

doi: 10.6046/zrzyyg.2021258

引用格式: 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. (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.)

基于 Landsat8 和无人机的福清核电温排水分布研究

董双发<sup>1,2</sup>, 范晓<sup>3</sup>, 石海岗<sup>1,2</sup>, 许莉萍<sup>3</sup>, 章新益<sup>1,2</sup>

(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; 3.福建福清核电有限公司,福州 350318)

摘要: 以福清核电附近海域为研究对象,选取 Landsat8 卫星数据和无人机热红外数据,进行温度反演获取核电附近海域温度空间分布。基于海上测温数据对反演结果进行可靠性验证,研究了核电附近海域温度场的分布变化特征。结果表明:温度反演结果与海上测温数据具有很强相关性,温度反演结果可靠;核电运行前,附近海域温度较为均匀,无明显温度分异与温升现象;核电运行后,周边海域具有明显水温分异现象;不同潮汐、不同季节条件下,温排水的空间分布与规模差别较大,总体上落潮时温升分布范围大于涨潮,夏季温升分布范围大于冬季。

关键词: Landsat8; 无人机; 温度反演; 核电温排水; 遥感监测

中图法分类号: TP 79 文献标志码: A 文章编号: 2097-034X(2022)03-0112-09

0 引言

核电运行过程中,会产生大量的余热,为保证设备安全,需利用循环冷却水将多余热量排放到周边环境<sup>[1]</sup>。周边水体温度升高到一定程度时将改变水体质量,影响各类水生物的生长及繁殖活动<sup>[2]</sup>。当核电取水区域受其影响时,可能会威胁到核电冷却水取水安全。因此,研究核电附近水域温排水的分布具有重要意义<sup>[3]</sup>。

温排水监测的方法主要有数值模拟、大面积实地测量及遥感监测等方法<sup>[4-5]</sup>。热红外遥感技术因同步性好、可重复观测和成本相对较低等优势成为温排水监测的重要方法<sup>[6]</sup>。国内外学者针对传感器热红外通道设置情况,提出了诸如单通道法<sup>[7]</sup>、普适性单窗算法<sup>[8]</sup>、劈窗算法和多通道法<sup>[9]</sup>等温度反演算法。研究者利用这些算法,对水体进行温度反演取得了较高的反演精度,并将其应用于核电附近海域温排水分布调查研究<sup>[10-14]</sup>。无人机航测具备机动灵活、分辨率高的优势,随着无人机技术的逐步成熟及热红外仪器的小型化,该技术正在成为核电厂温排水监测的新趋势<sup>[15-16]</sup>。

目前,基于遥感技术对温排水监测的研究多为卫星过境时刻的结果,对不同季节、不同潮汐状态下的研究结果罕有报道。本次研究选用 Landsat8 和无人机热红外数据,对福清核电附近海域的海表温度开展温度反演,分析不同潮汐、不同季节福清核电附近海域的温度场分布特征,利用无人机监测数据对温排水影响区域的水温分布细节进行遥感监测与分析,旨在促进无人机遥感技术在温排水遥感监测领域的应用。

1 研究区概况

基于2019年12月11日 Landsat8 数据的 B6, B5, B2 波段和全色波段,将影像融合为 15 m 空间分辨率,叠加地理要素后成图,可见福清核电厂位于福建省福清市三山镇南端,东、西、南三面环海,东北侧与陆地连接,周边道路发达,交通较为便利(图1)。厂址共规划6台百万千瓦级核电机组,1—4号机组为二代改进型压水堆机组,5和6号机组为我国自主研发的“华龙一号”核电机组。2014年11月以来,福清核电站1—4号机组相继投产,2021年1月30日全球首台“华龙一号”机组投入商业运行。

收稿日期: 2021-08-19; 修订日期: 2021-11-19

基金项目: 福清核电温排水监测项目“福清核电2020—2023年温排水监测外委服务”(编号: FQOFY-20001816-000)资助。

第一作者: 董双发(1980-),男,学士,研究员,主要从事温排水遥感监测、遥感地质、新技术应用等研究。Email: 13643218698@163.com。

通信作者: 石海岗(1984-),男,硕士,高级工程师,主要从事遥感地质及应用方面工作。Email: 383071766@qq.com。

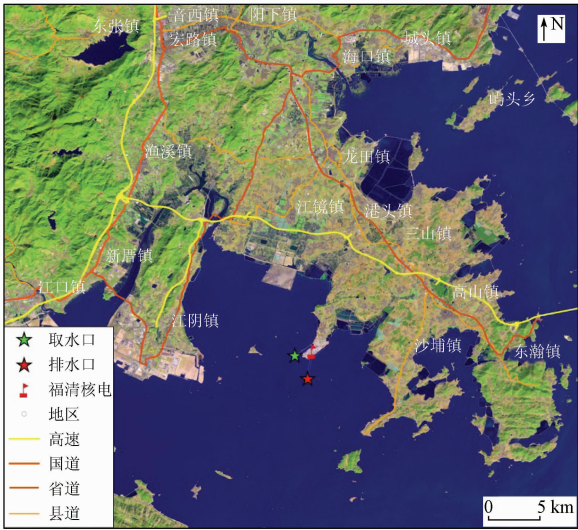


图1 福清核电地理位置示意图(2019 年 12 月 11 日)

Fig.1 Location of the Fuqing nuclear power plant

福清核电厂址区域属典型亚热带海洋性季风气候,海域多年平均气温为 22.3 ℃; 厂址温排水海域潮流为规则半日潮,每个潮汐日有 2 次高潮和 2 次低潮,运动形式为往复流,涨潮流向偏西北,落潮流

向偏东南,落潮流历时稍长于涨潮流历时。

2 数据源及数据处理

本文数据源为 Landsat8 和无人机热红外数据。Landsat8 数据具体参数和技术指标参见文献[17],数据时相分别为 2013 年 8 月 4 日、2014 年 1 月 27 日、2018 年 12 月 1 日、2019 年 7 月 29 日、2019 年 12 月 11 日、2020 年 8 月 7 日,无人机数据时相为 2019 年 7 月 15 日。为验证反演结果,获取了 2019 年 7 月 15 日、2019 年 7 月 29 日近同步海面测量数据。热红外波段参数、过境时间、机组运行工况、所处季节和潮态见表 1。根据 Landsat8 波段设置情况,对数据进行处理,包括几何精纠正、工作区裁剪、水陆分离等。几何精纠正基于地形数据,误差控制在 1 个像元(15 m)之内;海陆分离利用 Landsat8 OLI 绿光波段和短波红外波段对陆地和水体反射率差异开展波段比值获取;各影像按照研究区矢量进行裁剪。

表 1 不同传感器热红外数据参数信息对比

Tab.1 Parameter comparison for thermal band of different sensors

| 数据类型/传感器      | 幅宽/km | 分辨率/m | 过境时间                   | 运行工况              | 季节 | 潮态 |
|---------------|-------|-------|------------------------|-------------------|----|----|
| Landsat8/TIRS | 185   | 100   | 2013-08-04 10:34       | 未运行               | 夏季 | 落潮 |
|               |       |       | 2014-01-27 10:34       | 未运行               | 冬季 | 落潮 |
|               |       |       | 2018-12-01 10:27       | 4 台机组满功率          | 冬季 | 落潮 |
|               |       |       | 2019-07-29 10:27       | 4 台机组满功率          | 夏季 | 落潮 |
|               |       |       | 2019-12-11 10:33       | 4 台机组满功率          | 冬季 | 涨潮 |
|               |       |       | 2020-08-07 10:33       | 4 台机组满功率          | 夏季 | 涨潮 |
|               |       |       |                        |                   |    |    |
| 无人机/FLIR TAU2 | 0.32  | 0.5   | 2019-07-15 11:00—14:30 | 2 台机组满功率,2 台机组降功率 | 夏季 | 落潮 |

2.1 温度反演

学者针对 Landsat8 的 2 个热红外波段开展了劈窗算法研究<sup>[18-19]</sup>,但因第 11 波段存在严重的条带噪声,使得该方法存在较大的误差。本文采用辐射传输方程算法,对其第 10 波段开展温度反演。

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,设温度为  $T_s$ ,则卫星传感器获取的大气顶层辐射可表示为:

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

(1)

式中:  $L_{\lambda}$  为传感器接收到的大气顶层辐射,可由传感器辐射定标获取;  $T_s$  为地物实际温度;  $L_{\lambda}(T_s)$  为地物温度为  $T_s$  时的黑体辐射;  $\varepsilon_{\lambda}$  为地物的比辐射率;  $L_{\lambda atm \downarrow}$  和  $L_{\lambda atm \uparrow}$  分别是大气下行辐射和大气上行辐射;  $\tau_{\lambda}$  为波长为  $\lambda$  时地表和传感器之间的大气透射率。

将式(1)变形,可获取地物黑体辐射  $L_{\lambda}(T_s)$  时与大气顶层辐射  $L_{\lambda}$  及各项大气作用参数的关系,将各参数逐一解算,即可求得  $L_{\lambda}(T_s)$ ,公式为:

$$L_{\lambda}(T_s) = \frac{L_{\lambda} - L_{\lambda atm \uparrow}}{\tau_{\lambda}} - \frac{(1 - \varepsilon_{\lambda}) L_{\lambda atm \downarrow}}{\varepsilon_{\lambda}}.$$

(2)

1)大气顶层辐射  $L_{\lambda}$  的计算。对 Landsat8 第 10 波段灰度值辐射定标获取。定标公式为:

$$L_{\lambda} = a \cdot DN + b,$$

(3)

式中:  $DN$  为像元灰度值;  $a$  和  $b$  为 Landsat8 第 10 波段的定标系数,可以直接从元数据中获取。

2)海表比辐射率  $\varepsilon_{\lambda}$ 。与其他地物不同,本次温度反演主要针对海水表层进行,因其比辐射率变化不大,接近黑体<sup>[20]</sup>,本次研究取定值 0.995。

3)大气参数的获取。  $L_{\lambda atm \downarrow}$ ,  $L_{\lambda atm \uparrow}$  和  $\tau_{\lambda}$  均与大气成分含量、温度、湿度、压力密切相关。根据 MODTRAN 辐射传输模型,输入卫星过境时刻核电

气象站获取的温度、压力、相对湿度等气象数据、平均高程数据和 NCEP 大气廓线数据,开展大气校正<sup>[21-22]</sup>,即可获取上述参数。

4)海表温度  $T_s$  的计算。在以上计算完成后,获取温度  $T_s$  时的黑体辐射  $L_\lambda(T_s)$ ,根据普朗克法则,求得  $T_s$ ,公式为:

$$T_s = \frac{K_2}{\ln\left(1 + \frac{K_1}{L_\lambda(T_s)}\right)}, \tag{4}$$

式中  $K_1$  和  $K_2$  分别为校正系数,均可从 Landsat8 数据元数据获取,通过波段运算,获得福清核电附近海域海面温度场分布数据(图 2、表 2)。

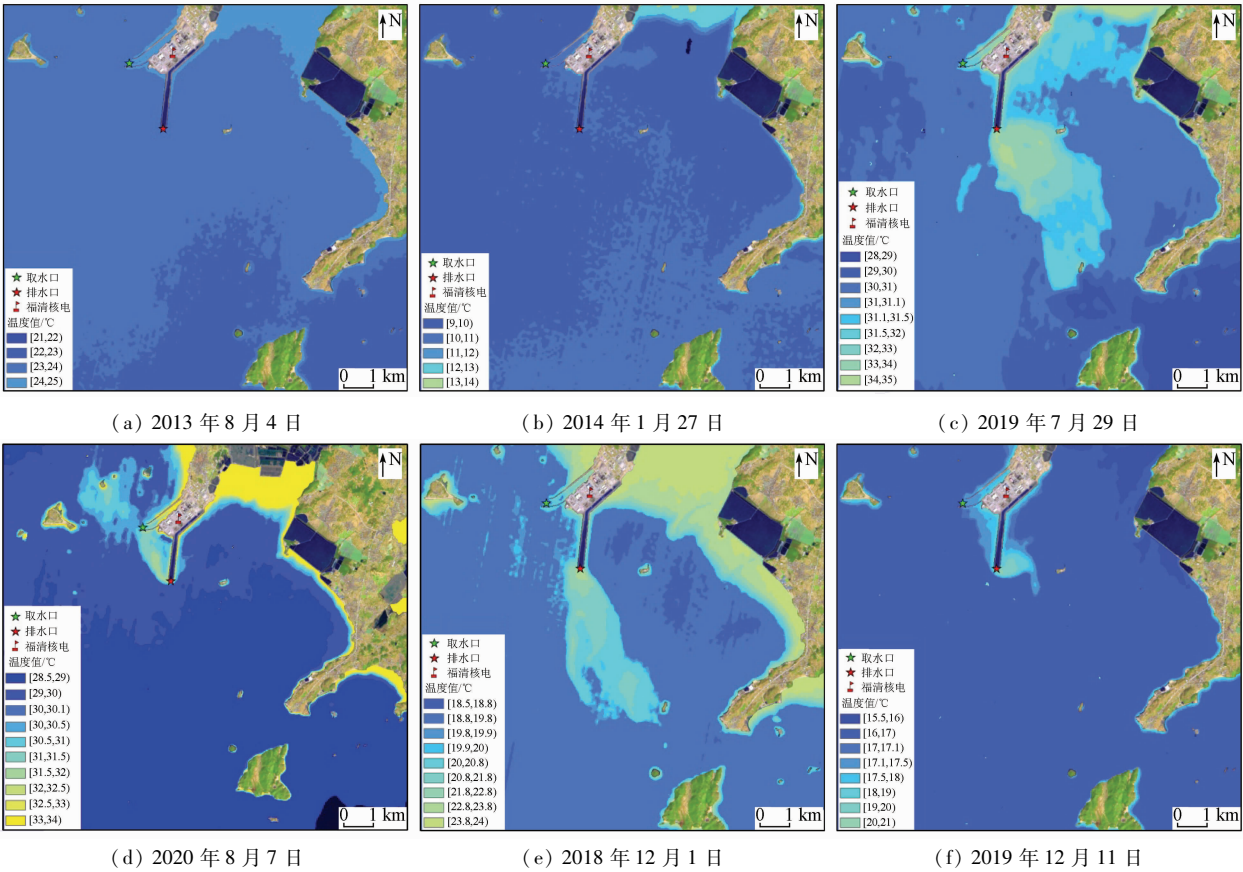


图 2 热红外温度场图

Fig.2 Distribution of thermal infrared temperature

表 2 温度场监测结果概况

Tab.2 Monitoring results of the distribution of thermal infrared temperature (℃)

| 时相               | 核电周边海域监测结果  |             |
|------------------|-------------|-------------|
|                  | 排水口周边       | 取水口周边       |
| 2013 年 8 月 4 日   | [23.0,24.0] | [23.0,24.0] |
| 2014 年 1 月 27 日  | [9.0,10.0]  | [9.0,10.0]  |
| 2019 年 7 月 29 日  | [31.0,35.8] | [30.4,31.8] |
| 2020 年 8 月 7 日   | [30.0,33.4] | [29.7,30.1] |
| 2018 年 12 月 1 日  | [19.7,23.8] | [19.3,19.7] |
| 2019 年 12 月 11 日 | [16.5,20.5] | [16.5,17.0] |

2.2 无人机数据处理与分析

无人机平台为国产 F300 固定翼无人机,热红外成像仪为美国产 FLIR TAU2,无人机数据单张图像大小为 640 像素×512 像素,温度分辨率可达 0.05 ℃。无人机平台系统配备 50 Hz 高精度 GNSS 板卡,支持 PPK,RTK 以及 PPK 和 RTK 融合作业模式。

根据气象情况,2019 年 7 月 15 日开展了无人

机航飞,航高为 380 m,航速为 60 km/h,地面分辨率为 0.5 m,航向重叠 80%,旁向重叠 55%,共飞行 12 架次,获取有效影像数量 8 252 张,航程约 350 km。

无人机数据包括陆地和海域 2 个部分,陆地纹理信息丰富,通过基于特征匹配的方法进行拼接<sup>[23]</sup>。海域纹理较弱,首先利用无人机照片 POS 数据点位信息、确定单个无人机影像的 4 个角点的地面坐标,利用坐标拼接图像<sup>[24]</sup>,其次匹配架次之间、影像之间存在的色彩差异,采用匀色算法进行影像色彩调整,实现色彩一致。对于图像中错误的区域,进行影像的位置调整。经处理后,可以得到色彩相对一致,位置准确的图像(图 3)。图 4 为无人机航测数据与实际数据的拟合,图 5 为获得的水体表面温度。由于 FLIR TAU2 已经进行了辐射校正,可获取热红外波段辐射亮度值和温度值。因海域辐射受多方面影响,测温型机芯获取的温度结果不可避免会产生偏差。因此,在无人机监测的同时,开展了近



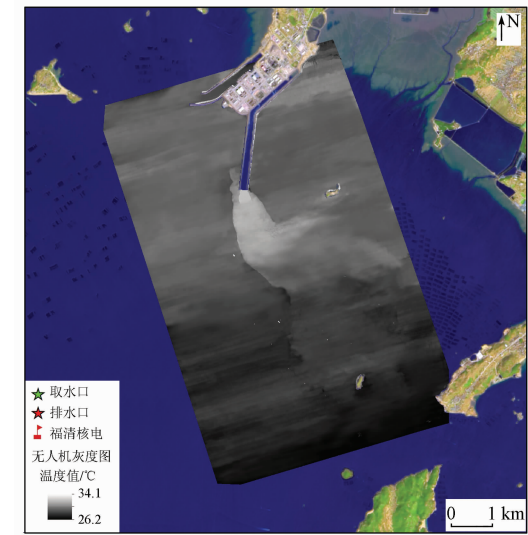


图 3 无人机热红外影像拼接图

Fig.3 Mosaic of the UAV thermal infrared image

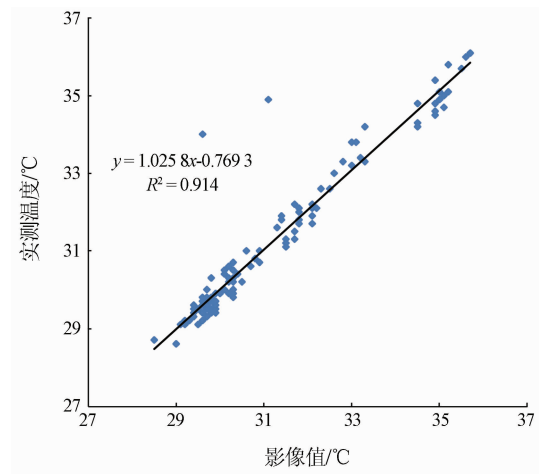


图 4 无人机航拍影像的温度标定

Fig.4 Temperature calibration for UAV image

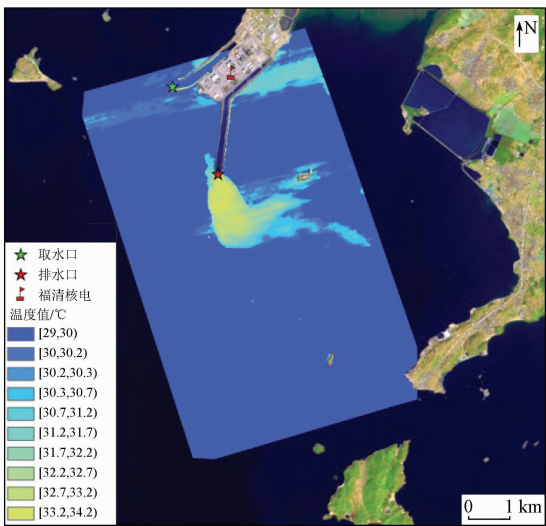


图 5 2019 年 7 月 15 日海面温度场分布

Fig.5 Distribution of thermal infrared temperature in Jul. 15, 2019

同步的海温测量,用于纠正偏差,获取真实海面温度。对同步获取的测量数据及航拍数据进行点对点的时空匹配,时间尺度设定为  $\pm 30\text{ s}$ ,空间匹配尺度设定为 1 像元,共获取数据 134 组,将实测数据和无人机航测温度数据进行拟合(图 4),获取到水体真实的表面温度(图 5)。结果表明 2019 年 7 月 15 日福清核电排次口周边温度为  $30.1 \sim 34.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,取水口周边温度为  $29.3 \sim 30.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

3 结果与分析

3.1 反演结果与精度验证

为了保证反演结果的准确性,在 2019 年 7 月 15 日无人机航测和 2019 年 7 月 29 日 Landsat8 卫星过境时刻,开展了近同步海面温度测量。测量设备为 JENCO 6010M 水质测量仪,标定后仪器温度测量精度为  $0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。测量时每  $50 \sim 100\text{ m}$  间距进行一次测温,以排水口为中心,测点布置近密远疏,控制温度变化。

对热红外遥感数据反演值和实测值使用最小二乘法进行线性回归拟合,以检查其相关程度。为衡量实际值与理论预测值的偏离程度引进了相关系数  $r$ 、标准误差  $\Omega$  和残差  $R$ ,并对其进行标准化处理。数据处理时定义实测值为  $x$ ,温度反演值为  $y$ ,则回归直线方程为  $y = a + bx$ ,主要参数的计算公式为:

$$r = \frac{\overline{xy} - \bar{x}\bar{y}}{\sqrt{(\overline{x^2} - \bar{x}^2)(\overline{y^2} - \bar{y}^2)}} \quad , \quad (5)$$

$$\Omega = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - bx_i - a)^2}{n - 2}} \quad , \quad (6)$$

$$R_y = y_i - y = y_i - a - bx_i \quad . \quad (7)$$

式中:  $\bar{x}$ 和 $\bar{y}$ 分别为实测值和反演值的平均值, $\overline{xy}$ 为实测值和反演值乘积的平均值;  $n$  为实测值个数。

无人机数据温度反演值与实测值的拟合后结果为  $y = 0.891x + 3.3538$ ,拟合后回归系数的平方值  $R^2$ 为 0.914,标准误差为 0.540 7(图 6),残差最大为  $4.05\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,位于排水口附近,80%的数据集中在  $(-0.5, 0.5)\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,残差绝对值的平均值为  $0.28\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。Landsat8 温度反演结果与实测值拟合后结果为  $y = 0.8141x + 6.1257$ ,拟合后回归系数的平方值  $R^2$ 为 0.897 1,标准误差为 0.679 2(图 7),残差最大为  $1.37\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,同样位于排水口附近,70%的数据集中在  $(-0.5, 0.5)\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,残差绝对值的平均值为  $0.44\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。综上,除排水口附近因水动力条件较强,温度变化略大外,其余处测点和实测关系具

有较强的线性回归关系,从线性关系程度、误差、残差上可以反映出热红外遥感反演结果准确可靠。

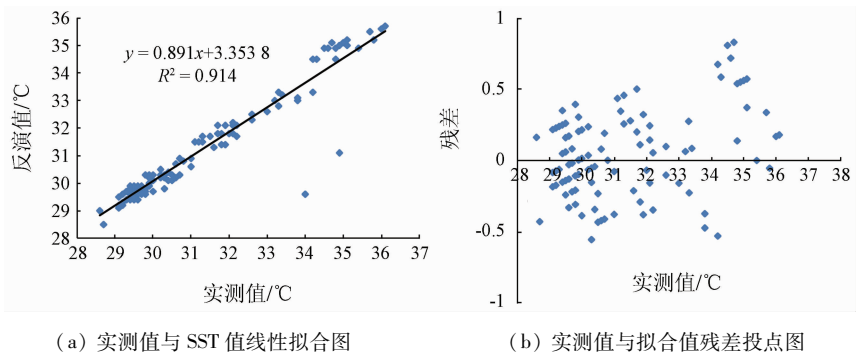


图 6 2019 年 7 月 15 日实测值与无人机航测数据线性拟合和残差图

Fig. 6 Linear fitting and residual point figure of measured values and UAV values at sea on Jul. 15, 2019

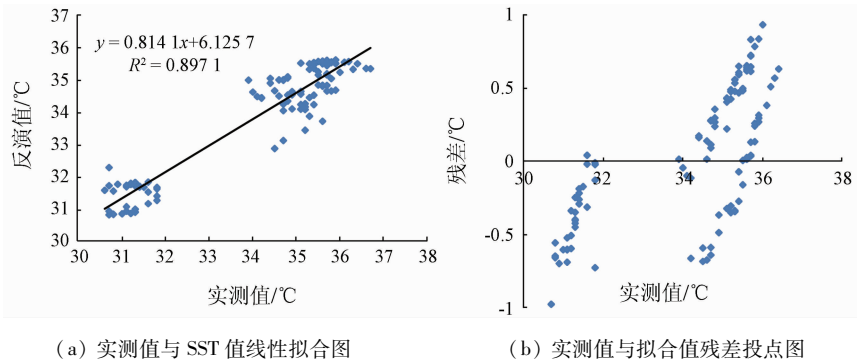


图 7 2019 年 7 月 29 日实测值与 Landsat8 反演数据线性拟合和残差图

Fig. 7 Linear fitting and residual point figure of measured values and Landsat8 retrieval values at sea on Jul. 29, 2019

3.2 核电周边温度场分布特征

2013 年 8 月 4 日和 2014 年 1 月 6 日福清核电厂无机组运行,排水口、取水口附近海水温度与邻近区域海水差异较小,不同季节温度差别较大(图 2(a)一(b)),夏季和冬季温度分别在 23.0 ~ 24.0 ℃ 和 9.0 ~ 10.0 ℃ 之间,从排水口到邻近海域温度缓慢过渡。

2018 年后 4 景 Landsat8 数据获取时 4 台机组均为满功率运行,无人机航飞时 2 台机组满功率,2 台机组降功率运行。温度反演结果显示(图 2(c)一(f)),福清核电运行后,排水口周边海域温度场具有明显的水温分异与温升现象,相似潮态下温度梯度及空间分布特征相似:核电排水口附近海域受温排水影响,距离排水口越近温度越高,远离排水口后,温度逐渐降低,到达一定距离后,变化趋缓并逐渐稳定。

与运行前数据相比,夏季(图 2(c)和(d))核电排水口附近海域温度范围为 30.0 ~ 35.8 ℃,取水口附近海域温度范围为 29.3 ~ 31.8 ℃;冬季(图 2(e)和(f))核电排水口附近海域温度范围为 16.5 ~ 23.8 ℃,取水口附近海域温度范围为 16.5 ~ 19.7 ℃。

核电周边海域整体温度受季节影响,夏季比冬

季温度场高 10 ~ 15 ℃。温度场分布特征则明显受到了海域涨、落潮的影响,落潮时(图 2(c),(e),图 5),高温冷却水出排水口后,主要沿潮水向南、东南方向展布,涨潮则相反(图 2(f)),主要向西北方向和东北方向展布(图 2(d)和(f)),随着远离排水口逐渐降温,最终与环境温度变化一致。

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。对于福清核电附近海域,由于远近海域存在一定的温度梯度,无法选取远海的温度作为背景温度。经对比研究核电运行前温度场数据(图 2(a)和(b)),核电排水口和取水口附近温度基本一致,且不同季节同步变化。因此,本次本底温度取值选取取水口北侧不受温排水影响海域平均温度作为本底温度,取值海域范围如图 8(a)中红框所示。将海域温度场数据扣除本底温度,得到核电温排水形成的温度场热影响分布范围。根据实际情况,采用高于本底水温温度的 0.1 ℃,0.5 ℃,1.0 ℃,2.0 ℃,3.0 ℃ 和 4.0 ℃ 温度,划分出 6 个等级,并分别进行编码(图 8)。根据各级水温像元分布情况和数量,计算不同温升级别面积(图 9)。

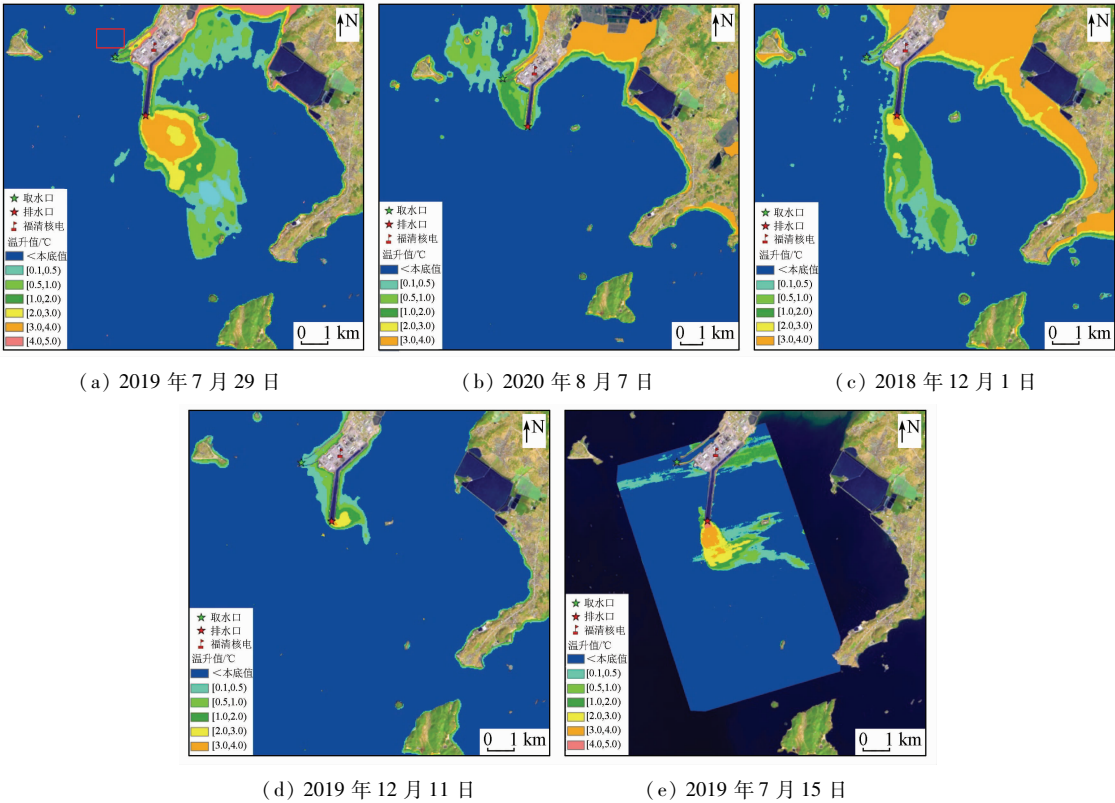


图 8 温升编码图

Fig.8 Coding chart of temperature rising

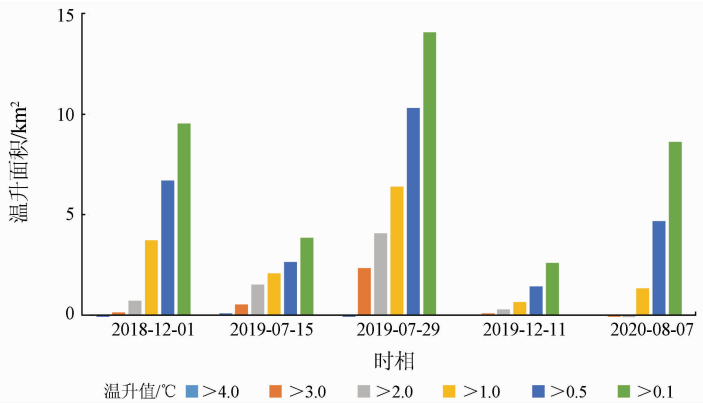


图 9 不同时相温升面积对比

Fig.9 Contrast chart of temperature rising area at different time

温升编码图(图 8)显示,涨、落潮温升分布特征与温度场分布特征一致:落潮时,温排水整体向东南方向展布,夏季最大温升影响范围为 5.95 km,冬季最大温升影响范围为 5.99 km;涨潮时主要向西北方向展布,随着潮流方向差异,向东北方向偏转,夏季最大影响范围为 5.80 km,冬季最大影响范围为 2.38 km。

温升面积统计结果显示(图 9),相同季节,相同工况条件下,落潮时刻各级别的温升范围均比涨潮时刻要大;相似潮态、相同工况条件下,冬季温升分布范围总体小于夏季。

综合分析认为,涨潮时,外海水体随涨潮流流

入温排水影响海域,与温排水快速混合,导致温排水温度快速降低,温排水随潮水继续向西北方向流动,海水进一步混合,温度继续降低;落潮时刻,水体流速相对较慢,靠近排水口处,高温热水未与低温海水充分混合,仍保持向南流动特征。远离排水口,温排水总体随着落潮主流向东南方向泄出,因潮流的拖曳作用,排水口附近的高温水体更容易向外扩散,因为混合水量相对涨潮较少,流速相对较慢,造成温升分布面积相对较大,也更易出现 4℃ 以上温升。

因核电所在的兴化湾海域,冬夏季潮差、流速均相似<sup>[25]</sup>,但夏季温度明显比冬季高,不利于温排

水温度扩散,造成夏季温升范围总体比冬季要大。

受排水量、具体潮汐状态、气象条件等因素影响,核电厂温排水对海温的影响在不断变化。2019 年 7 月 15 日无人机航飞数据因 2 台机组降功率运行,温升分布比 2019 年 7 月 29 日卫星数据温升范围要小。无人机温升监测结果显示,北侧存在残留的小面积紊动热团,东南侧低值温升呈现出一定的分岔现象和不连续带状分布,监测到相对明显的 4℃ 以上温升(图 8(e))。

### 3.4 无人机与 Landsat8 数据对比

Landsat8 卫星遥感数据具有固定时间分辨率(16 d)和空间分辨率(100 m),可瞬时获取研究海域数据(30 s 以内)。与其相比,无人机航测更加机动灵活,可根据气象、机组工况、空域情况,调整数据获取时间,且空间分辨率能达到亚米级,但获取时间相对较长(1 h 以上)。由此可以看出,无人机可在特定时段对典型潮态下温排水分布特征开展监测,且空间分辨率 0.5 m 的热红外数据,相比于空间分辨率 100 m 的 Landsat8 卫星数据,可更清晰反映温度场细节问题。但因单个照片覆盖宽度有限,数据获取无法瞬时完成,温度场整体性较差,温排水影响区外数据海域温度存在不一致的情况,表现为温度条带现象。

因无人机航测数据和 Landsat8 卫星数据,获取时气象、潮汐状态存在不一致的情况,两者之间对比不可避免受到干扰。为更直观反映两者之间关系,客观开展对比分析,下一步工作应在卫星过境前后,同时开展无人机航测和近同步的海上测量工作。

### 3.5 误差分析

1) 温度反演过程中,根据水体近似黑体的特性,海水比辐射率取定值 0.995,但海水的比辐射率会随泥沙含量、海浪状况等条件发生改变。相应的研究表明,平静海面的比辐射率可能会有所下降<sup>[8]</sup>。因此,比辐射率的取值在一定程度上会影响到反演的温度精度。

2) 反演值与测量值拟合产生的误差除与测量设备、测量操作有关外,还与实测时间和遥感数据获取时间不完全一致存在关系。实测数据在卫星过境前后 30 min 内或无人机测量期间获取,而卫星数据在不足 1 min 内获取,无人机数据亦无法与实测数据完全同步,造成该误差的存在,尤其在排水口附近因水动力条件复杂,误差相应也会更大。

## 4 结论

1) 通过对反演结果与海上测量数据的回归分

析,证明 Landsat8 数据利用辐射传输方程算法进行温度反演和测温型机芯获取的温度结果可靠。由于测量不完全同步,2 种数据之间存在着一定误差。

2) 不同时相 Landsat8 遥感数据显示,核电运行前,附近海域温度较为均匀,除自然增温外,无明显温度分异现象;核电运行后,受核电温排水影响,附近海域具有明显温升现象,且不同季节和不同潮汐条件下,温升分布特征不同。

3) 福清核电厂温排水温升在各个方向的分布受潮态控制。落潮时,温升主要集中在排水口东南侧。涨潮时,温排水总体向西北方向分布。落潮时刻的温升范围要大于涨潮,夏季温升分布大于冬季同潮态温升分布。

4) 因受限于飞行效率,无人机技术在核电温排水监测领域的应用受到一定制约,但其可以实现对温排水的实时监测,识别温排水分布的细节。

## 参考文献(References):

- [1] 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(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(2):46-50.
- [2] 於凡,张永兴. 滨海核电站温排水对海洋生态系统影响的研究[J]. 辐射防护通讯,2008,28(1):1-7.  
Yu F, Zhang Y X. The review on the effects of thermal effluent from nuclear plants on the marine ecosystem[J]. Radiation Protection Communication, 2008, 28(1):1-7.
- [3] 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 Communication, 2011, 31(6):20-23.
- [4] 姜晟,李俊龙,李旭文. 核电站温排水遥感监测方法研究——以田湾核电站为例[J]. 中国环境监测,2013,29(6):46-50.  
Jiang S, Li J L, Li X W. A research on the remote sensing monitoring method with the thermal discharge of Tianwan nuclear power station[J]. Environmental Monitoring in China, 2013, 29(6):46-50.
- [5] 姚沛林. 滨海核电厂温排水的监测与实践[J]. 红外,2013,34(11):43-48.  
Yao P L. Monitoring of warm water discharged from coastal nuclear power station[J]. Infrared, 2013, 34(11):43-48.
- [6] 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,2010,85(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, 85 (3): 51 – 53. doi:10.6046/gtzyyg. 2010.03.11.
- [7] Jimenez – Munoz 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): 1 – 9.
- [8] Qin Z H, Karnieli A, Berliner A. A mono – window algorithm for retrieving land surface temperature from Landsat TM and its application to the Israel – Egypt border region [J]. Remote Sensing, 2001, 22: 3719 – 3746.
- [9] Price J C. Land surface temperature measurements from the split window channels of the NOAA7 advanced very high resolution radiometer[J]. Journal of Geophysical Research, 1984, 89(d5): 231 – 237.
- [10] 吴传庆, 王 桥, 王文杰. 利用 TM 影像监测和评价大亚湾温排水热污染[J]. 中国环境监测, 2006, 22(3): 80 – 84.
- Wu C Q, Wang Q, Wang W J. Monitoring and evaluation of thermal pollution of thermal discharge in Daya Bay using TM images[J]. China Environmental Monitoring, 2006, 22 (3): 80 – 84.
- [11] 朱 利. 基于环境一号红外相机的田湾核电站温排水遥感监测研究[J]. 中国环境科学, 32(s1): 63 – 67.
- Zhu L. Study on remote sensing monitoring of temperature and drainage of Tianwan nuclear power station based on environment – 1 infrared camera[J]. China Environmental Science, 32 (s1): 63 – 67.
- [12] 王 祥, 苏 岫, 王新新. 基于 Landsat8 卫星数据的红沿河核电站温排水监测[J]. 红外, 2015, 36(8): 22 – 27.
- Wang X, Su X, Wang X X. Thermal drainage monitoring of Hongyanhe nuclear power station based on Landsat8 satellite data[J]. Infrared, 2015, 36 (8): 22 – 27.
- [13] 于 杰, 李永振, 陈丕茂. 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, 21(3): 24 – 29. doi:10.6046/gtzyyg. 2009.03.05.
- Yu J, Li Y Z, Chen P M. Retrieval of sea surface temperature in Daya Bay using Landsat TM6 data[J]. Remote Sensing for Land and Research, 2009, 21(3): 24 – 29. doi:10.6046/gtzyyg. 2009.03.05.
- [14] 许 静, 朱 利, 姜 建. 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.
- Xu J, Zhu Li, Jiang J. Remote sensing monitoring of temperature and drainage of Daya Bay nuclear power base based on HJ – 1B and TM thermal infrared data[J]. China Environmental Science, 2014, 34 (5): 1181 – 1186.
- [15] 孙芹芹, 张加晋, 姬厚德. 基于卫星和无人机的后石电厂温排水分布研究[J]. 应用海洋学报, 2020, 39(2): 261 – 265.
- Sun Q Q, Zhang J J, Ji H D. Distribution of thermal water around Houshi Power Plant based on Landsat8 and UVA study[J]. Journal of Applied Oceanography, 2020, 39 (2): 261 – 265.
- [16] 王 祥, 王新新, 苏 岫. 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. 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.
- [17] 初庆伟, 张洪群, 吴业伟, 等. Landsat8 卫星数据应用探讨[J]. 遥感信息, 2013, 28(4): 110 – 114.
- Chu Q W, Zhang H Q, Wu Y W, et al. Application research of Landsat8[J]. Remote Sensing Information, 2013, 28 (4): 110 – 114.
- [18] 陈瀚阅, 朱 利, 李家国, 等. 基于 Landsat8 数据的 2 种海表温度反演单窗算法对比——以红沿河核电基地海域为例[J]. 国土资源遥感, 2018, 30(1): 45 – 53. doi:10.6046/gtzyyg. 2018.01.07.
- Chen H Y, Zhu L, Li J G, et al. A comparison of two mono – window algorithm for retrieving sea surface temperature from Landsat8 data in coastal water of Hongyan River nuclear power station[J]. Remote Sensing for Land and Resources, 2018, 30 (1): 45 – 53. doi:10.6046/gtzyyg. 2018.01.07.
- [19] Rozenstein. Derivation of land surface temperature for Landsat8 TIRS using a split window algorithm[J]. Sensors, 2014, 14(14): 5768 – 5780.
- [20] 覃志豪. 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. Mono – window algorithm for retrieving land surface temperature from Landsat TM6 data[J]. Acta Geographica Sinica, 2001, 56(4): 456 – 466.
- [21] 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: 3014 – 3016.
- [22] Barsi J A, Schott J R, Palluconi F D, et al. Validation of a web – based atmospheric correction tool for single thermal band instruments[Z]. Earth Observing Systems X, 2005, 5882: 1 – 6.
- [23] 耿 娟, 何成龙, 刘宪鑫. 基于 CSIFT 特性的无人机影像匹配[J]. 国土资源遥感, 2016, 28(1): 93 – 100. doi:10.6046/gtzyyg. 2016.01.14.
- Geng J, He C L, Liu X X. UAV image matching based on CSIFT feature[J]. Remote Sensing for Land and Resources, 2016, 28 (1): 93 – 100. doi:10.6046/gtzyyg. 2016.01.14.
- [24] 王雅萍, 陈宜金, 谢东海, 等. 面向无人机水域影像的自动拼接方法[J]. 长江科学院院报, 2014, 31(5): 92 – 96.
- Wang Y P, Chen Y J, Xie D H, et al. Automatic mosaic method for UAV water – area image [J]. Journal of the Yangtze River Sciences Research Institute, 2014, 31(5): 92 – 96.
- [25] 福清 5、6 号机组运行阶段环评专题——温排水数值模拟复核研究报告[R]. 中国水利水电科学研究院, 2018, 4: 7 – 11.
- Special topic of environmental impact assessment during operation of No. 5 and No. 6 nuclear power units of Fuqing nuclear power – review research report on numerical simulation of thermal discharge [R]. China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2018, 4: 7 – 11.



# Study on distribution of thermal discharge in Fuqing nuclear power plant based on Landsat8 and UAV

DONG Shuangfa<sup>1,2</sup>, FAN Xiao<sup>3</sup>, SHI Haigang<sup>1,2</sup>, XU Liping<sup>3</sup>, ZHANG Xinyi<sup>1,2</sup>

(1. Airborne Survey and Remote Sensing Center of Nuclear Industry, Shijiazhuang 050002, China; 2. Hebei Key Laboratory of Airborne Detection and Remote Sensing Technology, Shijiazhuang 050002, China; 3. Fujian Fuqing Nuclear Power Co., Ltd., Fuzhou 350318, China)

**Abstract:** Based on the thermal infrared data from the Landsat8 satellite and a UAV, this study obtained the spatial distribution of the temperature of the sea area near the Fuqing Nuclear Power Plant through inversion. Then, this study verified the reliability of the inversion results using the measured temperature data and investigated the distribution and variation characteristics of the temperature field in the sea area near the power plant. The results are as follows. The inversion results of the temperature are strongly correlated with the measured offshore temperature data and thereby are reliable. Before the nuclear power plant was put into operation, the temperature of the sea area near the nuclear power plant was relatively uniform, without significant temperature differentiation or temperature rise. By contrast, after the nuclear power plant was put into operation, significant temperature differentiation occurred in the surrounding sea area because of the thermal discharge. Moreover, the spatial distribution of thermal discharge and its scale varied greatly under different tides and seasons. Generally, the temperature rise range was wider under ebb tides than under flood tides and was wider in summer than in winter.

**Keywords:** Landsat8; UAV; temperature inversion; thermal discharge from nuclear power plant; remote sensing – based monitoring

(责任编辑: 张 仙)