

DOI:10.11737/j.issn.1003-0239.2025.06.004

基于风、浪、流参数的畸形波发生概率预测方法研究

王译启¹, 任林¹, 杨劲松^{1,2*}, 李晓辉¹, 韩心海^{1,2}

(1. 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, 浙江 杭州 310012; 2. 上海交通大学 海洋学院, 上海 200240)

摘要: 基于58个波浪浮标的观测数据及风场、流场的再分析资料,利用滑动窗口法分析了多个海况参数与畸形波发生概率(RWO)的关系。结果表明:有效波高与RWO之间存在显著的负相关关系;随着风速增加,RWO先减小后增大,随着流速增加,RWO先增大后减小,但均在特定阈值处转折;不同风浪夹角下RWO变化较小,浪流夹角为锐角时RWO略大;随着相对水深增加,RWO存在一定下降趋势。从海况参数与RWO的相关性出发,选择有效波高作为主要建模参数。在此基础上,由于不同风速对畸形波的调制作用不同,探讨了不同风速下畸形波发生概率随有效波高的变化情况,并确定了最佳风速阈值。根据不同风速条件下有效波高与RWO的关系,将低风速与中等风速小波高(有效波高 ≤ 5 m)数据合并建模,中等风速大波高(有效波高 > 5 m)单独建模,并在测试集上进行验证。结果表明:在低风速及中等风速小波高条件下,真实RWO与模型预测RWO的决定系数和均方根误差分别为0.97和0.0019;中等风速大波高条件下分别为0.81和0.0035。

关键词: 畸形波;有效波高;波浪浮标;风速

中图分类号: P731.33 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-0239(2025)06-0024-11

0 引言

畸形波是指高度远高于周围海浪的瞬态重力波,具有波高极大、波峰陡峭、能量集中、破坏力强的特征^[1]。畸形波严重影响航海安全,并对海洋结构物(如海上石油平台、风力发电设备等)造成严重威胁^[2]。在过去20年中,畸形波导致了超过200艘超级油轮和巨型货轮沉没^[3]。据Nikolkina等^[4-5]的研究,2006—2010年,仅记录在案的畸形波事件就造成了131起人员伤亡和船只损坏。为提升海上建筑物和海洋船舶的安全防护能力,为海洋军事活动提供安全保障参考,必须充分了解畸形波的特征规律。因此,研究畸形波的预报方法是海洋防灾减灾的重要课题。

目前,关于畸形波的形成机理,许多学者提出了一些假说。Li等^[6]通过推导特定条件下的非线性薛定谔方程,揭示了不同风速对波浪调制不稳定性及波浪能量扩散有着不同的影响。White等^[7]指出,流场类似光学棱镜,会加速波能聚集,从而生成尖锐的大波。Pelinovsky等^[8]发现,当波浪传播到浅水区域时,地形的不均匀性显著促进了畸形波的生成。畸形波的机理在学界尚未形成定论,探讨不同风、流、水深条件下的畸形波发生概率,是目前畸形波发生概率预测研究的重要方向。

早期畸形波统计数据主要来源于船员的口述报告和事故报道。Didenkulova^[9]编制了一个包含2011—2018年210起畸形波事件的目录,并着重标注了风险最高的区域。Didenkulova等^[10]通过收集

收稿日期: 2025-03-21。

基金项目: 卫星海洋环境监测预警全国重点实验室自主研究课题(SOEDZZ2527);国家重点研发计划(2022YFC3103101);自然资源部空间海洋遥感与应用重点实验室开放基金课题(2023CF0009);国家自然科学基金(42306200)。

作者简介: 王译启(2001-),男,硕士,主要从事灾害性异常浪研究。E-mail: peter_wyq@sio.org.cn

*通信作者: 杨劲松(1969-),男,研究员,博士,主要从事海洋微波遥感研究。E-mail: jsyang@sio.org.cn

媒体和文献报道,总结了2005—2021年的429起畸形波事件,但由于语言壁垒,导致数据海域分布不均衡。然而,由于数据来源局限于目击者和媒体,畸形波事件的统计数量有限,不同地区畸形波观测数据的可获得性存在显著差异。

海浪浮标是提供当地海浪环境信息的重要工具,可以提供高度准确和全面的数据。目前,基于海浪浮标的原位观测数据研究与畸形波相关的海况参数,越来越受到研究者的重视。Baschek等^[11]收集了由海岸数据信息计划(Coastal Data Information Program, CDIP)部署和维护的16个浮标数据,以评估不同水深下畸形波的发生概率。Cattrell等^[12]分析了多个CDIP浮标的连续表面高程数据,揭示了畸形波的预测指标应具有区域特异性。Orzech等^[13]利用34个CDIP浮标数据,研究了畸形波与风和海表流切变之间的关系,并提出特定地点较大的负洋流切变可能是导致畸形波发生的潜在因素。Azevedo等^[14]结合再分析的风场和流场数据,对位于佛罗里达州坦帕湾的1个CDIP浮标5年的数据进行了研究,发现畸形波不完全依赖非线性机制,需要通过多参数联合实现畸形波预测。

因此,本研究将基于浮标观测数据和模式再分析数据,提取畸形波事件、计算畸形波发生概率,并探讨各海况参数与畸形波发生概率的关系,以建立准确可靠的畸形波预测模型,为后续灾害性畸形波

的精细预报提供新思路。

1 研究数据及数据预处理

1.1 研究数据

1.1.1 浮标数据

CDIP是由斯克里普斯海洋学研究所部署并运营的海洋浮标网络(网址:<https://cdip.ucsd.edu/>),包含一系列定向波浪测量浮标,主要用于收集和监测沿海海域的波浪参数^[15]。本研究选取2018—2022年有观测数据的58个浮标,这些浮标以约1.28 Hz的频率记录垂直位移,分辨率为0.01 m。图1为58个浮标的空间分布情况。

1.1.2 模式再分析数据

欧洲中期天气预报中心(European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, ECMWF)发布的第五代全球气候再分析资料产品ERA5,通过物理定律将模式数据与全球观测数据整合为完整且一致的数据集^[16](网址:<https://cds.climate.copernicus.eu/datasets/reanalysis-era5-single-levels?tab=overview>)。本文选用2018—2022年海平面以上10 m的经向和纬向风场,其空间分辨率为0.25°,时间分辨率为1 h,时间基准为世界时(下同)。

海表流场数据由混合坐标海洋模型(Hybrid Coordinate Ocean Model, HYCOM)模拟生成(网址:

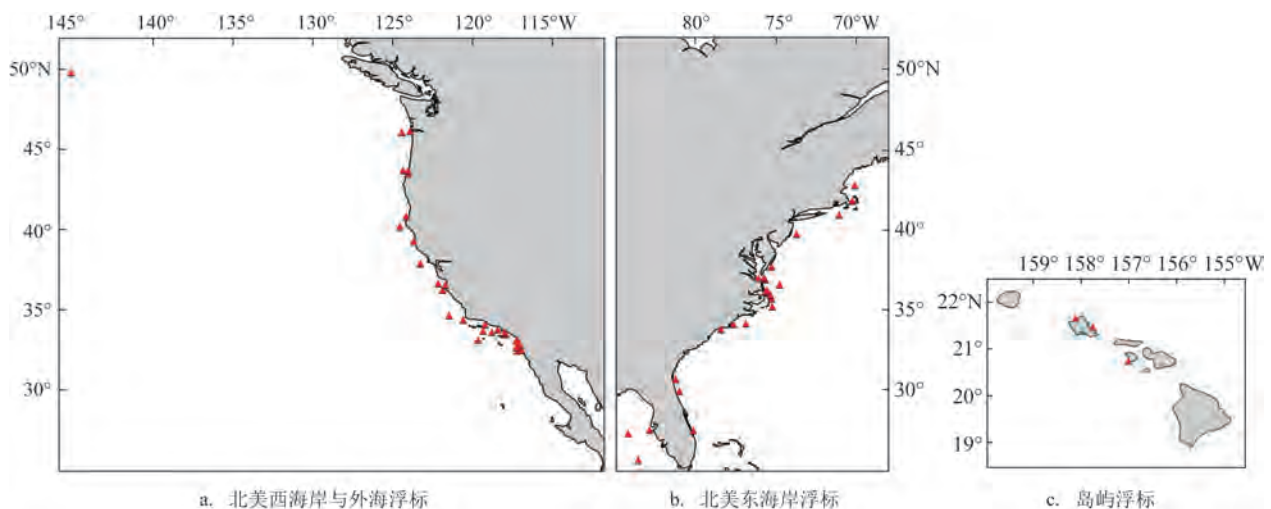


图1 浮标空间分布图

Fig.1 The locations of buoys

<https://tds.hycom.org/thredds/catalog.html>)。该HYCOM数据同化了卫星观测和浮标观测资料,包含41个深度层^[17]。本文选取第1层(深度为0 m)数据代表海表流场,其空间分辨率为 0.08° ,时间分辨率为3 h。

1.2 数据预处理

目前,对于畸形波尚无普遍接受的定义^[18-21]。因此,采用最常用的标准描述畸形波,即其最大波高超过有效波高的两倍,公式为:

$$\frac{H_{\max}}{H_s} > 2 \quad (1)$$

式中: H_{\max} 是最大波高; H_s 是有效波高,定义为波高总个数的1/3个大波波高的平均值。图2为2020年1月11日23:03由浮标029观测到的畸形波事件示例。对每个浮标的垂直位移数据进行30 min聚合,采用上跨零法提取单个波的最大波高^[22],并计算相应的 H_s 。若30 min内至少出现一个畸形波,则该记录被视为畸形波记录;若一个时间区间内存在多个畸形波,则只保留 H_{\max} 最大的畸形波。

为了减少测量不稳定引起的误差,应用了一系列质量控制原则^[23-24],如果满足任一条件,则删除整

个30 min的记录:

①原始数据中连续10个数据点具有相同的值;

②跨零周期大于25 s;

③海表垂直位移变化率 η 超过极限变化率2倍,表面高程变化率定义为:

$$\left| \frac{\partial \eta}{\partial x} \right| > 2U_{\lim} \quad (2)$$

式中: x 为时间;极限变化率 U_{\lim} 定义为:

$$U_{\lim} = 2\pi \frac{\text{std}(\eta)}{\bar{T}} \sqrt{2 \ln(n)} \quad (3)$$

式中: \bar{T} 表示观测到的平均过零周期; n 表示记录中的波数;

④一条记录中波浪数量少于100;

⑤波峰或波谷对应的海表垂直位移的绝对值大于海表垂直位移归一化中值绝对偏差的8倍,即:

$$|h| > 8\kappa \cdot \text{median}[|\eta - \text{median}(\eta)|] \quad (4)$$

式中: h 表示波峰或波谷对应的海表垂直位移; $\kappa = 1.483$ 。

ERA5风场和HYCOM流场原始数据均提供了东西方向和南北方向的速度分量 u 和 v ,而风和流的全速度 V 和方向 θ 可计算得出。计算公式为:

$$V = \sqrt{u^2 + v^2} \quad (5)$$

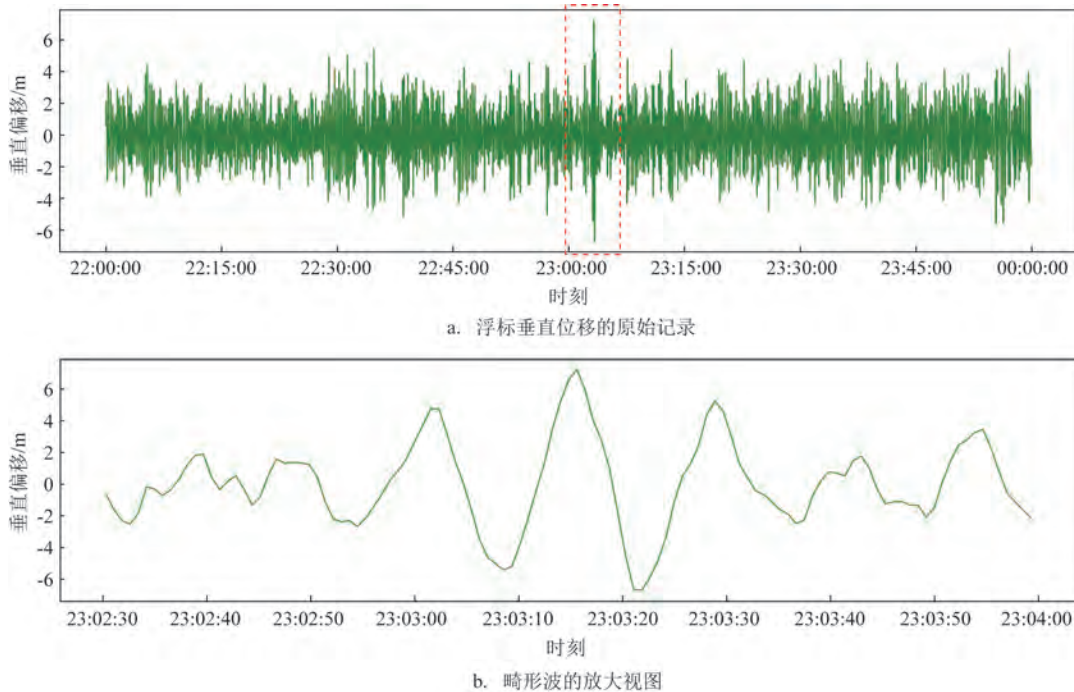


图2 2020年1月11日23:03浮标029测量到的畸形波事件

Fig.2 An example of a rogue wave event that was measured at 23:03 January 11, 2020 by Buoy 029

$$\theta = \arctan\left(\frac{v}{u}\right) \quad (6)$$

在获取模式再分析数据的风速和流速后,需将浮标数据获取的波浪信息与模式数据获取的信息进行时空匹配。基于9个最近网格点的数据,采用线性插值方法确定相应浮标位置处每条记录的风流参数。浮标和模式数据之间的最大时间间隔设置为30 min,最大空间间隔设置为0.25°。从观测数据中提取浮标的部署深度,用于计算相对水深 d_r ,其定义为浮标部署深度 d 与波长 L 的比值,计算公式为:

$$d_r = \frac{d}{L} \quad (7)$$

经过上述预处理流程,最终得到58个浮标的有效数据记录3 297 114条,数据基本信息见表1。

2 海况参数对畸形波发生概率的影响分析

畸形波发生概率(Rogue Wave Occurrence, RWO)定义为某个区间内畸形波的记录数 N_r 与总

记录数 N 的比值,计算公式为:

$$RWO = \frac{N_r}{N} \quad (8)$$

基于上述数据计算了每个浮标的RWO,其总体空间分布见图3。RWO的总体范围为0.03~0.06,北美西海岸浮标的RWO低于北美东海岸浮标,外海和岛屿浮标的RWO较低。

选取6个目标海况参数,即有效波高、风速、风浪夹角、流速、浪流夹角和相对水深。采用滑动窗口法研究这些参数与RWO的关系,即为每个参数定义固定长度的区间,在该区间内提取所有观测记录并计算其RWO;然后以指定步长将该区间从定义的起点滑动到终点,生成描述海况参数和RWO关系的序列。滑动窗口法参数见表2。此外,为避免样本量过小造成的统计误差,规定仅当畸形波记录超过10个时,该区间才视为有效。同时,针对不同海况参数采用不同的拟合函数,即使用反比例函数拟合有效波高、相对水深与RWO的关系,采用二次函数拟合风速、流速和浪流夹角与RWO的关系,采

表1 数据基本信息

Tab.1 Basic information of dataset

浮标总数量	起止时间	总波数	总记录数	有效波高平均值/m	最大波高平均值/m
58	2018年1月—2022年12月	475 960 273	3 297 114	1.26	2.13
有效波高最大值/m	最大波高最大值/m	风速平均值/(m/s)	风速最大值/(m/s)	流速平均值/(m/s)	流速最大值/(m/s)
12.32	21.55	4.09	20.35	0.23	0.97

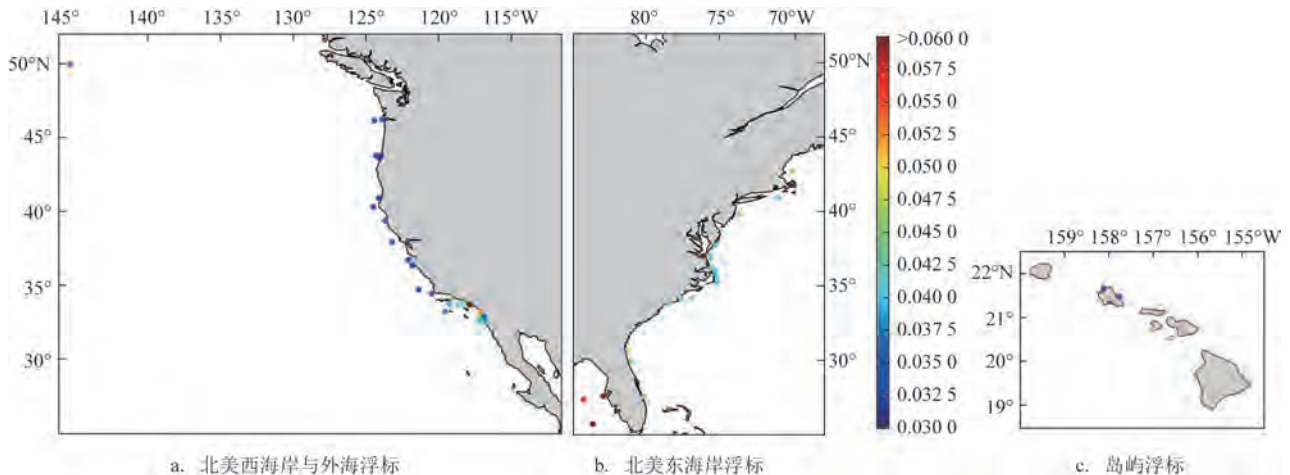


图3 RWO的总体空间分布

Fig.3 Overall spatial distribution of the RWO

表2 滑动窗口法对应的参数

Tab.2 Parameters used in the sliding window method

海况参数	起点	终点	步长	区间长度
有效波高	0	11	0.1	0.1
风速	0	20	0.2	0.2
风浪夹角	-180	180	1	1
流速	0	1	0.01	0.01
浪流夹角	-180	180	1	1
相对水深	0	100	0.1	0.1

用一次函数拟合风浪夹角与RWO的关系。

使用决定系数(Coefficient of Determination, R^2)、均方根误差(Root Mean Square Error, RMSE, 记为 E_{RMS})和标准差(Standard Deviation, STD, 记为 D_s)来评估建模效果。定义如下:

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \quad (9)$$

$$E_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2} \quad (10)$$

$$D_s = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \bar{y})^2} \quad (11)$$

式中: n 表示样本数; y_i 表示第 i 个观测值, 而 \hat{y}_i 表示

从模型中获得的第 i 个预测值, \bar{y} 表示所有观测值的平均值。由于每个模型的真实值不同,模型的STD和RMSE需要标准化。标准化标准差(Normalized Standard Deviation, NSTD, 记为 D_{NST})定义为预测数据STD与真实数据STD(STD_{true} , 记为 $D_{s,true}$)的比值, 而标准化均方根误差(Normalized Root Mean Square Error, NRMSE, 记为 E_{NRMS})定义为由预测数据的RMSE和真实数据STD的比值。计算公式为:

$$D_{NST} = \frac{D_s}{D_{s,true}} \quad (12)$$

$$E_{NRMS} = \frac{E_{RMS}}{D_{s,true}} \quad (13)$$

RWO随各海况参数的变化及对应的拟合曲线见图4, 相关误差指标见表3。

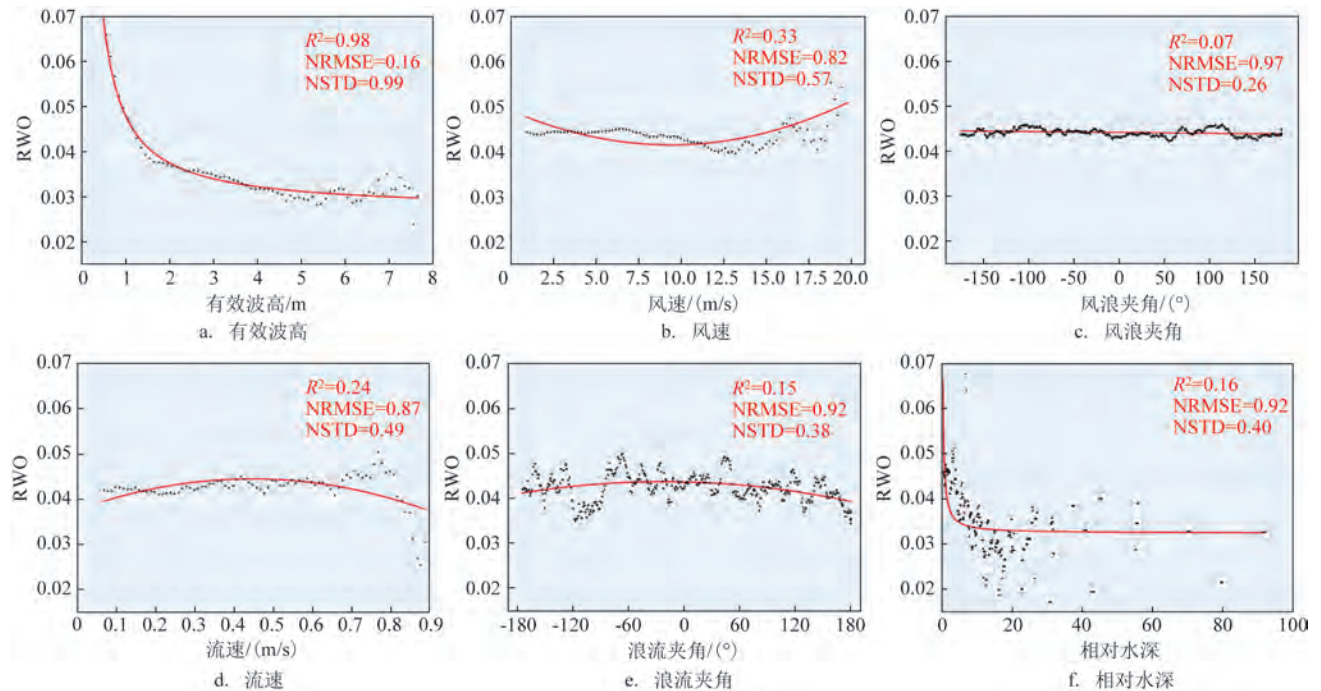


图4 RWO与各个海况参数的关系

Fig.4 Rogue wave occurrence varies with the increases of certain sea state parameters

表3 各海况参数的拟合方程对应的误差指标

Tab.3 Corresponding error metrics of fitting equations for each parameter

海况参数	R^2	NRMSE	NSTD
有效波高	0.98	0.16	0.99
风速	0.33	0.82	0.57
风浪夹角	0.07	0.97	0.26
流速	0.24	0.87	0.49
浪流夹角	0.15	0.92	0.38
相对水深	0.16	0.92	0.40

有效波高与RWO之间存在显著负相关关系(见图4a),RWO随有效波高的增加而降低,拟合方程具有最高的 R^2 ,最低的NRMSE和最接近1的NSTD。但当有效波高较大时,部分点明显偏离拟合曲线。整体上RWO随风速的增加先减小后增大(见图4b),在风速大于15 m/s后出现波动。虽然风速与RWO之间存在一定的相关性,但拟合方程中二次项系数和一次项系数均较小,说明拟合方程所体现的风速对RWO的影响较弱。不同风浪夹角对应的RWO值相近(见图4c),点的分布比较平稳,无明显趋势。随着流速增加,RWO大致呈现先上升后下降的趋势(见图4d),并在某一流速后出现弯曲。拟合方程表明,流速和RWO之间几乎无显著相关关系。RWO在不同浪流夹角下波动较大(见图4e),随浪流夹角的增加先增大后减小,且锐角时的RWO高于钝角。随着相对水深增加RWO存在下降趋势(见图4f),但点的分布较为散乱,拟合方程的 R^2 仅为0.16,说明相对水深与RWO之间相关性有限。因此,选择有效波高作为进一步建立预测模型的主要参数。

3 畸形波发生概率预测模型

3.1 风速边界的确定

按照1:1的比例将数据集分为训练集和测试集。考虑到不同风速对畸形波发生有不同的调制作用^[8,25-26],结合数据分布,选择针对低风速和中等风速按波高分开建模。对于低风速情况,采用近似反比例函数拟合有效波高和RWO的关系;对于中

等风速情况,采用二次函数进行拟合。根据蒲福风力表^[27],选择5~11 m/s作为低风速和中等风速的潜在分界线,分别进行建模并比较不同模型的性能,以选择最优分界点。

泰勒图基于 R^2 、NRMSE和NSTD 3个指标,通过比较模型结果与实际数据的关系来评估模型性能^[28]。 R^2 用于表征模型结果与实际数据的分布相似程度,NRMSE和NSTD用于表征两者的偏差大小。泰勒图简单明了地综合了3个因子的情况:当 R^2 越大、NRMSE越小、NSTD越接近于1时,预测结果与观测值越接近,模型性能越强。泰勒图见图5,各模型误差参数详见表4。

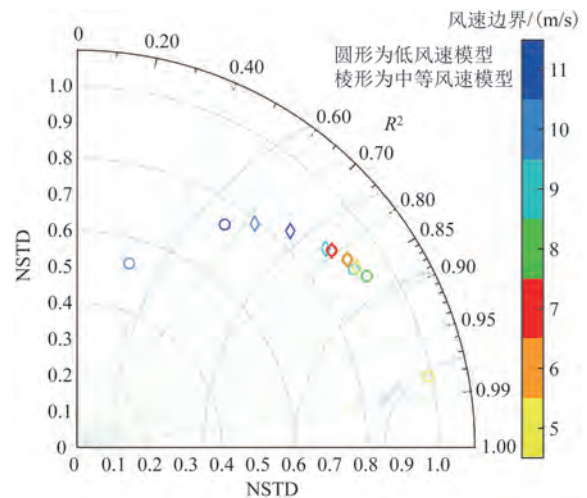


图5 不同风速边界的模型泰勒图

Fig.5 Taylor diagram of model with varying wind speed boundaries

总体而言,低风速条件下的模型分布较为分散,中等风速条件下的模型分布较为集中。对于低风速条件, R^2 为0.25~0.98,NRMSE为0.1~0.9,NSTD为0.50~0.99。相比之下,中等风速条件的 R^2 为0.60~0.85,NRMSE为0.3~0.5,NSTD为0.70~0.95。当风速边界大于10 m/s时,模型表现显著下降;当风速边界设置为5 m/s时,两种风速条件下的模型都达到最高的 R^2 、最低的NRMSE和最接近1的NSTD。因此,确定5 m/s作为低风速与中等风速的划分边界。

图6为数据集中风速分布的直方图,其中5 m/s为低风速和中等风速的划分边界。低风速数据占

表4 不同风速边界的模型精度与误差指标

Tab.4 Model accuracy and error analysis across different wind speed boundaries

风速条件	风速分界	RMSE	STD _{time}	STD	R ²	NRMSE	NSTD
低风速	<u>5</u>	<u>0.001 6</u>	<u>0.011 9</u>	<u>0.011 8</u>	<u>0.98</u>	<u>0.13</u>	<u>0.99</u>
	6	0.004 4	0.010 5	0.009 5	0.82	0.42	0.91
	7	0.004 4	0.009 8	0.008 7	0.79	0.45	0.89
	8	0.003 6	0.009 9	0.009 2	0.86	0.37	0.93
	9	0.003 9	0.009 5	0.008 7	0.84	0.41	0.91
	10	0.012 3	0.014 4	0.007 6	0.27	0.85	0.53
	11	0.005 9	0.008 7	0.006 4	0.55	0.67	0.74
中等风速	<u>5</u>	<u>0.003 6</u>	<u>0.009 3</u>	<u>0.008 6</u>	<u>0.85</u>	<u>0.38</u>	<u>0.92</u>
	6	0.004 1	0.009 9	0.009 0	0.82	0.41	0.91
	7	0.005 1	0.011 3	0.010 1	0.79	0.45	0.89
	8	0.003 8	0.008 9	0.008 1	0.82	0.42	0.91
	9	0.004 2	0.009 0	0.007 9	0.78	0.47	0.88
	10	0.006 4	0.010 4	0.008 2	0.62	0.61	0.79
	11	0.004 5	0.008 3	0.006 9	0.70	0.55	0.84

注:5 m/s 为本研究确定的低风速与中等风速的划分边界,各指标数据用下划线加粗突出显示。

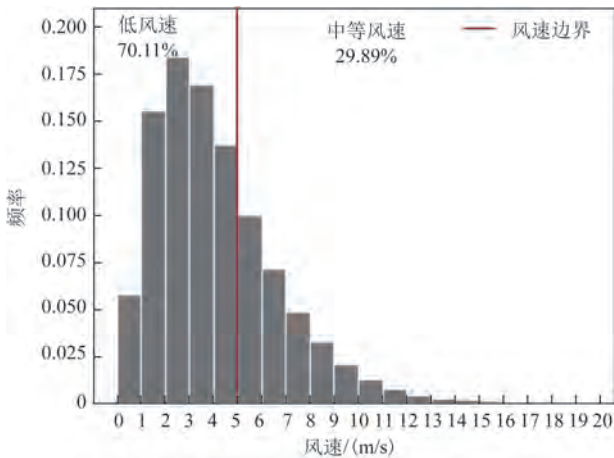


图6 风速分布直方图

Fig.6 The histogram of wind speed distribution showing the chosen boundary of wind speed conditions

70.11%, 中等风速数据占 29.89%。不同风速条件下训练集和测试集的有效波高分布见图 7。总体上, 低风速和中等风速下, 训练集和测试集的波高分布非常相似。

3.2 模型的建立与验证

在低风速和中等风速条件下, 有效波高与 RWO

的关系见图 8a, 由图可见, 在低风速条件下, 随着有效波高的增加, RWO 持续下降(类似反比例函数); 在中等风速条件下, 当有效波高增加到 5 m 前, RWO 持续下降, 有效波高大于 5 m 后, RWO 持续上升(类似二次函数)。此外, 在低风速与中等风速条件下, 当有效波高小于 5 m 时, 蓝点和红点分布相近, 有效波高大于 5 m 时, 两者分布存在显著不同。

因此, 可将中等风速小波高(有效波高 ≤ 5 m)的数据与低风速条件下的数据合并建模(见图 8b 中黑点), 对中等风速大波高(有效波高 > 5 m)的数据单独建模(见图 8b 中红点)。拟合结果分别见图 8b 的黑线和红线。采用 R^2 、RMSE、相对误差(Relative Error, RE, 记作 E_R)和平均绝对误差(Mean Absolute Error, MAE, 记作 E_{MA})指标评价拟合结果的精度与误差。计算公式为:

$$E_R = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{y_i - \hat{y}_i}{\hat{y}_i} \right| \times 100\% \quad (14)$$

$$E_{MA} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i - \hat{y}_i| \quad (15)$$

在低风速及中等风速小波高、中等风速大波高条件下, 模型在训练集上的 R^2 分别为 0.97 和 0.82, RMSE 分别为 0.001 8 和 0.002 9, RE 分别为 4.35%

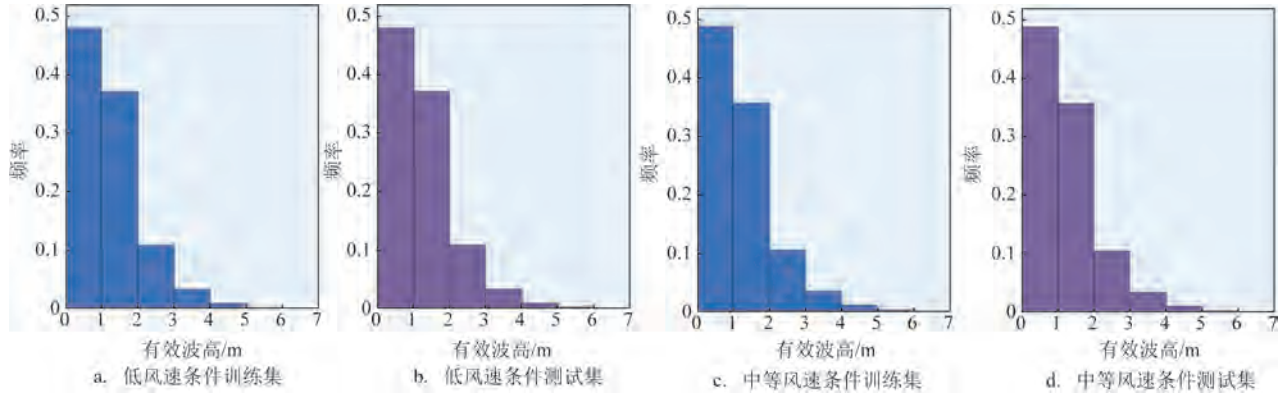


图7 训练集和测试集有效波高频率分布直方图

Fig.7 Histograms of significant wave height frequency distribution for training and test sets

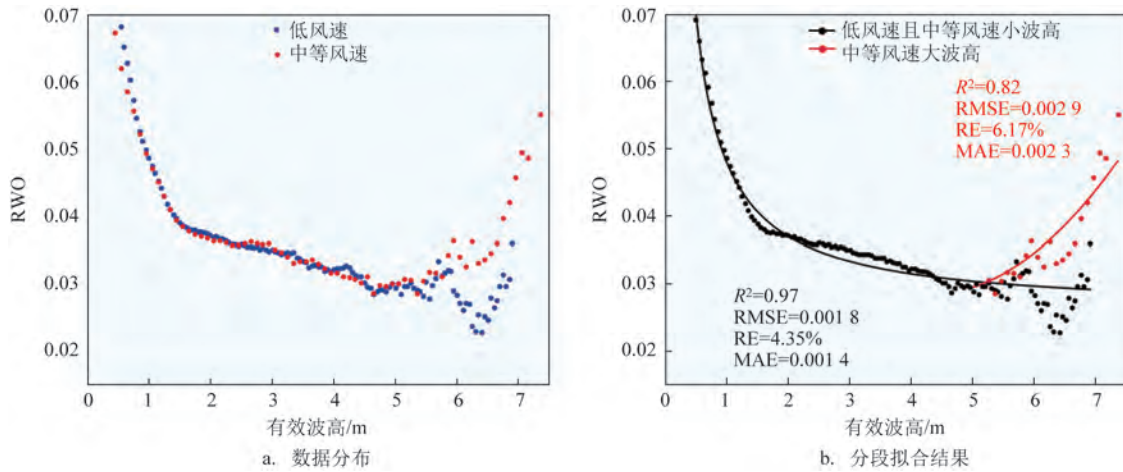


图8 不同风速下有效波高与RWO的关系及其拟合曲线

Fig.8 Relationship between significant wave height and the RWO with fitting curves for different wind speeds

和6.17%,MAE分别为0.001 4和0.002 3。两种条件下,模型均表现出良好性能,能准确反映有效波高与RWO的关系。对应的拟合曲线方程为:

$$RWO = \begin{cases} \frac{0.022}{H_s} + 0.026, V_w \leq 5 \text{ m/s} \text{ 或 } H_s \leq 5 \text{ m} \\ 0.0021 H_s^2 - 0.018 H_s + 0.067, V_w > 5 \text{ m/s} \text{ 且 } H_s > 5 \text{ m} \end{cases} \quad (16)$$

式中: V_w 为风速。采用测试集对模型进行验证,验证散点图见图9。总体上看,两种条件下的模型均具有较好精度,低风速及中等风速小波高、中等风速大波高条件下的 R^2 分别为0.97和0.81。同时,低风速及中等风速小波高条件下的误差显著低于中等风速大波高条件,其中前者的RMSE、RE和MAE分别为

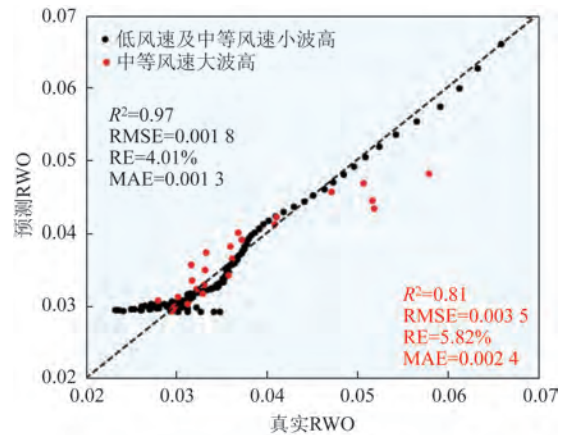


图9 基于有效波高的RWO预测模型的验证散点图

Fig.9 Validation scatter plot for the RWO prediction model

0.001 9、4.20% 和 0.001 3, 后者则分别为 0.003 5、5.82% 和 0.002 4。总的来说, 该模型可有效表征有效波高与 RWO 的关系, 并能根据特定风速和有效波高准确预测 RWO。

4 结论

通过结合浮标观测数据及模式再分析数据, 提取了 3 297 114 条 30 min 聚合的波浪事件, 选取有效波高、风速、风浪夹角、流速、浪流夹角和相对水深 6 个海况参数, 采用滑动窗口法系统性研究了这些参数与 RWO 的关系。研究发现: 有效波高与 RWO 之间呈现显著的负相关关系, 是相关性最强的影响因素; RWO 随风速增加先增大后减小, 随着流速增加先减小后增大, 但都在某个阈值后出现较大弯曲; 不同风浪夹角对应的 RWO 值相近, 浪流夹角为锐角时 RWO 更高; 相对水深增加时, RWO 存在下降趋势。但是, 风速、流速、风浪夹角、浪流夹角及相对水深与 RWO 的拟合精度有限、相关性较差。因此, 选取有效波高作为概率预测的核心变量, 结合风速分段构建畸形波发生概率预测模型, 利用泰勒图分析了不同风速阈值对模型精度的影响。结果表明: 低风速条件下模型精度波动较大, 中等风速条件下模型性能更为稳定, 但当风速边界超过 10 m/s 时, 模型性能显著下降; 当风速边界设置为 5 m/s 时, 低风速与中等风速条件下的模型均表现最佳。根据有效波高与 RWO 在不同风速下的数据分布, 将中等风速小波高数据与低风速数据合并建模, 中等风速大波高数据单独建模, 分别采用近似反比例函数和二次函数拟合, 建立了畸形波发生概率预测模型, 其在训练集上的 R^2 分别达到 0.97 和 0.82。测试集的验证结果表明, 两种条件下的模型都具有较好精度, 且低风速及中等风速小波高条件下的模型误差显著低于中等风速大波高条件; 模型在低风速及中等风速小波高、中等风速大波高条件下的 R^2 分别达到 0.97 和 0.81, 能够根据特定风速和有效波高计算 RWO。本文提出的基于典型海况参数分段建模的畸形波发生概率预测方法, 拓展了畸形波预测的思路, 为提升海上风险预警能力提供了有效支撑。

参考文献:

[1] 陶爱峰, 沈至淳, 李硕, 等. 中国灾害性海浪研究进展[J]. 科技导

报, 2018, 36(14): 26-34.

TAO A F, SHEN Z C, LI S, et al. Research progress for disastrous waves in China[J]. Science & Technology Review, 2018, 36(14): 26-34.

[2] KHARIF C, PELINOVSKY E. Physical mechanisms of the rogue wave phenomenon[J]. European Journal of Mechanics - B/Fluids, 2003, 22(6): 603-634.

[3] DIDENKULOVA I, ANDERSON C. Freak waves of different types in the coastal zone of the Baltic Sea[J]. Natural Hazards and Earth System Sciences, 2010, 10(9): 2021-2029.

[4] NIKOLKINA I, DIDENKULOVA I. Catalogue of rogue waves reported in media in 2006—2010[J]. Natural Hazards, 2012, 61(3): 989-1006.

[5] NIKOLKINA I, DIDENKULOVA I. Rogue waves in 2006—2010 [J]. Natural Hazards and Earth System Sciences, 2011, 11(11): 2913-2924.

[6] LI S F, XIE X H, CHEN D K, et al. Modulation effect of linear shear flow, wind, and dissipation on freak wave generation in finite water depth[J]. Physics of Fluids, 2023, 35(9): 097126.

[7] WHITE B S, FORNBERG B. On the chance of freak waves at sea [J]. Journal of Fluid Mechanics, 1998, 355: 113-138.

[8] PELINOVSKY E, SERGEEVA A. Numerical modeling of the KdV random wave field[J]. European Journal of Mechanics - B/Fluids, 2006, 25(4): 425-434.

[9] DIDENKULOVA E. Catalogue of rogue waves occurred in the World Ocean from 2011 to 2018 reported by mass media sources [J]. Ocean & Coastal Management, 2020, 188: 105076.

[10] DIDENKULOVA E, DIDENKULOVA I, MEDVEDEV I. Freak wave events in 2005—2021: statistics and analysis of favourable wave and wind conditions[J]. Natural Hazards and Earth System Sciences, 2023, 23(4): 1653-1663.

[11] BASCHEK B, IMAI J. Rogue wave observations off the US West Coast[J]. Oceanography, 2011, 24(2): 158-165.

[12] CATTRELL A D, SROKOSZ M, MOAT B I, et al. Can rogue waves be predicted using characteristic wave parameters? [J]. Journal of Geophysical Research: Oceans, 2018, 123(8): 5624-5636.

[13] ORZECH M D, WANG D. Measured rogue waves and their environment[J]. Journal of Marine Science and Engineering, 2020, 8(11): 890.

[14] AZEVEDO L, MEYERS S, PLESKACHEVSKY A, et al. Characterizing rogue waves at the entrance of Tampa Bay (Florida, USA) [J]. Journal of Marine Science and Engineering, 2022, 10(4): 507.

[15] BEHRENS J, THOMAS J, TERRILL E, et al. CDIP: maintaining a robust and reliable ocean observing buoy network[C]// Proceedings of the 2019 IEEE/OES Twelfth Current, Waves and Turbulence Measurement (CWTM). San Diego: IEEE, 2019: 1-5.

[16] Copernicus Climate Change Service, Climate Data Store. ERA5 hourly data on single levels from 1940 to present[J]. Copernicus Climate Change Service (C3S) Climate Data Store (CDS), 2023.

- [17] XUE H J, BANE J M JR. A numerical investigation of the Gulf Stream and its meanders in response to cold air outbreaks[J]. *Journal of Physical Oceanography*, 1997, 27(12): 2606-2629.
- [18] 谢涛, 南撑峰, 旷海兰, 等. 反常波海面参数计算方法及其色散关系[J]. *物理学报*, 2009, 58(6): 4011-4019.
XIE T, NAN C F, KUANG H L, et al. Numerical calculation of parameters of freak wave and its dispersion relation[J]. *Acta Physica Sinica*, 2009, 58(6): 4011-4019.
- [19] 刘首华, 牟林, 刘克修, 等. 畸形波研究的进展及存在问题[J]. *地球科学进展*, 2013, 28(6): 665-673.
LIU S H, MU L, LIU K X, et al. Research advance and problems in freak waves[J]. *Advances in Earth Science*, 2013, 28(6): 665-673.
- [20] 赵西增. 畸形波的实验研究和数值模拟[D]. 大连: 大连理工大学, 2008.
ZHAO X Z. Experimental and numerical study of freak waves [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2008.
- [21] 刘首华. 畸形波的海浪数值模拟研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2010.
LIU S H. Study of freak waves based on numerical ocean waves simulation[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2010.
- [22] WILSON J R, BAIRD W F. A discussion of some measured wave data[C]//13th International Conference on Coastal Engineering. Vancouver: ASCE, 1972: 113-130.
- [23] MCALLISTER M L, VAN DEN BREMER T S. Experimental study of the statistical properties of directionally spread ocean waves measured by buoys[J]. *Journal of Physical Oceanography*, 2020, 50(2): 399-414.
- [24] CHRISTOU M, EWANS K. Field measurements of rogue water waves[J]. *Journal of Physical Oceanography*, 2014, 44(9): 2317-2335.
- [25] TRULSEN K, DYSTHE K B. Action of windstress and breaking on the evolution of a wavetrain[C]//Proceedings of the IUTAM Symposium Sydney, Australia 1991 on Breaking Waves. Berlin: Springer, 1992: 243-249.
- [26] GALCHENKO A, BABANIN A V, CHALIKOV D, et al. Influence of wind forcing on modulation and breaking of one-dimensional deep-water wave groups[J]. *Journal of Physical Oceanography*, 2012, 42(6): 928-939.
- [27] WHEELER D, WILKINSON C. From calm to storm: the origins of the beaufort wind scale[J]. *The Mariner's Mirror*, 2004, 90(2): 187-201.
- [28] TAYLOR K E. Summarizing multiple aspects of model performance in a single diagram[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2001, 106(D7): 7183-7192.

Research on prediction method of rogue wave occurrence based on wind, wave and current parameters

WANG Yiqi¹, REN Lin¹, YANG Jingsong^{1,2*}, LI Xiaohui¹, HAN Xinhai^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Satellite Ocean Environment Dynamics, Second Institute of Oceanography, Ministry of Natural Resources, Hangzhou 310012, China; 2. College of Oceanography, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: Based on observational data of 58 wave buoys and reanalysis data of wind and ocean current, the relationship between multiple sea state parameters and rogue wave occurrence (RWO) is analyzed based on sliding window method. The results show that there is a significant negative correlation between effective wave height and the RWO. The RWO first decreases and then increases along with the increase of wind speed, while first increases and then decreases along with the increase of current speed. The RWO changes small under different wind-wave angles, but is relatively large under acute current-wave angle. The RWO has a downward trend when the relative water depth increases. Significant wave height is selected as the main parameter to build model considering the correlation between sea state parameters and the RWO. Further, the change of the RWO with significant wave height under different wind speeds is discussed and the optimal wind speed threshold is determined. As a result, the data of low-moderate wind speed with small wave height (significant wave height ≤ 5 m) are categorized to build a model, and the data of medium wind speed with large wave height (significant wave height >5 m) are separately categorized to build a model. Validation shows that the coefficient of determination and root mean square error between the real RWO and the predicted RWO are 0.97 and 0.001 9 under low-moderate wind speed with small wave height, and the values are 0.81 and 0.003 5 under medium wind speed with large wave height.

Key words: rogue wave; significant wave height; wave buoy; wind speed