



危险废物资源化技术四维综合评价：以废有机溶剂及含重金属废物为例

周倩¹, 王兰¹, 王甜甜¹, 朱悦², 曹伟华³, 楼紫阳^{4,✉}

1. 上海电力大学, 上海 201306; 2. 上海市环境科学研究院, 上海 200233; 3. 上海市政工程设计研究总院, 上海 200092; 4. 上海交通大学, 上海 201100

摘 要 我国现有危险废物资源化技术存在资源效率不高、环境影响显著、经济效益欠佳以及社会效应不良等多方面问题, 同时也缺乏对这些问题的系统性分析和综合性评价。据此, 本研究以废有机溶剂与含重金属废物这 2 种典型危险废物的资源化应用技术为案例, 从资源、环境、经济和社会 4 个维度, 构建出包含 7 个准则层及 20 项指标的危废资源化技术综合评价体系, 并引用改进熵权法确定权重, 同时基于 TOPSIS 法对这 2 种危废的 8 项案例进行了定量化综合评价。研究发现, 对于废有机溶剂, 由于减压精馏在产品净利润 (5.906%) 和产品质量 (5.528%) 这 2 个方面具有较显著的优势, 其综合得分指数 (0.687) 高于萃取精馏 (0.481) 和常压蒸馏 (0.422)。对于含重金属废物, 火法熔炼-湿法提炼联合工艺 (0.784) 作为最优工艺, 不仅弥补了火法熔炼法 (0.458、0.450) 中资源化率 (8.404%) 低的问题, 还避免了湿法提炼法 (0.486、0.645) 的大量辅料添加及后续复杂的除杂工艺, 最大程度提升经济利益 (经济层总权重 32.053%)。本研究结果可在废物处理应用领域为危险废物资源化技术优化提供科学支撑和参考建议。

关键词 资源化技术; 多维综合评价; 废有机溶剂; 含重金属废物; 熵权-TOPSIS

针对危险废物量大、面广、源多、物杂的产排特性^[1], 新《中华人民共和国固体废物污染环境防治法》^[2]中提出了危险废物分级分类管理的重要要求。不同类别的危废需要采取不同的资源化利用策略, 分级分类工作有效指导了危险废物高效地可持续资源化利用。但在循环经济快速发展过程中, 还有待实现危险废物高质、高值的资源化利用。

当前在种类繁多的危险废物中, 废有机溶剂和含重金属类危险废物分别占全国危险废物总量的 11.55%^[3]、33.3%^[4]。从含重金属废物中提取昂贵的有价金属和从废有机溶剂中再生重要的化工原料既是从源头减少有害物质污染的安全需求, 又是实现稀缺资源循环供给的发展需求^[1]。因此废有机溶剂与含重金属废物可作为危险废物的 2 种典型代表进行资源化技术优化分析。危险废物资源化技术种类繁多, 涉及原理、规模和适用性等方面的差异。全面了解不同类型技术的不同层面的优劣对于规划、设计、运营和管理危险废物资源化设施至关重要。目前已有研究关注危险废物资源化技术的环境影响与经济效益等单方面或双方面准则。能源消耗、资源消耗、水气固污染排放等是常用的体现环境影响程度的指标^[5]。处理废物投资额、运行成本、产品销路等是评价危险废物经营单位经济绩效的常用指标^[6]。废物交易价格、废物处理费是大多数企业实现经济-环境双赢策略的必然考量^[7]。大多数研究都是以资源化利用解决经济、环境和能源问题为主, 对于相关利益者 (工人、居民) 对可持续性问题的影响只有部分研究, 例如当地居民对处理设施的态度^[8]、工人的工作环境对健康的影响^[9]、废物处理设施建立提供的就业机会^[10]等。当前对于危险废物资源化技术评估的大多数研究是针对资源、经济、环境和社会的某一或几个方面, 缺乏综合性分析。从四维表现中综合选择符合“十四五”关于危险废物综合利用要求的技术来进行推广是一个难点。目前已有采用数学方法来进行

收稿日期: 2024-02-26 录用日期: 2024-04-02

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (72261147460); “科技兴蒙”上海交通大学行动计划专项项目资助项目 (2021PT0045-02-01)

第一作者: 周倩 (1998—), 女, 硕士研究生, 研究方向为危险废物管理, Ajuqianzhou@163.com ✉通信作者: 楼紫阳 (1980—), 男, 博士, 教授, 研究方向为固废管理与循环经济, louwz12@sjtu.edu.cn

综合评价,但各有优劣。资源化技术评价的方法需要满足能够对各种技术的适应性、可行性和经济性作出公正的评价。

归纳起来,国内外已有的技术综合评估方法包括层次分析法(AHP)、生命周期评价(LCA)、主成分分析法(PCA)、熵权法和逼近理想解排序法(TOPSIS)等。AHP运用相对标度的形式确定相对的优劣次序,简单易行,结果直观,目前已广泛应用于工业固废协同利用技术^[11]、医疗废物处置技术^[12]、持久性有机污染物处置技术^[13]和电解锌废渣资源化技术^[14]等的综合评价,但局限在于AHP虽然以一种科学的方法将人的经验以数量化的方式表达出来,但其模糊理论中的隶属度带有较高的主观性^[15],因此,AHP更适用于定性指标较多的评价体系。LCA通常用于评估产品或服务在整个生命周期中对环境的影响。目前LCA方法已被成功应用于城市废物协同处理环境效益核算^[16]、餐厨垃圾处理工艺的环境影响分析^[17]、废锂电池再生工艺的碳足迹分析^[18]等,其局限性在于获取数据的困难性,若研究过程中数据不够完整和精确将无法使用此方法^[19-20]。此外,LCA通常只关注环境性能方面的影响,而较少考虑经济效益以及社会影响等方面^[21]。PCA方法利用数据信息浓缩原理,利用方差解释率进行权重计算。该方法需要大量的样本数据,因此学者们大都对一个城市的环境质量^[22]或对一个园区的生态绩效^[23]做主成分分析。研究区域越大越易于获取大量样本,因此少有技术评价使用PCA方法。TOPSIS方法能够全面考虑技术各项指标的实际情况,对于突变的指标具有较高敏感性^[24],可以敏锐地捕捉到技术薄弱方面的变化,并将其转化为评价结果,现已成功应用碳捕集技术评估^[25]与污染场地修复技术评估^[26]中。但TOPSIS方法运用中,需要补充一项权重设计。熵权法是利用信息熵反映数据效用值来计算指标权重^[27],信息熵越小,指标离散程度越大,对评价结果影响就越大^[28]。相比于其他赋权方法,熵权法不仅精度较高,客观性更强^[24]。在技术评价的已有研究中都避免了主观因素的影响^[29-30]。熵权法对样本的依赖性较大,随着样本数据的变化,权重会有一定的波动。这种特点更适用于资源化技术综合分析。原因在于分析技术优劣时,变化不大的指标并不需要过多关注,而变化较大的指标则是评价所需考虑的重要对象。因此,本研究引入熵权法对TOPSIS模型的权重进行改进,基于资源、环境、经济和社会四个维度,选择了20个适用于评估危险废物资源化技术的指标,对我国现存的8项废有机溶剂与含重金属废物资源化应用案例进行综合分析,解析技术特征,推动危险废物领域资源化的技术创新、技术安全和技术升级,为国家“无废城市”建设战略提供科学关键的科学支撑。

1 材料与方法

1.1 危险废物资源化技术四维综合评价指标体系

本研究确定的技术评价的边界包括从危险废物的输入到资源化产品和各类废弃物输出的整个过程。设定危险废物资源化技术评价的功能单元为1t危险废物。在此过程中,输入涵盖危险废物、能源、辅料、水和土地资源等,而输出则包括资源化产品以及废气、废水和废渣等废弃物。参考中国循环经济协会团体标准《固体废物资源化技术多维绩效评价技术规范》(T/CACE 050—2022),并根据危险废物资源化技术特点及数据可获得性对指标进行调整,从而构建了危险废物资源化技术四维评价指标体系(图1)。指标体系由资源、环境、经济和社会4个系统层的7个准则层的20项指标构成。20项指标中除安全风险、工艺处理规模的适应性与循环经济示范性属于定性指标外,其余指标均属于定量指标,通过计算即可得出。对3种定性指标的量化依据为:安全风险(满分4分)——是否高温反应(0或1分),是否高压反应(0或1分),是否形成易爆条件(0或1分),是否有化学物质释放(0或1分);工艺规模的适应性——对入料的要求条数(例如含水率、粘度、杂质、COD等必须规定范围的特殊入料要求);循环经济示范性——国家或地方鼓励发展或重点推荐的次数。

1.2 评价指标权重确定

熵权-TOPSIS方法主要包括以下8个步骤。

1) 数据标准化,即对 n 项评价指标和 m 个评价对象的原始矩阵 $X = (x_{ij})_{m \times n}$ 进行标准化,见式(1)。

$$Y_{ij} = \begin{cases} \frac{x_{ij} - \min(x_i)}{\max(x_i) - \min(x_i)}, & \text{正向指标} \\ \frac{\min(x_i) - x_{ij}}{\max(x_i) - \min(x_i)}, & \text{负向指标} \end{cases} \quad (1)$$

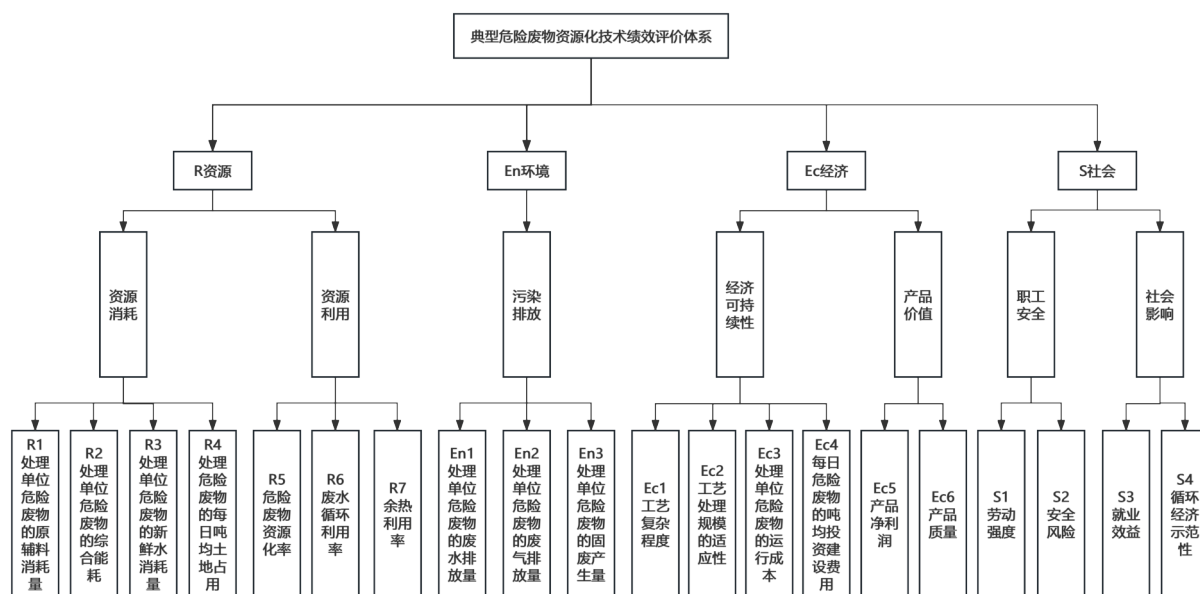


图1 危险废物资源化技术四维综合评价指标体系

Fig. 1 Four-dimensional comprehensive evaluation index system of hazardous waste resource utilization technologies

2) 定义特征权重，即计算第 i 个评价对象第 j 项指标数值占该指标的比重 (p_{ij})，见式 (2)。

$$p_{ij} = \frac{Y_{ij}}{\sum_{i=1}^m Y_{ij}} \quad (2)$$

3) 计算各指标信息熵，见式 (3)。

$$E_j = -k \sum_{i=1}^m (p_{ij} \times \ln p_{ij}) \quad (3)$$

式中： $k = \frac{1}{\ln m}$ 。

4) 确定指标权重，见式 (4)。

传统熵权法存在对指标进行一致化处理后出现熵值 E_j 趋近于 1 的情况，这时同一组熵值的微小变化都会引起 β_{ij} 成倍的变化，对该部分计算方法进行修正^[31]。

$$W_j = \begin{cases} (1 - \bar{E}_j^{35.35}) W_{1j} + \bar{E}_j^{35.35} W_{2j}, & E_j < 1 \\ 0, & E_j = 1 \end{cases} \quad (4)$$

式中： $\bar{E}_j$ 是所有不等于 1 的熵值的平均值， W_{2j} 的计算如下式 (5)。

$$W_{2j} = \frac{1 + \bar{E}_j - E_j}{\sum_{k=1, H_k \neq 1}^n (1 + \bar{E}_j - E_k)} \quad (5)$$

5) 计算加权标准化矩阵，见式 (6)。

$$Z_{ij} = W_j \times Y_{ij} \quad (6)$$

6) 计算正负理想解，见式 (7)、(8)。

$$I_j^+ = \max(z_{1j}, z_{2j}, \dots, z_{mj}) \quad (7)$$

$$I_j^- = \min(z_{1j}, z_{2j}, \dots, z_{mj}) \quad (8)$$

7) 计算各指标与正负理想解的欧氏距离，见式 (9)、(10)。

$$D_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^n (i_j^+ - z_{ij})^2} \quad (9)$$

$$D_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^n (i_j^- - z_{ij})^2} \quad (10)$$

8) 计算综合评价值, 见式 (11)。

$$C_i = \frac{D_i^-}{D_i^+ + D_i^-} \quad (11)$$

式中: C_i 是相对贴近度, 即各评价对象与最优方案的接近程度^[32]。 C_i 值越大, 表明与最优方案的相对距离越近, 即该资源化技术绩效越好。通过从高到低对所有评价项目的综合 C_i 进行排序, 则可以得到最终的优劣排名。

1.3 实证案例及数据收集

本研究以废有机溶剂和含重金属废物作为危险废物的典型代表。根据《国家危险废物名录 2021 版》^[33], 废有机溶剂主要包括废有机溶剂与含有机溶剂废物 (HW06)、含有机卤化物废物 (HW41), 含重金属废物主要包括含铜废物 (HW22)、含镍废物 (HW46) 和表面处理废物 (HW17)。研究筛选了全国范围内已建成的废有机溶剂和含重金属废物资源化项目。其环境影响评价报告书及可行性研究报告作为技术工艺参数的数据来源, 同时采用实地调研的方式获得案例的社会经济系统参数。本研究共获得了 8 个资源化处理案例的基础数据, 其分类与编号见图 2。

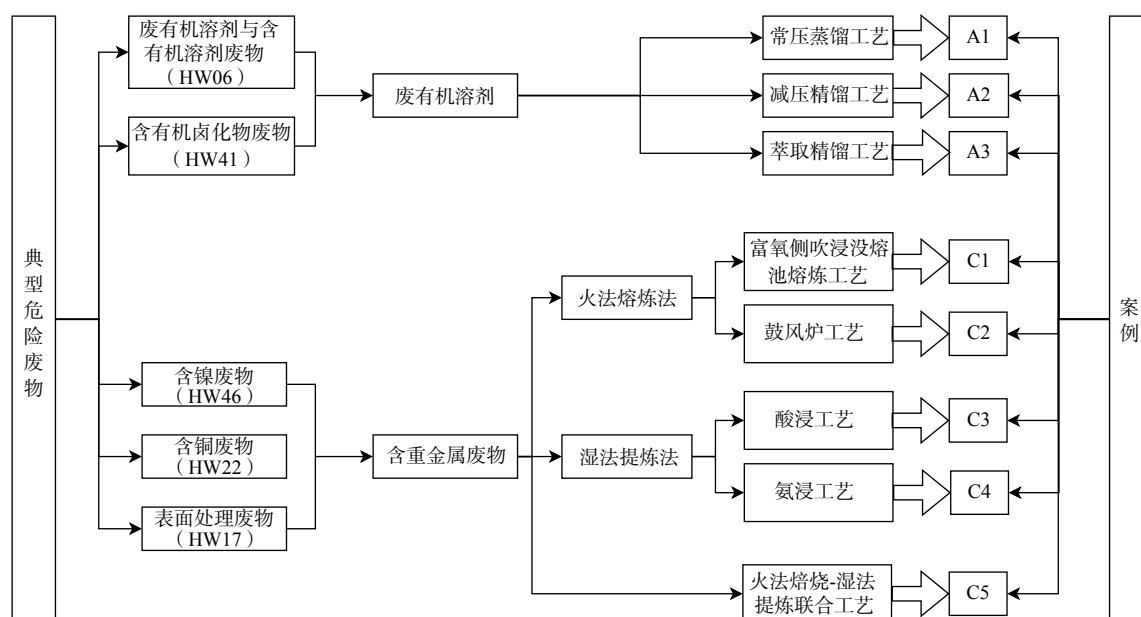


图 2 典型危险废物资源化案例类别与编号

Fig. 2 Categories and codes of typical hazardous waste resource utilization cases

2 结果与讨论

2.1 四维评价指标重要性分析

2 类典型危险废物资源化技术四维综合评价体系的各指标权重见表 1, 其系统层总权重大致相同, 废有机溶剂资源化技术资源指标和经济指标权重分别为 33.832% 和 31.318%, 社会指标权重 20.518%, 环境指标权重 14.330%; 含重金属废物资源指标和经济指标权重分别为 35.592% 和 32.053%, 环境指标权重 16.489%, 社会指标权重 15.868%。资源化技术的首要目标是将废弃物转化为有价值的物质或能源, 在这个

表 1 改进熵权法权重
Table 1 Weight of improved entropy method

技术分类	指标	信息熵值/e	权重	技术分类	指标	信息熵值/e	权重
废有机溶剂 资源化技术 指标体系	产品净利润	0.523	5.906%	含重金属 废物资源化 技术指标体系	工艺处理规模的适应性	0.656	8.475%
	产品质量	0.553	5.528%		危险废物资源化率	0.659	8.404%
	处理单位危险废物的运行成本	0.569	5.328%		处理单位危险废物的废气排放量	0.714	7.049%
	处理单位危险废物的综合能耗	0.577	5.23%		处理单位危险废物的综合能耗	0.764	5.801%
	循环经济示范性	0.58	5.199%		产品净利润	0.766	5.753%
	工艺复杂程度	0.58	5.199%		循环经济示范性	0.791	5.142%
	劳动强度	0.58	5.199%		产品质量	0.795	5.039%
	安全风险	0.58	5.199%		处理单位危险废物的固废产生量	0.796	5.021%
	余热利用率	0.598	4.969%		处理单位危险废物的新鲜水消耗量	0.81	4.682%
	处理危险废物的每日吨均土地占用	0.598	4.969%		处理单位危险废物的运行成本	0.816	4.519%
	处理单位危险废物的废气排放量	0.598	4.969%		处理危险废物的每日吨均土地占用	0.817	4.509%
	就业效益	0.602	4.921%		处理单位危险废物的废水排放量	0.82	4.419%
	处理单位危险废物的新鲜水消耗量	0.611	4.815%		每日危险废物的吨均投资建设费用	0.823	4.355%
	工艺处理规模的适应性	0.613	4.79%		处理单位危险废物的原辅料消耗量	0.824	4.342%
	处理单位危险废物的固废产生量	0.613	4.782%		余热利用率	0.84	3.943%
	废水循环利用率	0.621	4.688%		工艺复杂程度	0.841	3.912%
	危险废物资源化率	0.625	4.637%		废水循环利用率	0.841	3.911%
	处理单位危险废物的废水排放量	0.63	4.579%		就业效益	0.852	3.644%
	每日危险废物的吨均投资建设费用	0.631	4.567%		劳动强度	0.853	3.608%
	处理单位危险废物的原辅料消耗量	0.634	4.524%		安全风险	0.859	3.474%

过程中如果消耗更多的辅料与能源，将是另一种形式的资源浪费。其次，技术能够获得更多的附加值和利润是企业可持续发展的基础。权重结果也说明了衡量危险废物资源化技术的优劣更侧重于资源和经济层面。

然而，不同种类危险废物的资源化技术需要重点关注的技术特征不同。本研究使用熵权法确定的各指标权重，即对于同一种类危废的资源化技术，变化较大的指标是评价所需考虑的重要对象。对于废有机溶剂，经济系统中产品价值层的 2 个指标（产品净利润、产品质量）是影响排序结果的主要因素，可以看出，产品价值是衡量废有机溶剂资源化技术的最重要考量部分。因为它直接关系到企业的经济效益，高价值产品有助于推动废有机溶剂资源化技术的发展和應用。对于含重金属废物，工艺处理规模的适应性、危险废物资源化率、处理单位危险废物的废气排放量和处理单位危险废物的综合能耗指标是影响排序结果的主要因素。含重金属废物资源化技术对产品价值的关注度不及废有机溶剂，因为再生金属产品的销路多，能够大规模生产同时满足技术的环境友好性才是企业的考量点。根据综合评价体系中权重较大的指标去进行资源化技术优化是快速提升工艺先进性与弥补工艺差距的方法。

2.2 危险废物资源化技术综合评价

危险废物资源化技术通过 TOPSIS 法的排序结果如表 2 所示，同时为了比较资源化技术的各项指标对其排序结果的影响，本研究分别对指标层的标准化后的数据进行了展示（见图 3）。图 3 展现的内容可进一步解释表 2 的结果。对 2 类危险废物资源化技术的综合评价及优化建议如下。

2.2.1 废有机溶剂

废有机溶剂目前最优的资源化方法是减压精馏工艺（A2），主要原因是其在综合能耗、工艺处理规模适应性和产品质量指标方面具有较显著的优势。减压精馏借助于真空泵降低系统内的压力、液体的沸点以及操作的温度，因此既可以节能，又能避免热敏性有机溶剂在高温下分解，从而得到品质优良的产品。减压精馏

表 2 危险废物资源化技术排序结果

Table 2 Ranking of hazardous waste resource utilization technologies

技术分类	技术编号	正理想解距离 (D+)	负理想解距离 (D-)	综合得分指数	排序
废有机溶剂	A1	0.786 912 44	0.574 474 66	0.421 977 45	3
	A2	0.372 164 25	0.817 136 01	0.687 072 93	1
	A3	0.658 167 90	0.610 384 50	0.481 166 17	2
含重金属废物	C1	0.725 351 80	0.611 953 91	0.457 602 10	4
	C2	0.715 175 82	0.584 530 62	0.449 740 50	5
	C3	0.675 696 05	0.637 681 80	0.485 528 06	3
	C4	0.413 830 90	0.753 093 33	0.645 366 09	2
	C5	0.235 255 11	0.851 559 73	0.783 537 08	1

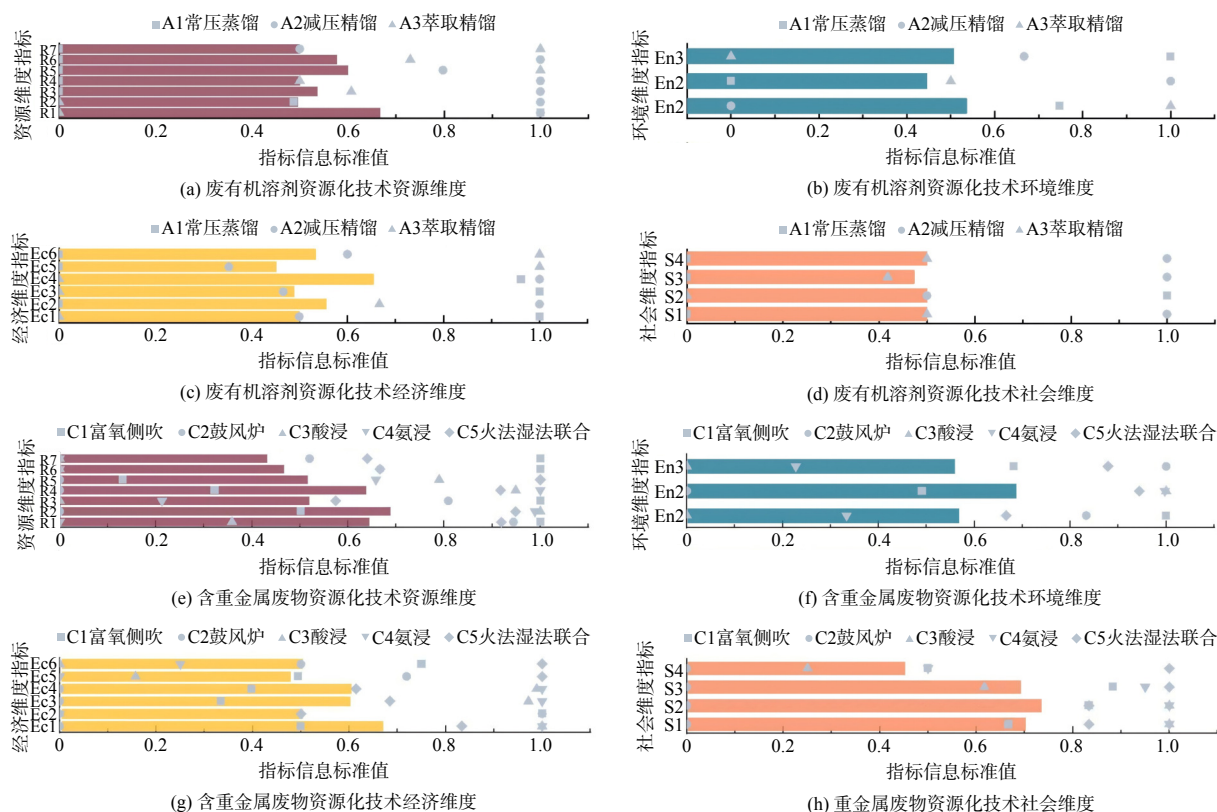


图 3 各资源化技术的指标信息标准化结果

Fig. 3 Standardized results of indicator information for various resource utilization technologies

的单套设备最大处理能力为 $100\ 000\ \text{t}\cdot\text{a}^{-1}$, 可进行连续工业生产。

萃取精馏工艺 (A3) 是废有机溶剂排名第 2 的资源化工艺。由于该工艺在精馏过程中连续加入高沸点添加剂, 比一般蒸馏方法更适用于分离组分间相对挥发度约为 1 的有机溶剂。该工艺生产的产品纯度可达 99.9%, 但其工艺较为复杂, 能耗高且产生大量固废, 同时该工艺对温度、压力等技术安全性要求较高。

常压蒸馏工艺 (A1) 是蒸发和冷凝 2 种操作单元的联合, 没有其他的分离手段。它的优点在于工艺简单, 能耗、固废排放量及运行成本等负向指标都很少, 但其资源化的产品质量太低, 在市场上仅销售于一些要求不高的化工行业。常压蒸馏在经济可持续性和产品价值方面的表现导致与 2 种精馏技术存在显著差距, 且 2.1 节的权重分析显示产品价值又是衡量废有机溶剂资源化技术的最重要考量部分, 因此常压蒸馏排名最低。

2.2.2 含重金属废物资源化工艺

火法熔炼工艺中富氧侧吹浸没熔池熔炼工艺（C1）比鼓风炉工艺（C2）更优。具体原因有：富氧侧吹工艺的原辅料和能源的消耗低于鼓风炉工艺，因为富氧侧吹工艺采用高浓度富氧空气代替空气，进料的含水率都已降至40%以下，提供了更高的温度和热效率。此外，富氧侧吹工艺系统配置紧凑，土地资源使用也得到了降低。在环境层面，鼓风炉工艺直接将热烟气与污泥接触，因此造成严重的气态环境污染和恶劣的生产环境，并间接导致了高昂的烟气处理成本，而富氧侧吹工艺通过减少鼓风量来避免对环境造成污染；在社会层面，富氧侧吹工艺具有高度自动化、低劳动强度以及设备密闭性强等特点，从而为员工提供相对安全的工作环境。而鼓风炉工艺预处理还包括搅拌、造粒、烘干、烧结等，不仅工序复杂且劳动强度大。

湿法提炼工艺中氨浸工艺（C4）比酸浸工艺（C3）更优。应用酸浸工艺的案例是利用硫酸将污泥中的重金属物质浸出，使含重金属污泥中的金属以离子态形式析出。其反应速率虽快，但金属浸出的选择性差导致后续除杂过程复杂，需要消耗大量的辅料。氨浸工艺是利用氨水中的铵根选择络合含重金属废物中的有价金属，其他杂质元素无法与铵根形成络合离子，对金属浸出具有良好的选择性，因此后续除杂过程相对简单，但氨浸工艺废水和残渣排放量以及安全风险指标表现较差，这是因为该工艺辅料（氨水）的挥发性强、臭味极重，导致废水及残渣不仅量大且难以处理，在系统密闭性方面要求极高，安全性相对较低。对于想使用氨浸法进行危废资源化的企业，多次安全隐患排查是必不可少的。

火法熔炼（C1与C2）与湿法提炼（C3与C4）相比，二者均有优缺点。火法熔炼的优点：一在于其工艺过程中多使用工艺冷却循环水很少消耗辅料与新鲜水，可实现废水“零排放”；二在于其对于入料要求低，适用于各种类型的含重金属废物，设备结构简单，适用于大规模连续化处理。火法熔炼的缺点：一在于其工艺复杂，投资建设费用更大；二在于其产生大量烟气，对空气污染严重；三在于其高温操作环境下，员工的劳动强度更大，安全性更低。湿法提炼的缺点是直接制取化合物需要消耗大量溶剂辅料，导致后续废水、废渣产量大且难以处理。此外，由于添加的辅料也同时增加了杂质，后续金属提炼工艺比火法复杂，且金属化合物的纯度低、销售净利润低，但湿法提炼的能耗更低，资源化率高，回收金属的效率更高。由2.1节指标权重分析可知，处理含重金属废物的企业更需关注危险废物资源化率、处理单位危险废物的废气排放量和处理单位危险废物的综合能耗指标，火法熔炼法在这些方面没有优势，因此综合而言，运用湿法提炼法更适用于含重金属废物资源化。

在所有选取的含重金属废物的5种资源化案例中，火法焙烧-湿法提炼联合工艺（C5）是最优工艺。含重金属废物中含有大量水分、有机物以及其他杂质，直接采用湿法提炼法又会消耗大量辅料。单纯使用火法或湿法均不利于含重金属废物的资源化利用。因此联合工艺解决了这个问题，该工艺首先对含有重金属废物进行焙烧预处理，通过火法去除污泥中的有机物、水分和一些杂质，以实现目标金属富集，焙烧后再利用湿法进行浸取。联合工艺不仅弥补了火法熔炼法中资源化率低的问题，还避免了湿法提炼法浸出率低、后续除杂过程复杂，最大程度回收有价金属，提升经济利益。但想利用联合工艺的企业项目，还需在能耗、气体排放量、投资和运行成本等方面对工艺进行优化。

3 结论

1) 本研究从资源、环境、经济和社会四个维度，构建了包含7个准则层及20项指标的危险废物资源化技术综合评价体系，引用改进的熵权确定权重，基于TOPSIS方法进行排序，为筛选综合表现较高的危险废物资源化技术提供科学指导。以我国8项废有机溶剂与含重金属废物资源化技术为案例，运用该方法进行了综合评价。评价结果显示，废有机溶剂资源化技术应用案例的排序为：A2（减压精馏）>A3（萃取精馏）>A1（常压蒸馏）；含重金属废物资源化技术应用案例的排序为：C5（火法焙烧-湿法提炼联合）>C4（湿法-氨浸）>C3（湿法-酸浸）>C1（火法-富氧侧吹）>C2（火法-鼓风炉）。本研究综合优选结果与国家及地方推荐的方案基本一致，验证了该方法的有效性。

2) 权重分析与可视化各指标信息标准化结果能够直观表达技术所需重点关注的方向以及技术在不同维度上的优势与不足。结果显示：产品价值是衡量废有机溶剂资源化技术的最重要考量部分，而对于含重金属废物处理技术来说，产品的销路多，能够大规模生产同时满足技术的环境友好性是企业的必然考量。不同类型技术应用均存在表现较好或较差的指标，对于废有机溶剂，简单易行且成本低的常压蒸馏技术在产品质量

方面仍有提升的空间;萃取精馏生产的产品质量是最好的,并且具备更为精准的应用领域,但需要研究如何简化工艺、降低能耗以及减少固废排放量。对于含重金属废物,选择火法焙烧-湿法提炼联合工艺无疑是最佳的,但还需在能耗、气体排放量、投资和运行成本等方面对工艺进行优化。

3) 该研究指标体系不仅可以帮助企业监测和评估危险废物资源化利用的实际效果和进展情况从而降低生产成本,增强竞争力,还可以帮助政府部门判断区域内该引起重视的技术短板,督促企业加大对危险废物资源化利用技术的投入和推广应用。同时,政府可以利用该指标体系评估企业的环保绩效,引导企业积极履行社会责任,推动行业绿色转型升级。行业协会可以借助该指标体系推动行业标准的制定和普及,规范企业行为,推动行业整体发展。危险废物资源化技术的应用正在逐步增多,但各种不同类型技术的数据积累仍然有待进一步深入研究。首先,本研究在危险废物典型种类的选择上仅选取了2种年产量较大且具有回收潜力的种类,其他例如废矿物油、废乳化液和废包装容器等也具有一定的回收价值。其次是在技术类型覆盖度上,除了8种案例涉及的工艺之外,还有共沸精馏、薄膜蒸发、微生物浸取和铁氧体反应等资源化利用方式。由于缺乏可靠的技术资料,本研究未展开这些危废种类与技术的分析比较。随着我国更多的危险废物技术应用案例投入应用,未来可建立各技术的绩效数据库,为多源危险废物资源化利用提供更多的科学依据。

参考文献

- [1] 辛宝平,王佳. 涉重危废资源化利用理论体系[J]. 环境工程学报, 2022, 16(3): 705-713.
- [2] 中华人民共和国全国人大常委会. 中华人民共和国固体废物污染环境防治法(2020修订)[EB/OL]. [2024-02-26]. https://www.mee.gov.cn/ywgz/fgbz/fl/202004/20200430_777580.shtml.
- [3] 熊鸿斌,丁涛. 废矿物油再生工艺生命周期评价及其不确定性研究[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2023, 46(8): 1009-1017.
- [4] 辛宝平,王佳. 涉重危废三维属性及其精细化分级分类体系[J]. 环境工程学报, 2022, 16(2): 355-362.
- [5] 葛亚男,张弛,袁进,等. 水泥窑协同处置危险废物的环境影响研究[J]. 安全与环境工程, 2021, 28(4): 201-206.
- [6] 张静园,张春鹏,张丁,等. 固体废弃物处理技术评价指标体系研究与实践[J]. 科技管理研究, 2020, 40(15): 89-94.
- [7] ZHANG W, LIU C, LI L. Economic and environmental implications of the interfirm waste utilisation[J]. International Journal of Production Research, 2022, 60(16): 4868-4889.
- [8] GUIMARÃES A G, VAZ-FERNANDES P, RAMOS M R, et al. Co-processing of hazardous waste: The perception of workers regarding sustainability and health issues in a Brazilian cement company[J]. Journal of Cleaner Production, 2018, 186: 313-324.
- [9] FARROKHI-ASL H, MAKUI A, GHOSI R, et al. Developing a hazardous waste management system with consideration of health, safety, and environment[J]. Computers & Electrical Engineering, 2020, 82: 106553.
- [10] LIU Y, PARK S, YI H, et al. Evaluating the employment impact of recycling performance in Florida[J]. Waste Management, 2020, 101: 283-290.
- [11] 杜洪彪,梁扬扬,李金惠,等. 工业园区固体废物协同利用技术评价方法:以包头铝业园区为例[J]. 环境科学研究, 2024, 37(1): 140-150.
- [12] 许晓芳,谭全银,刘丽丽,等. 基于层次分析法的医疗废物处置技术评价[J]. 环境科学, 2018, 39(12): 5717-5722.
- [13] 赵娜娜,李丽,易爱华,等. POPs废物处置技术多目标决策筛选研究[J]. 环境科学研究, 2007, 20(3): 164-167.
- [14] 肖宇凡,张建强,周杨,等. 基于层次分析法的电解锌废渣资源化技术评价[J]. 化工环保, 2021, 41(3): 356-361.
- [15] 司继涛,李冬,刘晋文,等. 危险废物处理处置技术评价方法研究[J]. 环境科学研究, 2005, 18(S1): 39-42.
- [16] GÜERECA L P, TORRES N, JUÁREZ-LÓPEZ C R. The co-processing of municipal waste in a cement kiln in Mexico. A life-cycle evaluation approach[J]. Journal of Cleaner Production, 2015, 107(16): 741-748.
- [17] 熊鸿斌,孔子逸. 基于LCA的2种餐厨垃圾处理工艺环境影响分析[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2023, 46(10): 1297-1306.
- [18] 孙杰,董强,张笛,等. 基于LCA的废锂电池典型回收再生工艺碳足迹分析和环境影响评价[J]. 环境工程, 2023, 41(S2): 1254-1259+1263.
- [19] 杨光,史波芬,周传斌. 我国厨余垃圾资源化技术的多维绩效评价[J]. 环境科学, 2023, 44(6): 3024-3033.
- [20] 杨雪. 数字化智能环保服装设计:探索时尚与绿色环保可持续发展的融合之路[J]. 环境工程, 2023, 41(4): 278-279.
- [21] 孙光亚,王雅君,徐同广,等. 基于LCA的PET再生纺织品环境影响分析[J]. 中国环境科学, 2023, 43(11): 6194-6203.
- [22] 李允洁,吕惠进. 基于主成分分析煤炭型城市环境质量评价——以安徽省淮南市为例[J]. 科技通报, 2016, 32(9): 224-228.
- [23] 宋叙言,沈江. 基于主成分分析和集对分析的生态工业园区生态绩效评价研究——以山东省生态工业园区为例[J]. 资源科学, 2015, 37(3): 546-554.
- [24] 鲁言波,陈湛峰,李彤. 基于改进TOPSIS模型的广东省主要湖库水质特征分析[J]. 生态环境学报, 2023, 32(12): 2194-2206.
- [25] 刘双,宋学行,尚丽,等. 基于AHP-TOPSIS法的碳捕集技术方案综合评估[J]. 洁净煤技术, 2023, 29(1): 1-14.
- [26] 张倩,蒋栋,谷庆宝,等. 基于AHP和TOPSIS的污染场地修复技术筛选方法研究[J]. 土壤学报, 2012, 49(6): 1088-1094.
- [27] 程星华,谢胜,吕永鹏,等. 熵权-灰色关联模型在农村生活污水治理技术选取中的应用[J]. 给水排水, 2014, 50(S1): 173-177.
- [28] 周末友,胡新亿. 基于熵权TOPSIS模型的工业资源环境承载力评价研究:以新余市为例[J]. 环境工程, 2023, 41(S2): 783-786+793.
- [29] 龙腾锐,赵欣,林于廉,等. M-AHP-熵权组合赋权法在垃圾渗滤液处理技术评价中的应用[J]. 环境工程学报, 2010, 4(11): 2455-2460.
- [30] 张亚青,王相,孟凡荣,等. 基于熵权和层次分析法的VOCs处理技术综合评价[J]. 中国环境科学, 2021, 41(6): 2946-2955.
- [31] 王玉梅,刘婧岩,李自强. 基于改进熵权法的煤矿电能质量评估方法[J]. 电子科技, 2021, 34(7): 31-36+78.

[32] 赵梦琪, 杨小林. 焦作市基本医疗卫生服务水平测度与提升策略研究——基于熵权 TOPSIS 模型[J]. 现代商贸工业, 2024, 45(3): 39-41.

[33] 生态环境部, 国家发展和改革委员会, 公安部, 等. 国家危险废物名录 (2021)[EB/OL]. [2024-02-26]. https://www.mee.gov.cn/gzk/gz/202112/t20211213_963867.shtml.

(责任编辑: 陶雪)

Four-dimensional comprehensive evaluation of hazardous waste resource utilization technologies: A case study on waste organic solvent and heavy metal contained waste

ZHOU Qian¹, WANG Lan¹, WANG Tiantian¹, ZHU Yue², CAO Weihua³, LOU Ziyang^{4,*}

1. Shanghai University of Electric Power, Shanghai 201306, China; 2. Shanghai Academy of Environmental Sciences, Shanghai 200233, China; 3. Shanghai Municipal Engineering Design Institute, Shanghai 200092, China; 4. Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 201100, China

*Corresponding author, Lou Ziyang, E-mail: louworld12@sjtu.edu.cn

Abstract Existing technologies for the resource utilization of hazardous waste, suffer from inefficiency, significant environmental impacts, poor economic benefits, and adverse social effects in China. There is also a lack of systematic analysis and comprehensive evaluation of these problems. Therefore, this study took the resource utilization technologies of waste organic solvents and heavy metal contained waste as examples. From the perspectives of resources, environment, economy, and society, a comprehensive evaluation system for hazardous waste resource utilization technologies was constructed, consisting of seven criteria layers and twenty indicators. The improved entropy weight method was used to determine the weights, and the TOPSIS method was employed to quantitatively evaluate eight cases of these two types of hazardous waste. The study found that for waste organic solvents, vacuum distillation had significant advantages in terms of product net profit (5.906%) and product quality (5.528%), resulting in a higher comprehensive score index (0.687) compared to extraction distillation (0.481) and atmospheric distillation (0.422). As for heavy metal contained waste, the combined process of pyrometallurgical smelting and wet refining (0.784) was identified as the optimal process. It not only addressed the low resource utilization rate (8.404%) in pyrometallurgical smelting processes (0.458, 0.450), but also avoided the extensive addition of auxiliary materials and subsequent complex purification processes in wet refining processes (0.486, 0.645). This approach maximized economic benefits (with an overall weight of 32.053% in the economic layer). The results of this study can provide scientific support and reference suggestions for optimizing hazardous waste resource utilization technologies in the field of waste treatment applications.

Keywords resource utilization technology; multidimensional comprehensive evaluation; waste organic solvent; heavy metal contained waste; entropy weight-TOPSIS