

危险废物填埋设施的环境风险分析

于可利, 刘华峰, 李金惠*, 聂永丰

(清华大学 环境科学与工程系, 北京 100084)

摘要: 识别了危险废物安全填埋场的风险源, 建立了危险废物填埋处置环境风险评价方法, 并将危险废物填埋的环境风险评价分为健康风险评价和系统安全性评价 2 个部分。对渗滤液污染地下水事故的风险评价方法进行了详细的讨论, 分析总结了安全填埋场造成渗滤液泄露的原因, 提出了其安全性分析方法。在此基础上, 结合一组假定的填埋场的数据, 进行了具体的风险评价和系统安全性分析。结果表明, 所建立的事故情况下的健康风险分析方法和故障树安全性分析可以满足环境风险评价的需要。

关键词: 危险废物; 填埋; 风险评价; 安全性分析

中图分类号: X327 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-6929(2005)S0-0043-05

The Environmental Risk Assessment of Hazardous Waste Landfill

YU Ke-li, LIU Hua-feng, LI Jin-hui, NIE Yong-feng

(Department of Environmental Science and Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: The risk sources of the hazardous waste landfill were distinguished and the environmental risk assessment method of hazardous waste landfill established; the environmental risk assessment was divided into health risk assessment and system safety security assessment. The health risk assessment under the leachate pollution accident condition was discussed in details. The reasons of the leak of leachate were analyzed, and the method of the safety analysis of security landfill established. Based on a hypothesis case, the established methodology of health risk and the system safety of landfill are testified. The results confirmed that the established methodology of health risk and the system safety of landfill could satisfy the requirement of environmental risk assessment.

Key words: hazardous waste; landfill; environmental risk assessment; safety analysis

危险废物的种类多、性质复杂, 所造成的危害通常具有长期性和潜伏性^[1]。危险废物填埋是危险废物的最终处置技术, 而风险评价是危险废物管理的基础。因此, 开展危险废物填埋设施环境风险评价非常重要和迫切。目前我国先后发布了《建设项目环境风险评价技术导则》和《危险废物和医疗废物处置设施建设项目环境影响评价技术导则》, 对于危险废物运营设施的环境风险评价做出了相关规定。但是导则中针对危险废物安全填埋场环境风险评价的内容较少, 对于渗滤液对地下水造成的长期影响没有考虑, 也没有指出渗滤液迁移时采用的模型; 而对危险废物填埋场的风险评价, 不同的评价者会产生不同的结论。笔者在识别危险废物安全填埋场风险源的基础上, 建立针对危险废物填埋场环境风险评价的方法, 以便于采取正确的管理措施减少风险^[2]。

1 安全填埋场环境风险分析方法

1.1 源项识别

危险废物安全填埋场的基本构造包括废物接收系统、贮存和预处理系统、防渗系统和渗滤液收集系统、覆盖系统和填埋气导排系统。危险废物安全填埋场可能发生的事故如表 1 所示。

如果贮存车间或预处理车间发生火灾爆炸事故, 或者填埋气发生爆炸事故, 以及填埋场发生崩塌事故, 则可以按照系统安全性评价方法进行评价。表 2 列出了几种系统安全性评价方法及其特点。

由于上述事故发生机率很小, 不能通过统计方法评价, 故可采取故障树的方法进行评价。

对于因地震、暴雨等自然因素造成的地表水污染事故, 可根据有毒有害物质在地表水中的扩散模式进行环境风险评价。对于河流可采取下式计算地表水中污染物的质量浓度:

$$c = (c_p Q_p + c_h Q_h) / (Q_p + Q_h) \quad (1)$$

式中, c 为完全混合后水中污染物的质量浓度, mg/L; Q_p 为污水流量, m^3/s ; c_p 为污水中污染物的质量浓度,

收稿日期: 2005-04-10 修回日期: 2005-10-20

基金项目: 国家“十五”科技攻关计划项目(2003BA614A-11-06)

作者简介: 于可利(1982-), 男, 山东济南人, 硕士研究生。

*通讯联系人

mg/L; Q_h 为河水流量, m^3/s ; c_h 为河水中污染物的质量浓度(指未混合前), mg/L。

在危险废物安全填埋场中, 上述事故发生的可能

性都很小。最有可能发生的事故为渗滤液污染地下水, 而如果贮存车间出现渗漏现象, 则也可以用上述方法进行评价。

表 1 危险废物安全填埋场风险源
Table 1 The risk source of the hazardous waste landfill

风险源	产生原因
贮存车间或者预处理 车间发生火灾爆炸事 故; 贮存时发生渗漏	废物中存在易燃易爆物品; 电线短路或者存在明火; 未进行及时地处理
防渗膜破损	由于废物对于基础层的压力, 迫使基础层的尖状物将防渗膜穿孔; 由于基础地质构造不稳定, 造成局部压力过大从而使地基本不均匀下陷, 最终导致防渗膜破裂; 焊缝部位和修补部位渗漏; 在填埋场底部持续承受压力的情况下, 拐角部位以及易折叠部位容易产生塑性变形; 机械设备在防渗膜上施工或者填埋作业时, 产生局部膜破损; 在低温下进行防渗膜的铺设, 造成材料变脆, 产生裂纹; 由于光氧化作用使得防渗膜破损; 危险废物或者其他废物的渗滤液的酸碱性如果较强, 可能会造成防渗膜的老化破损
渗滤液污染地下水	
地下水进入填埋场	地下水集排系统发生堵塞; 地下水位升高
地表水进入填埋场, 渗透到地下水中	由于出现暴雨, 使地表径流进入到填埋场内, 危险物质渗透到地下水中
地表水污染	地震、暴雨等不可抗拒自然因素导致危险废物与地表水发生接触
填埋场崩塌	废物未压实; 填埋气的产生使废物结构松散; 基础地质构造不稳定
填埋气爆炸	填埋气体泄露后遇明火

表 2 主要系统安全性评价方法及特点
Table 2 Main system safety assessment methods and characteristics

风险评估方法	特点
检查表法	简单易行, 所需人员和费用少, 但是只能定性, 不能定量
危险和可操作性分析法	针对所有潜在危险和问题, 适用范围广, 能有效处理技术失误和人因错误, 但是工作量大
专家调查法	简单直观, 灵活, 但是受专家主观影响大
故障树分析方法	直观, 逻辑性强, 可以定性定量分析, 但易受评价人员主观影响
道化学指数法	能客观地量化预期损失, 能确定可能引起事故的设备, 但是较为烦琐、评价周期长, 还需要充足的数据

1.2 渗滤液泄漏事故情况下的健康风险评价

1.2.1 风险源污染物的确定

渗滤液污染地下水事故的风险来源于渗滤液。一般而言, 渗滤液中的风险物质主要包括重金属、亚硝酸盐以及有机毒物(如卤代烃、芳香族化合物等)。由于危险废物填埋场渗滤液的释放是缓慢过程, 有毒有害物质与人的接触浓度比较低, 故所产生的危害主要为慢性效应。对性质不同的危险源, 根据是否可致癌分为 2 类分别进行剂量反应关系的评价。确定渗滤液中重点风险源的方法可采取毒性得分法^[3]: 对于非致癌化学物质, 毒性得分 $TS = C_{\max} / R_{fd}$, 其中, $C_{\max}$ 为渗滤

液中该成分的最大检测值; R_{fd} 为非致癌参考剂量。对于致癌化学物质, 毒性得分 $TS = SF \times C_{\max}$, 其中, SF 为致癌斜率因子。对于特定的暴露路线, 分别计算出各有毒有害物质的毒性得分后, 初步选择构成毒性得分 99 % 的物质作为评价对象, 再考虑化合物的难降解性以及迁移性等特点, 进行再次筛选, 最后确定主要风险物质。如果化学物质同时具有致癌和非致癌作用, 则应该出现在各自的排序中。

1.2.2 暴露评价

暴露评价主要是把危险废物填埋处置设施在事故情况下产生的风险进行量化。安全填埋场的渗滤液渗出后, 首先在包气带中由上至下垂直迁移, 最后进入潜水层, 并被输送到地下水流经地区。有毒有害物质在地下含水层的最大浓度位于释放源下方的潜水含水层中。在评价中为充分保护环境和人体健康, 应将有毒有害物质在浅层地下水中的最大浓度作为评价浓度^[4]。污染物在包气带的迁移, 可以用下述模型表示:

$$R_d \frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - u \frac{\partial C}{\partial x} - \lambda R_d C$$

(2)

式中, C 为非饱和土层中有毒有害物质的平均质量浓度, g/cm^3 ; D 为有毒有害物质在非饱和土壤中的弥散系数, cm^2/s ; R_d 为有毒有害物质在非饱和土壤中的滞留因子; λ 为有毒有害物质在非饱和土壤中的一级降解系数; u 为非饱和土壤中的水流流速, cm/s ; x 为迁

移距离,cm; t 为时间,s。

由于渗滤液的泄漏和释放是长期的,污染物在非饱和土层中终究会达到饱和稳定。因此,渗漏点下部浅水层中有毒有害物质的质量浓度可以用下式确定:

$$C = \frac{Q_0}{Vh\sqrt{S_0}} \exp\left(-\frac{\lambda \times R_d}{u}\right) \tag{3}$$

式中, V 为潜水层水流速度,cm/s; h 为潜水层高度,cm; $\sqrt{S_0}$ 为正方形场地边长(假设场地为方形, S_0 为场地面积),cm。

渗滤液泄漏后对于地下水产生污染,其中的重金属和亚硝酸盐等风险源随着地下水迁移,在地下水流动方向下游,人们可通过取用地下水而与风险源产生接触,饮水暴露剂量可以通过下式计算:

$$I = \frac{C_W \times R_I \times F_E \times D_E}{W_B \times T_A} \tag{4}$$

式中, I 为摄入剂量,mg/(d·kg); C_W 为水中化学物质的质量浓度(特定点的测量或者模型值),mg/L; R_I 为饮水速率,L/d,与年龄有关,成人可取 2 L/d,儿童可取 0.5 L/d; F_E 为暴露频率,d/a,为特定暴露途径值; D_E 为暴露持续时间,d; W_B 为体重,kg,成年人可取 70 kg,儿童可取 16 kg; T_A 为平均时间,d,对致癌效应取 70 a,即 25 550 d。

1.2.3 风险表征

风险表征是风险评价的最后步骤,需要综合上面的计算结果,得出风险评价的结论。风险值计算方法为:非致癌风险值 $R = I/R_{fd}$ 。对于致癌化学物质,风险值 $R = SF \times I$ 。根据得出的结果,与采用的风险指标做比较,得出结论,即发生渗滤液泄露事故的风险是否可以接受,并对环境风险进行综合描述和评价。一般来说,对于致癌风险,采用 10^{-6} 作为风险接受与否的标准值,如果经过计算得出的各种风险物质造成的风险总和大于 10^{-6} ,说明致癌风险大,超过了可以接受的范围;对于非致癌风险,一般采用与非致癌参考剂量做比较,如果风险的总和超过了 1,说明对健康影响较大,为不可接受风险^[5]。

1.3 危险废物安全填埋场的系统安全性分析

系统安全性分析的方法很多,根据系统的复杂程度,可以采用定性、定量或半定量的评价方法。对于危险废物安全填埋场而言,针对可能发生的火灾、爆炸事故可以采用道化学指数评价方法;而最可能发生的渗滤液污染地下水事故,其造成的后果往往是长久性和潜伏性的,很多数据无法得到,故采用故障树分析方法进行评价。故障树建立方法如图 1 所示。

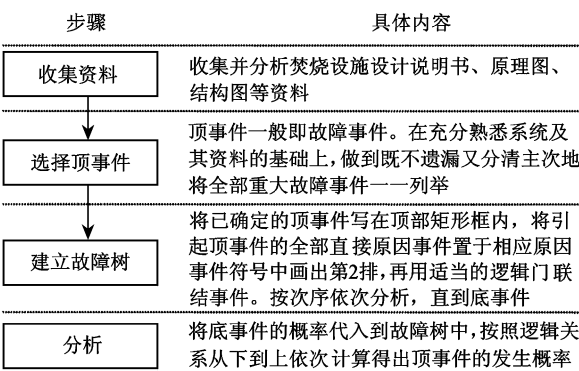


图 1 故障树建立流程图

Fig. 1 The establishment procedure of Fault Tree

1.4 不确定性分析

不确定性的存在是风险评价的特性之一。由于数据、知识的不足或者发生事件的随机性,都会导致不确定性。在风险评价过程中,应注意参数、基础数据的适用性,指明模型、方法的局限性并尽可能地广泛考虑可能出现的随机事件,以尽量降低不确定性对于风险评价的影响^[6]。

2 案例分析

下面以假定某填埋场的渗滤液数据^[7]为例,对健康风险评价及系统安全性进行分析。

2.1 渗滤液泄露情况下的健康风险评价

第 1 步:风险识别。首先分析渗滤液的成分,根据毒性得分法的步骤,选择风险源物质(见表 3)。根据毒性得分计算结果,选择亚硝酸盐、四氯甲烷、甲苯、汞化合物作为非致癌作用风险源,选择亚硝酸盐、汞化合物、砷化合物作为致癌作用风险源。

表 3 风险源物质的确定

Table 3 Assurance of risk source substances

项目	质量浓度/(mg L ⁻¹)		R _{fd} / (mg d ⁻¹ kg ⁻¹)	SF	毒性得分	
	最大值	平均值			非致癌作用	致癌作用
硫酸盐	4 250	3 446	—	—	—	—
亚硝酸盐	0.4	0.2	1 ×10 ⁻⁴	8 ×10 ⁻²	4 ×10 ³	0.2
四氯甲烷	65.3	40.2	2 ×10 ⁻²	6.2 ×10 ⁻²	3.75 ×10 ³	9.5 ×10 ⁻⁴
甲苯	4.9	3.0	3 ×10 ⁻³	—	1.46 ×10 ⁴	—
汞化合物	0.12	0.03	3 ×10 ⁻⁴	1.5	4 ×10 ²	11.3
砷化合物	0.01	0.025	3 ×10 ⁻⁴	0.2	33.3	20

第 2 步:暴露评价。假设每天有 1 000 L 渗滤液污染地下水,渗滤液中的风险源进入地下水并随着地下水向水流方向迁移。将表 3 数据代入式 (3) 和式 (4) 中,得出表 4 的结果(为了简化计算,并没有考虑物质

之间的区别,参数值取同样值。其中,地下水的平均流速为 0.3 m/d;有机物 R_d 为 1.5,亚硝酸盐 R_d 为 1,重金属 R_d 为 0.1,降解系数为 0.05,迁移距离(x)取最小值 2 m)。

表 4 各风险源物质评价浓度和暴露剂量
Table 4 The assessment concentrations and exposure doses of the risk source substances

项目	风险源物质				
	亚硝酸盐	四氯甲烷	甲苯	汞化合物	砷化合物
质量浓度/(mg L ⁻¹)	2.31 ×10 ⁻⁷	4.7 ×10 ⁻⁵	2.06 ×10 ⁻⁵	3.47 ×10 ⁻⁷	2.89 ×10 ⁻⁸
成人暴露剂量/(mg d ⁻¹ kg ⁻¹)	6.47 ×10 ⁻⁹	1.32 ×10 ⁻⁶	5.77 ×10 ⁻⁷	9 ×10 ⁻⁹	8.81 ×10 ⁻¹⁰
儿童暴露剂量/(mg d ⁻¹ kg ⁻¹)	7.16 ×10 ⁻⁹	1.46 ×10 ⁻⁶	6.39 ×10 ⁻⁷	1.08 ×10 ⁻⁸	8.96 ×10 ⁻¹⁰

第 3 步:风险表征。首先,对于致癌风险,选取 10⁻⁶ 作为风险可接受与否的标准;对于非致癌风险,选

取非致癌参考剂量作为标准。根据表 4 计算的致癌和非致癌风险计算结果见表 5。

表 5 风险计算结果
Table 5 The results of risk calculation

风险类型		风险源物质					
		亚硝酸盐	四氯甲烷	甲苯	汞化合物	砷化合物	总和
非致癌风险	成人	6.47 ×10 ⁻⁵	6.6 ×10 ⁻⁵	1.9 ×10 ⁻⁴	3 ×10 ⁻⁵	—	3.51 ×10 ⁻⁴
	儿童	7.16 ×10 ⁻⁵	7.3 ×10 ⁻⁵	2.13 ×10 ⁻⁴	3.6 ×10 ⁻⁵	—	3.94 ×10 ⁻⁴
致癌风险	成人	5.18 ×10 ⁻¹⁰	—	—	1.35 ×10 ⁻⁸	1.62 ×10 ⁻¹⁰	1.41 ×10 ⁻⁸
	儿童	5.73 ×10 ⁻¹⁰	—	—	1.5 ×10 ⁻⁸	1.8 ×10 ⁻¹⁰	1.56 ×10 ⁻⁸

从表 5 可看出,在假定的情况下,非致癌风险总和小于 1,是可以接受的;而致癌风险总和小于 10⁻⁶,也是可以接受的。

虽然在该案例中,渗滤液泄漏的风险是可以接受的,但是应该看到,该案例中很多参数都是取参考值,而且渗滤液的渗漏量取值也很小,在实际情况中,如果渗滤液渗漏量较大,而且含有剧毒性物质,则发生渗滤液泄漏事故的风险是较大的。如在上述例子中,如果渗滤液泄漏量扩大 3 倍,那么,致癌风险将超过 10⁻⁶ 的可接受值。

2.2 系统安全性评价

根据故障树方法所建立的渗滤液泄露事故故障树见图 2。

根据故障树方法估算渗滤液泄露事故的发生概率,表 6 给出了各个基本事件的发生概率。

将表 6 的数据代入到图 2 的故障树中,可得到顶事件“渗滤液污染地下水”发生的概率为 0.132 a⁻¹。即

大约平均 8 a 就会发生 1 次渗滤液泄漏事故。在填埋场运营初期,事故发生概率可能会较低,但是在运营后期,随着设备的老化和防渗性能的降低,发生事故的率将会明显升高。

表 6 事故基本事件的发生概率
Table 6 The probabilities of the basic incidents in the accident

事件	概率/a ⁻¹	事件	概率/a ⁻¹	事件	概率/a ⁻¹	事件	概率/a ⁻¹
X1	0.2	X5	0.08	X9	0.01	X13	0.1
X2	0.1	X6	0.02	X10	0.1	X14	0.01
X3	0.3	X7	0.02	X11	0.05	X15	0.1
X4	0.5	X8	0.05	X12	0.2	X16	0.2

注:由于这方面的数据难以获得,该表中的数据均为参考类似事件的发生概率给出的参考值。

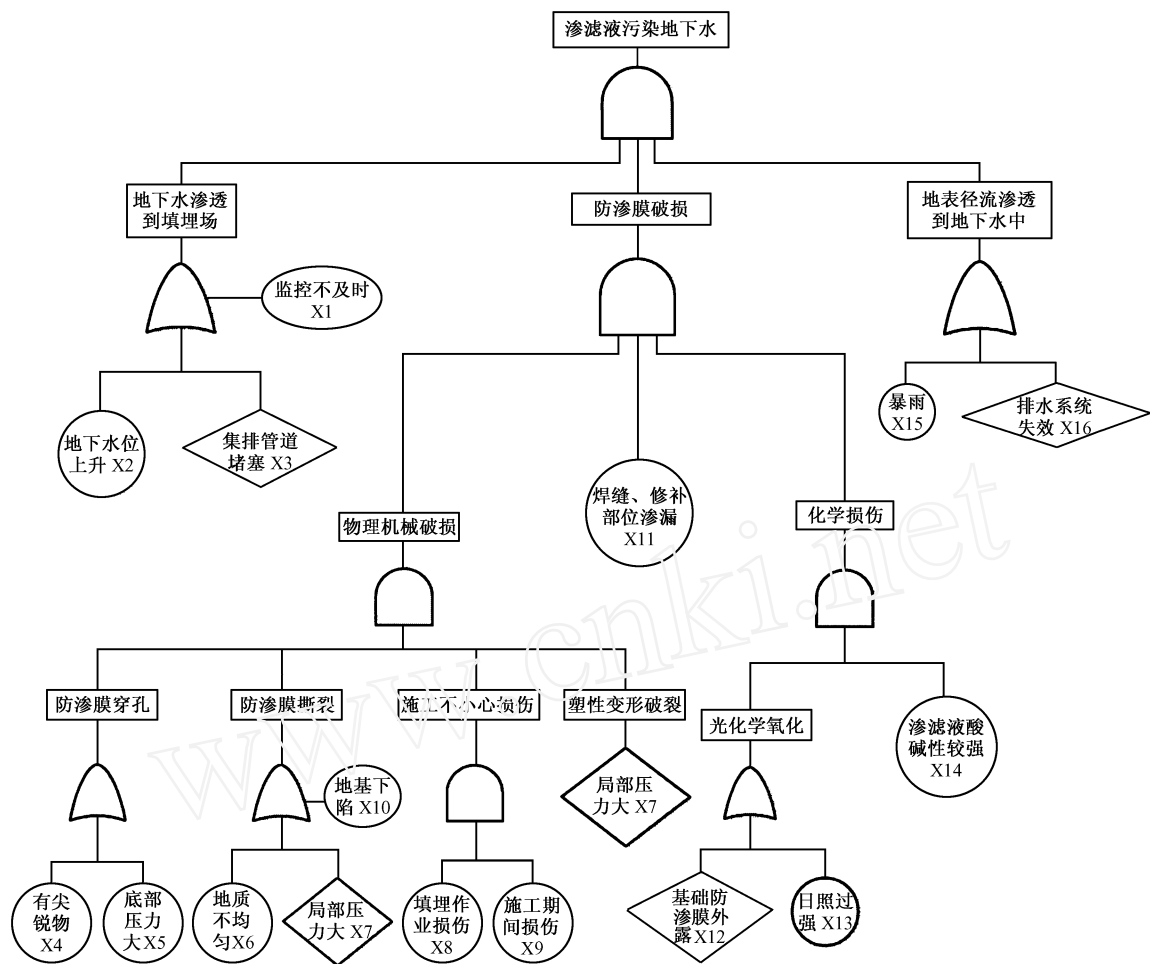


图 2 渗滤液污染地下水事故故障树图

Fig. 2 The Fault Tree of the underwater leachate pollution accident

3 结论

通过对危险废物填埋设施进行分析,识别出了危险废物填埋的风险源;提出发生渗滤液泄漏污染地下水事故时,可采取健康风险评价方法和故障树结合的办法进行环境风险评价;而如果发生其他事故则可以利用故障树方法进行评价。在给出了健康风险评价和故障树评价的方法之后,结合具体的案例,对渗滤液泄露污染地下水的事进行了详细的健康风险评价和系统安全性分析。结果表明,文中所建立的风险评价方法可以满足危险废物填埋设施环境风险评价的需求。

参考文献:

[1] 龙朝晖, 杨芸, 毕朝文. 危险废物的环境风险评价探讨[J]. 中国资源综合利用, 2004, (11): 21 - 23.
Long Chaohui, Yang Yun, Bi Chaowen. The study of environmental risk assessment of hazardous waste [J]. China Resources Comprehensive Utilization, 2004, (11): 21 - 23.
[2] David Slater, Huw Jones. Environmental risk assessment and the environment agency[J]. J Hazard Materi, 1999, 65: 77 - 91.

[3] Jim Bridges. Human health and environmental risk assessment: the need for a more harmonised and integrated approach[J]. Chemosphere, 2003, 52: 1347 - 1351.
[4] 国家环境保护总局危险废物管理培训及技术转让中心. 危险废物管理与处理处置技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2003.
National Environment Protection Bureau Hazardous Waste Management Training and Technology Transfer Center. Hazardous waste management and disposal technology [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2003.
[5] USEPA. Guidance on collection of emissions data to support site-specific risk assessments at hazardous waste combustion facilities, EPA530 - D - 98 - 002[R]. Washington DC: Office of Solid Waste, 1998.
[6] 杨晓松. 环境风险评价的不确定性及其度量[J]. 国外金属矿选矿, 1996, (10): 53 - 56.
Yang Xiaosong. The uncertainty and its quantitative estimates in environmental risk assessment[J]. Metallc Ore Dressing Abroad, 1996, (10): 53 - 56.
[7] Slacka R J, Gronowb J R, Voulvoulisa N. Household hazardous waste in municipal landfills: contaminants in leachate[J]. Sci Total Environ, 2005, 337: 119 - 137.

(责任编辑 潘风云)