

基于环境减灾卫星热红外波段数据研究 核电厂温排水分布

周颖^{1,2}, 巩彩兰^{1*}, 匡定波¹, 胡勇¹

(1. 中国科学院上海技术物理研究所 遥感信息研究实验室, 上海 200083;

2. 中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘要: 基于环境减灾卫星的热红外波段数据, 采用普适性单通道温度反演算法反演了田湾核电厂附近海域海面温度, 反演结果与 MODIS 海面温度产品具有一致性, 然后依据反演所得海面温度分布图, 对不同季节和不同潮汐条件下温排水的分布特征进行了分析, 结果表明, 夏季温升超过 3℃ 的区域明显小于冬季, 夏季温排水沿海岸单向扩散, 冬季的温升区域呈扇形分布; 低潮时温排水扩散范围明显增大, 温升超过 3℃ 的区域面积超过高潮时的 4 倍。

关键词: 热红外; 温排水; 海面温度; 单通道算法

中图分类号: TP7 文献标识码: A

Distribution of thermal discharge from a power plant: Analysis of thermal infrared data from the environmental mitigation satellite

ZHOU Ying^{1,2}, GONG Cai-Lan^{1*}, KUANG Ding-Bo¹, HU Yong¹

(1. Laboratory of Remote Sensing Information, Shanghai Institute of Technical Physics,

Chinese Academic of Sciences, Shanghai 200083, China;

2. Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Based on the thermal infrared data obtained from environmental mitigation satellite, the sea surface temperature (SST) was retrieved using generalized single-channel method to get the quantitative information about the diffusion of the thermal discharge around the Tianwan Nuclear Power Plant. It indicated that the retrieved SST was consistent with the MODIS SST product. Based on the retrieved SST distribution map, the thermal field variations in different seasons and tides were analyzed. The area where the SST has increased more than 3℃ in winter was much larger than that in summer. During the winter months, the thermal discharge extended to a sector area around the power station, while in summer it was limited to a longer and narrower area in one side of the bay. The thermal fields at low tide were rather larger than that at high tide, with the area where the SST has increased more than 3℃ four times larger than that at high tide.

Key words: thermal infrared data; thermal discharge; sea surface temperature; single-channel method

PACS: 95.75.Rs

引言

随着电力工业的发展, 近年来随着沿海地区的大型热、核电厂数量不断增加, 冷却系统所产生的循环冷却水量也日益增多, 造成热量和污染物不断增加, 必然产生一系列的温排水问题及影响^[1]。目前

常用的监测海面温度 (SST) 的方法包括实地观测调查温度分布、数值模拟与物理模型试验预测温度场^[2-3], 采用这两种方法研究温排水影响, 只能获取有限站点的海面温度值, 温排水引起海面温度变化的范围及分布难以准确计算, 而且不能实时、持续、动态监测。另外, 航空遥感也已经应用于监测核电站

收稿日期: 2011-12-19, 修回日期: 2012-07-11

Received date: 2011-12-19, revised date: 2012-07-11

基金项目: 海洋公益性行业科研专项经费项目 (200905010-2), 中国科学院上海技术物理研究所创新专项项目 (Q-ZY-19 和 Q-ZY-52)

Foundation items: Supported by National Nonprofit Project for Marine Industry Research (200905010-2); and Innovative Project of Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences (Q-ZY-19, Q-ZY-52)

作者简介 (Biography): 周颖 (1985-), 女, 湖北利川人, 博士研究生, 主要从事遥感信息应用研究. E-mail: zhouying_85@126.com.

*通讯作者 (Corresponding author): E-mail: gclxw@163.com.

温排水,中国国家海洋局东海分局在 2009 年对江苏省田湾核电站、福建省福州可门火电厂等 4 个电厂温排水扩散范围进行了航空遥感监测^[4],但是航空遥感成本高,不能长时间持续监测. 卫星遥感技术作为大范围、大尺度、可持续的宏观监测手段,能够弥补前面几种方法的不足,有效地为环境质量评估以及管理决策提供温排水影响的长期动态数据^[5-6].

我国第一颗环境与灾害监测预报小卫星星座中 B 星搭载的有效载荷红外相机(IRS)有 4 个波段,光谱范围覆盖了近红外、短波红外、中红外和热红外谱段. 其中热红外波段星下点空间分辨率为 300 m,波段范围为 10.5 ~ 12.5 μm . 该热红外遥感数据的光谱范围和 Landsat TM 热红外波段的光谱范围都十分接近,二者的通道响应函数也很相似. Landsat TM 热红外波段数据已被广泛应用于陆地与海洋表面温度的反演^[7]. 本文采用环境减灾卫星红外相机的热红外波段数据,采用普适性单通道温度反演算法反演获取了江苏省田湾核电站排水口附近海域的海面温度信息,然后根据反演获取的温度分布图分析了不同季节以及不同潮汐条件下核电站温排水的影响范围与强度的差异.

1 普适性单通道温度反演算法

目前,针对只有一个热红外波段的遥感数据,主要包括覃志豪等提出的单窗算法^[8]、Jimenez-Munoz 和 Jose A. Sobrino 提出的普适性单通道算法^[9]以及 Weng 等人提出的基于影像的反演算法^[10]. 这三种算法都只需要少量的大气参数进行地表温度的反演. 文中选择普适性单通道算法,对环境减灾卫星的热红外数据进行海面温度的反演.

根据辐射传输方程,传感器接收到的辐射亮度为:

$$L_{\lambda}^{\text{sensor}}[\varepsilon_{\lambda}B(\lambda, T_s) + (1 - \varepsilon_{\lambda})L_{\lambda}^{\text{atm}\downarrow}] \tau_{\lambda} + L_{\lambda}^{\text{atm}\uparrow}, \quad (1)$$

其中, λ 是给定的波长, $L_{\lambda}^{\text{sensor}}$ 是传感器接收到的辐射亮度, ε_{λ} 是地表发射率, $B(\lambda, T_s)$ 是在温度 T_s 下黑体的辐射亮度, $L_{\lambda}^{\text{atm}\downarrow}$ 、 $L_{\lambda}^{\text{atm}\uparrow}$ 分别是大气的下行、上行辐射亮度, τ_{λ} 是大气透过率. 式(1)中的 $B(\lambda, T_s)$ 可由 Planck 公式计算为:

$$B(\lambda, T_s) = \frac{c_1}{\lambda^5} \frac{1}{e^{c_2/\lambda T} - 1}, \quad (2)$$

其中, $c_1 = 1.1104 \times 10^8 \text{ W m}^{-2} \text{ sr}^{-1} \mu\text{m}^{-1}$

$$c_2 = 1.4388 \times 10^8 \mu\text{m} \cdot \text{K}$$

通过对 Planck 公式在初始温度 T_0 处作一阶

Taylor 级数展开推导可得:

$$T_s = \gamma(\lambda, T_0) \{ \varepsilon_{\lambda}^{-1} [\psi_1(\lambda, w) L_{\lambda}^{\text{sensor}} + \psi_2(\lambda, w)] + \psi_3(\lambda, w) \} + \delta(\lambda, T_0), \quad (3)$$

其中, $\gamma(\lambda, T_0)$ 、 $\delta(\lambda, T_0)$ 由 Planck 公式线性近似可得:

$$\gamma(\lambda, T_0) = \left\{ \frac{c_2 B(\lambda, T_0)}{T_0^2} \left[\frac{\lambda^4}{c_1} B(\lambda, T_0) + \frac{1}{\lambda} \right] \right\}^{-1}, \quad (4)$$

$$\delta(\lambda, T_0) = -\gamma(\lambda, T_0) B(\lambda, T_0) + T_0. \quad (5)$$

另外,大气函数 $\psi_1(\lambda, w)$ 、 $\psi_2(\lambda, w)$ 、 $\psi_3(\lambda, w)$ 由大气参数确定为:

$$\psi_1(\lambda, w) = \frac{1}{\tau(\lambda, w)}, \quad (6)$$

$$\psi_2(\lambda, w) = -L^{\text{atm}\downarrow}(\lambda, w) - \frac{L^{\text{atm}\uparrow}(\lambda, w)}{\tau(\lambda, w)}, \quad (7)$$

$$\psi_3(\lambda, w) = L^{\text{atm}\downarrow}(\lambda, w). \quad (8)$$

为了获取这三个大气函数的值, Jimenez-Munoz 和 Jose A. Sobrino 利用辐射传输模型 MOTRAN 进行了模拟,得到了 ψ_1 、 ψ_2 、 ψ_3 与 λ 、 w 的经验公式,因此只需要再获取水汽含量,就能推算出三个大气函数.

2 海面温度反演

2.1 遥感数据源及预处理

以江苏省田湾核电站附近海域,即经纬度范围分别为 $119.45^{\circ} \sim 119.58^{\circ}$ 和 $34.72^{\circ} \sim 34.61^{\circ}$ 的区域为研究区域,试验数据是由中国资源卫星中心提供的环境减灾卫星 B 星红外相机热红外波段 2 级数据. 试验数据经过几何精校正、裁剪等预处理后进行海面温度反演.

另外,反演海面温度所需的水汽含量以及验证反演结果所需的海面温度,分别采用 MODIS 1 km 分辨率的水汽产品和海温产品代替,MODIS 产品利用 ENVI 完成了 MODIS 数据定标、投影、去 bow-tie 效应、几何校正、重采样以及裁剪等预处理.

2.2 反演参数获取

根据普适性单通道算法的公式可以看出,需要先计算出传感器接收到的辐射亮度 $L_{\lambda}^{\text{sensor}}$ 、初始温度 T_0 、地表发射率 ε_{λ} 及水汽含量 w . 另外,该算法中波长都是指有效波长,所以还必须计算参数 λ_{eff} . 根据文献[9]所给出的计算有效波长公式以及传感器的光谱响应函数可得红外相机热红外波段有效波长为 11.511 μm .

1) 传感器接收到的辐射亮度 $L_{\lambda}^{\text{sensor}}$

根据中国资源卫星中心提供的红外相机的绝对辐射定标系数,可得传感器接收到的辐射亮度与图像

DN 值的关系为:

$$L = (DN - b) / g \quad (9)$$

其中, L 是红外相机接收到的长波红外波段辐亮度, DN 是图像像素值, b 、 g 为定标系数. 2009 年的定标系数 $b = -25.441$, $g = 59.421$, 2010 年的定标系数 $b = -25.441$, $g = 60.713$. 根据式(9)由图像像素值可获取接收到的辐亮度.

2) 初始温度 T_0

初始温度是地表温度的初始估计值, 文中选择用图像亮温代替. 对于红外相机热红外波段数据, 由式(9)获取的辐亮度值, 根据 Planck 公式, 可反算得到图像亮温为:

$$T_B = 1249.96 / \ln(1 + 589.346 / L) \quad (10)$$

3) 地表发射率 ε_λ

海水的发射率可能随海水的悬浮物含量等因素发生改变, 但这种变化幅度不大, 且大气中水汽的增加也会使得 SST 的反演对海表发射率的变化不敏感^[11], 因此, 对地物特征较为单一的海水而言, 地表发射率可取一近似值^[12], 文中取 0.985.

4) 水汽含量 w

获取大气水汽含量的方法很多, 本文采用 MODIS 的 2 级产品 MOD05 水汽产品数据作为当时大气水汽含量数据. 由于所选择的环境减灾卫星 B 星的过境时间与 Terra 卫星过境时间相差不到 1h, 可以认为 MODIS 数据与环境减灾卫星数据是准同步的, 反映了成像当时的大气水汽状况.

3 结果与分析

3.1 反演结果比对验证

利用前文所述的普适性单通道温度反演算法, 对 2010 年 7 月 6 日的红外相机的热红外遥感影像进行海面温度反演, 所得结果与同一时间 MODIS 海温产品进行比对(如图 1 所示). 由图 1 可以看出, 利用红外相机热红外数据反演所得田湾海域的海面温度分布与 MODIS 海温产品的温度分布整体趋势一致, 特别是核电站温排水引起的海面温度升高范围及梯度变化规律相同, 但是很明显 MODIS 产品的空间分辨率相对较低, 对温度的变化反应不灵敏. 整个田湾海域海面温度最高点位于核电厂排水口附近, 比正常海温高 5°C , 但是这个温升区域很小, 而整个温排水影响区域面积较大, 温升范围沿着海岸线蔓延, 距离排水口越远, 海温受影响的程度越弱.

为了验证反演结果, 将 MODIS 海温产品重采样到与反演结果相同分辨率, 然后对反演海温值与

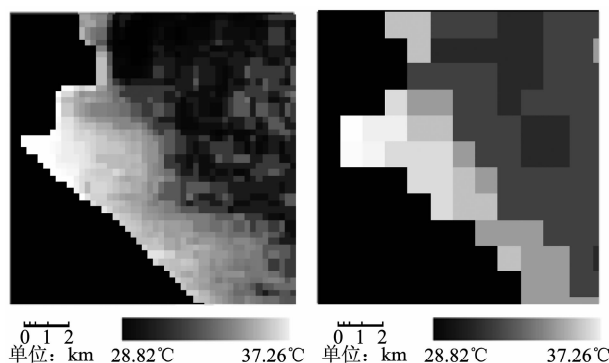


图 1 2010 年 7 月 6 日反演结果与 MODIS 海温产品对比(陆地部分未给出温度值) (a) 红外相机数据反演结果, (b) MODIS 海温产品

Fig. 1 Comparison of retrieved SST and MODIS SST on July 6, 2010 (where the area indicates the land without temperature value) (a) IRS retrieved SST, (b) MODIS SST product

MODIS 产品海温值逐点进行比较, 并采用公式 $\sum |SST_{IRS} - SST_{MODIS}| / N$ 和 $\sqrt{\sum (SST_{IRS} - SST_{MODIS})^2 / N}$ 反演结果的平均误差和均方根误差(式中 SST_{IRS} 为红外相机反演海温值, SST_{MODIS} 为 MODIS 产品海温值), 计算结果表明环境减灾卫星热红外波段数据反演海表温度的平均误差为 1.780°C , 均方根误差为 1.868°C . 图 2 为反演海温值与 MODIS 产品海温值的差异随温度的分布图, 两者差值介于 $1 \sim 3^\circ\text{C}$ 的数据点占总数据点的 90%, 且差值随温度的分布没有一定的规律. 环境减灾卫星反演海面温度与 MODIS 海温产品的差异产生有多种原因, 首先是环境减灾卫星的热红外数据反演海面温度采用单通道反演算法, 而 MODIS 海温产品采用多通道劈窗反演算法, 大气水汽含量的变化会严重影响单通道反演算法的精度, 但是对劈窗算法影响不大^[13], 文中采用 MODIS 水汽产品作为卫星过境时大气水汽含量, 它的空间分辨率和精度影响了反演结果的精度; 其次, 仪器的老化和绝对定标系数都可能使记录的信号与实际接收的信号产生偏差. 图 3 所示为反演结果相对 MODIS 海温产品的散点分布, 可以看出反演结果与 MODIS 海温产品具有显著的线性相关特性. 综上所述, 环境减灾卫星红外相机数据反演结果与 MODIS 产品具有良好的一致性, 两者的梯度变化趋势是一致的, 能够获取比较准确的海温信息, 反映温排水引起的海水温度变化情况, 对分析温排水的温升强度与分布具有很好地应用前景.

3.2 不同季节温排水分布特征

受排水量、水流方向、季风方向以及表层与底层海水热交换方式等因素的影响, 核电厂温排水对海

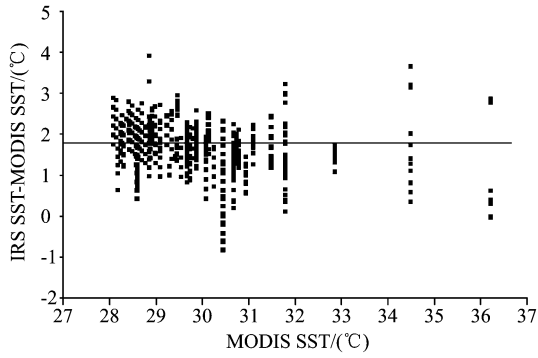


图2 反演海温值与 MODIS 海温产品的差异随温度的分布图
Fig.2 Distribution of the difference between the retrieved SST and MODIS SST

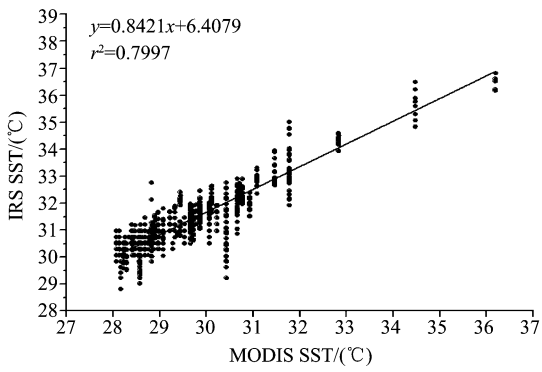


图3 反演海温值与 MODIS 海温产品的比较
Fig.3 Scatter diagram of the retrieved SST and MODIS SST

温的影响并不是一成不变的^[14]. 以不受温排水影响的海域海面平均温度为基准,将核电厂附近海域按照海面温度升高程度不同进行区域划分,可以获取该海域的温升分布图. 比较反演所得 2009 年 7 月 1 日、12 月 19 日和 2010 年 7 月 6 日、12 月 20 日温升分布图以及由当天 MODIS 海温产品所得的温升分布图(如图 4、图 5 所示),可以发现温升区域的范围与分布在夏季和冬季存在明显的差异. 另外,反演结果与 MODIS 产品反映的海面温度升高变化趋势一致,虽然 MODIS 产品能够剔除部分温度异常点,但是由于 MODIS 产品的空间分辨率为 1 km,所以每个像素所代表的海面温度是 1 km² 范围内的平均值,所以 MODIS 产品对于小于 1 km² 的温升信息不敏感,不能表现小于 1 km² 的温升区域. 因此,在分析温排水引起海面温度升高程度与面积时环境减灾卫星数据更具优势.

图 4、图 5 显示了田湾海域夏季、冬季不同温升区域的分布情况,不同颜色表示不同的温升区域,从

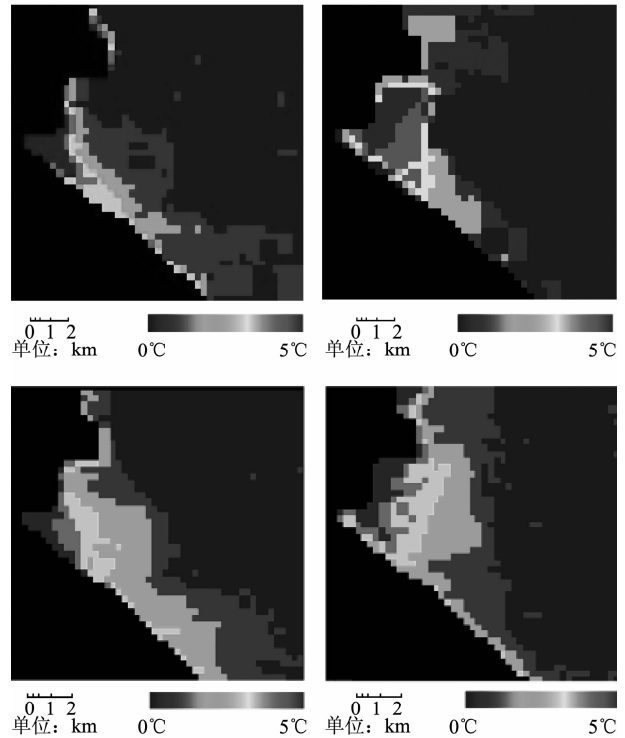


图 4 红外相机数据反演所得夏、冬两季研究区域温升分布图 (a) 2009 年 7 月 1 日(夏季)温升分布图, (b) 2009 年 12 月 19 日(冬季)温升分布图, (c) 2010 年 7 月 6 日(夏季)温升分布图, (d) 2010 年 12 月 20 日(冬季)温升分布图
Fig.4 Distributions of thermal fields in summer and winter from the IRS data (a) July 1, 2009 (summer), (b) December 19, 2009 (winter), (c) July 6, 2010 (summer), (d) December 20, 2010 (winter)

温度升高 0°C 到 5°C 分 6 个等级,主要呈现以下特征:

(1)虽然从夏季、冬季的温升区域分布都可以看出,高温升(3~6°C)影响范围较小,而低温升(1~2°C)影响范围较大,但是夏季与冬季各级温升区域的面积还是存在差异(见表 1),夏季高温升区域明显比冬季小,低温升区域差别不大,1°C 温升区域甚至比冬季大将近 5 km².

表 1 夏季与冬季各级温升区域面积比较表(单位:km²)
Table 2 Summary of thermal area in summer and winter (unit: km²)

海温升高程度	5°C	4°C	3°C	2°C	1°C
2009 年夏季温升面积	1.69	1.31	2.13	5.06	16.94
2009 年冬季温升面积	2.94	3.31	2.06	6.56	11.38
2010 年夏季温升面积	0.75	1.25	1.94	4.56	16.00
2010 年冬季温升面积	0.81	2.81	3.50	6.06	11.31

(2)夏季温升区域形状与冬季差异较大,夏季各级温升区域自排水口沿东南海岸线单向蔓延,呈

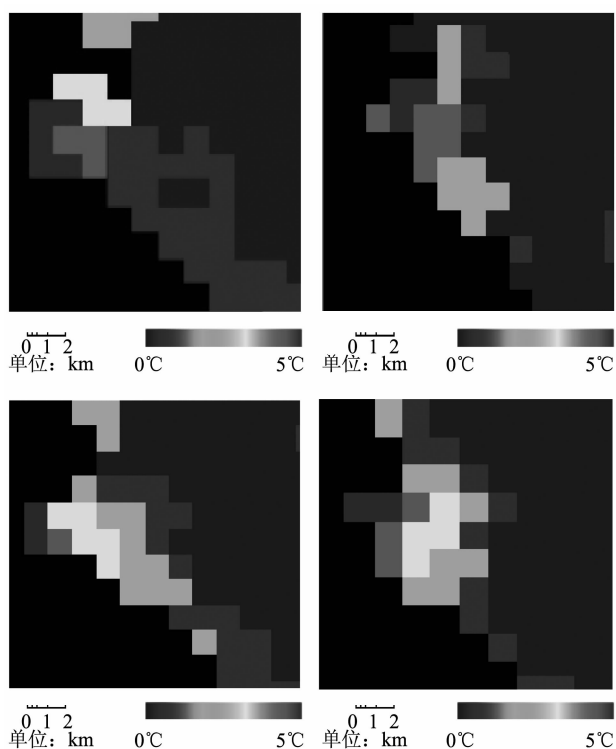


图5 MODIS 产品统计所得夏、冬两季研究区域温升分布图 (a) 2009 年 7 月 1 日(夏季)温升分布图, (b) 2009 年 12 月 19 日(冬季)温升分布图, (c) 2010 年 7 月 6 日(夏季)温升分布图, (d) 2010 年 12 月 20 日(冬季)温升分布图

Fig. 5 Distributions of thermal fields in summer and winter from the MODIS product (a) July 1, 2009 (summer), (b) December 19, 2009 (winter), (c) July 6, 2010 (summer), (d) December 20, 2010 (winter)

狭长状,这种分布形状与夏季海域入海口水流量较大,水位较高且季风方向有关. 各级温升区域界限明显,温升强度由排水口向离岸方向递减. 冬季温升区域由排水口向两岸呈放射状扇形分布,而且温升超过 2°C 区域混合现象突出,这是由于冬季正常海面温度较低,温排水与海水温差较大,两者热交换剧烈,以垂直混合为主. 虽然温排水与海水交换剧烈,但是冬季水位较低,水流量较小,所以温排水掺混作用较弱,因此温排水影响范围增大,高温升区域较夏季相对增大.

3.3 不同潮汐条件下温排水分布特征

温排水温升区域的分布不仅与季节有关,与潮汐潮位也有很大关系. 根据连云港 2010 年 11 月潮汐表,2010 年 11 月 4 日(阴历二十八)、12 日(阴历初七)、19 日(阴历初十四)、27 日(阴历二十一)8 点到 15 点的整点潮高如表 2 所示. 另外,红外相机数据当天的成像时间分别为 11:02、11:06、10:47 和

10:50. 因此,4 日和 19 日潮位很低,海水流动性较小,掺混作用很弱,温排水的扩散范围明显增大(见图 6(a)、图 6(b));温排水 12 日与 27 日潮位较高,垂直混合作用增强,刚排出的高温水被迅速冷却,扩散范围缩小,特别是高温升区域面积不到低潮时的 $1/4$ (见图 6(c)、图 6(d),表 3). 另外 4 日成像时为涨潮,海水运动剧烈,各温升区域的混合现象突出,各温升区域形状杂乱无规律. 综上所述,温排水的扩散范围与强度也会随着潮位的涨落而改变.

表 2 2010 年 11 月连云港潮汐表*(单位:cm)

Table 2 Tide table of Lianyungang in November, 2010 * (unit: cm)

公历日期	阴历日期	8 点	9 点	10 点	11 点	12 点	13 点	14 点	15 点
4 日	二十八	231	146	90	73	108	197	325	442
12 日	初七	386	433	436	401	344	277	209	151
19 日	初十四	250	177	123	101	121	185	281	378
27 日	二十一	426	470	452	392	315	232	157	100

*潮高基准面在平均海面下 290 cm

*The 290cm height below the mean sea level was defined as the tidal datum

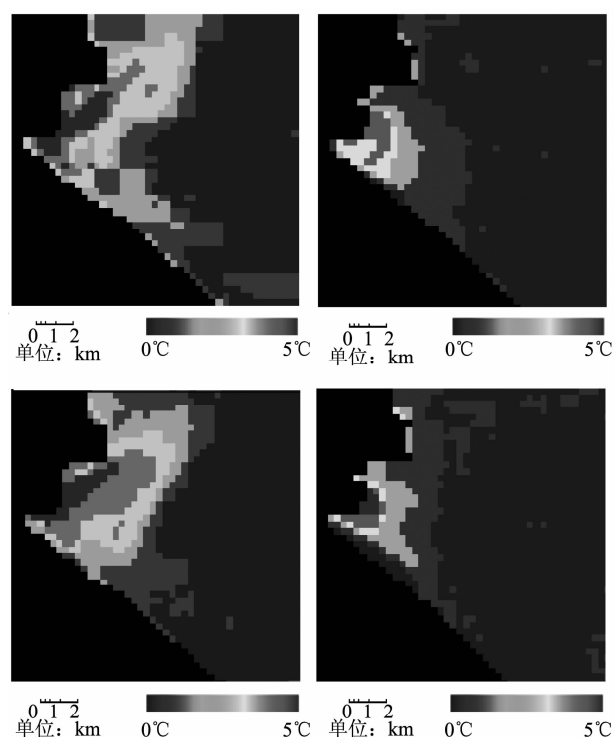


图 6 2010 年 11 月不同潮汐条件下温升分布图 (a) 2010 年 11 月 4 日(低潮位), (b) 2010 年 11 月 12 日(高潮位), (c) 2010 年 11 月 19 日(低潮位), (d) 2010 年 11 月 27 日(高潮位)

Fig. 6 Distributions of thermal fields at different tide in November, 2010 (a) November 4 (low tide), (b) November 12 (high tide), (c) November 19 (low tide), (d) November 27 (high tide)

表 3 大潮、小潮日各级温升区域面积比较(单位:km²)
Table 3 Comparison of thermal area at high and low tide (unit: km²)

海温升高程度	5℃	4℃	3℃	2℃	1℃
11月4日温升面积	2.69	3.56	8.81	10.31	16.50
11月12日温升面积	0.37	1.38	1.94	2.88	13.31
11月19日温升面积	2.38	6.75	6.56	8.06	12.38
11月27日温升面积	0.50	0.81	0.75	3.94	14.69

4 结论

基于环境减灾卫星 B 星的热红外相机热红外通道数据,反演了 2009 年、2010 年不同季节和不同潮汐条件下江苏省连云港市田湾核电站排水口附近海域的海面温度,并将反演结果与 MODIS 海温产品进行了对比,结果表明红外相机数据反演海面温度具有较好精度,与 MODIS 海温产品平均误差为 1.780℃,海面温度变化情况具有良好的一致性,能够宏观准确地反映温排水引起海温变化的梯度信息.分析不同季节和不同潮汐条件下的温升分布图,发现温升区域的范围与分布存在明显差异,结合温排水的这些分布特征,能够更准确地评估温排水对海洋环境影响,为环境质量评估以及管理决策提供科学依据与技术支持.

同时,采用 MODIS 水汽产品作为卫星过境时大气水汽含量,它的空间分辨率和精度直接影响了反演结果的准确性和精度.另外,虽然利用了 MODIS 海温产品与反演结果进行了对比,但是 MODIS 海温产品与实际的海面温度还是存在差异,因此反演结果需要更精确的验证,有待于今后研究工作的深入.

REFERENCES

- [1] QU Shui-Jing. Effects of thermal discharge from power plant on wetland ecology—a case of Sheyang port power plant in Jiangsu[D]. Nanjing Normal University (瞿水晶. 电厂温排水对湿地生态系统的影响研究—以江苏射阳港电厂为例. 南京师范大学), 2006.
- [2] Hamrick J M, Mills W B. Analysis of water temperature in Connoting Pond as influenced by the peach Bottom atomic power plant thermal discharge[J]. *Environmental Science & Policy* 2000, **3**:197–209.
- [3] ZHANG Da-Ke, WANG Yu-Jie. Mathematical simulation for thermal diffusion process of the power plant cooling water in the lake and reservoir [J]. *Communication on Applied Mathematics and Computation* (张大克,王玉杰. 电厂冷却水在湖泊和水库中热扩散过程的数学模拟. *应用数学与计算数学学报*), 2004, **18**(2): 85–89.
- [4] Bulletin of east China sea's marine environmental quality status for the year of 2009[OL]. (2009 年东海区海洋环境质量公报). <http://www.soa.gov.cn/soa/hygb/hq/webinfo/2010/06/1281687829447128.htm>.
- [5] Wu C, Wang Q, Yang Z, et al. Monitoring heated water pollution of the DaYaWan nuclear power plant using TM images[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2007, **28**(5): 885–890.
- [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**:186–201.
- [7] LUO Ju-Hua, ZHANG Jing-Cheng, HUANG Wen-Jiang. The Analysis of consistency between HJ-1B and Landsat 5 TM for retrieving LST based on the single-channel algorithm [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*(罗菊花, 张竞成, 黄文江等. 基于单通道算法的 HJ-1B 与 Landsat 5 TM 地表温度反演一致性研究. *光谱学与光谱分析*), 2010, **30**(12):3285–3289.
- [8] Qin Z, Karnieli A, Berliner P. A mono-window algorithm for retrieving land surface temperature from Landsat TM data and its application to the Israel-Egypt border region [J]. *Int. J. of Remote Sen.*, 2001, **22**(18):3719–3746.
- [9] Jimenez-Munoz J C, Sobrino J A. A generalized single-channel method for retrieving land surface temperature from remote Sensing Data[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2003:108 (doi: 10.1029/2003JD003480).
- [10] Weng Q, Lu D, Schubring J. Estimation of land surface temperature - vegetation abundance relationship for urban heat island studies[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2004, **89**(4):467–483.
- [11] Liu W Y, Feild R T, Gantr G, et al. Measurement of the surface emissivity of turbid waters [J]. *Remote Sensing of Environment*, 1987, **21**(1):97–109.
- [12] XING Qian-Guo, CHEN Chu-Qun, SHI Ping. Atmospheric correction of using Landsat data to retrieve sea surface temperature in coastal waters[J]. *Acta Oceanologica Sinica*(邢前国, 陈楚群, 施平. 利用 Landsat 数据反演近岸海水表层温度的大气校正算法. *海洋学报*), 2007, **29**(3): 23–30.
- [13] ZHU Li, GU Xing-Fa, CHEN Liang-Fu, et al. Comparison of LST retrieval precision between single-channel and split-windows for high-resolution infrared camera [J]. *J. Infrared Millim. Waves*(朱利, 顾行发, 陈良富, 等. 高分辨率红外相机单窗与劈窗陆表温度反演精度分析研究. *红外与毫米波学报*), 2008, **27**(5):346–353.
- [14] 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]. *China. Remote Sensing of Environment*. 2003, **84**:506–515.