

# 基于健康风险的危险废物智能化分级分类研究

蒋文博<sup>1</sup>, 黄玉洁<sup>2</sup>, 刘正<sup>2</sup>, 方文<sup>2</sup>, 郑洋<sup>1</sup>, 周强<sup>1\*</sup>

(1. 生态环境部固体废物与化学品管理技术中心, 北京 100029; 2. 污染控制与资源化研究国家重点实验室, 南京大学环境学院, 江苏 南京 210023)

**摘要:**在分析国内外危险废物分级管理经验的基础上, 结合健康风险的评估步骤, 提出了基于全过程危险废物污染物释放情景的精细化-动态健康风险评估方法。充分考虑处理利用工艺、企业管理水平等因素对于危险废物中污染物释放率和能力的影响, 并基于污染物向环境介质的迁移转化, 定量评估危险废物的健康风险。基于危险废物污染特性数据库和事故情景数据库, 结合全过程信息采集技术, 构建危险废物分级分类管理平台, 进行涉废企业的风险级别划分, 实施差异化, 形成更加科学有效的危险废物全过程精细化管理体系。

**关键词:**危险废物; 污染物释放情景; 健康风险评估

中图分类号: X327

文献标志码: C

文章编号: 1674-6732(2021)05-0014-05

## Intelligent Classification System of Hazardous Waste Based on Health Risk Assessment

JIANG Wen-bo<sup>1</sup>, HUANG Yu-jie<sup>2</sup>, LIU Zheng<sup>2</sup>, FANG Wen<sup>2</sup>, ZHENG Yang<sup>1</sup>, ZHOU Qiang<sup>1\*</sup>

(1. Solid Waste and Chemicals Management Center, Ministry of Ecology and Environment, Beijing 100029, China; 2. State Key Laboratory of Pollution Control and Resource Reuse Research, School of the Environment, Nanjing University, Nanjing, Jiangsu 210023, China)

**Abstract:** Based on the domestic and foreign experience in the hazardous waste classification management and the traditional health risk assessment steps, this paper proposed a refined-dynamic health risk assessment method to classify the hazardous waste which is aligned with the traditional health risk assessment steps. But in this method, we first considered the calculation of pollutant release from hazardous waste and the influence of enterprise management level and utilization/disposal processes on the pollutant release probability and amount. Then, the health risk was quantitatively assessed based on the migration and transformation of pollutants in the environmental media and the exposure-response relationship. According to the pollution characteristics database and accident scenario database of hazardous waste, combined with the information collection technology of the whole process, the classification and classification management platform of hazardous waste is built to classify the risk levels of waste-related enterprises, implement differentiated management, and form a more scientific and effective refined management system of the whole process of hazardous waste.

**Key words:** Hazardous waste; Pollutant release scenario; Health risk assessment

## 0 前言

随着我国工业化和城市化进程的加快, 危险废物的产生量呈现快速增长的态势。危险废物具有毒性、腐蚀性、易燃性、反应性、感染性等多种危险特性, 不合理的贮存、运输、利用、处置将产生显著的环境风险和危害<sup>[1]</sup>。危险废物的种类繁

多、涉及多个行业, 特性复杂、利用处置方式各异, 而数量、类别、性质和处置方式等因素的不同决定了其风险级别的差异性<sup>[2]</sup>。对于危害程度和风险等级不同的危险废物、涉废企业或区域采用同等程度的管理策略可能导致对低风险废物的过度保护和高风险废物的防范不足, 无法明确危险废物管

收稿日期: 2021-05-31; 修订日期: 2021-07-01

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2018YFC1902804)

作者简介: 蒋文博(1985—), 男, 高级工程师, 硕士, 主要从事危险废物环境管理工作。

\* 通讯作者: 周强 E-mail: zhouqiang@meescc.cn

理的重点<sup>[3]</sup>,增加了管理成本和难度。

分级分类管理是新修订的《中华人民共和国固体废物污染环境防治法》(以下简称《固废法》)提出的危险废物的管理目标之一。《固废法》第七十五条第二款规定,“国务院生态环境主管部门根据危险废物的危害特性和产生数量,科学评估其环境风险,实施分级分类管理”。这是我国首次在法律层面上明确提出对危险废物污染防治建立分级分类管理制度<sup>[4]</sup>。在动态修订《国家危险废物名录》基础上,建立危险废物分级分类管理制度,明确分级分类标准和管理要求,针对不同危害级别的危险废物以及涉废企业实施差别化的风险管理对策,是提高危险废物精细化管理水平的重要基础<sup>[5]</sup>。

分级分类的概念贯穿于危险废物产生到最终处置的全生命周期之中,风险评估是分级分类方法制定的重要基础。其中,健康风险评价是指估算人群暴露于造成环境污染的化学物质中而产生不利健康影响的过程,采用健康风险评价可将危险废物对人体健康的危害程度进行定性和定量分析,综合判定不同危险废物的暴露程度和危险等级,完善废物的风险分级,基于此对危险废物及涉废企业实施差别化管理,能够避免出现低风险性废物保护过度 and 高风险性废物防范不足的问题,同时也能为优先管理名录的制定提供依据。

## 1 国内外危险废物分级管理的经验

美国分别从危险废物特征、产生者和利用处置设施3个方面对危险废物进行分级分类管理,特征分类又包括类别分类、风险等级分类和形态分类等。类别分类是根据废物的产生来源和风险度将其分为特性废物、普遍性废物、混合废物和名录废物4类。风险等级分类包括可燃性(I)、腐蚀性(C)、反应性(R)、毒性特性(E)、急性危险性(H)和有毒性(T)6个等级,相应执行不同的管理要求。形态分类对每一类废物必要的物质含量、性状、构成等理化特性进行描述。产生者分类是根据危险废物的月产量及危害程度,将产废企业分成3类,对不同类别实施不同的管理政策<sup>[6]</sup>。

欧盟的危险废物分级管理利用风险评价的方法,对具有毒性、“三致”性等特性的危险废物分别从含量大小和毒性危害程度2个方面对其环境风险进行了评估,确定了风险分级的含量标准和分级

标准<sup>[7]</sup>,并且对各个等级采取不同程度的管理措施。日本的危险废物分为特别管理一般废物与特别管理工业废物。俄罗斯的《危险废物的分类标准》依据危险废物对自然环境具有直接或间接影响时产生的直接或潜在危害程度,对危险废物的危害级别进行划分<sup>[8]</sup>。

目前,我国对危险废物的定义来源于《固废法》,是指列入国家危险废物名录或者根据国家规定的危险废物鉴别标准和鉴别方法认定的具有危险特性的固体废物。《国家危险废物名录》自2016版发布后首次提出《危险废物豁免管理清单》,引入分级分类管理的理念,2021年新修订版进一步丰富了该清单;2021年1月,生态环境部《关于公开征求〈关于加强危险废物鉴别工作的通知(征求意见稿)〉意见的通知》(环办便函[2021]17号),规定了危险废物鉴别程序、鉴别机构管理规定等内容,进一步规范危险废物鉴别管理工作。但由于我国危险废物种类多,涉及行业多,部分危险废物分级分类的方式方法及其管理要求尚不明确,区分重点管控、一般管控单位的界限难以掌控,实际管理上存在困难<sup>[9]</sup>。除此之外,《国家危险废物名录》根据行业来源和生产工艺进行危险废物的分类,对废物不分危害程度大小和产生量多少,在申报、贮存、转移、利用、处置等全流程均进行同等的管理要求<sup>[10]</sup>。

## 2 健康风险评价在危险废物分级分类管理的应用

世界卫生组织估计,非洲疾病负担的1/3可归因于环境危险因素,危险废物已被列入前3个主要此类因素中<sup>[11]</sup>。2019年3月6日,成吨的危险废物被非法倾倒在马来西亚巴西古当的金金河中,导致附近的975名学生由于化学中毒而出现了呼吸道疾病的体征和症状,经过鉴定,有毒物质包含苯、丙烯醛、丙烯腈、氯化氢、甲烷、甲苯、二甲苯、乙苯和d-柠檬烯<sup>[12]</sup>。Fazzo等<sup>[13]</sup>选择了57篇关于生活在危险废物场所附近人口健康状况的流行病学调查论文作为证据,评估了95种健康结果(疾病和紊乱)与居民在危险废物场所的暴露之间的关联,研究表明暴露于释放高浓度硫化氢的石油工业废料与急性症状之间存在显著关联,并总结与危险废物有因果关系的疾病包括肝癌、膀胱癌、乳腺癌和睾丸癌,非霍奇金淋巴瘤、哮喘和先天性畸形,神经系统、泌尿生殖系统、结缔组织和肌肉骨骼系统

异常,低出生体重和早产。因此,危险废物对人体健康存在严重的危害。

已有部分学者在进行危险废物分级分类的研究中,考虑了危险废物的健康风险。谢琼芳等<sup>[14]</sup>基于风险系统特征,将评价指标分为风险源、控制机制、风险受体 3 种类别,对企业危险废物的风险水平进行综合评价,确定危险废物的风险等级,并据此提出不同企业风险管控的关键节点。Cheng 等<sup>[15]</sup>从健康危害、环境危害、物理危害以及舒适度和其他危害(包括空间需求、气味、灰尘、害虫、视觉冲击、放射性等)4 个方面对危险废物的危害属性进行评分,以根据废物的危险性对废物进行排名。但这些方法只是对危险废物的危害指数进行了分级,忽略了危险废物的暴露途径对受体产生的风险。也有学者<sup>[7, 16]</sup>通过美国国家研究委员会(NRC)于 1983 年制定的风险评价程序对潜在危险进行量化研究,估计危险废物进入环境之后造成危害的可能性及程度。

总体来说,目前的研究大多是针对危险废物的产量、所含特征组分的种类和毒性对危险废物及企业进行分级分类,相关研究对于危险废物中污染物的暴露评价不完善,进而无法开展健康风险的定量评估。暴露评价是健康风险分析的核心部分,主要包括分析暴露途径、鉴别潜在暴露人群、确定暴露时间与频度等。由于危险废物的种类复杂、处理链条长,且不同利用处置路径的差异显著,进而导致风险情景和暴露途径的多样化。同时,企业的风险控制水平等因素也可能对暴露概率造成影响。因此,针对危险废物健康风险的复杂性和不确定性,现提出精细化-动态的危险废物分级分类方法。

### 3 基于健康风险评价的精细化-动态危险废物分级分类步骤

为完善基于健康风险评估的危险废物分级分类,在经典的危害鉴别、暴露评价、剂量-效应关系评价、风险表征的基本框架下,针对暴露评价环节,提出了充分考虑全过程污染物释放情景的精细化-动态健康风险评价和分级分类方法,流程见图 1。明确了危险废物的分级标准,全面考虑了不同危险废物全过程的不同环节、不同技术路径下,危险废物的产量、特性、暴露途径的差异性,进而实现了不同企业、不同环节、不同危险废物的动态精准分级,为识别优先防控的高风险物质和节点提供了

参考依据。

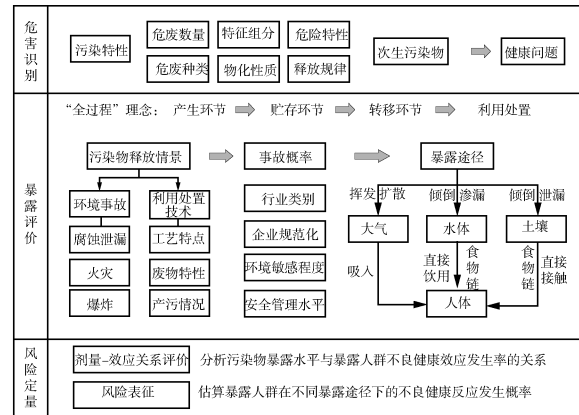


图 1 基于健康风险的危险废物分级分类流程

#### 3.1 危害识别

调研危险废物产量和组分特性相关数据,包括来源、形态、物化性质、特征组分的种类和毒性组分的含量、分布、释放、迁移和累积规律等,分析危险废物的污染特性以及污染物燃烧、爆炸或处置利用过程与其他物质发生化学反应生成的次生污染物。根据危险废物的污染特性识别健康风险危害,确认人体暴露于环境中的危险废物而导致发病率增高或其他不利健康影响,如死亡、癌症、生育缺陷、急性或慢性危害效应。

#### 3.2 暴露评价

##### 3.2.1 污染物释放情景

危险废物作为一种污染源,其中含有的污染物在发生环境事故或者利用处置的过程中,可能向大气、水、土壤等环境介质迁移转化,进而污染环境介质,并造成健康风险。因此,在进行暴露评价的过程中,必须明晰全过程不同环节中危险废物中污染物释放的情景和能力。污染物释放情景主要包括环境事故、利用处置过程。通过梳理现有危险废物环境事故案例,结合不同企业危险废物类型和关键风险节点,构建事故情景数据库。例如,人为操作不当或台风、洪水等自然灾害引发的腐蚀泄漏、液体火灾、物理或化学爆炸等。同时,针对不同利用处置技术的工艺特点、产污情况和被利用处置废物的特性,判断次生危险废物的产生环节、污染类型、对环境的影响作用方式以及污染影响程度的大小等,明晰污染物释放、迁移和转化过程。

##### 3.2.2 事故概率

由于环境风险需要综合考虑事件发生概率及

其后果,因此,在污染物释放情景分析的过程中,尤其是针对环境事故情景,必须充分考虑环境事故的概率。分析危险废物全过程各环节存在事故隐患的风险单元,例如储罐、贮槽、工艺设备、处理系统等,对危险废物风险源进行精细化梳理和源项分析。综合考虑涉废企业的企业类型、工艺流程、运营数据、规范化考核结果、环境敏感程度、历史事故发生率 and 安全管理水平等,评估该企业的风险事故概率。

### 3.2.3 暴露途径

对企业周边的地质、水文、气候及暴露人群状况等进行调研,确定污染物从污染源到人体的暴露途径和方式。事故发生后,危险废物会通过挥发扩散、倾倒、渗透等途径污染企业周边的大气、水体和土壤等环境,暴露于被危险物质污染环境的人群,会直接或间接摄入和接触毒性物质而造成对人体健康的危害。人体摄入危险废物中毒性物质的途径主要有:(1)吸入被污染空气;(2)直接饮用被污染水体或经水生动植物的食物链累积摄入;(3)直接接触被污染土壤或食用土壤种植植物摄入等。

## 3.3 风险定量

### 3.3.1 剂量-效应关系评价

根据危险废物的特性数据对其所含特性污染物毒性进行定量评估,建立污染物质暴露水平与暴露人群不良健康效应发生率之间的关系。

### 3.3.2 风险表征

基于暴露途径,采用不同介质的污染物扩散模拟模型分析污染物的扩散轨迹和扩散距离,确定每种暴露途径的污染物暴露量、暴露持续时间和影响范围。进而对暴露于危险废物的人群在不同暴露途径下的不良健康反应发生概率进行估算,采用健康风险计算模型(例如美国环保局推荐的致癌/非致癌计算公式),量化某种危险废物暴露于环境中对人体健康产生的风险。

## 3.4 分级分类管理

从危险废物种类层面,根据不同种类危险废物的风险评价结果,进行健康风险等级的划分,确定危险废物的危害级别。对具有特别严重风险的危险废物,实行重点管控;对一般等级危害的废物可相应放宽管理尺度,对基本不含毒害性成分、只有不合规处理时才可能造成健康危害的危险废物,可列入《国家危险废物名录》的危险废物豁免管理清单中,符合豁免条件的危险废物按环节实施豁免

管理。

从危险废物的全过程环境管理角度,结合涉废企业相关信息数据,划分危险废物产生和经营企业的风险级别。根据危险废物产生和经营企业的风险等级,实施差别化管理,并对危险废物收集、运输、贮存过程分别制定分级管理措施。针对高风险的涉废企业,实现危险废物安全事故的实时预警和风险节点的精准排查和防控,制定应急管控方案。同时,根据企业每年的规模扩建、环保项目验收、生产或利用处置工艺改造情况对企业的风险级别进行动态更新和调整。

## 4 危险废物分级分类管理平台建设

为实现危险废物的分级分类评估和管理规范,须完善危险废物污染特性数据库和事故情景数据库,同时结合信息化建设,进行全过程数据的采集,为危险废物分级管理提供明确的执行依据,对危险废物的全生命周期进行可追溯管理。

### 4.1 污染特性数据库

基于《国家危险废物名录》和《危险废物鉴别标准》,根据危险废物来源、生产工艺及特性,合理制定检测分析方案,建立主要危险废物污染特性数据库,主要包括危险废物中特征污染物的种类、含量和分布,毒性组分在环境中的释放、迁移和累积规律。

### 4.2 事故情景数据库

引入人工智能算法,排查危险废物生产企业和处置内部风险节点,结合对危险废物行业历史环境事故案例的类型、事故原因、演化历程和后果的梳理与分析,构建危险废物事故情景库。通过事故情景模拟和企业相关信息的匹配,为涉废企业的事故概率计算提供依据,同时有助于建立风险事故应急响应机制。

### 4.3 全过程信息采集

危险废物全过程信息化数据采集和对接是危险废物分级分类管理平台建设的基础。采用RFID、视频图像、GPS和传感器等技术,实时感知危险废物在产生、贮存、运输、利用处置各环节的状态参数和环境参数,实时监测和记录危险废物出入库情况、生产和处理设施运行数据等信息,便于危险废物全过程各环节的实时风险评估和预警,进行企业风险等级的动态化调整,完善对危险废物的信息化风险管理。

## 5 结语

我国危险废物产量大、种类复杂,且面临管理资源短缺和地区不平衡的挑战。建设危险废物分级分类管理平台,科学划分涉废企业的管理层级,有利于明确危险废物监管重点,提高环境监管效能,形成科学有效的危险废物精细化管理体系,取得危险废物的减量化、资源化和无害化的“多赢”,达成环境效益和经济效益的同时提升。未来,可将企业的风险等级纳入环境绩效考核,加大对低风险企业的政策扶持和财政补贴力度,激励高风险企业建立企业安全生产制度,进行技术与工艺的改造与升级,实现危险废物的源头减量,制定风险防范措施和应急预案,推动生产企业切实落实资源环境责任,实现危险废物环境风险最小化。

### [参考文献]

- [1] TALNL L, YAMANTÜRK R, AYDIN E, et al. A rating system for determination of hazardous wastes[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2005, 126(1-3):23-30.
- [2] 张丽颖,黄启飞,王琪,等.危险废物的分级管理研究[J]. *环境科学与技术*,2006,29(5):41-42.
- [3] 汪帅马,刘永轩.浅析建立危险废物分级管理体系的必要性[J]. *江西化工*,2016(5):128-130.
- [4] 郑洋,张喆.完善环境许可证制度 推动危险废物利用处置规范化[J]. *中国生态文明*,2020(4):29-31.
- [5] 周强,靳晓勤,郭瑞,等.我国危险废物全过程管理制度体系现状及展望[J]. *环境与可持续发展*,2020,45(5):43-46.
- [6] 许冠英,罗庆明,温雪峰,等.美国危险废物分类管理的启示[J]. *环境保护*,2010(9):74-76.
- [7] 马春燕.基于风险评价方法染料涂料废物的分级管理[D]. 杨凌:西北农林科技大学,2010.
- [8] 胡华龙,郑洋,郭瑞.发达国家和地区危险废物名录管理实践[J]. *中国环境管理*,2016,8(4):76-81.
- [9] 刘方明,修太春,孙理琳.危险废物环境管理体系研究[J]. *环境科学与管理*,2021,46(2):14-17.
- [10] 岳战林.我国危险废物分级管理体系与策略研究[J]. *能源环境保护*, 2015(3):61-64.
- [11] MCCORMACK V A, SCHÜZ J. Africa's growing cancer burden: Environmental and occupational contributions[J]. *Cancer Epidemiology*, 2012, 36(1):1-7.
- [12] IBRAHIM M F, HOD R, SAHANI M, et al. The impacts of illegal toxic waste dumping on children's health: A review and case study from Pasir Gudang, Malaysia[J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2021, 18(5):2221.
- [13] FAZZO L, MINICHILLI F, SANTORO M, et al. Hazardous waste and health impact: a systematic review of the scientific literature[J]. *Environmental Health*, 2017, 16(1):107.
- [14] 谢琼芳,陈来国,张宝春,等.广东省工业企业危险废物环境风险评价研究[J]. *节能*,2020,39(6):139-142.
- [15] CHENG K Y, WONG P Y, WHITWELL C, et al. A new method for ranking potential hazards and risks from wastes[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2019, 365:778-788.
- [16] 张丽颖.危险废物分级管理指标体系研究[D].北京:北京化工大学,2006.