

珠海市大万山岛海水抽水蓄能电站温排水对周边海域影响的模拟分析研究

李建秋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: 海水抽水蓄能电站上水库温度升高可能对下水库海域海水水温产生影响, 文章对珠海市大万山岛拟建的海水抽水蓄能电站温排水进行模拟分析, 结果表明, 海水抽水蓄能电站在设计水量 $12.3\text{m}^3/\text{s}$ 的条件下, 下水库排水 8h 后, 不会对所在海域海流流场产生显著影响; 当排放温度为 30.2°C 时, 春季温排水影响的面积为 1.76km^2 , 最大温升为 1.35°C , 最大温升面积为 0.006km^2 ; 夏季影响面积约 1.58km^2 , 最大温升为 0.7°C , 最大温升面积为 0.013km^2 ; 秋季影响面积约 1.66km^2 , 最大温升为 0.8°C , 最大温升面积约为 0.085km^2 ; 冬季影响面积约 1.95km^2 , 最大温升为 1.9°C , 最大温升面积约为 0.030km^2 。周边海域最大温升随着排水温度增加逐渐增加, 但对应的最大温升面积变化较小。在排水温度为 32.2°C 时, 夏季最高温升约 0.9°C , 冬季最高温升约 2.3°C ; 排水温度为 34.2°C , 夏季最高温升约 1.15°C , 冬季最高温升约 2.6°C 。最大温升面积在 $0.019\sim 0.027\text{km}^2$ 。排水流量从 $10.3\text{m}^3/\text{s}$ 逐渐增加到 $20.3\text{m}^3/\text{s}$, 周边海域的最大温升值增加, 但最大温升面积增幅较小, 当排水流量达到 $20.3\text{m}^3/\text{s}$ 时, 最大温升值达到最大值 2.25°C , 最大温升面积为 0.007km^2 。文章的研究结果为未来大万山岛海水抽水蓄能电站的环境影响评价及周边海域生态管理提供了科学依据。

关键词: 海水抽水蓄能电站; 大万山岛; 温排水; 最大温升

中图分类号: P76; X55

文献标志码: A

文章编号: 1005-9857(2022)03-0009-07

Simulation and Analysis on the Influence of Thermal Discharge of Seawater Pumped Storage Power Station on Surrounding Sea Area in Dawanshan Island of Zhuhai City

LI Jianqiu¹, ZENG Qiaoqiao², SU Yuehan³, LI Hengxiang⁴, LU Yaobin³,
LUO Haiping³, LIU Guangli³

(1. CSG Power Generation Company, Guangzhou 510630, China; 2. Guangdong Institute of water conservancy and Power Survey and Design 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 A-

收稿日期: 2021-05-20; 修订日期: 2022-02-23

基金项目: 国家重点研发计划课题(2017YFB0903700; 2017YFB0903703)。

作者简介: 李建秋, 工程师, 硕士, 研究方向为水利水电工程施工与运维技术

通信作者: 苏跃涵, 硕士, 研究方向为环境污染与生态修复

cademy of Sciences, Guangzhou 510301, China)

Abstract: The temperature rise of the upper reservoir of the seawater pumped storage power station may affect the seawater temperature of the lower reservoir. In this paper, the thermal discharge of the seawater pumped storage power station proposed to be built on Dawanshan Island in Zhuhai City was simulated and analyzed. The results showed that the seawater pumped storage power station would not have a significant effect on the local sea flow field under the condition of $12.3 \text{ m}^3/\text{s}$ within 8 h drainage from the lower reservoir. When the discharge temperature was 30.2°C , the affected area was 1.76 km^2 , and the maximum temperature rise was 1.35°C with the maximum temperature rise area of 0.006 km^2 in spring. In summer, the affected area was 1.58 km^2 , and the maximum temperature rise was 0.7°C with the maximum temperature rise area of 0.013 km^2 . In autumn, the affected area was 1.66 km^2 , and the maximum temperature rise was 0.8°C with the maximum temperature rise area of 0.085 km^2 . In winter, the affected area was 1.95 km^2 , and the maximum temperature rise was 1.9°C with the maximum temperature rise area of 0.030 km^2 . The maximum temperature rise in the surrounding sea area increased gradually with the increase of drainage temperature, but the corresponding maximum temperature rise area changed little. When the drainage temperature was 32.2°C , the maximum temperature rise was 0.9°C and 2.3°C in summer and winter, respectively. When the drainage temperature was 34.2°C , the maximum temperature rise was 1.15°C and 2.6°C in summer and winter, respectively. The maximum temperature rise area was in a range of $0.019\sim 0.027 \text{ km}^2$. With the drainage flow increasing from 10.3 to $20.3 \text{ m}^3/\text{s}$, the maximum temperature rise in the surrounding sea area increased but the maximum temperature rise area was almost kept stable. The maximum temperature rise reached 2.25°C with the maximum temperature rise area of 0.007 km^2 at the drainage flow of $20.3 \text{ m}^3/\text{s}$. The results should provide a scientific basis for environmental impact assessment and ecological management of seawater pumped storage power station in Dawanshan Island in the future.

Keywords: Seawater pumped storage power station, Dawanshan Island, Thermal discharge, Maximum temperature rise

0 引言

21 世纪是海洋的世纪,海洋战略在世界上所有沿海国家中都是重中之重^[1-4]。我国海洋经济发展迅猛,随着海岛开发步伐的加快,海岛用电装机容量不足的问题日益凸显,成为制约海洋开发的重要“瓶颈”^[5-6]。建设海水抽水蓄能电站,有利于增强海岛地区的电力保障,推动能源-海水淡化联产,为维护海岛安全和经济发展提供有力保障^[7-11]。海水抽水蓄能电站是利用电网中负荷低谷时的剩余电能从海洋(下水库)向上水库抽海水,将电能转化为势能存储起来;当电力系统需要时,从上水库向海洋泄放海水发电,再将势能转化为电能的一种电站。我国海水抽水蓄能电站资源站点丰富^[12-13],其中广东省珠海地区

岛屿资源总量达到 310MW ^[14-16]。

大万山岛^[17-18]位于珠海市正南 39 km 处,面积约 8.1 km^2 ,经勘察海水抽水蓄能资源站点为大万山岛东北部的推船湾,上水库到下水库(海洋)的水平距离约 560 m ,高差可达 170 m ,距高比为 3.3 ,装机容量估计 20MW 左右,有望成为较为理想的电站建设选址。大万山岛属亚热带海洋性气候,光照辐射强,海水提升至上水库后,上水库海水最高水位约 110 m ,其接受太阳辐射能量后,水温升高的程度要高于下水库的海洋温度。研究表明,太阳辐射是海洋热量的重要来源,太阳辐射中的红外部分可被海水表层迅速吸收转化为热量,而可见光部分能够穿透一定深度的海水,如果海水较为清澈,透明

度高,其穿透深度可达60~80 m,由此引起的海水混合层平均水温升高可达 $1.5^{\circ}\text{C}\sim 2.0^{\circ}\text{C}$,而表层海水的水温升高可达到 $6^{\circ}\text{C}\sim 7^{\circ}\text{C}$ ^[19-20]。海洋中的鱼类对温度的变化极为敏感,当海水水温变化超过 0.1°C ,都会引起鱼类行动的变化^[21]。因此,在电站的正常运行中,升高的上水库排水形成的温排水,进入下水库周边海域,有可能对周边海域造成不良的影响,形成热污染。《广东省海洋功能区划(2011—2020年)》将万山群岛及周边海域的功能区划为旅游娱乐、港口航运、农渔业,执行二类海水水质标准,人为造成的海水温升夏季不超过当时当地 1°C ,其他季节不超过 2°C 。

对海岸发电厂的研究表明,其利用海水作为冷却水运行中,向海域排放的温排水,可导致局部海域升温,对海洋物种生存造成恶劣影响。如温排水会干扰鱼类的产卵、孵化和生长,影响海洋养殖业的正常运行^[22-24];温排水也可对海洋底栖生物或者藻类种群产生不利影响。大亚湾核电站的温排水,其过高的温度可抑制浮游植物繁殖,甚至致其死亡^[25]。美国比斯开湾在温排水影响升温 $3^{\circ}\text{C}\sim 4^{\circ}\text{C}$ 后,生物数量急剧减少。海洋温度上高,不仅使溶解氧含量降低,影响生物生存繁衍,还会造成富营养化、水质恶化等问题^[26-28]。丹麦水利研究所研发的MIKE系列水动力软件,广泛应用于海洋、河流、海湾等水域的模拟预测分析,其数值模拟结果的可靠性已被世界公认。广西来宾电厂^[29]、马来西亚沙巴电厂^[30]、浙江苍南电厂^[31]等温排水对附近海域的影响均采用MIKE模型进行模拟,分析潮型、流量及季节下的最大温升包络面积和取水口的温升变化,为电厂的环境影响评价及管理提供依据^[32-34]。

因此,本研究基于MIKE模型,对珠海市大万山岛拟建海水抽水蓄能电站的温排水,开展其对周边海域水温影响的研究,为未来大万山岛海水抽水蓄能电站的环境影响评价及环境生态管理提供科学依据。

1 大万山岛拟建海水抽水蓄能电站位置及地质概况

大万山岛距珠海市直线距离约48 km,西北距澳门35 km,东北距香港59 km,岛上年平均气温为

22.6°C ,气温变幅不大,年平均温差为 4.3°C 。大万山岛所在地属于亚热带季风气候,多年平均最大风速为 17.3 m/s ,冬季多东北向风,夏季多偏西南向风。大万山岛在地质上属北东向的万山隆起带(滨海大断裂),为构造基本稳定区。拟建海水抽水蓄能电站位于山坳处,库区所处位置三面环山,为天然谷地,呈“V”型,远离岛上居民区。库区地貌属海岛地貌,库区地形起伏较大,以构造侵蚀地貌为主;未发现较大滑坡、潜在不稳定地质体、泥石流及可溶岩地区喀斯特地貌等的分布。

2 模型建立

2.1 模型的边界条件及网格划分

如图1所示,研究模拟区域为大万山岛周围海域,平均水深10~28 m,该模型基于非结构网格建立,网格生成最大单元面积为20万 m^2 ,最小允许角度为 31° ,最大节点数为50 000,然后对网格取迭代次数为10进行平滑处理,插值方法为自然邻点插值法。模型由11 514个网格节点、20 667个三角形网格单元构建而成。设置干水深、淹没水深和湿水深分别为0.005 m、0.05 m和0.1 m,涡黏系数取为0.28,底床摩擦力取曼宁系数 $70\text{ m}^{1/3}/\text{s}$ ^[35]。

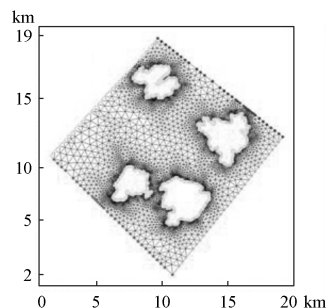


图1 模型模拟海域计算网格

海水抽水蓄能电站的运行参考淡水抽水蓄能电站的运行方式,按8 h排水计算,取排水流量设置多个梯度($10.3\text{ m}^3/\text{s}$ 、 $12.3\text{ m}^3/\text{s}$ 、 $14.3\text{ m}^3/\text{s}$ 、 $16.3\text{ m}^3/\text{s}$ 、 $18.3\text{ m}^3/\text{s}$ 、 $20.3\text{ m}^3/\text{s}$);背景温度参考南海海面温度^[36]及大万山岛当地温度值,取大万山岛海域春季水温为 28.4°C ,夏季水温为 29.3°C ,秋季水温为 28.9°C ,冬季水温为 26.7°C 。由于上下水库高差达170 m,下水库的水被抽到上水库后,接收光辐射增强导致最终排水温度升高,但目前尚未有明

确可参考的温升范围^[29]。参考太阳辐射引起的海水水温升高的情况,本研究在初步选取电站温排水温度 30.2°C 进行模拟计算后,对 $32.2^{\circ}\text{C} \sim 40.2^{\circ}\text{C}$ 的排水温度下,最大温升值及最大温升面积进行了对比分析。设定的排水温度为 40.2°C 时,大万山岛海域的水温变化范围为 $0.9^{\circ}\text{C} \sim 3.5^{\circ}\text{C}$ 。

2.2 模型验证

潮位验证数据实测值采用国家海洋信息中心东澳岛监测站($113^{\circ}41'33\text{E}$, $22^{\circ}0'39\text{N}$)和大万山监测站($113^{\circ}42'40\text{E}$, $21^{\circ}55'46\text{N}$)公开发布的潮汐表数据,分别选取春季、夏季、秋季、冬季不同时间段 24 h 内的潮位与模型模拟值进行比较。验证结果如图 2 和图 3 所示,可以看出模拟结果与东澳岛、大万山岛监测站的实测数据吻合较好,平均相对误差低于 10%,由此认为所建立的模型是合理的,可以满足预测要求。

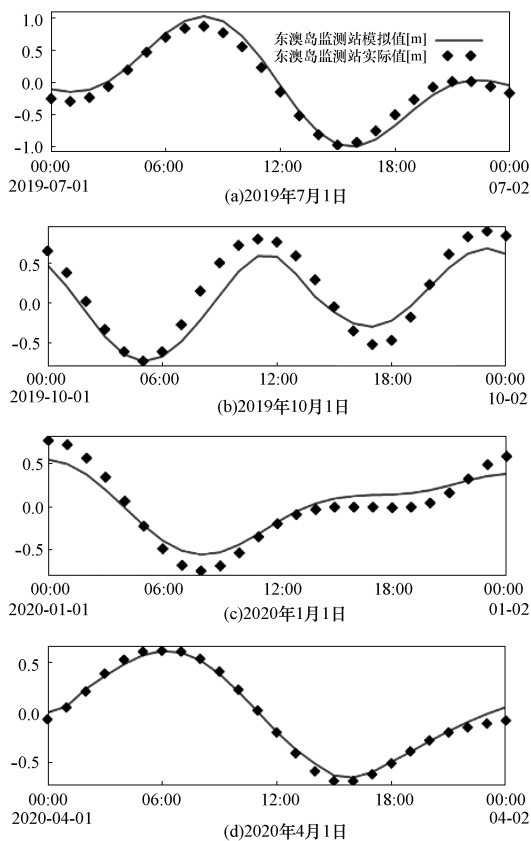


图 2 东澳岛监测站点不同时间段 24 h 内的实测潮位与模拟值对比

3 结果与讨论

3.1 电站排水对周边海域潮流场的影响

按电站排水水量 $12.3 \text{ m}^3/\text{s}$,排水与周边海域无

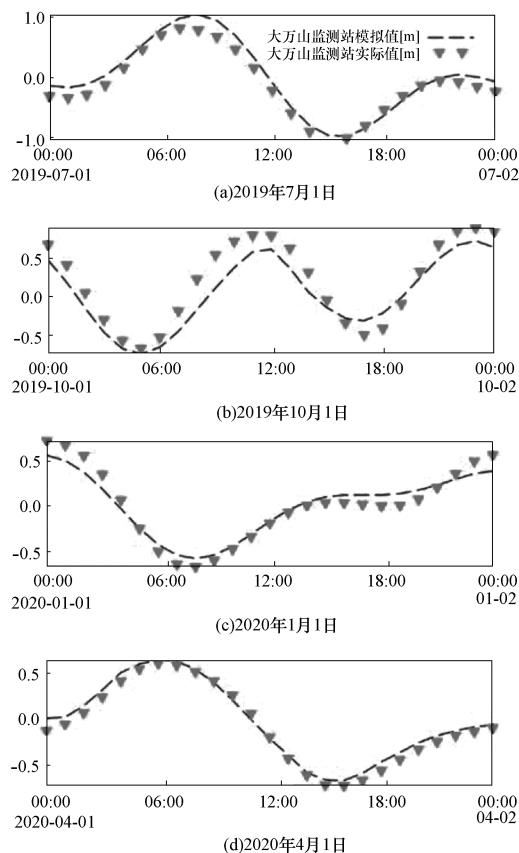


图 3 大万山监测站点不同时间段 24 h 的实测潮位与模拟值对比

温差计算,对拟建电站工程实施前后海域潮流场进行模拟分析,结果如图 4 所示。由图可知,电站排水前,下水库附近的潮流自西北沿大万山岛顺岸流动。当电站开始排水后,排水在入海口处流速较快,汇入外海时形成小型旋涡,之后逐渐向外海扩散,由于电站排水流量较小,流速迅速降低,对潮流方向无明显影响。因此抽水蓄能电站排水不会对所在海域海流的流场产生显著影响。

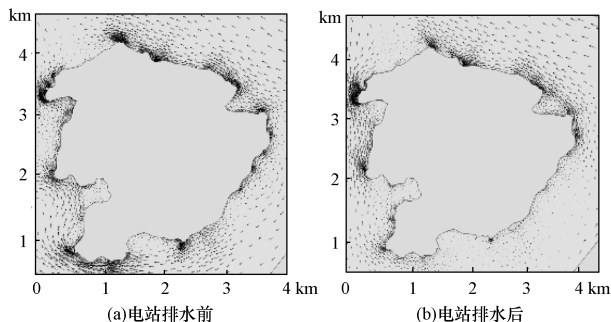


图 4 大万山岛周围海域的流场分布

3.2 不同季节电站排水对周边海域温度的影响分析

不同季节下,电站排放流量为 $12.3 \text{ m}^3/\text{s}$,排放温度 30.2°C ,连续排水 8h 后,周边海域的温升结果模拟计算如图 5 所示。与周边海域海水温差超过 0.1°C 的区域,即认为受到温排水影响的区域,计算温排水的影响面积。由图 5 可知,春季温排水受潮流作用,温升场逐渐向东南侧移动,最远延伸至 2.09 km ,影响面积约 1.76 km^2 ;最大温升为 1.35°C ,最大温升面积约为 0.006 km^2 ,最大温升出现在距离排放口约 0.5 km 的海域。温排水主要呈南北方向移动,东西方向移动距离较小。夏季温升场最远延伸至 1.86 km ,影响面积约 1.58 km^2 ;最大温升为 0.7°C ,最大温升面积约 0.013 km^2 ,最大温升出现在距离排放口约 0.6 km 的海域。秋季温升场主要向排水口南侧移动,最远延伸 2 km ,影响面积约 1.66 km^2 ;最大温升为 0.8°C ,最大温升面积约为 0.085 km^2 。冬季温升场主要向西北方向移动,最远延伸至 2.9 km 的海域,影响面积约 1.95 km^2 ;最大温升为 1.9°C ,最大温升面积约为 0.030 km^2 。

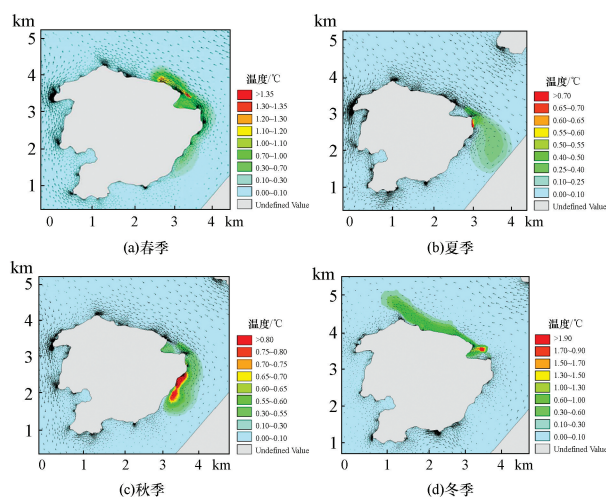


图5 电站排水流量 $12.3 \text{ m}^3/\text{s}$ 条件下不同季节温排水对周围海域温升的影响模拟结果

研究表明,火力发电厂温排水对周围水域造成的温升可达 6.11°C ,这是由于火力发电站的装机容量大,且尾水温度较高,温差可达到 13.3°C ,因此对周围水域造成的温升大^[29]。而海水抽水蓄能电站

的排水温度按 30.2°C 计算时,与周边海域的温差较低,夏季仅相差 0.9°C ,因此对周围海域造成的温升较小。

3.3 电站温排水温度变化和流量对周边海域最大温升的影响分析

为进一步考察电站温排水对周边海域的影响,在电站排水量为 $12.3 \text{ m}^3/\text{s}$,排水温度分别达到 32.2°C 、 34.2°C 的条件下,模拟计算夏季和冬季时周边海域温升的结果,如图 6 和图 7 所示。在排水温度为 32.2°C 时,夏季最高温升约 0.9°C ,出现在距离排放口约 0.75 km 的海域,最大影响面积约为 0.027 km^2 ;温排水总影响面积约为 1.6 km^2 。冬季最高温升约 2.3°C ,最大温升面积约 0.019 km^2 ,出现在距离排放口约 0.37 km 的海域,温排水总影响面积约为 1.81 km^2 。当排水温度为 34.2°C ,夏季最高温升约 1.15°C ,最大温升面积约 0.012 km^2 ,出现在距离排放口约 0.75 km 的海域,温排水总影响面积约为 1.69 km^2 。冬季最高温升约 2.6°C ,最大温升面积约 0.02 km^2 ,出现在距离排放口约 0.37 km 的海域,温排水总影响面积约为 1.83 km^2 。

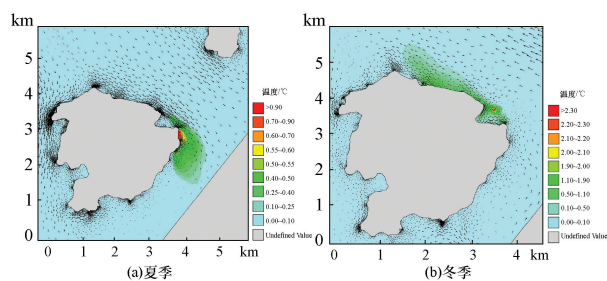


图6 在电站排水温度为 32.2°C 时温排水对周围海域温升的影响模拟结果

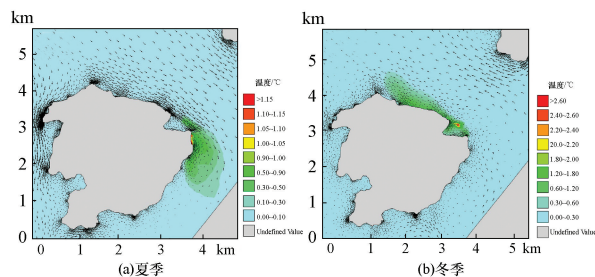


图7 在电站排水温度为 34.2°C 时温排水对周围海域温升的影响模拟结果

选取电站温排水温度 30.2°C , 周边海域海水水温为 28.4°C 的条件下, 研究不同电站排水流量对海域温升的影响, 结果如图 8 所示。随着排水流量从 $10.3 \text{ m}^3/\text{s}$ 逐渐增加到 $20.3 \text{ m}^3/\text{s}$, 周边海域的最大温升值增加, 但最大温升面积增幅较小, 当排水流量达到 $20.3 \text{ m}^3/\text{s}$ 时, 最大温升值达到最大值 2.25°C , 相应的温升面积为 0.007 km^2 。这表明, 即使电站排水流量达到 $20.3 \text{ m}^3/\text{s}$, 也难以对周边海域潮流的运动产生显著影响, 导致最大温升值虽然增加, 但最大温升面积并没有显著增大。可能是由于周边海域潮流影响起主要作用, 电站排水流量相对较小, 即使排水的温度与海水的温度温差较大, 进入海域中也可被很快稀释降温。

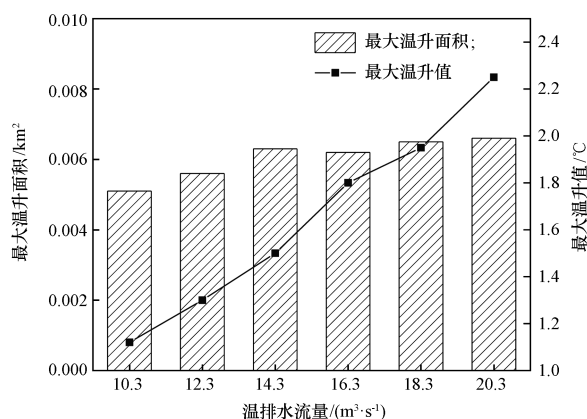


图8 电站温排水流量变化对周边海域最大温升和最大温升面积的影响模拟结果

对大万山岛周边海域的海洋生物初步调查发现, 鱼类主要有绯鲤、鲷科、多鳞鳢和舌鳎等。绯鲤一般栖息于水深 $20 \sim 110 \text{ m}$, 生殖期为 $2 \sim 4$ 月 (春季), 在广东省上川岛和下川岛附近一带水深 $8 \sim 35 \text{ m}$ 处有密集的生殖群, 该区域距离大万山岛约 140 km 。鲷科鱼类以底藻和碎屑为食, 耐寒冷, 是亚热带和热带地区的沿岸经济性鱼类。多鳞鳢为近海小型鱼类, 喜栖息在沙质海底中下层, $7 \sim 10$ 月 (夏秋季) 为其活跃觅食期。舌鳎栖息于浅海底层泥沙底质海区, 繁殖期为 $3 \sim 10$ 月 (春夏秋季), 适宜温度为 $22^{\circ}\text{C} \sim 23^{\circ}\text{C}$ 。因此, 海水抽水蓄能电站在运行中, 上水库排出的温排水对周边海域鱼类造成的影响可能各不相同, 绯鲤的影响较小, 而鲷科、多鳞鳢和舌鳎类鱼类因在近岸海底觅食繁殖, 上层海水

温度升高可能对此类鱼类的生长有一定影响; 若在周边海域温升达到 2.25°C 的条件下, 则需要密切关注鲷科、多鳞鳢和舌鳎类鱼类的生长繁殖, 对海水抽水蓄能电站下水库排水的方式进行改进, 强化其扩散过程, 降低温排水对周边海域的温升效应。

4 结论

(1) 海水抽水蓄能电站在设计水量为 $12.3 \text{ m}^3/\text{s}$ 的条件下, 下水库排水 8 h 后, 不会对所在海域海流场产生显著影响。

(2) 电站排放流量为 $12.3 \text{ m}^3/\text{s}$, 排放温度为 30.2°C , 连续排水 8 h 后, 春季温排水影响的面积为 1.76 km^2 , 最大温升为 1.35°C , 最大温升面积为 0.006 km^2 ; 夏季影响面积约 1.58 km^2 , 最大温升为 0.7°C , 最大温升面积为 0.013 km^2 ; 秋季影响面积约 1.66 km^2 , 最大温升为 0.8°C , 最大温升面积约为 0.085 km^2 ; 冬季影响面积约 1.95 km^2 , 最大温升为 1.9°C , 最大温升面积约为 0.030 km^2 。

(3) 电站排放流量为 $12.3 \text{ m}^3/\text{s}$ 时, 周边海域最大温升随着排水温度增加而逐渐增加, 但对应的最大温升面积变化较小。在排水温度为 32.2°C 时, 夏季最高温升约 0.9°C , 冬季最高温升约 2.3°C ; 排水温度为 34.2°C , 夏季最高温升约 1.15°C , 冬季最高温升约 2.6°C 。最大温升面积在 $0.019 \sim 0.027 \text{ km}^2$ 之间。排水流量从 $10.3 \text{ m}^3/\text{s}$ 逐渐增加到 $20.3 \text{ m}^3/\text{s}$ 时, 周边海域的最大温升值增加, 但最大温升面积增幅较小, 当排水流量达到 $20.3 \text{ m}^3/\text{s}$ 时, 最大温升值达到最大值 2.25°C , 最大温升面积为 0.007 km^2 。

参考文献

- [1] 李琳梅. 发展海水淡化事业促进海洋强国建设[J]. 海洋开发与管理, 2012, 29(12): 59—61.
- [2] 毕建国, 段志霞. 我国海洋渔业生态环境污染及治理对策[J]. 中国渔业经济, 2008(2): 16—21.
- [3] CAVALLO M, BORJA Á, ELLIOTT M, et al. Impediments to achieving integrated marine management across borders: The case of the EU Marine Strategy Framework Directive[J]. Marine Policy, 2019, 103: 68—73.
- [4] 吴凯, 卢布. 中国海洋产业结构的系统分析与海洋渔业的可持续发展[J]. 中国农学通报, 2007(1): 367—370.
- [5] 刘哲. 海水抽水蓄能技术在海岛供电中的应用探讨[J]. 电力

- 与能源, 2017(5): 593—597.
- [6] WANG Z, LIN X, TONG N, et al. Optimal planning of a 100% renewable energy island supply system based on the integration of a concentrating solar power plant and desalination units[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2020, 117:105707.
- [7] 钱钢粮. 我国海水抽水蓄能电站站点资源综述[J]. 水电与抽水蓄能, 2017, 3(5): 1—6.
- [8] 石文辉, 查浩, 罗魁, 等. 我国海水抽蓄电站发展初探[J]. 中国能源, 2015(12): 36—40.
- [9] 谭雅倩, 周学志, 徐玉杰, 等. 海水抽水蓄能技术发展现状及应用前景[J]. 储能科学与技术, 2017, 6(1): 35—42.
- [10] 张皓天, 吴世东, 芮德繁, 等. 我国海水抽水蓄能电站示范项目选择及开发研究[J]. 水电与抽水蓄能, 2017, 3(5): 7—10.
- [11] 侯平利, 柴建峰, 陈雄, 等. 单库海水抽水蓄能电站技术研究[J]. 水电与抽水蓄能, 2017, 3(5): 19—21.
- [12] 张东. 我国南部沿海地区海水抽水蓄能资源初步评价[J]. 低碳世界, 2015(1): 69—70.
- [13] 刘万久, 张皓, 黎俞琳, 等. 浅谈海水抽水蓄能电站在中国的发展前景[J]. 四川水泥, 2018(3): 295—296.
- [14] DUARTE C M, LOSADA I J, HENDRIKS I E, et al. The role of coastal plant communities for climate change mitigation and adaptation[J]. Nature Climate Change, 2013, 3(11): 961—968.
- [15] KATSAPRAKAKIS D A, CHRISTAKIS D G, STEFANAKIS I, et al. Technical details regarding the design, the construction and the operation of seawater pumped storage systems [J]. Energy, 2013, 55(1): 619—630.
- [16] MORGAN L K, WERNER A D. Seawater intrusion vulnerability indicators for freshwater lenses in strip islands [J]. Journal of Hydrology, 2014, 508: 322—327.
- [17] 廖静, 方琼玟. 珠海万山岛: 修复生态 探索海岛休闲游[J]. 海洋与渔业, 2017(8): 34—35.
- [18] 余志, 蒋念东, 游亚戈. 大万山岸式振荡水柱波力电站的输出功率[J]. 海洋工程, 1996(2): 78—83.
- [19] 刘志亮. 穿透性太阳辐射和盐度作用对混合层深度的影响[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2004.
- [20] 刘童童. 短波辐射传输模式对上层海温及混合的影响研究[D]. 厦门: 厦门大学, 2017.
- [21] 李雪渡. 海水温度与渔场之间的关系[J]. 海洋学报(中文版), 1982(1): 103—113.
- [22] 於凡, 张永兴, 曹颖. 全球变暖背景下核电站温排水对海洋生态系统的影响[J]. 海洋湖沼通报, 2010(2): 155—161.
- [23] JAVED M, AHMAD I, USMANI N, et al. Bioaccumulation, oxidative stress and genotoxicity in fish (*Channa punctatus*) exposed to a thermal power plant effluent[J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2016, 127:163—169.
- [24] ANSAH Y B, FRIMPONG E A, AMISAH S. Biological Assessment of Aquaculture Effects on Effluent-Receiving Streams in Ghana Using Structural and Functional Composition of Fish and Macroinvertebrate Assemblages[J]. Environmental Management, 2012, 50(1): 166—180.
- [25] 谢福武, 刘华雪, 黄洪辉, 等. 大亚湾浮游植物粒级结构对温排水和营养盐输入的响应[J]. 热带海洋学报, 2018, 37(3): 55—64.
- [26] 常小军. 胶州湾温排水数值模拟[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2011.
- [27] PENK M R, WILLIAMS M A. Thermal effluents from power plants boost performance of the invasive clam *Corbicula fluminea* in Ireland's largest river[J]. Science of The Total Environment, 2019, 693(133546).
- [28] JAVED M, USMANI N. Stress response of biomolecules (carbohydrate, protein and lipid profiles) in fish *Channa punctatus* inhabiting river polluted by Thermal Power Plant effluent[J]. Saudi Journal of Biological Sciences, 2015, 22(2): 237—242.
- [29] 王庆改, 戴文楠, 赵晓宏, 等. 基于 Mike21FM 的来宾电厂扩建工程温排水数值模拟研究[J]. 环境科学研究, 2009, 22(3): 332—336.
- [30] 严冰, 张娜, 赵洪波. 沿岸往复流海岸电厂平面二维温排水数值模拟研究[J]. 水道港口, 2011, 32(4): 291—296.
- [31] 张舒羽, 黄世昌, 韩海鹰. 浙江苍南电厂冷却水温排放的数值模拟[J]. 海洋学研究, 2009, 27(3): 61—66.
- [32] 谢晓倩. MIKE21 FM 在洪水风险图制作中的应用研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2016.
- [33] 袁雄燕, 徐德龙. 丹麦 MIKE21 模型在桥渡壅水计算中的应用研究[J]. 人民长江, 2006(4): 31—52.
- [34] 张志林, 贾艾晨. 基于 MIKE21 FM 模型的河道流场图绘制[J]. 东北水利水电, 2016, 34(10): 35—70.
- [35] 张大茹. 基于 Mike21FM 的山区小流域涉水工程防洪影响研究[D]. 北京: 中国水利水电科学研究院, 2015.
- [36] 孙伟富, 张杰, 孟俊敏, 等. 中国南海及邻近海域 SST 时空分布和变化特征分析[J]. 海洋科学进展, 2018, 36(3): 402—411.