

文章编号:1005-9865(2018)03-0096-08

杭州湾中部实测波浪特性分析

杨 斌,杨忠良,叶 钦,张俊彪,施伟勇

(国家海洋局第二海洋研究所 工程海洋学重点实验室,浙江 杭州 310012)

摘 要:利用杭州湾中部一年实测波浪资料,分析该地区的波参数统计变化特性,采用最小二乘法拟合得出相关参数之间的关系式,并统计分析了频谱特性。结果表明:杭州湾中部以小浪和轻浪为主,在各月分布较为均匀,年平均周期为 2.97 s;最大一次波浪过程为冷空气影响所致,影响强度大于台风莫拉克;常浪向分布在东北至东南向,其中又以小浪出现较多,对应的波周期以 2~4 s 为主;强浪向主要分布在西北和东北方向,对应的波周期主要分布在 3~5 s;多数特征波参数之间相关关系较好;由谱分析得知风浪占多数,且以单峰为主。研究结果可为相关工程和理论研究提供基础资料。

关键词:杭州湾;波浪特性;最小二乘法;频率谱;波参数

中图分类号:TV139.2 文献标志码:A DOI:10.16483/j.issn.1005-9865.2018.03.013

Analysis on wave characteristics of central Hangzhou Bay

YANG Bin, YANG Zhongliang, YE Qing, ZHANG Junbiao, SHI Weiyong

(Key Laboratory of Engineering Oceanography, The Second Institute of Oceanography, Hangzhou 310012, China)

Abstract: The statistical variation characteristics of waves were analyzed based on one year observation data measured at the central part of Hangzhou Bay. The least square method was used to calculate the correlations of wave parameters, and the characteristics of frequency spectrum were analyzed. The results show that the central Hangzhou Bay is dominated by small waves and light waves, which are distributed evenly in each month, and the wave period is short, with the annual average period of 2.97 s. The largest wave process is caused by cold air, and the intensity is greater than that of typhoon MORAKOT. The dominant wave directions are distributed in the NE-SE directions, in which the small waves appear more frequently with periods mainly distributed in 2~4 s. The strong waves are mainly distributed in NW and NE directions with periods mainly distributed in 3~5 s. Most of the characteristic wave parameters are well correlated. From the spectral analysis, it is known that the wind wave is the majority and the single peak is dominant. This study can provide the basic data for the related engineering and theoretical research.

Keywords: Hangzhou Bay; wave characteristics; least square method; frequency spectrum; wave parameter

对波浪进行研究的主要手段有理论分析、数值模拟、实验室研究和现场观测分析等。早期,由于仪器设备不够先进,现场观测较为困难,导致观测频次较低,实测数据较难获取。关于实测波浪特性研究虽有不少成果,但由于数据欠缺导致国内有些水域的波浪分析不够详细或者并未进行研究。现今测量仪器先进许多,国内外有关实测波浪分析的报道日渐增多^[1-3],方法上主要应用统计和波浪谱理论对实测波浪进行分析,着重于研究波参数和波谱的变化特性,这为详细了解研究水域的实测波浪特性提供了技术基础。同时,建设沿海或者海上工程之前,进行波浪观测和分析是十分必要的,对于防灾减灾也有重要的意义。

杭州湾地理形状为喇叭形,湾内水深从南向北总体上由浅变深,其中分布有不少岛屿,北部有深槽,其波

收稿日期:2017-10-28

基金项目:国家高技术研究发展计划(863计划)资助项目(2012AA0526);浙江省自然科学基金资助项目(LQ16D060007)

作者简介:杨 斌(1984-),男,博士,工程师,主要从事河口海岸水动力研究。E-mail:yb19841014@163.com

通信作者:杨忠良,男,硕士,高级工程师。E-mail:aliang2033300@163.com

浪受地形和湾口舟山群岛影响而变得复杂。前人对杭州湾的波浪特性作过一些分析和研究,茹荣忠和蒋胜利^[4]利用杭州湾乍浦、滩浒和游山(分别代表杭州湾西北部、东北部、南部)海洋水文观测站的实测风和波浪资料统计分析了杭州湾风浪分布规律,主要按年及季节统计分析风速、风向、波高、波向、周期等参数的变化,还初步统计了台风浪的特性。陈卫跃^[5]采用杭州湾北岸张家库潮滩450个测波记录,探讨分析了潮滩带波浪特征、波能衰减及波浪的统计分布。章可奇等^[6]采用最大熵谱方法分析杭州湾北岸张家库潮滩的波浪、潮流和滩面高程数据,得出滩面高程变化与波浪和潮流关系密切。夏期颐 and 洪广文^[7]基于多种风浪要素计算方法,根据实测风浪资料研究分析了长江口和杭州湾地区的风浪关系。总体上这些分析集中在沿岸或者岛屿附近,对杭州湾中部的波浪分析甚少,此外,近年来也有采用不同模式对杭州湾水域的台风浪及极值波浪进行数值模拟研究^[8-9],而对于杭州湾中部水域的实测波浪特性却未见深入报道。

利用杭州湾中部一年的实测波浪资料,深入分析了杭州湾中部的波浪统计特性,采用最小二乘法分析特征波参数之间的关系,统计研究了波谱特性,可为杭州湾相关工程建设和数值模拟研究提供有效的波浪基础资料。

1 数据与方法

1.1 数据介绍

杭州湾范围一般以北岸的澉浦镇与南岸的临山镇连线(经度约为 $120^{\circ}50'$)为西部,自西向东至湾口的湾区^[4],东南有舟山群岛,东北以洋山岛及洋山大桥为界。北岸自西南向东北依次为为嘉兴市的澉浦镇、海盐县、乍浦镇,还有上海市的金山区、奉贤区和浦东新区,南岸自西向东为宁波市的临山镇、庵东镇、新浦镇、三北镇、澥浦镇以及镇海区等地区。

波浪站位于杭州湾中部(如图1所示),经纬度位置为 121.577°E , 30.387°N ,水深为10 m,测量周期自2009年6月1日至2010年5月31日。测量周期内均利用声学波浪剖面流速仪(acoustic wave and current profiler,简称AWAC)进行观测,AWAC主要运用声表面追踪方法(AST法)测波,亦能同步分层测流速和流向,所测数据经过仪器配套的Storm处理软件可计算波高、周期、波向等波参数以及波谱等数据,测量所得数据可靠,精确度高^[10]。AWAC仪器设为每小时测量一次波面,一次采样持续1 024 s,采样间隔为0.5 s,一次记录2 048个波面数据。

1.2 数据处理方法

Storm软件用波面记录统计波参数时采用了跨零统计分析,可统计有效波高 $H_{1/3}$ 及有效周期 $T_{1/3}$,显著波高 $H_{1/10}$ 及显著周期 $T_{1/10}$,最大波高 H_{\max} 及其对应周期 T_{\max} ,平均波高 H_{mean} 及平均周期 T_{mean} 等参数。软件首选SUV方法^[11]计算波向,运用快速傅里叶变换方法计算频率谱,得到自由度为64的平滑频谱,谱高频截断为1 Hz,分辨率为0.01 Hz。此软件还可以输出谱计算的有效波高 H_{m0} 、平均周期 T_{02} 、谱峰周期 T_p (谱峰频率 f_p 的倒数)等参数。另外,还计算了其他参数,例如:零阶矩 m_0 、谱峰值 S_{\max} (波能密度谱曲线上的最大值,亦为谱峰频率对应的谱密度值)、平均周期 T_{01} 、谱宽度 ν 和相关系数 r 。在对各种参数进行初步处理分析时,对于由波面毛刺过多或者异常引起的软件统计波参数异常的数据组进行了删除处理,这些数据总体占比8.7%,分布较为分散,对多数较大波浪过程没有明显影响。另外,对于有效波高小于0.1 m以及平均波周期小于2 s的数据不进行分析,这部分占比3.6%,为无实质性意义的数据。

部分参数的定义如下:

$$H_{m0} = 4.0\sqrt{m_0} \quad (1)$$

$$T_{01} = m_0/m_1 \quad (2)$$



图1 波浪观测站位置示意

Fig. 1 Sketch map of the wave observation site

$$T_{02} = \sqrt{\frac{m_0}{m_2}} \quad (3)$$

$$v = \sqrt{\frac{m_0 m_2}{m_1^2}} - 1 \quad (4)$$

$$m_n = \int_0^\infty f^n S(f) df, \quad n = 0, 1, 2, \dots \quad (5)$$

式中: m_n 是指第 n 阶矩; f 为频率,Hz; $S(f)$ 为波能密度谱值, m^2/Hz 。

2 波参数统计分析

2.1 年月变化统计

经统计分析得出,研究水域有效波高年变化范围及年均值为 0.1 ~ 2.21 m(0.49 m),最大波高范围及均值为 0.14 ~ 3.25 m(0.84 m),平均周期范围及均值为 2.0 ~ 5.47 s(2.97 s),谱峰周期范围及均值为 1.98 ~ 12.69 s(3.81 s),说明研究水域多为短周期波。

部分波参数月均值和月最大值如图 2 所示,由图可知,最大波高月均值变化趋势与有效波高月均值基本一致,平均周期月均值变化趋势与谱峰周期月均值亦较为一致,但波动范围较小。统计可知,月均有效波高最大值为 0.68 m,出现在 11 月,次大的为 12 月和 3 月,均为 0.56 m;最大有效波高 2.21 m 出现在 11 月;月均最大波高的最大值为 1.13 m,也出现在 11 月,其次为 12 月的 0.98 m 和次年 3 月的 0.96 m;最大波高 3.25 m 出现在 12 月。月均平均周期最大值(3.2 s)、最大平均周期(5.47 s)和月均谱峰周期的最大值(4.16 s)均出现在 11 月,最大谱峰周期 12.69 s 出现在 10 月。

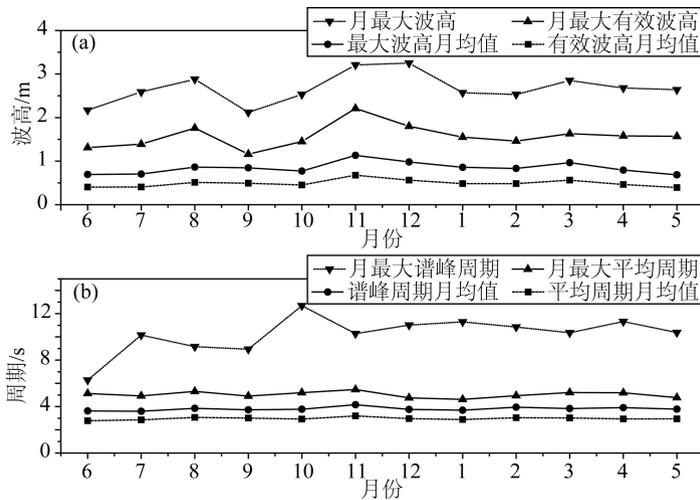


图 2 波参数月最大和月均值变化图

Fig. 2 Variation of monthly maximum and monthly averaged values of wave parameters

各月以及全年的各级别波高的出现频率如表 1 所示,由表 1 可知,测量水域全年以小浪为主,占五成多,其次为三成多比例的轻浪,出现的中浪甚少,占 2.5%,未测到大浪。各月的小浪和轻浪出现比例差异均不大,其中冬季出现的小浪相对较少,但出现的中浪相对较多。中浪主要出现在秋末、冬、春季以及 8 月,其中 8 月、12 月和 3 月份出现较多,8 月的中浪主要是 2009 年 8 号台风“莫拉克”影响所致,其他月份主要是冷空气影响所致。

全年冬春季出现较大波浪过程较多,夏秋季相对较少,冬季、春季和秋末主要受冷空气影响,冷空气影响频繁,6 月至 10 月主要受台风影响,但台风实际影响频次小于冷空气。11 月 15 日至 18 日的这次波浪过程影响最大,主要为冷空气影响所致,过程中波向由东北向逆时针逐渐转为西北向,出现了全年最大有效波高 2.21 m,对应平均波周期为 5.47 s,亦为全年最大平均周期,对应波向为西北向,其对应的最大谱密度 $5.66 \text{ m}^2/\text{Hz}$ 亦为全年最大值。影响最大的台风过程为台风莫拉克所致,莫拉克在西北太平洋生成,西偏北行进入台湾,之后登陆福建北部,后一直北上,穿行浙江,于 8 月 10 日晚以热带风暴自南向北经过杭州湾附

近,对湾内的影响时段主要为 8 月 6 日至 10 日,过程中波向由东北顺时针转为东南向,主要为偏东向,产生的最大有效波高为 1.76 m,对应平均波周期为 4.16 s,波向为东向,而该时段其他台风由于距离杭州湾较远,影响甚小。

表 1 2009 年 6 月至 2010 年 5 月各级有效波高出现频率分布

Tab. 1 Occurrence frequency of the significant wave height of all levels from June 2009 to May 2010 (%)

$H_{1/3}/m$	月份												全年
	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3	4	5	
0.1~0.5	5.1	5.4	4.8	4.6	5.2	3.2	3.4	3.5	3.9	3.8	4.5	5.4	52.9
0.5~1.25	2.2	2.4	2.8	3.3	2.6	3.3	3.2	2.0	2.4	3.5	2.7	2.1	32.3
1.25~2.5	0.0	0.0	0.3	0.0	0.0	1.0	0.3	0.2	0.1	0.3	0.1	0.0	2.5
合计	7.3	7.9	7.9	7.9	7.8	7.6	6.8	5.6	6.4	7.6	7.3	7.6	87.7

2.2 波高周期联合分布

各级实测有效波高和平均周期的联合分布如表 2 所示,由表 2 可知,全年中 2 ~ 3 s 的波浪占半数以上,其次为 3 ~ 4 s 的波浪,占三成多,其中又以波周期在 2 ~ 3 s 的小浪出现频率最高,达 39.4%。小浪和轻浪均以 2 ~ 4 s 为主,中浪的波周期主要分布在 3 ~ 5 s,总体上呈现浪大周期大的趋势。

表 2 波高周期联合分布

Tab. 2 Joint distribution of wave height and wave period (%)

$H_{1/3}/m$	T_{mean}/s			
	2~3	3~4	4~5	5~6
0.1~0.5	39.4	12.3	1.2	0.0
0.5~1.25	10.8	17.5	3.9	0.1
1.25~2.5	0.3	1.1	1.0	0.1
合计	50.4	31.0	6.2	0.2

2.3 波向

杭州湾中部常浪向主要分布在 NE 顺时针至 SE 向,全年的出现频率均大于等于 10%,其中小浪出现较多,轻浪其次(如表 3 所示),中浪主要是偏北向,并且由图 3 可知,强浪向主要分布在 NW、NE 方向,这两个方向也是中浪出现较多的方向。

从表 4 中可知,常浪向来波中以 2 ~ 3 s 的短周期波浪为主,其次是 3 ~ 4 s。5 ~ 6 s 的较长周期波浪主要出现在 NW 和 SE 向,其中的 NW 向波浪出现于春秋季节,多由冷空气引起,而 SE 向主要出现在夏季,多由台风引起。

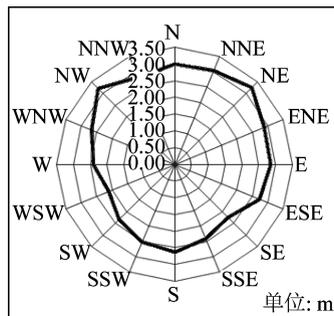


图 3 最大波高各向分布

Fig. 3 Probability rose of the wave direction of the maximum wave height

表 3 各级有效波高各向出现频率分布

Tab. 3 Occurrence frequency of the significant wave height of all levels and directions (%)

(%)

$H_{1/3}/\text{m}$	N	NNE	NE	ENE	E	ESE	SE	SSE	S	SSW	SW	WSW	W	WNW	NW	NNW
0.1~0.5	1.7	2.7	7.6	10.0	7.4	7.5	6.9	2.5	0.7	0.5	0.3	0.3	0.5	0.9	1.7	1.8
0.5~1.25	1.1	2.1	4.5	4.2	2.5	3.5	5.4	1.5	0.1	0.0	0.1	0.1	0.1	0.9	3.7	2.7
1.25~2.5	0.2	0.3	0.4	0.2	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.7	0.3
合计	2.9	5.0	12.5	14.5	10.0	11.1	12.3	4.1	0.9	0.5	0.4	0.3	0.6	1.9	6.1	4.7

表 4 各级平均周期各向出现频率分布

Tab. 4 Occurrence frequency of the mean wave period of all levels and directions (%)

(%)

T_{mean}/m	N	NNE	NE	ENE	E	ESE	SE	SSE	S	SSW	SW	WSW	W	WNW	NW	NNW
2~3	1.9	2.8	7.6	9.3	5.7	6.2	6.0	2.6	0.7	0.4	0.3	0.3	0.4	1.3	2.6	2.4
3~4	0.9	2.0	4.9	4.8	3.7	3.8	4.6	1.3	0.2	0.1	0.1	0.0	0.1	0.5	2.1	1.8
4~5	0.1	0.2	0.1	0.4	0.7	1.1	1.6	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	1.2	0.5
5~6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.0

3 波参数拟合分析

3.1 波高

实测有效波高 $H_{1/3}$ 和最大波高 H_{max} 之间有良好的相关性(如图 4(a)所示),相关系数为 0.99。理论上瑞利分布^[12]中 $H_{\text{max}}/H_{1/3}$ 的值为 1.53,本次实测数据分析显示该比值为 1.70,稍大于杨斌等^[2]统计的江苏辐射沙洲南部比值 1.65,小于 Goda^[13]在直立式防波堤设计中提出的比值为 1.8。零跨统计分析的有效波高 $H_{1/3}$ 与零阶距的开方之比为 3.72(如图 4(b)所示),也与杨斌等^[2]统计的 3.75 接近,均小于 $H_{\text{m}0}$ 理论值 4.0。统计显示, $H_{1/10}/H_{1/3}$ 、 $H_{1/3}/H_{\text{mean}}$ 的值分别为 1.26 和 1.58(相关系数均为 0.99),稍低于瑞利分布的 1.275 和 1.598,主要原因是波浪浅水效应。理论瑞利分布的关系是基于深水风浪数据推导所得,而后文对实测数据的谱分析可知,研究水域的波浪并不全为风浪,有一定比例的涌浪,这与沿海其他水域的波浪较为相似,均带有不同比例的涌浪数据,导致特征参数之间的比值与理论值有所不同。

3.2 波周期

部分实测特征波周期之间也有较好的相关关系,分析显示平均周期 T_{mean} 与谱计算的平均周期 T_{01} 、 T_{02} 、统计计算的 $T_{1/3}$ 、 $T_{1/10}$ 的相关性均较好,相关系数分别为 0.98、0.96、0.95、0.89,同时拟合得到的关系式分别为 $T_{01} = 1.01T_{\text{mean}}$ (如图 4(c)所示), $T_{02} = 0.93T_{\text{mean}}$, $T_{1/3} = 1.15T_{\text{mean}}$, $T_{1/10} = 1.17T_{\text{mean}}$ 。 T_{mean} 与谱峰周期 T_p 、 T_{max} 的相关性相对较差,相关系数分别为 0.63 和 0.66,拟合得到的关系式分别为 $T_p = 1.27T_{\text{mean}}$ (如图 4(d)所示)和 $T_{\text{max}} = 1.17T_{\text{mean}}$ 。 T_p 和 T_{max} 属于单个波周期,并不代表某种平均意义,所以与平均周期相关性较差。

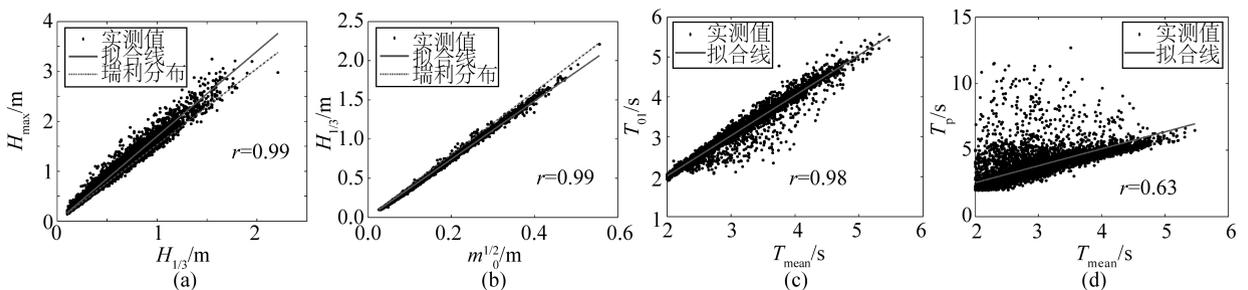


图 4 波参数散点关系

Fig. 4 Scatter plot of wave parameters

3.3 波高与波周期

采用全年资料分析平均周期 T_{mean} 与有效波高 $H_{1/3}$ 的关系得知两者相关性并不显著,相关系数为 0.55。通过按 16 方位波向各个方向分别计算两者相关系数,如图 5 所示,可知 WNW-NE 向的有效波高与平均周期的相关系数较大,合计相关系数为 0.71,其中又以 NNE 向最大,为 0.77,而偏西和偏南向的相关性较差。拟合 WNW-NE 向的有效波高与平均周期之间的关系得到 $T_{mean} = 1.19 H_{1/3} + 2.3, r = 0.71$,如图 6 所示。

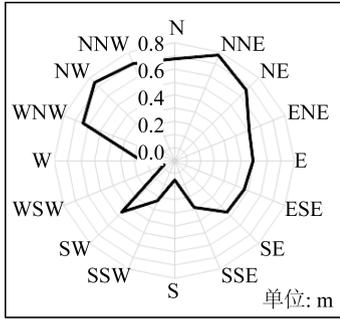


图 5 各向有效波高 $H_{1/3}$ 与平均周期 T_{mean} 的关系

Fig.5 Probability roses of the correlation coefficient of the significant wave height $H_{1/3}$ with mean wave period T_{mean}

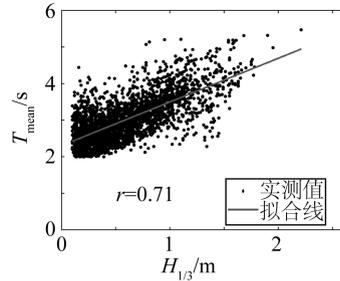


图 6 WNW-NE 向有效波高 $H_{1/3}$ 与平均周期 T_{mean} 的关系

Fig.6 Variation of significant wave height $H_{1/3}$ and mean wave period T_{mean} from west-northwest to northeast direction

4 谱特性

研究区域全年谱宽度 ν 分布较宽,从 0.24 到 0.81,均值为 0.41,最大谱密度变化范围为 0.001 8 ~ 5.66 m^2/Hz ,年平均为 0.24 m^2/Hz ,小于杨斌等^[2]统计江苏沿海开阔海域冷家沙水域的年均值 0.41 m^2/Hz 。谱宽度和谱密度的月均值以及月最大值如图 7 所示,由图可知,谱宽度月均值波动较小,均接近年均值;8、11、12 和次年 3 月的平均最大谱密度超过年均值,其他月份均低于年均值,表明季节性台风和冷空气对波谱能量有明显增大作用。

统计表明杭州湾的波浪谱以单峰为主,也存在多峰,实测单峰和多峰谱形如图 8 所示,多谱峰主要出现在谱峰值较小的波浪中,谱峰值较大时波谱多为单峰谱。

为区别波浪中的风、涌浪成份,采用 PORTILLA 等^[14]提出的计算方法,即判别实测谱峰与对应频率处完全发展风浪谱 PM 谱谱峰的比值是否大于 1,大于 1 则为风浪,反之为涌浪,根据实测谱峰与 PM 谱峰之比得出全年有 58.6%波浪以风浪为主。杨斌等^[15]对本测点较大波浪 ($H_{1/3} \geq 0.62 m$) 频率谱进行过拟合分析,得到改进后的规范谱—拟合效果好于 JONSWAP 谱,两谱模式的谱峰预测值如图 9 所示,由图 9 可见改进规范谱—预测的谱峰值效果好于 JONSWAP 谱。

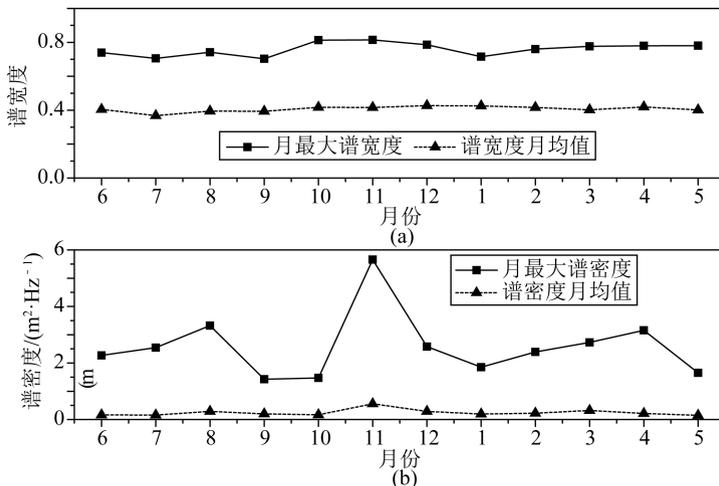


图 7 谱参数月最大和月均值变化图

Fig. 7 Variation of monthly maximum and monthly averaged values of wave spectral parameters

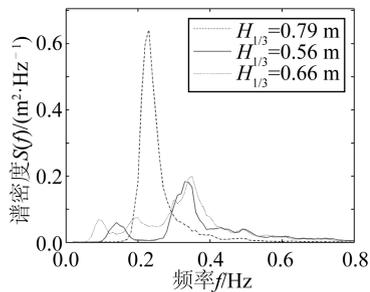


图 8 实测波浪单峰和多峰谱图形

Fig. 8 The unimodal and multimodal wave spectrum of measured waves

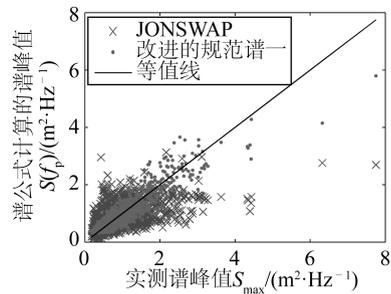


图 9 实测与理论计算谱峰值

Fig. 9 Maximum spectral energy based on measured and theoretical spectra

5 结 语

根据杭州湾中部实测波浪资料,采用最小二乘法拟合得出相关波参数之间的关系式,并统计分析了波浪频谱特性。得到如下结论:

1) 研究水域出现的小浪和轻浪分别占五成多和三成多,于各月的出现频率相差不大,中浪出现甚少,主要出现在冬、春季以及台风影响时段,多由冷空气或者台风引起,其中冷空气影响较为频繁,台风影响次数相对较少。

2) 常浪向主要分布在 NE-SE 向,其中又以平均周期为 2 ~ 4 s 的小浪出现较多。强浪向主要分布在 NW 和 NE 向,中浪主要来自偏北向,对应的平均周期主要分布在 3 ~ 5 s。出现的小浪和轻浪其平均周期相对较短,总体上浪大波周期也大。

3) 特征波高之间、特征波周期之间多数有较好相关关系,但有效波高与平均周期关系并不显著,在各个来波方向两者的关系差异较大,总体上偏北向浪两者关系相对较好。

4) 研究水域波浪以风浪居多,且以单峰谱为主,浪越大波谱越呈单峰,最大谱密度总体上小于开阔海域的值。

参考文献:

- [1] 耿宝磊,文先华. 台风作用下琼州海峡海域波浪特征分析[J]. 海洋工程, 2013, 31(6): 59-67. (GENG Baolei, WEN Xianhua. Analysis on wave characteristics of Qiongzhou channel in typhoon period[J]. The Ocean Engineering, 2013, 31(6): 59-67. (in Chinese))
- [2] YANG Bin, FENG Weibin, ZHANG Yu. Wave characteristics at south part of radial sand ridges of Southern Yellow Sea[J]. China Ocean Engineering, 2014, 28(3): 317-330.
- [3] AMRUTHA M M, KUMAR V S, SHARMA S, et al. Characteristics of shallow water waves off the central west coast of India before, during and after the onset of the Indian summer monsoon[J]. Ocean Engineering, 2015, 107(4): 259-270.
- [4] 茹荣忠,蒋胜利. 杭州湾的波浪概况[J]. 东海海洋, 1985, 3(2): 34-40. (RU Rongzhong, JIANG Shengli. A sketch of the wave in the Hangzhou Bay[J]. Donghai Marine Science, 1985, 3(2): 34-40. (in Chinese))
- [5] 陈卫跃. 杭州湾北岸滩涂波浪特征与统计分布[J]. 海洋科学, 1990, 6: 16-22. (CHEN Weiyue. Characteristics and statistical distributions of waves on a muddy flat, northern coast of Hangzhou Bay[J]. Marine Science, 1990, 6: 16-22. (in Chinese))
- [6] 章可奇,金庆祥,王宝灿. 杭州湾北岸张家厍潮滩动态系统的频谱分析[J]. 海洋与湖沼, 1994, 25(4): 446-451. (ZHANG Keqi, JIN Qingxiang, WANG Baocan. Spectral analysis of the dynamic system fo tidal flat at Zhangjiashe on the north bank of Hangzhou Bay[J]. Oceanologia & Limnologia Sinica, 1994, 25(4): 446-451. (in Chinese))
- [7] 夏期颐,洪广文. 长江口、杭州湾地区波要素推算及验证[J]. 河海大学学报(自然科学版), 1994, 22(2): 30-38. (XIA Qiyi, HONG Guangwen. Computation and verification of wave characteristics along the coastal water of Yangtze River Estuary and Hangzhou Bay[J]. Journal of Hohai University, 1994, 22(2): 30-38. (in Chinese))
- [8] 郑立松,余锡平. 杭州湾内台风浪模拟研究[J]. 南水北调与水利科技, 2010, 8(3): 128-130. (ZHENG Lisong, YU

- Xiping. Modeling of wind wave in Hangzhou Bay[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2010,8(3): 128-130. (in Chinese))
- [9] 王卫远,何倩倩,杨娟. 杭州湾海域50年一遇波浪数值模拟研究[J]. 海洋学研究, 2013, 31(4): 44-48. (WANG Weiyuan, HE Qianqian, YANG Juan. Numerical simulation research of wave with a return period of 50 years in the Hangzhou Bay[J]. Journal of Marine Sciences, 2013, 31(4): 44-48. (in Chinese))
- [10] PEDERSEN T, NYLUND S, DOLLE A. Wave height measurements using acoustic surface tracking[J]. Oceans, 2004,3: 1747-1754.
- [11] PEDERSEN T, SIEGEL E. Wave measurements from a subsurface platform[J]. Sea Technology, 2008, 49(2): 17.
- [12] LONGUET-HIGINS M S. On the statistical distribution of the heights of the sea waves[J]. Journal of Marine Research, 1952,11(3): 245-266.
- [13] GODA Y. New wave pressure formulae for composite breakwaters [C]//Proceedings of the 14th International Conference of Coastal Engineering(ASCE). 1974: 1702-1720.
- [14] 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: 117-122.
- [15] 杨斌,张俊彪,叶钦,等. 杭州湾中部实测波谱特性分析[C]//第十八届中国海洋(岸)工程学术讨论会. 北京: 海洋出版社, 2017: 295-299. (YANG Bin, ZHANG Junbiao, YE Qin, et al. Analysis on measured wave spectra of central Hangzhou Bay analysis[C]//Proceedings of the Eighteenth China Ocean (Coastal) Engineering Conference. Beijing: China Ocean Press, 2017: 295-299. (in Chinese))
-

(上接第95页)

- [12] HONG Liang, ZHU Renchuan, MIU Guoping, et al. An investigation into added resistance of vessels advancing in waves[J]. Ocean Engineering, 2016, 123:238-248.
- [13] 洪亮,朱仁传,缪国平,等. 三维频域有航速格林函数的数值计算与分析[J]. 水动力学研究与进展, 2013(4):423-430. (HONG Liang, ZHU Renchuan, MIU Guoping, et al. Numerical calculation and analysis of 3-D green's function with forward speed in frequency domain[J]. Chinese Journal of Hydrodynamic, 2013(4):423-430. (in Chinese))
- [14] 黄庆立,朱仁传,缪国平,等. Kelvin源格林函数及其在水平线段上的积分计算[C]//第二十七届全国水动力学研讨会. 2015.(HUANG Qingli, ZHU Renchuan, MIU Guoping, et al. Calculation of horizontal line segments Kelvin Green's function and integration over panels [C]//Proceeding of the Twenty-Seventh National Symposium on Hydrodynamics. 2015. (in Chinese))
- [15] TAKAHASHI T. A practical prediction method of added resistance of a ship in waves and the direction of its application to hull form design[J]. Transactions of West Japan Society Naval Architecture, 1988,75: 75-95