

文章编号: 1672-8785(2015)08-0022-06

基于Landsat-8卫星数据的红沿河核电站温排水监测

王祥 苏岫 王新新 王林 文世勇

(国家海洋环境监测中心, 辽宁大连 116023)

摘要:为了探索利用卫星遥感数据监测核电站温排水的业务方法,并检验新发射的Landsat-8卫星的热红外数据用于核电站温排水监测的应用能力,选取红沿河核电站附近的 $10\text{ km} \times 10\text{ km}$ 海域作为研究区域,采用Landsat-8卫星的热红外数据与中分辨率成像光谱仪(Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer, MODIS)温度产品的交叉标定方式建立了温度信息提取模型。参考《海水水质标准》,将温排水的不同温升强度分成五级;辅以现场水文、气象资料数据,分析了红沿河核电站温排水的温度场分布及温升强度变化,绘制出了不同潮汐条件下 $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 步长的温升曲线,获取了不同温升的影响面。将该数据与温排水数学模拟计算及物理模型试验的综合结果进行了对比。结果表明,依据这种研究方法,Landsat-8卫星数据可实现高精度的核电站温排水遥感监测。

关键词: 温排水; 遥感监测; Landsat-8; 红沿河核电站

中图分类号: X834 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-8785.2015.08.006

Thermal Plume Monitoring of Hongyanhe Nuclear Power Plant Based on Landsat-8 Satellite Data

WANG Xiang, SU Xiu, WANG Xin-xin, WANG Lin, WEN Shi-yong

(National Marine Environmental Monitoring Center, Dalian 116023, China)

Abstract: To explore the way to use remote sensing data to monitor the thermal plume from a nuclear power plant and verify the application ability of the thermal infrared data from Landsat-8 satellite in thermal plume monitoring of a nuclear power plant, a sea area of $10 \times 10 \text{ km}^2$ near Hongyanhe Nuclear Power Plant is selected as the research area. The cross calibration method consisting of the thermal infrared data from Landsat-8 satellite and the temperature product from the Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) is used to establish a temperature information extraction model. By referring to the 'Sea Water Quality Standard', different temperature rising intensity is classified into five ranks. With the supplemented in-situ hydrological and meteorological data, the temperature field distribution and temperature rising intensity variation of the thermal plume from Hongyanhe Nuclear Power Plant are analyzed. The temperature rising curves of a step of $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ in different tidal states are mapped out. The areas affected by different temperature rising are obtained. The data are compared with the comprehensive result of the mathematic simulation and physical model test. The results show that with the Landsat-8 satellite data, precise monitoring of thermal plume from a nuclear power plant can be implemented.

收稿日期: 2015-07-16

基金项目: 海域使用动态监测和污染监测研究(41-Y30B12-9001-14/16)

作者简介: 王祥(1984-),男,山东潍坊人,博士,助理研究员,主要研究方向为海洋环境遥感。

E-mail: xwang@nmemc.org.cn

Key words: thermal plume; remote sensing; Landsat-8; Hongyanhe nuclear power plant

0 引言

我国水电资源被进一步开发的潜力有限,而核能是目前已被证实的唯一一种不仅能够提供大量能源,而且不会释放温室效应气体的能源技术。因此,着力发展核电技术已成为一次性能源短缺的极好补充。国务院于 2007 年批准的《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,力争到 2020 年,使核电占全部电力装机容量的比重从不足 2% 提高到 4%。目前,我国已是世界上在建装机容量最大的国家。

然而,核电发展也面临着一些问题,温排水便是其中之一。核电中仅有三分之一的核裂变能量被转换成电能,而其余三分之二的能量则以热能的形式进入外部环境。对于采取直流冷却的滨海核电厂,大量余热经冷却水进入海洋环境,形成持续的温排水现象。温排水入海后,使得近岸的海水温度升高,造成海洋动物迁移、生物多样性下降、生物资源衰退等一系列后果,从而破坏海洋食物链,甚至造成某些物种的灭绝^[1-3]。因此,核电站温排水监测研究对于合理规划和使用核能以及防止热污染、保护海洋环境具有重要意义。

卫星遥感的飞速发展为核电站温排水监测提供了新的技术手段。基于卫星遥感的温排水监测方法的主要原理是,采用热红外遥感传感器探测温排水水体与正常海水水体之间的差异。利用中高分辨率热红外数据可以获取温排水热扩散区域中海水表面温度的空间分布细节,进而得到热污染(不同等级)的空间分布,并统计出各温升强度的影响面积。由于沿海核电站的温排水是一个小尺度人类活动,与其相关的遥感监测需要具有较高的观测频率和空间分辨率。许多学者利用改进型甚高分辨率辐射计(Advanced Very High Resolution Radiometer, AVHRR) 和 MODIS 数据对核电站温排水监测进行了尝试^[4-6],但过

低的空间分辨率(1 km)会造成严重的混合像元效应,使得人们难以准确地展示温排水的温升细节。而空间分辨率较高的 HJ-1B 卫星载红外多光谱相机(InfraRed Scanner, IRS)的数据(300 m)和 Landsat 卫星载专题制图仪(Thematic Mapper, TM)/增强型专题制图仪(Enhanced Thematic Mapper Plus, ETM+)的数据(120 m/60 m)则在温排水遥感监测研究中突显出了很好的温升细节表现力^[7-11],但由于受制于热红外传感器单通道设计和单通道温度反演算法的不成熟,其温度信息提取结果具有较大的不确定性。2013 年 2 月发射的 Landsat-8 卫星上搭载的热红外传感器(Thermal Infrared Sensor, TIRS)采用劈窗通道设置(10.6~11.2 μm 和 11.5~12.5 μm),其空间分辨率为 100 m,且可满足同时具有成熟算法模型和高空间分辨率的监测要求,因此是目前可用于温排水遥感监测的较为理想的数据源。

针对上述问题,本文选用 Landsat-8/TIRS 数据,从温度信息提取、温排水温度场分布以及温升范围特征等方面展开综合分析,并探索 TIRS 在核电站温排水遥感监测中的实际性能,为业务化温排水遥感监测及相关管理提供技术支持。

1 实验部分

1.1 研究区简介

红沿河核电站(见图 1)位于辽宁省瓦房店市红沿河镇,处于辽东湾东海岸,北、西、南三面临海。厂区属温带季风气候,年均气温为 11.0 ℃,年均相对湿度为 67%,年均总降水量为 540.3 mm,大气稳定性以中性和稳定天气为主。厂区附近的海底地形较为平坦,水深变化较大,等深线大致与海岸线平行。海区属非正规半日潮,潮流运动形式以往复流为主,涨、落潮的主流向分别为东北向和西南向。

核电站分两期规划,共建设 6 台百万千瓦级压水堆核电机组。其中,一期的 4 台机组目前已投入运营,二期的 2 台机组建设规划业已获批动工。一期工程采用敞开式明渠取水方案,共用厂区西侧岸边的 1 个取水口;明渠排水口集中

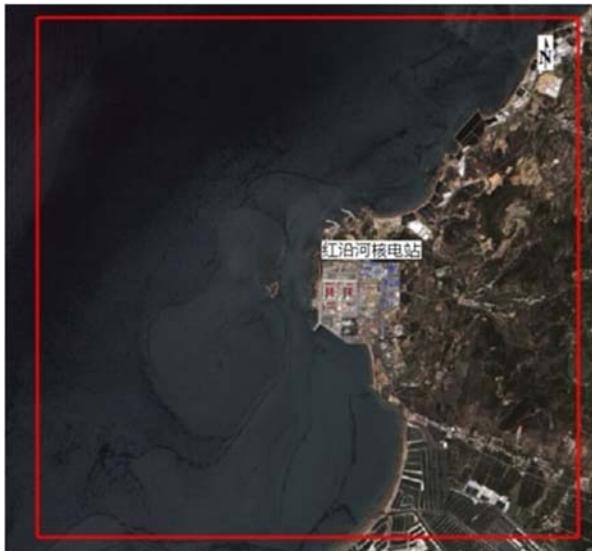


图 1 研究区域



图 2 厂区俯视图

布设于厂区西侧护岸外，以喇叭式集中排放，且口门向西南布置（见图 2）。

1.2 卫星数据及预处理

我们选取红沿河核电站运行后的 2014 年 7 月 13 日和 2014 年 10 月 17 日的覆盖研究区的 Landsat-8/TIRS 数据，其图幅编号分别为 LC81200322014194LGN00 和 LC81200322014290L-GN00。经与实测地面控制点比较，发现 Landsat-8 数据具有极高的几何定位精度，所以无需进行几何精校正。TIRS 的辐射定标参数可从数据头文件中获取，用于计算 TIRS 第十、十一通道的辐亮度。考虑到普朗克公式中温度的反算形式，建立由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 和 K_2 为模型系数。据 Landsat 官方数据， $K_{1-B10}=774.89$ ， $K_{1-B11}=480.89$ ， $K_{2-B10}=1321.08$ ， $K_{2-B11}=1201.14$ 。

陆地掩膜是采用矢量岸线数据在 ENVI 软件中处理完成的，而研究区的裁剪则利用了预先定义的兴趣区（Region Of Interest, ROI）。云掩膜直接采用成熟的 MODIS 云掩膜产品数据 MOD35，经图像匹配后直接剔除云影响，从而得到研究区的晴空海域数据。

1.3 温排水的温度信息提取

温度信息提取模型采用美国国家海洋和大气管理局（National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA）成熟的 MCSST 模型：

$$T_s = a_0 + a_1 B_{11} + a_2 B_{12} + a_3 (B_{11} - B_{12}) (\sec \theta - 1) \quad (2)$$

式中， T_s 为所提取的温度信息； a_i ($i=0,1,2,3$) 为模型参数； B_j ($j=11,12$) 为 TIR 传感器两个热红外通道的亮温； θ 为卫星的天顶角。由于 Landsat-8 卫星载 TIRS 为窄视场传感器，其最大天顶角仅为 7.5° ，所以可忽略观测天顶角的影响。

参照《核电厂温排水卫星遥感监测应用技术标准》建立相关算法，并采用与 MODIS SST 产品的交叉标定方式。MODIS/TERRA 降交点的地方时为 10:30 AM，Landsat-8 降交点的地方时为 10:15 AM，因此可保证匹配时间窗口在 30 min 以内，空间匹配窗口为 100 m，并通过对 MODIS 温度产品进行重采样实现。表 1 列出了所采用的 Landsat-8/TIRS 数据的相关信息，共包含 2013 年 7 月至 2015 年 5 月近两年内云量小于 7% 的 16 景数据，其温度跨度几乎完整地涵盖了这两年的低温（冬季）至高温（夏季）范围，说明该数据具有很好的质量及区域代表性。

利用布设于渤海海峡的定点浮标观测数据对新建的 MCSST 算法模型的精度进行了检验。结果表明，该模型的反演温度数据的误差小于 1 ℃，可用于红沿河核电站的温排水遥感监测。

表 1 建模所用的 Landsat-8 数据清单

序号	日期	Landsat-8 数据	序号	日期	Landsat-8 数据
1	2013-07-26	LC81200322013207LGN00	9	2014-09-15	LC81200322014258LGN00
2	2013-10-30	LC81200322013303LGN00	10	2014-10-17	LC81200322014290LGN00
3	2013-11-15	LC81200322013319LGN00	11	2014-11-02	LC81200322014306LGN00
4	2013-12-01	LC81200322013335LGN00	12	2014-11-18	LC81200322014322LGN00
5	2014-02-03	LC81200322014034LGN00	13	2014-12-20	LC81200322014354LGN00
6	2014-04-08	LC81200322014098LGN00	14	2015-03-10	LC81200322015069LGN00
7	2014-05-26	LC81200322014146LGN00	15	2015-03-26	LC81200322015085LGN00
8	2014-07-13	LC81200322014194LGN00	16	2015-05-13	LC81200322015133LGN00

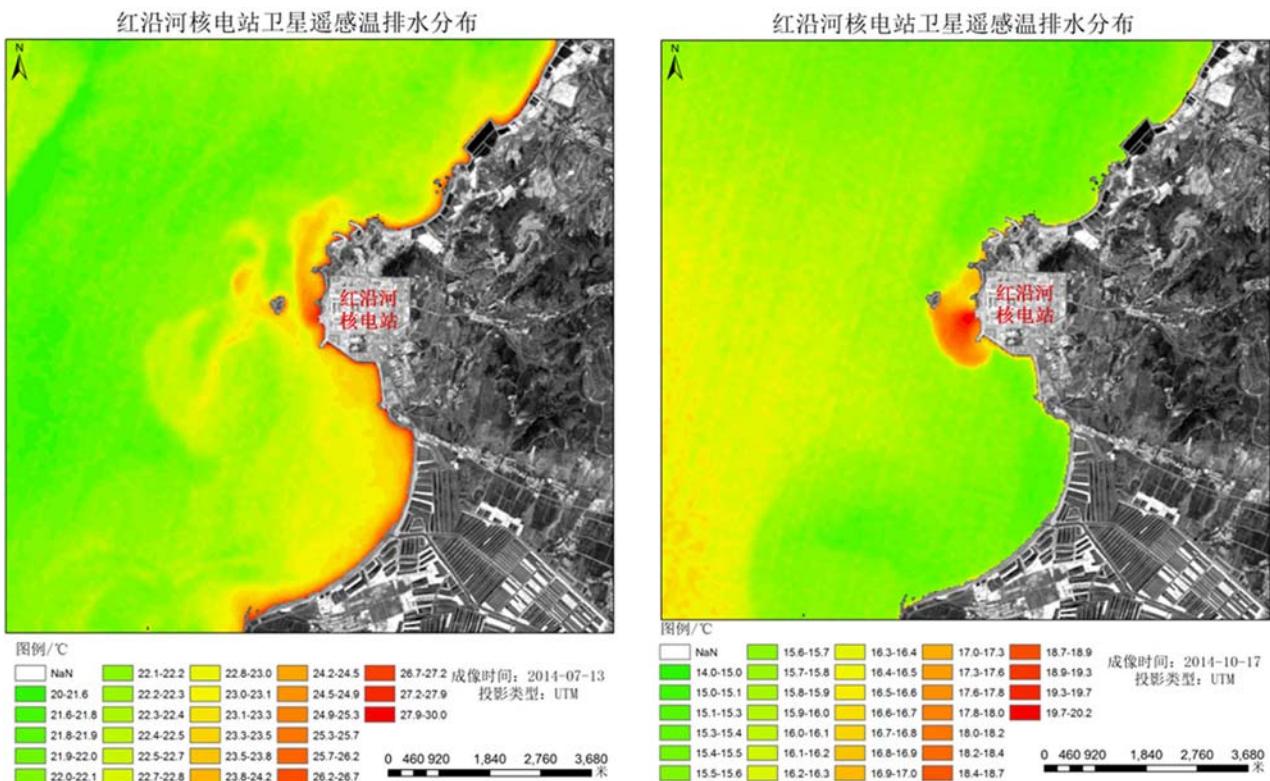


图 3 核电站温排水的温度场分布

1.4 基准温度计算

基准温度是相对于由温排水引起的热异常现象而言的，其定义为在没有温排水的情况下，现有区域内水体表面的平均温度。参考《核电厂温排水卫星遥感监测应用技术标准》中用于基准温度提取的常用方法——海湾平均温度法，本文以覆盖核电站温排水的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 $10\text{ km} \times 10\text{ km}$ 区域作为研究区（见图 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中高于平均温度 $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 及以上的区域；最后，统计剩余区域的平均海表温度，并以此作为温排水监测区的背景温度。

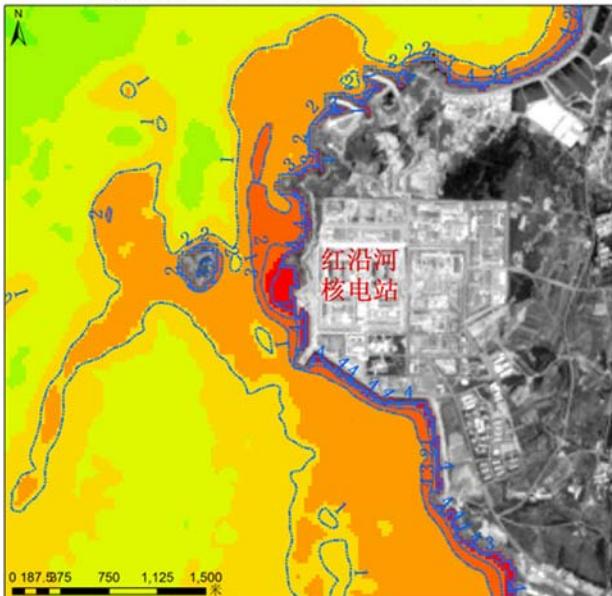
2 结果与讨论

2.1 温升区分布

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的影响，核电厂温排水对海温的影响不是一成不变的^[5]。图 3 所示为

2014 年 7 月 13 日 (左) 和 2014 年 10 月 17 日 (右) 的卫星遥感温排水温度场空间分布。经对比发现, 受海水混合效应的影响, 两者的高温升影响区域较小, 低温升影响区域较大, 且温升分布呈现出自排水口向外逐步递减的趋势; 两者的温度场分布形态及面积差异巨大, 左图中的温升区域面积较大, 且温升区呈现出沿岸边向南北两侧蔓延的趋势; 右图中的温升面积明显较小, 且温升区极为集中, 呈现出以排水口为中心的扇形分布。

红沿河核电站卫星遥感温排水温升分布



侧蔓延的趋势; 右图中的温升面积明显较小, 且温升区极为集中, 呈现出以排水口为中心的扇形分布。

2.2 温升区面积

图 4 所示为红沿河核电站温排水的温升空间分布。我们将温排水影响区域划分为 5 个等级 (见表 2), 并以等温线的形式对其进行标注。

红沿河核电站卫星遥感温排水温升分布

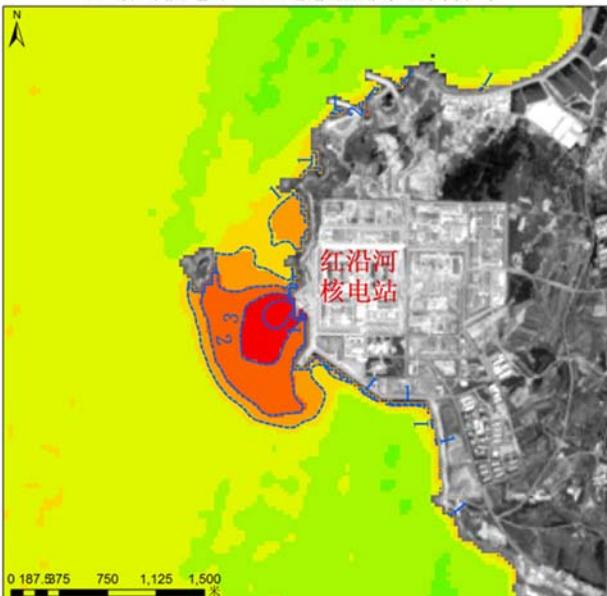


图 4 核电站温排水的温升区分布

表 2 不同温升强度的分级标准

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

从图 4 中可以看出, 等温线中的高温升区域 (+3 °C 和 +4 °C) 基本按圆环形向外扩展, 而低温升区域 (+1 °C 和 +2 °C) 则在左右两幅图中具有不同的表现形态, 其主要原因可能是潮汐和潮流的影响^[12–14]。若仅考虑海水混合效应的影响, 则温排水影响区域的温升自排水口向远端递减, 且表现出近似圆环的形态。在叠加潮汐和潮流的影响之后, 从图 4 中可以明显看出, 低潮期“拉伸”了温升区的影响范围, 而高潮期则

“压缩”了温升区的影响范围。

表 3 列出了不同潮汐及潮流状态下, 基于卫星遥感数据的各等级温升区域的面积对比情况。表 4 列出了《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的综合结果。经对比可知, 基于卫星遥感数据的各等级温升区域的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^[9]。温升面积信息表明, 红沿

表 3 温升统计信息

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

温升幅度 / °C	温升范围/km ²			
	全潮最大包络面积(夏季)	全潮平均最大面积(夏季)	全潮最大包络面积(冬季)	全潮平均最大面积(冬季)
+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

河核电站的温排水影响超过 4 °C 的超标区域分别仅为 0.5 km² 和 0.04 km² 大小, 完全符合国家海洋局批复的国海管字 [2009] 828 号文件所规定的温排水用海区标准, 且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

通过构建 Landsat-8/TIRS 的温度信息提取模型, 经反演获取了红沿河核电站在不同时期温排水扩散的影响范围信息, 并对其进行了定量化图形表达。通过将该数据与数模及物模结果进行对比, 得到了以下结论:

(1) 由于具有双通道设计及高空间分辨率, Landsat-8/TIRS 的数据非常适合小尺度的温排水精细化遥感监测。同时, 其 1 K 的反演精度也较为理想。

(2) 红沿河核电站的温排水遥感监测结果显示, 温排水的影响范围局限在规划批复的合理用海区域范围内, 且不会对邻近二类环境功能区及自然保护区产生不利影响。

(3) 受“体 – 肤效应”的影响, 基于卫星遥感获取的温度信息与数模及物模结果之间存在差异, 但两者又互为补充, 并可实现由“皮肤温度”至“体温度”的综合观测。

(4) 受制于卫星重访周期及天气对光学传感器的影响, 单星的高频率观测难以实现, 为我们下一步深入研究通过多星组网实现温排水的高频率观测指明了方向。

参考文献

- [1] Davies P A, Mofor L A. Remote Sensing Observation and Analyses of Cooling Water Discharges from a Coastal Power Station [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1993, 14(2): 253–273.
- [2] 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.
- [3] 翟水晶. 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 [D]. 南京: 南京师范大学, 2006.
- [4] 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.
- [5] Tang D L, Kester D R, Wang Z, 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.
- [6] 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.
- [7] 梁珊珊, 张兵, 李俊生, 等. 环境一号卫星热红外数据监测核电站温排水分布——以大亚湾为例 [J]. *遥感应用*, 2012, 20(2): 41–46.
- [8] 周颖, 巩彩兰, 匡定波, 等. 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 [J]. *红外与毫米波学报*, 2012, 31(6): 544–549.
- [9] 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): 3079–3083.
- [10] 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.
- [11] 吴传庆, 王桥, 王文杰, 等. 利用 TM 影像监测和评价大亚湾温排水热污染 [J]. *中国环境监测*, 2006, 22(3): 80–84.
- [12] 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, 12(8): 66–70.
- [13] 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]. *水利发电学报*, 2008, 27(3): 125–131.
- [14] 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: A辑*, 2014, 29(2): 157–165.