

杭州湾北部实测波浪特征*

杨 斌¹ 杨万康² 谢华伟¹ 黄赛花¹

(1. 浙江水利水电学院 浙江省农村水利水电资源配置与调控关键技术重点实验室 浙江杭州 310018; 2. 自然资源部第二海洋研究所 海洋空间资源管理技术重点实验室 浙江杭州 310012)

摘要 为了解杭州湾北部波浪特性,利用杭州湾北部一年实测波浪资料,统计分析该地区的波参数变化特征,运用回归分析获得波参数之间的相关关系,并用谱参数及波谱形态分析了实测波浪频谱的变化特性。结果表明,与杭州湾南部海域波浪特性明显不同之处是热带气旋对本观测水域波浪的影响强度大于冬季季风的影响强度,较大波浪主要由热带气旋引起,并且路径相似的热带气旋在杭州湾南、北部测点引起的最大波浪其参数较为接近。研究水域常浪向分布在东东北至东南向,强浪向主要分布在东东北方向。研究成果可为河口海湾相关工程的设计建造和沿海防灾减灾提供重要参考。

关键词 波浪特征; 杭州湾; 波参数; 频率谱; 台风浪

中图分类号 TV139.2 **doi:** 10.11693/hyhz20211100296

沿海波浪特性是近岸工程需要了解的一个重要因素,而且也是近些年来国内外学者经常关注的内容。世界各地关于实测波浪特性分析的研究报道较多: Yang 等(2014)利用 1 a 实测波浪资料对黄海辐射沙洲波浪的统计特性、谱特性和波群特性进行了研究, Amrutha 等(2017)利用浅水区域四个测站各一个月的实测波浪资料对印度沿海夏季季风浪统计特性和谱特性进行了分析, Anoop 等(2014)和 Nair 等(2017)对印度西海岸浅水海域波浪时空变化和谱形特性进行了研究报道。Shanas 等(2017, 2018)人对红海东岸中部的波浪来源进行研究以及对该区域波浪谱特性进行了分析。杨斌等(2017)分析了舟山岛东北部沿海深浅水两个测站的台风影响下的波浪特性。Xiong 等(2020)利用江苏、浙江和福建沿海合计五个测波点的短期测波资料,侧重分析了不同水深测点的波高、波压力和轨道速度之间的分布特性,并提出了一个推算波高的经验公式。Zhou 等(2020)分析了浙江中部三门湾某测波点的波浪特性,尤其对影响最大的台风浪过程进行了详细分析。上述学者研究实测波浪的方

法主要有波参数之间的回归分析、参数变化的数理统计和波浪频率谱或者方向谱的波谱理论分析,从年、季、月,甚至天的时间尺度对研究水域波浪进行分析,目的是深入了解海域波浪的外部波参数变化特征和内部波谱变化特性。

关于杭州湾实测波浪特征的论文亦有见报道,其中茹荣忠等(1985)利用杭州湾乍浦、滩浒和游山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,发现杭州湾冬季盛行偏北风,以西北风为主,夏季盛行偏南风,常浪向为 N-ENE 向,强浪向为 NE。夏期颐等(1994)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。杨斌等(2018)基于杭州湾中部偏南水域某测点的波浪资料进行了波浪特性分析,发现资料中的一个最大波浪过程是由冷空气影响所致,影响强度大于资料中的台风影响过程,并且冷空气影响次数比台风频繁。总体而言,由于早期波浪的测量频次较低,导致研究并不详细和深入,而近些年的仪器观测性能均显著提高,对波浪的分析也进一步

* 浙江省农村水利水电资源配置与调控关键技术重点实验室开放基金资助项目, ZJWEU-RWM-20200102B 号; 浙江省自然科学基金青年基金项目, LQ20D060003 号。杨 斌, 讲师, E-mail: yb19841014@163.com

通信作者: 杨万康, 硕士生导师, 高级工程师, E-mail: yangwankang@126.com

收稿日期: 2021-11-25, 收修改稿日期: 2022-01-14

深入并且较为全面。因此,对于杭州湾北部的实测波浪特性研究总体上是不够的,也未见详细研究成果见诸报道,有必要进行分析。

本文利用杭州湾北部一年实测波浪资料,分析杭州湾北部的波浪变化特性。具体为对观测期内的波参数变化进行统计分析,并进行波参数之间的相关性和波谱特性的研究,还对观测到的典型台风浪过程进行了阐述,并重点与南部已有分析成果进行了对比研究。本研究可为杭州湾北部水域相关工程建设和区域波浪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 观测区域及内容

杭州湾位于东中国海西部,经度大致为 $120.85^{\circ}\sim 121.85^{\circ}\text{E}$ 的水域(图 1),南北有陆地为其边界,东边有舟山群岛。杭州湾内的水下地形总体上变化较为平缓,大部分区域的海图水深约为 $7\sim 10\text{ m}$,湾内分布有一些小岛屿,岛屿附近水深变深,西北部有深槽,其边缘为 10 m 等深线圈,线圈里深槽最深处约有 46 m ,东及东南向接近岛屿附近水深相对较深,东北至东南方向均有大小不等的出口面向东海,其中东北东向的出口开敞程度大于东南东向。

本文波浪测站位于杭州湾北部(图 1),位置离北岸垂直距离为 14.1 km ,平均水深约为 10.9 m 。波浪测量周期自 2014 年 4 月 1 日至 2015 年 3 月 31 日,测量周期内均利用声学多普勒波浪流速剖面仪(acoustic wave and current profiler, AWAC)进行观测,每小时测量一次波面,一次采样持续 $1\ 024\text{ s}$,采样间隔为 0.5 s ,一次记录 $2\ 048$ 个波面数据。AWAC 主要运用声表面追踪方法测波,所测数据经过仪器配套的 Storm 处理软件可计算波参数和波谱等数据(Pedersen *et al.*, 2002)。

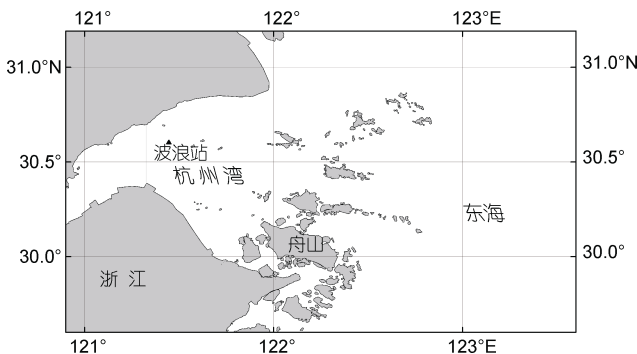


图 1 波浪站位置示意图

Fig.1 Sketch map of the wave observation site

1.2 数据处理方法

本文所用波面数据经过 Storm 软件采用跨零统计方法可统计有效波高 $H_{1/3}$ 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。该软件采用 SUV(acoustic surface tracking and horizontal velocity U and V)方法计算波向(Pedersen *et al.*, 2005), 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 , 还可以输出谱计算的有效波高 H_{m0} 、谱计算平均周期 T_{02} 、谱峰周期 T_p (谱峰频率 f_p 的倒数)等参数。另外, 本文计算了零阶矩 m_0 、谱峰值 S_{\max} 、平均周期 T_{01} 、谱宽度 v 和相关系数 r 等参数。其中部分参数的定义为

$$H_{m_0} = 4\sqrt{m_0}, \quad (1)$$

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

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

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

$$m_0 = \int_0^{\infty} f^n S(f) df, \quad n = 0, 1, 2, \dots, \quad (5)$$

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

在剔除明显异常数据后, 本文共选取 $8\ 282$ 组(占全年的 94.5%)有效数据用于分析。

2 波参数统计分析

2.1 年月变化统计

经统计得到有效波高年变化范围及年均值为 $0.03\sim 1.81\text{ m}$ 和 0.40 m , 最大波高范围及均值为 $0.05\sim 3.11\text{ m}$ 和 0.68 m , 平均周期范围及均值为 $1.5\sim 5.4\text{ s}$ 和 2.8 s , 谱峰周期范围及均值为 $1.0\sim 16.7\text{ s}$ 和 3.6 s (数据曲线图见图 2), 其中对谱峰周期超过 10 s 的波浪进行分析发现, 多数波浪来自 ENE 向, 该方向是外海波浪可直接传至观测点水域的方向, 总体而言研究水域多为波高偏小的短周期波浪。

最大波高月均值变化趋势与有效波高月均值变化趋势一致(图 3), 有效波高月均最大值为 0.52 m , 出现在 9 月, 最大有效波高 1.81 m 、最大波高月均值的最大值为 0.89 m 和最大波高 3.11 m 均出现在 9 月, 主要因为当月受强热带风暴影响。平均周期月均值变

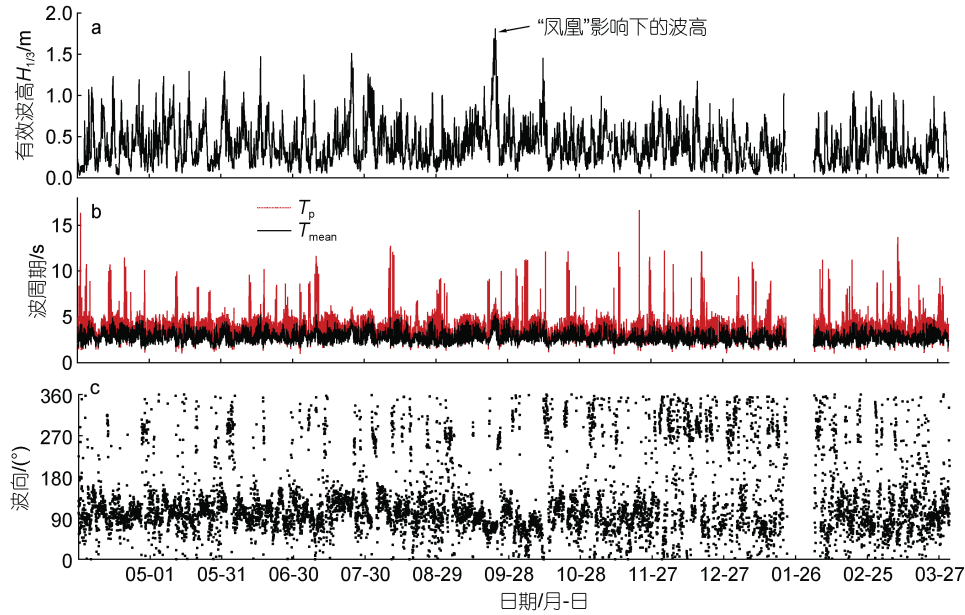


图2 2014年4月1日至2015年3月31日的有效波高 $H_{1/3}$ (a), 平均周期 T_{mean} 和谱峰周期 T_p (b), 平均波向的时间序列(c)
 Fig.2 Time series plot of significant wave height ($H_{1/3}$) (a), mean wave period (T_{mean}) and peak wave period (T_p) (b), and the mean wave direction (c) from 1 April 2014 to 31 March 2015

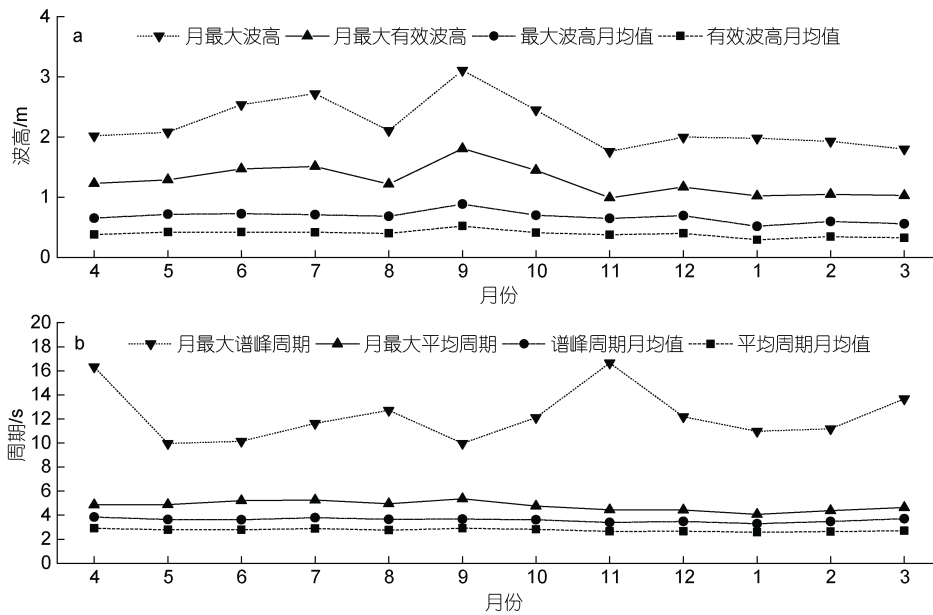


图3 波参数的月最大和月均值变化图
 Fig.3 Variation of monthly maximum and monthly averaged values of wave parameters

化趋势与谱峰周期月均值变化趋势亦较为一致, 波动范围较小, 而每月的最大谱峰周期变化相对较大, 最大谱峰周期 16.65 s 出现在 11 月。

经分析得知最大的一次波浪过程为强热带风暴“凤凰”(Fung-wong, 201416 号)引起, 其波浪过程总体强于冬季冷空气引起的较大波浪过程, 这与杭州湾南部海域的研究结果相反(杨斌等, 2018)。在冬季,

杭州湾多出现冷空气引起的偏北风, 引起的波浪也多为偏北向, 此次冬季波浪的有效波高均值为 0.35 m, 平均波周期为 2.6 s, 均小于年均值, 说明冬季平时波浪波高不大。冬季冷空气引起的最大一次波浪过程中最大有效波高 1.17 m, 对应平均波周期 3.9 s, 波向 WNW 向, 波高远小于南部冬季时期实测最大有效波高 2.21 m, 对应平均波周期 5.47 s, 波向为 NW 向(杨

斌等, 2018)。具体因为本次波浪观测点位置靠近杭州湾北岸, 偏北风的风区相对较短, 导致冷空气在测点产生波浪总体小于强热带风暴引起的波浪, 也小于杭州湾南部区域的波浪。

强热带风暴“凤凰”为自南向北穿过杭州湾海域的热带气旋, 其以热带风暴形式诞生于菲律宾以东海域, 后沿西北向行进至菲律宾北端升级成强热带风暴, 接着北上至浙江宁波象山附近登陆, 继续北上, 至杭州湾中部时降为热带风暴继续北上至启东市, 然后沿东北方向进入黄海, 接近韩国时消失。若以大于 0.4 m 有效波高来记录该气旋对观测点的影响历时, 从 9 月 20 日 17 时开始观测点的波浪开始增大, 到 23 日 0 时影响达到最大, 此时气旋中心接近但还未到杭州湾内, 随后气旋中心穿过杭州湾北上, 24 日 15 时后观测点波浪明显减小, 整个影响过程历时 95 h。平均周期的变化趋势是先从 2.4 s 波动式增长到 5.4 s, 后波动式减小到 2 s。在气旋中心位于观测点南方时波浪波向主要为 ENE 向, 之后波向主要为偏西方向。在观测点产生的最大波高 3.11 m 出现在 23 日 0 时, 对应有效波高为 1.81 m, 平均周期为 4.5 s, 波向为 ENE 向(见图 2)。这与杭州湾南部一次台风莫拉克引

起的最大有效波高 1.76 m 接近, 对应平均周期 4.2 s, 波向 E 向(杨斌等, 2018), 两个台风在杭州湾附近的路径较为相似, 引起的波参数大小也接近。因此, 本次“凤凰”引起的最大波浪比冬季冷空气引起的最大波浪高。

各月以及全年各级别波高的出现频率见表 1, 由表可知, 测量水域全年以 0.1~0.5 m 小浪为主, 占六成多, 其次为 0.5~1.0 m 的波浪, 占 25.24%, 1 m 以上的波浪占比甚少。各月也以小浪出现频率最高, 其中冬季占比相对较小; 各月占比次多为 0.5~1.0 m 波浪; 1 m 以上波浪主要出现在 7~9 月, 即热带气旋影响较多的月份。

2.2 波高周期联合分布

由各级有效波高和平均周期的联合统计可知, 全年中周期为 2~3 s 的波浪占近六成, 其中占比最多为 0.1~0.5 m 波浪, 占 44.29%, 集中度稍高于杭州湾南部观测数据; 其次为 3~4 s 的波浪, 占两成多, 4 s 以上波浪只占 4.1%, 稍低于杭州湾南部观测数据(杨斌等, 2018)。因此, 本文波浪主要以 0.1~1.0 m、2~4 s 为主, 大于 1 m 的波浪其波周期主要分布在 3~5 s, 总体上浪大波周期也大。

表 1 2014 年 4 月至 2015 年 3 月各级有效波高出现频率(单位: %)

Tab.1 The occurrence frequency of significant wave height at all levels from April 2014 to March 2015 (unit: %)

| $H_{1/3}/m$ | 4月 | 5月 | 6月 | 7月 | 8月 | 9月 | 10月 | 11月 | 12月 | 1月 | 2月 | 3月 | 全年 |
|-------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|-------|
| 0.0~0.1 | 0.78 | 0.22 | 0.08 | 0.34 | 0.08 | — | 0.07 | 0.11 | 0.32 | 0.63 | 0.50 | 0.55 | 3.68 |
| 0.1~0.5 | 5.03 | 5.26 | 5.62 | 5.54 | 5.97 | 4.73 | 5.79 | 6.04 | 4.77 | 3.78 | 4.82 | 6.30 | 63.64 |
| 0.5~1.0 | 2.23 | 2.79 | 2.35 | 2.17 | 2.17 | 2.91 | 2.40 | 1.77 | 2.49 | 0.68 | 1.66 | 1.63 | 25.24 |
| 1.0~1.5 | 0.14 | 0.23 | 0.17 | 0.39 | 0.27 | 0.34 | 0.09 | — | 0.03 | 0.01 | 0.06 | 0.01 | 1.75 |
| 1.5~2.0 | — | — | — | 0.02 | — | 0.22 | — | — | — | — | — | — | 0.24 |
| 合计 | 8.22 | 8.46 | 8.49 | 8.20 | 8.34 | 7.92 | 7.61 | 5.10 | 7.03 | 8.49 | 8.17 | 8.49 | 94.54 |

注: “—”代表无数据

2.3 波向

本文波浪来向主要分布于 ENE 至 SE 向, 全年出现频率为 62.76%, 其中 E 向波浪出现频率最高, 占 20.55% (图 4)。1 m 以上波浪亦出现在 ENE-SE 向, 其中强浪向为 ENE 向。常浪向以 2~3 s 的短周期波浪为主, 其次是 3~4 s, 5~6 s 的较长周期波浪出现在 ENE 和 E 向, 其中 ENE 向波浪出现较多, 多数出现在 9 月份热带气旋引起的波浪中(图 5)。

3 波参数相关分析

3.1 波高

研究显示, 特征波高之间的比值关系常常与理

论关系较为接近。本次实测数据的特征波高之间均有良好的相关性, 具体见图 6a~6d。由相关分析得到 $H_{max}/H_{1/3}$ 、 $H_{1/10}/H_{1/3}$ 、 $H_{1/3}/H_{mean}$ 的值分别为 1.70、1.26 和 1.57, 与杭州湾中南部波参数的对应比值基本一致(杨斌等, 2018), 其中 $H_{max}/H_{1/3}$ 值大于瑞利分布的值 1.53, 后两者稍低于瑞利分布的 1.271 和 1.598 (Longuet-Higgins, 1952)。有效波高 $H_{1/3}$ 与零阶距 m_0 的平方之比为 3.67 (图 6d), 小于杭州湾中南部统计的比值 3.72 (杨斌等, 2018) 以及理论比值 4.0, 主要原因为波浪浅水效应, 不同水域浅水效应并不相同, 导致比值不一致。此外, 理论瑞利分布的关系是基于深水风浪数据推导所得, 而本研究海域水深较浅, 波浪

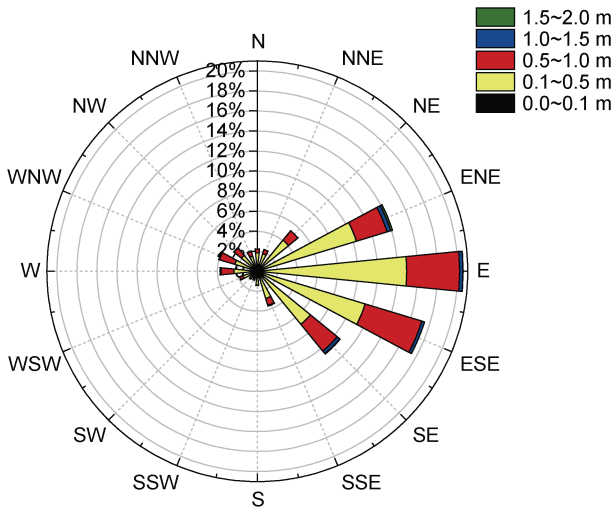


图 4 各级有效波高各向出现频率

Fig.4 The occurrence frequency of significant wave height of all levels and directions

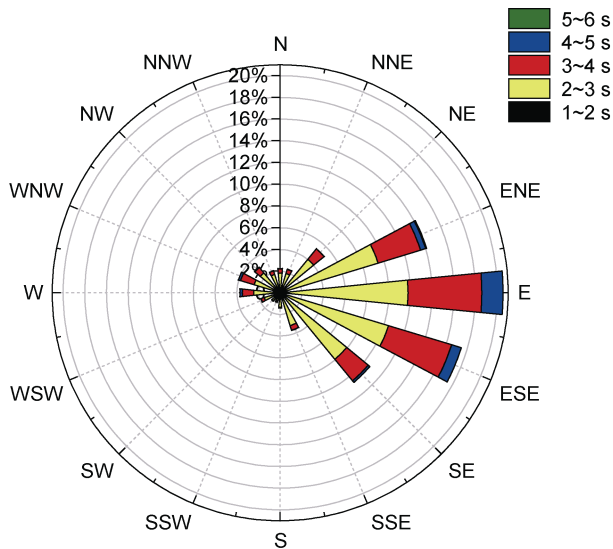


图 5 各级平均周期各向出现频率

Fig.5 The occurrence frequency of the mean wave period of all levels and directions

传播时发生了浅水变形, 导致特征参数之间的比值与理论值不同。

3.2 波周期

分析显示部分特征波周期之间亦有较好的相关关系, 其中 T_{mean} 与 $T_{1/3}$ 、 $T_{1/10}$ 、谱计算的 T_{01} 、 T_{02} 的相关性均较好, 相关系数分别为 0.95、0.88、0.99、0.99, 同时拟合得到的关系式分别为 $T_{1/3}=1.16T_{mean}$ 、 $T_{1/10}=1.17T_{mean}$ 、 $T_{01}=1.01T_{mean}$ 、 $T_{02}=0.94T_{mean}$ (图 6c~6h)。 T_{mean} 与 T_{max} 、 T_p 的相关性相对较差, 相关系数分别为 0.59 和 0.68。 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。

这些特征波周期之间的关系式与杭州湾中南部统计得出的关系式十分相近。因此, 虽然实测波参数的分布在各个海域会有所不同, 但对于同处于杭州湾区域的波浪而言, 特征波波参数之间的相关关系变化并不大。

3.3 波高与波周期

分析平均周期与有效波高的关系得知两者相关性并不显著, 相关系数 r 为 0.58。通过按 16 方位波向各个方向分别计算两者相关系数(图 7)可知, W-NW 向的有效波高与平均周期的相关系数较大, 其中又以 W 向最大, 为 0.78, 但实际上 W-NW 向波浪出现频率很低(图 4)。相关系数次大的方向为 E-SE 向, 这些方向是波浪出现频率高的方向, 而偏北向和偏南向的相关系数较小, 波高与周期之间的相关性较差。

4 谱特性

研究区域谱宽度 ν 年均为 0.39, 小于杭州湾中南部波浪的谱宽度 0.41, 全年最大谱密度的最大值为 $2.65 \text{ m}^2/\text{Hz}$, 年平均为 $0.15 \text{ m}^2/\text{Hz}$, 均小于杭州湾中南部波浪的值, 主要原因为本次观测点位置靠近北岸, 除了热带气旋以及较大偏南风能产生较大波浪, 冬季寒潮大风在观测点引起的波浪相对过境热带气旋引起的波浪明显偏小, 因此, 相对中南部水域少了一个引起大波浪的因素。由谱宽度和谱密度的月均值以及月最大值的统计可知, 谱宽度月均值波动较小, 秋冬季稍微小于年均值; 9 月的平均最大谱密度为 $0.26 \text{ m}^2/\text{Hz}$, 明显大于年均值, 1 月份的均值最小, 为 $0.07 \text{ m}^2/\text{Hz}$, 明显低于年均值(图 8), 这表明季节性台风对波谱能量有明显增大作用, 而冬季偏北风引起的波浪谱能量相对较小。

分析波浪谱形态得知杭州湾北部波浪谱以单峰为主, 占比 81.7%, 也存在多峰, 占比 12.9%, 其波浪单峰和多峰谱形见图 9。进一步分析显示单峰谱波浪的平均波高为 0.42 m, 而多谱峰波浪的平均波高比单峰谱波浪小, 为 0.23 m, 多数单峰谱波浪波高较多峰谱波浪波高大。对于工程中关注较大波浪的情况, 有效波高大于 0.8 m 的波浪谱形为单峰的占总数据的 5.72%, 而多峰谱数据占 0.13%, 表明较大波浪中出现的单峰波浪明显多于多峰波浪。

5 结语

根据杭州湾北部测波站一年的波浪资料, 采用统计方法着重与前人研究成果进行了对比分析, 研

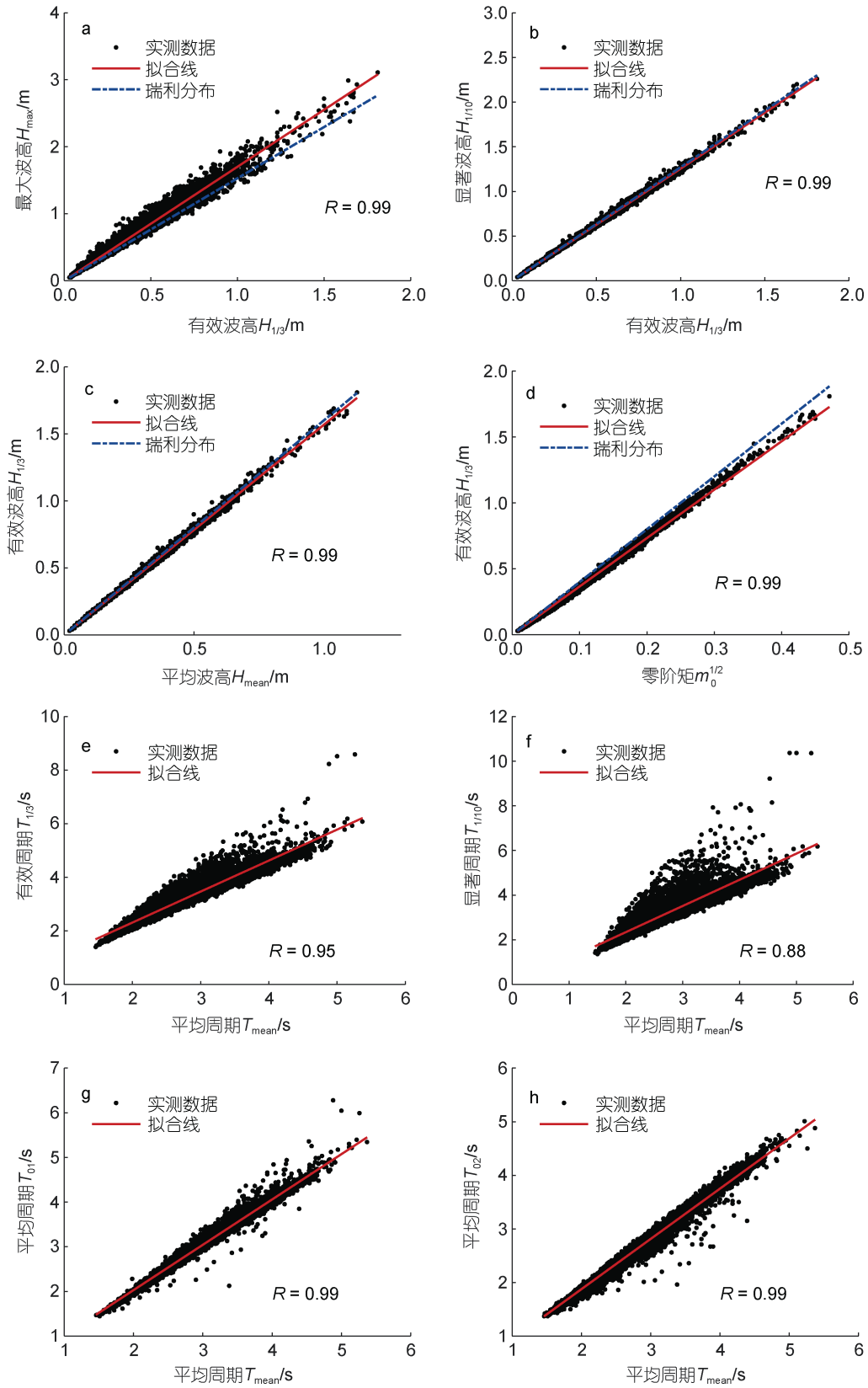


图 6 波参数散点关系图

Fig.6 The scatter plots of wave parameters

注: R 表示相关系数

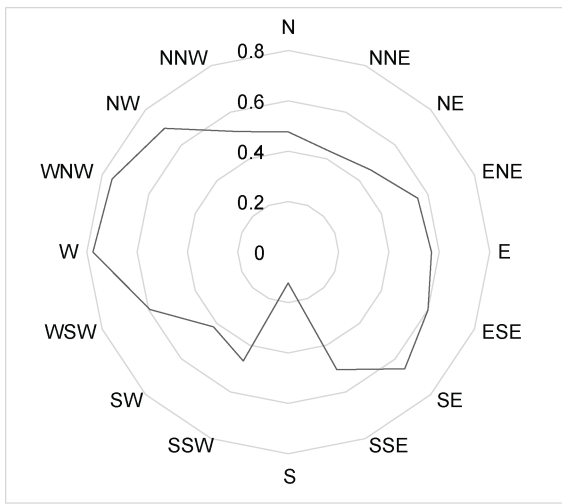


图 7 有效波高和平均周期的相关系数(r)玫瑰图
Fig.7 The rose diagram of the correlation coefficient (r) between significant wave height and mean period

究了特征波参数的变化特性, 分析了波参数的相关性和波浪频谱特征, 得到如下结论:

(1) 研究水域多为波高偏小的短周期波浪, 波高总体小于杭州湾偏南部水域的值, 波高月均值与波周期月均值的波动均较小, 有效波高 1 m 以上的较大波浪出现甚少, 主要出现在夏秋季的热带气旋影响时期。

(2) 本观测点离北岸较近, 偏北风风区较短, 导致冬季冷空气引起的最大波浪小于杭州湾南部冬季最大观测值, 也小于热带气旋在杭州湾北部引起的最大波浪, 这是与杭州湾南部波浪明显不同之处, 但本次分析得出路径相似的热带气旋在杭州湾南、北部测点引起的最大波浪其参数较为接近。

(3) 常浪向和强浪向的范围均与杭州湾南部波浪稍微不同, 其中常浪向出现在 ENE-SE 向, 其中又以平均周期为 2~3 s 的小浪出现较多。强浪向为 ENE 向, 较大波浪的出现方向分布与出现频率较高的波浪方向分布较为一致。大于 1 m 波浪其波周期主要分布在 3~5 s, 长周期(大于 4 s)波浪出现概率小于杭州湾南部的值。

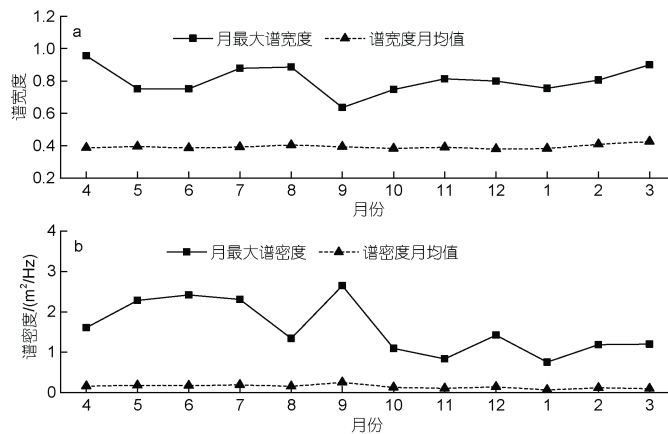


图 8 谱参数月最大和月均值变化图
Fig.8 Variation of monthly maximum and monthly averaged values of wave spectral parameters

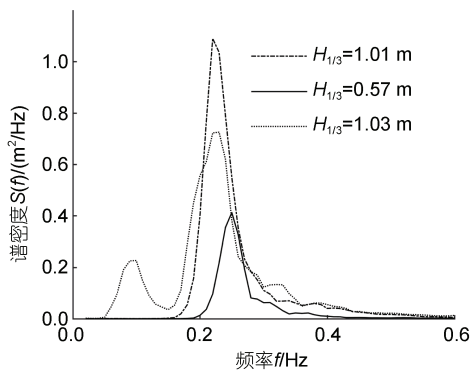


图 9 实测波浪单峰和多峰谱图
Fig.9 The unimodal and multimodal wave spectrum of measured waves

(4) 本研究揭示了杭州湾北部波浪特性, 丰富了区域波浪理论, 亦可为北部沿海及海上工程建设提供波浪分析成果, 但由于年内极端风浪出现较少, 需要继续积累长期数据, 才能更全面分析极端风浪特性。

参 考 文 献

杨斌, 杨忠良, 叶钦, 等, 2018. 杭州湾中部实测波浪特性分析[J]. 海洋工程, 36(3): 96-103.
杨斌, 施伟勇, 叶钦, 等, 2017. 舟山岛东北部沿海实测台风浪特性[J]. 水科学进展, 28(1): 106-115.
茹荣忠, 蒋胜利, 1985. 杭州湾的波浪概况[J]. 东海海洋, 3(2): 34-40.

- 夏期颐, 洪广文, 1994. 长江口、杭州湾地区波要素推算及验证[J]. 河海大学学报, 22(2): 30-38.
- AMRUTHA M M, KUMAR V S, 2017. Characteristics of high monsoon wind-waves observed at multiple stations in the eastern Arabian Sea [J]. Ocean Science Discussions, 1-30.
- ANOOP T R, KUMAR V S, SHANAS P R, 2014. Spatial and temporal variation of surface waves in shallow waters along the eastern Arabian Sea [J]. Ocean Engineering, 81: 150-157.
- LONGUET-HIGINS M S, 1952. On the statistical distribution of the heights of the sea waves [J]. Journal of Marine Research, 11(3): 245-266.
- NAIR M A, KUMAR V S, 2017. Wave spectral shapes in the coastal waters based on measured data off Karwar on the western coast of India [J]. Ocean Science, 13(3): 365-378.
- PEDERSEN T, LOHRMANN A, KROGSTAD H E, 2005. Wave measurement from a subsurface platform [C] // Proceedings Waves 2005. Madrid, Spain: International Association of Hydraulic Engineering and Research:1-10.
- PEDERSEN T, NYLUND S, DOLLE A, 2002. Wave height measurements using acoustic surface tracking [C] // OCEANS '02 MTS/IEEE. Biloxi, MI, USA: IEEE: 1747-1754.
- SHANAS P R, ABOOBACKER V M, ALBARAKATI ALAA M A, *et al*, 2017. Superimposed wind-waves in the Red Sea [J]. Ocean Engineering, 138: 9-22.
- SHANAS P R, ABOOBACKER V M, ZUBIER K M, *et al*, 2018. Spectral wave characteristics along the central coast of eastern Red Sea [J]. Arabian Journal of Geosciences, 11(5): 90.
- XIONG J L, YOU Z J, LI J, *et al*, 2020. Variations of wave parameter statistics as influenced by water depth in coastal and inner shelf areas [J]. Coastal Engineering, 159: 103714.
- YANG B, FENG W B, ZHANG Y, 2014. Wave characteristics at the south part of the radial sand ridges of the Southern Yellow Sea [J]. China Ocean Engineering, 28(3): 317-330.
- ZHOU Y, YE Q, SHI W Y, *et al*, 2020. Wave characteristics in the nearshore waters of Sanmen bay [J]. Applied Ocean Research, 101: 102236.

CHARACTERISTICS OF MEASURED WAVES IN THE NORTH OF HANGZHOU BAY, EAST CHINA SEA

YANG Bin¹, YANG Wan-Kang², XIE Hua-Wei¹, HUANG Sai-Hua¹

(1. Key Laboratory for Technology in Rural Water Management of Zhejiang Province, Zhejiang University of Water Resources and Electric Power, Hangzhou 310018, China; 2. Key Laboratory of Ocean Space Resource Management Technology, the Second Institute of Oceanography, Ministry of Natural Resources, Hangzhou 310012, China)

Abstract To understand the wave characteristics of northern Hangzhou Bay, We analyzed statistically the variation characteristics of measured wave parameters in the northern Hangzhou Bay, East China Sea based one-year observation data, from which correlations among wave parameters were obtained by regression, and the variation characteristics of measured wave spectrum were analyzed with spectral parameters and spectral morphology. Results show that the effect of tropical cyclones on the observed waves is stronger than that of winter monsoon, which is obviously different from that of the southern Hangzhou Bay. Large waves are mainly caused by tropical cyclones, and the parameters of the maximum waves induced by tropical cyclones of similar path in the southern and northern wave stations of Hangzhou Bay are similar. The direction of dominant wave of the study area is from ENE to SE, while the strong wave direction is ENE. This study provided an important reference for design and engineering of marine constructions, and for coastal disaster prevention and mitigation.

Key words wave characteristic; Hangzhou Bay; wave parameter; frequency spectrum; typhoon wave