

孙从容,刁宁辉,徐莹,等.中法海洋卫星产品体系及风浪数据精度综述[J].海洋气象学报,2024,44(4):1-11.
SUN Congrong, DIAO Ninghui, XU Ying, et al. Review of CFOSAT product series and quality evaluation results of wind/wave data [J]. Journal of Marine Meteorology, 2024, 44(4): 1-11. DOI: 10.19513/j.cnki.hyqxxb.20240226001. (in Chinese)

中法海洋卫星产品体系及风浪数据精度综述

孙从容^{1,2}, 刁宁辉^{1,2}, 徐莹^{1,2}, 郎姝燕^{1,2}

(1.国家卫星海洋应用中心,北京 100081;2.自然资源部空间海洋遥感与应用重点实验室,北京 100081)

摘要 中法海洋卫星(China-France Oceanography SATellite, CFOSAT)由中国和法国联合研制,于2018年发射并已在轨运行5年多,星上的载荷包括SWIM(Surface Waves Investigation and Monitoring)波谱仪和扇形波束旋转扫描微波散射计(CFOSAT SCATterometer, CSCAT),提供了全球海面风场和海浪谱的大面积联合遥感观测资料。中法海洋卫星1—4级数据产品包括后向散射系数、沿轨海面风场和海浪谱、全球网格化风场和海浪谱、宽刈幅海浪、极地海冰、多星融合风场和有效波高等,为海洋环境预报、海洋灾害监测、全球气候变化研究等提供了新的数据源。文中具体介绍了中法海洋卫星产品体系以及国内外学者和机构对海风、海浪数据精度的评估结果。

关键词 中法海洋卫星(CFOSAT);SWIM波谱仪;扇形波束旋转扫描微波散射计;海浪谱;海面风场
中图分类号: TP722.6;P732.1 **文献标志码**: A **文章编号**: 2096-3599(2024)04-0001-11
DOI: 10.19513/j.cnki.hyqxxb.20240226001

Review of CFOSAT product series and quality evaluation results of wind/wave data

SUN Congrong^{1,2}, DIAO Ninghui^{1,2}, XU Ying^{1,2}, LANG Shuyan^{1,2}

(1. National Satellite Ocean Application Service, Beijing 100081, China; 2. Key Laboratory of Space Ocean Remote Sensing and Applications, Ministry of Natural Resources, Beijing 100081, China)

Abstract The China-France Oceanography SATellite (CFOSAT), jointly developed by China and France and launched in 2018, has been in orbit for more than 5 years. Onboard payloads include Surface Waves Investigation and Monitoring (SWIM) spectrometer and a fan-beam rotary scanning microwave CFOSAT SCATterometer (CSCAT), which provide the simultaneous remote sensing data of global sea surface wind field and wave spectrum. The level 1–4 data products of CFOSAT include backscattering coefficient, along-track wind field/wave spectrum of the sea surface, global gridded wind field/wave spectrum, wide-swath wave, polar sea ice, multi-satellite fusion wind field/significant wave height, etc., which provide a new data source for marine environment prediction, marine disaster monitoring and global climate change research. This paper introduces CFOSAT product series, and the quality evaluation results of wind/wave data from global scholars and institutions.

Keywords China-France Oceanography SATellite (CFOSAT); Surface Waves Investigation and Monitoring (SWIM) spectrometer; fan-beam rotary scanning microwave scatterometer; sea wave spectrum; sea surface wind field

收稿日期:2024-02-26;修回日期:2024-07-11

基金项目:国家自然科学基金项目(42192561)

第一作者简介:孙从容,女,硕士,正高级工程师,主要从事海洋遥感应用研究,suncr@mail.nsoas.org.cn。

引言

中法海洋卫星(China-France Oceanography SATellite, CFOSAT)于2018年在酒泉基地成功发射,2019年9月通过在轨测试评审,2020年正式交付自然资源部投入业务应用。作为国际上首颗实现全球大面积海面风场和海洋波浪谱同步观测的遥感卫星^[1-2],星上载荷包括SWIM(Surface Waves Investigation and Monitoring)波谱仪和微波散射计(CFOSAT SCATterometer, CSCAT),这是中国和法国航天领域在卫星和地面全系统层面的一次成功合作。

建立的中法海洋卫星数据产品体系,既符合法国航天和海洋应用的技术规范,也与中国已有的海洋动力环境卫星(HY-2系列)基本保持一致,有利于数据的分发、应用和推广。卫星发射后,多国科学家和研究机构对CFOSAT数据产品精度进行了检验,开展了应用实践。Liu等^[1]、郎姝燕等^[2]、林文明等^[3]总结了扇形波束旋转扫描体制的特点,实现了CSCAT 12.5 km分辨率的风场观测,精度达到指标要求。Hauser等^[4]、Tourain等^[5]、Ren等^[6]、Jiang等^[7]等验证了SWIM数据产品,海浪谱精度达到指标要求,并利用低于7.5°入射角的波束反演海面风速,得到的风速精度与CSCAT一致。风浪数据的精度评估结果表明,中法海洋卫星产品满足并部分超过了设计要求。为实现全球大面积海面风场和海洋波浪谱同步观测^[8],CFOSAT在多波束全球海浪谱观测技术、扇形旋转扫描体制高相干数据测量的海面风场观测技术、全球大面积风浪联合观测技术等方面取得了突破性进展。

1 卫星和地面系统

CFOSAT卫星平台由中国航天东方红卫星有限公司研制,其中数传系统由中法联合研制,SWIM载荷由法国国家空间研究中心(Centre National d'Études Spatiales, CNES)研制,CSCAT由中国科学院国家空间科学中心研制,卫星运载、发射、测控由中方负责,中法双方分别建立地面接收与数据应用系统。自然资源部国家卫星海洋应用中心负责中方地面系统建设、在轨测试、星地系统运行管理,CNES负责法方地面系统建设和运行管理。卫星发射前,中法合作团队就数据格式、产品体系和业务接口等进行了充分地研讨,既沿用各自业务运行惯例,也充分尊重对方的工作体

制,形成了统一的数据产品体系,签署了地面系统运行接口控制文件。双方共同建立了中法海洋卫星产品体系,联合组建了国际科学团队,共同开展科学与应用研究,科学探测数据由中法双方共享,也提供给国际科学团队使用,国际科学团队定期召开学术会议,交流CFOSAT研究进展,并组织 and 发布相关研究计划。

卫星已在轨运行5年多,设计寿命超过3年,运行稳定。CNES的研究人员等在第一届至第四届中法海洋卫星科学组会议报告中,展示了散射计近实时产品的时效性统计,如图1所示。卫星在轨5年的运行结果表明,CFOSAT时效性、可靠性良好,97%的散射计、95%的海浪波谱仪近实时数据时效性达到3 h以内,满足卫星产品的应用需求。

2 数据产品及评估

中法海洋卫星的业务化产品体系包括全球海面风场产品、全球海浪谱产品和极地海冰监测产品等,产品级别分为1—4级标准产品和应用示范产品。各级产品定义见表1。

林文明等^[3]利用扇形波束旋转扫描体制多角度测量同一海面雷达后向散射系数的特点,实现了CSCAT近海岸海面风场处理,产品空间分辨率较高,通过对比欧洲先进散射计(Advanced SCATterometer, ASCAT)以及美国快速散射计(Quick SCATterometer, QuikSCAT)的近海岸风场,发现CSCAT风场的质量在离岸40 km以外区域具有良好的 consistency。Xiang等^[9]使用多个来源的风场数据验证了全球热带气旋期间的CSCAT海面风场产品,包括欧洲中期天气预报中心(European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, ECMWF)ERA5资料、交叉校准多平台(Cross-Calibrated Multi-Platform, CCMP)、主被动土壤湿度(Soil Moisture Active and Passive, SMAP)、WindSat、HY-2B、ASCAT和浮标风。使用ERA5、Jason-3和HY-2B高度计的波浪数据验证波浪参数(有效波高、主方向和波长)。结果表明:(1)CFOSAT风速和有效波高的误差随着热带气旋强度的增加而增加;(2)星下点附近的风矢量单元的风速精度优于星下点和条带边缘处的风速精度;(3)CSCAT与ERA5、ASCAT和WindSat之间的风向相关性在高速($v > 20 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$)

比在低风速 ($v < 6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$) 更明显; (4) SWIM 其他波束有效波高精度低于星下点波束有效波高的精度;

(5) CFOSAT、ERA5 和 WindSat 海面风场之间的对比表明, CFOSAT 海面风场性能最佳。

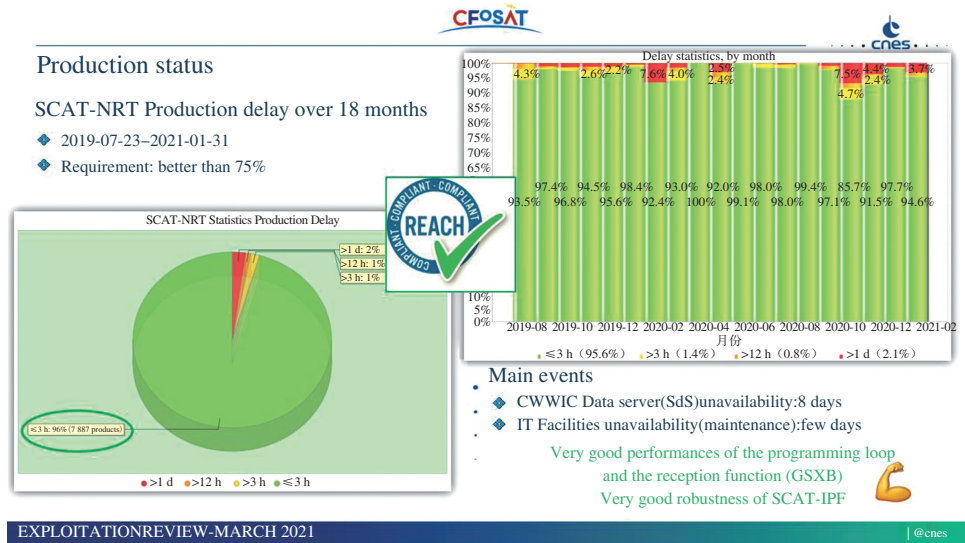


图 1 2021 年散射计产品效能评估(2022 年由 CNES 提供)
Fig.1 Evaluation of CSCAT products in 2021 (from CNES, 2022)

表 1 中法海洋卫星业务产品体系
Table 1 CFOSAT operational product series

产品级别	产品名称	说明
1 级标准产品	散射计后向散射系数产品	在 0 级数据基础上,进行定标和定位处理,生成足印和条带观测点的几何定位数据,经过噪声定标、内定标、多普勒频率偏移校正等信号处理生成后向散射系数产品
	波谱仪后向散射系数产品	在 0 级数据基础上,进行定标和定位处理,生成 6 个固定波束的几何定位数据,经过信号处理生成波谱仪后向散射系数
2 级标准产品	散射计沿轨风场产品	在 1 级数据基础上,进行面元配准,海陆和冰海标识,后向散射系数测量方差估算,大气衰减量校正、数据质量检查、风矢量反演,模糊解除,风矢量单元优化,降雨标识等处理,生成沿轨海面风场产品 刈幅:1 050 km 风速精度: $\pm 2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 或 10% ($4 \sim 24 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$) 风向精度: $\pm 20^\circ$ 分辨率: $25 \text{ km} \times 25 \text{ km}$, $12.5 \text{ km} \times 12.5 \text{ km}$
	波谱仪沿轨海浪谱产品	在 1 级数据基础上,进行海陆和冰海标识、降雨标识、波浪谱反演等处理,生成沿轨波浪谱产品,包括星下点波束产品和 $2^\circ \sim 10^\circ$ 波束的产品,波浪谱参数包括有效波高 (significant wave height, SWH)、波长和波向等 有效波高精度:有效波高 10% 或优于 0.5 m 可探测波长范围:70~500 m 波向精度: 15° 波高能量密度谱精度:15%
3 级标准产品	散射计全球风场产品	在 2 级数据基础上,经过标准网格化处理、单天升降轨分离、降雨检测等处理,制作 1 d、3 d、7 d、月、季和年平均的全球网格化海面风场产品和专题图
	波谱仪全球海浪产品	在 2 级数据基础上,经过投影变换、单天升降轨分离等处理,制作单星 1 d、3 d、7 d、月、季和年平均的全球网格化海浪参数产品和专题图
4 级融合产品	多源融合全球风场产品	对中法海洋卫星、海洋二号卫星、国外卫星的多种散射计辐射计产品进行融合处理,制作日、周、月、季、年的全球海面风场产品和专题图,南北极海面风场和专题图
	多源融合全球有效波高产品	对中法海洋卫星波谱仪、海洋二号卫星和国外卫星高度计产品进行融合处理,制作日、周、月、季、年的全球有效波高产品和专题图
	南北极海冰产品	利用后向散射系数反演南北极海冰,制作应用示范产品
	宽刈幅海浪有效波高融合产品	利用风浪联合观测的特点,利用散射计和波谱仪两个载荷的 2 级产品,制作宽刈幅海浪有效波高融合产品
	波谱仪联合离线产品	沿轨危险海况(波陡、涌浪)

Xu 等^[10]比较了在几种不同海况(主要是风浪、涌浪)和不同海面条件($v < 20 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,有效波高为1~7 m)下,SWIM与浮标的平均方向波高谱,包括全向波高谱与主波波向函数。结果表明,在中、高海况下,SWIM 8° 和 10° 入射角波束提供的方向谱与浮标具有较高的一致性。

2.1 全球海面风场产品及评估

CSCAT单轨观测数据时长约为97 min,刈幅为1 050 km,风速测量范围为 $4\sim 24 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,目前可提供

6.25 km科学试验产品、12.5 km近海岸全球海面风场产品与25 km全球海面标准产品^[2-3,11-12]。CFOSAT微波散射计L2B数据是一个轨道周期内获得的风矢量单元的测量集合,包括风矢量单元模糊解、唯一解、背景风场、残差、奇异指数、降雨概率、经纬度、风场误差、标识符等。L2B产品以风单元为基本单位,所有参量以二维矩阵的形式存储,数据格式为NetCDF。图2展示了CSCAT全球海面风场三日覆盖图。

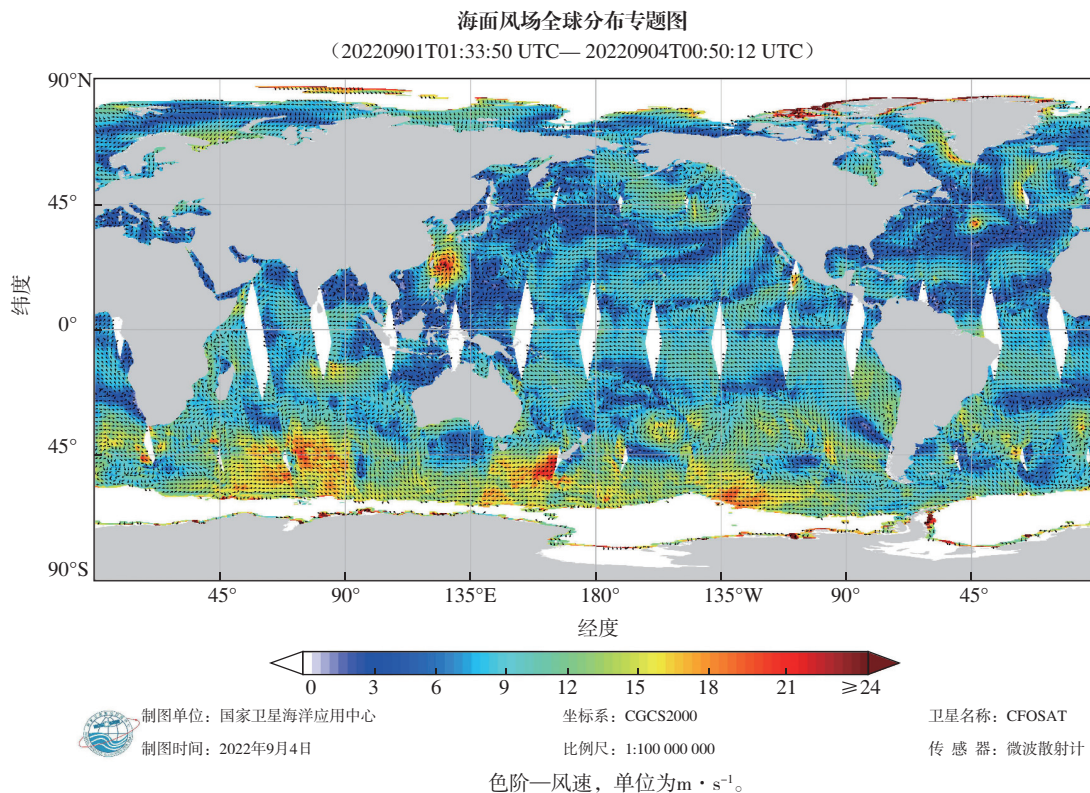


图2 2022年9月1—4日CSCAT海面风场覆盖图

Fig.2 CSCAT sea wind field coverage from 1 to 4 September 2022

Liu 等^[1]的研究结果表明,CSCAT风场质量与ECMWF风场、ASCAT风场以及浮标风场一致。后向散射系数精度随风速的降低而降低,波束中部的产品质量比接近星下点和波束外侧的产品质量更高。Liu 等^[12]利用南海位于 115.46°E 、 19.85°N 的一个浮标观测结果,与CFOSAT散射计风场数据进行比对,结果表明风速均方根误差为 $1.6 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,风向误差为 17° ,风速相关系数为0.85,风向相关系数为0.98,置信度为95%。Zhu 等^[13]对2019年8月—2021年7月CSCAT数据与浮标观测进行验证,并在台湾海峡极端天气预报中进行了业务应用测试,风速相关系数为

0.92,均方根误差(root mean square error, RMSE)为 $1.75 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,绝对偏差为 $1.10 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$;风向相关系数为0.96, RMSE为 21.87° ,绝对偏差为 1.17° 。冷空气经过时绝对偏差降到 $1.03 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,比台风期间的 $1.17 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 略低。使用CFOSAT风场数据作为历史数据加入预报模式,对极端天气预报结果的精度改善为4%~17%。Ren 等^[6]验证了利用CFOSAT SWIM低于 7.5° 入射角的波束反演海面风速,先使用基于数值天气预报的海洋校准方法重新校准了偏差,再通过KuLMOD2S模型从校准后的数据中反演了风速,得到的风速精度与CSCAT一致。

经评估,刈幅中心区域风场产品精度优于风速 $2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 、风向 20° 的技术指标要求,三日全球海面风场覆盖率近 96%^[11],测量范围超过 $24 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。Zhu 等^[13]的研究结果也表明,在强降雨时,CSCAT 低估了高风速,降雨对后向散射系数的影响比以往的笔形波束扫描散射计更为复杂,与风速、入射角、极化方式等有关。

2.2 全球海浪谱产品及评估

SWIM 是一个小入射角波束扫描机制的 Ku 波段雷达,单轨观测数据时长约为 97 min,刈幅为 180 km,提供 $70 \text{ km}\times 90 \text{ km}$ 全球海域海浪方向谱产品和星下点有效波高产品,首次实现了全球海域海浪方向谱的大面积、连续观测。

CFOSAT 波谱仪 L2B 数据是一个轨道周期内获得的海浪谱测量集合,2 级产品有 3 种,即星下点、波浪谱盒子和近实时。星下点产品名中含“NAD”标识,波浪谱盒子产品名中含“BOX”标识,近实时产品名中含“NRT”标识。以近实时产品为例,包括 1 Hz 的星下点有效波高和风速、5 Hz 的海浪参数、二维波浪谱模糊解(单波束和平均)、经纬度、海冰标识、海陆标识、质量标识等,部分参量以二维、三维、四维或五维矩阵的形式存储。L2B 产品中多波

束产品以波浪谱盒子(BOX)为基本单位,沿卫星轨道左右侧各 1 个,每个尺寸为 $70 \text{ km}\times 90 \text{ km}$,每个二维波浪谱盒子按照方向分为 24 个分区,每个分区为 15° ,数据格式为 NetCDF。每个盒子的方向谱,如图 3 所示。一周主波长、主波方向、有效波高专题图见图 4—6(3 级产品),单日多星融合全球有效波高专题图,如图 7 所示(4 级产品)。

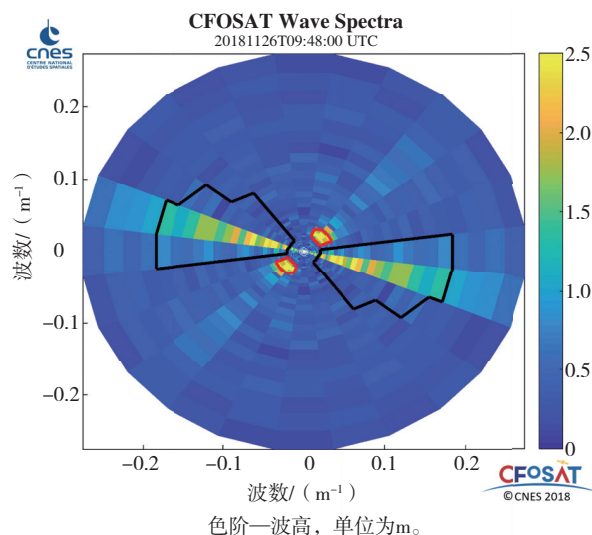


图3 SWIM 获取的海浪方向谱
Fig.3 SWIM sea wave directional spectrum

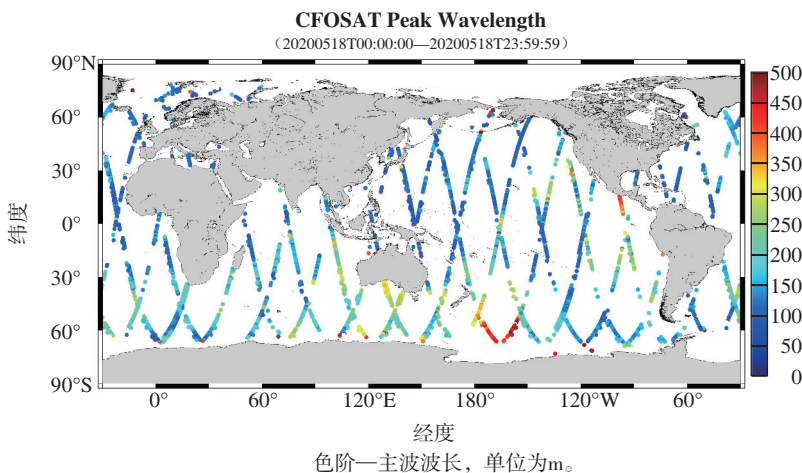


图4 SWIM 获取的全球海浪主波波长
Fig.4 SWIM global peak wavelength

Hauser 等^[4]、Aouf 等^[14]使用了适应低采样率的新式再跟踪算法对星下点(0°)波束数据进行反演,得到的产品(有效波高、风速)与标准高度计产品精度一致,2°~10°波束的参数随着雷达入射角和风速变化,为正确反演后向散射系数,建立了与观测

相关的噪声校正方法,海浪方向谱和平均参数与全球尺度的海浪模式对比,提供了 70~500 m 波长范围的海浪谱特征。Tourain 等^[5]在 SWIM 反演时采用自适应再跟踪算法,不需要查找表来纠正偏差,在有效波高反演中显著提高了信噪比,比经典的

MLE4 算法的精度和性能更好。CNES 认为,经过后续算法改进和优化后,海浪谱产品波长范围有望扩展到 1 100 m。Jiang 等^[7]对 SWIM 的分区积分波参数进行了研究验证,包括分区有效波高、分区峰值波周期和分区峰值波方向,与美国国家数据浮标中心(National Data Buoy Center, NDBC)的浮标数据进行比较,选择夏威夷附近相距 13 km 的 2 个 NDBC

浮标。结果表明,SWIM 在寻找不同分区的谱峰方面表现良好,波周期和波向的均方根误差分别为 0.9 s 和 20°,CFOSAT 可以作为其他波浪观测的有效补充,也指出 SWIM 的噪声影响了有效波高的准确性,需要进一步改进。有研究^[15-16]利用更新后的算法对 SWIM 数据进行了重处理,进一步提高数据质量,同时研究和陆续发布新的产品。

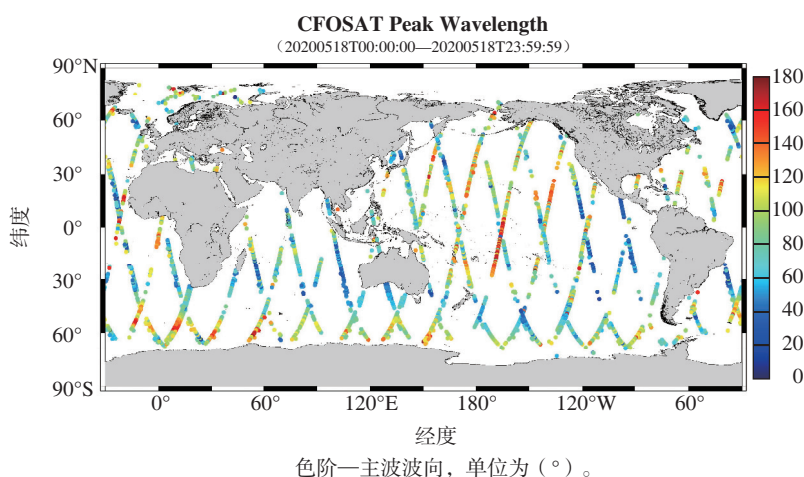


图5 SWIM 获取的全球海浪主波波向
Fig.5 SWIM global peak wave direction

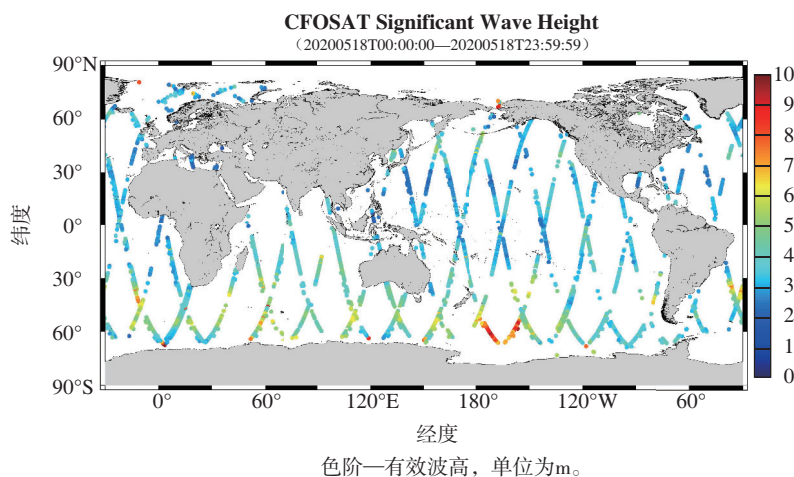


图6 SWIM 获取的全球海浪有效波高
Fig.6 SWIM global significant wave height

Xu 等^[17]将波谱仪在中国近海的有效波高与浮标观测结果进行对比, RMSE 为 0.29 m。黄冰清等^[18]利用 CFOSAT 波谱仪数据验证哨兵卫星雷达在北极海域的海浪方向谱反演结果,有效波高采用 SWIM 斜率谱积分计算。二者波高的偏差为 0.11 m, RMSE 为 0.71 m; 平均波周期的偏差为

-0.52 s, RMSE 为 0.62 s; 谱峰传播方向为 -7.74° , 波长的偏差为 -0.56 m, RMSE 分别为 15.75° 和 52.73 m。Li 等^[19]利用 NDBC 浮标和 Jason-3 高度计的星下点数据对 CFOSAT SWIM 星下点有效波高进行验证,结果表明 CFOSAT 星下点有效波高的正确率较高。Jiang 等^[20]结合 CFOSAT SWIM 的

10 m 风速 (U_{10})、SWH 和波谱估计平均波周期,与仅使用10 m风速+有效波高或 SWIM 波谱进行估算相比,有显著改进,在利用一些浮标数据训练反

演使用的神经网络模型后,波周期反演精度平均周期 RMSE 约为 0.41 s,能量周期 RMSE 约为 0.60 s。

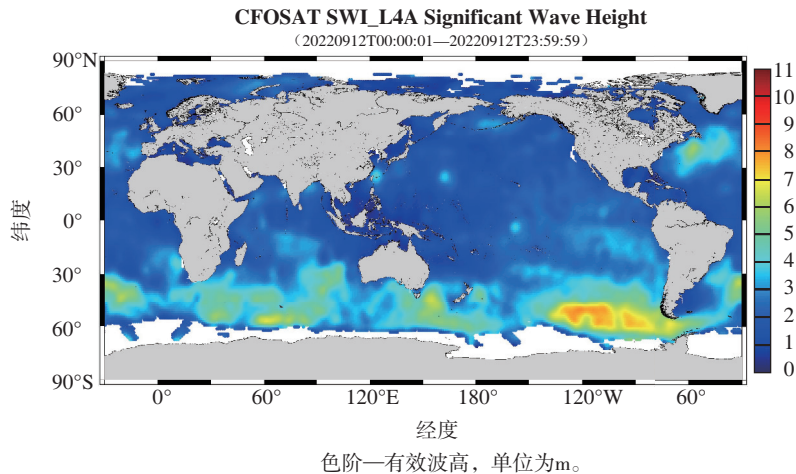


图7 CFOSAT 与其他卫星融合的全球有效波高

Fig.7 Global significant wave height merged by CFOSAT and other satellites

2.3 极地海冰监测产品

中法海洋卫星基于波谱仪回波波形和后向散射系数,结合 CSCAT 后向散射系数,制作极地海冰实时监测产品,信息包括海冰概率密度、海冰边缘线与海冰面积统计(图8)。Tourain 等^[5]和 Hermozo 等^[21]对 CFOSAT 卫星在海冰中的应用进行了研究,在中法海洋卫星第二次科学组会议报告中,展示了利用散射计反演的南北极地区日平均海冰分布专题图,如图9所示。Peureux 等^[22]研究并在 AVISO (Archiving, Validation and Interpretation of Satellite Oceanographic)网站发布了法方的波谱仪极地海冰监测图,如图10所示。Li 等^[23]研究了基于地球物理模型函数(Geophysical Model Function, GMF)的散射计海冰反演算法,并与 ASCAT 和专用传感器微波成像仪(Special Sensor Microwave Imager, SSMI)等主被动微波遥感载荷的反演结果进行比对,结果一致;同时指出中法海洋卫星散射计对 FY-3E 气象卫星扇形波束扫描双频风场雷达(WindRAD)的研发起到引领作用,如图11所示。

Zhai 等^[24]采用随机森林法对 CFOSAT 散射计数据进行分类,实现了极区的海冰监测,与2019年1月1日—2021年5月10日欧洲气象卫星应用组织(European Organisation for the Exploitation of

Meteorological Satellites, EUMETSAT)海洋和海冰卫星应用机构(Ocean and Sea Ice Satellite Application Facility, OSI SAF)的结果进行比对。结果表明, CSCAT 与 OSI SAF 产品在北极和南极的平均海冰面积差分别为 26.73 万 km^2 和 -44.46 万 km^2 (OSI SAT 北极海冰面积最大约为 1 164.62 万 km^2 , 南极海冰面积最大约为 1 672.89 万 km^2),除夏季外, CSCAT 在两极的海冰面积相对误差均小于 10%。来自 CSCAT 的总体海冰面积夏季偏少,可能是由于 CSCAT 分类算法是用辐射计海冰密集度数据训练的,而辐射计的海冰测量受到夏季融化的影响更为显著。

Liu 等^[25]利用2019年10月—2020年4月 CFOSAT 波谱仪南北极数据,开展了多个小入射角探测在冰水识别、海冰分类等方面的研究,使用了 SWIM 产品中 $0^\circ \sim 10^\circ$ 波束的后向散射功率等多个参数,采用 K 最近邻(K-Nearest Neighbor, KNN)方法的最佳多特征组合方式,反演得到区域内多年冰、一年冰、薄冰、海水的分类结果(一个冰年和单日),然后利用俄罗斯联邦国家科学中心北极和南极研究所(Arctic and Antarctic Research Institute, AARI)的海冰分类图(sea ice AARI charts)验证和评估结果。此外,还利用哨兵卫星合成孔径雷达(synthetic aperture radar, SAR)图像进行验证,结果表明, 0° 和 2° 波束对

极地小区域表面特征的敏感性高于其他波束,除了4°波束外,其余波束识别海水的准确率均高于96%,可有效用于冰水识别。基于小入射角多特征组合的KNN方法海冰分类结果表明,在2°时,整体精度最高,为81%;在4°时最低,约为70%。Peureux等^[26]利

用SWIM数据制作了海冰标识,在与ECMWF综合预报系统(Integrated Forecasting System,IFS)和SSMI的参考数据集进行比较后,验证该算法适用于业务运行,在40°以上纬度与SSMI数据相比,海冰标识算法对所有波束的精度大约为98%。

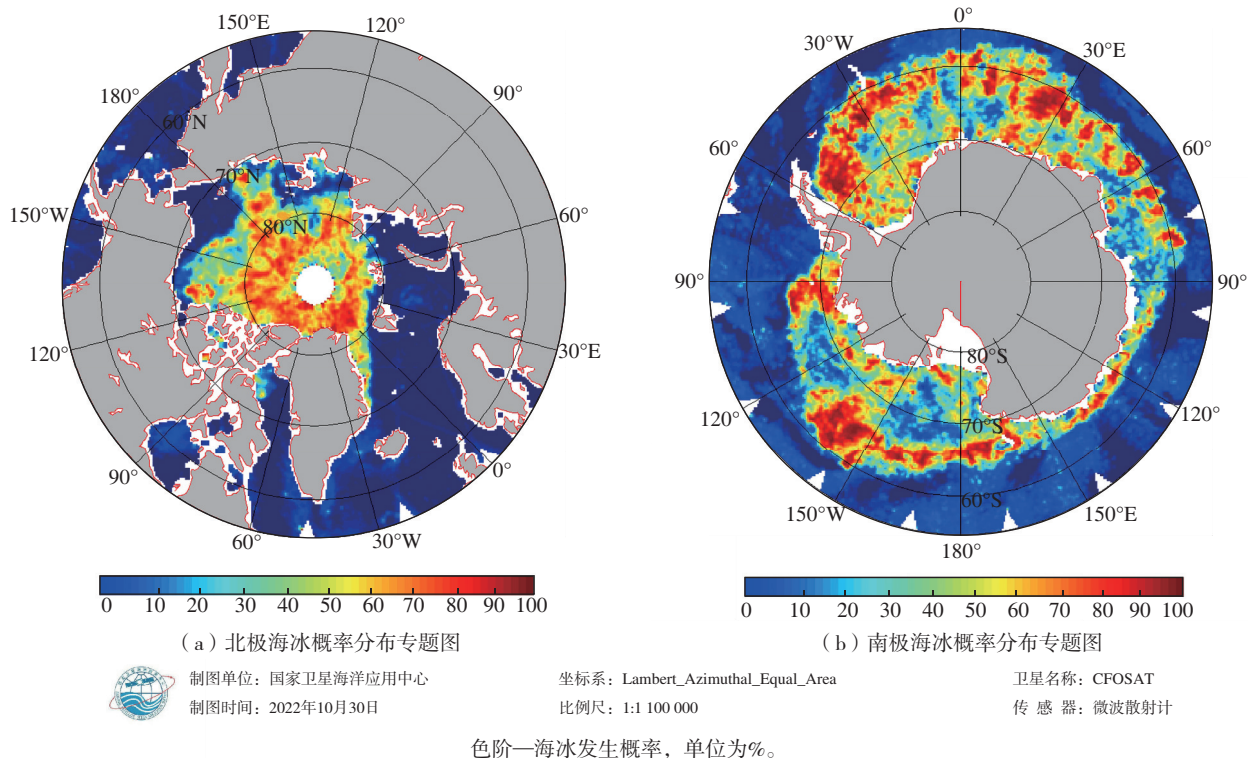


图8 2022年10月25日北极和南极CSCAT海冰监测产品
Fig.8 CSCAT sea ice monitoring product of the Arctic and Antarctic on 25 October 2022

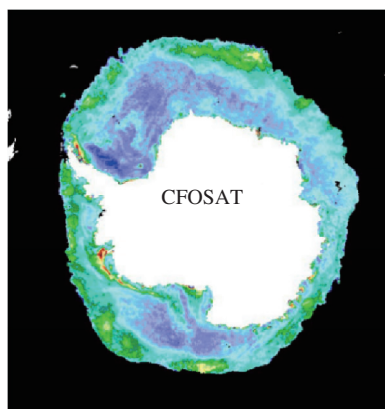


图9 CSCAT南极海冰监测产品
Fig.9 CSCAT sea ice monitoring product of the Antarctic (from CNES)

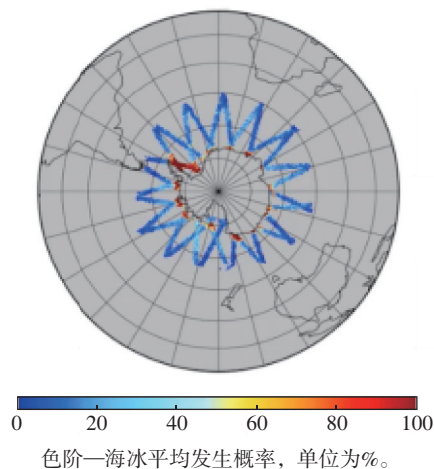
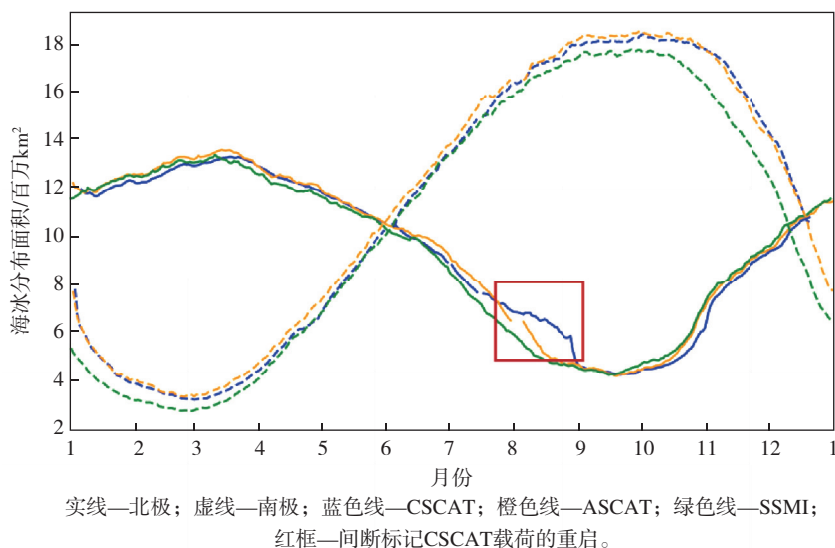


图10 SWIM南极海冰监测产品(单日)
Fig.10 SWIM sea ice monitoring product of the Antarctic(from CNES, single day)

图 11 CSCAT、ASCAT 及 SSMI 极地海冰分布反演结果对比^[23]Fig.11 Comparison of the Arctic and Antarctic sea ice retrieval results from CSCAT, ASCAT and SSMI^[23]

3 数据分发和汇交

国家卫星海洋应用中心通过海洋卫星数据分发网站(<https://osdds.nsoas.org.cn>)向用户分发中法海洋卫星数据,CFOSAT 与海洋二号卫星星座组网运行,沿轨 2 级产品和风场融合产品均通过网站向用户分发,并提交国家海洋科学数据中心收录。法国国家空间研究中心通过 AVISO 网站(<https://www.aviso.altimetry.fr/>)向全球用户分发波谱仪与散射计的科学数据。EUMETSAT 成员国与 ECMWF 传输近实时产品;2021 年 12 月起,在 CMEMS 网站(<https://resources.marine.copernicus.eu/>)发布波谱仪星下点 1 Hz 有效波高的近实时产品、2 级多波束产品,并融合到全球海浪 3 级和 4 级近实时产品中^[27],通过 CMEMS 分发。截至 2023 年 11 月,已向全球数十个国家的近 2 000 名用户分发 CFOSAT 数据,国内外用户可以通过以上 3 个网站获取 CFOSAT 数据产品。

4 总结和展望

中法海洋卫星数据产品体系完善,多家研究机构对数据产品的评估结果表明,风场和海浪谱产品精度满足设计要求,时效高。通过风浪联合观测,利用融合技术改善风场和浪场数据的时空分布及精

度,丰富海浪模型的同化数据,有助于提高海浪同化效果。Peng 等^[28]、吕思睿等^[29]在定标方面开展了工作,赵晓康等^[30]、董楹等^[31]分析了地球物理噪声和海面温度对风场产品的影响,Xu 等^[32]与荷兰皇家气象局(Royal Netherlands Meteorological Institute, 简记为“KNMI”)进行合作研究,对降水导致风场的空间异质进行定量化,提出了微波散射计海面风场反演的第四种质量控制因子(Joss),该因子对降水的表征特性优于已有的质量控制因子,并从原理上与 KNMI 已有的质控因子形成互补特性。该质量控制因子以数值预报质量控制(Numerical Weather Prediction-Quality Control, NWP-QC)和短临预报质量控制(Nowcasting-QC)的形式,形成业务运行系统中的新型质量标识方法,正式应用于包括 CFOSAT 等的 Ku 波段散射计降水影响观测的质量标识,纳入 EUMETSAT 海洋与海冰卫星应用系统中。随着新研究成果逐步应用到业务系统中,以及开展数据重处理,将继续提高 CFOSAT 风浪产品数据质量。Jiang 等^[20]、Ren 等^[33]、任静等^[34]的研究成果表明,中法海洋卫星及后续卫星可增加平均波周期、全球波致应力等新的数据产品,也将更加丰富产品序列。数据在海洋卫星数据分发网站、国家海洋科学数据中心、AVISO 网站得到广泛分发,海浪产品参与融合全球有效波高 4 级近实时产品,并在 CMEMS 网

站分发到数十个国家和地区;海浪、海面风场2种重要海洋参数的大面积同步监测,完善了海洋立体监测手段;在海洋环境预报、全球气候变化、防灾减灾、波浪能研究、商业和远洋航行等方面得到了应用。

致谢:中法海洋卫星数据由中国国家航天局和法国国家空间研究中心提供。

参考文献:

- [1] LIU J Q, LIN W M, DONG X L, et al. First results from the rotating fan beam scatterometer onboard CFOSAT [J]. *IEEE Trans Geosci Remote Sens*, 2020, 58(12): 8793-8806.
- [2] 郎姝燕, 孙从容, 鲁云飞, 等. 中法海洋卫星微波散射计近海岸产品在台风遥感监测中的应用 [J]. *海洋气象学报*, 2022, 42(2): 74-80.
- [3] 林文明, 郎姝燕, 赵晓康, 等. 中法海洋卫星散射计近海岸海面风场反演研究 [J]. *海洋学报*, 2021, 43(10): 115-123.
- [4] HAUSER D, TOURAIN C, HERMOZO L, et al. New observations from the SWIM radar on-board CFOSAT: instrument validation and ocean wave measurement assessment [J]. *IEEE Trans Geosci Remote Sens*, 2021, 59(1): 5-26.
- [5] TOURAIN C, PIRAS F, OLLIVIER A, et al. Benefits of the adaptive algorithm for retracking altimeter nadir echoes: results from simulations and CFOSAT/SWIM observations [J]. *IEEE Trans Geosci Remote Sens*, 2021, 59(12): 9927-9940.
- [6] REN L, YANG J, XU Y, et al. Ocean surface wind speed dependence and retrieval from off-nadir CFOSAT SWIM data [J]. *Earth Space Sci*, 2021, 8(6): e2020EA001505.
- [7] JIANG H Y, MIRONOV A, REN L, et al. Validation of wave spectral partitions from SWIM instrument on-board CFOSAT against in situ data [J]. *IEEE Trans Geosci Remote Sens*, 2022, 60: 4204013.
- [8] WANG L L, DING Z Y, ZHANG L, et al. CFOSAT-1 realizes first joint observation of sea wind and waves [J]. *Aerospace China*, 2019, 20(1): 20-27.
- [9] XIANG K S, YIN X B, XING S G, et al. Preliminary estimate of CFOSAT satellite products in tropical cyclones [J]. *IEEE Trans Geosci Remote Sens*, 2022, 60: 4203516.
- [10] XU Y, HAUSER D, LIU J Q, et al. Statistical comparison of ocean wave directional spectra derived from SWIM/CFOSAT satellite observations and from buoy observations [J]. *IEEE Trans Geosci Remote Sens*, 2022, 60: 5117520.
- [11] 刘建强, 蒋兴伟, 郎姝燕, 等. 中法海洋卫星及其典型应用 [J]. *卫星应用*, 2021(9): 41-48.
- [12] LIU Y X, LIN M S, JIANG X W, et al. A comparison of multiplatform wind products in the South China Sea during summer and autumn in 2019 [J]. *J Oceanol Limnol*, 2021, 39(6): 2181-2194.
- [13] ZHU B L, CHEN J R, XU Y, et al. Validation of the CFOSAT scatterometer data with buoy observations and tests of operational application to extreme weather forecasts in Taiwan Strait [J]. *Earth Space Sci*, 2022, 9(3): e01865.
- [14] AOUF L, HAUSER D. CFOSAT: four years of scientific results (2018-2022) [EB/OL]. (2022-12-07) [2024-02-26]. <https://doi.org/10.24400/527896/a02-2023.001>.
- [15] TOURAIN C, HERMOZO L, HAUSER D, et al. CFOSAT: products reprocessing and contributions in oceanography [C] // 2023 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Pasadena, USA: IEEE, 2023: 3958-3961.
- [16] CFO22WIN-Exploring_SWIM_and_Sentinel-1_wave_spectra_measurements_complementarities [EB/OL]. [2024-02-25]. <http://www.aviso.altimetry.fr>.
- [17] XU J W, WU H P, XU Y, et al. Validation of nadir SWH and its variance characteristics from CFOSAT in China's offshore waters [J]. *Remote Sens*, 2023, 15(4): 1005.
- [18] 黄冰清, 李晓明, 蔡琼琼. 北极海域 SAR 海浪方向谱反演及其与中法海洋卫星 CFOSAT/SWIM 数据的比较 [J]. *遥感学报*, 2023, 27(4): 881-890.
- [19] LI X Z, XU Y, LIU B C, et al. Validation and calibration of nadir SWH products from CFOSAT and HY-2B with satellites and in situ observations [J]. *J Geophys Res: Oceans*, 2021, 126(2): e2020JC016689.
- [20] JIANG H Y, SONG Y H, MIRONOV A, et al. Accurate mean wave period from SWIM instrument on-board CFOSAT [J]. *Remote Sens Environ*, 2022, 280: 113149.
- [21] HERMOZO L, SUQUET R R, TOURAIN C, et al. CFOSAT: latest improvements in the SWIM products and contributions in oceanography [C] // 2022 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Kuala Lumpur, Malaysia: IEEE, 2022: 6768-6771.

- [22] PEUREUX C, LONGÉPÉ N, MOUCHE A, et al. Sea-ice detection from near-nadir Ku-band echoes from CFOSAT/SWIM scatterometer[J]. *Earth Space Sci*, 2022, 9(6): e2021EA002046.
- [23] LI Z, VERHOEF A, STOFFELEN A. Bayesian sea ice detection algorithm for CFOSAT[J]. *Remote Sens*, 2022, 14(15):3569.
- [24] ZHAI X C, WANG Z X, ZHENG Z J, et al. Sea ice monitoring with CFOSAT scatterometer measurements using random forest classifier[J]. *Remote Sens*, 2021, 13(22):4686.
- [25] LIU M J, YAN R, ZHANG J, et al. Arctic sea ice classification based on CFOSAT SWIM data at multiple small incidence angles[J]. *Remote Sens*, 2021, 14(1):91.
- [26] PEUREUX C, LONGÉPÉ N, MOUCHE A, et al. Sea-ice detection from near-Nadir Ku-band echoes from CFOSAT/SWIM scatterometer[J]. *Earth Space Sci*, 2022, 9(6): e2021EA002046.
- [27] CMEMS-WAV-PUM-014-001-002-003-004 [EB/OL]. [2024-02-25]. <https://catalogue.marine.copernicus.eu/>.
- [28] PENG H L, MU B, HAUSER D, et al. Calibration of omnidirectional wave height spectra by SWIM through a BU-net[J]. *IEEE Trans Geosci Remote Sens*, 2023, 61: 2000116.
- [29] 吕思睿, 林文明, 邹巨洪, 等. 多源卫星遥感海面风速误差分析和交叉标定[J]. *海洋学报*, 2023, 45(5): 118-128.
- [30] 赵晓康, 林文明, 王志雄, 等. 海表温度对中法海洋卫星散射计测量的影响[J]. *空间科学学报*, 2023, 43(1): 190-198.
- [31] 董楹, 林文明. CFOSAT 散射计海面后向散射系数误差及影响分析[J]. *空间科学学报*, 2024, 44(2): 326-334.
- [32] XU X G, STOFFELEN A. A further evaluation of the quality indicator joss for Ku-band wind scatterometry in tropical regions[C]//2021 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Brussels, Belgium: IEEE, 2021: 7299-7302.
- [33] REN J, CHEN S, YIN X Q, et al. Seasonal variations in wave-induced stress over global ocean based on China France Oceanography Satellite[J]. *Sci China Earth Sci*, 2023, 66(12): 2930-2940.
- [34] 任静, 陈胜, 尹训强, 等. 基于中法海洋卫星的全球海面波致应力的季节变化[J]. *中国科学: 地球科学*, 2023, 53(12): 2969-2978.