

汪剑, 王晨, 王彦智, 等. 海水淡化系统除硼技术的研究现状与展望[J]. 净水技术, 2026, 45(2): 12-21.

Wang J, Wang C, Wang Y Z, et al. Research progress and prospect of boron removal technology for seawater desalination system [J]. Water Purification Technology, 2026, 45(2): 12-21.

海水淡化系统除硼技术的研究现状与展望

汪 剑^{1,3}, 王 晨², 王彦智², 刘思洁², 史建超^{2,*}, 孙贤鹏^{1,3}, 刘旭阳⁴

(1. 青岛市排水运营服务中心, 山东青岛 266000; 2. 烟台大学土木工程学院, 山东烟台 264006; 3. 青岛市海润自来水集团有限公司, 山东青岛 266000; 4. 青岛百发海水淡化有限公司, 山东青岛 266000)

摘要 【目的】随着全球淡水资源日益匮乏, 海水淡化技术的重要性愈发凸显。然而, 海水中较高浓度的硼元素给淡化过程带来挑战。研究表明: 过量硼摄入会对人体健康产生毒性效应, 并破坏生态系统平衡。而反渗透作为主流工艺, 其单级脱硼效果不理想, 需探究合适的方法和参数来达到更高效的脱硼效果。本文系统评述海水除硼技术的研究现状与发展趋势, 旨在为海水资源的高效利用提供理论依据和技术参考。【方法】本文首先介绍了硼的基本性质及其在海水中的存在形式和对动植物的影响; 继而重点评述了当前海水除硼的主流技术, 包括反渗透技术、离子交换树脂法、电渗析技术和吸附法等, 从作用机理、技术特点和研究进展 3 个维度进行系统比较分析。【结果】反渗透技术虽然已被广泛应用于海水淡化, 但其脱硼效果高度依赖溶液 pH 且需多级处理能耗较高。离子交换树脂法能有效降低硼浓度, 但存在树脂再生困难及成本较高等问题。电渗析技术具有出水水质稳定、操作简便等优点, 但高能耗限制其推广应用。吸附法应用广泛, 传统吸附剂对硼吸附能力有限, 而新型有机-无机杂化吸附材料显示出良好的吸附性能, 当前的研究重点在优化基体材料选择和杂化方法来提高吸附官能团负载量。【结论】综合分析表明: 基于活性炭等传统吸附剂开发的新型有机-无机杂化吸附材料具有显著优势, 不仅保留了基体材料成本低廉、比表面积大的特点, 通过功能化改性更能实现选择性吸附能力和吸附容量的提升。本技术路线在海水除硼领域展现出广阔的应用前景, 是未来研究的重要方向。

关键词 除硼 分离 海水淡化 发展趋势 技术

中图分类号: P747 文献标志码: A 文章编号: 1009-0177(2026)02-0012-10

DOI: 10.15890/j.cnki.jsjs.2026.02.002

Research Progress and Prospect of Boron Removal Technology for Seawater Desalination System

Wang Jian^{1,3}, Wang Chen², Wang Yanzhi², Liu Sijie², Shi Jianchao^{2,*}, Sun Xianpeng^{1,3}, Liu Xuyang⁴

(1. Qingdao Drainage Operation Service Centre, Qingdao 266000, China;

2. School of Civil Engineering, Yantai University, Yantai 264006, China;

3. Qingdao Hairun Water Supply Group Co., Ltd., Qingdao 266000, China;

4. Qingdao Baifa Desalination Co., Ltd., Qingdao 266000, China)

Abstract [Objective] With the increasing scarcity of freshwater resources worldwide, the importance of seawater desalination technology has become more and more prominent. However, yet the higher concentration of boron in seawater poses a challenge in the desalination process. Studies have shown that excessive boron intake can have toxic effects on human health and disrupt the ecosystem balance. While reverse osmosis remains the predominant technology for seawater desalination, conventional single-stage reverse osmosis systems demonstrates suboptimal performance in boron removal. To achieve more efficient boron elimination, it is imperative to systematically investigate appropriate methodologies and optimize operational parameters. This paper systematically reviews the research status and development trend of seawater boron removal technology, aiming to provide theoretical basis and technical reference

[收稿日期] 2025-04-29

[基金项目] 中央引导地方科技发展资金项目(YDZX2024025)

[作者简介] 汪剑(1977—), 男, 高级工程师, 主要从事供排水处理、运营维护管理等工作, E-mail: wujian3388@126.com。

[通信作者] 史建超(1987—), 副教授, 研究方向为特殊水质原水处理技术与装备研发, E-mail: shijianchao@ytu.edu.cn。

for the efficient utilization of seawater resources. [**Methods**] This paper firstly introduces the basic properties of boron, its existence in seawater and its effects on plants and animals. Then, it focuses on the current mainstream technologies for boron removal from seawater, including reverse osmosis technology, ion exchange resin method, electrodialysis technology and adsorption method, etc., and carries out a systematic comparative analysis of the three dimensions of action mechanism, technical characteristics and research progress. [**Results**] Although reverse osmosis technology has been widely used in seawater desalination, its boron removal effect is highly dependent on the pH of the solution and requires multi-stage treatment with high energy consumption. Ion exchange resin method can effectively reduce the boron concentration, but there are difficulties in resin regeneration and higher costs. Electrodialysis technology has the advantages of stable effluent quality and easy operation, but the high energy consumption limits its popularization and application. Adsorption method is widely used, the traditional adsorbent boron adsorption capacity is limited, while the new organic-inorganic hybrid adsorbent material shows good adsorption performance, the current research focuses on the optimization of matrix material selection and hybridization method to improve the adsorption functional group loading. [**Conclusion**] The comprehensive analysis shows that the new organic-inorganic hybrid adsorbent materials developed based on traditional adsorbents, such as activated carbon, have significant advantages; they not only retain the characteristics of low cost and large specific surface area of the matrix materials, but also achieve the enhancement of selective adsorption capacity and adsorption capacity through functionalization modification. This technology route shows a broad application prospect in the field of boron removal from seawater and is an important direction for future research.

Keywords boron removal separation seawater desalination development trend technology

人口增长、气候变化、工农业及城市化进程加剧了清洁水需求,导致淡水资源短缺成为可持续发展的严峻挑战^[1]。全球 97% 的水资源存在于海洋、内陆海和地下咸水中,无法直接饮用,可饮用水资源仅占 2% 左右^[2],其中仅有 0.01% 的淡水资源可被人类直接利用,资源极其有限^[3]。传统水源已无法满足缺水地区的人类需求,寻找替代水源,特别是从海洋获取水资源,成为当务之急。

海水淡化已经成为许多国家解决用水紧缺的一种方式。尽管地球表面约 71% 的面积被海洋覆盖,但将这部分“蓝色资源”转化为可用淡水,仍面临诸多技术挑战,其中深度除硼问题尤为突出^[4]。为了进一步了解国内在该领域的研究热点,利用

CiteSpace 对中国知网(CNKI)数据库 1995 年—2024 年 153 篇和 Web of Science(WOS)数据库 2010 年—2025 年 171 篇“海水淡化脱硼”方向的文献进行关键词共现分析。由图 1 可知,“脱硼”“海水淡化”“反渗透(RO)”“吸附”“离子交换”“树脂”“水处理”等关键词之间关联紧密,结果一定程度上反映了海水淡化脱硼研究聚焦的领域,剔除脱硼、海水淡化主题词,RO、吸附、离子交换基本都代表着一类海水淡化脱硼的方法。在现有技术中,RO 处于领先地位。在过去的几十年里,RO 技术在海水淡化市场取得了巨大成功,因为与传统的热法海水淡化技术相比,它更加节能。目前,全球约 70% 的海水淡化装机容量由 RO 技术提供。然而,普遍使用的 RO

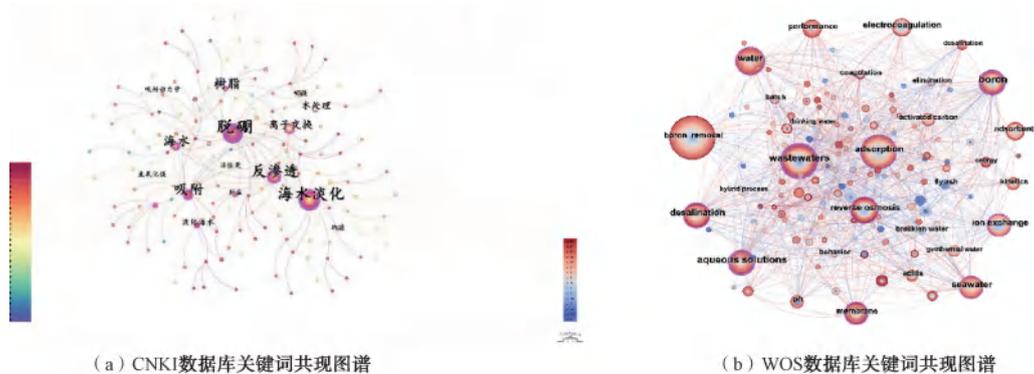


图 1 数据库关键词共现图谱
Fig. 1 Keywords Co-Occurrence Map of Database

膜存在一些瓶颈,一个主要挑战是对中小分子溶质(如硼)的低截留率^[5]。当前单级海水反渗透(SWRO)膜能够将渗透液中的硼质量浓度降低到0.9~1.8 mg/L,通常需要二级处理将硼浓度降低至满足饮用水质量要求的水平,十分耗能^[6]。因此,在实际应用中选择合适的去除方法和参数对高效地从海水中去除硼至关重要。

综上所述,随着水资源短缺问题的加剧及人们对硼毒性重视程度的提高,海水中硼的去除逐渐成为研究的热点之一。本文综述了海水除硼方法的优缺点及其应用现状,并探讨了海水淡化除硼技术的发展趋势,旨在为新型除硼方法的研发提供参考。

1 硼的概述

硼是自然界中广泛存在的微量元素,在水溶液中,硼通常以硼酸和各种硼酸盐的形式存在,这取决于溶液的 pH 和硼的浓度。海水中硼的初始质量浓度通常在 0.5~9.6 mg/L,平均质量浓度约 4.5 mg/L^[7]。硼酸是一种弱酸,酸解离常数(K_a)的负对数(pK_a)=9.2,在较低 pH 下,以中性硼酸为主,在较高 pH 下,单硼酸根离子占优势^[8],如图 2 所示。硼对地球上的生命体有着重要的作用。对植物而言,硼不仅影响植物的生殖生长,还参与碳水化合物的合成、代谢和运输^[9]。对人类和动物而言,硼在胚胎发育、骨骼形成与矿化、免疫调节、能量代谢以及酶活性促进等方面具有重要影响^[10]。此外,硼也是各种工业领域的重要材料。尽管硼对生物体的重要性不容忽视,但其在体内浓度必须维持在一个非常狭窄的范围内。缺硼与硼中毒之间的浓度范围很窄,二者均会对各种农作物产量造成不利影响。通常来说,水溶性硼质量浓度低于 0.5 mg/L 的土壤被

认为缺硼,而仅需几毫克每升就可能引发硼毒害^[9]。目前,各国对水中硼含量的规定是存在差异,大多数国家并未完全采纳世界卫生组织的建议。我国于 2022 年发布的《生活饮用水卫生标准》(GB 5749—2022)^[11],在硼的限值方面做出重要的调整。由 2006 年版标准^[12]的 0.5 mg/L,调整至 1.0 mg/L^[11],这一调整是基于健康风险评估与技术可行性的平衡。在保障国民健康的同时,推动高效、低成本除硼技术的开发与应用,也是本研究的重要意义所在。

2 海水除硼技术原理及应用

2.1 RO 技术

RO 是一种应用广泛的海水淡化技术,在海水淡化中,RO 对盐的去除率达到 99%,几乎可去除所有的污染离子和溶解的非离子物质。然而,RO 对硼酸的去除效果却较为有限。早在 1969 年,科学界便对 RO 膜对硼排斥性能进行了首次研究,当时 RO 技术尚处于初级阶段,最早的 RO 膜材料对硼的去除率仅约 50%^[13]。

RO 膜对硼的排斥能力与溶液 pH 密切相关。在典型的海水 pH 值(7~8)中,硼主要以硼酸的形式存在。由于硼酸具有中性电荷和较小的水合半径,使用膜技术难以去除^[14]。随着 pH 升高,硼酸呈指数减少并转化为硼酸根离子,后者具有更大的水合半径和负电荷。因此,在带负电荷的膜表面上可通过尺寸排阻和电荷排斥作用实现更高的去除率^[6]。

提高碱度有助于提高硼的去除率,但同时也会导致二价钙离子(Ca^{2+})、二价镁离子(Mg^{2+})等离子的沉淀,从而加剧膜结垢现象。膜结垢不仅降低产水量,还增加能耗,并可能进一步影响硼的去除效果。此外,硼的去除率不仅受到酸碱平衡的影响,还与系统的总体水回收率密切相关,过程机制较为复杂^[5]。Ben 结合不可逆热力学理论和溶液-扩散理论,考虑了溶质浓差极化现象,建立了一种新的 RO 运输模型,研究了 RO 工艺在各种操作条件下的性能并对其进行了优化。结果发现,在高 pH 流速以及施加较大进料压力下,硼通过膜的对流传输非常显著,其对总硼通量的贡献可以达到 20% 以上^[15]。还有不少研究者采用膜改性的方法来提高 RO 膜对硼的去除能力,如表 1^[5,16-20]所示。Li 等^[16]通过在

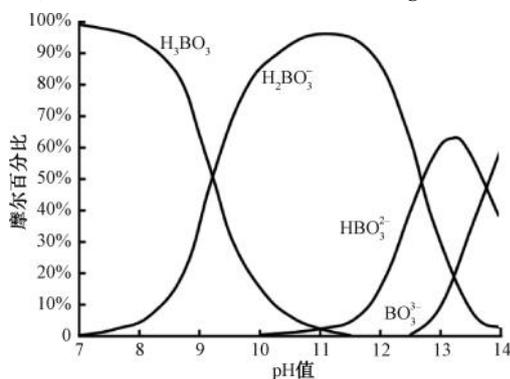


图 2 硼酸在水溶液中不同 pH 值下电离状态

Fig. 2 Ionization States of Boric Acid in Aqueous Solution at Different pH Values

聚酰胺(PA)网络中嵌入磺酰分子,设计了一种高脱硼 RO 膜,在模拟海水条件下,改性 RO 膜的硼截留

率从 82.12% 提高到 93.10%,脱盐率提高到 99.57%。

表 1 用于除硼的 RO 膜的性能^[5,16-20]
Tab. 1 Properties of RO Membranes for Boron Removal^[5,16-20]

薄膜型	原水硼/(mg·L ⁻¹)	水样	去除率	参考文献
COF-TPTG 单层膜	2 000	合成海水	64.20%	[5]
改性 RO 膜	5	合成海水	93.10%	[16]
TFC-PEI-ABA 膜	5	合成海水	90.45%	[17]
FilmTec™ SW30-2540	4.7	海水	76.60%	[18]
β-CD@TA-LDH TFN	15	合成微咸水	80.2%	[19]
LE 膜	500	模拟放射性废水	46.58%	[20]

2.2 离子交换树脂法

早在 20 世纪 70 年代,为了去除陶瓷工业中镁卤水中的硼酸盐,脱硼专用离子交换树脂技术便被开发出来^[21]。由于其优异的脱硼性能,该技术逐渐引起了研究者的广泛关注。其基本原理是利用离子交换树脂的多羟基结构与硼发生交换反应,形成各种硼酸酯,从而实现对硼的迅速高效去除,如图 3^[22]所示。



图 3 树脂吸附硼过程^[22]

Fig. 3 Process of Boron Adsorption by Resin^[22]

目前,已商业化应用的硼选择性离子交换树脂主要为含 N-甲基-D-葡萄糖胺(NMDG)官能团的螯合树脂,如 Amberlite IRA 726、Dowex 50WX8、XSC-700 等。NMDG 官能团上含有一个仲胺基(—NH—)和 5 个相邻羟基(图 4),可通过仲氨基接枝到聚合物骨架上。仲胺基 N 上的孤对电子赋予其较高的电子云密度,易发生亲核取代反应,从而增强

树脂对硼酸的螯合作用^[23]。此外,接枝生成的叔胺基在硼酸盐与羟基官能团络合过程中可起质子中和剂的作用,进一步增强了螯合效果。

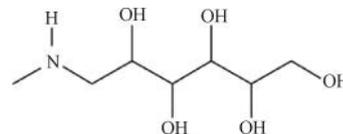


图 4 NMDG 的结构

Fig. 4 Structure of NMDG

树脂的除硼效率与接触时间、硼的初始浓度、溶液 pH 和温度等因素有关^[24]。郭利等^[25]研究了带有季铵基的 D201 树脂对硼的处理能力和影响因素,结果表明:当 pH 值为 10,接触时间为 150 min 时,树脂对硼的最大去除量为 59.6 mg/g。Sançiçek 等^[26]使用硼选择性树脂填充电去离子(EDI)从水溶液中去除硼,发现施加的电位和进料流速对硼去除有显著影响,溶液中硼质量浓度由 5 mg/L 降至 0.3 mg/L,脱硼率高达 94%。几种脱硼树脂的吸附性能对比如表 2^[27-30]所示。

表 2 几种脱硼树脂的吸附性能
Tab. 2 Adsorption Properties of Several Deboronation Resins

吸附材料名称	初始质量浓度/(mg·L ⁻¹)	去除率	吸附能力/(mg·g ⁻¹)	等温吸附模型	参考文献
新型离子交换螯合树脂	25	—	8.91	Langmuir 模型	[27]
PS-CH ₂ Cl	1 000	—	39.4	Langmuir 模型	[28]
DIAION™ CRB05	1 115	98%	—	Temkin 模型	[29]
PAF-1-NMDG	80	—	9.54	Langmuir 模型	[30]

2.3 电渗析(ED)法

ED 是一种电驱动膜分离的技术,可以高效地除去水体中的离子,已被用于处理多种废水,如工业

废水、城市废水、海水处理厂和养殖废水等。这种方法具有高效、强选择性和无化学处理等优点^[31]。ED 作用过程受到电压、膜性能、溶液初始浓度以及

pH 的影响^[32]。Han 等^[33]研究了在不同硼浓度、溶液 pH、盐度和电流下硼通过离子交换膜(IEMs)的转移,结果发现:在 pH 值为 6.1~10.8,硼迁移随 pH 的降低而单调增加;当氯化钠(NaCl)质量浓度在 10~35 g/L 时,对硼酸(即 pH 值=6.1 时)通量的影响可以忽略不计,在 ED 中观察到 RO 膜比 IEMs 具有更高的硼渗透率。

ED 工艺的首次商业化尝试是 EDI 工艺,即在 ED 稀释液室内加入离子交换树脂床,主要用于超纯水的生产和低电导率介质的脱盐处理。ED 工艺的另一个改进是双极膜 ED,这是纯电膜分离过程和膜电解之间的过渡状态^[34]。与传统的 ED 系统相比,双极膜 ED 系统更高效,并且在水分解的过程中不产生氧气(O₂)和氢气(H₂)。因此在实际应用中也越来越普遍^[35]。

Noguchi 等^[36]开发了双极膜 ED,使溶液循环通过单元,即去除和浓缩单元,进行半间歇式操作,使浓缩物中的硼浓度达到接近硼酸的溶解度,实现硼的回收与再循环。Hung 等^[37]探索了在双极膜 ED 工艺过程中 pH、初始硼浓度和电流密度对去除和回收硼的影响。当溶液 pH 值控制在 9.5~10.5,电流密度为 6.36 A/m²,最大允许电压为 12 V 时,硼的去除率和回收率分别为 98.6%和 86.5%。

总体来看,ED 及其衍生技术在脱盐和硼去除方面展现出巨大的潜力,但其推广应用仍面临能耗较高、膜性能不稳等挑战。工艺参数的优化、能耗和成本的分析以及选择性 IEMs 的设计是未来发展的重要方面。

2.4 吸附法

吸附法将硼从水中转移到吸附剂表面,常用的吸附剂包括活性炭、粉煤灰、天然矿物、层状双金属氢氧化物(LDHs)、生物质材料及各类氧化物等。硼的吸附过程通常可以分为物理吸附和化学吸附 2 种机制:物理吸附主要依赖范德华力等物理引力;而化学吸附则通过吸附剂表面螯合基团与硼酸之间的特异性结合力实现^[38]。

2.4.1 物理吸附

活性炭具有大比表面积和发达的孔隙,被广泛应用于工业和环境领域。然而,活性炭对硼的表面活性基团较少,导致其吸附选择性较低。Melliti 等^[39]采用棕榈树皮制备颗粒活性炭,通过傅里叶变换红外光谱、BET 比表面积分析、元素分析、拉曼散

射光谱、表面零电荷点 pH、X 射线衍射等技术表征了活性炭的化学结构、孔结构等特性,试验数据更符合 Langmuir 模型和 Sips 模型,最大吸附容量为 2.377 mg/g。

天然硼吸附剂是以自然界中直接存在的物质作为吸附剂去吸附硼,主要包括天然矿物和植物材料。Haddabi 等^[40]探索了用椰枣籽灰作为脱硼吸附剂的可行性,发现椰枣籽灰在中性 pH 下效果良好,温度和反应时间对吸附过程的影响较小。Kluczka 等^[41]以粉煤灰为原料合成新型粉煤灰沸石(FAZ),并研究了 FAZ 对硼的吸附行为,结果表明:吸附效果依赖于溶液的 pH,当 pH 值为 7,吸附时间为 0.5 h,吸附剂用量为 20 g/L 时,吸附率为 93%。此类天然产物虽然有助于资源化利用,但吸附效果欠佳,并且回收困难,经济效益和实用性较差。

2.4.2 化学吸附

化学吸附通常吸附强度较大,吸附效果较好,并且对物质的选择性较好,在实际除硼过程中,化学吸附占主导地位^[24]。吸附剂如 LDHs、介孔硅、沸石、磁性纳米颗粒用于硼的去除,已成为研究的热点。这些吸附剂拥有巨大的表面积、稳定的结构和惰性的骨架,有机官能团可以轻易地连接在其表面,使其对硼具有较高的选择性。

LDHs 是唯一表现出阴离子交换特性的天然黏土矿物,其储量丰富,易于在工业规模上合成,价格低廉,在高温(500~600 ℃)和高 pH 条件下稳定^[39]。Meng 等^[42]以碳量子点(CQD)为结构导向剂合成了 3D 多孔 CQDs/LDHs,用于吸附水溶液中的硼,结果表明:当初始硼质量浓度为 20 mg/L, pH 值为 8.5 时,CQDs/LDHs 的最大吸附量为 19.5 mg/g。在竞争吸附体系中,CQDs/LDHs 对硼(Ⅲ)的去除率可达 89.7%,是原 LDHs 的 3 倍。Zhao 等^[43]以单宁酸(TA)为结合剂,NMDG 对 LDHs 的表面进行了改性,通过优化改性 LDHs 纳米填料的负载,所得薄膜纳米(TFN)复合材料膜的透水性提高了,同时保持 99.4% 的高脱盐率。此外,当使用含有 2 000 mg/L NaCl 和 15 mg/L 硼(pH 值为 8)的进料时,这种新开发的 TFN 膜可提供 78.6% 的硼去除率^[43]。

Hu 等^[44]以氧化石墨烯为模板制备氧化石墨烯/金属有机框架材料(GO/ZIF-67),在 25 ℃ 时对

硼的吸附容量高达 66.65 mg/g, 吸附过程在 400 min 达到平衡状态。Wu 等^[45]将 NMDG 接枝到壳聚糖表面以去除硼元素, 合成的吸附剂最大吸附容量为

20.36 mg/g, 并且经过 5 次吸附-脱附循环后, 其吸附量没有明显下降。新型无机吸附剂的硼吸附性能如表 3^[42, 46-49]所示。

表 3 新型无机吸附剂的硼吸附性能

Tab. 3 Boron Adsorption Properties of Novel Inorganic Adsorbents

吸附剂	改性方法	模式	等温模型	吸附量/(mg · g ⁻¹)	去除率	参考文献
LDHs	CQD	批量	Langmuir 模型	19.5	89.7%	[42]
焙烧层状氢氧化镁铝	煅烧	批量	Langmuir 模型	22.1	99%	[46]
LDHs	没食子酸	批量	Langmuir 模型	10	—	[47]
珍珠岩	没食子酸	批量	Freundlich 模型	2 500	60%	[48]
磁性孢粉素	NMDG	批量	Langmuir 模型	—	84%	[49]

3 技术和经济比较

从海水中去除硼是一项复杂且具有挑战性的工作。根据溶液中硼的浓度, 需要采用一种或多种除

硼方法^[50]。目前, 已经对除硼技术进行了大量的研究, 如表 4 所示。

表 4 脱硼技术的比较

Tab. 4 Comparison of Boron Removal Technologies

方法	优点	缺点
RO 技术	形式单一、操作简便、管理方便、运行可靠, 去除率高、选择性高; 不需要额外的化学品	对操作条件如 pH、操作压力等有明显的依赖性; 高能耗; 膜易结垢和污染; 运营和维护成本高; 会产生浓缩水
离子交换树脂法	有效去除污染水中的低含量硼; 选择性高; 可通过灵活设计得到不同的水质	会形成二次废物; 再生和处理成本高; 易产生污垢, 价格昂贵
ED 法	组件设计方式简单, 便于操作维护; 耐久度高; 不需要消耗化学药品	能耗较高, 膜性能不稳定, 主要用于含硼量较低溶液, 海水对设备腐蚀严重等
吸附法	硼去除效率高; 易于操作和维护; 对小规模操作有效; 维护成本低	需要定期吸附再生; 需要高温和特定的 pH; 将污染物从水性介质转移到另一种介质中; 难以回收

RO 脱硼技术在海水淡化中已经得到部分利用, 其对溶液 pH 高度依赖^[51]。另外, 膜改性和工艺参数调整也是当前提高硼去除效果的重点研究方法。在过去的几十年里, 大中型海水 RO 装置的比能耗显著降低, 目前在 2.5~7.0 kW · h/m³^[52]。离子交换树脂法对于低硼浓度的溶液是有效的, 且污染更少^[53]。但树脂经多次使用后其活性下降, 硼的去除率逐渐降低^[2]。离子交换树脂法成本主要包括树脂采购(如树脂 Lewatit M600 市场价格约 340 美元/t)、再生化学品(氢氧化钠/盐酸)及废液处理费用。其中, 树脂再生环节的能耗费用占比极小, 但化学药剂消耗费用占总成本的 40%~60%, 长期运行经济性受树脂寿命和再生成本制约^[54]。虽然现阶段 ED 并不是主流脱硼技术, 但是其除硼效果非常可观的。ED 设备从组装到实际运用的中间时间极短, 装置运行稳定, 出水水质波动小。能耗较高仍是其主要劣势, 当溶液内硼离子的浓度过大, 或者浓、

淡室中的浓度差变大时, 都会使运行的耗电量增大, 进而提高运行成本^[55]。Sun 等^[56]研究使用双极膜 ED 系统从含有 1 000 mg/L Na₂B₄O₇ · 10H₂O 的溶液中回收硼, 在 3 h 的操作下, 电流效率为 94.9%, 分离效率为 76.6%, 能耗为 26.16 kW · h/kg。

吸附法则是应用最广泛的除硼方法之一, 所用吸附剂种类繁多。活性炭、粉煤灰和矿物等传统吸附剂对硼的吸附能力较低, 硼很难在这些吸附剂表面形成络合^[57]。受到其低选择性和低容量的限制, 需要大量的吸附剂才能达到所需的去除效率。一些研究者利用改性的新型无机材料对硼进行吸附, 将含活性炭、水滑石等其他无机材料作为基体, 硼选择性有机官能团在其表面接枝形成新型有机-无机杂化介孔吸附剂。胡俊威^[58]通过 NMDG 改性活性炭制备了 NMDG-C, 在 2.5 mg/L 的含硼溶液中进行吸附测试, 结果表明: 使用改性后的活性炭吸附饱和和吸附量约 0.018 8 mmol/g。有机-无机杂化硼吸附材

料机械性能优良,其难点在于寻找合适的基体材料和杂化方法来提高吸附官能团负载量,一旦克服吸附量偏低的问题,有机-无机杂化材料有望成为海水淡化工业中硼资源开发的主导材料^[23]。

在海水淡化脱硼研究领域,除主流工艺外,近年来还涌现出多种创新性技术。其中,电絮凝(EC)技术是一种高效的电学水处理技术,Najid等^[59]对合成海水中的硼进行研究,考察了电流密度、电解时间、初始pH、初始硼浓度、电极间隙等操作因素对除硼效果的影响,结果表明:在最佳条件(电流密度为16.67 A/m²,电解时间为90 min,

初始pH值为8)下,硼质量浓度为5 mg/L,去除率超过60%。在此工况下,EC系统以去除合成水和海水中的硼生产1 m³水时,分别消耗电量2.85 kW·h和3.6 kW·h。此外,正渗透(FO)作为一项新兴的膜技术,因其在学术界和工业界的广泛应用而备受关注。王子玉^[60]通过缺陷工程设计的锆基金属有机框架(Zr-fum-MOF)膜在FO技术中用于脱硼的性能优化及机理探索,实现了中性条件下近乎完全的硼截留率,优于大多数传统FO膜和RO膜。

硼吸附剂的优缺点如表5^[23,61-63]所示。

表5 硼吸附剂的优缺点

Tab. 5 Advantages and Disadvantages of Boron Adsorbents

吸附剂	优点	缺点	参考文献
天然硼吸附剂	来源广泛、价格低廉,从环境保护角度实现了资源化	硼吸附容量不高,并且回收困难,经济效益和实用性较差	[61]
LDHs	易于在工业规模上合成,价格低廉,具有良好的热稳定性和记忆效应	在处理含有有机物和复杂离子体系的废水时,LDHs的性能可能会受到影响,吸附容量降低	[62]
氧化物和氢氧化物	成本低廉、适用性广、来源广泛	吸附效果较差,且吸附过程中碱金属离子会干扰硼酸的分离	[23]
金属有机框架	良好的吸附性能,且在多次循环利用中吸附性能仍能保持良好	较高的成本使其应用范围小	[63]
有机-无机杂化吸附材料	机械性能较好,循环使用周期长,且具有较强的耐酸碱性能和耐水性能,同时具有良好的吸附性能	难点在于寻找合适的基体材料和杂化方法	[23]

4 结论

本文从发展、原理、特性等方面综述了除硼技术近年来的研究进展。近年来,除硼技术在海水淡化领域取得了显著的进步。目前,除硼技术的总体趋势如下。

(1)RO膜技术已被广泛应用于海水淡化除硼等领域,其主要问题是单级RO脱硼效率不高,需要多级RO系统才能将硼浓度降低到规定标准,大大增加了成本。因此,建议将RO技术与其他工艺相结合,并继续研发低成本且高硼排斥能力的RO膜。

(2)离子交换树脂法通常接枝了大量的多羟基官能团,具有较高的选择性,几乎能去除水中所有的硼,但其再生流程复杂,适用于水量不大、脱硼要求高的超纯水制备。

(3)尽管ED技术在除硼方面表现出良好效果,但其高能耗和膜性能的不稳定性仍然是制约其大规模应用的关键因素。因此,未来的研究应着重于优

化工艺参数、降低能耗,并提升选择性IEMs的性能,以提高ED法的经济性和稳定性。

(4)传统吸附剂如活性炭虽然因其低廉的成本、易获取性及巨大的比表面积而在水处理领域得到广泛应用,但其对硼的吸附容量较低且选择性较差,限制了其在含硼水处理中的实际应用。然而,这些材料作为基体具有显著的优势,通过对其进行有机-无机杂化改性,有望开发出具有高选择性和高吸附容量的新型硼吸附材料。

参考文献

- [1] Van Vliet M T H, Jones E R, Flörke M, et al. Global water scarcity including surface water quality and expansions of clean water technologies [J]. Environmental Research Letters, 2021, 16(2): 024020.
- [2] 赵同国. 渐进冷冻-融化法除硼及海水淡化的研究[D]. 烟台:烟台大学, 2022.
Zhao T G. Progressive freezing-thawing method for boron removal

- and seawater desalination[D]. Yantai: Yantai University, 2022.
- [3] 付梦晓. 基于冷冻过程的复合脱盐实验研究[D]. 北京: 北京建筑大学, 2020.
Fu M X. Experimental study on combined desalination process based on freezing method [D]. Beijing: Beijing University of Civil Engineering and Architecture, 2020.
- [4] Jones E, Qadir M, Van Vliet M T H, et al. The state of desalination and brine production: A global outlook [J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 657: 1343 – 1356. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2018.12.076.
- [5] Zhang X, Wei M J, Zhang Z, et al. Boron removal by water molecules inside covalent organic framework (COF) multilayers [J]. *Desalination*, 2022, 526: 115548. DOI: 10.1016/j.desal.2022.115548.
- [6] Mehanathan S, Jaafar J, Nasir A M, et al. Adsorptive membrane for boron removal: Challenges and future prospects [J]. *Membranes*, 2022, 12(8): 798.
- [7] Kim K C, Kim N I, Jiang T, et al. Boron recovery from salt lake brine, seawater, and wastewater—A review [J]. *Hydrometallurgy*, 2023, 218: 106062. DOI: 10.1016/j.hydromet.2023.106062.
- [8] Akdağ S, Keyikoğlu R, Karagunduz A, et al. Recent advances in boron species removal and recovery using layered double hydroxides [J]. *Applied Clay Science*, 2023, 233: 106814. DOI: 10.1016/j.clay.2023.106814.
- [9] Brdar-Jokanović M. Boron toxicity and deficiency in agricultural plants [J]. *International Journal of Molecular Sciences*, 2020, 21(4): 1424.
- [10] Abdelnour S A, El-Hack M E A, Swelum A A, et al. The vital roles of boron in animal health and production: A comprehensive review [J]. *Journal of Trace Elements in Medicine and Biology*, 2018, 50: 296–304. DOI: 10.1016/j.jtemb.2018.07.018.
- [11] GB 5749—2022 生活饮用水卫生标准[S].
GB 5749—2022 Standards for drinking water quality[S].
- [12] GB 5749—2006 生活饮用水卫生标准[S].
GB 5749—2006 Standards for drinking water quality[S].
- [13] Tu K L, Nghiem L D, Chivas A R. Boron removal by reverse osmosis membranes in seawater desalination applications [J]. *Separation and Purification Technology*, 2010, 75(2): 87–101.
- [14] Lee C, Kang Y, Kim D H, et al. Practical considerations of wastewater-seawater integrated reverse osmosis: Design constraint by boron removal [J]. *Membranes*, 2021, 11(4): 240.
- [15] Mansour B R. Modeling and optimization of salt and boron removal in reverse osmosis system [J]. *Desalination*, 2023, 562. DOI:10.1016/j.desal.2023.116699.
- [16] Li Y H, Wang S H, Song X X, et al. High boron removal polyamide reverse osmosis membranes by swelling induced embedding of a sulfonyl molecular plug [J]. *Journal of Membrane Science*, 2020, 597: 117716. DOI: 10.1016/j.memsci.2019.117716.
- [17] 谢欣, 张潇, 李蕊含, 等. 反渗透膜微结构的调控及海水脱硼性能的提升[J]. *高等学校化学学报*, 2019, 40(9): 2033–2040.
Xie X, Zhang X, Li R H, et al. Microstructure regulation of the reverse osmosis membrane to improve the boron removal performance [J]. *Chemical Journal of Chinese Universities*, 2019, 40(9): 2033–2040.
- [18] Guler E, Ozakdag D, Arda M, et al. Effect of temperature on seawater desalination-water quality analyses for desalinated seawater for its use as drinking and irrigation water [J]. *Environmental Geochemistry and Health*, 2010, 32(4): 335–339.
- [19] Khan M S, Zhu S D, Chung T S, et al. Enhancing desalination efficiency and boron removal through functionalization of layered double hydroxide thin-film nanocomposite membranes [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2025, 515: 163730. DOI: 10.1016/j.cej.2025.163730.
- [20] Chen D, Zhao X, Li F Z, et al. Rejection of nuclides and silicon from boron-containing radioactive waste water using reverse osmosis [J]. *Separation and Purification Technology*, 2016, 163: 92–99. DOI: 10.1016/j.seppur.2016.02.027.
- [21] Jacob C. Seawater desalination: Boron removal by ion exchange technology [J]. *Desalination*, 2007, 205(1/2/3): 47–52. DOI: 10.1016/j.desal.2006.06.007.
- [22] 张振潇. 吸硼剂的合成及其在海水淡化中的应用[D]. 天津: 天津工业大学, 2018.
Zhang Z X. Synthesis of boron absorbers and their application in desalination[D]. Tianjin: Tiangong University, 2018.
- [23] 林创辉, 陈子尚, 梁小平, 等. 硼吸附材料研究进展[J]. *盐湖研究*, 27(4): 82–90.
Lin C H, Chen Z S, Liang X P, et al. Research progress of adsorbent materials for boron removal [J]. *Journal of Salt Lake Research*, 27(4): 82–90.
- [24] Liu X W, Xu C J, Chen P, et al. Advances in technologies for boron removal from water: A comprehensive review [J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2022, 19(17): 10671.
- [25] 郭利, 史浩, 于旭东, 等. D201 阴离子树脂对硼的吸附性能研究[J]. *盐业与化工*, 2016, 45(3): 15–17.
Guo L, Shi H, Yu X D, et al. Study on adsorption properties of D201 anion resin for boron [J]. *Journal of Salt and Chemical Industry*, 2016, 45(3): 15–17.

- [26] Sarıççek E N, Tuğaç M M, Özdemir V T, et al. Removal of boron by boron selective resin-filled electrodeionization [J]. *Environmental Technology & Innovation*, 2021, 23: 101742. DOI: 10.1016/j.eti.2021.101742.
- [27] Hussain A, Sharma R, Minier-Matar J, et al. Application of emerging ion exchange resin for boron removal from saline groundwater [J]. *Journal of Water Process Engineering*, 2019, 32: 100906. DOI: 10.1016/j.jwpe.2019.100906.
- [28] Niu J Y, Zhang D X, Shen J W, et al. Poly (ethylene imine)-mediated dihydroxy-functionalized resin with enhanced adsorption capacity for the extraction of boron from salt lake brine [J]. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2024, 12(5): 113779.
- [29] Al-Dhawi B N, Kutty S R, Hayder G, et al. Adsorptive removal of boron by DIAION® CRB05: Characterization, kinetics, isotherm, and optimization by response surface methodology [J]. *Processes*, 2023, 11(2): 453.
- [30] Kamcev J, Taylor M K, Shin D-M, et al. Functionalized porous aromatic frameworks as high-performance adsorbents for the rapid removal of boric acid from water [J]. *Advanced Materials*, 2019, 31(18): 1808027.
- [31] Gurreri L, Tamburini A, Cipollina A, et al. Electrodialysis applications in wastewater treatment for environmental protection and resources recovery: A systematic review on progress and perspectives [J]. *Membranes*, 2020, 10(7): 146.
- [32] 王泽江, 于筱禹, 马来波, 等. 海水卤水脱硼技术研究进展 [J]. *盐科学与化工*, 2021, 50(11): 11-13.
Wang Z J, Yu X Y, Ma L B, et al. Research progress in boron removal from seawater and brine [J]. *Journal of Salt Science and Chemical Industry*, 2021, 50(11): 11-13.
- [33] Han L, Liu Y, Chew J W. Boron transfer during desalination by electrodialysis [J]. *Journal of Membrane Science*, 2018, 547: 64-72. DOI: 10.1016/j.memsci.2017.10.036.
- [34] 唐海兵. 双极膜电渗析处理反渗透浓盐水基础试验研究 [D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2023.
Tang H B. Basic experimental study on the treatment of reverse osmosis concentrates by bipolar membrane electrodialysis [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2023.
- [35] Öner M R, Kanca A, Ata O N, et al. Bipolar membrane electrodialysis for mixed salt water treatment: Evaluation of parameters on process performance [J]. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2021, 9(4): 105750.
- [36] Noguchi M, Nakamura Y, Shoji T, et al. Simultaneous removal and recovery of boron from waste water by multi-step bipolar membrane electrodialysis [J]. *Journal of Water Process Engineering*, 2018, 23: 299 - 305. DOI: 10.1016/j.jwpe.2018.04.010.
- [37] Hung W C, Horng R S, Tsai C H. Effects of process conditions on simultaneous removal and recovery of boron from boron-laden wastewater using improved bipolar membrane electrodialysis (BMED) [J]. *Journal of Water Process Engineering*, 2022, 47: 102650. DOI: 10.1016/j.jwpe.2022.102650.
- [38] 郑敏, 李浩, 潘建明. 硼吸附材料的研究进展 [J]. *盐湖研究*, 2024, 32(2): 101-116.
Zheng M, Li H, Pan J M. Research progress of boron adsorption materials [J]. *Journal of Salt Lake Research*, 2024, 32(2): 101-116.
- [39] Melliti A, Kheriji J, Bessaies H, et al. Boron removal from water by adsorption onto activated carbon prepared from palm bark: kinetic, isotherms, optimisation and breakthrough curves modeling [J]. *Water Science and Technology*, 2020, 81(2): 321-332.
- [40] Haddabi M A, Ahmed M, Jebri Z A, et al. Boron removal from seawater using date palm (*Phoenix dactylifera*) seed ash [J]. *Desalination and Water Treatment*, 2016, 57(11): 5130-5137.
- [41] Kluczka J, Trojanowska J, Zolotajkin M. Utilization of fly ash zeolite for boron removal from aqueous solution [J]. *Desalination and Water Treatment*, 2015, 54(7): 1839-1849.
- [42] Meng F Q, Ma W, Wu L, et al. Selective and efficient adsorption of boron (III) from water by 3D porous CQDs/LDHs with oxygen-rich functional groups [J]. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 2018, 83: 192-203. DOI: 10.1016/j.tjce.2017.12.008.
- [43] Zhao Q P, Zhao D L, Feng F, et al. Thin-film nanocomposite reverse osmosis membranes incorporated with citrate-modified layered double hydroxides (LDHs) for brackish water desalination and boron removal [J]. *Desalination*, 2022, 527: 115583. DOI: 10.1016/j.desal.2022.115583.
- [44] Hu G Z, Zhang W, Chen Y T, et al. Removal of boron from water by GO/ZIF-67 hybrid material adsorption [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2020, 27: 28396-28407. DOI: 10.1007/s11356-020-08018-6.
- [45] Wu Q, Liu M Y, Wang X. A novel chitosan based adsorbent for boron separation [J]. *Separation and Purification Technology*, 2019, 211: 162-169. DOI: 10.1016/j.seppur.2018.09.070.
- [46] Eljamal O, Maamoun I, Alkudhayri S, et al. Insights into boron removal from water using Mg-Al-LDH: Reaction parameters optimization & 3D-RSM modeling [J]. *Journal of Water Process Engineering*, 2022, 46: 102608. DOI: 10.1016/j.jwpe.2022.102608.
- [47] Cai L, Zhang Y Z, Peng X W, et al. Preparation of layered double hydroxide intercalated by Gallic acid for boron adsorption

- [J]. *Journal of Water Process Engineering*, 2021, 44: 102394. DOI: 10.1016/j.jwpe.2021.102394.
- [48] Demirçivi P, Saygılı G N. Comparative study of modified expanded perlite with hexadecyltrimethylammonium-bromide and gallic acid for boron adsorption [J]. *Journal of Molecular Liquids*, 2018, 254: 383–390. DOI: 10.1016/j.molliq.2018.01.116.
- [49] Kamboh M A, Yilmaz M. Synthesis of *N*-methylglucamine functionalized calix[4]arene based magnetic sporopollenin for the removal of boron from aqueous environment [J]. *Desalination*, 2013, 310: 67–74. DOI: 10.1016/j.desal.2012.10.034.
- [50] Zhang T T, Li Yi, Zhao X D, et al. A novel recyclable absorption material with boronate affinity [J]. *Separation and Purification Technology*, 2021, 272: 118880. DOI: 10.1016/j.seppur.2021.118880.
- [51] 邵兰燕. 海水低压淡化及脱硼性能研究[D]. 福州: 福州大学, 2020.
- Shao L Y. Research on low pressure seawater desalination and performance of boron removal[D]. Fuzhou: Fuzhou University, 2020.
- [52] Skuse C, Gallego-Schmid A, Azapagic A, et al. Can emerging membrane-based desalination technologies replace reverse osmosis? [J]. *Desalination*, 2021, 500: 114844. DOI: 10.1016/j.desal.2020.114844.
- [53] Al-Ejji M, Ponnamma D, Zadeh K, et al. Advanced membrane technology to remove boron from water and wastewater: A comprehensive study [J]. *Acs Applied Polymer Materials*, 2023, 5(10): 7675–7697.
- [54] Maestre-Valero J F, Imbernón-Mulero A, Martínez-Alvarez V, et al. Regional analysis of technological alternatives for boron reduction in desalinated seawater for irrigation in south-eastern Spain [J]. *Irrigation Science*, 2025, 43(3): 403–418.
- [55] 贾燕南, 邹晓梅, 李家成, 等. 除硼技术在海水淡化领域的研究进展[J]. *应用化工*, 2021, 50(2): 476–480.
- Jia Y N, Wu X M, Li J C, et al. Application and research progress of electrolysis chlorine technology in industry [J]. *Applied Chemical Industry*, 2021, 50(2): 476–480.
- [56] Sun M J, Li M, Zhang X, et al. Graphene oxide modified porous P84 co-polyimide membranes for boron recovery by bipolar membrane electro dialysis process [J]. *Separation and Purification Technology*, 2020, 232: 115963. DOI: 10.1016/j.seppur.2019.115963.
- [57] Guan Z M, Lü J F, Bai P, et al. Boron removal from aqueous solutions by adsorption-A review [J]. *Desalination*, 2016, 383: 29–37. DOI: 10.1016/j.desal.2015.12.026.
- [58] 胡俊威. 硼吸附改性材料的制备及性能研究[D]. 衡阳: 南华大学, 2017.
- Hu J W. Preparation and properties of modified materials on adsorption of boron[D]. Hengyang: University of South China, 2017.
- [59] Najid N, Gourich B, Kouzbour S, et al. Impact of saline water matrix on the removal of boron using electrocoagulation process: Unveiling performance, removal mechanism, and cost-energy evaluation [J]. *Chemical Engineering and Processing-Process Intensification*, 2025, 207: 110069. DOI: 10.1016/j.cep.2024.110069.
- [60] 王子玉. 陶瓷锆基金属有机框架膜的制备及正渗透脱硼性能探究[D]. 大连: 大连理工大学, 2024.
- Wang Z Y. Fabrication and performance of Zr metal-organic framework membrane for boron removal by forward osmosis[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2024.
- [61] 罗清龙, 黄雪莉, 董明哲, 等. 吸附法分离硼的研究进展[J]. *现代化工*, 2022, 42(11): 12–16.
- Luo Q L, Huang X L, Dong M Z, et al. Research progress in boron separation by adsorption method [J]. *Modern Chemical Industry*, 2022, 42(11): 12–16.
- [62] 蔡亮. 有机酸根插层类水滑石的制备及其吸附硼的研究[D]. 西宁: 中国科学院大学(中国科学院青海盐湖研究所), 2022.
- Cai L. Study on preparation of layered double hydroxides intercalated by organic acid anion and its adsorption of boron[D]. Xining: Qinghai Institute of Salt Lakes, Chinese Academy of Science, 2022.
- [63] 潘彤彤. 碳基硼吸附剂的改性制备及其吸附性能研究[D]. 西宁: 青海大学, 2023.
- Pan T T. Preparation of modified carbon-based boron adsorbent and its adsorption performance [D]. Xining: Qinghai University, 2023.