

HY-2D 卫星散射计海面风场产品在西北太平洋区域的适用性分析

刘晓燕^{1,2,3}, 张萌⁴, 林晓娟^{1,3*}, 郝赛^{1,3}, 彭炜^{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; 4. 自然资源部南海海域海岛中心, 广东 广州 510310)

摘要: 基于中国近海浮标数据、欧洲中期天气预报中心第五代全球再分析资料 ERA5 和 MetOp-B 卫星散射计 ASCAT 海面风场数据, 对 HY-2D 卫星散射计反演的风场数据在西北太平洋区域的质量进行了检验评估, 用以分析其在该区域的适用性。统计结果表明: HY-2D 风场数据与中国近海浮标数据、ERA5 数据和 ASCAT 数据均有较好的一致性, 3 组检验结果的风速均方根误差分别为 0.98 m/s、1.23 m/s 和 0.58 m/s, 误差都很好地控制在 2 m/s 以内; 风向均方根误差分别为 18.8°、16.8° 和 12.8°, 误差均控制在 20° 以内; HY-2D 风场数据与 ASCAT 数据有着最好的一致性。对比 HY-2D 风场数据和中国近海浮标站点风矢量数据, 未发现离岸距离和误差之间的明显规律。在 HY-2D 风场数据与 ERA5 和 ASCAT 的对比结果中, 近 9 成数据的风速绝对误差 ≤ 2 m/s、风向绝对误差 $\leq 20^\circ$ 。由此可见, HY-2D 卫星散射计反演的海面风场数据在西北太平洋区域质量较高, 能够较好地满足业务化应用的精度要求。

关键词: HY-2D 卫星; 散射计海面风场; 西北太平洋; 适用性; ERA5

中图分类号: P732 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-0239(2024)05-0089-10

0 引言

海面风可以直接生成海浪、风暴潮等海洋灾害, 影响航海、海上作业和渔业生产^[1-2]。海面风场是研究海洋运动和气候变化重要的物理参数^[3-4], 是海洋气象研究与业务预报中最重要的要素之一^[5]。获取高质量的海面风场资料对于提高海洋灾害预报准确率具有重要作用, 海面风预报的准确性是海洋防灾减灾的基础^[6]。卫星散射计是一种专门用于获取全球海面风场的主动式微波传感器, 随着技术发展, 卫星散射计凭借全天时、全天候、快速等优点, 为海洋与气象等研究领域提供高精度、高分辨率的全球海面风场信息^[7-10]。

卫星散射计风场数据由于具有全球观测、高精

度、准实时等优点, 已经在海洋动力模式以及天气预报过程中广泛使用。但是, 卫星风场数据的质量会直接影响数据的使用效果, 为了获取更好的预报结果, 有必要在卫星风场数据使用前对数据质量进行评估^[11]。陈克海等^[11]利用欧洲中期天气预报中心 (European Center for Medium - Range Weather Forecasts, ECMWF) 再分析风场数据、热带大气海洋观测计划 (Tropical Atmosphere Ocean Array, TAO) 浮标和美国国家数据浮标中心 (National Data Buoy Center, NDBC) 浮标获取的海面风矢量实测数据, 对 HY-2B 散射计海面风场数据产品的质量进行统计分析, 对比结果表明, 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。YANG 等^[12]的研究结果表明, HY-2B、HY-2C 以及 HY-2D

收稿日期: 2023-12-11。

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, 从事海面风场资料同化研究。E-mail: liuxiaoyan-de@163.com

*通信作者: 林晓娟(1991-), 女, 助理研究员, 硕士, 主要从事海洋预报研究。E-mail: lin-xiaojuan@foxmail.com

这3颗卫星散射计风场均与NDBC浮标获取的海面风矢量实测数据具有较好的一致性, HY-2D的误差略大于HY-2B, 略小于HY-2C。王东良等^[13]利用国际海气综合数据集(International Comprehensive Ocean-Atmosphere Data Set, ICOADS)中的海面风场数据作为真实值, 对HY-2系列卫星散射计风场产品进行了真实性检验, 发现卫星风场在高风速时存在风速低估现象, 风向误差集中在 $-15^{\circ}\sim 15^{\circ}$, 但整体而言, 数据满足业务应用需求。上述研究均验证了HY-2系列卫星散射计风场数据是可信的。

我国东临西北太平洋, 因此更关注HY-2D卫星散射计数据在此区域的观测能力。自然资源部在我国近海布放的10 m浮标数据精度较高, 在HY-2D散射计风场质量分析上具备优势, 但存在数据稀少的缺点, 无法覆盖全场; 而ERA5再分析风场数据覆盖全球, 且空间分辨率与HY-2D比较接近, 可以对散射计风场全场进行细致分析; 此外, ASCAT散射计海面风场数据是国际上比较认可的卫星散射计数据, 用其来分析HY-2D散射计风场的质量, 同样具有较高的可信度。基于此, 本文采用上述3种风场数据, 对西北太平洋区域($-5^{\circ}\sim 50^{\circ}\text{N}$, $90^{\circ}\sim 160^{\circ}\text{E}$)的HY-2D风场从点到面地进行细致分析, 以掌握其在该区域的适用性。

1 数据和方法介绍

1.1 HY-2D卫星散射计海面风数据

HY-2D卫星于2021年5月19日发射, 载有名为HSCAT-D的Ku波段散射计。HY-2D卫星发射后, 与HY-2B和HY-2C在轨组成了一个三星观测网, 形成了HY-2系列星载散射计星座。本文使用的HY-2D卫星散射计数据是空间分辨率为 $25\text{ km}\times 25\text{ km}$ 的沿轨数据, 每轨数据有 $1\,624\times 76$ 个风矢量单元, 标称风速范围为 $2\sim 24\text{ m/s}$ 。本文选取了2021年7月—2022年6月的海面10 m风场数据用于质量检验评估。需要说明的是, 由于风向存在自身变异性, 当风速低于 4 m/s 时, 风向数据的误差较大^[14], 所以本文的检验评估工作是针对 $2\sim 24\text{ m/s}$ 风速范围内的风速和 $4\sim 24\text{ m/s}$ 内的风向数据展开的。

1.2 中国近海浮标数据

本文选取了中国近海11个浮标的10 m风速和风向数据, 其中渤海海域3个(N01、N02、N03)、黄海海域3个(N04、N05、N06)、东海海域2个(N07、N08)、南海海域3个(N09、N10、N11), 浮标的具体位置分布见图1。数据的时间选取范围同HY-2D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。

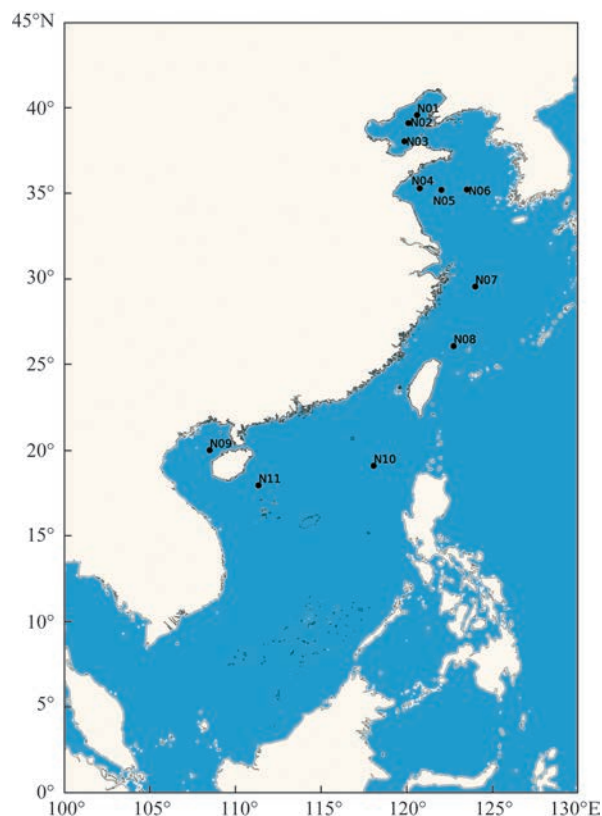


图1 浮标位置分布

Fig.1 Distribution of buoy locations

1.3 ERA5再分析风场数据

ERA5再分析数据是ECMWF研发的第五代全球再分析资料, 是目前最新一代再分析资料^[15-16], 具有高分辨率、高精度等优点。本文使用的是该资料中的10 m经向风和10 m纬向风, 水平分辨率为 $0.25^{\circ}\times 0.25^{\circ}$, 时间分辨率为逐小时。数据的时间选取范围同HY-2D卫星散射计海面风数据。

1.4 ASCAT 散射计海面风场数据

ASCAT 是欧洲航天局 (European Space Agency) 发射的第二颗气象卫星 MetOp-B 上搭载的散射计, 由欧洲气象卫星应用中心 (EUMETSAT) 运营, 该卫星于 2012 年 9 月成功发射并在轨运行至今。ASCAT 采用了先进的微波散射计技术, 能够测量大气中的风速和风向, 同时具有较高的空间分辨率和时间分辨率, 标称风速范围是 0~25 m/s, 本文使用的是该数据的 L2B 级产品, 空间分辨率为 25 km×25 km。数据的时间选取范围同 HY-2D 卫星散射计海面风数据。

1.5 数据处理方法

HY-2D 卫星散射计风场数据与中国近海浮标数据、ERA5 再分析数据以及 ASCAT 散射计数据的时空分辨率均不同, 所以使用这 3 种数据对 HY-2D 卫星散射计风场数据进行检验评估前, 需对各种数据分别进行插值处理, 以完成数据的时空匹配。

与浮标单点数据进行匹配的原则是, 以浮标的时间和经纬度位置为参照, 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, 匹配过程中剔除了质量标志异常的数据。

与 ERA5 数据/ASCAT 散射计数据进行匹配的原则是, 以 HY-2D 卫星散射计数据的时间和经纬度位置为参照, 时间相差 30 min 以内、空间距离相差 0.25° 以内的最近的 ERA5 数据/ASCAT 散射计数据近似认为是该时刻该 HY-2D 卫星散射计数据位置的 ERA5 数据/ASCAT 散射计数据, 匹配过程中剔除了 HY-2D 卫星散射计数据/ASCAT 散射计数据质量标志异常的数据。

1.6 统计方法

本文使用的误差统计方法有平均偏差 (E)、平均绝对误差 (E_{MA})、均方根误差 (E_{RMS}) 和相关系数 (r)。具体公式如下:

平均误差:

$$E = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (H_i - T_i) \quad (1)$$

平均绝对误差:

$$E_{MA} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |H_i - T_i| \quad (2)$$

均方根误差:

$$E_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (H_i - T_i)^2} \quad (3)$$

相关系数:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^N (H_i - \bar{H})(T_i - \bar{T})}{\left[\sum_{i=1}^N (H_i - \bar{H})^2 \sum_{i=1}^N (T_i - \bar{T})^2 \right]^{\frac{1}{2}}} \quad (4)$$

式中: H_i 是 HY-2D 卫星散射计的风速/风向值; T_i 是 ERA5 再分析、ASCAT、浮标的风速/风向值等作为真值参考的数据; N 是对应的样本量。

风速绝对误差小于 2 m/s 的比例和风向绝对误差小于 20° 的比例分别为:

$$R_s(2) = \int_0^2 P_s(x) dx \quad (5)$$

$$R_d(20) = \int_0^{20} P_d(x) dx \quad (6)$$

式中: $P_s(x)$ 和 $P_d(x)$ 分别为 HY-2D 风速、风向绝对误差的概率密度函数。

2 检验结果分析

2.1 整体检验结果分析

分别使用中国近海浮标、ERA5 和 ASCAT 数据对 HY-2D 卫星散射计海面风数据进行检验, HY-2D 数据与浮标风速、风向数据的 E_{RMS} 分别为 0.98 m/s 和 18.8°, 与 ERA5 数据的 E_{RMS} 分别为 1.23 m/s 和 16.8°, 与 ASCAT 数据的 E_{RMS} 分别为 0.58 m/s 和 12.8°, 其他统计量结果见表 1。由检验结果可知, 各组检验的风速 E_{RMS} 均很好地控制在 2 m/s 以内, 风向 E_{RMS} 控制在 20° 以内。此外, 为使上述检验结果更具说服力, 本文还增加了中国近海浮标、ERA5 和 ASCAT 这 3 种数据的两两比对结果 (见表 1), 统计结果表明这 3 组作为真值的数据质量是可信的。基于上述检验结果, HY-2D 卫星散射计海面风数据质量在西北太平洋区域是可信的。

图 2a—2c 分别是中国近海浮标、ASCAT 和 ERA5 的风速数据与 HY-2D 卫星散射计海面风速数据的散点图。HY-2D 风场数据和浮标数据的相关系数为 94.75% (见表 1), 与 ASCAT 散射计的相关系

表1 风速、风向统计特征

Tab.1 Statistical characteristics of wind speed and wind direction

检验组名称	风速/(m/s)				风向/(°)		
	E	E_{MA}	E_{RMS}	r	E	E_{MA}	E_{RMS}
HY_2D vs BUOY	0.11	0.75	0.98	94.75%	-6.8	14.1	18.8
HY_2D vs ERA5	0.44	0.91	1.23	90.96%	-2.7	11.0	16.8
HY_2D vs ASCAT	-0.10	0.42	0.58	97.60%	-0.7	7.7	12.8
ASCAT vs BUOY	0.14	0.64	0.85	96.10%	-4.3	10.3	14.1
ERA5 vs BUOY	-0.15	1.08	1.43	89.96%	-2.4	14.3	20.0
ASCAT vs ERA5	0.36	0.73	1.01	94.11%	-1.0	7.8	14.4

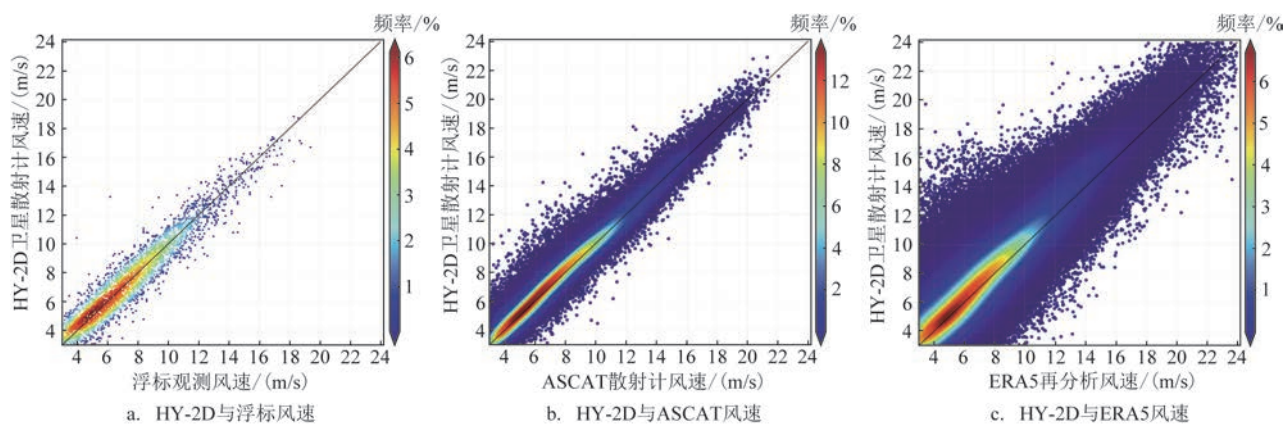


图2 风速散点图

Fig.2 Wind speed scatter diagram

数为 97.60%，与 ERA5 再分析数据的相关系数为 90.96%，由此可以看出与 HY-2D 风场数据相关系数最高的是 ASCAT 散射计风速，其次是浮标数据，最低的是 ERA5 再分析数据，但总体来说 HY-2D 卫星散射计海面风数据与 3 种风场数据的相关系数都很高，数据质量可靠。从图 2a 可以看出，当风速小于 5 m/s，HY-2D 风速略高于浮标观测风速；从图 2b 可以看出，ASCAT 风速和 HY-2D 数据总体均匀地分布在对角线两侧；从图 2c 可以看出，HY-2D 数据在中低风速区 (3~12 m/s) 的值总体略大于 ERA5 再分析数据。

2.2 使用浮标数据检验结果分析

2.1 节中给出了 HY-2D 数据的整体检验结果，为了更清晰地了解 HY-2D 卫星散射计数据在不同浮标站的观测水平，本节分析各浮标数据对 HY-2D

卫星散射计数据的检验结果。图 3a 和 3c 展示的是 HY-2D 卫星散射计风速在各浮标位置的观测能力，其中，HY-2D 风速的均方根误差控制在 0.6~1.3 m/s (见图 3a)，平均误差控制在 -0.3~0.4 m/s (见图 3c)，平均绝对误差控制在 0.5~0.9 m/s。3 种统计量均很好地控制在了 2 m/s 以内，由此可见 HY-2D 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。

图 3b、3d 展示的是 HY-2D 卫星散射计风向在各浮标位置的观测能力，其中 N05 浮标和 N08 浮标位置的平均误差和平均绝对误差十分接近且为正值，这说明在这两个位置，HY-2D 风向在浮标实测风向顺时针方向出现的概率极高；此外，N04 浮标位置的平均误差和平均绝对误差大小十分接近，不同的是负一正，这说明在 N04 位置，HY-2D 风向在浮标实测风向逆时针方向出现的概率极高。为更清楚

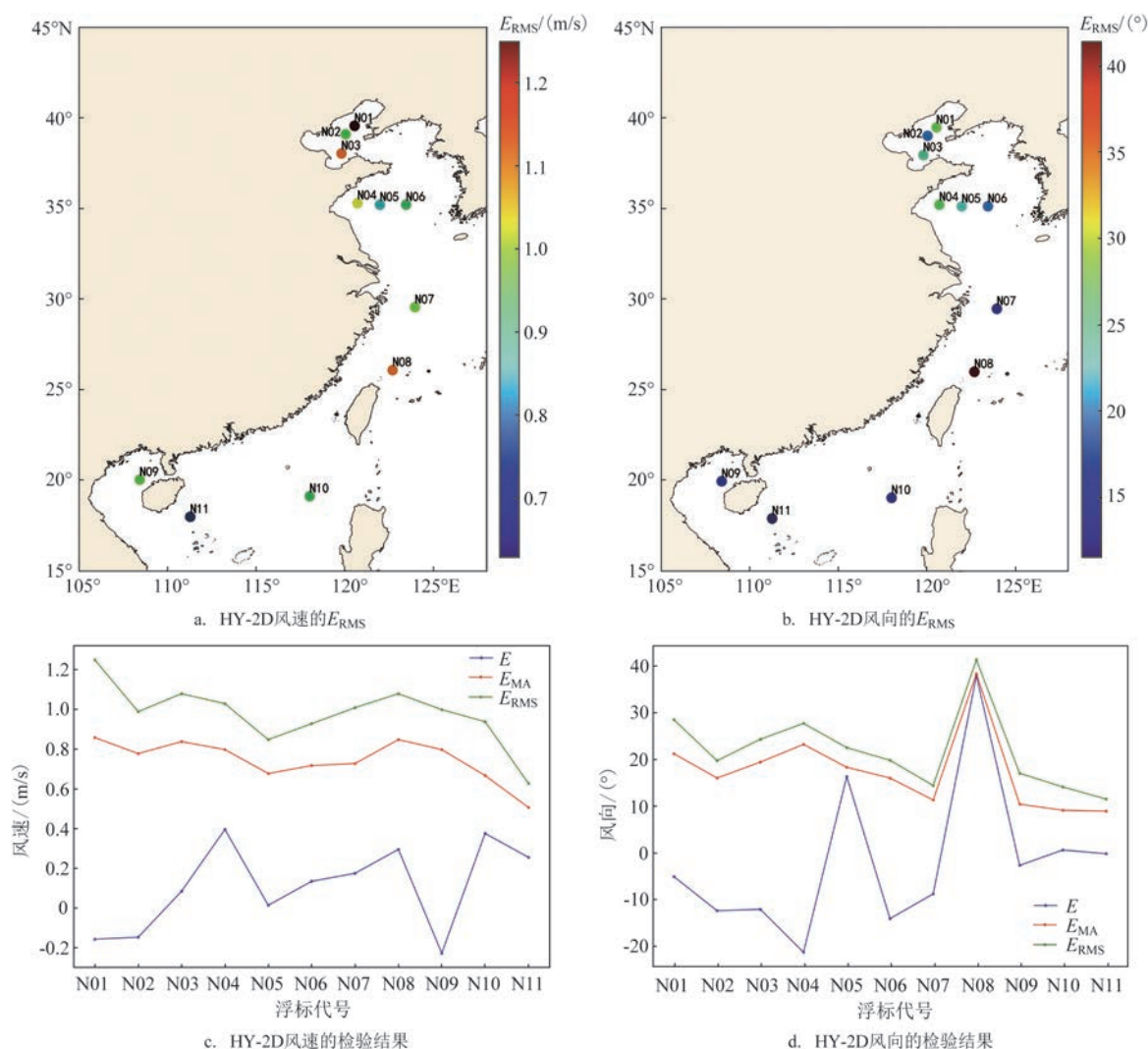


图3 HY-2D卫星散射计数据在各浮标站位置的检验的结果

Fig.3 Validation results of HY-2D satellite scatterometer data at each buoy station

地了解两组数据的关系,绘制了两组数据的时序图(图略),结果表明二者之间不存在稳定的偏差关系。为保证检验结果的可靠性,在整体评估工作中,上述3个浮标位置的风向数据未计入统计量的计算中。通过图3a、3b并没有观察到近岸浮标数据的误差更大。

2.3 使用ERA5风场、ASCAT风场数据检验结果分析

2.1节给出了ERA5、ASCAT风场数据对HY-2D卫星散射计海面风场产品的整体检验结果,本节主要分析风速、风向误差的空间分布特征、随风速变化的特征和概率分布特征。

2.3.1 HY-2D与ERA5风场平均误差空间分布特征

图4为HY-2D卫星散射计数据与ERA5再分析数据的风速、风向平均误差空间分布特征。由图4a可以看出,两者的风速平均误差在西北太平洋区域整体为正值,即HY-2D的平均风速高于ERA5的风速,且呈纬度高的海域误差相对偏小、纬度低的海域误差相对偏大的特征;在中国近海海域范围内,两者在渤海区域的误差较小,平均风速比较一致,而在东海、南海海域正偏差相对略大。图4b为HY-2D数据与ERA5再分析数据风向平均误差的空间分布特征,由图可以看出,两者的风向平均误差在西北太平洋区域整体为负值,少数的正值区出现在赤道附近,而中国近海海域均为负值区。

2.3.2 HY-2D与ASCAT风场平均误差空间分布特征

图5为HY-2D卫星散射计数据与ASCAT的风速、风向平均误差空间分布特征。从图5a可以看出, HY-2D相对于ASCAT的风速平均误差在西北太平洋区域呈现的特征与ERA5有所差异, 前者呈现更多的点状分布特征, 在整个海区是不连续的; 此外, 除少数区域平均误差较大外, 整场的平均误差较小, 尤其是中国近海海域, 平均误差基本控制在

0.3 m/s 以内, 这也说明, 在中国近海区域, 两种散射计的风速观测水平比较一致。从图5b可以看出, HY-2D与ASCAT的风向平均误差分布不存在明显的地理位置特征, 但出现了较多误差较大值点, 且不规律地分布在整个西北太平洋海域, 尤其是赤道附近。

通过对比不难发现, 图3的HY-2D数据与浮标数据的平均误差具有较明显的连续渐变的特点, 而

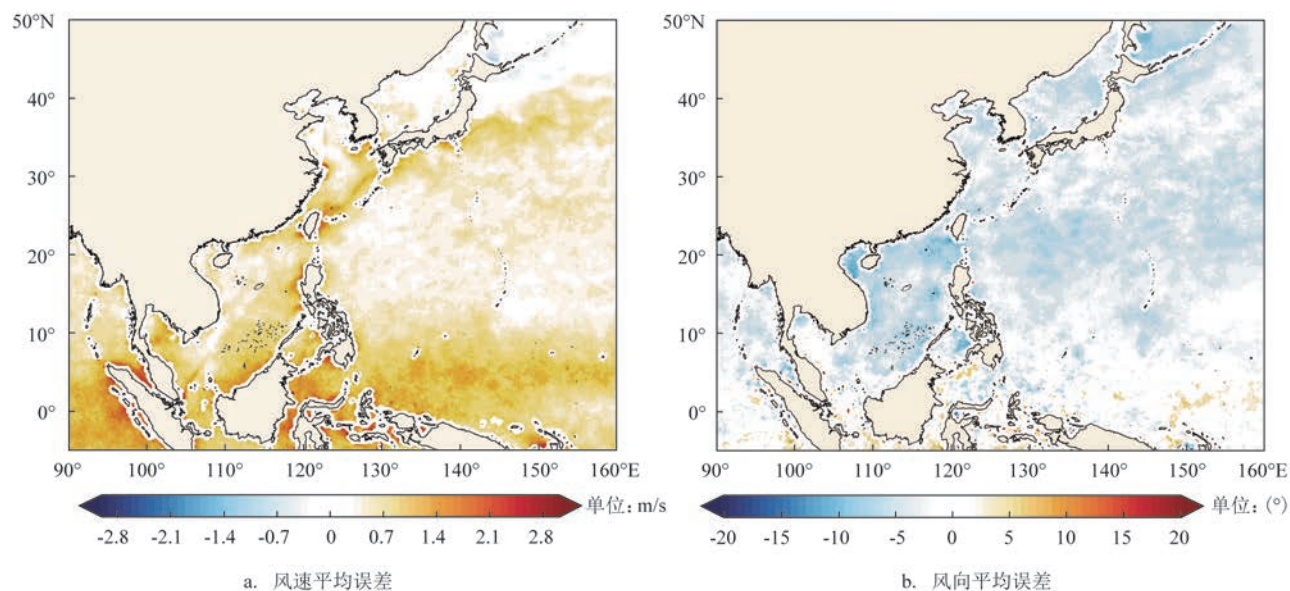


图4 HY-2D卫星散射计数据与ERA5再分析数据的风矢量平均误差空间分布特征

Fig.4 Spatial distribution of wind vector mean error between HY-2D and ERA5

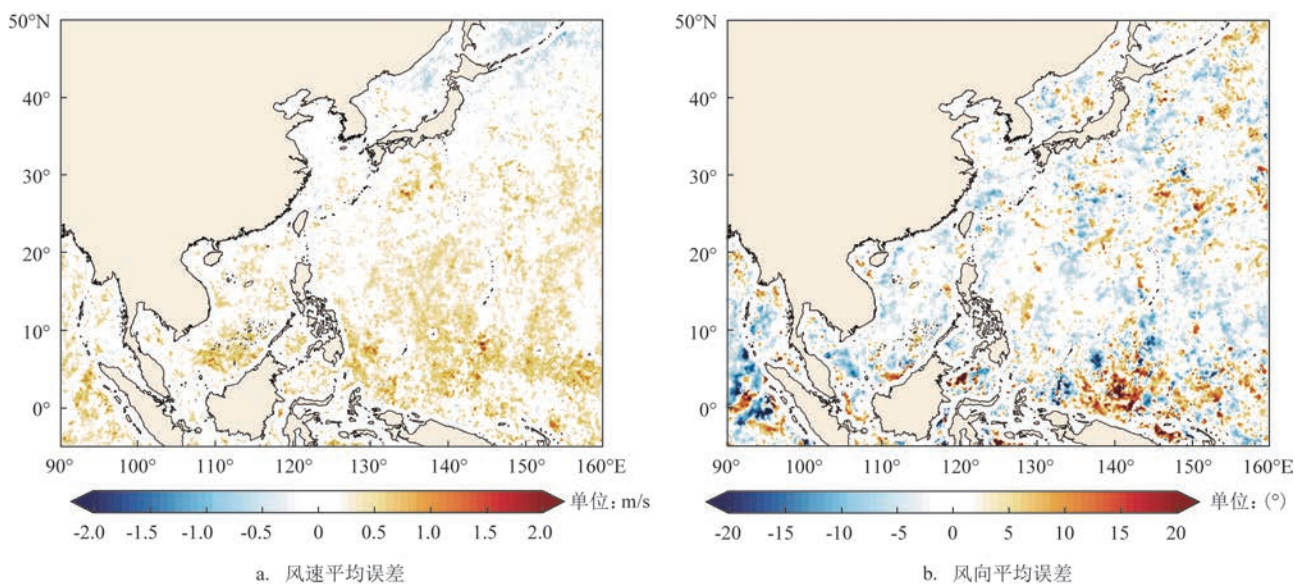


图5 HY-2D卫星散射计数据与ASCAT的风矢量平均误差空间分布特征

Fig.5 Spatial distribution of wind vector mean error between HY-2D and ASCAT

图5则呈现不连续的突变特点,这与图4使用的ERA5数据是数值模式数据有着直接的联系。

2.3.3 HY-2D与ERA5风场的风速、风向误差随风速变化特征分析

图6a为HY-2D风速相较于ERA5风速的 E 、 E_{MA} 和 E_{RMS} 随风速大小的变化情况。由图可知,两者风速的 E 随着风速的增大而减小,并在风速为22 m/s时 E 由正转负,继而沿负值方向增大,可见相较于ERA5数据,HY-2D数据在风速<22 m/s时 E 偏大。风速的 E_{MA} 、 E_{RMS} 随着风速的增大整体呈现先减小后增大的趋势,最小值出现在风速为9 m/s时。

图6b为HY-2D风向相较于ERA5风向的 E 、 E_{MA} 和 E_{RMS} 随风速大小的变化情况。从图可知,两者的风向 E 在风速≤22 m/s时为负值,22 m/s以上时为正值;在风速≤22 m/s时,随着风速的增大, E 呈现先增大后减小的趋势,在风速为10 m/s左右时, E 达到最

大。风向 E_{MA} 、 E_{RMS} 结果的变化趋势十分一致,即当风速<8 m/s时, E_{MA} 和 E_{RMS} 均随着风速的增大而快速减小,之后缓慢减小趋于稳定,这说明相较于ERA5的风向数据,HY-2D数据在风速较小时风向误差更大,随着风速增大,风向误差减小。

2.3.4 HY-2D与ASCAT风场风速风向误差随风速变化特征分析

图7a为HY-2D风速相较于ASCAT风速的 E 、 E_{MA} 和 E_{RMS} 随风速大小的变化情况。由图可知,两者风速的 E 在多数情况下为正值,少数为负值,由此可见HY-2D风速相对ASCAT风速总体偏大,而在风速>22 m/s后偏小较为明显。两者的 E_{MA} 、 E_{RMS} 随着风速的增大整体呈现波动式增大,在风速为20 m/s时, E_{MA} 、 E_{RMS} 达到最大。

图7b为HY-2D风向相较于ASCAT风向的 E 、 E_{MA} 和 E_{RMS} 随风速大小的变化情况。由图可知,随

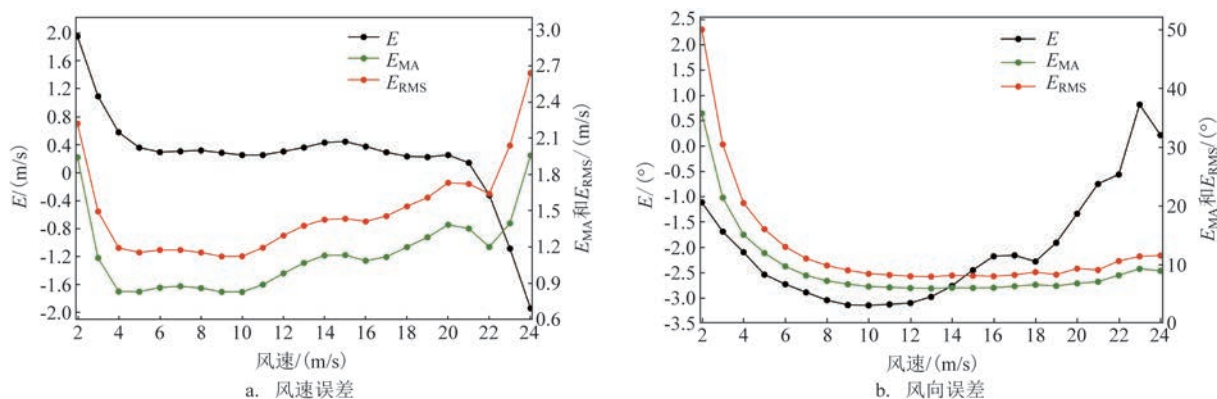


图6 HY-2D卫星散射计数据与ERA5再分析数据的风矢量误差随风速变化特征

Fig.6 The characteristics of wind vector error varying with wind speed between HY-2D and ERA5

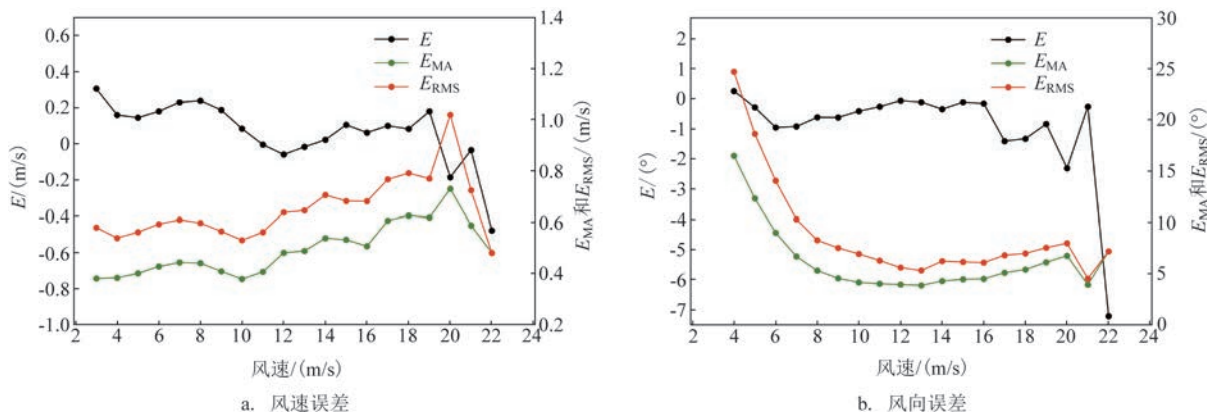


图7 HY-2D卫星散射计数据与ASCAT卫星散射计风场的风矢量误差随风速变化特征

Fig.7 The characteristics of wind vector error varying with wind speed between HY-2D and ASCAT

着风速的增大,两者风向的 E 在 $-2^{\circ}\sim 1^{\circ}$ 之间波动,当风速增大到22 m/s时,风向的 E 突然增大,这种现象可能与样本量太少有关。风向的 E_{MA} 、 E_{RMS} 的变化趋势十分一致,即当风速 < 9 m/s时,两者风向的 E_{MA} 和 E_{RMS} 均随着风速的增大而快速减小,之后缓慢减小后又有所增大,说明相较于ASCAT风向, HY-2D数据在风速较小时风向误差更大,随着风速增大,风向误差减小。

对比2.3.3和2.3.4小节可以看出, HY-2D数据与ERA5和ASCAT风速、风向数据的 E 和 E_{RMS} 有着较好的一致性,不过整体而言,相对于ASCAT的误差更小。

2.3.5 HY-2D与ERA5风场、ASCAT风场风速、风向绝对误差概率分布特征分析

图8a为HY-2D风速绝对误差与ERA5再分析数据、ASCAT散射计数据的累计概率分布曲线。当

风速绝对误差 < 2 m/s时,两者的累计概率均快速增长,2 m/s时HY-2D风速与ERA5数据、ASCAT数据绝对误差累计概率分别为90.2%和99.2%;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,ERA5的累计概率达到98.9%,之后增长速度进一步变缓。由此可见,风速绝对误差超过4 m/s的概率只有1%。这两组曲线的变化趋势十分相似,不同的是相较于ERA5, HY-2D相对ASCAT的累计概率增长更快,这也在一定程度说明了HY-2D与ASCAT数据的相似度更高。

图8b为HY-2D风向绝对误差与ERA5再分析数据、ASCAT散射计数据的累计概率分布曲线,这两组曲线的变化趋势依然一致,ERA5的变化趋势略滞后于ASCAT。当风向绝对误差小于 20° 时, HY-2D风速与ERA5数据、ASCAT数据的累计概率均快速增长,当绝对误差为 20° 时,两者的累计概率分别为89.3%

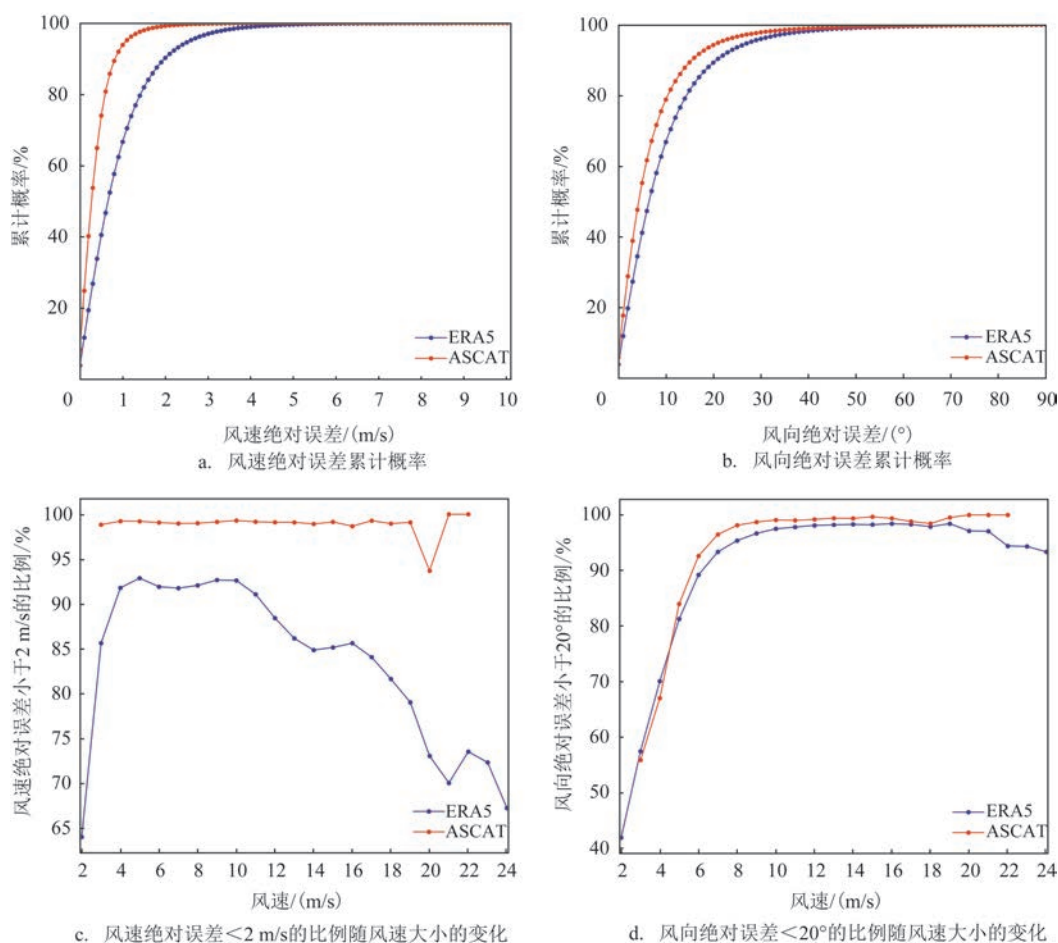


图8 HY-2D卫星散射计数据与ERA5再分析数据、ASCAT散射计数据的风速/风向误差概率分布情况

Fig.8 The error probability distribution of HY-2D wind vector against ERA5 and ASCAT

和94.3%;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98.3%和98.9%,之后累计概率的增长速度进一步变缓。

图8c为HY-2D数据与ERA5数据、ASCAT数据的风速绝对误差 $<2\text{ m/s}$ 的比例随风速的变化曲线。从图中可以看出, HY-2D相较ERA5曲线在风速为 2 m/s 时比例较低,在风速为 $4\sim 11\text{ m/s}$ 时,这一比例达到90%以上,随着风速增大,该比例整体呈现下降趋势,其中在风速为 $14\sim 16\text{ m/s}$ 和 22 m/s 时,出现了短暂的上升趋势,当风速为 24 m/s 时,这一比例已下降至67.3%。而HY-2D相较ASCAT有更好的表现,风速绝对误差 $<2\text{ m/s}$ 的比例稳定维持在98%以上(风速为 20 m/s 时除外)。综合来看,在风速为 $3\sim 18\text{ m/s}$ 时,两组数据风速误差 $<2\text{ m/s}$ 的比例都在80%以上,在风速 $>18\text{ m/s}$ 后, ERA5的对比结果表现略差,总体来看HY-2D风速反演精度较高。

图8d为HY-2D数据与ERA5数据、ASCAT数据的风向绝对误差 $<20^\circ$ 的比例随风速的变化曲线,总的来看HY-2D数据与ERA5和ASCAT曲线的变化趋势比较一致,均呈现该比例先快速增大后维持稳定略有波动的特征。在风速由 2 m/s 增大 9 m/s 时,该比例快速增大,之后增长缓慢,趋向平稳,直至风速 $\geq 20\text{ m/s}$ 后, ERA5的该比例有所减小,但依然维持在93%以上。由此可见,当风速 ≥ 5 级时,风向的反演精度较高。

3 结论

本文利用中国近海浮标数据、ERA5风场数据、ASCAT海面风场数据对HY-2D风场产品在西北太平洋区域的适用性进行了分析。结论如下:

①在总体质量分析中,3组结果的风速均方根误差分别为 0.98 m/s 、 1.23 m/s 和 0.58 m/s ,误差均很好地控制在 2 m/s 以内;风向均方根误差分别为 18.8° 、 16.8° 和 12.8° ,误差均控制在 20° 以内。从总体上看HY-2D卫星散射计海面风数据质量是可信的,且与同为卫星散射计资料的ASCAT风场数据的误差最小,可以用于业务工作中。

②通过对HY-2D和中国近海浮标站点风矢量数据的对比分析发现,各站点风速均方根误差分布在 $0.7\sim 1.3\text{ m/s}$ 之间,风向均方根误差分布在 $15^\circ\sim$

30° ,未发现离岸距离和误差之间的明显规律。

③HY-2D相较ERA5的风速均方根误差随风速增大呈先减小后增大趋势,而与ASCAT的风速均方根误差呈波动式增大趋势;风向均方根误差均呈现随风速增大而逐渐减小的趋势。

④分析HY-2D风速、风向绝对误差累计概率特征可知, HY-2D数据较ERA5和ASCAT的风速绝对误差 $\leq 2\text{ m/s}$ 的概率分别为90.2%和99.2%,风向绝对误差 $\leq 20^\circ$ 的概率分别为89.3%和94.3%。

⑤HY-2D风速相较ERA5的绝对误差 $<2\text{ m/s}$ 的比例随风速增大呈先增大后减小的趋势,在风速为 $4\sim 6$ 级时, HY-2D风速与ERA5风速最接近,而与ASCAT风速的绝对误差 $<2\text{ m/s}$ 的比例一直较高,可见这两种数据的相似性很高;由风向绝对误差 $<20^\circ$ 的比例随风速的变化曲线可以看出,当风速 ≥ 5 级时,风向的反演精度较高。

参考文献:

- [1] 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]. Strategic Study of CAE, 2013, 15(7): 68-74.
- [2] 郭春廷, 钟水新, 胡亮, 等. ASCAT反演风场与华南及南海站点观测对比分析[J]. 热带气象学报, 2020, 36(4): 508-517.
GUO C Y, ZHONG S X, HU L, et al. Comparative analysis of ASCAT inversion winds and AWS observations in the South China Sea[J]. Journal of Tropical Meteorology, 2020, 36(4): 508-517.
- [3] 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.
- [4] 陈坤堂, 董晓龙, 徐星欧, 等. 微波散射计反演海面风场的神经网络方法研究[J]. 遥感技术与应用, 2017, 32(4): 683-690.
CHEN K T, DONG X L, XU X O, et al. The study on oceanic vector wind field retrieve technique based on neural networks of microwave scatterometer[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2017, 32(4): 683-690.
- [5] 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.
- [6] 连喜虎, 刘桂艳, 高松, 等. EC细网格 10 m 风场产品在渤、黄海海域的预报能力检验与评估[J]. 海洋预报, 2020, 37(6): 74-82.
LIAN X H, LIU G Y, GAO S, et al. Evaluation of the ECMWF

- forecast skills for the 10m wind field in the Bohai Sea and the Yellow Sea[J]. *Marine Forecasts*, 2020, 37(6): 74-82.
- [7] NADERI F M, FREILICH M H, LONG D G. Spaceborne radar measurement of wind velocity over the ocean-an overview of the NSCAT scatterometer system[J]. *Proceedings of the IEEE*, 1991, 79(6): 850-866.
- [8] 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.
- LYU S R, LIN W M, ZOU J H, et al. Error quantification and cross calibration of sea surface wind speeds from multiple remote sensing satellites[J]. *Haiyang Xuebao*, 2023, 45(5): 118-128.
- [9] WANG Z X, ZOU J H, ZHANG Y G, et al. Intercalibration of backscatter measurements among Ku-band scatterometers onboard the Chinese HY-2 satellite constellation[J]. *Remote Sensing*, 2021, 13(23): 4783.
- [10] YANG S, MU B, SHI H Q, et al. Validation and accuracy analysis of wind products from scatterometer onboard the HY-2B satellite [J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2023, 42(2): 74-82.
- [11] 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.
- [12] YANG S, ZHANG L, LIN M S, et al. Evaluation of sea surface wind products from scatterometer onboard the Chinese HY-2D satellite[J]. *Remote Sensing*, 2023, 15(3): 852.
- [13] 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.
- [14] MAHRT L. Surface wind direction variability[J]. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 2011, 50(1): 144-152.
- [15] 刘婷婷, 朱秀芳, 张世喆, 等. ERA5 再分析地面气温数据在中国区域的适用性分析[J]. *热带气象学报*, 2023, 39(1): 78-88.
- LIU T T, ZHU X F, ZHANG S Z, et al. Applicability analysis of ERA5 reanalysis surface air temperature data in China[J]. *Journal of Tropical Meteorology*, 2023, 39(1): 78-88.
- [16] 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.

Applicability analysis of the HY-2D satellite scatterometer sea surface wind field product in the Northwest Pacific region

LIU Xiaoyan^{1,2,3}, ZHANG Meng⁴, LIN Xiaojuan^{1,3*}, HAO Sai^{1,3}, PENG Wei^{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, Ministry of Natural Resources, Beijing 100081, China; 4. South China Sea Sea Area and Island Center, Ministry of Natural Resources, Guangzhou 510310, China)

Abstract: Based on the Chinese offshore buoy data, the European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF) fifth-generation global reanalysis data (ERA5), and the MetOp-B satellite scatterometer ASCAT sea surface wind field data, the quality of wind field data from the HY-2D satellite scatterometer inversion is evaluated to analyze its applicability in the Northwest Pacific region. The statistical results show that the HY-2D wind field data are in good agreement with the Chinese offshore buoy data, the ERA5 and ASCAT data. The root-mean-square errors of wind speed against the three data sets are 0.98 m/s, 1.23 m/s and 0.58 m/s, and those of wind direction are 18.8°, 16.8° and 12.8°, respectively. All of which are lower than 2 m/s and 20°. Comparison of wind vector data from the HY-2D and Chinese offshore buoy data does not reveal a clear relationship between offshore distance and the error. Comparison against the ERA5 and ASCAT data shows that the percentage of the data with wind speed absolute error ≤ 2 m/s and wind direction absolute error $\leq 20^\circ$ is nearly 90%. In summary, the quality of the HY-2D scatterometer sea surface wind field in the Northwest Pacific region is high enough to satisfy the accuracy requirements of operational applications.

Key words: HY-2D satellite; scatterometer sea surface wind; Northwest Pacific; applicability; ERA5