

黄静, 蔡姝崑, 高屹. 真空膜蒸馏海水淡化工程应用中饮用水水质健康性分析[J]. 净水技术, 2025, 44(8): 148–153.

HUANG J, CAI S W, GAO Y. Analysis of drinking water health in application of vacuum membrane distillation in seawater desalination project [J]. Water Purification Technology, 2025, 44(8): 148–153.

真空膜蒸馏海水淡化工程应用中饮用水水质健康性分析

黄 静¹, 蔡姝崑^{2,*}, 高 屹¹

(1. 中国人民解放军海军勤务学院海防工程系, 天津 300450; 2. 中国人民解放军海军勤务学院基础部, 天津 300450)

摘 要 【目的】 在全球淡水资源日益短缺的今天, 海水淡化技术逐渐成为破解这一难题的重要途径, 其中, 真空膜蒸馏技术作为一种重要的海水淡化技术, 具有非常广阔的应用前景, 随着人们健康意识的不断增强, 对饮用水品质的要求也不断提高, 海水淡化水的水质也逐渐引起人们的关注。【方法】 该研究利用新型海水淡化装置, 通过真空膜蒸馏技术对三亚市的海水进行淡化, 将得到的淡化水采用直接投加药剂法进行矿化处理, 以改善水的口感并增加有益于人体健康的矿物质元素。重点从感官性状和一般化学指标方面对矿化水进行水质分析, 并与当地反渗透技术得到的纯净水进行对比。【结果】 该矿化水各项指标都符合国家相关标准, 不仅保证了水质的稳定性, 也符合人们对矿物质的合理需求, 总溶解性固体质量浓度为 248 mg/L, 硬度质量浓度为 130 mg/L, 微量元素尤其是硼元素的质量浓度仅为 0.018 mg/L, 科学合理; 钠离子、钾离子、氯化物、硫酸盐、土霉素和 2-甲基异莰醇等影响饮用水口感和舒适度的指标也都在合理范围内, 矿化水口感甘甜、无异味, 可以作为直饮水长期饮用。【结论】 该研究可为直饮水标准的制定提供一定的依据与参考, 也为偏远岛屿居民提供便捷、健康的优质饮用水提供了解决方案, 对推动海水淡化技术的普及应用具有重要的现实意义。

关键词 真空膜蒸馏技术 海水淡化 矿化水 矿化处理 直饮水

中图分类号: X703 文献标志码: A 文章编号: 1009-0177(2025)08-0148-06

DOI: 10.15890/j.cnki.jsjs.2025.08.019

Analysis of Drinking Water Health in Application of Vacuum Membrane Distillation in Seawater Desalination Project

HUANG Jing¹, CAI Shuwei^{2,*}, GAO Yi¹

(1. Department of Coastal Defense Engineering, Naval Logistics, Academy, Tianjin 300450, China;

2. Basic Department of the Naval Logistics, Academy, Tianjin 300450, China)

Abstract [Objective] In the face of the global shortage of fresh water resources, seawater desalination technology is becoming an important solution to solve the challenge. Among these technologies, vacuum membrane distillation technology is one of the seawater desalination technologies, which has broad application prospect. As public health awareness grows, the demand for high-quality drinking water has increased, and the quality of desalinated seawater has gained more attention. [Methods] The research desalinated the seawater in Sanya via vacuum membrane distillation technology, which using novel seawater desalination device. The desalinated seawater was mineralized by direct additive method to improve the taste of the water and increase the mineral elements beneficial to human health and carried out analysis from the aspects of sensory trait and general chemical index as well as compared with the local pure water obtained by reverse osmosis technology. [Results] All indices of the mineralized water met the relevant national standards, which not only ensures the stability of water quality, but also met people's reasonable demand for minerals, the total dissolved solid content of 248 mg/L and a hardness of 130 mg/L, and the scientific and reasonable content of trace elements, especially boron, is only 0.018 mg/L. Sodium ion, potassium ion, chloride, sulfate, oxytetracycline and 2-methyl iso-camphanol, which affected the taste and comfort of drinking water, were also within a reasonable range. Mineralized water is sweet and odorless,

[收稿日期] 2024-07-25

[基金项目] 国家部委资助重点科研计划(BHJ16C006)

[作者简介] 黄静(1978—), 女, 副教授, 主要从事岛礁海水淡化技术及相应的生态环境保护工作, E-mail: huangjing197816@sina.com。

[通信作者] 蔡姝崑, 女, 讲师, E-mail: shuweicai2018@126.com。

and can be used as drinking water for a long time. [**Conclusion**] This study can provide some references for the formulation of drinking water standard, and also make a contribution to the provision of convenient, healthy and high-quality drinking water for the residents of remote islands, it is of great practical significance to promote the popularization and application of seawater desalination technology.

Keywords vacuum membrane distillation technology seawater desalination mineralized water mineralization treatment direct drinking water

面对淡水资源的短缺,海水淡化技术成为解决这一难题的有效方法之一。世界卫生组织(WHO)提出彻底脱盐的水必须矿化后方能用于人类饮用,因此,人们开始对淡化水进行矿化处理研究,常见的矿化处理工艺包括与其他水源掺杂法、溶解矿石法、直接投加药剂法。目前,得到的矿化水虽然符合《生活饮用水卫生标准》(GB 5749—2022)的要求,但是对于水质究竟如何,长期饮用是否会对人体的健康产生负面影响的研究则鲜有涉及。本文根据目前饮用水的相关研究与标准,结合实验室中的理论研究及工程中的实际应用,分析通过真空膜蒸馏技术得到的矿化水作为偏远岛屿居民长期饮用水的可行性,并与目前主流的反渗透技术进行比较,以期与健康直饮水产业的发展作出一定的贡献。

1 真空膜蒸馏技术

传统的海水淡化方法有热法和膜法两大类。近年来,膜蒸馏技术作为膜分离技术与传统蒸发过程相结合的新型膜分离工艺,具有分离效率高、膜孔不易堵塞、操作条件温和等优点^[1]。疏水膜是膜蒸馏的核心元件,它只允许水蒸气分子通过,由于膜的一侧与待处理的热溶液接触,另一侧直接或间接地与冷的液体接触,这样膜两侧就会产生温度差,温度差所引起的传递组分的蒸汽压力差就成为了膜蒸馏的传质驱动力。在此驱动力的作用下,水蒸气分子通过疏水膜在冷凝侧冷凝,而其他组分则被疏水膜阻挡在热侧。所以在膜蒸馏中不仅存在传质过程还存在传热过程,两者同时发生,相互影响。以盐水为例,溶液加热后,其中的挥发性组分水分子与疏水膜接触后,在膜表面汽化,水蒸气通过膜孔在另一侧冷凝成淡化水,这是传质。相应地,热量从盐水以热对流的方式传递到疏水膜的边界层,水在膜面吸收热量后汽化成水蒸气,热量也从膜的热侧传递到冷侧表面,水蒸气在膜的冷侧冷凝,放出冷凝热。这一过程中存在汽化潜热,当这一部分的热量得到有效利用时,可以显著降低膜蒸馏的热能耗。根据在冷凝

侧收集水蒸气的方式,可将膜蒸馏技术分为直接接触膜蒸馏、气隙式膜蒸馏、气扫式膜蒸馏和真空膜蒸馏4类,其中真空膜蒸馏技术是利用冷凝侧的真空系统提供更大的压差,从而具有膜通量高、运行温度和操作压力低等优势^[2]。

传统的海水淡化技术或因成本高难以推广,或因杂质多不适合饮用。本文的新型海水淡化装置利用太阳能作为能源供应,在降低制水成本的同时提高了产水效率,所得矿化水水质达到国家《生活饮用水卫生标准》(GB 5749—2022),口感甘甜,成功实现了为我国沿海偏远岛屿居民提供健康直饮水的目标,极大地缓解了居民的饮用水压力。该装置搭载的净化装置具有占地面积小、灵活性强,以及便于安装的特点,在管道连接畅通的情况下,可以根据实际需求灵活调整安装的位置,还可以根据用水量的需求灵活增减相同的设备。目前,该装置已投入实际工程应用一年多,运行稳定,所采集的水质数据有效性高、真实可靠。

研究团队^[3-5]前期对真空膜蒸馏技术的工艺条件以及淡化水后期的矿化处理进行了实验室内的相关研究,并在工程实际中进行应用,采用投加 CaCl_2 和 NaHCO_3 组合药剂的方法得到了本文所用的矿化水。

2 淡化水与三亚生活卫生饮用水水质对比性分析

海水淡化水指海水经脱盐处理后的水,为低矿化度水。表1为真空膜蒸馏装置得到的海水淡化水与三亚市管网末梢水在感官性状和一般化学指标方面的对比。淡化水达到《生活饮用水卫生标准》(GB 5749—2022)的要求,但水中缺乏人体必要的微量元素,总硬度质量浓度仅为 1.8 mg/L ,属于极软水,长期饮用这种低矿化度的水容易引发心血管疾病和骨质疏松的发生,不利于人体健康^[6-7],必须进行进一步的矿化处理。三亚市3个供水水厂均采用次氯酸钠消毒的方式,次氯酸钠消毒可能增加水

中的氯酸盐、次氯酸盐和溴酸盐等无机物副产物,对人体产生不良影响,必须烧开后饮用,而淡化水在生产过程中无需添加消毒剂,不含有毒物质,保证了直接饮用的安全性。

表 1 海水淡化水与三亚市管网末梢水在感官性状和一般化学指标方面的对比
Tab. 1 Comparison of Sensory Properties and General Chemical Indices between Water Qualities of Seawater Desalination and Pipelines Network End in Sanya

类型	色度(铂 钴色度单 位)/度	浑浊度(散 射浑浊度 单位)/NTU	臭和味	肉眼 可见物	pH 值	铁/ ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	锌/ ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	氯化物/ ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	硫酸盐/ ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	溶解性 总固体/ ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	总硬度(以 CaCO_3 计)/ ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)
《生活饮用水卫生标准》(GB 5749—2022)	15	1	无异味、 异臭	无	6.5~8.5	0.3	1.0	250	250	1 000	450
海水淡化水	5 *	0.5 *	无异味、 异臭	无	6.75	0.004 5 *	0.001 *	1.5 *	5 *	2.4	1.8
当地生活卫生 饮用水	<5	0.124	无异味 无异味	无	7.24	<0.05	<0.05	10.54	3.97	81.9	37.0

注:标 * 的结果表示该项目未检出,数值为检出限。

3 矿化水水质指标与健康性分析

《低矿化度饮用水矿化卫生标准》(GJB 1335—92)中给出了饮用水硬度的适宜质量浓度为 100~200 mg/L ;Fox 在《健康的水》^[8]中提出,饮用水硬度的理想值是 170 mg/L 左右,溶解性总固体的理想值是 300 mg/L ;WHO 专著中给出了饮用水中镁的最低水平为 10 mg/L ,最佳值为 20~30 mg/L ,钙的最低水平为 20 mg/L ,最佳值为 40~80 mg/L ,水的总硬度(以钙、镁总和计)应为 2~4 mmol/L ,溶解性总固体的最佳值为 250~500 mg/L ^[9]。

以《生活饮用水卫生标准》(GB 5749—2022)、海口市《生活饮用水水质标准》(DB4601/T 3—2021)、《饮用净水水质标准》(CJ 94—2005)、《低矿化度饮用水矿化卫生标准》(GJB 1335—92)、《天津市管道直饮水工程技术标准》(DB 29-104—2010)以及上述提及的矿化水各项合理指标为参考,重点从感官性状和一般化学指标方面分析矿化水水质的合理性。

由表 2 可知,矿化水的 pH 值为 7.42,呈弱碱性。水的 pH 过低会对管道产生一定的腐蚀性且水质可能出现金属味,pH 过高会使水有滑腻感和异味,喝起来更像是苏打水,口感不佳;水中的钠离子含量高则水的口感偏咸,反之则偏甜,高浓度的钾离子可能会导致水有轻微的苦咸味,矿化水中钠离子和钾离子的质量浓度分别为 35.6 mg/L 和 6.96 mg/L ,都在合理的浓度范围内;矿化水中氯化物质量浓度为 75.5 mg/L ,硫酸盐质量浓度为 55 mg/L ,水中的氯化物含量与水的口感有关,当水中氯化物

的含量过高时,会与水中的阳离子发生化学反应,使水的口感发生变化,当水的咸味过重时就无法当作饮用水饮用,当水中的硫酸盐含量过高时,不仅会与其他污染物反应形成沉淀,影响水质的浑浊度,还会造成水的口感发苦。因此,《饮用净水水质标准》(CJ 94—2005)、海口市《生活饮用水水质标准》(DB4601/T 3—2021)和《低矿化度饮用水矿化卫生标准》(GJB 1335—92)在氯化物和硫酸盐方面做了更加严格的要求。上述指标说明了直饮水要更加注重在人体感官上的可接受度。相比于淡化水的溶解性总固体和总硬度,矿化水中的溶解性总固体和总硬度得到了极大的提升,分别是 248 mg/L 和 130 mg/L 。溶解性总固体表示 1 L 水中全部溶质的毫克,包括无机物和有机物的含量,主要指钙离子、镁离子、钠离子、钾离子、氯离子、硫酸根、碳酸根等。一般来说,总溶解性固体值越小,代表水中的含盐量越少,说明水的纯净度越高,当然并不是说水的纯净度越高越好,缺少钙镁离子等对人体有益的矿物质元素反而不利于人体健康。还要结合水的总硬度来看水质,水的总硬度是指水中钙镁离子的总浓度,它与我们的健康关系密切,高硬度的水容易产生苦涩味道,长期饮用可能导致肾结石的发病率升高,但是长期饮用硬度过低的水也容易引发一些心血管疾病,因此,水的硬度应适中。综合这两方面对人体健康的影响,可以进一步证明淡化水必须进行矿化处理。本矿化水的溶解性总固体和总硬度指标符合《低矿化度饮用水矿化卫生标准》(GJB 1335—92)的标准,与 WHO 专著中给出的参考值基本接近,但

低于 Fox 在《健康的水》^[8]中提及的理想值,结合矿化水中钙镁离子的实际含量与《低矿化度饮用水矿化卫生标准》和 WHO 发布的《饮用水水质准则》^[9]中镁的最佳范围,在后续矿化处理中,可以适当增加含镁物质的投加量以提高水的硬度。

《生活饮用水卫生标准》(GB 5749—2022)增加了土臭素和 2-甲基异莰醇指标,这 2 种物质是水中腥味的主要来源,尤其是三亚的高温季节,海水中藻类繁殖比较旺盛,蓝藻、硅藻和放线菌的代谢会产生

土臭素和 2-甲基异莰醇,使水体的腥味有所增加,但是这 2 种物质本身对人体没有明显的危害,主要影响饮用水的口感。对于海水淡化水而言,要想达到直饮水的标准,不仅要满足健康的基本要求,还要注重口感和舒适度。

膜蒸馏技术的工艺特点决定了其矿化水的水质指标一般都优于《生活饮用水卫生标准》(GB 5749—2022),除了感官性状和一般化学指标,矿化水的微生物指标和毒理指标也都低于标准限值。

表 2 矿化水与水质标准中感官性状和一般化学指标对比
Tab. 2 Comparison of Sensory Properties and General Chemical Indices in Mineralized Water and Water Quality Standard Indices

指标	GB 5749— 2022	DB4601/T 3—2021	CJ 94— 2005	GJB 1335— 92	DB 29—104— 2010	理想 的水	矿化水
色度(铂钴色度单位)/度	15	10	5	/	5	/	/
浑浊度(散射浑浊度单位)/NTU	1	0.5	0.5	/	0.1	/	/
臭和味	无异臭、异味	无异臭、异味	无异臭、异味	/	无异臭、无异味	/	无异臭、无异味
肉眼可见物	无	无	无	/	无	/	无
pH 值	6.5~8.5	6.5~8.5	6.0~8.5	7.0~8.5	6.0~8.5	/	7.42
铝/(mg·L ⁻¹)	0.2	0.2	0.2	/	0.2	/	/
铁/(mg·L ⁻¹)	0.3	0.2	0.2	/	0.1	/	/
锰/(mg·L ⁻¹)	0.1	0.05	0.05	/	0.02	/	/
铜/(mg·L ⁻¹)	1.0	1.0	1.0	/	1.0	/	/
锌/(mg·L ⁻¹)	1.0	1.0	1.0	/	1.0	/	/
氯化物/(mg·L ⁻¹)	250	250	100	50~100	100	/	75.5
硫酸盐/(mg·L ⁻¹)	250	250	100	30~100	100	/	55
总溶解性固体/(mg·L ⁻¹)	1 000	500	500	200~500	300	300	248
总硬度(以 CaCO ₃ 计)/(mg·L ⁻¹)	450	250	300	100~200	200	170	130
高锰酸盐指数(以 O ₂ 计)/(mg·L ⁻¹)	3	3	/	/	/	/	/
氨(以 N 计)/(mg·L ⁻¹)	0.5	0.5	/	/	/	/	/
钠/(mg·L ⁻¹)	200	/	/	20~100	/	/	35.6
钾/(mg·L ⁻¹)	/	/	/	5~10	/	/	6.96
钙/(mg·L ⁻¹)	/	/	/	20~50	/	/	41.3
镁/(mg·L ⁻¹)	/	/	/	10~20	/	/	12.8
重碳酸盐/(mg·L ⁻¹)	/	/	/	50~150	/	/	69

注:“/”表示该水质指标在标准中未作明确规定。

4 与反渗透技术的对比

反渗透技术是目前获得直饮水的主要技术,三亚 6 个景区已开展反渗透直饮水试点工作,取得了很好的反馈,但是反渗透技术得到的纯净水几乎不

含人体所需的矿物质,长期饮用容易引起人体内电解质紊乱、增加患结石性疾病的风险以及增加抑郁倾向^[10]。虽然可以通过增加矿物质填料层的方法,增加反渗透水中的矿物质含量,但需要定期更换填

料层,并且反渗透膜也需要定期更换以保证出水水质。同时,反渗透对海水的水质要求较高,需要严格的预处理,这些使反渗透技术成本增加,以目前三亚市反渗透海水淡化装置为例,其运行成本为4~6元/t,而真空膜蒸馏海水淡化装置因全部采用太阳能加热,极大地降低了运维成本。真空膜蒸馏技术在成本上有一定的优势。蒸馏法海水淡化技术主要包括低温多效和多级闪蒸技术,其生产的淡水纯度很高,但是仍会有一些离子残留。

硼元素是人体可能的4种必需微量元素之一,主要参与矿物质、维生素D、蛋白质、葡萄糖等的代谢过程以及红血球和血细胞的生成,对人体保持正常的骨密度有积极作用,长期饮用含硼量高的水可

能对人体的健康产生消极影响,甚至导致人体中毒^[11]。三亚市海水中硼离子的质量浓度在5 mg/L左右,一级反渗透脱硼率在85%左右,按照《生活饮用水卫生标准》(GB 5749—2006)中对硼离子的要求(<0.5 mg/L)需要进行二级反渗透水质才能合格,虽然《生活饮用水卫生标准》(GB 5749—2022)对硼离子的极限值放宽,但是在实际工程中,大家的接受度并不高,且长期饮用含硼量高的水对人体健康性的影响依然不容忽视。通过表3的对比可知,矿化水硼质量浓度仅为0.018 mg/L,而反渗透纯净水经过二级反渗透后的硼含量依然高于矿化水,常规蒸馏产水中硼离子含量虽然也较低,但它属于极软水,不适宜长期饮用。

表3 矿化水与反渗透淡化水感官性状和一般化学指标对比

Tab. 3 Comparison of Sensory Properties and General Chemical Indices of Mineralized Water and RO Desalinated Water

直饮水类型	pH 值	氯化物/ (mg·L ⁻¹)	硫酸盐/ (mg·L ⁻¹)	溶解性 总固体/ (mg·L ⁻¹)	总硬度(以 CaCO ₃ 计)/ (mg·L ⁻¹)	硼/ (mg·L ⁻¹)	钾/ (mg·L ⁻¹)	钠/ (mg·L ⁻¹)	钙/ (mg·L ⁻¹)	镁/ (mg·L ⁻¹)
真空膜蒸馏矿化水	7.42	75.5	55	248	130	0.018	6.96	35.6	41.3	12.8
反渗透纯净水	8.17	6.0	<5	14	<1.0	0.112	/	/	/	/
常规蒸馏产水	6.7	0.73	0.15	<10	1.02	<0.020	/	0.42	/	/

注:“/”表示该水质指标未被检测。

5 结论

本文利用团队已有研究成果,分析真空膜蒸馏装置生产的矿化水作为偏远岛屿居民健康直饮水长期饮用的可行性,并与当地的反渗透海水淡化技术进行对比,主要有以下几点结论。

(1)淡化水作为低矿化度水,水中钙镁离子等有益元素含量低且水质过软,需要通过矿化处理后才能长期饮用。

(2)真空膜蒸馏技术具有运维成本低、生产过程中无需添加消毒剂的优势,并且得到的矿化水硬度适中,矿物质元素,尤其是硼离子含量合理,可以作为直饮水长期饮用。

(3)矿化水在满足健康的前提下,关注钠离子、钾离子、氯化物、硫酸盐、土臭素和2-甲基异莰醇等影响饮用水口感和舒适度的指标,且这些指标都在合理范围内,进一步证明了该矿化水的安全性和舒适性。

同时,建议相关权威部门尽快建立适用于健康直饮水的水质卫生标准,并给出相关指标的下限值;针对特定地区、特定工作性质的人群提供个性化的饮水方案和健康直饮水。

参考文献

- [1] 王众众,刘宇坚,胡永键,等. 国内膜蒸馏技术研究应用进展[J]. 中国设备工程, 2016(12): 112-115.
WANG Z Z, LIU Y J, HU Y J, et al. Research and application progress of membrane distillation technology in China[J]. China Plant Engineering, 2016(12): 112-115.
- [2] 邹士洋,张建平,伍俊荣,等. 真空膜蒸馏海水淡化技术研究进展分析[J]. 净水技术, 2021, 40(3): 106-110.
ZOU S Y, ZHANG J P, WU J R, et al. Analysis of development in seawater desalination based on vacuum membrane distillation [J]. Water Purification Technology, 2021, 40(3): 106-110.
- [3] 黄静,蔡姝崑,高屹,等. 操作条件对真空膜蒸馏过程影响的实验及模拟研究[J]. 水处理技术, 2023, 49(9): 44-47.
HUANG J, CAI S W, GAO Y, et al. Experiment and numerical simulation study on effect of operating condition in vacuum membrane distillation process [J]. Technology of Water Treatment, 2023, 49(9): 44-47.
- [4] HUANG J, CAI S W, ZHANG X C, et al. Study on the technology of vacuum membrane distillation for desalination [M]// DOMENICO L, WANG K. Advances in materials science and engineering. Changsha: CRC Press, 2022: 455-462.
- [5] 黄静,蔡姝崑,王付杉. CaCl₂ 和 NaHCO₃ 对海水淡化水矿

- 化处理效果的影响及最佳浓度分析[J]. 净水技术, 2022, 41(7): 131-137.
- HUANG J, CAI S W, WANG F S. Effect of CaCl_2 and NaHCO_3 on mineralization treatment of desalinated seawater and analysis of optimum concentration [J]. Water Purification Technology, 2022, 41(7): 131-137.
- [6] 葛云红, 李炎, 安子韩, 等. 海水淡化水可饮用性分析[J]. 盐科学与化工, 2021, 50(2): 49-52.
- GE Y H, LI Y, AN Z R, et al. Analysis on the drinkability of seawater desalination water [J]. Journal of Salt Science and Chemical Industry, 2021, 50(2): 49-52.
- [7] 高文海, 张彦菊, 程欣欣, 等. 饮用水硬度详述及其对口感健康影响分析[J]. 食品工业, 2023, 44(6): 148-152.
- GAO W H, ZHANG Y J, CHENG X X, et al. Cognitive understanding of drinking water hardness and analysis of its health effects[J]. Food Industry, 2023, 44(6): 148-152.
- [8] Martin Fox. 健康的水[M]. 罗敏, 周蓉, 译. 北京: 中国建筑工业出版社, 2001.
- FOX M. Healthy water [M]. LUO M, ZHOU R, translated. Beijing: China Architecture and Building Press, 2011.
- [9] 世界卫生组织. 饮用水水质准则[M]. 4 版. 上海供水调度监测中心, 上海交通大学, 译. 上海: 上海交通大学出版社, 2021.
- World Health Organization. Guidelines for drinking-water quality [R]. 4th ed. Shanghai Water Supply Dispatching and Monitoring Center, Shanghai Jiao Tong University, translated. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University Press, 2021.
- [10] 舒为群. 反渗透技术冲击下军队给水卫生工作的思考[J]. 第三军医大学学报, 2019, 41(19): 1840-1845.
- SHU W Q. Thinking on military water sanitation under the impact of reverse osmosis technology [J]. Acta Academiae Medicinae Militaris Tertiae, 2019, 41(19): 1840-1845.
- [11] 赵同国. 渐进冷冻-融化法除硼及海水淡化的研究[D]. 烟台: 烟台大学, 2022.
- ZHAO T G. Progressive freezing-thawing method for boron removal and seawater desalination [D]. Yantai: Yantai University, 2022.

(上接第 121 页)

- QIU H. Study on advanced removal of typical organics in secondary effluent from the chemical industry park by catalytic ozonation coagulation process [D]. Nanjing: Nanjing University, 2022.
- [17] 周彦宏, 王丹, 李珊珊, 等. 应用明亮发光杆菌检测联合毒性的研究进展[J]. 环境科学与技术, 2022, 45(8): 117-131.
- ZHOU Y H, WANG D, LI S S, et al. Advances in the application of Photobacterium phosphoreum on joint toxicity detection[J]. Environmental Science & Technology, 2022, 45(8): 117-131.
- [18] 杨臣强, 杨瑞, 于玉洁, 等. 基于三维荧光光谱-平行因子分析及紫外-可见吸收光谱对制药污水不同处理工艺单元溶解性有机物特征分析[J]. 环境工程学报, 2023, 17(10): 3444-3453.
- YANG C Q, YANG R, YU Y J, et al. Characterization of dissolved organic matter in pharmaceutical wastewater treatment process units based on three-dimensional fluorescence spectroscopy-parallel factor analysis and ultraviolet-visible absorption spectroscopy [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2023, 17(10): 3444-3453.
- [19] HANSON B, WÜNSCH U, BUCKLEY S, et al. DOM molecular weight fractionation and fluorescence quantum yield assessment using a coupled in-line sec optical property system [J]. ACS ES&T Water, 2022, 2(12): 2491-2501.
- [20] 周合喜, 罗华瑞, 李华伟, 等. 化工园区废水处理过程中溶解性有机物变化特征[J]. 中国给水排水, 2022, 38(23): 80-87.
- ZHOU H X, LUO H R, LI H W, et al. Variation characteristics of dissolved organic matter in wastewater treatment process of chemical industrial park [J]. China Water & Wastewater, 2022, 38(23): 80-87.