

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2022.10.003

# 海水淡化工程全球大规模应用发展趋势

郝晓地, 王邦彦, 曹达启, 张大玉

(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-荷污水处理技术研发中心, 北京 100044)

**摘要:** 淡水缺乏是全球近一半人口(约37.5亿人)目前普遍面临的问题,且事态还在进一步加剧。为解决缺水问题,沿海甚至近海城市对海水进行淡化已变得愈来愈普遍,工程应用水平正朝着大规模化方向发展,以至于中东地区已出现日产水量百万吨级淡化工厂。与远距离调水及污水深度处理回用相比,海水淡化最低生产成本目前已降至3元/m<sup>3</sup>以下,通常也不会超过5元/m<sup>3</sup>,这就逐渐改变了人们对海水淡化成本昂贵的传统认识。随着海水淡化主流技术——反渗透(RO)能耗的降低以及太阳能与风能等清洁能源的利用,海水淡化成本与其生态足迹必将大为减少;电-水联产也会使热蒸馏海水淡化法的成本显著降低。在介绍全球大型海水淡化工程应用基础上,总结海水淡化产水成本与其生态足迹,展望海水淡化作为不可或缺补充淡水资源的大规模应用前景。

**关键词:** 海水淡化; 反渗透; 热蒸馏; 产水成本; 生态足迹; 远距离调水

**中图分类号:** TU991 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2022)10-0018-07

## Global Trends of Desalination towards Large-scale Engineering Applications

HAO Xiao-di, WANG Bang-yan, CAO Da-qi, ZHANG Da-yu

(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:** Lack of freshwater is a common problem faced by nearly half of the world's population (about 3.75 billion), which would be further aggravated in the future. To resolve the problem of water shortage, the desalination of seawater on site has been more and more commonly used in coastal and even adjacently-coastal cities, and its application level is developed towards large-scale engineering projects. Some desalination plants over 1×10<sup>6</sup> m<sup>3</sup>/d have been established in the Middle East. Compared to water diversion on a long distance and effluent reuse of advanced wastewater treatment, the lowest production cost of desalination has been declined to less than 3 yuan/m<sup>3</sup> (normally no more than 5 yuan/m<sup>3</sup>), which has gradually changed people's traditional minds about high cost of desalination. The costs of desalination and its ecological footprints would be greatly reduced with the energy consumption reduction of RO (the mainstream technology for desalination) as well as the use of clean energy such as solar and wind energy. Moreover, the costs of desalination by distillation would also be significantly reduced due to the combination of combined power and heat (CHP) and freshwater. The costs of production and ecological footprints of desalination were summarized based on introducing large-scale desalination

基金项目: 北京市高水平创新团队资助项目

projects in the world, and desalination as an indispensable supplement of freshwater resources was finally prospected for large-scale engineering applications.

**Key words:** desalination; reverse osmosis (RO); distillation; costs of produced freshwater; ecological footprint; water diversion on a long distance

相对于陆地水资源,海水体量大且拥有巨大的自净作用,所以,受人类污染程度相对较低。再加上陆地淡水资源因远距离调水(如南水北调)和气候变化等原因使其利用成本日趋攀升<sup>[1]</sup>,这使得沿海城市乃至近海城市(如北京)向大海汲取淡水(海水淡化)的趋势愈发明显,海水淡化工程已从原先日产几十吨、上百吨小规模生产演变为百万吨工程级别。

根据国际水务情报网(GEL)的预测,到2022年全球海水淡化总规模将达到 $8\,580\times 10^4\text{ m}^3/\text{d}$ ,以中东、欧洲、美国、日本等地区和国家应用最为广泛。我国对海水淡化工程应用起步虽然较早,但应用水平不高;现有海水淡化工程近115个,但总淡水产量才 $157\times 10^4\text{ m}^3/\text{d}$ 左右,仅为全球应用水平的1.6%<sup>[2]</sup>。海水淡化技术最早源于蒸馏-冷凝技术[即热法,如多级闪蒸(MSF)技术和多效蒸馏(MED)技术],但随着反渗透(RO)技术的迅速发展,目前RO已成为海水淡化的主流技术(份额高达2/3,其余1/3为热蒸馏技术)<sup>[3]</sup>。

在简要论述海水淡化发展历程的基础上,重点介绍近年来国际上大规模海水淡化技术的工程应用现状以及我国应用发展状况,详述海水淡化产水成本与生态足迹,并就海水淡化未来发展前景进行展望。

## 1 海水淡化发展历程

人类早在2 000多年前就有文字记载海水蒸馏汲取淡水的故事;1560年世界上第一个陆基海水脱盐工厂在突尼斯某海岛建成;1675年和1683年英国专利 No. 184 和 No. 226 提出了海水蒸馏淡化技术<sup>[4]</sup>。19世纪后随着蒸汽机的出现,远洋殖民开拓必需的航海业发展对就近海水淡化有了实际需求,导致浸没式蒸发器出现<sup>[4]</sup>。1898年沙俄投产了第一个海水淡化工厂,基于MED原理,日产淡水量达 $1\,230\text{ m}^3/\text{d}$ 。1954年膜分离技术下的电渗析海水淡化装置问世。1957年MSF技术出现,这也是人类大规模海水淡化工程应用的开始<sup>[4]</sup>。1975年,随着美

国杜邦(Dupont)公司“Permsep”B-10中空纤维膜的出现,反渗透(RO)海水淡化技术走进人们的视野<sup>[4]</sup>。与此同时,“低温多效蒸馏法”因克服了“高温多效蒸馏法”易结垢和高能耗的缺点,也开始实现商业化生产<sup>[4]</sup>。

我国海水淡化实际工程应用于1920年前后,主要标志是在山东省威海市刘公岛上建设了一座海水淡化蒸馏塔<sup>[2]</sup>。1965年,山东海洋学院曾在国内率先进行反渗透醋酸纤维素膜(CA膜)研究,但当时受文革影响而有始无终<sup>[5]</sup>。1981年,我国第一座电渗析海水淡化厂(处理规模为 $200\text{ m}^3/\text{d}$ )在西沙永兴岛建成投产<sup>[5]</sup>。1997年,我国第一座 $500\text{ m}^3/\text{d}$ 成规模反渗透海水淡化装置在浙江省舟山市嵊山镇建成,真正开启了我国海水淡化规模化工程应用的先河<sup>[5]</sup>。

进入21世纪,全球海水淡化正朝着大规模和清洁能源方向发展,处理规模超过 $5\times 10^4\text{ m}^3/\text{d}$ 的淡化厂已比比皆是,突破百万吨级别的淡化厂也已在中东地区国家出现<sup>[6]</sup>。我国目前正在建设的海水淡化厂也正朝着大规模方向迈进。根据《2019全国海水利用报告》,规模超过 $10\times 10^4\text{ m}^3/\text{d}$ 的淡化厂已在应用或正在建设。

## 2 大规模海水淡化工程

### 2.1 应用案例

从全球范围来看,海水淡化工程正朝着处理规模大型化、应用领域广泛化方向发展,如表1所示<sup>[5-15]</sup>。

表1显示,处理规模 $\geq 25\times 10^4\text{ m}^3/\text{d}$ 的海水淡化工程主要分布在中东地区,其中,最大3座规模已超过 $100\times 10^4\text{ m}^3/\text{d}$ <sup>[6-7]</sup>。不仅如此,已经拥有大量海水淡化工程项目的沙特阿拉伯近年来依然在进一步扩大应用规模,例如,在麦加拉比格扩建的Rabigh 3项目计划2021年建成,将使该地海水淡化规模达到 $60\times 10^4\text{ m}^3/\text{d}$ ;吉赞地区的海水淡化项目Shuqaiq 3计划也在同年建成,届时将为该地带来 $45\times 10^4\text{ m}^3/\text{d}$ 的淡水<sup>[13]</sup>。

表1 全球大型海水淡化工程应用案例

Tab.1 Global large-scale engineering cases for desalination in the world

项目	地区	规模/ ( $10^4 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$ )	工艺	建成 时间
Shuaiba 3 <sup>[6]</sup>	沙特阿拉伯麦加	128.2	MSF、RO	2019年
Sorek <sup>[6-7]</sup>	以色列特拉维夫	117.2	RO	2023年
Ras Al Khair <sup>[6]</sup>	沙特阿拉伯哈萨	103.6	MSF、RO	2016年
Taweelah <sup>[6]</sup>	阿联酋阿布扎比	90.92	RO	2022年
JWAP <sup>[6]</sup>	沙特阿拉伯 朱拜勒	80	MED	2010年
Umm Al Quwain <sup>[6]</sup>	阿联酋乌姆盖万	68.2	RO	2022年
Jubail 3A IWP <sup>[6]</sup>	沙特阿拉伯 朱拜勒	60	RO	2022年
Rabigh 3 <sup>[8]</sup>	沙特阿拉伯 拉比格	60	RO	2021年
Jebel Ali M <sup>[9]</sup>	阿联酋迪拜	63.6	MSF	2018年
Fujairah 2 <sup>[6]</sup>	阿联酋富查伊拉	59.1	MED、RO	2007年
Magtaa <sup>[10]</sup>	阿尔及利亚奥兰	50	RO	2014年
Hadera <sup>[11]</sup>	以色列哈代拉	46.2	RO	2010年
Shuweihat 2 <sup>[5]</sup>	阿联酋阿布扎比	45.46	MSF	2004年
Tuas <sup>[12]</sup>	新加坡	45.45	RO	2016年
CA San Francisco <sup>[5]</sup>	美国旧金山	45.42	RO	2008年
Shuqaiq 3 <sup>[13]</sup>	沙特阿拉伯吉赞	45	RO	2021年
Umm Al Nar <sup>[14]</sup>	阿联酋阿布扎比	39.76	MSF	2007年
Jebel Ali L 2 <sup>[5]</sup>	阿联酋迪拜	36.32	MSF	2007年
Sulaibya <sup>[5]</sup>	科威特	30	MSF	2003年
Ras Laffan <sup>[5,15]</sup>	卡塔尔拉斯拉凡	28.6	MSF	在建
Kurnell <sup>[5]</sup>	澳大利亚新南威 尔士州	25	RO	2010年

以色列与阿联酋也是中东地区应用海水淡化规模较大的国家。3座晋级百万吨规模的淡化工程其中之一便在以色列,它是特拉维夫Sorek二期工程,预计2023年完工,规模将从 $54.8 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 提升至 $117.2 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ <sup>[6-7]</sup>。值得一提的是计划2022年完工的阿联酋最大规模Taweelah工程( $90.92 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ ),以ACWA电力公司为首的工程承包商爆出了仅0.49美元/ $\text{m}^3$ (约3元/ $\text{m}^3$ )的低水价<sup>[6]</sup>。阿联酋目前海水淡化项目还考虑水-电联建,用发电余热为热法淡化提供能源。例如,2018年刚扩建完工的迪

拜Jebel Ali M工程便是水-电联建项目,它是Jebel Ali发电、供水综合体中的一部分。Jebel Ali项目目前发电装机容量为9 656 GW,几个相邻的淡化厂(RO与热蒸馏工艺)可提供总量为 $213.67 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 的淡水<sup>[9]</sup>。中东地区之外,位于北非的阿尔及利亚也是海水淡化应用规模较大的国家,该国奥兰地区已经运行有规模达到 $50 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 的淡化工厂。不仅如此,该国还于2018年7月再次招标,计划为阿尔及尔和布利达地区建设两座 $30 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 海水淡化厂,项目完成后将使海水淡化水占到该国饮用水供应量的25%<sup>[16]</sup>。工程应用中,规模较大的淡化工程还有新加坡大士( $45.45 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ )、美国旧金山( $45.42 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ )和澳大利亚新南威尔士州( $25 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ )。

## 2.2 应用范围与清洁能源

海水淡化工程应用领域不断拓宽,利用RO技术实现废水回用与海水淡化相结合的技术应用也已出现;该技术已在南非德班市Remix Water项目中开始全面运行,是一个将废水处理后的出水与海水混合后淡化为饮用水的案例<sup>[17]</sup>。由于出水与海水混合,这就稀释了海水中的盐分,导致RO技术应用时可适当减少对外加压力的需求,从而将传统RO所需高压泵改为革新后的中压泵来维持运行,可节约近30%的能源<sup>[17]</sup>。同时,因废水处理出水混入海水,也就降低了淡化后尾水排放的盐度,使应用工程更具可持续性<sup>[17]</sup>。

海水淡化无论热法还是RO,能源消耗是涉及成本或环境的主要问题。显然,海水淡化对化石能源(煤、油发电)的依赖,不仅决定其生产成本难以大幅度下降,重要的是会产生大量温室气体—— $\text{CO}_2$ 。因此,海水淡化对清洁能源的使用趋势明显。有关直接利用太阳能海水淡化的技术早在1872年就有应用,有人在智利建成了一个顶棚状太阳能蒸馏装置,使用了4 760  $\text{m}^2$ 玻璃,淡水产量为 $19 \text{ m}^3/\text{d}$ 。其实,传统海盐生产便是人类直接利用太阳能蒸发水分、逆向晒盐的例子。

近年,在沙特阿拉伯西北部边界Tabuk省并横跨埃及、约旦领土正在规划建设超级城市“NEOM(新未来)”项目(总投资5 000亿美元)备受瞩目;该项目规划占地26 500  $\text{km}^2$ ,预计将于2030年全部建成;得天独厚的地理位置与气候条件将使NEOM成为三国乃至世界教育、科技、金融、贸易、旅游、娱



乐、健康、休闲的中心<sup>[18]</sup>。NEOM基础建设从规划伊始便强调以人为本,兼顾可持续性,因此,可再生能源与海水淡化相结合将是NEOM基础设施建设的一个亮点。NEOM将首次大规模使用聚光太阳能技术(CSP)转化太阳能用于海水淡化,解决了长期以来直接利用太阳能在辐射强度、淡化器密封、供水可靠性等方面存在的问题,可实现大规模利用太阳能(附带储能设备,使夜间生产成为可能)进行海水淡化(工程规模显然将超过百万吨级别),将使产水成本下降为0.34美元/m<sup>3</sup>(<2.5元/m<sup>3</sup>)<sup>[19]</sup>。即便是在反渗透技术已经日渐成熟的今天,海水淡化成本仍处于0.49美元/m<sup>3</sup>的高价位,因此,NEOM超级城市的建成将具有划时代意义,特别是利用太阳能而无CO<sub>2</sub>排放,对生态环境影响程度最低。

### 2.3 国内工程应用现状

相对于全球海水淡化工程呈大规模应用化趋势,国内工程应用发展缓慢。目前,国内海水淡化工程规模小且技术单一,新建工程以反渗透(RO)为主、低温MED热法为辅。国内十大海水淡化工程应用案例<sup>[20-22]</sup>见表2。

表2 我国十大海水淡化工程项目

Tab.2 Top ten projects for desalination in China

项 目	规模/ (10 <sup>4</sup> m <sup>3</sup> ·d <sup>-1</sup> )	工艺	投运时间
山东烟台核电海水淡化工程	30	RO	在建
天津北疆电厂海水淡化工程	20	MED	2012年
浙江舟山绿色石化基地海水淡化工程	18	RO、MED	2019年
中国香港 Tseung Kwan O 海水淡化工程	13.5	RO	2023年
天津大港新泉海水淡化工程	10	RO	2009年
山东青岛百发海水淡化工程	10	RO	2013年
山东青岛董家口海水淡化工程	10	RO	2016年
河北纵横丰南钢铁厂海水淡化工程	10	RO、MED	2019年
河北首钢京唐钢铁厂海水淡化工程	5	MED	2009年
河北曹妃甸北控阿科凌海水淡化工程	5	RO	2011年

目前已运行的工程当数天津北疆电厂海水淡化工程,于2012年扩建完成后生产能力从2010年的10×10<sup>4</sup> m<sup>3</sup>/d提升至目前的20×10<sup>4</sup> m<sup>3</sup>/d;该工程还是我国第一次将淡化水接入市政管网的大型工程,

淡化水与自来水按1:3比例混合后进入汉沽市政供水管网<sup>[23]</sup>。

根据2020年10月我国自然资源部海洋战略规划与经济司发布的2019年度全国海水利用报告,我国海水淡化工程建设经历了自2015年以来的持续放缓后,在2019年迎来了较大的提升。全国年增量近40×10<sup>4</sup> m<sup>3</sup>,这是史无前例的,虽然较国外成熟的大规模工程建设还有较大差距,但是可以看出我国已经在大规模发展道路上迈出了关键一步。

### 2.4 国内应用速度与规模迟缓原因

2016年底国家公布的《全国海水利用“十三五”规划》明确提出,到2020年海水淡化总规模要达到220×10<sup>4</sup> m<sup>3</sup>/d以上,然而,我国目前建成海水淡化总规模仅为157×10<sup>4</sup> m<sup>3</sup>/d。显然,无论早期的蒸馏技术还是现代的反渗透技术,海水淡化的技术、设备应该不存在国产化困难,关键问题是很多沿海城市自来水价与海水淡化相比还多处于低位,使得海水淡化的市场竞争力受到客观约束。再者,我国对于海水淡化似乎并没有太多的鼓励和扶持政策,仅有的财政补贴只是将工业用电按民用电价计费而已。这与沙特阿拉伯在海水淡化上政府几乎全额补贴是无法相提并论的;早在2015年以前,当海水淡化水成本处在5元/m<sup>3</sup>以上高位时,沙特居民用水价格便处在0.05美元/m<sup>3</sup>(约0.35元/m<sup>3</sup>)的极低价格<sup>[24]</sup>。

2018年自然资源部、中国工商银行联合印发《关于促进海洋经济高质量发展的实施意见》,但工商银行为海洋经济发展提供的1000亿元融资额度绝大部分投在了海洋旅游、远洋运输和海产养殖业中,仅在渤海湾区和海南岛缺水沿岸少量涉及海水淡化工程。长期以来,政府部门和很多工程技术人员主观上均认为海水淡化成本昂贵,大规模工程应用很难做到5元/m<sup>3</sup>以下,而现实中东地区海水淡化价格已可做到3元/m<sup>3</sup>以下。另一方面,远距离调水(如南水北调)的获取成本已远远超过居民的实际用水价格,已出现价格倒挂现象。可以预见,海水淡化价格持续降低与非传统水源水价不断攀升势必为我国海水淡化大规模发展带来商机。

## 3 海水淡化成本及其生态足迹

### 3.1 淡水资源概况

相对于海水,陆地淡水资源(2.8%)少且大多又分布在难以利用的南、北两极(77.2%)和地下深处

(22.4%),实际可供人类利用的淡水资源只有0.4% (约占地球包括海水在内全部水资源量的0.007%)<sup>[25]</sup>。我国是一个严重缺水国家,  $2.8 \times 10^{12}$  m<sup>3</sup>的淡水资源分布也不均衡,人均2 200 m<sup>3</sup>水资源扣除洪水径流等难以利用的部分后,实际人均拥有水资源量仅为900 m<sup>3</sup>,为世界平均水平的1/4,属于缺水国家。与其说包括我国在内的缺水国家缺的是绝对水量,倒不如说我国更缺相对水量,是我国过度发展而不注意保护环境所导致的水资源普遍遭受污染的结果。

但无论如何,要想维持世界目前近75亿人的生存以及“奢侈”的现代生活需要,对清洁淡水绝对需要量的增加趋势难以阻挡,这就使人类不得不想方设法寻求一切可以利用的淡水资源。像筑坝拦水、远距离调水等传统淡水获取方式固然短时间内可以奏效,但随着气候变化和水污染现象普遍加剧,势必加大传统淡水获取方式的生产与生态双重成本。这便为沿海或近海城市实施海水淡化工程带来曙光。

### 3.2 淡水获取成本

传统淡水为就近获取原则,无论打井还是汲取河湖水,在水质未受污染前提下付出的代价并不是很大,成本在日常生活中几乎可以忽略不计,特别是广大农村地区。然而,人口激增以及对舒适生活需要的经济发展,导致就近获取清洁水源已变得十分困难。要么就近高标准净化水质(污水深度处理+给水高级处理),要么远距离调取相对清洁之水。无论何种方式,势必会大大增加用水成本,使水变成“昂贵”的商品。例如,已开始利用的“南水北调”工程水价若完全按市场经济定价,北京居民用水价格应至少10元/m<sup>3</sup>(而目前自来水价格只有5元/m<sup>3</sup>)<sup>[26]</sup>。大连已经完成的三期“引碧入连”工程,因引水距离额外延长300 km,水价已超10元/m<sup>3</sup><sup>[4]</sup>。

美国水资源整体上看是非常丰富的,除五大湖拥有丰富的水资源外,也拥有着众多水量丰沛的长河。然而,美国几个严重缺水州(如加利福尼亚、德克萨斯等)似乎并未首先考虑远距离调水,这除了成本因素外,考虑更多的可能是生态问题。这些缺水地区更多采用的是污水处理后回用以及应用海水淡化(拥有全球15%海水淡化市场份额<sup>[2]</sup>)。

对于中东众多石油输出国家,由于无水可调,在石油还未开发时代形成水贵如油的局面。然而,

伴随二战后全球经济快速发展对石油的依赖,石油国家因财力丰厚而开始研究海水淡化。在20世纪我国城市居民用水价格还普遍较低时(<1元/m<sup>3</sup>),其海水淡化价格高达5~8元/m<sup>3</sup><sup>[26]</sup>。

如上所述,目前我国的远距离调水成本已远远超过3~5元/m<sup>3</sup>的海水淡化成本。即使像北京这样的非海滨城市,距海最近也不过100 km,海水淡化后输水入京成本也不会增加太多。可见,目前海水淡化与远距离调水成本相比已具有价格竞争力,保守估计只是南水北调价格的1/2。

西班牙的Ebro河调水工程(规模为 $10 \times 10^8$  m<sup>3</sup>/a,分别北供巴塞罗那、南至阿尔梅里亚)与海水淡化LCA全生命周期比较评价后显示,当RO工程能耗<3 kW·h/m<sup>3</sup>时则具有明显的价格优势<sup>[27]</sup>。因为目前普通RO技术能耗为2~4 kW·h/m<sup>3</sup>,所以Ebro河的调水工程价格优势与海水淡化相比并不明显。

### 3.3 海水淡化生态影响

远距离调水的主要问题是违背自然水文循环规律,由此可能引起难以预料的一系列连锁生态环境问题。例如,不同流域连接会导致生物多样性显著丧失,气候变化也会因调水出现一定问题。而海水淡化走人工水循环之路,对自然水循环几乎无影响。再者,海水淡化取水量与海洋水量相比微不足道,对海洋生态影响也微乎其微<sup>[25]</sup>。海水淡化唯一需要注意的生态影响是局部海水盐分变化对海洋生物的影响。因此,美国等国家规定海水淡化后的浓缩盐水(卤水)不能再排入海洋。对此,海水淡化可以考虑“风力发电+海水淡化+盐业化工”这种三位一体的生态生产方式,充分发掘海水中除盐分之外其他丰富的元素或化合物<sup>[28]</sup>。

## 4 结语与展望

全球海水淡化工程应用规模正朝着大型化方向发展,日产淡水量百万吨级别工厂已在富裕的中东国家不断出现。目前海水淡化成本最低已降至3元/m<sup>3</sup>以下,考虑到气候变化对水资源时空分布、水源污染、战略安全等的影响,海水淡化可能是解决北京这种严重缺水城市淡水资源一劳永逸的途径。

能源消耗与膜材料寿命是决定主流反渗透(RO)海水淡化技术价格的关键要素。在此方面,研发的新型RO能量回收装置——压力交换器可以回收约95%的输入能量,且近年研发人员还提出了轴

向活塞泵取代传统离心泵技术设想,将对RO技术节能产生重大影响。此外,RO直接利用太阳能或风能会彻底改变其消耗化石燃料带来的温室气体排放问题,这将是革命性的能源转型。在膜材料改进方面,通过模仿树木净化原理已开发出木质膜技术;新型纳米木材配合膜蒸馏技术已显示出能耗等可持续性较传统工程高出20%。

目前我国山东烟台已出现 $30 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 规模海水淡化应用工程。相信在不久的将来会出现更大规模实际工程应用,甚至凭借制度优势今后会超越中东地区等国家成为世界海水淡化工程应用规模最大的国家。

### 参考文献:

- [1] AGHAKOUCHAK T, FELDMAN D, HOERLING M, *et al.* Water and climate: recognize anthropogenic drought [J]. *Nature*, 2015, 524(7566): 409-411.
- [2] 陈雨, 段薇薇. 中国海水淡化简史与现状/海水淡化主要工艺及其应用[J/OL]. [2020-04-16]. <https://mp.weixin.qq.com/s/Pwy3YUfeS5Yl0V2zO-mJFg>. CHEN Yu, DUAN Weiwei. Brief history and current situation of desalination in China [J/OL]. [2020-04-16]. <https://mp.weixin.qq.com/s/Pwy3YUfeS5Yl0V2zO-mJFg> (in Chinese).
- [3] 陈晨. 2018年全球海水淡化产业竞争格局分析[EB/OL]. (2018-06-14) [2020-04-16]. <https://www.qianzhan.com/analyst/detail/220/180614-081cc30f.html>. CHEN Chen. Analysis on the competition pattern of global desalination industry in 2018 [EB/OL]. (2018-06-14) [2020-04-16]. <https://www.qianzhan.com/analyst/detail/220/180614-081cc30f.html> (in Chinese).
- [4] 高从堦, 陈国华. 海水淡化技术与工程手册[M]. 北京: 化学工业出版社, 2004. GAO Congjie, CHEN Guohua. *Manual of Desalination Technology and Engineering* [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2004 (in Chinese).
- [5] 杨尚宝. 中国海水淡化年鉴2010[M]. 北京: 海洋出版社, 2012. YANG Shangbao. *China Year Book of Sea Water Desalination (2010)* [M]. Beijing: Ocean Press, 2012 (in Chinese).
- [6] Aquatech. Does size matter? Meet ten of the world's largest desalination plants [EB/OL]. [2020-04-19]. [https://www.aquatechtrade.com/news/desalination/worlds-largest-desalination-plants/?utm\\_term=&utm\\_content=AQD2021\\_NB\\_16&utm\\_medium=email&utm\\_campaign=Nieuwsbrieven\\_2021&utm\\_source=RE\\_emailmarketing&tid=TIDP2773919X215746D8E1ED4C8D83FCDD5547CFA8BBYI2&noactioncode=1](https://www.aquatechtrade.com/news/desalination/worlds-largest-desalination-plants/?utm_term=&utm_content=AQD2021_NB_16&utm_medium=email&utm_campaign=Nieuwsbrieven_2021&utm_source=RE_emailmarketing&tid=TIDP2773919X215746D8E1ED4C8D83FCDD5547CFA8BBYI2&noactioncode=1).
- [7] Water Technology. Israel receives bids for construction of new desalination plant at Sorek [EB/OL]. (2018-10-08) [2020-04-16]. <https://www.water-technology.net/news/israel-receives-bids-construction-new-desalination-plant-sorek/>.
- [8] SEPCO III. 沙特拉比格三期海水淡化项目以日产60万立方淡水创吉尼斯世界记录[EB/OL]. [2020-02-25]. [http://www.sepco3.com/cn/news\\_article.aspx?NewsId=2969&CateId=72](http://www.sepco3.com/cn/news_article.aspx?NewsId=2969&CateId=72). SEPCO III. Rabigh 3 set a Guinness world record with a daily output of 600 thousand cubic meters of fresh water [EB/OL]. [2020-02-25]. [http://www.sepco3.com/cn/news\\_article.aspx?NewsId=2969&CateId=72](http://www.sepco3.com/cn/news_article.aspx?NewsId=2969&CateId=72) (in Chinese).
- [9] Water Technology. Siemens to expand M-Station power and desalination plant in Dubai [EB/OL]. [2020-02-22]. <https://www.water-technology.net/news/newssiemens-to-expand-m-station-power-and-desalination-plant-in-dubai-4517932/>.
- [10] Water desalination+reuse. Africa's largest desalination plant opens [EB/OL]. (2014-11-13) [2020-04-16]. <https://www.desalination.biz/news/0/Africas-largest-desalination-plant-opens/7802/>.
- [11] Water Technology. Hadera desalination plant [EB/OL]. [2020-04-12]. <https://www.water-technology.net/projects/hadera-desalination/>.
- [12] Water Technology. Tuaspring desalination and integrated power plant [EB/OL]. [2020-04-25]. <https://www.water-technology.net/projects/tuaspring-desalination-and-integrated-power-plant/>.
- [13] Water Technology. Acciona and partners win €750m contract for Shuqaiq 3 desalination plant [EB/OL]. (2019-01-31) [2020-04-25]. <https://www.water-technology.net/news/acciona-shuqaiq-3-desalination/>.
- [14] Water Technology. Umm Al Nar [EB/OL]. [2020-03-03]. <https://www.water-technology.net/projects/umm/>.
- [15] Water Technology. Seawater desalination plant opened in Qatar [EB/OL]. (2011-06-05) [2020-04-03]. <https://www.water-technology.net/uncategorised/news120785.html/>.
- [16] MYERS Carl. Algeria prepares two ITTs for desalination plant projects [EB/OL]. (2018-06-06) [2020-04-16].



- <https://www.desalination.biz/news/0/Algeria-prepares-two-ITTs-for-desalination-plant-projects/9035/>.
- [17] Aquatech. Durban unites water reuse & desalination with Remix Water [EB/OL]. [2020-03-11]. [https://www.aquatechtrade.com/news/desalination/remixwater-combines-reuse-and-desalination-in-durban/?utm\\_term=&utm\\_content=AQD2020\\_NB\\_15\\_A\\_EN&utm\\_medium=email&utm\\_campaign=Nieuwsbrieven\\_2020&utm\\_source=RE\\_emailmarketing&tid=TIDP1735386X5CB28E4B983B47AC8C4CAC07E9276674YI2&noactioncode=1](https://www.aquatechtrade.com/news/desalination/remixwater-combines-reuse-and-desalination-in-durban/?utm_term=&utm_content=AQD2020_NB_15_A_EN&utm_medium=email&utm_campaign=Nieuwsbrieven_2020&utm_source=RE_emailmarketing&tid=TIDP1735386X5CB28E4B983B47AC8C4CAC07E9276674YI2&noactioncode=1).
- [18] Wikipedia. NEOM [EB/OL]. [2020-05-29]. <https://en.wikipedia.org/wiki/Neom>.
- [19] Aquatech. Solar desalination dome promises record-low water price [EB/OL]. [2020-02-04]. [https://www.aquatechtrade.com/news/desalination/solar-desalination-dome-offers-low-water-price/?utm\\_term=&utm\\_content=AQD2020\\_NB\\_15\\_A\\_EN&utm\\_medium=email&utm\\_campaign=Nieuwsbrieven\\_2020&utm\\_source=RE\\_emailmarketing&tid=TIDP1735386X5CB28E4B983B47AC8C4CAC07E9276674YI2&noactioncode=1](https://www.aquatechtrade.com/news/desalination/solar-desalination-dome-offers-low-water-price/?utm_term=&utm_content=AQD2020_NB_15_A_EN&utm_medium=email&utm_campaign=Nieuwsbrieven_2020&utm_source=RE_emailmarketing&tid=TIDP1735386X5CB28E4B983B47AC8C4CAC07E9276674YI2&noactioncode=1).
- [20] 山东省海洋局. 山东核电日产30万吨海水淡化项目落户烟台 [EB/OL]. [2020-04-28]. [http://hyj.shandong.gov.cn/xwzx/ttxw/202004/t20200428\\_3085731.html](http://hyj.shandong.gov.cn/xwzx/ttxw/202004/t20200428_3085731.html).  
Shandong Ocean Bureau. Shandong nuclear power desalination project with a daily output of 300 000 tons settled in Yantai [EB/OL]. [2020-04-28]. [http://hyj.shandong.gov.cn/xwzx/ttxw/202004/t20200428\\_3085731.html](http://hyj.shandong.gov.cn/xwzx/ttxw/202004/t20200428_3085731.html) (in Chinese).
- [21] 自然资源部海洋战略规划与经济司. 2017全国海水利用报告[R]. 北京:自然资源部海洋战略规划与经济司, 2018.  
Department of Marine Strategic Planning and Economy, Ministry of Natural Resources. Report on Seawater Utilization in China (2017) [R]. Beijing: Department of Marine Strategic Planning and Economy, Ministry of Natural Resources, 2018 (in Chinese).
- [22] Aquatech. Chinese/Spanish consortium to build Hong Kong's desalination plant [EB/OL]. [2020-01-29]. <https://www.aquatechtrade.com/news/desalination/acciona-desalination-hong-kong/>.
- [23] 郭兆然, 郭秀泉. 海水淡化工程实例分析之展望与启示[J]. 环渤海经济瞭望, 2013(9): 21-23.  
GUO Zhaoran, GUO Xiuquan. Prospect and enlightenment of desalination engineering case analysis [J]. Economic Outlook the Bohai Sea, 2013(9): 21-23 (in Chinese).
- [24] ZETLAND D. Desalination and the commons: tragedy or triumph? [J]. Water Resources Development, 2017, 33(6): 890-906.
- [25] TRUJILLO A P, THURMAN H V. Essentials of Oceanography [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2017.
- [26] 郝晓地, 李天宇, 曹达啟. 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).
- [27] RALUY G R, LUIS S, UCHE J. Life cycle assessment of water production technologies [J]. International Journal of Life Cycle Assessment, 2005, 10(5): 289-293.
- [28] 郝晓地, 李会海. 海水淡化+风能发电+盐业化工——三位一体的清洁生产技术[J]. 节能与环保, 2006(10): 25-28.  
HAO Xiaodi, LI Huihai. Desalination+wind electricity+salt production—a proposal for a trinity technology of cleaner production [J]. Energy Saving and Environmental Protection, 2006(10): 25-28 (in Chinese).

**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:**2020-06-09

**修回日期:**2020-06-13

(编辑:丁彩娟)