张琪琪,张少东,徐铃鸿,等.基于互联网大数据的中国生活垃圾填埋场事故风险统计概率研究 [J]. 中国环境科学, 2026,46(2):1176-1184.
Zhang Q Q, Zhang S D, Xu L H, et al. Statistical probability of accident risks of municipal solid waste landfills in China based on internet big data [J]. China Environmental Science, 2026,46(2):1176-1184.

基于互联网大数据的中国生活垃圾填埋场事故风险统计概率研究

张琪琪[1,2,3],张少东[1,2,3],徐铃鸿[1,2,3],韩智勇[1,2,3*] (1.地质灾害防治与地质环境保护全国重点实验室(成都理工大学),四川 成都 610059；2.生态环境部水土污染协同控制与联合修复重点实验室(成都理工大学),四川 成都 610059；3.成都理工大学生态环境学院,四川 成都 610059)

摘要：通过对 2004~2022 年互联网报道的中国生活填埋场事故风险事件进行大数据检索,采用离散型二项分布的概率模型,对填埋场事故风险概率进行统计分析,以期厘清事故类型、发生概率及其发展趋势,识别主要风险源,并提出针对性的防范措施.研究表明:中国生活垃圾填埋场事故数总计 128 件,事故年发生量总体呈波动上升趋势,2021 年达到峰值后开始下降;填埋场事故风险发生概率为 1.92×10^{-2};事故类型占比由高到低依次为环境污染事故(52.34%)、火灾(13.28%)、中毒(10.16%)、坍塌(8.59%)、其他事故(8.59%)、爆炸(7.03%),其发生概率依次为 1.0×10^{-2}、2.54×10^{-3}、1.95×10^{-3}、1.65×10^{-3}、1.65×10^{-3}、1.35×10^{-3},其中环境污染事故最为突出;生活垃圾填埋场事故风险可以通过保障填埋场防渗、导排、覆盖等施工质量,完善渗滤液处理设施,加强填埋气导排与回收利用,严控明火,实时监测重点区域,构建风险事故应急体系,加强日常运行安全管理和宣传教育等措施进行管控.

关键词：生活垃圾填埋场；事故风险；事故概率；防范措施；大数据统计
中图分类号：X55 **文献标识码**：A **文章编号**：1000-6923(2026)02-1176-09

Statistical probability of accident risks of municipal solid waste landfills in China based on internet big data. ZHANG Qi-qi[1,2,3], ZHANG Shao-dong[1,2,3], XU Ling-hong[1,2,3], HAN Zhi-yong[1,2,3*] (1.State Key Laboratory of Geohazard Prevention and Geoenvironment Protection (Chengdu University of Technology), Chengdu 610059, China；2.State Environmental Protection Key Laboratory of Synergetic Control and Joint Remediation for Soil & Water Pollution (Chengdu University of Technology), Chengdu 610059, China；3.College of Ecology and Environment, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China). *China Environmental Science*, 2026,46(2)：1176~1184

Abstract：Based on big data retrieval of internet-reported risk incidents in municipal solid waste (MSW) landfills from 2004 to 2022 in China, landfill accident risks were statistically analyzed with a discrete binomial distribution probability mode. The aims were to clarify accident types, occurrence probabilities and trends, identify major risk sources, and propose targeted prevention measures, thereby providing a theoretical basis for landfill risk management. The results showed that a total of 128 MSW landfill accidents were reported, with annual occurrences exhibiting a fluctuating upward trend, peaking in 2021 before declining. The overall probability of landfill accidents was 1.92×10^{-2}, with the following distribution by type in descending order: environmental pollution incidents (with percentage of 52.34%, with probability of 1.0×10^{-2}), fires (13.28%, 2.54×10^{-3}), poisoning (10.16%, 1.95×10^{-3}), collapses (8.59%, 1.65×10^{-3}), other accidents (8.59%, 1.65×10^{-3}), and explosions (7.03%, 1.35×10^{-3}). Notably, Environmental pollution incidents were identified as the dominant accidents. To mitigate these risks, key measures include ensuring the quality of landfill engineering (such as seepage prevention system, drainage system and cover system et al.), improving leachate treatment facilities, enhancing landfill gas extraction and utilization, strict fire control, monitoring critical zones in real time, establishing emergency response systems, strengthening daily operational safety management, and promoting safety awareness.

Key words：municipal solid waste landfills；accident risk；accident probability；prevention measures；big data statistics

卫生填埋因其成本低、运行操作简单、适应性强,已成为目前国内外应用最为广泛的垃圾处置方式[1].自 20 世纪 80 年代以来,我国填埋垃圾数 10 亿 t,累计承载了超 70%的生活垃圾无害化处置量;尤其是“十一五”以来,填埋场建设迅速推进,到 2018 年,已建运行城市生活垃圾卫生填埋场 663 座,填埋量达到峰值 12037.6 万 t[2-4],随后被焚烧替代而迅速降低,填埋占比从 2013 年的 68.16%降低至 2022 年的 12.46%[5].尽管填埋场的数量和比例日益减少,但在

收稿日期：2025-07-08
基金项目：西藏自治区科技计划重点科技项目(XZ202403ZY0043)
* 责任作者, 教授, hanzhiyong13@cdut.edu.cn

众多已建填埋场的长期运行和封场维护过程中存在多种潜在事故风险.例如填埋气积聚造成火灾爆炸事故[6];有毒有害填埋气体释放造成大气污染并危害人体健康[7];垃圾渗滤液渗漏或处置不当,对周边水土和生态环境造成持续数十年甚至上百年的污染[8-10].同时,非正规填埋场由于风险防范措施不足,除了会发生上述风险事故外,更易发生坍塌事故,研究发现未按标准进行分层压实的填埋场坍塌风险更高[11].

当前,针对我国生活垃圾填埋场事故,其风险防控面临技术标准迭代与历史遗留问题的双重挑战,这一现实困境引发了众多学者和管理者的持续关注.在填埋场环境污染风险评价方面,主要聚焦于污染机理与风险评估方法的探索,包括:运用概率模型量化防渗层破损程度[12];通过地下水中微生物的群落结构特征反映填埋场水污染情况,内梅罗指数、单因子污染指数等反映土壤污染情况[13-14];采用内梅罗污染指数法对填埋气恶臭气体进行评价以及对填埋气产气量进行评估[15-16],并构建了填埋场周边环境综合评价体系[17].在事故概率研究方法方面呈现多样化特征,既有针对船舶火灾事故风险的故障树法[18]及石油泄露概率计算的二项分布模型[19],也发展了基于贝叶斯网络的危化品爆炸事故分析[20],对化工厂氯化氢事故的模拟和预测,还基于事故树分析对加氢站的安全进行风险评估等[21-22].

综上所述,现有研究主要聚焦在填埋场生态环境污染和事故风险影响评价方面,考虑风险是发生危险事件或有害暴露的可能性,与随之引发的人身伤害、健康损害或财产损失的结果的组合[22].在风险分析中,不仅要分析事件的危害后果,还要分析其可能性.然而,在当前填埋场风险评价中,由于事故报告制度不完善、历史档案缺失、非正规填埋场监管薄弱等原因,导致系统、全面地获取全国范围内填埋场事故数据面临巨大挑战,因此,针对填埋场事故风险概率的研究尚未见报道.新兴的互联网大数据技术为挖掘、整合分散的事故信息提供了新的可能性.因此,本研究采用离散型二项分布的概率模型和数理统计法对生活垃圾填埋场事故概率进行统计分析,科学评估填埋场事故风险,旨在为填埋事故风险管理提供参考.

1　研究方法

1.1　数据来源

1.1.1　检索年限与事故类型　虽然我国生活垃圾填埋场从“十一五”开始大量建设,但无法获取填埋场事故发生的官方系统统计数据.鉴于互联网新闻报道也从“十一五”开始逐渐普及,通过互联网追踪填埋场事故报道成为可能,因此将检索年限设定为2004~2022 年,检索工具主要依托各大门户网站、政府官网和密切相关的公众号.检索事故类型包括:环境污染事故(含大气污染、水体污染、土壤污染,以及渗滤液泄漏或渗漏导致的复合生态环境污染等)、火灾事故、爆炸事故、中毒事故、坍塌事故、其他事故(包括安全事故致人死亡、非法处置其他固废、淹溺、机械伤害以及其他致伤致残致死事件等).

1.1.2　检索关键词　百度官方网站(www.baidu.com)的检索关键词为“填埋场”(爆炸)、“填埋场”(火灾)、“填埋场”(坍塌)、“填埋场”(污染)、“填埋场”(事故)、“填埋场”(风险)、“填埋场”(安全隐患);中国固废网(solidwaste.com.cn)、安全管理网(safehoo.com)和各省生态环境厅官网的检索关键词为“填埋场”;生态环境部官网(mee.gov.cn)检索关键词为“警示案例填埋场”;北极星环保网(bjx.com.cn)、公众号(固废观察、北极星固废网)检索关键词为“填埋场事故”.

1.1.3　检索结构筛选原则　检索结果根据如下原则进行筛选:

(1)非相关性剔除,包括①非事件性剔除,例如仅涉及政策法规文件、技术专利文献、纯经济效益分析类;②非生活垃圾事件剔除,例如仅涉及建筑垃圾、工业固废、危险废物等;③非填埋场事件剔除,例如仅涉及焚烧厂、堆肥厂等;④非事故性事件剔除,例如仅涉及日常运营问题,未造成实际风险的违规操作以及计划内的封场或检修活动.

(2)非确定性剔除,例如无时间地点,无法考证其真实性的.

(3)重复性剔除:根据时间、地点、填埋场名称以及发生的事故类型识别重复事件,4 个要素相同时,只记为 1 件.

(4)在环境污染事故统计中,单次渗滤液渗漏或泄漏事故事件只统计为 1 件;但在环境污染事故类型统计中,将渗滤液渗漏或泄漏导致的水、土、气污

染分别计入对应的水体污染、土壤污染、大气污染统计中.

(5)针对其他事故事件,同一事件导致不同事故类型,只按照主要事故类型记为 1 件.

1.2 事故风险概率计算方法

1.2.1 数理统计法 基于历史事故或事件记录,通过统计分析来计算事故发生频率或概率的方法.如果 n 个生活垃圾填埋场在一定时间内发生 k 次事故(k=0,1,2,3,…,k),则发生事故的风险概率计算公式为[23]:

$$P(k) = k / n \tag{1}$$

式中:P 为生活垃圾填埋场发生事故的概率;n 为生活垃圾填埋场个数;k 为在 n 个生活垃圾填埋场发生事故的件数.

1.2.2 离散二项分布法 概率计算方法包括先验概率计算和后验概率计算[24].由于生活垃圾填埋场事故的统计数据仅来自互联网,因此事故的基础概率值采用后验概率计算[25].首先运用后验计算法求出事故发生的概率基础值,再计算出生活垃圾填埋场发生事故的概率以及发生不同事故类型的概率.

通过对我国填埋场发生事故历史资料的分析表明,生活垃圾填埋场在运行过程中发生事故的概率非常小,是稀少事件.因此,认为生活垃圾填埋场发生事故的表现形式符合离散二项分布,其发生事故的风险概率为[26]:

$$P(k) = C_n^k p^k q^{n-k} = \frac{n!}{k!(n-k)!} p^k q^{n-k} \tag{2}$$

式中:P 为生活垃圾填埋场发生事故的概率;p 为每个生活垃圾填埋场发生事故的概率;q=1−p 为每个生活垃圾填埋场不发生事故的概率;n 为生活垃圾填埋场个数;k 为在 n 个生活垃圾填埋场发生事故的件数.

将一定时间内在运行的生活垃圾填埋场不发生事故的置信度取为 95%,则事故概率为[25]:

$$P(k \geqslant 1) = \sum_{i=n}^{k} C_n^k p^k (1-p)^{n-k} \leqslant 0.95 \tag{3}$$

即

$$P(k = 0) = 1 - P(k \geqslant 1) \geqslant 0.95 \tag{4}$$

填埋场发生事故的概率基础值:

$$p \leqslant 1 - \sqrt[n]{0.05} \tag{5}$$

数据采用 Microsoft Excel 2016 进行整理,通过 Origin 2021 进行数据绘图,使用 SPSS 26.0 计算 Pearson 相关系数.

2 结果与讨论

2.1 中国生活垃圾填埋场事故风险统计分析

2.1.1 事故分布与趋势分析 如图 1 所示,2004~2022 年检索结果总数为 16453 条,剔除无效检索结果后,得到生活垃圾填埋场事故有效事件数 128 件,并随着填埋场个数的增长而波动上升:在 2014 年前事故数在 0~6 之间波动,随后迅速上升,在 2021 年达到峰值 22 件后随填埋场数量的下降开始回落.

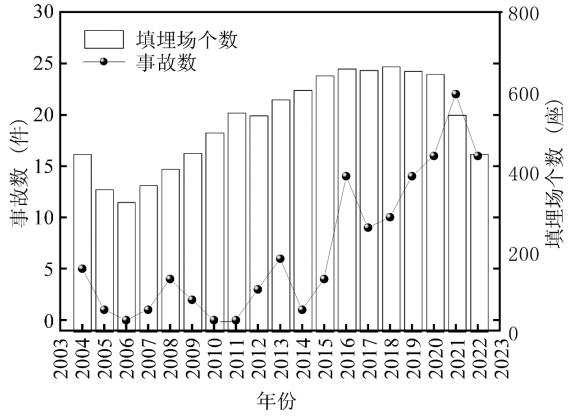


图 1 中国生活垃圾填埋场事故数历史变化趋势

Fig.1 Historical trend of accident number at municipal solid waste landfills in China

填埋场事故发生受多种因素影响,其中 Pearson 相关分析显示事故数与填埋场总数呈显著正相关(r=0.468,P=0.044),可见填埋场基数影响明显.此外,填埋场风险管理水平和互联网新闻报道的普及也密切相关.在填埋场发展前期互联网报道的事故数相对较低,这是因为填埋场总数相对较低,同时互联网也正处于普及和发展中,因此实际发生的填埋场事故和可检索的互联网新闻报道事故数均相对较少.到填埋场发展后期,一方面填埋场数量明显增多,另一方面前期建设和运行的大量填埋场因设备设施老化、管理维护不到位以及互联网全面普及等原因[27],导致互联网报道的事故数迅速增加;2021 年后,随着填埋场总数的下降,填埋场管理规范增强,以及国家对老旧填埋场进行了全面整治,因此填埋场风险事故总数开始迅速回落.

由表 1 可知,我国填埋场事故数在不同地区分布差异明显,整体呈从东部到西部、再到东北地区

递减的趋势.其中华东地区填埋场事故数最多,达37 件;东北地区最少,仅有 6 件.东部地区作为我国人口高度集聚、经济发达的核心地带,生活垃圾产生量高于其它地区;同时城镇化进程起步早,生活垃圾填埋场率先在这些地区建设使用,填埋场基数更大;早期建设的填埋场普遍存在防渗标准偏低的问题,加之丰沛的降雨量,导致渗滤液产生和泄漏风险加剧;随着运营年限增加,这些历史遗留填埋场面临堆体超高、超量填埋以及边坡失稳等结构性风险;而且,东部地区环境监管体系更为完善,环保执法力度更严,信息公开更完善,因此,导致东部地区填埋场事故曝光率高.

表 1　生活垃圾填埋场事故数区域统计

Table 1　Regional statistics of accidents in MSW landfill

区域	事故数
华东地区	37
华中地区	25
华南地区	23
西南地区	17
西北地区	11
华北地区	9
东北地区	7

2.1.2　事故类型分析　由表 2 可知,生活垃圾填埋场发生事故的类型依次为环境污染事故(52.34%)、火灾(13.28%)、中毒(10.16%)、坍塌(8.59%)、其他事故(8.59%)、爆炸(7.03%).可见填埋场事故风险主要为环境污染事故,而且渗滤液渗漏或泄漏导致的水土污染十分突出,占环境污染事故的 71.2%,尤其是水污染,达到 50%.火灾事故居次,可能与填埋场内的可燃物堆积自燃或简易填埋场人为焚烧减量有关[6].中毒与填埋场有害气体(如甲烷、硫化氢)直接相关,主要是由于填埋场和渗滤液处理站气体导排不畅聚集在封闭或半封闭空间,缺乏预警和个人防护所致[28].坍塌事故可能是因为填埋高度超高、边坡未按 1:3 放坡,以及渗滤液和浓缩液回灌、污泥填埋等导致填埋场堆体结构失稳所致[29].爆炸事故可能是由于生活垃圾填埋场内部产生的大量填埋气体未及时导排,导致内部压力过大而突发性释放所致,或是填埋气体在封闭或半封闭空间聚集,甲烷达到爆炸极限遇明火所致[28,30].其他事故主要是在填埋场建设和运行过程中操作不规范,管理不到位所致[31].

2.2　中国生活垃圾填埋场事故风险概率计算

2.2.1　填埋场事故风险基础值计算　2004~2022 年中国生活垃圾填埋场事故风险以及不同类型事故风险的发生概率基础值为 2.99×10^{-4}.由表 3 可知,由于概率基础值仅与填埋场座数有关,因此填埋场事故概率基础值的历史变化趋势与填埋场座数变化趋势一致,概率基础值介于 9.20×10^{-3}~4.51×10^{-3} 之间,呈现波动增长的趋势,在 2018 年达到峰值后下降.

表 2　生活填埋场不同事故类型统计

Table 2　Statistics of different types of MSW landfills landfill accidents

事故类型	事故数	占比(%)
环境污染事故	67	52.34
火灾事故	17	13.28
中毒事故	13	10.16
坍塌事故	11	8.59
其他事故	11	8.59
爆炸事故	9	7.03

表 3　生活垃圾填埋场事故概率基础值

Table 3　Fundamental accident probability in MSW Landfills

年份	填埋场个数(n)	概率基础值(p)	年份	填埋场个数(n)	概率基础值(p)
2004	444	6.72×10^{-3}	2014	604	4.95×10^{-3}
2005	356	8.40×10^{-3}	2015	640	4.67×10^{-3}
2006	324	9.20×10^{-3}	2016	657	4.55×10^{-3}
2007	366	8.15×10^{-3}	2017	654	4.57×10^{-3}
2008	407	7.33×10^{-3}	2018	663	4.51×10^{-3}
2009	447	6.68×10^{-3}	2019	652	4.58×10^{-3}
2010	498	6.00×10^{-3}	2020	644	4.64×10^{-3}
2011	547	5.46×10^{-3}	2021	542	5.51×10^{-3}
2012	540	5.53×10^{-3}	2022	444	6.72×10^{-3}
2013	580	5.15×10^{-3}	2004~2022	10009	2.99×10^{-4}

2.2.2　填埋场事故风险概率计算　由表 4 可知,离散二项分布法和数理统计法计算的 2004~2022 年中国生活垃圾填埋场发生事故的概率分别为 1.92×10^{-2} 和 1.28×10^{-2},事故发生概率的变化趋势与事故事件数历史变化趋势基本一致,尤其是 2014 年以后增长显著,在 2021 年达到最大值后开始下降.两种方法计算的填埋场事故风险概率在数量级上基本保持一致,但离散二项分布法计算的概率略高于数理统计法;从统计方法的严谨性来说,可优先选择离散二项分布法计算的概率.

2004~2022 年中国生活垃圾填埋场不同类型事故的概率分布见表 5.环境污染事故概率最大(1.00×10^{-2}),是填埋场最易发生的事故,这主要是由渗滤液泄漏和填埋气无序释放造成.一方面,大量高含水率、高有机质的厨余垃圾、污泥等进入填埋场,不但增加渗滤液产量[32],还促进填埋气体的产生.另一方面,由于填埋场覆盖系统和防渗系统未设置或者破损,不但导致渗滤液产量增加,也会造成渗滤液和填埋气体的渗漏或散逸;此外,渗滤液和填埋气体的收集、导排和处理不畅,会造成事故排放,污染环境;最后,填埋场选址和日常运行管理不规范,也会导致环境污染事故[33].

表 4 生活填埋场发生事故概率

Table 4 Probability of accidents occurring in MSW landfills

年份	事故数	离散二项分布	数理统计法
2004	5	1.68×10^{-2}	1.12×10^{-2}
2005	1	4.19×10^{-3}	2.80×10^{-3}
2006	0	0	0
2007	1	4.08×10^{-3}	2.73×10^{-3}
2008	4	1.47×10^{-2}	9.82×10^{-3}
2009	2	6.68×10^{-3}	4.47×10^{-3}
2010	0	0	0
2011	0	0	0
2012	3	8.30×10^{-3}	5.56×10^{-3}
2013	6	1.55×10^{-2}	1.03×10^{-2}
2014	1	2.47×10^{-3}	1.70×10^{-3}
2015	4	9.34×10^{-3}	6.25×10^{-3}
2016	14	3.18×10^{-2}	2.13×10^{-2}
2017	9	2.06×10^{-2}	1.38×10^{-2}
2018	10	2.25×10^{-2}	1.51×10^{-2}
2019	14	3.21×10^{-2}	2.15×10^{-2}
2020	16	3.71×10^{-2}	2.48×10^{-2}
2021	22	6.06×10^{-2}	4.06×10^{-2}
2022	16	5.38×10^{-2}	3.6×10^{-2}
2004~2022	128	1.92×10^{-2}	1.28×10^{-2}

表 5 生活填埋场不同类型事故概率

Table 5 Probabilities of different types of accidents occurring in MSW landfills

事故类型	离散二项分布	数理统计法
环境污染事故	1.00×10^{-2}	6.69×10^{-3}
火灾事故	2.54×10^{-3}	1.70×10^{-3}
中毒事故	1.95×10^{-3}	1.30×10^{-3}
坍塌事故	1.65×10^{-3}	1.10×10^{-3}
其他事故	1.65×10^{-3}	1.10×10^{-3}
爆炸事故	1.35×10^{-3}	8.99×10^{-4}

填埋场火灾(2.54×10^{-3})和爆炸事故(1.35×10^{-3})是填埋场常见的风险之一.相比化工罐区储罐火灾概率(9.20×10^{-5})[34],填埋场火灾和爆炸事故发生概率高出 2 个数量级.这是因为生活垃圾中大量厨余等有机组分在厌氧降解过程中会持续产生大量甲烷气体(CH_4).由于气体导排系统在设计上存在不足或后期维护不善,这些可燃气体容易在填埋体内积聚,当甲烷浓度达到 5%~15%的爆炸极限范围时,极易引发爆炸事故;而且,填埋场作为开放式作业环境,各类潜在点火源,包括作业机械产生的火花、雷电以及人为因素等火源管控面临巨大挑战;同时,相比化工园区,填埋场存在管理不完善、监测预警系统建设滞后、应急预案执行不力等问题,这些都可能导致火灾爆炸事故发生概率增加[35-36].

填埋场中毒事故(1.95×10^{-3})也是填埋场常见的风险之一,比气化站生物质气化中毒(1.11×10^{-4})明显更高,这主要是由于作业人员吸入有害气体(H_2S 等)导致,尤其是在填埋场污泥填埋区、渗滤液收集处理池等封闭和半封闭空间作业或检修时,由于未按规范作业,未做好个人防护,极易造成操作人员吸入过量有毒有害气体致人昏迷甚至死亡,或高浓度 CH_4 和 CO_2 致人窒息[37-38].

填埋场坍塌事故(1.65×10^{-3})主要是由垃圾堆体滑坡或垃圾坝垮塌造成.这主要是由于垃圾堆体填埋边坡过陡、高度过高、压实不足等不规范运行所致;同时向填埋堆体混入半固态污泥、回灌渗滤液和浓缩液等流体,也会影响填埋堆体的稳定性此外,如果选址不当,在遇暴雨、干缩裂缝、地震等自然灾害时,垃圾堆体也极易坍塌[6,39].

填埋场其他事故(1.65×10^{-3})包括机械伤害、淹溺和非法倾倒等,主要是由于运行管理不规范、安全制度缺乏、监管不到位、人员宣传教育不足等多种原因综合导致.

本研究受限于互联网数据捕获率(尤其 2010 年前),真实概率可能被低估;未来需融合卫星遥感(如渗滤液渗漏热异常监测)与政府监管数据构建更完备事故库.概率模未考虑区域气候与管理水平差异,建议引入空间贝叶斯网络深化分析.

2.3 中国生活垃圾填埋场事故风险防范措施

2.3.1 环境污染事故 环境污染事故为主要事故,发生概率为 1.00×10^{-2}(渗滤液泄漏导致的水土污染是首要风险,占比 71.2%),其发生的过程包括三阶段,

即污染物的产生阶段(包括渗滤液、填埋气体产生:尤其是填埋中后期)、传播阶段(渗滤液渗漏或泄漏到水土环境、填埋气体释放到大气环境)、污染物的影响阶段(水、土、气、生态环境污染).

在产生阶段,可以通过(1)源头减量措施,减少渗滤液和填埋气体的产生,包括严控垃圾入场管理,防止高含水率、高有机负荷的垃圾进入;(2)加强人工调控措施(pH 值、温度、含水率、营养物、微生物接种等),缩短填埋场稳定化时间[40].

在传播阶段,(1)强制安装渗滤液导排层渗透系数实时监测仪,确保>10^{-3}cm/s;(2)保障填埋场防渗和覆盖系统的建设质量和日常维护,减少渗滤液和填埋气体排放量;(3)强化渗滤液导排和处理,降低填埋场内部渗滤液液位,减少渗漏量, 障渗滤液达标排放,减少非法泄漏量;(4)设置有效的防渗、覆盖和雨污分流系统,减少渗液下渗;(5)强化填埋气体导排和处理,降低填埋场内部气压,减少无组织排放量.安装渗滤液收集和处理设施,确保渗滤液得到妥善处理,将垃圾渗滤液隔离在库区内并进行有效导排,防止污染地下水及地表水[41-43].

在影响阶段:(1)科学选址,设置卫生防护距离;(2)开展填埋场封场生态修复、水土污染修复;(3)加强个人防护.

2.3.2　火灾和爆炸事故　火灾(垃圾自燃、填埋气燃烧)和爆炸事故发生的概率分别为(2.54×10^{-3}、1.35×10^{-3}),发生事故的 3 个阶段包括产生与聚集阶段,即热与可燃垃圾聚集,填埋气的产生与聚集(H_2S、CH_4、NH_4 浓度达 5%~15%);火源触发阶段,即垃圾自燃、人为点燃和机械火花等;火势蔓延阶段和产生影响阶段,即持续燃烧,连锁爆炸,有毒气体会进行扩散,爆炸产生强大的冲击力和高温,对填埋场及其周边的设施、人员等造成严重破坏和影响.

产生与聚集阶段,防止 CH_4 浓度达爆炸极限:(1)填埋气收集井内设置CH_4>5%LEL 自动报警(2)加强填埋气(CH_4 等)实时监测与爆炸极限预警,安装激光甲烷检测仪,覆盖导气井、堆体裂隙等高风险区;(3)填埋气高效收集与利用,优化导气井布局:按垃圾堆体高度动态调整,间距≤30m,强化负压抽气:真空泵压力维持−5kPa~−10kPa,防止气体滞留.

在火源触发阶段,可通过(1)加强垃圾入场管理,杜绝易燃易爆物进入填埋场;(2)严禁携带火种进入填埋场;(3)选用防爆机械装置,加强运输和操作机械维护,减少机械火花产生;(4)减少封闭和半封闭空间设置,加强这些空间的通风;(5)加强填埋气收集、导排和利用.

在火势蔓延和影响阶段,主要做好应急预案及日常演练,按规范设置防火防爆物资,并按应急预案程序开展相应的应急处置[6].

2.3.3　中毒事故　中毒事故发生的概率为(1.95×10^{-3}),发生的 3 个阶段包括有毒气体在填埋区和渗滤液处理区产生、有毒物质的扩散、有毒物质造成影响.可通过(1)加强对填埋气体的收集与导排;(2)加强对密封空间的密封性检查、封闭和半封闭空间有毒有害气体的实时监测;(3)加强半封闭空间通风换气;(4)规范运行操作,加强个人防护;(5)设置中毒事故应急物资,加强应急演练;(6)加强宣传教育,提高工作人员的安全意识和应急能力等措施进行防范[44].

2.3.4　坍塌事故　坍塌事故发生的概率为(1.65×10^{-3}),其过程包括坍塌事故的隐患形成阶段(施工质量不达标、运营管理不善、选址等)、坍塌事故的事故触发阶段(自然灾害,堆体失稳、坝体溃坝和边坡滑坡)、坍塌事故的影响阶段.

在隐患形成阶段,可通过科学的选址和设计,确保填埋场址水文地质条件稳定;规范填埋操作,边坡不超过 1:3,不超高填埋,压实密度不低于 0.8t/m^3 等措施防范.在事故触发阶段,加强自然灾害的防御,做好暴雨灾害应急预案;合理处置渗滤液、浓缩液和污泥,减少或禁止半固体和流体物质进入填埋场;做好填埋堆体稳定性的常规监测,发现问题及时处理,启动应急削坡减载或加固垃圾坝等措施,提前阻断失稳过程[45].

2.3.5　其他事故　其他事故概率为(1.65×10^{-3}),主要可通过建设完善的安全、环保、健康管理制度,加强填埋场日常管理和运行维护;加强安全环保卫生宣传教育,提高风险防范意识,规范不规范操作和运行行为等措施进行防范.

3　结论

3.1　2004~2022 年,中国生活垃圾填埋场共发生 128 起事故,整体呈波动上升趋势,2021 年达到峰值后略有回落.事故类型以环境污染事故为主

(52.34%),其中,渗滤液泄漏引发的水土污染是首要风险,占全部环境污染事故的 71.2%,其次为火灾(13.28%)、中毒(10.16%)、坍塌(8.59%)、其他事故(8.59%)和爆炸(7.03%).环境污染主要是渗滤液泄漏导致的水土污染.

3.2 中国生活垃圾填埋场事故风险的总概率为1.92×10^{-2}.不同类型事故的发生概率由大到小依次为:境污染事故(1.00×10^{-2})、火灾(2.54×10^{-2})、中毒(1.95×10^{-3})、坍塌(1.65×10^{-3})、其他事故(1.65×10^{-3})和爆炸(1.35×10^{-3}),其中环境污染事故的发生概率最高.

3.3 按填埋场不同类型事故发生概率优先级做好防范措施.首先,做好渗滤液防渗、导排、处理以及填埋场覆盖措施,减少渗滤液污染事故.其次,加强填埋气(CH_4 等)导排和监测以及火源防控,减少火灾爆炸事故.再次,科学选址,规范设计和操作,构建安全监测及应急响应机制,以防范坍塌事故.最后,对于中毒事故和其他事故要加强运行管理和日常维护,强化人员的安全、环保和卫生教育等系统性防控措施.

参考文献:

[1] 杨 娜,何品晶,吕 凡,等.我国填埋渗滤液产量影响因素分析及估算方法构建 [J]. 中国环境科学, 2015,35(8):2452-2459.
Yang N, He P J, Lv F, et al. Analysis of factors affecting the production of landfill leachate and development of an estimation method [J]. Chinese Journal of Environmental Science, 2015,35(8):2452-2459.

[2] 中华人民共和国国家统计局.中国统计年鉴 [M]. 北京:中国统计出版社, 2023.
National Bureau of Statistics of the People's Republic of China. China Statistical Yearbook [M]. Beijing: China Statistics Press, 2023.

[3] 李 蕾,彭 垚,谭涵月,等.填埋场原位好氧稳定化技术的应用现状及研究进展 [J]. 中国环境科学, 2021,41(6):2725-2736.
Li L, Peng Y, Tan H Y, et al. Current status and research progress of in-situ aerobic stabilisation technology in landfills [J]. Chinese Journal of Environmental Science, 2021,41(6):2725-2736.

[4] Madon I, Drev D, Likar J. Long-term risk assessments comparing environmental performance of different types of sanitary landfills [J]. Waste Management, 2019,96:96-107.

[5] 张净瑞,郑铭灏,郑飞龙,等.我国生活垃圾渗滤液的产生、处理现状及发展趋势 [J/OL]. 环境工程学报, 1-19[2025-07-27].
Zhang J R, Zheng M H, Zheng F L, et al. Generation, treatment status, and development trends of municipal solid waste leachate in China [J/OL]. Journal of Environmental Engineering, 1-19[2025-07-27].

[6] 刘忠鹏.老垃圾堆放场环境风险评估技术研究 [D]. 成都:西南交通大学, 2014.
Liu Z P. Technical research on environmental risk assessment of old landfills [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2014.

[7] Masalegooyan Z, Piadeh F, Behzadian K. A comprehensive framework for risk probability assessment of landfill fire incidents using fuzzy fault tree analysis [J]. Process Safety and Environmental Protection, 2022,163:679-693.

[8] 冯诗杰,韩智勇,费勇强,等.填埋场地下水溶解性有机物时空分布特征分析:以四川红层区某生活垃圾填埋场为例 [J]. 环境科学研究, 2023,36(6):1156-1165.
Feng S J, Han Z Y, Fei Y Q, et al. Spatio-temporal distribution characteristics of dissolved organic matter in landfill groundwater: A case study of a municipal solid waste landfill in the hongcheng district of sichuan province [J]. Research on Environmental Sciences, 2023,36(6):1156-1165.

[9] 韩智勇,许 模,刘 国,等.生活垃圾填埋场地下水污染物识别与质量评价 [J]. 中国环境科学, 2015,35(9):2843-2852.
Han Z Y, Xu M, Liu G, et al. Identification and quality assessment of groundwater pollutants in municipal solid waste landfills [J]. Chinese Journal of Environmental Science, 2015,35(9):2843-2852.

[10] 胡馨然,杨 斌,韩智勇,等.中国正规、非正规生活垃圾填埋场地下水中典型污染指标特性比较分析 [J]. 环境科学学报, 2019,39(9):3025-3038.
Hu X R, Yang B, Han Z Y, et al. Comparative analysis of typical pollution indicators in groundwater at formal and informal municipal solid waste landfills in China [J]. Journal of Environmental Sciences, 2019,39(9):3025-3038.

[11] Jayaweera M, Gunawardana B, Gunawardana M, et al. Management of municipal solid waste open dumps immediately after the collapse: An integrated approach from meethotamulla open dump, Sri Lanka [J]. Waste Management, 2019,95:227-240.

[12] 徐 亚,刘玉强,能昌信,等.基于概率风险分析的填埋场安全防护距离研究 [J]. 中国环境科学, 2017,37(7):2786-2792.
Xu Y, Liu Y Q, Neng C X, et al. Research on the safety protection distance of landfills based on probabilistic risk analysis [J]. Chinese Journal of Environmental Science, 2017,37(7):2786-2792.

[13] 李娜英,韩智勇,王双超,等.多污染源作用下填埋场地下水微生物群落分析 [J]. 中国环境科学, 2020,40(11):4900-4910.
Li N Y, Han Z Y, Wang S C, et al. Analysis of microbial communities in landfill groundwater under the influence of multiple pollution sources [J]. Chinese Journal of Environmental Science, 2020,40(11):4900-4910.

[14] 潘 霞,吕梅乐,叶碎增,等.浙江省某非正规垃圾填埋场环境污染状况及稳定化水平研究 [J]. 环境污染与防治, 2021,43(12):1543-1549.
Pan X, Lv M L, Ye S Z, et al. Study on environmental pollution and stabilisation level of an informal landfill in zhejiang province [J]. Environmental Pollution and Prevention, 2021,43(12):1543-1549.

[15] 高 武,詹良通,兰吉武,等.高渗滤液水位填埋场的填埋气高效收集探究 [J]. 中国环境科学, 2017,37(4):1434-1441.
Gao W, Zhan L T, Lan J W, et al. Investigation into the efficient collection of landfill gas from high-permeability leachate water level landfills [J]. Chinese Journal of Environmental Science, 2017,37(4):1434-1441.

[16] 柯 瀚,徐 兴,胡 杰,等.垃圾填埋场生化降解指标测试及液气产

量评估 [J]. 中国环境科学, 2021,41(9):4167−4175.
Ke H, Xu X, Hu J, et al. Testing of biochemical degradation indicators and assessment of liquid and gas production in landfill sites [J]. Chinese Journal of Environmental Science, 2021,41(9):4167−4175.

[17] Masalegooyan Z, Piadeh F, Behzadian K. A comprehensive framework for risk probability assessment of landfill fire incidents using fuzzy fault tree analysis [J]. Process Safety and Environmental Protection, 2022,163:679−693.

[18] 马　可.基于事故树分析的船舶火灾危险性评价和防治研究 [J]. 船舶标准化与质量, 2024,(5):39−43,50.
Ma K. Research on the evaluation and prevention of ship fire hazards based on accident tree analysis [J]. Ship Standardisation and Quality, 2024,(5):39−43,50.

[19] 朱旖旎.基于贝叶斯网络的船舶污染应急防备能力有效性分析 [D]. 宁波:宁波大学, 2022.
Zhu, Y N. Analysis of the effectiveness of emergency preparedness capabilities for ship pollution based on Bayesian networks [D]. Ningbo: Ningbo University, 2022.

[20] 张江石,冯娜娜.基于动态贝叶斯网络情景推演的危化品事故应急处置研究 [J]. 安全与环境学报, 2020,20(4):1420−1426.
Zhang J S, Feng N N. Research on emergency response to hazardous chemical accidents based on dynamic Bayesian network scenario simulation [J]. Journal of Safety and Environment, 2020,20(4):1420−1426.

[21] 张方敏,徐　冰,尹　新,等.氯化氢事故性泄漏扩散的后果模拟分析 [J]. 安全与环境学报, 2011,11(4):193−196.
Zhang F M, Xu B, Yin X, et al. Simulation analysis of the consequences of accidental hydrogen chloride leakage and diffusion [J]. Journal of Safety and Environment, 2011,11(4):193−196.

[22] 刘　堃,杨晓冬,戴　超.基于危险度评价和事故树分析的加氢站安全风险研究 [J]. 中国安全生产科学技术, 2021,17(S1):50−55.
Liu K, Yang X D, Dai C. Safety risk research on hydrogen refuelling stations based on hazard assessment and accident tree analysis [J]. China Safety Science and Technology, 2021,17(S1):50−55.

[23] 李　敏,林志军,王德明,等.我国煤矿重特大火灾事故统计分析 [J]. 中国安全科学学报, 2023,33(1):115−121.
Li M, Lin Z J, Wang D M, et al. Statistical analysis of major and extraordinary fire accidents in chinese coal, mines [J]. Journal of Chinese Safety Science, 2023,33(1):115−121.

[24] 黄燕品,李　颖,周　新,等.港口石油储备基地溢油风险概率计算 [J]. 海洋环境科学, 2015,34(2):313−316.
Huang Y P, Li Y, Zhou X, et al. Calculation of the probability of oil spill risk at port oil reserve bases [J]. Marine Environmental Sciences, 2015,34(2):313−316.

[25] 张　舒.海上溢油事故风险概率实用计算方法的研究 [D]. 大连:大连海事大学, 2011.
Zhang S. Research on practical calculation methods for the probability of risks in marine oil spill accidents [D]. Dalian: Dalian Maritime University, 2011.

[26] 洪晓煜,陈伟琪,张珞平.罗源湾船舶溢油风险评价分析 [J]. 海洋通报, 2009,28(1):59−64.
Hong X Y, Chen W Q, Zhang L P. Risk assessment and analysis of oil spills from ships in luoyuan bay [J]. Marine Bulletin, 2009,28(1):59−64.

[27] 徐　慧.青藏高原生活垃圾填埋场环境风险评价体系研究 [D]. 成都:成都理工大学, 2020.
Xu H. Research on the environmental risk assessment system for municipal solid waste landfills on the qinghai−tibet plateau [D]. Chengdu Chengdu University of Technology, 2020.

[28] 徐翔宇,邵立明,王玉婧,等.黄土覆盖对西北地区填埋场恶臭释放的影响——现场监测与分析 [J]. 中国环境科学, 2025,45(2):882−891.
Xu X Y, Shao L M, Wang Y J, et al. The impact of loesscovering on odour emission from landfills in northwest China——field monitoring and analysis [J]. Chinese Journal of Environmental Science, 2025,45(2):882−891

[29] 戴世金,钱剑文,兰吉武,等.典型生活垃圾填埋场堆体安全监测及堆高稳定性分析 [J]. 环境工程学报, 2022,16(11):3685−3695.
Dai S J, Qian J W, Lan J W, et al. Safety monitoring and height stability analysis of typical municipal solid waste landfills [J]. Journal of Environmental Engineering, 2022,16(11):3685−3695.

[30] 杨兆生.基于层次分析法的生活垃圾应急填埋场工程项目风险管理研究 [D]. 贵阳:贵州大学, 2024.
Yang Z S. Research on risk management of municipal solid waste emergency landfill projects based on the analytic hierarchy process [D]. Guiayng: Guizhou University, 2024.

[31] 黄峰威,姜晓明,陈　林.浅析生活垃圾填埋场运营与管理现状和对策 [J]. 环境卫生工程, 2015,23(5):66−67.
Huang F W, Jiang X M, Chen L. A brief analysis of the current status and countermeasures of municipal solid waste landfill operation and management [J]. Environmental Sanitation Engineering, 2015,23(5):66−67.

[32] 李　鹤.高厨余垃圾填埋场降解固结性状及液气诱发灾害治理方法 [D]. 杭州:浙江大学, 2021.
Li H. Degradation of solidification properties and liquid−gas induced disaster control methods in high kitchen waste landfills [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2021.

[33] 马晨辉,徐　亚,胡　俊,等.固废填埋风险控制理论与技术研究进展 [J]. 环境科学研究, 2025,38(5):1129−1140.
Ma C H, Xu Y, Hu J, et al. Research progress on solid waste landfill risk control theory and technology [J]. Research on Environmental Sciences, 2025,38(5):1129−1140.

[34] 曾　涛,魏利军,多英全,等.化工罐区多灾种耦合动态概率分析 [J]. 消防科学与技术, 2025,44(2):190−195,201.
Zeng T, Wei L J, Duo Y Q, et al. Dynamic probability analysis of multi−disaster coupling in chemical tank areas [J]. Fire Science and Technology, 2025,44(2):190−195,201.

[35] 付文鼎.考虑气泡积聚的高水位垃圾填埋场形成机理及液气运移规律 [D]. 上海:同济大学, 2022.
Fu W D. Formation mechanism and liquid−gas transport patterns of high−water−level landfills considering bubble accumulation [D]. Shanghai: Tongji University, 2022.

[36] 伍琳瑛.某镇级简易垃圾填埋场封场整治技术研究 [D]. 广州:华南理工大学, 2019.
Wu L Y. Research on closure and remediation technology for a simple municipal landfill site [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2019.

[37] 杨秀珍,许开立,龚维立,等.基于故障树的生物质气化中毒事故 BN-LOPA 分析 [J]. 安全, 2021,42(3):25-30.
Yang X Z, Xu K L, Gong W L et al. BN-LOPA analysis of biomass gasification poisoning accidents based on fault trees [J]. Safety, 2021,42(3):25-30.

[38] 黄金勇,陈 巧,朱冰军.垃圾填埋场职业病危害因素检测及防护对策 [J]. 中国卫生工程学, 2016,15(1):8-10.
Huang J Y, Chen Q, Zhu B J. Detection of occupational health hazards and protective measures in landfill sites [J]. Chinese Journal of Health Engineering, 2016,15(1):8-10.

[39] 陈俊飞.生活垃圾填埋场反渗透膜浓缩液回灌垃圾堆体对渗滤液水质的影响分析 [J]. 中国资源综合利用, 2025,43(2):266-268.
Chen J F. Analysis of the impact of reinjecting reverse osmosis membrane concentrate from municipal solid waste landfills into the landfill body on leachate water quality [J]. China Comprehensive Utilisation of Resources, 2025,43(2):266-268.

[40] 龙於洋,范丽娇,沈东升,等.基于文献计量的垃圾填埋场污染物研究现状与趋势分析 [J]. 环境污染与防治, 2023,45(1):97-104.
Long Y Y, Fan L J, Shen D S, et al. Analysis of the current status and trends in research on pollutants in landfills based on bibliometric data [J]. Environmental Pollution and Prevention, 2023,45(1):97-104.

[41] 吉栋梁,徐 亚,黄兆琴,等.干旱区危废填埋场与水源的缓冲距离及其调控 [J]. 中国环境科学, 2023,43(2):712-721.
Ji D L, Xu Y, Huang Z Q, et al. Buffer distance between hazardous waste landfills and water sources in arid regions and its regulation [J]. Chinese Journal of Environmental Science, 2023,43(2):712-721.

[42] 生活垃圾处理技术指南 [J]. 中国资源综合利用, 2010,28(5):14-17.
Technical guide for domestic waste treatment [J]. China Comprehensive Utilisation of Resources, 2010,28(5):14-17.

[43] 汪思颖,韩 绮,张立秋,等.中国地下水污染防治技术研究进展与展望 [J]. 环境污染与防治, 2024,46(12):1834-1840.
Wang S Y Han Q, Zhang L Q, et al. Research progress and prospects for groundwater pollution prevention and control technologies in China [J]. Environmental Pollution and Prevention, 2024,46(12):1834-1840.

[44] 刘彦君,杨惠媛,刘 宏,等.生活垃圾填埋场覆盖膜破损及其环境影响 [J]. 中国环境监测, 2022,38(3):170-174.
Liu Y J, Yang H Y, Liu H, et al. Damage to landfill cover membranes and its environmental impact [J]. China Environmental Monitoring, 2022,38(3):170-174.

[45] 张鹏远.垃圾填埋场渗滤液导排与回灌研究 [D]. 西安:西安理工大学, 2023.
Zhang P Y. Research on the drainage and reinjection of leachate from landfill sites [D]. Xi'an Xi'an University of Technology, 2023

作者简介: 张琪琪(2001-),女,苗族,贵州晴隆人,成都理工大学硕士研究生,研究方向为固体废物资源化利用与处理处置.发表论文 1 篇.LZ552977@163.com.