

工程实例

DOI: 10. 19853/j. zgjsps. 1000-4602. 2025. 10. 013

海水淡化技术在海岛供水中的应用经验

方 刚¹, 李会慧²

(1. 珠海市供水有限公司, 广东 珠海 519000; 2. 天津市蓝十字膜技术有限公司, 天津 300450)

摘 要: 珠海桂山岛海水淡化工程设计规模为1 000 m³/d, 采用微絮凝过滤+多介质过滤+两级精密过滤+反渗透(部分二级)的工艺流程。淡化产水主要进入桂山水库, 与水库水混合经净水厂净化后外供。部分产水经二级脱盐、消毒后生产瓶装水和桶装水。系统运行实践表明, 一级反渗透平均回收率为43.37%, 平均脱盐率为98.25%, 电耗为3.30 kW·h/m³, 回收率偏低, 脱盐率和吨水电耗基本达到设计预期。该工程试产期间产水量为67 641.9 m³, 占该岛当年水资源供应量的39.34%, 有效替代了船运水, 缓解了淡水资源短缺问题, 节省了供水成本。

关键词: 海岛供水; 海水淡化; 供水安全; 反渗透

中图分类号: TU991 **文献标识码:** B **文章编号:** 1000-4602(2025)10-0079-07

Application Experience of Seawater Desalination Technology for Island Water Supply

FANG Gang¹, LI Hui-hui²

(1. Zhuhai Water Supply Co. Ltd., Zhuhai 519000, China; 2. Tianjin Blue Cross Membrane Technology Co. Ltd., Tianjin 300450, China)

Abstract: The Guishan Island seawater desalination project in Zhuhai, with a design capacity of 1 000 m³/d, employs a process flow that includes micro-coagulation filtration, multi-media filtration, two-stage precision filtration, and reverse osmosis(with partial secondary treatment). The desalinated water is primarily fed into the Guishan Reservoir, where it mixes with reservoir water before undergoing further treatment at a water treatment plant for external supply. A portion of the product water is subjected to secondary desalination, purification, and disinfection to produce bottled and barreled water. System operation indicates that the average recovery rate of the first-stage reverse osmosis is 43.37%, the average desalination rate is 98.25%, and the specific power consumption is 3.30 kW·h/m³. Although the recovery rate is relatively low, the desalination rate and specific power consumption meet the design expectations. During the trial production period, the project produced 67 641.9 m³ of water, accounting for 39.34% of the island's annual water supply. This effectively replaced water transported by ship, alleviated the shortage of freshwater resources, and reduced water supply costs.

基金项目: 2023年国家(兵团)科技计划项目(2023AB034); 农业农村部西北绿洲节水农业重点实验室开放课题(2023OWSL-01)

通信作者: 方刚 E-mail: angang@126.com

Key words: island water supply; seawater desalination; water security; reverse osmosis

1 项目建设背景

桂山岛是珠海万山海洋开发试验区的一座重要岛屿,位于深圳、香港、澳门和珠海陆地之间的核心位置,是珠江口海上交通的枢纽。由于其独特的地理位置,桂山岛被视为“一国两制”政策实践的交汇点,具有重要的政治意义和经济意义。该岛陆地面积约 10 km²,人口构成包括常住居民约 3 300 人和流动人口近 6 000 人。桂山岛以其完善的开发程度和最多的居住人口成为该试验区发展的典型代表。桂山岛供水保障经验将为该试验区其他岛屿的供水提供重要参考。

桂山岛的淡水资源供应主要依赖一座小二型水库,库容 24.4×10⁴ m³,用于收集岛上雨水。岛上建有一座产水能力为 720 m³/d 的小型水厂,采用常规处理工艺,负责向全岛居民提供生活饮用水。桂山水库集雨面积仅 0.37 km²,收集的雨水量远不能满足岛上用水需求,在枯水季节尤为突出,水库蓄水量屡屡降至临界点,凸显了岛上水资源供给的脆弱性。根据 2019 年—2023 年的数据分析结果(见表 1),桂山水库的年均集水量约为 17.27×10⁴ m³/a,而同期年均供水所耗原水量达 20.21×10⁴ m³/a。这一数据差异直观地反映了岛上淡水资源供需失衡的严峻现状,也表明仅依靠常规淡水收集方式难以满足海岛用水的发展需求。因此,应用海水淡化开发利用非常规水资源,成为保障桂山岛乃至整个万山群岛可持续发展的必然选择。

表 1 2019 年—2023 年桂山水库蓄水量统计
Tab.1 Statistics of water storage of Guishan Reservoir from 2019 to 2023

年份	水厂供水量/m ³	水厂取水量/m ³	年末库容/10 ⁴ m ³	水库蓄水量/10 ⁴ m ³
2018	111 445	122 901.55	8.84	
2019	180 357	198 897.70	12.6	23.65
2020	215 128	237 243.16	2.46	13.58
2021	157 970	171 480	4.98	12.92
2022	166 908	187 213	4.51	16.59
2023	195 882	215 615	7.85	19.59

2 海水淡化规模的确定

在水资源平衡分析基础上,通过评估水资源缺口来确定桂山岛海水淡化规模。需水量预测采用

不同性质用地用水量指标法,桂山岛需水量预测如表 2 所示。不同性质用地用水量指标参考《珠海城市规划技术标准与准则规范》(2021 版),同时考虑海岛地区的特殊性,选取各指标的最低值。不同性质用地面积及人口规模数据来源于《珠海万山海洋开发试验区桂山岛城市设计及控制性详细规划(调整及深化修改)》(以下简称《规划》)。经测算,桂山岛未来需水量为 15 924.8 m³/d。

表 2 桂山岛需水量预测(不同性质用地指标法)
Tab.2 Water demand forecast for Guishan Island (based on different land use indicators)

用地类型	用地面积/hm ²	需水量指标	用水量/(m ³ ·d ⁻¹)
居住用地(人口按 18 000 人计)		180 L/(人·d)	3 240
公共管理与公共服务设施用地	10.18	50 m ³ /(hm ² ·d)	509
商业服务业设施用地	106.04	50 m ³ /(hm ² ·d)	5 302
工业用地	11.82	30 m ³ /(hm ² ·d)	354.6
物流仓储用地	59.94	25 m ³ /(hm ² ·d)	1 498.5
道路和交通设施用地	42.77	25 m ³ /(hm ² ·d)	1 069.25
公用设施用地	10.76	25 m ³ /(hm ² ·d)	269
绿地与广场用地	12.00	10 m ³ /(hm ² ·d)	120
港口用地	32.91	25 m ³ /(hm ² ·d)	822.75
特殊用地	0.17	50 m ³ /(hm ² ·d)	8.5
发展备用地	23.84	80 m ³ /(hm ² ·d)	1 907.2
其他建设用地	16.48	50 m ³ /(hm ² ·d)	824
合计			15 924.8

供水量数据依据《规划》,保留并扩建桂山给水厂,设计规模为 2 000 m³/d。同时,考虑利用污水处理设施的出水经过深度处理后作为中水水源,计划设置 3 处中水处理站:北片区中水处理站 4 050 m³/d,西片区中水处理站 2 070 m³/d,东片区中水处理站 900 m³/d。综上所述,桂山岛未来的可供水量预计达到 9 020 m³/d。

桂山岛需水量为 15 924.8 m³/d,供水量为 9 020 m³/d,未来的缺水量为 6 904.8 m³/d。然而,考虑到 2018 年—2020 年日供水量仅为 305.3、494.1、587.8 m³/d,且呈现逐年上升趋势,因此建议采取分期建设海水淡化工程的策略,首期建设规模为 1 000 m³/d。

3 取水点选择与原水水质分析

为了便于与岛上现有桂山给水厂进行统一管理,海水淡化厂选址毗邻现有桂山给水厂,位于桂山给水厂北门边小山坡,距海岸约100 m。取水点选择遵循《反渗透海水淡化工程设计规范》(HY/T 074—2018),主要考虑因素包括:靠近主厂区、受自

然因素影响小、远离污染源、不妨碍海上活动。水源要求:符合《海水水质标准》(GB 3097—1997)第三类或更优标准、表层无污染物、海藻和泥沙含量低、最低潮位水深4 m以下且海床稳定。综合考虑,取水点确定在淡化厂东侧125 m处。淡化厂总体平面布置如图1所示。

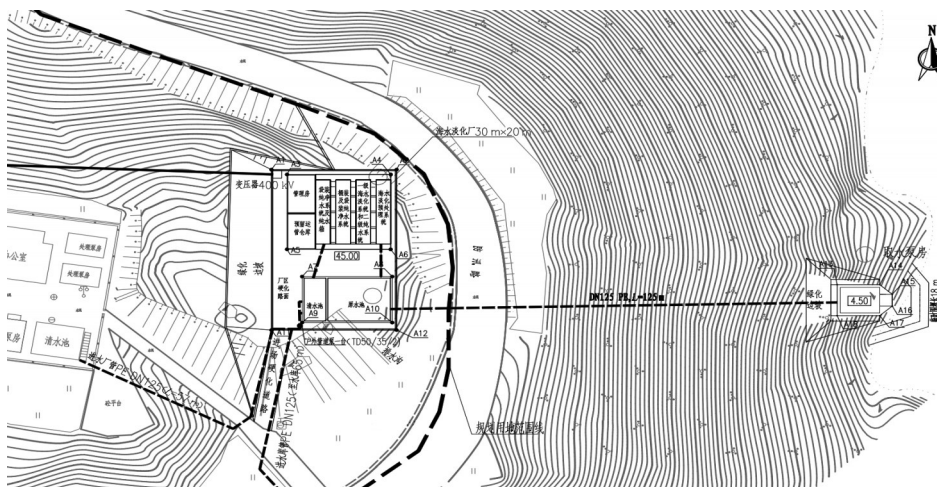


图1 淡化厂平面布置

Fig.1 Layout of the desalination plant

取水点附近海域海水水质检测结果见表3。

表3 桂山岛海域海水水质检测结果

Tab.3 Seawater quality of Guishan Island

项目	检测结果	项目	检测结果
总大肠菌群/(个·L ⁻¹)	未检出	pH	7.5
砷/(mg·L ⁻¹)	0.000 1	铁/(mg·L ⁻¹)	<0.000 9
镉/(mg·L ⁻¹)	<0.000 06	锰/(mg·L ⁻¹)	<0.000 06
铬/(mg·L ⁻¹)	<0.000 09	铜/(mg·L ⁻¹)	<0.000 09
铅/(mg·L ⁻¹)	<0.000 07	锌/(mg·L ⁻¹)	<0.000 8
汞/(mg·L ⁻¹)	<0.000 07	氯化物/(mg·L ⁻¹)	16 520
硒/(mg·L ⁻¹)	<0.000 09	硫酸盐/(mg·L ⁻¹)	3 373.4
氟化物/(mg·L ⁻¹)	0.46	TDS/(mg·L ⁻¹)	29 208
硝酸盐/(mg·L ⁻¹)	1.24	总硬度/(mg·L ⁻¹)	4 963.2
色度/度	<15	耗氧量/(mg·L ⁻¹)	0.36
浊度/NTU	0.32	挥发酚类/(mg·L ⁻¹)	<0.002
臭和味	强烈咸涩味道	阴离子合成洗涤剂/(mg·L ⁻¹)	<0.05
肉眼可见物	无		

结果表明:其海水溶解性总固体(TDS)相对不高,为29 208 mg/L,低于通常海水溶解性总固体(35 000 mg/L)。

4 海水淡化工艺的确定

4.1 设计水质

桂山岛附近海域海水浑浊度较低、水质较好,

TDS 低于常规海水,水温常年为20~26 ℃。海水淡化产品水作为水库补充水,用于供应市政供水,产水水质符合《生活饮用水卫生标准》(CB 5749—2022),其中TDS<500 mg/L。此外,还设置了部分二级反渗透,二级反渗透产品水经灌装线生产桶装水、袋装水,产水TDS<10 mg/L。

4.2 工艺选择

目前,主流海水淡化技术主要有反渗透膜法、多级闪蒸和低温多效蒸馏法^[1],在实际应用时需综合考虑各技术的特点及其在特定环境下的适用性。对桂山岛这样的离岸小岛而言,多级闪蒸技术难以应对用水需求的季节性波动,且存在传热管腐蚀污染水质风险^[2]。低温多效蒸馏法虽具操作灵活性,但设备体积庞大,初始投资高^[3],不适合空间和资源有限的海岛环境。反渗透技术则展现出显著优势:能耗低、成本效益高、占地小、操作简便、适应性强^[4]。综合考虑,反渗透技术最适合桂山岛的特定需求和条件。

从技术应用来看,根据《2023年全国海水利用报告》,截至2023年底,国内已建成海水淡化工程156个,产能达到252.3×10⁴ m³/d。其中,反渗透海水淡化工程140个,工程规模169.6×10⁴ m³/d,占总工

程规模的67.24%,因此反渗透技术成为桂山岛海水淡化工程的最佳选择。桂山岛海水淡化工艺流程如图2所示。

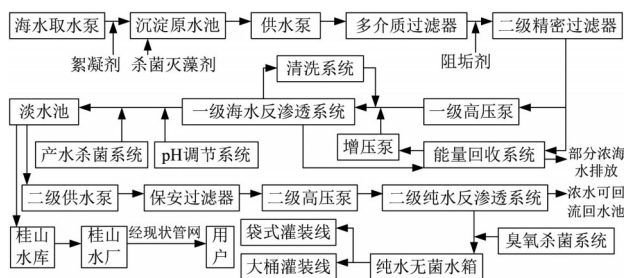


图2 桂山岛海水淡化工艺流程

Fig.2 Process flow of Guishan Island seawater desalination plant

海水淡化装置采用集装箱形式,原水池、清水池采用钢筋混凝土结构,设置于集装箱外。共配置4座40尺(通常尺寸为长×宽×高=12.192 m×2.438 m×2.591 m,下同)集装箱:1座40尺高柜集装箱安装海水淡化预处理系统;1座40尺高柜集装箱安装一级海水淡化系统和二级纯水反渗透系统;1座40尺高柜集装箱安装5加仑(1美制加仑=3.79 L,1英制加仑=4.55 L)桶装生产线,并配置千级净化车间;1座40尺高柜集装箱安装袋式灌装生产线及纯水箱,配置千级净化车间,部分空间可用于存储生产用料。

4.3 系统设计

4.3.1 预处理

针对取水位置海水水质较好的特点,预处理采用微絮凝过滤工艺,包括混凝、多介质过滤、杀菌和阻垢等步骤,以降低污染指数和浊度,延长反渗透膜寿命。预处理系统包括400 m³原水池/混凝沉淀池、3台 \varnothing 1 200 mm×2 100 mm玻璃钢多介质过滤器(单台处理量33 m³/h)和配套供水泵(1用1备)及空压机。过滤器采用气水反冲洗,自动控制阀定时反冲洗,反冲洗水源为原水池海水。

4.3.2 一级海水反渗透

一级海水反渗透系统产水量为42 m³/h,设计回收率为45%,产水TDS<500 mg/L。一级反渗透系统由保安过滤器、高压泵能量回收系统、一级反渗透膜组、清洗装置组成。一级海水反渗透产水经杀菌、pH调节后进入淡水池储存,淡水池容积100 m³。淡水池的水一部分进入水库,另一部分进入二级反渗透生产袋装水和桶装水。

① 保安过滤器

设置3台10 μ m精密过滤器和3台5 μ m精密过滤器,均采用40英寸(1英寸=2.54 cm)PP大通量折叠滤芯,外壳采用玻璃钢材质,压力等级0.6 MPa,其功能是截留水中粒径>10 μ m和5 μ m的颗粒杂质,防止杂质颗粒进入后续处理工艺,延长RO膜的使用寿命。

② 高压泵能量回收系统

高压泵能量回收系统包括反渗透高压泵、能量回收装置和增压泵。能量回收装置采用美国ERI公司的转子式压力交换能量回收装置(PX能量回收),能量传递效率最高可达98%^[5]。高压泵采用丹佛斯的轴向柱塞高压泵,设置1台柱塞高压泵,流量24~53 m³/h,最大压力8 MPa,过流部件采用超级双相钢2507材质,变频控制。设置1台能量回收装置,流量41~59 m³/h,最大压力8.272 MPa。配套1台HP2402循环增压泵,流量29.5~52.3 m³/h,扬程400 kPa,过流部件采用双相钢2205材质,变频控制。

③ 一级海水反渗透膜组

此部分设置一级海水反渗透膜组1套,膜产水通量平均为14.2 L/(m²·h)。海水反渗透膜选用美国陶氏8英寸SW30HRLE-400海水膜,有效膜面积为37 m²,脱盐率可达到99.8%。膜组件采用一段式排列方式,8040膜壳共16支,8040海水反渗透膜共80支。膜壳为玻璃钢材质,5芯装,压力等级为6.895 MPa。

④ 清洗装置

化学清洗装置包括1台水箱、1台清洗水泵和1台清洗保安过滤器。化学清洗周期一般为3~6个月。化学清洗药剂根据膜污染类型进行选择,主要包括盐酸、氢氧化钠等。在正常使用情况下,每次停机之后对膜系统自动进行常规的无压冲洗,冲洗水源采用预处理后的海水;在反渗透膜系统受到严重污染或堵塞时,启动化学清洗装置用化学清洗药剂对膜系统进行半自动清洗。

4.3.3 二级纯水反渗透

二级纯水反渗透系统将一级海水反渗透产水进一步脱盐净化成为纯净水,然后经过消毒后灌装成袋装水、桶装水。纯水袋式灌装生产线规模3 000袋/h,桶装灌装生产线规模150桶/h。二级纯水反渗透系统产水量5 m³/h,设计回收率68%,产水TDS<

10 mg/L。目前,该工程二级纯水反渗透和灌装生产线未启用。

5 运行效果及分析

桂山岛海水淡化工程于2021年4月建成投产,产水主要进入桂山水库补充水库水。建设单位委托第三方检测机构对淡化产品水和水库水进行取样分析,部分水质分析结果如表4、5所示。结果表明,海水淡化产水水质符合《生活饮用水卫生标准》(GB 5749—2022),水库水主要水质指标未超出《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)的相关要求。

表 4 桂山岛海水淡化工程的产水水质

Tab.4 Product water quality of Guishan Island seawater desalination plant

项目	检测结果	项目	检测结果
总大肠菌群/(个·L ⁻¹)	未检出	pH	6.6
氟化物/(mg·L ⁻¹)	0.019	铁/(mg·L ⁻¹)	<0.000 9
硝酸盐/(mg·L ⁻¹)	0.023	锰/(mg·L ⁻¹)	<0.000 06
浊度度/NTU	0.13	氯化物/(mg·L ⁻¹)	232.6
TDS/(mg·L ⁻¹)	321	硫酸盐/(mg·L ⁻¹)	6.04
总硬度/(mg·L ⁻¹)	23.8	硼/(mg·L ⁻¹)	<0.20

表 5 桂山水库水质监测结果

Tab.5 Water quality of Guishan Reservoir

项目	监测结果	项目	监测结果
pH	6.9~8.0	氯化物/(mg·L ⁻¹)	18~154
溶解氧/(mg·L ⁻¹)	5.5~10.6	硼/(mg·L ⁻¹)	0.014 2~0.694 8
总硬度/(mg·L ⁻¹)	39~100	化学需氧量/(mg·L ⁻¹)	4.2~13.0
总碱度/(mg·L ⁻¹)	7~73	总有机碳/(mg·L ⁻¹)	0.5~3.3
硫酸盐/(mg·L ⁻¹)	5~21	总氮/(mg·L ⁻¹)	0.31~1.54
氨氮/(mg·L ⁻¹)	0.02~0.36	总磷/(mg·L ⁻¹)	0.010~0.039
硝酸盐/(mg·L ⁻¹)	0.29~1.57	藻类/(个·L ⁻¹)	518 001~29 785 000

6 日常运维经验

桂山岛海水淡化工程自2021年4月投产以来,其运行状况呈现显著的阶段性特征。2021年,由于旱情严重,水库蓄水量接近枯竭,因此该工程在投产初期即发挥了关键作用,产水量达到67 641. 9 m³/a,占当年总水资源供应量的39. 34%。这一阶段的高产水量有效缓解了岛上的供水压力,证明了该工程在应急供水中的重要性。然而,随着2022年降雨量的增加,水库水源充足,海水淡化工程的使用频率显著降低,累计产水量降至16 628. 1 m³/a。2023

年,随着经济复苏带来的用水量需求增长,该工程在下半年逐步恢复稳定运行,累计产水量达到53 156 m³/a。这一数据表明,海水淡化工程在面对需求增长时,能迅速恢复并稳定供水,显示出良好的适应能力和可控性。尽管目前使用率仅为设计规模的13. 7%,但其潜在产能为未来可能的需求增长提供了保障。

回收率和脱盐率是衡量海水淡化系统性能和效率的重要指标。依据《海水淡化反渗透膜装置测试评价方法》(GB/T 32359—2015)提供的方法计算回收率和脱盐率。

该工程的产水回收率见表6,平均值为43. 35%。

表 6 桂山岛海水淡化工程产水回收率

Tab.6 Water recovery rate of Guishan Island seawater desalination plant

项目	平均进水流 量/(m ³ ·h ⁻¹)	平均产水 流量/(m ³ · h ⁻¹)	平均浓盐 水流量/ (m ³ ·h ⁻¹)	产水回收 率/%
2023年6月	99.73	43.39	47.45	43.51
2023年7月	99.23	43.73	47.61	44.07
2023年8月	99.78	43.24	48.47	43.34
2023年9月	95.93	42.63	48.58	44.44
2023年10月	96.78	42.63	48.88	44.05
2023年11月	96.07	42.63	48.78	44.37
2023年12月	102.21	40.75	49.34	39.87
平均	98.53	42.86	48.45	43.35

该工程的产水脱盐率见表7,平均值为98. 25%。

表 7 桂山岛海水淡化工程产水脱盐率

Tab.7 Desalination rate of Guishan Island seawater desalination plant

项目	平均进水含盐量/ (mg·L ⁻¹)	平均产水含盐 量/(mg·L ⁻¹)	脱盐 率/%
2023年6月	19 864.9	363.84	98.17
2023年7月	22 286.0	357.66	98.40
2023年8月	21 880.0	397.87	98.18
2023年9月	19 008.8	393.82	97.93
2023年10月	22 407.8	495.19	97.79
2023年11月	25 020.8	369.93	98.52
2023年12月	25 007.8	430.81	98.64
平均	22 210.9	388.45	98.25

海水淡化工程的能耗是影响其运行成本的关键因素之一。桂山岛海水淡化工程采用反渗透技术,其能耗主要集中在高压泵。根据实测数据,该工程的电耗约3. 30 kW·h/m³(见表8)。

表8 桂山岛海水淡化工程近期产水能耗

Tab.8 Energy consumption of Guishan Island seawater desalination plant

项目	产水量/ m^3	用电量/ $(\text{kW}\cdot\text{h})$	吨水电耗/ $(\text{kW}\cdot\text{h}\cdot\text{m}^{-3})$
2023年6月	10 457.5	31 926	3.05
2023年7月	6 382	20 574	3.22
2023年8月	13 976	45 906	3.28
2023年9月	4 940	15 774	3.19
2023年10月	1 707	5 958	3.49
2023年11月	2 367.2	8 694	3.67
2023年12月	8 193.8	29 544	3.61
平均	—	—	3.30

7 技术经济分析

桂山岛海水淡化工程采用微絮凝过滤+砂滤+一级反渗透+部分二级反渗透的工艺流程。预处理采用微絮凝过滤,而没有采用目前国内流行的超滤+反渗透的“双膜法”工艺,即增加超滤膜处理来减少反渗透膜阶段元件的污染及堵塞,主要考虑目前海岛供水体量较小且财政资金有限,尽量节省建设投资和运行成本。2023年的运行数据显示,该工程的回收率为43.37%,脱盐率达到98.25%,吨水电耗为 $3.30 \text{ kW}\cdot\text{h}/\text{m}^3$,可见回收率偏低,脱盐率和吨水电耗基本达到设计预期值。

由于海岛规模条件限制,供水体量较小,长期以来供水生产经营成本高于售水水价,根据政府对海岛供水生产成本的审核资料,2021年10月—2022年11月桂山水厂的生产成本(含运营服务)为 $12.1 \text{ 元}/\text{m}^3$,而海岛商用水价为 $8.4 \text{ 元}/\text{m}^3$ 。因此需要政府补贴才能维系桂山水厂的正常运行。值得注意的是,在水资源匮乏的情况下,为保障供水,需从大陆船运淡水至海岛,运输成本高达 $20\sim 35 \text{ 元}/\text{m}^3$,加剧了供水成本压力,而且船运水的运输效率较低,一艘运水船的运输能力为 $600\sim 1\,000 \text{ m}^3/\text{次}$,输配需耗时 $6\sim 8 \text{ h}/\text{次}$,并受到天气和航行条件的影响。采用海水淡化大幅降低了供水成本,据测算,2023年海水淡化的总成本约为 $10.9 \text{ 元}/\text{m}^3$ (见表9),显著低于船运水成本($27.56 \text{ 元}/\text{m}^3$)。这种成本差异不仅减少了供水亏损约86万元,还提升了供水系统的经济可持续性。

桂山岛海水淡化工程除具有降低供水成本的经济效益外,还具有较好的社会效益。然而,在运行过程中也暴露出一些问题,需在今后的工作中予

以重视和改进。

表9 桂山岛海水淡化工程运行成本

Tab.9 Operating costs of Guishan Island seawater desalination plant

项目	费用/ $(\text{元}\cdot\text{m}^{-3})$	备注
电费	2.41	电耗 $3.30 \text{ kW}\cdot\text{h}/\text{m}^3$,运行电价为 $0.73 \text{ 元}/(\text{kW}\cdot\text{h})$
材料更换费	0.41	主要为预处理滤芯,按2023年6月—12月运行消耗18支、1 200元/支计算
药剂费	0.07	
修理费	0.42	按2023年6月—12月运行情况计算
人工费	2.67	运行人员2人,按2023年珠海市平均工资 $10\,121 \text{ 元}/(\text{人}\cdot\text{月})$ 计算
交通运输费	0.19	包含货运和人员往返交通费用
其他管理费用	1.32	除运行人员外的管理开支,按1万元/月计算
膜费用	3.41	80支膜共计54.4万元,按3年使用周期、每年18.13万元、2023年产水量 $53\,156 \text{ m}^3$ 计算
合计	10.9	

首先,在整体供水规划中尚需进一步统筹建设规模与运行管理,以充分发挥海水淡化工程的效益。根据统计数据,桂山岛海水淡化工程在过去3年的累计运行时间仅约376 d,其中2022年由于水资源状况较好,仅运行32 d。以累计产水量 $137\,642 \text{ m}^3$ 计,海水淡化工程的使用率仅为13.70%。由此可见,现有工程的利用率较低,未能充分发挥其应有的作用。因此,在未来的运行调度中,应结合桂山岛的实际用水需求,合理制定运行计划,尽可能保证海水淡化设备的日常运行,以最大化其效益。这种综合供水策略与传统的单一供水措施相比,具有显著优势。

其次,与海水淡化工程相比,建设海岛水库的投资成本较高,尤其对于山塘级水库,其投资约为海水淡化工程的 $6\sim 8$ 倍,且供水能力不及海水淡化工程。考虑到海水淡化产水的水质优于常规净水工艺的产水,可以探讨将淡化水直接用于生活供水的可行性。虽然淡化水直供可能引发管网水质稳定性的问题,但可以通过后矿化处理或与常规水厂产水混合供应等方式加以解决。

此外,桂山岛海水淡化工程由于整体投资较低,在取水设计、材料选用等方面仍存在问题,难以应对海岛的环境条件,运行中局部跑漏滴渗等

小故障偏多,运行维护的工作量相对较大。因此,亟须针对淡化设施进行优化调整,保证海水淡化工程的高效稳定运行。

8 结论

① 桂山岛作为重要的海岛,其淡水资源主要依赖一座小二型水库,存在供水缺口。通过水资源平衡分析和需水量预测,确定了近期海水淡化建设规模为 $1\,000\text{ m}^3/\text{d}$ 。

② 厂址选择考虑了与现有自来水厂的统一管理,原水水质分析显示水质良好。海水淡化工程采用简易的微絮凝过滤工艺作为前处理,一级反渗透膜处理后输入水库,设计产水规模为 $42\text{ m}^3/\text{h}$ 。二级反渗透膜处理用于生产桶装水,设计产量规模为 $5\text{ m}^3/\text{h}$ 。

③ 自 2021 年 4 月投产以来,有效缓解了岛上淡水资源紧张的问题,提供了稳定的供水保障。该工程产水水质良好,平均回收率为 43.35%,平均脱盐率为 98.25%,吨水电耗约为 $3.30\text{ kW}\cdot\text{h}/\text{m}^3$ 。

④ 海水淡化工程不仅降低了供水成本,还增加了淡水资源总量,改善了当地居民的生活条件,产水水质符合国家生活饮用水标准,可为其他海岛供水提供借鉴。

参考文献:

[1] GHAFFOUR N, MISSIMER T M, AMY G L. Technical

review and evaluation of the economics of water desalination: current and future challenges for better water supply sustainability [J]. *Desalination*, 2013, 309:197-207.

[2] KHAWAJI A D, KUTUBKHANAH I K, WIE J M. Advances in seawater desalination technologies [J]. *Desalination*, 2008, 221(1/3):47-69.

[3] DARWISH M A, ABDULRAHIM H K. Feed water arrangements in a multi-effect desalting system [J]. *Desalination*, 2008, 228(1/3):30-54.

[4] FRITZMANN C, LÖWENBERG J, WINTGENS T, *et al.* State-of-the-art of reverse osmosis desalination [J]. *Desalination*, 2007, 216(1/3):1-76.

[5] 卢彪,杨志峰,马延强,等. 青岛某市政用途全流程海水淡化厂工艺设计[J]. *中国给水排水*, 2023, 39(4): 47-52.

LU Biao, YANG Zhifeng, MA Yanqiang, *et al.* Process design of a whole-process seawater desalination plant for municipal water supply in Qingdao [J]. *China Water & Wastewater*, 2023, 39(4): 47-52 (in Chinese).

作者简介:方刚(1977-),男,湖北武汉人,硕士,工程师,主要研究方向为供水水质管理、海岛供水、海水淡化等。

E-mail: angang@126.com

收稿日期:2024-08-30

修回日期:2024-09-11

(编辑:衣春敏)

贯彻绿色发展理念

推进美丽中国建设