



海水淡化发展利用状况分析与启示

孙 珊, 金晓杰, 于潇潇, 由丽萍, 王立明

(山东省海洋资源与环境研究院, 山东省海洋生态修复重点实验室, 山东烟台 264006)

[摘要] 我国人均淡水资源相对匮乏, 不足全球平均水平的 1/4。海水淡化作为沿海地区非常规的新型水资源, 为水供应结构的优化和水资源的补充供给提供了有效方式。综述了我国海水资源综合利用的主要形式——海水淡化, 及其技术应用。列举了几种常用淡化方法, 反渗透法因设备投资少、运行费用及单位制水成本低等优点, 运用最为广泛。分析了组合型技术和正渗透、太阳能等一些新型海水淡化技术的特点。对国内外海水淡化的发展利用情况进行了调研, 从项目规模、技术、用途、政策等方面进行了分析汇总。探讨了目前海水淡化利用在技术创新、淡化成本、淡化水消纳及环境影响、相关政策标准等方面的问题, 并提出了具有一定创新性的应对措施。

[关键词] 海水淡化; 海水利用; 制度设计; 淡化水消纳; 应对措施

[中图分类号] P747 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1005-829X(2022)02-0045-06

Analysis and enlightenment on development and utilization of seawater desalination

SUN Shan, JIN Xiaojie, YU Xiaoxiao, YOU Liping, WANG Liming

(Shandong Key Laboratory of Marine Ecological Restoration,

Shandong Marine Resource and Environment Research Institute, Yantai 264006, China)

Abstract: Fresh water resources of China is relatively scarce, per capita of which are less than 1/4 of the world average level. As a new type of unconventional water resource in coastal areas, seawater desalination provides an effective way for optimizing water supply structure and replenishing water resources. The main form of comprehensive utilization of seawater resources—seawater desalination in China and its technology application were introduced. Several commonly used desalination methods were listed. Among them, reverse osmosis method was the most widely used, because of its advantages of small equipment investment, low operating cost and low cost of unit water system. The characteristics of some new desalination technologies, such as combined technology, forward osmosis and solar energy, were analyzed. The development and application of seawater desalination at home and abroad were investigated, and the scale, technology, application, policy and other aspects of the project were analyzed and summarized. Some problems existing in seawater desalination utilization were discussed, including the technological innovation, the cost of desalination, the capacity of desalinated water and the environmental impact of desalination, relevant policies and standards. Some innovative solutions were put forward.

Key words: seawater desalination; comprehensive utilization of seawater; system design; desalinated water consumption; solutions

由于当今社会经济的迅速发展, 淡水资源短缺已是一个全球性的问题。我国是海洋强国, 对海水进行有效地开发利用, 可成为淡水重要的补充来源。海水淡化作为沿海地区非常规的新型水资源,

其开发利用已逐渐受到中央和地方政府的重视。海水资源综合利用的研究有 3 个重要领域: (1) 海水淡化, 即运用海水淡化的方法生产淡水^[1-2], 是海水利用的主要形式; (2) 海水直接使用, 即用海水代替淡

水,应用于工业冷却水及生活用水^[3-4]; (3)综合利用化学资源,提取海水中的化学元素,进行深加工处理^[5]。全球淡水只占总水资源的2.5%,而海水占97.5%^[4],海水是水资源的重要宝库。开发海水综合利用及淡化技术已经是沿海人口稠密地区淡水资源供给的主要途径之一^[6]。目前,海水淡化应用广泛,2010—2019年,全球海水淡化装机容量每年增长7%左右,为满足全球日益增长的淡水需求提供了技术支持^[7]。

我国在《海水淡化利用发展行动计划(2021—2025年)》^[8]中提出,“十四五”时期要着力推进居民供水、工业园区、海岛、船舶用水方面的海水淡化规模化利用。笔者对海水淡化的应用情况及相关政策进行了汇总,通过综合分析海水淡化发展存在的问题,提出了依托我国经略海洋和海洋强国战略的海水淡化利用的相关对策,希望为基于海水资源综合利用领域的研究提供一定的参考。

1 海水淡化技术

目前,海水淡化常用的技术分成2大类:膜法海水淡化(主要是反渗透RO技术)和热法海水淡化(多效蒸馏MED技术、多级闪蒸MSF技术)^[9]。热法和膜法各有利弊。热法具有设备工艺简单、化学试剂用量很少、对环境污染小的优点,但其设备噪音大、投资高、无废热时单位制水成本也高^[10]。膜法(RO技术)虽设备投资少、运行费用及单位制水成本低,但设备工艺及运行维护复杂,尤其是膜元件的废弃还会给环境带来二次污染。反渗透法因在成本上比热法具有优势,应用更为广泛,平均淡化成本约为热法的23%^[6]。

全球主要海水淡化技术的应用情况见图1。RO、MSF、MED 3种技术占全球海水淡化总产能的94%,其中RO技术占69%,应用最为普遍^[11]。

近些年,各国学者研发出一些新兴海水淡化技术。正渗透(FO)技术因其膜污染小和能耗低等特点成为主要的淡化技术^[12-13];组合型技术,如RO-MSF、MED-AD(AD,吸附式海水淡化)和MSF-MED组合型技术,将各技术的优势融合,弥补了单一技术的缺陷,提升了海水淡化能力,在减少腐蚀的同时,可降低建设成本、提高产水水质^[14-15];利用可再生能源进行海水淡化的太阳能海水淡化技术在成本和技

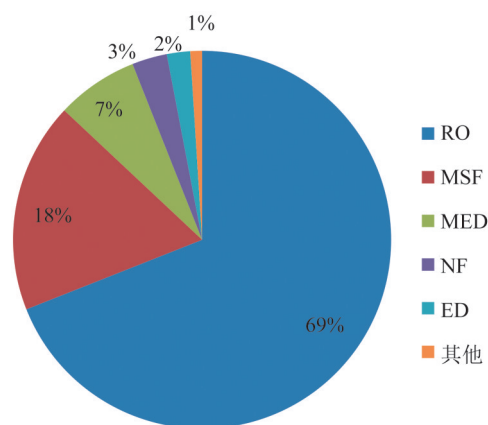


图1 全球主要海水淡化技术的应用情况

Fig. 1 Application of global major desalination technologies

术上具有竞争优势;新材料(如纳米颗粒^[16-18]、石墨烯基分离膜^[19])、新装置(如流体切换能量回收装置)的研发可有效提升海水淡化能力^[20-21]。这些新兴海水淡化技术具有重要的基础性影响,发展潜力巨大。

2 海水淡化发展及利用现状

2.1 国外海水淡化发展及利用

2.1.1 海水淡化工程应用情况

D. IHSANULLAH等^[22]指出,到2050年,60个国家中大约70亿人将面临严重的水资源短缺,这也是21世纪全球应对的重要挑战之一。2019年国际海水淡化协会(IDA)报道^[23],全球有19 744家海水淡化厂,海水淡化能力约9 970万 m³/d,这些工厂位于150个国家,服务3亿人。

海水淡化尤其可作为一些中东国家安全可靠的淡水资源^[4],沙特阿拉伯是世界上最大的海水淡化用户,其产能约占全球总产能的25.9%,拥有世界上最大的MSF/RO“Ras Al Khair”淡化厂^[24]、MED“Marafiq Jubail IWPP”工程^[25]、单套MED海水淡化装置的“Shoaiba II”工程^[26]、MSF“Shoaiba III”工厂,以及太阳能海水淡化厂。2021年阿联酋建成了规模为68.2万 m³/d位于阿布扎比Mirfa的大型反渗透海水淡化项目。近年来以色列在地中海沿线先后建设大型海水淡化厂5个,可提供淡化水约6亿 m³/a^[27],截至2017年,以色列80%的饮用水是通过海水淡化生产的。位于福冈的如来中心拥有日本最大的海水淡化能力,产能占总供水的1/12左右。此外,所有的

澳大利亚省会城市都有海水淡化厂^[22]。马尔代夫等一些海岛国家基本全部要通过海水淡化的方式获得淡水。世界海水淡化市场的成交规模以年均20%的速度递增,海水淡化技术在欧洲、北非的应用也较为成熟。

2.1.2 海水淡化产业相关政策

美国、日本、澳大利亚、以色列等海水利用产业较发达的国家均制定了相关政策及执行措施,在海水利用产业上给予支持引导,确保其健康发展^[6]。表1为国外部分国家海水淡化相关政策,对我国海水淡化发展也有重要启示。

表1 国外部分国家海水淡化相关政策

Table 1 Desalination related policies of some countries abroad		
国家	海水淡化相关政策	内容
美国	通过立法形式(如《淡化厂选址及监测草案》 ^[28] 、《海水淡化法案2011》 ^[29])及示范工程进行推广辐射	推动海水淡化技术创新,避免对环境的影响;建立公有装置共享开发、技术示范及转化 ^[30]
日本	委托与联合研发相结合;国内产业结构升级;把海水淡化作为公益供水工程 ^[30]	支持海水淡化技术创新,提倡应用性研究 ^[30-31]
澳大利亚	对海水淡化工程加强实时监测,制定《海洋及河口监测程序》 ^[32-33]	对海水淡化工程的建设、设计及正式运营等进行海洋及河口环境影响监测
中东国家	以政策引导为主,加大海水淡化支持力度	多元化融资、实施淡化水水价补贴 ^[33]

2.2 我国海水淡化应用及发展

2.2.1 海水淡化应用状况

2019年和2020年沿海9个省市的海水淡化产水能力如图2所示^[34-35]。

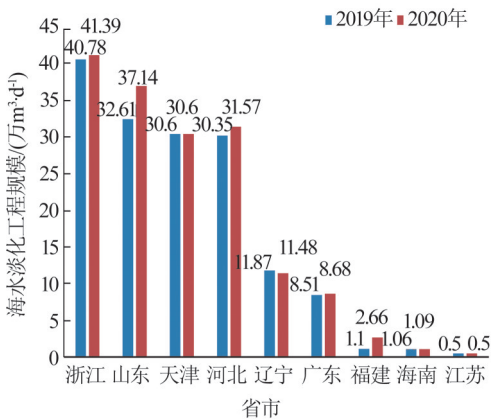


图2 全国沿海各省市海水淡化工程产能

Fig. 2 The desalination engineering capacity of coastal provinces

对比发现,2019—2020年内各省市海水淡化规模基本处于稳步发展状态,2020年新建成的海水淡化工程大多数都在山东省,其规模相对2019年有一定幅度的增长。

2019年,全国建成115个总规模达157.38万m³/d的海水淡化工程,其中,新建成的17个总规模为39.91万m³/d的工程分布于沿海一带^[34]。浙江省的海水淡化工程规模40.78万m³/d,较2018年的23.23万m³/d涨幅75.5%,2019年发展尤为突出。同年,天

津海水淡化工程规模为30.60万m³/d,河北海水淡化工程规模为30.35万m³/d,京津冀地区不仅是我国海水淡化技术应用与发展的先进区域之一,也是该领域创新驱动发展最集中的地区之一^[6,36]。

2020年底,全国有135个海水淡化工程,总规模165.11万m³/d,新建成的14个总规模为6.485万m³/d的海水淡化工程均采用RO技术,其中规模最大的是烟台南山铝业海水淡化工程,达3.3万m³/d^[35]。到“十四五”时期末,我国将新增超125万m³/d的海水淡化项目,总规模达290万m³/d^[8]。

国内现有海水淡化项目产水用途^[27]分布见图3。

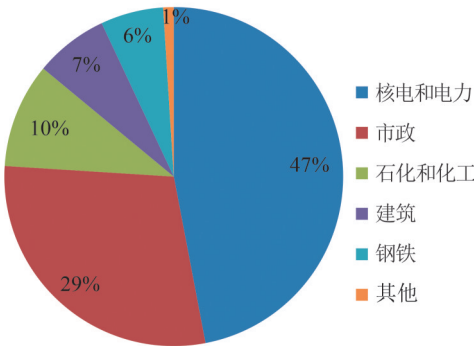


图3 国内现有海水淡化项目淡化水用途分布

Fig. 3 Use distribution of desalted water in domestic existing desalination project

海水淡化水主要用作工业用水及生活用水,集中用于沿海地区电力、石化和钢铁等高耗水行业,市政供水仅占 29%,由于各种条件的限制基本不能有效进入管网系统。

2.2.2 我国海水淡化相关政策文件

2020 年以来,我国制定发布了一系列海水淡化相关政策和标准(表 2),为海水淡化工程提供了有力支撑,使其设计更安全,运行更稳定,海水利用的标准体系更健全。

表 2 2020 年以来我国海水淡化相关政策和标准

Table 2 Desalination relevant policies and standards in China since 2020

制定时间	制定部门	政策标准
2020 年 8 月	山东省人民政府办公厅	《关于加快发展海水淡化与综合利用产业的意见》
2020 年 12 月	自然资源部天津海水淡化与综合利用研究所	《海水淡化利用工业用水水质》(GB/T 39481—2020) 《多效蒸馏海水淡化系统设计指南》(GB/T 39222—2020) 《反渗透海水淡化阻垢剂阻垢性能试验周期浓缩循环法》(GB/T 39221—2020) 《海水淡化水后处理设计指南》(GB/T 39219—2020)
2021 年 2 月	国务院	《加快建立健全绿色低碳循环发展经济体系的指导意见》
2021 年 6 月	国家发展改革委、自然资源部	《海水淡化利用发展行动计划(2021—2025 年)》

3 海水淡化存在的问题

我国的海水淡化不仅有规模开发、技术应用方面的问题,还有一些制约海水淡化发展及利用的因素存在。

(1)海水淡化厂供水范围较小,技术自主创新能力较低。由于关键技术和设备国产化率较低,我国淡化海水民用供给较少,多数仅限企业自用。

(2)相比自来水,淡化水水价运作机制不科学,结构体系不完整。造成海水淡化成本高的原因往往还有运输距离远、工程规模小、国产化率低等。

(3)海水淡化水消纳问题及产水过程对环境产生负面影响。产品水消纳、长距离输水管道建设等问题,导致一些项目进展较为缓慢。排海浓盐海水比海水的含盐量高大约 1 倍,且温度较高,导致局部海水盐度增大,水温升高,溶解氧减少,进而影响海洋生态环境。

(4)竞争力不足,配套政策不完善。现如今,整体有效的海水淡化组织协调体系还未形成,相应的价格、金融、财税等一系列引导措施和配套政策也未健全,相关管理对策还需进一步优化^[37]。

4 海水淡化发展的应对措施

(1)激发技术自主创新意识,为海水淡化发展提供支撑。针对目前的发展情况,在工艺优化、降低成本、关键设备和技术研发等方面进行自主创新。在强化技术研发,完善产业链条、提升服务能力的同时,建设示范工程。鼓励科研单位及企业将蒸发器、

反渗透膜、能量回收装置等重要设备最新研究成果纳入示范项目,通过进一步试验与改进,逐步实现海水淡化设备的国产化。破除技术单一性,多种技术相结合,开发可再生能源,深化传统海水淡化技术节能降耗等方面的研究。在海水淡化新兴材料(如石墨烯等纳米材料)方面积极探索,在新兴技术工艺(如正渗透、太阳能)方面集成创新^[30]。根据世界海水淡化的研究趋势,推动海水淡化技术的进一步发展。

(2)科学制定淡化水价,作为政府补贴淡化厂和用水企业的基本依据。鼓励生产型企业 and 用水量大的企业优先使用淡化海水,提供优惠政策,弥补水费损失。鉴于现在海水淡化成本水平,闲置产能得以解决不可或缺的是政府的直接补贴。对沿海城市继续实行分类水价和阶梯水价的自来水价格改革^[4],这些改革使过度用水者被征收的水资源税增加,也间接提升了对非常规水资源的需求。对于供应给市政管网的淡化海水,供水企业应与海水淡化厂签订长期采购合同,并按各市政管网实际淡化海水用量向海水淡化厂付费。为了降低能源消耗和预处理成本,将核电与海水淡化相结合,可满足核能发电对冷却水的需要。

(3)解决海水淡化消纳问题,推动绿色清洁生产。建立省级水资源调配体系,统筹规划部署各地海水淡化项目,省市区(县)三级联动,打造综合供水体系。完善海水淡化水的储备和调节机制,探索产品水消纳途径,推动海水淡化水跨地市调蓄水库、供水管网的建设,提升海水淡化水供应规模和能力,从

根本上解决海水淡化水的消纳问题。针对环境问题,排海仍是当前处理浓盐水的主要形式,然而海水消耗浓缩盐水的能力是有限的,有必要将海水淡化产生的浓盐水作为化工资源进行综合利用。保护海洋生态环境,首先要注意合理选择海水淡化厂地址,从源头杜绝污染;其次,可与各企业相互结合,开启废热循环的经济模式;最后,综合利用淡化后的浓海水,从中提取钾、溴、镁等元素,既获得了化工原料,也实现了浓盐水的零排放^[38]。

(4)加强对海水淡化的政策扶持,完善政策标准体系。在海水淡化项目管理制度建设中,应在法律上明确海水淡化的战略定位,促进海水淡化的规范化发展。此外,国务院、环境保护部、国家海洋局、水利部和其他当地部门以及协会参与海洋管理,需要确认各自的功能、责任、权利和利益分配等。积极推进扶持海水淡化发展相关经济政策的出台,建立确定新建项目适宜规模的体系。引导和规范海水淡化产业发展可从安全生产、资源开发、环境保护、产业发展等方面入手。明确浓盐水处置要求,完善其入海相关标准规范,修订饮水安全标准,优化海水淡化相关指标。开展海水淡化技术、项目设计、给排水、运行管理与实践、质量与设备标准设计、监管标准设计等多种形式的课题研究。

参考文献

- [1] MARTÍNEZ-ALVAREZ V, MARTIN-GORRIZ B, SOTO-GARCÍA M. Seawater desalination for crop irrigation: A review of current experiences and revealed key issues [J]. *Desalination*, 2016, 381: 58-70.
- [2] ELIMELECH M, PHILLIP W A. The future of seawater desalination: Energy, technology, and the environment [J]. *Science*, 2011, 333(6043): 712-717.
- [3] ZHANG Jibao, CHEN Shujun, MAO Ning, et al. Progress and prospect of hydrate-based desalination technology [J]. *Frontiers in Energy*. DOI: 10.1007/s11708-021-0740-5.
- [4] GONG Shuxin, WANG Hongrui, ZHU Zhongfan, et al. Comprehensive utilization of seawater in China: A description of the present situation, restrictive factors and potential countermeasures [J]. *Water*, 2019, 11(2): 397.
- [5] 袁俊生, 纪志永, 陈建新. 海水化学资源利用技术的进展 [J]. *化学工业与工程*, 2010, 27(2): 110-116.
YUAN Junsheng, JI Zhiyong, CHEN Jianxin. Progress of utilization of chemical resources in seawater [J]. *Chemical Industry and Engineering*, 2010, 27(2): 110-116.
- [6] 柳文华, 苏仁琼. 国内外海水利用发展与趋势对比分析 [J]. *海洋科学前沿*, 2015, 2(1): 1-6.
LIU Wenhua, SU Renqiong. Analysis of trend and development on seawater utility in China and abroad [J]. *Advances in Marine Sciences*, 2015, 2(1): 1-6.
- [7] 高忠文, 蔺智泉, 王铎, 等. 我国海水利用现状及其对环境的影响 [J]. *海洋环境科学*, 2008, 27(6): 671-676.
GAO Zhongwen, LIN Zhiquan, WANG Duo, et al. Seawater utilization and impact on environment in China [J]. *Marine Environmental Science*, 2008, 27(6): 671-676.
- [8] 国家发展改革委, 自然资源部. 《海水淡化利用发展行动计划(2021—2025年)》[R]. 北京: 国家发展改革委, 自然资源部, 2021.
National Development and Reform Commission, Ministry of Natural Resources of the People's Republic of China. Action plan for the development of seawater desalination utilization (2021—2025) [R]. Beijing: National Development and Reform Commission, Ministry of Natural Resources of the People's Republic of China, 2021.
- [9] 刘承芳, 李梅, 王永强, 等. 海水淡化技术的进展及应用 [J]. *城镇供水*, 2019(2): 54-58.
LIU Chengfang, LI Mei, WANG Yongqiang, et al. Progress and application of seawater desalination technology [J]. *Journal of China Urban Water Association*, 2019(2): 54-58.
- [10] 刘万兵. 海水淡化膜法与热法方案综合比较 [J]. *广东化工*, 2014, 41(16): 114-115.
LIU Wanbing. The comprehensive comparison of seawater desalination for membrane method and thermal method [J]. *Guangdong Chemical Industry*, 2014, 41(16): 114-115.
- [11] 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.
- [12] ZHAO Shuaifei, ZOU Linda, TANG C Y, et al. Recent developments in forward osmosis: Opportunities and challenges [J]. *Journal of Membrane Science*, 2012, 396: 1-21.
- [13] MI Baoxia, ELIMELECH M. Organic fouling of forward osmosis membranes: Fouling reversibility and cleaning without chemical reagents [J]. *Journal of Membrane Science*, 2010, 348 (1/2): 337-345.
- [14] KHAYET M. Membranes and theoretical modeling of membrane distillation: A review [J]. *Advances in Colloid and Interface Science*, 2011, 164(1/2): 56-88.
- [15] AMY G, GHAFFOR N, LI Zhenyu, et al. Membrane-based seawater desalination: Present and future prospects [J]. *Desalination*, 2017, 401: 16-21.
- [16] ZHOU Lin, TAN Yingling, WANG Jingyang, et al. 3D self-assembly of aluminium nanoparticles for plasmon-enhanced solar desalination [J]. *Nature Photonics*, 2016, 10: 393-398.
- [17] SHARON H, REDDY K S. A review of solar energy driven desalination technologies [J]. *Renewable and Sustainable Energy Re-*

- views, 2015, 41: 1080-1118.
- [18] GHASEMI H, NI G, MARCONNET A M, et al. Solar steam generation by heat localization [J]. *Nature Communications*, 2014, 5: 4449.
- [19] 郑智颖, 李凤臣, 李倩, 等. 海水淡化技术应用研究及发展现状[J]. *科学通报*, 2016, 61(21): 2344-2370.
- ZHENG Zhiying, LI Fengchen, LI Qian, et al. State-of-the-art of R&D on seawater desalination technology [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2016, 61(21): 2344-2370.
- [20] LEE K P, ARNOT T C, MATTIA D. A review of reverse osmosis membrane materials for desalination: Development to date and future potential [J]. *Journal of Membrane Science*, 2011, 370(1/2): 1-22.
- [21] KHAWAJI A D, KUTUBKHANAH I K, WIE J M. Advances in seawater desalination technologies [J]. *Desalination*, 2008, 221(1/2/3): 47-69.
- [22] IHSANULLAH I, ATIEH M A, SAJID M, et al. Desalination and environment: A critical analysis of impacts, mitigation strategies, and greener desalination technologies [J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 780: 146585.
- [23] FERIA-DÍAZ J J, CORREA-MAHECHA F, LÓPEZ-MÉNDEZ M C, et al. Recent desalination technologies by hybridization and integration with reverse osmosis: A review [J]. *Water*, 2021, 13(22): 1369.
- [24] ZHU Zhongfan, PENG Dingzhi, WANG Hongrui. Seawater desalination in China: An overview [J]. *Journal of Water Reuse and Desalination*, 2018, 9(2): 35-41.
- [25] AL-MUTAZ I S. Features of multi-effect evaporation desalination plants [J]. *Desalination and Water Treatment*, 2015, 54(12): 3227-3235.
- [26] DEHWAH A H A, AL-MASHHARAWI S, MISSIMER T M. Mapping to assess feasibility of using subsurface intakes for SWRO, Red Sea coast of Saudi Arabia [J]. *Desalination and Water Treatment*, 2014, 52(13/14/15): 2351-2361.
- [27] 张雨山. 海水淡化技术产业现状与发展趋势[J]. *工业水处理*, 2021, 41(9): 26-30.
- ZHANG Yushan. The status and development trend of seawater desalination tech industry [J]. *Industrial Water Treatment*, 2021, 41(9): 26-30.
- [28] Common Wealth of Massachusetts Executive Office of Energy and Environmental Affairs. Siting and monitoring protocols for desalination plants draft [R]. Massachusetts: Common Wealth of Massachusetts Executive Office, 2007.
- [29] 黄立业, 姜常梅, 李莎, 等. 国内外海水淡化产业政策分析及启示[J]. *科技广场*, 2018(2): 57-62.
- HUANG Liye, JIANG Changmei, LI Sha, et al. Analysis and enlightenment of domestic and foreign seawater desalination industry policy [J]. *Science Mosaic*, 2018(2): 57-62.
- [30] 温菲. 近 50 年国际海水淡化技术研究的发展状况——基于 Web of Science 数据库的文献计量分析 (1971—2020 年) [J]. *海洋科学*, 2021, 45(1): 110-119.
- WEN Fei. Research on international seawater desalination in past 50 years: A bibliometric analysis of the Web of Science core collection [J]. *Marine Sciences*, 2021, 45(1): 110-119.
- [31] 郭永清. 日本海水淡化产业政策对中国的启示[J]. *海洋经济*, 2013, 3(3): 59-64.
- GUO Yongqing. Enlightenment of Japan's policy of desalination industry for promoting the desalination industry in China [J]. *Marine Economy*, 2013, 3(3): 59-64.
- [32] Water Reuse Association. Seawater concentrate management white paper [R]. California: Water Reuse Association, 2011.
- [33] 刘淑静, 张拂坤, 王静, 等. 国外海水淡化环境政策研究及对我国的启示[J]. *中国人口·资源与环境*, 2013, 23(11): 179-181.
- LIU Shujing, ZHANG Fukun, WANG Jing, et al. Study on foreign environmental policies of sea water desalination and enlightenment to China [J]. *China Population, Resources and Environment*, 2013, 23(11): 179-181.
- [34] 自然资源部. 2019 年全国海水利用报告 [R]. 北京: 自然资源部, 2020.
- Ministry of Natural Resources of the People's Republic of China. 2019 national seawater utilization report [R]. Beijing: Ministry of Natural Resources of the People's Republic of China, 2020.
- [35] 自然资源部. 2020 年全国海水利用报告 [R]. 北京: 自然资源部, 2021.
- Ministry of Natural Resources of the People's Republic of China. 2020 national seawater utilization report [R]. Beijing: Ministry of Natural Resources of the People's Republic of China, 2021.
- [36] 刘淑静, 张拂坤, 王静, 等. 京津冀海水淡化协同创新现状及发展研究[J]. *环境科学与管理*, 2020, 45(4): 50-52.
- LIU Shujing, ZHANG Fukun, WANG Jing, et al. Present situation and development research of Beijing-Tianjin-Hebei seawater desalination synergy innovation [J]. *Environmental Science and Management*, 2020, 45(4): 50-52.
- [37] 尤强, 李振青. 海水淡化, 为水资源供应增量 [N]. *中国自然资源报*, 2021-04-20(5).
- YOU Qiang, LI Zhenqing. Seawater desalination for water supply increment [N]. *China Natural Resources News*, 2021-04-20(5).
- [38] 黄立业, 李莎, 史筱飞, 等. 山东省海水淡化产业发展对策研究[J]. *工业水处理*, 2019, 39(8): 5-8.
- HUANG Liye, LI Sha, SHI Xiaofei, et al. Study on the countermeasures for the development of seawater desalination industry in Shandong Province [J]. *Industrial Water Treatment*, 2019, 39(8): 5-8.

[作者简介] 孙珊(1983—), 硕士, 副研究员。电话: 0535-6370506, E-mail: sunshan18@163.com。通讯作者: 王立明, 学士, 助理研究员。E-mail: wangliming1059@163.com。

[收稿日期] 2021-12-28(修改稿)