

3种不同卫星遥感海温产品在南海台风过程中的差异对比

张培军^{1,2}, 周水华^{1,2}, 梁昌霞^{1,2}, 邢会斌^{1,2}

(1. 自然资源部南海预报减灾中心, 广东 广州 510310; 2. 自然资源部海洋环境探测技术与应用重点实验室, 广东 广州 510310)

摘 要: 针对3种不同卫星遥感海温产品(CRW SST、OSTIA SST和RSS SST)在不同台风影响期间对南海海域海表温度的表征能力进行了对比和评估。研究表明:3种卫星遥感产品均能捕捉到台风影响时海域海表温度的时空变化特征,CRW SST和OSTIA SST产品反映的南海海域海表温度时空特征变化的差异较小(均方根误差为0.22,相关系数为0.97),而RSS SST产品在台风过境后的局部海域显示出更大幅度的降温;CRW SST、OSTIA SST和RSS SST产品与浮标观测数据的均方根误差分别为1.27℃、1.32℃和1.00℃。结果表明,与其他两种卫星遥感海表温度产品相比,RSS SST产品更能反映台风过境期间南海海域海表温度的变化特征。

关键词: 海表温度;卫星遥感;南海;浮标观测;台风

中图分类号: P731.11 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-0239(2024)04-0011-10

0 引言

海表温度(Sea Surface Temperature, SST)是研究大洋环流、海气相互作用、台风预报和气候预测等领域的关键物理参数,SST产品在海洋渔业、海上救援和海洋军事活动等方面具有重要的应用价值。船测和浮标等传统的海温观测手段由于成本耗费大、空间覆盖率低,已经不能满足日益频繁的海上活动、海洋科学研究和海洋空间规划等需求。随着卫星遥感技术的发展,卫星遥感海温产品以其时空分辨率高、空间覆盖范围广、时间序列长等优势已成为全球或局地海温资料不可或缺的数据来源,被许多学者广泛应用于海洋内部垂向温度场重构^[1-6]、海温预报模式订正^[7-8]、珊瑚礁白化监测预警^[9-10]以及台风期海温变化特征^[11-12]等研究工作。

目前卫星遥感海温数据资料的种类较多,但不同数据由于遥感探测方式、空间分辨率以及数据融合方法等方面的差异,数据质量参差不齐。国内外学者利用现场观测资料对卫星遥感海温资料开展

了质量评估工作。一些学者针对某种特定的卫星遥感海温数据开展了准确性评估工作,GENTEMANN等^[13]基于1998—2001年的TAO/TRITON(Tropical Atmosphere Ocean / Triangle Trans - Ocean Buoy Network)浮标数据对热带测雨卫星(Tropical Rainfall Measuring Mission, TRMM)的微波成像仪(TRMM Microwave Imager, TMI)SST数据进行验证;KACHI等^[14]基于全球电信系统(Global Telecommunications System, GTS)浮标的SST数据对先进微波扫描辐射计(Advanced Microwave Scanning Radiometer 2, AMSR-2)的SST数据进行验证。另一些学者针对多种卫星遥感海温数据进行质量评估,孙凤琴等^[15]利用Argo浮标数据对西北太平洋海域甚高分辨率辐射计(Advanced Very High Resolution Radiometer, AVHRR)、中分辨率成像光谱仪(Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer, MODIS)和TMI SST这3种卫星遥感海温数据进行验证。李明等^[16]利用17年的南极走航观测数据对AVHRR、TMI和地球观测系统高级微波

收稿日期: 2023-06-16。

基金项目: 自然资源部海洋环境探测技术与应用重点实验室自主设立课题(MESTA-2020-C007);南海分局海洋科学技术局长基金资助项目(180109);自然资源部海洋环境探测技术与应用重点实验室自主设立课题(MESTA-2022-D010)。

作者简介: 张培军(1984-),女,工程师,博士,主要从事海洋环境数值预报模拟和模式检验等方面的研究。E-mail: zpj@hyyb.org

扫描辐射计(Advanced Microwave Scanning Radiometer for the Earth Observing System, AMSR-E)3种不同卫星遥感海温资料进行系统评估,分析了红外遥感SST与微波遥感SST的差别。蒋兴伟等^[17]分析了常用的AVHRR、AMSR+AVHRR、美国海军研究实验室的海军耦合海洋资料同化系统(Navy Coupled Ocean Data Assimilation, NCODA)、遥感系统(Remote Sensing Systems, RSS)、实时全球高分辨率产品(Real-time Global High Resolution, RTG-HR)和英国气象局研制的业务化海温-海冰分析系统(Operational SST and Sea Ice Analysis system, OSTIA)6种卫星遥感海温产品对海洋锋面区域的解析能力。赵洪臣等^[18]基于浮标、志愿观测船舶数据,开展了MODIS-Aqua、MODIS-Terra、AVHRR最佳插值版本(AVHRR-OI)、OSTIA和RTG这5种SST产品在中国近海及其邻近海域的质量评价研究。研究结果均表明,不同类型的卫星遥感海温产品在不同海域、不同时间段的适用性上存在一定的差异。

南海热带气旋活动较为频繁,华南沿岸是我国受台风影响最为严重的地区之一,SST预报的准确性对台风路径和强度预报等研究具有重要意义。目前评估不同遥感海温数据资料在台风过境期间解析能力的研究相对较少,王晨琦等^[19]利用中国近海浮标数据分析了OISST、OSTIA和RTG3套SST再分析资料在台风过境前后的差异,结果表明,OSTIA SST数据在高海况条件下能更真实地反映中国近海SST的基本状况,但该研究选取的台风过程发生在东海海域。本文基于现场浮标观测数据,以在南海粤西沿岸登陆的3个台风为例,分析应用较为广泛的珊瑚礁监测计划(Coral Reef Watch, CRW) SST、OSTIA SST和RSS SST这3种高分辨率的卫星遥感海温数据在南海海域台风过境期间时空变化的差异。

1 数据和方法

1.1 台风过程

本文选取在南海粤西海域登陆的3个台风作为研究对象,分别是1822号台风“山竹”、2107号台风“查帕卡”和2209号台风“马鞍”,台风基本信息、路

径等见图1和表1。2018年9月16日12时(北京时,下同),台风“山竹”的中心位于21.2°N,114.4°E的洋面上,中心最低气压为945 hPa(强台风级),16日17时台风登陆广东省江门市台山沿海。2021年7月20日14时,台风“查帕卡”的中心位于21.3°N,112.5°E的洋面上,中心最低气压为965 hPa(台风级),20日21时50分台风在广东省阳江市江城区沿海登陆,并于23日再次入海进入北部湾海域,24日台风在北部湾海域消散。2022年8月25日02时,台风“马鞍”的中心位于20.6°N,113.3°E的洋面上,中心最低气压为970 hPa(台风级),25日10时30分台风在广东省茂名市电白沿海登陆。

1.2 现场浮标观测数据

为了验证3种卫星遥感海温产品在台风过程中的准确性,本文利用南海粤西海域的锚系海洋浮标观测数据进行验证,浮标温度传感器位于水深1~2 m处,可用于对卫星遥感海温融合数据进行验证。该浮标位于3个台风的影响范围内,其中2107号台风“查帕卡”中心经过该浮标(见图1)。选取3个台风在粤西海域登陆前后为研究时段,分别为2018年9月11—21日、2021年7月15—25日和2022年8月20—30日,3次台风过程中浮标位置处最大降温幅度见表1。数据使用前需进行必要的质量控制和校正,包括检验采样时间的准确性、剔除奇异值、剔除浮标移位后的数据等。该数据为逐小时数据,根据研究需要对数据进行日平均处理。

1.3 卫星遥感海温数据

本文选取CRW SST、OSTIA SST和RSS SST3种高分辨率的卫星遥感海温数据,分析了它们在南海

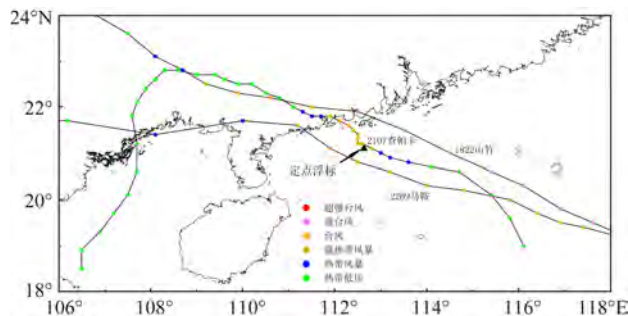


图1 浮标位置以及3个台风路径图

Fig.1 Location of buoy and tracks of 3 typhoons

表1 3个台风以及定点浮标最大降温幅度情况

Tab.1 Overview of 3 typhoons and maximal typhoon-induced SST cooling at the buoy position

台风编号和名称	生成源地	登陆地点	登陆时间	登陆时强度等级	定点浮标最大降温幅度/℃
1822号“山竹”	西太平洋	广东江门沿海	9月16日17时	强台风	2.7
2107号“查帕卡”	南海	广东阳江沿海	7月20日21时50分	台风	5.0
2209号“马鞍”	西太平洋	广东茂名沿海	8月25日10时30分	强热带风暴	2.0

海台风过境期间 SST 数据的差异。3 种数据的时间分辨率均为 1 d。

CRW SST 是由美国国家海洋和大气管理局 (National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA) 的国家环境卫星数据和信息服务中心 (National Environmental Satellite, Data, and Information Service, NESDIS) 组织开展的 CRW 计划形成的一种重要的珊瑚礁白化监测和评估遥感产品^[9]。该产品以最优插值算法为基础,融合了地球同步卫星 (Geostationary Satellite) 和极地运行环境卫星 (Polar Operational Environmental Satellite, POES) 的多种卫星遥感海温数据,由 NOAA、日本气象厅 (Japan Meteorological Agency, JMA) 和欧洲气象卫星应用组织 (European Organization for the Exploitation of Meteorological Satellites, EUMET-SAT) 3 家机构提供,其中地球同步卫星包括 GOES-E (Geostationary Operational Environmental Satellite-East)、GOES-W (Geostationary Operational Environmental Satellite-West)、MTSAT-2 (Multi-functional Transport Satellite-2) 和 MSG-3 (Meteosat Second Generation-3), 极地运行环境卫星包括 S-NPP (Suomi-National Polar-orbiting Partnership) 和 MetOp-B (Meteorological Operational Satellite-B)。选择夜间卫星数据可以消除太阳光照对 SST 造成的影响,避免受到太阳光污染,从而提高测量精度。时间范围为 2014 年至今,空间分辨率为 0.05° (约 5 km)。

OSTIA SST 是英国气象局提供的逐日海温分析资料,其利用三维变分同化算法融合了多个平台的微波、红外遥感数据和 GTS 实测数据,并进行了基于 EUMETSAT 的海冰密集度产品 OSI-SAF (Ocean and Sea Ice Satellite Applications Facility)、AATSR (Advanced Along Track Scanning Radiome-

ter) 数据和浮标数据的误差纠正。OSTIA SST 产品在输入 SST 数据时滤除了白天风速小于 6 m/s 的观测值,以消除白天海表升温带来的误差。OSTIA SST 资料的起始时间为 2006 年,空间分辨率为 0.05° (约 5 km)。

RSS SST 数据由全球海洋数据同化试验 (Global Ocean Data Assimilation Experiment, GODAE) 高分辨率海表温度项目提供的融合日平均海表温度数据 (Group for High Resolution SST, GHRSS), 空间分辨率为 0.09° (约 9 km), 时间范围为 2002 年至今,为定期更新的准实时数据。该产品以最优插值算法为基础,融合了能穿透云层的微波数据和空间分辨率较高的红外数据,其中,微波数据由 TMI、AMSR-E、AMSR-2、大气主要温室气体监测仪 (Greenhouse Gases Monitoring Instrument, GMI) 以及星载极化微波辐射计 WindSat 提供,红外数据由 Terra 卫星和 Aqua 卫星上搭载的 MODIS 传感器以及搭载于 NPP 卫星的 VIIRS 传感器 (VIIRS-NPP) 提供。

1.4 检验指标

本文采用均方根误差 (Root Mean Square Error, RMSE)、平均偏差 (Mean Error, ME) 和相关系数 (Correlation Coefficient, R) 分析 3 种卫星遥感海温数据之间的差异,并利用海洋观测浮标数据对 3 种卫星遥感 SST 产品进行检验。各指标的具体表达式为:

$$ME = \frac{1}{N} (O_i - P_i) \quad (1)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (O_i - P_i)^2} \quad (2)$$

$$R = \sum_{i=1}^N \frac{(O_i - \bar{O})(P_i - \bar{P})}{\sqrt{(O_i - \bar{O})^2} \sqrt{(P_i - \bar{P})^2}} \quad (3)$$

式中: O_i 和 P_i 分别表示两种不同卫星遥感 SST 数据, 或浮标观测海温数据与卫星遥感 SST 数据第 i 个样本; N 为样本个数; \bar{O} 和 \bar{P} 分别表示任意一种 SST 数据 N 个样本的均值。

2 结果与分析

2.1 台风影响下3种卫星遥感海温数据差异

本文选取在南海粤西海域登陆的3个台风(1822号台风“山竹”、2107号台风“查帕卡”和2209号台风“马鞍”), 分析 OSTIA SST、CRW SST 和 RSS

SST 3种卫星遥感海温产品在台风影响期间的空间分布差异。

图2a为2018年9月14日1822号台风“山竹”登陆前 OSTIA SST在南海海域的分布。如图所示, 台风“山竹”登陆前, 南海北部海域出现 $29 \sim 30^\circ\text{C}$ 的高温, 有利于台风强度的进一步增强, 台湾海峡附近海域的 SST 为 27°C 左右, 30°C 以上的高温分布在南海中部和西部海域。图2b和图2c分别为 CRW SST、RSS SST 与 OSTIA SST 的差值分布。由图可知, 台风登陆前两种产品与 OSTIA 的 SST 差值均在 1°C 以内, 3种卫星遥感产品的 SST 整体趋势基本一致。

图2d为9月16日台风“山竹”登陆后 OSTIA SST在南海海域的分布情况。由图可以看出, 台风

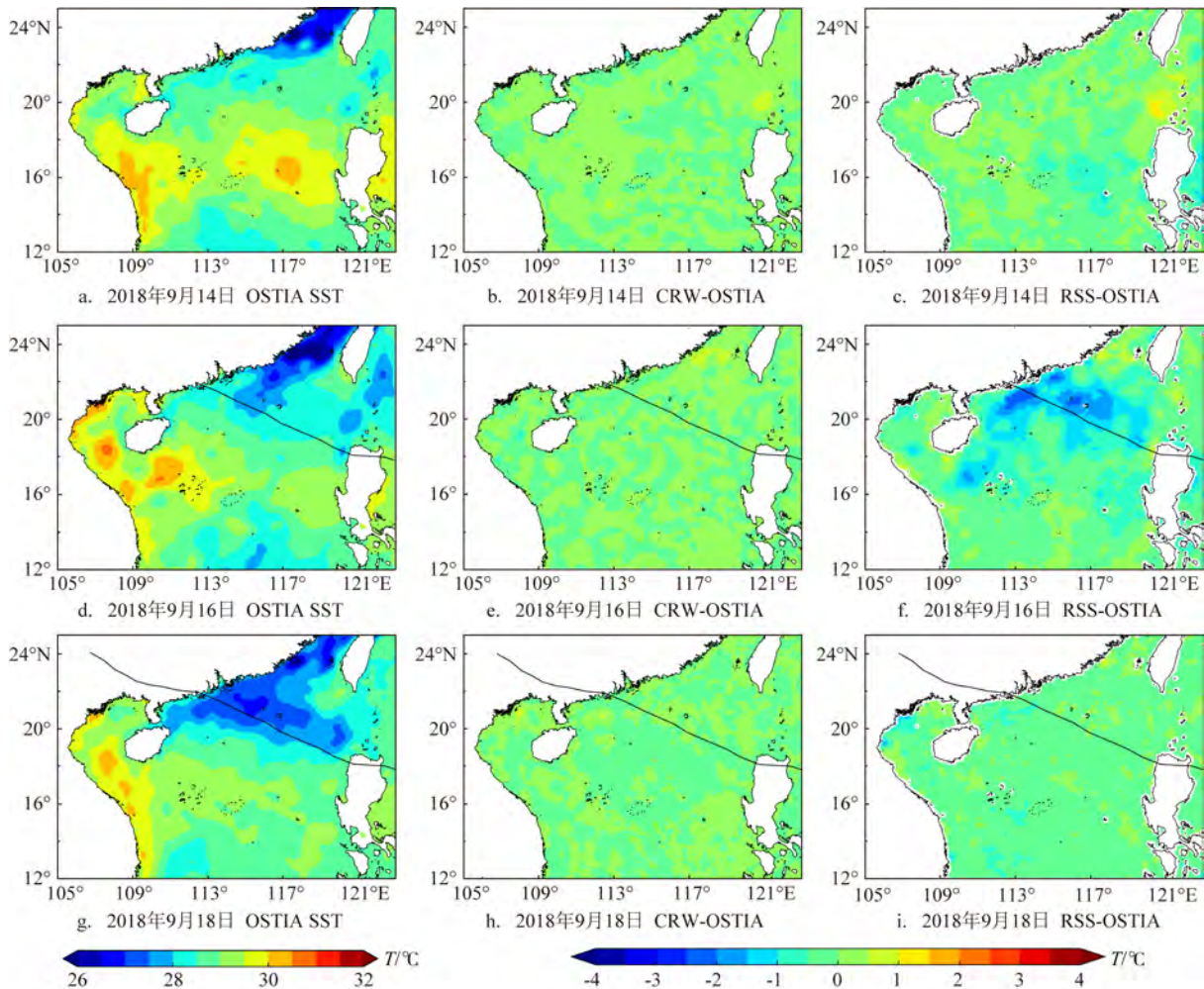


图2 1822号台风登陆前后 OSTIA SST 分布以及 CRW SST 和 RSS SST 的差值分布

Fig.2 Spatial distribution of OSTIA SST and its biases with respect to the other two SST products before and after the landing of the typhoon 1822

登陆后路径附近海域出现了约 1°C 的降温, 29°C 等温线南移到了南海中部。台风过境后, CRW 与 OSTIA 的 SST 变化表征基本一致(见图 2e), 但在台风路径两侧海域 RSS 与 OSTIA 的 SST 差值超过了 1°C (见图 2f)。这表明与其他两种产品相比, RSS 的 SST 在台风“山竹”过境后路径附近海域的降温幅度更大。

图 2g 显示在台风“山竹”登陆两天后的路径两侧海域, OSTIA 的 SST 降温范围进一步扩大, 但 RSS 和 CRW 与 OSTIA 的 SST 差异均在 1°C 以内(见图 2h、2i), 这表明在台风登陆两天后, 3 种卫星遥感产品 SST 的整体趋势基本一致, 差异不大。

2021 年 7 月 18 日 14 时, 2107 号台风“查帕卡”在南海北部海域生成。图 3a 为 2021 年 7 月 18 日南

海海域 OSTIA 的 SST 分布, 台风生成海域的 SST 达 30°C 左右, 有利于台风强度的进一步增强。7 月 20 日台风登陆后, 台风路径附近海域 OSTIA 的 SST 略有降低(见图 3d), 两天后, 经过路径附近海域的 SST 逐渐恢复到 30°C 左右(见图 3g)。

与台风“山竹”的情况类似, 在台风“查帕卡”登陆前、登陆后以及登陆后两天 CRW 与 OSTIA 的 SST 差值均在 1°C 以内, 对南海 SST 的表征基本一致(见图 3b、3e、3h)。在台风登陆前和登陆两天后, 大部分海域 RSS 与 OSTIA 的 SST 差异均在 1°C 以内(见图 3c、3i), 但台风登陆当天两种 SST 产品在粤西部分海域的差值大于 1°C (见图 3f), 与 OSTIA 的 SST 相比, RSS SST 显示出的降温幅度较大。

2022 年 8 月 23 日台风“马鞍”进入南海海域, 图

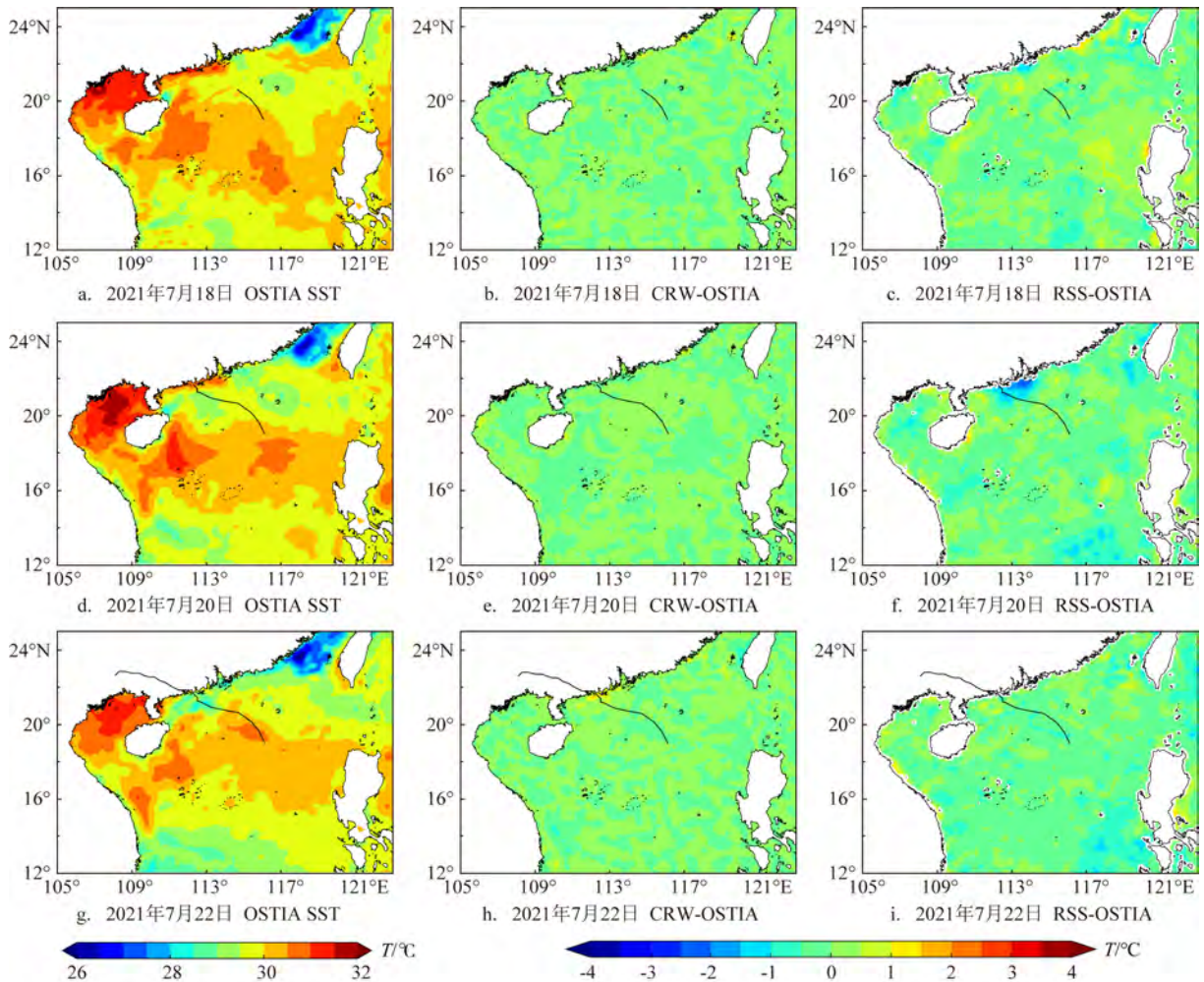


图3 2107号台风登陆前后 OSTIA SST 分布以及 CRW SST 和 RSS SST 的差值分布

Fig.3 Spatial distribution of OSTIA SST and its biases with respect to the other two SST products before and after the landing of the typhoon 2107

4a 为当天 OSTIA 的 SST 分布,从图中可以看出粤西海域的 SST 达 30°C 左右,有利于台风的进一步增强。8月25日台风登陆后 OSTIA 的 SST 在台风路径附近海域降低 1°C 左右(见图4d),两天后,海南岛东部海域的 SST 逐渐恢复到 30°C 左右(见图4g)。

与台风“山竹”和台风“查帕卡”类似,在台风“马鞍”登陆前、登陆后以及登陆后两天 CRW 与 OSTIA 的 SST 差值均在 1°C 以内,对南海 SST 的表征基本一致(见图4b、4e、4h)。台风登陆前和台风登陆两天后大部分海域 RSS 与 OSTIA 的 SST 差异均在 1°C 以内(见图4c、4i),但台风登陆当天北部湾部分海域两种 SST 产品的差值大于 1°C (见图4f),与 OSTIA 的 SST 相比,RSS 的 SST 降温幅度较大。

以上研究表明,3种卫星遥感 SST 产品均能在

一定程度上反映出台风过境前后 SST 先降温后回温的变化特征,其中 RSS SST 产品在台风过境后部分海域的降温幅度大于其他两种产品。为进一步检验3种卫星遥感 SST 产品对台风过程响应的差异性,选取位于粤西海域海洋观测浮标处的 SST 变化序列进行统计分析。时间范围包括2018年9月11—21日、2021年7月15—25日和2022年8月20—30日,即3个台风过境前后的时间段。统计分析结果表明(见表2),OSTIA 和 CRW 产品的 SST 对粤西海域的表征基本一致,两者具有较好的相关性,平均偏差为 0.09°C ,均方根误差为 0.22°C ,相关系数为 0.97。RSS 的 SST 与其他两种卫星遥感产品的 SST 具有一定的差异,均方根误差分别为 0.54°C 和 0.60°C ,相关系数分别为 0.89 和 0.87。

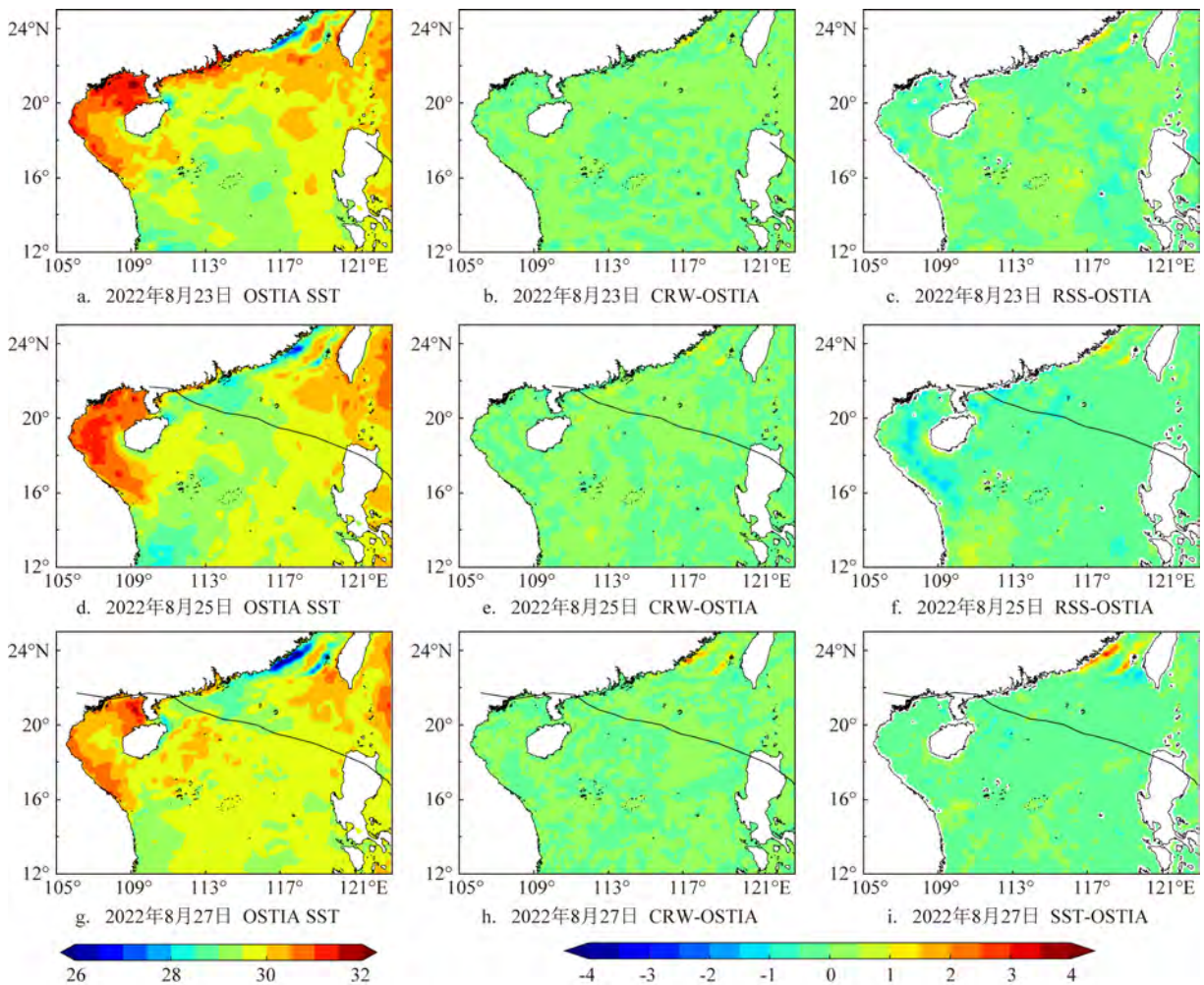


图4 2209号台风登陆前后 OSTIA SST 分布以及其与 CRW 和 RSS SST 产品的差值分布

Fig.4 Spatial distribution of OSTIA SST and its biases with respect to the other two SST products before and after the landing of the typhoon 2209

表2 浮标点位置处3种卫星遥感SST产品统计结果

Tab.2 Statistical results among satellite-derived SST datasets at the buoy position

对比产品	平均 偏差/℃	均方根 误差/℃	相关系数
CRW SST与RSS SST	0.16	0.54	0.89
RSS SST与OSTIA SST	-0.25	0.60	0.87
OSTIA SST与CRW SST	0.09	0.22	0.97

2.2 卫星遥感海温数据验证

为了评估台风影响期间3种卫星遥感SST产品数据的准确性,本文选用南海粤西海域的近海浮标观测数据对其进行验证。表3表明,RSS的SST与浮标观测的海温平均偏差、均方根误差最小,分别为0.69℃和1.00℃;CRW SST产品次之,平均偏差为0.85℃,均方根误差为1.27℃;OSTIA SST产品最差,平均偏差为0.94℃,均方根误差为1.32℃。RSS、CRW和OSTIA的SST与浮标观测海温的相关系数分别为0.89、0.83和0.84。

表3 3种卫星遥感SST产品与浮标观测的平均偏差、均方根误差及相关系数

Tab.3 Mean bias, root mean square error and correlation coefficient between the three satellite-derived SST datasets and the buoy observation

参数	产品名称		
	CRW SST	RSS SST	OSTIA SST
平均偏差/℃	0.85	0.69	0.94
均方根误差/℃	1.27	1.00	1.32
相关系数	0.83	0.89	0.84

图5为1822号台风“山竹”、2107号台风“查帕卡”和2209号台风“马鞍”登陆前后,3种卫星遥感SST产品与浮标观测海温的对比时间序列。从图5a可以看出,1822号台风“山竹”影响期间,浮标观测海温较3种卫星遥感的SST偏低,台风过境后一天,即9月17日定点浮标处的最低温度为25.7℃,降温幅度约为2℃。RSS的SST在9月16日台风登陆当天的最低值为26.2℃,台风过境后预报的降温幅度约为2.7℃,而其他两种卫星遥感SST产品的降温幅度较小,与浮标观测的海温数据差异较大。

图5b和图5c表明,在2107号台风“查帕卡”和

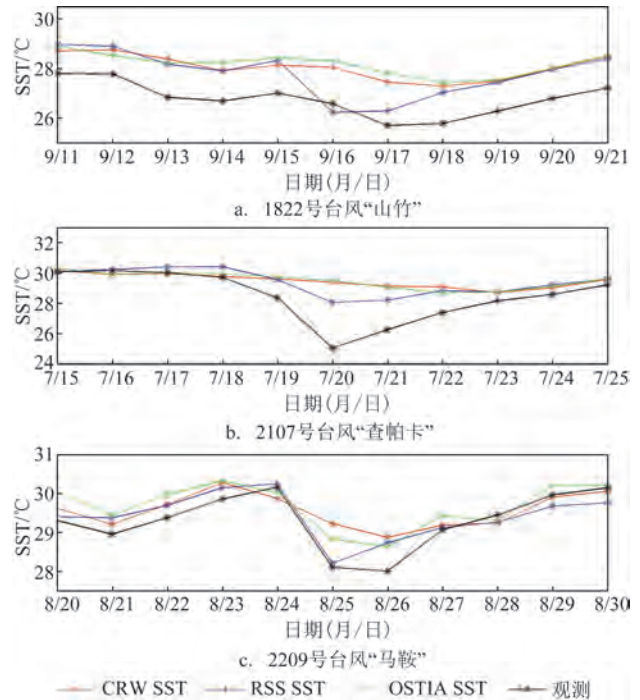


图5 3种卫星遥感SST产品与浮标观测海温的时间序列

Fig.5 Time series of the three satellite-derived SST products and the buoy data

2209号台风“马鞍”过境前后,3种卫星遥感SST产品与浮标观测的海温变化基本一致,差异较小。台风“查帕卡”过境当天,浮标观测海温出现了5℃的降温,最低温度为25℃;RSS的SST也出现降低但降温幅度较小;其他两种卫星遥感SST产品未出现明显的降温现象。3种卫星遥感SST产品在台风“马鞍”过境后均出现了降温现象,浮标观测海温在8月26日出现最低温度28℃(见图5c),RSS的SST在8月25日出现最低温度28.2℃,其他两种卫星遥感SST产品的最低温度与观测最低温度相差约0.6℃,但最低温度的出现时间与观测相同。

以上分析表明,在南海粤西海域,RSS SST产品优于OSTIA SST和CRW SST产品,能够较为真实地反映台风过境前后该海域的SST变化特征。由图5可以看出,台风“查帕卡”和“马鞍”过境后海洋观测浮标SST的日变化降温幅度大于台风“山竹”。这可能是因为海洋观测浮标位于台风“山竹”路径的左侧、台风“马鞍”路径的右侧,而台风“查帕卡”路径几乎穿过海洋观测浮标,在台风风应力的强迫作用下,强风夹卷使得台风路径右侧海域的垂直混合更强,造成台风右侧SST的降温幅度最大^[20]。

进一步利用珠江口外海海域和粤东海域两个浮标,考察1822号台风“山竹”影响期间3种卫星遥感SST产品在南海其他海域的差异。珠江口外海海域浮标位于台风路径左侧,粤东海域浮标位于台风路径右侧。时间范围仍取2018年9月11—21日,即与本文1822台风“山竹”的研究时段保持一致。图6为1822号台风“山竹”登陆前后,珠江口外海海域和粤东海域的浮标观测海温与3种卫星遥感SST产品的时间序列。统计结果表明,CRW SST、RSS SST和OSTIA SST产品与浮标观测的海温均方根误差分别为0.39℃、0.18℃和0.45℃,相关系数分别为0.83、0.97和0.81。研究结果进一步验证了在台风影响期间,RSS SST产品对南海海域表层海温的解析能力优于其他两种卫星遥感产品这一结论。

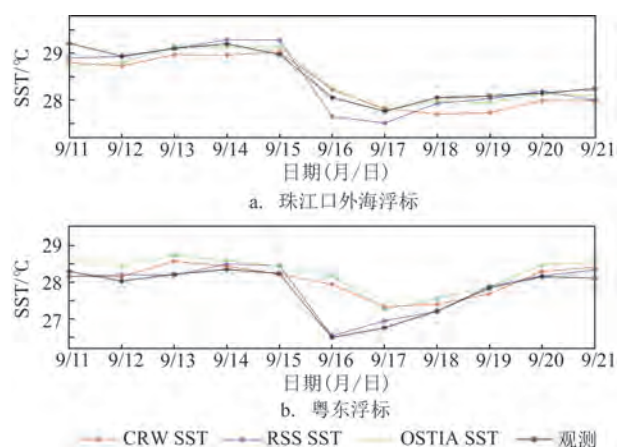


图6 1822号台风影响期间3种卫星遥感SST产品与浮标观测海温的时间序列

Fig.6 Time series of the three satellite-derived SST products and the buoy data during the 1822 typhoon period

3 结论

本文针对3种应用广泛的卫星遥感SST产品(CRW SST、RSS SST和OSTIA SST),对其在1822号台风“山竹”、2107号台风“查帕卡”和2209号台风“马鞍”影响期间的南海海域SST的解析能力进行对比分析,同时基于南海粤西海域的海洋浮标观测数据,对比检验了3个台风过境前后3种卫星遥感SST产品在南海近海区域的可靠性。结论如下:

①3种卫星遥感产品对台风过境前、过境时和过境后南海海域SST的变化都具有一定的重现能

力。这其中,CRW SST产品和OSTIA SST产品具有较高的相关性和一致性,两种产品在粤西海域的均方根误差为0.22℃,相关系数为0.97;RSS SST产品与其他两种卫星遥感SST产品的结果在台风过境时具有一定的差异,在台风过境后的部分海域RSS的SST与其他两种SST产品的冷偏差超过1℃。

②3种卫星遥感SST产品与南海粤西近海浮标观测数据的对比结果表明,RSS的SST与浮标观测的海温平均偏差、均方根误差最小,分别为0.69℃和1.00℃,相关系数为0.89,优于其他两种卫星遥感SST产品。因此,采用RSS SST产品研究南海海域台风影响期间的SST变化特征更具有可信度。

OSTIA SST产品采用了变分算法并融合了多种微波、红外遥感以及GTS实测数据,产品质量与仅采用融合多种卫星观测遥感数据的CRW SST产品基本相同。CRW SST产品采用夜间卫星数据以消除太阳光照对SST的影响,RSS SST产品采用了简单的日增温模型来考虑卫星遥感昼夜观测的SST数据,虽然台风影响期间云层覆盖时间较长,但日间海温观测数据同样具有一定价值,这可能是RSS SST产品在台风影响期间更能反映SST变化的一个重要因素。

参考文献:

- [1] CHU P C, FAN C W, LIU W T. Determination of vertical thermal structure from sea surface temperature[J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 2000, 17(7): 971-979.
- [2] FOX D N, TEAGUE W J, BARRON C N, et al. The modular ocean data assimilation system (MODAS)[J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 2002, 19(2): 240-252.
- [3] GUINEHUT S, LE TRAON P Y, LARNICOL G, et al. Combining Argo and remote-sensing data to estimate the ocean three-dimensional temperature fields-a first approach based on simulated observations[J]. Journal of Marine Systems, 2004, 46(1-4): 85-98.
- [4] 王喜冬, 韩桂军, 李威, 等. 利用卫星观测海面信息反演三维温度场[J]. 热带海洋学报, 2011, 30(6): 10-17.
WANG X D, HAN G J, LI W, et al. Reconstruction of ocean temperature profile using satellite observations[J]. Journal of Tropical Oceanography, 2011, 30(6): 10-17.
- [5] WU X B, YAN X H, JO Y H, et al. Estimation of subsurface temperature anomaly in the North Atlantic using a self-organizing map neural network[J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 2012, 29(11): 1675-1688.
- [6] LIU L, PENG S Q, HUANG R X. Reconstruction of ocean's

- interior from observed sea surface information[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2017, 122(2): 1042-1056.
- [7] 韩玉康, 余丹丹, 申晓莹, 等. HYCOM 模式 SST 的预报误差订正[J]. *海洋预报*, 2018, 35(3): 76-80.
- HAN Y K, YU D D, SHEN X Y, et al. Study on the correction of SST prediction of HYCOM[J]. *Marine Forecasts*, 2018, 35(3): 76-80.
- [8] 张培军, 周水华, 梁昌霞. 基于卫星遥感海温数据的南海 SST 预报误差订正[J]. *热带海洋学报*, 2020, 39(6): 57-65.
- ZHANG P J, ZHOU S H, LIANG C X. Study on the correction of SST prediction in South China Sea using remotely sensed SST[J]. *Journal of Tropical Oceanography*, 2020, 39(6): 57-65.
- [9] LIU G, HERON S, EAKIN C, et al. Reef-scale thermal stress monitoring of coral ecosystems: new 5-km global products from NOAA coral reef watch[J]. *Remote Sensing*, 2014, 6(11): 11579-11606.
- [10] 孙旋, 蔡玉林, 索琳琳, 等. 基于 SST 的珊瑚礁白化监测技术综述[J]. *国土资源遥感*, 2018, 30(2): 21-28.
- SUN X, CAI Y L, SUO L L, et al. Review of coral reef bleaching monitoring technology based on SST[J]. *Remote Sensing for Land & Resources*, 2018, 30(2): 21-28.
- [11] 杨晓霞, 唐丹玲. 台风引起南海海面降温的位置变化特征[J]. *热带海洋学报*, 2010, 29(4): 26-31.
- YANG X X, TANG D L. Location of sea surface temperature cooling induced by typhoon in the South China Sea[J]. *Journal of Tropical Oceanography*, 2010, 29(4): 26-31.
- [12] 杨元建, 洗桃, 孙亮, 等. 连续台风对海表温度和海表高度的影响[J]. *海洋学报*, 2012, 34(1): 71-78.
- YANG Y J, XIAN T, SUN L, et al. Impacts of sequential typhoons on sea surface temperature and sea surface height in September 2008[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2012, 34(1): 71-78.
- [13] GENTEMANN C L, WENTZ F J, MEARS C A, et al. In situ validation of tropical rainfall measuring mission microwave sea surface temperatures[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2004, 109(C4): C04021.
- [14] KACHI M, NAOKI K, HORI M, et al. AMSR2 validation results [C]//2013 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Melbourne, VIC, Australia: IEEE, 2013: 831-834.
- [15] 孙凤琴, 张彩云, 商少平, 等. 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[J]. *厦门大学学报(自然科学版)*, 2007, 46(S1): 1-5.
- SUN F Q, ZHANG C Y, SHANG S P, et al. Primary validation of AVHRR/MODIS/TMI SST for part of the Northwest Pacific[J]. *Journal of Xiamen University (Natural Science)*, 2007, 46(S1): 1-5.
- [16] 李明, 张占海, 刘骥平, 等. 利用南极走航观测评估卫星遥感海表面温度[J]. *海洋学报*, 2008, 30(3): 16-27.
- LI M, ZHANG Z H, LIU J P, et al. Evaluation of satellite-based sea surface temperature using in situ measurements from Chinese Antarctic Expeditions[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2008, 30(3): 16-27.
- [17] 蒋兴伟, 奚萌, 宋清涛. 六种遥感海表温度产品的比对分析[J]. *海洋学报*, 2013, 35(4): 88-97.
- JIANG X W, XI M, SONG Q T. A comparison analysis of six sea surface temperature products[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2013, 35(4): 88-97.
- [18] 赵洪臣, 刘永学, 周兴华, 等. 基于志愿观测船舶和浮标数据的 SST 日产品质量评价研究[J]. *海洋科学进展*, 2016, 34(4): 462-473.
- ZHAO H C, LIU Y X, ZHOU X H, et al. Quality evaluation of SST daily products based on VOS and buoy measurements[J]. *Advances in Marine Science*, 2016, 34(4): 462-473.
- [19] 王晨琦, 李响, 张蕴斐, 等. 3套不同的 SST 再分析数据与中国近海浮标观测的对比研究[J]. *海洋学报*, 2020, 42(3): 118-128.
- WANG C Q, LI X, ZHANG Y F, et al. A comparative study of three SST reanalysis products and buoys data over the China offshore area[J]. *Haiyang Xuebao*, 2020, 42(3): 118-128.
- [20] WADA A. Numerical simulations of sea surface cooling by a mixed layer model during the passage of typhoon Rex[J]. *Journal of Oceanography*, 2005, 61(1): 41-57.

Comparison of three satellite-derived SST products during typhoon processes in the South China Sea

ZHANG Peijun^{1,2}, ZHOU Shuihua^{1,2}, LIANG Changxia^{1,2}, XING Huibin^{1,2}

(1. South China Sea Marine Forecast and Hazard Mitigation Center, Ministry of Natural Resource, Guangzhou 510300, China; 2. Key Laboratory of Marine Environment Survey Technology and Application, Ministry of Natural Resource, Guangzhou 510300, China)

Abstract: Three sets of satellite-derived SST products (CRW SST, OSTIA SST and RSS SST) are compared and evaluated during typhoon processes in the South China Sea. The results show that all three products can capture

the spatial-temporal variation of SST in typhoon-affected sea area. The difference between the CRW and OSTIA products is small (root mean square error is $0.22\text{ }^{\circ}\text{C}$, correlation coefficient is 0.97), and the local SST in the RSS product decreases significantly after typhoon process. The root mean square errors of the CRW, OSTIA and RSS products with respect to buoy data are $1.27\text{ }^{\circ}\text{C}$, $1.32\text{ }^{\circ}\text{C}$ and $1.00\text{ }^{\circ}\text{C}$, respectively. In summary, the RSS product performs best on SST variance during typhoon processes in the South China Sea.

Key words: sea surface temperature; satellite remote sensing; South China Sea; buoy observation; typhoon