



海水淡化技术及ISO国际标准化现状分析与展望

胥建美^{1*}, 徐国荣¹, 马乐天^{2,3}, 谢春刚¹, 邵天宝¹, 王敏¹

1. 自然资源部天津海水淡化与综合利用研究所, 天津 300192

2. 海底科学与划界全国重点实验室, 杭州 310012

3. 自然资源部第二海洋研究所, 杭州 310012

* 联系人, E-mail: xujianmei_0402@126.com

国家重点研发计划政府间国际科技创新合作项目(2023YFE0101000)、天津市科技计划(24ZXTKSN00040)、2022年中央级公益性研究所基本科研业务费专项资金(K-JBYWF-2022-QR-03)和国家自然科学基金(22408410)资助

水是生命之源, 它承担着重要的资源支撑作用. 淡水资源已被列为与粮食、石油并列的三大战略资源之一. 在经济日益发展的今天, 全世界大部分国家都面临着淡水资源短缺这一共同问题^[1-3]. 随着科学技术的发展, 海水淡化作为一种新的水源, 正在显示出独特的优势和良好的前景. 在各种解决水资源短缺的方法中, 海水淡化因不受气候和时空限制已成为解决世界沿海地区淡水供给的重要方式^[4-7].

据2023~2024年国际海水淡化和再利用协会(International Desalination and Reuse Association, IDRA)海水淡化和再利用手册^[8]数据统计显示, 近20年来, 随着全社会发展进程的加快, 海水淡化产业发展迅猛, 如图1所示, 截至2023年6月, 全球海水淡化装机规模已经超过1亿m³/d, 实际运行约0.95亿m³/d, 全球新建海水淡化规模也逐渐增加, 其中2019年全球新增产能创历史新高(新建工程量约640万m³/d). 海水淡化主要部署在世界上能源丰富且缺水的地区, 因此, 全球近一半的海水淡化产能位于中东, 其中以沙特阿拉伯、阿拉伯联合酋长国(阿联酋)、科威特、卡塔尔和以色列为主^[9-13]. 其他国家如美国、澳大利亚、新加坡、中国等也都在积极发展海水淡化产业^[14-16]. 近年来, 我国海水淡化工程总体规模稳步增长, 截至2023年底, 全国现有海水淡化工程156个, 工程规模252万m³/d, 其中, 万吨级及以上海水淡化工程55个, 工程规模230万m³/d (https://gi.mnr.gov.cn/202406/t20240606_2847506.html). 目前, 全球海水淡化厂数量达2万余家, 每天向3亿多人供应淡水. 海水淡化产品水一般应用在市政供水、工业用水、灌溉用水、旅游用水和能源用水等方面, 其中以市政供水为主, 就全球而言, 约有74%的海水淡化水用于市政饮用, 24%用于工业用途^[6], 其中中东和北非地区由于极度干旱的自然环境, 87%的海水淡化水都用于市政饮用^[17]. 可见, 发展海水淡化是增加水资源供给、优化供水结构的重要手段, 对



胥建美 自然资源部天津海水淡化与综合利用研究所, 主要研究方向为海水淡化技术研究及ISO国际标准研制.

淡水资源短缺地区缓解水资源瓶颈制约、保障经济社会可持续发展具有重要意义.

随着社会的发展和技术的进步, 海水淡化产业也向着大型规模化、节能环保化和标准化的方向发展. 尤其各技术领域标准的制定, 不仅规范了海水淡化产业的健康发展, 促进海水淡化领域产业化进程, 更能提升海水淡化技术的研发水平和产品质量, 引导新技术、新工艺、新设备及新材料的推广应用^[18]. 本文在简要论述海水淡化技术发展的基础上, 重点介绍了海水淡化国际标准的研制情况, 详述了现有的ISO国际标准在海水淡化产业领域的应用增效作用, 并就ISO国际标准的体系构建和未来发展前景提出了建议和展望.

1 海水淡化技术发展现状

海水淡化又称为海水脱盐, 也就是从海水中提取淡水的技术和过程. 如图2(a)所示, 根据被分离出物质的不同, 海水淡化技术可以分为两大类: 将水从海水中分离出去和将盐从海水中分离出去^[19-21]. 海水中盐的质量分数通常低于4%, 由于技术的限制, 目前将水从海水中取出的方法相比将盐从海水中取出的方法更有效. 将水从海水中分离出来的方法按照

引用格式: 胥建美, 徐国荣, 马乐天, 等. 海水淡化技术及ISO国际标准化现状分析与展望. 科学通报

Xu J, Xu G, Ma L, et al. Current development and future prospects in seawater desalination technology and ISO standards (in Chinese). Chin Sci Bull, doi: 10.1360/TB-2024-1106

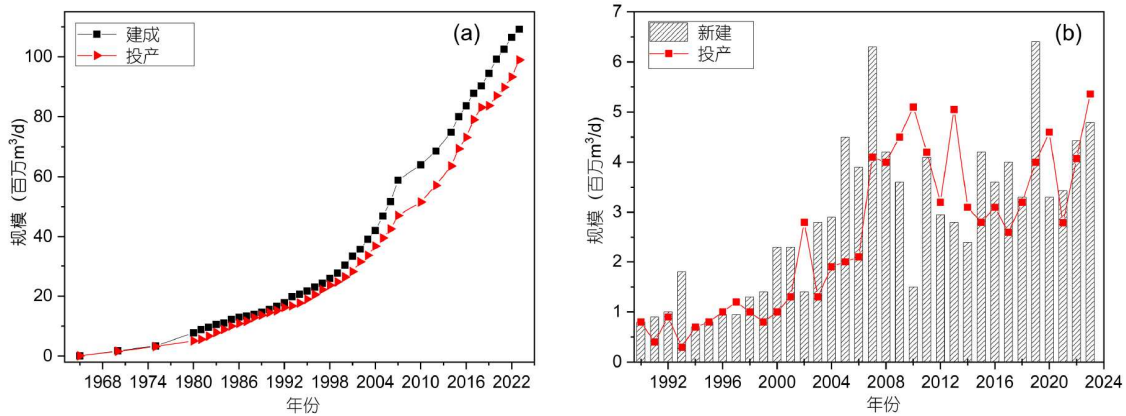


图 1 全球海水淡化工程规模趋势数据图. (a) 1965年以来全球海水淡化工程建成规模及实际投产规模数据图; (b) 1990年以来各年度全球新建和投产海水淡化工程规模数据图
Figure 1 Growth trends in global desalination project capacity. (a) Date on global cumulative contracted and online desalination capacity since 1965. (b) Annual data on global cumulative contracted and online desalination capacity since 1990

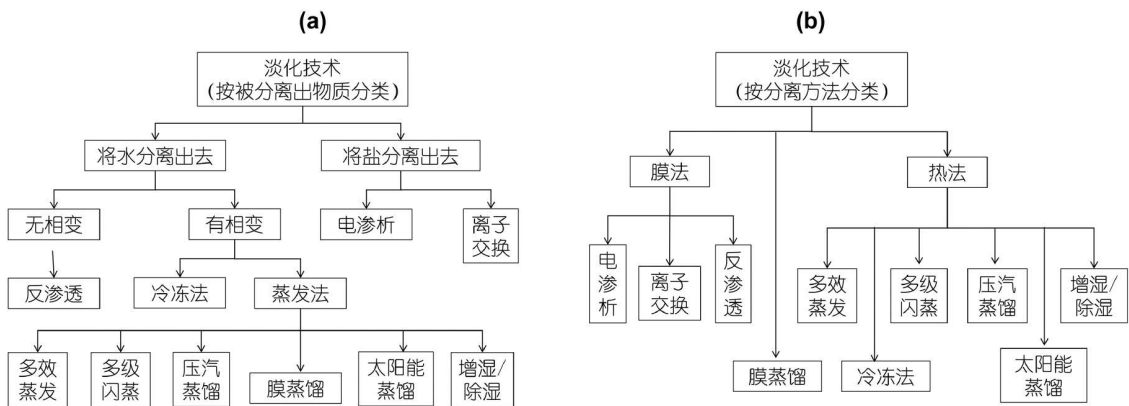


图 2 海水淡化技术分类示意图. (a) 海水淡化技术按分离的物质分类; (b) 海水淡化技术按分离方法的分类
Figure 2 Schematic diagram of desalination technologies classification. (a) Desalination technologies classified by separated substances. (b) Desalination technologies classified by separation methods

是否发生相变而分成两类, 蒸馏, 冷冻均属于发生相变过程, 而反渗透属于不发生相变过程。

按照分离方法将海水淡化技术分类如图2(b)所示, 目前, 国际上已商业化应用的主流海水淡化技术分为两种类型: 热法和膜法, 热法主要包括低温多效蒸发(low-temperature multi-effect distillation, LT-MED) 和多级闪蒸(multi-stage flash, MSF)工艺, 膜法以RO海水淡化工艺为主^[22-25]。由于造水成本方面的优势和供水应用的灵活性, 目前RO已成为海水淡化的主流技术^[26-28]。如图3显示, 2010年以来, 全球范围内新建的海水淡化厂主要为膜法淡化技术, 而且趋势越来越明显, 在目前运行的20000 余个海水淡化厂中, 约74%的淡化厂采用RO技术进行盐分离^[8]。在我国, 膜法占据淡化技术份额也逐年增大, 截至2023年底, 全国应用RO技术的工程140个,

工程规模达到169万 m³/d(https://gi.mnr.gov.cn/202406/t20240606_2847506.html), 占总工程规模的67.24%。随着对经济性和环境效益的追求, 海水淡化产业也在不断地进行技术革新和优化管理, 未来, 海水淡化产业将向着大型规模化、节能环保化和标准化的方向发展。

1.1 大型规模化

全球淡化装机容量快速增加, 并且每年都以百万吨级的速度逐年递增, 全球海水淡化工程规模正在向大型规模化方向发展。图4介绍了2000年后历年新建的不同规模海水淡化工程情况, 可以看出建设的大型海水淡化厂(规模为5~50万 m³/d)和超大型海水淡化厂(规模>50万 m³/d)越来越多^[8]。目前, 阿联酋在2022年建成的 Taweelah IWP淡化厂, 是全球

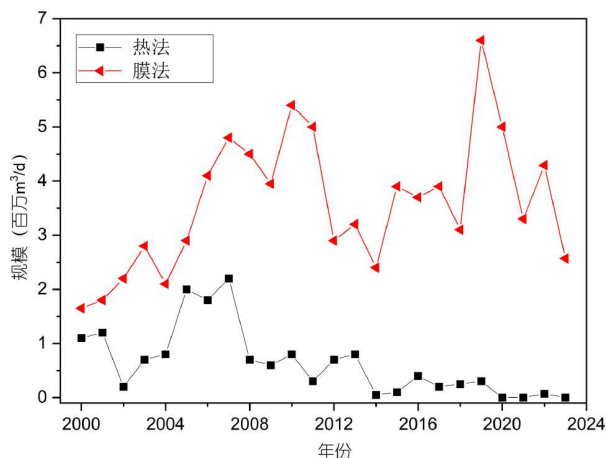


图3 2000年以来各年度新建热法和膜法海水淡化工程规模数据图
Figure 3 Data on newly built thermal and membrane desalination projects since 2000

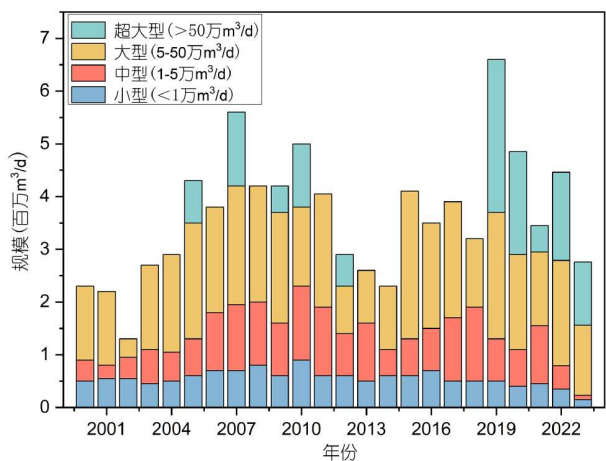


图4 2000年以来各年度新建的不同规模海水淡化工程数据图
Figure 4 Data on newly built desalination projects of different capacities since 2000

最大的RO海水淡化项目, 产水能力达到了90.9万m³/d, 满足阿联酋大量的淡水需求; 沙特阿拉伯的Shoaiba 3海水淡化厂是目前最大的热法淡化厂, 以MSF淡化工艺为主, 产水规模达到88万m³/d^[8,29]。海水淡化工程的大型规模化发展主要是由于随着城市化进程的加快和工业发展的需要, 许多沿海城市和工业区对淡水的需求急剧增加, 而大型海水淡化厂能够提供稳定和大规模的淡水供应, 满足这些地区的需求。同时, 在经济性方面, 大型海水淡化厂能够通过规模经济来降低单位造水成本, 比如, 建设和运营大规模设施可以分摊固定成本, 包括设备采购、基础设施建设和管理费用等, 从而降低每立方米淡水的生产成本。此外, 大型海水淡化项目还可以

更有效地实施环保措施, 如废水处理和浓盐水管理, 降低对环境的影响; 还可以与其他工业过程结合, 优化资源利用和能效。通过进一步的技术创新和管理优化, 大型化、规模化的海水淡化工程将在全球水资源管理中发挥越来越重要的作用。

1.2 节能环保化

为了应对能源消耗、环境影响和可持续发展方面的挑战, 海水淡化产业也正在向着节能环保化的方向发展。首先, 海水淡化产业可以结合太阳能、风能等可再生能源, 大幅减少化石能源的使用, 是未来发展的重要方向。例如, 在沙特阿拉伯和阿联酋等地, 太阳能和风能被集成到海水淡化厂中, 提供清洁能源以降低对化石燃料的依赖, 这不仅减少了碳排放, 还增强了系统的可持续性^[30-32]。沙特新未来城NEOM将首次大规模使用聚光太阳能技术转化太阳能用于海水淡化, 将使产水成本下降为0.34美元/m³ (<https://www.mofcom.gov.cn/dl/gbdqzn/upload/shatealabo.pdf>)。与目前RO海水淡化的造水成本0.49美元/m³相比, NEOM海水淡化工程的建成将具有划时代意义。阿联酋Abu Dhabi Taweelah海水淡化项目产水规模为90万m³/d, 采用RO淡化技术外加辅助光伏补偿发电系统, 试运期间, 脱盐转化率39%, 比电耗值2.77 kWh/T, 有效降低能源消耗, 机组性能处于世界最先进水平^[8]。其次, 根据海水淡化工程的能源条件及投资, 集成多种淡化技术优势形成的耦合工艺, 是降低海水淡化成本、提高海水淡化效益的有效手段。可以利用多源融合, 将海水淡化与其他工业过程结合, 如利用电厂余热进行LT-MED^[33,34], 进一步提高系统的能效和资源利用率。韩国斗山集团在阿联酋Fujairah建造了世界上首套RO和MSF技术混合使用的海水淡化厂1期, 项目的总规模为45.4万m³/d, 由5套MSF系统和1套RO系统组成, 其中, MSF系统与电厂配套建设, 这种灵活的产电产水模式, 可充分利用电厂的蒸汽, 有效地提高产电、产水效率^[35]。同时, 也可以进行多技术之间的耦合^[36-38], 如利用蒸馏法和膜法工艺的互补性, 二者的物流、能流之间相互匹配, 共用一套预处理和排放系统等方式进行热膜耦合, 而使整个淡化体系更加经济合理。此外, 节能低碳最有效的方法是高效高压泵和能量回收装置的研发、节能抗污染膜组件的技术革新、绿色预处理技术和绿色化学品的应用等。当然, 随着物联网和人工智能技术的发展, 海水淡化厂的运营管理也进入了智能化时代。通过实时监控和数据分析, 优化操作参数, 也可有效提高系统的效率和响应能力, 减少化石能源的使用。

1.3 标准化

海水淡化产业的标准化发展不仅能促进国际合作, 还能带来经济效益和技术进步, 是推动该产业健康发展的重要手段。从经济性来说, 海水淡化技术和工艺的标准化也是实现

规模化发展的途径之一,通过批量生产和使用标准化设备,可以有效降低单位产水成本;使用标准化组件和技术,可以减少重复性设备和技术研发的成本。在技术层面,海水淡化标准化可以确保不同批次的设备和系统具有一致的质量和性能;通过标准化测试和认证,确保整个淡化工艺流程在各种条件下的可靠性和稳定性;同时,海水淡化标准化有助于技术的传播、转移和共享,促进全球范围内技术进步。此外,淡化技术标准化可以确保不同国家和地区的设备和系统互相兼容,促进全球合作;对于符合国际标准的产品更容易进入其他国家的市场,为淡化设备和产品生产厂家拓展市场范围,促进全球范围内技术进步。

2 海水淡化ISO国际标准化现状及分析

制定国际标准的三大国际标准组织为: 国际标准化组织、国际电工委员会和国际电信联盟。涉及海水淡化技术领域的国际标准主要是由ISO制定和出版。2015年, ISO在船舶与海洋技术委员会/海洋技术分委会中专门设立了海水淡化工作组(ISO/TC 8/SC 13/WG 3), 目前, ISO/TC 8/SC 13/WG 3已经发布ISO国际标准2项, 在研2项。此外, 海水淡化工艺涉及多领域技术融合, 因此, 如TC 282(水回用技术委员会)、TC 147(水质技术委员会)、TC 115(泵技术委员会)等组织发布的标准中也有同样适用于海水淡化领域的ISO国际标准, 具体ISO技术委员会编制的相关ISO国际标准在RO海水淡化工程各工艺环节的应用情况如图5所示, 这些标准可以分为海水

淡化类标准、技术通用类标准和工艺过程应用类标准3类。

2.1 海水淡化类标准

海水淡化类标准是由ISO/TC 8/SC 13/WG 3专门针对海水淡化技术而研制的, 目前发布的2项标准中: ISO 23446《海洋技术-反渗透海水淡化产品水水质-市政供水指南》^[39], 是由我国主持制定的首项ISO海水淡化领域国际标准。本标准的框架结构是基于行业标准《海水淡化产品水水质要求》(HY/T 247-2018)而搭建, 该行业标准规定了热法和膜法两种技术的产品水水质, 而近年来, 以RO为主的膜法淡化技术以其各项优势占据主导地位, 因此, ISO 23446主要是针对RO膜法淡化产品水的水质而制定。世界上现行各类水质标准, 主要针对的是传统水源, 对海水淡化这一新水源并未做出明确要求。本标准规范了市政用RO海水淡化工程产品水关键水质参数及其范围、监测频率和测试方法, 通过控制pH、钙硬度($H_{[Ca]}$)、总碱度、朗格利尔饱和指数(langelier saturation index, LSI)等关键指标即可保证RO淡化产品水的可饮用和管网相容性, 是WHO《饮用水水质准则》的流程简化和必要补充。该标准的发布实施, 可规范并简化海水淡化产品水的水质检测, 保证管网和终端用水安全, 尤其对发展中国家安全使用淡化水有重要意义。2024年6月, ISO发布了ISO 13205《海洋技术-海水淡化-术语》^[40], 作为ISO/TC 8/SC 13/WG 3发布的第2项国际标准, 该海水淡化术语框架按照海水淡化工艺流程而搭建, 包括了基础定义、取水系统、预处

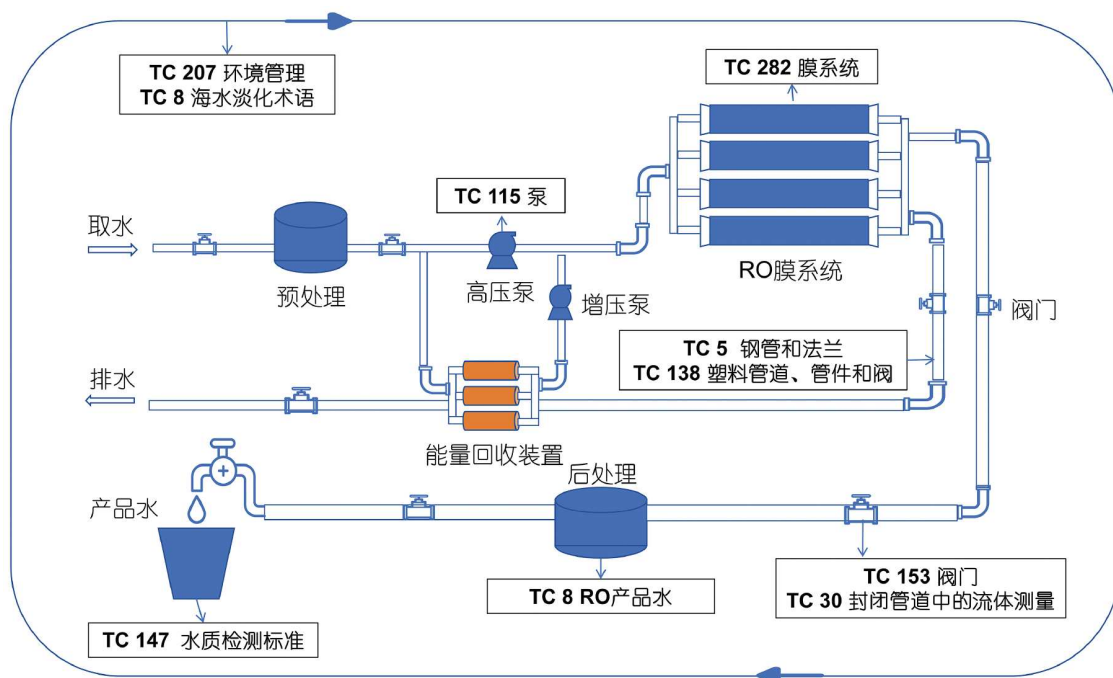


图5 RO海水淡化工程工艺环节中ISO国际标准应用示意图

Figure 5 Schematic diagram of ISO standards applicable to each stage of the RO desalination process

理系统、膜法淡化系统、热法淡化系统、后处理系统,此外,膜清洗和药剂添加内容作为淡化工艺不可缺少的部分将其归为辅助术语进行了规定,其词汇内容涵盖了具体的工艺流程、关键设备、主要技术参数等条目,内容科学全面,便于形成海水淡化产业统一的概念,有利于打破沟通壁垒,提高技术交流效率,促进海水淡化在更多国家和地区开展应用与合作。

除了已经发布的这两项标准之外,ISO/TC 8/SC 13/WG 3预构建包括基础术语、关键设备、产品水、设计与工艺、淡化工程运营、环境影响等涵盖海水淡化各个方面技术的ISO标准体系,目前关键设备和工程运营类标准正在推进中。

2.2 技术通用类标准

海水淡化技术属于水处理技术之一,RO、纳滤(nanofiltration, NF)等技术在水处理领域的应用也非常广泛,TC 282(水回用技术委员会)制定的标准中,也有相关膜法技术标准适用于海水淡化领域。在工艺设计方面,ISO 23044^[41]为工业废水回用过程的软化和脱盐工艺的设计和比较提供了指导。与工业废水相比,海水淡化过程的原水是海水,其中的 Mg^{2+} 、 Ca^{2+} 等硬度离子含量相对较低,成分相对稳定,因此海水淡化工艺中一般不需要软化过程。而本标准中提到的淡化脱盐工艺,如RO、NF和电渗析等,也是海水淡化工艺中常用的技术^[42-44],该标准对这些海水淡化技术的常规水质参数和脱除性能等内容进行了总结和比较,包括进水总溶解固体(total dissolved solids, TDS)浓度范围、TDS去除率、能耗、回收率和水生产成本等,参照该标准,海水淡化工艺设计者可以根据设定参数的需要选择合适的淡化技术。

ISO 23070^[45]为城市废水RO处理系统的设计提供了指南,本标准中涉及的RO处理系统设计原则也适用于海水淡化领域,具体内容包括:RO系统组成、给水水质和技术要求说明、运行和维护指南、水质和设备性能监测系统,以及RO系统完整性测试方法和浓盐水处理技术等。然而,市政废水成分与海水有很大不同,例如,二级出水中的溶解有机物(dissolved organic matter, DOM)浓度(以溶解有机碳(dissolved organic carbon, DOC)计)在5~20 mg/L范围内^[46],远高于海水中的DOM浓度(<2 mg/L)^[47],且其成分复杂得多。因此,为了防止RO系统出现严重的有机物和生物污染,城市废水RO预处理装置需集成多种处理工艺,运行过程中化学品的用量也更大、更有针对性;海水淡化RO系统的预处理工艺则更加简易,以初级过滤和超滤为主。

海水淡化RO装置完成装配后,需要对整个RO系统的性能进行综合评价,ISO 20468-5^[48]可以为提供技术支持。该标准规定了膜过滤系统性能评价的功能性要求和非功能性要求。功能性要求的评价包括了产水水质及产水量等指标、工艺流程的性能指标和系统的完整性测试指标。在膜法海水淡化系统中,典型的水质和运行参数可参照该标准中提供的

样本进行选取。对于完整性试验,该标准中提供了压力衰减试验和真空衰减试验2种直接测试系统完整性的方法,这两种方法完全适用于膜法海水淡化系统。此外,该标准还提供了膜系统非功能性要求的评价方法,包括能耗、化学消耗、盐水处理、固体废弃物处理、生命周期成本等,参照这些评价指标,可以对海水淡化系统的完整性、技术达标性、经济性、安全性、环保性进行综合评价。

2.3 工艺过程应用类标准

海水淡化系统涉及多技术集成和设备组合,在每一个技术分支领域都有适用的相关ISO国际标准。除了以上介绍的ISO/TC 8/SC 13/WG 3制定的产品水标准和术语标准、TC 282制定的膜系统设计和评估标准以外,还有适用于高压泵选型、管道和管件选型、阀门选型、水质检测及环境管理的相关标准。在大中型海水淡化装置中,高压泵多以多级离心泵为主^[49-51],而TC 115(泵技术委员会)制定的相关离心泵技术规范可在高压泵选型时给与指导。离心泵系列标准将其分为一级、二级和三级3类^[52-54]。第一类离心泵的要求最为严格,适用于如高温、高压、腐蚀等最苛刻的工况条件;第二类离心泵适用于对扬程、效率、流量和其他参数有较高的要求,以满足特定工作条件的需要;第三类离心泵适用于一般流体的运输。一般情况下,海水淡化工程选择第二类离心泵,而ISO 5199^[53]给出了第二类离心泵的详细参数规格,包括形状、材料、流体传递性能、封装、轴密封、振动和噪声等关键方面。因此,ISO 5199标准可以在海水淡化工程离心泵的选择和使用中发挥重要作用,确保离心泵的性能、可靠性和安全性得到充分考虑。当然,如果有材料需求或成本考虑,也可以使用第一类或第三类离心泵。

在海水淡化项目中,管道、管件和阀门在确保海水淡化设备高效可靠的运行方面发挥着至关重要的作用。其中,由于海水的腐蚀性,海水淡化项目管道的材料选择至关重要,根据不同工程规模和工况,通常使用不锈钢管道或高密度聚乙烯(high density polyethylene, HDPE)、聚氯乙烯(unplasticized poly(vinyl chloride), PVC-U)、聚丙烯(polypropylene, PP)等^[55-57]。例如,为了防止浓盐水腐蚀并克服高压,浓盐水输送通常使用316L钢管,而TC 5(金属管道和管件技术委员会)制定的相关标准可以为海水淡化工程不锈钢管道的选择和应用提供支持。ISO 1127^[58]、ISO 3545-1^[59]和ISO 4200^[60]介绍了钢管的外径分类、优选厚度、公差和符号等方面的基本信息;ISO 7005-1^[61]和ISO 7483^[62]给出了与管道一起使用的法兰和垫片的详细介绍和使用指南。利用这些标准将有助于海水淡化工程设计人员选择最合适的管材和管件,提高海水淡化工程运行的安全性和高效性。TC 138(液体传送给用塑料管道、管件和阀门技术委员会)制定的ISO 1452系列^[63-67]、ISO 4427系列^[68-71]和ISO 15874^[72-75]系列标准则是对使用的PVC-U管道、HDPE管道、PP管道及管件和阀门的

规格给出了详细的介绍和要求。TC 153(阀门技术委员会)制定的标准主要从工业阀门的参数、互换性、测试、质量要求等方面进行了规范,相关标准也可作为淡化工程阀门的选型给与辅助指导。

海水淡化的各个工艺环节都离不开水质检测,从海水、预处理水、淡化水到产品水的检测,每一个环节都需要严格的质量控制,它不仅关系到淡化过程的效率,更直接影响到最终产品水的质量。TC 147(水质技术委员会)已发布或研制了300多项国际标准,包括物理、化学及生化测定方法类标准160余项,放射性物质测定方法、微生物测定方法及生物测定方法类标准140余项,以及采样方法、在线监测和基础术语类标准40余项,内容十分全面,这些标准在海水淡化制水各阶段的水质检测中发挥着至关重要的作用。TC 30(封闭管道内流体流量测量技术委员会)制定的相关标准可以为管道上流量计的选取提供技术指导。

此外,随着海水淡化产业的日益壮大,以及全球对新兴产业发展的绿色可持续要求,海水淡化工程带来的环境影响应得到重视^[76-79]。TC 207(环境管理技术委员会)从1993年开始制定了一系列环境管理国际标准,被称为ISO 14000系列标准。其中,ISO 14001^[80]为环境管理系统(environmental management system, EMS)提供了一个结构化的框架,使组织机构能够系统地识别、评估和管理其活动、产品和服务对环境的影响。ISO 14004^[81]就建立、实施、维护和改善EMS给予了指导。海水淡化厂采用ISO 14001及ISO 14004标准,可协助识别、控制及管理海水淡化活动有关的环境问题,例如海水取排水、能源消耗、化学品使用及废物产生等。ISO 14002-2^[82]其侧重点是指导如何应用ISO 14001的框架来处理与水有关的环境方面问题和影响,指出组织机构在打算将其环境管理工作的重点放在解决水方面环境影响的同时,也应该认识到水与其他环境媒介及各生态系统之间的相互关系。例如,海水淡化产生的浓盐水排放到海洋中可能对海洋生态造成影响,为了解决这个问题,业内也有提议对浓盐水进行综合利用,但对浓盐水浓缩的过程也会消耗大量能源、并产生温室气体,因此,为了避免这种额外的环境影响,该标准鼓励在管理水资源问题时应进行综合考量,最小限度降低对环境的影响。生命周期评价(life cycle assessment, LCA)作为ISO的标准化方法,已被广泛应用于海水淡化的环境绩效评价。根据ISO 14040^[83]和ISO 14044^[84],生命周期评估包括4

个阶段:目标和范围、生命周期清单(life cycle inventory, LCI)、生命周期影响评估(life cycle impact assessment, LCIA)和解释。根据ISO 14040和ISO 14044的定义,使用生命周期评估产品的环境影响是一种“从摇篮到坟墓”的方法,这种“从摇篮到坟墓”的生命周期评估概念同样可应用于海水淡化产业。海水淡化工程对环境的影响不仅在于淡水生产过程,还涉及基础设施建设、能源生产、化工生产、膜和设备制造、废物管理等间接需求对自然资源的消耗以及污染物的排放,海水淡化管理者应进行全面的综合评估。作为海水淡化项目的管理者,可以利用ISO 14000系列标准构建海水淡化项目的环境管理体系框架,制定海水淡化项目建设和运营的管理规则。

3 建议与展望

海水淡化产业近年来发展迅速,而且正朝着大型规模化、节能环保化和标准化等方向前进。其中,建立统一的标准和规范变得尤为重要。目前,海水淡化ISO国际标准制定还处于初级阶段,仅有2项标准是专门为海水淡化领域制定,标准体系和分类、与技术之间的配套性建设还有待规划。未来,海水淡化ISO国际标准化工作的推动可以从以下几方面进行。

(1) 建立ISO海水淡化标准体系框架。依托ISO/TC 8/SC 13/WG 3,搭建科学合理的ISO国际标准体系框架,研制出适用于淡化技术、工艺、设备、材料、环境管理、运营管理、测试和认证、教育和培训等相关领域的海水淡化ISO国际标准。

(2) 推进共同合作与共享。加强ISO/TC 8/SC 13/WG 3与各国海水淡化领域高校、科研机构、企业和行业组织的合作,促进技术交流和信息共享,鼓励发展中国家参与ISO国际标准制定,提升其淡化技术能力。

(3) 保证标准与政策、法规对接。积极与各国政府部门合作,确保海水淡化ISO标准与各国政策、法规相协调。尤其要关注不同地区的水资源特点,制定出适应性强的海水淡化产品水ISO国际标准,促进国际统一。

(4) 推动我国海水淡化标准国际化。截至2023年年底,我国现行有效海水淡化相关标准70余项,其标准体系框架搭建合理,分类齐全,标准制定与技术发展相互协调。因此,应大力推动我国先进的和实用性强的海水淡化标准转化为ISO国际标准,以标准国际化助推我国淡化产业“走出去”,打造中国淡化品牌,带动产业链条发展。

推荐阅读文献

- 1 United Nations. The United Nations World Water Development Report 2024. <https://www.unwater.org/publications/un-world-water-development-report-2024>
- 2 World Health Organization. Water safety plan manual: step-by-step risk management for drinking-water suppliers, second edition. <https://www.who.int/publications/i/item/9789240067691>
- 3 Rashedi M, Vahdani B, Etebari F, et al. Design of a water desalination and distribution network addressing challenges of sharing, trading, and

- fairness under uncertainty. *Desalination*, 2025, 598: 118420
- 4 Hao X D, Wang B Y, Cao D Q, et al. Global trends of desalination towards large-scale engineering applications (in Chinese). *China Water Wastew*, 2022, 38: 18–24 [郝晓地, 王邦彦, 曹达敏, 等. 海水淡化工程全球大规模应用发展趋势. *中国给水排水*, 2022, 38: 18–24]
 - 5 Harby K, Emad M, Benghanem M, et al. Reverse osmosis hybridization with other desalination techniques: an overview and opportunities. *Desalination*, 2024, 581: 117600
 - 6 Song H W, Song D, Zhang H, et al. Status of seawater desalination in China and abroad (in Chinese). *Membr Sci Tech*, 2021, 41: 170–176 [宋瀚文, 宋达, 张辉, 等. 国内外海水淡化发展现状. *膜科学与技术*, 2021, 41: 170–176]
 - 7 Zolghadr-Asli B, McIntyre N, Djordjevic S, et al. The sustainability of desalination as a remedy to the water crisis in the agriculture sector: an analysis from the climate-water-energy-food nexus perspective. *Agric Water Manage*, 2023, 286: 108407
 - 8 International Desalination and Reuse Association (IDRA). IDRA Desalination & Reuse Handbook (2023–2024). Oxford: Media Analytics Ltd., 2004
 - 9 Janowitz D, Margane A, Yüce S, et al. Photovoltaics powered seawater desalination by reverse osmosis and water conveyance benefits the green energy transition in the Middle East. *Desalination*, 2025, 602: 118646
 - 10 Mahmoudi A, Bostani M, Rashidi S, et al. Challenges and opportunities of desalination with renewable energy resources in Middle East countries. *Renew Sustain Energy Rev*, 2023, 184: 113543
 - 11 Wang G, Kumar S, Huang Z, et al. Water resource management and policy evaluation in Middle Eastern countries: achieving sustainable development goal 6. *Desalin Water Treat*, 2024, 320: 100829
 - 12 Saleem H, Abounahia N, Siddiqui H R, et al. Qatar desalination research: an overview. *Desalination*, 2023, 564: 116802
 - 13 Housh M. Optimizing bilinear multi-source water supply systems using mixed-integer linear programming approximations: an analysis of the Israeli seawater desalination array. *Adv Water Resour*, 2023, 178: 104498
 - 14 Rao P, Morrow Iii W R, Aghajanzadeh A, et al. Energy considerations associated with increased adoption of seawater desalination in the United States. *Desalination*, 2018, 445: 213–224
 - 15 Heihsel M, Lenzen M, Malik A, et al. The carbon footprint of desalination. *Desalination*, 2019, 454: 71–81
 - 16 Lin S, Zhao H, Zhu L, et al. Seawater desalination technology and engineering in China: a review. *Desalination*, 2021, 498: 114728
 - 17 Sayed E T, Olabi A G, Elsaid K, et al. Recent progress in renewable energy based-desalination in the Middle East and North Africa MENA region. *J Adv Res*, 2023, 48: 125–156
 - 18 Wu S B, Zhao H L, Shao T B. Current status analysis of standardization for seawater desalination industry in China (in Chinese). *Water Supply Drain*, 2011, 37: 123–127 [吴水波, 赵河立, 邵天宝. 我国海水淡化行业标准化现状分析. *给水排水*, 2011, 37: 123–127]
 - 19 Zhang Y S. The status and development trend of seawater desalination industry (in Chinese). *Ind Water Treat*, 2021, 9: 26–30 [张雨山. 海水淡化技术产业现状与发展趋势. *工业水处理*, 2021, 9: 26–30]
 - 20 Ahmad N A, Goh P S, Yogarathinam L T, et al. Current advances in membrane technologies for produced water desalination. *Desalination*, 2020, 493: 114643
 - 21 Gao C J, Ruan G L. Seawater Desalination Technology and Engineering (in Chinese). Beijing: Chemical Industry Press, 2015 [高从塔, 阮国岭. 海水淡化技术与工程. 北京: 化学工业出版社, 2015]
 - 22 Prajapati M, Shah M, Soni B. A comprehensive review of the geothermal integrated multi-effect distillation (MED) desalination and its advancements. *Groundwater Sustain Dev*, 2022, 19: 100808
 - 23 Mabrouk A N, Fath H E S. Technoeconomic study of a novel integrated thermal MSF–MED desalination technology. *Desalination*, 2015, 371: 115–125
 - 24 Guduru R K, Singh R, Vij RK. Chapter 13 - Desalination of seawater and related technologies: a step towards achieving sustainable development goals. In: Dehghani M H, Karri R R, Tyagi I, et al., eds. *Water, The Environment, and the Sustainable Development Goals*, 2024. Amsterdam: Elsevier, 2024. 305–325
 - 25 Khawaji A D, Kutubkhanah I K, Wie J M. Advances in seawater desalination technologies. *Desalination*, 2008, 221: 47–69
 - 26 Gao C J, Zhou Y, Liu L F. Current status and prospect of reverse osmosis desalination technology (in Chinese). *J Ocean Technol*, 2016, 35: 1–14 [高从塔, 周勇, 刘立芬. 反渗透海水淡化技术现状和展望. *海洋技术学报*, 2016, 35: 1–14]
 - 27 Lim Y J, Goh K, Kurihara M, et al. Seawater desalination by reverse osmosis: current development and future challenges in membrane fabrication – A review. *J Membrane Sci*, 2021, 629: 119292
 - 28 Qasim M, Badrelzaman M, Darwish N N, et al. Reverse osmosis desalination: a state-of-the-art review. *Desalination*, 2019, 459: 59–104
 - 29 Alnajdi O, Calautit J K, Wu Y. Development of a multi-criteria decision making approach for sustainable seawater desalination technologies of medium and large-scale plants: A case study for Saudi Arabia's vision 2030. *Energy Procedia*, 2019, 158: 4274–4279
 - 30 Imam A A, Abusorrah A, Marzband M. Potentials and opportunities of solar PV and wind energy sources in Saudi Arabia: land suitability, techno-socio-economic feasibility, and future variability. *Results Eng*, 2024, 21: 101785

- 31 Al-Obaidi M A, Zubo R H A, Rashid F L, et al. Evaluation of solar energy powered seawater desalination processes: a review. *Energies*, 2022, 15: 6562
- 32 Alkaisi A, Mossad R, Sharifian-Barforoush A. A review of the water desalination systems integrated with renewable energy. *Energy Procedia*, 2017, 110: 268–274
- 33 El-Hady B, Kashyout A, Hassan A, Hassan G, et al. Hybrid renewable energy/hybrid desalination potentials for remote areas: selected cases studied in Egypt. *RSC Adv*, 2021, 11: 13201–13219
- 34 Almulla A, Hamad A, Gadalla M. Integrating hybrid systems with existing thermal desalination plants. *Desalination*, 2005, 174: 171–192
- 35 Al-Obaidi M A, Filippini G, Manenti F, et al. Cost evaluation and optimisation of hybrid multi effect distillation and reverse osmosis system for seawater desalination. *Desalination*, 2019, 456: 136–149
- 36 Xu J M, Ren J B, Xie C G, et al. Technical status and prospects of hybrid membrane-thermal seawater desalination (in Chinese). *Water Purif Technol*, 2021, 40: 46–50 [胥建美, 任建波, 谢春刚, 等. 海水淡化耦合技术的发展应用与展望. *净水技术*, 2021, 40: 46–50]
- 37 Sadri S, Ameri M, Haghighi Khoshkhoo R. Multi-objective optimization of MED-TVC-RO hybrid desalination system based on the irreversibility concept. *Desalination*, 2017, 402: 97–108
- 38 Al-Obaidi M, Alsarayreh A A, Rashid F L, et al. Hybrid membrane and thermal seawater desalination processes powered by fossil fuels: a comprehensive review, future challenges and prospects. *Desalination*, 2024, 583: 117694
- 39 International Organization for Standardization. ISO 23446:2021: marine technology-product water quality of seawater reverse osmosis (RO) desalination – Guidelines for municipal water supply. <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:23446:ed-1:v1:en>
- 40 International Organization for Standardization. ISO 13205:2024: marine technology – seawater desalination-vocabulary. <https://www.iso.org/obp/ui/en/#iso:std:iso:13205:ed-1:v1:en>
- 41 International Organization for Standardization. ISO 23044:2020: guidelines for softening and desalination of industrial wastewater for reuse. <https://www.iso.org/obp/ui/en/#iso:std:iso:23044:ed-1:v1:en>
- 42 Fu Z K, Wang C Y. The current status and application of seawater desalination technology (in Chinese). *China Equip Eng*, 2023, 15: 259–262 [傅泽凯, 王慈云. 海水淡化技术现状及其应用探析. *中国设备工程*, 2023, 15: 259–262]
- 43 Ding X D. The current status and development of reverse osmosis seawater desalination technology (in Chinese). *Autom Appl*, 2023, S01: 29–31, 47 [丁旭东. 反渗透海水淡化技术的现状与发展. *自动化应用*, 2023, S01: 29–31, 47]
- 44 Wang H G, Wang X J. Research progress on electrodialysis seawater desalination technology (in Chinese). *Guangdong Chem Ind*, 2017, 20: 138–140, 137 [王浩歌, 王小娟. 电渗析海水淡化技术研究进展. *广东化工*, 2017, 20: 138–140, 137]
- 45 International Organization for Standardization. ISO 23070:2020: water Reuse in Urban Areas – Guidelines for reclaimed water treatment: design principles of a RO treatment system of municipal wastewater. <https://www.iso.org/obp/ui/en/#iso:std:iso:23070:ed-1:v1:en>
- 46 Wachinski A. M. Membrane Process for Water Reuse. New York: McGraw Hill Education, 2013
- 47 Greenlee L F, Lawler D F, Freeman B D, et al. Reverse osmosis desalination: water sources, technology, and today's challenges. *Water Res*, 2009, 43: 2317–2348
- 48 International Organization for Standardization. ISO 20468-5:2021: guidelines for performance evaluation of treatment technologies for water reuse systems Part 5: membrane filtration. <https://www.iso.org/obp/ui/en/#iso:std:iso:20468-5:ed-1:v1:en>
- 49 Zhao C P. Application analysis of high-pressure pumps in membrane seawater desalination systems (in Chinese). *Pump Technol*, 2010, 1: 44–47 [赵才甫. 膜法海水淡化系统中的高压泵应用分析. *水泵技术*, 2010, 1: 44–47]
- 50 Yin F, Zhang Y, Nie S, et al. A system-level CFD simulation model for investigating the energy dissipation mechanism of seawater pump and rotary energy recovery device in SWRO desalination system. *Desalination*, 2024, 587: 117947
- 51 Liu S H, Wang C P, Huang P F, et al. Design and development of hydraulic turbine pumps for reverse osmosis seawater desalination under variable operating conditions (in Chinese). *Chem Eng Mach*, 2021, 2: 263–267 [刘思晗, 汪程鹏, 黄云飞, 等. 变工况反渗透海水淡化水力涡轮泵设计开发. *化工机械*, 2021, 2: 263–267]
- 52 International Organization for Standardization. ISO 9905:1994: technical specifications for centrifugal pumps – Class I – Amendment 1. <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:9905:ed-1:v1:en>
- 53 International Organization for Standardization. ISO 5199:2002: technical specifications for centrifugal pumps – Class II. <https://www.iso.org/obp/ui/en/#iso:std:iso:5199:ed-2:v1:en>
- 54 International Organization for Standardization. ISO 9908:2011: technical specifications for centrifugal pumps – Class III -Amendment 1. <https://www.iso.org/obp/ui/en/#iso:std:iso:9908:ed-1:v1:en>
- 55 Fan X P, Li H X, Pan Q. Material selection study for membrane seawater desalination systems (in Chinese). *Water Supply Drain*, 2009, 35: 412–414 [范晓鹏, 李宏秀, 潘旗. 膜法海水淡化系统材质选择研究. *给水排水*, 2009, 35: 412–414]
- 56 Cai M, Zhao Z, Sun W, et al. Impact of pipeline materials on water quality stability of desalinated seawater in the pipeline network. *Desalination*, 2023, 556: 116558

- 57 Ludwig H. Materials for SWRO Plants. In: Ludwig H, ed. Reverse Osmosis Seawater Desalination 2: Planning, Process Design and Engineering – A Manual for Study and Practice. Cham: Springer, 2022
- 58 International Organization for Standardization. ISO 1127:1992: stainless steel tubes – Dimensions, tolerances and conventional masses per unit length. <https://www.iso.org/obp/ui/en/#iso:std:iso:1127:ed-3:v1:en>
- 59 International Organization for Standardization. ISO 3545-1:1989: steel tubes and fittings – Symbols for use in specifications Part 1: tubes and tubular accessories with circular cross-section. <https://www.iso.org/obp/ui/en/#iso:std:8937:en>
- 60 International Organization for Standardization. ISO 4200:1991: plain end steel tubes, welded and seamless – General tables of dimensions and masses per unit length. <https://www.iso.org/obp/ui/en/#iso:std:iso:4200:ed-4:v1:en>
- 61 International Organization for Standardization. ISO 7005-1:2011: pipe flanges – Part 1: steel flanges for industrial and general service piping systems. <https://www.iso.org/obp/ui/en/#iso:std:iso:7005:-1:ed-2:v1:en>
- 62 International Organization for Standardization. ISO 7483:1991: dimensions of gaskets for use with flanges to ISO 7005. <https://www.iso.org/obp/ui/en/#iso:std:iso:7483:ed-1:v1:en>
- 63 International Organization for Standardization. ISO 1452-1:2009: plastics piping systems for water supply and for buried and above-ground drainage and sewerage under pressure – Unplasticized poly(vinyl chloride) (PVC-U). <https://www.iso.org/obp/ui/en/#iso:std:iso:1452:-1:ed-1:v1:en>
- 64 International Organization for Standardization. ISO 1452-2:2009: plastics piping systems for water supply and for buried and above-ground drainage and sewerage under pressure – Unplasticized poly(vinyl chloride) (PVC-U) Part 2: pipes. <https://www.iso.org/obp/ui/en/#iso:std:iso:1452:-2:ed-1:v1:en>
- 65 International Organization for Standardization. ISO 1452-3:2009: plastics piping systems for water supply and for buried and above-ground drainage and sewerage under pressure – Unplasticized poly(vinyl chloride) (PVC-U) - Part 3: fittings. <https://www.iso.org/obp/ui/en/#iso:std:iso:1452:-3:ed-1:v2:en>
- 66 International Organization for Standardization. ISO 1452-4:2009: plastics piping systems for water supply and for buried and above-ground drainage and sewerage under pressure – Unplasticized poly(vinyl chloride) (PVC-U) - Part 4: valves. <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:1452:-4:ed-1:v1:en>
- 67 International Organization for Standardization. ISO 1452-5:2009: plastics piping systems for water supply and for buried and above-ground drainage and sewerage under pressure – Unplasticized poly(vinyl chloride) (PVC-U) - Part 5: fitness for purpose of the system. <https://www.iso.org/obp/ui/en/#iso:std:iso:1452:-5:ed-1:v1:en>
- 68 International Organization for Standardization. ISO 4427-1:2019: plastics piping systems for water supply and for drainage and sewerage under pressure – Polyethylene (PE) - Part 1: general. <https://www.iso.org/obp/ui/en/#iso:std:iso:4427:-1:ed-2:v1:en>
- 69 International Organization for Standardization. ISO 4427-2:2019: plastics piping systems for water supply, and for drainage and sewerage under pressure – Polyethylene (PE) - Part 2: pipes. <https://www.iso.org/obp/ui/en/#iso:std:iso:4427:-2:ed-2:v1:en>
- 70 International Organization for Standardization. ISO 4427-3:2019: plastics piping systems for water supply, and for drainage and sewerage under pressure – Polyethylene (PE) - Part 3: fittings. <https://www.iso.org/obp/ui/en/#iso:std:iso:4427:-3:ed-2:v1:en>
- 71 International Organization for Standardization. ISO 4427-5:2019: plastics piping systems for water supply, and for drainage and sewerage under pressure – Polyethylene (PE) - Part 5: fitness for purpose of the system. <https://www.iso.org/obp/ui/en/#iso:std:iso:4427:-5:ed-2:v1:en>
- 72 International Organization for Standardization. ISO 15874-1:2013: plastics piping systems for hot and cold water installations – Polypropylene (PP) - Part 1: general. <https://www.iso.org/obp/ui/en/#iso:std:iso:15874:-1:ed-2:v1:en>
- 73 International Organization for Standardization. ISO 15874-2:2013: plastics piping systems for hot and cold water installations – Polypropylene (PP) - Part 2: pipes. <https://www.iso.org/obp/ui/en/#iso:std:iso:15874:-2:ed-2:v1:en>
- 74 International Organization for Standardization. ISO 15874-3:2013: plastics piping systems for hot and cold water installations – Polypropylene (PP) - Part 3: fittings. <https://www.iso.org/obp/ui/en/#iso:std:iso:15874:-3:ed-2:v1:en>
- 75 International Organization for Standardization. ISO 15874-5:2013: plastics piping systems for hot and cold water installations – Polypropylene (PP) - Part 5: fitness for purpose of the system. <https://www.iso.org/obp/ui/en/#iso:std:iso:15874:-5:ed-2:v2:en>
- 76 Kou X Y, Miao Y X, Chen J B, et al. Analysis of the environmental impact of brine discharge from seawater desalination on the marine environment (in Chinese). Shandong Chem Ind, 2019, 4: 206–208, 212 [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. 山东化工, 2019, 4: 206–208, 212]
- 77 Nasrollahi M, Motevali A, Banakar A, et al. Comparison of environmental impact on various desalination technologies. *Desalination*, 2023, 547: 116253
- 78 Lee K, Jepson W. Environmental impact of desalination: a systematic review of Life Cycle Assessment. *Desalination*, 2021, 509: 115066
- 79 Al-Kaabi A, Al-Sulaiti H, Al-Ansari T, et al. Assessment of water quality variations on pretreatment and environmental impacts of SWRO desalination. *Desalination*, 2021, 500: 114831
- 80 International Organization for Standardization. ISO 14001:2015: environmental management systems – Requirements with guidance for use.

<https://www.iso.org/obp/ui/en/#iso:std:60857:en>

- 81 International Organization for Standardization. ISO 14004:2016: environmental management systems – General guidelines on implementation. <https://www.iso.org/obp/ui/en/#iso:std:60856:en>
- 82 International Organization for Standardization. ISO 14002-2:2023: environmental management systems – Guidelines for using ISO 14001 to address environmental aspects and conditions within an environmental topic area -Part 2: water. <https://www.iso.org/obp/ui/en/#iso:std:79165:en>
- 83 International Organization for Standardization. ISO 14040:2006: environmental management – Life cycle assessment - Principles and framework. <https://www.iso.org/obp/ui/en/#iso:std:iso:14040:ed-2:v1:en>
- 84 International Organization for Standardization. ISO 14044:2006: environmental management – Life cycle assessment - Requirements and guidelines. <https://www.iso.org/obp/ui/en/#iso:std:38498:en>

Summary for “海水淡化技术及ISO国际标准化现状分析与展望”

Current development and future prospects in seawater desalination technology and ISO standards

Jianmei Xu^{1*}, Guorong Xu¹, Letian Ma^{2,3}, Chungang Xie¹, Tianbao Shao¹ & Min Wang¹

¹ The Institute of Seawater Desalination and Multipurpose Utilization, Ministry of Natural Resources, Tianjin 300192, China

² State Key Laboratory of Submarine Geoscience, Hangzhou 310012, China

³ Second Institute of Oceanography, Ministry of Natural Resources, Hangzhou 310012, China

* Corresponding author, E-mail: xujianmei_0402@126.com

As the world's population continues to grow and industry develops, the global demand for fresh water continues to increase, leading to global fresh water shortages. Desalination technology is one of the important means to solve global water shortages. The causes of global water shortages include but are not limited to: global population growth, climate change and excessive water use. In recent years, many desalination plants have been built in water-scarce areas to increase available water resources. Global desalination capacity has exceeded 100 million cubic meters per day. However, the rapid expansion of the desalination industry has also exposed many new problems, such as uneven technological development in various regions and low construction and operation efficiency. Regarding the future of seawater desalination, IDRA proposed that “reverse osmosis is moving towards a digital and standardized world” as one of the key development directions. In particular, the standardization of seawater desalination has gained significant attention as a pathway toward smarter desalination practices. The development and implementation of standards not only regulate and guide the desalination market and industry but also drive technological advancements. Furthermore, international standards in seawater desalination can foster innovation and the application of new technologies, processes, equipment, and materials while enhancing communication and cooperation among international organizations. This paper provides a systematic review of the seawater desalination industry and its technological advancements, highlighting its transition toward large-scale, eco-friendly, and standardized solutions. Since international standards for seawater desalination are primarily set by the International Organization for Standardization (ISO), this study focuses on the development and application of ISO standards in this field. The relevant ISO standards have been categorized into three groups: desalination-specific ISO standards, generic technology ISO standards, and process-applied ISO standards. In 2015, ISO established the Seawater Desalination Working Group (ISO/TC8/SC13/WG3) under the Ships and Marine Technology Committee/Marine Technology Subcommittee. To date, ISO/TC8/SC13/WG3 has published two desalination-specific ISO standards related to Reverse Osmosis (RO) product water and basic desalination vocabulary. Additionally, membrane desalination technologies such as RO, ultrafiltration (UF), and nanofiltration (NF) are applicable to other water treatment plants. As a result, generic technology ISO standards related to membrane filtration technologies can guide the design and evaluation of membrane-based seawater desalination. Moreover, seawater desalination engineering is a multidisciplinary integration system. Process-applied ISO standards help coordinate various aspects, including engineering management, operations, equipment, testing, and quality control, ensuring the efficient construction and operation of standardized desalination plants. Since all ISO standards are developed under the guidance of Technical Committees (TCs), this study conducts a comprehensive review of TCs relevant to seawater desalination, aligned with the desalination process flow, to provide deeper insights into the standards' content and applications. Finally, this paper explores and proposes future prospects for developing and revising ISO standards in seawater desalination. The study aims to identify applicable ISO standards that facilitate regulatory desalination management, promote the sustainable development of desalination industries, enhance engineering efficiency, and drive technological innovation. Additionally, we encourage experts and stakeholders in the seawater desalination sector to actively participate in ISO/TC8/SC13/WG3 to contribute to drafting desalination standards, accelerating the standardization process, and fostering high-quality development in the industry.

seawater desalination, technology, standardization, ISO standards

doi: [10.1360/TB-2024-1106](https://doi.org/10.1360/TB-2024-1106)