多目标优化处理油气田采出水的应用研究进展

杨艺琳[1],陈俊宇[2,3],周雅煊[2],孟凡宾[4],宾零陵[2*]
(1.天津师范大学,天津市水资源与水环境重点实验室,天津 300387;
2.天津师范大学地理学部,天津 300387; 3.中国科学院大学新疆生态与地理研究所,乌鲁木齐 830011;
4.中石化石油化工科学研究院有限公司,北京 100083)

摘要:为推动油气田采出水的处理与资源化,综述了多目标优化在组合工艺中的研究进展,提出“技术局限-工艺协同-系统优化”的逻辑框架,剖析现有技术瓶颈,梳理组合工艺优缺点及适用场景,阐述多目标工艺参数优化方法,并综合分析经济与环境效益。未来通过“数据-机理”双驱动的绿色集成路径、可解释多目标算法等技术结合实现采出水处理资源化全链条优化与工程化落地。

关键词:油气田采出水;多目标优化算法;组合工艺;经济环境效益;生命周期评价
中图分类号:X741 **文献标志码**:A **文章编号**:0253-4320(2026)11-0058-07
DOI:10.16606/j.cnki.issn0253-4320.2026.11.011

Research progress on the application of multi-objective optimization in the treatment of oilfield produced water

YANG Yi-lin[1], *CHEN Jun-yu*[2,3], *ZHOU Ya-xuan*[2], *MENG Fan-bin*[4], *BIN Ling-ling*[2*]
(1.Tianjin Key Laboratory of Water Resources and Environment, Tianjin Normal University, Tianjin 300387, China;
2.Faculty of Geography, Tianjin Normal University, Tianjin 300387, China; 3.The Xinjiang Institute of Ecology and Geography of the Chinese Academy of Sciences, Urumqi 830011, China;
4.SINOPEC Research Institute of Petroleum Processing Co., Ltd., Beijing 100083, China)

Abstract:To advance the treatment and resource recovery of oilfield produced water, this study reviews multi-objective optimization applications in combined processes, proposing a “technical limitations-process synergy-system optimization” framework.It analyzes current technological bottlenecks, outlines advantages, disadvantages and applicable scenarios of combined processes, elaborates Multi-Objective Optimization (MOO)-based parameter tuning methods, and synthesizes economic and environmental benefits.Future efforts should implement a “data-mechanism” dual-driven green integration pathway coupled with interpretable MOO algorithms to achieve whole-chain optimization and engineering implementation for produced water resource recovery.

Key words: oilfield produced water; multi-objective optimization algorithms; combined processes; economic and environmental benefits; life cycle assessment

采出水是油气田开发过程中产生的含油、有机污染物、悬浮固体和高盐分的复杂废水,其水量随开发规模增加且成分多变,对环境和资源利用构成重大挑战[1]。采出水成分受油气地质条件、开采方式及驱油药剂等因素显著影响,涵盖游离态与乳化态油、溶解性有机物、悬浮固体、高盐度溶解性盐、金属离子、放射性核素及药剂残留物等[2],这些复杂组分直接影响处理单元选择与运行参数。由于单一工艺难以同时兼顾出水质量、能耗、成本与回用率,多单元组合工艺已成为工程实践主流[3]。然而,组合工艺的设计与运行是典型的多目标优化问题,需在出水达标、成本最小化、能耗最低、资源化率最大化、环境影响最小化及可实施性提升等相互冲突的目标间寻求权衡[4]。例如,强化除油会增加药剂成本与污泥产量,而蒸发结晶虽可回收盐分但能耗高昂。近年来基于演化算法、代理模型(如高斯过程)、鲁棒/不确定性优化及数字孪生的在线优化方法在该领域取得显著进展[5-7],但仍面临基准缺失、不确定性处理不足、生命周期评价(life cycle assessment, LCA)耦合与工程可实施性评价薄弱等关键短板[8-9]。本文中综述多目标优化在采出水组合工艺中的建模范式、主流算法与应用案例,系统分析现有研究局限并提出促进工程化落地的若干研究方向,为实现采出水处理的高效、低碳与资源化提供参考。

1 采出水常用处理单元及组合工艺

1.1 采出水处理常用单元

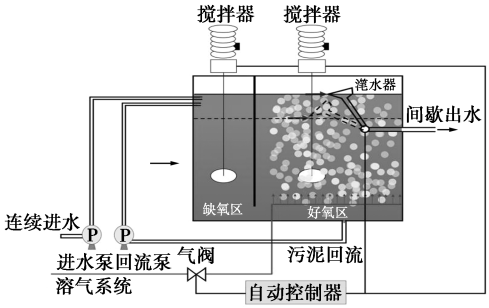
油气田采出水处理技术主要包括物理分离、化学/物化、高级氧化、膜分离与生物处理5类[10-11]。

收稿日期:2025-12-31;**修回日期**:2026-09-03
基金项目:天津市教委科研计划项目(2023KJ184)
作者简介:杨艺琳(1991-),女,博士,助理研究员,研究方向为水污染控制与治理,yangyilin@tjnu.edu.cn;宾零陵(1987-),女,博士,副教授,研究方向为水资源与水环境,通讯联系人,bll813@126.com。

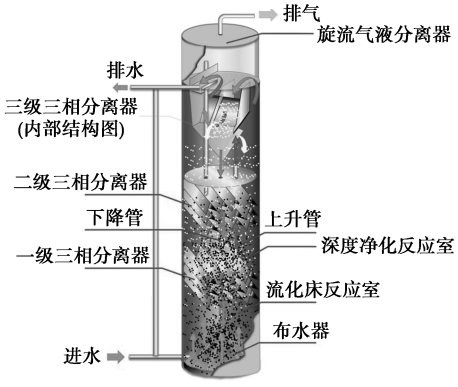
物理分离涵盖加热、离心、重力沉降及膜分离[12],后续通过混凝气浮去除游离油与悬浮物。化学/物化法利用混凝、氧化、吸附及离子交换去除溶解性/难降解组分,其中化学破乳采用混凝剂、盐类、酸类或非乳化型表面活性剂(如超支化聚合物)[13];电脱水与膜分离处于示范阶段[14],超声波破乳、碳纳米管/生物基破乳剂及高温高压破乳装置尚在中试或实验室验证[15-16]。高级氧化通过催化剂、高温高压产生自由基降解难降解有机物[17-18]。膜技术应用广泛,覆盖工业应用至实验室验证各成熟阶段,常见膜技术优缺点对比见表 1。生物处理以多级 A/O 法为主流[19],其中循环活性污泥工艺[图 1(a)]抗冲击能力强[20],EGSB 与 IC 等高效厌氧反应器[图 1(b)]虽非主流但发展前景广阔。

表 1　常见膜技术优缺点对比表

名称	特点	优点	缺点
陶瓷超滤膜[21]	氧化锆/氧化铝基非对称结构,表面 SiO_2 亲水改性	耐高温(300℃+)、耐腐蚀,除油率>99.5%,寿命>5 a	脆性断裂风险,单位成本高(400 美元/m^2),需化学清洗
耐油反渗透膜(RO)[22]	聚酰胺-沸石纳米复合,表面磺酸基团修饰	抗油吸附性提升 50%,脱盐率>99%(TDS10000-100 mg/L)	纳米颗粒溶出风险,预处理要求严苛(SS<1 mg/L)
卷式膜组件[23]	螺旋卷绕结构,高装填密度(>800 m^2/m^3)	空间利用率高,适用于海上平台	易受纤维状污染物堵塞,清洗难度大
疏水膜蒸馏膜(MD)[24]	PVDF/PTFE 中空纤维,接触角>150°	耐受 TDS 200000 mg/L,零药剂添加,淡水回收率>85%	热能需求高(ΔT>20℃),膜孔润湿导致失效
单价选择性电渗析[25]	CSO 离子筛膜	Li+/Na+选择性>90%,阻二价离子结垢	膜堆占系统成本 60%,流道设计复杂
振动剪切膜[26]	压电陶瓷驱动中空纤维(20~100 Hz)	湍流抑制污染,通量提升 125%,清洗周期延长 400%	10^7 次振动后断裂率>15%,大型化能耗陡增
量子点光催化膜[27]	CdS/TiO_2 异质结涂层,全光谱响应	乳化油降解率>95%,自清洁	Cd^{2+}溶出超标(>0.08 g/L),阴雨天效能衰减 40%
离子液体-石墨烯膜[28]	BMIM/PF6 灌注层间通道(0.6~0.9 nm)	单价离子筛分效比 120,Li^+通量 3.8 L/(m^2·h)	离子液体流失率>30%/200 h,成本 850 美元/m^2
水通道蛋白仿生膜[29]	AQP 脂质体嵌入聚合物基质	水通量达 RO 膜 5~10 倍,NaCl 截留率>99%	活性维持<6 个月,工业制备面积<1 m^2



(a)循环活性污泥工艺(CASS)



(b)EGSB 反应器

图 1　常见生物处理工艺示意图

现有的组合工艺普遍存在如下问题:模块化程度欠佳,难以实现快速组合响应,且功能呈现同质化特征;成本高昂,设备投资以及运行维护成本较高,不利于大规模推广应用;操作复杂,各模块间缺乏统一标准,衔接存在障碍,维护管理难度较大;智能化水平较低,与大模型的衔接存在困难,数据自检和自动模拟优化的能力有限。亟需研发高效、低成本、智能化、模块化的前/后处理阶段组合工艺。

1.2　采出水前处理阶段组合工艺

1.2.1　光催化法+芬顿法组合工艺

由于高级氧化法局限性,“光催化法+芬顿法”组合适用于进行采出水中微量油类去除,当采出水的 COD 过高时,可考虑将光催化法替换为湿式氧化法[25],仍以光催化为例,如图 2 所示。该组合工艺协同产生更多自由基,强化处理效果,但对水质要求高,催化剂回收困难,能耗较高。

1.2.2　电催化氧化法+微生物接触氧化法组合工艺

电催化氧化法+微生物接触氧化法组合工艺(图 3)适用于高盐度、高 COD 废水,但能耗高,操作复杂[26]。

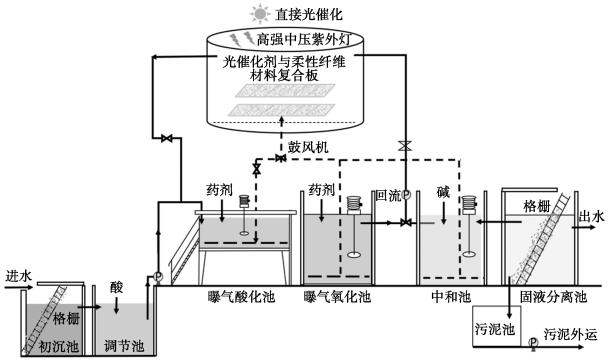


图 2　光催化法+芬顿法组合工艺一般流程

1.3　采出水深度处理阶段组合工艺

1.3.1　气浮法+臭氧氧化法+生物膜法组合工艺

气浮法+臭氧氧化法+生物膜法组合工艺一般流程如图 4 所示，该组合工艺灵活性高，可针对不同污染物进行优化处理，但投资和管理成本高，需妥善处理副产物。

1.3.2　气浮法+曝气生物滤池组合工艺

该组合工艺占地面积小，出水水质高，运行能耗低，但对进水水质要求严格，不适用于高浓度难降解废水和含有重金属或无机污染物的废水[27]，一般流程见图 5。

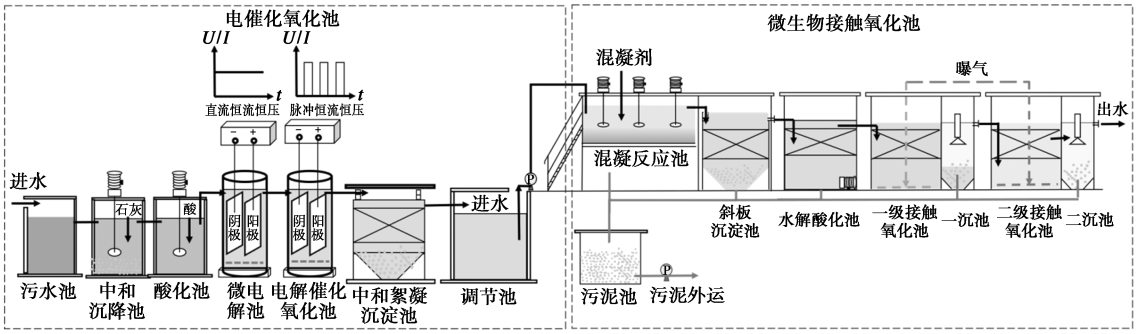


图 3　电催化氧化法+微生物接触氧化法组合工艺一般流程

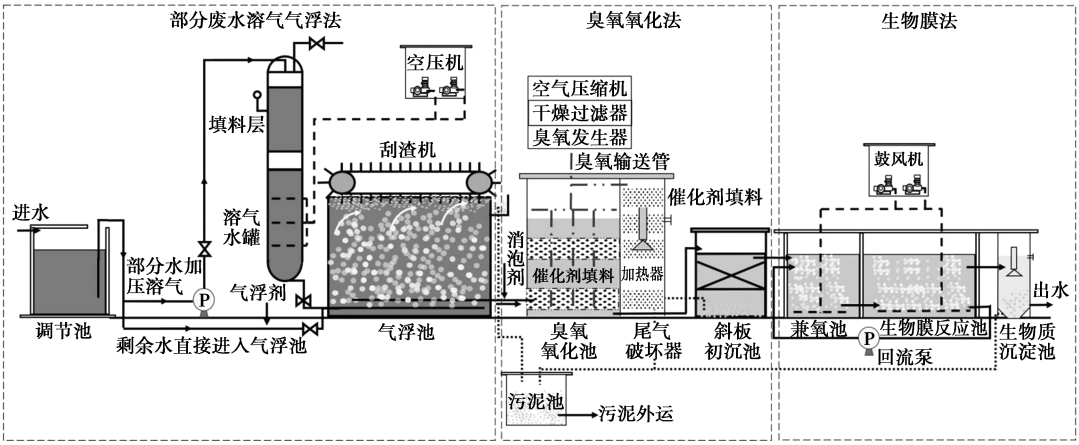


图 4　气浮法+臭氧氧化法+生物膜法组合工艺一般流程

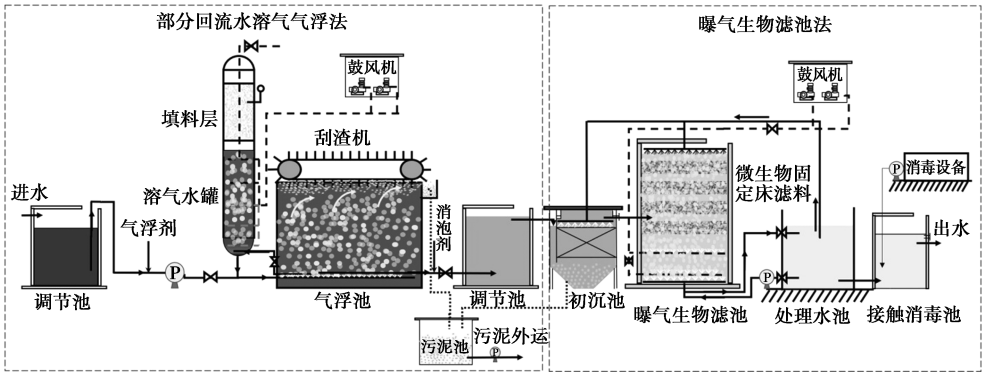


图 5　气浮法+曝气生物滤池(BAF)组合工艺一般流程

综上,采出水组合工艺联合效果及优缺点对比如表 2 所示。

表 2　采出水组合工艺优缺点对比表

名称	光催化法+芬顿法	电催化氧化法+微生物接触氧化法	气浮法+生物膜法+臭氧氧化法	气浮法+曝气生物滤池
联合效果	光催化产生的电子空穴促进芬顿反应,加速了芬顿反应中电子-空穴对的分离	电催化氧化法产生中间产物影响效率,而微生物接触氧化法能降低中间产物的抑制作用	气浮法与生物膜法:气浮法提供均匀的进水条件;气浮法针对高浓度悬浮物含油污水,生物膜法针对乳化油和溶解油,臭氧氧化法针对微量油类精细化处理以满足高排放要求	减少占地面积和基建成本;提升整体处理效率,气浮法减少 BAF 负荷减少占地面积;优化稳定出水水质
优点	反应速度快;适用范围广;试剂消耗少,污泥少	能源利用高效环保;具有较强的抗冲击负荷能力;特别适用于高盐度、高 COD 及色度较高的采出水处理	能耗和化学品使用较少;出水水质稳定;抗冲击负荷能力强	占地面积小,BAF 无需二沉池;出水水质高;运行能耗低,气浮法对 BAF 的预曝气联合,BAF 滤料层提高了氧利用率;启动和挂膜速度快,低温下可完成挂膜
缺点	最优 pH 在 3 左右;催化剂回收与再利用问题:TiO_2 需定期更换,成本较高;能耗与成本高	能耗较高;操作维护成本高;对来水重金属含量要求高	流程多、维护管理复杂;臭氧副产物处理不当产生二次污染	两环节互相影响,联合难度大;曝气量的精细调整难度大
来水水质要求	COD 浓度控制在 5 g/L 以下;悬浮物会干扰光催化反应;pH 3~5	pH、重金属含量在微生物承受范围内;低毒;悬浮物含量低	进水水质稳定;预处理来水要在生物膜承受范围内	不适用于对微生物有毒有害的采出水;不适用于高浓度的难降解;不适用于重金属和无机污染物废水,高盐度废水
相似工艺去除效果	在 $Cu/CuFe_2O_4$-OVs 复合催化剂和光催化-类芬顿耦合体系在协同条件下 18 min 即可将 100×10^{-6} 的苯酚降解 92.72%,降解速率常数是单纯光催化的 8165 倍,芬顿氧化的 4.35 倍	在大庆油田进行了 240 m^3/d 的现场实验,以“接触氧化+曝气生物滤池+电催化氧化”三步法处理工艺,经 2 个月连续运行,处理后污水的油质量浓度低至 0.2 mg/L,SS 质量浓度降至 2.3 mg/L,COD 降至 38.1 mg/L	在优化石化废水处理的过程中引入结合了催化臭氧氧化和生物膜技术的方法显著改善了传统处理技术的效果,使废水中的总氮(TN)含量从原先的 36.7 mg/L 降至 10.4 mg/L,实现了 70.5% 的平均去除率。同时使废水中 COD_{Cr} 的平均值从 97.1 mg/L 降低到 28.1 mg/L,实现了 71.0% 的平均去除率	运行期间对河流污染水处理后,生物接触氧化池对氨氮的去除率为 70% 以上,最高可达 96.59%;对 COD 的最高去除率为 85.71%,气浮池可使总磷的含量降至 0.05 mg/L 以下,去除率为 90% 以上;出水浊度 10 度左右,平均去除率 85%

2　组合工艺的优化策略

2.1　基于多目标的工艺参数优化方法

组合工艺虽为油气采出水处理主流方向,但效能非单元简单叠加,内部协同机制复杂且参数耦合相互关联、制约,传统单目标方法或经验调优方法难以获取全局最优,故亟需进行多目标优化。多目标优化可在效率、成本、环境等冲突目标间获取 Pareto 最优解集,非支配排序遗传算法Ⅱ(NSGA-Ⅱ)因强大的全局搜索能力和无需预设权重等优点,在环境工程领域得到了广泛应用[28]。一个典型的采出水组合工艺多目标优化问题可做如下表述。

2.1.1　目标函数

最大化处理效率(E):通常由关键污染物[如化学需氧量(COD)、石油类]的去除率加权组合而成,如公式(1)所示:

$$\text{Maximize } E = w(\text{COD}) \cdot R(\text{COD}) + w(\text{Oil}) \cdot R(\text{Oil}) \tag{1}$$

式中,w 为权重因子;R 为去除率。

最小化运行成本(C):涵盖药剂费用、电能消耗、污泥处置费用、人工费用等。如公式(2)所示:

$$\text{Minimize } C = C(\text{chemicals}) + C(\text{energy}) + C(\text{sludge}) + C(\text{labor}) \tag{2}$$

最小化环境冲击(I):基于生命周期评价(LCA)方法对关键环境影响类别进行量化,如公式(3)所示:

$$\text{Minimize } I = w(\text{GWP}) \cdot \text{GWP} + w(\text{AP}) \cdot \text{AP} + w(\text{EP}) \cdot \text{EP} \tag{3}$$

式中,w 为权重因子,GWP、AP、EP 分别为全球变暖趋势、酸化趋势和富营养化趋势。

2.1.2 决策变量

为实际操作中可调控的工艺参数,如气浮单元的 pH、混凝剂/絮凝剂投加量、气泡流量等;芬顿单元的 pH、过氧化氢投加量、过氧化氢与亚铁离子的摩尔比、反应时间等;吸附单元的活性炭投加量、吸附时间等;生物单元的水力停留时间(HRT)、曝气量等。

2.1.3 约束条件

包括各决策变量的取值区间(如 pH 需处于 2~5 之间)以及出水水质必须满足的排放标准[如出水化学需氧量(COD)<50 mg/L]。

本文中结合多目标优化算法给出的组合工艺参数优化的概念化模式见图 6。

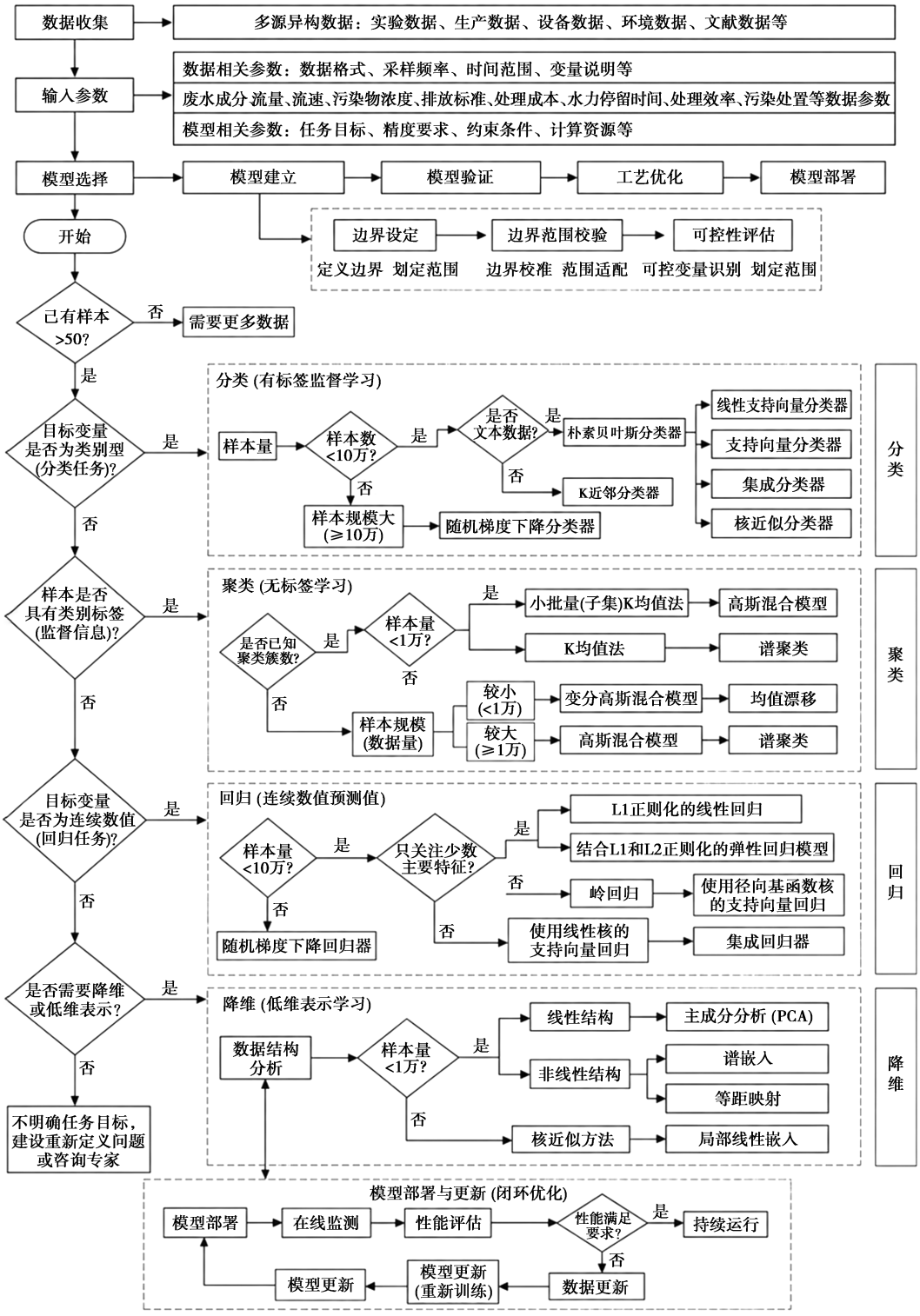


图 6 基于多目标组合工艺参数优化概念图

2.2　经济与环境效益评估

为实现对组合工艺环境友好性的全面且科学评估,运用全生命周期评估(life cycle assessment, LCA)方法[29]。借助 LCA 对组合工艺的环境性能展开评价,其功能单元设定为“将 1 m^3 采出水处理至达标”。评估边界覆盖药剂的生产与运输、运行过程中的能源与物质消耗以及废渣处置等环节,以此对全球变暖、酸化、富营养化、资源耗竭、人体毒性这 5 大指标进行量化,输出单立方环境影响评估值,以供方案比选。然而,静态的 LCA 评估难以反映工艺运行过程中的动态变化,将 LCA 与数字孪生技术相结合,是达成智能化、精细化环境管理的前沿研究方向,具体如图 7 所示。

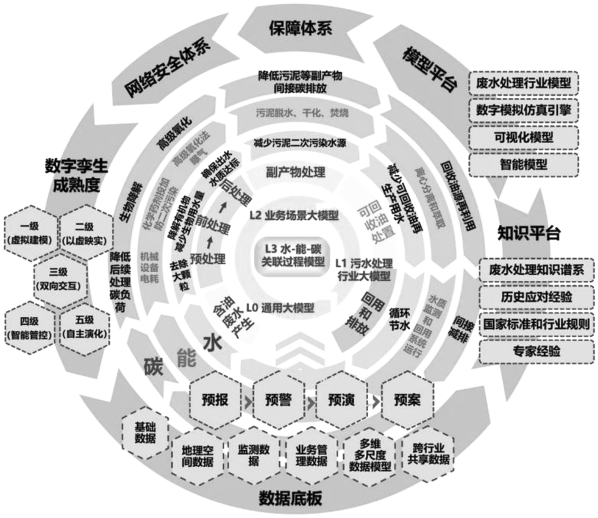
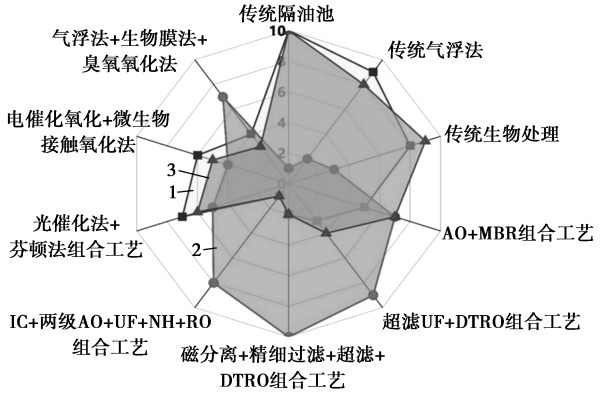


图 7　组合工艺处置采出水全生命周期图

一个用于采出水处理的数字孪生系统,核心架构应包含 4 层:物理层,真实的处理厂,包括所有的反应器、泵、阀门、管道以及各类传感器;数据层,经 IoT/SCADA 实时汇聚运行、知识、模型数据;模型层,融合机理、多目标优化与动态 LCA,在线预测工况与环境影响;决策控制层,把优化指令下发至物理层加药泵、曝气机等,形成“感知-分析-决策-执行”闭环。通过这种集成,系统能从被动的“事后评估”转为主动“事前预测和事中优化”。如当进水水质波动时,数字孪生系统可立即通过模型预测不同策略的环境影响(实时 LCA),并通过多目标优化算法快速计算出兼顾效率、成本和当前环境影响最小化的最优操作参数组合,实现动态、智能、绿色调控。

3　组合工艺成本案例对比

结合设备投资成本、单位水量处理成本、运行维护成本、处理效果和适用场景等方面对代表性组合工艺综合分析(图 8)。传统隔油、气浮、生物法聚于左下,投资低但效果有限;气浮+生物膜+臭氧、电催化+接触氧化等中端组合向右上迁移,效能提升、成本略增;高端“IC+两级 AO+UF+NF+RO”、“磁分离+精滤+UF+DTRO”等膜深度处理居右上,污染物削减率最高,资本与运行费亦显著上升。UF+DTRO 与磁分离+UF+DTRO 在相同效果区间成本更低,显示磁集成-膜浓缩路线具备经济-技术兼顾优势,为高盐采出水零排放优选。



1—总投资与维护成本;2—处理效果;3—单位水量处理成本

图 8　成本及处理效果对比图

4　结论和展望

油气田采出水处理正从单一达标排放向“降本-增效-减排-资源化”多目标协同优化转型,但仍面临 3 大瓶颈:技术层面,单目标优化难以兼顾多重约束,生物处理抗盐冲击性差,物化法能耗、药耗高且二次污染风险大,膜分离技术受膜污染与浓水处置制约,规模化应用受限;数据层面,智慧化依赖全流程数据,但现场“数据孤岛”严重,AI 模型跨油田迁移误差大、可解释性差,导致“建而不用”困境;系统层面,工艺多聚焦末端治理,与清洁生产、注水开发脱节,管网配套不足制约边远油田回注,资源化缺乏统一评价标准,经济性逊于传统方法。未来发展方向包括:工艺协同优化,发展“预处理-生物/物化耦合-资源化”集成,数字孪生驱动动态调度;智能决策升级:构建可解释多目标优化算法,融合小样本与迁移学习,提升跨油藏泛化能力;资源化转型:将采出水视为“资源池”,推进资源再生提取与回注水质协同优化,建立统一技术经济评价体系;标准与政策驱动:完善数据共享机制与资源化标准,推动工程化落地。

参考文献

[1] 周泾泾,徐国瑞,于萌,等.石油工业中乳液分离技术研究进展[J].工业水处理,2026,46(3):47-56.

[2] Avornyo A, Chrysikopoulos C V. Applications of graphene oxide (GO) in oily wastewater treatment: Recent developments, challenges, and opportunities[J]. Journal of Environmental Management, 2024,353:120178.

[3] Medeiros A D M, Silva Junior C J G, Amorim J D P, *et al*. Oily wastewater treatment: Methods, challenges, and trends[J]. Processes, 2022,10(4):743.

[4] Druskovic M, Vouk D, Posavcic H, *et al*. The application of electrochemical processes in oily wastewater treatment: A review[J]. Journal of Environmental Science and Health, Part A, 2021,56(12):1341-1358.

[5] Costa S I G, Ferreira F L, Weschenfelder S E, *et al*. Towards the removal of soluble organic compounds present in oilfield produced water by advanced oxidation processes: Critical review and future directions[J]. Process Safety and Environmental Protection, 2023,175:757-775.

[6] Lawan M S, Kumar R, Rashid J, *et al*. Recent advancements in the treatment of petroleum refinery wastewater[J]. Water, 2023, 15(20):3676.

[7] Zhang X Z, Wang Q X, Yu Z X, *et al*. Superhydrophilic/superoleophobic GO@CoSx photocatalytic membranes with excellent antifouling properties for efficient oil-water separation and organic pollutant degradation[J]. Diamond and Related Materials, 2023,140:110492.

[8] Lei J, Du J, Lei X, *et al*. Oily wastewater treatment and reuse technology in low permeability oilfield[J]. Petroleum Science and Technology, 2024,42(25):4316-4330.

[9] Fahmy H S, Abouzeid R, Abd El-Sadek M S, *et al*. Fabrication of polysulfone membranes by blending with polyaniline and cellulose nanocrystals: Towards the effective separation of oil-in-water emulsions[J]. Cellulose, 2023,30(9):5871-5893.

[10] Zhu X B, Dudchenko A, Gu X T, *et al*. Surfactant-stabilized oil separation from water using ultrafiltration and nanofiltration[J]. Journal of Membrane Science, 2017,530:178-184.

[11] Al Jabri F, Muruganandam L, Aljuboury D A D A. Treatment of the oilfield-produced water and oil refinery wastewater by using inverse fluidization—A review[J]. Journal of Water Process Engineering, 2018,22:171-181.

[12] Tasaki M, Kojima K, Okamura K. Valuation of COD analysis methods for oilfield produced waters[J]. Journal of the Japan Petroleum Institute, 2013,56(4):244-248.

[13] Jiang S H, Li Q S, Ma Q, *et al*. Efficient demulsification performance of emulsified condensate oil by hyperbranched low-temperature demulsifiers[J]. Journal of Dispersion Science and Technology, 2023,44(6):979-986.

[14] 屈璇,尹安伟,方艾伦,等.难降解含聚采出水处理技术研究进展[J].环境工程,2021,39(11):46-51.

[15] 姚弘赟,栾楚珺,毛汇一,等.太阳能光热技术用于含油废水的油水分离应用进展[J].环境工程学报,2025,19(11):2712-2723.

[16] 沈燕婷,李瑶,伍心怡,等.钛基底二氧化铅电催化阳极的改性及其应用进展[J].中国环境科学,2024,44(2):859-876.

[17] You Z Y, Xu H Y, Sun Y J, *et al*. Effective treatment of emulsified oil wastewater by the coagulation-flotation process[J]. RSC Advances, 2018,8(71):40639-40646.

[18] El-Gawad H A, Ebrahiem E E, Ghaly M Y, *et al*. An application of advanced oxidation process on industrial crude oily wastewater treatment[J]. Scientific Reports, 2023,13:3420.

[19] Abid M B, Wahab R A, Salam M A, *et al*. Desalination technologies, membrane distillation, and electrospinning, an overview[J]. Heliyon, 2023,9(2):e12810.

[20] Mansi A E, El-Marsafy S M, Elhenawy Y, *et al*. Assessing the fouling behavior of PTFE membrane in air-gap membrane distillation against oil-in-brine stabilized emulsions[J]. Applied Water Science, 2024,14:35.

[21] Khatoon R, Raksasat R, Ho Y C, *et al*. Reviewing advanced treatment of hydrocarbon-contaminated oilfield-produced water with recovery of lithium[J]. Sustainability, 2023,15(22):16016.

[22] 江乐勇,王宇萌,孙事昊,等.MBBR 及 IFAS 工艺中功能性生物膜挂膜/驯化影响因素的研究进展[J].环境工程,2025,43(9):92-106.

[23] 王宝玉,朱武卫,付文震,等.厌氧氨氧化工艺在主流污水处理中的应用及其调控研究进展[J].水处理技术,2024,50(1):20-25.

[24] Ren G, Han H, Wang Y, *et al*. Recent advances of photocatalytic application in water treatment: A review[J]. Journal of Environmental Sciences, 2021,100:1-14.

[25] Elmobarak W F, Hameed B H, Almomani F, *et al*. A review on the treatment of petroleum refinery wastewater using advanced oxidation processes[J]. Journal of Environmental Chemical Engineering, 2021,9(1):104566.

[26] Lin X, Wang Q. Advances in the application of modified ceramic membranes in oily wastewater treatment[J]. Journal of Materials Science & Technology, 2024,183:152-164.

[27] 荆王松,梅荣武,王泉源.气浮/UASB/芬顿/AO 工艺处理含油废水[J].中国给水排水,2018,34(8):103-105,109.

[28] 舒全英,马媛,陈亮,等.数字孪生水利建设中的人工智能大模型应用探索[J].中国水利,2025,(6):14-30.

[29] Corominas L, Byrne D M, Guest J S, *et al*. The application of life cycle assessment (LCA) to wastewater treatment: A best practice guide and critical review[J]. Water Research, 2020,184:116058.

■