doi:10. 3969/j.issn. 1672-4623.2023.01.019

基于遥感技术的田湾核电周边海域环境监测

石海岗[1,2]，王　虎[3]，章新益[1,2]，牛海威[1,2]，张　恩[1,2]，张建永[1,2]，张春雷[1,2]，程　旭[1,2]
（1. 核工业航测遥感中心，河北 石家庄 050002；2. 河北省航空探测与遥感技术重点实验室，河北 石家庄 050002；
3. 江苏核电有限公司，江苏 连云港 222000）

摘　要：基于Landsat5、Landsat8卫星数据，开展田湾核电周边海域岸线和海域温度场的信息提取，分析研究了田湾核电附近海域环境的分布变化特征。结果表明，2008—2020年田湾核电周边工程建设明显增加，周边海域环境变化显著；核电运行前，排水口附近海域未出现明显温度分异，核电运行后，温排水海域具有明显温升现象；核电周边工程建设改变了海域流场，保护了核电冷却水取水安全，但不利于温排水扩散，导致温升分布向东南偏移，温升面积增大；二期3、4号机组扩建后，温升面积进一步增加，1℃以上温升增加约12.11%，4℃以上温升增加约6.98%。遥感技术能有效监测核电周边海域环境变化情况，满足核电对周边海域环境的监测需求。

关键词：遥感技术；核电站；温排水；温度反演；遥感监测
中图分类号：P237　　**文献标志码：**B　　**文章编号：**1672-4623（2023）01-0094-07

Sea Region Environment Monitoring Surrounding Tianwan Nuclear Power Plant Based on Remote Sensing Technology

SHI Haigang[1,2], WANG Hu[3], ZHANG Xinyi[1,2], NIU Haiwei[1,2], ZHANG En[1,2], ZHANG Jianyong[1,2],
ZHANG Chunlei[1,2], CHENG Xu[1,2]
(1. Airborne Survey and Remote Sensing Center of Nuclear Industry, Shijiazhuang 050002, China;
2. Hebei Key Laboratory of Airborne Survey and Remote Sensing Technology, Shijiazhuang 050002, China;
3. Jiangsu Nuclear Power Co., Ltd., Lianyungang 222000, China)

Abstract: Based on Landsat5 and landsat8 data, we extracted the information of coastline and sea region temperature field around Tianwan nuclear power plant, and analyzed the distribution characteristics of sea region temperature field near Tianwan nuclear power plant. The results showed that from 2008 to 2020, the construction projects surrounding Tianwan nuclear power plant increased significantly, and the peripheral sea region environment changed significantly. Before the operation of nuclear power plant, the temperature in the nearby sea region was relatively uniform, and there was no obvious temperature difference and temperature rising. After the operation of nuclear power plant, there appeared obvious water temperature of sea region surrounding Tianwan nuclear power plant. The water intake channel construction of nuclear power plant can protect the safety of cooling water intake, but it is not conducive to the diffusion of thermal discharge. After the expansion of nuclear power plant, the heat affected area increased further, that temperature rise above 1℃ increased by about 12.11%, and the temperature rise above 4℃ increased by about 6.98%. Remote sensing technology can effectively monitor the environmental changes and meet the needs of environmental monitoring in the sea region near the nuclear power plant.

Key words: remote sensing technology, nuclear power plant, thermal discharge, temperature retrieval, remote sensing monitoring

随着公众环保意识的增强以及国家产业结构和能源结构的优化，我国将持续稳步推进核电建设。核电作为清洁能源，运行过程中不会产生有害气体（SO_x、NO_x等）和温室气体（CO_2），但会形成大量的温排水，造成周边海域升温[1]，而当温度过高且扩散到核电取水口附近时，将影响核电的正常运行。此外，温升较高时还会改变水体质量，影响水生生物的繁殖和分布情况[2]。海岸线的变迁与海域使用、海岸保护等活动密切相关，对于海湾型的海域，岸线变化将影响海域的纳潮量和流场[3]，从而间接影响核电温排水的分布情况。因此，监测核电站周边海域环境，尤其是岸线、温度场信息变化对于核电的安全运行和研究水域生态平衡具有重要意义[4]。遥感作为对地观测综合技术，在核电周边海域环境监测方面具有其他技术手段无法比拟的特点[5-6]。

连云港作为欧亚大陆的东桥头堡，沿海经济快速

收稿日期：2021-08-13。
项目来源：江苏核电温排水研究资助项目（ASNJF20373-04）。

发展，核电周边海域涉海工程逐年增加。田湾核电因自身机组扩建也开展了系列工程建设，导致海域岸线形态和温排水排水量变化显著。海域岸线形态的改变和核电排水量的增加给水动力和水环境带来连锁反应[7]，导致核电周边海域环境发生显著变化。以往海域环境变化研究多集中于分析岸线变迁驱动力，为加强岸线管理提供依据，本文基于Landsat5存档数据和Landsat8现势数据，利用遥感和地理信息技术提取田湾核电周边海域的海岸线数据和温度场分布数据，进而研究田湾核电周边海域岸线变迁、核电扩建对海域环境温度场的影响。

1　研究区概况与数据来源

1.1　研究区概况

田湾核电位于江苏省连云港市高公岛乡，规划建设8台百万千瓦级核电机组，一期1、2号机组和二期3、4号机组分别于2007年和2018年投入商运，三期5、6号机组分别于2020年9月和2021年5月投入商运，6台机组单机容量均超过100万千瓦。核电周边海域向东开放，近岸区域属淤泥分布区，南北两侧现已被港口工程包围（图1）。核电周边为规则浅海半日潮型，一日经历两次涨落潮，海域流场运动形式以往复流或接近往复流为主，历时略有不同。落潮时，海水自核电排水口沿导流堤向南流动，然后受潮汐影响向东北方向泻出，分别流经排水口导流堤、取水明渠、连云港防波堤至连岛镇北侧；涨潮流大致与落潮流相反。

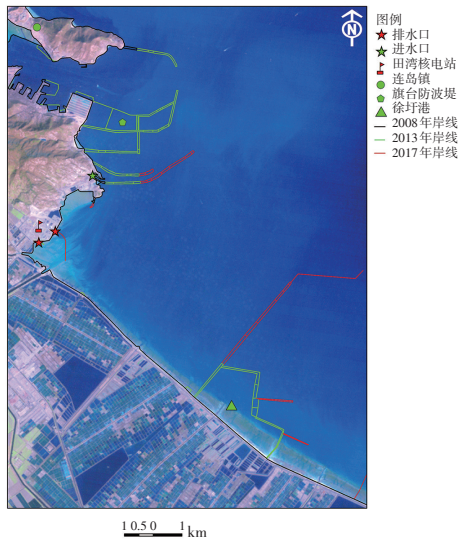


图1　田湾核电周边海域岸线解译结果图

1.2　数据来源

本文采用的数据源为2003-12-22、2005-09-06和2008-02-19的Landsat5数据以及2013-11-15、2017-02-27和2020-03-23的Landsat8数据。为验证反演结果，本文获取了2008-02-19过境的MODIS 1 km-Level1B Calibrated Radiances数据和2013-11-15海面测量数据。卫星热红外波段参数、过境时间、机组运行工况、所处季节和潮态如表1所示。Landsat5卫星携带的专题制图仪（TM）、Landsat8的OLI和TIRS传感器具体参数特征见参考文献[8]。

表1　田湾核电不同时相热红外数据概况表

数据类型	有效载荷	地面幅宽/km	空间分辨率/m	重访周期/d	过境时间及运行工况	季节与潮态
Landsat5	Band6	185	120	16	2003-12-22 10: 15 未运行 2005-09-06 10: 24 未运行 2008-02-19 10: 27 两台机组运行	冬季、- 夏季、- 冬季、落潮
Landsat8 TIRS	Band10 Band11	185	100	16	2013-11-15 10: 36 两台机组运行 2017-02-27 10: 36 两台机组运行 2020-03-23 10: 36 四台机组运行	冬季、落潮
MODIS	Band31 Band32	2 330	1 000	1	2008-02-19 13: 15 两台机组运行	冬季、落潮

2　研究方法

2.1　数据预处理

遥感影像预处理主要是对Landsat8 OLI/TIRS、Landsat5 TM和MODIS数据进行辐射定标、大气校正、几何精校正、海陆分离、影像裁剪和重采样。几何精校正以1∶5万地形图数据为基准进行，校正后的误差控制在5 m之内；大气校正通过ENVI软件进行；海陆分离利用Landsat8 OLI和Landsat5 TM的短波红外波段来区分。对于MODIS产品，几何校正后，重采样为120 m。各影像按照研究区矢量进行裁剪。

2.2　温度场信息提取

温度场信息提取的基础是对热红外波段开展温度反演。中外学者均针对Landsat8的两个热红外通道开展了劈窗算法研究，并进行了精度估算[9-10]，但因Landsat8的B11波段受条带干扰严重，数据分发单位（https：//glovis.usgs.gov/）经过测试显示，利用B11波段的劈窗算法将带来较大的误差。针对Landat5热红外数据，国内外学者提出了不同的反演算法，主要包括单窗算法[11]、普适性单通道算法[12]和辐射传输方程

法[13-14]，前两种算法是通过对辐射传输方程算法中大气相关参数进行近似简化获取地表温度。为保证结果的一致性，本文采用辐射传输方程算法对Landsat8和Landsat5数据开展温度反演，并对反演结果进行验证。

在无云情况下，不考虑大气对电磁波的散射，水平大气各种组分混合均匀，则地表的黑体辐射为：

$$L_\lambda(T_S)=\frac{L_\lambda-L_{\lambda\,\mathrm{atm}\uparrow}}{\tau_\lambda}-\frac{(1-\varepsilon_\lambda)L_{\lambda\,\mathrm{atm}\downarrow}}{\varepsilon_\lambda} \tag{1}$$

式中，T_S为地物温度；L_λ为传感器接收到的大气顶层辐射，可由传感器辐射定标获取；ε_λ为地物的比辐射率，因海水接近黑体，比辐射率可取0.995[11]；$L_{\lambda\,\mathrm{atm}\downarrow}$和$L_{\lambda\,\mathrm{atm}\uparrow}$分别为大气下行和上行辐射；$\tau_\lambda$为波长为$\lambda$时，地表和传感器之间的大气透射率。

式（1）经变形，可得到卫星传感器接收到的L_λ，即

$$L_\lambda=\varepsilon_\lambda\tau_\lambda L_\lambda(T_S)+(1-\varepsilon_\lambda)\tau_\lambda L_{\lambda\,\mathrm{atm}\downarrow}+L_{\lambda\,\mathrm{atm}\uparrow} \tag{2}$$

由式（2）可知，求取T_S除需ε_λ外，还需计算L_λ、$L_\lambda(T_S)$、τ_λ、$L_{\lambda\,\mathrm{atm}\uparrow}$和$L_{\lambda\,\mathrm{atm}\downarrow}$五个参数。

1）L_λ的计算。L_λ的计算是热红外传感器辐射定标的过程，即将传感器观测到的数据灰度（DN）值转换为辐射亮度值的过程。其计算公式为：

$$L_\lambda=a\times DN+b \tag{3}$$

式中，a、b为定标系数，分别为图像的增益和偏移，可直接从各自元数据中获取。

2）大气参数$L_{\lambda\,\mathrm{atm}\downarrow}$、$L_{\lambda\,\mathrm{atm}\uparrow}$和$\tau_\lambda$的获取。根据卫星过境时刻核电地面的平均温度、气压、湿度和影像中心经纬度，结合MODTRAN模块，进行在线（http://atmcorr.gsfc.nasa.gov/）大气校正[11-12]，获取$L_{\lambda\,\mathrm{atm}\downarrow}$、$L_{\lambda\,\mathrm{atm}\uparrow}$和$\tau_\lambda$。

3）$L_\lambda(T_S)$和T_S的计算。在获取$L_{\lambda\,\mathrm{atm}\downarrow}$、$L_{\lambda\,\mathrm{atm}\uparrow}$和$\tau_\lambda$后，即可得到海域表层真实的$L_\lambda(T_S)$，再根据普朗克公式的反函数，获取海表真实温度$T_S$，即

$$T_S=K_2/\ln(K_1/L_\lambda(T_S)+1) \tag{4}$$

式中，对于Landsat8 B10，K_1=774.89 W/(m²·sr·μm)，K_2=1321.08K；对于Landsat5B6，K_1=60.776W/(m²·sr·μm)，K_2=1 260.56 K。

本文基于上述算法和元数据中相关参数进行波段运算，获得6期数据海面的温度场分布如图2、表2所示。

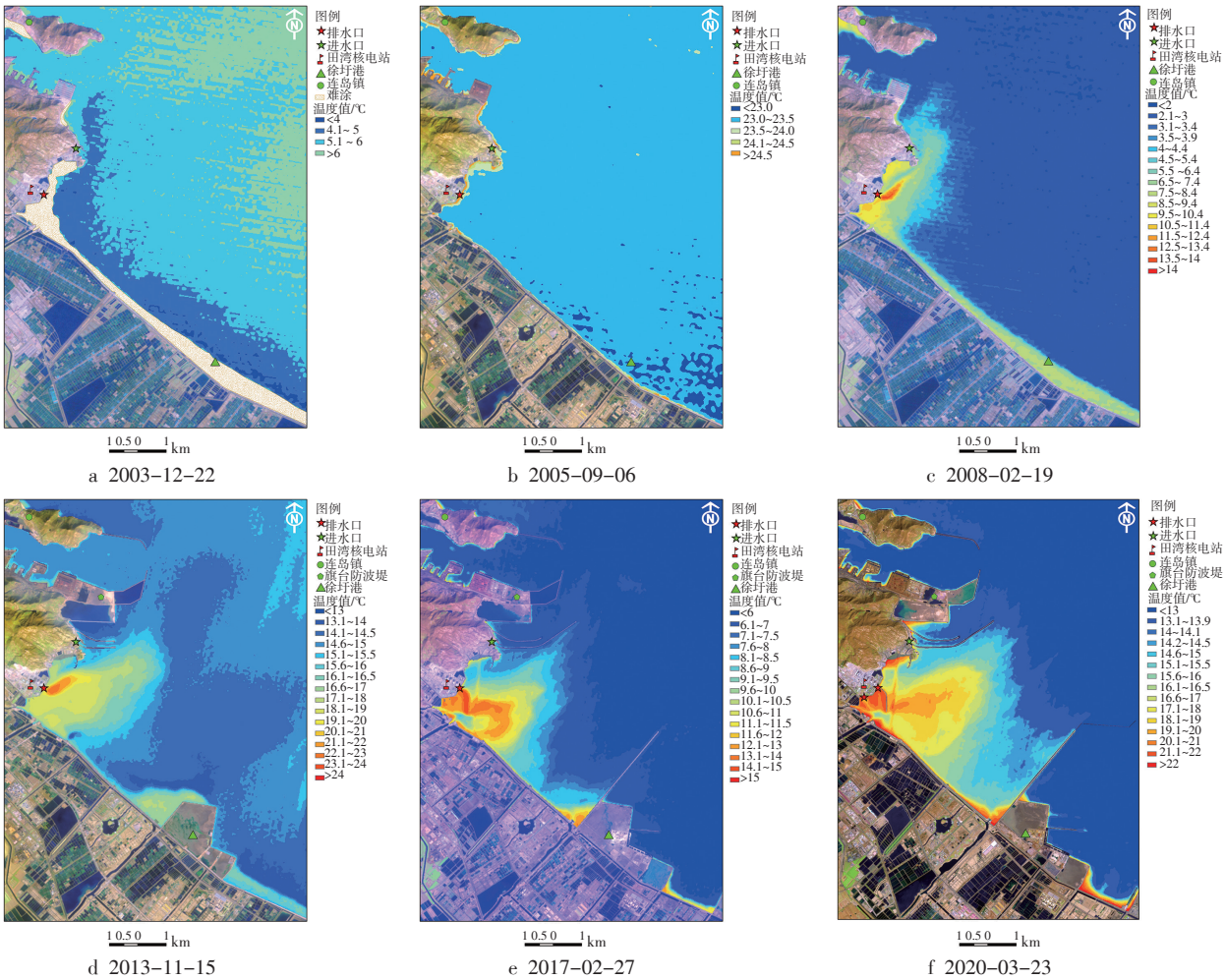


图2 田湾核电周边海域不同时期热红外温度场图

表2　田湾核电周边海域不同时期温度概况表

时相	核电周边海域温度场监测结果/℃		
	排水口周边	徐圩港	连岛北侧
2003-12-22	4.0 ~ 6.0	3.5 ~ 5.0	5.0 ~ 6.0
2005-09-06	23.0 ~ 23.5	23.0 ~ 24.0	23.0 ~ 23.5
2008-02-19	2.1 ~ 12.9	2.1 ~ 2.6	2.1 ~ 3.2
2013-11-15	13.0 ~ 23.0	13.4 ~ 14.1	13.7 ~ 14.5
2017-02-27	6.1 ~ 14.7	5.5 ~ 6.6	6.6 ~ 7.2
2020-03-23	13.5 ~ 21.7	11.5 ~ 13.0	12.7 ~ 13.5

2.3　岸线信息提取

本文对大气校正后的Landsat5、Landsat8多光谱数据进行图像融合、波段组合和图像增强；基于ArcGIS软件，采用目视解译法对6期遥感影像进行解译，并提取核电周边海域的岸线情况，如图1、表3所示。

表3　田湾核电周边海域不同时期岸线概况表

时相	工程变化/km			
	旗台防波堤	取水明渠	徐圩港防波堤	排水口导流堤
2003-12-22	0	0.35	0	0
2005-09-06	0	0.35	0	0
2008-02-19	0	0.35	0	0
2013-11-15	4.81	1.91	2.61	0
2017-02-27	4.81	4.54	6.86	1.50
2020-03-23	4.81	4.54	6.86	1.50

解译结果显示，在核电运行前，2003—2008年田湾核电周边岸线未发生变化。2008—2017年核电周边发生了显著变化：①连岛南侧、进水口北侧的旗台防波堤从无到有，最终长度达4.81 km；②取水明渠逐年扩展，最终增加到4.54 km；③排水口导流堤向南扩建约1.50 km；④南侧徐圩港防波堤从无到有，最终离岸距离达6.86 km；⑤核电排水口由原来的相对开放，逐渐处于两侧防波堤环抱的人工海湾湾底。2017—2020年岸线稳定，未发生变化。

3　研究结果与分析

本文于2013-11-15Landsat8卫星过境期间开展了近同步海面温度测量，海温测量方式和温度反演精度的分析研究在参考文献[15]、[16]中已有论述，不再赘述。

3.1　Landsat5反演结果与MODIS温度数据的对比分析

由于Landsat5数据时相较早，未开展同步海面实测工作。为验证Landsat5热红外波段温度反演结果，本文以精度较高的MODIS数据的海表温度二级产品[17]（图3）为基础，与Landsat5反演温度开展交叉验证[18]。因处于落潮末期，近岸滩涂出露面积较大，由于比热容的差异，滩涂温度明显高于海水温度。MODIS热红外数据空间分辨率为1 km，海陆像元混合比Landsat5大，为减小误差，选取30个随机点位时应远离近岸滩涂；此外，2008-02-19的MODIS数据过境时南侧闸口放水，选点时应避开放水影响区域。本文对选取的数据进行拟合（表4、图3），并进行交叉验证。Landsat5偏差最大为3.61℃，最小为0.02℃，平均偏差为0.64℃。两组数据的拟合关系式为 $y=0.726\,6x+1.210\,4$，拟合后 R^2 为0.885 6，标准误差为0.666 3。

表4　Landsat5反演结果与MODIS反演结果对比表

序号	MODIS	Landsat5	差值	序号	MODIS	Landsat5	差值
1	13.41	12.26	1.15	16	2.66	3.07	-0.41
2	10.16	6.55	3.61	17	2.66	3.07	-0.41
3	3.79	5.06	-1.28	18	2.10	2.93	-0.83
4	3.23	3.65	-0.42	19	3.79	3.82	-0.03
5	2.66	3.65	-0.99	20	2.66	2.91	-0.25
6	3.23	4.40	-1.18	21	2.66	2.64	0.02
7	2.66	3.07	-0.41	22	3.23	3.13	0.10
8	2.10	2.65	-0.55	23	6.00	5.14	0.86
9	2.66	2.80	-0.14	24	7.09	7.32	-0.23
10	2.10	2.77	-0.68	25	4.34	4.29	0.05
11	6.00	4.60	1.40	26	4.34	4.29	0.05
12	3.23	4.40	-1.18	27	3.23	4.29	-1.07
13	3.23	3.42	-0.20	28	2.66	2.95	-0.28
14	2.10	2.66	-0.56	29	2.66	2.70	-0.04
15	3.23	3.30	-0.07	30	2.10	2.77	-0.68

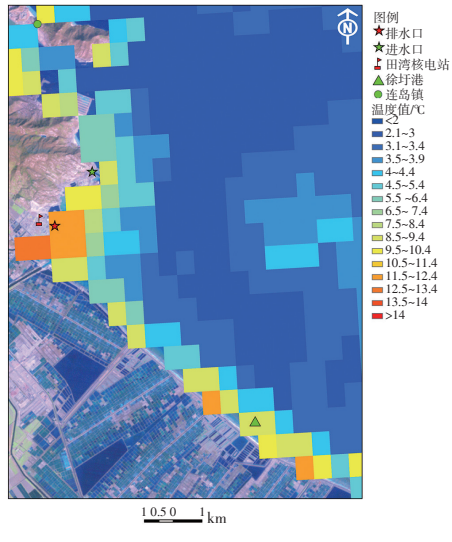


图3　2008-02-19的MODIS热红外温度场分布图

Landsat5反演结果与MODIS温度数据的拟合结果如图4所示，可以看出，Landsat5反演结果与MODIS温度数据之间线性特征明显，具有很好的线性相关性和一致性，说明Landsat5热红外波段温度反演方法获得的温度场数据准确可信。

3.2　核电周边温度场分布特征

2003-12-22、2005-09-06田湾核电未运行，附近海域温度较均匀（图2a、2b），温度分别在4.0 ~ 6.0℃

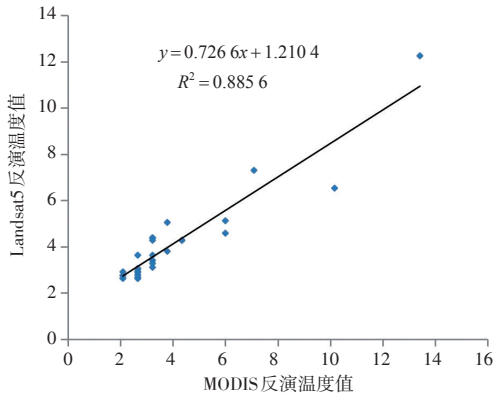


图4 Landsat5反演结果与MODIS温度数据拟合图/℃

和23.0～24.0℃之间，温度变化较小，排水口周边海域无明显温度分异与温升现象。

2008年后获取的4期数据，核电已投入运行，排水口周边温排水海域温度层次分明，存在明显的水温分异现象，距离排水口越近温度越高，反之越低，到达一定距离后，温度趋于稳定。因处于落潮状态，核电东南部至徐圩港防波堤底部和核电北部均有不同面积的滩涂干出，由于泥沙比热容仅为海水比热容的1/5，受太阳辐射的影响，滩涂在图像上显示出明显的增温区域。核电运行后的4期数据，由于所处潮态相似，温排水形成的温度场均具有沿海水落潮方向扩散的特征。2008-02-19周边工程还未开始修建（图2c），温排水扩散较快，影响范围相对较小，因无工程阻挡，进水口处于明显受温排水影响（4.9℃）、高于周边海水温度（3.2℃）的范围内；2013-11-15的海域温度场显示（图2d），由于旗台防波堤和取水明渠向外海延伸，阻挡温排水落潮扩散通道，温度场整体向东偏移，进水口平均温度为15.4℃，略高于周边海水温度（15.0℃），温排水影响的温度场整体规模略有增大；2017-02-27的温度场结果显示（图2e），高温热水受排水口导流堤阻挡向南扩散，过南侧堤头后，受潮汐拖曳作用，以约1.0 km的宽度向东延伸2 km，温度降低2.0℃，继续向东扩散，因与外海海水混合，温度迅速降低，2 km范围内降低4.0℃，因取水明渠阻挡，温排水被限制在进水口处南侧，向东南扩散的温排水羽迹，被徐圩港防波堤阻断，温排水展布进一步向东、东南偏移，范围增大明显；2020-03-23的核电周边岸线未发生变化，核电二期3、4号机组投入商运，4台机组满功率运行，一期排水口西南侧800 m处第二个排水口开始启用，两个排水口同时向外排放温排水，因热水混合较快，新排水口未形成独立温度场（图2f），展布形态与2017-02-27相似，但温度场规模明显扩大。

4 温升统计与讨论

4.1 基准温度选取与温升统计

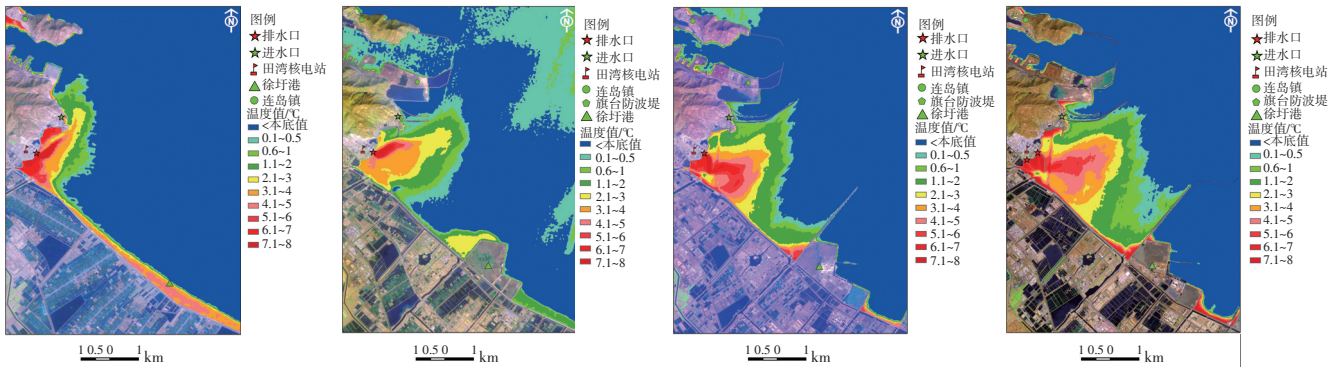
遥感监测反映的是核电周边海域实际水温分布，是温排水和自然因素综合影响的结果。核电运行后温排水温升信息提取，应将自然水温从遥感监测的温度场扣除，从而获取核电站温排水的影响范围。然而，实际情况是核电周边海域根据季节、潮汐、核电运行工况的不同，绝对温度不断变化，基准温度不是一个固定值，若没有准确的基准温度作参考，就无法确定温升分布范围的大小与位置，无法进行环境影响评价。目前技术条件下，无法把精确的本底温度场从附近水体中完全剔除，但可利用临近区域替代法、海湾平均温度法或取水口法等选取基准温度[6]。

对比分析核电运行前温度场发现，连岛北侧的温度与温排水区域温度基本一致（图2a、2b和表2），因此本文的基准温度以连岛北侧的海水温度为参考，综合考虑剔除温排水影响区域后的核电附近海域平均温度。首先将热红外反演的海域温度场扣除基准温度，划分温升等级并进行编码（图5）；再通过多光谱影像剔除滩涂增温占据的像元；然后统计核电周边海水各级温升像元的个数；最后获取核电温排水形成的温升分布结果（图6）。

由温升编码图（图5a、b、c）可知，随着周边岸线变化，取水口处温升影响逐年降低，但排水口周边温排水海域各级温升面积总体均有增大趋势（图6）。由于核电机组运行功率相同，监测季节和所处潮汐相似，可认为温升面积增大主要是由核电周边岸线环境改变所致。2020-03-23的数据为核电二期3、4号机组商运后数据（图5d），核电周边工程建设稳定，与2017年相比，岸线无变化，温升影响规模显著增加，1℃以上温升增加约12.11%，4℃以上温升增加约6.98%（图6），排除其他影响因素，可推断温升面积增加为新增机组温排水量增加引起的变化。

4.2 结果讨论

随着周边工程的变化和核电的扩建，核电周边海域环境发生了显著变化。核电周边工程未建成时，涨潮时刻潮水从外海沿东北方向流进排水区域，遇岸线阻挡，向东南方向流动，落潮时刻潮水基本沿相反方向流出；工程建成后，取水明渠在涨潮时使潮水发生挑流，落潮时阻碍了潮水向东北方向的流动，而徐圩港防波堤阻挡了潮水向南扩散；受此影响，温排水海域涨落潮流速都有不同程度的减小，且流向发生了偏



a 2008-02-01　　b 2013-11-01　　c 2017-02-02　　d 2020-03-02

图5　田湾核电周边海域不同时期温升编码图

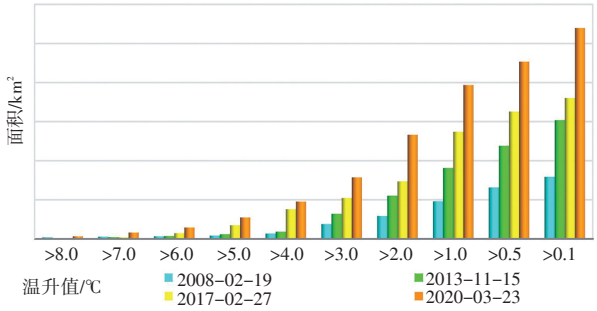


图6　田湾核电周边海域不同时期温升面积对比图

转，不利于温排水的扩散，造成了温排水影响面积的增大。2020年3、4号机组投入运行后，温排水量增加近一倍，进一步改变了周边海域环境，温升分布在近岸区域也有较明显的变化，各级别温升面积均有扩大，但并未按照温排水排放量成相应比例增加，而是小于该比例，主要原因在于温排水向外海扩散到一定距离后，海水流速、海水深度都明显高于近岸，有利于温排水与低温海水的快速掺混，导致热量迅速扩散、温度剧烈下降。因此，核电扩建后温排水影响面积并未按照机组增加幅度增加。

如前所述，现有技术很难把自然温度场完全分离出来，现有的基准温度扣除可能会导致遥感监测得到的温升范围与实际温排水造成的温升范围不符，加之海陆混合像元的影响，也会导致遥感监测得到的温升范围略大于实际温排水造成的温升范围。为了扣除准确的本底温度场，还需开展季节、潮汐和近岸浅滩的影响因素研究。

5　结　语

1）由Landsat8反演温度与近同步测量的测温数据的对比以及Landsat5与同日过境的MODIS数据的交叉验证可知，利用辐射传输方程算法反演Landsat8和Landsat5的温度结果可靠。田湾核电运行前，排水口周边海域温度无明显升温现象；核电运行后，海域温升现象明显。

2）Landsat5、Landsat8数据岸线和温度场信息提取结果显示，田湾核电周边海域环境变化明显，周边工程建设，尤其是取水明渠的建设有效保护了核电冷却水不受温排水影响，但阻碍了温排水的扩散速度，影响了温排水的扩散方向，造成温排水温升面积的增加。核电二期扩建后，温排水量增加，温升面积进一步扩大；但由于外海流速、深度的增大，有利于温排水热量的扩散，温升幅度未按机组增加幅度增加。核电站需要时刻关注周边海域的环境变化，必要时应进行周边海域环境信息提取、温排水的影响分析。

3）Landsat5、Landsat8数据能满足田湾核电周边海域环境的监测需求，可为评估核电站周边海域环境提供存档、现势的遥感数据。

参考文献

[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,2008,28(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

[3] 张存勇. 岸线变化对连云港港口海域纳潮量的影响研究[J]. 海洋湖沼通报,2014,36(3):39-43

[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):212-216

[5] 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

[6] 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

[7] 李梅娜,陈小英,刘金庆,等. 基于遥感的威海岸线变迁分析[J]. 海洋地质与第四纪地质,2016,36(6):79-84

[8] 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

[9] 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

[10] Rozenstein O, QIN Z H, Derimian Y. Derivation of Land Surface Temperature for Landsat8 TIRS Using a Split Window Algorithm[J]. Sensors,2014,14:5 768-5 780

[11] 覃志豪, ZHANG M H, Arnon K,等. 用陆地卫星TM6数据演算地表温度的单窗算法[J]. 地理学报, 2001, 56(4): 456-466

[12] Jimenez M, Juan C, Sobrino J A. A Generalized Single-channel Method for Retrieving Land Surface Temperature from Remote Sensing Data[J]. Geophysical Research Letters,2003,108(D22):1-9

[13] Barsi J A, Barker J L, Schott J R. An Atmospheric Correction Parameter Calculator for a Single Thermal Band Earth-sensing Instrument[Z]. IGARSS03 , 2003 , 5:3 014-3 016

[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, 2005,5 882:1-6

[15] 石海岗,张春雷,张建永,等. Landsat8和HJ-1B海面温度监测可靠性和一致性研究[J]. 地理空间信息,2017,15(11): 67-70

[16] 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

[17] 刘玉洁,杨忠东. MODIS遥感信息处理原理与算法[M]. 北京:科学出版社,2001:287-297

[18] 刘恒. 多传感器卫星海表温度数据的印证与交叉比较[D]. 青岛:中国海洋大学,2008:1-12

第一作者简介：石海岗（1984—），高级工程师，主要研究方向为遥感软件的应用与开发。

（上接第49页）

效的防控干预。

本文获取的患者家庭信息只精确到区、县，因此进行时空聚集性分析时只能以区、县地理位置为基本单元，若能以患者的家庭住址为基本单元，将大大提高空间聚集性探测的灵敏度。本文主要研究河南省新冠肺炎疫情的影响因素，由于各区县温度、湿度差异较小，因此其对新冠肺炎疫情的影响需进一步研究。

参考文献

[1] 蔺茂文,刘天,田克卿,等. 荆州市新型冠状病毒肺炎时空分布特征分析[J]. 上海交通大学学报(医学版),2020,40(5):566-572

[2] 张态,申元英. 地理信息系统在环境流行病学中的应用[J]. 现代预防医学,2013,40(11):2 005-2 009

[3] 李久枫,余华飞,付迎春,等. 广东省“人口—经济—土地—社会—生态”城市化协调度时空变化及其聚类模式[J]. 地理科学进展,2018,37(2):287-298

[4] 任梦圆,陈俊熹,巴哈白克·江吐鲁,等. 环境温湿度对新型冠状病毒传播影响研究的现状及展望[J]. 环境化学,2020, 39(6):1 473-1 478

[5] 刘勇,杨东阳,董冠鹏,等. 河南省新冠肺炎疫情时空扩散特征与人口流动风险评估:基于1 243例病例报告的分析[J]. 经济地理,2020,40(3):24-32

[6] 张平. 三峡地区细菌性痢疾流行特征与时空聚集性分析研究[D]. 北京:中国疾病预防控制中心,2018

[7] LIAO Y L, XU B, LIU X C, et al. Using a Bayesian Belief Network Model for Early Warning of Death and Severe Risk of HFMD in Hunan Province, China[J]. Stochastic Environmental Research and Risk Assessment,2018,32(6): 1 531-1 544

[8] 徐敏,曹春香,程锦泉,等. 甲流感疫情时空聚集性的GIS分析[J]. 地球信息科学学报,2010,12(5):707-712

[9] 朱伶俐,任红艳,丁凤,等. 陕西省HFRS疫情时空分异特征及影响要素研究[J]. 地球信息科学学报, 2020, 22(5): 1 142-1 152

[10] 王劲峰,徐成东. 地理探测器:原理与展望[J]. 地理学报, 2017,72(1):116-134

[11] ZHENG S, LIANG X, FANG H Y. Quantitative Analysis of Driving Factors in Soil Erosion Using Geographic Detectors in Qiantang River Catchment, Southeast China[J]. Journal of Soils and Sediments,2020(12):126-134

[12] 阎世杰,王欢,焦珂伟. 京津冀地区植被时空动态及定量归因[J]. 地球信息科学学报,2019,21(5):767-780

[13] 刘彦随,李进涛. 中国县域农村贫困化分异机制的地理探测与优化决策[J]. 地理学报,2017,72(1):161-173

[14] 刘小惠,何阳,麻先思,等. 有关新冠肺炎潜伏期和疑似期的统计数据分析:基于湖北省外2 172条确诊数据[J]. 应用数学学报,2020,43(2):278-294

第一作者简介：任利敏（1990—），硕士研究生，讲师，主要从事数据的时空分析研究。