

陈君芝,施晓晖,温敏,2023. ERA5 再分析 10 m 风速数据在“两洋一海”的适用性分析[J]. 气象,49(1):39-51. Chen J Z, Shi X H, Wen M, 2023. Applicability of ERA5 surface wind speed data in the region of “two oceans and one sea”[J]. Meteor Mon, 49(1):39-51(in Chinese).

ERA5 再分析 10 m 风速数据在“两洋一海” 的适用性分析*

陈君芝 施晓晖 温 敏

中国气象科学研究院灾害天气国家重点实验室, 北京 100081

提 要: 西太平洋-南海-东印度洋(以下简称“两洋一海”)地区对我国的天气气候、国家和社会经济有重要影响,但由于资料条件的限制,现有的海上高风速事件研究主要集中于近海,导致对“两洋一海”地区远洋高风速事件的时空分布、变化特征及其机理仍然不够了解,急需利用新的高分辨率资料进行深入的研究。目前欧洲中期天气预报中心第五代全球大气再分析资料(ERA5)再分析近地面 10 m 风速数据与现场观测风速的比较研究还相对较少,因此本文将“两洋一海”地区的国际海洋大气综合数据集(ICOADS)锚定浮标观测资料与 ERA5 进行了对比分析。结果表明:ERA5 再分析 10 m 风速数据能够较好地表现出海面风场的分布特点和变化特征。ERA5 再分析资料具有较高的时空分辨率、较长的时间序列以及完整的数据记录,将其用于海上高风速事件的气候分析是可行的,且具有一定的优势。需要注意的是,ERA5 再分析风速总体上存在低估实测风速的系统偏差,尤其是实测风速较大时,ERA5 偏离于实测风速的现象更为明显。

关键词: ERA5, ICOADS(International Comprehensive Ocean-Atmosphere Data Set), 近地面 10 m 风速, 两洋一海, 高风速事件
中图分类号: P413 **文献标志码:** A **DOI:** 10.7519/j.issn.1000-0526.2022.072301

Applicability of ERA5 Surface Wind Speed Data in the Region of “Two Oceans and One Sea”

CHEN Junzhi SHI Xiaohui WEN Min

State Key Laboratory of Severe Weather, Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081

Abstract: The Western Pacific-South China Sea-East Indian Ocean (two oceans and one sea) region has an important impact on the weather and climate, national security, as well as social economy of China. However, due to the limitation of data conditions, the existing research on high sea winds are mainly focused on the offshore, resulting in the insufficient understanding of the temporal and spatial distribution, the characteristics of changes and their mechanisms of high sea winds in the two oceans and one sea region. So, it is urgent to use new high-resolution data for in-depth research, but at present, there are relatively few comparative studies between ERA5 reanalysis surface winds and the observation data. Therefore, this paper compares the ICOADS moored buoy observation data with the ERA5 reanalysis data in the two oceans and one sea region, and the results show that the ERA5 reanalysis 10 m winds can well reflect the distribution and variation characteristics of sea surface wind field. In addition, the ERA5 reanalysis data has high

* 国家重点研发计划(2019YFC1510104)、国家自然科学基金重点项目(92158203)和中国气象科学研究院科技发展基金项目(2021KJ023)共同资助

2022 年 4 月 27 日收稿; 2022 年 8 月 25 日收修定稿

第一作者:陈君芝,主要从事“两洋一海”海上强风的变化特征及其可能成因研究. E-mail:3462918502@qq.com

通讯作者:施晓晖,主要从事东亚季风与气候变化研究. E-mail:shixh@cma.gov.cn

temporal and spatial resolution, long time-series and complete data records. Using the ERA5 reanalysis data is feasible and has certain advantages for climate analysis of high sea winds. However, it should be noted that the ERA5 reanalysis surface wind speed generally has a systematic bias of underestimating the observed wind speed. In particular, the greater the observed wind speed, the greater the deviation of ERA5 from the observed wind speed.

Key words: ERA5, International Comprehensive Ocean-Atmospheric Data Set (ICOADS), 10 m wind speed near the surface, two oceans and one sea, high sea wind

引言

海上强风具有突发性强、瞬时性显著等特点,往往会对海上作业的渔船和沿海地区的人民生命及财产安全造成严重影响(吕爱民等,2018)。1999—2005 年期间,我国近海风灾事故共发生 1076 起,其中由于海上强风导致的渔船全损事故占到全部近海事故的 33.92%(孙颖士和李冬霄,2007;尹尽勇等,2009)。海上强风作为强破坏性天气的一种主要形式,会造成渔业生产的严重经济损失,并可能危害到人民的生命安全,但另一方面,海上强风可以搅动海洋混合层下的营养物质和浮游生物,为海洋生物提供丰富的饵料,还能促进海洋和大气在动量、热量等方面的交换(Lin et al,2003;Sampe and Xie,2007)。

随着“21 世纪海上丝绸之路”国家战略的实施和开展,近海乃至远洋的海上高风速(6 级及以上)预报逐渐成为现代天气预报业务中的重要组成部分。胡海川等(2017;2022)、胡海川和周军(2019)曾提出海上极大风速预报属于业务预报难点,是否能够提供精准的预报,将关系到渔业生产和海洋监管部门的海上安全保障工作能否顺利开展。西太平洋-南海-东印度洋(以下简称“两洋一海”)地区包括了世界气象组织赋予我国的责任海区,而且特色鲜明,季风-信风交汇、台风频发、海洋环流复杂、温盐变化显著,细致分析“两洋一海”地区海上高风速事件的变化规律,并探讨其形成机制,可以为提高海上高风速的预报水平提供科学基础,对于保证航行安全和沿海灾害预防都有着极为重要的意义。由于资料条件的限制,以往的研究主要集中于近海(范苏丹等,2017;陈艳春等,2017),近几年的研究则更多地关注了台风的活动特征和预报难点分析(邱金晶等,2021;危国飞等,2021;王叶红等,2019;王天驹等,2019),导致对“两洋一海”地区远洋高风速事件的时空分布、变化特征及其机理不够了解,急需利用新的

高分辨率资料进行深入的研究。

目前在海洋和气象科学研究常用的数据中,国际海洋大气综合数据集(International Comprehensive Ocean-Atmosphere Data Set,ICOADS)是目前观测时间最长、海洋表面记录最全的现场观测资料,其主要由船舶资料组成,还包括锚定浮标、漂浮浮标和海岸站点数据等(宝乐尔其木格和任国玉,2013;Woodruff et al,2011)。随着卫星遥感技术的发展,微波散射计成为海面风场全球观测的一种有效技术手段,它可以通过雷达接收回波信号的强弱及不同角度的回波信号反演出 10 m 高度的海面风速和风向。自 1996 年以来,先后有美国的 NSCAT、QuikSCAT、WindSAT,日本的 SeaWinds 以及欧洲的 ASCAT 等卫星测风资料发布,在物理海洋学、海洋气象数值预报和台风监测等方面发挥了重要的作用。再分析风场资料是基于数值模式并将各种历史观测资料(如卫星观测、地面观测和高空观测等),通过同化(如四维变分、Kalman 滤波等)而生成的数值产品,近年来在海洋和气象的研究中也得到了广泛应用。

综合来看,由于航线的限制,ICOADS 大部分观测都局限在北半球中纬度区域,在低纬度、高纬度和南半球的观测非常有限,部分海域的观测记录十分稀少。卫星测风资料具有观测精度高、覆盖范围广(大约 90%的全球海洋)和空间分辨率高(25 km)等特点,但同时也存在时间分辨率较低(一天仅 2 次)的不足,与海上浮标观测值相比存在一定误差(Chelton and Freilich,2005;Mears et al,2001)。20 世纪 90 年代以来,各类再分析产品相继推出,例如,NCEP/NCAR、NCEP/DOE、NCEP-CFSR、MERRA、MERRA-2、ERA-Interim、JRA-55 等(Rienecker et al,2011;Kalnay et al,1996;Kanamitsu et al,2002;Saha et al,2010;Kobayashi et al,2015;Uppala et al,2008;Dee et al,2011;邓小花等,2010)。国内外一些专家学者开展了对上述再分析资料在海上

风速适用性方面的讨论,结果表明,再分析资料与卫星测风资料相比,虽然存在一定的系统性误差(范苏丹等,2017;陈艳春等,2017;孟宪贵等,2018;Carvalho,2019;刘鸿波等,2021),但由于同化了大量的观测资料,保证了其基本的可信度。此外,再分析数据还具有时间序列长、覆盖范围广、空间分辨率高及要素记录更加完整等特点,其在探讨海上高风速事件的气候特征方面具备一定的优势。

最近,欧洲中期天气预报中心(ECMWF)推出了第五代全球大气再分析资料(ERA5),该资料的时空分辨率有了很大的提高,同化观测资料的种类和数量也明显增加(Hersbach et al, 2020)。与 ERA-Interim 再分析 10 m 风速和 ASCAT 卫星观测数据相比,ERA5 的数据精度比 ERA-Interim 提高了约 20%,但仍存在一定的系统性误差,具体表现为中纬度地区的平均纬向风速偏小,而热带地区的平均经向风速偏小(Rivas and Stoffelen, 2019)。目前,ERA5 再分析 10 m 风速与现场观测风速数据的对比研究还相对较少,需要进一步开展这方面的研究。另外,虽然 ERA5 同化的数据中包含了锚定浮标观测资料,但其地面风速再分析产品对现场观测数据的重现能力如何,它们之间存在怎样的差异?仍然值得进行细致的分析。因此,本文将根据国家气象中心提供的 2020 年中国近海大风事件记录,利用“两洋一海”地区的 ICOADS 锚定浮标观测资料与 ERA5 再分析数据进行对比分析,了解 ERA5 再分析 10 m 风速数据在海上高风速事件研究中的适用性和误差范围。

1 资料及预处理

1.1 ERA5 简介

ERA5 为逐小时再分析资料,取代了之前的 ERA-Interim 再分析资料。其起始时间为 1979 年 1 月 1 日 00 时(世界时,下同),并持续更新至实时 5 d 以内(Kanamitsu et al, 2002; Saha et al, 2010)。本文采用了 2020 年逐时 ERA5 再分析 10 m 风速数据,其水平分辨率为 $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$ 。

1.2 ICOADS 资料预处理

由于浮标站风速观测记录缺测较多,考虑到后续将与 ERA5 再分析资料进行逐时和逐日最大风

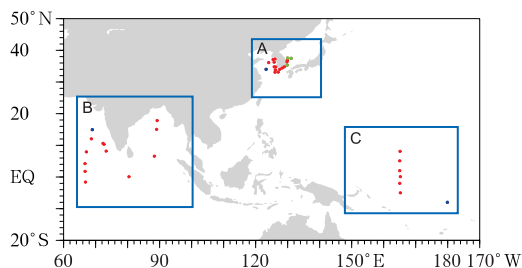


图 1 锚定浮标(圆点)在“两洋一海”地区的分布情况
(蓝色方框 A、B、C 分别表示黄渤海-日本海海区、东印度洋海区和西太平洋

海区,蓝色圆点为各海区资料质量较好的代表站,绿色圆点为黄渤海-日本海海区一次大风过程中最大风速 $\geq 20 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的典型浮标站)

Fig. 1 The distribution of the moored buoys (dot) in the Western Pacific-South China Sea-East Indian Ocean (Blue boxes A, B, C indicate the Yellow Sea-Bohai Sea-Sea of Japan (SOJ) sea area, the Eastern Indian Ocean sea area and the Western Pacific sea area respectively, blue dots are the representative stations with good data quality in each sea area, and green dots are the representative stations with the maximum wind speed $\geq 20 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ during a strong wind in the Yellow Sea-Bohai Sea-SOJ)

速之间的对比,首先剔除了 2020 年全年逐时风速记录缺测率达到 80% 的锚定浮标,然后将逐日最大风速记录缺测日数超过 122 d 的锚定浮标也全部剔除。剩余的锚定浮标空间分布情况如图 1 所示,并将“两洋一海”地区分为黄渤海-日本海(18 个浮标)、东印度洋(13 个浮标)和西太平洋(7 个浮标)共三个海区。

表 1 给出了各浮标站逐时观测在全年和不同季节的样本数、超过 6 级的高风速出现次数,以及浮标站和最近的 ERA5 格点的位置。可以看出,东印度洋海区的缺测较多,全年样本量较小;其余两个海区浮标站观测情况较好,全年样本数均超 6000 个。总体来看,各海区的总样本量是很充足的。对于不同的季节,除西太平洋海区的 52321 站(其夏季样本量为 0 个)以外,其他浮标站的观测在各个季节的分布基本均衡,表明数据具有较好的季节代表性。高风速的出现次数在黄渤海-日本海海区最多,西太平洋和东印度洋海区则相对较少。比较浮标站和 ERA5 最近格点的经纬度可以发现,由于 ERA5 资料的水平分辨率很高,使得它们之间的位置偏差很小,因此采用最近格点来和浮标站点进行比较是合理且方便易行的。

表 1 2020 年三个海区各浮标站点逐时风速各季节、全年、高风速样本量，
以及浮标站点与距离最近 ERA5 格点的地理位置对比

Table 1 Sample size of hourly wind speed at each buoy station by each season, year and high wind in the three sea areas, and comparison of geographical location between the buoy station and the nearest ERA5 grid point in 2020

海区	站号	样本量/个						浮标站点位置		ERA5 格点位置	
		全年	春季	夏季	秋季	冬季	高风速	纬度/°N	经度/°E	纬度/°N	经度/°E
黄渤海-日本海	21229	8610	2155	2177	2133	2145	1413	37.46	131.11	37.5	131
	22101	7939	1770	2042	2021	2106	735	37.24	126.02	37.25	126
	22102	8016	2098	1708	2089	2121	816	34.79	125.78	34.75	125.75
	22103	8457	2172	1971	2152	2162	1276	34	127.5	34	127.5
	22104	8126	2170	1717	2152	2087	1134	34.77	128.9	34.75	129
	22105	8395	2160	2174	1904	2157	1273	37.54	130	37.5	130
	22106	8309	1814	2183	2151	2161	1593	36.35	129.78	36.25	129.75
	22107	8390	1925	2174	2152	2139	1877	33.08	126.03	33	126
	22108	8472	2159	2157	2096	2060	866	36.25	125.75	36.25	125.75
	22183	7817	2129	2063	1678	1947	505	34.73	126.24	34.75	126.25
	22184	7424	2027	1589	1980	1828	1226	33.79	126.14	33.75	126.25
	22185	8396	2145	2054	2055	2142	945	37.09	125.43	37	125.5
	22187	8645	2127	2190	2162	2166	2202	33.13	127.02	33.25	127
	22188	8596	2145	2163	2135	2153	1215	34.39	128.23	34.5	128.25
	22189	8662	2171	2184	2155	2152	1718	35.35	129.84	35.25	129.75
	22190	8322	2165	1860	2144	2153	1162	36.91	129.87	37	129.75
	22191	7864	2116	2104	2150	1494	1217	36.13	124.06	36.25	124
	22192	7975	2153	2188	2147	1487	1145	34	123.26	34	123.25
西太平洋	52001	8437	2142	1995	2139	2161	105	2	165	2	165
	52002	8447	2146	2020	2126	2155	134	-2	165	-2	165
	52003	8418	2164	1999	2090	2165	200	5.1	165	5	165
	52004	8412	2140	2011	2110	2151	279	-5	165.2	-5	165.25
	52006	8489	2161	2028	2135	2165	738	8.1	165.1	8	165
	52316	8419	2134	2016	2129	2140	252	-8	179.9	-8	180
	52321	6331	2080	0	2085	2166	77	0.1	165.2	0	165.25
东印度洋	23001	3144	765	832	751	796	83	0.08	80.41	0	80.5
	23009	2822	727	724	654	717	170	15.04	89.05	15	89
	23012	2952	782	762	682	726	93	7.94	67.1	8	67
	23013	2938	766	749	673	750	43	4.22	66.67	4.25	66.75
	23014	3010	784	769	688	769	40	1.78	66.7	1.75	66.75
	23016	3024	787	766	692	779	44	-1.61	66.82	-1.5	66.75
	23091	2572	648	646	634	644	195	17.82	89.22	17.75	89.25
	23451	2684	657	703	662	662	263	14.95	68.97	15	69
	23452	2714	655	714	677	668	251	12.05	68.65	12	68.75
	23453	2456	544	667	650	595	36	8.18	73.29	8.25	73.25
	23454	2634	671	665	637	661	92	10.32	72.61	10.25	72.5
	23460	2051	675	695	231	450	63	6.57	88.35	6.5	88.25
	23497	2359	553	661	528	617	497	10.62	72.3	10.5	72.25

锚定浮标的观测记录为海平面以上 3 m 高度的风速和风向,而 ERA5 再分析风速数据为 10 m 高度上的风速,因此需要进行高度外推的换算(Rivas and Stoffelen, 2019)。一般认为海洋边界层不都是中性稳定的,当风速达到 $6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 以上时才可将其近似作为中性层结,但最近有研究(Carvalho, 2019)指出,由于洋面的粗糙度很小,且外推的高度

差也不大,可以利用对数风廓线外推公式将浮标风速值外推到 10 m 高度。

$$U(Z) = \frac{\ln \frac{Z}{Z_0}}{\ln \frac{Z_m}{Z_0}} U(Z_m) \quad (1)$$

式中: $U(Z)$ 是高度 Z 处的风速; Z_0 为粗糙度,海洋上一般取 $1.52 \times 10^{-4} \text{ m}$; Z_m 为浮标测量高度。本

文同样采用式(1)将浮标实测风速外推为 10 m 高度风速。

2 结果分析

2.1 ERA5 与锚定浮标逐时数据的对比

2.1.1 总体情况

利用“两洋一海”地区全部 38 个锚定浮标站点和距离站点最近格点上的 2020 年全年逐小时 10 m 处风速数据,根据世界气象组织的风力等级标准,统计了不同风力等级的风速占比(图 2)。可以看到浮标和 ERA5 再分析风速均表现出准正态分布特征:大部分为 3~5 级风(浮标:74.8%, ERA5:73.8%),0~2 级风和 6 级以上高风速所占的比例都相对较小,4 级风在两套资料中的占比都是最高的,分别达到了 35.8% 和 29.7%。两者分布基本一致,说明 ERA5 再分析 10 m 风速数据能够比较好地重现实测风速,同时从图 2 也可以发现,6 级以上高风速所占的百分率,ERA5 始终比浮标的要低,如果按业务标准划分风力等级,ERA5 中高风速事件出现的频率将比实际情况要低。

逐时海面风速偏差(ERA5 与浮标数据,记为 $V_{\text{ERA5}} - V_{\text{浮标}}$)随浮标风速的变化(图 3)在三个海区表现出相似的特征:随着浮标风速的增加,风速偏差逐渐减小,从正值偏多转为负值偏多,且偏离程度逐渐增大,其线性回归系数分别为 -0.2486(图 3a)、-0.2483(图 3b)和 -0.3063(图 3c)。这一特征表

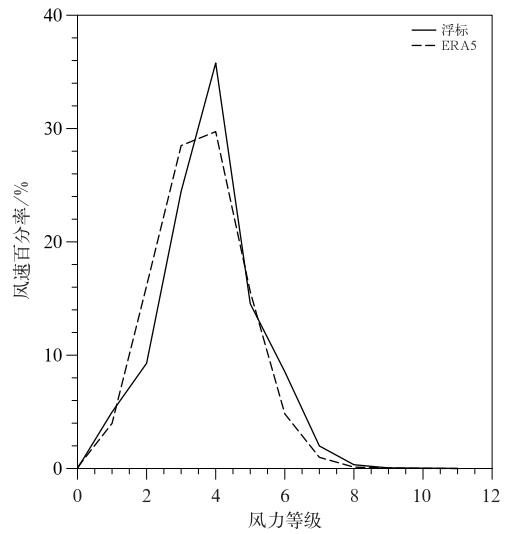


图 2 2020 年浮标观测和 ERA5 再分析 10 m 风速数据的风力等级百分率分布

Fig. 2 Percentage distribution curve of wind scale for buoy observations and ERA5 reanalysis surface wind speed in 2020

明,当浮标风速较大时,ERA5 风速比浮标风速明显偏小,与 ERA5 再分析数据中 6 级以上高风速占比偏小的情况(图 2)相对应。此外,从三个海区逐时海面风速偏差随浮标风速风力等级的变化可以看出,除东印度洋海域在 3 级风力($3.4 \sim 5.4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$)处风速偏差由正转负外,其余两个海区都是在 4 级风力($5.5 \sim 7.9 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$)处风速偏差由正转负(图 4)。因此,可以认为当浮标风速为 0~3 级时,ERA5 总体上高估了实测风速;浮标风速超过 3 级后,ERA5 则是普遍地低估了实测风速。

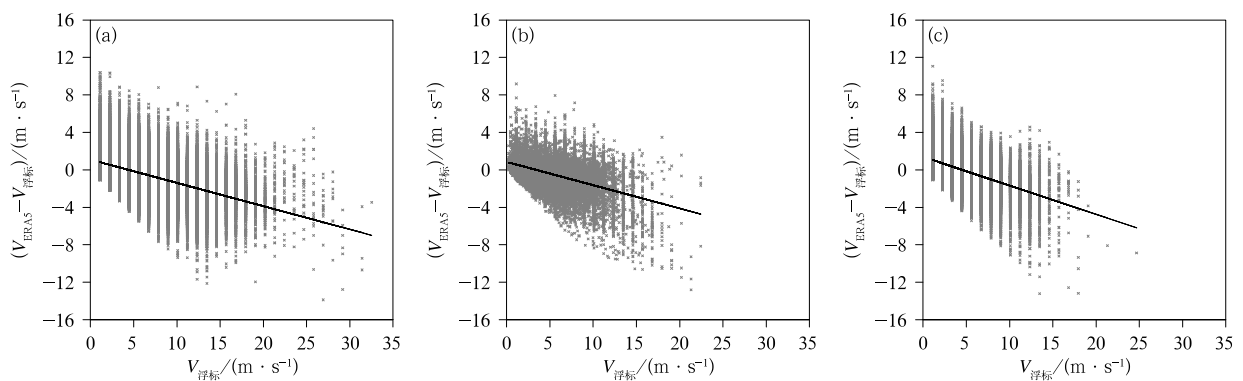


图 3 2020 年不同海区逐时海面风速偏差($V_{\text{ERA5}} - V_{\text{浮标}}$)随浮标风速的变化

(a) 黄渤海-日本海, (b) 东印度洋, (c) 西太平洋

Fig. 3 Variation of hourly sea surface wind speed deviation ($V_{\text{ERA5}} - V_{\text{浮标}}$) with buoy wind speed in different sea areas in 2020

(a) Yellow Sea-Bohai Sea-SOJ, (b) Eastern Indian Ocean, (c) Western Pacific

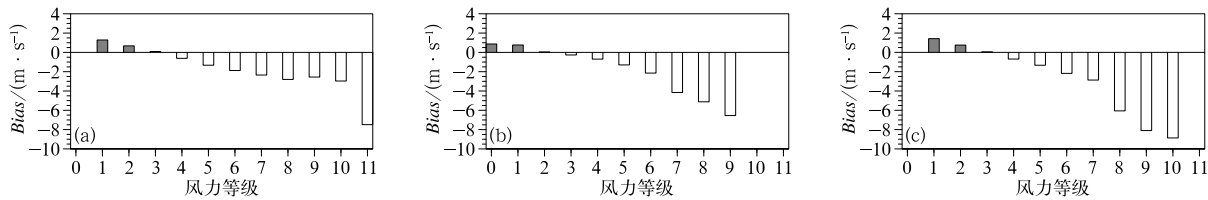


图 4 2020 年不同海区逐时海面风速偏差随浮标风速风力等级的变化
(a)黄渤海-日本海,(b)东印度洋,(c)西太平洋

Fig. 4 Variation of hourly sea surface wind speed deviation with buoy
wind speed wind scale in different sea areas in 2020

(a) Yellow Sea-Bohai Sea-SOJ, (b) Eastern Indian Ocean, (c) Western Pacific

进一步分别统计不同海区的浮标平均风速以及 ERA5 相对于浮标实测资料的平均偏差(海区内所有站点、所有时刻 ERA5 与浮标的风速偏差平均值)、相对偏差(平均偏差与浮标平均风速的百分比)、绝对偏差(海区内所有站点、所有时刻 ERA5 与浮标的风速偏差绝对值的平均值)、均方根误差和相关系数(表 2)。由表 2 可见,在三个海区内,ERA5 再分析风速相对于浮标实测风速的平均偏差均为负值,进一步表明 ERA5 再分析 10 m 风速数据低估实测风速的系统误差是确实存在的,但总体偏差幅度较小(低于 $1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$)。此外,两套资料的相关系数在三个海区均超过 0.8,说明两套数据具有很好的相关性,ERA5 再分析资料可以较好地表现出浮标站逐小时风速的变化。

具体到不同的海区,西太平洋海区两套资料的相对偏差、平均偏差和均方根误差都是最小的,这可能与太平洋海区宽广,几乎不受地形条件影响有关,但相关系数只有 0.8032,也是三个海区中最小的,应该是受到了该海区浮标站点数量较少的影响。黄渤海-日本海海区的绝对偏差和均方根误差最大,可能是因为这一海区的浮标站点实测风速较大(表 2 中黄渤海-日本海海区的平均风速是三个海区中最大的),进而使 ERA5 再分析 10 m 风速相对于实测风速的偏离程度也增加(图 3a)。东印度洋海区两套资料的相对偏差和平均偏差则是三个海区中最大

的,ERA5 再分析资料更为明显地低估了这一区域的风速。

针对高风速事件,挑选出大于 $10.8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (6 级以上)的逐时浮标风速与对应时刻最近格点的 ERA5 风速,分别计算了三个海区相应的统计量。结果表明,二者之间的偏差明显增大,如平均偏差分别达到 $-2.0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (黄渤海-日本海海区)、 $-2.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (西太平洋海区)和 $-2.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (东印度洋海区)。相关系数则明显减小,其中黄渤海-日本海海区可达到 0.7224,而西太平洋海区和东印度洋海区分别为 0.3396 和 0.3237。进一步表明了实测风速越大,ERA5 再分析风速的误差也越大的特点。

2.1.2 个例分析

根据国家气象中心提供的《2020 年我国近海海域主要大风天气过程(台风除外)纪要表》,2020 年 1 月 6 日夜间至 8 日白天,受入海气旋(黄淮气旋)和冷空气的共同影响,渤海、渤海海峡、黄海大部海域、东海北部海域出现了 7~8 级、阵风 9~10 级的大风。其中,8 级大风主要出现在渤海东部、渤海海峡、黄海北部、中东部和东南部以及东海东北部,渤海及东海东北部的站点观测到风速为 $21 \sim 26 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的大风。本文针对此个例初步讨论了 ERA5 再分析数据对大风过程的表现能力。

图 5 给出了此次大风过程中,黄渤海-日本海海区实测最大风速 $\geq 20 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的三个浮标站(图 1 中

表 2 2020 年三个海区逐时 ERA5 再分析 10 m 风速相对于锚定浮标实测数据的统计量
Table 2 Statistics of hourly ERA5 reanalysis surface wind speed relative to the observed
data of the moored buoys in three sea areas in 2020

海区	浮标平均风速 /($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	ERA5 平均风速 /($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	相对偏差 /%	平均偏差 /($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	绝对偏差 /($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	相关系数	均方根误差 /($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)
黄渤海-日本海	6.8	6.2	-8.3	-0.6	1.5	0.8677	1.9
西太平洋	5.7	5.3	-6.4	-0.4	1.2	0.8032	1.6
东印度洋	5.8	5.2	-10.2	-0.6	1.2	0.8504	1.6

绿色圆点)的实测风速及其距离最近格点的 ERA5 再分析 10 m 风速的对比,可以看到在三个站点上,二者的变化趋势都基本一致(相关系数分别达到 0.9151、0.9025 和 0.8759),即 ERA5 再分析数据能够很好地表现出这次大风过程的演变特征。但同时也发现,在实测风速较大($\geq 15 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$)时,三个站点均存在 ERA5 再分析风速相对于实测数据明显偏小的情况,体现了 ERA5 在高速区显著低估实测风速的系统误差。经统计,在 2020 年 1 月 6 日 20 时至 8 日 08 时时间段内,三个浮标站 ERA5 再分析风速相对于 3 个浮标站实测风速的平均偏差均为负值(分别为 -1.1 、 -0.5 和 $-1.4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$),与表 2 中黄渤海-日本海海区 ERA5 与浮标风速的平均偏差为负值的情况一致。

此次大风事件逐 4 h 的 10 m 风场空间分布(图 6)显示,黄渤海-日本海海区的浮标站实测风速、风向与 ERA5 再分析风速、风向在各时刻都基本对应,较好地反映了此次大风过程的发生、发展情况(各时刻的平均风向偏差均在 30° 以内),但个别时刻存在浮标风向与 ERA5 再分析风向偏差较大的情况,如 1 月 7 日 08 时(图 6b),风向最大偏差达到 -194.47° ; 7 日 12 时(图 6c),风向最大偏差也达到 -188.57° 。从图 6 还可以看到,随着时间的推移,浮标实测风速 $> 20 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的记录(红色风羽)依次出现在黄海中部、朝鲜海峡(图 6d, 6e)和日本海(图 6f, 6g),ERA5 再分析风场则较为清楚地反映出了气旋入海后加强东移的过程,均与记录中的实际情况比较吻合。总体而言,ERA5 再分析数据能较好地表现出此次大风过程的发展进程、天气形势和主要影响系统,但在具体的风速大小和风向上仍然存在一定的偏差。

2.2 ERA5 与锚定浮标逐日最大风速的对比

由 2.1 节的分析结果可知,ERA5 逐时再分析风速在实测风速较大时,存在明显低估实测风速的系统误差,而日最大风速是研究中经常用来定义海上高速事件的一个气象要素,ERA5 日最大风速数据的可信度如何? 同样值得关注。为此,从 2020 年逐时数据中挑选出各浮标站点以及距离浮标站点最近格点的逐日最大风速,计算了各浮标站逐日最大风速和与浮标站点距离最近格点上的 ERA5 再分析 10 m 风速数据的平均偏差(ERA5 - 浮标,图 7)。从图 7 中可以看到,除印度洋的 23460 号锚

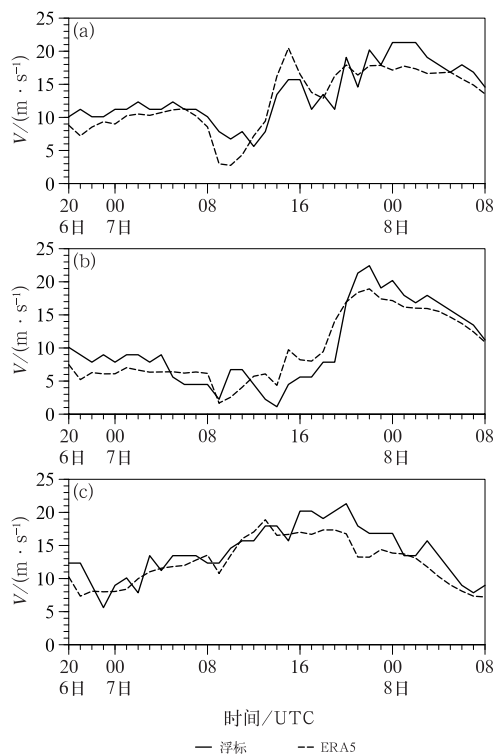


图 5 2020 年 1 月 6 日 20 时至 8 日 08 时典型浮标站和 ERA5 再分析逐时风速的时间演变

(a)21229 号站,(b)22105 号站,(c)22189 号站

Fig. 5 Temporal evolution of hourly surface wind speed at typical buoy stations and ERA5 reanalysis from 20:00 UTC 6 to 08:00 UTC 8 January 2020

(a) No. 21229, (b) No. 22105, (c) No. 22189

定浮标的日最大风速平均偏差为正值($0.1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$)外,其余站点的日最大风速平均偏差均为负值,说明 ERA5 再分析资料的日最大 10 m 风速普遍存在低估实测风速的误差。

类似地,利用 2020 年的逐日最大风速数据计算了三个海区两种资料之间的统计量(表 3),与逐时数据得到的结果(表 2)相比,ERA5 日最大风速的平均偏差、相对偏差、绝对偏差和均方根误差都比逐时数据相应的结果更大,表明 ERA5 再分析的逐日 10 m 最大风速更加明显地低估了浮标站点的实测风速。

从表 3 还可以看出,西太平洋海区的相对偏差、平均偏差和均方根误差都是三个海区中最大的,而且相关系数也是最小的,这说明 ERA5 的日最大风速在西太平洋海区显著地低估了浮标站实测风速。

黄渤海-日本海海区的两套资料的相关系数仍然是最高的,其相关系数高达 0.9039,这表明在该海区,ERA5 再分析资料能够很好地反映出浮标站逐日最大风速的变化,但是该海区的平均偏差达到 $-1.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,相对偏差超过了 15 %,ERA5 还是明显地低估了实测风速。东印度洋的情况与前两个海区类

似,ERA5 能较好地表现出日最大风速的变化(相关系数为 0.8273),仍然是低估了实测风速,但偏差相对较小。

进一步分析各个站点日最大风速的纬向、经向风分量的平均偏差(图 8),可以看到大部分(28/38)站点的日最大风速纬向风分量的平均偏差为正值,

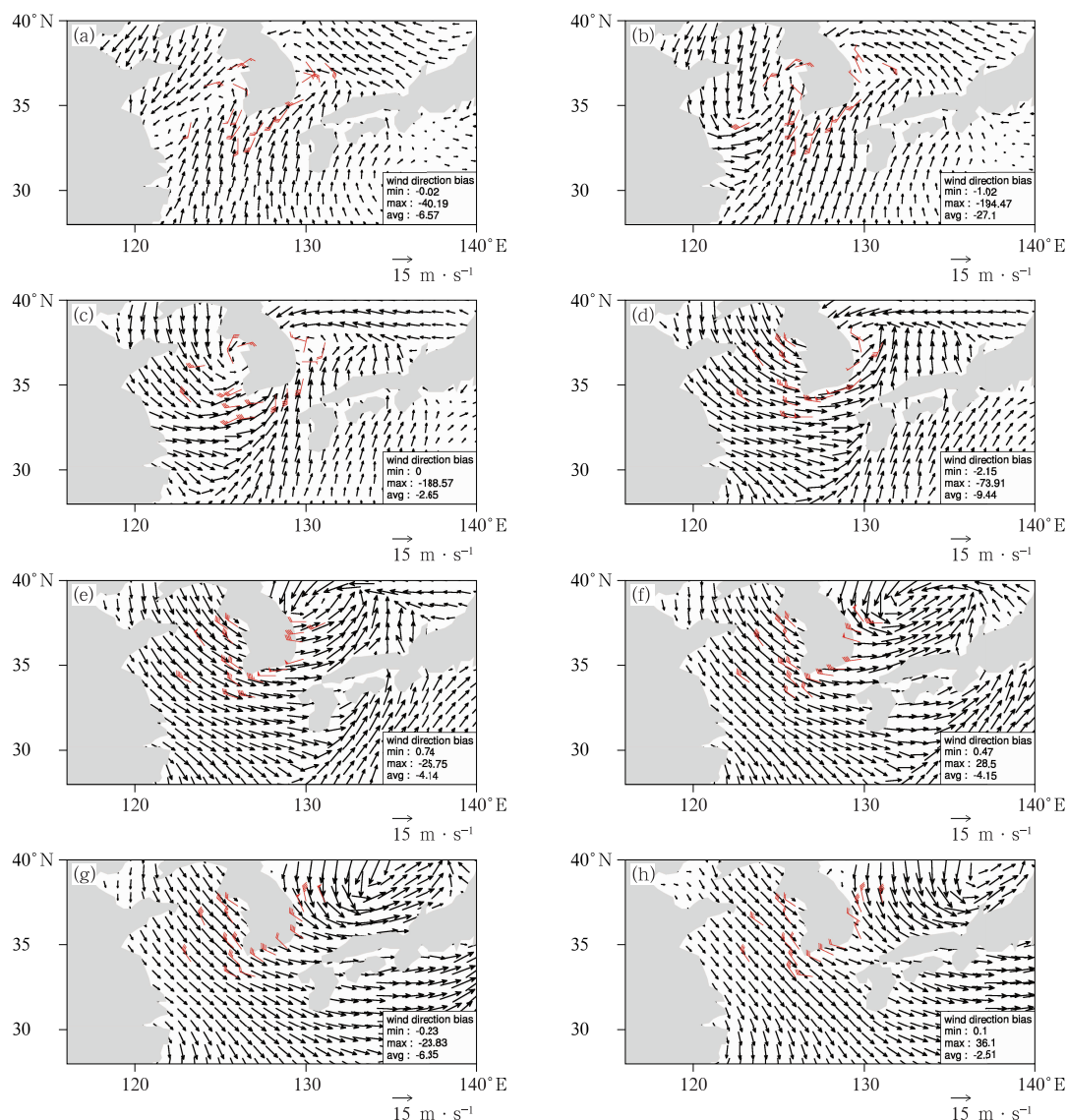


图 6 2020 年 1 月 7 日 04 时至 8 日 08 时黄渤海-日本海海区逐 4 h 的 ERA5 再分析(风矢)和浮标实测(红色风羽)近地面 10 m 风场
(a)7 日 04 时,(b)7 日 08 时,(c)7 日 12 时,(d)7 日 16 时,
(e)7 日 20 时,(f)8 日 00 时,(g)8 日 04 时,(h)8 日 08 时
(右下角是各时刻对应的 ERA5—浮标风向偏差,单位:°;包括所有站点中风向的最小偏差、最大偏差以及平均偏差)

Fig. 6 ERA5 reanalysis (wind vector) and the observed buoys (red barb) of the 10 m wind field every 4 h in the Yellow Sea-Bohai Sea-SOJ sea area from 04:00 UTC 7 to 08:00 UTC 8 January 2020

(a) 04:00 UTC 7, (b) 08:00 UTC 7, (c) 12:00 UTC 7, (d) 16:00 UTC 7,
(e) 20:00 UTC 7, (f) 00:00 UTC 8, (g) 04:00 UTC 8, (h) 08:00 UTC 8

(The lower right corner shows the ERA5—buoy deviation of the wind direction at each moment, unit: °; including the minimum deviation, maximum deviation and average deviation of wind direction of all buoys)

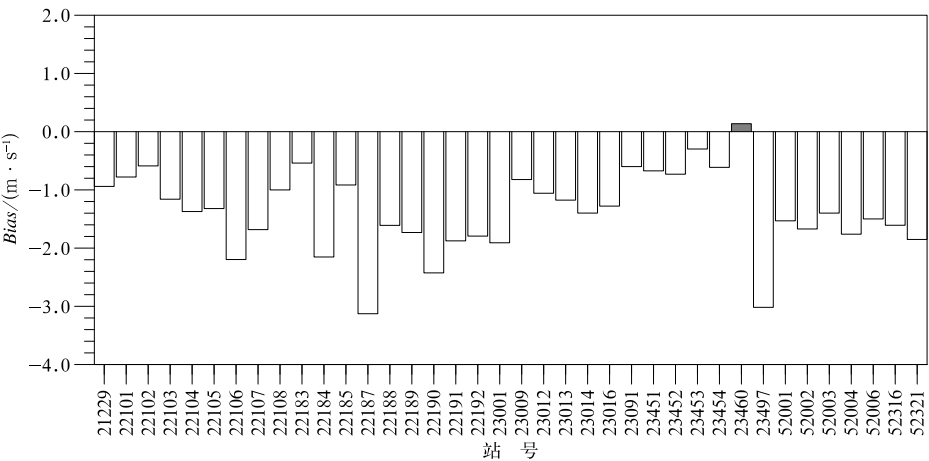


图 7 2020 年各浮标站日最大风速与 ERA5 再分析 10 m 日最大风速数据的平均偏差

Fig. 7 Average deviation between daily maximum wind speed of each buoy station and daily maximum 10 m wind speed ERA5 reanalysis data in 2020

表 3 2020 年三个海区逐日 ERA5 再分析 10 m 最大风速相对于锚定浮标实测风速的统计量

Table 3 Statistics of daily ERA5 maximum 10 m wind speed reanalysis data relative to the observed wind speed of the moored buoys in three sea areas in 2020

海区	浮标平均风速 /($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	ERA5 平均风速 /($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	相对偏差/%	平均偏差 /($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	绝对偏差 /($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	相关系数	均方根误差 /($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)
黄渤海-日本海	10.0	8.5	-15.0	-1.5	1.8	0.9039	2.2
西太平洋	8.5	6.9	-19.0	-1.6	1.8	0.7876	2.3
东印度洋	7.5	6.4	-14.1	-1.1	1.4	0.8273	2.0

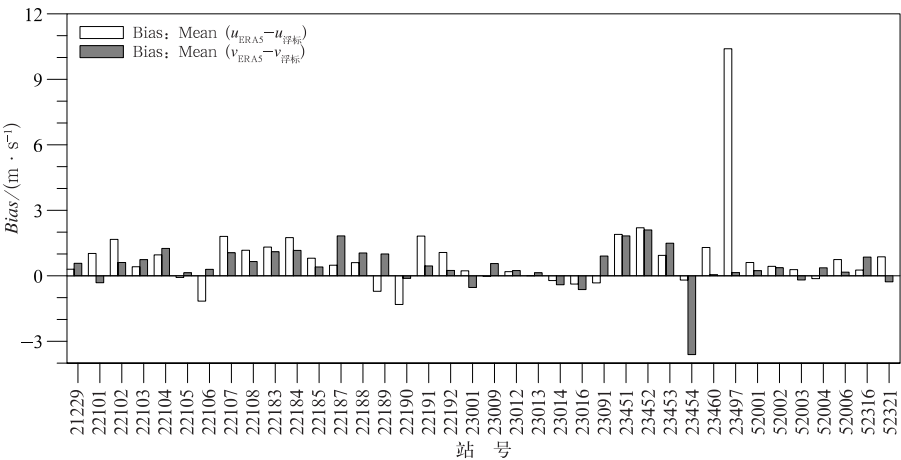


图 8 2020 年各浮标站日最大纬向、经向风速与 ERA5 再分析 10 m 最大风速的平均偏差

Fig. 8 Average deviation of daily maximum zonal and meridional wind speed of each buoy station from ERA5 maximum 10 m wind speed reanalysis data in 2020

最大偏差可达 $10.4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$; 经向风分量也类似, 30 个站点的平均偏差为正值, 最大偏差为 $-3.6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。考虑到日最大风速平均偏差多为负值(图 7), 可以推断 ERA5 再分析 10 m 风速数据存在纬向分量低估东风, 而经向分量低估北风的系统误差。

“两洋一海”地区所有浮标站点和 ERA5 日最

大风速的纬向、经向分量偏差(ERA5—浮标)随浮标风速的变化(图 9)显示, 纬向风速为负值(东风)时, 风速偏差多为正值; 纬向风速为正值(西风)时, 风速偏差多为负值(图 9a)。类似地, 经向风速为负值(北风)时, 风速偏差多为正值; 经向风速为正值(南风)时, 风速偏差多为负值(图 9b)。证实了上

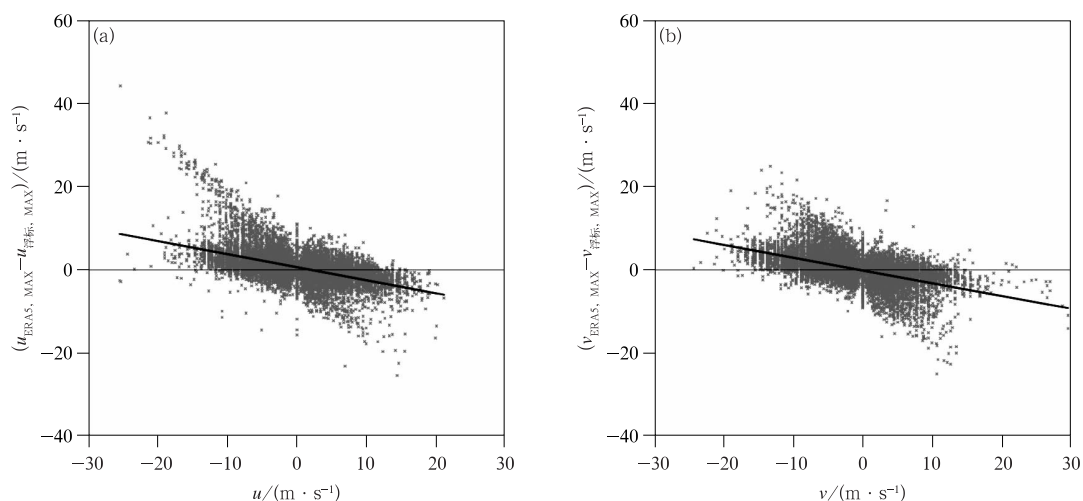


图 9 2020 年逐日最大风速(a)纬向分量和(b)经向分量的偏差随浮标风速的变化

Fig. 9 Variation of daily maximum sea surface wind speed deviation of (a) zonal wind and (b) meridional wind with the change in buoy wind speed in 2020

述推论,即 ERA5 存在低估东风和北风的系统误差,同时发现 ERA5 对西风 and 南风也存在低估,共同造成了日最大风速偏小的误差。

为了能更加直观地体现 ERA5 和浮标观测逐日最大风速的差异,在三个海区各自选取了一个观测记录比较完整的典型浮标站:位于黄海中部的 22192 号、西太平洋的 52316 号和东印度洋的 23451 号(图 1 中蓝色圆点),与典型浮标站距离最近格点上的 ERA5 再分析数据进行了逐日最大风速的对比(图 10)。

从图 10a 可以发现,ERA5 再分析与 22192 号锚定浮标观测的逐日最大风速的变化基本一致,相关系数可达到 0.9560;平均偏差约为 $-1.8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,且大部分时刻 ERA5 再分析风速都低于浮标风速,尤其是实测风速比较大的时候,ERA5 再分析风速偏低的特征更为明显,这与陈艳春等(2017)发现的当实测风速达到 6 级以上时,再分析资料偏小更为明显的情况基本一致。在西太平洋海区,52316 号浮标站实测与最近格点 ERA5 再分析日最大风速的相关系数为 0.8238,两者的变化较为一致。平均偏差为 $-1.6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,表明 ERA5 总体上低估了实测风速,尤其是在实测风速出现极大值时,低估程度更加明显,如 1 月 17 日,浮标实测风速达到 $24.7 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,而 ERA5 风速只有 $17.7 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,低估了 $7.0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。除 1 月外,其他月份没有再出现超过 $20 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的实测风速,但实测风速的起伏变化很频繁,相较而言,ERA5 风速变化曲线比较平滑,波动

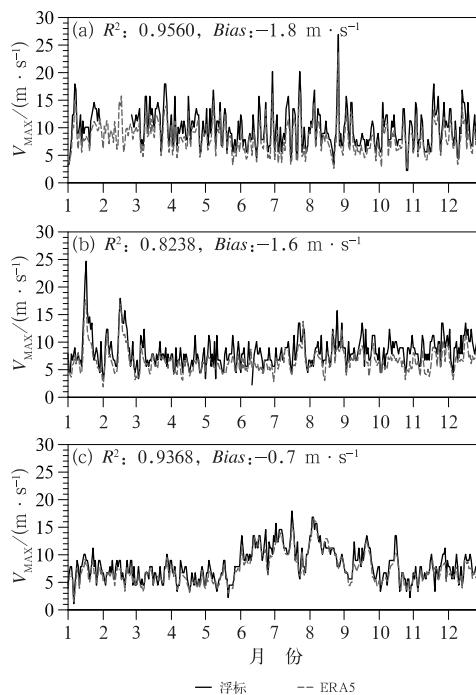


图 10 2020 年典型浮标站与距离最近格点 ERA5 再分析逐日最大风速的对比
(a) 黄海 22192 号站, (b) 西太平洋 52316 号站, (c) 东印度洋 23451 号站

Fig. 10 Comparison of typical buoy stations with the nearest grid point ERA5 reanalysis of daily maximum wind speed in 2020

(a) No. 22192 site in Yellow Sea, (b) No. 52316 site in Western Pacific, (c) No. 23451 site in Eastern Indian Ocean

幅度明显小于浮标实测风速(图 10b)。ERA5 与东印度洋上 23451 浮标站日最大风速的平均偏差为 $-0.7 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 是三个代表站中最小的, 这可能与该站点实测最大风速偏低有关, 图 10c 显示, 实测最大风速除了在夏季基本稳定在 $10 \sim 15 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 外, 其余月份风速大多在 $5 \sim 10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。两者的相关系数为 0.9363, 变化十分一致。

综合上述对比分析结果, 总体来看, ERA5 的逐日 10 m 最大风速能很好地反映出实测最大风速的变化特征, 但同样存在低估实测风速的系统误差。通过表 2 和表 3 的对比还可以看出, 与逐时风速的结果比较, 三个海区的日最大风速的偏差幅度更大(超过 $1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$), 即实测风速大则 ERA5 的偏离程度也大。因此, 在使用 ERA5 进行海上高风速事件研究时, 需要对其识别标准进行合理的调整, 避免出现过多的漏判。为此, 分别计算了全部浮标站点及相应距离最近格点上的逐日最大风速从第 5~95 的百分位数阈值(图 11)。

从图 11 可以看到, 所有浮标实测风速的百分位数阈值都比 ERA5 再分析风速的高, 且随着百分位数的增大, 两套资料所对应阈值的差距也随之增大, 这同样反映了 ERA5 在高风速区明显低估实测风速的系统误差。计算结果中, 两套资料的第 90 百分位数阈值分别为 $13.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (浮标) 和 $11.3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (ERA5), 都在 6 级风($10.8 \sim 13.8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$) 范围内。因此, 为保证挑选出的高风速事件具有一定的极端性, 同时也能够基本符合目前科研和业务上的常用标准(日最大风速达到 6 级及以上)(吕爱民等, 2018; 徐蜜蜜和徐海明, 2010; 王慧和隋伟辉, 2013),

可以考虑将 ERA5 日 10 m 最大风速大于 $11.3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 作为海上高风速事件的判断标准。

3 结论与讨论

通过“两洋一海”地区 ICOADS 锚定浮标实测和 ERA5 再分析风场的对比分析, 发现水平分辨率为 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ 的逐小时 ERA5 再分析 10 m 风速数据能够较好地表现出海面风场的分布特点和变化特征。ERA5 再分析资料具有较高的时空分辨率、较长的时间序列以及完整的数据记录, 将其用于海上高风速事件的气候分析是可行的, 且具有一定的优势。具体结论如下:

(1) 无论是逐时风速还是逐日最大风速, ERA5 再分析 10 m 风速数据与浮标实测风速的变化基本一致, 表现为两套资料具有很好的相关性, 三个海区逐时风速的相关系数均在 0.8 以上, 逐日最大风速的相关系数都超过了 0.7, 表明 ERA5 再分析 10 m 风速数据能够很好地反映浮标实测风速的时间变化特征。

(2) 对近海大风天气过程的个例分析结果表明, ERA5 再分析数据能较好地表现出大风天气过程的发展进程、天气形势和主要影响系统, 但个别浮标站点在某些时刻会出现实测风向与 ERA5 再分析风向存在明显偏差的现象。

(3) 随着浮标风速的增大, 风速偏差逐渐从正值偏多转为负值偏多。具体而言, 浮标风速处于 0~3 级区间, ERA5 高估实测风速; 当浮标风速超过 3 级后, ERA5 则是更为普遍地低估了实测风速。总体

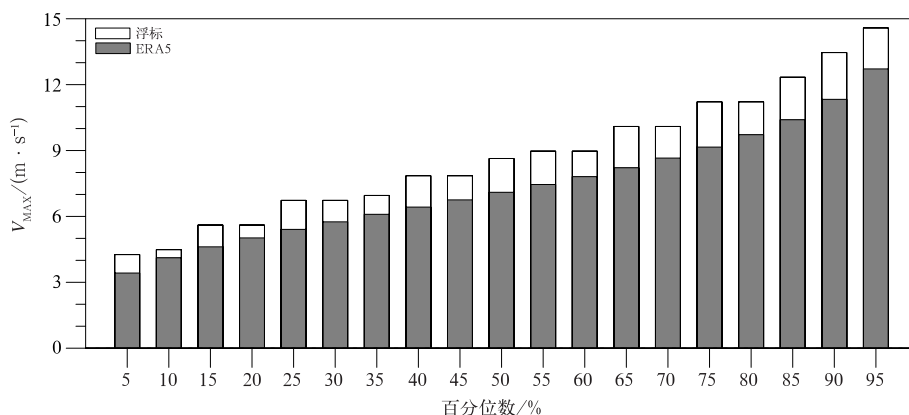


图 11 锚定浮标观测和 ERA5 再分析逐日 10 m 最大风速的百分位数阈值

Fig. 11 Quantile threshold of daily maximum 10 m wind speed for moored buoy observation and ERA5 reanalysis

上看,ERA5 再分析风速低估实测风速的系统偏差更为明显,且实测风速较大时,ERA5 相对于实测风速的偏离程度更大。

(4)在利用 ERA5 数据进行海上高风速事件分析时需要高风速识别标准进行合理的调整。综合考虑高风速事件的极端性、科研和业务的常用标准,以及 ERA5 再分析风速低估实测风速的系统偏差等因素,可以通过比较实测和再分析风速的百分位数阈值,定义适当的海上高风速事件识别标准,例如本文提出的第 90 百分位数阈值。当然,本文只是使用了 2020 年的数据进行了初步分析,海上高风速事件的判别标准的具体数值还有待于利用更多的资料,并进行更为深入的研究来进一步加以确定。

参考文献

- 宝乐尔其木格,任国玉,2013. 海温观测方法及常用海温资料数据集比较[J]. 气象科技进展,3(6):52-57. Baoleerqimuge, Ren G Y, 2013. Sea surface temperature observation methods and comparison of commonly used sea surface temperature datasets[J]. Adv Meteor Sci Technol,3(6):52-57(in Chinese).
- 陈艳春,王娜,顾伟宗,等,2017. 环渤海区域再分析资料地面风速场的适用性对比分析[J]. 海洋气象学报,37(1):67-72. Chen Y C, Wang N, Gu W Z, et al, 2017. Comparative analysis of wind velocity of reanalysis datasets over the Bohai Rim Region[J]. J Mar Meteor,37(1):67-72(in Chinese).
- 邓小花,翟盘茂,袁春红,2010. 国外几套再分析资料的对比与分析[J]. 气象科技,38(1):1-8. Deng X H, Zhai P M, Yuan C H, 2010. Comparative analysis of NCEP/NCAR, ECMWF and JMA reanalysis[J]. Meteor Sci Technol,38(1):1-8(in Chinese).
- 范苏丹,盛春岩,曲巧娜,等,2017. 利用春季黄渤海沿海大风观测资料评估 CFSR 风场再分析数据[J]. 气象科技,45(5):917-924. Fan S D, Sheng C Y, Qu Q N, et al, 2017. Evaluation and analysis of CFSR data based on spring gale observation over coastal areas of Yellow Sea and Bohai Sea[J]. Meteor Sci Technol,45(5):917-924(in Chinese).
- 胡海川,黄彬,魏晓琳,2017. 我国近海洋面 10 m 风速集合预报客观订正方法[J]. 气象,43(7):856-862. Hu H C, Huang B, Wei X L, 2017. Objective correction method of ensemble forecast of 10 m winds on Chinese offshore[J]. Meteor Mon,43(7):856-862(in Chinese).
- 胡海川,刘珏,林建,2022. 基于预报方程的我国近海阵风预报[J]. 气象,48(3):334-344. Hu H C, Liu J, Lin J, 2022. Application of prediction equation to gust forecasting for Chinese offshore areas[J]. Meteor Mon,48(3):334-344(in Chinese).
- 胡海川,周军,2019. 集合预报在渤海极大风预报中的应用[J]. 气象,45(12):1747-1755. Hu H C, Zhou J, 2019. Application of ensemble extreme wind forecast in Bohai Sea[J]. Meteor Mon,45(12):1747-1755(in Chinese).
- 刘鸿波,董理,严若婧,等,2021. ERA5 再分析资料对中国大陆区域近地层风速气候特征及变化趋势再现能力的评估[J]. 气候与环境研究,26(3):299-311. Liu H B, Dong L, Yan R J, et al, 2021. Evaluation of near-surface wind speed climatology and long-term trend over China's mainland region based on ERA5 reanalysis[J]. Climatic Environ Res,26(3):299-311(in Chinese).
- 吕爱民,杨柳妮,黄彬,等,2018. 中国近海大风的天气学分型[J]. 海洋气象学报,38(1):43-50. Lü A M, Yang L N, Huang B, et al, 2018. Classification of synoptic patterns for China offshore gales[J]. J Mar Meteor,38(1):43-50(in Chinese).
- 孟宪贵,郭俊建,韩永清,2018. ERA5 再分析数据适用性初步评估[J]. 海洋气象学报,38(1):91-99. Meng X G, Guo J J, Han Y Q, 2018. Preliminary assessment of ERA5 reanalysis data[J]. J Mar Meteor,38(1):91-99(in Chinese).
- 邱金晶,陈锋,董美莹,2021. 基于全球模式检验结果的海上台风初始场重建技术研制和应用[J]. 气象,47(12):1444-1456. Qiu J J, Chen F, Dong M Y, 2021. Development and application of typhoon initial field reconstruction technology over sea based on evaluation results of global models[J]. Meteor Mon,47(12):1444-1456(in Chinese).
- 孙颖士,李冬霄,2007. 中国渔船安全分析报告[M]. 北京:中国农业出版社:45-52. Sun Y S, Li D X, 2007. Analysis Report of China Fishery Vessel Safety[M]. Beijing: China Agricultural Press:45-52(in Chinese).
- 王慧,隋伟辉,2013. 基于 CCMP 风场的中国近海 18 个海区海面大风季节变化特征分析[J]. 气象科技,41(4):720-725. Wang H, Sui W H, 2013. Seasonal variation analysis of sea surface winds in China Sea areas with CCMP wind field data[J]. Meteor Sci Technol,41(4):720-725(in Chinese).
- 王天驹,钟中,王举,等,2019. 位涡倾向分布与台风 Megi(2010)移动的关系及其影响因子[J]. 气象,45(6):791-798. Wang T J, Zhong Z, Wang J, et al, 2019. Correlation between PVT distribution and movement of Typhoon Megi (2010) and the impact factors[J]. Meteor Mon,45(6):791-798(in Chinese).
- 王叶红,赵玉春,罗昌荣,等,2019. 双雷达风场反演拼图在登陆台风“莫兰蒂”(1614)强降水精细预报中的同化应用试验[J]. 气象学报,77(4):617-644. Wang Y H, Zhao Y C, Luo C R, et al, 2019. Assimilation experiments for the application of dual-radar retrieval wind mosaics in detailed heavy precipitation forecast produced by landfall Typhoon “Meranti” (1614)[J]. Acta Meteor Sin,77(4):617-644(in Chinese).
- 危国飞,刘会军,潘宁,等,2021. 台风路径数值预报实时订正技术及其集成应用[J]. 大气科学,45(1):195-204. Wei G F, Liu H J, Pan N, et al, 2021. Real-time correction method for numerically modeled typhoon tracks and its integrated application[J]. Chin J Atmos Sci,45(1):195-204(in Chinese).
- 徐蜜蜜,徐海明,2010. 我国近海大风分布特征及成因[J]. 热带气象学报,26(6):716-723. Xu M M, Xu H M, 2010. The characteristic of strong wind distribution in the coastal area of China and its causes[J]. J Trop Meteor,26(6):716-723(in Chinese).
- 尹尽勇,刘涛,张增海,等,2009. 冬季黄渤海大风天气与渔船风损统计

- 计分析[J]. 气象, 35(6):90-95. Yin J Y, Liu T, Zhang Z H, et al, 2009. Statistical analysis of the weather system types causing strong winds and fishery boat windage loss accidents in Bohai Sea and Yellow Sea in winter[J]. Meteor Mon, 35(6):90-95 (in Chinese).
- Carvalho D, 2019. An assessment of NASA's GMAO MERRA-2 reanalysis surface winds[J]. J Climate, 32(23):8261-8281.
- Chelton D B, Freilich M H, 2005. Scatterometer-based assessment of 10-m wind analyses from the operational ECMWF and NCEP numerical weather prediction models[J]. Mon Wea Rev, 133(2):409-429.
- Dee D P, Uppala S M, Simmons A J, et al, 2011. The ERA-Interim reanalysis: configuration and performance of the data assimilation system[J]. Quart J Roy Meteor Soc, 137(656):553-597.
- Hersbach H, Bell B, Berrisford P, et al, 2020. The ERA5 global reanalysis[J]. Quart J Roy Meteor Soc, 146(730):1999-2049.
- Kalnay E, Kanamitsu M, Kistler R, et al, 1996. The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project[J]. Bull Am Meteor Soc, 77(3):437-472.
- Kanamitsu M, Ebisuzaki W, Woollen J, et al, 2002. NCEP-DOE AMIP-II reanalysis (R-2) [J]. Bull Am Meteor Soc, 83(11):1631-1644.
- Kobayashi S, Ota Y, Harada Y, et al, 2015. The JRA-55 reanalysis: general specifications and basic characteristics[J]. J Meteor Soc Japan, 93(1):5-48.
- Lin I, Timothy Liu W, Wu C C, et al, 2003. New evidence for enhanced ocean primary production triggered by tropical cyclone [J]. Geophys Res Lett, 30(13):1718.
- Mears C A, Smith D K, Wentz F J, 2001. Comparison of Special Sensor Microwave Imager and buoy-measured wind speeds from 1987 to 1997 [J]. J Geophys Res: Oceans, 106(C6):11719-11729.
- Rienecker M M, Suarez M J, Gelaro R, et al, 2011. MERRA: NASA's modern-era retrospective analysis for research and applications [J]. J Climate, 24(14):3624-3648.
- Rivas M B, Stoffelen A, 2019. Characterizing ERA-Interim and ERA5 surface wind biases using ASCAT[J]. Ocean Sci, 15(3):831-852.
- Saha S, Moorthi S, Pan H L, et al, 2010. The NCEP climate forecast system reanalysis[J]. Bull Am Meteor Soc, 91(8):1015-1058.
- Sampe T, Xie S P, 2007. Mapping high sea winds from space: a global climatology[J]. Bull Am Meteor Soc, 88(12):1965-1978.
- Uppala S, Dee D, Kobayashi S, et al, 2008. Towards a climate data assimilation system: status update of ERA-Interim[J]. ECMWF Newsletter, (115):12-18.
- Woodruff S D, Worley S J, Lubker S J, et al, 2011. ICOADS Release 2.5: extensions and enhancements to the surface marine meteorological archive[J]. Int J Climatol, 31(7):951-967.

(本文责编:何晓欢)