

利用 MODIS 多通道数据反演近海海表温度

张春桂¹ 陈家金¹ 谢怡芳² 林 晶¹ 曾银东³

(1. 福建省气象科学研究所,福州 350001; 2. 福建省气象局;
3. 福建省海洋环境与渔业资源监测中心)

提 要: 以 EOS 卫星的中分辨率成像光谱仪 MODIS 遥感资料为数据源,以福建近岸海域为示范区,利用多通道数据算法模型进行近海海表温度卫星遥感反演试验,并根据 2003—2004 年福建近岸海域 10 个观测站点的实测海洋表面温度对反演结果进行精度检验与分析。遥感反演的海洋表面温度与现场观测的海洋表面温度绝对误差的平均值为 0.75°C ,标准差为 0.52°C ,绝对误差在 1.0°C 以内的样本占总样本的 68%。结果表明利用 MODIS 多通道数据算法模型遥感反演近海海表温度能够满足海洋应用的精度要求。

关键词: 遥感 海洋表面温度 MODIS

Retrieval of Sea Surface Temperature in Coastal Region by Using MODIS Multi-channel Data

Zhang Chungui¹ Chen Jiajin¹ Xie Yifang² Lin Jing¹ Zeng Yindong³

(1. Fujian Province Meteorological Institute, Fuzhou 350001; 2. Fujian Provincial Meteorological Bureau;
3. Monitoring Center for Marine Environment and Fishery Resources)

Abstract: By using MODIS images of EOS satellite as data source, and taking coastal region of Fujian as a demonstration site, the retrieval experiment of sea surface temperature was carried out based on MODIS multi-channel data, and the precision of MODIS sea surface temperature was verified and analyzed with measurements of ten stations in coastal region of Fujian during 2003—2004. The average absolute error of sea surface temperature calculated by MODIS data was 0.75°C , the standard error was 0.52°C , the samples of absolute error within 1.0°C was 68% of total samples. The results showed that the accuracy of sea surface temperature calculated by MODIS data in coastal region was equivalent with the accuracy of sea surface temperature calculated by NOAA/AVHRR data.

Key Words: remote sensing sea surface temperature MODIS

资助项目: 福建科技厅重点项目(2006Y0008)“MODIS 卫星数据在福建生态环境与灾害监测中的应用研究”和福建省气象局重大项目“福建沿海及台湾海峡气象防灾减灾服务体系”资助。

收稿日期: 2007 年 7 月 16 日; 修定稿日期: 2008 年 1 月 3 日

引 言

在地球表面海洋面积所占的比例高达 70%,海洋表面温度(Sea Surface Temperature, 以下简称为 SST)是海洋的主要物理参数之一,海水的热容量大、比热高,可以存贮和传输大量热量,制约着海面和大气的热量、动量和水汽交换,海气相互作用对于天气和气候有着巨大的影响^[1-3],因此 SST 是海洋一大气系统中一个十分关键的物理量,在海洋学和气象学研究中占有非常重要的地位。渔场海洋学的研究和渔业生产实践都表明, SST 与海洋养殖^[4]、海洋中上层鱼类的生存、洄游、繁殖有着密切的关系^[5]。

以往 SST 数据主要来源于沿岸、岛屿、船舶和浮标的观测资料,采用传统的观测手段既费时费力又不能保证数据质量,特别是由于数据的同步性较差,能得到的往往只是几个断面的数据,整个海洋温度场的空间结构得不到正确反映。卫星遥感技术可以实现对大范围海域迅速而且几乎同步的观测,海洋温度场空间结构的位置信息准确,且数据更新快、成本低,这是传统观测手段无法比拟的,因此遥感技术已成为探测海洋表面温度场的最佳手段。利用卫星红外遥感技术反演 SST 国内外许多学者已做了大量工作,许多光学传感器都具备探测 SST 的能力,但总的说来探测 SST 采用的遥感数据源主要是以美国 NOAA 极轨气象卫星 AVHRR 数据为主^[6-9],此外利用日本空间分辨率较低的 GMS 静止气象卫星^[10-11]和我国自行发射的海洋卫星 HY-1 的传感器数据^[12]开展 SST 反演研究的也有报道。中分辨率成像光谱仪 MODIS 是美国国家航空航天局(NASA)新一代对地观测系统(EOS)两颗在轨业务卫星 TERRA 和 AQUA 上最有特色的传感器之一,分别于 1999 年和 2002 年投入运行,国内

接收使用 MODIS 数据开始于 2001 年,且大多用在陆地和大气研究方面。MODIS 具有空间覆盖面广和观测频次高的优势,共有 36 个探测光谱通道,覆盖可见光、近红外和热红外波段,其探测通道具有更高的信噪比和更窄的波段宽度,在海洋环境监测方面越来越受到人们的重视。

福建近岸海域的海流具有明显的季节变化,在季风控制下不同性质的海流自东海和南海进入,海流交汇、锋面发育,在地形的作用下形成沿岸和浅滩上升流,是我国近海的重要渔场之一。同时,福建近岸海域的养殖业十分发达,赤潮灾害也较为严重,近岸海域 SST 的分布状况及其精度对于渔业养殖和减灾防灾工作都十分重要。本文将福建近岸海域作为示范区,采用 MODIS 遥感数据反演 SST 并用近岸海域观测站点实测的 SST 对反演结果进行检验。本研究结果可为今后建立我国近岸海域的 SST 算法提供一定的参考和依据。

1 数据与方法

1.1 数据来源

本研究以 EOS/MODIS 遥感数据作为信息源,其中 2003 年原始 MODIS 数据来源于国家卫星气象中心,2004 年原始 MODIS 数据来源于福建省气象科学研究所卫星资料接收站。原始 MODIS 数据通过北京星地通公司提供的 ShineTek 软件包进行预处理,最后生成 LD2 格式的福建省近岸海域局地数据集,数据集地理范围是 23.5~27.3°N、117.2~121.0°E,探测通道包括 CH1、CH2、CH 19、CH 31、CH 32。

福建省海洋与渔业局海洋观测站点的观测时间为每年 4 至 10 月,常规观测每月 2 次,本研究收集了福建省海洋与渔业局提供的 2003—2004 年 10 个海洋观测站点共 74

个样本的实测 SST 数据, 10 站点分别位于福建省北部海岸的三都湾海域、中部海岸的

闽江口海域和南部海岸的厦门海域, 具体位置及代码见表 1。

表 1 福建近岸海域 10 个海洋观测站点的代码和经纬度

站点代码	三都海域 FJ02	三都海域 FJ03	三都海域 FJ04	闽江口海域 FJ13	闽江口海域 FJ15
经度	120°12'29"	120°03'00"	120°06'11"	119°50'10"	119°56'31"
纬度	26°55'07"	26°52'01"	26°45'11"	26°19'08"	26°21'00"
站点代码	闽江口海域 FJ16	厦门海域 FJ18	厦门海域 FJ20	厦门海域 FJ22	厦门海域 FJ24
经度	119°54'36"	118°09'47"	118°13'08"	118°04'44"	118°04'08"
纬度	26°21'36"	24°35'56"	24°29'58"	24°32'17"	24°28'48"

1.2 反演模式

MODIS 传感器的中红外和热红外两组波段为红外 SST 观测提供很好的数据基础, MODIS 部分探测通道的特性见表 2。中红外的大气窗口比热红外更透明, 而且 MODIS 在中红外窗口拥有的 22 和 23 两个波段是窄波段, 从而受大气影响更小, 不过由于白天太阳耀斑对中红外波段的严重干扰, 中红外波段的反演模式只适合于夜间, 由于福建省海洋观测站点只观测白天的 SST, 因此本文对夜间 SST 的反演不进行探讨。在晴空无云的条件下, 利用热红外波段反演 SST 最为关键的问题是如何消除大气中水汽含量对热红

外辐射传输吸收而造成的削弱影响, 如果知道海洋上空大气湿度廓线的垂直分布, 就可以根据热红外辐射传输方程直接反演 SST, 但实际上海洋上空水汽垂直分布状况的常规资料十分缺乏, 因此直接进行大气削弱订正仍然存在着较大的困难。但是由于水汽对不同热红外波段的削弱量不同, 比如在 12 μm 附近的削弱量远比在 11 μm 附近的削弱量大, 因此, 可以利用不同热红外波段受水汽影响的差异来估计大气中的水汽含量, 即采用卫星多通道数据进行大气削弱订正, 然后进行统计回归建立反演模式, 这是目前国内用于反演 SST 采用的主要手段。

表 2 MODIS 部分探测通道的特性

通道	带宽/中心波长(μm)	波段	光谱辐射率($\text{W}/\text{m}^2 \cdot \mu\text{m} \cdot \text{sr}$)	等效噪声温度差($^{\circ}\text{C}$)
20	3.66~3.84/3.75	中红外	0.45(300K)	0.05
22	3.929~3.989/3.96	中红外	0.67(300K)	0.07
23	4.02~4.08/4.05	中红外	0.79(300K)	0.07
31	10.78~11.28/11.03	热红外	9.55(300K)	0.05
32	11.77~12.27/12.02	热红外	8.94(300K)	0.05

由于 MODIS 传感器热红外窗口的 31 和 32 波段与 NOAA/AVHRR 的 4 和 5 波段基本对应, 覃志豪等^[13]在以前针对 NOAA/AVHRR 卫星数据分裂窗算法反演地球表面温度的基础上, 改进并提出了适用于 MODIS 卫星数据的地球表面温度反演算法:

$$SST = C_0 + C_1 \times T_{31} - C_2 \times T_{32} \quad (1)$$

式中, SST 、 T_{31} 和 T_{32} 分别是海洋表面温度、MODIS 第 31 和 32 波段的亮度温度, C_0 、 C_1 和 C_2 是模型参数, 它们是通过 MODIS 第 31 和 32 波段的地球表面比辐射率 ϵ 和大气透过率 τ 计算得到。

首先把地球表面当作理想黑体来处理, 那么卫星热红外探测通道获得的地表光谱辐

射率遵循普朗克定律:

$$R = \frac{2hc^2}{\lambda^5 (e^{hc/\lambda T} - 1)} \quad (2)$$

式中, R 是地表光谱辐射率 ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \mu\text{m}^{-1} \cdot \text{sr}^{-1}$), h 是普朗克常数, c 是光速, k 是玻尔兹曼常数, λ 是卫星传感器热红外探测通道的中心波长, T 是地表亮度温度。根据式(2)可以分别计算得到 MODIS 第 31 和 32 波段的亮度温度。

比辐射率 ϵ 定义为在相同温度和波长下观测地球表面的光谱辐射率与理想黑体的光谱辐射率之比值, 水体在热红外波段范围内的比辐射率很高, 基本接近理想黑体, 根据常用地物光谱库, 在 MODIS 第 31 和 32 波段其值可分别取 $\epsilon_{31} = 0.992$ 和 $\epsilon_{32} = 0.989$ 。

大气透过率 τ 定义为遥感传感器接收到的光谱辐射率与地表真实光谱辐射率之比值, 本研究采用经验公式进行估算, 由于大气透过率主要受大气水汽含量的影响, 首先由 MODIS 的第 19 波段(水汽强烈吸收波段)和第 2 波段(水汽窗口波段)的反射率比值获得 MODIS 的第 19 波段的大气透过率(r_{19}/r_2), 然后采用毛克彪^[14]基于大气模拟软件模拟得到的经验公式分别估算 MODIS 第 31 和 32 波段的大气透过率:

$$\tau_{31} = -0.10671 \times [(0.02 - \ln(r_{19}/r_2))/0.651]^2 + 1.04015 \quad (3)$$

$$\tau_{32} = -0.12577 \times [(0.02 - \ln(r_{19}/r_2))/0.651]^2 + 0.99229 \quad (4)$$

在得到水体比辐射率和大气透过率之后, 根据覃志豪等^[13]给出的以下一系列公式计算模型中三个参数, 最后再根据式(1)反演得到海洋表面温度 SST。

$$\begin{aligned} X_{31} &= \epsilon_{31} \times \tau_{31}; & X_{32} &= \epsilon_{32} \times \tau_{32}; \\ Y_{31} &= (1 - \tau_{31}) \times [1 + (1 - \epsilon_{31}) \times \tau_{31}]; \\ Y_{32} &= (1 - \tau_{32}) \times [1 + (1 - \epsilon_{32}) \times \tau_{32}]; \end{aligned}$$

$$Z_0 = Y_{31} / (Y_{32} \times X_{31} - Y_{31} \times X_{32});$$

$$Z_1 = Y_{32} \times (1 - X_{31} - Y_{31}) / (Y_{32} \times X_{31} - Y_{31} \times X_{32});$$

$$Z_2 = Y_{31} \times (1 - X_{32} - Y_{32}) / (Y_{32} \times X_{31} - Y_{31} \times X_{32});$$

$$C_0 = -64.60363 \times Z_1 + 68.7255 \times Z_2;$$

$$C_1 = 1 + Z_0 + 0.440817 \times Z_1;$$

$$C_2 = Z_0 + 0.473453 \times Z_2$$

2 结果分析

反演精度是衡量反演模式性能的重要指标, 直接影响到反演产品的应用质量, 因此精度检验与分析是遥感定量监测中重要的一步。为了与 10 个海洋观测站点现场观测的 SST 数据进行比较, 需从反演得到的 SST 分布图上选取相应匹配点, 匹配点选取的原则, 第一是考虑到遥感数据上单个点的数据不具有代表性, 取该点周边 3×3 个像素点的平均值作为该点的 SST 值; 第二是 EOS 的上午星 TERRA 过境时间为 10—11 时, 下午星 AQUA 过境时间为 13—14 时, 而近岸海洋观测站点 SST 的观测时间为上午 10 时, 因此与近岸海洋观测站点匹配的 MODIS 数据以选择上午星为主, 当天缺少上午星数据的才选择下午星; 第三是鉴于台湾海峡上空的天气多变, 云覆盖量较大, 造成与现场观测 SST 数据相匹配的 MODIS 遥感数据很少, 同时考虑到 SST 是一个缓慢的变化量, 因此如果当天无相应匹配的遥感数据, 则时间跨度取 48 小时内的上午星 TERRA 数据。由于天气等因素的影响, 最后得到近岸海域现场观测和遥感反演 SST 匹配的数据样本点共 68 个, 限于篇幅, 部分匹配的现场观测与 MODIS 数据反演的 SST 结果见表 3, 反演误差为卫星反演的 SST 与现场观测的 SST 之差。

表 3 基于 MODIS 多通道数据遥感反演 SST 部分结果

现场观测日期	卫星观测日期	站点代码	现场观测 SST(°C)	卫星反演 SST(°C)	反演误差(°C)
2003-05-20	2003-05-20	FJ03	22.1	22.5	0.4
2003-05-27	2003-05-26	FJ02	22.8	21.6	-1.2
2003-06-03	2003-06-02	FJ13	23.7	23.7	0.0
2003-06-18	2003-06-18	FJ16	24.3	23.7	-0.6
2003-07-08	2003-07-09	FJ04	27.9	28.4	0.5
2003-08-06	2003-08-08	FJ15	27.3	27.0	-0.3
2003-09-16	2003-09-18	FJ02	28.5	28.9	0.4
2003-10-21	2003-10-20	FJ16	23.3	23.8	0.5
2003-10-22	2003-10-22	FJ02	22.0	21.6	-0.4
2004-04-29	2004-04-28	FJ22	23.7	23.4	-0.3
2004-05-10	2004-05-10	FJ22	23.9	23.0	-0.9
2004-05-17	2004-05-18	FJ24	24.9	24.2	-0.7
2004-06-07	2004-06-09	FJ22	26.9	27.0	0.1
2004-06-21	2004-06-20	FJ22	28.8	28.3	-0.5
2004-07-05	2004-07-05	FJ24	29.6	28.6	-1.0
2004-07-19	2004-07-18	FJ24	29.2	28.8	-0.4
2004-08-02	2004-08-04	FJ22	30.1	29.6	-0.5
2004-08-16	2004-08-16	FJ22	30.1	29.7	-0.4
2004-09-06	2004-09-06	FJ24	29.9	29.9	0.0
2004-09-20	2004-09-21	FJ22	29.1	27.9	-1.2
2004-10-08	2004-10-08	FJ24	25.1	24.3	-0.8
2004-10-18	2004-10-18	FJ22	22.9	22.8	-0.1

近岸海域观测站点现场观测的 68 个样本 SST 与 MODIS 反演 SST 的相关系数为 0.96(见图 1),现场观测与遥感反演结果的 SST 变化曲线见图 2,从图 2 来看,遥感 SST 有高于现场观测 SST,也有低于现场观测 SST。一般地将远离海岸带且较清澈的海水定为一类水体,将海岸带附近且较浑浊的海水定为二类水体,福建近岸海域基本上属于二类水体,其海域上空的大气状况比较复杂,海上气溶胶浓度普遍较高,本研究所采用的基于多通道数据的 SST 算法模型只是对水汽吸收进行校正,同时由于近岸海域临近大陆,受自身地形的影响比较大,较浅的海水受太阳加热作用比较明显以及沿岸海流的作用,使得 SST 在近岸海域变化较快,从而造成与之相匹配的卫星数据在时间上不是很同步。除此之外,卫星传感器所带来的等效噪声误差(见表 2)、实测海温精度也是影响

SST 反演精度的因素。现场观测的 SST 是厚度在几十厘米到几米之间海洋近表面水层温度,是一个点的值,而卫星遥感反演的 SST 则是海面以下几毫米厚度海水层的温度,是一定面积海洋表面温度的平均值,据研究这两个温度值本身平均相差可达 0.3°C ,这种偏差还受到风速、云量等海况的影响。

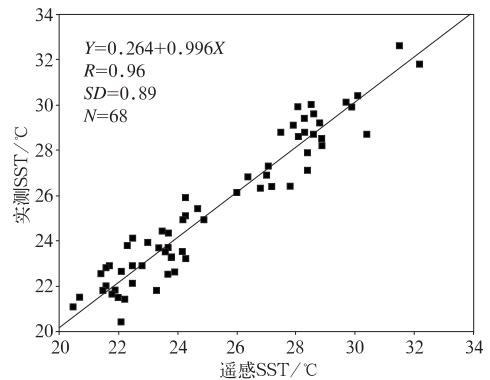


图 1 实测 SST 与遥感 SST 相关统计结果

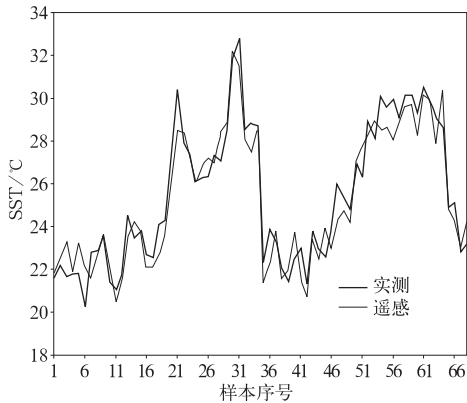


图2 实测 SST 与遥感 SST 变化曲线

从监测误差的统计分析结果来看,近岸海域 68 个样本 MODIS 反演的 SST 其绝对误差的平均为 0.75°C ,标准差为 0.52°C ,最大绝对误差为 1.8°C ,绝对误差在 0.5°C 和 1.0°C 以内的样本分别占总样本的 41% 和 68%,在 1.0°C 以上的仅占 32%,绝对误差分布图见图 3。

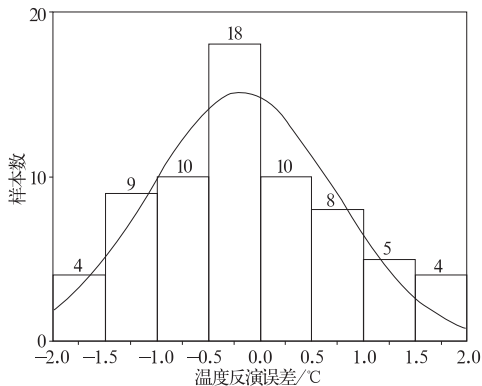


图3 MODIS 数据反演 SST 的误差统计

McMillin 等^[15]采用分裂窗算法对 AVHRR 数据的 3 个红外通道 9 种组合的 SST 反演模式进行精度验证,温度误差为 $0.15\sim 1.59^{\circ}\text{C}$,标准差为 $1.04\sim 1.71^{\circ}\text{C}$,李万彪等^[8]采用多通道统计法反演西北太平洋 SST 的精度为 1.06°C ,李娜等^[16]利用 NOAA/AVHRR 卫星数据反演的 SST 产品对

台湾海峡及其邻近海域进行验证,精度可达 $0.11\pm 0.97^{\circ}\text{C}$,我国国家卫星气象中心极轨气象卫星 SST 业务产品的平均偏差为 -0.6°C ,标准差为 1.5°C ^[17]。在全球意义上,目前美国 NOAA 数据中心提供的采用极轨气象卫星资料反演的 SST 业务产品精度较为可靠,SST 产品资料与现场浮标资料的平均误差在 0.5°C 左右,中纬度海域为 0.7°C ,热带海域则为 $1\sim 2^{\circ}\text{C}$ ^[18]。由此可见,利用基于 MODIS 多通道卫星数据的算法模型进行近岸海域海洋表面温度卫星遥感反演是可行的,所反演 SST 的总体精度可达到美国 NOAA 数据中心提供的 SST 业务产品的精度,采用 MODIS 卫星资料替代传统的 AVHRR 卫星资料反演海洋 SST 能够满足海洋应用的精度要求,图 4(见彩页)为福建海洋养殖业较为发达的宁德和福州地区近岸海域基于 MODIS 数据的 SST 业务监测产品。

3 小结

(1) 晴空天气条件下,利用 MODIS 多通道卫星数据算法模型遥感反演近岸海域的 SST 是可靠的,虽然有个别像元的反演误差较大,但总体精度可满足一般海洋应用的精度要求。

(2) 由于近岸海域的海洋环境较为复杂,进行准确的大气校正并建立适合于特定海域的 SST 反演模型是今后研究的重点问题。

参考文献

- [1] 刘瑞云.海面温度对热带气旋路径的影响初探[J].气象,1993,19(7): 35-37.
- [2] 袁金南,肖伟生.海温变化对台风路径的影响[J].广东气象,2002,(3): 1-2.
- [3] 袁佳双,郑庆林.热带海表温度持续异常对东亚初夏大气环流的影响[J].气象,2005,31(12): 10-17.

- [4] 杜云艳,周成虎,邵全琴,等. 东海区海表温度与中上层渔获量关系的时空分析[J]. 高技术通讯,2001,(2): 56-60.
- [5] 卢峰本,黄滢,周启强,等. 海水养殖的气象风险分析与预报[J]. 气象,2006,32(11): 113-117.
- [6] 韩玺山,袁国恩,赵彦. 气象卫星遥感在海温资源调查中的应用[J]. 气象,1993,19(5): 45-49.
- [7] 刘百桥,王华,王宏. 用 AVHRR 资料计算月平均海水表层温度场[J]. 海洋通报,1995,14(5): 24-28.
- [8] 李万彪,朱元竞,赵柏林. 气象卫星遥感西北太平洋海温的研究[J]. 气象学报,1997,55(1): 43-54.
- [9] 张春桂. 福建省近海区域海面表层温度的卫星遥感应用研究[J]. 国土资源遥感,1999,(1): 25-28.
- [10] 刘文. 试用 GMS 卫星多通道资料反演海表温度[J]. 气象,1997,23(11): 27-31.
- [11] 陈子通. 静止气象卫星反演海温及其分析技术方法的研究[J]. 热带气象学报,2001,17(3): 235-241.
- [12] 王其茂,林明森,郭茂华. HY-1 卫星海温反演的误差分析[J]. 海洋科学进展,2006,24(3): 355-359.
- [13] 覃志豪,高懋芳,秦晓敏,等. 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.
- [14] 毛克彪,覃志豪,王建明,等. 针对 MODIS 数据的大气水汽含量反演及 31 和 32 波段透过率计算[J]. 国土资源遥感,2005,(1): 26-29.
- [15] McMillin L M, Crosby D S. Theory and validation of the multiple window sea surface temperature technique[J]. J. Geophys. Res., 1984,(89): 3655-3661.
- [16] 李娜,孙凤琴,张彩云,等. 台湾海峡及其邻近海域 AVHRR 遥感 SST 的初步验证[J]. 厦门大学学报(自然科学版),2006,45(3): 383-387.
- [17] 王保华. 极轨气象卫星业务产品 SST 反演方法及精度检验[J]. 气象科技,2001,(1): 27-30.
- [18] Robinson I S, Donlon C J. Global measurement of sea surface temperature from space[J]. Global Atmos. Ocean Syst., 2003,9(1/2): 19-37.

张春桂等：利用MODIS多通道数据反演近海海表温度

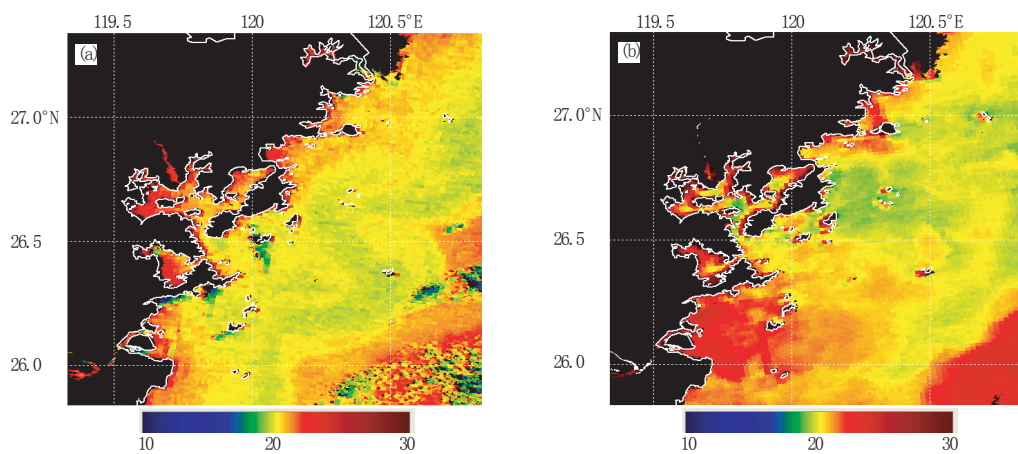


图4 福建近岸海域基于MODIS数据的SST业务监测产品
a 2003年5月26日； b 2004年5月10日