

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

王 祥¹, 苏 岫¹, 王新新¹, 王 林¹, 陈艳拢¹,
赵建华¹, 徐 进²

(1.国家海洋环境监测中心, 辽宁 大连, 116023; 2.大连海事大学, 辽宁 大连, 116026)

摘 要:近年来,我国核电事业发展迅速,随之而来的环境问题备受关注。本研究采用同时相、不同空间分辨率的 MODIS 数据、HJ-1B 红外相机数据及 Landsat-8 热红外数据计算获取了红沿河核电站附近海域的海表温度分布信息,并基于校正的海湾平均温度法得到三种星源数据的核电站温排水分布。分析显示:在红沿河核电站温排水监测中,Landsat-8 监测结果精度最高,且能体现最多的升温细节信息;HJ-1B 与 MODIS 数据因受制于较低空间分辨率所导致的“混合像元”效应,监测结果精度较低。考虑到不同温排水扩散区域水文地质条件的差异,在监测工作中应综合利用不同时间及空间分辨率的卫星数据,同时,无人机载红外载荷监测方式有望成为卫星遥感监测手段的有力补充。

关键词:温排水; 遥感监测; Landsat-8; HJ-1B; MODIS; 红沿河核电站

中图分类号:X834 文献标识码:A 文章编号:1007-6336(\$article_year)00-0001-06

Remote sensing based application research of nuclear power plant thermal plume monitoring with different spatial resolution imagery

WANG Xiang¹, SU Xiu¹, WANG Xin-xin¹, WANG Lin¹,
CHEN Yan-long¹, ZHAO Jian-hua¹, XU Jin²

(1.National Marine Environmental Monitoring Center, Dalian 116023, China; 2.Dalian Maritime University, Dalian 116026, China)

Abstract: Nuclear power industry developed rapidly in China in recent years and the environmental problems that followed have attracted much attention. In this study, three kinds of data source, MODIS thermal data, HJ-1B infrared scanner data and Landsat-8 thermal infrared data, which were imaged at simultaneous phase and different spatial resolution, were used to calculate sea surface temperature in the waters near the Hongyanhe nuclear power plant. Based on the corrected gulf average temperature method, the thermal plume distribution of nuclear power plants with three kinds of data source was obtained. Analysis shows that: Landsat-8 data achieves the highest accuracy and more details in thermal plume distribution. For restriction of the "mixed pixel" effect caused by low spatial resolution, HJ-1B and MODIS data have a bad performance. According to the differences in hydrogeological conditions between different monitoring areas, it's wise to use satellite data with different time phase and spatial resolution Comprehensively. It can be foreseen that unmanned aerial vehicles with infrared payload is expected to be

收稿日期:2019-01-31, 修订日期:2019-05-22

基金项目:国家重点研发计划“海上目标识别与监视系统集成与应用示范”课题(2017YFC1404900)

作者简介:王 祥(1984-),男,山东潍坊人,博士、助理研究员,主要从事海洋生态环境遥感监测方面的研究, E-mail: xwang@nmemc.org.cn

通讯作者:苏 岫(1984-),女,辽宁辽阳人,硕士,主要从事海岸带生态系统卫星遥感监测评价方面的研究, E-mail: xsu@nmemc.org.cn

a powerful complement to satellite remote sensing monitoring methods.

Key words: thermal plume; remote sensing monitoring; Landsat-8; HJ-1B; MODIS; hongyanhe nuclear power plant

2007年,国务院批准的《核电中长期发展规划(2005-2020年)》中明确了“积极推进核电建设”的电力发展基本方针。我国已成为世界在建装机容量最大的国家,安全有效的核电利用成为我国一次性能源短缺的有效补充方式。核电发展同样也面临一些问题,温排水便是其中之一^[1-2]。相对火电,核电热效率偏低,近2/3的热量被循环冷却水带入核电基地周边受纳水体,引起近岸水体温度升高,造成海洋动物迁移、生物多样性降低及生物资源衰退等一系列后果,形成水体热污染^[3-7]。因而,加强核电温排水的环境影响监测及评估对于合理规划和使用核能,防止热污染、保护海洋环境具有重要意义。

高效连续、动态同步的遥感技术成为核电温排水监测的主要手段之一。最早研究者们^[8-10]利用1d重访周期的AVHRR及MODIS数据监测核电站温排水,但1km的空间分辨率无法准确获取温排水的温升细节分布。不少研究者继而采用空间分辨率为120m和60m的Landsat TM/ETM+数据开展温排水监测,但16d的重放周期以及云对光学影像的影响导致有效数据匮乏,难以满足动态监测的业务需求。我国于2008年发射的环境一号B星(HJ-1B)搭载300m空间分辨率和4d重放周期的红外相机,在时间分辨率和空间分辨率方面进行了平衡,被诸多研究者^[7-11]用于大亚湾、田湾及红沿河等核电项目的温排水监测中。

对于核电温排水的业务化环境监测和管理而言,需要综合考量数据的成像质量及时间和空间分辨率。本研究选择三种不同空间分辨率的卫星遥感数据,以红沿河核电站温排水为监测研究区,分别开展温排水受纳水体温度反演和温升信息提取工作,比较三种数据源在监测应用中的优劣势,为红沿河核电站温排水监测提供相关技术依据。

1 材料与方法

1.1 研究区简介

红沿河核电站(图1)位于辽宁省瓦房店市红

沿河镇,地处辽东湾东海岸,北、西、南三面临海。核电站分两期规划,共建设六台百万千瓦级压水堆核电机组。一期四台机组目前均已投入运营,二期两台机组建设规划业已获批动工。一期工程采用敞开式的明渠取水方案,共用厂区西侧岸边的一个取水口,明渠排水口集中布设于厂区西侧护岸外以喇叭式集中排放,口门向西南布置。

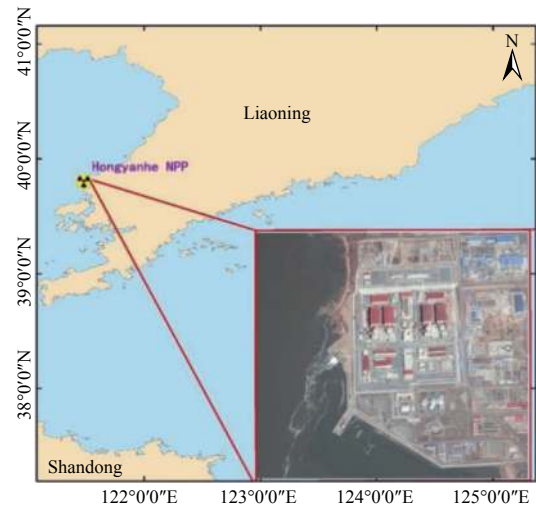


图1 研究区域

Fig. 1 Study area

厂区属温带季风气候,年均气温为11.0℃,年均相对湿度为67%,年总降水量为540.3mm,大气稳定度以中性和稳定天气为主。厂区附近海底地形较为平坦,水深变化较大,等深线大致与海岸线平行。海区属不正规半日潮,潮流运动形式以往复流为主,涨、落潮主流向分别为东北向和西南向。

1.2 卫星数据及预处理

研究选取覆盖红沿河核电站的2014年9月15日MODIS、HJ-1B IRS及Landsat-8 TIR数据进行温排水监测,三种数据详细信息见表1。研究技术路线图如图2。

MODIS数据采用NASA Ocean Color(<https://oceancolor.gsfc.nasa.gov/>)提供的L2级海表温度产品数据,提取其中海表温度数据集作为MODIS数据温度产品的结果。L2级HJ-1B IRS数据(源

表 1 卫星数据参数

Tab.1 Parameters of satellite data used

数据类别	有效波段/ μm	空间分辨率/km	重访周期/d	成像日期	成像时间/UTC
TERRA	10.78-11.28	1	1		02:00:00
MODIS	11.77-12.27				
HJ-1B IRS	10.5-12.5	0.3	4	2014-09-15	01:58:02
Landsat-8	10.6-11.19	0.1	16		02:35:07
TIRS	11.5-12.51				

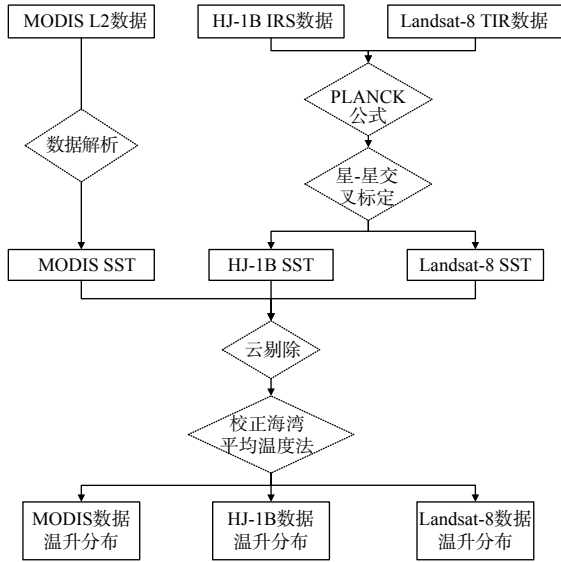


图 2 技术路线

Fig. 2 Flowchart of study

自中国资源卫星应用中心)及 Landsat-8 TIRS 数据 (<https://glovis.usgs.gov/app?fullscreen=0>) 自带几何投影信息。二者元数据文件均提供波段辐射定标参数,可直接将影像 DN 值转化为入瞳辐亮度,综合普朗克公式中温度的反算形式,建立如式(1)的辐亮度至温度的转换模型:

$$T_C = \frac{K_2}{\ln[1+K_1/L(T_C)]} \quad (1)$$

式中: $L(T_C)$ 为通道辐亮度; T_C 为星上亮度温度; K_1 、 K_2 为模型系数,可在影像元数据中查找。

陆地掩膜采用矢量岸线数据提取,云污染像元的剔除则直接采用成熟的 L2 级 MODIS 云掩膜产品数据 MOD35,经重采样完成图像匹配后直接剔除云影响,得到研究区三种卫星数据的无云星上亮温数据。

1.3 温排水温度信息提取

MODIS 数据采用 OCEAN COLOR 提供的 L2 级温度产品数据,其包含的海表温度数据集

即为所需 MODIS 的温排水温度信息。IRS 及 TIRS 数据采用与成熟 MODIS 海表温度产品交叉标定方式建模并校正和提高其温度信息精度。

交叉标定区域选定渤海湾,时间匹配窗口设为 $\pm 30 \text{ min}$ 以内,空间匹配窗口为 100 m ,通过对 MODIS 温度产品重采样实现。交叉标定所采用的数据共包含 2013 年 7 月至 2015 年 5 月近两年的云量小于 7% 的数据,温度跨度几乎完整的涵盖两年的低温(冬季)至高温(夏季)范围,数据具有代表性。图 3 为数据交叉标定散点图,通过

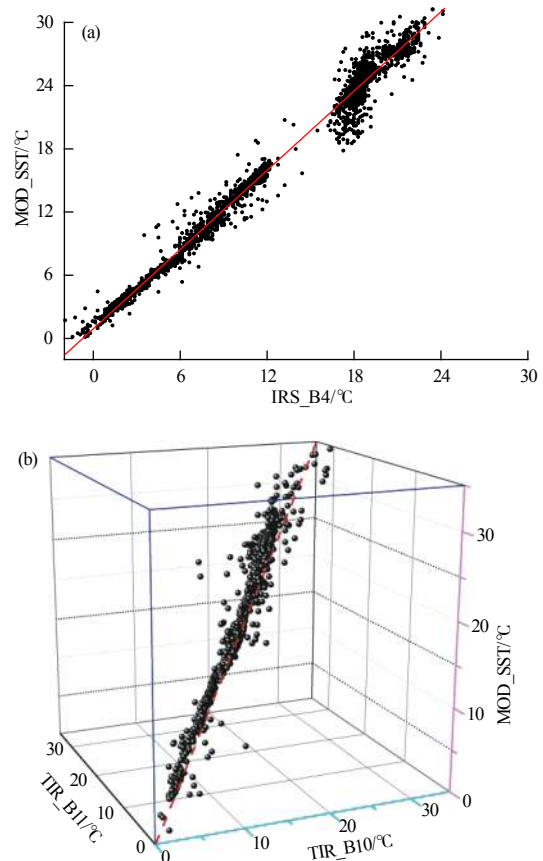


图 3 交叉标定拟合散点

Fig. 3 Scatter plot of cross-calibration

标定使得 IRS 及 TIRS 数据温度反演精度与 MODIS SST 产品基本一致。图 3(a) 为 MODIS 与 IRS 交叉标定散点图, 受天气因素制约, 5、6 月份匹配数据点较少, 对应图中 13 °C 至 18 °C 数据部分, 造成该部分数据缺失。但低温部分数据点和高温部分数据点相对丰富, 使得中段部分少量数据的缺失不影响线性拟合精度。拟合结果显示: 相关性达到 0.98, 标准偏差为 0.83 °C, 平均误差为 0.74 °C; 图 3(b) 为 MODIS 与 TIR 交叉标定散点图, 二者相关性达到 0.92, 受 11 μm 通道定标系数的影响^[11], 标准偏差为 0.93 °C, 平均误差为 0.86 °C。

1.4 背景温度计算

背景温度是相对于温排水引起的热异常而言, 定义为在没有温排水情况下, 现有区域内水体表面的平均温度^[12]。参考“核电厂温排水卫星遥感监测应用技术标准”中基准温度提取的常用方法—海湾平均温度法, 本研究对该方法加以修正, 以覆盖核电站温排水温升影响区域为原则, 以核电站为中心, 选定不受陆源入海及海流影响的 10 km×10 km 区域作为研究区(如图 1)。首先, 统计研究区内的平均海表温度; 其次, 剔除温排水影响区域高于平均温度 1 °C 及以上的区域; 最后, 统计剩余区域平均海表温度, 以此作为温排水监测区的背景温度。

2 结果与讨论

2.1 温升区分布

基于交叉标定后三种星源数据, 利用校正海湾平均温度法获取了不同空间分辨率观测模式下温排水的监测结果, 如图 4。

可见, 三种监测结果趋势性较为一致, 均表现出自排水口向离岸方向温度的递减, 但 MODIS 数据监测结果因为空间分辨率太低, 不存在任何扩散细节信息; 随着观测数据空间分辨率的提升, 温排水扩散的细节信息逐渐显现, HJ-1B 监测结果受较低空间分辨率导致陆地与海水的混合像元影响, 提升了水边线处观测像元的温度值, 是监测结果的误差源之一; Landsat-8 监测结果较为精细, 刚出排水口的高温水体十分明显, 随着水体的扩散和混合稀释, 水温逐渐降低, 形

成不规则环状形态, 同时, 温排水的形态也反映了当时潮汐状态^[13]。

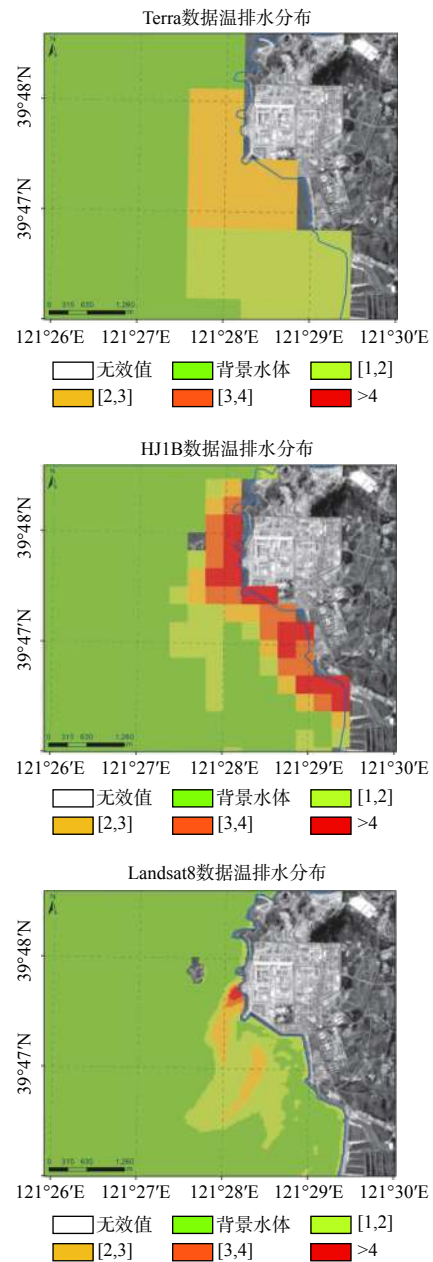


图 4 研究区温排水分布

Fig. 4 Distribution of thermal plume

受取排水量、水流方向、季风方向以及表底层水流交换方式等因素影响, 核电厂温排水对海温的影响不是一成不变的^[9]。如图 5 表示 2014 年 7 月 13 日(左), 2014 年 9 月 15 日(中)和 2014 年 10 月 17 日(右)的卫星遥感温排水温度场空间分布, 对比发现, 受海水混合效应的影响, 二者高温升影响区域较小, 低温升影响区域较

大,且温升分布呈现自排水口向外的逐步递减;温度场分布形态及面积差异巨大,左图温升区域面积较大,且温升区呈现沿岸边向南北两侧蔓延的趋势;右图温升面积明显较小,且温升区极为集中,呈现以排水口为中心的扇形分布。



图 5 不同潮汐状态下温排水分布

Fig. 5 Distributions of thermal plume under different tide conditions

2.2 温升区面积

图 5 展示了红沿河核电站温排水温升空间分布,将温排水影响区域划分为为五个等级,如

表 2,并以等温线的形式进行了图上标注。图上可以看出,等温线高温升区域(+3 °C、+4 °C)基本按圆环形向外扩展,而低温升区域(+1 °C、+2 °C)在两幅图中有不同的形态表现,主要原因可能是潮汐潮流的影响^[13-15]。仅考虑海水混合效应影响,温排水影响区域的温升自排水口向远端递减,表现出近似圆环的形态。而叠加潮汐潮流影响之后,图 5 可以明显的看出,低潮期“拉伸”了温升区的影响范围,高潮期则“压缩”了温升区的影响范围。

表 2 不同温升强度分级标准

Tab.2 Grade scale of various temperature rising intensity

温升范围(<基准温度)	分级标准(<基准温度)
<1 °C	<1 °C
[+1 °C, +2 °C]	+1 °C
(+2 °C, +3 °C]	+2 °C
(+3 °C, +4 °C]	+3 °C
>+4 °C	+4 °C

表 3 为不同潮汐潮流状态下,卫星遥感各等级温升区域的面积对比。表 4 为依据“辽宁红沿河核电厂一、二号机组环境影响报告书”中温排水数学模拟计算及物理模型试验综合结果。对

表 3 温升统计信息

Tab.3 Statistics of temperature rising

温升幅度/°C	温升范围/km ²	
	2014-07-13	2014-10-17
+1 °C	8.26	0.53
+2 °C	1.18	0.42
+3 °C	0.6	0.15
+4 °C	0.5	0.04

表 4 模拟计算结果信息

Tab.4 Statistics of analog computation

温升幅度/°C	温升范围/km ²			
	夏季		冬季	
	全潮最大包络面积	全潮平均最大面积	全潮最大包络面积	全潮平均最大面积
+1 °C	26.30	7.40	37.10	14.4
+2 °C	4.60	2.20	4.69	1.05
+3 °C	1.60	0.60	1.24	0.17
+4 °C	0.60	0.20	0.52	0.08

比看见, 卫星遥感各等级温升区域面积均小于模拟计算结果, 这种差异可能来源于“体温度”与“皮肤温度”效应^[16]。温升面积信息表明, 红沿河温排水影响超过 4 °C 的超标区域分别仅为 0.5 km² 和 0.04 km², 完全符合国家海洋局批复的国海管字 [2009]828 号文件规定的温排水用海区标准, 不会对邻近的二类环境功能区及自然保护区产生影响。

3 结 论

通过不同空间分辨率卫星遥感监测结果的比较分析发现, 空间分辨率的提升有助于提高温排水扩散范围的识别精度, 但单星观测模式下, 空间分辨率的提升也带来了较长的重访周期, 因而, 根据不同温排水监测区域水文地质条件差异, 综合利用不同时间及空间分辨率卫星数据, 达到既可以识别温排水扩散范围, 又能有较为丰富数据来源的效果。同时, 新兴的无人机平台搭载红外载荷也可尝试用于温排水的监测, 发挥其机动灵活及高空间分辨率优势, 有望成为卫星遥感监测手段的有力补充。

参考文献:

- [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.
- [2] 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.
- [3] DAVIES P A, MOFOR L A. Remote sensing observations and analyses of cooling water discharges from a coastal power station[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1993, 14(2): 253-273.
- [4] 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.
- [5] 於凡, 张永兴, 曹颖. 全球变暖背景下核电站温排水对海洋生态系统的影响[J]. *海洋湖沼通报*, 2010, (2): 155-161.
- [6] 翟水晶, 李缙来, 胡维平, 等. 火电厂温排水对湿地生态系统的影响分析-以江苏射阳港电厂为例[J]. *海洋环境科学*, 2008, 27(6): 571-575.
- [7] 张惠荣, 赵瀛, 杨红, 等. 象山港滨海电厂温排水温升特征及影响效应研究[J]. *上海海洋大学学报*, 2013, 22(2): 274-281.
- [8] CHUANG H H, TSENG R S. Remote sensing of SST around the outfall of a power plant from LANDSAT and NOAA satellite[J]. *Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 1998, 3(2): 17-45.
- [9] TANG D L, KESTER D R, WANG Z D, et al. AVHRR satellite remote sensing and shipboard measurements of the thermal plume from the Daya Bay, nuclear power station, China[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2003, 84(4): 506-515.
- [10] 张彩, 朱利, 贾祥, 等. 不同空间分辨率热红外数据在近海核电厂温排水监测一致性研究[J]. *遥感信息*, 2015, 30(2): 71-76.
- [11] 徐涵秋. 新型Landsat 8卫星影像的反射率和地表温度反演[J]. *地球物理学报*, 2015, 58(3): 741-747.
- [12] 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.
- [13] 涂向阳, 高时友, 陈荣力, 等. 潮汐控制下的河湾地区温排水运动和扩散规律研究[J]. *水动力学研究与进展*, 2014, 29(2): 157-165.
- [14] 郝瑞霞, 韩新生. 潮汐水域电厂温排水的水流和热传输准三维数值模拟[J]. *水利学报*, 2004, (8): 66-70.
- [15] 何国建, 赵慧明, 方红卫. 潮汐影响下电厂温排水运动的三维数值模拟[J]. *水力发电学报*, 2008, 27(3): 125-131.
- [16] 朱利, 赵利民, 王桥, 等. 核电站温排水分布卫星遥感监测及验证[J]. *光谱学与光谱分析*, 2014, 34(11): 3079-3084.