

## 浙江沿海基于浮标的有效波高分析和数值预报订正

姚日升<sup>1,2</sup>, 肖王星<sup>3</sup>, 涂小萍<sup>3\*</sup>, 朱佳敏<sup>4</sup>, 周凯<sup>2</sup>, 庞琦烨<sup>2</sup>

(1. 宁波市生态环境气象中心, 浙江 宁波 315012; 2. 浙江省气象台, 浙江 杭州 310057; 3. 宁波市气象台, 浙江 宁波 315012; 4. 宁波市北仑区气象局, 浙江 宁波 315826)

**摘要:** 基于2010年10月—2022年12月浙江沿海5个浮标站观测资料和2020—2022年欧洲中期天气预报中心细网格模式海浪和海面10 m风预报资料,对浮标站的风、浪相关性进行分析,对有效波高预报进行评估和订正方法研究。0~240 h预报偏差和均方根误差表明:模式对远岸浮标的预报比实况稍偏大,对近岸浮标预报则略偏小,预报不稳定性随预报时效的延长而增大。远离海岸的浮标站24 h预报与实况的相关性高于近岸站,两者的相关系数分别约为0.94和0.85。有效波高预报存在一定系统偏差,且是预报误差的主要来源。近岸浮标有效波高预报值小于观测值,远岸浮标的预报值偏差则随着有效波高的增大由正转负,负偏差的绝对值逐渐增大。对于远岸浮标,仅针对有效波高进行预报和实况的一元一次回归就有很好的订正效果,但近岸浮标受地形影响大,海浪预报的误差更大,同时引入有效波高和10 m风速作为预报因子,进行二元一次回归的订正效果更好。订正方程应用到同类型的周边海区浮标站仍然有很好的订正效果,可推广到浙江沿海同类型海区。

**关键词:** 有效波高;海面10 m风;数值预报;订正;浙江沿海

**中图分类号:** P731.33 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-0239(2024)03-0044-10

### 0 引言

海洋灾害对我国影响较大,2010—2019年共造成我国经济损失约1 001亿元<sup>[1]</sup>。在海洋灾害中,海浪灾害造成的死亡人数最多,2000—2016年,我国因海洋灾害死亡或失踪2 659人,其中66.7%由海浪灾害导致<sup>[2]</sup>。海洋上的大风和大浪都能单独形成灾害,很多时候同时出现,更加剧了灾害的程度。周阳等<sup>[3]</sup>研究了浙江中部三门湾海域的波浪特征后得出,该地区的常浪向和强浪向均为E向,地形是主导因素。蒋璐璐等<sup>[4]</sup>利用浙江省自动气象站、舟山和温州浮标资料以及欧洲中期天气预报中心(Euro-pean Medium Range Weather Prediction Center, ECMWF)的数值模式输出产品,分析了1918号台

风“米娜”影响期间浙江沿海风 and 海浪的时空变化特征,并与同样严重影响浙江的1909号台风“利奇马”进行对比后得出,在台风主要影响时段,有效波高和风速在空间分布上存在较好的对应关系。陈剑桥等<sup>[5]</sup>利用ECMWF的再分析数据,分析了2015—2021年发生在浙江东部海域9起沉船海难事故的海浪灾害性特征,结果表明沉船海难事故的发生往往伴随着波高或波陡的增大,使得船舶的纵摇和垂荡加剧。

海浪是一种十分复杂的海洋随机现象,至今没有理论上严密和完善的预报方法。已有的海浪预报方法主要分为3类:半经验半理论预报法、经验统计预报法、数值预报法<sup>[6]</sup>。海洋科学和大气科学的进步,使海浪数值预报法研究得到飞速发展。海浪

收稿日期: 2023-04-08。

基金项目: 浙江省基础公益研究计划项目(LGF22D050005);宁波市公益研究计划项目(2019C50004)。

作者简介: 姚日升(1968-),男,正高级工程师,硕士,主要从事气象预报与应用技术研究。E-mail: yaorisheng@aliyun.com

\*通信作者: 涂小萍(1968-),女,正高级工程师,硕士,主要从事天气预报和研究。E-mail: txp\_hk@aliyun.com

数值预报大致可划分为3代,目前SWAN(Simulating Waves Nearshore)模式和WW3(Wave Watch III)模式为第三代海浪数值预报模式的典型代表。

海浪数值产品的应用和检验是做好海洋气象服务的基础。梁小力等<sup>[7]</sup>利用国家海洋环境预报中心基于SWAN模式和美国国家环境预报中心(National Centers for Environmental Prediction, NCEP)预报风场模拟的全球海浪预报场,结合Jason-2卫星高度计和美国国家浮标数据中心(National Data Buoy Center, NDBC)的浮标资料对全球海浪场进行统计检验,结果表明:预报波高与实测值吻合较好,24 h、48 h、72 h预报的均方根误差均小于0.6 m,偏差绝对值均小于0.1 m,相关系数均大于0.91。徐丽丽等<sup>[8]</sup>利用WW3和SWAN模型嵌套技术在业务化海浪预报系统中开展应用及检验,结果表明:24 h、48 h、72 h预报的平均绝对误差分别在0.3 m、0.5 m、0.7 m以下。邓心怡等<sup>[9]</sup>利用NCEP全球天气预报产品和WW3的全球预报产品开展长江口近岸海上风电场风浪预报,结果显示:大于6 m/s风速的24 h预报准确率达到46.3%;使用递减平均法可以使风速预报的均方根误差减少10%~14%,预报准确率提高为57.0%;长江口灯船站48 h预报的有效波高均方根误差在0.25 m以下,相关系数高达0.80。

海浪数值预报目前仍存在很多问题,包括:①无法准确刻画海浪物理过程;②浪流耦合问题,即在局部强流区,如边界流和海岸等区域,如果不考虑海流的作用,可能会导致海浪模式输出结果出现较大错误;③精确刻画海岸线问题,即在靠近海岸的沿海地区,曲折蜿蜒的海岸线制约了结构化网格模式精度的进一步提高<sup>[10]</sup>。这些问题,特别是后两个问题造成海浪预报在近海某些区域更有可能出现较大的误差。利用近岸浮标等观测结果对海浪预报开展研究,可以提高近海有效波高预报的准确率。

大多时候风和浪密切相关,针对风和浪的模式预报检验和订正方法研究已取得了一些成果。沿海海面风方面,姚日升等<sup>[11]</sup>基于华东沿海14个浮标站等资料,对ASCAT(Advanced SCATterometer)散射计的反演风速进行检验和订正,得出线性回归可有效减小反演风速误差的结论。申华羽等<sup>[12]</sup>利用浙

江沿海观测站资料,通过线性回归方法,对冷空气过程中浮标站的最大风速预报进行订正,取得较好的效果。基于ECMWF集合预报基础上建立的客观订正方法,可以改进冷空气及台风、大风天气过程的预报效果<sup>[13]</sup>,基于多元回归方法的阵风预报方程对阵风有更好的拟合效果<sup>[14]</sup>。海浪预报方面,毛科峰等<sup>[15]</sup>针对数值模式和统计模型在预报近岸海浪时存在的局限性,构建了两相耦合的近岸海浪预报框架,能够提高近岸海浪有效波高预报精度。张蔺廉等<sup>[16]</sup>利用舟山海洋浮标站和附近海岛自动测风站环境风场多年资料建立了回归拟合方程,有较好的应用价值。龚葵等<sup>[17]</sup>基于浮标站海浪历史数据,利用回归分析方法建立了海浪数值模式有效波高预报产品的订正统计模型,发现一元二次回归订正方程的拟合效果更好。

浙江省气象部门自2010年起陆续在浙江沿海投放了5个浮标站,本文根据其观测资料,分析有效波高与风速的相关性,对ECMWF海浪预报进行检验,构建预报订正方程,提高近海有效波高预报的准确性,为海洋航运和海上作业提供风险预报和预警。

## 1 资料和方法

浙江省气象预报服务中的沿海海面是指沿行政区划海岸线平行外延100 km范围的海区,图1显示了该海区和5个浮标站的位置,表1为浮标站相关观测信息。表1中前3个浮标站离海岸线相对较远,最东边的海礁站距离大陆海岸线100 km左右,舟山站、温州站两浮标分别距离大陆海岸线约42 km和70 km,浮标站周围较空旷,基本不受岛屿影响,这3个点称为远岸站;后两个站点离海岸线或岛屿较近,受地形影响大,为近岸站。

本文所用资料有:浙江省气象信息中心提供的2010年10月—2022年12月浙江省5个浮标站的观测资料和2020—2022年ECMWF细网格模式的海浪和海面风场预报资料。浮标站观测资料包括逐小时10 min平均风向、风速,有效波高。远岸站使用直径10 m的大浮标,由山东省科学院海洋仪器仪表研究所研制,波浪传感器为SBY1-1型;近岸站使用直径3 m的小浮标,由国家海洋局第二海洋研究

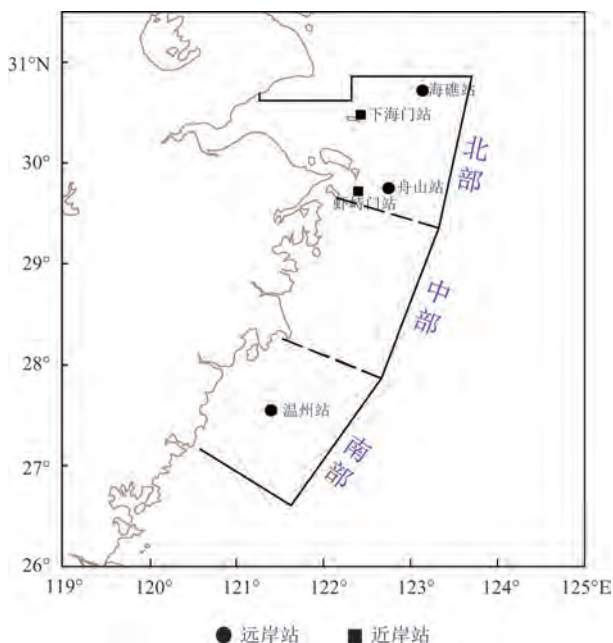


图1 浙江沿海5个浮标站位置

Fig.1 Location of the five buoys along the Zhejiang coast

所研制,波浪传感器为SBS-1测波仪。波高测量范围为0.5~15.0 m,分辨率分别为0.01 m,准确度为 $\pm 10\%$ 。风传感器均为美国YOUNG 05106测风仪,测风范围为0~90 m/s,分辨率为0.1 m/s,准确度为 $\pm 10\%$ 。资料使用前经过了自动和人工质控,剔除了其中的缺测记录和异常值。逐日08时(北京时,下同)、20时起报的ECMWF预报资料中,有效波高预报分辨率为 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ ,海面10 m风场预报分辨率为 $0.125^\circ \times 0.125^\circ$ ,均采用双线性插值到浮标站位置<sup>[18]</sup>。

利用相关系数( $R$ )、平均偏差(Mean Deviation, MD)、均方根误差(Root Mean Square Error, RMSE)等参数进行风、浪相关性分析和模式预报及订正结

果的评估。 $R$ 绝对值越大,两组资料的相关性越高; $MD$ 表示预报与观测资料之间的偏离程度, $RMSE$ 表示预报与观测资料的离散程度;两者数值越小,表示预报效果越好。相应的计算公式如下:

$$R = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(o_i - \bar{o})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (o_i - \bar{o})^2}} \quad (1)$$

$$MD = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - o_i) \quad (2)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - o_i)^2} \quad (3)$$

式中: $n$ 为样本数; $R$ 中 $x$ 和 $o$ 代表计算相关系数的两组资料; $MD$ 、 $RMSE$ 中 $x$ 和 $o$ 分别代表预报和观测资料。

采用线性回归方法建立预报订正方程。使用相关分析法分析5个浮标站风速与有效波高的相关性,总结不同类型站点的特征。利用浮标站的有效波高观测数据,对2020—2022年ECMWF有效波高的预报进行检验,并根据检验结果,设置有效波高预报和海面10 m风速两个预报因子,采用2020—2021年资料建立订正方程,2022年作为独立样本进行检验,其中下海门站因样本时间较短,采用70%的样本建立订正方程,30%的独立样本进行检验。

根据国际波级表的规定,将海浪按照有效波高划分为0~9共10级,考虑实际应用情况,本文分4个等级来进行分析:轻浪(波级 $\leq 3$ 级,有效波高 $< 1.25$  m)、中浪(波级4级, $1.25$  m $\leq$ 有效波高 $< 2.50$  m)、大浪(波级5级, $2.50$  m $\leq$ 有效波高 $< 4.00$  m)、巨浪(波级 $\geq 6$ 级,有效波高 $\geq 4.00$  m)。

表1 浙江沿海5个浮标站和观测信息

Tab.1 Location and observation information of the 5 buoys along the Zhejiang coast

站名	位置	类型	浮标直径/m	观测资料起止时间	有效时数/h
海礁站	30.72°N, 123.14°E	远岸站	10	2017年10月—2022年12月	43 040
舟山站	29.75°N, 122.75°E	远岸站	10	2010年10月—2022年12月	96 454
温州站	27.53°N, 121.38°E	远岸站	10	2010年10月—2022年12月	86 415
下海门站	30.48°N, 122.43°E	近岸站	3	2021年11月—2022年12月	8 638
虾峙门站	29.72°N, 122.40°E	近岸站	3	2017年10月—2022年12月	38 471



## 2 结果分析

### 2.1 风与浪的相关性分析

浪对风的响应有一定的时间滞后性。对浪与0~24 h内的逐时风速做滞后相关分析,结果见图2。5个浮标站的浪与0~24 h逐时风速均显著相关(通过0.001的显著性检验),远岸站相对近岸站的相关性更高,其有效波高与风速的相关系数在-2~-3 h达到最高,而近岸站在-1 h达到最高,之后迅速下降,说明浪对风响应的滞后性在远岸站表现得更为明显。进一步分析不同有效波高后发现,无论

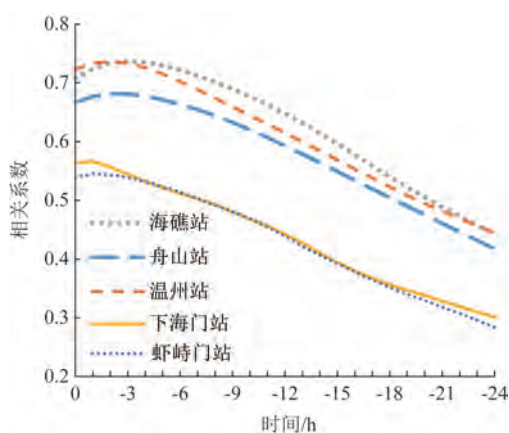


图2 浙江沿海各浮标站有效波高与前24 h逐时风速间的相关性

Fig.2 Correlation evolution between significant wave height and hourly lag wind speed in 24 hours at the five buoys along the Zhejiang coast

是远岸站还是近岸站,都表现出当有效波高较小时,浪对风响应的滞后性表现得更为明显(图略)。随着浪级增大,特别是达到巨浪时,浪与0 h风速的相关性最高,说明在浪级很高时,浪对风的响应更及时,风浪成分更大。

### 2.2 预报检验和评估

对2020—2022年ECMWF有效波高数值预报进行检验。从图3可以看出,预报偏差随预报时效的变化不大,远岸站的偏差为正值,海礁站、舟山站、温州站的预报偏差分别在0.19 m、0.14 m、0.22 m左右,近岸站的预报偏差为负值,下海门站和虾峙门站分别在-0.04 m和-0.14 m左右。均方根误差在0~72 h内变化不大,72 h后随预报时效的增大而增大,远岸站的均方根误差高于近岸站。由此可见,模式对远岸浮标有效波高的预报稍偏大,而对近岸浮标的预报略偏小,各浮标0~72 h有效波高预报的稳定性变化不大,但72 h后预报稳定性变差。

表2为2020—2022年ECMWF模式对浙江沿海5个浮标站24 h不同等级有效波高的预报误差。从中可以看出,3个远岸站与2个近岸站的预报偏差有所不同。对于远岸站,轻浪和中浪预报均为正偏差,表明预报较实况偏高,随着波高增大,大浪和巨浪预报转为负偏差,预报较实况偏小,随着有效波高等级增大,负偏差的绝对值增大,说明预报偏小得越多。近岸站的有效波高预报偏差均为负值,且随着有效波高的增大,负偏差的绝对值增大,表明近岸站不同等级有效波高预报存在系统性偏小,且

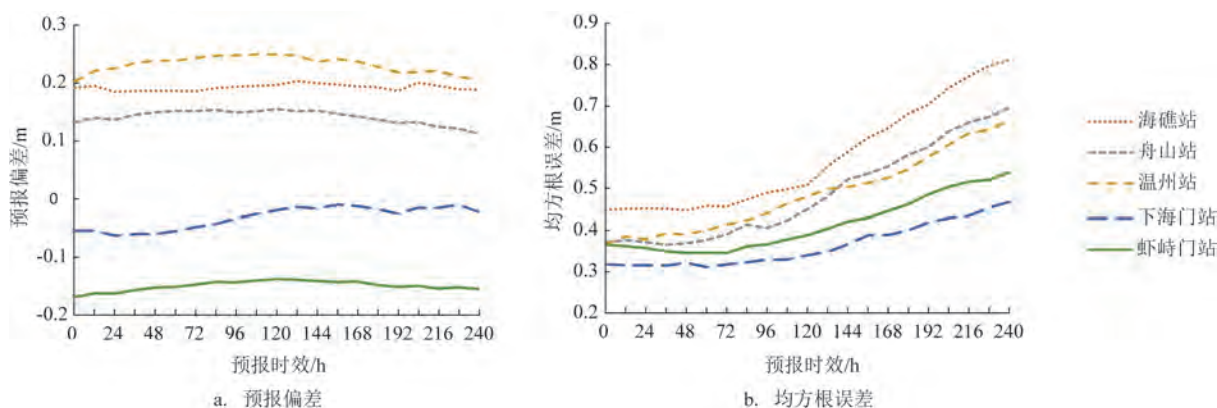


图3 2020—2022年ECMWF模式在浙江沿海5个浮标站处有效波高的预报误差

Fig.3 Prediction error of significant wave height of ECMWF model at 5 buoys along the Zhejiang coast from 2020 to 2022

表2 浙江沿海5个浮标站不同等级有效波高24 h预报误差(单位:m)

Tab.2 24 h forecasting biases of different grades of significant wave height at the five buoys along the Zhejiang coast (unit:m)

站点	误差类型	轻浪	中浪	大浪	巨浪
海礁站	偏差	0.19	0.16	-0.07	-0.23
	均方根误差	0.27	0.30	0.59	0.81
舟山站	偏差	0.16	0.11	-0.06	-0.13
	均方根误差	0.23	0.27	0.39	0.74
温州站	偏差	0.21	0.20	0.16	-0.42
	均方根误差	0.27	0.33	0.39	0.67
下海门站	偏差	-0.07	-0.25	-0.74	—
	均方根误差	0.22	0.52	0.91	—
虾峙门站	偏差	-0.10	-0.29	-0.75	-1.44
	均方根误差	0.19	0.42	0.89	1.62

波高等级越大,预报偏小越多,对有效波高预报进行分级订正有望减小系统性偏差。对于均方根误差,所有站的预报偏差都表现出随着波高的增大而增大,表明波高越大,预报的离散度越大。

### 2.3 预报订正方法

预报因子的选取必须满足两方面的要求:一是具有明确的物理意义,二是与预报对象间有较好的相关关系。对于波高预报,有两个较明显的可选预报因子,即有效波高和海面风速。对于海面风速预报,可以根据1.1节风与浪的相关性分析,采用预报时刻前一定时间内的平均风速。表3为浙江沿海各浮标站有效波高实况与有效波高预报、风速预报的相关性。从表中可见,有效波高预报、风速预报与

有效波高实况均存在较好的相关关系,但有效波高预报与实况的相关性更好,对于风速预报而言,考虑待预报时刻前6 h、前12 h的平均风速比仅考虑预报时刻的风速相关性略有提高。通过站点间的比较发现,无论是有效波高预报还是风速预报,其与有效波高实况的相关性都是远岸站优于近岸站,且有效波高相关性的优势更明显,远岸站和近岸站有效波高预报与实况的相关系数分别为0.94和0.85左右。

选择有效波高预报和海面风速预报两个因子,分别建立5个浮标站的线性回归方程,开展ECMWF有效波高预报订正。不同等级订正方程为:

海礁站(轻—中浪):

$$Y = 0.931\ 1X_1 - 0.003\ 4X_2 - 0.062\ 3 \quad (4)$$

海礁站(大—巨浪):

$$Y = 1.126\ 2X_1 - 0.025\ 9X_2 - 0.214\ 6 \quad (5)$$

舟山站(轻—中浪):

$$Y = 1.044\ 7X_1 - 0.028\ 6X_2 + 0.007 \quad (6)$$

舟山站(大—巨浪):

$$Y = 1.175\ 3X_1 - 0.080\ 5X_2 + 0.422\ 3 \quad (7)$$

温州站(轻—中浪):

$$Y = 0.952\ 4X_1 - 0.01X_2 - 0.051\ 9 \quad (8)$$

温州站(大—巨浪):

$$Y = 1.459\ 1X_1 - 0.086\ 5X_2 - 0.633 \quad (9)$$

下海门站(轻—中浪):

$$Y = 1.439\ 6X_1 - 0.074\ 6X_2 + 0.264\ 1 \quad (10)$$

虾峙门站(轻—中浪):

表3 浙江沿海各浮标站有效波高实况与有效波高、风速24 h预报的相关性

Tab.3 Correlation between the observed and 24-h forecasting significant wave height, and 10-meter wind speed at the buoys along the Zhejiang coast

站点	有效波高	风速	样本数
海礁站	0.936	0.724	2 037
舟山站	0.947	0.671	1 874
温州站	0.936	0.731	1 791
下海门站	0.844	0.616	757
虾峙门站	0.872	0.595	1 999

注:表中相关系数均通过0.001的相关显著性检验

$$Y = 1.296 1X_1 - 0.039X_2 + 0.132 8 \quad (11)$$

式中: $X_1$ 为模式有效波高预报; $X_2$ 为模式风速预报; $Y$ 为订正后的有效波高预报。

表4为浙江沿海各浮标站回归拟合优度和订正前后预报误差对比。首先分析风速作为预报因子所起的作用。从回归方程的拟合优度( $R^2$ )来看,考虑风速后,远岸站的预报准确度略有提高但不明显,近岸站的预报效果有较大提高,说明地形影响降低了模式对近岸站有效波高的预报能力,加入预报风速作为订正因子可以在一定程度上加以弥补。回归方程的标准误差以及独立检验样本订正前后的误差(见表4)显示,加入风速作为预报订正因子相对于远岸站和近岸站的作用也与拟合优度( $R^2$ )的表现一致。通过有效波高预报、风速预报可以分析订正前后预报误差的对比。从偏差来看,除了对海礁站、舟山站的大一巨浪只有50%左右的订正效果外,其他站点和浪型订正后的偏差都减小了82%以上,并且订正后的偏差接近0,基本消除了预报的系统偏差。从均方根误差来看,海礁站大一巨浪的预报误差减少了6%左右,舟山站大一巨浪减少了16%左右,其他站点和浪型减小了19%~32%,可见订正效果很好。

分别以温州和虾峙门浮标代表远岸站和近岸站,图4为两站订正前后有效波高预报与观测值的联合分布散点图,图中对角线上落点表示预报与实

况完全相同,落点越靠近对角线则预报与实况越接近。订正前温州浮标预报值多落在对角线以上(见图4a),表明预报值偏大,轻一中浪平均偏大0.21 m,大一巨浪平均偏大0.45 m;虾峙门站订正前散点多位于对角线下(见图4c),预报较实况偏小-0.18 m。经订正后,无论是温州浮标还是虾峙门浮标,落点均更靠近对角线(见图4b和4d),两站预报偏差分别减小到0.02 m和-0.04 m,均方根误差也相应减小。

## 2.4 预报订正的推广应用

海洋上风、浪的观测点非常有限,在缺乏观测资料的海域,如何对有效波高进行订正是值得思考的问题。本文将前面基于浮标站观测资料的订正应用到其他海域。表5为订正方程在其他浮标站的应用结果。从表中可以看出,当订正方程推广到其他同类型站点时,虽相对于本站略差,但仍然有很好的订正效果,如将海礁站方程应用到本站时,订正后的偏差和均方根误差分别为-0.01 m和0.22 m,应用到舟山站时为0.03 m和0.25 m,应用到温州站时为0.06 m和0.22 m,可见海礁站方程应用到舟山站、温州站都有很好的订正效果。但是,对于不同类型站点,订正方程的通用性变差,如将海礁站方程应用到下海门站,订正后的偏差和均方根误差分别为-0.30 m和0.41 m,应用到虾峙门站时为-0.33 m和0.42 m,对比表4,这两站订正前的偏差和均方根

表4 浙江沿海各浮标站回归拟合优度和订正前后预报误差对比

Tab.4 Regression goodness and comparison of forecasting biases after correction of the buoys along the Zhejiang coast

站点	浪级	拟合优度( $R^2$ )		回归 样本数	偏差/m			均方根误差/m			检验 样本数
		浪*	浪+风**		订正前	浪	浪+风	订正前	浪	浪+风	
海礁站	轻一中浪	0.700	0.701	1 220	0.16	-0.02	-0.02	0.25	0.19	0.19	665
	大一巨浪	0.847	0.849	99	0.25	0.12	0.11	0.49	0.44	0.46	54
舟山站	轻一中浪	0.832	0.845	1 289	0.17	0.05	0.05	0.27	0.21	0.20	490
	大一巨浪	0.765	0.800	64	0.28	0.24	0.18	0.45	0.42	0.38	31
温州站	轻一中浪	0.824	0.826	1 200	0.21	0.03	0.03	0.28	0.19	0.19	481
	大一巨浪	0.791	0.827	58	0.45	0.09	0	0.55	0.38	0.37	52
下海门站	轻一中浪	0.650	0.730	600	-0.15	-0.08	-0.03	0.32	0.29	0.26	159
虾峙门站	轻一中浪	0.749	0.775	1 331	-0.18	-0.21	-0.04	0.32	0.34	0.26	653

注:1.\*“浪”表示有效波高预报值为预报因子,\*\*“浪+风”表示有效波高和风速的预报值为预报因子;2.下海门站、虾峙门站的大一巨浪样本太少,不进行回归订正和检验。

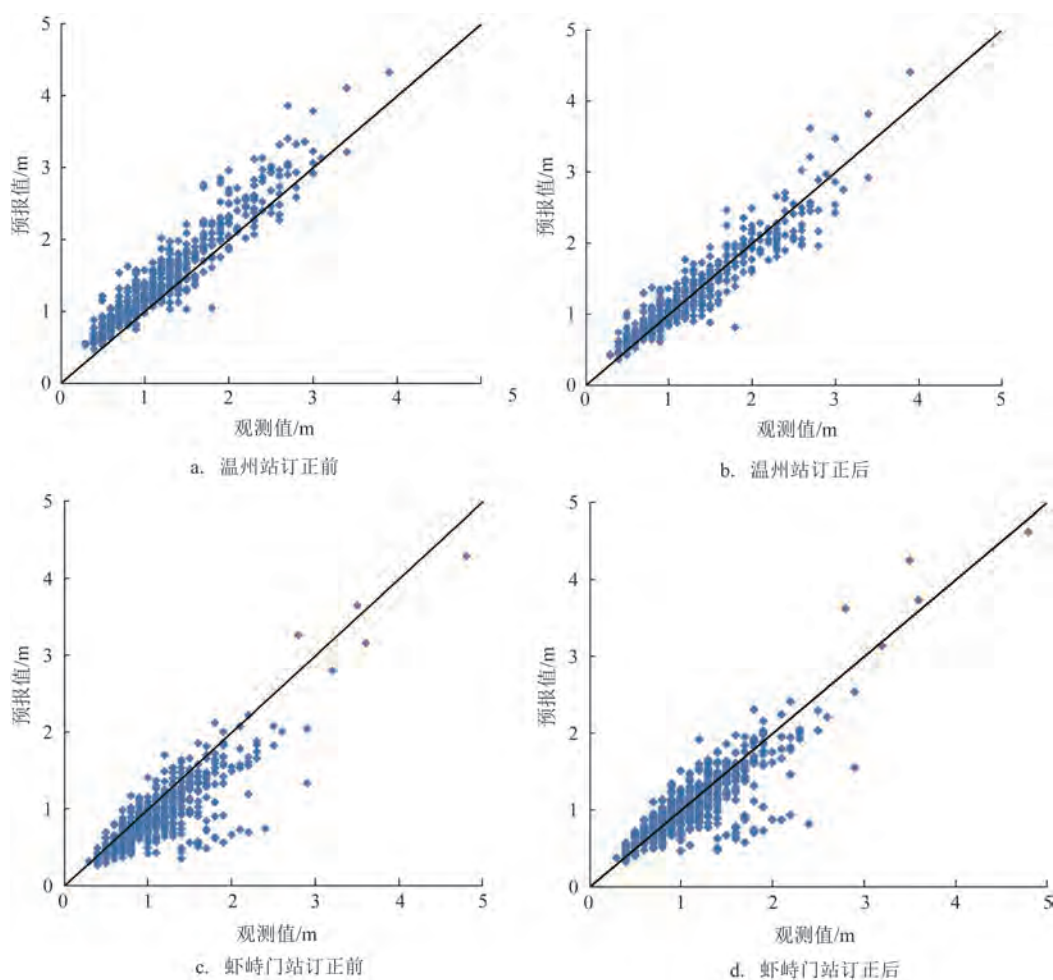


图4 有效波高的观测和预报值的联合散点分布

Fig.4 Scattered plots between the observed and predicted significant wave height

表5 浙江沿海浮标站间预报方程应用的订正误差(单位:m)

Tab.5 Correction errors of the fitting equations by applying to the other buoys along the Zhejiang coast (unit:m)

站点	偏差/均方根误差					样本数
	海礁站*	舟山站	温州站	下海门站	虾峙门站	
海礁站**	<b>-0.01/0.22</b>	0.05/0.24	-0.02/0.24	0.49/0.56	0.41/0.47	719
舟山站	0.03/0.25	<b>0.06/0.22</b>	0.00/0.24	0.50/0.55	0.42/0.48	521
温州站	0.06/0.22	0.10/0.24	<b>0.02/0.21</b>	0.53/0.57	0.50/0.46	533
下海门站	-0.30/0.41	-0.31/0.41	-0.32/0.42	<b>-0.03/0.26</b>	-0.03/0.28	159
虾峙门站	-0.33/0.42	-0.33/0.42	-0.35/0.43	-0.02/0.26	<b>-0.04/0.26</b>	653

注:\*横向是提供方程的站点,\*\*纵向是实施订正的站点

误差分别为-0.15 m和0.32 m, -0.21 m和0.32 m,说明使用海礁站方程订正后的误差更大。由此推断,订正方程对于同类型的海域站点有一定的普适性,

因此,对于所关心海域内的每个预报格点,可以选用距离其最近的同类型站点的订正方程来进行有效波高的预报订正。



## 2.5 冷空气海浪预报订正检验

不同天气系统以及不同风向/浪向导致的海浪均有所不同。由于样本数量限制,涉及本研究的台风、温带气旋等天气系统个例太少,因此仅对冷空气导致的海浪有效波高预报开展订正检验。选取冬半年(1—3月、10—12月)偏北风(风向 $\leq \pm 45^\circ$ )时中浪及以上等级的海浪个例进行回归订正和检验。

图5为海礁站、舟山站、温州站、下海门站、虾峙门站5个站点有效波高观测值和预报值的联合分布散点图。从图中可以看出,订正后落点分布的离散性减小,更趋于靠近对角线,预报偏差由0.082 m变成-0.037 m,均方根误差由0.342 m变成0.261 m。与之前未针对冷空气类型的订正结果比较,预报偏差和均方根误差均有所减小,说明区分天气类型有助于提高订正效果。

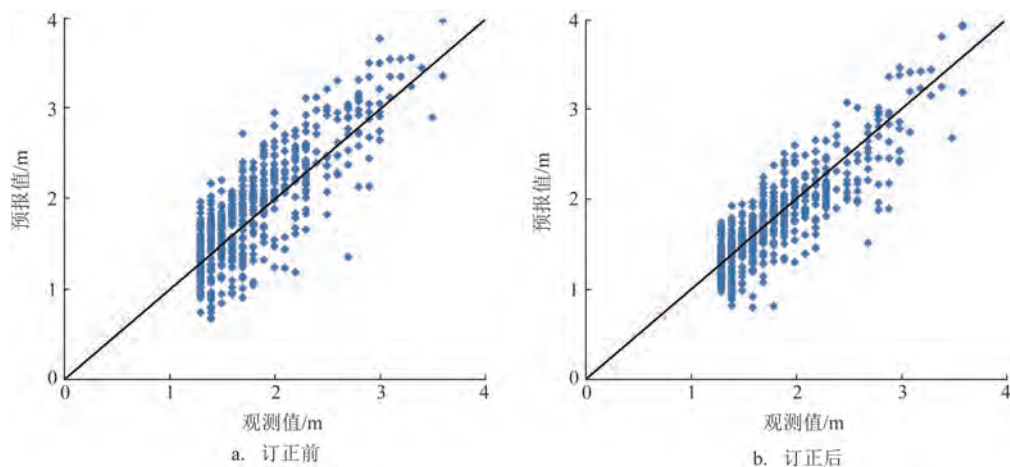


图5 冷空气型有效波高的观测和预报值的联合散点分布

Fig.5 Scattered plots between the observed and predicted significant wave height under cold air masses

## 3 结论与讨论

基于2010年10月—2022年12月浙江省沿海5个浮标站观测资料、2020—2022年ECMWF细网格海浪预报和海面10 m风预报资料,对浮标站的风、浪相关性进行分析,利用浮标站观测资料对ECMWF有效波高预报进行检验和订正。结果表明:

①浮标站风、浪观测资料的分析显示,远岸站相对近岸站的风、浪相关性更高,远岸站的有效波高与风速的相关系数在-2~ -3 h达到最高,而近岸站在-1 h达到最高,之后迅速下降,说明浪对风响应的滞后性在远岸站表现得更明显。无论是远岸站还是近岸站,当有效波高较小时,浪对风响应的滞后性均表现得更明显,随着浪级增大,浪对风的响应更及时,风浪的成分更大。

②0~240 h预报偏差显示,远岸站预报比实况稍偏大,近岸站预报略偏小,模式预报的稳定性随

着预报时效的延长而变差。24 h有效波高预报与实况的相关性为远岸站高于近岸站,两者分别为0.94和0.85左右。对于远岸站,轻浪和中浪预报较实况偏高,随着波高增至大浪和巨浪,预报较实况转为偏小,且随着波高增大,预报偏小得越多。近岸浮标站的有效波高预报较实况系统性偏小,且波高越大,预报偏小越多。

③对于远岸站,仅针对有效波高预报进行一元一次回归,就有很好的订正效果,但对于近岸站,同时增加海面10 m风速作为预报因子,进行二元一次回归的订正效果更好。

④将订正方程应用到同类型的周边海域,仍然有很好的订正效果。对所关心海域内的每个预报格点,可选用距离其最近的同类型站点的订正方程来进行有效波高的预报订正。

本文只重点针对24 h预报进行了订正效果分析,对于更长时效的预报,除了预报误差逐渐增大外,订正方法与24 h相同。如果预报样本累积足



够,可以开展更加精细化的不同浪级的预报订正,也可分天气类型或分不同风向/浪向建立预报订正方程。目前,海浪ERA5再分析资料已经得到较为广泛的应用,但其与实况仍然存在一定的差距,需要开展进一步检验,如果能将有限的浮标站观测与ERA5再分析资料进行融合分析,就能将海浪预报的订正应用到更远的海域。

#### 参考文献:

- [1] 黄婉茹, 张尧, 黎舸, 等. 海洋灾害调查与风险评估[J]. 城市与减灾, 2021(2): 14-19.  
HUANG W R, ZHANG Y, LI G, et al. Survey on marine disaster and its risk assessment[J]. City and Disaster Reduction, 2021(2): 14-19.
- [2] 陈汨梨, 潘志刚, 徐啸, 等. 中国近海冷空气浪的参数化判别标准研究[J]. 中国港湾建设, 2020, 40(12): 1-4.  
CHEN M L, PAN Z G, XU X, et al. Parameterized criterion for cold air wave in China's coastal seas[J]. China Harbour Engineering, 2020, 40(12): 1-4.
- [3] 周阳, 叶钦, 施伟勇, 等. 浙江中部三门湾波浪特征统计分析[J]. 海洋学报, 2021, 43(3): 13-23.  
ZHOU Y, YE Q, SHI W Y, et al. Statistical analysis on wave characteristics in the Sanmen Bay of Zhejiang middle coast[J]. Haiyang Xuebao, 2021, 43(3): 13-23.
- [4] 蒋璐璐, 涂小萍, 王毅, 等. “米娜”(1918)台风浪特征及其与“利奇马”(1909)的差异[J]. 海洋预报, 2021, 38(4): 53-60.  
JIANG L L, TU X P, WANG Y, et al. Characteristics of typhoon-induced wave by Mitag (1918) and their differences with that induced by typhoon Lekima (1909)[J]. Marine Forecasts, 2021, 38(4): 53-60.
- [5] 陈剑桥, 韩博, 杨清华, 等. 浙江东部海域沉船海难海浪灾害性特征分析[J]. 海洋预报, 2023, 40(1): 28-38.  
CHEN J Q, HAN B, YANG Q H, et al. Analysis of the disastrous characteristics of waves for shipwrecks in the eastern waters of Zhejiang province[J]. Marine Forecasts, 2023, 40(1): 28-38.
- [6] 刘凡, 陆小敏, 徐丹, 等. 海浪预报方法研究进展[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2021, 49(5): 387-393.  
LIU F, LU X M, XU D, et al. Research progress of ocean waves forecasting method[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2021, 49(5): 387-393.
- [7] 梁小力, 王毅. 基于SWAN模式的全球有效波高数值预报结果之初步验证[J]. 海洋预报, 2015, 32(6): 1-9.  
LIANG X L, WANG Y. A preliminary validation of global numerical significant wave height prediction result based on the SWAN model[J]. Marine Forecasts, 2015, 32(6): 1-9.
- [8] 徐丽丽, 肖文军, 石少华, 等. WaveWatch III和SWAN模型嵌套技术在业务化海浪预报系统中的应用及检验[J]. 海洋通报, 2015, 34(3): 283-294.  
XU L L, XIAO W J, SHI S H, et al. Application and validation of an operational wave forecast model system based on the nesting use of WaveWatch III and SWAN model[J]. Marine Science Bulletin, 2015, 34(3): 283-294.
- [9] 邓心怡, 黎北梅, 王晓春, 等. 2019年8—10月长江口近岸海上风电场风浪预报[J]. 海洋预报, 2021, 38(4): 45-52.  
DENG X Y, LI B M, WANG X C, et al. Wind and ocean wave forecasts for the offshore wind farms near the Changjiang River estuary from August to October 2019[J]. Marine Forecasts, 2021, 38(4): 45-52.
- [10] 张永垂, 陈诗尧, 王宁, 等. 全球业务化海洋预报系统进展[J]. 地球科学进展, 2022, 37(4): 344-357.  
ZHANG Y C, CHEN S Y, WANG N, et al. Progress of global operational ocean forecasting systems[J]. Advances in Earth Science, 2022, 37(4): 344-357.
- [11] 姚日升, 涂小萍, 丁焯毅, 等. 华东沿海ASCAT反演风速的检验和订正[J]. 应用气象学报, 2015, 26(6): 735-742.  
YAO R S, TU X P, DING Y Y, et al. Verification and correction on ASCAT wind velocities within the offshore East China Sea[J]. Journal of Applied Meteorological Science, 2015, 26(6): 735-742.
- [12] 申华羽, 方艳莹, 涂小萍, 等. ECMWF细网格10 m风预报在浙江沿海的评估与订正[J]. 气象, 2020, 46(11): 1485-1494.  
SHEN H Y, FANG Y Y, TU X P, et al. Verification of ECMWF 10 m wind forecast for coastal Zhejiang province[J]. Meteorological Monthly, 2020, 46(11): 1485-1494.
- [13] 胡海川, 黄彬, 魏晓琳. 我国近海洋面10 m风速集合预报客观订正方法[J]. 气象, 2017, 43(7): 856-862.  
HU H C, HUANG B, WEI X L. Objective correction method of ensemble forecast of 10 m winds on Chinese offshore[J]. Meteorological Monthly, 2017, 43(7): 856-862.
- [14] 胡海川, 刘珺, 林建. 基于预报方程的我国近海阵风预报[J]. 气象, 2022, 48(3): 334-344.  
HU H C, LIU J, LIN J. Application of prediction equation to gust forecasting for Chinese offshore areas[J]. Meteorological Monthly, 2022, 48(3): 334-344.
- [15] 毛科峰, 萧中乐, 王亮, 等. 数值模式与统计模型相耦合的近岸海浪预报方法[J]. 海洋学报, 2014, 36(9): 18-29.  
MAO K F, XIAO Z L, WANG L, et al. Coastal wave forecasting by dynamical model coupled with a statistical method[J]. Acta Oceanologica Sinica, 2014, 36(9): 18-29.
- [16] 张荫廉, 陈淑琴, 陈梅汀. 基于舟山多年风浪资料的近海海浪预报研究[J]. 海岸工程, 2018, 37(3): 25-33.  
ZHANG L L, CHEN S Q, CHEN M T. Research on offshore wave prediction based on wind and wave data obtained in Zhoushan in the past years[J]. Coastal Engineering, 2018, 37(3): 25-33.
- [17] 龚葵, 曹宗元, 刘茜, 等. 一种利用浮标站资料改进海浪模式有效波高预报的方法[J]. 海洋预报, 2020, 37(1): 50-54.

- GONG Y, CAO Z Y, LIU H, et al. A method for improving significant wave height prediction of wave mode using buoy station data[J]. *Marine Forecasts*, 2020, 37(1): 50-54.
- [18] 李江夏, 朱钰, 徐杰, 等. ERA-Interim 和 ERA5 再分析风资料在中国近海的适用性对比研究[J]. *海洋通报*, 2023, 42(3): 260-

271.

- LI J X, ZHU Y, XU J, et al. A comparative study on the applicability of ERA-Interim and ERA5 reanalysis wind data in the coastal waters of China[J]. *Marine Science Bulletin*, 2023, 42(3): 260-271.

## Significant wave height analysis and numerical forecast correction based on the buoy observations along the Zhejiang coast

YAO Risheng<sup>1,2</sup>, XIAO Wangxing<sup>3</sup>, TU Xiaoping<sup>3\*</sup>, ZHU Jiamin<sup>4</sup>, ZHOU Kai<sup>2</sup>, PANG Qiye<sup>2</sup>

(1. Ningbo Ecological Environment Meteorological Center, Ningbo 315012, China; 2. Zhejiang Meteorological Observatory, Hangzhou 310057, China ; 3. Ningbo Meteorological Observatory, Ningbo 315012, China; 4. Ningbo Beilun District Meteorological Bureau, Ningbo 315826, China)

**Abstract:** Based on the observations of five buoys along the Zhejiang coast from October 2010 to December 2022, and sea wave and 10-meter wind forecasts of the European Medium-Range Weather Prediction Center fine grid model, the observed correlation between wind and wave is analyzed, the significant wave height (SWH) forecasting is verified and correction method is studied as well. Deviations and root mean square error (RMSE) of the 0~240 hour forecasts indicate that the SWH is slightly overestimated for the buoys away from the coastline, while a little bit underestimated for the near shore buoys. The forecasting instability increases along with the prolong of lead time. The correlated coefficients between the 24-hour forecasts and the observations of the buoys far away from the coastline are higher than those of the near shore buoys, with coefficients of 0.94 and 0.85, respectively. There exists systematic deviations for the SWH forecasting, which dominates the error sources for the buoys. The predicted SWHs of the near shore buoys are lower than observations, while the forecast biases of the buoys far away from the coastline change from positive to negative with the SWH increasing, and the greater the SWH, the more absolute biases received. It basically follows a linear regression between the predicted SWHs and observations for the buoys away from the coastline. While larger biases are recorded for the near shore buoys due to the influence of terrain, and a two-variable linear regression can get a better SWH correction result, with the predicted SWH and 10-meter speed as regression variables. The correction equations can achieve good results and can be applied to the locations similar to the buoys along the Zhejiang coast.

**Key words:** significant wave height; 10 m wind on the sea surface; numerical forecast; correction; Zhejiang coastal areas