

基于 BWM-CRITIC-VIKOR 法的石化行业典型油气回收技术综合评价

杨雅新¹, 戴安国², 张家申³, 赵东风^{1*}

(1. 中国石油大学(华东)化学化工学院, 山东 青岛 266580;

2. 青岛中石大环境与安全技术中心有限公司, 山东 青岛 266555;

3. 中国石油天然气股份有限公司抚顺石化分公司, 辽宁 抚顺 113004)

摘要:为系统评估石化行业油气回收技术, 构建涵盖技术性能、经济性能、环境影响与可持续性、操作与安全性的综合评价指标体系, 并集成 BWM 法(最优最劣法)、CRITIC 法(基于相关性与标准差的客观赋权法)与博弈论组合赋权, 结合 VIKOR(多准则妥协解排序法)方法对 5 种典型油气回收组合工艺进行比较分析。结果表明, 达标排放能力、安全性、去除效率与二次污染为影响技术选型的核心指标; “吸收+膜+PSA 吸附”、“吸附+吸收”与“冷凝+吸附”3 类工艺综合表现优异, 构成稳定折衷解集, 适用于不同决策偏好。该模型有效融合主客观信息, 为企业技术选型与行业绿色升级提供科学依据。

关键词: 油气回收; 综合评价; 组合赋权法; 多属性决策

中图分类号: X511

文献标志码: A

文章编号: 0253-4320(2026)S1-0006-07

DOI: 10.16606/j.cnki.issn0253-4320.2026.S1.002

Comprehensive evaluation of typical oil and gas recovery technologies in petrochemical industry based on BWM-CRITIC-VIKOR method

YANG Ya-xin¹, DAI An-guo², ZHANG Jia-shen³, ZHAO Dong-feng^{1*}

(1. College of Chemistry and Chemical Engineering, China University of Petroleum (East China), Qingdao

266580, China; 2. Qingdao Zhongshida Environment and Safety Technology Center Co., Ltd., Qingdao

266555, China; 3. PetroChina Fushun Petrochemical Company, Fushun 113004, China)

Abstract: To systematically evaluate oil and gas recovery technologies in the petrochemical industry, a comprehensive evaluation index system was constructed covering technical performance, economic performance, environmental impact and sustainability, as well as operational and safety aspects. The system integrates Best-Worst Method (BWM), Criteria Importance Through Intercriteria Correlation (CRITIC), and game theory for combined weighting, and employs the VlseKriterijumska Optimizacija I Kompromisno Resenje (VIKOR) method to compare and analyze five typical combined oil and gas recovery processes. The results indicate that compliance emission capability, safety, removal efficiency, and secondary pollution are the core indicators influencing technology selection. The “absorption + membrane + PSA adsorption”, “adsorption + absorption”, and “condensation + adsorption” processes demonstrate outstanding comprehensive performance, forming a stable compromise solution set suitable for different decision-making preferences. The model effectively integrates subjective and objective information, providing a scientific basis for enterprise technology selection and green upgrading in the industry.

Key words: oil and gas recovery; comprehensive evaluation; combined weighting method; multi-attribute decision making

石化行业是国民经济的重要支柱, 虽已蓬勃发展数十年, 仍呈上升趋势^[1-2]。作为挥发性有机物(VOCs)主要排放源之一, 其油气的无组织逸散不仅造成资源浪费, 还严重威胁大气环境、人体健康和生产安全^[3-6]。全球石化及储运环节因油气挥发导致的资源损失达 150~170 亿 m³, 并释放非甲烷总烃、多环芳烃等污染物, 加剧臭氧与雾霾污染^[7]。随着我国《空气质量持续改善行动计划》等政策的

深入推进和多项排放标准限值从“克级”提升至“毫克级”, 油气回收治理已成为行业绿色转型的核心任务。

当前, 多种油气回收技术已在石化行业中得到广泛应用, 但在实际选型过程中, 企业决策往往过于侧重处理效率与初始投资成本等有限维度, 而忽视了运行能耗、环境影响、长期稳定性等关键因素, 导致评估不够全面。在此背景下, 企业面临技术性能、

收稿日期: 2025-11-27; 修回日期: 2026-03-12

作者简介: 杨雅新(2001-), 女, 硕士生, 研究方向为石化企业废气差异化管控研究, 2733890381@qq.com; 赵东风(1968-), 男, 博士, 教授, 研究方向为化工安全、环保与节能等, 通讯联系人, zhaodf@vip.sina.com。

经济性、环境影响与运行难度等多方面属性差异显著^[8-9]、难以系统权衡的困境,加之缺乏统一、科学的评价框架,常使技术选择依赖经验判断,难以统筹效率、成本与绿色发展的综合需求。

针对上述问题,本研究构建了一套融合BWM(最优最劣法)、CRITIC(基于相关性与标准差的客观赋权法)与VIKOR(多准则妥协解排序法)的组合评价模型,对5种典型油气回收技术进行多维度综合分析。该模型不仅实现了指标主客观权重的科学平衡,还在评价过程中兼顾了技术方案的“整体效益”与“局部短板”,从而在优选决策中同时兼顾群体共识与个体风险,确保评价结果兼具科学性、稳健性与实用价值。本研究旨在通过系统化的评估框架,为企业技术选型、行业绿色升级及“减污降碳”目标的落实提供兼具理论依据与操作价值的决策支持。

1 研究对象

科学、客观地评估各类油气回收技术,并从中筛选出综合表现优异的方案,对石化企业实现VOCs深度治理与资源化回收具有重要意义。当前,单一回收技术(如冷凝、吸附或膜分离)因其固有的技术边界,往往难以在复杂工况下,同时满足日益严格的排放标准、经济可行性与运行稳定性要求。因此,将不同工艺原理的技术进行集成与优化,形成“组合工艺”,已成为行业技术发展的主流趋势。这类组合工艺通过优势互补,可突破单一技术的应用瓶颈,实现对更宽浓度范围的适应性、更高的回收效率以及更优的整体经济性。

基于技术的典型性、代表性与可比性原则,本研究选取了5种在石化行业已有应用或具备潜力的典型组合工艺作为分析对象,包括:“吸收+膜+PSA吸附”组合工艺(方案A)、“吸附+吸收”(方案B)、“冷凝+吸附”(方案C)、“冷凝+膜”(方案D)、“吸收+膜”(方案E)。这些方案涵盖了吸收、膜分离、冷凝、吸附等主流技术路线,代表行业技术融合的发展方向。各方案在投资成本、能耗、效率及安全性等关键维度具有梯度差异,适于开展多准则决策分析,能够清晰反映不同偏好下的最优选择。综合评价结

果既能为企业平衡技术效能、经济性与环保要求提供科学依据,又可指引技术向高效、集成、低碳方向发展。

2 研究方法及数据来源

2.1 评价指标体系的构建

本研究以石化企业油气回收技术综合评价作为目标层,将技术性能、经济性能、环境影响与可持续性以及操作与安全性确立为核心准则层,其选择基于全面、系统与实用的原则。技术性能作为评估基础,直接决定污染控制效能,重点关注去除效率、达标排放能力与技术适用性,以满足环保法规要求并适应石化行业复杂工况。经济性能是技术推广的关键约束,通过投资成本、运行成本与资源回收效益的综合分析,为企业提供成本—效益决策依据。环境影响与可持续性准则着眼于全生命周期,涵盖二次污染控制、资源消耗与技术成熟度,响应“双碳”战略与绿色发展要求。操作与安全性准则针对石化行业高危特点,评估操作便捷性、系统维护要求与风险管控能力,确保技术在现场长期稳定运行。因此本研究构建了包含技术性能、经济性能、环境影响与可持续性4个维度,涵盖12项指标(表1)的综合油气回收技术评估体系。为统一定性指标的量化标准,本研究采用5级评分法对各定性指标进行赋值,具体评分标准如表2所示。

表1 石化行业油气回收技术综合评估指标体系

目标层 A	准则层 B	指标层 C	属性
石化行业油气回收技术综合评价指标体系	技术性能 B1	去除效率 C1	定量
		达标排放能力 C2	定性
		技术适用性 C3	定性
	经济性能 B2	投资成本 C4	定量
		运行成本 C5	定量
		资源回收率 C6	定量
	环境影响与可持续性 B3	二次污染 C7	定性
		资源消耗 C8	定性
		技术成熟度 C9	定性
	操作与安全性 B4	操作难度 C10	定性
		维护要求 C11	定性
		安全性 C12	定性

表2 定性指标评分标准

指标	0~2分	2~4分	4~6分	6~8分	8~10分
达标排放能力 C2	远低于标准	难以达标	波动性达标	稳定达到国标	稳定优于国标
技术适用性 C3	适应范围很窄,仅限特定工况	适应范围较窄,工况波动影响大	适应范围一般,需设计工况	适应范围较宽,耐一定波动	适应范围极宽,抗冲击强

续表

指标	0~2分	2~4分	4~6分	6~8分	8~10分
二次污染 C7	大量高危废料	废料处理成本较高	需专业处理的耗材	少量易处理废料	无任何废料产生
资源消耗 C8	能耗极高	能耗较高	能耗中等	能耗较低	能耗极低
技术成熟度 C9	技术未经验证	较新,案例有限	已推广,案例较多	国内成熟,案例多	国际顶尖,高度可靠
操作难度 C10	操作极复杂	需专人复杂操作	需常规操作	自动化高,偶需巡检	全自动化
维护要求 C11	频繁维护(月度)	频次高(季度/半年)	定期年检,换耗材	维护要求低(2~5年)	基本免维护(>5年)
安全性 C12	风险极高	风险较高,需防护	有风险但可控	安全性高,风险可控	本质安全

2.2 油气回收技术综合评价模型

2.2.1 BWM 法

层次分析法(AHP)的核心是通过两两比较确定权重,但指标较多易导致决策者逻辑矛盾或判断混乱。BWM法(Best Worst Method,最优最劣法)是 Rezaei^[10]在2015年提出的全新的多准则决策方法,该法在保留两两对比思想的前提下对AHP进行了算法改进,只需要将最优、最劣指标分别与其余指标进行比较,得到比较数据即可计算权重分布,与AHP法相比能够减少判断和计算负担,可以聚焦核心关系,并且效率、一致性、可靠性等都优于AHP法^[11-13],其基本原理如图1所示。

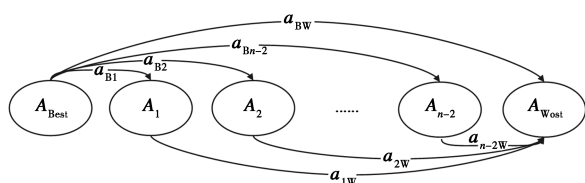


图1 BWM基本原理流程图

2.2.2 CRITIC 法

针对本指标体系多维度、高复杂性的特点,采用CRITIC法进行客观赋权。该方法通过量化指标间的对比强度与冲突性,能有效识别并赋予高区分度、低冗余的指标更高权重,从而规避信息冗余带来的权重失真,确保权重分配精确反映指标的真实信息贡献^[14-15]。在此基础上,引入BWM与之构成组合赋权,既可兼顾主观判断的合理性与客观数据的科学性,也有效规避了单一方法的固有偏差,实现了主客观优势的动态平衡。

2.2.3 博弈论法

博弈论法确定组合权重的核心是利用博弈论模型协调不同赋权方法之间的冲突,以寻求最优权重组合。本研究引入基于纳什均衡的组合赋权方法,通过最小化组合权重与各单一权重之间的偏差实现

优化,使最终权重同时贴近专家经验与数据规律^[16],更适用于多维度、高复杂性的油气回收技术评估体系。与传统的乘法合成法或加权修正法相比,博弈论所得权重有效融合了主观经验与客观数据,避免了单一赋权方法的局限性,同时保留了主客观两类方法的优势^[17-19]。

2.2.4 VIKOR 法进行综合评价

如图2所示,VIKOR方法是 Opricovic 等^[20]针对复杂系统而提出的一种基于理想解的多属性决策方法。该方法通过确定正理想解和负理想解,衡量各备选方案属性值与理想解的接近程度,在兼顾群体效用与个体遗憾的基础上进行排序,从而得出最接近理想解的折衷解,体现不同属性间的平衡与妥协^[21-22]。将该方法应用于油气回收技术评价,既能计算各技术的群体效用值与个体遗憾值,反映其在各指标上的综合表现及与理想方案的差距,又能有效协调技术、经济、环保等多维目标之间的冲突,契合石化行业多重需求的特点。

2.3 数据来源

为构建科学可靠的评估体系,本研究通过系统性的文献调研、多地的实地考察以及多轮专家访谈,系统收集并整理了两类基础数据:定量数据,包括去除效率、投资成本与运行成本等关键数值,主要来源于应用该技术的典型石化企业的内部技术文件与官方环境记录,如项目操作规程、环境影响评价报告、排污许可证申报材料、年度执行报告以及日常管理台账等,确保了数据的准确性与可验证性;定性数据,如对达标排放能力、技术适用性及操作难度的评判,则主要通过结构化的实地调研问卷和对企业现场观察记录,并辅以行业专家对各项技术方案资料的集中评审与分析来获取,从而保证了主观评价的专业性与一致性。本研究调研了3家石化企业共10套油气回收装置技术运用情况,具体数据见表3。

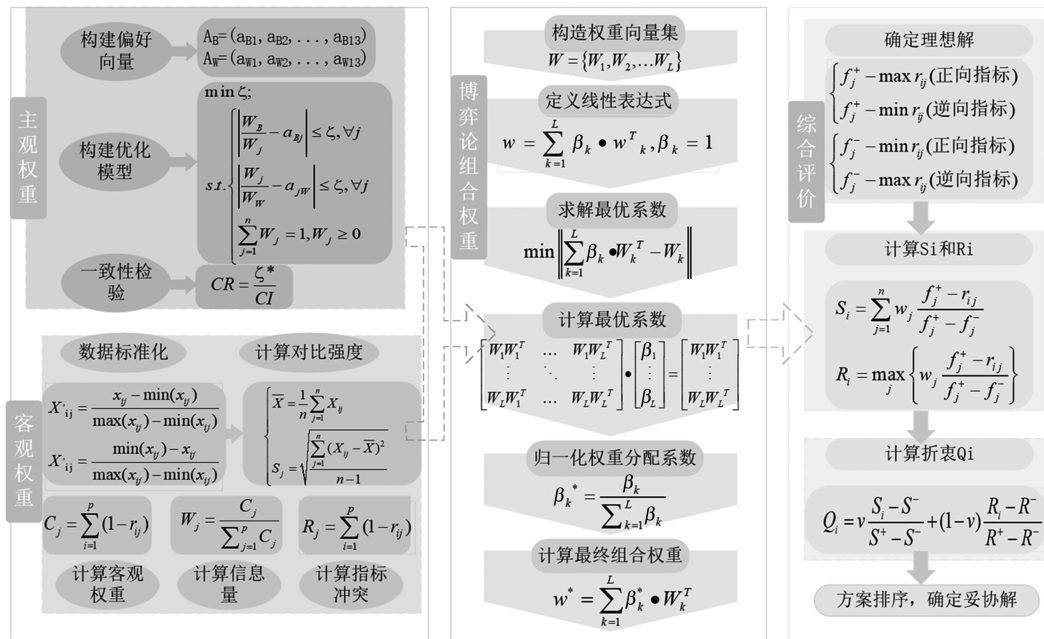


图 2 BWM-CRITIC-VIKOR 模型步骤流程图

表 3 综合评价原始数据表

	去除效率/ %	投资成本/ (万元·套 ⁻¹)	运行成本/ (元·m ⁻³ 油气)	资源回 收率/%
吸收+膜+ PSA 吸附	97~99.8	300~600	1.2~2.5	>98
吸附+吸收	95~97	300~450	0.5~1.2	96~98
冷凝+吸附	95~98	150~300	0.8~1.5	96~98
冷凝+膜	90~95	200~400	1.0~1.8	95~97
吸收+膜	90~97	250~400	0.8~1.6	90~97

3 评价结果与分析

3.1 指标权重的确定

首先由 4 名专家选定准则层中的最优与最劣指标,利用 1~9 标度构建最优与最劣偏好向量,据此确定准则权重,进而计算各准则下属指标相对权重,综合得到主观权重。然后,基于采集的样本数据及专家对定性指标的评分,采用 CRITIC 法客观计算指标间的对比强度和冲突性,从而确定客观权重。最后,引入博弈论思想,将主、客观权重进行组合优化,寻求二者间的一致性与平衡,最终得到综合性的组合权重。专家资料及权重结果见表 4~表 9 所示。

表 4 专家资料

专家	职称	教育水平	背景
A	高级工程师	本科	石化行业工作经验 20 余年,具备扎实的现场经验与废气治理研究能力

B	高级工程师	博士	从事环保工作 10 余年,具备资深的行业背景与扎实的现场实践经验
C	中级工程师	硕士	从事环境监测及环境评价工作多年,且具有丰富现场工作经验
D	初级工程师	硕士	从事环境监测及环境评价工作多年,研究方向包括 VOCs 治理及管控等

表 5 准则层最优指标偏好向量

	最优指标	B1	B2	B3	B4
专家 1	B1	1	7	2	4
专家 2	B1	1	9	2	3
专家 3	B1	1	7	3	2
专家 4	B1	1	8	3	3

表 6 准则层最劣指标偏好向量

	最劣指标	B1	B2	B3	B4
专家 1	B4	1/7	1	1/4	1/3
专家 2	B4	1/9	1	1/4	1/3
专家 3	B4	1/7	1	1/3	1/5
专家 4	B4	1/8	1	1/4	1/3

表 7 BWM 法计算指标权重

准则层	权重	指标层	相对权重	绝对权重
技术性能 B1	0.5146	去除效率 C1	0.3056	0.1573
		达标排放能力 C2	0.5833	0.3002
		技术适用性 C3	0.1111	0.0572

续表

准则层	权重	指标层	相对权重	绝对权重
经济性能 B2	0.0622	投资成本 C4	0.2308	0.0144
		运行成本 C5	0.3077	0.0191
		资源回收 C6	0.4615	0.0287
环境影响与可持续性 B3	0.1959	二次污染 C7	0.7121	0.1395
		资源消耗 C8	0.1969	0.0386
		技术成熟度 C9	0.0910	0.0178
操作与安全性 B4	0.2273	操作难度 C10	0.0834	0.0190
		维护要求 C11	0.1944	0.0442
		安全性 C12	0.7222	0.1642

表 8 CRITIC 法计算指标权重

指标层	指标变异性	指标冲突性	信息量	权重
去除效率 C1	1.826	10.022	18.302	0.1278
达标排放能力 C2	1.219	11.647	14.203	0.0991
技术适用性 C3	1.558	6.999	10.903	0.0761
投资成本 C4	1.593	9.001	14.337	0.1001
运行成本 C5	1.190	10.557	12.567	0.0877
资源回收 C6	1.433	12.887	18.465	0.1289
二次污染 C7	1.506	7.696	11.587	0.0809
资源消耗 C8	1.797	8.407	15.105	0.1055
技术成熟度 C9	0.292	11.601	3.382	0.0236
操作难度 C10	0.192	12.494	2.403	0.0168
维护要求 C11	1.176	6.754	7.940	0.0554
安全性 C12	2.050	6.854	14.052	0.0981

表 9 博弈论法计算组合权重

指标层	BWM 权重	CRITIC 权重	组合权重
去除效率 C1	0.1573	0.1278	0.1561
达标排放能力 C2	0.3002	0.0991	0.2921
技术适用性 C3	0.0572	0.0761	0.0580
投资成本 C4	0.0144	0.1001	0.0179
运行成本 C5	0.0191	0.0877	0.0219
资源回收 C6	0.0287	0.1289	0.0327
二次污染 C7	0.1395	0.0809	0.1371
资源消耗 C8	0.0386	0.1055	0.0413
技术成熟度 C9	0.0178	0.0236	0.0180
操作难度 C10	0.0190	0.0168	0.0189
维护要求 C11	0.0442	0.0554	0.0447
安全性 C12	0.1642	0.0981	0.1615

权重分析表明, BWM 法确定的主观权重差异显著, 技术性能(B1)权重达 0.514 6, 居主导地位, 而经济性能(B2)仅为 0.062 2, 说明专家普遍将技术

有效性视为方案选择的核心; 指标层中, 达标排放能力(C2)、安全性(C12)和二次污染(C7)为构成 3 个核心维度。CRITIC 法确定的客观权重则显示, 资源回收(C6)、去除效率(C1)与资源消耗(C8)因信息量较大而权重较高, 反映其在数据中区分度更强。通过博弈论组合赋权得到的最终权重, 有效融合了主客观信息, 既保留了专家认知结构, 也吸收了数据统计规律, 使权重体系更科学, 为评价提供可靠依据。

3.2 综合评价分析

3.2.1 结果与分析

将指标数据及权重结果(图 3)代入 VIKOR 综合分析, 取折衷系数 $v=0.5$, 利用 MATLAB 软件计算各油气回收技术方案的群体效用值(S_i)、个体遗憾值(R_i)、利益比率(Q_i)值并进行排序, 结果见表 10。

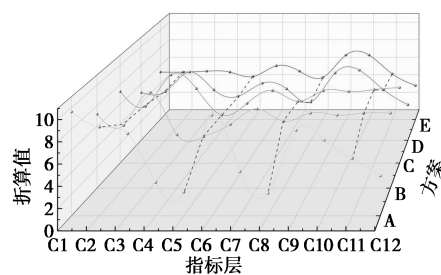


图 3 综合评价指标数据

表 10 不同油气回收技术方案 VIKOR 参数

技术方案	S_i	R_i	Q_i	S_i 排序	R_i 排序	Q_i 排序
A	0.46476	0.16147	0.08812	3	1	1
B	0.37834	0.20443	0.16451	1	2	2
C	0.38406	0.23363	0.28218	2	3	3
D	0.84147	0.29204	0.97218	4	5	5
E	0.86875	0.28231	0.96272	5	4	4

由此可知, 方案 A、B、C 分别在 R_i 值、 S_i 值及 Q_i 值上排名前 3, 而且利益比率(Q_i 值)均远低于方案 D 和 E, 且三者 Q 值非常接近, 未能满足可接受优势的判定条件[即排名第一的方案 B 与第二的方案 C 之间的 Q 值差小于阈值 $1/(m-1)=0.25$], 因此无法作为唯一的理想解。具体而言, 方案 B 在群体效用值(S_i)最优, 整体效益最高; 方案 A 的个体遗憾值(R_i)最低, 各准则表现最均衡; 方案 C 的 Q_i 值与方案 B 高度接近, 综合表现优异。这 3 个方案在“群体效益”和“个体遗憾”两个维度上各有优势, 共同构成了一个平衡且可接受的折衷方案集合, 而方

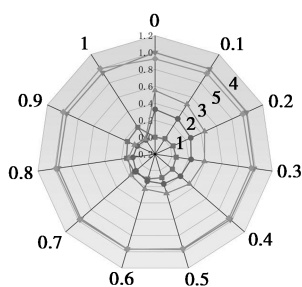
案D和方案E因 Q 值过高,且 S 值和 R 值均显著劣于前3者,故被排除在理想方案之外,因此方案A、方案B、方案C均为理想折衷方案。

3.2.2 敏感性分析

折衷系数 v 反映决策者的策略偏好, v 大于0.5侧重最大化群体效用(即大多数指标表现好), v 小于0.5则侧重最小化个体遗憾(即避免在任何单个指标上表现太差)。为检验结果的稳定性,将折衷系数 $v \in [0, 1]$ 等间隔进行取值,进行敏感性分析,以检验在不同折衷系数下评价结果的变化,具体结果如表11和图4所示。

表11 不同折衷系数对技术方案排序的影响

折衷系数 v	$Q(A)$	$Q(B)$	$Q(C)$	$Q(D)$	$Q(E)$	方案排序
0	0	0.32902	0.55268	1	0.92545	ABCED
0.1	0.01762	0.29612	0.49858	0.99444	0.9329	ABCED
0.2	0.03525	0.26322	0.44448	0.98887	0.94036	ABCED
0.3	0.05287	0.23031	0.39038	0.98331	0.94781	ABCED
0.4	0.07049	0.19741	0.33628	0.97774	0.95527	ABCED
0.5	0.08812	0.16451	0.28218	0.97218	0.96272	ABCED
0.6	0.10574	0.13161	0.22807	0.96662	0.97018	ABCDE
0.7	0.12336	0.09871	0.17397	0.96105	0.97763	BACDE
0.8	0.14099	0.0658	0.11987	0.95549	0.98509	BCADE
0.9	0.15861	0.0329	0.06577	0.94992	0.99254	BCADE
1.0	0.17623	0	0.01167	0.94436	1	BCADE



1—方案A;2—方案B;3—方案C;4—方案D;5—方案E

图4 不同折衷系数对技术方案排序的影响

敏感性分析结果表明,方案排序对 v 值的变化呈现出阶段性敏感特征。具体而言,当决策策略侧重于最小化个体遗憾或趋于平衡时($v \in [0, 0.6]$),方案A始终为最优,整体排序为A、B、C、E、D或A、B、C、D、E;当 v 值升至0.7,即决策更倾向于群体效用时,最优方案转变为B,内部排序也出现调整;而在 $v \in [0.8, 1.0]$ 区间内,即决策高度关注整体效益时,排序稳定于B、C、A、D、E,方案B成为最优先选择。这表明,最优方案的选择本质上取决于决策者

的风险偏好:方案A在规避短板的策略下更具优势,而方案B在追求整体效益最大化时表现更佳。总体来看,尽管内部序位随 v 值发生变化,方案A、B、C始终稳居前3,而方案D和E始终位列最后两位,这表明最优方案集合 $\{A, B, C\}$ 的选择具有显著稳定性,不受折衷系数变化的显著影响,验证了VIKOR决策结论的可靠性。

3.3 局限性分析

3.3.1 数据来源与样本局限性

本研究数据主要来源于文献、专家打分及有限的企业运行记录,样本数量不足,工艺类型和运行工况覆盖不全。未来需扩大样本规模,增加实地监测与运行数据,以提升评估结论的客观性。

3.3.2 指标体系构建的局限性

准则层虽涵盖技术、经济、环境、安全4个维度,但指标多为定性评价,易引入人为偏差。后续应结合实际,逐步引入可量化、可验证的指标,增强指标体系的精确性与实用性。

3.3.3 模型方法的局限性

BWM-CRITIC-VIKOR模型虽具有较强的综合能力,但计算过程复杂,组合赋权仍基于线性加权假设,未充分考虑指标间的非线性交互。未来可探索非线性赋权方法,进一步提升权重准确性与模型适用性。

3.3.4 缺乏动态评价视角

本研究基于静态数据,未能反映技术演进、政策调整、市场波动等动态因素影响。后续可引入时间序列分析或动态多准则决策方法,增强模型的预测与指导价值。

4 结论

(1)本研究通过BWM-CRITIC-VIKOR综合评价模型分析表明,达标排放能力、安全性、去除效率及二次污染为核心指标,反映出石化行业对合规性、风险管控、治理效能与环境友好性的高度重视。组合权重有效融合了主客观信息,增强评价科学性。

(2)综合评价显示,“吸收+膜+PSA吸附”、“吸附+吸收”和“冷凝+吸附”3种方案的 Q 值显著优于其他方案,共同构成理想折衷方案集合。其中,“吸附+吸收”整体效益最优,“吸收+膜+PSA吸附”指标均衡性最佳,“冷凝+吸附”表现出稳定的综合性能,均满足当前石化行业对高效、稳定与绿色运行的基本要求,可作为企业技术选型的优先选项。

(3)敏感性分析表明,尽管决策者策略偏好在

0~1 范围内变化会引起内部排序的微小波动,但上述 3 种组合工艺始终稳居最优序列,“冷凝+膜”与“吸收+膜”两类工艺持续排名靠后,证明最优方案集合的结论稳定可靠,不受参数变化的显著影响。

综上所述,本研究建立的 BWM-CRITIC-VIKOR 评价模型有效克服了单一赋权法的局限性,实现了主客观权重的科学融合,为油气回收技术评价提供了系统、可靠的方法支撑。然而,本研究在数据来源、指标体系构建、模型复杂度及动态评价方面仍存在一定局限。未来应进一步扩大样本范围,引入实测数据,优化指标体系,并探索动态多阶段评价方法,以提升模型的时效性与普适性。

参考文献

- [1] 张子玥,杨文玉,李焕,等.基于在线监测数据的石化企业 CFB 锅炉大气污染物排放综合评价[J].安全与环境学报,2023,23(6):2051-2059.
- [2] Yan Y, Pang Y X, Luo X, et al. Carbon dioxide-focused greenhouse gas emissions from petrochemical plants and associated industries: Critical overview, recent advances and future prospects of mitigation strategies[J]. Process Safety and Environmental Protection, 2024, 188:406-421.
- [3] 姜雪,赵琳.挥发性有机物污染的环保治理新思路探讨[J].皮革制作与环保科技,2025,6(14):115-117.
- [4] 李翠明.石化企业挥发性有机物(VOCs)治理方案[J].科技创新与应用,2024,14(35):147-149,154.
- [5] 周颢,拓思阳.石化行业 VOCs 排放特征与源头控制技术研究[J].化工管理,2025,(13):56-58,68.
- [6] 张芸聪.油气储运中油气回收技术的应用分析[J].中国设备工程,2025,(7):216-218.
- [7] Hagos F Y, Rashid A A A, Zharif Z E, et al. Recovery of gas waste from the petroleum industry: A review[J]. Environmental Chemistry Letters, 2022, (1):20.
- [8] 黄梅梅.油气回收与达标治理技术分析[J].化工设计通讯,2025,51(6):117-119.
- [9] 母莉娜,张柳,方海明.油气回收技术研究进展[J].能源研究与管理,2025,17(2):146-155.
- [10] Rezaei J. Best-worst multi-criteria decision-making method[J]. Omega, 2015, 53:49-57.
- [11] Mi X, Tang M, Liao H, et al. The state-of-the-art survey on integrations and applications of the best worst method in decision making: Why, what, what for and what's next? [J]. Omega, 2019, 87:205-225.
- [12] 罗蕾,张博远,方兴.基于 BWM-改进 CRITIC-TOPSIS 模型的儿童寝具设计提升决策研究[J].包装工程,2025,46(6):161-169.
- [13] 黄蓉,王海燕.基于 BWM-CRITIC-TOPSIS 的邮轮建造物资源物流集配质量风险评价:2024 世界交通运输大会(WTC2024)论文集(运输规划与航空运输)[C].武汉理工大学交通与物流工程学院,2024:567-572.
- [14] Yang Y B, Sun H W, Dai Z, et al. Comprehensive evaluation of majors offered by universities based on combination weighting[J]. Evaluation and Program Planning, 2023, 97:102202.
- [15] 刘刚,徐斌,陈璐璐,等.基于 AHP-CRITIC 综合权重的改进物元可拓模型在地下水水质评价中的应用[J].中国环境监测,2024,40(3):125-133.
- [16] 张向阳,李苏豫,杨德群,等.基于博弈组合赋权-可拓云模型的深部煤巷围岩稳定性评价[J/OL].矿业安全与环保,1-10 [2025-11-26]. <https://link.cnki.net/urlid/50.1062.TD.20250918.1516.002>.
- [17] 何应超,徐雷,李厚俊,等.基于博弈组合赋权和 GRA-MARCOS 的虚拟电厂储能选型方法[J].科学技术与工程,2025,25(18):7621-7630.
- [18] 聂帅,蔡国田,高丽萍.基于博弈论-云模型的园区能源系统 3E 评价方法[J].新能源进展,2022,10(2):169-177.
- [19] 张艳,韩立芝,刘明红,等.基于博弈论组合赋权和改进 VIKOR 法的电网数字化储备项目优选排序研究[J].电工技术,2025,(5):29-33.
- [20] Opricovic S, Tzeng G H. Multicriteria planning of post-earthquake sustainable reconstruction[J]. Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering, 2002, 17:211-220.
- [21] Khan M, Kumam P, Kumam W. Theoretical justifications for the empirically successful VIKOR approach to multi-criteria decision making[J]. Soft Computing, 2021, (25):7761-7767.
- [22] 杨明智.基于 VIKOR-耦合协调模型的阜阳市水资源承载力研究[J].地下水,2025,47(5):203-205. ■

(上接第 5 页)

- [2] International Energy Agency. Net zero roadmap 2024 update: A pathway to stabilise climate change[R]. Paris: International Energy Agency, 2024.
- [3] 新华网.“双碳”战略引领绿色变革[EB/OL]. (2023-10-09). <http://www.xinhuanet.com/energy>.
- [4] International Energy Agency. International Energy Agency (IEA) CCUS Projects Database[EB/OL]. (2025-05-17). <https://www.iea.org/data-and-statistics/data-product/ccus-projects-database>.
- [5] 李琳,方波.绿色经济下 CO₂ 捕集、利用与封存技术的发展[J].节能,2024,43(9):91-93.
- [6] 盛依依.二氧化碳捕集技术研究及工业化进展[J].现代化工,2025,45(3):56-60,65.
- [7] 张艺峰,王茹洁,邱明英,等.CO₂ 捕集技术的研究现状[J].应用化工,2021,50(4):1082-1086.
- [8] 国务院国有资产监督管理委员会.全球最大化学链燃烧示范装置建成[EB/OL]. (2023-04-06). <http://www.sasac.gov.cn/n2588025/n2588124/e27618599/content.html>.
- [9] 刘强,肖金,于航,等.变压吸附捕集 CO₂ 技术研究进展及其在石化行业应用案例分析[J].南方能源建设,2024,11(5):37-49.
- [10] 严鑫.功能化 IL@ZIF-8 复合材料用于 CO₂ 高效捕集与分离[D].北京:北京化工大学,2025. ■