

基于浮标观测和ERA5资料的浙江沿海海浪特征分析

姚日升^{1,2}, 涂小萍^{3*}, 徐蓉³, 周凯², 缪群⁴, 肖王星³, 蒋璐璐³

(1.宁波市生态环境气象中心,浙江 宁波 315012;2.浙江省气象台,浙江 杭州 310057;3.宁波市气象台,浙江 宁波 315012;4.宁波大学 数学与统计学院,浙江 宁波 315211)

摘要: 基于舟山、温州两个浮标观测和ERA5再分析资料,开展浙江沿海风浪和涌浪特征统计,重点分析了风浪及其有效波高、波周期和海浪危险等级。结果发现:ERA5再分析资料与舟山、温州浮标观测值表现基本一致。风浪发生时两浮标10 m观测风和ERA5再分析风力均超过6级,涌浪多发生在风速小于4 m/s的弱风条件下。舟山浮标风浪主要出现在盛行风为NNW、NW和N风向时,而温州浮标风浪主要集中在N、NNE和NE风向。浙江沿海风浪多出现在冬半年的1—3月和11—12月,冷空气是造成该地区风浪事件的主要气象因子。海浪危险性月际分布显示,两浮标站均表现出5—6月危险等级较低,8—10月较高。风浪时的ERA5再分析资料表明:8月的风浪与台风密切相关,浙江沿海大范围地出现4 m以上巨浪,冬季冷空气和9—10月浙江沿海风浪主要为中到大浪,且浙南沿海各风浪要素值均高于浙北。冷空气风浪事件造成的Ⅱ级以上海浪危险等级范围最大,而台风会在浙江沿海造成较大范围的Ⅰ级海浪危险等级。

关键词: 海浪;浮标;ERA5;危险等级;浙江

中图分类号: P731.22 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-0239(2024)05-0034-10

0 引言

海浪灾害在我国海洋灾害中造成的死亡人数最多。2000—2016年,我国因海洋灾害死亡(或失踪)2 659人,其中66.7%由海浪灾害导致^[1]。海洋灾害与灾害性天气有关,季节性特征明显。灾害性海浪主要由台风、温带气旋、冷空气等天气系统导致^[2],其中台风造成的海浪灾害影响最大,相关研究也最多,主要集中在台风浪传播演变特性、典型受灾区域和台风浪与典型承灾体相互作用三方面^[3-5]。温带气旋和冷空气海浪灾害主要出现在10—12月和1—4月,且两种天气系统经常交互出现,在海浪灾害中造成的人员伤亡比例最大,但相关研究相对较少,直至20世纪80年代才起步^[1-2]。

海洋船舶、浮标等观测资料是了解不同海区海

浪特征的重要支撑,中国海洋浮标观测技术较成熟,甚至已具备研发极端环境海洋资料浮标的技术基础和深海浮标布放作业经验^[6],浮标在青岛^[7]、秦皇岛^[8]海域都已投入观测并形成了相应的研究成果。欧洲中期天气预报中心(European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, ECMWF)的再分析资料在海洋风、浪研究中也得到广泛应用。易风等^[9]基于ERA-interim再分析资料对南海海浪特征进行分析。谭海燕等^[10]将ERA5风场与美国国家环境预报中心(National Centers for Environmental Prediction, NCEP)风场在黄海、东海波浪模拟的适用性进行对比,研究表明在长江口邻近海域内,ERA5风速与实测资料的相关性在0.8以上;江苏海域内,相关性在0.9以上;基于ERA5的数值模拟精度较NCEP更高。耿姗姗等^[11]通过对ERA5海面气

收稿日期:2023-09-08。

基金项目:浙江省基础公益研究计划项目(LGF22D050005);宁波市公益研究计划项目(2019C50004)。

作者简介:姚日升(1968-),男,正高级工程师,硕士,主要从事气象预报与应用技术研究。E-mail:yaorisheng@aliyun.com

*通信作者:涂小萍(1968-),女,正高级工程师,硕士,主要从事天气预报和研究。E-mail:txp_hk@aliyun.com

压和风速再分析资料在渤海和北黄海适用性的分析得出,再分析资料与观测资料具有良好的相关性,不同时间尺度的统计结果存在一定差异,累年逐月的相关性优于日均值和日极值,极端天气下的相关系数最低。

针对海浪灾害等级,2016年1月国家海洋局发布了以波高为指标的海浪危险性定量评估方法——《海浪灾害风险评估和区划技术导则》^[12]。陈剑桥等^[13]通过对发生在浙江东部海域沉船海难事故的海浪灾害性特征分析得出,沉船海难事故的发生往往伴随着波高或波陡的增大,使得船舶的纵摇和垂荡加剧。事实上海浪的危险性与波高和波周期均相关。刘文通^[14]通过模拟实验和理论分析指出,波高和波周期对海洋建筑物安全具有同等重要性,不论是越浪量还是作用于防波堤胸墙上的波压强,波高小周期大的波浪均明显大于波高大周期小的波浪,长周期波对于防波堤具有重要影响。近年来海洋石油平台破坏事故时有发生,原因之一是其固有自振周期较长,易与长波发生共振,造成整体响应过大而影响结构强度^[15]。虽然与不同船型发生共振横摇的波浪周期范围不同,但船型越大对应发生共振横摇的波浪周期越大,因此周期越大的海浪对大船的危害越大^[16]。基于波高和波周期双指标的海浪危险性评估研究逐渐深入^[16-17],一般来说,风浪产生的波高较涌浪更大,而涌浪的波周期更大,如果两者因天气、海洋的因素结合在一起,无疑会增大海浪的危险性。

本文基于浙江省气象部门2010年投放的两个观测浮标和ERA5再分析资料,开展浙江沿海海浪特征和危险性分析,研究其时空分布特征,旨在为海洋气象服务提供参考。

1 资料和方法

1.1 资料

浙江省气象服务沿海海面是指沿行政区海岸线平行外延100 km的海区,图1显示了行政区划和浮标位置。两浮标均为直径10 m的大浮标,由山东省科学院海洋仪器仪表研究所(简称山仪所)研制,能够提供海表温度、海浪、海面风、能见度等要素。测风仪和波浪传感器分别为山仪所SBY1-1型和美

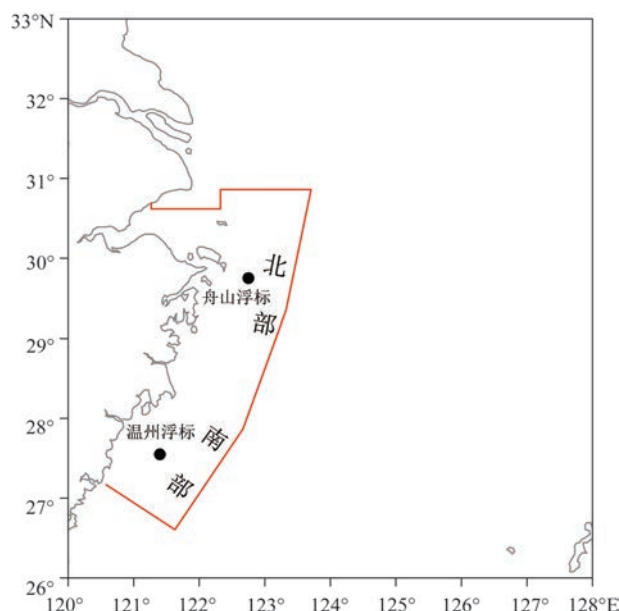


图1 浙江省气象服务沿海海面行政区域(红色折线与海岸线所围区域)及舟山、温州浮标位置

Fig.1 The meteorological service areas along the Zhejiang coast (the coverage of the coastal line and red polygonal line) and the locations of Buoy Zhoushan and Wenzhou

国 YOUNG 05106 型。测风范围为0~90 m/s,分辨率为0.1 m/s,准确度为 $\pm 10\%$ 。波高和波周期测量范围分别为0.5~15.0 m和3~30 s,分辨率分别为0.01 m和0.1 s,准确度分别为 $\pm 10\%$ 和 ± 0.5 s。

所用资料包括ERA5逐小时再分析资料和舟山、温州浮标资料,时间段为2011—2021年。浮标资料来自浙江省气象信息中心,资料经过自动和人工质量控制后,剔除缺测和异常记录,分别得到舟山和温州浮标观测样本88 561和80 007组。ERA5再分析资料来自ECMWF (<https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/search?type=dataset>),其中气象资料空间分辨率为 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$,海洋数据空间分辨率为 $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ 。所用要素包括海平面10 m风向和风速、有效波高、风浪高、涌浪高及相应的波周期,共计96 432组记录。通过双线性插值得到舟山、温州浮标处再分析资料各96 432组。

1.2 浮标观测与ERA5再分析资料的应用

首先将浮标观测结果和ERA5再分析资料进行风浪和涌浪对比,分析两者的一致性,然后将两浮

标站分别作为浙江北部(浙北)和浙江南部(浙南)海域的代表站,进行浙江沿海风浪特征月际统计,并基于ERA5资料开展浙江沿海和外部洋面风浪的时空分布特征分析。冷空气风浪主要发生在冬半年(11月一次年4月),文中主要以1月为代表。

1.3 海浪波型划分方法

1.3.1 基于浮标观测的海浪波型划分

有效波陡可作为判别海浪波型的基本依据。根据 THOMPSON 理论^[18],当有效波陡 $\delta \geq 1/40$ 时为风浪, $1/40 > \delta \geq 1/100$ 时为未成熟涌浪, $\delta < 1/100$ 时为成熟涌浪。有效波陡计算公式为:

$$\delta_{1/3} = \frac{1.949\pi H_{1/10}}{gT^2} \quad (1)$$

式中: $\delta_{1/3}$ 为有效波陡; $H_{1/10}$ 为1/10大波平均波高(单位:m); T 为平均周期(单位:s); g 为重力加速度。

1.3.2 基于ERA5再分析资料的海浪波型划分

引入涌浪概率(P_s)和风浪概率(P_w),同时考虑风速和有效波高,将其应用于海浪分型^[19-20]。JIANG 等^[21]研究得出, P_s 与涌浪能在海浪能中的占比基本接近。浮标观测验证了该结论,在此基础上

给出 P_s 和 P_w 与涌浪高(H_s)、风浪高(H_w)和有效波高(H)的关系:

$$H_s = H\sqrt{P_s}, H_w = H\sqrt{P_w} \quad (2)$$

据式(2)可得 P_s 和 P_w :

$$P_s = \left(\frac{H_s}{H}\right)^2, P_w = \left(\frac{H_w}{H}\right)^2 \quad (3)$$

基于ERA5的 H_s 、 H_w 、 H 和式(3),可计算逐时 P_s 和 P_w 。分别选择其中 $P_s \geq 90\%$ 和 $P_w \geq 90\%$ 作为涌浪和风浪样本,其余的为混合浪。

1.4 海浪危险指数计算方法

按照波级标准^[22],海浪可分为10个等级(见表1)。观测分析发现,舟山和温州浮标有效波高和波周期的分布趋势基本一致(见图2),即:轻—中浪(3~4级)和5~10 s的波周期累积频率均达90%左右,波高超过4 m和波周期超过10 s的海浪发生概率很小,且波高和波周期分布相对独立,舟山浮标记录的超过50%的轻—中浪的波高为0.5~1.5 m、波周期为5~7 s(图略)。波高小但周期大的海浪对建筑物的影响力大于波高大但周期小的海浪^[14],故海浪危险指数中应当同时考虑波高和波周期两个

表1 海浪等级

Tab.1 The grade of wave height

| 海浪等级 | 无浪 | 微浪 | 小浪 | 轻浪 | 中浪 | 大浪 | 巨浪 | 狂浪 | 狂涛 | 怒涛 |
|------|----|----------|------------|-------------|-------------|----------|--------|--------|---------|----------|
| | 0级 | 1级 | 2级 | 3级 | 4级 | 5级 | 6级 | 7级 | 8级 | 9级 |
| 波高/m | 0 | (0, 0.1) | [0.1, 0.5) | [0.5, 1.25) | [1.25, 2.5) | [2.5, 4) | [4, 6) | [6, 9) | [9, 14) | [14, +∞) |

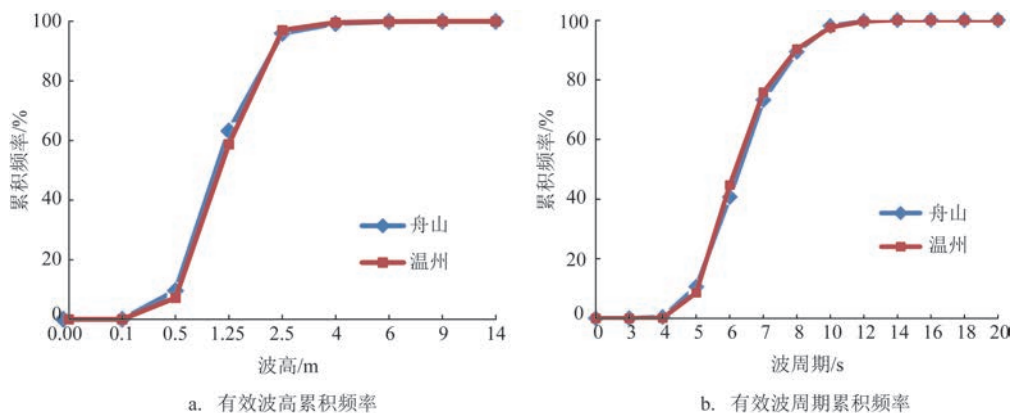


图2 舟山和温州浮标观测有效波高和波周期累积频率

Fig.2 Accumulated frequencies of the observed significant wave heights and wave periods at the Zhoushan and Wenzhou buoys

因子。

双指标海浪危险等级计算中,谢欣等^[16]将 I 级波周期定义为 7 s 以上,而过瑞康等^[17]则定义为 11 s 以上。浙江沿海两个浮标站的平均波周期均为 6.4 s, 10 s 以上波周期属于小概率海浪,故采用 10 s 作为 I 级海浪强度波周期。波高危险强度指标则遵循《海浪灾害风险评估和区划技术导则》^[12]。波高和波周期海浪强度等级划分见表 2。

表 2 海浪强度等级划分

Tab.2 Classification of wave intensity levels

| 强度等级 | 有效波高 H/m | 有效波周期 T/s |
|------|---------------------|-----------------|
| I | $H \geq 4$ | $T \geq 10$ |
| II | $2.5 \leq H < 4$ | $7 \leq T < 10$ |
| III | $1.25 \leq H < 2.5$ | $5 \leq T < 7$ |
| IV | $H < 1.25$ | $T < 5$ |

根据表 2 分别统计浮标处各等级出现的有效波高和波周期次数,并计算海浪危险指标 H_w 和 T_w 。计算公式为:

$$H_w = 0.6N_1 + 0.25N_2 + 0.1N_3 + 0.05N_4 \quad (4)$$

$$T_w = 0.6N_5 + 0.25N_6 + 0.1N_7 + 0.05N_8 \quad (5)$$

式中: $N_1 \sim N_4$ 为各等级波高次数, $N_5 \sim N_8$ 为各等级波周期次数。对 H_w 和 T_w 进行归一化处理,计算公式为:

$$H_{wn} = \frac{H_w - H_{wmin}}{H_{wmax} - H_{wmin}} \quad (6)$$

$$T_{wn} = \frac{T_w - T_{wmin}}{T_{wmax} - T_{wmin}} \quad (7)$$

式中: H_{wn} 和 T_{wn} 分别为经归一化处理后的海浪灾害危险指数; H_{wmax} 和 H_{wmin} 、 T_{wmax} 和 T_{wmin} 分别为根据式(4)和(5)计算的最大和最小危险指标。在此基础上计算综合考虑波高和波周期的海浪危险指数 D :

$$D = \omega_1 H_{wn} + \omega_2 T_{wn} \quad (8)$$

式中: ω_1 和 ω_2 为权重系数,均取值 0.5^[16-17]。根据 D 值大小划分海浪危险等级,危险等级 I—IV 分别对应 D 值大小为: $[0.75, 1.00)$ 、 $[0.50, 0.75)$ 、 $[0.25, 0.50)$ 、 $(0, 0.25)$ 。

2 结果分析

2.1 ERA5 风、浪要素与观测值的统计对比

基于 2011—2021 年浮标观测和 ERA5 再分析

资料,采用上述两种方法分别进行波型划分,得到舟山浮标处均为风浪和涌浪的样本分别为 3 375 和 3 560 组,温州浮标处分别为 4 322 和 3 560 组。分别统计不同波型时的风、浪要素,结果见表 3。从表中可见,风浪时舟山和温州两浮标处的 10 m 风速和 ERA5 再分析风速均达到 6 级以上(风速 ≥ 10.8 m/s), 平均有效波高均在 2.0 m 以上,波周期小于 6.0 s。涌浪一般发生在风速小于 4 m/s 的弱风条件下,有效波高一般不超过 1 m,波周期为 7 s 左右。温州浮标处的 ERA5 资料接近观测值,舟山浮标处的 ERA5 风浪和涌浪要素结果略小于观测,风浪时有效波高、波周期和 10 m 风速分别偏小约 0.5 m、0.3 s 和 1.2 m/s, ERA5 再分析资料与观测结果总体差异不大。

表 3 舟山和温州浮标处 ERA5 风、浪要素与观测值的统计对比

Tab.3 Statistical comparison of wind and wave elements between the ERA5 and the observations at the Zhoushan and Wenzhou buoys

| 浮标 | 类别 | 波型 | 有效波高/m | 有效波周期/s | 平均风速/(m/s) |
|----|------|----|--------|---------|------------|
| 舟山 | 观测 | 风浪 | 2.4 | 5.7 | 13.2 |
| | | 涌浪 | 0.7 | 6.9 | 4.0 |
| | ERA5 | 风浪 | 1.9 | 5.4 | 12.0 |
| | | 涌浪 | 0.7 | 6.5 | 3.2 |
| 温州 | 观测 | 风浪 | 2.0 | 6.0 | 12.5 |
| | | 涌浪 | 0.7 | 7.2 | 3.5 |
| | ERA5 | 风浪 | 2.2 | 5.8 | 12.4 |
| | | 涌浪 | 0.7 | 7.0 | 3.3 |

2.2 不同风向下的风浪发生频率和风浪频率月际变化

在海洋气象服务中,会更多地关注风浪事件,因此重点分析风浪特征。风浪与风速有很大关系。浙江沿海典型大风事件与台风、低压倒槽、冷空气等天气系统有关^[23],不同风向下的风浪事件发生频次并不相同。基于舟山和温州浮标的海面风向、风速、浪高和浪周期等观测资料,按照 16 分位风向分别统计不同风向下的风浪发生频率及其月际变化,结果见图 3。

从图 3a 可见,舟山浮标风浪最多出现在 NNW

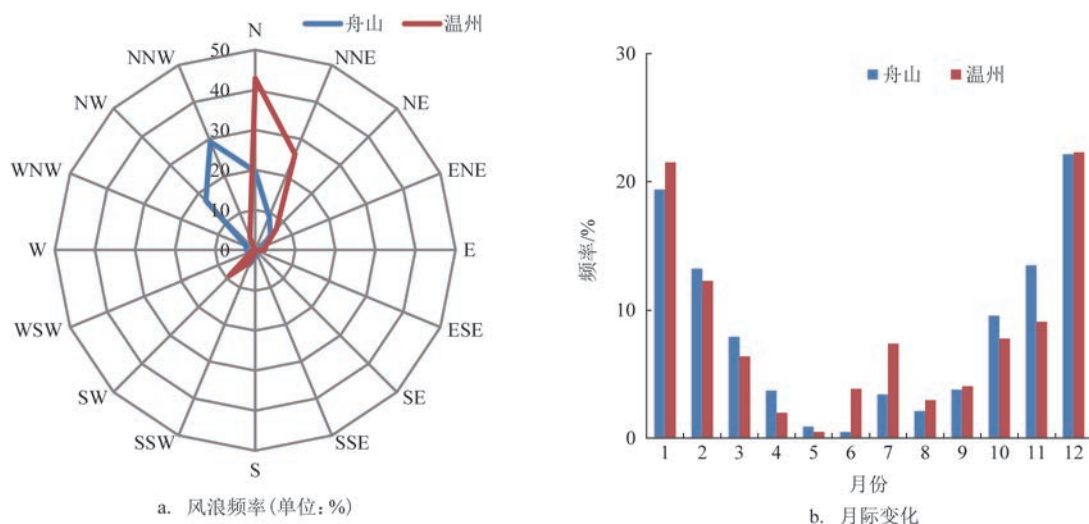


图3 舟山和温州浮标不同风向下的风浪发生频率及其月际变化

Fig.3 Wind wave frequencies under different wind directions and monthly variations of wind wave frequencies at the locations of the Zhoushan and Wenzhou buoys

风向下,频率接近30%,其次是NW和N风向,共计66.3%的风浪出现在这3个风向。而温州浮标接近43%的风浪出现在N风向,累积76.2%的风浪集中在N、NNE和NE风向。计算数据表明,冬半年(11月一次年4月)舟山和温州浮标累积风浪频率分别达到80.0%和73.5%,由此可见,与冷空气相关的北风是造成浙江沿海风浪的主要气象原因。

图3b的风浪月际分布显示,1—3月和10—12月浙江沿海风浪事件较多,分析主要与冷空气有关;5月风浪概率很低,浙南和浙北均不到1%;6—9月风浪概率一般低于7%,且浙南沿海高于浙北。逐月风浪频率对比显示,两浮标在6—7月和11月的差异超过3%,其余月份差异不大。究其原因,6—7月副热带高压自西北太平洋洋面逐渐加强西伸北抬影响浙江,海平面气压场上浙江受南—西南气流影响,并有暖脊配合^[24],导致风浪多发生在S和SSW风向下,而偏南气流更易影响浙南,因而浙南风浪频率高于浙北;11月冷空气开始活跃,但强度偏弱,对浙北的影响大于浙南,导致浙北风浪频率高于浙南。其他月份的风浪主要是由台风和冷空气导致,天气形势对浙南和浙北的影响差异不大。

2.3 平均风浪要素场分布特征

以1月平均场代表冷空气风浪,图4为基于ERA5再分析资料的1月、8月、9月和10月浙江沿海

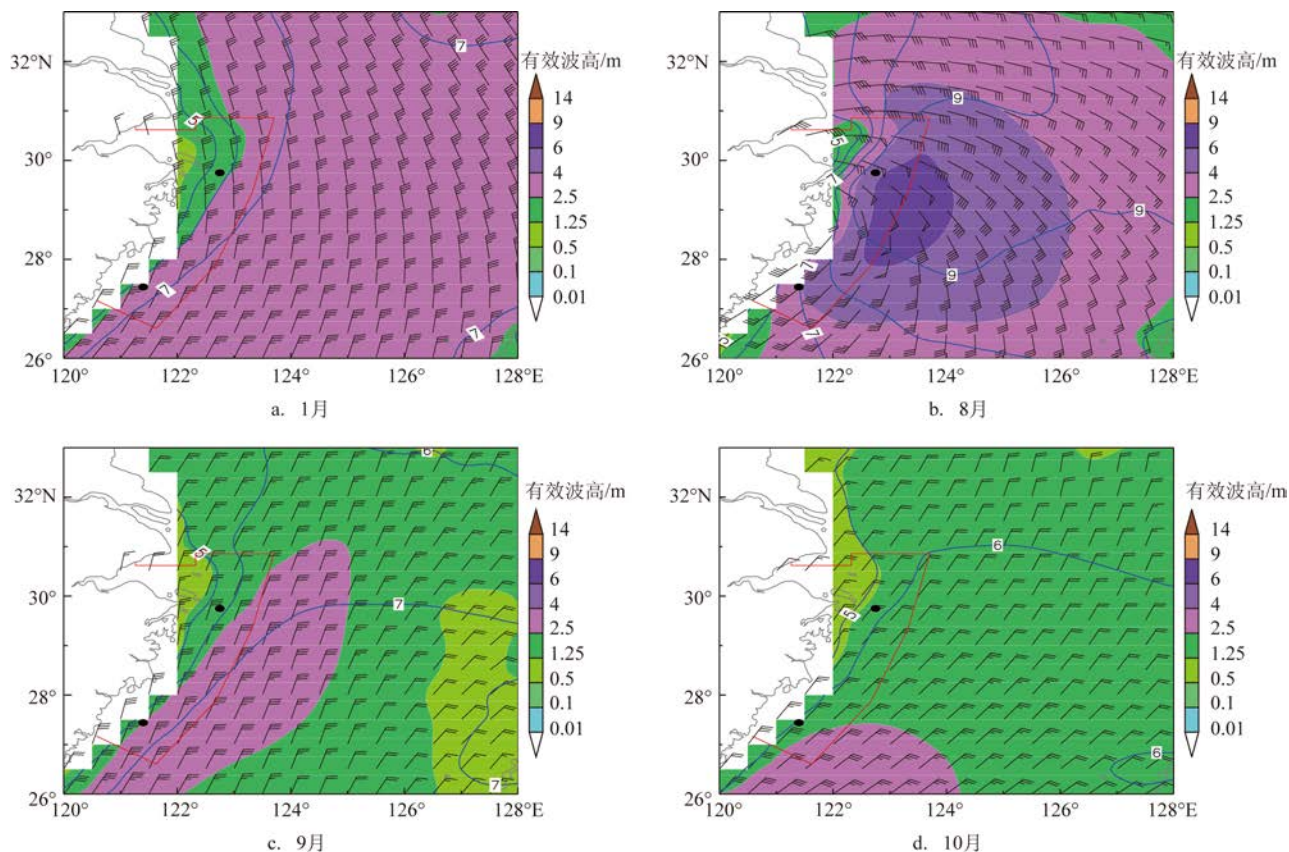
风浪作用时有效波高、波周期和10 m风的平均场分布。从图中可见,1月浙北沿海以1.25 m以上的中—大浪为主(见图4a),浪周期一般为5~7 s,盛行12~14 m/s的北风;浙南沿海以2.5 m以上的大浪为主,浪周期可达6~7 s,盛行14 m/s以上的北风,各风浪要素值均高于浙北沿海。8月的风浪与台风环流密切相关(见图4b),浙江沿海平均风速可超过20 m/s,并伴有大范围6级以上的巨浪,部分海区甚至可出现6~9 m的狂浪,平均波周期可达9 s,是各月中最长的。9—10月的浙江沿海盛行东北风(见图4c—d),浙南沿海海面风速可达14 m/s,以2.5 m以上的大浪为主,9月波周期可达7 s,10月波周期可达6 s,无论是风速、有效波高还是波周期,浙南沿海都高于浙北。综上可见,8月浙江沿海风浪与台风密切相关,伴有大范围6级以上巨浪;1月和9—10月浙江沿海以中—大浪为主,且浙南沿海各风浪要素值均高于浙北。

2.4 风浪时浙江沿海海浪危险性特征

2.4.1 海浪危险等级月际变化特点

基于式(6)—(8),分别计算舟山和温州浮标波高、波周期和双指标的逐月海浪危险指数,结果见图5。

由图5可见,风浪时舟山浮标波高和波周期的单指标海浪危险指数并不完全同步(见图5a),2—5



注:红色折线与海岸线所围区域为浙江省气象服务海区

图4 浙江沿海风浪时基于ERA5再分析资料的有效波高(填色,单位:m)、有效波周期(蓝色等值线,单位:s)及海平面10 m风(风羽,单位:m/s)的月平均场分布

Fig.4 Monthly mean field distributions of significant wave heights (the shaded, unit: m), significant wave periods (blue contours, unit: s), and 10 m winds (barbs, unit: m/s) at sea level based on the ERA5 reanalysis data along the Zhejiang coast under wind wave condition

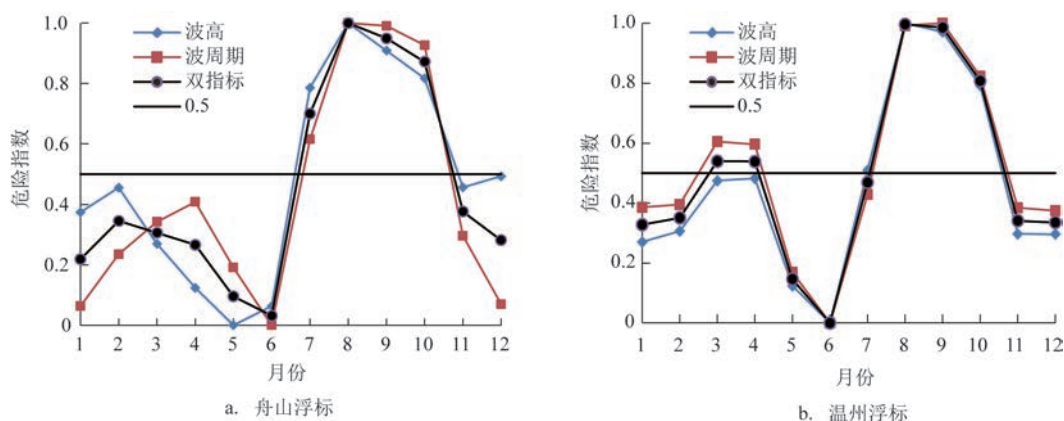


图5 舟山和温州浮标风浪时的海浪危险指数月际变化

Fig.5 Monthly variations of wave risk indices at the Zhoushan and Wenzhou buoys

月波高危险指数呈下降趋势,而波周期危险指数则呈倒V型,导致1—6月双指标海浪危险等级为IV

级;8月二者的危险指标均达到I级,为舟山浮标海浪危险指数最高的月份;9—10月波周期对舟山浮

标海浪危险等级影响大于波高。而温州浮标(见图5b)的波高和波周期海浪危险指数月际变化趋势基本一致,说明二者对双指标海浪危险等级的影响是同步的,即8—9月危险指数最高,3—4月海浪危险等级达到Ⅱ级,其中波周期的影响相对较大。

温州浮标和舟山浮标的海浪危险指标既有相同点,也有不同点。相同的是考虑双指标的5—6月风浪的危险等级均只有Ⅳ级,危险性较低;8—10月风浪的危险指标均超过0.75,危险等级为Ⅰ级;其余月份多为Ⅲ级;两浮标海浪危险指标均呈双峰型。不同的是温州浮标危险指数的双峰型较明显,其次峰值出现在3—4月,而舟山浮标2—4月的次峰值不明显。

8—9月风浪时的海浪危险指数与台风环流密切相关,而10月的高海浪危险指数不仅与冷空气活动有关,还与洋面上的低压环流有关。图6为10月当舟山和温州浮标同时出现风浪时,根据ERA5资料绘制的850 hPa天气形势和地面形势。由图可见,850 hPa华北地区有冷槽东移入海,浙江上空存在一定强度的锋区,南北温差达4℃以上。我国中部内陆受高压控制,台湾以东洋面有低于147 dagpm的

低压环流(见图6a);相应地,地面有风切变倒槽(见图6b中红色弯曲箭头所示)。由于冷高压和洋面低压倒槽形成气压梯度堆积,浙江沿海大范围地区的风速超过6级,并伴有2.5 m以上的大浪(见图6b),导致10月发生风浪事件时浙江沿海海浪危险等级较高。

2.4.2 海浪危险等级空间分布特征

与图4相对应,基于ERA5再分析资料,绘制风浪时的双指标海浪危险指数空间分布特征(见图7)。由图可见,1月浙江沿海海浪危险指数平行于海岸线自西向东由0.25~0.50增大到0.50~0.75(见图7a),海浪危险等级由Ⅲ级升为Ⅱ级,东部大片海域甚至为Ⅰ级;8月台风导致浙江沿海的海浪危险等级普遍为Ⅰ级和Ⅱ级(见图7b);9月(见图7c)和10月(见图7d)浙江沿海海浪危险指数平行于海岸线自西向东由0.25~0.50增大到0.50~0.75,海浪危险等级由Ⅲ级升为Ⅱ级,浙南沿海往东的海域出现Ⅰ级。1月在浙江海岸线向东直至128°E的广袤洋面,冷空气风浪时分别有46.0%和23.5%的格点的海浪危险指数达到0.75~1.00和0.50~0.75,意味着近70%的洋面海浪危险等级达到Ⅰ级和Ⅱ级(见图

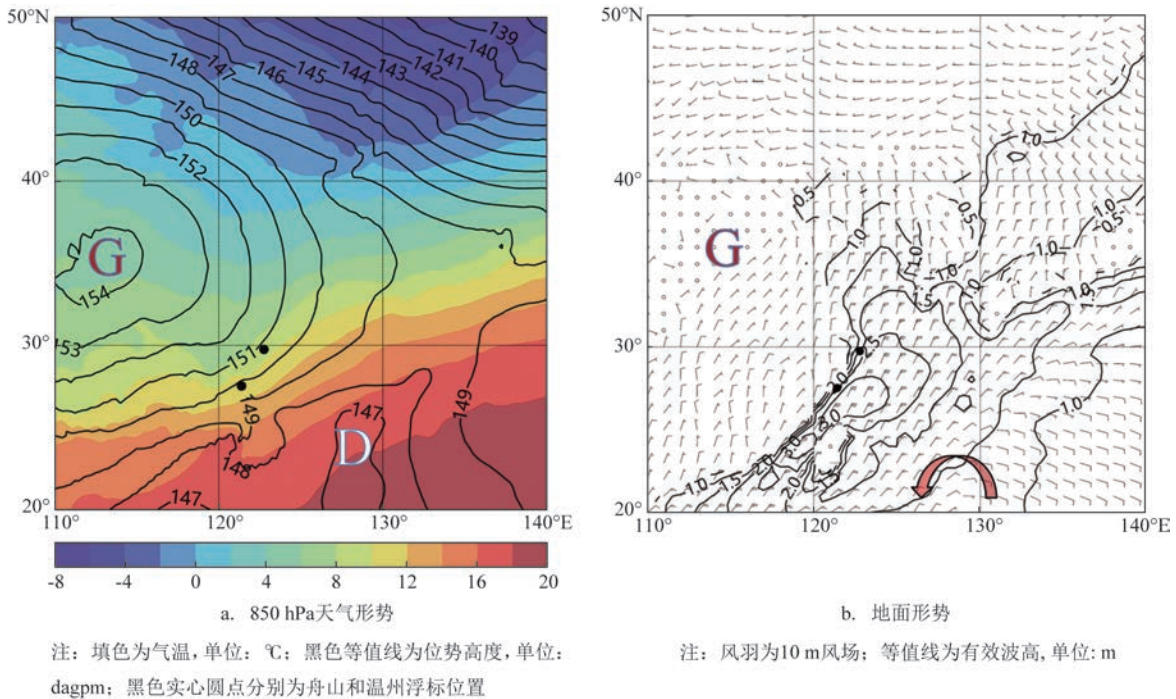
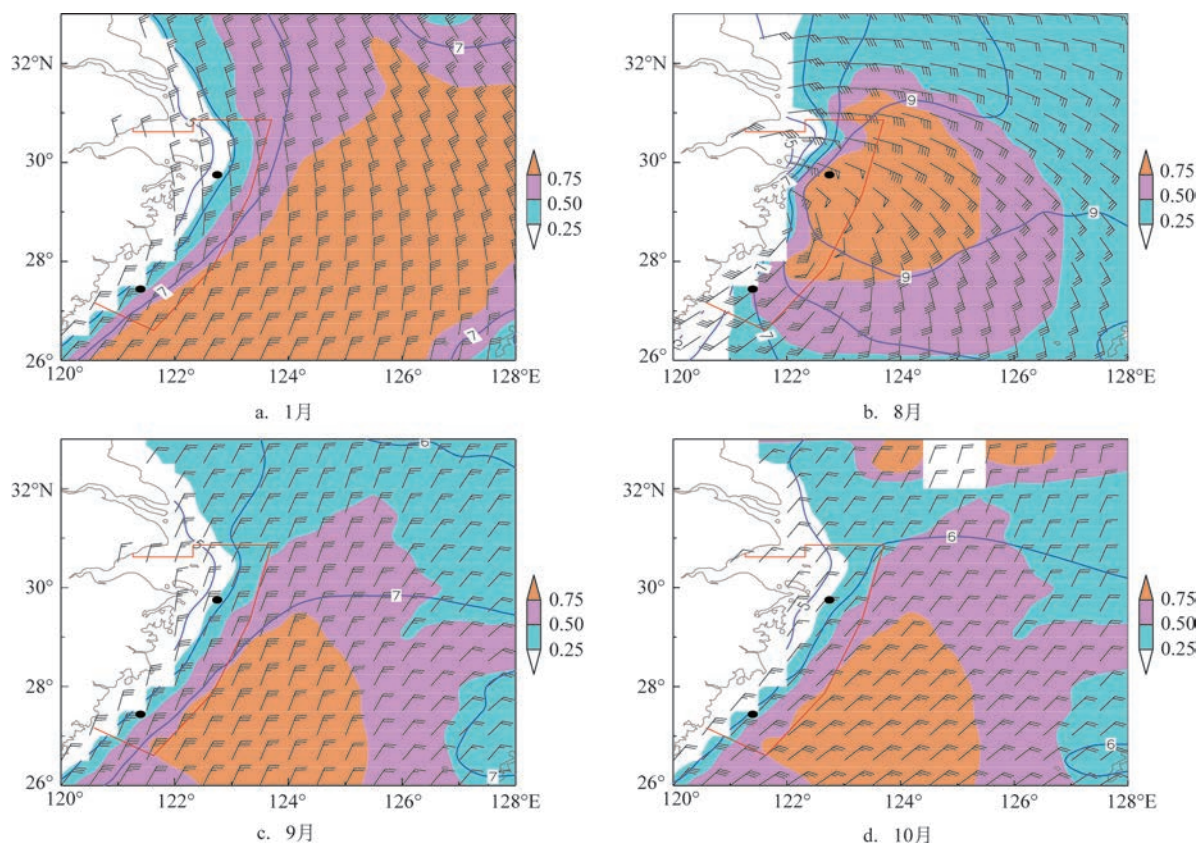


图6 10月浙江沿海风浪时850 hPa天气形势和地面形势

Fig.6 Weather situation at 850 hPa and ground situation under wind wave condition along the Zhejiang coast in October



注:红色折线与海岸线所围区域为浙江省气象服务海区

图7 浙江沿海风浪时基于ERA5再分析资料的海浪危险指数(填色)、有效波周期(蓝色等值线,单位:s)及海平面10 m风(风羽,单位:m/s)的月平均场分布

Fig.7 Monthly mean field distributions of wave risk indices (the shaded), significant wave periods (blue contours, unit: s), and 10 m winds (barbs, unit: m/s) at sea level based on the ERA5 reanalysis data along the Zhejiang coast under wind wave condition

7a),而8—10月的风浪事件中,海浪危险等级达到Ⅰ级和Ⅱ级的格点数分别为43.5%、31.0%和45.6%。由此可见冷空气风浪事件在浙江沿海和外部洋面造成的Ⅱ级以上海浪危险等级范围最大,但只有台风会在浙江沿海海面造成较大范围Ⅰ级海浪危险等级。

3 结论

基于舟山和温州两个浮标观测和ERA5再分析资料,对浙江沿海海浪进行了海浪分型和特征统计,重点分析了风浪及其对应的波高、波周期和海浪危险性特征。结论如下:

①舟山浮标处ERA5风浪和涌浪要素的平均值略小于观测值,温州浮标处ERA5资料接近观测值。

总体来说ERA5资料与观测值的表现基本一致。

②风浪时两浮标的10 m风速均超过6级,平均有效波高一般在2.0 m以上,波周期小于6.0 s;而涌浪一般发生在风速低于4 m/s的弱风条件下,有效波高一般不超过1 m,波周期为7 s左右。冷空气是造成浙江沿海风浪的主要气象因子。

③舟山和温州浮标海浪危险性月季分布显示,5—6月海浪危险等级较低,8—10月较高。温州浮标波高和波周期对双指标海浪危险等级的影响基本同步,舟山浮标则不完全同步。冷空气风浪事件在浙江沿海和外部洋面造成的Ⅱ级以上海浪危险等级范围最大,但台风会造成浙江沿海海面出现较大范围的Ⅰ级海浪危险等级。

浙江沿海风浪事件与冷空气、台风、温带气旋密切相关,下一步将基于浙江沿海自动气象观

测(包括浮标)结果、ERA5再分析资料等,分别针对冷空气和台风影响过程中的海浪危险性变化特征开展研究,进一步提高浙江省海洋气象服务能力。

参考文献:

- [1] 陈汨梨,潘志刚,徐啸,等.中国近海冷空气浪的参数化判别标准研究[J].中国港湾建设,2020,40(12):1-4.
CHEN M L, PAN Z G, XU X, et al. Parameterized criterion for cold air wave in China's coastal seas[J]. China Harbour Engineering, 2020, 40(12): 1-4.
- [2] 侯一筠,尹宝树,管长龙,等.我国海洋动力灾害研究进展与展望[J].海洋与湖沼,2020,51(4):759-767.
HOU Y J, YIN B S, GUAN C L, et al. Progress and prospect in research on marine dynamic disasters in China[J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 2020, 51(4): 759-767.
- [3] 陶爱峰,沈至淳,李硕,等.中国灾害性海浪研究进展[J].科技导报,2018,36(14):26-34.
TAO A F, SHEN Z C, LI S, et al. Research progress for disastrous waves in China[J]. Science & Technology Review, 2018, 36(14): 26-34.
- [4] 冯兴如,杨德周,尹宝树,等.中国浙江和福建海域台风浪变化特征和趋势[J].海洋与湖沼,2018,49(2):233-241.
FENG X R, YANG D Z, YIN B S, et al. The change and trend of the typhoon waves in Zhejiang and Fujian coastal areas of China[J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 2018, 49(2): 233-241.
- [5] 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.
- [6] 冯月永,周达,周文清,等.西风带海洋环境观测技术研究[J].海洋技术学报,2019,38(4):21-26.
FENG Y Y, ZHOU D, ZHOU W Q, et al. Research on westerlies environmental observation technology[J]. Journal of Ocean Technology, 2019, 38(4): 21-26.
- [7] 王志勇,王炜荔,胡伟,等.青岛近岸海域波浪要素特征研究[J].海洋技术学报,2021,40(2):61-68.
WANG Z Y, WANG W L, HU W, et al. Statistical analysis of wave characteristics in coastal waters of Qingdao[J]. Journal of Ocean Technology, 2021, 40(2): 61-68.
- [8] 傅圆圆,杨超,姚远,等.秦皇岛海洋站海浪特征分析[J].海洋环境科学,2022,41(6):842-846.
FU Y Y, YANG C, YAO Y, et al. Analysis of sea wave characteristics at Qinhuangdao station[J]. Marine Environmental Science, 2022, 41(6): 842-846.
- [9] 易风,冯卫兵,曹海锦.基于ERA-Interim资料近37年南海波浪时空特征分析[J].海洋预报,2018,35(1):44-51.
YI F, FENG W B, CAO H J. Wave analysis based on ERA-Interim reanalysis data in the South China Sea[J]. Marine Forecasts, 2018, 35(1): 44-51.
- [10] 谭海燕,邵珠晓,梁丙臣,等.ERA5风场与NCEP风场在黄海、东海波浪模拟的适用性对比研究[J].海洋通报,2021,40(5):524-540.
TAN H Y, SHAO Z X, LIANG B C, et al. A comparative study on the applicability of ERA5 wind and NCEP wind for wave simulation in the Huanghai Sea and East China Sea[J]. Marine Science Bulletin, 2021, 40(5): 524-540.
- [11] 耿姗姗,韩春花,徐珊珊,等.ERA5海面气压和风速再分析资料在渤海和北黄海适用性分析[J].海洋通报,2023,42(2):159-168.
GENG S S, HAN C H, XU S S, et al. Applicability analysis of the sea surface pressure and wind speed of ERA5 reanalysis data in the Bohai Sea and the northern Huanghai Sea[J]. Marine Science Bulletin, 2023, 42(2): 159-168.
- [12] 国家海洋局.海浪灾害风险评估和区划技术导则[EB/OL]. [2023-09-08]. <http://www.docin.com/p-1471348867.html>.
State Oceanic Administration. Guidelines for risk assessment and zoning of wave disaster[EB/OL]. [2023-09-08]. <http://www.docin.com/p-1471348867.html>.
- [13] 陈剑桥,韩博,杨清华,等.浙江东部海域沉船海难海浪灾害性特征分析[J].海洋预报,2023,40(1):28-38.
CHEN J Q, HAN B, YANG Q H, et al. Analysis of the disastrous characteristics of waves for shipwrecks in the eastern waters of Zhejiang province[J]. Marine Forecasts, 2023, 40(1): 28-38.
- [14] 刘文通.波浪周期对海洋建筑物的影响[J].海岸工程,1998,17(3):1-5.
LIU W T. The effect of wave period on coastal and offshore structures[J]. Coastal Engineering, 1998, 17(3): 1-5.
- [15] 裴晔,陶爱峰,张义丰,等.东海E3海域低频涌浪生成机制研究[J].海洋湖沼通报,2016(1):17-24.
PEI Y, TAO A F, ZHANG Y F, et al. The generation mechanisms of low-frequency well in the E3 sea area of the East China Sea[J]. Transactions of Oceanology and Limnology, 2016(1): 17-24.
- [16] 谢欣,陶爱峰,张尧,等.基于波高和周期双指标的福建海域海浪危险性分析[J].海洋通报,2019,38(2):167-172.
XIE X, TAO A F, ZHANG Y, et al. Analysis of wave risk in Fujian offshore area based on double indicator considering both wave height and wave period[J]. Marine Science Bulletin, 2019, 38(2): 167-172.
- [17] 过瑞康,邓夕贵,范骏,等.基于ERA-5的西非海域波浪时空分布特征分析[J].中国港湾建设,2022,42(6):1-6.
GUO R K, DENG X G, FAN J, et al. Analysis of temporal and spatial distribution characteristics of ocean waves in West Africa based on ERA-5[J]. China Harbour Engineering, 2022, 42(6): 1-6.

- [18] 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. Houston: American Society of Civil Engineers, 1984: 661-677.
- [19] SEMEDO A, SUŠELJ K, RUTGERSSON A, et al. A global view on the wind sea and swell climate and variability from ERA-40 [J]. *Journal of Climate*, 2011, 24(5): 1461-1479.
- [20] CHEN G, CHAPRON B, EZRATY R, et al. A global view of swell and wind sea climate in the ocean by satellite altimeter and scatterometer[J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2002, 19(11): 1849-1859.
- [21] JIANG H Y, CHNE G. A global view on the swell and wind sea climate by the Jason-1 mission: a revisit[J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2013, 30(8): 1833-1841.
- [22] 国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会. GB/T 42176-2022 海浪等级[S]. 北京: 中国标准出版社, 2022.
- State Administration for Market Regulation, Standardization Administration. GB/T 42176-2022 The grade of wave height[S]. Beijing: Standards Press of China, 2022.
- [23] 申华羽, 方艳莹, 涂小萍, 等. ECMWF 细网格 10 m 风预报在浙江沿海的评估与订正[J]. *气象*, 2020, 46(11): 1485-1494.
- SHEN H Y, FANG Y Y, TU X P, et al. Verification of ECMWF 10 m wind forecast for coastal Zhejiang Province[J]. *Meteorological Monthly*, 2020, 46(11): 1485-1494.
- [24] 吕劲文, 姚日升, 涂小萍, 等. 浙江省 6—9 月午后短时强降水空间分布特征分析[J]. *暴雨灾害*, 2019, 38(4): 320-328.
- LYU J W, YAO R S, TU X P, et al. Analysis on spatial distribution characteristics of afternoon flash heavy rain from June to September in Zhejiang[J]. *Torrential Rain and Disasters*, 2019, 38(4): 320-328.

Sea wave characteristics along Zhejiang coast based on buoy observations and ERA5 data

YAO Risheng^{1,2}, TU Xiaoping^{3*}, XU Rong³, ZHOU Kai², MIAO Qun⁴, XIAO Wangxing³, JIANG Lulu³

(1. Ningbo Ecological Environment Meteorological Center, Ningbo 315012, China; 2. Zhejiang Provincial Meteorological Observatory, Hangzhou 310057, China; 3. Ningbo Meteorological Observatory, Ningbo 315012, China; 4. School of Mathematics and Statistics, Ningbo University, Ningbo 315211, China)

Abstract: Analysis on wind wave and swell characteristics of Zhejiang coast is carried out based on two buoys, Observations offshore Zhoushan and Wenzhou, and the ERA5 reanalysis data, with emphasis on significant wave heights (SWH), wave periods (WP) and risk indices of wind wave. Results show that the ERA5 data is basically consistent with the buoy observations. Wind wave and swell generally occur under strong breezes of ≥ 10.8 m/s and light winds of below 4 m/s respectively. Wind wave mainly happens with prevailing winds from NNW, NW and N at the Zhoushan buoy, and N, NNE and NE at the Wenzhou buoy. The months with high frequency of wind wave are usually in winter half year, from January to March and from November to December, closely related to cold air masses. Monthly wave danger index shows that both buoys have a low risk level from May to June, and a high risk level from August to October. The ERA5 fields show wind wave in August is closely related to typhoon circulation, and SWH can be up above 4 m, while SWH of wind wave in winter and in months September and October is mainly between moderate and rough, and it displays higher wind wave elements along the southern Zhejiang coast than the northern coast. Cold air masses hold the widest coverage with wave risk above level II, but only typhoons can cause wave risk of level I in a large coverage of the coastal areas of Zhejiang.

Key words: wind wave; buoy; ERA5; risk level; Zhejiang