

基于现场观测数据的三门核电站冬季温排水 时空特征分析

赵 强, 曹 维, 邢 健, 龙绍桥

(国家海洋局宁波海洋环境监测中心站, 浙江 宁波 315012)

摘 要: 基于 2022 年冬季三门湾海域 20 个定点站和 2 条走航测线的水温观测数据, 分析了三门核电站冬季温排水的时空特征。受温排水影响, 冬季观测海域表层水温通常为 10 °C ~ 19 °C。从垂向上看, 位于排水口东侧的分层水温测站存在温度层化, 表底温差平均值在大、小潮期间分别为 0.16 °C ~ 1.21 °C 和 0.51 °C ~ 2.37 °C, 小潮期间温度层化较强且持续时间较大潮期间长 3 ~ 13 h; 其余分层水温测站的水体总体呈混合均匀状态。涨急和涨憩时刻, 温排水主要被限制在排水口外较小的区域, 并向北经猫头水道进入蛇蟠水道; 落急和落憩时刻, 温排水则向南影响南部滩涂及其以东海域。以 1 °C 温升为标准, 涨潮时段温排水最远可影响到排水口西北约 3 km 处, 落潮时段温排水最远可影响到排水口东南约 5 km 处。三门核电厂址以南各测站小潮期典型潮时水温通常比大潮期高 0.5 °C ~ 5.0 °C, 说明三门核电站以南海域在小潮期受温排水的影响更大。

关键词: 温排水; 水温; 三门湾; 现场观测

中图分类号: P731.11

文献标识码: A

文章编号: 1007-6336(2022)06-0847-10

Spatio-temporal characteristics of thermal discharge from Sanmen Nuclear Power Plant in winter based on field observations

ZHAO Qiang, CAO Wei, XING Jian, LONG Shao-qiao

(Ningbo Marine Environment Monitoring Center, SOA, Ningbo 315012, China)

Abstract: Based on the water temperature data from 20 fixed-point stations and 2 voyage lines in the Sanmen Bay in the winter of 2022, the spatio-temporal characteristics of thermal discharge from the Sanmen Nuclear Power Plant (SNPP) in winter are analyzed. Affacted by the thermal discharge, the SSTs of the observation area are usually in the range of 10 °C to 19 °C. In vertical, water temperature is stratified at the station located on the east of the outlet, and the averaged differences of tempetature between surface and bottom are in the rage of 0.16 °C to 1.21 °C during the spring tide and 0.51 °C to 2.37 °C during the neap tide. At the other stations, the water is well mixed. At the time of flood peak tide and flood slack tide, thermal discharge is limited to a small area outside the outlet and is transported northward to the Shepan Waterway through the Maotou Waterway. While at the time of ebb peak tide and ebb slack tide, thermal discharge is transported southward to the tidal flats and their eastern area. Taking the temperature rise of 1 °C as the standard, the thermal discharge can affect about 3 km northwest of the outlet during the flood tide and about 5 km southeast of the outlet during the ebb tide. The difference of the water temperature at the north of the SNPP between the spring tide and the neap tide is usually 0 to 0.8 °C, and the water temperature at the south of the SNPP is usually 0.5 °C to 5.0 °C higher during

收稿日期: 2022-03-30, 修订日期: 2022-06-21

基金项目: 国家自然科学基金(42076156); 国家重点研发计划项目(2018YFC1407000)

作者简介: 赵 强(1982—), 男, 山东青岛人, 工程师, 博士, 主要从事海洋数据分析和数值模拟工作, E-mail: zhaoliang@ecs.mnr.gov.cn

the neap tide than that during the spring tide, indicating that the water at the south of the SNPP is more affected by the thermal discharge during the neap tide.

Key words: thermal discharge; water temperature; Sanmen Bay; field observation

沿海核电站在生产过程中会产生大量废热,这些废热以温排水的形式排放到周围水体,引起局部海水温度升高,并进一步影响周边海域的水质和生态系统,是沿海区域广受关注的污染源之一^[1-4]。数值模拟、卫星遥感和现场调查作为当前电厂温排水分析和评估常用的三种方法,具有各自的优缺点。数值模拟方法可以获得大范围、高时空分辨率的二维或三维温度场分布^[5-8],但其模拟结果的精度依赖于研究者的模拟技巧。卫星遥感方法具有监测范围广的优势^[9-11],但通过反演得到的水温为“表皮温度(skin temperature)”,与现场测得的“体温度(bulk temperature)”存在差异,且反演精度受大气校正和反演算法的影响^[12-14]。同时,受卫星重访周期的限制,通过卫星遥感方法难以获得受潮周期影响的水温变化特征。现场调查是获取电厂周边高精度水温资料的直接手段,但因观测成本较高,现场调查的覆盖范围有限,目前多用于遥感或模拟方法的率定和准确性验证^[15],较少直接用于温排水的分析。

三门核电站坐落于浙江省台州市三门县健跳镇东北部约6 km的猫头山嘴半岛,濒临三门湾,北、东、南三面临海,西面靠猫头山。三门核电站规划容量为6台百万千瓦级压水堆核电机组,分三期建设,其中一期2台1250 MW机组已于2018年并网发电。机组采用海水直流供水冷却系统,循环冷却水量约为155.32 m³/s。冷却水源自厂区东北面猫头水道深潭,排水口和排水明渠布置在厂址南堤外侧滩涂。本研究于2022年冬季大、小潮期间在三门湾海域开展了20个定点站的连续水温观测和2条走航测线的典型潮时水温观测,观测区域覆盖电厂周边的滩涂和水道,结合同期潮位、潮流、风速、气温等数据,对三门核电站冬季温排水的时空特征进行分析。观测数据可为物理模型、数值模型的率定以及遥感资料的反演提供数据支撑,分析结果可为三门核电站温排水环境影响评价提供参考依据。

1 材料与方法

水温观测包括9个定点分层水温测站、9个定点表层水温测站、2条走航测线,以及厂址潮位站和健跳潮位站的表层水温,各测站位置如图1所示。9个定点分层水温测站(站位编号:N1~N9)的观测时间为2022年1月3日至4日(大潮)和1月9日至10日(小潮),观测时长皆为28 h,观测频率为逐时(整点),并在涨、落急流和转流时刻的半点加测。当水深 ≥ 5 m时,采用六点法观测(表层、0.2H、0.4H、0.6H、0.8H和底层,H为测站水深);当水深 < 5 m时,采用三点法观测(0.2H、0.6H和底层)。9个定点表层水温测站(站位编号:T0~T8)的观测时间为2022年1月1日至14日,数据间隔为10 min。其中,T0测站位于三门核电站1、2号机组排水口处,T1~T8测站位于电厂南部的滩涂——南海滩。两条走航测线S1和S2自排水口外分别向东南和东东南方向延伸,观测时间为2022年1月3日和10日的涨急、涨憩、落急、落憩4个典型潮

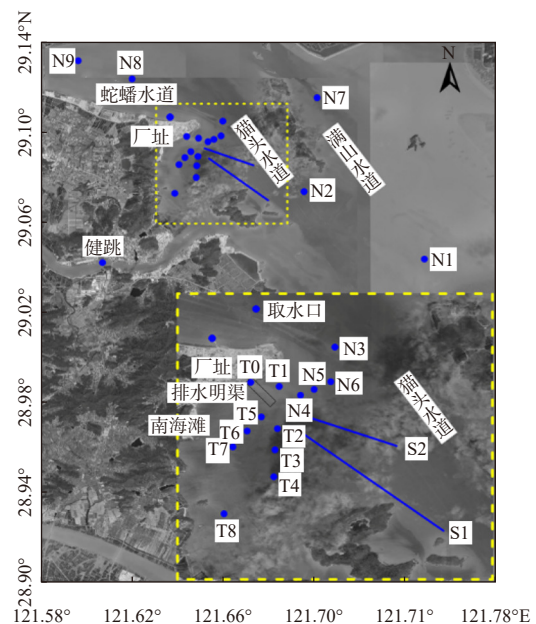


图1 水温观测站位

Fig. 1 Locations of the water temperature stations

时,每个潮时单条测线的水温观测皆在15 min内完成。定点和走航水温观测采用加拿大RBR公司生产的RBRduet³微型温深仪,测量范围为 $-5\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 40\text{ }^{\circ}\text{C}$,测量精度为 $0.03\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。通过温深仪的压力数据和温度数据梯度综合判断,对滩涂测站的水温和气温进行区分。潮位站表层水温数据通过温盐井采集,数据间隔为1 h。本研究还获取了观测期间电厂冷却系统入水(A1)和出水(A2)温度监测数据,数据间隔为10 min。

同时,本研究在5个测站(N1、N2、N3、N7、N8)开展了分层潮流观测,观测时间、频率和层次与水温观测相同。在潮流观测的同时,利用手持风速仪和现场目测,获得了5个潮流测站逐3 h的海表风速和海况资料,并搜集了2021年12月23日至2022年1月20日厂址潮位站的潮位、风速和气温资料。

大潮观测期间,各站海表风力多在1~2级,个别测站偶有3级,海况为1~2级;小潮观测期

间,各站海表风力为3~4级,海况多为3级。天气和海况对观测数据质量的影响较小。

2 结果与讨论

2.1 气象、潮位、潮流

图2为观测期间厂址潮位站潮位、风速和气温的日变化曲线。大潮观测期间,厂址潮位站最高潮位为3.22 m,最低潮位为 -3.28 m ,最大潮差为6.50 m;最大风速为 3.82 m/s ,平均风速为 2.03 m/s ,主风向为西南向,但强风向为东南向;气温为 $4.00\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 12.30\text{ }^{\circ}\text{C}$,平均气温为 $8.32\text{ }^{\circ}\text{C}$,气温最低值通常出现在上午8时,之后持续升高,并在下午3时达到最高。小潮观测期间,厂址潮位站最高潮位为1.83 m,最低潮位为 -1.27 m ,最大潮差为3.09 m;最大风速为 4.82 m/s ,平均风速为 3.18 m/s ,风向多为西至西北向,强风向为西北向;气温为 $3.66\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 11.77\text{ }^{\circ}\text{C}$,平均气温为 $7.23\text{ }^{\circ}\text{C}$,气温日变化趋势与大潮期间相同。

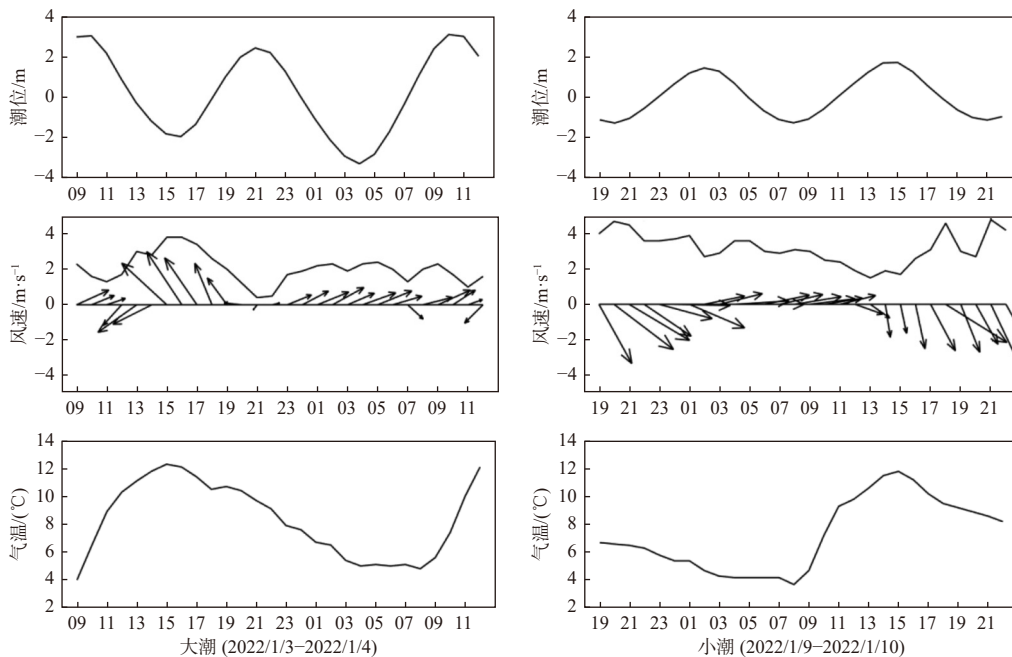


图2 观测期间的潮位、风速和气温

Fig. 2 Tidal level, wind velocity and air temperature during the survey

三门湾地处浙江中部沿海,潮流性质为正规半日潮,在一天内通常会呈现两次涨潮及两次落潮。大潮期间各站最大流速为 $1.17\sim 1.34\text{ m/s}$,平均流速为 $0.57\sim 0.71\text{ m/s}$;小潮期间各站最大流速为 $0.62\sim 0.75\text{ m/s}$,平均流速为 $0.30\sim 0.35\text{ m/s}$ 。

最大流速通常出现在表层或 $0.2H$ 层,并向底层递减。涨、落潮流呈现明显的往复流特征,流向总体与等深线平行,涨潮流沿西北向指向湾顶,落潮流沿东南向指向湾口。结合各站水深数据,涨、落急流多出现在中潮位附近,涨、落憩流多

出现在高、低平潮时,呈现出协振波特征,潮流观测结果与前人基本一致^[16-20]。

2.2 水温

2.2.1 水温随时间的变化

图3为9个定点分层测站(N1~N9)水温随时间变化的等值线图,图4为健跳潮位站和厂址潮位站表层水温及电厂入水(A1)和出水(A2)温度的日变化曲线,图5为排水口测站(T0)和滩涂测站(T1~T8)海表水温的日变化曲线。由于部分低潮位时段滩涂裸露,导致N4测站和各滩涂测站水温数据间断。表1为各测站表层水温及电厂入水、出水温度的最大值、最小值、平均值和日较差。

大潮期电厂入水温度(A1)的变化范围为10.55℃~12.01℃,平均值为11.08℃,日较差为1.46℃,温度随涨潮而升高,随落潮而下降;小潮期电厂入水温度的变化范围略小,为10.67℃~11.38℃,平均值为11.02℃,日较差为0.71℃,温度变化与涨落潮的关系不明显。大潮期出水温度(A2)的变化范围为17.99℃~19.54℃,日较差为1.56℃;小潮期出水温度为18.16℃~18.80℃,日较差为0.64℃。出水温度变化显然受入水温度的影响,曲线特征与入水温度一致,较入水温度约高7.5℃。

排水口测站(T0)水温较同期出水温度略低,大潮期水温为16.54℃~19.32℃,日较差为2.78℃;小潮期水温为17.60℃~18.45℃,日较差为0.85℃,变化幅度较大潮期间小。T0水温的日变化趋势与出水温度基本一致,主要区别在于大潮期1月3日10时和1月4日11时,T0测站水温的下降程度较同期出水温度的下降程度更大。结合潮位曲线可以看出,此时为高平潮时段,且为一天中两次高潮中较高的一次,其温度的降低应与南侧冷水入侵和水深增加有关。

距离排水口较远的健跳、N1、N2、N7测站表层水温的日变化不大,各站大潮期表层水温的日较差为0.42℃~0.70℃,小潮期表层水温的日较差略大,为0.56℃~0.95℃。不同测站表层水温的差异较小,通常在0.2℃~0.3℃。其中,健跳、N1、N7测站表层水温受潮汐影响,涨潮期间升高,落潮期间降低,这与三门湾海域冬季水温

湾外高、湾内低的空间分布特征是相一致的,说明这些测站受温排水的影响较小。与之相反,位于排水口南侧、猫头水道的N2测站水温在落潮期间升高,涨潮期间降低,与温排水随潮流运动的规律一致。

从水温的日变化可以看出,距离排水口较近的N3~N6测站和位于滩涂的T1~T8测站都出现了水温陡然升高的现象,表层尤为显著,最高温升超过8℃,且温升程度大体随测站与排水口间距离的增大而降低。靠近猫头水道的N4~N6测站最高水温一般出现在低平潮后0~1h,且大潮期间温升峰值较高,但持续时间较短;小潮期温升峰值较低,但持续时间较长。距离排水口最近的分层水温测站N4在落憩时刻因为水深较浅,高温水可深达底部。位于排水口南部滩涂的T1~T7测站在一个潮周期内存在多次升温 and 降温过程,温度峰值通常出现在涨急、涨憩和落急3个时刻附近,峰值出现的时间大体随测站与排水口间距离的增大而向后推迟,峰值也相应减小。落潮期间低潮时段滩涂裸露,部分测站在一个潮周期内只出现2次峰值,N3测站表层水温的日较差在大潮期为1.81℃,在小潮期为5.42℃。结合该站水温等值线可以看出,高温水主要出现于低平潮后1~2h的测站表层,说明小潮期在较弱的潮混合作用下,温排水可覆盖在冷水表层向东到达更远的区域。位于滩涂最南侧的T8测站表层水温的日较差在大潮期为1.73℃,在小潮期为3.31℃,高值出现在落潮开始后1~3h,且高值在夜间也会出现,说明小潮期温排水可向南到达更远的滩涂区域。

位于蛇蟠水道的N8、N9测站具有相似的水温日变化规律,水温都随涨潮而升高,随落潮而降低。N8测站表层水温在大潮期为9.66℃~11.31℃,在小潮期为10.18℃~11.79℃;N9测站表层水温在大潮期为9.49℃~11.15℃,在小潮期为10.09℃~11.60℃。N8、N9测站水温最低值皆低于湾口的N1测站,而最高值却高于N1测站,且温升在夜晚依旧存在,说明温升非气温和日照所致。由此可以看出,N8、N9测站在涨潮期间也会受到温排水的影响。

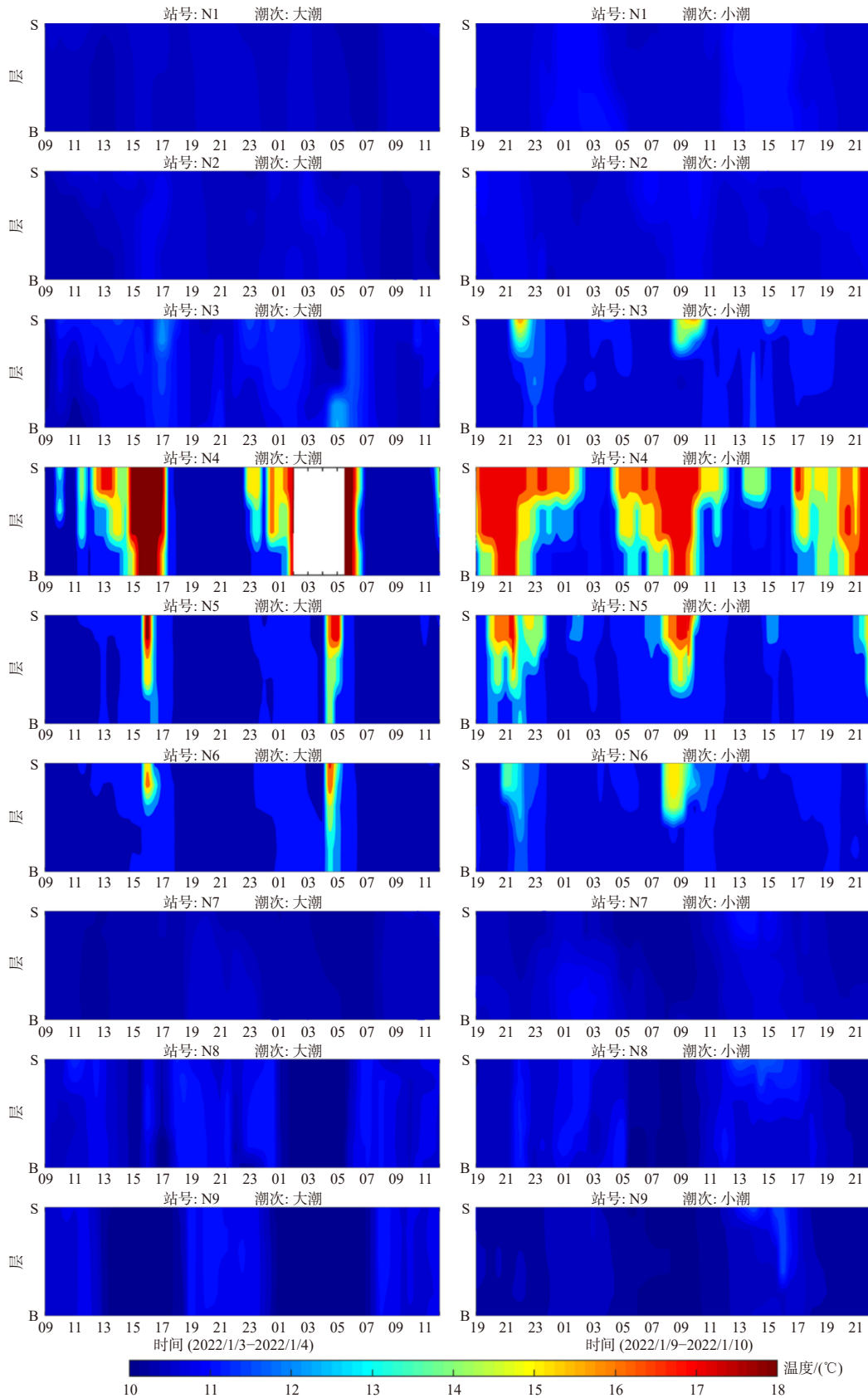


图 3 N1~N9 测站水温随时间的变化

Fig. 3 Temporal variance of sea temperature at Staion N1 ~ N9

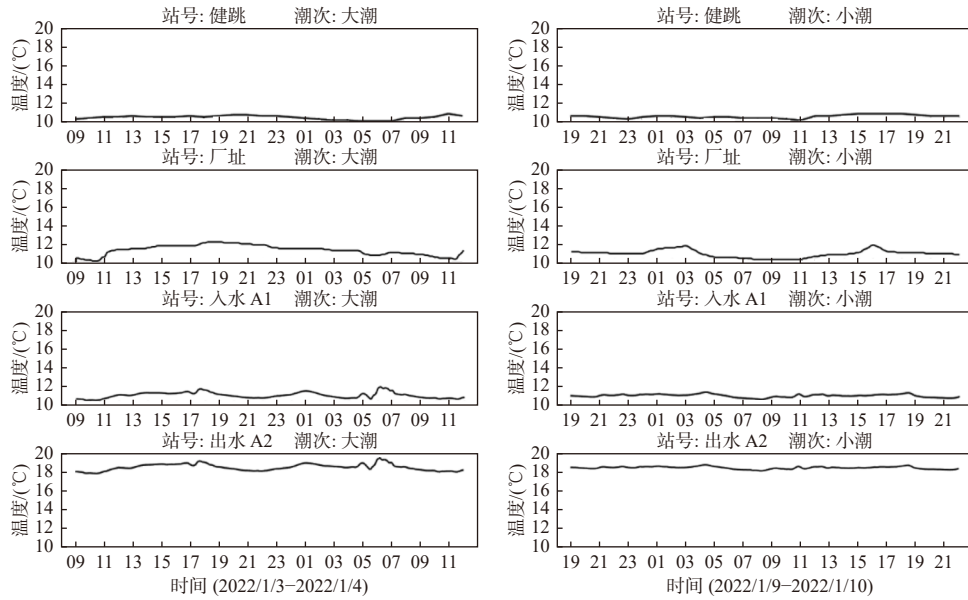


图 4 健跳、厂址测站表层水温及电厂入水(A1)、出水(A2)水温的日变化曲线

Fig. 4 SSTs at Station Jiantiao, Station Changzhi, and temperatures of intake (A1) and outlet (A2)

表 1 各测站电厂入水、出水温度的最大值、最小值、平均值和日较差(单位: °C)

Tab.1 The maximum, minimum, mean and daily range of SSTs(units: °C)

潮汛	特征值	厂址	健跳	N1	N2	N3	N4	N5	N6	N7	N8	N9
大潮	最大值	12.20	10.80	10.73	10.78	12.00	18.34	18.28	17.09	10.56	11.31	11.15
	最小值	10.20	10.10	10.31	10.32	10.19	10.43	10.35	10.28	10.14	9.66	9.49
	平均值	11.34	10.45	10.50	10.53	10.99	13.30	11.32	11.14	10.32	10.66	10.42
	日较差	2.00	0.70	0.42	0.46	1.81	7.91	7.93	6.81	0.42	1.65	1.66
小潮	最大值	11.90	10.80	11.17	11.00	15.89	17.73	17.32	15.42	11.11	11.79	11.60
	最小值	10.40	10.20	10.43	10.44	10.47	10.89	10.67	10.59	10.16	10.18	10.09
	平均值	10.98	10.54	10.74	10.75	11.46	15.40	12.55	11.47	10.45	10.72	10.46
	日较差	1.50	0.60	0.74	0.56	5.42	6.84	6.65	4.83	0.95	1.61	1.51
潮汛	特征值	入水	出水	T0	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8
大潮	最大值	12.01	19.54	19.32	18.77	17.09	17.59	16.77	18.94	17.47	17.12	11.95
	最小值	10.55	17.99	16.54	10.43	10.45	10.42	10.40	10.54	10.46	10.42	10.22
	平均值	11.08	18.59	18.09	14.37	11.91	11.77	11.62	13.14	12.62	12.05	10.82
	日较差	1.46	1.56	2.78	8.34	6.64	7.17	6.37	8.40	7.01	6.70	1.73
小潮	最大值	11.38	18.80	18.45	17.99	17.52	16.75	15.78	18.04	17.58	16.60	13.76
	最小值	10.67	18.16	17.60	10.23	10.79	10.70	10.70	11.58	10.89	10.67	10.45
	平均值	11.02	18.49	18.06	14.43	14.33	13.43	12.96	16.40	16.01	14.70	11.66
	日较差	0.71	0.64	0.85	7.76	6.73	6.05	5.08	6.46	6.69	5.93	3.31

厂址潮位站表层水温在小潮期的日变化趋势与 N8、N9 测站相似,即随涨潮而升高、随落潮而降低,但在大潮期的日变化与潮汐关系不明显。

2.2.2 水温垂向分布特征

表 2 为定点分层测站(N1~N9)表底温差(表层-底层)的最大值、最小值和平均值。结合图 3 可以看出,湾口的 N1 测站、猫头水道的

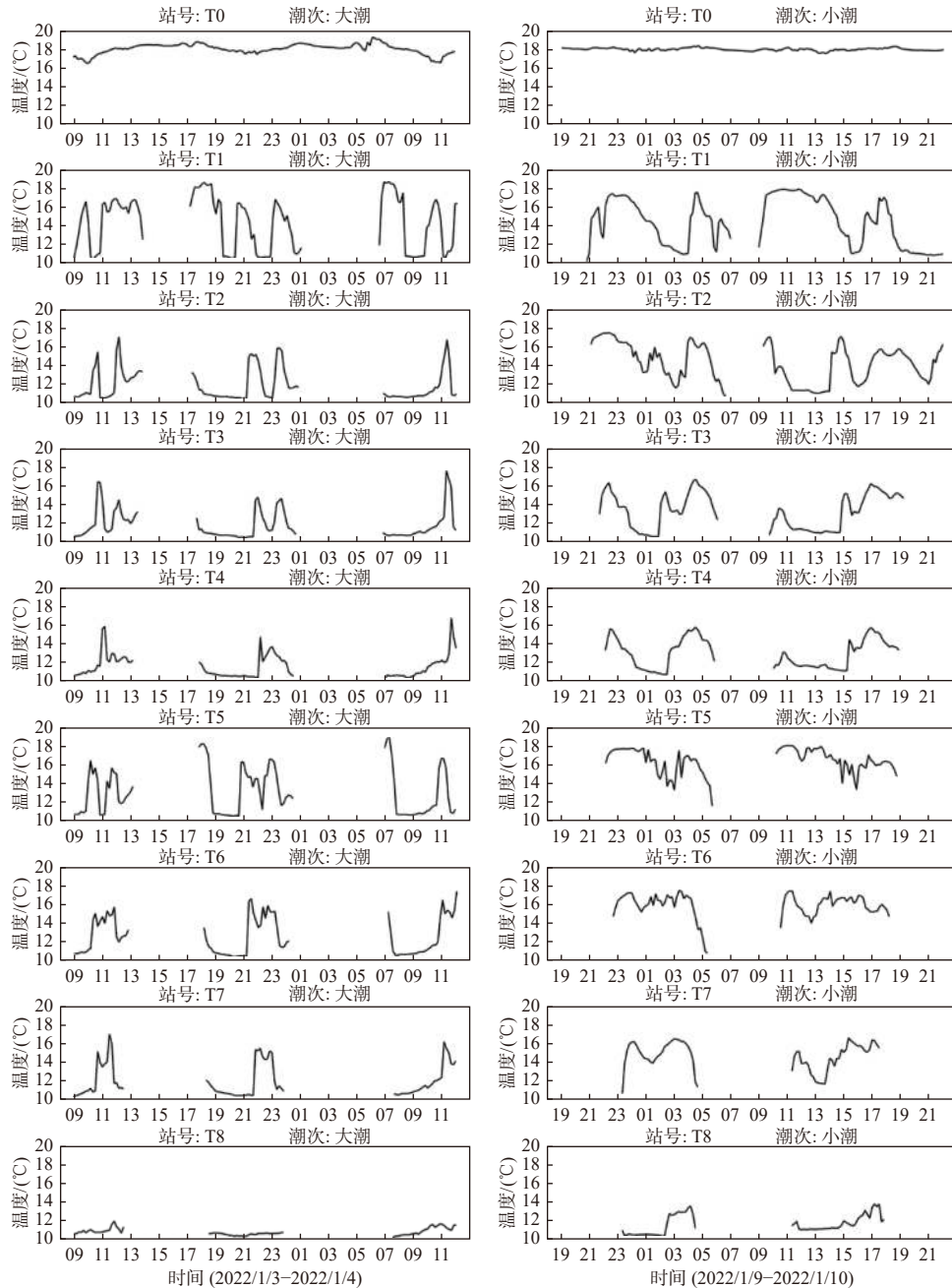


图 5 排水口测站(T0)和滩涂测站(T1~T8)表层水温的日变化曲线

Fig. 5 Temporal variance of SSTs at Station T0, T1 ~ T8

N2 测站、满山水道的 N7 测站、蛇蟠水道的 N8、N9 测站的表底温差较小, 各测站表底温差平均值在大潮期为 $-0.03\text{ }^{\circ}\text{C} \sim 0.04\text{ }^{\circ}\text{C}$, 在小潮期为 $-0.11\text{ }^{\circ}\text{C} \sim 0.14\text{ }^{\circ}\text{C}$, 水体总体呈均匀混合状态。而位于排水口东侧的 N3 ~ N6 测站表底温差平均值在大潮期为 $0.16\text{ }^{\circ}\text{C} \sim 1.21\text{ }^{\circ}\text{C}$, 在小潮期为 $0.51\text{ }^{\circ}\text{C} \sim 2.37\text{ }^{\circ}\text{C}$, 存在温度层化现象。小潮期温度层化较强, 且持续时间比大潮期长 3 ~ 13 h, 这

与小潮期间的潮混合较弱有关。

表层水温还会受到气温和太阳辐射的影响, 如 N7 测站 1 月 9 日 22 时至 1 月 10 日 3 时表层水温下降速度比底层快, 出现表层低、底层高的逆温现象, 最大温差达 $-0.53\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。此外, 水温的垂向分布还受流场的三维结构影响, 如 1 月 4 日 5 时, N3 测站表层水温为 $10.67\text{ }^{\circ}\text{C}$, 而底层水温为 $12.41\text{ }^{\circ}\text{C}$, 高于表层 $1.74\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。结合水深和分层

潮流资料可以看出,4时该站底层潮流已由南向转为北向,底层水受其西南侧温排水北上的影响,呈现相对高温的特征;而表层至中层潮流在5时才开始转向,表层水仍受北侧湾顶冷水南下的影响,呈现相对低温的特征,因此该站出现了短时冷水覆盖暖水的逆温现象。

表2 N1~N9 测站表底温差的最大值、最小值和平均值(单位:℃)
Tab.2 The maximum, minimum and mean of the temperature difference between surface and bottom at Station N1 ~ N9 (units: °C)

潮流特征值	N1	N2	N3	N4	N5	N6	N7	N8	N9
大潮 最大值	0.16	0.36	0.95	5.81	6.69	4.53	0.15	0.68	0.17
大潮 最小值	-0.20	-0.33	-1.74	-0.18	-0.37	-0.62	-0.33	-0.30	-0.15
大潮 平均值	0.01	0.04	0.16	1.21	0.39	0.28	-0.03	0.04	0.02
小潮 最大值	0.12	0.38	4.95	6.09	5.97	4.53	0.41	1.09	0.99
小潮 最小值	-0.36	-0.25	-0.64	-1.52	-0.08	-0.20	-0.53	-0.53	-0.08
小潮 平均值	-0.06	0.09	0.51	2.37	1.38	0.57	-0.11	0.14	0.11

2.2.3 表层水温水平分布特征

图6为按照大、小潮和涨急、涨憩、落急、落憩4个典型潮时划分的各测站及走航测线的表层水温分布。其中大潮涨急、涨憩、落急、落憩时刻依次取1月3日18:30、9:30、12:30、15:30;小潮涨急、涨憩、落急、落憩时刻依次取1月10日11:30、14:30、17:30、20:30。由于落憩时刻排水口附近滩涂裸露,因此T1~T8测站在落憩时刻无水温数据。

受温排水影响,冬季观测海域表层的最高水温皆出现在排水口T0测站,最低水温一般出现在满山水道的N7测站或蛇蟠水道的N9测站。N7测站与排水口分属不同的水道,中间被田湾岛等诸岛分割,受温排水影响较小;N9测站距离排水口较远,可能受到上游清溪、珠游溪等陆源冷水的影响。

大潮期间涨急时刻,表层最高水温为18.42℃,最低水温为10.37℃(N7测站)。受涨潮流的顶托作用,温排水主要被限制在排水口外较小的区域,并向北绕过猫头山嘴进入蛇蟠水道,在混合作用下水温迅速降低。此时,离排水口最近的T1和T5测站的水温在大潮4个典型潮时中最高。涨憩时刻,表层最高水温为

18.42℃,最低水温为10.39℃(N7测站)。观测区域海表水温分布与涨急时刻相似,而T1和T5测站水温较涨急时刻低3℃~6℃,这可能与水深增加有关。落急时刻,表层最高水温为18.05℃,最低水温为10.25℃(N7测站)。温排水的影响范围向南扩展增大,T1~T8和N4~N6测站、走航测线S1大部分和测线S2北段的水温都较N7测站高1℃以上。落憩时刻,表层最高水温为18.40℃,最低水温为9.83℃(N9测站)。温排水的影响范围进一步向南扩展,两条走航测线的温升程度更高,几乎所有测点的水温都比N7测站高2℃以上。

小潮期海表水温的分布和变化特征与大潮期相似。表层最高水温在4个典型潮时的差异不大,为17.97℃~18.16℃;涨急、落急、落憩时刻最低水温出现在N9测站,为10.26℃~10.51℃;涨憩时刻最低水温出现在走航测线S1中部,为10.63℃。大潮涨急时刻T5、T6测站水温较同期N7测站高1℃~1.5℃,而小潮涨急时刻T5、T6测站水温则较同期N7测站高4℃~6℃;大潮落急时刻T2~T8测站水温较同期N7测站高1℃~2.5℃,而小潮落急时刻T2~T8测站水温较同期N7测站高2℃~5℃。小潮期间潮混合较弱,水温层化较强,温排水覆盖于冷水表层在落潮流的作用下可以运输到排水口以南更远的区域。同时,大潮落潮期间风向由东北转向东南,小潮落潮期间风向为持续的北向和西北向,与落潮流流向更为一致,更有利于温排水向南、东南方向运输,因此风也是温排水分布的影响因素之一。

以N7测站相同时刻水温为背景温度,以1℃温升为标准,涨潮时段温排水最远可影响到排水口西北约3km处,落潮时段温排水最远可影响到排水口东南约5km处。这是由于排水口北侧水道水深较深,温排水北上过程中在混合作用下水温迅速降低,而排水口南侧水深较浅,水温下降慢,因此温排水可以到达更远的区域。

3 结论

(1)受温排水影响,冬季观测海域表层水温通常为10℃~19℃,最高水温皆出现在排水口

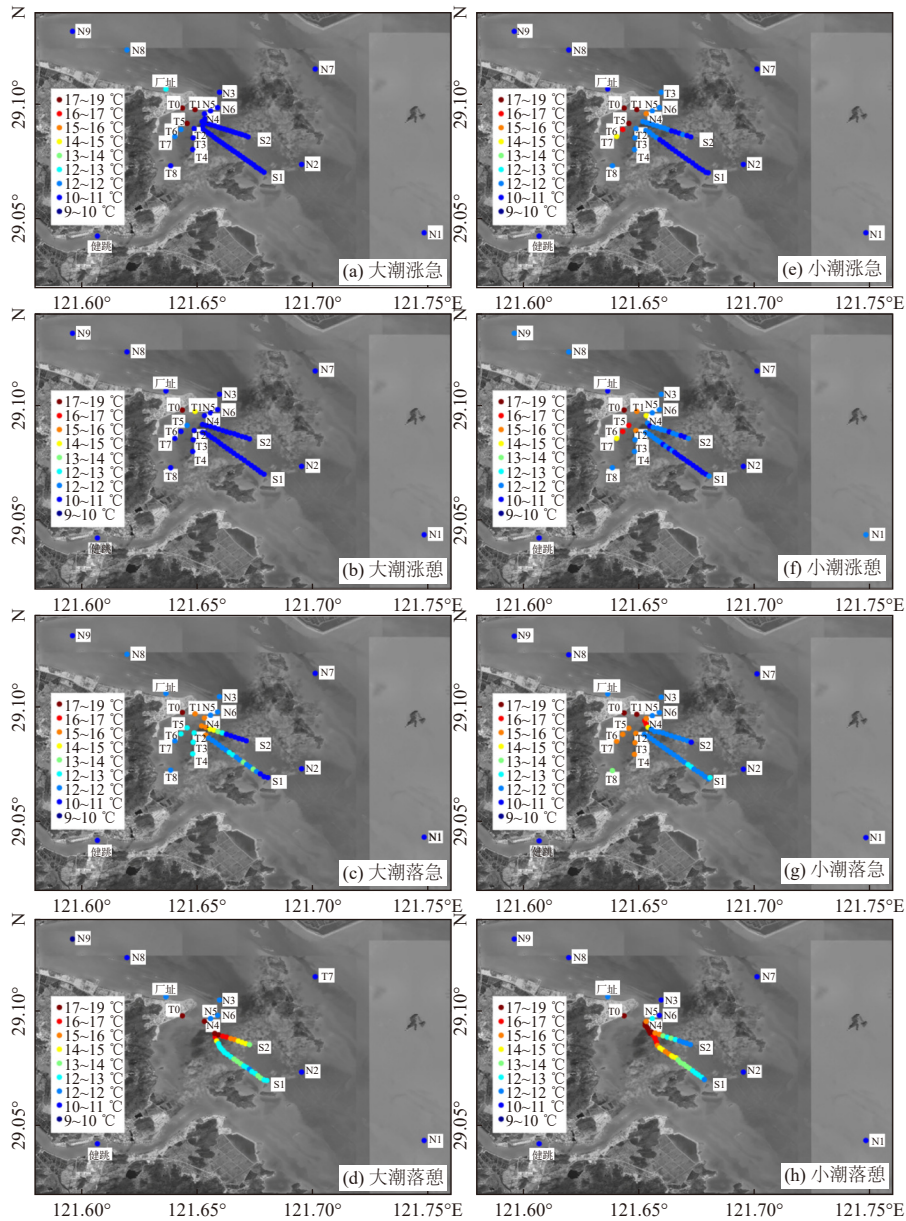


图 6 典型潮时表层水温分布图

Fig. 6 SST patterns at typical time during the spring tide and neap tide

T0 测站, 最低水温一般出现在位于满山水道的 N7 测站或位于蛇蟠水道的 N9 测站; 排水口附近的 N3 ~ N6 测站和位于滩涂的 T1 ~ T8 测站受温排水影响, 均出现表层水温陡然升高的现象, 且升温幅度随测站与排水口间距离的增加而降低; 位于猫头水道的 N2 测站在落潮期间和位于蛇蟠水道的 N8、N9 测站在涨潮期间也会受温排水的影响。

(2) 从垂向上看, 湾口的 N1 测站、猫头水道的 N2 测站、满山水道的 N7 测站、蛇蟠水道的

N8、N9 测站表底温差的平均值在大潮期间小于 0.04 °C, 在小潮期间小于 0.14 °C, 水体总体呈均匀混合状态; 位于排水口东侧的 N3 ~ N6 测站表底温差的平均值在大潮期间为 0.16 °C ~ 1.21 °C, 小潮期间为 0.51 °C ~ 2.37 °C, 存在温度层化现象, 小潮期间水温层化较强, 且持续时间较大潮期间长 3 ~ 13 h。

(3) 涨急和涨憩时刻, 受涨潮流的顶托作用, 温排水主要被限制在排水口外较小的区域并向北绕过猫头山嘴经猫头水道进入蛇蟠水道; 落急

和落憩时刻,温排水则向南影响南海滩及其以东海域。以 N7 测站相同时刻水温为背景温度,以 1 °C 温升为标准,涨潮时段温排水最远可影响到排水口西北约 3 km 处,落潮时段温排水最远可影响到排水口东南约 5 km 处,可见,温排水在落潮时段可以到达更远的区域。

(4) 三门核电站厂址以北各测站典型潮时水温在大、小潮期间的差异通常在 0 °C ~ 0.8 °C; 厂址以南各测站小潮期间典型潮时水温通常较大潮期间高 0.5 °C ~ 5.0 °C, 说明三门核电站周边海域特别是排水口以南海域, 在小潮期间受温排水的影响更大。

参考文献:

- [1] KENNISH M J. Ecology of Estuaries: Anthropogenic effects[M]. Boca Raton: CRC Press, 1992: 1-494.
- [2] WEI X Y, WEI G L, XIONG X W. Effects of thermal discharge from nuclear power plant on phytoplankton[J]. *Advanced Materials Research*, 2014, 986/987: 738-741.
- [3] CHUANG Y L, YANG H H, LIN H J. Effects of a thermal discharge from a nuclear power plant on phytoplankton and periphyton in subtropical coastal waters[J]. *Journal of Sea Research*, 2009, 61(4): 197-205.
- [4] SANDSTRÖ O, ABRAHAMSSON I, ANDERSSON J, et al. Temperature effects on spawning and egg development in Eurasian perch[J]. *Journal of Fish Biology*, 1997, 51(5): 1015-1024.
- [5] 吴宇帆, 朱建荣. 长江河口电厂温排水输运扩散数值模拟[J]. *华东师范大学学报: 自然科学版*, 2017 (2): 126-137,142.
- [6] 颜 钰, 邵冬冬, 顾 卫, 等. 鲚鱼圈热电厂温排水的现场观测和三维数值模拟[J]. *海洋环境科学*, 2016, 35(4): 571-579.
- [7] 张 琨, 张爱玲, 覃春丽, 等. CORMIX与二维数模、物模在滨海核电站温排水近区模拟中的比对研究[J]. *海洋科学进展*, 2017, 35(1): 117-123.
- [8] 曹 颖, 朱军政. 基于FVCOM模式的温排水三维数值模拟研究[J]. *水动力学研究与进展*, 2009, 24(4): 432-439.
- [9] 许 静, 朱 利, 姜 建, 等. 基于HJ-1B与TM热红外数据的大亚湾核电基地温排水遥感监测[J]. *中国环境科学*, 2014, 34(5): 1181-1186.
- [10] 张晓峰, 徐京萍, 张曼祺, 等. Landsat-8热红外数据监测田湾核电站温排水分布[J]. *海洋科学进展*, 2019, 37(3): 518-525.
- [11] 梁珊珊, 张 兵, 李俊生, 等. 环境一号卫星热红外数据监测核电站温排水分布——以大亚湾为例[J]. *遥感信息*, 2012 (2): 41-46.
- [12] SCHLUESSEL P, EMERY W J, GRASSL H, et al. On the bulk-skin temperature difference and its impact on satellite remote sensing of sea surface temperature[J]. *Journal of Geophysical Research Oceans*, 1990, 95(C8): 13341-13356.
- [13] HULLEY G C, HOOK S J, SCHNEIDER P. Optimized split-window coefficients for deriving surface temperatures from inland water bodies[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2011, 115(12): 3758-3769.
- [14] 朱 利, 赵利民, 王 桥, 等. 核电站温排水分布卫星遥感监测及验证[J]. *光谱学与光谱分析*, 2014, 34(11): 3079-3084.
- [15] 汤德福, 吴群河, 刘广立, 等. 滨海电厂温排水监测及模拟方法探讨[J]. *环境科学导刊*, 2017, 36(6): 84-89.
- [16] 吴创收, 黄世昌, 罗向欣. 三门湾海域悬沙输运特征及其影响机制[J]. *水运工程*, 2021 (7): 7-13,31.
- [17] 宋泽坤, 施伟勇, 张 峰, 等. 三门湾近期水动力特性观测研究[J]. *应用海洋学学报*, 2017, 36(2): 279-285.
- [18] 杨万康, 尹宝树, 杨青莹, 等. 海岸围垦工程对三门湾内潮汐振幅的影响与研究[J]. *应用海洋学学报*, 2019, 38(3): 408-415.
- [19] 朱泽南, 朱小华, 张传正, 等. 三门湾沿海声层析潮流观测实验[J]. *地球物理学报*, 2015, 58(5): 1742-1753.
- [20] 胡方西, 曹沛奎. 三门湾潮波运动特征及其与地貌发育的关系[J]. *海洋与湖沼*, 1981, 12(3): 225-234.