

李福林,张其坤,陈华伟,等. 地下取水系统在海水淡化工程中的应用[J]. 地球科学与环境学报, 2023, 45(2): 399-413.

LI Fu-lin, ZHANG Qi-kun, CHEN Hua-wei, et al. Application of Subsurface Water Intake System in Seawater Desalination Projects [J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2023, 45(2): 399-413.

DOI: 10.19814/j.jese.2022.01033

·《地球科学与环境学报》更名二十周年纪念专辑·

地下取水系统在海水淡化工程中的应用

李福林¹, 张其坤^{2*}, 陈华伟¹, 王开然¹, 孙婷婷¹, 王志宁³,

梁恒⁴, 白朗明⁴, 谷东起⁵, 孙永根⁵

(1. 山东省水利科学研究院, 山东 济南 250014; 2. 山东师范大学 化学化工与材料科学学院, 山东 济南 250014; 3. 山东大学 环境科学与工程学院, 山东 青岛 266237; 4. 哈尔滨工业大学 环境学院, 黑龙江 哈尔滨 150090; 5. 自然资源部第一海洋研究所, 山东 青岛 266061)

摘要:海水淡化已经成为解决世界滨海地区城市和生活用水短缺的重要手段, 地下取水系统是海水淡化工程的重要组成部分, 在提供充足和稳定的水源方面发挥了非常重要的作用。为了提升中国海水淡化工程地下取水技术水平, 在参阅大量文献基础上, 首先对地下取水系统的类型进行了介绍; 然后, 以反渗透海水淡化工艺为例, 采取个例分析、数据挖掘再加工、环境影响分析和归纳总结等方法, 对地下取水系统的优劣势进行了分析; 最后, 就地下取水系统对不同海岸地貌的适应性以及地下取水设施的投资和运行成本进行了分析。结果表明: ①地下取水系统相比开敞式地表海水取水系统, 具有消除海洋生物撞击和夹带、去除藻类和一些有机物、净化改善水质、替代或部分替代海水淡化预处理等优势; ②地下取水设施因选址、建设和地下水开采运行等因素, 也可能存在破坏海滩地貌形态, 导致近岸海洋栖息地环境变化, 引起滨海敏感地区海水入侵和地下水水质污染等问题; ③地下取水系统对不同海岸环境的适应性, 不仅取决于海岸地貌类型, 还取决于海洋水文及海岸带水文地质条件; ④地下取水系统相比地表海水取水系统具有较强的优势, 不同类型地下取水系统的投资费用取决于取水工程的建设规模、取水量以及取水构筑物 and 管材等多种因素。目前, 海水淡化地下取水系统研究尚不充分, 未来一方面要加强组合式地下取水设施及取水口设计的创新性研究, 另一方面要注重海水淡化地下取水的海岸海洋环境效应尤其是生态环境效应的研究。

关键词: 地下取水系统; 地下廊道取水系统; 海水淡化; 撞击和夹带; 预处理; 海岸环境; 适应性

中图分类号: P751; P753 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-6561(2023)02-0399-15

Application of Subsurface Water Intake System in Seawater Desalination Projects

LI Fu-lin¹, ZHANG Qi-kun^{2*}, CHEN Hua-wei¹, WANG Kai-ran¹, SUN Ting-ting¹,
WANG Zhi-ning³, LIANG Heng⁴, BAI Lang-ming⁴, GU Dong-qi⁵, SUN Yong-gen⁵

(1. Water Resources Research Institute of Shandong Province, Jinan 250014, Shandong, China; 2. School of Chemistry, Chemical Engineering and Materials Science, Shandong Normal University, Jinan 250014, Shandong, China; 3. School of Environmental Science and Engineering, Shandong University, Qingdao 266237, Shandong, China; 4. School of Environment, Harbin Institute of

收稿日期: 2022-01-29; 修回日期: 2022-06-08

投稿网址: <http://jese.chd.edu.cn/>

基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFC0408000); 国家自然科学基金项目(40776050)

作者简介: 李福林(1967-), 男, 山东郯城人, 研究员, 理学博士, E-mail: fulinli@126.com.

* 通讯作者: 张其坤(1972-), 男, 山东济南人, 副教授, 理学博士, E-mail: zhangqk@sdnu.edu.cn.

Technology, Harbin 150090, Heilongjiang, China; 5. The First Institute of Oceanography, Ministry of Natural Resources, Qingdao 266061, Shandong, China)

Abstract: Seawater desalination has been become a reliable solution to the shortage of urban and domestic water in the coastal areas around the world. As an integral part of the desalination process, subsurface water intake system is different from the direct seawater intake system, which refers to the water facilities that taking salty water from beaches, coastal aquifers or submarine mediums, playing an important role for providing adequate and consistent flow of feed water. Unfortunately, there is little research and application on subsurface water intake system of seawater desalination in China. In order to fill the knowledge gap and promote the related subsurface water intaking technologies in China, the types of the subsurface water intake systems was firstly introduced based on the review of many literatures. Secondly, taking the reverse osmosis process as an example, the advantages and disadvantages of the subsurface water intake system were discussed by some cases, data mining and reprocessing, environmental impact and systematic summaries. Finally, adaptive assessment of subsurface water intake system for different coastal geomorphology was analyzed, as well as the investment cost of subsurface water intake system. The results show the following understandings: ① comparing with the open-ocean intakes for seawater reverse osmosis desalination, the alternative subsurface water intake system can offer the advantages for eliminating the impingement and entrainment, removing algae and some organic matters, purifying and improving raw water quality, completely or partly replacing seawater desalination pretreatment; ② due to inappropriate site selection, irregular construction and groundwater exploitation operations, the subsurface water intake system may also cause some issues such as changes in the original beach morphology, threats to coastal marine habitats and induction of saltwater intrusion and intake water pollution in sensitive coastal areas; ③ subsurface water intake system is adaptive to coastal environment, which depends not only on coastal geomorphology, but even more on the nearshore hydrologic and hydrogeological conditions, especially the hydraulic properties of coastal aquifers; ④ the investment and operation costs for the subsurface water intake system have strong advantages over the surface water intake systems, of which the investment cost depends on the factors such as water intake capacity, building scales, infrastructure structures and construction materials. Due to the limitations in research at present, it is necessary to strengthen the joint water intake facilities and the innovative intake design, and in the meantime, it should be more focused on coastal and marine environmental effects, especially the ecological environmental effects on the subsurface water intakes of desalination in the future.

Key words: subsurface water intake system; gallery intakes; seawater desalination; impingement and entrainment; pretreatment; coastal environment; adaptation

0 引言

海水淡化是解决滨海地区水资源短缺的重要手段,淡化水已经成为许多沿海国家生活饮用水的重要替代水源^[1]。海水淡化工程一般包括取水、预处理、脱盐处理、后处理等环节,其中取水是海水淡化工程的重要前提条件,脱盐处理是海水淡化工程的核心工艺,一般从取水到脱盐处理需要先进行预处

理,以保证进水水质的稳定,这对采用反渗透膜处理工艺的海水淡化厂最为重要。取水设施的合理设计,不仅能够提供可靠的原水水量和良好的给水水质,而且还能有效降低预处理费用,对于全生命周期内海水淡化工程的运行和维护具有重要意义。海水淡化取水系统一般包括直接的开敞式地表海水取水系统(Open-ocean Intakes 或 Open Seawater Intake Systems)和间接的地下取水系统(Subsurface Wa-

ter Intake System)^[2]。开敞式地表海水取水系统以其便捷的取水方式和较大的取水能力而得到了广泛应用,但由于海水中存在大量的藻类、细菌、有机物和海洋生物,可能会对取水口造成海洋生物撞击 (Impingement) 和夹带 (Entrainment) 影响^[3], 如果引入受到污染的水体, 在进行化学预处理后, 又会对环境造成不利影响^[4]; 而地下取水系统因处于海底沉积物或含水层内部, 取水水温、水质较少受海洋水文和海洋生物因素的影响, 加上沉积物的自然过滤能力又可降低海水中的浊度, 去除微生物和其他有机化合物, 能有效提高膜处理效率, 从而得到了越来越多的应用^[5]。鉴于目前国内尚未见到有关海水淡化工程采用地下取水系统的报道, 本文以反渗透海水淡化工艺及国际上相关海水淡化工程为例, 对地下取水系统的类型、优劣势及其对海岸环境适应性、投资与运行成本等进行综述, 以期促进中国地下取水系统在海水淡化中的应用研究和相关技术的推广。

1 地下取水系统的类型

海水淡化取水系统可分为开敞式地表海水取水系统和地下取水系统(图 1)。开敞式地表海水取水系统, 简称为地表取水系统, 又称为直接取水系统, 是指从近岸和离岸的地表海水或深层海水直接取水的设施; 而地下取水系统, 又称为间接取水系统, 是指从近岸和离岸的地下沉积物或含水层间接取水的设施, 一般包括地下井取水系统和地下廊道取水系统。其中, 地下井取水系统分为垂直井、辐射集水井、斜井和水平定向井; 地下廊道取水系统分为海滩廊道和海床廊道。也有学者根据地下取水设施距海岸线的远近, 将海水淡化地下取水系统分为近岸取水系统和离岸取水系统^[6]。近岸取水系统包括垂直井、斜井、水平辐射井和海滩廊道; 离岸取水系统包括水平定向井和海床廊道。本文就地下取水系统的各种类型分别进行简要的介绍和分析。

1.1 地下井取水系统

1.1.1 垂直井

垂直井 (Vertical Well), 又称为竖井, 建在海滩上的垂直井称为海滩井 (Beach Well), 是最为常用的一种海水淡化地下取水设施(图 2)^[5,7]。垂直井由取水井、取水井套管 (Well Casings)、滤网 (Screen)、潜水泵 (Submersible Pump)、立管 (Riser)、泵启动器 (Pump Starter)、化学加药系统 (Chemical Dosing System)、连接管 (Interconnec-

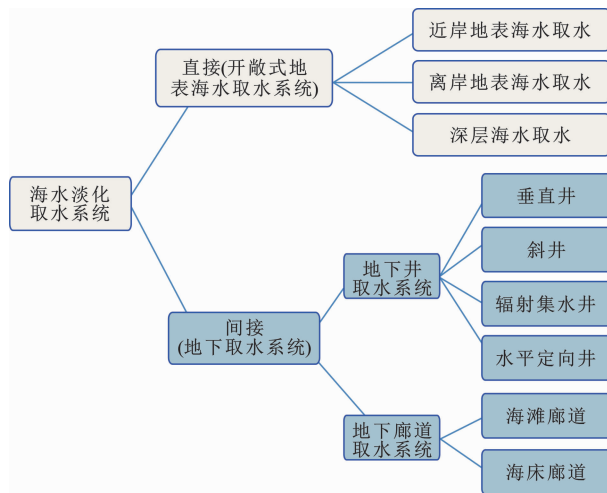


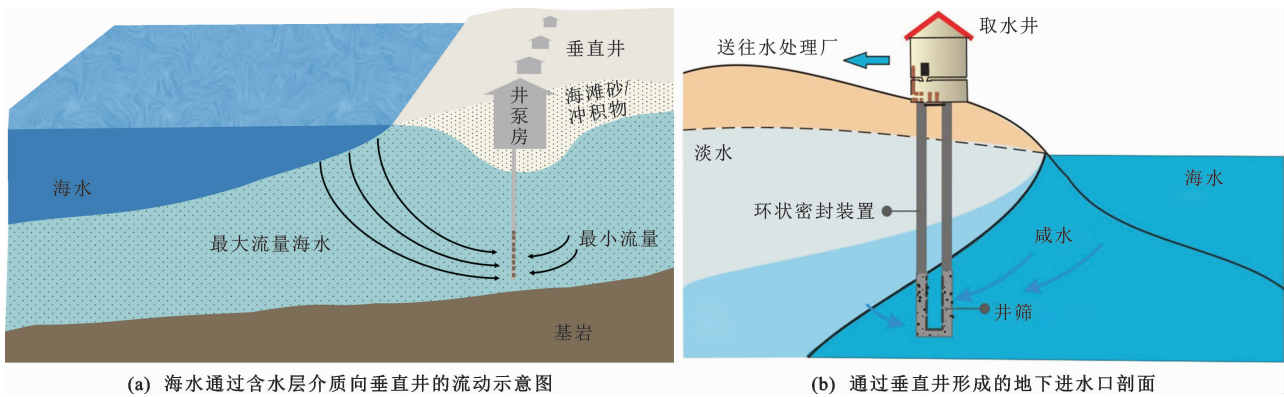
图 1 海水淡化取水系统组成

Fig. 1 Composition of Water Intake System for Seawater Desalination

ting Pipes)等组成^[8]。垂直井结构简单、易于施工, 一般建在海滩或海床下面的第四系含水层内, 井房设施矗立在海滩上。垂直井的井深和取水量一般取决于海滩砂层和第四系孔隙含水层的厚度、渗透能力或富水能力, 为了满足大中型海水淡化厂取水量较大的需求, 往往在近岸带建设多组海滩井群。另外, 垂直井也可以建在含水层较为发育的近岸陆区一侧, 如沙特阿拉伯 Jeddah 地区 2 个反渗透海水淡化厂的取水点 Site A 和 Site B 分别位于距海岸线 450 m 和 300 m 的陆区一侧石灰岩含水层中, 取水井深度 50 m 左右, 单井取水量 $2\ 300\ \text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$ 左右^[9]。

1.1.2 斜井

斜井 (Slant Well) 是指在海区一侧的固结或非固结岩层中钻探具有一定倾斜角度 (一般为 $15^\circ \sim 25^\circ$) 的滤水管井(图 3、4)^[5,10]。斜井从海底可渗透沉积层中取水, 接受水体沿海床的垂直渗漏补给和地下含水层的水平渗流补给。在非固结岩层中, 斜井一般采用双循环 (Dual-rotary) 成井技术, 外侧用套管支撑钻孔, 内部为滤网和滤料; 斜井的长度可超过 300 m, 配置人工渗水过滤组件, 产水量可达 $(1.0 \sim 1.6) \times 10^4\ \text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$ 。建在固结岩层中的斜井, 一般处于石灰岩分布的近岸区域, 因其富水性相对较大, 可以满足较大的取水需求。斜井的施工较垂直井复杂, 但可在岸上施工, 不占用海滩, 节约土地。另外, 斜井还可以通过改变井群的排列方式和取水管延伸的倾角来降低取水盐度的波动变化, 这对于未来在气候变化和海平面上升条件下, 保持取水设施给水盐度的稳定性具有重要作用。



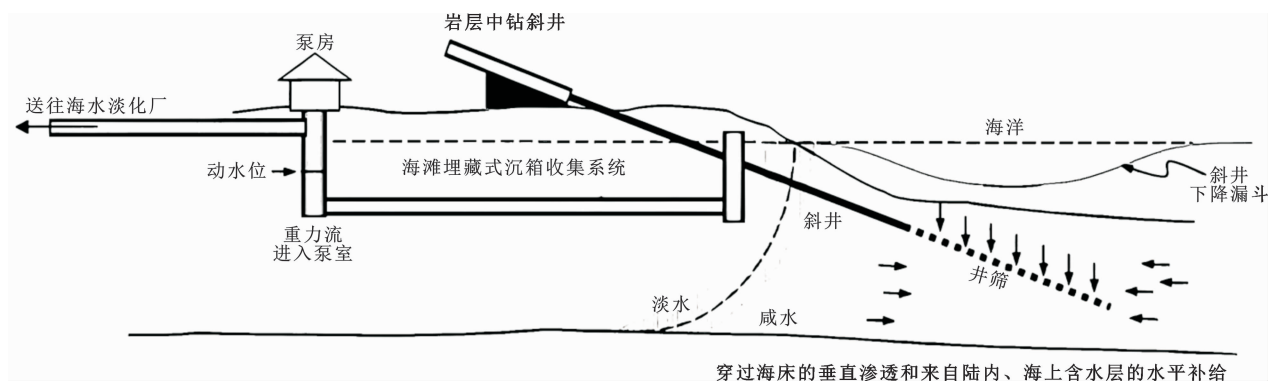
(a) 海水通过含水层介质向垂直井的流动示意图

(b) 通过垂直井形成的地下进水口剖面

底图引自文献[5]、[7]和[11]

图2 垂直井示意图

Fig. 2 Schematic Views of the Vertical Well

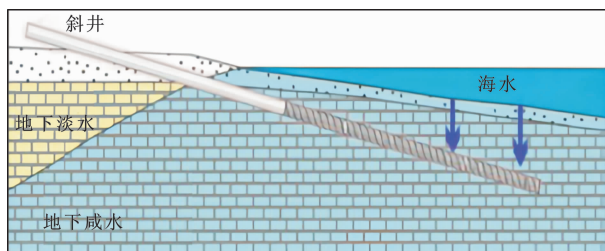


穿过海床的垂直渗透和来自陆内、海上含水层的水平补给

底图引自文献[10]

图3 斜井概念图

Fig. 3 Conceptual View of the Slant Well



底图引自文献[10]

图4 斜井示意图

Fig. 4 Schematic View of the Slant Well

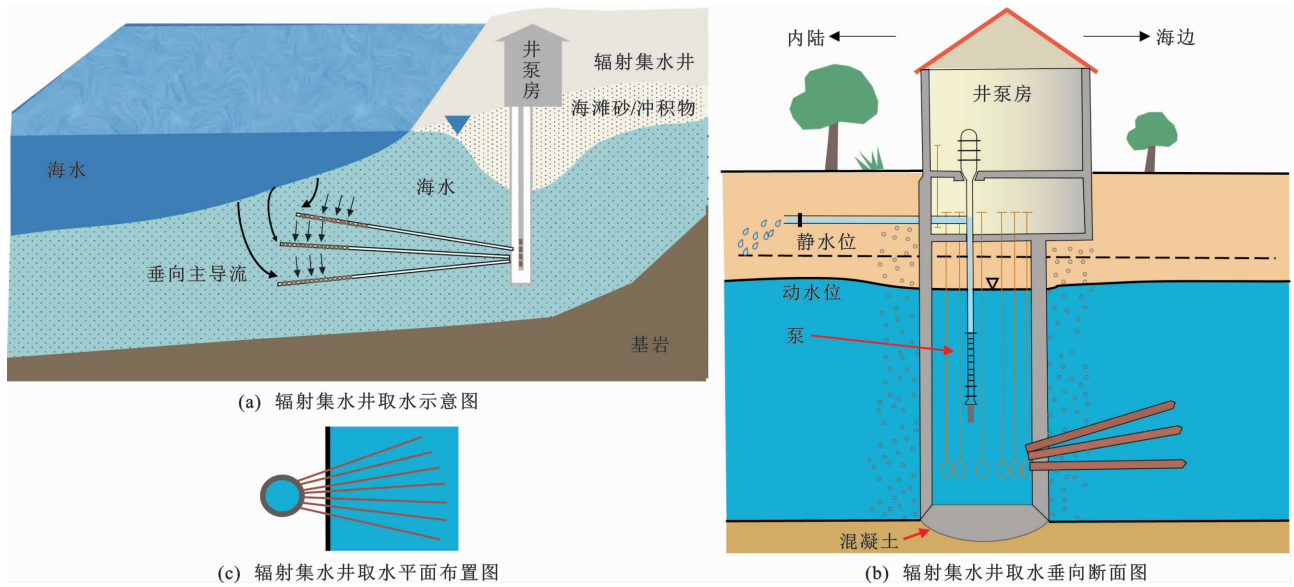
1.1.3 辐射集水井

辐射集水井 (Radical Collector Well), 又称为兰尼井 (Raney Well) 或水平辐射井 (Horizontal Radical Wells), 是由一个直径较大的中心集水井筒和数根长短不一的水平辐射管组成 (图 5)^[5, 12-13]。其中, 中心集水井筒为竖井, 深度一般在 40 m 以内, 井筒内径一般为 4~8 m, 由钢筋混凝土建成; 水平辐射管位于井筒海区一侧的含水层内, 由液压水平钻机采用直接顶进法和套管法完成施工, 辐射管长度几米至几十米, 安装有滤水管以便接受海水及

海底含水层的渗透补给。位于墨西哥 PEMEX Salina Cruz 炼油厂附近海滩的辐射集水井群, 建有 3 口井, 单井取水量为 $1.5 \times 10^4 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$, 为炼油厂冷却塔以及反渗透海水淡化设施供水, 运行效果较好^[14]。辐射集水井不仅可以中粗砂层、砂砾石含水层中成井, 还可以在粉细砂等细颗粒含水层中构建水平辐射管进行集水; 当含水层厚度较大时, 可通过设置多层水平集水管实现集水, 能够满足大中型反渗透海水淡化厂的取水需求, 这必将成为沿海海水淡化厂的优选取水设施。

1.1.4 水平定向井

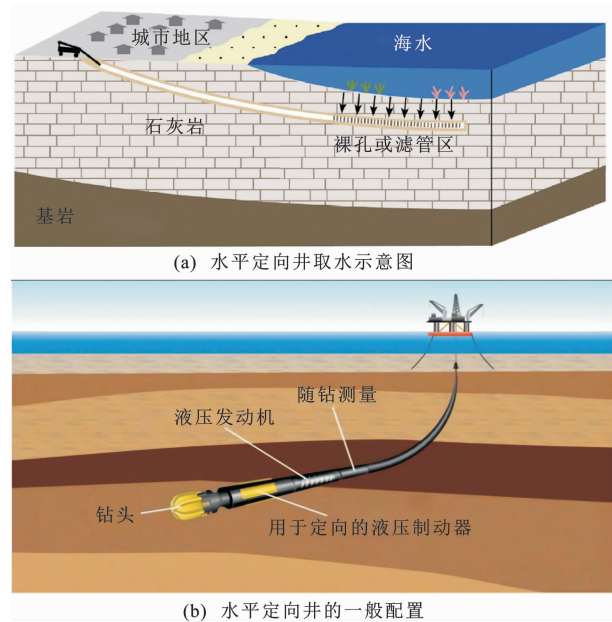
水平定向井 (Horizontal Direction Drilling Well, HDD) 是指在海底可渗透砂层或含水层中安装的水平渗透集水装置, 钻井抽取经过海底砂层“自然”过滤的海水, 再供给海水淡化厂 (图 6)。该装置采用的水平定向钻技术是基于海底无疏浚管道建设经验而开发的, 又称为 Neodren 技术^[15], 可以通过声波、旋转、冲击或喷射灌浆等方法完成钻探工作^[2], 其中导向钻头通过钻杆逐渐将滤水管导入砂



底图引自文献[7]

图 5 辐射集水井示意图

Fig. 5 Schematic Views of the Radical Collector Well



底图引自文献[5]

图 6 水平定向井示意图

Fig. 6 Schematic Views of the Horizontal Direction Drilling Well

层或含水层内。位于西班牙 Mar Menor 北部地区(小海区)的某海水淡化厂,处于 Cartagena 河口公园和微咸水处理厂之间,周边是海草保护区,目标含水层介质为延伸至海区深处黏土海床覆盖下的 10 m 厚大理石;为满足取水需求,构建了 10 条水平定向井生产线,单井出水量 $8\,500\text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$,既满足海水淡化厂取水需求,又减少了占地^[16]。一般而言,水平定向井适用于土地受限、较为狭窄的海岸区域,

一般不占用海滩,可在岸上施工;集水管安装在向海延伸的海床下至少 2~4 m 厚的多孔地层中;水平井的长度和取水量决定于海底含水层的分布、厚度及水力特性,与辐射集水井类似,多个水平井可以安装在同一集水井筒附近,从而满足海水淡化厂大流量取水需求。

1.2 地下廊道取水系统

地下廊道取水系统(Gallery Intakes),是利用慢砂滤(Slow Sand Filtration)或类似河岸过滤(Riverbank Filtration)原理,构建一个外围包裹着海滩砂或人工砂砾石层的过滤廊道,将经过海滩砂或人工砂砾石层过滤之后的海水供给海水淡化厂^[17]。该设施一般由集水竖井、井泵、输水管和过滤廊道等组成,按照过滤介质的不同,地下廊道取水系统又分为海滩廊道和海床廊道两种类型。

1.2.1 海滩廊道

海滩廊道(Beach Gallery)是指将经过海滩砂过滤的海水由集水廊道输送到海水淡化厂的取水设施(图 7)^[18]。该设施一般位于高潮线之上或高、低潮线之间的海滩,由集水井筒、取水廊道(滤水管或滤水井)和输水管组成。取水廊道安装在海滩砂砾底部,顶部至少留有 2 m 厚的砂层,以保持足够长的渗径用于过滤海水。为了满足水量水质要求,海滩廊道可以建在自然海滩砂层内,也可以构筑在人工砂砾石过滤层内。Missimer 等提出在美国佛罗里达州 St. Johns County 地区构建 6 个取水廊道和 1 个备用廊道的人工海滩廊道设计方案,以满足海水

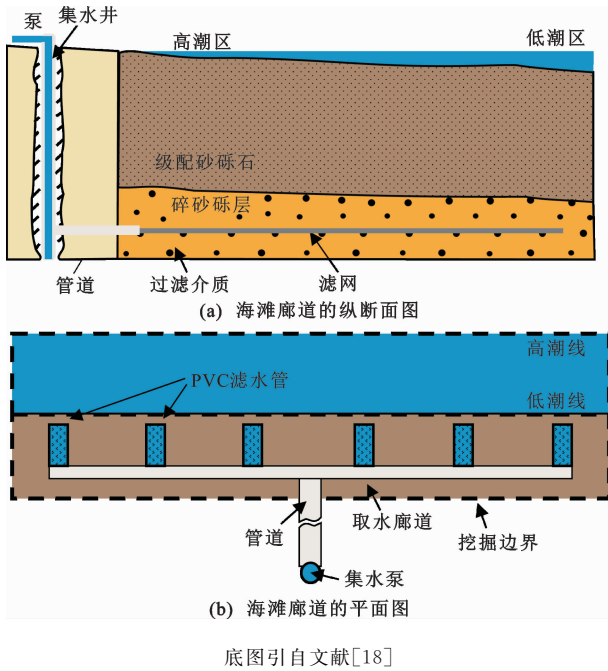


图7 海滩廊道的纵断面图和平面图

Fig. 7 Vertical and Plane Sections of the Beach Gallery

淡化厂取用原水 $18.18 \times 10^4 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$ 的要求; 美国加利福尼亚州长滩水务局 (LBWD) 于 2008~2010 年建造了一个面积 3 100 平方英尺、深度 5 英尺、内含 6 英寸集水管及滤网的人工海滩廊道^[18-20]。

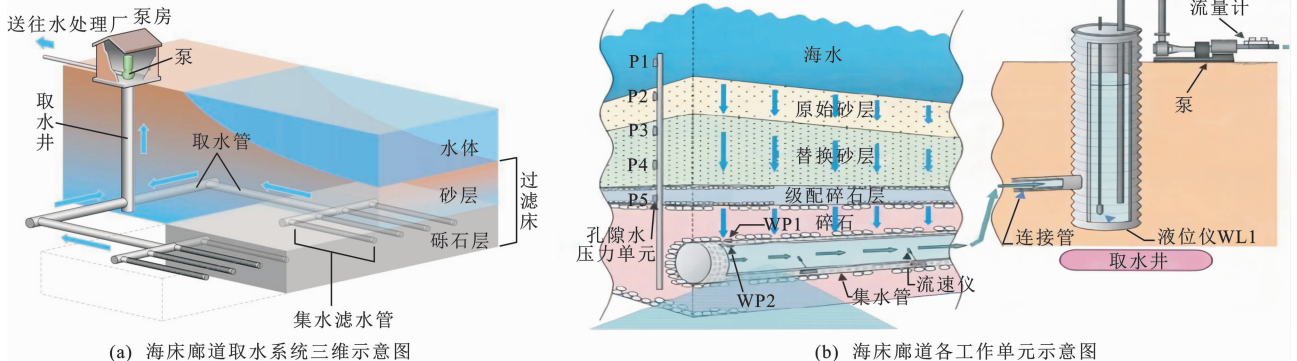
取水廊道的产水量、净化水质, 与取水廊道的位置、廊道规模、海滩砂或人工砂砾石层的导水系数、过滤层厚度、海水入渗速率、过滤层的水头损失、过滤层的延滞时间等因素有关。一般而言, 多组海滩廊道单元可以满足大中型海水淡化厂的用水需求; 对于处于高潮线之上的取水廊道, 其产水量会受到海滩面积、长度的限制以及海滩沉积物特性的影响; 对于高、低潮线之间的取水廊道, 其海滩稳定性受到波浪和潮流掏蚀的影响, 进而影响水量和水质。为

了解决这些问题, Maliva 等提出了具有良好预处理功能的自净海滩取水廊道 (Self-cleansing Beach Gallery) 设计方案^[21], 即在海滩挖掘一条沟渠, 将取水廊道安装在沟渠底部, 保证廊道上方的海滩沉积物一直呈现饱和状态, 这不仅可以增加海水入渗量, 还可以避免海滩遭受波浪和潮流侵蚀, 保持廊道上方“海水-沉积物”界面清洁和渗透到取水廊道中的水体具有较好的水质。

1.2.2 海床廊道

海床廊道 (Seabed Gallery) 是指在近岸潮间带和潮下带, 通过构建人工砂砾石过滤床, 利用表面分选或除砂来清除海床上层堵塞物, 维持海床清洁, 保证海水以恒定流量渗透到集水廊道的地下取水设施^[17]。目前, 对海床廊道进行可行性研究的成果相对较多, 研究区域主要集中在沙特阿拉伯的红海东岸以及波斯湾沿岸^[22-23]; 而设计方面的典型成果当属沙特阿拉伯的舒卡伊克 (Shuqaiq) 海水淡化项目^[24], 其海床廊道包括 9 个取水单元, 入渗速率为 $10 \text{ m} \cdot \text{d}^{-1}$, 每个廊道单元取水量为 $6.6 \times 10^4 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$, 总取水量可达 $53 \times 10^4 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$, 是目前世界上设计规模最大的海床廊道。

海床廊道供水规模较大, 不仅要考虑产水量问题, 还要考虑水质问题, 特别是海床过滤海水的过程中需要延滞多久时间才能保证良好的给水水质, 这也给具体应用带来了较大的难度。目前世界范围内海水淡化厂正式采用海床廊道取水的仅有日本福冈海水淡化厂, 其取水廊道 (图 8) 处于距海岸线 640.0 m、深 11.5 m 的海床之下, 单个人渗床的长和宽分别为 313.6 m 和 64.2 m, 总入渗表面积达 $20\,000 \text{ m}^2$, 入渗速率 $6 \text{ m} \cdot \text{d}^{-1}$, 取水量 $10.3 \times 10^4 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$, 自 2005 年 6 月投入使用以来, 其水量、水质都



P1~P5 为海水和孔隙水压力单元; WP1 代表集水滤水管外部水压力; WP2 代表集水滤水管内部水压力; 底图引自文献[25]和[26]

图8 海床廊道取水系统示意图

Fig. 8 Schematic Views of the Seabed Gallery Water Intake System

可满足海水淡化厂的进水要求^[25-26]。

1.2.3 小结

海滩廊道与海床廊道的不同之处主要在于:前者建于高能海岸区的海滩内部,海水靠波浪和潮汐的反复冲刷运动,经沙滩过滤后再行收集,对海滩宽度和砂层厚度有一定要求;后者建于低能海岸区的潮间带和潮下带,海水主要通过人工砂砾石层过滤,海床基底即便是软岩,只要便于挖槽施工即可。一般而言,地下取水廊道的产水量与海底沉积物以及人工砂砾石层的导水系数、海水入渗速率、过滤层厚度、过滤层水头损失、过滤层延滞时间等因素有关。多组地下取水廊道单元可以满足大中型海水淡化厂的用水需求,应用潜力和应用前景很大。

1.3 其他类型地下取水设施

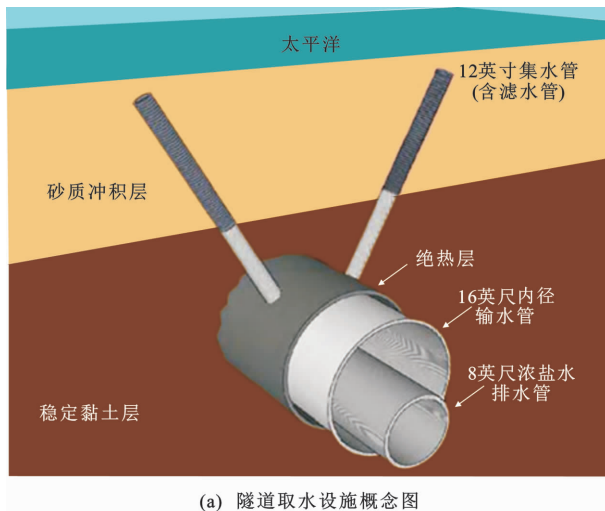
随着取水设施设计理念的更新,其他类型的地下取水设施也在不断提出,如隧道取水设施(Tunnel或Water Tunnels Intake Facility)、石灰岩深坑(Limestone Pit)取水设施和其他混合取水设施。

位于美国南加州某海水淡化厂的隧道取水设施,其集水隧道位于海滩下方的黏土层内,隧道上方建有若干条伸入上覆含水层的集水管,能够保证在水泵抽水时,海水经过砂层过滤后向隧道汇集[图9(a)],其运行方式类似于一个垂直的Raney收集系统^[27]。西班牙Alicante地区二期反渗透海水淡化厂的隧道取水设施由一条平行于海岸线的汇水隧道(长1.00 km,直径3.14 m)、位于隧道上方的104条含滤水孔的集水管(长25.00 m,直径25.00 cm)以及位于隧道另一侧长度为300~400 m的排水管等组成,该套设施可向海水淡化厂供水 $15.6 \times 10^4 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$ [图9(b)]^[7]。

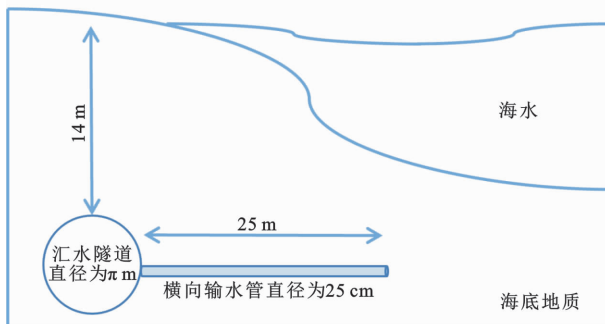
位于加勒比海南部库拉索岛(Curacao)的石灰岩深坑(Limestone Pit)取水设施^[2],利用海岛上灰岩裂隙较为发育且与海水具有密切水力联系的有利条件,在离海岸线100 m的陆侧建造了6 m深的石灰岩取水池,水池周边由多孔的预制混凝土板建成围墙,便于海水的不断渗透补给和过滤,取水量达到 $5.2 \times 10^4 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$ 。

隧道取水设施与海滩廊道类似,只不过近岸带要求发育有足够厚的冲积砂层,同时该类地区也较适合建造海滩取水井。Fayaz等提出利用半深井和廊道组成混合式海滩取水设施,认为对进水水质和水环境具有显著的改善作用,这显然对于扩大取水规模、降低成本具有实际意义^[28]。

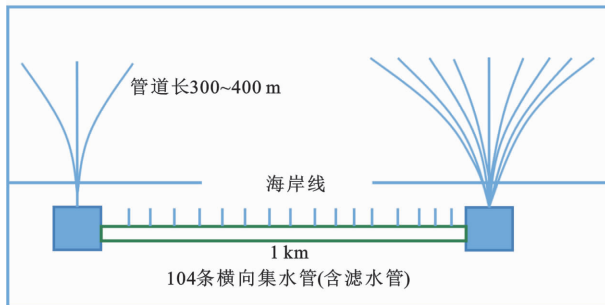
实际上,在同一处海岸或浅海区,可以根据取水



(a) 隧道取水设施概念图



(b) 西班牙Alicante地区隧道取水设施横剖面



(c) 西班牙Alicante地区隧道取水设施纵剖面

底图引自文献[7]和[27]

图9 隧道取水设施示意图

Fig. 9 Schematic Views of Tunnel Intakes Facility

条件进行不同地下取水方案的比选,可以选择单一类型的地下取水设施,也可以选择不同类型的组合式取水设施,还可以与地表海水取水设施联合应用,以满足海水淡化厂取水水量和水质的要求。

2 地下取水系统的优劣势及其对海岸环境适应性

地下取水系统的取水经过自然海滩、海床或人工砂砾石层过滤后进入海水淡化厂,这一过程对进水水质具有净化作用,在一定程度上可以替代海水淡化的预处理过程,相比开敞式地表海水取水系统

直接从海洋取水的方式,具有较大的优势。当然,不同类型的地下取水设施也存在各自的优势,对海岸环境具有一定的适应性。

2.1 地下取水设施相对于地表海水取水设施的优势

2.1.1 有效消除生物撞击和夹带

海水含有大量的水生生物(如藻类、浮游生物、鱼类、细菌等)。当采用开敞式地表海水取水设施进行取水时,海水中一些个体较大的生物体(鱼、虾、蟹类等)将无法通过取水口的拦阻屏障,造成撞击现象;一些小型海洋生物则会通过取水口的生物格栅或滤网,被吸入进水系统,进而通过输水管道进入水处理设施,形成所谓的夹带现象^[3]。而地下取水设施由于进水口位于海滩内部或海床底部,与开放水域没有直接的物理接触,海洋生物与取水设施之间存在一道天然的隔离屏障,能够有效过滤水生生物、细颗粒有机物和悬浮沉积物,从而大大减少甚至消除海洋生物带来的撞击和夹带影响,有效保护鱼类和其他水生生物^[4,25]。

2.1.2 保障进水水量和水质的稳定

地下取水设施的取水口埋藏在自然砂层或人工砂砾石层内,其进水流速基本不受波浪作用和潮汐运动的影响,入渗水量能够保持相对稳定,可保证一定规模海水淡化厂的取水水量要求。在砂层厚度较大的高能海岸区建设的海滩井和海滩廊道,其本身就是一个天然的过滤器,海水在波浪和潮汐作用下不断冲刷清洁海滩,入渗水流一般不会产生堵塞现象,水温和盐度变化不大,可保护海水淡化厂脱盐过程中进水水质的稳定。同时,地下取水设施因沉积体与海水的相对隔绝,还能在一定程度上避免藻华和海面漏油等相关污染物的负荷冲击影响以及其他非正常事件的影响。

2.1.3 显著改善海水淡化厂的进水水质

海水中含有大量的藻类、有机物和细菌,有些沿岸海水受泥沙输移的影响,浑浊度较高。如果利用开敞式地表海水取水设施进行取水,为防止反渗透工艺过程中造成膜污染,需要首先进行过滤、沉淀等预处理,而地下取水设施取水具有明显的水质预处理效果。Henthorne 等分析认为,地下取水设施可将水体的膜污染指数(SDI)降低 75%~90%,几乎能清除所有藻类,去除 90%的细菌,并消除多种生物聚合物和多糖物^[29]。

对于地下取水井, Missimer 等根据多个国家和地区海水淡化厂地下取水的运行数据,分析了海滩井和近岸含水层取水井过滤后的水质与原海水水质

的差异^[5,9,22,30]。表 1 对比整理了部分地区的数据。从表 1 可以看出:海滩井或近岸含水层取水井在降低水体浊度、泥沙淤积密度指数(SDI₁₅)具有良好的效果,其中泥沙淤积密度指数一般都在 3.0 以下,可以满足一般海水淡化厂反渗透进水水质要求;藻类和生物聚合物几乎完全被去除,50%以上的总有机碳(TOC)、溶解性有机碳(DOC)、腐殖质、构筑块、低分子中性和酸性有机物被去除,50%~90%的透明胞外聚合物颗粒(TEP)被去除。

对于地下廊道取水设施, Dehwah 等利用由二氧化硅和碳酸盐砂两种过滤介质组成的 1 m 厚砂柱,开展为期 620 d 的室内砂柱有机物去除实验^[31]。结果表明,在硅质砂柱中,几乎所有的藻类、87%的细菌、59%的生物聚合物、59%的颗粒 TEP 和 32%的胶体 TEP 被去除;在碳酸盐砂柱中,藻类被完全去除,细菌去除率为 74%,生物聚合物、颗粒 TEP 和胶体 TEP 的去除率分别为 72%、66%和 36%^[31]。而在实际运行的地下取水工程中,日本福冈海水淡化厂进水的泥沙淤积密度指数从 10.0 降至 2.0;美国加利福尼亚州长滩海滩廊道的出水浊度从 3.04 降至 0.66,膜污染指数降至 3.00 以内。

海水淡化厂正是因为地下取水设施的过滤作用、设计合理的海水渗透路径和必要的水力停留时间,而省略了预处理环节。例如,阿曼 Sur 地区的海水淡化项目仅仅经过石英砂单层过滤器和芯式过滤器简单处理后便供给反渗透设施。很多海水淡化厂在预处理环节省掉了盘式过滤器(Disk Filter)和超滤(Ultrafiltration)两道预处理工序^[32],这样不仅能够保证海水淡化厂反渗透进水水质,还大大节约了投资。

由此可见,相比地表海水取水设施,地下取水设施具有保障水量、改善水质以及降低海洋环境影响等优势。

2.2 不同类型地下取水设施的优劣势比较

2.2.1 地下取水井与地下廊道取水系统的比较

就取水量而言,由于受含水层储水能力的限制,地下取水井的单井取水量一般低于地下廊道取水系统的取水量,前者主要适用于中小型海水反渗透装置给水,后者适用于大中型海水淡化厂。Anderson 等对澳大利亚新南威尔士州中央海岸地区的湖滩(Lakes Beach)海岸含水层取水过程进行了数值模拟,认为海滩井最大取水量不超过 $1 \times 10^4 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$,难以满足海水淡化厂 $(3 \sim 17) \times 10^4 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$ 的取水,但是如果利用辐射集水井、海滩廊道和海床廊

表 1 原海水与海滩井、近岸含水层取水井的水质参数对比

Table 1 Comparison of Water Quality Parameters Between Raw Seawater and Filtrated Water from Beach Wells and Coastal Aquifer Wells

水质参数		阿曼 Sur 地区		沙特阿拉伯 Jeddah 地区		中美洲 Turks-Caicos 群岛		西班牙 Alicante 地区	
		海水	取水井	A 区海水	取水井	海水	取水井	海水	取水井
物理参数	pH 值	8.02	7.48	8.30		7.92	7.66	8.45	7.31
	盐度/(g · L ⁻¹)	37.1	36.1	39.1	41.4	36.6	36.3	38.2	39.8
	浊度(NTU)	0.91	0.30	0.42	0.21	6.12	0.11		0.17
	泥沙淤积密度指数	16.52	0.82	7.60	2.75			7.50	0.39
有机物参数	总有机碳/(mg · L ⁻¹)	1.050	0.000	1.005	0.537	1.677	0.289	1.120	0.568
	溶解性有机碳/(mg · L ⁻¹)	0.890	0.000	0.517	0.293	0.997	0.222	0.856	0.396
	生物聚合物含量/ppb	133	8	76	3	215	0	142	0
	腐殖质含量/ppb	394	74	345	70	446	142	449	238
	构筑块含量/ppb	167	38	103	23	174	52	121	70
	低分子中性有机物含量/ppb	76	22	88	44	51	25	78	47
	低分子酸性有机物含量/ppb	187	68	168	120	111	3	66	41
藻类参数	Prochlorococcus sp. 密度/(cells · mL ⁻¹)	4 400	<100	203	<50	770	<100	350	<100
	Synechococcus sp. 密度/(cells · mL ⁻¹)	113 040	<100			37 225	<100	24 275	<100
	Cyanobacteria 密度/(cells · mL ⁻¹)	0	<100	30 053	<50	0	<100	0	<100
	Piconanoplankton 密度/(cells · mL ⁻¹)	1 900	<100	268	<50	250	<100	985	<100
细菌参数	总细菌密度/(cells · mL ⁻¹)	995 310	3 270	112 790	5 978	698 152	17 065	292 283	29 348
透明胞外聚合 颗粒物参数	颗粒 TEP 浓度/(mg · L ⁻¹)	0.036	0.007	0.162	0.007	0.642	0.051	0.521	0.147
	胶体 TEP 浓度/(mg · L ⁻¹)	0.000		0.130	0.052			0.171	0.080

注:表格数据引自文献[30];阿曼 Sur 地区利用 28 眼海滩井取水,取水量 $16 \times 10^4 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$,水质分析井为 Well #1W;沙特阿拉伯 Jeddah 地区 North Obhor 海水淡化厂利用 13 眼近岸硅质砂海滩井取水,取水量 $3.3 \times 10^4 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$,水质分析井为 Well #4;中美洲 Turks-Caicos 群岛从近岸碳酸盐含水层 6 眼井取水,取水井深度 50~55 m,取水量 $5 \times 10^4 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$,水质分析井为 Well #A;西班牙 Alicante 地区利用 30 眼海滩井取水,取水量 $13 \times 10^4 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$,水质分析井为 Well #31。

道,则能够满足海水淡化厂的取水需求,而且这种取水方式还能减少地下水降深对附近盐沼和沼泽森林湿地的影响^[33]。

Voutchkov 认为,对于超过 $4 \times 10^4 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$ 处理能力的海水淡化厂来说,地下取水设施的优势会减弱,而且大型海滩井的产水量、使用寿命和取水水质也存在诸多不确定性,会增加海水淡化厂的生产成本^[34]。但是,这一观点并未影响大型地下取水设施的应用。目前世界上最大的地下取水井群位于阿曼 Sur 地区,取水量高达 $16.00 \times 10^4 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$,向 $8.02 \times 10^4 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$ 处理能力的海水淡化厂供水;最大的海床廊道取水设施位于日本福冈地区,取水量 $10.30 \times 10^4 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$,向 $5.00 \times 10^4 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$ 处理能力的海水淡化厂供水^[13]。由此可见,地下取水井和地下廊道取水系统的取水优势不在于单个井或廊道的取水能力,而在于海岸区域能否设置多个取水单元以及多单元系统的总取水能力。

2.2.2 不同地下取水井的比较

垂直井与其他形式的地下取水井相比,其最大

优势是施工简单,成本低廉,另一个优势是可以取用较深含水层的海底地下水(Submarine Groundwater),最大钻深可达上百米。但是,由于垂直井的单井产水量较小^[35],需要通过建设取水井群来满足海水淡化厂较大规模的取水需求。

就水平定向井而言,由于过滤层入渗路径一般只需要 6~10 m,井点位置的选择性比垂直井具有更大的优势。在施工方面,水平定向井初始沟槽开挖深度达到 3~4 m 即可,可以最大限度地减少施工对海滩的干扰影响^[35];在产水量方面,水平定向井的渗滤面积远远大于垂直井,其产水量是垂直井的 5~10 倍,而且地下水开采形成的降落漏斗较小,对于开发海底地下水是一种较好的选择^[7,36]。

就斜井而言,由于其施工角度可从几度倾斜到几十度,长度可达上百米,单个斜井的产水量一般是垂直井的 1.5 倍,多个斜井并联在一起构成井群可向大型海水淡化厂供水,有较大的供水优势。例如,美国加利福尼亚州某海岸在距海岸线 2 英里的陆侧

建有 27 眼斜井,产水量高达 $91 \times 10^4 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$ ^[37]。斜井的另一优势是可以改变其物理布局和地层的穿透角度,实现在海底特定位置取水,以保证入渗海水盐度的稳定性^[37]。

至于辐射集水井,目前可参考资料较少。借鉴陆地上地下辐射集水井的工程技术,有理由认为在同样海岸环境条件下,其产水量要大于垂直井和斜井,与水平定向井相当,只不过其工程施工过程较为复杂。

2.3 地下取水设施对海岸环境的影响

2.3.1 对海岸地貌形态和栖息地环境的影响

由于地下取水设施建造在岸上、海滩、潮间带和浅水区,取水井、取水廊道以及输排水管道的施工占用空间大,不仅会改变海岸地貌形态^[34],影响海滩视野,而且会对岸边水鸟、潮间带生物和海洋哺乳动物的栖息地造成一定影响^[38]。尤其是建造在海滩上的海滩井或海滩廊道,会破坏海滩平衡剖面,产生海滩侵蚀或淤积,高出海滩表面或潮水水位的取水井井群和井筒等设施也会对海岸线美学和海岸旅游产生一定影响。因此,地下取水设施在可行性研究阶段就需要同步开展海岸环境影响评价,在工程施工完成后还要采取海岸带生态修复、海滩养护和栖息地恢复等措施,以降低对海岸环境的影响。

地下取水井群需要维持一定的井间距,这样不仅占用空间大,影响海滩视野,而且开采量过程中还会形成地下水降落漏斗,影响海岸带咸淡水的交换。

2.3.2 对海岸含水层水量交换及水质的影响

利用海滩井和海滩廊道取水时,会因为波浪潮汐运动带来滩面泥沙和有机物的堵塞,降低海水渗透能力,造成含水层的堵塞和水量交换。利用地下井取水时,如果单井或井群地下水开采量过大,会形成局部的地下水降落漏斗,影响产水量。

当在咸淡水界限附近或近岸敏感地区取水时,如果地下取水吸引较多的陆侧淡水含水层中的淡水,就会加剧该地区的海水入侵;反之,如果抽取较多海水渗透补给的海底地下水,则会缓解海水入侵^[39]。Baalousha 基于海水入侵模型(SWI2)和地下水 MODFLOW 数值模型,模拟了卡塔尔地区海滩井取水情况,发现地下咸水的开采可有效阻止该地区的海水入侵^[35]。

地下取水对海水淡化厂进水水质的影响主要表现在两个方面:一方面,当在近岸含水层抽取地下水、吸引部分陆侧淡水体汇入时,会造成取水盐度的降低,这需要对海水淡化处理工艺进一步优化,才能

保障设备正常运行;另一方面,海底地下水会掺混有内陆地下水排泄带来的溶解性金属离子(如 Fe^{2+} 、 Fe^{3+} 、 Mn^{2+}),需要对取水水质进行处理,以免引起膜污染^[29,40]。Missimer 等也认为,如果在靠近陆区一侧的后滩(Back-beach)构建取水廊道,会诱导陆区地下水的入海排泄,可能会带来鞣酸、 Fe^{2+} 、 Fe^{3+} 和其他金属离子,造成反渗透膜污染^[18]。

2.4 地下取水系统对海岸环境适应性

目前,中国的海水淡化工程主要采用地表海水取水系统,尚未应用地下取水系统。至于哪些海区适宜选择地下取水系统、选择何种类型的地下取水系统,不仅取决于区域海岸地质地貌特征,还取决于当地的海洋水文及海岸带水文地质条件。

首先,要开展海岸线和海岸地形测绘(Shoreline and Coastal Terrain Mapping),对地下取水设施的适应性进行评估。所谓海岸测绘,是对海岸特征及其相关的物理、化学和生物属性的时空关系进行描绘的一种方法^[41],主要用于海岸分类(Coastal Classification),目前被有关学者用于对地下取水设施的评估。Dehwah 等对沙特阿拉伯红海沿岸区域进行了海岸测绘和沉积物取样分析^[42],发现在 17 种海岸地貌环境类型中,只有砂质海滩、基岩海岸、河流-海相沉积物交互海岸类型中的 6 类海岸形态比较适合建造地下取水设施。其中,砂质海滩适合建设多种类型的地下取水设施;基岩海岸中,仅有含近岸砂层的石灰岩海岸以及河流相沉积物分布的基岩海岸适宜建造地下取水设施;生物海岸和泥质岸滩基本不适合建造地下取水设施;地下取水井对于低容量海水淡化反渗透设施是可行的,而高容量的地下取水系统将仅限于海底廊道取水口;地下取水井的取水能力一般低于取水廊道,垂直井的取水能力则要高于其他类型的地下取水井(表 2)。

Dehwah 等还以美国佛罗里达州海岸为例,按照高一中一低能砂质海滩、基岩海岸、含暗礁的浅海陆架区、泥质海岸和河口海岸分别进行地下取水设施的可行性评价^[42]。结果表明:高一中能砂质海滩适宜建造不同类型的地下取水井和取水廊道,低能砂质海滩仅适宜建造垂直井、斜井和取水廊道;石灰岩岩礁海岸适宜建造垂直井和辐射集水井;带边缘礁的浅海陆架区限制性低能海滩(Restricted Low Energy Beach)适宜建造垂直井和海床廊道。总之,海岸线和海岸地形测绘对于规划和可行性论证阶段确定海区是否可以采用地下取水系统以及采用哪种类型的地下取水设施是非常有用的。

表 2 不同海岸地貌形态地下取水设施的适宜性

Table 2 Suitability of Subsurface Water Intake Facilities in Different Coastal Landforms

海岸地貌类型		垂直井	水平定向井	辐射集水井	斜井	海滩廊道	海床廊道
砂质海滩 (A)	沙滩,含相应的近岸砂或黏质砂、离岸珊瑚礁体(A1)	√√(b)	Q	√(b)	√(b)	√√(d)	√√(d)
	沙滩,受限、无岩礁(A2)	√√(a)	Q	√(b)	√(a)	X	√√(c)
	离岸岛,含近岸砂质沉积物和暗礁(A3)	√√(a)	Q	√(b)	√(b)	√√(d)	√√(d)
基岩海岸线 (B)	灰岩海岸线,含相应的近岸砂、离岸珊瑚礁体(B1)	√√(b)	Q	√√(b)	√√(c)	√√(c)	√√(d)
	灰岩海岸线,含近岸泥质沉积物(B2)	X	X	X	X	X	√(c)
	灰岩海岸,近岸深水,无岩礁(B3)	X	X	X	Q	X	X
	基岩岬角,含基岩底质,无岩礁(B4)	X	X	X	X	X	X
	基岩海岸线,含近岸河相沉积物和离岸岩礁(B5)	√√(a)	Q	√(b)	√(a)	√(c)	√(c)
河流-海相 沉积物 交互海岸 (C)	海岸线发育河相沉积体(巨砾、卵石和砾石),砂、砾石和淤泥组成离岸带,无岩礁(C1)	X	X	X	X	X	X
	河相沉积物海岸线,含近岸海相硬质基底及少量近岸砂、离岸珊瑚礁(C2)	√√(b)	Q	√(c)	√(b)	√(c)	√(c)

注:表格引自文献[42];√√表示优秀,√表示可行,Q表示存疑,X表示不可行;a、b、c、d代表地下取水设施的取水能力,分别对应<20 000、20 000~50 000、50 000~100 000 $\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$ 和不受限等4类。

然后,要进行详细的海洋水文及海岸带水文地质条件现场调查研究。实际上,一个具体海岸区域是否适宜建造地下取水设施以及建造何种类型的地下取水设施,不仅取决于海岸地貌形态,还取决于海洋水文及海岸带水文地质条件,尤其是海岸含水层的富水性调查研究。地下取水设施一般建在海岸附近的第四系海滩松散沉积物内或其他固结和非固结含水岩层中,只有海区沉积物具有良好的储水和富水性,才能保证有足够的取水水源补给。在取水系统设计之前需要开展详细的海洋水文及海岸带水文地质条件现场调查研究。这些调查研究内容主要包括:①海洋水文与海岸泥沙输移,主要分析海区波浪、潮汐运动特征,分析沿岸泥沙运动以及海滩淤积、侵蚀是否会对取水设施和附属构筑物建设造成影响;②离岸灾害调查,主要利用地球物理手段解译分析海床下的冲沟、侵蚀沟是否会发展成滑坡、断裂等次生地质灾害,是否对取水设施造成影响;③水文地质调查和地下水数值模拟,主要摸清取水口附近海岸水文地质条件,根据需要开展钻井试验、含水层抽水试验,合理确定地下取水井群规模、地下水可开采量和影响范围,并分析地下水水质状况是否符合进水水质要求。

另外,地下取水系统对海岸环境适应性分析还需要开展海岸工程咨询和环境影响评价工作,包括工程可行性、经济可行性及环境影响评价。目前,地下取水系统的应用在技术和经济上都不成问题,只要地下取水井所处的近岸海区含水层的富水性强、水质可靠,完全可以通过合理的布局、优化的设计和

施工,实现向大型海水淡化厂供水的目标。重要的是,需要进一步分析评价地下取水系统建设对海岸环境的影响,尤其是未来气候变化和高强度人类活动影响下,在海水淡化工程设计框架内进行工程、环境影响的叠加分析。

3 地下取水系统的投资与运行成本

3.1 地下取水系统与地表海水取水系统的成本对比
海水淡化的成本主要包括投资成本和运行成本。一般而言,地下取水系统的成本要比地表海水取水系统低很多。本文以垂直井(或海滩井)等地下取水系统与地表海水取水系统进行比较。

对于小型海水淡化工程,Abdel-Jawad 等开展了一次海水淡化海滩井取水系统和地表海水取水系统的对比试验和成本分析^[8]。文献[8]设定反渗透海水淡化厂服务周期为 20 年,膜寿命为 5 年,采用直线折旧方法进行成本计算。结果表明:在投资成本方面,海滩井取水系统不需要给水泵、加氯厂的投资以及预处理的费用,仅有海滩井的建设费和排水设施费,相比地表海水取水系统,节省了 42% 的投资成本;在运行成本方面,海滩井取水系统在电能、化学药品应用和过滤器等方面比地表海水取水系统节省了 31.6% 的运行成本。总体上,海滩井取水系统的总成本比传统的地表海水取水系统成本低 30%。

对于万吨级的海水淡化工程,Shahabi 等以 $3.5 \times 10^4 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$ 处理能力的反渗透海水淡化厂为例,利用生命周期评估(Life Cycle Assessment,

LCA)方法计算分析了开敞式地表海水取水系统和海滩井取水系统的单方水全成本分别为 1.89 美元和 1.65 美元,其中前者的化学药剂和运营费偏高^[32]。不仅如此,在取水、制水、后处理等工艺流程环节的能耗和材料消耗方面,海滩井取水系统也比地表海水取水系统有较大优势^[32]。比如,在原水消耗方面,淡化 1 m³ 的海水,开敞式地表海水取水系统需要取水 2.27 m³,而海滩井取水只需 2.02 m³;在耗电方面,开敞式地表海水取水设施耗电量为 0.05 kW·h·m⁻³,海滩井稍高,为 0.16 kW·h·m⁻³;在预处理方面,开敞式地表海水取水系统需要盘式过滤(Disk Filter)、超滤(Ultrafiltration)和桥式过滤(Cartridge Filter)等 3 道工序,耗电量为 0.28 kW·h·m⁻³,而海滩井取水系统仅需桥式过滤,耗电量仅为 0.02 kW·h·m⁻³;开敞式地表海水取水系统和海滩井取水系统的反渗透耗电量一样,均为 2.85 kW·h·m⁻³;在化学药品使用方面,开敞式地表海水取水系统使用的类型和数量很多,海滩井取水系统用得少;在浓盐水和膜废料填埋量方面,开敞式地表海水取水系统单方淡化水的浓盐水产出量为 1.27 m³,膜废料填埋量为 2.11 g·m⁻³,而海滩井取水系统单方淡化水的浓盐水产出量为 1.01 m³,膜废料填埋量也为 2.11 g·m⁻³。由此可见,海滩井取水系统比开敞式地表海水取水系统具有较大的成本和能耗优势。

大型海水淡化工程会因地下取水设施的建造而稍微增加投资成本,但是这并不是决定海水淡化总体和长期成本的主要因素。Missimer 等以一个 10×10⁴ m³·d⁻¹ 处理能力的海水淡化厂为例进行投资成本和运行成本分析^[5]。该海水淡化厂采用传统的开敞式地表海水取水系统,投资总额为 2.15 亿美元,其中取水系统投资 1 000 万美元,占总投资的 4.6%,预处理投资 2 500 万美元,占总投资的 11.6%;而对于一个同样规模的海水淡化厂,若采用地下取水系统,一般不需要进行过多的预处理,只需让地下水流直接进入筒式过滤器(Cartridge Filters)或配备一套抛光过滤系统(Polishing Filter System),前者预处理费用接近于免费,后者预处理费用降为 1 000 万美元;虽然地下取水系统的投资成本比地表海水取水系统略显高,但在 10 年到 30 年的运营期内,海水淡化厂的整体运营成本可减少 5%~30%^[5]。

3.2 不同类型地下取水系统的成本对比

不同类型地下取水系统投资的直接和间接费用

也各不相同。直接费用包括取水设施建造安装费、输送管道费、取水增压泵站建设费和井泵供电费等;间接费用包括土地租赁或购置费、工程设计费、环境影响或补偿费等。

就中小型海水淡化厂而言,利用垂直井(或海滩井)取水,其建设成本普遍低于水平定向井,水平定向井和辐射集水井的建造成本通常比垂直井高出 30%~50%,而海滩廊道和海床廊道的渗透通道通常是最昂贵的一种取水方式。

就大型海水淡化厂而言,由于取水规模较大,海滩井需要多组井群才能满足其需求,总体建设费用要高于斜井、辐射集水井和廊道取水设施。Missimer 等根据秘鲁 Tia Maria 地区海水淡化设施处理 6×10⁴ m³·d⁻¹ 海水的需求,对比分析了采用地表海水取水设施、12 眼海滩井取水设施、3 眼辐射集水井取水设施和 3 套海滩廊道单元取水设施的成本费用,其分别为 1 300 万美元、240 万美元、750 万美元和 200 万美元^[43]。垂直井的建设费用是取水量、井深的函数,利用 Nikolay 给出的资料^[44],绘制垂直井建造成本与不同取水量、井深之间的关系(图 10)。由图 10 可以看出,垂直井建造费用随着取水量和井深的增加而增加,同时又随着取水量呈现阶梯式上升的趋势。因此,比较不同类型地下取水系统的建设费用,需要考虑一定的条件,尤其是单方取水量费用的对比,但目前尚无更详细的对比资料可供分析。

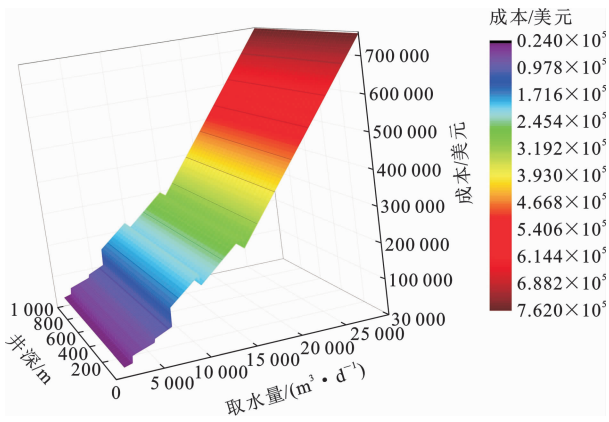
4 结论与展望

4.1 结论

海水淡化工程的地下取水系统一般包括垂直井、辐射集水井、斜井和水平定向井等地下井取水系统以及海滩廊道、海床廊道等地下廊道取水系统。

(1) 地下取水系统相对于开敞式地表海水取水系统,具有较大的优势。地下取水系统利用海滩和地下含水层过滤取水,不仅能够减少或消除海洋生物的撞击和夹带现象,有效保护鱼类和其他水生生物,而且能够有效去除藻类、有机物、细菌,降低水体含沙量,保持水温和盐度的相对稳定,具有完全替代或部分替代海水淡化预处理的功效,正在世界范围内大中型海水淡化工程中得到越来越多的应用。

(2) 地下取水系统的建设对海岸环境具有一定的影响。由于地下取水设施建造在海滩和海床底部或近岸浅水区地下含水层内,不仅会破坏原始海岸地貌形态和海滩平衡剖面,还会对近岸海洋栖息地



图片根据文献[44]的数据绘制

图10 垂直井建造成本与取水量、井深的关系

Fig. 10 Relationships Among Vertical Well Construction Cost, Water Intake and Well Depth

环境产生一定影响;在咸淡水界限附近或敏感区域取水,会导致海水入侵或增加内陆地下水入海排泄,造成取水盐度、水质的变化和可能的污染,对海水淡化厂进水水质产生一定影响。

(3)不同类型的地下取水设施各有优势。一般而言,地下井取水系统的取水量低于地下廊道取水系统,前者主要适用于中小型海水反渗透装置的供水,后者适用于大中型海水淡化厂的供水。垂直井施工简单、取水方便,但单井取水量较小;水平定向井和斜井的单井取水量远大于垂直井,在适宜地点构建取水井群,可以满足大型海水淡化厂的取水需求。

(4)不同类型的海岸地貌形态适宜构建不同类型的地下取水设施。单个海岸区域适宜建造何种类型的取水设施,不仅取决于海岸地貌形态,还取决于海洋水文及海岸带水文地质条件,尤其是海岸含水层的富水性。因此,要综合进行海岸测绘、水文地质调查和海岸环境影响评价分析。

(5)地下取水系统相比地表海水取水系统具有一定的综合成本优势,而且能耗和材料消耗较少。取水规模较小时,垂直井(或海滩井)建设成本普遍低于水平定向井和辐射集水井;但随着取水规模的扩大,垂直井(或海滩井)的建设费用呈现阶梯式上升趋势;不同类型地下取水系统的建设费用对比分析,尚需要一定的相似条件以及更多的数据信息。

4.2 展望

随着地下取水系统设计理念的更新、海水淡化工程对取水水量和水质的要求以及海岸海洋环境保护的要求,地下取水系统的应用研究至少在以下两个方面需要进一步加强。

一是要研发不同类型的地下取水设施并创新取水口设计。廊道取水、隧道取水以及石灰岩深坑取水设施就是充分利用海岸海滩附近的含水层进行有效集水,比传统的开敞式地表海水取水系统更具有竞争优势。针对自然环境不便于建设传统地下取水设施的地区,还可以通过构建人工海滩和人工沙滩过滤系统进行取水。另一方面,需要对取水口进行创新性改进、设计和维护研究。取水口良好的过滤设计,能够避免持续的水下吸入作业可能引起细小生物物种、细微泥沙颗粒和胶体以及微塑料等的进入,给海水淡化预处理带来难度;水泵进口和滤网上沉积的某些铁生物污染物(Iron-biofouling)或污垢需要清除维护。

二是要加强地下取水设施的海岸海洋环境效应研究,尤其是大型海水淡化工程地下取水设施对周边海岸海洋环境的影响。要注重地下取水设施对盐沼湿地、海洋生物栖息地以及濒危物种的影响;注重地下取水设施对海水入侵和地下水入海排泄的影响;注重内陆陆源地下水污染(地下油库、垃圾渗滤液、硝酸盐等)和海洋污染、海底重金属污染对地下水水质和海水淡化处理设备的影响。总之,地下取水设施是否会对周边海区环境造成影响、影响程度以及取水与周边环境因素的相互作用下的生态效应,是下一步地下取水系统的重点研究方向。

值此《地球科学与环境学报》更名二十周年之际,谨向贵刊致以热烈的祝贺!贵刊自更名以来,办刊目标明确、学术定位准确、发展思路正确,无论是投稿、审稿,还是组稿、约稿,都吸引了一大批专家学者聚集交流,在地质学界有了越来越高的知名度和学术影响力。祝愿贵刊今后继续提升办刊质量,办出特色、办出水平,扩大影响,成为地质领域专家和学者喜爱的刊物!

参考文献:

References:

- [1] DAWOUD M A. The Role of Desalination in Augmentation of Water Supply in GCC Countries[J]. Desalination, 2005, 186(1/2/3): 187-198.
- [2] PANKRATZ T. Overview of Intake Systems for Seawater Reverse Osmosis Facilities[M]//MISSIMER T M, JONES B, MALIVA R G. Intakes and Outfalls for Seawater Reverse-osmosis Desalination Facilities. Berlin: Springer, 2015: 3-17.
- [3] LATTEMANN S, HOPNER T. Environmental Impact and Impact Assessment of Seawater Desalination

- [J]. *Desalination*, 2008, 220(1/2/3): 1-15.
- [4] HOGAN T W. Impingement and Entrainment at SWRO Desalination Facility Intakes[M]// MISSIMER T M, JONES B, MALIVA R G. *Intakes and Outfalls for Seawater Reverse-osmosis Desalination Facilities*. Berlin: Springer, 2015: 57-78.
- [5] MISSIMER T M, GHAF FOUR N, DEHWAH A H A, et al. Subsurface Intakes for Seawater Reverse Osmosis Facilities: Capacity Limitation, Water Quality Improvement, and Economics[J]. *Desalination*, 2013, 322: 37-51.
- [6] HUSSAIN A, MAHRUKH M, AHMED I. Review the Importance of Seawater Intake and Its Treatment Techniques for RO Desalination Plant[J]. *Pakistan Journal of Scientific and Industrial Research Series A: Physical Sciences*, 2019, 62(3): 215-222.
- [7] PULIDO-BOSCH A, VALLEJOS A, SOLA F. Methods to Supply Seawater to Desalination Plants Along the Spanish Mediterranean Coast and Their Associated Issues[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2019, 78(10): 1-9.
- [8] ABDEL-JAWAD M, EBRAHUM S. Beachwell Seawater Intake as Feed for an RO Desalting System[J]. *Desalination*, 1994, 99(1): 57-71.
- [9] DEHWAH A H A, MISSIMER T M. Subsurface Intake Systems: Green Choice for Improving Feed Water Quality at SWRO Desalination Plants, Jeddah, Saudi Arabia[J]. *Water Research*, 2016, 88: 216-224.
- [10] WILLIAMS D E. Slant Well Intake Systems: Design and Construction[M]// MISSIMER T M, JONES B, MALIVA R G. *Intakes and Outfalls for Seawater Reverse-osmosis Desalination Facilities*. Berlin: Springer, 2015: 275-320.
- [11] RACHMAN R, LI S, MISSIMER T M, et al. SWRO Feed Water Quality Improvement Using Subsurface Intakes in Oman, Spain, Turks and Caicos Islands, and Saudi Arabia[J]. *Desalination*, 2014, 351: 88-100.
- [12] HASSAN A M, JAMALUDDIN A T M, ROWAILI A, et al. Investigating Intake System Effectiveness with Emphasis on a Self-jetting Well-point (SJWP) Beach Well System[J]. *Desalination*, 1999, 123(2/3): 195-204.
- [13] MALIVA R G, MISSIMER T M. Well Intake Systems for SWRO Systems: Design and Limitations [M]// MISSIMER T M, JONES B, MALIVA R G. *Intakes and Outfalls for Seawater Reverse-osmosis Desalination Facilities*. Berlin: Springer, 2015: 147-162.
- [14] NIKOLAY V. Thorough Study Is Key to Large Beachwell Intakes[J]. *International Desalination and Water Reuse Quarterly*, 2004, 14(1): 16-20.
- [15] PETERS T, PINTO D, PINTO E, et al. Improved Seawater Intake and Pre-treatment System Based on Neodren Technology[J]. *Desalination*, 2007, 203(1/2/3): 134-140.
- [16] FARIÑAS M, LÓPEZ L A. New and Innovative Seawater Intake System for the Desalination Plant at San Pedro del Pinatar[J]. *Desalination*, 2007, 203(1/2/3): 199-217.
- [17] DEHWAH A H, MISSIMER T M. Technical Feasibility of Using Gallery Intakes for Seawater RO Facilities, Northern Red Sea Coast of Saudi Arabia: The King Abdullah Economic City Site[J]. *Desalination and Water Treatment*, 2013, 51(34/35/36): 6472-6481.
- [18] MISSIMER T M, MALIVA R G, DEHWAH A H, et al. Use of Beach Galleries as an Intake for Future Seawater Desalination Facilities in Florida and Globally Similar Areas[J]. *Desalination and Water Treatment*, 2014, 52(1/2/3): 1-8.
- [19] WILLIAMS D E. Design and Construction of Subsurface Intakes[M]// GUDE V G. *Sustainable Desalination Handbook*. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2018: 227-258.
- [20] ALLEN J B, CHENG R C, TSENG T J, et al. Update Evaluation of Under-ocean Floor Seawater Intake and Discharge[J]. *IDA Journal of Desalination and Water Reuse*, 2011, 3(1): 19-25.
- [21] MALIVA R G, MISSIMER T M. Self-cleaning Beach Gallery Design for Seawater Desalination Plants[J]. *Desalination and Water Treatment*, 2010, 13(1/2/3): 88-95.
- [22] RACHMAN R, MISSIMER T M. Feasibility and Design of Seabed Gallery Intake Systems Along the Arabian Gulf Coast of Saudi Arabia with a Discussion on Gallery Intake Use for the Entire Arabian Gulf Region[M]// MISSIMER T M, JONES B, MALIVA R G. *Intakes and Outfalls for Seawater Reverse-osmosis Desalination Facilities*. Berlin: Springer, 2015: 251-273.
- [23] DEHWAH A H A, AL-MASHHAWARI S, MISSIMER T M. Mapping to Assess Feasibility of Using Subsurface Intakes for SWRO, Red Sea Coast of Saudi Arabia[J]. *Desalination and Water Treatment*, 2014, 52(13/14/15): 2351-2361.
- [24] MANTILLA D, MISSIMER T M. Seabed Gallery Intake Technical Feasibility for SWRO Facilities at Shu-

- qaiq, Saudi Arabia and Other Global Locations with Similar Coastal Characteristics[J]. *Journal of Applied Water Engineering and Research*, 2014, 2(1): 3-12.
- [25] NIKOLAY V. Overview of Desalination Plant Intake Alternatives[R]. Virginia: Watereuse Association Desalination Committee, 2011.
- [26] SHIMOKAWA A. Fukuoka District Desalination System with Some Unique Methods[R]// National Centre of Excellence in Desalination. International Desalination Intakes and Outfalls Workshop Proceedings. Adelaide: National Centre of Excellence in Desalination, 2012: 116-118.
- [27] MISSIMER T M, MALIVA R G, PANKRATZ T. Innovations in Design and Operation of SWRO Intake Systems[M]// MISSIMER T M, JONES B, MALIVA R G. Intakes and Outfalls for Seawater Reverse-osmosis Desalination Facilities. Berlin: Springer, 2015: 351-360.
- [28] FAYAZ S M H, MAFIHOLOMI R, RAZAVIAN F, et al. Technical and Economical Comparison Study Between Operation Costs of Beach Well Intake and Open Intake for Seawater Reverse Osmosis Desalination in Persian Gulf [J]. *Desalination and Water Treatment*, 2020, 178: 74-82.
- [29] HENTHORNE L, BOYSEN B. State-of-the-art of Reverse Osmosis Desalination Pretreatment[J]. *Desalination*, 2015, 356: 129-139.
- [30] RACHMAN R, DEHWAH A H A, LI S, et al. Effects of Well Intake Systems on Removal of Algae, Bacteria, and Natural Organic Matter[M]// MISSIMER T M, JONES B, MALIVA R G. Intakes and Outfalls for Seawater Reverse-osmosis Desalination Facilities. Berlin: Springer, 2015: 163-193.
- [31] DEHWAH A H A, MISSIMER T M. Seabed Gallery Intakes: Investigation of Water Pretreatment Effectiveness of the Active Layer Using a Long-term Column Experiment[J]. *Water Research*, 2017, 121: 95-108.
- [32] SHAHABI M P, MCHUGH A, HO G. Environmental and Economic Assessment of Beach Well Intake Versus Open Intake for Seawater Reverse Osmosis Desalination[J]. *Desalination*, 2015, 357: 259-266.
- [33] ANDERSON D J, TIMMS W A, GLAMORE W C. Optimising Subsurface Well Design for Coastal Desalination Water Harvesting[J]. *Australian Journal of Earth Sciences*, 2009, 56: 53-60.
- [34] VOUTCHKOV N. SWRO Desalination Process; On the Beach-seawater Intakes[J]. *Filtration and Separation*, 2005, 42(8): 24-27.
- [35] BAALOUSHA H M. The Potential of Using Beach Wells for Reverse Osmosis Desalination in Qatar[J]. *Modeling Earth Systems and Environment*, 2016, 2(2): 1-12.
- [36] RODRIGUEZ-ESTRELLA T, PULIDO-BOSCH A. Methodologies for Abstraction from Coastal Aquifers for Supplying Desalination Plants in the Southeast of Spain[J]. *Desalination*, 2009, 249(3): 1088-1098.
- [37] WILLIAMS D E. Yield and Sustainability of Large Scale Slant Well Feedwater Supplies for Ocean Water Desalination Plants[C]// IDA. The International Desalination Association World Congress on Desalination and Water Reuse. San Diego: IDA, 2015: 1-17.
- [38] PANKRATZ T. A Review of Seawater Intake, Pretreatment and Discharge Technologies[R]. Tehran: The International Desalination Association Seminar on Water Desalination Technologies, 2006.
- [39] PANTELL S E. Seawater Desalination in California [R]. California: California Coastal Commission, 1993.
- [40] BELL R B, DONOVAN M, CHARETTE M, et al. Ocean Water Desalination Pilot Testing Utilizing a Slant Well Intake System in Dana Point, Orange County, CA[R]. Dana Point: The Wate Reuse California Annual Conference, 2011.
- [41] MORTON R A. Mapping Shores and Coastal Terrain [M]// SCHWARTZ M L. Encyclopedia of Coastal Science. Berlin: Springer, 2005: 618-623.
- [42] DEHWAH A H A, AL-MASHHAWARI S, MISSIMER T M. Coastal Evaluation and Planning for Development of Subsurface Intake Systems[M]// MISSIMER T M, JONES B, MALIVA R G. Intakes and Outfalls for Seawater Reverse-osmosis Desalination Facilities. Berlin: Springer, 2015: 125-145.
- [43] MISSIMER T M, SCOTT MANAHAN W, MALIVA R G. Technical and Economic Analyses of Intake Options for the Proposed 100 L/S Tia Maria Seawater RO Treatment Facility in Southern Peru[C]// AMTA. 2010 American Membrane Technology Association Annual Conference and Exposition. San Diego: AMTA, 2010: 25-34.
- [44] NIKOLAY V. Desalination Engineering: Planning and Design[M]. New York: McGraw-Hill, 2012.