

doi: 10.6046/zrzyyg.2023234

引用格式: 石海岗,梁春利,薛庆,等. 基于卫星遥感的秦山核电周边海域温度分布研究[J].自然资源遥感,2025,37(1): 152-160.(Shi H G, Liang C L, Xue Q, et al. A study of temperature distribution in the sea area around Qinshan Nuclear Power Plant based on satellite remote sensing[J]. Remote Sensing for Natural Resources, 2025, 37(1): 152-160.)

基于卫星遥感的秦山核电周边海域温度分布研究

石海岗^{1,2}, 梁春利^{1,2}, 薛庆^{1,2}, 张恩^{1,2}, 章新益^{1,2}, 张建永^{1,2}, 张春雷¹, 程旭^{1,2}

(1.核工业航测遥感中心,石家庄 050002; 2.河北省航空探测与遥感技术重点实验室,石家庄 050002)

摘要:以秦山核电周边海域为研究对象,利用 Landsat 系列热红外遥感数据,研究秦山核电周边海域的温度分布情况。结果显示,温度反演结果与海上测温数据具有强相关性,反演结果可靠;秦山核电运行前,周边海域温度较为均匀,除自然增温外,无明显温度分异现象,沿岸南北方向上海域温度几乎无变化,东西方向存在较小的温度梯度,离岸 10 km 范围内温度变化不超过 0.6 °C;核电运行后,周边海域呈现水温分异现象,温排水分布特征与潮汐和季节密切相关,同季节落潮时刻的温升范围总体要大于涨潮,同潮态夏季温升分布总体大于冬季;某厂取水口处表层海水在涨潮时刻存在 1.0 °C 以上温升。Landsat 系列数据基本满足秦山核电周边海域温度分布研究需求,针对特定潮态温排水分布可开展航空遥感监测。

关键词:秦山核电;温排水;温度反演;遥感监测;潮汐

中图分类号: TP 79 **文献标志码:** A

文章编号: 2097-034X(2025)01-0152-09

0 引言

国家“十四五”规划纲要明确提出“安全稳妥推动沿海核电建设,建设一批多能互补的清洁能源基地”,预示着我国将持续稳步推进核电建设。核电站运行过程中会形成大量温排水,对周边海域造成一定升温^[1],温度较高时可能会影响核电正常运行^[2]及改变水体的质量进而影响水生生物的繁殖和发育^[3],因此,如何准确监测温排水分布范围,已成为环境监管部门、核电单位和公众共同关注的问题。目前核电温排水监测常用 3 种方法,分别是数值模拟、海面实测和遥感监测。其中数值模拟一般应用在核电建设的前期阶段或核电周边环境变化后进行评估;海面实测可快速获取精确的单点数据,但因为成本高、监测面积有限、难以形成场数据等局限多用于数模和遥感监测的校验;热红外遥感在核电周边海域环境监测方面具有同步性好、周期重复观测和成本相对较低等其他技术手段无法比拟的特点^[4-6]。

秦山核电站是中国自行设计、建造和运营管理的第一座核电站,核电运行前后海域温度分布情况

已经发生很大变化^[7],基于卫星遥感技术对秦山核电周边海域温度分布情况的研究还罕有报道。本次研究选用 6 期 Landsat 系列卫星热红外遥感数据,对秦山核电运行前、后周边海域的海表温度开展温度反演和校验,分析不同时期秦山核电周边海域温度的空间分布,以评估核电运行后对其周边海域的热影响,为核电安全运行和附近海域水体环境影响评价提供数据资料。

1 研究区概况及数据源

1.1 研究区概况

秦山核电站地处浙江省海盐县秦山镇,坐落于杭州湾北部湾顶附近的秦山脚下,核电周边海域为本次研究区。秦山核电站包括秦山核电厂、秦山第二核电厂、秦山第三核电厂、方家山核电厂(以下分别简称一厂、二厂、三厂和方家山电厂),1991 年第一座 30 万 kW 压水堆核电站投入运行,至 2015 年已陆续投运 9 台机组,总装机容量达到 658.4 万 kW,年发电量约 500 亿 kW·h,是国内核电机组数量最多、堆型最丰富的核电站。

研究区位置示意图如图 1 所示(底图为 Land-

收稿日期: 2023-08-02; 修订日期: 2023-11-20

基金项目: 秦山核电温排水遥感测量项目(编号: QX3FY-21003481-000)和河北省重点研发计划项目“华北平原中低温地热异常信息热红外遥感探测技术研究与应用”(编号: 2134202D)共同资助。

第一作者: 石海岗(1984-),男,硕士,高级工程师,主要从事环境遥感、遥感地质、遥感技术推广应用方面工作。Email: 383071766@qq.com。

通信作者: 梁春利(1971-),男,博士,研究员,主要从事环境遥感及核电温排水遥感监测方面研究。Email: 1270610414@qq.com。

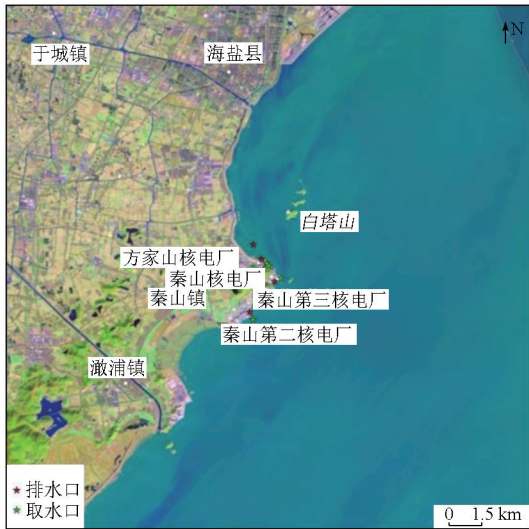


图 1 研究区地理位置分布
Fig.1 Location of the study area

sat9 B7, B5, B2 假彩色合成影像)。该区地处亚热带南缘,是典型的季风气候,冬夏季风交替明显,日照充足,气候温和湿润,取排水所在的杭州湾作为闻名世界的强潮海湾,具有潮差大、海流急、水体混合强等特点。潮流在秦山海域呈往复流,涨潮流向为涌向核电方向,水流基本与海岸线相平行,水流贴岸流动,落潮流向与之相反。核电周边海域潮汐属于

非正规半日浅海潮,每个太阴日内有 2 次高潮,2 次低潮^[7]。

1.2 遥感数据源

Landsat5 是美国陆地卫星系列的第 5 颗卫星,于 1984 年 3 月 1 日发射,2013 年因故障退役,其携带的 MSS 和 TM 传感器为全球提供了近 30 a 高质量的表面遥感数据,为海域温度变化分析提供了基础对照数据。Landsat8 和 Landsat9 分别是美国陆地卫星系列的第 8 和第 9 个卫星计划,分别于 2013 年 2 月 11 日和 2021 年 9 月 27 日发射,数据均开放下载(<https://earthexplorer.usgs.gov/>)。两者均为太阳同步轨道,运行高度为 705 km,重访周期为 16 d。Landsat9 与 Landsat8 轨道存在 8 d 的偏移,成像方式相较于 Landsat5 的扫描电镜方式,提升为推扫式成像,有效地延长设备使用寿命。Landsat9 作为 Landsat8 数据的备份,同样具有陆地成像仪(OLI-2)和热红外成像仪(TIRS-2),能够同时收集 8 个 30 m 的多光谱波段,1 个 15 m 的全色波段和 2 个 100 m 的热红外波段,且 OLI-2 相较于 Landsat8 的 12 位量化提高到 14 位,为该系列卫星数据中信噪比最高的数据。本文采用的数据源 Landsat5, Landsat8 和 Landsat9 成像时间、机组运行工况见表 1。

表 1 秦山核电不同时相热红外数据概况

Tab.1 Overview of thermal infrared data of Qingshan nuclear power plant in different time

数据类型	有效载荷	地面幅宽/km	空间分辨率/m	重访周期/d	过境时间及运行工况		季节及潮态
Landsat5	B6	185	120	16	1986-01-23 09:52	未运行	冬季涨潮
					1986-08-19 09:46	未运行	夏季落潮
Landsat8	B10	185	100	16	2020-12-22 10:25	9 台机组运行	冬季落潮
					2019-07-29 10:25	9 台机组运行	夏季涨潮
Landsat9	B10	185	100	16	2022-01-02 10:15	9 台机组运行	冬季涨潮
					2022-08-14 10:25	9 台机组运行	夏季落潮

2 研究方法

2.1 遥感数据预处理

预处理主要是对 Landsat 多光谱数据进行辐射定标、大气校正、波段合成及海陆分离。辐射定标和大气校正通过 ENVI 软件进行,海陆分离利用大气校正后的绿光波段和短波红外波段比值来提取,多光谱数据波段合成前,采用 Gram-Schmidt Pan Sharpening 方法对 Landsat8 和 Landsat9 多光谱数据与全色波段融合,将空间分辨率提升为 15 m。

2.2 温度反演

温度场信息提取的基础是对热红外波段开展温度反演。目前针对 Landsat9 热红外数据开展温度反演研究的较少,因 Landsat9 热红外波段设置与 Landsat8 一致,本文借鉴针对 Landsat8 热红外数据

的辐射传输方程法^[8-9],对相关参数进行调整。针对 Landsat5 热红外数据,国内外学者提出不同的反演算法,主要有单窗算法^[10]、普适性单通道算法^[11-12]和辐射传输方程法。为保证结果一致性,对所有数据均使用辐射传输方程算法开展温度反演。

在无云情况下,不考虑大气对电磁波的散射,水平大气各种组分混合均匀,对于温度为 T_s 的条件下,卫星传感器接收到的大气顶层辐射 L_λ 为:

$$L_\lambda = \varepsilon_\lambda \tau L_\lambda(T_s) + (1 - \varepsilon_\lambda) \tau L_{\lambda atm \downarrow} + L_{\lambda atm \uparrow}, \tag{1}$$

式中: $L_\lambda(T_s)$ 为温度为 T_s 时的黑体辐射; L_λ 为卫星传感器接收到的大气顶层辐射,可由传感器辐射定标获取; ε_λ 为比辐射率,因海水接近黑体,比辐射率取 0.995^[11]; $L_{\lambda atm \downarrow}$ 和 $L_{\lambda atm \uparrow}$ 分别为大气下行辐射和大气上行辐射; τ 为大气透射率。

经式(1)变形,可以得到地物温度为 T_s 时的黑体辐射 $L_\lambda(T_s)$ 为:

$$L_\lambda(T_s) = \frac{L_\lambda - L_{\lambda atm \uparrow}}{\varepsilon_\lambda \tau} - \frac{(1 - \varepsilon_\lambda) L_{\lambda atm \downarrow}}{\varepsilon_\lambda} \quad (2)$$

由式(2)可知,要求算地表温度 T_s ,除海表比辐射率 ε_λ 外,还需计算 5 个参数: L_λ , $L_\lambda(T_s)$, τ , $L_{\lambda atm \uparrow}$ 和 $L_{\lambda atm \downarrow}$ 。

1) L_λ 的计算。将传感器观测到的表观反射率值 DN 转换成辐射亮度值,即辐射定标。公式为:

$$L_\lambda = aDN + b \quad (3)$$

式中 a 和 b 为定标系数,分别为图像的增益和偏移,可以直接从各自元数据中获取。

2) $L_{\lambda atm \downarrow}$, $L_{\lambda atm \uparrow}$ 和 τ 的获取。根据卫星过境时刻研究区核电厂区内气象铁塔 10 m 处平均空气温度、气压、湿度等气象数据及影像中心经纬度,结合 MODTRAN 模块进行在线大气校正^[8-9],获取 $L_{\lambda atm \downarrow}$, $L_{\lambda atm \uparrow}$ 和 τ 参数 (<http://atmcorr.gsfc.nasa.gov/>)。

3) $L_\lambda(T_s)$ 和 T_s 的计算。在获取 $L_{\lambda atm \downarrow}$, $L_{\lambda atm \uparrow}$ 和 τ 后,计算 $L_\lambda(T_s)$,根据普朗克公式的反函数,获取海表温度 T_s 为:

$$T_s = K_2 / \ln[K_1 / L_\lambda(T_s) + 1] \quad (4)$$

式中:对于 Landsat5 B6 波段, $K_1 = 607.76 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{sr} \cdot \mu\text{m})$, $K_2 = 1260.56 \text{ K}$; Landsat8 B10 波段, $K_1 = 774.89 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{sr} \cdot \mu\text{m})$, $K_2 = 1321.08 \text{ K}$; Landsat9 B10 波段, $K_1 = 799.03 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{sr} \cdot \mu\text{m})$, $K_2 = 1329.24 \text{ K}$ 。

基于以上算法和元数据中相关参数,进行波段运算,获得 6 期海面温度场分布数据。

3 结果与分析

3.1 温度反演可靠性分析

因 Landsat5 数据为存档数据,无法开展同步海

面实测工作,根据学者研究,该方法标准差可达 0.965°C ^[13]。为验证 Landsat9 数据 B10 波段辐射传输方程算法的可靠性,在 2022 年 1 月 2 日 Landsat9 卫星过境前后半小时,在秦山核电周边海域开展了同步海上测量工作。测量仪器为接触式 JENCO 牌 6010 定制版水质测量仪,标定后测量精度为 0.1°C , 50~100 m 间距测温一次,测量水体表面 0~10 cm 的温度,共获取到 120 个测温数据(图 2)。

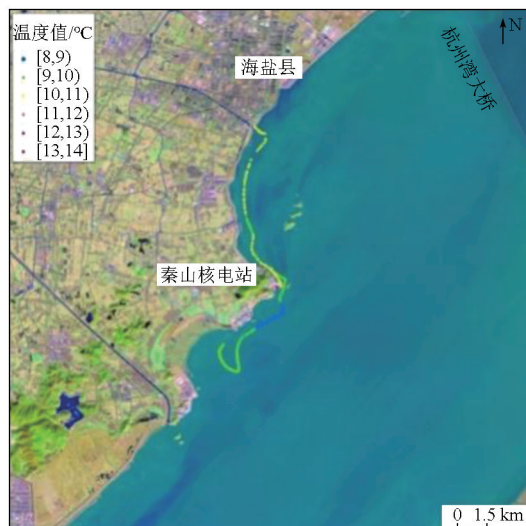


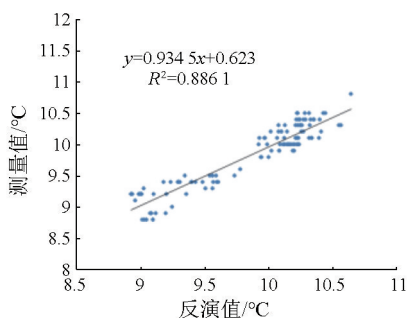
图 2 2022 年 1 月 2 日海面实测点位

Fig.2 Distribution of sea surface temperature on Jan. 2, 2022

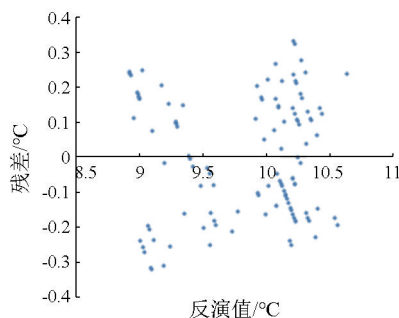
利用最小二乘法将 2022 年 1 月 2 日反演结果与测量温度值开展回归分析,并对残差进行投点(图 3)。Landsat9 反演获得的海面温度(sea surface temperature, SST)值与实测数据拟合关系式为:

$$y = 0.9345x + 0.623 \quad (5)$$

拟合后回归系数平方值为 0.8861,标准误差为 0.17, SST 值残差集中在 $(-0.3, 0.3)$ 的范围内,大部分集中在 $(-0.2, 0.2)$ 。从线性关系的程度和误差大小上可以反映出温度反演方法获得的温度场数据是准确可信的, SST 监测结果是可靠的。



(a) 海上实测值与反演 SST 值线性拟合图



(b) 实测值与拟合值残差投点图

图 3 2022 年 1 月 2 日海上实测值与反演 SST 值线性拟合图和残差投点图

Fig.3 Linear fitting and residual point map of measured values and inverted SST values at sea on Jan. 2, 2022

3.2 核电周边温度场分布特征

1986年1月23日和1986年8月19日秦山核电处于建设阶段,核电现状取水口和排水口周边海域无明显温度差异,不同季节温度差异较大,以核电为中心10 km范围内冬季和夏季温度分别集中在

5.2~5.7℃(图4(a))和27.5~28.1℃(图4(b))之间,核电周边10 km范围内存在0.5℃的温度梯度,海洋向陆地的温度随季节变化,冬季由高到低,夏季则反之,海岸线周边存在太阳辐射后快速升温的浅水滩涂区域,且夏季较为明显。

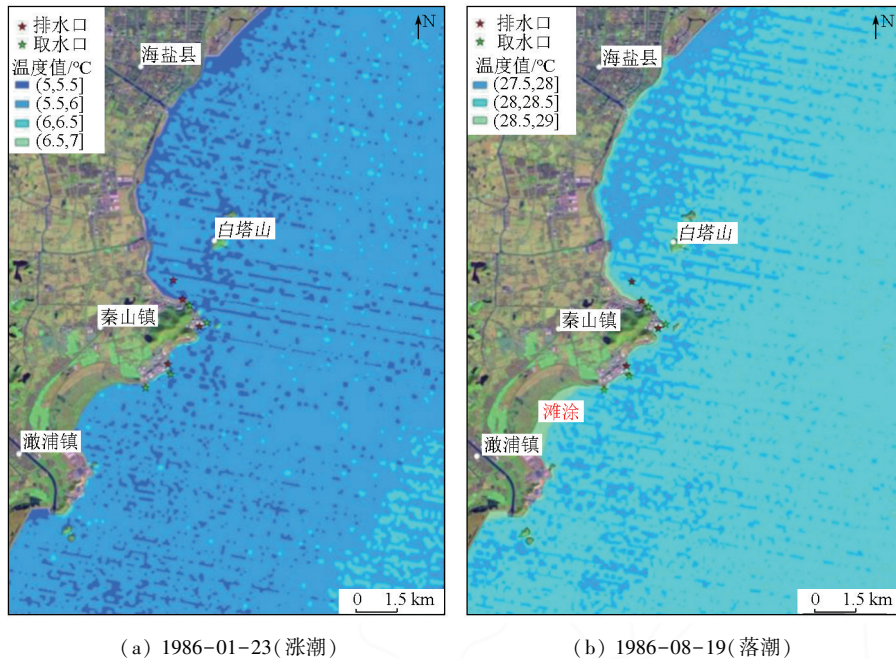


图4 秦山核电运行前周边海域热红外温度场

Fig.4 Thermal infrared temperature of the sea region near Qinshan nuclear power plant

秦山核电9台机组运行后,周边海域温度场发生明显变化,排水口周边存在明显的水温分异现象。与运行前数据相比,冬季(图5(a)和(b))核电附近

海域温度范围为8~15.3℃;夏季(图5(c)和(d))核电附近海域温度范围为27.5~38.0℃。运行后各时相温度分布见表2。

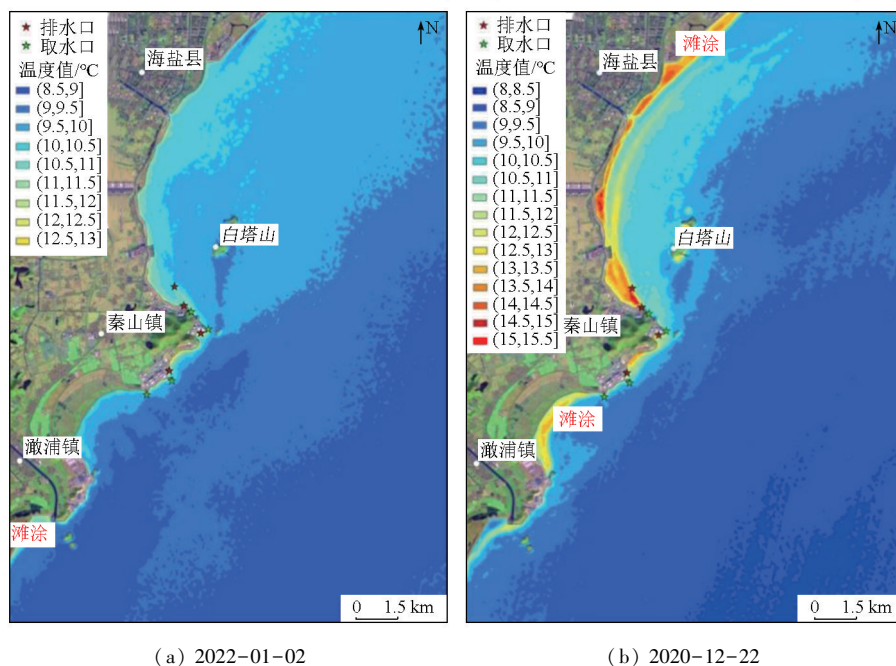


图5-1 秦山核电运行后周边海域热红外温度场

Fig.5-1 Thermal infrared temperature of the sea region near Qinshan nuclear power plant at different periods

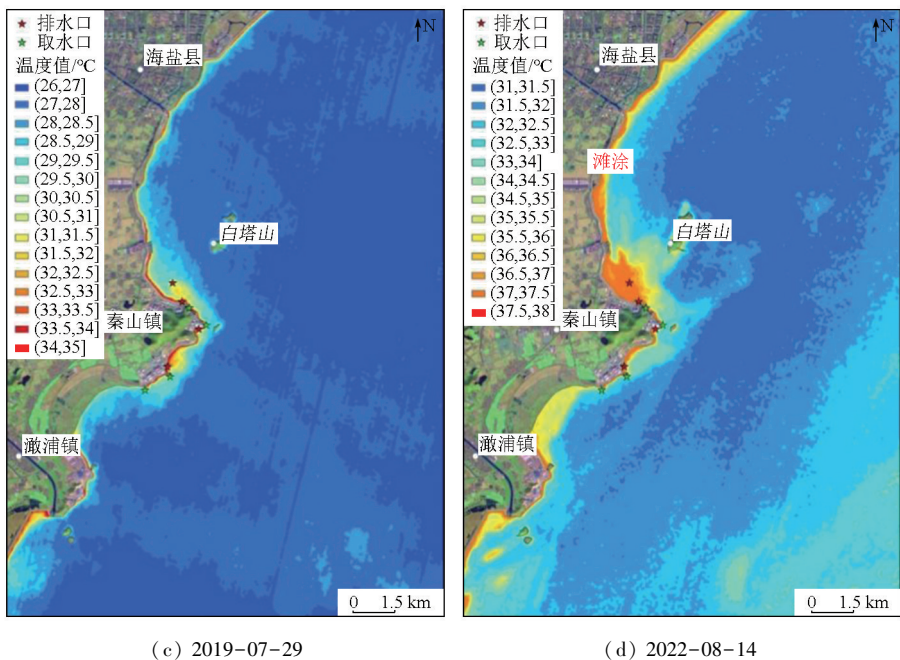


图 5-2 秦山核电运行后周边海域热红外温度场

Fig.5-2 Thermal infrared temperature of the sea region near Qinshan nuclear power plant at different periods

表 2 秦山核电周边海域不同时相温度分布统计

Tab.2 Statistics of temperature distribution in the sea area around Qinshan nuclear power plant at different time (°C)

时相	温度范围	排水口温度				取水口温度			
		方家山电厂	一厂	三厂	二厂	一厂及方家山电厂	三厂	二厂南 1	二厂南 2
2019-07-29	27.5~35.0	31.7	33.3	33.3	34.8	31.9	29.8	29.8	29.8
2020-12-22	8.5~15.3	14.4	15.3	12.5	12.2	10.5	11.7	10.3	10.1
2022-01-02	8.5~12.0	11.2	11.2	11.9	11.9	10.6	10.2	10.2	10.2
2022-08-14	31.0~38.0	37.8	37.8	37.5	38.0	36.3	33.9	33.8	32.4

研究冬夏季涨落潮温度场分布特征发现：①季节影响海域整体温度，夏季温度明显高于冬季，温度高约 20℃；②相同季节时，核电周边海域涨潮时刻的温度总体低于落潮时刻，除与当时气象条件有关外，推测主要是因为涨潮时刻流速较快使外海低温水体涌入温排水排放区域使其温度快速降低所致，而落潮时刻流速较涨潮时刻慢，且温排水热水回归造成温度较高；③核电附近海域温度场分布特征明显受到了海域涨、落潮的影响，相似潮态下温度空间分布特征相似，涨潮条件下，温排水受海岸线地形影响，在三厂北侧随海岸线向东南展布，在三厂南侧向西南方向展布，温排水流动和混合顺序依次为，方家山电厂→一厂→三厂→二厂，落潮则反之；④温排水在涨、落潮期间均显示出贴岸展布的特征，由于排水口均位于涨、落潮通道上，温排水存在明显的混合情况，距离排水口越近温度越高，因取水口亦设置在海岸线附近，位于温排水扩散通道上，影像均显示不同冷却程度的温排水已流经取水口附近，同时因一厂和方家山电厂取水口（因位置较近，图中 2 个取水口合并为一个）距离方家山和一厂排水口均较近

且位于涨潮的通道上，表层海水温度相对较高，这与核电厂内观测结果较为一致^[14]；⑤在离岸方向上，温排水影响一般不超过 5.0 km，与外海水体存在较为明确的界限，核电南北两侧近岸海域潮间带均有不同面积的滩涂干出，由于泥沙比热容较海水低，受太阳辐射的影响，滩涂在图像上显示为明显的高温区域。

3.3 温升影响分析

为获取温排水对周边水域造成的热影响，首先要剔除海域环境本底温度。对于秦山核电附近海域，运行前本底温度场显示，离岸 10 km 范围内温度变化一般不大于 0.6℃，运行后温排水的影响宽度一般不超过 5 km，参考《滨海核电厂温排水卫星遥感监测技术规范（试行）》（HJ 1213—2021）临近区域替代法，选用核电周边 5 km 范围内不受温排水影响区域的平均温度为初始本底温度，将温度场图像扣除该温度，若温排水影响的温度场仍与外海温度场无法区分，则在此基础上，采用由外海向温排水逐步递进的原则，以 0.1℃为变化区间，进一步精确厘定出遥感测量时本底温度值。

将海域温度场数据扣除本底温度值,得到核电温排水形成的温度场热影响分布范围,划分温升等级并以冷暖色调进行分类(图6)。排除滩涂出露区

后,根据各级水温像元分布和数量统计不同温升级别面积(图7)。

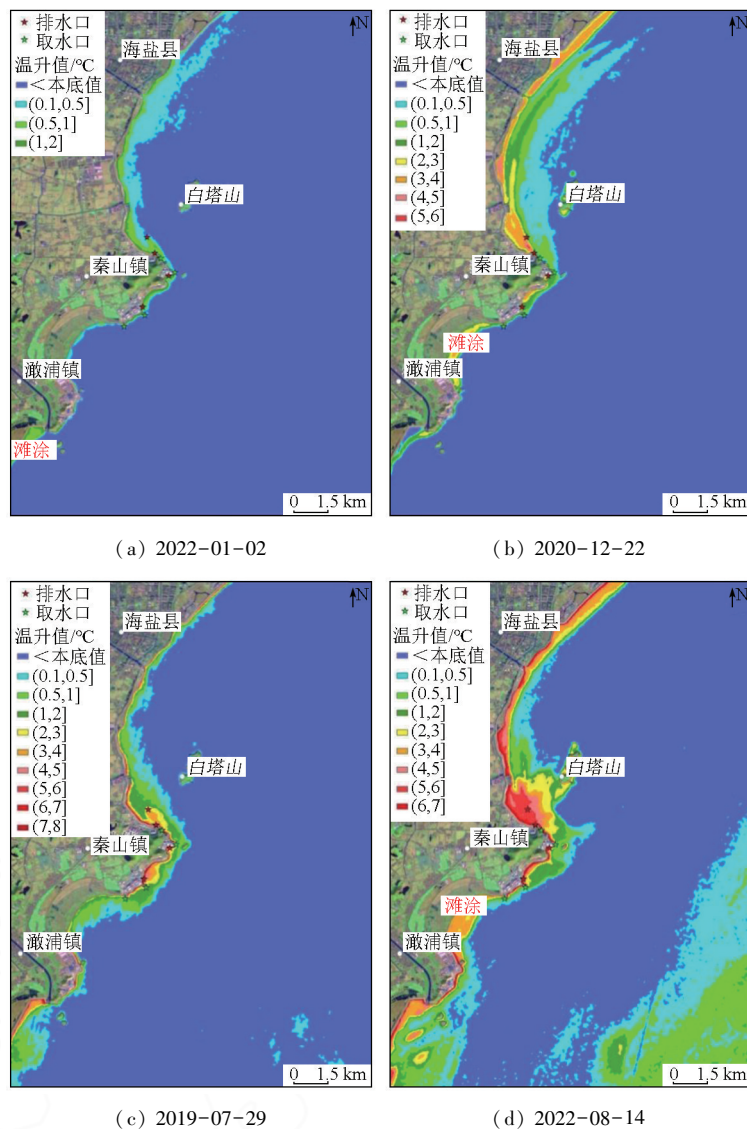


图6 秦山核电运行后周边海域温升分布

Fig.6 Temperature rise map of the surrounding sea area after the operation of Qinshan nuclear power plant

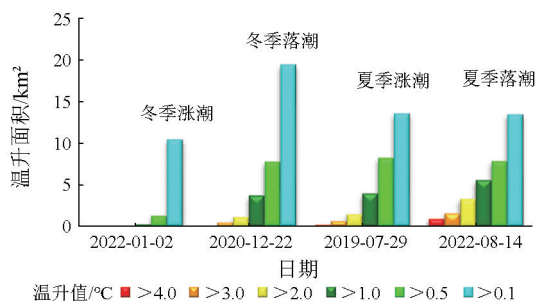


图7 不同时相温升面积对比

Fig.7 Contrast chart of temperature rising area at different time

图6显示,涨、落潮温升分布特征与温度场分布特征一致:涨潮时,一厂和方家山电厂温排水整体向东南方向展布,过三厂后受海岸线地形影响转向

西南,落潮则反之。由于落潮流速低于涨潮流速,不利于温排水的扩散,导致落潮时温排水影响宽度明显大于涨潮。温升面积统计结果也显示(图7),相同季节,相同工况条件下,落潮时刻各级别的温升范围总体比涨潮时刻要大;相似潮态、相同工况条件下,涨潮时夏季温升范围大于冬季;落潮时,冬季温升分布范围虽在低值温升区比夏季要大,但总体小于夏季,推测主要是因为夏季温度明显比冬季要高,不利于温排水温度扩散。因取水口均位于温排水扩散通道上,各取水口均有处于低值温升的情况,除一厂取水口外,温升影响均小于 1.0°C ,未影响核电取水和正常运行。一厂取水口因距离方家山电厂和一厂排水口较近,且位于涨潮的通道上,温度相对较高,表层海水已监测到超过 1.0°C 温升^[14]。

综合分析认为,涨潮时方家山电厂和一厂温排水沿岸朝东南方向展布,绕过三厂后受海岸线地形影响转向西南,由于狭管效应流速加快,温排水影响宽度变窄。三厂温排水在湾内温度较高,出湾后与一厂和方家山电厂温排水混合向南流动,二厂温排水受北侧旋转流影响部分向北进入湾内,溢出湾后与北侧温排水混合向西南贴岸展布,最远延伸至二厂排水口南侧湾内。落潮时,二厂温排水向东北方向流动,由于二厂北侧浅滩裸露且流速相对较低,水体整体东移,影响宽度加大,到三厂湾口附近与三厂温排水混合,绕过三厂后由于地形开阔流速减慢,随海岸线向西北流动与方家山电厂和一厂温排水混合,影响宽度由方家山电厂排水口扩展至白塔山西缘。

4 讨论与结论

4.1 讨论

核电运行的机组数量、功率、周边海域的潮汐状态^[15]、气象条件^[16]是影响周边海域升温范围和幅度的主要因素。当周边海域海岸线变化较大时,也会影响温排水的分布特征^[17]。秦山核电站所在的杭州湾海域南北两岸经济发达,用地需求较大。在自然条件和人类活动的共同作用下,杭州湾沿岸地理条件发生了巨大变化,海岸线变迁较为剧烈^[18-19]。以 1986 年秦山核电站运行前作为调查基础数据,研究 36 a 间杭州湾海岸线变化情况(图 8)。研究发现杭州湾的海岸线变化具有向海扩张的趋势,北岸变化较小,南岸变化较大,从 1986—2022 年杭州湾海域面积减少超过 760 km²。海岸线变迁达到一定规模后会改变局部海域海水的流速、

流向和海域冲淤变化,从而影响温度场的分布。本次研究从秦山核电站运行前(1986 年)到 9 台机组运行后(2022 年),跨度 36 a,本底温度的提取未考虑杭州湾海岸线变迁的具体影响,对温升提取结果造成一定的偏差。

核电站温排水是在有限空间范围内连续变化水体的扩散过程,温排水受季节、潮汐影响,其温度场呈一定规律性变化,特别在冬夏两季温升呈现不同的分布特征。因此,《核动力厂取排水环境影响评价指南(试行)》(HJ 1037—2019)指出,为获取最大的温升影响范围,核电站运行后需开展冬夏季大、中、小潮条件下各个潮态的温排水监测。卫星遥感方法虽具有监测范围广的优势,但受重访周期和空间分辨率的限制,难以针对研究区开展高精度的调查和特定时段的动态监测,无法对核电周边海域不同季节、不同潮态情况下温排水的分布范围进行有效监控,因而在核电温排水监测应用中受到一定程度的限制。

同时,因杭州湾是闻名世界的强潮海湾,涨落潮流速较大,温排水热量扩散较快,秦山核电站温排水影响范围和温升等级均较小,因空间分辨率的限制和混合像元的影响,卫星遥感监测无法有效监测到排水口处小于 0.01 km² 的 4 ℃ 以上温升分布,无法全面满足《海水水质标准》(GB 3097—1997)的评价要求。

航空遥感具有空间分辨率高、机动性强、反应快等优点,可针对不同潮态的温排水变化特征进行精细研究,后续研究可补充航空遥感监测方法,针对典型季节和典型潮态开展温排水航空遥感监测^[20-21]。

4.2 结论

本文基于卫星遥感数据,对其热红外波段进行了温度反演,研究分析了秦山核电周边海域温度分布变化情况。通过对核电站周边海域温度场信息提取和对比分析得出:

1) 秦山核电运行前周边海域温度较为均匀,除自然增温外,无明显温度分异现象。沿岸南北方向上海域温度几乎无变化,东西方向存在较小的温度梯度,离岸 10 km 范围内温度变化不超过 0.6 ℃。

2) 核电运行后,受温排水影响,周边海域呈现水温分异现象,不同季节和不同潮汐条件下,温升分布特征不同。温升的分布受潮汐控制,呈现出贴岸分布的特征。涨潮时,一厂和方家山电厂温排水整体向东南方向展布,过三厂后受海岸线地形影响转向西南,落潮则反之。同季节条件下,落潮时刻的温升范围总体要大于涨潮;同潮态条件下,夏季温升范围整体上大于冬季。

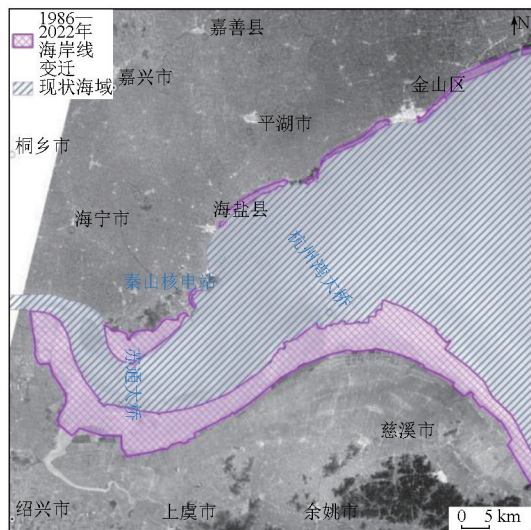


图 8 秦山核电站所在杭州湾海域不同时期海岸线解释
Fig.8 Interpretation of the coastlines changes in Hangzhou Bay at different time

3) 因排水口和取水口均位于涨落潮的通道上,取水口均监测到处于温排水影响范围内的情况,一厂取水口因距离方家山电厂和一厂排水口较近,涨潮时刻表层海水存在 1.0 °C 以上温升。

4) Landsat 系列数据基本满足秦山核电周边海域温度分布研究需求,受重访周期和空间分辨率的限制,难以针对特定时段和小于 0.1 km² 的 4 °C 以上温升开展高精度的动态监测。为全面满足环境影响后评价的要求,可开展航空热红外遥感监测。

5) 本文本底温度取值未考虑杭州湾海岸线变迁和海域环境自然增温的影响,对温升提取结果造成一定的偏差,后续工作有待进一步研究。

参考文献 (References):

- [1] 高宁,韩瑞,赵懿珺,等.基于减缓温排水热影响的滨海核电排水明渠改造优化研究[J].给水排水,2022,58(10):109-115.
Gao N, Han R, Zhao Y J, et al. Research on the optimization and modification about the water discharge channel of a coastal NPP based on mitigating the heat effects of its thermal effluent[J]. Water and Wastewater Engineering, 2022, 58(10): 109-115.
- [2] 刘永叶,陈晓秋.核电厂温排水热影响研究的建议[J].辐射防护通讯,2011,31(6):20-23.
Liu Y Y, Chen X Q. Suggestion of the study on thermal impact of thermal discharge from NPPs[J]. Radiation Protection Bulletin, 2011, 31(6): 20-23.
- [3] 陈晓秋,商照荣.核电厂环境影响审查中的温排水问题[J].核安全,2007,6(2):46-50.
Chen X Q, Shang Z R. The issue of thermal discharge in reviewing the environmental impacts report for nuclear power plant[J]. Nuclear Safety, 2007, 6(2): 46-50.
- [4] 张建永,梁春利,石海岗,等.热红外遥感技术在核电站温排水监测中的应用[J].铀矿地质,2021,37(3):534-540.
Zhang J Y, Liang C L, Shi H G, et al. Application of thermal infrared remote sensing in monitoring heated water discharge of nuclear power plant[J]. Uranium Geology, 2021, 37(3): 534-540.
- [5] 王虎.基于卫星热红外数据的田湾核电温排水监测[J].地理空间信息,2022,20(5):48-53.
Wang H. Thermal discharge monitoring of Tianwan nuclear power plant based on satellite thermal infrared data[J]. Geospatial Information, 2022, 20(5): 48-53.
- [6] 董双发,范晓,石海岗,等.基于 Landsat8 和无人机的福清核电温排水分布研究[J].自然资源遥感,2022,34(3):112-120. doi:10.6049/zrzyyg.2021258.
Dong S F, Fan X, Shi H G, et al. Study on distribution of thermal discharge in Fuqing nuclear power plant based on Landsat8 and UAV[J]. Remote Sensing for Natural Resources, 2022, 34(3): 112-120. doi:10.6049/zrzyyg.2021258.
- [7] 秦山核电厂扩建项目(方家山核电工程)温排水数模计算和分析报告[R].浙江省水利河口研究院,2014.
Thermal discharge numerical simulation calculation and analysis report of Qinshan nuclear power plant expansion project (Fangjia-shan nuclear power project) [R]. Zhejiang Institute of Hydraulics and Estuary, 2014.
- [8] Barsi J A, Barker J L, Schott J R. An atmospheric correction parameter calculator for a single thermal band earth-sensing instrument [C]// IGARSS 2003—2003 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. IEEE, 2005: 3014-3016.
- [9] Barsi J A, Schott J R, Palluconi F D, et al. Validation of a web-based atmospheric correction tool for single thermal band instruments [C]. Earth Observing Systems X, 2005, 5882: 1-6.
- [10] Jiménez-Muñoz J C, Sobrino J A. A generalized single-channel method for retrieving land surface temperature from remote sensing data[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2003, 108(D22): 4688.
- [11] Qin Z H, Karnieli A, Berliner P. A mono-window algorithm for retrieving land surface temperature from Landsat TM data and its application to the Israel-Egypt border region [J]. International Journal of Remote Sensing, 2001, 22(18): 3719-3746.
- [12] 覃志豪, Zhang M H, Karnieli A, 等.用陆地卫星 TM6 数据演算地表温度的单窗算法[J].地理学报,2001,56(4):456-466.
Qin Z H, Zhang M H, Karnieli A, et al. Mono-window algorithm for retrieving land surface temperature from Landsat TM6 data[J]. Acta Geographica Sinica, 2001, 56(4): 456-466.
- [13] 涂梨平,周斌.利用 Landsat/TM 热红外数据进行陆面温度反演的比较[J].科技通报,2007,23(3):326-331.
Tu L P, Zhou B. A comparative study of algorithms for estimating land surface temperature from Landsat/TM data [J]. Bulletin of Science and Technology, 2007, 23(3): 326-331.
- [14] 陈望.温排水效应对秦山核电厂1号机组的影响及应对措施[J].中国核电,2021,14(1):114-119.
Chen W. Influence of warm water discharge on Qinshan nuclear power plant and its countermeasures [J]. China Nuclear Power, 2021, 14(1): 114-119.
- [15] 王冠琳,熊学军.田湾海域温排水分布及变化规律分析[J].海洋科学进展,2013,31(1):69-74.
Wang G L, Xiong X J. Distribution and variation of warm water discharge in the coastal area of Tianwan [J]. Advances in Marine Science, 2013, 31(1): 69-74.
- [16] 朱利,王桥,吴传庆,等.温排水遥感监测原理与示范[M].北京:中国环境出版社,2016:147-154.
Zhu L, Wang Q, Wu C Q, et al. Principle and application of thermal discharge monitoring using remote sensing [M]. Beijing: China Environmental Science Press, 2016: 147-154.
- [17] 石海岗,梁春利,张建永,等.岸线变迁对田湾核电站温排水影响遥感调查[J].国土资源遥感,2020,32(2):196-203. doi:10.6049/zrzyyg.2020.02.25.
Shi H G, Liang C L, Zhang J Y, et al. Remote sensing survey of the influence of coastline changes on the thermal discharge in the vicinity of Tianwan nuclear power station [J]. Remote Sensing for Land and Resources, 2020, 32(2): 196-203. doi:10.6049/zrzyyg.2020.02.25.
- [18] 黄赛花,章琪宇,严军,等.杭州湾围垦工程引起的岸线变化对水环境的影响分析[J].华北水利水电大学学报(自然科学版),2021,42(2):32-41.
Huang S H, Zhang Q Y, Yan J, et al. Impact of shoreline changes caused by Hangzhou Bay reclamation project on water environment

- [J]. Journal of North China University of Water Resources and Electric Power (Natural Science Edition), 2021, 42(2): 32-41.
- [19] 王力彦, 邢喆, 侯辰, 等. 1990—2017 年杭州湾大陆岸线时空变迁分析[J]. 海洋通报, 2020, 39(4): 481-487.
- Wang L Y, Xing Z, Hou C, et al. The spatio-temporal change analysis of mainland coastline in Hangzhou Bay from 1990 to 2017 [J]. Marine Science Bulletin, 2020, 39(4): 481-487.
- [20] 贺佳惠, 梁春利, 李名松. 核电站近岸温度场航空热红外遥感测量数据处理研究[J]. 国土资源遥感, 2010, 22(3): 51-53. doi: 10.6046/gtzyyg.2010.03.11.
- He J H, Liang C L, Li M S. Temperature field airborne thermal remote sensing survey of the alongshore nuclear power station [J]. Remote Sensing for Land and Resources, 2010, 22(3): 51-53. doi: 10.6046/gtzyyg.2010.03.11.
- [21] 王祥, 王新新, 苏岫, 等. 无人机平台航空遥感监测核电站温排水——以辽宁省红沿河核电站为例[J]. 国土资源遥感, 2018, 30(4): 182-186. doi: 10.6046/gtzyyg.2018.04.27.
- Wang X, Wang X X, Su X, et al. Thermal discharge monitoring of nuclear power plant with aerial remote sensing technology using a UAV platform: Take Hongyanhe nuclear power plant, Liaoning Province, as example [J]. Remote Sensing for Land and Resources, 2018, 30(4): 182-186. doi: 10.6046/gtzyyg.2018.04.27.

A study of temperature distribution in the sea area around Qinshan Nuclear Power Plant based on satellite remote sensing

SHI Haigang^{1,2}, LIANG Chunli^{1,2}, XUE Qing^{1,2}, ZHANG En^{1,2}, ZHANG Xinyi^{1,2},
ZHANG Jianyong^{1,2}, ZHANG Chunlei¹, CHENG Xu^{1,2}

(1. Airborne Survey and Remote Sensing Center of Nuclear Industry, Shijiazhuang 050002, China; 2. Hebei Key Laboratory of Airborne Survey and Remote Sensing Technology, Shijiazhuang 050002, China)

Abstract: This study investigated the temperature distribution in the sea area around the Qinshan Nuclear Power Plant using Landsat thermal infrared remote sensing data. The results indicate a strong correlation between the inversion results of temperature and the measured data, suggesting reliable inversion results. Before the operation of the nuclear power plant, the surrounding sea area exhibited relatively uniform temperature, with no significant temperature difference except for natural warming. Furthermore, the temperature along the coast remained almost unchanged in the north-south direction and displayed slight temperature gradients in the east-west direction, with temperature variation not exceeding 0.6 °C within 10 km from the coast. After the operation of the nuclear power, the surrounding sea area showed temperature differentiation. The distribution characteristic of thermal discharge was closely related to tides and seasons. In the same season, the increased amplitude of the temperature during ebb tides generally exceeded that during flood tide. Under the same tidal condition, the increased amplitude of the temperature in summer typically exceeded that in winter. At a certain water intake of the first plant, the surface seawater manifested a temperature rise of over 1.0 °C during flood tide. Landsat data generally meet the demand for research on temperature distribution in the surrounding sea area of the Qinshan Nuclear Power Plant, and the distribution of thermal discharge under specific tidal conditions can be investigated using aerial remote sensing monitoring.

Keywords: Qinshan Nuclear Power Plant; thermal discharge; temperature inversion; remote sensing monitoring; tide

(责任编辑: 陈庆)