

HY-2C 卫星散射计海面风场产品的检验评估

刘晓燕^{1,2,3}, 郝赛^{1,3*}, 彭炜^{1,2,3}, 刘宇昕², 张洁^{1,3}

(1. 国家海洋环境预报中心, 北京 100081; 2. 自然资源部空间海洋遥感与应用研究重点实验室, 北京 100081; 3. 国家海洋环境预报中心 自然资源部海洋灾害预报技术重点实验室, 北京 100081)

摘要: 基于中国近海浮标的逐小时海面风矢量实测数据、ASCAT 散射计风场数据以及欧洲中期天气预报中心的第五代全球再分析数据(ERA5)的逐小时风场数据, 使用统计分析方法对 HY-2C 卫星散射计海面风场数据产品进行检验评估, 检验使用的是 2~24 m/s 风速区间内的数据。结果表明: 使用 11 个浮标共计 3 351 个样本数据作为真值进行检验, 风速和风向的均方根误差分别为 1.01 m/s 和 20.7°; 使用 8 304 963 个 ASCAT 样本数据进行检验, 风速和风向的均方根误差分别为 0.66 m/s 和 11.5°; 使用 ERA5 风场数据进行全球区域检验, 风速和风向的均方根误差分别为 1.05 m/s 和 12.0°; 使用 ERA5 风场数据进行西北太平洋区域检验, 风速和风向的均方根误差分别为 1.19 m/s 和 15.5°。由此可见, HY-2C 卫星散射计海面风场产品质量的可信度较高, 能够较好地满足业务化应用的精度要求。

关键词: HY-2C 卫星; 散射计海面风场; 检验; 评估

中图分类号: P732 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-0239(2024)02-0092-12

0 引言

海面风场是海洋气象领域的一个重要研究内容, 它与海洋气象灾害(包括台风、温带气旋、海浪、风暴潮等)的发生有着直接或间接的关系, 因此海面风的监测和及时准确的预报对海洋防灾减灾有着十分重要的意义^[1-4]。随着观测技术的提高, 尤其是卫星监测技术的快速发展, 越来越多的海洋卫星可观测到全球范围、高精度、实时的海面数据, 大量积累了观测资料, 有效改善了海面常规观测资料匮乏的状况。我国于 2011 年 8 月 16 日成功发射了第一颗海洋动力环境卫星——海洋二号 A 卫星(HY-2A), 标志着我国海洋系列卫星体系初步形成。该卫星上搭载的微波散射计可提供大量海面风场数据, 填补了我国在该领域的空白, 目前该卫星降级工作, 其中散射计由于机械故障停止运行。2018 年

10 月 25 日, 海洋二号 B 卫星(HY-2B)成功发射, 标志着中国海洋动力环境卫星从科研业务星转换到业务星; 2020 年 9 月 21 日, 海洋二号 C 卫星(HY-2C)成功发射; 2021 年 5 月 19 日, 海洋二号 D 卫星(HY-2D)成功发射。这 3 颗在轨 HY-2 系列卫星共同构成了我国海洋动力环境监测网, 形成了全天候、全天时、高频次的全球大中尺度的海洋动力环境监测体系。这 3 颗卫星上搭载的微波散射计的风速测量范围均为 2~24 m/s, 风速精度为 2 m/s, 风向为 20°。此外, 我国与法国共同研制的中法海洋卫星(CFOSAT)于 2018 年 10 月 29 日发射成功, 其上载荷之一的微波散射计是由中国科学院国家空间科学中心研制, 这是国际上首个采用扇形波束旋转扫描体制的卫星散射计^[5-7]。

由于卫星散射计风场数据具有显著优势, 已在海洋动力环境监测以及天气预报中得到了广泛使

收稿日期: 2023-03-16。

基金项目: 自然资源部空间海洋遥感与应用研究重点实验室开放基金(202102004)。

作者简介: 刘晓燕(1988-), 女, 工程师, 硕士, 主要从事海面风场资料同化研究工作。E-mail: liuxiaoyan-de@163.com

*通信作者: 郝赛(1987-), 女, 工程师, 博士, 主要从事台风海气相互作用及数值模拟工作。E-mail: haosai@lasg.iap.ac.cn

用。然而,风场数据的质量会直接影响实际的应用效果,因此,对数据质量进行评估是数据使用前的重要环节^[8]。针对卫星散射计海面风场或其他数据的检验评估,国内外学者已经有了很多成果,积累了很多经验方法。林明森等^[9]将HY-2A卫星散射计风数据与美国国家数据浮标中心(National Data Buoy Center, NDBC)的浮标以及其他卫星散射计观测数据进行对比,结果表明HY-2A卫星微波散射计的风速、风向数据精度可满足海洋科学研究和海洋业务应用的需求。王东良等^[10]利用国际海-气综合数据集(International Comprehensive Ocean-atmosphere Data Set, ICOADS)中的海面风场实测数据同样对HY-2A卫星散射计的风场产品进行了检验,在2~24 m/s风速条件下,剔除超过3个标准偏差的风速样本后, HY-2A卫星散射计与ICOADS两者风速的平均绝对误差为1.36 m/s,风向的平均绝对误差为14.98°,结果同样表明HY-2A数据满足业务应用需求。陈克海等^[8]利用欧洲中期天气预报中心(European Center for Medium - Range Weather Forecasts, ECMWF)的再分析风场数据、热带大气海洋观测计划(Tropical Atmosphere Ocean Array, TAO)和NDBC浮标获取的海面风矢量实测数据,对HY-2B卫星散射计海面风场数据产品的质量进行了统计分析,3组对比结果均表明, HY-2B卫星散射计风场数据可以较好地满足业务化应用的精度要求。WANG等^[11]利用浮标数据、ECMWF数据等对HY-2C卫星散射计风场数据进行了验证,结果表明, HY-2C卫星散射计风场数据满足精度,同时与HY-2B数据有着很好的一致性。此外,还有很多国内外学者开展了其他卫星散射计的评估检验工作^[12-14],皆证明了卫星散射计风的数据质量是可信的。

本文同样对HY-2C卫星散射计风场数据进行检验评估,使用中国近海浮标以及ECMWF的第五代全球再分析数据(ERA5)的风场数据分别进行检验,由于我国东临西北太平洋,所以更关注HY-2C卫星散射计数据在此区域的观测能力,所以使用ERA5风场数据分别对全球区域和西北太平洋区域(-5°~50°N, 90°~160°E)进行检验。受散射计海面风场反演原理的限制, HY-2系列卫星散射计在2~24 m/s风速范围内的风场产品较为可靠^[10],此

外,由于风向存在自身变异性,当风速低于4 m/s时,风向的误差较大^[15-16],所以本文的检验评估工作针对2~24 m/s风速范围内的风速和4~24 m/s风速范围内的风向数据开展。

1 数据和方法介绍

1.1 HY-2C卫星散射计海面风数据

本文使用的HY-2C卫星散射计海面风数据是经过处理后的L2B级产品。该产品是按轨道存储的经反演获得的海面风矢量数据产品,每一轨数据有1 624×76个风矢量单元,其中1 624是行数,76是每行的风元数,空间分辨率为25 km×25 km^[17]。该产品主要参数包括与每个风矢量单元对应的经度、纬度、反演获得的海面风速、风向、质量标志以及每个风矢量单元行所对应的观测时间等,本文选取2021年5月—2022年6月的数据用于检验评估。

1.2 中国近海浮标数据

本文选取中国近海11个浮标站的数据,其中渤海海域3个(B01、B02、B03)、黄海海域3个(H01、H02、H03)、东海海域2个(D01、D02)、南海海域3个(N01、N02、N03)。数据的时间选取范围同HY-2C卫星散射计海面风数据,每个浮标数据的时间分辨率为逐小时。

1.3 ERA5风场数据

ERA5再分析数据是ECMWF第五代全球再分析资料,也是目前为止最新一代再分析资料^[18-19]。本文使用的是该资料中的10 m经向风和10 m纬向风数据,水平分辨率为0.25°×0.25°,时间分辨率为逐小时。数据的时间选取范围同HY-2C卫星散射计海面风数据。

1.4 ASCAT散射计海面风场数据

本文使用的ASCAT(The Advanced Scatterometer)海面风数据是由装载于Metop-B业务观测卫星之上的散射计数据反演而来的L2B级产品。同HY-2C产品一样,该产品同为按轨道存储的海面风矢量数据产品,每一轨数据有1 632(1 584)×42个风矢量单元,其中1 632(1 584)是行数,42是每行

的风元数,其空间分辨率为 $25\text{ km} \times 25\text{ km}$ 。该产品主要参数包括与每个风矢量单元对应的经度、纬度、反演获得的海面风速、风向、质量标志以及每个风矢量单元行所对应的观测时间等。数据的时间选取范围同HY-2C卫星散射计海面风数据。

1.5 数据处理方法

上述4种数据中,两种卫星散射计数据是沿轨数据,近海浮标数据是单点数据,ERA5数据是空间分辨率为 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ 的逐小时全球等经纬网格数据。为了便于将4种数据进行两两对比验证,需对数据进行不同的插值处理,完成数据时空匹配。匹配过程中,当被评估数据与参照数据的偏差超过3倍标准差 σ 时,则判定该匹配数据为异常值,做缺省处理。

1.5.1 使用浮标数据进行单点检验

中国近海浮标数据是逐小时单点数据,当使用该数据与其他3种数据进行匹配时,需对其他3种数据进行插值处理。ERA5数据的时间与浮标数据一致,均为逐小时,所以只需对ERA5数据进行空间插值即可,可采用双线性插值方法得到与各个浮标点匹配的ERA5数据;两种卫星散射计数据的插值方法为:以浮标的时间和经纬度位置为参考,时间相差30 min以内、空间距离相差 0.25° 以内的卫星数据可近似认为是该时刻该浮标点位置的卫星散射计数据,在插值处理的同时需剔除质量标志异常的数据。此外,对浮标数据也进行了常规的质量控制,包括范围检测法、奇异值检测法等,剔除了存在明显质量问题的数据。

1.5.2 使用卫星散射计数据、ERA5数据进行场检验

ERA5数据是规则的全球等经纬度数据,为便于3种数据两两进行检验,本文将两种不规则的卫星散射计沿轨数据分别插值至逐小时的等经纬度全球网格点上。具体步骤如下:

①首先构建检验时段内逐小时的空间分辨率为 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ 的全球等经纬网格,并赋值所有时刻所有格点上风速、风向为缺省,网格点的设置与ERA5数据保持一致。

②逐轨读取散射计数据,将每个风元的数据分别进行时间和空间插值,其中时间按就近原则插值到最近的整点时刻,空间按就近原则插值到最近的

等经纬度网格点上,同时还需满足该点与插值网格点的距离小于 0.25° ,若同时有多个风元匹配到同一时刻同一网格点,则选取距离最近的风元作为该格点的数据(因为散射计数据的空间分辨率为 25 km ,采取该方式插值可以最大限度地保留散射计数据)。

③最终经过处理后的HY-2C/ASCAT数据的时空分辨率均与ERA5数据一致。此外,在插值处理过程中剔除质量标志异常的数据。

1.6 统计方法介绍

检验评估用到的统计量包括平均误差(Mean Error, ME)、平均绝对误差(Mean Absolute Error, MAE)、均方根误差(Root Mean Square Error, RMSE)和相关系数(Correlation Coefficient, CC),具体公式如下:

平均误差:

$$ME = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (F_i - O_i) \quad (1)$$

平均绝对误差:

$$MAE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |F_i - O_i| \quad (2)$$

均方根误差:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (F_i - O_i)^2} \quad (3)$$

相关系数:

$$CC = \frac{\sum_{i=1}^N (F_i - \bar{F})(O_i - \bar{O})}{\left[\sum_{i=1}^N (F_i - \bar{F})^2 \sum_{i=1}^N (O_i - \bar{O})^2 \right]^{\frac{1}{2}}} \quad (4)$$

式中: F_i 是被检验评估数据的风速/风向值; O_i 是作为真值的数据的风速/风向值; \bar{F} 是被检验评估数据的风速/风向平均值; \bar{O} 是作为真值的数据的风速/风向平均值; N 是对应的样本量。

2 检验结果分析

2.1 整体检验结果分析

分别使用中国近海11个浮标实测风矢量数据

(BUOY)、ASCAT 散射计风场数据和 ERA5 风场数据对 HY-2C 卫星散射计海面风场数据进行检验。浮标检验结果的风速 ME 为 0.07 m/s, MAE 为 0.78 m/s, RMSE 为 1.01 m/s; 风向 ME 为 -5.4° , MAE 为 15.8° , RMSE 为 20.7° ; ASCAT 风场数据检验结果为风速的 ME、MAE 和 RMSE 分别为 -0.18 m/s、0.5 m/s 和 0.66 m/s; 风向的 ME、MAE 和 RMSE 分别为 -0.2° 、 7.2° 和 11.5° ; ERA5 全球区域检验结果为风速的 ME、MAE 和 RMSE 分别为 0.10 m/s、0.78 m/s 和 1.05 m/s; 风向的 ME、MAE 和 RMSE 分别为 0.6° 、 8.1° 和 12.0° ; ERA5 西北太平洋区域检验结果为风速的 ME、MAE 和 RMSE 分别为 0.36 m/s、0.88 m/s 和 1.19 m/s; 风向的 ME、MAE 和 RMSE 分别为 -2.6° 、 10.4° 和 15.5° 。其他 3 组检验结果见表 1 和表 2。通过各组检验结果对比可发现, 各组数据的风速比较一致, 检验结果的 RMSE 明显优于 2 m/s; 而各组风向的检验结果有所差异, 主要的差异来自于浮标检验, 其各组检验结果的 RMSE 均在 20° 左右, 而其他 3 种数据两两对比结果的 RMSE 略大于 10° 。综上可

知, HY-2C 卫星散射计的海面风数据质量是可信的。

2.2 使用浮标数据检验结果分析

2.1 节中给出了浮标数据对 HY-2C 数据的整体检验结果。为了更清晰地了解 HY-2C 卫星散射计数据在不同浮标站的观测能力, 本节分析各个浮标数据对 HY-2C 卫星散射计数据的检验结果。图 1 是各浮标站点分布图, 每个浮标点的两个数字分别代表匹配到的 HY-2C 卫星散射计风速、风向数, 由于风速、风向统计区间不同, 所以匹配的样本数也存在差异。

图 2a 是 HY-2C 风速数据在各浮标站位置的检验结果。由图可以看出, 不同浮标对 HY-2C 卫星散射计风速的检验结果差异不大, ME 的波动范围均在 ± 0.4 m/s 内, MAE 的波动集中在 0.5~1.0 m/s, RMSE 的波动集中在 0.8~1.3 m/s。由此可以看出, ME、MAE 和 RMSE 的误差均在 2 m/s 以内, 所以 HY-2C 卫星散射计在不同浮标站位置对风速均具有很好的观测能力。

表 1 风速统计特征

Tab.1 Statistical characteristics of wind speed

	ME/(m/s)	MAE/(m/s)	RMSE/(m/s)	CC	样本数
HY-2C vs BUOY	0.07	0.78	1.01	0.94	3 351
ASCAT vs BUOY	0.12	0.65	0.87	0.96	1 867
ERA5 vs BUOY	-0.11	1.10	1.47	0.92	96 894
HY-2C vs ERA5	0.10	0.78	1.05	0.95	235 777 164
HY-2C vs ASCAT	-0.18	0.50	0.66	0.98	8 304 963
ASCAT vs ERA5	0.23	0.68	0.92	0.97	168 441 510

表 2 风向统计特征

Tab.2 Statistical characteristics of wind direction

	ME/($^\circ$)	MAE/($^\circ$)	RMSE/($^\circ$)	样本数
HY-2C vs BUOY	-5.4	15.8	20.7	2 635
ASCAT vs BUOY	-3.9	13.7	19.2	1 438
ERA5 vs BUOY	0.3	14.6	20.2	71 722
HY-2C vs ERA5	0.6	8.1	12.0	222 644 300
HY-2C vs ASCAT	-0.2	7.2	11.5	7 793 074
ASCAT vs ERA5	0.4	6.3	11.2	159 280 210

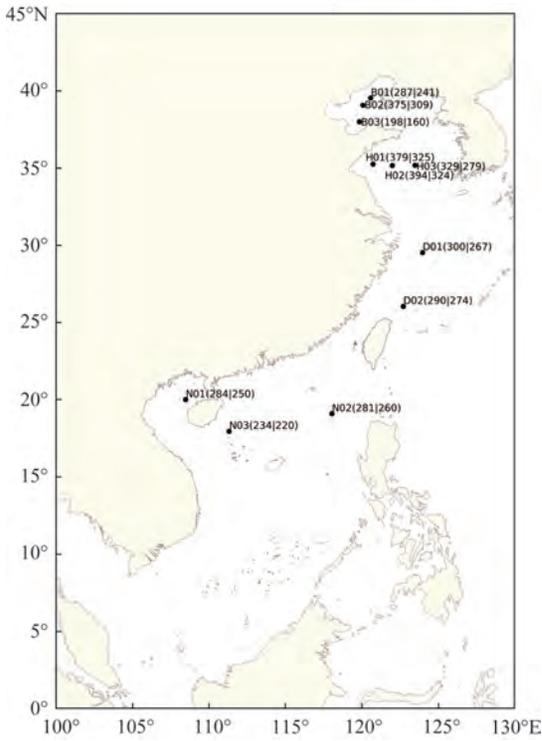


图1 浮标站点位置分布图

Fig.1 Distribution of buoy locations

图2b是HY-2C风向的检验结果。由图可以看出,除浮标D02点外,其他浮标点的ME基本控制在 $\pm 20^\circ$,MAE控制在 $10^\circ \sim 25^\circ$,RMSE控制在 $20^\circ \sim 35^\circ$ 。此外,本文还统计了ASCAT、ERA5与各浮标站风速、风向的对比结果,其中风向的对比结果与HY-2C的检验结果有着很好的一致性,即在D02位置存在较大的差异,二者与浮标D02的风向RMSE

分别为 45.7° 和 45.8° 。为保证检验结果的可靠性,在整体评估工作中,浮标D02的风向数据不计入计算中。

图3—6为各浮标位置点的HY-2C卫星散射计数据与浮标实测数据的风玫瑰图。风玫瑰图用于展示某个方向上风向、风速的概率分布,风向用16方位表示,分别为北(N)、北东北(NNE)、东北(NE)、东东北(ENE)、东(E)、东东南(ESE)、东南(SE)、南东南(SSE)、南(S)、南西南(SSW)、西南(SW)、西西南(WSW)、西(W)、西西北(WNW)、西北(NW)、北西北(NNW)。玫瑰图中的不同颜色代表不同等级的风。

图3是渤海海域3个浮标位置的风玫瑰图。从图中可以看出,B02、B03两个浮标点的数据玫瑰图整体比较一致,而B01浮标点的两组数据差异较大。B01位置的HY-2C数据的主要风向为NNE、NE和SW,而浮标实测数据的主要风向是SSW、WSW和ENE,其他风向出现的频率相对较低;B02位置的HY-2C风向数据在WSW、SSW和NNE方向上出现的频率较高,在其他方向的频率较为均衡,而对应的浮标实测数据在NE、SSE和SSW方向上出现的频率较高;B03位置的HY-2C风向数据在SSW和SSE方向上出现的频率较高,而浮标实测数据在S、SSW和SW方向上出现的频率较高。

图4是黄海海域3个浮标位置的风玫瑰图。由图分析可得,每个位置上的两组数据的玫瑰图均有所差异。在H01位置,HY-2C数据在NNE、SE、SSE以及N方向上出现的频率较高,而浮标实测数据在

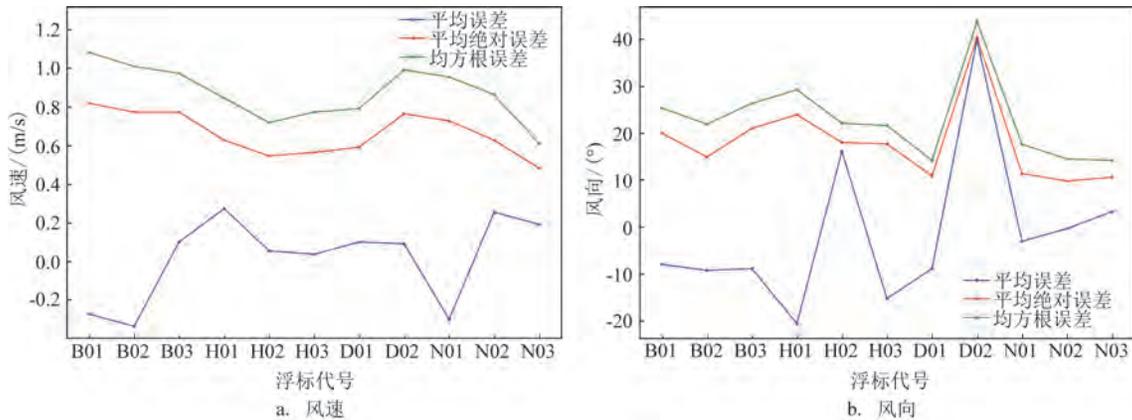


图2 HY-2C卫星散射计数据在各浮标站位置的检验结果

Fig.2 Examination results of HY-2C satellite scatterometer data at each buoy station

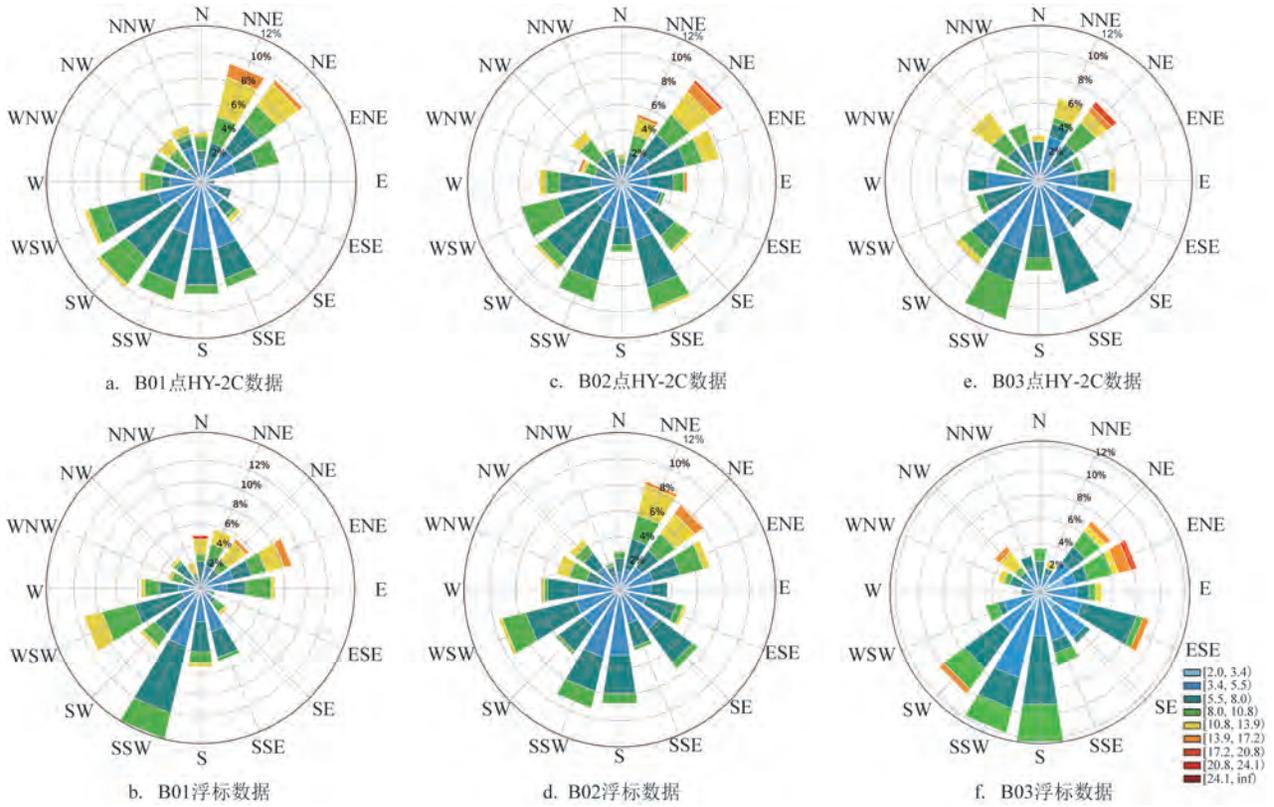


图3 渤海海域风速、风向玫瑰图

Fig.3 Wind rose chart of the Bohai Sea

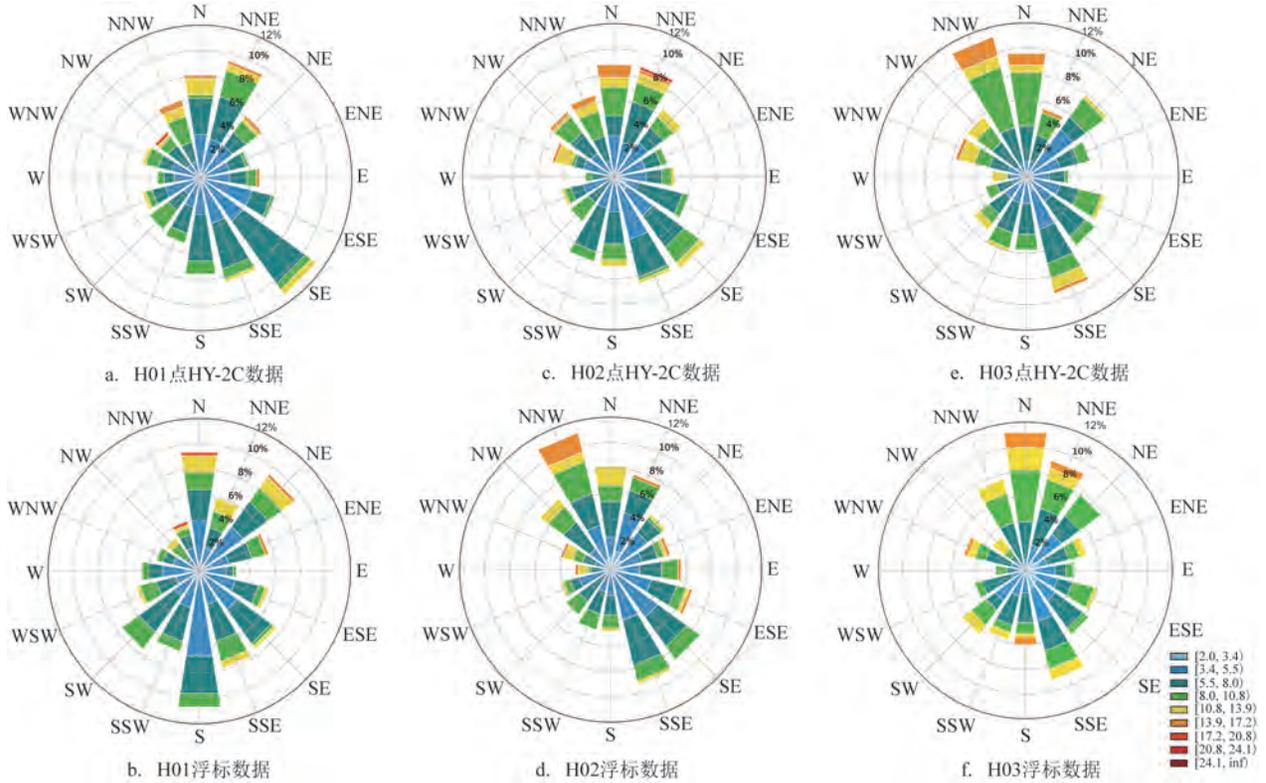


图4 黄海海域风速、风向玫瑰图

fig.4 Wind rose chart of the Yellow Sea

N、NE以及S方向上出现的频率较高;在H02位置, HY-2C数据在各个风向上出现的频率差异不大,浮标实测风在NNW、SSE和SE方向上的频率相对较高;在H03位置, HY-2C数据在NNW和SSE方向上出现的频率较高,而浮标实测数据在N和SSE方向上出现的频率较高。

图5是东海海域2个浮标位置的风玫瑰图。由图可以看出,在D01位置,两组数据有着较高的一致性,在NNE和NE方向上的频率较高,此外, HY-2C数据在SSW和S方向上的频率也较高,而浮标实测风则在SSW方向上频率较高。在D02位置,本文给出了4种数据的玫瑰图,除HY-2C数据玫瑰图(见图5c)和浮标数据玫瑰图(见图5f)外,还给出了该位置ASCAT和ERA5两种数据的玫瑰图(见图5d、5e),对比这4幅图不难发现,除D02浮标的主导风向为N和NNW外,另外3组数据的主导风向均为NNE和NE,其他方向出现的频率均极低。

图6是南海海域3个浮标位置的风玫瑰图。由图可以看出,这3个位置的两组数据的玫瑰图均有

着较高的一致性。在N01位置,两组数据在NNE、NE以及SSW方向上均出现了较高的频率;在N02位置,两组数据在NE和ENE方向上出现的频率较高,其他方向出现的频率较低;在N03位置,两组数据的主导风向均为S,此外, HY-2C数据在NNE、NE、ENE和SSW方向上也有着较高的频率,浮标实测数据在NE、ENE和SSE方向上有着较高的频率。综上可知,南海海域3个浮标位置的HY-2C数据和浮标实测数据有着很好的一致性。

此外,从图中还可以看到,各个海域均以3~6级风居多,而6级及以上大风以偏北风居多。

2.3 ERA5风场数据检验结果分析

2.1节给出了ERA5风场数据对HY-2C卫星放射计海面风场产品的整体检验结果,本节主要分析风速、风向误差随风速变化的特征和概率分布特征。图7为ERA5和HY-2C数据匹配的样本数在不同风速区间的分布情况。由图可以看出,样本数随着风速的增大呈先变大后变小的趋势,其中西北太

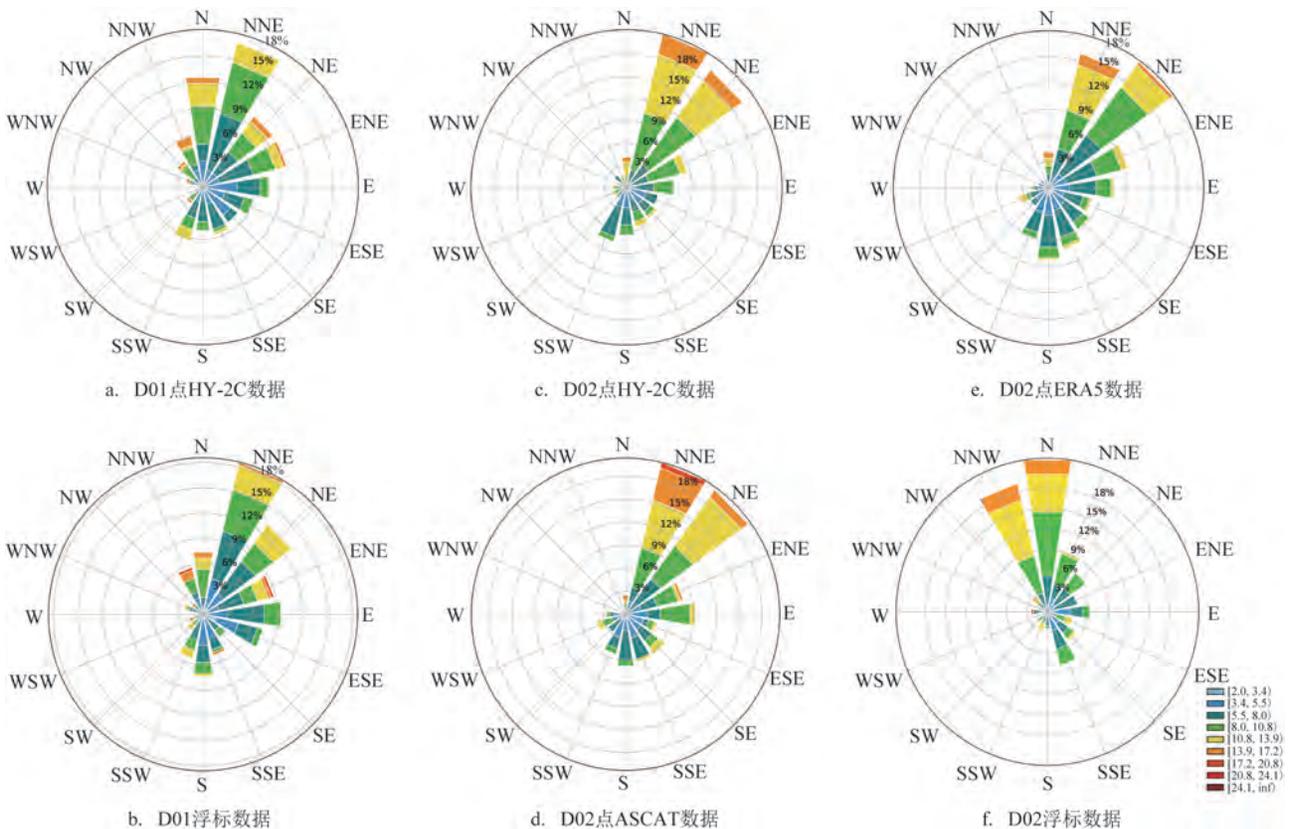


图5 东海海域风速、风向玫瑰图
Fig.5 Wind rose chart of the East China Sea

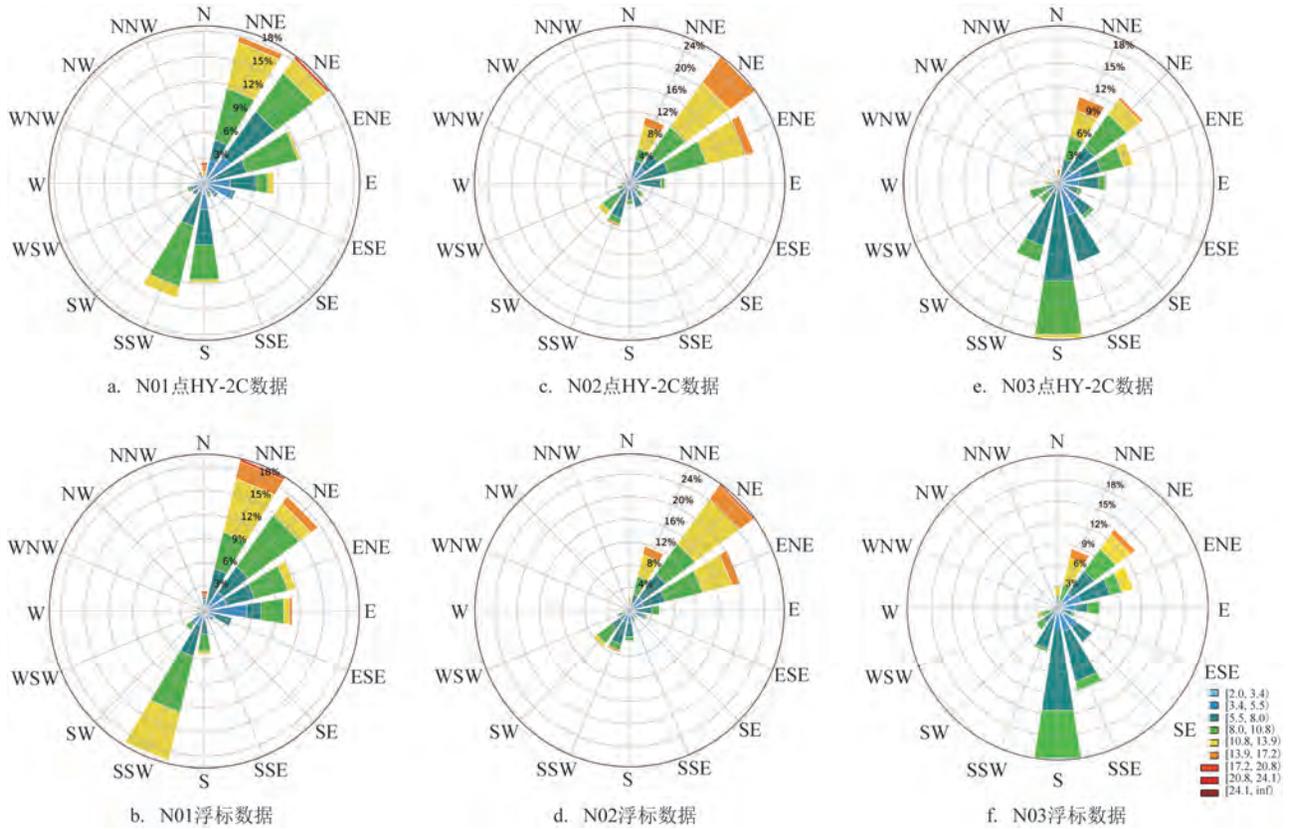


图6 南海海域风速、风向玫瑰图

Fig.6 Wind rose chart of the South China Sea

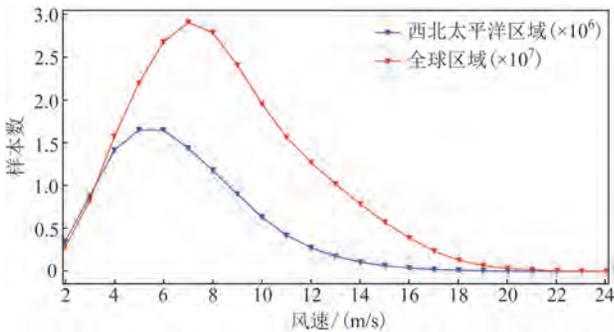


图7 不同风速区间内的样本数分布情况

Fig.7 Distribution of samples in different wind speed intervals

平洋区域(蓝线)样本数的数量级为 10^6 ,全球区域(红线)的数量级为 10^7 。

2.3.1 风速、风向误差随风速变化特征分析

图8a—c分别为HY-2C风速相较于ERA5风速的ME、MAE和RMSE随风速大小的变化情况。从图中可以看出,西北太平洋区域与全球区域的特征比较一致。由图8a可知,风速的ME随着风速

的增加先减小后增大,全球区域的结果在10 m/s风速处由正值变为负值,而西北太平洋区域则是在18 m/s风速处由正值变为负值;此外,我们还可以看到,当风速为4~22 m/s时,风速的ME在 ± 0.5 m/s内,由此可见,较大/较小的风速均会带来较大的误差。由图8b可知,两组风速数据的MAE变化趋势一致,均为随着风速的增加先减小后波动式增大,最小值均出现在风速为9 m/s时;不同的是,任意风速下西北太平洋区域的风速MAE均高于全球区域,前者的误差范围为0.8~2.1 m/s,其中只有风速为24 m/s时,误差值超过2.0 m/s,而后的误差范围为0.7~1.9 m/s,全风速段内误差值均在2.0 m/s以内。图8c的变化特征与图8b相似,不同的是风速的RMSE值稍偏大,全球区域的风速RMSE为0.9~2.2 m/s,而西北太平洋区域为1.1~2.6 m/s, RMSE均小于2 m/s的风速区间为3~23 m/s。

图8d—f分别为HY-2C风向相较于ERA5风向的ME、MAE和RMSE随风速大小的变化情况。从图中可以看出,西北太平洋区域与全球区域的风

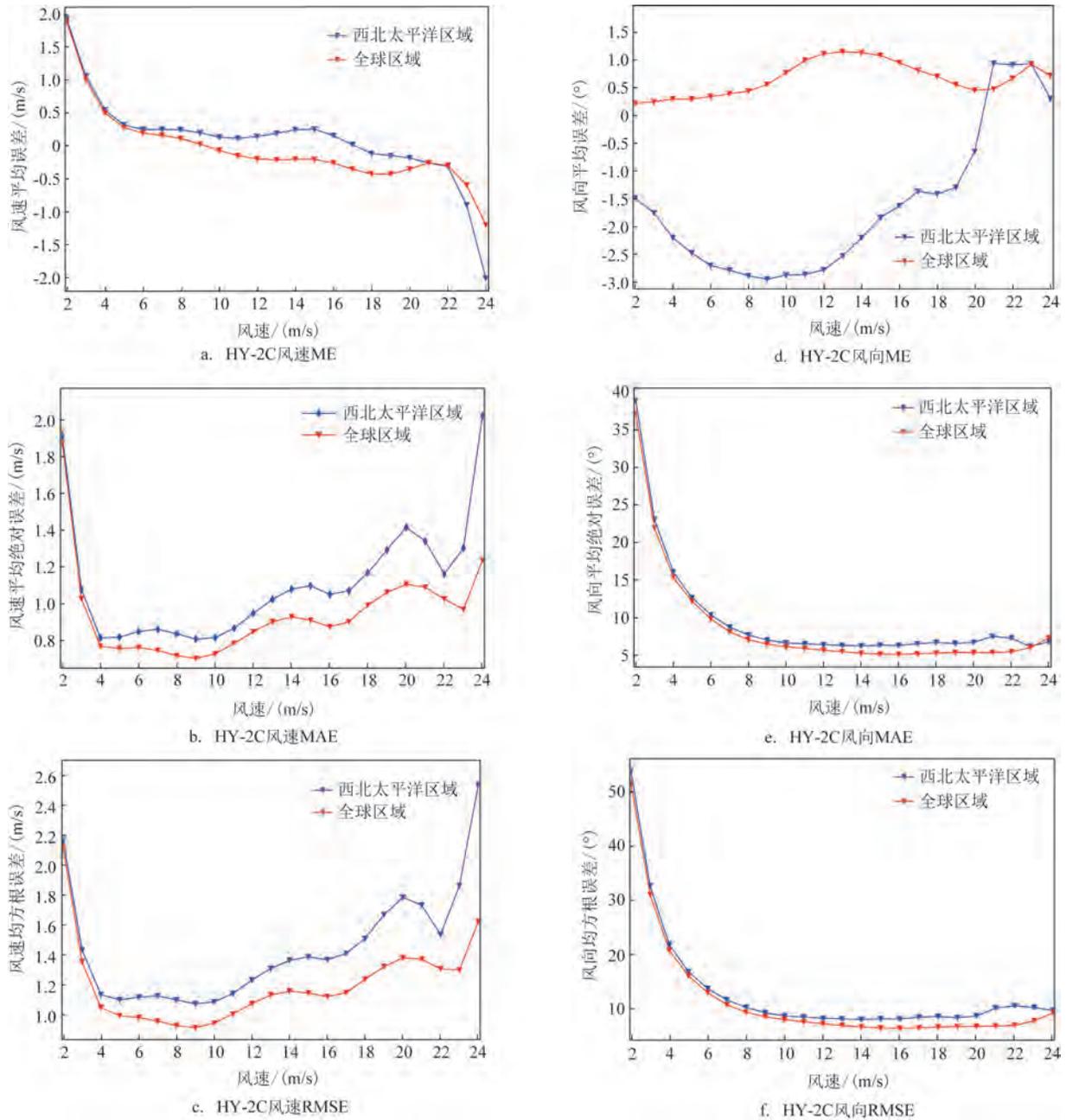


图8 HY-2C卫星散射计数据与ERA5再分析数据的风矢量误差随风速变化特征
 Fig.8 Characteristics of HY-2C and ERA5 wind vector error varying with speed

向MAE和RMSE的特征非常一致,但与风向ME的结果呈现较大差异。全球区域的风向ME随风速的增大呈先增大后减小然后再增大的变化特征,且误差一直为正值,波动区间为0°~1.2°;而在西北太平洋区域,当风速为2~20 m/s时,风向ME为负,且该误差绝对值随着风速的增大呈先增大后减小的趋势,在9 m/s风速时达到最大,当风速≥21 m/s时,风

速的ME为正值。由图8e可以看出,两组结果的变化趋势十分一致,即当风速小于8 m/s时,两组数据的MAE均随风速的增大而快速减小,之后缓慢减小趋于稳定。此外,由图还可以看出,当风速≥4 m/s时,风向的MAE控制在20°范围内。图8f的变化特征与图8e相似,略有不同的是风向的RMSE偏大,由图可以看出,当风速>4 m/s时,风向的RMSE控

制在 20°范围内。

2.3.2 风速、风向绝对误差概率分布特征分析

图 9a 为 HY-2C 风速绝对误差累计概率分布曲线。由图可以看出,两组曲线的变化趋势十分一致,不同的是西北太平洋区域的变化略滞后于全球区域,正是由于这种差异导致西北太平洋区域的误差整体偏大。当风速绝对误差小于 2 m/s 时,累计概率快速增长,全球区域和西北太平洋区域的风速绝对误差 ≤ 2 m/s 的概率分别为 94.3% 和 90.8%;之后随着风速绝对误差的增大,累计概率增长变缓,当风速绝对误差为 4 m/s 时,两组结果的累计概率均已达到 99%,之后累计概率增长速度进一步变缓。

图 9b 为 HY-2C 风向绝对误差累计概率分布曲线。由图可以看出,两组曲线的变化趋势一致,不同

的是西北太平洋区域的变化略滞后于全球区域。当风向绝对误差小于 20°时,累计概率快速增长,全球区域和西北太平洋区域的风向绝对误差 $\leq 20^\circ$ 的概率分别为 93.1% 和 87.8%;之后累计概率增长变缓,当风向绝对误差为 40°时,两者的累计概率分别达到 99.1% 和 97.9%,之后累计概率增长速度进一步变缓。

图 9c 为风速绝对误差小于 2 m/s 的比例随风速的变化曲线。由图可以看出,两组曲线变化趋势一致,但西北太平洋区域数据在每个风速区间的比例均低于全球范围。此比例在风速由 2 m/s 增大至 4 m/s 的过程中快速增长,由 65% 左右增长至近 90%;之后随着风速增大,该比例变化不大,直至当风速大于 11 m/s 时,该比例开始呈波动式下降趋势。

图 9d 为风向绝对误差小于 20°的比例随风速的变化

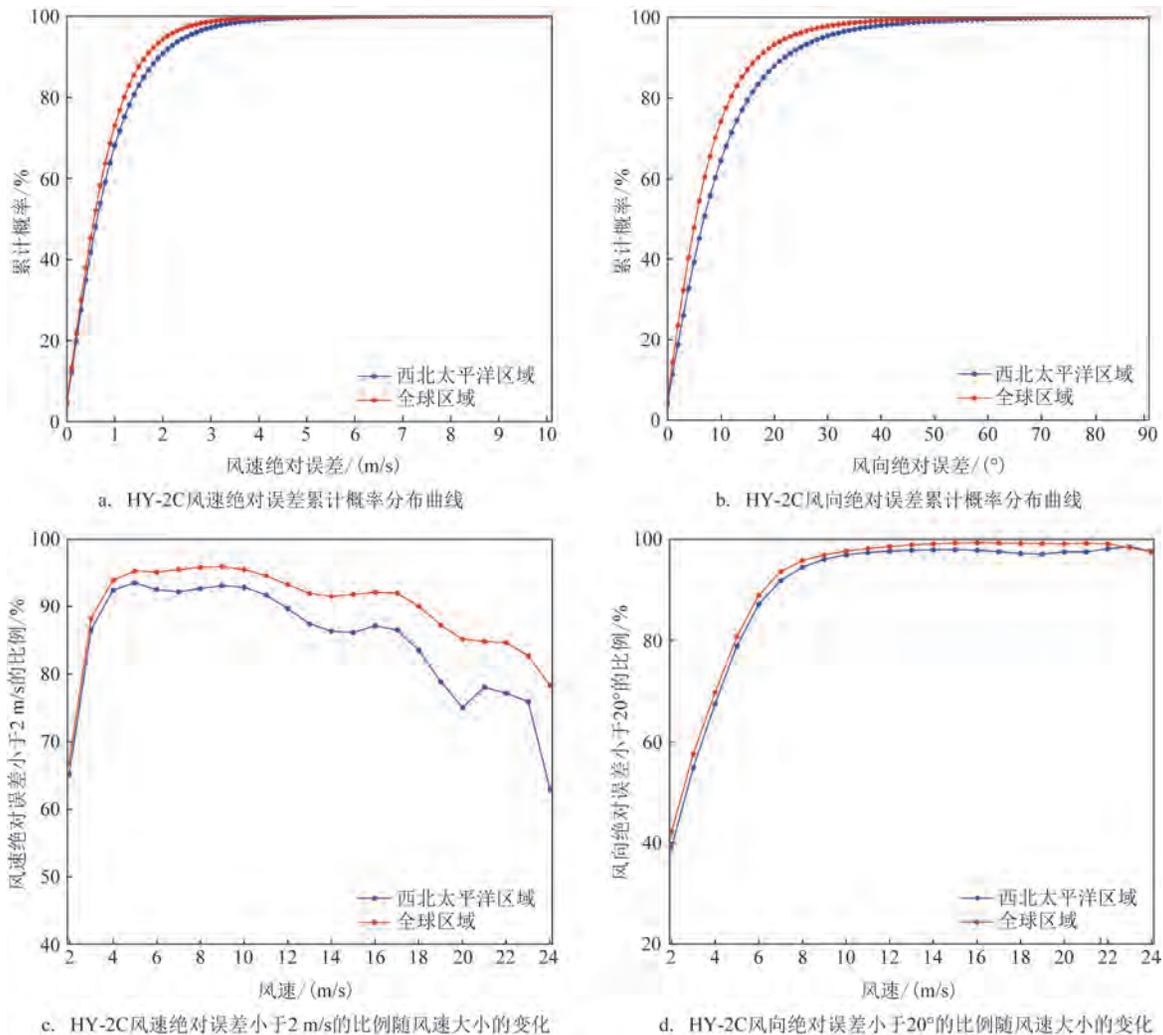


图9 HY-2C卫星散射计数据与ERA5再分析数据的风速/风向误差概率分布情况

Fig.9 The error probability distribution of HY-2C and ERA5 wind vector

变化曲线。由图可以看出,两组曲线变化趋势比较一致,但也有所不同。当全球区域的风速从2 m/s增大至8 m/s时,该比例快速增大至95%,之后缓慢增长,在风速为16 m/s时该比例达到最大99%,之后有所回落,但依然维持在97%以上;而当西北太平洋区域的风速从2 m/s增大至9 m/s时,该比例快速增大至95%,之后缓慢增长,在风速为15 m/s时该比例达到极大值,超过97%,之后维持略有波动,在风速为23 m/s时,该比例达到最大,超过98%。由此可见,当风速 ≥ 5 级时,风向绝对误差小于 20° 的比例可以稳定维持在90%以上。

3 结论

本文基于中国近海11个浮标的逐小时海面风矢量实测数据、ASCAT散射计海面风场数据以及欧洲中期天气预报中心的第五代全球再分析数据(ERA5)的逐小时风场,使用统计分析方法对HY-2C卫星散射计海面风场数据产品进行了检验评估。结论如下:

①使用中国近海浮标实测风矢量数据对HY-2C卫星散射计海面风数据点进行单点检验,风速和风向的均方根误差分别为1.01 m/s和 20.7° 。

②使用ASCAT数据对HY-2C卫星散射计海面风数据进行检验,风速和风向的均方根误差分别为0.66 m/s和 11.5° ,该精度远高于2 m/s和 20° 。

③使用ERA5风场数据对全球区域和西北太平洋区域HY-2C卫星散射计海面风数据分别进行了检验,其中全球区域的风速和风向均方根误差分别为1.05 m/s和 12.0° ,西北太平洋区域分别为1.19 m/s和 15.5° ,该精度同样高于2 m/s和 20° 。

④针对ERA5风场数据检验HY-2C卫星散射计海面风数据的检验结果,分析了风速、风向误差与风速大小的关系,即风速的绝对误差与均方根误差随着风速的增大呈先减小后增大的趋势,在风速达9 m/s(5级)时,风速误差最小,而风向的平均绝对误差和均方根误差随着风速的增大呈快速减小后维持稳定或小幅增大的特征,即在风速较小(< 5 级)时,风向的平均误差较大。

⑤此外,针对ERA5风场数据检验HY-2C卫星散射计海面风数据的结果,分析了风速、风向绝对

误差的累计概率分布特征、风速绝对误差小于2 m/s的比例与风速大小的关系、风向绝对误差小于 20° 的比例与风速大小的关系,结果表明风速绝对误差 ≤ 2 m/s的累计概率大于90%,风向绝对误差 $\leq 20^\circ$ 的累计概率大于85%。

基于上述结论可知, HY-2C卫星散射计海面风产品具有较高的可信度,能够很好地满足业务化应用的精度要求。

参考文献:

- [1] 张东翔. 多源卫星海面风场产品检验及融合研究[D]. 长沙: 国防科技大学, 2018.
ZHANG D X. Research of multi-source satellite sea surface wind validation and data fusion[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2018.
- [2] 渠鸿宇, 黄彬, 赵伟, 等. HRCLDAS-V1.0和ERA5海面风场对比评估分析[J]. 热带气象学报, 2022, 38(4): 569-579.
QU H Y, HUANG B, ZHAO W, et al. Comparison and evaluation of HRCLDAS-V1.0 and ERA5 sea-surface wind fields[J]. Journal of Tropical Meteorology, 2022, 38(4): 569-579.
- [3] ZHAO K, ZHAO C F, CHEN G. Evaluation of Chinese scatterometer ocean surface wind data: preliminary analysis[J]. Earth and Space Science, 2021, 8(7): e2020EA001482.
- [4] 林明森, 张有广, 袁欣哲. 海洋遥感卫星发展历程与趋势展望[J]. 海洋学报, 2015, 37(1): 1-10.
LIN M S, ZHANG Y G, YUAN X Z. The development course and trend of ocean remote sensing satellite[J]. Haiyang Xuebao, 2015, 37(1): 1-10.
- [5] 刘建强, 蒋兴伟, 林明森. 我国海洋卫星发展历程、现状与建议[J]. 卫星应用, 2021(9): 14-18.
LIU J Q, JIANG X W, LIN M S. The development course, status and suggestion of Chinese ocean satellite[J]. Satellite Application, 2021(9): 14-18.
- [6] 刘建强, 叶小敏, 兰友国. 我国海洋卫星遥感大数据及其应用服务[J]. 大数据, 2022, 8(2): 75-88.
LIU J Q, YE X M, LAN Y G. Remote sensing big data from Chinese ocean satellites and its application service[J]. Big Data Research, 2022, 8(2): 75-88.
- [7] 林明森, 何贤强, 贾永君, 等. 中国海洋卫星遥感技术进展[J]. 海洋学报, 2019, 41(10): 99-112.
LIN M S, HE X Q, JIA Y J, et al. Advances in marine satellite remote sensing technology in China[J]. Haiyang Xuebao, 2019, 41(10): 99-112.
- [8] 陈克海, 解学通, 张金兰, 等. HY-2B卫星散射计海面风场产品质量分析[J]. 热带海洋学报, 2020, 39(6): 30-40.
CHEN K H, XIE X T, ZHANG J L, et al. Accuracy analysis of the retrieved wind from HY-2B scatterometer[J]. Journal of Tropical Oceanography, 2020, 39(6): 30-40.
- [9] 林明森, 邹巨洪, 解学通, 等. HY-2A微波散射计风场反演算法

- [J]. 中国工程科学, 2013, 15(7): 68-74.
- LIN M S, ZOU J H, XIE X T, et al. HY-2A microwave scatterometer wind retrieval algorithm[J]. Engineering Sciences, 2013, 15(7): 68-74.
- [10] 王东良, 姚小海, 孟雷, 等. 海洋二号卫星散射计风场产品真实性检验及分析[J]. 海洋预报, 2014, 31(4): 47-53.
- WANG D L, YAO X H, MENG L, et al. Validation and analysis of wind field products of HY-2[J]. Marine Forecasts, 2014, 31(4): 47-53.
- [11] WANG Z X, ZOU J H, STOFFELEN A, et al. Scatterometer sea surface wind product validation for HY-2C[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 2021, 14: 6156-6164.
- [12] 张婷, 张杰, 杨俊钢, 等. 卫星散射计与海面平台所测的风场数据比较[J]. 海洋学研究, 2013, 31(2): 45-51.
- ZHANG T, ZHANG J, YANG J G, et al. Comparison of seawind data between spaceborne scatterometer and platform measurements[J]. Journal of Marine Sciences, 2013, 31(2): 45-51.
- [13] EBUCHI N, GRABER H C, CARUSO M J. Evaluation of wind vectors observed by QuikSCAT/SeaWinds using ocean buoy data [J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 2002, 19(12): 2049-2062.
- [14] 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.
- ZHANG Z H, CAO Y N, LIU T, et al. Preliminary validation and application of ASCAT scatterometer retrieved winds over China offshore seas[J]. Meteorological Monthly, 2014, 40(4): 473-481.
- [15] 郭鑫, 韩震, 张雪薇, 等. HY-2B 卫星散射计神经网络多区间风速反演[J]. 海洋科学进展, 2021, 39(2): 268-278.
- GUO X, HAN Z, ZHANG X W, et al. Multiple interval wind speed inversion for HY-2B satellite scatterometer based on neural network[J]. Advances in Marine Science, 2021, 39(2): 268-278.
- [16] MAHRT L. Surface wind direction variability[J]. Journal of Applied Meteorology and Climatology, 2011, 50(1): 144-152.
- [17] LIN W M, PORTABELLA M. Characterizing global sea surface local wind variability from ASCAT data[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2022, 60: 4212210.
- [18] OSES N, AZPIROZ I, MARCHI S, et al. Analysis of copernicus' ERA5 climate reanalysis data as a replacement for weather station temperature measurements in machine learning models for olive phenology phase prediction[J]. Sensors, 2020, 20(21): 6381.
- [19] 张巍, 杜超凡, 郭安博宇, 等. 一种机器学习海面风场快速融合的方法[J]. 海洋学报, 2022, 44(11): 144-158.
- ZHANG W, DU C F, GUO A B Y, et al. Sea surface wind field smart fusion base on machine learning method[J]. Haiyang Xuebao, 2022, 44(11): 144-158.

Examination and evaluation of the HY-2C satellite scatterometer sea surface wind field

LIU Xiaoyan^{1,2,3}, HAO Sai^{1,3*}, PENG Wei^{1,2,3}, LIU Yuxin², ZHANG Jie^{1,3}

(1. National Marine Environment Forecasting Center, Beijing 100081, China; 2. Key Laboratory of Space Ocean Remote Sensing and Application, Ministry of Natural Resources, Beijing 100081, China; 3. Key Laboratory of Marine Hazards Forecasting, National Marine Environment Forecasting Center, Ministry of Natural Resources, Beijing 100081, China)

Abstract: Based on the hourly sea surface wind vector data observed by the China's offshore buoys, ASCAT scatterometer sea surface wind field data and the fifth generation of the European Center for Medium-Range Weather Forecasts reanalysis wind data (ERA5), this paper examines and evaluates the HY-2C satellite scatterometer sea surface wind field products in 2~24 m/s wind speed range by using statistical analysis. The results show that in comparison to 3 351 sample wind vector data of 11 buoys, the root mean square errors (RMSEs) of wind speed and direction are 1.01 m/s and 20.7°, respectively. When using 8 304 963 ASCAT sample wind field data for examination, the RMSEs of wind speed and direction are 0.66 m/s and 11.5°, respectively. With respect to the ERA5 wind field data for global regional examination, the RMSEs of wind speed and direction are 1.05 m/s and 12.0°, respectively. With respect to the ERA5 wind field data for the Northwestern Pacific region examination, the RMSEs of wind speed and direction are 1.19 m/s and 15.5°, respectively. In summary, the quality of the HY-2C satellite scatterometer sea surface wind field products has a high reliability and the products can satisfy the operational precision requirement well.

Key words: HY-2C satellite; scatterometer sea surface wind; examination; evaluation