

研究论文

多源星载辐射计 SST 数据对比分析

李宇恒¹, 孙伟富^{2*}, 曹凯翔², 孟俊敏², 张 杰²

(1. 山东科技大学 测绘科学与工程学院, 山东 青岛 266590; 2. 自然资源部 第一海洋研究所, 山东 青岛 266061)

摘要: 基于 2018 年 4 种红外辐射计 (MODIS-Aqua, MODIS-Terra, VIIRS 和 AVHRR) 的 SST 数据和 3 种微波辐射计 (GMI, WindSat 和 AMSR2) 的 SST 数据, 分析了 7 种星载辐射计 SST 数据的全球覆盖情况, 利用 Argo 数据对 7 种辐射计 SST 数据进行了真实性检验, 并开展了微波产品、红外产品和 Argo 的交叉比对分析。结果表明: VIIRS SST 数据的覆盖率、有效覆盖天数均高于 MODIS-Aqua, MODIS-Terra 和 AVHRR; AMSR2 微波辐射计 SST 数据的覆盖率和有效覆盖天数均高于 GMI 和 WindSat; 4 种红外辐射计 SST 数据与 Argo 浮标数据的平均偏差在 $-0.27\sim 0\text{ }^{\circ}\text{C}$, 均方根误差小于 $0.76\text{ }^{\circ}\text{C}$, 其中 VIIRS 数据质量最好; 3 种微波辐射计 SST 数据与 Argo 浮标数据的平均偏差在 $-0.04\sim 0.22\text{ }^{\circ}\text{C}$, 均方根误差小于 $0.88\text{ }^{\circ}\text{C}$, 其中 AMSR2 绝对偏差、标准偏差和均方根误差均小于其他 2 个微波辐射计数据。AMSR2 和 VIIRS 的 SST 数据交叉对比发现, AMSR2 与 APDRC Argo, VIIRS 与 APDRC Argo 的平均偏差分别小于 0.15 和 $-0.20\text{ }^{\circ}\text{C}$, 标准偏差分别小于 0.52 和 $0.60\text{ }^{\circ}\text{C}$; AMSR2 与 VIIRS 平均偏差在 $-0.23\sim -0.10\text{ }^{\circ}\text{C}$, 标准偏差小于 $0.41\text{ }^{\circ}\text{C}$, 两者具有较高的一致性。

关键词: SST; Argo 浮标; 红外辐射计; 微波辐射计

中图分类号: P731; TP79

文献标识码: A

文章编号: 1671-6647(2021)01-0045-17

doi: 10.3969/j.issn.1671-6647.2021.01.006

引用格式: LI Y H, SUN W F, CAO K X, et al. Comparison analysis of SST data from multi-source satellite radiometer[J]. Advances in Marine Science, 2021, 39(1): 45-61. 李宇恒, 孙伟富, 曹凯翔, 等. 多源星载辐射计 SST 数据对比分析[J]. 海洋科学进展, 2021, 39(1): 45-61.

海表温度 (Sea Surface Temperature, SST) 是研究海洋的重要参数之一, 是全球气候变化的关键指标, 广泛应用于气候变化监测、大气模拟等方面研究^[1]。监测 SST 的分布和时空变化规律, 对理解海洋温度升高对全球环境变化有重要意义^[2]。目前, 获取 SST 的方式有现场观测和卫星遥感两种方式, 其中遥感探测又分为红外遥感和微波遥感。基于浮标、科考船等获取的实测温度资料, 不足以支撑全球范围内大尺度、长时间序列、连续的 SST 时空变化分析。卫星遥感数据以其覆盖面积广, 连续、实时、全天候的观测等优势, 在 SST 时空变化分析上发挥着重要的作用, 是目前全球海洋 SST 研究的重要技术手段。

SST 红外传感器主要包括先进甚高分辨率辐射计 (Advanced Very High Resolution Radiometer, AVHRR), 中等分辨率辐射计 (Moderate-resolution Imaging Spectroradiometer, MODIS) 和可见光红外辐射计组合仪 (Visible Infrared Imaging Radiometer, VIIRS) 等; SST 微波传感器主要包括 Windsat, 全球降水测量微波成像仪 (GPM Microwave Imager, GMI) 和高级微波扫描辐射计 2 (Advanced Microwave Scanning Radiometer 2, AMSR2) 等^[3]。SST 红外遥感获取的 SST 空间分辨率高, 但是易受到云和气溶胶等的影响;

收稿日期: 2019-12-03

资助项目: 国家重点研发计划项目——基于卫星组网的海洋战略通道与战略支点环境安全保障决策支持系统研发与应用 (2017YFC1405600) 和海洋气候数据集成与分析 (2016YFA0600102); 全球变化与海气相互作用专项——东印度洋 IND-YGST04 区块海洋环境参数遥感调查 II 期 (GASI-02-IND-YGST2-04), 西太平洋 PAC-YGST04 区块海洋环境参数遥感调查 II 期 (GASI-02-PAC-YGST2-04) 和南海 SCS-YGST04 区块海洋环境参数遥感调查 II 期 (GASI-02-SCS-YGST2-04)

作者简介: 李宇恒 (1996—), 男, 硕士研究生, 主要从事多源遥感 SST 融合方面研究。E-mail: liyuheng134516@163.com

* **通信作者:** 孙伟富 (1983—), 男, 助理研究员, 博士, 主要从事海洋遥感产品研制与分析方面研究。E-mail: sunweifu@fio.org.cn

(王佳实 编辑)

SST 微波遥感相比红外遥感,可以克服云和气溶胶的影响,但是其数据空间分辨率较低,且在近岸海域由于陆地信号的干扰易产生噪声^[4]。

对于 SST 产品的精度估计和对比分析,国内外的专家学者做了大量的工作;针对红外辐射计 SST 数据(简称红外 SST 数据)的精度验证,Barton 和 Pearce^[5]将全球成像仪(The Global Imager,GLI)、AVHRR、先进的沿轨扫描辐射计(The Advanced Along Track Scanning Radiometer,AATSR)和 MODIS 数据与 Argo 浮标数据进行真实性检验,发现标准偏差均优于 0.60 °C;Tu 等^[6]使用船测和浮标数据评价 VIIRS SST 精度,验证结果表明 VIIRS 数据的精度较高,均方根误差介于 0~0.60 °C;张精英等^[7]基于 Argo 浮标数据对 MODIS-Aqua、MODIS-Terra 和 VIIRS 三种红外 SST 数据进行精度评定,结果表明北极地区红外 SST 数据的误差普遍高于全球总体水平,且 VIIRS 在北极的覆盖率、有效观测天数及与浮标的匹配结果为 3 种红外辐射计中为最优;奚萌等^[8]基于 Argo 数据对 AVHRR、MODIS-Terra 和 MODIS-Aqua 进行精度评价,结果表明,三者的平均偏差分别为-0.07,-0.14 和-0.15 °C,均方根误差小于 0.80 °C,3 种红外 SST 数据之间的平均偏差均±0.10 °C,均方根误差小于 0.60 °C;刘伊格等^[9]利用 Argo 数据从时间和空间尺度对 VIIRS 进行检验分析,白天数据接近 Argo 数据,夏季偏差大于冬季。

针对微波辐射计 SST 数据(简称微波 SST 数据)的精度验证,Stammer 等^[10]对热带降雨观测卫星(Tropical Rainfall Measuring Mission,TRMM)微波成像仪(TRMM Microwave Imager,TMI)进行了精度评定,平均偏差为 0.18 °C,标准偏差为 0.54 °C;Gentemann 等^[11]基于 TAO/TRITON 对 TMI 进行精度评定,平均偏差为-0.07 °C,标准偏差为 0.57 °C;Chelton 和 Wentz^[12]基于 TMI 数据对 AMSR-E 进行验证,平均偏差为 0.06 °C,标准偏差为 0.56 °C;奚萌等^[13]利用 Argo 浮标数据对 2013 年和 2014 年 3 个微波辐射计海表温度产品(AMSR2,TMI 和 WindSat)进行精度评定,发现 AMSR2 的微波 SST 数据质量比 TMI 和 WindSat 的海表温度数据更接近 Argo 数据;孙伟富等^[14]基于 Argo 浮标数据对 AMSR2,GMI,Windsat 和海洋二号卫星(HY-2A RM)等星载微波辐射计数据进行精度评价,结果表明北极地区误差均大于全球平均水平,AMSR2 数据精度较好。

目前,研究主要集中在区域性红外辐射计或微波辐射计 SST 数据的精度分析,较少系统针对全球范围星载辐射计观测能力的评价。本文针对 2018 年红外辐射计(MODIS,VIIRS 和 AVHRR)和微波辐射计(AMSR2,GMI 和 WindSat)SST 数据,研究各卫星 SST 数据的全球覆盖情况,利用 Argo 数据评估 SST 产品的精度,并进行微波产品、红外产品和 Argo 数据的交叉比对分析,以研究红外辐射计和微波辐射计的 SST 遥感观测能力。

1 研究数据与方法

1.1 卫星数据

1.1.1 红外辐射计数据

本研究所使用的 MODIS-Aqua,MODIS-Terra 和 NPP VIIRS 红外 SST 数据,来自美国国家航空航天局(National Aeronautics and Space Administration, NASA)数据网站 OceanColor Web 发布的每日 SST 数据(<https://oceandata.sci.gsfc.nasa.gov/>);AVHRR SST 数据来源于 NODC(National Oceanographic Data Committee of the Netherlands)。MODIS 是搭载在 NASA 发射的 Terra(EOS AM)和 Aqua(EOS PM)卫星上的传感器,MODIS-Aqua 数据由 NASA 自 2002-07-04 开始生产发布,MODIS-Terra 数据由 NASA 自 2000-02-24 开始生产发布至今。两颗星相互配合每 1~2 天可重复观测整个地球表面,刈幅宽度为 2 330 km^[15];VIIRS 是 NPP(the Suomi National Polar-orbiting Partnership)卫星上的传感器,NPP 发射于 2011-10-28,有 22 个光谱波段,扫描刈幅宽度为 3 040 km,该数据由 NASA 自 2012-01-02 开始生产发布^[16];AVHRR 是 NOAA 系列气象卫星上搭载的传感器,从 1979 年 TIROS-N 卫星发射以来,持续进行着对地观

测任务,包含可见光、近红外和热红外,扫描刈幅为 2 800 km^[17]。选用 2018 年上述 4 种 SST 数据对全球红外辐射计的遥感观测能力进行研究,数据的空间分辨率为 4 km(表 1)。

表 1 红外辐射计数据

Table 1 Satellite infrared radiometer data

卫星传感器	轨道倾角/(°)	数据	SST 时/空分辨率
MODIS-Aqua	98.2	白天、夜间	每日/4 km
MODIS-Terra	98.2	白天、夜间	每日/4 km
VIIRS	98.7	白天、夜间	每日/4 km
AVHRR	98.7	白天、夜间	每日/4 km

1.1.2 微波辐射计数据

本研究选用 AMSR2,GMI 和 WindSat 卫星遥感 SST 数据对全球微波辐射计的遥感观测能力进行研究(表 2)。AMSR2 搭载于日本宇宙航空研究开发机构(Japan Aerospace Exploration Agency,JAXA)的水循环变动观测卫星(Global Change Observation Mission-Water1,GCOM-W1)上;GMI 搭载于全球降水观测计划(Global Precipitation Measurement,GPM)卫星上,观测刈幅 931 km;WindSat 搭载于 Coriolis 卫星平台上,这些微波辐射计均具备 SST 探测的频段^[18]。遥感系统(Remote Sensing System,RSS)提供了 AMSR2,GMI 和 WindSat 的每日 SST 数据产品。

表 2 微波辐射计数据

Table 2 Satellite microwave radiometer data

卫星传感器	轨道倾角/(°)	轨道	SST 时/空分辨率
Coriolis Windsat	98.7	升轨、降轨	每日/0.25°
GCOM-W1 AMSR2	98.0	升轨、降轨	每日/0.25°
GPM GMI	65.0	升轨、降轨	每日/0.25°

1.1.3 Argo 浮标数据

Argo 是由多个自由浮标组成的全球浮标阵列,用于测量海洋 2 000 m 以内的温度和盐度,相邻的 2 个浮标之间的间隔约 300 km,测量周期为 10 d,通过卫星将获取的海洋数据传送至数据接收站^[19]。截至 2019-10-10 由国际 Argo 计划倡议建设的全球 Argo 实时海洋观测网中活跃浮标总数达 3 851 个。

本研究根据卫星数据的时间范围,使用 2018 年全年的全球 Argo 实测温度数据验证红外和微波 SST 数据的精度。由于浮标在 0~1 m 的数据资料较少,不足以开展有效的统计分析,因而参照张精英^[7]、孙伟富等^[14]和 Marcello 等^[15]的做法,选取海洋 0~10 m 深的温度数据与辐射计 SST 数据进行匹配验证,经筛选共获的 157 454 个可利用的 Argo 数据(图 1)。

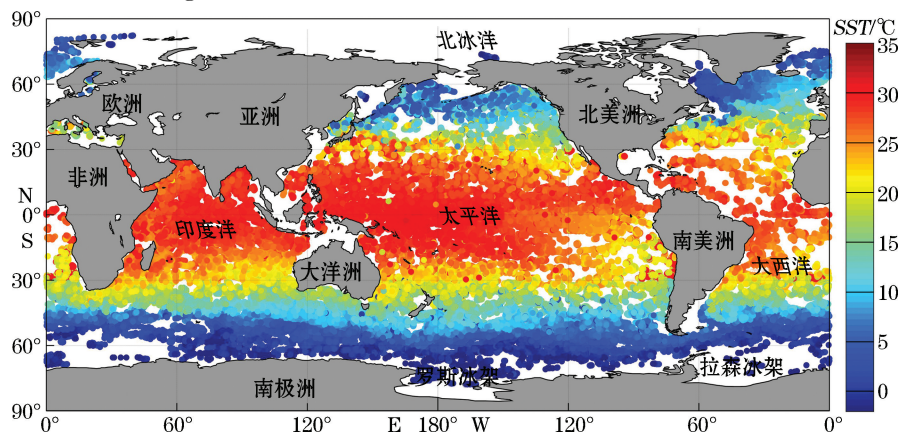


图 1 2018 年全球 Argo 实测 SST 数据分布

Fig.1 Global distribution of the Argo-measured SST data in 2018

1.1.4 Argo 网格产品数据

亚洲太平洋数据研究中心(Asia Pacific Data Research Center, APDRC)从美国全球 Argo 资料中心(Global Data Assembly Centre, GDAC)获取每日 Argo 实测数据并生成多种数据产品。APDRC 产品处理方法包括:水平网格化,使用最优插值的方法将数据网格化成空间分辨率为 1° 的产品,该方法会对缺失的数据进行插值,因此海洋中所有的网格点都有数据值;垂直插值,Argo 浮标通常测量海表面以下 2 000 m 至 5 m 处的离散温度值,APDRC 将这些数据内插至“标准”深度水平^[20]。

本文将开展红外和微波 SST 数据的交叉比对分析,考虑到红外和微波 SST 数据的覆盖范围不一致,且与 Argo 散点数据匹配的时空窗口不同,不能保证红外和微波与 Argo 散点数据的匹配结果在同一位置,因此采用 APDRC 生产的 Argo 月均 SST 网格产品(简称 APDRC Argo)海面(0 m)的 SST 数据作为基准,进行红外月均 SST 数据、微波月均 SST 数据和 APDRC Argo 的交叉比对。海面(0 m)的 APDRC Argo SST 网格数据如图 2 所示。

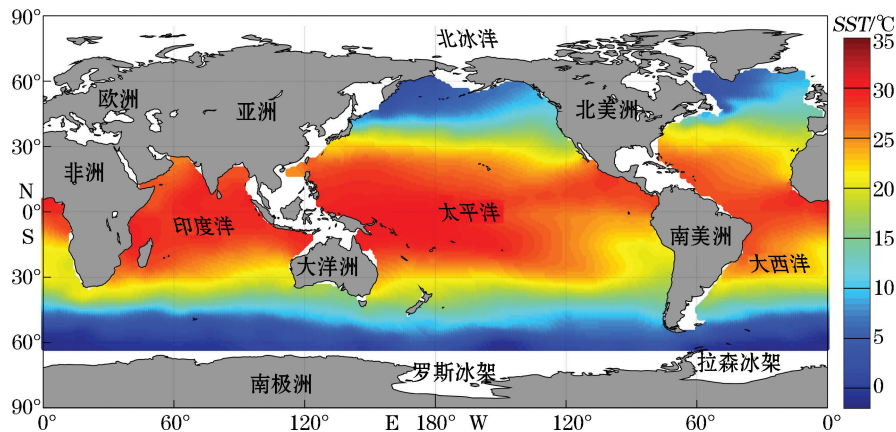


图 2 2018 年全球 APDRC Argo 实测 SST 数据分布

Fig.2 Global distribution of Argo SST data provided by APDRC 2018

1.2 研究方法

1.2.1 质量控制与数据匹配

红外 SST 数据和微波 SST 数据在与 Argo 数据匹配之前进行质量控制,根据卫星数据的质量标记,选取 MODIS-Aqua、MODIS-Terra 和 VIIRS 质量标记为 0(标记范围为 0~7,其中 0 代表质量最好)以及 AVHRR 质量标记为 7(标记范围为 0~7,其中 7 代表质量最好)的数据,提取 $-2.00 \sim 45.00$ °C 范围内的数据。由于红外 SST 数据量少,导致匹配结果数据相应较少,不足以支撑统计分析,本文参照孙伟富等^[14]、张精英等^[7]的方法,数据匹配时,红外时间窗口设置为 ± 12 h,选用 0.125° 的空间窗口;微波 SST 数据选择 ± 1 h 的时间窗口、 0.25° 的空间窗口。根据 3 Sigma 原则,当数据样本足够大,平均偏差(*bias*) ± 3 倍标准偏差(*std*)范围内的数据置信度水平可达到 99.73%,所以将 *bias* $\pm 3std$ 范围外的数据认为是大误差数据,对其进行剔除^[21]。

1.2.2 精度评估

基于 2018 年 Argo 数据对红外 SST 数据和微波 SST 数据进行精度评价。本文对辐射计的 SST 数据评价的指标包括平均偏差(*bias*)、绝对偏差(*bias_abs*)、标准偏差(*std*)、均方根误差(*rmse*)以及相关系数(*r*)。平均偏差是用来评价 Argo 数据与卫星数据的系统偏差,绝对偏差可以说明系统偏差的数据情况,标准偏差可以说明 Argo 数据与卫星数据的偏差的离散程度,均方根误差用来评价卫星数据相对于实测数据的精度,相关系数可以展现单星 SST 的精密度^[4],计算公式如下:

$$bias = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (A_i - B_i), \quad (1)$$

$$bias_abs = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (|A_i - B_i|), \quad (2)$$

$$std = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N [(A_i - B_i) - (A - B)]^2}{N}}, \quad (3)$$

$$rmse = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (A_i - B_i)^2}, \quad (4)$$

$$r = \frac{\sum_{i=1}^N [(A_i - \bar{A}) - (B_i - \bar{B})]}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (A_i - \bar{A})^2 \sum_{i=1}^N (B_i - \bar{B})^2}}, \quad (5)$$

式中, N 为 Argo 浮标数据与卫星数据匹配的数据总数; A_i, B_i 分别为在第 i 个 Argo 浮标数据与卫星数据的匹配点; \bar{A}, \bar{B} 分别为 Argo 浮标数据与卫星数据匹配结果的平均值。

2 辐射计 SST 数据时空覆盖

2.1 红外辐射计 SST 数据时空覆盖

2.1.1 覆盖率

本文选取 2018 年的 MODIS-Aqua、MODIS-Terra、AVHRR 和 VIIRS 红外辐射计 SST 数据,开展全球每日卫星有效 SST 数据覆盖率研究,红外辐射计逐日 SST 覆盖率是指每日全球有效 SST 网格点的总量占全球海洋网格点总量的比重。由 2018 年红外 SST 逐日全球海洋覆盖率(图 3)可知,2018 年白天 MODIS-Aqua 和 MODIS-Terra 的覆盖率整体趋势基本一致且差异较小,在 12% 左右波动; AVHRR 覆盖率为 6% 左右波动; VIIRS 覆盖率较高,呈现先增后减的变化,最大值出现在第 216 天,达到 21%。产生差异的主要原因: VIIRS 的扫描幅宽较大且 SST 产品的云检测算法一定程度上减少了误判成云的概率^[22]; 夏季极地海冰融化使 VIIRS 能够观测到更广的范围; 2018 年夜间 MODIS-Aqua、MODIS-Terra 和 VIIRS 覆盖率整体趋势基本一致且差异较小,在 15% 附近稳定波动, AVHRR 覆盖率低于 5%。

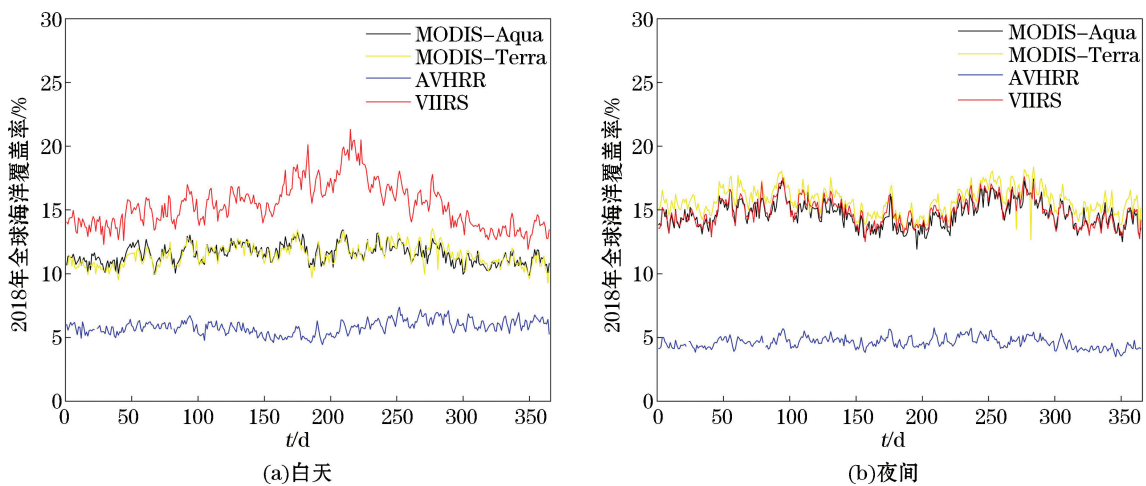


图 3 2018 年红外 SST 数据逐日全球海洋覆盖率

Fig.3 Percentage of global ocean coverage by the satellite infrared SST data in 2018

2.1.2 有效观测天数

图 4 为 4 种红外辐射计 SST 数据的有效天数统计结果。由图 4 可见,中低纬度海域以及大陆沿岸观测天数较多,极地观测到的天数较少;红外辐射计白天观测到的范围均大于夜间,白天 VIIRS 的观测范围更广,夜间观测范围 4 个数据基本一致;VIIRS 扫描幅宽大于其他辐射计,能够获取更多的信息,全年观测到的最大天数 VIIRS 高于其他红外辐射计,白天最高有效观测天数为 216 d,夜间的最高有效观测天数为 246 d。

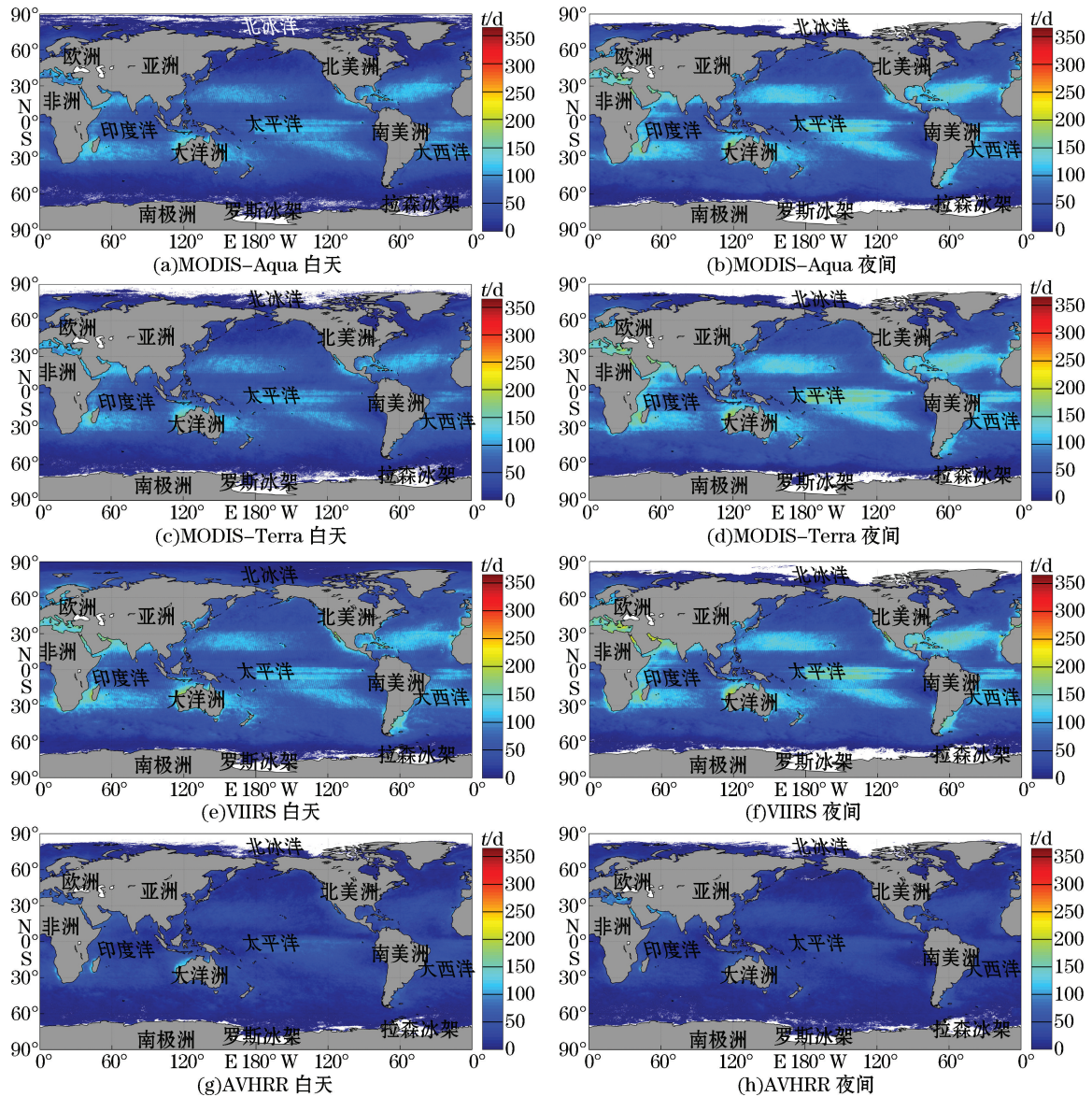


图 4 2018 年红外 SST 数据有效观测天数

Fig.4 Number of days with valid infrared SST observations Observations in 2018

2.2 微波辐射计 SST 数据时空覆盖

2.2.1 覆盖率

选取 2018 年的 WindSat, GMI 和 AMSR2 微波辐射计 SST 数据,开展逐日卫星有效 SST 数据覆盖率研究,微波辐射计逐日 SST 覆盖率是指每日全球有效 SST 网格点的总量占全球海洋网格点总量的比重。由 2018 年

微波 SST 逐日全球海洋覆盖率(图 5)可知,2018 年 GMI 和 AMSR2 升轨覆盖率相对稳定,AMSR2 覆盖率最高,在 40%~50%波动,GMI 覆盖率约在 35%~40%;GMI 降轨覆盖率为 37%附近稳定波动,AMSR2 降轨覆盖率呈现先减后增的趋势,总体覆盖率为 35%~45%;2018 年 WindSat 出现数据残缺,导致 SST 数据逐日覆盖率较低、波动较大且出现了多个极端值;GMI 由于受到轨道倾角的限制,升降轨逐日覆盖率小于 AMSR2。

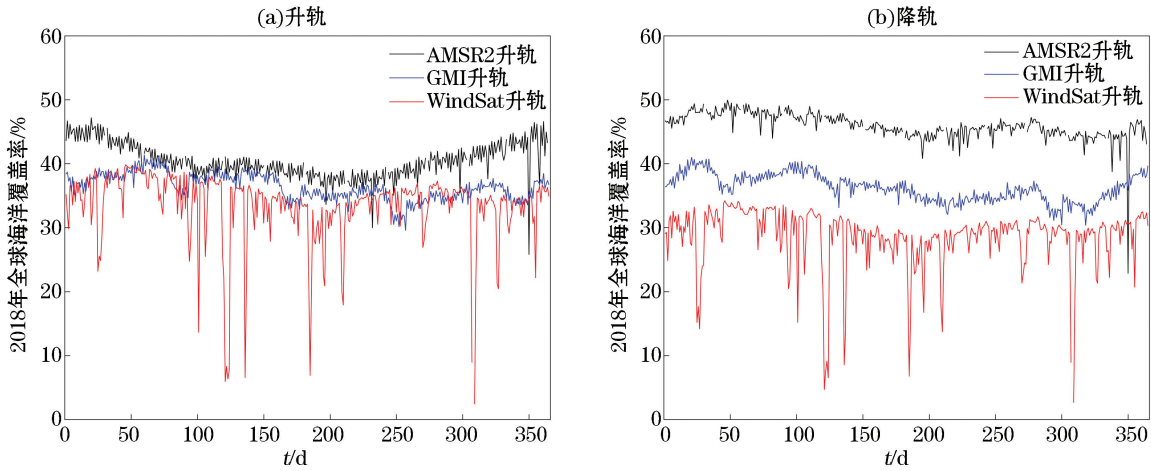


图 5 2018 年微波 SST 数据逐日全球海洋覆盖率

Fig.5 Percentage of global ocean coverage by the satellite microwave data in 2018

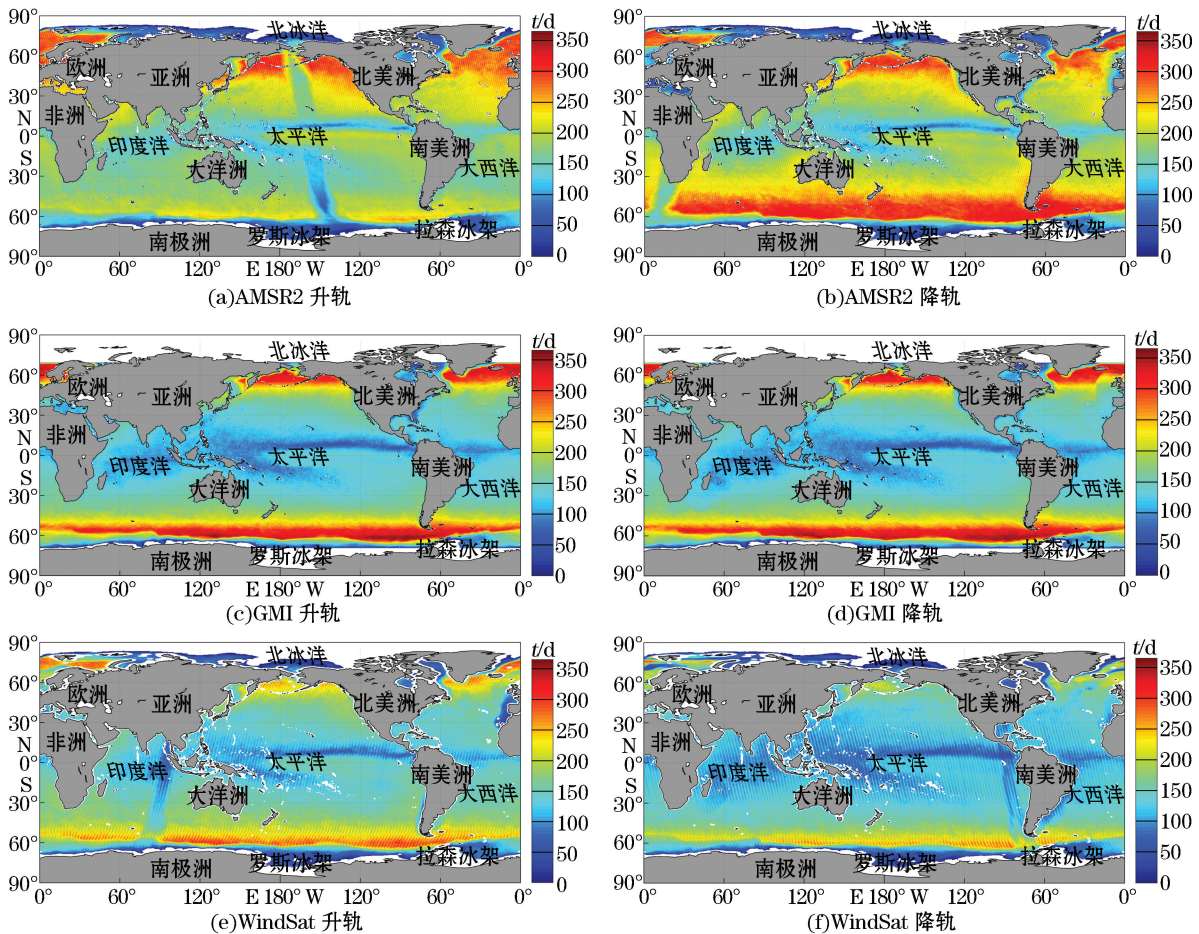


图 6 2018 年微波 SST 数据有效观测天数

Fig.6 Number of days with valid microwave SST observations in 2018

2.2.2 有效观测天数

利用 2018 年 AMSR2、GMI 和 WindSat 微波辐射计 SST 数据,进行有效天数的统计分析,结果见图 6,可以看出,全球覆盖天数反映了 3 种微波辐射计 SST 数据的全年覆盖情况,南北纬 $30^{\circ}\sim 60^{\circ}$ 海域有效观测天数较多,低纬度及近岸海域观测天数较少;AMSR2 与 WindSat 覆盖范围基本一致,GMI 受到轨道倾角的限制,无法覆盖到南北纬 67° 以上的区域;总体有效覆盖天数 AMSR2 较高,覆盖范围较广,WindSat 的全球有效覆盖天数较低;受到赤道洋流和降雨的影响,各微波辐射计在太平洋低纬度海域有效观测天数均在 50 d 左右。

4 辐射计 SST 产品精度评估

4.1 红外辐射计精度评估

由红外 SST 数据与 Argo 实测数据的匹配评估结果(表 3)可见:VIIRS 的平均偏差和均方根误差分别为 -0.07 和 0.65 $^{\circ}\text{C}$,小于其他 3 个辐射计数据;AVHRR 和 VIIRS 白天均方根误差高于夜间,MODIS-Aqua 和 MODIS-Terra 白天均方根误差低于夜间;4 种红外 SST 数据的白天和夜间的平均偏差均为负偏差,且白天平均偏差优于夜间,夜间标准偏差要小于白天。SST 数据与 Argo 浮标数据的相关系数均高于 0.994,表明 4 种辐射计数据与实测数据均有较好的一致性。

表 3 红外辐射计白天、夜间 SST 的误差统计

Table 3 Error statistics of daytime and nighttime SST of satellite infrared radiometer

红外辐射计	统计类型	匹配点数目/个	平均偏差/ $^{\circ}\text{C}$	绝对偏差/ $^{\circ}\text{C}$	标准偏差/ $^{\circ}\text{C}$	均方根误差/ $^{\circ}\text{C}$	相关系数
AVHRR	白天	7 109	-0.19	0.48	0.66	0.69	0.995 2
	夜间	5 707	-0.36	0.48	0.56	0.66	0.996 2
	全天	12 816	-0.27	0.48	0.62	0.68	0.995 6
VIIRS	白天	7 946	0.06	0.41	0.68	0.68	0.996 8
	夜间	6 226	-0.26	0.41	0.58	0.63	0.996 9
	全天	14 172	-0.08	0.41	0.65	0.66	0.996 7
MODIS Aqua	白天	15 013	-0.02	0.48	0.75	0.75	0.994 7
	夜间	15 798	-0.39	0.52	0.66	0.77	0.996 3
	全天	30 811	-0.21	0.50	0.73	0.76	0.995 3
MODIS Terra	白天	15 344	-0.14	0.46	0.70	0.72	0.995 8
	夜间	16 064	-0.33	0.50	0.68	0.76	0.996 3
	全天	31 408	-0.24	0.48	0.70	0.74	0.996 0

由红外 SST 数据与 Argo 实测数据的匹配结果分布情况(图 7)可见:1)4 个红外辐射计的匹配结果的空间分布基本一致,误差区间主要是在 $-1.00\sim 0.50$ $^{\circ}\text{C}$,多为负偏差;2)由于极地地区环境和天气恶劣,红外辐射计 SST 数据和 Argo 实测数据稀少,导致匹配结果稀少且偏差较大;3)黑潮、湾流和大西洋经向翻转环流等都会对卫星 SST 数据产生影响,导致偏差的出现。

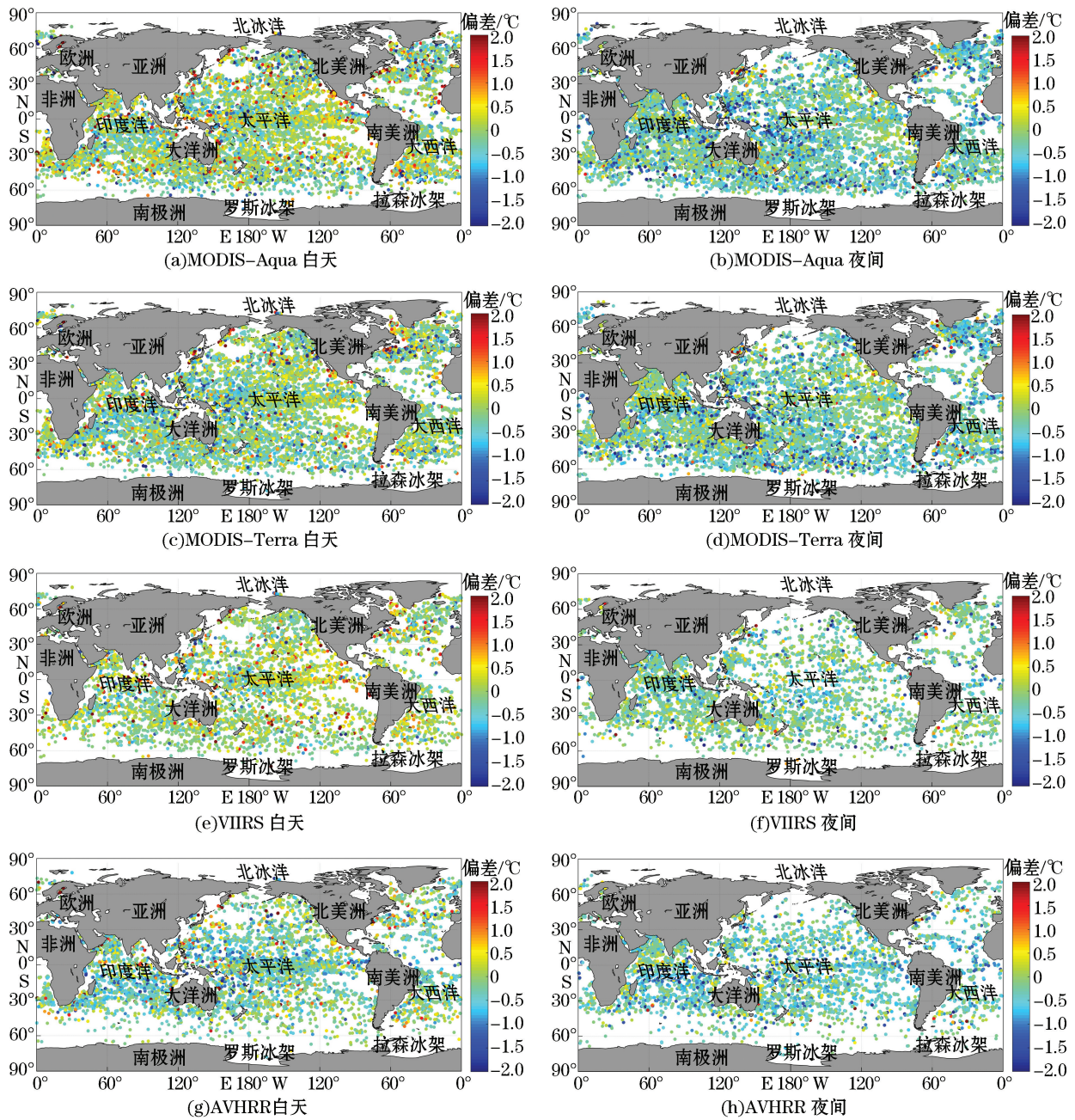


图7 2018年全球红外SST数据与Argo匹配结果

Fig.7 Global distribution of match-ups between satellite infrared radiometer SST data and Argo measurements in 2018

由图8可见,红外SST数据白天和夜间平均偏差与标准偏差随纬度的变化,由于极地Argo数据少,匹配点纬度最多达南北纬80°附近。4个红外辐射计SST数据的平均偏差和标准偏差在高纬度地区随纬度变化波动较大,受黑潮、湾流和北大西洋暖流等影响,北半球的偏差大于南半球。VIIRS整体偏差较小,与误差统计结果一致。

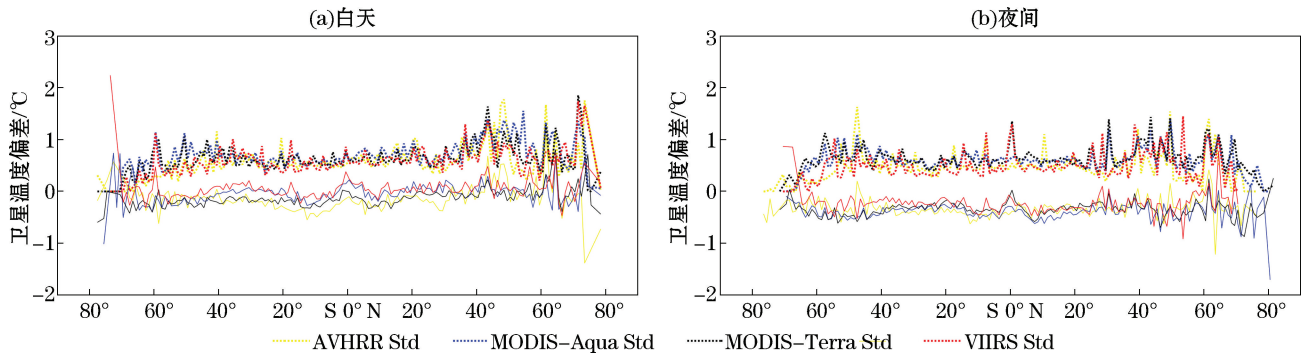


图 8 红外 SST 数据平均偏差与标准偏差随纬度变化

Fig.8 Bias and standard deviation of satellite infrared SST along with latitude

红外辐射计 SST 数据与 Argo 实测数据存在差异的主要原因:1)红外辐射计温度传感器测量表层海温, Argo 浮标测量水下温度,不同深度的 SST 会产生偏差^[23];2)Argo 浮标数据是单点 SST 的平均值,然而红外辐射计是网格内 SST 的平均值,由于北太平洋西部的黑潮、大西洋翻转环流、中尺度涡以及湾流现象的出现,导致该区域海表面温度产生较大的梯度变化;3)红外辐射计反演的 SST 消除了对流层水汽产生的大气辐射影响,但并没有排除气溶胶的影响产生偏差^[24-25]。

4.2 微波辐射计精度评估

由微波 SST 数据与 Argo 实测数据匹配结果(表 4)可以看出,AMSR2 的 SST 数据与 Argo 数据有 0.17 °C 左右的正偏差,绝对偏差、标准偏差和均方根误差均优于其他 2 个微波 SST 数据,AMSR2 的 SST 数据质量优于另外 2 个微波 SST 数据;GMI 绝对偏差略高于其他 2 个辐射计的绝对偏差;WindSat 和 GMI 降轨数据比升轨数据的偏差较高,升轨的实测数据与 Argo 浮标数据更接近,而 AMSR2 的降轨数据优于升轨。3 种微波 SST 数据与 Argo 数据相关性优于 0.995,表明 3 种微波辐射计与 Argo 有较高的一致。

表 4 微波辐射计升轨、降轨 SST 的误差统计

Table 4 Error statistics of ascending and descending passes SST of satellite microwave radiometer

微波辐射率	统计类型	匹配点数目/个	平均偏差/°C	绝对偏差/°C	标准偏差/°C	均方根误差/°C	相关系数
AMSR2	升轨	5 020	0.22	0.43	0.53	0.57	0.998 1
	降轨	6 502	0.13	0.38	0.48	0.50	0.999 5
	全天	11 522	0.17	0.40	0.51	0.53	0.998 3
Windsat	升轨	2 656	0.10	0.42	0.60	0.61	0.997 9
	降轨	2 343	0.04	0.41	0.61	0.62	0.997 8
	全天	4 999	0.07	0.42	0.61	0.61	0.997 9
GMI	升轨	3 031	-0.03	0.58	0.84	0.85	0.996 0
	降轨	3 323	-0.03	0.61	0.90	0.90	0.995 5
	全天	6 354	-0.03	0.59	0.87	0.87	0.995 7

由微波 SST 数据与 Argo 实测数据的匹配结果(图 9)可以看出,3 个微波辐射计匹配结果的空间分布基本一致。微波辐射计受到极地海冰、陆地电磁波的影响,同时黑潮、大西洋翻转环流和湾流对微波 SST 数据的影响也较大,这些区域相比于其他区域偏差较高。

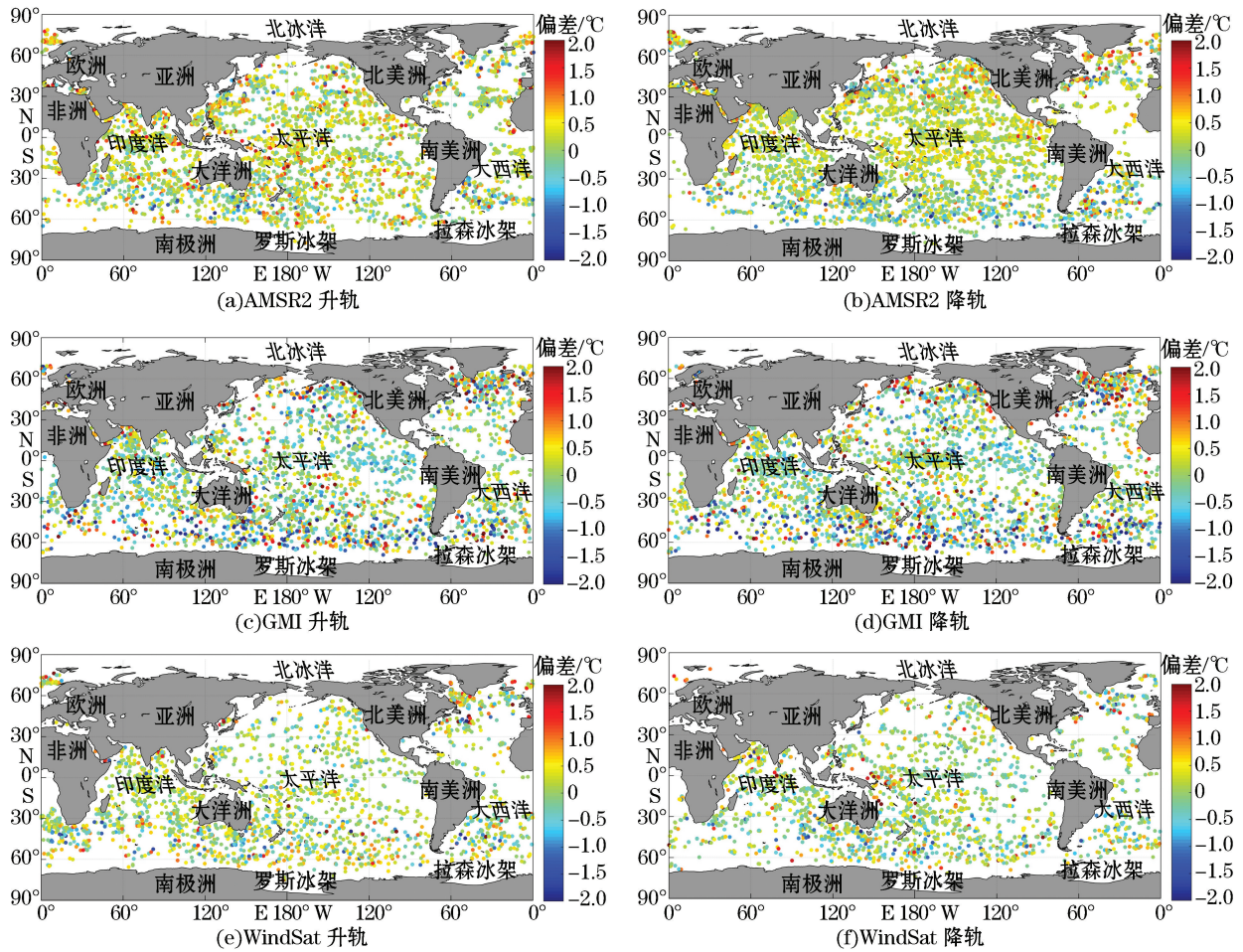


图 9 2018 年全球微波辐射计 SST 数据与 Argo 匹配结果

Fig.9 Global distribution of match-ups between satellite microwave radiometer SST data and Argo measurements in 2018

微波 SST 数据与 Argo 浮标实测数据存在偏差的原因,除了容易受到影响红外 SST 数据的 3 个因素外,近岸海域微波 SST 数据还容易受到陆地电磁波干扰,导致偏差较大。

微波 SST 数据升轨和降轨平均偏差和标准偏差随纬度变化如图 10,由于受到极地 Argo 数据的限制,匹配点纬度仅能达到南北纬 80°附近;30°S~30°N 偏差随纬度变化波动较小,主要因为该区域为开阔大洋,相对于高纬度地区陆地少,无海冰;AMSR2 整体偏差较小,与误差统计结果一致,GMI 随纬度变化,偏差波动较大,尤其在低纬度区域。

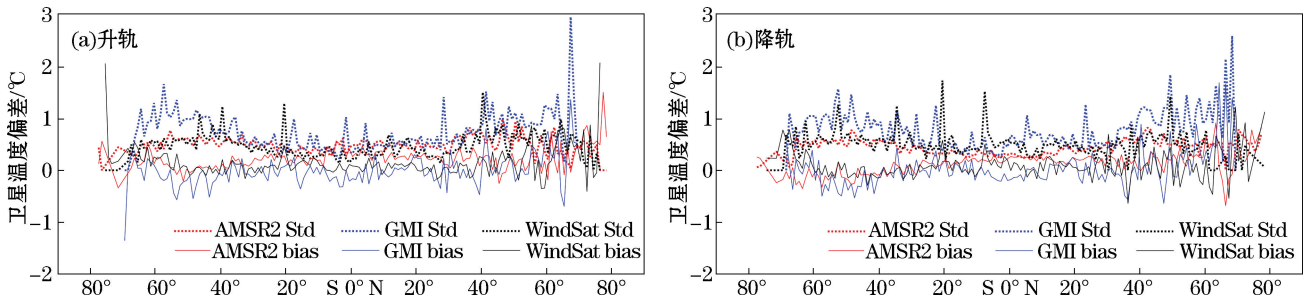


图 10 微波 SST 数据平均偏差与标准偏差随纬度变化

Fig.10 Bias and standard deviation of satellite microwave SST along with latitude

由 SST 偏差与风速和大气柱水汽的关系(图 11 和图 12)可见,风速在 0~3 m/s 时为负偏差,但随着风速的增加温度偏差逐渐趋向 0 m/s,当风速达到 5 m/s 左右时温度偏差最小,而随着风速的持续增强,风速大于 13 m/s 时与温度偏差不再有线形关系;低水汽值(WindSat: <20 mm, GMI: <23 mm, AMSR2: <25 mm)SST 偏差较大,偏差除低水汽值外基本不受影响。

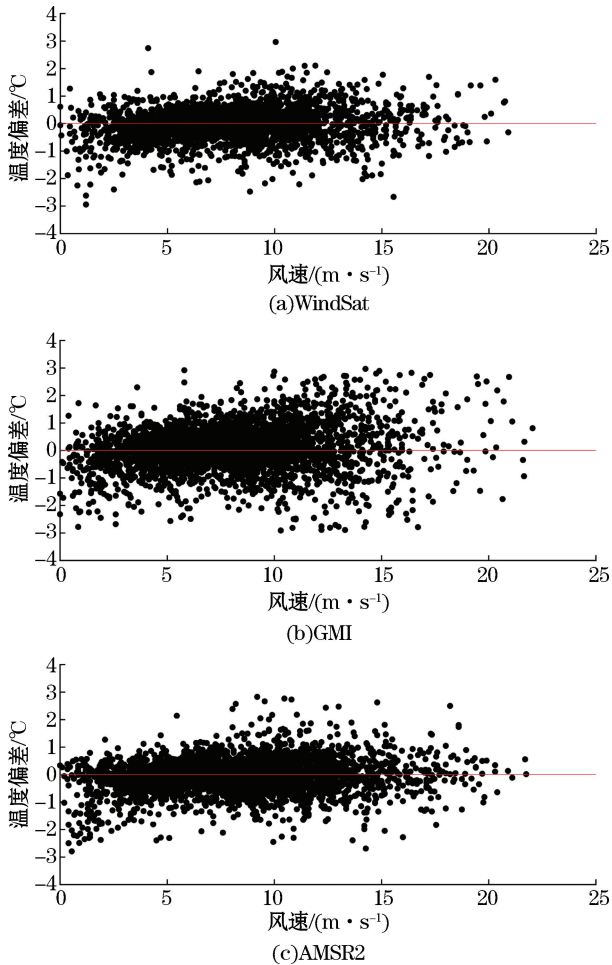


图 11 SST 偏差随风速的分布

Fig.11 SST deviation distribution with wind speed

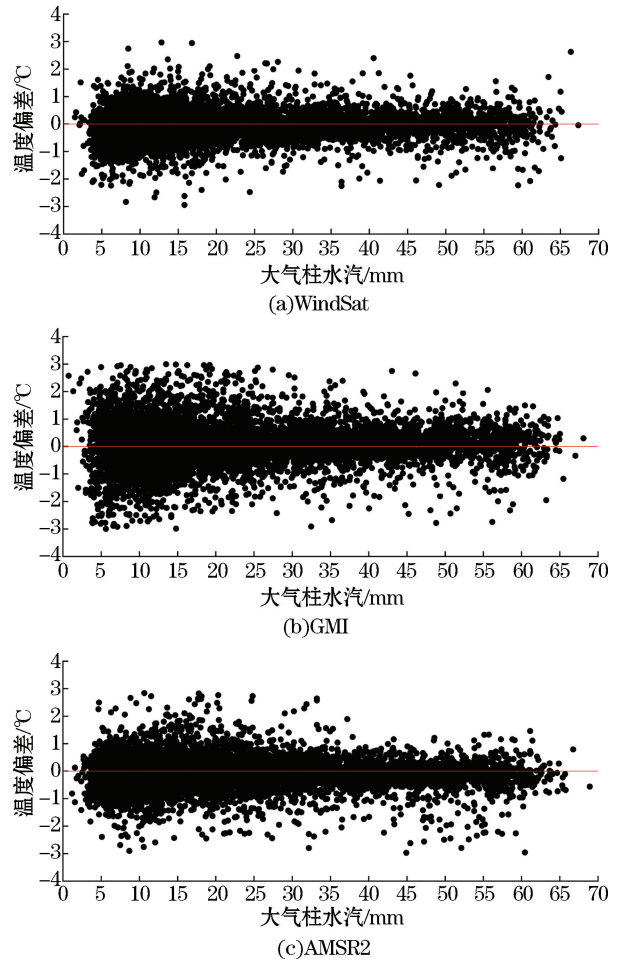


图 12 SST 偏差随大气水柱的分布

Fig.12 SST deviation distribution with water vapor

4.3 红外与微波 SST 数据交叉对比分析

根据上述分析结果,选取精度较高的红外辐射计 SST 数据和微波辐射计 SST 数据,进行 2 种辐射计 SST 产品的交叉对比分析。

基于双线性插值法将 2018 年 VIIRS 和 AMSR2 SST 数据插值到 1° 的网格上,利用插值后的 2018 年 VIIRS 和 AMSR2 月均 SST 数据分别与 APDRC Argo 浮标数据进行对比分析。根据 3 Sigma 原则,剔除平均偏差 ± 3 倍标准偏差范围外的数据,AMSR2 与 Argo、VIIRS 与 Argo、VIIRS 与 AMSR2 分别剔除了 1.56%、1.60% 和 1.42% 的数据。

由 2018 年辐射计 SST 产品与 APDRC Argo 月均 SST 数据的年平均偏差空间分布(图 13)可知,2 种辐射计数据在赤道、西风带、黑潮、大西洋翻转环流和湾流海域以及近岸海域标准差较大,在开阔海域偏差较小具有一致性。近岸海域,红外 SST 数据受到水汽和气溶胶等复杂的大气条件、较高的泥沙悬浮物含量以及海洋动力因素的影响出现偏差^[9],微波辐射计受到陆地射频干扰,导致近岸 SST 数据偏差较大。

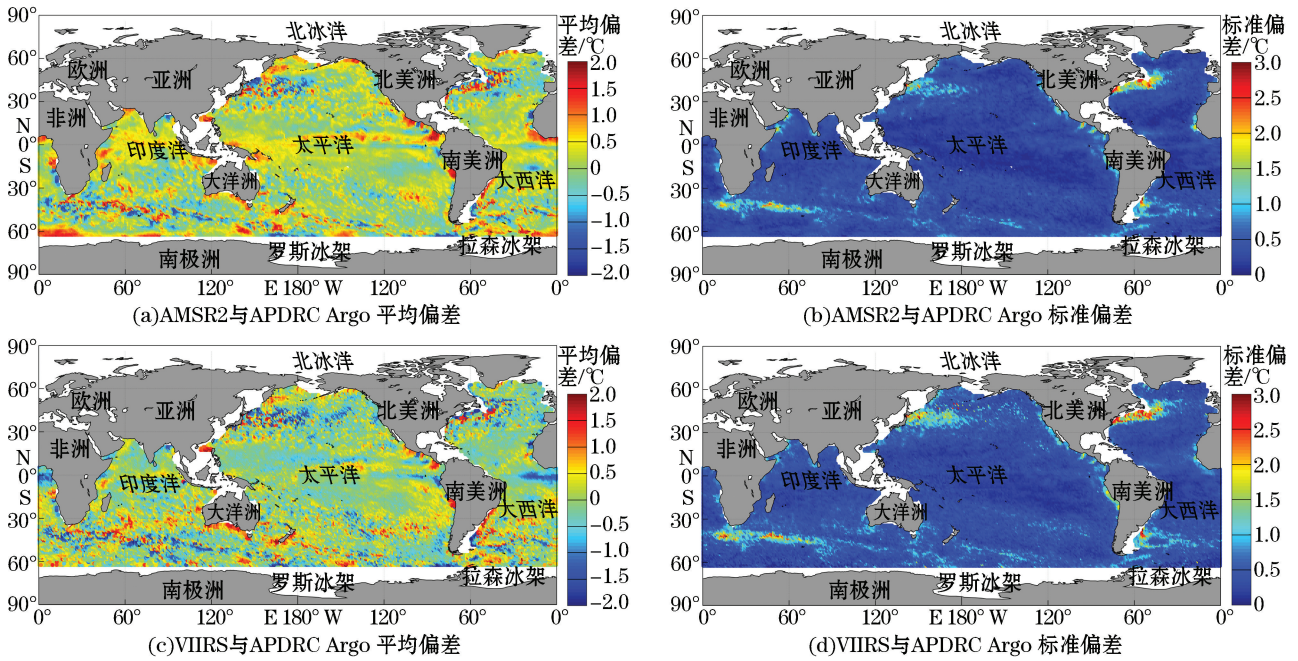


图 13 2018 年辐射计 SST 产品与 APDRC Argo 月均 SST 数据的年平均偏差空间分布

Fig.13 Annual mean difference between satellite monthly SST data and APDRC Argo data in 2018

由 2018 年 VIIRS 与 AMSR2 月均 SST 数据的年平均偏差分布图(图 14)可知,平均偏差较大的地区主要分布在高纬度地区、西风带和近岸地区。在 30°~60°S 的海域,出现小于 1 °C 的正偏差;在 30°S~30°N 的海域,除几内亚湾附近海域出现高于 -0.50 °C 的负偏差外,其余海域均出现大于 -0.50 的负偏差,即 AMSR2 产品 SST 值略高于 VIIRS;在 30°~60°N 的海域,除亚洲东岸、北美洲东岸海域出现 -1 °C 左右的负偏差外,整体出现 -0.50~0.50 °C 的偏差。数据间标准偏差在全球海域整体较小,在大部分开阔海域,标准偏差在 1 °C 以下,在极地、黑潮、西风带等海域标准偏差较大。

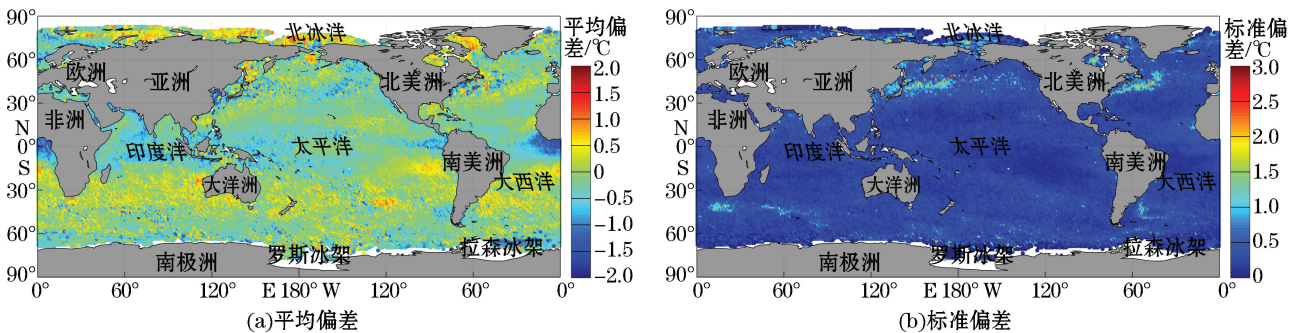


图 14 2018 年 VIIRS 与 AMSR2 月均 SST 数据的年平均偏差空间分布

Fig.14 Annual mean difference in 2018 between monthly SST data from VIIRS and AMSR2

2018 年月均 SST 数据交叉对比统计结果见表 5。VIIRS 与 APDRC Argo 的平均偏差为负偏差,存在明显的季节性变化,在 -0.20~0 °C 之间波动,表明 VIIRS 月均 SST 低于 APDRC Argo,标准偏差在 0.50~0.60 °C 波动;AMSR2 与 APDRC Argo 的平均偏差均为正偏差,存在季节性变化,在 0~0.15 °C 波动,表明 AMSR2 月均 SST 高于 APDRC Argo 月均 SST,标准偏差在 0.40~0.52 °C 波动;VIIRS 与 AMSR2 的平均偏差均为负偏差,在 -0.23~-0.10 °C 波动,VIIRS 与 AMSR2 的标准偏差在 0.30~0.41 °C 波动,低于与

Argo 数据对比的结果。

表 5 2018 年月均 SST 数据交叉对比统计结果

Table 5 Comparison between different types of monthly mean SST data in 2018

月 份	AMSR2-Argo		VIIRS-Argo		VIIRS-AMSR2	
	平均偏差/°C	标准偏差/°C	平均偏差/°C	标准偏差/°C	平均偏差/°C	标准偏差/°C
1 月	0.08	0.45	-0.03	0.51	-0.11	0.34
2 月	0.07	0.45	-0.05	0.52	-0.13	0.34
3 月	0.08	0.45	-0.07	0.51	-0.16	0.32
4 月	0.12	0.47	-0.08	0.52	-0.20	0.32
5 月	0.12	0.45	-0.11	0.51	-0.22	0.34
6 月	0.10	0.49	-0.12	0.57	-0.21	0.37
7 月	0.08	0.52	-0.13	0.60	-0.19	0.41
8 月	0.10	0.50	-0.10	0.53	-0.20	0.34
9 月	0.09	0.49	-0.09	0.51	-0.17	0.31
10 月	0.10	0.47	-0.05	0.50	-0.14	0.34
11 月	0.11	0.47	-0.06	0.52	-0.18	0.36
12 月	0.12	0.46	-0.03	0.52	-0.15	0.35

2018 年 VIIRS 全球月均 SST 与 APDRC Argo 相关系数为 0.998 3, AMSR2 全球月均 SST 与 APDRC Argo 相关系数为 0.998 7, VIIRS 和 AMSR2 SST 数据的相关系数为 0.999 3, 证明 AMSR2 与 VIIRS 的数据一致性较高(图 15)。

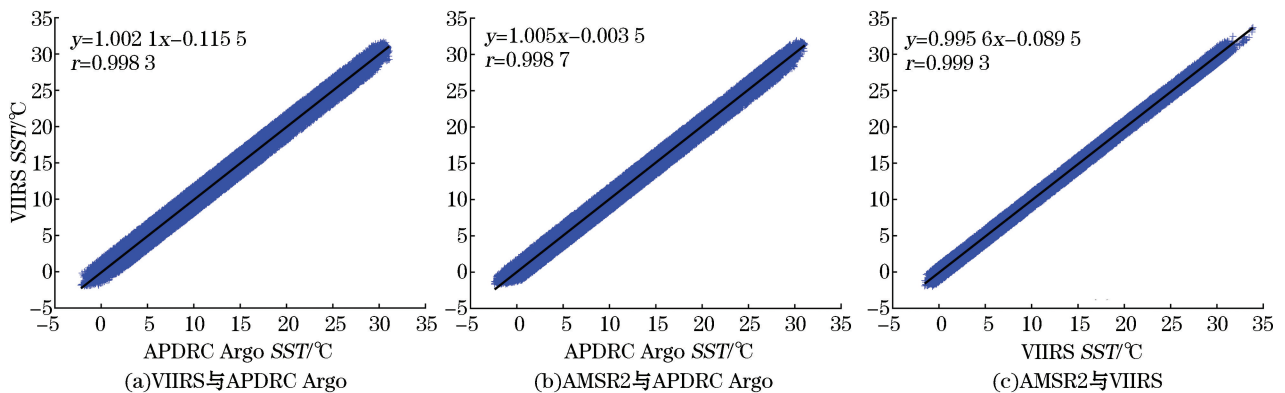


图 15 VIIRS、AMSR2 和 APDRC 三种月均 Argo SST 数据交叉对比

Fig.15 Cross-comparison of VIIRS, AMSR2 and APDRC Argo SST data

5 结 论

基于 2018 年的 4 种红外辐射计(MODIS-Aqua, MODIS-Terra, VIIRS 和 AVHRR)和 3 种微波辐射计(AMSR2, WindSat 和 GMI)SST 数据,研究各卫星 SST 数据的全球覆盖情况,利用 Argo 实测温度资料评估了 7 种星载辐射计 SST 数据的产品精度,并以典型数据为例,开展了红外辐射计 SST 数据、微波辐射计 SST 数据和 Argo 数据的交叉比对研究,主要结论如下:

1)4 种红外辐射计白天的覆盖率差异较大,其中 VIIRS 覆盖率较高,MODIS-Aqua 与 MODIS-Terra 覆

盖率基本一致;4种红外辐射计白天的观测范围高于夜间,白天 VIIRS 的范围最广,夜间4种红外辐射计的观测范围基本一致,主要集中在中低纬度海域以及大陆沿岸,极地观测天数较少。3种微波辐射计中的 AMSR2 与 WindSat 观测范围基本一致,GMI 受到轨道倾角的限制,无法覆盖到南北纬 67° 以外的区域;3种微波 SST 数据有效观测天数主要集中在南北纬 $30^{\circ}\sim 60^{\circ}$;AMSR2、GMI 微波辐射计 SST 数据覆盖率较稳定,WindSat 覆盖率低且波动较大,整体微波 SST 数据覆盖率优于红外。

2)4种红外 SST 数据平均偏差都为负偏差,表明红外辐射计比 Argo 浮标的观测值低;VIIRS 整体的精度评定结果较优,数据质量较好;高纬度地区随纬度变化波动大,受黑潮、湾流和北大西洋暖流等影响,北半球的偏差大于南半球。3种微波辐射计中的 AMSR2 数据与 Argo 数据有 0.16°C 左右的正偏差,绝对偏差、标准偏差和均方根误差均优于其他2个微波 SST 数据; $30^{\circ}\text{S}\sim 30^{\circ}\text{N}$ 为开阔海域,相对于高纬度地区陆地少、无海冰,偏差随纬度变化波动较小;风速在 $0\sim 3\text{ m/s}$ 时为负偏差,但随着风速的增加温度偏差逐渐趋向 0,当风速达到 5 m/s 左右时温度偏差最小,而随着风速的持续增强,风速大于 13 m/s 时与温度偏差不再有线性关系;低水汽值 SST 偏差较大,偏差除低水汽值外基本不受影响。

3)VIIRS 月均 SST 数据与 APDRC Argo 数据的平均偏差为 $-0.20\sim 0^{\circ}\text{C}$,标准偏差均低于 0.60°C ;AMSR2 月均 SST 数据与 APDRC Argo 数据的平均偏差为 $0\sim 0.15^{\circ}\text{C}$,标准偏差低于 0.52°C ;VIIRS 月均 SST 与 AMSR2 月均 SST 数据标准偏差不超过 0.41°C 。2种辐射计与 APDRC Argo 数据相关性优于 0.99,一致性较好。

参考文献(References):

- [1] HØYER J L, BORGNE P L, EASTWOOD S. A bias correction method for Arctic satellite sea surface temperature observations[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2013, 146(5): 201-213.
- [2] COMISO J C. Large decadal decline of the arctic multiyear ice cover[J]. *Journal of Climate*, 2012, 25(4): 1176-1193.
- [3] WANG Y Z, GUAN L, QU L Q. Merging Sea Surface Temperature observed by satellite infrared and microwave radiometers using Kalman filter[J]. *Periodical of Ocean University of China (Natural Science)*, 2010, 40(12): 126-130. 王艳珍,管磊,曲利芹. 卡尔曼滤波在卫星红外、微波海表温度数据融合中的应用[J]. *中国海洋大学学报(自然科学版)*, 2010, 40(12): 126-130.
- [4] LU S L, XU J P, LIU Z H. Analysis of the difference between microwave remote sensing SST and Argo NST in the Southern Hemisphere[J]. *Marine Forecasts*, 2014, 31(1): 1-8. 卢少磊,许建平,刘增宏. 南半球微波遥感 SST 与 Argo 浮标 NST 的异同分析[J]. *海洋预报*, 2014, 31(1): 1-8.
- [5] BARTON I, PEARCE A. Validation of GLI and other satellite-derived sea surface temperatures using data from the Rottneest Island ferry, Western Australia[J]. *Journal of Oceanography*, 2006, 62(3): 303-310.
- [6] TU Q G, PAN D L, HAO Z Z. Validation of S-NPP VIIRS sea surface temperature retrieved from NAVO[J]. *Remote Sensing*, 2015, 7(12): 17234-17245.
- [7] ZHANG J Y, SUN W F, ZHANG J, et al. Comparative analysis of Arctic sea surface temperature data based on spaceborne infrared radiometer[J]. *Marine Sciences*, 2018, 42(11): 1-12. 张精英,孙伟富,张杰,等. 基于星载红外辐射计的北极海表温度数据对比分析[J]. *海洋科学*, 2018, 42(11): 1-12.
- [8] XI M, SONG Q T, LIN M S, et al. Comparison in multi-infrared products of sea surface temperature in Northwest Pacific[J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2017, 48(3): 436-453. 奚萌,宋清涛,林明森,等. 西北太平洋红外辐射计海表温度数据交叉比对分析[J]. *海洋与湖沼*, 2017, 48(3): 436-453.
- [9] LIU Y G, SUN W F, MENG J M, et al. Accuracy analysis of VIIRS sea surface temperature products from 2012 to 2016[J]. *Journal of Applied Oceanography*, 2019, 38(2): 159-168. 刘伊格,孙伟富,孟俊敏,等. 2012—2016年可见光红外成像辐射计(VIIRS)海表面温度产品精度检验分析[J]. *应用海洋学学报*, 2019, 38(2): 159-168.
- [10] STAMMER D, WENTZ F, GENTEMANN C. Validation of microwave sea surface temperature measurements for climate purposes[J]. *Journal of Climate*, 2003, 16(1): 73-87.
- [11] GENTEMANN C L, WENTZ F Z, MEARS C A, et al. In situ validation of tropical rainfall measuring mission microwave sea surface temperatures[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2004, 109. DOI:10.1029/2003JC002092.
- [12] CHELTON, D B, WENTZ F J. Global microwave satellite observations of sea surface temperature for numerical weather prediction and

- climate research[J] *Bulletin of the American Meteorological Society*, 86(8): 1097-1115.
- [13] XI M, SONG Q T, LIN M S, et al. Intercomparison analysis of multi-microwave radiometer sea surface temperature data for the Northwest Pacific[J]. *Haiyang Xuebao*, 2016, 38(7): 32-47. 奚萌, 宋清涛, 林明森, 等. 西北太平洋多源微波辐射计海表温度数据交叉比对分析[J]. *海洋学报*, 2016, 38(7): 32-47.
- [14] SUN W F, MIAO J W, ZHANG J, et al. Evaluation of the precision of VIIRS and AVHRR sea surface temperature fields[J]. *Haiyang Xuebao*, 2018, 40(11): 116-127. 孙伟富, 苗俊伟, 张杰, 等. 北极星载微波辐射计海表温度遥感观测能力分析[J]. *海洋学报*, 2018, 40(11): 116-127.
- [15] MARCELLO J, EUGENIO F, HEMANDEZ A. Validation of MODIS and AVHRR/3 sea surface temperature retrieval algorithms[J]. *IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, 2004(2): 839-842.
- [16] WU F, CORNILLON P, GUAN L. Evaluation of the precision of VIIRS and AVHRR sea surface temperature fields[J]. *Periodical of Ocean University of China (Natural Science)*, 2019, 49(8): 123-129. 吴凡, Peter Cornillon, 管磊. VIIRS 和 AVHRR 海表温度场空间精密度估算[J]. *中国海洋大学学报(自然科学版)*, 2019, 49(8): 123-129.
- [17] ZHANG H. Merging AVHRR and AMSR-E sea surface temperature data based on wavelet transform[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2006. 张慧. 基于小波变换的 AVHRR 和 AMSR-E 卫星海表温度数据融合[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2006.
- [18] TURK F J, DIMICHELE S, HAWKINS J. Observations of tropical cyclone structure from WindSat[J]. *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on*, 2006, 44(3): 645-655.
- [19] ZHU B K, XU J P. Argo buoy scheme in the tropical Pacific Ocean[J]. *Ocean Technology*, 2001, 20(3): 6-8. 朱伯康, 许建平. 热带太平洋海域的 Argo 浮标计划[J]. *海洋技术学报*, 2001, 20(3): 6-8.
- [20] Asia Pacific Data Research Center, International Pacific Research Center, University of Hawaii at Manoa. IPRC products based on Argo data[EB/OL].[2019-04-26]. http://apdrc.soest.hawaii.edu/datadoc/argo_iprc.php.
- [21] PUKESHEIM F. The three Sigma rule[J]. *The American Statistician*, 1994, 48(2): 88-91.
- [22] KILPATRICK K A, PODESTÁ G P, EVANS R, et al. 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 Oceans*, 2001, 106(C5): 9179-9197.
- [23] SEELYE M. An Introduction to Ocean Remote Sensing[M]. JIANG X W, translate. Beijing: China Ocean Press, 2008: 165-220. SEELYE MARTIN. 海洋遥感导论[M]. 蒋兴伟, 译. 北京: 海洋出版社, 2008: 165-220.
- [24] WALTON C C, SULLIVAN J T, RAO C R N, et al. Corrections for detector nonlinearities and calibration inconsistencies of the infrared channels of the advanced very high resolution radiometer[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1998, 103(C2): 3323-3337.
- [25] 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 Oceans*, 2004, 109. DOI:10.1029/2003JC002247.

Comparison Analysis of SST Data From Multi-source Satellite Radiometer

LI Yu-heng¹, SUN Wei-fu², CAO Kai-xiang², MENG Jun-min², ZHANG Jie²

(1. College of Geodesy and Geomatics, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China;

2. First Institute of Oceanography, MNR, Qingdao 266061, China)

Abstract: Based on the SST data from four satellite infrared radiometers (MODIS-Aqua, MODIS-Terra, VIIRS, AVHRR) and three microwave radiometers (GMI, WindSat, AMSR2) in 2018, the global ocean spatio-temporal coverage of these space-borne radiometer SST data was analyzed, followed by the comparison between satellite-derived (microwave and infrared) SST and Argo in situ measured ones. The results show that, the higher SST spatio-temporal coverage is achieved by VIIRS compared to MODIS-Aqua, MODIS-Terra and AVHRR. For the microwave radiometer observation, AMSR2 has the higher spatio-temporal coverage than GMI and WindSat. The average SST deviation between the four infrared radiometers and the Argo buoy measurement is between $-0.27-0$ °C, and the root mean square error (RMSE) is less than 0.76 °C; VIIRS SST exhibits the best quality. The average deviation between the three microwave radiometers and the Argo measurement ranges from -0.04 °C to 0.22 °C, and the RMSE is less than 0.88 °C. The absolute deviation, standard deviation and RMSE of AMSR2 SST are lower than those of the other two microwave radiometers. The average (standard) deviation of AMSR2 and VIIRS SST with respect to the Argo measurement is less than 0.15 °C (0.52 °C) and -0.20 °C (0.60 °C), respectively. High consistency between AMSR2 and VIIRS SST is found, indicated by the average deviation ranging from -0.23 °C to -0.10 °C and the standard deviation of less than 0.41 °C.

Key words: SST; Argo buoy; infrared radiometer; microwave radiometer

Received: December 3, 2019