王晓丽, 杨洋, 杨志宏, 等. 海水淡化污泥的特性与处置及其资源化利用探索[J]. 净水技术, 2026, 45(10): 33-40.
Wang X L, Yang Y, Yang Z H, et al. Exploration on characteristics, disposal and resource utilization of seawater desalination sludge[J]. Water Purification Technology, 2026, 45(10): 33-40.

海水淡化污泥的特性与处置及其资源化利用探索

王晓丽[1],杨 洋[1],杨志宏[1],李会慧[2],黄鹏飞[1],宋代旺[1,*]
(1. 自然资源部天津海水淡化与综合利用研究所,天津 300192;2. 天津市蓝十字膜技术有限公司,天津 300270)

摘 要 **【目的】** 为应对水资源短缺背景下海水淡化产业伴生污泥带来的污染挑战,攻克该污泥"高盐度、高腐蚀性、低有机质含量、低热值"特性引发的处置难题,本文围绕海水淡化污泥开展研究。**【方法】** 以海水淡化污泥独特的理化特性为切入点,系统解析其生成机制与核心特征。采用文献综述与工程案例分析相结合的方法,重点阐述高盐污泥浓缩调理、机械脱水、深度干化等核心处理技术的研究进展与实际工程应用效能,并围绕资源化利用途径探讨其在建材化利用、功能材料制备、储能材料开发等领域的应用可行性。**【结果】** 明确海水淡化污泥的生成规律与关键特性,厘清现有处理技术的适用性及局限性,证实其在多领域资源化利用的潜力。**【结论】** 未来研究应以"双碳"目标为导向,聚焦于低成本低碳污泥处理工艺研发、高盐组分高效回收技术突破等方向,推动"无废城市"建设与产业可持续发展。

关键词 海水淡化污泥; 高盐污泥; 污泥处置; 脱水技术; 资源化利用
中图分类号: X705 **文献标志码**: A **文章编号**: 1009-0177(2026)10-0033-08
DOI: 10.15890/j.cnki.jsjs.2026.10.004

Exploration on Characteristics, Disposal and Resource Utilization of Seawater Desalination Sludge

Wang Xiaoli[1], Yang Yang[1], Yang Zhihong[1], Li Huihui[2], Huang Pengfei[1], Song Daiwang[1,*]
(1. *The Institute of Seawater Desalination and Multipurpose Utilization, MNR<Tianjin>, Tianjin* 300192, *China*;
2. *Tianjin Blue Cross Membrane Technology Co., Ltd., Tianjin* 300270, *China*)

Abstract [**Objective**] To address the pollution challenge posed by the by-product sludge from the seawater desalination industry amid water resource scarcity, this paper aims to tackle the disposal difficulties caused by the sludge's characteristics of "high salinity, high corrosiveness, low organic matter content, and low calorific value". [**Methods**] This paper takes the unique physicochemical properties of seawater desalination sludge as the entry point and systematically analyzes its generation mechanism and core characteristics. By combining literature review and engineering case analysis, this paper focuses on elaborating the research progress and practical engineering application efficiency of core treatment technologies such as high-salt sludge concentration conditioning, mechanical dewatering, and deep dewatering. It also explores the feasibility of its resource utilization in fields such as building materials, functional material preparation, and energy storage material development. [**Results**] This paper clarifies the generation rules and key characteristics of seawater desalination sludge, clarifies the applicability and limitations of existing treatment technologies, and confirms its application potential in multi-field resource utilization. [**Conclusion**] Future research should be guided by the "Dual Carbon" goals, focusing on the development of low-cost and low-carbon sludge treatment processes and breakthroughs in the efficient recovery of high-salt components to promote the construction of a "Waste-Free City" and the sustainable development of the industry.

Keywords seawater desalination sludge; high-salinity sludge; sludge dewatering technology; sludge disposal resource utilization

[收稿日期] 2026-01-27
[基金项目] 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金项目(K-JBYWF-2025-QR09);农业农村部盐碱土改良与利用(干旱半干旱区盐碱地)重点实验室开放基金(YJDKFJJ202401、2022TSYCLJ0039);天津市重点研发项目(24YFZCSN00260);2023 年国家(兵团)科技计划项目(2023AB034);中央级科研院所基本科研业务费专项(K-JBYWF-2025-J03)
[作者简介] 王晓丽(1986—),女,高级工程师,主要从事海水与苦咸水淡化技术等工作,E-mail: wxl861115@163.com。
[通信作者] 宋代旺(1988—),男,正高级工程师,主要从事海水淡化技术及关键设备等工作,E-mail: 617131371@qq.com。

全球淡水资源紧缺与城市化进程加速的双重压力下,发展海水淡化技术已成为缓解水资源供需矛盾的必由之路。截至2024年,全国海水淡化规模已突破285万t/d,年供水量超10亿t,成为沿海地区及海岛供水安全的核心保障[1]。然而,海水淡化过程中不可避免地产生海水淡化污泥,其产量随产能激增呈现同步增长态势。据测算[1],每生产10 000 m^3淡水约伴生800 t污泥,据此估算我国海水淡化污泥日均产量已达2.5×10^5 t,年产生量超9 000万t,如图1所示。

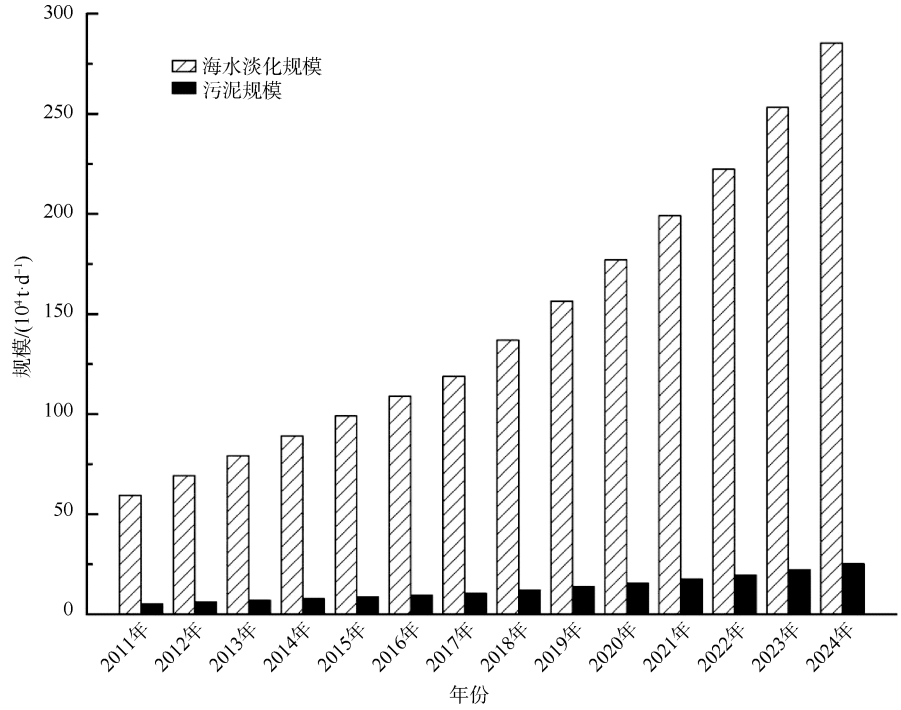


图1　我国海水淡化及污泥量规模统计

Fig. 1　Statistical Data on Seawater Desalination Capacity at Home

海水淡化污泥主要产生于海水预处理环节,包括混凝沉淀、气浮及介质过滤等单元[2]。其基本特征受海水水质与投加药剂共同影响,主要表现为高氯离子含量、低有机质、低热值以及以钙、镁、硅的化合物为主的化学组成,同时含有微量重金属及残留混凝剂[3]。因此,海水淡化污泥在性质上与市政污泥存在显著区别,传统污泥处置技术(如填埋、焚烧等)难以直接适用[4]。目前,常见的处置方式仍以直接排海或简易填埋为主,但这些做法容易引发海洋生态环境扰动、沿岸土壤盐碱化等一系列环境问题[5]。如何实现海水淡化污泥的高效、环保与资源化处置,仍是当前该领域面临的主要挑战。

随着"无废城市"建设与"双碳"目标的推进,海水淡化污泥的无害化处置与资源化利用成为海水淡化行业高质量发展的核心制约因素,亦是水处理与固废管理交叉领域的前沿课题。目前,针对海水淡化污泥的系统性研究仍处于起步阶段,在特性机制解析、专用技术研发以及工程应用等方面存在显著缺口。本文通过研究海水淡化污泥特性,重点论述其脱水处置技术现状与资源化路径,剖析核心技术瓶颈,提出未来研究方向,为海水淡化污泥的可持续管理提供科学依据。

1　海水淡化污泥来源及特性

1.1　污泥生成机制与产量规模

反渗透技术作为当前海水淡化的主流工艺,全球应用占比超过70%,其工艺流程包含预处理、反渗透脱盐及淡化水后处理三大核心单元,其中预处理阶段是海水淡化污泥的主要生成源头[6-7]。该阶段的核心目标是去除海水中悬浮颗粒、胶体、藻类及部分有机物,以避免反渗透膜堵塞与污染,保障膜系统稳定运行,常用工艺包括混凝/絮凝沉淀、气浮及介质过滤,其应用份额与污泥形态如表1所示。

在预处理过程中,投加的铁盐、铝盐等混凝剂与海水离子反应形成絮体,与海水中原有悬浮物、胶

表 1 初级海水淡化污泥的工艺来源

Tab. 1 Process Sources of Primary Seawater Desalination Sludge

生产工艺	适用范围	应用份额	污泥形态	污泥产率贡献
混凝/絮凝沉淀	高浊、高悬浮物海水	50%~60%	致密矾花	60%~70%
气浮	高藻、高有机物海水	20%~30%	疏松浮渣	15%~20%
介质过滤	复杂水质海水	>90%	滤饼残渣	10%~15%

体、生物残骸及析出的 $CaCO_3$、$Mg(OH)_2$ 沉淀共同构成初级海水淡化污泥。污泥生成量与原海水浑浊度、碱度、药剂投加量直接相关。当海水浑浊度高于 5 NTU 时，聚合氯化铝（PAC）投加量每增加 10 mg/L，污泥产率增加 0.15 kg/m^3[8]。根据全球水务智库（GWI）公布数据，全球海水淡化总产能达 68.45×10^6 t/d，按产率系数 0.70~0.90 kg/m^3 测算，全球海水淡化污泥日产量逾 6.00×10^6 t。

1.2 核心特性及差异化分析

海水淡化污泥的物化特性与市政污泥存在本质区别，其核心特征源于海水高离子含量与化学预处理的双重作用，如表 2 所示[8]。

表 2 海水淡化污泥与典型市政污泥特性对比

Tab. 2 Characteristics Comparison of Seawater Desalination Sludge and Typical Municipal Sludge

特性指标	海水淡化污泥	市政污泥	核心差异影响
含水率（初沉）	>99%	95%~98%	海水淡化污泥减容压力更大
氯离子/(g·L^{-1})	15~25	<0.5	海水淡化污泥需专用耐腐蚀设备
pH 值	8.5~10.0（偏碱性）	6.5~8.0（近中性）	海水淡化污泥调理药剂需耐碱适配
有机质含量	<10%	40%~50%	海水淡化污泥能源化价值低
干基低位热值/(MJ·kg^{-1})	<3	12~15	海水淡化污泥无法单独焚烧
主要化学成分	Ca、Mg、Si、Al/Fe 化合物	C、H、O、N、P 及微生物体	海水淡化污泥资源化方向聚焦建材与矿物回收
重金属浸出风险	受海域污染影响显著	受管网污水来源影响	海水淡化污泥需针对性风险评估

1.2.1 高盐高腐蚀性

海水淡化污泥孔隙水盐度接近原海水（3.5%~4.5%），氯离子质量浓度高达 15~25 g/L，远高于市政污泥（通常<1 g/L），导致污泥具有强腐蚀性。对普通碳钢的腐蚀速率可达 0.5~1.2 mm/a，是市政污泥的 5~8 倍[9]。这种特性不仅对处理设备材质提出严苛要求，需选用 2205 双相不锈钢、哈氏合金等耐腐蚀材料，还会显著影响污泥胶体稳定性：高离子强度压缩双电层，使污泥颗粒 Zeta 电位绝对值降至 10 mV 以下，颗粒间排斥力减弱，形成致密絮体，但也导致水分包裹严重，脱水难度剧增[10]。

1.2.2 低有机质低热值

海水淡化污泥因海水天然有机物质量浓度通常小于 10 mg/L，且预处理过程仅去除少量大分子有机物，其基质以无机矿物为主，这使得污泥有机质含量普遍偏低，不具备单独能源化利用经济性，无法套用市政污泥焚烧发电、厌氧消化等技术路线[11]。此特性对处理工艺及设备造成诸多不利：例如在厌氧消化时微生物底物不足，甲烷产率极低，无机颗粒易沉降结泥，加剧搅拌设备磨损；焚烧需添加大量辅助燃料，灰渣易结焦降低传热效率，加剧炉体腐蚀磨损；堆肥升温慢难达无害化温度，透气性差延长周期，磨损翻抛设备；脱水需投加更多絮凝剂，泥饼含固率低、无机颗粒多，加剧输送设备磨损，增加转运处置压力[12]。

1.2.3 高无机质高硬度

海水淡化污泥干基中无机矿物质占比大，主要成分为 $CaCO_3$、$Mg(OH)_2$、SiO_2 及 Al/Fe 氧化物，这些成分源于海水碱度调节过程中的化学沉淀与混凝剂残留[7]。高无机质含量使污泥压实密度达 1.2~1.5 g/cm^3，高于市政污泥（0.8~1.0 g/cm^3），同时干化后易形成坚硬结块，对脱水设备的压榨强度与耐磨性提出更高要求。

1.2.4 复合环境风险

海水淡化污泥的环境风险主要源于两方面：一是沿岸工业活动导致的微量重金属 Cu、Zn、Ni、Cr 等的累积，其浸出浓度受海域污染程度影响显著，部分工业集聚区附近污泥重金属浸出[13]；二是残留化

学药剂的环境效应,包括未反应的混凝剂 PAC 残留铝离子、杀菌剂如次氯酸钠等,可能对土壤微生物群落及水体生态系统产生抑制作用。此外,高盐特性导致其土地利用时易引发土壤盐碱化,直接限制了该处置路径的应用。

2　海水淡化污泥处理技术

海水淡化污泥的处理目标在于减量化、稳定化、无害化,并积极探索资源化。其技术路线遵循“浓缩-调理-脱水-最终处置/利用”的基本框架,但需针对其高盐、高腐蚀、低有机质特性进行专用化适配。本节重点论述各环节核心技术的研究进展与应用效果。

2.1　污泥浓缩与调理

2.1.1　化学调理

化学调理的核心是通过絮凝剂破坏污泥胶体双电层,降低颗粒间排斥力以促进聚集,但海水淡化污泥盐度通常高达 25 000~40 000 mg/L,盐离子会压缩胶体扩散层,导致常规阳离子聚丙烯酰胺(CPAM)吸附架桥效果衰减 30%~50%,因此需选用耐盐改性高分子絮凝剂[14]。

在高盐度海水淡化污泥调理中,需选用耐盐改性高分子絮凝剂以解决常规 CPAM 吸附架桥效果衰减的问题,常用的聚合氯化铝/铁、耐盐型 CPAM、两性离子聚丙烯酰胺(AmPAM)各有其独特的机理特性与应用优势。聚合氯化铝/铁作为无机高分子絮凝剂,兼具铝盐和铁盐特性,水解后生成的多核羟基络合物可通过电荷中和与吸附架桥作用促进污泥颗粒聚集,耐盐性强且在 25 000~40 000 mg/L 盐度下仍能稳定水解,形成的絮体密度大、沉降速度快,pH 适应范围广且成本较低[15];耐盐型 CPAM 则通过分子链上的耐盐官能团,在高盐环境下保持结构稳定,依靠阳离子基团的电荷中和作用与超长分子链的吸附架桥作用形成大粒径絮体,絮凝效率高、投加量少,絮体韧性好不易破碎,与无机絮凝剂复配时协同效应显著[16];AmPAM 分子链兼具阴阳离子基团,阳离子基团可中和污泥胶体负电荷,阴离子基团能与污泥中金属离子络合形成交联结构,凭借吸附架桥与空间位阻稳定双重作用构建疏松多孔絮体,其耐盐性最优,即使盐度超 40 000 mg/L 仍能保持良好溶解性与絮凝活性,形成的絮体滤水通道不易堵塞,适用范围广且污泥脱水后滤饼含水率低、药剂残留少[17]。

但单一化学调理易形成致密絮体,包裹间隙水导致滤水通道闭塞,因此需结合超声、微波等物理调理手段破坏污泥胞外聚合物(EPS)结构、释放胞内水并优化絮体孔隙,实现化学-物理协同优化,提升污泥脱水性能。

2.1.2　物理调理及协同增效

为克服单一化学调理在高盐海水淡化污泥处理中易形成致密絮体、堵塞滤水通道的技术局限,物理-化学协同调理技术已成为破解此类污泥脱水难题的关键路径。物理调理通过重构污泥结构弥补化学调理缺陷,主流技术路径分为 4 类:其一为骨架构建型调理,投加粉煤灰、稻壳粉、硅藻土等刚性颗粒作为骨架构建体,利用其吸附特性与刚性结构增强絮体渗透性及机械强度。研究[18]证实,投加 30 mg/L 煤质炭粉可在海水淡化污泥中形成透水、稳定的孔隙结构,配合聚丙烯酰胺(PAM)的吸附架桥能力,能进一步将污泥浓缩效率提升 20%~30%,降低后续脱水能耗 15% 以上;其二为热调理,在 80~180 ℃通过高温破坏污 EPS 结构,促进结合水释放,175 ℃时泥饼含水率最低,120~150 ℃高压热调理对高盐污泥脱水改善率可达 40%,适用于具备余热回收条件的大型基地[19];其三为超声调理,采用 15 kHz~10 MHz 超声波的空化效应破碎污泥絮体,与化学调理联用可减少絮凝剂投加量 30%~40%,协同性强且无二次污染[20];其四为冷冻-解冻调理,借助冰晶生长挤压破坏污泥胶体结构,寒冷地区可利用自然低温,调理后污泥过滤速度提升 2~3 倍[21]。

物理-化学协同调理通过“絮凝架桥+骨架支撑”双重机制,有效解决海水淡化污泥因高盐、低有机质导致的脱水效能低下问题。综上,优化调理剂投加顺序、配比参数及联用工艺,是提升高盐海水淡化污泥浓缩脱水效能的重要方向,亦是该领域未来核心研究热点。

2.2　污泥脱水技术

脱水是海水淡化污泥减量化的核心环节,其深度直接决定后续处置路径的选择。填埋或土地利用一般要求含水率<60%[22],直接焚烧要求含水率<50%[23],而建材利用要求含水率<40%[24]。

2.2.1　机械脱水技术

机械脱水是海水淡化污泥处理的主流技术,通过压力差实现固液分离,常用设备包括板框压滤机、

离心脱水机、带式压滤机等,其技术特性对比如表 3 所示[24]。

表 3 机械脱水技术比较

Tab. 3 Comparison of Mechanical Dewatering Technologies

机械脱水工艺	优点	缺点	出泥含水率
板框压滤	造价低,能耗小,运行稳定	间歇运行,滤布拆装繁琐	60%~80%
带式压滤	连续运行,效率高,费用低	易堵塞,需加调理剂	80%
离心脱水	自动运转,占地小,效率高	费用高,噪声大,工艺要求高	80%
叠螺式脱水	能耗低	出水浑浊度高,工序复杂,噪声大	75%~80%

板框压滤机因抗压强度高(工作压力为 0.6~1.2 MPa)、耐腐蚀性强,成为海水淡化污泥脱水的首选设备。青岛百发、天津先达等大型海水淡化厂均采用板框压滤机,配合复合调理技术,出泥含水率可稳定在 60%左右,泥饼运输成本降低 40%,其核心优势在于适应高盐高腐蚀性污泥,滤布选用聚四氟乙烯材质,使用寿命可达 18 个月,远高于带式压滤机的 6 个月[25]。

离心脱水机因自动化程度高,在中小型海水淡化厂应用较多。福建某核电 3 600 m^3/d 海水淡化工程采用离心式压滤机,出泥含水率约为 80%,外运至专业处置厂进一步处理。该设备适合连续化、自动化大生产,减少人工干预,且物料适合离心沉降。

叠螺式脱水机通过螺旋轴的旋转推动污泥在固定环与游动环组成的腔体内前进,利用螺旋挤压产生的压力实现污泥脱水,具有工艺较简单、可连续运行等特点。上海市某 20 万 m^3/d 规模水厂,经叠螺式压滤机脱水后,污泥含水率可降至 75%以下。

2.2.2 深度脱水与干化技术

为实现污泥资源化利用,需要将含水率降至 40%以下,通常采用深度脱水或干化技术。深度脱水技术以高压脱水为核心,通过施加 1.5~2.0 MPa 压榨压力实现水分深度脱除[26]。该技术的能耗仅为热干化的 1/5,运行成本较低,但泥饼硬度较高,需破碎后再利用。

热干化技术通过热能蒸发水分,可将含水率降至 10%~40%,但传统热干化能耗较高(蒸发每吨水约消耗 0.8 t 蒸汽),限制了其在海水淡化污泥处理中的应用。德国、日本探索真空干化,在低温下将污泥含水率干燥至 30%~40%,该技术的核心优势在于能耗低、耐腐蚀性强,已在小型污水项目中应用,有望在海水淡化污泥处理中推广[27]。此外,太阳能干化与热泵干化技术也展现出良好应用前景,美国某海水淡化厂采用热泵干化技术,利用反渗透系统余热,干化能耗降低 30%,为低碳干化提供了另一种技术路径[28]。国内相关企业开发了太阳能污泥干化温室,利用污泥有机质自燃产热与太阳能相结合,实现干化、稳定双重作用[29]。

海水淡化污泥脱水面临两大核心挑战:一是高盐特性导致设备腐蚀严重,常规碳钢设备使用寿命不足 1 a,需选用 2205 双相不锈钢、哈氏合金等高端耐腐蚀材质,设备投资增加 30%~50%;二是污泥无机质含量高导致滤布堵塞频繁,板框压滤机的滤布清洗周期仅为市政污泥处理工况的 1/2,降低处理效率。

针对上述问题,优化方向包括:①开发专用耐腐设备,如内衬聚四氟乙烯的板框压滤机、陶瓷过滤膜等,延长设备使用寿命;②优化调理工艺,通过骨架材料添加减少滤布堵塞;③开发一体化脱水装备,将调理与脱水集成,减少污泥转运过程中的盐分腐蚀。

2.3 终端处置技术

海水淡化污泥的终端处置需基于其特性选择技术,目前主要包括卫生填埋、焚烧和建材利用,其可行性与优缺点如下。

2.3.1 卫生填埋

卫生填埋是当前海水淡化污泥最主要的处置方式,需满足含水率及氯离子质量浓度要求[13]。我国沿海地区已建成多个海水淡化污泥专用填埋场,该路径的优势在于技术成熟、成本低,缺点是占用土地资源,且浪费污泥中的无机矿物资源。

2.3.2 焚烧处置

焚烧可实现污泥彻底减容(减量率>90%),据统计[30],荷兰、瑞士、比利时和德国分别有 100%、97%、89%和 70%的市政污泥及工业污泥采用焚烧处理。这些污泥焚烧并非单一处置手段,往往会结

合脱水、干化等预处理工艺,提升焚烧效率,同时配套余热利用、烟气净化等设施,兼顾环保与资源回收。但海水淡化污泥低热值的特性导致其无法单独焚烧,需与燃煤、生物质等辅助燃料掺烧。此外,掺烧比例需严格控制,过高会导致炉膛温度下降,影响燃烧效率。

2.3.3　建材利用

建材利用是海水淡化污泥资源化的核心方向,契合其高无机质特性,主要包括制砖、制水泥、路基材料等。海水淡化污泥含有的 $CaCO_3$、SiO_2 等成分可作为制砖原料;经脱水干化焚烧后主要成分为 SiO_2、Al_2O_3,可作为水泥混合材料,能替代 10%~15%的水泥熟料,降低水泥生产成本;经固化稳定处理后,可作为路基填料[31]。

3　海水淡化污泥资源化利用潜力

海水淡化污泥作为海水淡化过程中伴生的典型无机固体废弃物,具有矿物组分丰富、无机质含量高、富含多种有价金属与非金属元素等特征。传统以填埋、外运处置为主的方式不仅占用土地资源、存在二次污染风险,还造成了大量有价组分的浪费。近年来,随着“双碳”目标与固废资源化理念的不断推进,海水淡化污泥由“末端处置”向“资源化高值利用”转型已成为重要发展方向。依托其独特的元素组成与物化特性,海水淡化污泥在环境功能材料、新能源储能材料等领域展现出显著的资源化潜力,相关基础研究与技术探索正逐步展开,为海水淡化产业绿色低碳发展提供了新思路。

3.1　环境功能材料制备

基于海水淡化污泥中富含 Fe、Si、Co、Ni 等金属及非金属氧化物的特点,将其转化为环境催化与水处理功能材料,是当前资源化利用的重要路径。污泥中多种金属氧化物协同作用,可提供丰富的表面活性位点与含氧官能团,在高级氧化、污染物吸附、催化降解等领域具备天然优势。

Tong 等[32]以海水淡化污泥为基体原料,制备出非均相过硫酸盐活化剂,充分利用污泥中 Fe、Si 氧化物表面富含羟基的特性,显著强化对过硫酸盐的吸附与活化作用,有效促进体系内活性自由基生成,实现水体中难降解污染物的高效去除。试验结果显示,该污泥基活化剂对总有机碳(TOC)及有机氮的去除率分别可达 80.33%和 100.00%,为海水淡化污泥在水处理催化材料领域的高值化利用提供了可行方案。整体而言,以海水淡化污泥制备环境功能材料,具有原料成本低、处置路径绿色、应用场景贴近水处理行业等优势,是兼具环境效益与经济效益的资源化方向。

3.2　储能材料开发

海水淡化污泥是锂、钠、镁等关键元素的潜在资源库。Kazemi 等[33]针对波斯湾海水淡化厂产生的铁基污泥颗粒,开展了室温烧结条件下的元素提取与纯化研究。结果表明,该污泥在储能电容器领域同样具有较大应用潜力:其中提取的钠盐可用于制备钠离子电池阴极,实验室测试显示其比容量可达约 120 mAh/g,与部分商用钠电材料初始性能相当。尽管该技术路线具备可行性,但其规模化应用仍受经济成本、工艺集成度及材料纯度等因素制约。

海水淡化污泥中含有锂、钠、镁等典型电化学活性元素,是低成本、规模化开发储能电极材料的潜在原料库,在新能源材料领域具有重要拓展价值。将污泥中碱金属与过渡金属组分定向提取、纯化并用于电池、超级电容器等储能器件,可实现固废减量与新能源材料制备的协同统一。

目前,该方向仍处于实验室探索阶段,虽然技术路线具备可行性,但在实际放大过程中仍面临多重瓶颈:有价元素提取成本偏高、工艺流程与现有海水淡化系统集成度不足、材料纯度与稳定性难以满足高端储能要求等。未来,通过低成本提纯、绿色合成、原位资源化等技术创新,有望进一步推动海水淡化污泥在储能材料领域的规模化、高值化应用。

4　结论

针对海水淡化污泥高盐、高腐蚀、低热值的核心特性,综述了从调理脱水到建材利用、材料回收等多种技术路线的初步进展。针对海水淡化污泥处理的难点,可采用浓缩脱水工艺以及干化固化等措施加以解决,但同时存在影响因素众多、易产生附加问题、经济成本较高、实际工程应用困难等情况。为进一步解决这些问题,从技术层面对未来研究方向提出以下展望。

(1)解析污泥盐分迁移转化及重金属浸出动力学规律,探究对污泥干化、焚烧等工艺及设备的影响。

(2)加强有价值矿物提取技术研究,实现废弃物向高值产品的转化。

(3)推广污泥能量回收及协同利用,耦合热泵、光伏发电等技术,发展低碳技术。

参考文献

[1] 自然资源部海洋战略规划与经济司. 2024 年全国海水利用报告[R]. 北京: 自然资源部, 2025.
Department of Marine Strategic Planning and Economy, Ministry of Natural Resources. National seawater utilization report 2024 [R]. Beijing: Ministry of Natural Resources, 2025.

[2] 何才昌, 朱力, 柴子绯. 混凝斜板沉淀池和 V 型滤池用于特大型海水淡化工程[J]. 中国给水排水, 2023, 39(8): 97-102.
He C C, Zhu L, Chai Z F. Application of coagulation inclined plate sedimentation tank and V-type filter in super-scale seawater desalination project[J]. China Water & Wastewater, 2023, 39(8): 97-102.

[3] 薛彬, 陈海航, 郭建波, 等. 浙江舟山绿色石化区域水质特征研究[J]. 广州化工, 2024, 52(19): 129-132.
Xue B, Chen H H, Guo J B, et al. Study on water quality environment of Zhoushan green petrochemical base [J]. Guangzhou Chemical Industry, 2024, 52(19): 129-132.

[4] 戴晓虎, 侯立安, 章林伟, 等. 我国城镇污泥安全处置与资源化研究[J]. 中国工程科学, 2022, 24(5): 145-153.
Dai X H, Hou L A, Zhang L W, et al. Safe disposal and resource recovery of urban sewage sludge in China[J]. Strategic Study of CAE, 2022, 24(5): 145-153.

[5] 代丽, 姜新舒, 张真, 等. 海南核电工程取排水对邻近海域海水水质的影响[J]. 海洋环境科学, 2024, 43(1): 37-47.
Dai L, Jiang X S, Zhang Z, et al. Effects of water intake and drainage from the nuclear power project in Hainan Provinceon water quality in adjacent sea areas[J]. Marine Environmental Science, 2024, 43(1): 37-47.

[6] 张海春, 陆阿定. 反渗透海水淡化预处理技术研究现状[J]. 能源环境保护, 2010, 24(3): 1-4, 8.
Zhang H C, Lu A D. Research status of pretreatment in seawater reverse osmosis desalination [J]. Energy Environmental Protection, 2010, 24(3): 1-4, 8.

[7] 闫会, 张岩, 李风琪, 等. 絮凝技术用于高有机物海水预处理的研究[J]. 广东化工, 2016, 43(23): 56-57, 55.
Yan H, Zhang Y, Li F Q, et al. Study on treatment of high organic seawater by flocculation [J]. Guangdong Chemical Industry, 2016, 43(23): 56-57, 55.

[8] 张乾, 翟自芹, 冯涛, 等. 高固含量海水淡化预处理模拟试验研究[J]. 盐科学与化工, 2021, 50(4): 14-18.
Zhang Q, Zhai Z Q, Feng T, et al. A simulation study on pretreatment of high solid content seawater desalination [J]. Journal of Salt Science and Chemical Industry, 2021, 50(4): 14-18.

[9] 薛瑞, 曹阳, 孙肖, 等. 降低淡化海水腐蚀性的研究与应用[J]. 工业水处理, 2016, 36(7): 106-107.
Xue R, Cao Y, Sun X, et al. Research and application of reducing the corrosiveness of desalinated seawater[J]. Industrial Water Treatment, 2016, 36(7): 106-107.

[10] 王燕飞. 无机聚合物絮凝剂对活性污泥颗粒絮凝的影响[J]. 能源化工, 2025, 46(2): 69-73.
Wang Y F. Effect of inorganic polymer flocculants on flocculation of activated sludge particles [J]. Energy Chemical Industry, 2025, 46(2): 69-73.

[11] 李怀正, 金伟, 张文灿, 等. 我国农村生活污水综合治理研究[J]. 中国工程科学, 2022, 24(5): 154-160.
Li H Z, Jin W, Zhang W C, et al. Comprehensive treatment of rural domestic sewage in China [J]. Strategic Study of CAE, 2022, 24(5): 154-160.

[12] Gonzalez A, Hendriks A T W M, van Lier J B, et al. Pre-treatments to enhance the biodegradability of waste activated sludge: Elucidating the rate limiting step [J]. Biotechnology Advances, 2018, 36(5): 1434-1469.

[13] 吴海锁, 许明, 张敏健, 等. 太湖流域印染废水为主的城镇污水处理厂提标技术研究[J]. 中国工程科学, 2010, 12(6): 54-59.
Wu H S, Xu M, Zhang M J, et al. Research on standard upgrading technologies of urban wastewater treatment plants for pollutions dominated by printing and dyeing wastewater in Taihu Lake Basin[J]. Engineering Sciences, 2010, 12(6): 54-59.

[14] 常路平, 武月枝. 絮凝剂加药设备的研发及应用[J]. 自动化应用, 2024, 65(23): 173-175, 179.
Chang L P, Wu Y Z. Research and application of flocculant dosing equipment[J]. Automation Application, 2024, 65(23): 173-175, 179.

[15] van der Linde J C, Fosso-Kankeu E, Gericke G, et al. Flocculant types and operating conditions influencing particles settling rates in feed water used at a coal power plant [J]. Desalination and Water Treatment, 2019, 150: 293-300.

[16] 程俊, 王国虹, 吕宣, 等. St-PAM 复配型絮凝剂的制备及在海水中的应用[J]. 河北环境工程学院学报, 2025, 35(3): 77-82.
Cheng J, Wang G H, Lyu X, et al. Preparation of St-PAM complex flocculant and its application in seawater[J]. Journal of HeiBei University of Environmental Engineering, 2025, 35(3): 77-82.

[17] 刘卫博, 王磊, 赖小娟, 等. 耐盐型聚丙烯酰胺的制备及其盐水溶液流变性能研究[J]. 应用化工, 2022, 51(4): 993-997, 1003.
Liu W B, Wang L, Lai X J. Preparation of salt-tolerant polyacrylamide and study on rheological properties of salt solution

[J]. Applied Chemical Industry,2022,51(4):993-997, 1003.

[18] 汪东东, 李荣寨. 炭粉骨架构建对气浮污泥浓缩脱水的影响[J]. 化工管理, 2024(4): 61-63.
Wang D D, Li R Z. Effect of carbon powder skeleton construction on thickening and dewatering of air floating sludge [J]. Chemical Enterprise Management, 2024(4): 61-63.

[19] 刘博, 张毅彪, 黄凯文, 等. 城市污泥调理脱水影响因素与技术应用进展[J]. 环境工程, 2025, 43(6): 41-50.
Liu B, Zhang Y B, Huang K W, et al. Influencing factors and technology application advances in urban sludge conditioning and dewatering[J]. Environmental Engineering, 2025, 43(6): 41-50.

[20] 李玉瑛, 何文龙, 邓斌, 等. 超声波联合高分子絮凝剂对污泥的调理研究[J]. 工业水处理, 2015, 35(2): 57-60.
Li Y Y, He W L, Deng B, et al. Study on the conditioning of sludge by using ultrasonic combined with macromolecule flocculants[J]. Industrial Water Treatment, 2015, 35(2): 57-60.

[21] 谢文玉, 郭晓培, 申屠灵女, 等. 剩余污泥脱水预处理技术研究进展[J]. 水处理技术, 2023, 49(9): 1-6.
Xie W Y, Guo X P, ShenTu L N, et al. A review of pretreatment technologies for excess sludge dewatering [J]. Technology of Water Treatment, 2023, 49(9): 1-6.

[22] GB/T 23485—2009 城镇污水处理厂污泥处置混合填埋用泥质[S].
GB/T 23485—2009: Disposal of sludge from municipal wastewater treatment plant—Quality of sludge for co-landfilling [S].

[23] GB/T 24602—2009 城镇污水处理厂污泥处置单独焚烧用泥质[S].
GB/T 24602—2009: Disposal of sludge from municipal wastewater treatment plant—Quality of sludge used in separate incineration[S].

[24] GB/T 25031—2010 城镇污水处理厂污泥处置制砖用泥质[S].
GB/T 25031—2010: Disposal of sludge from municipal wastewater treatment plant—Quality of sludge used in making brick[S].

[25] 刘林润. 具有隔膜挤压的板框压滤机设计及应用效果分析[J]. 机械管理开发, 2025, 40(10): 122-123, 177.
Liu L R. Design and application effect analysis of plate-and-frame filter press with diaphragm squeezing effect [J]. Mechanical Management and Development, 2025, 40(10): 122-123, 177.

[26] 刘红宇, 宋玉. 超高压隔膜压滤机在煤泥脱水工艺中的应用研究[J]. 当代化工研究, 2024(5): 167-169.
Liu H Y, Song Y. Research on the application of high pressure membrane filter press in coal slime dewatering process [J]. Modern Chemical Research, 2024(5): 167-169.

[27] Naqvi S R, Tariq R, Shahbaz M, et al. Recent developments on sewage sludge pyrolysis and its kinetics: Resources recovery, thermogravimetric platforms, and innovative prospects [J]. Computers & Chemical Engineering, 2021, 150: 107325. DOI: 10.1016/j.compchemeng.2021.107325.

[28] Yuan G, Chu K H. Heat pump drying of industrial wastewater sludge[J]. Water Practice and Technology, 2020, 15(2): 404-415.

[29] 章华熔, 畅凯旋, 陈菲琳. 脱水污泥的流变特性及其对干燥特性影响的研究[J]. 节能与环保, 2021(10): 53-55.
Zhang H R, Chang K X, Chen F L. The research on rheological properties of sludge and its influence on drought characteristics [J]. Energy Conservation & Environmental Protection, 2021(10): 53-55.

[30] 李辉, 吴晓芙, 蒋龙波, 等. 城市污泥焚烧工艺研究进展[J]. 环境工程, 2014, 32(6): 88-92.
Li H, Wu X F, Jiang L B, et al. Progress in study on the incineration technology of municipal sewage sludge [J]. Environmental Engineering, 2014, 32(6): 88-92.

[31] 莫言鑫. 粉煤灰混合污泥制备陶粒及其吸附应用的研究[D]. 大连: 大连交通大学, 2023.
Mo Y X. Study on the preparation of ceramsite from fly ash and sludge and its adsorption applications [D]. Dalian: Dalian Jiaotong University, 2023.

[32] Tong S Q, Chen D, Jiang X B, et al. Persulfate activation by Fe_3O_4-doped biochar synthesized from Fenton sludge and sewage sludge for enhanced 1-H-1, 2, 4-triazole degradation [J]. Chemical Engineering Journal, 2023, 461: 142075. DOI: 10.1016/j.cej.2023.142075.

[33] Kazemi A S, Arshia M J, Khabazian A. Sea water desalination sludge perspectives for circular economy: A case study of Persian Gulf desalination plant[J]. Desalination, 2025, 614: 119109. DOI:10.1016/j.desal.2025.119109.