

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2026.02.002

基于终端用户空间特征的海水淡化利用模式分析

吴放¹, 缪正强¹, 陈勇¹, 褚俊英², 程昭¹, 周祖昊²,
马明月², 李孟泽²

(1. 山东核电有限公司, 山东烟台 265116; 2. 中国水利水电科学研究院 流域水循环
与水安全全国重点实验室, 北京 100044)

摘要: 作为优质的非常规水源,海水淡化产品水对缓解沿海地区水资源短缺、保障城市供水安全、优化供水结构具有重要意义,已成为提高区域水资源承载力的重要途径。从终端用户的空间特征出发,探索了海水淡化利用的典型模式(“点”“线”“面”三种模式),识别了海水淡化利用三个主导影响因素(成本可接受性、水质可达性和水量稳定性),提出提升价格合理性、水质满足性以及水量稳定性是促进海水淡化利用不同模式发展的关键途径。同时,对海水淡化利用模式发展进行展望,提出未来海水淡化利用将呈现规模化、多元化和集成化趋势。该研究成果可为我国系统推动海水淡化利用提供技术支撑。

关键词: 海水淡化; 终端用户; 空间模式

中图分类号: TU991 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2026)02-0009-07

Pattern Analysis of Seawater Desalination Utilization Based on Spatial Characteristics of End Users

WU Fang¹, MIAO Zhengqiang¹, CHEN Yong¹, CHU Junying², CHENG Zhao¹,
ZHOU Zuhao², MA Mingyue², LI Mengze²

(1. Shandong Nuclear Power Company Ltd., Yantai 265116, China; 2. State Key Laboratory of
Water Cycle and Water Security, China Institute of Water Resources and Hydropower Research,
Beijing 100044, China)

Abstract: As a high-quality unconventional water source, desalination seawater plays a crucial role in alleviating water shortages in coastal areas, ensuring urban water supply security, and optimizing water supply structures. It is increasingly viewed as an essential solution to enhance the carrying capacity of regional water resources. This study identifies typical patterns of seawater desalination utilization based on the spatial characteristics of end users, including “point” pattern, “line” pattern, and “surface” pattern. Three main factors influencing seawater desalination utilization are identified, including cost acceptability, water quality accessibility, and water quantity stability. It is proposed that improving the rationality of prices, water quality satisfaction, and water quantity stability are vital for promoting development of various desalination utilization patterns. Future trends in seawater desalination utilization are also proposed, including scaling, diversification, and integration. This research can provide technical

基金项目: 山东核电有限公司项目(SDNP-TSC-2019-Z02、SDNP-TSC-2024-Z03)

通信作者: 褚俊英 E-mail: jchu@iwhr.com

support for advancing seawater desalination utilization in China.

Keywords: desalination seawater; end users; spatial pattern

发展海水淡化是增加水资源供给、优化供水结构的重要手段,对沿海地区缓解水资源制约、保障经济社会可持续发展以及提升流域生态安全具有重要意义。随着水资源日益紧缺、常规水源成本持续提升以及海水淡化利用技术的不断创新,缺水带来的经济社会损失已显著超过海水淡化成本。此外,考虑其在生态环境方面带来的附加收益,海水淡化利用在全球范围内得到了稳步发展^[1]。

当前针对海水淡化利用模式的研究主要侧重于海水淡化利用的主要用途、多水源体系建设以及相关政策,对海水淡化利用模式认知的系统性仍有待提升,因此开展海水淡化利用模式研究尤为必要和迫切。从终端用户空间特征视角,探索海水淡化利用的典型模式及其影响因素,分析并提出该领域的发展趋势,以期为推动我国海水淡化利用实践提供技术支撑。

1 我国海水淡化产品水的终端用户及分布

我国海水淡化工程起步较早,但滞后于城市供水综合生产能力的发展。自 2005 年以来,随着我国缺水问题的日益突出,海水淡化水的规模发展速度较快。自然资源部海洋战略规划与经济司发布的《2024 年全国海水利用报告》显示,截至 2024 年底,我国海水淡化工程有 158 个,工程规模达到 285.6 万 m³/d,占全球海水淡化规模的 3.12%,主要分布在辽宁、天津、河北、山东、江苏、浙江、福建、广东、广西以及海南 10 个沿海省市。

海水淡化产品水的终端用户指淡化海水的直接使用者,我国海水淡化产品水的终端用户主要分为工业和生活两大类,以工业用水为主,占比超过 85%^[2]。根据中国水利企业协会脱盐分会公布的数据,核电和电力、石化和化工行业海水淡化用水规模占比最大,分别为 39.4% 和 20.9%,其次为钢铁和有色(15.4%)、市政和饮用(13.8%)。海水淡化产品水用作工业用水主要集中在沿海地区北部、东部和南部海洋经济圈的核电和电力、石化和化工、钢铁和有色等高耗水行业;海水淡化产品水用作生活用水主要集中在海岛地区和北部海洋经济圈的天津、青岛等沿海城市,以市政(包括冲厕、洗车和

冲洗路面等)和生活饮用为主。

2 面向终端用户特征的海水淡化利用模式

基于海水淡化水终端用户的特征,我国海水淡化利用主要有“点”“线”“面”三种典型模式,基本框架如图 1 所示。其中,海水淡化利用的“点”模式以供需市场行为为主、政府补贴为辅;而海水淡化利用的“线”模式和“面”模式则以政府行为为主。当前,我国海水淡化利用以“点”模式和“面”模式为主流,“线”模式相对较少,是未来理论和实践探索的方向。

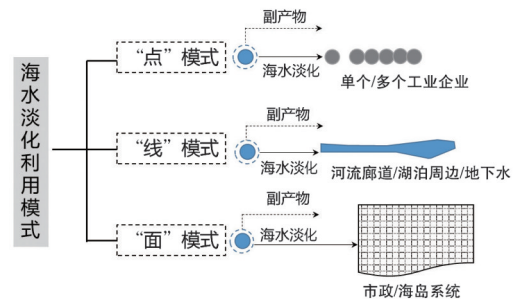


图 1 基于终端用户特征的海水淡化利用模式框架

Fig.1 Framework for seawater desalination utilization patterns based on end users characteristics

2.1 “点”模式

在该模式中,海水淡化利用的用户呈点状分布(用户以分散式的工业企业项目为主,如石化、钢铁、船厂等),从海水淡化产品水的供给点到用水点形成“点对点”的供水方式,水量水质稳定,可为工业企业用水提供强有力的水资源保障。通常,这些用户自身的生产用水量较大,同时又有很多余热可以利用,以降低成本。该模式可进一步细化为“单点”和“多点”模式,其中“单点”模式主要对一个点状用户供水,即海水淡化厂向单独的工业企业供水,如天津大港新泉海水淡化工程(一期规模 10 万 m³/d),主要为中石化天津 100 万 t 乙烯项目供水,浙江舟山绿色石化基地海水淡化工程的用水户为浙石化 4 000 万 t/a 炼化一体化项目;“多点”模式则针对有限数量的多个点状的用水户,由海水淡化厂向多个企业供水,如山东青岛董家口海水淡化工程,用户为董家口经济区的青岛中石化、青岛华电等多家

企业;南山铝业海水淡化项目的用户为东海热电及航材园各铝业公司。海水淡化产品水可有效替代工业用户自来水,缓解企业生产缺水的难题。海水淡化利用的“点”模式在国内外应用较多,是主流的海水淡化利用方式。

2.2 “线”模式

在该模式中,海水淡化利用的用户呈线状分布,从海水淡化产品水的供给点到用水户之间形成“点对线”的供水方式。例如,以色列正在探索将海水淡化产品水泵入该国最大、全球海拔最低的淡水湖加利利海,为湖泊周边沿线的农场和葡萄园提供灌溉水源,并应对干旱条件下湖泊水位下降问题;此外,该国将海水淡化产品水输送到梅纳什河和希克马河系统,以回补该区域的地下水,其优点是海水淡化产品水水质更好,不易造成含水层堵塞。我国山东核电探索将海水淡化产品水补充到山东半岛的河流廊道中,以改善河流生态系统,促进流域经济社会高质量发展。总体上,相对于“点”模式而言,海水淡化利用的“线”模式发展仍不充分,主要受到成本高、能耗大以及生态环境影响大等因素的制约,其应用在国内外尚处于探索阶段。

2.3 “面”模式

在该模式中,海水淡化利用的用户呈面状分布,从海水淡化产品水的供给点到用水户形成“点对面”的供水方式,代表性的用户有市区、海岛和农业灌区等。海水淡化产品水接入市政供水管网,或与当地水库水勾兑后再进入供水管网,形成常规水源与海水淡化产品水联合供水体系,可为城市与海

岛经济社会发展提供重要水源,并发挥调峰供水、优化水质作用。海水淡化利用的“面”模式在我国主要分布于天津、青岛、舟山等沿海缺水城市以及海岛地区。例如,天津北疆电厂海水淡化工程(规模20万 m^3/d)的海水淡化产品水与自来水掺混后进入滨海新区供水管网,用于居民生活、城市绿化等方面。青岛市百发海水淡化工程是我国首个取得饮用水卫生许可证的海水淡化项目,也是该市供水系统调峰调压的主要水源,其产品水通过市政管网直接进入居民家中^[3],在一定程度上缓解了青岛市的用水高峰缺水问题。在海岛地区,浙江舟山群岛将海水淡化产品水接入供水管网系统,构建了海岛以及岛际之间的引配水工程^[4]。杨志宏等^[5]以山东烟台崆峒岛为例,通过分析引水工程及海水淡化工程的优势,认为后者在近岸海岛规模化供水方式中更有发展前景。对于农业灌区,当传统灌溉无法适应时,基于海水淡化的农业灌溉得到发展^[6]。

3 不同模式下海水淡化利用的影响因素

从终端用户视角出发,海水淡化利用的主导影响因素为成本合理性、水质可达性和水量满足性(见表1)。当前,海水淡化利用的“线”“面”模式通常以政府保障水安全为主,侧重水质可达性和水量满足性,而海水淡化利用的“点”模式以市场行为模式为主,除了水质可达性、水量满足性外,更追求经济效益,对价格合理性也尤为关注。从整体上看,提升海水淡化产品水的价格合理性、水质可达性以及水量匹配性是促进海水淡化利用不同模式发展的关键。

表1 海水淡化利用不同模式的特点与主要影响因素

Tab.1 Characteristics and major influencing factors of different patterns of seawater desalination utilization

模式分类	终端用户特征	主要影响因素	调控重点
“点”模式	海水淡化产品水用户以企业为主,呈点状分布,可细分为“单点”模式和“多点”模式;供需水量和水质匹配性好,用户分散且广泛	水质可达性,水量稳定性,价格合理性	以企业供需市场行为为主、政府补贴为辅
“线”模式	海水淡化产品水用户用水以河湖和地下水为主,呈线状分布;用户较少,逐步探索	水质可达性,水量稳定性	以政府行为为主
“面”模式	海水淡化产品水用户以市政和海岛供水为主,有供水管网覆盖,呈面状分布;用户集中且广泛,逐步成熟	水质可达性,水量稳定性	以政府行为为主

3.1 价格合理性

价格是影响不同模式下海水淡化产品水利用的重要因素,主要体现以下两个方面:①海水淡化产品水自身的价格影响不同模式终端用户使用海水淡化水的直接成本;②常规水源的价格决定不同

模式终端用户使用海水淡化产品水的机会成本。受缺水或水污染导致常规水源开发建设成本的不断增大或者政府价格管制以刺激用户节水等综合因素的影响,常规水源的价格高于海水淡化成本,终端用户更倾向于选择海水淡化产品水,不同模式

条件下海水淡化利用的经济可行性更大^[7]。海水淡化产品水的价格主要受海水淡化成本以及政府补贴等外部因素的影响^[8],其成本主要包括建设投资和运行管理费用。其中,建设投资成本分为设备费用、管道费用、土地成本、施工投资等;运行管理费用包括能源成本、材料成本、维修费用、药剂成本以及人员管理费用等。海水淡化成本通常受到海水淡化工艺、建设规模、设备选择、资金来源、能源价格以及税收等多方面的影响,通常能源成本占比较大。根据相关研究^[9],大型海水淡化工程的两种主流典型工艺即低温多效和反渗透的制水成本分别为 6.23 元/m³和 5.85 元/m³。目前,反渗透工艺在经济性方面具有优势,能源消耗与膜材料寿命是决定反渗透工艺成本的关键要素。随着新型能量回收技术的研发、清洁能源的利用、新型膜材料的开发、建设规模的扩大以及工艺和设备的优选,海水淡化的成本和价格将进一步降低^[10-12]。

近年来,随着技术的不断进步和海水淡化利用规模的扩大,加上太阳能、生物质能、风能、光伏等新能源的应用,海水淡化成本呈下降趋势,相较于成本高昂的远距离调水其经济优势开始显现,但仍高于自来水价格,成为其广泛应用的制约要素。采用经济政策,对海水淡化产品水价格进行调控是推动海水淡化发展的重要途径。例如,以色列采用私人承包海水淡化建设与运行模式,政府进行初期投资支持,并根据签约水价(浮动)购买海水淡化产品水,或者海水淡化工程实施过程中泵站、管道的建设和维护费用由政府支付^[13]。西班牙、科威特和沙特阿拉伯等国家海水淡化生产公司进行补贴,使海水淡化水的价格与居民家庭用水价格接近。新加坡海水淡化特许经营项目由私人企业建设和运行并与政府签约,考虑燃油价格和通货膨胀的影响,实行浮动价格。

3.2 水质可达性

相对于常规水源,无论采用热法还是膜法进行处理,海水淡化产品水的水质都较好。我国《海水淡化产品水水质要求》(HY/T 247—2018)对不同工艺海水淡化产品水的溶解性总固体(TDS)给出了限值,即单级反渗透法产品水 TDS 不大于 500 mg/L,单级反渗透法与蒸馏法混合产品水 TDS < 500 mg/L,两级反渗透产品水、蒸馏法产品水以及两级反渗透法与蒸馏法混合产品水 TDS 均小于 50 mg/L。该标准

还对水质检验项目和检验频率提出了要求,为不同模式的海水淡化产品水利用提供了重要基础。

在“点”模式条件下,海水淡化产品水主要作为工业用水,依据《海水淡化利用 工业用水水质》(GB/T 39481—2020),海水淡化产品水须满足循环冷却水补充水及工艺用水水源水质的要求,具体如表 2 所示。对于特定的工业用水,应根据不同的生产工艺要求确定是否增加后续处理工艺,以达到生产用水的水质要求。

表 2 海水淡化利用“点”模式主要水质指标要求

Tab.2 Requirements of major water quality indicators for the “point” pattern of seawater desalination utilization

控制指标	锅炉补给水水源	循环冷却水补充水及工艺用水水源
pH(25℃)	7.0~8.5	6.5~8.5
浑浊度/NTU	≤0.1	≤1.0
色度/度		≤15
TDS/(mg/L)	≤20	≤500
总有机碳(TOC)/(mg/L)	≤0.5	≤2.5
总硬度(以 CaCO ₃ 计)/(mg/L)	≤1.0	≤50
总碱度(以 CaCO ₃ 计)/(mg/L)		≤20
氯化物/(mg/L)		≤250
硫酸盐/(mg/L)		≤20
铁/(mg/L)	≤0.01	≤0.3
锰/(mg/L)	≤0.01	≤0.1
二氧化硅(SiO ₂)/(mg/L)	≤0.5	≤1.0
游离氯/(mg/L)	≤0.05	≤0.05

在“线”模式条件下,海水淡化产品水补充到河流或渠道系统,其水质应满足水功能区或控制断面水质指标要求,即《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)。若补水河流为水源地,还应满足《生活饮用水水源水质标准》(CJ 3020—93)。

在“面”模式条件下,进入市政管网的海水淡化产品水水质应满足 HY/T 247—2018 和《海洋技术-反渗透海水淡化产品水水质-市政供水指南》(ISO 23446: 2021)要求,主要控制指标及其水质要求如表 3 所示。研究^[14]表明,受海水淡化产品水纯度高、硬度低、碱度低等因素的影响,长期单一饮用海水淡化产品水存在一定的健康风险,可通过处理措施降低海水淡化产品水进入自来水系统可能带来的水质劣化、水温波动以及细菌滋生等风险。根据 HY/T 247—2018 要求,在海水淡化产品水作为市政

供水进入供水管网前,水质除符合《生活饮用水卫生标准》(GB 5749—2022)外,还应该满足总硬度、总碱度和朗格利尔指数等指标的要求。

表3 海水淡化利用“面”模式主要水质指标要求

Tab.3 Requirements of major water quality indicators for the “surface” pattern of seawater desalination utilization

控制指标	ISO 23446: 2021	HY/T 247—2018
TDS/(mg/L)	一级反渗透:≤500	单级反渗透:≤500
	二级反渗透:≤100	两级反渗透:≤50
pH(25℃)	7.5~8.5	
总硬度(以CaCO ₃ 计)/(mg/L)	60~120	50~450
总碱度(以CaCO ₃ 计)/(mg/L)	≥50	≥50
朗格利尔指数	-0.5~0.5	-0.5~0.5

3.3 水量稳定性

从水量上看,海水淡化的出水具有稳定性,但其利用受到用户需水特点影响,存在不稳定性。在“点”模式条件下,海水淡化的水量需求主要受工业生产规模、生产过程的影响。在“线”模式条件下,海水淡化的水量需求主要集中在非汛期以及汛期的缺水时段,或者干旱期。在“面”模式条件下,海水淡化产品水与自来水按照一定比例掺混用于市政供水,水量需求相对较稳定。

4 海水淡化利用模式发展趋势

未来一个时期,我国海水淡化规模将不断扩大,终端用户体系将不断扩大。依据2021年国家发展和改革委员会、自然资源部联合印发的《海水淡化利用发展行动计划(2021—2025年)》,到2025年,我国海水淡化总规模达到290万m³/d以上,新增海水淡化规模125万m³/d以上,其中,沿海城市和海岛地区分别新增105万、20万m³/d以上。在此过程中,海水淡化利用的“点”“线”“面”模式将不断深化,并呈现融合与交织态势。

① 实现规模化发展,持续推动海水淡化利用“点”“线”“面”模式发展。主要包括如下几个方面:

a. 持续推进海水淡化利用多场景“点”模式发展,持续扩大海水淡化的工业用量,为工业企业提供水资源保障,提高企业市场竞争力。在此过程中,应建立良好的价格激励机制。如前所述,海水

淡化产品水的价格是影响海水淡化“点”模式发展的重要因素,建议尽快理顺海水淡化产品水与常规水源的水价体系,必要时建立海水淡化利用的补贴机制,发挥水价调节作用,鼓励沿海石化、钢铁、火电厂、核电厂等更多的用水企业利用海水淡化产品水。

b. 积极探索海水淡化利用“线”模式,助力国家河湖生态水网建设。基于河湖生态需水状况,将海水淡化产品水作为主要水源进入沿海地区水网体系,实现大水网的综合功能,促进流域生态环境保护与高质量发展。

c. 推动海水淡化利用“面”模式规模化发展,除沿海城市、城镇以及海岛外,不断向城乡一体化供水系统延伸,建立海水淡化产品水与常规水源联合配水体系,提升城乡饮水安全保障水平。在此过程中,应实施系统化的水质健康风险控制,在水源环节应加强钙镁离子、硼、氟化物、溴化物等污染物指标控制,出台相应的技术标准、规范;在输配水环节,针对海水淡化水纯度高、硬度低和碱度低的特点,采用后处理技术(如添加药剂法、溶解矿石法等)和自来水掺混配比技术等^[15],降低海水淡化产品水进入市政供水系统带来的水质风险。除水质外,拓展海水淡化产品水在应急等方面的应用,调蓄海水淡化产品水作为城市与区域应急战略水源已成为重要发展趋势。例如,浙江省玉环市亚海水淡化(一期)抗旱应急工程2019年通水后在旱季发挥了重大作用,有效缓解了玉环市应急供水难题。

② 推进多元化发展,实现海水淡化利用“水-热-产品”用户拓展。坚持循环经济理念,通过综合利用实现海水淡化处理“零排放”,拓展海水淡化产品水的用户群体,具体包括:一是推进“水-热”联产同送,对电力、冶金和化工生产工艺的余热进行利用^[16],实现水-热联产、同送,拓展用户群体;二是推进物质资源综合利用,海水淡化过程中产生的浓盐水用于制盐和盐化工,并提取高附加值的硼、镁等物质以及发展盐场制盐和氯碱工业等^[17]。例如,天津北疆电厂依托汉沽盐场开展浓海水制盐和海水提溴、提镁等产业化应用,形成“发电-海水淡化-浓海水制盐-土地节约整理-废弃物资源化再利用”循环经济产业链。通过海水淡化综合利用,实现“水-热-产品”等不同用户的有机链接,促进海水淡化利用综合效益的发挥。

③ 推动集成化发展,打造海水淡化利用“点-线-面”模式创新示范工程。随着海水淡化技术的成熟和经济性的日益提升,通过集成化实现长距离海水淡化产品水输送日益受到关注。张一鸣^[18]提出实施海水淡化西输工程破解华北西北需水问题的设想。山东海阳核电厂建设水热同产同送示范工程^[19],利用核能实现在“零碳”供热的同时“零能耗”制水,可有效解决沿海地区面临的水资源和供热热源短缺问题。未来,结合核能等新能源发展布局,建设“点-线-面”结合的海水淡化长距离、规模化、水热耦合和综合利用示范工程尤为必要且迫切,打造“点-线-面”模式结合、生态与经济社会并重、多场景利用的典范,更大发挥海水淡化价值,对我国实现“双碳”目标、提高供水安全性、推动高质量发展以及拉动基础建设投资促进经济发展都具有示范意义。

5 结论

海水淡化产品水作为优质的非常规水源,对缓解沿海地区水资源短缺、保障城市供水安全、优化城市供水水质意义重大,被认为是解决城市水资源短缺的重要途径。从终端用户出发,提出海水淡化利用的典型模式,即“点”“线”“面”模式。识别海水淡化利用的3个主导影响因素,包括成本可接受性、水质可达性、水量稳定性,其中,海水淡化利用的“线”模式、“面”模式更侧重水质可达性和水量满足性,而海水淡化利用的“点”模式则以市场行为模式为主,对价格合理性也尤为关注。研究表明,提升价格合理性、水质可达性以及水量匹配性是促进海水淡化利用不同模式发展的关键。

未来,海水淡化产品水作为水资源的重要补充和战略储备,将被纳入统一的水资源统筹规划和调配,其利用呈现规模化、多元化和集成化态势。推动不同类型海水淡化利用模式发展,将在我国沿海城市缓解水资源短缺、提升供水保障能力、促进社会稳定和推动经济可持续发展等方面发挥重要作用。

参考文献:

- [1] BAR-NAHUM Z, REZNIK A, FINKELSHTAIN I, et al. Centralized water management under lobbying: economic analysis of desalination in Israel [J]. *Ecological Economics*, 2022, 193: 107320.
- [2] 赵春红,刘中一,任志远. 我国非常规水源利用现状、问题和发展对策[J]. *水利发展研究*, 2022, 22(5): 54-58.
ZHAO C H, LIU Z Y, REN Z Y. The present situation, problems and countermeasures for non-conventional water resources utilization in China [J]. *Water Resources Development Research*, 2022, 22(5): 54-58 (in Chinese).
- [3] 康权,王锐浩,黄鹏飞,等. 青岛市海水淡化利用现状及潜力分析[J]. *盐科学与化工*, 2021, 50(5): 11-14.
KANG Q, WANG R H, HUANG P F, et al. Analysis on status and potential of seawater desalination in Qingdao [J]. *Journal of Salt Science and Chemical Industry*, 2021, 50(5): 11-14 (in Chinese).
- [4] 闫佳伟,王红瑞,朱中凡,等. 我国海水淡化若干问题及对策[J]. *南水北调与水利科技(中英文)*, 2020, 18(2): 199-210.
YAN J W, WANG H R, ZHU Z F, et al. Relevant issues and countermeasures of seawater desalination in China [J]. *South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology*, 2020, 18(2): 199-210 (in Chinese).
- [5] 杨志宏,张尊良,施坤涛,等. 近岸海岛规模化供水方案比较分析[J]. *给水排水*, 2022, 48(增刊2): 99-103.
YANG Z H, ZHANG Z L, SHI K T, et al. Comparative analysis of large-scale water supply schemes for offshore islands [J]. *Water & Wastewater Engineering*, 2022, 48(S2): 99-103 (in Chinese).
- [6] PISTOCCHI A, BLENINGER T, BREYER C, et al. Can seawater desalination be a win-win fix to our water cycle? [J]. *Water Research*, 2020, 182: 115906.
- [7] GAO L, YOSHIKAWA S, ISERI Y, et al. An economic assessment of the global potential for seawater desalination to 2050 [J]. *Water*, 2017, 9(10): 763.
- [8] GUDE V G. Desalination and sustainability—an appraisal and current perspective [J]. *Water Research*, 2016, 89: 87-106.
- [9] 吴云奇,贾麟,闫玉莲,等. 大型海水淡化工程投资和成本分析[J]. *盐科学与化工*, 2021, 50(3): 6-9.
WU Y Q, JIA L, YAN Y L, et al. Investment and cost analysis of large scale seawater desalination project [J]. *Journal of Salt Science and Chemical Industry*, 2021, 50(3): 6-9 (in Chinese).
- [10] 郝晓地,王邦彦,曹达敏,等. 海水淡化工程全球大规模应用发展趋势[J]. *中国给水排水*, 2022, 38(10): 18-24.

- HAO X D, WANG B Y, CAO D Q, et al. Global trends of desalination towards large-scale engineering applications [J]. *China Water & Wastewater*, 2022, 38 (10):18-24(in Chinese).
- [11] 翁晓丹,张希建,张建中,等. 我国反渗透海水淡化能量回收装置研究与应用现状[J]. *中国给水排水*, 2021,37(4):11-15.
- WENG X D,ZHANG X J,ZHANG J Z, et al. Research and application status of energy recovery devices for desalination of reverse osmosis sea water system in China [J]. *China Water & Wastewater*, 2021, 37(4):11-15 (in Chinese).
- [12] 郇松桦,刘秀丽. 海水淡化业发展现状及生产成本动态对比分析[J]. *水利经济*, 2022, 40(4):28-33, 78,92.
- HUAN S H, LIU X L. Development status of seawater desalination industry and dynamically comparative analysis of its production cost[J]. *Journal of Economics of Water Resources*, 2022, 40(4):28-33, 78, 92 (in Chinese).
- [13] 邢淑颖,刘淑静,李磊,等. 典型国家海水淡化水定价机制及对我国的启示[J]. *水利经济*, 2014,32(3):31-34,76.
- XING S Y, LIU S J, LI L, et al. Water-pricing mechanism of seawater desalination in typical countries and its enlightenment to China [J]. *Journal of Economics of Water Resources*, 2014,32(3):31-34,76 (in Chinese).
- [14] 刘静. 推进我国淡化海水作为生活用水利用的思考和建议[J]. *水利发展研究*, 2021,21(1):54-58.
- LIU J. Suggestions on promoting the utilization of desalinated seawater as domestic water in China [J]. *Water Resources Development Research*, 2021, 21(1):54-58(in Chinese).
- [15] 张权,张岩,张艺缤. 天津市淡化海水进入市政管网掺混比例研究[J]. *供水技术*, 2018,12(1):62-64.
- ZHANG Q, ZHANG Y, ZHANG Y B. Study on the mixing ratio of desalinated seawater into municipal pipe network in Tianjin City [J]. *Water Technology*, 2018, 12 (1):62-64(in Chinese).
- [16] WU Q Y, LI G, YIN J J, et al. The integration of seawater desalination system with nuclear power plant: operational flexibility enhancement and thermo-economic performances [J]. *Nuclear Engineering and Design*, 2024, 418:112889.
- [17] 陈进斌,关纯安,王晓丽,等. 我国海水淡化浓海水综合利用产业技术研究进展[J]. *盐科学与化工*, 2022, 51(12):1-6.
- CHEN J B, GUAN C A, WANG X L, et al. Research progress of industrial technologies for multipurpose utilization of concentrated seawater produced by seawater desalination in China [J]. *Journal of Salt Science and Chemical Industry*, 2022, 51(12):1-6 (in Chinese).
- [18] 张一鸣. 建议实施海水淡化西输工程破解华北西北需水之困[N]. *中国经济时报*, 2023-05-17(1).
- ZHANG Y M. Suggestion on implementing the seawater desalination westward transmission project to solve the water demand problems in the northwest and north China [N]. *China Economic Times*, 2023-05-17 (1) (in Chinese).
- [19] 张世钢. 山东海阳核电厂水热同产同送示范工程[J]. *可持续发展经济导刊*, 2022(4):34-35.
- ZHANG S G. Demonstration project for simultaneous production and transmission of water and heat in nuclear power plants [J]. *China Sustainability Tribune*, 2022 (4):34-35(in Chinese).

作者简介:吴放(1971—),男,北京人,硕士,研究员级高级工程师,研究方向为核电厂运维管理、核能综合利用。

E-mail: wufang@spic.com.cn

收稿日期: 2023-11-14

修回日期: 2023-12-25

(编辑:丁彩娟)