

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2026.08.006

水母暴发对某10万m³/d海水淡化项目运行的影响及防控

杨鑫^{1,2}, 刘旭阳^{1,2,3}, 王钧², 杨兴涛², 刘骁智⁴, 董晓亮⁵,
于崇勤¹, 尹涛², 徐柏衡², 潘文泉²

(1. 青岛百发海水淡化有限公司, 山东 青岛 266041; 2. 青岛海水淡化有限公司, 山东 青岛 266071; 3. 中国海洋大学 海洋生命学院, 山东 青岛 266003; 4. 青岛水务碧水源科技发展有限公司, 山东 青岛 266071; 5. 山东海洋高新技术发展有限公司, 山东 青岛 266000)

摘要: 水母暴发对海水淡化厂的运维管理造成诸多挑战。基于10万m³/d双膜法海水淡化项目,分析了海月水母暴发后设备故障项词频分布、工艺电耗和药耗以及超滤和反渗透膜系统跨膜压差的变化,以揭示水母暴发对海水淡化项目运行的影响,并提出防控策略。研究表明,在水母暴发期间,海水淡化厂的设备故障集中于超滤系统的玻璃钢管道(尤其是三通部位)和阀门,表现为漏水与腐蚀;建议在水母暴发前进行管道加固和修补。水母暴发导致超滤化学清洗电耗增加75.0%,超滤和反渗透化学清洗电耗分别增长28.1%、14.5%。超滤清洗药剂次氯酸钠和氢氧化钠投加量分别增加6.7%和25.6%,药单耗分别增加18.2%和13.4%;反渗透杀菌剂投加量提高323.6%,药单耗提高207.4%。通过优化超滤运行时间及增加反冲洗和化学清洗频次,可有效控制超滤跨膜压差;增加化学清洗对反渗透跨膜压差控制的效果有限,需进一步排查超滤与反渗透之间的污染源。该研究为水母暴发期海水淡化厂的运行和防控提供了参考和依据。

关键词: 海水淡化; 水母暴发; 电耗; 药耗; 跨膜压差; 设备故障项; 词频分析

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2026)08-0041-07

Impact of Jellyfish Blooms on the Operation of a 10×10⁴ m³/d Seawater Desalination Project and Its Prevention and Control Measures

YANG Xin^{1,2}, LIU Xuyang^{1,2,3}, WANG Jun², YANG Xingtao², LIU Xiaozhi⁴,
DONG Xiaoliang⁵, YU Chongqin¹, YIN Tao², XU Baiheng², PAN Wenquan²

(1. Qingdao Baifa Seawater Desalination Co. Ltd., Qingdao 266041, China; 2. Qingdao Seawater Desalination Co. Ltd., Qingdao 266071, China; 3. College of Marine Life Sciences, Ocean University of China, Qingdao 266003, China; 4. Qingdao Water Resources Biyuan Water Technology Development Co. Ltd., Qingdao 266071, China; 5. Shandong Marine High-tech Development Co. Ltd., Qingdao 266000, China)

Abstract: Jellyfish blooms significantly compromise the operational efficiency of seawater desalination plants. This study investigates a dual-membrane desalination system with the scale of 10×10⁴

基金项目: 山东省海洋科技成果转移转化中心(创新创业共同体)“揭榜挂帅”项目(2024JBGS07); 市政供水国产化高性能海水淡化反渗透膜制备技术研究及产业化应用项目(25-1-1-gjgg-52-hy)

通信作者: 杨鑫 E-mail: yangxin-008.2005@163.com

m³/d, analyzing the term frequency distribution of equipment failure items, electricity/chemical consumption, and the variation of transmembrane pressure (TMP) in ultrafiltration(UF) and reverse osmosis(RO) systems after *Aurelia aurita* outbreaks, with the aim of revealing the impacts of jellyfish blooms on desalination plant and proposing prevention and control strategies. Key findings indicate that bloom events primarily affect UF systems, with equipment failures occurring in FRP pipes (especially discharge pipeline T-joints) and valves, predominantly through leakage and corrosion mechanisms—highlighting the importance of preventive maintenance. The research quantifies substantial operational impacts: UF chemical cleaning electricity consumption surges by 75.0%, while UF and RO chemical cleaning experience 28.1% and 14.5% higher electricity requirements, respectively. Chemical consumption patterns reveal even more dramatic effects, with UF cleaning agents (NaClO and NaOH) showing dosage increases of 6.7% and 25.6%, respectively, with unit consumption increasing by 18.2% and 13.4%, respectively. Most strikingly, RO biocide requirements escalate by 323.6% (dosage) and 207.4% (unit consumption). Operational optimization demonstrates that adjusting UF cycles and intensifying cleaning protocols effectively manages TMP, whereas RO systems show limited responsiveness to chemical cleaning—suggesting cross-process contamination as a critical research focus. These evidence-based insights offer practical solutions for desalination plant management during jellyfish proliferation periods.

Keywords: seawater desalination; jellyfish blooms; electricity consumption; chemical consumption; transmembrane pressure difference; equipment failure items; term frequency analysis

随着全球水资源短缺形势的日益严峻,膜法海水淡化作为一种水资源增量技术在沿海地区得到广泛应用^[1]。采用超滤(UF)作为预处理单元的膜法海水淡化厂被称为双膜法海水淡化厂^[2-3]。近年来,全球海洋水母大规模暴发现象频发,我国所在海域也是水母暴发的“重灾区”^[4]。在水母暴发期间,大量水母碎片和胶体黏液进入双膜法海水淡化厂取水系统,导致膜污染加剧,产水效率和质量降低,运维成本增大^[5]。因此,研究水母暴发对海水淡化项目各工艺单元的影响,并提出有效应对策略,具有重要的现实意义。随着膜法海水淡化产能在全球范围内的快速扩张^[6],国内外学者在膜污染控制技术和反渗透工艺优化方面取得突破^[7-8],但针对水母暴发对海水淡化系统影响的研究仍停留在实验室规模^[9]。现有研究主要集中于对海域浮游动植物群落的影响^[10],缺乏实际双膜法海水淡化工艺影响的工程案例报道^[11],鲜见对双膜法海水淡化工艺设备运维管理经验的探讨。由于对水母暴发期药剂选择和投加以及膜系统关键运行参数变化规律认识不足,现有成果难以为水母暴发期间海水淡化厂的运行提供有效指导。

本研究以青岛胶州湾沿岸某双膜法海水淡化厂^[12]的一期项目为对象,运用词频分析方法识别水母暴发期间的设备故障特征,通过对比水母暴发前后各工艺段电耗和药耗变化,分析UF和反渗透(RO)跨膜压差增长趋势,多维度揭示水母暴发对海水淡化厂运维管理的影响,在此基础上提出应对措施,以期对膜法海水淡化厂运维管理提供参考。

1 青岛某双膜法海水淡化厂概况

该海水淡化厂采用双膜法海水淡化工艺,总装机规模20万m³/d,由一期项目10万m³/d和二期项目10万m³/d分步建成。一期项目工艺流程如图1所示。

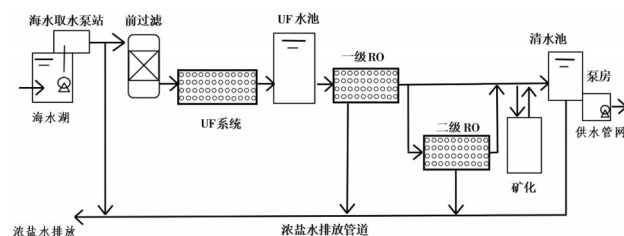


图1 青岛某海水淡化厂一期项目工艺流程

Fig.1 Process flow of phase I for a seawater desalination plant in Qingdao

变化幅度。

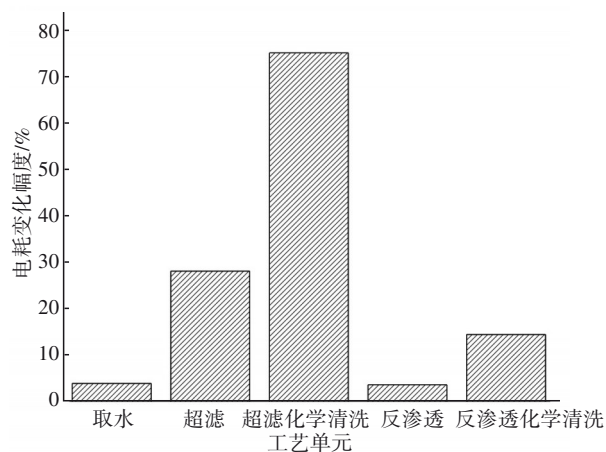


图3 水母暴发后海水淡化厂各工艺单元电耗变化情况

Fig.3 Changes in electricity consumption of each process unit at the seawater desalination plant after jellyfish blooms

由图3可知,水母暴发显著增大了海水淡化系统的整体电耗。在水母暴发后水厂日均进水量增长0.27%的情况下,虽然反渗透单元电耗在工艺段中最高,但超滤化学清洗能耗相比水母暴发前增长75.0%,超滤电耗增长28.1%。此外,反渗透的化学清洗电耗增加14.5%。这说明超滤作为反渗透的预处理单元,是保障反渗透正常运行的核心单元,水母暴发对超滤化学清洗和超滤运行的影响最大。

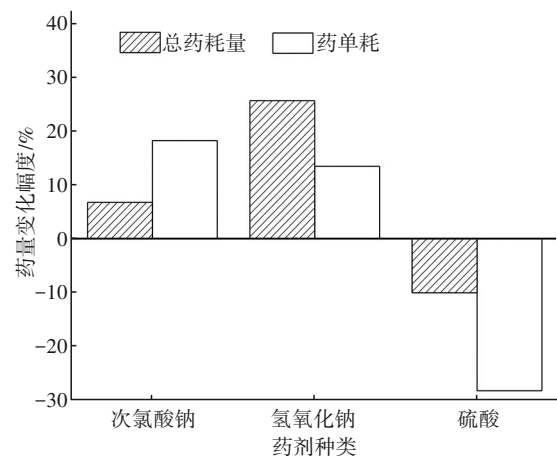
4.2.2 对工艺单元药耗的影响

总药耗量反映了整个系统对药剂的整体需求情况,而药单耗是单位处理水量所消耗的清洗药剂,用于衡量药剂使用的效率。水母暴发后超滤系统不同种类清洗药剂的总药耗和药单耗变化情况如图4所示。

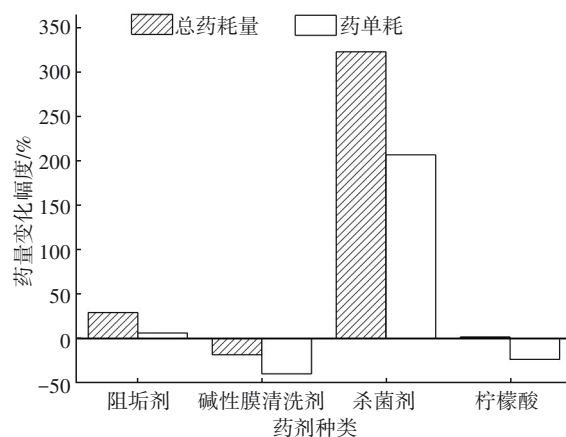
由图4(a)可知,相比于水母暴发前,水母暴发后超滤清洗药剂次氯酸钠和氢氧化钠的药剂总投加量分别增加6.7%和25.6%,药单耗分别增加18.2%和13.4%;硫酸总投加量减少10.1%,药单耗降低28.3%。

反渗透单元采用的阻垢剂和杀菌剂均为国产药剂,碱性膜清洗剂为进口药剂。碱性膜清洗剂和柠檬酸分别用于反渗透膜的碱洗和酸洗。由图4(b)可知,碱性膜清洗剂的总药耗量和药单耗均有所降低;而柠檬酸的总药耗量保持不变,药单耗降低。杀菌剂和阻垢剂的总药耗量和药单耗均增加,其中杀菌剂的药剂总投加量提高323.6%,药单耗

提高207.4%。这是因为在水母暴发期间,夏季高温使得水母胶体及黏液进入系统,加剧超滤膜的微生物和有机物污染。由于超滤对有机物的去除效果良好,RO膜可主要侧重微生物控制。实践表明,次氯酸钠和氢氧化钠能有效抑制微生物及有机物污染,显著降低超滤跨膜压差,而硫酸对膜污染控制效果有限。因此,在水母暴发期间,超滤膜宜重点防控微生物及有机物污染,反渗透膜宜以微生物控制为主,两者均可适当降低对无机污染物的控制强度。



a. 超滤系统



b. 反渗透系统

图4 水母暴发后海水淡化厂超滤和反渗透系统清洗药剂的总药耗量和药单耗变化情况

Fig.4 Changes in total chemical consumption and unit chemical consumption for UF and RO cleaning at the seawater desalination plant after jellyfish blooms

4.3 对超滤、反渗透跨膜压差的影响

选取海水淡化厂130#超滤膜组和6#反渗透膜组作为研究对象。图5展示了海水淡化厂超滤和反渗透膜组件跨膜压差随时间的变化特征,图中黑色

点划线表示5月1日水母暴发开始时刻。

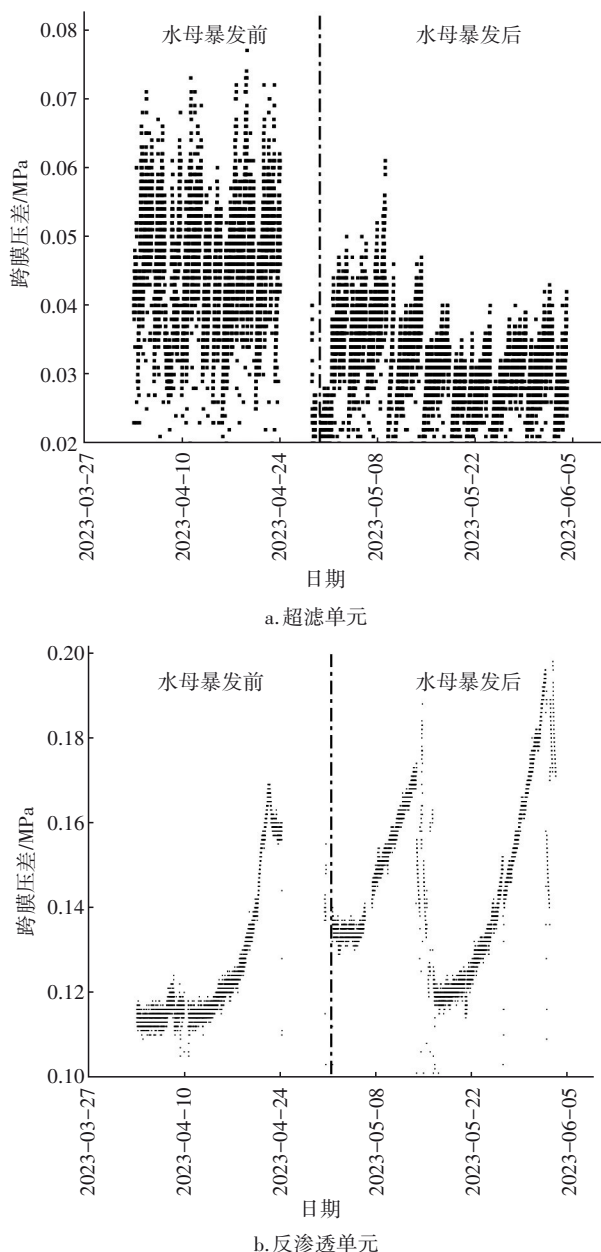


图5 水母暴发前后超滤、反渗透膜跨膜压差的变化

Fig.5 Changes in transmembrane pressure of UF and RO membranes before and after jellyfish blooms

如图5(a)所示,水母暴发前,超滤膜的跨膜压差为0.03~0.06 MPa;水母暴发后,超滤膜的跨膜压差为0.02~0.04 MPa,且呈现下降的趋势。其原因是水母暴发前,超滤的运行时间为90 min左右,且化学清洗频次为3个月1次;水母暴发后,维持原有的运行参数会导致超滤压差涨幅较快。经前期试验,将超滤运行时间降至50~70 min,并增加反冲洗频次以及化学清洗频次(化学清洗频次增至1

次/月),可使超滤运行跨膜压差保持在相对较低水平,避免压差大幅升高的情况发生。

如图5(b)所示,对于反渗透膜,在水母暴发前的运行周期内,跨膜压差前两周维持在0.115 MPa左右,最后一周则明显增大,从0.122 MPa升至0.158 MPa。而在水母暴发后的两个运行周期中,跨膜压差仅能稳定运行约一周,随后即呈现快速上涨趋势。以最后一个运行周期为例,5月21日—6月3日跨膜压差从0.116 MPa升至0.171 MPa,升高0.055 MPa。为保证夏季高峰供水期的供水量,加大了反渗透化学清洗频次,但效果不明显,跨膜压差依然出现骤增的情况。分析认为超滤和反渗透之间存在污染源,应针对水母暴发时期的水质特点开展针对性排查。

5 防控措施探讨

5.1 水母暴发期海水淡化设备维护管理经验

在水母暴发前,应对超滤玻璃钢管道的三通接头等易损部位进行环氧树脂修补和材料加固,以修复微孔缺陷和局部腐蚀,密封性能可恢复至95%以上,显著降低运行期间的泄漏风险。同时,通过结构加固提升管道抗振性能,可有效减轻因频繁清洗引发的流体冲击和振动,从而避免管道开裂问题。建议定期检查阀门密封性能,采用耐腐蚀材料替换老化阀门,并在水母暴发前进行压力测试,避免由腐蚀导致的内漏。

5.2 水母暴发期海水淡化能耗管理经验

在水母暴发期间,海水淡化厂面临取水水质恶化和膜污染加剧的双重挑战,能耗管理尤为重要。为提高运行效率并降低能耗成本,建议海水淡化厂根据实时水质变化,动态调整药剂投加策略,以实现污染控制与能耗优化的平衡。通过调整超滤清洗药剂次氯酸钠和氢氧化钠、反渗透杀菌剂的投加量及投加浓度,增强对微生物和有机污染物的控制能力,同时适度减少酸洗加药量,以降低化学药剂的消耗和相关处理负担。此外,在清洗过程中,根据膜污染特性和清洗效果需求,甚至可以考虑省略酸洗步骤,通过简化清洗流程进一步降低能耗和运行成本。此类灵活的超滤膜清洗策略不仅有助于维持膜系统的稳定运行,还能有效延长膜寿命,提升海水淡化厂在水母暴发期间的整体运行效率。

5.3 水母暴发期海水淡化膜运行管理经验

在水母暴发期间,海水淡化厂应重视取水环节

对水母的有效拦截,以避免水母碎片和胶体进入海水淡化系统为首要目标。该海水淡化厂未设置超滤前的强化预处理设施,水母碎片和胶体黏液随进水经自清洗过滤器(150 μm)处理后直接进入超滤系统,导致超滤膜污染加剧,断丝率增加,提高了系统整体运行负荷和能耗。

试验研究发现,该海水淡化厂通过缩短超滤单周期运行时间、提高反冲洗频次和化学清洗频次,可将超滤跨膜压差控制在理想范围内,减少超滤膜断丝率,从而保障夏季高峰期的产水量和产水水质稳定。然而,对于反渗透单元,尽管已加大杀菌剂投加量并增加清洗频次以抑制微生物滋生和控制有机污染,但其跨膜压差增长速率仍较快。其原因可能是水母碎片和胶体在超滤处理后未被完全拦截,部分污染物进入反渗透系统,进一步加剧了膜污染。为解决该问题,建议在取水口或超滤与反渗透之间增设保安过滤器,同时在超滤产水池采用低浓度持续投加杀菌剂的方式,强化对超滤水池和输水管道的微生物污染防控,从而有效提升反渗透膜的运行稳定性。

6 结论

① 词频分析结果表明,水母暴发期海水淡化厂的设备故障主要集中于玻璃钢管道的泄漏与腐蚀,以及阀门内漏和腐蚀。其中,超滤玻璃钢管道的故障主要集中在排放管道的三通部位,建议在水母暴发前进行环氧树脂修补与材料加固,以有效控制水母暴发期的管道损伤。

② 在系统平均进水量相差不大的情况下,水母暴发后,双膜法海水淡化项目各工艺单元电耗均增加,其中对超滤化学清洗的影响最大,电耗提高75.0%;超滤和反渗透化学清洗电耗分别提高28.1%、14.5%。在药耗方面,相比于水母暴发前,水母暴发后超滤清洗药剂中次氯酸钠和氢氧化钠的药剂投加量分别增加6.7%和25.6%,药单耗分别增加18.2%和13.4%;但硫酸的药剂投加量减少10.1%,药单耗降低28.3%;反渗透杀菌剂的药剂总投加量提高323.6%,药单耗提高207.4%。水母暴发后,海水淡化厂应更加关注超滤和反渗透膜微生物和有机物污染的预防。

③ 水母暴发后,海水淡化厂超滤和反渗透跨膜压差增速加快。在实际运行中,将超滤运行时间

由90 min降至50~70 min,增加反冲洗频次和化学清洗频次(增至1次/月),可有效控制超滤跨膜压差升高并保障超滤产水量和水质稳定;频繁的化学清洗对控制反渗透跨膜压差上升效果有限,需进一步排查超滤与反渗透之间的潜在污染源,在取水或超滤与反渗透之间增设保安过滤器,同时优化杀菌剂的投加点位,尽可能接近超滤产水位置,以增强对微生物污染的防控效果。

参考文献:

- [1] 郝晓地,王邦彦,曹达啟,等. 海水淡化工程全球大规模应用发展趋势[J]. 中国给水排水, 2022, 38(10):18-24.
HAO X D, WANG B Y, CAO D Q, et al. Global trends of desalination towards large-scale engineering applications [J]. China Water & Wastewater, 2022, 38(10):18-24(in Chinese).
- [2] 翁晓丹,张希建,张建中,等. 大型反渗透海水淡化系统双端产水脱硼工艺研究[J]. 中国给水排水, 2020, 36(7):26-31.
WENG X D, ZHANG X J, ZHANG J Z, et al. Double-end deboronization process for large-scale reverse osmosis desalination system [J]. China Water & Wastewater, 2020, 36(7):26-31(in Chinese).
- [3] 王晓楠,刘小骥,刘昱,等. 反渗透海水淡化水的电导率、氯化物及硼指标分析[J]. 中国给水排水, 2019, 35(22):10-13,19.
WANG X N, LIU X Q, LIU Y, et al. Analysis on conductivity, chloride and boron of product water for drinking by full-scale seawater reverse osmosis desalination plants [J]. China Water & Wastewater, 2019, 35(22):10-13,19(in Chinese).
- [4] WANG P P, ZHANG F, GUO D J, et al. Trophic effects of jellyfish blooms on fish populations in ecosystems of the coastal waters of China[J]. Science of the Total Environment, 2024, 948:174832.
- [5] RAHAV E, BELKIN N, NNEBUO O, et al. Jellyfish swarm impair the pretreatment efficiency and membrane performance of seawater reverse osmosis desalination [J]. Water Research, 2022, 215:118231.
- [6] 高瑞,刘彩虹,周艺凡,等. 太阳能驱动反渗透技术用于海水淡化的研究进展[J]. 中国给水排水, 2024, 40(24):33-39.
GAO R, LIU C H, ZHOU Y F, et al. Research progress of solar-driven reverse osmosis technology applied in

- seawater desalination [J]. China Water & Wastewater, 2024, 40(24):33-39(in Chinese).
- [7] 于慧,张梦,宋杰,等. 生物污染对反渗透膜的微观结构和宏观性能的影响[J]. 中国给水排水, 2021, 37(11):46-51.
- YU H, ZHANG M, SONG J, et al. Effects of biological fouling on microstructure and macroscopic properties of reverse osmosis membrane [J]. China Water & Wastewater, 2021, 37(11):46-51(in Chinese).
- [8] 薛冰超,廖惠琦,骆政豪,等. 次氯酸钠清洗对超滤膜的长期损伤行为[J]. 中国给水排水, 2024, 40(23):7-12.
- XUE B C, LIAO H Q, LUO Z H, et al. Long-term damage behavior of sodium hypochlorite cleaning on ultrafiltration membrane[J]. China Water & Wastewater, 2024, 40(23):7-12(in Chinese).
- [9] 张冬,董岳,周东菊,等. xDLVO理论定量解析纳米SiO₂和天然有机物超滤膜污染机理[J]. 中国给水排水, 2016, 32(21):66-70.
- ZHANG D, DONG Y, ZHOU D J, et al. Quantitative analysis of the fouling mechanism of ultrafiltration membranes by nano-SiO₂ and natural organic matter using xDLVO theory [J]. China Water & Wastewater, 2016, 32(21):66-70(in Chinese).
- [10] SUN X H, SUN X Y, ZHU L X, et al. Seasonal and spatial variation in abundance of the copepod *Calanus sinicus*: effects of decreasing dissolved oxygen and small jellyfish bloom in northern Yellow Sea, China, nearshore waters [J]. Marine Pollution Bulletin, 2020, 161(Pt B):111653.
- [11] SHEN Z C, FANG W, YU Z X, et al. Key environmental parameters and numerical prediction model of jellyfish bloom in Qingchuan Bay Nuclear Power Plant, China[J]. Marine Environmental Research, 2024, 202:106786.
- [12] 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 B, YANG Z F, MA Y Q, 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).
- [13] XIAO W P, ZENG Y, LIU X, et al. The impact of giant jellyfish *Nemopilema nomurai* blooms on plankton communities in a temperate marginal sea [J]. Marine Pollution Bulletin, 2019, 149:110507.
- [14] PEREIRRA G L D, JEGATHEESAN V. Mapping the evolution of seawater desalination research (2000-2024): bibliometric and co-word analysis of 11 000+ publications[J]. Desalination, 2024, 591:118029.

作者简介:杨鑫(1986—),女,山西长治人,硕士,高级工程师,从事海水淡化工作。

E-mail:yangxin-008.2005@163.com

收稿日期:2025-04-23

修回日期:2025-05-12

(编辑:丁彩娟)

珍惜地下水,珍视隐藏的资源