

基于ERA5再分析数据的钦州湾40年风浪关系分析

张渝¹, 何俊辉², 胡江¹, 高成岩³, 许媛媛¹

(1.重庆交通大学 河海学院,重庆 400074;2.平陆运河集团有限公司,广西南宁 530200;3.中交水运规划设计院有限公司,北京 100007)

摘要: 基于欧洲中期天气预报中心的ERA5数据集,系统性研究了钦州湾1983—2022年风场、海浪场的分级概率分布以及特征要素的年际、月际特征值分布和重现期特征;进一步拟合风浪关系,明晰有效波高与波周期的联合概率分布。结果表明:钦州湾常风向为NNE向、常浪向为SSW向;风速与有效波高的季节特征明显,春夏两季多为向岸风,秋冬两季多为离岸风,根据不同风向可建立不同的风浪关系;波高与周期的联合分布呈类斜三角形特征,波高为0~1.0 m、波周期为2.0~5.0 s的波浪发生次数最多。

关键词: 钦州湾;风浪特征分析;风浪关系;波高与周期联合分布

中图分类号: P732.6 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-0239(2025)06-0006-11

0 引言

钦州湾作为中国南海的一个重要区域,常年受到台风的影响,台风引起的灾难性海浪,对人员安全与近海建筑物造成了极大的威胁。青年船闸是平陆运河最下游的梯级航运枢纽,距离钦州湾入海口约27 km,当钦州湾受到大风大浪影响时,风浪会向前传递,给上游航行船舶造成影响。然而,钦州湾的波浪资料缺乏,导致对其风浪特征及其关系的研究较少。探明钦州湾风浪特征及其关系,有利于指导船舶在平陆运河下游的安全航行。

建立风浪关系模型是风浪场研究的一个重要任务,风场和有效波高的统计关系不仅可以用于海浪预报^[1-2],亦是在单一大气模式的海气界面通量交换过程中参数化引入海浪作用因子的有效途径^[3]。针对不同海域的风浪关系,国内外学者进行了深入研究^[4-5]。Andreas等^[4]利用浮标数据建立美国东北海岸模型,对有效波高进行预测,结果表明当风速为0~4 m/s时,有效波高不变;风速在4~25 m/s时,波高是风速和水深的函数。潘锦嫦^[6]直接应用波浪

观测资料推算出大连湾小风区风浪要素的经验关系;冯卫兵等^[7]运用回归分析方法,建立了南黄海近岸海域风浪关系模型等。不同地区的风浪关系式差异较大,且通常仅在当地具备良好的适用性,因此有必要针对钦州湾风浪要素进行研究。

目前,针对整个北部湾的风浪研究主要为对月平均或者季节平均风、浪场的分析,对钦州湾海域更加精细化的风、浪场统计分析多为工程区部分特征分析。赵红军等^[8]采用近岸海浪数值模拟(Simulating Waves Nearshore, SWAN)模型对北部湾海浪逐时过程进行了数值模拟,分析了波浪的季节变化特征;张敏等^[9]基于模型耦合对北部湾风浪及增水进行分析,得到了满足一般性台风风浪模拟需求的风浪关系;孙美燕等^[10]分析了白龙尾海洋站和涠洲岛海洋站多年分方向年极值风速和波浪资料,通过分析比较后确定了钦州湾外海深水处的设计波浪要素。当前,尚需对钦州湾海域长时间序列的风浪要素进行系统分析。

因此,为保障船舶在平陆运河河口区的安全航行,本文基于高时空分辨率、长时间序列的欧洲中

收稿日期:2024-10-09。

基金项目:国家重点研发计划项目(2023YFC3208800);重庆市教委科学技术研究项目(KJQN202400764)。

作者简介:张渝(2000-),男,硕士,主要从事港口航道与海岸工程、航道整治研究。E-mail: zy12138626@163.com

期天气预报中心(European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, ECMWF)ERA5再分析数据集,采用统计分析的方法,得到钦州湾风、浪场的统计特征,并建立适合于钦州湾的风浪关系模型,为风浪要素的预报提供参考。

1 研究区域与资料来源

ERA5是ECMWF的第五代再分析数据集,由ERA-Interim改进而来,数据集包括了1979年至今的再分析数据,并保持持续更新。ERA5之前的再分析数据用于波浪波高的模拟过程中普遍存在精度偏低的问题,但最新的ERA5数据已有很大提升。较其前身ERA-Interim, ERA5的变量个数从100个增加到240个,其中波高和波向来源于耦合模型,数据更加精确^[11]。实测风浪数据难以实现大范围、长时段的观测,近年来ERA5被广泛用于分析南海风场、波浪场特征,易风等^[12]基于ERA-Interim再分析资料对南海海浪特征进行分析,相关研究证明ERA5资料在南海有较高精度^[13-14]。

本文研究区域见图1。由于ERA5数据集采用了高分辨率的网格系统,其风要素空间分辨率为 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ 、波浪要素空间分辨率为 $0.5^\circ \times 0.5^\circ$, ERA5的每个数据点都代表了对应空间分辨率内的地理区域(小蓝框为风要素,大蓝框为波浪要素),

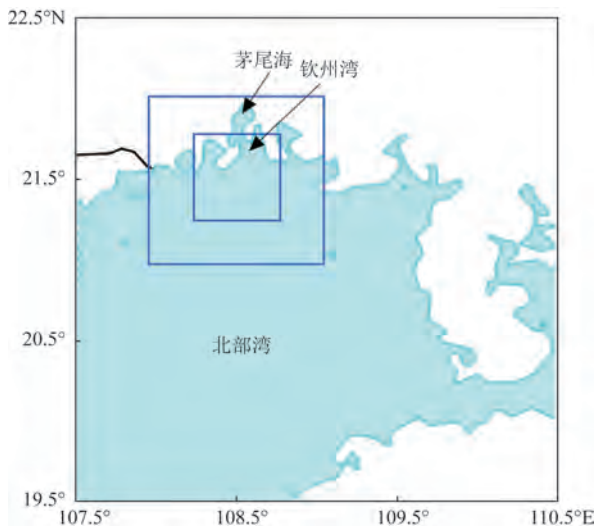


图1 研究区域图

Fig.1 Study area

时间分辨率为3 h。所选研究区域涵盖了钦州湾,时间范围为1983年1月—2022年12月,采用数据主要包括海表面10 m水平、垂向风速(u_{10} 、 v_{10})、风向(由海表面10 m水平与垂向风速的比值求反正切函数得到)、平均波周期、平均波向(即仅考虑风浪,是风-海浪谱的所有频率和方向的平均值)以及风浪有效波高(即二维风浪谱在所有方向和所有频率上积分的4倍平方根)。

2 风浪要素基本特征

2.1 ERA5数据验证

由于钦州湾附近实测资料较少,本文根据白龙尾站1969—1984年SSW、NNE方向的最大波高值^[15],与ERA5资料进行对比。由图2可见,ERA5数据与实测值相近,表明基于ERA5数据的统计分析能够得到钦州湾及邻近海域的风浪要素分布特征。

2.2 风浪要素特征值统计

按照国际通用的风力蒲福表对研究海域的风速进行分级,本次统计数据共有104 621个。风力主要分布在2~5级,即风速范围为1.6~10.7 m/s,频率累计达93.58%。波浪按有效波高标准分级,统计数据同样为104 621个,研究区有效波高为0.50~1.25 m的小浪、轻浪的出现频率约为86.53%;大浪、巨浪的分布频率不足2.0%。

按照年际、月份统计了最大风浪要素的分布情况。由图3a可知,40年间最大风速与波高均出现在2014年(即台风“威马逊”影响期间),年际最大风速可达35.86 m/s,对应的最大波高为5.45 m。年际风速最大值分布在18~36 m/s之间,年际有效波高最大值分布在2.0~5.5 m之间;从图3a还可以看出,风浪要素的最大值呈现大致相同的变化趋势。由图3b、3c可知,40年间月际风速最大值在20~36 m/s之间,月际波高最大值的平均值在2~5 m之间,最大值均出现在7月(该月也是台风多发的月份)。年际、月际最大风速与年际最大波高呈现规律性变化。40年内,月际波平均周期在3.1~4.0 s范围内,变动幅度较小,40年平均周期为4.2 s;月际波最大周期为6.0~9.5 s,最大值和最小值分别出现在6月

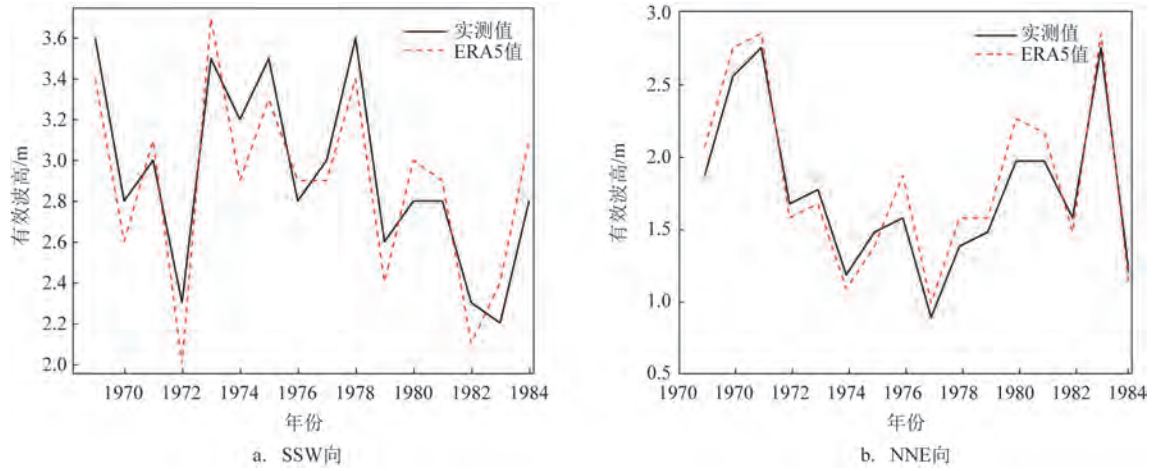


图2 波高实测值与ERA5数据对比图

Fig.2 Comparison of measured wave heights with the ERA5 data

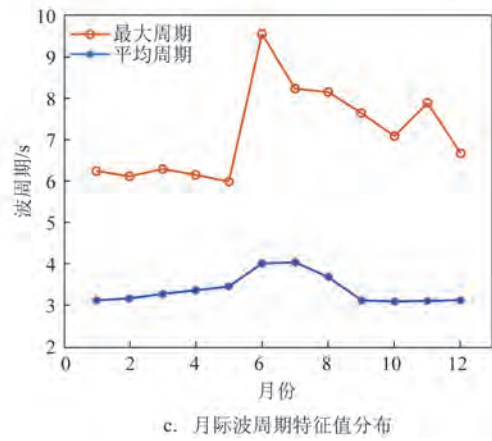
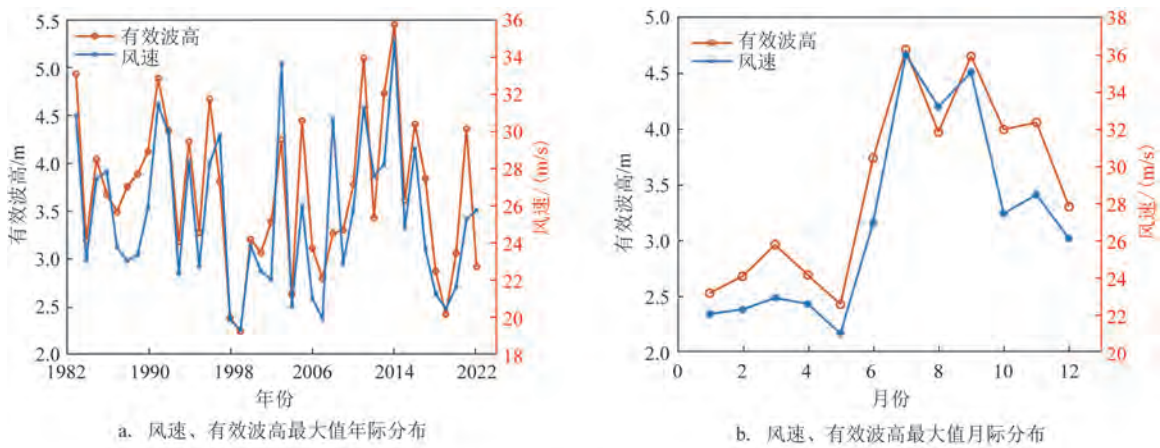


图3 年际、月际风浪要素特征值分布

Fig.3 Interannual and monthly distribution of characteristic values of wind and wave elements

和5月。这表明钦州湾海域在夏、秋两季容易受到台风侵袭。

2.3 风浪要素重现期分析

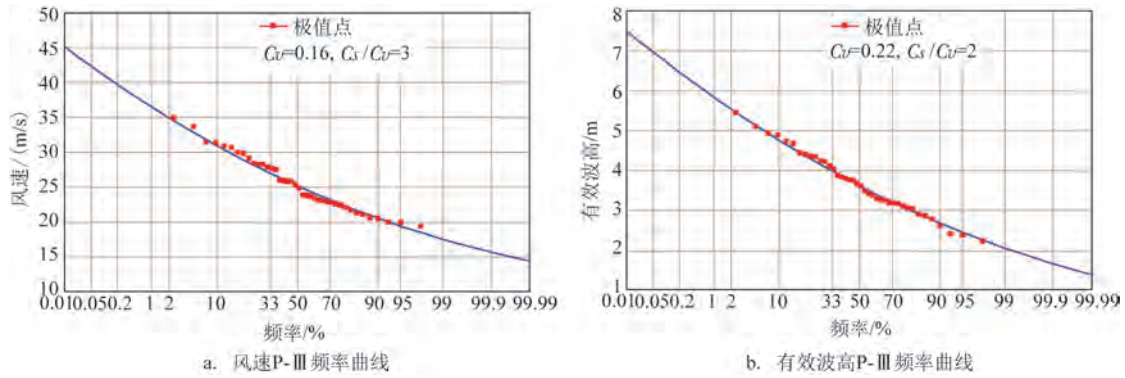
基于1983—2022年钦州湾风浪要素数据,利用P-III极值分布模型计算钦州湾的不同重现期波

高,采用的取样方法为年极大值法^[16]。表1为钦州湾海域基于P-III极值分布计算所得5 a、10 a、20 a、50 a和100 a一遇的重现期风速和有效波高。图4为钦州湾海域风速与有效波高基于P-III极值分布的频率分布图,从图中可以看出两条曲线的拟合效果均较好。

表1 基于P-III极值分布钦州湾不同重现期风速与有效波高

Tab.1 Wind speed and significant wave height at different recurrence periods in Qinzhou Bay based on P-III extreme value distribution

类别	5 a一遇	10 a一遇	20 a一遇	50 a一遇	100 a一遇
风速/(m/s)	28.79	30.89	32.72	34.91	36.43
有效波高/m	4.35	4.76	5.12	5.54	5.84



注: C_v 为变差系数,是标准差与数学期望值之比; C_s 为偏差系数,用来反映分布是否对称的特征,表征分布的不对称程度

图4 钦州湾风浪要素频率曲线图

Fig.4 Hydrological frequency curve of wind and wave elements in Qinzhou Bay

2.4 风要素季节分布特征

为了更加全面地了解风浪要素分布特征,将每年12个月划分为4个季节,规定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。将风速按方向划分,统计分析各个方向上风向的强度及出现频率,得到风速分布,从而全面地掌握钦州湾的风速分布特性。风向根据16方位划分,规定0°为正北方向,风向表示风的来向,如N向表示来向为N的风,结果见图5。

由图5可知,钦州湾全年风向分布比较集中,常风向为东北偏北向(NNE),频率为23.90%,次常风向为西南偏南向(SSW),频率为14.35%,西向(W)分布较少,区间在6~12 m/s的风速所占比例最大,18 m/s以上占比较小。常风向的季节变

化规律为:春、秋、冬季出现最多风向均为NNE向,频率分别为19.29%、30.37%、43.16%;夏季以SSW向风速为主,频率为33.44%。四季的风向分布较为不同,春季主要以NNE和SSW向为主,夏季集中在SSW向,秋、冬两季以NNE向为主风向。

钦州湾全年强风向为SSW向,实测风速最大值达35.86 m/s。强风向的四季分布特征不同,春、冬两季的强风向为S向,两者最大风速分别达到22.87 m/s、25.25 m/s;夏季的强风向即为全年强风向SSW向,最大风速为35.86 m/s;秋季强风向为SSE向,最大风速为34.32 m/s。钦州湾全年以东北向风居多,西南向风最大,最大风速可达34.86 m/s。最大风速发生在夏季,这是因为台风、风暴潮等极端天气多出现在这个季节。

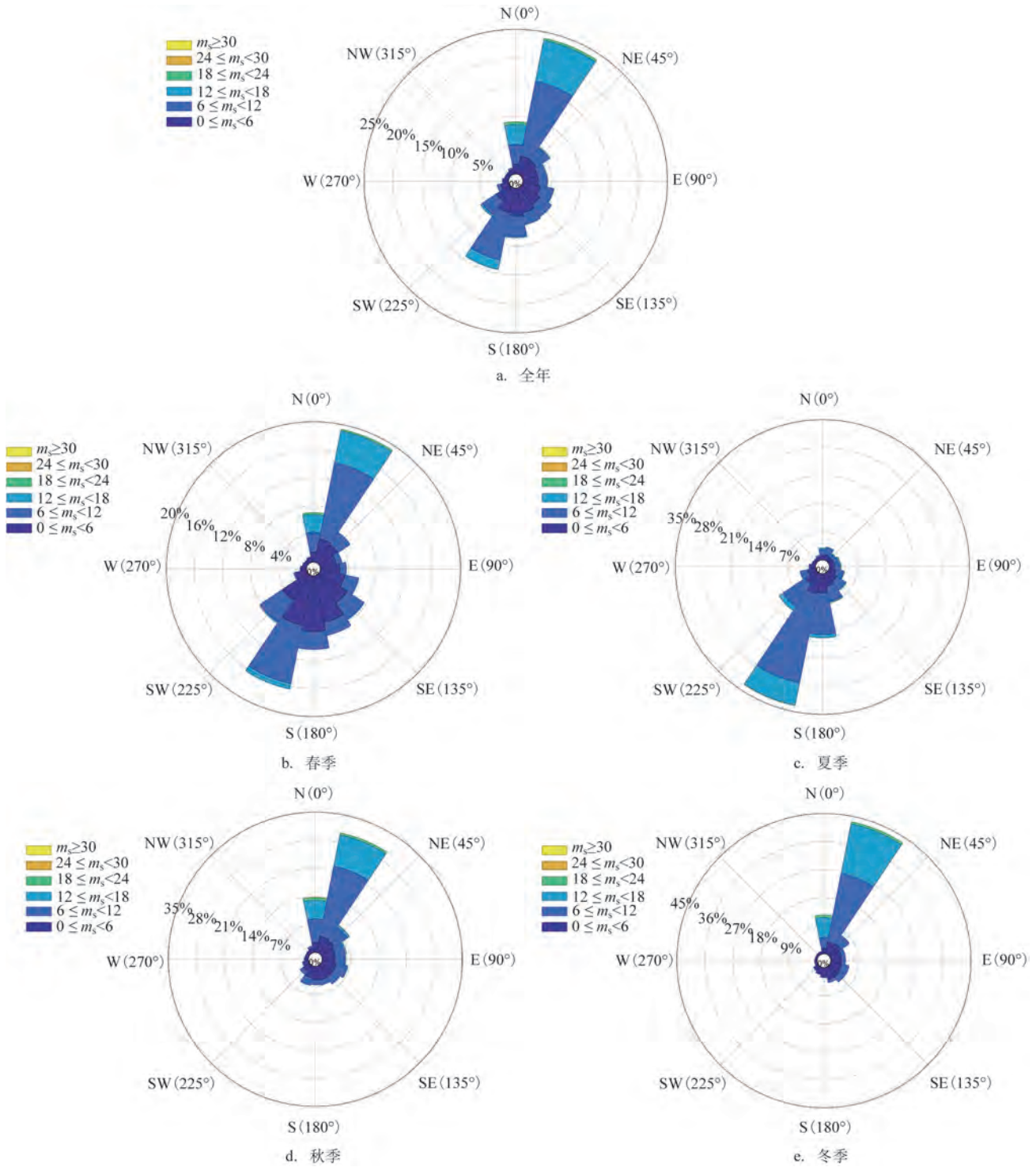


图5 40年全年、四季风速(单位:m/s)与方向频率统计图

Fig.5 Statistical charts of wind speed (unit: m/s) and direction frequency for the whole year and four seasons over 40 years

2.5 波浪要素季节分布特征

将波高按方向进行划分,统计分析不同方向上

波高的强度及出现频率,得到波高分布。浪向根据16方位划分,规定0°为正北方向,浪向表示波浪的来向,如N向表示来向为N的浪,结果见图6。

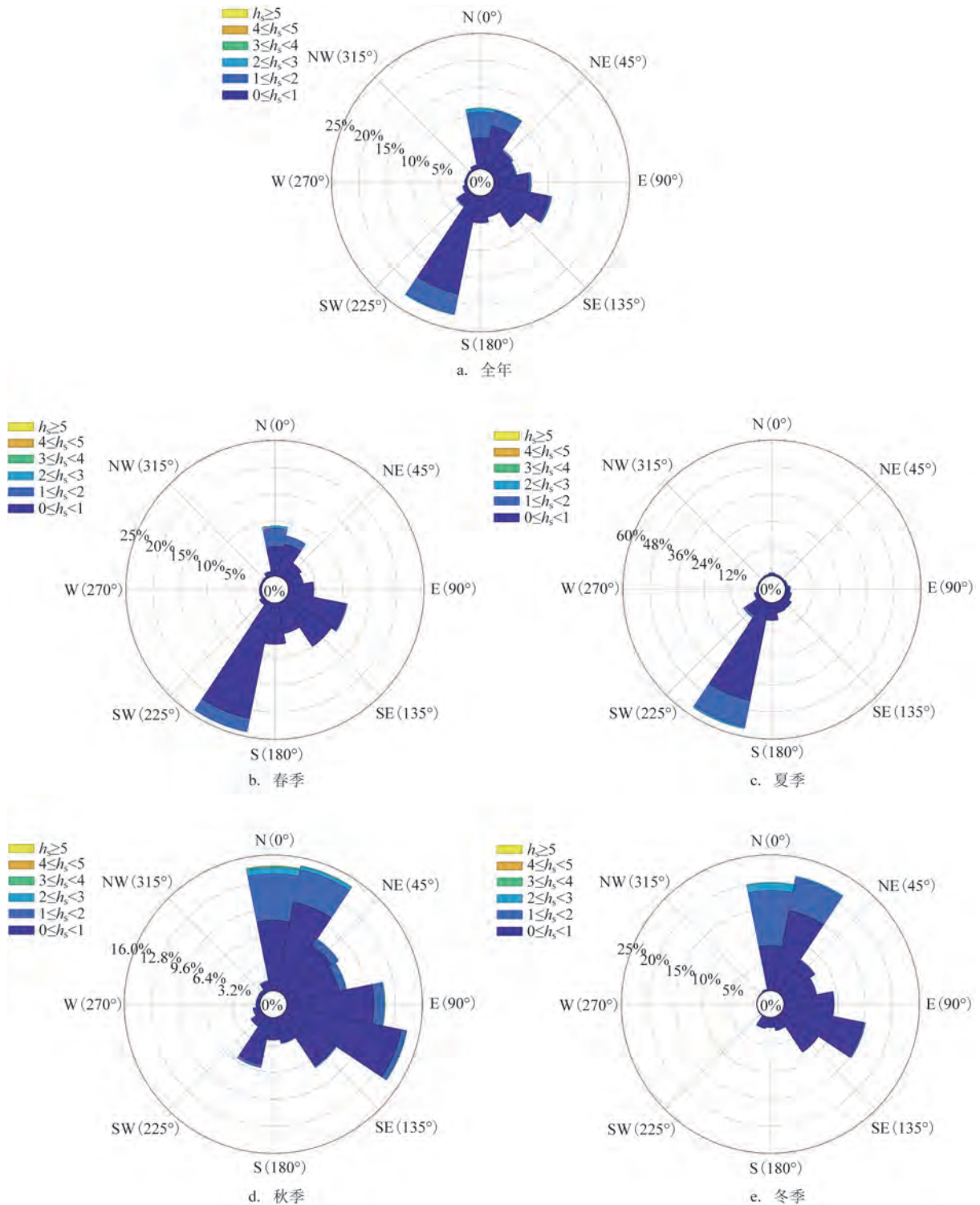


图6 40年全年、四季有效波高(单位:m)与方向频率统计图

Fig.6 Statistical charts of effective wave height (unit: m) and direction frequency for the whole year and four seasons over 40 years

由图6可知,钦州湾全年出现频率最高的波浪为SSW向,频率为23.94%,其次为NNW向,频率为

11.45%。全年的波向各方向均有分布,但W向较少。有效波高主要分布在0.5~2.0 m范围内,2 m以

上占比较小。常浪向的季节变化规律为:SSW向为春、夏季出现最多的浪向,频率分别为27.06%、58.67%;秋、冬季出现最多的浪向为NNE向,各占15.33%、21.67%。

钦州湾40年内最大有效波高为5.44 m,方向为N向;次强浪向为NNW向,其最大有效波高为5.09 m。强浪向的季节分布特征为:N向为秋、冬两季的强浪向,最大有效波高分别为5.44 m、3.71 m;SSW向为春季的强浪向,最大有效波高为3.33 m;夏季强浪向出现在SW向,最大有效波高为5.01 m。

风向和浪向的主要方向均为NNE和SSW向,但风向和浪向同向的频率存在些许差异。研究区域为钦州湾近岸区域,当波浪受到水深变浅、海岸线形状、岬角和港湾等地形影响时,会发生反射、折射和干涉,从而导致波浪方向发生改变。

3 风浪要素关系分析

3.1 钦州湾风浪关系

前文分析得到了风浪之间的相关性,为了更好地体现两者的关系,本文通过建立有效波高与海表10 m风速的相关关系式,量化风浪相关关系。由于数据量较大,选取能够覆盖整个样本最大值与最小值、且风速与有效波高极大值及其出现频率都高于其他月份的7月风浪要素进行分析,拟合曲线见图7,拟合公式见式(1)。

$$H = 0.024 5V^{1.573} - 0.125 \quad R^2 = 0.81 \quad (1)$$

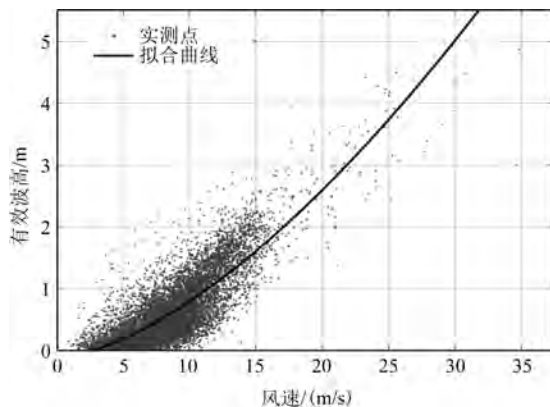


图7 有效波高与风速的拟合关系曲线图

Fig.7 The fitting relationship between significant wave height and wind speed

式中: H 为有效波高, V 为海表10 m风速, R^2 为相关系数。

3.2 不同月份的风浪关系

研究区域为近岸海域,风区对风浪成长关系有明显影响^[17-19],因此根据风向的不同分别建立风浪关系。通过前文不同季节风向分析可知,春夏两季多为SSW向风,吹向内陆;秋冬两季多为NNE向风,吹向外海。因此选取7月(夏季)、9月(秋季)的风浪要素分别建立风浪关系,并分别用8月与10月的数据进行检验^[20]。

参考王晨迪等^[21]的方法建立有效波高 H 和风速 V 的关系,每隔0.5 m/s取有效波高 H 的平均值,而后根据计算所得平均值对应的散点进行非线性二次多项式拟合分析。风速范围为0~35 m/s,有效波高范围为0~5 m,拟合曲线见图8,拟合公式见式(2)、式(3)。

7月有效波高与风速拟合关系式为:

$$H = 0.001 9V^2 + 0.098V - 0.292 8 \quad R^2 = 0.98 \quad (2)$$

9月有效波高与风速拟合关系式为:

$$H = 0.001 3V^2 + 0.120 5V - 0.397 5 \quad R^2 = 0.98 \quad (3)$$

由图8可知,在相同的风力条件下,向岸风会离岸风产生更大的波浪。为验证拟合风浪关系的精度,采用拟合得到的风浪关系式分别推求8月、10月有效波高(H -fit),将计算得到的有效波高与ERA5中的原始有效波高(H -fact)进行对比验证。验证结果见图9,其中 R^2 为相关系数、RMSE为均方根误差、Skill系数反映实测变量被模拟变量准确估计的程度,两者通过了95%的信度检验。这表明通过拟合公式推求得到的有效波高与已有数据提供的有效波高相差不大,所建立的风浪关系是可行的。基于前文风向分析,春夏两季多为向岸风,风浪关系适用式(2);秋冬两季多为离岸风,风浪关系适用式(3)。

本文基于已有风浪数据拟合得到风浪关系,通过回归分析得到风速与波高的线性或非线形关系表达式,在已知风速的情况下,可以快速估算波高,为船舶在安全波高范围内的航行提供参考。

3.3 波高-周期联合概率密度分布

对钦州湾1983—2022年的波高和波周期的联

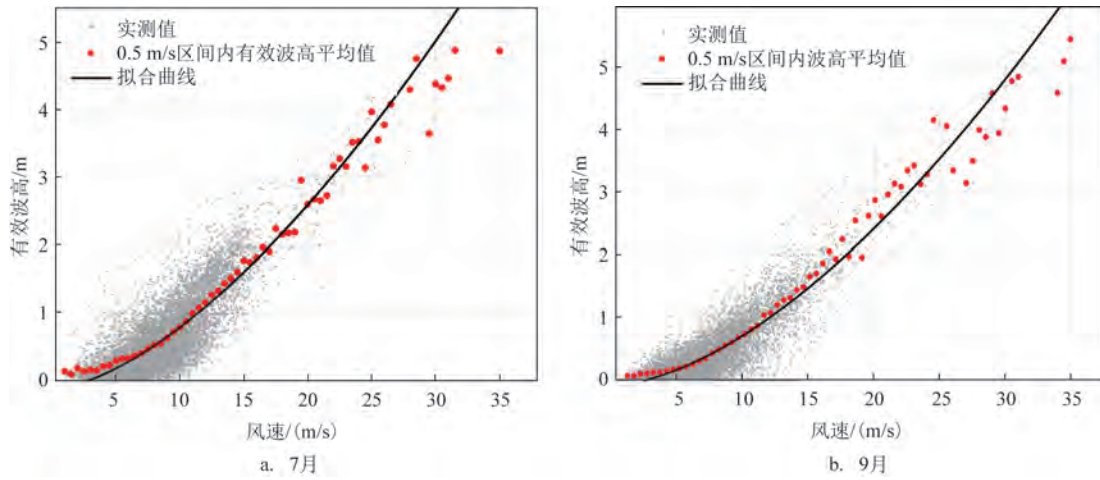


图8 不同月份有效波高与风速的拟合关系曲线图

Fig.8 The fitting relationship between significant wave height and wind speed of different months

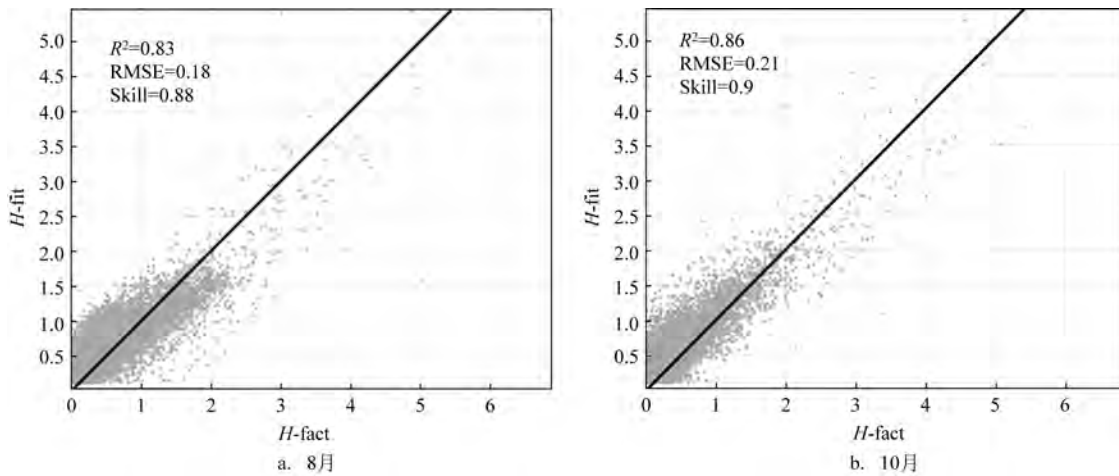


图9 风浪关系模型的验证

Fig.9 Verification of the Wind Wave Relationship Model

合分布特征进行分析。波浪周期分布在0~7 s,主要分布在1~6 s,周期大于6 s的波浪几乎不出现;波高主要分布在0~1 s,波高大于1 s后,分布逐渐减少。40年间,波高在0~1 m且波周期在2~5 s的波浪发生次数最多;波高在0.5~4.0 m、周期大于6 s的波浪几乎没有发生。

为更好地研究区域内波高与波周期联合概率密度分布特征,分别将波高与波周期进行无因次化(即两者分别与平均值的比值),得到无因次波高 H/H_m 和无因次周期 T/T_m 。从图10可以看出,研究点的波高和波周期的联合概率密度呈斜向三角形分布。最大概率密度出现在 H/H_m 为0.25、 T/T_m 为0.8附近。发生概率小的波浪为大波高大周期同时出

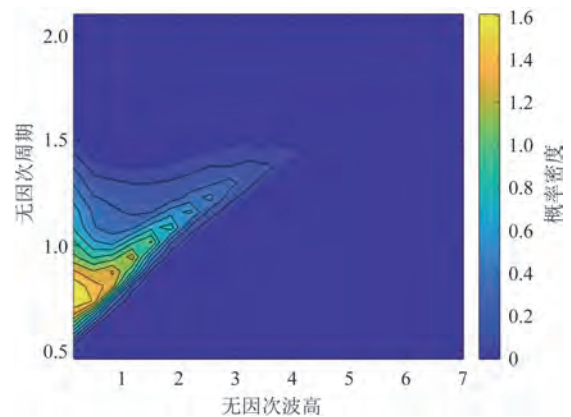


图10 钦州湾无因次波高和无因次波周期联合分布图
Fig.10 Scatter plot of the joint distribution of wave height and wave period at the research point

现的情况。

根据 ERA5 数据集得到钦州湾 40 年的波浪数据,可构建有效波高 H 与波周期的联合概率模型^[22]。模型表达式为:

$$f_{HT}(h,t) = f_H(h) f_{TH}\left(\frac{t}{h}\right) \quad (4)$$

式中: h 为有效波高; t 为波周期; $f_H(h)$ 为有效波高的边缘分布密度函数, $f_{TH}\left(\frac{t}{h}\right)$ 为条件密度函数,两者分别采用 Weibull 分布和对数正态分布拟合。公式为:

$$f_H(h) = \frac{\beta}{\rho} \left(\frac{h}{\rho}\right)^{\beta-1} * \exp\left\{-\left[\left(\frac{h}{\rho}\right)^\beta\right]\right\} \quad (5)$$

式中: β 为 Weibull 分布的形状参数; ρ 为 Weibull 分布的尺度参数。

$$f_{TH}\left(\frac{t}{h}\right) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma(h)t}} * \exp\left\{-\frac{(\ln t - \mu(h))^2}{2\sigma(h)^2}\right\} \quad (6)$$

式中: $\sigma(h)$ 、 $\mu(h)$ 为波高为 H 时,变量 $\ln T$ 的期望和标准差。

这两个参数通过属于一个范围内波高对应的周期来估计,采用最小二乘法进行拟合,对应函数为:

$$\mu(h) = 1.574h^{0.143} \quad (7)$$

$$\sigma(h) = 0.103 - 0.07\exp\{h\} \quad (8)$$

有效波高的边缘概率密度分布见图 11a,波周期的条件概率密度分布(波高范围为 0~3 m)见图 11b,拟合公式见式(9)。

$$f_{HT}(h,t) = \frac{\beta}{\rho} \left(\frac{h}{\rho}\right)^{\beta-1} * \exp\left\{-\left(\frac{h}{\rho}\right)^\beta\right\} \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma(h)t}} * \exp\left\{-\frac{(\ln t - \mu(h))^2}{2\sigma(h)^2}\right\} \quad (9)$$

式中: h 为有效波高; t 为波周期; β 为 Weibull 分布的形状参数; ρ 为 Weibull 分布的尺度参数; $\sigma(h)$ 、 $\mu(h)$ 为波高为 H 时,变量 $\ln t$ 的期望和标准差。

从钦州湾有效波高和波周期的概率密度分布(见图 11)可以看出,拟合公式与 ERA5 数据的分布规律很相符。

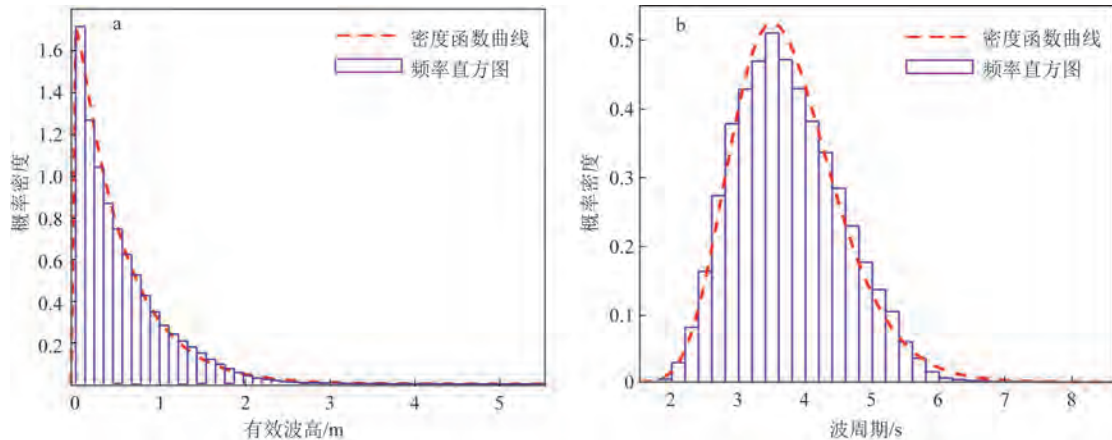


图 11 钦州湾有效波高(a)和波周期(b)的概率密度分布

Fig.11 Probability density distribution of significant wave height (a) and wave period (b) at the research point

4 结论

本文利用 ERA5 数据集,分析了钦州湾海域的风浪年际、四季分布特征,并建立了适用于当地的风浪关系、构建了波周期与波高的联合概率分布模型。具体结论如下:

①钦州湾 40 年内的年际最大风速分布在 18~36 m/s 之间,年际最大有效波高分布在 2.0~5.5 m,

风速与有效波高具有相同的变化趋势,最大值均出现在 2014 年(即台风“威马逊”影响期间),风速最大值为 35.86 m/s,有效波高最大值为 5.45 m。根据 P-III 极值分布可以计算得到不同重现期的风速与有效波高。

②钦州湾常风向为 NNE 向、常浪向为 SSW 向,钦州湾风浪特征的季节性变化较强。春夏两季多为向岸风,秋冬两季多为离岸风。由于研究区域为

近岸海域,风区对风浪成长关系有明显影响,因此可根据风向的不同分别建立风浪关系,选择7月与9月分别建立不同风向的风浪关系并验证,得到可靠的风浪关系曲线。

③建立波周期与波高的联合概率分布模型。波周期与波高的联合分布呈现斜三角形特征,40年间波高在0~1 m且波周期在2~5 s的波浪发生次数最多。本研究为风浪要素的预测提供参考,以期保证船舶在平陆运河下游的安全航行。

参考文献:

- [1] ALTUNKAYNAK A, ÖZGER M. Temporal significant wave height estimation from wind speed by perceptron Kalman filtering [J]. *Ocean Engineering*, 2004, 31(10): 1245-1255.
- [2] PANDEY P C, GAIROLA R M, GOHIL B S. Wind-wave relationship from SEASAT radar altimeter data[J]. *Boundary-Layer Meteorology*, 1986, 37(3): 263-269.
- [3] TAYLOR P K, YELLAND M J. The dependence of sea surface roughness on the height and steepness of the waves[J]. *Journal of Physical Oceanography*, 2001, 31(2): 572-590.
- [4] ANDREAS E L, WANG S. Predicting significant wave height off the northeast coast of the United States[J]. *Ocean Engineering*, 2007, 34(8-9): 1328-1335.
- [5] RAPIZO H, BABANIN A V, SCHULZ E, et al. Observation of wind-waves from a moored buoy in the Southern Ocean[J]. *Ocean Dynamics*, 2015, 65(9-10): 1275-1288.
- [6] 潘锦嫦. 大连湾小风区风浪要素的经验关系[J]. *水运工程*, 1984(1): 50-53.
- PAN J C. Empirical relationship of wind and wave elements in the small wind zone of Dalian Bay[J]. *Port & Waterway Engineering*, 1984(1): 50-53.
- [7] 冯卫兵, 彭向丽, 张少兰. 南黄海近岸海域风浪统计分析[C]//第十四届中国海洋(岸)工程学术讨论会论文集(上册). 呼和浩特: 中国海洋学会海洋工程分会, 2009: 6.
- FEN W B, PENG X L, ZHANG S L. Statistical analysis of wind and waves in the coastal waters of the South Yellow Sea[C]// *Proceedings of the 14th China Marine (Coastal) Engineering Academic Symposium (Volume One)*. College of Transportation, College of Oceanography, Hohai University, 2009: 6.
- [8] 赵红军, 王俊达, 孔俊, 等. 北部湾海浪季节变化和驱动因素的数值模拟研究[J]. *海洋学报*, 2022, 44(10): 10-19.
- ZHAO H J, WANG J D, KONG J, et al. Numerical investigations on seasonal variations and forcing factors to waves in the Beibu Gulf[J]. *Haiyang Xuebao*, 2022, 44(10): 10-19.
- [9] 张敏, 米婕, 赵振宇, 等. 基于模型耦合的北部湾风暴潮增水与风浪模拟研究[J]. *广西科学*, 2019, 26(6): 655-662.
- ZHANG M, MI J, ZHAO Z Y, et al. Study on the coupled numerical simulation of storm surge and wind wave in Beibu Gulf [J]. *Guangxi Sciences*, 2019, 26(6): 655-662.
- [10] 孙美燕, 王永兴, 朱峰. 钦州港附近海域波浪要素数值模拟研究[J]. *水道港口*, 2023, 44(4): 586-593.
- SUN M Y, WANG Y X, ZHU F. Numerical simulation of wave parameters in sea area near Qinzhou Port[J]. *Journal of Waterway and Harbor*, 2023, 44(4): 586-593.
- [11] 李江夏, 朱钰, 徐杰, 等. ERA-Interim和ERA5再分析风资料在中国近海的适用性对比研究[J]. *海洋通报*, 2023, 42(3): 260-271.
- LI J X, ZHU Y, XU J, et al. A comparative study on the applicability of ERA-Interim and ERA5 reanalysis wind data in the coastal waters of China[J]. *Marine Science Bulletin*, 2023, 42(3): 260-271.
- [12] 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.
- [13] 侯敏, 王国松, 卜清军. 基于4种再分析资料的中国近海风速特征分析[J]. *天津科技*, 2017, 44(10): 109-113.
- HOU M, WANG G S, BU Q J. Characteristics of sea surface wind over China seas based on four reanalysis data sets[J]. *Tianjin Science & Technology*, 2017, 44(10): 109-113.
- [14] 李荣波, 陈晓斌, 陈璇, 等. 南海海面风速、波高的变化趋势[J]. *海洋开发与管理*, 2016, 33(8): 93-97.
- LI R B, CHEN X B, CHEN X, et al. Variation trend of surface wind speed and wave height of South China Sea[J]. *Ocean Development and Management*, 2016, 33(8): 93-97.
- [15] 夏华永, 李树华. 广西沿海年极值波高分析[J]. *热带海洋学报*, 2001, 20(2): 1-7.
- XIA H Y, LI S H. An analysis on annual extreme wave height distributions along Guangxi coast[J]. *Journal of Tropical Oceanography*, 2001, 20(2): 1-7.
- [16] 汪强. 基于典型站点粤东粤西沿海重现期波高趋强特性研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2022.
- WANG Q. Research on the characteristics of wave height intensification in the return period based on typical sites in coast of eastern and western Guangdong[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2022.
- [17] 李永青, 李彬, 石洪源, 等. 南海北部波浪特征分析[J]. *海洋湖沼通报*, 2019(2): 18-23.
- LI Y Q, LI B, SHI H Y, et al. Analysis of wave characteristics in the northeastern part of the South China Sea[J]. *Transactions of Oceanology and Limnology*, 2019(2): 18-23.
- [18] 文先华, 武艺. 广西北海近岸海域波浪的分布特征[J]. *水运工程*, 2016(7): 32-35.
- WEN X H, WU Y. Distribution characteristics of wave in Guangxi Beihai offshore sea area[J]. *Port & Waterway Engineering*, 2016(7): 32-35.

- [19] 高晨晨, 周谷城, 王侃睿. 响水近岸海域波浪特性研究[J]. 海洋学报, 2019, 41(5): 23-34.
GAO C C, ZHOU G C, WANG K R. Study on wave characteristics in the nearshore waters of Xiangshui[J]. Haiyang Xuebao, 2019, 41(5): 23-34.
- [20] 王小丹, 赵文静. 基于ERA-Interim再分析资料的南沙海域风、浪场特征分析[J]. 海洋预报, 2019, 36(2): 30-37.
WANG X D, ZHAO W J. Characteristics analysis of wind and wave in the Nansha Aera based on ERA-Interim reanalysis data [J]. Marine Forecasts, 2019, 36(2): 30-37.
- [21] 王晨迪, 费建芳, 丁菊丽, 等. 海气界面动量通量算法的改进[J]. 热带气象学报, 2017, 33(5): 627-636.
WANG C D, FEI J F, DING J L, et al. Improvement to the air-sea momentum flux algorithm[J]. Journal of Tropical Meteorology, 2017, 33(5): 627-636.
- [22] 李佳谦, 邵珠晓, 梁丙臣. 渤海和黄海北部波高与周期联合分析[J]. 海洋与湖沼, 2022, 53(4): 990-998.
LI J Q, SHAO Z X, LIANG B C. Joint analysis of wave height and wave period in the Bohai Sea and northern Yellow Sea[J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 2022, 53(4): 990-998.

Analysis of wind-wave relationships in Qinzhou Bay over 40 years based on ERA5 reanalysis data

ZHANG Yu¹, HE Junhui², HU Jiang¹, GAO Chengyan³, XU Yuanyuan¹

(1. Chongqing Jiaotong University Hohai College, Chongqing 400074, China; 2. Pinglu Canal Group Co., Ltd. Nanning, Guangxi 530200, China; 3. China Communications Water Transport Planning and Design Institute Co., Ltd. Beijing 100007, China)

Abstract: Based on the ERA5 data from the European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, this study systematically examines the graded probability distribution of wind and wave fields in Qinzhou Bay from 1983 to 2022, as well as the interannual, monthly, and return period characteristics of key parameters. Further-more, the wind-wave relationship is fitted to clarify the joint probability distribution of significant wave height and wave period. The results show that the prevailing wind direction in Qinzhou Bay is NNE, while the dominant wave direction is SSW. Seasonal variations in wind speed and significant wave height are evident: onshore winds prevail in spring and summer, whereas offshore winds dominate in autumn and winter. Wind-wave relationships are established based on different wind directions. The joint distribution of wave height and period resembles an oblique triangle, with waves of 0~1.0 m in height and 2.0~5.0 s in period occurring most frequently.

Key words: Qinzhou Bay; analysis of wind-wave characteristics; wind-wave relationship; joint distribution of wave height and period