

此版本修订日期：2024-08-26 T13:10

FY-3E/WindRAD 双频散射计海面风场反演 和验证研究¹

方贺^{1,2,3} 樊高峰¹ 李正泉¹ 陈林⁴ 张驰⁵ 杨劲松⁶

¹ 浙江省气候中心, 杭州 310051

² 中国气象科学研究院灾害天气国家重点实验室, 北京 100081

³ 南京信息工程大学 气象灾害教育部重点实验室、气象灾害预报预警与评估协同创新中心, 南京 210014

⁴ 国家卫星气象中心, 北京 100081

⁵ 浙江省气象信息中心, 杭州 310051

⁶ 自然资源部第二海洋研究所卫星海洋环境动力学国家重点实验室, 杭州 310012;

摘要: 2021 年 7 月发射的 FY-3E 星是世界首颗民用晨昏轨道气象卫星, 其搭载的 WindRAD 双频测风雷达具有全球海面风场探测能力。本文首先基于 FY-3E/WindRAD L1 级观测资料, 研究了雷达海面后向散射和风场非线性关系, 分别建立了适用于 C 和 Ku 波段 VV/HH 极化的地球物理模式函数 (GMF)。随后, 结合最大似然估计法 (MLE) 对 WindRAD 散射计探测资料进行风场反演。利用海洋浮标、中法海洋卫星散射计 (CSCAT) 和美国国家环境预报中心 (NCEP) 模式风场资料对 WindRAD 反演风场进行验证。结果显示: WindRAD 反演风速与浮标风速偏差约为 0.2 m/s, 均方根误差 (RMSE) 在 1.13~1.44 m/s 之间, 优于 2m/s 的业务化应用的风速精度要求; 两者风向偏差在 1.4 ~ 3.0° 之间, RMSE 在 25.3 ~ 30.0° 之间。WindRAD 和 CSCAT 风场具有较好

收稿日期 2023-12-23; 网络预出版日期

作者简介 方贺, 男, 1990 年出生, 博士研究生, 主要从事海洋微波遥感研究。E-mail: fanghe_doc@163.com

通讯作者 李正泉, E-mail: lizhengquan@cma.gov.cn

资助项目 国家自然科学基金 42305153, 风云卫星先行计划 FY-APP-2021.0105, 浙江省自然科学基金 LQ21D060001、LZJM23D050001, 华东区域气象科技协同创新基金 QYHZ202307, 浙江省气象局科技项目 2022ZD06、2023YB06, 中国气象局创新发展专项 CXFZ2022J040、CXFZ2023J074, 灾害天气国家重点实验室开放课题 2024LASW-B22, 气象灾害教育部重点实验室&气象灾害预报预警与评估协同创新中心联合开放课题 KLME202408, 中国气象局青年创新团队 CMA2023QN12

Funded by the National Natural Science Foundation of China (Grant 42305153), Fengyun Application Pioneering Project (Grant FY-APP-2021.0105), Zhejiang Provincial Natural Science Foundation of China (Grants LQ21D060001, LZJM23D050001), East China Regional Meteorological Science and Technology Collaborative Innovation (Grant QYHZ202307), Science and technology project of Zhejiang Meteorological Bureau (Grant 2022ZD06, 2023YB06), Innovation and Development Project of China Meteorological Administration (CXFZ2022J040, CXFZ2023J074), State Key Laboratory of Severe Weather Open Project (2024LASW-B22), Key Laboratory of Meteorological Disaster, Ministry of Education & Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of Meteorological Disasters Open Project (KLME202408), Youth Innovation Team of the China Meteorological Administration (CMA2023QN12)

21 的一致性, 风速 RMSE 在 1.37~1.6m/s 之间, 风向 RMSE 在 22.9° ~ 25.9 °之间。
22 WindRAD 和 NCEP 模式风速 RMSE 在 1.87~2.12m/s 之间, 风向 RMSE 在 22.3°~27.1°之
23 间。研究表明 WindRAD 散射计 C 和 Ku 波段 VV/HH 极化反演风场均具有较高的精度,
24 充分显示了 WindRAD 载荷在全球海面风场探测方面的应用潜力和价值。

25 **关键词** 风云卫星 海面风场 地球物理模式函数 WindRAD 散射计

26 **Ocean surface wind field retrieval and validation** 27 **from FY-3E/WindRAD dual-frequency scatterometer**

28 Fang He^{1,2,3}, FAN Gaofeng¹, LI Zhengquan¹, CHEN Lin⁴, ZHANG Chi⁵, Yang Jingsong⁶

29 1 Zhejiang Climate Centre, *Hangzhou* 310051,

30 2 State Key Laboratory of Severe Weather, Chinese Academy of Meteorological Sciences,
31 *Beijing* 100081

32 3 Key Laboratory of Meteorological Disaster (KLME), Ministry of Education &
33 Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of Meteorological
34 Disasters(CIC-FEMD), Nanjing University of Information Science & Technology, *Nanjing*,
35 210044

36 4 National Satellite Meteorological Center, *Beijing* 100081

37 5 Zhejiang Meteorological Information Network Center, *Hangzhou* 310051

38 6 State Key Laboratory of Satellite Ocean Environment Dynamics, Second Institute of
39 Oceanography, Ministry of Natural Resources, *Hangzhou* 310012

40 **Abstract:** The FY-3E satellite launched in July 2021, which is the world's first civilian
41 twilight orbit meteorological satellite. The WindRAD dual-frequency scatterometer it
42 carries has the ability to detect global ocean surface wind fields. This paper first studies
43 the nonlinear relationship between sea surface backscatter and wind field based on FY-
44 3E/WindRAD L1 level observation data, and then establishes geophysical model
45 functions (GMFs) for C- and Ku-band VV/HH polarization wind field retrieval
46 respectively. Based on the maximum likelihood estimation (MLE) method, ocean
47 surface wind field were retrieve from WindRAD scatterometer data. The wind field is
48 validated using ocean buoy, CSCAT and NCEP wind field data. The results show that
49 the wind speed bias between the WindRAD and buoy is about 0.2m/s, and the root-
50 mean-square error (RMSE) is range from 1.20 to 1.44 m/s, which better than 2m/s for
51 operational applications. The wind direction bias and RMSE are range from 1.4 ~ 3.0°
52 and 25.3 ~ 30.0°, respectively. WindRAD and HSCAT wind fields have good

53 consistency, with the RMSE of wind speed between 1.37~1.6m/s and the RMSE of
54 wind direction between 22.9°~25.9°. The RMSE between WindRAD and NCEP wind
55 speed is 1.87~2.12m/s, and the RMSE of wind direction is between 22.3°~27.1°. These
56 results indicate that sea surface wind fields retrieved from WindRAD dual-frequency
57 scatterometer have high accuracy, fully demonstrating the application potential and
58 value of WindRAD payload in global sea surface wind field detection.

59 **Keywords** Fengyun satellite, Ocean surface wind field, Geophysical model function
60 WindRAD, Scatteromete

61 doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.2403.23161

62 1 引言

63 星载微波散射计是一种专门用于监测全球海面风场的主动式微波传感器，
64 能够在晴空和有云条件下全天候提供海面风矢量（风速和风向）观测资料，是
65 目前为止获取全球海洋风矢量最主要的微波传感器（冷洪泽和曹航，2023；林
66 文明等，2021）。自 1968 年美国国家航空航天局（NASA）发射全球第一个星
67 载散射计 SEASAT 以来，经过 ERS-1/2, NSCAT, QuikSCAT, ASCAT, HY-2 和
68 CFOSCAT 等传感器系统发展，散射计测风技术逐渐成熟，为数值天气预报、海
69 气相互作用和海洋防灾减灾提供丰富的风场数据。

70 星载微波散射计是一种主动式微波传感器，它对海面风矢量的探测是间接
71 的，直接测量的是海表面的雷达后向散射信号强度，即归一化雷达后向散射系
72 数（NRCS）。NRCS 不仅与微波散散射计的雷达系统有关（如波段，入射角，
73 方位角和极化方式），也由海面状态决定（如海流，海表面温度和厘米尺度的波
74 浪）。而海面风场是海面波浪形成的主要驱动力，风生波浪会引起海表面粗糙度
75 增加，从而导致雷达接收的 NRCS 变强，即 NRCS 随着风速的增大而增大。这
76 也是利用散射计等星载微波传感器反演海面风场的基本原理（方贺等，2022）。
77 基于此，把定量表达 NRCS、海面风矢量等主要地球物理参数和散射计观测方
78 式之间的关系函数称为地球物理模式函数（GMF）。由于对海洋表面后向散射
79 的物理过程尚未完全理解，很难建立一个严格的理论模型，因此业务化散射计
80 运行中使用的 GMF 大多数采用半经验方法，即以卫星遥感、海上观测以及数值
81 天气预报模式风场资料作为参考海面风场，通过海面 NRCS 对 GMF 模型参数进
82 行拟合的方式构建。由此可见，GMF 的适用性在一定程度上受到卫星观测和参

83 考风场数据的制约 (Wang et al., 2019; 吕思睿等, 2023)。

84 目前业务化运行的散射计通常工作在 C 波段 (如 ASCAT) 或 Ku 波段 (如
85 QuikSCT, HY2 和 CFOSAT)。对于 C 波段 VV 极化散射计风场反演, 最为常用
86 的是 CMOD 系列 GMF。学者们通过不同传感器资料建立众多版本的 CMOD 模
87 型 (Hersbach et al., 2010; Stoffelen et al., 2017; Fang et al., 2018)。对于 C 波段 HH
88 极化散射计资料, 学者们通常利用极化比模型将 HH 极化的 NRCS 转化为 VV 极
89 化的 NRCS, 再代入 CMOD 系列 GMF 进行海面风反演 (赵现斌等, 2013;
90 Zhang et al., 2019)。最近, 基于 C 波段 HH 极化星载合成空间雷达 (SAR) 卫星
91 资料, Mouche 等 (2015) 建立了直接从 HH 极化雷达后向散射中提取海面风场
92 的 GMF。但目前该模型还未应用在星载散射计数据上面。对于 Ku 波段散射计,
93 最为常用风场反演模型是 NSCAT 系列 GMF。NSCAT-1 GMF 是基于三个月的
94 NSCAT 散射计观测资料建立的, 随后学者又对其进行改进并建立了 NSCAT-2
95 GMF (Masuko et al., 2000; 冯倩等, 2006)。然而受 NSCAT 观测数据量少 (仅
96 有 9 个月), 以及当时 ECMWF 和 SSMIS 辅助数据质量等因素的影响, NSCAT-
97 2 GMF 的准确性不够高。研究表明, 基于 NSCAT-2 GMF 处理 QuikSCAT、
98 OceanSat-2 和 HY-2A 等卫星散射计数据得到的反演风速存在显著误差 (Zhao et
99 al., 2021)。针对这种情况, 欧洲荷兰皇家气象研究所 (KNMI) 通过校正
100 NSCAT-2 GMF 的风速依赖关系得到了 NSCAT-4GMF (Wang et al., 2019)。由于
101 NSCAT 散射计具有 VV 和 HH 极化观测和较大的入射角范围 ($16^{\circ}\sim 66^{\circ}$),
102 NSCAT-4 GMF 可以用于 QuikSCAT、OSCAT、HY-2 系列、SCATSAT-1 以及
103 CSCAT 等业务化 Ku 波段散射计的风场反演 (王东良等, 2014; Carvalho et al.,
104 2017; Johny et al., 2019; 杨典等, 2019; 林文明等, 2021)。上述这些用于特定
105 极化的 GMF 略有不同, 但都具有相似的通用模型形式和结构。

106 2021 年 7 月 5 日, 全球首颗民用晨昏轨道气象卫星 FY-3E 在酒泉卫星发射
107 中心成功发射。FY-3E 搭载的 WindRAD 测风雷达 (散射计) 采用双波段 (C 和
108 Ku 波段)、双极化 (VV 和 HH) 圆锥扫描雷达, 通过星上内定标和在轨主动外
109 定标实现高精度全球海面风场测量, 具有动态范围大、空间分辨率高等优点
110 (Zhang et al., 2022)。由于 FY-3E 星在轨运行时间相对较短, 对 WindRAD 散射
111 计风场反演和应用的研究还处于起步阶段。在卫星发射之前, 窦芳丽 (2012)
112 利用模拟的 C 和 Ku 波段观测数据, 基于最大似然估计法 (MLE) 研究了台风

113 条件下 WindRAD 双频散射计风场反演适用性。结果显示：双频 MLE 方法能够
114 显著减小降雨偏差，提高风速反演精度，是提高台风降雨条件下测风精度的有
115 效手段。随后，Liu 等（2023）从旋转特性和标定参数两个方面究了 WindRAD
116 散射计在发射前的探测性能。测试结果显示：WindRad 性能优异，完全可以满
117 足海面风场探测应用需求。卫星发射后，Li 等（2023）以数值天气预报风场资
118 料为输入，利用 GMF 模拟的 NRCS 对 WindRAD 探测 NRCS 进行修正，从而有
119 效提升了 C 和 Ku 波段探测资料风场反演精度。Shang 等（2023）等研究认为
120 WindRAD 可以提供高质量全球海面后向散射系数数据，这为后续风场反演地球
121 物理模式函数（GMF）的研发以及数据同化提供了数据支撑。最近，He 等
122 （2023）利用海洋浮标观测资料，对 WindRAD 散射计全球海面风场产品进行了
123 验证。研究结果显示：WindRAD 散射计 C 波段 VV 极化海面风速与浮标观测资
124 料具有良好的一致性，两者标准差为 1.37m/s，偏差为 0.7m/s。然而，这一研究
125 仅对 C 波段 VV 极化风场产品进行了检验，并未对 C 波段 HH 极化以及 Ku 波段
126 风场产品进行验证。

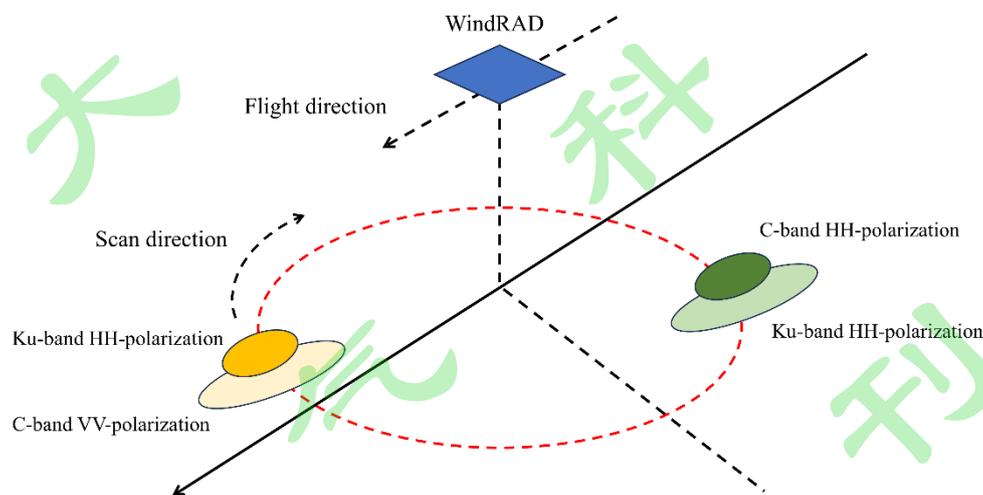
127 目前，国家卫星气象中心（NSMC）提供了 L2 级（版本 1.2）WindRAD 散
128 射计全球海面风矢量产品，充分显示了其在地面风探测方面的适用性。然而，
129 L2 级产品提供的风矢量数据是通过整合 VV 和 HH 极化 NRCS 生成的，从而缺
130 少了单独的 VV 或 HH 极化风矢量数据，这在一定程度上限制了不同极化方式风
131 场资料的应用。此外，目前对于 WindRAD 风矢量产品的检验大多依赖再分析资
132 料，利用海上站位（浮标）观测和其他业务化散射计风场资料的检验较少。基
133 于此，本研究通过采集 WindRAD 散射计 L1 级观测资料及时空匹配的参考风场，
134 通过拟合不同波段 NRCS 和参考风场的关系，分别建立 C 波段 VV 和 HH 极化、
135 Ku 波段 VV 和 HH 极化风场反演 GMF。随后，利用海洋浮标、其他业务化散射
136 计和模式风场数据，对反演风矢量信息进行验证。本文研究成果将为 WindRAD
137 双频散射计风场反演提供技术支撑，同时也为 NSMC 风矢量产品精度验证提供
138 参考风场资料。

139 2 数据来源

140 2.1 WindRAD L1 级资料

141 WindRAD 散射计采用双扇形波束圆锥扫描方式，其扫描方式由图 1 所示

142 (Li et al., 2023)。WindRAD 雷达天线由 4 个波导缝隙阵构成，分别为 C 波段 V
143 极化天线、C 波段 H 极化天线、Ku 波段 V 极化天线和 Ku 波段 H 极化天线。C
144 波段（中心频率 5.4 GHz）和 Ku（中心频率 13.265 GHz）双波段同时工作，每
145 个波段包含 VV 和 HH 两种极化测量方式，同频段的两种极化测量分时间间隔进
146 行，不同频段之间的测量相互独立。C 波段入射角范围为 $33^{\circ}\sim 47^{\circ}$ ，Ku 波段入
147 射角范围为 $36.5^{\circ}\sim 44^{\circ}$ 。本研究采用的是国家卫星气象中心提供的 WindRAD L1
148 级资料，数据时间尺度为 2022 年 3 月 15 日至 6 月 15 日。L1 级资料以轨道形式
149 向用户提供，分别为 C 波段升轨、C 波段降轨、Ku 波段升轨和 Ku 波段降轨。
150 经过定标处理后向散射数据集是 L1 级资料中最重要的数据集，这些数据以轨道
151 形式的风矢量单元（WVC）为单位进行存储。对于单个文件，除了包含 VV 和
152 HH 极化雷达后向散射系数、经纬度信息和时间数据集外，还提供了质量控制标
153 识（Quality_Flag）数据集。该数据集以风矢量单元形式对可用雷达后向散射系
154 数进行了标识，在风场反演过程中可以对后向散射系数质量进行控制。
155 WindRAD L1 级资料提供 10 和 20km 两种空间分辨率的后向散射系数数据集，
156 本文主要采用 20km 分辨率数据进行风场反演研究。



157
158 图 1 WindRAD 扇形波束圆锥扫描示意图

159 Fig.1 WindRAD rotating fan-beam illustration.

160 2.2 海洋浮标资料

161 海洋浮标具有可靠性高、稳定性好等特点，是获取海面风场信息的重要手
162 段。本文所采用的浮标资料隶属于美国国家浮标数据中心（NDBC），时间分辨

163 率为 6 分钟。首先利用时空匹配法将散射计和浮标观测资料进行匹配。时间上，
164 散射计和浮标观测资料不超过 30 分钟；空间上，WindRAD 散射计网格点空间
165 距离浮标小于 20 公里。由于卫星反演风速为海表面 10 m 高处风速，因此本文
166 采用风廓线公式将不同高度测风仪观测风速转化为海面 10 m 高处等效风速
167 (Fang et al., 2022)。

168 2.3 NCEP 再分析资料

169 全球再分析海面风资料可以为卫星反演产品校验提供大量的同步分析数据。
170 美国国家环境预报中心 (NCEP) 模式可以提供网格化全球海面 10m 高度风矢量
171 资料。本文采用的是 NCEP/NCAR 再分析海面风资料，可以同时提供径向和纬
172 向分量的海面风速，空间分辨率为 0.5 度，时间分辨率为 3 小时。再分析海面风
173 场资料在本文中的作用有两个。一是用于拟合 WindRAD 风场反演模式函数并在
174 风场反演中提供风向信息；二是为 WindRAD 风场反演提供验证资料。因此，利
175 用时空插值方法，将 NCEP/NCAR 再分析资料插值到 WindRAD 风矢量单元，从
176 而建立时空匹配的 WindRAD 风矢量单元和再分析风场资料数据集。数据集中
177 70% 的样本量用于建立 WindRAD 风场反演 GMF，30% 的样本量用于反演风场的
178 验证。

179 2.4 CSCAT 散射计资料

180 中法海洋卫星 (CFOSAT) 于 2018 年 10 月 29 日酒泉卫星发射中心成功发
181 射，其搭载的 CSCAT 散射计可以提供全球海面风场资料。研究显示，CSCAT 散
182 射计提供全球风矢量产品具有较高的精度，且和 WindRAD 都一样采用了扇形扫
183 描体制，从而更有利检验 WindRAD 风场反演效果 (Liu et al., 2020; 林文明等，
184 2021; Mou et al., 2023)。国家海洋卫星应用中心提供的 CSCAT 散射计风矢量产
185 品分为 25km 和 12.5km 的海面风场产品，本研究采用的是 25km 分辨率风场产
186 品，CSCAT 和 WindRAD 的时间范围对应。在匹配 WindRAD 与 CSCAT 数据过
187 程中，限制限制空间距离小于 12.5 km，观测时间差小于 45 分钟。此外，根据
188 CSCAT 和数据产品中的质量标识等信息，进一步根据数据产品中质量控制标识
189 筛除受降雨影响等质量较差的数据。

190 3 散射计风矢量反演

191 3.1 最大似然估算法

192 星载散射计风场反演主要包括利用 GMF 求解风矢量和风向模糊去除两个过
193 程（唐焕丽等，2020；冷洪泽和曹航，2023）。由于 GMF 与风速、风向、雷达
194 入射角和天线方位角等参数成非线性关系，且由于测量 NRCS 存在各种噪声增
195 加了风矢量反演问题的非线性，导致 NRCS 测量反演风矢量不能直接用求逆的
196 方法来求解。在众多风矢量求解方法中，最大似然估计方法（MLE）具有反演
197 精度高、取值范围不受限制、完全独立与 GMF 等特点，成为业务化运行散射计
198 最为常用的算法（张增海等，2014；Liu et al., 2020; 王冰花等，2021）。MLE 方
199 法核心思想是，查找散射计探测 NRCS 与 GMF 模拟的 NRCS 差异最小的解作为
200 “真实”风矢量解。MLE 目标函数具体表达式为

$$201 \quad J_{MLE}(w, \phi) = -\frac{1}{N} \left[\sum_{i=1}^N \frac{(z_i - M(w, \phi, \dots, \theta, p, f))^2}{2V_{Ri}} + \ln \sqrt{V_{Ri}} \right] \quad (1)$$

202 其中， N 为每个风矢量单元测量值的个数； z_i 为散射计探测 NRCS； M 是 GMF
203 模拟的 NRCS，它是风速 w 、相对风向 ϕ 、雷达入射角 θ 、天线极化方式 p 和雷
204 达频率 f 等参数的函数。 R_i 表示散射计探测的第 i 个像元 NRCS 与相应 GMF 模
205 拟 NRCS 的偏差， V_{Ri} 是总体偏差的方差。在本研究中，WindRAD 散射计探测
206 NRCS 包括 C 波段 VV 和 HH 极化以及 Ku 波段 VV 和 HH 极化四种。因此，相
207 应的 GMF 选取也不同，C 波段 VV 极化采用 CMOD5.N GMF（Hersbach, 2010），
208 C 波段 HH 极化采用 CSARMOD GMF（Mouche et al., 2015），Ku 波段 VV 和 HH
209 极化则采用 NSCAT4 GMF（Lin et al., 2017）。

210 散射计风场反演实际上就是寻找最优风矢量解使得式公式（1）取得局部最
211 大的过程。一般的风矢量检索方法是在给定极化方式、入射角和视向角等雷达
212 参数前提下，分别设置风速和风向初始值以及步长，通过循环迭代确定目标函
213 数最大值时对应的风速和风向即为最终风矢量解。通常风速初始值设为 0.1m/s，
214 步长为 0.1m/s，终值为 50m/s；风向初始值设置为 0°，步长为 1°，终值为 360°。
215 在实际应用中，采用二次快速风矢量搜索方法，将风矢量的搜索分为粗搜索和
216 精搜索可以有效提高运行效率（解学通等，2006；夏雪宁，2023）。

217 3.2 模糊解去除

218 散射计风场反演过程中，会出现 2~4 个风矢量解使得目标函数达到局部最
219 大值，但其中只有一个真实解，其余的则称为模糊解。风矢量模糊解中风速相
220 差不大，但风向上相差较大。因此在使用 MLE 方法求得多个解后还要对模糊风
221 向进行去除，从而获取最优的风矢量信息。

222 圆中数滤波是广泛应用于图像处理中用于降低噪声影响的算法，其核心思
223 想是当风场中绝大部分（超过 50%）风矢量单元是正确的前提下，少数面元中
224 的模糊风矢量解可以被认为是噪声，中数滤波器就会用无噪声的相邻元素上的
225 值来取代噪声值（陈克海等，2006；安大伟等，2012；窦芳丽等，2012）。目前，
226 我国 HY-2 卫星散射计采用的就是圆中数滤波方法来去除模糊风向。本文中采用
227 圆中数滤波方法去除散射计反演风矢量模糊解，同时结合 NCEP 提供的模式背
228 景风场来消除180°模糊风向。

229 4 WindRAD 风场反演 GMF 构建

230 基于 C 波段和 Ku 波段散射计卫星资料和不同的参考风场数据，前期学者们
231 已经建立了众多用于风场反演的 GMF 模型。这些用于特定极化的经典 GMF 具
232 体参数略有不同，但具有相似的通用模型形式和结构。大量研究证明，这些成
233 熟的 GMF 适用于多种散射计和 SAR 卫星资料业务化海面风场反演（Hersbach et
234 al., 2010; Stoffelen et al., 2017; Johny et al., 2019; 杨典等，2019; 王志雄等，2023）
235 因此，本研究是在这些 GMF 的结构基础上建立适用于 WindRAD 散射计资料的
236 风场反演 GMF，而非构建全新形式的 GMF。

237 本文通过收集 2022 年 3 月 15 日至 6 月 15 日逐日 WindRAD 散射计 L1 级资
238 料和 NCEP 同步模式风场数据，通过对比 WindRAD 探测 NRCS 和参考风场之间
239 的关系，建立适用于 WindRAD 风场反演 GMF。WindRAD GMF 表达式如下：

$$240 \quad \sigma_{\text{WindRAD}}^0 = f(\theta) + \sigma_{\text{GMF}}^0 \quad (2)$$

241 其中， $\sigma_{\text{WindRAD}}^0$ 为 WindRAD L1 级资料观测 NRCS， σ_{GMF}^0 为经典 GMF 仿真
242 NRCS， $f(\theta)$ 为入射角函数。WindRAD GMF 函数的结构模型的结构综合考虑了
243 WindRAD 数据自身特性以及经典地球物理模型的特性。这里，WindRAD 数据
244 自身特性是关于入射角的函数，而经典地球物理模型的特性是关于入射角、风
245 速和风向的函数。

246 4.1 C 波段 VV 极化

247 WindRAD 散射计 C 波段 VV 极化 GMF (简记为 WRD-CVV) 是在
 248 CMOD5.N 模型对入射角进行了修正而建立的 (Hersbach, 2010)。其表达式如
 249 下:

$$250 \quad \sigma_{C,VV}^0 = c_2 \cdot \theta^2 + c_1 \cdot \theta + c_0 + \sigma_{CMOD5.N}^0 \quad (3)$$

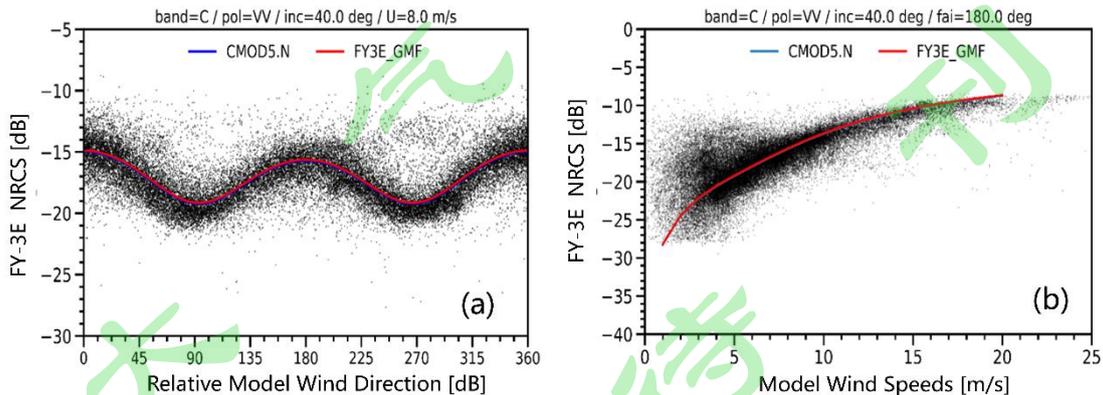
251 其中, $\sigma_{C,VV}^0$ 为 WindRAD 散射计 VV 极化 NRCS, θ 为入射角, $\sigma_{CMOD5.N}^0$ 是基于
 252 CMOD5.N 模型得到的 NRCS, c_0 , c_1 和 c_2 为模型系数 (表 1)。

253 表 1 WRD-CVV GMF 模型系数

254 Table.1 Model coefficient of WRD-CVV GMF

系数	c_2	c_1	c_0
值	0.003578	-0.2664	4.98

255 图 2 为 WRD-CVV 和 CMOD5.N 模式函数随海面风向和风速的变化趋势。
 256 可以看出本文建立的 WRD-CVV 模式函数 $\sigma_{C,VV}^0$ 与风速风向的变化趋势和
 257 CMOD5.N 非常接近, 这也说明了 WindRAD 散射计 C 波段 VV 极化与其它散射
 258 计数据的散射特性非常一致。此外, 从公式 (2) 可以看出, 海面风速和风向是
 259 求解 GMF 方程时同时存在的两个未知量。由于 GMF 对风向的双余弦特征, 反
 260 演过程会存在多个风向模糊解, 即 180° 模糊风向问题。因此, 本研究采用
 261 NCEP 模式风向来消除 WindRAD 反演风场中的 180° 模糊风向。



262
 263 图 2 WRD-CVV 和 CMOD5.N 模拟 NRCS 随海面风向和风速变化趋势。图中蓝线和红线分
 264 别代表 CMOD5.N 和 WRD-CVV 模式函数仿真结果。

265 Fig.2 WRD-CVV and CMOD5.N simulate NRCS trends with ocean surface wind direction and

266 speed. The blue line represents theCMOD5.N model results, and the red line represents the WRD-
267 CVV results, respectively.

268 4.2 C 波段 HH 极化

269 WindRAD 散射计 C 波段 HH 极化 GMF (简记为 WRD-CHH) 是在
270 CSARMOD 模型基础上对入射角进行了修正而建立的 (Mouche, 2015)。WRD-
271 CH 模型其表达式如下:

$$272 \sigma_{C,HH}^0 = c_2 \cdot \theta^2 + c_1 \cdot \theta + c_0 + \sigma_{SARMOD}^0 \quad (3)$$

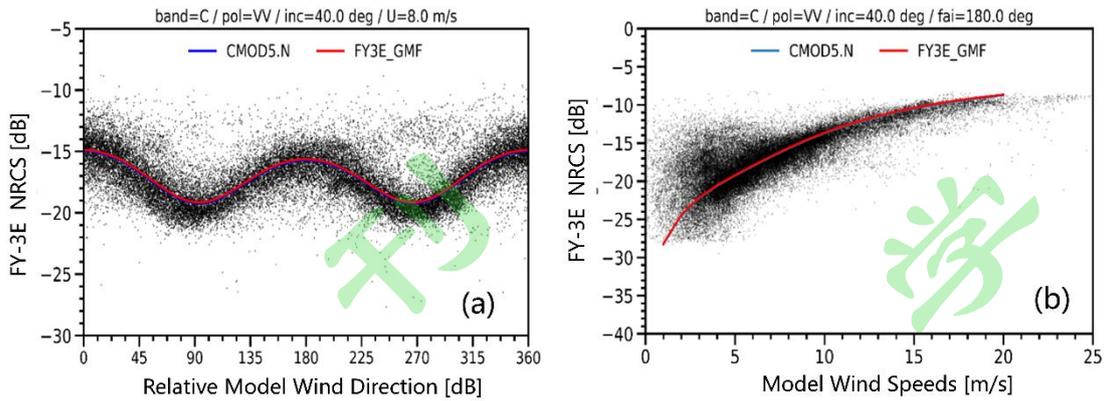
273 其中, $\sigma_{C,HH}^0$ 为 WindRAD 散射计 HH 极化 NRCS, θ 为入射角, σ_{SARMOD}^0 是基于
274 CSARMOD 模型得到的 NRCS, c_0 , c_1 和 c_2 为模型系数 (表 2)。

275 表 2 WRD-CHH GMF 模型系数

276 Table.2 Model coefficient of WRD-CHH GMF

系数	c_2	c_1	c_0
值	0.01427	- 1.081	21.3

277 图 3 (a) 展示了入射角为 40° , 海面风速为 8m/s 条件下, WRD-HH 和
278 CSARMOD 模式函数 HH 极化 NRCS 随海面风向的变化趋势。图中可以明显看
279 出, WRD-HH 和 CSARMOD 模拟的 NRCS 随着海面风向增加均呈现出明显的余
280 弦特征, 且变化规律具有较好的一致性。图 3 (b) 则展示了相同入射角条件下,
281 海面风向为 180° 时 WRD-HH 和 CSARMOD 函数模拟 HH 极化 NRCS 随风速变
282 化特征。可以明显看出, 随着海面风速的增加, 两种模式函数模拟的 NRCS 均
283 呈现非线性增加的趋势特征, 这也符合 WindRAD 观测 NRCS 随风速增加而增加
284 的整体特征。由此可见, WRD-HH 和 CSARMOD 模式函数仿真 NRCS 随海面风
285 速和风向的变化规律具有较好的一致性, 且整体上符合 WindRAD 观测 NRCS 随
286 风速、风向的变化趋势。



287

288 图 3 WRD-CHH 和 CSARMOD 模拟 NRCS 随海面风向和风速变化趋势。图中蓝线和红线分
289 别代表 CSARMOD 和 WRD-CHH 模式函数仿真结果。

290 Fig.3 WRD-CHH and CSARMOD simulate NRCS trends with ocean surface wind direction and
291 speed. The blue line represents the CSARMOD model results, and the red line represents the WRD-
292 CHH results, respectively.

293 4.3 Ku 波段 VV 和 HH 极化

294 WindRAD 散射计 Ku 波段共极化 (VV 和 HH 极化) GMF (简记为 WRD-
295 KCOP) 模式函数是在 NSCAT4 GMF 基础上对入射角进行了修正而建立的。
296 WRD-KCO

$$297 \sigma_{Ku,cop}^0 = c_2 \cdot \theta^2 + c_1 \cdot \theta + c_0 + \sigma_{NSCAT4}^0 \quad (4)$$

298 其中, $\sigma_{Ku,cop}^0$ 为 WindRAD 散射计共极化 NRCS, θ 为入射角, σ_{NSCAT}^0 是基于
299 NSCAT4 模型得到的 NRCS, c_0 , c_1 和 c_2 为模型系数 (表 3)。

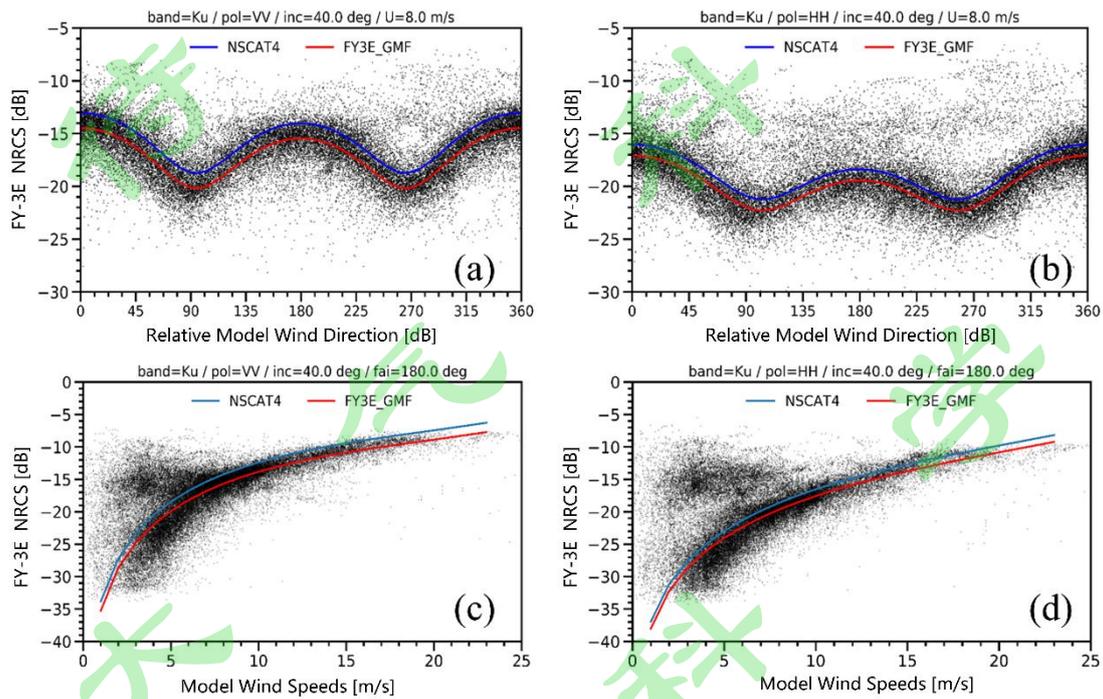
300 表 3 WRD-KCOP GMF 模型系数

301 Table. 3 Model coefficient of WRD-KCOP GMF

系数	C2	C1	C0
VV 极化	-0.04395	3.631	- 76.39
HH 极化	-0.03476	2.982	- 64.74

302 图 4a 和 b 分别展示了 WRD-KCO 和 NSCAT4 模式函数仿真的 VV 和 HH
303 极化 NRCS 随海面风向变化趋势。可以看出, 无论是 VV 还是 HH 极化, 在雷
304 达雷达入射角 40°、海面风速 8m/s 条件下, WRD-KCO 和 NSCAT4 模式函数
305 仿真的 NRCS 随海面风向的增加呈现明显的余弦特征, 且整体上符合

306 WindRAD 观测 NRCS 随海面风向的变化趋势。同样地，在雷达入射角 40° 、
 307 相对风向 180° 时，图 4c 和 d 分别展示了 WRD-KCO 和 NSCAT4 模式函数仿真的
 308 VV 和 HH 极化 NRCS 随海面风速的变化趋势。可以看出，无论是 VV 还是
 309 HH 极化，WRD-KCO 和 NSCAT4 模式函数仿真的 NRCS 均随海面风速的增加
 310 而呈现非线性增加特征，且整体上符合 WindRAD 观测 NRCS 随海面风速增加
 311 的特征。



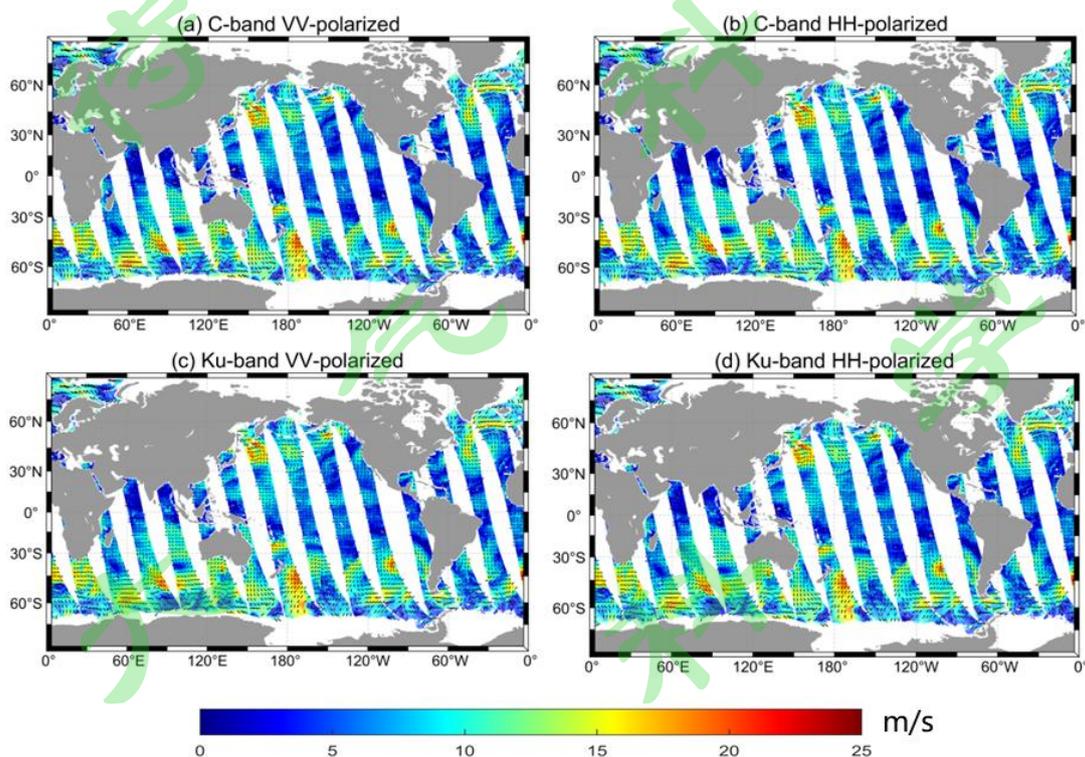
312
 313 图 4 WRD-KCO 和 NSCAT4 模式函数模拟 NRCS 随海面风速和风向的变化趋势。图中蓝线
 314 和红线分别代表 NSCAT4 和 WRD-KCO 模式函数仿真结果。

315 Fig.4 WRD-KCO and NSCAT4 model simulate NRCS trends with ocean surface wind direction and
 316 speed. The blue line represents the NSCAT4 model results, and the red line represents the WRD-
 317 KCO results, respectively.

318 4.4 反演案例

319 本节以 WindRAD 散射计 C 波段 VV 极化资料为例对全球海面风场进行反演
 320 演。首先对获取的 WindRAD 散射计 L1 级资料进行预处理，提取 C 波段 VV 极
 321 化 NRCS。根据 WindRAD 观测时间和范围，获取时空同步的 NCEP 再分析背景
 322 海面风速和风向数据。基于 WindRAD 散射计 VV 极化 NRCS、雷达入射角和极
 323 化参数信息，在 CMOD5.N GMF 基础上，利用 MLE 方法和 NCEP 模式背景风场
 324 可以求解唯一风矢量。基于同样方法，可以对 C 波段 HH 极化和 Ku 波段共极化

325 海面风进行反演。值得注意的是，由于 WindRAD 散射计空间分辨率较粗，在近
326 岸海域由于陆地回波效应导致风场无法反演，因此本文对近岸 25km 以内的数据
327 进行剔除，反演的海面风矢量数据仅在开阔洋面。此外，由于极地区域海冰的
328 存在，导致散射计无法获取有效的海面后向散射信号，因此在风场反演时剔除了
329 了极地区域的像元数据。图 5 所示为本文建立的 WindRAD 风场反演 GMF 提取
330 全球海面风场空间分布（升轨）。可以看出，基于本文建立的 GMF 可以从较好的
331 从 WindRAD L1 级观测资料中获取全球海面风矢量信息。



332

333 图 5 WindRAD 散射计 (a) C 波段 VV 极化, (b) C 波段 HH 极化, (c) Ku 波段 VV 极化
334 和 (d) Ku 波段 HH 极化全球海面风场反演。WindRAD 观测时间为 2022 年 4 月 27 日 00:33-
335 22:32 (升轨)

336 Fig.55 Global ocean wind fields retrieved from WindRAD scatterometer at (a) C-band VV-
337 polarized, (b) C-band HH-polarized ,(c) Ku-band VV-polarized and (d) Ku-band HH-polarized.
338 WindRAD observation duration 00:33-22:32 UTC on May 25, 2022 (Ascending).

339 5 WindRAD 散射计风场反演验证

340 本节利用同步的海洋浮标、NCEP 和 CSCAT 风场资料对 WindRAD 散射计
341 风场反演进行验证。通过计算 WindRAD 散射计反演风场和同步风场差异性的统
342 计参数来确定反演精度，统计参数主要包括偏差 (Bias) 和均方根误差

343 (RMSE)。用于验证的 WindRAD 风矢量资料全部来自开阔洋面，并剔除了近
344 岸 25 km 和极地区域像元数据。

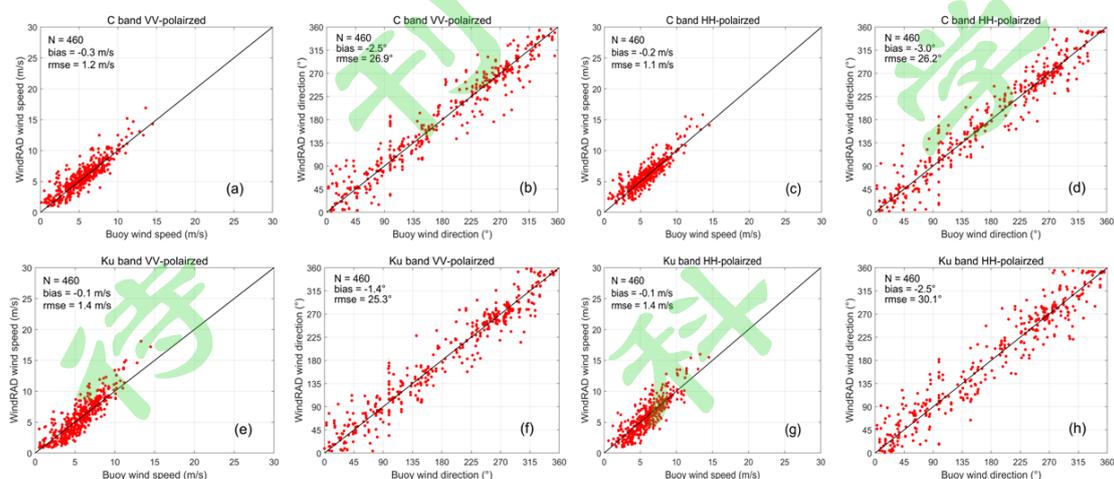
345 5.1 与海洋浮标资料对比

346 由于 WindRAD 散射计观测的是海面 10m 高度等效中性风，因此采用风廓
347 线公式将不同高度测风仪观测风速转化为海面 10 m 高处等效风速，并假设在这
348 一转换过程中海面风向不会发生变化 (Fang et al., 2022)。WindRAD 散射计空间
349 分辨率为 20km，因此在与浮标空间匹配中，选取空间上最接近浮标位置
350 (20km 以内) 的风矢量单元，且 WindRAD 和浮标观测时间不超过 30 分钟。

351 图 6a-d 所示为 WindRAD 散射计 C 波段 VV 和 HH 极化数据反演风场和浮标
352 风场散的对比。可以看出，通过本文建立的 GMF 反演的 WindRAD 风场与浮标
353 有着较好的一致性，浮标观测风速和 VV 极化资料反演风速 RMSE 分别为 1.2m/s
354 和 1.3m/s，优于 2m/s 的业务化散射计风速测量精度要求；风向 RMSE 分别为
355 26.9°和26.1°，略低于 20°业务化散射计风向测量精度要求。研究指出浮标观测
356 风向误差大约 2°，因此本研究中 WindRAD 反演风向与浮标的偏差可以忽略不计
357 (McPhaden et al., 1998)。前人利用海洋浮标对其他 C 波段散射计风场进行了验
358 证。例如，孙莎莎等 (2017) 利用山东近海 7 个浮标站测风资料，对 C 波段
359 ASCAT 散射计反演海面风进行了验证。结果显示两风速 RMSE 在 2.3~3.7m/s 之
360 间，风向 RMSE 在 65~85°之间。田光辉等 (2020) 利用浮标观测资料在我国南
361 海对 ASCAT 风场进行了验证，两者风速 RMSE 为 1.07m/s，风向 RMSE 为 46.05°。
362 由此可见，WindRAD 散射计 C 波段探测资料与 ASCAT 在风速反演上具有较高
363 的精度，但 ASCAT 反演风向精度要明显低于 WindRAD。

364 图 6e-h 展示了 Ku 波段 VV 和 HH 极化数据反演风场和浮标风场散的对比。
365 图中可以看出，Ku 波段 VV 和 HH 极化数据反演风速与浮标观测 RMSE 分别为
366 1.42m/s 和 1.44m/s，风向 RMSE 为 25.3°和 30.0°。以浮标测风资料为参考，前人
367 对其他国内外 Ku 波段散射计反演风场进行了验证。例如，印度 Oceansat-2 卫星
368 搭载的 OSCAT 散射计反演风速和风向 RMSE 分别为 1.54m/s 和 39.86° (Wu and
369 Chen, 2015)；我国 HY-2B 散射计风矢量产品演风速和风向 RMSE 分别为 1.22m/s
370 和 25.69° (Wang et al., 2019)；中法海洋卫星搭载的 CSCAT 散射计风速和风向
371 RMSE 分别为 1.75m/s 和 21.87°。接着本研究可以看出，WindRAD、OSCAT、

372 HY-2B 和 CSCAT 散射计在风速反演方面均具有良好的精度，优于 2m/s 的业务
373 化应用的风速精度要求；风向反演方面 4 种散射计反演精度均略低于 20°业务化
374 应用的风向精度要求。



375

376 图 6 WindRAD 散射计反演风场和浮标观测风场对比

377 Fig.6 Statistical comparison between WindRAD-retrieved ocean wind fields and *in-situ* buoys.

378 5.2 与 CSCAT 散射计资料对比

379 在没有浮标观测资料的海域利用同步的 CSCAT 散射计风矢量产品对
380 WindRAD 反演风场进行检验。表 4 所示为 WindRAD 与 CSCAT 海面风场的统计
381 性对比。就风速而言，CSCAT 风速与 WindRAD 在 C 波段 VV 极化、C 波段 HH
382 极化、Ku 波段 VV 极化和 Ku 波段 HH 极化反演风速均具有较好的一致性，
383 RMSE 分别为 1.37m/s，1.38m/s，1.56m/s 和 1.6m/s，优于 2m/s 的业务化应用的
384 风速精度要求；两者偏差分别为-0.3m/s，-0.3m/s，-0.1m/s 和-0.2m/s，表示
385 WindRAD 反演风速略高于 CSCAT 风速。在风向对比方面，WindRAD 和 CSCAT
386 风向 RMSE 分别为 22.4° (C 波段 VV 极化)、23.8°(C 波段 HH 极化)、22.9°(Ku
387 波段 VV 极化)和 25.9°(Ku 波段 HH 极化)，偏差分别为 0.1°、0.33°、0.7°和 0.58°。
388 略低于 20°的业务化应用的风速精度要求。Shen 等 (2023) 在利用 ASCAT 散射
389 计风场产品对 HY-2B 风场产品进行检验，结果显示在全球不同海域两者风速具
390 有较好的一致性，RMSE 在 0.9 ~ 1.98m/s 之间，而风向精度略低于 20°的业务化
391 应用要求，RMSE 在 15.19 ~ 23.78° 之间。

392 值得注意的是，星载散射计并非直接对海面风场进行探测，而是通过海面
393 后向散射系数结合相应的 GMF 反演得出的。前文提到利用 MLE 方法可以反演

394 得出多个风矢量，这些风矢量模糊解中风速相差不大，但风向相差较大。散射
 395 计风向模糊解去除一直是学界研究的难点和热点（Yang et al., 2019; Liu et al.,
 396 2020; 林文明等, 2021; 夏雪宁, 2023）。目前业务化运行的散射计使用了不同的方
 397 式进行模糊解去除。例如，ASCAT 和 CSCAT 散射计采用二维变分法（2DVAR）
 398 进行模糊风向去除；HY-2B 散射计资料则采用了圆中数滤波法对模糊风向进行
 399 去除。由此可见，业务化散射计使用的不同风场反演算法造成产品本身具有不
 400 确定性，这可能是造成星星交叉对比风场验证误差的一个主要来源。

401 表 4 WindRAD 反演风场和 CSCAT 风场产品统计性对比

402 Table.4 Summary of statistics between WindRAD and CSCAT wind data

波段	极化方式	数量	风速 (m/s)		风向 (°)	
			Bias	RMSE	Bias	RMSE
C	VV	94928	-0.3	1.37	0.1	22.4
	HH	92300	-0.3	1.38	0.33	23.8
Ku	VV	96641	-0.1	1.56	0.7	22.9
	HH	93768	-0.2	1.6	0.58	25.9

403

404 图 7 展示了 WindRAD 与 CSCAT 风速的 RMSE 在不同风速区域的变化。由
 405 于 25m/s 以上样本量较少，因此仅在 0~25m/s 风速段内进行比较，风速区间设置
 406 为 2m/s。图中可以看出，在 0~25m/s 风速区间内，WindRAD 散射计在不同波段
 407 和极化方式下反演风速均具有良好的精度，RMSE 均小于 2m/s 的业务化精度要
 408 求。在全风速段条件下，Ku 波段 HH 极化反演风速精度略低于其他 3 种，RMSE
 409 在 22~24m/s 风速区间达到最大，为 1.71m/s。在中低风速条件下 (<20m/s)，C
 410 波段 VV 极化反演风速明显优于其他 3 种，在 6~8m/s 风速区间 RMSE 达到最小，
 411 为 1.22m/s。C 波段 VV/HH 极化和 Ku 波段 HH 极化反演风速 RMSE 特征较为一
 412 致，即中低风速条件下风速反演精度明显优于高风速，尤其在 22-24m/s 风速区
 413 间。Ku 波段 VV 极化在高风速条件下反演精度要优于中低风速条件。

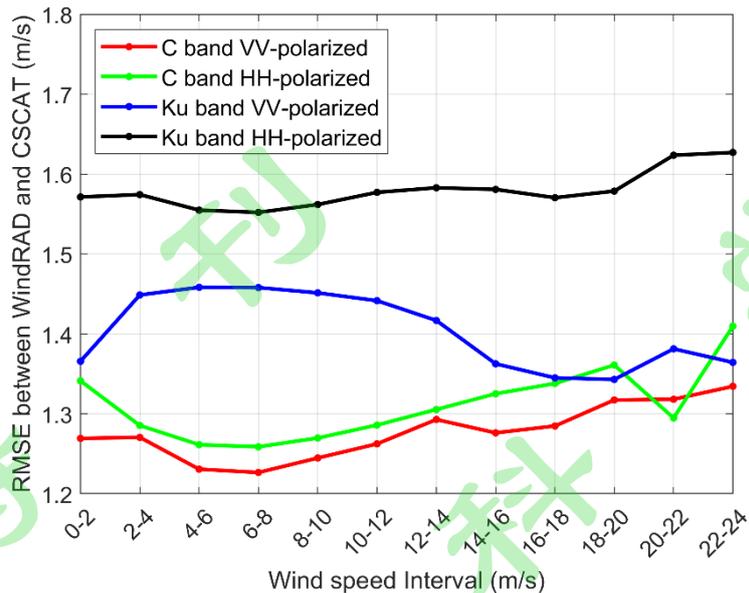


图 7 WindRAD 和 CSCAT 风速 RMSE 在不同风速区间的变化

Fig.7 RMSE for wind speed of WindRAD and CSCAT in different wind interval

5.3 与 NCEP 模式资料对比

NCEP 模式资料提供的是 U（径向）和 V（纬向）方向风速分量，因此首先要将风速分量合成海面风矢量单元，并与 WindRAD 反演风场对比。表 5 所示为 WindRAD 与 NCEP 模式风场的统计性对比。在风速对比方面，WindRAD C 波段反演风速要整体优于 Ku 波段，C 波段 VV 和 HH 极化风速 RMSE 分别为 1.97 m/s，优于 2 m/s 的业务化应用的风速精度要求；而 Ku 波段 VV 和 HH 极化风速 RMSE 分别为 2.23 和 2.12 m/s，略低于业务化应用的风速精度要求。Wang 等（2020）利用 ERA5 模式风速对 ASCAT、OSCAT 和 HY-2A/B 散射计风速进行验证，结果表明 ERA5 风速与 3 种散射计反演风速均方根误差介于 1.81~2.14m/s，与 WindRAD 风速反演精度基本一致。

在风向比较方面，WindRAD 和 NCEP 模式风向 RMSE 分别为 22.3° (C 波段 VV 极化)、24.6°(C 波段 HH 极化)、23.6°(Ku 波段 VV 极化)和 27.1 °(Ku 波段 HH 极化)，偏差分别为 0.26°、0.14°、0.41°和 0.32°。以 NCEP 模式风向参考，WindRAD 反演风向略低于 20°的业务化应用的风速精度要求。Yang 等（2014）利用 ECMWF 模式风向对我国 HY-2A 散射计反演风向进行验证，结果表明模式风向与 HY-2A 风向的 RMSE 为 38.56°。随后，陈克海等（2020）利用 ECMWF 模式风向对 HY-2B 散射计反演风向进行检验，结果表明 ECMWF 与 HY-2B 在全

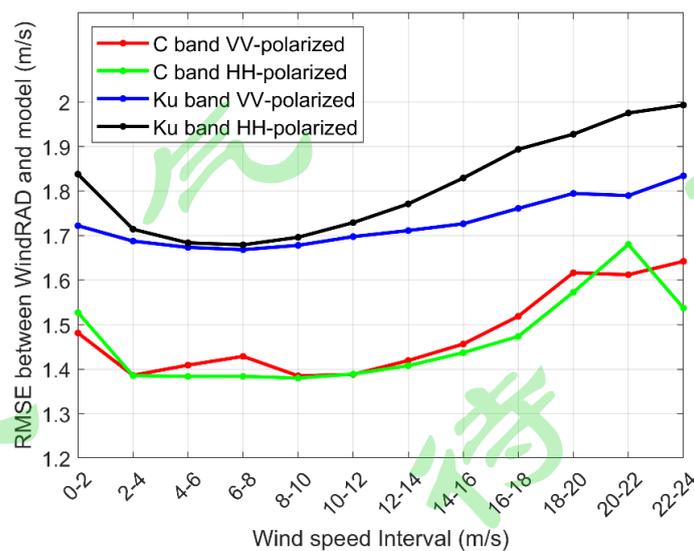
435 风速段（0~24m/s）条件下风向 RMSE 为 32.3°。通过对比前人研究发现，以模
 436 式风向为参考，散射计反演风向精度还有待进一步提高，这与本研究的研究结
 437 果基本一致。

438 表 5 WindRAD 反演风场和 NCEP 模式风场产品统计性对比

439 Table.5 Summary of statistics between WindRAD and NCEP model wind data during

波段	极化方式	数量	风速 (m/s)		风向 (°)	
			Bias	RMSE	Bias	RMSE
C	VV	48532	0.26	1.97	-0.8	22.3
	HH	42615	0.14	1.87	-0.6	24.6
Ku	VV	46398	0.41	2.23	-1.2	23.6
	HH	42735	0.32	2.12	-1.1	27.1

440 图 8 所示为 WindRAD 与 NCEP 模式风速的 RMSE 在不同风速区域的变化。
 441 以 NCEP 模式风速为参考，WindRAD C 波段风速反演精度要明显优于 Ku 波段。
 442 其中 C 波段 VV 极化反演风速整体较好，与 NCEP 模式风速 RMSE 为 1.46 m/s。
 443 4 种反演风速 RMSE 在 0~25m/s 风速区间内均表现为先下降再上升的趋势，即在
 444 4~16m/s 区间风速反演精度要明显高于 0~4 m/s 和 16~24 m/s 区间。陈克海等
 445 (2020) 等通过对比 ECMWF 和 HY-2B 风速发现，0~4m/s 风速区间两者 RMSE
 446 为 2.01m/s，而 4~24m/s 两者 RMSE 为 1.58m/s，表明在 4m/s 以下低风速区间散
 447 射计风速反演精度较低，这与本文研究结果非常相似。



448 图 8 WindRAD 和 NCEP 模式风速 RMSE 在不同风速区间的变化

449 Fig.8 RMSE for wind speed of WindRAD and NCEP model in different wind interval

450

451

452 5 总结

453 2021年7月发射的FY-3E星是中国第二代极轨气象卫星的第五颗卫星，也
454 是世界首颗民用晨昏轨道气象卫星。FY-3E搭载的WindRAD双频散射计具备全
455 球海表面风场探测的能力。本文首先基于大量WindRAD散射计L1级观测资料
456 研究了NRCS和海面风场的非线性关系，并分别建立适用于C和Ku波段VV/HH
457 极化风场反演GMF。随后利用建立的GMF对WindRAD风场进行反演，并利用
458 时空匹配的浮标、CSCAT和NCEP风场资料进行检验。得到结论如下：

459 (1) 基于WindDAR散射计L1级观测资料建立的C波段VV极化、C波段
460 HH极化、Ku波段VV极化和Ku波段HH极化风场反演GMF函数可以有效提
461 取可靠的全球海面风场信息。

462 (2) 与海洋浮标观测资料相比，WindRAD反演风速与浮标风速偏差在
463 0.11~0.26m/s之间，RMSE在1.13~1.44 m/s之间；风向偏差1.36°~3.03°之间，
464 RMSE在25.3°~30.0°之间。这表明WindRAD在反演风速方面具有较高的精度，
465 RMSE小于仪器载荷设计需求的2m/s；反演风向RMSE略高于仪器载荷设计需
466 求的20°。

467 (3) 与中法海洋卫星搭载的CSCAT散射风场产品相比，两者风速RMSE
468 在1.37~1.6m/s之间，且在风速超过20m/s时，WindRAD散射计Ku波段VV极
469 化和HH极化风速明显高于CSCAT；两者风向偏差在0.1°~0.7°之间，RMSE在
470 22°~26°之间，表明WindRAS散射计和CSCAT散射计探测风场具有较好的一致
471 性。

472 (4) 与NCEP模式风场资料相比，两者风速RMSE在1.87~2.23m/s之间，
473 风向RMSE在22.3°~27.1°之间。当风速超过22m/s时，WindRAD散射计C波段
474 VV和HH极化反演风速低于NCEP模式资料，而Ku波段VV和HH极化反演
475 风速高于NCEP模式资料。

476 整体而言，本项目基于WindRAD散射计L1级观测资料建立的风场反演模
477 式函数可以有效提取海面风速和风向信息，与浮标观测、CSCAT散射计和
478 NCEP模式风场均有良好的一致性。此外，相较于C波段散射计观测资料，Ku
479 波段海面雷达后向散射信号易受降雨影响，从而导致风场反演误差增加。本文

480 侧重于 WindRAD 散射计业务风场反演模型构建和验证，因此根据质量控制标识
481 筛除受降雨影响等质量较差的数据。WindRAD 散射计可以同时提供 C 和 Ku 波
482 段观测资料，利用 C 波段基本不受降雨衰减影响的特征，构建包含降雨因子的
483 新型 Ku 波段风场反演 GMF，进而提升 Ku 波段风场反演精度将是下一步研究重
484 点。

参考文献 (References)

- 485
- 486
- 487 Carvalho D, Rocha A, Gomez-Gesteira M, et al. 2017. Offshore winds and wind energy
488 production estimates derived from ASCAT, OSCAT, numerical weather prediction
489 models and buoys - A comparative study for the Iberian Peninsula Atlantic coast[J].
490 Renewable Energy, 102: 433-444. doi: [https://doi.org/10.1016/j.renene.-](https://doi.org/10.1016/j.renene.2016.10.063)
491 2016.10.063.
- 492 Fang H, Perrie W, Fan G, et al.2022. High-resolution sea surface wind speeds of Super
493 Typhoon Lekima (2019) retrieved by Gaofen-3 SAR[J]. Frontiers of Earth Science,
494 16(1): 90-98. doi: 10.1007/s11707-021-0887-8
- 495 Fang H, Xie T, Perrie W, et al. 2018. Comparison of C-band quad-polarization synthetic
496 aperture radar wind retrieval models[J]. Remote Sensing, 10(9): 1448. doi:
497 10.3390/rs10091448
- 498 He Y, Fang H, Li X, et al.2023. Assessment of Spatiotemporal Variations in Wind Field
499 Measurements by the Chinese FengYun-3E Wind Radar Scatterometer[J]. IEEE
500 Access, 11, 128224-128234. doi: 10.1109/ACCESS.2023.3331761
- 501 Hersbach H. 2010. Comparison of C-Band Scatterometer CMOD5.N Equivalent
502 Neutral Winds with ECMWF[J]. J. Atmos. Oceanic Technol., 27(4): 721-736. doi:
503 10.1175/2009JTECHO698.1
- 504 Johny C J, Singh S K, Prasad V S. 2019. Validation and Impact of SCATSAT-1
505 Scatterometer Winds [J]. P Pure and Applied Geophysics., 176(6): 2659-2678.
506 doi:10.1007/s00024-019-02096-5.
- 507 Li Z, Verhoef A, Stoffelen A, et al. 2023. First Results from the WindRAD
508 Scatterometer on Board FY-3E: Data Analysis, Calibration and Wind Retrieval
509 Evaluation. Remote Sen., 15(8), 2087, doi: 10.3390/rs15082087
- 510 Lin W, Portabella M, Stoffelen A, et al. 2017. Toward an improved wind inversion
511 algorithm for RapidScat[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth

512 Observations and Remote Sensing, 10(5): 2156-2164. doi: r
513 10.1109/JSTARS.2016.2616889

514 Liu L, Jin A, Jin A, et al. 2023. FY-3E Wind Scatterometer Prelaunch and
515 Commissioning Performance Verification[J]. IEEE Transactions On Geoscience
516 And Remote Sensing, 61:5106912. doi: 10.1109/TGRS.2023.3293809

517 Masuko H, Arai K, Ebuchi N, et al. 2000. Evaluation of Vector Winds Observed by
518 NSCAT in the Seas around Japan[J]. J. Oceanogr., 56(5): 495-505.
519 doi:10.1023/A:1011192725800.

520 Mcphaden M J, Busalacchi A J, Cheney R, et al. 1998. The Tropical Ocean-Global
521 Atmosphere observing system: A decade of progress[J]. J Geophys. Res-Oceans,
522 103(C7): 14169-14240. doi: https://doi.org/10.1029/97-JC02906.

523 Mou X, Lin W, He Y. 2023. Towards a consistent wind data record for the cfosat
524 scatterometer[J]. Remote Sensing, 15(8): 2081. doi: 10.3390/rs15082081

525 Mouche A, Chapron B. 2015. Global C-Band Envisat, RADARSAT-2 and Sentinel-1
526 SAR measurements in copolarization and cross-polarization[J]. J. Geophys. Res-
527 =Oceans, 120(11): 7195-7207. doi: 10.1002/2015J-C011149.

528 Shang J, Wang Z, Dou F, et al. 2023. Preliminary performance of the WindRAD
529 scatterometer onboard the FY-3E meteorological satellite[J]. IEEE Transactions
530 on Geoscience and Remote Sensing, 62: 5100813. doi:
531 10.1109/TGRS.2023.3337098

532 Stoffelen A, Verspeek J, Vogelzang J, et al. 2017. The CMOD7 Geophysical Model
533 Function for ASCAT and ERS Wind Retrievals[J]. IEEE J. Sel. Top. Appl. Earth
534 Obs. Remote Sens., 10(5): 2123-2134. doi:10.1109/JSTAR-S.2017.2681806

535 Wang Z, Stoffelen A, Zhang B, et al. 2019. Inconsistencies in scatterometer wind
536 products based on ASCAT and OSCAT-2 collocations[J]. Remote Sens. Environ.,
537 225: 207-216. doi: 10.1016/j.rse.2019.03.005

538 Wang Z, Stoffelen A, Zou J, et al. 2020. Validation of new sea surface wind products
539 from scatterometers onboard the HY-2B and MetOp-C satellites[J]. IEEE
540 Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 58(6): 4387-4394. doi:
541 10.1109/TGRS.2019.2963690

542 Wu, Q, Chen, G . 2015. Validation and intercomparison of HY-2A/MetOp-A/Oceansat-
543 2 scatterometer wind products[J]. Chinese Journal of Oceanology and Limnology,
544 33(5): 1181-1190. doi: 10.1007/s00343-015-4160-4

545 Yang S, Mu B, Shi H, et al. 2023. Validation and accuracy analysis of wind products

546 from scatterometer onboard the HY-2B satellite[J]. *Acta Oceanologica Sinica*,
547 42(2): 74-82. doi: 10.1007/s13131-022-2030-4

548 Yang X, Liu G, Li Z, et al. 2014. Preliminary validation of ocean surface vector winds
549 estimated from China's HY-2A scatterometer [J]. *International journal of remote*
550 *sensing*, 35(11-12): 4532-4543. doi: 10.1080/01431161.2014.916049

551 Zhang B, Mouche A, Lu Y, et al. 2019. A Geophysical Model Function for Wind Speed
552 Retrieval from C-Band HH-Polarized Synthetic Aperture Radar[J]. *IEEE Geosci.*
553 *Remote. S.*, 16(10): 1521-1525. doi:10.1109/LGRS.2019.2905578.

554 Zhang P, Hu X, Lu Q, et al. 2022. FY-3E: The First Operational Meteorological Satellite
555 Mission in an Early Morning Orbit[J]. *Advances In Atmospheric Sciences.*,
556 39(1):1-8. doi:10.1007/s00376-021-1304-7

557 Zhao K, Zhao C, Chen G. 2021. Evaluation of Chinese Scatterometer Ocean Surface
558 Wind Data: Preliminary Analysis[J]. *Earth Space Sci.*, 8(7): e2020EA00-1482.
559 doi:10.1029/2020EA001482.

560 安大伟,谷松岩,杨忠东,等. 2012. 散射计海面非气旋风场块状模糊去除方法[J]. *应*
561 *用气象学报*, 23(04):485-492. An Dwei, Gu Songyan, Yang Zhongdong, et al.
562 2012. Ocean surface non-cyclone wind block ambiguity removal algorithm for
563 scatterometer[J]. *Journal of Applied Meteorological Science(in Chinese)*,
564 23(04):485-492.

565 陈克海, 解学通, 陈晓翔, 等.2006 一种修正的 Sea Winds 散射计圆中数滤波法[J].
566 *热带海洋学报*, 5: 31-35. Chen Kehai, Xie Xuetong, Chen Xiaoxiang, et al., 2006.
567 A modified circle median filter approach for sea winds scatterometer[J]. *Journal*
568 *of Tropical Oceanography (in Chinese)*, 5: 31-35.doi: 10.3969/j.issn.1009-
569 5470.2006.05.006

570 窦芳丽, 卢乃锰, 谷松岩. 2012. 星载双频风场雷达热带气旋降雨区测风模拟[J].*应*
571 *用气象学报*, 3(04): 467-477. Dou Fangli, Lu Naimeng, Gu Yansong. 2012 Wind
572 Retrieval Simulation in Tropical Cyclone for FY-3E Dual-Frequency WFR. 3(04):
573 467-477.

574 方贺, 杨劲松, 樊高峰, 等. 2022. 组合表面 Bragg 散射模型共极化 SAR 海表面风速
575 反演[J]. *遥感学报*, 26(06):1274-1287. Fang He, Yang Jingsong, Fan Gaofeng, et
576 al. 2022. Ocean surface wind speed retrieve from copolarized SAR using
577 composite surface bragg scattering model. *National Remote Sensing Bulletin. (in*
578 *Chinese)*, 26(06):1274-1287. doi: 10.11834/jrs.20210143

579 冯倩,彭海龙,林明森. 2006. 基于混合密度网络的 NSCAT 散射计海面风场反演[J].
580 海洋学报, 28(5):44-48. Feng Qian, Peng Hailong, Lin Ming. 2006. Mixture
581 density network based sea surface wind field retrieval from NSCAT scatterometer
582 data [J]. Acta Oceanol. Sin. (in Chinese), 28(5):44-48. doi:
583 10.3321/j.issn:02534193.2006.-05.005.

584 解学通,方裕,陈克海,等. 2006. 一种海面风场反演的快速风矢量搜索算法[J].遥感
585 学报, 2 : 236-241. Xie Xuotong, Fang Yu, Chen Kehai, et al., 2006. A fast wind
586 vector search algorithm for ocean surface wind retrieval[J]. Journal of Remote
587 Sensing (in Chinese), 2: 236-241. doi: 10.3321/j.issn:1007-4619.2006.02.013

588 林文明,郎姝燕,赵晓康,等. 2021. 中法海洋卫星散射计近海岸海面风场反演研究
589 [J]. 海洋学报, 43(10): 115-123. Lin Wenming, Lang Shuyan, Zhao Xiaokang,
590 et al. 2021. Coastal wind retrieval from the China-France oceanography satellite
591 scatterometer [J]. Haiyang Xuebao(in Chinese), 43(10): 115–123, doi:
592 10.12284/hyxb2021157

593 吕思睿,林文明,邹巨洪,等. 2023. 多源卫星遥感海面风速误差分析和交叉标定[J].
594 海洋学报, 45(5):118-128. Lü Sirui, Lin Wenming, Zou Juhong, et al. 2023. Error
595 quantification and cross calibration of sea surface wind speeds from multiple
596 remote sensing satellites [J]. Haiyang Xuebao(in Chinese), 45(5): 118–128,
597 doi:10.12284/hyxb2023066

598 孙莎莎,孙艺,郭俊建,等. 2017. ASCAT 近岸风在山东沿海的适用性分析 [J]
599 海洋气象学报,37(2) : 90—95. Sun Shasha, Sun Yi, Guo Junjian, et al. 2017.
600 Validation of ASCAT sea surface wind data in Shandong coast sea [J]. Journal
601 of Marine Meteorology (in Chinese), 37(2), 90—95.doi:10.19513
602 /j.cnki.issn2096-3599. 2017.02.011.

603 唐焕丽,姚琴,吕晓莹,等. 2020. 多源卫星融合的广东海域海面风场特征[J].遥感信
604 息, 35(01):117-122. Tang Huanli, Yao Qin, Lv Xiaoying, et al.
605 2020.Characteristics of sea surface wind field in Guangdong sea area with multi-
606 source satellite fusion [J].Remote sensing information (in Chinese),, 35 (01) : 117-
607 122.

608 田光辉,刘少军,李伟光等. 2020. ASCAT 风场在南海的适用性分析[J]. 广东气
609 象, 42(5) ,39 - 43.Tian Guanghui, Liu Shaojun, Li weiguang, et al. 2020. Analysis

610 of the Applicability of ASCAT-derived Wind Field in the South China Sea[J].
611 Guangdong Meteorology, 42(5) ,39 -43.

612 王东良, 姚小海, 孟雷, 等. 2014. 海洋二号卫星散射计风场产品真实性检验及分析
613 [J]. 海洋预报, 31(4):47-53. WANG Dongliang, YAO Xiaohai, MENG Lei, et al.
614 2014. Validation and analysis of wind field products of HY-2[J]. Marine Forecasts
615 (in Chinese), 31(4):47-53. doi: 10.11737/j.issn.1003-0239.2014.04.007

616 夏雪宁.2023. 基于深度学习的 HY-2B 微波散射计海面风场反演研究[D] .广州大
617 学硕士论, 2023. Xia Xuening. 2023. A study of sea surface wind field retrieval
618 for the HY-2B scatterometer based on deep learning[D]. Master degree thesis of
619 Gangzhou University. doi: 10.27040/d.cnki.ggzdu.2023.000445.

620 杨典, 宋清涛, 蒋兴伟, 等. 2019. 基于散射计风场数据的台风强度诊断方法——以
621 海洋二号卫星数据为例[J]. 海洋学报 ,41(1):151-159. Yang Dian, Song Qingtao,
622 Jiang Xingwei, et al. A typhoon intensity estimation technique based on
623 scatterometer winds observed from the HY-2 satellite[J]. Haiyang Xuebao(in
624 Chinese), 41(1):151-159. doi: 10.3-969/j.issn.0253-4193.2019.01.016.

625 赵现斌, 严卫, 孔毅, 等. 2013. 机载 C 波段全极化 SAR 海面风矢量反演理论研究
626 及实验验证[J]. 物理学报, 62(13):138402-1-138402-12. Zhao XianBin, Yan Wei,
627 Kong Yi, et al. Theoretical research and experimental verification for ocean
628 surface wind vector retrieval from airborne C-band fully polarimetric SAR [J].
629 Acs Phys. Sin (in Chinese), 62(13): 138402-1-138402-12.
630 doi:10.7498/aps.62.138-402

631

632

633

634

635

636

637

638