

东方市近岸海域波浪特征分析

王小红

(国家海洋局海口海洋环境监测中心站, 海南 海口 570311)

摘要: 为了解海南东方市近岸海域波浪基本特征, 根据东方海洋环境监测站使用的 SZF 型波浪浮标连续 11 a 的实测数据, 进行了统计分析。首先对波浪要素进行统计, 得到了各向各级波高的季节分布, 以及波高和周期的均值与极值; 再对波高和周期的联合分布、平均持续时间与波高的关系进行了探讨; 最后选取一典型台风浪过程进行分析。结果表明本海域以 S 向浪出现频率最高, 为 14.3%, 其次是 N 向和 NNE 向, 频率均为 11.9%; 强浪向为 S 向和 N 向, 浪向分布与东方市所处地理位置相符。该海域以有效波高小于 1.3 m 的小浪和轻浪为主, 年出现频率为 97.6%, 4 级中浪占 2.22%, 5 级大浪仅占 0.12%, 只有在夏、秋季台风过境时才出现。累年有效波高平均值为 0.49 m, 最大值为 3.2 m; 最大波高为 5.6 m, 最大波高平均值为 2.5 m; 平均有效周期为 4.2 s, 最大有效波周期为 9.5 s。有效波高在 1.0 m 以下, 且周期在 4~5 s 的波浪出现频率最大, 为 80.5%。强台风“海燕”影响期间, 波高具有明显的滞后特征, 5 级大浪持续了 10 h, 浪向与风向基本一致, 说明台风产生的波浪是以风浪为主, 最大波高均出现于偏 S 向。通过波谱分析, 台风海浪的波型变化规律为混合浪-风浪-混合浪。

关键词: 东方市; SZF 波浪浮标; 波浪特征; 台风浪; 波浪谱

中图分类号: P731.22 文献标识码: A 文章编号: 1000-3096(2023)2-0031-16

DOI: 10.11759/hyxx20220919001

东方市位于海南省的西南部, 西濒北部湾。东方市八所镇位于海南省西部工业走廊的核心区域, 临港经济发展迅速, 各类船舶航行频繁。东方市的港区有八所老港区、八所化工危险品港区、华能东方电厂配套煤码头港区、八所原油码头和八所中心渔港。八所港为国家一级口岸, 是海南大型的港口之一。由于东方市的港口所处地理位置开阔, 四周无遮蔽, 海面在风的作用下容易形成风浪^[1], 台风或冷空气引发的灾害性海浪, 对海岸防护、港口码头、防波堤及海上作业等构成巨大威胁, 曾引发多起船舶沉没的安全事故^[1]。近年来已有学者对海南岛部分近岸海域波浪要素特征做了一些研究。冯兴如等^[2]利用一整年的海浪观测资料, 分析了东方近岸海浪的时间变化特征; 陈三江等^[3]利用多年的实测资料, 阐明了莺歌海附近海域海浪的特点及变化规律; 苏志等^[4]对北部湾海域的灾害性海浪特征进行了分析; 李淑江等^[5]基于 2012—2013 年海南岛东南近岸整年海浪观测资料, 初步分析了观测海域的海浪季节变化和统计特征, 并研究了台风期间的波浪发展特征。但到目前, 利用 10 a 以上连续完整的波浪自动观测数据对东方市近岸海域海浪基本要

素进行全面统计分析的文献还未见报道。为保证波浪要素特征数据分析的一致性, 采用东方海洋环境监测站使用的同型号的 SZF 型波浪浮标, 获取长度为 11 a 的观测数据, 通过研究分析东方市近岸海域波浪的基本特征, 揭示其波浪常年变化的基本规律, 并选取一个典型的台风浪过程进行分析, 研究台风过程中该海域海浪的变化特征。

1 波浪数据观测

波浪测点位于东方市八所老港区西南方 2.4 km 处(19°05.522'N, 108°36.143'E), 水深 11~14 m, 测点海域开阔, 周围无暗礁、岛屿或人工建筑物等障碍物, 具有良好的代表性, 观测位置见图 1 所示。

SZF 型波浪浮标由中国海洋大学生产, 广泛应用于海洋台站的波浪观测, 具有能自动、定点、定时(或连续)对波浪要素进行测量的小型浮标自动测量

收稿日期: 2022-09-19; 修回日期: 2022-10-10

基金项目: 海南省自然科学基金项目(419QN380); 海南省自然科学基金联合项目(420LH022)

[Foundation: Hainan Provincial Natural Science Foundation, No. 419QN380; Hainan Provincial Natural Science Foundation Union Fund, No. 420LH022]

作者简介: 王小红(1973—), 男, 海南临高人, 工程师, 长期从事海洋观测与监测, E-mail: wxh67138@139.com

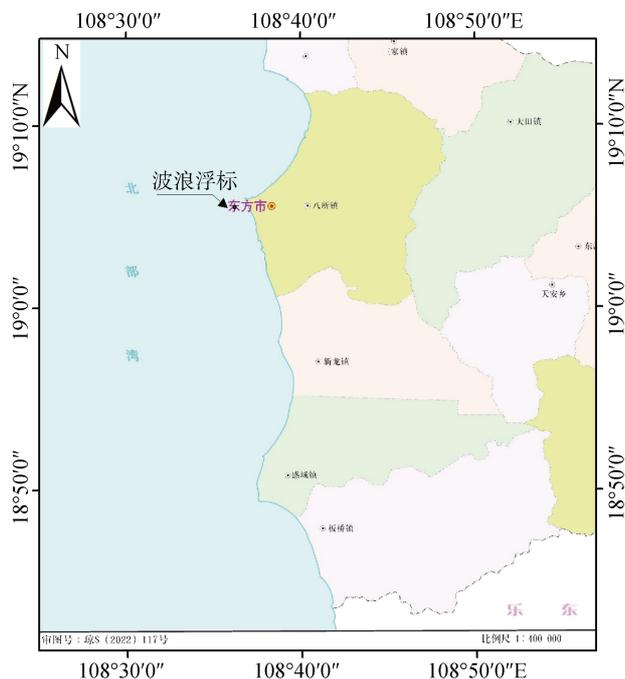


图1 波浪浮标观测位置(审图号: 琼S(2022)117号)

Fig. 1 Observation position of wave buoy

系统,能测量海浪的波高、周期、波向。采用重力加速度原理进行波高和周期的测量,波向是通过波高倾斜传感器及方位传感器进行测量^[6]。波高测量范围是0.3~20 m,准确度为 $\pm(0.3+5\% \times \text{测量值})$ m;波向测量范围 $0^\circ \sim 360^\circ$,准确度为 $\pm 10^\circ$;周期测量范围2~20 s,准确度为 ± 0.5 s。SZF型浮标采用单点锚泊方式系留浮标,浮标工作方式为每隔3 h测量一次,也就是每天02、05、08、11、14、17、20、23时(北京时间)进行测量,设定当 $H_{1/10} \geq 1.5$ m时加密到1 h观测一次。浮标正点前21 min开始通电,波浪传感器稳定3 min后开始观测,采样间隔为0.5 s,数据采集时间为17 min,连续记录波数为200个左右。浮标测得的波浪各特征值实时通过GSM短信传输至东方站上的岸站数据接收机。

东方海洋环境监测站于1969年5月开始进行波浪观测,早期用的是人工HAB型岸用光学测波仪进行观测波浪,自2002年6月开始配备了SZF型波浪浮标使用至今。本文采用东方站2010年至2020年共计11 a的SZF型波浪浮标观测数据,该时段数据经过三级审核,进行了严格质量控制,资料质量可靠,完整性、代表性较好,能全面反映该海域真实波浪变化规律。

2 波浪要素统计分析

本论文根据11 a的波浪实测数据,按16个方位

计算统计了各波级^[7]出现的频率、有效波高($H_{1/3}$)平均值、有效周期($T_{1/3}$)平均值、最大 $H_{1/3}$ 和最大波高(H_{\max}),并绘出了春、夏、秋、冬及累年各向浪各级波高出现频率玫瑰图(图2),其中3—5月为春季,6—8月为夏季,9—11月为秋季,12月—次年2月为冬季。

2.1 波向及各级波高的季节分布

图2(a)为累年春季各向各级波高出现频率,1级波高的频率为0.02%,2级和3级波高出现频率相当,分别为48.7%和50.9%,4级波高只占0.37%,5级波高没有出现。由此可见,春季的常见波是轻浪和小浪,占99.6%。春季是季风转换季节,冬季的偏北风逐渐减弱,偏南风逐渐增多,常浪向为S,频率为16.9%;其次是N向和SW向,频率均为12.8%;SSW向第三,频率为10.3%。强浪向为NNE向,4级波高出现频率0.24%;次强浪向分布于N向,4级波高出现频率为0.05%;第三强浪向为S向,4级波高出现频率0.03%。

图2(b)为累年夏季各向各级波高出现频率,1级波高的频率为0.05%,3级波高占优,为53.5%,其次是2级波高,出现频率为41.1%,4级波高只占5.23%,5级波高出现次数很少,频率仅为0.16%。由此可见,夏季以轻浪为多,其次是小浪,两者占94.6%。夏季盛行西南季风,相应的S浪向占绝对优势,频率为31.1%;SW向次之,频率为16.9%;SSW向第三,频率为13.9%。夏季强浪向主要是S向,4—5级波高出现频率为1.8%;其次是SW向,4—5级波高出现频率为0.96%;第三强浪向为SSW,频率为0.75%。

图2(c)为累年秋季各向各级波高出现频率,1级波高的频率为0.17%,2级波高出现频率最大,为64.6%,其次是3级波高,出现频率为33.1%,4级波高只占1.89%,5级波高仅为0.30%。由此可见,秋季主要是以小浪为主,当有台风影响时才会出现中到大浪。秋季常浪向为NNE向,频率为17.8%;其次是N向,频率为13.7%;NE向第三,频率为11.9%。强浪向主要表现为N向,4—5级波高出现频率为0.33%;次强浪向为NW向,4—5级波高出现频率分别为0.16%;第三强浪向为SSW向。

累年冬季各向各级波高出现频率见图2(d),1级波高的频率为0.06%,2级出现频率最多,为53.1%,其次是3级,频率为45.4%,4级波高出现较少,仅占1.41%,5级波高未见。由此可见,冬季的常见波为小

到轻浪, 占 98.5%。冬季盛行东北季风, 常浪向为 NNE 向, 频率为 20.8%; 其次是 N 向, 频率为 18.4%; 第三是 NE 向, 频率为 11.6%。冬季强浪向为 NNE

向, 4 级波高频率为 0.64%; 次强浪向为 NE 向, 4 级波高频率为 0.38%; 第三强浪向为 N 向, 4 级波高频率为 0.16%。

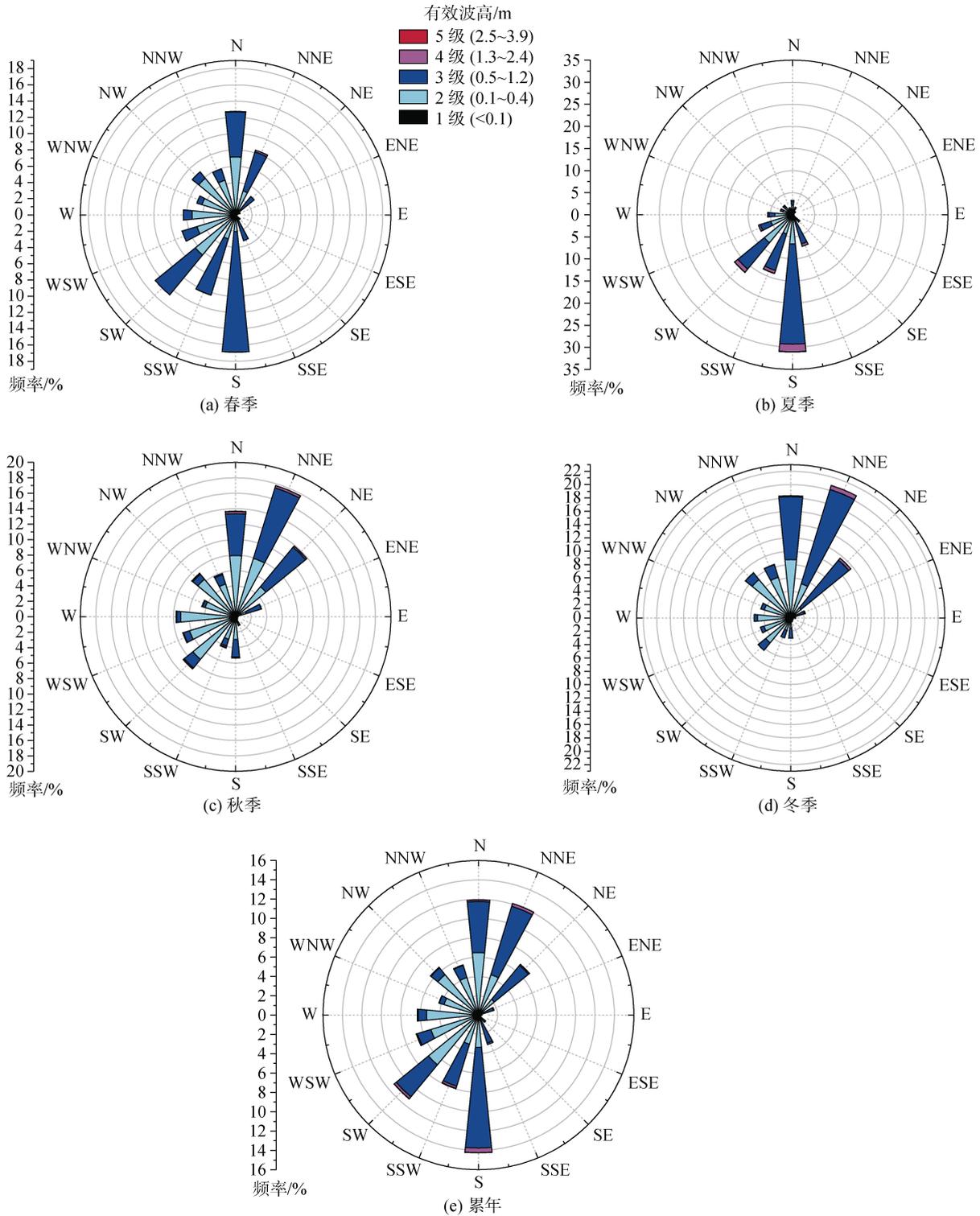


图 2 各季及累年各向浪各级波高出现频率玫瑰图

Fig. 2 Rose map of the wave frequency of each wave class in different directions in four seasons and years

累年各向各级波高出现频率见图 2(e), 1 级波高的频率为 0.06%, 最多是 2 级波高, 频率占 51.6%, 其次是 3 级波高, 出现频率为 46.0%, 4 级波高占 2.22%, 5 级波高占 0.12%。由此可见, 本海域以有效波高小于 1.3 m 的小浪和轻浪为主, 年出现频率为 97.6%。有效波高超过 2.5 m 的波很少见, 出现频率仅为 0.12%, 只有在夏、秋季台风过境时才出现, 秋季多于夏季。累年以 S 向浪出现频率最高, 为 14.3%; 其次是 N 向和 NNE 向, 频率均为 11.9%; 第三是 SW 向, 频率为 11.3%。这与童朝锋等^[8]分析的基本一致, 常浪向与常风向也基本相吻合^[9]。累年强浪向为 S

向, 4—5 级波高出现频率为 0.50%; 次强浪向为 N 向, 4—5 级波高出现频率 0.16%; 第三强浪向为 SSW 向。在 E-ESE 范围的波浪很少, 出现频率均不足 0.5%, 与海南省海岛资源综合调查报告^[10]描述的基本相符。浪向分布与东方市所处地理位置相符。

春、夏季常浪向均为 S 向, 秋、冬季常浪向一样, 都为 NNE 向。冬、春季的强浪向为 NNE 向, 夏季的强浪向为 S 向, 秋季的强浪向为 N 向。各季常、强浪向统计见表 1。从全年来看, 秋季和夏季会出现个别较大海浪, 主要是这两个季节台风出现最多, 对海上作业会有影响。

表 1 各季常、强浪向统计表

Tab. 1 Statistical table of frequent wave direction and strong wave direction in each season

项目	春季	夏季	秋季	冬季	累年
常浪向	S	S	NNE	NNE	S
频率/%	16.9	31.1	17.8	20.8	14.3
次常浪向	SW, N	SW	N	N	N, NNE
频率/%	12.8	16.9	13.7	18.4	11.9
强浪向	NNE	S	N	NNE	S
4—5 级频率/%	0.24	1.8	0.33	0.64	0.50
最大 $H_{1/3}$ /m	1.7	2.6	3.0	1.8	2.9
次强浪向	N	SW	NW	NE	N
4—5 级频率/%	0.05	0.96	0.16	0.38	0.16
最大 $H_{1/3}$ /m	1.6	2.7	3.2	1.6	3.0

2.2 海浪要素的均值与极值

2.2.1 均值分布

图 3 为累年各季各向 $H_{1/3}$ 平均值和 $T_{1/3}$ 平均值的玫瑰图。春季各向 $H_{1/3}$ 平均值在 0.28~0.68 m, 平均

0.48 m, SE-S 向较大, W-NW 向和 E 向较小; 各向 $T_{1/3}$ 平均值在 3.9~4.5 s, 平均 4.16 s, NE 向和 SE 向最大, W-NW 向最小。

夏季各向 $H_{1/3}$ 平均值在 0.32~0.70 m, 平均 0.49 m,

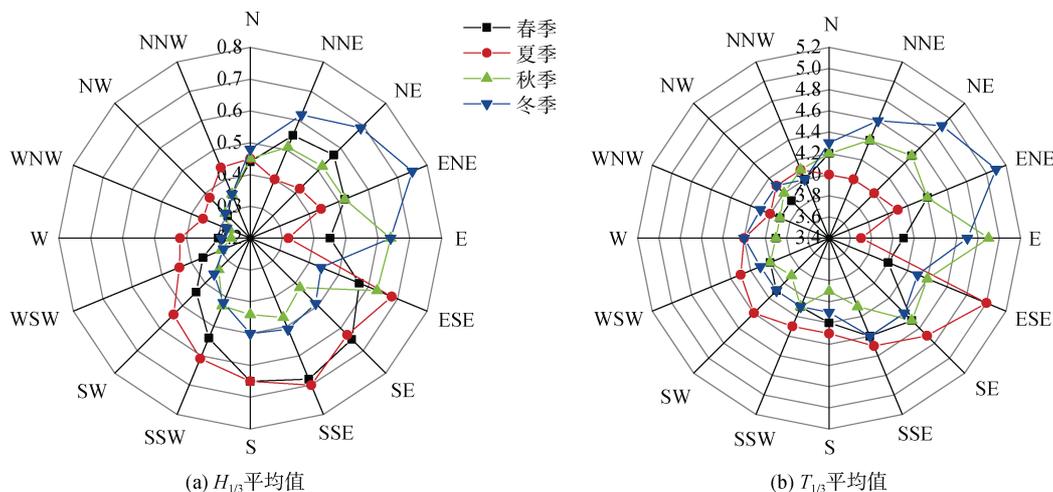


图 3 累年各季各向 $H_{1/3}$ 平均值和 $T_{1/3}$ 平均值玫瑰图

Fig. 3 Rose map of $H_{1/3}$ average value and $T_{1/3}$ average value in all directions in all seasons over the years

ESE-S向较大, WNW-NW向和E向较小; 各向 $T_{1/3}$ 平均值在3.7~5.0 s, 平均4.23 s, ESE向最大, E向最小。

秋季各向 $H_{1/3}$ 平均值为0.26~0.64 m, 平均0.43 m, E-ESE向较大, WSW-NW向较小; 各向 $T_{1/3}$ 平均值在3.9~4.9 s, 平均4.20 s, E向最大, 偏W向最小。

冬季各向 $H_{1/3}$ 平均值为0.28~0.75 m, 平均0.46 m, NE-ESE向较大, WSW-NW向较小; 各向 $T_{1/3}$ 平均值在4.0~5.1 s, 平均4.34 s, ENE向最大, NNW向最小。

各季 $H_{1/3}$ 平均值都是NE-S向较大, W-NW向较小。夏季 $H_{1/3}$ 平均值最大, 秋季最小。

累年各向 $H_{1/3}$ 平均值在0.29~0.66 m, 平均0.49 m, SSE向最大, WNW向最小。NE-W向都较大, W-NW向都较小。各向 $T_{1/3}$ 平均值介于4.0~4.7 s, 平均4.32 s, 最大值出现在NE向, 最小值出现在W-NW向, 偏东向较大。

图4已给出了累年各月 $H_{1/3}$ 平均值与 $T_{1/3}$ 平均值, 可以看出, 本海域累年各月 $H_{1/3}$ 平均值为0.49 m, 各月介于0.38~0.61 m, 6月最大, 9月最小。累年各月 $T_{1/3}$ 平均值都很接近, 介于4.0~4.5 s, 12月最大, 5月、9月最小。

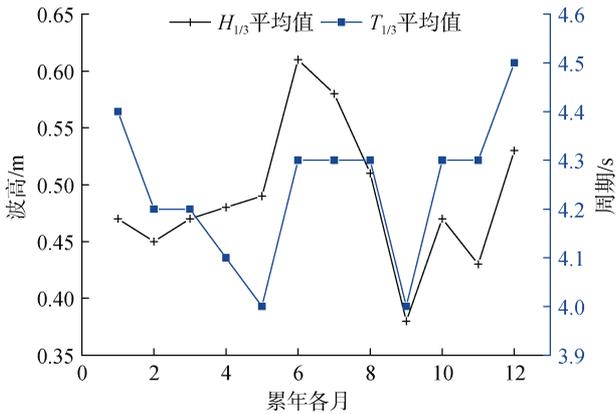


图4 累年各月 $H_{1/3}$ 平均值与 $T_{1/3}$ 平均值

Fig. 4 $H_{1/3}$ average and $T_{1/3}$ average of months in years

图5给出了各年 $H_{1/3}$ 平均值、 $T_{1/3}$ 平均值和 H_{max} 平均值, 从图中可以看出, 本海域各年 $H_{1/3}$ 平均值介于0.41~0.53 m, 平均0.49 m, 2015年和2020年最大, 2017年最小。各年 H_{max} 平均值为2.5 m, 每年的 H_{max} 平均值很接近, 其中2011年最大, 为2.7 m, 2017年最小, 为1.9 m。各年 $T_{1/3}$ 均值非常接近, 介于4.1~4.4 s, 平均4.2 s, 2010年和2011年最小, 2019年最大。

2.2.2 极值分布

图6给出累年及各季各向的最大 $H_{1/3}$ 和 H_{max} , 从

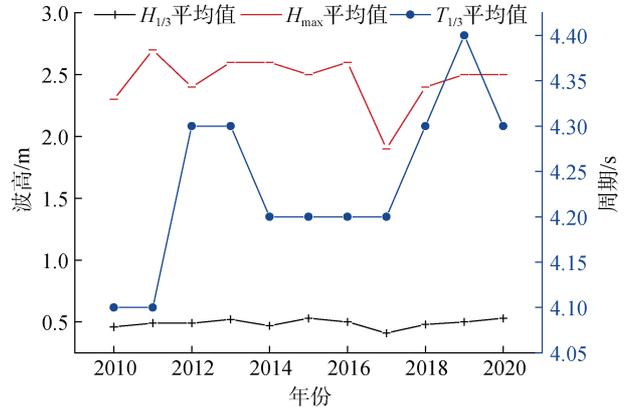


图5 各年 $H_{1/3}$ 平均值、 $T_{1/3}$ 平均值和 H_{max} 平均值

Fig. 5 $H_{1/3}$ average, $T_{1/3}$ average and H_{max} average in each year

中可看出, 秋季各向最大 $H_{1/3}$ 最大, 出现较大波高的方向有S、SSW、SW、NW、N。最大值出现在NW向, 为3.2 m, 第二是N向, 为3.0 m, E向最小, 为1.2 m。其次是夏季, SSW向和SW向最大 $H_{1/3}$ 最大, 为2.7 m, E向最小为0.6 m。冬、春季各向, 最大 $H_{1/3}$ 基本一样, 在0.8~1.8 m范围内, 都是NNE向最大, ESE向最小。

各向 H_{max} 出现在夏、秋两季, 夏季SSW向最大, 为5.6 m, 秋季WNW向和NW向最大, 都是4.9 m; 冬、春季最小, 范围在1.2~3.5 m, 冬季NNE向最大, 为3.5 m, 春季S向最大, 为3.3 m。

由图6可看出, 累年与秋季的图形基本重合, 各向最大 $H_{1/3}$ 出现在NW向, 为3.2 m, 其次是N向, 为3.0 m, 最小值出现在E向, 为1.4 m; 累年各向 H_{max} 出现在SSW向, 为5.6 m, 其次是S向, 为5.3 m, 最小是E向, 为2.7 m。E向是离岸浪, 所以波高最小。

累年各月最大 $H_{1/3}$ 、 H_{max} 和最大 $T_{1/3}$ 如图7所示。由图7可看出, 本海域累年各月最大 $H_{1/3}$ 的最大值为3.2 m, 出现在9月, 最小值在5月, 为1.3 m。累年各月 H_{max} 的最大值为5.6 m, 在8月出现, 其次是6月, 为5.3 m, H_{max} 最小值为2.8 m, 在2月。累年各月最大 $T_{1/3}$ 的最大值为9.5 s, 出现在1、7、10、11月, 5月是最小值, 为6.5 s。

图8绘出了最大 $H_{1/3}$ 、 H_{max} 和最大 $T_{1/3}$ 的年变化, 从中可看出, 本海域各年最大 $H_{1/3}$ 的最大值为2011年的3.2 m, 最小值为2017年的1.5 m。各年 H_{max} , 其最大值为2016年(5.6 m), 其次是2015年(5.3 m), H_{max} 最小值是2017年的2.7 m。各年最大 $T_{1/3}$, 其最大值为9.5 s, 分别出现在2012—2015年和2019年; 其最小值为7.5 s, 出现在2020年。

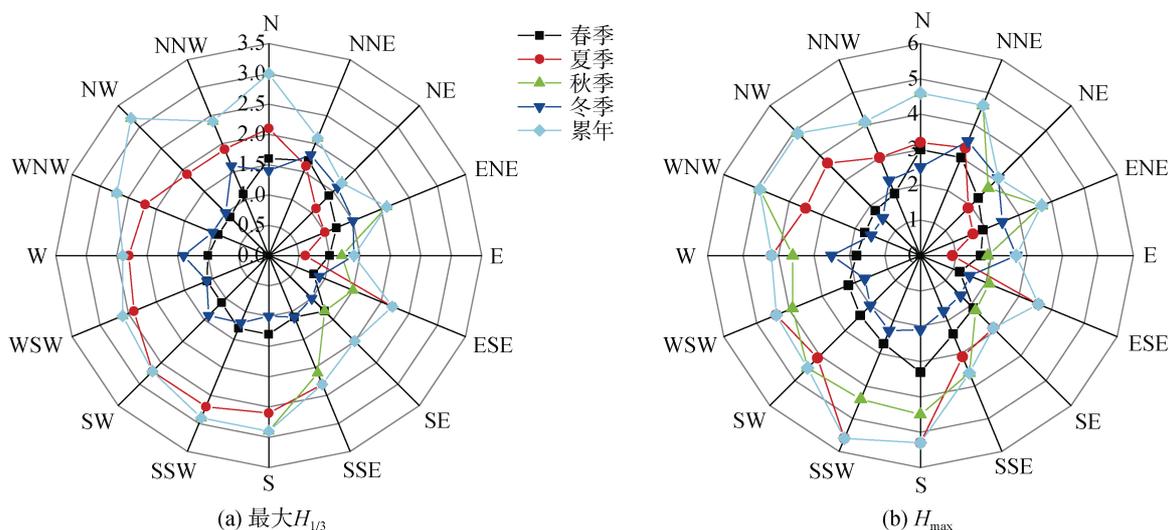


图6 累年及各季各向最大 $H_{1/3}$ 和 H_{max} 玫瑰图

Fig. 6 Rose map of maximum $H_{1/3}$ and H_{max} in all seasons and directions over the years

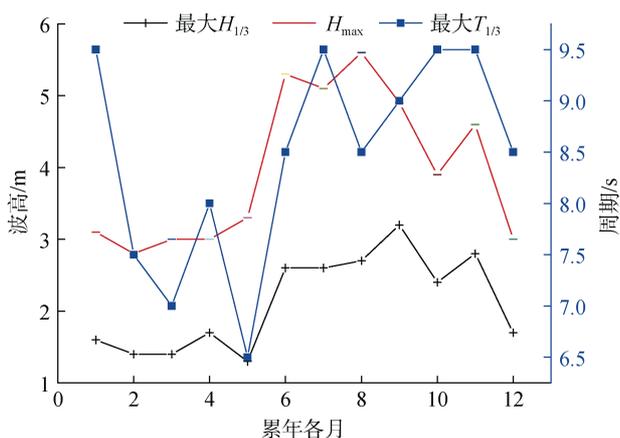


图7 累年各月最大 $H_{1/3}$ 、 H_{max} 和最大 $T_{1/3}$

Fig. 7 Maximum $H_{1/3}$, H_{max} and maximum $T_{1/3}$ in each month of over the years

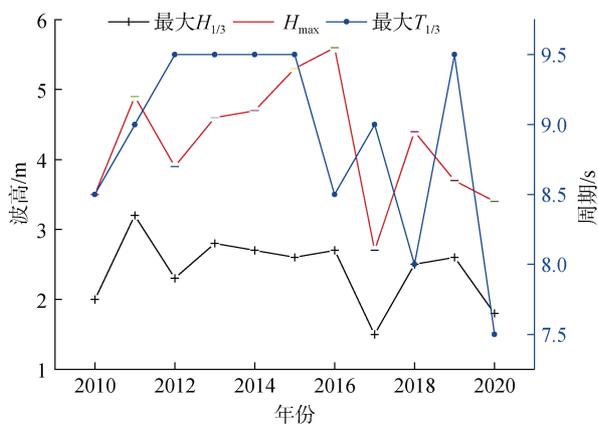


图8 各年最大 $H_{1/3}$ 、 H_{max} 和最大 $T_{1/3}$

Fig. 8 Maximum $H_{1/3}$, H_{max} and maximum $T_{1/3}$ in each year

2.3 波高和周期联合分布

本文从波高与周期联合出现的频率出发, 探讨本海域波高和周期的联合分布。利用 11 a 的资料, 实测有效波高以 0.5 m, 有效波周期以 1.0 s 为间隔, 统计它们于每一间隔内出现的频率, 以 10^{-3} 单位表示, 绘制成波高和周期联合分布频率图(图 9)。有效波高在 1.0 m 以下, 且周期在 4~5 s 的波浪出现频率最大, 为 80.5%; 其次是波高 0.5 m 以下, 且周期为 3 s 的频率为 8.4%; 第三是波高 1.5 m 以下, 且周期为 6 s 的频率为 8.2%。有效波高在 2.5 m 以上, 周期在 8 s 以上的波浪所占的比例极小。

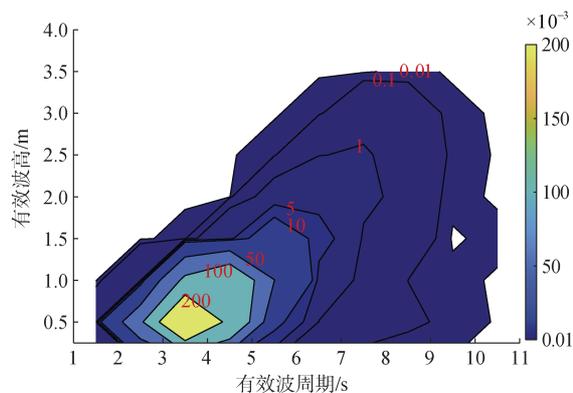


图9 累年波高和周期联合分布频率图

Fig. 9 Joint distribution frequency diagram of wave height and period over the years

有研究表明, 波高和周期的对应关系, 并非完全独立, 它们之间有一定的相关性, 平均波高与平均周

期的平方之间,存在着良好的线性关系^[11]: $\bar{H} = a\bar{T}^2$, 不同海域 a 值不尽相同,如 Bretschneider 提出 a 值为 0.058 5, 1965 年海狼会战求得 0.038, 1978 年莆田试验站为 0.051, 1979 年黄海实测资料求得 0.025, 连云港地区的观测资料求得 0.041^[11]。石臼港由实测资料得 0.023^[12], 黄河口海域由风浪观测资料统计得 0.033 8^[13]。本文根据 11 a 的浮标实测资料, 讨论不同波级情况下平均波高与平均周期的平方之间的线

性关系, 通过计算统计, 系数 a 值、系数标准差及相关系数列于表 2, 表中平均值表示各年的平均, 范围表示各年统计数据中的最小值至最大值。由表 2 可知, 本海域按不同波级平均波高和平均周期的关系式如下:

$$a = \frac{\bar{H}}{\bar{T}^2} = \begin{cases} 0.022 & \text{(不分级)} \\ 0.014 & \text{(2级波高)} \\ 0.030 & \text{(3级波高)} \\ 0.038 & \text{(4—5级波高)} \end{cases} \quad (1)$$

表 2 各波级系数 a 值统计表

Tab. 2 Statistical table of coefficient a value of each wave level

波级	系数 a		系数标准差		相关系数	
	平均值	范围	平均值	范围	平均值	范围
2 级	0.014	0.013~0.016	0.006 6	0.006 3~0.007 4	0.11	0.06~0.17
3 级	0.030	0.028~0.032	0.007 8	0.007 4~0.008 7	0.40	0.32~0.51
4—5 级	0.038	0.035~0.042	0.006 6	0.004 4~0.011 0	0.56	0.11~0.91
不分级	0.022	0.019~0.025	0.010 9	0.010 3~0.011 9	0.59	0.40~0.70

波级不同, 系数 a 值也不同, a 值随着波级的增大也加大, 相关系数也变大。说明平均波高与平均周期之间的关系分波级表达更为符合, 波高越大, 相关性越好。

2.4 平均持续时间

波浪的持续时间是指大于等于某设定波高的连续延时时, 平均持续时间是指设定波高的各次持续时间的均值^[14]。本文采用 1975 年 Lawson 和 Abernethy^[15] 提出的指数函数:

$$D = \alpha H^\beta \quad (2)$$

式(2)用于研究本海域平均持续时间与波高的关系, 式中 H 为指定波高值, 单位为 m; D 为大于等于 H 的平均持续时间, 单位为 d; α 与 β 为两个参数。不同海域的参数都不相同。Lawson 和 Abernethy 根据澳大利亚东南海岸的波高观测资料得 $\alpha=7, \beta=-2$; 李淑江等^[5]根据海南岛东南近岸 1 a 的观测资料计算出 $\alpha=1.67, \beta=-2.09$; 冯兴如等^[2]利用一整年的海南西南海域观测资料拟合出 $\alpha=0.35, \beta=-1.83$ 。我们基于东方海洋环境监测站 2010—2020 年共 11 a 的观测数据, 统计计算出了海域有效波高对应的平均持续时间, 并绘出了平均持续时间与有效波高的关系(图 10)。从图 10 可以看出拟合出 2 条曲线, 当有效波高小于 2.6 m 时, 拟合得到 $\alpha=0.45, \beta=-1.07$, 表现出平均持续时间随着波高的增大而缓慢减少, 符合 Lawson 和 Abernethy 提出的指数衰减规律; 当有效波高大于 2.9 m 时,

拟合得到 $\alpha=5.61 \times 10^7, \beta=-17.93$, 表现出平均持续时间随着波高的增大而迅速减少, 这说明了本海域出现 3.0 m 以上的有效波高极少。当有效波高在 2.6~2.9 m 时, 出现了平均持续时间随着波高的增大而增大的现象, 这主要是因为在这个范围内随着波高的加大, 出现的次数减少, 导致平均持续时间增大。

3 研究方法比较分析

本文与参考文献[2]研究方法主要有两大不同点: 其一, 采用的波浪观测仪器不同, 本文采用的是基于重力式加速度测量原理的波浪浮标, 文献[2]采用的是基于声学坐底式测波仪。波浪浮标可适用于从浅海到深海。声学坐底式测波仪一般适用于近海, 目前存在遇到大浪测量误差大的问题, 主要原因是高海况下波浪破碎产生浪花同时水中产生气泡, 声波遇到气泡和破碎波会产生反射波。如文献[2]2014 年 9 月与 2015 年 6 月测得最大 $H_{1/3}$ 分别为 3.48 m 和 4.03 m, 本文同时间的最大 $H_{1/3}$ 分别为 2.7 m 和 2.6 m。目前国家海洋局海洋台站的波浪观测主要采用波浪浮标。

其二, 采用的波浪数据样本、长度不同, 导致结果不同。如文献[2]的结论为冬季波高较大, 秋季最小, 常浪向为 SSW 方向, 强浪向为 WSW 向, 而本文的结论为夏季有效波高平均值最大, 秋季最小, 常浪向为 S 向, 强浪向为 S 向和 N 向, 与之有些差别,

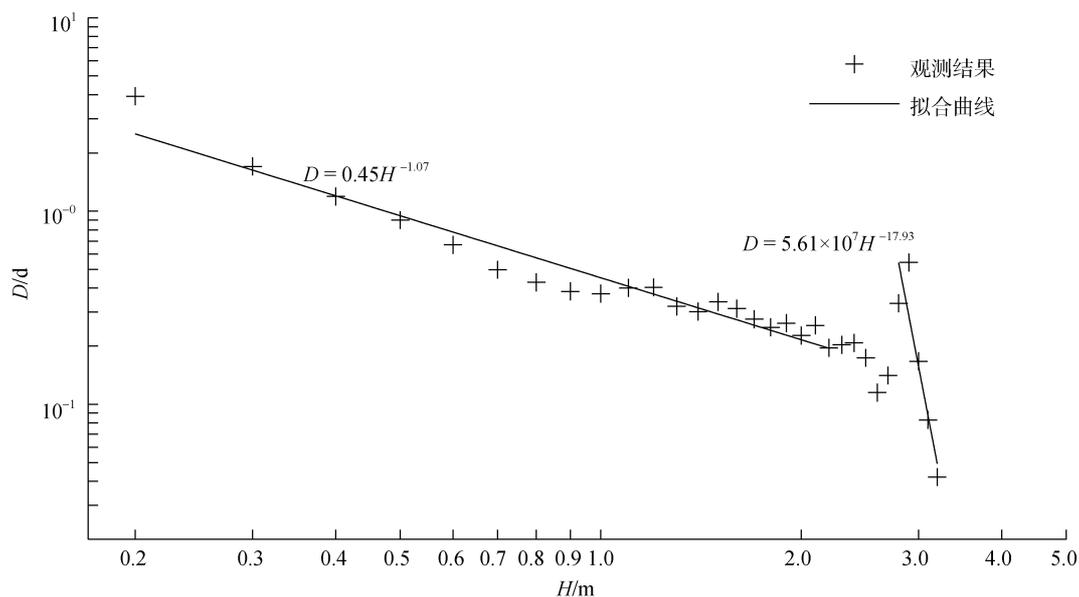


图 10 累年平均持续时间随波高的变化

Fig. 10 Variation of average duration with respect to wave height over the years

这主要是资料长短的差别。经统计，我们采用的 11 a 的资料，波高最大值出现在夏季最大的有 8 a，在冬季的有 2 a，在春季的有 1 a；最小值出现在秋季的有 7 a，在春季的有 3 a，在冬季的有 1 a。常浪向为 S 向的有 6 a，N 向的有 1 a，SW 向的有 2 a，NNE 向的有 2 a。强浪向为 S 向的有 6 a，N 向的有 1 a，SSW 向的有 1 a，NNE 向的有 2 a，SW 向的有 1 a。可见每年的最大 $H_{1/3}$ 、最大波高、常浪向、强浪向不完全一样。显然，长年的波浪资料能更加准确反映该海域的波浪变化特征。

4 台风浪过程分析

东方市每年都受到台风影响，图 8 中的各年最大 $H_{1/3}$ 和 H_{max} 都是台风引起的，根据每年最大 $H_{1/3}$ 对应的台风，统计 2010—2020 年的台风浪数据(表 3)。从表 3 可知台风影响的时间为 6—11 月，波向与风向基本一致，说明台风影响最大时以风浪为主，波向为偏 S 向居多；最大 $H_{1/3}$ 滞后于最大风速，一般为 1~6 h，台风强度越大，滞后时间越长，这说明风的动能需要一定的时间才能转化为波浪的势能；4 级以上波高持续时间在 23~39 h，波高的大小与台风的强度、距离均有关。东方市受台风影响最多年份是 2013 年，共受台风影响 9 次^[1]，其中台风“海燕”影响最大，本文选取该台风浪发生过程进行分析，以了解台风过程中该海域海浪的特征。

4.1 台风“海燕”概况

台风“海燕”于 2013 年 11 月 4 日在西北太平洋上生成，8 日 7 时以超强台风级别登陆菲律宾，登陆后向西北方向移动进入北部湾南部海面，10 日 15 时至 20 时，“海燕”以强台风级(42 m/s)擦过海南岛西南部沿海，后移入北部湾海面，11 日 5 时以台风级别在越南北部的广宁沿海一带登陆，11 日 20 时在南宁市境内减弱为热带低压。该台风给海南带来巨大人员受灾和经济损失，毁坏渔船 152 艘，损坏渔船 326 艘，死亡(含失踪)2 人，直接经济损失 4.60 亿元^[16]。

4.2 台风过程的波浪分析

图 11 为 2013 年 11 月最大波高及对应周期和有效波高及对应周期变化过程曲线。从海浪过程曲线可以看到，11 月波高均不大，而 11 月 11 日前后受台风影响时波高急剧加大。11 月 10 日 5 时台风距离测点 425 km，风速开始增加，测点处 10 min 平均风速 1.9 m/s，风向偏 E；波高渐渐增大，有效波高为 0.9 m，波向为 N。14 时台风距离测点 150 km，平均风速 6.2 m/s，风向偏 E；最大波高达到 4.6 m，有效波高为 1.8 m，波向 NNE。20 时台风距离测点较近，为 84 km，平均风速 9.3 m/s，风向 SE，最大波高达到 3.2 m，有效波高为 2.0 m，波向开始转为偏 S 向。23 时风速达到最大，平均风速 14.0 m/s，

表 3 2010—2020 年台风浪统计
Tab. 3 Statistical e of typhoon waves from 2010 to 2020

年份	台风名称	影响日期	最大 $H_{1/3}/m$	对应 $T_{1/3}/s$	出现时间 (北京时间)	对应 波向/ $(^\circ)$	对应 风向/ $(^\circ)$	对应风速 $(m\cdot s^{-1})$	最大风 风向/ $(^\circ)$	最大风速 $(m\cdot s^{-1})$	最大风时间 (北京时间)	4 级以上波高 持续时间/h	影响台风 级别	距台风 最小距离/km	台风相对 测点方位
2010	康森	07-17	2.0	8.0	14:00	180	184	10.7	196	19.5	12:52	27	11 级	25	W
2011	纳沙	09-30	3.2	8.5	02:00	315	274	8.9	306	15.8	20:08	31	12 级	177	NE
2012	山神	10-28	2.3	9.5	23:00	202	227	6.5	43	9.3	20:22	24	13 级	120	W
2013	海燕	11-11	2.8	9.0	05:00	202	211	6.8	176	14.0	22:48	28	13 级	60	W
2014	海鸥	09-16	2.7	9.0	19:00	180	223	5.9	318	20.5	12:18	34	13 级	190	NE
2015	鲸鱼	06-23	2.6	7.5	16:00	180	208	9.0	235	14.9	14:25	36	8 级	107	NE
2016	莎莉嘉	08-18	2.7	8.5	06:00	202	207	9.1	239	15.6	02:48	39	11 级	93	NE
2017	卡努	10-16	1.5	6.5	02:00	315	323	7.0	334	8.1	02:58	24	8 级	132	NE
2018	贝碧嘉	08-16	2.5	8.0	21:00	225	196	4.1	238	9.4	11:28	36	10 级	103	N
2019	木恩	07-03	2.6	9.5	20:00	180	160	5.8	164	9.0	19:00	23	8 级	12	N
2020	浪卡	10-14	1.8	7.5	01:00	315	326	11.9	312	14.9	01:31	26	8 级	65	N

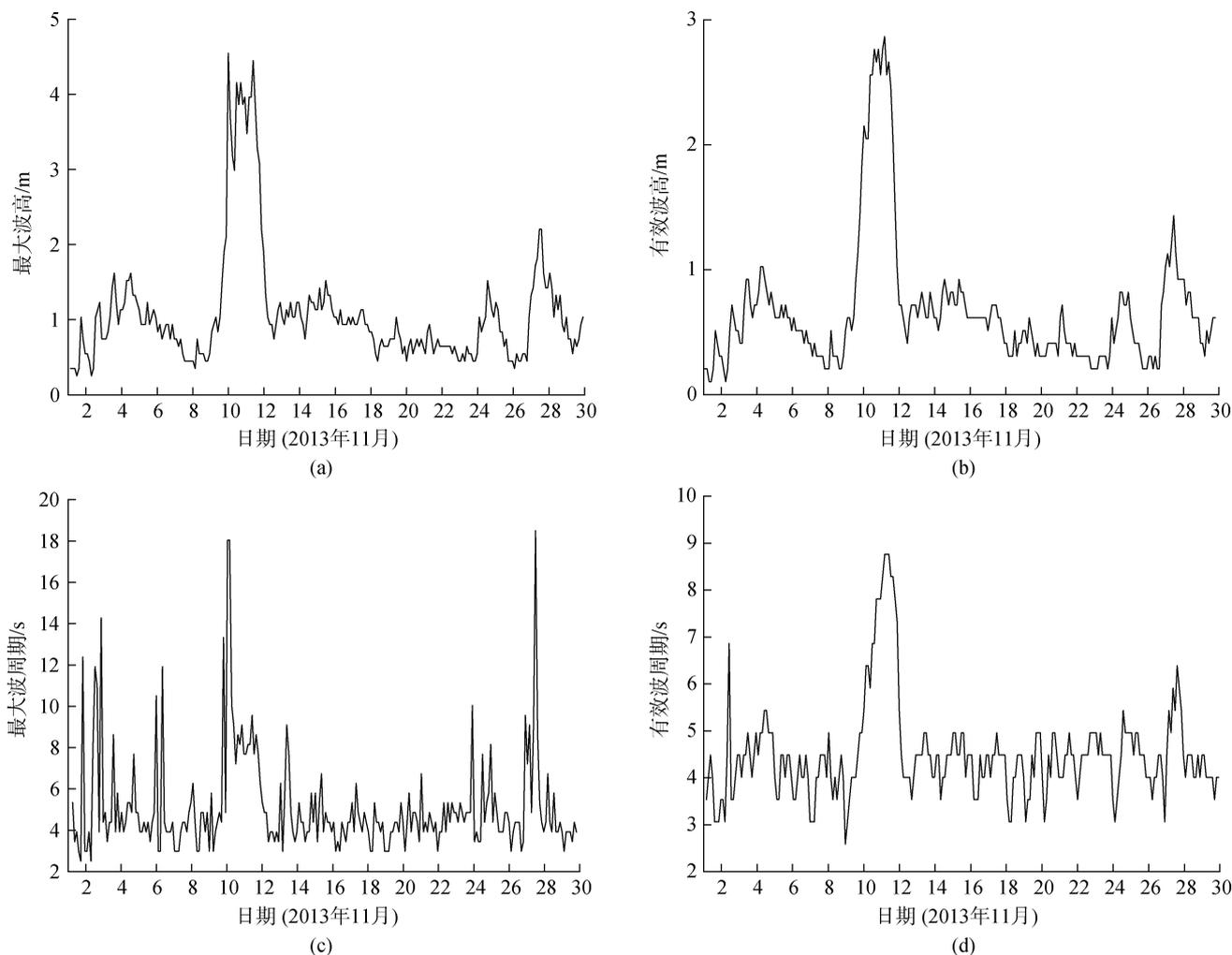


图 11 2013 年 11 月最大波高及对应周期和有效波高及对应周期变化过程曲线图

Fig. 11 Variation curves of maximum wave height and corresponding period and significant wave height and corresponding period in November 2013

极大风速 30.0 m/s, 波高达到了 5 级大浪。此后风速开始减弱, 但波高没有降低, 具有明显的滞后特征, 主要原因是台风强度强、影响范围广, 7 级风圈半径 320 km, 风区大、风时长, 再加上海浪始终受到来自于同一方向风应力的作用, 致使海浪发展充分, 波高持续不变。11 日 5 时台风登陆越南, 6 时有效波高达到峰值, 为 2.8 m, 对应周期 9.0 s; 最大波高为 4.0 m, 对应周期 8.5 s; 波向为 SSW 向。5 级大浪持续了 10 h, 到 11 日 11 时波高才渐渐减小, 20 时波高迅速回落, 最大波高仅为 1.3 m, 有效波高降至 0.7 m, 见图 12 所示。图 13 是台风期间风向和浪向对照图, 可见浪向与风向基本一致, 说明台风产生的波浪是以风浪为主^[17], 最大波高均出现于偏 S 向。

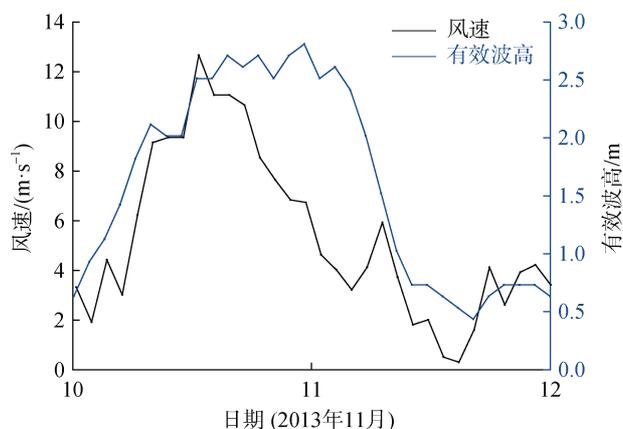


图 12 台风期间风速和波高对照图

Fig. 12 Comparison of wind speed and wave height during typhoon

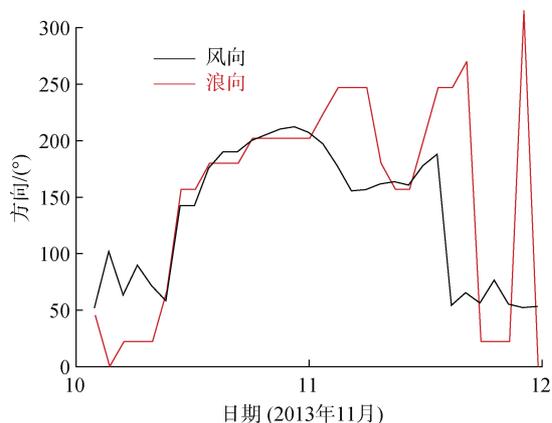


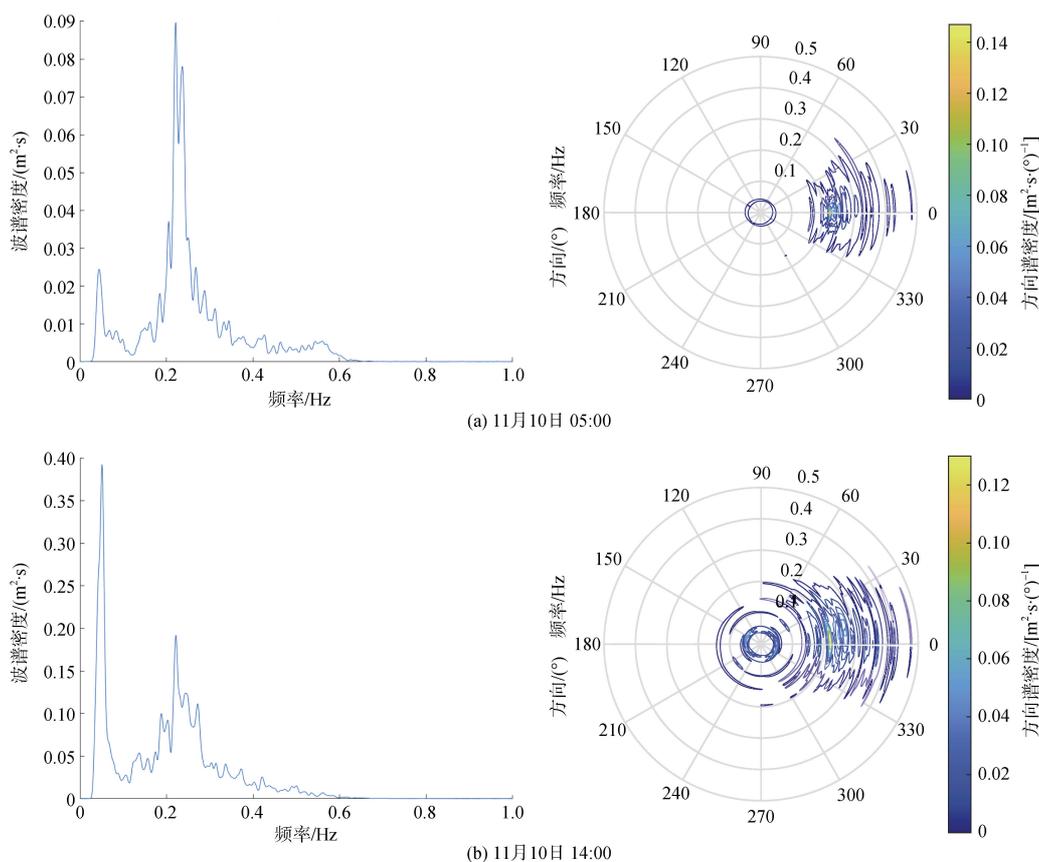
图 13 台风期间风向和浪向对照图

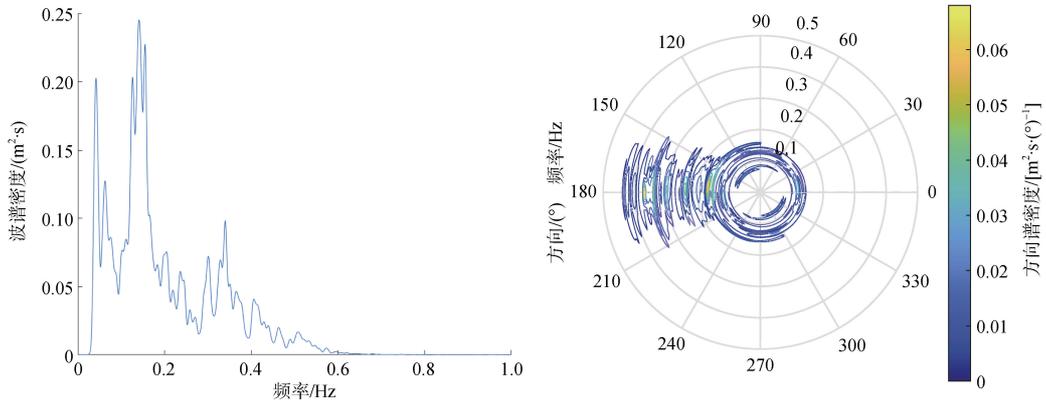
Fig. 13 Comparison of wind direction and wave direction during typhoon

4.3 台风浪谱分析

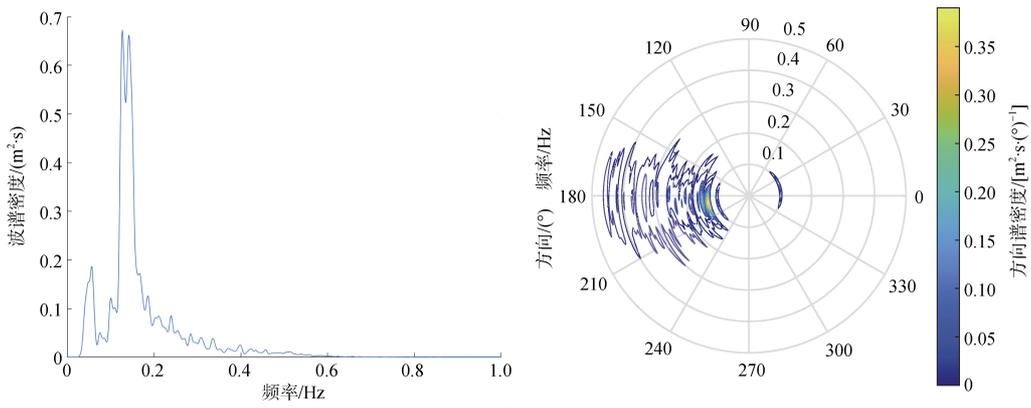
波浪谱反映了波浪内部各成分波能量相对于频率和方向的分布，用于分析波浪的成长耗散过程^[18]。图 14 给出了台风“海燕”来临前、影响最大、远离后 3 个阶段的实测二维海浪频谱和极坐标方向谱。图 14(a)、14(b)、14(c)、14(d)是处于成长阶段的波浪谱，10 日 5 时台风距离还较远，出现双峰谱，高频峰值比低频峰值大，说明是以风浪为主的混合浪，波谱方向为 N 向；

随着台风的移动，涌浪逐步增大，到 14 时出现低频峰值比高频峰值大的双峰谱，说明此时涌浪比风浪大，波谱方向有 NNE、NNW 和 SSE 向；随着台风逐渐靠近测点，高频谱峰值随着海浪的成长而增大，频率也逐渐向低频方向推移，越来越小，20 时台风离测点最近，高频峰值已超过了低频峰值，波谱方向为 SSE-SSW；11 日 0 时，高频峰值大大超过了低频峰值，谱形越来越陡，波谱方向为 S-SSW 向。图 14(e)、14(f)、14(g)、14(h)是处于高峰阶段的波浪谱，由图可见，4 时变成了单峰谱，波谱方向为 S-SSW 向；5 时、6 时、7 时是高而窄的单峰谱，6 时谱峰值达到最大，谱峰频率达到最小，波谱方向都为 S-SSW 向，说明此时波高最大，周期也最大，波形为风浪，这与张经汉的研究结果较为一致^[19]。图 14(i)、14(j)、14(k)是处于衰弱期的波浪谱，11 日 11 时台风逐渐减弱，谱峰逐渐降低，谱形逐渐展开，峰频率右移，波谱方向为 SW 向，这与成长期的波浪谱正好相反，到 17 时谱形变得越来越平缓，并伴有次峰出现，形成了双峰谱的混合浪，波谱方向为 S-WSW 向；20 时台风消失，主峰值降到最低，主峰频率范围越来越宽。以上分析表明，台风“海燕”3 个阶段海浪的波型变化规律为混合浪-风浪-混合浪，与一般台风浪波形的演变规律较为一致。

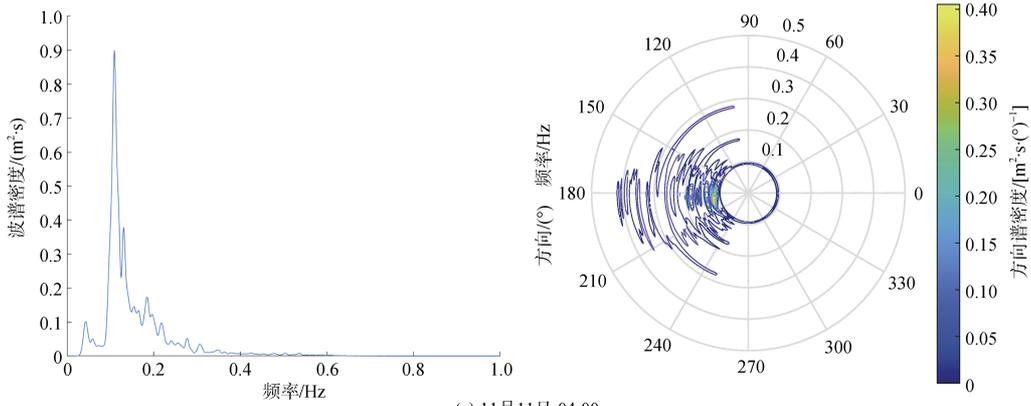




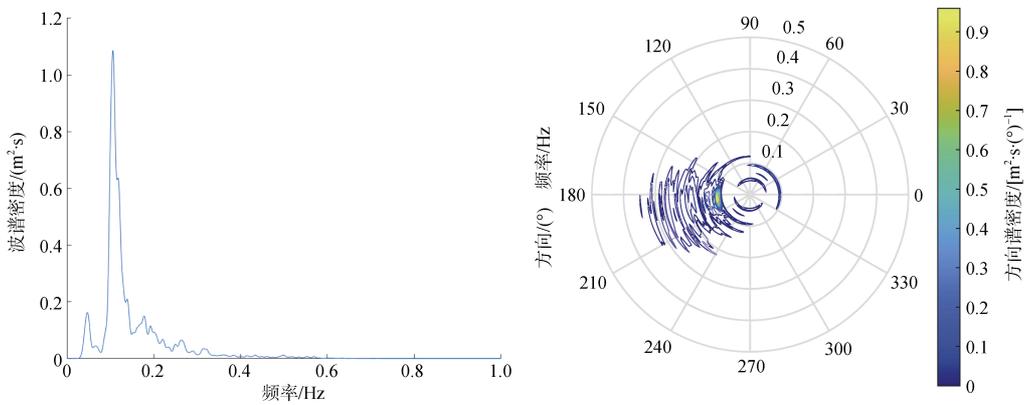
(c) 11月10日 20:00



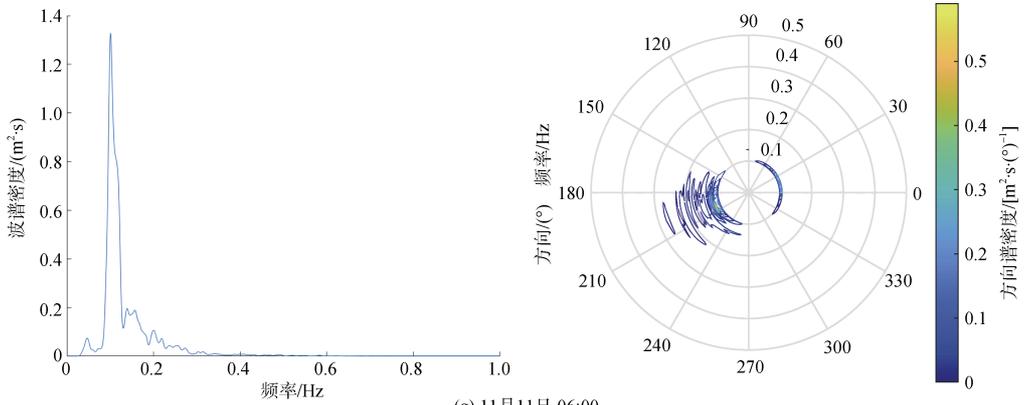
(d) 11月11日 00:00



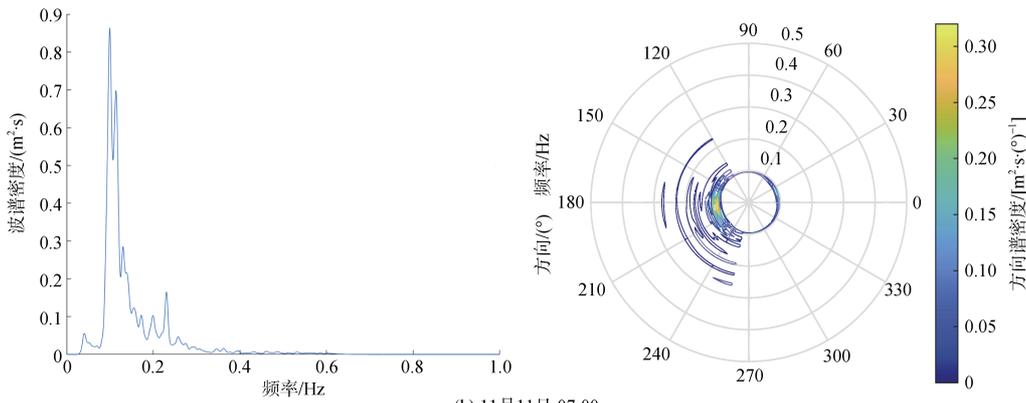
(e) 11月11日 04:00



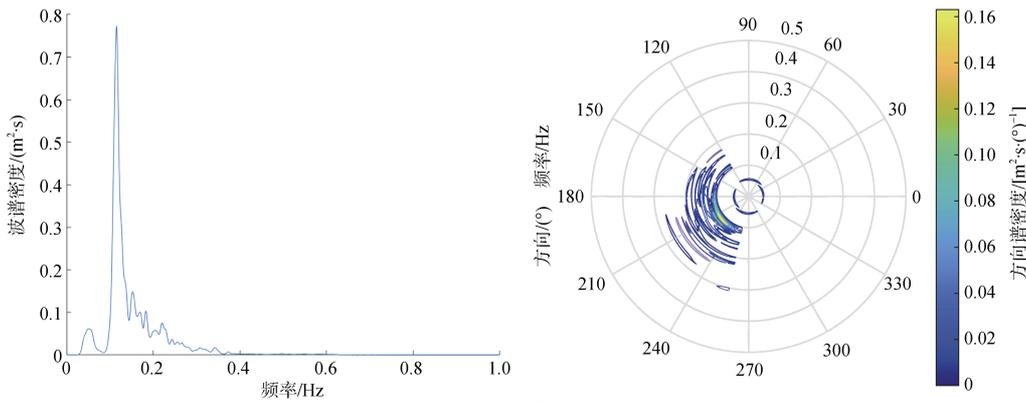
(f) 11月11日 05:00



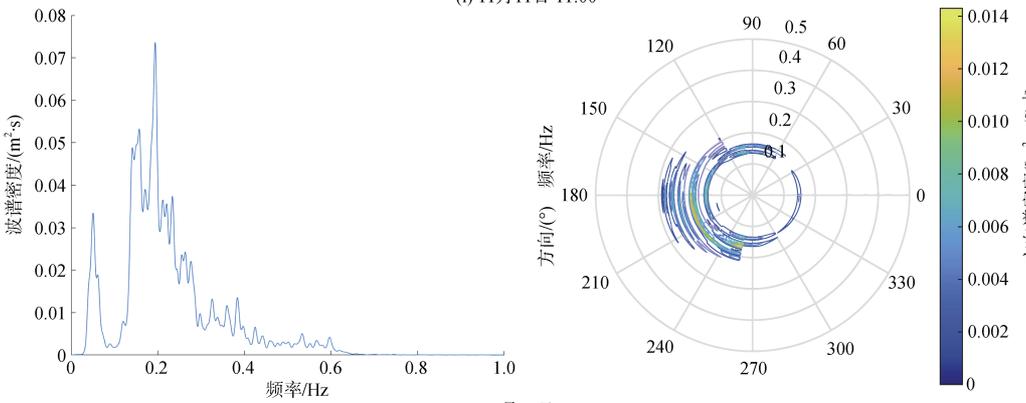
(g) 11月11日 06:00



(h) 11月11日 07:00



(i) 11月11日 11:00



(j) 11月11日 17:00

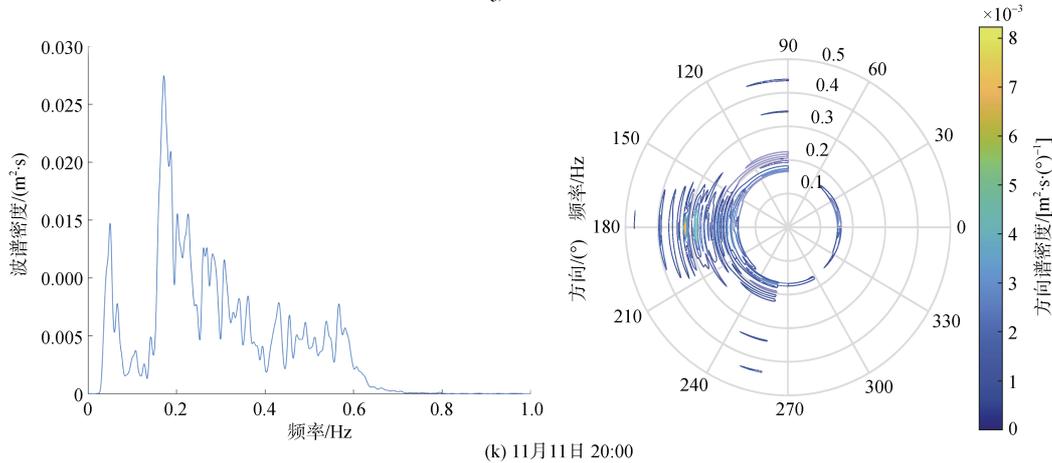


图 14 台风期间实测二维海浪频谱和极坐标方向谱

Fig. 14 Two-dimensional wave frequency spectrum and polar directional spectrum measured during typhoon

5 结论

本文根据东方海洋环境监测站 2010 年至 2020 年共计 11 a 的 SZF 型波浪浮标观测数据, 对东方市近岸海域波浪基本特征进行了综合分析, 并选取一个台风浪过程进行研究。主要结论如下:

(1)本海域以 S 向浪出现频率最高, 为 14.3%, 其次是 N 向和 NNE 向, 频率均为 11.9%; 强浪向为 S 向和 N 向。在 E-ESE 范围的波浪很少, 出现频率均不足 0.5%。春、夏季常浪向均为 S 向, 秋、冬季常浪向一样, 都为 NNE 向。冬、春季的强浪向均为 NNE 向, 夏、秋季的强浪向分别为 S 向、N 向。浪向分布与东方市所处地理位置相符。

(2)本海域以有效波高小于 1.3 m 的小浪和轻浪为主, 年出现频率为 97.6%, 4 级中浪占 2.22%, 超过 2.5 m 的大浪很少见, 出现频率仅为 0.12%, 只有在夏、秋季台风过境时才出现。有效波高平均值为 0.49 m, 最大值为 3.2 m; 最大波高为 5.6 m, 最大波高平均值为 2.5 m; 平均有效周期为 4.2 s, 最大有效波周期为 9.5 s; 夏季有效波高平均值最大, 秋季最小。

(3)有效波高在 1.0 m 以下, 且周期在 4~5 s 的波浪出现频率最大, 为 80.5%; 平均波高与平均周期的平方之间的线性关系, 分波级表达更为符合, 不分波级的系数为 0.022, 2 级波高的系数为 0.014, 3 级波高的系数为 0.030, 4—5 级波高的系数为 0.038, 波级越大, 相关性越好。

(4)当有效波高小于 2.6 m 或大于 2.9 m 时, 平均

持续时间与波高的关系符合 Lawson 和 Abernethy^[15] 于 1975 年提出的指数函数关系式, 平均持续时间随着波高的增大而减少。

(5)强台风“海燕”影响期间, 浮标测到最大波高达到 4.6 m, 风速减弱, 但波高没有降低, 波高具有明显的滞后特征, 5 级大浪持续了 10 h, 浪向与风向基本一致, 说明台风产生的波浪以风浪为主, 最大波高均出现于偏 S 向。通过波谱分析, 台风海浪的波型变化规律为混合浪-风浪-混合浪。

参考文献:

- [1] 田小雷. 海南省东方市船舶防抗台风管理研究[D]. 海口: 海南大学, 2017.
TIAN Xiaolei. Research on management of vessel resist typhoon in Dongfang City of Hainan[D]. Haikou: Hainan University, 2017.
- [2] 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 Xingru, LI Jinyuan, YIN Baoshu, 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.
- [3] 陈三江, 陈坤, 贺仕昌, 等. 莺歌海洋站附近海域波浪特征分析[J]. 海洋技术学报, 2021, 40(2): 69-76.
CHEN Sanjiang, CHEN Kun, HE Shichang, et al. Analysis of wave characteristics in the sea area near Yinggehai station[J]. Journal of Marine Technology, 2021, 40(2): 69-76.
- [4] 苏志, 赵飞, 郑凤琴, 等. 北部湾海域灾害性海浪特征及影响天气系统分析[J]. 气象与环境科学, 2019, 42(2): 55-61.
SU Zhi, ZHAO Fei, ZHENG Fengqin, et al. Characteris-

- tics and weather impact system analysis of disastrous wave in Beibu Gulf[J]. *Meteorological and Environmental Sciences*, 2019, 42(2): 55-61.
- [5] 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 Shujiang, LI Zewen, FAN Bin, et al. Wave observation and statistical analysis in the southeast coast of Hainan Island[J]. *Advances in Marine Science*, 2016, 34(1): 1-9.
- [6] 张莹. SZF 型波浪浮标数据采集、处理与无线传输系统[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2010.
ZHANG Ying. Data acquisition, processing and wireless transmission systems of SZF wave buoy[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2010.
- [7] 国家市场监督管理总局. 海洋观测规范第 2 部分: 海滨观测: GB/T 14914.2—2019[S]. 北京: 中国标准出版社, 2019.
State Administration for Market Regulation. The specification for marine observation-Part2: Offshore observation: GB/T 14914.2—2019[S]. Beijing: Standards Press of China, 2019.
- [8] 童朝锋, 王波, 鲁盛, 等. 海南岛西南岸沿岸输沙特性及防波堤影响[J]. *水利水运工程学报*, 2016(1): 9-16.
TONG Chaofeng, WANG Bo, LU Sheng, et al. Characteristics of longshore sediment transport and effects of breakwaters in southwest coast of Hainan Island[J]. *Hydro-Science and Engineering*, 2016(1): 9-16.
- [9] 王扬妹. 东方海洋站海洋气象概况[J]. *南海海洋*, 1986, 6(2): 49, 76.
WANG Yangmei. Overview of marine meteorology at Dongfang ocean station[J]. *South China Sea Ocean*, 1986, 6(2): 49, 76.
- [10] 海南省海洋厅调查领导小组. 海南省海岛资源综合调查报告[R]. 北京: 海洋出版社, 1996.
Survey Leading Group of Hainan Ocean Department. Comprehensive survey report on island resources in Hainan Province[R]. Beijing: China Ocean Press, 1996.
- [11] 葛明达. 连云港波高波周期统计分布[J]. *海洋工程*, 1984, 2(1): 40-50.
GE Mingda. Distributions of wave heights and periods in Lianyungang[J]. *The Ocean Engineering*, 1984, 2(1): 40-50.
- [12] 俞聿修, 柳淑学. 石臼港海浪的统计特征和谱[J]. *港口技术*, 1989(2): 12-22.
YU Yuxiu, LIU Shuxue. Statistical characteristics and spectrum of waves in Shijiu Port[J]. *Port Engineering Technology*, 1989(2): 12-22.
- [13] 范顺庭, 王以谋. 黄河口海域特征波浪要素比的分析[J]. *海洋预报*, 1999, 16(1): 22-29.
FAN Shunting, WANG Yimou. An analysis for element ratio of characteristic wave over Yellow-River Mouth Area[J]. *Marine Forecasts*, 1999, 16(1): 22-29.
- [14] 潘锦嫦, 翟华联. 海浪波候(风候)的统计分布及其持续时间的研究[J]. *海洋通报*, 1994, 13(1): 1-14.
PAN Jinchang, ZHAI Hualian. Statistics distribution and persistence duration of wave climate and wind climate[J]. *Marine Science Bulletin*, 1994, 13(1): 1-14.
- [15] LAWSON N V, ABERNETHY C L. Long term wave statistics off Botany Bay[C]//Institution of Engineers, Australia. Proceedings 2nd Australasian Conference on Coastal and Ocean Engineering Barton, Australia: Institution of Engineers, Australia, 1975: 167-176.
- [16] 国家海洋局. 2013 年中国海洋灾害公报[R]. 北京: 国家海洋局, 2014.
State Oceanic Administration. 2013 China marine disaster bulletin[R]. Beijing: State Oceanic Administration, 2014.
- [17] 胡劲召, 卢徐节, 徐功娣. 海洋环境科学概论[M]. 广州: 华南理工大学出版社, 2018.
HU Jinzhao, LU Xujie, XU Gongdi. Introduction to marine environmental science[M]. Guangzhou: South China University of Technology Press, 2018.
- [18] 陈宜展, 曹永港, 黄艳松, 等. 海口湾海域波浪特征分析[J]. *海洋工程*, 2019, 37(2): 96-103.
CHEN Yizhan, CAO Yonggang, HUANG Yansong, et al. Analysis on wave characteristics in Haikou Bay[J]. *The Ocean Engineering*, 2019, 37(2): 96-103.
- [19] 张经汉. 台风波浪的波型及其与海岸工程设计波浪要素的关系[J]. *热带海洋*, 1988, 7(3): 45-53.
ZHANG Jinghan. The pattern of typhoon waves and its relation to the design of wave parameters for coastal engineering[J]. *Tropical Ocean*, 1988, 7(3): 45-53.

Analysis of wave characteristics in the offshore area of Dongfang City

WANG Xiao-hong

(Haikou Marine Environment Monitoring Center Station, SOA, Haikou 570311, China)

Received: Sep. 19, 2022

Key words: Dongfang City; SZF wave buoy; wave characteristics; typhoon wave; wave spectrum

Abstract: Based on the 11-year measured data of SZF Wave Buoy from the Dongfang Marine Environmental Monitoring Station, this paper statistically analyzed the basic characteristics of waves in the offshore area of Dongfang City. Firstly, the seasonal distribution of wave heights at all levels in all directions, as well as the mean and extreme values of wave heights and periods are obtained by statistical analysis of wave elements; The joint distribution of wave height and period, and the relationship between average duration and wave height are discussed; Finally, a typical typhoon wave process is selected for analysis. The results show that the wave frequency in S-direction is the highest in this sea area, accounting for 14.3%, the frequency is 11.9% in the N-direction and NNE-direction, and the strong wave is in the S-direction and N-direction, which is consistent with the geographical position of Dongfang City. In this sea area, small waves and light waves with effective wave height less than 1.3 m are dominant, at the annual frequency 97.6%, the middle wave of grade 4 is 2.22%, and the big wave of grade 5 is only 0.12%. The average and the maximum annual effective wave height are 0.49 m and 3.2 m, respectively. The maximum wave height is 5.6 m and the average maximum wave height is 2.5 m. The average effective period and the maximum effective wave period are 4.2 s and 9.5 s respectively. The wave with significant wave height below 1.0 m and period of 4~5 s has the maximum frequency of 80.5%. During the impact of strong typhoon “Haiyan”, the wave height had obvious hysteresis characteristics, The magnitude 5 wave lasted for 10 hours, and the wave direction is basically consistent with the wind direction, indicating that the wave generated by typhoon is mainly wind wave, and the maximum wave height appears in the S-direction. According to the spectral analysis, the wave pattern change law of typhoon is mixed wave—wind wave—mixed wave. The research work in this paper can provide reference basis for marine disaster prevention and mitigation, and the development and utilization of marine engineering.

(本文编辑: 丛培秀)