

阮久莉,王艺博,郭玉文.基于层次分析-模糊综合评价法的锌冶炼行业水污染控制技术评价[J].环境工程技术学报,2021,11(5):976-982.

RUAN J L, WANG Y B, GUO Y W. Research on water pollution control technology assessment in zinc smelting industry based on AHP-FCE[J]. Journal of Environmental Engineering Technology, 2021, 11(5): 976-982.

基于层次分析-模糊综合评价法的锌冶炼行业 水污染控制技术评价

阮久莉,王艺博,郭玉文*

国家环境保护生态工业重点实验室,中国环境科学研究院

摘要 通过构建锌冶炼行业水污染控制技术评价指标体系,结合层次分析-模糊综合评价(AHP-FCE)法,分别对污酸及酸性废水、综合废水2类废水建立锌冶炼行业水污染控制技术评价标准,对2类废水的8种污染控制技术进行综合量化评价。结果表明:基于选择性吸附—气液强化硫化—蒸发浓缩—氟氯分离的污酸资源化处理关键技术综合评价得分为4.38,为评价的4种污酸及酸性废水污染控制技术中最优的;基于重金属废水生物制剂深度处理技术的重金属冶炼废水生物-物化组合处理与回用技术综合评价得分为4.14,为评价的4种综合废水处理与回用技术中最优的。该评价结果可为企业选择适宜水污染控制技术提供可靠依据,也可为管理部门推荐最佳可行性技术及制订相关政策标准提供强有力的支撑。

关键词 锌冶炼;水污染控制技术;评价指标体系;层次分析(AHP);模糊综合评价(FCE);综合量化评价

中图分类号:X703.1 文章编号:1674-991X(2021)05-0976-07 doi:10.12153/j.issn.1674-991X.20210032

Research on water pollution control technology assessment in zinc smelting industry based on AHP-FCE

RUAN Jiuli, WANG Yibo, GUO Yuwen*

State Environmental Protection Key Laboratory of Ecological Industry, Chinese Research Academy of Environmental Sciences

Abstract The evaluation index system of water pollution control technology of zinc smelting industry was constructed, the analytic hierarchy process-fuzzy comprehensive evaluation (AHP-FCE) model was developed, and the evaluation standards of water pollution control technology of zinc smelting industry were established in two technical units: the complete set of pollution control technology for waste acid and acid wastewater and the complete set of comprehensive wastewater treatment and reuse technology. Then the comprehensive quantitative evaluation of eight pollution control technologies in two technical units was carried out based on AHP-FCE. The results showed that: The comprehensive evaluation score of the key technology of waste acid resource treatment based on “selective adsorption-gas-liquid enhanced sulphidation-evaporation concentration-fluorine chlorine separation” was 4.38, which was the best of the four waste acid and acid wastewater pollution control technologies; the comprehensive evaluation score of the heavy metal smelting wastewater biophysical and chemical combination treatment and reuse technology based on “biological agent advanced treatment technology of heavy metal wastewater” was 4.14, which was the best of the four comprehensive wastewater treatment technologies. The evaluation results could provide a reliable basis for enterprises to choose suitable water pollution control technology, and also provide a strong support for the management department to recommend the best feasible technology and formulate relevant policies and standards.

收稿日期:2021-02-02

基金项目:国家水体污染控制与治理科技重大专项(2017ZX07402004-003)

作者简介:阮久莉(1987—),女,高级工程师,主要从事废物资源化技术与管理研究,ruanj@ craes.org.cn

* 责任作者:郭玉文(1967—),男,研究员,博士,主要从事废物资源化技术与管理研究,guoyw@ craes.org.cn

Key words zinc smelting; water pollution control technology; evaluation index system; analytic hierarchy process (AHP); fuzzy comprehensive evaluation (FCE); comprehensive quantitative evaluation

锌冶炼行业是我国国民经济的重要支撑行业,但因其耗水量大、重金属排放浓度高成为高耗水、高污染行业之一。随着生态环境监管日益严格,污染防治要求不断提高,锌冶炼行业的水污染控制技术发展已经从单向治理向综合治理、循环利用转变,水循环利用率不断提高,废水中有价金属回收成效显著。但当有多个技术可供选择时,如何选择合理有效的水污染控制技术成为人们关注的重点。

锌冶炼行业水污染控制技术种类繁多,在适用范围、成熟度、治理效果和运行成本等方面各有优劣,企业在选择水污染控制技术时缺乏指导和依据,政府部门在制订行业污染防治技术政策和标准时缺乏技术支撑,通过综合量化评价可筛选不同需求时适宜的污染控制技术,为有效控制锌冶炼行业废水排放和重金属污染控制提供支撑。

国内外现代技术综合评价方法主要有专家分析法^[1]、层次分析法^[2]、灰色综合评价法^[3]、模糊综合评价法^[4]、德尔菲法^[5]、数据包络分析法^[6]、灰色关联分析法和成本效益分析法^[7]等。其中层次分析法将定性与定量相结合,实现多目标决策与分析,对解决评价、排序和许多其他问题非常有效,但评价结果带有一定的主观臆断性。而模糊综合评价法对难以量化、非确定性问题的解决非常有效,且系统性强,结果明确^[1]。将2种方法结合起来的层次分析-模糊综合评价(AHP-FCE)法^[8-9]依据模糊集理论、最大隶属度原则,结合加权平均法对系统的多因素开展综合定量评价^[10],已在石化^[11]、制药^[12]、电镀^[13]、冶金^[14-15]等多个行业广泛应用,但在锌冶炼行业的相关研究仍相对较少。笔者采用AHP-FCE法对锌冶炼行业的污酸及酸性废水、综合废水2类废水的污染控制技术进行综合量化评价,建立适用于我国锌冶炼行业水污染控制技术的评价指标体系,以期为我国锌冶炼行业水污染控制技术的评价和筛选提供技术支持。

1 评价技术的筛选

锌冶炼行业水污染控制技术涉及污酸及酸性废水、综合废水等废水种类,来自不同的工艺环节。通过文献调研、专家咨询和现场调研,分析锌冶炼行业的产能、工艺、废水产生节点和排放特性,结合已发布的相关产业和生态环境保护政策、标准,梳理当前

锌冶炼行业的清洁生产技术、水污染控制技术特点和应用实际等,对现有锌冶炼企业的水污染控制技术进行筛选,再与行业协会、企业专家等共同研讨,确定待评价的锌冶炼行业水污染控制技术清单(表1)。

表1 备选评价技术清单

Table 1 List of alternative assessment techniques

废水种类	备选评价技术
污酸及酸性废水	石灰中和法
	酸性高砷废水还原-共沉淀协同除砷技术 ^[16]
	含重金属酸性废水生物制剂深度处理技术 ^[17] 污酸资源化处理关键技术(选择性吸附—气液强化硫化—蒸发浓缩—氟氯分离) ^[18]
综合废水	石灰中和法
	高密度泥浆法 ^[17]
	重金属废水电化学处理技术 ^[19] 重金属废水生物制剂深度处理技术 ^[19-20]

2 AHP-FCE 法综合评价

2.1 评价指标体系的构建

锌冶炼行业构建的水污染控制技术评价指标体系主要包含目标层、准则层和指标层3个层次(图1)。其中,目标层反映了锌冶炼行业水污染控制技术水平。准则层一般为具有普适性和概括性的指标。指标层中的各项指标是具有锌冶炼行业水处理特点的、具体的、可操作的、可验证的若干指标。评价指标体系主要包括技术性能、经济成本、环境影响和运行管理4个方面。技术性能表征被评价技术的自身性能;经济成本表征被评价技术的工程投资、运行维护费用等;环境影响表征被评价技术对各种污染物的处理效率;运行管理表征被评价技术的稳定性和可操作性。

2.2 评价指标权重的确定

运用层次分析法确定各评价指标的权重^[21],邀请有色行业研究院、相关高校和行业协会专家评价指标选取的合理性,并按照1~9标度法通过比较指标间两两重要程度,对各指标的相对重要性赋值。根据专家的赋值进行加权加和并求平均,确定各项指标的最终权重,结果见表2。

通过表2得到判断矩阵,并求算最大特征根及其特征向量,最后经一致性检验,得出各指标的权向量。若该矩阵满足一致性检验,则直接计算判断

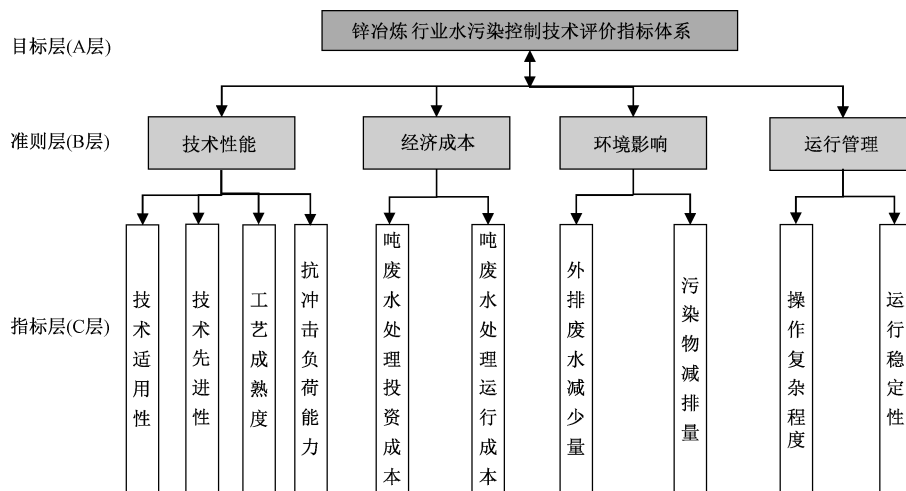


图 1 锌冶炼行业水污染控制技术评价指标体系框架

Fig.1 Framework of evaluation index system of water pollution control technology in zinc smelting industry

表 2 锌冶炼行业水污染控制技术评价专家评定

Table 2 Expert evaluation of water pollution control technologies in zinc smelting industry

比较对象(二选一,较重要的请打√)		重要程度 (选填数字 1~9)
一级指标	技术性能√ 经济成本	3
	技术性能 环境影响√	3
	技术性能 运行管理	1
	经济成本 环境影响√	3
	经济成本 运行管理√	3
	环境影响 运行管理	1
二级指标	技术先进性 技术适用性√	3
	技术先进性 工艺成熟度√	3
	技术先进性 抗冲击负荷能力√	3
	技术适用性 工艺成熟度√	3
	技术适用性 抗冲击负荷能力	1
	抗冲击负荷能力 工艺成熟度	1
经济成本 吨废水处理投资成本 吨废水处理运行成本√	3	
环境影响 外排废水减少量 污染物减排量√	3	
运行管理 操作复杂程度 运行稳定性√	5	

注:没有打√代表 2 个指标的重要程度相同。

矩阵对应的权向量;若不满足一致性检验,则征求专家意见,对打分结果适当进行调整,直至满足一致性检验后,计算该矩阵的权向量。以一级指标为例,权重计算过程如下。

建立正确的判断矩阵:

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 3 & 1/3 & 1 \\ 1/3 & 1 & 1/3 & 1/3 \\ 3 & 3 & 1 & 1 \\ 1 & 3 & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

求得矩阵的最大特征根(λ_{max})为 4.153 3。

一致性检验:当矩阵阶数(n)为 4 时,一致性检验指标(CI) = $(\lambda_{max} - n)/(n - 1) = 0.051 1$,随机一致性比例(CR) = $0.057 4 < 0.1$,一致性检验通过。求得的权重结果如表 3 所示。

表 3 一级指标对目标层的权重

Table 3 Weight of primary indexes to the target layer

指标	技术性能	经济成本	运行管理	环境影响	权重
技术性能	1	3	1/3	1	0.222 9
经济成本	1/3	1	1/3	1/3	0.097 8
环境影响	3	3	1	1	0.386 0
运行管理	1	3	1	1	0.293 3

按照以上方法计算二级指标权重,并结合一级指标权重计算二级指标的综合权重,结果如表 4 所示。

表 4 二级指标权重

Table 4 Secondary index weight

指标	权重	综合权重
技术先进性	0.097 8	0.021 8
技术适用性	0.222 9	0.049 7
工艺成熟度	0.386 0	0.086 0
抗冲击负荷能力	0.293 3	0.065 4
吨废水处理投资成本	0.250 0	0.024 4
吨废水处理运行成本	0.750 0	0.073 3
外排废水减少量	0.250 0	0.096 5
污染物减排量	0.750 0	0.289 5
操作复杂程度	0.166 7	0.048 9
运行稳定性	0.833 3	0.244 4

将反馈得到的 10 个有效专家评价指标权重赋值表按照上述方法进行统计分析,将各评价指标的权重取平均值,得到各评价指标的最终权重,如表 5 所示。

表 5 各级指标权重

Table 5 Index weight at all levels

一级指标	权重	二级指标	权重	综合权重
技术性能	0.506 7	技术先进性	0.410 8	0.208 1
		技术适用性	0.282 9	0.143 3
		抗冲击负荷能力	0.213 1	0.108 0
		工艺成熟度	0.093 2	0.047 2
经济成本	0.238 0	吨废水处理投资成本	0.480 0	0.114 2
		吨废水处理运行成本	0.520 0	0.123 7
环境影响	0.164 2	外排废水减少量	0.546 7	0.089 8
		污染物减排量	0.453 3	0.074 5
运行管理	0.091 1	操作复杂程度	0.456 7	0.041 6
		运行稳定性	0.543 3	0.049 5

2.3 模糊综合评价

根据现场调研和专家咨询,以及锌冶炼行业清洁生产评价指标体系等,将评价指标评价等级分为很好、较好和一般 3 个等级。根据不同污染控制技

术特征,对污酸及酸性废水污染控制技术和综合废水处理与回用技术的评价标准在吨废水处理投资成本、吨废水处理运行成本以及外排废水减少量 3 个指标上进行了差异化设置,具体见表 6。

2.3.1 指标隶属度

邀请 5 位锌冶炼行业专家根据表 6 对待评价技术进行评价,统计结果见表 7 和表 8。

2.3.2 一级模糊综合评价

以污酸及酸性废水污染控制技术中的污酸资源化处理关键技术为例,构造准则层 (B_i) 所包含的最低层的模糊隶属矩阵和权重矩阵,计算过程如下:

$$B_1 = W_1 \times R_1$$

$$= [0.410\ 8\ 0.282\ 9\ 0.213\ 1\ 0.093\ 2] \times$$

$$\begin{bmatrix} 0.8 & 0.2 & 0 \\ 0.8 & 0.2 & 0 \\ 0.8 & 0.2 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} = [0.818\ 6\ 0.181\ 4\ 0.000\ 0]$$

同理可得, $B_2 = [0.584\ 0\ 0.208\ 0\ 0.208\ 0]$, $B_3 = [0.800\ 0\ 0.2000\ 0\ 0.000\ 0]$, $B_4 = [0.617\ 3\ 0.382\ 7\ 0.000\ 0]$ 。最终,得到第二层评价矩阵, $R = [B_1\ B_2\ B_3\ B_4]^T$ 。

表 6 锌冶炼行业废水污染控制技术(综合废水处理与回用技术)评价标准

Table 6 Evaluation standard for wastewater pollution control technology (comprehensive wastewater treatment and reuse technology) in zinc smelting industry

一级指标	二级指标	评价基准值		
		很好(5分)	较好(3分)	一般(1分)
技术性能	技术先进性	技术评价或鉴定结论为国际先进及以上	技术评价或鉴定结论为国内领先	技术评价或鉴定结论为国内先进
	技术适用性	BAT、国家鼓励技术	经企业实际工程应用,运行效果良好	经企业实际工程应用,存在技术、设备等因素影响运行效果
	抗冲击负荷能力	抗冲击负荷能力强	抗冲击负荷能力一般	抗冲击负荷能力差
	工艺成熟度	5 家以上成功工程案例	1 家以上成功工程案例	中试或扩大性应用阶段
经济成本	吨废水处理投资成本/(万元/t)	投资成本高,约 6~10 (0.8~1.0),绝大多数企业难以承受	投资成本适中,约 3~5 (0.6~0.8),一般企业可以承受	投资成本低,<3 (<0.6),企业较能承受
	吨废水处理运行成本/(元/t)	运行成本低,<40 (<2),绝大多数企业均可以负担	运行成本较适中,40~60(2~3),一般企业可以负担	运行成本较高,>60 (>3),中小型企业难以负担
环境影响	外排废水减少量	与普通石灰中和法相比,废水排放量降低 $\geq 70%$ ($\geq 50%$)	与普通石灰中和法相比,废水排放量降低 $\geq 40%$ ($\geq 40%$)	与普通石灰中和法废水排放量相比,不下降
	污染物减排量	与普通石灰中和法相比,重金属减排量降低 $\geq 90%$,且危险废物产生量下降 $\geq 70%$	与普通石灰中和法相比,重金属减排量降低 $\geq 70%$,且危险废物产生量下降 $\geq 50%$	与普通石灰中和法相比,重金属减排量 <30%;且危险废物产生量 <20%
运行管理	操作复杂程度	自动化程度很高,操作简单	采用少量人工,其他大部分实现自动化	药剂投加以及压滤卸料全部采用人工,操作难度大
	运行稳定性	连续 3 年以上稳定达标	连续 2 年稳定达标	连续 1 年稳定达标

注:括号内数字为综合废水处理与回用技术的评价标准。

表 7 污酸及酸性废水污染控制技术专家评价结果

Table 7 Expert evaluation results of pollution control technology for waste acid and acid wastewater

一级指标	二级指标	指标隶属度											
		石灰中和法			酸性高磷废水还原-共沉淀协同除磷技术			含重金属酸性废水生物制剂处理技术			污酸资源化处理关键技术(选择性吸附—气液强化硫化—蒸发浓缩—氟氯分离)		
		很好	较好	一般	很好	较好	一般	很好	较好	一般	很好	较好	一般
技术性能	技术先进性	0	0	1	0.4	0.6	0	0.6	0.4	0	0.8	0.2	0
	技术适用性	0	1	0	0.4	0.6	0	0.8	0.2	0	0.8	0.2	0
	抗冲击负荷能力	1	0	0	0	0.2	0.8	0.8	0.2	0	0.8	0.2	0
	工艺成熟度	0	0.4	0.6	0	0.4	0.6	0.8	0.2	0	1	0	0
经济成本	吨废水处理投资成本	0	0	1	0.4	0.4	0.2	0.4	0.6	0	1	0	0
	吨废水处理运行成本	0.6	0.4	0	0	0.4	0.6	0.4	0.6	0	0.2	0.4	0.4
环境影响	外排废水减少量	0	0	1	0	0.6	0.4	0.8	0.2	0	0.8	0.2	0
	污染物减排量	0	0.6	0.4	0.4	0.6	0	0.6	0.2	0.2	0.8	0.2	0
运行管理	操作复杂程度	0	0.4	0.6	0	0.6	0.4	0.6	0.4	0	0.4	0.6	0
	运行稳定性	0	0.4	0.6	0.4	0.6	0	0.8	0.2	0	0.8	0.2	0

表 8 综合废水处理与回用技术专家评价结果

Table 8 Expert evaluation results of comprehensive wastewater treatment and reuse technology

一级指标	二级指标	指标隶属度											
		石灰中和法			高密度泥浆法			重金属废水电化学处理技术			重金属冶炼废水生物-物化组合处理与回用技术(重金属废水生物制剂深度处理技术)		
		很好	较好	一般	很好	较好	一般	很好	较好	一般	很好	较好	一般
技术性能	技术先进性	0	0	1	0.6	0.4	0	0.6	0.4	0	0.8	0.2	0
	技术适用性	0	1	0	0.2	0.8	0	0.6	0.4	0	0.6	0.4	0
	抗冲击负荷能力	1	0	0	0.2	0.6	0.2	1	0	0	0.8	0.2	0
	工艺成熟度	0	0.4	0.6	0.4	0.6	0	0.8	0.2	0	0.8	0.2	0
经济成本	吨废水处理投资成本	0	0	1	0	1	0	0.2	0.8	0	0.8	0.2	0
	吨废水处理运行成本	0.6	0.4	0	0.2	0.8	0	0	0.6	0.4	0	0.8	0.2
环境影响	外排废水减少量	0	0	1	0	0.2	0.8	0	0.6	0.4	0.6	0.2	0.2
	污染物减排量	0	0.6	0.4	0.2	0.6	0.2	0.2	0.8	0	0.6	0.4	0
运行管理	操作复杂程度	0	0.4	0.6	0.4	0.4	0.2	0.2	0.6	0.2	0.2	0.8	0
	运行稳定性	0	0.4	0.6	0.4	0.6	0	0.8	0.2	0	0.8	0.2	0

2.3.3 二级模糊综合评价

通过一级模糊综合运算求出准则层中各项指标所对应的不同评价等级的隶属度,则第二层模糊综合评价矩阵计算公式如下:

$$A = W \times R = [0.5067 \quad 0.2380 \quad 0.1642 \quad 0.911] \times \begin{bmatrix} 0.8186 & 0.1814 & 0.0000 \\ 0.5840 & 0.2080 & 0.2080 \\ 0.8000 & 0.2000 & 0.0000 \\ 0.6173 & 0.3827 & 0.0000 \end{bmatrix} = [0.7414 \quad 0.2091 \quad 0.0495]$$

2.3.4 综合评价得分

将污染控制技术第二层模糊综合评价结果所属的隶属度分别乘以评价等级分值(5分、3分、1分),即得到该污染控制技术的综合评价得分,计算公式如下:

$$D = 0.7414 \times 5 + 0.2091 \times 3 + 0.0495 \times 1 = 4.38$$

同理得到其他 7 组污染控制技术的综合得分,结果见表 9。由表 9 可以看出,在污酸及酸性废水污染控制技术中,基于选择性吸附—气液强化硫化—蒸发浓缩—氟氯分离的污酸资源化处理关键技

表 9 各污染控制技术评价结果的比较

Table 9 Comparison of assessment results of various pollution control technologies

污染控制技术	评价得分	污染控制技术	评价得分
石灰中和法	2.31	石灰中和法	2.31
酸性高砷废水还原-共沉淀协同除砷技术	2.94	高密度泥浆法	3.31
污酸及酸性废水污染控制技术	4.25	综合废水处理与回用技术	3.7
含重金属酸性废水生物制剂处理技术	4.38	重金属废水电化学处理技术	3.7
污酸资源化处理关键技术(选择性吸附—气液强化硫化—蒸发浓缩—氟氯分离)	4.38	重金属冶炼废水生物-物化组合处理与回用技术(重金属废水生物制剂深度处理技术)	4.14

术的综合评价得分最高,相比其他 3 种污酸及酸性废水处理技术,该技术应用广泛并可实现废水零排放,技术先进性、抗冲击负荷能力、外排废水减少量和污染物减排量等指标的评分都较高,因此综合评价得分也较高,是比较好的污酸及酸性废水处理技术。而在综合废水处理与回用技术中,基于重金属废水生物制剂深度处理技术的重金属冶炼废水生物-物化组合处理与回用技术得分较高,相比其他 3 种综合废水处理与回用技术,该技术对重金属深度处理的效果较好,外排废水减少量显著,运行稳定性高,抗冲击负荷能力、污染物减排等指标的评分都较高,因此综合评价得分最高。在企业实际生产运行中,以上 2 种技术分别对应废水处理中应用较多的技术,评价结果与应用现状基本一致,该评价方法可为锌冶炼行业水污染控制技术的筛选提供重要参考。

3 结论

构建了以技术性能、经济成本、环境影响、运行管理 4 项指标为一级评价指标,技术先进性、技术适用性、抗冲击负荷能力、工艺成熟度、吨废水处理投资成本和运行成本、外排废水减少量和污染物减少量、操作复杂程度和运行稳定性等 10 项指标为二级评价指标的锌冶炼行业水污染控制技术评价指标体系,并选用 AHP-FCE 评价模型开展了污酸及酸性废水污染控制技术和综合废水处理与回用技术 2 类废水处理技术的评价,在综合科研机构、高校以及行业协会各专家相对客观的评分基础上计算得到各评价指标的权重,并对备选评价技术进行等级赋分,得到基于选择性吸附—气液强化硫化—蒸发浓缩—氟氯分离的污酸资源化处理关键技术综合评价得分为 4.38,为评价的 4 种污酸及酸性废水处理技术中最优的;基于重金属废水生物制剂深度处理技术的重

金属冶炼废水生物-物化组合处理与回用技术综合评价得分为 4.14,是评价的 4 种综合废水处理与回用技术中最优的。

参考文献

- [1] 任岩军,张铮,何京东,等.我国燃煤电厂大气汞控制技术综合评估与对策探讨[J].环境科学研究,2020,33(4):841-848.
REN Y J,ZHANG Z,HE J D,et al.Comprehensive evaluation and countermeasures of atmospheric mercury pollution control technology in coal-fired power plants [J]. Research of Environmental Sciences,2020,33(4):841-848.
- [2] 李梁,曹欣然,庞燕,等.洱海流域农村生活污水治理技术评价[J].环境工程技术学报,2019,9(4):349-354.
LI L,CAO X R,PANG Y,et al.Evaluation of rural domestic wastewater treatment technologies in Lake Erhai Basin[J].Journal of Environmental Engineering Technology,2019,9(4):349-354.
- [3] XU G,YANG Y P,LU S Y,et al.Comprehensive evaluation of coal-fired power plants based on grey relational analysis and analytic hierarchy process[J].Energy Policy,2011,39(5):2343-2351.
- [4] CHEN T,SHEN D S,JIN Y Y,et al.Comprehensive evaluation of environ-economic benefits of anaerobic digestion technology in an integrated food waste-based methane plant using a fuzzy mathematical model[J].Applied Energy,2017,208:666-677.
- [5] SCHNEIDER P J,EVANIEW N,MCKAY P,et al.Moving forward through consensus:a modified Delphi approach to determine the top research priorities in orthopaedic oncology [J]. Clinical Orthopaedics and Related Research,2017,475(12):3044-3055.
- [6] LIM D J.Technology forecasting using DEA in the presence of infeasibility [J]. International Transactions in Operational Research,2018,25(5):1695-1706.
- [7] 陈欢哲.新乡市化工行业大气污染物控制技术与成本效益评估研究[D].郑州:郑州大学,2019.
- [8] PU H X,LUO K L,ZHANG S X.Risk assessment model for different foodstuff drying methods via AHP-FCE method:a case study of "coal-burning" fluorosis area of Yunan and Guizhou Province,China[J].Food Chemistry,2018,263:74-80.
- [9] SHAO L N,CHEN G Q.Evaluation of heavy metal pollution

- prevention technology based on AHP-FCE [C]//Proceedings of the 2016 International Conference on Biological Engineering and Pharmacy (BEP 2016). Paris: Atlantis Press, 2016: 223-226.
- [10] 姜河, 周建飞, 廖学品, 等. 牛皮制革过程污染控制技术评估模型的建立与实证 [J]. 中国皮革, 2018, 47 (11): 40-47.
JIANG H, ZHOU J F, LIAO X P, et al. Evaluation method development and case analysis of pollution control technologies for cowhide leather manufacturing process [J]. China Leather, 2018, 47 (11): 40-47.
- [11] 牟桂芹, 隋立华, 郭亚逢, 等. 石化行业炼油恶臭污染源治理技术评估 [J]. 环境科学, 2013, 34 (12): 4771-4778.
MU G Q, SUI L H, GUO Y F, et al. Evaluation of treatment technology of odor pollution source in petrochemical industry [J]. Environmental Science, 2013, 34 (12): 4771-4778.
- [12] 梁静芳. 制药行业水污染防治技术评估方法研究 [D]. 石家庄: 河北科技大学, 2010.
- [13] 王谦. 电镀行业六价铬污染防治最佳可行技术评估的研究 [D]. 南京: 南京大学, 2013.
- [14] 田亚静, 姜晨, 吴广龙, 等. 再生铜冶炼过程多氯萘与二噁英类排放特征分析与控制技术评估 [J]. 环境科学, 2015, 36 (12): 4682-4689.
TIAN Y J, JIANG C, WU G L, et al. Assessment of emission and co-reduction of PCDD/Fs and PCNs in the secondary copper production sector [J]. Environmental Science, 2015, 36 (12): 4682-4689.
- [15] 李旭华, 周长波, 朱宁芳, 等. 电解锰行业污染治理技术评估研究 [J]. 环境工程技术学报, 2013, 3 (6): 514-518.
LI X H, ZHOU C B, ZHU N F, et al. Evaluation of the technologies for EMM industry pollution control [J]. Journal of Environmental Engineering Technology, 2013, 3 (6): 514-518.
- [16] 曲久辉, 杨中超, 刘锐平, 等. 一种高浓度含砷酸性废水处理方法及装置: CN103253791A [P]. 2013-08-21.
- [17] 环境保护部. 铅冶炼污染防治最佳可行技术指南 (试行) [A/OL]. (2012-01-17) [2021-03-08]. http://www.mee.gov.cn/gkml/hbb/bgg/201201/t20120120_222827.htm.
- [18] 柴立元, 王庆伟, 蒋国民, 等. 污酸资源回收与深度处理方法及装置: CN105439355A [P]. 2016-03-30.
- [19] 环境保护部. 铅锌冶炼工业污染防治技术政策 [A/OL]. (2012-03-07) [2021-03-08]. http://www.mee.gov.cn/ywgz/fgbz/bz/bzwb/wrfzjzsc/201203/t20120319_224788.htm.
- [20] 邓国屏, 王化敏. 重金属废水生物制剂深度处理与回用技术在锌冶炼废水处理中的运用 [J]. 青海环境, 2013, 23 (1): 18-20.
- [21] 李艳萍, 乔琦, 柴发合, 等. 基于层次分析法的工业园区环境风险评价指标权重分析 [J]. 环境科学研究, 2014, 27 (3): 334-340.
LI Y P, QIAO Q, CHAI F H, et al. Study on environmental risk assessment index weight of industrial park based on the analytic hierarchy process [J]. Research of Environmental Sciences, 2014, 27 (3): 334-340. □