

中法海洋卫星与 ERA5 数据在中国邻近海域的波高对比分析

刘剑浩^{1,3}, 陶爱峰^{1,3*}, 徐莹^{2,4}, 王岗^{1,3}, 吕韬^{1,3}, 曹力玮^{1,3}

(1. 河海大学海岸灾害及防护教育部重点实验室, 江苏 南京 210024; 2. 自然资源部空间海洋遥感与应用重点实验室, 北京 100081; 3. 河海大学港口海岸与近海工程学院, 江苏 南京 210024; 4. 国家卫星海洋应用中心, 北京 100081)

摘要: 中法海洋卫星 CFOSAT 搭载的高性能海浪谱仪 SWIM 获得了连续、大范围的海浪数据。CFOSAT 海浪波高数据在全球范围已开展了许多验证与校准工作, 但大多是与站点数据的比对, 将卫星数据应用于面域波浪场特性研究时缺乏与已有成熟数据集的对比。通过将中国邻近海域作为研究区域, 对 CFOSAT 与 ERA5 数据的有效波高进行对比, 分析了二者间的差异。结果表明, CFOSAT 数据与 ERA5 数据在波浪的面域观测上表现相似, 相关性较高; 二者有效波高的差值呈现季节变化特征, 秋冬季节的数据离散程度较大, 春夏季节较稳定; 随海浪高度的增加, CFOSAT 与 ERA5 数据的差异明显增加。

关键词: 中法海洋卫星; ERA5 数据集; SWH; 对比分析

中图分类号: U652.3; P731.22; P715.6

文献标志码: A

文章编号: 2095-7874(2024)10-0001-05

doi: 10.7640/zggwjs202410001

Comparison analysis of wave height in China's adjacent seas between CFOSAT and ERA5 data

LIU Jian-hao^{1,3}, TAO Ai-feng^{1,3*}, XU Ying^{2,4}, WANG Gang^{1,3}, LÜ Tao^{1,3}, CAO Li-wei^{1,3}

(1. Key Laboratory of Ministry of Education for Coastal Disaster and Protection, Hohai University, Nanjing, Jiangsu 210024, China; 2. Key Laboratory of Space Ocean Remote Sensing and Application, Ministry of Natural Resources, Beijing 100081, China; 3. College of Harbour, Coastal and Offshore Engineering, Hohai University, Nanjing, Jiangsu 210024, China; 4. National Satellite Ocean Application Service, Beijing 100081, China)

Abstract: The CFOSAT (Chinese-French Oceanography Satellite) equipped with the high-performance wave spectrometer SWIM has obtained continuous and extensive wave data. While CFOSAT wave data have undergone numerous validations and calibrations globally, most comparisons have been made with buoy data. There is a lack of contrast with existing mature datasets when applying satellite data to the study of wave field characteristics. By focusing on the China's adjacent seas, comparing the significant wave heights (SWH) between CFOSAT and ERA5 data and analyzing their differences. The results show that the CFOSAT data and ERA5 data exhibit similar performance and high correlation in wave field observations; The difference in SWH between them shows seasonal variation characteristics, with a greater degree of dispersion in the autumn and winter seasons and a more stable in the spring and summer seasons; With the increase of wave height, the bias between CFOSAT and ERA5 data significantly increases.

Key words: CFOSAT; ERA5 data set; SWH; comparison analysis

收稿日期: 2023-12-05 修回日期: 2024-02-28

基金项目: 国家重点研发计划(2023YFC3007900); 国家自然科学基金(52271271); 自然资源部空间海洋遥感与应用重点实验室资助项目(2023CF0002); 江苏省自然科学基金杰出青年基金(BK20220082); 水利部重大科技项目(SKS-2022025)

作者简介: 刘剑浩(2000—), 男, 山西大同人, 硕士研究生, 港口、海岸及近海工程专业, 从事水波动力学研究。

*通讯作者: 陶爱峰, E-mail: aftao@hhu.edu.cn

0 引言

海浪是海洋表面自然的波动现象,海浪的波高对于近海工程、海上作业、航行安全等方面具有重要影响。因此,了解海浪场波高的分布特性,对于海洋的开发利用有重要作用。传统的海浪观测依赖于放置在海洋表面的浮标,但想要对海洋整个波浪场进行观测时,浮标并不能很好地满足需求,海洋卫星遥感应运而生。海洋卫星遥感技术是通过遥感仪器(如地球卫星)对海洋进行远距离观测以获取全球海洋观测信息,具有大范围、全天候观测的优势。

中法海洋卫星 CFOSAT(Chinese–French Oceanography Satellite)作为中法两国合作研制的首颗海洋卫星,携带2枚高性能载荷:由中方研制的扇形波束扫描微波散射计 CSCAT^[1]和由法方研制的海浪谱仪 SWIM^[2]对全球海面风场、海浪场进行观测。卫星自2018年10月发射以来,观测记录了大量全球波浪场、风场信息,为进一步提高海洋动力环境及其变化规律认知、海洋气象与风浪预报水平提供了宝贵数据。

关于 CFOSAT 海浪波高数据,在国内外已有不少应用与研究:Hauser 等^[3]在2021年首次对海浪谱仪 SWIM 进行了载荷仪器验证与海浪测量结果的评估,使用欧洲中期天气预报中心(ECMWF)的 MFWAM 波浪模型数据进行对比验证,二者混合浪有效波高数据相关系数达到0.97,平均偏差为0.02 m;Li 等^[4]使用 NDBC 浮标、Jason-3 卫星、HY-2B 卫星数据对 SWIM 的 Nadir 近底点有效波高进行了验证,验证结果显示与三者的相关系数均高于0.98,数据偏差分别为0.12 m、0.09 m 和0.07 m,并给出了对应的线性校准参数;Liang 等^[5]使用 NDBC 浮标与 Jason-3 高度计数据,分别对比了近底点 native、nsec 以及 box 等的有效波高数据,对6°、8°、10°入射角波束的有效波高数据做了横向对比,结果发现近底点 nsec 与 box 数据准确性优于 native 数据,10°入射角波束数据精度优于其他入射角;Ye 等^[6]使用 NDBC 浮标数据对 SWIM 有效波高数据进行了时空匹配与验证,对不同离岸距离和海况下的数据精度进行了比较,发现离岸距离大于50 km 时数据精度好于50 km 内,评估了使用二次函数校准方法校准后的数据精度;Grigorieva 等^[7]使用 VOS 志愿观测船数据与 SWIM 获得的风、浪数据对比;Jiang 等^[8]使用 NDBC

浮标与 SWIM box 有效波高数据对比,二者混合浪有效波高数据相关系数为0.92,平均偏差为0.33 m;Tang 等^[9]使用南海的2个波浪浮标数据与 SWIM 的有效波高对比,共匹配到166个数据点,相关系数为0.66,平均偏差为0.44 m;Li 等^[10]使用南海5个浮标测站,分别与 SWIM 有效波高数据对比,与2个水深小于20 m 的浮标数据相关系数 R 均小于0.4,但对于2个水深超1 000 m 的浮标,相关系数 R 大于0.85,表现出良好的数据质量;Xu 等^[11]使用中国近海23个浮标数据以及 HY-2B 卫星数据对 SWIM 近底点有效波高数据在中国近海的表现进行了评价,相关系数分别为0.96和0.99。

在上述有关研究中,CFOSAT 有效波高数据已与众多浮标、卫星数据进行了对比,均得到了不错的结果,但对于卫星在更大面域范围上的表现并没有研究。本研究将 CFOSAT box 有效波高数据与高时空分辨率的 ERA5 数据集进行对比,比较2种数据的总体差异,分析在中国邻近海域 CFOSAT 与 ERA5 数据间的差异。

1 研究区域与数据

1.1 研究区域

为了研究卫星在局部复杂海域的表现,选取了中国近海及邻近海域作为目标研究区域,具体范围为105°E—135°E,0°N—42°N(如图1所示)。图中方框表示卫星所设置的数据单元“box”,线段表示卫星的星下点轨迹。

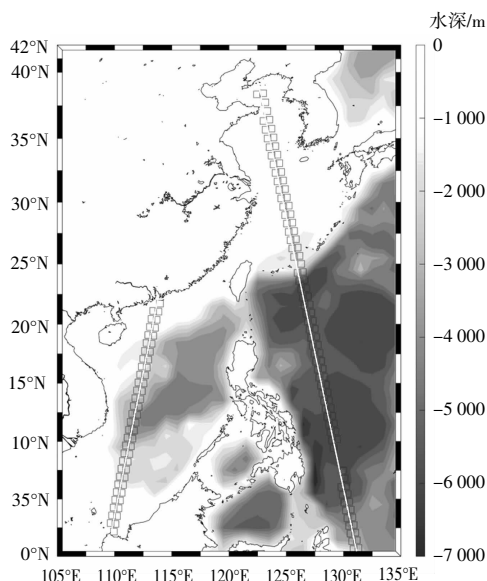


图1 研究区域水深与卫星数据示意图

Fig.1 Water depth in the study area and schematic diagram of CFOSAT data

1.2 数据来源

1.2.1 卫星数据

中法海洋卫星波浪谱仪 SWIM 是一个 Ku 波段(13.575 GHz)的多波束的真实孔径雷达, 专用于测量海浪二维波谱以及海浪参数的反演。本研究使用的数据来自 SWIM 的二级数据(L2)产品, 产品定义了数据单元格“box”, 这些 box 排列在卫星轨迹的两侧, 对应于大约 70 km×90 km 的区域。卫星的重访周期约为 13 d, 图 2 展示了一个周期内卫星数据的覆盖情况。

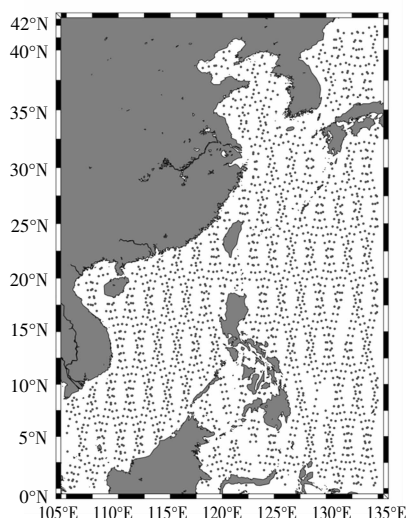


图 2 单个重访周期内卫星数据覆盖情况

Fig. 2 Coverage of CFOSAT data within a single revisit cycle

CFOSAT 的数据可以在中国国家卫星海洋应用中心(<http://www.nsoas.org.cn>)和法国国家空间研究中心(CNES)的数据中心网站(<https://www.aviso.altimetry.fr>)下载。SWIM 数据的可用时间起始于 2019 年 4 月 25 日, 为了方便分析, 本研究使用了 2019 年 5 月 1 日—2023 年 4 月 30 日的数据(48 个整月)。

1.2.2 ERA5 数据

ERA5 再分析数据集是欧洲中期天气预报中心 ECMWF 发布的第五代再分析数据集, 该数据集融合了大量观测数据和后报数值模拟结果, 提供跨越几十年的大范围数据, 拥有较高的时空分辨率, 适用于大范围海域的长期波浪特性分析。相较于上一代产品, 它拥有更高的时空分辨率、更好的数据精度, 目前已经被国内外许多学者用于研究全球海域波浪特性^[12-14]。

为匹配卫星数据, 本研究选用 2019 年 5 月—

2023 年 4 月的 ERA5 混合浪有效波高数据。数据范围与本研究区域相同(105°E—135°E, 0°N—42°N), 数据空间分辨率为 0.5°×0.5°, 时间分辨率为 1 h。

2 数据对比

2.1 对比方法

本研究使用的 2 种数据形式不相同, 相较于 ERA5 数据在时间和空间上都是连续的, 卫星数据随着时间的变化其位置也一直在保持变化, 故无法与之在时间序列上进行对比。采用类似于卫星数据与浮标数据匹配时用到的“时空匹配”方法^[15], 为每一条卫星数据匹配到距离其时空距离最近的 ERA5 数据。本研究选取的时空窗口大小为 30 min 和 50 km, 这与以往已有研究常采用的时空匹配窗口大小相同^[4,16], 即匹配到的每一对数据, 其在空间上的距离不超过 50 km, 二者时间相差不超过 30 min。

为了确定卫星数据与 ERA5 数据间的差异, 定义了以下 5 种统计参数, 相对绝对误差 RAE 、分散指数 SI 、相关系数 R 、均方根误差 $RMSE$ 和平均偏差 $Bias$:

$$RAE = \frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |A_i - B_i|}{\bar{B}} \quad (1)$$

$$SI = \frac{\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [(A_i - \bar{A}) - (B_i - \bar{B})]^2}}{\bar{B}} \quad (2)$$

$$R = \frac{\sum_{i=1}^n (A_i - \bar{A})(B_i - \bar{B})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (A_i - \bar{A})^2 (B_i - \bar{B})^2}} \quad (3)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (A_i - B_i)^2}{n}} \quad (4)$$

$$Bias = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (A_i - B_i) \quad (5)$$

式中: A 、 B 分别为 CFOSAT 和 ERA5 有效波高数据, m ; A_i 和 B_i 分别为匹配得到的数据对中的 CFOSAT 和 ERA5 有效波高数据; n 为得到的匹配数据对的数量。

2.2 对比结果

根据上述对比方法中介绍的时空匹配规则, 计算了全部匹配点数据的统计参数, CFOSAT 和 ERA5 有效波高的匹配散点密度图如图 3 所示。匹配到的数据点数量为 238 787 个, 平均偏差 $Bias$ 为 0.121 m, 均方根误差 $RMSE$ 为 0.293 m, 分散指数 SI 为 18.6%, 相关系数 R 为 0.964, 二者最小二乘回归线斜率为 1.083, 截距为 0.001。

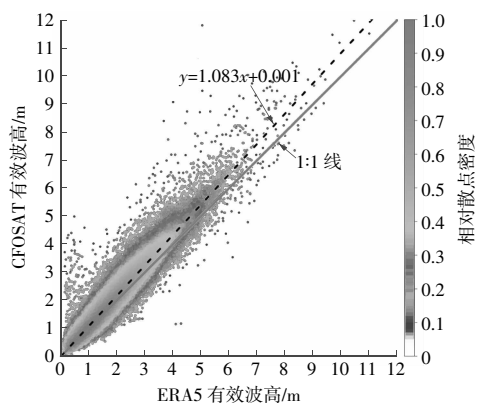


图3 匹配数据的散点密度图与统计参数

Fig. 3 Scatter density plots and statistical parameter for matched data

计算研究时间范围内各月的统计参数,结果如图4所示。CFOSAT与ERA5有效波高数据的相关性很高,各月相关系数均高于0.9,表明二者有效波高在研究区域内有很强的线性关系,数据趋势相似;二者的相对绝对误差水平较为稳定,平均RAE为0.136,卫星数据在质量上几乎没有异常变化,数据质量稳定;分散指数SI是一种用于衡量地理或空间数据分析中参数观测值在每个网格点上的变化或离散程度的指标,反映观测值相对于平均值的接近程度,计算得到二者平均分散指数为0.186。从图4可以看出,分散指数值呈现出季节性的周期变化,秋冬季节的分散指数高于平均数据,这表示CFOSAT有效波高数据在秋冬季节的一致性相较于其他季节更低;2组数据的平均均方根误差为0.293 m,与分散指数SI呈现出相同的季节变化特性,这表明在秋冬季节CFOSAT与ERA5数据相比出现了更多的大差异值。

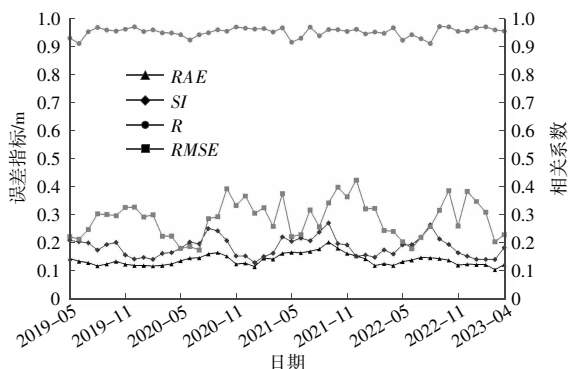


图4 各项统计指标结果

Fig. 4 Results of various statistical indicators

通过对比研究区域内各季节的有效波高偏差分布,发现CFOSAT与ERA5数据的差值分布呈

现出明显的季节变化特征(见图5):在春夏季节(3—5月、6—8月),有效波高总体差值较小,而在波高相对更大的秋冬季节(9—11月、12月—次年2月),二者的差值则明显偏大,这与前面采用统计指标进行分析得出的结果相同。有效波高差值在空间上的分布形式基本一致,在近岸海域CFOSAT波高一般要大于ERA5波高,在秋冬季节更为显著。

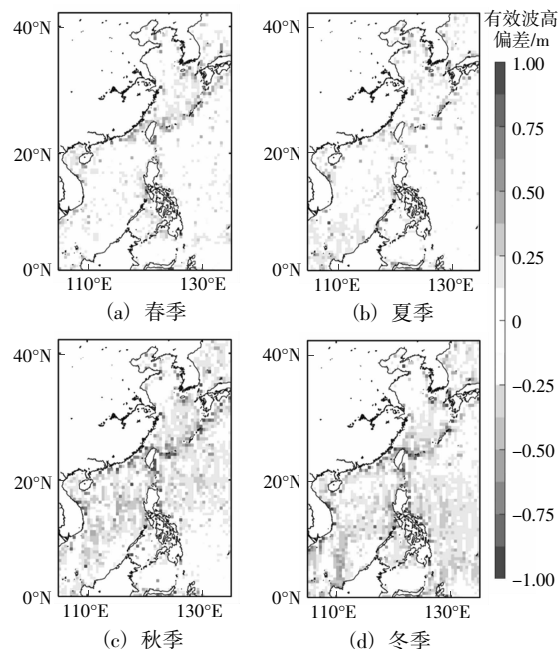


图5 有效波高偏差季节分布图

Fig. 5 Seasonal distribution of SWH bias

通过与ERA5数据偏差的对比发现,CFOSAT海浪数据秋冬季节表现出与ERA5数据集更大的差异。通过观察均方根误差RMSE在空间上的分布(如图6所示),进一步观察2个数据之间的差

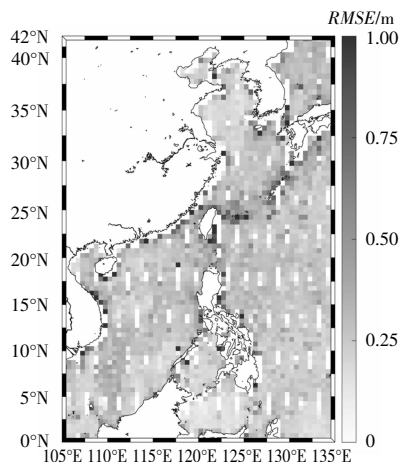


图6 有效波高的均方根误差RMSE空间分布

Fig. 6 Spatial distribution of RMSE of SWH

异分布。 $RMSE$ 的分布结果与秋冬季节数据间的偏差分布相似: 在大部分区域, $RMSE$ 小于 0.25 m; $RMSE$ 最大的区域集中在冲绳群岛、菲律宾群岛、朝鲜海峡以及台湾岛附近。

本研究还计算了不同海况下的各项统计指标, 结果如图 7 所示。从图 7 可以看出, 随着有效波高的增大, 各项误差统计参数也不断增大。绝对平均偏差 $abs\ Bias$ 在各海况下均大于平均偏差,

这表明在各海况下卫星波高数据整体都大于 ERA5 数据; 在有效波高小于 2 m 时, $Bias$ 、 $RMSE$ 等统计参数小于均值。

此外, 由于研究区域在秋冬季节波高整体较大, 在秋冬季节各统计参数也较春夏季节偏大, 这与图 7 中得到的结论相同。在较高海况下(有效波高大于 1.25 m), 需要进一步与实地观测数据进行比对, 以分析 2 种数据与真实波高的差异。

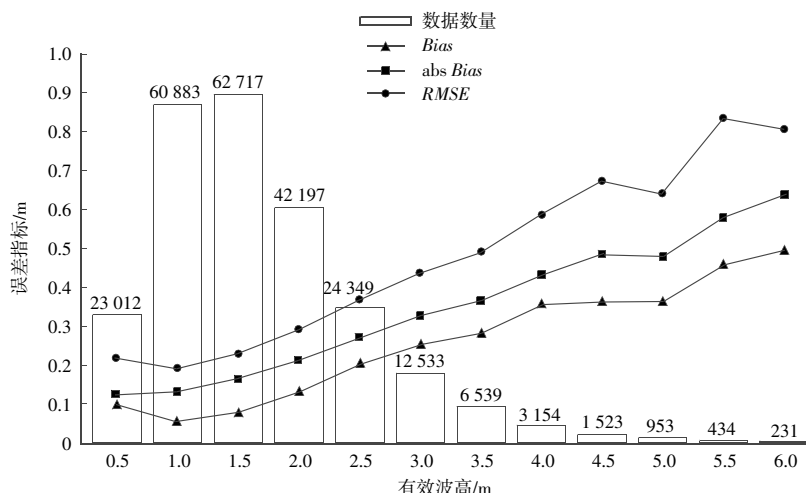


图 7 不同有效波高下的统计指标

Fig. 7 Statistical indicators in different SWH

3 结语

本文以中国海及邻近海域作为研究区域, 针对 2019 年 5 月—2023 年 4 月之间中法海洋卫星 CFOSAT 和 ERA5 的有效波高数据, 使用 4 个统计指标以及对差异的空间分布进行了对比分析。主要结论如下:

1) 中法海洋卫星 CFOSAT 与 ERA5 的有效波高数据相关性高, 相关系数 R 为 0.964, 均方根误差 $RMSE$ 为 0.293 m。表明 CFOSAT 数据与 ERA5 数据相似性高, 在波浪的面域观测上与成熟数据集的表现整体相似。

2) CFOSAT 与 ERA5 有效波高的差值呈现季节变化特征, 秋冬季节(9—11 月、12 月—次年 2 月)数据的离散程度要显著大于春夏季节(3—5 月、6—8 月), 二者数据差异最大的区域集中在冲绳群岛、菲律宾群岛、朝鲜海峡以及台湾岛附近。

3) 在较高海况下, 中法海洋卫星 CFOSAT 与 ERA5 的有效波高数据差异明显升高, 需要进一步与实地观测数据进行比对, 分析在高海况下 2 种数据的准确性。

参考文献:

- [1] LIN W, DONG X, PORTABELLA M, et al. A perspective on the performance of the CFOSAT rotating fan-beam scatterometer[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2019, 57(2): 627–639.
- [2] HAUSER D, TISON C, AMIOT T, et al. SWIM: The first space-borne wave scatterometer[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2017, 55(5): 3000–3014.
- [3] 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 Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2021, 59(1): 5–26.
- [4] LI X, XU Y, LIU B, et al. Validation and calibration of nadir SWH products from CFOSAT and HY-2B with satellites and in situ observations[J]. Journal of Geophysical Research: Oceans, 2021, 126(2): e2020JC016689.
- [5] LIANG G, YANG J, WANG J. Accuracy evaluation of CFOSAT SWIM L2 products based on NDBC buoy and Jason-3 altimeter data[J]. Remote Sensing, 2021, 13(5): 887.
- [6] YE Jing, WAN Y, DAI Y. Quality evaluation and calibration of the SWIM significant wave height product with buoy data[J]. Acta Oceanologica Sinica, 2021, 40: 187–196.

(下转第 78 页)