

文章编号:1005-9865(2024)02-0148-09

浙江东矾列岛海域实测波要素及典型台风浪特征分析

邰彩云^{1, 2}

(1. 浙江省深远海风电技术研究重点实验室, 浙江 杭州 310014; 2. 中国电建集团华东勘测设计研究院有限公司, 浙江 杭州 310014)

摘 要:利用东矾列岛海域一年实测波浪资料,统计分析波要素特征,以台风“利奇马”为例,分析台风浪演变过程。结果表明:研究海域年平均有效波高 0.88 m,年平均周期 4.3 s,年最大波高 8.67 m 出现在夏季台风“利奇马”影响时。研究海域以轻浪为主,其次是小浪和中浪;常浪向为 ESE,次常浪向为 E 和 SE;强浪向为 SSE,次强浪向为 SE。波浪平均持续时间和波高之间符合指数衰减关系。台风“利奇马”影响期间,最大谱峰 56.20 m²/Hz,台风浪谱型以双峰谱为主,台风浪类型经历了涌浪—混合浪—风浪—混合浪—涌浪这一演变过程。

关键词:东矾列岛;波要素;台风浪;波浪谱

中图分类号:P731.22 **文献标志码:**A **DOI:**10.16483/j.issn.1005-9865.2024.02.013

Analysis of measured wave parameters and typical typhoon wave characteristics in the Dongji Islands sea area of Zhejiang Province

HUAN Caiyun^{1, 2}

(1. Key Laboratory of Far-shore Wind Power Technology of Zhejiang Province, Hangzhou 310014, China; 2. PowerChina Huadong Engineering Corporation Limited, Hangzhou 310014, China)

Abstract: Utilizing one year of measured wave data in the Dongji Islands sea area, this study statistically analyzes wave characteristics and examines the evolution of typhoon waves, taking Typhoon "Lekima" as an example. The results indicate that the annual average significant wave height in the study area is 0.88 m, with an average period of 4.3 s. The maximum wave height of 8.67 m occurred during the impact of Typhoon "Lekima" in the summer. Light waves dominate the study area, followed by small and medium waves. The prevailing wave direction is ESE, followed by E and SE; the strong wave direction is SSE, followed by SE. There is an exponential decay relationship between the average wave duration and wave height. During the influence of Typhoon "Lekima," the maximum spectral peak reaches 56.20 m²/Hz, and the typhoon wave spectrum is characterized by a double-peak pattern. The typhoon wave type undergoes the transition of swell to mixed waves to wind waves to mixed waves to swell.

Keywords: Dongji Islands; wave parameters; typhoon waves; wave spectrum

众所周知,波浪要素是各种海洋工程所必须考虑的重要参数之一,而在台风等极端天气条件下,波浪的巨大破坏力会对海上构筑物带来极大的安全隐患,因此,研究波浪特征对海洋工程建设、海洋资源开发、防灾减灾等具有重要的理论意义和实际价值。

实测波浪数据是研究波浪特征的主要手段,杨斌等^[1-3]利用杭州湾中部和北部一年实测波浪资料,统计分析杭州湾中部和北部海域波要素分布特征,拟合分析了各波要素之间的相关关系,研究了波浪谱特征。杨斌等^[4]还利用过境舟山东北部海域的 6 个台风浪资料,分析了台风浪期间的波高、周期、波浪谱发展过程,探讨了舟山东北部海域在不同台风路径、不同台风强度影响下的台风浪成长衰减过程的特征。周阳等^[5-6]利

收稿日期:2023-03-19

作者简介:邰彩云(1983—),女,正高级工程师,主要从事海上风机基础结构设计、海洋水文研究。E-mail:huan_cy@hdec.com

用三门湾一年实测波浪资料,进行波要素统计和线性回归分析,探讨了台风“泰利”影响下波要素和波浪谱的变化过程;还选取了三门湾一年实测波浪资料中影响较为显著的5次台风浪数据,统计分析了三门湾台风浪过程中波要素和波浪谱变化特征,并在此基础上探讨了台风浪对码头系泊船舶的影响,发现台风期间波浪的谱峰周期与系泊船舶的固有横摇周期接近,易造成三门湾内系泊船舶的剧烈运动,该成果可为相关海工结构设计和防灾减灾提供参考。高晨晨等^[7]和解静等^[8]分别利用江苏响水和广东阳江近岸海域的一年实测波浪数据,统计了波高、周期的分布特征,分析了波高、周期的相关性特征。潘晓东等^[9]利用南麂海洋观测站1990—2014年25年的波浪观测资料,对灾害性海浪分布特征及致灾因子进行分析,发现南麂岛海域灾害性海浪多发生在夏季和秋初,热带气旋、冷空气及出海气旋是引起灾害性海浪的主要因子,冷空气影响下海浪的增大、衰减过程快于热带气旋。蒋璐璐等^[10]利用台风“利奇马”和“米娜”过境期间,浙江温州和舟山海洋观测浮标记录的资料,分析对比了这两个台风下浙江沿海风和海浪的时空变化特征。蔡丽等^[11]根据江苏射阳海域和广东南澳海域4个月的实测波浪数据,统计分析了畸形波个数和波浪要素,并研究了海域内畸形波发生的概率分布。

不同海域具有不同的地形地貌和水动力条件,波浪的成长和发展方式也呈现出不同的特征,基于所在海域的实测波浪数据分析能准确而直观地了解该海域的波浪特征。由于离岸长周期现场观测成本较高,目前对于东矾列岛海域实测波浪特征的研究较为空白,而台风浪期间观测设备更易丢失,安全无保障,该海域的台风浪研究更未见报道,这里利用该海域波浪观测站一年实测波浪资料,统计分析各波要素的分布特征,研究波浪持续时间和波高的关系,并以导致该海域观测期内最大波高8.67 m的典型台风“利奇马”为例,分析在台风“利奇马”影响下东矾列岛海域的台风浪发展变化过程,以期为该海域的波浪理论研究和涉海工程的设计建设、防灾减灾等提供基础数据资料。

1 数据获取和处理

东矾列岛位于浙江省台州市沿海,南北分别为台州湾和三门湾,波浪观测站布设于东矾列岛东北方向,站址坐标(121°57′4″E、28°48′27″N),离岸约25 km,水深15 m左右,四周较为开阔无明显遮挡,可观测到各方向的来波,波浪代表性较好;观测方法采用声学多普勒波浪流速剖面仪(AWAC“浪龙”)座底观测。

“浪龙”可根据所测得的压力、波浪轨道速度和波高表面位置计算波高和周期,其中波高表面位置由声学表面跟踪(AST)法测得,AST法沿垂直声束发射一个短的声学脉冲,其水面发射信号能够被很好地处理,通过垂向换能器的回程测距方法测算仪器传感器至表面的距离,这种方法可以避开深度限制,使用底部压力测量,压力则由高精度压电阻元件测得,且不受流速和压力信号衰减的影响,可不受干扰地对水表面进行直接测量,所观测波浪的最小周期可达0.5 s。观测时仪器设置每小时测量一次波面,采样频率1 Hz,一次采样1 024个波面数据,观测周期为2019年4月1日至2020年3月31日,历时完整一年,对异常数据处理后共计获取8 449组实测完整波浪数据,获取率96.19%(文中所做统计针对所获取的8 449组数据)。

“浪龙”配套的Storm软件通过SUV(acoustic surface tracking and horizontal velocity U and V)方法计算波向,运用快速傅里叶变换(FFT)计算波浪谱。Storm软件对波面记录进行波参数统计时采用跨零统计分析,经处理可得到波高、周期、波向等波要素,包括最大波高 $H_{\max}$ 及其对应周期 $T_{\max}$ 、十分之一大波波高 $H_{1/10}$ 及其对应周期 $T_{1/10}$ 、有效波高 $H_{1/3}$ 及其对应周期 $T_{1/3}$ 、平均波高 H_{mean} 及其对应平均周期 T_{mean} 等。

2 波浪要素统计分析

2.1 波高、周期年内变化特征

各波要素特征值如表1所示:周年平均 $H_{1/3}$ 为0.88 m,周年最大 $H_{1/3}$ 为5.56 m;周年平均 $H_{1/10}$ 为1.07 m,周年最大 $H_{1/10}$ 为6.35 m;周年平均 $H_{\max}$ 为1.39 m,周年最大 $H_{\max}$ 为8.67 m。研究海域波浪周期较短,月均平均周期 T_{mean} 介于3.3~4.8 s, T_{mean} 周年平均为4.3 s,年最大 T_{mean} 为8.9 s。从观测周年内波高的变化过程看:总体上各级平均波高逐月波动性不大,但存在一定的季节特征,月均有效波高、月均十分之一波高和月均最大波高自7月起逐月略有增大至9月最大,此后又逐渐降低,说明研究海域周年内夏、秋季的波高相对略大;而各级最大波高的波动性则十分明显,月最大有效波高、月最大十分之一波高和月最大波高的波动性在夏季8月至秋季10月明显大于其他时间。

表 1 波要素特征值统计
Tab. 1 Statistics values of wave parameter characteristics

月份	T_{mean} 平均/s	T_{mean} 最大/s	$H_{1/3}$ 平均/m	$H_{1/3}$ 最大/m	$H_{1/10}$ 平均/m	$H_{1/10}$ 最大/m	H_{max} 平均/m	H_{max} 最大/m
4月	3.3	5.8	0.64	1.41	0.81	1.75	1.08	2.55
5月	3.6	5.9	0.67	1.49	0.84	1.86	1.12	2.36
6月	4.2	6.9	0.61	1.67	0.74	2.07	0.99	2.88
7月	4.7	8.9	0.91	5.09	1.09	5.68	1.44	7.47
8月	4.5	8.9	0.99	5.50	1.19	6.24	1.56	8.67
9月	4.5	8.0	1.12	3.54	1.37	4.35	1.81	5.58
10月	4.8	8.8	1.09	5.56	1.32	6.35	1.69	8.13
11月	4.7	8.2	1.07	2.46	1.30	3.06	1.69	3.29
12月	4.5	7.7	0.93	2.28	1.15	2.78	1.51	3.35
1月	4.0	8.4	0.86	2.13	1.03	2.52	1.32	3.08
2月	4.5	8.2	0.91	2.35	1.05	2.77	1.30	3.24
3月	4.1	7.7	0.79	2.10	0.94	2.49	1.22	3.66
周年平均	4.3	8.9	0.88	5.56	1.07	6.35	1.39	8.67

根据图 1 所示周年观测期内有效波高和有效波周期的变化过程,在绝大多数时间里,观测海域有效波高在 2.00 m 以下,有效波周期维持在 5.0 s 左右,而在 2019 年 7 月 19 日、8 月 10 日、10 月 1 日有效波高分别出现明显的突增现象,相应同期的有效波周期也明显增大至 10.0 s 以上,这分别对应着影响该海域的极端天气——台风“丹娜丝”、“利奇马”和“米娜”,相应的最大波高分别为 7.47、8.67 和 8.13 m。

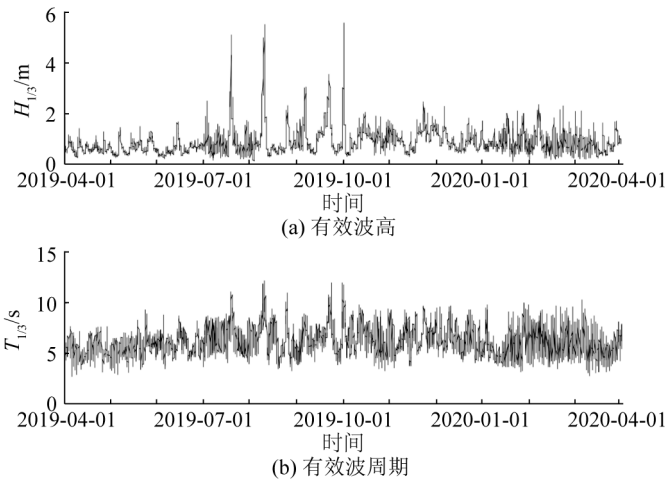


图 1 观测期间有效波高和有效波周期过程线

Fig. 1 Time series of significant wave height and significant wave period during the observation period

2.2 波级、波向分布特征

根据波浪等级表对观测期内的有效波高进行分级统计,各级有效波高各方向出现频率如表 2 所示,由此绘制的各级有效波高玫瑰图如图 2 所示,从中可以看出,研究海域以轻浪(0.5 ~ 1.25 m)为主,出现频率 67.4%,其次是小浪(0.1 ~ 0.5 m)和中浪(1.25 ~ 2.5 m),出现频率分别为 17.3% 和 13.7%,大浪(2.5 ~ 4.0 m)和巨浪(4.0 ~ 6.0 m)出现甚少,合计频率仅为 1.6%,巨浪以上则未出现。从波向上看,东矾列岛海域主要盛行

东至东南向浪(E ~ ESE ~ SE),合计出现频率 71.3%,其中,常浪向为 ESE,出现频率 26.6%,次常浪向为 E 和 SE,出现频率分别为 24.3%和 20.4%。各方向最大波高分布如图 3 所示,可以看出,东矾列岛海域强浪向为 SSE,最大波高 8.67 m,出现在 2019 年 8 月台风“利奇马”过境时,次强浪向为 SE,最大波高 8.13 m,出现在 2019 年 10 月台风“米娜”过境时。

表 2 各级有效波高各方向出现频率

Tab. 2 Frequency of occurrence of significant wave heights at different directions

%

$H_{1/3}/\text{m}$	N	NNE	NE	ENE	E	ESE	SE	SSE	S	SSW	SW	WSW	W	WNW	NW	NNW	合计
0.1 ~ 0.5	0	0.1	0.3	1.3	3.1	5.4	5.6	1.2	0.2	0.1	0	0	0	0	0	0	17.3
0.5 ~ 1.25	0.5	0.7	3.0	10.7	17.1	18.7	12.8	3.0	0.4	0.2	0.1	0	0	0	0	0.2	67.4
1.25 ~ 2.5	0.3	0.4	0.8	3.7	3.9	2.0	1.6	0.6	0.1	0	0	0	0	0	0	0.3	13.7
2.5 ~ 4.0	0	0	0.1	0.1	0.2	0.3	0.3	0.1	0.1	0	0	0	0	0	0	0	1.2
4.0 ~ 6.0	0	0	0	0	0	0.2	0.1	0.1	0	0	0	0	0	0	0	0	0.4
合计	0.8	1.2	4.2	15.8	24.3	26.6	20.4	5.0	0.8	0.3	0.1	0	0	0	0	0.5	100

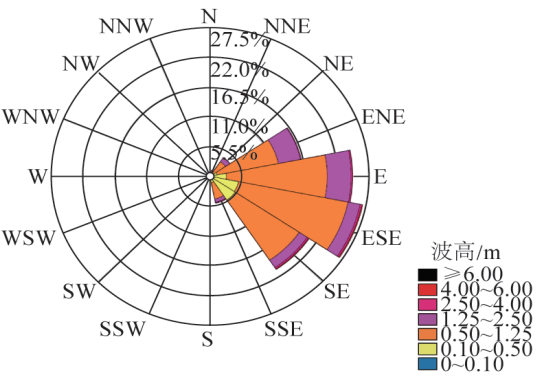


图 2 有效波高玫瑰图

Fig. 2 Rose diagram of significant wave heights

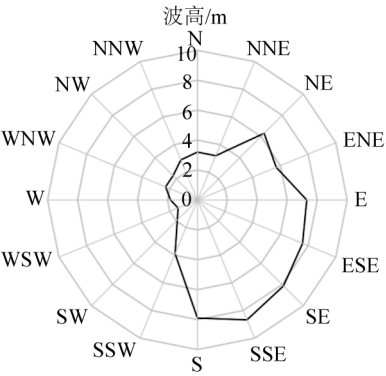


图 3 最大波高各方向分布

Fig. 3 Distribution of maximum wave heights in different directions

2.3 波高周期联合分布

实测有效波高和有效波周期的散点分布如图 4 所示,可以看出研究海域主要以有效波高 2.0 m 以下、有效波周期 4 ~ 8 s 的波浪为主;进一步统计各级有效波高和对应周期的联合分布如表 3 所示,从表中可知,东矾列岛海域以周期 4 ~ 7 s 的波浪为主,合计出现频率 74.3%,其中又以周期 4 ~ 7 s 的轻浪和小浪为主;另外,从波级和对应周期看,小浪和轻浪以周期 4 ~ 7 s 为多,中浪以周期 5 ~ 9 s 为多,大浪和巨浪以周期 9 s 以上为多,总体上波高周期呈现浪大周期长的特征。

为探究有效波高 $H_{1/3}$ 和有效波周期 $T_{1/3}$ 的相关关系,采用最小二乘法进行拟合,结果如图 4 中所示,拟合所得的相关关系 $T_{1/3}=0.995H_{1/3}+5.20$ ($r=0.38$)较为一般。

2.4 波浪持续时间和波高的关系

波浪持续时间指的是大于等于某特定波高所持续的时间,波浪平均持续时间是指某特定波高所对应的各次持续时间的平均值。Lawson 和 Abernethy^[12]通过对澳大利亚东南海域的波高和平均持续时间的研究,提

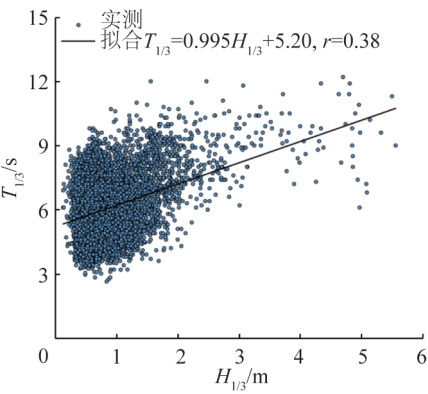


图 4 有效波高和有效波周期的相关关系

Fig. 4 Correlation between significant wave height and significant wave period

出波浪平均持续时间和波高之间存在着指数关系,该关系式如下:

$$D=\alpha\times H^\beta$$
(1)

其中, α 和 β 为拟合系数; H 为设定波高; D 为大于等于设定波高 H 的平均持续时间,d。该指数关系在不同海域得到验证研究:Lawson 和 Abernethy^[12]根据澳大利亚东南海域观测资料研究得到 $\alpha=7$ 、 $\beta=-2$;Graham^[13]根据北海观测资料得到 $\alpha=4.16$ 、 $\beta=-1.52$;冯兴如等^[14]利用中国海南东方近岸海域观测资料研究得到,当有效波高小于 1.58 m 时, $\alpha=0.35$ 、 $\beta=-1.83$,当有效波高大于 2.70 m 时, $\alpha=27.66$ 、 $\beta=-4.71$;李淑江等^[15]根据中国海南岛东南近岸海域观测资料研究得到,当有效波高小于 2.80 m 时, $\alpha=1.67$ 、 $\beta=-2.09$,当有效波高大于 4.30 m 时, $\alpha=27.66$ 、 $\beta=-4.71$ 。上述研究成果的波浪平均持续时间和波高都符合指数衰减关系,只是不同海域的拟合系数不同,衰减速度不同。

表 3 有效波高周期联合分布
Tab. 3 Joint distribution of significant wave height and significant wave period %

$H_{1/3}/\text{m}$	$T_{1/3}/\text{s}$							
	2 ~ 3	3 ~ 4	4 ~ 5	5 ~ 6	6 ~ 7	7 ~ 8	8 ~ 9	>9
0.1 ~ 0.50	0	0.8	3.6	5.2	4.7	2.4	0.7	0
0.5 ~ 1.25	0.1	2.6	15.4	21.7	16.0	7.9	2.9	0.7
1.25 ~ 2.5	0	0.1	1.1	3.2	3.3	2.8	2.0	1.3
2.5 ~ 4.0	0	0	0	0	0.1	0.3	0.3	0.5
4.0 ~ 6.0	0	0	0	0	0	0	0.1	0.2
合计	0.1	3.5	20.1	30.1	24.1	13.4	6.0	2.7

以有效波高为例,统计了各级波高和平均持续时间,两者的拟合关系如图 5 所示,拟合结果 $D=0.74H_{1/3}^{-1.38}$, $\alpha=0.74$ 、 $\beta=-1.38$,相关系数为 0.88,相关性较好;可见研究海域的波浪平均持续时间随波高的增大而衰减,符合 Lawson 所提出的指数衰减关系,只是衰减速度不同。

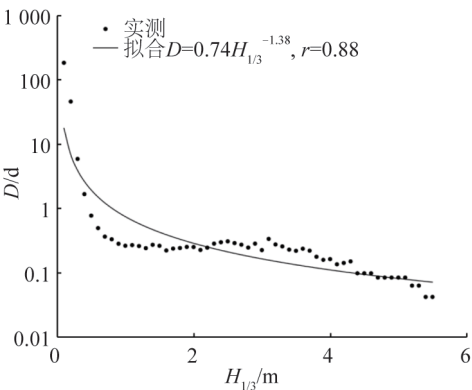


图 5 平均持续时间随波高的变化
Fig. 5 Variation of average duration with significant wave height

3 典型台风浪分析

1951 年以来在观测海域附近登陆或途经该海域,对海域波浪影响较大的台风如表 4 所示,只有 2019 年的台风“利奇马”达到超强台风等级,可见其在历史上影响浙江东矾列岛海域的台风中具有很好的代表性,属于影响该海域的较大台风。另外如前所述,在观测期间引起海域较大波高的台风有“丹娜丝”、“利奇马”和“米娜”,其中,“丹娜丝”只属于热带风暴级,“米娜”属于台风级;“米娜”与波浪观测站最近距离约 50 km,“利奇马”的最近距离约 80 km,虽然“米娜”距离略近,但“利奇马”属于超强台风等级,“米娜”台风级和其有一定的差距,其风力和所携带的能量逊于“利奇马”,产生的最大波高不及“利奇马”。综上,这里以引起观测期间最大波高的超强台风“利奇马”为例,分析海域的台风浪特征,具有较好的典型性和代表性。

表4 历史上影响研究海域的台风
Tab. 4 Historical typhoons that have affected the study area

编号名称	台风等级	编号名称	台风等级	编号名称	台风等级
5122	热带低压	9015	台风	201315“康妮”	热带风暴
5207	热带低压	9507	强热带风暴	201509“灿鸿”	强台风
6126	强台风	9711	台风	201814“摩羯”	强热带风暴
7410	强热带风暴	0004“启德”	强热带风暴	201905“丹娜丝”	热带风暴
7413	台风	0414“云娜”	强台风	201909“利奇马”	超强台风
7504	台风	0509“麦莎”	强台风	201918“米娜”	台风
7805	台风	0515“卡努”	强台风	202004“黑格比”	台风
8403	热带风暴	200703“韦帕”	强台风	202114“灿哪”	强台风
8506	台风	201105“米雷”	台风	202106“烟花”	台风
8923	强热带风暴	201211“海葵”	强台风	202212“梅花”	强台风

3.1 台风过程

台风“利奇马”于2019年8月4日在菲律宾以东洋面生成(热带低压),此后逐渐向西北方向移动,强度逐渐加强,于8月9日6时进入东海(超强台风,中心风力17级,60 m/s),随后继续保持超强台风的等级继续向西北方向移动,并逐渐靠近观测海域,随即于8月10日2时前后以超强台风(中心风力16级,52 m/s)的等级在台州市温岭县沿海登陆,此时台风与观测站的距离最近(约80 km),登陆后台风强度逐渐减弱。图6所示为其过境期间最大波高和最大波周期的变化过程,从中可见台风“利奇马”对观测海域产生显著影响,最大波高、最大波周期均呈现明显的先增大再减小的变化过程。台风影响前,最大波高稳定维持在1.0 m左右,最大波周期在8 s上下;自8月7日起,台风“利奇马”引发的外围长周期涌浪开始影响观测海域,最大波高开始逐渐增大,相应的最大波周期逐渐振荡增大,时有10 s以上长周期波浪;8月9日16时,观测到最大波高的一个峰值7.63 m,最大波周期则维持在12 s上下;此后最大波高小幅下降出现一个波谷,随着台风的继续靠近,最大波高和最大波周期再次持续增大,至8月10日2时台风登陆,此时距离观测海域最近,观测到台风过程的最大波高极大值8.67 m,最大波周期同步达到最大14 s;此后随着台风的登陆、远去和强度下降,最大波高开始逐渐下降,但最大波周期并未同步逐渐减小,由于涌浪继续影响观测海域,使得最大波周期维持在11 s上下的长周期状态,至8月11日8时起,随着台风影响趋于结束,最大波周期持续逐渐减小,至8月12日以后,海面波浪恢复至台风前的状态,最大波高1.0 m左右,最大波周期8 s以下。

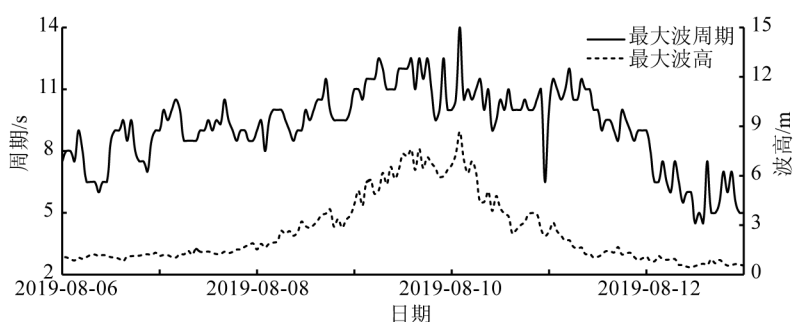


图6 台风“利奇马”影响期间最大波高和谱峰周期变化过程

Fig. 6 Variation process of maximum wave height and spectral peak period during the impact of Typhoon “Lekima”

3.2 波型演变

根据有效波陡 δ 可快捷简便地判断波型,根据Thompson理论^[16],当有效波陡 $\delta \geq 1/40$ 时,波型为风浪,当 $\delta \leq 1/100$ 时,波型为涌浪,当 $1/100 < \delta < 1/40$ 时,波型为风浪、涌浪的混合浪;有效波陡的计算公式如下:

$$\delta = \frac{1.949\pi H_{\text{mean}}}{gT_{\text{mean}}^2} \quad (2)$$

其中, δ 为有效波陡, H_{mean} 为平均波高, g 为重力加速度, T_{mean} 为平均波周期。

根据式(2)计算的同期有效波陡如图7所示,可见台风影响期间,观测海域波型主要经历了涌浪—混合浪—风浪—混合浪—涌浪的演变过程。

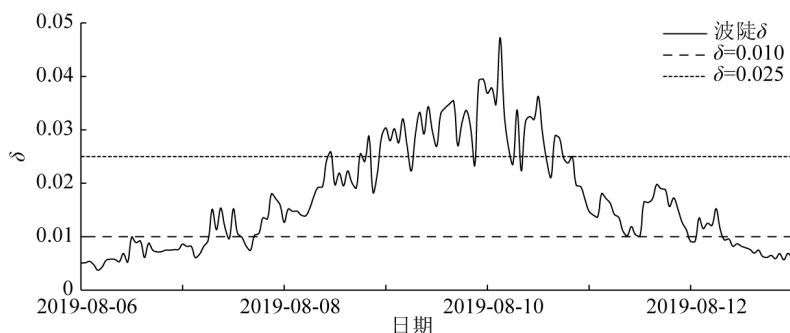


图7 台风“利奇马”影响期间有效波陡变化过程

Fig. 7 Sudden changes in significant wave height during the impact of Typhoon “Lekima”

台风影响观测海域前,影响观测海域的是经过长距离传播而衰减的外海涌浪,观测海域波型为涌浪;2019年8月7日起,随着台风继续靠近,观测海域风力渐增,风浪逐渐影响观测海域,波浪持续成长,波高和周期持续增大,波陡也逐渐增大,波型逐渐演变成风浪为主的混合浪;8月9日起,台风来到观测海域,风浪直接影响观测海域,波高、周期、波陡继续增大,波型演变成风浪,8月10日3时,波陡出现峰值,和波高、周期极大值的时间基本同步;此后随着台风的登陆、强度降低,风浪逐渐减弱,外海涌浪持续影响观测海域,波型逐渐由风浪演变成涌浪为主的混合浪;8月12日起,观测海域逐渐恢复至台风影响前的状态,波型恢复为涌浪。由此可见,观测海域的波型主要和台风强度、台风路径、台风距离有关,随着这3个因素的变化呈现动态演变过程,台风“利奇马”影响过程中的波型演变过程为:涌浪—涌浪为主混合浪—风浪为主混合浪—风浪—涌浪为主混合浪—涌浪。

3.3 台风浪谱分析

波浪谱分析可以从波浪的内部结构对波浪能量在频率和方向上的分布特征进行描述,图8为“利奇马”台风浪过程中波浪谱峰密度的变化过程,从中可见台风浪的持续影响时间大约3 d(8月8—10日),影响最大时段为8月10日前后,波浪谱峰值经历了急剧升高和降低的成长到消退变化过程,最大谱峰出现在8月10日1:00,为56.20 m^2/Hz 。

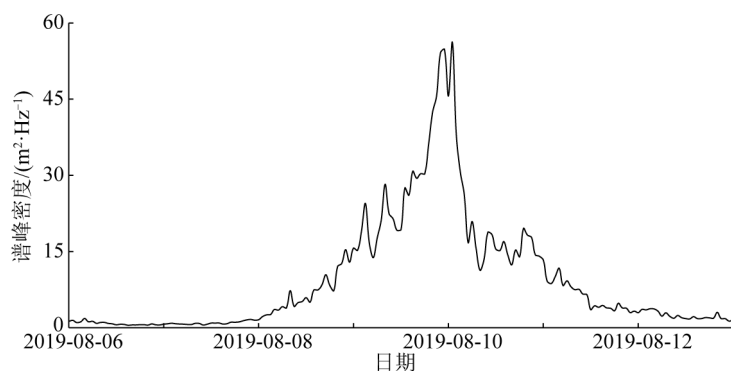


图8 台风“利奇马”期间波浪谱峰密度变化过程

Fig. 8 Variation in wave spectrum peak density during Typhoon “Lekima”

台风过程中波浪谱型主要以双峰谱为主,选取台风过境前后几个代表时刻,绘制相对应的谱型(如图9所示),以此分析台风过程中波浪谱型演变过程。台风过境前,影响观测海域的是外海长周期涌浪,波浪谱呈现主峰频率趋于低频的单峰谱(图9(a)),由于长距离传递的能量衰减,谱峰较小。随着台风的逐渐靠近,高频的风浪逐渐影响观测海域,谱峰逐渐增大,波浪谱逐渐演变为双峰谱,起初是低频谱峰大于高频谱峰的双峰谱(图9(b)),随着台风持续靠近、风浪增强,波浪谱逐渐演变为高频谱峰大于低频谱峰的双峰谱(图9

(c))。当台风进入观测海域,台风中心风圈直接影响,台风浪特征显著,谱峰急剧增大,8月10日1时出现最大谱峰 $56.20 \text{ m}^2/\text{Hz}$,和波高、周期、波陡的峰值出现时间基本同步,波浪谱型呈现高频谱峰明显大于低频谱峰的双峰谱(图9(d)),其低频谱峰频率为 0.10 Hz ,对应谱峰 $34.66 \text{ m}^2/\text{Hz}$,高频谱峰频率为 0.18 Hz ,对应谱峰 $56.20 \text{ m}^2/\text{Hz}$ 。根据 Portilla 等^[17]提出的风浪涌浪判别方法,即实测谱峰与对应谱峰频率的PM谱谱峰比值大于1为风浪,小于1为涌浪,经计算,在最大谱峰时刻,低频谱峰频率 0.10 Hz 对应的PM谱峰为 $14.30 \text{ m}^2/\text{Hz}$,高频谱峰频率 0.18 Hz 对应的PM谱峰为 $0.76 \text{ m}^2/\text{Hz}$,比值均大于1,说明最大谱峰时高频、低频均为风浪。随着台风登陆和减弱,风浪的影响减弱,涌浪持续影响,谱峰迅速降低,波浪谱又演变为低频谱峰大于高频谱峰的双峰谱(图9(e))。最后台风远离,风浪消散殆尽,海面恢复台风前的状态,外海传递的涌浪影响观测海域,谱峰较小,波浪谱型再次演变为主峰频率趋于低频的单峰谱(图9(f))。

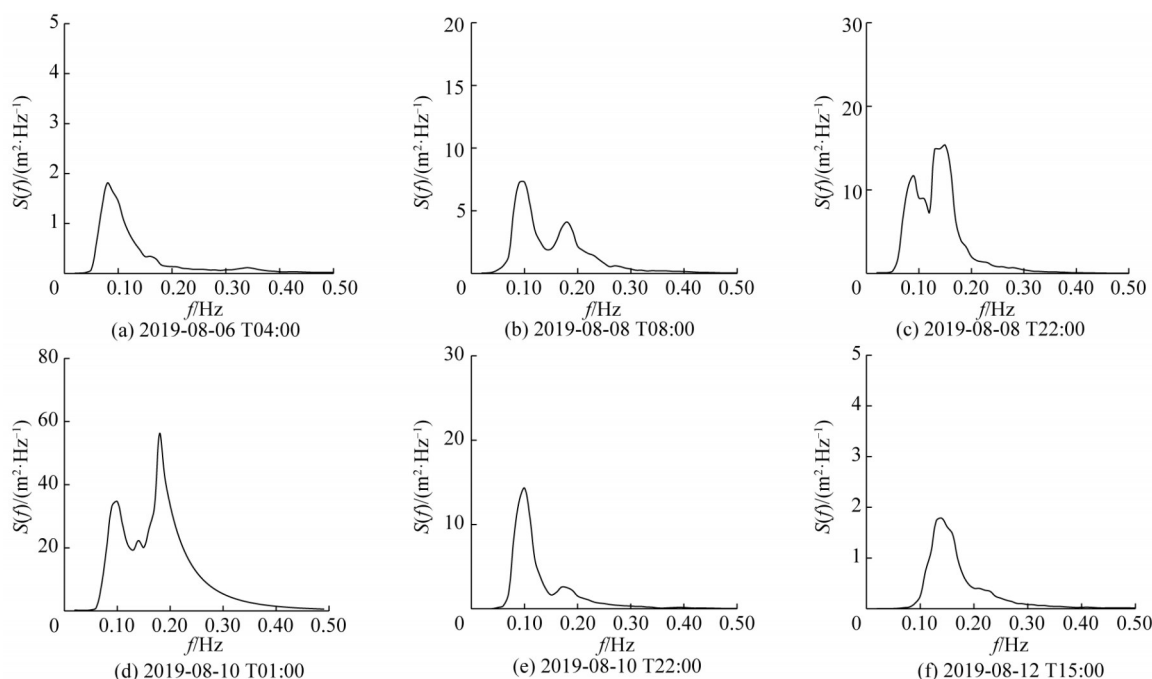


图9 台风“利奇马”期间波浪谱型变化过程

Fig. 9 Evolution of wave spectrum types during Typhoon “Lekima”

综上所述,在台风“利奇马”的影响过程中,研究海域以双峰谱为主,台风前和台风后呈现主峰频率趋于低频的单峰谱,谱峰较小,台风过境期间呈现为高低频谱峰互有大小的双峰谱,谱峰较大;谱峰经历先升高后降低的发展过程。

4 结 语

1) 东矾列岛海域周年观测期间,年平均有效波高 0.88 m ,年平均周期 4.3 s ;年内波高存在一定季节性特征,夏、秋季波高相对较高,受台风极端天气影响,年最大波高 8.67 m 和次最大波高 8.13 m 分别出现在夏季8月台风“利奇马”和秋季10月台风“米娜”过境时。

2) 研究海域以轻浪为主,出现频率 67.4% ,其次是小浪和中浪,大浪和巨浪最少;常浪向为 ESE,次常浪向为 E 和 SE,强浪向为 SSE,次强浪向为 SE;有效波周期以 $4 \sim 7 \text{ s}$ 为主,其中,小浪和轻浪以周期 $4 \sim 7 \text{ s}$ 为主,中浪以周期 $5 \sim 9 \text{ s}$ 为多,大浪和巨浪以周期 9 s 以上为多,总体上波高周期呈现浪大周期长的特征。

3) 波浪平均持续时间 D 和有效波高的关系 ($D=0.74H_{1/3}^{-1.38}$) 符合 Lawson 的指数衰减关系,平均持续时间随波高的增大而衰减。

4) 台风“利奇马”影响期间,研究海域的波高、周期、有效波陡和波浪谱峰均显著呈现先增大后降低的变化过程,最大波高 8.67 m ,最大波周期 14.0 s ,最大谱峰 $56.20 \text{ m}^2/\text{Hz}$;波浪谱型以双峰谱为主,台风前和台风后呈现主峰频率趋于低频的单峰谱,谱峰较小,台风过境期间呈现为高、低频谱峰互有大小的双峰谱,谱峰较大;波浪类型经历了涌浪—涌浪为主混合浪—风浪为主混合浪—风浪—涌浪为主混合浪—涌浪这一演变过程。

参考文献:

- [1] 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. (YANG B, YANG Z L, YE Q, et al. Analysis on wave characteristics of central Hangzhou Bay[J]. The Ocean Engineering, 2018, 36(3): 96-103. (in Chinese))
- [2] 杨斌, 叶钦, 张俊彪, 等. 杭州湾中部波浪统计分布[J]. 水道港口, 2018, 39(1): 38-43. (YANG B, YE Q, ZHANG J B, et al. Statistical wave distribution of central Hangzhou Bay[J]. Journal of Waterway and Harbor, 2018, 39(1): 38-43. (in Chinese))
- [3] 杨斌, 杨万康, 谢华伟, 等. 杭州湾北部实测波浪特征[J]. 海洋与湖沼, 2022, 53(4): 999-1006. (YANG B, YANG W K, XIE H W, et al. Characteristics of measured waves in the north of Hangzhou Bay, East China Sea[J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 2022, 53(4): 999-1006. (in Chinese))
- [4] 杨斌, 施伟勇, 叶钦, 等. 舟山岛东北部沿海实测台风浪特性[J]. 水科学进展, 2017, 28(1): 106-115. (YANG B, SHI W Y, YE Q, et al. Characteristics of waves in coastal waters of northeast Zhoushan Island during typhoons[J]. Advances in Water Science, 2017, 28(1): 106-115. (in Chinese))
- [5] 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. (in Chinese))
- [6] 周阳, 叶钦, 杨斌, 等. 海湾台风浪特性及其对船舶的影响[J]. 中国造船, 2020, 61(3): 216-227. (ZHOU Y, YE Q, YANG B, et al. Wave characteristics in the bay during typhoons and its effect on mooring ships[J]. Shipbuilding of China, 2020, 61(3): 216-227. (in Chinese))
- [7] 高晨晨, 周谷城, 王侃睿. 响水近岸海域波浪特性研究[J]. 海洋学报, 2019, 41(5): 23-34. (GAO C C, ZHOU G C, WANG K R. Study on wave characteristics in the nearshore waters of Xiangshui[J]. Haiyang Xuebao, 2019, 41(5): 23-34. (in Chinese))
- [8] 解静, 常江, 孙家文, 等. 阳江近海海域波浪特征分析[J]. 海洋环境科学, 2022, 41(2): 167-173. (XIE J, CHANG J, SUN J W, et al. Analysis on wave characteristics of Yangjiang offshore area[J]. Marine Environmental Science, 2022, 41(2): 167-173. (in Chinese))
- [9] 潘晓东, 林顺利, 姚玉娟, 等. 南麂海域灾害性海浪分布特征[J]. 中国水运(下半月), 2016, 16(12): 160-162. (PAN X D, LIN S L, YAO Y J, et al. Distribution characteristics of disastrous waves in Nanji Sea area[J]. China Water Transport, 2016, 16(12): 160-162. (in Chinese))
- [10] 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. (in Chinese))
- [11] 蔡丽, 赵建春, 向容瑶, 等. 基于实测资料的畸形波概率及波浪要素分析[J]. 海洋工程, 2023, 41(3): 56-64. (CAI L, ZHAO J C, XIANG R Y, et al. Analysis of freak wave probability and wave characteristics based on measured data[J]. The Ocean Engineering, 2023, 41(3): 56-64. (in Chinese))
- [12] LAWSON N V, ABERNETHY C L. Long term wave statistics off Botany Bay [C]//Proceedings of the Second Australian Conference on Coastal and Ocean Engineering. 1975: 167-176.
- [13] GRAHAM C. The parameterisation and prediction of wave height and wind speed persistence statistics for oil industry operational planning purposes[J]. Coastal Engineering, 1982, 6(4): 303-329.
- [14] 冯兴如, 李近元, 尹宝树, 等. 海南东方近岸海域海浪观测特征研究[J]. 热带海洋学报, 2018, 37(3): 1-8. (FENG X R, LI J Y, YIN B S, et al. Characteristics of ocean waves in coastal area of Dongfang, Hainan Island based on observations [J]. Journal of Tropical Oceanography, 2018, 37(3): 1-8. (in Chinese))
- [15] 李淑江, 李泽文, 范斌, 等. 海南岛东南近岸海浪观测及统计特征[J]. 海洋科学进展, 2016, 34(1): 1-9. (LI S J, LI Z W, FAN B, et al. Wave observation and statistical analysis in the southeast coast of Hainan Island [J]. Advances in Marine Science, 2016, 34(1): 1-9. (in Chinese))
- [16] THOMPSON W C, NELSON A R, SEDIVY D G. Wave group anatomy of ocean wave spectra [C]// Proceedings of the 19th International Conference on Coastal Engineering. New York, USA: American Society of Civil Engineers, 1985: 661-677.
- [17] PORTILLA J, OCAMPO-TORRES F J, MONBALIU J. Spectral partitioning and identification of wind sea and swell [J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 2009, 26(1): 107-122.