

蒋正江,王恩国. 基于卫星遥感的某核电站近岸海域温度场分析[J]. 世界核地质科学, 2025, 42(1): 178-186. doi:10.3969/j.issn.1672-0636.2025.01.015

JIANG Zhengjian, WANG Enguo. Analysis on temperature field in the coastal area of a nuclear power plant based on satellite remote sensing[J]. World Nuclear Geoscience, 2025, 42(1): 178-186 (in Chinese).

## 基于卫星遥感的某核电站近岸海域温度场分析

蒋正江,王恩国

中核霞浦核电有限公司, 福建 宁德 355199

**摘要** 以福建某核电站近岸海域为研究对象, 采用 Landsat-8/9 TIRS 热红外卫星遥感数据, 分析核电运行前后不同季节的温度场分布特征。研究结果显示, 基于辐射传输方程算法的 Landsat-8/9 TIRS 数据温度反演结果具有较高的可靠性; 核电站运行前, 核电厂址附近海域不同季节温度场特征存在明显差异, 冬季温度场总体较为均一, 南部略高于北部, 东部略高于西部, 取水口附近水温略高于排水口, 厂址周边 4 km 范围内最大温差约 1.5 °C, 2 km 范围内最大温差约 1.0 °C, 夏季区域温差较大, 整体呈现出北高南低、西高东低的特征, 厂址周边 4 km 范围内最大温差约 5.5 °C, 2 km 范围内最大温差约 2.5 °C, 且局部分布较为紊乱, 排水口附近水温高于取水口 1.0~1.5 °C; 核电站运行后, 区域温度场特征与运行前基本一致, 但排水口出现明显高温特征, 最大超出周边 3.0 °C, 冬季高温强度和面积均大于夏季, 说明温排水排放对附近海域温度场的影响冬季强于夏季; 潮流流向影响温度场的局部分布, 温排水的扩散方向与潮流流向相关。Landsat-8/9 TIRS 数据基本满足区域温度场分布研究需求, 但难以实现全潮态温排水监测。

**关键词** 海表温度; 热红外; 卫星遥感; 温排水

**中图分类号** X87 **文献标志码** A **文章编号** 1672-0636 (2025) 01-0178-09

## Analysis on temperature field in the coastal area of a nuclear power plant based on satellite remote sensing

JIANG Zhengjian, WANG Enguo

CNNP Xiapu Nuclear Power Co., Ltd, Ningde 355199, China

**Abstract:** This article made a temperature field analysis in a nearshore waters of a nuclear power plant in Fujian Province, and uses Landsat-8/9 TIRS thermal infrared satellite remote sensing data was used to study the temperature field distribution characteristics in different seasons before and after nuclear power operation. The research results show that the temperature inversion results of Landsat-8/9 TIRS data based on the radiative transfer equation algorithm have high reliability. Before the operation of nuclear power plants, there were significant differences in temperature field characteristics in different seasons in the sea area near the nuclear power plant site. In winter, the temperature field was generally more uniform, slightly higher in the south than in the north and slightly higher in the east than in the west. The water temperature near the water intake was slightly higher than that near the drainage outlet. The maximum temperature difference within 4 km of the plant site was about 1.5 °C, and within 2 km was about 1.0 °C. In summer, there was a large

收稿日期: 2024-12-15 改回日期: 2025-01-14

第一作者: 蒋正江, 男, 1990年生, 工程师, 主要从事核电厂周围环境监测研究。E-mail: jiangzj01@cnnp.com.cn

Received date: 2024-12-15 revised date: 2025-01-14

First author: JIANG Zhengjiang, male, born in 1990, engineer, focusing on environmental monitoring around nuclear power plants. E-mail: jiangzj01@cnnp.com.cn

temperature difference in the region, showing the characteristics of being higher in the north and lower in the south, and higher in the west and lower in the east. The maximum temperature difference within 4 km of the plant site was about 5.5 °C, and within 2 km was about 2.5 °C, and some parts were distributed in a disorderly manner. The water temperature near the drainage. After the operation of the nuclear power plant, the characteristics of the regional temperature field are basically the same as before, but there are obvious high-temperature bright spots at the drainage outlet, with a maximum temperature exceeding the surrounding area by 3.0 °C. The intensity and area of the high-temperature bright spots in winter are greater than those in summer, indicating that the impact of thermal drainage discharge on the temperature field in the nearby sea area is stronger in winter than in summer. The flow direction of the current affects the local distribution of the temperature field, and the diffusion direction of the warm water discharge is related to the flow direction of the current. The Landsat-8/9 TIRS data basically meet the needs of regional temperature field distribution research, but it is difficult to realize the monitoring of full tidal temperature and drainage.

**Keywords:** sea surface temperature; thermal infrared; satellite remote sensing; warm drainage

核电作为一种高效且清洁的能源,以其高能量密度、大单机功率和高效的土地利用等优势,在保障能源供应安全、优化电力结构以及推动可持续发展方面扮演着关键角色。截至 2024 年 6 月,我国投入商业运行的核电机组数量已达 56 台,全部位于沿海地带,其额定装机容量位列世界第三,仅次于美国和法国。核电站运行过程中,为了维持发电机组的冷却,需要不断地抽取大量海水,并在使用后向附近海域排放温排水。这些温排水在海洋中扩散,形成相对高温的区域,对周围的水体环境和生态系统产生一定的影响<sup>[1-3]</sup>。此外,如果冷却水的温度过高,不仅会降低发电机组的效率,严重时甚至可能导致机组停运<sup>[4]</sup>。鉴于此,对核电站附近海域的温度场进行监测,对于保护海洋环境和支持核电的安全运行具有极其重要的意义。

目前,海洋温度测量主要采用数学模拟、物理模拟、海面实测和遥感监测四种方法<sup>[5]</sup>。数学模拟和物理模拟由于难以实时模拟复杂的气象条件和海况,通常不适用于监测需求,而更多地用于预测预报。海面实测虽然能够精确获取单点温度数据,但在大面积协同观测方面存在局限性<sup>[6]</sup>,难以获取反映温排水分布的场数据,因此其主要作用在于验证数学模拟和遥感监测的结果。热红外卫星遥感技术因其观测范围广、同步性好、成本低和现场作业风险小等优势,被广泛应用于数学模拟的原型观测和监测工作中<sup>[7]</sup>。

星载热红外传感器的空间分辨率通常在几十米到几千米之间。例如,NOAA-AVHRR 和

MODIS 的热红外波段分别具有 1.1 km 和 1 km 的空间分辨率,这些低分辨率的数据在大尺度监测中有效<sup>[8]</sup>,但在核电站温排水影响海域的精细监测上,难以满足精度要求。研究者利用 HJ-1B、TM/ETM、CBERS-04 和 GF-5 等卫星的热红外数据在核电站附近海域进行了温度场监测研究,证实这些数据的高精度和适用性<sup>[9-14]</sup>,然而,这些卫星目前已难以获取合格的热红外数据。近年来,许多学者开始使用 Landsat-8 TIRS 和 Landsat-9 TIRS 数据来研究核电站温排水的影响<sup>[15-18]</sup>。这两颗卫星分别于 2013 年 2 月 11 日和 2021 年 9 月 27 日发射,具有相同的空间分辨率(100 m)和重访周期(16 d),但它们的重访周期存在 8 d 的偏移。此外,Landsat-9 TIRS 的辐射精度(14 位量化)略高于 Landsat-8 TIRS(12 位量化)<sup>[19]</sup>,使得其在温度监测方面具有更高的数据质量。这些研究表明,Landsat-8/9 TIRS 数据在核电站附近海域的温度场监测中具有重要作用,为温排水热扩散研究提供有力的数据支持。

本研究旨在运用热红外遥感技术,通过分析 8 期 Landsat-8/9 TIRS 数据,深入探讨福建某核电站在运行前后以及不同季节条件下,近岸海域温度场的分布特征,以期为进一步的温排水排放监测提供科学依据和参考信息。

## 1 研究区及数据源

### 1.1 研究区概况

本研究区域位于福宁湾海域,该地区属于中亚热带季风湿润气候,具有明显的冬夏季风交替

特征,四季变化分明,年平均气温介于 16 至 19 °C 之间。研究区海域属于强潮水域,特点是潮位较高、潮差较大,呈现规则性的半日潮型<sup>[20]</sup>。潮流的流向受到湾顶地形的显著影响,呈现出 EW 向的往复流特性。在涨潮期间,外海的涨潮流在湾顶东侧分叉,一部分潮流绕过北侧的排水东堤,流入长表岛与短表岛之间的水域,少量水流则通过厂址西侧的水道进入南部水域;另一部分潮流则绕过南侧的取水导流堤,流入长表岛南部的海域。而在落潮期间,潮流的流动过程则相反。

1.2 数据源

Landsat-8 和 Landsat-9 卫星搭载的 TIRS

传感器均配备了两个热红外通道,分别是第 10 波段(10.6 至 11.9 μm)和第 11 波段(11.5 至 12.5 μm)。由于 Landsat-8 的第 11 波段存在严重的条带问题,数据质量不及第 10 波段,因此在本研究中,选择第 10 波段进行数据分析。在考虑核电运行状态、季节变化以及受限于气象条件导致可用数据较少的情况下,本文分别选取核电运行前、后各 4 期 Landsat-8/9 TIRS 数据(表 1)。卫星原始数据从美国地质调查局地球资源观测与科学中心(USGS/EROS)的地球探索者网站(<http://earthexplorer.usgs.gov/>)下载获得。

表 1 卫星遥感数据源概况

Table 1 Overview of satellite remote sensing data sources

数据类型	波段范围/μm	空间分辨率/m	获取时间	运行工况	潮态
Landsat-8 TIRS	B10: 10.6~11.9	100	2018-12-17 10: 26	未运行	落潮
Landsat-8 TIRS	B10: 10.6~11.9	100	2022-07-21 10: 26	未运行	落潮
Landsat-9 TIRS	B10: 10.6~11.9	100	2022-07-29 10: 26	未运行	涨潮
Landsat-8 TIRS	B10: 10.6~11.9	100	2023-01-29 10: 26	未运行	涨潮
Landsat-9 TIRS	B10: 10.6~11.9	100	2023-12-07 10: 26	机组运行	落潮
Landsat-8 TIRS	B10: 10.6~11.9	100	2023-12-31 10: 26	机组运行	涨潮
Landsat-8 TIRS	B10: 10.6~11.9	100	2024-07-10 10: 26	机组运行	涨潮
Landsat-9 TIRS	B10: 10.6~11.9	100	2024-08-03 10: 26	机组运行	落潮

2 数据处理

2.1 数据预处理

对获得的卫星遥感数据利用公式(1)进行辐射定标:

$$L_{\lambda} = gain * DN + bias \quad (1)$$

式(1)中: $L_{\lambda}$ —辐射亮度,  $W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1} \cdot \mu m^{-1}$ , 由传感器接受到的大气顶层辐射; gain—增益参数; bias—偏移量, gain 和 bias Landsat-8 TIRS 分别取值 0.000 334 2 和 0.1, Landsat-9 TIRS 分别取值 0.000 38 和 0.1。

2.2 温度反演

Landsat 8/9 TIRS 数据进行海表温度反演,常用的方法包括辐射传输方程法、单窗算法、单通道算法和劈窗算法<sup>[21-22]</sup>。其中,辐射传输方程法因其对海表温度反演结果的较高可靠性而受到研究者的青睐<sup>[23-24]</sup>。卫星传感器接收到的热红外辐射亮度值由 3 个主要部分构成:1)大气向上辐射亮度;2)地面

的真实辐射亮度;3)经过大气层后到达卫星传感器的能量。具体来说,地面的真实辐射亮度是由同温度下黑体的辐射亮度值与地表比辐射率的乘积决定的。这一过程可用辐射方程表示<sup>[6]</sup>:

$$L_{\lambda} = [\epsilon_{\lambda} * L_{\lambda}(T_s) + (1 - \epsilon_{\lambda}) * L_{\lambda atm \downarrow}] * \tau + L_{\lambda atm \uparrow} \quad (2)$$

式(2)中: $\epsilon_{\lambda}$ —地表的比辐射率; $T_s$ —地表温度, K; $L_{\lambda}(T_s)$ —温度为  $T_s$  时的黑体辐射,  $W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1} \cdot \mu m^{-1}$ ;  $L_{\lambda atm \downarrow}$ —大气下行辐射,  $W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1} \cdot \mu m^{-1}$ ;  $L_{\lambda atm \uparrow}$ —大气上行辐射,  $W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1} \cdot \mu m^{-1}$ ;  $\tau$ —地表和传感器之间的大气透射率。

对式(2)变形,可以得到温度为  $T_s$  时的黑体辐射  $L_{\lambda}(T_s)$ :

$$L_{\lambda}(T_s) = [L_{\lambda} - L_{\lambda atm \uparrow} - (1 - \epsilon_{\lambda}) * L_{\lambda atm \downarrow} * \tau] / (\epsilon_{\lambda} * \tau) \quad (3)$$

式(3)中: $L_{\lambda atm \uparrow}$ 、 $L_{\lambda atm \downarrow}$  和  $\tau$  可根据卫星过境时刻核电厂气温、气压和湿度等观测数据结合 MODTRAN 模型模拟计算,附近海水  $\epsilon_{\lambda}$  可取值 0.97。

根据普朗克定律求表温度  $T_s$ , 公式为<sup>[16]</sup>:

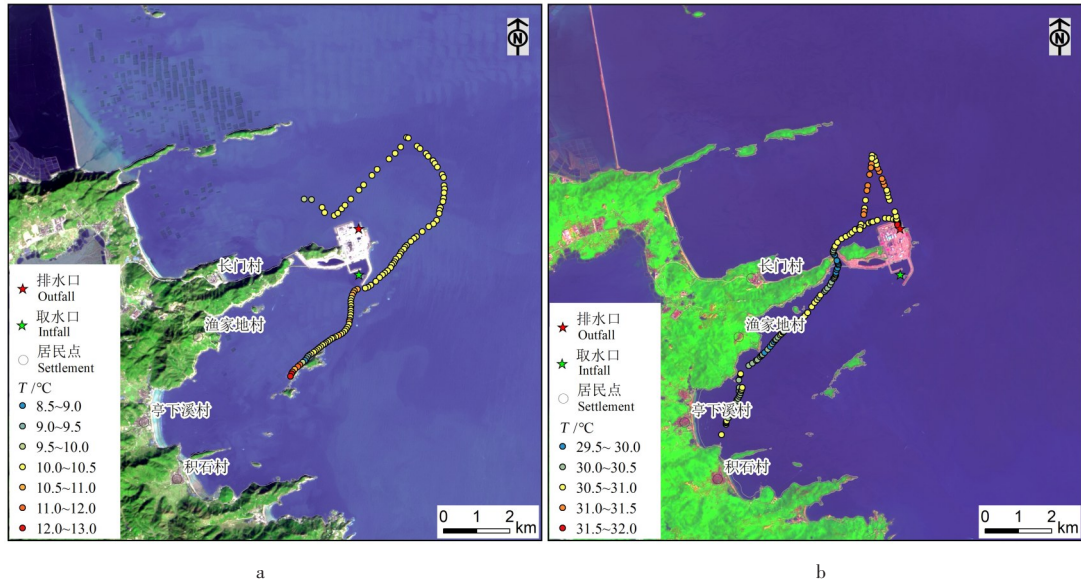
$$T_s = K_2 / \ln(K_1 / L_\lambda (T_s) + 1) \quad (4)$$

式(4)中:  $K_2$  和  $K_1$  是常数,  $W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1} \cdot \mu m^{-1}$ ,  $K$ 。Landsat-8 TIRS 分别取值 774.885 3 和 1 321.078 9, Landsat-9 TIRS 分别取值 779.028 4 和 1 329.240 5。

### 2.3 温度反演可靠性分析

为了确保温度反演算法的准确性,于 2023 年 1 月 29 日和 2024 年 8 月 3 日,分别在 Landsat-8

TIRS 和 Landsat-9 TIRS 卫星过境前后一小时,对核电站周边海域进行近同步的海温实地测量。测量所使用的仪器为 JENCO 牌 6010 定制版水质测量仪,经过标定,该仪器的测量精度达到 0.1 °C。在测量过程中,以 50 至 100 m 的间隔进行温度测量,最终分别收集到 108 个和 133 个测温数据点(图 1)。



a—2023 年 1 月 29 日; b—2024 年 8 月 3 日。

图 1 近同步海温实地测量点位

Fig. 1 Field measurement of near-synchronous SST

2023 年 1 月 29 日 Landsat-8 TIRS 反演结果与实地测量值之间的标准误差为 0.10 °C, 平均误差 0.12 °C; 2024 年 8 月 3 日 Landsat-9 TIRS 反演结果与实地测量值之间标准误差为 0.24 °C, 平均误差 0.21 °C。利用最小二乘法对反演结果与实测数据进行线性拟合(图 2)。从两次实测验证结果上看, 温度反演精度整体优于 0.6 °C, 且线性拟合程度较高, 因此温度反演结果是可靠的。

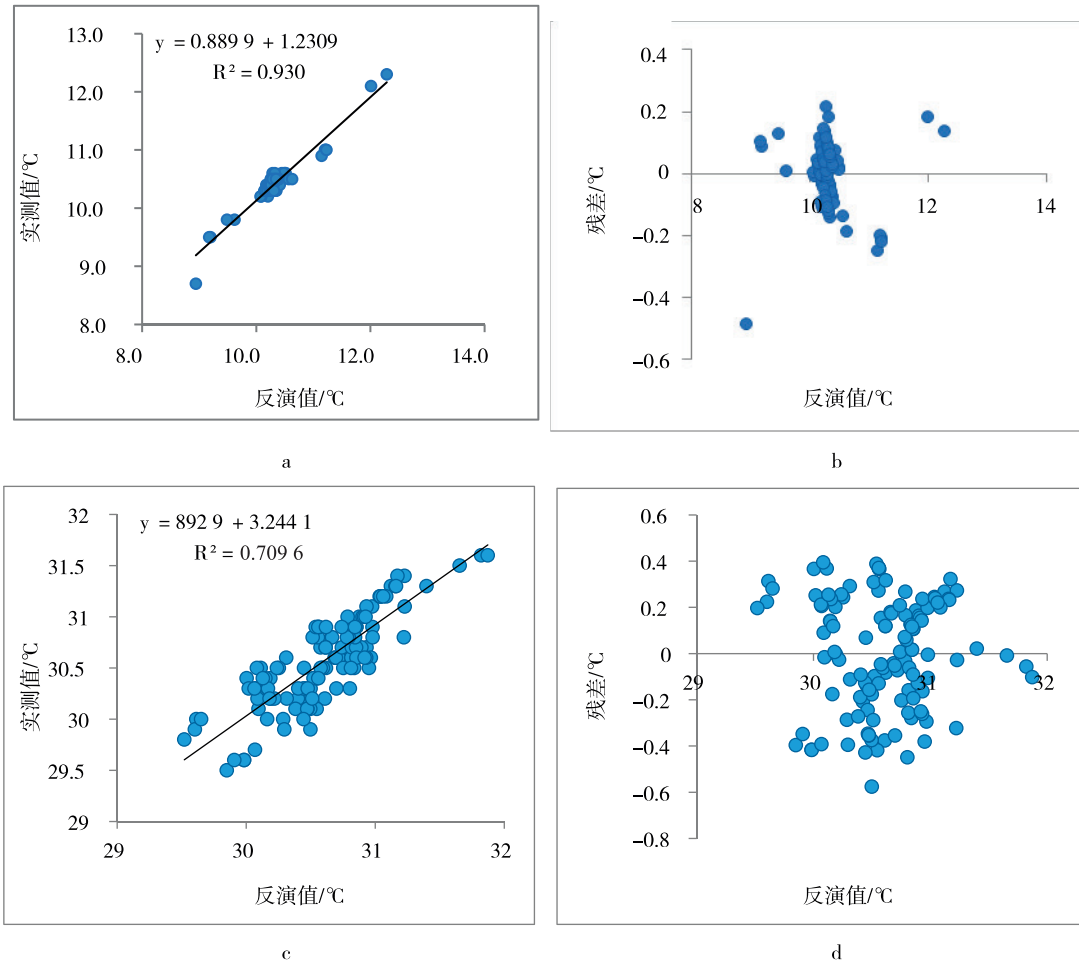
## 3 温度场特征分析

### 3.1 核电站运行前温度场

研究区在冬季, 海面温度普遍较低, 整体呈现出东部温度高于西部、南部温度高于北部的分布格局(图 3a、b)。在 2018 年 12 月 17 日, 海面温度范围介于 14.5 至 19.5 °C 之间, 大部分区域温度集中在 15.0 至 16.0 °C, 平均温度 15.6 °C。在 2023 年 1 月 29 日, 温度范围 9.5 至

14.5 °C, 主要分布在 10.0 至 11.0 °C, 平均温度 10.7 °C。近岸水域存在明显的相对高温(低)区, 近岸南侧和东侧水域存在 100 至 200 m 宽的贴岸相对高温区, 温度较周边海域高出 0.5 至 1.0 °C; 北侧和西侧存在 100 至 150 m 宽的贴岸相对低温区, 温度偏低 0 至 0.5 °C。核电厂址周边, 除了贴岸相对高(低)温区外, 4 km 范围内的温度差异不超过 1.0 °C, 2 km 范围内不超过 0.5 °C, 显示出温度场的均一性。排水口附近温度略高于取水口, 温差在 0 至 0.5 °C 之间, 温度场未显现出涨落潮的特征。

夏季, 海面温度较高, 温度场特征与冬季相反, 整体表现为西部温度高于东部、北部温度高于南部的分布趋势(图 3c、d)。在 2022 年 7 月 21 日, 区域温度范围在 24.0 至 33.0 °C 之间, 大部分集中在 26.0 至 30.0 °C, 平均温度为 28.1 °C, 厂址西北侧存在直径约 500 m 的相对低温区, 温度低于周边 0.5 至 1.0 °C。在 2024 年



a—2023年1月29日线性拟合图；b—2023年1月29日残差图；c—2024年8月3日线性拟合图；d—2024年8月3日残差图。

图2 温度实测值和反演值线性拟合图

Fig. 2 Linear fitting of measured and inverted temperature values

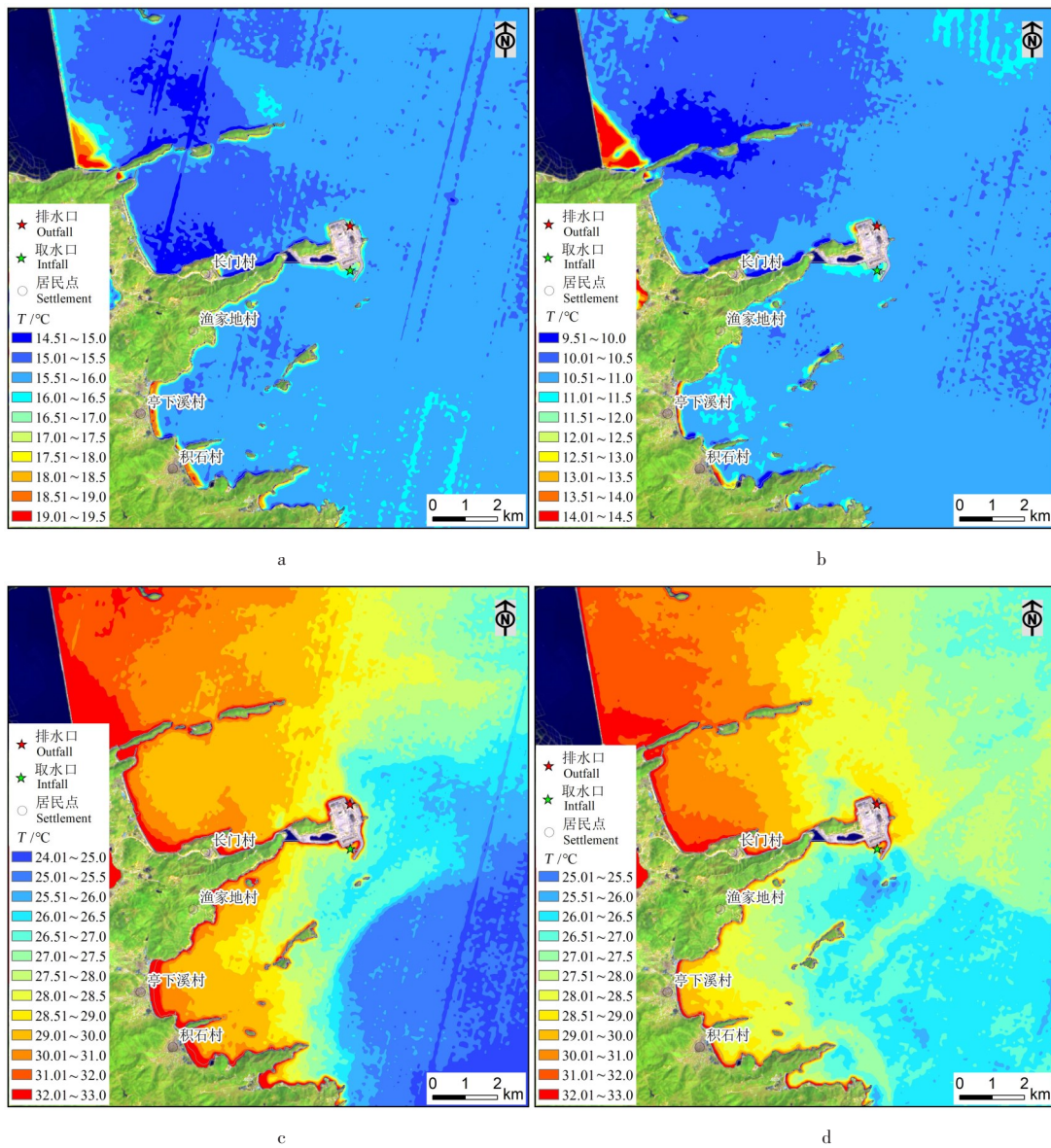
7月29日,温度范围在25.0至33.0℃之间,主要集中在27.5至29.0℃,平均温度为28.3℃,厂址西北侧存在长约2 km,宽约800 m的相对低温区,低于周边1.0至1.5℃,南侧则有长约3 km,宽约1.6 km的相对低温区,低于周边1.0至2.0℃。近岸水域存在100至300 m宽的贴岸相对高温区,温度高出1.0至2.0℃。核电厂址周边,4 km范围内温差约为5.5℃,2 km范围内约为2.5℃,且局部温度分布较为紊乱。排水口附近温度比取水口高1.0至1.5℃。局部温度场受潮流作用明显,在涨潮时,东部低温区明显向西部流动挤压,厂址北部和南部的等温线向西南下凹;落潮时,西部高温区明显向东部流动扩散,等温线向东北方向凸出。

### 3.2 核电站运行后温度场

核电站运行后,区域温度场分布特征和局

部温度场潮流影响特征总体上较运行前没有显著变化,主要差异在于排水口附近出现小范围的高温特征,这一现象在冬季相较于夏季更为突出。表明核电站运行对周边海域的温度分布有一定影响,尤其是在排水口附近,但这种影响在空间上相对较小,且在不同季节和潮汐条件下表现出不同的特征。

在冬季2023年12月7日落潮期间(图4a),核电站运行产生的温排水排放和潮流共同作用,导致排水口附近出现明显的高温异常区域,温度比周边海域高出3.0至3.5℃,温升的羽迹向北东方向扩散,最远可达约2.2 km。而在同年12月31日的涨潮期间(图4b),排水口附近的高温异常区域温度比周边海域高出2.5至3.0℃,温升羽迹则呈北西方向延伸,最远达到1.2 km。



a—2018年12月17日; b—2023年1月29日; c—2022年7月21日; d—2022年7月29日。

图3 核电运行前热红外温度场

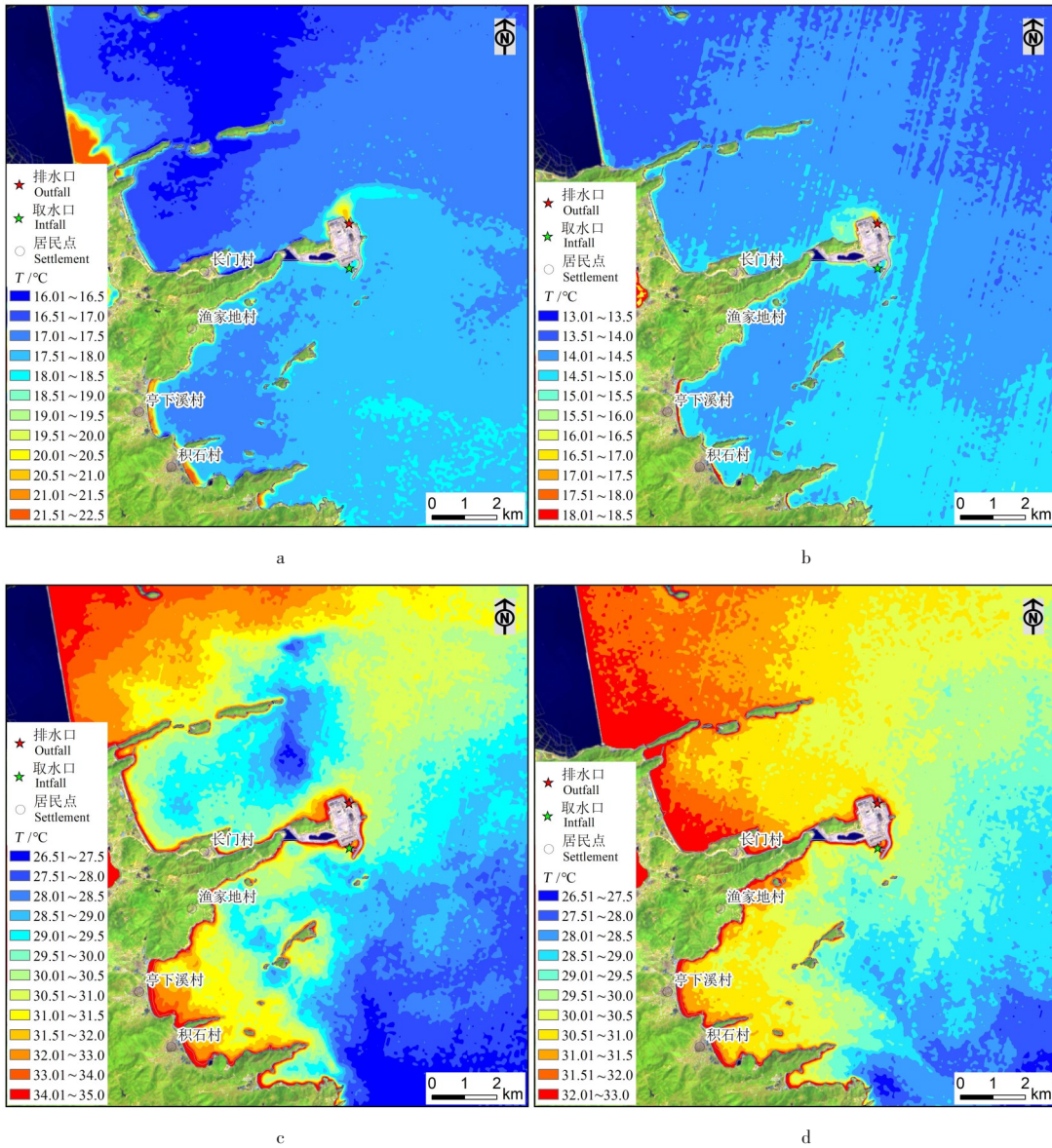
Fig. 3 Thermal infrared temperature field before nuclear power operation

夏季的情况则有所不同。2024年8月3日落潮时(图4d),排水口附近的高温异常范围较小,温度比周边海域仅高出约1.0℃,温升羽迹主要向北延伸,最远延伸距离约为500m。7月10日涨潮期间(图4c),排水口附近同样出现小范围的高温异常,温度高出周边约1.0℃,温升羽迹主要向西延伸,最远延伸距离约为800m。

### 4 讨论

1) Landsat-9 TIRS热红外传感器作为Landsat-8 TIRS的升级版,其辐射测量精度和信噪比均有所提升。本研究中采用的反演方法和参数取值

相同,实测试验结果显示:Landsat-8 TIRS的温度反演精度高于Landsat-9 TIRS,与卫星传感器的性能提升预期不符。推测认为:①夏季的气象条件比冬季更为复杂,导致夏季辐射方程参数的精度略低于冬季;②夏季海面温度场较冬季更为复杂,且受潮汐影响的变化较快,本文选取的实测数据与卫星过境时刻的最大时间差约为1h,部分数据可能在卫星过境时已发生显著变化,Landsat-8 TIRS在冬季进行验证,而Landsat-9 TIRS在夏季进行验证导致该结果。为了更准确地评估温度反演精度,建议在不同季节和气象条件下进行多次验证,并且尽可能实现实测数据与卫星过境



a—2023年12月7日；b—2023年12月31日；c—2024年7月10日；d—2024年8月3日。

图4 核电运行后热红外温度场

Fig. 4 Thermal infrared temperature field after nuclear power operation

的同步。

2) 研究区内每年通常仅能采集到几期 Landsat-8/9 TIRS 无云数据, 这难以覆盖冬季和夏季的大、中和小潮的涨急、涨末、落急和落末等所有典型潮态。因此, 仅依靠 Landsat-8/9 TIRS 数据难以实现全潮态温排水监测。

## 5 结论

本研究利用热红外卫星遥感技术, 对核电厂运行前后不同季节的海域温度场特征进行分析, 得出以下结论:

1) 在核电站运行前, 研究海域的季节性温

度场特征表现出显著差异。冬季温度场整体较为均匀, 南部水温略高于北部, 东部略高于西部, 取水口附近水温略高于排水口不超过 0.5 °C。夏季区域温差较大, 整体呈现出北部水温高于南部、西部高于东部的特点, 厂址周边 4 km 范围内的最大温差约为 5.5 °C, 2 km 范围内约为 2.5 °C, 且局部温度分布较为紊乱, 排水口附近的水温比取水口高 1.0 至 1.5 °C。

2) 核电站运行后, 区域温度场特征与运行前大体保持一致, 但排水口附近出现了明显的高温特征, 温度最高可超出周边 3.0 °C。此外, 冬季高温特征的强度和面积均大于夏季, 表明温排水排

放对附近海域温度场的影响在冬季更为显著。

3) 近岸水域存在贴岸的相对高温或低温区域。在夏季, 岸线周边水域的温度普遍高于外围海域; 而在冬季, 岸线阳面(南侧及东侧)的水域温度高于外围, 阴面(北侧及西侧)则低于外围。

4) 潮流流向对温度场的局部分布有显著影响, 温排水的扩散方向与潮流流向密切相关。涨潮期间, 外海温度场明显呈现出向西部流动的挤压特征; 而在落潮期间, 则显示出向外海扩散的特征。

### 参考文献

- 王薇, 何桂萍, 关晓捷, 等. 我国滨海核电厂取排水方式现状及其对海洋生态环境的影响[J]. 浙江大学学报(理学版), 2024, 51(6): 769-780.  
WANG Wei, HE Guiping, GUAN Xiaojie, et al. Research on the water intake and drainage methods of the coastal nuclear power plants in China and the associated impacts on the marine ecological environment [J]. Journal of Zhejiang University (Science Edition), 2024, 51(6): 769-780(in Chinese).
- 李毅, 周大颜, 陈晓磁, 等. 模拟夏季温排水温升对福宁湾常见海洋生物的热耐受性研究[J]. 海洋科学, 2020, 44(12): 61-68.  
LI Yi, ZHOU Dayan, CHEN Xiaoci, et al. Thermal tolerance of common marine organisms in Funing Bay by simulation of temperature increase in summer from thermal drainage[J]. Marine Sciences, 2020, 44(12): 61-68(in Chinese).
- 蔡显岗, 张泽宇, 张路怀, 等. 对核电厂环境影响评价相关问题的探讨[J]. 核安全, 2022, 21(6): 42-46.  
CAI Xiangang, ZHANG Zeyu, ZHANG Luhuai, et al. Discussion on concerns about environmental impact assessment of nuclear power plant[J]. Nuclear Safety, 2022, 21(6): 42-46(in Chinese).
- 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 Wang. Influence of warm water discharge on Qinshan nuclear power plant and its countermeasures [J]. China Nuclear Power, 2021, 14(1): 114-119(in Chinese).
- 王祥, 苏岫, 王林, 等. 滨海核电厂温排水空间分布无人机遥感识别及驱动力分析[J]. 海洋环境科学, 2023, 42(4): 542-549.  
WANG Xiang, SU Xiu, WANG Lin, et al. Unmanned remote sensing identification and driving force analysis of spatial distribution of thermal discharge from coastal nuclear power plant [J]. Marine Environmental Science, 2023, 42(4): 542-549.(in Chinese).
- 张琳敏, 梅格致, 刘明亮, 等. 千岛湖水体表层温度遥感估算方法对比[J]. 遥感学报, 2024, 28(8): 2113-2130.  
ZHANG Linmin, MEI Gezhi, LIU Mingliang, et al. Comparison of lake surface water temperature retrieval algorithms: A case study of Lake Qiandaohu [J]. National Remote Sensing Bulletin, 2024, 28(8): 2113-2130(in Chinese).
- 陈小莉, 段亚飞, 赵懿珺, 等. 基于数值模拟和原型观测联合的电厂温排水影响评价[J]. 水利学报, 2023, 54(1): 94-104.  
CHEN Xiaoli, DUAN Yafei, ZHAO Yijun, et al. Impact assessment of thermal-discharge from power plants based on combination of numerical simulation and prototype observation [J]. Shuili Xuebao, 2023, 54(1): 94-104(in Chinese).
- TANG D L, KESTER D R, WANG Z D, et al. AVHRR satellite remote sensing and shipboard measurements of the thermal plume from the Daya Bay nuclear power station, China [J]. Remote Sensing of Environment, 2003, 84(4): 506-515.
- 吴传庆, 王桥, 王文杰, 等. 利用 TM 影像调查和评价大亚湾温排水热污染[J]. 中国环境调查, 2006, 22(3): 80-84.  
WU Chuanqing, WANG Qiao, WANG Wenjie, et al. Monitoring and Evaluating Therm-water Pollution of Dayawan by TM Images [J]. Environmental Monitoring in China, 2006, 22(3): 80-84(in Chinese).
- 于杰, 李永振, 陈丕茂, 等. 利用 Landsat TM6 数据反演大亚湾海水表层温度[J]. 国土资源遥感, 2009(3): 24-29.  
YU Jie, LI Yongzhen, CHEN Pimao, et al. SST retrieving of date bay from Landsat TM6 [J]. Remote Sensing for Land & Resource, 2009(3): 24-29(in Chinese).
- 陆衍, 阚芑芑. 基于 ETM+ 影像的田湾核电站温排水影响分析[J]. 上海国土资源, 2012, 33(4): 44-47.  
LU Yan, KAN Pengpeng. Influence of warm water discharge from the Tianwan nuclear power plant on sea surface temperature [J]. Shanghai Land & Resource, 2012, 33(4): 44-47(in Chinese).
- 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调查[J]. 中国环境科学, 2014, (34): 1181-1186.  
XU Jing, ZHU Li, JIANG Jian, et al. Monitoring thermal discharge in Daya Bay plant based on thermal infrared band of HJ-1B and TM remote sensing data [J]. China

- Environmental Science, 2014, (34) : 1181-1186 (in Chinese).
- 13 石海岗,梁春利,张建永,等. 基于 CBERS-04 星田湾核电温排水遥感监测研究[J]. 地理空间信息, 2019, 17(12) : 75-80.  
SHI Haigang, LIANG Chunli, ZHANG Jianyong, et al. Monitoring of thermal water discharge of Tianwan nuclear power plant on sea surface temperature using thermal infrared images of CBERS-04 [J]. Geospatial Information, 2019, 17(12) : 75-80 (in Chinese).
- 14 王雅萍,马秀秀,李家国,等. 核电温排水基准温度星地协同提取与分析—以宁德为例[J]. 遥感学报, 2023, 27(8) : 1899-1913.  
WANG Yaping, MA Xiuxiu, LI Jianguo, et al. Satellite-marine synergistic extraction and analysis of reference temperature of thermal plume from nuclear power by taking Ningde as an example [J]. National Remote Sensing Bulletin, 2023, 27(8) : 1899-1913 (in Chinese).
- 15 张晓峰,徐京平,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.  
ZHANG Xiaofeng, XU Jingping, ZHANG Manqi, et al. Distribution of thermal discharge from Tianwan nuclear power plant: Analysis of thermal infrared data from Landsat-8 [J]. Advances in Marine Science, 2019, 37(3) : 518 - 525 (in Chinese).
- 16 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 Jianyong, LIANG Chunli, SHI Haigang, 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 (in Chinese).
- 17 朱欧娜,田义超. 基于 Landsat-8 TIRS 的防城港核电站温排水分布规律研究[J]. 生态科学, 2023, 42(5) : 25-30.  
ZHU Ouna, TIAN Yichao. Study on distribution and change law of temperature and drainage in Fangchenggang nuclear power plant based on Landsat-8 TIRS [J]. Ecological Science, 2023, 42(5) : 25-30 (in Chinese).
- 18 韩涛,张阔,王方,等. 基于 Landsat8 的海阳核电厂周边海域水温监测[J]. 地理空间信息, 2022, 20(09) : 81-85+94.  
HAN Tao, ZHANG Kuo, WANG Fang, et al. Sea surface temperature monitoring around Haiyang nuclear power plant based on Landsat8 [J]. Geospatial Information, 2022, 20(09) : 81-85+94 (in Chinese).
- 19 石海岗,薛庆,章新益,等. 基于遥感的海域环境变化监测分析[J]. 环境监测管理和技术, 2024, 36(1) : 53-56.  
SHI Haigang, XUE Qing, ZHANG Xinyi, et al. Analysis of marine environment change based on remote sensing monitoring [J]. The Administration and Technique of Environmental Monitoring, 2024, 36(1) : 53-56 (in Chinese).
- 20 毕云天,胡日军,陈娟娟,等. 福宁湾及附近海域悬沙粒度与影响因素[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2024, 44(01) : 15-29.  
BI Yuntian, HU Rijun, CHEN Juanjuan, et al. Suspended sediment grain size and influencing factors in Funing bay and its nearby sea areas [J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2024, 44(1) : 15-29 (in Chinese).
- 21 卢响军,许尘璐,郭金金. 基于 Landsat 8 数据的地表温度反演方法对比分析[J]. 干旱环境监测, 2023, 37(3) : 138-144.  
LU Xiangjun, XU Chenlu, GUO Jinjin, et al. Comparison of land surface temperature retrieval algorithms based on Landsat 8 data [J]. Arid Environmental Monitoring, 2023, 37(3) : 138-144 (in Chinese).
- 22 段四波,茹晨,李召良,等. Landsat 卫星热红外数据地表温度遥感反演研究进展[J]. 遥感学报, 2021, 25(8) : 1591-1617.  
DUAN Sibao, RU Chen, LI Zhaoliang, et al. 2021. Reviews of methods for land surface temperature retrieval from Landsat thermal infrared data [J]. National Remote Sensing Bulletin, 25(8) : 1591-1617 (in Chinese).
- 23 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.  
SHI Haigang, LIANG Chunli, ZHANG Jianyong, 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 (in Chinese).
- 24 张春雷,高丽辉,石海岗,等. 田湾核电温排水遥感监测与数模一致性分析[J]. 环境监测管理和技术, 2018, 30(3) : 67-71.  
ZHANG Chunlei, GAO Lihui, SHI Haigang, et al. Consistency analysis on remote sensing monitoring and numerical simulation of cooling water from Tianwan nuclear power plant [J]. The Administration and Technique of Environmental Monitoring, 2018, 30(3) : 67-71 (in Chinese).