



文章栏目：固体废物处理与资源化

DOI 10.12030/j.cjee.202302088

中图分类号 X323

文献标识码 A

李玉爽, 霍慧敏, 刘海兵, 等. 危险废物城市环境风险评估方法及案例研究[J]. 环境工程学报, 2023, 17(9): 2993-3004. [LI Yushuang, HUO Huimin, LIU Haibing, et al. Environmental risk assessment method and case study for hazardous waste within the city[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2023, 17(9): 2993-3004.]

危险废物城市环境风险评估方法及案例研究

李玉爽, 霍慧敏, 刘海兵, 郑洋[✉]

生态环境部固体废物与化学品管理技术中心, 北京 100029

摘要 在不同经济社会发展情况下, 危险废物的风险源危险性和风险受体脆弱性存在很大差异。因此, 城市对危险废物采取的风险防控和应急措施应该因城市而异。然而, 目前我国大部分城市对危险废物的管理仍然是全过程从严管理, 并未建立基于风险评估的环境管理体系。本研究以城市为边界, 从危险废物的风险源危险性、风险受体脆弱性和风险防控与应急能力 3 个维度构建评估指标体系, 然后在层次分析法的基础上, 采用等比例分配法对指标进行赋权, 并运用线性加权法合成经过正向化处理的指标评分值, 从而得出危险废物城市环境风险评估结果。通过计算 3 个维度评分值的耦合度, 可以确定风险防控与应急能力维度与风险源危险性维度和风险受体脆弱性维度的匹配程度。运用该方法对深圳市开展案例研究, 结果表明, 深圳市在“无废城市”建设试点期间, 主要通过提升风险防控与应急能力, 将危险废物城市环境风险值降低了 20.7%; 并且风险防控与应急能力维度与风险源危险性维度和风险受体脆弱性维度的匹配度较高, 属于高风险高能力城市。因此, 建议深圳市在下一步工作中, 继续完善涉危险废物项目环境准入审查, 严格评估危险废物再利用安全, 不断加强信息化手段在环境监管中的应用, 避免涉危险废物突发环境事件的发生, 全面降低危险废物对城市造成的环境风险。

关键词 无废城市; 深圳市; 环境管理; 风险防控

近年来, 防范和化解涉危险废物环境风险已成为生态环境保护工作的重要内容。国务院办公厅和生态环境部从源头减量、过程管理、末端处理等方面, 构建了危险废物全过程精细化管理体系, 通过落实责任、统筹治理、长效监管等措施, 不断提升危险废物环境风险防控水平^[1]。“十四五”期间, 我国在深入推进“无废城市”建设的过程中, 围绕危险废物环境风险防控, 提出“强化监管和利用处置能力”的要求, 并且从减量化工艺设备研发、定向利用豁免管理、区域协同治理、应急处置机制完善、生态损害赔偿制度实施等多个方面布置了工作任务^[2]。危险废物环境风险防控已成为加强生态文明建设和改善环境质量的关键, 也是建设美丽中国实现人与自然和谐共生的基础^[3]。

我国危险废物环境管理整体上存在废物产生量大且持续增加、利用处置能力结构性失衡、综合利用风险控制不足等问题。此外, 不规范处理处置带来的环境风险在部分地区也较为突出^[4]。现阶段, 国家对地方的危险废物环境管理主要是基于统一的指标体系, 从产废单位和经营单位的污染防治制度执行以及生态环境部门的监管责任落实 2 个方面, 开展规范化评估工作^[5]。但是, 城市的经济社会发展水平差异明显, 危险废物环境管理需求各不相同^[6], 并且环境风险是风险源、风险受体、风险控制等多重复合因子相互作用的结果^[7], 因此, 规范化评估结果并不能真实地反映城市的风险状况, 亟需基于城市的经济社会发展情况和危险废物环境管理现状, 开展环境风险评估, 从而有针对性地提出管控措施和治理策略, 为城市的差异化治理和废物的精细化管理提供科学支撑。

本研究将城市作为一个整体, 沿用我国危险废物规范化环境管理评估工作中列表打分法的思路, 从风险

收稿日期: 2023-02-17; 录用日期: 2023-07-04

基金项目: 国家重点研发计划资助项目 (2020YFC1806304)

第一作者: 李玉爽 (1987—), 女, 博士, 工程师, 417262794@qq.com; ✉通信作者: 郑洋 (1980—), 男, 硕士, 正高级工程师, zhengyang@meescc.cn

源危险性、风险受体脆弱性、风险防控与应急能力 3 个方面分别设置指标, 并且通过事件情景量化指标评分, 综合运用指数法和层次分析法, 构建城市危险废物环境风险评估方法。然后, 基于该方法, 量化评估深圳市在“无废城市”建设前后的危险废物城市环境风险, 分析其变化原因, 并有针对性地提出风险管控建议。

1 指标设置

1.1 风险源危险性

危险废物本身具有腐蚀性、毒性、易燃性、反应性、感染性等多种或几种危险特性^[8]。在其产生、贮存、收集、运输、处理、处置等过程中, 不规范管理或运行, 均可能造成危险物质遗撒或泄露, 从而导致危险特性的显露^[9-10]。此外, 部分企业逃避处置责任, 以长期贮存、不合规再利用、非法倾倒等形式处理处置危险废物, 造成污染事故的发生, 危害环境安全^[11]。可见, 危险废物的环境风险既有低剂量、长时间、持续作用的累积性风险, 也有突发性、大剂量、短时间爆发的突发性风险^[12-13]。

危险废物环境管理工作的难点在于其行业来源广泛、产生量大、危害性复杂^[14]。不同行业产生的危险废物在种类、性质、数量上存在显著差异, 对其进行处理处置则需要匹配足够且恰当的能力。但是, 当前我国危险废物处理处置能力结构性失衡, 导致部分地区部分废物种类的处置费用居高不下^[15], 部分污染性高危险性大的废物长期贮存, 不仅增加了非法倾倒的风险, 也带来了其它环境介质的安全隐患。因此, 在针对危险废物的危险性进行评估的过程中, 主要从种类、产生、贮存、处置费用等方面开展。鉴于危险废物的产生量与产生强度具有不同的涵义, 本研究对其分别评估。此外, 本研究并未将危险废物再利用和处置的相关指标纳入评估体系中, 一方面是由于危险废物再利用的合规性和安全性需要结合具体情况进行论证^[16], 不应盲目追求高数值的综合利用率; 另一方面是因为处置与产生、贮存、管理水平等多种因素有关, 并不能直接反映危险废物环境风险的高低。

企业是危险废物污染防治和风险控制的主体责任, 工业园区是为防止污染扩散的企业聚集地。城市的企业数量和工业园区数量在一定程度上反映了风险源的多少, 间接体现了危险废物环境管理工作的复杂程度。近年来, 生态环境部强化精准治污, 发布了《环境监管重点单位名录管理办法》, 将年产生危险废物 100 t 以上的企业、具有危险废物自行利用处置设施的企业、持有危险废物经营许可证的企业(本研究中统称“重点监管企业”)作为环境风险重点管控单位, 实行重点管理^[17]。可以认为, 重点监管单位的多少反应的是城市危险废物环境风险源的强弱。此外, 未进入工业园区的产废企业分散于统一监管区域之外, 更需要强化重视。综上, 在对城市的风险源危险性进行评价时, 产废企业个数、工业园区个数、重点监管单位个数、未进入工业园区的产废企业个数都应考虑在内。

涉危险废物突发环境事故的发生频率和危害程度在一定程度上反映了其潜在的环境风险。生态环境部发布的《行政区域突发环境事件风险评估推荐方法》将“近 5 年突发环境事件发生数量及影响”作为表征环境风险源强度的指标之一^[18]。鉴于危险废物的危害程度难以直接量化, 综合考虑突发环境事件的危害性, 本研究用具有强腐蚀性、反应性、易燃性、剧毒类急性毒性、感染性等性质的危险废物的贮存量作为其危害程度的量化值。风险源危险性评估指标体系及评分标准见表 1。

1.2 风险受体脆弱性

风险受体脆弱性反映了可能受到污染影响的环境、人体、经济社会的敏感程度。风险受体脆弱性指标体系的构建因研究目的不同而存在较大差异。我国《行政区域突发环境事件风险评估推荐方法》中, 表征环境风险受体脆弱性的指标包括暴露途径、受体易损性、受体恢复性 3 方面的内容^[18]。杨小林等^[20]在研究长江流域环境污染事故风险受体脆弱性时空变异特征时, 从敏感性和恢复力 2 个方面, 分别选取了人群、经济系统、生态系统 3 个层面的 6 项指标, 对受体的脆弱性进行分解。王欢欢等^[21]在对白洋淀水环境风险受体脆弱性进行评价时, 选取敏感性和缓冲能力 2 个层面的 14 项指标构建指标体系。薛丽洋等^[22]在研究甘肃省内陆河流域环境风险时, 用河道有无水体及其流速、水系级别、是否存在乡镇级及以上饮用水源地保护区、水体功能区、人口密度、人均 GDP、道路和输油管线穿越保护区的情况等 7 项指标表征环境风险受体脆弱性。本研究从环境、人体健康、经济社会发展 3 个方面, 分别选取单位面积敏感区个数、人口密度、产废行业的 GDP 贡献 3 项指标, 量化风险受体脆弱性(见表 2)。

1.3 风险防控与应急能力

完善的环境治理体系能够有效降低固体废物环境风险^[23]。在危险废物环境管理过程中, 风险防控和应急

表1 风险源危险性评估指标体系及评分标准

Table 1 Assessment index system and rating criteria for the hazardousness of risk sources

系统层	准则层	指标层	指标解释	单位	情景	评分
危险废物的危险性 B_1	种类数 C_1	产生的危险废物种类 (按大类统计)	—	—	≥ 30	100
					[20,30)	60
					[10,20)	30
					[0,10)	0
	产生量 C_2	I类危险废物产生量*100+II类危险废物产生量*10+III类危险废物产生量	$10^4 \cdot t$	—	≥ 100	100
					[10,100)	50
					[0,10)	0
	贮存量 C_3	贮存时间超过1年的危险废物的重量	$10^4 \cdot t$	—	≥ 1	100
					[0.01,1)	50
					[0,0.01)	0
平均处置费用 C_4	危险废物经营单位处理处置一吨危险废物 (包含收集、运输、预处理、利用或处置) 的平均费用	$1000 \text{元} \cdot t^{-1}$	—	≥ 10 或 ≤ 1	100	
				(1,2)∪(6,10)	50	
				[2,6]	0	
产生强度 C_5	单位工业增加值产生的危险废物的重量	$t \cdot (10^8 \text{元})^{-1}$	—	≥ 100	100	
				[50,100)	50	
				[0,50)	0	
风险源危险性 A_1	产废企业个数 C_6	贡献95%危险废物产生量的企业个数	—	—	≥ 1000	100
					[100,1000)	50
					[0,100)	0
企业的危险性 B_2	重点监管企业个数 C_7	产生危险废物100 t以上的企业、具有危险废物自行利用处置设施的企业、持有危险废物经营许可证的企业的总数量	—	—	≥ 50	100
					[10,50)	50
					[0,10)	0
未进入工业园区的产废企业个数 C_9	工业园区外的危险废物产生量超过3 t的企业个数	—	—	—	≥ 50	100
					[10,50)	50
					[0,10)	0
突发环境事故的危险性 B_3	危害程度 C_{10}	贮存超过1年的I类危险废物的重量	t	—	≥ 100	100
					[1,100)	50
					[0,1)	0
近五年发生的涉危险废物环境事件 C_{11}	参照《国家突发环境事件应急预案》，五年内发生的较大及以上等级的涉危险废物突发环境事件数量	—	—	—	≥ 2	100
					1	50
					0	0

注：I级危险废物主要表现特征为对人体有害或易造成安全事故，包括具有强腐蚀性、反应性、易燃性、剧毒类急性毒性、感染性等具有严重安全风险的危险废物；II级危险废物主要表现特征为环境危害性，包括具有弱腐蚀性、非剧毒类急性毒性以及浸出毒性或毒性物质含量危害值 H 大于1的危险废物；III级危险废物主要表现特征为环境污染性，通常为管理要求类危险废物和政策要求类危险废物，包括浸出毒性或毒性物质含量危害值 H 小于1的危险废物。毒性物质 H 值计算参照《危险废物鉴别标准 毒性物质含量鉴别》(GB 5085.6-2007)^[19]进行计算。

表 2 风险受体脆弱性评估指标体系及评分标准

Table 2 Assessment index system and rating criteria for the vulnerability of risk receptors

系统层	准则层	指标层	指标解释	单位	情景	评分
	环境脆弱性 B_4	单位面积敏感区个数 C_{12}	单位面积水环境风险敏感区和大气环境风险敏感区的总个数	$(\text{km}^2)^{-1}$	≥ 1	100
					[0.5,1)	50
					[0,0.5)	0
风险受体脆弱性 A_2	人体健康脆弱性 B_5	人口密度 C_{13}	单位面积内常住人口数量	$(\text{km}^2)^{-1}$	≥ 1000	100
					[150,1 000)	50
					[0,150)	0
	经济社会发展脆弱性 B_6	产废行业的GDP贡献 C_{14}	产废行业的GDP占该地区的GDP的比重	%	≥ 50	100
					[10,50)	50
					[0,10)	0

注：水环境风险敏感区主要指水源保护区、水产养殖区、天然渔场；大气环境风险敏感区主要指居民区、学校、医疗卫生机构。

能力作为缓冲措施，对于降低环境风险具有直接作用^[24]。在经历了探索起步、体系构建、能力构筑、全面提升阶段后，我国危险废物管理面临的形势和人民群众对生态环境质量的要求都发生了深刻变化^[25]。2021年5月，国务院办公厅印发《强化危险废物监管和利用处置能力改革实施方案》，提出以有效防控危险废物环境与安全风险为目标，通过完善危险废物监管体制机制、强化危险废物源头管控和收集转运等过程监管、提升危险废物集中处置基础保障能力等措施^[26]，不断强化危险废物环境风险防控能力。本研究对该方案的具体要求进行分解，从监管体制机制、源头管控能力、过程监管能力、集中处置基础保障能力、应急能力等方面，形成风险防控与应急能力评估指标体系(见表3)。

2 权重分配

2.1 方法选择

权重是评价指标对于评价目标相对重要程度的量化体现，权重的确定是多要素综合评价中的关键环节，直接影响着评价结果的可靠性和有效性^[27]。常用的权重确定方法有主观赋权法、客观赋权法、主客观联合赋权法^[28]。其中，主观赋权法主要是依靠专家的经验进行判断，基本能够体现指标的重要程度，但是存在一定的主观随意性；客观赋权法是在统计数据的基础上，通过数理计算得出指标权重，需要大量的数据支撑，且可能出现与主观认识相悖的情况；主客观联合赋权法是将主观赋权法和客观赋权法联合使用，得出相对科学合理的权重值，但是存在计算量大且结果可能出现随机性偏差等问题^[29-30]。各种方法都存在优缺点，在风险评估中，使用何种方法如何分配权重没有统一的结论，需要结合评价目标、样本数据、指标关系等，选取适用的分配方法。

本研究中的指标既有定性指标也有定量指标，并且定量指标如危险废物种类数、产生量、产生强度等，主要由城市的产业结构决定。在进行危险废物城市环境风险评估的过程中，难以通过数据的差异程度或离散程度来判断指标的重要性。因此，本研究采用主观赋权法。层次分析法是一种常用的主观赋权法，是在专家主观判断的基础上，对各指标之间的相对重要程度进行逻辑分析，再运用数学方法处理得出更科学的结果，在风险评估中已有较广泛的应用^[31,32]。相比于德尔菲法、二项系数法、环比评分法等其它主观赋权法，该方法仅用一次调查，操作简便成本低，并且可以通过对系统层和系统层的分解，减少单次比较过程中的指标个数，避免造成逻辑混乱。

2.2 权重确定

在层次分析法的基础上，将系统层和准则层逐层分解；然后，分别按照指标贡献，设置数值1~5，量化各指标的重要程度，其中，1表示最不重要，5表示最重要，共形成12个五级矩阵量表；将上述矩阵量表发放给危险废物环境管理领域的11位专家进行填报。由于上述专家在该领域均有5年以上相关经验，且在填报过程中，并未出现用时过短或过长、量表选项选择一致等情况，因此，可以认为所有调查结果均真实、可

表 3 风险防控与应急能力评估指标体系及评分标准

Table 3 Assessment index system and rating criteria for the capacity of risk prevention and emergency response

系统层	准则层	指标层	指标解释	情景	评分
风险防控与 应急能力 A ₃	危险废物监管体制机制B ₇	部门监管职责C ₁₅	监管职责明确，各部门形成合力	是	100
				职责模糊	50
				否	0
		联防联控措施C ₁₆	实现区域信息共享、联合执法、设施建设和运营管理优势互补	是	100
				否	0
				≥90	100
		企业主体责任C ₁₇	企业的危险废物规范化管理抽查合格率(%)	[80,90)	50
				[0,80)或未开展	0
				建立并运行良好	100
		信息化体系建设与应用C ₁₈	信息化平台建成并在危险废物全过程监管方面运行良好	建立但运行不佳	50
				未建立	0
				2项均开展	100
	危险废物源头管控能力B ₈	环境准入C ₁₉	开展涉危废项目环评复核，实行危险废物排污许可	开展1项	50
				均未开展	0
				政府设有专项资金支持减量化工艺设备技术研发；经工艺改造或创新，实现危险废物产生量减少；建立研发成果评价体系；建立成果转化平台，对成果进行应用和推广	开展4项
		收集转运贮存专业化C ₂₁	建设区域性收集网点和贮存设施；工业园区内实行集中收集；有服务于小微企业的收集方式或方法；实验室废物实行规范化管理；社会源危险废物实行规范管理	开展2项	50
				均未开展	0
				每项20分，均实行100分，均未实行0分	100
	危险废物过程监管能力B ₉	转运便捷化C ₂₂	危险废物运输车辆备案；划定点对点常备通行路线	2项均开展	100
				开展1项	50
				均未开展	0
		再利用安全C ₂₃	实行点对点定向利用许可；有标准或程序对再利用安全进行评估	2项均开展	100
				开展1项	50
				均未开展	0
打击涉危险废物违法犯罪行为C ₂₄	环境保护部门与公检法部门建立合作机制；联合开展相关行动	2项均开展	100		
		开展1项	50		
		均未开展	0		
危险废物集中处置基础保障能力B ₁₀	特殊类别危险废物处置能力C ₂₅	对特殊类别危险废物作出合理处置安排	有	100	
			无	0	
			全部废物安全处置	100	
	处置能力与产废情况匹配C ₂₆	处置能力与产废情况结构性平衡	产废量大于处置能力	50	
			部分种类废物无处置能力	0	
			建成并运行良好	100	
医疗废物处置能力C ₂₇	医疗废物分类收集转运处置体系建成并运行良好	建成未运行良好	50		
		未建成	0		
		将涉危险废物突发生态环境事件应急处置纳入政府应急响应体系；企业制定的环境应急响应预案中涵盖危险废物应急处理内容	2项均开展	100	
应急能力B ₁₁	应急处置机制C ₂₈	将涉危险废物突发生态环境事件应急处置纳入政府应急响应体系；企业制定的环境应急响应预案中涵盖危险废物应急处理内容	开展1项	50	
			均未开展	0	
			2项均开展	100	
专业队伍C ₂₉	有专业的管理队伍，定期接受培训	开展1项	50		
		均未开展	0		

注：特殊类别废物指废盐、生活垃圾焚烧飞灰、以及本地无处置能力的危险废物。

靠、有效。在对 11 份量表进行分析的过程中, 首先, 计算指标重要程度对应数值的算术平均值, 并将其作为指标重要性得分; 然后, 按照每个 5 级量表中指标权重之和为 1, 根据指标重要性得分, 按比例分配各指标权重; 最后, 从系统层开始, 对准则层和指标层进行逐层归一化, 得到各指标的最终权重 (见表 4)。

表 4 指标权重分配情况
Table 4 Allocation of indicator weights

系统层	系统层 权重	准则层	准则层 权重	归一化 结果	指标层	指标权重	归一化结果
风险源危险性 A_1	0.358	危险废物的危险性 B_1	0.354	0.127	种类数 C_1	0.230	0.029
					产生量 C_2	0.207	0.026
					贮存量 C_3	0.212	0.027
					平均处置费用 C_4	0.162	0.021
					产生强度 C_5	0.189	0.024
		企业的危险性 B_2	0.292	0.104*	产废企业个数 C_6	0.242	0.025
					重点监管企业个数 C_7	0.279	0.029
					工业园区个数 C_8	0.230	0.024
					未进入工业园区的产废企业个数 C_9	0.248	0.026
		突发环境事故的危险性 B_3	0.354	0.127	危害程度 C_{10}	0.564	0.072
					近五年发生的涉危险废物环境事件 C_{11}	0.436	0.055
风险受体脆弱性 A_2	0.314	环境脆弱性 B_4	1/3	0.104*	单位面积敏感区个数 C_{12}	1	0.104
		人体健康脆弱性 B_5	1/3	0.105	人口密度 C_{13}	1	0.105
		经济社会发展脆弱性 B_6	1/3	0.105	产废行业的GDP贡献 C_{14}	1	0.105
风险防控与应急能力 A_3	0.328	危险废物监管体制机制 B_7	0.207	0.068	部门监管职责 C_{15}	0.245	0.017
					联防联控措施 C_{16}	0.234	0.016
					企业主体责任 C_{17}	0.283	0.019
					信息化体系建设与应用 C_{18}	0.239	0.016
		危险废物源头管控能力 B_8	0.194	0.063*	环境准入 C_{19}	0.527	0.033
					减量化工艺设备技术研发 C_{20}	0.473	0.030
		危险废物过程监管能力 B_9	0.198	0.065	收集转运贮存专业化 C_{21}	0.267	0.018*
					转运便捷化 C_{22}	0.203	0.013
					再利用安全 C_{23}	0.251	0.016
					打击涉危险废物违法犯罪行为 C_{24}	0.278	0.018
		危险废物集中处置基础保障能力 B_{10}	0.194	0.064	特殊类别危险废物处置能力 C_{25}	0.317	0.020
处置能力与产废情况匹配 C_{26}	0.338				0.022		
医疗废物处置能力 C_{27}	0.345				0.022		
应急能力 B_{11}	0.207	0.068	应急处置机制 C_{28}	0.5	0.034		
			专业队伍 C_{29}	0.5	0.034		

注: *指为了保证归一化结果之和为1, 该项未按四舍五入法取值。

3 结果计算

风险源危险性和风险受体脆弱性中的各项指标为正向指标，评分值越大，则风险越高；风险防控和应急能力中的各项指标为负向指标，评分值越小，则风险越高。因此，在计算风险防控和应急能力风险值时，需要对指标评分值进行逆向转换^[33]，如式(1)。经指标转换后的风险防控与应急能力与风险源危险性和风险受体脆弱性一样，风险值越大，风险越高。

$$X = (x_{max} - x) / (x_{max} - x_{min}) * 100 \quad (1)$$

式中：X 为转换后的评分值；x 为指标原始评分值； x_{max} 为满分值， x_{min} 为最低值，本研究中各指标满分值和最低值分别为 100 和 0。

采用线性加权法对各项指标进行合成运算^[34]，得到风险值——各指标经矢量关系转换后的评分值乘以对应的权重，得到该指标风险值；各指标风险值加和得到对应的准则层和系统层风险值，即该层的风险值；各系统层的风险值加和，得到城市危险废物环境风险值，如式(2)。

$$\begin{cases} V_{Total} = V_{source} + V_{receptor} + V_{capacity} \\ V_j = \sum v_i \\ v_i = w_i * X_i \\ \sum w_i = 1 \end{cases} \quad (2)$$

式中： V_{Total} 、 V_{source} 、 $V_{receptor}$ 、 $V_{capacity}$ 分别表示城市危险废物环境风险值、风险源危险性风险值、风险受体脆弱性风险值、风险防控与应急能力风险值； v_i 表示指标风险值； V_j 表示指标对应的准则层或系统层风险值； w_i 代表权重； X_i 代表经正逆向转换后的指标评分值。

引入耦合度模型^[35-36]，如式(3)，通过计算风险源危险性、风险受体脆弱性、风险防控与应急能力 3 方面的耦合度，分析城市风险防控与应急能力水平与其风险源危险性和风险受体脆弱性的匹配程度，进而明确是否需要加强或减弱在风险防控与应急能力方面的管理措施。耦合度越高，说明风险防控与应急能力与风险源危险性和风险受体脆弱性 3 者之间的匹配度越高。

$$\begin{cases} C = 3 * \frac{(Z_1 Z_2 Z_3)^{\frac{1}{3}}}{Z_1 + Z_2 + Z_3} \\ Z_i = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \end{cases} \quad (3)$$

式中：C 为耦合度，代表风险源危险性、风险受体脆弱性、风险防控与应急能力 3 个系统层的相互关联程度， $C \in [0, 1]$ ； Z_i 为各系统层指标评分值的算术平均值，即 Z_1 、 Z_2 、 Z_3 分别代表风险源危险性、风险受体脆弱性、风险防控与应急能力 3 个系统层指标未经正向化处理的评分值的算数平均值；n 为系统层中的指标个数； x_i 为未经正向化处理的指标评分值。

4 深圳市危险废物环境风险评估

4.1 数据来源与基本情况

本研究的基础数据(见表 5)主要来源于深圳市统计年鉴^[37]和深圳市固体废物污染防治信息公告^[38]，部分难以获取的数据通过调查问卷询问深圳市生态环境局的相关管理人员。同时，借助“全国固体废物管理信息系统”(https://gfmh.meesc.cn/solidPortal/#)中深圳市企业 2019 年填报的 1 826 项数据，分析废物的行业来源，进而分析深圳市“无废城市”建设前后危险废物环境风险变化。

2018 年，深圳市产生量在 1 000 t 以上的危险废物种类共涉及 12 大类，占年度危险废物总产生量的 99.3%，其中含铜废物、表面处理废物、焚烧处置残渣，在数量上远超过其它种类危险废物，占总产生量的 78.7%。主要危险废物的产生源情况见图 1。

由图可见，计算机、通信和其它电子设备制造业，水利、环境和公共设施管理业，其它制造业，电气机械和器材制造业，批发业，专用设备制造业，铁路、船舶、航空航天和其它运输设备制造业，金属制品业，生态保护和环境治理业，有色金属冶炼和压延加工业，印刷和记录媒介复制业，电力、热力生产和供应业，铁路、船舶、航空航天和其它运输设备制造业，机动车、电子产品和日用产品修理业，石油和天然气开采业等 14 个行业对深圳市的危险废物产生量贡献较大。

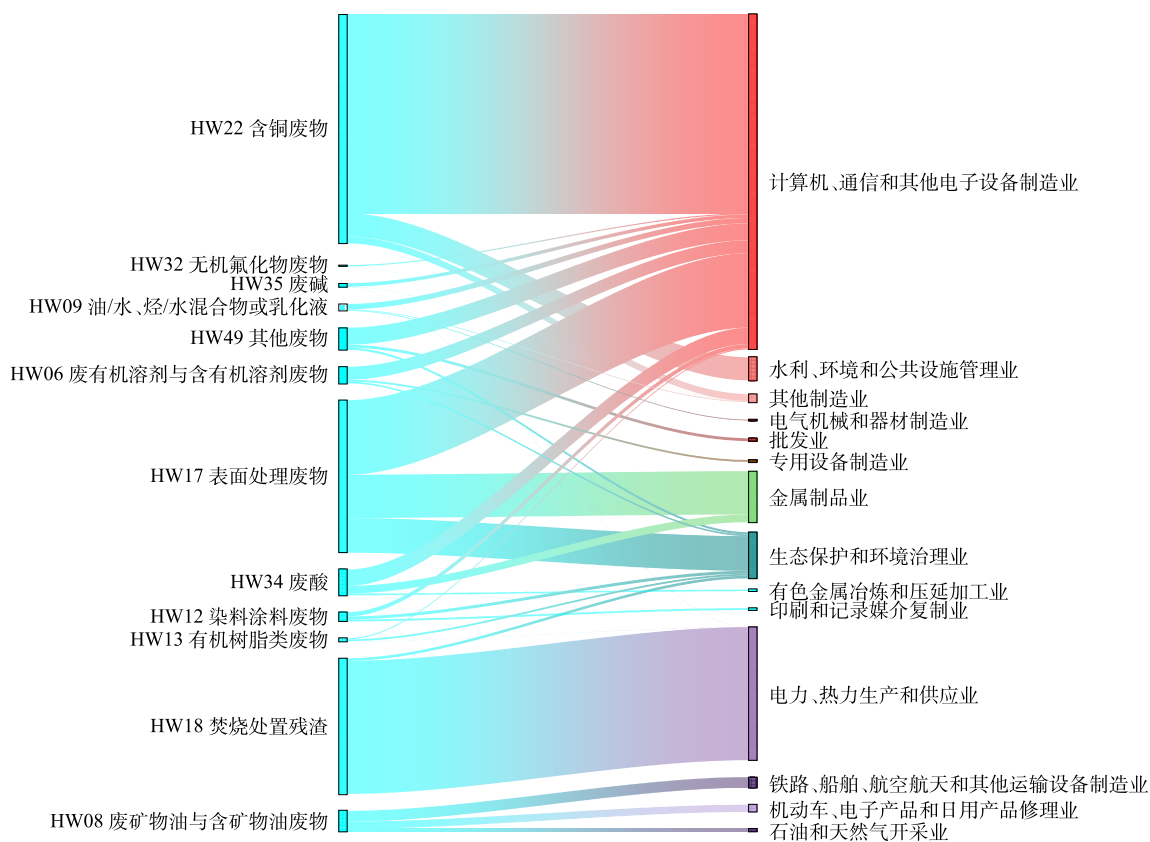


图1 重点类别危险废物的行业来源

Fig. 1 Industry sources of key categories of hazardous waste

表5 深圳市危险废物基本信息

Table 5 Basic information on hazardous waste in Shenzhen

指标名称	2018年	2020年	数据来源	指标名称	2018年	2020年	数据来源
种类数	31	32	②	平均处置费用/ 10^3 元·t ⁻¹	4	4	③
实际产生量/(10^4 t)	54.5	67.18	②	未进入工业园区的企业个数	1 000+	1 000+	③
换算后产生量/(10^4 t)	100+	100+	②④	危害程度/t	0	0	②
贮存量/(10^4 t)	0	0	②	近五年发生的涉危险废物环境事件	4	0	③
产生强度/[t·(10^8 元) ⁻¹]	59.2	64.3	①②	单位面积敏感区个数/(km ²) ⁻¹	3+	3+	①
产废企业个数	5 959	5 000+	③	人口密度/(km ²) ⁻¹	6 484	8 877	①
重点监管企业个数	371	300+	③	产废行业的GDP贡献/%	50+	50+	①④
工业园区个数	200+	200+	③	规范化管理抽查合格率/%	89	90+	③

注：1，深圳市土地面积1 997.47 km²，2018年各类学校2 533个，医疗机构3 806个，加上其他敏感区，则单位面积敏感区个数大于3个。2，计算机、通信和其他电子设备制造业是深圳市危险废物产生的主要行业，2018年该行业的GDP占总GDP的59.9%，因此产废行业的GDP贡献大于50%。3，危险废物产生强度=产生量/工业增加值。4，危害程度用贮存超过一年的I类危险废物的重量表示。5，数据来源中，①统计年鉴②固体废物污染防治信息公告③问卷调查④全国固体废物管理信息系统。

4.2 环境管理情况

2019年，深圳市入选我国首批“无废城市”建设试点。在此之前，深圳市主要是以危险废物规范化管理为抓手，通过开展相关工作发现并补齐短板，并且在有机溶剂和医疗废物处理、企业环境风险防控、突发环境事件初期应急处置等能力提升方面成效显著^[39]。同时，通过持续开展执法检查行动和专项整治活动，打击涉

危险废物环境违法行为，不断规范行业危险废物环境管理。在2019年和2020年“无废城市”建设试点期间，深圳市不断提升危险废物风险防控与应急能力，主要表现在以下6个方面^[40]：一是建立区域和部门联防联控联治机制，联合多部门开展专项行动，震慑涉危险废物环境违法犯罪行为；二是全面建成了“深圳市固体废物智慧监管系统”，实现危险废物GPS+视频全过程智慧监控的全链条闭环执法监管；三是建立危险废物环境重点监管单位清单，强化清洁生产审核在危险废物源头减量中的作用；四是健全危险废物收集体系，上线危险废物处置交易平台，畅通处理处置渠道，实现全生命周期追踪；五是推进危险废物利用处置能力结构优化，新增利用处置能力 $18.02 \times 10^4 \text{ t} \cdot \text{a}^{-1}$ ，全部医疗废物和工业危险废物得到安全处理处置；六是，提升危险废物环境应急响应能力，建立“企业-街道-区-市”的环境应急体系，督促2408家企事业单位完成环境应急预案备案。

4.3 结果与讨论

结合深圳市具体情况，对各项指标进行打分，然后邀请一位参与深圳市固体废物环境管理的人员核对指标评分结果。在风险防控与应急能力维度的指标评分值正向转换之后，运用线性加权法合成评分值与权重，得到风险值。深圳市危险废物环境风险评估中各项指标评估结果见表6。

表6 深圳市危险废物环境风险评估中各项指标评估结果

Table 6 Assessment results of various indicators in the environmental risk assessment of hazardous waste in Shenzhen

系统层	系统层风险值		准则层	准则层风险值		指标序号	指标评分值		指标权重	指标风险值							
	2018	2020		2018	2020		2018	2020		2018	2020						
风险源危险性A ₁	22.6	17.1	危险废物的危险性B ₁	6.7	6.7	种类数C ₁	100	100	0.029	2.9	2.9						
						产生量C ₂	100	100	0.026	2.6	2.6						
						贮存量C ₃	0	0	0.027	0	0						
						平均处置费用C ₄	0	0	0.021	0	0						
						产生强度C ₅	50	50	0.024	1.2	1.2						
			产废企业个数C ₆	100	100	0.025	2.5	2.5									
			重点监管企业个数C ₇	100	100	0.029	2.9	2.9									
			企业的危险性B ₂	10.4	10.4	工业园区个数C ₈	100	100	0.024	2.4	2.4						
			未进入工业园区的产废企业个数C ₉	100	100	0.026	2.6	2.6									
			突发环境事故的危险性B ₃	5.5	0	危害程度C ₁₀	0	0	0.072	0	0						
			风险受体脆弱性A ₂	31.4	31.4	环境脆弱性B ₄	10.4	10.4	近五年发生的涉危险废物环境事件C ₁₁	100	0	0.055	5.5	0			
单位面积敏感区个数C ₁₂	100	100							0.104	10.4	10.4						
人体健康脆弱性B ₅	10.5	10.5							人口密度C ₁₃	100	100	0.105	10.5	10.5			
经济社会发展脆弱性B ₆	10.5	10.5							产废行业的GDP贡献C ₁₄	100	100	0.105	10.5	10.5			
风险防控与应急能力A ₃	13.7	5.2							危险废物监管体制机制B ₇	1.8	0	部门监管职责C ₁₅	100	100	0.017	0	0
												联防联控措施C ₁₆	100	100	0.016	0	0
			企业主体责任C ₁₇	50	100	0.019	1.0	0									
			信息化体系建设与应用C ₁₈	50	100	0.016	0.8	0									
危险废物源头管控能力B ₈	4.8	3.3	环境准入C ₁₉	0	0	0.033	3.3	3.3									
减量化工艺设备技术研发C ₂₀	50	100	0.030	1.5	0												

续表6

系统层	系统层风险值		准则层	准则层风险值		指标序号	指标评分值		指标权重	指标风险值						
	2018	2020		2018	2020		2018	2020		2018	2020					
风险防控与应急能力A ₃	13.7	5.2	危险废物过程监管能力B ₉	2.6	1.9	收集转运贮存专业化C ₂₁	40	80	0.018	1.0	0.3					
						转运便捷化C ₂₂	100	100	0.013	0	0					
						再利用安全C ₂₃	0	0	0.016	1.6	1.6					
						打击涉危险废物违法犯罪行为C ₂₄	100	100	0.018	0	0					
						特殊类别危险废物处置能力C ₂₅	100	100	0.020	0	0					
						危险废物集中处置基础保障能力B ₁₀	1.1	0	处置能力与产废情况匹配C ₂₆	50	100	0.022	1.1	0		
								医疗废物处置能力C ₂₇	100	100	0.022	0	0			
								应急能力B ₁₁	3.4	0	应急处置机制C ₂₈	0	100	0.034	3.4	0
											专业队伍C ₂₉	100	100	0.034	0	0

注：指标评分按实际情况评分；指标风险值是指标评分值的矢量转换后加权值；准则层风险值是对应指标风险值的加和；系统层风险值是对应准则层风险值的加和。

由表可见，深圳市在“无废城市”建设期间，危险废物城市环境风险值由 67.7 降低至 53.7，降低了 20.7%。其中，风险源危险性由 22.6 降低至 17.1，主要归因于近 5 年发生的涉危险废物环境事件数大幅减少；风险受体脆弱性保持 31.4 的满分不变，主要归因于其作为经济社会高速发展的超大型城市，人口、环境、主导产业都难以在短时间内发生根本性变化；风险防控与应急能力风险值由 13.7 降低至 5.2，主要归因于其管理措施和保障能力的不断完善与提升，具体表现为——强化了网络平台在危险废物全生命周期处理处置和环境监管方面的应用、完善了部门监管职责和区域联防联控措施、提升了废物处置保障能力和应急处置能力。但是，在区域性收集网点和贮存设施的建立、涉危险废物项目的环境准入，以及危险废物再利用安全评估等方面依然存在不足之处。

从整体上看，虽然在危险废物城市环境风险评估方法中，所设置的风险值为 [0,100]，但是基于深圳市的经济社会发展趋势，在短期内，其风险源危险性和风险受体脆弱性难以改变，因此，深圳市的城市危险废物环境风险值区间为 [48.5,100]，即深圳市的风险值难以小于 48.5。由于深圳市已基本达到当前最低环境风险水平，若从风险源和风险受体 2 个方面强化管控措施，则将收效甚微，建议深圳市下一步结合其科技成果和管理需求，探索提升风险防控和应急能力的创新性方法，并形成可复制可推广的经验，以充分发挥其在我国危险废物环境管理领域的示范带头作用。

5 结语

1) 本研究构建了一种可用于城市危险废物环境风险评估的方法。该方法首次将城市作为一个整体，从风险源危险性、风险受体脆弱性、风险防控与应急能力等 3 个方面，系统评估危险废物环境风险。同时，借鉴耦合度计算模型，分析风险防控与应急能力与风险源危险性和风险受体脆弱性的匹配程度。该方法多角度评估了城市危险废物环境风险，有助于明确当前经济社会发展水平下，来自于风险源和风险受体的最低风险值，进而有针对性地采取不同强度的风险防控与应急能力措施，实现危险废物环境管理绩效产出的有效提升。

2) 运用该方法对深圳市“无废城市”建设前后危险废物环境风险进行评估，结果表明，深圳市在“无废城市”建设过程中，通过采取信息化监管、区域联防联控、处置能力提升等措施，将城市风险值由 67.7 降低至 53.7，降低了 20.7%；由于深圳市风险源危险性和风险受体脆弱性难以发生改变，导致城市风险值难以降至 48.5 以下，因此深圳市匹配了较高水平的风险防控与应急能力，属于高风险高能力型城市；深圳市还应继续

完善涉危险废物项目环境准入和危险废物再利用安全评估, 进一步提升风险防控与应急能力。

参考文献

- [1] 刘宏博, 吴昊, 田书磊, 等. “十四五”时期危险废物污染防治思路探讨[J]. 中国环境管理, 2020, 12(4): 56-61.
- [2] 生态环境部. “十四五”时期“无废城市”建设工作方案[EB/OL]. [2021-12-15]. http://www.mee.gov.cn/xxgk/xxgk/xxgk03/202112/t20211215_964275.html.
- [3] 黄启飞, 王菲, 黄泽春, 等. 危险废物环境风险防控关键问题与对策[J]. 环境科学研究, 2018, 31(5): 789-795.
- [4] 郑洋, 蒋文博, 李克, 等. 规范危险废物管理 推进“无废城市”建设[J]. 环境保护, 2019, 47(9): 26-29.
- [5] 生态环境部办公厅. 关于印发《“十四五”全国危险废物规范化环境管理评估工作方案》的通知[EB/OL]. [2021-09-02]. https://www.mee.gov.cn/xxgk/xxgk/xxgk05/202109/t20210906_900190.html.
- [6] 徐亚, 王京京, 李淑, 等. 黄河流域固废治理现状、问题与对策建议[J]. 环境科学研究, 2023, 36(2): 373-380.
- [7] 尚建程, 张孟瑶, 葛永慧, 等. 区域环境风险评估研究综述[J]. 环境污染与防治, 2017, 39(4): 461.
- [8] ASANTE-DUAH K. Hazardous waste risk assessment[M]. CRC Press, 2021.
- [9] ZHANG Z, MALIK M Z, KHAN A, et al. Environmental impacts of hazardous waste, and management strategies to reconcile circular economy and eco-sustainability[J]. *Science of The Total Environment*, 2022, 807: 150856.
- [10] GAUR V K, SHARMA P, SIROHI R, et al. Assessing the impact of industrial waste on environment and mitigation strategies: A comprehensive review[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2020, 398: 123019.
- [11] SIDDIQUA A, HAHLADAKIS J N, AL-ATTIYA W A K A. An overview of the environmental pollution and health effects associated with waste landfilling and open dumping[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2022, 29(39): 58514-58536.
- [12] FAZZO L, MINICILLI F, SANTORO M, et al. Hazardous waste and health impact: a systematic review of the scientific literature[J]. *Environmental health*, 2017, 16(1): 1-11.
- [13] XIONG S, PENG Y, CHEN K, et al. Phase distribution, migration and relationship of polychlorinated dibenzo-p-dioxins and dibenzofurans and heavy metals in a large-scale hazardous waste incinerator[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2022, 341: 130764.
- [14] 郑洋. 大力推动危险废物监管和利用处置能力改革[J]. 中国环境管理, 2022, 14(4): 5-6.
- [15] 张箐, 王夏晖, 霍慧敏, 等. 我国危险废物处置收费政策的问题与建议[J]. 中国环境管理, 2022, 14(4): 19-24.
- [16] 孙诗睿, 林建. 危险废物综合利用产品动态分级管理研究[J]. 上海涂料, 2022, 60(2): 47-51.
- [17] 生态环境部. 环境监管重点单位名录管理办法[EB/OL]. [2022-11-28]. https://www.mee.gov.cn/xxgk/xxgk/xxgk02/202212/t20221201_1006540.html.
- [18] 环境保护部办公厅. 行政区域突发环境事件风险评估推荐方法[EB/OL]. [2018-01-31]. https://www.mee.gov.cn/gkml/hbb/bgt/201802/t20180206_430931.htm.
- [19] 生态环境部. 危险废物鉴别标准 毒性物质含量鉴别(GB 5085.6—2007). [2007-10-01]. https://www.mee.gov.cn/ywgz/fgbz/bz/bzwb/gthw/wxfwjbfbz/200705/t20070522_103961.shtml.
- [20] 杨小林, 程书波, 李义玲. 基于客观赋权法的长江流域环境污染事故风险受体脆弱性时空变异特征研究[J]. 地理与地理信息科学, 2015, 31(2): 119-124.
- [21] 王欢欢, 尹心安, 田凯, 等. 白洋淀水环境风险受体脆弱性评价[J]. 农业环境科学学报, 2020, 39(11): 2606-2612.
- [22] 薛丽洋, 赵浦秋, 乔飞扬, 等. 甘肃省内陆河流域环境风险评估方法探究[J]. 安全与环境学报, 2022, 22(4): 2280-2289.
- [23] GUO W, XI B, HUANG C, et al. Solid waste management in China: Policy and driving factors in 2004–2019[J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2021, 173: 105727.
- [24] 陈阳, 何艺, 郑洋. 危险废物环境风险全过程防控管理现状及建议[J]. 环境与可持续发展, 2017, 42(6): 30-33.
- [25] 何艺, 霍慧敏, 蒋文博, 等. 中国危险废物管理的历史沿革——从“探索起步”到“全面提升”[J]. 环境工程学报, 2021, 15(12): 3801-3810.
- [26] 国务院办公厅. 国务院办公厅关于印发强化危险废物监管和利用处置能力改革实施方案的通知[EB/OL]. [2021-05-11]. http://www.gov.cn/zhengce/content/2021-05/25/content_5611696.htm.
- [27] 郭永辉, 尚战伟, 邹俊国, 等. 群决策关键问题研究综述[J]. 统计与决策, 2016(468): 63-67.
- [28] 刘秋艳, 吴新年. 多要素评价中指标权重的确定方法评述[J]. 知识管理论坛, 2017, 2(6): 500-510.
- [29] El Gibari S, GÓMEZ T, RUIZ F. Building composite indicators using multicriteria methods: a review[J]. *Journal of Business Economics*, 2019, 89(1): 1-24.
- [30] 何超, 李萌, 李婷婷, 等. 多目标综合评价中四种确定权重方法的比较与分析[J]. 湖北大学学报(自然科学版), 2016, 38(2): 172-178.
- [31] 杨敏慧, 袁培炎, 罗天烈, 等. 基于层次分析法评估长江上游宜宾段工业园区环境风险[J]. 环境工程技术学报, 2022, 12(2): 624-632.
- [32] 唐登勇, 张聪, 杨爱辉, 等. 太湖流域企业的水风险评估体系[J]. 中国环境科学, 2018, 38(2): 766-775.
- [33] 陈鹏宇. 线性无量纲化方法对比及反向指标正向化方法[J]. 运筹与管理, 2021, 30(10): 95-101.
- [34] 刘飞燕, 张建方. 多指标回归综合评分[J]. 数理统计与管理, 2014, 33(3): 408-415.
- [35] XING L, XUE M, HU M. Dynamic simulation and assessment of the coupling coordination degree of the economy–resource–environment system: Case of Wuhan City in China[J]. *Journal of Environmental Management*, 2019, 230: 474-487.
- [36] 舒小林, 高应蓓, 张元霞, 等. 旅游产业与生态文明城市耦合关系及协调发展研究[J]. 中国人口·资源与环境, 2015, 25(3): 82-90.
- [37] 深圳市统计局. 深圳市统计年鉴(2021年)[EB/OL]. [2021-12-30]. <http://tjj.sz.gov.cn/zwgk/zfxgkml/tjsj/tjnj/>.
- [38] 深圳市生态环境局. 2019年度和2021年度深圳市固体废物污染防治信息公告[EB/OL]. [2021-06-05]. http://meeb.sz.gov.cn/szsthjjwzgmml/szsthjjwzgmml/qt/tzgg/content/post_7759457.html.
- [39] 洪鸿加, 吴彦瑜, 陈琛, 等. 深圳市危险废物污染防治现状及对策研究[J]. 环境与可持续发展, 2016, 41(4): 159-162.
- [40] 李水生. 深圳“无废城市”建设成效及“十四五”推进策略[J]. 环境保护, 2022, 50(23): 32-35.

(责任编辑: 金曙光)

Environmental risk assessment method and case study for hazardous waste within the city

LI Yushuang, HUO Huimin, LIU Haibing, ZHENG Yang*

Solid Waste and Chemicals Management Centre, Ministry of Ecology and Environment, Beijing 100029, China

*Corresponding author, E-mail: zhengyang@meescc.cn

Abstract Differences in economic and social development among cities result in significant variations in source risk and receptor vulnerability of hazardous waste. Consequently, the measures for risk prevention and emergency management implemented by cities should be tailored to their specific circumstances, either strict or lenient. However, most cities in China adopt strict management practices for hazardous waste throughout the entire process, without establishing an environmental management system based on risk assessment. This study focuses on the city as the boundary and constructs an indicator system based on three dimensions of hazardous waste: source risk, receptor vulnerability, and the capacity for risk prevention and emergency response. The Analytic Hierarchy Process is employed to assign weights to the indicators along with the proportional distribution method. Subsequently, the linear weighting method is utilized to synthesize the indicator scores after appropriate normalization, resulting in an environmental risk assessment for hazardous waste within a city. By calculating the degree of coupling, the matching level between the capacity for risk prevention and emergency response and the source risk and receptor vulnerability becomes apparent. Using this methodology, a case study was conducted on Shenzhen. The results indicate: During the “Zero Waste City” pilot period, Shenzhen managed to reduce the environmental risk value of hazardous waste by 20.7%, primarily through enhancing the capacity for risk prevention and emergency response; and Shenzhen exhibits a high level of alignment among the three dimensions, categorizing it as a high-risk and high-capacity city. Based on the findings, it is recommended that, in the next steps, Shenzhen should continue to improve the environmental access review for projects, rigorously evaluate the safety of hazardous waste recycling, continuously strengthen the application of information technology in environmental regulation, and prevent the occurrence of sudden environmental incidents involving hazardous waste, so as to comprehensively reduce the environmental risks posed by hazardous waste to the city.

Keywords Zero Waste City; Shenzhen; environmental management; risk prevention and control