

海水淡化浓盐水排海的环境影响与对策

齐延民^{1,2}, 刘 昕¹, 王立明^{1,2}, 孙 珊^{1,2}

(1. 山东省海洋资源与环境研究院, 山东烟台 264006;

2. 山东省海洋生态修复重点实验室, 山东烟台 264006)

[摘要] 目前虽未见海水淡化工程对其所在海域的生态环境造成严重破坏的相关报道,但由于浓盐水具有高盐度、高温的特点,且含有铝、重金属和杀菌剂余氯,会明显抑制部分浮游动植物的生长;而在浓盐水排放的相关海域中,鱼类丰度和物种丰富度有所提高。因此,需要进一步研究浓盐水排放对海洋生态环境的影响。综述了国内外海水淡化产生的浓盐水的排放现状和管理要求,重点分析了海水淡化工程浓盐水排放对海洋生态环境造成的影响,并提出减缓影响的相应对策与建议。通过梳理现有排放方式,发现通过优化浓盐水排放口设计,采用混合排放技术、综合利用与零排放技术等相应措施,可进一步减缓浓盐水排海的影响范围和程度。随着海水淡化产能的增加,建议在海水淡化工程取排水海域开展生态环境常规监测,以加强对海水淡化排放浓盐水的监测评估,对海水淡化管理的相关政策和标准进行研究和分析,以促进海水淡化产业健康、可持续发展。

[关键词] 海水淡化;浓盐水;海洋生态环境;影响分析

[中图分类号] P747;X55 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1005-829X(2023)04-0022-06

Effects and countermeasures of desalination concentrated brine discharge on ecological environment

QI Yanmin^{1,2}, LIU Xin¹, WANG Liming^{1,2}, SUN Shan^{1,2}

(1. *Shandong Marine Resource and Environment Research Institute, Yantai 264006, China;*

2. *Shandong Key Lab of Marine Ecological Restoration, Yantai 264006, China*)

Abstract: There are no reports of desalination projects causing serious damage to the ecological environment of the sea, but because of the high salinity and high temperature of concentrated brine, and the presence of aluminum, heavy metals and residual chlorine, it will significantly inhibit the growth of some phytoplankton. Fish abundance and species richness increased in the sea areas associated with concentrated brine discharge. Therefore, the impact of concentrated brine discharge on the marine ecosystem needs further study. The current situation and management requirements of concentrated brine discharge at home and abroad were summarized, the impact of desalination brine discharge on marine ecological environment was analyzed, and corresponding suggestions to mitigate the impact were proposed. By combing through the existing discharge methods, it was found that by optimizing the design of concentrated brine discharge port, adopting the corresponding measures such as mixed discharge technology, comprehensive utilization and zero discharge technology, the influence range and extent of concentrated brine discharge could be further reduced. With the increase of desalination capacity, it is recommended to carry out routine monitoring of ecological environment in the sea area, in order to strengthen the monitoring and assessment of the concentrated brine discharged from desalination, and to analyze the relevant policies and standards for the desalination management, so as to promote the sustainable development of desalination industry.

Key words: seawater desalination; brine; marine ecological environment; influence analysis

海水淡化工程因产品水质优良,可作为淡水资源的补充,成为解决我国沿海地区淡水短缺问题的重要方法,在部分海岛地区甚至是唯一有效的方法,近年来快速发展。我国海水淡化已建成项目分布在淡水资源短缺的城市和海岛,产品大多用作工业用水及海岛地区生活用水,小部分汇入城市市政管网。山东作为沿海缺水省份,人均淡水占有率不足全国的1/6,因此,大力发展海水淡化工程可很大程度缓解工业生产、居民生活等方面的用水紧张问题。截至2020年底,全国有海水淡化工程135个,已有规模超过165万t/d,其中山东省已有规模为37.1万t/d,当年新建规模约4.6万t/d,居全国首位^[1];至2021年11月,山东省已建成海水淡化工程41个,产能达45.09万t/d。随着海水淡化产能的快速增加,以及国家对新兴产业绿色可持续发展的要求,浓盐水排放越来越受到关注,其对海洋环境的影响研究也成为一个新课题。笔者对海水淡化浓盐水排海的生态环境影响进行了综述,并提出合理的对策方法,以期海水淡化产业的可持续发展提供一定参考。

1 国内外浓盐水排放现状和管理要求

1.1 国外浓盐水排放状况与管理

目前全球在营的海水淡化项目中,中东海湾国家和北非地区贡献了近六成产能^[2],其中大多数国家将产生的浓盐水直接排入海洋,近50%的浓盐水排入距海岸线1 km海域,近80%的浓盐水排入距海岸线10 km海域^[3]。目前暂无浓盐水排入海造成重大环境破坏的报道。位于阿联酋的海水淡化项目——阿布扎比塔维勒海水淡化项目产生的浓盐水进行了直接排放,并未造成污染^[4]。

在浓盐水排放管理方面,仅有部分国家和地区对浓盐水实行排放许可制度,提出了针对浓盐水排放影响范围、盐度等指标的具体规定。澳大利亚要求“排放口50 m范围内盐度增加值应 $<1.2 \times 10^{-12}$,扩散1 000 m后增加值应在 0.8×10^{-12} 之内”^[5];在海水淡化工程开建前应进行严格的环境影响评价,规划减小环境影响的措施,以保护海洋环境和海洋生物多样性^[6]。以色列具有全球领先的海水淡化技术和企业,通过保护沿海环境法、防止陆源污染海洋法等多项法律法规文件对浓盐水的直排作出规定,如:在海水淡化项目建造前,相关企业应使用最佳技术设

计排放方案,准备排污口环境监测计划和排放物成分分析的预案;依照排放许可证进行排放,详细规定浓盐水排放条件,建议在排污口安装扩散装置,鼓励深海排放,指导排污口位置和排放管线设计等,以规范海水淡化项目的立项和营运期间的排放,促进该行业的绿色高质量发展。美国先后颁布了联邦、州、地方等各级法律,规定海水淡化企业产生的浓盐水要在深海或较大环流海域进行排放,且需在排放口安装扩散器或采取其他措施进行稀释,如需在地表排放,必须取得“国家污染物排放消除体系”(NPDES)颁发的许可证。

1.2 国内浓盐水排放状况与管理

目前我国的海水淡化产业正处在快速发展阶段,国家相继出台《环境保护法》《海洋环境保护法》《防治海洋工程建设项目污染损害海洋环境管理条例》等多部法律法规,要求加强对海洋环境的保护,防治和减轻海洋工程建设项目污染损害海洋环境。按照《全国海洋功能区划(2011—2020年)》^[7]分析海水淡化用海与各个功能区的兼容性(见表1),除工业与城镇建设区外,海水淡化浓盐水的排放对港口航运区和矿产与能源区等特定区域的影响也是可以耐受的;《海水淡化浓盐水排放要求》(HY/T 0289—2020)以行业标准的形式规定了海水淡化装置排放浓盐水的一般规定、水质要求、检测方法、取样与监测频率,规定浓盐水排放口应安装排放装置以加快浓盐水的稀释与扩散,建议浓盐水与冷却海水、达到排放标准的污水等混合排放,确定浓盐水排放水质要求^[8]。建有海水淡化工程的城市,则以地方法规的形式对浓盐水排放作出要求,如青岛市要求胶州湾附近海域的海水淡化浓盐水在海水交换良好的海域离岸达标排放,也可稀释后近岸排放,但稀释后的盐度不得超过胶州湾海水盐度^[9]。

表1 海水淡化用海与海洋功能区的符合性和兼容性

Table 1 Conformity and compatibility of seawater for desalination and marine functional areas

| 海洋功能区 | 符合性/兼容性 |
|----------|-------------------------|
| 农渔业区 | 不兼容 |
| 港口航运区 | 兼容 |
| 工业与城镇建设区 | 符合 |
| 矿产与能源区 | 兼容 |
| 旅游娱乐区 | 不兼容 |
| 海洋保护区 | 不兼容 |
| 特殊利用区 | 与军事区不兼容; 与其他特殊利用区相兼容 |
| 保留区 | 不兼容 |

2 浓盐水排放对生态环境的影响

2.1 不同工艺产生浓盐水的特点

海水淡化工工艺主要分为膜法和热法,分别利用了反渗透与电渗析原理和蒸发原理。我国海水淡化工程中使用较多的是膜法的反渗透技术和热法的低温多效蒸馏技术。这两种技术的产能占全国产能的九成以上,部分海水淡化工程因地制宜地采用热法的多级闪蒸技术^[1]。当海水淡化工程使用热法工艺进行生产时,需要利用热交换系统对原料海水进行加热,产生的浓盐水除盐度高以外,温度也较高,其中多级闪蒸工艺会产生温度为70~90℃的浓盐水^[10],低温多效蒸发工艺则产生温度为40℃^[11]的浓盐水;此外,铜合金、铝合金等材质的传热管容易受到腐蚀,目前海水淡化项目中管阀、水泵等大量使用常见的奥氏体不锈钢,在海水中容易发生锈蚀^[12],导致排放水中含有铝及铜、镍、铁等重金属离子。使用膜法时需要对原料海水进行预处理,不需要加热,故浓盐水与原料海水温差不大,主要特点为盐度增加,及含有预处理过程中添加的试剂及反应副产物。

2.2 浓盐水对海水环境的影响

在使用热法进行海水淡化的过程中,产生的浓盐水会显著提高排放口附近海域的海水温度,从而造成一定的热污染。此外,海水温度上升将影响水中氧的溶解度,导致海水出现低氧甚至缺氧现象,间接对海洋环境产生不利影响。澳大利亚珀斯团队实时监测的结果表明,对于利用反渗透工艺的海水淡化厂,其排放的浓盐水对溶解氧无明显影响^[6]。

目前海水淡化技术的淡水产率仍不高,膜法约为30%~40%,热法约为15%~50%^[13],排放的浓盐水盐度约为原料海水的1.3~1.7倍。半封闭型海湾的水体交换能力较差,直接排放浓盐水会造成排放口附近海域盐度升高且分布不均^[14],一定程度上影响海洋生态环境。

热法海水淡化排放的浓盐水中含有铝、铜、镍、铁等重金属离子,对海洋环境会产生不利影响。其中铜对海洋环境的影响引起了广泛关注^[15]。J. W. OLDFIELD等^[16]对海水淡化排放的浓盐水进行监测,发现重金属铜的浓度非常高,比天然海水高1~2个数量级,此外,腐蚀产物中含有的锌、铬、钼等金属污染物也会对海洋环境产生不利影响。

2.3 浓盐水对海洋生态的影响

热法造成的热污染可能导致严重的生态破坏,改变海洋生物的生理机能,影响海洋生物繁殖、生长及幼虫孵化能力,改变海洋生态系统的生物多样性^[17]。

有研究发现,海水淡化排放浓盐水的盐度对海洋生物的影响最为直接。海洋原甲藻和塔玛亚历山大藻对盐度非常敏感,属盐度敏感藻种。当盐度达到4.50%时,塔玛亚历山大藻的细胞结构会发生明显变化;当盐度达到5.36%时,中肋骨条藻细胞结构受到破坏,表明浓盐水影响了海洋浮游植物的细胞形态和生长繁殖能力^[18]。王晓萌等^[19]通过实验结合非检测效应模型,计算了浓盐水对胶州湾典型浮游植物的非检测效应浓度,初步将盐度3.71%作为对胶州湾海洋环境具有明显影响的基准值,即盐度>3.71%将对胶州湾典型浮游植物的生长产生明显抑制作用。

铜含量较高的浓盐水排放入海后,铜可与蛋白质结合,从而使浮游植物细胞中的酶失活,限制浮游植物对硝酸盐和硅酸盐的吸收和利用,影响其代谢、生长和繁殖^[20]。同时海水除浊过程加入的铁盐和铝盐絮凝剂可能在浓海水中残留,含量过高时将海洋生物产生毒性效应^[21];铁含量过高可使硅藻数量迅速增加而成为优势种^[22],影响生物群落结构。珀斯团队对浮游幼虫的浓盐水毒性进行测试,结果表明,在初始稀释区边缘,浓盐水稀释率达到9.2:1~15.1:1即可有效保护敏感物种,实际扩散器系统可使浓盐水稀释率达到45:1^[23]。

卷载效应对海洋生物的损害程度与生物体型、种群密度等有关,对浮游动物中桡足类和无节幼虫的伤害较大^[24]。Y. D. RUSO等^[25]调查发现,浓盐水排放口附近海域的底栖生物群落单一,优势种由多毛类、甲壳类和软体类逐渐演变为线虫。金属离子通过扩散、沉积作用被深海生物体吸收,最终在整个食物链中传递。

2.4 浓盐水对生物资源的影响

海水淡化浓盐水排放过程中会形成较快的流速,与天然水体流速差异较大,导致海水压力发生变化,形成卷载效应,导致海水撞击海洋生物的幼体、幼虫、胚胎等,造成其死亡或受伤^[26]。

在海水淡化取水杀菌过程中,会使用液氯、次氯酸钠等试剂。氯是一种强力杀生剂,不仅产生余氯,

还可与海洋中的有机物反应生成氯代副产物,形成有毒且稳定的卤代有机化合物,氧化血红蛋白中的铁离子,破坏鱼类血液还原性酶的酶代谢过程,使鱼鳃组织发生病变,影响鱼类呼吸作用^[27]。

然而,对部分海水淡化项目的一部分实际调查发现,浓盐水排放未对海洋生态产生明显影响,某些项目还可适当提高当地鱼类的丰度和物种丰富度。珀斯团队对排放区大型动物群落与底栖生境进行调查,结果表明,底栖群落的变化同浓盐水排放并无明显相关性,浓盐水未对海洋环境产生显著影响^[6]。B. P. KELAHER等^[28]长期评估了海洋淡化浓盐水排放对鱼群的影响,发现排放口附近的鱼类数量增加了279%,其中包括大量的中上层和底层鱼类。浓盐水排放中止后,鱼类丰度基本恢复到原来的水平,与海水淡化厂开始运作前相比,不再有显著影响。因此,海水淡化在满足日益增长的淡水需求的同时,亦可提高本地鱼类的丰度和物种的丰富度。

3 减少浓盐水排放对环境影响的对策

3.1 优化现有直排工艺

借鉴国外海水淡化工程管理措施及我国海水淡化工程相关经验,可通过对排水设施和排放方式的优化处理,保证排放水的清洁度^[29]。提高浓盐水排海后的稀释扩散速率是减少浓盐水对海洋生态环境影响的有效方法之一^[30]。排放口应尽可能地选择海洋水动力条件较好的开放性海域,避开由岬角等特定地形引起的波浪破碎带和涡流带,以具备充足的混合速率。近年来,国内外多采取在排放口安装扩散器的方式增强浓盐水的稀释扩散。我国相关标准要求,在浓海水排放管道末端50~100 m处采用多端口扩散,扩散位置的水深至少为7 m,起点距低潮线至少200 m^[31];西班牙现行浓盐水排放系统均设计成多端口、潜没式排放^[32],可明显减小对受纳海域和生物群落的影响。同时,排放口与大陆坡之间的角度为30°~45°,也能促进浓盐水排放后的稀释和扩散速率^[33]。

在建有海水淡化工程的工业园区,海水淡化浓盐水与电厂或钢铁厂的冷却水或处理达标的废水进行混合冲稀后排放时^[8],可进一步降低混合废水中各污染元素的浓度,减少排放海域盐升影响。此外

还可根据当地潮汐规律和水动力情况,利用排放口海域海流方向和流速,依靠海水的自净能力,在落潮时进行排放^[34],可迅速降低高温浓盐水的温度和盐度,降低对海洋环境的影响。在水体交换能力差的海域,或者生态功能区、生态环境敏感区和脆弱区等海域,新建海水淡化工程不宜对浓盐水进行直排,可采用船舶运输浓盐水到水体交换能力强的海域进行排放,处理成本约为1.3元/t^[35],此方式具有成本优势且对生态环境压力较小。

3.2 加快零排放技术的研发与实施

现阶段优化的直排工艺虽然是海水淡化后处理中最经济的方法,对海洋环境相对安全,但仍具有潜在影响和不可持续性。加强浓盐水综合利用技术,对海水淡化产生的浓盐水进行再利用与再加工,实现浓盐水零排放,是解决浓盐水排海对生态环境影响的有效途径,可从根本上解决其对海洋生态环境造成的危害。为尽量降低热污染造成的影响,可将海水淡化产业同钢铁、火电等能耗产业相结合,实现废热的回收利用,以节约能源;燃煤电厂生产过程中产生的脱硫废水处理后不会对晒盐造成影响^[36],可连同浓盐水混合作为制盐原料;另外还可将高温浓盐水引入蒸发池,利用太阳能和浓盐余热加快蒸发,提高制盐速率^[37]。浓盐水中不仅含有氯化钠,还含有大量无机盐、稀有元素等,是重要的化工原料,可开发石膏、氢氧化镁、氯化钙等有价值的产品。目前,首钢京唐钢铁、舟山海水淡化等项目已将综合利用技术投入生产,在全国起到示范作用^[38]。山东滨州大力发展海水淡化与综合利用产业,将浓盐水二次利用进行制盐和提溴,拉动盐化工产业发展^[39]。零液体技术将膜分离和制盐相结合,实现对浓盐水全部循环利用,并回收金属和多种物质,未来会成为不可替代的淡化海水后处理工艺^[40]。太阳能光热催动的界面水蒸发过程被认为是最富前景的实现盐水零排放的技术之一。浓盐水零排放技术虽然能有效减小对环境的危害,但其技术的发展受投入成本高、工艺不够成熟、运行费用高等因素的限制,因此,破解相关技术难题和降低成本是其推广的关键。

表2总结了海水淡化产生的浓盐水在温度、盐度、排海物质等方面对排放海域海水环境、海洋生态、生物资源产生的影响及应对措施。

表 2 浓盐水排放影响及对策

Table 2 The impact and countermeasures of desalination concentrated brine discharge

| 影响因素 | 对排放邻近海域的影响 | 应对措施 |
|------|--|--|
| 盐度 | 盐度升高,海域盐度分布不均,浮游动植物和底栖生物群落结构发生改变,渔业资源种类大幅升高 | 提高浓盐水稀释和扩散速率,排放口设置在海洋水动力条件较好的开放性海域,避开波浪破碎带和涡流带,在排放口安装扩散器;采用混合排放技术,可有效降低盐度和温度 |
| 温度 | 水温升高,溶解氧浓度降低,导致海域低氧甚至缺氧,影响海洋生物生存 | |
| 添加剂 | 絮凝剂和消毒剂会产生铁、铝、氯等元素残留,对海洋生物产生毒性,影响其生存 | 采用混合排放技术,使用其他工程排放的冷却淡水进行稀释,降低添加剂和腐蚀产物的浓度;采用水下排放,加大排放口深度和距低潮线距离,可降低排放产生的不利影响;另外加大综合利用和零排放技术的开发与利用,减少浓盐水中铁、铝、氯及重金属含量 |
| 腐蚀产物 | 冷凝管会产生铜、镍、锌、铬、钼等重金属渗析,伴随浓盐水排放到海水中,重金属含量过高产生毒性,对海洋环境带来不利影响 | |
| 其他 | 海洋工程建设会改变排放海域的地形地貌及冲淤环境,浓盐水在排放时会产生较快流速,产生卷载效应,对海洋生物的生长发育产生不利影响 | 海洋工程开建前应开展环境影响评价和环境保护设施的验收,预防、控制或减轻海洋工程对海洋环境的破坏 |

4 结语与展望

整体上,海水淡化浓盐水排海的生态环境影响结论不尽统一,关于浓盐水排放影响的科学机理认识还处于实验室、小范围研究阶段;部分实际调查结果显示,浓盐水的排放未对排放海域的生态环境产生明显影响。浓盐水排放在实际海域中的综合影响尚不明确,主要影响因素需要进一步深入研究。在实际生产中,通过优化浓盐水排放口设计、采用混合排放技术等可进一步降低浓盐水排海的影响范围和程度,而综合利用与零排放技术等相应技术措施,显然更符合公众对生态环境保护和经济生活发展的认知和期望。当前零排放技术在行业发展中存在技术和资金等难题,成功破解此系列难题将成为突破现有发展速度的有效手段。

为促进海水淡化产业健康、可持续发展,建议将海水淡化产业进一步纳入政府相关部门的管理,加强对海水淡化排放浓盐水的监测评估,尽快出台关于海水淡化管理更加细化的相关政策和标准。2021年6月,国家发展改革委、自然资源部印发了《海水淡化利用发展行动计划》(2021—2025年),为海水淡化的发展目标和实施举措提供了新的纲领性文件。相信在不久的将来,我国海水淡化规模目标会逐一实现,标准体系和政策机制会更加完善。

参考文献

[1] 中华人民共和国自然资源部. 2020年全国海水利用报告[R]. 北京:自然资源部,2021.
Ministry of Natural Resources of the People's Republic of China. National seawater utilization report of 2020[R]. Beijing: Ministry of Natural Resources, 2021.

[2] 叶凯. 中东地区海水淡化项目市场分析[J]. 现代营销(信息

版), 2019(7): 170-171.

YE Kai. Market analysis of desalination projects in the Middle East[J]. Marketing Management Review, 2019(7): 170-171.

[3] JONES E, QADIR M, VAN VLIET M T H, et al. The state of desalination and brine production: A global outlook[J]. Science of the Total Environment, 2019, 657: 1343-1356.

[4] 温存. 全球在建最大海水淡化项目正式产出合格饮用水[EB/OL]. (2021-11-23)[2022-06-07]. www.sasac.gov.cn/n2588025/n2588124/c21883050/content.html.

[5] 张静怡, 徐伟, 刘治帅, 等. 我国海水淡化用海管理存在的问题及对策分析[J]. 海洋开发与管理, 2015, 32(8): 29-34.
ZHANG Jingyi, XU Wei, LIU Zhishuai, et al. Problems and countermeasures in the management of desalination in China[J]. Ocean Development and Management, 2015, 32(8): 29-34.

[6] 刘伟, 张铭. 澳大利亚环境友好型海水淡化产业发展分析[J]. 海洋经济, 2015, 5(5): 48-54.
LIU Wei, ZHANG Ming. Analysis on the development of eco-friendly seawater desalination in Australia[J]. Marine Economy, 2015, 5(5): 48-54.

[7] 中华人民共和国自然资源部. 全国海洋功能区划(2011-2020)[R]. 北京: 自然资源部, 2012.
Ministry of Natural Resources of the People's Republic of China. National marine functional zones of 2011-2020[R]. Beijing: Ministry of Natural Resources, 2012.

[8] HY/T 0289—2020 海水淡化浓盐水排放要求[S].
HY/T 0289—2020 Requirement for discharge of sea water desalination brine[S].

[9] 胶州市自然资源和规划局. 青岛市胶州湾保护条例[Z]. 2014.

[10] ALATIQUI I, ETTOUNEY H, EL-DESSOUKY H, et al. Measurements of dynamic behavior of a multistage flash water desalination system[J]. Desalination, 2004, 160(3): 233-251.

[11] 刘彦华, 李保安, 张利. 用膜蒸馏技术处理反渗透浓盐水工艺介绍[C]//2012青岛国际脱盐大会论文集. 青岛: 2012青岛国际脱盐大会, 2012: 581-586.
LIU Yanhua, LI Baotian, ZHANG Li. Introduction of membrane distillation process for treating concentrated brine [C]//Proceed-

- ings of 2012 Qingdao international conference on desalination and water reuse. Qingdao: 2012 Qingdao International Conference on Desalination and Water Reuse, 2012: 581-586.
- [12] 肖威,王楠,李丹.膜法海水淡化工程中材质及设备的选型[J].工业水处理,2020,40(9):124-127.
XIAO Wei, WANG Nan, LI Dan. The material and equipment selection in membrane seawater desalination project[J]. Industrial Water Treatment, 2020, 40(9): 124-127.
- [13] 马学虎,兰忠,王四芳,等.海水淡化浓盐水排放对环境的影响与零排放技术研究进展[J].化工进展,2011,30(1):233-242.
MA Xuehu, LAN Zhong, WANG Sifang, et al. Impact of discharges in seawater desalination on marine environment and progress of zero liquid discharge[J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2011, 30(1): 233-242.
- [14] ALAMEDDINE I, EL-FADEL M. Brine discharge from desalination plants: A modeling approach to an optimized outfall design[J]. Desalination, 2007, 214(1/2/3): 241-260.
- [15] 寇希元,苗英霞,陈进斌,等.海水淡化浓海水排海对海洋环境影响分析[J].山东化工,2019,48(4):206-208.
KOU Xiyuan, MIAO Yingxia, CHEN Jinbin, et al. Analysis of the environmental impact of concentrated seawater discharge from seawater desalination on the marine environment[J]. Shandong Chemical Industry, 2019, 48(4): 206-208.
- [16] OLDFIELD J W, TODD B. Environmental aspects of corrosion in MSF and RO desalination plants[J]. Desalination, 1997, 108(1/2/3): 27-36.
- [17] 王保栋.海水淡化厂排水对海洋生态环境的影响[J].海洋开发与管理,2007,24(4):77-78.
WANG Baodong. Influence of desalination plant drainage on marine ecological environment[J]. Ocean Development and Management, 2007, 24(4): 77-78.
- [18] 蔺智泉.海水淡化对海洋环境影响的研究[D].青岛:中国海洋大学,2012.
LIN Zhiqun. Impacts of seawater desalination on marine environment[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2012.
- [19] 王晓萌.排海浓盐水对胶州湾典型浮游植物影响及环境容量研究[D].青岛:中国海洋大学,2009.
WANG Xiaomeng. Study on the effect of brine on typical phytoplanktons in Jiaozhou Bay and the environmental capacity[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2009.
- [20] HALL J L. Cellular mechanisms for heavy metal detoxification and tolerance[J]. Journal of Experimental Botany, 2002, 53(366): 1-11.
- [21] 崔蕴霞,肖锦.铝盐絮凝剂及其环境效应[J].工业水处理,1998,18(3):6-9.
CUI Yunxia, XIAO Jin. Aluminum salt flocculating agent and its affection on environment[J]. Industrial Water Treatment, 1998, 18(3): 6-9.
- [22] 姚波,席北斗,胡春明,等.铁限制对浮游植物生长和群落组成的影响研究综述[J].生态环境学报,2010,19(2):459-465.
- YAO Bo, XI Beidou, HU Chunming, et al. A review of iron limitation on the growth and competition of phytoplankton[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2010, 19(2): 459-465.
- [23] Water Reuse Association. Seawater Concentrate Management: White Paper[R]. 2011:22-24.
- [24] 王琼,王东村,叶林,等.反渗透海水淡化工程对海洋环境的影响与对策[J].海洋开发与管理,2010,27(9):24-25.
WANG Qiong, WANG Dongchen, YE Lin, et al. Influence of reverse osmosis desalination project on marine environment and countermeasures[J]. Ocean Development and Management, 2010, 27(9): 24-25.
- [25] RUSO Y D P, DE LA OSSA CARRETERO J A, CASALDUERO F G, et al. Spatial and temporal changes in infaunal communities inhabiting soft-bottoms affected by brine discharge[J]. Marine Environmental Research, 2007, 64(4): 492-503.
- [26] 黄晓琛,陈雪初,彭欣,等.滨海电厂温排水对海洋环境的影响研究进展[J].海洋环境科学,2014,33(6):972-976.
HUANG Xiaochen, CHEN Xuechu, PENG Xin, et al. The research progress of the impact of thermal discharge from coastal power plants on marine environment[J]. Marine Environmental Science, 2014, 33(6): 972-976.
- [27] 曾江宁,陈全震,郑平,等.余氯对水生生物的影响[J].生态学报,2005,25(10):2717-2724.
ZENG Jiangning, CHEN Quanzhen, ZHENG Ping, et al. Advanced in effect of residual chlorine on hydrobios[J]. Acta Ecologica Sinica, 2005, 25(10): 2717-2724.
- [28] KELAHER B P, CLARK G F, JOHNSTON E L, et al. Effect of desalination discharge on the abundance and diversity of reef fishes[J]. Environmental Science & Technology, 2020, 54(2): 735-744.
- [29] 胥建美,谢春刚,苏慧超,等.海水淡化浓盐水排放对海洋环境影响及管理政策研究[J].环境科学与管理,2021,46(2):5-8.
XU Jianmei, XIE Chungang, SU Huichao, et al. Study on impacts of brine discharge from seawater desalination on marine environment and relative management policy[J]. Environmental Science and Management, 2021, 46(2): 5-8.
- [30] 徐显,张拂坤,邹川玲,等.晋江海域海水淡化工程浓盐排水方案研究[J].海洋技术学报,2019,38(4):91-96.
XU Xian, ZHANG Fukun, ZOU Chuanling, et al. Study on the scheme of brine discharge from seawater desalination projects in the sea area near Jinjiang[J]. Journal of Ocean Technology, 2019, 38(4): 91-96.
- [31] GB 18486—2001 污水海洋处置工程污染控制标准[S].
GB 18486—2001 Standard for pollution control of sewage marine disposal engineering[S].
- [32] 刘伟,张铭,齐连明.西班牙海水淡化产业政策研究[J].海洋开发与管理,2015,32(3):15-20.
LIU Wei, ZHANG Ming, QI Lianming. Study on the policy of desalination industry in Spain[J]. Ocean Development and Management, 2015, 32(3): 15-20.

(下转第44页)