

西北太平洋部分海域 AVHRR、TMI 与 MODIS 遥感海表层温度的初步验证

孙凤琴^{1,2}, 张彩云^{1,2}, 商少平^{1,2}, 商少凌^{1*}

(1. 近海海洋环境科学国家重点实验室(厦门大学), 2. 厦门大学海洋学系, 福建 厦门 361005)

摘要: 选取[10~35°N, 110~165°E]的西北太平洋海域, 利用 2002 年 7 月~2005 年 12 月 Argo 浮标数据对 AVHRR/MODIS/TMI SST 的 daily(升轨)数据进行验证. 结果表明: AVHRR/MODIS/TMI daily SST 与 Argo 浮标 5~6 m 层温度总体的均方差 rms 在 0.6~0.9, 平均偏差 bias 在 -0.2~0.2, 平均绝对偏差 bias_abs 在 0.3~0.7. 这与三传感器全球范围的 SST 反演目标相当, 说明在本区域 SST 反演不存在显著偏差. 各遥感 SST 与浮标温度的差异存在季节变化, 夏季偏高, 很可能与夏季垂直混合较弱, 比对采用的实测水温与海表温度差距较大有关. 在 3 种遥感 SST 中, TMI SST 偏离实测值的程度最高, 且偏离范围较大. 作者认为这与该区域黑潮经过, 产生诸多涡旋和锋面, SST 时空变化剧烈而 TMI 空间分辨率较低有关. 本研究将为此西北太平洋海域的多源 SST 融合提供一个比较可靠的依据.

关键词: 海表层温度; 甚高分辨率红外辐射仪; 微波成像仪; 中分辨率成像光谱辐射计; 地转海洋学实时观测阵

中图分类号: P 731.1

文献标识码: A

文章编号: 0438-0479(2007)S1-0001-05

海表层温度 (Sea Surface Temperature, SST) 是表征海-气热量、动力和水汽交换的重要参量, 是气候变化、海洋营养盐、初级生产力和渔场分布的重要影响因子. 遥感海表层温度以其高时空分辨率、大空间覆盖度、长时间序列等优势已日益成为全球或局地海表层温度资料不可或缺的数据源. 目前遥感测量 SST 的传感器主要有红外传感器和微波传感器两种. 红外探测空间分辨率高 (~1 km), 有较长的使用历史 (>20 年), 不过其检测精度易受云、水汽和气溶胶的影响. 最常见的红外传感器有 AVHRR (Advanced Very High Resolution Radiometer) 和 MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer). AVHRR 是至今使用最长 (自 1985 年起)、应用最广泛的传感器, 而 MODIS 为新一代红外传感器, 较 AVHRR 在数据波段数目和数据应用范围、数据分辨率、数据接收和数据格式等方面都作了相当大的改进^[1]. 微波探测不受云的影响, 但空间分辨率较低 (~25 km), 对地表辐射较为敏感, 限制了其在近岸海区的应用, 其中 TMI (TRMM Microwave Imager) 产品的应用倍受关注. 鉴于不同传感器的优缺点和海洋在不同时空尺度变化的复杂过程, 很有必要综合运用这些多源遥感资

料, 取长补短, 建立一套准确可靠的、高时空分辨率的全球 SST 产品, 从而提高海洋观测和预报能力, 这也是“全球海洋同化实验”(Global Ocean Data Assimilation Experiment, GODAE) 计划^[2]的主要目标. 其中最基础的工作之一就是针对不同传感器反演的 SST 产品进行区域性的检验评估, 以确保他们之间的有效融合. 对单一或者两种传感器遥感 SST 的验证比对在国外不同海区已有广泛报道^[3-7], 但综合验证 AVHRR、MODIS 和 TMI SST 的工作至今仍不多见. 此类验证通常采用浮标数据进行, 而在中国海区浮标数据相对匮乏, 故本研究选择包括中国海在内的西北太平洋部分海域作为验证海区 (图 1), 对 AVHRR/MODIS/TMI 3 种传感器反演的 SST 与 Argo 浮标数据的一致性进行检验. 该海区主要受副热带高压和季风系统的影响, 是台风的高发区, 加上世界上第二暖流黑潮由该海域蜿蜒北上, 气候和水动力环境复杂多变, 具有独特性. 该区域遥感 SST 的验证是开展全球变化在中国海的区域响应研究的重要基础.

1 数据源与方法

1.1 遥感 SST

(1) AVHRR SST

AVHRR SST 源自 NASA JPL (National Aeronautics and Space Administration Jet Propulsion Laboratory) 数据中心 (<http://podaac.jpl.nasa.gov/>).

收稿日期: 2007-04-10

基金项目: 国家自然科学基金 (40376031, 40331004, 40521003), 863 计划 (2006AA09A302), 教育部创新群体计划, 厦门大学新世纪人才计划联合资助

* 通讯作者: slshang@xmu.edu.cn

本文所用数据为 Pathfinder SST 版本 5.0 中 daily 升轨的数据,分辨率约为 4 km. 根据 NASA 提供的 AVHRR 质量控制文件,分 0 级(最差)~7 级(最好),本文选取质量 4 级(含)以上的 SST 作为有效数据.

(2) MODIS SST

MODIS SST 源自 NASA 水色遥感网站 (<http://oceans.gsfc.nasa.gov/>). 本文所用的是(Aqua 卫星)版本 5 中 daily 升轨的数据,分辨率约为 4 km.

(3) TMI SST

TMI SST 源自 NASA 所支持的 Remote System Inc. (<http://www.ssmi.com/>). 本文所用的是版本 3 中 daily 升轨数据,分辨率 25 km.

1.2 Argo SST

Argo 浮标 SST 源自中国 ARGO 资料中心 (<http://www.Argo-cndc.org/>) 提供的延时模式数据. 选取时间从 2002 年 7 月至 2005 年 12 月,空间范围为 10~35 N, 110~165 E. 由于在目标海区,上层的数据以 5~6 m 层的居多,含浮标 0 m 层温度资料的仅 5 个浮标,数据量不足以开展有效的比对,故而参考 Marcello 等^[7]的做法,本文选取 Argo 浮标在深度 5~6 m 的温度建立实测数据集.

1.3 遥感与实测匹配数据集的生成和验证方法

遥感与实测匹配数据集的生成,必须考虑到空间与时间的匹配. 空间上,我们仅选取 Argo 测量点对应有效像素的遥感数据;时间上,筛选浮标实测时间与卫星过境时间同一天的数据组. 最终获得匹配数据集,其中 AVHRR 共 144 组,MODIS 共 311 组,TMI 共 640 组. 所有匹配数据点的位置如图 1 所示.

将匹配数据点分成四个季节(3~5 月为春季,6~8 月为夏季,9~11 为秋季,12~2 月为冬季),采用以

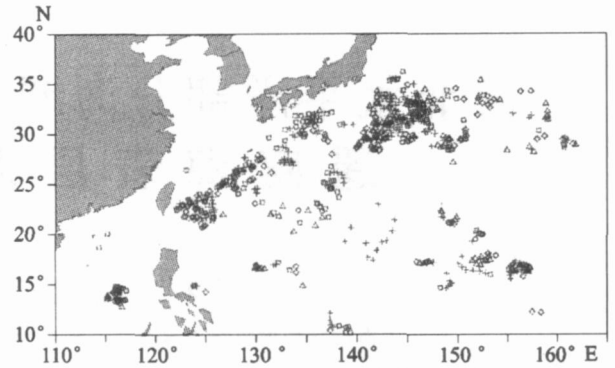


图 1 与遥感 SST 对比的浮标温度数据分布
○:春季; +:夏季; △:秋季; □:冬季

Fig. 1 Distribution of Argo data for comparison with remote sensing SST

下公式分别统计各季节遥感 SST 与 Argo SST 之间的平均偏差(bias)、平均绝对偏差(bais_abs)和均方差(rms):

$$bias = \frac{[a(i) - m(i)]}{n} \tag{1}$$

$$bias_abs = \frac{[|a(i) - m(i)|]}{n} \tag{2}$$

$$rms = \sqrt{\frac{[a(i) - m(i)]^2}{n}} \tag{3}$$

其中 a 指 AVHRR/MODIS/TMI SST, m 是 Argo 浮标温度, i 的范围从 1 ~ n, n 为匹配数据点数.

2 结果与讨论

2.1 遥感与实测温度的总体差异

图 2 所示为遥感 SST 对实测温度的散点分布,可以看出各点基本均匀地分布在 1◇1 线的周围,表明遥感与实测温度基本一致. 二者呈现显著线性相关(图 2),斜率在 0.98~1.03 之间,截距为 -0.6~

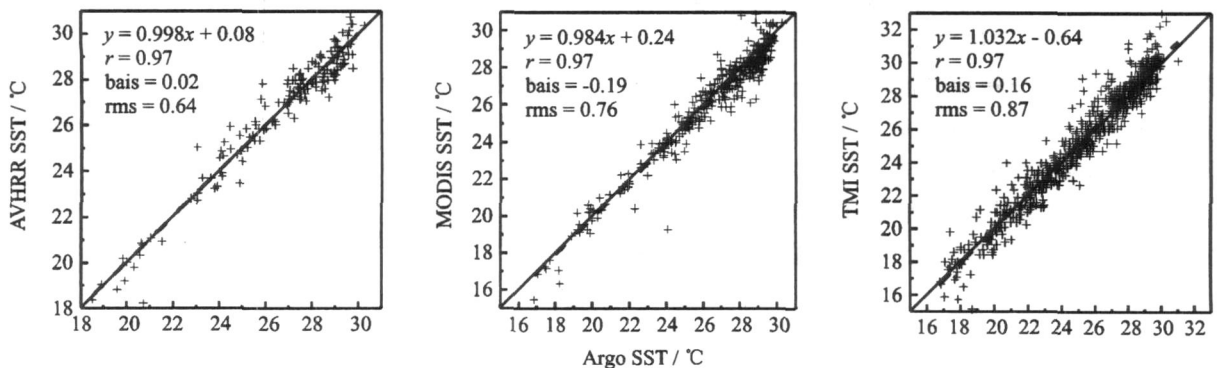


图 2 AVHRR/TMI/MODIS SST 与 Argo SST 所有数据的比较

图中:对角实线为 1◇1 线,虚线为线性拟合

Fig. 2 Scatter diagram of AVHRR/TMI/MODIS SST and Argo SST

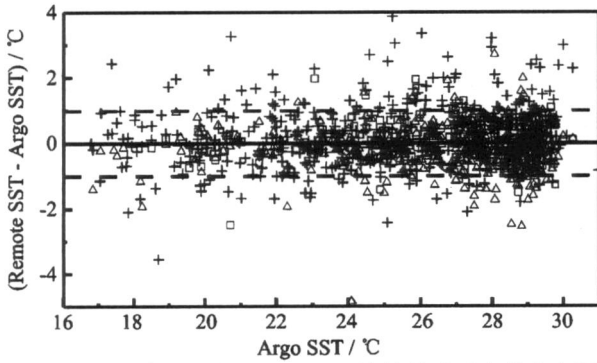


图3 各遥感 SST 与 Argo SST 的差异随温度的分布图
□:AVHRR-Buoy; △:MODIS-Buoy; +:TMI-Buoy

Fig. 3 Distribution of the difference between remote sensing SST and Argo SST

同时,rms 均在 0.6~0.9,bias 在 -0.2~0.2 之间;各传感器 SST 反演本身的目标 rms 约 0.5~0.7^[8-10].显然本研究海区 3 种遥感 SST 基本达到此标准,不存在显著偏差.直接计算每组遥感与实测温度数据的差减值,该值介于 -1~1 的数据点平均占总数据点的 86%,介于 -0.5~0.5 的数据点平均占总数据点的 56%.该值随温度的分布没有呈现一定的规律(图 3).

2.2 遥感与实测温度差异的季节变化

由表 1 分季节统计的结果看来,遥感与实测数据的差异,存在季节变化.无论是 AVHRR,还是 MODIS 或 TMI SST,与 Argo SST 的比较,其 bias 和

rms 均以夏季为最大,bias 介于 -0.2~0.3,rms 在 0.7~0.9 之间;在冬季为最小,bias 介于 -0.1~0,rms 在 0.4~0.8 之间.3 种遥感 SST 与 Argo SST 之间的相关系数 r 以冬季为最高,均大于 0.966,春季次之,夏季最低.其根本原因,首先在于遥感表皮与实测海水体温的差异^[11],且此差异存在季节变化^[12].本研究采用 5~6 m 层实测温度,我们对超出本研究海区范围 - 经纬度范围为 30~45°N,140~200°E 的区域 - 同时含有 0 m 和 5~6 m 层温度的 Argo 剖面数据进行了这两层水温差异的统计分析,发现冬季水体垂直分布较为均匀,上层 5 m 水体内的温度差异不大,其 bias 为 0,rms 仅为 0.02;而夏季 0~1 m 层海水增温很快,海水温度层化明显,0 m 与 5~6 m 层水温差异较大,其 bias 为 -0.6,rms 为 1.1.两种因素综合的结果,导致显著的遥感与实测温度差异的季节变化.

2.3 3 种遥感 SST 之间的比较

表 1 的结果同时表明,3 种遥感 SST 与实测数据的差异,程度不等.无论哪个季节均以 TMI SST 和 Argo SST 的 rms 为最大(0.7~1.0),AVHRR 和 MODIS 次之.遥感 SST 与 Argo SST 之间差值的范围和平均绝对偏差 bias_abs,同样以 TMI 为最大(最大范围在春季,-3.6~3.3,bias_abs 为 0.71).总之,TMI SST 偏离实测值的程度最高,且在较大的偏离范围内变化.而三者当中,AVHRR SST 的 rms 最小(<0.69)(除春季外);因此如果仅就偏离实测

表 1 三遥感 SST 与 Argo 浮标 SST 的比较统计结果*

Tab. 1 Difference Stat. between AVHRR/ MODIS/ TMI SST and Argo SST

季节	传感器	统计量/				匹配点数	相关系数	a	b
		差异范围	平均偏差	平均绝对偏差	均方差				
春季	AVHRR	- 2.5~1.3	- 0.12	0.52	0.69	39	0.98	1.061	- 1.65
	MODIS	- 1.9~2.0	- 0.07	0.49	0.66	72	0.98	1.006	- 0.21
	TMI	- 3.6~3.3	0.15	0.71	0.95	155	0.97	1.051	- 1.03
夏季	AVHRR	- 1.0~2.0	0.1	0.53	0.68	45	0.90	0.807	5.49
	MODIS	- 4.8~2.7	- 0.2	0.63	0.93	106	0.89	1.08	- 2.43
	TMI	- 2.4~3.9	0.34	0.68	0.94	206	0.93	1.032	- 0.54
秋季	AVHRR	- 1.5~1.5	0.08	0.51	0.63	44	0.91	0.83	4.76
	MODIS	- 1.9~1.6	- 0.31	0.54	0.69	96	0.93	0.946	1.18
	TMI	- 1.8~2.7	0.11	0.54	0.73	165	0.94	1.056	- 1.42
冬季	AVHRR	- 0.9~0.8	- 0.01	0.24	0.36	16	0.99	0.965	0.86
	MODIS	- 1.2~1.3	- 0.11	0.42	0.55	37	0.99	0.964	0.78
	TMI	- 2.1~3.2	- 0.04	0.58	0.81	114	0.97	0.956	0.97

*平均偏差: bias,平均绝对偏差: bias_abs,均方差: rms,相关系数: r; a、b.遥感 SST 和浮标温度线性拟合方程 $y = ax + b$ 中的斜率和截距.

数据的程度评估, AVHRR 在该区域是三者中最为理想的遥感 SST 数据源。

遥感与实测温度匹配点的时空不一致很可能是导致这一差异的主要原因。为了获取足够的样本数,我们将匹配时间窗口放大到 1 天,也就是说遥感与实测的时间差在 ± 24 h 的范围内;具体而言,Argo SST 的测量时间为浮标上浮或下沉测量经过 5~6 m 深度的时间,对所有浮标不统一,而各卫星升轨的过境时间过境时间除 MODIS(Aqua 卫星)约为每天 12:00~14:00 时(按北京时间),其他亦不确定。时间不完全同步会导致一定的差异。另一方面,Argo SST 为空间点的测量,而遥感 SST 则代表某像素点周围一定范围的平均;如 TMI 分辨率 25 km, SST 值代表像素点周围 $25 \times 25 \text{ km}^2$ 水域的平均海表温度。本研究海区有高温高盐的黑潮流经,存在诸多的气旋式涡或者反气旋式涡,锋面多发, SST 的时空变化剧烈^[13], 这个海洋学特征,对于 TMI,相对于较高分辨率(约 4.6 km)的 AVHRR 和 MODIS 而言,影响必然更为严重,从而导致 TMI 相对高的与实测温度的统计偏差。三者之中,仅有 MODIS SST 的 bias 在各个季节皆为负值,在总体上,低估于 Argo SST,然而偏差值不高,平均为 -0.2,目前尚难以找到出现这一现象的原因。

3 结 论

通过 2002 年 7 月~2005 年 12 月 Argo 浮标数据对西北太平洋海域 AVHRR/MODIS/TMI SST 的 daily(升轨)数据的验证,其结果表明:在本研究区域, AVHRR/MODIS/TMI 三传感器 SST 与 Argo 浮标 5~6 层温度总体上的差异 rms 在 0.6~0.9, bias 介于 -0.2~0.2 之间;这与各传感器 SST 反演本身的目标(rms 约 0.5~0.7)相当,不存在显著偏差。各遥感 SST 与浮标温度的差异在各个季节有所不同。主要原因有遥感表皮与实测海水体温的差异及这个差异存在季节变化等综合影响有关。在本验证中,较之 AVHRR 和 MODIS, TMI SST 偏离实测值的程度最高,且偏离范围较大。这与本区域黑潮流经,存在诸多的气旋式涡或者反气旋式涡,锋面多发, SST 的时空变化剧烈而 TMI 空间分辨率较低有关。鉴于本区域复杂的动力条件,三遥感 SST 与浮标现场温度的差异是基本一致的,因此对于本区域海洋温度的时空变动等方面,应该考虑结合红外传感器的较高空间分辨率、微波传感器的全天候工作能力和现场的垂直结构观测,以有效提高遥感温度数据的利用和对海洋的连续观测。

致谢:感谢中国 ARGO 资料中心提供 Argo 浮标观测资料, NASA JPL 及 Remote Sensing Systems 提供遥感数据。遥感数据的使用符合 NASA 关于科学研究应用数据协议的规定。

参考文献:

- [1] 刘忠, 凌峰, 张秋文. MODIS 遥感数据产品处理流程与大气数据获取[J]. 遥感信息, 2005(2): 52-57.
- [2] Donlon C J. The global ocean data assimilation experiment high resolution sea surface temperature pilot project strategy and implementation plan[C]//Marine Environment Unit. Isra, Italy: Joint Research Centre, 2001: 58.
- [3] Mathur A K, Panda T C, Agarwal V K. Validation of sea surface temperature derived from ERS-1/ATSR in Indian waters[J]. International Journal of Remote Sensing, 2002, 23(24): 5155-5163.
- [4] Ricciardulli L, Wentz F J. Uncertainties in sea surface temperature retrievals from space: Comparison of microwave and infrared observations from TRMM[J]. Journal of Geophysical Research, 2004, 109(C12013), doi: 10.1029/2003JC002247.
- [5] Guan L, Kawamura H. SST availabilities of satellite infrared and microwave measurements[J]. Journal of Oceanography, 2003, 59(2): 201-209.
- [6] Corlett G K, Barton I J, Donlon C J. The accuracy of SST retrievals from AATSR: An initial assessment through geophysical validation against in situ radiometers, buoys and other SST data sets[J]. Advances in Space Research, 2006, 37: 764-769.
- [7] Marcello J, Eugenio F, Hernandez A. Validation of MODIS and AVHRR/3 sea surface temperature retrieval algorithms[J]. Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2004. IGARSS 04. Proceedings. 2004, 2: 839-842.
- [8] Wentz F J, Gentemann C, Smith D, et al. Satellite measurements of sea surface temperature through clouds[J]. Science, 2000, 288(5467): 847-850.
- [9] Kilpatrick K A, Podesta G P, Evans R. Overview of the NOAA/NASA advanced very high resolution radiometer Pathfinder algorithm for sea surface temperature and associated matchup database[J]. Journal of Geophysical Research, 2001, 106(C5): 9179-9197.
- [10] Minnett P J, Brown O B, Key E L, et al. Sea surface temperature measurements from the Moderate-Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) on Aqua and Terra[J]. IEEE, 2004(7): 4576-4579.
- [11] Schluessel P, Emery W J, Grassl H, et al. On the bulk-skin temperature difference and its impact on satellite remote sensing of sea surface temperature[J]. Journal of Geophysical Research, 1990(95): 13341-13356.

- [12] 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.
- [13] 袁耀初,苏纪兰. 1995 年以来我国对黑潮及琉球海流的研究[J]. 科学通报,2000,45(22):2353-2356.

Primary Validation of AVHRR/ MODIS/ TMI SST for Part of the Northwest Pacific

SUN Feng-qin^{1,2}, ZHANG Cai-yun^{1,2},
SHANG Shao-ping^{1,2}, SHANG Shao-ling^{1*}

(1. State Key Laboratory of Marine Environmental Science(Xiamen University),

2. Dept. of Oceanography, Xiamen University, Xiamen 361005, China)

Abstract : We used Argo data during the period of July 2002 to December 2005 to validate the consistency of AVHRR/ MODIS/ TMI SST (Sea Surface Temperature) at daily scale in the region of [10 ~ 35 °N, 110 ~ 165 °E]. The statistic showed that between AVHRR/ MODIS/ TMI SST and Argo temperature at 5 ~ 6 m depth, their rms ranged from 0.6 ~ 0.9 °C and the bias was -0.2 ~ 0.2 °C. It was consistent with the accuracy of SST retrieval of 0.6 ~ 0.7 °C on global scale. However the differences between AVHRR/ MODIS/ TMI SST and Argo temperature varied in different seasons. TMI showed the most significant deviation from Argo data, which was probably resulted from its low resolution and the dynamic feature of SST in this specific region which had abundant eddies and fronts induced by the passage of Kuroshio. Further efforts for remote sensing SST merging in this region would be possible based on the result we presented.

Key words : Sea Surface Temperature, SST; Advanced Very High Resolution Radiometer, AVHRR; TRMM Microwave Imager, TMI; Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer, MODIS; Array for Real-time Geostrophic Oceanographic, Argo