4 种表层风场资料在北半球海域的适用性评估

刘解明[1]，熊学军[2,3*]，宫庆龙[1]，于 龙[2]，郭延良[2]

（1. 中国海洋大学 海洋与大气学院，山东 青岛 266100；
2. 自然资源部 第一海洋研究所，山东 青岛 266061；
3. 青岛海洋科学与技术试点国家实验室 区域海洋动力学与数值模拟功能实验室，山东 青岛 266061）

摘 要：为进行海洋表层风场的物理结构重建与基础理论溯源，需选用可靠准确且通过检验的高时空分辨率风场资料。本文利用 NDBC、TAO 和嵊泗站现场观测资料，在全面比较分析的基础上，对其中应用较广泛的 CFSR/CFSv2、ERA-Interim、FNL 和 CCMP 四种风场产品在北半球海域（北太平洋、北大西洋）进行了检验评估，得出结论：1）4 种资料的风速都不同程度地低估了实际观测风速；在低风速区的风向偏差较大，风速越低，偏差越多；产品资料在远岸地区比近岸地区更接近实测资料，在高纬地区的效果优于低纬地区。2）通过比较 4 种产品资料与浮标实测资料的风向和风速的偏差、均方根误差、误差标准差和相关系数，发现 CCMP 资料是 4 种资料中整体效果最好的一种，而 CFSR/CFSv2 资料是较差的一种。3）嵊泗站观测平台资料与浮标观测资料验证的结论略有差异，结果显示：FNL 资料是 4 种资料产品中效果最好的产品，ERA-Interim 资料的效果仅次于 FNL，而用浮标验证效果较好的 CCMP 资料在嵊泗站点效果却较差，CFSR/CFSv2 资料是 4 种资料中效果最差的。4）通过分析 4 种风场资料的偏差分布发现，CCMP 与 ERA-Interim 风场资料的偏差较小，而 CFSR/CFSv2 与 FNL 风场资料的偏差较小。CCMP 资料与其他 3 种资料的纬向风偏差在海洋上以负偏差为主，陆地以及沿岸地区的偏差较大，且分布不均匀；经向风偏差分布中，南半球的正偏差区较为明显，而北半球的负偏差区则较为明显，但偏差程度要小于纬向风偏差。

关键词：表层风场；CFSR/CFSv2；ERA-Interim；FNL；CCMP；空间差异

中图分类号：P425 **文献标识码：**A **文章编号：**1671-6647(2020)01-0038-13

doi：10.3969/j.issn.1671-6647.2020.01.005

引用格式：LIU X M, XIONG X J, GONG Q L, et al. Applicability evaluation of four surface wind products in the northern hemisphere sea area[J]. Advance in Marine Science, 2020, 38(1): 38-50. 刘解明，熊学军，宫庆龙，等. 4 种表层风场资料在北半球海域的适用性评估[J]. 海洋科学进展，2020，38(1)：38-50.

20 世纪以来，随着观测和模拟资料产品的增多，人们对全球领域的气候研究愈加频繁。表层风场（地面或者海面以上 10 m 高度）调节了地球表面与大气之间的热量、水汽和物质交换，对气候变化有着直接和间接的影响，对评估地球表面湍流动量和热量也有着重要意义[1-4]。表层风场可以间接地通过感热通量影响到生物圈，也可以直接作用于海洋上层，对海水运动、海面波浪的形成以及海洋环流变化起到了重要作用[6-8]。此外，风能在社会经济中也有重要作用，随着世界经济的快速增长，能源需求不断增加，而风能有着资源丰富、清洁、可再生等特点，所以风能已经成为很多能源产业增加能源供应，减少温室气体排放的重要能源之一[9]。因此，研究表层风场的气候态对于海上贸易、风能开发、防灾减灾等方面都具有重要的研究意义[10]。

收稿日期：2018-07-01

资助项目：国家科技重大专项项目——南海北部内波流监测、预报、预警系统研究及应用(2016ZX 05057015)；国家自然科学基金委员会-山东省人民政府联合资助海洋科学研究中心项目——海洋环境动力学和数值模拟(U1606405)；国家海洋局全球变化与海气相互作用专项子课题——黑潮不稳定性及多核结构(GASI-IPOVAI-01-05)；国家自然科学基金项目——黄海暖流的多时相特征及其发生机制研究(41376038)

作者简介：刘解明(1994-)，男，硕士研究生，主要从事海气相互作用方面研究. E-mail：ouc0627lxm@qq.com

* **通讯作者：**熊学军(1976-)，男，研究员，博士，主要从事区域海洋动力学及调查技术方面研究. E-mail：xiongxj@fio.org.cn

（李 燕 编辑）

研究表层风场的气候态需要一个高时空分辨率的资料集。目前满足研究要求的表层风场资料产品主要分为 3 类，分别是分析资料产品、再分析资料产品和合成资料产品。分析资料的优势在于能及时修正算法的缺陷和引入最新的观测数据，所以在使用分析资料时需要使用者随时关注分析资料的算法以及观测数据的更新情况，以便做出最佳的选择。由于分析资料在一个比较长的时间范围内产生的算法不统一，所以为了解决这一个问题，随之就产生了再分析数据。再分析资料能为全球大气环流提供一个多变量、空间完整且时间连贯的数据集，不受算法变化的影响，对于大气气候态的研究具有很高价值[2,11-12]。合成风场资料是通过将不同性质、不同来源获得的风场资料，在一定的准则下加以综合分析，充分利用多源信息间冗余，得到的一组多源融合资料。合成风场资料产品的优势在于融合了各方面信息，能最大限度的降低单个数据的误差，取长补短，达到 1＋1＞2 的效果，提高了各个数据的利用率[13]。

风场资料产品在时间和空间上具有一致性的客观评价将会增加这个资料集在用于分析气候研究时的可信度，但是这些资料集产品可能会受到测量设备、数据质量和算法变化以及观测实验的不连续性影响。最近几年发布的几种表层风场资料之间风速、风向的质量对比并没有现成的结论，所以对于一些学者来说，判断出最适合他们研究的资料依然很困难[14]。

本研究在全面比较分析和评估的基础上，利用 NDBC，TAO 和嵊泗站现场观测资料对其中应用较广泛的 CFSR/ CFSv2，ERA-Interim，FNL 和 CCMP 四种风场资料在北半球海域进行适用性评估，确立一种可靠准确且通过检验的高时空分辨率的资料产品，从而为海洋表层风场的物理结构重建与基础理论溯源工作提供可靠的依据。

1　表层风场的资料产品现状

正如前言中所述，表层风场的资料产品主要分为分析资料、再分析资料和合成风场资料，表 1 分别列出了目前应用较为广泛的几种表层风场资料产品。

表 1　表层风场资料产品的数据特征

Table 1　Major characteristics of surface wind data sets

风场资料类型	产　品	时间范围	同化方案/融合方案	时间分辨率/h	空间分辨率
再分析风场	CFSR/CFSv2	1979 年至今	GSI(3D-VAR)	6	0.312°×0.312°
	ERA-Interim	1979 年至今	4D-VAR	6	0.125°×0.125°
	JRA-55	1958 年至今	2D-OI	6	0.562°×0.562°
	MERRA	1979—2016 年	GSI(3D-VAR)	6	0.5°×0.66°
	20-CR	1871—2014 年	GSI(3D-VAR)	6	2°×2°
分析风场	FNL	1999 年至今	GSI(3D-VAR)	6	1°×1°
合成风场	QuikSCAT/NCEP	1999—2009 年	B-样条插值	6	0.5°×0.5°
	CCMP	1987 年至今	变分法	6	0.25°×0.25°

1.1　再分析风场资料

就时间范围来看，NOAA 发布的再分析资料产品 20-CR 时间覆盖最长，涵盖了 19 世纪后半期和整个 20 世纪，一直到最近的 2014 年。大部分资料都发布在 20 世纪后半期之后，其中 MERRA 和 20-CR 资料已经停止发布。所有表层风场资料的时间分辨率都为 6 h。在空间分辨率方面，ERA-Interim 再分析资料的分辨率最高，CFSR/CFSv2 次之，20-CR 的分辨率最低。

再分析资料使用的同化方案中，JRA-55 使用的二维最优插值法(2D-OI)的优点在于其运用简单，计算

量相对较小,若使用不同的来源的观测资料,在分析场容易生成寄生噪声,并且很难保证大尺度分析与小尺度分析的一致性。而其他再分析资料使用的"变分法"通过使用复杂的观测算子,可以更为简易地实现与状态量非直接或非线性相关的观测量的同化[14]。四维变分法(4D-VAR)是在三维变分法(3D-VAR)的基础上发展起来的,其中 3D-VAR 仅考虑了分析时刻前的观测资料,而 4D-VAR 在此基础上又增加了未来时刻的观测资料,弥补了状态量在初始化角度的缺陷,但也增加了伴随模式的复杂性以及算法的计算量[14-15]。Thepaut 和 Whitaker 等也已证明 4D-VAR 的表现要优于 3D-VAR[16-17]。

再分析资料中使用的同化资料中,MERRA 中最新的卫星同化资料分别是 SSM/I 微波辐射计资料和 QuikSCAT 散射计资料,而 QuikSCAT 资料局限于 1999—2009 年,因此,在 2009 年以后用于同化的资料仅有 SSM/I 辐射计资料,同化资料较为单一[18]。CFSR/CFSv2 和 ERA-Interim 两种产品中使用的最新卫星同化资料分别为 WindSAT 辐射计资料和 ASCAT 散射计资料,这 2 种资料目前依然在持续更新中,且广泛应用于其他各种产品资料产品中。

CFSR/CFSv2 和 ERA-Interim 两种再分析资料在时间覆盖范围、时空分辨率、同化方案以及同化资料等各个方面的优势相比其他几种资料都比较明显。当然这 2 种资料也各有优缺点:ERA-Interim 使用的 4D-VAR 同化方案优势要大于 CFSR/CFSv2 的 3D-VAR;CFSR/CFSv2(38 km)的大气模式水平分辨率要高于 ERA-Interim(79 km);CFSR/CFSv2(64 层)的大气模式垂直分辨率要高于 ERA-Interim(61 层)[19]。针对这 2 种再分析资料,有学者进行过相关研究评估,得出的结论也有所不同。旷芳芳等就 2011 年台湾海峡处的 3 个浮标观测资料与 3 种海面风场资料进行相互比较后发现,CFSR/CFSv2 资料比 ERA-Interim 资料更接近观测[20]。Peng 等比较了 2009 年赤道上的 3 个系泊浮标资料与 2 种再分析表层风场资料的差异,结果显示 CFSR/CFSv2 在赤道地区的整体评估效果比 ERA-Interim 好[21]。Stopa 和 Cheung 利用 NDBC 提供的 25 个浮标资料与再分析资料进行比较分析,发现 ERA-Interim 资料与浮标观测资料的评估效果要优于 CFSR/CFSv2[22]。

1.2 分析风场资料

NCEP/NCAR 提供的最终全球分析资料(Final Operational Global Analysis,FNL)的风场产品由于观测资料来源的限制,在不同时期获取的同化资料是不同的。该资料收集了过去 6 h 来自全球电信系统(GTS)和其他来源的观测数据和卫星反演资料,包括 TIROS 业务的垂直探测仪、无线电探空仪、下投式探空仪等资料,使用和全球预报系统(GFS)相同的模式做一个全球性的数据分析。FNL 在 GFS 初始化 60～90 min 后进行数据分析,所以比 GFS 分析多了约 10%的观测数据。石慧用 QuikSCAT 散射计资料比较验证了 FNL 资料的准确性[23]。

1.3 合成风场资料

合成风场资料融合了各方面信息,能最大限度地降低单个数据的误差,提高各个数据的利用率。目前的合成风场资料使用的融合资料有卫星遥感资料(散射计、高度计和辐射计等)、船舶和浮标的实时观测资料等。应用较多的合成风场资料有 NASA 研制的交叉定标多平台合成风场资料(Cross Calibrated Multi-Platform,CCMP)和科罗拉大学研制的全球范围的表层风场资料 QuikSCAT/NCEP。

QuikSCAT/NCEP 是基于 QSCAT-1/F13 模式函数重新校准得到的 QuickSCAT 卫星资料,然后利用 B-样条插值方案再融合进 NCEP 全球再分析资料得到的合成风场资料,该方法保留了 QuickSCAT 卫星轨道内的高波数信息[24]。但由于 QuickSCAT 卫星于 2009 年已停止工作,所以 QuikSCAT/NCEP 资料的范围只有 1999—2009 年,时间范围有限。

CCMP 是通过对卫星微波遥感和仪器观测的海面风数据进行交叉校准和同化而得出的合成风场资料。以 ECMWF 的再分析业务资料为背景场,利用变分法同化了 SSM/I,TMI,QuikSCAT,WindSAT 和 ASCAT 等 20 多种卫星探测海面风资料以及部分船舶、浮标观测资料,最后用海洋系泊浮标对辐射计和散

射计数据都进行了验证。数据的空间范围为 180°W～180°E，78°22′30″S～78°22′30″N。Atlas 验证了 CCMP 合成风场资料较单个的卫星平台风场资料在精度方面有很大的提高[25]。毛科峰等发现，CCMP 风场资料的均方根误差精度在东中国海海域高于 ERA-Interim 风场资料和 QuikSCAT/NCEP 合成风场资料[26]。

2　4 种风场资料产品的检验评估

通过第一节的全面分析比较和评估，本文最终选择检验的风场资料包括 CFSR/CFSv2，ERA-Interim，FNL 和 CCMP。通过近岸和远岸、低纬度和高纬度两种对比方式，分别对 4 种产品资料进行不同区域的验证，进一步了解产品资料在离岸远近和纬度高低两方面的精度差别。

2.1　实测数据介绍

使用的实测数据包括：1）国家浮标资料中心（National Data Buoy Center，NDBC）提供的 24 个浮标风速、风向资料，位置信息如图 1 所示，绿点为远岸浮标，黑点为近岸浮标；2）TAO 提供的 16 个浮标风速、风向资料，位置信息为图 1 中蓝点所示；3）中国浙江的嵊泗平台观测站的风速资料，位置为 122°27′E，30°44′N，如图 1 中红色圆点所示，平台的测风高度为 79.6 m。所有资料的时间全部选取为 2008 年。根据选取实测浮标的位置，将热带大气海洋阵列（TAO）作为低纬地区的实测资料代表；国家浮标资料中心（NDBC）的浮标资料中，将离岸≤50 km 的浮标作为近岸实测资料的代表，将离岸＞50 km 的浮标作为远岸和高纬实测资料的代表。由于 4 种产品资料都同化了 NDBC 和 TAO 的观测资料，选取这 2 种观测资料进行风场对比验证的独立性不是很强，所以单独选取中国的嵊泗站作为独立观测资料的参考。

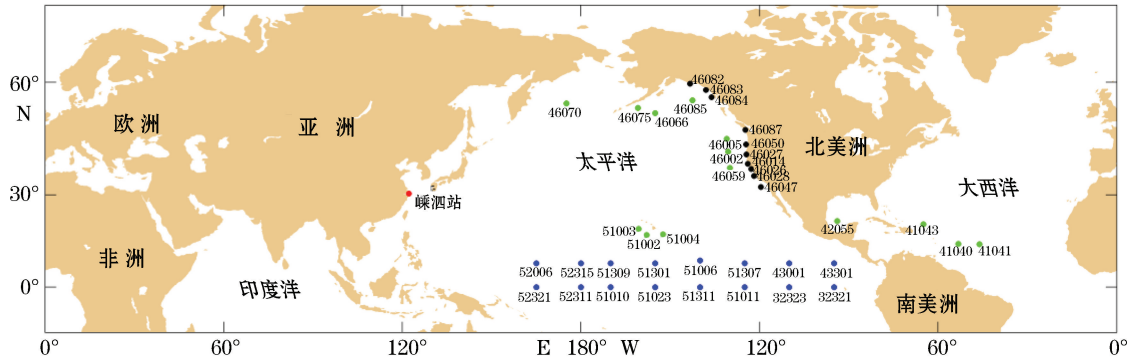

图 1　观测站点位置分布

Fig.1　Locations of observation stations

2.2　方法介绍

2.2.1　数据空间匹配

将 4 种产品资料采取双线性二次插值方案插值到观测站点所在的经纬度上，然后利用对数风廓线风速高度换算公式将观测站点风速订正到 10 m 的高度上[27]，计算式为

$$u_{z_2}=u_{z_1}\times\left(\frac{\ln z_2-\ln z_0}{\ln z_1-\ln z_0}\right), \tag{1}$$

式中，u_{z_2} 和 u_{z_1} 分别为高度 z_1 和 z_2（m）处的风速（m/s）；z_0 为粗糙度，取 0.003 m。

2.2.2 数据时间匹配

在资料的时间匹配上，NDBC 资料可以直接选取与产品资料对应时次(00:00,06:00,12:00,18:00)的观测资料与产品资料进行比较；由于 TAO 阵列和嵊泗站时间间隔不同，所以观测资料选取与产品资料对应时次(00:00,06:00,12:00,18:00)前后 1 h 的资料进行平均，再与产品资料进行比较。

2.2.3 统计变量计算公式

为了进一步定量分析和评估 4 种资料产品的可信度与准确性，需要对 4 种产品资料风速、风向与观测资料风速、风向的偏差(*Bias*)、均方根误差(*RMSE*)、误差标准差(*STDE*)和相关系数(R^2)进行统计，计算公式：

$$Bias=\frac{\sum_{i=1}^{n}(x_i-x'_i)}{n},RMSE=\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(x_i-x'_i)^2}{n}},STDE=\sqrt{(RMSE^2-Bias^2)},R^2=\frac{\mathrm{Cov}(x_i,x'_i)}{\sqrt{D(x_i)}\sqrt{D(x'_i)}},\tag{2}$$

式中，x_i 代表观测资料的风速和风向，x'_i 代表风场产品资料的风速和风向，$\mathrm{Cov}(x_i,x'_i)$ 为 x_i、x'_i 的协方差，$D(x_i)$ 为 x_i 的方差，$D(x'_i)$ 为 x'_i 的方差，n 为样本数。

2.3 结果与分析

图 2 是 4 种风场产品资料与 TAO 浮标观测资料风速、风向的散点分布，满足要求的散点共 10 223 个。从图 2 可以看出，4 种产品资料 $y=x$ 上侧的散点均多于 $y=x$ 下侧，说明产品资料的风速均低估了实际风速。表 2 给出的是风速偏差统计，CFSR/CFSv2 资料低估实际风速最为明显($Bias=0.76$ m/s)，CCMP 资料的效果较好($Bias=0.31$ m/s)，ERA-Interim 和 FNL 的风速偏差相近，分别为 0.51 和 0.64 m/s。CFSR/CFSv2 资料散点偏离对角线的程度最大($RMSE=1.55$ m/s)，CCMP 资料的偏离程度最小($RMSE=1.08$ m/s)。4 种产品资料中，CCMP 资料风速与实测风速的相关系数最大为 0.89，误差标准差最小为 1.04，而 CFSR/CFSv2 资料的相关系数最小为 0.89，误差标准差最大为 1.35。所以，在赤道太平洋地区，CCMP 资料风速与浮标实测风速最为接近，是效果最好的产品资料，而 CFSR/CFSv2 资料是效果最差的资料。

由图 2 可见风向在 120°～180°的散点明显较少，说明偏北风较少，这与赤道北侧常年的东南信风相符合。偏离对角线较多的风向散点明显集中于 0～6 m/s，说明在低风速段产品资料与实测资料偏差较大，效果较差。通过比较可以发现，CCMP 产品资料的风向散点更多地集中于对角线附近，表 2 的风向统计也印证了这一点，CCMP 的偏差最小为 2.30°，明显小于其他 3 种资料，均方根误差最小为 35.46°，误差标准差最小为 35.38°。而 ERA-Interim 资料除了偏差较大以外，整体效果偏小于 CCMP 资料，FNL 和 CFSR/CFSv2 是效果最差的 2 种资料。

表 2 4 种产品资料与 TAO 浮标观测资料的风速和风向的相关统计变量

Table 2 Statistics of wind speed and direction between the four wind products and TAO buoys

产 品	风 速				风 向		
	Bias /(m·s^{-1})	R^2	*RMSE* /(m·s^{-1})	*STDE* /(m·s^{-1})	*Bias*/°	*RMSE*/°	*STDE*/°
CFSR/CFSv2	0.76	0.81	1.55	1.35	−3.79	24.69	24.40
ERA-Interim	0.51	0.85	1.31	1.20	−3.01	22.07	21.86
FNL	0.64	0.82	1.46	1.31	−3.44	23.87	23.62
CCMP	0.31	0.89	1.08	1.04	−1.49	20.49	20.44

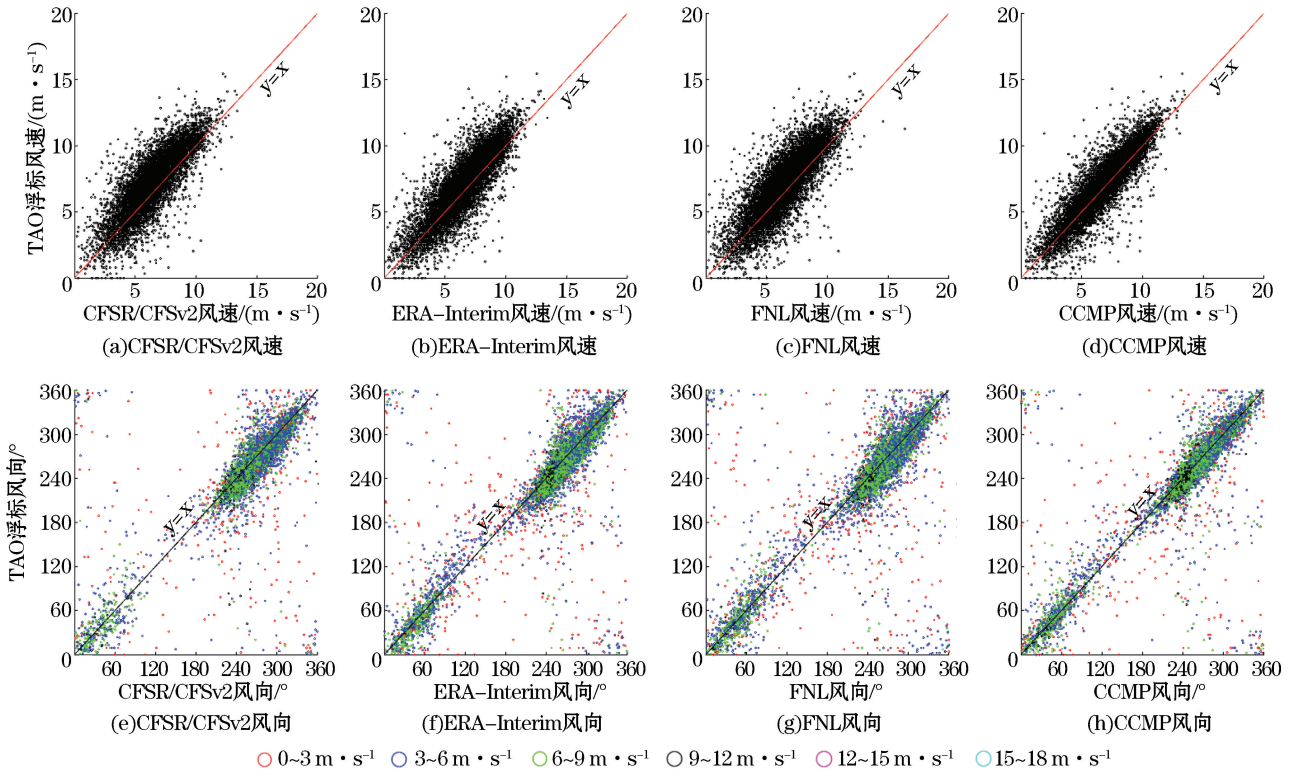

图 2　4 种风场产品资料与 TAO 浮标观测资料风速和风向的散点分布

Fig.2　Scatter diagrams of wind speed and direction from the four wind products and TAO buoys

图 3 是 4 种风场产品资料与远岸 NDBC 浮标观测资料风速、风向的散点分布，满足要求的散点共15 736 个。可以看出，相比赤道低纬地区的风速风向散点分布(图 2)，高纬的风速风向散点(图 3)要更集中于对角线附近。对比表 2 和表 3 的相关统计变量也可看出，在高纬度地区，产品资料的偏差、均方根误差和相关系数均优于赤道低纬度地区。CCMP 资料的风速在 4 种产品资料中最接近实测浮标资料，偏差(0.17 m/s)远小于其他 3 种资料，均方根误差(1.23 m/s)也是最小。FNL 风速资料的效果仅次于 CCMP，除了偏差(0.47 m/s)较大以外，其他统计变量和 CCMP 资料均相差不大。CFSR/CFSv2 资料的相关统计变量远差于 CCMP 和 FNL，是 4 种产品资料中效果最差的资料。

由图 2 和图 3 可以看出，偏离对角线较多的风向散点依然集中于低风速段(0～10 m/s)，且风速越低，偏差越多。结合图 3 和表 3，比较发现，CFSR/CFSv2 资料的效果最差，误差标准差(*STDE*)达到 27.36°。其他 3 种资料的统计变量比较接近，CCMP 资料的偏差效果偏好为－0.51°，ERA-Interim 资料均方根误差的效果偏好为 25.39°，FNL 的效果略差。

表 3　4 种产品资料与远岸 NDBC 浮标观测资料的风速和风向的相关统计变量

Table 3　Statistics of wind speed and direction between the four wind products and off-shore NDBC buoys

产　品	风　速				风　向		
	Bias/(m·s⁻¹)	R^2	*RMSE*/(m·s⁻¹)	*STDE*/(m·s⁻¹)	*Bias*/°	*RMSE*/°	*STDE*/°
CFSR/CFSv2	0.59	0.91	1.49	1.36	－1.05	27.38	27.36
ERA-Interim	0.51	0.93	1.35	1.25	－1.48	25.39	25.35
FNL	0.47	0.94	1.25	1.16	－1.02	25.82	25.80
CCMP	0.17	0.93	1.23	1.22	－0.51	25.84	25.83

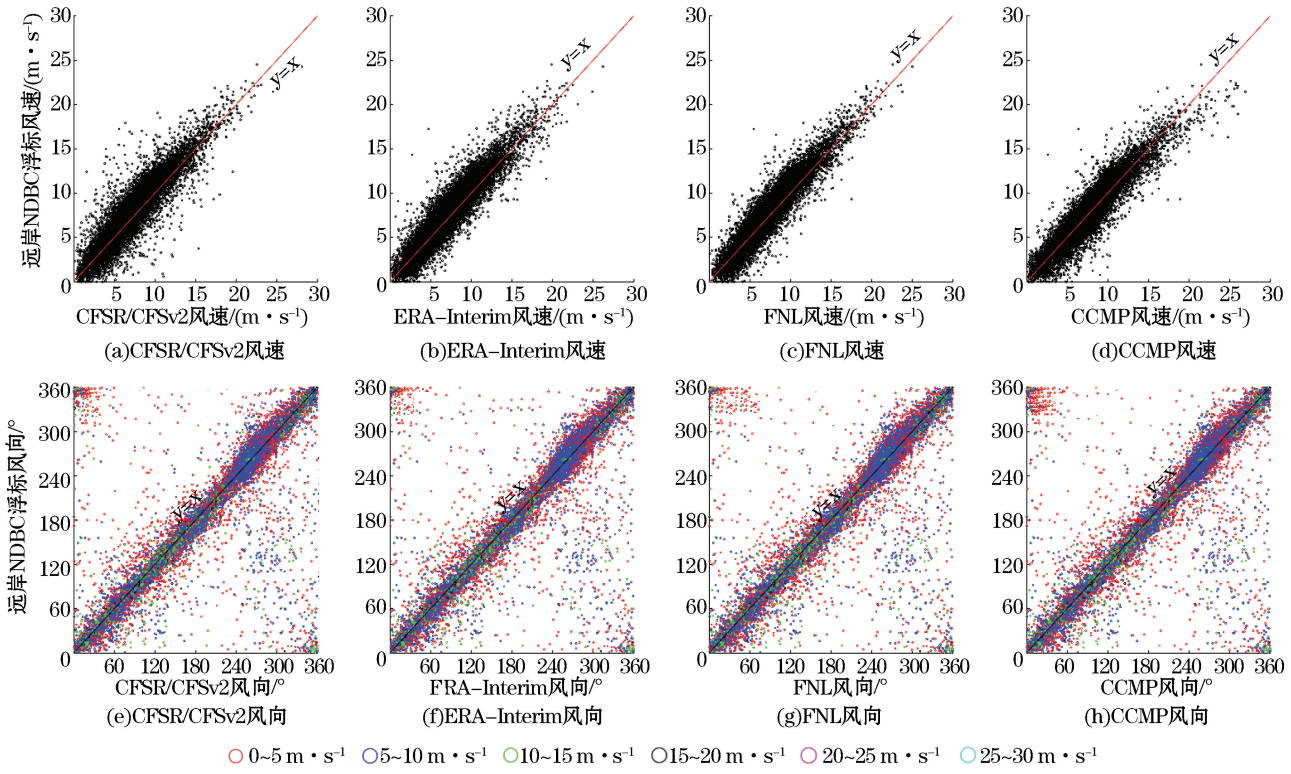

图 3 4 种风场产品资料与远岸 NDBC 浮标观测资料风速和风向的散点分布

Fig.3 Scatter diagrams of wind speed and direction from the four wind products and off-shore NDBC buoys

图 4 是 4 种风场产品资料与近岸 NDBC 浮标观测资料风速、风向的散点分布，满足要求的散点共 9 950 个。相比远岸地区的散点图，近岸浮标处在对角线上的风速散点明显多于对角线下侧，分布较为分散，说明产品资料在近岸地区的效果较差。CCMP 的风速要明显优于其他 3 种资料，散点比较均匀的分布在对角线两侧，风速偏差(0.2 m/s)是 4 种资料中最小的，均方根误差(2.38 m/s)也是最小的，相关系数 0.84 仅次于最大值的 0.87，所以 CCMP 是 4 种资料中效果最好的产品资料。ERA-Interim 风速资料是效果最差的资料，误差标准差达到了 2.74 m/s。FNL 和 CFSR/CFSv2 的效果相近，相关统计变量相差不大。风向散点分布图中可以看出，偏离对角线的风向散点大部分集中于 0～5 m/s，有少部分在 5～10 m/s，且数量远远多于远岸地区。相比远岸地区的散点分布，近岸地区明显分布较为分散，有更多的产品资料与实测资料偏差较大。结合图 4 和表 4，通过比较可以发现，CCMP 的风向资料效果最好，偏差最低为 0.21°，均方根误差(47.50°)仅次于最低值 46.87°，误差标准差(47.50°)也仅次于最低值(46.85°)，而 CFSR/CFSv2 资料的均方根误差和误差标准差虽然最小，但是偏差太大，导致整体效果较差。

表 4 4 种产品资料与近岸 NDBC 浮标观测资料的风速和风向的相关统计变量

Table 4 Statistics of wind speed and direction between the four wind products and near-shore NDBC buoys

产 品	风 速				风 向		
	Bias/(m·s⁻¹)	R^2	*RMSE*/(m·s⁻¹)	*STDE*/(m·s⁻¹)	*Bias*/°	*RMSE*/°	*STDE*/°
CFSR/CFSv2	1.44	0.84	2.76	2.35	1.33	46.87	46.85
ERA-Interim	0.99	0.78	2.91	2.74	−1.61	47.87	47.86
FNL	1.47	0.87	2.68	2.24	0.75	48.31	48.30
CCMP	0.20	0.84	2.38	2.37	0.21	47.50	47.50

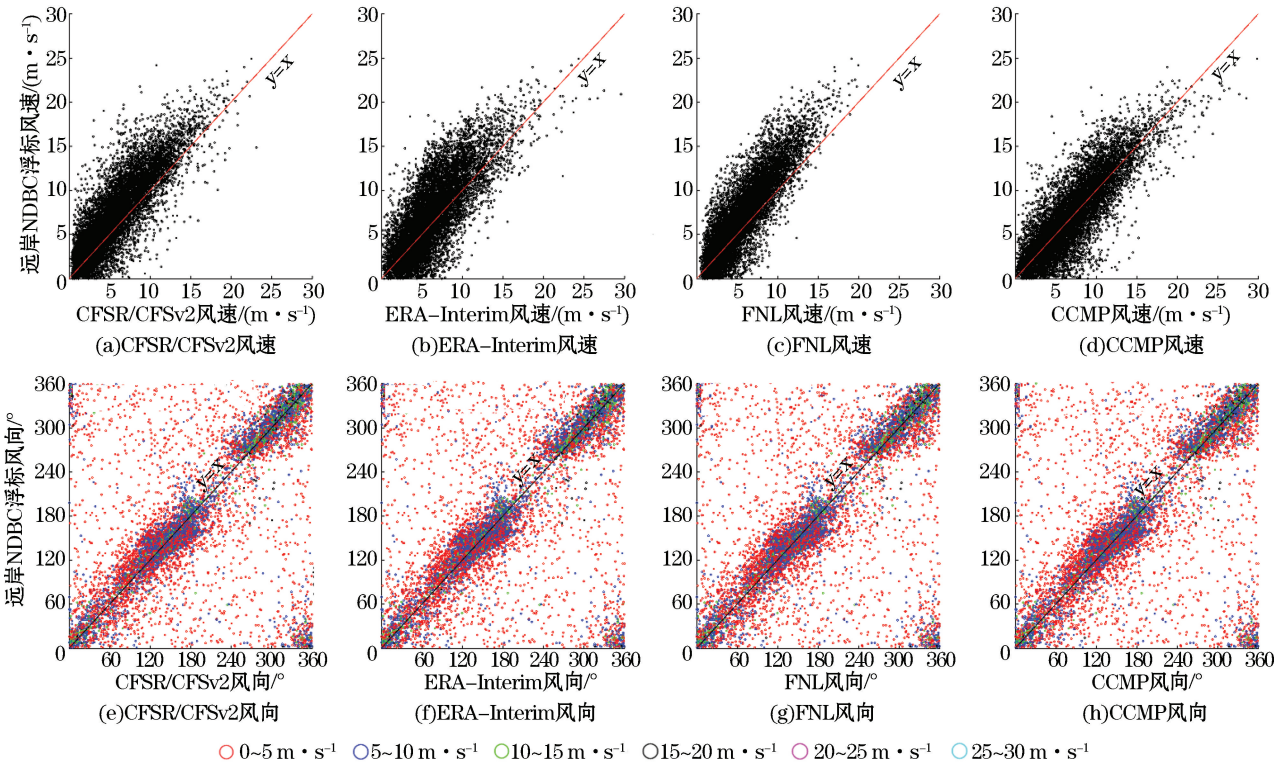

图 4　4 种风场产品资料的风速和风向与近岸 NDBC 浮标观测资料风速和风向的散点分布

Fig.4　Scatter diagrams of wind speed and direction from the four wind products and near-shore NDBC buoys

结合 4 种风场资料产品与嵊泗观测站风速的散点分布(图 5)以及其相关统计变量(表 5)可见，FNL 资料和嵊泗站观测风速资料最为接近，偏差最小为 0.05 m/s，均方根误差最小为 2.31 m/s，相关系数(R^2)为 0.64，仅次于最高值 0.65，所以，FNL 是 4 种资料中效果最好的资料。ERA-Interim 资料的效果仅次于 FNL，偏差为 0.24 m/s，误差标准差为 2.33 m/s。而在浮标处验证效果较好的 CCMP 资料在嵊泗站处的效果却较差，偏差达到 0.48 m/s，误差标准差为 2.45 m/s。CFSR/CFSv2 资料是 4 种资料中效果最差的，相关系数仅为 0.55，误差标准差达到了 2.71 m/s。侯敏等利用观测平台来验证产品资料的风速精度，证明 ERA-Interim 资料的效果由于 CCMP 和 CFSR/CFSv2[26]。造成浮标(<10 m)资料与观测平台(>30 m)资料验证的产品资料精度差异的原因可能跟实测资料的高度有关(实测资料在进行不同高度的风速换算时产生误差)，具体原因还有待研究。

表 5　4 种资料产品与嵊泗观测站风速的统计变量

Table 5　Statistics of wind speed between the four wind products and the observation at Shengsi station

产　品	*Bias*/(m·s^{-1})	R^2	*RMSE*/(m·s^{-1})	*STDE*/(m·s^{-1})
CFSR/CFSv2	0.45	0.55	2.75	2.71
ERA-Interim	0.24	0.65	2.34	2.33
FNL	0.05	0.64	2.31	2.31
CCMP	0.48	0.64	2.45	2.40

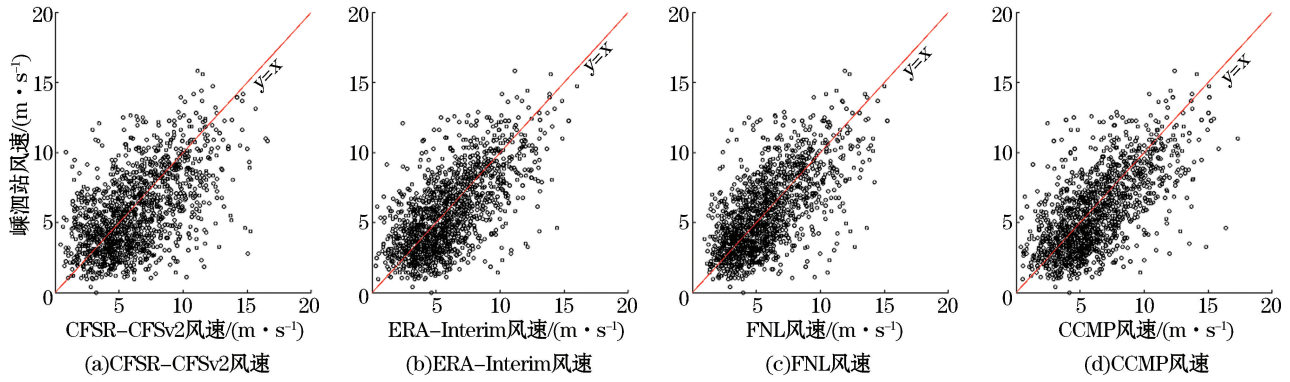

图 5 4 种资料产品的风速与嵊泗观测站风速的散点分布

Fig.5 Scatter diagrams of wind speed from the four data products and the observation at Shengsi station

3 4 种风场资料的差异分析

前文在利用现有实测资料的基础上实现了对北半球海域表层风场产品资料的检验。由于全球范围内实测资料的时空分布不均匀(尤其是南半球分布非常稀少),所以在全球区域内对产品资料进行检验就会非常困难。本节将北半球海域效果较好的 CCMP 资料作为参考对象,用双线性插值法将 4 种资料插值成统一的空间分辨率,比较了 4 种产品资料在全球范围内(180°W～180°E,75°7′30″S～75°7′30″N)的偏差(用 CCMP 减去其他 3 种资料)分布,以期为特定区域表层风场资料的选取等相关研究工作提供一些的帮助。

图 6 给出了 CCMP 资料与其他 3 种资料的纬向风偏差分布,从图中可以看出,CCMP 与 ERA-Interim 偏差大值区的范围远远小于 CFSR/CFSv2 和 FNL,这与 ERA-Interim 作为 CCMP 的背景场有很大的关系。比较 CCMP 与 ERA-Interim 的纬向风偏差分布(图 6a)可以发现,陆地上的偏差基本在－0.1～0.1 m/s 的范围之内,要远远小于海洋上的偏差。海洋上的偏差以负偏差为主,只有在北大西洋和北印度洋海域有范围较大的正偏差区,其他的正偏差区大多在沿岸地区附近。海洋上的负偏差区在南印度洋地区、太平洋中部地区和大西洋中部地区(尤其在岛屿和沿岸附近)比较明显。比较 CCMP 与 CFSR/CFSv2 的纬向风偏差分布(图 6b)可以发现,陆地上的偏差明显大于图 6a,并且陆地上的偏差分布及其不均匀,正偏差区与负偏差区交叉分布,低海拔地区以正偏差为主,高海拔地区以负偏差区为主。海洋上以太平洋中部(尤其在岛屿附近)海域的负偏差区最为明显,南半球西风带为正偏差区,沿岸地区多为正偏差。CCMP 与 FNL 的纬向风偏差分布(图 6c)与图 6b 相似,说明基于 GFS 系统处理的 CFSR/CFSv2 和 FNL 两种资料的偏差较小,但图 6c 中正偏差区较图 6b 较为明显,证明 CFSR/CFSv2 资料与 CCMP 资料的偏差要小于 FNL 资料与 CCMP 资料的偏差。

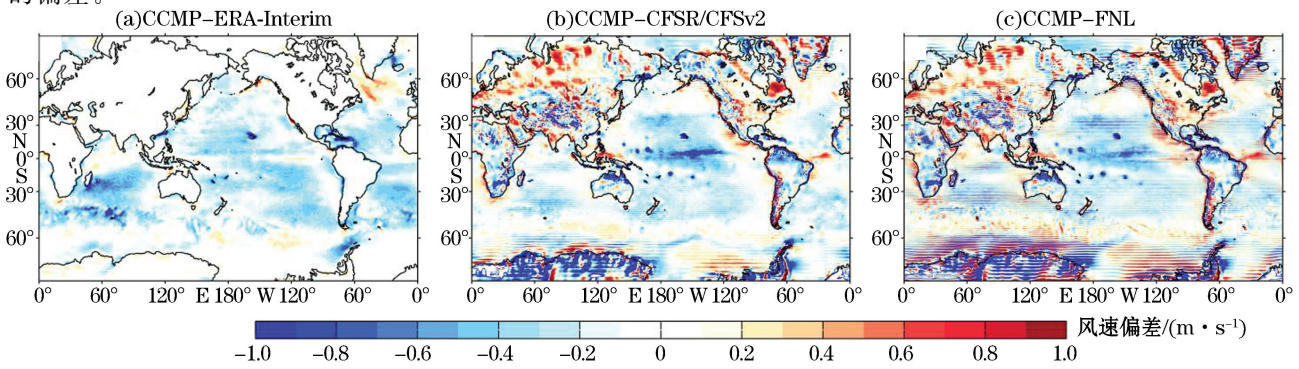

图 6 CCMP 资料与 ERA-Interim 资料、CFSR/CFSv2 资料和 FNL 资料的纬向风偏差分布

Fig.6 Bias distribution of zonal wind between CCMP and ERA Interim, CFSR/CFSv2, and FNL

由 CCMP 资料与其他 3 种资料的经向风偏差分布（图 7）可以看出，CCMP 与 ERA-Interim 偏差大值区的范围依然远远小于 CFSR/CFSv2 和 FNL，南半球的正偏差区较为明显，而北半球的负偏差区则较为明显。CCMP 与 ERA-Interim 的经向风偏差分布（图 7a）可以发现，陆地上的偏差依然非常小。在太平洋和大西洋的近赤道地区有明显的正偏差区。北半球海洋上的偏差以负偏差为主，其中岛屿和沿岸地区尤为明显，而南半球海洋上的偏差则以正偏差为主。CCMP 与 CFSR/CFSv2 的经向风偏差分布（图 7b）中，陆地上的偏差明显大于图 7a，偏差分布依然不均匀，在高海拔地区依然存在较大的偏差区，而北半球大部分的低海拔地区则以负偏差为主。北半球海洋上以负偏差为主，南半球相反。CCMP 与 FNL 的经向风偏差分布（图 7c）与图 7b 依然相似，图 7c 中南半球正偏差区较图 7b 较为明显。

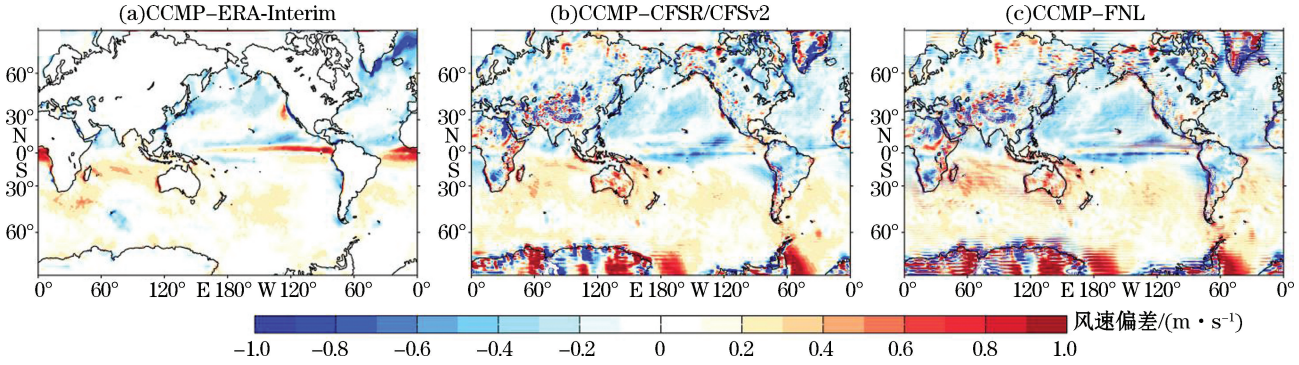

图 7　CCMP 资料与(a)ERA-Interim 资料、(b)CFSR/CFSv2 资料和(c)FNL 资料的经向风偏差分布

Fig.7　Bias distribution of meridional wind between CCMP and ERA Interim, CFSR/CFSv2, and FNL

4　结　语

为了给海洋表层风场的物理结构重建与基础理论溯源工作确立一种准确可靠且通过检验的高时空分辨率风场资料产品，本文利用 NDBC，TAO 和嵊泗站现场观测资料对目前应用较为广泛的 4 种表层风场产品在北半球海域进行了检验评估，并分析了 4 种产品资料的偏差，得出结论：

1）4 种资料的风速都不同程度地低估了实际观测风速，在低风速区的风向偏差较大，风速越低，偏差越多。产品资料在远岸地区比近岸地区更接近实测资料，在高纬地区的效果优于低纬地区。不同区域的偏差相比，远岸浮标处的偏差（0.44 m/s）小于近岸浮标处的偏差（1.03 m/s），低纬地区的偏差（0.55 m/s）大于高纬地区；不同区域的 RMSE 相差很大，近岸浮标处的 *RMSE*（2.68 m/s）远远大于远岸区域（1.33 m/s），低纬地区的 RMSE（1.35 m/s）大于高纬地区；不同区域的相关系数也相差很大，远岸浮标处的相关系数（0.92）远大于近岸区域（0.83），低纬地区的相关系数（0.84）小于高纬地区。在风向方面，低纬浮标处的偏差（−2.93°）远大于高纬地区（−1.02°），近岸地区的偏差（0.98°）略大于远岸地区；近岸浮标处的 RMSE（47.64°）远远大于远岸地区（25.61°），低纬浮标处的 RMSE（22.78°）略大于高纬地区。

2）不同资料在不同区域的精度也不同，但整体而言，CCMP 资料是 4 种资料在不同区域中效果最好的一种资料，而 CFSR/CFSv2 资料是效果较差的一种资料。在赤道低纬浮标地区，CCMP 资料的风速偏差（0.31 m/s）、均方根误差（1.08 m/s）和误差标准差（1.04 m/s）最小，相关系数（0.89）最大，风向偏差（−1.49°）、均方根误差（20.49°）、误差标准差（20.44°）最小，与实测风场的符合度最好；在远岸浮标地区，CCMP 的风场效果整体好，风速风向偏差（分别为 0.17 m/s 和−0.51°）最小，风速均方根误差（1.23 m/s）最小，风向均方根误差（25.84°）仅次于 ERA-Interim 的最小值（25.39°）；在近岸浮标地区，CCMP 资料的风速偏差（0.20 m/s）、均方根误差（2.38 m/s）最小，相关系数（0.84）仅次于最大值 0.87，风向偏差（0.21°）最小，均方根误差（47.50°）略大于最小值 46.87°，与实测风场的符合度最好。

3)利用嵊泗站观测平台资料与浮标资料验证的产品资料精度略有差异。结果显示:FNL 资料的风速偏差最小为 0.05 m/s,风速均方根误差最小为 2.31 m/s,风速相关系数为 0.64,仅次于最大值 0.65,是 4 种资料产品中效果最好的产品。ERA-Interim 资料的效果仅次于 FNL。而用浮标验证效果较好的 CCMP 资料在嵊泗站点效果却较差,偏差达到 0.48 m/s。CFSR/CFSv2 资料是 4 种资料中效果最差的,相关系数仅为 0.55。造成以上差异的原因可能跟实测资料的高度有关(实测资料在进行不同高度的风速换算时产生误差),具体原因还有待研究。

4)通过分析 4 种风场资料的偏差分布发现,CCMP 与 ERA-Interim 风场资料偏差较小,与 ERA-Interim 作为 CCMP 的背景场有很大的关系,CFSR/CFSv2 与 FNL 风场资料偏差较小(图略)是由于 2 种资料均基于 GFS 系统。CCMP 资料与其他 3 种资料的纬向风偏差在海洋上以负偏差为主,其中南印度洋地区、太平洋中部地区和大西洋中部地区(尤其在岛屿附近)尤为明显;陆地以及沿岸地区的偏差较大(CCMP 与 CFSR/CFSv2 和 FNL),且分布不均匀,欧洲平原一直到西伯利亚平原地区为正偏差区,各个大洲上高原地区以负偏差区为主。经向风偏差分布中,南半球的正偏差区较为明显,而北半球的负偏差区则较为明显,但偏差程度要小于纬向风偏差,在太平洋和大西洋的近赤道地区有明显的正偏差区(CCMP 与 ERA-Interim),陆地上(除澳大利亚)以负偏差为主。

参考文献(References):

[1] ZHANG P, CHEN X L, LU J Z, et al. Research on wave simulation of Bohai Sea based on the CCMP remotely sensed sea winds[J]. Marine Science bulletin, 2011, 30(3): 266-271. 张鹏, 陈晓玲, 陆建忠, 等. 基于 CCMP 卫星遥感海面风场数据的渤海风浪模拟研究[J]. 海洋通报, 2011, 30(3): 266-271.

[2] HARTMANN D L, KLEIN T A M G, RUSTICUCCI M, et al. Observations: atmosphere and surface[C]// Intergovernmental Panel on Climate Change. Climate change 2013 -the physical science basis: working group I contribution to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change. Cambridge: Cambridge University Press, 2014: 159-254. doi:10.1017/CBO9781107415324.008.

[3] ROTHROCK D A. The steady drift of an incompressible Arctic ice cover[J]. Journal of Geophysical Research, 1975, 80(3): 387-397.

[4] LARGE W G, POND S. Open ocean momentum flux measurements in moderate to strong winds[J]. Journal of Physical Oceanography, 1981, 11(3): 324-336.

[5] WANG J Y, FANG G H, WANG YG. Trends and interannual variability of the South China Sea surface winds, surface height and surface temperature in the recent decade[J]. Advances in Marine Science, 2017, 35(2): 159-175. 方国洪, 王永刚. 南海海面风场、高度场和温度场近十年的变化趋势及年际变化特征[J]. 海洋科学进展, 2017, 35(2): 159-175.

[6] STEELE M, ZHANG J, ROTHROCK D, et al. The force balance of sea ice in a numerical model of the Arctic Ocean[J]. Journal of Geophysical Research Oceans, 1997, 102(C9): 21061-21079.

[7] DUKHOVSKOY D S, BOURASSA M A, STEFFEN J. Comparison of the ocean surface vector winds from atmospheric reanalysis and scatterometer-based wind products over the Nordic Seas and the northern North Atlantic and their application for ocean modeling[J]. Journal of Geophysical Research: Oceans, 2017, 122(3): 1943-1973.

[8] FENG S D, LI F Q, LI S J, et al. Introduction to marine science[M]. Beijing: Advanced Education Press, 1999. 冯士筰, 李凤岐, 李少菁, 等. 海洋科学导论[M]. 北京: 高等教育出版社, 1999.

[9] LI Z Q, SONG L L, MA H, et al. Review of methodologies for offshore wind resource observation and assessment[J]. Advances in Earth Science, 2016, 31(8): 800-810. 李正泉, 宋丽莉, 马浩, 等. 海上风能资源观测与评估研究进展[J]. 地球科学进展, 2016, 31(8): 800-810.

[10] LI Z Q, XIAO J J, ZHANG Y H, et al. Variation analysis of sea surface wind over China Seas using global wind products[J]. Marine Environmental Science, 2016, 35(4): 587-593. 李正泉, 肖晶晶, 张育慧, 等. 基于全球风场产品中国海表面风速变化分析[J]. 海洋环境科学, 2016, 35(4): 587-593.

[11] DEE D P, UPPALA S M, SIMMONS A J, et al. The ERA-Interim reanalysis: configuration and performance of the data assimilation system[J]. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 2011, 137(656): 553-597.

[12] BOSILOVICH M G, KENNEDY J, DEE D, et al. On the reprocessing and reanalysis of observations for climate[J]. Climate Science for Serving Society, 2013: 51-71.

[13] WANG H P. The study of merged technique about sea surface wind based on variational method[D]. Nanjing: PLA University of Sci-

ence and Technology，2013. 王慧鹏. 基于变分法的海面风场融合技术研究[D]. 南京：中国人民解放军理工大学，2013.

[14] MA J W，QIN S X. Recent advances and development of data assimilation algorithms[J]. Advances in Earth Science，2012，27(7)：747-757. 马建文，秦思娴. 数据同化算法研究现状综述[J]. 地球科学进展，2012，27(7)：747-757.

[15] GAN L. Study on wind speed and direction assimilation method[D]. Changsha：National University of Defense Technology，2013. 干莉. 散射计资料风速风向同化方法研究[D]. 长沙：国防科学技术大学，2013.

[16] THEPAUT J N. Assimilating only surface pressure observations in 3D-Var and 4D-Var[R]. The United Kingdom：ECMWF，2006.

[17] WHITAKER J S，COMPO G P，THEPAUT J N. A comparison of variational and ensemble-based data assimilation systems for reanalysis of sparse observations[J]. Monthly Weather Review，2008，137(6)：1991-1999.

[18] RIENECKER M M，SUAREZ M J，GELARO R，et al. MERRA：NASA's modern-era retrospective analysis for research and applications[J]. Journal of Climate，2011，24(14)：3624-3648.

[19] SHINELD P. IFS documentation：part I：observations[M]. England：European Centre for Medium-Range Weather Forecasts，2017.

[20] KUANG F F，ZHANG Y Q，ZHANG J P，et al. Comparison and evaluation of three sea surface wind products in Taiwan Strait[J]. Haiyang Xuebao，2015，37(5)：44-53. 旷芳芳，张友权，张俊鹏，等. 3 种海面风场资料在台湾海峡的比较和评估[J]. 海洋学报，2015，37(5)：44-53.

[21] PENG G，ZHANG H M，FRANK H P，et al. A comparison of various equatorial pacific surface wind products[C]//Geoscience & Remote Sensing Symposium. Vancouver，BC，Canada：IEEE，2011：2049-2052.

[22] STOPA J E，CHEUNG K F. Inter-comparison of wind and wave data from the ECMWF reanalysis interim and the NCEP climate forecast system reanalysis[J]. Ocean Modelling，2014，75(2)：65-83.

[23] SHI H. Classification of offshore wind field in China and its application in offshore oil spill emergency[D]. Beijing：Peking University，2011. 石慧. 中国近海海面风场分类及其在海上溢油事故应急中的应用研究[D]. 北京：北京大学，2011.

[24] Summary of blending scheme，version 5.0[R]. The United States：NWRA，2008.

[25] ATLAS R，HOFFMAN R N，ARDIZZONE J，et al. A cross-calibrated，multiplatform ocean surface wind velocity product for meteorological and oceanographic applications[J]. Bulletin of the American Meteorological Society，2011，92(2)：157-174.

[26] MAO K F，CHEN X，LI Y，et al. Evaluation of the new cross-calibrated，multi-platform ocean surface wind fields in the East China Sea region[J]. Meteorological Monthly，2012，38(12)：1456-1463. 毛科峰，陈希，李妍，等. 东中国海域交叉定标多平台合成洋面风场资料的初步评估[J]. 气象，2012，38(12)：1456-1463.

[27] HOU M，WANG G S，PU Q J. Characteristics of sea surface wind over China seas based on four reanalysis data sets[J]. Tianjin Science and Technology，2017，44(10)：109-113. 侯敏，王国松，卜清军. 基于 4 种再分析资料的中国近海风速特征分析[J]. 天津科技，2017，44(10)：109-113.

Applicability Evaluation of Four Surface Wind Products in the Northern Hemisphere Sea Area

LIU Xie-ming[1], XIONG Xue-jun[2,3], GONG Qing-long[1], YU Long[2], GUO Yan-liang[2]
(1. *College of Oceanic and Atmospheric Sciences, Ocean University of China*, Qingdao 266100, China;
2. *First Institute of Oceanography, MNR*, Qingdao 266061, China;
3. *Laboratory for Regional Oceanography and Numerical Modeling, Pilot National Laboratory for Marine Science and Technology (Qingdao)*, Qingdao 266061, China)

Abstract: In order to reconstruct the physical structure of sea surface wind field, reliable, accurate and tested data with high spatial and temporal resolution are necessary. Comprehensive comparison is applied to observational data of NDBC, TAO and Shengsi station to evaluate the four wind products, CFSR/CFSv2, ERA-Interim, FNL and CCMP, with focus in northern hemisphere sea area (North Pacific and North Atlantic), and our conclusions are: 1) Wind speed is underestimated in all the four data products in various degree. The bias of wind direction is larger in the region where wind speed is low. The data in open oceans is closer to observation than those in coastal area, and the data in high latitudes have better quality than those in low latitudes. 2) Comparison on bias, root mean square error, standard deviation and correlation coefficient of wind direction and speed reveals that the CCMP is the most accurate data product, while the CFSR/CFSv2 is the worst. 3) Comparison with ShengSi platform observation data and buoy data shows that the FNL is the best, ERA-Interim ranks the second, the accuracy of CCMP verified by station data is lower than that verified by buoy data, and the CFSR/CFSv2 has the worst accuracy. 4) Bias distribution of the four datasets further demonstrated that the bias between CCMP and ERA-Interim is smaller, and the bias between CFSR/CFSv2 and FNL is also smaller. The biases of zonal wind of CCMP and the other three products are mostly negative in open oceans but mostly positive in coastal areas. For the bias of meridional wind, positive values are dominant in southern and negative ones are dominant in northern hemisphere, but the values are smaller than the zonal wind bias.

Key words: surface wind; CFSR/CFSv2; ERA-Interim; FNL; CCMP; spatial difference
Received: July 1, 2018