

姚沛林, 薛庆, 卢辉雄, 等. 核电站温排水监测技术现状与展望[J]. 世界核地质科学, 2025, 42(1): 155-165. doi:10.3969/j.issn.1672-0636.2025.01.013

YAO Peilin, XUE Qing, LU Huixiong, et al. Current status and prospects of nuclear power plant thermal discharge monitoring technology[J]. World Nuclear Geoscience, 2025, 42(1): 155-165 (in Chinese).

核电站温排水监测技术现状与展望

姚沛林¹, 薛庆^{2,3}, 卢辉雄^{2,3}, 张恩^{2,3}

1 辽宁核电有限公司, 辽宁 葫芦岛 125100

2 核工业航测遥感中心, 河北 石家庄 050002

3 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 核电站温排水是其运行过程中对周围环境影响的重要因素之一, 对附近海域温度、水质和水生生物分布均会产生影响。综述国内外核电温排水监测技术的现状, 包括传统监测方法、遥感监测方法(卫星遥感、航空遥感)、数值模拟和物理模型试验, 以及新兴技术(水下无人潜水器、传感器网络和生物监测); 分析现有技术的优缺点和面临的挑战, 并对未来技术发展趋势进行展望, 强调高分辨率卫星遥感技术, 无人机遥感技术和智能实时监测系统的重要性, 旨在为核电温排水监测提供参考, 促进相关技术的创新和发展, 更好保护海洋环境。

关键词 核电温排水; 监测技术; 遥感; 数值模拟; 展望

中图分类号 X87 文献标志码 A 文章编号 1672-0636(2025)01-0155-11

Current status and prospects of nuclear power plant thermal discharge monitoring technology

YAO Peilin¹, XUE Qing^{2,3}, LU Huixiong^{2,3}, ZHANG En^{2,3}

1 Liaoning Nuclear Power Co., Ltd., Huludao 125100, China

2 Airborne Survey and Remote Sensing Center of Nuclear Industry, Shijiazhuang 050002, China

3 Key Laboratory of Airborne Survey and Remote Sensing Technology of Heibei Province, Shijiazhuang 050002, China

Abstract: Nuclear power thermal discharge is one of the important factors affecting the surrounding environment during its operation, which can have an impact on the temperature, water quality, and distribution of aquatic organisms in the nearby sea area. This article provided an overview of the current status of nuclear power thermal discharge monitoring technology both home and abroad, including traditional monitoring methods, remote sensing monitoring methods (satellite remote sensing, aerial remote sensing), numerical simulations and physical model experiments, as well as emerging technologies (unmanned underwater vehicles, sensor networks and biological monitoring); the advantages and disadvantages of existing technologies and the facing challenges were analyzed, an outlook was provided on future technological development trends, emphasizing the importance of high-resolution satellite remote sensing technology,

收稿日期: 2025-01-09 改回日期: 2025-01-14

第一作者: 姚沛林, 男, 1982年生, 高级工程师, 主要从事各电厂环境应急、保健物理工作。E-mail: yaopl@cnp.com.cn

通信作者: 薛庆, 男, 1985年生, 高级工程师, 主要从事环境遥感监测研究。E-mail: 122717561@qq.com

Received date: 2025-01-09 revised date: 2025-01-14

First author: YAO Peilin, male, born in 1982, senior engineer, focusing on environmental emergency and health physics work in various power plants. E-mail: yaopl@cnp.com.cn

Corresponding author: XUE Qing, male, born in 1985, senior engineer, focusing on remote sensing monitoring of nuclear power thermal discharge and geological hazard investigation technology research. E-mail: 122717561@qq.com

unmanned aerial vehicle remote sensing technology, and intelligent real-time monitoring systems. The review provides reference for nuclear power plant thermal discharge monitoring, promote innovation and development of related technologies, and better reservation of the marine environment.

Keywords: nuclear power plant thermal discharge; monitoring technology; remote sensing; numerical simulation; expectation

核电作为清洁能源,在全球能源结构中占据着重要地位。随着全球污染和气候变化加剧,各国对清洁能源的需求持续增长。我国“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。核电发展虽面临着与扩散、安全和废物处理相关的严重风险^[1],但随着核电工程技术的进步,这些风险均已控制在安全范围内。我国商运核电厂均为滨海厂址,采用直流冷却方式排出大量的温排水,使周围海域水温升高,而水温作为水质和生态环境的重要要素,几乎影响水的各种物理、化学和生物化学性质,就经常性影响而言远较以上问题影响严重^[2]。根据诸多学者研究,周边海域水温变化较大时,影响水生生物的生存和海洋生态系统的平衡,对水生生物分布产生显著影响^[3-8],并且可能会影响取水安全。

核电站温排水分布是在有限空间范围内连续变化水体的扩散过程,呈现一定规律性变化,尤其受到潮汐影响较为显著,国家出台相关法规标准对其进行约束。其中,《海水水质标准:GB 3097—1997》规定第一、二类海水水质“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℃”;第三、四类水质“人为造成的海水温升不超过当时当地 4℃”^[9];为获取最大的温升分布范围,《核电厂温排水环境影响评价技术规范:NB/T 20299—2014》和《核动力厂取排水环境影响评价指南(试行):HJ 1037—2019》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”^[10-11]。因此,对核电站温排水进行有效的监测和评估,已成为环境监管部门、核电单位和公众共同关注的问题。

1 核电温排水监测技术现状

国内外在温排水监测方面的经验和做法涵盖多种技术和方法,包括传统监测方法、遥感监测、数值模拟和物理模型试验等。这些方法能够从不同角度和层面评估温排水对环境的影响。

1.1 传统监测方法

传统监测方法主要包括沿岸船舶走航和浮标定点测量^[12-13]。传统监测是温排水调查最直接和最直观的手段,主要通过监测设备与水体直接接触进行实时调查,除温度外,还可以调查 pH、溶解氧、TP、TN 和 COD 等水质参数。这种方法的优点在于能够获取精确、连续和系统的温度数据,可以实现对特定区域的持续监测,适合于固定海域的长期观测,精度和可靠性方面表现相对良好,是获取实际海域温排水影响的重要手段。

传统方法缺点也很明显,主要是传统方法数据采集点较为离散,数据同步性差,通过空间插值获取的海域温度分布,不能准确反映温度场的时空变化特征和温排水的影响范围。同时,船舶走航操作复杂且费时费力,需要大量的人力和物力投入^[14],受天气和海况影响较大,数据采集受限制,且可能存在安全风险;浮标监测站需要固定位置的基础设施支持,可能受到地理位置和环境条件的限制,需要定期维护和更换设备,数据传输可能受限于通信技术,后期成本较高。因此传统监测方法,多作为其他技术方法的校验手段。

1.2 遥感监测方法

核电站温排水遥感监测是一种利用热红外遥感技术对温排水进行监测和评估的方法,通过热红外遥感数据温度反演和信息提取,分析海表温度变化来监测温排水的分布、强度和扩散范围。遥感技术是目前核电温排水监测的主要手段,结合星地协同提高监测准确性,

采用自动化提取方法提高监测效率。根据数据获取方式分为卫星遥感和航空遥感。

1.2.1 卫星遥感监测方法

卫星遥感技术因其大幅宽、高效和经济等优势,已被广泛应用于多个核电基地。王雅萍等针对宁德核电站采用了星地协同的方法来计算温排水基准温度以提取温升范围,为核电机组规划、建设、运行等过程的重要决策依据^[14];Nie等通过 Landsat 遥感数据对田湾核电站过去 20 a 的热污染进行监测,显示 Landsat 数据能够有效地监测核电站的温排水情况^[15]。王祥等利用不同空间分辨率的热红外数据监测红沿河核电站附近海域的海表温度分布,结果显示 Landsat-8 的监测结果精度最高,能提供最多的温升细节信息。HJ-1B 与 MODIS 数据由于较低的空间分辨率,监测结果精度较低^[16]。熊攀等基于 HJ-1B 卫星热红外遥感数据对大亚湾核电站温排水的空间分布特征进行识别和验证,发现遥感与地面调查两种手段获得的温升分布基本一致^[17]。Wang 等利用 Landsat-8/9 遥感数据监测 2013 至 2022 年全球核电站附近海表温度(SST),分析全球核电站热排放的时空分布特征,研究全球不同国家核电站的热排放效率^[18];除以上研究外,诸多研究者以卫星遥感数据为基础,研究潮汐、岸线、工况和季节对温排水分布的影响,田湾、秦山、海阳和福清等核电多有报道^[19-31],这表明遥感监测技术在核电站温排水监测方面具有较高的准确性和可靠性。

世界其他核电站也多有利用卫星遥感数据开展研究的报道。Zoran 等在罗马尼亚 Cernavoda 核电站,通过 Landsat TM 和 ETM 热红外波段、ASTER 和 MODIS TIR 时间序列卫星数据,成功监测温排水的水表温度^[32]。Muthulakshmi A L 等对印度 Kalpakkam 核电站的研究也展示遥感技术在监测温排水分布模式方面的可靠性^[33];Dinelli G 等利用遥感红外调查研究河流和沿海水域的水动力和热模式,研究验证适用于河流排放的垂直集成准三维椭圆模型,以及适用于沿海排放的积分喷射模型。目前正在开发更复杂的沿海排放的多层三维椭圆模型^[34]。

尽管卫星遥感技术在核电站温排水监测中具有显著优势,但仍存在一些挑战和限制,如不同季节和潮汐条件下的监测结果可能存在差异^[15,28-31],且低空间分辨率的数据可能会受到“混合像元”效应的影响^[16,27],导致监测结果精度较低。因此,重访周期和空间分辨率的限制使得基于卫星遥感监测的研究仅能在卫星过境时刻进行,这对于仅在一定时段内受温排水影响且影响范围较小的核电厂而言,难以开展细致入微的研究工作。

1.2.2 航空遥感监测方法

航空遥感具有空间分辨率高、机动性强和温度精度高等优势,可针对核电站不同典型潮态下温排水分布开展精细化、系统性研究。无人机技术逐步成熟正在成为核电厂温排水监测的新趋势,许多研究者已在红沿河核电、福清核电、后石电厂开展过相关实践^[31,35-39]。但其因受成本、空域、气象、潮态和工况等多种因素影响^[40],不适合长时间持续监测。同时,无人机航空遥感多集中于对某个潮态下温排水分布开展研究,且存在因飞行效率和载荷问题导致的图像条带突出和拼接困难等局限^[31],经研究,在无人机飞行过程中因相机的稳定性受飞行高度、温度、风速和太阳辐射等影响,温度准确度下降最大可达 $\pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$,并且会出现明显的晕染和畸变现象^[41-43]。

与之相比,有人机航空遥感空间分辨率相当、信息容量大,可携带集成 IMU 和制冷型扫描仪,测温设备稳定,温度精度高。航空热红外数据空间分辨率一般优于 2.0 m,相较于百米级航天数据,可更加精细地反映温度场的范围和特征,温度精度优于 $0.3\text{ }^{\circ}\text{C}$ ^[40,44-45]。利用有人机开展温排水监测研究技术比较成熟^[46],已广泛应用于秦山、田湾、三门、昌江和霞浦等核电站的典型潮态温排水监测中^[40]。

1.2.3 本底取值方法

如何准确确定本底温度取值是遥感监测过程中温排水温升提取的关键,且是温排水监测工作中的技术难点^[19]。根据目前温排水的监测情况研究,传统的基准温度的提取方法主要有最低温度法、背景温度法、闭合海湾平均温度法、半封闭海湾平均温度法、区域替代温

度法和数模和物模温度法几种^[19-22],目前尚未形成统一的技术标准。随着研究的深入,王雅萍等通过星地协同提取与分析,对基准温度进行了研究^[14];隋超等提出温度梯度法,通过计算临界温度梯度及温度空间梯度的散度值,来确定背景温度^[48];朱秀芳等利用孤立森林进行温排水和正常水体样本的自动提取,利用支持向量机监督分类提取温排水像元得到最终的温排水空间分布,提出一种基于单时相热红外波段的温排水自动化提取方法^[49]。

由于不同核电站所处地理位置不同,受周围地形、气候环境等因素的影响,海域环境差别较大。在确定温排水本底温度提取方案时,应基于核电站运行前海域温度数据进行分析,以多种方案分别计算环境本底温度,最后对比各种方法得到的本底温度,综合考虑结果的稳定性、可靠性和方法便利性等因素,选择最佳方案作为核电站本底温度的标准计算方法^[40]。同一核电站,使用相同的温排水本底温度选择标准,可以确保温升评价的客观性,也可以保持同一核电站监测与评价结果的一致性和可比性。

综上,遥感技术为核电站温排水监测提供一种实时、大范围的监测手段,对于评估核电站对周围水环境的影响、制定环境管理措施以及提高公众对核能发展的信心具有重要意义。随着遥感技术的进一步发展,预计将在核电站温排水监测中发挥更大的作用。

1.3 数值模拟和物理模型试验

数值模拟和物理模型试验是另一种重要的监测预测方法,通过构建模型来模拟温排水对周围水体的影响,有助于理解温排水的扩散机制和影响范围^[50-52]。数值模拟方法,能够预测温排水的扩散过程,是预报模型的主要发展方向。陈小莉等通过三维数学模型反映浅水明渠排放浮力作用下的水温分层,较好兼顾近区和远区的模拟精度^[53];李慧子等、戴天奇等采用有限体积法和 Reynolds 平均法,考虑环境流速、排放口角度和海水流速等因素对温排水热影响范围和程度的影响,模拟温排水在不同环境条件下的温度扩散过程^[54-55];陈汉宝等通过考虑温度变化对流体密度的影响,建立更为复杂的端流动能(k)紊流模型,提高模拟的准确性^[56]。

物理模型试验通过在实验室或水池中模拟实际的海水流动和温排水排放过程,可以直观地观察和记录温排水的扩散情况,验证数值模型的准确性^[57]。郭磊等采用物理模型试验手段,结合排水口多点多层温升实时监测数据,研究电厂排水三维热扩散特性,揭示温排水的三维热力扩散特征^[58];张琨等通过对 CORMIX 与二维数模、物模进行比较,认为 CORMIX 对于近区的模拟结果优于二维数模,与物模试验结果的一致性较好^[59]。段亚飞等研究比较了温排水水槽试验与平面二维、准三维及三维数值模拟的结果,为数值模型的改进提供数据支持^[60]。

段亚飞等和陈小莉等通过研究认为,在实际海域进行温度场观测可以获取第一手的温排水影响数据,为数值模型和物理模型提供实证支持^[61-62],还可以辅助评估数值模型和物理模型的预测精度,进一步优化模型参数和结构^[47]。

数值模拟方法也存在一些问题,如模型参数的选择和灵敏度分析需要进一步深入研究^[63],模型对垂向流速求解存在简化,应用于不同排放型式的模拟精度尚需要深入论证^[64],而物理模型试验也存在局限性,如成本较高、难以模拟远区复杂环境条件下的温排水影响^[56]。

数学模型与物理模型相结合的研究方法在核电温排水监测技术中具有重要意义。在实际应用中,数学模型和物理模型应相互结合,互为补充,在排水口近区海域,宜采用物理模型模拟其水力热力特性,以获得更直观和准确的温排水扩散情况;在远区海域,则宜采用数值计算,以精细反映温排水的扩散过程。此外,加强原型观测及工程后评估等工作,可以进一步提高工程安全性及满足生态环境的保护要求^[57]。

1.4 其他技术方法

随着物联网和无人装备的迅速发展,远程实时监测逐渐开始应用于水质监测领域。无人潜水器可以携带各种传感器,对温排水的水温、流速和盐度等参数进行实时监测,并将数据传输至地面控制中心进行分析和处理^[65-67];

项慧慧等设计和研发一种基于无人船的远程水环境监测系统,通过设计无人监测船搭载水质监测传感器及摄像头,可全面监测水环境状况^[68];通过在核电站周边海域布置传感器网络,可以实时监测海域内的水温、水质等参数变化,及时发现异常情况并采取相应的应对措施,为核电温排水的实时监测和预警提供有力保障^[69];张文斌等利用海洋生物指标来评估温排水对生态环境的影响,通过监测生物的数量、种类和分布等参数变化,反映温排水对海域生态系统的干扰程度和恢复能力^[70]。

综上所述,水下无人潜水器、传感器网络以及生物监测技术等都是核电温排水监测中潜在技术。这些技术的应用和发展扩展了核电温排水的监测方法和实时监测能力,还为核电站的环保决策和生态保护提供科学依据。

2 核电站温排水监测面临的挑战

2.1 监测数据的精确性、同步性和实时性问题

温排水监测需要高效连续、动态同步的遥感技术,但现有的卫星遥感数据分辨率较低,无法准确获取温排水的温升细节分布,对高温区较小的核电海域影响更大^[28]。航空遥感监测系统虽然可以对特定时间段的典型潮态进行监测并具有高精度,但其连续飞行时间需要约1 h,航空数据和实测数据同步性和实时性需要进行协调处理。这些技术手段在实际应用中仍存在一定的局限性,在研究过程中需要进一步优化和改进。

2.2 监测标准和技术规范的制定和完善

温排水监测标准和技术规范的制定和完善是一个系统工程,需要综合考虑法规要求、监测方法、数据有效性、点位布设、频次安排以及国内外标准的参考等多个方面。通过科学合理的技术规范,可以有效提高温排水监测规范性、准确性和可靠性,保障水域环境监测质量。我国已经发布了一系列规范和标准法规,如《滨海核电站温排水卫星遥感监测技术规范(试行):HJ 1213—2021》针对卫星热红外技术规定了在滨海核电厂温排水排放时的遥感监测的流程和方法^[71];《核电厂温排水环境影响评价技术规范:N/B/T 20299—2014》规定内陆核

电厂址和滨海核电厂址的核电厂环境影响评价的原则、方法及要求,且侧重于规定温度影响程度限制指标^[10];《核动力厂取排水环境影响评价指南(试行):HJ 1037—2019》给出了滨海固定式核动力厂取水和温排水环境影响评价方法和判定准则,且侧重于温排水对海洋生物影响的评价工作^[11];《温排水监测技术规范:DB35/T 1597—2016》规定温排水的卫星监测方法、技术要求和浮标定点测量自动监测设施的运营维护管理办法^[72]。现有标准法规均集中于某一领域,目前还没有统一可行的全流程参考规范。随着核电站数量的增加和温排水对环境影响的关注度提高,需要有一套完善的监测标准和技术规范来指导监测工作。

3 核电站温排水监测技术的展望

核电站温排水监测技术的创新与发展主要集中在高分辨率卫星遥感技术、无人机遥感技术和智能实时监测系统的推广等方面。

3.1 高分辨率卫星遥感技术

随着遥感技术的进步,高分辨率卫星数据空间分辨率、时间分辨率和光谱分辨率在不断提高,能够更精确、更快速地获取核电站附近海域的海表温度信息。如HJ-2A/B和ZY-1-02E卫星数据因其热红外波段高空间分辨率(分别为96和15 m)能够提供更精细的温排水扩散细节信息;随着卫星数量的增加和轨道设计优化,卫星的重访周期不断缩短,时间分辨率进一步提高,能够更及时地获取温排水信息;随着热红外波段分割越来越精细,能够提供更丰富的光谱信息,有助于更精确提取温升信息。

3.2 无人机遥感技术

尽管目前存在图像畸变、拼接困难和温度不稳定等局限,无人机遥感技术在核电温排水监测中展现出巨大的潜力。随着热红外设备的小型化,稳定性有待完善的非制冷型热红外相机将升级为稳定的制冷型相机并集成IMU系统,加之无人机载重、稳定性和续航时间持续提升,这些局限终将被克服。预期无人机遥感技术将朝着自动化飞行、智能数据分析和多平台协同观测等方向发展,构建更完善的温排

水监测体系^[40]。

3.3 智能实时监测系统

智能实时监测系统利用传感器、数据采集、数据分析和信息处理等技术,对核电站温排水水质和水文参数进行实时监测和管理。该系统是核电站温排水监测技术的又一重要发展方向,它通过对数据的实时采集和分析,生成相应的报表和图表,为相关人员提供数据分析和决策支持,能够及时发现异常情况,并采取相应措施。智能监测系统还可以与其他成熟的技术相结合,形成更为完善的监测体系。如高分辨率遥感技术和智能监测技术相结合,实现数据温度反演校验、温排水范围提取和图表报告输出流程化;三维数值模拟技术与智能实时监测系统相结合,实现实时修正数值模拟参数和模型结构,提升监测预测精度。

4 结 语

核电站温排水监测技术的发展对于保护海洋环境和维持生态平衡具有重要意义。

1)随着技术的进步,尤其是遥感技术、数值模拟、物理模型试验以及其他技术方法的应用,对温排水影响的监测能力得到显著提升,形成以遥感技术为主导,辅以传统监测、数值模拟与物理模型试验等多种手段相结合的技术体系。这些技术不仅有助于准确评估核电站对海洋环境的实际影响,也为制定合理的环境保护措施提供科学依据。

2)尽管上述技术的快速发展极大提高了核电站温排水的监测能力,但在实际应用中仍面临着多源监测数据的同步性和实时性问题、监测标准和技术规范的制定和完善等挑战,仍需提升数据质量、增加监测频率和降低运营成本等方面做出努力。

3)未来的温排水监测技术应聚焦于技术创新,进一步推动高分辨率卫星遥感技术、无人机遥感技术和智能实时监测系统在核电站温排水监测技术的发展。

4)推动监管部门、技术单位和核电业主尽快建立健全统一的行业标准和技术规范,推动整个监测技术的规范化发展,为核电站的环保决策和生态保护提供更加科学和准确的技术支撑。

参考文献

- 1 KESSIDES I N .Nuclear power and sustainable energy policy: Promises and perils[J].World Bank Research Observer,2010,25(2):323-362.
- 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 Yongye, CHEN Xiaoqiu. Suggestion of the study on thermal impact of thermal discharge from NPPs[J]. Radiation Protection Communication, 2011, 31(6): 20-23(in Chinese).
- 3 姜礼燧.热冲击对鱼类影响的研究[J].中国水产科学,2000,7(2):77-81.
JIANG Lifan. Effects of thermal shock on fishes[J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2000, 7(2): 77-81(in Chinese).
- 4 林昭进,詹海刚.大亚湾核电站温排水对邻近水域鱼卵、仔鱼的影响[J].热带海洋,2000,19(1):44-51.
LIN Zhaojin, ZHAN Haigang. Effects of thermal effluent on fish eggs and larvae in waters near Daya bay nuclear plant[J]. Tropic Oceanology, 2000, 19(1): 44-51(in Chinese).
- 5 张文全,周如明.大亚湾核电站和岭澳核电站循环冷却水排放的热影响分析[J].辐射防护,2004,24(3/4):257-262.
ZHANG Wenquan, ZHOU Ruming. Thermal impact analysis of discharge of circulating cooling water at Daya bay nuclear power station(GNPS) and Ling Ao nuclear power station(LNPS)[J]. Radiation Protection Communication, 2004, 24(3/4): 257-262(in Chinese).
- 6 刘胜,黄晖,黄良民,等.大亚湾核电站对海湾浮游植物群落的生态效应[J].海洋环境科学,2006,25(2):9-12.
LIU Sheng, HUANG Hui, HUANG Liangmin, et al. Ecological response of phytoplankton to the operation of Daya bay nuclear power station [J]. Marine Environmental Science, 2006, 25(2): 9-12(in Chinese).
- 7 蒋朝鹏.秦山核电温排水影响海域的鱼类分布特征[D].上海:上海海洋大学,2016.
JIANG Chaopeng. The distribution pattern of fish in the sea area of thermal discharge of Qinshan nuclear plant [D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2016: 1-33.
- 8 兰志刚,李新仲,肖钢,等.海上浮式核电站温排水对海洋生态环境的影响[J].海洋科学,2016,40(6):84-88.
LAN Zhigang, LI Xinzhong, XIAO Gang, et al.

- Potential impacts of thermal discharge on marine environment from offshore floating nuclear power plant [J]. *Marine Sciences*, 2016, 40(6): 84-88 (in Chinese).
- 9 国家海洋局第三海洋研究所, 青岛海洋大学. 海水水质标准[S]. 北京: 国家环境保护局, 1997. Third Institute of Oceanography, Ministry of Natural Resources, Ocean University of China. Sea water quality standard [S]. Beijing: Ministry of Ecology and Environment of the People's Republic of China, 1997 (in Chinese).
- 10 中国核电工程有限公司, 中国水利水电科学研究院. 核电厂温排水环境影响评价技术规范[S]. 北京: 国家能源局, 2019. China Nuclear Power Engineering Co., Ltd, China Institute of Water Resources and Hydropower Research. Technical specification in assessing the environmental impact of thermal discharge for nuclear power plants[S]. Beijing: National Energy Administration, 2019 (in Chinese).
- 11 生态环境部核与辐射安全中心. 核动力厂取排水环境影响评价指南(试行)[S]. 北京: 生态环境部, 2019. Nuclear and Radiation Safety Center. Guidelines for environmental impact assessment of cooling water intake and thermal discharge for nuclear power plants (on trial) [S]. Beijing: Ministry of Ecology and Environment of the People's Republic of China, 2019 (in Chinese).
- 12 栗小东. 基于遥感的滨海核电厂温排水污染监测研究[D]. 上海: 华东师范大学, 2011. LI Xiaodong. Remote sensing based monitoring of coastal nuclear power plants' thermal pollution [D]. Shanghai: East China Normal University, 2011 (in Chinese).
- 13 李磊, 田亚杰, 许丹, 等. 核电厂海洋水文水质监测系统探讨[J]. *自动化仪表*, 2021, 42(增刊1): 32-35+40. LI Lei, TIAN Yajie, XU Dan, et al. Discussion on marine hydrology and water quality monitoring system design for nuclear power plant [J]. *Process Automation Instrumentation*, 2021, 42 (Sup. 1): 32-35+40 (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 NIE Pingjing, WU Hua, XU Jie, et al. Thermal pollution monitoring of Tianwan nuclear power plant for the past 20 years based on Landsat remote sensed data [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2021, 14: 6146-6155.
- 16 王祥, 苏岫, 张浩, 等. 不同空间分辨率遥感数据在核电站温排水监测中的应用研究[J]. *海洋环境科学*, 2020, 39(4): 646-651. WANG Xiang, SU Xiu, ZHANG Hao, et al. Remote sensing based application research of nuclear power plant thermal plume monitoring with different spatial resolution imagery [J]. *Marine Environmental Science*, 2020, 39(4): 646-651 (in Chinese).
- 17 熊攀, 朱利, 顾行发, 等. 基于HJ-1B星热红外数据的大亚湾海温反演模型及其应用[J]. *国土资源遥感*, 2014, 26(1): 132-138. XIONG Pan, ZHU li, GU Xingfa, et al. Sea water temperature retrieval model for Daya Bay based on HJ-1B thermal infrared remote sensing data and its application [J]. *Remote Sensing for Land and Resources*, 2014, 26(1): 132-138 (in Chinese).
- 18 WANG Luyan, LI Guoqing, GUO Xinglong, et al. Monitoring of temperature rise in global nuclear power plant thermal discharge from 2013 to 2022 [J]. *Journal of Environmental Management*, 2024, 366: 121844.
- 19 朱利, 王桥, 吴传庆. 温排水遥感监测原理与示范[M]. 北京: 中国环境出版社, 2016: 104-117. ZHU Li, WANG Qiao, WU Chuanqing. Principle and application of thermal discharge monitoring using remote sensing [M]. Beijing: China Environmental Science Press, 2016: 147-154 (in Chinese).
- 20 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).
- 21 张爱玲, 朱利, 陈晓秋, 等. 核电站温排水卫星遥感监测应用研究[J]. *环境监测管理与技术*, 2014, 26(6): 12-16. ZHANG Ailing, ZH Li, CHEN Xiaoqiu, et al. Research on application of satellite remote sensing techniques for

- monitoring thermal discharge from nuclear power plant [J]. *The Administration and Technique of Environmental Monitoring*, 2014, 26 (6): 12-16 (in Chinese).
- 22 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监测[J]. *中国环境科学*, 2014, 34(5): 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(5): 1181-1186 (in Chinese).
- 23 吕春阳. 基于 Landsat-8 数据劈窗算法的红沿河核电站温排水监测[D]. 阜新: 辽宁工程技术大学, 2016: 1-50.
LYU Chunyang. Thermal discharge monitoring of Hongyanhe nuclear power station based on Landsat-8 and split window algorithm [D]. Fuxin: Liaoning Technical University, 2016: 1-50 (in Chinese).
- 24 张晓峰, 徐京萍, 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).
- 25 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): 75-79+10.
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).
- 26 石海岗, 梁春利, 张建永, 等. 岸线变迁对田湾核电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).
- 27 石海岗, 王虎, 章新益, 等. 基于遥感技术的田湾核电周边海域环境监测[J]. *地理空间信息*, 2023, 21(1): 94-100.
SHI Haigang, WANG Hu, ZHANG Xinyi, et al. Sea environment monitoring surrounding Tianwan nuclear power plant based on remote sensing technology[J]. *Geospatial Information*, 2023, 21(1): 94-100 (in Chinese).
- 28 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]. *环境监测管理与技术*, 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).
- 29 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 Hu. Thermal discharge monitoring of Tianwan nuclear power plant based on satellite thermal infrared data [J]. *Geospatial Information*, 2022, 20(5): 48-53 (in Chinese).
- 30 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(9): 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(9): 81-85+94 (in Chinese).
- 31 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 Shangfa, FAN Xiao, SHI Haigang, 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 (in Chinese).
- 32 ZORAN M A, SAVASTRU R S, SAVASTRU D M, et al. Thermal pollution assessment in nuclear power plant environment by satellite remote sensing data[C]// *Remote Sensing for Agriculture, Ecosystems, & Hydrology XIV. International Society for Optics and Photonics*, 2012(8531): 1-8.
- 33 MUTHULAKSHMI A L, NATESAN U, FERRER V A, et al. A novel technique to monitor thermal discharges using thermal infrared imaging [J]. *Environmental Science: Processes and Impacts*, 2013, 15(9): 1729-1734.
- 34 DINELLI G, MAINI M. Remote sensing of thermal alterations and circulation patterns of riverine and coastal effluents[J]. *IFAC Proceedings Volumes*, 1977,

- 10(7):415-421.
- 35 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).
- 36 张云千, 王露璐. 多旋翼无人机在排水监护中的应用[J]. 电子测试, 2019, (22): 103-104.
ZHANG Yunqian, WANG Lulu. Application of Multi-rotor UAV in drainage monitoring [J]. Electronic Test, 2019, (22): 103-104 (in Chinese).
- 37 石功权. 无人机在核电厂温排水监测中的应用[J]. 南方能源建设, 2019, 6(2): 94-98.
SHI Gongquan. Application of drone surveying on heat disposal to the ocean from nuclear power plants [J]. Southern Energy Construction, 2019, 6(2): 94-98 (in Chinese).
- 38 孙芹芹, 张加晋, 姬厚德, 等. 基于卫星和无人机的后石电厂温排水分布研究[J]. 应用海洋学学报, 2020, 39(2): 261-265.
SUN Qinqin, ZHANG Jiajin, JI Houde, et al. Distribution of thermal water around Houshi power plant based on Landsat 8 and UVA study [J]. Journal of Applied Oceanography, 2020, 39(2): 261-265 (in Chinese).
- 39 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.
WANG Xiang, WANG Xinxin, SU Xiu, 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 (in Chinese).
- 40 梁春利, 李名松, 石海岗, 等. 核电站温排水遥感监测精细研究应用[M]. 北京: 中国原子能出版社, 2021: 12-18.
LIANG Chunli, LI Mingsong, SHI Haigang, et al. Fine research and application of remote sensing monitoring for nuclear power plant thermal discharge [M]. Beijing: Atomic Energy Press, 2021: 12-18 (in Chinese).
- 41 KELLY J, KLJUN N, OLSSON P O, et al. Challenges and best practices for deriving temperature data from an uncalibrated UAV thermal infrared camera [J]. Remote Sensing, 2019, 11(5): 1-21.
- 42 MAGUIRE M S, NEALE C M U, WOLDT W E. Improving accuracy of unmanned aerial system thermal infrared remote sensing for use in energy balance models in agriculture applications [J]. Multidisciplinary Digital Publishing Institute, 2021(9).
- 43 ELFARKH J, JOHANSEN K, ANGULO L M M F. Quantifying within-flight variation in land surface temperature from a UAV-based thermal infrared camera [J]. Drones, 2023, 7(10).
- 44 刘银年. 高光谱成像遥感载荷技术的现状与发展[J]. 遥感学报, 2021, 25(1): 439-459.
LIU Yinnian. Development of hyperspectral imaging remote sensing technology [J]. National Remote Sensing Bulletin, 2021, 25(1): 439-459 (in Chinese).
- 45 张长兴, 王跃明, 张东, 等. 一种机载大视场面阵摆扫热像仪温排水监测方法: CN202010395043.X [P]. [2024-03-26].
ZHANG Changxing, WANG Yueming, ZHANG Dong, et al. A method for monitoring temperature and drainage of airborne large field array scanning thermal imager: CN202010395043.X [P]. [2024-03-26] (in Chinese).
- 46 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.
HE Jiahui, LIANG Chunli, LI Mingsong. 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 (in Chinese).
- 47 徐进, 王海霞, 曲颖丽, 等. 核电站温排水遥感定量监测方法研究[J]. 地理信息世界, 2019, 26(1): 82-86.
XU Jin, WANG Haixia, QU Yingli, et al. Research on thermal effluent quantitative remote sensing monitoring method for nuclear power station [J]. Geomatics World, 2019, 26(1): 82-86 (in Chinese).
- 48 隋超, 朱君, 王庆, 等. 基于温度梯度算法的核电温排水遥感影像背景温度提取方法研究[J/OL]. 海洋科学进展, 2024: 1-9 [2024-10-29].
SUI Chao, ZHU Jun, WANG Qing et al. Research on background temperature extraction method of remote sensing image of thermal drainage in nuclear power plant based on temperature gradient algorithm [J/OL]. Advances in Marine Science, 2024: 1-9 [2024-12-29] (in Chinese).
- 49 朱秀芳, 李原. 温排水自动提取方法研究[J]. 中国环

- 境科学,2023,43(11):6115-6122.
ZHU Xiufang, LI Yuan. Research on automatic extraction method of thermal discharge [J]. China Environmental Science,2023,43(11):6115-6122.
- 50 李涛,王庆,孙岳,等.滨海核电温排水监测预测技术手册[M].北京:科学出版社,2023.
LI Tao, WANG Qing, SUN Yue, et al. Technical manual for monitoring and predicting thermal discharge of coastal nuclear power plant[M]. Beijing: Science Press,2023(in Chinese).
- 51 万浩平,杨楠,李昌垣.河工模型温排水试验多通道温度采集系统的研制及应用[J].水利与建筑工程学报,2018,16(5):185-189.
WAN Haoping, YANG Nan, LI Changyuan. Development and application of multi-channel temperature collection system for warm-water discharge in river model test [J]. Journal of Water Resources and Architectural Engineering,2018,16(5):185-189(in Chinese).
- 52 张琨.关于核电厂温排水影响范围预测及运行后观测的探讨[C]//中国环境科学学会.2017中国环境科学学会科学与技术年会论文集:第4卷.北京:环境保护部核与辐射安全中心,2017:4.
ZHANG Kun. Discussion on the prediction of the impact range of thermal discharge from nuclear power plants and post operation observation [C]//Proceedings of the 2017 Annual Conference on Science and Technology of the Chinese Society of Environmental Sciences : Volume 4. Nuclear and Radiation Safety Center of the Ministry of Environmental Protection, 2017:4(in Chinese).
- 53 陈小莉,张强,赵懿珺,等.滨海核电厂冷却水明渠浅水排放三维数值模拟[J].中国水利水电科学研究院学报,2018,16(3):207-212.
CHEN Xiaoli, ZHANG Qiang, ZHAO Yijun, et al. 3D numerical simulation of waste thermal discharge by channel into shallow coastal area from nuclear power plants [J]. Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2018, 16 (3): 207-212(in Chinese).
- 54 李慧子,刘安涟,刘毅.温排水对船体外域水流温度场影响计算[J].中国舰船研究,2019,14(增刊1):82-89.
LI Huizi, LIU Anlian, LIU Yi. Calculation of the effect of thermal discharge on the temperature field of the external flow of the platform[J].Chinese Journal of Ship Research,2019,14(Sup.1):82-89(in Chinese).
- 55 戴天奇,姚世卫,魏志国.海上浮动核电站温排水浮升扩散规律数值模拟[J].热力发电,2015,44(10):58-62+67.
DAI Tianqi, YAO Shiwei, WEI Zhiguo. Numerical simulation of buoyant and diffusion rules of thermal discharge from floating nuclear power plants [J]. Thermal Power Generation,2015,44(10):58-62+67(in Chinese).
- 56 陈汉宝.滨海电厂温排水模型及其应用研究[D].天津:天津大学,2014.
CHEN Hanbao. Research on the theory and application of models for the thermal discharge of coastal power plants [D]. Tianjin: Tianjin University, 2014 (in Chinese).
- 57 林燕萍,王威,童中山,等.我国滨海核电厂温排水及液态流出物排放研究进展[J].海洋湖沼通报,2024,46(1):210-216.
LIN Yanping, WANG Wei, TONG Zhongshan, et al. Research progress on thermal discharge and liquid effluent from coastal nuclear power plants in China[J]. Transactions of Oceanology and Limnology, 2024, 46 (1): 210-216(in Chinese).
- 58 郭磊,黄本胜,邱静,等.某电厂温排水三维扩散特征物理模型研究及分析[J].广东水利水电,2018(11):26-30+39.
GUO Lei, HUANG Bensheng, QIU Jing, et al. Response relationship between flood tide level and estuary extension in the river network in pearl river delta [J]. Guangdong Water Resources and Hydropower,2018(11):26-30+39(in Chinese).
- 59 张琨,张爱玲,覃春丽,等.CORMIX与二维数模、物模在滨海核电厂温排水近区模拟中的对比研究[J].海洋科学进展,2017,35(1):117-123.
ZHANG Kun, ZHANG Ailing, QIN Chunli, et al. Comparison between CORMIX and traditional models on the simulation of coastal nuclear power plant water discharge[J]. Advances in Marine Science, 2017, 35 (1): 117-123(in Chinese).
- 60 段亚飞,赵懿珺,纪平,等.温排水水槽试验与平面二维、准三维及三维数值模拟的比较[J].水力发电学报,2017,36(9):100-110.
DUAN Yafei, ZHAO Yijun, JI Ping, et al. Tank experiment of cooling water discharge and its numerical simulations using 2D, quasi-3D and 3D models[J]. Journal of Hydroelectric Engineering,2017,36(9):100-110(in Chinese).
- 61 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).
- 62 张永红, 李家国, 朱利, 等. 温排水监测海面采样与空间插值方法优化研究[J]. 海洋环境科学, 2017, 36(5): 765-773.
- ZHANG Yonghong, LI Jianguo, ZHU Li, et al. Optimization research on the ocean surface sampling and space interpolation method of thermal discharge monitoring[J]. Marine Environmental Science, 2017, 36(5): 765-773(in Chinese).
- 63 张爱玲, 汪萍, 陈莹莹. 滨海核电厂温排水物理影响模拟中几个关注问题及审评见解[J]. 辐射防护通讯, 2011, 31(1): 21-24+27.
- ZHANG Ailing, WANG Ping, CHEN Yingying. Discussion on quality management of technical review of nuclear application environmental impact assessment [J]. Radiation Protection Communication, 2011, 31(1): 21-24+27(in Chinese).
- 64 陈小莉, 张强, 赵懿珺, 等. 滨海核电厂明渠深水温排放三维数值模拟研究[J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2022, 20(5): 394-401.
- CHEN Xiaoli, ZHANG Qiang, ZHAO Yijun, et al. 3D numerical simulation of waste thermal discharge by channel into deep coastal area from nuclear power plants [J]. Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2022, 20(5): 394-401(in Chinese).
- 65 龚雪晴, 刘明雍, 王子健. 基于无人舰艇的嵌入式水环境监测系统[J]. 国外电子测量技术, 2011, 30(12): 25-29.
- GONG Xueqing, LIU Mingyong, WANG Zijian. Embedded water environment monitoring system based on USV [J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2011, 30(12): 25-29(in Chinese).
- 66 沈杰, 赵琛, 王一帆, 等. 水下浮游探测器系统设计与实现[J]. 数字技术与应用, 2022, 40(1): 192-195+201.
- SHEN Jie, ZHAO Chen, WANG Yifan, et al. Design and implementation of underwater floating detector system[J]. Digital Technology & Application, 2022, 40(1): 192-195+201(in Chinese).
- 67 孙滨, 管正刚, 修磊, 等. 核电海水取水口水下检测 ROV 的研发及应用[J]. 自动化应用, 2023, 64(19): 77-79.
- SUN Zhen, GUAN Zhenggang, XIU Lei, et al. Development and application of ROV for underwater inspection of nuclear power plant seawater intake[J]. Automation Application, 2023, 64(19): 77-79(in Chinese).
- 68 项慧慧, 王吉祥, 徐森, 等. 基于无人船的水环境监测物联网研究与设计[J]. 计算机技术与发展, 2022, 32(1): 216-220.
- XIANG Huihui, WANG Jixiang, XU Sen, et al. Research and design of monitoring system for water environment IoT based on unmanned surface vehicles [J]. Computer Technology and Development, 2022, 32(1): 216-220(in Chinese).
- 69 陈振华, 陈小燕, 刘星毅. 基于 Zigbee 技术的滨海电站温排水监测系统的设计与实现[J]. 计算机测量与控制, 2013, 21(9): 2400-2402.
- CHEN Zhenhua, CHEN Xiaoyan, LIU Xingyi. A temperature monitoring system for warm water discharge from coastal power plant based on Zigbee and GPRS networking[J]. Computer Measurement & Control, 2013, 21(9): 2400-2402(in Chinese).
- 70 张文斌, 孙伟, 许歆, 等. 某核电厂附近海域生态环境特征及潜在致灾生物研究[J]. 海洋科学, 2022, 46(7): 32-43.
- ZHANG Wenbin, SUN Wei, XU Xin, et al. Ecological environment and the potential hazard-causing organisms in the sea area near the nuclear power plant[J]. Marine Science, 2022, 46(7): 32-43(in Chinese).
- 71 生态环境部卫星环境应用中心. 滨海核电厂温排水卫星遥感监测技术规范(试行)[S]. 北京: 生态环境部, 2021.
- Satellite Application Center for Ecology and Environment, MEE. Technical specification to thermal discharge monitoring for coastal nuclear power plants based on satellite remote sensing (on trial) [S]. Beijing: Ministry of Ecology and Environment of the People's Republic of China, 2021(in Chinese).
- 72 厦门市环境科学研究院, 厦门市环境监测中心站. 温排水监测技术规范[S]. 福州: 福建省质量技术监督局, 2016.
- Xiamen Environmental Science Research Institute, Xiamen Environmental Monitoring Center Station. Technical specification of thermal discharge monitoring [S]. Fuzhou: Fujian Province Bureau of Quality and Technical Supervision, 2016(in Chinese).