

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

梁珊珊, 张兵, 李俊生, 张浩, 申茜

(中国科学院对地观测与数字地球科学中心, 北京 100094)

摘要:选择 2009 年的 2 景环境一号卫星热红外数据, 利用单通道算法计算了大亚湾海水表面温度, 分析该算法反演的海温空间分布特征, 得到如下结论: 大亚湾和岭澳核电站排水的出口温度, 比周围水温高 $3^{\circ}\text{C}\sim 5^{\circ}\text{C}$, 呈现明显的扩散状。然后, 综合直方图和选取的 5 个样本点, 将本文反演结果和当天的 MODIS 海水表面温度产品进行比较, 结果表明: 二者的海温分布特征基本一致。本文证实了环境一号卫星热红外遥感数据监测温排水的可行性。

关键词:温排水; 单通道算法; 环境一号卫星; 水表温度

doi: 10.3969/j.issn.1000-3177.2012.02.008

中图分类号: TP79 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-3177(2012)120-0041-06

Distribution of Therm-water Pollution of Nuclear Power Plant Using the Thermal Infrared Band of HJ-IRS Data-taking Daya Bay as an Example

LIANG Shan-shan, ZHANG Bing, LI Jun-sheng, ZHANG Hao, SHEN Qian

(Center for Earth Observation and Digital Earth, Chinese Academy of Science, Beijing 100094)

Abstract: Therm-water pollution caused by nuclear power station hazards the aquatic organism to grow and seriously destroys the coastal ecosystem. The method which uses satellite thermal infrared data to monitor the distribution of heat discharge dynamically in large area has big significance to prevent thermal pollution, and protect marine water quality and ecological environment. Two sea surface temperatures (SST) of Daya Bay were derived from the IRS onboard HJ satellite during 2009 using single-channel method. The analysis of the spatial distribution of SST shows the outlet of the two power plants with $3^{\circ}\text{C}\sim 5^{\circ}\text{C}$ higher SST than elsewhere in a more obvious diffusion shape. Histograms and temperature data of five points of interesting between IRS-SST and MODIS-SST show that both of the SST distributions are basically the same. This article confirmed IRS's ability and feasibility in therm-water pollution monitoring.

Key words: therm-water pollution; single-channel method; HJ-IRS; sea surface temperature

1 引言

目前,核能是唯一被证实的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,但是核能发展仍面临着一些问题,核电站的“温排水”问题就是其中之一。与一般的火电厂相比,核电站的热效率偏低,仅为 $30\%\sim 35\%$,大部分热量被冷却水带走,

加之核电机组循环水量是火电机组的 $1.2\sim 1.5$ 倍,弃热量较多。核电站的冷却水不断地排入接纳水体,造成水域温度升高,影响水体水质,危害水中生物的生长,对周围水域造成热污染。因此,核电站温排水环境影响的研究对于防止热污染,保护海域水质和生态环境具有重要意义^[1]。而水温的高低是环境影响评价的前提,是反映热污染程度的一个重要

收稿日期:2010-12-29 修订日期:2011-02-21

基金项目:水体污染控制与治理科技重大专项(2009ZX07527-006-5),国家自然科学基金项目(40901174)、(41001205)。

作者简介:梁珊珊(1986~),女,硕士生,主要从事遥感应用方面的研究。

E-mail: Ssliang@ceode.ac.cn

指示因子。

卫星遥感技术监测核电站温排水分布的关键是利用热红外遥感数据反演水表温度,常用的温度反演算法有:单通道算法^[2~4]、分裂窗算法^[5~7]和多通道法^[8]。单通道算法是利用卫星传感器上一个位于大气窗口内的热红外通道获得辐射能,同时借助无线电探空数据或卫星遥感得到的大气廓线数据(包括温度廓线、湿度廓线和压力廓线),结合大气辐射传输方程来修正大气对比辐射率的影响,从而得到地表温度。这一方法实际应用起来非常困难,主要原因:①需要在卫星过境的同时发射地面无线电探空;②辐射传输模型与大气效应和陆面发射率的变化、高程和观测角等影响因素成非线性关系,使用辐射传输模型进行处理计算非常耗时;③要精确地知道发射率、高程和温度等参数,从而限制了应用范围。Jiménez-Muñoz 和 Sobrino^[2]提出的单通道算法简便,在已知地表比辐射率的前提下,只需要输入水汽和有效作用波长 2 个参数就可以实现温度的反演;覃志豪为了避免传输方程对无线电探空数据的依赖性,针对 Landsat-TM6 提出的一种地表温度反演算法—单窗算法^[3],该算法由地表热辐射传导方程推导而来,把大气和地表的影响直接包括在反演公式中,该算法的最大优点是参数比较简单,只需地表比辐射率、大气透过率和大气平均作用温度 3 个参数,而且精度高。分裂窗算法是利用 $10\mu\text{m} \sim 13\mu\text{m}$ 的大气窗口内,2 个相邻通道对大气吸收作用的不同,通过这两个通道测量值的各种组合来剔除大气的影响。这也是最早应用于海水表面温度反演的算法,后来研究者们将这种方法推广到陆地表面温度的反演中。这种方法的主要特点是:①它不要求精确的大气廓线;②不需要逐个像元的辐射模拟计算;③大气校正的精度高于单通道算法。分裂窗法是应用最广、最成熟的方法。多通道算法是利用多个热红外通道数据来反演地表温度的方法,如 Wan 和 Li 在文献^[8]中针对 MODIS 数据提出的一个 7 通道反演方法,该方法最大的优点在于它能同时反演地表温度和比辐射率。但该方法需要建立 14 个方程,同时需要昼夜遥感影像资料,操作起来比较复杂。

利用上述的温度反演算法,国内外的学者在计算出的海水表面温度基础上,实现了对核电站温排水分布的动态监测。DanLing Tang^[9]利用 1997 年 11 月到 1999 年 2 月之间,342 幅 1km 的 AVHRR 多波段热红外遥感数据,采用 McClain 等^[10]提出的

MCSST 分裂窗算法得到海温分布图,在此基础上分析了大亚湾核电站温排水的空间和时间分布特征;Yu-Hwan Ahn^[11]对于只有一个热红外波段的 TM 和 ETM+ 数据,利用计算出的星上亮度温度分析位于韩国西海岸的 Younggwang 核电站温排水的区域。面积和时间变化规律。同时对于包含多个热红外通道的 AVHRR 数据,采用 McClain 等^[10]提出的 MCSST 分裂窗算法计算海温,进而研究温排水的分布特征;吴传庆等^[11]利用多时相的 TM 热红外数据,计算出星上亮度温度,加上大气的校正因子,得到大亚湾核电站附近水域的表面温度,对温排水强度、扩散范围和环境的影响进行了评价。以上的研究表明应用遥感技术反演水表温度、探测核电站温排水区域是可行的。其优势在于:①卫星数据获取途径方便,而传统的海上水温实测方法费时费力,成本高;②由于卫星几天或者十几天就可以完成对地表某一地区的重复观测,利用遥感技术能够实现长期持续的海温动态监测;③传统海温调查方法仅能获得有限站点的温度数据,而使用卫星资料则反演可以得到大面积水域的表面温度,有利于开展海面温度的空间分布特征研究。

热红外遥感海水表面温度采用的数据源主要有 AVHRR 和 MODIS,但这两种数据空间分辨率较低,尺度大,适用于全球海洋气候的研究,而对于海湾、海岸带等小尺度的区域,应用该数据反演冬季海湾的海温时,很有可能探测不到核电站温排水带来的高温区的位置。因此,对于本文的研究区大亚湾,面积仅 600km^2 左右,适宜采用高分辨率热红外数据反演水温。常用的 Landsat TM6 数据具有 120m 的空间分辨率,在陆地地表温度反演中应用较多,但是其重返周期是 16 天,与 AVHRR、TM 等数据源相比,环境一号卫星红外相机 4 天的重返周期,300m 的空间分辨率更有利于大亚湾水表温度反演和核电站温排水的动态监测。

本文在 Jiménez-Muñoz 和 Sobrino(2003)单通道算法基础上,基于环境一号热红外波段,对大亚湾进行水表温度(SST)反演,并将反演结果和当天的 MODIS 的海温产品进行比对,结果表明二者的水温空间分布有较好的一致性,本文的结果可以为环境保护相关研究提供数据支持。

2 研究区介绍

本文的研究区是位于广东省深圳市东部的大亚湾,地理位置如图 1 所示,东侧入口水面宽约为

9.6km,水深约为19m~20m;西侧入口水面宽约为5.4km,水深约为19m。大亚湾的最大水深约为21m,平均水深约为11m,水深自湾顶向湾口逐渐增大。透明度年均约为4.5m,也是由湾顶向湾口逐渐增大。大亚湾冬季水体为相对低温高盐,夏季为高温低盐,盐度在29.7%~34.36%之间。该地区1月和2月的气温最低,月平均气温是15℃;7月和8月的气温最高,月平均气温是28℃。坐落于大亚湾西海岸的大亚湾核电站是中国第一座大型商用核电站,1987年8月7日工程正式开工,1994年2月1日和5月6日两台机组先后投入商业营运。1995年,岭澳核电站开始规划建设,其规模是大亚湾核电站的两倍。岭澳核电站直面大亚湾,毗邻运行中的大亚湾核电站仅1km。2002年7月和2003年3月,岭澳核电的前两台机组已先后投入商业运行,正式向广东省电力市场送电^[12](图1中大亚湾西部的小圆圈代表2座核电站的位置)。

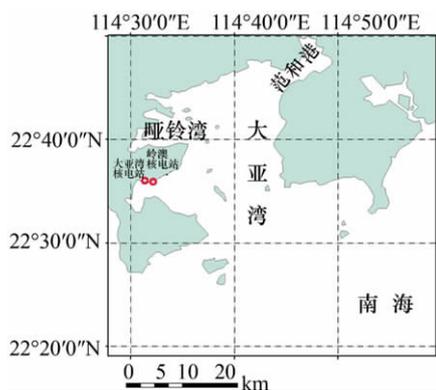


图1 大亚湾和大亚湾、岭澳核电站

3 卫星数据及预处理

我国于2008年9月6日成功发射了环境与灾害监测预报小卫星星座(简称环境一号)的两颗光学小卫星(HJ-1A, HJ-1B),其中HJ-1B卫星有效载荷为两台宽覆盖多光谱可见光相机(CCD)和一台红外多光谱相机(IRS)。HJ-IRS有4个波段,光谱范围覆盖近红外、短波红外、中红外和热红外谱段,其中第4个波段为热红外波段,表1为环境一号卫星红外多光谱相机(HJ-IRS)主要技术指标。

遥感数据在进行温度反演之前,需要经过预处理,预处理包括几何精校正、区域裁剪、阈值分割、云检测和掩膜。采用已校正好的TM影像对HJ-IRS数据进行几何精校正。几何校正时,选择3次多项式拟合方法和最近邻重采样方法。

表1 环境一号卫星红外相机 IRS 主要技术指标

波段号	光谱范围 (μm)	空间分辨 率(m)	幅宽 (km)	重访时间 (day)
IRS1	0.75~1.10	150	720	4
IRS2	1.55~1.75			
IRS3	3.50~3.90	300		
IRS4	10.5~12.5			

本文裁剪以后的研究区是大亚湾(图1),通过阈值分割来区分水体和陆地,使用IRS的短波红外(IRS2,波长范围:1.55 μm ~1.75 μm)。首先在ENVI4.5下,将IRS 150m Band2采样到和第4波段分辨率一样的300m;然后,统计该波段的灰度直方图,发现有2个峰,一个峰对应于水体,另一个峰对应于陆地。选择两个峰之间的谷值的波长作为阈值进行阈值分割。通过阈值分割,得到掩膜图像,水体的值为1,陆地的值为0。利用云和冰雪在IRS第1波段(近红外)和第2波段(短波红外)上高辐射率的特点,设定阈值初步提取云和冰雪,然后利用冰雪在第1波段大于第2波段的特性,设定阈值最终完成云检测。将非云像元的值设为1,云像元为0,然后将掩膜图像和原图像相乘,这样岸边和被云污染的图像的值都为0,无云影响的水体图像的值不变。

4 水表温度反演

4.1 单通道算法

考虑到HJ-IRS只有一个热红外波段,于是本文采用Jiménez-Muñoz和Sobrino提出的单通道算法对HJ-IRS热红外数据进行水表温度反演。该算法在已知比辐射率的情况下,只需要输入大气水汽含量,就可以利用一个热红外波段的数据反演得到温度。对于水体来说,其比辐射率可以近似为1。因此在比辐射率为1时,Jiménez-Muñoz和Sobrino提出的单通道算法可以表示为:

$$\text{SST} = \gamma[\Psi_1 L_{\text{sensor}} + \Psi_2 + \Psi_3] + \delta \quad (1)$$

$$\gamma = \frac{T_{\text{sensor}}^2}{C_2 L_{\text{sensor}} \left[\frac{\lambda_{\text{eff}}^4}{C_1} L_{\text{sensor}} + \frac{1}{\lambda_{\text{eff}}} \right]} \quad (2)$$

$$\delta = -\gamma L_{\text{sensor}} + T_{\text{sensor}} \quad (3)$$

其中:SST是水表温度(单位:K), L_{sensor} 是星上辐射亮度(单位: $\text{m}^{-2} \text{sr}^{-1} \mu\text{m}^{-1}$), T_{sensor} 是星上亮度温度(单位:K), $C_1 = 1.19104 \times 10^8 \text{ W} \mu\text{m}^4 \text{ m}^{-2} \text{ sr}^{-1}$, $C_2 = 14387.7 \mu\text{mK}$, λ_{eff} 是有效波长,大气函数 Ψ_1 , Ψ_2 , Ψ_3 是大气上行辐射 L^\uparrow ,大气下行辐射 L^\downarrow 和大气透射率 τ 的函数,可以表示为:

$$\Psi_1 = \frac{1}{\tau} \quad (4)$$

$$\Psi_2 = -L^\downarrow - \frac{L^\uparrow}{\tau} \quad (5)$$

$$\Psi_3 = L^\downarrow \quad (6)$$

有效波长 λ_{eff} 可以通过下式计算得到:

$$\lambda_{eff} = \frac{\int \lambda f(\lambda) d\lambda}{\int f(\lambda) d\lambda} \quad (7)$$

其中: $f(\lambda)$ 是通道响应函数。通过 HJ-IRS 第 4 波段的通道响应函数可以计算得到 IRS4 的有效波长为 $\lambda_{eff} = 11.51\mu\text{m}$ 。

4.2 大气函数与大气水汽含量的关系拟合

由公式(4)–(6)可以看出,大气函数 Ψ_1, Ψ_2, Ψ_3 是大气上行辐射 L^\uparrow , 大气下行辐射 L^\downarrow 和大气透过率 τ 的函数。在热红外遥感中,大气上行辐射 L^\uparrow , 大气下行辐射 L^\downarrow 和大气透过率 τ 又可以表示为大气水汽含量 ω 的函数。因此,大气函数 Ψ_1, Ψ_2, Ψ_3 可以表示为大气水汽含量 ω 的函数。通过从 TIGR 数据中选取的 1413 条晴空大气廓线,运行大气辐射传输模型 MODTRAN4 可以得到大气水汽含量、大气透过率、大气上行辐射和大气下行辐射。通过最小二乘拟合可以得到 3 个大气函数和大气水汽含量的关系:

$$\Psi_1 = 0.02287\omega^3 - 0.02594\omega^2 + 0.17466\omega + 0.99353 \quad (8)$$

$$\Psi_2 = -0.15499\omega^3 - 0.17076\omega^2 - 2.32394\omega + 0.28601 \quad (9)$$

$$\Psi_3 = -0.0536\omega^3 + 0.36115\omega^2 + 1.12284\omega - 0.09672 \quad (10)$$

4.3 获取大气水汽含量 ω

如前面提到的,在水体比辐射率近似为 1 的情况下,Jiménez-Muñoz 和 Sobrino 提出的单通道算法只需要输入大气水汽含量就可以反演水表温度。常用的基于遥感数据本身反演大气水汽含量的方法包括差分吸收法和分裂窗算法^[13]。例如 MODIS 第 2 和 19 波段的两波段比值是利用 2 个分别位于水汽窗口和强吸收位置的波段的比值来反演大气水汽含量,由于 HJ-IRS 没有类似的 2 个通道来计算大气水汽含量,于是本文采用与 HJ-IRS 成像时间最接近的 Terra 卫星(上午星)的水汽产品 MOD05 来作为算法的水汽输入数据。MOD05 有红外和近红外 2 种水汽产品,红外水汽产品在很大程度上依赖于最初选择的温湿廓线,并且当地面温度和边界层温度比较接近时,结果有很大的误差,因此近红外水汽产品应用更为广泛。近红外产品主要是利用地表或云在 MODIS 近红外太阳反射辐射通道的测量值反演气柱水汽含量,精度在 5%~10%。

5 结果与分析

5.1 环境一号卫星热红外数据大亚湾海水表面温度反演结果

经过本文的单通道算法,基于 IRS 热红外通道反演大亚湾海水温度结果图 2 所示:

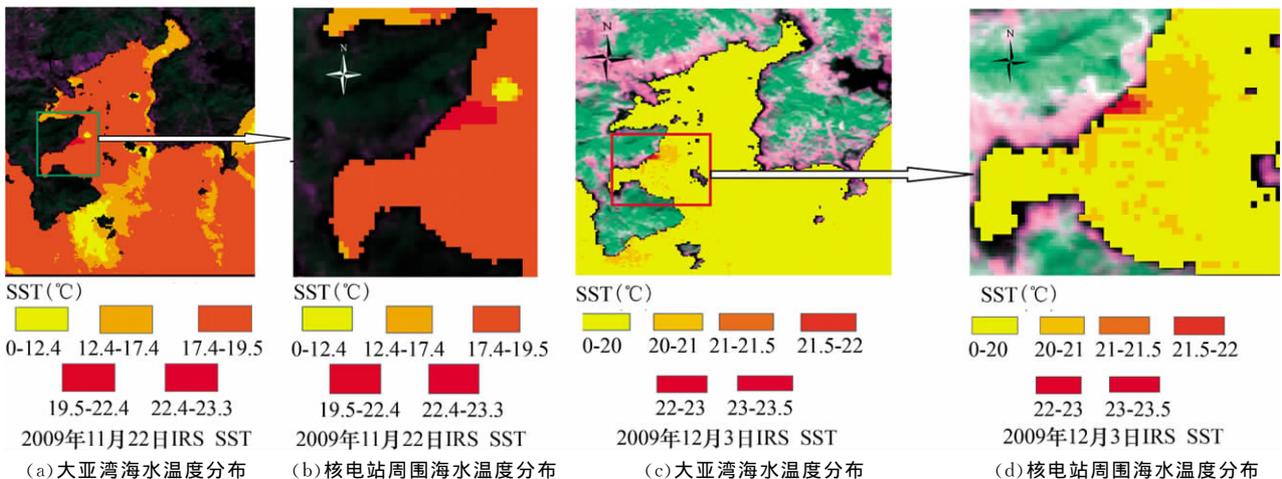


图 2 环境一号反演大亚湾地区海水温度分布图

由图 2(a)、(b)可以看出,11 月 22 日的大亚湾海水温度分布主要呈现以下特征:

海温分布较为均匀,温度集中在 $17.4^\circ\text{C} \sim 19.5^\circ\text{C}$;影像东北侧的范和港和西南部海区由于受到云的影响,呈现明显的浅黄色低温区;大亚湾西侧

2 个核电站出水口排出的热废水呈现红色高温区,温度在 $22.4^\circ\text{C} \sim 23.3^\circ\text{C}$,大约高出平均水温 5°C 。

由图 2(c)、(d)可以看出,12 月 3 日的大亚湾海水温度分布主要呈现以下特征:

海温分布均匀,温度集中在 $19^\circ\text{C} \sim 20^\circ\text{C}$;大亚

湾西侧 2 个核电站排出的热废水呈现红色高温区, 有明显的扩散状, 温度在 22℃~23.5℃, 大约高出平均水温 3℃, 属于典型的工业点源污染特征。

5.2 MODIS 海水表面温度产品 MODIS-SST

由于 MODIS 的过境时间和环境一号卫星接近 (11:00AM 左右), 本文选择 2009 年 11 月 22 日 (11:30AM) 和 2009 年 12 月 3 日 (11:15AM) 的 MODIS 2 级海水表面温度产品 MODIS-SST 和 IRS

反演结果进行比较分析。MODIS 海水表面温度如图 3: 由图 3 可以发现, MODIS 海水表面温度产品得到的温度分布大致和环境卫星反演结果一致, 但是很明显, MODIS 的空间分辨率相对环境卫星较低, 在 11 月 22 日的 MODIS-SST 影像上, 大亚湾西侧受温排水影响的高温区并没有表现出来。可见, MODIS 的低空间分辨率决定了其在小尺度区域细致分析的不足, 而应更适合于大尺度、全球性的热环境分析。

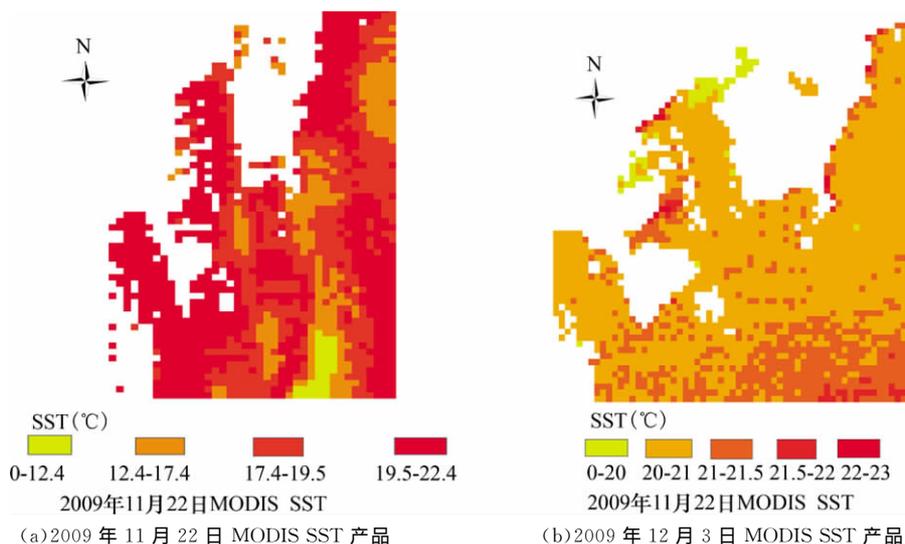


图 3 MODIS SST 产品

5.3 IRS 反演 SST 和 MODIS-SST 的对比分析

5.3.1 直方图

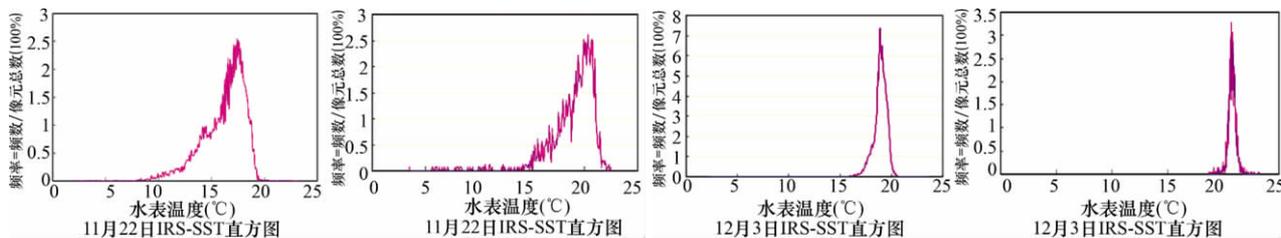


图 4 IRS 反演的大亚湾海水温度分布直方图和 MODIS 大亚湾海水温度分布直方图

从图 4 的温度直方图可以看出:

(1) 温度出现频率最大的温度值范围并不是均匀分布在最小值和最大值之间, 而是集中在一个相对较小的区间内, IRS-SST 和 MODIS-SST 温度的范围分别为 10℃~20℃和 15℃~23℃ (11 月 22 日), 15℃~20℃和 20℃~22℃ (12 月 3 日), 温度变幅分别为 10℃和 8℃, 5℃和 2℃, 说明 IRS 反演结果所能表达的温度信息大于 MODIS。

(2) 11 月 22 日和 12 月 3 日 IRS 反演的温度出现频率最大的温度值分别是 18℃和 19℃, 当天的 MODIS-SST 出现频率最大的温度值分别是 20℃和 21℃, IRS 低于 MODIS 2℃左右。

5.3.2 样点对比

参照图 5, 分别在 2 个时相的 IRS-SST 和 MODIS-SST 上选取样点 (白色方框), 将 IRS 反演结果与 MODIS 海温产品作对比分析, 结果如表 2 所示。

表 2 IRS 反演结果与 MODIS 海温产品比较

样点	2009 年 11 月 22 日			2009 年 12 月 3 日		
	SST _{IRS} (℃)	SST _{MODIS} (℃)	δT (℃)	SST _{IRS} (℃)	SST _{MODIS} (℃)	δT (℃)
1	18.64	20.67	2.03	18.88	20.30	1.42
2	17.76	19.74	1.98	19.58	20.51	0.93
3	19.03	21.37	2.34	19.00	20.61	1.61
4	18.22	20.33	2.11	18.26	21.35	3.09
5	17.97	20.11	2.14	19.77	20.99	1.22

其中, $\delta T = SST_{MODIS} - SST_{IRS}$

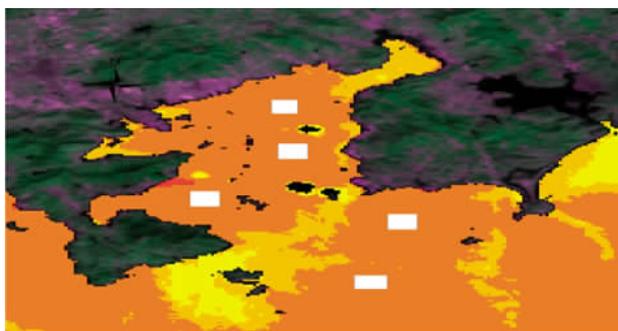


图5 选取的点位(以11月22日IRS-SST为例)

综合图4和表2可以发现:IRS反演的温度数值比MODIS产品低 2°C 左右。主要原因有3点:①可能是IRS数据本身的原因:因为和MODIS相比,IRS星上校正精度偏低,而且HJ-1B卫星在轨运行期间空间环境变化和元器件老化,对红外相机热红外通道进行了7次星上定标表明星上定标系统校正精度有明显的降低;②环境一号过境的时候天空有少量云,本文IRS反演水面温度时没有剔除云,而MODIS-SST产品剔除了云的影响;③单通道温度反演算法是仅考虑少数大气影响因子的简化模型,随着大气总水汽含量的增大,反演值的误差显著增加。因此,大亚湾海域较高的水汽含量是造成IRS反演结果和MODIS产品较大偏差的又一原因。

6 结束语

环境一号卫星为新的数据源,有重返周期短(4天)和热红外数据空间分辨率高(300m)的特点,但是在地表温度反演方面应用还比较少。本文探讨了环境一号数据的地表温度反演方法,包括反演算法的选择、基本参数确定和详细的反演步骤。在现有的单通道算法中,Jiménez-Muñoz(2003)提出的模型仅需要两个基本参数,并具有很高的反演精度,因而是地表温度遥感反演的最佳选择。模型所需要的基本参数包括大气参数和地表比辐射率。利用MODIS近红外水汽数据获取像元尺度的大气参数,不仅克服了传统的单通道算法对实测点尺度大气资料的依赖,而且确保了所得大气参数与HJ-IRS过境时间的准同步性。

IRS反演结果和MODIS SST产品得到的温度分布大体一致,而前者变温范围更大,表明IRS表达的温度信息大于MODIS。MODIS的低空间分辨率决定了其在小尺度区域细致分析的不足,而更加适合于大尺度、全球性的热环境分析。在IRS反演的水温图上,大亚湾核电站排水的出口温度,比周围水温高 $3^{\circ}\text{C}\sim 5^{\circ}\text{C}$,呈现明显的扩散状。本文的结果将有利于推广环境一号数据在环保方面的应用。

参考文献

- [1] 朱晓翔,刘建琳,王凤英.核电站温排水环境影响研究方法调查评价[J].电力科技与环保,2010,26(1):8-10.
- [2] Jiménez-Muñoz, J., & Sobrino, J. A generalized single-channel method for retrieving land surface temperature from remote sensing data[J]. Journal of Geophysical Research, 2003(108):4688-4695.
- [3] 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]. International Journal of Remote Sensing, 2001(22):3719-3746.
- [4] 于杰,李永振,陈丕茂,等.利用Landsat TM6数据反演大亚湾海水表层温度[J].国土资源遥感,2009(3):24-29.
- [5] Wan, Z., & Dozier, J. A generalized split-window algorithm for retrieving land-surface temperature from space[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1996(34):892-905.
- [6] 覃志豪,高懋芳.农业旱灾监测中的地表温度遥感反演方法:以MODIS数据为例[J].自然灾害学报,2005,14(4):64-71.
- [7] 郭广猛,杨青生.利用MODIS数据反演地表温度的研究[J].遥感技术与应用,2004,19(1):34-36.
- [8] Wan Z M, Li Z L. A physics-based algorithm for retrieving land-surface emissivity and temperature from EOS/MODIS data[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1997(35):980-996.
- [9] Tang, D., Kester, D., 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):506-515.
- [10] McClain, E., Pichel, W., Walton, C. Comparative performance of AVHRR-based multichannel sea surface temperatures [J]. Journal of Geophysical Research, 1985(90):11587.
- [11] Ahn, Y., Shanmugam, P., Lee, J., 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.
- [12] 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.
- [13] 梁顺林.定量遥感[M].北京:科学出版社,2009.