

盐碱地治理中含盐排水处理技术的研究进展及示范案例

张辽辽^{1,2,3}, 张 乾^{1,2,3*}, 李勇凯^{1,2,3}, 邢明悦^{1,2,3}, 简卓凌^{1,2,3}, 王 彤^{1,2,3},
张耀中^{1,2,3*}, 穆卫谊^{2,3,4}, 徐 燕^{3,5}, 王全九^{2,3,4}

- (1. 西安理工大学生态环境与化工学院, 陕西 西安 710048;
2. 旱区水工程生态环境全国重点实验室, 陕西 西安 710048;
3. 新疆未来灌区工程技术研究中心, 新疆 乌鲁木齐 830000;
4. 西安理工大学水利水电学院, 陕西 西安 710048; 5. 新疆维吾尔自治区生态水利研究中心
(新疆维吾尔自治区水利厅院士专家工作站), 新疆 乌鲁木齐 830000)

摘要:盐碱地在全球分布广泛,盐碱地改良过程中含盐排水的处理以及再利用是盐碱地治理关键环节,对水资源可持续利用与生态环境保护意义重大,本文系统梳理了盐碱地治理中的含盐排水处理问题和措施,为盐碱地含盐排水的高效治理提供理论与实践参考。含盐排水处理具体可涉及膜分离、电渗析、蒸发结晶、离子交换、化学沉淀等多种技术方法,各有特点和优势。通过对几个不同地区的含盐排水处理的典型案例分析,比较了不同处理措施在实际应用中的效果及面临的挑战。盐碱地含盐排水处理需在技术创新、多学科融合、生态可持续发展以及政策支持与技术推广等多方面协调进行,并持续发力,从而实现盐碱地的高效治理与水资源可持续利用,为保障农业高产与地区可持续发展奠定坚实基础。

关键词:盐碱地;含盐排水;处理措施

中图分类号:X703;S156.4

文献标志码:A

文章编号:0253-4320(2026)09-0062-05

DOI:10.16606/j.cnki.issn0253-4320.2026.09.012

Research progress and demonstration cases of saline drainage treatment technologies in saline-alkali land improvement

ZHANG Liao-liao^{1,2,3}, ZHANG Qian^{1,2,3*}, LI Yong-kai^{1,2,3}, XING Ming-yue^{1,2,3}, JIAN Zhuo-ling^{1,2,3},
WANG Tong^{1,2,3}, ZHANG Yao-zhong^{1,2,3*}, MU Wei-yi^{2,3,4}, XU Yan^{3,5}, WANG Quan-jiu^{2,3,4}

- (1. School of Eco-environmental & Chemical Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China;
2. State Key Laboratory of Water Engineering Ecology and Environment in Arid Area, Xi'an 710048, China;
3. Xinjiang Future Irrigation District Engineering Technology Research Center, Urumqi 830000, China;
4. School of Water Resources and Hydro-Electric Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China;
5. Xinjiang Uygur Autonomous Region Ecological Water Resources Research Center (Academician and Expert Workstation of the Department of Water Resources of the Xinjiang Uygur Autonomous Region), Urumqi 830000, China)

Abstract: Saline-alkali lands are widely distributed globally. The treatment and reuse of saline drainage are crucial aspects of saline-alkali land remediation, and are of great significance for the sustainable utilization of water resources and ecological environmental protection. This paper reviews the problems and measures involved in the treatment of saline drainage in saline-alkali land remediation systematically, providing theoretical and practical references for the efficient management of saline drainage. Specific treatment methods for saline drainage include various technologies such as membrane separation, electrodialysis, evaporation crystallization, ion exchange, and chemical precipitation, each with its own characteristics and advantages. Through analyzing the typical cases of saline drainage treatment in several different regions, the effectiveness and challenges of different treatment measures in practical applications are compared. The treatment of saline drainage in saline-alkali lands requires coordinated efforts in technological innovation, multidisciplinary integration, ecological sustainable development, and policy support and technology promotion, and continuous efforts are needed to achieve efficient management of saline-alkali lands and sustainable utilization of water resources, laying a solid foundation for ensuring high agricultural yields and regional sustainable development.

Key words: saline-alkali land; saline drainage; measures

中国盐碱地面积高达 991 300 km²,盐碱地能导致作物生长不良、产量低下,严重阻碍农作物正常生

长,且排水携带过高含盐量,造成区域生态系统脆弱化。在盐碱地综合治理体系中,含盐排水处理是核

收稿日期:2026-01-26;修回日期:2026-07-01

基金项目:新疆维吾尔自治区重大科技专项(2024A03007);陕西省科技厅自然科学基金基础研究计划一般项目面上项目(2025JC-YBMS-537);陕西省教育厅青年创新团队项目(23JP103);陕西省教育厅一般专项科学研究计划项目(25JK0571)

作者简介:张辽辽(2001-),女,硕士生;张乾(1978-),男,博士,教授,博士生导师,研究方向为盐水淡化与盐碱地治理及先进水处理技术,通讯联系人,qzh@xaut.edu.cn;张耀中(1983-),男,博士,讲师,研究方向为盐水的膜法淡化过程,通讯联系人,zhangyz@xaut.edu.cn。

心环节,若处理不当,盐分回流会加重土壤盐碱化,含盐废水排放还会污染周边水体与土壤,引发一系列生态环境问题。由此可见,盐碱地的含盐排水问题正成为制约农业可持续发展的关键瓶颈^[1]。通过对盐碱地的含盐排水进行科学处理并回用于灌溉,能够显著缓解农业用水的供需矛盾,为农业生产提供稳定的水资源保障,减少对新鲜水资源的过度依赖,提高水资源的利用效率^[2]。近年来,国内外科研人员围绕这一难题展开了大量研究与实践,研发出一系列物理、化学以及综合处理技术,在实际应用中取得了一定成效,对这些处理措施深入研究和成功案例细致分析,不仅能够为现有盐碱地治理项目提供有力的技术支撑和实践经验借鉴,还能推动盐碱地治理工作向更高水平迈进^[3]。

1 盐碱地治理中含盐排水的处理措施

1.1 膜分离技术

在含盐排水处理及盐碱地淡水循环治理中,膜分离技术凭借半透膜的选择透过性发挥关键作用,主要包括纳滤(NF)、反渗透(RO)和膜蒸馏(MD)等工艺。其中,反渗透(RO)是全球应用最广泛的淡化技术,占有所有淡化设施的 65%^[4],技术普及率位居首位(NF 与 RO 的核心区别详见表 1^[5-6])。

表 1 NF 与 RO 的核心区别

项目	纳滤(NF)	反渗透(RO)
膜孔径	0.1~2 nm(纳米级)	<0.1 nm(接近分子级)
截留对象	二价及多价离子-大分子有机物	所有离子(包括单价离子)
脱盐率	较低(通常为 50%~90%,决于离子价态)	极高(>95%)
操作压力	低(0.5~1.5 MPa)	高(1.0~10 MPa)
能耗	低	高(因需克服更高渗透压)
水回收率	较高(可达 80%以上)	较低(通常 60%~80%)
典型应用	软化水、去除有机物、分离特定溶质	纯水制备、海水淡化、盐废水处理

反渗透膜截留水中的各种无机离子和胶体物质,实现盐水分离。在农业灌溉中,反渗透技术常用于处理农业高盐地下水与盐碱地排水脱盐,产出灌溉用水、缓解缺水。但是还存在较多缺点,比如能耗与运行成本高,膜污染问题频发,维护难度大^[7]。Ohshita 等^[8]采用聚倍半硅氧烷基反渗透膜处理含盐排水,通过合成 3 种含脲三乙氧基硅烷单体,引入柔性极性连接体提升膜亲水性,NaCl 截留率最高可达 95.9%。

纳滤是介于超滤与反渗透间的压力驱动膜技术,可选择性截留高价离子与有机大分子,对离子分离选择性强,具备低压、高通量、运行稳定的优势。盐碱地含盐排水膜浓缩预处理后,常联用纳滤与反渗透,初步除盐除杂,产出淡水可回用^[9]。Yan 等^[10]则研发了新型聚(酯酰胺)纳滤膜来处理含盐排水,以 4-hydroxypiperidine 为反应单体参与聚合,实现 1 价/2 价阴离子盐分级分离,SO₄²⁻ 类盐截留率超 90%,且允许 Cl⁻ 透过,实现含盐排水中不同价态阴离子盐的有效分级。

膜蒸馏(MD)是膜蒸馏为温差产生蒸气压差驱动的热分离工艺,具备低温运行、设备简易、脱盐与回收率高、预处理需求少、无需加压、运行稳定性优于反渗透等优势。膜蒸馏很少需要预处理,并且不需要压力差作为驱动力,因此稳定性比反渗透技术更好。但缺乏优异疏水性能的蒸馏膜,限制了该技术的广泛应用^[11]。姜新等^[12]制备 F-SiO₂/CNTs-PVDF 复合超疏水膜,用于含盐排水膜蒸馏脱盐,脱盐率高达 99.9%,产水电导率低至 1~10 μS/cm,符合生活饮用水标准,实现了含盐排水向洁净水转化。

1.2 电渗析技术

电渗析(ED)是一种基于膜的技术,利用电场作用下离子的定向迁移原理,使盐水中的阴、阳离子分别透过阴、阳离子交换膜,从而使一部分水中的离子浓度降低,得到淡化水;另一部分水中的离子浓度升高,实现了水的分离和浓缩过程,达到淡化海水和农业含盐排水的目的(图 1)^[13]。该技术尤其适用于处理盐度 1~10 g/L 的水体,脱盐效果好、淡水回收率高;相较其他脱盐工艺,抗污抗垢、集成度与操作灵活性佳,小规模投资更低,且依靠电场驱动离子迁移,脱盐速率更快、能耗优于反渗透。此外,该技术可便捷地与太阳能、风能等可再生能源系统集成,为构建可持续的淡水生产体系开辟了新路径^[14]。

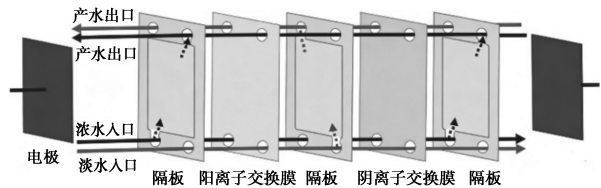


图 1 电渗析(ED)板框结构

Suhag 等^[15]将 f-GO 改性 SPPO 阳离子交换膜应用于含盐排水的电渗析脱盐工艺。在 20℃ 电渗析脱盐中,处理模拟含盐排水后盐含量大幅降低,脱

盐率可达 98.01%, 能耗达 7.91 kWh/m^3 , 对含盐排水中的阳离子 (Na^+ 、 K^+ 、 Ca^{2+} 等) 选择透过率高于 95%, 产水电导率可降至 $100 \sim 500 \mu\text{S/cm}$, 达到标准排放要求。

1.3 蒸发结晶技术

蒸发结晶是处理高盐浓水的常用物理方法之一, 通常有多效蒸发 (MEE)、机械蒸气再压缩 (MVR) 蒸发和太阳能界面蒸发 (SIE) 技术。多效蒸发技术利用多个蒸发器串联, 通过多次蒸发、冷凝过程, 逐步浓缩废水中的盐分, 实现盐与水的分离^[16]。多效蒸发 (MEE) 脱盐灵活、运行温度低, 搭配蒸气压缩机可提升热效率, 但存在能效、能耗、设备结垢腐蚀等缺陷; 机械蒸气再压缩 (MVR) 自动化、稳定性、环保性、热能利用率更优、能耗更低, 二者均适合工业高盐废水规模化浓缩与零排放^[17]。

太阳能界面蒸发 (SIE) 可吸收太阳能转化为热量, 集中于蒸发表面加热界面水产生蒸气, 降低能量损耗、提升淡水制备效率, 助力清洁水源获取。具备高效、低成本、低碳、操作简便等优势, 但长期运行易出现盐积累, 严重制约可持续性^[18]。该技术适用于偏远缺电地区农业含盐排水处理与分散式淡水制取, 以太阳能为淡化能源, 是兼具环保价值与实际意义的发展新路径。Ali^[19] 采用太阳能驱动的 VAR-多效蒸发耦合系统处理含盐排水, VAR 系统产低温冷源, 提升冷凝效率, 同时供能驱动蒸发, 能源利用率提升 20%~30%, 脱盐率超 99.5%, 单位产水能耗降 50% 以上, 且零碳排放。

1.4 离子交换法和化学沉淀法

离子交换法利用离子交换树脂与废水中离子发生交换反应去除特定离子, 常用于海水淡化、苦咸水处理脱除盐离子及重金属离子, 也可用于重金属废水预处理与水中特定污染物的针对性处理。化学沉淀法投加特定药剂沉淀钙镁、重金属离子。该化学法虽能精准高效去除特定高浓度离子, 处理效率高、针对性强, 但会产生大量化学污泥, 易造成二次污染, 且药剂投加可能引入新杂质。吴欣森等^[20] 采用自制 Srici-1 螯合型离子交换树脂脱除含盐排水中 Ca^{2+} , 出水 Ca^{2+} 浓度低于 7.45 mg/L , 显著降低水硬度, 避免后续设备结垢, 为含盐排水软化提供可行关键操作。对于含盐排水的处理, 离子交换法和化学沉淀法还未实现大规模应用, 主要原因是其方法不适用于高盐高浓度复杂体系, 不仅药剂成本高, 还会产生二次含盐废水, 增加后续处理负担, 长期大规模运行的经济可行性极低。

2 国内外研究及应用现状

2.1 美国农业排水的处理和回用

2.1.1 研究背景与水质特征

灌溉在美国淡水取用中占比较大, 圣华金谷农业排水和地下水盐度已达 $3\,000 \sim 30\,000 \text{ mg/L}$ 总溶解固体 (TDS), 并且农业排水中含有的高浓度盐分、营养物质 (如氮、磷)、农药、沉积物以及微量元素等, 这些成分会对水体造成污染, 引发水体富营养化、土壤盐碱化等环境问题^[21-22]。

2.1.2 农业排水处理特征与再利用现状

加利福尼亚州圣路易斯示范工厂 (SLDTP) 展示了大规模盐碱农业排水的处理, 加利福尼亚州中央山谷的帕诺切排水区每天处理 $1\,090 \text{ m}^3$ 的二级农业排水, 目的是测试去除有毒物质的可行性, SLDTP 技术则是采用 2 阶段 ABMet 生物反应器, 超滤与反渗透的结合。在此处理流程中, 将海水反渗透 (SWRO) 和苦咸水反渗透 (BWRO) 工艺并排放置 (图 2)。来自 ABMet 生物反应器的含硒废物在澄清器和压滤机中进一步处理, 硒废物经脱水处置, 压滤机滤液回流, 反渗透浓液与渗透液混合后排放。

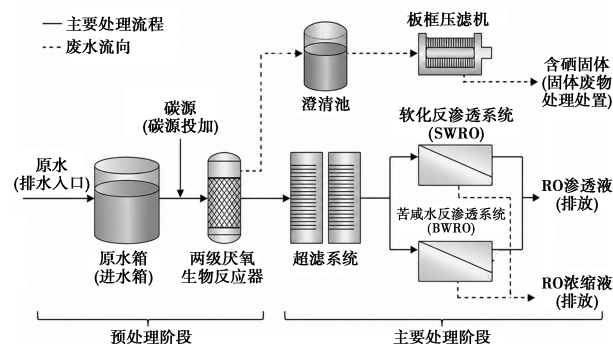


图 2 圣路易斯示范处理厂 (SLDTP) 简化工艺流程

2000 年 8—9 月, 加利福尼亚州 Buttonwillow 的 Buena Vista Water Storage District 建立了试点厂, 验证 RO 脱盐处理圣华金谷农业排水的可行性。厂区设多介质过滤预处理与两级反渗透系统; 预处理去除杂质目的为保护膜元件, 两级 RO 逐级脱盐提纯。投加阻垢剂并调节进水 pH 至 6.8, 这一操作旨在抑制水中矿物质盐在 RO 膜表面的结晶和沉淀, 确保 RO 系统的稳定运行, 提高脱盐效率^[21-22]。

2.1.3 现有研究技术实施存在的问题及未来发展方向

目前, 膜分离 (RO/UF) 是西部咸水排水脱盐的核心技术, 但主要存在 3 大问题: ① 能耗极高, 对于

SLDTP 案例占总能耗的 76.7%;②膜污染严重,排水中颗粒物、有机物易导致膜堵塞,增加维护成本;③对于高盐废水处理中产生的副产物浓盐水处置困难。未来科研人员需努力研究开发耐污染、抗高盐的新型膜材料,延长膜寿命,并且将太阳能、风能与 RO/UF 等能耗密集型技术结合,以此来降低单位水能耗。

2.2 中国新疆南部咸碱水脱盐项目的处理方案

2.2.1 研究背景与废水水质

中国南疆太阳能虽充足,却存在土地盐碱化、水资源紧缺双重难题。由于传统洗盐法导致地下水污染和水资源浪费,且农田排水携带高盐水(矿化度 3.47~14.00 g/L)污染河流,形成“盐污染循环”。

2.2.2 关键技术突破与实施措施

南疆盐碱水淡化项目先进行盐度监测与分类,通过传感器实时监测排水渠中盐碱水的矿化度(盐含量),将水体分为 2 类:①高盐排水(矿化度>5 g/L)主要来自农田洗盐排水,优先采用膜技术与太阳能蒸馏联合处理。②低盐排水(矿化度 1~3 g/L)经简单过滤后用于农业灌溉或市政杂用,减少淡水消耗。新疆高盐排水处理核心技术为反渗透(RO)与太阳能蒸馏结合,通过两级 RO 工艺截留 Na⁺、Cl⁻ 等离子,达到出水矿化度<0.5 g/L,但产生的 3~5 倍浓缩浓水需进一步处理以规避二次污染。该技术实现盐分与淡水完全分离,且能耗低(3~4 kWh/m³)、占地小,适配大规模处理,提取的盐分纯度超 90%,低盐淡水用于灌溉,可缓解缺水并改善生态(图 3)^[23]。

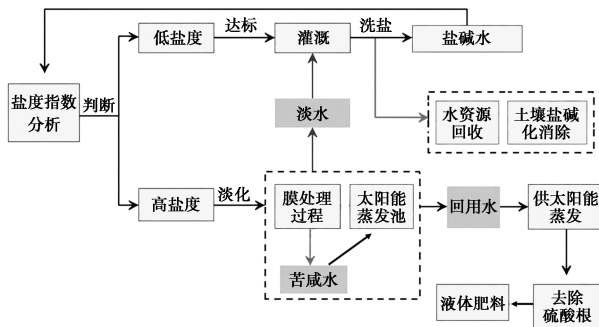


图 3 新疆盐碱水淡化项目的集成流程

所以,南疆结合自己的当地优势,利用太阳能对新疆盐碱地进行苦咸水的淡化,将淡化后的水进行回收利用与灌溉,形成一个完整的脱盐系统,达到盐碱地环境改善和含盐排水纯净化的目的。

2.2.3 现有研究技术实施存在的问题及未来发展方向

新疆盐碱水含高硫酸盐,现有膜材料耐腐蚀性

不足;且 RO 产生的浓盐水缺乏合规处置路径,直接排放会污染土壤和河流,制约规模化应用。未形成膜处理与结合当地特色太阳能利用的协同体系,RO 处理后的浓盐水未进一步回收,太阳能资源未充分转化为脱盐动力,导致资源浪费。未来将推广 RO 与太阳能蒸馏技术结合体系,RO 处理 80%低盐水用于灌溉,剩余 20%浓盐水经太阳能蒸馏器深度处理,实现零污染排放。

2.3 国内外的指标分析以及成本分析

针对美国农业排水中含有的高浓度硒、硼及总溶解固体(TDS)等有害物质开展处理。经处理后,相关指标均得到改善,有效降低了水中有害物质浓度,使水质更趋近于灌溉用水标准,对含盐排水处理结果具有重要参考价值^[21-22](表 2)。

表 2 脱盐处理前后具体指标分析

具体指标	处理前状况	SLDTP 处理结果
总溶解固体 (TDS)	原水 TDS 为 3000~30000 mg/L	TDS 在 350~8 800 mg/L 之间波动,以达到可利用标准
硒(Se)	部分区域硒浓度在 0.14~1.4 mg/L 之间(标准灌溉水的硒含量低于 0.005 mg/L)	硒含量有所降低
硼(B)	硼(B)含量较高	硼去除率超 95%,满足严格的水质要求
盐分	存在大量的盐分(如 Na ⁺ 、Cl ⁻ 等)	对盐分有一定去除作用

美国淡化系统规模扩大可降低单位产水成本,但配套管网泵送会抵消部分成本优势;阻垢、加酸控垢带来药剂开销,回收率提升则会加大能耗,运行时需结合进水水质调控药剂投加量,平衡处理效果与运行成本。南疆盐碱水处理后反渗透膜(RO)出水矿化度低于 0.5 g/L,离子去除率高于 99%(如 Na⁺、Cl⁻、SO₄²⁻),达饮用水标准,可直接用于灌溉或生活用水。太阳能蒸馏器出水矿化度低于 0.1 g/L,纯度接近蒸馏水,可作为高附加值水源(如饮用水),浓盐水完全结晶为工业盐,接近实现零排放^[23]。具体指标如表 3 所示。

表 3 南疆盐碱水处理前后主要指标分析

主要指标	处理前	处理后	改善幅度/%
矿化度	1~14 g/L	<0.5 g/L	95~99
硫酸盐(SO ₄ ²⁻)	500~2000 mg/L	<20 mg/L	96~99
氟化物(F ⁻)	1.5~3.0 mg/L	<1.0 mg/L	33~67

新疆每年减少塔里木河盐污染输入 1.54×10⁶ t,

土壤盐含量年均降低0.1%~0.2%。淡化水可创造农业产值超1亿元/a,盐资源销售收入覆盖部分运营成本。

3 结论

盐碱地治理中含盐排水在农业领域的科学研究与实践探索,主要依托离子交换沉淀、蒸发结晶、膜分离等工艺对含盐排水开展脱盐处理并构建“排水-处理-回用”循环体系,可同步实现土壤降盐改良与水资源节约,各地实践已验证其双重效益,实际应用需结合区域水土、自然及经济条件单施或联用适配工艺以获取最优治理成效。农业灌溉中反排水的处理往往是综合运用多种方法,结合当地区域特色,利用太阳能处理含盐排水,降低成本,显著降低水体中盐分浓度指标,除硬效果明显,水资源的循环利用由此得以实现。未来发展方向上,重点推进智能化改进,最终达到水资源利用率显著提高,生态环境质量持续向好,为全球盐碱地治理与农业可持续发展提供中国方案^[24]。

参考文献

- [1] Feng Q, Yin X, Zhu M, *et al.* Overall promotion of integrated management and utilization of saline-alkali land in Northwest China: conditions, challenges, and recommendations [J]. *Bulletin of the Chinese Academy of Sciences*, 2024, 39(12): 2060–2073.
- [2] Suvendran S, Johnson D, Acevedo M, *et al.* Effect of irrigation water quality and soil compost treatment on salinity management to improve soil health and plant yield [J]. *Water*, 2023, 16(10): 146287.
- [3] Li Z, Kekeli M A, Jiang Y, *et al.* Progress and prospect of saline-alkaline soil management technology: A review [J]. *Applied Sciences*, 2025, 15(8): 4567.
- [4] Elmenshawy M R, Shalaby S M M, Armanuos A, *et al.* Assessing RO and NF desalination technologies for Irrigation-Grade water [J]. *Processes*, 2024, 12(9): 1866.
- [5] Zhu J, Jin Q, Dongming L. Investigation on two integrated membrane systems for the reuse of electroplating wastewater [J]. *Water and Environment Journal*, 2017, 32(2): 267–275.
- [6] Lansman M R, Lawler F, Katz L E. Application of electrodialysis pretreatment to enhance boron removal and reduce fouling during desalination by nanofiltration/reverse osmosis [J]. *Desalination*, 2020, 491: 114563.
- [7] Ismail S M, Kassem A S, El-Saadawy M A, *et al.* RO desalination system for irrigation purposes: I. Modeling and optimization [C]. The 20th Annual Conference of Misr Soc of Ag Eng Alexandria, Egypt, 2015: 193–216.
- [8] Ohshita J, Horata K, Kaneko T, *et al.* Preparation of polysilsesquioxane-based RO membranes with Urea Units for water desalination [J]. *Membranes*, 2025, 15(10): 322.
- [9] Carpanez T G, de Lima Silva N C L, Amaral M C S, *et al.* Reuse of wastewater and biosolids in soil conditioning: potentialities, contamination, technologies for wastewater pre-treatment and opportunities for land restoration [J]. *Chemosphere*, 2025, 373: 144185.
- [10] Yan F, Wang Z, Wang M. Novel poly (ester amide) nanofiltration membranes fabricated utilizing 4-hydroxypiperidine as a co-reactive monomer for monovalent/divalent anionic salt separation [J]. *Journal of Membrane Science*, 2025, 734: 124430.
- [11] 艾恒雨, 梁洪博, 刘乾亮, 等. 超疏水蒸馏膜的功能改性研究进展 [J]. *材料导报*, 2024, 38(10): 259–267.
- [12] 姜新, 马全, 王文, 等. F-SiO₂/CNTs-PVDF 超疏水膜的制备及其膜蒸馏性能研究 [J]. *无机盐工业*, 2026, 58(5): 19–27.
- [13] Tahmid M, Joo Choi H, Ganapavarapu S T, *et al.* Concentrating nitrogen waste with electrodialysis for fertilizer production [J]. *Environmental Science & Technology Letters*, 2024, 11(12): 1413–1419.
- [14] Ji X, Jiang H, Huo Z, *et al.* Electrodialysis coupled with nano-activated carbon (ED-NAC): A promising technology for the removal of trace pollutants in saline-alkaline waters [J]. *Frontiers in Environmental Science*, 2024, 12: 1507095.
- [15] Suhag S, Kumar P, Mandal J R, *et al.* Functionalized graphene oxide-modified sulfonated poly (2,6-dimethyl-1,4-phenylene oxide) based thermal-resistance anti-fouling bi-functional cation exchange membrane for electrodialytic desalination [J]. *Desalination*, 2024, 578: 117454.
- [16] Chen L, Deemer E M, Li X J, *et al.* Sulfonated polyethersulfone membranes for brackish water desalination: Fabrication, characterization, and electrodialysis performance evaluation [J]. *Applied Sciences*, 2024, 15(1): 216.
- [17] Hou C, Yang L, Lin X, *et al.* Characteristics research on application of mechanical vapor recompression (MVR) technology in evaporation and crystallization of high salinity wastewater [J]. *Modern Chemical Industry*, 2022, 42(6): 211.
- [18] 胡子艳, 张林江, 白波, 等. PDA@PPHF 太阳能驱动界面蒸发性能及水质净化研究 [J]. *现代化工*, 2022, 42(3): 149–153, 158.
- [19] Ali E. Multi-Effect evaporation desalination powered by vapor absorption refrigeration using solar energy [J]. *Chemical Engineering & Technology*, 2025, 48(9): e70103.
- [20] 吴欣森, 杨晔, 张杨, 等. 离子交换树脂脱除高盐废水中 Ca²⁺ 的特性研究 [J]. *中国胶粘剂*, 2023, 32(1): 39–43, 54.
- [21] Hejase C A, Weitzel K A, Stokes S C, *et al.* Opportunities for Treatment and Reuse of Agricultural Drainage in the United States [J]. *ACS ES&T Engineering*, 2021, 2(3): 292–305.
- [22] Cohen Y, Mccool B, Rahardianto A, *et al.* Membrane desalination of agricultural drainage water [M]. *California: Salinity and Drainage in San Joaquin Valley*, 2013: 303–341.
- [23] Fang S, Tu W, Mu L, *et al.* Saline alkali water desalination project in Southern Xinjiang of China: A review of desalination planning, desalination schemes and economic analysis [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2019, 113: 109268.
- [24] Zhou X, Zhao X, Zhang Q, *et al.* Major ion chemistry of waters and possible controls under winter irrigation in the saline land of arid regions [J]. *Water*, 2023, 15(22): 3968. ■