

低碳目标下高盐难降解废水处理技术研究进展

郭小龙¹, 刘 玠¹, 李惠平^{2*}, 黄 慧³, 于晨晖⁴, 刘 岚⁴, 赵 龙³, 董博文³

(1.招商局生态环保科技有限公司, 重庆 400000; 2.同济大学环境科学与工程学院, 上海 200092;

3.甘肃省生态环境科学设计研究院, 甘肃 兰州 730030;

4.中联西北工程设计研究院有限公司, 陕西 西安 710000)

摘要:面向碳中和目标,系统阐述高盐难降解废水水质特征与处理工艺碳排放来源,梳理生物处理、物化处理和耦合集成 3 大类低碳处理技术,分析各技术特点、适用场景及碳减排效益,总结当前技术在处理效能、协同调控、能耗药耗控制与资源化利用等方面的瓶颈,并从高效功能菌种、低耗材料研发、能量梯级利用和智能集成优化等方面展望未来发展方向,可为高盐难降解废水低碳化、高效化和资源化处理提供理论支撑与技术参考。

关键词:碳中和;高盐难降解废水;低碳处理技术;耦合集成;碳减排

中图分类号:X52

文献标志码:A

文章编号:0253-4320(2026)09-0030-05

DOI:10.16606/j.cnki.issn0253-4320.2026.09.006

Research progress on treatment technologies for hypersaline and refractory wastewater toward carbon neutrality

GUO Xiao-long¹, LIU Jie¹, LI Hui-ping^{2*}, HUANG Hui³, YU Chen-hui⁴,
LIU Lan⁴, ZHAO long³, DONG Bo-wen³

(1.China Merchants Ecological Environmental Protection Technology Co., Ltd., Chongqing 400000, China;

2.College of Environmental Science and Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China;

3.Gansu Academy of Eco-Environmental Sciences & Design, Lanzhou 730030, China;

4.China United Northwest Institute for Engineering Design & Research Co., Ltd., Xi'an 710000, China)

Abstract:In view of carbon neutrality target, this paper systematically summarizes the water quality characteristics of hypersaline refractory wastewater and carbon emission sources from treatment processes. The biological treatment, physicochemical treatment and coupled integrated technologies for low-carbon emission treatment are reviewed, and their technical characteristics, application scenarios and carbon reduction benefits are analyzed. The existing bottlenecks of current technologies are discussed, including low treatment efficiency, poor synergistic control, high energy and chemical consumption, and insufficient resource utilization. Furthermore, the future development directions are prospected from the aspects of high-efficiency strains, low-consumption materials development, energy cascade utilization and intelligent integration. This review can provide theoretical support and technical reference for the low-carbon, efficient and resourceful treatment of hypersaline refractory wastewater.

Key words: carbon neutrality; hypersaline refractory wastewater; low-carbon technology; coupled integration; carbon emission reduction

近年来,化工、制药、印染和煤化工等工业领域高速发展,生产过程中产生的高盐难降解废水排放量持续攀升^[1]。此类废水具有盐度高、有机物结构稳定、可生化性差和毒性大且组分复杂等特征,传统物化工艺则存在能耗高、药剂投加量大、运行成本高和二次污染突出等问题,处理全过程碳排放居高不下,与我国“双碳”战略目标严重不符。实现高盐难降解废水的低碳化、高效化与资源化处理,已成为工业水污染控制领域亟待突破的关键课题^[2]。

碳中和目标下,以低能耗、低药耗和资源回收为

核心的新型水处理技术成为研究热点。本文中系统分析高盐难降解废水的水质特征与处理系统碳排放来源,重点综述低碳技术的研究进展,旨在为高盐难降解废水绿色低碳处理提供理论参考与技术支撑。

1 高盐难降解废水特征及处理工艺碳排放来源

1.1 水质特征

高盐难降解废水具有盐度高、有机物浓度高、毒

收稿日期:2026-04-17;修回日期:2026-06-30

基金项目:国家重点研发计划项目(2021YFC3200805);甘肃省科技计划软科学专项项目(25JRZA165)

作者简介:郭小龙(1988-),男,硕士,高级工程师,研究方向为机器学习在水处理领域的应用及污水资源化利用,guoxl0828@126.com;李惠平(1995-),男,博士,助教,研究方向为机器学习在水处理领域的应用,通讯联系人,2210525@tongji.edu.cn。

性高、可生化性低、降解效率低和组分复杂等特点;盐离子以 Na^+ 、 Cl^- 和 SO_4^{2-} 为主,质量分数通常在 5%~15%,部分行业废水可达 20% 以上^[3]。高盐环境引发微生物渗透压胁迫,破坏细胞膜结构与酶活性,导致生物处理效率大幅下降^[4]。难降解有机物多为芳香族化合物、卤代物、硝基物和杂环化合物,具有生物累积性与环境持久性,常规生化难以矿化。同时,废水常含氮、磷及重金属,易对膜分离和催化氧化等单元造成干扰,提升处理难度与运行成本^[5]。

1.2 处理工艺的碳排放来源

高盐废水处理系统碳排放以间接排放为主,直接排放占比较低,碳排放来源主要涵盖 5 个方面(图 1)。其中,电能消耗是系统最主要碳排放源,曝气、提升泵、膜系统、MVR 蒸发和电化学等工艺单元用电产生的碳排放,占总排放量 60% 以上;絮凝剂、酸碱、氧化剂、碳源和催化剂等处理药剂,在生产与运输环节产生大量隐含碳排放;剩余污泥、废催化剂、废活性炭和杂盐等固废残渣,经外运处置(填埋)会释放甲烷和二氧化碳等温室气体^[6]。同时,

淡水、无机盐及可回收能源未得到有效回收,致使系统全生命周期碳利用效率偏低;另外,处理工艺抗冲击能力弱,存在重复处理、浓水回流和设备频繁清洗等低效运行问题,进一步推高单位污染物处理能耗与碳排放。立足碳中和目标,降低工艺电耗、减少药剂投加、推进水与盐类资源化利用和回收系统化学能与热能,是高盐废水处理实现碳减排的重要方向^[7]。

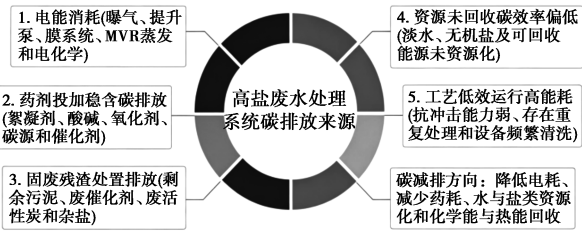


图 1 处理工艺的碳排放来源示意

2 面向碳中和的处理技术

本章围绕碳中和目标,从生物处理、物化处理和耦合集成 3 个方向,系统梳理适用于高盐废水的低碳减排技术(表 1)。

表 1 高盐难降解废水处理技术对比

技术大类	细分技术	核心特点	适用方向	碳减排效果
生物处理技术	耐盐微生物强化	耐盐驯化,活性稳定,减碳源投加	中高盐可生化有机废水	减药剂、降曝气能耗,低碳运行
	低碳生物处理	低曝气、污泥减量、能源回收	盐度适中稳定废水	降电耗与污泥处置碳排放
物化处理技术	低能耗高级氧化	低药耗、低电耗、高效降解	高盐难降解废水深度处理	大幅削减电耗与药剂碳排放
	低碳膜分离分盐	低能耗膜组件,资源化分盐	脱盐、减量化、资源化	降膜能耗,回用减碳
	蒸发结晶低碳强化	余热回用,低能耗蒸发结晶	高盐浓水零排放/资源化	显著降低蒸发系统碳排放
耦合集成技术	生物-物化协同	优势互补,流程短,降耗药	复杂高盐难降解废水	全流程优化,碳减排更优
	蒸发-膜分离耦合	梯级分离,膜污染轻、能效高	高盐废水近零排放	节能 40% 以上,碳减排显著
	多技术协同集成	全链条处理,智能调控	复杂工业废水	能量梯级利用,综合减碳

2.1 生物处理技术

2.1.1 耐盐微生物强化技术

耐盐微生物强化技术是破解高盐环境对污染物降解过程强烈抑制作用的有效途径。通过定向筛选、极端驯化获得高效嗜盐细菌、耐盐古菌及复合功能菌群,可显著提升体系在高盐胁迫下的代谢稳定性与污染物去除能力。经优化构建的耐盐功能菌群能够在 3%~12% 盐度范围内维持稳定的降解活性,有效克服高盐导致的酶活性抑制、细胞膜损伤及代谢通路紊乱等问题,为高盐有机废水和盐渍污染土壤等复杂场景的生物修复提供了高效、低碳且环境适配性强的技术支撑^[8]。Su 等^[9]利用微生物开展生物修复,借助合成生物学技术,对海洋需钠弧菌(*vibrio natriegens*)进行工程改造,使其可在高盐废水与土壤环境中修复复杂有机污染物,改造菌株可

在氯碱厂与炼油厂工业废水中,高效修复联苯、苯酚、萘、二苯并呋喃及甲苯等覆盖单环至多环的典型有机污染物,展现出广谱底物降解与高盐环境适应能力;该技术以微生物代谢为核心,无需高温高压与强化学试剂,原位降解污染物且副产物环境友好,显著降低传统物化修复的能耗与碳排放,在高盐复杂污染场景下具备低碳与可持续优势。

2.1.2 低碳生物处理技术

低碳生化工艺以低曝气、少投加、能回收和污泥减量为目标。厌氧消化可将有机物转化为甲烷(CH_4),实现能源回收与碳减排,上流式厌氧污泥床(UASB)、内循环厌氧反应器(IC)和膨胀颗粒污泥床(EGSB)等反应器在中高盐条件下经驯化可稳定运行,显著降低好氧负荷与曝气能耗。厌氧氨氧化和短程硝化反硝化等自养脱氮工艺无需外加碳源,

曝气能耗降低 50% 以上,在高盐废水脱氮领域应用前景广阔。膜曝气生物膜(MABR)、好氧颗粒污泥(AGS)和移动床生物膜(MBBR)等工艺传质效率高、污泥产量低和抗盐毒性能力强,可在高盐环境下提升处理稳定性。微藻-细菌共生系统可同步降解有机物、固定 CO_2 和脱氮除磷,并产出高附加值生物物质,进一步提升碳汇效益^[10]。Negi 等^[11]设计厌氧共消化系统以替代现有堆肥工艺,结合动力学模型、厌氧降解性能、经济性分析与生命周期评价,从能源、工程、经济与环境维度实现减碳;生命周期评价显示,该工艺较堆肥碳排放降低 68%,年可减排二氧化碳当量 32 t。

2.2 物化处理技术

2.2.1 低能耗高级氧化技术

高级氧化是破除难降解有机物的关键单元,近年研究转向非自由基氧化、催化强化和自驱动氧化等低碳路径。单原子催化剂、双金属氧化物和缺陷型催化材料可显著提升类芬顿和过硫酸盐氧化效率,在高盐体系下抗干扰能力强,铁泥产量大幅降低。电化学氧化以高盐废水自身为电解质,电流效率提升,脉冲供电、三维电极和高效阳极可进一步降低能耗。光催化、光热催化和微波催化等以可再生能源驱动,无二次污染,在太阳能富集地区具有显著减碳优势^[12]。Liang 等^[13]构建一种新型 $\text{FeMo}_{0.5}\text{-OCN}$ 催化剂,通过铁团簇与氧配位钼单原子的协同作用活化过一硫酸盐,生成硫酸根自由基与单线态氧等活性氧物种,实现污染物高效降解,该体系对苯酚 1 min 内降解率超 90%,矿化率达 73%,可稳定运行 30 次并在 pH 2~11 范围内保持高效,对多种酚类污染物均有优异降解效果;在实际废水中化学需氧量(COD)去除效果优于传统芬顿与活性炭体系,敏感性分析证实单线态氧介导生成对苯醌为决速步骤,生命周期评价表明该体系金属浸出低、环境友好性与经济性显著优于传统体系。

2.2.2 低碳膜分离与分盐技术

膜分离是高盐废水减量与回用的主要技术,减碳关键在于抗污染、低能耗和分盐资源化。纳滤可实现 1、2 价盐高效分离,为 NaCl 、 Na_2SO_4 资源化提供前提;反渗透、正渗透和膜蒸馏可实现高倍浓缩,降低蒸发负荷。抗污染膜材料、表面亲水改性、动态膜和振动膜等技术可延长清洗周期,降低运行能耗。正渗透和膜蒸馏利用低品位余热驱动,可替代高能耗加压工艺,在余热富裕场景优势明显^[14]。Shi 等^[15]针对煤化工 60 m^3/h 规模化零排放工艺,系统

研究纳滤膜在 NaCl 与 Na_2SO_4 分离资源化中的应用;采用椰壳活性炭预处理,有效维持膜性能并延长使用寿命。该研究为高盐废水纳滤分盐资源化提供了工程依据,通过保障膜分离长效稳定运行,减少药剂消耗与膜更换频次,实现运行能耗与碳足迹的同步降低。

2.2.3 蒸发结晶与低碳强化

蒸发结晶是高盐废水零排放的最终单元,也是能耗与碳排放最高环节。MVR 机械蒸气再压缩技术利用二次蒸气潜热,能耗较传统多效蒸发降低 60%~70%,是当前主流低碳蒸发技术。热泵蒸发、余热回收、乏汽冷凝回用、结晶母液减量化与资源化处理可进一步降低能耗。通过预处理除硬、除硅和除有机物,可减轻结垢与污染,提升系统连续运行率。分盐结晶可实现工业盐资源化,避免杂盐填埋带来的环境与经济成本,实现环境效益与碳效益协同提升^[16]。Si 等^[17]构建机械蒸气再压缩蒸发耦合多单元真空膜蒸馏(MVR-MVMD)系统,在优化工况下,系统比热能耗低至 81.95 kWh/t,较传统 MVMD 工艺节能 79.24%;经技术经济分析,该系统在投资、运行及环境成本方面综合优势突出,长期运行经济性优异,具备显著低碳节能潜力。

2.3 耦合集成技术

2.3.1 生物-物化协同低碳技术

生物-物化协同低碳技术是生物处理工艺与物理和化学净化单元有机耦合的废水处理技术,通过 2 类技术优势互补,突破单一工艺处理效率低、能耗物耗高和低碳性不足的技术局限,实现污染物高效去除与节能减排双重目标。其技术本质在于依托生物处理单元低成本和无二次污染的降解特性,实现废水中可生化性污染物深度矿化,再经物化处理单元针对性去除难降解有机物、重金属离子及盐分等污染物,同时优化系统运行参数,降低整体工艺能耗与药剂投加量^[18]。相较于传统分步处理工艺,该技术通过流程集成与反应耦合,缩短水处理流程,减少设备占地面积与动力消耗,有效降低处理过程碳排放。目前已研发出生物膜-吸附、厌氧生物-高级氧化和活性污泥-膜分离等成熟耦合工艺,广泛应用于工业废水和难降解有机废水处理领域。在低碳运行方面,通过优化生物单元供氧模式、回收物化过程余热与物料和降低药剂投加比例,实现能耗与药耗双重削减,契合废水处理低碳化、高效化和资源化发展趋势^[19]。Piao 等^[20]针对油田采油废水可持续处理需求,对比分析了生物电化学系统(BES)与电化

学氧化、活性污泥法、芬顿工艺及反渗透的全生命周期环境影响。结果表明,BES 在低碳排放条件下可高效去除 COD,相较活性污泥法与芬顿工艺,其全球变暖潜值降低 79.6%,人体毒性潜值降低 88.2%,该优势源于 BES 可将有机污染物转化为生物能以支撑污染物降解,且无需外加化学药剂。

2.3.2 蒸发-膜分离耦合低碳技术

蒸发-膜分离耦合低碳技术是针对高盐和高浓度工业废水处理研发的高效集成技术,将传统蒸发工艺与膜分离技术深度耦合,有效解决了单一蒸发工艺能耗偏高和二次蒸气利用率低,以及单一膜分离工艺易膜污染和处理极限受限的技术痛点。该耦合技术通过蒸发单元实现废水中水分与盐分的初步分离,回收蒸发过程产生的二次蒸气,再利用膜分离单元对蒸发冷凝水进行深度净化,同时截留废水中残留的难降解污染物与溶解性盐分,实现废水的近零排放与资源回收^[21]。相较于独立运行的蒸发与膜分离工艺,该耦合技术通过物料流与能量流的协同调控,实现了处理流程的梯级衔接,大幅降低了蒸发系统的换热负荷与膜组件的处理压力,既能延长膜组件使用寿命、减少清洗药剂消耗,又能提升整体处理效率。其中,多效蒸发(MED)与膜蒸馏、机械蒸气再压缩(MVR)与超滤/反渗透的耦合形式,在高盐工业废水处理中应用最为广泛,可实现能耗降低 40%以上,盐分回收率可达 95%以上,兼具低碳减排与资源化双重效益,成为高难度工业废水低碳处理的核心技术路线^[22]。

2.3.3 多技术协同耦合集成系统

针对复杂工业废水水质波动大、污染物组分复

杂和处理要求严苛的特点,多技术协同耦合集成系统将生物-物化、蒸发-膜分离和热泵-结晶等多种耦合单元进行深度整合,构建全流程、一体化的低碳水处理系统。该系统通过各单元工艺的优势互补与协同调控,实现从可生化污染物降解和难降解污染物去除,到高盐废水蒸发结晶和水资源与盐分回收的全链条处理,最大程度削减系统能耗和物耗与碳排放^[23]。该集成系统以全生命周期低碳为设计理念,通过智能化调控各工艺单元运行参数,实现能量的梯级利用和物料的循环回收,全面提升废水处理系统的稳定性、高效性与经济性^[24]。目前,该类多技术耦合系统已在工业园区综合废水、煤化工高盐废水和电镀重金属废水等复杂水质处理场景中逐步推广应用,为工业废水深度处理与资源化利用提供了系统化和低碳化的技术解决方案,是未来水处理耦合集成技术的重要发展方向^[25]。

2.4 各技术存在问题与突破方向

当前生物、物化及耦合集成 3 类废水处理技术在处理效能、低碳水平与工程适用性上各有局限(表 2)。生物处理技术成本低和环境友好,但难以适配难降解和高盐废水,微生物活性易受抑制,处理效率低,且抗水质冲击能力差,低温效果差;好氧工艺供氧能耗高,污泥产量大,低碳性能不足;物化处理技术污染物去除效果好,但存在药剂耗量大、能耗高和资源利用率低等问题,膜分离工艺易膜污染,运行稳定性差,低碳减排潜力有限。耦合集成技术虽优势互补,但存在单元协同调控差、能量回收效率低、系统流程复杂、运维及投资成本高和复杂水质适配性不足等问题,规模化应用存在技术壁垒。

表 2 各类水处理技术优缺点及突破方向总结表

技术类别	核心优势	现存主要问题	低碳化突破方向
生物处理技术	运行成本低、无二次污染、可生化污染物降解效果好	难降解废水处理效率低、抗冲击性差、好氧单元能耗高、污泥产量大	功能菌种驯化、节能供氧、污泥减量、智能化调控
物化处理技术	污染物去除效率高、适配复杂水质、处理流程短	药剂/能耗高、易产生二次污染、膜污染严重、运行成本高	低耗药剂研发、余热资源回收、抗污染膜制备、工艺参数优化
耦合集成技术	工艺优势互补、处理效果优异、能效高、资源化潜力大	系统流程复杂、运维难度大、初始投资高、协同调控难	单元协同优化、能量梯级利用、模块化集成、定制化工艺开发

生物处理技术需选育高效功能菌种,优化联合处理工艺,研发节能供氧与污泥减量技术,结合智能调控提升工艺稳定性与低碳性。物化处理技术应研发低耗环保药剂,强化余热与盐分回收,开发抗污染膜材料及清洗技术,实现低碳资源化升级。耦合集成技术需优化单元协同机制,简化系统、研发模块化装备,定制水质适配方案,提升能效与资源化率,推

动规模化工程应用。

3 减碳效能瓶颈

(1)能效利用瓶颈:蒸发、膜分离和曝气等核心单元能耗占比高,余热和二次蒸气回收不充分,低位热能利用率低,单位污染物处理能耗偏高。

(2)药耗减排瓶颈:絮凝剂、氧化剂和碳源等药

剂投加大,生产与运输隐含碳排放高,催化剂与吸附剂再生效率低,难以实现药剂减量化与循环利用。

(3) 协同运行瓶颈:多工艺耦合时单元匹配性差,能量流与物料流调控不精准,流程冗余,系统整体低碳性能未达最优。

(4) 资源化转化瓶颈:淡水、盐分和有价资源回收率偏低,杂盐填埋与污泥处置产生大量温室气体,碳汇效益不足。

(5) 智能化调控瓶颈:水质波动适应性差,缺乏全流程在线监测与动态优化,频繁清洗与重复处理进一步提升碳排放。

4 未来展望

(1) 功能材料与菌种革新:研发耐盐、耐毒高效降解菌群与合成生物学改造菌株,开发低能耗、抗污染膜材料与高效绿色催化剂。

(2) 能量梯级与闭环利用:深化 MVR、热泵和余热回收集成,实现热能、电能和化学能高效循环,最大限度降低外部能源输入。

(3) 多技术深度耦合:构建生物-物化-膜分离-蒸发结晶一体化系统,优化单元衔接,实现减碳、除污和资源化协同增效。

(4) 全生命周期低碳设计:以碳足迹为导向,开展工艺优化、技术经济与环境影响综合评价,推动技术工程化与标准化。

(5) 智能化低碳运维:结合大数据与人工智能,实现水质、能耗和药耗实时调控,提升系统稳定性与低碳运行水平。

5 结论

高盐难降解废水处理碳排放主要来自电能消耗、药剂投加、固废处置及资源未高效回收。生物处理、物化处理与耦合集成技术各具低碳优势,但仍存在效能不足、能耗药耗偏高、协同调控差和资源化率低等瓶颈。面向碳中和,需以高效菌种、低耗材料、能量梯级利用、多单元耦合与智能调控为核心,构建全流程低碳技术体系。未来应聚焦技术耦合优化、资源循环利用与全生命周期减碳,推动高盐难降解废水处理向低碳化、高效化、资源化和智能化升级,为工业领域实现“双碳”目标提供关键技术支撑。

参考文献

- [1] Zhang L, Wang J, Fu G, *et al.* Simultaneous electricity generation and nitrogen and carbon removal in single-chamber microbial fuel cell for high-salinity wastewater treatment [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 276: 123203.
- [2] Liu T, Zhao Z, Tang W, *et al.* From micromechanisms to macro-engineering in direct seawater electrolysis [J]. *Nature Reviews Clean Technology*, 2026, 2: 305–319.
- [3] Yuan Y, Garg S, Wang Y, *et al.* Influence of salinity on the heterogeneous catalytic ozonation process: Implications to treatment of high salinity wastewater [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2022, 423: 127255.
- [4] Miao Q, Xie Y, Ismail S, *et al.* Salt-tolerant marine sludge is more suitable for stable and efficient high-salinity wastewater treatment than activated sludge [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2025, 505: 159404.
- [5] Wei Q, Xu Z, Yin H. Enhanced nitrogen prediction and mechanistic process analysis in high-salinity wastewater treatment using interpretable machine learning approach [J]. *Bioresource Technology*, 2025, 426: 132393.
- [6] Ke X, He H, Qin Z, *et al.* Salt exposure and emission reduction strategies in typical industrial wastewater treatment processes [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2025, 486: 144470.
- [7] Xue N, Lu J, Gu D, *et al.* Carbon footprint analysis and carbon neutrality potential of desalination by electrodialysis for different applications [J]. *Water Research*, 2023, 232: 119716.
- [8] Wu Z, Li M, Qu L, *et al.* Metagenomic insights into microbial adaptation to the salinity gradient of a typical short residence-time estuary [J]. *Microbiome*, 2024, 12(1): 115.
- [9] Su C, Cui H, Wang W, *et al.* Bioremediation of complex organic pollutants by engineered *Vibrio natriegens* [J]. *Nature*, 2025, 642(8069): 1024–1033.
- [10] Xia Z, Ng H Y, Bae S. Synergistic microalgal-bacterial interactions enhance nitrogen removal in membrane-aerated biofilm photoreactors treating aquaculture wastewater under salt stress: Insights from metagenomic analysis [J]. *Water Research*, 2025, 283: 123878.
- [11] Negi S, Pan S Y, Shiao Y J. Decarbonizing food waste treatment through anaerobic codigestion with yard waste: Energy, engineering, economic, and environmental aspects [J]. *ACS ES&T Engineering*, 2023, 3(10): 1495–1503.
- [12] You X, Wang C, Wang C, *et al.* Long-range electron transfer pathways at FeCu bimetallic interfaces: Bridging catalytic mechanisms and scalable applications for persistent pollutant degradation [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2025, 494: 138682.
- [13] Liang L, Cao J, Chen Z, *et al.* Harnessing Fe–Mo atomic interfaces for boosted electron transfer and ROS generation in sustainable pollutant degradation [J]. *Environmental Science & Technology*, 2025, 59(42): 22914–22926.
- [14] Osman A, Mat Nawi N I, Samsuri S, *et al.* Patterned membrane in an energy-efficient tilted panel filtration system for fouling control in activated sludge filtration [J]. *Polymers*, 2020, 12(2): 432.
- [15] Shi Y T, Meng X, Yao L, *et al.* A full-scale study of nanofiltration: Separation and recovery of NaCl and Na₂SO₄ from coal chemical industry wastewater [J]. *Desalination*, 2021, 517: 115239.

(下转第 40 页)

- [9] 赵璠云, 胡家朋, 林皓, 等. Ag^+ 改性羟基磷灰石制备及其除氟抑菌特性研究[J]. 硅酸盐通报, 2020, 39(12): 3977–3984.
- [10] Wang Z, Su J, Zhao T, *et al.* Enhanced removal of fluoride from groundwater using biosynthetic hydroxyapatite modified by bimetallic (La-Fe or La-Al) hydroxides[J]. Journal of Cleaner Production, 2024, 436: 140649.
- [11] Sylvestre N Y, Sadat A, Henri G B B, *et al.* Removal of fluoride in groundwater by adsorption using hydroxyapatite modified Corbula trigona shell powder[J]. Chemical Engineering Journal Advances, 2022, 12: 100386.
- [12] Nagaraj A, Munusamy M A, Ahmed M, *et al.* Hydrothermal synthesis of a mineral-substituted hydroxyapatite nanocomposite material for fluoride removal from drinking water[J]. New Journal of Chemistry, 2018, 42(15): 12711–12721.
- [13] Kanno C M, Sanders R L, Flynn S M, *et al.* Novel apatite-based sorbent for defluoridation: synthesis and sorption characteristics of nano-micro-crystalline hydroxyapatite-coated-limestone[J]. Environmental Science & Technology, 2014, 48(10): 5798–5807.
- [14] Mohan R, Dutta K R. Continuous fixed-bed column assessment for defluoridation of water using HAP-coated-limestone[J]. Journal of Environmental Chemical Engineering, 2020, 8(4): 103840.
- [15] Samant A, Nayak B, Misra K P, *et al.* Kinetics and mechanistic interpretation of fluoride removal by nanocrystalline hydroxyapatite derived from Limacina artica shells[J]. Journal of Environmental Chemical Engineering, 2017, 5(6): 5429–5438.
- [16] Dhillon A, Prasad S, Kumar D, *et al.* Recent advances and spectroscopic perspectives in fluoride removal[J]. Applied Spectroscopy Reviews, 2017, 52(3): 175–230.
- [17] Xu F, Jiang C, Li L, *et al.* Defluoridation of wastewaters using HAP-coated-limestone[J]. Separation Science and Technology, 2019, 54(14): 2304–2313.
- [18] Gómez-Hortigüela L, Pérez-Pariente J, Chebude Y, *et al.* Controlled growth of hydroxyapatite on the surface of natural stilbite from Ethiopia: application in mitigation of fluorosis[J]. Royal Society of Chemistry Advances, 2014, 4: 7998–8003.
- [19] Sani T, Gómez-Hortigüela L, Mayoral Á, *et al.* Controlled growth of nano-hydroxyapatite on stilbite: Defluoridation performance[J]. Microporous and Mesoporous Materials, 2017, 254: 86–95.
- [20] 章萍, 杨陈凯, 马若男, 等. 碳纳米管/羟基磷灰石复合材料对水体 F^- 的去除研究[J]. 中国环境科学, 2019, 39(1): 179–187.
- [21] 干成果, 冯莉. 负载羟基磷灰石活性炭的制备及除氟性能[J]. 功能材料, 2013, 44(22): 3243–3246.
- [22] Qiu H, Ye M, Zhang M, *et al.* Nano-hydroxyapatite encapsulated inside an anion exchanger for efficient defluoridation of neutral and weakly alkaline water[J]. ACS ES&T Engineering, 2021, 1(1): 46–54.
- [23] Fernando S M, Wimalasiri K V D K A, Ratnayake P S, *et al.* Improved nanocomposite of montmorillonite and hydroxyapatite for defluoridation of water[J]. Royal Society of Chemistry Advances, 2019, 9: 35588–35598.
- [24] Sani T, Gómez-Hortigüela L, Pérez-Pariente J, *et al.* Defluoridation performance of nano-hydroxyapatite/stilbite composite compared with bone char[J]. Separation and Purification Technology, 2016, 157: 241–248.
- [25] Zou Y, Diao D, Zhang H, *et al.* Evaluation of the efficient fluoride removal of porous CeO_2/HAP : Performance and mechanism study[J]. Separation and Purification Technology, 2025, 364(P3): 132527.
- [26] Kalpana V D K A W, Shanika M F, Karolina D, *et al.* Structure-activity relationship of lanthanide-incorporated nano-hydroxyapatite for the adsorption of fluoride and lead[J]. ACS Omega, 2021, 6(21): 13527–13543.
- [27] Nijhawan A, Butler C E, Sabatini A D, *et al.* Macroporous hydroxyapatite ceramic beads for fluoride removal from drinking water[J]. Journal of Chemical Technology & Biotechnology, 2017, 92(8): 1868–1875.
- [28] Nunes-Pereira J, Lima R, Choudhary G, *et al.* Highly efficient removal of fluoride from aqueous media through polymer composite membranes[J]. Separation and Purification Technology, 2018, 205: 1–10.
- [29] 胡家朋. 羟基磷灰石复合改性材料的制备及其除氟性能研究[D]. 南昌: 南昌大学, 2016. ■

(上接第 34 页)

- [16] Jiang H, Zhang Z, Gong W. Design and evaluation of a parallel-connected double-effect mechanical vapor recompression evaporation crystallization system[J]. Applied Thermal Engineering, 2020, 179: 115646.
- [17] Si Z, Han D, Xiang J. Experimental investigation on the mechanical vapor recompression evaporation system coupled with multiple vacuum membrane distillation modules to treat industrial wastewater[J]. Separation and Purification Technology, 2021, 275: 119178.
- [18] Pasquarelli F, Oliva G, Mariniello A, *et al.* Integration of moving bed biofilm reactor (MBBR) and algal photo bio reactors (aPBR) for achieving carbon neutrality in wastewater treatment[J]. Science of the Total Environment, 2024, 955: 177012.
- [19] Liu T, Qin H, Wang S, *et al.* Electrically conductive membrane-based anammox MBR with electrochemical assistance: An effective strategy for simultaneous mitigation of membrane fouling and enhancement of nitrogen removal[J]. Water Research, 2025: 124636.
- [20] Piao X, Li Y, Liu L, *et al.* Low-carbon sustainable bio-electrochemical system for upgrading oilfield wastewater treatment: Comparative life cycle assessment[J]. Bioresource Technology, 2025: 133338.
- [21] López-Porfiri P, Ramos-Paredes S, Núñez P, *et al.* Towards the technological maturity of membrane distillation: The MD module performance curve[J]. npj Clean Water, 2023, 6(1): 18.
- [22] Swaminathan J, Chung H W, Warsinger D M. Energy efficiency of membrane distillation up to high salinity: Evaluating critical system size and optimal membrane thickness[J]. Applied energy, 2018, 211: 715–734.
- [23] Li M, Wang X, Ma M, *et al.* Efficient treatment of high-concentration pharmaceutical wastewater with high-salinity by chemical synthesis coupling with evaporation: From lab-scale to pilot-scale[J]. Chemical Engineering Journal, 2024, 496: 154278.
- [24] Wang X, Cheng X, Shuai A, *et al.* A critical review on desalination technologies for high-salinity wastewater: Development and challenges[J]. Membranes, 2026, 16(1): 27.
- [25] Shen Z, Zou X, Li Y, *et al.* Perspective on the sustainable development of a novel high-salinity coal mine water treatment technology[J]. Desalination, 2026, 625: 119917. ■