

述评与讨论

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2025.04.001

小型模块化核反应堆海水淡化技术

郝晓地, 朱开宇, 刘然彬

(北京建筑大学城市雨水系统与水环境教育部重点实验室 中-荷未来污水处理
技术研发中心, 北京 100044)

摘要: 应对全球淡水短缺危机,海水淡化技术是一种可持续的供水解决方案。而传统以化石能源为动力的海水淡化在气候变化大背景下则显得不合时宜,发展清洁或低碳能源动力驱动淡化是当务之急。其中,小型模块化反应堆(SMR)作为一种低碳、便捷的核动力能源展现出了一定优势。SMR建设投资门槛降低,可灵活分散布置,安全可靠,其潜在应用可助力海水淡化持续发展。SMR耦合海水淡化亦可错峰满载制氢,从而降低制水成本,有望实现 $2\text{ kW}\cdot\text{h}/\text{m}^3$ 的能耗和 $2\text{ 元}/\text{m}^3$ 的成本。此外,卤水资源化带来的经济附加值以及对环境的低程度影响,利于SMR耦合海水淡化为沿海/海岛乃至近海(100~200 km)缺水地区提供稳定的低价淡水资源。

关键词: 海水淡化; 低碳能源; 小型模块化核反应堆; 卤水

中图分类号: TU991 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2025)04-0001-08

Seawater Desalination Technology Using Small Modular Nuclear Reactors

HAO Xiao-di, ZHU Kai-yu, LIU Ran-bin

(Sino-Dutch R & D Centre for Future Wastewater Treatment Technologies, Key Laboratory of
Urban Stormwater System and Water Environment <Ministry of Education>, Beijing University of
Civil Engineering and Architecture, Beijing 100044, China)

Abstract: To address the phenomena of global freshwater shortage, desalination could serve as a sustainable approach to water supply. However, in the context of global climate change, desalination powered by fossil fuels is no longer appropriate, and transitioning to cleaner or low-carbon energy sources must be a top priority for powering desalination. As a low-carbon and convenient nuclear source, small modular nuclear reactors (SMR) show great promise. SMR are characterized by low in investment costs, flexible decentralized installation, and high safety standards, making them a potential driver for advancing desalination technologies. Furthermore, SMR coupled with desalination could produce hydrogen with full capacity during off-peak power usage periods, reducing the cost of freshwater price to 2 yuan/ m^3 with an energy consumption of $2\text{ kW}\cdot\text{h}/\text{m}^3$. In addition to the benefits of brine utilization and reduced environmental impact, SMR-based desalination could provide a sustainable and low-cost freshwater supply for coastal areas, island, and even offshore areas (100–200 km away).

Key words: seawater desalination; low-carbon energy; small modular nuclear reactors (SMR); brine

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52170018); 北京建筑大学研究生创新项目(PG2024081)

现代海水淡化技术多半以化石燃料作为动力,在获得淡水的同时还会产生大量 CO_2 等温室气体(GHG)。因此,海水淡化需要与不产生GHG的清洁或低碳能源相结合。其中,核裂变产生的核能以经济、可靠、高效、成熟、无碳排而显示出独特的优势。然而,大型核电站建设受诸多因素影响而不能广泛建设,限制了核能海水淡化的发展。对此,近年新一代核反应——小型模块化核反应堆(SMR)技术的出现则给核能海水淡化创造了机遇^[1]。目前,SMR海水淡化技术与装置已应用于实践,这为沿海/海岛乃至近海(100~200 km)缺水地区获得淡水资源创造了新的途径。

1 核能的机遇与未来

1.1 能源转型中的核机遇

能源转型的特点是电气化、低碳发电、热电联产、低碳制氢与能源结构多元化,这为核能发展带来了契机^[1]。全球核反应堆技术已有200多年的运行经验,400余座核裂变电站已运行了半个多世纪。核电站反应堆饱和蒸汽压力和温度较低,对应的高压汽轮机入口处蒸汽焓也较低,导致比蒸汽消耗量较高,产生的大量“废”蒸汽可提供大量低品位热能,完全能满足海水淡化对热源的需求^[2]。核电站通过热电联产耦合海水淡化,能量利用效率超过80%,远高于将热转化为净电的30%~33%^[3]。

核电之外的其他低碳能源,如风能、太阳能和波浪能等都无法实现连续稳定的供电。可见,核能无疑是化石燃料的首选替代能源。“双碳”目标下,2060年我国波动性可再生能源发电量将占总电力供应的58%,但仅占峰值容量的8%左右^[4]。换言之,为确保电力供应稳定,未来波动性能源的价值将会下降。相比之下,核电具有可靠、高效、成熟、无碳排等特性,其能源价值将逐步提升^[1]。

1.2 核能突破——小型模块化

SMR模块功率低于300 MW,其组件和系统可工厂制造、模块运输和现场安装^[3]。与传统大型核反应堆相比,SMR具有突破性优势,能够有效降低建设成本、缩短工程周期、避免成本超支、提高可调度性以及增强社会接受程度,为其实际应用开辟了新思路。

1.2.1 分散式布置

我国拥有长达32 647 km的海岸线,这为SMR

提供了广阔的布局空间,其高度灵活性可以充分体现。沿海地区通常是工业高度发达和集中区域,对能源需求量巨大。SMR可以满足不同规模沿海工业区对能源的需求,甚至可以在各个工业区单独建设。分散布置在海岸线的SMR可因地制宜地向周边地区供应能源。结合海水淡化技术,还可以为沿海/海岛乃至近海(100~200 km)缺水地区提供充足、稳定的淡水资源。以北京市为例,其与渤海湾的最近直线距离不到100 km,长期面临水资源短缺问题,主要依赖南水北调工程调水为淡水资源补给,不仅成本高,且存在水量和水质双重安全隐患^[5]。若在最近海域海岸线规划布置SMR装置,结合海水淡化技术完全可以解决北京市淡水资源绝对性短缺问题。

1.2.2 模块化优势

利用模块化逐步部署,具有高度可扩展性,精准适应对能源不断增长的需求。通过模块化技术,在重复生产过程中可以实现规模效应,促进经验积累和技术进步,从而提高生产效率并降低成本。制造54个以上模块后,效益将达到最大化,SMR模块成本可降低40%^[6]。此外,还可以提前规划和统一标准,避免现场建设中出现浪费和返工,这将会降低20%的间接成本^[7]。利用模块化技术重复部署,达到标准化、改进项目规划、缩短建设时间和供应链开发等目标,预计可将最终成本降低40%^[8]。

1.2.3 安全系数高

自日本福岛核电站发生核泄漏事件以来,核安全问题受到了全球广泛关注。然而,随着技术的不断进步,核能海水淡化技术正变得越来越安全。相较于过去的核反应堆,现代核电站配备了自动关闭系统、多备用发电机和安全壳建筑等安全设施,进一步提升了核能应用的安全性。此外,SMR非能动安全(固有安全)系统设计、较低功率输出以及较小堆芯等特点有助于缩小场外应急区域,提高社会接受度^[3]。同时,核废料也可以在核反应堆中进行回收再利用,实现了无害化处理与资源化利用。

1.2.4 发展现状

截至2022年,世界各地共开发了80多种SMR概念与设计,包括不同基础技术,涵盖水、气、液态金属或熔盐冷却反应堆以及不同燃料循环。其中,中国、俄罗斯和阿根廷处于研发领先阶段,全球小型模块化反应堆研发现状^[3]如图1所示。



图1 全球小型模块化反应堆研发现状

Fig.1 Global R & D status of small modular reactors

俄罗斯的 Akademik Lomonosov 浮动动力装置与双模块 KLT-40S 于 2019 年 12 月并网,并于 2020 年 5 月开始商业运营;BREST-OD-300 于 2021 年 6 月开始建设,计划于 2026 年完工。阿根廷的 CAREM25 正在建设之中,预计 2026 年达到首次临界状态。2020 年 9 月,美国 NuScale SMR 设计获得美国 NRC 标准设计批准。

我国在先进核电技术开发方面处于世界领先地位,位于石岛湾示范工厂的两个球床模块式高温气冷反应堆(HTR-PM)机组(同类首个)已于 2021 年并入电网。每个 HTR-PM 反应堆均可驱动一台 210 MW 的汽轮机,温度高达 750 °C,主要冷却剂为氦气。其他公布的球床模块式高温气冷反应堆项目分别位于福建万安、浙江三门和广东白安。此外,海南“玲龙一号”(ACP100)于 2021 年 7 月开始建设,计划于 2026 年底开始商业运营,功率为 125 MW^[1,3]。

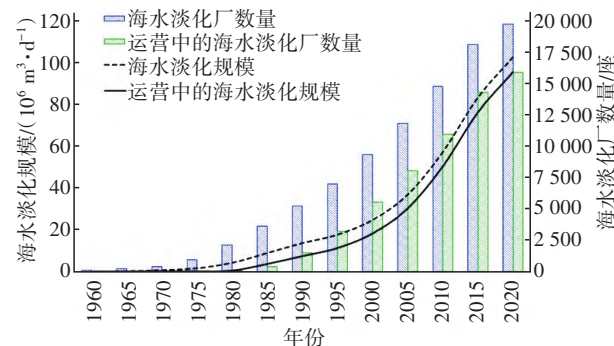
SMR 在替代燃煤发电厂以及作为补充性能源方面具有显著技术优势,其设计及尺寸非常适合非电力应用,如区域供热、工业供热、制氢和海水淡化^[3]。

2 SMR 海水淡化

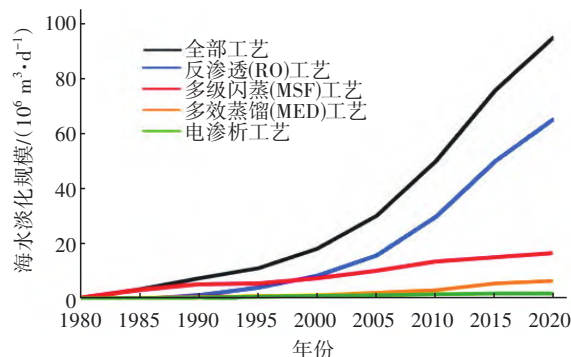
2.1 海水淡化发展趋势

随着全球水资源需求的持续增加以及海水淡化技术的长足进步,特别是海水淡化新型能源不断应用,海水淡化技术能耗以及成本不断降低,大大促进了海水淡化工程向大型化方向不断发展。目前,全球运营中的海水淡化规模已从 1969 年的 $2.725 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 增长至 2022 年底的 $1.1 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{d}$,全

球海水淡化厂数量与规模变化^[9-10]见图 2。



a. 海水淡化厂规模与数量变化



b. 不同工艺的海水淡化规模变化

图2 全球海水淡化厂数量与规模变化

Fig.2 Global changes in the number and capacity of seawater desalination plants

海水淡化属于能源密集型技术,随着海水淡化市场的快速增长,对能源需求也相应增加。此外,传统观念认为海水淡化能耗大、成本高,相应的碳排放量也就很高,特别是浓盐水/卤水排放回海会对海洋生态系统造成不可逆损害。可见,清洁或低碳能源的使用将是海水淡化技术发展的未来。同时,通过卤水资源化规避其排放回海也是未来亟待解决的技术问题。

2.2 海水淡化工艺

海水淡化工艺可根据目标物质、分离工艺和能量类型进行分类:①根据目标物质分为提取水和提取盐或其他化合物和元素;②根据分离工艺分为热法和膜法两种;③根据能量类型分为机械能、热能和电能三种^[2],具体如图 3 所示。其中,MSF、MED 和 RO 技术最为成熟,已广泛应用于商业化海水淡化,而其他技术则多停留在实验研究阶段。MSF 装置的核心是闪蒸室,工作温度为 90~110 °C,温度和压力随级数逐渐递减。海水在闪蒸室内被逐级加热产生蒸汽,再经剩余海水冷却后形成淡水。MED

在加热管外表面进行蒸发,海水由管内压缩热蒸汽加热,每一个加热室称为一效,前一效蒸汽作为下一效热源,热集成式设计可以实现体系高能量利用效率。与MSF技术相比,MED技术能源利用效率更高,且操作温度较低(70℃),淡化过程中腐蚀和结垢风险都低于MSF。RO通过在海水一侧施加压力来对抗自然渗透,使水通过RO膜从海水侧迁移到淡水一侧。该技术可用于大规模海水淡化,但需要消耗大量能源。

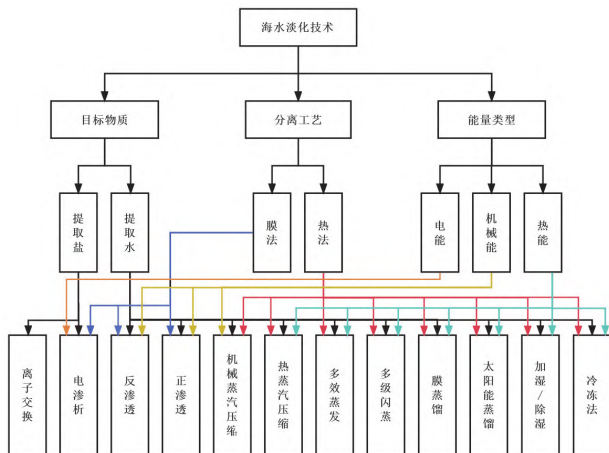


图3 海水淡化技术分类

Fig.3 Classification of seawater desalination technology

MSF、MED和RO各有特点,适用于不同的应用场景^[11],具体如表1所示。由表1可知,MSF在需要较高温度时具有优势;MED在提高能源效率方面表现出色;RO则在大规模应用时具有优势。MSF和MED系统通常建在热电联产(CHP)厂中,因为两者所需的低压加热蒸汽可以从CHP中轻易获取。RO因能耗低、效率高、操作简单、兼容性好且稳定灵活而成为近20年来工程应用最多的海水淡化技术。

表1 MSF、MED和RO工艺特点

Tab.1 Characteristics of MSF, MED and RO

项目	MSF	MED	RO
原理	蒸发和冷凝	蒸发和冷凝	压力驱动半透膜盐水分
工作温度/℃	90~110	70	
优点	易于管理和操作,可处理高盐水	运行规模任意调节,适合与可再生能源结合	适应当地条件,规模可按需调整,有显著成本优势,可去除二氧化硅
缺点	运行规模不低于60%,不宜与波动性能源联用,能耗高	容易积垢,需要投加防垢剂	需对海水进行预处理,膜易堵塞,配置复杂

2.3 海水淡化能耗与成本

海水淡化属于能源密集型技术,能源成本在总成本中占有很大比例,最高可达30%^[12]。不同海水淡化技术的能耗和成本分析显示,由于MSF和MED需要同时消耗电能和热能,其总能耗和制水成本均高于RO(仅消耗电能)。3种淡水工艺的能耗与成本^[12-14]见表2。MSF总能耗(总电当量)为13.5~25.5 kW·h/m³,制水成本为3.72~12.52元/m³;MED总能耗(总电当量)为6.5~11.0 kW·h/m³,制水成本为3.72~7.22元/m³;RO能耗为2~5 kW·h/m³,制水成本为2.00~4.00元/m³。最新技术^[13-14]表明,海水淡化最低能耗已达2 kW·h/m³,制水成本低至2元/m³。这比国内目前南水北调不低于10元/m³的调水成本显然具有更大的市场竞争力^[5]。

表2 不同淡化工艺(MSF、MED、RO)的能耗与成本

Tab.2 Energy consumption and costs of MSF, MED and RO

项目	MSF	MED	RO
电耗/(kW·h·m ⁻³)	4~6	1.5~2.5	2~5
热耗/(MJ·m ⁻³)	190~390	230~390	
热能电当量/(kW·h·m ⁻³)	9.5~19.5	5~8.5	
总电当量/(kW·h·m ⁻³)	13.5~25.5	6.5~11.0	2~5
制水成本/(元·m ⁻³)	3.72~12.52	3.72~7.22	2.00~4.00

2.4 SMR耦合海水淡化优势

2.4.1 降低制水成本

大型海水淡化厂的成本构成如图4所示。

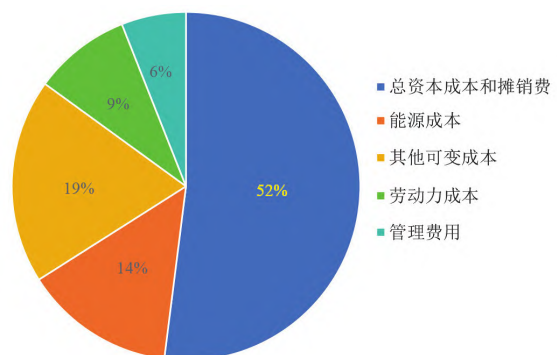


图4 大型海水淡化厂成本构成

Fig.4 Cost components of large desalination plants

由图4可以看出,在海水淡化项目中,建设成本占比很大(52%),远远超过其运营成本^[15]。这一价格结构使得海水淡化建设成本成为制约其发展的主要因素。因此,降低海水淡化厂的建设投资门槛是推动海水淡化技术广泛应用的首要因素。

根据发达国家2050年普遍实现净零碳排放愿景,2030年前发达经济体将关停所有化石燃料发电厂,2040年前世界上所有化石燃料发电厂将被替换为核电等低碳排发电厂^[16],对同一区间内SMR海水淡化、超超临界火电(USC)海水淡化和大型核反应堆(LR)海水淡化的建设与运营成本^[6,17]进行对比,结果见表3。其中,SMR海水淡化投资需求最低,即,SMR海水淡化<USC海水淡化<LR海水淡化。在碳税价格为140元/t时(我国目前最高价),低碳能源海水淡化还能降低近20%运行成本^[18];若以欧洲目前100欧元/tCO₂计,SMR海水淡化因碳税节省的运行成本优势更加突出。

表3 SMR、LR和USC发电厂成本对比

Tab.3 Cost comparison of SMR, LR and USC power generation plant 元·kW⁻¹

成本	SMR (PWR 60 MW×12)	USC (350 MW)	LR (PWR 1 200 MW)
建设成本	24 739	26 240	39 881
运营成本	21.4	32.1	16.9

2.4.2 利用低碳能源

SMR同时耦合热脱盐工艺与RO工艺,通过能量的高效利用(利用率>80%)以及生产的集约化,可显著降低整体制水成本。多工艺集成SMR海水淡化方案^[19]见图5。

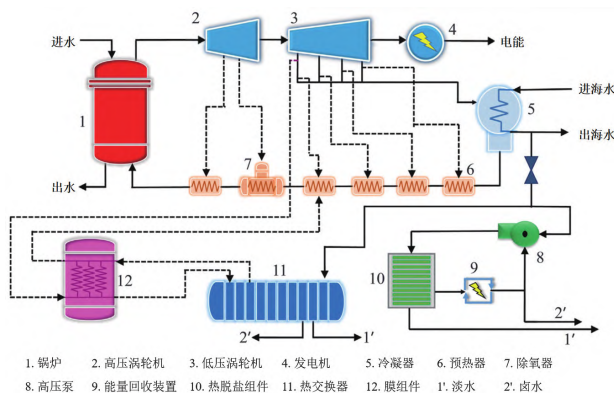


图5 多工艺集成SMR海水淡化方案

Fig.5 General scheme of hybrid installation integrated with SMR

利用MSF排出的卤水作为MED热源,同时将两者产生的优质淡水作为反应堆冷却剂的给水以及蒸发器的给水。RO给水可以通过热脱盐系统排放的卤水来进行预热,从而提高RO组件的使用寿命和系统效率。RO排出的卤水可以作为MSF或MED

的给水,RO产水与热脱盐系统产水混合后可改善水质,降低成本。

2.4.3 错峰满载制氢

与大型火电站或大型核电站不同,SMR所有机组模块都可以满负荷运行,而不需要使用负载模式对功率进行调整而导致某些组件(如泵和涡轮机)在最佳工况外的条件下运行,从而降低电力转换效率。在夜间/谷电期间运行时,只需要对部分机组工作模式进行切换,如断开与电网连接,就可实现全功率和最大转换效率工作。

SMR海水淡化错峰满载制氢是另外一个可行方向。核电自身就是低碳能源,利用供应过剩期间的SMR谷电进行制氢,电解水制氢即绿氢。此外,在工业中心附近建设SMR海水淡化厂,不仅可以直接利用海水作为水源节省供水成本,而且还能大幅降低高昂的氢气运输和分配成本,大大提高了SMR海水淡化联用工业制氢的竞争力。

目前,电解水制氢工艺中,碱性电解槽制氢技术最为成熟,生产成本较低,但是难以快速启停,也就是说,波动性电能无法与之配合使用,而SMR输出的稳定电力正好能够弥补这一不足。电解水制氢成本受电价影响很大,电费往往占到总成本的70%以上。一般认为,当电价低于0.3元/(kW·h)时,电解水制氢成本会接近于传统化石能源制氢成本。如果使用传统化石燃料发电厂的谷电制氢,其电价也很难达到0.3元/(kW·h)这样的低价。然而,核电电价成本仅为0.212元/(kW·h),其中,燃料成本0.04元/(kW·h),建设成本0.04元/(kW·h),运行成本0.132元/(kW·h)^[20]。合理利用SMR错峰谷电制氢,其成本可以达到13元/kgH₂,可与煤炭气化制氢(12.1元/kgH₂)和天然气重整制氢(14.6元/kgH₂)技术相竞争^[21]。

2.5 卤水资源化

海水富含各类化学资源,包括钠、镁、钙、钾、锂、硫酸盐和溴等。考虑到海水淡化行业未来增长趋势,将卤水转化为有价值的副产品潜力巨大,这在经济和生态方面都具有重要意义。

全球经济严重依赖于稀有金属和贵重矿物的可持续供应,而21世纪先进制造业中可持续产品的开发和部署对这些材料的需求更高。镁、锂等重要金属是欧洲经济发展的关键原材料,而欧洲本土这些资源相对匮乏,通过从卤水中提取镁、锂,可以摆

脱对这些材料进口的严重依赖^[22]。在海水淡化过程中,氢氧化钠也是重要的化学材料,通过特定提取方法可以从中获取氢氧化钠,用于平衡进水的酸度,以防止膜污染^[23]。

美国能源部的数据显示,世界海洋中铀含量是所有已知陆地储量的500倍。由于核电项目的快速发展,铀作为核裂变原料,2050年其产量与需求累计缺口预计 $85 \times 10^4 \text{ t}$ ^[24]。而新研发的多孔膜材料,其铀提取性能可提高至现有膜材料的20倍左右^[25]。随着技术的不断进步,有望实现从海水中提取铀,以满足日益增长的铀需求。此外,海水中氘浓度约30 mg/L,1 L海水通过聚变反应产生的能量相当于300 L汽油^[26]。而从海水中提取氘的过程相对简单且已经过充分验证,高氘浓度产水可以通过海水蒸馏或从卤水中获得。氘可用作核聚变反应的主要原料,核聚变一旦实现,将彻底改变能源和水的生产方式,或将是未来可持续海水淡化的最终途径。

可见,卤水提取物具有双重利用价值:一方面可以作为资源回收的原料;另一方面还可以就地利用,作为海水淡化处理药剂与能量来源。

2.6 环境影响评价

海水淡化对环境的影响主要体现在两个方面:一是温室气体排放对大气的影 响,二是取水流量和卤水排放引起的海洋影响。传统海水淡化厂由于装机容量较大,对大气和海洋的影响较为明显,而SMR海水淡化由于装机容量相对较小,对大气和海洋的影响将会减轻许多。

2.6.1 大气影响

化石燃料燃烧会产生大量温室气体和有毒排放物。据估计,使用化石燃料进行海水淡化,每增加 $1\,000 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 规模, CO_2 、 SO_2 、 NO_x 、VOCs的排放量将分别增加 2×10^8 、 20×10^4 、 6×10^4 和 $1.6 \times 10^4 \text{ t/a}$ ^[2]。截止到2020年,全球海水淡化厂装机规模近 $1 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{d}$,每年消耗56 TW·h的电力^[9,27]。若继续使用化石燃料作为能源,每年额外产生的 CO_2 、 SO_2 、 NO_x 、VOCs排放量分别达 20×10^8 、 200×10^4 、 60×10^4 和 $16 \times 10^4 \text{ t}^{[9]}$ 。表4列出了基于化石燃料的海水淡化厂全生命周期评估空气排放数据^[2]。

使用核能进行海水淡化则可以避免GHG排放问题。以RO工艺为例,核能海水淡化向大气中释放的GHG约10~60 $\text{gCO}_2\text{-eq}/\text{m}^3$,远低于天然气海水淡化(1 000~2 000 $\text{gCO}_2\text{-eq}/\text{m}^3$)和煤炭海水淡化

(1 900~3 200 $\text{gCO}_2\text{-eq}/\text{m}^3$)^[28]。除了GHG排放外,放射性物质释放也是一个重要因素。煤的平均放射性为 $1.6 \times 10^5 \text{ Bq/t}$,与容量相当的燃煤电厂相比,核电厂向大气中释放的放射性物质仅为其1%^[29]。因此,从空气污染角度来看,核能海水淡化可以被认为是环境友好型。

表4 基于化石燃料的海水淡化系统产生的相关空气排放
Tab.4 Relevant air emissions produced by seawater desalination systems based on fossil fuels

项目	MSF	MED	RO
$\text{CO}_2/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	18.05	23.41	1.78
粉尘/ $(\text{g} \cdot \text{m}^{-3})$	1.02	2.04	2.07
$\text{NO}_x/(\text{g} \cdot \text{m}^{-3})$	24.41	28.29	3.87
VOCs(非甲烷)/ $(\text{g} \cdot \text{m}^{-3})$	5.85	7.90	1.10
$\text{SO}_2/(\text{g} \cdot \text{m}^{-3})$	26.29	27.92	10.68

2.6.2 海洋影响

① 取水影响

核能海水淡化取水通常采用直接进水系统,包括开放式或地面进水式。然而,直接进水系统以及泵、过滤器和筛网等整体组件使用会对水生生物造成严重威胁。将海水直接吸入核能海水淡化设施,可能还会导致水生生物在进水系统中受到撞击和夹带。与使用化石燃料海水淡化厂相比,核能海水淡化厂由于取水率较高,预计会表现出更高的冲击率和夹带率。

对于SMR核能海水淡化厂而言,由于海水取水量较少,可采用间接进水系统,冷却塔由开放式转变为封闭式,从而显著降低对水生生物的撞击和夹带现象,并实现更高效的能源利用。间接进水系统具有独特的设计特点,如进水装置与海洋之间多孔岩石和沙子的缓冲作用会使吸力降低,同时为海洋生物提供一定的屏障。因此,与直接进水系统相比,间接进水系统在降低夹带率和撞击率方面具有显著优势^[2]。专有屏障技术和收集系统也可用作减少夹带和撞击的措施,包括使用楔形丝网、细网筛、屏障网和生物过滤屏障等。此外,通过全面水文研究有助于减少撞击和夹带,以便将取水系统定位在生物活性较低的地区。

② 浓卤水排放影响

海水淡化过程会排放盐度高于进料盐度的浓卤水,而浓卤水的排放由于其高盐度,以及由进水预热和化学预处理而引起的温度和pH变化等不利

因素,会对海洋生物产生不良影响(见表5),特别是对盐度变化敏感的海洋生物影响更为显著。高于环境温度的排放水还会降低溶解氧水平,从而影响海洋生物群新陈代谢率,并改变生物体生理和行为反应^[2]。

表5 海水淡化的环境影响

Tab.5 Environmental impact of seawater desalination

项目	MED	MSF	RO
排放温度	比环境温度高10~15℃	比环境温度高10~15℃	常温排放
TDS排放增长率/%	15~20	15~20	50~80
CO ₂ /(kg·m ⁻³)	7.0~17.6	15.6~25.0	1.7~2.8
淡化水含盐量/(g·m ⁻³)	<10	<10	<500
海水消耗量/(m ³ ·m ⁻³)	5~8	8~10	2~4

为了减轻卤水处理对海洋环境的影响,应积极寻找利用卤水的有效方法。例如,将卤水用于提取高附加值资源(锂、铀、氘)或用于普通制盐,以避免浓卤水直接排放海洋,从而消除相关不利影响。即使是小规模卤水排放,也应考虑向具有高能量的开阔海洋(如洋流、海浪等)排放,以促进其与海水的混合。

3 结语

海水淡化技术目前已十分成熟,但其运行能耗限制了其普遍应用。传统化石能源消耗不仅体现在能源价格上,更重要的是化石能源所产生的温室气体——CO₂。鉴于此,开发使用清洁或低碳能源用于海水淡化,成为目前努力的方向并取得了一定成效。其中,SMR技术与海水淡化耦合似乎具有较好的应用前景,因为应用SMR可降低制水成本、大幅减少碳排放并能错峰满载制氢。对SMR唯一担心的核泄漏问题因其固有安全系统设计、较低功率输出以及较小堆芯等特点有助于缩小场外应急区域,这将会逐步提高社会接受程度。

SMR海水淡化技术对环境产生的影响较小,产生的浓盐水/卤水可用于提取高附加值资源,如锂、铀、氘等,进一步加大海水利用的综合价值并降低卤水排海对海洋生态的潜在风险。

SMR海水淡化技术虽然主要针对海岛、沿海缺水地区,但它有望替代传统化石能源海水淡化技术,在100~200 km的近海区域亦可获得应用,这比远距离调水成本和生态代价小得多。

参考文献:

- [1] IEA. Nuclear power and secure energy transitions [EB/OL]. [2023-12-03]. <https://www.iea.org/reports/nuclear-power-and-secure-energy-transitions>.
- [2] MICALE G, RIZZUTI L, CIPOLLINA A. Seawater Desalination: Conventional and Renewable Energy Processes [M]. Berlin: Springer Berlin Heidelberg, 2009.
- [3] ARIS. ARIS related publications [EB/OL]. [2023-12-03]. <https://aris.iaea.org/sites/Publications.html>.
- [4] IEA. An energy sector roadmap to carbon neutrality in China [EB/OL]. [2023-12-03]. <https://www.iea.org/reports/an-energy-sector-roadmap-to-carbon-neutrality-in-china>.
- [5] 郝晓地, 李天宇, 曹达敏. 北京给水水源的历史变迁与终极选择[J]. 中国给水排水, 2016, 32(8): 1-7.
HAO Xiaodi, LI Tianyu, CAO Daqi. Historical transformation and ultimate choice of drinking water sources in Beijing City [J]. China Water & Wastewater, 2016, 32(8): 1-7 (in Chinese).
- [6] BLACK G A, AYDOGAN F, KOERNER C L. Economic viability of light water small modular nuclear reactors: general methodology and vendor data [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2019, 103: 248-258.
- [7] ZHANG Z Y, SUN Y L. Economic potential of modular reactor nuclear power plants based on the Chinese HTR-PM project [J]. Nuclear Engineering and Design, 2007, 237(23): 2265-2274.
- [8] Energy. gov. Commercializing advanced nuclear reactors explained in five charts [EB/OL]. [2023-12-03]. <https://www.energy.gov/ne/articles/commercializing-advanced-nuclear-reactors-explained-five-charts>.
- [9] 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.
- [10] Globe Newswire News Room. Markets R and battling water scarcity: the growing significance of seawater and brackish water desalination [EB/OL]. (2023-11-24) [2023-12-03]. <https://www.globenewswire.com/en/news-release/2023/11/24/2785501/28124/en/Battling-Water-Scarcity-The-Growing-Significance-of-Seawater-and-Brackish-Water-Desalination.html>.
- [11] CURTO D, FRANZITTA V, GUERCIO A. A review of the water desalination technologies [J]. Applied

- Sciences, 2021, 11(2): 670.
- [12] DO THI H T, PASZTOR T, FOZER D, *et al.* Comparison of desalination technologies using renewable energy sources with life cycle, pestle, and multi-criteria decision analyses[J]. Water, 2021, 13(21): 3023.
- [13] BUIJS P. Paul Buijs: busting four desalination myths [EB/OL]. [2023-12-03]. <http://www.aquatechtrade.com/news/desalination/paul-buijs-busting-desalination-myths>.
- [14] AYZAZ M, NAMAZI M A, DIN M A U, *et al.* Sustainable seawater desalination: current status, environmental implications and future expectations [J]. Desalination, 2022, 540: 116022.
- [15] EKE J, YUSUF A, GIWA A, *et al.* The global status of desalination: an assessment of current desalination technologies, plants and capacity [J]. Desalination, 2020, 495: 114633.
- [16] IEA. Net zero by 2050: a roadmap for the global energy sector[EB/OL]. [2023-12-03]. <https://www.iea.org/events/net-zero-by-2050-a-roadmap-for-the-global-energy-system>.
- [17] EIA. Capital costs and performance characteristics for utility scale power generating technologies [EB/OL]. [2023-12-03]. https://www.eia.gov/analysis/studies/powerplants/capitalcost/pdf/capital_cost_AEO2020.pdf.
- [18] TIAN L, WANG Y Q, GUO J L. A comparative economic analysis of the contribution of nuclear seawater desalination to environmental protection using the clean development mechanism (CDM) [J]. Desalination, 2003, 157(1/3): 289-296.
- [19] SADEGHI K, GHAZAIE S H, SOKOLOVA E, *et al.* Comprehensive techno-economic analysis of integrated nuclear power plant equipped with various hybrid desalination systems [J]. Desalination, 2020, 493: 114623.
- [20] NEI. Nuclear costs in context [EB/OL]. [2023-12-03]. <https://www.nei.org/resources/reports-briefs/nuclear-costs-in-context>.
- [21] 郝晓地, 闫颖颖, 李季, 等. 污水处理出水电解制氢可行性分析[J]. 中国给水排水, 2023, 39(18): 1-8. HAO Xiaodi, YAN Yingying, LI Ji, *et al.* Feasibility analysis of producing hydrogen by electrolyzing effluent from wastewater treatment [J]. China Water & Wastewater, 2023, 39(18): 1-8 (in Chinese).
- [22] LI Z, MERCKEN J, LI X H, *et al.* Efficient and sustainable removal of magnesium from brines for lithium/magnesium separation using binary extractants [J]. ACS Sustainable Chemistry & Engineering, 2019, 7(23): 19225-19234.
- [23] KUMAR A, PHILLIPS K R, THIEL G P, *et al.* Direct electrosynthesis of sodium hydroxide and hydrochloric acid from brine streams [J]. Nature Catalysis, 2019, 2(2): 106-113.
- [24] IAEA. IAEA increases projections for nuclear power use in 2050 [EB/OL]. [2023-12-03]. <https://www.iaea.org/newscenter/pressreleases/iaea-increases-projections-for-nuclear-power-use-in-2050>.
- [25] YANG L S, XIAO H Y, QIAN Y C. Bioinspired hierarchical porous membrane for efficient uranium extraction from seawater [J]. Nature Sustainability, 2022, 5: 71-80.
- [26] Energy. gov. DOE explains...deuterium-tritium fusion reactor fuel [EB/OL]. [2023-12-06]. <https://www.energy.gov/science/doe-explainsdeuterium-tritium-fusion-reactor-fuel>.
- [27] IEA. Introduction to the water-energy nexus [EB/OL]. [2023-12-03]. <https://www.iea.org/articles/introduction-to-the-water-energy-nexus>.
- [28] AL-OTHMAN A, DARWISH N N, QASIM M, *et al.* Nuclear desalination: a state-of-the-art review [J]. Desalination, 2019, 457: 39-61.
- [29] YAO Z T, JI X S, SARKER P K, *et al.* A comprehensive review on the applications of coal fly ash [J]. Earth-Science Reviews, 2015, 141: 105-121.
-
- 作者简介:**郝晓地(1960—),男,山西柳林人,博士,教授,从事市政与环境工程专业教学与科研工作,主要研究方向为污水生物脱氮除磷技术、污水处理数学模拟技术、可持续环境生物技术,现为国际水协期刊 *Water Research* 区域主编(Editor)。
- E-mail:**haoxiaodi@bucea.edu.cn
- 收稿日期:**2023-12-07
- 修回日期:**2023-12-27

(编辑:丁彩娟)