

# Review of Water Quality Risk and Assessment Methods of Desalinated Seawater Supply

Lin Wang\*, Feifei Kong, Chunxia Mou

School of Environmental Science and Engineering, Ocean University of China, Qingdao Shandong  
Email: \*lwangouc@126.com

Received: Jun. 24<sup>th</sup>, 2019; accepted: Jul. 15<sup>th</sup>, 2019; published: Jul. 26<sup>th</sup>, 2019

---

## Abstract

At present, the shortage of freshwater resources has become a limitation of China's economic social development. As a non-conventional high-quality water source, it is urgent and imperative for desalinated seawater to be incorporated into the urban water supply system. This paper analyzes the status quo of seawater desalination in China and the risk of desalinated seawater into the water supply system, and reviews the water quality risk assessment methods of the water supply system. It is found that the scale of seawater desalination in China is gradually expanding, the desalination technology is gradually mature, but the desalinated seawater treated by reverse osmosis as drinking water still has the health risks such as insufficient minerals, low hardness, low fluoride, excessive boron, residual cleaning disinfectant, and disinfection by-products. Meanwhile, there is a risk of pipeline corrosion during the process of distribution. In order to ensure the safety of drinking water and facilitate the management of water supply system using desalinated water, the seawater desalination technology should be vigorously developed and do a good job in the whole-process water quality risk assessment of the urban water supply system using desalinated water. The future development prospect of seawater desalination technology and several suggestions for the whole-process risk assessment are proposed.

## Keywords

Risk Assessment, Desalinated Seawater, Water Supply System

---

# 海水淡化水纳入城市供水水质风险与评估方法综述

王琳\*, 孔飞飞, 牟春霞

中国海洋大学环境科学与工程学院, 山东 青岛  
Email: \*lwangouc@126.com

---

作者简介: 王琳(1966-), 女, 山东潍坊人, 教授, 博士生导师, 主要从事水资源利用与水污染控制方面的研究工作。  
\*通讯作者。

收稿日期：2019年6月24日；录用日期：2019年7月15日；发布日期：2019年7月26日

## 摘要

目前淡水资源短缺已成为制约我国经济社会发展的因素，海水淡化水作为非常规优质水源，纳入城市供水系统是刻不容缓、势在必行的。本文分析了我国海水淡化现状以及海水淡化水纳入供水系统水质风险，综述了供水系统水质风险评估方法，发现了我国海水淡化规模逐渐扩大，海水淡化技术逐渐成熟，但经过反渗透法处理的海水淡化水作为饮用水仍然存在矿物质不足、硬度低、氟化物过低、硼过量及清洗、消毒剂有残留、消毒副产物等健康风险，输配过程还存在管道腐蚀风险。为了保障饮水安全、方便海水淡化水供水系统的管理，应大力发展海水淡化技术，并做好海水淡化水纳入城市供水系统全过程水质风险评估，展望了海水淡化技术未来发展前景并对全过程风险评估提出了几点建议。

## 关键词

风险评估，海水淡化水，供水系统

Copyright © 2019 by author(s) and Wuhan University.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

我国是世界 13 个贫水国之一，缺水已成为我国经济发展的制约问题。海水淡化水作为高纯度、高品质的非常规水源，具有硬度小、碱度低、水质偏酸性、缓冲能力低等特点[1][2]，如果海水淡化水能纳入市政应用，将能够很好地解决水资源短缺这一大问题。目前世界上已有很多地区将海水淡化水作为饮用水，尤其是中东缺水地区，如以色列 80% 的海水淡化水用于饮用水的供给[1][3]。我国也在大力发展海水淡化产业。截止 2015 年底，全国已建成海水淡化产水规模 1030 万吨/日，其中，反渗透膜技术约占总产水规模的 65% [4]。

相关学者对海水淡化水的检测结果，各项指标基本达到饮用水卫生标准，个别指标甚至远远优于该标准，但是海水淡化水作为饮用水纳入城市供水系统还是存在一些风险。据报道，山东省长岛县和浙江省嵊泗县的海水淡化示范工程，海水淡化水进入市政自来水管网时均出现了“黄水”或“红水”现象。虞吉寅[5]研究了岱山县海水淡化水与自来水联合供应的某一渔村管道末梢铁的含量，发现远远高于出厂水中铁含量。海水淡化水纳入城市供水系统应进行水质风险评估，为海水淡化水后处理的调整以及管网的优化提供参考，为供水系统的管理提供预警和防控目标，从而更好地保障居民用水安全。

## 2. 海水淡化发展现状

### 2.1. 国内外海水淡化工程规模

自 1960 年以来，全国海水淡化产业快速发展，到 2016 年全国产水量已达到 9559 万吨/日[6]。从全球的海水淡化项目的分布看，主要集中在中东和北美地区，其中规模比较大的海水淡化工程有沙特阿拉伯的海水淡化厂、阿什凯隆海水淡化厂、Umm al Houl 海水淡化电厂，产水量分别为 46 万吨/日、33 万吨/日、54.5 万吨/日[7][8]。

我国海水淡化工程规模也在逐渐扩大，截止到 2017 年，我国已建成海水淡化工程 136 个，产水能力达到 118.91 万吨/日，其中最大规模的海水淡化工程产水能力为 20 万吨/日[9]。目前海水淡化工程主要分布在沿海地

区, 产水规模最大的是天津市, 达到 31.72 万吨/日; 其次是山东省, 达到 28.26 万吨/日。

## 2.2. 海水淡化技术

海水淡化技术种类很多, 主要包括反渗透、低温多效、多级闪蒸、离子交换法及冻结法等。随着海水淡化技术发展, 反渗透、低温多效、多级闪蒸已成为国际上商业化应用的主流海水淡化技术[10]。目前我国主要应用反渗透法、低温多效法来进行海水淡化。截止到 2017 年, 在全国已建成投产的 136 个海水淡化工程中, 反渗透法 117 个, 产水能力为 81.35 万吨/日, 占全国总产水能力的 68.43%; 低温多效法 16 个, 产水能力为 36.91 万吨/日, 占全国总产水能力的 31.04%; 多级闪蒸法 1 个, 产水能力 6000 吨/日, 占全国总产水能力的 0.50%; 电渗析法 2 个, 产水能力 300 吨/日, 占全国总产水能力的 0.03% [9]。

由于具有出水纯度高、供给稳定及综合成本低等优点, 目前用于市政供水的海水淡化厂多采用反渗透法[11]。

## 2.3. 海水淡化成本

随着海水淡化技术的改进和新材料的研发使用, 海水淡化的投资、运行成本逐年下降。目前应用反渗透法进行海水淡化的成本大约在 4.16~5.59 元/吨, 达到饮用水级别的海水淡化成本约为 7 元/吨; 应用低温多效法进行海水淡化的成本大约在 4.88~6.70 元/吨[12] [13]。随着海水淡化技术的发展, 与其他供水方式相比, 海水淡化水的综合成本逐渐取得一定的优势。张明宇[12]等将反渗透制取的饮用水级别海水淡化水的综合成本与使用净水器、饮用桶装水的居民生活用水的综合成本进行比较, 发现海水淡化水的综合成本低 1~3 元/吨。闫玉莲[6]等将海水淡化水成本与自来水成本、远程调水成本进行比较, 发现海水淡化水成本虽高于自来水成本, 但已经与远程调水成本相当, 具有一定的市场竞争力。

海水淡化成本逐年下降, 但相比于地表水供水成本仍然过高。我国应大力发展海水淡化技术, 保证出水质量的同时降低成本, 增强海水淡化水的市场竞争力。

## 2.4. 存在的问题

目前我国海水淡化的发展主要存在四方面的问题: 1) 核心技术: 我国海水淡化技术已有了很大的改进, 但与国外的技术水平相比, 仍存在很大的差距, 目前应用的核心装置许多仍是国外生产的, 国产化程度不高; 2) 政策问题: 目前还没有健全的海水淡化法律法规和相关的标准体系。由于海水的特殊性, 对于生产、运输过程出现的各种问题, 现有的标准难以解决; 3) 环境污染问题: 由于在淡化处理的过程中加入了化学试剂, 浓海水直接排放可能对海域环境有影响; 同时为了防止管道腐蚀, 对海水淡化水进行处理时可能会加入含磷药剂, 导致海水淡化水进入环境可能会引起水体富营养化; 4) 反渗透法处理后得到的海水淡化水硬度低、具有腐蚀性, 对人体有潜在健康风险, 进入管道会对管道进行腐蚀[14]。

## 3. 海水淡化水作为饮用水进入供水系统风险分析

根据海水淡化的相关研究资料以及现行的饮用水卫生标准, 目前用于饮用的海水淡化水主要关注的指标有硬度、碱度、溶解性总固体、钙、镁、氟化物、硼等。根据刘艳辉[15]对海水淡化水的检测结果可知, 通过反渗透处理, 海水淡化水除硼外, 其他指标基本达到饮用水标准, 不过海水淡化水在反渗过程、消毒过程、输配过程有一些潜在水质风险需要进行评估。

### 3.1. 反渗过程的水质风险

反渗透膜能截留海水中病原微生物、病毒等有害物质, 但同时也使淡化水中对人体有利的钙、镁等矿物质大量流失。据相关研究, 饮水可提供人体所需的这两种矿物质每日摄入量的 20%。长期饮用海水淡化水可能会导致人体矿物质不足, 甚至使人体已有的矿物质被溶解最终排出体内。此外, 体内矿物质缺失会导致生理性病

变。以色列对死于急性心肌梗塞的患者死因分析,发现饮用海水淡化水的人群生存率要低于饮用普通淡水的,并发现前者血镁水平要显著低于后者,因此推测饮用海水淡化水会导致血镁水平的下降,从而导致生存率下降[16]。另一方面,海水淡化水属于软水,硬度小,国内外研究表明,硬度与心血管疾病的发病率呈现负相关关系。据计算,调整其他因素后,软水地区心血管疾病死亡率要高于硬水地区10%~15% [17]。除此之外,经过反渗透处理,海水淡化水中氟含量很少,氟元素是人体必需的微量元素之一,人体缺氟可能导致龋齿病,因此长期饮用海水淡化水可能会导致患龋齿病的概率增大。有研究认为,在发展中国家,公众对于龋齿的认知度不高,较少采取措施进行防御,设定饮用水中氟化物水平在0.5~1.0 mg/L 是一个比较适宜的限值[18]。

反渗透膜无法截留所有有害物质,比如硼、部分小分子有机污染物等。经过反渗透处理,淡化水中的硼仍然超出饮用水卫生标准,研究指出,动物体内通过饮水摄入大量的硼,将会损害实质性器官,破坏糖代谢及增加一些酶的活性,同时还会对动物的生殖系统有致畸致突变的不利影响[19]。同时为了防止反渗透膜堵塞,需定期清洗和消毒,目前常用的清洗、消毒剂有甲醇、亚硫酸氢铵等,这些清洗、消毒剂不易分解,残留量虽少,但可能对人体有“三致”风险。

目前我国的生活饮用水卫生标准规定了饮用水总硬度,但并未给出下限值,且该标准未规定饮用水中钙镁离子的限值。国外很多国家都已经规定了饮用水中钙镁离子的适宜浓度。根据舒为群[20]对各国推荐饮用水钙镁离子含量的比较,饮用水中镁的含量最好不低于10 mg/L,最高不得超过50 mg/L,适宜浓度为20~30 mg/L,对于钙离子,最好不低于20 mg/L,最高不超过80 mg/L,适宜浓度为40~80 mg/L。

### 3.2. 消毒过程水质风险

为了防止细菌的滋生,同时管网中须保持一定余氯浓度,需对海水淡化水进行消毒,目前常用的消毒剂有次氯酸钠、液态氯等,这些消毒剂与淡化水中有机物反应,将会产生氯代消毒副产物,同时海水中溴离子含量很高,通过反渗透处理,虽然能够去除了大量溴离子,但是淡化后水中仍然含有较高的溴离子,在进入管网时,可能会产生较多溴代消毒副产物。这些消毒副产物对人体的危害很大,不仅对人体有致癌的危害,可能还会引起肝中毒、精神中毒等危害。

### 3.3. 输配过程水质风险

海水淡化水的硬度低、pH 低和碱度低,这种特质的水化学稳定性和缓冲能力较差。表征水质化学稳定性指数有 Langelier 饱和指数、Ryznar 稳定指数、碳酸钙沉淀势 CCPP、Larson 比率,可用这些指数定性反应水质的稳定性。

根据供水水质监测数据发现,某海水淡化厂出厂水的总硬度为11 mg/L,总碱度为23 mg/L,总溶解固体为209 mg/L,水的稳定指数为 $IR = 11.7$  (出厂水温以 $22^{\circ}\text{C}\sim 27^{\circ}\text{C}$ 、pH 以7.2计),表明淡化水属于极严重腐蚀类型( $IR > 9.0$ ) [21]。我国供水输配系统,铁质管材运用较为广泛,由于铁质管材的特性,极易在管内壁生成腐蚀产物并逐渐形成管垢。由于水源切换、海水淡化水本身又具有较强腐蚀性,海水淡化水进入供水管网将会腐蚀管网,出现“黄水”现象,甚至管道释放出的铁、铜、锌等物质超出标准限值,这些金属离子过量会引起腹泻、呕吐等健康问题。

综上,通过反渗透处理,海水淡化水会存在着矿物质不足、硬度低、氟化物过低、硼过量及清洗、消毒剂有残留等健康风险,消毒过程会产生氯代消毒副产物和溴代消毒副产物风险,输配水过程由于化学稳定性差,将导致管道腐蚀,释放有害重金属等物质。

## 4. 水质风险评估方法

目前对于供水系统水质风险评估主要有基于水质评价的风险评估、健康风险评估、基于危害分析与关键点控制原理的风险评估。



#### 4.1. 基于水质评价的风险评估

水质评价是按照评价目标,选择相应的水质参数、水质标准和评价方法,对水体的质量利用价值及水的处理要求作出评定。常用的水质评价方法有单因子评价法、层次分析法、模糊综合评价法等。在供水系统中主要通过水质评价获得水源地和管网水质风险级别,并指出主要污染指标。张春荣等[22]通过层次分析法和灰色分析法得到了纯净水风险度值和风险级别。黄丽红[23]应用改良综合指数法对管道直饮水水质进行评价,得到了主要的水质污染指标。王俊良[24]等利用自组织特征映射神经网络(SOM 网络)和 K-means 算法对城市供水管网水质进行聚类分析,得到了各节点水质风险级别。

在监测数据和水质标准的基础上,通过对水质的评价,可获得水质风险级别,并可指出水体潜在风险,评价结果客观可靠,不过水质评价只能反映监测点的水质情况,不能获得供水系统主要控制管段及主要控制指标,无法反映整个供水系统的水质风险。

#### 4.2. 健康风险评估

健康风险评价是将水质与人体健康联系在一起,定量反应水体中重金属等污染物对人体健康造成损伤的可能性及程度。健康风险评价的方法很多,例如美国环保局公布的四步法、MES 法、生命周期分析、放射性物质健康风险评价模型和评价病毒感染的 Beta-Possion 模型等[25]。对于饮用水中硼、铁、铜等重金属元素以及消毒副产物的健康风险评价,目前多用美国环保局推荐的健康风险评估方法,即危害鉴别、剂量—反应评价、暴露评价和风险表征。目前国内外主要对水源及管网末梢的水质进行健康风险评估。张亚宁[26]等就对校区饮用水及管网末梢水中重金属进行了健康风险评估,得出水源水及管网末梢水均已超过可接受风险水平,主要风险贡献者为  $\text{Cr}^{6+}$ 。周荣喜等[27]将多属性决策法与健康风险评估法结合,根据指标从达标到不达标的敏感度,对指标赋予权重,并对多个饮用水水样进行健康风险评估,结果证明改进后更具实效性。

美国环保局推荐的健康风险评估可得出饮用水中污染物对人体危害的程度及污染物优先控制顺序,为风险管理提供了科学依据。不过必须得有明确的致癌强度系数和食用途径参考剂量,无法涵盖所有指标,故该法目前主要针对重金属、有机物等污染物。

#### 4.3. 基于危害分析与关键点控制原理的风险评估

危害分析和关键控制点(Hazard Analysis and Critical Control Point, HACCP)是以科学为基础,通过系统地识别具体危害及其控制措施以保障食品安全的体系[28]。世界卫生组织将其定义为“识别、评估和控制风险的一种科学、合理、系统的方法”。Havelaar [29]首次提出将 HACCP 原理应用于供水系统,之后该原理被各国广泛的应用于供水体系。Aspropyrgos 水务公司引入该原理进行风险管理,识别出关键控制点(包括水源、过滤、配水网等) [30]。李洪兴[31]在河北省土城供水系统的危害分析与评价中引入 HACCP 原理,识别出水源、消毒、清水池以及管网部分各个关键控制点,并对其危害进行评分。王兵等[32]按照 HACCP 基本原则和步骤对二次供水系统 29 个步骤和环节进行危害分析、危害评估和决定树逻辑分析后,确定了 12 个关键控制点。并通过对色度、浊度等 7 项权重指标观察,可得出应用 HACCP 体系后,水质改善。祁峰等[33]基于 HACCP 原理,将改进的监测数据标准化方法和主成分分析法结合,构建了关键控制因子识别法(KCFs),并将其应用于南水北调工程东线引黄济青工程主干渠的风险识别。

应用危害分析和关键点控制原理可对供水系统全过程的风险进行评估,结果更加系统合理,通过对关键控制点的识别,可很大程度的减少监测工作量,更好地保障用水安全。

### 5. 结论与建议

随着经济社会发展,水资源短缺已成为制约我国经济发展的主要因素之一,海水淡化水作为饮用水纳入城

市供水系统将能很好地解决这一问题。我国海水淡化工程规模在逐渐扩大,海水淡化技术也在逐渐成熟,不过反渗透法、低温多效法仍是目前的主流技术,而且海水淡化产业存在造水成本较高、出水水质具有潜在风险等问题,严重限制了海水淡化技术的发展。为完善海水淡化产业,应大力发展海水淡化技术,主要的发展方向有:

1) 对现有的海水淡化技术进行改进。我国应用最多的是反渗透法,但反渗透法存在更换周期短、清洗困难等问题,应积极创新,研发核心设备,提高出水水质并降低能耗。

2) 耦合相关技术。无论哪种海水淡化技术都存在一些弊端,将二种或多种技术进行结合,取长补短,就可降低能耗、简化工艺。目前已有这方面的研究,例如双膜法、热膜耦合等。

3) 开发新能源。可利用太阳能、波浪能、潮汐能等新能源给海水淡化过程提供能量,从而降低能耗。

除此之外,鉴于海水淡化水的水质特性,应对其纳入城市供水系统进行全过程风险评估,更好地保障居民用水安全。为此有以下几点建议:

1) 由于海水淡化水出厂水硼超标、部分重金属仍能被检出,并且在消毒过程中会产生氯代消毒副产物和溴代消毒副产物,在管网运输过程中,管道释放了铜、铁、锌等有害离子,故应对出厂水和管道末梢水中硼、消毒副产物、重金属进行监测,利用美国环保局推荐的健康风险评估对其进行风险评估。

2) 对于海水淡化水矿物质不足、硬度低、氟含量过低对人体造成的健康风险,目前并没有合适的定量健康风险评估方法,因此可以根据国内外规定的饮用水中钙、镁、氟的适宜浓度建立一个风险等级标准,再将监测结果与标准比对,定性分析海水淡化水中矿物质不足、硬度低及氟化物含量低对人体健康的风险。

3) 海水淡化水供水全过程为海水淡化水-后处理-自来水厂-管网-用户,对这全过程的风险评估可基于危害分析与关键点控制原理,参考关键控制因子识别法,识别出关键控制管段和关键控制指标,对关键控制管段应用合适的水质评价方法,对该管段的水质风险程度进行评价分析。

## 基金项目

感谢国家重点研发计划项目(NO.2018YFC0408000,2018YFC0408004)的支持。

## 参考文献

- [1] 樊娟,李浩宾,王文琴,等.海水淡化水进入市政管网的水质化学稳定性研究进展[J].供水技术,2016,10(5):1-5.  
FAN Juan, LI Haobing, WANG Wenqin, et al. Research on chemical stability of water quality in municipal distribution system using desalinated water. Water Technology, 2016, 10(5): 1-5. (in Chinese)
- [2] GREENLEE, L. F., LAWLER, D. F., FREEMAN, B. D., et al. Reverse osmosis desalination: Water sources, technology, and today's challenges. Water Research, 2009, 43(9): 2317-2348. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2009.03.010>
- [3] ZHENG, X., CHEN, D., WANG, Q., et al. Seawater desalination in China: Retrospect and prospect. Chemical Engineering Journal, 2014, 242(15): 404-413. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2013.12.104>
- [4] 阮国岭,冯厚军.国内外海水淡化技术的进展[J].中国给水排水,2008,24(20):86-90.  
YUAN Guoling, FENG Houjun. Progress in seawater desalination technology at home and abroad. China Water and Wastewater, 2008, 24(20): 86-90. (in Chinese)
- [5] 虞吉寅,陈伟,邱凤梅,等.一起海水淡化末梢水铁超标事件调查[J].浙江预防医学,2014,26(7):728-729.  
YU Jiyan, CHEN Wei, QIU Fengmei, et al. Investigation on the over-standard event of seawater desalination. Zhejiang Preventive Medicine, 2014, 26(7): 728-729. (in Chinese)
- [6] 闫玉莲,吴云奇,吴水波,等.海水淡化在供水行业成本优势潜力分析[J].盐科学与化工,2018,47(9):16-20.  
YAN Yulian, WU Yunqi, WU Shuibao, et al. Analysis of cost potential of seawater desalination in water supply industry. Journal of Salt Science and Chemical Industry, 2018, 47(9): 16-20. (in Chinese)
- [7] 郑根江,栗鸿强,薛立波,等.海水淡化产业现状[J].水处理技术,2017,43(10):4-6.  
ZHENG Genjiang, SU Hongqiang, XUE Libo, et al. Industry status of seawater desalination. Technology of Water Treatment, 2017, 43(10): 4-6. (in Chinese)
- [8] 崔小红,高渊.海水淡化国内外工程研究进展[J].城市建设理论研究,2016(34):130-131.  
CUI Xiaohong, GAO Yuan. Research progress of seawater desalination engineering at home and abroad. Urban Construction

- Theory Research, 2016(34): 130-131. (in Chinese)
- [9] 自然资源部. 2017 年全国海水利用报告[R]. 2018: 1.  
Natural Resources. 2017 national seawater utilization report. 2018: 1. (in Chinese)
- [10] 邱明英. 浅析我国海水淡化技术[J]. 中国环保产业, 2018(3): 58-60.  
QIU Mingying. Analysis on desalting technology of sea water in china. China Environmental Protection Industry, 2018(3): 58-60. (in Chinese)
- [11] 谭永文, 谭斌, 王琪. 中国海水淡化工程进展[J]. 水处理技术, 2007, 33(1): 1-3.  
TAN Yongwen, TAN Bin and WANG Qi. Progress in seawater desalination projects in China. Technology of Water Treatment, 2007, 33(1): 1-3. (in Chinese)
- [12] 张明宇, 凌长明, 李儒松, 等. 海水淡化成本与效益分析[J]. 净水技术, 2019(3): 113-118.  
ZHANG Mingyu, LING Changming, LI Rusong, et al. Analysis of cost and benefit of seawater desalination. Water Purification Technology, 2019(3): 113-118. (in Chinese)
- [13] 刘树模, 李爱斌, 叶亮. 我国大型海水淡化供水工程技术经济分析[J]. 科技创新导报, 2015, 12(16): 56-61.  
LIU Shumo, LI Aibin and YE Liang. The engineering economic analysis of large-scale seawater desalination water supply subjects in China. Science and Technology Innovation Herald, 2015, 12(16): 56-61. (in Chinese)
- [14] 李鹏, 肖飞, 高海菊. 我国海水淡化产业发展趋势与探讨[J]. 东北水利水电, 2016, 34(2): 66-68. (in Chinese)  
LI Peng, XIAO Fei and GAO Haiju. Development trend and discussion of seawater desalination industry in China. Northeast China Water Conservancy and Hydropower, 2016, 34(2): 66-68. (in Chinese)
- [15] 刘艳辉, 冯厚军, 葛云红. 海水淡化产品水的水质特性及用途分析[J]. 中国给水排水, 2009, 25(14): 88-92.  
LIU Yanhui, FENG Houjun and GE Yunhong. Analysis on characteristics and use of product water from seawater desalination plants. China Water & Wastewater, 2009, 25(14): 88-92. (in Chinese)
- [16] 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. International Journal of Cardiology, 2016, 220: 544-550. <https://doi.org/10.1016/j.ijcard.2016.06.241>
- [17] 姜智海, 张昀, 张泓, 等. 海水淡化的饮用水水质分析[C]//上海公共卫生国际研讨会. 2007 上海公共卫生国际研讨会论文集. 上海: 上海人民出版社, 2007: 117-119.  
JIANG Zhihai, ZHANG Jun, ZHANG Hong, et al. Water quality analysis of desalinated seawater supplied as drinking water. International forum for public health. Shanghai 2007 proceedings of international forum for public health. Shanghai: Shanghai People's Publishing House, 2007: 117-119. (in Chinese)
- [18] 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.  
XU Cixian, DONG Shaoxia and LU Kai. Characteristics of desalinated seawater and its effects on human health. Journal of Environmental Hygiene, 2012, 2(6): 313-319. (in Chinese)
- [19] 赵明, 沈娜, 何文杰. 淡化水作为城市供水时的水质问题与对策[J]. 水处理技术, 2011, 37(10): 1-3.  
ZHAO Ming, SHEN Na and HE Wenjie. Water quality issues and countermeasures in municipal water supply system using desalinated water. Technology of Water Treatment, 2011, 37(10): 1-3. (in Chinese)
- [20] 舒为群, 黄玉晶, 曾惠, 等. 中国居民饮用水中钙镁及其相关指标适宜保留水平的探讨[J]. 给水排水, 2017, 43(10): 13-18.  
SHU Weijun, HUANG Yujin, ZENG Hui, et al. Discussion on the appropriate retention level of calcium and magnesium and related indicators in drinking water of Chinese residents. China Water and Wastewater, 2017, 43(10): 13-18. (in Chinese)
- [21] 潘海祥. 海水淡化水厂供水的黄水现象及应对措施[J]. 中国给水排水, 2008, 24(12): 90-92.  
PAN Haixiang. Yellow water phenomenon from seawater desalination plant and improvement measures. China Water and Wastewater, 2008, 24(12): 90-92. (in Chinese)
- [22] 张春荣, 纪淑娟, 朱红梅. 基于层次分析和灰色分析的水质风险评价方法[J]. 水资源保护, 2011, 27(1): 11-14.  
ZHANG Chunrong, JI Shujuan and ZHU Hongmei. Water quality risk assessment based on analytic hierarchy process and gray analysis method. Water Resources Protection, 2011, 27(1): 11-14. (in Chinese)
- [23] 黄丽红, 陈仁杰, 吴邈, 等. 应用改良综合指数法评价管道直饮水水质[J]. 环境与职业医学, 2011, 28(3): 129-132.  
HUANG Lihong, CHEN Renjie, WU Chuan, et al. An improved integrated index method for evaluating piped drinking water quality. Journal of Environmental & Occupational Medicine, 2011, 28(3): 129-132. (in Chinese)
- [24] 王俊良, 李娜娜, 高金良, 等. 基于 SOM 网络模型的供水管网水质综合评价[J]. 中国给水排水, 2010, 26(11): 116-119.  
WANG Junliang, LI Nana, GAO Jinliang, et al. Comprehensive water quality evaluation in urban water distribution system based on SOM network model. China Water and Wastewater, 2010, 26(11): 116-119. (in Chinese)
- [25] 程雅柔. 贵阳市生活饮用水水质检测及健康风险评价[D]: [硕士学位论文]. 贵阳: 贵州师范大学, 2015.  
CHENG Yarou. The detection and health risk assessment of drinking water in Guiyang City. Master's Degree Thesis. Guiyang:

- Guizhou normal university, 2015. (in Chinese)
- [26] 张亚宁, 韩海英, 吴喜军. 榆林学院校区生活饮用水中重金属污染物的健康风险评估[J]. 应用化工, 2014, 43(5): 939-941. ZHANG Yaning, HAN Haiying and WU Xijun. Health risk assessment of heavy metal pollutants of drinking water in Yulin University campus. Applied Chemical Industry, 2014, 43(5): 939-941. (in Chinese)
- [27] 周荣喜, 范福云, 杨晓进. 基于多属性决策方法的饮用水健康风险全面评价[J]. 环境科学与管理, 2011, 36(3): 158-162. ZHOU Rongxi, FAN Fuyun and YANG Xiaojin. Comprehensive assessment of health risk to drinking and using water based on multi-attribute decision making. Environmental Science and Management, 2011, 36(3): 158-162. (in Chinese)
- [28] Codex Alimentarius Commission. Food hygiene basic texts. 3rd Edition. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations and World Health Organization, 2003.
- [29] HAVELAAR, A. H. Application of HACCP to drinking water supply. Food Control, 1994, 5: 145-152. [https://doi.org/10.1016/0956-7135\(94\)90074-4](https://doi.org/10.1016/0956-7135(94)90074-4)
- [30] DAMIKOUKA, I., KASTIRI, A. and TZIA, C. Application of HACCP principles in drinking water treatment. Desalination, 2007, 210: 138-145. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2006.05.039>
- [31] 李洪兴, 姚建义, 付彦分, 等. 农村供水系统中应用危害分析和关键控制点原理的实例研究[J]. 卫生研究, 2005, 34(6): 110-112. LI Hongxing, YAO Jianyi, FU Yanfen, et al. Study on application of hazard analysis and critical control point in rural water supply system. Journal of Hygiene Research, 2005, 34(6): 110-112. (in Chinese)
- [32] 王兵, 王霖邦, 胡刚, 等. 危害分析关键控制点技术在二次供水卫生安全管理中的应用[J]. 环境与健康杂志, 2017, 34(8): 718-723. WANG Bing, WANG Linbang, HU Gang, et al. Application of hazard analysis critical control point technology in secondary water supply sanitation safety management. Journal of Environmental Health, 2017, 34(8): 718-723. (in Chinese)
- [33] 祁峰, 王琳, 孙艺珂. 关键控制因子识别法筛查引黄济青干渠水质安全风险[J]. 水土保持通报, 2018, 38(5): 347-352. QI Feng, WANG Lin and SUN Yike. Screening water quality safety risks in main canal for water diversion from Yellow River to Qingdao City by key control factors identification method. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2018, 38(5): 347-352. (in Chinese)