

DOI:10.13476/j.cnki.nsbdtk.2020.0043

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)

我国海水淡化若干问题及对策

闫佳伟^{1,2}, 王红瑞^{1,2}, 朱中凡^{1,2}, 白琪阶^{1,2}

(1. 北京师范大学水科学研究院, 北京 100875; 2. 城市水循环与海绵城市技术北京市重点实验室, 北京 100875)

摘要:我国拥有 1.8 万 km 的海岸线, 海洋资源丰富, 海水淡化是解决水资源短缺, 增加淡水资源的根本之道。总结了海水淡化的利用情况, 深入探究制约海水淡化发展的因素, 分析了淡化海水的利用前景。在分析国际海水淡化现状、经验及浙江舟山海水利用经验的基础上, 针对我国海水淡化存在的问题, 提出了我国海水淡化发展的对策: 建议加大技术投入, 发展政产学研商模式, 降低经济成本; 合理规划建设海水淡化项目, 提高产能利用; 加强对海水综合利用, 减少环境污染; 加强政策扶持, 完善法规标准, 不断推进海水淡化产业的发展。

关键词:海水淡化; 制约因素; 对策; 前景; 舟山

中图分类号: TV213.1 文献标志码: A 开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Relevant issues and countermeasures of seawater desalination in China

YAN Jiawei^{1,2}, WANG Hongrui^{1,2}, ZHU Zhongfan^{1,2}, BAI Qijie^{1,2}

(1. College of Water Science, Beijing Normal University, Beijing 100875, China;

2. Beijing Key Laboratory of Urban Hydrological Cycle and Sponge City Technology, Beijing 100875, China)

Abstract: China has a coastline of 18,000 kilometers, rich in marine resources. Desalination is the fundamental way to solve water shortages and increase freshwater resources. This paper summarized the utilization of seawater desalination, deeply explored the factors that restricted the development of desalination, and analyzed the utilization prospects of desalinated seawater. Based on the analysis of the current status and experiences of international desalination and seawater utilization in Zhoushan, Zhejiang, this study put forward the countermeasures for the development of seawater desalination in China. It was suggested to increase technical input, developed the model of government, industry, and research, to reduce economic costs, to reasonably plan and build seawater desalination projects. The projects may increase the utilization of production capacity, strengthen the comprehensive utilization of seawater, reducing the environmental pollution, strengthen policy support, improved laws and regulations, and continuously promoted the development of seawater desalination industry.

Key words: desalination of seawater; constraints; countermeasures; prospects; Zhoushan

近年来,随着社会经济的高速发展,水生态环境逐渐恶化,我国水资源供需矛盾将进一步加剧,海

水、雨洪水、生活污水、矿井水等非常规水源逐渐引起政府和相关研究人员的重视。地球上海水总量占

收稿日期:2019-06-11 修回日期:2019-09-25 网络出版时间:2019-11-01

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20191101.0949.002.html>

基金项目:国家自然科学基金(51879010;51479003)

作者简介:闫佳伟(1995—),男,山西太原人,主要从事水资源系统分析和非常规水源方面研究。E-mail:yanjw0824@163.com

通信作者:王红瑞(1963—),男,北京人,教授,博士生导师,主要从事水资源系统分析和环境规划与评价方面研究。E-mail:henrywang@bnu.edu.cn

全球各类总水量的 97.5%, 约为 13.5 亿 km^3 。我国拥有 1.8 万 km 的海岸线, 海洋资源丰富, 进一步推进海水淡化产业发展, 是解决沿海地区淡水资源短缺的现实选择^[1]。

我国人均淡水资源短缺, 沿海地区经济发达且人口众多, 但水资源占有量并不与之相适应。截至 2017 年底, 辽宁、河北、天津等 11 个沿海省(直辖市、自治区)用仅占全国 26.1% 的淡水资源供养了全国 43.5% 的人口, 创造了全国 56.0% 的 GDP^[2]。水资源的短缺与人口、GDP 之间的矛盾不仅难以应对突发事件时的供水安全, 更会造成沿海省市一系列环境问题, 包括地面沉降、水生态环境恶化等^[3-6]。因此推动海水淡化产业发展, 可以有效缓解我国沿海城市水资源的供需矛盾, 对改善水环境, 保障水安全具有重大意义, 同时也是开发海岛、发展海洋经济、实施海洋发展战略的需要^[7-10]。

近年来, 海水淡化一直是国内学者研究的重点内容。刘炳伟等^[11-13]对低温多效和多套反渗透海水淡化装置进行了技术经济比较分析, 结果表明低温多效法成本高于反渗透法。海水淡化大规模应用的限制因素主要是高成本。并且, 浓盐水的直接排放严重影响海洋环境^[14]。聂红涛等^[15]模拟分析了浓盐水排放对渤海湾近岸海域水环境的影响, 结果表明, 相对于连续排放 3 d 浓盐水的情况, 连续排放 10 d 浓盐水后盐度上升的海域约增大 4 倍, 随着排放时间的增加, 近岸海域盐度上升, 受影响的范围逐渐

扩大。同时也有研究表明, 海水淡化产生的热量在随浓盐水排放的过程中海水温度升高导致水华现象易爆发^[16]。另外也有学者针对我国海水淡化的未来发展趋势、存在问题以及管理政策进行研究。朱庆平等^[17]预测 2030 年沿海地区海水淡化利用需求总量为 14.43 亿 m^3 , 占沿海地区需水量的 0.52%, 占全国总需水量的 0.21%; 海水直接利用需求总量 1 789 亿 m^3 。陈莹等^[18]指出, 我国在海水淡化过程中还存在扶持政策落实差、自主产业发展缓慢、管理体制不顺等问题, 并提出了相应建议, 如纳入水资源配置工程体系, 作为水利公益工程进行扶持, 搭建产学研平台, 设立专项资金, 开展试点示范工程建设等。

我国在海水淡化技术方面的研究较多, 取得了较大的进步, 但在海水淡化政策管理方面的研究比较宽泛, 存在不足。本文在分析 2017 年我国海水淡化利用及发展情况的基础上, 深入探究制约海水淡化利用发展的因素与应对建议。

1 我国海水淡化发展历程及现状

我国海水淡化技术的研究起步较早, 海水淡化的发展历程可见表 1。1958—1992 年全国陆续开展电渗析(ED)、反渗透(SWRO)等多种海水淡化方法的研究。从 1997 年开始, 海水淡化发展进入了实际应用阶段。2000—2006 年, 我国海水淡化产能累计达到 14 万 m^3/d 。

表 1 我国海水淡化技术的发展历程

Tab. 1 Development process of desalination technology in China

时期	方法	案例与工程	产能	用途
研究阶段	1958 年	ED 石松研究员等首先开展离子交换膜电渗析海水淡化研究	—	科研
	1967 年	MED 国家科委组织全国海水淡化会战	—	其他
	1970 年	ED 在浙江省杭州市组建全国第一个海水淡化研究室; 建成当时世界最大的电渗析海水淡化站——西沙永兴岛海水淡化站	—	军用
	1982 年	— 在杭州成立中国海水淡化与水再利用学会	—	科研
	1984 年	— 杭州水处理技术开发研究中心	—	科研
	1991 年	SWRO 国家液体分离膜工程技术研究中心	—	科研
实际生产阶段	1997 年	SWRO 浙江舟山市嵊山镇海水淡化示范工程	500 m^3/d	市政
	2000 年	SWRO 山东长岛和浙江嵊泗分别建成海水淡化示范工程	1 000 m^3/d	市政
	2002 年	SWRO 山东荣成海水淡化示范工程	5 000 m^3/d	市政
	2004 年	MED 山东黄岛发电厂海水淡化示范工程	3 000 m^3/d	电力
快速发展阶段	2006 年	SWRO 华能营口电厂海水淡化装置(II 期)	10 000 m^3/d	电力
	2009 年	SWRO 天津大港新泉海水淡化工程	100 000 m^3/d	石化
	2012 年	SWRO 青岛百发海水淡化厂	100 000 m^3/d	市政
	2013 年	MED 天津北疆电厂海水淡化工程	200 000 m^3/d	电力

在“十一五”与“十二五”期间,海水淡化除在产能上高速增长外,在关键技术、材料和企业合作方面也取得了长足发展。反渗透(SWRO)、低温多效(MED)和多级闪蒸(MSF)法作为我国的主流海水淡化技术,进一步的实际应用拓宽了海水淡化新市场。主要海

水淡化技术的利用现状与前景见表 2,其中应用反渗透技术的工程占总数量的 86%,其产能占到全国总产能的 63%。另外,太阳能蒸馏法等新技术也逐渐从实验阶段投入中小型实际应用,目前我国已在海南省建设了首个太阳能光热海水淡化示范基地。

表 2 我国主要海水淡化方法及发展动向

Tab. 2 Main seawater desalination methods and development trends in China

方法	现况	发展动向
反渗透法	实际应用	半透膜及膜组器的研究 新工艺和能量回收的研究
低温多效蒸发法	实际应用	热力学及流体力学研究 锅垢控制的研究 材料设备的研究 与多级闪蒸馏相结合的开发
多级闪急蒸馏法	实际应用	最宜大型化,开发与原子能发电相结合的超大型装置
蒸汽压缩蒸馏法	实际应用	中小型规模
太阳能蒸馏法	研究发展、小型试验与应用	日照强烈地区应用
结晶法	研究发展、中小型试验工厂	泥浆的生成、输送及细冰分离洗涤的研究 溶剂及水合剂的选择与回收的研究
电渗析法	咸水淡化和浓缩制盐已实际应用	膜的研究 高温电渗析法的研究 淡化与综合利用相结合
溶剂萃取法	研究发展	寻找溶剂和溶剂回收的研究
离子交换法	纯水制备已实际应用	树脂合成及再生方法的研究

图 1 为 2006 年至 2017 年我国海水淡化工程产能发展情况,随着我国海水淡化产业的不断发展,单个海水淡化工程的规模不断增大,2006 年,一批万吨级以上的海水淡化工程建成投产,此后我国海水呈现规模化增长^[17]。2009 年,首个海水淡化日产能 10 万 m³ 的海水淡化工程——天津大港新泉海水淡化工程建成,2013 北疆电厂一期项目(II)的建成,我国最大的海水淡化项目日产能突破了 20 万 m³。截至 2017 年底,海水淡化日产能达到 122.26 万 m³/d,其中 2016 年新建成海水淡化工程 15 个,新增海水淡化规模 17.33 万 m³/d,2017 年新建成海水淡化工程 6 个,新增产能 2.27 万 m³/d。分析各省份各年份的工程规模(图 2),我国海水淡化工程规模的增长主要得益于北方的天津、山东、河北等省市以及南方的浙江省。海水淡化工程建设数量同样从 2009 年进入快速发展时期,并于 2011 年建成工程数首次超过百个,到 2017 年 12 月底,全国已建成 160 个海水淡化工程,在已建成海水淡化工程中,日产能最大的为天津北疆电厂海水淡化项目,为 20 万 m³。从工程规模来看,我国海水淡化工程规模在 5 万 m³/d 以上的有 6 个,占总工程数量的 4%,日产

能达 55 万 m³,占日总产能的 45%;1 万~5 万 m³/d 的海水淡化工程 31 个,占总工程数量的 19%,日产能达 52.29 万 m³,占日总产能的 43%;其他产能区间的工程数量及规模占比见图 3、4。

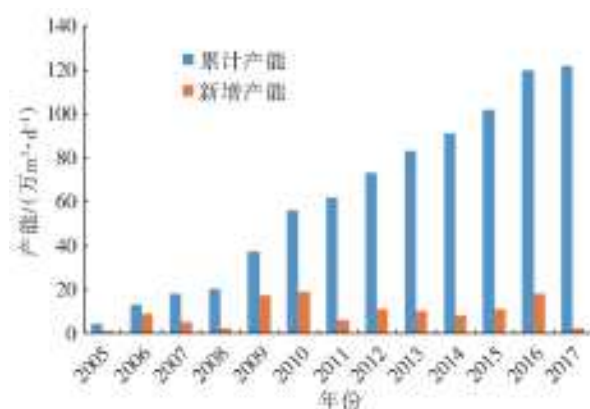


图 1 2005—2017 年我国海水淡化工程产能发展情况

Fig. 1 China's desalination project capacity development in 2005—2017

我国海水淡化产品水的终端用户主要分为两类:一类是工业用户,另一类是市政用户。截至 2017 年 12 月底,用于工业用水的工程规模为 83.02 万 m³/d,占总工程规模的 67.92%。其中,电力(火电和核电)

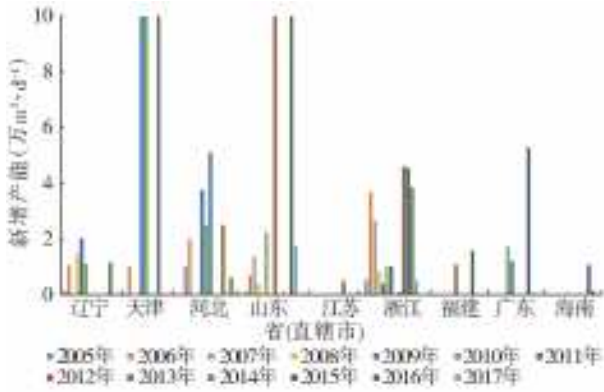


图 2 2005—2017 年沿海各省市海水淡化工程新增产能情况
Fig. 2 New capacity of seawater desalination projects in coastal provinces and cities from 2005—2017

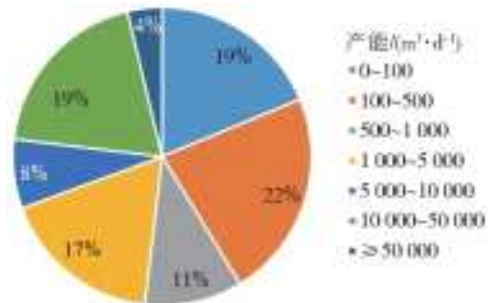


图 3 2017 年不同规模海水淡化工程数量所占比例
Fig. 3 Proportion of seawater desalination projects of different scales in 2017

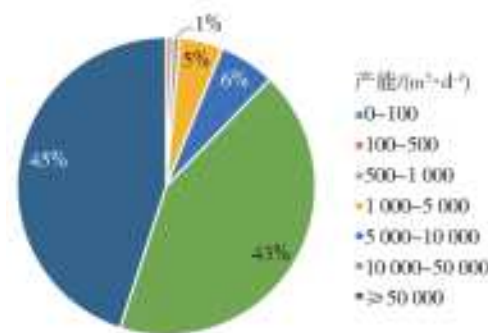


图 4 2017 年不同规模海水淡化工程产能所占比例
Fig. 4 Proportion of capacity of seawater desalination projects of different scales in 2017

企业为 50.36%；石化和化工企业为 10.96%；钢铁企业为 6.58%。用于居民生活用水的工程规模为 38.41 万 m^3/d ，占总工程规模的 31.42%，用于试验、港务、船舶等其他用水的工程规模为 8 125 m^3/d ，占总工程规模的 0.66% (图 5)。2017 年我国各地区海水淡化工程产能与建设数量的空间分布情况见图 6 和表 3，主要集中在天津、浙江、河北、山东等沿海 9 个省(直辖市)，由图 6 可以看出各省市的淡化海水主要为工业用水，工业用水主要集中在核电、钢铁等高耗水行业；市政用水比例较高的省份为山东、浙江和河北，分别达到了

209 475、101 720 和 56 000 m^3/d 。浙江省与山东省的海水淡化工程建设在数量上比较突出，分别占到全国工程总数的 31.24% 与 21.25%，浙江省海水淡化建设工程已建成 50 座，数量居全国第一；天津市的海水淡化工程数量虽不多，但产能取得的成效最为突出，达到 31.73 万 m^3/d ，接近全国总产能的 1/3，海水淡化工程日产能超过 10 万 m^3 的地区还有山东、浙江和河北省，分别为 27.81、24.61 和 17.46 万 m^3/d ；另外，广西壮族自治区与上海市由于水资源充沛等因素还未大范围开展海水淡化相关工作。

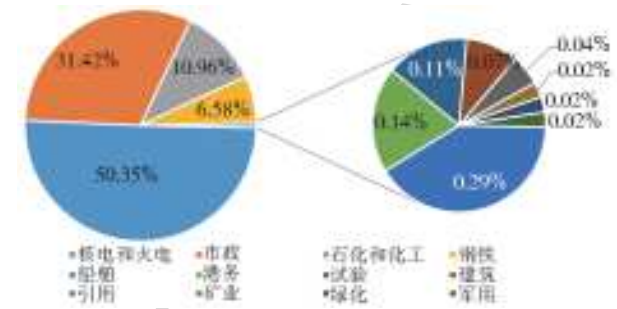


图 5 2017 年我国淡化海水利用途径结构
Fig. 5 The distribution structure of utilization of desalinated seawater in 2017

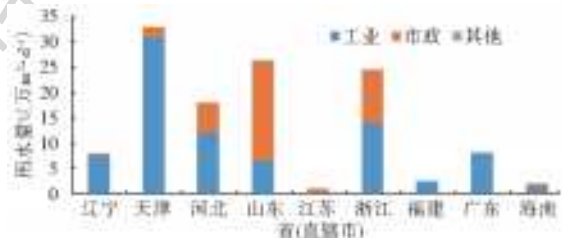


图 6 2017 年沿海各省市淡化海水用水结构
Fig. 6 Water use structure of desalinated seawater in coastal provinces and cities in 2017

表 3 2017 年沿海各省市淡化海水工程数量和规模
Tab. 3 Number and scale of desalinated seawater projects in coastal provinces in 2017

省(直辖市)	工程数量/个	数量占比/%	工程规模/ $(m^3 \cdot d^{-1})$	规模占比/%
辽宁	17	10.63	79 694	6.52
天津	9	5.63	317 295	25.95
河北	10	6.25	174 600	14.28
山东	34	21.25	278 055	22.74
江苏	4	2.50	5 305	0.43
浙江	50	31.25	246 125	20.13
福建	8	5.00	26 811	2.19
广东	10	6.25	82 000	6.71
海南	18	11.25	12 775	1.04
总计	160	100	1 222 660	100

我国十大海水淡化工程见图 7。其中，天津北

疆电厂海水淡化工程作为我国海水淡化产能第一的项目,采用“效率高、成本低、防腐性能好、适应性强”的低温多效海水淡化技术,目前日产能达到20万m³。除自用2万m³/d外,其余18万m³/d水量,按照塘沽区9万m³/d,汉沽区2万m³/d,开发区7万m³/d进行配置,进入自来水厂,通过市政管网向城市供水。青岛百发海水淡化厂日产能为10万m³,该项目采用的是世界先进的双膜法反渗透海水淡化技术,淡化水应用到饮用水的量占青岛市区供水量的15%到20%,大部分用于工商企业。天津大港新泉海水淡化项目于2009年就建成,使用的是反渗透海水淡化技术,作为当时亚洲最大的海水淡化厂,一期建设海水处理能力为日产10万m³,主要满足大港区内工业项目的用水问题,缓解区域用水紧张状况,特别是为100万m³乙烯工程进行供水配套。



图7 我国十大海水淡化工程及产能

Fig. 7 China's ten seawater desalination project and capacity map

近年来,我国海水利用规模稳步增长。在海水淡化方面,截至2017年12月,我国已建成的海水淡化工程共计160个,工程规模达122.26万m³/d。我国海水淡化经过几十年的发展,已掌握反渗透和低温多效等主流的海水淡化技术。部分技术达到或接近于世界先进水平^[19-28]。在现有的海水淡化工程项目中,采用反渗透技术、低温多效技术、多级闪蒸技术、电渗析技术的项目分别为137、20、1、2个,日产水规模分别为84.59万m³、37.04万m³、6000m³、300m³,分别占全国总产水规模的69.19%、30.30%、0.49%、0.02%(图8)。



图8 2017年我国海水淡化工程技术应用情况

Fig. 8 The distribution structure of utilization type of seawater desalination in 2017

2 我国海水淡化发展制约因素

2.1 关键技术设备国产化率较低

近年来,我国在海水淡化关键技术方面取得了较多的突破,但由于基础研究不足,设备制造及配套能力较弱,在国际上,海水淡化技术在仍不具有优势,美国、日本、中东等国家和地区,海水淡化技术成熟,处于世界前列。关键设备技术在海水淡化成本中占据了较大的比例。目前,在我国万吨级别以上的海水淡化工程中,对国外技术设备有较强的依赖作用。如天津大港新泉海水淡化厂采用的膜元件均来自美国海德能公司。此外,海水淡化工程的能量回收装置、高压泵等依然主要依赖于进口,按投资情况看,国产化率不及50%^[17]。海水预处理所使用的超滤膜,几乎全部依赖进口。另外,海水淡化规模化程度偏低,在海水淡化与新能源结合等方面的技术处于起步阶段,仍需要深入研究。

2.2 经济成本相对偏高

随着技术的发展,我国海水淡化成本已接近世界平均成本,在5~8元,但相比于自来水的价格,仍然偏高。海水淡化成本由多种因素构成,主要包括设备、材料投资、能源消耗、管网铺设以及预处理等。其中,能耗占到单位吨水成本的60%以上,对于万吨级以上海水淡化工程,如果将蒸馏法消耗的热折算成电,多级闪蒸法能耗约为8.5kW·h/m³,多效蒸馏法约为5.5kW·h/m³,反渗透法约为4.3kW·h/m³^[29]。此外,现今海水淡化主要是利用反渗透法,反渗透膜价格高昂,在使用过程中容易被污染,一般3至5年需要更换一次。在远距离输送淡化海水过程中,管网铺设成本也占据较大比例。以唐山曹妃甸工业区海水淡化工程为北京输水为例,吨水管网铺设成本高达1元,占输水后总成本的15%。在对海水进行淡化前,需要对海水进行预处理,以便去除海水中的颗粒泥沙等杂质,此外,环渤海地区每年有5个月的时间海水水温低于10℃,在对其进行预处理时首先要进行加热,预处理成本在海水淡化成本中占据了较大的比例。

2.3 工程产水率较低

根据海水淡化工程产水的用途不同,工程投产情况也有较大的差异。其中,工业用的海水淡化工程,其产水量相对稳定,通常可以达到设计产能的70%~80%,但民用海水淡化工程情况不容乐观。一方面,舟山等地区由于降水量的年际差异,对淡化海水的需求不稳定。另一方面,在淡化海水过程中,对海水中的杂质以及各种离子都有较高的去除率,

但与此同时,也去除了水中对人体健康有益的一些物质,如氟等。淡化海水为软水,硬度、碱度通常都较低,基本不具备缓冲能力,这就对其接入市政管网造成了一定的困难,实际产水量远低于预期产水量。如天津的北疆电厂海水淡化项目,设计日产能 20 万 m^3 ,实际日产能不足 7 万 m^3 ;此外唐山曹妃甸海水淡化项目、青岛的 10 万 m^3/d 海水淡化项目等也存在一定程度的闲置状况。

2.4 海水利用造成的环境问题

全国海水利用“十三五”规划指出,到 2020 年,全国海水淡化总规模达到 220 万 m^3/d 以上。海水直接利用规模达到 1 400 亿 m^3/a 以上,海水循环冷却规模达到 200 万 m^3/h 以上。大规模的海水利用,将产生大量的浓盐水,盐度作为海洋重要的生态指标之一,对海生物的生长繁殖均有重要的影响;若浓盐水被不合理的排至地表水或渗入地下水中,将导致河流湖泊含盐量升高,对淡水鱼类、植物的生长造成重要的威胁。海水温度是评价海洋生态的重要指标之一,高温浓海水排放口海水温度会显著提高,造成海洋水文条件的改变,降低海水的黏度,对输沙能力造成一定的影响,海水温度升高更会造成水体缺氧,影响附近海域生物的新陈代谢等,对海洋生态系统造成较为严重的破坏。在海水淡化过程中,为了达到水质要求,需加入很多化学物质如絮凝剂、杀菌剂等以去除悬浮物及细菌、藻类对管道造成的损害^[30-31]。这些化学物质若达到一定浓度,将对动植物产生毒性效应或导致海水富营养化等。此外,由于大量浓海水排放,与天然海水形成流速差,机械卷载效应对浮游生物的生存造成一定的影响。

2.5 竞争力不足且缺乏完备的扶持政策

淡化海水生产成本约 7~8 元/ m^3 ,加上输配成本,远高于常规水源价格。现状海水淡化按照市场化运作,缺乏完备的政府资金支持和价格补贴,出现价格倒挂,制约了产业化发展。以青岛淡化海水进市政管网为例,其每吨淡化海水成本为 5.45 元左右,政府协议收购价为 6 元,远高于青岛目前实施的 1.8 元居民供水价格,需要十几年的成本回收期,而根据项目日产 10 万 m^3 淡水为基础,粗略计算,政府每年需支付 1.53 亿元左右的差额补贴。此外,国家也未将淡化海水纳入水资源统一配置体系,一定程度上影响了淡化海水的利用。

2.6 缺乏完善的法规和标准

目前,海水淡化没有相应法规来规范其建设发展和管理,海水淡化项目定位和监管不清,其责任、权力和利益不明确。国内对于海水淡化水的安全使用指标研究还处于空白。例如天津市海水淡化水的

水质标准沿用的是《生活饮用水卫生标准(GB 5749—2006)》,该标准对有毒有害物质提出了不得超出的浓度上限,但是没有提及影响管网稳定的离子必须达到的浓度下限值。此外,企业标准管理体系不健全,现有的海水冷却标准多为技术标准,管理类的标准几乎为空白。各企业的管理工作通常由企业自己制定,导致权责不明确、管理混乱的现象。

3 我国淡化海水利用前景分析

随着我国社会经济的快速发展,我国淡水资源供给矛盾愈发突出。2017 年底,我国北方沿海省市为典型的资源型缺水地区,人口占全国的 16.9%,而淡水资源量仅为全国总量的 2.0%。用水技术落后,生态环境恶化,节水理念不强,浪费现象严重更进一步导致了我国北方沿海省市可用水资源量的进一步缩减。此外,北方沿海省市水资源开发利用已接近极限,均存在地下水严重超采、地面沉降、地下水水质恶化、海水入侵等一些列问题。从图 9 可以看出,在 2017 年沿海省市供水结构中,辽宁、天津、河北、山东等北方沿海省市地下水占比均远超前南方沿海省市,河北省地下水供水比例更是高达 63.88%。在沿海省市的供水结构中,工业用水量(不含火电、核电)远超除地表水、地下水外包括淡化海水的用水量(图 10),淡化海水有巨大的利用空间^[32]。

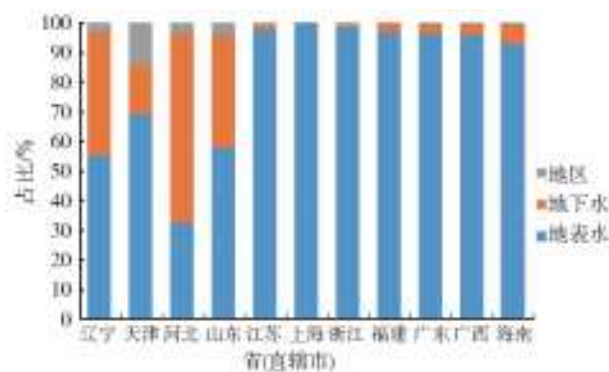


图 9 2017 年沿海省市供水结构

Fig. 9 Water supply structure of coastal provinces and cities in 2017

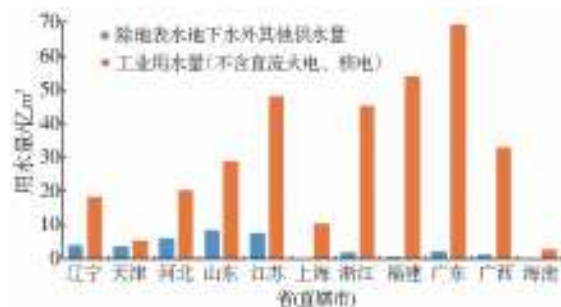


图 10 2017 年沿海省市工业用水量(不含直流火电、核电)与除地表水地下水外其他供水量

Fig. 10 Industrial water consumption (excluding DC thermal power, nuclear power) and other water supply in addition to surface water and groundwater in coastal provinces and cities in 2017

淡化海水与其他非常规水资源相比,有着不可替代的优势。首先,淡化海水不会受气候、地理位置、环境条件等因素的影响,供水率和供水水质可以得到较好的保证;其次,淡化海水水质优良,各项指标属于均达到甚至优于国家《饮用水卫生标准》,属于高品质的饮用水,且从全球经验来看,经过处理的淡化海水作为生活饮用水不存在品质方面的问题^[33];再次,淡化海水可以较好的满足如钢铁等特定行业的用水需求;最后,淡化海水的副产物经综合利用,可以产生良好的经济效益。

尽管近年来南水北调等一系列调水工程很大程度缓解了北方水资源短缺的现状,但是跨区域调水受诸多因素的影响,未来可能出现来水量大幅减少等情况。以引滦工程为例,其设计供水能力为每年20亿 m^3 ,但如今引滦工程的实际供水量已不足10亿 m^3 ,不及设计能力的50%。虽然海水淡化成本相对较高,但随着技术的发展,海水淡化的制水成本在逐年降低,相较于成本高昂的远距离调水与工业用水,已经有了较好的经济优势。此外,相较于雨污水、矿井水等其他非常规水源,公众对雨污水、矿井水再生利用造成的健康风险担忧,但在淡化海水利用方面,公众有相对较高的接受意愿。

近年来,海水利用得到了党和国家的高度重视,积极出台一系列政策推动海水淡化的发展。在中国国民经济“十三五”规划纲要中指出,要推动海水规模化应用;2016年12月,当时的国家海洋局颁布的《全国海水利用“十三五”规划》,对“十三五”末期海水淡化规模提出了明确的目标,要达到220万 m^3/d ^[34];2017年5月,《全国海洋经济发展“十三五”规划》指出,要推动淡化海水接入市政管网,为进一步利用淡化海水指明了方向^[35]。山东针对当地用水极为紧张的现状,出台《山东省水安全保障总体利用规划》,将淡化海水利用作为城市供水的重要组成部分,优先利用淡化海水解决淡水资源紧缺地方用水^[36];青岛创新性出台了地方标准——《海水淡化生活饮用水集中式供水单位卫生管理规范》,用以保障饮用者健康安全和管网稳定^[37];此外,青岛还对百发、董家口两大海水淡化项目提供了优惠电价政策,自2018年1月1日起按照居民生活用电类的非居民用户0.555元/($\text{kW}\cdot\text{h}$)进行收费,包括大连、烟台、舟山、深圳等地区也出台了一系列海水淡化相关政策,推动海水淡化产业的进一步发展。2019年,国家发改委,水利部联合印发《国家节水行动方案》,提出强制推动淡化海水等非常规水纳入水资源统一配置,逐年提高非常规水利用比例,并严格考核。目前11

个沿海省(市、自治区)中,共有9个省(市、自治区)出台了与海水利用相关的政策制度,据不完全统计,目前我国在建的海水淡化工程有28个,总产能达66.16万 m^3/d 。海水淡化利用前景广阔。

4 我国海水淡化的对策

从全球来看,海水淡化产能主要分布在中东、北非、亚太和美洲等地区。中东地区由于极度缺水和石油效益提供支撑,一直为海水淡化产能最大的地区。目前,沙特海水淡化产能高达525万 m^3/d ,是世界上海水淡化产能最多的国家,且拥有目前世界上最大的多级闪蒸海水淡化厂和热膜耦合工艺海水淡化厂——RAZZOUR海水淡化厂,其日产能高达102.5万 m^3/d ,淡化海水主要用于生活饮用水和农业用水^[38]。目前世界上最大的低温多效海水淡化厂为位于阿联酋的Taweelah A1海水淡化厂,日产能高达24万 m^3/d ,其淡化海水主要用于工业用水及生活饮用水^[39]。目前世界上最大的反渗透海水淡化厂为维多利亚海水淡化工程,日产能高达44.4万 m^3/d ,其淡化海水主要用于市政方面。此外,电渗析海水淡化技术由于成本较高,其海水淡化产能规模通常较小,目前美国和日本在电渗析技术方面走在世界前列^[40]。从国外海水淡化发展较好的国家和地区来看,其政府规划、产业政策等方面对我国海水淡化产业的发展都具有较高的借鉴意义。如沙特作为严重缺水的国家,早在上世纪60年代初就制定了“根据国家紧急发展远景目标在全国建立大型海水淡化厂的长远计划”;在阿尔及利亚,政府鼓励私人部门参与阿尔及利亚海水淡化事业,部分海水淡化厂可以获得国家财政预算的资助;在以色列,政府与受资助的海水淡化厂签订协议确定最低的淡化海水购买量,以降低海水淡化厂投资者的风险,促进海水淡化产业的发展。

在我国,浙江舟山、山东青岛等地海水淡化已取得了较大的发展,积累了许多十分宝贵的经验。以浙江舟山为例,受特殊的地理位置及淡水资源的短缺的影响,舟山市的海水淡化起步较早。1997年,日产能500 m^3 的反渗透海水淡化装置在嵊泗县建成运行,开创了我国反渗透海水淡化的里程碑,也是我国海水淡化技术产业化发展的标志。到2017年底,浙江舟山已建成海水淡化工程20余处,除市政用水外,淡化海水还用于电水联产、工业、港口物流和旅游等。淡化海水在舟山供水结构中占据了重要的地位,为缓解舟山水资源短缺做出了重要的贡献。舟山市开发利用海水的主要经验做法有:(1)近年

来,舟山市委市政府出台多项落地政策,保障舟山市海水淡化产业化发展。《舟山市海水淡化和综合利用发展规划》指出要从战略高度推进海水淡化产业发展,使海水淡化成为解决近中期水资源需求的重要选择^[41];《舟山市国民经济和社会发展第十三个五年规划纲要》指出,要依托主要产业区和主要大岛大力发展海水淡化的机遇,提高海水淡化产业化程度,扩大海水综合利用规模,加强海水淡化国产化技术研发和推广^[42];《舟山市山海协作工程十二五规划》提出要提高海水淡化产业规模,发展海水化学元素综合利用^[43];《浙江省舟山群岛新区水资源节约和开发利用保护总体规划(2011—2020)》指出,海水淡化等非常规水资源加大开发利用力度,有效补给供水管网等^[44]。(2)舟山就淡化海水等非常规水源建立了联合调度供水体系。首先是水源联网,将各独立水库连成整体,实现岛内城镇供水水源的统一调度;其次是构建供水管网联网体系,进一步扩大供水范围,提高供水协调能力;再次是淡化海水接入供水管网,或者淡化海水与当地水库水勾兑后再进入供水管网,降低了吨水成本,形成常规水源与淡化海水联合供水体系;最后是构建了岛际之间的引配水工程,进一步提高了供水能力。(3)舟山建立了水务一体化管理的新模式,将城建等部门有关水资源的管理职能划分水务局,水资源调度、水量调配、计划用水等均实现一体化管理,改变之前多头管理的局面。(4)舟山市人民政府与浙江大学联合设立了浙江大学舟山海洋研究中心,加大了对海水淡化技术尤其海水淡化技术与海水利用造成的环境问题研究,为舟山市的海水的综合利用提供了强大的技术保障。(5)为解决浓盐水对环境造成的影响,舟山探索出了一条海水淡化和晒盐结合的新道路。这样不仅保证了舟山海水制盐这一基础行业,节约了大量的海边盐场,降低盐业生产成本,更有效的降低了海水淡化带来的环境问题。借鉴国外及舟山经验,结合我国海水淡化存在的问题,对我国海水综合利用提出以下对策。

4.1 加大技术投入,降低经济成本

首先,政府层面要充分重视海水淡化的重要性,通过立法来确定海水淡化的战略地位,同时配套相应的目标规划、专项基金、管理办法来保障海水淡化产业的发展。科研机构要进行相关的基础技术研究,培养海水淡化相关方面的人才,与相关企业共建研发中心,进行海水淡化共性技术的研究及商业应用的研究,科研机构(如高校)为企业定向培养人才,企业为相关专业学生提供实践基地,待研究成果可以转

化时,企业进行规模化生产,形成海水淡化利用的政产学研商模式(图 11),政府、科研机构和企业共赢,从而不断提高海水淡化的规模。



图 11 海水淡化利用的政产学研商模式

Fig. 11 The mode of government, industry, education, research and business for desalination

4.2 合理规划建设,提高产能利用

在当前海水淡化生产成本水平上,要解决大范围的产能闲置问题,需加大政府直接补贴力度。就政府补贴而言,城市经济发展形成的边际收益,可以完全或部分为政府对淡化海水施行补贴提供激励。此外,海水淡化的大规模应用以及设备的国产化,也会使其成为一种新的产业,带动地方经济的繁荣和增加税收。国家和沿海城市应该进一步推动自来水价改革,实行分类水价和阶梯水价,加大对过多用水户的水资源税征收力度,通过计算在不同水价基础上的需求量,确定在海水淡化综合成本水平上的供水需求,间接的加强对海水等非常规水需求量的规划。政府态度很大程度上决定淡化海水能否在城市供水体系中大规模应用,但是作为一个城市管理者,政府并不只是简单将供水问题作为一个资金和技术问题来看待,建立安全稳定的城市供水保障体系,以维持经济发展和居民的需求才是首先需要考虑的。将淡化海水接入市政管网时,需要从水厂规划、淡化生产、运输存储、后处理、掺混消毒、运营管理、应急处理等阶段编制相关技术要求,具体内容如图 12 所示。在条件允许的地区,要加快建设淡化海水等非常规水联合调度供水体系,将淡化海水纳入水资源统一配置,扩大供水范围,提高供水能力。

4.3 综合利用海水,减少环境污染

为减少海水淡化造成的浓盐水污染,可以通过综合利用海水来实现。除海水淡化外,海水的其他利用方式包括海水循环冷却、海水制盐、海水提钾、提溴、提镁等。首钢京唐钢铁有限公司海水淡化利用钢铁厂内特有的“水—汽—水”的物质循环以及能量的梯级使用,最大限度实现了钢铁厂能源的合理利用,淡化海水满足了炼铁、炼钢、轧钢等生产使用

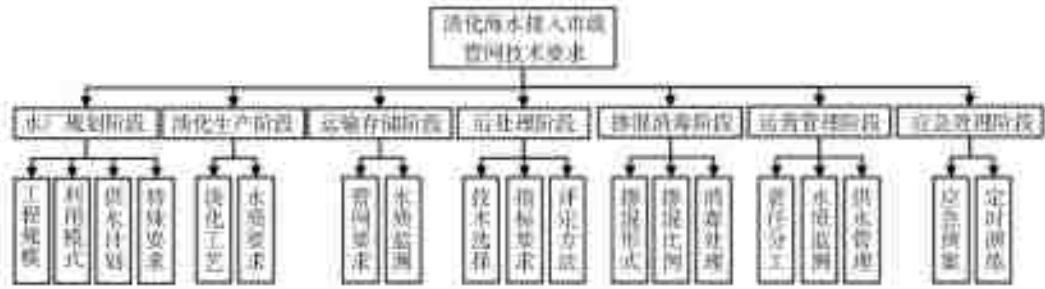


图 12 淡化海水接入市政管网的技术要求

Fig. 12 Technical requirements for desalinated seawater access to municipal pipe network

高品质冷却水的需求,浓盐水进入盐场制成固体盐后,最终汇入大海,这种循环高效的方式实现能源利用最大化、环境污染最小化的目标,同时首钢京唐公司海水淡化项目作为热法海水淡化工艺在钢铁行业成功应用的范例,填补了国内钢铁厂海水淡化项目的空白,为钢铁行业水资源的匮乏提供了良好的解决方法。舟山海水淡化和晒盐结合的发展模式在保证海水制盐当地这一基础行业的基础上,减少了浓盐水带来的环境污染,这些做法与方式应在全国进行推广。对于海水的综合利用,除冷却发电和海水淡化外,包括对淡化利用后的浓盐水进行提取钾钠镁锂溴等化学物质,盐场制盐,发展氯碱工业等,海水综合利用流程见图 13,各地可依据实际情况选取相关产业进行发展,实现海水的最大化利用,实现海水资源最大化利用与环境保护两大目标。除此之外,在研发海水综合利用技术的基础上,应建立一批海水综合利用的示范基地,以在行业内形成良好的示范作用。



图 13 海水综合利用流程

Fig. 13 Comprehensive seawater utilization process

4.4 加强政策扶持,完善法规标准

首先,在法律方面,要通过立法明确海水淡化及其他利用方式的主管部门,水利部、自然资源部、生态环境部以及其他涉及海洋管理的国家部门、地方部门与协会需要明确各自职能、责任、权利和利益分配等问题;出台保护海水资源、海洋环境相关的法律,确保在充分利用海洋资源的情况下不对海洋环境造成破坏;要进一步提高淡化海水的利用,还需要研究将淡化海水纳入水资源统一配置。此外,在政

策方面,要完善海水利用的准入制度,确保海水利用行业的秩序;明确产业规划,包括海洋资源的潜力、海洋资源的需求、经济效益、产业布局等方面定期规划、适时调整;制定海水利用相关企业的管理办法,避免管理混乱的状况发生;科学制定激励机制,在审批、补贴、信贷、税收等方面加以明晰,以弥补企业在水价及其他方面的劣势,例如,对于进入市政管网的海水淡化水,供水企业应与海水淡化厂签订长期的采购合同,按照实际入网水量向海水淡化厂支付费用,自来水市场价格与海水淡化采购价之间的差额由政府补偿;在群众认知方面,要不断加强引导。最后,在标准制定方面,要从技术、水质、监测、运输等方面进行定制并不断完善,研究海水淡化水安全进入市政管网应满足的水质条件,建立海水淡化水水质标准,开发出适合海水淡化的矿化处理标准,建立项目规模论证制度(图 14)。

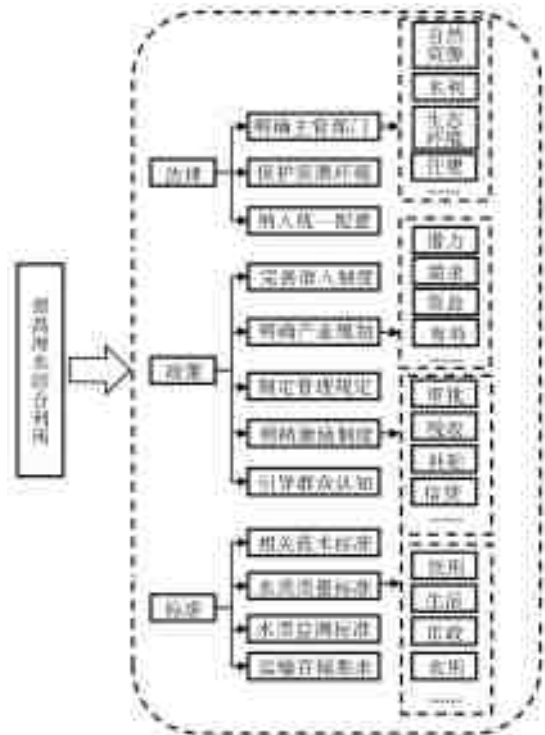


图 14 海水淡化法律、政策、标准构建框架

Fig. 14 Seawater desalination law, policy, and standard construction framework

5 展 望

我国海水资源利用正处于发展阶段,加之区域水资源之间存在差异性,利用程度各不相同,与淡水、地下水等水源相比较价格优势不突出等现实问题,海水开发利用仍存在难点。在未来海水淡化产业化进程中,要着重突破海水淡化各个环节的核心技术,研发高效安全的海水全产业链技术;建立完善的政策、标准支持体系,加强海水淡化设计运营公司的对外输出;积极开展海水淡化试点城市、示范基地等工作。在党和国家的高度重视下,海水淡化必将得到快速的发展,这将对保护水资源、发展海洋战略性新兴产业、建设人水和谐的新时代社会主义具有重要意义。

参考文献(References):

- [1] 王晓丽,初喜章,单科,等.我国海岛发展海水淡化产业前景和战略对策分析[J].中国农村水利水电,2014(10):96-100. WANG X L, CHU X Z, SHAN K, et al. SWOT Analysis and industry development strategy of seawater desalination on the islands[J]. China Rural Water and Hydropower, 2014(10): 96-100. (in Chinese) DOI: 10. 3969/j. issn. 1007-2284. 2014. 10. 025.
- [2] 中华人民共和国国家统计局. 2018 年中国统计年鉴[M].北京:中国统计出版社,2018. (National Bureau of Statistics of the People's Republic of China. China Statistical Yearbook of 2018 [M]. China Statistics Press, Beijing, China, 2018. (in Chinese))
- [3] 宋进喜,王伯铎,李怀恩.西北开发中的水资源问题及对策[J].长安大学学报(自然科学版),2002(6):108-112. (SONG J X, WANG B D, LI H E. Water resources and development of Chinese Northwest zone [J]. Journal of Chang'an University (Natural Science Edition), 2002(6): 108-112. (in Chinese)) DOI: 10. 19721/j. cnki. 1671-8879. 2002. 06. 028.
- [4] 刘昌明,王红瑞.浅析水资源与人口、经济和社会环境的关系[J].自然资源学报,2003,18(5):635-644. (LIU C M, WANG H R. An analysis of the relationship between water resources and population-economy-society-environment[J]. Journal of Natural Resources, 2003, 18(5): 635-644. (in Chinese)) DOI: 10. 3321/j. issn: 1000-3037. 2003. 05. 017.
- [5] 王红瑞,钱龙霞,许新宜,等.基于模糊概率的水资源短缺风险评价模型及其应用[J].水利学报,2009,40(7):813-821. (WANG H R, QIAN L X, XU X Y, et al. Model for evaluating water shortage risk based on fuzzy probability and its application [J]. Journal of Hydraulic engineering, 2009, 40(7): 813-821. (in Chinese)) DOI: 10. 13243/j. cnki. slxb. 2009. 07. 007.
- [6] 高媛媛,许新宜,王红瑞,等.中国水资源利用效率评估模型构建及应用[J].系统工程理论与实践,2013,33(3):776-784. (GAO Y Y, XU X Y, WANG H R, et al. Model for evaluating water shortage risk based on fuzzy probability and its application [J]. Systems Engineering Theory & Practice. 2013, 33(3): 776-784. (in Chinese)) DOI: 10. 3969/j. issn. 1000-6788. 2013. 03. 029.
- [7] 张春园,钟玉秀,王建华,等.关于积极发展我国海水利用的几点建议[J].水利发展研究,2011(9):1-5. (ZHANG C Y, ZHONG Y X, WANG J H, et al. Some advice about the positive development of China seawater use [J]. Water Resources Development Research, 2011(9): 1-5. (in Chinese)) DOI: 10. 13928/j. cnki. wrdr. 2011. 09. 001.
- [8] 孙才志,郭可蒙,邹玮.中国区域海洋经济与海洋科技之间的协同与响应关系研究[J].资源科学,2017,39(11):2017-2029. (SUN C Z, GUO K M, ZOU W. The coordination and response between regional marine economy and marine science and technology in China [J]. Resources Science, 2017, 39(11): 2017-2029. (in Chinese)) DOI: CNKI: SUN; ZRZY. 0. 2017-11-001.
- [9] AMY G, GHAFPUR N, LI Z Y, et al. Membranebased seawater desalination: Present and future prospects [J]. Desalination, 2017, 401: 16-21. DOI: 10. 1016/j. desal. 2016. 10. 002.
- [10] 陈康翔,钱德雪.海水淡化在舟山海岛地区的适用性分析[J].浙江水利科技,2006(5):11-12. (CHEN K X, QIAN D X. Analysis of applicability of seawater desalination in Zhoushan island area [J]. Zhejiang Water Resources Science and Technology, 2006(5): 11-12. (in Chinese)) DOI: 10. 13641/j. cnki. 33-1162/tv. 2006. 05. 004.
- [11] 刘炳伟,刘伟杰,胡文培.火电厂海水淡化工艺的技术经济分析及选择[J].工业安全与环保,2010,36(2):24-26. (LIU B W, LIU W J, HU W P. Techno-economic analysis and selection for the desalination in power plant [J]. Industrial Safety & Environmental Protection, 2010, 36(2): 24-26. (in Chinese)) DOI: 10. 3969/j. issn. 1001-425X. 2010. 02. 010.
- [12] 杨尚宝.关于我国海水淡化产业发展的几点看法[J].水处理技术,2010(7):1-5. (YANG S B. Several views on China's seawater desalination industry [J]. Technol. Water Treat, 2010(36): 1-5. (in Chinese)) DOI: 10. 16796/j. cnki. 1000-3770. 2010. 07. 001.
- [13] CHOI J S, LEE S, KIM J M, et al. Small-scale desalination plants in Korea: technical challenges [J]. Desalination, 2009(247): 222-232. DOI: 10. 1016/j. desal. 2008. 12. 026.
- [14] 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 Z W, LIN Z Q, WANG D, et al. Seawater utilization and impact on environment in China[J]. Marine Environmental Science, 2008(6): 671-676. (in Chinese)) DOI: 10. 3969/j. issn. 1007-6336. 2008. 06. 026
- [15] 聂红涛,陶建华. 渤海湾海岸带开发对近海水环境影响分析[J]. 海洋工程, 2008(3): 44-50. (NIE H T, TAO J H. Impact of coastal exploration on the eco-environment of Bohai Bay[J]. Ocean Eng. 2008(3): 44-50. ((in Chinese)) DOI: 10. 16483/j. issn. 1005-9865. 2008. 03. 006.
- [16] ZHENG X, CHEN D, WANG Q, et al. Seawater desalination in China: Retrospect and prospect [J]. Chemical Engineering Journal, 2014 (242): 404-413. DOI: 10. 1016 / j. cej. 2013. 12. 104.
- [17] 朱庆平,史晓明,詹红丽,等. 我国海水利用现状、问题及发展对策研究[J]. 中国水利, 2012(21): 30-33. (ZHU Q P, SHI X M, ZHAN H L, et al. Seawater utilization in China; current situation, issue and development strategy [J]. China Water Resources, 2012(21): 0-33. (in Chinese)) DOI: 10. 3969/j. issn. 1000-1123. 2012. 21. 011.
- [18] 陈莹,赵辉. 我国海水淡化利用现状和有关政策建议[J]. 水资源管理, 2014(9): 19-20. (CHEN Y, ZHAO H. Utilization of desalination of sea water; current situation and policy suggestion[J]. Water Resources Management, 2014(09): 19-20. (in Chinese)) DOI: 10. 3969/j. issn. 1000-1123. 2014. 09. 007.
- [19] 2016-2017年中国海水淡化年度报告[R]. 北京:中国水利企业协会脱盐分会, 2018. (China Desalination Yearbook of 2016-2017 [R]. Desalination Branch of China Water Enterprises Confederation; Beijing, China, 2018. (in Chinese))
- [20] MOHAMMADI T, KAVIANI A. Water shortage and seawater desalination by electro dialysis[J]. Desalination, 2003, 158 (1): 267-270. DOI: 10. 1016/S0011-9164(03)00462-4.
- [21] ELIMELECH M, PHILLIP W A. The future of seawater desalination; Energy, technology, and the environment [J]. Science, 2011, 333 (6043): 712-717. DOI: 10. 1126/science. 1200488.
- [22] MALIK A U, ANDIJANI I, JAMALUDDIN A M, et al. Crevice corrosion behavior of high-alloy stainless steels in a SWRO pilot plant[J]. Desalination, 2004, 171 (3): 289-298. DOI: 10. 1016 / j. desal. 2004. 04. 007.
- [23] MALIK A U, ANDIJANI I N, MOBIN M, et al. Corrosion behavior of materials in RO water containing 250-350 ppm chloride[J]. Desalination, 2005, 196 (1-3): 149-159. DOI: 10. 1016/j. desal. 2005. 12. 010.
- [24] BINDRA S P, ABOSH W. Recent developments in water desalination[J]. Desalination, 2001, 136(1): 49-56. DOI: 10. 1016 / S0011-9164(01)00164-3.
- [25] OLDFIELD J W, TODD B. The use of stainless steels and related alloys in reverse osmosis desalination plants[J]. Desalination, 1985(55): 261-280. DOI: 10. 1016/0011-9164(85)80077-1.
- [26] GUSMANO G, MONTESPERELLI G, FORTE G, et al. On-line corrosion resistance tests in sea water on metals for MED plants [J]. Desalination, 2005, 183 (1): 187-194. DOI: 10. 1016/j. desal. 2005. 02. 048.
- [27] 海水淡化与综合利用关键技术和装备成果汇编[R]. 北京:科技部,国家海洋局, 2015. (The key technologies and equipment of desalination and comprehensive utilization of seawater[R]. Ministry of Science and Technology of the People's Republic of China, State Oceanic Administration; Beijing, China, 2015. (in Chinese))
- [28] 张国辉,王为强,孙守智. 海水利用:解决青岛市淡水不足的重要措施[J]. 海岸工程, 2000(2): 178-180. (ZHANG G H, WANG W Q, SUN S Z. An Important measure to solve the lack of fresh water of Qingdao-Usage of sea water[J]. Coastal Engineering, 2000(02): 178-180. (in Chinese))
- [29] 刘冬林,王海锋,庞靖鹏,等. 进一步发展海水淡化产业的制约因素和对策建议[J]. 水利发展研究, 2012, 12(4): 20-23, 27. (LIU D L, WANG H F, PANG J P, et al. Restrictive factors and countermeasures for further development of seawater desalination industry [J]. Research and Development of Water Resources, 2012, 12(4): 20-23, 27. (in Chinese)) DOI: 10. 13928/j. cnki. wrdr. 2012. 04. 001.
- [33] 李皞,龙潇,刘克成. 浅谈海水淡化浓盐水的影响及利用[J]. 应用能源技术, 2012(1): 13-16. (LI H, LONG X, LIU K C. Discussion on the effect and exploitation of the seawater desalination brine[J]. Applied Energy Technology, 2012(01): 13-16. (in Chinese)) DOI: 10. 3969/j. issn. 1009-3230. 2012. 01. 004.
- [31] 国务院办公厅. 国务院办公厅关于加快发展海水淡化产业的意见[J]. 中华人民共和国国务院公报, 2012(5): 119. (General Office of the State Council of the People's Republic of China. The opinions about accelerating the development of seawater desalination industry[J]. The Bulletin of State Council of the People's Republic of China, 2012(5): 119. (in Chinese))
- [32] 中华人民共和国水利部. 2017年中国水资源公报[M]. 北京:水利水电出版社, 2018. (Ministry of Water Resources of the People's Republic of China. 2017 Water Resources Bulletin of China. [M]. Beijing: Water Resources and Hydropower Press, 2018. (in

- Chinese))
- [33] 思雨. 海水淡化水属于高品质饮用水[J]. 中国食品, 2017(3): 40-43. (SI Y. Desalination water is a high quality drinking water[J]. Chinese Food, 2017 (3): 40-43. (in Chinese)) DOI: 10. 3969/j. issn. 1000-1085. 2017. 03. 009.
- [34] 国家发展和改革委员会, 国家海洋局. 全国海水利用“十三五”规划[Z]. 2016. (National Development and Reform Commission, State Oceanic Administration. National 13th five-year plan for seawater utilization [Z]. 2016. (in Chinese))
- [35] 国家发展和改革委员会, 国家海洋局. 全国海洋经济发展“十三五”规划[Z]. 2017. (National Development and Reform Commission, State Oceanic Administration. National marine economic development "13th five-year plan"[Z]. 2017. (in Chinese))
- [36] 山东省水利厅. 山东省水安全保障总体规划[Z]. 2017. (Shandong Provincial Department of Water Resources. Shandong Water Safety Assurance Master Plan[Z]. 2017. (in Chinese))
- [37] 青岛市卫生和计划生育委员会. 海水淡化生活饮用水集中式供水单位卫生管理规范[Z]. 2016. (Qingdao Municipal Health and Family Planning Commission. Hygienic management practices for centralized desiccated drinking water units for seawater desalination [Z]. 2016. (in Chinese))
- [38] 王世明, 李晴, 周婷. 海水淡化集成技术的相关研究[J]. 环境工程, 2017, 35(1): 1-5. (WANG S M, LI Q, ZHOU T. Research on seawater desalination integration technology[J]. Environmental Engineering, 2017, 35 (1): 1-5 (in Chinese)) DOI: 10. 13205/j. hjgc. 201701001.
- [39] 朱淑飞, 薛立波, 徐子丹. 国内外海水淡化发展历史及现状分析[J]. 水处理技术, 2014, 40(7): 12-15. (ZHU S F, XUE L B, XU Z D. Analysis of development history and current situation of seawater desalination at home and abroad[J]. Water Treatment Technology, 2014, 40(7): 12-15. (in Chinese)) DOI: 10. 16796/j. cnki. 1000-3770. 2014. 07. 004.
- [40] 魏巍. 电渗析海水淡化制备饮用水的应用研究[D]. 兰州: 兰州交通大学, 2018. (WEI W. Application of electrodialysis seawater desalination to prepare drinking water [D]. Lanzhou: Lanzhou Jiaotong University, 2018. (in Chinese)).
- [41] 舟山市发展和改革委员会. 舟山市海水淡化和综合利用发展规划[Z]. (Zhoushan Development and Reform Commission. Zhoushan City desalination and comprehensive utilization development plan[Z]. (in Chinese))
- [42] 舟山市发展和改革委员会. 舟山市国民经济和社会发展第十三个五年规划纲要[Z]. 2016. (Zhoushan Development and Reform Commission. The 13th five-year plan for national economic and social development of Zhoushan City[Z]. 2016. (in Chinese))
- [43] 舟山市发展和改革委员会. 舟山市山海协作工程十二五规划 [Z]. 2015. (Zhoushan Development and Reform Commission. Zhoushan City sea-sea cooperation project 12th five-year plan[Z]. 2015. (in Chinese))
- [44] 浙江省发展和改革委员会, 浙江省水利厅. 浙江省舟山群岛新区水资源节约和开发利用保护总体规划(2011-2020) [Z]. 2014. (Zhejiang Development and Reform Commission, Zhejiang Water Resources Department. Zhejiang Province Zhoushan islands new district water conservation and development and utilization protection master plan (2011-2020)[Z]. 2014 (in Chinese))