

# 从化学物质角度介绍美国固体废物和土壤修复管理

霍立彬, 聂晶磊\*, 张梦莎, 徐淑民

(环境保护部固体废物与化学品管理技术中心, 北京 100029)

**摘要:**通过对美国固体废物和土壤修复的法律基础、管理体系和技术支持的研究,系统地梳理了美国在这两个领域的管理经验,明晰了美国化学物质清单管理制度。根据美国的实施经验,对我国固体废物和土壤修复环境管理提出建议,旨在协同推进我国在这两方面的环保工作。

**关键词:**固体废物;危险废物;优先物质;土壤修复;国家优先目录

中图分类号:X-01

文献标志码:A

文章编号:0253-4320(2015)01-0001-05

## Study on solid waste and soil remediation management through chemicals in US

HUO Li-bin, NIE Jing-lei\*, ZHANG Meng-sha, XU Shu-min

(Solid Waste and Chemical Management Center of MEP, Beijing 100012, China)

**Abstract:** Management experience on solid waste and soil remediation in US are systematically summarized based on a study of legal basis, management system and technical support. The chemicals list management system is especially clarified. The suggestions about solid waste and soil remediation management are proposed to synergistically promote the environmental protection work in China.

**Key words:** solid waste; hazardous waste; priority chemicals; soil remediation; National Priority List

空气、水和土壤是环境介质,有害化学物质进入环境介质就成为需要治理的污染物,而防止和治理有害化学物质进入环境介质则是环境保护工作的重要内容。美国国家环境保护局的固体废物和应急管理办公室(Office of Solid Waste and Emergency Response, OSWER)依据《资源保护和恢复法》(Resource Conservation and Recovery Act, RCRA)负责实施固体废物防范管理,依据《环境应对、赔偿和责任综合法》(Comprehensive Environmental Response, Compensation, and Liability Act, CERCLA)实施污染土壤治理恢复<sup>[1]</sup>。在实施过程中,OSWER大量运用化学物质的相关知识和信息来推进和细化固体废物和土壤治理恢复的相关工作。本文以化学物质为切入点,介绍了美国在固体废物和土壤修复管理的经验,以此促进我国土壤修复、固体废物管理与化学品管理的协同推进。

## 1 固体废物管理情况

### 1.1 法案要求

1976年,美国国会通过《资源保护和恢复法》,

建立了美国对固体废物管理的主体框架体系,从法案的名称可知,美国并不是将其视为废物,而是视为资源。此后国会又几次对该法进行修正以适应不断变化的管理需求,形成了延续至今的基本法律框架。根据RCRA的要求,美国EPA又颁布了《有害固体废物修正案》(Hazardous and Solid Waste Amendments, HSWA),其包括九大部分及大量附录,每一部分都与RCRA的有关章节相对应,实际上是RCRA的实施细则<sup>[2]</sup>。

RCRA的目标是保护人体健康和环境,削减废物和节约能源和资源,尽量减少或消除危险废物的产生。其涉及4个不同但又相互关联的领域:一是固体废物管理,鼓励各州建立对非危险废物(如生活垃圾)的综合管理和资源回收计划;二是危险废物管理,要求建立对危险废物从产生到最终处置的控制制度,包括有关法律法规及标准;三是建立对地下贮存罐的使用及渗漏等管理标准和体系;四是建立对医疗废物从产生到处置的跟踪控制制度。

### 1.2 危险废物的管理

RCRA依据危险废物的不同环节和相应的主体

实施不同的管理<sup>[3]</sup>。

### 1.2.1 危险废物的产生者

申请注册要求。危险废物的产生者应当申请和获取 EPA 分配的危险废物鉴别号。无鉴别号的废物产生者禁止对危险废物进行处理、处置和运输。废物积存应当遵守 EPA 在贮存、应急、人员培训等方面的规定。

联单要求。联单制度是实现危险废物从“摇篮到坟墓”式管理的关键。通过联单,可以对危险废物从产生到处理、处置和贮存等各个环节进行跟踪。RCRA 联单包括废物产生者姓名、EPA 鉴别号、运输者、处理、处置和贮存设施地点、运输数量等详细内容。

### 1.2.2 危险废物运输者

危险废物运输者必须获得 EPA 的危险废物鉴别号,执行联单制度,并有能力处理危险废物的泄漏。危险废物应当有合理包装,以防范正常和潜在危险情况下的泄漏,且包装要有明显的废物特性和危险性的标签标志。

### 1.2.3 危险废物贮存、处理、处置者

危险废物贮存、处理、处置者的管控是 RCRA 中的核心和最为庞杂的内容,包括了大量的标准、技术要求、检测程序等,综合起来分两类规定:一类是管理性和非技术性法律规定,另一类是技术性法律规定。

管理性和非技术性规定:确保危险废物处理、处置和贮存设施的所有者和运营者通过建立必要的程序和计划,正确地运转其设施及处理任何紧急情况或事故。这些规定包括法律规定适用的主体、一般的设施标准、准备和预防、应急计划和应急程序、联单制度和记录及报告等。

技术性规定:确保危险废物处理、处置和贮存设施的所有者和运营者在运转其设施时,把对环境和人体健康的潜在威胁减少到最低限度。技术性规定又分成两大类:一是适用于设施的通用标准,包括地下水的监测、防渗层及二级防渗层等。二是针对危险废物管理的标准,包括容器标准、贮存罐、废物堆肥、土壤处理、填埋、焚烧、热处理、化学、物理和生物处理、地下灌注等。

鉴于危险废物的贮存、运输、处理、处置是危险废物的重要管理环节,RCRA 建立了对危险废物的贮存、处理、处置者实施许可的规定。许可制度是最强制的行政管理。在许可文件中,将规定设

施所必须遵守或达到的管理和技术上的要求。现有的或是新建的设施都必须取得危险废物的运营许可。

### 1.3 危险废物的鉴别及分类

危险废物的鉴别和分类是实施危险废物管理的重要技术基础。RCRA 法规定,所有固体废物产生者必须确定所产生废物是否属于危险废物。判断危险废物的基本准则为是否具有可燃性、腐蚀性、毒性之一特性的固体废物和其混合物,或是由处理处置和贮存而产生的具有上述特性之一的派生物。

EPA 将危险废物(hazardous waste)分为 4 类:第一类是名单废物(Listed Wastes),是指列入名单的危险废物,包括了 F-list(工业过程产生的废物)、K-list(来自特殊工业的废物)、P-和 U-lists(来自商业化学产品的废物);第二类是特征废物(Characteristic Wastes),是指不能列入名单废物但具备易燃、腐蚀、有反应性和毒性的废物;第三类是广普废物(Universal Wastes),包括电池、农药、含汞设备(如温度计)和电灯(如荧光灯泡);第四类是混合废物(Mixed Wastes),包括了放射性和危险成分的混合废物。分类的角度包括了来源分类、含量分类、用途分类等。其中 P-和 U-lists 均为针对急性毒性和反应性的商业级废弃化工产品名录,P-lists 有 239 种,U-lists 有 486 种,只要是涉及没有使用就废弃的这些化工产品或者不合格产品及残渣,就列为危险废物,无需分析鉴定<sup>[4]</sup>。

### 1.4 国家废物最小化计划中的优先物质

美国于 2006 年制定并实施了国家废物最小化计划(National Waste Minimization Program, NWMP),该计划识别了 31 种优先物质(Priority Chemicals, PC),物质清单见表 1。NWMP 着重减少 31 种优先物质在废物中的存在量,同时消除或持续减少这些物质在生产过程中的使用。31 种优先物质清单中有 3 种重金属元素及其化合物,28 种有机物(27 种具有 PBT 性质),它们来源于广泛的工业生产过程,在环境中即使很小的释放量也会累积并导致环境问题,而且清除难度大、费用高<sup>[5]</sup>。这种从化学物质入手的管理方式,更容易寻找和识别出需要优先管制的废物,并采取与企业合作的方式,推进企业从源头减少涉及这些化学物质的废物,实现废物的减量化和最小化。

表1 NWMP 提出的 31 种优先物质清单

序号	中文名称	外文名称	CAS 号
1	1,2,4-三氯苯	1,2,4-trichlorobenzene	120-82-1
2	1,2,4,5-四氯苯	1,2,4,5-tetrachlorobenzene	95-94-3
3	2,4,5-三氯苯酚	2,4,5-trichlorophenol	95-95-4
4	4-溴苯和苯基醚	4-bromophenyl phenyl ether	101-55-3
5	萘	acenaphthene	83-32-9
6	亚萘基	acenaphthylene	208-96-8
7	蒽	anthracene	120-12-7
8	苯并(g,h,i)茚	benzoperylene(g,h,i)	191-24-2
9	二苯并呋喃(氧茱)	dibenzofuran	132-64-9
10	二噁英	dioxinsfurans	1746-01-6
11	$\alpha$ & $\beta$ 硫丹	alpha-endosulfan & beta-endosulfan	959-98-8, 33213-65-9
12	茱	fluorene	86-73-7
13	七氯,七氯环氧化物	heptachlor,heptachlor epoxide	76-44-8, 1024-57-3
14	六氯苯	hexachlorobenzene	118-74-1
15	六氯丁二烯	hexachlorobutadiene	87-68-3
16	$\gamma$ -六氯环己烷	hexachlorocyclohexane, gamma-(lindane)	58-89-9
17	六氯乙烷	hexachloroethane	67-72-1
18	甲氧氯(甲氧滴滴涕)	methoxychlor	72-43-5
19	萘	naphthalene	91-20-3
20	二甲戊乐灵	pendimethalin	40487-42-1
21	五氯苯	pentachlorobenzene	608-93-5
22	五氯硝基苯	pentachloronitrobenzene (quintozene)	82-68-8
23	五氯苯酚	pentachlorophenol	87-86-5
24	菲	phenanthrene	1985-1-8
25	多环芳烃化合物 (多环芳烃)	polycyclicaromatic compounds (PACs) PAH	Group
26	多氯联苯	polychlorinatedbiphenyls (PCBs)	1336-36-3
27	茈	pyrene	129-00-0
28	氟乐灵	trifluralin	1582-09-8
29	镉	cadmium	7440-43-9
30	铅	lead	7439-92-1
31	汞	mercury	7439-97-6

## 2 土壤修复的管理情况

### 2.1 法案背景和法案要求

土壤是重要的环境介质之一,相比气和水,其流

动性不强,均质性弱,毒性和危害性可以集中并积累呈现,因此,往往更具有局部的危害性。造成土壤污染的原因是多方面的,但主要有两类,一是废弃物的不当处置;二是工业生产过程中废物的随意排放或者堆放。

美国拉弗运河(Love Canal)事件引发了公众对污染土壤的关注,促成了美国国会于1980年通过了《环境应对、赔偿和责任综合法案》(Comprehensive Environmental Response, Compensation and Liability Act, CERCLA)。该法案批准设立污染场地管理与修复基金,即超级基金<sup>[6]</sup>。

CERCLA 主要有 4 个方面的要求:一是对全国的有毒有害废物遗留地和高污染区进行分类、确认、清理和修复;二是建立对关闭和废弃的危险废物场地实施禁止的要求;三是规定了造成危险废物排放地点相关人的责任;四是建立了超级基金,以提供清理无主场地的费用。超级基金的经费主要来源于国内生产石油和进口石油产品税、化学品原料税、环境税。上述税收全部进入超级基金托管基金,然后按每年的实际需要进行拨款,解决了土壤修复的资金问题,成为该法的一大亮点。

CERCLA 法规规定了两类行动:一类是紧急清理行动,当造成的释放或者威胁的排放有紧急影响时,需要采取的行动;另一类是长期治理影响行动,通过对排放或者可能释放危险物质的地点进行评估,如果严重,但没有立即生命威胁的情况,就列入《国家优先名录》(National Priority List, NPL),定期更新,持续按步骤和程序开展长期治理<sup>[7]</sup>。

超级基金制度授权 EPA 对全国污染场地进行管理,并责令责任者对污染特别严重的场地进行修复;对找不到责任者或责任者没有修复能力的,由超级基金来支付污染场地修复费用;对不愿支付修复费用或当时尚未找到责任者的场地,可由超级基金先支付污染场地修复费用,再由 EPA 向责任者追讨。由于超级基金制度具有无限期的追溯权力,这使其成为一项颇为严厉的制度。

### 2.2 土壤修复的流程

土壤修复工作可分为以下 4 个步骤<sup>[8]</sup>:

一是场地发现。污染场地发现通常有 3 种途径:所在地环境管理部门的定期或不定期监测;通过公众检举土壤污染事件,土地所有者或使用者均有通报土地污染的义务;一些特定行业在开业、停业或进行土地使用转让时,要求企业出具土壤污染的监

测资料。

二是场地的初步调查与扩大调查。场地的初步调查和扩大调查可进行多次,仅进行一次的初步调查可能无法发现重大问题,通常是在后期调查中才发现更严重的问题,因此有必要再进行场地扩大调查。

三是列入 NPL。有 3 种机制可将场地列入 NPL:最常见的是用危险等级系统(Hazard Ranking System, HRS)进行打分,当场地的危险等级分值超过 28.5 分后,须进行为期 60 天的公示,若 EPA 对公众的评价作出响应后仍然认为该场地符合列入 NPL 的要求,则该场地列入 NPL;第 2 种是由每个州或地区提出优先列入 NPL 的场地;第 3 种是美国毒性物质和疾病登记署(Agency for Toxic Substances and Disease Registry, ATSDR)已确认为严重威胁公众健康,发出让人群离开相关场地的决定,而且采取修复行动比紧急搬迁行动更经济,则该场地列入 NPL 中<sup>[9]</sup>。

四是场地修复。首先进行场地修复调查,以获得污染程度、修复标准、修复技术筛选和修复费用预算等数据,编制可行性研究报告。此后,进行修复工程的设计实施与运行维护。当修复场地达到修复标准后,一般还需进行 5 年的跟踪监测,确定稳定达标时,可将其从 NPL 中删除。在整个修复期间,可将场地已稳定达标的部分区域或污染物提前从 NPL 中删除。

在超级基金场地管理的各阶段,需通知潜在的责任者参与相关管理事宜,同时及时向公众公布在污染场地上将要采取的措施及各项决定。污染场地经修复后若发现再被污染,还可列入 NPL。

### 2.3 NPL 确定的技术

建立 NPL 制度是治理土壤污染的核心环节,也是 CERCLA 法的重要举措,其通过技术识别或者管理要求将需要治理的土壤污染列入名单,在资源资金有限的条件下,找到最优先处理的污染场地,分步实施治理,治理达标后,可从 NPL 中删除,整个工作量和工作进程清楚可见<sup>[10]</sup>。

因此列入 NPL 的技术至关重要,HRS 是将污染场地列入 NPL 的主要机制,其利用场地调查信息,通过结构分析方法对场地进行赋分,评价场地对人体健康和环境的潜在威胁。该方法将与风险相关的因素进行赋分,如场地释放危险物质的可能性、废弃物特征、人群或敏感靶标等。然后使用这些赋分对

地下水迁移、地表水迁移、土壤暴露和空气传输四种途径计算,这些计算值通过均方根方程进行组合,产生场地总得分。

危险物质范围是危险等级系统和土壤污染处理中的一个重要因素,CERCLA 规定了危险物质的定义,并在 40 CFR 302.4 中列明了 800 多种化学物质的清单。ATSDR 按国会要求进行挑选,提出优先物质清单(Substance Priority List),目前有 275 种物质。在确定优先物质时,ATSDR 主要考虑 3 个因素,一是化学物质在 NPL 中出现的频率;二是化学物质的毒性;三是化学物质潜在的人体暴露概率。

根据 CERCLA 规定,当一个地点的土壤被污染,或者被怀疑受到危险物质污染,或者超出报告限值(reportable quantities)后,就需要向其下属的国家响应中心(National Response Center)报告,这个地点就进入 EPA 的环境治理调查数据库,然后根据时间程序安排所要进行的污染程度调查和风险评估工作。根据初步评价和场地调查结果,由 EPA 根据 HRS 得分来决定是否将污染场地列入 NPL。在评估确定 NPL 时,EPA 会运用超基金化学品数据矩阵(Superfund Chemical Data Matrix, SCDM)作为相关物质的信息源,用 HRS 技术来确定是否列入 NPL。

列入 NPL 的污染场地,污染物类型多以挥发性有机污染物常见(这种场地的可修复性较高),其次为重金属污染。另外,很多场地存在 1 种以上的化学污染物,同时存在 2 种以上的污染介质(土壤、地表水、底泥以及地下水)。

### 2.4 修复目标的确定

对污染场地实施土壤修复时,确定修复目标是至关重要的,其决定了修复的技术、投资成本、时间等等因素。而确定修复目标是由污染场地的污染物种类和修复后土壤用途决定的<sup>[11]</sup>。因此,美国在此领域,制定了针对不同污染物的土壤筛选值,也就是《区域性土壤筛选值》(Regional Screening Level, RSL),之前称为初步治理目标值(Preliminary Remediation Goals, PRGs)<sup>[12]</sup>。其基于人体健康风险制订,没有考虑生态风险,用于确定美国超级基金场地土壤污染风险的初筛和制定初步修复目标的达到值。土壤筛选值分为居住和工业用地两大类,并按三大环境要素确定 6 个类别,针对致癌物和非致癌物涉及的暴露途径分别列出这 6 个类别的土壤筛选

值,共涉及约780种化学污染物。

这些土壤筛选值相当于土壤治理后,土壤中含有这些污染物的最高含量值,在此值以下,可以证明修复后的土壤不会对人体健康造成风险。美国EPA综合考虑化学污染物毒性与暴露因素,通过复杂的风险评估技术和程序确定这些化学物质在不同条件下的土壤筛选值。在污染物的毒性方面,EPA会参考美国综合风险资讯系统(Integrated risk information system, IRIS)(涉及500多种化学物质)、美国环保署暂行毒性因子(Provisional Peer Reviewed Toxicity Values, PPRTV)以及ATSDR等重要数据库提供的毒性信息;在污染物的暴露方面,EPA会确定土壤类型(暴露场地表征)、进入人体的暴露途径和暴露量估计等因素,最终以污染物造成致癌风险不高于 $10^{-6}$ 、非致癌风险不高于1(也有的调整到不高于0.1)作为风险表征的基准,从而倒推确定修复后这些化学污染物在土壤中的含量值<sup>[13-15]</sup>。

### 3 我国固体废物管理和土壤修复工作的建议

危险废物目录是实施危险废物管理的重要基础,从化学污染物入手结合废物产生来源确定危险废物是识别危险废物的一种便捷方式,此类方式不需要实验室的采样鉴别,不需要做成分分析,直接可从固体废物的产生来源来鉴别,方便操作,是国际通行的做法。控制固体废物的本质和核心,就是控制其中有毒有害化学物质的含量,因此,从化学物质入手,控制固体废物中有毒有害物质的含量是今后固体废物管理的方向,固体废物的管理应当加强与化学物质管理的联合协同作用,从源头防止有毒有害化学物质进入产品,同时减少产品转变为固体废物的可能。

从国外经验上看,土壤修复工作需要从不同的化学污染物入手,开展健康风险评估,确定修复后不会引发不可接受风险的土壤含量限值,这体现了污染土壤治理的精细化管理和量化管理<sup>[16]</sup>。我国在污染土壤修复方面刚起步,应当吸收国外已有的经验和相关技术为我所用。特别是在确定修复目标值时,可以直接参考美国制订的RSL,或是在此基础上结合修复后的土壤使用用途进行调整,省去大量的

毒理学等基础研究和评估认识工作,关注于治理技术和实际效果,以推进我国土壤修复工作的进程。通过实践积累经验,提升我国在土壤修复工作的实际处理能力。

### 参考文献

- [1] 许冠英,罗庆明,温雪峰,等.美国危险废物分类管理制度及对我国的启示[C].中国环境科学学会学术年会.北京:中国环境科学出版社,2010:1240-1244.
- [2] 胡华龙,温雪峰,李秀金,等.固体废物管理与技术发展研究报告[R].北京:2006—2007环境科学技术学科发展报告,2007:98-123.
- [3] 杨玉飞,黄泽春,黄启飞.国外危险废物优先管理理论与实践研究[J].环境工程技术学报,2013,3(1):10-17.
- [4] 高记.我国危险废物管理法律制度研究[D].西安:西南建筑科技大学,2011.
- [5] US EPA. Waste minimization priority chemicals[EB/OL]. <http://www.epa.gov/wastes/hazard/wastemin/priority.html>, 2012-11-15/2013-12-20.
- [6] 谷庆宝,颜增光,周友亚,等.美国超级基金制度及其污染场地环境管理[J].环境科学研究,2007,20(5):84-88.
- [7] 游彦霞.美国CERCLA及其对我国土壤污染防治立法的借鉴[D].青岛:中国海洋大学,2008.
- [8] 龚宇阳.国际经验综述:污染场地管理政策与法规框架[R].华盛顿:世界银行研究报告,2010:1-49.
- [9] US EPA. Agency for toxic substances and disease registry[EB/OL]. <http://www.atsdr.cdc.gov>, 2013-12-16/2013-12-20.
- [10] 李飞.污染场地土壤环境管理与修复对策研究[D].北京:中国地质大学,2011.
- [11] 化勇鹏.污染场地健康风险评价及确定修复目标的方法研究[D].北京:中国地质大学,2012.
- [12] US EPA. Regional screening levels for chemical contaminants[EB/OL]. <http://www.epa.gov/region9/superfund/prg>, 2013-12-03/2013-12-20.
- [13] 宋静,陈梦舫,骆永明,等.制订我国污染场地土壤风险筛选值的几点建议[J].环境监测管理与技术,2011,23(3):26-33.
- [14] US EPA. User's guide[EB/OL]. <http://www.epa.gov/reg3hwmd/risk/human/rb-concentration-table/usersguide.html>, 2013-11-01/2013-12-20.
- [15] US EPA. Health & environmental research online (HERO) database[EB/OL]. <http://hero.epa.gov>, 2013-12-20/2013-12-20.
- [16] 张百灵.中美土壤污染防治立法比较及对我国的启示[J].山东农业大学学报,2011,1:79-84. ■