

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2023.21.018

反渗透海水淡化系统双端产水脱盐工艺探讨

薛喜东, 潘春佑, 冯涛, 王可宁, 李露, 邵天宝
(自然资源部天津海水淡化与综合利用研究所, 天津 300192)

摘要: 结合工业用水对淡化水质的特殊要求,设计了“一级反渗透双端产水+部分二级反渗透”工艺,采用反渗透系统模拟软件研究了海水温度、二级进水比例、膜型号等因素对产水水质的影响,并进行了经济性分析。结果表明,降低海水温度和提高二级进水比例有利于提升产水水质,双端产水工艺水质受这两种因素的影响较单端产水工艺要弱;与高脱盐率膜相比,大通量膜的二级启动温度降低、二级进水比例增加;在试验条件下,双端产水工艺的二级启动温度和进水比例分别为13℃、20%,与传统单端产水工艺相比,双端产水工艺使二级反渗透的规模、设备投资和氢氧化钠消耗量均降低50%左右,电耗减少0.08 kW·h/m³。

关键词: 反渗透海水淡化; 双端产水; 氯离子; 总溶解性固体

中图分类号: TU991 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2023)21-0111-06

Discussion on Double-end Water Production Process of Reverse Osmosis Seawater Desalination System

XUE Xi-dong, PAN Chun-you, FENG Tao, WANG Ke-ning, LI Lu, SHAO Tian-bao
(The Institute of Seawater Desalination and Multipurpose Utilization, MNR, Tianjin 300192, China)

Abstract: This paper designed a desalination process consisting of primary reverse osmosis double-end water production and partial secondary reverse osmosis, investigated the effects of seawater temperature, secondary influent ratio, membrane type and other factors on effluent quality by using reverse osmosis system simulation software, and analyzed the operational cost according to the special requirements of desalting water quality for industrial usage. Reducing seawater temperature and increasing the secondary influent ratio were conducive to improving the effluent quality, and the effluent quality of the double-end water production process was less affected by two factors than that of the single-end water production process. Compared with the high desalination membrane, the secondary start-up temperature of the high flux membrane decreased, and the secondary influent ratio increased. Under the test conditions, the secondary start-up temperature and secondary influent ratio of the double-end water production process were 13℃ and 20%, respectively. Compared with the traditional single-end water production process, the double-end water production process reduced the scale, equipment investment and sodium hydroxide consumption of the secondary reverse osmosis all by 50%, and the power consumption by 0.08 kW·h/m³.

基金项目: 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金资助项目(K-JBYWF-2021-QR06、K-JBYWF-2021-ZT01)
通信作者: 潘春佑 E-mail: 418309446@qq.com

Key words: reverse osmosis seawater desalination; double-end water production process; chloride ion; total dissolved solids

反渗透海水淡化是解决水资源短缺的重要途径,可实现开源增量,我国在沿海区域兴建了一大批海水淡化设施,为化工厂、核电站、火电厂等用水大户解决了淡水供给问题^[1-4]。与普通自来水相比,淡化水具有硬度低、碱度低、氯根高、水质稳定性差等特点^[5-7],会供水管道和用水设备带来一定的腐蚀问题,而腐蚀问题又会进一步导致淡化水质的恶化。目前,淡化水在工业用途中,大多作为循环冷却水使用,需要尽可能高的浓缩倍数来提高水利用率^[8],同时为了预防腐蚀、结垢等问题,对水质稳定系数、硬度、硫酸根、碱度、氯离子等水质指标均提出了明确要求^[9-11],按照《工业循环冷却水处理设计规范》(GB/T 50050—2017)的技术要求,一级反渗透产水虽能满足硬度、硫酸根、碱度等水质指标要求,但氯离子含量严重超标,且在夏季高温季节尤为严重,传统解决方法是将全部或部分一级反渗透产水直接进行二次脱盐,虽能解决氯离子超标问题,但需要较大的工程建设投资与运行成本。

基于以上问题,笔者针对“一级反渗透双端产水+部分二级反渗透”工艺在某大型反渗透海水淡化系统中的应用进行了探讨,采用反渗透系统模拟软件研究了海水温度、二级进水比例、膜型号等因素对产水水质的影响,并进行了经济性分析,以期大型反渗透海水淡化工程建设和系统运行提供理论依据。为保证软件模拟计算结果的可靠性,笔者前期基于新海水淡化膜进行了试验比较,试验和模拟的产水电导率、运行压力基本吻合,偏离值分别在9%和3%以内,该结果与张弛等人^[12]的研究结果基本一致。

1 工艺设计

1.1 进水水质及产水水质

进水为渤海湾某海域海水,设计进水水质如下:溶解性总固体(TDS)、钙、镁、钠、钾、氯离子、硫酸根浓度分别为32 000、376、1 176、9 821、364、17 648、2 473 mg/L,pH为7.8~8.1。

淡化水主要作为某石化企业的循环冷却用水,设计产水水质如下:TDS≤250 mg/L、氯离子≤90 mg/L、总硬度(以CaCO₃计)≤50 mg/L、总碱度(以CaCO₃

计)≤200 mg/L、pH在6.5~8.5之间。

1.2 工艺流程

图1为基于“一级反渗透双端产水+部分二级反渗透”工艺设计的10 000 m³/d反渗透海水淡化系统工艺流程。与常规工艺不同,一级反渗透为双端产水,在海水进水端取出的产水为含盐量较低的一级产水,在浓水端取出的产水为含盐量较高的一级产水,浓水端产水经过二级反渗透进一步脱盐后,与一级反渗透进水端产水汇合,作为反渗透海水淡化系统的产水,为了提高系统的水利用率,二级反渗透浓水回流至一级反渗透进水端。一级反渗透设计回收率为45%,二级反渗透设计回收率为85%,海水进水端取水比例在0~100%之间可调。

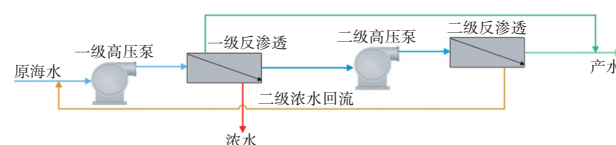


图1 反渗透海水淡化系统工艺流程

Fig.1 Flow chart of reverse osmosis seawater desalination system

本研究采用海德能IMSDesign软件进行模拟计算,为确保膜寿命期内的产水水质达标,膜使用年限按照5年考虑,透盐增长率取7%,考虑到一级反渗透产水的硬度、碱度均满足产水水质要求,因此本研究重点对产水中的氯离子和TDS进行分析。

2 结果与讨论

2.1 海水温度对产水水质的影响

在海水温度为5~30℃条件下,比较单级工艺、一级单端产水+部分二级(简称“单端产水工艺”)、一级双端产水+部分二级(简称“双端产水工艺”)的运行效果,二级进水比例设为40%,结果如图2所示。可以看出,不同工艺下的变化趋势相同,产水TDS和氯离子浓度均随海水温度的升高而增加,但TDS和氯离子浓度及变化幅度差异较大。随着海水温度由5℃升至30℃,单级工艺产水TDS由111 mg/L升至345 mg/L,氯离子由64 mg/L升至197 mg/L,温度高于10℃时产水氯离子高于90 mg/L;在单端产水工艺中,产水TDS由65 mg/L升至202 mg/L,氯离

子由 37 mg/L 升至 116 mg/L, 温度高于 25 °C 时产水氯离子高于 90 mg/L; 在双端产水工艺中, 产水 TDS 由 40 mg/L 升至 85 mg/L, 氯离子仅由 23 mg/L 升至 48 mg/L, 其受温度的影响较单端产水工艺明显要弱, 主要是由于一级反渗透靠近浓水端含盐量高的产水进行了二次脱盐, 在二级进水比例相同的情况下, 双端产水工艺截留的离子数量多于单端产水工艺, 脱盐率明显高于单端产水工艺, 其产水氯离子浓度始终远低于 90 mg/L, 在保证产水水质的前提下, 其二级进水比例可以进一步降低。

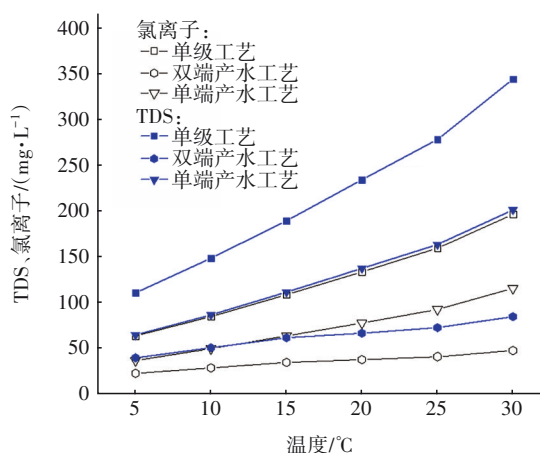


图2 海水温度对产水水质的影响

Fig.2 Effect of seawater temperature on effluent quality

2.2 二级进水比例对产水水质的影响

在二级进水比例为 10%~45% 条件下, 比较单端产水工艺和双端产水工艺的运行效果, 其中进水温度为 30 °C, 结果如图 3 和图 4 所示(图 3 中膜元件位置编号 1-1 至 1-7 分别代表一级反渗透膜壳第 1 支膜元件至第 7 支膜元件)。

从图 3 可以看出, 随着膜元件位置向浓水端的推移(由 1-1 向 1-7 推移), 膜元件产水中的 TDS 及氯离子浓度逐渐增加, 且越靠近浓水端, 浓度增长越快; 从图 4 可以看出, 随着二级进水比例的提高, 产水的 TDS 和氯离子浓度均降低, 在相同二级进水比例下, 双端产水工艺水质明显优于单端产水工艺水质。具体来说, 当单端产水工艺的二级进水比例由 10% 增至 45% 时, 产水 TDS 由 308 mg/L 降至 185 mg/L, 氯离子由 135 mg/L 降至 105 mg/L; 当双端产水工艺的二级进水比例由 10% 增至 45% 时, 产水 TDS 由 211 mg/L 降至 79 mg/L, 氯离子由 120 mg/L 降至 45 mg/L。此外, 单端产水工艺水质与二级进水比例整体呈现良好的线性关系, 而双端产水工艺水质

仅在二级进水比例低于 30% 时与其呈现良好的线性关系, 当二级进水比例高于 30% 时, 产水受二级进水比例的影响较单端产水工艺要弱。例如, 当二级进水比例由 30% 增至 45% 时, 单端产水工艺的 TDS 由 237 mg/L 降至 185 mg/L、氯离子由 135 mg/L 降至 105 mg/L, TDS 和氯离子分别降低了 52、30 mg/L; 而双端产水工艺的 TDS 由 117 mg/L 降至 79 mg/L、氯离子由 66 mg/L 降至 45 mg/L, TDS 和氯离子分别降低了 38、21 mg/L, 主要是由于一级膜壳内靠近浓水端膜元件产水的离子浓度迅速升高, 而靠近进水端则变化缓慢, 随着二级进水比例的提高, 一级膜壳进水端产水分流至浓水端的比例增加, 最终导致其受二级进水比例的影响减弱。

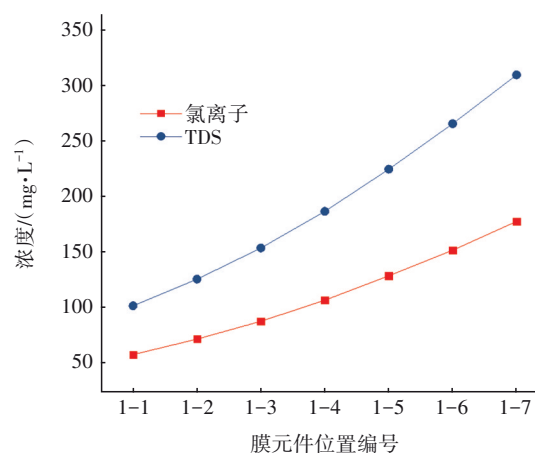


图3 不同膜元件位置的产水水质

Fig.3 Effluent quality of membrane elements at different positions

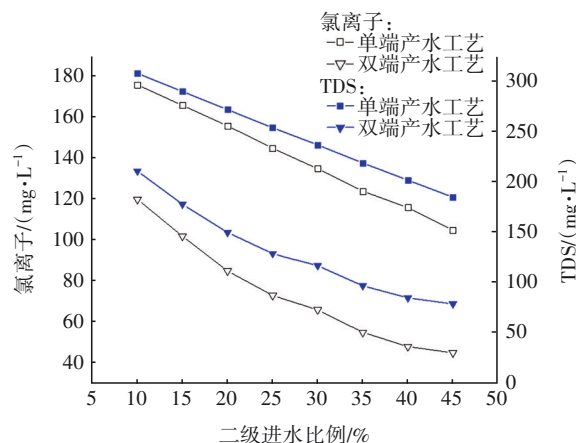


图4 二级进水比例对产水水质的影响

Fig.4 Effect of secondary ratio on produced water quality

2.3 不同膜型号对产水水质的影响

选择某品牌 3 种海水淡化膜进行比较, 分别记

为A、B、C,膜面积和膜数量均相同,其中A膜为高脱盐率膜,C膜为大通量膜,B膜介于二者之间,首先仅运行一级反渗透系统来比较脱盐率,结果如图5所示。可以看出,在相同温度下,3种膜的产水TDS和氯根浓度从低到高依次为A、B、C,随着进水温度的升高,低脱盐率膜受温度的影响较为明显。具体来说,在5℃时,A、B、C的产水TDS分别为80、112、185 mg/L,氯离子分别为46、64、106 mg/L;在30℃时,A、B、C的产水TDS分别为242、345、549 mg/L,氯离子分别为139、197、315 mg/L,C膜的脱盐率由99.4%降至98.3%,A膜则由99.8%降至99.6%。

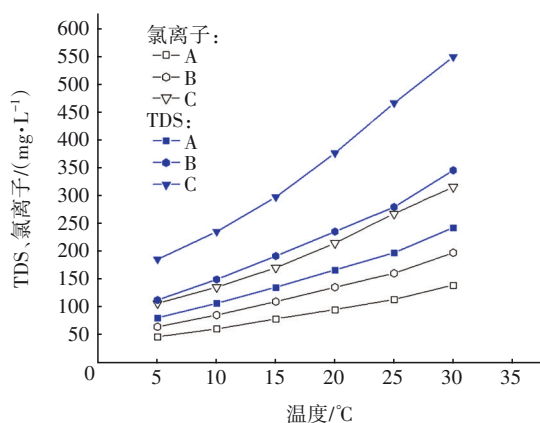


图5 一级膜型号对产水水质的影响

Fig.5 Effect of primary membrane type on produced water quality

按照设计产水水质中TDS和氯离子的浓度要求,在运行温度为3~30℃范围内,以上3种型号的膜仅开启一级反渗透均无法满足产水水质要求,需要在运行温度达到一定值后开启二级反渗透,且二级比例也不相同,为此进一步研究了不同型号膜的二级启动温度和二级进水比例,计算结果如表1所示。可以看出,随着3种膜脱盐率的下降,二级启动温度降低,二级进水比例增加,A、B、C膜的二级启动温度分别为20、13、3℃,二级进水比例分别为13%、20%和30%。

表1 二级反渗透运行工况

Tab.1 Operating condition of secondary reverse osmosis

| 项目 | 二级进水比例/% | 二级启动温度/℃ | 氯离子/(mg·L ⁻¹) | TDS/(mg·L ⁻¹) |
|----|----------|----------|---------------------------|---------------------------|
| A | 13 | 20 | 86 | 151 |
| B | 20 | 13 | 85 | 150 |
| C | 30 | 3 | 88 | 154 |

注: 进水温度为30℃。

3 经济效益分析

以10 000 m³/d海水淡化系统为例,比较单端产水工艺和双端产水工艺的经济性,其中一级反渗透膜采用B膜,产水水质满足设计要求。

3.1 设备投资分析

为便于直观分析双端产水工艺的经济效果,只比较反渗透系统本体设备投资,且重点从投资降低值方面进行分析,反渗透系统本体设备包括反渗透膜、膜壳、高压泵、能量回收装置和增压泵等,反渗透系统本体设计参数如下:进水温度为5~30℃,进水TDS为32 000 mg/L,一级膜元件数量为784支,一级回收率为49%,二级回收率为85%,单端产水工艺的二级膜元件数量为102支、二级进水比例为40%,双端产水工艺的二级膜元件数量为48支、二级进水比例为20%。可以看出,两种工艺的系统配置差别主要集中在二级反渗透规模,双端产水工艺的二级反渗透进水比例较单端产水工艺降低了50%,基于以上设计参数,双端产水和单端产水工艺的反渗透设备本体投资分别约为1 150和1 300万元,双端产水工艺的设备投资减少约150万元。

3.2 药耗分析

系统运行过程中消耗的药剂主要有阻垢剂、还原剂和氢氧化钠,化学清洗药剂暂不计,阻垢剂、还原剂投加于一级反渗透进水,氢氧化钠投加于二级反渗透进水,阻垢剂、还原剂和氢氧化钠的投加量分别为4、5、3 mg/L,单端产水工艺的阻垢剂、还原剂和氢氧化钠年消耗量分别为30.46、38.08、4.42 t,双端产水工艺的阻垢剂、还原剂和氢氧化钠年消耗量分别为29.94、37.43、2.21 t。可以看出,两种工艺的阻垢剂和还原剂消耗量基本相当,氢氧化钠消耗量差别较大,主要是由于两种工艺的一级反渗透进水量基本相同,而双端工艺的二级反渗透规模较小。基于以上各药剂消耗量,按照市场价格,单端产水工艺和双端产水工艺的药剂费分别约为0.29和0.28元/m³,二者的药剂费基本相当,虽然氢氧化钠消耗量差别大,但其单价及用量远低于阻垢剂和还原剂,对药剂费的影响较小。

3.3 电耗分析

结合渤海湾某海域的实际水温,模拟计算年平均电耗,其中运行压力、吨水电耗为平均水温下的对应值,一级反渗透系统设置PX系列能量回收装

置,计算结果见表2。可以看出,双端产水工艺和单端产水工艺的一级进水压力相当,双端产水工艺的二级进水压力较单端产水工艺升高约0.2 MPa,主要是由于双端产水工艺的二级进水TDS增加;此外,双端产水工艺受益于二级进水比例的显著降

低,其综合电耗仍低于单端产水工艺,基于各个月份的平均电耗计算,单端产水工艺和双端产水工艺的年平均电耗分别约为2.26和2.18 kW·h/m³,按照1.0元/(kW·h)计,双端产水工艺较单端产水工艺可节省电费0.08元/m³。

表2 不同月份的运行电耗

Tab.2 Operation power consumption in different months

| 项目 | 平均水温/℃ | 设计水温/℃ | 单端产水工艺 | | | 双端产水工艺 | | |
|-----|--------|--------|------------|------------|----------------------------|------------|------------|----------------------------|
| | | | 一级进水压力/MPa | 二级进水压力/MPa | 电耗/(kW·h·m ⁻³) | 一级进水压力/MPa | 二级进水压力/MPa | 电耗/(kW·h·m ⁻³) |
| 1月 | -0.3 | 2.0 | 6.86 | 未启动 | 2.45 | 6.86 | 未启动 | 2.45 |
| 2月 | 2.7 | 2.7 | 6.73 | 未启动 | 2.41 | 6.73 | 未启动 | 2.41 |
| 3月 | 7.1 | 7.1 | 6.10 | 未启动 | 2.19 | 6.10 | 未启动 | 2.19 |
| 4月 | 12.6 | 12.6 | 5.61 | 1.49 | 2.36 | 5.62 | 1.62 | 2.20 |
| 5月 | 18.5 | 18.5 | 5.31 | 1.23 | 2.21 | 5.22 | 1.38 | 2.07 |
| 6月 | 23.4 | 23.4 | 5.18 | 1.07 | 2.14 | 5.21 | 1.24 | 2.02 |
| 7月 | 27.2 | 27.2 | 5.12 | 0.98 | 2.10 | 5.15 | 1.16 | 1.99 |
| 8月 | 27.5 | 27.5 | 5.11 | 0.97 | 2.09 | 5.16 | 1.17 | 2.00 |
| 9月 | 22.7 | 22.7 | 5.19 | 1.09 | 2.15 | 5.12 | 1.25 | 2.02 |
| 10月 | 14.6 | 14.6 | 5.48 | 1.39 | 2.30 | 5.50 | 1.53 | 2.15 |
| 11月 | 5.6 | 5.6 | 6.28 | 未启动 | 2.25 | 6.28 | 未启动 | 2.25 |
| 12月 | 0.7 | 2.0 | 6.86 | 未启动 | 2.45 | 6.86 | 未启动 | 2.45 |

4 结论

① 结合工业用水对淡化水质的特殊要求,设计了一种“一级反渗透双端产水+部分二级反渗透”工艺,二级反渗透仅需要对一级反渗透产水中含盐量较高部分进行二次脱盐。试验结果表明,该工艺可实现高效脱盐,有效降低二级反渗透规模,随着海水淡化产水规模的增加,经济效益愈加明显。

② 降低海水温度和提高二级进水比例有利于产水水质的提高,选择高脱盐率一级反渗透膜有利于提高二级反渗透启动温度和降低二级进水比例,通过优选膜型号及调节二级进水比例可满足不同产水水质要求。

③ 在产水含盐量为250 mg/L、氯离子为90 mg/L的工业水质要求下,当海水温度低于13℃时,仅需要启动一级反渗透;当海水温度高于13℃时,需要启动二级反渗透,双端产水工艺较传统单端产水工艺的二级反渗透规模减少约50%,电耗减少0.08 kW·h/m³,氢氧化钠药剂用量节约50%。

参考文献:

[1] 高从堦,阮国岭. 海水淡化技术与工程[M]. 北京:化

学工业出版社,2016.
GAO Congjie, RUAN Guoling. Seawater Desalination Technology and Engineering [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2016 (in Chinese).
[2] 张玲玲,何梦婷,王宗志,等. 滨海缺水城市海水淡化全成本分析——以华能威海电厂为例[J]. 水利经济, 2021, 39(1): 31-35, 80.
ZHANG Lingling, HE Mengting, WANG Zongzhi, et al. Full-cost analysis of seawater desalination in coastal cities: taking Weihai Power Plant of Huaneng Power International Inc. as an example [J]. Journal of Economics of Water Resources, 2021, 39(1): 31-35, 80 (in Chinese).
[3] 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 technology industry [J]. Industrial Water Treatment, 2021, 41(9): 26-30 (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 Jiawei, WANG Hongrui, ZHU Zhongfan, et al. Relevant issues and countermeasures of seawater

- desalination in China [J]. *South-to-North Water Transfer and Water Science & Technology*, 2020, 18 (2): 199–210 (in Chinese).
- [5] 付祖洪, 孙晓菊. 海淡化水在工业循环水应用中遇到的问题[J]. *能源与节能*, 2014(8): 106–107.
FU Zuhong, SUN Xiaojun. Problems in the application of desalted seawater as industrial circulating water [J]. *Energy and Energy Conservation*, 2014 (8): 106–107 (in Chinese).
- [6] 刘国新. 淡化海水用作循环冷却水腐蚀监测系统开发[J]. *全面腐蚀控制*, 2017, 31(11): 55–58.
LIU Guoxin. Desalination is used as the circulating cooling water corrosion monitoring system development [J]. *Total Corrosion Control*, 2017, 31 (11): 55–58 (in Chinese).
- [7] 张搏. 淡化海水对核电厂输水管材及设施的腐蚀性研究[D]. 青岛: 中国石油大学(华东), 2016.
ZHANG Bo. Study on Corrosivity of Desalinated Seawater to Water Delivery Pipes and Facilities of Nuclear Power Plant [D]. Qingdao: China University of Petroleum (East China), 2016 (in Chinese).
- [8] 赖世伟. 发电厂循环冷却水节水措施及优化处理方案的研究[J]. *冶金动力*, 2021(3): 67–69, 73.
LAI Shiwei. Study on water saving measures and optimal treatment scheme of circulating cooling water in power plant [J]. *Metallurgical Power*, 2021 (3): 67–69, 73 (in Chinese).
- [9] 高枫, 张宝军, 王永宏, 等. 城市再生水回用于火电厂循环冷却水的应用研究[J]. *给水排水*, 2020, 46 (S1): 768–770, 773.
GAO Feng, ZHANG Baojun, WANG Yonghong, *et al.* The application of urban reclaimed water for circulating cooling water in thermal power plants [J]. *Water & Wastewater Engineering*, 2020, 46 (S1): 768–770, 773 (in Chinese).
- [10] 温柔, 刘文君. 淡化海水水质调节技术对管网铁释放的影响[J]. *给水排水*, 2016, 42(9): 110–115.
WEN Rou, LIU Wenjun. Control effect of regulating desalinated seawater quality parameters on iron release in drinking water distribution system [J]. *Water & Wastewater Engineering*, 2016, 42 (9): 110–115 (in Chinese).
- [11] 李耀. 海水淡化水在循环冷却水中的应用分析[J]. *中国氯碱*, 2018(5): 39–41.
LI Yao. Application analysis of seawater desalination water in circulating cooling water [J]. *China Chlor-Alkali*, 2018 (5): 39–41 (in Chinese).
- [12] 张弛, 赵河立, 张林, 等. 双膜法海水淡化系统调试运行与模拟分析[J]. *工业水处理*, 2018, 38(7): 23–26.
ZHANG Chi, ZHAO Heli, ZHANG Lin, *et al.* Debugging running and simulation analysis of the sea water desalination system by ultrafiltration–reverse osmosis [J]. *Industrial Water Treatment*, 2018, 38(7): 23–26 (in Chinese).

作者简介: 薛喜东(1989–), 男, 陕西延安人, 硕士, 工程师, 研究方向为膜分离与水处理技术。

E-mail: 18822181311@163.com

收稿日期: 2022-02-15

修回日期: 2022-04-14

(编辑: 刘贵春)

保护生态环境就是保护生产力

改善生态环境就是发展生产力