

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, doi:10.12284/hyxb2021097
Zhou Yang, Ye Qin, Shi Weiyong, et al. Statistical analysis on wave characteristics in the Sanmen Bay of Zhejiang middle coast[J]. Haiyang Xuebao, 2021, 43(3): 13–23, doi:10.12284/hyxb2021097

浙江中部三门湾波浪特征统计分析

周阳¹, 叶钦^{2*}, 施伟勇², 杨斌², 宋泽坤², 闫东号³

(1. 浙江海洋大学 海洋工程装备学院, 浙江 舟山 316022; 2. 自然资源部第二海洋研究所, 浙江 杭州 310012; 3. 浙江浙能台州第二发电有限责任公司, 浙江 台州 317100)

摘要: 为了研究浙江中部三门湾海域的波浪特征, 本文基于 AWAC 波浪观测仪在该海域进行了连续 1 年的观测, 对观测得到的波浪参数进行了统计分析、线性回归分析, 同时研究分析了三门湾海域受台风影响时, 波浪参数和波浪谱的变化情况, 探讨了波浪变化的原因。研究表明, 三门湾海域常浪向和强浪向均为 E 向, 地形是主导因素; 显著波高绝大部分在 0.8 m 以下, 期间的最大波高为 2.71 m; 该海域的波浪特征分布是一个比较典型的瑞利分布; 台风“泰利”期间波能谱以双峰为主, 外海涌浪和研究海域风区内的风浪形成混合浪, 其中 0.08 Hz 左右的低频涌浪成分占比很大, 而 0.25 Hz 左右的高频风浪成分占比较小。本文的研究工作为沿海海洋工程结构物的设计建造以及防灾减灾提供重要参考依据。

关键词: 波浪特征; 三门湾; 线性回归分析; 风浪; 涌浪; 波浪频谱

中图分类号: TV139.2 文献标志码: A 文章编号: 0253-4193(2021)03-0013-11

1 引言

海湾和河流入海口地区是海陆相互作用的敏感地带, 各种动力过程耦合复杂多变, 然而由于这些地区交通和海洋资源上的优势, 往往是人类集中生活的地方, 同时也是人类重点开发的区域。三门湾位于浙江省中部沿海, 北靠象山半岛, 东起南田岛, 西至坡坝港牛头门, 南部至牛头山, 湾内长约 40 km, 宽约 10 km, 是多条河流的入海口, 内有多个港口, 往来船只众多, 对该区域的波浪参数进行统计分析, 有利于深入了解三门湾海域的波浪特性。另外, 三门湾海域常年受到台风的影响, 据统计, 浙江沿海的台风主要出现在每年的 5–11 月, 8 月最多^[1], 其引起的台风浪对码头、堤防等沿海设施造成重大影响, 还会对船只的安全系泊构成威胁, 因此, 台风浪的实测分析对该

海域附近的港口规划设计和海岸工程的建设与保护有十分重要的意义。

目前, 国外关于实测波浪特性的研究分析比较多, 对印度附近海域波浪做了大量的研究工作, 统计了印度沿海的波浪特征^[2-4], 指出印度沿海的波浪约 6 成为多谱峰混合浪^[5], 并分别对阿拉伯海^[6-8]和孟加拉湾^[9-10]的波浪特征进行了具体的研究分析, 包括相关性分析、谱分析、风涌浪的分离等, 对不同季风影响下、季风前中后、各年际间的波浪特征进行了深入研究。Umesh 等^[11]采用数值模拟和实测资料相结合的方法对印度东南沿海的波浪特征进行了统计分析, 得到了适用于该海域的 SWAN 波浪模型。Kumar 等^[12]对韩国浦项市新港的港内实测波浪进行了谱密度分析, 并通过数值模拟完成了对港湾入口处设置防波堤必要性的论证。Shanas 等^[13]对红海东部夏季的波浪

收稿日期: 2020-08-21; 修订日期: 2020-12-20。

基金项目: 国家自然科学基金(42006175); 浙江省自然科学基金(LQ20E090004)。

作者简介: 周阳(1987—), 男, 浙江省宁波市人, 博士, 主要从事海洋工程水动力研究。E-mail: edit502@126.com

* 通信作者: 叶钦(1979—), 男, 高级工程师, 主要从事河口海岸水动力研究。E-mail: 641897696@qq.com

进行了风涌浪分离的研究,指出该海域夏季多为混合浪。国内也有一些相关研究, Yang 等^[14]通过实测波浪资料对江苏南部辐射沙洲的波浪变化特征、参数相关性、谱特征进行了研究分析。杨斌等^[15]对舟山群岛局部海域的台风浪特性进行了实测分析,指出台风路径对波浪谱型有着显著影响。祁祥礼等^[16]对渤海湾中部的波浪特征进行了统计分析,对波高和风速、波向和风向的相关性进行了探讨。然而,目前关于三门湾波浪特性尤其是台风浪特性的研究报道十分罕见,之前一些学者对三门湾的研究主要集中在潮流、潮位^[17]、渔业资源^[18]等方面,主要是由于长期的现场波浪实测费用昂贵,资料获取难度大。

本文基于 AWAC 波浪观测仪的实测资料,首先,对三门湾海域的波浪特征进行了统计分析,包括最大波高(H_{max})、显著波高($H_{1/10}$)、有效波高($H_{1/3}$)、平均波高(H_{mean})、平均波周期(T_{mean})、谱峰周期(T_p)等,并进行了特征波高、特征波周期的线性回归分析;其次,对三门湾海域受台风影响时,各波浪参数的变化情况进行了研究分析,根据波浪频谱进行了风涌浪的分离。本文的研究工作为这一海域的工程建设和海浪研究提供科学依据。

2 资料选取与处理方法

2.1 研究区域及数据

三门湾在平面形态上总体呈 NW-SE 走向,湾口

为一个朝向为 SE 的半封闭式网袋状海湾^[17]。本文选用的波浪实测数据为 2016 年 10 月 1 日至 2017 年 9 月 30 日三门湾湾口海域临时测波点的观测资料,测波点位于 29°01.003'N, 121°42.893'E, 水深约为 7.5 m, 测波点 SE 向面向东海海区敞开,基本无岛屿遮掩, NW 向顺时针至 SE 向均有较宽阔的水域,可观测到多个方向的波浪,波浪代表性好,测波点 SW 向紧靠半岛山地海岸,波浪测站位置示意图见图 1。波浪观测每小时进行一次,每次观测约 18 min, 采样间隔为 0.5 s。用于辅助分析的风资料由波浪测站西向约 200 m 处的台二电厂码头前沿测风塔测得,与波浪观测同步进行,台二电厂码头前沿四面开阔,风资料测量基本不受周围地形的影响。

2.2 仪器及数据处理

波浪现场观测采用的仪器是挪威 Nortek 公司制造的声学多普勒波浪流速剖面仪 (Acoustic Wave and Current Meter, AWAC, 国内称浪龙), 该仪器具有声学波浪表面扫描功能, 所得数据经仪器配套的 Storm 软件处理后得到各类波要素, 包括最大波高(H_{max})、显著波高($H_{1/10}$)、有效波高($H_{1/3}$)、平均波高(H_{mean})、平均波周期(T_{mean})以及谱峰周期(T_p)等参数, 另外, 根据需要还计算了零阶矩 m_0 、谱峰值 $S(f_p)$ 、波高概率密度 $p(H/H_{mean})$ 以及平均周期 T_{01} 、 T_{02} 等参数^[19]。Storm 软件采用声学表面跟踪结合水平流速方法 (acoustic surface tracking and horizontal velocity U and V, SUV) 计算

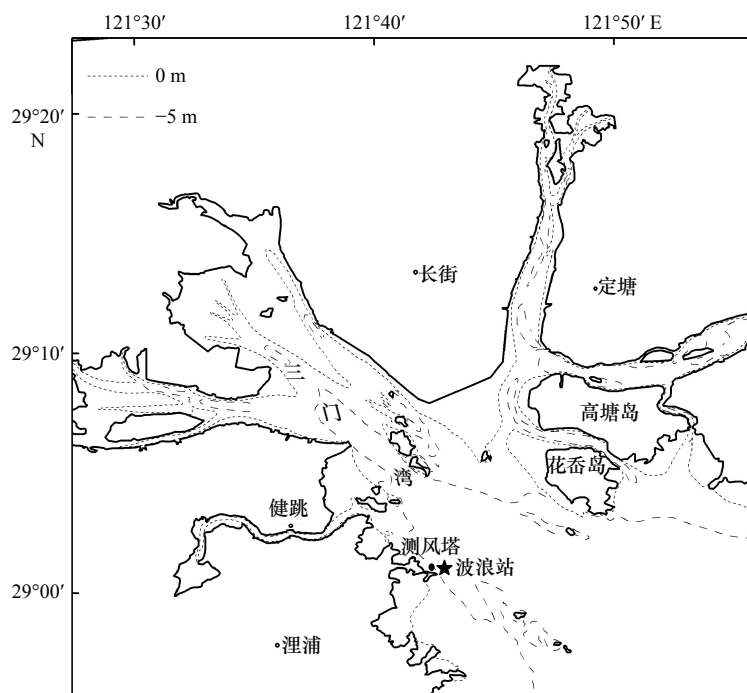


图 1 波浪测站位置

Fig. 1 Location of the wave measurement station

波浪来向^[20],通过快速傅里叶变换(FFT)方法计算波浪谱,可以得到64自由度的平滑波浪谱曲线,截断频率为1 Hz,分辨率为0.01 Hz。AWAC波浪观测仪应用广泛,数据处理效率高,所测得的波向误差小于2°,波高误差小于0.15%,保证了此次波浪测量数据的可靠性和准确性^[21]。

3 波浪要素统计分析

3.1 波高统计特征

图2给出了全年波高平均值及最大值逐月变化规律,由图可知,所测海域秋季波浪运动最为剧烈,主要是受台风影响,其他季节各月份之间相差不大。表1给出了测站全年各级波高按16方位波向统计的结果,资料完整率为99.42%,图3为相应的波浪玫瑰图,分析可知:(1)实测波浪常浪向为E向,出现频率为40.27%,这与地形主要向东面敞开密切相关,该方向 $H_{1/10}$ 年平均值为0.43 m;(2)次常浪向为ESE向,出现频率为25.07%,该方向 $H_{1/10}$ 年平均值为0.39 m;(3)强

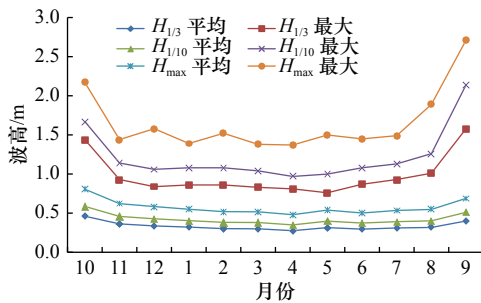


图2 测站各月特征波高变化

Fig. 2 Variation of wave height in each month

表1 测站各级各向显著波高 ($H_{1/10}$) 出现频率分布 (%)

Table 1 Distribution of $H_{1/10}$ in different levels and different directions (%)

$H_{1/10}/m$	N	NNE	NE	ENE	E	ESE	SE	SSE	S	SSW	SW	WSW	W	WNW	NW	NNW	合计
0.0~0.6	1.13	1.63	3.39	12.72	34.35	22.24	6.31	1.10	0.30	0.03	0.09	-	0.01	0.02	0.06	0.32	83.70
0.6~0.8	1.18	0.89	0.78	0.88	3.84	2.12	0.34	0.05	0.01	-	-	-	-	-	0.01	0.53	10.62
0.8~1.0	0.40	0.25	0.21	0.51	1.21	0.57	0.08	-	-	-	-	-	-	-	0.02	0.31	3.56
1.0~1.2	0.09	0.05	0.02	0.08	0.34	0.13	0.03	-	-	-	-	-	-	-	-	0.07	0.81
1.2~1.5	-	-	0.01	0.07	0.29	0.01	0.01	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.39
1.5~2.0	-	-	-	0.08	0.25	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.33
≥ 2.0	-	-	-	0.01	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.01
合计	2.80	2.82	4.41	14.35	40.27	25.07	6.78	1.14	0.31	0.03	0.09	-	0.01	0.02	0.09	1.22	99.42
平均值/m	0.64	0.57	0.47	0.40	0.43	0.39	0.35	0.31	0.25	0.28	0.32	-	0.22	0.37	0.55	0.71	0.42
最大值/m	1.08	1.12	1.43	2.14	1.95	1.26	1.22	0.79	0.66	0.38	0.5	-	0.22	0.47	0.86	1.06	2.14

注: -代表不存在这些情况。

浪向为E向, $H_{1/10}$ 大于1.5 m的波浪主要发生在该范围内,相应的出现频率为0.25%,观测期间出现的最大波高为2.71 m,对应的 $H_{1/10}$ 为2.14 m,波向为ENE,风向为N,出现在2017年9月14日11时第18号台风“泰利”期间;(4) $H_{1/10}$ 小于0.8 m的波浪全年中出现频率为94.32%,因此,所测海域超9成是不超过0.8 m的波浪。

3.2 波周期统计特征

图4给出了全年波周期平均值及最大值逐月变化规律,由图可知,各月之间波周期没有明显的变化规律和差异, T_{mean} 月均值和 T_p 月均值的变化趋势基本相同,且波动较小。表2给出了测站全年各级平均波周期按16方位波向统计的结果,图5为相应的玫瑰图,分析可知:(1)常浪向(E向)的 T_{mean} 年平均值为3.71 s,次常浪向(ESE向)的 T_{mean} 年平均值为3.49 s;(2)观测期间出现的 T_{mean} 最大值为9.78 s,出现在2016年11月10日23时,相应的 T_p 为13.08s;(3) T_{mean} 小于4s的波浪全年中出现频率为75.02%,可见该海域主要是短周期波浪。

3.3 特征波高线性回归分析

根据Longuet-Higgins提出的瑞利波高分布形式,各特征波高之间存在着固定的比值关系,如 $H_{1/10}/H_{mean}=2.031$ 、 $H_{1/3}/H_{mean}=1.598$ 等,然而实测得到的波浪数据由于地形、海区、水深等因素,它们的特征波高之间的比值相比于理论值通常有一定的差异。本文通过对三门湾海域全年各特征波高的统计,得到了该海域特征波高之间的比值关系,采用最小二乘法对各特征波高比值关系进行线性回归分析,得到了 $H_{1/10}$ 、 $H_{1/3}$ 、

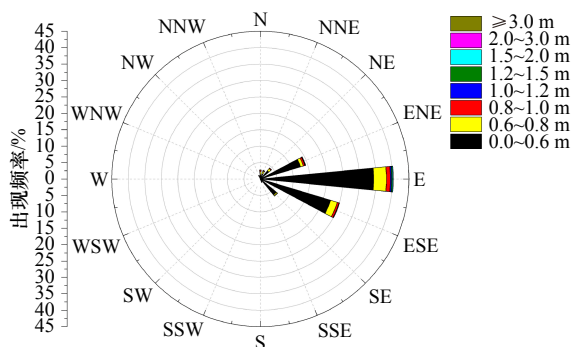


图 3 测站全年各级各向显著波高($H_{1/10}$)出现频率分布
Fig. 3 Distribution of $H_{1/10}$ in different levels and different directions

H_{max} 与平均波高 H_{mean} 的相关关系(表 3)。波浪测站海水水深 $d=7.5$ m, 平均波高 $H_{mean}=0.21$ m, 计算可知浅水因子 $H^*=H_{mean}/d=0.028<0.1$, 属于深水水域, 通过比较表 3 可知, 本区域实测得到的特征波高之间的相关关

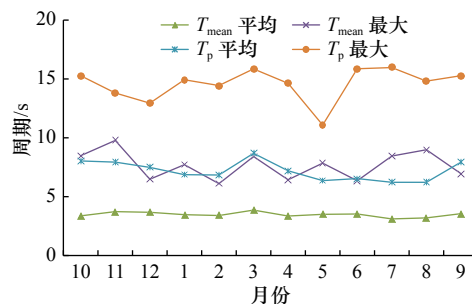


图 4 测站各月特征波周期变化
Fig. 4 Variation of wave period in each month

系与理论值较为接近, 基本符合瑞利分布, 部分组次波高分布如图 6 所示。图 7a 给出了最大波高和平均波高之间的相关关系, 线性拟合可知, 实测 $H_{max}/H_{mean}=2.70$, 相关系数为 0.97, 根据深水海域连续 N 个波中 H_{max}/H_{mean} 的数学期望与波数 N 的近似关系, 可以得到理论比值, 公式如下所示^[22]:

表 2 测站各级各向平均波周期出现频率分布 (%)

Table 2 Distribution of T_{mean} in different levels and different directions (%)

T_{mean}/s	N	NNE	NE	ENE	E	ESE	SE	SSE	S	SSW	SW	WSW	W	WNW	NW	NNW	合计
0.1~4	2.79	2.79	4.17	11.39	26.76	18.55	5.84	1.05	0.26	0.03	0.07	-	-	0.02	0.08	1.22	75.02
4~5	0.01	0.02	0.18	2.08	8.81	4.44	0.71	0.06	0.05	-	0.02	-	-	-	0.01	-	16.39
5~6	-	0.01	0.06	0.73	3.74	1.76	0.16	0.03	-	-	-	-	0.01	-	-	-	6.51
6~7	-	-	-	0.13	0.66	0.25	0.06	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1.10
7~8	-	-	-	0.01	0.17	0.05	0.01	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.24
≥8	-	-	-	0.01	0.13	0.02	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.16
合计/%	2.80	2.82	4.41	14.35	40.27	25.07	6.78	1.14	0.31	0.03	0.09	-	0.01	0.02	0.09	1.22	99.42
平均值/s	2.94	2.90	3.03	3.39	3.71	3.49	3.14	3.07	3.20	2.51	2.84	-	5.36	2.47	3.03	3.06	3.47
最大值/s	4.05	5.53	5.92	8.09	9.78	8.45	7.10	5.55	4.99	2.68	4.40	-	5.36	2.90	4.73	3.60	9.78

注: -表示不存在这些情况。

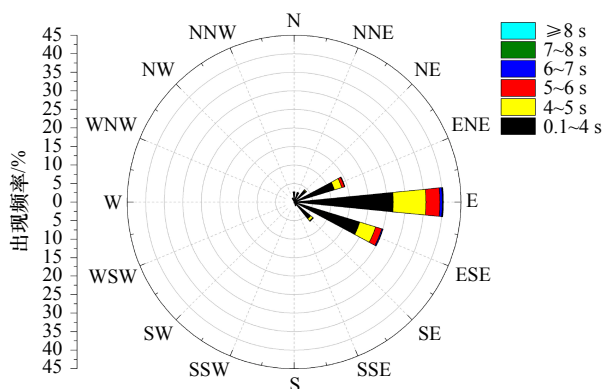


图 5 测站全年各级各向平均波周期(T_{mean})出现频率分布
Fig. 5 Distribution of T_{mean} in different levels and different directions

$$H_{max}/H_{mean} = \frac{2}{\sqrt{\pi}} (\ln N)^{\frac{1}{2}}, \quad (1)$$

此处 N 取 312.6, 为全年观测期间 AWAC 每次观测波数的平均值, 计算可知理论比值 $H_{max}/H_{mean}=2.70$, 可见实测波浪数据在此比值上同理论比值非常一致。图 7b 和图 7c 分别给出了 $H_{1/10}$ 和 $H_{1/3}$ 与 H_{mean} 的相关关系, 与杨斌等^[15] 统计的舟山海域波浪特征参数相比, 其 $H_{1/10}/H_{1/3}$ 和 $H_{1/3}/H_{mean}$ 分别为 1.25 和 1.57, 而 Yang 等^[14] 统计的黄海南部海域的 $H_{1/10}/H_{1/3}$ 和 $H_{1/3}/H_{mean}$ 分别为 1.24 和 1.54, 本文统计得到的 $H_{1/10}/H_{1/3}$ 和 $H_{1/3}/H_{mean}$ 分别为 1.26 和 1.58, 三者比值均分别小于理论比值 1.27 和 1.60, 其中舟山海域的比值与本文非常接近, 其观

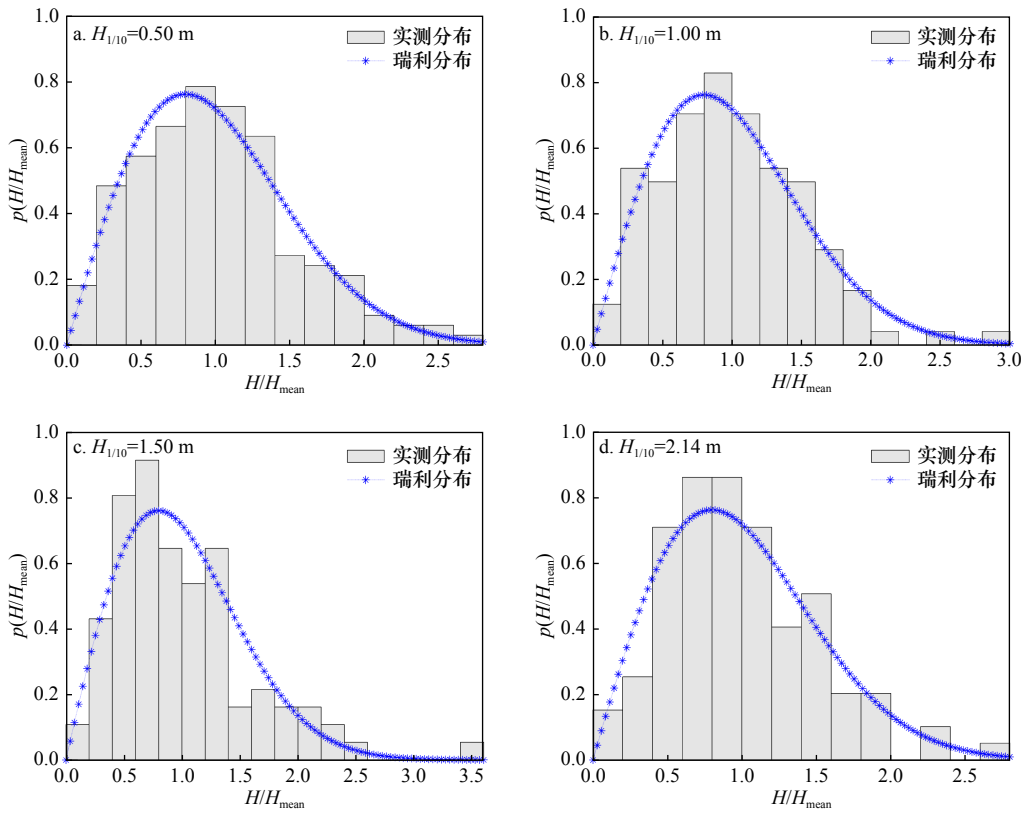


图6 三门湾海域波高分布特征

Fig. 6 Wave height distribution during the observation period in the Sanmen Bay

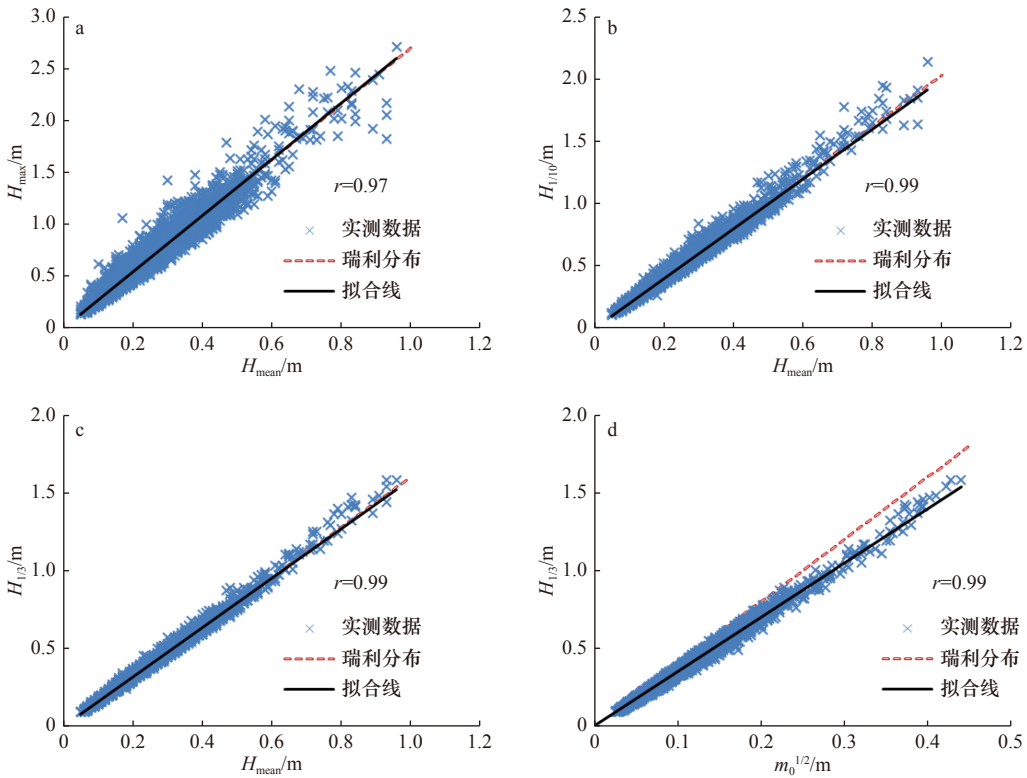


图7 三门湾海域各特征波高参数的线性拟合

Fig. 7 Linear relationship of different characteristic wave height of the Sanmen Bay

测海区与三门湾海域也更为接近。总体而言三门湾海域的特征波高相关关系符合瑞利分布情况,该海域的波浪特征分布是一个比较典型的瑞利分布。

图 7d 给出了实测波浪数据的跨零统计有效波高 $H_{1/3}$ 与零阶距 m_0 开方的比值,线性拟合得到 $H_{1/3}$ 与 $m_0^{1/2}$ 的比值为 3.50,而理论情况下谱计算的有效波高 H_{m0} 与 $m_0^{1/2}$ 的比值为 4,查阅文献可知一般情况下 $H_{1/3}/m_0^{1/2}$ 均小于 4,其中,Godal^[23]对深水情况下的风浪特征参数统计发现该比值为 3.8,Kumar 等^[7]对印度西部沿海的波浪统计发现该比值为 3.72,杨斌等^[15]对舟山海域的波浪统计显示该比值为 3.57,本文的比值最小,通过频谱分析可知,本观测海域的波浪往往是风浪和涌浪形成的混合浪,而不是以单峰的风浪为主,这是 $H_{1/3}/m_0^{1/2}$ 变小的重要原因。

3.4 特征波周期线性回归分析

波浪特征周期之间的关系并不像特征波高一样具有明显的理论关系,随着观测海域的不同有较大的差别^[7,14-15,23]。1976 年 Godal^[24]根据现场实测资料得出:

$$T_{\max} = (0.6 \sim 1.3) T_{1/3}, \quad (2)$$

$$T_{1/10} = (0.9 \sim 1.1) T_{1/3}, \quad (3)$$

$$T_{1/3} = (0.9 \sim 1.4) T_{\text{mean}}. \quad (4)$$

根据当时大量记录的平均关系推定:

$$T_{\max} \approx T_{1/10} \approx T_{1/3} \approx 1.1 T_{\text{mean}}. \quad (5)$$

而根据 Godal^[23]的实测统计结果,日本近海的特征波周期关系取:

$$T_{\max} \approx T_{1/10} \approx T_{1/3} \approx 1.2 T_{\text{mean}}. \quad (6)$$

本文对观测海域的特征波周期进行了线性拟合,得出 T_{\max} 、 $T_{1/10}$ 、 $T_{1/3}$ 以及谱计算平均周期 T_{01} 和 T_{02} 与 T_{mean} 的比值关系分别为 1.69、1.58、1.40、1.10、0.91,谱峰周期 T_p 与 T_{mean} 的相关关系很差,相关系数仅为 0.47,相应的比值为 2.04,具体统计情况见表 3。分析可知,该海域实测 T_{\max} 、 $T_{1/10}$ 、 $T_{1/3}$ 和 T_{mean} 的相互比值关系和 Godal^[23]的实测比值关系有较大差异,可见不同海域的特征波周期关系是有一定差别的。理论深水条件下,满足 $T_{02} < T_{01} \approx T_{\text{mean}} < T_p$ ^[22],本文的实测结果为 $T_{02} < T_{\text{mean}} < T_{01} < T_p$,与理论情况有一定差别,这是由于理论关系基于完全的深水条件,而实测波浪从外海传入会受到地形等因素影响,变化复杂,导致实测关系与理论关系并不完全一致。图 8 给出了部分各特征波周期之间的散点关系,分析可知, $T_{1/3}$ 与 T_{mean} 和 T_{02} 与 T_{mean} 有着很好的线性相关关系,而 T_{\max} 与 T_{mean} 和 T_p 与 T_{mean} 的线性相关关系较差。另外,与特征波高之间的线性相关关系相比,特征波周期之间的线性相关关系要差些。

表 3 三门湾海域各波参数比值系数

Table 3 Wave parameter ratio factors of the Sanmen Bay

特征波高比	变化范围	线性回归系数	标准差	深水理论值
H_{\max}/H_{mean}	1.96~6.24	2.70	0.31	2.70
$H_{1/10}/H_{\text{mean}}$	1.44~2.86	2.00	0.13	2.03
$H_{1/3}/H_{\text{mean}}$	1.33~2.0	1.58	0.07	1.60
$H_{1/3}/m_0^{1/2}$	2.84~4.0	3.50	0.17	4.00
特征波周期比	变化范围	线性回归系数	标准差	深水理论值
T_{\max}/T_{mean}	0.29~5.48	1.69	0.64	1.20
$T_{1/10}/T_{\text{mean}}$	0.97~3.14	1.58	0.31	1.20
$T_{1/3}/T_{\text{mean}}$	1.01~1.97	1.40	0.16	1.20
T_{01}/T_{mean}	0.94~1.31	1.10	0.06	1.00
T_{02}/T_{mean}	0.73~1.12	0.91	0.05	<1.00
T_p/T_{mean}	0.74~6.67	2.04	0.94	>1.00

4 台风浪过程分析

4.1 过程分析

在波浪实测分析中,大浪过程是研究的重点之一,了解一个海域的大浪情况对工程建设和规划布局有重要的参考价值,对于三门湾海域,台风是引起大浪的主要原因,本文选取了观测期间影响最大的台风“泰利”引起的大浪过程进行研究分析。

2017 年 9 月第 18 号台风“泰利”(9 月 9 日 20 时起编至 9 月 18 日 14 时停编)在东海东南面海域逼近三门湾海域,后转向在日本登陆(图 9),期间对三门湾海域波浪有明显影响。图 10 为台风“泰利”期间的各波要素变化过程,同时给出了风速、风向的变化情况。从图 10a 可知,该过程发生时段的风向主要为偏北向,而浪向主要为偏东向。从图 10b 可知,平均周期和谱峰周期有一个先增大再减小的过程,其中谱峰周期在中间时间段基本维持在 12 s 左右,因此可以初步认为该海域在台风“泰利”期间的波浪以长周期涌浪为主。图 10c 给出了显著波高和风速的时程变化情况,分析可知,风速于 13 日 11 时之后明显增大,波高和风速有着较一致的变化趋势,这主要是由于外海波浪形成与风速相关。受沿海地形影响,经绕射、折射作用后,波浪从东向传入观测区所在海湾,所以出现了波高和风速正相关,而波向和风向无关的现象。

由表 4 可知,台风“泰利”期间各特征波高之间同样符合瑞利分布的比值关系,与表 3 全年的统计结果相比,台风期间各比值系数的变化范围均有一定程度

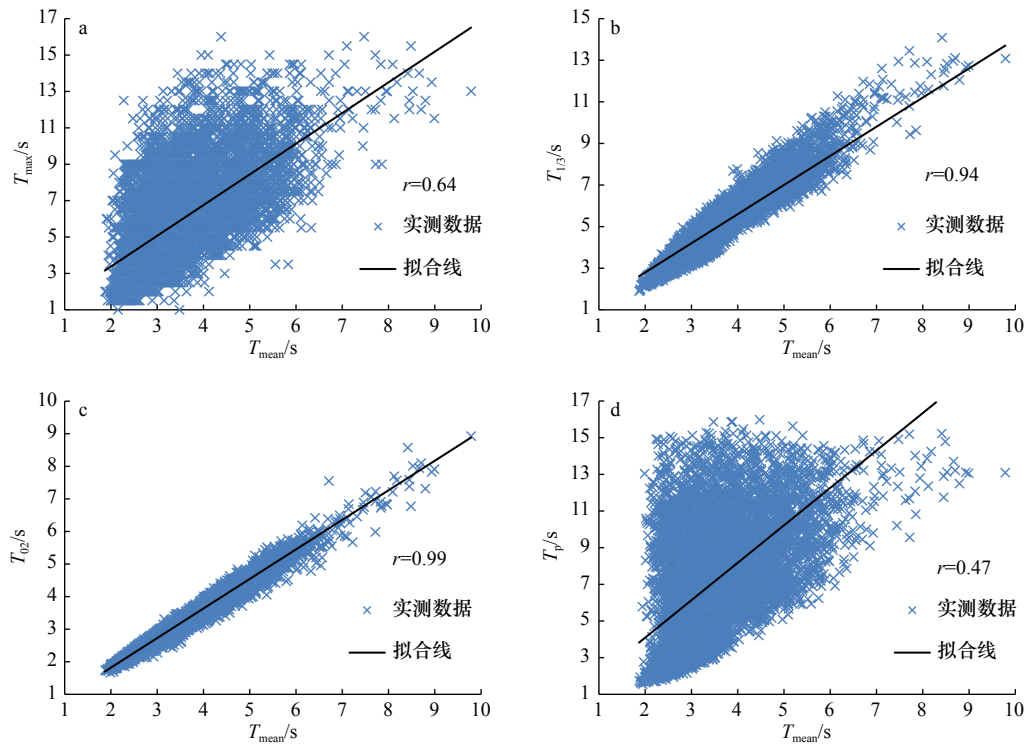


图8 三门湾海域各特征波周期的线性拟合

Fig. 8 Linear relationship of different characteristic wave period of the Sanmen Bay



图9 台风“泰利”路径图

Fig. 9 The track of Typhoon Talim

的减小。另外,线性拟合得到此时 $H_{1/3}/m_0^{1/2}$ 仅为 3.47, 较全年统计值 3.50 更小,这是由于台风期间该海域波浪表现为明显的混合浪。

4.2 谱分析

对观测期间的“泰利”台风浪过程进行了波浪频谱分析,图 11 为“泰利”台风浪过程的频谱随时间变

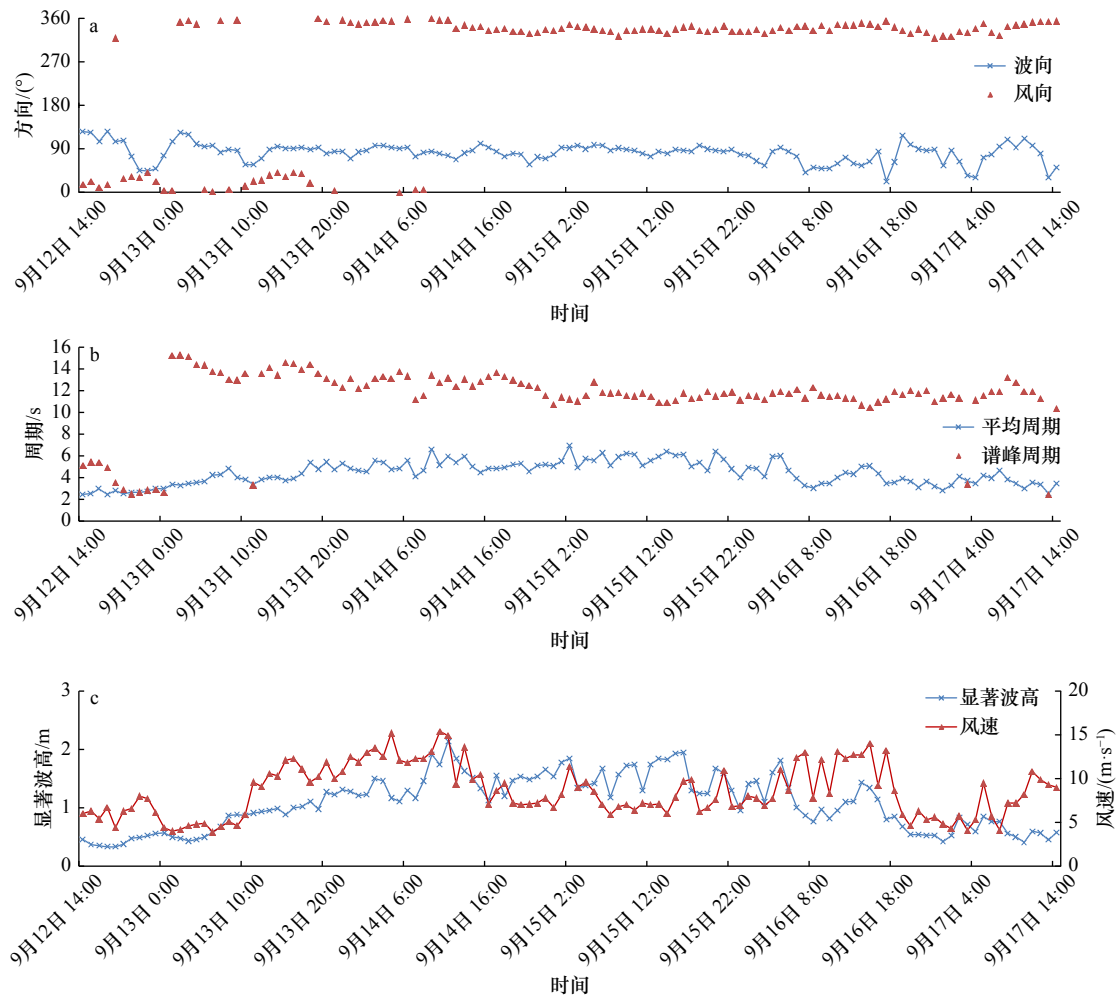


图 10 台风“泰利”作用下 2017 年 9 月 12 日 14 时至 17 日 14 时各波要素变化情况

Fig. 10 Variation of wave parameters from 14:00 12th to 14:00 17th September 2017 during Typhoon Talim

表 4 台风“泰利”期间各波参数比值系数

Table 4 Wave parameter ratio factors during Typhoon Talim

特征波高比	变化范围	线性回归系数	标准差	深水理论值
H_{max}/H_{mean}	2.16~3.47	2.73	0.29	2.70
$H_{1/10}/H_{mean}$	1.75~2.47	2.11	0.15	2.03
$H_{1/3}/H_{mean}$	1.42~1.77	1.63	0.07	1.60
$H_{1/3}/m_0^{1/2}$	2.94~3.81	3.47	0.17	4.00
特征波周期比	变化范围	线性回归系数	标准差	深水理论值
T_{max}/T_{mean}	0.75~4.07	2.12	0.67	1.20
$T_{1/10}/T_{mean}$	1.09~2.68	1.94	0.33	1.20
$T_{1/3}/T_{mean}$	1.10~1.75	1.55	0.16	1.20
T_{01}/T_{mean}	1.00~1.29	1.18	0.07	1.00
T_{02}/T_{mean}	0.81~1.01	0.90	0.04	<1.00
T_p/T_{mean}	0.90~4.60	2.48	0.80	>1.00

化过程,从图可知“泰利”台风浪过程的影响天数约为 3 d,以双峰谱为主,标记线为最大波高发生时刻。为了具体了解最大波高发生时的波浪频谱变化情况,图 12 给出了最大波高发生时刻及其前后的波浪频谱曲线,从中可以看到明显的双峰情况,波浪主要由频率为 0.08 Hz 左右的低频波浪组成,少量的高频部分在 0.25 Hz 左右,最大波高发生时刻,其能谱密度达到最大值 3.5 m²/Hz,对应的谱频率为 0.08 Hz。

根据 Portilla 等^[25]提出的判断风涌浪方法来区分波浪中的风涌浪成分,即实测的谱峰值与对应频率的 PM 谱谱峰值比值大于 1 为风浪,反之则为涌浪,PM 谱的谱峰密度计算公式为

$$S(f_p) = \alpha g^2 (2\pi)^{-4} f_p^{-5} e^{-\frac{1}{2}}, \quad (7)$$

式中, $S(f_p)$ 为谱峰密度; f_p 为谱峰频率; α 为峰形系数,对于 PM 谱 $\alpha=0.008$ 1; g 为重力加速度。

以图 12 的频谱曲线为例,谱峰频率为 0.08 Hz 的 PM 谱峰值为 43.64 m²/Hz,谱峰频率为 0.25 Hz 对应

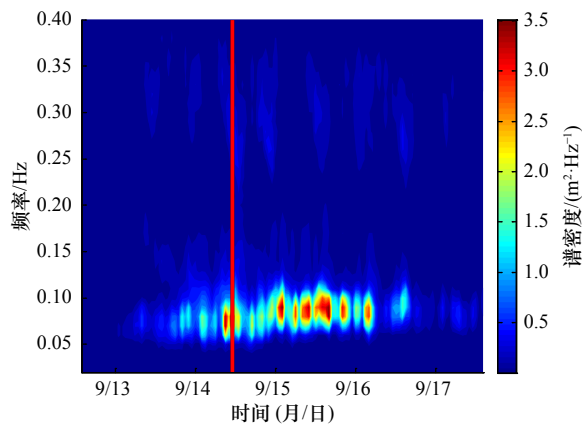


图 11 台风“泰利”期间波浪频谱随时间变化过程

Fig. 11 Variation of spectral wave characteristics during Typhoon Talim

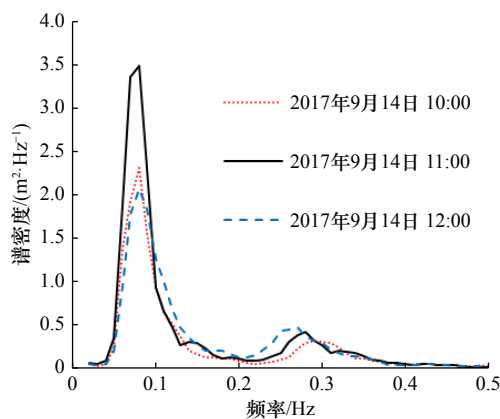


图 12 最大波高发生时的波浪频谱变化情况

Fig. 12 Variation of wave spectra curve during the maximum wave height

的 PM 谱峰值为 $0.15 \text{ m}^2/\text{Hz}$, 比较分析可知“泰利”台风浪双峰谱中低频谱峰与相应频率完全发展风浪谱 PM 谱的谱峰比值小于 1, 而高频谱峰的比值大于 1, 因此双峰谱中的低频部分为涌浪, 而高频部分为风浪。

5 结论

本文根据 2016 年 10 月至 2017 年 9 月在浙江中

部三门湾海域实测波浪资料, 统计分析了该海域的波浪特征, 对波参数进行了回归分析, 并对台风大浪过程进行了过程分析和谱分析, 主要得到以下结论。

(1) 三门湾海域常浪向和强浪向均为 E 向, 这与地形主要向东面敞开密切相关。所测海域全年显著波高超 9 成是不超过 0.8 m 的波浪, 期间的最大波高为 2.71 m , 可见该海域的波浪运动总体相对较弱, 其中, 以秋季的波浪运动最为剧烈, 主要是由于浙江沿海秋季经常受到台风的影响, 因此秋季台风浪过程较多。

(2) 本文的特征波高之间有着较好的线性相关关系, 基本符合深水情况下波高瑞利分布时各特征波高之间的相关关系, 相对而言, 特征波周期之间的线性相关关系要差些, 其中谱峰周期 T_p 与 T_{mean} 的相关关系很差, 相关系数仅为 0.47 。本文测得 $T_{02} < T_{\text{mean}} < T_{01} < T_p$, 与理论情况有一定差别, 主要由于实测的波浪从外海传入会受到沿海地形的影响, 变化复杂, 导致实测关系与建立在完全深水条件下的理论关系并不完全一致。总体而言, 三门湾海域的波浪特征参数之间的相关关系基本符合瑞利分布时各波浪参数的相关关系, 该海域的波浪分布是一个较典型的瑞利分布。

(3) 台风“泰利”影响三门湾海域 3 d 左右, 期间波高和风速呈一致变化趋势, 而波向和风向无关, 这是海湾地形的特有现象, 究其原因主要是外海大浪形成与风速相关, 经海湾地形绕射、折射后, 波浪沿湾口从东向传入观测区。而观测区本身风场所形成的风浪能量较小, 这从波浪谱分析中可以看到, 因此仪器统计所得的平均波向以外海传入的长周期涌浪方向为主, 形成了该海湾偏北风、东向浪的波浪情况。台风期间波能谱以双峰为主, 采用风涌浪分离分析发现, 外海传入的涌浪和研究海域风区内的风浪形成混合浪, 其中, 0.08 Hz 左右的低频涌浪成分占比很大, 而 0.25 Hz 左右的高频风浪成分占比较小。

参考文献:

- [1] 孙佳, 王燕妮, 左军成. 江浙沿海台风特征分析[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2015, 43(3): 215–221.
Sun Jia, Wang Yanni, Zuo Juncheng. Characteristic analysis of typhoon along coastal areas of Jiangsu and Zhejiang provinces[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2015, 43(3): 215–221.
- [2] Kumar V S, Anoop T R. Spatial and temporal variations of wave height in shelf seas around India[J]. *Natural Hazards*, 2015, 78(3): 1693–1706.
- [3] Amrutha M M, Kumar V S, George J. Observations of long-period waves in the nearshore waters of central west coast of India during the fall inter-monsoon period[J]. *Ocean Engineering*, 2017, 131: 244–262.
- [4] Nair M A, Kumar V S, Amrutha M M. Spectral wave characteristics in the nearshore waters of northwestern Bay of Bengal[J]. *Pure and Applied Geophysics*, 2018, 175(8): 3111–3136.
- [5] Kumar V S, Anand N M, Kumar K A, et al. Multi-peakedness and groupiness of shallow water waves along Indian coast[J]. *Journal of*

- Coastal Research, 2003, 19(4): 1052–1065.
- [6] Glejin J, Kumar V S, Singh J. Inter-annual variations in wave characteristics off Ratnagiri, Northeast Arabian Sea[J]. *Aquatic Procedia*, 2015, 4: 25–31.
- [7] Kumar V S, Singh J, Pednekar P, et al. Waves in the nearshore waters of northern Arabian Sea during the summer monsoon[J]. *Ocean Engineering*, 2011, 38(2/3): 382–388.
- [8] Glejin J, Kumar V S, Amrutha M M, et al. Characteristics of long-period swells measured in the near shore regions of eastern Arabian Sea[J]. *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*, 2016, 8(4): 312–319.
- [9] Kumar V S, Dubhashi K K, Nair T M B. Spectral wave characteristics off Gangavaram, Bay of Bengal[J]. *Journal of Oceanography*, 2014, 70(3): 307–321.
- [10] Patra S K, Mishra P, Mohanty P K, et al. Cyclone and monsoonal wave characteristics of northwestern Bay of Bengal: long-term observations and modeling[J]. *Natural Hazards*, 2016, 82(2): 1051–1073.
- [11] Umesh P A, Kani S P, Bhaskaran P K. Numerical simulation of wave characteristics off Kulasekharapatnam, Southeast Coast of India[J]. *Pure and Applied Geophysics*, 2017, 174(10): 3979–4001.
- [12] Kumar P, Zhang H, Ik Kim K. Spectral density analysis for wave characteristics in Pohang New Harbor[J]. *Pure and Applied Geophysics*, 2014, 171(7): 1169–1185.
- [13] Shanas P R, Aboobacker V M, Zubier K M, et al. Spectral wave characteristics along the central coast of eastern Red Sea[J]. *Arabian Journal of Geosciences*, 2018, 11: 90.
- [14] Yang Bin, Feng Weibing, Zhang Yu. Wave characteristics at the south part of the radial sand ridges of the Southern Yellow Sea[J]. *China Ocean Engineering*, 2014, 28(3): 317–330.
- [15] 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 Bin, Shi Weiyong, Ye Qin, et al. Characteristics of waves in coastal waters of northeast Zhoushan Island during typhoons[J]. *Advances in Water Science*, 2017, 28(1): 106–115.
- [16] 祁祥礼, 郑向阳, 谌业良. 渤海湾中部波浪特征分析[J]. *水道港口*, 2018, 39(3): 288–293.
Qi Xiangli, Zheng Xiangyang, Shen Yeliang. Analysis of wave characteristic in the middle part of the Bohai Bay[J]. *Journal of Waterway and Harbor*, 2018, 39(3): 288–293.
- [17] 宋泽坤, 施伟勇, 张峰, 等. 三门湾近期水动力特性观测研究[J]. *应用海洋学学报*, 2017, 36(2): 279–285.
Song Zekun, Shi Weiyong, Zhang Feng, et al. Field observation and analysis on the characteristics of tidal dynamics in Sanmen Bay[J]. *Journal of Applied Oceanography*, 2017, 36(2): 279–285.
- [18] 李新, 周青松, 俞存根, 等. 浙江三门湾春季鱼类种类组成及多样性研究[J]. *浙江海洋学院学报(自然科学版)*, 2014, 33(6): 488–494.
Li Xin, Zhou Qingsong, Yu Cungen, et al. Species composition and diversity of fish in spring in Sanmen Bay[J]. *Journal of Zhejiang Ocean University (Natural Science)*, 2014, 33(6): 488–494.
- [19] Cartwright D E, Longuet-Higgins M S. The statistical distribution of the maxima of a random function[J]. *Proceedings of the Royal Society A, Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 1956, 237(1209): 212–232.
- [20] Pedersen T, Lohrmann A, Krogstad H E. Wave measurement from a subsurface platform[C]//*Proceedings of the Waves 2005 Conference*. Madrid, Spain, 2005: 1–10.
- [21] Pedersen T, Nylund S, Dolle A. Wave height measurements using acoustic surface tracking[C]//*OCEANS '02 MTS/IEEE*. Biloxi MI, USA: IEEE, 2002, 3: 1747–1754.
- [22] 董胜, 孔令双. 海洋工程环境概论[M]. 青岛: 中国海洋大学出版社, 2005.
Dong Sheng, Kong Lingshuang. *An Introduction to Ocean Engineering Environment*[M]. Qingdao: China Ocean University Press, 2005.
- [23] Goda Y. *Random Seas and Design of Maritime Structures*[M]. Singapore: World Scientific Publishing Co Pte Ltd, 2000: 278–280.
- [24] Goda Y. On wave groups[C]//*Proceedings of Boss, Trondheim, Norway*, 1976, 76(1): 115–128.
- [25] 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.

Statistical analysis on wave characteristics in the Sanmen Bay of Zhejiang middle coast

Zhou Yang¹, Ye Qin², Shi Weiyong², Yang Bin², Song Zekun², Yan Donghao³

(1. School of Marine Engineering Equipments, Zhejiang Ocean University, Zhoushan 316022, China; 2. Second Institute of Oceanography, Ministry of Natural Resources, Hangzhou 310012, China; 3. Zhejiang Zheneng Taizhou Second Electric Power Generation Co., LTD., Taizhou 317100, China)

Abstract: In order to study the wave characteristics in the Sanmen Bay, field observation based on AWAC data acquisition equipment was continued for one year, and the statistical analysis, linear regression analysis was done. Moreover, statistics and spectral variations of waves during the typhoon occurrence were investigated, and the reason for the variations was determined on the basis of wave data collected. The results show that the dominant wave direction and the strong wave direction are both E due to the topography of coastal areas; during the wave observation period, $H_{1/10}$ is mainly under 0.8 m, and H_{\max} is 2.71 m; the distribution of wave characteristics is a typical Rayleigh distribution in this region; the wave spectra estimated during Typhoon Talim is double-peaked, and the total wave is a combination of swell and wind sea, when the low frequency swell about 0.08 Hz is in a dominant position and the high frequency wind sea about 0.25 Hz is relatively weak. This study will be important as reference in the design of offshore structures as well as for disaster prevention and mitigation.

Key words: wave characteristics; Sanmen Bay; linear regression analysis; wind sea; swell; wave spectra