

工程实例

DOI: 10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2026.10.013

海水淡化厂水母动态协同拦截方案研究

朱连孝^{1,2}, 任彬², 杨鑫², 刘旭阳^{1,2,3}, 刘骁智⁴, 姜跃鹏¹,
尹涛², 矫立磊¹, 邓丁华¹, 汝少国³, 王祥宁⁵

(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 266071; 4. 青岛水务碧水源科技发展有限公司, 山东 青岛 266071; 5. 青岛水务集团有限公司, 山东 青岛 266071)

摘要: 针对双膜法海水淡化系统受水母暴发影响导致的超滤污染加剧与能耗升高问题,以青岛某海水淡化厂一、二期项目为研究对象,开展胶州湾5月—8月生态数据调查,基于水母种群更替与尺寸异质性特征,提出“动态协同拦截方案”,按水母演替规律分阶段组合拦截网,并协同调度一、二期项目取水系统,充分利用二期项目旋转滤网+气浮强化对有机胶体污染物的处理效果。该方案实施后,超滤跨膜压差均值下降23.1%,超滤及清洗电耗分别降低28.1%和35.3%。

关键词: 水母; 海水淡化; 海水蓄水湖; 海域调查; 拦截技术

中图分类号: TU991 **文献标识码:** B **文章编号:** 1000-4602(2026)10-0090-07

Study on a Dynamic Collaborative Jellyfish Interception Strategy for Seawater Desalination Plants

ZHU Lianxiao^{1,2}, REN Bin², YANG Xin², LIU Xuyang^{1,2,3}, LIU Xiaozhi⁴,
JIANG Yuepeng¹, YIN Tao², JIAO Lilei¹, DENG Dinghua¹, RU Shaoguo³,
WANG Xiangning⁵

(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 266071, China; 4. Qingdao Origin Water Technology Development Co. Ltd., Qingdao 266071, China; 5. Qingdao Water Group Co. Ltd., Qingdao 266071, China)

Abstract: This study addresses the problems of aggravated ultrafiltration (UF) membrane fouling and increased energy consumption in dual-membrane seawater desalination systems, which are caused by jellyfish outbreaks. Focusing on the phase I and phase II projects of a seawater desalination plant in Qingdao, we conducted an ecological survey in Jiaozhou Bay from May to August. Based on the characteristics of jellyfish population succession and size heterogeneity, a dynamic coordinated interception strategy is proposed. This strategy involves a phased combination of interception nets according to the jellyfish succession patterns, coordinated with the operational scheduling of the intake

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)

通信作者: 刘旭阳 E-mail: xyang12008@163.com

systems for the phase I and phase II projects. This approach fully leverages the enhanced pretreatment process of the phase II project, which combines a rotating screen with a dissolved air flotation (DAF) system, to improve the removal efficiency of organic colloidal pollutants. After implementation of the strategy, the average transmembrane pressure (TMP) of the UF system decreased by 23.1%, while the electricity consumption for UF operation and cleaning was reduced by 28.1% and 35.3%, respectively.

Keywords: jellyfish; seawater desalination; seawater lagoon; marine environmental survey; interception technology

双膜法(超滤-反渗透)海水淡化技术作为缓解沿海地区水资源短缺的核心路径,已在全球范围实现规模化应用^[1]。然而,随着近岸海洋生态系统扰动加剧,生物性风险持续攀升,水母暴发已从偶发性生态事件演变为常态化、系统性的运行胁迫因子,对淡化系统的长期稳定运行构成严峻挑战^[2]。

研究表明,水母体富含黏多糖与蛋白质类物质^[3],在取水及预处理环节受机械剪切作用破碎后,释放形成有机胶体污染物^[4]。此类污染物可显著加剧膜污染进程,使得以超滤为预处理的海水淡化系统的跨膜压差(TMP)上升速率提高2.3~3.8倍^[5],膜丝断裂率增加15%~25%,不仅大幅缩短膜组件使用寿命,还导致清洗频次增加、能耗上升与运维成本攀升,严重削弱系统的经济性与运行稳定性^[6]。

当前主流水母防控策略多聚焦物理拦截环节,普遍依赖固定孔径筛网系统^[7]。然而,该模式未充分考虑水母群落季节性演替规律与种群动态特征,筛网拦截当量直径与实际生态需求脱节,难以兼顾“低阻力高效率”与“高截留率”的双重目标,导致在实践中经常陷入“孔径偏小易堵塞、孔径偏大易漏筛”的困境。此外,固定孔径筛网系统与后续预处理单元之间缺乏深度工艺耦合,尤其对微型水母体、浮游动物幼体^[8]等高透过性风险类群,尚未构

建多级协同、动态响应的拦截路径,难以实现从源头到终端的系统性风险防控^[9]。

本研究拟在水母暴发期开展连续海域调查,系统掌握其种类组成、时空分布规律及个体尺寸特征的季节性变化;在此基础上,针对性构建适用于双膜法海水淡化厂取水-蓄水湖系统的水母拦截技术体系,优化拦截设施的类型选择与组合配置,显著提升拦截效率与系统运行可靠性。

1 双膜法海水淡化厂概况

本研究以青岛某海水淡化厂^[10]为研究对象,该厂采用双膜法工艺,总设计产能为20万m³/d,分两期建设,一期、二期各10万m³/d,工艺流程如图1所示。海水淡化厂的南侧约1 km处设有海水蓄水湖,通过潮汐的重力自流以及配套的海水蓄水湖泵站从胶州湾海域取水,泵站设计取水能力为27万m³/d。海水进入海水蓄水湖后,分别通过碱业泵房和PS3泵房进入一期和二期项目。但一、二期项目的预处理工艺不同,受一期项目泵房结构限制,其前端未配置旋转滤网,仅依靠自清洗过滤器完成初级拦截;二期项目则在取水泵站增设旋转滤网(孔径6 mm)和气浮以强化预处理能力。两期系统实现供水互联,二期取水设施具备向一期项目供水的调度能力,为本研究方案实施提供了保障。

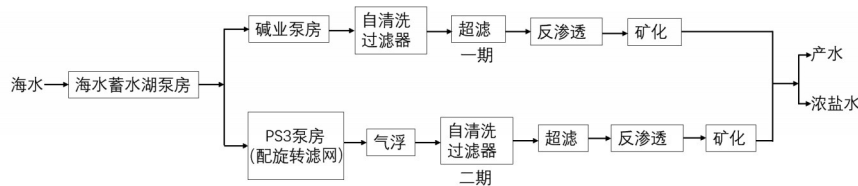


图1 青岛某海水淡化厂一期、二期项目工艺流程

Fig.1 Flow chart of phase I and phase II projects at a seawater desalination plant in Qingdao

2 海域调查及不同时期水母特征分析

本次海域生态调查由中国海洋大学生态学科科研团队组织实施,以浮游动物为监测重点,严格依

据《海洋监测规范》(GB 17378—2007)、《近岸海域环境监测技术规范》(HJ 442—2020)开展采样与分析工作。调查聚焦刺胞动物门类群,系统解析其物

种组成、空间密度分布及当量直径特征。该调查区域位于海水淡化厂的海水蓄水池,共布设3个代表性采样站位。海水经海水蓄水池泵房进入蓄水池,沿1#站位和3#站位方向进入一期项目,沿1#站位和2#站位方向进入二期项目。采样站位见图2。

5月—8月,海水蓄水池共检出多种水母类群,包括多手帽形水母、蕨枝螳水母、细颈和平水母、半球美螳水母、盘形杯水母、球形侧腕水母、海月水母。优势水母种见图3。可见,5月—7月海月水母为优势种,其个体呈现显著尺寸分异;至8月,群落结构发生明显演替,多手帽形水母取代海月水母成为优势种。



图2 海水蓄水池采样站位

Fig.2 Sampling sites at the seawater storage lake



a. 小型海月水母(1 L标准塑料瓶)

b. 大型海月水母(A3白纸)

c. 多手帽形水母(1 L标准塑料瓶)

图3 海水蓄水池中的优势水母种

Fig.3 Dominant jellyfish species in the seawater storage lake

图4展示了5月—8月海月水母与多手帽形水母的当量直径及密度变化趋势。

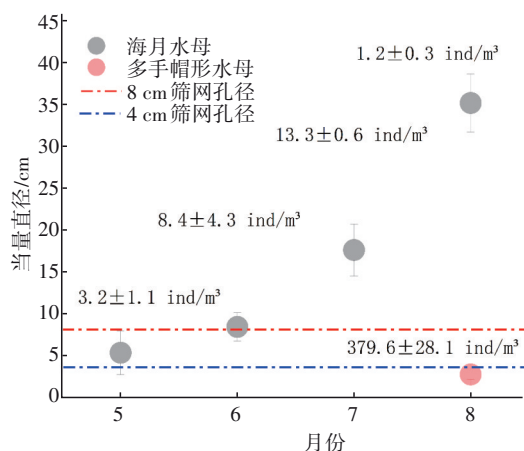


图4 5月—8月水母的当量直径和密度

Fig.4 Equivalent diameter and density of jellyfish from May to August

海月水母密度在5月—7月持续上升,分别达到3.2、8.4和13.3 ind/m³,8月降至1.2 ind/m³;其当量直径则稳步增大,从5月的5.3 cm增至8月的35.2

cm。与此同时,多手帽形水母在8月成为优势种,密度高达379.6 ind/m³,但个体较小,当量直径仅为2.7 cm。

3 水母拦截方案比较及确定

3.1 水母拦截方案

基于海域不同时期水母特征分析,形成了动态协同拦截技术方案(见图5)。5月—6月采用4 cm 孔径筛网,可有效拦截处于生长期的海月水母,其密度不超过8.4 ind/m³,不会显著影响筛网通量;7月—8月改用8 cm 孔径筛网,以去除当量直径达13.3~35.2 cm的大型成熟个体。然而,针对8月高密度(379.6 ind/m³)且个体微小的多手帽形水母,当量直径仅2.7 cm,4 cm 筛网完全失效,而进一步缩小孔径将导致过水能力严重下降。因此,8月建议优先调配至二期项目泵站取水,该系统配置旋转滤网与气浮预处理装置,可通过旋转滤网高效截留小型水母,并借助气浮工艺强化去除水母黏液^[11],从而保障进水系统稳定运行。

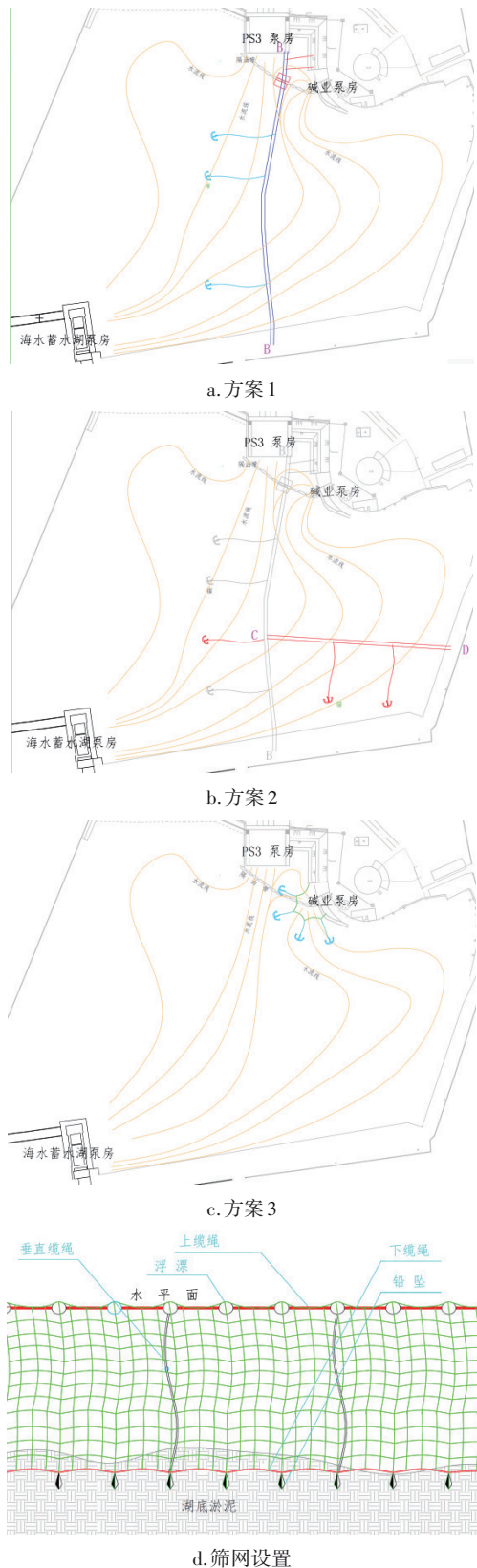


图5 海水蓄水湖水母拦截方案

Fig.5 Jellyfish interception schemes for the seawater storage lake

方案1是沿一期进水泵房(碱业泵房)与二期进水泵房(PS3进水口)岸线布设总长约240 m、孔径为8 cm×8 cm的立式拦截网,网体连接浮漂并局部抬高出水,通过两道斜拉缆绳锚固于东岸以防水流变形,网与隔油带交叉节点以4只空桶支撑,避免缺口形成,适用于拦截当量直径8 cm以上的较大体型水母。方案2是在一期进水泵房南侧设置一道东西向、长约16 m、孔径为4 cm×4 cm的细拦截网,适用于少量水母的拦截,能有效阻拦当量直径4 cm以上的个体,但需及时清理,否则水母积聚会压垮网体。方案3是在一期泵房附近布设同样孔径、呈弧形的16 m拦截网,通过反向四锚锚固,并在进水口南北岸以缆绳桩加强固定,隔油带与拦截网交叉处以浮桶抬高,既防止网体下沉,又确保隔油带处于水面以下以维持拦截效能,适用于大量中小体型水母的防控,具备较好承载韧性,但仍需定期维护清理。

3.2 动态协同水母拦截方案确定

为降低水母暴发对一期预处理系统的影响,以筛网拦截为核心,根据水母种群演变规律,通过动态调配不同类型的筛网,将水母导流至配备旋转滤网与气浮强化预处理的二期泵站进行集中处置;2025年5月—8月海水蓄水湖水母拦截方案见表1。

表1 2025年5月—8月海水蓄水湖水母拦截方案

Tab.1 Jellyfish interception scheme for the seawater storage lake from May to August in 2025

月份	水母种类	水母尺寸	方案选择	筛网运维成本/万元
5	海月水母	小尺寸	方案1+方案2	12~20
6	海月水母	小尺寸+中尺寸+大尺寸	方案1+方案2+方案3	24~36
7	海月水母	大尺寸	方案1+方案3	20~28
8	海月水母+多手帽形水母	大尺寸+微小尺寸	方案1+旋转滤网+气浮强化处理	12~16

海域生态调查数据显示,5月水母处于暴发初期,呈现密度低、个体小的特征。因此,仅需实施方案2进行拦截,即便有少量小水母进入系统,其影响也可控,同时也先将方案1建立起来;6月水母尺寸多样但密度尚未达峰,在方案1、2的基础上增加方案3,兼顾对不同当量直径水母的高效拦截,同时由于此时海水淡化厂未达到用水高峰,增加筛网也不会显著影响泵站的供水能力;7月海月水母个体显著增大且密度升高,海水淡化厂需要保障供水能

力,因此撤掉拦截韧性较低的方案2,采用方案1与方案3联用,强化对大尺寸水母的截留能力,同时提高筛网拦截体系的整体过水能力;8月,面对低密度大型海月水母与高密度小型多手帽形水母并存的情况,仅实施方案1拦截大型个体水母,同时暂停一期项目取水,改由二期项目泵站单独供水,依托二期项目的旋转滤网拦截经筛网过筛的水母胶体碎片,再通过气浮装置去除微型水母、水母胶体碎片及水母黏液等有机胶体污染物,从而最大限度地降低大型水母和微型水母共同作用对系统运行造成的冲击。此外,将定期的人工筛网清理与间接水泵抽吸清理贯穿整个水母暴发期,保障拦截筛网体系长效稳定运行。

4 水母拦截方案实施效果

4.1 超滤跨膜压差对比

静态独立拦截方案在动态协同方案实施前一年应用于一期工程,仅采用该方案模式,筛网抗冲击韧性不足,水母暴发高峰期易堆积压溃失稳,造成水母突破筛网拦截屏障,进入系统并引发瞬时连锁停机;同时,该方案对微型水母缺乏有效次级拦截与预处理,导致自清洗过滤器及超滤膜频繁承受高负荷冲击,压差持续升高、清洗频次增加,系统运行稳定性显著下降。静态独立拦截方案与动态协同拦截方案下超滤过程跨膜压差的分布特征对比见图6。

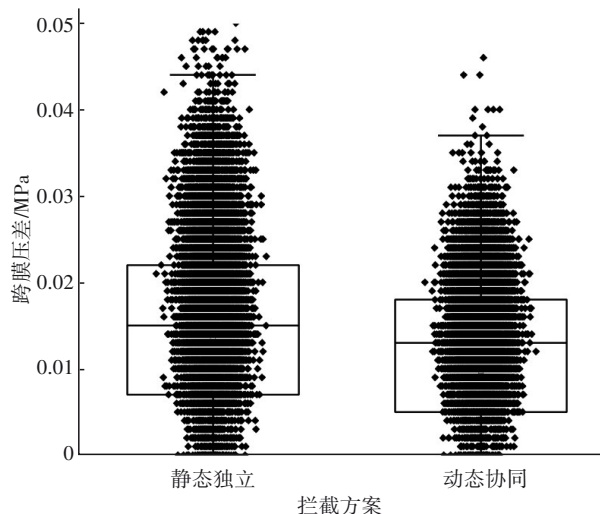


图6 两种水母拦截方案条件下超滤跨膜压差对比

Fig.6 Comparison of ultrafiltration transmembrane pressure drop under two jellyfish interception schemes

相比之下,动态协同拦截方案实施后,超滤膜

组跨膜压差均值由0.013 MPa降至0.010 MPa,中位数由0.015 MPa降至0.013 MPa,降幅分别为23.1%与13.3%,且压差分布更集中、波动更小,95%以上数据点低于0.035 MPa,而静态方案上限接近0.040 MPa。结果表明,动态协同拦截策略不仅有效降低了超滤膜污染程度,还显著提升了系统运行的稳定性。

4.2 系统电耗对比

图7展示了动态协同拦截方案相比静态独立拦截方案的节电效果,可见,前者各工艺单元的电耗均显著下降,凸显其在降低系统能耗与运行成本方面的有效性。

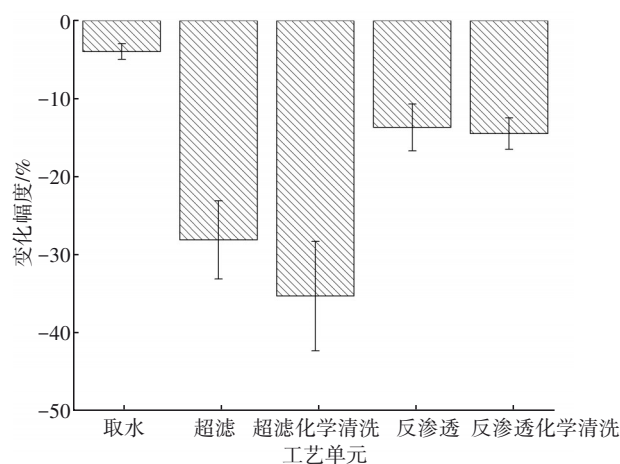


图7 动态协同拦截方案的节电效果

Fig.7 Power saving effect of dynamic collaborative interception technology

其中,超滤及其化学清洗环节电耗降幅最大,分别达28.1%和35.3%,表明该方案通过高效拦截水母等高风险生物污染物,有效延缓了膜污染进程并大幅减少化学清洗频次与强度。反渗透单元及其化学清洗环节电耗同步下降13.7%~14.5%。可见,动态协同拦截方案显著缓解了水母分泌胶体对超滤内压式中空纤维膜的堵塞风险,降低了膜丝断裂概率,保障了反渗透进水水质稳定。

5 方案实施要点及注意事项

① 在泵房进水口增设浮游动物采样器,动态监测水母种类与体型变化,评估现有拦截方案的效果。密切关注超滤等预处理单元运行状态,记录跨膜压差、清洗频次等基准值,一旦数据波动,立即对系统作出响应。

② 拦截网采用浮漂、锚固装置、缆绳桩与双道斜拉缆绳组成多重固定体系,形成从水面到水底

的连续封闭屏障,防止水母溢流或绕流。在水流的作用下,拦截网的浮筒受力向上游倾斜;若采用浮标式立式圆形浮筒,其抗倾覆能力有限^[12],因此需采用卧式浮筒串联结构,并充分抵消由水流流速和方向引起的倾覆力矩,避免网体局部下沉。同时,网体底部设混凝土沉块和锚链配重组,确保筛网在底泥不均等复杂工况下仍能紧密贴合河床,实现全断面有效密封。

③ 在水母暴发高峰期,岸端锚固采用钢筋混凝土锚墩和系缆桩组合配置,拦截网采用反向锚固的筛网结构,锚固点间距控制在5 m以内,确保极端海况下结构稳定,抗水流冲击不变形或位移。重点监控筛网局部水母堆积情况,及时清理,防止集中荷载导致筛网坍塌失效。

④ 筛网检查频次应不低于1次/3 h;水母暴发高峰期应加密至1次/h。检查工作须配备专用船只、清理工具及专职人员,并落实防暑降温等劳动保护措施。

⑤ 建立常态化清污机制,动态响应水母密度变化,及时清除旋转滤网截留的水母体,避免因堆积引发滤网通量衰减、运行负荷上升或局部堵塞风险。在水母暴发期,采用“自动刮除为主、人工清污为辅”的协同作业模式,确保滤网系统持续稳定高效运行。

⑥ 处理死亡水母时,需全流程监控并落实水母处理处置过程,确保不会影响生态环境。

6 结论

① 监测数据显示,5月—7月海月水母为优势种,密度由3.2 ind/m³增至13.3 ind/m³,当量直径由5.3 cm增至35.2 cm。8月多手帽形水母成为优势种,密度激增至379.6 ind/m³,但个体当量直径仅2.7 cm;海月水母当量直径达35.2 cm,但密度仅为1.2 ind/m³。

② 基于水母种群演变规律,采用筛网拦截策略将水母导流至二期泵站集中处置。根据5月—8月水母密度和个体大小的动态变化,灵活调配3种拦截方案:5月单用方案2应对低密度小个体水母,且建立方案1备用;6月同时采用3种方法,兼顾拦截不同尺寸水母;7月撤除拦截韧性较低的方案2,联用方案1、3保持对大尺寸水母截留能力并保障供水能力;8月仅启用方案1拦截大型水母,暂停一期

取水、单用二期进水,依托二期旋转滤网截留水母胶体碎片,结合气浮工艺去除微型水母及黏液类有机胶体污染物,全程辅以人工清理与水泵抽吸,保障拦截体系稳定运行。

③ 海水淡化厂实施动态协同拦截方案后,超滤跨膜压差均值降低23.1%,超滤电耗降低28.1%,超滤化学清洗电耗降低35.3%,反渗透能耗下降13.7%~14.5%。

④ 该方案的核心是通过“监”与“控”相结合,实现基于水母种群演替规律的筛网动态调控。其中,“监”主要包括:在泵房进水口增设浮游动物采样器、建立种群基准值以及强化日常巡检;“控”主要包括:提高筛网截留率,降低筛网堵塞率,以及死亡水母的处理处置。

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] WANG P, ZHANG F, GUO D, 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.
- [3] BAR-ZEEV E, PASSOW U, CASTRILLÓN S R, et al. Transparent exopolymer particles: from aquatic environments and engineered systems to membrane biofouling [J]. Environmental Science & Technology, 2015, 49(2):691-707.
- [4] 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.
- [5] SCHAUB J, HUNT B P V, PAKHOMOV E A, et al. Using unmanned aerial vehicles (UAVs) to measure jellyfish aggregations [J]. Marine Ecology Progress Series, 2018, 591: 29-36.
- [6] KASTL A, BOGLER A, SPINNLER M, et al. Impact of hydrodynamics on the first stages of biofilm formation in forward osmosis with spacers[J]. Environmental Science & Technology, 2020, 54(8):5279-5287.

- [7] LIN H, ZHANG S, CAO R, et al. A review on the risk, prevention and control of cooling water intake blockage in coastal nuclear power plants[J]. Nuclear Engineering and Technology, 2024, 56(2):389-401.
- [8] 刘慧涛,高峥,王朋鹏,等. 不同气泡幕条件对海月水母(*Aurelia coerulea*)和海蜇(*Rhopilema esculentum*)的阻拦效果研究[J]. 海洋与湖沼, 2025, 56(6):1409-1419.
- LIU H T, GAO Z, WANG P P, et al. The blocking effect of different bubble curtain conditions on giant jellyfish *Aurelia coerulea* and *Rhopilema esculentum* [J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 2025, 56(6):1409-1419(in Chinese).
- [9] 陈丽珠,巢猛,何孙胃. 净水厂水蚤类浮游动物的生物风险及影响因素研究[J]. 中国给水排水, 2022, 38(1):60-63.
- CHEN L Z, CHAO M, HE S W. Biosafety risk and influencing factors of daphnia zooplankton in waterworks [J]. China Water & Wastewater, 2022, 38(1): 60-63 (in Chinese).
- [10] 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).
- [11] 王玥,刘朵,郑雅文,等. 北方某水厂气浮工艺处理南水北调水源水的适应性[J]. 中国给水排水, 2025, 41(1):46-51.
- WANG Y, LIU D, ZHENG Y W, et al. Adaptability of air flotation process for treating source water from South-to-North Water Transfer Project in a waterworks in North China [J]. China Water & Wastewater, 2025, 41(1): 46-51(in Chinese).
- [12] 李应峰,周波,谢冰. 核电站进水渠拦污网的改进与维护[J]. 电力安全技术, 2015, 17(11):45-47.
- LI Y F, ZHOU B, XIE B. Improvement and maintenance of debris screens in the intake channel of nuclear power plants [J]. Electric Safety Technology, 2015, 17(11): 45-47(in Chinese).

作者简介:朱连孝(1971—),男,山东潍坊人,硕士,高级工程师,从事海水淡化工作。

E-mail:13356898808@163.com

收稿日期:2025-11-18

修回日期:2025-12-19

(编辑:衣春敏)

·信息·

工业和信息化部等十部门印发《人工智能科技伦理审查与服务办法(试行)》

为规范人工智能科技活动伦理治理,促进公平、公正、和谐、安全和负责任创新,推动人工智能产业健康发展,2026年4月2日,工业和信息化部等十部门印发《人工智能科技伦理审查与服务办法(试行)》(简称《伦理办法》)。《伦理办法》共分6章,分别是总则、服务与促进、实施主体、工作程序、监督管理和附则。从事人工智能科技活动的高等学校、科研机构、医疗卫生机构、企业等是本单位人工智能科技伦理审查管理的责任主体,应按照《伦理办法》第4条有关要求,设立人工智能科技伦理委员会(简称委员会)。委员会应配备必要的工作人员、办公场所和经费等条件,采取有效措施保障委员会独立开展工作。鼓励有资质的相关单位开展人工智能科技伦理管理体系相关认证。《伦理办法》的附件明确了需要开展科技伦理专家复核的人工智能科技活动清单:一、对人类主观行为、心理情绪和生命健康等具有较强影响的人机融合系统的研发;二、具有舆论社会动员能力和社会意识引导能力的算法模型、应用程序及系统的研发;三、面向存在安全、人身健康风险等场景的具有高度自主能力的自动化决策系统的研发。

(本刊编辑部根据工业和信息化部官网文件编辑整理)