

王奎, 岳显昌, 吴雄斌, 等. 台湾海峡有效波高的 SWAN 模式与 ERA-Interim 数据对比分析[J]. 海洋学报, 2021, 43(12): 15–25, doi:10.12284/hyxb2021173

Wang Kui, Yue Xianchang, Wu Xiongbin, et al. Comparative analysis of SWAN model and ERA-Interim data on significant wave height in the Taiwan Strait[J]. Haiyang Xuebao, 2021, 43(12): 15–25, doi:10.12284/hyxb2021173

# 台湾海峡有效波高的 SWAN 模式 与 ERA-Interim 数据对比分析

王奎<sup>1</sup>, 岳显昌<sup>1\*</sup>, 吴雄斌<sup>1</sup>, 周恒<sup>1</sup>, 滕陈轲敏<sup>1</sup>

(1. 武汉大学 电子信息学院, 湖北 武汉 430072)

**摘要:** 有效波高是描述海浪的关键参数。欧洲中期天气预报中心 (ECMWF) 提供的 ERA-Interim 再分析数据提供了全球海浪的有效波高, 本文选取该数据在台湾海峡 2013 年 3 月份的有效波高结果, 分别与浮标观测数据以及海浪数值模式 SWAN (Simulating Waves Nearshore) 的数值模拟结果相对比, 来分析其预报效果。结果显示: 在浮标点, ERA-Interim 数据和 SWAN 模拟浪高数据与浮标浪高数据的时间相关系数分别为 0.94 和 0.98, ERA-Interim 数据的浪高均值约为浮标的 51%, 为 SWAN 模拟数据的 70%。在台湾海峡区域, ERA-Interim 数据与 SWAN 模拟浪高之间的空间异常相关系数 (ACC) 月均值为 0.51, 时序 ACC 曲线显示, 一般在海峡东北口风初起时刻 ACC 值最小, 在风吹遍海峡并增长的过程中, ACC 迅速增加, 在风速达到最大值之后, ACC 开始下降, 但 ERA-Interim 数据与 SWAN 数值模拟结果在整个海峡区域的浪高最大值与最小值分布位置基本一致。综合分析, ERA-Interim 数据能够反映台湾海峡区域此时间段的有效波高的时空变化趋势, 在数值上有明显低估。

**关键词:** ERA-Interim 数据; SWAN; 浮标; 台湾海峡; 有效波高

中图分类号: P731.22

文献标志码: A

文章编号: 0253-4193(2021)12-0015-11

## 1 引言

海洋是一个巨大的宝库, 同时也是一个危险的区域, 在海洋上几乎每天都有各种突发事件, 风暴和巨浪、漩涡和暗流, 这些事件的发生对人类的生命财产和经济文化的发展都构成了极大的威胁。据统计, 大部分的海难事件均是由海浪引起的, 所以研究海浪场对于研究海洋以及防灾减灾来说是具有重要意义的<sup>[1]</sup>。台湾海峡是重要的海上通道, 海底地貌属大陆架浅海, 地形复杂, 海水深度从 10 m 到 80 m 不等。台湾海峡地处季风气候区, 以及受海峡“峡谷效应”的影

响, 该海域的风场受到季风的影响较大, 冬季盛行东北季风, 夏季盛行西南季风<sup>[2-4]</sup>。在季风和海底地形的共同影响下, 台湾海峡及其邻近海域经常受到台风等恶劣天气的影响进而导致船只倾覆等灾难的发生。

对于海浪的研究, 一般有 3 种方法, 即理论分析、实验观测和数值模拟<sup>[5]</sup>。在台湾海峡实验观测方面, 袁凯瑞等<sup>[6]</sup>利用福建省海洋预报台布设于台湾海峡中部的 2 号浮标对经过台湾海峡的 3 场台风进行了观测和分析, 得到了台风经过时有效波高的变化规律; Li 等<sup>[7]</sup>利用雷达组网对台湾海峡的风浪场进行了观测, 得到了台湾海峡地形和风速等对风浪场形成的

收稿日期: 2020-09-16; 修订日期: 2021-04-09。

基金项目: 广东省重点领域研发计划 (2020B1111020005); 科技部重点研发计划 (2016YFC1401100); 自然科学基金面上项目 (61771352)。

作者简介: 王奎 (1996—), 男, 河南省驻马店市人, 主要从事海洋动力学及数值模拟方向研究。E-mail: wang\_kui@whu.edu.cn

\* 通信作者: 岳显昌, 副教授, 主要从事中高层大气动力学及无线电海洋遥感方向研究。E-mail: yuexc@whu.edu.cn

影响;吴雄斌等<sup>[8]</sup>和 Wu 等<sup>[9]</sup>利用高频地波雷达和天地波一体化雷达系统对台湾海峡的海浪进行了遥感探测。随着数值模式的发展,利用数值模拟的方法对海浪的研究越来越受到国内外学者的重视。叶雨颖<sup>[10]</sup>和姬厚德<sup>[11]</sup>利用 SWAN 模式对台湾海峡强弱海况下的风浪场进行了研究分析,对该区域的风浪场特别是有台风经过时的浪场分布有了基本的认识。陈希等<sup>[12-13]</sup>通过对台湾岛及附近海域台风经过时的风浪场数值模拟,得到了台风中心位于台湾海峡不同海域时风浪场的分布特点。滕陈轲敏等<sup>[14]</sup>通过对几种不同的驱动风场的研究,发现在台湾海峡区域,CCMP 风场驱动所得模拟结果与实测的浮标结果吻合度较好,而 Christakos 等<sup>[15]</sup>通过比较几种不同类型的风场对 SWAN 模式的驱动对挪威近海岸的海浪进行了数值模拟,进而体现出风力强迫作用对海湾波浪形成的影响。丁磊和于博<sup>[16]</sup>利用 SWAN 模式对不同风速下的拖曳系数对风浪模式的影响程度进行分析,从而为拖曳系数的选择提供参考。Wang 等<sup>[17]</sup>利用 SWAN 模式对未来 30 年内青岛附近海域的台风进行了预测,为防灾减灾工作提供参考。

近年来,预报模式发展得越来越成熟,如利用欧洲中期天气预报中心(ECMWF)的再分析数据可以对全球的风浪进行预报。Dee 等<sup>[18]</sup>对 ERA-Interim 再分析数据的预测模型、数据同化方法和输入数据集进行了介绍并对其性能进行了评估,对该数据的质量表示了肯定。Kumarl 和 Naseef<sup>[19]</sup>通过在印度附近海域 ERA-Interim 数据与浮标数据的有效波高和波周期等参数的比较,初步显示出两者具有一定的一致性。Shanas 和 Kumarl<sup>[20]</sup>利用 ERA-Interim 再分析数据中 1979—2012 年的数据对阿拉伯海东部某一点的风速和有效波高的变化进行了研究分析,得到了其在该时间段内的变化规律。万勇等<sup>[21]</sup>利用 ECMWF 预报模式的 ERA-Interim 数据对东海、南海的海浪进行了研究,得到了区域内的波能分布结果。王小丹和赵文静<sup>[22]</sup>利用 ERA-Interim 数据对南沙海域的风浪场特征进行了分析,建立了适用于南海海域的风浪模型。Islek 和 Yuksel<sup>[23]</sup>通过 SWAN 模式与 ERA-Interim 再分析数据的对比,对黑海的波势能分布进行了研究。

当前文献表明,鲜有利用 ERA-Interim 数据对台湾海峡海浪的预报研究工作,本文将结合浮标观测数据、SWAN 模式数值模拟结果与 ECMWF 后报的台湾海峡的海浪有效波高数据进行对比分析,了解 SWAN 模式数值模拟结果及 ERA-Interim 再分析数据在台湾海峡海浪的预报效果。

## 2 数据

### 2.1 ERA-Interim 再分析数据

ECMWF 再分析数据来源于该组织在其公开网页中的 ERA-Interim 再分析数据(<https://apps.ecmwf.int/datasets/data/interim-full-daily>),该数据是 1979 年以来的一种涵盖了最丰富数据的全球大气再分析数据。ERA-Interim 数据是欧洲中期天气预报中心在 ERA-40 后推出的另外一套新的高质量再分析数据,采用以 12 h 为周期向前推进的连续数据同化方案,同化了大量的浮标、卫星高度计等观测数据,同时结合了改进的湿度分析和卫星数据误差校正等技术,为全球用户提供最新全球大气数值预报再分析资料,并且保持了每月一次的频率进行数据的实时更新<sup>[24-25]</sup>。

ERA-Interim 数据包含了风场资料数据、浪场资料数据、流场资料数据和海洋表面温度场资料数据等海洋参数数据,具有精度高、分辨率较高等特点,其提供的数据空间分辨率有  $0.125^{\circ} \times 0.125^{\circ}$ 、 $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$ 、 $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$ 、 $0.75^{\circ} \times 0.75^{\circ}$ 、 $3^{\circ} \times 3^{\circ}$  等。其中浪场数据的海浪谱共有 24 个波向及 30 个频率值,本文的浪高数据有效波高的空间分辨率选用网格分辨率最高的  $0.125^{\circ} \times 0.125^{\circ}$ ,时间分辨率为 6 h。

### 2.2 浮标数据

本文选用的浮标数据为台湾海峡 1 号大浮标数据,该浮标隶属于福建省海洋预报台,所处平台位于  $23.63^{\circ}\text{N}$ ,  $118.20^{\circ}\text{E}$  处,该处的水深为 39 m,其测量得到的数据包括有效波高、海表风速、风向和海流的流速流向等参数,测量的时间分辨率为 10 min,能够很好地测量出海域点的海洋参数。本文选取的浮标数据时间范围为 2013 年 3 月 1 日至 2013 年 3 月 31 日共计 31 d。

### 2.3 SWAN 模式设置

SWAN 模式的控制方程是以 Euler 近似的波作用平衡方程为基础,考虑了波浪的产生和耗散过程,利用在有海流影响的情况下守恒的动量谱密度  $N$ ,考虑该作用量密度随时间的变化、在地理空间上的传播、由于水深和流的变化导致的相对频率变化以及由流和水深的变化引起的折射和变浅作用等,与包含有风能输入、波能耗散和非线性波-波相互作用的能量源项相结合,共同驱动完成海浪的产生和耗散过程<sup>[26-29]</sup>。

本文的研究区域为台湾海峡,东西向经度范围为  $117.0^{\circ} \sim 121.0^{\circ}\text{E}$ ,南北向纬度范围为  $22.0^{\circ} \sim 25.0^{\circ}\text{N}$ 。但是为了减小区域过小对数值模拟的有效浪高产生

较大的误差,所以在进行网格制作和SWAN模式数值计算过程中其区域设置为中国邻近海区域。计算网格选用单层不规则三角形网格,网格制作选用SMS(Surface Water Modeling System)软件<sup>[30-31]</sup>,三角形网格格点之间的距离为0.1°。本文的岸线数据来自于由美国国家海洋和大气管理局(National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA)和美国夏威夷大学共同开发和维护的全球地理信息数据集GSH-HG(A Global Self-consistent, Hierarchical, High-resolution Geography Database),将其进行处理后用于网格制作,得到的计算区域的网格如图1所示,同时在图1中给出了本文所关注的台湾海峡区域网格放大图。

计算区域的边界设置为图1中中国邻近海区域的下边界和右边界设置为开边界,其他边界设置为陆地边界。将从NOAA中的国家环境信息中心(National Centers for Environmental Information, NCEI)获取到的空间分辨率为1'×1'的水深数据插入到网格中,图2为得到的研究区域的水深地形图。台湾海峡平均水深不大,有大面积的浅滩和隆起,所以为了更清楚地展示这些浅水区,了解水深对海浪的影响,在水深图中将大于100m的水深设置为蓝色。

在本文中,驱动风场选择CCMP(Cross Calibrated Multi-Platform)卫星遥感风场<sup>[32]</sup>。CCMP风场是由美

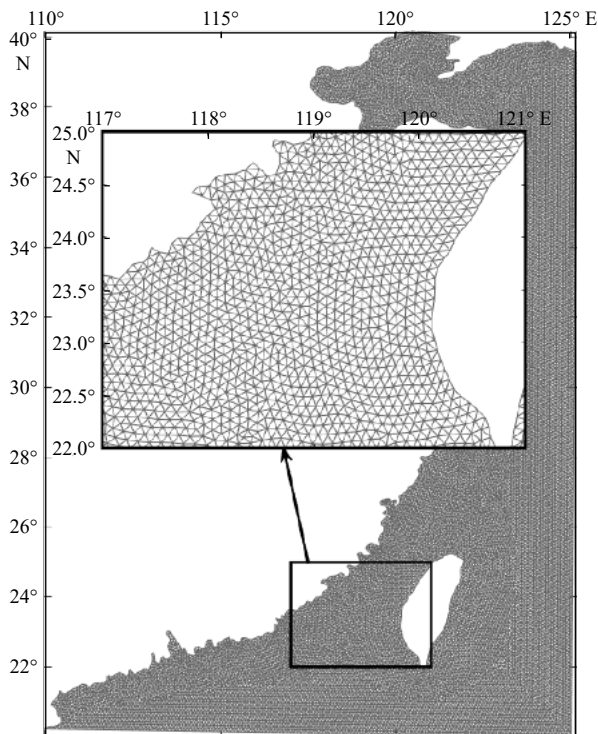


图1 计算区域网格及台湾海峡研究区域局部放大  
Fig. 1 The computational region grid and the partial enlarged detail of Taiwan Strait

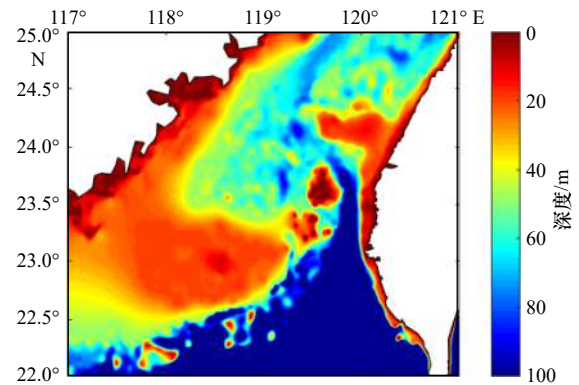


图2 台湾海峡研究区域水深地形  
Fig. 2 Topography and depth of the study area in the Taiwan Strait

国国家航空航天局(NASA)于2009年推出,具有较高的时空分辨率(时间分辨率为6h,空间分辨率为 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ ),自发布以来,被广泛应用于海洋与大气环境问题的研究。风场驱动海水产生波浪的指数增长部分采用Janssen(1989, 1991)增长模式<sup>[33-34]</sup>,考虑四波相互作用<sup>[35-36]</sup>,模式输出时间分辨率为30min。考虑到与浮标数据的对比,数值模拟的输出时间段选为2013年3月1日至2013年3月31日,共计31d。

### 3 单点模拟结果分析

我们首先输出浮标点处的模拟结果用于对比,了解SWAN模拟结果与浮标实测数据之间的差别,而后以浮标数据为参考与ERA-Interim再分析数据进行对比,了解ERA-Interim数据的预测效果。

#### 3.1 SWAN数值模拟结果与浮标数据对比分析

浮标点处SWAN模式模拟的有效波高与浮标测量的有效波高时序结果展示在图3中,同时图中展示了两者之间的差值与海面10m处风速(本文中的风速均为CCMP风速)。图3显示,在模拟时段内有6次显著的起风过程,最大风速均超过了10m/s,海浪有效波高随着风速的增减而起伏,同时显示出很好的风生浪时延特性。SWAN模式模拟的浪高(蓝色实线)与浮标实测浪高(黑圆点)变化趋势保持非常好的一致性,统计分析表明两者的相关系数达到了0.98。通常,模拟浪高低于浮标浪高,但在刚起风阶段也会出现模拟浪高高于浮标浪高的情况。为此,我们计算了浮标实测浪高与模拟浪高的差值,如图中的绿线所示。多数时刻该差值都为正值且低于1m,这表明模拟的海浪有效波高一般低于实际结果,但在风起阶段二者的差值会呈现负值,这表明模拟的风生海浪的初起过程比实际风生海浪的初起过程更为迅速。另外,

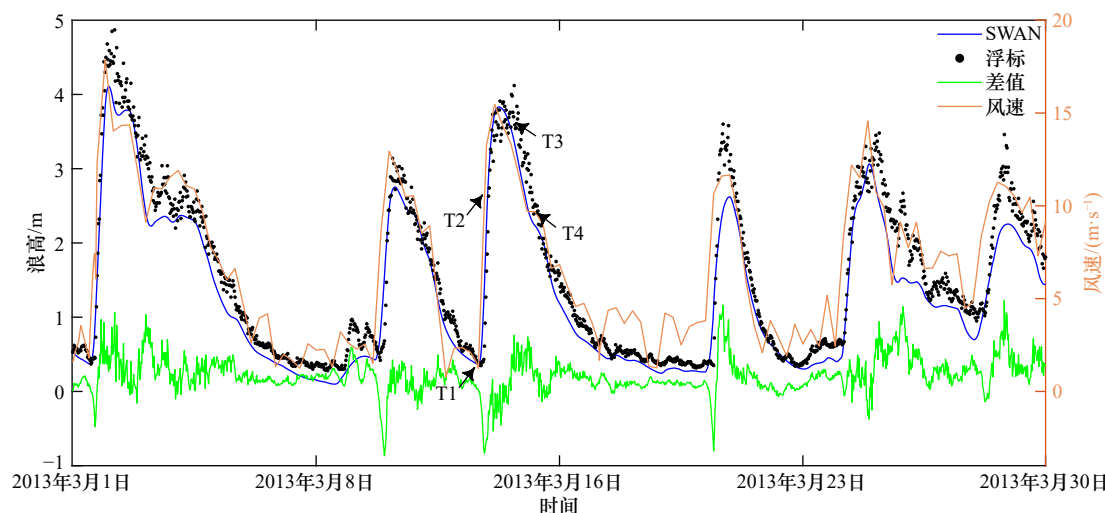


图 3 浮标点处有效波高的 SWAN 模式模拟结果(蓝线)与浮标观测结果(点线)对比

Fig. 3 Comparison of SWAN model simulation results (blue line) and buoy observation results (dotted line) of the significant wave height at the buoy point

在风速极大值附近,实测海浪浪高往往会很散乱,实测和模拟结果之间的差值会出现显著的起伏,这可能是实际中发生的海浪破碎导致的结果。统计分析表明,二者差值的平均值是 0.25 m,均方根值为 0.36 m。

从图 3 中可以看出,不同的风速条件下两者之间的吻合度存在一定的差别,根据 Li 等<sup>[7]</sup>对不同风速下风场的分类,本文根据风速  $U$  的大小将研究时间段内的有效波高进行了分类。首先将风场分为弱风 ( $0 \text{ m/s} \leq U \leq 5 \text{ m/s}$ )、中风 ( $5 \text{ m/s} < U \leq 12 \text{ m/s}$ ) 和强风 ( $U > 12 \text{ m/s}$ ), 然后对每一种风速情况下对应的 SWAN 数值模拟与浮标测得的有效波高的相关性及两者差值的最大值、均值和均方根值(RMS)进行了计算,得到的结果如表 1 所示。

根据得到的结果可以看出,无论在何种风速条件下,模拟和实测浪高的相关系数都在 0.90 以上。在中风速的条件下,两者之间的相关系数最大。该风速条件下有最大的偏差值、偏差均值和偏差均方根值。结合图 3,该风速条件包括了全部风起过程,模拟过程中风生浪的时延与实际风生浪的时延可能是该偏差更大的原因。在强风条件下,偏差的值与均方根值略低于中风情况,考虑到浮标浪高的观测准确度同时与观测值的大小有关,那么其结果的相对准确度相比于中风条件下更高。从整体上来说,数值模拟的结果在与浮标进行对比之后我们可以确定,模拟结果是可信的。

### 3.2 欧洲中期天气预报中心再分析数据与浮标数据对比结果分析

欧洲中期天气预报中心(ECMWF)再分析数据在

表 1 不同风场条件下 SWAN 数值模拟结果与浮标观测结果比较

Table 1 Comparison of SWAN numerical simulation results and buoy observation results under different wind field conditions

风场类型	风速 $U$ 范围( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ )	相关系数	二者差值 /m		
			最大值	均值	RMS
弱风	$0 \leq U \leq 5$	0.90	0.60	0.15	0.18
中风	$5 < U \leq 12$	0.93	1.29	0.34	0.46
强风	$U > 12$	0.90	1.20	0.28	0.42

气象预报方面的应用越来越广泛,对于其海浪有效波高数据产品在我国有关海域的应用报道不多,这里我们将该数据集中的 ERA-Interim 数据与 SWAN 数值模拟结果进行对比,了解其数据特性。我们首先以浮标点为参考点将二者进行对比。在浮标点周围的 4 个 ERA-Interim 数据网格点具有不同的水深,考虑到水深对风浪形成的影响,我们选择水深和浮标点最靠近的位于浮标右上方位置的点处( $23.750^\circ\text{N}$ ,  $118.250^\circ\text{E}$ ) ERA-Interim 数据和浮标数据进行对比,考虑到 ERA-Interim 数据的 6 h 时间分辨率,我们先对浮标浪高进行了均值处理。二者对比结果的时序图展示在图 4 中,同样给出了对应时刻的海平面 10 m 处的风速。

图 4 显示 ERA-Interim 浪高和浮标浪高有相近的变化趋势,它们大体上随着风速的起伏而起伏。相关分析表明,二者的相关系数达到了 0.94,由于时间分辨率低,ERA-Interim 浪高曲线更加光滑,不能体现风场的小周期变化。同时我们注意到,两种浪高数据变

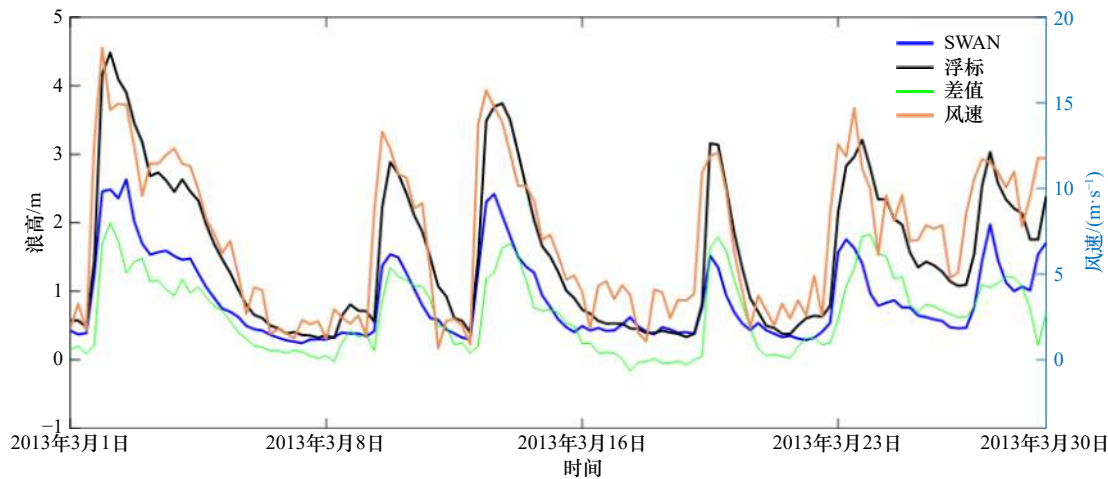


图4 浮标点处有效波高的ERA-Interim数据(蓝线)和浮标数据(黑线)对比

Fig. 4 Comparison of ERA-Interim reanalysis data (blue line) and buoy data (black line) of the significant wave height at the buoy point

化的幅度有明显的差别,以2013年3月2日浮标浪高达到的最大值时刻比较来说,浮标浪高达到了4.48 m,而ERA-Interim对应的浪高只有2.49 m,二者差了1.99 m,相对ERA-Interim值来说,二者之差达到了79.9%。浮标浪高与ERA-Interim浪高值之间的差值在图4中用绿色细实线画出,注意到在某些时刻,差值甚至高于ERA-Interim再分析数据本身。我们统计计算得到差值的均值为0.67 m。同时,此间浮标浪高的均值为1.29 m,即平均来说,ERA-Interim浪高只及浮标浪高的48%。由此可知,虽然ERA-Interim数据能够反映浪高随时间的变化趋势,但其数值比实际值低估超过50%。

浮标所在的ERA-Interim数据经纬度网格上有4个顶点,我们上文选择了其中一个水深与浮标点最接近的,这存在着一定的选择导致的偏差。故此,我们将浮标浪高与其他3个点的ERA-Interim浪高也进行了对比,二者有效波高差值的最大值、均值和RMS结果列于表2中,同时列出了所有4个点的地理坐标、水深数据。对比数据发现,表中列出的3种统计数据均随着水深的加深而减小,但不同位置点处之间数值差别不大。在水深最深的点处(23.625°N, 118.250°E)有效波高差值最大值也有2.01 m,均值也达到了0.63 m,也就是说,此点ERA-Interim数据的有效波高也仅为浮标浪高的51%。这再一次表明,ERA-Interim数据中的有效浪高比实际值低估约50%。

浮标点的有效波高值随着风速的变化而变化,为了更加清晰展示出不同方式得到的有效波高值之间存在差异,为此,在表3中给出了浮标、SWAN模式和ERA-Interim再分析数据的有效波高的均值、最大值以及与风速之间的相关系数。从表3中可以看出,

表2 浮标点与周围4个ERA-Interim数据点有效波高对比  
Table 2 Comparison of the significant wave height between the buoy point and the surrounding 4 ERA-Interim data points

数据点信息		有效波高差值/m		
坐标	水深/m	最大值	均值	RMS
23.750°N, 118.125°E	32.42	2.13	0.72	0.95
23.625°N, 118.125°E	35.41	2.10	0.68	0.90
23.625°N, 118.250°E	42.90	2.01	0.63	0.83
23.750°N, 118.250°E	39.54	2.04	0.67	0.88

表3 浮标点3种方式得到的有效波高月均值、最大值以及与CCMP风速相关系数的对比

Table 3 Comparison of the significant wave height monthly averaged values, maximum values and correlation coefficients with the CCMP wind speed obtained by three methods

	浮标	SWAN模式	ERA-Interim
均值/m	1.55	1.30	0.88
最大值/m	4.87	3.98	2.63
相关系数	0.92	0.94	0.91

浮标与SWAN模式得到的有效波高均值和最大值相差不大,ERA-Interim低估近50%,但与CCMP风速之间的相关系数均高于0.90且相差不大,即3种方式得到的有效波高与风速之间的变化趋势基本一致。

均值的比较掩盖了不同风场条件下ERA-Interim数据的预测效果。因此,我们进一步比较了不同风场条件下ERA-Interim数据的有效波高与浮标浪高的差值,结果列于表4。从相关系数看,在中风和强风条件下,两种数据之间的相关性都超过了0.80,表

明了在此条件下 ERA-Interim 数据的时间变化规律与浮标实测结果有较好的一致性。在弱风条件下该值为 0.56, 表明了二者在随时间的变化规律上存在着较大的不同。从二者差值来看, 最大值出现在强风条件下, 而该差值的均值则随着风速的增加而显著增加, 在中风条件下, 均值达到了 0.99 m, 在强风条件下, 则达到了 1.25 m。这些数值表明 ERA-Interim 预报的浪高与实测浪高有显著差别, 风速越大, 差别也越大。对比表 1 和表 4, 注意到在中风和强风情况下, ERA-Interim 与浮标浪高的差值均值分别为 0.99 m 和 1.25 m, 较 SWAN 模拟结果与浮标浪高差值均值的 0.34 m 和 0.28 m 大了 0.65 m 和 0.97 m。

表 4 不同风场条件下浮标数据与 ERA-Interim 数据有效波高值比较

Table 4 Comparison of significant wave height between buoy data and ERA-Interim data under different wind conditions

风场类型	风速 $U$ 范围/( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ )	相关系数	二者差值/m		
			最大值	均值	RMS
弱风	$0 \leq U \leq 5$	0.56	0.81	0.19	0.27
中风	$5 < U \leq 12$	0.85	1.83	0.99	1.06
强风	$U > 12$	0.88	2.00	1.25	1.35

#### 4 台湾海峡 ERA-Interim 数据与 SWAN 模式有效波高对比分析

前文就浮标点及周围的有效波高变化进行了对比分析, 发现了 ERA-Interim 的有效波高要显著低于 SWAN 模式模拟结果, 更大大低于浮标实测结果, 同时, SWAN 模式模拟结果与浮标实测结果符合得很好。为了解在台湾海峡区域 ERA-Interim 数据的有效波高后报情况, 我们将其与 SWAN 模式的模拟结果进行对比。根据浮标点附近风速的变化, 我们在一个东北-西南风周期中标记了的风初起、风涨, 风大和风落 4 个时刻进行分析, 分别为图 3 中标识的 T1 (2013 年 3 月 13 日 12 时 00 分), 该时刻风速大小为 1.24 m/s; T2 (2013 年 3 月 13 日 18 时 00 分), 该时刻风速大小为 13.28 m/s; T3 (2013 年 3 月 14 日 06 时 00 分), 该时刻风速达到最大值, 大小为 15.46 m/s; T4 (2013 年 3 月 15 日 06 时 00 分), 该时刻的风速下降到 9.68 m/s。

为了更清楚地研究和比较 SWAN 模式模拟出的有效波高, 图 5 给出了台湾海峡区域内选取的 4 个时间点的有效波高与 ERA-Interim 数据有效波高的对比结果。其中左列是 SWAN 模式模拟结果, 右列是

ERA-Interim 数据的浪高。从上到下展示了一次风起风消过程中, 台湾海峡海浪从起到落的几个时刻的空间分布特点。由于风是从东北方向吹起的, 所以海浪也是从东北方向向西南逐渐高涨。总体上看, 海峡中线附近的海浪最高, 向两侧岸边逐渐降低。SWAN 模式浪高明显高于 ERA-Interim 的浪高, 最大等值线相差 1 m 以上。在细节上, SWAN 模式结果显示在以 23.5°N, 119.5°E 为中心的一个小范围内, 也就是澎湖列岛地区, 无海浪或浪高接近 0 m, 但 ERA-Interim 数据结果是不能分辨该海岛的。另外, SWAN 模拟结果显示在 T3 和 T4 时刻, 23.0°N, 118.0°E 周围的海浪浪高也显著低于其相邻纬度区域的海浪, 这部分区域恰好是台湾浅滩地区, 这显示了海底地形对海浪的影响。由于空间分辨率较低的原因, 在 ERA-Interim 数据中, 看不到浅滩地形对海浪的影响。

在对空间相关性进行分析时, 一般采用空间异常相关系数 (Anomaly Correlation Coefficient, ACC) 来进行量化, ACC 是一个主要用来衡量两个空间变量的空间分布一致性的统计量, 两个变量的空间结构相差越大 ACC 的值越小, 一般情况下, 当 ACC 大于 0.6 时可以认为两者之间的相关性比较好。在本文中用来验证再分析数据和数值模拟数据之间的一致性, 其计算方法为

$$\text{ACC} = \frac{\sum_i \sum_j (x_{ij} - \bar{x})(y_{ij} - \bar{y})}{\sqrt{(\sum_i \sum_j (x_{ij} - \bar{x})^2)(\sum_i \sum_j (y_{ij} - \bar{y})^2)}} \quad (1)$$

式中,  $x_{ij}$ 、 $y_{ij}$  分别为对应的再分析数据和数值模拟结果在第  $i$  行第  $j$  列的有效波高值,  $\bar{x}$  和  $\bar{y}$  分别为整个研究区域有效波高的均值。我们以 ERA-Interim 网格点为中心, 将半网格范围内的 SWAN 模式格点结果做平均, 计算所得到的空间分布结果与 ERA-Interim 空间分布数据之间的 ACC, 得到这 4 个时刻的 ACC 值分别为 0.28、0.82、0.74 和 0.64。二者之间的相关性在 T1 时刻最小, 在 T2 时刻最大, 在 T3 和 T4 两个时刻也具有强相关性。由图 3 可知, T1 时刻对应一次风起的初始时刻, 在浮标点处风速最小, 整个海峡风速也比较小, 此时风生海浪还非常小, 对于观测结果来说, 此时的误差也相对较大, 给数据带来了较强的随机性, 所以降低了与模拟结果间的空间相关性。后续随着风速的增长, 风生浪高的增加, 图 5b 和图 5f 显示该时刻海浪在海峡东北口处达到最大, 向西南方向其浪高值逐渐下降, ERA-Interim 数据的浪高与 SWAN 浪高之间的 ACC 也达到了一个 0.82 的高值。随着风

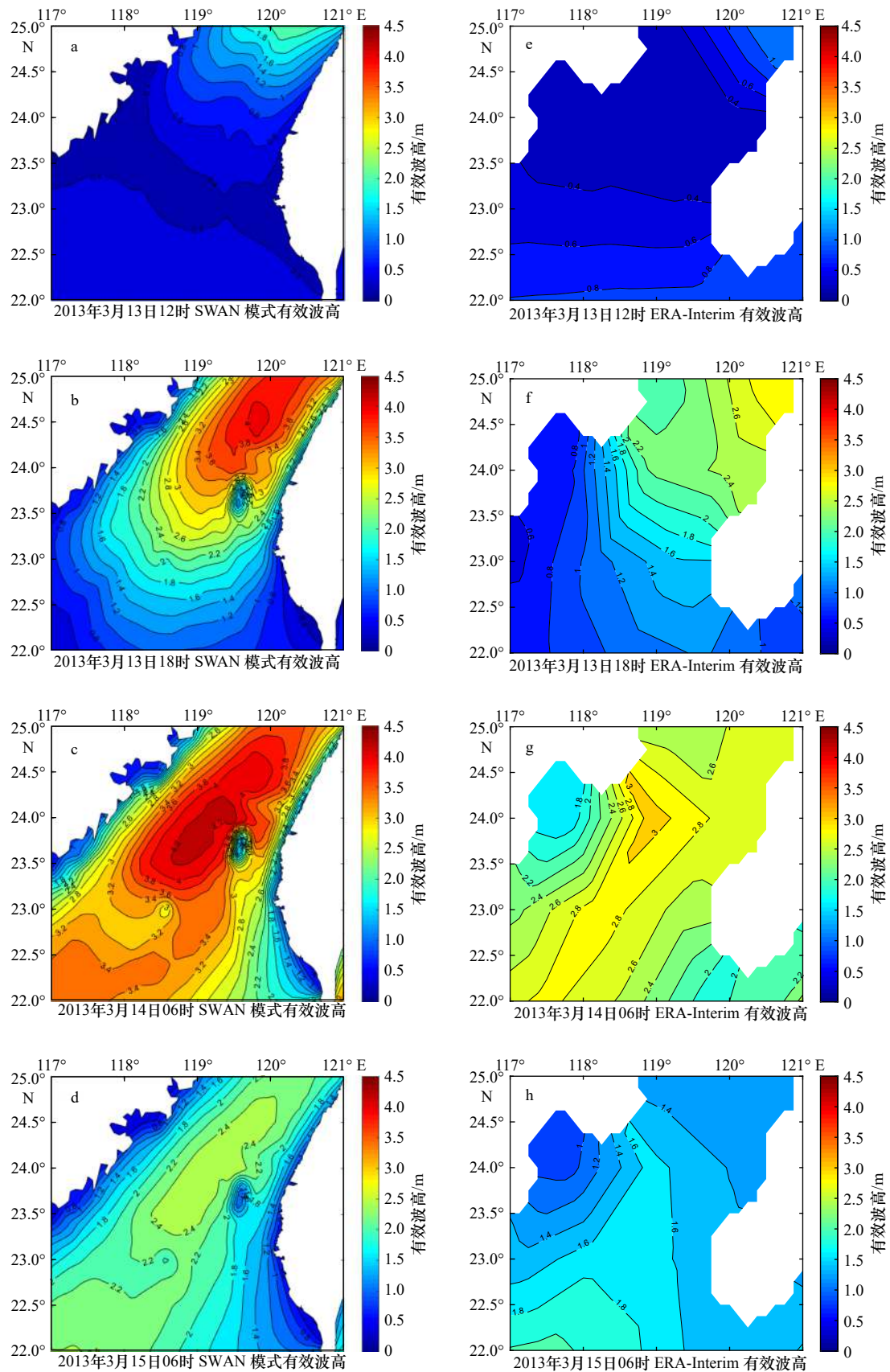


图5 所选择的4个时刻台湾海峡区域SWAN模式数值模拟与ERA-Interim数据有效波高空间变化分布

Fig. 5 The spatial variation distribution of significant wave height by the SWAN numerical simulation and the ERA-Interim data at the selected 4 moments in the Taiwan Strait

沿海峡自东北向西南吹过,到 T3 时刻海峡中部较大区域的浪高值达到此次风起的最大。注意到此次风起最大风速超过了 15.0 m/s,风浪在大风条件下会发生破碎,从而影响浪高的空间分布。图 5c 和图 5g 也显示在海峡的较大部分区域海浪已经达到了最大值。海浪的破碎可能是此时刻两种数据之间 ACC 下降的重要原因。注意到此时最大风速所在区域位于海峡中心附近,SWAN 模拟浪高最大超过了 4.2 m,而 ECMWF 后报的浪高最高值刚刚超过 3.0 m, ERA-Interim 数据的最大浪高仅约为 SWAN 模拟浪高的 70%。T4 时刻风吹过了海峡,大部分区域的风速已经很低,因此海浪浪高也相应降低。图 5h 显示的 ERA-Interim 数据的浪高自东北向西南逐渐增加,即体现了此种风场情况下的海浪特征。我们注意到此时图 5d 显示,SWAN 模拟浪高在沿着海峡中线的大部分海域是非常接近的,这与 ERA-Interim 浪高特征是不一样的,因而二者之间的 ACC 也进一步下降到 0.64。SWAN 模拟浪高在此时刻的特征可能与风浪过后的涌浪有关。

我们以 ERA-Interim 时刻为基准,计算了模拟期间 ERA-Interim 数据浪高与 SWAN 模拟浪高之间 ACC 的时序值,并画在图 6 中。图中显示 ACC 数值最大超过 0.8,最小则为负值,其均值为 0.53。与图 3 对比可知,在风初起时,ACC 一般是局部极小值,随着风速的增加,ACC 也迅速增加。在风速达到极大值后的下降阶段,ACC 也会有迅速地减小。此间 ACC 出现了较大负值,对应时刻风速接近 0 m/s,在其前后的几个时间点上,风速也不超过 5 m/s,说明此时几乎没有风浪,ACC 体现的也并不是风浪特征。

## 5 结论与展望

欧洲中期天气预报中心的 ERA-Interim 数据在海面天气预报中起着越来越重要的作用。本文以定点浮标在 2013 年 3 月份的观测数据以及 CCMP 风场驱动的 SWAN 模式模拟结果为参考,首次对比分析了在该时段 ERA-Interim 数据对于台湾海峡浪高的预测效果。

在这一时间段内,台湾海峡主要为东北-西南方向的风,多次风速达到 15 m/s 以上,同时也有几天的时间风速小于 5 m/s,甚至无风。我们将浮标浪高分别与该点的 SWAN 模式浪高和附近的 ERA-Interim 数据在整个时段进行了统计对比,而后,我们选择了 4 个时间点将 SWAN 模式模拟浪高与 ERA-Interim 浪

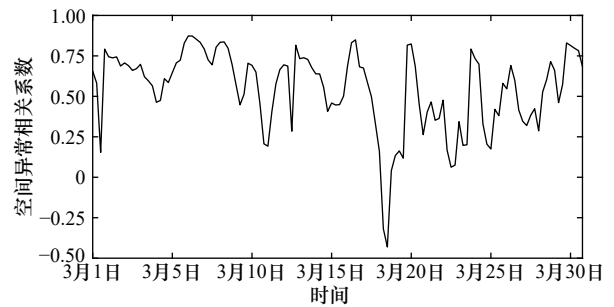


图 6 模拟期间 ERA-Interim 浪高与 SWAN 模拟浪高之间空间异常相关系数的时序值

Fig. 6 The anomaly correlation coefficient between ERA-Interim wave height and SWAN simulated wave height during simulation

高在整个海峡上进行了平面对比,主要结果如下:

在浮标点,SWAN 模式模拟浪高与浮标观测浪高间的相关系数超过 0.98,二者偏差平均值是 0.25 m,均方根值为 0.36 m,最大偏差为 1.29 m。通常 SWAN 模拟浪高小于浮标观测的有效波高。在浮标点附近的 4 个 ERA-Interim 数据网格点中,ERA-Interim 数据的浪高与浮标浪高之间的相关系数可达 0.93,二者偏差平均值大于 0.63 m,均方根值不小于 0.83 m,最大偏差不低于 2.00 m。平均而言,ERA-Interim 数据的浪高仅为浮标观测浪高的 51% 或更弱。

在海峡区域,在一次风起过程中选择的 4 个时间点上,SWAN 模拟浪高与 ERA-Interim 浪高之间的空间异常相关系数 ACC 最小为 0.28,对应于风初起 T1 时刻,浮标点处的风速小于 2 m/s; ACC 最大为 0.82,对应于浮标点处风速上升过程中的 T2 时刻,海峡的东北角风速刚刚达到最大值。T3 时刻当浮标点风速达到最大值时,海峡中心区的浪高也达到了最大值,此时的 ACC 为 0.74,该数值的下降可能反映了高风速情况下海浪的破碎对线性相关的影响。T4 时刻对应于风速的下降过程,此时的 ACC 为 0.64。注意到风过后往往会有涌浪传播,该数值的降低可能反映了涌浪的影响。

在台湾海峡一个月的 SWAN 模拟数据与 ERA-Interim 数据对比表明,二者之间的 ACC 数值是起伏的,其均值超过 0.50。ACC 的数值往往在风初起的时候小,在风起的过程中增加,在风速达到峰值后迅速下降。在风速保持的时段,ACC 的数值往往较大。ACC 的数值体现了 ERA-Interim 数据浪高与 SWAN 模拟浪高在台湾海峡区域的分布相似性。SWAN 模式由风场驱动,风场的真实性影响着其结果。因此不同风场条件下,CCMP 风场的精度影响着模拟结果,

高风速情况下,海浪会发生破碎,海浪破碎条件下预测得到的浪高与SWAN模式中通过耗散来模拟高风背景下的浪高可能会有较大的差别,因此会降低二者之间的空间相关性。在低风速情况下,噪声的影响使得与CCMP风场的偏差相对较大,同时,ERA-Interim浪高与之相比变化趋势一致,但数值相对较小。

综合来看,ERA-Interim数据在台湾海峡盛行东北-西南季风时节对海峡海浪的预报在趋势上与浮标以及SWAN模式有较好的一致性,但浪高数值低于对比结果,甚至只有浮标有效波高的50%强,SWAN

模拟有效波高的70%。同时,我们的对比仅限于一个月的特定季风情况下,在其他季节和不同风向条件下的结果还需要进一步的工作来分析。

**致谢:** 作者向为本文提供浮标数据的福建省海洋预报台表示由衷的感谢,向为本文提供ERA-Interim再分析数据的欧洲中期天气预报中心表示感谢,向为作者在撰写本文过程中提供帮助的海态实验室的全体同学和老师表示感谢。

### 参考文献:

- [1] 管长龙. 我国海浪理论及预报研究的回顾与展望[J]. 青岛海洋大学学报, 2000, 30(4): 549-556.  
Guan Changlong. A review of history and prospect for study of sea wave theory and its forecast in China[J]. Journal of Ocean University of Qingdao, 2000, 30(4): 549-556.
- [2] 刘金芳, 刘忠, 顾翼炎, 等. 台湾海峡水文要素特征分析[J]. 海洋预报, 2002, 19(3): 22-32.  
Liu Jinfang, Liu Zhong, Gu Yiyan, et al. Analysis of the hydrographic elements features in Taiwan Strait[J]. Marine Forecasts, 2002, 19(3): 22-32.
- [3] Chuang W S. A note on the driving mechanisms of current in the Taiwan Strait[J]. Journal of Oceanography, 1986, 42(5): 355-361.
- [4] Jan S, Sheu D D, Kuo H M. Water mass and throughflow transport variability in the Taiwan Strait[J]. Journal of Geophysical Research: Oceans, 2006, 111(C12): C12012.
- [5] 姬厚德, 蓝尹余, 赵东波. SWAN在台湾海峡台风浪场数值模拟中的应用研究[J]. 水道港口, 2013, 34(2): 113-117.  
Ji Houde, Lan Yinyu, Zhao Dongbo. Application of SWAN in Taiwan Strait typhoon waves numerical simulation[J]. Journal of Waterway and Harbour, 2013, 34(2): 113-117.
- [6] 袁凯瑞, 商少平, 谢燕双, 等. 台湾海峡台风浪的数值模拟[J]. 厦门大学学报(自然科学版), 2014, 53(3): 413-417.  
Yuan Kairui, Shang Shaoping, Xie Yanshuang, et al. The simulation of typhoon waves in Taiwan Strait[J]. Journal of Xiamen University (Natural Science), 2014, 53(3): 413-417.
- [7] Li Chuan, Wu Xiongbin, Yue Xianchang, et al. Extraction of wind direction spreading factor from broad-beam high-frequency surface wave radar data[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2017, 55(9): 5123-5133.
- [8] 吴雄斌, 李伦, 李炎, 等. 高频地波雷达海面有效波高探测实验研究[J]. 海洋与湖沼, 2012, 43(2): 210-216.  
Wu Xiongbin, Li Lun, Li Yan, et al. Experimental research on significant waveheight detecting with HFSWR OSMAR071[J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 2012, 43(2): 210-216.
- [9] Wu Xiongbin, Yang Shaolin, Cheng Feng, et al. Ocean surface current detection by HF surface wave radar at the Eastern China Sea[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2003, 46(3): 489-498.
- [10] 叶雨颖. 台湾海峡风浪场的数值模拟研究[D]. 厦门: 厦门大学, 2006.  
Ye Yuying. The numerical simulation of wind waves in Taiwan Strait[D]. Xiamen: Xiamen University, 2006.
- [11] 姬厚德. 台湾海峡及附近港湾的风浪场数值模拟研究[D]. 厦门: 厦门大学, 2007.  
Ji Houde. The numerical simulation of wind waves in Taiwan Strait and Harbors nearby[D]. Xiamen: Xiamen University, 2007.
- [12] 陈希, 沙文钰, 闵锦忠. 台湾岛邻近海域台风浪的模拟研究[J]. 海洋预报, 2002, 19(4): 1-10.  
Chen Xi, Sha Wenyu, Min Jinzhong. The simulation of typhoon waves around Taiwan Island[J]. Marine Forecasts, 2002, 19(4): 1-10.
- [13] 陈希, 闵锦忠, 李妍, 等. 台湾岛邻近海域台风浪模拟分析[J]. 气象科学, 2003, 23(1): 46-54.  
Chen Xi, Min Jinzhong, Li Yan, et al. The simulation of typhoon waves around Taiwan Island[J]. Scientia Meteorologica Sinica, 2003, 23(1): 46-54.
- [14] 滕陈轲敏, 岳显昌, 吴雄斌, 等. 风场对SWAN模式在台湾海峡后报结果的影响[J]. 海洋学报, 2019, 41(5): 59-69.  
Teng Chenkemin, Yue Xianchang, Wu Xiongbin, et al. Impacts of wind data on the hindcast of wave height simulated by SWAN model on the Taiwan Strait[J]. Haiyang Xuebao, 2019, 41(5): 59-69.
- [15] Christakos K, Furevik B R, Aarnes O J, et al. The importance of wind forcing in fjord wave modelling[J]. Ocean Dynamics, 2020, 70(1): 57-75.
- [16] 丁磊, 于博. SWAN模型中不同风拖曳力系数对风浪模拟的影响[J]. 海洋学报, 2017, 39(11): 14-23.  
Ding Lei, Yu Bo. Impact of wind drag coefficients on wave simulation using SWAN model[J]. Haiyang Xuebao, 2017, 39(11): 14-23.
- [17] Wang Zhifeng, Li Songtao, Hao Yan, et al. Estimation and prediction of typhoons and wave overtopping in Qingdao, China[J]. Journal of Ocean University of China, 2020, 19(5): 1017-1028.

- [18] 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.
- [19] Kumarl V S, Naseef T M. Performance of ERA-Interim wave data in the nearshore waters around India[J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2015, 32(6): 1257–1269.
- [20] Shanas P R, Kumar V S. Temporal variations in the wind and wave climate at a location in the eastern Arabian Sea based on ERA-Interim reanalysis data[J]. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 2014, 14(5): 1371–1381.
- [21] 万勇, 张杰, 孟俊敏, 等. 基于ERA-Interim高分辨率数据的中国东海南海波浪能评估[J]. *太阳能学报*, 2015, 36(5): 1259–1267.  
Wan Yong, Zhang Jie, Meng Junmin, et al. Wave energy assessment in the East China sea and South China Sea based on ERA-Interim high resolution data[J]. *Acta Energetica Solaris Sinica*, 2015, 36(5): 1259–1267.
- [22] 王小丹, 赵文静. 基于ERA-Interim再分析资料的南沙海域风、浪场特征分析[J]. *海洋预报*, 2019, 36(2): 30–37.  
Wang Xiaodan, Zhao Wenjing. Characteristics analysis of wind and wave in the Nansha Area based on ERA-Interim reanalysis data[J]. *Marine Forecasts*, 2019, 36(2): 30–37.
- [23] Islek F, Yuksel Y. Inter-comparison of long-term wave power potential in the Black Sea based on the SWAN wave model forced with two different wind fields[J]. *Dynamics of Atmospheres and Oceans*, 2021, 93: 101192.
- [24] 陈雅雅, 邹仲水, 赵栋梁. 基于SWAN模式的台风浪数值模拟初步研究[J]. *海洋湖沼通报*, 2017(6): 1–10.  
Chen Yaya, Zou Zhongshui, Zhao Dongliang. A preliminary study of typhoon wave based on numerical simulations using SWAN model[J]. *Transactions of Oceanology and Limnology*, 2017(6): 1–10.
- [25] 麻巨慧, 朱跃建, 王盘兴, 等. NCEP、ECMWF及CMC全球集合预报业务系统发展综述[J]. *大气科学学报*, 2011, 34(3): 370–380.  
Ma Juhui, Zhu Yuejian, Wang Panxing, et al. A review on the developments of NCEP, ECMWF and CMC global ensemble forecast system[J]. *Transactions of Atmospheric Sciences*, 2011, 34(3): 370–380.
- [26] Booij N, Haagsma I J G, Holthuijsen L H, et al. SWAN cycle III version 41.31A users manual[M]. Delft, The Netherlands: Delft University of Technology, 2004: 115.
- [27] 潘番. 渤海海浪SWAN计算模式及波浪反射的研究[D]. 天津: 天津大学, 2013.  
Pan Fan. Research on calculation model and reflection simulation for wave in Bohai Sea by SWAN[D]. Tianjin: Tianjin University, 2013.
- [28] Yan Yixin, Xu Fumin, Mao Lihua. A new type numerical model for action balance equation in simulating nearshore waves[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2001, 46(11): 963–968.
- [29] Du Jianting, Bolaños R, Larsén X G. The use of a wave boundary layer model in SWAN[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2017, 122(1): 42–62.
- [30] Group S S. Surface Water Modeling System (SMS)[EB/OL]. (2006–04–15)[2020–09–15]. <https://doi.org/10.1002/0470848944.hsa288>.
- [31] 薛立梅. SMS系统软件在水利工程中的应用[J]. *东北水利水电*, 2010, 28(11): 63, 68.  
Xue Limei. Application of SMS system software in hydro project[J]. *Water Resources & Hydropower of Northeast China*, 2010, 28(11): 63, 68.
- [32] 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.  
Zhang Peng, Chen Xiaoling, Lu Jianzhong, 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.
- [33] Huang Yong, Weisberg R H, Zheng Lianyan, et al. Gulf of Mexico hurricane wave simulations using SWAN: Bulk formula-based drag coefficient sensitivity for Hurricane Ike[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2013, 118(8): 3916–3938.
- [34] 孟凡昌. 强海况下的波流相互作用研究[D]. 北京: 国家海洋环境预报中心, 2017.  
Meng Fanchang. Study on wave-current interaction under strong sea conditions[D]. Beijing: National Marine Environmental Forecasting Center, 2017.
- [35] 宗芳伊, 吴克俭. 基于近20年的SWAN模式海浪模拟结果的南海波浪能分布、变化研究[J]. *海洋湖沼通报*, 2014(3): 1–12.  
Zong Fangyi, Wu Kejian. Research on distributions and variations of wave energy in South China Sea based on recent 20 years' wave simulation results using SWAN wave model[J]. *Transactions of Oceanology and Limnology*, 2014(3): 1–12.
- [36] 黄必桂. 渤海海浪的数值模拟和涌浪对风浪影响的研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2009.  
Huang Bigui. Numerical simulation of waves in Bohai Sea and research on the influence of swells on wind waves[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2009.

## Comparative analysis of SWAN model and ERA-Interim data on significant wave height in the Taiwan Strait

Wang Kui<sup>1</sup>, Yue Xianchang<sup>1</sup>, Wu Xiongbín<sup>1</sup>, Zhou Heng<sup>1</sup>, Teng Chenkemin<sup>1</sup>

(1. School of Electronic Information, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

**Abstract:** The significant wave height (SWH) is a key parameter for describing the ocean waves. In this paper, the SWH in the Taiwan Strait provided by the ERA-Interim reanalysis data from the European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF) in March 2013 is compared with the buoy observations and the simulation results of the SWAN (Simulating Waves Nearshore) model. The results showed that the correlation coefficient of SWH between the buoy data and the ERA-Interim as well as the SWAN results is 0.94 and 0.98, respectively. The average SWH of the ERA-Interim data is about 51% of the buoy data and 70% of the SWAN results. The monthly averaged values of the spatial anomaly correlation coefficient (ACC) of the SWH between the ERA-Interim data and the SWAN results is 0.51. The ACC was minimal when the wind started, it boosted rapidly with increasing of the wind speed and reached the maximum before the wind speed reached the peak. Then the ACC turned to decrease at the peak wind speed. Integrated analysis imply that the ERA-Interim data can reflect the spatial distribution and the temporal variations trend of the SWH over the Taiwan Strait during this period, but it's evidently smaller than the SWAN model data.

**Key words:** ERA-Interim data; SWAN; buoy; Taiwan Strait; significant wave height