

Doi: 10.11840/j.issn.1001-6392.2021.05.005

# ERA5 风场与 NCEP 风场在黄海、东海波浪模拟的适用性对比研究

谭海燕, 邵珠晓, 梁丙臣, 高慧君

(中国海洋大学 工程学院, 山东 青岛 266100)

**摘 要:** 全球再分析数据集已成为研究气候规律和数值模拟的重要工具, 其中海面风场数据集是波浪模拟的重要资料, 风场资料的准确性是影响海浪要素模拟结果的关键因素, 不同的海面风场资料在中国各个海域的适用性具有不确定性。利用黄海、东海海域的 12 个观测点, 选取了 2006—2018 年间的 11 场台风进行对比, 验证了 ERA5 和 NCEP 风场在台风期间与常海况下的风速; 模拟了中国近海海域的波浪场, 与范围内 15 个测站的有效波高及谱峰周期进行了对比验证; 分析了 ERA5 和 NCEP 风场在黄海、东海波浪模拟的适用性。主要结果如下: (1) 风场质量是造成台风浪模拟误差的主要原因之一, 研究区域内 ERA5 风场在台风期间的风速大小与实测资料具有较高一致性; 长江口邻近海域内, ERA5 风速相关性在 0.8 以上; 江苏海域内, ERA5 风速相关性在 0.9 以上; (2) 分别采用 ERA5 和 NCEP 再分析风场资料作为驱动风场输入 Mike21 SW 模型, 较好地模拟了黄海、东海海域在不同海况下的波浪变化情况; 在江苏海域, ERA5 资料模拟波高值与浮标测站观测波高资料相关性超过 0.85, 平均绝对误差不超过 0.2 m; (3) 两种风场在江苏海域、长江口及其邻海的适用性比黄海北部更好。结果表明, NCEP 和 ERA5 在中国近海海域波浪模拟的适用性有差异, 在江苏海域、长江口及其邻海, 基于 ERA5 的数值模拟结果相对于 NCEP 模拟结果精度提高。

**关键词:** 东海; 黄海; 再分析资料; 波高模拟; 适用性分析

中图分类号: P732

文献标识码: A

文章编号: 1001-6392(2021)05-0524-17

## A comparative study on the applicability of ERA5 wind and NCEP wind for wave simulation in the Huanghai Sea and East China Sea

TAN Haiyan, SHAO Zhuxiao, LIANG Bingchen, GAO Huijun

(College of Engineering, Ocean University of China, Qingdao 266100, China)

**Abstract:** The global reanalysis dataset has become an important tool for the numerical studying of global climate. The sea surface wind dataset is important to wave simulations, and the accuracy of the wind is key to the simulation results of wave. The applicability of different sea surface wind data in various seas of China is uncertain. In this paper, 11 typhoons between 2006 and 2018 were taken for comparison using 12 observation stations in the Huanghai Sea and East China Sea, and the ERA5 and NCEP wind dataset were verified during typhoons and under normal sea conditions; the wave in offshore waters were simulated, and the significant wave heights and spectral peak periods of 15 stations in the range were compared and verified; the applicability of ERA5 and NCEP wind dataset in the Huanghai Sea and East China Sea was analyzed. The main results are as follows: (1) the wind dataset quality is one of the main causes of the error in typhoon wave simulation. The wind speed magnitude of ERA5 wind dataset in the study area during the typhoon is in high agreement with the measured data, with the correlation of ERA5 wind speed above 0.8 in the Changjiang Estuary waters and above 0.9 in the sea area of Jiangsu. (2) ERA5 and NCEP reanalysis wind data are input to Mike21's SW model respectively; the correlation between the simulated wave heights of ERA5 data and the observed wave heights of buoy stations is more than 0.85, and the average absolute error

收稿日期: 2021-02-06; 修订日期: 2021-06-04

基金项目: 国家自然科学基金 (51739010)

作者简介: 谭海燕 (1996—), 硕士研究生, 主要从事河口与海岸水动力研究。电子邮箱: Aimeethy@163.com

通信作者: 梁丙臣, 博士, 教授, 主要从事河口、海岸海洋环境理论及数值研究。电子邮箱: bingchen@ouc.edu.cn

<http://hytb.nmdis.org.cn>

does not exceed 0.2m in Jiangsu sea. (3) The simulated wave characteristics are influenced by the sea area, and the simulation of the two kinds of wind data in Jiangsu waters and the Changjiang Estuary is better than that in the northern Huanghai Sea. The results show that there is a difference in the applicability of NCEP and ERA5 in Chinese offshore waters, the numerical simulation results based on ERA5 are more accurate than those based on NCEP.

**Keywords:** East China Sea; Huanghai Sea; reanalysis data; wave simulation; applicability analysis

海洋表层风吹过海面时,会把能量传递给海水,驱动海水运动,从海面微尺度波浪到大尺度海洋环流,几乎所有的海洋动力过程都受到海洋表面风的影响。我国海域毗邻西太平洋,西北太平洋上会生成许多名为台风的猛烈风暴,台风期间极易引发极端波浪变化,造成灾害性海浪(陶爱峰等,2018)。中国海域的海表风场季节性变化明显,黄海南部以及东海海域在每年的6—9月会频繁遭受台风袭击,东海、南海是6级以上大风高频中心分布最集中的区域(郑崇伟,2011)。东海、黄海灾害性波浪频繁出现(闻斌等,2008),台风浪与寒潮浪是比例最高的两种(许富祥,1996)。同时,中国东海、黄海沿岸海域受到涌浪场的影响也非常显著(Zhang et al, 2002),风浪和涌浪均可组成台风浪(陈橙等,2017)。海浪蕴藏着巨大的能量,在高水位和强风条件下,波浪对近岸地形的影响很大(张长宽等,1999),波浪力对海岸及近岸建筑物的破坏在暴风浪时最为显著。模拟波浪特征对工程建设意义重大,极端天气下的波浪要素是影响海洋工程建设的重要指标(徐佳丽等,2019)。风场的准确性直接影响波浪模拟结果的可靠性,因此选择合适的海洋表层风场资料对于波浪数值模拟至关重要。

海上直接观测条件严峻复杂,造价颇高,难以获得完整的大范围资料,再分析资料成了波浪数值模拟不可替代的研究资料。截至目前,国内外各种数据产品并存,在每个地方的适用性尚不确定,这使得选择适用于不同地区的数据产品变得复杂。国内外学者对不同类型的再分析数据都开展过很多质量检验工作,主要包括分析不同资料模式在分辨率上的差异(邓小花等,2010),评估数据集风向矢量场之间的差异以及这些差异对海洋建模的潜在影响(Dmitry et al, 2017)。许多学者对于广泛使用的NCEP CFSR/CFSV2与精度较高的ERA-Interim风场数据地区适用性评估做过很多研究。在黄海、渤海,对于近海站点在6级以上大风时,NCEP

CFSR的评估更加可靠(范苏丹等,2017)。在东海和南海,ERA-Interim风场对台风中心附近风速的预测低于实测风速(Shao et al, 2018)。在台湾海峡,东北季风影响期和风速较大时(10 m/s以上),NCEP CFSV2资料的风速可信度较高,比ERA-Interim数据更接近观测资料(旷芳芳等,2015)。在北半球,不同再分析资料在热带气旋期间的适用性对比表明,ERA-Interim的拟合结果比NCEP CFSR更好,两者也存在强度差异(Hodges et al, 2011)。

NCEP CFSR/CFSV2是美国环境预报中心(National Centers for Environmental Prediction,简称NCEP)延续至今应用较为广泛的数据;ERA5是欧洲中期天气预报中心(European Centre for Medium-Range Weather Forecasts,简称ECMWF)推出的新一代数据,相对于ERA-Interim质量更高,水平分辨率提高到31 km(ERA-Interim的水平分辨率约为80 km,时间分辨率为6 h)。

目前也有一些研究对ERA5风场资料进行了对比分析与评估。ERA5的表面风场和波浪数据在印度洋表面与浮标数据吻合较好(Naseef et al, 2020),在大西洋的气旋路径与强度对比研究中,NCEP CFSR/CFSV2数据集呈现出比ERA5更强烈的气旋(Grancianinov et al, 2020)。在中国黄海、渤海、东海海域,初步判定ERA5风场输入SWAN模拟近岸海浪的结果比JRA-55、CCMPv2、MERRA-2、NCEP/DOE和FNL资料作为驱动风场模拟结果更好(Wu et al, 2020),但是观测站点分布在研究海域的南北两端,对于研究江苏海域与长江口海域的波浪模拟不完全具有代表性。对于ERA5风场资料与NCEP CFSR/CFSV2风场资料在东海、黄海海域极端天气下的波浪模拟较为深入的对比研究还不多,对于该海域的波浪模拟适用性对比研究较少。

本文利用黄海和东海海域内的12个浮标与平台观测站点,选取了计算范围内站点附近经过的

11 场台风作为研究案例,探讨了目前常用的 NCEP CFSR/CFSV2 与 ERA5 两种资料在东海、黄海区域的可靠性,并模拟台风经过期间的波浪场和常海况下的波浪变化,对比分析 NCEP CFSR/CFSV2 与 ERA5 这两种风场资料在东海、黄海海域波浪模拟研究中的适用性。

## 1 风场信息

ERA5 资料是欧洲中期天气预报中心 (ECMWF) 的哥白尼气候变化服务中心 (C3S) 制作的最新一代气候再分析资料,是对 1979 年 1 月至今的全球气候进行的第五代大气再分析。2016 年 11 月,ECMWF 推出了其第五代再分析产品 (ERA5) 的两个月预览版数据,按照当时规划,到 2020 年夏末,ERA5 将实现从 1950 年至今的历史时期覆盖 (Hans et al, 2020)。ERA5 利用先进的建模和数据同化系统,将大量的历史观测数据结合到全球估算中,提供许多大气、陆地表面和海洋状态参数的每小时数据。ERA5 的前身 ERA-interim 已被广泛接受,ERA5 将取代目前已有 10 年历史的 ERA-Interim 再分析资料。

NCEP CFSR (Climate Forecast System Reanalysis) 再分析数据是美国国家环境预报中心 (NCEP) 利用全球预报系统 (Global Forecast System) 反演的全球再分析数据,CFS 模型是 NCEP 用于季节性预测的第一个准全球、完全耦合的大气-海洋-陆地预报模型。CFSR 再分析资料使用了 GEOS-5 (Goddard Earth Observing System) 大气模式与资料

同化系统,CFSR 于 2004 年 8 月投入运行 (Saha et al, 2014)。2011 年 3 月,NCEP 气候预报系统第二版 (CFSV2) 投入运行,CFSV2 (Climate Forecast System Version 2) 是 CFSR 资料进一步的延续产品,是 CFSR 的扩展,对数据同化和预测部分的几乎所有方面进行了升级,提高了模型与数据同化之间的一致性。

本文使用的观测资料为逐时数据,再分析资料是海上 10 m 风速的 U 和 V 分量数据,水平分辨率、时间分辨率见表 1。

表 1 背景风场信息

风场	资料提供时间	水平分辨率	时间分辨率
ERA5	1950 年至今	0.25°×0.25°	1 h
NCEP CFSR	1979—2010 年	0.313°×0.312°	1 h
NCEP CFSV2	2011 年至今	0.205°×0.204°	1 h

## 2 风场验证与对比

浮标观测作为海洋气象观测系统中的重要手段之一,观测资料为台风预报提供了客观依据。本文使用的测站资料来自中国科学院海洋研究所海洋科学数据中心、国家海洋数据中心大连分部和上海河口海岸研究所,测站站位从北到南,跨越黄海及东海南部区域,包括了我国部分海岸边界和韩国西海岸边界。12 个验证风速的观测站分布于黄海、东海范围,坐标与验证的台风信息如表 2 所示,靠近中国海岸 (石岛 (Shidao)、小麦岛 (Xiaomaidao)、2 号平台 (#T2)、04 号平台 (#T04)、6 号浮标 (#F6)、南槽东 (Nancaodong)、牛皮礁 (Niupi-

表 2 风场验证实测站点信息

测站	经度/°E	纬度/°N	台风数量	台风
石岛	122.26	36.53	4	2011 Meari、2011 Muifa、2012 Bolaven、2014 Matmo
小麦岛	120.25	36.03	3	2012 Damrey、2014 Matmo、2018 Ampil
Jongdal	125.93	34.65	3	2010 Dianmu、2011 Meari、2011 Muifa
#F6	123.133	30.717	2	2014 Nakri、2015 Chanhom
Incheon	126.59	37.33	1	2007 Wipha
Jeju	126.6	33.54	1	2011 Muifa
Seocheon	126.5	36.13	1	2006 Ewiniar
#T2	121.29	33.408	2	2012 Damrey、2012 Bolaven
口外	122.433	31.119	1	2014 Nakri
南槽东	122.112	31.022	2	2014 Nakri、2015 Chanhom
牛皮礁	122.255	31.137	2	2014 Nakri、2015 Chanhom
#T04	121.0778	33.619	0	0

jiao)、长江口外浮标站 (Kouwai) 和韩国西海岸 (Incheon、Seocheon、Jongdal、Jeju) 的各个观测站位置如图 1 所示。

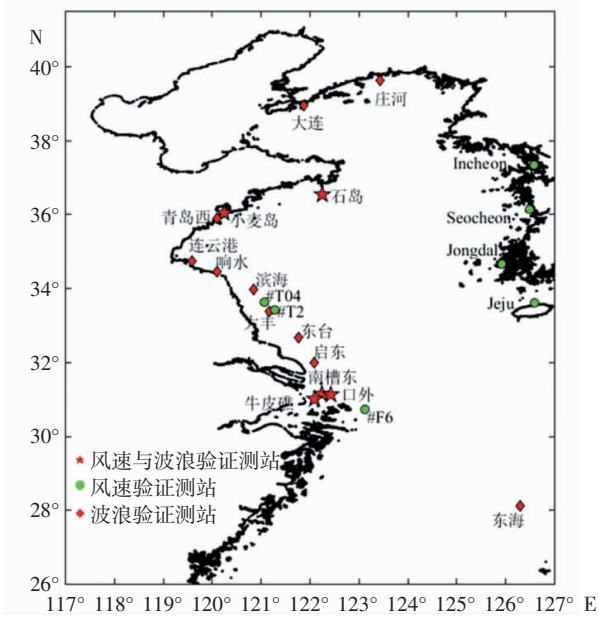


图 1 验证测站分布

波浪参数模拟的准确性依赖于风场质量，通过公式  $\sqrt{U^2 + V^2}$  计算得到区域再分析资料的海上 10 m 平均风速，与 12 个测站在不同海况下的风速进行对比，分析 ERA5 和 NCEP 风场风速大小的可靠性。根据统计学方法，计算各个测站观测数据和再分析资料之间的平均绝对误差、均方根误差、相关系数。A 为观测资料，B 为再分析资料，N 为样本个数，计算结果见表 3。

平均绝对误差：

$$MAE = \frac{\sum |A_i - B_i|}{N} \quad (1)$$

均方根误差：

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N-1} (\sum (A_i - B_i)^2)} \quad (2)$$

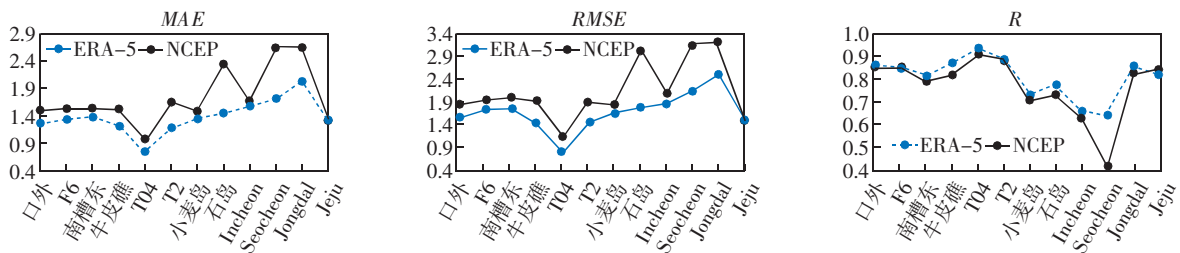


图 2 ERA5 与 NCEP 资料在 12 个测站相关系数、均方根误差和平均绝对误差的对比

相关系数：

$$R = \frac{\sum (A_i - \bar{A})(B_i - \bar{B})}{\sqrt{\sum (A_i - \bar{A})^2 \sum (B_i - \bar{B})^2}} \quad (3)$$

表 3 风速相关性分析

站点	R		RMSE/(m·s <sup>-1</sup> )		MAE/(m·s <sup>-1</sup> )	
	ERA5	NCEP	ERA5	NCEP	ERA5	NCEP
口外	0.876	0.864	1.675	1.945	1.269	1.491
#F6	0.870	0.870	1.820	2.004	1.327	1.516
南槽东	0.832	0.806	1.833	2.053	1.379	1.540
牛皮礁	0.888	0.835	1.560	1.982	1.203	1.520
#T04	0.955	0.930	0.942	1.274	0.750	0.973
#T2	0.911	0.907	1.555	2.004	1.179	1.645
小麦岛	0.738	0.723	1.750	1.911	1.354	1.473
石岛	0.786	0.746	1.867	3.013	1.454	2.340
Incheon	0.667	0.637	1.934	2.141	1.590	1.676
Seocheon	0.652	0.410	2.187	3.147	1.717	2.642
Jongdal	0.875	0.842	2.530	3.186	2.024	2.645
Jeju	0.836	0.854	1.660	1.643	1.308	1.331

12 个测站的风速相关性分析如图 2—图 6 所示，在相关系数、平均绝对误差和均方根误差的对比下，ERA5 再分析资料与实测风速总体相关性更高、平均绝对误差和均方根误差更小。在江苏海域 (图 3) 和长江口邻近海域 (图 4)，ERA5 风速与实测资料相关系数均在 0.83 以上，平均绝对误差约为 0.7~1.38 m/s；NCEP 风速平均绝对误差为 0.9~1.64 m/s。在韩国近岸 (图 5)，两种资料在 Incheon 与 Seocheon 测站的相关性均不太理想；在韩国近海南部的 Jongdal 与 Jeju 测站，ERA5 风速相关系数在 0.83 以上。在山东半岛南部海域近海测站 (图 6)，ERA5 风速较实测风速偏小，NCEP 风速整体偏大。综合分析表明，在黄海与东海北部海域，ERA5 的海上 10 m 风速资料与实测风速资料具有更好的相关性。

台风期间与常海况期间的风速验证对比结果如图 7—图 12 所示。

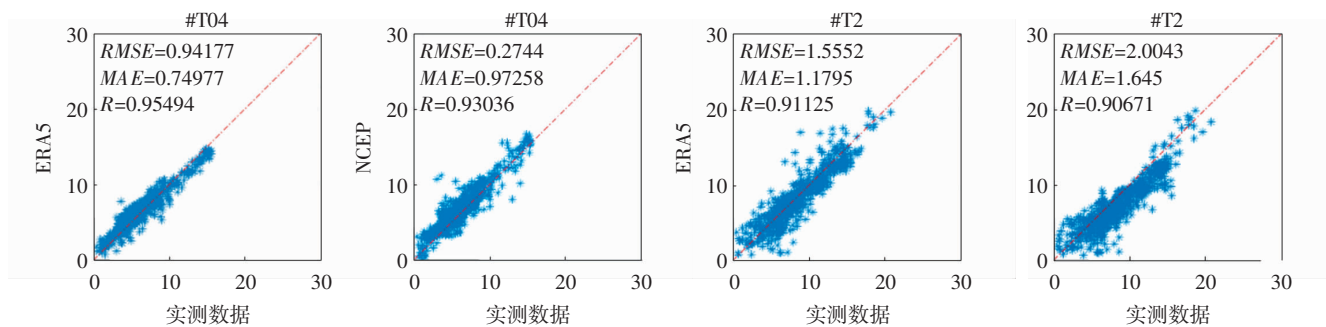


图3 江苏海域测站风速与再分析资料对比

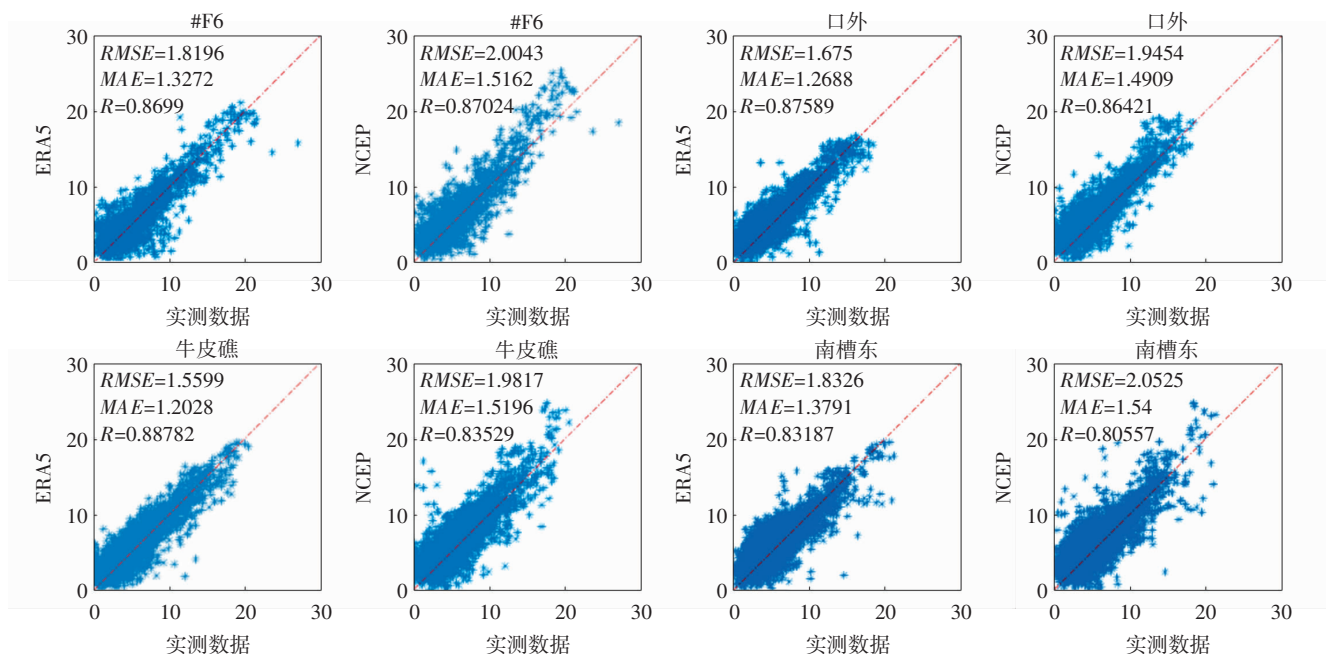


图4 长江口外海测站风速与再分析资料对比

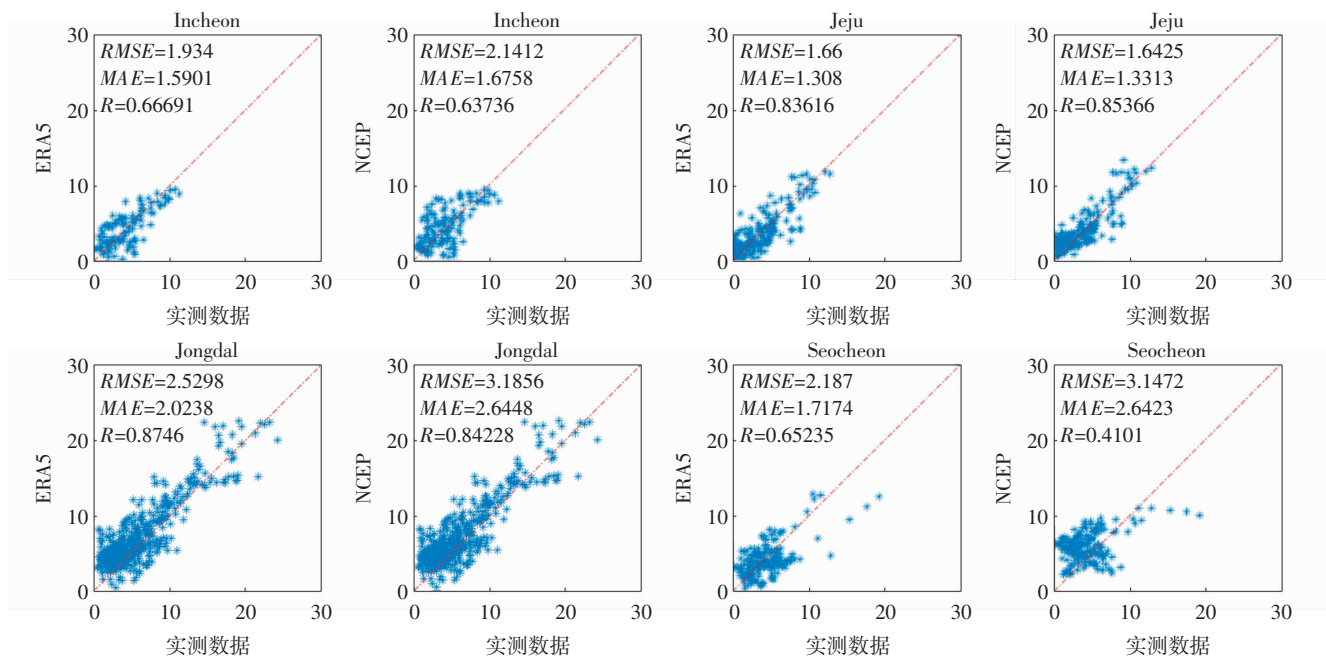


图5 韩国西海岸测站风速与再分析资料对比

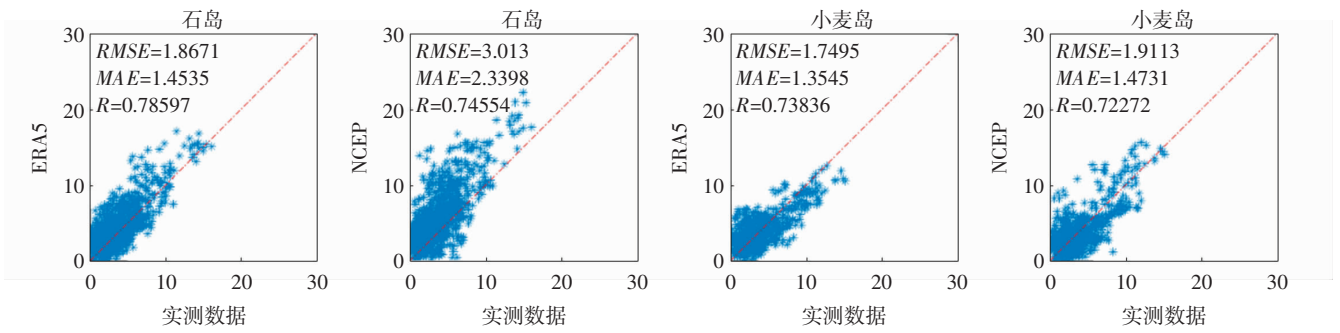


图 6 山东近海测站风速与再分析资料对比

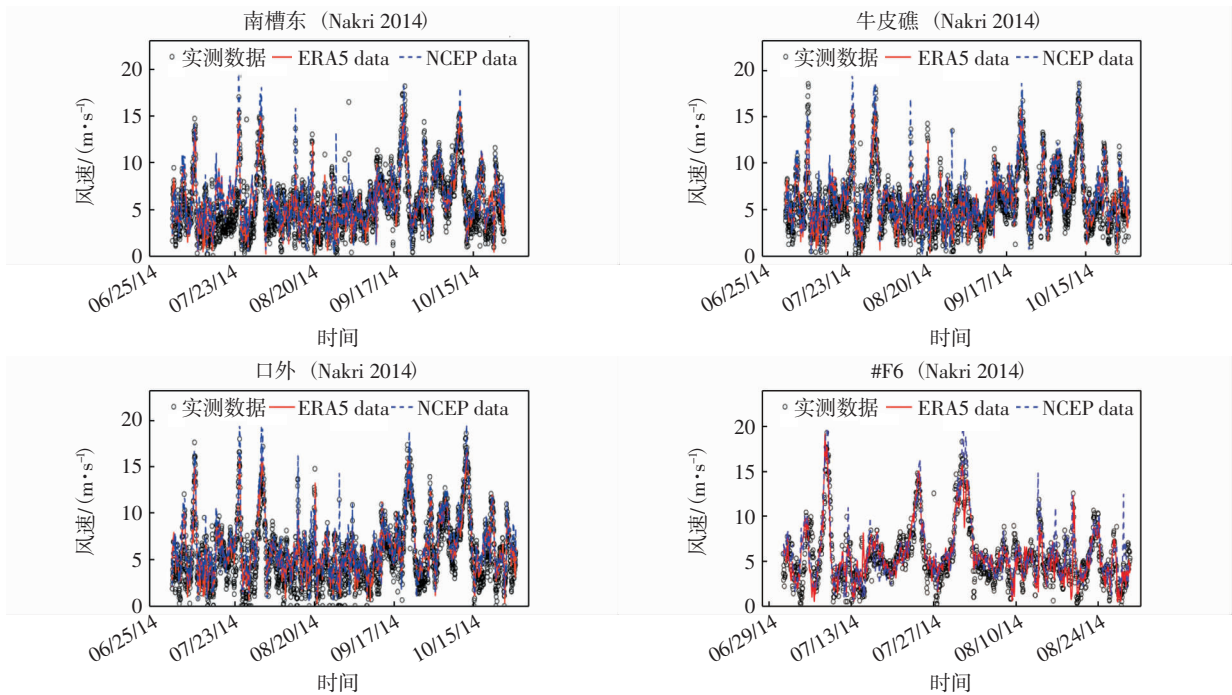


图 7 2014 “娜基莉” 期间风速对比

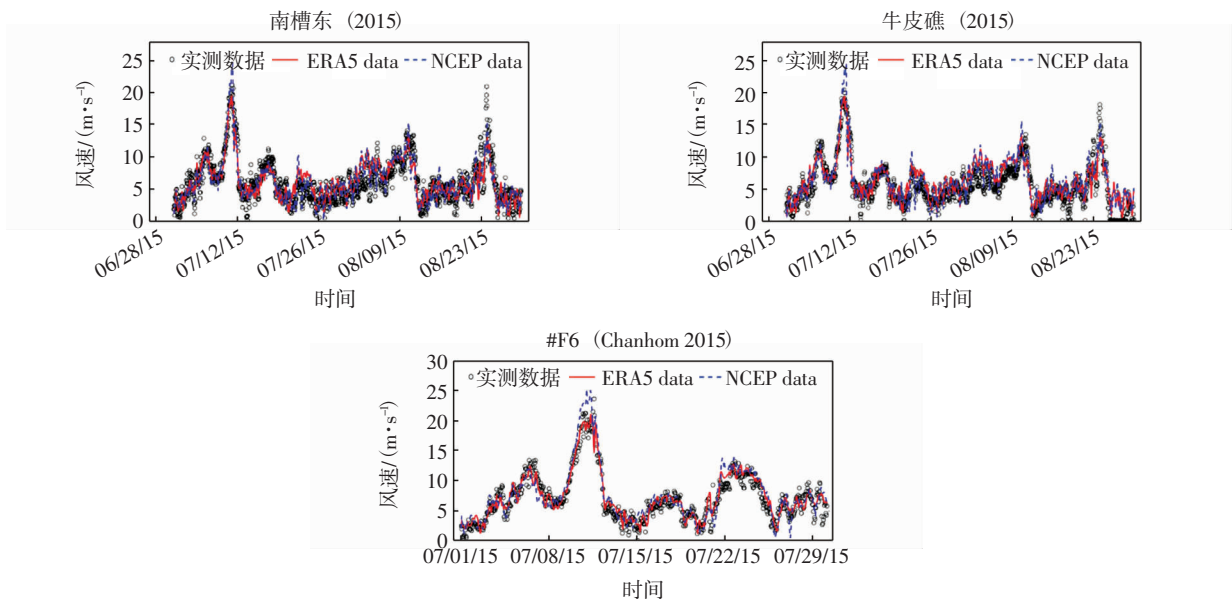


图 8 2015 “灿鸿” 期间风速对比

### 2.1 长江口邻近海域

图 7、图 8 为长江口外海域测站的风速验证，牛皮礁、南槽东与口外浮标测站在长江口近海海域，浮标 6 号测站离岸较远。2014 年 7 月台风“娜基莉 (Nakri)”和 10 月大风期间 (图 7)，ERA5 和 NCEP 风速与实测风速相比，整体趋势一致，吻合均较好。2015 年 7 月台风“灿鸿 (Chanhom)”过境期间 (图 8)，两种再分析资料与实测资料验证较好，但是在浮标 6 号测站两种资料风速均偏小。在离岸较近的牛皮礁与南槽东测站，NCEP 在两次强风过程风速都偏大，ERA5 在强风过程风速偏小。综合比较表明，在长江口邻近海域，两种资料在台风过境前后的风速与实测风速趋势一致，

NCEP 在不同强风过程风速偏大；ERA5 在个别强风时段的最大风速偏小。

### 2.2 江苏海域

在江苏外海区域，T2 与 T04 测站验证结果如图 9 所示，ERA5 与 NCEP 资料与实测资料验证均较好，与实测风速的趋势一致，在两个测站的相关性均在 0.9 以上。在 T04 测站，NCEP 强风过程风速偏大，平均绝对误差为 1.5 m/s；ERA5 在个别时段风速偏小，平均绝对误差为 0.9 m/s (表 3)。在 T2 测站，NCEP 在强风过程风速偏小，均方根误差约为 1.64 m/s；ERA5 风场均方根误差为 1.18 m/s (表 3)。综合比较下，在江苏近海海域，ERA5 风速与实测风速更为接近。

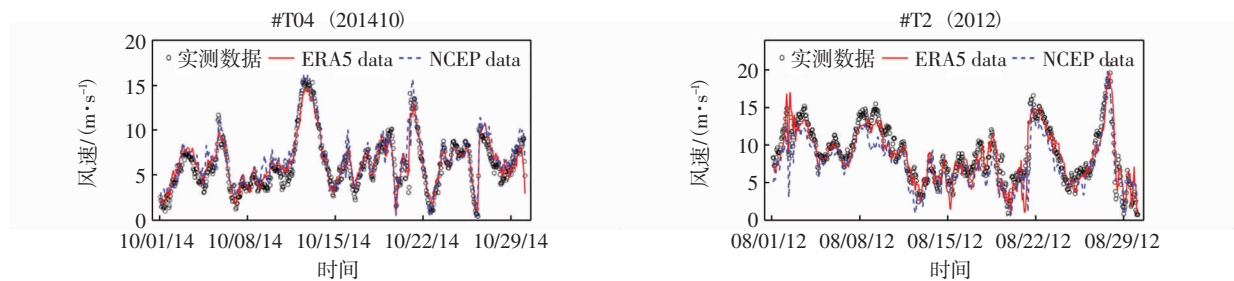


图 9 测站 04 号 2014 年 10 月期间与测站 2 号 2012 “达维” “布拉万” 期间风速对比

### 2.3 山东半岛南部海域

石岛测站位于黄海北部，该测站风速验证如图 10 所示，两种资料在强风过程的风速验证总体趋

势较好。在 2011—2014 年的 4 场强风与常风期间，ERA5 风速在部分时段小于实测风速，NCEP 风速趋势大致符合实测资料，强风过程风速大于实测风速。

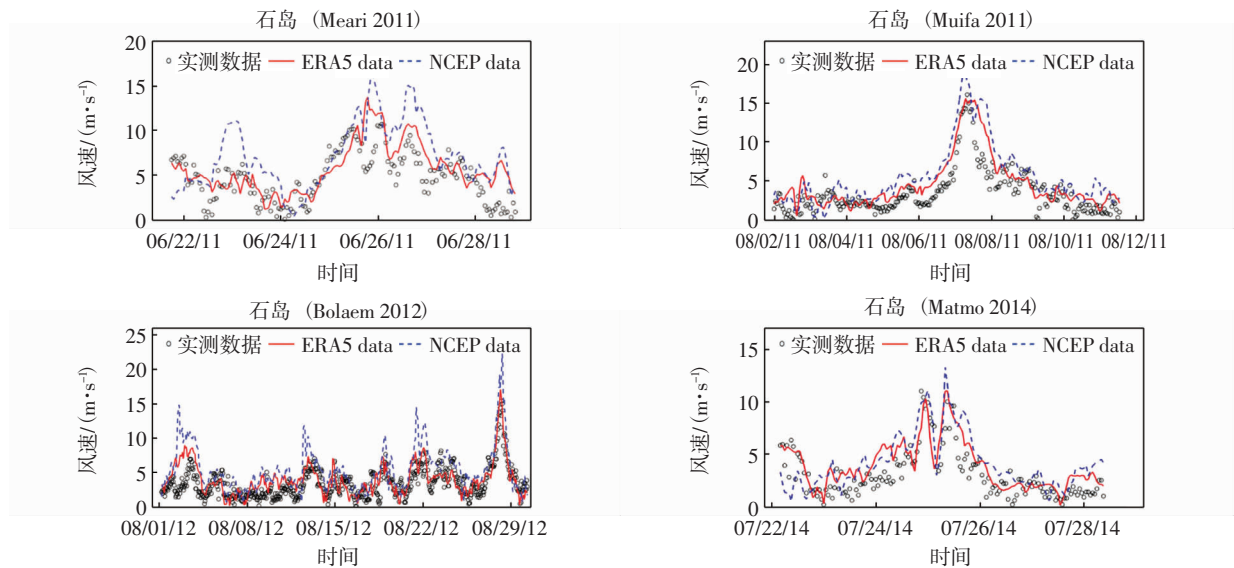


图 10 石岛测站风速对比

小麦岛测站风速验证如图 11 所示。小麦岛测站离岸较近，两种再分析资料在小麦岛均偏小。2012 年台风“达维 (Damrey)”经过小麦岛测站期

间，ERA5 在强风过程风速低于实测风速；NCEP 风速在强风过程更接近实测风速，但是总体风速仍然偏小。两种再分析资料相差不大，相关系数在

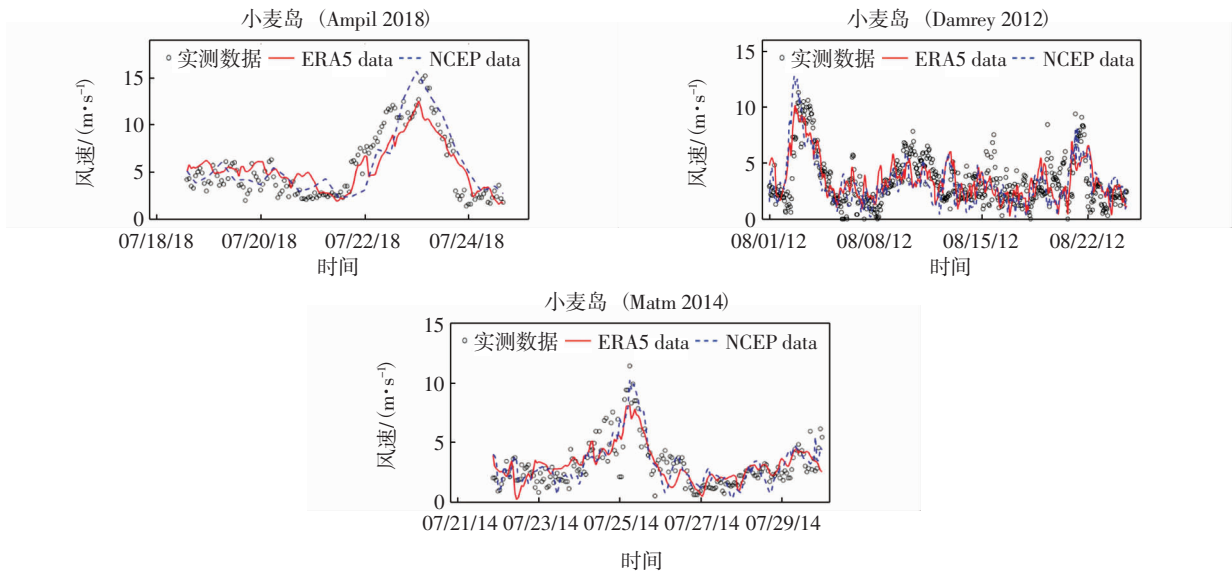


图 11 小麦岛测站风速对比

0.7~0.8 之间。相比石岛测站，在小麦岛的平均绝对误差与均方根误差更小。总体来说，在山东半岛南侧近海海域，ERA5 风速资料更接近实测风速。

### 2.4 韩国西海岸

韩国西海岸岸线曲折，岛屿众多，测站 In-

cheon、Seocheon、Jongdal 均离岸较近，Jeju 测站位于济州海峡。四个测站的风速验证如图 12 所示。在 Jongdal、Jeju 测站，两种再分析风场与实测资料对比趋势相近（图 12），NCEP 在台风期间风速偏大。测站 Seocheon 与 Incheon 在黄海北部，ER-

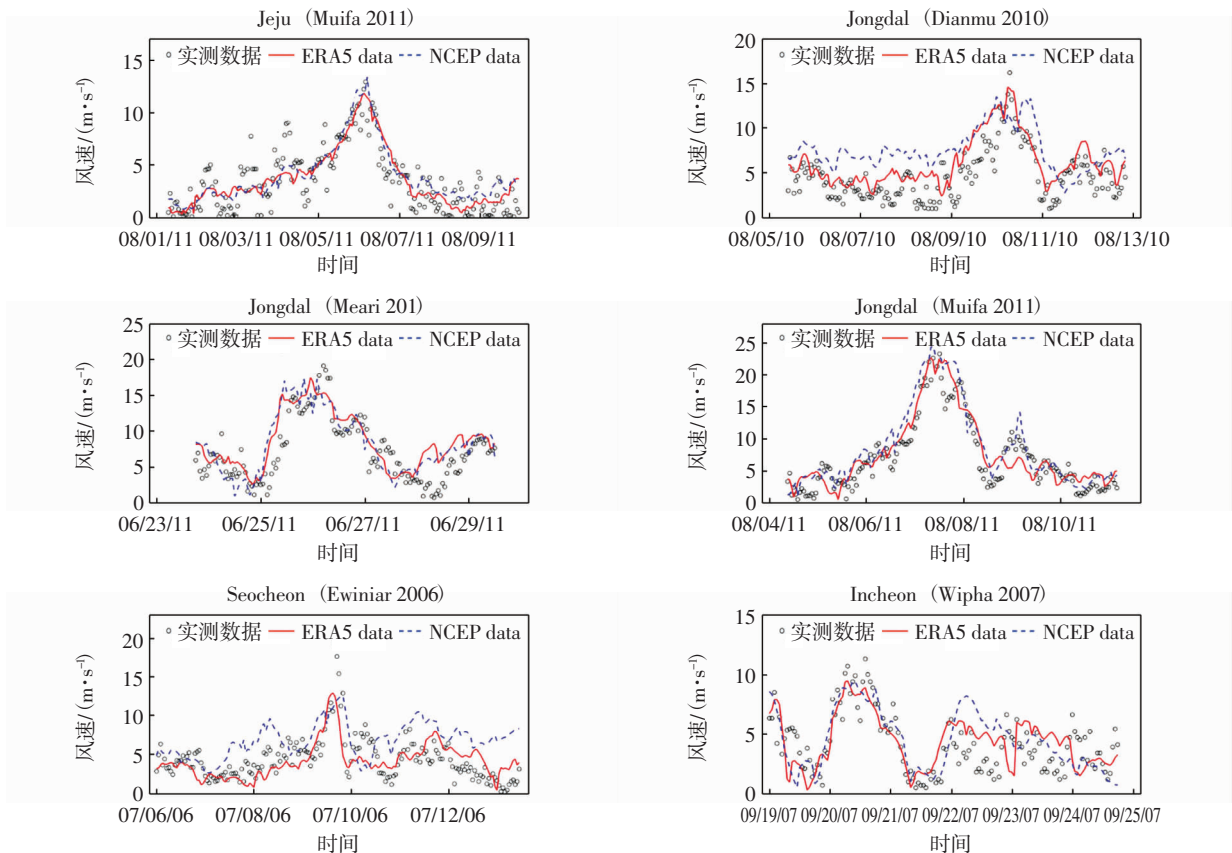


图 12 韩国西海岸风速对比



A5 风速与实测资料趋势基本符合, 强风期间小于实测风速。由于地形影响, 导致实测的逐时风速变化较大, 再分析资料与实测资料在一定程度上均有偏差。

经过初步对比分析, 在黄海和东海北部海域, 两种再分析资料与实测资料的相关性均较好, 8 个测站的风速相关系数在 0.8 以上; 在江苏海域, ERA5 与实测风速相关性在 0.9 以上; NCEP 在台风经过期间风速不同程度的偏大, ERA5 的海上 10 m 风速资料在强风过程小于实测风速, 总体上 ERA5 风速资料与实测风速更接近; ERA5 在黄海海域的相关性从南往北减小, 在高纬度地区, ERA5 在强风过程与实测风速相比偏小。

### 3 波浪模拟

Mike21 软件是典型的静压模型 (时健等, 2017), 具有操作便捷性和实用的数据处理功能, 适用于模拟近海海域风浪和涌浪的生长、衰退以及变形, 实际工程应用上也广泛使用 Mike21 进行数值模拟。模拟近岸、河口波浪的浅水波浪数值预报模型主要有缓坡方程 (崔雷等, 2008)、Boussinesq 方程 (张尧等, 2018)、Texel.Marsen 和 Arsole Spectrum (TMA) 谱预报法及能量平衡方程等 (徐福敏等, 2004)。依据研究区域的地形特征及选取的 15 个波浪测站的分布情况, 采用 Mike21 SW 数值模型对区域波浪要素进行模拟和分析。以 ERA5 和 NCEP 风速资料为风场驱动输入 Mike21 SW 模型, 根据实测点的有效波高和周期来验证模型模拟的准确性和可靠性, 对两种风场资料在波浪数值模型中的适用性进行探讨并分析模拟不同海域的波浪特性。

Mike21 SW 模型的控制方程为:

$$N(\sigma, \theta) = E(\sigma, \theta) / \sigma \quad (4)$$

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \nabla \cdot (\vec{v}N) = \frac{S}{\sigma} \quad (5)$$

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \nabla_x \cdot (c_g \cdot N) + \nabla_\theta \cdot (c_\theta \cdot N) + \nabla_\sigma \cdot (c_\sigma \cdot N) = S \quad (6)$$

其中,  $N(x, \theta, \sigma, t)$  为波浪作用谱; 源项  $S$  描述的是与海浪谱有关的源和汇的总和, 各种物理现象的能源函数的叠加。

$$S = S_m + S_{nl} + S_{ts} + S_{bot} + S_{surf} \quad (7)$$

其中,  $S_m$  代表风能输入项,  $S_{nl}$  是由于非线性波-波

相互作用而产生的波能量传递,  $S_{ts}$  是由于白帽引起的能量耗散,  $S_{bot}$  是由低摩擦产生的耗能,  $S_{surf}$  是波浪破碎项。

#### 3.1 模型参数

采用 Mike21 SW 模块搭建计算模型, 计算网格采用非结构化网格, 网格空间最小为 900 m, 最大为 35 km, 计算时间步长为 600 s, 计算时间为台风经过各个测站期间, 波浪计算方法采用全谱公式, 时间方程采用非恒定形式。计算范围地形如图 13 所示, 外海域范围为 121.68°E—128.435°E, 25.999°N—N34.833°N, 水深数据基准为理论深度基准面。Mike 21 SW 模型的陆地岸线边界设置为闭边界, 外海波浪边界设为开边界。开边界输入采用有效波高、谱峰周期、平均波向和方向分布指数组成的随时间变化的动态边界, 数据来源于中国海洋大学建立的中国海区波浪要素数据库 (Liang et al., 2019)。

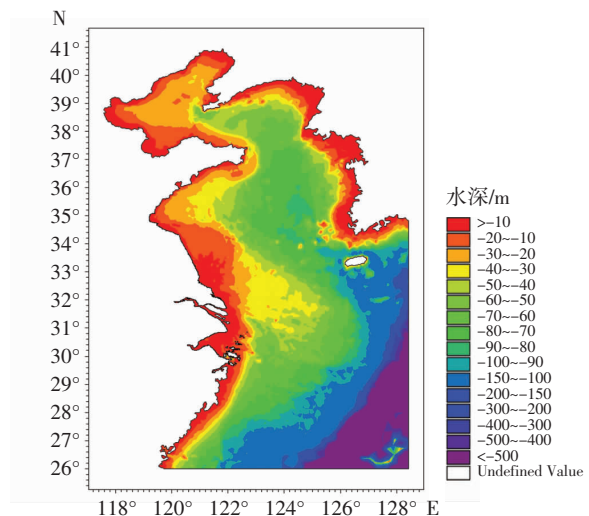


图 13 研究范围水深示意图

根据 Mike21 SW 模型参数敏感性分析, 白帽参数对波浪模拟影响相对重要, 白帽系数越小, 波高越高, 周期越长, 结果更接近实测值。由于模拟范围较大, 为了避免出现模型计算不稳定的情况, 验证点离岸均较近, 白帽耗散系数分别设置为  $C_{ads} = 2$ ,  $\delta = 0.5$ 。合理地确定波浪破碎指标非常重要 (唐军等, 2008), 波浪破碎参数参考相关设置取 0.85 (孙晓帆, 2011)。计算海域的糙率系数是个综合影响因素, 与当地的水深、床面形态等因素有关。模型选用 Nikuradse 粗糙度, 设置为 0.02 m, 底摩阻耗散源函数基于线性理论, 见公式 8。

$$S_{bot}(f, \theta) = -C_f \frac{k}{\sinh 2kh} E(f, \theta) \quad (8)$$

在利用 Mike21 SW 模型进行波浪数值模拟时，需要输入背景风场，分别采用 ERA5 和 NCEP 风场用作模型的风场驱动条件，模拟常海况和不同台风期间波浪运动情况。

### 3.2 结果验证与分析

15 个波浪验证站点分布在黄海、东海的近岸与外海海域（图 1），具有一定的代表性。测站具体位置、网格水深与实际水深信息见表 4。15 个测站的验证结果见图 14—图 20。

图 14 为庄河与大连测站的波高验证结果，ERA5 模拟有效波高与实测资料趋势相近，波高最大值与实测一致，都不超过 2 m。在庄河测站，9 月 10 日附近，两种资料的模拟波高均偏大，测站靠近内陆浅海，波浪向近岸的传播过程中受地形影响较大，随着水深变浅，波浪发生破碎变形。在大连测站，模拟波高在 2007 年 7 月中旬均偏高，测站位于黄海北部，离岸较近，模拟过程忽略了渤海

表 4 波浪观测站点信息

测站	经度/°E	纬度/°N	实际水深/m	网格水深/m
庄河	123.448 3	39.627 6	10	9.1
大连	121.886	38.946	16.4	17.85
石岛	122.26	36.53	26.5	25.7
小麦岛	120.25	36.03	20.4	16.5
口外	122.433	31.119	15	13.5
南槽东	122.112	31.022	12	9.3
牛皮礁	122.255	31.137	10	10.5
滨海	120.849 9	22.968 9	17.5	15.15
大丰	120.48	33.2	8.5	5.62
东台	121.779 97	32.653 6	12.5	11.23
启东	122.096 85	31.972 72	9.7	10.56
连云港	119.433	34.783	12.9	10.01
青岛西	120.116 7	35.879 2	12.5	10.7
响水	120.101	34.436	8.4	8
东海	126.3	28.1	60	72

内侧波浪与潮流的影响。渤海受温带气旋与北方寒潮的影响，在近岸会产生 2 ~ 4 m 的海浪（高斌，

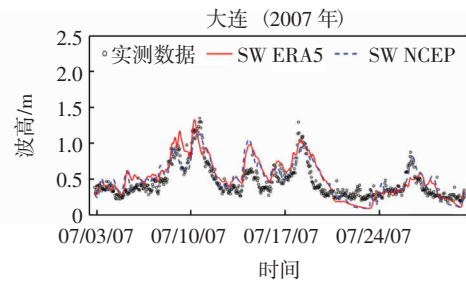
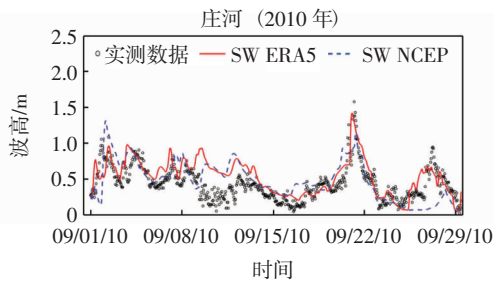


图 14 庄河与大连测站模拟与实测有效波高时间序列图

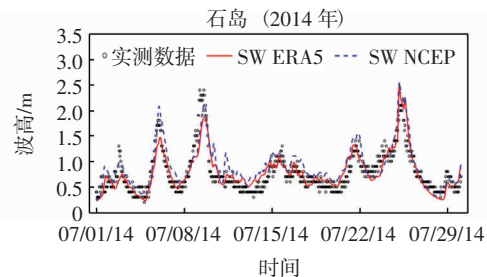
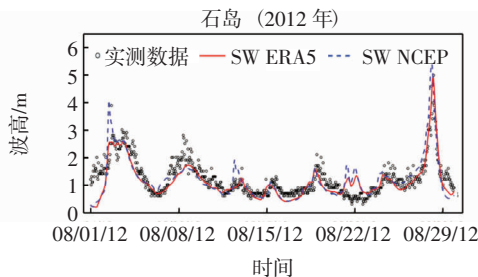
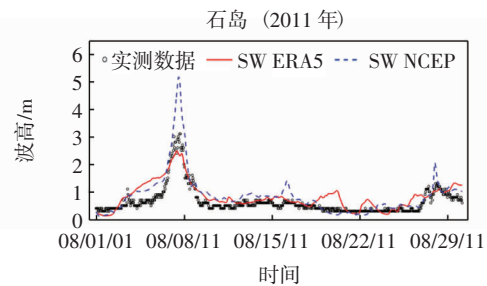
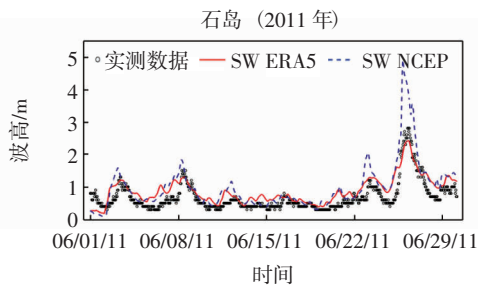


图 15 石岛测站模拟与实测有效波高时间序列图

2012), 对邻近黄海海域的海浪会产生一定影响。总体来说, 在部分时段两种风场模拟结果与实测波高均存在一定误差, ERA5 能更稳定地模拟常海况下黄海北部的波浪变化。

图 15 为 4 场台风期间石岛测站有效波高的验证。利用 NCEP 风场驱动模拟的有效波高大于实测波高, 实测有效波高峰值约为 3 m, 而模拟有效波高最大值接近 5 m, 这主要与风场质量有关, 在石岛测站 NCEP 风速较实测风速偏大。ERA5 在强风过程模拟的波高偏小, 平均绝对误差约为 0.2 m, 附近海岛较多, 未考虑潮流的作用, 波浪发生折射会引起一定的误差, 也可能与 ERA5 风场在台风期间的质量有关。综合分析, ERA5 整体模拟结果较好, 与实测资料趋势的一致性更高。

小麦岛与青岛西测站的波高、周期验证如图 16、图 17 所示, 小麦岛和青岛西测站离岸较近, 附近大的波浪主要为涌浪和混合浪。ERA5 和 NCEP 风场驱动的模拟结果与实测值验证均较好, 趋势一致, 模拟周期与实测周期基本吻合, 强风过程模拟

波高小于实测波高, 这与测站所处海域的风场质量有关系。由于小麦岛测站离岸较近, 波浪向近岸的传播过程中受地形影响较大, 水深变浅过程中, 波浪发生折射、破碎, 未考虑潮流作用会对模拟结果产生一定影响。在山东青岛近海海域, ERA5 风场模拟的有效波高与 NCEP 风场模拟结果相差不大, 平均绝对误差不超过 0.3 m。综合分析, ERA5 风场可用于山东半岛南部近岸海域的波浪模拟。

江苏沿海波高模拟结果如图 18 所示。连云港测站模拟结果与实测趋势一致, 但是在最大值处偏小, 这可能与风场质量有关。响水测站的模拟值与实测波高整体吻合较好, 但在 7 月 8—15 日期间, 模拟波高增大较快, 峰值处却偏小, 这应该是受地形影响, 还有未考虑潮流的变化对波浪的影响。在滨海、东台、大丰、启东这四个测站, 由于测站位于辐射沙洲海区, 离岸较远, 受海岸边界影响相对较小, 风场资料的精度和地形的影响较大; 该区域浅滩较多, 波浪易发生破碎, 同时未考虑潮流变化带来的影响, ERA5 风场模拟波高在部分时段小于

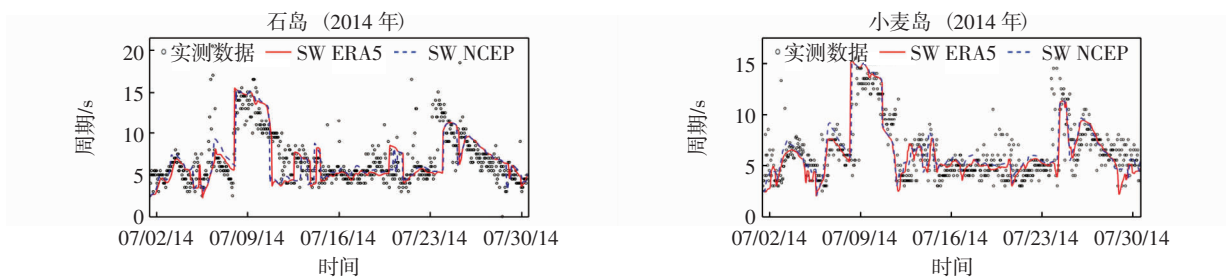


图 16 石岛和小麦岛测站模拟与实测谱峰周期时间序列图 (2014 年“麦德姆”)

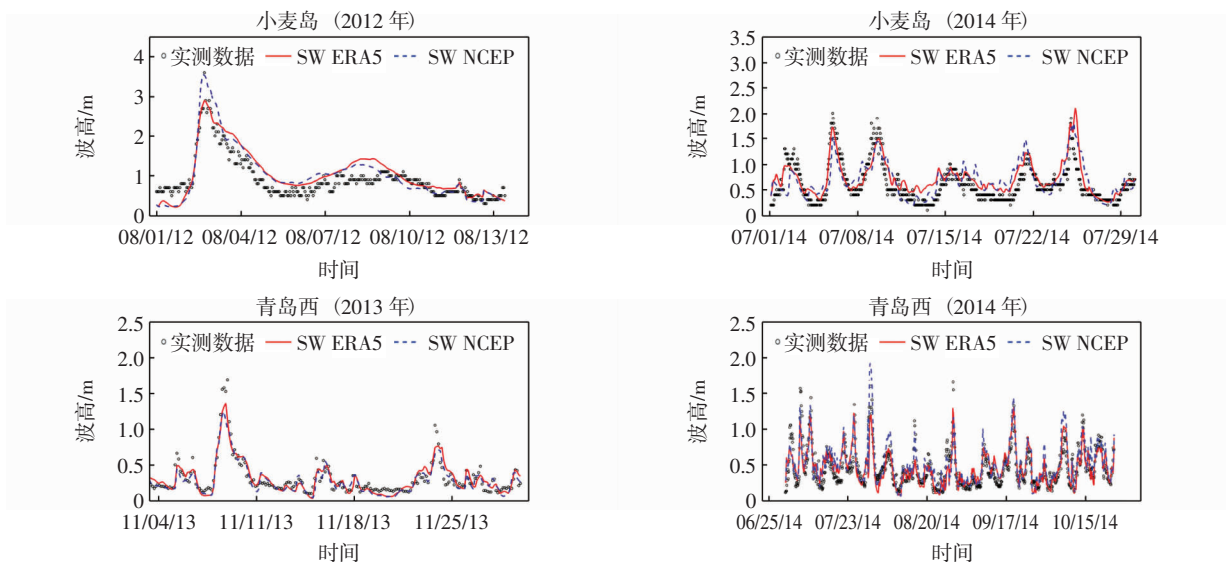


图 17 小麦岛、青岛西测站模拟与实测有效波高时间序列图

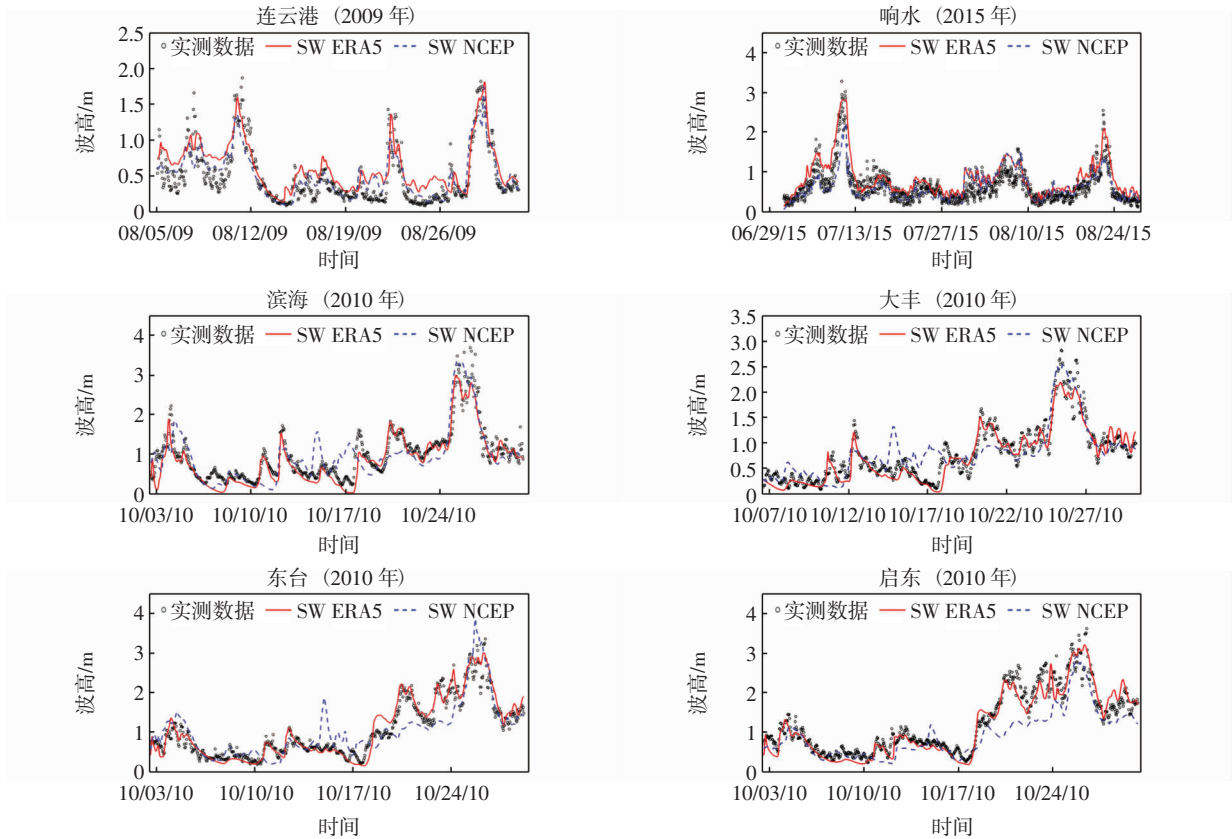


图 18 江苏海域测站模拟与实测有效波高时间序列图

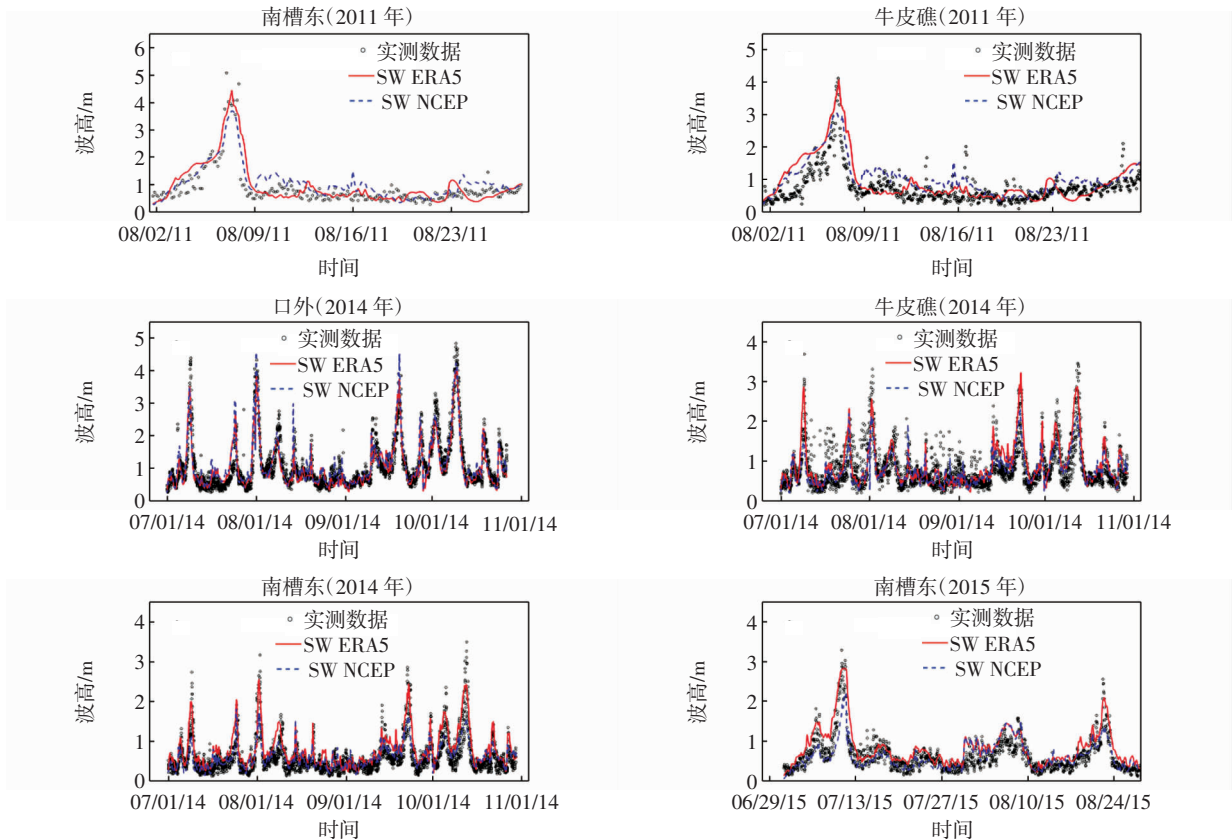


图 19 南槽东测站模拟与实测有效波高时间序列图

实测波高。在江苏海域,输入 ERA5 风场模拟波浪结果整体较好,与实测资料趋势更一致。

从以上测站验证结果可以看出,ERA5 风场驱动 Mike21 SW 模型能够较好地模拟黄海常海况与极端海况下波浪的变化过程,模拟结果与实测值较为一致。ERA5 风场可以作为黄海海域波浪数值模拟的驱动风场。

长江口邻海域的牛皮礁测站、南槽东和口外测站实测数据与模拟的有效波高对比如图 19 所示。2011 年台风“梅花”经过期间,NCEP 风场驱动模拟的有效波高偏小,台风过后波高偏大;ERA5 风场驱动模拟的有效波高在台风过境前后偏大,峰值处偏小。2014 年 7—10 月与 2015 年台风“灿鸿”经过期间,两种资料模拟的波高在最大值处均偏小,可能与风速资料有关(图 7、图 8),但是 ERA5 风场模拟波高更接近于实测值。模型在模拟期间未考虑长江口径流与潮流带来的水位变化影响,也会导致模拟波高在部分时段偏小。

台风浪的模拟不仅取决于台风强度,受地形和海岸线轮廓等影响也很大。在长江口河口段,各种动力交汇,泥沙沉积,形成规模庞大的河口拦门沙,牛皮礁测站靠近河口浅滩,由于口外浅滩的阻碍,波浪发生折射,局部容易产生较大的波高。在口外测站,风浪传播受到地形的阻碍更小,NCEP 风场模拟结果在峰值部分时段偏大,这可能与 NCEP 风场在大风期间风速偏大有关。

东海测站位于东海海域的东南部,两种资料的模拟结果与观测值趋势一致(图 20),在部分时段 NCEP 模拟有效波高比实测值偏大,ERA5 模拟值在部分时段小于实测值;综合比较下,ERA5 模拟结果与观测值更吻合,平均绝对误差约为 0.3 m。

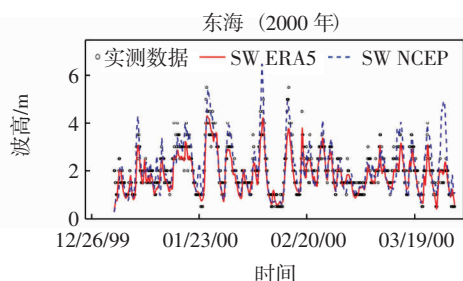


图 20 东海测站有效波高时间序列图(2000 年 1—3 月)

综合分析,ERA5 风场模拟结果与实测有效波高更为一致。ERA5 模拟波高的相关系数分析见表 5,江苏海域内测站的模拟波高误差更小,东海

测站位于东海外海域,比长江口附近测站相关性更好。庄河与大连测站位于黄海最北部,离岸较近,波高模拟结果不及山东沿海测站。

表 5 模拟波高相关系数对比

测站	R		RMSE/(m·s <sup>-1</sup> )		MAE/(m·s <sup>-1</sup> )	
	ERA5	NCEP	ERA5	NCEP	ERA5	NCEP
大连	0.829	0.830	0.164	0.149	0.132	0.149
庄河	0.691	0.499	0.221	0.260	0.171	0.260
石岛	0.840	0.825	0.315	0.420	0.238	0.420
小麦岛	0.682	0.709	0.252	0.291	0.198	0.291
青岛西	0.839	0.838	0.149	0.165	0.111	0.165
连云港	0.854	0.867	0.243	0.198	0.201	0.198
响水	0.918	0.915	0.198	0.161	0.156	0.161
滨海	0.931	0.811	0.270	0.410	0.197	0.410
大丰	0.940	0.829	0.196	0.316	0.152	0.316
东台	0.965	0.822	0.211	0.412	0.158	0.412
启东	0.955	0.880	0.252	0.496	0.189	0.496
南槽东	0.840	0.769	0.323	0.294	0.247	0.294
牛皮礁	0.754	0.692	0.399	0.374	0.286	0.374
口外	0.888	0.869	0.364	0.398	0.263	0.398
东海	0.913	0.807	0.426	0.650	0.322	0.650

以上分析表明,ERA5 风场驱动 SW 模型可以较好地模拟出黄海与东海的台风浪过程与近岸波浪特征的变化,在江苏海域与东海海域适用性比山东邻近海域更好。

2015 年 9 号强台风“灿鸿”影响范围甚广,在长江口外海域,台风期间波高的模拟结果(图 21)与台风期间风场分布(图 22)表明,波高与风速变化分布一致,最大风速在台风路径的右侧东南方向,最大波高出现在长江口东南部海域,均在 7 m 以上(图 21)。随着台风接近长江口,风浪与浪涌并存,口外测站有效波高最高达到 5 m,波高随着口外复杂的地形而变化,波浪在传向口内过程中受到横沙浅滩的影响,波能逐渐衰减,波高减小。随着台风往东南方向移动,最大风速呈逆时针变化,由东南侧转向东侧。从 ERA5 的模拟结果(图 21)可以看出,波高变化从东南往西北逐渐减小,波高等值线变化较为规则,在近海海域更为密集,波高变化较快。在江苏海域内分布着辐射沙洲群,波高等值线呈弧形分布。NCEP 模拟结果最大波高值范围较广,在黄海海域 NCEP 风场模拟波高出现分流变化,与 NCEP 风场变化趋势一致。

两种资料的风速分布在整个海域内有明显的差异(图 22),由验证结果可知 NCEP 风速数据相比

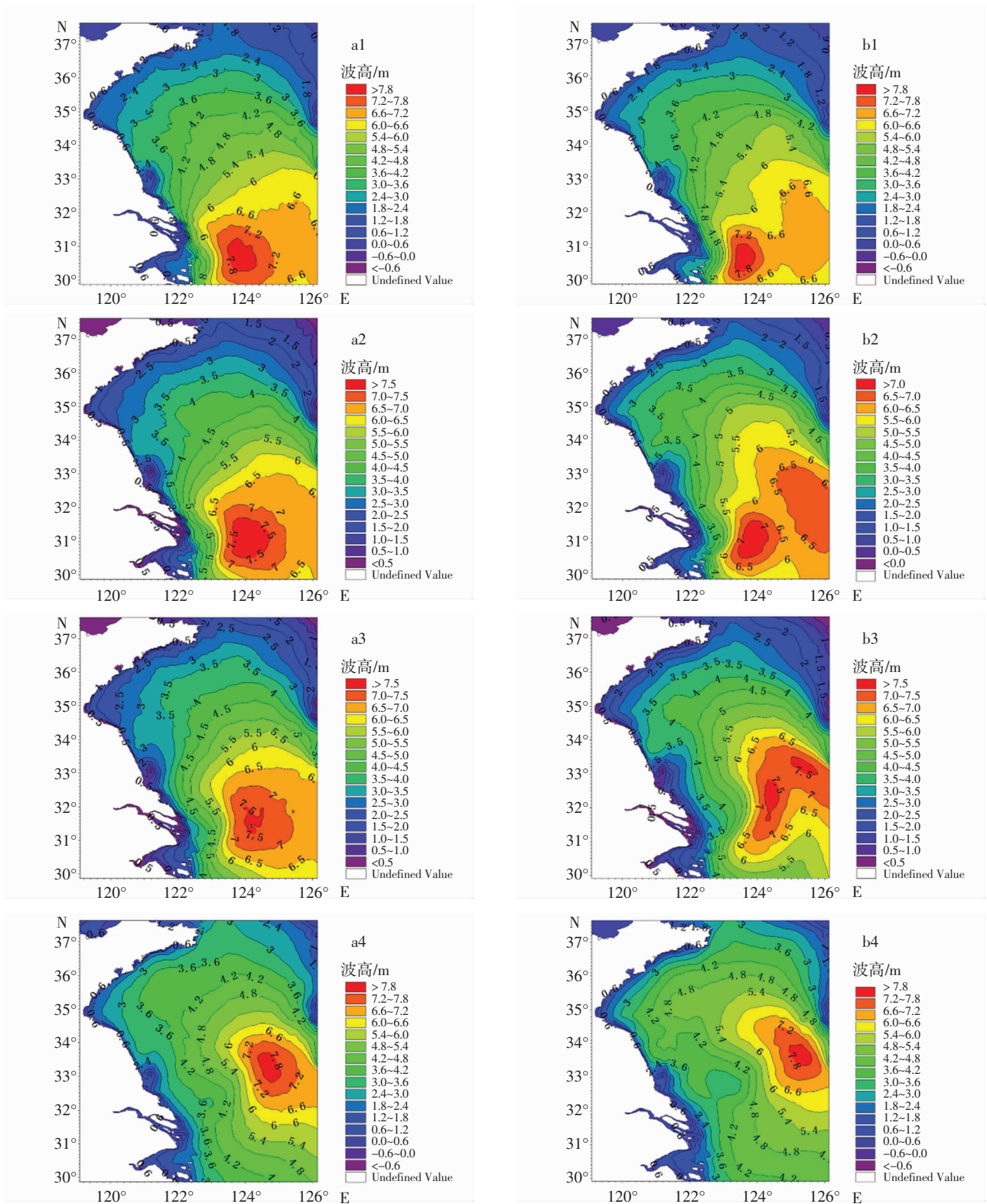


图 21 台风“灿鸿”过程的模拟有效波高分布对比图

注：a1~a4 为 ERA5 风场模拟结果，b1~b4 为 NCEP 风场模拟结果

实测更大，ERA5 风速数据在强风过程风速相较于实测偏小。ERA5 描述的热带气旋大小与结构分布与观测到的更相似 (Bian et al, 2021)，ERA5 数据资

料能够更好地代表热带气旋的结构，能够较好地描述其外部的的气候特征 (Malakar et al, 2020)。在中国东海、黄海的半封闭海域内，ERA5 资料再分析

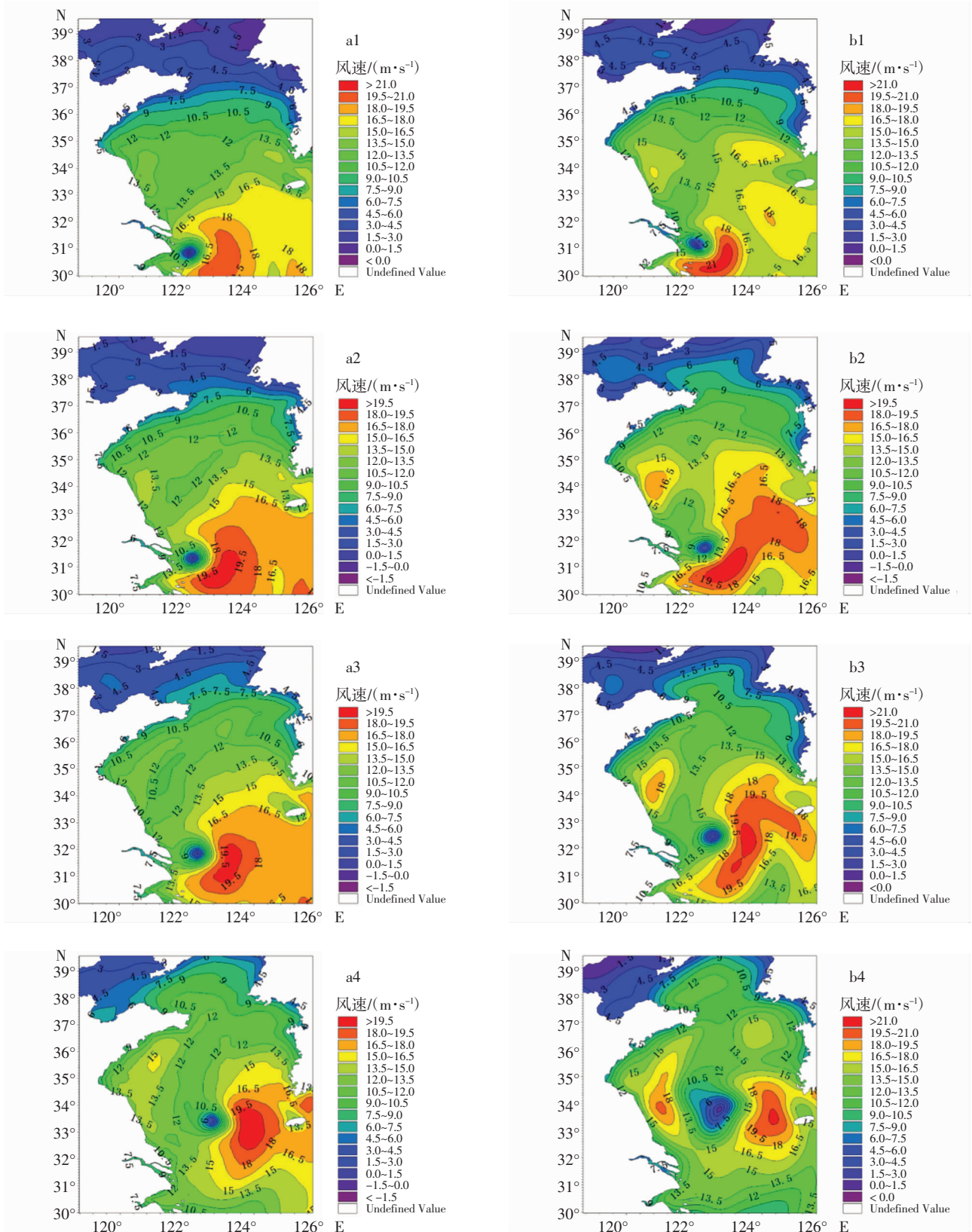


图 22 台风“灿鸿”过程的风速分布对比图

注: a1~a4为ERA5风场, b1~b4为NCEP风场

能够更好分析小尺寸的热带气旋。利用再分析风场进行波浪模拟可以给出深海波浪的大致分布, 工程应用中对于小范围波浪的精确模拟可以采用更高分辨率的风场资料进行驱动模拟。

将两种风场分别输入 Mike21 SW 模型, 均可较好地模拟黄海与东海海域的波浪特征。综合对比 15 个波浪测站验证结果, ERA5 风场驱动模拟的结果与实测资料吻合度较高, 在江苏海域的相关性达到 0.9, 平均绝对误差不超过 0.2 m; 总体相关性达到 0.8, 可以更好地重现台风过程中东海、黄海内的波浪变化。总体结果表明, ERA5 风场驱动的波浪模型在靠近外海的测站模拟效果普遍优于近岸测站, 在黄海南部的模拟结果优于黄海北部。

## 4 结论

(1) 选用 NCEP 和 ERA5 再分析资料的海上 10 m 风速与 12 个测站观测资料做对比, 结果表明在台风期间 NCEP 风速不同程度的大于实测风速; ERA5 的海上 10 m 风速资料与实测风速具有较高的一致性, 在强风期间小于实测风速。

(2) ERA5 风场和 NCEP 风场在各个海域与实测资料的相关性不同。ERA5 风场在黄海的相关性从南往北逐渐减小, 在江苏海域相关性比山东半岛以南近海更高, 在东海海域模拟结果精度比黄海北部海域更高。在黄海近海海域, NCEP 风速较实测风速偏大。在高纬度地区, ERA5 在强风过程风速小于实测风速。

(3) 利用 ERA5 风场驱动 Mike21 SW 模型能够较好地模拟东海、黄海海域的台风浪过程, ERA5 风场资料可以作为 Mike21 SW 模拟东海、黄海海域波浪的驱动风场。

(4) ERA5 风场驱动的波浪模型在靠近外海的测站模拟效果普遍优于近岸测站, 黄海的表现南部优于黄海北部。

## 参 考 文 献

- 陈橙, 李焱, 2017. 基于 SWAN 模型的南中国海“莫拉菲”台风浪研究[J]. 海洋学研究, 35(4): 14-19.
- 崔雷, 唐军, 沈永明, 2008. 近岸波浪及沿岸流数值模拟研究[J]. 水利学报, 39(12): 1340-1345.
- 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.
- 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.
- 高斌, 2012. 渤海海域波浪场的数值计算与特征分析[D]. 青岛: 中国海洋大学.
- 旷芳芳, 张友权, 张俊鹏, 等, 2015. 3 种海面风场资料在台湾海峡的比较和评估[J]. 海洋学报, 37(5): 44-53.
- 时健, 郑金海, 严以新, 等, 2017. 河口海岸水动力非静压数学模型研究述评[J]. 河海大学学报(自然科学版), 45(2): 167-174.
- 孙晓帆, 2011. 海洋风浪模型在我国邻近海域的应用与对比[D]. 上海: 上海交通大学.
- 唐军, 沈永明, 崔雷, 等, 2008. 近岸波浪破碎区不规则波浪的数值模拟[J]. 海洋学报, 30(2): 147-152.
- 陶爱峰, 沈至淳, 李硕, 等, 2018. 中国灾害性海浪研究进展[J]. 科技导报, 36(14): 26-34.
- 闻斌, 汪鹏, 万雷, 等, 2008. 中国近海海域台风浪模拟试验[J]. 海洋通报, 27(3): 1-6.
- 徐福敏, 张长宽, 陶建峰, 2004. 浅水波浪数值模型 SWAN 的原理及应用综述[J]. 水科学进展, 15(4): 538-542.
- 许富祥, 1996. 中国近海及其邻近海域灾害性海浪的时空分布 [J]. 海洋学报, 18(2): 26-31.
- 徐佳丽, 时健, 张弛, 等, 2019. 近 40 年中国近海波浪数据库的建立及极值分析[J]. 海洋工程, 37(6): 94-103.
- 张尧, 谢欣, 陶爱峰, 等, 2018. Boussinesq 相位解析的海岸水动力学数学模型研究进展[J]. 海洋通报, 37(5): 481-493.
- 郑崇伟, 2011. 基于 CCMP 风场的近 22 年中国海表风场特征分析[J]. 气象与减灾研究, 34(3): 41-46.
- BIAN G F, NIE G Z, QIU X, 2021. How well is outer tropical cyclone size represented in the ERA5 reanalysis dataset?[J]. Atmospheric Research, 249: 105339.
- DMITRY S D, MARK A B, Guðrún N P, et al, 2017. 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, 122(3): 1943-1973.
- GRAMCIANINVO C B, CAMPOS R M, DE CAMARGO R, et al, 2020. Analysis of Atlantic extratropical storm tracks characteristics in 41 years of ERA5 and CFSR/CFSv2 databases[J]. Ocean Engineering, 216: 108-111.
- HANS H, BILL B, PAUL B, et al, 2020. The ERA5 global reanalysis[J]. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 146(730).
- HODGES K I, LEE R W, BENGTTSSON L, 2011. A Comparison of Extratropical Cyclones in Recent Reanalyses ERA-Interim, NASA MERRA, NCEP CFSR, and JRA-25[J]. Journal of Climate, 24(18): 4888-4906.
- LIANG B C, GAO H J, SHAO Z X, 2019. Characteristics of global waves based on the third-generation wave model SWAN [J]. Marine Structures, 64: 35-53.
- MALAKAR P, KESARKAR A P, BHATE J N, et al, 2020. Comparison of Reanalysis Data Sets to Comprehend the Evolution of Tropical Cyclones Over North Indian Ocean [J]. Earth And Space Science, 7(2):



- 1-15.
- NASEEF T M, KUMAR V S, 2020. Climatology and trends of the Indian Ocean surface waves based on 39-year long ERA5 reanalysis data [J]. *International Journal of Climatology*, 40(2): 979-1006.
- SAHA, S, MOORTHY, S, Wu X R, et al, 2014. The NCEP Climate Forecast System Version 2[J]. 27(6): 2185-2208.
- SHAO Z X, LIANG B C, LI H J, et al, 2018. Blended wind fields for wave modeling of tropical cyclones in the South China Sea and East China Sea[J]. *Applied Ocean Research*, 71: 20-33.
- WU W, LI P, ZHAI F, et al, 2020. Evaluation of different wind resources in simulating wave height for the Bohai, Yellow, and East China Seas (BYES) with SWAN model[J]. *Continental Shelf Research*, 207: 104217.
- ZHANG C K, ZHANG D S, ZHANG J L, et al, 1999. Tidal current-induced formation—storm-induced change—tidal current-induced recovery—Interpretation of depositional dynamics of formation and evolution of radial sand ridges on the Yellow Sea seafloor[J]. *Science in China (Series D: Earth Sciences)* (1): 3-5.
- ZHANG L, ZHANG X, Chu P C, et al, 2017. Impact of sea spray on the Yellow and East China Seas thermal structure during the passage of Typhoon Rammasun (2002)[J]. *Journal of Geophysical Research-Oceans*, 122(10): 7783-7802.

(本文编辑: 王少朋)