

doi:10.3969/j.issn.1003-2029.2019.04.015

晋江海域海水淡化工程浓盐水排海方案研究

徐 显, 张拂坤*, 邹川玲, 刘淑静

(自然资源部天津海水淡化与综合利用研究所, 天津 300192)

摘 要:为科学选择海水淡化浓盐水排海方案, 运用 MIKE3 数值模拟软件, 选取福建晋江附近海域, 建立了海水淡化浓盐水排海三维数值模型, 模型水位振幅误差在 10 cm 以内, 流速、流向计算结果与实测值变化规律一致, 精度符合要求。考虑多端口、排放口间距、喷射速度等因素对浓盐水稀释的影响, 选取了 4 种不同的浓盐水排放方案, 开展了海水淡化浓盐水排放扩散模拟, 计算了不同排海方案下盐升包络面积。结果表明, 晋江海域浓盐水排放量为 3.5 万 t/d 的海水淡化工程采用扩散器后盐升分布面积显著减少, 采用多个排放口且每个排放口多个端口喷射的排放方案, 可明显增强浓盐水在受纳海域中的扩散稀释效果, 盐升 3 的分布面积可减少近一半。建议加强我国海水淡化工程浓盐水排海扩散器的研究与应用, 保护受纳海域海洋生态环境。

关键词:海水淡化, 浓盐水, 盐升, 排海, 扩散器

中图分类号: P747

文献标志码: A

文章编号: 1003-2029(2019)04-0091-06

淡水资源短缺是全球面临的主要问题之一, 海水淡化技术在缓解全球淡水资源短缺问题方面发挥着越来越重要的作用。近年来全球海水淡化市场蓬勃发展, 根据国际脱盐协会(IDA)相关数据, 截至 2018 年 6 月, 全球淡化工程规模已达 9 820 万 m³/d。目前, 全球大多数海水淡化工程通过排放系统将淡化后的浓盐水直接排入海洋, 据统计^[1], 近 50% 的浓盐水排入距海岸线 1 km 海域, 近 80% 的浓盐水排入距海岸线 10 km 海域。随着浓盐水排海量的日益增加, 浓盐水排放对受纳水体和海洋生物群落的影响, 以及如何采取有效措施缓解其环境影响, 受到了国内外广泛关注。

海水淡化不可避免地会产生浓盐水, 一般来说, 采用不同技术的海水淡化浓盐水, 其盐度是进水的 1.1~2 倍。由于盐度较高, 直接排放后会受纳海域的局部盐度升高。由于岸边表层排放成本较低, 便于建设安装, 世界上许多海水淡化工程, 特别是早期建设的海水淡化工程都采用直接排海这种

方式排放浓盐水, 如阿联酋的许多海水淡化工程都将浓盐水直接排海处理^[2]。然而, 一些研究认为^[3-4], 海水淡化工程排放的浓盐水可能会对近海受纳海域环境造成一定的环境风险。因此, 近年来一些海水淡化工程在建设时, 尽可能避免采用这种排放方式。增加浓盐水排海后的稀释扩散速率是避免浓盐水环境影响的有效方法之一。近年来, 国外开展了相关研究与工程实践^[5-8], 多采取在排放口安装扩散器的方式增强浓盐水的稀释扩散。目前, 国外海水淡化工程常用的潜没排放口设计大多是带有多端口扩散器的排放管。如: 西班牙大多数的浓盐水排放系统都设计成潜没式、多端口的排放^[9]; 以色列索雷科 (Sorek) 54 万 t/d 海水淡化工程是世界上最大的反渗透海水淡化工程, 其浓盐水不经任何预先稀释的情况下, 通过距海岸线 1.9 km、水深 20 m 的扩散器排海^[6]。通过对西班牙圣佩德罗 (San Pedro) 海水淡化工程^[10]和新运河 (Nuevo Canal) 海水淡化工程^[11]多年的监测发现, 在管道末端安装扩散器, 能够增

收稿日期: 2019-04-30

基金项目: 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资助项目 (K-JBYWF-2017-G17, K-JBYWF-2017-T13); 国家科技支撑计划资助项目 (2014BAB04B02)

作者简介: 徐显 (1985-), 男, 助理工程师, 本科, 主要从事海水淡化环境模拟研究。E-mail: dick123xuxian@163.com

通讯作者: 张拂坤 (1981-), 女, 高级工程师, 主要从事海水淡化环境模拟研究。E-mail: zfk1229zfk@163.com

加排海浓盐水的混合和稀释,对受纳海域和生物群落的影响范围明显减小。目前,我国海水淡化浓盐水排放的主要方式包括:直接排海、降温后排海、与海水或电厂温排水混合后排海、综合利用等。扩散器在我国海水淡化工程浓盐水排海中还未广泛应用,且相关研究较少,已有研究与应用大多是针对污水排海^[12-14]。为避免和减少浓盐水排海的生态环境影响,应加强扩散器在我国海水淡化工程浓盐水排海系统中的应用研究。

本文将针对海水淡化浓盐水盐度高、密度大等特点,选取福建晋江附近海域,运用 MIKE3 数值模拟软件,建立海水淡化浓盐水排海三维温盐扩散模型,并设置 4 种不同的排放方式,开展海水淡化浓盐水排海方案对比研究,提出有利于浓盐水稀释扩散的方案建议,降低浓盐水环境影响,保护海洋生态环境。

1 海水淡化浓盐水排放方案研究

1.1 模型建立

MIKE3 FM 模型是基于 Boussinesq 假定和流体静压假定的三维不可压缩雷诺平均 $N-S$ 方程,由连续性方程、动量方程、温度、盐度和密度方程组成,本研究在浓盐水排海模拟中耦合了温盐对流扩散方程^[15]。模型采用的计算方法为有限体积法,水平面采用非结构(FM)网格,垂直方向采用结构化网格,动量方程和连续性方程采用交替隐式离散法(ADI)进行离散求解。

为提高模拟结果的准确性,首先建立台湾海峡大范围模型,并从中提取福建晋江附近海域小范围模型的边界条件,模型计算网格如图 1 所示。大范围模型网格单元边长 4 000 m,在此基础上,初步计算确定浓盐水扩散范围,并以此为中心,对排放口附近海域进行 20 m 网格加密处理,并在网格外围进行 100~400 m 加密,在垂向上分为 7 层。小范围模型的边界水位、初始时刻的三维水位场、温度场、盐度场均由大范围模型计算结果中提取,并设置干湿边界、涡粘系数、底床超滤、风速风向等参数^[15]。海水淡化工程浓盐水排海模拟时间为 2018 年 7 月 30 日至 9 月 1 日,前 10 d 用于模型稳定。

选择厦门、东山、泉州、马公岛作为水位率定点,以及东山附近 2 个海流观测点作为流速、流向率定点(图 1)。模型验证结果如图 2~图 3 所示,水

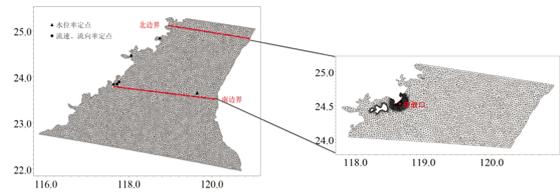


图 1 模型计算网格

位振幅误差在 10 cm 以内,流速、流向计算结果与实测值变化规律一致,精度符合要求,且流速与有关文献^[16]报道的该区域平均流速为 0.01~0.36 m/s 基本相符,能真实表征该海域的水动力特征。

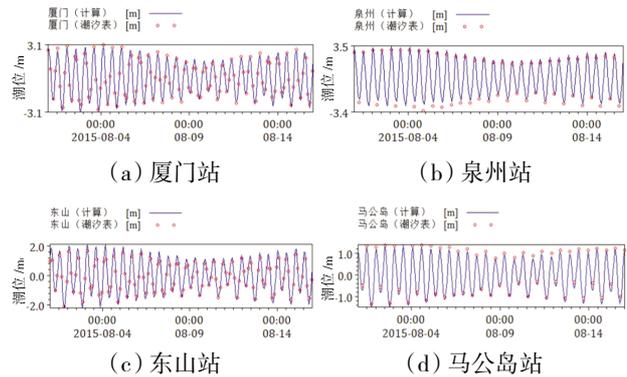


图 2 潮位经验证结果

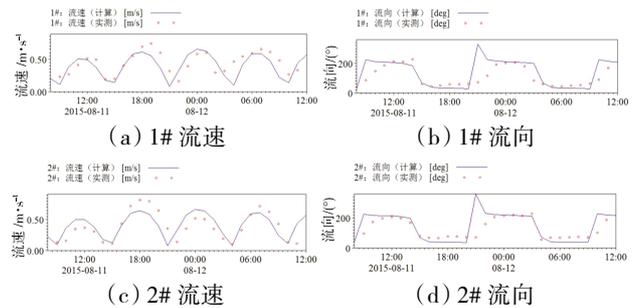


图 3 流速、流向验证结果

1.2 浓盐水排放方案

本文以浓盐水排放量为 3.5 万 t/d 的海水淡化工程为例,海水初始盐度为 33,初始温度为 24 °C。以盐升作为特征评价因子,排放口设置在底层,距离岸边 800 m(排放口位置如图 1 所示),所在位置水深约 14 m,排海浓盐水盐升 1 倍。为探讨喷射排放和排放端口数量对浓盐水扩散稀释的影响,分别设置了 4 个方案(如图 4),其中,方案 1 作为参照方案设置一个排放口简单排放,浓盐水以自然速度流出;方案 2 为一个排放口设置 3 个端口向不同方向喷射排放,喷射速度 2 m/s;方案 3 为沿放流管设置 3 个等间距排放口,浓盐水以自然速度流出;方案 4 为 3 个等间距排放口各设置 3 个端口向不同方向喷射排放,喷射速度 2 m/s。其中铺设在海底的放流

管长度 800 m,扩散器长度约 300 m,具体参数如表 1。

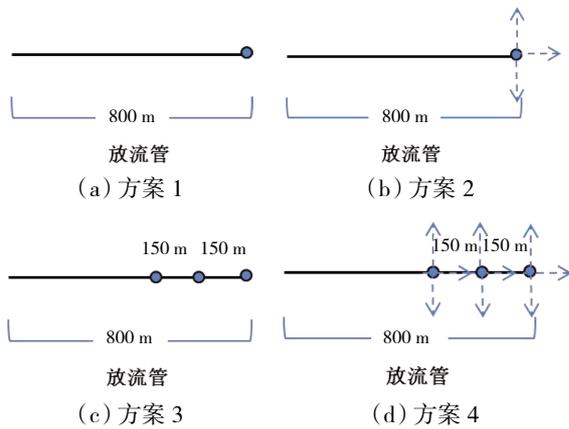


图 4 海水淡化工程浓盐水排放方案排放口示意图

表 1 海水淡化工程浓海水排放方案

序号	排放口数量/个	单个排放口排放量 $/\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$	排放口 间距/m	单个排放口端口 数量/个	排放角度 (与正北方向)/ $(^\circ)$	排出速度 $/\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$
1	1	0.405	-	1	自然流出	
2	1	0.405	-	3	45, 135, 225	2
3	3	0.135	150	1	自然流出	
4	3	0.135	150	3	45, 135, 225	2

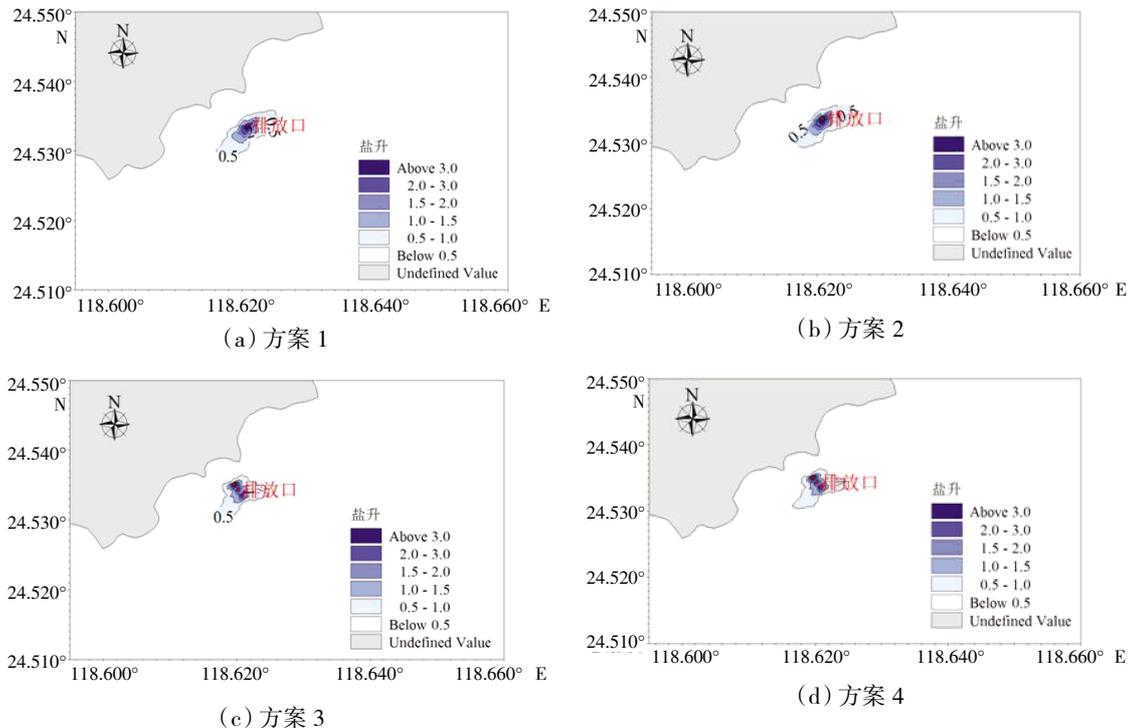


图 5 不同排放方案盐升包络图

布趋势呈现差异,且盐升范围有明显缩小,说明等间距分布式排放能够影响接纳海域盐升分布趋势并显著增强浓盐水扩散稀释的效果。采取沿放流管设置 3 个等间距排放口的方案后,且每个排放口 3

1.3 结果与讨论

图 5 为不同排放方案下,海水淡化浓盐水排海后接纳海域底层盐升包络图。由图 5 可以看出,浓盐水排放量为 3.5 万 t/d 时,盐升包络范围非常小,即排海后受影响海域面积非常小。采取不同排放方案后,排海海域盐升分布趋势及范围均有一定程度差异。采取一个排放口 3 个端口喷射排放的方案后,方案 2 与方案 1 相比,接纳海域盐升分布趋势一致,盐升大于 0.5 的海域范围接近,但盐升大于 1 的范围有所减小,说明多端口喷射排放有助于高盐水团的稀释。采取沿放流管设置 3 个等间距排放口的方案后,方案 3 与方案 1 相比,接纳海域盐升分

个端口喷射排放的方式,方案 4 的盐升包络范围是 4 种方案中最小的,且浓盐水的扩散趋势与方案 3 相似。

表 2 为浓盐水排海后盐升包络面积计算结果。

采取一个排放口简单排放方式,方案 1 受纳海域最大盐升超过 1 的包络面积约为 0.10 km²,最大盐升超过 1.5 的包络面积为 0.041 km²;最大盐升超过 3 的包络面积为 0.008 6 km²。采用喷射排放或多排放口排放后,排放海域盐升分布包络面积均有不同程度减小。

采取一个排放口 3 个端口喷射排放方式,方案 2 受纳海域最大盐升超过 1 的包络面积为 0.094 km²,与方案 1 相当;最大盐升超过 1.5 的包络面积为 0.040 km²,与方案 1 相比减小了约 2%;最大盐升超过 3 的包络面积为 0.007 km²,与方案 1 相比缩小了约 8%。分析原因,方案 2 中浓盐水以高于环境水体流速的速度喷射排入受纳海域水体中,其具有的动量使浓盐水与周围环境水体迅速掺混,从而有利于浓盐水的稀释扩散。

采取沿放流管设置 3 个等间距排放口排放方式,方案 3 受纳海域最大盐升超过 1 的包络面积 0.077 km²,与方案 1 相比缩小了约 23%;最大盐升超过 1.5 的包络面积为 0.033 km²,与方案 1 相比缩小了约 20%;最大盐升超过 3 的包络面积 0.006 4 km²,与方案 1 相比缩小了约 26%。分析原因,与 1 个喷口相比,分 3 个端口排放增加了浓盐水与环境水体的接触面积,对浓盐水的稀释也是有利的。方案 3 中将浓盐水分多个排放口排放,除可增加浓盐水与环境水体的接触面积外,由于 3 个排放口有一定距离,使得方案 3 与方案 1、方案 2 相比,通过排放口附近的潮流量增多,即参与稀释的环境水体增多,因此可获得较高的稀释度。

采取沿放流管设置 3 个等间距排放口,且每个排放口 3 个端口喷射排放的方式,方案 4 受纳海域最大盐升超过 1 的包络面积 0.075 km²,与方案 1 相比缩小了约 25%;最大盐升超过 1.5 的包络面积为 0.031 km²,与方案 1 相比缩小了 24%;最大盐升超过 3 的包络面积为 0.004 7 km²,与方案 1 相比缩小了 45%。分析原因,方案 4 为方案 2 与方案 3 的结合,浓盐水分多个排放口排放,并以高于环境水体流速的速度喷射排入受纳海域中,不仅增大了浓盐水与环境水体的接触面积,增加了排放口的潮流量,而且加速了浓盐水与环境水体的掺混速率,因此稀释效果也是这 4 种方案中最好的。

通过各方案最大盐升包络面积的对比,进一步

表 2 不同排放方案下海域盐升包络面积/km²

排放方案	盐升		
	≥1	≥1.5	≥3
方案 1	0.100 0	0.041 0	0.008 6
方案 2	0.094 0	0.040 0	0.007 9
方案 3	0.077 0	0.033 0	0.006 4
方案 4	0.075 0	0.031 0	0.004 7

证实多端口喷射排放有助于浓盐水扩散稀释,相比于一个排放口多端口喷射排放,等间距分布式多端口喷射排放的稀释效果更佳,能够显著缩小浓盐水对海域影响范围。

2 结论与建议

(1) 海水淡化浓盐水处理方式包括排海处理和再利用两类。世界上许多海水淡化工程,特别是早期建设的海水淡化工程多采取岸边表层排放的方式处理浓盐水。建在电厂附近的海水淡化工程,其浓盐水多与电厂温排水混合排放,以减少受纳海域盐升影响。为保障海水淡化与海洋生态环境协调、可持续发展,越来越多的海水淡化工程采取多种有效措施,加强浓盐水的稀释扩散,其中,在排放口安装扩散装置作为有效措施之一得到工程应用。

(2) 本文选取福建晋江附近海域,运用 MIKE3 构建了海水淡化浓海水排海三维数值模型,以盐升作为特征评价因子,开展不同排放方案的模拟和对比研究。研究表明,晋江海域浓盐水排放量为 3.5 万 t/d 的海水淡化工程采用扩散器后盐升分布面积显著减少,采用 3 个等间距排放口且每个排放口 3 个端口喷射的排放方案,可明显增强浓盐水在受纳海域中的扩散稀释效果,盐升 3 的包络面积可减少近一半。

(3) 目前,扩散器在我国海水淡化工程浓盐水排海中的研究与应用还较少,但随着我国海水淡化工程规模的不断增加,为预防和减小浓盐水排海的生态环境影响,应加强扩散器在我国海水淡化工程浓盐水排海系统中的应用研究。建议我国大型海水淡化工程浓盐水排海采用扩散器排放,并加强有关扩散器形式及排放速率的研究与应用,兼顾提高浓盐水扩散效率和有效控制成本的问题,保障海水淡化与海洋环境协调可持续发展。

参考文献:

- [1] Edward Jones, Manzoor Qadir, Michelle T H van Vliet, et al. The state of desalination and brine production: A global outlook[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 657: 1343–1356.
- [2] A Giwa, V Dufour, F Al Marzooqi, et al. Brine management methods: Recent innovations and current status[J]. *Desalination*, 2017, 407: 1–23.
- [3] N Afrasiabi, E Shahbazali. RO brine treatment and disposal methods[J]. *Desalin. Water Treat*, 2011, 35: 39–53.
- [4] G Al Bazedi, R S Ettouney, S R Tewfik, et al. Salt recovery from brine generated by large-scale seawater desalination plants[J]. *Desalin Water Treat*, 2013: 1–9.
- [5] Veera Gnaneswar Gude. Sustainable desalination handbook—Plant selection, design and implementation [R]. Oxford: Butterworth – Heinemann, 2018.
- [6] Hila Frank, Katarina E. Fussmann, Eyal Rahav, et al. Chronic effects of brine discharge from large-scale seawater reverse osmosis desalination facilities on benthic bacteria[J]. *Water Research*, 2019, 151: 478–487.
- [7] Thomas M Missimera, Robert G Maliva. Environmental issues in seawater reverse osmosis desalination: Intakes and outfalls [J]. *Desalination*, 2018, 434: 198–215.
- [8] Tobias Bleninger, Anne Niepelt, Gerhard Jirka. Desalination plant discharge calculator[R]. Paper BD 180 for EDS Congress, Germany, 2009.
- [9] P Palomar, I J Losada. Desalination in Spain: Recent developments and recommendations[J]. *Desalination*, 2010, 255: 97–106.
- [10] Yoana Del-Pilar-Ruso, Elena Martinez-Garcia, Francisca Gimenez-Casalduero, et al. Benthic community recovery from brine impact after the implementation of mitigation measures[J]. *Water Research*, 2015, 70: 325–336.
- [11] Ángel Loya-Fernández, Luis Miguel Ferrero-Vicente, Candela Marco-Méndez, et al. Quantifying the efficiency of a mono-port diffuser in the dispersion of brine discharges[J]. *Desalination*, 2018, 431: 27–34.
- [12] 张东华, 王虹. 烟台市套子湾污水处理厂排海管道有关参数的确定[J]. *海岸工程*, 2010, 29(1): 46–52.
- [13] 徐志刚. 大亚湾石化工业区污水排海工程扩散器的数值模拟[J]. *科学技术与工程*, 2011, 14(5): 235–260.
- [14] 杨吉凯, 艾丛芳, 金生, 等. 污水排海扩散器的数值模拟与模型试验[J]. *海洋环境科学*, 2016, 35(6): 938–942.
- [15] 张拂坤, 邹川玲, 刘淑静, 等. 晋江海域海水淡化排海盐度场三维数值模拟[J]. *海洋学研究*, 2018, 36(2): 12–18.
- [16] 沈俊强, 孙豪为, 潘爱军, 等. 基于夏季船载 ADCP 数据的台湾海峡西南部平均流与潮流特征的初步研究[J]. *热带海洋学报*, 2016 35(3): 11–19.

Study on the Scheme of Brine Discharge from Seawater Desalination Projects in the Sea Area Near Jinjiang

XU Xian, ZHANG Fu-kun, ZOU Chuan-ling, LIU Shu-jing

Institute of Seawater Desalination and Multipurpose Utilization, MNR, Tianjin, 300192, China

Abstract: In order to scientifically select the scheme of seawater desalination brine discharge, a three-dimensional numerical model of brine discharge was established based on MIKE3 in the sea area near Jinjiang. The water level amplitude error of the model is within 10 cm, the calculated results of velocity and direction are consistent with the measured values, and the accuracy can meet the requirements. Considering the influence of multiple ports, discharge port spacing, injection velocity and other factors on the dilution of brine, four different schemes of brine discharge are selected, and the diffusion simulation of brine discharge is carried out. The envelopment area of salinity increasing is calculated under different discharge schemes. The results show that the installation of diffusers in the discharge port can effectively reduce the salinity-increasing area of discharge from a 35 000 t/d desalination project in Jinjiang sea area. Implementation of the emission scheme with multiple discharge ports can significantly enhance the diffusion and dilution effect of brine in the receptive sea area. The envelopment area of salinity increased by 3 units can be reduced by nearly a half. It is suggested to strengthen the research and application of brine diffusers in seawater desalination projects, so as to protect the marine ecological environment.

Key words: seawater desalination; brine; salinity increase; discharge; diffuser