

淡化海水纳入城市供水系统的水质风险防控技术

王欣婷, 牟春霞, 孔飞飞, 王琳

(中国海洋大学 环境科学与工程学院, 山东 青岛 266100)

摘要: 淡化海水是重要的淡水补充水, 其水质好, 但 pH、碱度、硬度都很低。这种特质的水极具侵蚀性, 若不加处理直接纳入城市供水系统会造成管网的腐蚀。因此, 本文从管道优选、管材防腐和淡化水厂后处理 (投加药剂法、溶解矿石法、掺混法、添加镁法) 等 3 个方面, 系统地介绍了目前淡化海水风险防控技术的原理、适用条件和发展现状, 可为今后实现淡化海水的规模化应用提供参考。

关键词: 管材优选; 管道防腐; 水厂后处理; 掺混

中图分类号: P747

文献标识码: A

文章编号: 1007-6336(2021)04-0625-06

Water quality risk prevention and control technology integrated into desalination seawater in urban water supply system

WANG Xin-ting, MU Chun-xia, KONG Fei-fei, WANG Lin

(College of Environmental Science and Engineering, Ocean University of China, Qingdao 266100, China)

Abstract: Desalination seawater is an important source for supplementing fresh water, its water quality is high, but the pH, alkalinity and hardness of desalination seawater are very low. Desalination seawater is corrosive due to these characteristics, which will cause damage to the pipe network if it directly brought into the urban water supply system without treatment. Therefore, this review systematically introduce the desalination of risk prevention and control technology principle, applicable conditions and development present situation from the three aspects of the pipe selection, pipe anticorrosion and desalination plant post-processing method (additive agent, dissolving ore, blending, adding magnesium method). This review can provide useful reference for the large-scale application of the desalination in the future.

Key words: optimization of pipes; anticorrosion of pipes; post treatment in water plant; blending

进入 21 世纪以来, 淡水资源短缺已经成为全球性问题, 预计到 2050 年世界 75% 的人口将面临淡水危机^[1]。因此, 寻找和开发新的淡水资源已迫在眉睫。淡化海水具有水质好、供水稳定的特点, 近年来被大力推广。在极度缺水的中东和北非等地区, 淡化海水是重要的淡水来源^[2]。在降雨不确定性和用水量急剧增加的影响下, 美

国^[3]、英国^[4]、澳大利亚^[5]也不断扩大其海水淡化工程规模, 以确保城市供水的稳定性和连续性。2012 年, 国家发改委发布《海水淡化产业发展“十二五规划”》, 将我国的海水淡化工程建设推向高潮。截至 2017 年底, 环渤海地区海水淡化工程的总规模约为全国的 72.4%, 是我国海水淡化工程应用最广泛的地区^[6], 但直接以淡化

收稿日期: 2020-05-22, 修订日期: 2020-07-14

基金项目: 滨海城市海水淡化综合利用技术研究及应用(2018YFC0408000); 西北典型区生活节水与污水再生利用技术研发与示范(2018YFC0408004)

作者简介: 王欣婷(1997-), 女, 山东淄博人, 硕士研究生, 主要研究方向为淡化海水的处理和应用, E-mail: 1119660367@qq.com

通讯作者: 王琳(1966-), 女, 山东潍坊人, 博士生导师, 教授, 主要研究方向为污水处理与回用, E-mail: lwangouc@126.com

海水作为居民饮用水尚存在一定的难度^[7]。

海水淡化技术多种多样,以反渗透法(seawater reverse osmosis, SWRO)为代表的膜处理技术是目前应用最广泛的技术之一。反渗透法的原理是在海水进水的一侧施加压力,使水分子克服渗透压差通过反渗透膜(reverse osmosis膜, RO膜),同时盐分被截留,进而获得淡化海水。RO膜能有效截留海水中的离子、大分子化合物、细菌和病毒等,脱盐率高达95%^[8],这导致淡化海水pH低、硬度低(缺乏Ca²⁺、Mg²⁺等)、缓冲能力差^[9]。经淡化处理的海水极具侵蚀性,容易使管道进入不稳定的腐蚀状态,释放出Fe²⁺、Fe³⁺、Cu²⁺、Zn²⁺等^[10],造成淡化水水质恶化,引发“红水”和“黄水”问题。世界卫生组织(WHO)在《饮用水中的营养素》^[1]中指出:镁对人类健康至关重要^[11],而淡化海水中几乎不含有钙和镁。有研究发现,饮用淡化海水的人群与饮用普通淡水的人群相比,体内的血镁水平更低,脑血管疾病的发病率和死亡率更高,所以他推测未经处理的淡化海水会使人们的生存率下降^[12]。除钙和镁以外,氟、硼等微量元素也影响着人体健康。淡化水的硼含量是饮用水的1.8倍^[13],而过量的硼会导致腹泻、肠炎、肾损伤等疾病^[14];淡化水的氟含量仅为饮用水的2%^[15],而水中的氟浓度过低会引发龋齿。因此,淡化海水对城市管网系统和人体健康均有不同程度的威胁。

为了充分利用淡化海水,同时避免以上的种种风险,就要采取合理有效的水质风险防控措施^[16]。目前已有的风险防控技术主要包括两个方面:一是选择合适的管材及采用管道防腐技术减缓腐蚀;二是采用投加药剂和掺混处理等技术手段调节淡化海水水质。但到目前为止,风险防控技术研究较少且单一,往往只集中在后处理的某个工艺单元上,并没有综合考虑水质条件的改变对城市管网的具体影响。后处理步骤是否能够在改善淡化水水质条件的基础上,维持淡化水自身的化学稳定性和保障供水管网的安全,还有待进一步的研究。

本文指出了当前限制淡化海水大规模纳入

城市供水系统的因素,并对已有的淡化海水水质风险防控技术的原理、适用条件、防控效果进行了详细介绍,总结了目前各项技术的优势和不足,展望了未来的发展方向。

1 管材优选

供水管网纵横交叉、层层铺设于地下,由不同管径和材质的管道组成,连接自来水厂、调节构筑物(如水塔)和千家万户^[17],是城市输配水系统中最关键的一环。供水管网携带水厂处理后的出水,管道内水的水质指标如色度、浊度、余氯、大肠杆菌数和消毒副产物(disinfection by products, DBPs)会随着管网中水流速度的变化而变化。在远离城市中心的地区,较慢的水流速度会使水力停留时间(通常也称为水龄)长达数天,导致管网中余氯含量降低,再加上缺氧环境,最终使厌氧微生物大量繁殖,微生物产生的某些代谢产物如硫化氢等能够造成管材腐蚀^[18]。

供水管材根据材质不同,可分为金属和非金属管材。《全国城市供水管网改造近期规划(2006年—2007年)》指出,灰口铸铁、球墨铸铁和钢等金属是我国供水管材的首选,使用率高达86%^[19]。金属是否是城市管网供水过程的最佳选择,目前仍没有一个确定的答案。蔡美全等研究了淡化海水在不同管材中进行输配水时的水质变化,结果表明,PVC管及内衬环氧树脂管对淡化海水水质稳定性的影响小于铸铁管、镀锌管、内衬水泥砂浆管^[20]。李晓敏的研究也表明,对于维持淡化海水水质稳定性来说,聚氨酯内衬管效果较好,环氧树脂内衬管次之,水泥砂浆内衬管较差^[21]。

表1概述了不同管材的特性,并列出了其对输水水质的影响。考虑到强度、刚度、韧性以及安装难度等种种因素,金属管材尤其是不锈钢管材,与非金属管材相比仍有不可替代的优势。高丽飞等研究发现,2205双相不锈钢在一级RO淡化水中点蚀敏感性低,耐点蚀性能好^[22]。而李超等^[23]研究发现,2205不锈钢的耐点蚀性能和耐缝隙腐蚀性能均明显优于316L不锈钢,这也

注1:世界卫生组织. 饮用水中的营养素 [M]. 北京: 人民卫生出版社, 2017: 93-95.

证明了高丽飞的结论^[22]。但不锈钢种类繁多,有一些类型并不适合作为淡化海水的供水管材,如304不锈钢的点蚀敏感性强,在输送淡化海水的过程中易产生严重腐蚀现象^[24]。

表1 不同管材特性及对输水水质的影响

Tab.1 Characteristics of different pipes and their effects on water quality

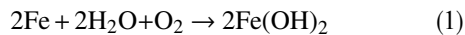
管材	特性	对输水水质的影响
镀锌管	加工制作简单,价格低廉;极易发生腐蚀结垢现象	短时间内可溶出大量的锌,还可能为水体带来铅、铁、钙等污染物 ^[25]
铸铁管	耐腐蚀性能较好,价格便宜;重量大而不均,易发生爆管	易对水体造成铁污染,使水体色度、浊度升高
钢管	耐压力高、韧性强、重量轻;在溶解氧和余氯含量高的水体中易腐蚀	可能对水体造成铁污染,产生红水现象
不锈钢管	良好的耐腐蚀性;价格昂贵	基本无影响
内衬水泥砂浆球墨铸铁管	性价比较高,抗腐蚀性能较好;溶出较高,会改变水质	溶出物使水的硬度升高,pH值上升,促进水中DPBs的生成
PVC管与内衬环氧树脂钢管	耐腐蚀性能好,无结垢问题,内壁光滑,水头损失小,输水性能好涂料必须均匀覆盖,否则局部腐蚀加重	基本无影响

在选择城市输配水系统的管道材质时,需要综合考虑安装成本、使用寿命和管材对输水水质的影响。随着我国经济的不断发展和缺水问题的日益严重,淡化海水已经成为重要的饮用水补充水,因此将传统的、易腐蚀的铸铁管道更换为不锈钢管道或PVC管不失为一个良好的发展方向。

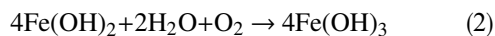
2 管道防腐

2.1 管道腐蚀原理

供水管网中发生的腐蚀一般为电化学腐蚀,包括缝隙腐蚀、点腐蚀、微生物腐蚀等多种过程,受水质、水流量、水流速度、管材等多条件的影响。淡化水可视为电解质溶液,在有氧的条件下,溶解氧作为主要电子受体参与到腐蚀反应中,且溶解氧含量越高,腐蚀越剧烈。以碳钢为例,电化学腐蚀反应方程式如下:



在(1)过程的持续作用下,碳钢不断被溶解,造成管壁变薄,控制闸门处的碳钢阀门、阀瓣也可被腐蚀破坏,造成阀门失效。而(1)过程产生的腐蚀产物可以在有氧的条件下被进一步氧化:



(2)过程的腐蚀产物 $\text{Fe}(\text{OH})_3$ 性质更稳定,可在碳钢管道的内壁上形成一层薄膜,随着(2)过程的运行, $\text{Fe}(\text{OH})_3$ 膜不断增厚,管径变小,管壁变脆,容易造成管道堵塞甚至破裂。而在

$\text{Fe}(\text{OH})_3$ 膜疏松的地方,淡化水中的 Cl^- 会诱导碳钢发生点腐蚀,使管道漏水^[26]。

2.2 管道防腐措施

在金属管道内壁涂覆超疏水涂层以实现管道防腐,是近年来热门的研究领域^[27]。具有自清洁性的超疏水涂层使淡化水难以接触到金属管道,被认为是提高金属材料耐腐蚀性的有效方法之一^[28]。Li等制备的Cu-Zn超疏水涂层具有优良的自清洁性、防腐防垢性和机械热稳定性,且在连续使用6个月后,金属未受到明显腐蚀^[29]。有学者开发了低成本的石墨烯纳米片—有机硅氧烷—丙烯酸树脂超疏水涂层,将其涂覆在金属表面并暴露在室外120天后,金属表面完好^[30]。但超疏水涂层目前造价高于普通防腐涂层,如何降低造价以实现超疏水涂层的大规模应用,从而维持淡化水在城市管网中的稳定性,这还有待进一步研究。

3 淡化水后处理

淡化海水具有低碱度和低含盐量的特性,与自来水的理化性质区别很大,因此淡化水直接进入城市管网会打破管网中原有的水垢平衡^[31],使管道内水垢加速溶解并露出新鲜的金属表面,水中的 Cl^- 在溶解氧的作用下对管道进行点蚀,造成水质恶化。城市管网可视作一个复杂的反应容器,出水水质不止受到管材本身属性的影响,还受到水体自身因素(硬度、碱度、pH、温

度、溶解氧、离子浓度等)的影响,甚至后者才是出水水质恶化的主要原因,因此通过调节淡化水水质可以有效减少输配水过程出现的问题。

但长期以来,国内外有关淡化水纳入城市供水系统的风险防控技术的研究,多集中在输配水管网的保护和升级,面对调节淡化海水水质以提高淡化水稳定性的研究相对较少。提高淡化海水的稳定性,即通过一定的措施提高它的硬度、碱度、pH等,从而达到优质出水的目的。水的稳定性可通过 Langelier 饱和指数(Langelier saturation index, LSI)和碳酸钙沉淀势(calcium carbonate precipitation potential, CAPP)来表征^[32]。常见的淡化水厂后处理方法主要有投加药剂法、溶解矿石法、掺混法和添加镁法等。

(1)投加药剂法:投加药剂法是一种向淡化水中直接投加化学药剂来提高淡化海水水质稳定性的风险防控技术,具有简便快捷、占地面积小等优点。温柔等通过滴加 NaOH 调节 pH,并投加 NaHCO₃ 增加碱度,以提高淡化水的稳定性,抑制管网的铁释放,进而避免了“黄水”的问题^[33]。吕振华等通过投加 NaHCO₃ 调节水体碱度和 pH,调节后的淡化水 CAPP 仅为 6.6 mg/L,水质基本保持稳定,可以直接进入市政管网系统^[34]。但通过投加药剂来调节淡化水水质,成本过高,仅适用于小型海水淡化厂。此外,投加药剂法往往会引入大量的杂质离子(Na⁺、Cl⁻),这更容易引起管道腐蚀。

(2)溶解矿石法:溶解矿石法指的是向淡化水中通入 CO₂ 并通过石灰石(主要成分为 CaCO₃)滤床,这样石灰石中的 CaCO₃ 会形成 CaHCO₃ 溶解在淡化水中,淡化水的碱度和硬度得以提高。经过溶解矿石法处理的水叫做矿化水。李晓敏等研究发现淡化水在内衬水泥砂浆管道中可通过内衬和水垢的溶解实现自矿化过程,但无法判断常年运行管道中自矿化的持续时间和持续效果^[35],而且长时间的运行会破坏管道内衬及原有的水垢平衡,造成管道腐蚀,故建议淡化水经过矿化处理后再排入管网。张凯的研究表明,

随着 Ca²⁺浓度的增加,淡化水的稳定性不断提高^[36]。何国华等^[37]采用溶解矿石法提高淡化水稳定性,通过优化 CO₂ 通入体积流量和搅拌速率,可有效提高淡化水的水质稳定性(LSI 为 0.44>0)。溶解矿石法效果显著,价格低廉,在实际配水过程中应用广泛,但缺点是石灰石的溶解过程耗时久,并且存在逆溶解现象,添加硫酸虽然可以缩短反应时间,但会引入 SO₄²⁻使硫酸盐还原菌大量繁殖,诱发管道的微生物腐蚀^[38],同时造成水温升高。

(3)掺混法:淡化水与自来水进行一定比例的掺混所形成的混合水,既可以补充城市饮用水供水的不足,又可以弥补淡化水直接进入管网系统所造成的各种问题,是目前淡化海水纳入城市供水系统风险防控技术中最经济便捷有效的一种方法,得到了广泛应用^[39]。根据魏成吉的研究,掺混体积比超过 4:1(自来水:淡化水)时得到的混合水水质已经接近自来水的化学稳定性^[40]。史昱骁等研究得出,自来水与淡化水掺混比为 3:1~5:1 时,掺混水 pH 波动范围小,缓冲能力好^[41]。但淡化海水中未被完全去除的 Br⁻会与自来水消毒过程中产生的余氯结合,生成遗传毒性较高的消毒副产物^[42],影响人体健康。

(4)添加镁法:以色列卫生部发布的淡化海水饮用标准²中建议向淡化水中添加镁以保护人体健康^[43]。Deng 等发现镁的添加减少了碳酸钙沉淀的量,改变了铸铁试件上碳酸钙沉淀的形态和微观结构,能有效减少球墨铸铁的腐蚀^[44]。Kousa 的研究表明饮用水中镁含量每增加 1 mg/L,急性心肌梗死的风险就降低 4.9%^[45]。目前,淡化水厂主要通过投加含镁的化学试剂(如 MgCO₃)提高淡化水中的 Mg²⁺浓度,但大规模添加镁的成本过高,而且镁如何降低管道结垢和腐蚀倾向的机理尚不明确,因此,是否在淡化海水中添加镁具有争议性。

4 结语与展望

随着城市缺水问题的日益严峻和海水淡化

注 2: LAHAV O, BIRNHACK L. Quality criteria for desalinated water following post-treatment[J]. Desalination, 2007, 207(1-3): 286-303.

技术的不断发展,如何将淡化海水安全经济的纳入城市供水系统,来补充传统水资源的不足,是海水淡化领域下一阶段的工作重点。但大量的研究表明,淡化海水直接进入城市管网会对管材和水质产生不可弥补的损害。因此,必须通过管材优选、管道防腐以及水厂后处理技术来维持输水管网中淡化水水质的稳定性,使末端出水符合饮用水质量标准。合理有效的水质风险防控技术是实现海淡化水利用的重要前提,一般不使用单一的防控技术,而是多种技术结合使用。目前,我国沿海地区已经开发出多种风险防控手段,以解决淡化海水作为市政用水的风险,如青岛市在实际工程中采用以管网掺混供水、分质供水、自来水厂末端混合处理供水等多种方式提高淡化海水在城市管网中的稳定性;天津市将淡化海水输送至水库和自来水水源地,并通过掺混来提高淡化水稳定性。但这些方法仅适用于少量淡化海水纳入城市供水系统,未考虑淡化海水对市政管网造成的潜在损害。

未来我国沿海地区可大力发展海水淡化产业,并依托海水淡化厂构建试点区,全面推行将淡化海水作为主要市政用水的工程。在更换耐腐蚀性更好的管网的前提下,各地政府出台符合自身发展情况的淡化海水供水使用规范(如青岛市发布的《海水淡化生活饮用水集中式供水单位卫生管理规范》),通过调节淡化水水质实现直接供水。以网状的模式修建海水淡化厂,可以不断扩大淡化海水的应用规模,在严重缺水的沿海地区实现淡化海水作为居民饮用水这一构想,从而全面提升我国人均水资源的占有量,并打造沿海地区海水淡化产业带,实现以淡化海水作为城市市政用水重要水源的愿景。同时,供水企业和政府部门应加强对混合水水质的监控。所以,将淡化海水引入城市供水管网,构建新型城市管网输配水体系,并利用有效风险防控技术来稳定淡化水水质,是淡化海水规模化应用的未来方向。

参考文献:

- [1] LIYANAARACHCHI S, SHU L, MUTHUKUMARAN S, et al. Problems in seawater industrial desalination processes and potential sustainable solutions: a review[J]. *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*, 2013, 13(2): 203-214.
- [2] The World Bank. Renewable energy desalination: an emerging solution to close the water gap in the Middle East and North Africa[R]. Washington, D. C: The World Bank, 2012.
- [3] LOCKWOOD D. Thirsty California turns to sea and sewer[J]. *ACS Central Science*, 2015, 1(3): 108-111.
- [4] LATTEMANN S, HÖPNER T. Environmental impact and impact assessment of seawater desalination[J]. *Desalination*, 2008, 220(1/2/3): 1-15.
- [5] EL SALIBY I, OKOUR Y, SHON H K, et al. Desalination plants in Australia, review and facts[J]. *Desalination*, 2009, 247(1/2/3): 1-14.
- [6] 黄鹏飞, 刘南希, 王锐浩, 等. 环渤海地区海水淡化发展研究[J]. *环境科学与管理*, 2019, 44(12): 40-44.
- [7] 黄立业, 李莎, 史筱飞, 等. 山东省海水淡化产业发展对策研究[J]. *工业水处理*, 2019, 39(8): 5-8.
- [8] 张权, 张岩, 张艺缤. 天津市淡化海水进入市政管网掺混比例研究[J]. *供水技术*, 2018, 12(1): 62-64.
- [9] 于金旗, 王为民, 程方琳, 等. 超滤-反渗透工艺处理热法海淡浓盐水的中试研究[J]. *水处理技术*, 2018, 44(3): 109-113.
- [10] BIRNHACK L, VOUTCHKOV N, LAHAV O. Fundamental chemistry and engineering aspects of post-treatment processes for desalinated water — a review[J]. *Desalination*, 2011, 273(1): 6-22.
- [11] DELION N, MAUGUIN G, CORSIN P. Importance and impact of post treatments on design and operation of SWRO plants[J]. *Desalination*, 2004, 165(8): 323-334.
- [12] World Health Organization. Nutrients in drinking water [EB/OL]. (2005-01-11). http://www.who.int/water_sanitation_health/dwq/nutrientsindw.pdf.
- [13] SHLEZINGER M, AMITAI Y, GOLDENBERG I, et al. Desalinated seawater supply and all-cause mortality in hospitalized acute myocardial infarction patients from the acute coronary syndrome Israeli survey 2002—2013[J]. *International Journal of Cardiology*, 2016, 220: 544-550.
- [14] NADAV N. Boron removal from seawater reverse osmosis permeate utilizing selective ion exchange resin[J]. *Desalination*, 1999, 124(1/2/3): 131-135.
- [15] 徐赐贤, 董少霞, 路凯. 海水淡化后水质特征及对人体健康影响[J]. *环境卫生学杂志*, 2012, 2(6): 313-319, 327.
- [16] 刘运起, 赵丽军, SHEN Y F, 等. 1991—2005年全国地方性氟中毒监测结果分析[J]. *中国地方病学杂志*, 2006, 25(6): 665-669.
- [17] 严熙世, 刘遂庆. 给水排水管网系统[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2006: 23.
- [18] 陈俊宇, 李伟英, 张骏鹏, 等. 以南方某市为例探究供水管网系统生物稳定性[J]. *给水排水*, 2019, 45(6): 114-119, 125.
- [19] SARINA P, SNOEYINK V L, BEBEEB J, et al. Iron release

- from corroded iron pipes in drinking water distribution systems: effect of dissolved oxygen[J]. *Water Research*, 2004, 38(5): 1259-1269.
- [20] 蔡美全, 温 柔, 刘文君. 管材对淡化海水在管网中水质稳定性的影响[J]. *水处理技术*, 2018, 44(11): 26-32.
- [21] 李晓敏. 淡化海水在输配水管网中的化学稳定性和控制措施研究[D]. 北京: 清华大学, 2017.
- [22] 高丽飞, 杜 敏. 2205双相不锈钢在淡化海水中的点蚀行为[J]. *装备环境工程*, 2017, 14(2): 11-18.
- [23] 李 超, 吴 恒, 张 波, 等. 典型不锈钢在淡化海水中的耐腐蚀性能研究[J]. *装备环境工程*, 2017, 14(2): 67-71.
- [24] 高丽飞, 杜 敏. 304不锈钢在淡化海水中的点蚀行为[J]. *腐蚀科学与防护技术*, 2017, 29(1): 8-14.
- [25] 周 韬. 铁质给水管道内壁腐蚀对管网水质影响研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2006.
- [26] 张宝宏, 丛文博, 杨 萍. 金属电化学腐蚀与防护[M]. 北京: 化学工业出版社, 2011: 172-175.
- [27] TOMA M, LOGET G, CORN R M. Flexible Teflon nanocone array surfaces with tunable superhydrophobicity for self-cleaning and aqueous droplet patterning[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2014, 6(14): 11110-11117.
- [28] ZHANG H F, YIN L, SHI S Y, et al. Facile and fast fabrication method for mechanically robust superhydrophobic surface on aluminum foil[J]. *Microelectronic Engineering*, 2015, 141: 238-242.
- [29] LI H, YU SR, HAN XX, et al. A stable hierarchical superhydrophobic coating on pipeline steel surface with self-cleaning, anticorrosion, and anti-scaling properties[J]. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2016, 503: 43-52.
- [30] UZOMA P C, LIU F C, XU L, et al. Superhydrophobicity, conductivity and anticorrosion of robust siloxane-acrylic coatings modified with graphene nanosheets[J]. *Progress in Organic Coatings*, 2019, 127: 239-251.
- [31] 李 喆, 刘 杨, 张学伟, 等. 海水淡化水与地表水掺混后的水质稳定性研究[J]. *供水技术*, 2013, 7(4): 19-24.
- [32] 胡小佳. 水质变化对供水管网铁释放的影响及其机理研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2012.
- [33] 温 柔, 刘文君. 淡化海水水质调节技术对管网铁释放的影响[J]. *给水排水*, 2016, 42(9): 110-115.
- [34] 吕振华, 高学理, 徐 源, 等. 淡化海水后处理对金属管材腐蚀性的影响研究[J]. *水处理技术*, 2017, 43(4): 15-18.
- [35] 李晓敏, 汪 隽, 陈 超, 等. 淡化海水进入水泥砂浆内衬管后的水质化学稳定性[J]. *中国给水排水*, 2016, 32(17): 43-47.
- [36] 张 凯, 韩 旭, 朱金亮, 等. 矿化海水淡化水在镀锌管中的化学稳定性研究[J]. *海河水利*, 2016, (3): 60-64.
- [37] 何国华, 王学魁, 唐 娜, 等. 溶解矿石法矿化海水淡化水的研究[J]. *水处理技术*, 2014, 40(5): 43-45, 51.
- [38] SUN H F, SHI B Y, YANG F, et al. Effects of sulfate on heavy metal release from iron corrosion scales in drinking water distribution system[J]. *Water Research*, 2017, 114: 69-77.
- [39] 闫佳伟, 王红瑞, 朱中凡, 等. 我国海水淡化若干问题及对策[J/OL]. *南水北调与水利科技*. (2019-11-01). <http://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20191101.0949.002.html>.
- [40] 魏成吉, 张宇菲, 吴绍全, 等. 自来水与淡化海水掺混和调质对城市供水管网腐蚀性研究[J]. *水处理技术*, 2016, 42(12): 60-63, 67.
- [41] 史昱骁, 田一梅, 赵 鹏, 等. 自来水与海水淡化水掺混和调质对既有输配水管道铁释放的影响研究[J]. *给水排水*, 2013, 39(11): 150-155.
- [42] POWERS L, GONSIOR M. Non-targeted screening of disinfection by-products in desalination plants using mass spectrometry: A review[J]. *Current Opinion in Environmental Science & Health*, 2019, 7: 52-60.
- [43] PENN R, BIRNHACK L, ADIN A, et al. New desalinated drinking water regulations are met by an innovative post-treatment process for improved public health[J]. *Water Science and Technology: Water Supply*, 2009, 9(3): 225-231.
- [44] DENG A Q, XIE R J, GOMEZ M, et al. Impact of pH level and magnesium addition on corrosion of re-mineralized seawater reverse osmosis membrane (SWRO) product water on pipeline materials[J]. *Desalination*, 2014, 351: 171-183.
- [45] KOUSA A. Magnesium and calcium in drinking water and heart diseases[M]//NRIAGU J. *Encyclopedia of Environmental Health*. 2nd ed. Amsterdam: Elsevier, 2015: 163-172.