

高理,孔祥宁,李玉,等.CFOSAT与MetOp卫星散射计12.5 km产品反演风速交叉验证分析[J].海洋气象学报,2024,44(4):91-100.
GAO Li, KONG Xiangning, LI Yu, et al. Cross-validation analysis of wind speed retrieved by 12.5 km products of CFOSAT and MetOp satellite scatterometers [J]. Journal of Marine Meteorology, 2024, 44 (4): 91-100. DOI: 10.19513/j.cnki.hyqxxb.20240709001. (in Chinese)

CFOSAT与MetOp卫星散射计12.5 km产品 反演风速交叉验证分析

高理^{1,2,3},孔祥宁^{1,2,3},李玉⁴,张秀芝⁴,董旭光^{1,2,3}

(1.山东省气象防灾减灾重点试验室,山东 济南 250031;2.山东省气候中心,山东 济南 250031;3.长岛国家气候观测台,山东 长岛 265800;4.国家气候中心,北京 100081)

摘要 按照30 min和50 km的时空窗口,对2021—2022年同期在轨的中法海洋卫星(China-France Oceanography SATellite, CFOSAT)微波散射计(SCATterometer,简记为“CSCAT”)与MetOp (Meteorological Operational)卫星A、B、C星先进散射计(Advanced SCATterometer-A/B/C, ASCAT-A/B/C)反演海面风速进行交叉配对,进而对匹配数据进行降雨和陆地质控、匹配数据相关分析、相对误差和风速分布偏差分析,结果如下:(1)质量控制后CSCAT与ASCAT-A反演风速相关系数为0.94~0.97,均方根误差为0.82~1.89 m·s⁻¹。(2)2 m·s⁻¹以下风速段CSCAT比ASCAT-A/B/C大30%~70%,2~21 m·s⁻¹风速段CSCAT比ASCAT-A小0~5%,2~3 m·s⁻¹风速段CSCAT较ASCAT-B/C大3%~30%,4~17 m·s⁻¹风速段CSCAT比ASCAT-B/C小2%~10%。(3)2021年中国近海整体风速CSCAT大于ASCAT-A,其中1月,东海、南海、菲律宾及以东海域CSCAT比ASCAT-A大0.5~1.5 m·s⁻¹;7月,黄海、南海CSCAT比ASCAT-A大1.0~1.5 m·s⁻¹,与中国近海2021年各月平均风速变化相吻合,表明卫星间风速交叉验证可以很好地揭示卫星间风速的差异。

关键词 中法海洋卫星(CFOSAT);卫星反演风速;交叉验证;偏差分析

中图分类号: P405 文献标志码: A 文章编号: 2096-3599(2024)04-0091-10

DOI:10.19513/j.cnki.hyqxxb.20240709001

Cross-validation analysis of wind speed retrieved by 12.5 km products of CFOSAT and MetOp satellite scatterometers

GAO Li^{1,2,3}, KONG Xiangning^{1,2,3}, LI Yu⁴, ZHANG Xiuzhi⁴, DONG Xuguang^{1,2,3}

(1. Key Laboratory for Meteorological Disaster Prevention and Mitigation of Shandong, Jinan 250031, China; 2. Shandong Climate Center, Jinan 250031, China; 3. Changdao National Climate Observatory, Changdao 265800, China; 4. National Climate Center, Beijing 100081, China)

Abstract The cross matching of sea surface wind speed retrieved by China-France Oceanography SATellite (CFOSAT) SCATterometer (hereinafter referred to as “CSCAT”) and Advanced SCATterometer (ASCAT) onboard MetOp (Meteorological Operational)-A/B/C satellites (hereinafter referred to as “ASCAT-A/B/C”) in the same period of 2021–2022 is carried out according to the space-time windows of 30 min and 50 km, and then after rainfall and land quality control, the matched data is studied with respect to correlation, relative error and deviation analysis of wind speed distribution. The

收稿日期:2024-07-09;修回日期:2024-10-16

基金项目:风云卫星应用先行计划项目(FY-APP-ZX-2023.02);环渤海区域科技协同创新基金项目(QYXM202107, QYXM202206);山东省气象局科研项目(2023SDYD07)

第一作者简介:高理,女,硕士,高级工程师,主要从事海洋气象和气候应用研究,gaoli201213@163.com。

results are listed as follows. (1) After quality control, the correlation coefficient between CSCAT and ASCAT-A is 0.94–0.97, and the root mean square error is 0.82–1.89 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$. (2) The wind speed of CSCAT is 30%–70% larger than that of ASCAT-A/B/C when the wind speed is below 2 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$, 0–5% smaller than ASCAT-A in the range of 2–21 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$, 3%–30% larger than ASCAT-B/C in the range of 2–3 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$, and 2%–10% smaller than ASCAT-B/C in the range of 4–17 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$. (3) In 2021, the overall wind speed of CSCAT in China's offshore areas is larger than that of ASCAT-A, and the wind speed of CSCAT is 0.5–1.5 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ larger than that of ASCAT-A in the East China Sea, the South China Sea, the Philippines and the waters east of it in January. The wind speed of CSCAT is 1.0–1.5 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ larger than that of ASCAT-A in the Yellow Sea and the South China Sea in July, which is consistent with the changes in the monthly mean wind speed in China's offshore areas in 2021, showing that the cross validation of wind speed can well reveal the difference in wind speed between satellites.

Keywords China-France Oceanography SATellite (CFOSAT); satellite wind speed retrieval; cross validation; deviation analysis

引言

监测海面风场对于理解海洋与大气之间的相互作用以及开展海洋、大气领域的相关研究至关重要^[1]。1978年以来,卫星微波散射计和辐射计一直在提供洋面风的测量,为了将近几十年各种卫星洋面风数据相互校准且合并为一致的气候数据集,通过比较海洋浮标与卫星洋面风的差异,并分析不同卫星传感器之间的交叉验证结果,对不同卫星反演风速进行评估^[2–4]。微波散射计是目前获取全球海面风场最主要的传感器,其利用海面粗糙度的雷达后向散射系数以及多角度观测,间接反演海表风场信息,主要工作在C波段和Ku波段,C波段波长较长,受云雨等因素的影响较小;Ku波段频率高,对目标特征的变化更加敏感,有利于探测低速风场。目前为止,已成功发射的卫星散射计运行时间较长的主要包括欧洲遥感卫星(European Remote Sensing Satellite,简记为“ERS”)系列的ERS-1(1991年7月—1996年6月)和ERS-2(1995年4月—2001年1月),快速散射计(Quick SCATterometer, QuikSCAT;1999年6月—2009年11月),欧洲气象卫星应用组织(European Organisation for the Exploitation of Meteorological Satellites, EUMETSAT)发射的MetOp(Meteorological Operational)卫星A星(MetOp-A)搭载的先进散射计(Advanced SCATterometer-A, ASCAT-A;2006年10月—2021年11月)、ASCAT-B(2012年9月至今)、ASCAT-C(2018年11月至今),中法海洋卫星(China-France Oceanography SATellite, CFOSAT)搭载的微波散射计(SCATterometer,简记为“CSCAT”;2018年10月至今),海洋二号B星(HY-2B)微波散射计(简

记为“HY-2BSCAT”,2018年至今),海洋二号C星(HY-2C)微波散射计(简记为“HY-2CSCAT”,2020年至今),海洋二号D星(HY-2D)微波散射计(简记为“HY-2DSCAT”,2021年至今)等。2021年7月5日,风云三号E星(FY-3E)在酒泉卫星发射中心成功发射,是中国自主研发的第二代极轨气象卫星。受天气状况和海况的影响,由于不同设备测风的差异,卫星反演风速资料的精度和适用性需要地面观测资料及卫星交叉轨道资料的验证。荷兰皇家气象局(Royal Netherlands Meteorological Institute,简记为“KNMI”)使用全球的浮标观测数据对其发布的ASCAT资料进行质量评价,12.5 km产品风速平均偏差和均方根误差(root mean square error, RMSE)为 $-0.33 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 和 $1.06 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,风向平均偏差和RMSE为 -0.50° 和 17.28° ^[5]。张增海等^[6]对中国近海的ASCAT反演风场资料进行检验,近海中相对离岸较近的海域风速平均绝对偏差和RMSE为 $1.4 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 和 $1.2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,风向绝对偏差和RMSE为 26° 和 39° 。李玉等^[7]利用中国近海浮标资料与QuikSCAT和ASCAT-A的微波散射计海面风资料进行分析,两者风速相关系数达0.95时, $3.5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 以下的风速区间内前者明显小于后者, $10.0 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 以上的风速区间内前者明显大于后者。高留喜等^[8]用浮标资料对QuikSCAT和ASCAT南海北部数据进行了分析。

为了获得高精度的海面风场产品,国内外一直在探索改进散射计反演海面风场算法,开展风场融合研究^[9]。Yu等^[10]使用最小方差线性估计分析了OAFux(Objectively Analyzed air-sea Fluxes)项目研制的包含12个卫星传感器(2个散射计和10个微波辐射计)数据的高分辨率全球海洋表面矢量风产品,低

风和中风(风速小于 $15 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$)占全球日风场的98%,除了受天气风暴影响的区域外,全球海洋上空的日平均地面风可以由散射计和辐射计合并得到,但强风雨条件对风场反演造成了一定的影响^[11-12]。林溢园等^[9]基于变分估计方法,利用HY-2A、MetOp-A和印度空间研究组织发射的Oceansat-2卫星的星载微波散射计数据,开展了融合技术研究,多源风场的融合结果明显优于单一卫星的观测结果。但关于不同卫星传感器之间的交叉验证以及根据卫星数据中的质控码对风速进行质量控制则不多见。

CFOSAT由中国和法国联合研制,其搭载的国际上首个星载扇形波束旋转扫描体制的CSCAT,由中国科学院国家空间科学中心研制,也是中国首次从方案设计论证、载荷技术实现、数据处理与反演全链条自主创新实现的散射计,其反演的10 m风场产品有25.0 km和12.5 km两种分辨率。2018年10月29日成功发射,海面风场产品于2019年正式发布,在业务服务保障工作中提供了大量及时、准确、精细的信息。文中针对CSCAT和稳定运行历时较久的MetOp-A/B/C系列卫星ASCAT开展交叉轨道海面风速对比分析,为卫星海面风校准融合、海洋气象研究和业务应用提供科学支撑。

1 资料和方法

1.1 使用资料

ASCAT搭载在EUMETSAT发射的MetOp卫星

上,反演海洋表面10 m高度上的风速和风向。2006年10月发射的MetOp-A星,已于2021年11月停止运行;2012年9月发射MetOp-B星,2018年11月发射MetOp-C星,目前仍在轨运行。3颗星的ASCAT反演风均有25.0 km和12.5 km两种分辨率的洋面风产品,文中使用12.5 km分辨率L2数据产品,工作频率为C波段(5.255 GHz)^[13],资料来源于KNMI,下载自<https://scatterometer.knmi.nl>。

CFOSAT的10 m反演风场刈幅大于1 000 km,雷达分辨单元约为 $10 \text{ km}\times 12.5 \text{ km}$,是目前原始空间分辨率最高的在轨运行微波散射计^[2],其反演产品也有25.0 km和12.5 km两种分辨率,文中使用12.5 km分辨率L2B数据产品,工作频率为Ku波段(13.575 GHz),资料来源于国家卫星海洋应用中心(National Satellite Ocean Application Service, NSOAS),下载自海洋卫星数据分发系统网站(<https://osdds.nsoas.org.cn>)。

图1展示了2019—2022年ASCAT-A/B/C和CSCAT反演风速在中国近海区域($105^\circ\sim 135^\circ\text{E}$, $0^\circ\sim 45^\circ\text{N}$)逐月平均风速变化情况,可以看到,ASCAT-A/B/C风速比较接近,有的月份存在差异;CSCAT与ASCAT-A/B/C的风速差异明显,尤其表现在1、7月风速处于峰谷值的月份,最大平均风速差异可达 $1.5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。因此文中通过对4颗卫星同期在轨的2020—2021年海面风数据进行交叉验证分析,探索它们之间在不同风速段的差异。

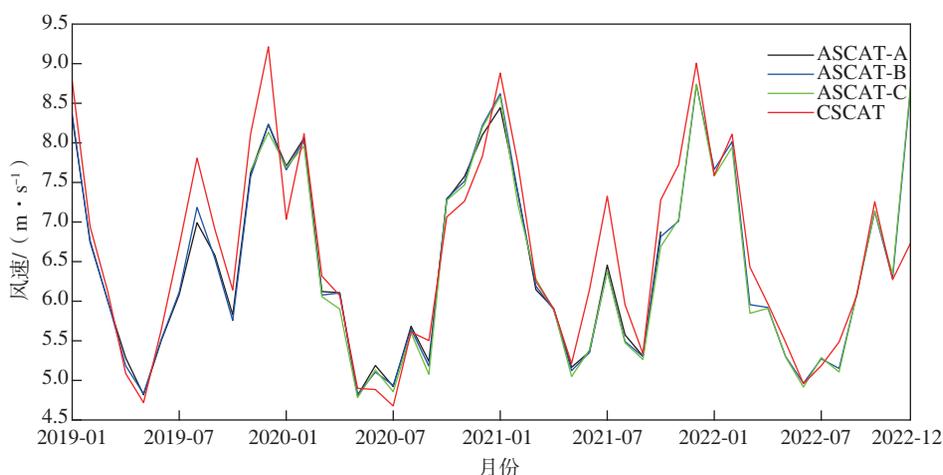


图1 中国近海区域ASCAT-A/B/C和CSCAT反演风速逐月平均变化
Fig.1 Variation of monthly mean wind speed over China's offshore areas retrieved by ASCAT-A/B/C and CSCAT

1.2 风速匹配时空窗口

卫星海面风交叉验证是指同期在轨的2颗卫星在相同的时间经过相同的地点挑取其风速进行配对,进而对所有匹配数据进行对比分析,获得2颗卫星反演风速的差异。卫星测风地面轨道随时间不断变化(图2),因此需要选取一定的时空窗口筛选卫星轨道交叉的样本数据。国内外相关研究^[14-15]在将卫星遥感数据与浮标现场测量数据进行比较时,

通常选取时间窗口为0.5~1.5 h,空间窗口为10~150 km。国外通常采用30 min、50 km的窗口^[16-18],Queffeuilou^[19]即采用此时空窗口介绍欧洲环境卫星(ENVIRONMENTAL SATellite, ENVISAT)装载的雷达高度计(Radar Altimeter 2, RA-2)风和波浪的验证结果。文中选取2颗卫星轨道交叉数据点距离小于50 km且时间小于30 min的数据进行配对和对比分析。

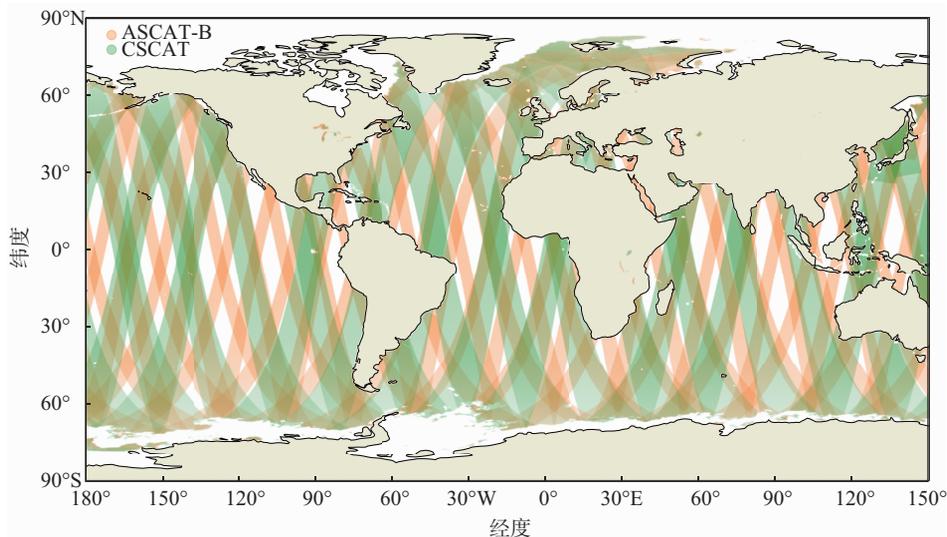


图2 2021年1月1日ASCAT-B与CSCAT测风轨道图

Fig.2 Wind track map from ASCAT-B and CSCAT on 1 January 2021

1.3 匹配样本筛选范围及质控

选取2020—2021年1、4、7、10月轨道ASCAT-A/B/C和CSCAT的反演风速进行样本配对,分别代表冬、春、夏、秋四季情况。由于每颗卫星运行参数不同,轨道交叉点在不同区域有数量差异,为了得到足够多的样本对,选取包含中国近海区域及往东、往北扩展到太平洋中高纬度范围(105°~120°W, 5°~70°N),挑选出2020、2021年ASCAT-A和CSCAT匹配样本分别为712 897、4 835 156对;ASCAT-B和CSCAT在中国近海区域交叉点较少,在中高纬度2020、2021年匹配样本分别为20 351、22 894对,多集中在7月和10月;ASCAT-C和CSCAT在中国近海区域交叉点同样稀少,2020、2021年在中高纬度匹配样本分别为23 017、18 378对,详见图3。根据数据质量码标识,剔除陆地覆

盖、降水影响,进一步筛选交叉样本(表1)。

1.4 稳健回归和Q-Q图分析方法

基于数据处理中无法预料的错误和误差,冯耀煌^[20]提出了非线性稳健回归模型。采用稳健回归(robustness regression)来估计线性模型 $y = X\beta$,返回系数向量 β 。算法基于bisquare加权函数的迭代加权最小二乘法,识别出潜在可能的离群点、强影响点或与模型假设相偏离的结构,拟合大部分数据存在的结构。

Q-Q图(quantile-quantile plot)是用图形的方式比较两组数据的概率分布^[21-22],把两组数据按分位数分为等间隔数组,同一个分位数组成坐标点 (x, y) ,形成一系列两组数据的样本对,如果两个分布相似,则该Q-Q图趋近于落在 $y = x$ 线上,如果两分布线性相关,则点在Q-Q图上趋近于落在一条直线上。

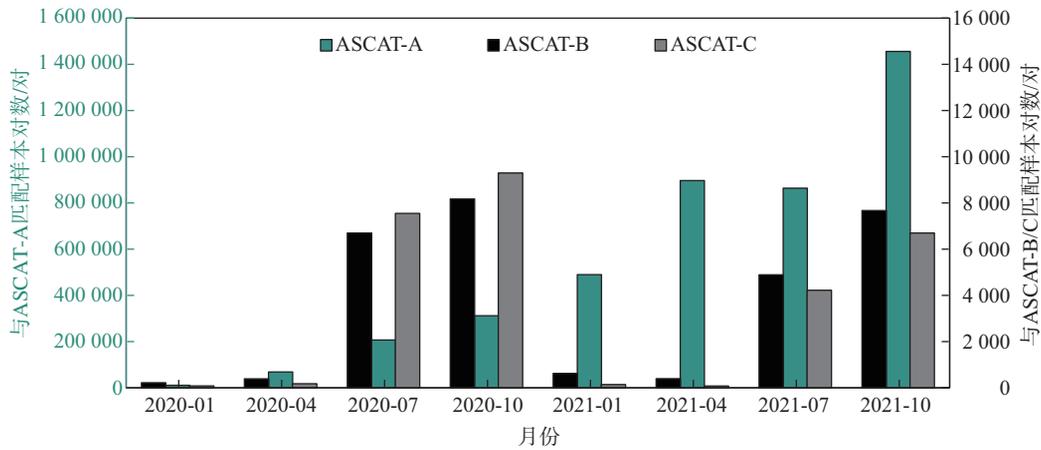


图3 2020—2021年1、4、7、10月CSCAT与ASCAT-A/B/C轨道交叉风速匹配样本对数

Fig.3 The number of cross-track wind speed matching sample pairs retrieved by CSCAT and ASCAT-A/B/C in January, April, July and October from 2020 to 2021

表1 2020—2021年CSCAT与ASCAT-A/B/C轨道交叉风速匹配样本对数质控前后对比分析

Table 1 Comparative analysis of the number of cross-track wind speed matching sample pairs retrieved by CSCAT and ASCAT-A/B/C from 2020 to 2021 before and after quality control

月份	与CSCAT交叉样本数量/对					
	质控前			质控后		
	ASCAT-A	ASCAT-B	ASCAT-C	ASCAT-A	ASCAT-B	ASCAT-C
2020年1月	17 947	334	53	10 832	219	18
2020年4月	88 694	524	208	68 482	388	176
2020年7月	254 209	9 297	11 278	206 817	6 699	7 548
2020年10月	352 047	10 196	11 478	311 862	8 171	9 297
2021年1月	562 804	758	236	489 759	623	140
2021年4月	965 579	547	32	896 841	394	14
2021年7月	1 413 273	10 085	8 487	863 940	4 891	4 222
2021年10月	1 893 509	11 504	9 623	1 455 911	7 671	6 699

1.5 相对误差

CSCAT与ASCAT海面风速的对比检验主要针对样本的RMSE和不同风速等级区间的平均偏差进行。具体公式如下:

$$\bar{x} = \sum_{i=1}^N \frac{y_i - x_i}{N \cdot x_i}, \quad (1)$$

$$V_{RMSE} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (y_i - x_i)^2}{N}}。 \quad (2)$$

式中: \bar{x} 为平均相对误差; x_i 为CSCAT反演风速, y_i 为ASCAT反演风速,单位为 $m \cdot s^{-1}$;N为样本对数,单位为对; V_{RMSE} 为均方根误差值。

2 交叉结果分析

2.1 匹配风速对比分析

2020、2021年ASCAT-A与CSCAT交叉风速数量较多,因此选取ASCAT-A代表ASCAT系列卫星

进行质控前后对比分析,以1、7月代表冷、热季节,分别分析2颗卫星匹配的原始样本、剔除陆地覆盖、剔除降水影响及同时剔除两者影响的关系。

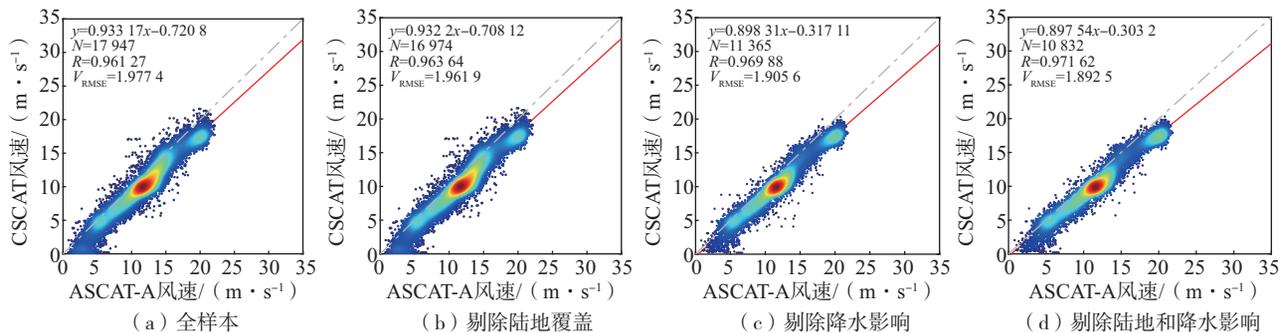
由2颗卫星在不同质控条件下的交叉匹配风速散点图(图4)可以看出,不论是在1月还是7月,CSCAT与ASCAT-A交叉风速剔除陆地覆盖和剔除降水影响,2颗卫星风速的相关性均有所提高,RMSE同时减少,尤其是剔除降水影响后散点更加集中在拟合线附近,而剔除陆地覆盖后散点图的分布态势变化不大。表2列出每种质控方案下的风速匹配对数(N)、相关系数(R)和RMSE,2020年1月,陆地覆盖占5.4%的样本,降水影响占36.7%的样本,两者均剔除后,相关系数由0.961提高到0.972, RMSE由1.98 $m \cdot s^{-1}$ 降至1.89 $m \cdot s^{-1}$;2020年7月,陆地覆盖占6.6%的样本,降水影响占13.0%的样本,两者均剔除后,相关系数由0.929提高到0.941, RMSE由1.14 $m \cdot s^{-1}$ 降至0.97 $m \cdot s^{-1}$;2021年1月,陆地覆盖占3.3%的样本,降水影

响占10.4%的样本,两者均剔除后,相关系数由0.967提高到0.970, RMSE 由 $1.29 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 降至 $1.17 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$; 2021年7月,陆地覆盖占2.9%的样本,降水影响占37.1%的样本,两者均剔除后,相关系数由0.954提高到0.956, RMSE 由 $1.03 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 降至 $0.82 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。分析显示,1月风速总体大于7月,两年的1月 RMSE 均较7月偏大,而2020年1月交叉样本较少,风速散点密度集中范围为 $10\sim 15 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,而其他三者交叉样本多,且散点密度集中在较低风速段,因而2020年1月 RMSE 较其他三者偏大明显。

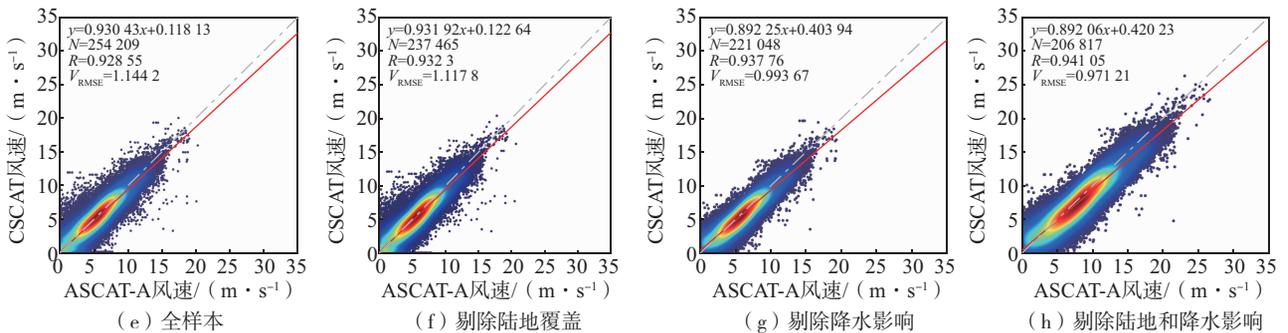
Q-Q 图可以很好地展示两组数据由小到大的跨度变化以及2颗卫星风速的细微差异。由质控后2021年全年的样本分析(图5)来看,ASCAT-B/C与CSCAT的Q-Q图基本一致, $4 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 以下低风速段

CSCAT 略偏大, $4\sim 13 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 风速段 CSCAT 接近或略小于 ASCAT-B/C, $13 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 以上风速段波动较大,无 $18 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 以上风速;ASCAT-A 与 CSCAT 的 Q-Q 图则有明显差异,风速小于 $3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时 CSCAT 略偏小, $3\sim 23 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 风速段2颗卫星接近,风速大于 $23 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时 CSCAT 小于 ASCAT-A, 无 $30 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 以上风速。此差异在2021年全年的散点图(图6)上也可以清晰地看出,ASCAT-A 与 CSCAT 的交叉样本风速多集中在 $3\sim 13 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 范围,大风速段较为离散,最大风速集中在 $30 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 以内,两组数据的相关系数为0.96, RMSE 为 $0.96 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$; 而 ASCAT-B/C 与 CSCAT 的交叉风速多集中在 $5\sim 12 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 范围,最大风速集中在 $18 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 以内,样本更接近线性拟合线,相关系数分别为0.92、0.93, RMSE 略高,分别为 1.24 、 $1.11 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。

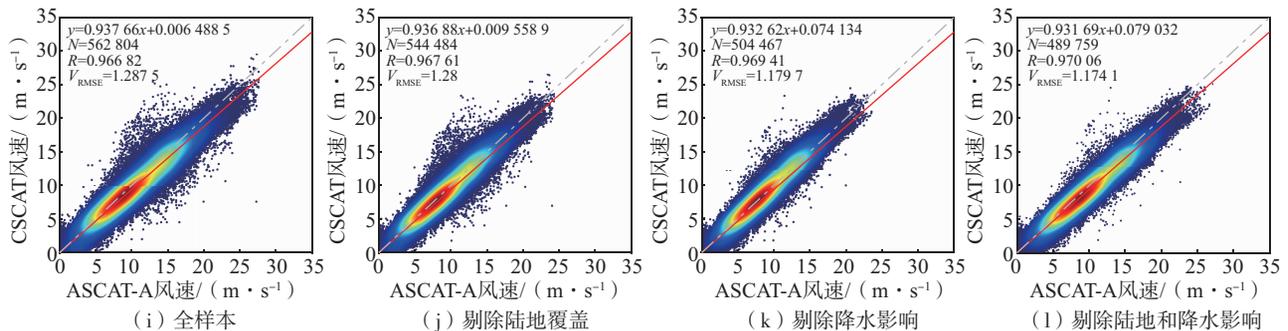
2020年1月



2020年7月



2021年1月



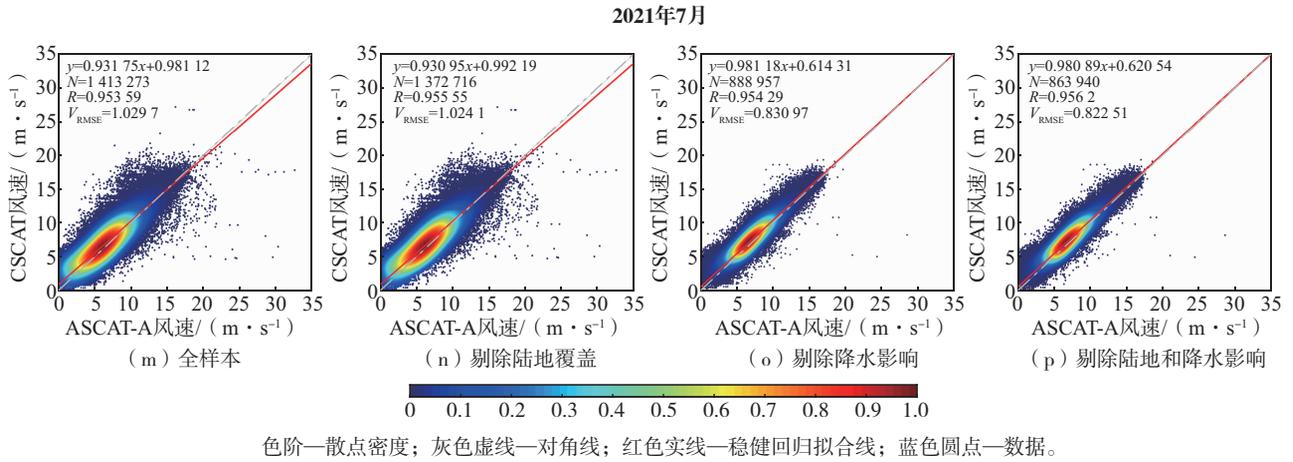


图4 ASCAT-A和CSCAT反演风速匹配样本散点密度图
Fig.4 Density scatter plot of wind speed matching samples retrieved by ASCAT-A and CSCAT

表2 CSCAT与ASCAT-A轨道交叉匹配风速关系质控前后对比分析

Table 2 Comparative analysis of cross-matching wind speed relationship between CSCAT and ASCAT-A before and after quality control

月份	分类	匹配对数/对	RMSE/ $(m \cdot s^{-1})$	相关系数
2020年1月	全样本	17 947	1.977	0.961
	剔除陆地覆盖	16 974	1.962	0.964
	剔除降水影响	11 365	1.906	0.970
	剔除陆地和降水影响	10 832	1.893	0.972
2020年7月	全样本	254 209	1.144	0.929
	剔除陆地覆盖	237 465	1.118	0.932
	剔除降水影响	221 048	0.994	0.938
	剔除陆地和降水影响	206 817	0.971	0.941
2021年1月	全样本	562 804	1.288	0.967
	剔除陆地覆盖	544 484	1.280	0.968
	剔除降水影响	504 467	1.180	0.969
	剔除陆地和降水影响	489 759	1.174	0.970
2021年7月	全样本	1 413 273	1.030	0.954
	剔除陆地覆盖	1 372 716	1.024	0.956
	剔除降水影响	888 957	0.831	0.954
	剔除陆地和降水影响	863 940	0.823	0.956

2.2 误差分析

基于2021年1、4、7、10月ASCAT-A/B/C与CSCAT的交叉风速,每间隔 $1 m \cdot s^{-1}$ 求2颗卫星风速之间的误差百分率,结果见图7。 $2 m \cdot s^{-1}$ 以下的低风速段,CSCAT比ASCAT-A/B/C大30%~70%; $2 \sim 21 m \cdot s^{-1}$ 风速段CSCAT比ASCAT-A小0~5%; $22 m \cdot s^{-1}$ 以上风速段CSCAT比ASCAT-A小10%左右。对于ASCAT-B/C而言, $2 \sim 3 m \cdot s^{-1}$ 风速段CSCAT较ASCAT-B/C大3%~30%, $4 \sim 17 m \cdot s^{-1}$ 风速段CSCAT比ASCAT-B/C小2%~10%,与图1相吻合,由此可见,通过交叉验证可以很好地揭示卫星间风速的差异。ASCAT-A与CSCAT交叉风速 $5 \sim 8 m \cdot s^{-1}$ 的样本最多,ASCAT-B与CSCAT交叉风速 $6 \sim 9 m \cdot s^{-1}$ 的样本最多,ASCAT-C与CSCAT交叉风速 $7 \sim 10 m \cdot s^{-1}$ 的样本最多,这可能与卫星轨道交叉点所处的纬度不同有关。

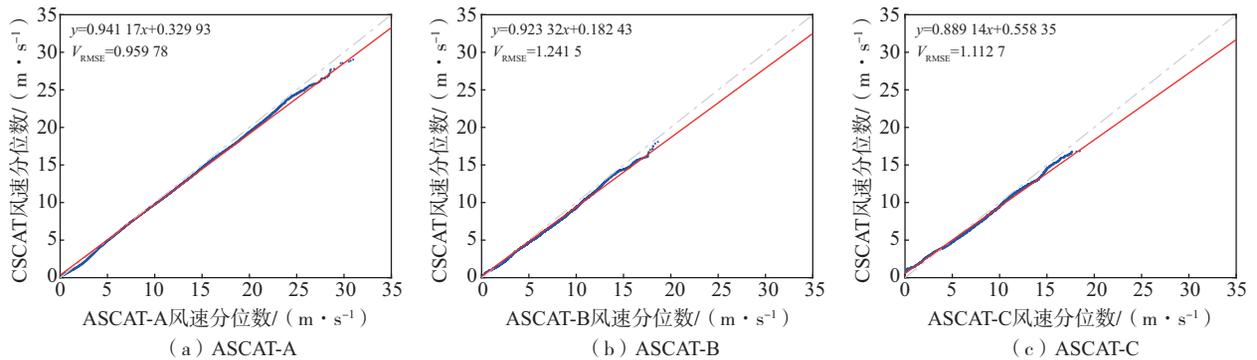
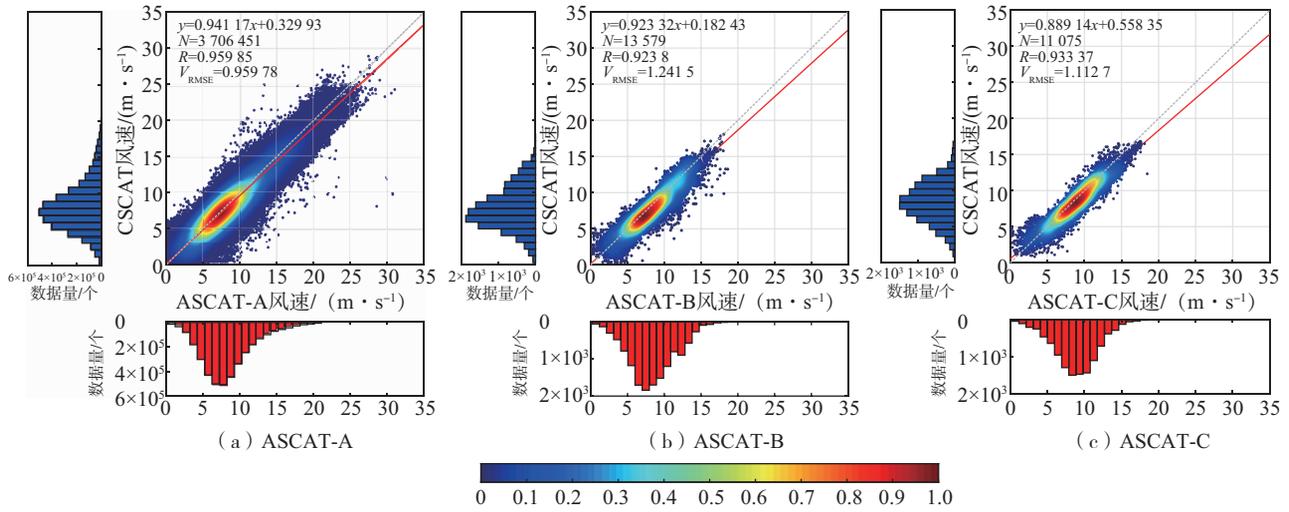


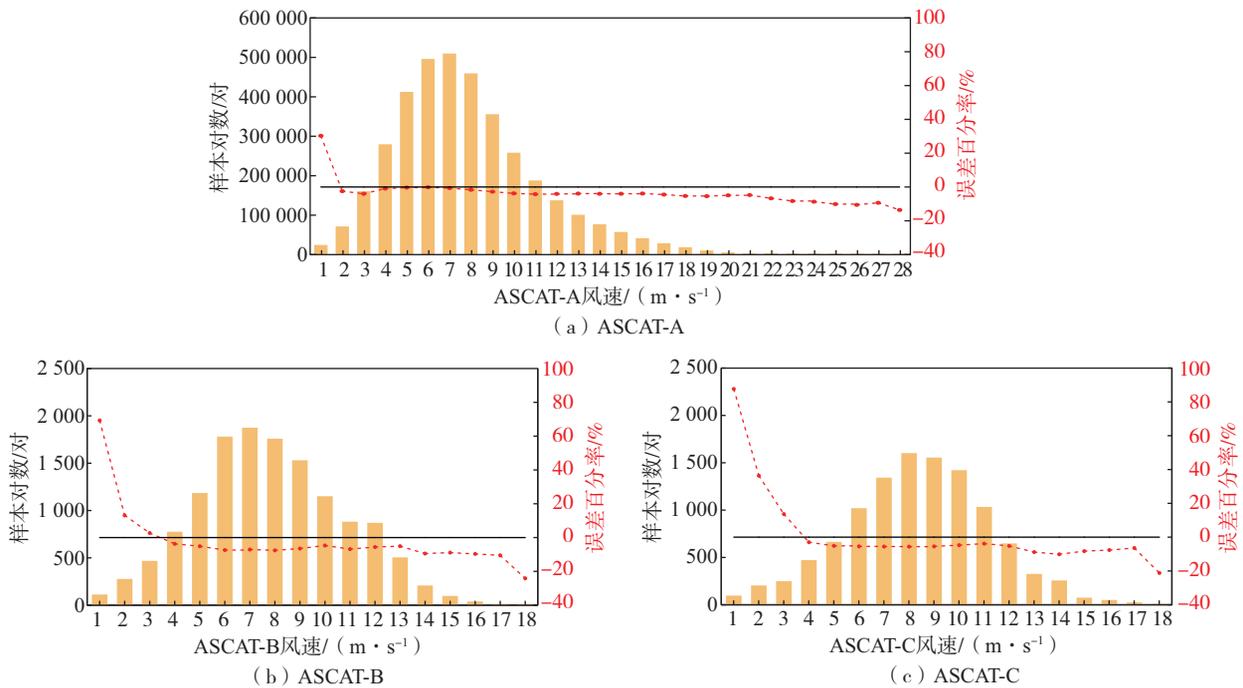
图5 2021年ASCAT-A/B/C和CSCAT反演风速匹配样本Q-Q图
Fig.5 Q-Q plot of wind speed matching samples retrieved by ASCAT-A/B/C and CSCAT in 2021



色阶—散点密度；灰色虚线—对角线；红色实线—稳健回归拟合线；蓝色圆点—数据。

图6 2021年ASCAT-A/B/C和CSCAT的反演风速匹配样本散点密度图

Fig.6 Density scatter plot of wind speed matching samples retrieved by ASCAT-A/B/C and CSCAT in 2021



黄色柱—样本对数；红色虚线—CSCAT相对ASCAT系列风速的误差百分率；黑色实线—误差零线。

图7 2021年ASCAT-A/B/C和CSCAT风速误差分析

Fig.7 Wind speed error analysis of ASCAT-A/B/C and CSCAT in 2021

3 风速分布对比分析

3.1 卫星风速分布

选取2021年1、7月ASCAT-A和CSCAT同期反演风速数据,对海岸陆地及岛屿影响进行屏蔽处理后,分析中国近海的平均风速分布(图8)。2颗

卫星反演风速分布基本一致,1月台湾海峡、巴士海峡风速最大,风速大值区向东北延伸至琉球群岛、朝鲜海峡,向西南延伸至越南东南海域一带,菲律宾以南、印度尼西亚以东低纬度海域风速小,渤海、黄海北部海上风速相对中纬度也偏小;7月是小风月,2颗卫星反演风速在东海、南海中西部、菲律宾以东

海域较大,菲律宾以南、渤海、黄海北部、日本海海域较小。整体而言,CSCAT 风速大于 ASCAT-A。卫星

反演风速与基于模式资料、船舶资料绘制的平均风速气候分布态基本吻合^[23-25]。

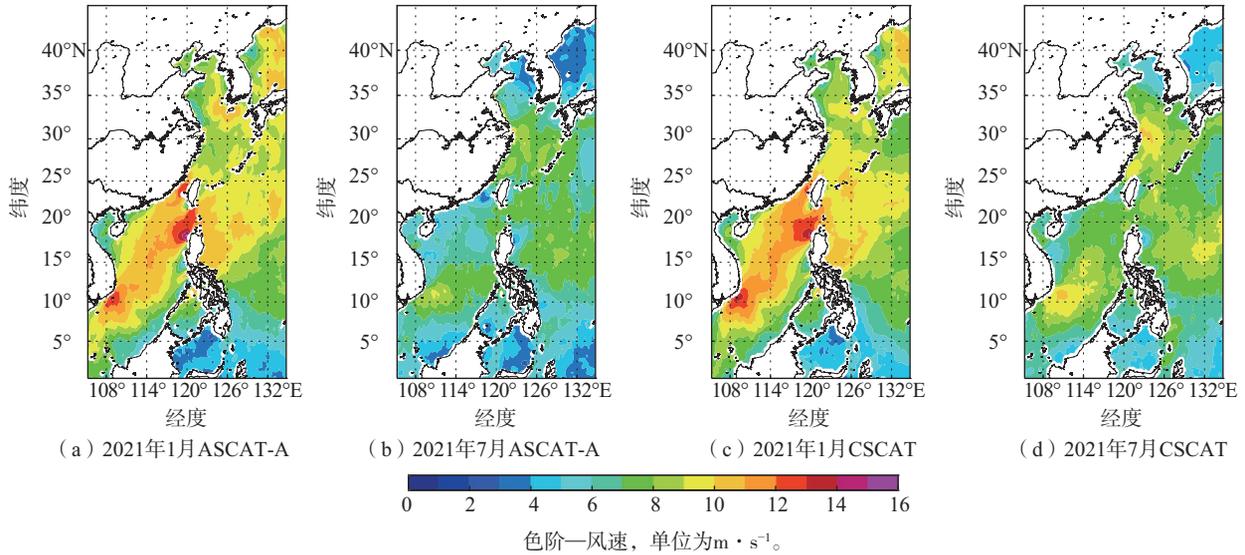


图8 2021年1、7月ASCAT-A和CSCAT反演平均风速分布

Fig.8 Distribution of mean wind speed retrieved by ASCAT-A and CSCAT in January and July 2021

3.2 CSCAT 与 ASCAT-A 的差异分析

图9为2021年1月和7月CSCAT与ASCAT-A的风速差分布,可以看到,1月东海、南海、菲律宾及以东海域风速CSCAT比ASCAT-A大 $0.5 \sim 1.5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$;7月黄海、南海风速CSCAT比ASCAT-A大 $1.0 \sim 1.5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。与图1 2021年1、7月风速CSCAT大于ASCAT-A一致。

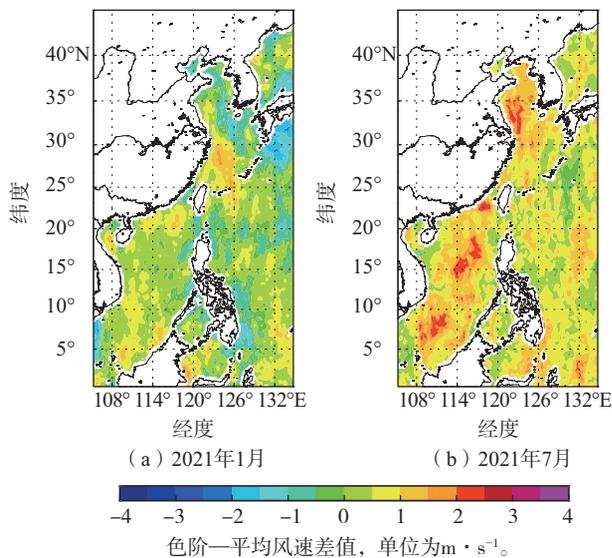


图9 2021年1、7月CSCAT与ASCAT-A反演平均风速差值分布

Fig.9 Distribution of mean wind speed difference between those retrieved by CSCAT and ASCAT-A in January and July 2021

4 结论

通过进行2019—2022年CFOSAT和MetOp卫星反演风速在不同质量标识分类下的对比分析,得到如下结论:

(1)按照同期在轨卫星间50 km、前后30 min的时空窗口,CSCAT分别与ASCAT-A/B/C卫星轨道海面风数据进行交叉配对,发现在中国近海及太平洋范围内ASCAT-A和CSCAT匹配样本较多,ASCAT-B/C和CSCAT在中国近海区域匹配样本较少,多集中在中高纬度。

(2)剔除陆地覆盖和降水影响后,CSCAT与ASCAT-A/B/C的各月反演风速相关性均有所提高, RMSE减小;CSCAT与ASCAT-A的各月风速相关系数为 $0.94 \sim 0.97$,RMSE为 $0.82 \sim 1.89 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。

(3) $2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 以下的低风速段,CSCAT比ASCAT-A/B/C大 $30\% \sim 70\%$; $2 \sim 21 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 风速段CSCAT比ASCAT-A小 $0 \sim 5\%$; $22 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 以上CSCAT比ASCAT-A小 10% 左右。对于ASCAT-B/C而言, $2 \sim 3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 风速段CSCAT较ASCAT-B/C大 $3\% \sim 30\%$, $4 \sim 17 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 风速段CSCAT比ASCAT-B/C小 $2\% \sim 10\%$,与图1相吻合。由此可见,通过交叉验证可以很好地揭示卫星间风速的差异。

(4)中国近海CSCAT与ASCAT-A同期风速分

布态基本一致,2021年整体而言CSCAT风速大于ASCAT-A,其中1月东海、南海、菲律宾及以东海域CSCAT比ASCAT-A大 $0.5 \sim 1.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,7月黄海、南海CSCAT比ASCAT-A大 $1.0 \sim 1.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。与图1中2021年1、7月风速CSCAT大于ASCAT-A一致。

参考文献:

- [1] 张毅,蒋兴伟,林明森,等.星载微波散射计的研究现状及发展趋势[J].遥感信息,2009,24(6):87-94.
- [2] WENTZ F J, RICCIARDULLI L, RODRIGUEZ E, et al. Evaluating and extending the ocean wind climate data record[J]. IEEE J Sel Top Appl Earth Obs Remote Sens, 2017,10(5):2165-2185.
- [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] 田光辉,刘少军,李伟光,等.ASCAT风场在南海的适用性分析[J].广东气象,2020,42(5):39-43.
- [5] VERHOEF A, STOFFELEN A. Validation of ASCAT 12.5-km winds [EB/OL]. (2013-05) [2024-07-09]. https://knmi-scatterometer-website-prd.s3-eu-west-1.amazonaws.com/publications/validation_of_ascat_12.5km_winds_1.3.pdf.
- [6] 张增海,曹越男,刘涛,等.ASCAT散射计风场在我国近海的初步检验与应用[J].气象,2014,40(4):473-481.
- [7] 李玉,高理,张秀芝,等.QuikSCAT与ASCAT-A卫星海面风在中国近海风电规划区的差异[J].船舶工程,2022,44(增刊1):140-146.
- [8] 高留喜,朱蓉,常蕊. QuikSCAT和ASCAT卫星反演风场在中国南海北部的适用性研究[J].气象,2014,40(10):1240-1247.
- [9] 林溢园,邹巨洪,林明森,等.多源星载微波散射计海面风场信息融合研究[J].遥感技术与应用,2017,32(1):126-132.
- [10] YU L S, JIN X Z. Insights on the OAFlux ocean surface vector wind analysis merged from scatterometers and passive microwave radiometers (1987 onward) [J]. J Geophys Res:Oceans,2014,119(8):5244-5269.
- [11] 汪栋,张杰,范陈清,等.两种ASCAT散射计风产品的比较及评估[J].海洋科学,2016,40(4):108-115.
- [12] 姚日升,涂小萍,丁焯毅,等.华东沿海ASCAT反演风速的检验和订正[J].应用气象学报,2015,26(6):735-742.
- [13] 张增海,曲荣强,刘涛,等.环渤海海域卫星反演风与站点观测风对比分析[J].海洋气象学报,2018,38(3):30-38.
- [14] 陈春涛,李军,朱建华,等.时空窗口对HY-2有效波高产品检验影响模拟研究[J].海洋技术学报,2015,34(5):31-36.
- [15] 孙莎莎,孙艺,郭俊建,等.ASCAT近岸风在山东沿海的适用性分析[J].海洋气象学报,2017,37(2):90-95.
- [16] ZIEGER S, VINOTH J, YOUNG I R. Joint calibration of multiplatform altimeter measurements of wind speed and wave height over the past 20 years[J]. J Atmos Oceanic Technol,2009,26(12):2549-2564.
- [17] RAY R D, BECKLEY B D. Calibration of ocean wave measurements by the TOPEX, Jason-1, and Jason-2 satellites[J]. Mar Geod,2012,35(s1):238-257.
- [18] QUEFFEULOU P. Long-term validation of wave height measurements from altimeters [J]. Mar Geod,2004,27(3/4):495-510.
- [19] QUEFFEULOU P. Validation of ENVISAT RA-2 and JASON-1 altimeter wind and wave measurements [C]// Proceedings of IEEE International Geoscience & Remote Sensing Symposium. Seoul,Korea;IEEE,2005:2987-2989.
- [20] 冯耀煌.非线性稳健回归在天气预报中的应用[J].气象,1990,16(5):15-19.
- [21] 樊利利.变形广义极值分布的参数估计及实例分析[J].首都师范大学学报(自然科学版),2016,37(6):18-24.
- [22] 王康宁,林路.空间非参回归的变量选择[J].中国科学:数学,2016,46(3):301-320.
- [23] 周钰淇,崔佳乐,孙博雯,等.“21世纪海上丝绸之路”风能资源时空变化评估[J].海洋气象学报,2022,42(4):11-21.
- [24] 陈冠宇,艾未华,程玉鑫,等.基于星载SAR数据和模式资料的海面风场变分融合方法研究[J].海洋气象学报,2017,37(4):65-74.
- [25] 中国气象局国家气象中心.中国内海及毗邻海域海洋气候图集[M].北京:气象出版社,1995:21-81.