

doi: 10.6046/gtzyyg.2020.02.25

引用格式: 石海岗, 梁春利, 张建永, 等. 岸线变迁对田湾核电站温排水影响遥感调查[J]. 国土资源遥感, 2020, 32(2): 196-203. (Shi H G, Liang C L, Zhang J Y, 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.)

岸线变迁对田湾核电站温排水影响遥感调查

石海岗¹, 梁春利¹, 张建永^{1,2}, 张春雷¹, 程旭¹

(1. 核工业航测遥感中心, 石家庄 050002; 2. 东华理工大学, 南昌 330013)

摘要: 以田湾核电站周边海域为主要研究对象, 选取2组同一潮态下、不同时相的 Landsat8 数据, 研究田湾核电站周边岸线变化及温排水热影响现象, 综合分析核电站周边岸线变迁对附近海域水温分布与变化的影响。结果表明, 田湾核电站周边海域岸线变化显著, 岸线变迁影响温排水水域流场分布, 对核电站温排水区域造成影响。遥感技术能够监测出核电站周边岸线变迁情况及其对温排水的影响情况, 关注周边岸线变化情况对于核电站周边海域海温监测工作具有积极意义。

关键词: 岸线变迁; Landsat8; 核电站温排水; 温度反演; 遥感监测

中图法分类号: TP 79 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-070X(2020)02-0196-08

0 引言

随着我国核电事业的飞速发展和社会环境保护意识的不断增强, 核电站温排水对其受纳水域环境造成的热影响越来越受到人们的关注^[1-2]。水体温度几乎影响水的各种物理、化学、生物化学性质, 从而间接影响到各类水生物的生长和繁殖活动, 甚至产生明显的危害效应。因此, 开展核电站温排水的监测评价对研究水环境生态平衡有着重要意义^[3]。对于核电站温排水的监测, 以往所采用的方法主要包括数值模拟计算、物理模拟实验、现场测量等方法^[4]。随着科技的进步, 热红外遥感技术因其同步性、周期性和经济性方面的优势已成为海温监测的有效调查手段^[5-6]。

核电站温排水热影响规模主要受核电站运行机组的数量和功率、周边海域的潮汐状态^[7]、气象条件^[8]的影响。海域的潮汐状态主要通过流场的流速、流向体现, 当核电站周边海上工程处在海水涨、落潮的通道上, 岸线的变迁达到一定规模后, 会改变局部海域海水的流速和流向, 影响温排水的扩散^[9]。近年来, 随着江苏省沿海开发国家战略实施及其他工程活动, 田湾核电站周边海域岸线发生了

显著的变化: 2013—2017年间, 田湾核电站南部的徐圩港建设初步完工, 港区工程建设深入海域; 田湾核电站排水口导流堤、取水明渠等的建设, 使核电站周边海洋环境发生了持续变化。国内海域岸线变迁关注的焦点多集中在气象、渔业资源、生态环境等宏观方面, 海岸线变化对核电站温排水的影响主要是利用数值模拟方法进行研究, 但该方法对岸线变化后的海底地形、冲淤变化等影响模拟的因素不能及时更新, 难免造成偏差。遥感技术因其同步性、周期性和经济性好的特点, 可多次、同时获取核电站周边海域岸线和温排水分布情况, 用于分析岸线对温排水影响情况, 但目前罕有这方面的报道。

本研究基于 Landsat8 数据, 利用其多光谱数据定量获取了2013、2017年间2期田湾核电站周边海域海岸线的数据, 利用其热红外数据反演获取了周边海域的温度场情况, 对田湾核电站周边海域海岸线的时空变化特征及对温排水的影响进行分析, 以研究岸线变化对核电站温排水带来的影响。

1 研究区概况及数据源

1.1 研究区概况

田湾核电站位于连云港市连云区田湾, 厂区按

收稿日期: 2018-11-09; 修订日期: 2019-01-03

基金项目: 江苏核电站温排水调查项目“2017—2018年附近海域温排水遥感调查项目”(编号: ASNJF17060-02)和河北省人才工程培养经费资助科研项目“核电站温排水遥感监测技术研究”(编号: A2017005010)共同资助。

第一作者: 石海岗(1984-), 男, 硕士, 工程师, 主要从事遥感地质及应用方面工作, 研究方向为遥感软件的应用及开发。Email: 383071766@qq.com。

通信作者: 梁春利(1971-), 男, 博士, 研究员, 主要从事环境遥感及核电温排水遥感监测方面研究。Email: 1270610414@qq.com。

8 台百万 kW 级核电站机组规划,一期工程 2 台单机容量 106 万 kW 核电站机组均在 2007 年投入商业运行,二期 3、4 号机组在 2018 年相继投入商业运行。田湾核电站厂址所在海域属黄海北部,涨潮时,潮流从东北方向涌入,自北向南分别进入连岛镇南部水域、核电站取水明渠、核电站周边排水区域,顺岸向东南方向形成沿岸涨潮流态;落潮流态大致与涨潮流相反。排水口附近区域呈半圆形向东开放,半径 1 km 范围内,海拔从 3 m 缓慢降低到 -2 m,属淤积分布区,北岸为海水封闭区域。

1.2 遥感数据源及预处理

本文数据源为 2013 年 11 月 15 日和 2017 年 2 月 27 日获取的 Landsat8 数据。为验证反演结果,获取了 2013 年 11 月 15 日的海面测量数据和同日过境的 MODIS 数据。只有在相同或相似潮态的情况下,才能比较不同岸线造成的流速、流向的变化。为保证对比的客观性,选取的数据为田湾核电站 2 台机组在满功率运行、且均处在冬季落潮状态。

Landsat8 卫星上携带有 OLI 和 TIRS 2 个主要载荷,相关参数及波段特征见文献[10]。数据准备完成后,利用 ENVI 软件对 Landsat8 遥感影像进行预处理,包括辐射定标、几何裁剪、几何精校正、滤波、水陆分离及去云等处理。

为更准确地对岸线变迁进行解译,分别对 2 期 Landsat8 数据进行了大气校正,采用 Gram-Schmidt pan sharpening 方法将影像融合为 15 m 空间分辨率。为突出地物特征,影像采用 B6(R),B5(G),B2(B)波段组合。

2 岸线变迁解译及温度反演

2.1 岸线变迁解译

利用 ArcGIS 制图软件,结合 2 期遥感影像,采用遥感动态监测中常用的目视解译方法对 2 期遥感影像进行单独解译,然后通过对各解译结果进行比较,直接提取变化信息。

解译结果如图 1 所示,在 2013—2017 年间,田湾核电站周边岸线发生了显著的变化,进水口处的取水明渠由原来的 1.9 km 增加到 4.5 km,排水口处导流堤向南扩建了 1.5 km,南侧徐圩港防波堤,则从 2.6 km,增加到了 6.9 km,核电站排水口处于两侧防波堤环抱的人工海湾的湾底。

2.2 温度反演

因 Landsat8 TIRS 数据与 MODIS 热红外波段类似,有学者对其热红外波段开展了劈窗算法研究^[11-12],但根据美国地质调查局网站([\[vis.usgs.gov/\]\(https://vis.usgs.gov/\)\)公布的测试结果,TIRS 的 11 波段由于条带太突出,反演结果干扰太大,无法应用。本文采用辐射传输方程算法,对 Landsat8 TIRS 的 10 波段进行了温度反演。](https://glo-</p>
</div>
<div data-bbox=)

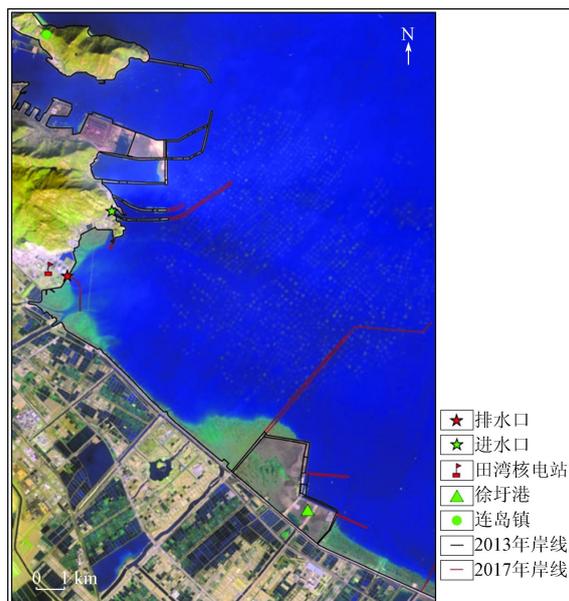


图 1 田湾核电站周边岸线解译结果图

Fig. 1 Interpretation results of the coastline around Tianwan Nuclear Power Station

卫星 TIRS 传感器接收到的热红外辐射值由大气向上辐射亮度、地面的真实辐射亮度经过大气层之后到达卫星传感器的能量组成。公式为

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

式中: L_{λ} 为由传感器接受到的大气顶层辐射,可通过辐射定标过程获取; ε_{λ} 为地表的比辐射率; T_s 为地表温度; $L_{\lambda}(T_s)$ 为温度为 T_s 时的黑体辐射,通过普朗克定律求得; $L_{\lambda atm \downarrow}$ 和 $L_{\lambda atm \uparrow}$ 分别为大气下行辐射和大气上行辐射; τ 为地表和传感器之间的大气透射率。

由辐射传输方程可知,要求算地表温度 T_s ,需要知道大气透射率 τ 、大气上行辐射亮度 $L_{\lambda atm \uparrow}$ 、大气下行辐射亮度 $L_{\lambda atm \downarrow}$ 和地表比辐射率 ε_{λ} 等参数的值。

1) L_{λ} 的计算。主要是指将传感器观测到的图像灰度值转换成辐射值的过程,即

$$L_{\lambda} = M_L Q_{cal} + A_L, \quad (2)$$

式中: Q_{cal} 为像元灰度值; M_L 和 A_L 分别为图像的增益和偏移。定标系数可以直接从元数据中获取。

2) 比辐射率 ε_{λ} 。物体的比辐射率是物体向外辐射电磁波的能力表征,受很多因素制约,与物体的表面状态及物理性质有关。本次反演主要针对海面进行,接近于黑体(比辐射率为 1),比辐射率取定值

0.995。

3)其他参数。大气下行辐射 $L_{\lambda atm \downarrow}$, 大气上行辐射 $L_{\lambda atm \uparrow}$, 地表和传感器之间的大气透射率 τ , 与大气作用有关。本次研究根据美国国家环境预报中心 (National Centers for Environmental Prediction, NCEP) 提供的标准大气剖面, 结合 MODTRAN4.0 模块建立的大气校正模型, 进行大气校正^[13-14], 通过辐射传输法, 消除大气的影 响。根据田湾核电站提供的卫星过境时刻的气压、地表温度、相对湿度、影像获取时间以及中心经纬度获取以上 2 个参数。

在获取大气下行辐射 $L_{\lambda atm \downarrow}$, 大气上行辐射 $L_{\lambda atm \uparrow}$, 地表和传感器之间的大气透射率 τ 参数后,

计算出海表真实的辐射亮度值 $L_{\lambda}(T_s)$, 根据普朗克公式的反函数, 求得地表真实温度, 即

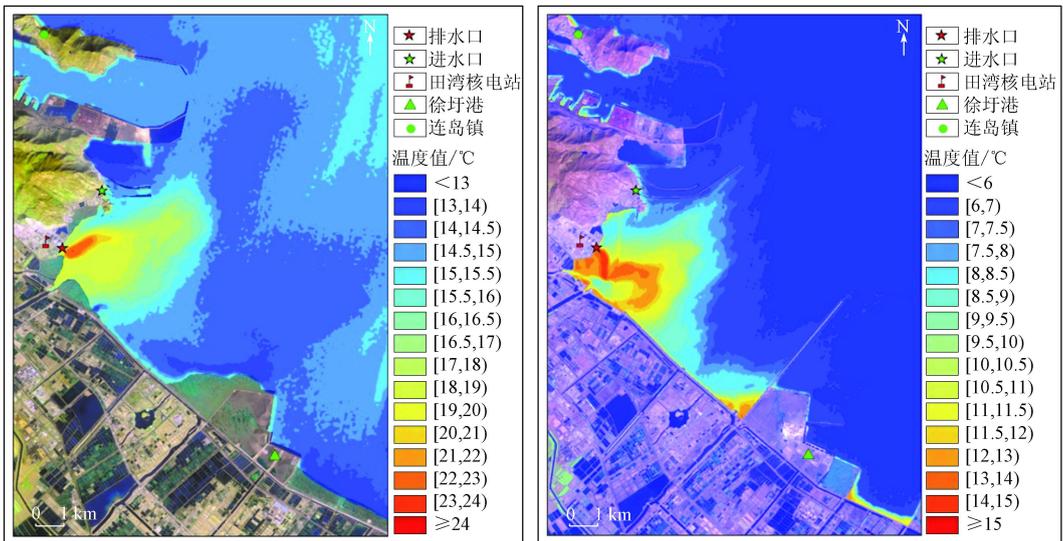
$$T_s = K_2 / \ln [K_1 / L_{\lambda}(T_s) + 1] \quad (3)$$

式中: 对于波段 10, $K_1 = 774.89 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{sr} \cdot \mu\text{m})$, $K_2 = 1\,321.08 \text{ K}$ 。

3 结果分析

3.1 反演结果与实测数据拟合

基于以上的算法, 进行波段运算, 获得 2 期数据海面的温度场如图 2(a) 和 (b) 所示。



(a) 2013 年 11 月 15 日

(b) 2017 年 2 月 27 日

图 2 热红外温度场图

Fig. 2 Distribution of thermal infrared temperature

为了验证温度反演结果的可靠性, 在 2013 年 11 月 15 日卫星过境前后一段时间内进行了海面温度测量。测量仪器为 JENCO 牌 6010 定制版水质测量仪, 标定后仪器测量精度 $0.1 \text{ }^\circ\text{C}$ 。测量时使用平面定位精度为 $5 \sim 10 \text{ m}$ 的 Garmin 60 CSx (GPS) 对现场观测和测量的地理位置进行精确定位, 以保证测量数据和遥感数据的位置相对应。卫星过境前后, 在核电站温排水区域至本底温度值海域内进行反复测量 (图 3)。因 Landsat8 热红外波段空间分辨率为 100 m , 测量时每 $50 \sim 100 \text{ m}$ 间距进行一次测温, 共获取到 156 个测温数据。

利用最小二乘法将反演温度值 (sea surface temperature, SST) 与实测值进行拟合, 验证 Landsat8 反演值与海面实测值之间的关系。无论是否有相关, 都可以用最小二乘法求出最佳的 a 和 b , 通过相关系数 r (通常以其平方值进行衡量, $0 < |r| \leq 1$) 衡量线性相关程度, r 越接近 1, 线性相关程度越高; r 为 0 时,

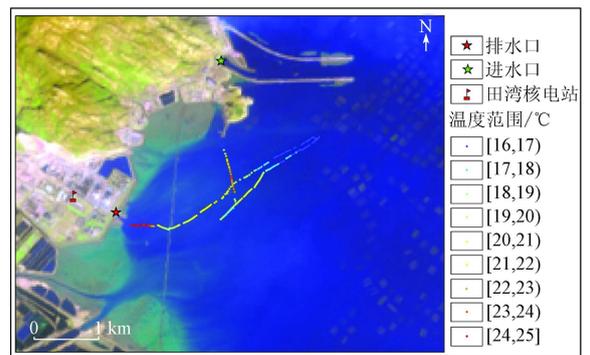


图 3 2013 年 11 月 15 日海面实测点位图

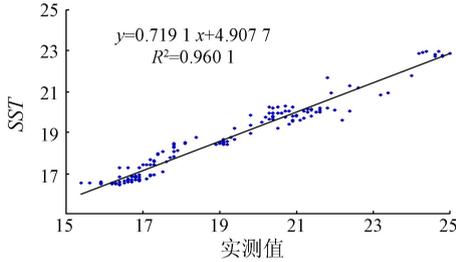
Fig. 3 Distribution of sea surface temperature on November 15, 2013

则不相关。同时, 为了衡量实际值与理论预测值的偏离程度引进了标准误差、残差和标准残差, 这些值偏离越大, 表明相关性越差, 反之则相关性越好。

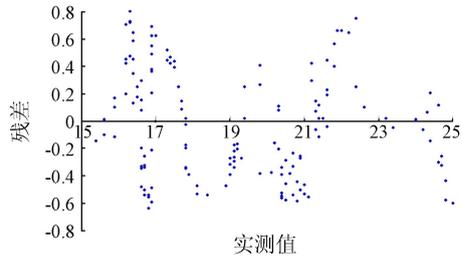
根据最小二乘法的计算方法, 将 2013 年 11 月 15 日得到的 156 组实测值分别与 Landsat8 和 HJ-1B 数据反演的 SST 值进行线性回归拟合, 并对 SST

值残差进行投点,得到了图 4 的拟合结果。2013 年 11 月 15 日 Landsat8 反演获得的 SST 值与实测数据拟合关系式为 $y=0.7191x+4.9077$, 拟合后回归系数的平方值为 0.9601, 标准误差为 0.37, SST 值残差集中在 $(-0.8, 0.8)$ 的范围内, 大部分集中

在 $(-0.4, 0.4)$, 标准残差的绝对值也集中在 $(0.0027, 3.3361)$ 区间内, 大多数都小于 1。从线性关系的程度和误差大小上可以反映出温度反演方法获得的温度场数据是准确可信的, 海面温度监测结果是可靠的。



(a) 海上实测值与反演 SST 值线性拟合图



(b) 实测值与拟合值残差投点图

图 4 2013 年 11 月 15 日海上实测值与反演 SST 值线性拟合图和残差投点图

Fig. 4 Linear fitting and residual point map of measured values and inverted SST values at sea on November 15, 2013

3.2 反演结果与 MODIS 温度数据对比分析

MODIS 是美国 Terra 和 Aqua 卫星的主要传感器, 每天可获取全球任意地点的影像数据, 含有 16 个热红外波段, 其中的第 31 波段和 32 波段由于对水汽的吸收作用不同, 受太阳光反射的影响较弱, 可以用来消除水汽吸收的影响。针对 MODIS 数据地表温度的算法, 国内外很多学者开展了很多相关研究, 尤以分裂窗算法最为成熟^[15]。经过长期的验证, 美国 NASA 网站针对 MODIS 海表温度二级产品免费对外分发^[16], 其精度为 $0.053 \sim 0.66 \text{ }^\circ\text{C}$ ^[15-16]。为验证 Landsat8 数据反演结果, 以 MODIS 数据的海表温度(图 5)为基础, 与 Landsat8 热红外数据反演结果对比分析, 进行交叉验证^[17]。

2 组数据过境时间有一定的时间间隔 (MODIS 过境时间为 2013 年 11 月 15 日 13:20, Landsat8 卫星为 2013 年 11 月 15 日 10:38), 这段时间主要为落潮末期到涨潮初期, 且落潮末期占时间比例较大 (图 6), 因为落末阶段海水比较稳定, 涨潮时间较短, 大量外海海水还未涌入该海域, 海表温度变化不大。

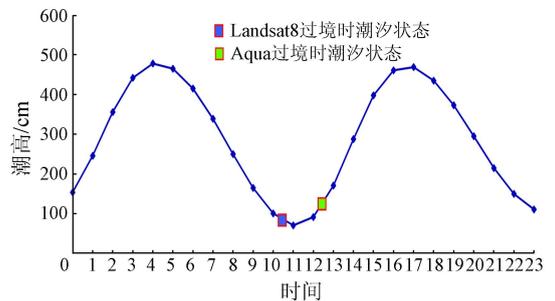


图 6 2013 年 11 月 15 日潮汐状态变化示意图

Fig. 6 Diagram of tidal state changes on November 15, 2013

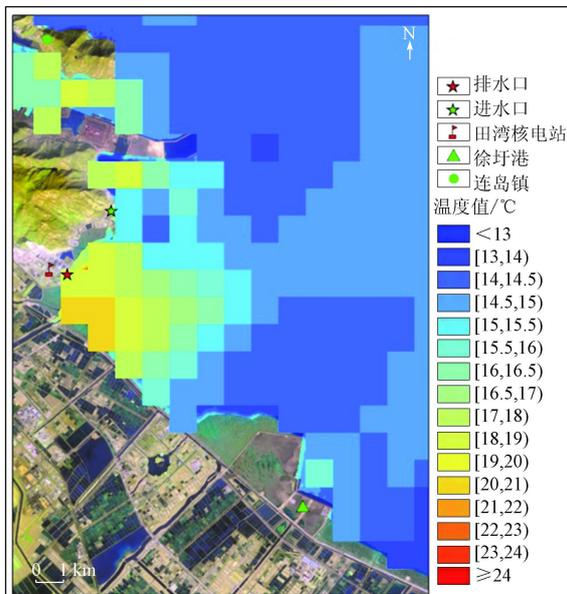


图 5 2013 年 11 月 15 日 MODIS 热红外温度场图

Fig. 5 Temperature distribution map of MODIS thermal infrared on November 15, 2013

在两景温度场数据上随机选取 23 个点, 利用最小二乘法研究两者之间的关系 (表 1)。MODIS 数据空间分辨率为 1 km, 海陆像元混合比 Landsat8 要大, 点位选取时优先选取远离海岸海域的点位。从表中可知, 偏差最大为 $1.13 \text{ }^\circ\text{C}$, 最小小于 $0.1 \text{ }^\circ\text{C}$ 。利用最小二乘法进行拟合探讨两组数据之间的回归关系, 拟合结果如图 7 所示。两组数据拟合关系式为 $y=0.8447x+2.2576$, 拟合后回归系数的平方为 0.8266, 标准误差为 0.3918。数据拟合结果表明两组数据之间线性特征非常明显, 具有很好的线性相关性和一致性, 同样可以反映出 Landsat8 热红外波段温度反演方法获得的温度场数据是准确可信的。

表 1 Landsat 8 反演结果与 MODIS 反演结果对比表

Tab. 1 Comparison of Landsat 8 inversion results with MODIS inversion results (°C)

序号	Landsat8 反演结果	MODIS 反演结果	偏差
1	14.69	14.41	0.28
2	14.52	14.62	-0.10
3	14.76	14.87	-0.12
4	14.64	14.70	-0.05
5	14.55	14.55	0.00
6	14.63	14.46	0.17
7	14.37	14.56	-0.19
8	14.36	14.60	-0.24
9	14.40	14.63	-0.23
10	14.47	14.63	-0.16
11	15.15	15.79	-0.64
12	14.50	14.81	-0.31
13	15.18	14.60	0.58
14	14.87	14.78	0.09
15	14.37	14.43	-0.06
16	16.33	15.20	1.13
17	15.06	16.11	-1.05
18	14.40	14.70	-0.30
19	14.23	14.45	-0.22
20	14.27	14.33	-0.06
21	14.30	14.39	-0.09
22	14.30	14.45	-0.15
23	15.25	14.68	0.57

排水沿海水落潮方向朝东北方向扩散,取水口处于略高于本底温度的温度范围内,对核电站的冷却水取水造成了一定的影响,不利于海水置换。

田湾核电站周边岸线解译结果(图 1)显示,取水口处的取水明渠由原来的 1.9 km 增加到 4.5 km,排水口处导流堤向南扩建了 1.5 km,南侧徐圩港防波堤,则从 2.6 km,增加到了 6.9 km。由于潮汐状态相似,2017 年 2 月 27 日温度场(图 2(b))梯度及空间分布特征与 2013 年 11 月 15 日温度场相似。由于气象条件不同,整体温度较低。核电站周边温度场范围 6.1 ~ 14.7 °C,主要集中在 6.5 ~ 13.2 °C。徐圩港的半封闭海域温度主要集中在 5.5 ~ 6.6 °C,连岛北部海域温度主要集中在 6.6 ~ 7.2 °C。卫星过境时,获取的数据同样处于落潮潮态,温度场明显受到了潮态的影响。高温热水(12.4 °C)漫过排水口导流坝后向东北方向展布,随着距离增加,海水混合,温度逐渐降低。因为岸线的阻挡,温排水被限制在取水明渠南侧,此时温排水温度已降至 6.8 °C;南侧同样受到了防波堤的影响,温排水的羽迹被阻断。高温海水虽然被阻隔在取水口之外,保护了取水安全,但岸线的变化使田湾核电站排水口处于一个由两侧海工建筑环抱下的人工海湾的湾底,改变了海域流场情况,影响了温排水的展布形态和规模。

3.4 热影响统计与讨论

本底温度是指在没有温排水发生的情况下,现有温排水影响区域的水体环境的平均温度。对于核电站温排水监测,实际情况是无法把温排水的影响从附近水体中剔除的,且温排水区域的绝对温度在不断变化,准确确定环境的背景温度非常困难。如果没有准确的背景温度作为参考,就无法确定热影响分布范围的大小及位置,无法进行环境影响评价。对于田湾核电站附近海域,由于远近海区域温度差别较大,本底温度综合考虑海湾平均温度(剔除温排水区域)的基础上,采用核电附近不受温排水影响区域的平均温度作为本底温度。

温排水影响区域为核电站排水口处高于本底温度 0.1 °C 以上区域。综合考虑后将周边海域(剔除温排水影响区域后海域)平均海面温度作为本底温度。之后将遥感反演的温度场数据整体扣除本底温度,以获取核电站温排水形成的温度场的热影响数据。提取核电站热影响区,分别划分出 9, 10 个等级,并分别进行编码(图 8(a), (b)),分类统计各个等级的面积,采用 0.1 °C, 0.5 °C 和 1.0 °C (高于本底水温)等提取核电站温排水的热影响分布信息。根据各级水温水体所占的像元数,计算不同级别水温分布面积(图 9)。

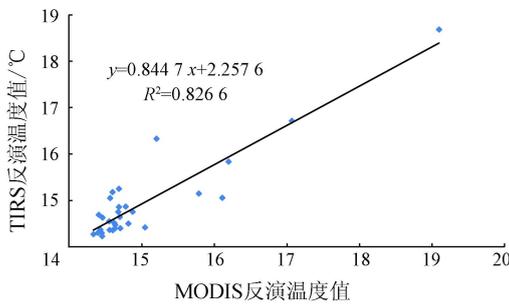


图 7 2013 年 11 月 15 日 Landsat 8 与 MODIS 反演结果数据拟合图

Fig. 7 Fitting of Landsat 8 and MODIS Inversion Results on November 15, 2013

3.3 核电站周边温度场分布特征

2013 年 11 月 15 日热红外温度场(图 2(a))显示,核电站附近海域温度分布层次分明,温度场范围为 13.0 ~ 23.0 °C,主要集中在 14.5 ~ 18.9 °C。连岛北部海域温度主要集中在 13.7 ~ 14.5 °C。核电站南部徐圩港正在建设过程中,周边海域温度主要集中在 13.4 ~ 14.1 °C。

核电站周边海域的温度场明显受到了温排水的影响,热影响强度较高的水体离排水口近,由排水口向外延伸,温度逐渐降低,到达环境本底温度区后,变化趋缓。由于两颗卫星过境时处于落潮潮态,温

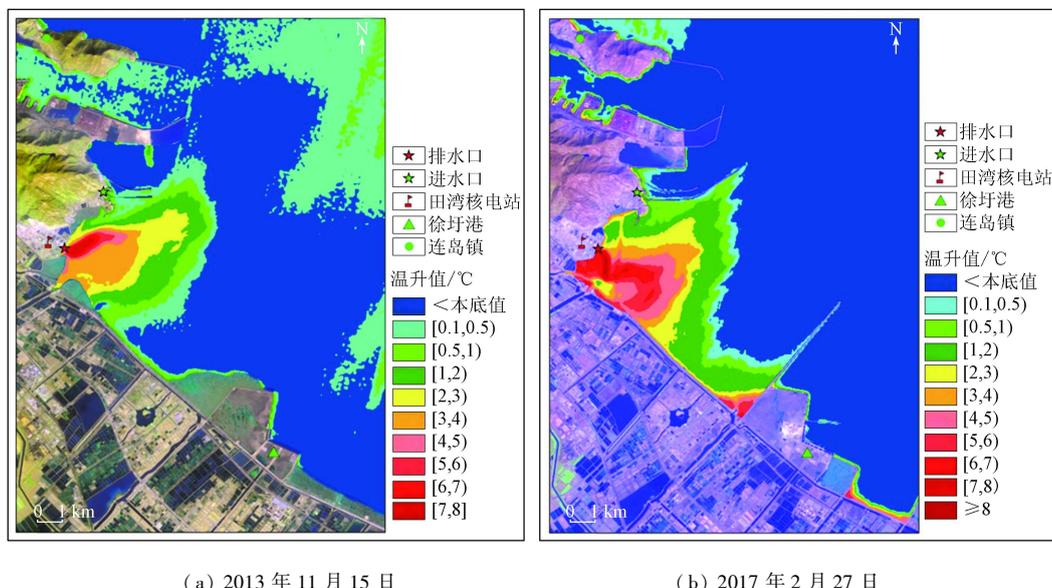


图 8 热影响编码图

Fig. 8 Heat impact coding chart

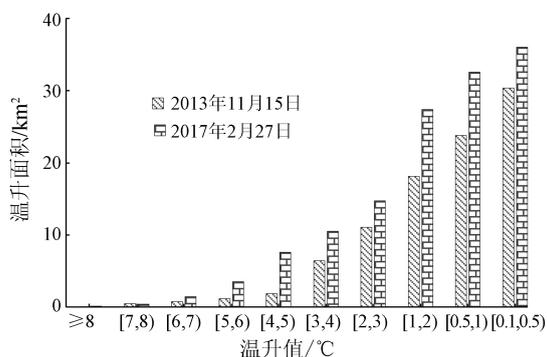


图 9 不同时期热影响面积对比图(单位: km²)

Fig. 9 Contrast chart of heat affected area at different time phases

热影响编码图显示,核电站温排水明显影响了核电站附近海域的温度场,由排水口向外延伸,热影响温度逐渐降低,到达本底温度后,温度趋于稳定。相较于 2013 年 11 月 15 日反演的结果,2017 年 2 月 27 日的获取的结果,总体而言,各级别的面积均有扩大,具有温升级别越高,面积变化越大的趋势,最大热影响范围(0.1 °C 以上的温升范围)增加了约 18.68%,并出现了 8 °C 以上的温升。因为两组数据获取时核电站的运行工况、所处的季节及潮汐状态类似,推断面积增大的原因为工程建设阻碍了温排水扩散造成的。

核电站周边海域岸线的变化,改变了海域的流场情况。工程未建成时,涨潮海水从东北方向涌入,沿岸向东南方向流动,落潮时,海水从东北方向流出;工程建成后,徐圩港防波堤阻隔了排水口向南的顺岸水流,涨落潮时形成了向岸、离岸的往复流,流速减慢,取水明渠延伸,在另一面限制了海水的流动。受此影响,温排水海域涨落潮流速都有不同程

度的减小,流向发生了偏转,不利于温排水的扩散,造成了温排水影响的面积增大。

4 误差分析

本研究海表温度反演中,海水的发射率 ϵ 为 0.995,但海水的比辐射率会随泥沙含量、海浪状况和观测条件的变化而发生改变。相应的研究表明^[18],平静海面的发射率可能下降到 0.95,因此,比辐射率的取值在一定程度上影响到反演的精度。

测量数据与反演值的误差除与仪器的精度、人为操作方法有关外,还与测量的连续性和卫星数据的瞬时性有很大的关系。测量获取的数据是在卫星过境前后一段时间获取的(前后约 0.5 h),而卫星数据是在不足 1 min 的时间内获取的瞬时数据,经过一定时间,海域温度必然会发生轻微变化,造成该误差的存在。

MODIS 数据和 Landsat8 数据之间存在的差别主要来源于以下 3 点:

1)空间分辨率引起的差别。MODIS 数据空间分辨率为 1 km,反演获得的温度值是周边 1 km² 地物的平均值,Landsat8 数据获取的反演值为周边 0.01 km² 海域范围内的平均温度值,不同的空间尺度,造成了差别的存在。

2)过境时间不同引起的差别。两种卫星过境时间相差 2 h 42 min,虽然处于落潮末期到涨潮初期,海水虽总体比较平静,但仍处于一个动态的过程中,温度变化是不可避免,符合正常的规律。

3)潮态变化引起的差别。MODIS 数据获取时,

海域处在涨潮初期,虽然与 Landsat8 反演获取的温度场总体上是一致的,但已经显示出潮水涌入,温度场整体微向南西方向摆动的特征,对海域温度场分布也造成了影响。

5 结论

本文基于 2013 年、2017 年 2 景 Landsat8 数据,完成了田湾核电站周边海域岸线变迁调查,对其热红外波段进行了温度反演,获取了相似潮汐、气候条件下核电站周边海域温度场分布情况,并对 2013 年 11 月 15 日数据过境前后进行了海温测量。通过解译、对比分析得出:

1) 在 2013—2017 年间,田湾核电站周边岸线发生显著变化,进水口处的取水明渠由原来的 1.9 km 增加到 4.5 km,排水口处导流堤向南扩建了 1.5 km,南侧徐圩港防波堤,则从 2.6 km 增加到了 6.9 km,核电站排水口处于两侧防波堤环抱的人工海湾的湾底。

2) 通过对 2013 年 11 月 15 日 Landsat8 热红外波段温度反演结果与卫星过境前后的海上测温数据进行拟合、与同日过境的 MODIS 数据进行交叉验证,显示温度反演的结果与海上测温数据和 MODIS 数据具有很强的相关性,证明温度反演结果是可靠的,但由于测量不是完全同步,数据之间存在着误差。误差存在的原因除与仪器的精度、人为操作、温度反演的方法有关外,还与测量的连续性和卫星数据的瞬时性有很大的关系。

3) 不同时相遥感数据显示,工程建设虽然保护了温排水的取水安全,但是却影响了温排水展布形态和规模。核电站需要时刻关注,根据建设进度变化,必要时进行温排水影响分析,做出相应的对策。

4) Landsat8 数据能满足核电站温排水的监测需求,为评估核电站温排水对其周边海域温度环境的影响提供了迅速便捷的手段。

5) 本文仅对冬季落潮落急时刻的温度场进行了分析,不同季节、不同潮态下的核电站附近海域的遥感监测还有待进一步研究。

致谢: 文中 Landsat8 数据由美国 USGS 网站提供,在此表示诚挚的谢意。

参考文献 (References):

[1] 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(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(1):1-7.

[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 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.

[3] 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):69-74.
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.

[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 Tian-Wan nuclear power station[J]. Environmental Monitoring in China, 2013, 29(6):46-50.

[5] 熊盛青. 国土资源遥感技术应用现状与发展趋势[J]. 国土资源遥感,2002,51(1):1-5. doi:10.6046/gtzyyg.2002.01.01.
Xiong S Q. The application status and development trend of remote sensing technology in national land and resources[J]. Remote Sensing for Land and Resources, 2002, 14(1):1-5. doi:10.6046/gtzyyg.2002.01.01.

[6] 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.

[7] 王冠琳,熊学军. 田湾海域温排水分布及变化规律分析[J]. 海洋科学进展,2013,31(1):46-50.
Wang G L, Xiong X J. Distribution and variation of warm water discharge in the coastal area of Tianwan[J]. Advances in Marine Science, 2013, 31(1):46-50.

[8] 孙恋君,王凤英,朱晓翔. 田湾核电站温排水环境影响遥感调查[J]. 中国辐射卫生,2011,20(3):330-332.
Sun L J, Wang F Y, Zhu X X. Remote sensing investigation on environmental impact of thermal discharge of Tianwan nuclear power station[J]. Chinese Journal of Radiological Health, 2011, 20(3):330-332.

[9] 山东海阳核电项目 3、4 号机组温排水、液态流出物数值模拟补充计算分析报告[R]. 中国水利水电科学研究院,2015,12:15-57.
Supplementary calculation and analysis report on numerical simulation of thermal discharge and liquid effluent for No. 3 and No. 4 nuclear power units of Haiyang nuclear power project in Shandong Province[R]. China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2015, 12:15-57.

[10] 初庆伟,张洪群,吴业炜,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.

[11] 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.2008.01.07.
Chen H Y, Zhu L, Li J G, et al. A Comparison of two mono-window

- dow algorithm for retrieving sea surface temperature from Landsat8 data in coastal water of Hongyan River nuclear power station [J]. Journal of Geomatics, 2018, 30(1): 45 - 53. doi: 10. 6046/gtzyyg. 2008. 01. 07.
- [12] Rozenstein. Derivation of land surface temperature for Landsat8 TIRS using a split window algorithm [J]. Sensors, 2014, 14: 5768 - 5780.
- [13] Barsi J A, Barker J L, Schott J R. An atmospheric correction parameter calculator for a single thermal band earth - sensing instrument [J]. IGARSS03, 2003, 5: 3014 - 3016.
- [14] 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.
- [15] 刘玉洁, 杨忠东, 等. MODIS 遥感信息处理原理与算法 [M]. 北京: 科学出版社, 2001: 287 - 297.
- Liu Y J, Yang Z D, et al. Processing principle and algorithm of MODIS remote sensing information [M]. Beijing: Science Press, 2001: 287 - 297.
- [16] Otis B B, Peter J M, et al. Modis infrared sea surface temperature algorithm theoretical basis document [EB/OL]. [2004 - 5 - 6]. http://modis.gsfc.nasa.gov/data/dataproduct/dataproducts.php?MOD_NUMBER=28.
- [17] 刘恒. 多传感器卫星海表温度数据的验证与交叉比较 [D]. 青岛: 中国海洋大学, 2008: 1 - 12.
- Liu H. Verification and cross - comparison of multi - sensor satellite sea surface temperature data [D]. Qingdao: China Ocean University, 2008: 1 - 12.
- [18] 田国良. 热红外遥感 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2006: 7 - 10.
- Tian G L. Thermal infrared remote sensing [M]. Beijing: Electronic Industry Press, 2006: 7 - 10.

Remote sensing survey of the influence of coastline changes on the thermal discharge in the vicinity of Tianwan Nuclear Power Station

SHI Haigang¹, LIANG Chunli¹, ZHANG Jianyong^{1,2}, ZHANG Chunlei¹, CHENG Xu¹

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

2. Donghua Polytechnic University, Nanchang 330013, China)

Abstract: Based on the infrared data of the Landsat 8 in similar tides and different time spans in the sea region near Tianwan nuclear plant, Lianyungang City, Jiangsu Province, on November 15, 2013 and February 27, 2017, the authors used remote sensing technology to study the thermal discharge of nuclear power plant and change along the coastal line. The relationship between the thermal discharge and change in the coastal line was analyzed. The results show that the construction of peripheral engineering of Tianwan nuclear power plant dramatically changed the coastline, which affected the size and distribution of the thermal discharge. Remote sensing technology can detect the change of coastal line near the nuclear power plant and its effect on thermal discharge distribution. It is important to monitor the change of coastline near the nuclear power plant for sea temperature monitoring.

Keywords: coastline changes; Landsat8; thermal discharge of nuclear power plant; temperature retrieving; remote sensing monitoring

(责任编辑: 李瑜)