

再分析风场驱动下的南海波浪模拟误差*

王绿卿^{1,3}, 梁丙臣^{1,2**}, 夏运强³, 邵珠晓¹, 高慧君¹

(1. 中国海洋大学工程学院, 山东 青岛 266100; 2. 中国海洋大学山东省海洋工程重点实验室, 山东 青岛 266100; 3. 海军研究院海防工程设计研究所, 北京 100070)

摘要: 本文采用国际上广泛应用的3种再分析风场驱动 WAVEWATCH III 模型得到了南海波浪后报数据,并基于全球卫星高度计波高数据和我国沿海浮标实测数据对不同的风场计算结果进行了对比分析,分析表明3种风场的误差特征相差明显,其中 ERA-40 风场偏小,CFSR 风场非常适合模拟常见天气的波浪过程,NCDC 风场适合模拟大浪过程。论文重点以 NCDC 风场后报波浪数据分析了波浪模型模拟误差特点,发现在台风频发的南海北部海域,再分析风场易低估大值波高,而在季风影响明显的南海南部海域,再分析风场易高估波高。浮标周边 2°范围海域内的卫星高度计波高模拟误差趋势与浮标波高模拟误差趋势相似,浮标波高数据的统计特征值与“2度法”提取的卫星高度计数据统计特征值具有较高一致性。

关键词: 再分析风场; WAVEWATCH III; 模拟误差分析; 南中国海; 波浪模拟

中图法分类号: R965.1

文献标志码: A

文章编号: 1672-5174(2020)11-096-09

DOI: 10.16441/j.cnki.hdxh.20180176

引用格式:王绿卿, 梁丙臣, 夏运强, 等. 再分析风场驱动下的南海波浪模拟误差[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2020, 50(11): 96-104.

WANG Lv-Qing, LIANG Bing-Chen, XIA Yun-Qiang, et al. Simulation error of wave models forced by reanalysis wind data in the South China Sea[J]. Periodical of Ocean University of China, 2020, 50(11): 96-104.

再分析风场被广泛用于各类海浪后报及波候研究^[1-3],在没有实测数据的海域,可采用再分析风场驱动波浪数学模型获得连续多年的波浪数据开展相关研究。

研究人员对再分析风场驱动下的波浪数值模型进行了大量的校核及检验工作^[4-7],由于风场精度及模型模拟机制本身的因素,计算值和实测值之间总会存在一定的误差。基于 WAVEWATCH III 模型(下文简称 WW3)结果的研究发现,模型计算误差在不同海域的具有不同的特征^[6],且呈现出一定的趋势性^[8]。在已有研究中,针对再分析风场驱动下的中国海域波浪模型误差研究成果不多。

本文对比了国际上应用广泛的3类再分析风场产品的波浪后报结果,对南海海域的波浪模型误差特点进行分析,得到的相关结论对指导合理使用后分析风场产品具有实际参考价值。

1 波浪模型设置

1.1 再分析风场数据

国际上一些气象研究机构提供了不同的再分析风

场产品^[9],应用较广泛的有欧洲中期天气预报中心(ECMWF)的 ERA-40 数据、美国国家海洋大气管理局的 CFSR 数据(NOAA/NCEP)^[10]和卫星融合数据(NOAA/NCDC)^[11]。

表1列出上述3个再分析风场产品的基本信息,各风场时间精度均为6h,空间解析精度约为0.25°左右。实际应用表明,再分析风场能够较好地后报模拟0.1~0.99分位数之间的波高数据,准确复演海域波高的平均、整体、长期趋势,但在此时间及空间精度下对大风过程刻画不足,在采用大值波高时需谨慎^[12],文献[12]认为CFSR风场相对ERA风场更适合做极值大浪分析。

CFSR再分析风场以微波成像仪探测数据为基础数据,通过神经网络转换函数得到。神经网络训练数据中的大值风速缺失会导致最终再分析产品数据无大值风速过程^[13]。NCDC卫星融合数据是综合利用不同卫星遥测设备同化得到的数据,从后文对比可以发现,NCDC风场数据产品能够较好地后报大值波浪过程。

* 基金项目:国家自然科学基金项目(51739010,51679223);山东省自然科学基金项目(JQ201506)资助

Supported by the National Natural Science Foundation of China (51739010,51679223);the Natural Science Foundation of Shandong Province, China (JQ201506)

收稿日期:2018-03-26;修订日期:2018-09-05

作者简介:王绿卿(1978-),男,高级工程师。E-mail:picsoho@163.com

** 通讯作者:bingchen@ouc.edu.cn

表 1 常用再分析风场数据基本信息
Table 1 Brief information of the reanalysis
wind products widely used in the research

风场名称 ^①	CFSR	ERA-40	NCDC
可用年限 ^②	1979—2010	1979—2015	1981—2008
发布机构 ^③	NOAA/NCEP	ECMWF	NOAA/NCDC
空间精度 ^④	0.31°	0.25°	0.25°

Note: ①Wind products; ②Time available; ③Agency; ④Grid

1.2 WAVEWATCH III 模型设置

第三代波浪数值模型广泛用于海洋波浪数据的后报研究,WW3 作为其中的代表模型主要用于中、大尺度海域的波浪数值研究。该模型作为 NOAA 的业务化预报平台为美国诸多研究结构提供基础波浪数据^[14],国际上 WW3 也广泛用于波浪后报及波候研究,其可靠性得到一致认可^[2, 14-16]。

本文采用 WW3 模型搭建中国海及附近海域波浪后报数学模型,波浪模型采用 Tolman 的经典输入耗散组合项,即 Tolman Chalikov 计算组合。模型采用 ET-OPO2 地形数据作为水深基础地形^[17],在解析岛屿(“障碍物”)及大陆岸线时采用全球高精度岸线形状数据,既能满足水深精度要求,又能较好模拟大陆岸线对波浪场的影响。在全球或中大尺度海洋波浪模型中,计算网格间距往往较大,地形网格数据无法精确解析大洋岛屿,WW3 模型通过加入“障碍物”数据,在数值方法上考虑了岛屿的影响^[17],表 2 为本文所用 WW3 模型的基本参数设置。

2 实测波浪数据

研究采用浮标实测波浪数据和卫星高度计波高数据作为模型验证和误差分析的依据。

QF301~QF303 波浪浮标位处广东东南沿海,浮标所处海域开敞无岛屿,3 个浮标距离大陆海岸线在 50~85 km 之间,其中 QF301 距 QF302 约 200 km, QF302 距 QF303 约 130 km。实测数据中包括 H_s 波高,平均周期(T_p)及波向,采集时间间隔为 1 h,采集时间为 2009—2013 年,各浮标位置见图 1。

随着卫星遥感测量技术的不断提高,卫星高度计数据精度得到一致认可^[18],在验证中、大尺度海域波浪数学模型时,常常采用卫星高度计数据作为验证依据^[5, 19-20]。本研究选用 GlobWAVE 项目发布的全球卫星高度计波高融合数据(<http://globwave.ifremer.fr/>)作为验证及分析的依据,该数据产品期限为 1993—2016 年,数据质量可靠^[21-22]。本文用到了 3 个海域的卫星同步模型数据进行分析,即图 1 中的 XS、NS 和 TP 海域,其中 XS 覆盖西沙群岛海域,NS 覆盖南沙群岛海域,TP 海域位于菲律宾西侧。

表 2 WW3 模型设置参数列表
Table 2 Wave model setup of WW3

基本参数名称 Names of parameters	参数设置 Setup
计算范围及精度 ^①	0°N ~45°N, 100°E~130°E, 10'×10'
模型最小水深 ^② /m	2.5
方向谱频率参数 ^③	频谱数: 25, 方向数: 36Frequency: 25, direction: 36
时间步长 ^④ /s	1 800, 600, 900, 45
常规数据输出间隔 ^⑤ /s	3 600
卫星高度计轨迹 ^⑥	GLOBWAVE 数据路径信息 Track information from GLOB- WAVE
卫星高度计输出间隔 ^⑦ /s	1 800 (FLX3 CTYPE = 1, CDMAX=0.002 5)
其他模型参数设置 ^⑧	MISC FLAGTR=4 SBT1 GAMMA=-0.038 &MISC FLAGTR=4, CICE0= 0.33, CICE1=0.67 &SDS2 PHIMIN=0.003 &SIN4 BETAMAX = 1. 52, ZOMAX=1.002

Note: ①Computing range and grid; ②Minimum water depth in model; ③Setup of directional spectrum; ④Time steps; ⑤Interval of normal model output; ⑥Altimeter track; ⑦Output intervals of altimeter synchronized wave height; ⑧Other model setup

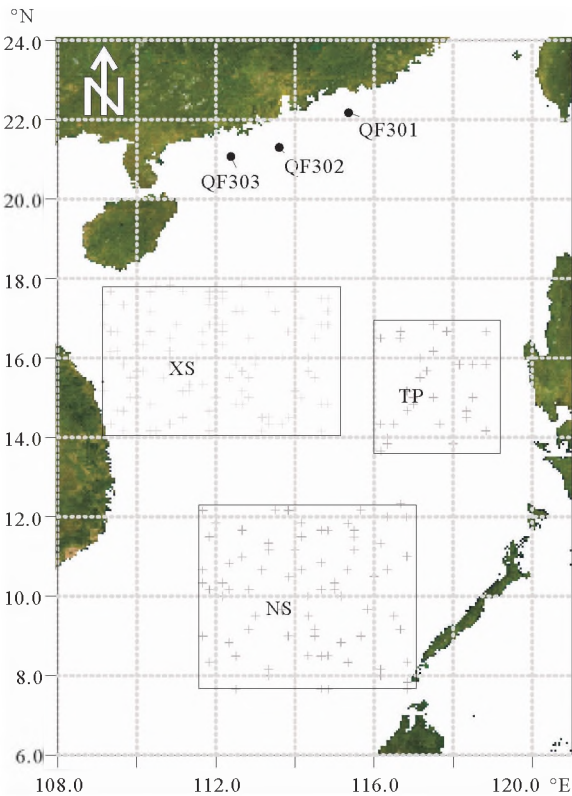


图 1 浮标位置及卫星高度计数据提取范围
Fig.1 Locations of buoys and covering oceans of altimeter data

3 再分析风场比较

图 2、3 分别是不同再分析风场驱动 WW3 模型在 XS、NS 海域的卫星同步波高数据对比图,图 4、5 为对应的卫星高度计实测数据和同步模型数据分位数对比图。

综合以上各图,ERA-40 风场得到的模型波高整体低于卫星高度计实测值;CFSR 风场驱动下低值波高符合程度较好,但对大值波浪过程捕捉能力相对较弱;NCDC 卫星融合风场能够很好地捕捉大浪过程,但略微高估小值波浪。

根据上述风场误差特点,在选用驱动风场时需考虑实际研究的需要,如在研究长期波候变化时宜采用 CFSR 风场,但如果为海洋(岸)工程提供波浪数据,应当选用能够较好捕捉大浪过程的 NCDC 风场数据。

4 基于浮标数据的模型误差分析

本节及第 5 节将依据 NCDC 融合风场后报波浪数据进行 WW3 模型模拟误差分析。

高度计受卫星绕轨周期影响,无法采集到定点海域的逐时数据,为提高卫星高度计数据的使用效率,从 1990 年代开始有学者尝试采用“平均海域”的方法基于高度计数据计算重现期波高及风速^[23],之后,不同学者对卫星高度计数据在不同范围海域的均质性进行了研究^[24-26],认为在经纬度 $2^{\circ} \times 2^{\circ}$ 范围海域内的波浪与同海域中心处浮标数据具有一致的随机特性^[24],即某处海域波浪数据样本,可由该点周边 $2^{\circ} \times 2^{\circ}$ 海域内的卫星高度计数据组建,如以 QF301 浮标为中心 $2^{\circ} \times 2^{\circ}$ 海域的卫星高度计数据与 QF301 浮标数据具有较高一致性。该方法得到的样本数据虽然无法完全取代浮标逐时数据,但在没有浮标数据的条件下,不失为一个替代方法,下文将该取样方法简称为“2 度法”。本节采用“2 度法”提取了三个 3 标附近 2° 范围海域的波高数据,并进行了统计分析。

图 6~8 为浮标 QF301 在 2010、2012 和 2013 年浮标波高、周期及 2° 范围高度计波高模拟结果分位数对比图,QF302、QF303 浮标模拟结果与此基本类似,表

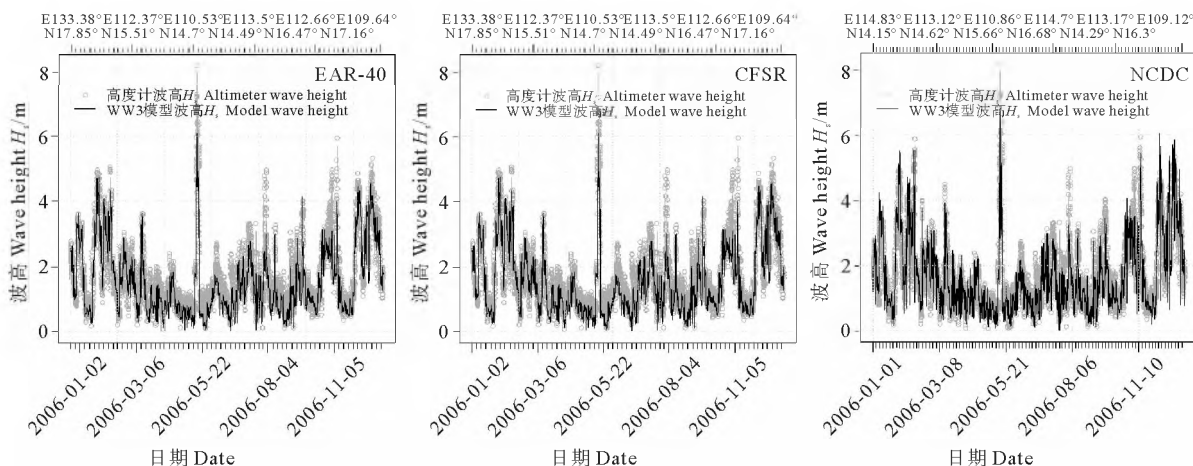


图 2 不同再分析风场驱动下 XS 海域卫星高度计波高与 WW3 模型结果对比图(2006)

Fig.2 Time series comparison of altimeter wave height and WW3 modeling results forced by different reanalysis wind data(2006)

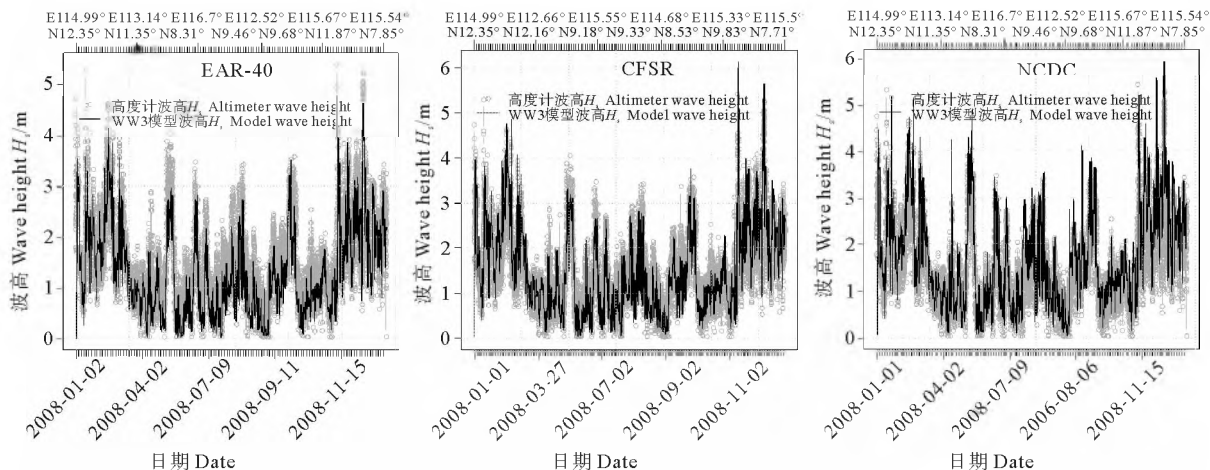


图 3 不同再分析风场驱动下 NS 海域卫星高度计波高与 WW3 模型结果对比图(2008)

Fig.3 Time series comparison of altimeter wave height and WW3 modeling results forced by different reanalysis wind data(2008)

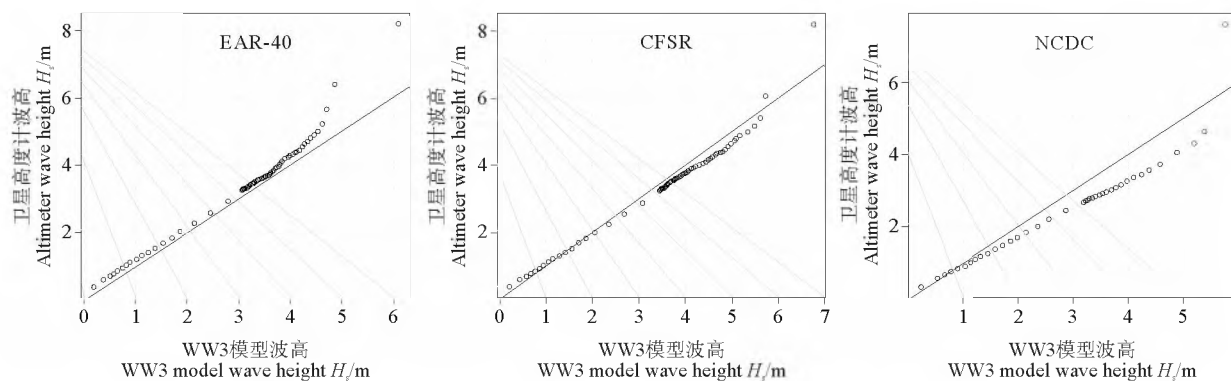


图4 不同再分析风场驱动下 XS 海域卫星高度计波高及模型同步结果分位数对比图(2006)

Fig.4 Quantiles comparison of altimeter wave height and WW3 modeling results forced by different reanalysis wind data(2006)

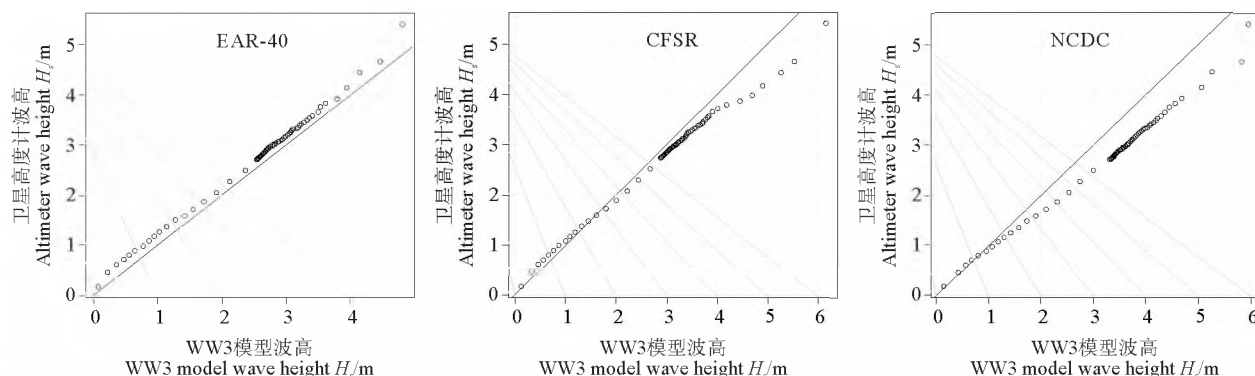


图5 不同再分析风场驱动下 NS 海域卫星高度计波高及模型同步结果分位数对比图(2006)

Fig.5 Quantiles comparison of altimeter wave height and WW3 modeling results forced by different reanalysis wind data(2006)

3~5为各浮标模拟结果及附近海域卫星高度计模拟结果统计结果。

综合上述图表,WW3 模型能够较好地复演研究海域的主要波浪特征,但 WW3 模型整体低估波浪周期,该类问题在第三代波浪数值模型中普遍存在。波高则在不同的年份出现不同的差异,如 2010 年浮标实测波高数据及高度计实测波高数据均整体大于对应的模型值,而 2012 和 2013 年则与之不同,波高误差的年际性差异主要与不同年份的风场精度有关。

对比同一年份的浮标波高数据和周边海域卫星高度计波高数据可以发现,浮标周边海域波高模型值与浮标同步模型值具有近似一致的误差趋势。

基于“2 度法”的卫星高度计波高统计特征值与浮标波高统计特征值整体接近,分位数 0.999 以下的波高数据两者基本一致。若以研究波高整体平均趋势为目的,则浮标数据与“2 度法”提取的卫星高度计数据结论相差不大,但若以研究大值波高为目的(如推算重现期波浪要素),“2 度法”数据无法满足实际应用需要。

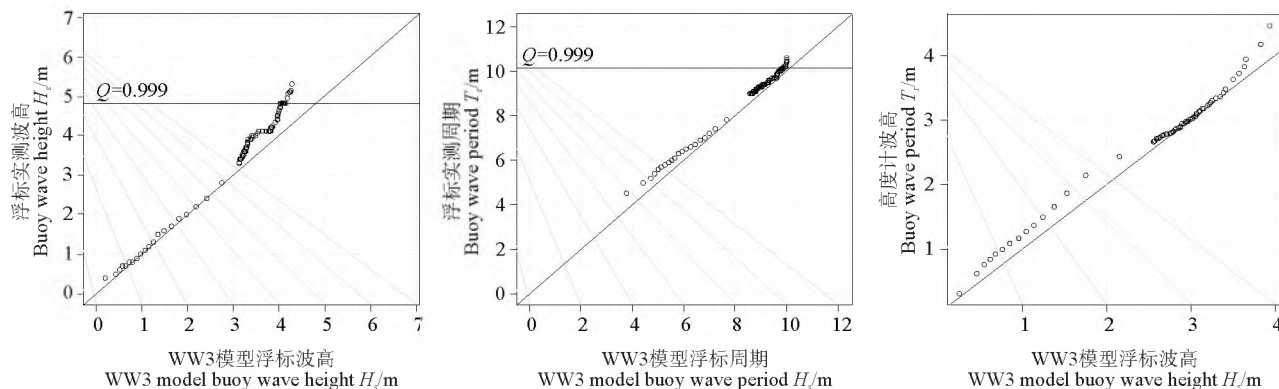


图6 浮标 QF301 波高(左)、周期(中)及附近 2°海域卫星高度计模拟波高(右)分位数对比图(2010)

Fig.6 Quantiles comparison of buoy QF301 wave height(Left), wave period (Middle) and altimeter wave height in the vicinity of 2°(Right) with equivalent modeling results (2010)

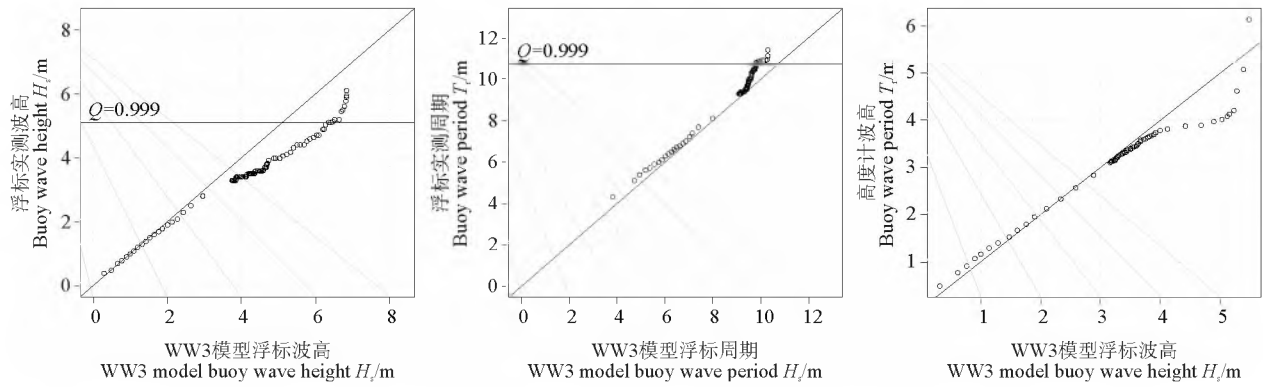


图7 浮标 QF301 波高(左)、周期(中)及附近 2°海域卫星高度计模拟波高(右)分位数对比图(2012)
Fig.7 Quantiles comparison of buoy QF301 wave height(Left) ,wave period (Middle)and altimeter wave height in the vicinity of 2°(Right) with equivalent modeling results (2012)

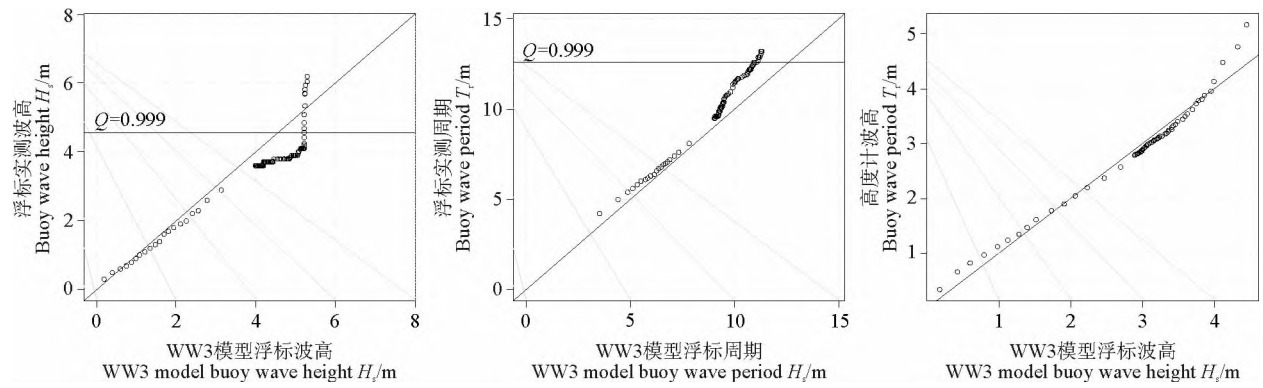


图8 浮标 QF301 波高(左)、周期(中)及附近 2°海域卫星高度计模拟波高(右)分位数对比图(2013)
Fig.8 Quantiles comparison of buoy QF301 wave height(Left) ,wave period (Middle)and altimeter wave height in the vicinity of 2°(Right) with equivalent modeling results (2013)

表 3 浮标 QF301 及周边海域波浪模拟结果对比表(2010、2012、2013)

Table 3 Validation of modeling wave results for buoy QF301 and it vicinity oceans (2010,2012,2013)

分位数 Quantiles	浮标数据 Buoy data				周边 2°海域数据 Data by 2 degree method	
	浮标实测值 Buoy data		WW3 模型值 Modeling results of WW3		高度计实测值 Altimeter data	WW3 模型值 Modeling results of WW3
	H_s/m	T_r/s	H_s/m	T_r/s	H_s/m	H_s/m
0.05	0.50	5.00	0.42	4.41	0.62	0.42
0.25	0.90	5.80	0.87	5.35	1.05	0.86
0.5	1.40	6.40	1.39	6.09	1.52	1.38
0.75	2.00	7.00	2.05	6.75	2.24	2.19
0.9	2.40	7.50	2.58	7.27	2.87	2.95
0.99	3.40	9.20	3.63	8.87	3.92	4.05
0.999	4.80	11.67	5.23	10.24	4.96	5.36
0.999 9	5.95	12.95	6.81	11.23	5.85	5.63
最大值 Max	6.20	13.20	6.83	11.31	6.15	5.63

表 4 浮标 QF302 及周边海域波浪模拟结果对比表(2010、2012、2013)

Table 4 Validation of modeling wave results for QF302 and it vicinity oceans (2010、2012、2013)

分位数 Quantiles	浮标数据 Buoy data				周边 2°海域数据 Data by 2 degree method	
	浮标实测值 Buoy data		WW3 模型值 Modeling results of WW3		高度计实测值 Altimeter data	WW3 模型值 Modeling results of WW3
	H_s/m	T_r/s	H_s/m	T_r/s	H_s/m	H_s/m
0.05	0.50	4.90	0.46	4.37	0.59	0.38
0.25	0.90	5.80	0.87	5.26	1.04	0.83
0.5	1.40	6.50	1.35	6.13	1.46	1.28
0.75	2.00	7.20	2.04	6.97	2.04	1.93
0.9	2.40	7.80	2.61	7.55	2.59	2.70
0.99	3.20	9.30	3.40	8.55	3.67	3.82
0.999	4.70	10.60	4.19	9.95	5.11	5.63
0.999 9	6.90	11.90	6.44	10.52	5.42	5.76
最大值 Max	7.00	12.00	6.65	10.55	5.47	5.81

表 5 浮标 QF303 及周边海域波浪模拟结果对比表(2010、2012、2013)

Table 5 Validation of modeling wave results for QF303 and it vicinity oceans (2010、2012、2013)

分位数 Quantiles	浮标数据 Buoy data				周边 2°海域数据 Data by 2 degree method	
	浮标实测值 Buoy data		WW3 模型值 Modeling results of WW3		高度计实测值 Altimeter data	WW3 模型值 Modeling results of WW3
	H_s/m	T_r/s	H_s/m	T_r/s	H_s/m	H_s/m
0.05	0.50	4.80	0.46	4.18	0.59	0.43
0.25	0.90	5.70	0.89	5.14	0.99	0.86
0.5	1.30	6.40	1.36	6.08	1.42	1.30
0.75	1.80	7.10	1.95	6.94	2.01	1.93
0.9	2.30	7.70	2.44	7.57	2.58	2.67
0.99	3.20	9.40	3.77	8.96	3.79	4.13
0.999	5.50	10.90	6.50	11.04	5.25	5.68
0.999 9	7.82	13.14	8.15	12.58	5.76	5.95
最大值 Max	8.90	13.70	8.25	12.69	5.82	5.99

5 基于卫星高度计数据的误差分析

图 9 给出了 TP、XS 和 NS 海域在 1991—2008 年波高模拟结果与实测值的分位数对比图,表 6 给出了相应的分位数统计结果。

综合图表,WW3 波浪模型整体较好地再现了各个海域的波浪特征,但在同一个 NCDC 再分析风场驱动下,南海不同海域的波高误差特点有明显不同。

在 TP 海域,模型值和高度计实测值整体符合较好,模型略高估一些低值波浪,模型高估的波浪集中分

布在 2~5 m 之间。由于受到西侧菲律宾半岛的遮护,台风过程未在该海域产生极端大浪,低值波高和大值波高均在模型中得到良好复演。

在 XS 海域,WW3 模型高估低值波高,高估程度略大于 TP 海域,但由于受到风场时间精度(相邻风场时间间隔为 6 h)影响,再分析风场低估台风大浪过程,导致模型结果丢失大浪数据。

在 NS 海域,冬季受东北季风影响较大,在自然界中,实际风速过程通常具有一定波动性,不会保持恒定风速的持续作用,而由时间精度为 6 h 的再分析风场插

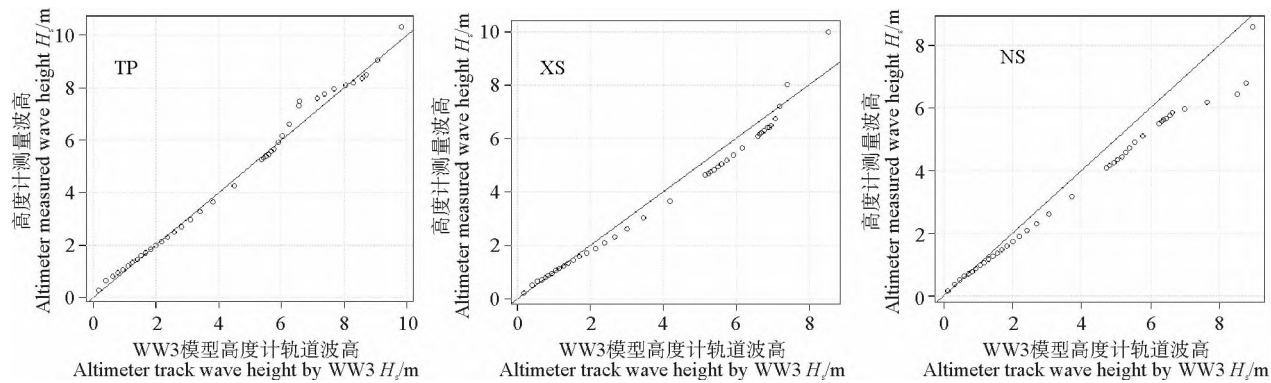


图9 卫星高度计波高模拟结果分位数对比图(1991—2008)

Fig.9 Quantiles comparison of altimeter wave height and equivalent modeling results (1991—2008)

表6 1991—2008年卫星高度计波高数据模型验证结果分位数对比表

Table 6 Quantile statistics of altimeter wave height and equivalent modeling results (1991—2008) /m

分位数 Quantiles	TP 海域 TP ocean		XS 海域 XS ocean		NS 海域 NS ocean	
	模型值 Modeling results	高度计数据 Altimeter data	模型值 Modeling results	高度计数据 Altimeter data	模型值 Modeling results	高度计数据 Altimeter data
0.05	0.37	0.61	0.38	0.47	0.26	0.34
0.25	1.07	1.19	0.84	0.87	0.80	0.77
0.5	1.80	1.82	1.37	1.31	1.38	1.23
0.75	2.77	2.66	2.34	2.06	2.14	1.86
0.9	3.73	3.58	3.36	2.94	2.96	2.55
0.99	5.37	5.27	5.15	4.63	4.72	4.10
0.999	6.55	7.32	6.60	6.09	6.25	5.50
0.999 9	9.05	9.05	7.40	8.03	8.78	6.81
最大值 Max	9.82	10.33	8.52	10.00	8.97	8.61

值得到风速过程比较光滑,不会出现风速的波动过程,容易导致波高持续增大,致使 WW3 模型高估波高。

6 结论

本文依据我国沿海浮标数据和全球卫星高度计数据对 ERA-40、CFSR、NCDC 融合风场驱动下的 WW3 模型结果进行了对比分析,并基于 NCDC 融合风场驱动的 WW3 模型结果分析了模型模拟误差分析,结论如下:

(1)WW3 模型结果受风场影响明显,不同的再分析风场产品误差特点各异,其中 ERA-40 风场风速整体偏小,CFSR 风场适合平常天气的波浪模拟,能够较好地模拟波浪过程的长期趋势,而 NCDC 风场能够较好地捕捉大浪过程,实际应用中需根据研究目的确定采用合适的再分析风场产品,如 CFSR 风场适合研究波候的平均趋势,而 NCDC 风场更适合研究大值波浪。

(2)误差分析表明各浮标在不同年份的波浪周期模拟

结果整体偏低,而波高在不同年份、不同海域的误差趋势各异。通过分析可认为由再分析风场驱动的 WW3 模型波高误差具有“海域性、年际性和趋势性”特点,WW3 模型整体低估波浪周期。

(3)浮标周边 2°范围海域内的卫星高度计波高模拟误差趋势与浮标波高模拟误差趋势具有一定相似性,浮标波高数据的统计特征值与“2 度法”提取的卫星高度计数据统计特征值具有较高的一致性,两者分位数 0.999 以下的统计值符合良好。

(4)6 h 间隔的后分析风场较难准确复演高分位数波高,尤其在台风频发的南海北部海域,易造成大值波浪缺失,低估大值波浪,而在季风影响明显的南海南部海域,同样受输入风场时间精度影响,易高估波高。

参考文献:

[1] Musi cS, Nickovi c S. 44-year wave hindcast for the eastern Mediterranean[J]. Coastal Engineering, 2008, 55(11): 872-880.

- [2] Amrutha M M, Kumar V S, Sandhya K G, et al. Wave hindcast studies using SWAN nested in WAVEWATCH III-comparison with measured nearshore buoy data off Karwar, eastern Arabian Sea[J]. *Ocean Engineering*, 2016, 119: 114-124.
- [3] Orimolade A P, Haver S, Gudmestad O T. Estimation of extreme significant wave heights and the associated uncertainties: A case study using NORA10 hindcast data for the Barents Sea[J]. *Marine Structures*, 2016, 49: 1-17.
- [4] Liu P C, Schwab D J, Jensen R E. Has wind-wave modeling reached its limit? [J]. *Ocean Engineering*, 2002, 29(1): 81-98.
- [5] Janssen P A E M. Progress in ocean wave forecasting[J]. *Journal of Computational Physics*, 2008, 227(7): 3572-3594.
- [6] Hanson J L, Tracy B A, Tolman H L, et al. Pacific hindcast performance of three numerical wave models[J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2009, 26(8): 1614-1633.
- [7] Tolman H L, Chalikov D. Source terms in a third-generation wind wave model[J]. *Journal of Physical Oceanography*, 1996, 26(11): 2497-2518.
- [8] Chawla A, Tolman H L, Gerald V, et al. A multigrid wave forecasting model: A new paradigm in operational wave forecasting[J]. *Weather and Forecasting*, 2013, 28(4): 1057-1078.
- [9] Bao X, Zhang F. Evaluation of NCEP-CFSR, NCEP-NCAR, ERA-Interim, and ERA-40 reanalysis datasets against independent sounding observations over the Tibetan Plateau[J]. *Journal of Climate*, 2013, 26(1): 206-214.
- [10] Saha S, Moorthi S, Pan H L, et al. The NCEP climate forecast system reanalysis[J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2010, 91(8): 1015-1058.
- [11] Zhang H M, Reynolds R W, Bates J J. Blended and gridded high resolution global sea surface wind speed and climatology from multiple satellites: 1987-present[C]. // *Proceedings of the 14th Conference on Satellite Meteorology and Oceanography*. Atlant: American Meteorological Society, 2006: 2-23.
- [12] Stopa J E, Cheung K F. Intercomparison of wind and wave data from the ECMWF Reanalysis Interim and the NCEP Climate Forecast System Reanalysis[J]. *Ocean Modelling*, 2014, 75: 65-83.
- [13] Krasnopolsky V M, Breaker L C, Gemmill W H. A neural network as a nonlinear transfer function model for retrieving surface wind speeds from the special sensor microwave imager[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 1995, 100(C6): 11033-11045.
- [14] Dykes J D, Rogers W E. WAVEWATCH III: Transition to Naval Operations (Session Paper)[EB/OL]. (2011-11-17) <https://scholarworks.uno.edu/oceanwaves/2011>.
- [15] Wang D P, Oey L Y. Hindcast of waves and currents in Hurricane Katrina[J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2008, 89(4): 487-496.
- [16] Chawla A, Tolman H L, Gerald V, et al. A multigrid wave forecasting model: A new paradigm in operational wave forecasting[J]. *Weather and Forecasting*, 2013, 28(4): 1057-1078.
- [17] Chawla A, Tolman H L. Automated Grid Generation for WAVEWATCH III[M]. Washington, DC: Technical Bulletin 254, NCEP/NOAA/NWS, National Center for Environmental Prediction, 2007.
- [18] Mirzaei A, Tangang F, Juneng L, et al. Wave climate simulation for southern region of the South China Sea[J]. *Ocean Dynamics*, 2013, 63(8): 961-977.
- [19] Young I R, Babanin A V, Zieger S. The decay rate of ocean swell observed by altimeter [J]. *Journal of Physical Oceanography*, 2013, 43(11): 2322-2333.
- [20] Ardhuin F, Rogers E, Babanin A V, et al. Semiempirical dissipation source functions for ocean waves. Part I: Definition, calibration, and validation[J]. *Journal of Physical Oceanography*, 2010, 40(9): 1917-1941.
- [21] David W, Erick R. Validation of global WAVEWATCH III Hindcasts Using Merged Altimeter Data[EB/OL]. <http://global-wave.ifremer.fr/tools/case-studies-tutorials/validation-of-global-wavewatch-iii-hindcasts-using-merged-altimeter-data>.
- [22] Ellis A. GlobWave_D.7 Product User Guide Phase 3[M]. Leatherhead, Surrey, UK: Logica UK Ltd, 2013.
- [23] Carter D J T. Estimating Extreme Wave Heights in the NE Atlantic from GEOSAT Data[M]. London: Health and Safety Executive, 1993.
- [24] Vinoth J, Young I R. Global estimates of extreme wind speed and wave height[J]. *Journal of Climate*, 2011, 24(6): 1647-1665.
- [25] Alves J H G M, Young I R. On estimating extreme wave heights using combined Geosat, Topex/Poseidon and ERS-1 altimeter data[J]. *Applied Ocean Research*, 2003, 25(4): 167-186.
- [26] Challenor P G, Wimmer W, Ashton I. Climate Change and Extreme Wave heights in the North Atlantic[C]. Salzburg, Austria: Envisat& ERS Symposium, 2005: 572.

Simulation Error of Wave Models Forced by Reanalysis Wind Data in the South China Sea

WANG Lv-Qing^{1,3}, LIANG Bing-Chen^{1,2}, XIA Yun-Qiang³, SHAO Zhu-Xiao¹, GAO Hui-Jun¹

(1.College of Engineering, Ocean University of China, Qingdao 266100, China; 2.Shandong Province Key Laboratory of Ocean Engineering, Ocean University of China, Qingdao 266100, China; 3.NAVY Institute of Engineering Design & Research, Beijing 100070, China)

Abstract: In this paper, WAVEWATCH III wave model, which is individually forced by ERA-40, CFSR and NCDC reanalysis wind products, is used to obtain wave data in the South China Sea. Based on the global satellite altimeter wave height data and Chinese coastal buoy wave data, the three sets of modeling wave results induced by different wind products are compared and analyzed. It is revealed that the error characteristics of the three reanalysis wind products are obviously different. The ERA-40 wind data underestimate wave height and the CFSR wind field is very suitable for simulating the wave climate in the common weather. The NCDC wind data is more capable to capture large wave height series. Generally, according to the validation based on buoy data and altimeter wave data, both CFSR and NCDC reanalysis wind products can make good simulation of the main wave series in the South China Sea. Referring to the hindcasting wave data by NCDC wind, the error of WAVEWATCH III are investigated. It is found that in the north of the South China Sea where typhoons occur frequently, wave model tend to underestimate large wave heights. While in the south of the South China Sea, where the monsoon has a significant impact, wave model is prone to overestimate waves. Although the wave height errors vary from the north to the south, the WW3 wave model underestimate wave period in the whole South China Sea. According to the error characteristics, different reanalysis wind products should be used to conduct different research. For example, NCDC reanalysis wind is more suitable for definition of engineering wave standards and CFSR reanalysis wind is more capable to investigate long-term wave climate. The tendency of errors provides helpful clues for smart use of the hindcasting wave data. It is proved that all of the reanalysis wind products utilized in this paper is prone to underestimate extreme waves, especially those waves induced by intense typhoons, which is mainly due to the 6-hour interval of the wind field. It should be very cautious to use high quantiles of the hindcasting wave results. The simulation error trend of satellite altimeter wave height in the oceans of 2° around a buoy is similar with that of the buoy wave height simulation. The statistical quantiles of buoy wave height data are generally equal with those of satellite altimeter data extracted by the “2 Degree Method”. Especially, for the low quantiles, similar statistical results can be deduced from the data by “2 Degree Method” and the buoy data. In those oceans where there is not long-term buoy data, the data set by “2 Degree Method” is a good alternative to buoy data for long-term wave climate research.

Key words: reanalysis wind; WAVEWATCH III; analysis of simulating error; South China Sea; numerical simulation of waves

责任编辑 高 蓓