

浙江舟山海域实测波浪特征分析

周旭聪^{1,2}, 董翔^{3,4*}, 李小松^{1,2}

(1. 自然资源部宁波海洋中心, 浙江 宁波 315000; 2. 舟山市海洋环境监测预报中心, 浙江 舟山 316022; 3. 自然资源部花鸟山东海-大气-生态综合野外科学观测研究站, 上海 201306; 4. 自然资源部东海预报减灾中心, 上海 201306)

摘 要: 研究基于浙江舟山海域嵎山和朱家尖两个观测站 2018—2023 年长期连续实测波浪数据, 综合运用统计分析、频谱分析及极端事件识别等方法, 系统分析有效波高、平均周期、主波向等波浪要素的统计规律、季节性变化及对台风、寒潮等极端事件的响应特征。研究结果表明: 观测海域波浪受季风和台风共同控制影响, 特征呈现显著的季节性差异与空间分异。冬季受强西北季风主导, 以西北向风浪为主, 平均有效波高达到 1.8 m, 平均波周期为 5.2 s; 夏季盛行东南向涌浪, 平均有效波高最小为 0.9 m, 平均波周期最长为 6.8 s。频谱分析表明, 冬季风浪谱与 JONSWAP 谱拟合良好 ($R^2=0.93$), 夏季涌浪谱更接近 P-M 谱分布。2019 年台风“利奇马”观测期间最大波高为 8.5 m, 波周期达到 12.3 s, 波浪谱呈现显著低频能量集中 (主峰频率 0.07~0.15 Hz) 和方向性增强的特征。受岛屿地形遮蔽效应影响, 近岸站有效波高较外海站平均衰减约 19.1%, 主波向分布更为分散。季风与台风是驱动舟山海域波浪时空变化的核心动力因子, 而复杂岛屿地形是导致波浪从外海向近岸传播过程中能量衰减与频谱形变的关键地理因素。

关键词: 舟山海域; 波浪特征; 实测数据; 频谱分析; 波浪谱

中图分类号: P731.22 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-0239(2026)04-0061-12

0 引言

浙江舟山海域位于长江口南部, 包含 1 390 座岛屿, 是我国首个以海洋经济为核心的战略新区, 也是连接长三角经济区与外海的重要节点。从国家层面来说, 其独特的地理位置具有深远的战略价值^[1]。舟山海域波浪动力环境复杂, 受到东亚季风、西太平洋台风和长江径流输入等多重自然因素影响, 动力过程呈现高度的时空非均匀性^[2]。分析该海域波浪的统计规律、季节性变化及对极端事件的响应机制, 对船舶航行安全、海洋工程设计、渔船避风和海上救援均具有重要意义^[3]。

波浪要素主要包括有效波高 (Significant Wave Height, H_s)、平均周期 (Mean Period, T_m) 和主波向 (Main Wave Direction, Dir)。针对舟山海域波浪特

性的研究已积累了丰富成果, 近期研究多聚焦于在波浪能资源评估与开发潜力分析。早期研究通过第三代海浪模型 (WAVEWATCH III) 和第三代浅海波浪数值模式 (Simulating Waves Nearshore, SWAN) 研究了舟山海域的波浪能功率密度和分布特征^[4], 并计算了各等深线上的波浪能资源理论蕴藏量, 为波浪能开发利用提供了重要的资源量参考依据^[5]。基于 SWAN 模型和近 10 年高精度数据集的研究表明, 舟山海域波浪能资源空间分布受复杂岛屿地形遮蔽效应影响显著, 呈现“东高西低”的明显空间差异, 具有显著的季节性变化特征^[6-7]。学者通过长期再分析数据, 详细评估了舟山周边海域的波浪能资源时空分布, 为资源开发提供了依据^[8-9]。潮波特性的研究揭示舟山复杂地形对潮波特性的影响^[10-11]。基于 SWEM (Shallow Water Equation Model) 建立三

收稿日期: 2025-09-03。

基金项目: 舟山市科技项目 (2025C31034)。

作者简介: 周旭聪 (1981-), 男, 工程师, 本科, 主要从事海洋环境观测预报与调查研究。E-mail: jimmyzxc1@163.com

*通信作者: 董翔 (1982-), 男, 工程师, 博士, 主要从事海洋观测与船舶测报研究。E-mail: zaoyinv@163.com

维水沙盐模型和二维波流泥沙模型,聚焦波浪与潮流共同作用下的泥沙冲淤过程,量化波浪在一般天气和台风天气下对淤积量的贡献^[12-13]。近年来,学者进一步研究了基于有限体积海岸海洋模型(Finite Volume Community Ocean Model, FVCOM)建立了波流耦合模型,揭示了波浪对潮流流速的影响与水深相关^[14],侯衍凯等^[15]通过原位观测,揭示了台风过程中波浪对海床孔隙水压力的影响机制及衰减规律。在工程应用方面,已有学者开展了基于波浪能供电的浮标水动力学研究,为海洋观测平台的能源自给和结构优化提供了新思路^[16]。为提高预报精度,有学者提出融合改进的自适应噪声完备集合经验模态分解-变分模态分解(Improved Complete Ensemble Empirical Mode Decomposition with Adaptive Noise-Variational Mode Decomposition, ICEEMDAN-VMD)级联分解与长短期记忆网络(Long Short-Term Memory, LSTM)的混合模型,显著提升了舟山海域多要素海浪的长时预报能力,体现了人工智能技术在海洋预报中的应用趋势^[17]。具有代表性的研究是通过建立 MIKE21 SW 的耦合与非耦合模型对比发现,波-流相互作用会导致波能频谱峰区能量重新分布(涨潮向低频、落潮向高频转移),频谱峰变平^[18]。

浙江省台风浪模型能有效模拟该海域台风波浪特征,并揭示了台风移动路径上有效波高变化会经历“升高—降低—再升高—再降低”4个阶段的演变规律^[19]。该区域南部台风浪要素(包括增水、有效波高、波浪方向谱和流速)受到台风路径、台风强度和登陆潮位共同作用,会显著改变增水幅度、有效波高空间分布和波浪谱形态,使台风浪呈现显著的空间差异和时间变化^[20]。舟山波浪能开发需因地制宜,结合不同地形特征选择合适的波浪能转换装置类型,已有研究提出了3种适用场景设想,并探索综合利用潮汐能、风能等互补模式以提升能源利用效率^[21]。针对因忽略波浪方向性和岛屿地形导致重复计算、高估资源的问题,有学者提出了一种考虑波浪方向性影响的“代表区段”新估算方法,验证表明该方法能更准确地评估海岛波浪能资源总量^[22]。通过耦合 SWAN 与 FVCOM 模型模拟台风过程下的波浪,研究了海平面变化(水位)对台风浪模拟精度的影响,结果发现忽略水位效应可能导致有效波高模

拟出现较大偏差,因此在近岸受风暴潮影响的区域,进行高精度水动力-波浪耦合模拟是十分必要的^[23]。

这些研究为理解该海域波浪环境奠定了重要基础。然而,现有研究也存在一些局限:多数研究依赖于数值模拟或短期观测,缺乏基于长期、连续、原位实测数据的系统性统计验证。对波浪的长期统计特征、风浪与涌浪的季节性转换规律,从外海至近岸传播过程中的能量衰减与频谱形变规律,以及不同海况下波浪谱结构的定量对比等关键科学问题的揭示尚不够深入和系统。

针对这一痛点问题,本文基于舟山海域嵊山(外海站 A,以下简称“A站”)和朱家尖(近岸站 B,以下简称“B站”)两个观测站近5年的高分辨率连续实测波浪数据开展研究,采用统计分析、频谱分析和极端事件识别等方法,旨在系统回答以下几个关键科学问题:①舟山海域波浪要素(有效波高、平均周期、主波向)的长期统计特征与季节性变化规律如何?②冬季风浪与夏季涌浪在频谱结构上有什么本质区别,其主导能量分布机制是什么?③台风等极端事件如何显著改变波浪的统计与频谱特征?④复杂的岛屿地形对波浪从外海向近岸的传播产生了怎样的调制与衰减效应?通过对这些问题的实证研究,本文旨在构建一个基于长期实测数据的、多时间尺度(统计、季节、事件)和多维度(时域、频域、空间)的舟山海域波浪特征认知框架,以期为该区域的海洋工程精细化设计、航行风险评估、波浪能资源开发以及台风浪灾害预警提供更坚实的数据支撑和理论依据。

1 数据来源与研究方法

1.1 数据来源

本研究收集的波浪观测数据源自舟山海域的两处固定观测站点 2018—2023 年的观测数据。A 站水深 23 m,位于舟山岛东北侧的嵊山深水区,主要用于监测外海波浪。B 站水深 12 m,位于朱家尖岛南侧近岸区域,主要用于监测近岸波浪。两个站点浮标协同部署,共同构建了覆盖波浪传播全程并有效评估能量衰减的观测体系。其具体地理位置见图 1。



图1 舟山海域观测站分布图

Fig.1 Distribution map of observation stations in the Zhoushan sea area

1.1.1 观测站分布

两站点布设 SZF2 型波浪浮标进行同步观测。该浮标采用三轴加速度计与数字积分算法,具有可靠性高、测量精度稳定的特点。其波高测量范围为 0.2~25 m,测量准确度为 $\pm(0.1+5\%H)$, H 为实测波高,分辨率为 0.1 m;波周期测量范围为 2~30 s,测量准确度为 ± 0.25 s(采样频率为 4 Hz)或 ± 0.5 s(采样频率为 2 Hz),分辨率为 0.1 s;主波向测量范围为 0~360°;测量准确度为 $\pm 10^\circ$,分辨率为 1°;采样周期为每秒两次(2 Hz)。

1.1.2 观测站特征对比

两个观测站点由于地理位置及其所处环境不同,观测数据呈现显著差异(见表 1)。A 站位于舟山群岛外围,直面东海开阔水域,与陆地较远,它受到外海风浪与远距涌浪的复合影响,是揭示外海波浪主导区能量属性的关键观测点。A 站直接受外海风浪的影响,能清晰记录源自外海的波浪,其特征为有效波高显著、平均周期较长且主波向集中,典型地呈现开放海域特有的波浪模式。B 站位于内湾过渡区,因岛屿与岸线的地理遮挡、浅滩折射及局

表 1 观测数据参数对比

Tab.1 Comparison of observational data parameters

参数	A 站	B 站
水深/m	23	12
有效波高 H_s	较大,分布偏向较高值,波浪能量较强	较小,偏向较低值,波浪能量较弱
平均周期 T_m	相对较长	相对较短
主波向 Dir	较为集中,波浪传播方向较为单一	较为离散,波浪传播方向受岛屿遮挡影响显著
风速 U_{10}	风速变化较大,可能受外海强风影响	风速相对较低,且受岛屿影响,较为平稳
潮位 Z	潮位变化较为规律,受深水影响较小	潮位受近岸水文条件影响较大,波浪传播受潮位变化影响

地风场影响显著,近岸波浪特征更为典型,波浪运动更加平稳。该区域有效波高较小、平均周期较短,主波向分布较为分散。

1.2 研究方法

本研究采用以下3种方法分析舟山海域波浪特性:

①统计分析法:计算各月及全年的有效波高、平均周期和主波向的平均值、极值和频率密度分布,绘制主波向玫瑰图,分析波浪特征的季节性变化。该方法有助于揭示波浪的主要变化趋势与频率分布特征。

②频谱分析法:运用快速傅里叶变换(Fast Fourier Transform, FFT)对波浪时间序列进行频域分析,获得波浪能量谱(Wave Energy Spectrum, WES)。同时将实测谱与经典波浪谱模型——JONSWAP谱($\gamma=3.3$)与皮尔森-莫斯科维茨波(Pierson-Moskowitz, P-M)谱进行对比拟合,从而评估典型理论谱在舟山海域的适用性。

③极端事件识别:根据台风最佳路径数据集,选取2019年台风“利奇马”、2021年台风“烟花”等8次典型强台风过程,采用基于30 min滑动窗口统计准则(3σ 准则)进行峰值筛选。研究中同步记录风速(U_{10})和潮位(Z)参数,作为影响波浪生成与传播的重要环境因素。

1.2.1 参数定义

波浪传感器记录有效波高(H_s)、平均周期(T_m)、主波向(Dir)、风速(U_{10})和潮位(Z)5项参数信息。为保证数据的科学性与可比性,各参数定义与处理方法如下:

有效波高(H_s):表征波浪能量强度,定义为观测期间波高平均值的两倍:

$$H_s = 4 \times \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N H_i^2} \quad (1)$$

平均周期(T_m):反映波浪时程特征,计算式为:

$$T_m = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N T_i \quad (2)$$

主波向(Dir):描述波浪传播方向,采用 5° 方向分辨率计算,并以玫瑰图形式展示主导波向。

风速(U_{10}):指10 m高度处的风速,由浮标内置传感器测得(单位:m/s),是波浪生成与发展的关键

因子。

潮位(Z):记录海面相对基准的高程变化,受气压、风力及潮汐共同影响,对波浪能量传播具有调节作用。

1.2.2 数据预处理

为确保原始观测数据的完整性与准确性,需对采集后的观测数据进行去噪等预处理。首先剔除设备故障与异常数据,即通过对设备传感器的状态监测与数据逻辑判断,剔除由于设备故障、误读或不可控环境因素引起的异常数据。然后,对连续时间序列中的有效波高、平均周期和主波向等数据应用平滑算法,以减少噪声的影响,确保频谱分析结果的稳定性与可比性;采用五点滑动窗口的移动平均法对瞬时谱曲线实施平滑操作,旨在有效降低高频噪声干扰,同时确保谱图中关键能量峰值的精确保留;为降低高频噪声,对波浪能量谱进行滑动平均平滑;对比不同窗口长度(三点、五点、七点)平滑后的谱形与原始谱的总体偏差,确定五点窗口平滑能在有效抑制噪声的同时,使平滑前后谱序列的均方根误差(Root Mean Square Error, RMSE)变化控制在3%以内,从而获得最佳平滑效果。最后对异常波动的数据进行剔除,并且依据特定标准筛选极端事件的时间段,以便提取和分析台风浪等极端波浪现象。极端波浪事件识别采用 3σ 准则,即:

$$H_i > \bar{H}_{30} + 3\sigma_{30} \quad (3)$$

式中: H_i 代表单次观测到的波高值; $\bar{H}_{30}$ 则表示以30 min为平均周期计算得到的平均波高; σ_{30} 则是与 $\bar{H}_{30}$ 对应的波高标准差。当连续3次观测符合规定准则时,即被界定为极端事件。该方法可精确辨识瞬时高能波浪的峰顶。

2 波浪基本特征分析

2.1 有效波高特征

2.1.1 整体统计

观测海域波浪要素统计数据见表2。其中,年平均有效波高为1.28 m,范围为0.3~8.5 m;平均周期为5.8 s,最小为2.1 s,最大为12.3 s。

当有效波高 ≤ 1.0 m(约占45.1%)时,表现为平静海况;有效波高为1.0~2.0 m(约占35.2%)和2.0~3.0 m(约占15.6%)时,属于中浪;当有效波高 ≥ 3.0 m

表2 有效波高、平均周期统计数据

Tab.2 Statistical data for significant wave height, mean period				
要素	最小值	平均值	最大值	标准差
有效波高/m	0.3	1.28	8.5	0.8
平均周期/s	2.1	5.8	12.3	2.3

(仅占 4.3%)时,为大浪。总体特征表明,观测海域波浪以中低波高为主,该区间出现频率最高(见图2)。

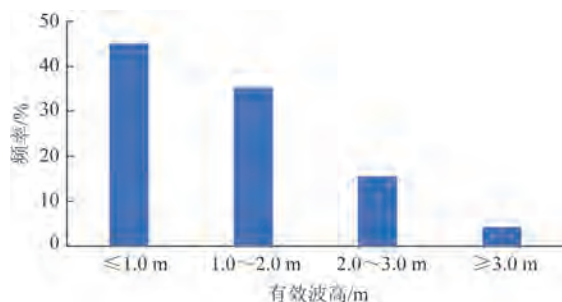


图2 观测海域有效波高频率分布图

Fig.2 Frequency distribution map of significant wave height in the observed sea area

2.1.2 有效波高季节差异

观测海域波浪要素的季节特征见表3。海浪高度在一年四季展现出显著的季节性波动,主要归因于东亚季风的驱动作用,体现出明显的周期性特征。基于过去5年的观测数据,并综合考虑海域的独特特征,该海域的有效波高呈现明显的季节性波动。这一现象与季节性的风向、风力强度紧密相关,而局部地形条件,尤其是岛屿对风浪的遮挡效应,也对有效波高分布产生显著影响。

表3 波浪要素的季节特征

Tab.3 Seasonal characteristics of wave elements				
季节	平均波高/m	频率分布特点	主要风向	风速/(m/s)
冬季(12月—次年2月)	1.8	≥2.0 m的有效波高占15.6%	偏北风(7.8°)	7.8
春季(3—5月)	1.1	较为平稳	NE/E	5.2
夏季(6—8月)	0.9	≤1.0 m的有效波高占82.3%	SE(135°)	4.5
秋季(9—11月)	1.3	台风频发	SE/NE	6.3

观测数据显示,A站的年均有效波高为1.52 m,远高于B站的1.23 m。冬季,两处站点的海浪高度均呈上升趋势:A站直接受东北风显著影响,最大有效波高达到4.8 m,B站由于内湾地形的作用,有效波高变化较为平稳,峰值为3.1 m。由于季风周期性变换的影响,观测海域的有效波高表现出明显的季节性差异(见图3):冬季,北向强风显著增强,海面有效波高显著增加,平均有效波高达1.8 m,超过2.0 m的有效波高频率升至15.6%;春季,由于东北风与东风的共同作用,波浪高度保持稳定;夏季,由于季风减弱、台风频率较低,波浪能量普遍不高,平均有效波高为0.9 m,其中低于1.0 m的有效波高频率占82.3%;秋季,台风活动对海浪产生显著影响,导致有效波高增加,并引发波高频率与方向的显著波动。岛屿遮蔽效应对不同区域的有效波高分布具有显著影响,是造成波高差异的重要因素。

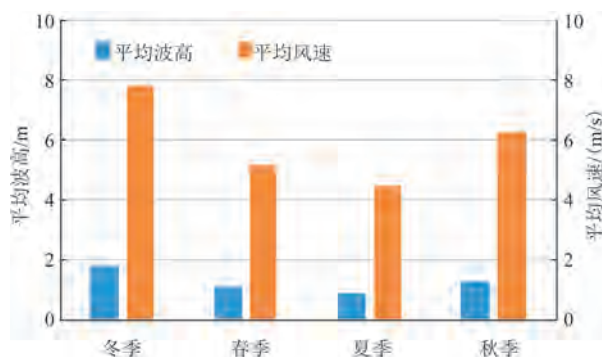


图3 四季平均有效波高对比图

Fig.3 Comparison of seasonal average significant wave heights

观测海域有效波高表现出明显的季节性变化,不仅受制于季风模式的演变调控,也深受局部地形尤其是岛屿屏障效应的影响。A站位于开放海域,受东北风显著驱动,易产生较大波高;B站地处相对封闭的内湾,岛屿的遮挡效应使得传入的波浪能量被有效吸收,海面有效波高表现出较为稳定的特征。东亚季风的年际波动显著影响海面波高的季节性模式,在台风频繁的秋季,观察到有效波高表现出尤为明显的动态变化。

2.2 平均周期特征

舟山海域年平均周期呈现双峰分布特征(见表4)。

表4 波浪平均周期频率分布
Tab.4 Wave mean period frequency distribution

平均周期区间/s	占比/%	特征说明
2~4	10.5	局地风浪短周期
4~6	51.4	本地风场风浪主导
6~8	32.7	外海涌浪或混合浪
>8	5.4	台风期间显著延长周期

2.3 主波向特性

主波向受季风主导。冬季北向波浪较为常见；夏季则以南向波浪占主导，呈现明显的“冬北夏南”特征；春季处于季风转换期，波向不稳定；而秋季受台风影响，波向变化剧烈（见表5）。

主波向玫瑰图显示（见图4），该海域冬季以北偏西风为主，夏季以南偏西风为主。

由表5和图4可知，A站年主导波向集中在ENE—ESE（60°~120°）方向，与主导风向高度一致，表现

出典型开敞海域特征。相比之下，B站主波向分布更分散，常受沿岸折射与反射影响，主波向多为SE—SSE（120°~160°），显示出一定的岸线调制效应^[24]。

2.4 频谱特征

观测海域的波浪频谱具有鲜明的季节性模式，特征为兼具风浪与涌浪的复合结构，并展现出典型的海洋动力学特征。对比分析典型季节与极端台风条件下的波浪频谱特征可以看出波浪能量分布的动态演化规律及其在不同地理区域的显著差异。A站观察结果显示，波浪频率分布特征显著，能量更集中；B站波浪谱宽增加、峰值降低至0.08 Hz，表明该海域波浪对多向干扰响应较为敏感。

2.4.1 季节性频谱对比

冬季，观测海域受强北风主导，波浪特性以本地生成的风浪为主，其频谱能量分布显著偏向高频区域。典型冬季风浪的峰值频率通常为0.15 Hz，对

表5 波浪主方向频率分布
Tab.5 Wave main direction frequency distribution

季节	主波向	频率/%	次波向	频率/%	特征说明
冬季	NW(303.75°~326.25°)	38.2	NNW(326.25°~348.75°)	22.5	北向波浪较为常见
夏季	SE(123.75°~146.25°)	29.7	SSE(146.25°~168.75°)	21.1	南向波浪占主导
秋季	NE/E/SE	—	—	—	台风影响，波向变化剧烈
春季	NE/E	—	—	—	季风转换，波向不稳定

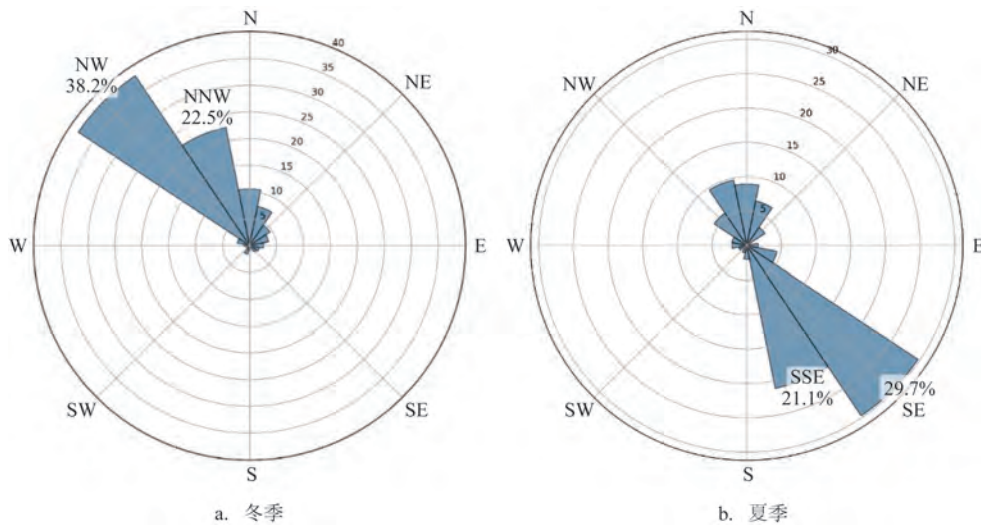


图4 主波向玫瑰图
Fig.4 Main wave direction diagram

应平均周期约为 6.7 s,这一特征与其在持续强风作用下达到的充分发展阶段相吻合,表现形式与 JONSWAP 谱模型(参数 γ 取值为 3.5)高度相似,指示了在强风影响下波浪系统已成熟并进入稳定演化阶段。频谱曲线能量集中、能量传输效率高,明确揭示了风浪发生地的集约化特性^[18]。

夏季,海浪主要由涌浪构成,其波谱特征表现为峰值频率约为 0.12 Hz(平均周期约为 8.3 s)。冬季与夏季的波浪频谱对比见表 6。波谱形态展现出宽阔的分布和相对平缓的能量分配,与 P-M 谱的预测高度吻合。这说明夏季波浪活动主要由中至长周期的涌浪构成,局部风场效应微弱,导致波浪能衰减缓慢,波浪形态保持稳定^[25]。

表 6 冬季与夏季波浪频谱密度对比

Tab.6 Frequency spectrum of winter and summer waves

频率/Hz	冬季风浪谱密度/ (m^2/Hz)	夏季涌浪谱密度/ (m^2/Hz)
0.05	0.08	0.12
0.10	0.22	0.28
0.15	0.35	0.25
0.20	0.18	0.15
0.25	0.05	0.04

在频谱分析中,冬季波浪能量集中在 0.10~0.20 Hz(见图 5),展现出清晰的风浪特征;而夏季波浪能量集中于 0.05~0.15 Hz,反映涌浪占主导地位。

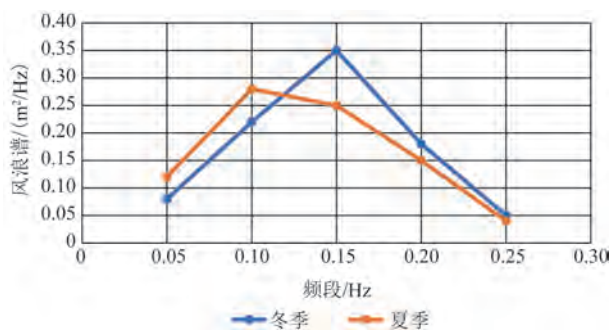


图 5 冬季与夏季波浪频谱图对比

Fig.5 Comparison of wave spectrum between winter and summer

2.4.2 与经典谱拟合优度分析

为了量化评估实测光谱与理论光谱的一致性,

普遍采用 RMSE(记作 E_{RMS})和决定系数(R^2)作为衡量拟合质量的指标。

$$E_{\text{RMS}} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2} \quad (4)$$

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \quad (5)$$

式中: y_i 是实际值; $\hat{y}_i$ 是预测值。

基于评估指标,冬季实测谱与 JONSWAP 谱之间的拟合表现出色, R^2 达到 0.93, RMSE 仅为 0.037 m^2/Hz ,彰显了两者的 高度一致性和精确性。相比之下,夏季谱与 P-M 谱的匹配度有所下降, R^2 为 0.88, RMSE 增加至 0.045 m^2/Hz ,这表明在涌浪环境中存在复杂的多方向干扰因素,对模型拟合精度构成挑战。

2.4.3 台风浪频谱特征

在极端气候事件影响下,观测海域波浪频谱的低频特性更为显著。2019 年台风“利奇马”影响期间(见表 7),观测到的波浪谱峰值频率约为 0.08 Hz(平均周期为 12.5 s),显著低于常规风浪或涌浪谱峰值频率,显示台风浪具有较长的波长和较高的能量传输特性^[9]。

表 7 实测谱与 JONSWAP($\gamma=5.0$)谱对比

Tab.7 Comparison of measured spectrum and JONSWAP ($\gamma=5.0$) spectrum

频率/Hz	实测谱/(m^2/Hz)	JONSWAP 谱($\gamma=5.0$)
0.05	0.50	0.40
0.10	1.20	1.00
0.15	0.80	0.60
0.20	0.30	0.20
0.25	0.10	0.08

台风浪能量主要集中于 0.05~0.15 Hz,这一频段内能量占比高达约 82%,呈现出显著的集中性和明确的方向性特点。经理论谱拟合可得 $R^2=0.91$ 、RMSE=0.052 m^2/Hz 。这表明拟合效果优异,可解释数据中约 91% 的变异程度,同时预测误差属于极低水平。实验证明,高频段的谱衰减显著加速,表明岛屿地貌对高频波能的消散效应尤为明显。实测

谱峰值高且集中、高频衰减迅速(见图6),反映出台风浪强度大、传播距离远、破坏力显著。

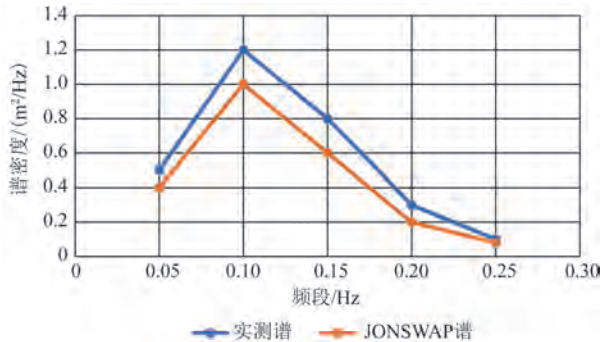


图6 台风“利奇马”期间波浪实测频谱与JONSWAP谱对比图

Fig.6 Comparison of measured wave spectrum and JONSWAP spectrum during Typhoon "Lekima"

2.4.4 对比统计

表8数据显示,A站冬季平均有效波高为1.85 m,夏季显著下降至1.25 m,而B站相应数值分别为1.45 m和1.10 m,季节性变化幅度不及A站显著^[23]。A站和B站分别代表舟山海域两个关键动力区域——外海主导动力区与近岸动力衰减区,二者协同描绘了该区域波浪动力分布与能量流动的复杂图谱,具备良好的代表性与科学价值。数据表明,A站外海波浪特性强烈,表现为有效波高较高、主波向分布明确、频谱形态陡峭;与此作为对比的B站波浪则受到地形效应的影响,呈现波高相对较低与频谱结构更为复杂的近岸波浪特征。

表8 A站与B站波浪统计表

Tab.8 Wave statistics comparison between A station and B station

指标	A站	B站
年平均有效波高/m	1.52	1.23
最大有效波高/m	4.8	3.1
主波向	ENE—ESE	SE—SSE
主峰频率(典型过程)/Hz	0.08	0.07
冬季平均有效波高/m	1.85	1.45
夏季平均有效波高/m	1.25	1.10

综上,观测海域波浪频谱具有以下规律:

①冬季风浪特征表现为频率高、谱线尖锐且能量分布集中,与JONSWAP谱的特性高度一致,表明风浪已发展到成熟状态。

②夏季涌浪特征表现为频率低、谱形宽展且能量分布平缓,与P-M谱相符,表现为外海以涌浪占主导;

③台风浪型特征以峰值频率偏低、能量密度偏高、谱形陡峭以及高频成分快速衰减为标志,体现出由极端强风激发的长周期大波的独特性质。

2.5 极端事件影响分析

2.5.1 夏季台风影响

观测海域受夏季台风影响明显,强台风容易造成极端海况。例如,2020年台风“美莎克”影响舟山时,观测数据显示最大有效波高达到7.2 m,在此波浪环境下,超过3.0 m的大浪占近50%。这种极端浪涌现象给海上作业安全和稳定航行带来严重威胁。在台风“美莎克”影响区域,连续多天主波向从初始的SE逐步转为稳定的S。主波向转变原因同台风移动方向和强度有密切联系^[9]。

2.5.2 冬季寒潮影响

观测海域冬季寒潮频发,常常伴随强偏北大风,这会明显改变区域内的温度分布,且会对海洋表面的波浪特性产生重要影响。2019年12月寒潮期间,最大波高达到6.5 m,超过3.0 m的大浪出现概率将近20%,这种极端海况不但大幅增加海上作业安全隐患,也给船舶航行安全带来极大威胁。寒潮时期,观测海域常遭受强劲的偏北风侵袭,波浪能量明显加大,主波向趋于NW,与寒潮主导风向契合。风向的转变会引发波浪的强烈响应,伴随着气压系统大幅波动,风速可达10.5 m/s,进一步加大波浪强度、延长波浪持续时间。冬季寒潮引发的极端波浪事件不仅显著改变波高时空分布,也对舟山海域生态系统和人类活动产生深远影响。

3 波浪特征影响分析

3.1 波浪动力学特性

观测海域的波浪动力学特征显著受季风循环与台风事件的影响,展现出鲜明的季节性变化规律,包括波浪形态与能量分布的周期性波动。冬

季,主导的西北季风激发强劲风浪,波浪能量显著增强,造就了动荡的海洋环境;相反,夏季则由东南季风主导,波浪较为平静。在遭遇极端天气如台风或强季风时,舟山地区的岛屿地形展现出显著的防护效应,特别是在近岸海域,岛屿对波浪强度的削弱作用极为明显。研究揭示,特定区域的波浪能量传输效率显著下降,观察到的波浪衰减可达50%及以上。该现象对海洋工程规划、航行安全与渔业生产等领域产生了深远的影响。在台风或强季风作用下,波浪动力学性质的剧烈变化对海上基础设施构成显著安全挑战,深入探讨波浪的动力学特性对于评估此类极端气象条件下的设施安全性至关重要。

3.2 波浪的统计特征

舟山海域的年均有效波高表明海域整体波浪环境相对平稳,其中1.0~2.0 m的中小波浪占据主导地位,比例高达96.1%。这表明,在常规气候状况下,海洋表面波纹温和,属于典型的中低波高海域。然而,当台风来袭,极端波浪事件频发,最大波高可达8.5 m。在极端气象条件下,观察到有效波高与波周期呈现明显的正相关趋势,表明大浪通常对应波长更长。该规律对于海洋工程设计,特别是防波堤等防护结构的规划,具有至关重要的指导意义。在极端气候条件下,通过深入剖析波浪动力学特性,尤其是有效波高与波周期之间的相互作用及耦合机制,可识别调控波浪关键特征的主要驱动因素。厘清该机制,将显著提升防灾减灾策略的精确度与效能。

3.3 波浪谱特性

舟山海域的波浪谱特征呈现显著的季节性波动,这一现象主要受季风环流周期性变化和台风活动的动态共同作用,导致不同季节与气候状况下,波浪谱的动力学属性展现出异质性差异。冬季西北季风引发的风浪活动显著增强,其波浪谱特征与JONSWAP模型的理论预测高度吻合,揭示了风浪能分布集中、波周期相对短暂的特性。相比之下,夏季显著以涌浪为主导,波浪谱呈现出P-M模型所描述的缓和分布,以长周期波浪为主,整体海况稳定性较高。台风期间,波浪谱显示低频区间(0.05~

0.15 Hz)的能量显著集中,表明该频段波动在台风作用下占据主导地位。海底地形对波浪谱的生成与演变具有决定性影响。浅滩、礁石等海底地形要素,对波浪频率谱分布与能量传输机制产生关键性影响,深入探讨该过程有助于全面理解波浪传播特性及其与海底界面的动态交互过程。

4 结论

本研究基于浙江舟山海域嵎山和朱家尖两个观测站2018—2023年长期连续实测波浪数据,揭示了舟山海域实测波浪特征。结论如下:

①波高特征存在季节差异。统计特征表明:观测海域年均有效波高为1.28 m,且以中小浪(波高 ≤ 2.0 m)为主,占比高达93.4%;年平均周期为5.8 s,周期分布呈现双峰特征(4~6 s与6~8 s风浪平均周期占比最高)。主波向年际变化显著,总体呈现“冬北夏南”规律。观测海域波浪特征存在明显的季节性差异,在寒潮或强冷空气影响下,冬季受强西北季风(NW)控制,波浪能量更强,平均有效波高(1.8 m)最大,但平均周期(5.2 s)较短;在东南季风影响下,夏季以小尺度东南向(SE)涌浪为主导,波高偏低,风生波效应较弱,平均有效波高(0.9 m)最小,但平均周期(6.8 s)最长;春、秋季为过渡季节,春季的有效波高和主波向随季风转换变化,秋季受台风影响发生波动。

②冬季风浪与夏季涌浪在频谱结构上有本质区别。冬季风浪谱能量集中分布于较高频段(0.10~0.20 Hz),谱形尖锐,与JONSWAP谱高度吻合($R^2=0.93$),表明其能量主要来源于西北季风持续输入,具备风浪能量集中、传输效率高的集约化特征,波浪处于充分成长阶段;夏季涌浪谱能量则集中于较低频段(0.05~0.15 Hz),峰值频率0.12 Hz,谱形宽平,更接近P-M谱分布,表明其能量主要来源于外海传入的长周期涌浪,在传播过程中高频成分衰减,能量分布较为弥散。

③台风活动对观测海域的海浪动态也产生显著影响。极端台风事件(如台风“利奇马”)可导致波浪特征量级大幅增加,平均有效波高急剧增大,最大有效波高达8.5 m,平均周期显著延长至12.3 s,主波向集中且随时间急剧变化。台风在短时间内

贡献了全年主要的极端波浪能量。台风浪频谱表现为低频能量高度集中特征(主峰频率为0.07~0.15 Hz),谱峰频率降低至0.08 Hz;波浪谱呈现峰值高、低频能量密度大、方向性增强、谱形更加陡峭、高频能量迅速衰减的特点,波浪方向扩散范围变小,能量分布高度集中,表明其由极端强风激发,具有波长长、能量大、方向性极强的破坏性波浪特性。不同路径的台风会对波浪方向与能量分布产生差异化影响:北行台风路径对东南部波浪产生显著扰动、抬升波高;南行台风路径则主要影响东北部海域,显示出地理位置带来的波浪动力学显著差异效应。台风不仅剧烈改变波浪幅值,更重塑了波浪的能量频谱结构、概率分布及方向特性,使其统计与谱特征区别于常态季节海况。

④复杂的岛屿地形对波浪传播产生显著的遮蔽、折射和耗散作用。波浪从外海传向近岸过程中,受岛屿地形阻挡,B站年均有效波高为1.23 m,低于A站的1.52 m,平均衰减约19.1%。地形效应导致B站有效波高分布更为平稳,极端值降低,其主波向受地形遮蔽和折射作用较A站更为分散,体现典型的岸线调制效应。近岸站点波浪频谱宽度增加、峰值降低,表明地形耗散部分能量并增加波浪多向性。岛屿群对波浪能量具备天然过滤与方向调节作用,是导致近岸波浪能量衰减、频谱形变的关键地理因素。

本研究明确了季风与台风是驱动舟山海域波浪的核心动力因子,波浪时空变化特征显著。极端事件会剧烈改变波浪幅值与能量分布形态。波浪频谱结构是区分冬季本地风浪与夏季外海涌浪的本质特征。复杂岛屿地形是波浪自外海向近岸传播中能量衰减、谱形展宽和方向散射的关键因素。长期的实测数据能为舟山海域波浪研究提供直接验证数据,可为该区域海洋工程规划、防灾减灾、灾害预警及海上交通安全运营提供关键的数据支撑和科学依据。

参考文献:

- [1] 朱立毅,江国成.中国设立首个群岛新区——浙江舟山群岛新区[N].新华网,2011-07-08.
Zhu Liyi, Jiang Guocheng. China establishes the first archipelago new area—Zhoushan Archipelago New Area of Zhejiang[N]. Xinhua net, 2011-07-08.
- [2] 任剑波,何青,沈健,等.远区台风“三巴”对长江口波浪动力场的作用机制[J].海洋科学,2020,44(5):12-23,doi:10.11759/hyxx20200118001.
Ren Jianbo, He Qing, Shen Jian, et al. The effect mechanism of a remote typhoon "Sanba" on wave dynamics in the Changjiang Estuary[J]. Marine Sciences, 2020, 44(5): 12-23, doi: 10.11759/hyxx20200118001.
- [3] 杨斌,杨忠良,叶钦,等.杭州湾中部实测波浪特性分析[J].海洋工程,2018,36(3):96-103,doi:10.16483/j.issn.1005-9865.2018.03.013.
Yang Bin, Yang Zhongliang, Ye Qin, et al. Analysis on wave characteristics of central Hangzhou bay[J]. The Ocean Engineering, 2018, 36(3): 96-103, doi: 10.16483/j.issn.1005-9865.2018.03.013.
- [4] 王绿卿,唐筱宁,夏运强,等.舟山群岛海域波浪能资源评估[J].可再生能源,2014,32(12):1939-1944,doi:10.13941/j.cnki.21-1469/tk.2014.12.029.
Wang Lüqing, Tang Xiaoning, Xia Yunqiang, et al. Assessment of wave energy resources in Zhoushan islands[J]. Renewable Energy Resources, 2014, 32(12): 1939-1944, doi: 10.13941/j.cnki.21-1469/tk.2014.12.029.
- [5] 王卫远,何倩倩,李睿元.舟山海域波浪能资源评估[J].水力发电,2016,42(1):93-97.
Wang Weiyuan, He Qianqian, Li Ruiyuan. Assessment of wave energy resources in Zhoushan sea[J]. Water Power, 2016, 42(1): 93-97.
- [6] 于建民,纪棋严,郑欢,等.基于SWAN模式的舟山海域波浪能资源的评估研究[J].海洋预报,2020,37(4):38-49,doi:10.11737/j.issn.1003-0239.2020.04.005.
Yu Jianmin, Ji Qiyuan, Zheng Huan, et al. The investigation of wave energy in Zhoushan coastal area based on SWAN model[J]. Marine Forecasts, 2020, 37(4): 38-49, doi: 10.11737/j.issn.1003-0239.2020.04.005.
- [7] 周一帆,魏笑然,支泓欢,等.舟山群岛海域近十年波浪能资源评估[J].海洋与湖沼,2024,55(5):1110-1119.
Zhou Yifan, Wei Xiaoran, Zhi Honghuan, et al. Ten-year wave energy resource assessment and characterization in the sea around Zhoushan archipelago[J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 2024, 55(5): 1110-1119.
- [8] Liang Bingchen, Fan Fei, Liu Fushun, et al. 22-year wave energy hindcast for the China East Adjacent Seas[J]. Renewable Energy, 2014, 71: 200-207, doi: 10.1016/j.renene.2014.05.027.
- [9] Wan Yong, Fan Chenqing, Zhang Jie, et al. Wave energy resource assessment off the coast of China around the Zhoushan islands[J]. Energies, 2017, 10(9): 1320, doi: 10.3390/en10091320.
- [10] 石磊,王学昌,郭耀同.宁波舟山内海域潮汐波数模拟[J].青岛海洋大学学报,1994(S1):180-192.
Shi Lei, Wang Xuechang, Guo Yaotong. Tide simulation of Ningbo-Zhoushan inner sea[J]. Journal of Ocean University of

- Qingdao, 1994(S1): 180-192.
- [11] 任剑波, 羊天柱. 舟山本岛北部灌门水道及邻近海域潮波特性初步研究[J]. 海洋工程, 2008, 26(1): 77-82, doi: 10.3969/j.issn.1005-9865.2008.01.011.
- Ren Jianbo, Yang Tianzhu. Preliminary research on the characteristics of tides in Quanmen channel and its neighborhood in Zhoushan[J]. The Ocean Engineering, 2008, 26(1): 77-82, doi: 10.3969/j.issn.1005-9865.2008.01.011.
- [12] 侯庆志, 陆永军, 王志力, 等. 高含沙岛礁海区促淤工程动力地貌响应——以舟山海域岱山北部岛礁为例[J]. 应用基础与工程科学学报, 2019, 27(4): 720-733, doi: 10.16058/j.issn.1005-0930.2019.04.002.
- Hou Qingzhi, Lu Yongjun, Wang Zhili, et al. Morphodynamic responses to the deposition-promoting project in hyperconcentration of suspended sediment island and reef coasts-take sea area north of Daishan island of the Zhoushan archipelago, as an example[J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2019, 27(4): 720-733, doi: 10.16058/j.issn.1005-0930.2019.04.002.
- [13] 陆罕芳, 顾峰峰, 陈学恩, 等. 舟山群岛海域波浪对泥沙冲淤过程的影响[J]. 中国海洋大学学报, 2019, 49(8): 1-9, doi: 10.16441/j.cnki.hdx.20180116.
- Lu Hanfang, Gu Fengfeng, Chen Xueen, et al. Effect of sea waves on sediment transport in the sea waters surrounding Zhoushan islands, China[J]. Periodical of Ocean University of China, 2019, 49(8): 1-9, doi: 10.16441/j.cnki.hdx.20180116.
- [14] 郑胜, 朱业, 陈新平, 等. 基于波流耦合模型的舟山海域水动力特性研究[J]. 海洋湖沼通报, 2024, 46(2): 82-90, doi: 10.13984/j.cnki.cn37-1141.2024.02.010.
- Zheng Sheng, Zhu Ye, Chen Xinping, et al. Numerical investigation of the hydrodynamic characteristics in Zhoushan sea area based on wave-current coupling model[J]. Transactions of Oceanology and Limnology, 2024, 46(2): 82-90, doi: 10.13984/j.cnki.cn37-1141.2024.02.010.
- [15] 侯衍凯, 薛凉, 梁天阳, 等. 风暴过程中泥质海岸的孔压响应——以舟山朱家尖海域为例[J]. 海洋湖沼通报, 2024, 46(2): 62-70, doi: 10.13984/j.cnki.cn37-1141.2024.02.008.
- Hou Yankai, Xue Liang, Liang Tianyang, et al. Pore pressure response of silt seabed during storms—taking Zhoushan Zhujiajian sea area as an example[J]. Transactions of Oceanology and Limnology, 2024, 46(2): 62-70, doi: 10.13984/j.cnki.cn37-1141.2024.02.008.
- [16] 姜楠. 基于波浪能供电的浮标水动力学研究[D]. 上海: 上海海洋大学, 2019.
- Jiang Nan. Hydrodynamic study of buoys based on wave energy [D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2019.
- [17] 范迦勒, 赵文宇, 周桑君, 等. 基于长短时记忆神经网络的舟山群岛海域长时多要素海浪预报模型[J]. 海洋与湖沼, 2025, 56(5): 1073-1085, doi: 10.11693/hyhz20250400096.
- Fan Jiale, Zhao Wenyu, Zhou Sangjun, et al. A long-time multivariate wave forecasting model for Zhoushan archipelago using Long Short-Term Memory deep neural networks[J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 2025, 56(5): 1073-1085, doi: 10.11693/hyhz20250400096.
- [18] Shi Xueli, Li Shaowu, Liang Bingchen, et al. Numerical study on the impact of wave-current interaction on wave energy resource assessments in Zhoushan sea area, China[J]. Renewable Energy, 2023, 215: 119017, doi: 10.1016/j.renene.2023.119017.
- [19] 夏璐一. 浙江省近岸台风浪特征分析[D]. 大连: 大连海洋大学, 2014.
- Xia Luyi. Analysis of typhoon wave characteristics in Zhejiang offshore area[D]. Dalian: Dalian Ocean University, 2014.
- [20] 李致远. 舟山南部海域台风浪特征分析研究[D]. 舟山: 浙江海洋大学, 2024, doi: 10.27747/d.cnki.gzjhy.2024.000386.
- Li Zhiyuan. Analysis and research on the characteristics of typhoon waves in the southern sea area of Zhoushan[D]. Zhoushan: Zhejiang Ocean University, 2024, doi: 10.27747/d.cnki.gzjhy.2024.000386.
- [21] 陈喜龙, 王志平, 谷汉斌, 等. 舟山海域波浪能开发利用方式的设想与展望[J]. 浙江电力, 2018, 37(6): 30-35, doi: 10.19585/j.zjdl.201806007.
- Chen Xilong, Wang Zhiping, Gu Hanbin, et al. Ideas and prospect of wave energy development in Zhoushan sea area[J]. Zhejiang Electric Power, 2018, 37(6): 30-35, doi: 10.19585/j.zjdl.201806007.
- [22] 胡欣雨. 海岛波浪能资源特性分析与评估研究[D]. 天津: 国家海洋技术中心, 2024, doi: 10.27074/d.cnki.ghy.2024.000003.
- Hu Xinyu. Characterization and assessment of wave energy resources around islands[D]. Tianjin: National Ocean Technology Center, 2024, doi: 10.27074/d.cnki.ghy.2024.000003.
- [23] Yang Zhehao, Shao Weizeng, Ding Yang, et al. Wave simulation by the SWAN model and FVCOM considering the sea-water level around the Zhoushan islands[J]. Journal of Marine Science and Engineering, 2020, 8(10): 783, doi: 10.3390/jmse8100783.
- [24] Hu Rijun, Wu Jianzheng, Li Guangxue, et al. Characteristics of sediment transport in the Zhoushan archipelago sea area[J]. Acta Oceanologica Sinica, 2009, 28(5): 116-127, doi: 10.3969/j.issn.0253-505X.2009.05.014.
- [25] Yang B, Xie H W, Ding J, et al. Wave characteristics in northeast coastal waters of Zhoushan island under the influence of winter monsoon[J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2021, 787(1): 012134, doi: 10.1088/1755-1315/787/1/012134.

Wave characteristics analysis of measured data in Zhoushan, Zhejiang waters

ZHOU Xucong^{1,2}, DONG Xiang^{3,4*}, LI Xiaosong^{1,2}

(1. Ningbo Marine Center, Ministry of Natural Resources, Ningbo 315000, China; 2. Zhoushan Marine Environment Monitoring and Forecasting Center, Zhoushan 316022, China; 3. Observation and Research Station of Huaniaoshan East China Sea Ocean-Atmosphere Integrated Ecosystem, Ministry of Natural Resources, Shanghai 201306, China; 4. East China Sea Forecasting and Disaster Reduction Center, Ministry of Natural Resources, Shanghai 201306, China)

Abstract: Based on the long-term continuous measured wave data from 2018 to 2023 at two observation stations, namely Shengsan and Zhujiajian in the Zhoushan sea area of Zhejiang Province, this study comprehensively used methods such as statistical analysis, spectral analysis, and extreme event identification to systematically analyze the statistical laws, seasonal variations, and response characteristics of wave parameters, including significant wave height, mean period, and main wave direction, to extreme events such as typhoons and cold waves. The results show that the waves in the Zhoushan sea area are jointly controlled by the monsoon and typhoons, with significant seasonal differences and spatial variations in characteristics. Dominated by the strong northwest monsoon in winter, the sea area is mainly characterized by northwest wind waves, with an average wave height of 1.8 m and a wave period of 5.2 s. In summer, southeast swell waves prevail, with the minimum average wave height of 0.9 m and a wave period of 6.8 s. Spectral analysis shows that the winter wind wave spectrum fits well with the JONSWAP spectrum ($R^2=0.93$), while the summer swell wave spectrum is closer to the P-M spectrum distribution. During the observation period of Typhoon Lekima in 2019, the maximum wave height reached 8.5 m, and the wave period hit 12.3 s. The wave spectrum showed significant characteristics of low-frequency energy concentration (peak frequency ranging from 0.07 to 0.15 Hz) and enhanced directionality. Affected by the shielding effect of island topography, the wave height at the nearshore station is attenuated by about 19.1% on average compared with that at the offshore station, and the wave direction distribution is more scattered. This study points out that monsoons and typhoons are the core dynamic factors driving the temporal and spatial variations of waves in the Zhoushan sea area, while the complex island topography is the key geographical factor leading to energy attenuation and spectral deformation during wave propagation from the open sea to the nearshore.

Key words: The Zhoushan sea area; wave characteristics; measured data; spectral analysis; wave spectrum