

文章编号: 1672-8785(2025)12-0067-09

基于航空红外遥感的核电温排水 监测发展与展望

张长兴^{1,2} 王晟玮^{1,2} 王跃明^{1,2*} 张 恩^{3,4} 姚 祎^{1,2} 韩贵丞^{1,2}张 东^{1,2} 庄晓琼^{1,2} 何道刚^{1,2} 薛 庆^{3,4} 石海岗^{3,4}

(1. 中国科学院上海技术物理研究所, 上海 200083;

2. 中国科学院空间主动光电技术重点实验室, 上海 200083;

3. 核工业航测遥感中心, 河北 石家庄 050002;

4. 河北省航空探测与遥感技术重点实验室, 河北 石家庄 050002)

摘 要: 核电温排水带来的热污染是核能可持续发展中备受关注的环境问题。航空红外遥感技术凭借其灵敏度高、分辨率高、可定量反演等独特优势, 成为重要的核电温排水监测途径。在对温排水航空红外观测的关键性能指标进行分析的基础上, 本文系统回顾了国内外温排水航空红外监测的发展历程和典型应用, 并阐述了辐射定标、几何校正与温度反演等核心环节。构建“空天地一体化”协同监测网络、深度融合人工智能技术, 是推动我国核电温排水监测向业务化、智能化发展的必然趋势。

关键词: 航空红外遥感; 温排水; 热污染; 温度反演; 环境遥感; 核电站

中图分类号: X87 **文献标志码:** A **DOI:** 10.11972/j.issn.1672-8785.2025.12.006

Development and Prospect of Monitoring Thermal Discharge from Nuclear Power Plants Based on Airborne Infrared Remote Sensing

ZHANG Chang-xing^{1,2}, WANG Sheng-wei^{1,2}, WANG Yue-ming^{1,2*}, ZHANG En^{3,4}, YAO Yi^{1,2}, HAN Gui-cheng^{1,2},ZHANG Dong^{1,2}, ZHUANG Xiao-qiong^{1,2}, HE Dao-gang^{1,2}, XUE Qing^{3,4}, SHI Hai-gang^{3,4}

(1. Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China;

2. Key Laboratory of Space Active Opto-Electronics Technology, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China;

3. Airborne Survey and Remote Sensing Center of Nuclear Industry, Shijiazhuang 050002, China;

4. Hebei Key Laboratory of Airborne Survey and Remote Sensing Technology, Shijiazhuang 050002, China)

收稿日期: 2025-11-03

基金项目(Foundation Item): 国家重点研发计划项目(2023YFC3107602)

作者简介(Biography): 张长兴(1988-), 男, 山东枣庄人, 助理研究员, 主要从事红外和高光谱数据处理与应用方面的研究。

***通讯作者(Corresponding Author):** 王跃明(1977-), 男, 安徽黟县人, 研究员, 博士, 主要从事红外与光谱信息获取方法研究及相关仪器研制。E-mail: wangym@mail.sitp.ac.cn

Abstract: Thermal pollution from nuclear power plant thermal discharge is a significant environmental concern in the sustainable development of nuclear energy. Airborne infrared remote sensing technology, with its unique advantages such as high sensitivity, high resolution, and quantitative inversion capabilities, has become an important monitoring method in this field. Based on the analysis of key performance indicators of airborne infrared observation of thermal discharge, this paper systematically reviews the development history and typical applications of airborne infrared monitoring of thermal discharge both domestically and internationally, and elaborates on core aspects such as radiometric calibration, geometric correction, and temperature inversion. Building an integrated space-air-ground collaborative monitoring network and deeply integrating artificial intelligence technology are inevitable trends in promoting the operationalization and intelligentization of nuclear power plant thermal discharge monitoring in China.

Key words: airborne infrared remote sensing; thermal discharge; thermal pollution; temperature retrieval; environmental remote sensing; nuclear power plant

0 引言

能源是国民经济和社会发展的基石。在“碳达峰、碳中和”战略目标的引领下,我国核电事业正进入迅猛发展的快车道。目前,业务化运行、准建设及规划中的核电站已几乎覆盖所有沿海省份,形成了规模化的沿海核电带,为保障国家能源安全与优化能源结构作出了重要贡献。

然而,核电机组在正常运行过程中需将汽轮机排出的废热带入环境水体,由此产生的大流量温排水不可避免地会导致附近海域水温升高,形成显著的温升区。这一“热效应”构成了核电发展中最受关注的环境问题之一^[1]。尽管温排水不同于化学污染,但其持续的热输入会改变水体的物理化学性质,进而对水生生态系统产生深远影响^[2-3]。因此,对核电温排水进行持续、精确的监测与评估,是协调核电发展与环境保护、实现可持续发展不可或缺的环节。

核电温排水监测目前采用的手段主要包括传统监测手段(定点测量、船测)、机载航空平台监测(有人机、无人机)和卫星平台观测等(见表1)。温排水遥感监测应用最多的是星载红外成像,NOAA(AVHRR)^[4]、MODIS、Land-sat(TM/ETM+)^[5-6]、SDGSAT-1(TIS)^[7]等众多红外数据先后被国内外学者使用。但是几十米至千米尺度的分辨率,难以精细刻画

温排水的空间形态特征,且太阳同步轨道卫星过顶时间固定,无法满足高时效监测的需求。因此,自美国在20世纪70年代开始使用机载红外相机开展核电温排水监测以来^[8-9],各类机载红外载荷不断涌现^[10-12]。随着无人机技术的发展,轻小型非制冷红外相机也被使用^[13-15]。

本文将系统回顾国内外利用有人机载航空红外技术进行核电温排水监测的发展历程与应用现状,阐述其基本原理和关键技术环节,总结该领域的成果、不足以及未来发展趋势,旨在为核电温排水环境监管的业务化、精细化和智能化提供科学参考与技术支撑。

1 温排水航空红外观测性能指标分析

1.1 噪声等效温差与动态范围

噪声等效温差(Noise Equivalent Temperature Difference, NETD)决定了红外系统的温度灵敏度,直接影响温排水反演的精度;而动态范围则定义了系统可测量的温度跨度,决定了其监测的适用性。GB 3097—1997《海水水质标准》规定:对于第一、二类海水,“人为造成的海水温升夏季不超过当时当地1℃,其他季节不超过2℃”;对于第三、四类海水,“人为造成的海水温升不超过当时当地4℃”。美国水质标准因州而异,但通常要求夏季地表水温度上限为32℃,而温排水允许超过最高温度2~3℃^[16]。英国环境署规定进出水口温差应小于8℃。

表 1 不同监测手段的对比
Table 1 Comparison of different monitoring methods

监测手段	应用场景	优点	缺点
水面监测	作为“基准真值”，长期真值监测，可用于校准和验证所有遥感数据的准确性	精度最高； 可获取垂直剖面数据； 技术成熟	空间代表性差； 覆盖范围有限
无人机遥感	用于高频次、近区、精细化的监测，应急响应，以及对特定现象的加密观测	灵活性强； 空间分辨率极高	受天气和空域影响； 覆盖范围有限； 存在安全风险
有人机遥感	用于定期、大范围、高精度的业务化监测和模型验证	覆盖范围大，效率高； 时空分辨率高； 载荷能力强	受天气和空域影响； 单次成本相对较高
卫星遥感	用于大范围、周期性的本底调查和趋势宏观判断	覆盖范围极广； 具有绝对安全性	空间和时间分辨率较低； 受天气影响

Wei J 等^[5]对全球核电(66 座)温排水的长期监测表明，核电站的平均最大水面温度增量为 4.80 K，我国田湾核电站的温升值最高为 8.51 K。

目前水面定点水温的测温精度普遍优于 0.1 K。在平均温升 5 K 的条件下，0.1 K 的分辨率仅能记录 50 个温度差异值。而高灵敏度的红外系统可以捕获更多的温度细节。根据 NETD 的计算公式：

$$NETD(i, j) = \frac{T - T_0}{V_s(i, j)/V_N(i, j)} \quad (1)$$

式中， T 和 T_0 为黑体温度； V_s 为像元响应电压； V_N 为像元噪声电压。

若将 NETD 提升至 20 mK，则 5 K 温差便可更细微地捕获至少 250 个温度差异值。针对高精度的制冷型红外系统， $V_N(i, j)$ 可达到 6；考虑最大温差至少为 10 K 的条件下， $V_s(i, j)$ 应大于 3000，即数字量化(Digital Number, DN)值的动态范围应大于 3000；考虑到不同的季节和温度，DN 值的实际动态范围应更大。

1.2 空间分辨率

空间分辨率是衡量遥感图像细节刻画能力的关键指标，直接决定了目标地物的识别与分类精度。针对核电温排水监测的应用，分辨率的选择需要紧密结合实际的应用场景。核电温排水监测最直观的是进水和排水口。通过 Arc-

GIS Earth 软件对国内外典型核电站关注目标的测量结果表明，入水口的阻拦网通常在 2 m 以上宽度，导流堤露出水面的宽度一般在 15 m 以上，进水和排水口的宽度通常在 50 m 以上。根据约翰逊准则，探测、识别和确认目标分别需要 1.5、6 和 12 个像素以上。为更精细区分混合区域，分辨率应优于 3 m；在瞬时视场角为 1 mrad 的条件下，航高可以设置至 2000~3000 m。

1.3 时间分辨率

时间分辨率是指遥感平台对同一地区进行重复观测的时间间隔，其直接影响了温排水特征潮时影像获取的准确性。为评估影响范围，NB/T 20299—2014《核电厂温排水环境影响评价技术规范》和 HJ 1037—2019《核动力厂取排水环境影响评价指南(试行)》规定：核电运行后，应开展冬、夏季(大、中、小潮)典型潮型及半月潮型条件下特征潮时(涨急、高平潮、落急和低平潮)的流场和温度场(平面和垂向)分布监测。航空遥感凭借其灵活的机动性，能够针对特征潮时进行动态监测，有效弥补了卫星过顶时间固定的局限，满足了时间分辨率的关键需求。

常规的温排水监测区域一般大于 200 km²。在航高 2000 m、视场角 70°时幅宽可达 2800 m，且在 30% 重叠条件下，基本上可以实现 0.5 h 左右的测区覆盖。考虑到观测的特

表 2 国内外应用于温排水监测的典型红外成像仪

Table 1 Typical infrared imagers used for monitoring thermal drainage both domestically and internationally

成像仪	国家	分辨率/(m@1 km)	总视场角/°	波段数(8~12.5 μm)	NETD/mK	应用开始时间
AA3600 ^[10]	美国	2.6	86	1	/	1999
OMIS ^[17]	中国	3	73	8/1*	700	2001
MAMS ^[11]	中国	5	73	1	100	2006
ABS ^[12]	美国	3	90	1	/	2012
SIRI ^[18]	中国	0.4	75	1	50	2015
WSIR-WTI	中国	1	75	1	20	2020

* OMIS-1 型包含 8 个长波红外谱段, OMIS-2 型包含 1 个长波红外谱段

征潮时通常在 1~2 h, 在这种飞行条件下可以在一个架次实现两种特征潮时每种至少两次覆盖, 确保有效潮时的备份和高效采集。

2 用于温排水监测的航空相机与应用

2.1 典型红外成像系统

核电温排水监测中离不开高性能红外成像系统的支撑。自 20 世纪 70 年代以来, 国内外相继研发了多型适用于海洋与水体热红外监测的航空遥感设备。这些系统在空间分辨率、温度灵敏度、视场角等关键性能上不断优化(见表 2), 推动了温排水监测从定性描述向定量反演的跨越。

2.2 实用型模块化成像光谱仪

实用型模块化成像光谱仪(Operational Modular Imaging Spectrometer, OMIS)是国内最早的成像光谱仪: OMIS-1 型包含 8 个长波红外谱段, OMIS-2 型包含 1 个长波红外谱段。2001 年 8 月至 9 月, 采用 OMIS-1 成像光谱仪在日本东京湾对富津发电厂温排水进行了数据采集(见图 1), 虽然是常规火电监测, 但是为我国后续核电温排水监测奠定了基础。

2.3 海监多光谱扫描仪

海监多光谱扫描仪(Marine Airborne Multi-spectrum Scanner, MAMS)是针对海洋应用的专业成像仪, 其红外谱段包含中波红外和长波红外两个通道。MAMS 在秦山核电站和田湾核电站开展了数年的温排水监测任务。如图 2 所示, 田湾核电站核心区域温升与 Wei J 等^[5]的研究结果基本一致。

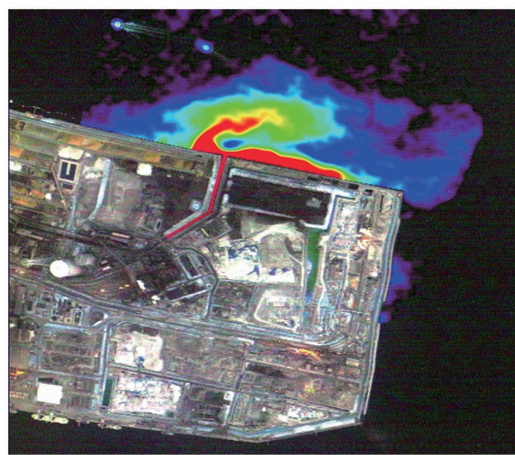
图 1 富津发电厂温排水温度划分^[17]

Fig. 1 Temperature classification of thermal drainage from Fujin power plant^[17]

2.4 机载双波段扫描仪

机载双波段扫描仪(Airborne Bispectral Scanner, ABS)是国内引进的一款紫外/红外双波段成像仪。该仪器具有 90°的大视场以及内置标定黑体, 在秦山核电站温排水监测中得到了应用(见图 3)。它在一个观测周期内获取了 8 种潮态的成像数据, 实现了动态监测^[12]。

2.5 扫描型大视场红外水温仪

扫描型大视场红外水温仪(Wide-field Scanning Infrared Water Temperature Imager, WSIR-WTI)是面向核电站温排水业务监测需求研制的新一代红外成像仪, 是一款轻量化、小体积、大视场、高灵敏度的扫描成像仪器, 其重量仅在 5 kg 左右(见图 4)。仪器采用面阵扫描方案, 实现了大视场高灵敏度成像; 作业效率可达 500 km²/h (2 m@2 km), 温度灵敏

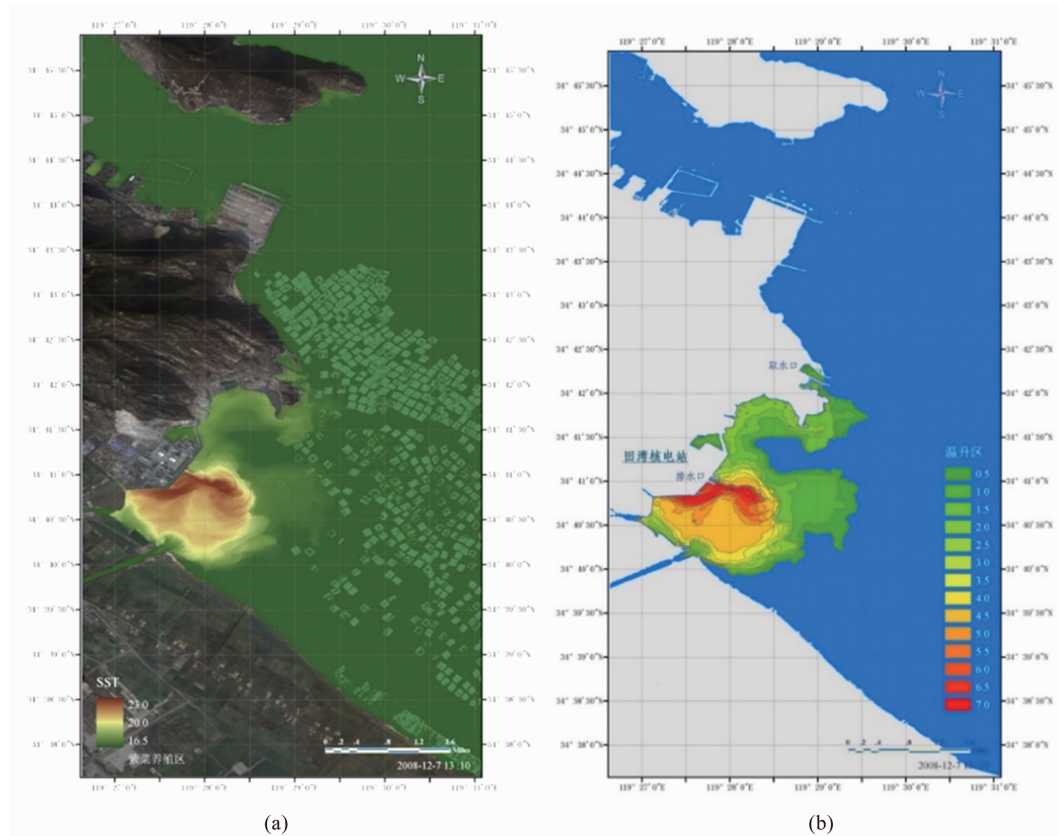


图 2 田湾核电站温排水监测结果：(a)红外水温反演结果；(b)温升提取图

Fig. 2 Results of thermal discharge monitoring at Tianwan nuclear power plant: (a) Infrared water temperature retrieval results; (b) Extraction chart of temperature rise

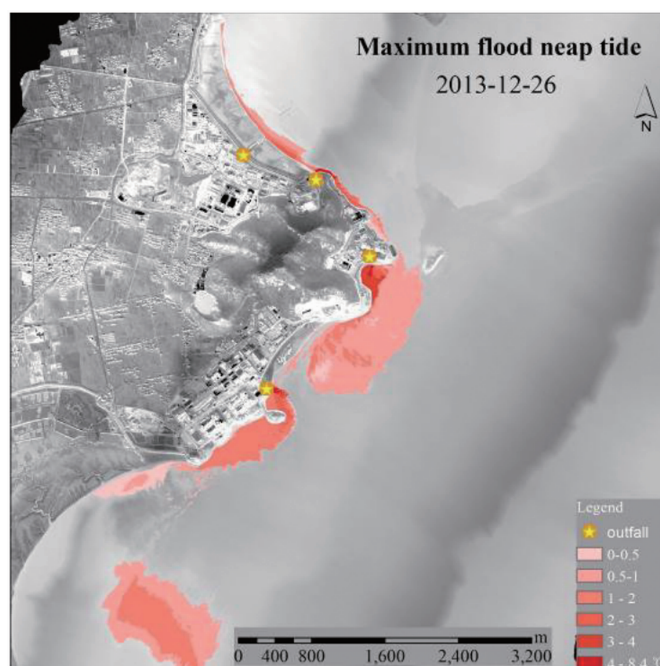


图 3 用 ABS 数据反演小潮涨急温升图^[12]

Fig. 3 Using ABS data to invert the rapid temperature rise during tidal surges^[12]

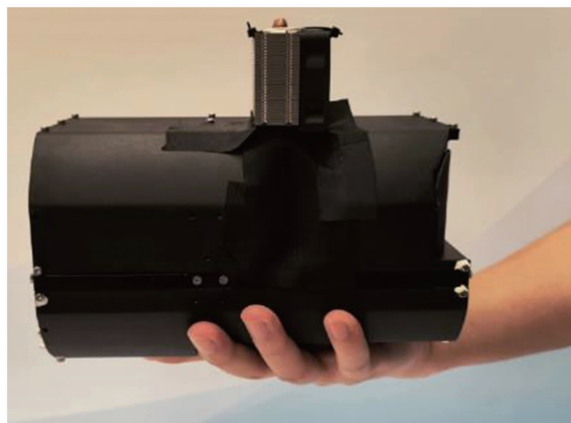


图 4 WSIR-WTI 实物图

Fig. 4 Actual image of WSIR-WTI

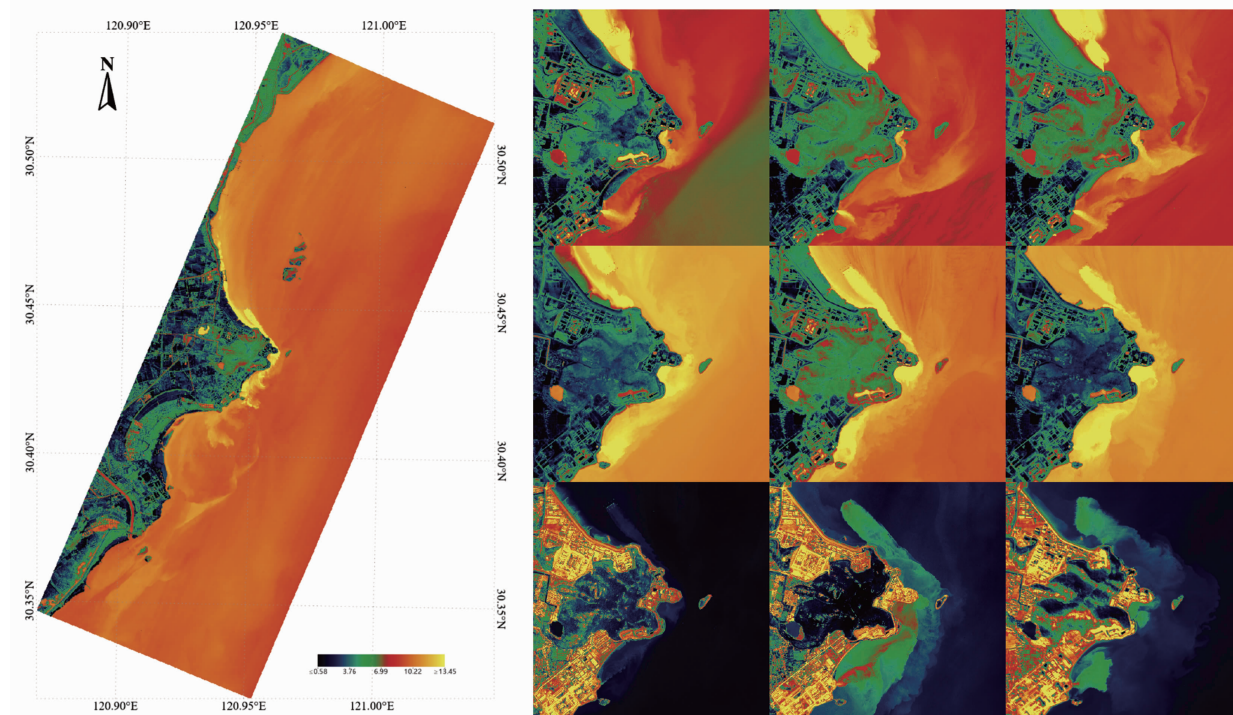


图 5 WSIR-WTI 在温排水监测中的应用效果图

Fig. 5 Application effect diagram of WSIR-WTI in thermal drainage monitoring

度最高可至 20 mK；结合地面同步测量数据，海面水温反演精度可达 0.3°C ，目前已连续多年在田湾、秦山、三门等近 10 座核电站海域开展温排水监测任务。图 5 所示为秦山核电站的温排水监测效果。其中左图的测区面积约为 220 km^2 ，共 5 条航线，采用 30% 旁向重叠的单次覆盖时间约为 40 min；右侧显示了不同潮态的动态监测对比情况。

3 关键技术

3.1 大视场、高分辨率成像

大视场与高分辨率是航空红外监测能够高效、精确捕捉温排水羽流空间细节的基础。早期的单元扫描虽然具有大视场，但是较低的分辨率限制了作业的航高，严重影响作业效率。目前主流的面阵扫描成像可以使得高分辨率、高灵敏度和大视场成像兼得。然而，要确保其

成像质量,需将精准的扫描控制与高精度的数据后处理作为必要支撑。

3.2 辐射定标

辐射定标是建立传感器输出的原始数字量化值与入瞳处光谱辐射亮度值之间定量关系的关键步骤,是所有定量遥感分析的先决条件。航空红外系统普遍采用机上黑体定标方案以确保数据的绝对精度。传统的光机扫描通过两侧布设低温和高温黑体来实现实时定标;WSIR-WTI 设置内部面源变温黑体,黑体温控采用 TEC 加热/制冷复合控制,从而实现高精度内定标。

3.3 校正与图像拼接

单幅红外图像覆盖范围有限,且受飞行姿态变化影响,会产生几何畸变。基于机载定位定向系统(Position and Orientation System, POS)获取的高精度位置和姿态数据完成几何校正,通过高精度的相机检校数据或基础底图,实现像素级的图像拼接。但是通常重叠区域存在辐射亮度差的问题,需要采用匀色、羽化等算法进行融合,消除接缝,生成一幅无缝、大范围的温度辐射亮度图。

3.4 温度反演

温度反演是整个技术链条的最终目标。热红外传感器测量到的是大气顶层辐亮度。要得到海表温度,必须从该辐亮度中去除大气的影 响。大气校正是温度反演中最关键也是最复杂的环节。

$$L(\lambda) = B(T_s, \lambda)\epsilon(\lambda)t(\lambda) + [1 - \epsilon(\lambda)]L_d(\lambda)t(\lambda) + L_u(\lambda) \quad (2)$$

式中, λ 为中心波长; $L(\lambda)$ 为传感器接收到的辐射亮度; T_s 为物理温度; $B(T_s, \lambda)$ 为温度 T_s 所对应的黑体辐射亮度; $\epsilon(\lambda)$ 是波长为 λ 时的发射率; $t(\lambda)$ 是波长为 λ 时的大气透过率; $L_d(\lambda)$ 为大气向下辐射亮度; $L_u(\lambda)$ 为大气向上辐射亮度。

在热红外波段,海表发射率可采用 0.98~0.99 的常数。根据大气状况,将实测的相对湿度、气温和能见度大气参数输入 MODT-

RAN 等软件,计算 $t(\lambda)$ 、 $L_d(\lambda)$ 和 $L_u(\lambda)$, 然后根据式(2)逐像元反演出海表温度值,生成直观的、量化的海表温度分布图,从中可以精确提取温排水的各项特征参数。

4 挑战、发展趋势与展望

尽管航空红外遥感技术在核电温排水监测中展现出巨大优势,但我们必须清醒地认识到,没有任何一种单一技术能够解决所有问题。当前,核电温排水航空红外遥感正经历着从“点”(地面)到“面”(航空/卫星),再向“实时、精细、灵活”的方向发展,最终是构建一个高效协同的“空天地一体化”监测网络。在这一进程中,我们既面临严峻挑战,也迎来发展机遇。

4.1 主要挑战

面对日益增长的精细化、量化监测需求,对航空红外传感器核心性能的要求越来越高。当前,在兼顾大视场的前提下进一步提升红外成像仪的温度灵敏度、空间分辨率与动态范围仍面临技术挑战。

近地表大气变化极为复杂,机载红外传感器接收的辐射信号极大地受到大气影响,因此突破高精度大气校正的瓶颈是提升温度反演准确性的核心难点。

有人航空遥感平台和高性能科研级红外传感器的研发与购置成本相对高昂。任务执行所涉及的空域申请与飞行保障,使得常规性、高频次的业务化监测面临巨大压力,限制了该技术在更广泛范围内的普及与应用。所以迫切需要研发轻量化、低功耗、高性能的制冷型红外传感器,以实现低成本、高频次的业务监测。

4.2 发展趋势与展望

为应对上述挑战,未来技术的发展将聚焦于仪器升级、智能协同与深度应用。

未来的监测网络必然是“空天地一体化”的协同应用,但是高性能红外传感器作为整个监测过程的首要环节,其性能是决定最终数据产品质量的先决条件。一方面,面向有人平台,聚焦高端科研级传感器,进一步突破灵敏

度和分辨率极限；另一方面，需大力发展适配无人机的轻小型、低成本、智能化红外载荷，实现平台与传感器的协同优化。

人工智能(Artificial Intelligence, AI)技术将会给海量遥感数据的处理与分析带来革命性变化。利用智能模型(如机器学习、深度学习)技术驱动高精度大气校正模型的发展；结合水文气象数据，构建基于 AI 的温排水扩散预测模型，实现对羽流未来数小时动态的预报，为电站智能调控提供前瞻性信息。基于数据同化技术，监测结果从孤立的“温度图像数据”，深化为揭示“温排水输运-水质参数变化-生态响应”内在关联的融合信息，并进一步升华成可定量评估风险和支持管理决策的体系化知识。这一转变使得监测工作能够直接服务于核电环境安全预警、生态损害评估以及海洋环境保护管理，从而实现核电与环境的和谐共生。

5 结束语

航空红外遥感已发展成为核电温排水精细化、业务化监测的核心技术。本文系统梳理了航空红外遥感技术在核电温排水监测中的应用与发展。当前，机载红外成像技术已进入以大面阵、高分辨率为特征的发展阶段。在此趋势下，我国自主研发的多型系统的核心性能已比肩国际先进水平。然而，高精度辐射定标与大气校正仍是实现温度场精确反演的关键技术挑战。未来，我国核电温排水航空红外监测应着力于发展高灵敏度、高分辨率的大视场红外相机，构建多平台协同监测网络，推动技术智能化深化数据融合与应用，最终为核电环境安全与管理提供更强大的技术支撑。

参考文献

- [1] Nowakowski K, Sługocki Ł. Short-term heat shock perturbation affects populations of *Daphnia magna* and *Eurytemora carolleeae*: A warning to the water thermal pollution [J]. *Scientific Reports*, 2021, **11**(1): 16909.
- [2] Lin J, Zou X, Huang F. Effects of the thermal discharge from an offshore power plant on plankton and macrobenthic communities in subtropical China [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2018, **131**: 106–114.
- [3] Sun Y, Wu X, Wang H. Numerical simulation of thermal discharge on water environmental impact [J]. *Electric Power Environmental Protection*, 2008, **24**(1): 42–45.
- [4] Tang D L, Kester D R, Wang Z, 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.
- [5] Wei J, Feng L, Tong Y, et al. Long-term observation of global nuclear power plants thermal plumes using Landsat images and deep learning [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2023, **295**: 113707.
- [6] Ahn Y H, Shanmugam P, Lee J H, et al. Application of satellite infrared data for mapping of thermal plume contamination in coastal ecosystem of Korea [J]. *Marine Environmental Research*, 2006, **61**(2): 186–201.
- [7] Huang W, Jiao J, Zhao L, et al. Thermal discharge temperature retrieval and monitoring of NPPs based on SDGSAT-1 images [J]. *Remote Sensing*, 2023, **15**(9): 2298.
- [8] Langner D, Michael J, Wright D. Digital processing of infrared scanner data for radiometric temperature analysis of thermal plumes [R]. *Los Alamos: EG&G, Inc*, 1975.
- [9] Bland R A, Hiser H W, Lee S S, et al. Aerial remote sensing of thermal plumes [C]. Miami Beach: Waste Heat Management & Utilization Conference, 1977.
- [10] Han J G, Chi K H, Yeon Y K. Detection of Thermal Effluent Discharged from Nuclear Power Plant Using Airborne MSS and Landsat ETM+ [C]. Busan: 2002 Korean Society of Remote Sensing (KSRS) Fall Conference, 2002.
- [11] Wang D, Pan D, Li N. Experiment of monitoring thermal discharge drained from nuclear plant through airborne infrared remote sensing [C].

- SPIE*, 2009, **7383**: 1194–1201.
- [12] Shao H, Xie F, Liu C, et al. The dynamic monitoring of warm-water discharge based on the airborne high-resolution thermal infrared remote sensing data [C]. *SPIE*, 2016, **9880**: 524–534.
- [13] Xiang W, Xinxin W, Jianhua Z, et al. Monitoring the thermal discharge of hongyanhe nuclear power plant with aerial remote sensing technology using a UAV platform [C]. Fort Worth: 2017 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2017.
- [14] DeMario A, Lopez P, Plewka E, et al. Water plume temperature measurements by an unmanned aerial system (UAS) [J]. *Sensors*, 2017, **17**(2): 306.
- [15] Wang L, Li G, Shi H, et al. Integrated monitoring and prediction of thermal discharge from nuclear power plants using satellite, UAV, and numerical simulation [J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2024, **196**(8): 736.
- [16] Madden N, Lewis A, Davis M. Thermal effluent from the power sector: an analysis of once-through cooling system impacts on surface water temperature [J]. *Environmental Research Letters*, 2013, **8**(3): 035006.
- [17] 赵永超, 童庆禧, 郑兰芬, 等. 利用 OMIS 的 TIR 和 MIR 波段对日本东京湾富津发电厂热排水的探测效果及处理方法 [C]. 温州: 成像光谱技术与应用研讨会, 2002.
- Zhao Y C, Tong Q X, Zheng L F, et al. Detection results and processing methods of thermal drainage from the Fumitsu power plant in Tokyo Bay, Japan, Using OMIS TIR and MIR bands [C]. Wenzhou: Seminar on Imaging Spectroscopy Technology and Applications, 2002.
- [18] 亓洪兴, 刘毓博, 周潘伟, 等. 无人机载大视场高分辨率热红外成像系统 [C]. 苏州: 2015 年无人机系统与任务载荷技术及应用研讨会, 2015.
- Qi H X, Liu Y B, Zhou P W, et al. High resolution thermal infrared imaging system with wide field for unmanned airborne [C]. Suzhou: 2015 UAV Loads and Technology and Application Conference, 2015.