

基于Landsat 8的滨海电厂温排水分布研究

孙芹芹, 罗美雪, 张加晋, 蓝尹余

(福建海洋研究所 福建省海岛与海岸带管理技术研究重点实验室, 福建 厦门 361013)

摘要: 基于 Landsat 8 卫星 TIRS10 波段进行滨海电厂排水口附近海域的水温反演发现, 南埔电厂排水口区域水温与参照区域水温相比, 在夏季与冬季均有不同幅度的升高, 其中夏季升温幅度小而范围较大, 冬季升温幅度大而范围较小; 电厂冷却水经排水口排出后, 涨潮时向西北侧扩散可至外乌屿以北, 落潮时向东南侧运移, 受煤码头及导流堤影响, 电厂温排水扩散对取水口的影响较小, 该遥感反演结果与项目施工前开展的数值模拟结果基本一致。

关键词: 温排水; 电厂; 热红外; Landsat 8

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

Distribution of the thermal discharge pollution of coastal power plant based on Landsat 8

SUN Qin-qin, LUO Mei-xue, ZHANG Jia-jin, LAN Yin-yu

(Fujian Provincial Key Laboratory of Coast and Island Management Technology Study, Fujian Institute of Oceanography, Xiamen 361013, China)

Abstract: The sea surface temperature has been retrieved from Landsat 8 TIRS 10, which shows that the water temperature nearby the discharge area of Nanpu power plant are increased in summer and winter compared with that in the reference area. The scope of water temperature rise is larger and the degree is smaller in summer, while the scope of water temperature rise is smaller and the degree is larger in winter. The thermal discharge pollution from the power plant goes northwest to Waiwu island at rising tide, and moves to southeast at ebb tide. Due to the coal wharf and diversion dike, thermal discharge has little effect on intake. The retrieving results based on satellite images are consistent with the numerical simulation results before project construction.

Key words: thermal discharge; power plant; thermal infrared; Landsat 8

随着围填海项目的增多, 港口码头、石化工业、发电厂等项目的用海规模扩张对海域的资源环境安全产生巨大的压力。目前, 用海项目的资源环境影响多是在海域申请使用时的海域使用论证报告和项目海洋环评报告中建立模型预测项目施工及营运期的悬浮泥沙、温排水等对周围环境影响^[1], 并通过与当地的海洋生态和环境调查资料进行叠加, 计算项目造成的海洋资

源损失。在用海项目施工及营运期也主要是通过水质、沉积物采样等的传统方法来分析对海洋资源环境的影响。一方面, 模型精度受限于实际监测点位的分布和数量、边界条件、网格尺寸等条件的影响, 模型的模拟和预测有时与实际情况有所偏颇^[2]; 另一方面, 传统监测费时费力, 且多属于点状监测, 无法反映整个温排水扩散的实际空间分布情况。

收稿日期: 2019-01-08, 修订日期: 2019-03-21

基金项目: 福建省自然科学基金项目(2016J01178); 福建省公益项目(2017R1006-2, 2018R1006-1)

作者简介: 孙芹芹(1983-), 女, 山东潍坊人, 博士, 副研究员, 主要从事 3S 技术在海洋环境管理中的应用研究, E-mail: norasun1983@126.com

基于 Landsat TM/ETM+ 卫星热红外波段的温度反演已经具有很高的精度^[3-6], 但是利用 Landsat 8 开展温度反演大多集中在陆域地表温度, 对海水温度的反演相对较少^[7-8]。与 MODIS、HJ-1B 等其它卫星相比, Landsat 8 搭载的热红外传感器 (thermal infrared sensor, TIRS) 是目前在轨卫星中最先进的热红外荷载, 且空间分辨率、温升分辨率更小, 可以更为准确的反映小区域海水温度的变化, 是滨海电厂开展海水温度监测的理想数据来源^[9]。因此, 本研究尝试采用 Landsat 8 遥感卫星数据对滨海电厂排水口区域的水温进行定量反演, 并辅以数值模型模拟结果互为参照与补充, 实现对电厂营运期排水区温度的时间及空间变化规律的识别与监测。

1 材料与方法

1.1 研究区域

国电福建南埔电厂位于福建省泉州市泉港区南埔镇柯厝村北侧, 位于规划的泉港临港工业区北部, 厂址东北临湄洲湾海域。电厂一期工程装机 2×300 MW 超临界燃煤机组, 两台机组分别于 2005 年 11 月和 2006 年 4 月投产。电厂二期工程地理位置同一期工程, 扩建装机 2×670 MW 级超临界燃煤机组, 于 2012 年建成投产。电厂采用海水直流供水系统, 一期工程设计冷却水量为 21.56 m³/s, 循环水温升约 8.2℃; 二期工程冷却水量约为 41.48 m³/s, 设计排水温升约 8.4℃。该电厂北侧已建 250 m 涵管用于电厂温水的排放, 排水口呈喇叭形向东北方向直接排水入海, 电厂取水口位于厂区东南侧, 经煤码头与导流堤相隔, 取水口距离排水口较近, 为保证电厂取水工作的顺利进行, 需定期对该区域水温进行监测。电厂取、排水口位置如图 1 所示。

1.2 研究方法

1.2.1 数据获取

本研究采用 Landsat 8 TIRS 传感器的 10 波段进行研究, 研究区域卫星影像行列号为 119/43。影像获取时间分别为 2017 年 8 月 15 日 10:33 分和 2018 年 3 月 11 日 10:32 分, 影像使用前已经进行了几何校正。根据影像文件信息, Landsat 8 TIRS 传感器的波段 10 光谱范围为

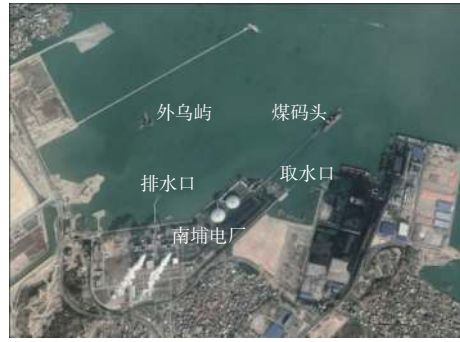


图 1 南埔电厂取、排水口位置

Fig. 1 The intake and discharge locations of Nanpu power plant

10.6~11.19 μm, 波段 10 中心波长 10.9 μm, 波段空间分辨率为 100 m, 经三次卷积插值法重采样后空间分辨率为 30 m。与 MODIS 卫星 1 km 空间分辨率相比, Landsat 8 卫星可见光波段 30 m 空间分辨率和热红外波段 100 m 空间分辨率可以更加清晰的反映出电厂排水口附近的温度变化情况。

1.2.2 遥感水温反演

海洋遥感监测的主要依据是目标水体具有异于其它水体的独特光谱特征^[10-11], 入射到水体的太阳光被水体中的物质选择性吸收与散射, 形成各自特征的吸收光谱。根据斯蒂芬—波尔兹曼定律, 辐射通量密度随温度的增加而迅速增大, 与温度的四次方成正比, 任何温度的微小变化均会引起辐射通量密度很大的变化^[12-14]。因此, 配备热红外波段的卫星传感器可以收集、记录地物的这种热红外信息, 并利用这种热红外信息来识别温度升高的海域。

多数研究表明, 基于 Landsat 卫星热红外波段的温度反演已经具有很高的精度, 利用 Landsat 8 的 TIRS 10 波段来反演温度也是可行的^[15], 其计算步骤首先需要利用公式(1)将 Landsat TM/ETM+热红外波段的 DN 值转化为该波段的光谱辐照度:

$$L = \text{GAIN} * \text{DN} + \text{BIAS} \quad (1)$$

式中: L 为波段 10 的光谱辐照度, 单位 $\text{watts}/(\text{m}^2 \cdot \text{sr} \cdot \mu\text{m})$; DN 为波段 10 的像元值; GAIN 、 BIAS 分别为波段 10 的偏移参数和增益参数, 其数值可从影像的元文件中获得, 分别为 0.1 和 3.3420×10^{-4} 。

经过计算取得波段 10 的光谱辐照度后, 需要进一步将光谱辐照度转换为亮度温度, 其公式如下^[16-17]:

$$T = K_2 / \ln(K_1/L + 1) \quad (2)$$

式中: T 为亮度温度, 单位为 K; K_1, K_2 为校正常数, LANDSAT 8 卫星波段 10 的 K_1, K_2 值分别为 774.8853, 1321.0789。

最后, 通过以下公式将亮度温度转换为水体表面温度^[18-19]:

$$LST = T / [1 + (\lambda \times T / r) \ln \varepsilon] \quad (3)$$

式中: λ 为波段的中心波长, 对于 Landsat 8 的波段 10 来说, $\lambda = 10.9 \mu\text{m}$; LST 为卫星遥感反演的表面温度; ε 为地表比辐射率, 由于近岸海水比较匀称, 比辐射率没有很大的变化, 因此可以取常数, 一般取 0.96 ~ 0.99 之间, 但由于研究区域近岸海水有泥沙影响, ε 取常值 0.985, r 为常数 14384mK; T 为亮度温度。

LST 为经过反演计算取得的水体表面温度, 单位为 K, 其与摄氏度的换算公式如下:

$$T_c = LST - 273.13 \quad (4)$$

式中: T_c 为水体表面温度, 单位为 $^{\circ}\text{C}$ 。

1.2.3 数值模拟

为了准确模拟工程海域水体温度的变化, 选用温升作为模拟量。温升扩散方程如下^[20]:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} [(h+\zeta)T] + \frac{\partial}{\partial x} [(h+\zeta)uT] + \frac{\partial}{\partial y} [(h+\zeta)vT] = \\ \frac{\partial}{\partial x} \left[(h+\zeta)D_x \frac{\partial T}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[(h+\zeta)D_y \frac{\partial T}{\partial y} \right] - \frac{K_S T}{\rho c_p} + S_r \end{aligned} \quad (5)$$

式中: ζ 为潮位 (m); t 为时间 (s); h 为水深; u, v 分别为 x, y 方向的垂线平均流速 (m/s); T 为沿水深的平均温升 ($^{\circ}\text{C}$); D_x, D_y 分别为 x, y 方向的热扩散系数 (m^2/s); K_S 为水面综合散热系数 ($\text{J/s m}^2 \text{ } ^{\circ}\text{C}$); ρ 为海水密度 (kg/m^3); c_p 为海水的等压比热 ($\text{J/kg } ^{\circ}\text{C}$); S_r 为温排水的热量源汇强度 ($\text{m}^3 \text{ } ^{\circ}\text{C/s}$)。

$$S_r = Q \times T_s \quad (6)$$

式中: Q 为排水量 (m^3/s); T_s 为排水口水温 ($^{\circ}\text{C}$)。

根据工程实施方案, 模型运行过程中初始值设计如下: 夏季排水量 (Q) 为 $65.28 \text{ m}^3/\text{s}$, 排水口水温 (T_s) 为 $36.88 \text{ } ^{\circ}\text{C}$; 冬季排水量 (Q) 为 $39.3 \text{ m}^3/\text{s}$,

排水口水温 (T_s) 为 $25.04 \text{ } ^{\circ}\text{C}$ 。

2 结果与讨论

2.1 卫星遥感定量反演结果

根据遥感反演结果 (图 2), 2017 年 8 月, 近岸海水温度大约为 $25.5 \text{ } ^{\circ}\text{C} \sim 26.5 \text{ } ^{\circ}\text{C}$, 受电厂温排水影响, $1 \text{ } ^{\circ}\text{C}$ 温升区 ($26.5 \text{ } ^{\circ}\text{C} \sim 27.5 \text{ } ^{\circ}\text{C}$) 主要分布在距离排水口东侧约 1.3~1.5 km 处, 并向北向南蔓延, 受地形影响, 向北蔓延距离较长, 约 1 km, 向南则受煤码头影响扩散距离明显缩短, 约 500 m, 面积约 76 hm^2 ; $2 \text{ } ^{\circ}\text{C}$ 温升区 ($27.5 \text{ } ^{\circ}\text{C} \sim 28.5 \text{ } ^{\circ}\text{C}$) 主要分布在距离排水口东侧 200 m, 北侧 50 m 处, 范围较大, 主要位于排水口东北侧呈东西走向, 面积约 118 hm^2 ; $3 \text{ } ^{\circ}\text{C}$ 温升区 ($28.5 \text{ } ^{\circ}\text{C} \sim 29.5 \text{ } ^{\circ}\text{C}$) 的分布分为两处, 其中一处位于排水口东侧 500 m 范围内, 另一处位于排水口北侧 500 m 处, 与外乌屿连接, 呈东西走向, 宽约 500 m, 面积约 41 hm^2 ; 在本期遥感图像反演结果中排水口附近未发现 $4 \text{ } ^{\circ}\text{C}$ 温升区 ($29.5 \text{ } ^{\circ}\text{C} \sim 30.5 \text{ } ^{\circ}\text{C}$)。

2018 年 3 月, 近岸海面平均水温约 $16.2 \sim 17.2 \text{ } ^{\circ}\text{C}$, $1 \text{ } ^{\circ}\text{C}$ 温升区 ($17.2 \text{ } ^{\circ}\text{C} \sim 18.2 \text{ } ^{\circ}\text{C}$) 主要分布在距离排水口东侧约 1.5 km 处, 并向东南方向延伸, 面积约 45 hm^2 ; $2 \text{ } ^{\circ}\text{C}$ 温升区 ($18.2 \text{ } ^{\circ}\text{C} \sim 19.2 \text{ } ^{\circ}\text{C}$) 主要分布在距离排水口东侧约 1.2 km 处, 并向东南方向延伸, 面积约 37 hm^2 ; $3 \text{ } ^{\circ}\text{C}$ 温升区 ($19.2 \text{ } ^{\circ}\text{C} \sim 20.2 \text{ } ^{\circ}\text{C}$) 主要分布在距离排水口东侧约 800 m 处, 并向东南方向延伸, 面积约 34 hm^2 ; $4 \text{ } ^{\circ}\text{C}$ 温升区 ($20.2 \text{ } ^{\circ}\text{C} \sim 21.2 \text{ } ^{\circ}\text{C}$) 主要分布在距离排水口 700 m 范围内, 呈东西走向, 面积约 15 hm^2 。

其中 2017 年 8 月可代表夏季温排水情况, 2018 年 3 月代表冬季温排水情况。与冬季相比, 夏季温升影响范围较大, 尤其是 $2 \text{ } ^{\circ}\text{C}$ 温升区面积几乎是冬季温升扩散面积的 3 倍, 但是, 与冬季温升增量相比, 夏季温升增量较小, 几乎无 $4 \text{ } ^{\circ}\text{C}$ 温升区, 可能与夏季水温本身较高有关。夏季温升扩散范围呈东西形状向北向东蔓延, 冬季温升扩散则向东向南蔓延, 可能与卫星过镜时间的潮汐状态有关。同时, 由于排水口东侧建有 5 万 t 级卸煤码头, 对温水的扩散起到一定的隔离作用, 因此, 排水口温升扩散对位于煤码头南侧的取水口的影响相对较小。

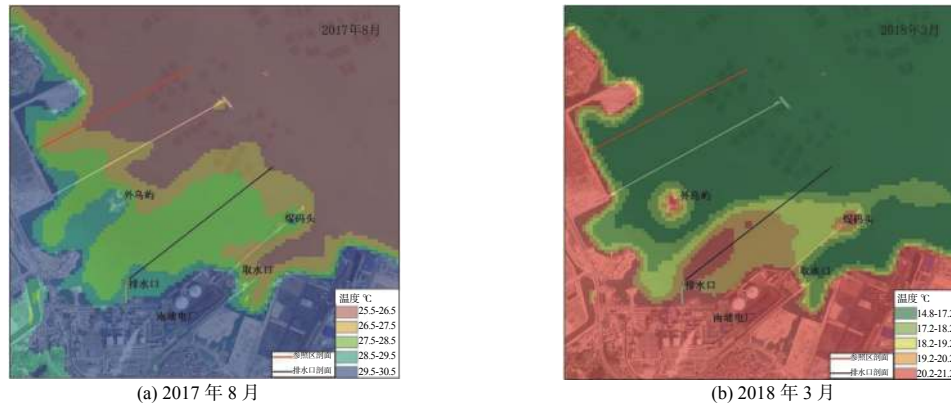


图2 南埔电厂排水口区域水温分布图(2017年、2018年)

Fig. 2 Thermal discharge distributions of Nanpu power plant in 2017 and 2018

2.2 电厂排水口附近水温剖面分布

为了更好的揭示电厂热水排放对该海域海水温度的影响,选取本海域距离南埔电厂排水口北侧约 1300 m 的地点作为参照区域,参照区域与研究区水域相连且无明显外来水源汇入,可以较好的反映水温的自然变化。在参照区及排水口区域沿东西方向各作一条约 1400 m 的剖面,剖面位置如图 2 所示,对 2 条剖面的水温变化进行比较,研究该海域受排水口影响带来的温度变化差异。

根据对照区域与排水口 1400 m 范围内温度变化剖面图(图 3)所示,2017 年夏季,参照区域随着与近岸距离的增大,温度迅速下降,从排水口距离 700 m 后,温度从 29.5°C 迅速下降至 26°C;排水口区域的水温随着与近岸距离的增大则变化较慢,在距离近岸 0~1200 m 范围内,水温在 28.5°C~27.5°C 之间缓慢下降,至 1200 m 后有明显下降趋势,直至 1400 m 后温度下降至 26°C 以下。

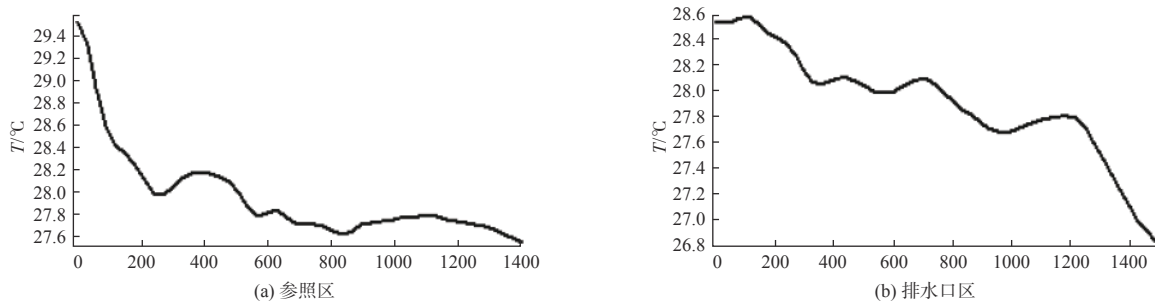


图3 参照区与排水口区 1400 m 范围内温度变化(夏季)

Fig. 3 Temperature profiles of 1400 m distances in the reference area and nearby discharge outlet (in summer)

根据对照区域与排水口 1400 m 范围内温度变化剖面图(图 4)所示,2018 年冬季,参照区域随着与近岸距离的增大,温度迅速下降,从排水口距离 800 m 后,温度从 17.5°C 迅速下降至 15.5°C;排水口区域的水温则随着与近岸距离的增大变化较慢,在距离近岸 0~1400 m 范围内 21.5°C~16.5°C 之间徘徊,直至 1400 m 后有明显下降趋势,至 1400 m 后温度下降至 16°C 以下。

2.3 数值模拟计算结果对比

本次研究选取的 2 期遥感卫星成像时间分别为 2017 年 08 月 15 日 10 时 32 分和 2018 年 3 月 11 日 10 时 32 分。其中,夏季对应农历时间为 2017 年 6 月 24 日,小潮。经查询,当日泉州港的潮汐时间为 9: 59 和 22: 51 高潮, 3: 51 和 16: 10 低潮,因此 10: 32 为高潮过后的落潮时间,此时刻对应数值模拟类型为夏季小潮时刻。冬季对应农历时间为 2018 年 1 月 24 日,小潮。经查询,当日泉州港的潮汐时间为 1: 31 和 13: 48 高潮, 7: 36 和 19: 55 低潮,因此 10: 32 为涨潮时

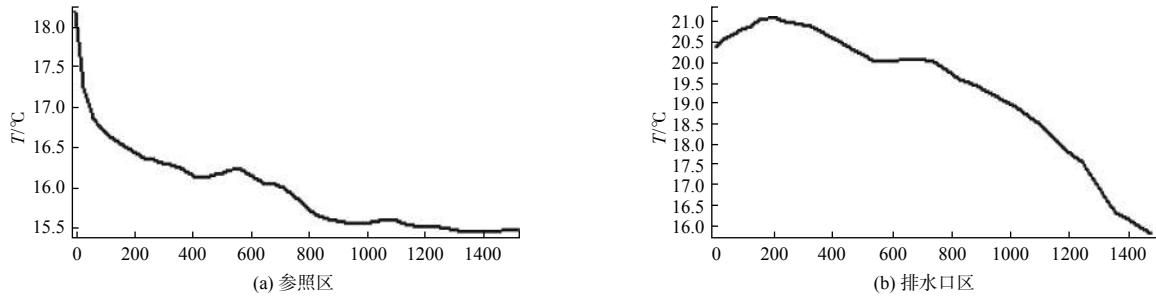


图 4 参照区与排水口区 1400 m 范围内温度变化(冬季)

Fig. 4 Temperature profiles of 1400 m distances in the reference area and nearby discharge (in winter)

间, 此时刻对应数值模拟类型为冬季小潮时刻。

根据遥感影像成像时间, 对比遥感影像反演结果与数值模型计算结果得到以下结论(图 5)。

(1) 模型计算结果显示, 夏季小潮全潮平均温升超过 1.0°C 的包络范围大于冬季小潮全潮平均温升 1.0°C 的包络范围, 但是夏季小潮全潮平均温升超过 4.0°C 的包络范围小于冬季小潮全潮平均温升 4.0°C 包络范围, 该结果与本次遥感定量反演结果基本一致。

(2) 从温排水扩散的分布来看, 模型计算结果显示, 电厂热水团自排水口排出后, 涨潮期间

随潮流向西北运移, 落潮时向东南运移。涨潮时温升影响范围在排水口北侧及排水口近岸区域, 落潮时温升影响范围在取水口南侧。由于本次研究选取的夏季遥感卫星影像成像时间为高潮过后的落潮时间, 温度较高的热水团仍位于排水口北侧及附近海域, 尚未随潮水向东南扩散, 反映了涨潮后的温水分布情况, 而冬季遥感卫星影像成像时间位于从低潮到高潮涨潮过程的中间时刻, 潮水尚未涨至湄洲湾顶部, 反映了落潮时的温水分布情况。

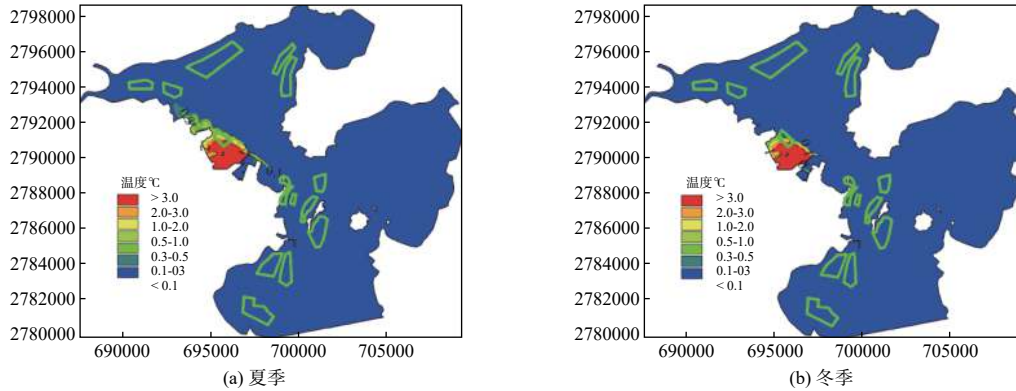


图 5 夏季、冬季小潮最大温升包络线^[21]

Fig. 5 Envelope areas of maximum temperature rise for neap tide in summer and winter

3 结 论

(1) 基于 Landsat 8 的 TIRS 10 波段进行近岸小范围海水温度的反演是切实可行的, 尤其是针对沿海电厂温排水区域水温变化较明显的海域, 通过遥感图像定量反演可以较好的识别电厂温水排放对周围水域的温度变化影响范围和影响程度。

(2) 根据遥感定量反演结果, 南埔电厂排水口区域水温与参照区域水温相比, 在夏季与冬季均会造成周围海水一定幅度的升温, 其中夏季升温幅度小而范围较大, 冬季升温幅度大而范围较小; 电厂冷却水经排水口排出后, 涨潮时向西北侧扩散可至外乌屿以北, 落潮时向东南侧运移, 受煤码头及导流堤影响, 电厂温排水扩散对取水口的影响较小。

(3)对于电厂用海项目的温排水监测,基于Landsat 8 遥感影像的海水温度定量反演可以对项目申请用海前的数值模拟结果进行较好的验证与补充,一方面可以为温排水数值模拟提供验证参考,另外一方面可以实现对电厂营运期排水区温度的时间及空间变化规律的识别与监测。

参考文献:

- [1] 安永宁, 杨 颀, 王 莹, 等. MIKE21模型在海洋工程研究中的应用[J]. *海岸工程*, 2013, 32(3): 1-10.
- [2] 郑 震, 张 静, 宫辉力. MIKE SHE水文模型参数的不确定性研究[J]. *人民黄河*, 2015, 37(1): 23-26.
- [3] SUGA Y, OGAWA H, OHNO K, et al. Detection of surface temperature from LANDSAT-7/ETM+[J]. *Advances in Space Research*, 2003, 32(11): 2235-2240.
- [4] THOMAS A, BYRNE D, WEATHERBEE R. Coastal sea surface temperature variability from Landsat infrared data[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2002, 81(2/3): 262-272.
- [5] 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[J]. *海洋学报*, 2007, 29(3): 23-30.
- [6] 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.
- [7] 成 丰, 朱 利, 吴传庆, 等. 基于遥感数据的核电站温排水季节性分布监测分析--以阳江核电站为例[J]. *环境保护*, 2017, (4): 44-48.
- [8] 王 祥, 苏 岫, 王新新, 等. 基于Landsat-8卫星数据的红沿河核电站温排水监测[J]. *红外*, 2015, 36(8): 22-27.
- [9] 张 晰, 张 杰, 孟俊敏. Landsat-8与GF-1卫星渤海海冰探测能力对比研究[J]. *海洋科学*, 2015, 39(2): 50-56.
- [10] KOPONEN S, PULLIAINEN J, KALLIO K, et al. Lake water quality classification with airborne hyperspectral spectrometer and simulated MERIS data[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2002, 79(1): 51-59.
- [11] DEKKER A G, VOS R J, PETERS S W M. Analytical algorithms for lake water TSM estimation for retrospective analyses of TM and SPOT sensor data[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2002, 23(1): 15-35.
- [12] 李小文, 汪骏发, 王锦地, 等. 多角度与热红外对地遥感[M]. 北京: 科学出版社, 2001: 12-17.
- [13] 赵英时. 遥感应用分析原理与方法[M]. 北京: 科学出版社, 2003: 104-130.
- [14] 孙家柄. 遥感原理与应用[M]. 2版. 武汉: 武汉大学出版社, 2009: 13-16.
- [15] 徐涵秋. 新型Landsat8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.
- [16] SCHOTT J R, VOLCHOK W J. Thematic mapper thermal infrared calibration[J]. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 1985, 51: 1351-1357.
- [17] WUKELIC G E, GIBBONS D E, MARTUCCI L M, et al. Radiometric calibration of Landsat Thematic Mapper thermal band[J]. *Remote Sensing of Environment*, 1989, 28: 339-347.
- [18] SRIVASTAVA P K, MAJUMDAR T J, BHATTACHARYA A K. Surface temperature estimation in Singhbhum Shear Zone of India using Landsat-7 ETM+ thermal infrared data[J]. *Advances in Space Research*, 2009, 43(10): 1563-1574.
- [19] ARTIS D A, CARNAHAN W H. Survey of emissivity variability in thermography of urban areas[J]. *Remote Sensing of Environment*, 1982, 12(4): 313-329.
- [20] 吴海杰, 王志刚, 陈淑丰. 滨海电站温排水数值模拟[J]. *电力环境保护*, 2005, 21(4): 48-51.
- [21] 国家海洋局第三海洋研究所. 福建南埔电厂二期工程海洋环境影响报告书[R]. 厦门: 国家海洋局第三海洋研究所, 2011: 227-230.