海水抽水蓄能电站运行中的有机污染物排放对周边海域的环境影响

向正林[1]，曾俏俏[2]，苏跃涵[3]，李恒翔[4]，卢耀斌[3]，骆海萍[3]，刘广立[3]

（1.南方电网调峰调频发电有限公司　广州　510630；2.广东省水利电力勘测设计研究院有限公司　广州　510635；
3.中山大学环境科学与工程学院　广州　510006；4.中国科学院南海海洋研究所　广州　510301）

摘要：为保障海水抽水蓄能电站运行的环境友好和生态安全，文章以大万山岛为例，在海水水质监测分析的基础上，模拟拟建海水抽水蓄能电站运行中的化学需氧量（COD）排放对周边海域的环境影响。研究结果表明：大万山岛周边海域水质较好，COD浓度在0.2 mg/L以下；当海水抽水蓄能电站的COD排放浓度不超过50 mg/L时，周边海域的COD最高浓度为2.29 mg/L，满足海水水质要求，但当COD排放浓度超过100 mg/L时即存在超标风险；受水温和潮流的影响，海水抽水蓄能电站周边海域COD的浓度、扩散方向、聚集位置和影响面积随季节变化而变化；海水抽水蓄能电站排水口周边海域的COD最高浓度随排水量增大而提高，COD最高浓度海域与排水口的距离约为1.6 km。研究结果可为控制海水抽水蓄能电站的COD排放对周边海域的环境影响提供科学参考。

关键词：海水抽水蓄能电站；有机污染物；海洋环境；化学需氧量；海水水质

中图分类号：X55；P76；TV743　　**文献标志码**：A　　**文章编号**：1005－9857(2022)04－0097－05

The Environmental Impact of Organic Pollutant Discharge from the Seawater Pumped Storage Power Station on Surrounding Sea Areas

XIANG Zhenglin[1]，ZENG Qiaoqiao[2]，SU Yuehan[3]，LI Hengxiang[4]，
LU Yaobin[3]，LUO Haiping[3]，LIU Guangli[3]

（1.CSG Power Generation Company，Guangzhou 510630，China；
2.Guangdong Water Conservancy & Electric Power Survey & Design Institute Co. Ltd.，Guangzhou 510635，China；
3.School of Environmental Science and Engineering，Sun Yat-sen University，Guangzhou 510006，China；
4.South China Sea Institute of Oceanology，Chinese Academy of Sciences，Guangzhou 510301，China）

Abstract：To ensure the environment-friendly and ecological safety of seawater pumped storage power station (SPSPS) operation, the effect of chemical oxygen demand (COD) discharged by a proposed SPSPS on the surrounding marine environment was simulated and investigated in this paper, which was based on the monitoring and analysis of seawater quality in the Dawanshan is-

收稿日期：2021-06-11；**修订日期**：2022-04-06

基金项目：国家重点研发计划项目(2017YFB0903700、2017YFB0903703).

作者简介：向正林，工程师，硕士，研究方向为自动化和电池储能技术

通信作者：苏跃涵，硕士，研究方向为环境污染和生态修复

land as an example. The results showed that the seawater quality surrounding the Dawanshan island was good with the COD value less than 0.2 mg/L. When the COD concentration was less than 50 mg/L in the effluent of SPSPS, the maximum COD concentration reached 2.29 mg/L in the surrounding seawater, which could still satisfy the requirement of the seawater quality. However, when the COD concentration was higher than 100 mg/L in the effluent of SPSPS, the risk of exceeding the seawater standard was high in the surrounding seawater. The discharge of COD was affected by the seawater temperature and tide, and fluctuated in terms of concentration, diffusion direction and gather location in the surrounding seawater according to the season change. The maximum COD concentration would increase with the water discharge increasing from the SPSPS into the surrounding seawater. The distance between the location of the maximum COD concentration in the surrounding seawater and the outfall of SPSPS was about 1.6 km. The results would provide a scientific basis for controlling the COD pollution from the discharge of SPSPS.

Keywords: Seawater pumped storage power station, Organic pollutant, Marine environment, Chemical oxygen demand, Seawater quality

0 引言

我国海域辽阔,海洋资源丰富,其中海岛及其周边海域蕴藏的自然资源在我国经济发展和国防建设中发挥重要支撑作用。海岛作为海洋生态系统的重要组成部分,其特殊的地理位置和资源环境关系到“21 世纪海上丝绸之路”建设乃至我国未来的可持续发展[1-3]。随着海上风能、潮汐能和太阳能等新能源的开发,配套建设海水抽水蓄能电站不仅可以满足远离能源基地和能源条件匮乏的海岛用电需求和优化能源结构,而且对于沿海和海岛地区构建安全、稳定、经济和清洁的能源供应体系具有重要作用,符合我国能源发展战略。

与陆地相比,海岛的面积狭小、地理环境独特且生态系统脆弱[4]。随着海岛开发利用活动的增多,海岛岸线蚀退、植被退化、水土流失、生物多样性降低以及周边海域污染等问题凸显,已经对海岛生态系统结构的稳定性和服务功能的可持续性构成严重威胁,不仅制约海岛地区的经济发展,而且影响海岛地区的社会稳定[5-7]。因此,在海水抽水蓄能电站的建设和运行中必须考虑其对周边海域环境的影响[8-10]。

目前国内外广泛通过海水水动力过程分析海洋污染物的迁移和扩散,并预测海水水质随污染物的输入而产生的变化[11-14]。目前在水质预测方面已有多种数学模型,其中 MIKE 模型具有灵活处理复杂地形、可视性强和操作界面友好等优点[15-18]。例如:采用 MIKE 模型对渤海湾海水水质的模拟结果表明,填海工程对渤海湾海洋环境影响较大,使渤海湾纳潮量降低 9 %,导致污染物向湾外扩散的能力降低[19];对上海市金山区排海污水纳污海域海水水质的模拟结果表明,污水的紧急排放对海域造成严重污染[20];对曹妃甸工业区的渤海二维污染物迁移转化的模拟结果表明,当有机污染物排放满环境容量后,4 mg/L 浓度场(COD_{Mn})的覆盖面积可达 4.42 km^2[21]。此外,在石油泄漏事件中应用 MIKE 模型预测浮油轨迹和面积也取得较好效果[22]。本研究基于 MIKE 21 模型,研究珠海市大万山岛拟建海水抽水蓄能电站运行中的有机污染物排放对周边海域的环境影响及其迁移转化规律,以期防控电站对海洋环境的污染,为电站运行的环境友好和生态安全提供技术支撑。

1 参数与模型

1.1 海水水质

2019 年 9 月在大万山岛拟建海水抽水蓄能电站排水口周边海域设立 7 个监测站位,对海水的水温、盐度、悬浮物浓度和化学需氧量(COD)浓度进行取样测定,样品分析参照《海洋监测技术规程》(HY/T 147—2013)要求。各站位的主要环境指标

如表 1 所示。

表 1　监测站位的位置及其主要环境指标

站位	纬度(N)	经度(E)	水温/℃	盐度/‰	悬浮物浓度/(mg·L^{-1})	COD 浓度/(mg·L^{-1})
S1	21°56′55″	113°44′32″	29.8	29.65	4.72	0.10
S2	21°57′15″	113°44′32″	29.6	30.12	3.66	0.12
S3	21°57′02″	113°44′45″	29.7	29.91	2.54	0.09
S4	21°56′47″	113°44′58″	29.8	29.85	2.43	0.10
S5	21°57′50″	113°44′40″	29.8	30.27	3.59	0.08
S6	21°57′18″	113°45′10″	29.8	29.66	4.63	0.10
S7	21°56′47″	113°45′35″	29.7	29.70	2.65	0.12

各站位 COD 的平均浓度为 0.10 mg/L，因此在模拟参数时设置 COD 背景浓度为 0.10 mg/L。参考上海市金山区排海污水的模拟方法[20]，考虑电站排水的环境风险（如混入生活污水），设置 COD 排放浓度梯度即梯度 1（10 mg/L）、梯度 2（20 mg/L）、梯度 3（50 mg/L）、梯度 4（100 mg/L）和梯度 5（200 mg/L），模拟计算海水抽水蓄能电站排水对周边海域环境造成的影响。

1.2　数值模型

采用 MIKE 21 模型进行模拟计算，涡黏系数取 0.28，曼宁系数取 70 $m^{1/3}/s$。前期的潮位验证结果表明，本研究建立的二维水动力水质模型满足预测要求[23−25]。除特别说明外，海水抽水蓄能电站的下水库流量通常取 12.3 m^3/s，COD 的扩散系数取0.05 m^2/s。

根据我国南海海域在不同季节的水温，在实验室条件下设置不同的水温梯度（16℃、21℃、22℃和 26℃）以确定 COD 降解系数，并根据阿伦尼乌斯（Arrhenius）方程得出 COD 降解系数与水温的关系[26]，计算公式为：

$$\ln k_T = -3\,210/T + 7.9 \tag{1}$$

式中：T 表示水温；k_T 表示水温为 T 时的 COD 降解系数。

由于目前缺乏大万山岛海域 COD 降解系数与水温关系的数据，本研究根据式（1）模拟计算。我国南海海域春季、夏季、秋季和冬季的水温分别为 28.4℃、29.3℃、28.9℃和 26.7℃，由式（1）可得出 4 个季节的 COD 降解系数分别为 0.064 2 d^{-1}、0.066 3 d^{-1}、0.065 3 d^{-1}和 0.060 4 d^{-1}。

2　结果与讨论

2.1　COD 排放浓度对海水水质的影响

以春季为例，海水抽水蓄能电站上水库的排放时间按 8 h 计算，在不同 COD 排放浓度梯度下分析各监测站位 COD 浓度的变化，模拟结果如表 2 所示。

表 2　不同梯度下各监测站位的 COD 浓度　　mg/L

站位	COD 浓度				
	梯度 1	梯度 2	梯度 3	梯度 4	梯度 5
S1	0.52	1.16	2.29	5.12	10.24
S2	0.10	0.11	0.14	0.19	0.25
S3	0.09	0.14	0.17	0.16	0.21
S4	0.09	0.10	0.13	0.17	0.22
S5	0.10	0.13	0.15	0.14	0.17
S6	0.09	0.11	0.11	0.14	0.16
S7	0.10	0.12	0.13	0.15	0.16

当 COD 排放浓度为 10 mg/L 时，海水扩散和净化作用使 COD 浓度快速下降，8 h 后 S1 站位的 COD 浓度为 0.52 mg/L，其他站位的 COD 浓度达到背景浓度；这是由于 S1 站位距排水口较近，COD 还未被完全降解，而其他站位距排水口较远，低浓度 COD 的影响较小。

随着 COD 排放浓度的提高，COD 浓度有所提高。当 COD 排放浓度提高至 50 mg/L 时，S1 站位

的 COD 浓度为 2.29 mg/L，未超过二类海水水质标准(3.00 mg/L)，其他站位的 COD 浓度较接近背景浓度，表明此时 COD 还未被完全降解，影响面积将继续扩大。当 COD 排放浓度提高至 100 mg/L 时，S1 站位的 COD 浓度为 5.12 mg/L，超过二类海水水质标准。因此，建议电站排水前对污水进行预处理，使 COD 排放浓度不高于 100 mg/L。

当 COD 排放浓度分别为 50 mg/L 和 100 mg/L时，模拟排放 8 h 后周边海域的影响面积，结果表明 COD 污水排放后受潮流影响沿 SE 方向顺岸扩散，最高浓度出现在排水口附近。当 COD 排放浓度为 50 mg/L 时，S1 站位的 COD 最高浓度超过2.50 mg/L，最大影响面积约为 0.07 km^2；当 COD 排放浓度为 100 mg/L 时，S1 站位的 COD 最高浓度超过 5.50 mg/L，最大影响面积约为 2.63 km^2。由于 COD 沿 SE 方向扩散，S2～S6 站位的 COD 浓度较低。

2.2 COD 排放季节对海水水质的影响

春季的海水水温为 28.4℃，当 COD 排放浓度为 100 mg/L 时，由于海水的扩散和净化作用，COD 浓度迅速下降。经过 8 h 的扩散和净化后，COD 最高浓度超过 3.50 mg/L，出现在距排水口 1.67 km 的 NW 方向，影响面积约为 6.40 km^2。

夏季的海水水温为 29.3℃，污水排放后 COD 主要沿 SE 方向扩散，COD 最高浓度为 5.50 mg/L，出现在距排水口 0.83 km 的 NW 方向，影响面积约为 3.10 km^2。

秋季的海水水温为 28.9℃，污水排放后 COD 被快速扩散和降解，COD 最高浓度约为3.50 mg/L，主要集中在排水口周边海域，最大影响面积约为 4.30 km^2；除排水口周边出现小面积高浓度海域外，大部分海域的 COD 浓度为 0.50～0.75 mg/L。

冬季的海水水温为 26.7℃，水温降低导致降解系数减小，COD 在排水口周边海域聚集，最高浓度超过 10.50 mg/L；污水排放后 COD 大范围沿 NW 方向扩散，最大影响面积约为 19.50 km^2。

2.3 排水量对 COD 扩散的影响

在 COD 排放浓度为 100 mg/L 的条件下，电站排水量对 COD 扩散的影响如图 1 所示。

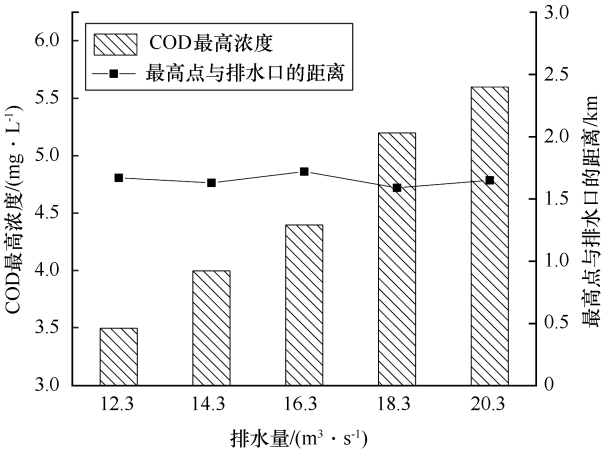

图 1 电站排水量对 COD 扩散的影响

由图 1 可以看出，排水口周边海域的 COD 最高浓度随排水量增大而提高，然而 COD 最高浓度海域与排水口的距离一直保持在 1.6 km 左右。这是由于 COD 扩散主要受潮流影响，同一段时间的潮流方向不变，COD 最高浓度海域与排水口的相对位置也不变。

3 结语

针对海水抽水蓄能电站运行中 COD 排放对周边海域的环境影响，本研究以大万山岛为例，通过监测现有海水水质建立 COD 迁移转化模型并进行模拟计算，主要得到 3 点结论。

(1)当 COD 排放浓度为 50 mg/L 时，周边海域的 COD 浓度为 2.29 mg/L；当 COD 排放浓度达到 100 mg/L 时，周边海域的 COD 最高浓度为 5.12 mg/L，无法满足当地对海水水质的要求。因此，建议将海水抽水蓄能电站的 COD 排放浓度控制在 100 mg/L 以下。

(2)春季 COD 最高浓度超过 3.50 mg/L，影响面积约为 6.40 km^2；夏季 COD 主要沿 SE 方向扩散，最高浓度为 5.50 mg/L，影响面积约为3.10 km^2；秋季 COD 最高浓度约为 3.50 mg/L，主要集中在排水口周边海域，最大影响面积约为4.30 km^2；冬季 COD 在排水口周边海域聚集，最高浓度超过 10.50 mg/L，最大影响面积约为 19.50 km^2。

(3)排水口周边海域的 COD 最高浓度随排水量增大而提高，COD 最高浓度海域与排水口的距离

保持在 1.6 km 左右。

参考文献

[1] 方平，王玉梅，孙昭宁，等.我国海洋资源现状与管理对策[J].海洋开发与管理，2010，27(3)：32－34.

[2] 刘刻福.贯彻落实“十八大”精神 围绕建设海洋强国目标 认真履职 攻坚克难 做好东海区海洋工作[J].海洋开发与管理，2012，29(12)：28－29.

[3] 白燕.浅论海洋文化在建设海洋强国战略中的作用[J].海洋开发与管理，2014，31(2)：46－49.

[4] CHI Y，ZHANG Z，XIE Z，et al.How human activities influence the island ecosystem through damaging the natural ecosystem and supporting the social ecosystem? [J].Journal of Cleaner Production，2020，248：119203.

[5] WANG S，LIU J，LI J，et al.Environmental magnetic parameter characteristics as indicators of heavy metal pollution in the surface sediments off the Zhoushan Islands in the East China Sea [J].Marine Pollution Bulletin，2020，150：110642.

[6] WATSON E B，POWELL E，MAHER N P，et al.Indicators of nutrient pollution in Long Island，New York，estuarine environments [J]. Marine Environmental Research，2018，134：109－120.

[7] CRITCHELL K，HAMANN M，WILDERMANN N，et al.Predicting the exposure of coastal species to plastic pollution in a complex island archipelago[J].Environmental Pollution，2019，252：982－991.

[8] 蔡文恬.海洋环境污染的原因及对策[J].科技传播，2012，4(22)：97－98.

[9] 张静.深圳湾水环境综合评价及环境容量研究[D].大连：大连海事大学，2010.

[10] WU Y，ZHANG T，CHEN K，et al.A risk assessment framework of seawater pumped hydro storage project in China under three typical public-private partnership management modes[J].Journal of Energy Storage，2020，32：101753.

[11] 杜鑫，吴钢，许东.基于 ARMA 模型的地表水水质预测方法研究[J].中国农学通报，2013，29(32)：221－224.

[12] XIANG Y，FU Z M，MENG Y，et al.Analysis of wave clipping effects of plain reservoir artificial islands based on MIKE 21 SW model[J].Water Science and Engineering，2019，12(3)：179－187.

[13] XU M J，YU L，ZHAO Y W，et al.The simulation of shallow reservoir eutrophication based on MIKE 21：a case study of douhe reservoir in North China[J].Procedia Environmental Sciences，2012，13：1975－1988.

[14] HOQUE M A，PERRIE W，SOLOMON S M.Evaluation of two spectral wave models for wave hindcasting in the Mackenzie Delta[J].Applied Ocean Research，2017，62：169－180.

[15] 郭凤清，屈寒飞，曾辉，等.基于 MIKE 21 FM 模型的蓄洪区洪水演进数值模拟[J].水电能源科学，2013，31(5)：34－37.

[16] 徐帅，张凯，赵仕沛.基于 MIKE 21 FM 模型的地表水影响预测[J].环境科学与技术，2015，38(S1)：386－390.

[17] 刘晨辉，刘思飓，李丹，等.基于 MIKE 21 模型的长江中环排污口水质影响分析[J].中国农村水利水电，2020(1)：72－76，82.

[18] 于蕾.珠海市大万山岛渔民转产转业问题研究[D].广州：华南理工大学，2012.

[19] 贾晗.围填海对渤海湾和珠江口水动力及水质影响数值模拟研究[D].大连：大连理工大学，2018.

[20] 国峰，张海平，李阳，等.金山污水排海对纳污海域水质影响的数学模拟[J].海洋学研究，2007(4)：81－85.

[21] 朱静.近岸海域水污染物输移规律及环境容量研究[D].南京：河海大学，2007.

[22] VETHAMONY P，SUDHEESH K，BABU M T，et al.Trajectory of an oil spill off Goa，eastern Arabian Sea：field observations and simulations[J].Environmental Pollution，2007，148(2)：438－444.

[23] 张利.基于 MIKE 21 FM 模型的跨河电缆塔基水动力模拟研究[J].中国防汛抗旱，2018，28(12)：74－77.

[24] 许婷.MIKE 21 HD 计算原理及应用实例[J].港工技术，2010，47(5)：1－5.

[25] 梁云，殷峻暹，祝雪萍.MIKE 21 水动力学模型在洪泽湖水位模拟中的应用[J].水电能源科学，2013(1)：135－137.

[26] 陈松，廖文卓，许爱玉，等.厦门市排海污水 COD 的降解动力学[J].海洋学报(中文版)，1991(3)：401－406.