风险评估技术导则》相关要求。

### 5.3.10 风险表征

#### （1）风险计算

风险表征的工作内容包括暴露评估和危害评估信息汇总、健康风险值估算、敏感性和不确定性分析、风险可接受水平与评估结论。

在《生态环境健康风险评估技术指南 总纲》（HJ 1111）相关要求基础上，本标准在风险表征公式中引入生物有效性这一参数，具体公式见标准 9.2 部分。

#### （2）不确定性分析

不确定性分析参照 HJ 1111 中规定的方法执行。

#### （3）风险可接受水平与评估结论

涉及计算表征单一污染物的致癌和非致癌风险、单一污染物多途径的致癌和非致癌风险、复合污染物多途径的风险。美国环保局将单一污染物或暴露途径的可接受致癌风险水平设定为  $10^{-6}$ 。美国密苏里州、新墨西哥等州环保局在制订基于风险评估的土壤筛选值时，均采用致癌风险  $10^{-5}$  作为可接受风险水平；荷兰住房空间规划和环境部在制定基于健康风险评估标准时，以  $10^{-4}$  作为可接受致癌风险；瑞典环保局和英国皇家协会推荐的最大可接受水平均为  $10^{-6}$ 。

此外，我国《建设用地土壤污染风险评估技术导则》（HJ 25.3）规定，对于单一污染物致癌风险，采用  $10^{-6}$  作为可接受风险水平；对于非致癌风险，采用 1 作为可接受风险水平。

《生态环境健康风险评估技术指南 总纲》（HJ 1111）未对可接受风险水平进行规定。

综上，结合我国经济社会发展及技术水平，主要借鉴我国《建设用地土壤污染风险评估技术导则》（HJ 25.3）规定，采用  $10^{-6}$  作为单一污染物所有暴露途径的可接受致癌风险。对于单一非致癌化合物，本导则采用 1 作为可接受风险水平。

## 6 对实施本标准的建议

本技术规范为现阶段指导性技术规范。建议标准发布实施后，根据标准实施情况适时对本标准进行修订，同步加强相关科学研究。