

核电温排水基准温度星地协同提取与分析——以宁德为例

王雅萍¹, 马秀秀^{1,2}, 李家国², 朱利³, 李凯云²

1. 河南理工大学 测绘与国土信息工程学院, 焦作 454003;

2. 中国科学院空天信息创新研究院, 北京 100094;

3. 生态环境部卫星环境应用中心, 北京 100094

摘要: 核电在中国正式进入积极推进建设时期, 而核电温排水对周边水域环境的影响监测与评估不仅为核电机组的规划、建设、运行等过程提供重要决策依据, 同时也对海域水质和生态保护具有重要价值。客观精准的基准温度提取是温排水热污染遥感监测与评估的基础, 本文以宁德核电站星地同步监测为例, 通过对72个离散测量点位温度垂直剖面特征进行分析, 将其划分为7种不同剖面形态, 从中归纳出稳定温度点, 并据此构建基准温度星地协同提取“实测稳定温度法”, 解决以往地面测量监测和热红外遥感监测在实施过程中基准温度计算相互独立、未进行星地协同处理, 致使监测结果可比较性相对较弱等问题。研究结果表明, 基于实测稳定温度法提取得到的温排水星地同步监测结果从分布范围、强度到扩散趋势最为一致, 提取效果明显优于其他基准温度提取方法; 实测稳定温度法监测星地面积差异最小, 为1.53 km², 相对于其他方法精度提高了4—10倍, 而多点平均温度法(近岸多点)、取水口温度法、邻近区域温度替代法、校正的海湾平均法、半径区域平均温度法(5 km半径)、温升混合区最低温度法的星地面积差异分别为11.95 km²、11.12 km²、7.69 km²、6.61 km²、8.46 km²和14.93 km²。实测稳定温度法能够更客观、准确的提取核电站温排水热污染分布范围和大小, 在核电温排水热污染监测中具有重要的应用价值。

关键词: 温排水, 星地协同, GF-5, 基准温度, 热污染, 遥感

中图分类号: P2

引用格式: 王雅萍, 马秀秀, 李家国, 朱利, 李凯云. 2023. 核电温排水基准温度星地协同提取与分析——以宁德为例. 遥感学报, 27(8): 1899–1913

Wang Y P, Ma X X, Li J G, Zhu L and Li K Y. 2023. Satellite-marine synergistic extraction and analysis of reference temperature of thermal plume from nuclear power by taking Ningde as an example. National Remote Sensing Bulletin, 27(8): 1899–1913[DOI:10.11834/jrs.20210583]

1 引言

近年来, 沿海地区核电站数量不断增加, 而社会对环境保护意识逐步增强, 核电站在工作过程中造成周围水域温度异常升高的“热污染”现象越来越引起公众的普遍关注(Chen等, 2000)。核电站热效率仅为一般火电厂的30%—35%, 加上核电机组循环水量是火电机组的1.2—1.5倍, 所以弃热量较多(梁珊珊等, 2012)。弃热量主要是通过循环加热冷却水方式进行热量交换, 加热后的冷却水最终被排入邻近受纳海域, 由于其温度

高于周边水体温度, 因此, 又被称为“温排水”(Chew等, 2015; Jiang等, 2009; Bamber和Seaby, 2004)。温排水会改变受纳海域水体温度场特征, 对周围水域生态系统和水生生物的数量、种类、群落结构产生不同程度的影响(Wang等, 2008; Arieli等, 2011; Reutter和Herdendorf, 1976; Wang等, 2009; Kelly等, 2016)。因此, 核电站温排水的状态监测和评价对于防止热污染, 保护海域水质和水环境的生态平衡具有重要意义(许静等, 2014)。准确、定期地调查温排水影响的范

收稿日期: 2021-01-08; 预印本: 2021-02-28

基金项目: 国家自然科学基金(编号: 41971391); 河南理工大学博士基金(编号: B2015-22)

第一作者简介: 王雅萍, 研究方向为遥感图像处理与应用。E-mail: wangyp326@163.com

通信作者简介: 李家国, 研究方向为传感器辐射定标与校正、水环境遥感监测、遥感大数据快速处理。E-mail: jacoli@126.com

围和强度,是评估核电站温排水对周围海域环境影响的基础条件。

目前,核电站温排水热污染监测和评价主要包括3种手段:数学及物理模拟、地面测量监测、热红外遥感监测。数学及物理模拟(Hamrick和Mills, 2000; Shen等, 1996; Suh, 2001; Zeng等, 2002)主要用于核电站发电前的评价与论证,以及拟建核电站温排水热污染影响范围的预测, Lowe等(2009)使用三维流体力学模型MIKE 3来评估从Charles Poletti核电站排放到纽约市皇后区东河的温排水的影响,并成功地利用三轴热场数据对模型进行校准。Cheng等(2011)通过三维数值模拟,使用 κ - ε 湍流模型研究了地形对电厂温排水热扩散的影响。地面测量监测主要采用现场人工测量的方式进行水域实况调查,是温排水调查最直接和最直观的手段。其优点是受天气影响较小,结果最为客观真实,能直接获取海表温度和海水温度—深度廓线等相关数据,缺点是成本高、速度慢、只能获取有限个采样点的温度数据。Huang等(2019)以ND和FCG两个不同潮汐动力的研究区为例,以实测数据为基础,分析了由热排放引起海水分层的时空特征。Jiang等(2019)在象山湾上游宁海电厂附近的两个牡蛎养殖场和控制区进行了10次巡航调查,通过研究表明牡蛎养殖有效缓解了水体富营养化和海藻大量繁殖,提高了浮游植物多样性。与地面接触式测量监测不同,热红外遥感监测是利用卫星从太空进行非接触式的海表温度反演以及温排水监测。热红外遥感可以进行大范围海表温度同步反演(Hosoda等, 2007; Chen等, 2003; Donlon等, 2002; Wu等, 2007),成本低、速度快、范围广、可多期连续动态监测,是温排水热污染监测的重要方式,不足之处是易受天气影响。吴传庆等(2006)利用多时相的TM热红外卫星影像数据反演了广州大亚湾核电站附近的水域温度,对核电站温排水强度、扩散范围和环境影响进行了有效的评价。Liu等(2020)利用Landsat 8和GF-5卫星影像数据,采用辐射传输方程法对红沿河地区的海表温度进行反演,分析了热排放对近海岸区域的影响,并论证了GF-5数据在海表温度监测应用中的优势。

热污染分布范围及程度监测,无论是数学及物理模拟、地面测量监测还是热红外遥感监测,基准温度获取的科学性与客观性起着至关重要作用。基准温度主要是相对于温排水引起的热异常

而言,定义为在假设没有温排水发生情况下,现有区域内水体表面的平均温度(朱利等, 2014)。目前常用的基准温度提取方法有多点平均温度法(近岸多点)、取水口温度法、邻近区域温度替代法、校正的海湾平均法、半径区域平均温度法(5 km半径、10 km半径、15 km半径)、温升混合区最低温度法(朱利等, 2016)。多点平均温度法位置确定方便,但是对点位的分布位置依赖性较大,不易确定最优点位,如近岸多点、均匀多点和边界多点监测的结果往往相互差异性较大。取水口温度法由于是单点法,计算简单方便,点位在温升混合区附近,而实际发生温排时受洋流等影响很难确定取水口是否受到热污染。邻近区域温度替代法是在发电前长时间序列热红外遥感影像的基础上,根据相关性原则选择核电站附近不受温排水影响的区域,具有一定的统计科学依据,但也需要大量热红外遥感影像进行计算。校正的海湾平均法比较稳定,以海湾范围为边界,不适用于开放及半开放的受纳海域。半径区域平均温度法受温升混合区变化的影响,半径不易确定,相较开阔性海域,更适用于湾形海域。温升混合区最低温度法,又称最小值法,采用最小温度作为基准计算方便快捷,但是会过高估算温排水的影响范围。

地面测量监测可为热红外遥感监测结果提供比对和验证,热红外遥感监测可为地面测量监测的采样和实施提供宏观指导(朱利等, 2014)。然而,当前地面测量监测和热红外遥感监测在实施过程中,往往是各自独立计算基准温度和热污染提取,并没有将地面监测数据与遥感反演参数进行协同处理,基准温度设定客观性不足且互相独立、缺少一致性,监测结果的可比较性相对较弱。本文以宁德核电站附近受纳海域为研究区,采用地面测量与GF-5卫星遥感监测相结合的方式,开展星地协同基准温度提取方法研究,以及星地协同热污染提取与比对分析,以期获取更为科学合理的温排水监测基准和热污染分布范围及等级,提高温排水监测水平,进而为核电站温排水管理和水环境监管等提供有效的科学依据和数据支撑。

2 研究区概况与数据获取

2.1 研究区概况

宁德核电站位于福建省宁德市辖福鼎市太姥

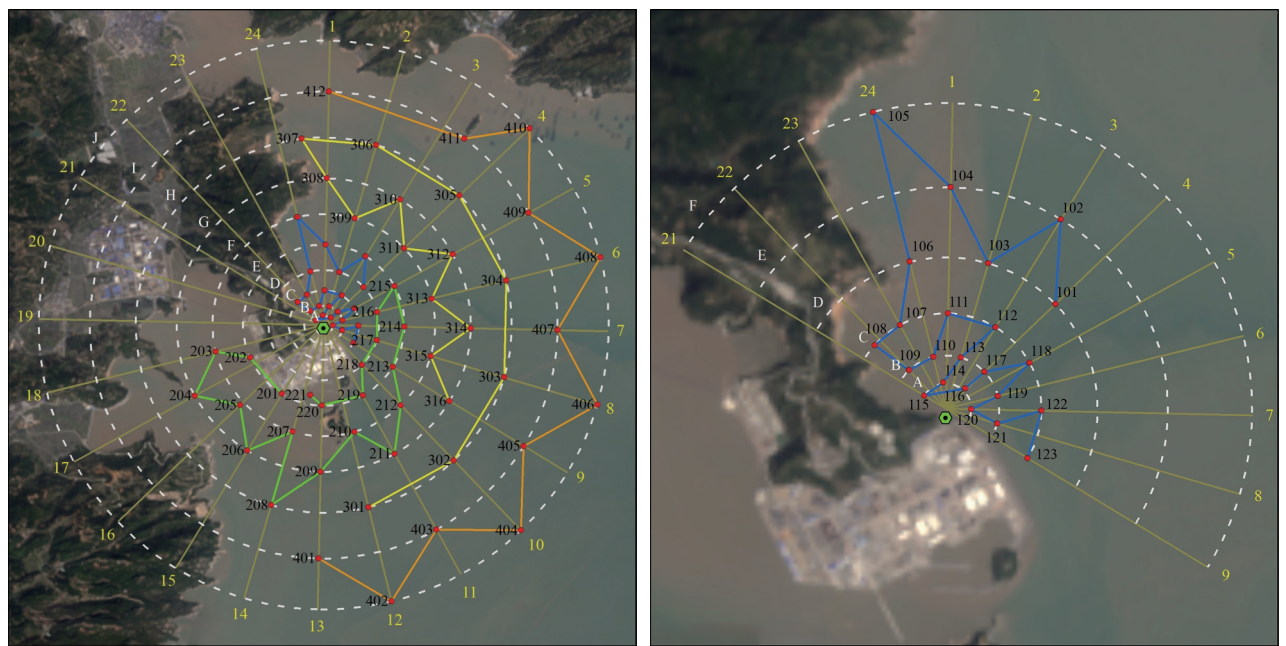
山镇，濒临东海，交通便利。该核电站是中国第一座在海岛上建设的核电站，也是海峡西岸经济区建设的第一座核电站，同时还是国家核电中长期发展规划颁布实施后正式开工的第一个百万千瓦级核电项目。主体工程于2008年2月18日开工建设，一期工程4台机组于2016年7月21日全面建成（<http://www.ndnp.com.cn/ndnp/c101496/listtt.shtml> [2021-01-08]）。

2.2 实验设计与数据采集

2.2.1 航点航线设计

试验团队于2019年10月在宁德核电站周边海域进行了海面定点剖面观测试验，与GF-5卫星过境同步观测。基于宁德核电站前期温度反演结果，

结合核电站周边海域具体情况，设计试验航点与航线。以排水口为中心建立不同距离等距线，由里及外编号为A, B, ..., J; 同时，以排水口为中心创建等角度辐射线，编号依次为1, 2, ..., 24。等距线与辐射线的交点即为设计航点，如图1所示。设计过程中，需对部分点位位置进行调整以避免陆地和岛屿的影响。试验共设计72个航点，以核电站为中心向外由密到疏逐渐分布。由于核电站在工作模式下，离排水口越近温升越大，所以离排水口越近，航点越为密集，以确保后期水体温度插值的精度。为保证星地同步观测，每条航线既要考虑航点数量和航点位置，也要考虑航行总路程，试验共设计4条航线，如图1所示。



(a) 地面试验航点、航线设计总图
(a) Waypoints and routes design total drawing of marine test
图例 ● 排水口 ● 设计航点 — 航线1 — 航线2 — 航线3 — 航线4 - - 等距线 — 辐射线

图1 地面试验航点航线设计图
Fig. 1 Waypoints and routes design drawing of marine test

2.2.2 数据采集

试验由4艘渔船执行，每艘渔船分别携带1台温盐深测仪CTD (Conductivity-Temperature-Depth) 或温深仪TD (Temperature-Depth)。CTD/TD是测量海洋物理特性的重要工具，可用于测量不同深度下精确的海水温度和盐度等参数，仪器温度测量范围为-5℃—35℃ (精度: 0.002℃; 稳定度: 每

月 $\leq 0.0002^{\circ}\text{C}$)，深度测量范围为1000 m (精度: 1% 满刻度范围; 稳定度: 每年 $\leq 0.05\%$ 满刻度范围)。

试验过程中CTD/TD均设定为自容式测量，数据采集频率均设定为1次/s，全程不间断连续测量。试验过程中为了降低测量误差，保证测量温度的有效性，CTD/TD每次刚入水时均需在水表20 cm处停留10 s以上以确保测量探头与水体充分进行温度

交换,在投递过程中匀速缓慢下放和回收,同时小心避免触底。仪器回收后,置于船舱内以避免阳光直射,避免高温光照带来仪器电子器件性能变化。

2.3 卫星数据获取

GF-5卫星于2018年5月9日在太原卫星发射中心成功发射,2019年03月21日正式投入使用。GF-5卫星配置有6台先进有效载荷,观测谱段覆盖紫外到长波红外。其中,B09—B12为GF-5/VIMS传感器的4个热红外通道:B09(8.01—8.39 μm)、B10(8.42—8.83 μm)、B11(10.30—11.30 μm)、B12(11.40—12.50 μm),空间分辨率为40 m,可提供高空间分辨率的海表温度信息。

本文以2019年10月15日星地同步过境的GF-5/VIMS卫星影像进行海表温度反演和温排水遥感提

取与分析。

3 研究方法

3.1 总体技术流程

本文总体技术流程如图2所示。先对地面试验获取的时间序列温度数据进行处理,包括分割与提取、深度校正、分层统计以及异常值剔除,进而获取各航点温度分层数据;随后对地面测量数据进行空间插值以及对GF-5卫星数据进行处理,获取地面和卫星两种手段得到的水体温度;同时,在对各航点温度垂直剖面特征进行分析基础之上,构建稳定温度法对基准温度进行提取;随后,分别进行地面测量和遥感监测两者温升分布范围提取;最后对不同提取方法结果进行比对与分析。

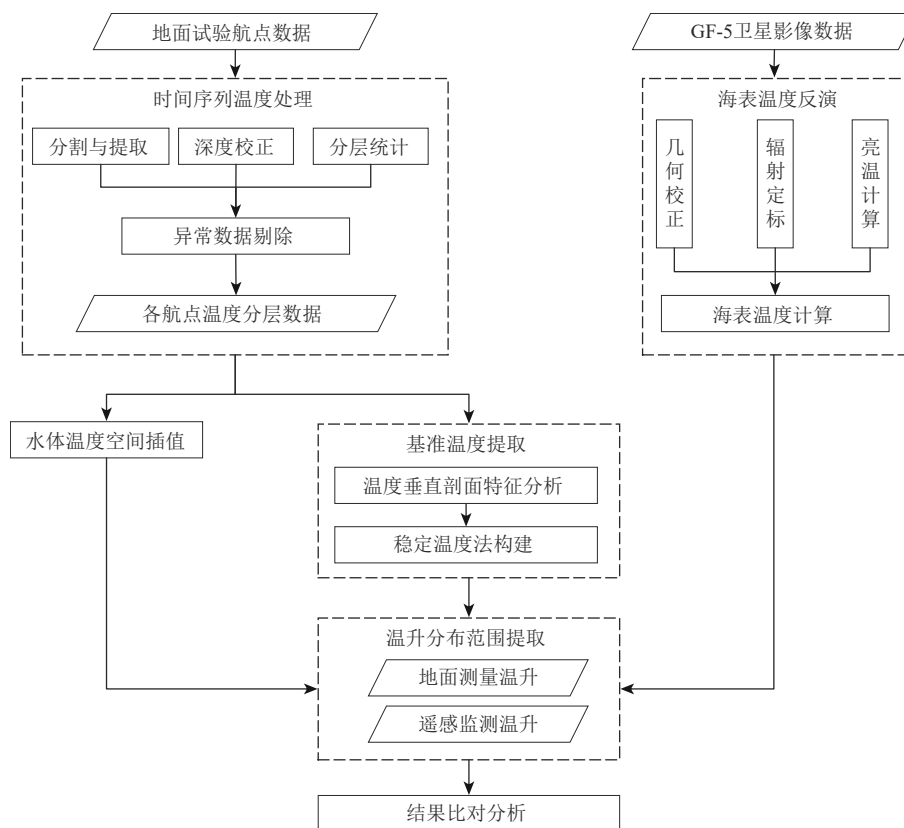


图2 温排水星地协同提取技术路线

Fig. 2 Satellite-marine synergistic extraction technology roadmap of thermal plume

3.2 时间序列温度处理

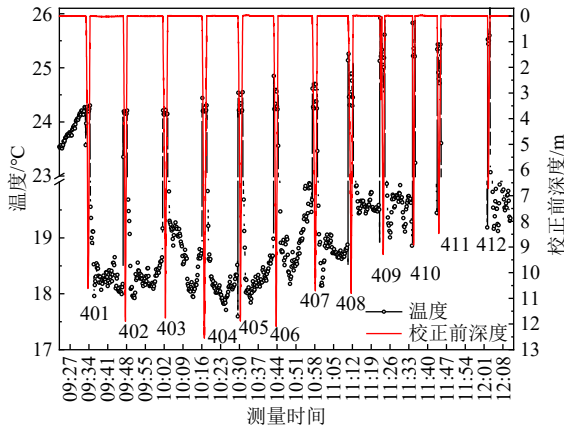
3.2.1 航点数据处理

(1) 航点分割与提取。CTD/TD自容式测量频率为1次/s,整个试验过程均有数据记录,记录内

容包括入水后的水体温度和入水前、出水后的空气温度,因此需要从所有记录数据里面筛选航点处水体温度数据。由于仪器在测量过程中先进水后出水,所以每个航点处的深度数据均呈现由浅入深之后又由深至浅的周期性现象。如图3(a)

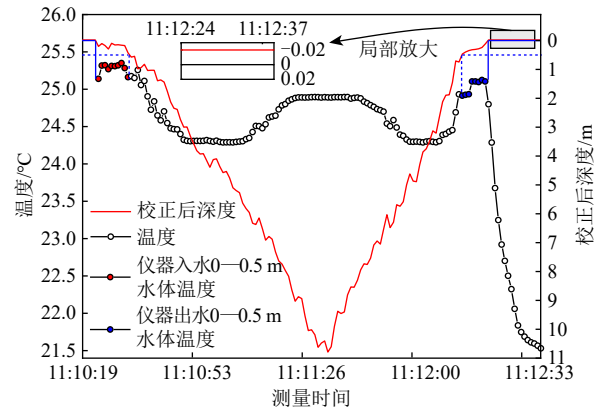
航线4温度序列数据所示, 整个测量过程中温度和深度随时间呈现12个周期变换, 分别对应航线4测量的12个航点。通过图3中规律分析, 仪器刚入水和刚出水时的测量深度为海平面高度, 由仪器记录值可知为0.02 m (真实值应为0 m, 此处0.02 m

由实际大气压与标准大气压差异引起, 后文对该误差进行校正), 故深度从0.02 m增加后再次回到0.02 m为仪器测量一个航点的周期, 各周期内对应的温度值即为相应航点处测量温度序列。



(a) 航线4测量温度序列

(a) Measured temperature sequence of route four



(b) 航点408分层温度数据提取

(b) Stratified temperature data extraction of waypoint 408

图3 地面试验航点温度数据提取

Fig. 3 Data extraction of waypoint temperature in marine test

(2) 深度校正。CTD/TD 仪器现场测量的航点深度包含海平面高度处实际大气压与标准大气压差异引起的相对误差, 需对大气压差异引起的深度误差进行校正以得到仪器入水真实深度, 计算如式 (1) 所示:

$$h = h_m - h_0 \quad (1)$$

式中, h 为校正后仪器入水深度, h_m 为仪器校正前入水深度, h_0 为仪器放置于海平面高度时记录的深度值, 本次试验如前文所述为0.02 m。校正后海表以上深度值为-0.02 m, 如图3 (b) 航点408数据所示。

(3) 分层统计。各航点温度数据提取之后, 根据温升监测需求, 每0.5 m设为一个深度分层, 计为 h_i ($i=0.5, 1.0, 1.5, \dots$), 如 $h_{0.5}$ 分层代表0—0.5 m深度。各深度分层内水体温度的平均值为该层温度, 如式 (2) 所示。以图3 (b) 航点408第0.5 m分层温度数据提取为例, 红色点为仪器从0 m到0.5 m入水过程中测量的10个温度值, 蓝色点为仪器从0.5 m到0 m出水过程中测量的8个温度值, 18个温度数据的平均值25.171 °C即为航点408的0.5 m层温度数据, 其他分层温度类同计算。

$$\bar{T}_i = \frac{\sum_{j=1}^m T_{(h_i)_j}}{m} \quad (2)$$

式中, $\bar{T}_i$ 为分层平均温度 ($i=0.5, 1.0, 1.5, \dots$), $T_{(h_i)_j}$ ($j=1, 2, \dots, m$) 为深度 h_i 内的第 j 个测量点的温度值, m 为第 i 层提取的温度值个数。

3.2.2 异常温度剔除

在测量过程中如果仪器触底或者在入水前受到高温照射, 可能使测量数据存在异常值, 因此需对表层和底层数据进行异常识别与剔除, 对测量数据相邻分层深度的温度值进行梯度计算得到相邻分层深度梯度值, 若梯度值过大则说明对应分层温度存在异常。采用统计学中的格拉布斯 (Grubbs) 准则法 (Grubbs, 1950; 王建, 2002) 对相邻分层温度梯度值进行异常值判断:

(1) 将样本 u_i ($i=1, 2, \dots, m$) 按升序排列成顺序统计量, 其中, m 为样本总数;

(2) 计算样本均值 $\bar{u}$ 和标准差 σ ;

(3) 计算格拉布斯统计量, 如式 (3) 所示:

$$g_i = \frac{|u_i - \bar{u}|}{\sigma} \quad (3)$$

式中, i 值为1、 m , g_1 为下侧格拉布斯数, g_m 为上侧格拉布斯数。

(4) 根据测量值的个数及显著性水平 α 查找格拉布斯表得到对应的格拉布斯准则临界值 $G_{1-\alpha}(m)$, 其中, α 为造成检验错误的概率, $1-\alpha$ 为置信概率, 本研究取 α 为 0.01 (池庆玺和司锡才, 2006);

(5) 判断, 见式 (4):

$$g_i \geq G_{1-\alpha}(m), u_i \text{ 为异常值} \quad (4)$$

式中, i 值为 1、 m 。

(6) 剔除异常值后重复上述步骤, 直到不存在异常值为止。

经计算, 在航点 104、105、218、308 处相邻分层温度梯度存在 4 处异常, 将其去除以避免异常值干扰。

3.3 水体温度空间插值

地面试验测量数据为点状离散分布, 采用克里金空间插值方法 (kriging), 将地面测量结果插值成具有连续分布特征的温度场空间。kriging 是基于地统计学的插值方法, 以空间统计学为理论基础, 通过权重系数的确定, 使内插函数处于最佳状态 (Reynolds 和 Smith, 1994), 如式 (5) 所示:

$$\hat{Z}(s_0) = \sum_{i=1}^N \lambda_i Z(s_i) \quad (5)$$

式中, $Z(s_i)$ 是第 i 个位置的测量值, λ_i 是第 i 个位置处的测量值的未知权重, s_0 是预测位置, N 是测量值个数。

3.4 海表温度反演

遥感数据反演海表温度方法主要分为针对单个通道的算法和针对多个通道的算法。劈窗算法 (Qin 和 Karnieli, 1999; Prata, 1993, 1994; Sobrino 等, 1991) 被证明是一种精度较高的针对多个通道的算法。对 GF-5 热红外谱段进行正射校正、辐射定标等预处理后, 采用两通道 (B09—B10) 劈窗算法对海表温度进行反演。

(1) 正射校正。正射校正可纠正一般系统因素产生的几何形变, 也能消除地形引起的几何形变, 本研究采用 RPC 文件进行正射校正。

(2) 辐射定标。目的是将影像的 DN 值转化为能表征地面热辐射能力大小的物理量, 是反演海表温度的基础, 计算如式 (6) 所示:

$$L = DN \times Gain + Bias \quad (6)$$

式中, L 为辐亮度 (单位: $W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1} \cdot \mu m^{-1}$), $Gain$ 为绝对定标系数增益, $Bias$ 为偏移量, 相关参数见表 1。

表 1 GF-5 全谱段光谱成像仪 B09 与 B10 定标系数

Table 1 The B09 and B10 calibration coefficients of the GF-5 VIMS

波段号	B09	B10
Gain	0.0057	0.0063
Bias	-1.6613	-3.9283

(3) 亮温计算。利用 GF-5/VIMS 传感器通道响应函数, 通过 Planck 函数计算在不同亮度温度输入条件下对应的等效辐亮度, 采用二次拟合 (崔文杰 等, 2020) 建立亮温与辐亮度的拟合关系, 如式 (1) 所示。

$$\begin{aligned} T_{09} &= -0.6679 \times L_{09}^2 + 15.215 \times L_{09} + 212.12 \\ T_{10} &= -0.5496 \times L_{10}^2 + 14.323 \times L_{10} + 210.36 \end{aligned} \quad (7)$$

式中, L_{09} 、 L_{10} 为通道 09 和通道 10 的辐亮度, T_{09} 、 T_{10} 为通道 09 和通道 10 的亮度温度。

(4) 海表温度计算。劈窗算法的一般表达式如式 (8) 所示:

$$T_0 = A_0 + A_1 \times T_{09} + A_2 \times T_{10} \quad (8)$$

式中, T_0 为海表温度, A_0 、 A_1 、 A_2 为温度反演系数参数, 本研究选取观测天顶角 0° 、中纬度条件下多通道劈窗算法修订系数进行计算 (崔文杰 等, 2020), 相关系数见表 2。

表 2 GF-5 全谱段光谱成像仪两通道劈窗算法系数

Table 2 Two-channel split-window algorithm coefficients of the GF-5 VIMS

观测天顶角	劈窗系数	B09-B10
0°	A_0	1.22201
	A_1	-1.20183
	A_2	2.20166

3.5 基准温度提取

3.5.1 基于剖面特征基准温度提取

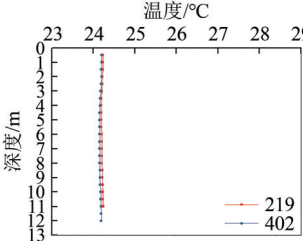
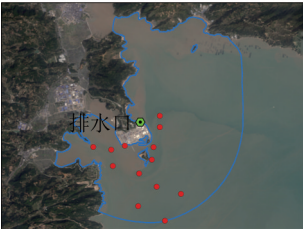
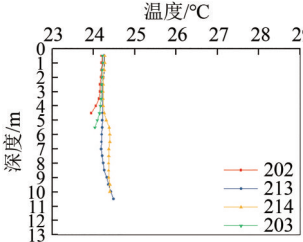
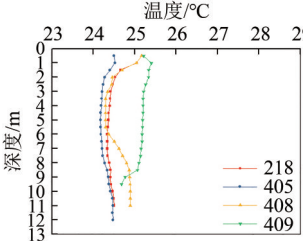
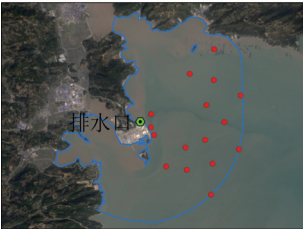
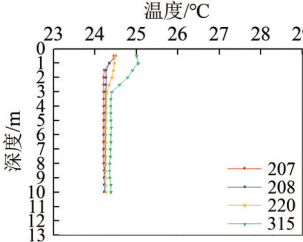
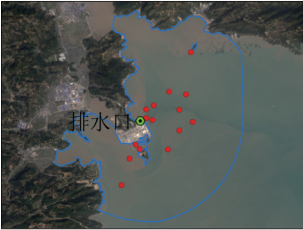
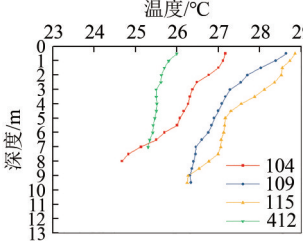
(1) 航点温度垂直剖面特征分析。通过对实测海水温度随深度的剖面变化规律进行分析, 将其归纳为 7 种类型。选取各类型代表性数据, 以深度为纵轴, 温度为横轴制作垂直剖面图, 再结合各类型航点空间分布位置, 分析各种类型垂直剖面温度特征和空间分布特征, 如表 3 所示。

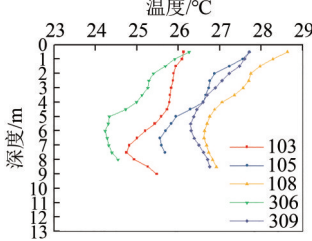
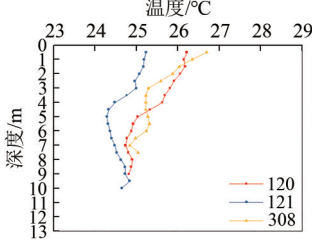
(2) 实测稳定温度法基准温度提取。由表 3 可得, 类型 1 航点剖面数据保持稳定, 空间位置分散分布且不在排水口附近聚集, 所以不受温排水的影响。类型 2 航点剖面数据前端稳定, 一定深度后

温度略有升高或降低，空间分布较分散，所以认为保持稳定的前几层不受温排水影响。类型3温度数据中端主体趋于稳定，且位置分散分布，受温排水影响的可能性较小。类型4多数点位远离排水口，部分点位虽接近排水口但其垂直剖面特征在一定深度后主体趋于稳定，说明这些航点温度在一定深度以下不受温排水影响。类型5温度数据一

直降低，没有趋于稳定的温度层，且部分点位聚集在排水口附近，无法排除温排水的影响。类型6数据先降低后升高，始终没有趋于稳定，可能受到温排水影响。类型7中剖面曲线没有明显的规律特征，通过对其空间分布位置分析，发现部分点位分布在排水口附近，受温排水影响的可能性很大。

表3 地面试验航点垂直剖面图分类及各类型空间分布位置

类型	代表性垂直剖面	空间分布位置	垂直剖面温度特征	空间分布特征
类型1			航点各层温度数据保持稳定，基本不变，表现为一条直线	空间位置分散分布，没有集中在排水口附近，主要分布在排水口以南
类型2			航点温度数据先主体趋于稳定，后小范围变化，表现为一条直线之后略有升高或降低	分布在排水口以东和远离排水口的西部区域
类型3			航点温度数据前端不稳定，中端趋于稳定，后端升高或降低	分布在排水口以东、东北、东南方向，没有在排水口附近聚集
类型4			航点温度数据起初不稳定，后主体趋于稳定，表现为先升高或降低后趋于一条直线	空间位置较分散，主要分布在排水口东北、正东和西南方向，没有全部集中在排水口附近
类型5			航点温度一直降低，没有趋于稳定	分布在排水口附近及其正北方向

类型	代表性垂直剖面	空间分布位置	垂直剖面温度特征	空间分布特征
类型6			航点温度先降低后升高,一直没有趋于稳定	分布在排水口附近及其以北方向
类型7			航点温度没有明显的规律特征	分布在排水口附近及其正北方向

综上所述,前4种类型的垂直剖面温度分别在整体、前端、中端、后端存在连续多层保持稳定的数据且空间分布远离排水口,称之为稳定温度点,可用于基准温度提取,这些航点大多分布在核电站排水口正东、东南以及南部方向,考虑到卫星遥感反演的是表层温度,类型3和类型4表层温度并不是稳定温度,因此,本文只使用类型1和类型2的表层稳定温度点进行基准温度提取。后3种类型的垂直剖面数据不存在连续稳定温度层说明受到了温排水影响或者无法排除是否受到影响,称为不稳定温度点,不能用于基准温度提取,这些航点主要分布在排水口附近及其正北方向。

本次试验共获取49个稳定温度点,包含18个表层稳定温度点;23个不稳定温度点。分别对18个表层稳定温度点的各自稳定层温度值求平均得到各航点稳定温度,再对18个航点稳定温度求平均得到实测数据基准温度,称之为实测稳定温度法,该方法是基于地面试验实测数据垂直廓线特征提取基准温度位置与大小。

3.5.2 基于卫星遥感基准温度提取

参考实测稳定温度法获取的基准温度位置,从卫星影像反演的海表温度数据提取遥感监测基准温度。通过实测稳定温度法得到不受温排水影响的遥感影像空间点位分布,采用这些点位信息提取遥感影像海表温度数据,并计算平均值得到热红外遥感监测基准温度。

3.6 温升分布范围提取

基准温度确定后,通过式计算温升,并通过分级(许静等,2014)标识不同温升强度,如表4所示。

$$\Delta T = T - T_r \tag{9}$$

式中,ΔT为温升,T为地面试验插值温度或GF-5卫星影像反演温度,T_r为提取的基准温度值。

表4 温升级别划分
Table 4 Thermal plume intensity level division

温升强度	温升范围
一级	1℃≤ΔT<2℃
二级	2℃≤ΔT<3℃
三级	3℃≤ΔT<4℃
四级	4℃≤ΔT<5℃
五级	ΔT≥5℃

4 结果与分析

4.1 地面测量水体温度

水体0.5 m分层温度插值结果如图4所示。由图4可得,高温区主要集中在排水口附近,温度由排水口向外逐渐扩散,主体扩散方向为排水口正北方向,距离排水口越远的位置温度值越低,说明这些区域受温排水的影响越小。排水口以南区域温度空间分布均匀,说明这些区域温排水分布较少。温度由排水口向正北呈递减分布,这与核电站所处海湾洋流有关,使温排水排放到排水口以北区域。

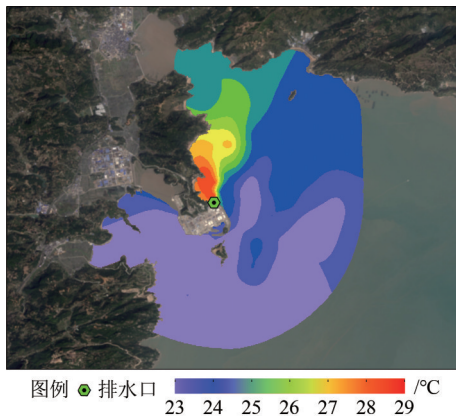


图4 地面测量0.5 m分层深度温度分布图

Fig. 4 Temperature distribution of 0.5 m stratified depth in marine measurement

4.2 遥感反演海表温度

GF-5 卫星影像温度反演结果如图5所示。由图5可知,排水口附近的温度较高,温度由排水口向北扩散,而排水口以东和以南区域温度较低,且基本保持不变,说明这些区域受温排水影响不大。

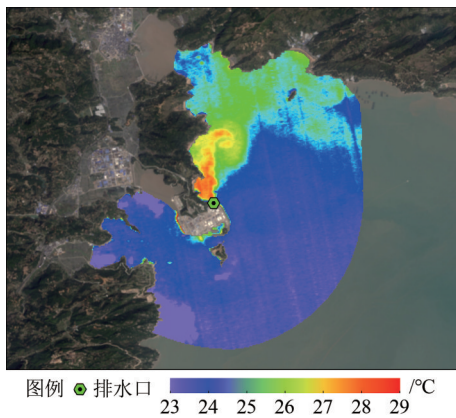


图5 GF-5卫星遥感监测温度分布图

Fig. 5 GF-5 monitoring temperature distribution

由地面实测0.5 m水体温度(图4)和GF-5卫星遥感反演温度(图5)可得,两者的高温区均集中在排水口附近,并且温度均由排水口向正北方向扩散。两种监测手段得到的温度值在排水口东部、东南和南部区域较低,说明这些区域较少受到温排水影响,且离排水口越远,温排水造成的热污染强度越小。综上所述,由地面试验和GF-5卫星遥感两种监测手段得到的温度分布范围和扩散趋势基本一致。

4.3 基准温度与比对分析

采用构建的实测稳定温度法提取地面试验和GF-5卫星影像的基准温度,并分别计算研究区平

均温度,如图6所示。研究区地面试验与卫星影像的平均温度分别为25.5 °C和26.4 °C,相差0.9 °C,基准温度分别为24.3 °C和25.6 °C,相差1.3 °C。比可见,地面试验与卫星影像的平均温度差异在1 °C以内,达到海表温度反演精度要求。引起平均温度差异的原因主要包括:(1)CTD/TD的是一个点的温度,而GF-5卫星影像测量的是40 m×40 m的平均像元温度,由此产生了点源温度和面源温度的差异;(2)水体测量的0.5 m以内平均温度与遥感反演的表皮温度存在一定的差异;(3)空间插值误差和遥感反演算法自身误差;(4)地面测量时段内海水温度受光照或风浪影响而产生的局部升温或降温变化。由于温排水监测采用的是基于基准温度的相对温差,即式(9)中的 ΔT ,而且遥感监测使用的基准温度是基于遥感反演水表温度结果提取的,因此地面测量和遥感反演的相对差异对温升提取的影响较小。

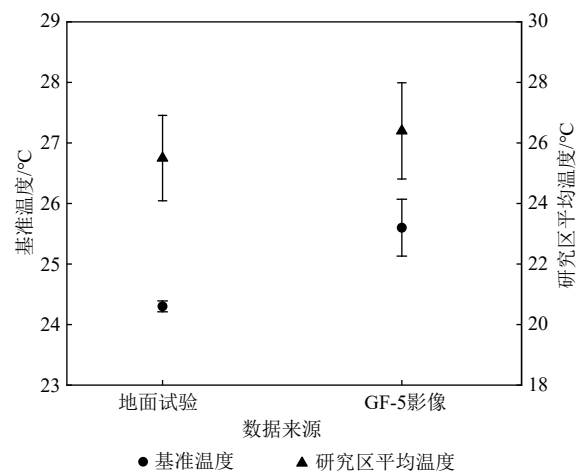


图6 地面测量和GF-5卫星遥感基准温度及平均温度

Fig. 6 Reference and average temperature of marine measurement and GF-5 monitoring

4.4 温升空间分布与比对分析

研究区地面试验测量与GF-5卫星遥感监测不同强度温排水空间分布结果如图7所示。从地面监测和卫星遥感监测温升结果可以看出,热污染在排水口附近及其以北方向均有分布,两者的二、三、四级温升分布范围、分布趋势基本一致,温升二级及以上的区域分布在排水口附近;卫星遥感监测的一级温升向北扩散的同时有部分又由北向东扩散,而地面试验监测的一级温升大多向北流动,向东北方向流动较少,卫星遥感监测的一级温升范围略大于地面试验一级温升范围,两者在排水口以东以及东南方向均不存在温升现象。

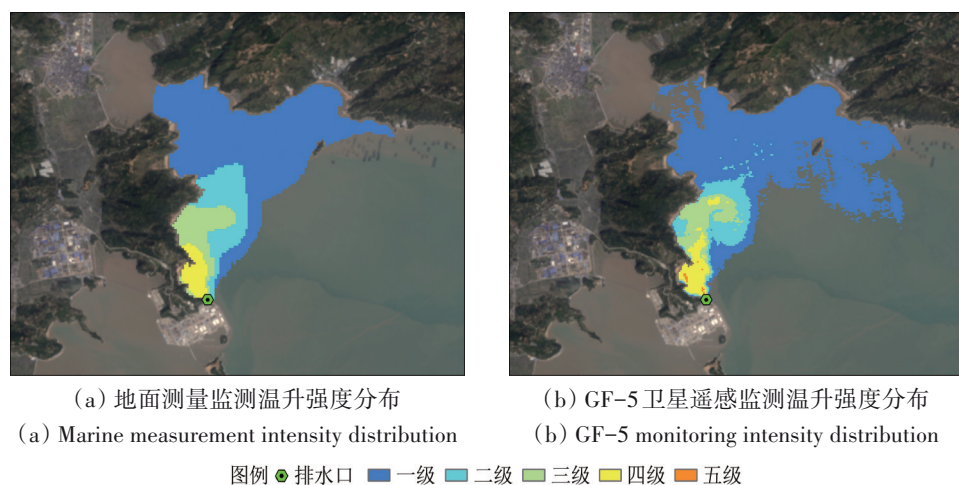


图7 地面测量监测与GF-5卫星遥感监测不同强度温升分布

Fig. 7 Marine measurement and GF-5 monitoring different intensity distribution

地面测量监测表明, 温排水热污染主要分布在核电站排水口附近及其正北方向, 导致这些位置航点的剖面温度波动较大, 这与表3中的不稳定温度点(类型5—类型7)相对应; 在排水口正东、东南、南部方向不存在热污染现象, 所以这些位置航点的剖面温度波动较小, 存在连续的温度稳定层, 对应表3中的稳定温度点(类型1—类型4)。说明本研究构建的基准温度提取方法能有效提取地面实测数据热污染分布情况, 可以避免因受到温排水的影响而造成的基准温度值偏高现象, 避免基准温度值不稳定以及出现异常值的情况。

分别计算地面试验与卫星遥感监测的温升分级面积及其面积比例, 如图8所示。两种手段监测的温升面积和温升面积比例由一级到五级逐渐递减。地面测量监测和GF-5卫星遥感监测得到的热污染总面积分别为15.00 km²、16.53 km², 两者面积相差1.53 km², 分别占地面和遥感监测热污染总面积的10.17%和9.23%。地面试验得到的一级温升面积为10.65 km², 占总面积的70.96%, GF-5卫星遥感监测的一级温升面积为12.69 km², 占总面积的76.76%, 两者面积相差2.04 km², 占地面测量监测热污染总面积的13.60%。由地面试验数据和GF-5卫星遥感监测得到的二到四级温升面积差异分别为0.39 km²、0.21 km²、0.05 km², 面积差异占地面测量监测热污染总面积的比例分别为2.59%、1.39%、0.32%, 可见两种手段得到的二到四级温升面积非常接近。地面测量监测没有五级温升, 而GF-5卫星遥感数据监测得到的五级温升面积也仅仅为0.03 km², 星地面积差异占地面测量监测热

污染总面积的0.22%。总体而言, 地面试验监测温升扩散面积与GF-5卫星遥感监测的温升扩散面积差异较小。综上所述, 采用实测稳定温度法提取实测数据和卫星遥感数据的基准温度, 能够准确、有效的提取核电站热污染分布范围和大小。

4.5 不同方法比对分析

为了比对实测稳定温度法与当前其他基准温度提取方法的差异, 分别采用多点平均温度法(近岸多点)、取水口温度法、邻近区域温度替代法、校正的海湾平均法、半径区域平均温度法(5 km半径)、温升混合区最低温度法共6种方法来计算GF-5卫星遥感监测基准温度以及对应的温升分布, 结果分别如表5和图9所示。

由图9可得, 多点平均温度法(近岸多点)、取水口温度法、邻近区域温度替代法3种方法得到的热污染分布范围显著小于地面测量监测结果(图7(a))。其中, 多点平均温度法(近岸多点)和取水口温度法提取的热异常分布范围最小, 两者的热污染均分布主要集中于排水口附近; 邻近区域温度替代法虽然提取的一级温升分布范围略大, 但与地面试验监测的一级温升分布范围相比差异仍然较大。

校正的海湾平均法、半径区域平均温度法(5 km半径)、温升混合区最低温度法三者得到的热污染分布范围均显著大于地面测量监测结果。其中, 3种方法提取的二级温升分布范围明显大于地面测量监测的二级温升; 另一方面, 3种方法在排水口附近存在面积较大的五级温升区域, 而地面测量监测并没有五级温升。

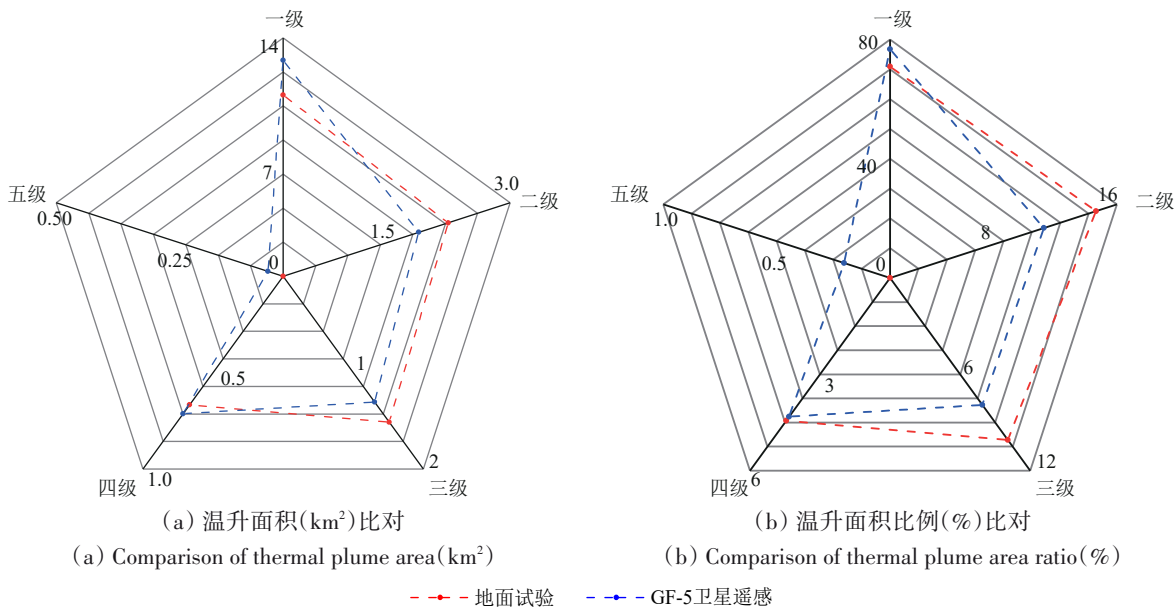


图8 地面测量与GF-5卫星遥感监测温升面积和面积比例比对

Fig. 8 Comparison of thermal plume area and its ratio between marine measurement and GF-5 monitoring

表5 不同方法GF-5卫星遥感基准温度提取结果

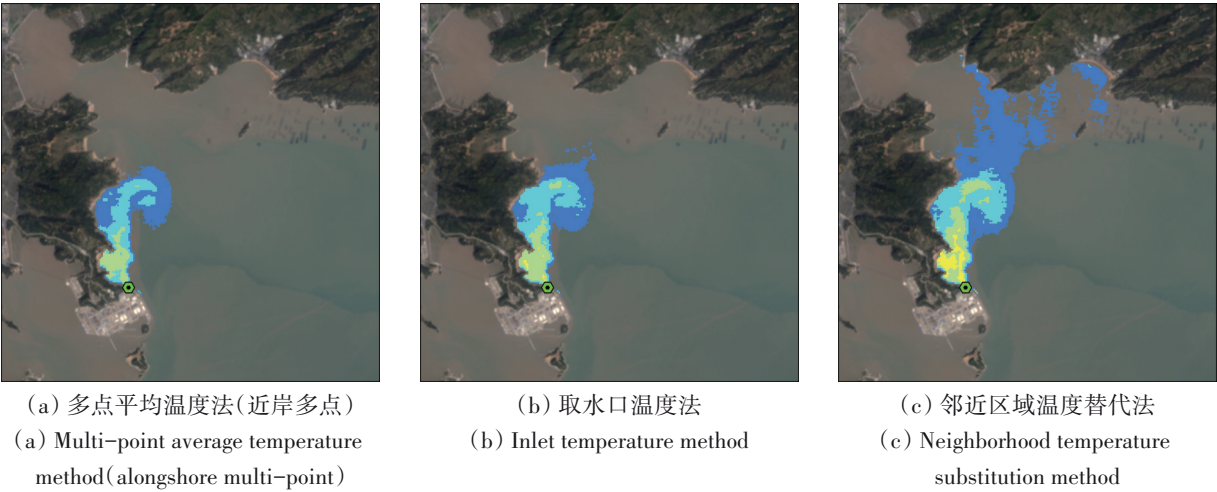
Table 5 Reference temperature of GF-5 monitoring with different methods

方法	基准温度/℃
多点平均温度法(近岸多点)	27.0
取水口温度法	26.6
邻近区域温度替代法	26.2
校正的海湾平均法	25.1
半径区域平均温度法(5 km半径)	24.9
温升混合区最低温度法	24.5

综合比对表明，多点平均温度法（近岸多点）、取水口温度法和邻近区域温度替代法显著低估了温排水影响，而校正的海湾平均法、半径区域平均温度法（5 km半径）和温升混合区最低温

度法却显著高估了温排水影响，实测稳定温度法提取结果最为客观、准确。

不同基准温度方法遥感监测各等级温升面积及其比例、星地监测面积比对如图10所示。实测稳定温度法、多点平均温度法（近岸多点）、取水口温度法、邻近区域温度替代法、校正的海湾平均法、半径区域平均温度法（5 km半径）、温升混合区最低温度法遥感监测温升总面积与地面测量的差异分别为1.53 km²、11.95 km²、11.12 km²、7.69 km²、6.61 km²、8.46 km²、14.93 km²，差异占比分别为10.17%、79.65%、74.11%、51.25%、44.09%、56.39%、99.53%。可见实测稳定温度法提取的星地热污染差异最小，相较于其他方法精度提高了4—10倍。



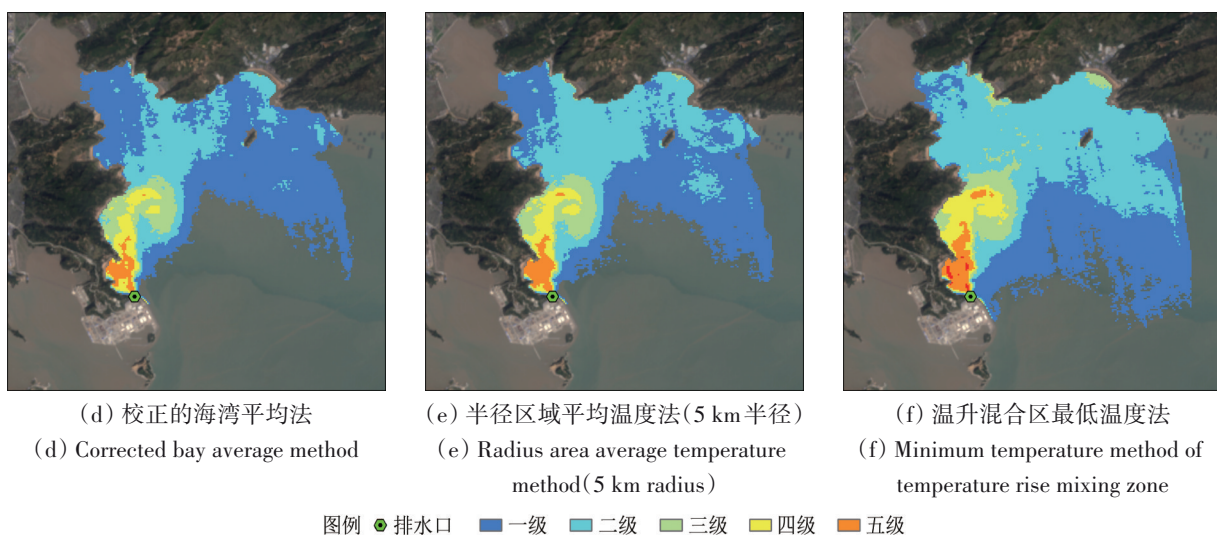


图9 不同方法GF-5卫星遥感温升提取结果

Fig. 9 Thermal plume of GF-5 monitoring with different methods

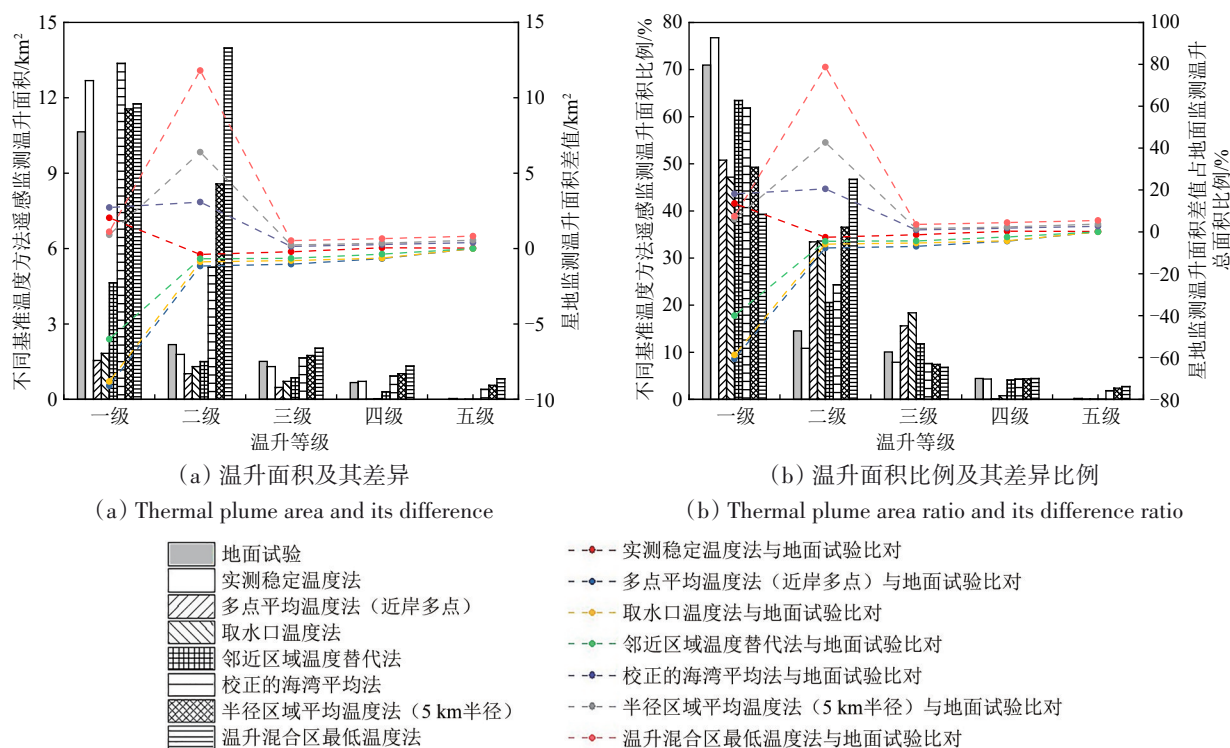


图10 不同基准温度方法遥感监测温升面积、面积比例及其比对

Fig. 10 Area, ratio and its comparison of thermal plume to different reference temperature methods by remote sensing monitoring

对于一级温升提取结果, 实测稳定温度法、半径区域平均温度法 (5 km 半径) 和温升混合区最低温度法三者提取的结果相对一致, 面积差异占比在 6%—14%, 其余方法差异占比均较大 (18% 以上); 对于二级温升提取结果, 实测稳定温度法提取的面积差异为 0.39 km², 面积差异占比为 2.59%, 与地面测量监测结果最为一致, 多点平

均温度法 (近岸多点)、取水口温度法和邻近区域温度替代法三者的差异占比在 4%—8%, 其余方法均在 20% 以上; 对于 3 级温升提取结果, 实测稳定温度法、校正的海湾平均法和半径区域平均温度法 (5 km 半径) 三者结果差异占比均在 1.6% 以内, 其中校正的海湾平均法略优于实测稳定温度法, 其余方法差异占比均在 3% 以上; 实测稳定温

度法提取的四级温升差异占比为0.32%，而其他方法差异占比相对较高（1.7%以上）。总体而言，相较于当前其他基准温度提取方法，实测稳定温度法提取的星地温排水面积最为一致，误差最小，实测稳定温度法能够有效、准确的提取温排水分布范围和温升强度。

5 结 论

通过海面定点剖面观测试验共获取72个航点不同深度处温度数据，并对数据进行分割提取、深度校正和分层统计，以及基于Grubbs统计准则进行异常值剔除。在分析航点垂直剖面温度特征的基础上，结合航点空间分布特征构建了基准温度提取的实测稳定温度法，并应用于地面测量监测和GF-5卫星遥感反演监测。通过将实测稳定温度法以及当前6种基准温度提取方法分别与地面测量监测结果进行比对，分析不同方法的提取精度。本文得出的主要结论如下：

（1）通过对测量点位温度垂直剖面特征分析，将剖面形态总结为7种不同类型，进一步对7种形态进行归纳，划分为稳定温度点和不稳定温度点，进一步基于稳定温度点特征，构建基准温度提取实测稳定温度法。通过对温排水空间范围分析表明，稳定温度点均位于温升范围之外，而不稳定温度点均位于温升范围之内，直观证明实测稳定温度法客观有效。

（2）地面测量监测表明，温排水热污染主要分布在核电站排水口附近及其正北方向，对应23个不稳定温度点的分布位置；在排水口正东、东南、南部方向不存在热污染现象，与49个稳定温度点位相对应，进一步表明航点垂直剖面温度特征可以反映温排水热污染分布情况，也证明了实测稳定温度法的有效性。

（3）不同基准温度提取方法比对表明，基于实测稳定温度法提取得到的星地同步热污染分布范围、强度和扩散趋势最为一致，提取效果明显优于其他基准温度提取方法，提取面积误差最小，面积差异为1.53 km²，占地面监测热污染总面积的10.17%，相对于其他方法精度提高了4—10倍，而多点平均温度法（近岸多点）、取水口温度法、邻近区域温度替代法、校正的海湾平均法、半径区域平均温度法（5 km半径）、温升混合区最低温度法的星地面积差异分别为11.95 km²、11.12 km²、

7.69 km²、6.61 km²、8.46 km²、14.93 km²，差异占比分别为79.65%、74.11%、51.25%、44.09%、56.39%、99.53%。

总体而言，通过星地协同手段构建的实测稳定温度法提取核电温排水分布效果相较于传统方法更具有科学依据且精度更高，但该方法需要现场做大量的星地同步试验，操作复杂且费时费力，对缺乏星地同步观测数据情况下基准温度的提取存在局限性。研究表明，校正的海湾平均法提取温排水热污染精度仅次于实测稳定温度法，星地温升面积差异为6.61 km²，可用于缺乏星地同步实测数据时长时序温排水卫星遥感监测。另外，温排水时空变化特征和对水环境的影响分析是下一步研究重点。本研究方法基于宁德核电站温排水星地同步监测数据而构建，对于其他核电站温排水星地协同监测具有重要参考价值。

志 谢 感谢十三五民用航天技术预先研究项目（国产卫星信息智能分发技术）给本文提供的技术支持！

参考文献(References)

- Arieli R N, Almogi-Labin A, Abramovich S and Herut B. 2011. The effect of thermal pollution on benthic foraminiferal assemblages in the Mediterranean shoreface adjacent to Hadera power plant (Israel). *Marine Pollution Bulletin*, 62(5): 1002-1012 [DOI: 10.1016/j.marpolbul.2011.02.036]
- Bamber R N and Seaby R M H. 2004. The effects of power station entrainment passage on three species of marine planktonic crustacean, *Acartia tonsa* (Copepoda), *Crangon crangon* (Decapoda) and *Homarus gammarus* (Decapoda). *Marine Environmental Research*, 57(4): 281-294 [DOI: 10.1016/j.marenvres.2003.08.002]
- Chen C Q, Shi P and Mao Q W. 2003. Application of remote sensing techniques for monitoring the thermal pollution of cooling-water discharge from nuclear power plant. *Journal of Environmental Science and Health, Part A*, 38(8): 1659-1668 [DOI: 10.1081/ESE-120021487]
- Chen C W, Weintraub L H Z, Herr J and Goldstein R A. 2000. Impacts of a thermal power plant on the phosphorus TMDL of a reservoir. *Environmental Science and Policy*, 3 Suppl 1: 217-223 [DOI: 10.1016/S1462-9011(00)00058-7]
- Cheng Y L, Hao Q Z and Hu J. 2011. Effects of topography on diffusion of thermal discharge in power plant. *Procedia Environmental Sciences*, 11: 618-623 [DOI: 10.1016/j.proenv.2011.12.096]
- Chew L L, Chong V C, Wong R C S, Lehet P, Ng C C and Loh K H. 2015. Three decades of sea water abstraction by Kapar power plant (Malaysia): what impacts on tropical zooplankton community? *Marine Pollution Bulletin*, 101(1): 69-84 [DOI: 10.1016/j.marpol-

- bul.2015.11.022]
- Chi Q X and Si X C. 2006. Discussion for radar signal sorting method based on the Grubbs' Criterion. *Chinese Journal of Sensors and Actuators*, 19(6): 2625-2629 (池庆玺, 司锡才. 2006. 基于格拉布斯准则的雷达信号分选方法的探讨. *传感技术学报*, 19(6): 2625-2629) [DOI: 10.3969/j.issn.1004-1699.2006.06.070]
- Cui W J, Li J G, Li Z, Zhu L, Wang D Z and Zhang N. 2020. Simulation of sea surface temperature retrieval based on GF-5 thermal infrared data. *Journal of Remote Sensing*, 24(7): 852-866 (崔文杰, 李家国, 李忠, 朱利, 王殿忠, 张宁. 2020. 高分五号热红外传感器多通道 SST 反演. *遥感学报*, 24(7): 852-866) [DOI: 10.11834/jrs.20209062]
- Donlon C J, Minnett P J, Gentemann C, Nightingale T J, Barton I J, Ward B and Murray M J. 2002. Toward improved validation of satellite sea surface skin temperature measurements for climate research. *Journal of Climate*, 15(4): 353-369 [DOI: 10.1175/1520-0442(2002)015<0353:TIVOSS>2.0.CO;2]
- Grubbs F E. 1950. Sample criteria for testing outlying observations. *The Annals of Mathematical Statistics*, 21(1): 27-58 [DOI: 10.1214/aoms/1177729885]
- Hamrick J M and Mills W B. 2000. Analysis of water temperatures in Conowingo Pond as influenced by the Peach Bottom atomic power plant thermal discharge. *Environmental Science and Policy*, 3 Suppl 1: 197-209 [DOI: 10.1016/S1462-9011(00)00053-8]
- Hosoda K, Murakami H, Sakaida F and Kawamura H. 2007. Algorithm and validation of sea surface temperature observation using MODIS sensors aboard terra and aqua in the Western North Pacific. *Journal of Oceanography*, 63(2): 267-280 [DOI: 10.1007/s10872-007-0027-4]
- Huang F M, Lin J and Zheng B X. 2019. Effects of thermal discharge from coastal nuclear power plants and thermal power plants on the thermocline characteristics in sea areas with different tidal dynamics. *Water*, 11(12): 2577 [DOI: 10.3390/w11122577]
- Jiang Z B, Du P, Liao Y B, Liu Q, Chen Q Z, Shou L, Zeng J N and Chen J F. 2019. Oyster farming control on phytoplankton bloom promoted by thermal discharge from a power plant in a eutrophic, semi-enclosed bay. *Water Research*, 159: 1-9 [DOI: 10.1016/j.watres.2019.04.023]
- Jiang Z B, Zeng J N, Chen Q Z, Huang Y J, Liao Y B, Xu X Q and Zheng P. 2009. Potential impact of rising seawater temperature on copepods due to coastal power plants in subtropical areas. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 368(2): 196-201 [DOI: 10.1016/j.jembe.2008.10.016]
- Kelly P, Clementson L, Davies C, Corney S and Swadling K. 2016. Zooplankton responses to increasing sea surface temperatures in the southeastern Australia global marine hotspot. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 180: 242-257 [DOI: 10.1016/j.ecss.2016.07.019]
- Liang S S, Zhang B, Li J S, Zhang H and Shen Q. 2012. Distribution of therm-water pollution of nuclear power plant using the thermal infrared band of HJ-IRS data-taking Daya Bay as an example. *Remote Sensing Information*, (2): 41-46 (梁珊珊, 张兵, 李俊生, 张浩, 申茜. 2012. 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. *遥感信息*, (2): 41-46) [DOI: 10.3969/j.issn.1000-3177.2012.02.008]
- Liu Y L, Huang S T, Yi P Y and Wu D. 2020. The thermal discharge retrieve and analysis of Hongyanhe district with Landsat-8 and GF-5 image. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 569: 012062 [DOI: 10.1088/1755-1315/569/1/012062]
- Lowe S A, Schuepfer F and Dunning D J. 2009. Case study: three-dimensional hydrodynamic model of a power plant thermal discharge. *Journal of Hydraulic Engineering*, 135(4): 247-256 [DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9429(2009)135:4(247)]
- Prata A J. 1993. Land surface temperatures derived from the advanced very high resolution radiometer and the along-track scanning radiometer: 1. Theory. *Journal of Geophysical Research*, 98(D9): 16689-16702 [DOI: 10.1029/93jd01206]
- Prata A J. 1994. Land surface temperatures derived from the advanced very high resolution radiometer and the along-track scanning radiometer: 2. Experimental results and validation of AVHRR algorithms. *Journal of Geophysical Research*, 99(D6): 13025-13058 [DOI: 10.1029/94jd00409]
- Qin Z H and Karnieli A. 1999. Progress in the remote sensing of land surface temperature and ground emissivity using NOAA-AVHRR data. *International Journal of Remote Sensing*, 20(12): 2367-2393 [DOI: 10.1080/014311699212074]
- Reutter J M and Herdendorf C E. 1976. Thermal discharge from a nuclear power plant: predicted effects on lake Erie fish. *The Ohio Journal of Science*, 76(1): 39-45
- Reynolds R W and Smith T M. 1994. Improved global sea surface temperature analyses using optimum interpolation. *Journal of Climate*, 7(6): 929-948 [DOI: 10.1175/1520-0442(1994)007<0929:IGSSTA>2.0.CO;2]
- Shen Y M, Li Y C and Chwang A T. 1996. Quasi-three-dimensional refined modelling of turbulent flow and water quality in coastal waters. *Science in China Series E-Technological Sciences*, 39(4): 342-353 [DOI: 10.1360/ye1996-39-4-342]
- Sobrino J A, Coll C and Caselles V. 1991. Atmospheric correction for land surface temperature using NOAA-11 AVHRR channels 4 and 5. *Remote Sensing of Environment*, 38(1): 19-34 [DOI: 10.1016/0034-4257(91)90069-I]
- Suh S W. 2001. A hybrid near-field/far-field thermal discharge model for coastal areas. *Marine Pollution Bulletin*, 43(7/12): 225-233 [DOI: 10.1016/s0025-326X(01)00074-1]
- Wang J. 2002. Key technology of dam safety monitoring integrated intelligent expert system. Nanjing: Hohai University: 65-67 (王建. 2002. 大坝安全监控集成智能专家系统关键技术研究. 南京: 河海大学: 65-67)
- Wang Y S, Lou Z P, Sun C C and Sun S. 2008. Ecological environment changes in Daya Bay, China, from 1982 to 2004. *Marine Pollution Bulletin*, 56(11): 1871-1879 [DOI: 10.1016/j.marpolbul.2008.07.017]
- Wang Z H, Zhao J G, Zhang Y J and Cao Y. 2009. Phytoplankton community structure and environmental parameters in aquaculture areas of Daya Bay, South China Sea. *Journal of Environmental Sciences*, 21(9): 1268-1275 [DOI: 10.1016/s1001-0742(08)62414-6]
- Wu C, Wang Q, Yang Z and Wang W. 2007. Monitoring heated water pollution of the DaYaWan nuclear power plant using TM images. *International Journal of Remote Sensing*, 28(5): 885-890 [DOI: 10.1080/01431160600580616]

- Wu C Q, Wang Q, Wang W J and Wang C Z. 2006. Monitoring and evaluating therm-water pollution of Dayawan by TM images. *Environmental Monitoring in China*, 22(3): 80-84 (吴传庆, 王桥, 王文杰, 王昌佐. 2006. 利用TM影像监测和评价大亚湾温排水热污染. *中国环境监测*, 22(3): 80-84) [DOI: 10.3969/j.issn.1002-6002.2006.03.026]
- Xu J, Zhu L, Jiang J, Li J G, Zhao S H and Yuan L. 2014. Monitoring thermal discharge in Daya Bay plant based on thermal infrared band of HJ-1B and TM remote sensing data. *China Environmental Science*, 34(5): 1181-1186 (许静, 朱利, 姜建, 李家国, 赵少华, 袁蕾. 2014. 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. *中国环境科学*, 34(5): 1181-1186)
- Zeng P, Chen H Q, Ao B C, Ji P, Wang X J and Ou Z L. 2002. Transport of waste heat from a nuclear power plant into coastal water. *Coastal Engineering*, 44(4): 301-319 [DOI: 10.1016/S0378-3839(01)00039-4]
- Zhu L, Wang Q, Wu C Q and Li J G. 2016. Principle and Application of Thermal Discharge Monitoring Using Remote Sensing. Beijing: China Environmental Publishing House: 104-113 (朱利, 王桥, 吴传庆, 李家国. 2016. 温排水遥感监测原理与示范. 北京: 中国环境出版社: 104-113)
- Zhu L, Zhao L M, Wang Q, Zhang A L, Wu C Q, Li J G and Shi J X. 2014. Monitoring the thermal plume from coastal nuclear power plant using satellite remote sensing data: modeling and validation. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 34(11): 3079-3084 (朱利, 赵利民, 王桥, 张爱玲, 吴传庆, 李家国, 石继香. 2014. 核电站温排水分布卫星遥感监测及验证. *光谱学与光谱分析*, 34(11): 3079-3084) [DOI: 10.3964/j.issn.1000-0593(2014)11-3079-06]

Satellite-marine synergistic extraction and analysis of reference temperature of thermal plume from nuclear power by taking Ningde as an example

WANG Yaping¹, MA Xiuxiu^{1,2}, LI Jiaguo², ZHU Li³, LI Kaiyun²

1. School of Surveying and Land Information Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454003, China;

2. Aerospace Information Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China;

3. Ministry of Ecology and Environment Center for Satellite Application on Ecology and Environment, Beijing 100094, China

Abstract: Nuclear power is actively used in China to promote construction projects. Monitoring and evaluating the impact of thermal plume from nuclear power on the surrounding water environment not only provide important decision-making basis for the planning, construction, and operation of nuclear-power-generating units but also hold significant value for marine water quality and ecological protection.

An objective and accurate reference temperature extraction serves as the basis for the remote sensing monitoring and evaluation of the thermal pollution of the thermal plume. In this paper, the satellite-marine synergistic monitoring of the Ningde nuclear power plant is taken as an example. By analyzing the vertical profile characteristics of 72 discrete temperature measurement points, it is divided into 7 profile morphologies, from which the stable temperature points are summarized. A satellite-marine synergistic method for extracting the reference temperature, hereinafter referred to as the measured stable temperature method, is then built based on these morphologies. This method can solve some problems associated with the reference temperature settings during the implementation of marine measurement monitoring and thermal infrared remote sensing monitoring, such as the independence of the reference temperature calculation and the lack of satellite-marine synergistic processing, both of which reduce the comparability of monitoring results.

Results of the satellite-marine synchronous monitoring from the thermal plume extracted by the measured stable temperature method show the highest consistency with the distribution range and intensity-to-diffusion trend, and the extraction effect of this method is significantly better than those of other reference temperature extraction methods. The proposed method also achieves the smallest difference of 1.53 km² in the satellite-marine monitoring area and reports a 4- to 10-fold improvement in its accuracy compared with other methods. By comparison, the satellite-marine area differences of the multi-point average temperature method (alongshore multi-point), inlet temperature method, neighborhood temperature substitution method, corrected bay average method, radius area average temperature method (5 km radius), and minimum temperature method in the temperature rise mixing zone are 11.95, 11.12, 7.69, 6.61, 8.46, and 14.93 km², respectively.

The measured stable temperature method can objectively and accurately extract the distribution range and size of thermal pollution of the thermal plume from a nuclear power plant, hence carrying an important application value in monitoring the thermal pollution of the thermal plume.

Key words: thermal plume, satellite-marine synergy, GF-5, reference temperature, thermal pollution, remote sensing

Supported by National Natural Science Foundation of China (No. 41971391); Ph.D. Fund Project of Henan Polytechnic University (No. B2015-22)