

中国浙江和福建海域台风浪变化特征和趋势*

冯兴如^{1, 2, 3} 杨德周^{1, 2, 3} 尹宝树^{1, 2, 3, 4} 李明杰⁵

(1. 中国科学院海洋研究所 青岛 266071; 2. 中国科学院海洋环流与波动重点实验室 青岛 266071;
3. 青岛海洋科学与技术国家实验室海洋动力过程与气候功能实验室 青岛 266237; 4. 中国科学院大学 北京 100049;
5. 国家海洋环境预报中心 北京 100081)

摘要 基于非结构网格的海浪-海流耦合模式 SWAN+ADCIRC(Simulating Waves Nearshore+Advanced Circulation model), 模拟了 1997—2016 年共 20 年间所有影响浙江和福建海域台风过程期间的海浪过程。利用 4 个台风过程期间的海浪观测数据对模拟结果进行了验证, 模拟结果和实测结果吻合较好。基于该长时间序列台风浪模拟结果, 分别分析了浙江和福建海岸带台风浪有效波高极值以及台风浪有效波高大于 1m 和 1.5m 的持续时间。结果显示, 在福建北部海岸带台风浪有效波高极值和台风浪有效波高大于 1m 的持续时间($t_{HS>1}$)有显著增长的趋势。其中, 台风浪高极值的增长趋势最大可达 0.05m/a, $t_{HS>1}$ 的增长趋势位于 0.54 至 1.72h/a 之间。分析 $t_{HS>1}$ 与 ENSO 指数的关系发现, 福建省南部海域台风浪与 ENSO 指数有较显著的负相关, 浙江省北部海域台风浪与 ENSO 指数有较显著的正相关, ENSO 信号对这两个海域的台风浪有着较显著的影响。

关键词 台风浪; 耦合模式; 趋势; 浙江福建海域

中图分类号 P731 doi: 10.11693/hyh20180200036

中国是海洋大国, 海洋灾害频发, 其中海浪是引起海洋灾害的主要原因之一。台风过境时, 风速较大, 由其造成的台风浪更容易造成较大的海洋灾害, 统计显示, 2013 台风浪造成的人员伤亡 78 人, 经济损失 6.19 亿元(李硕等, 2017)。因此研究台风浪的长期变化特征和趋势对于海岸带管理、海浪的长期预测以及防灾减灾等具有重要的意义。石永芳等(2014)基于卫星高度计资料研究了 1993—2011 年北太平洋波浪的变化趋势; 对于中国近海, He 等(2018)基于第三代海浪模式模拟了中国东海 1988—2002 年的波浪场, 并分析了该海域的极值波高; 李硕等(2017)研究了中国 2002—2015 年共 15 年间的海浪灾害特征, 并对台风浪灾害进行了单独分析, 发现台风浪在海浪灾害中导致的人员死亡比例呈下降趋势; 彭冀等(2013)通过分析 2002—2011 年近 10 年的海浪灾害数据发现, 浙江遭受海浪灾害最严重, 福建受海浪灾害影响增长

幅度最大, 并且台风浪是造成海浪灾害损失最大的因素。因此, 本文将浙江和福建海岸带的台风浪作为研究内容, 研究该海域 1997—2016 年最近 20 年台风浪的变化特征和趋势。

研究海浪的长期变化特征和趋势需要长时间序列的海浪数据, 但是目前国内高质量的海浪连续观测数据较少, 这样海浪数值模式便成了一个重要的工具。近岸海浪受时空变化的水位和流场影响较大, 采用考虑水位和海流影响的耦合模式可以显著提高近岸海浪的模拟准确度(Huang *et al*, 2010; Feng *et al*, 2016)。此外, 福建和浙江海岸线复杂, 因此本文采用非结构网格的海浪-海流耦合模式来模拟研究海域的台风浪过程, 既可以提高准确性, 又可以很好的刻画海岸线。

本文针对浙江和福建海域建立了高分辨率的非结构计算网格, 基于海浪-海流耦合模式模拟了

* 国家重点研发计划项目, 2016YFC1402000 号, 2016YFC1401500 号; 国家自然科学基金项目, 41776016 号。冯兴如, 副研究员, E-mail: fengxingru07@qdio.ac.cn

通讯作者: 杨德周, 研究员, E-mail: yangdezhou@qdio.ac.cn

收稿日期: 2018-02-12, 收修改稿日期: 2018-02-17

1997—2016年共20年间所有影响该海域台风过程期间的海浪过程,并对模拟结果进行了充分验证。之后对模拟结果进行分析,得出了研究海域海岸带台风浪的变化特征和趋势。该研究对于研究海域海浪的长期预测和防灾减灾具有重要意义。同时对于航运和近岸的泥沙输运研究也有一定的借鉴意义。

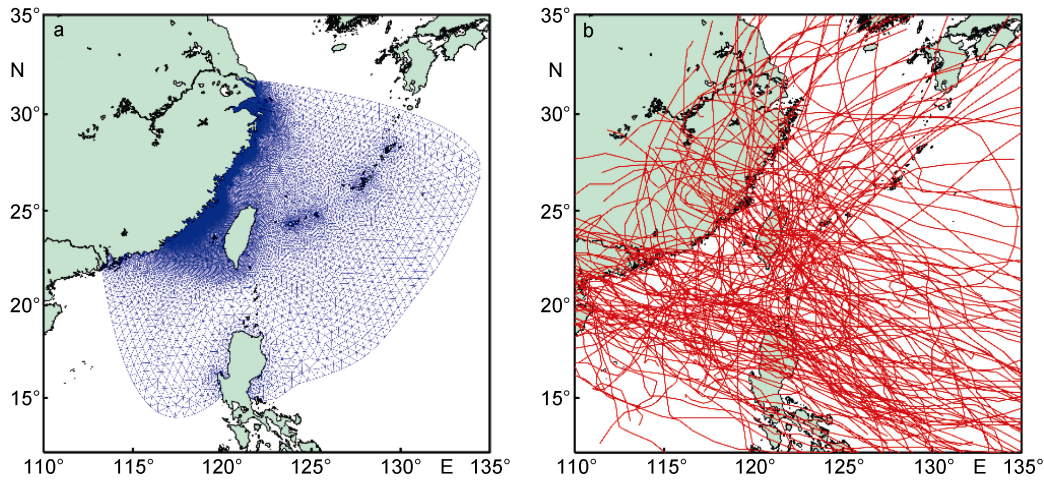


图1 a: 模式计算网格; b: 1997—2016年间影响浙江和福建海域的158个台风过程

Fig.1 a: Computational grid of the coupled model; b: Paths of the typhoons that affected sea area of Zhejiang and Fujian Provinces from 1997 to 2016. A total of 158 typhoons were selected

1.1 耦合模式介绍

本文采用的海浪-海流耦合模式为 SWAN+ADCIRC(Dietrich *et al*, 2011), 其中 ADCIRC (Advanced Circulation Model)模式是一种非结构网格有限元水文动力模式(Westerink *et al*, 1991), SWAN (Simulating WAVesNearshore)模式为 Zijlema(2010)在曲线正交网格模式基础上, 修改得到的基于三角形网格的海浪模式。本研究中, 耦合模式运行的物理机制为: ADCIRC 将模拟得到的水位和流场提供给 SWAN, 作为海浪模式的背景场; SWAN 模式将计算得到的辐射应力提供给 ADCIRC 作为外力驱动, 同时海浪模式中的波长和周期信息用来参与 ADCIRC 模式的风应力计算。

其中, 对于风应力的计算, 原模式中, 风应力计算公式为 Garratt(1977)公式: $C_d=0.001 \cdot (0.75+0.067W)$, W 为风速, 模式将 C_d 的上限默认为 0.0035。在该研究中, 风应力拖曳系数采用同时考虑依赖波龄和风速的 Donelan(1993)公式:

$$C_d = \left(\frac{K}{\ln 10 - \ln Z_0} \right)^2, \quad Z_0 = 3.7 \times 10^{-5} \frac{W^2}{g} \left(\frac{C_p}{W} \right)^{-0.9}. \quad (1)$$

1 历史台风浪模拟

本研究采用非结构网格的海浪-海流耦合模式, 对浙江和福建海域 1997—2016 年间所有影响该海域台风过程期间的海浪过程进行了模拟。模式采用的计算网格以及考虑的所有台风过程的路径分别见图 1a 和图 1b。

其中, C_d 为风应力拖曳系数, K 为 Karman 常数, 取 0.4, Z_0 为海表面粗糙度, C_p 为海浪谱峰频率对应的波速, W 为风速, C_p/W 代表波龄。当风速超过 33m/s 时, 将风应力拖曳系数设为其上限 0.0025(Donelan *et al*, 2004)。

1.2 模式设置

耦合模式的计算网格为高分辨率的非结构网格, 见图 1a。计算区域大体位于 15° — 32° N, 112° — 135° E 这个范围内, 模式的分辨率从外海的 $30'$ 逐渐过渡到近岸的 100 m, 一共 274415 个节点, 525071 个三角形单元。模式采用的水深数据在近岸为分辨率为 $3'' \times 3''$ 的高分辨率地形, 外海采用 ETOPO2 数据, 该水深数据来自美国国家地球物理资料中心(NGDC), 其水平分辨率为 $2'$ 一个格点。

对于 ADCIRC 模式, 初始流速和水位都为 0; 模式海岸边界条件取: $V_n=0$, 这里 V_n 是指固边界的法向水深平均流速。开边界上采用 $M_2, S_2, K_1, O_1, N_2, S_2, P_1, Q_1$ 共 8 个分潮的调和常数预报的水位作为驱动, 这些调和常数来自 NAO99 潮汐模型(Matsumoto *et al*, 2000)。SWAN 模式的计算网格和水深与 ADCIRC 模

式完全一致。初始频率为 0.04Hz, 频率增加因子为 1.1, 频率数为 41, 波浪谱方向的分辨率为 10° , 模式计算的时间步长为 30 分钟。耦合模式在运行时, 模式间交换数据的时间间隔为 30 分钟。

1.3 风场模型和台风过程

本研究采用的风场驱动为混合风场, 具体方法为在 8 倍最大风速半径内完全采用模型风场, 8 倍和 10 倍最大风速半径内逐渐转换为背景风场, 10 倍最大风速半径外, 完全采用背景风场, 本研究选取的背景风场为 ECMWF(European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, <https://www.ecmwf.int/>, 2018) 风场。其中模型风场采用的是 Jelesnianski 的圆形台风模型(Jelesnianski, 1965)。该台模型对风场的计算考虑了台风的移动速度。其对风场和气压的计算公式如下:

$$V = \begin{cases} \frac{r}{R_{\max} + r}(V_{ox}\mathbf{i} + V_{oy}\mathbf{j}) + V_{\max} \left(\frac{r}{R_{\max}}\right)^{\frac{3}{2}} \frac{1}{r}(A\mathbf{i} + B\mathbf{j}) & (r \leq R_{\max}) \\ \frac{R_{\max}}{R_{\max} + r}(V_{ox}\mathbf{i} + V_{oy}\mathbf{j}) + V_{\max} \left(\frac{R_{\max}}{r}\right)^{\frac{1}{2}} \frac{1}{r}(A\mathbf{i} + B\mathbf{j}) & (r > R_{\max}) \end{cases} \quad (2)$$

$$P_a = \begin{cases} P_0 + \frac{1}{4}(P_\infty - P_0) \left(\frac{r}{R_{\max}}\right)^3 & (r \leq R_{\max}) \\ P_\infty - \frac{3}{4}(P_\infty - P_0) \left(\frac{R_{\max}}{r}\right) & (r > R_{\max}) \end{cases} \quad (3)$$

其中 $A = -(x - x_c)\sin\theta + (y - y_c)\cos\theta$, $B = [(x - x_c)\cos\theta - (y - y_c)\sin\theta]$, (x, y) 和 (x_c, y_c) 分别代表计算点的位置和台风中心的位置; (V_{ox}, V_{oy}) 分别为台风中心的移动速度在 x 和 y 方向的分量; V_{\max} 为台风最大风速; R_{\max} 为最大风速半径; r 为计算点到台风中心的距离; θ 为流向角, 在本研究中, 当 $r \leq R_{\max}$ 时 $\theta = 20^\circ$, $r > R_{\max}$ 时 $\theta = 15^\circ$; V 为计算点的速度; i 和 j 分别代表 x 和 y 方向的单位矢量; P_0 为台风的中心气压; P_∞ 为台风的外围气压, 模式中设为 1010hPa。

台风模型中的最大风速计算公式为:

$$V_{\max} = 3.447(1010 - P_0)^{0.644} \quad (4)$$

Atkinson 等(1977)在分析了位于西北太平洋沿岸以及一些岛屿观测站上的近 28 年的最大台风风速观测数据后, 提出了上述最大台风风速和台风中心气压之间的关系式。

基于耦合模式, 本研究共模拟了 1997—2016 年间, 所有影响浙江和福建海域的 158 个台风期间的海浪过程。其台风路径和强度数据均来自中国台风网的

热带气旋最佳路径数据集(<http://tcdata.typhoon.org.cn/>)(Ying *et al*, 2014)。

2 模拟结果验证

2.1 1319 号台风过程海浪模拟验证

为了对耦合模式结果进行验证, 首先搜集了 2013 年 1319 号台风过程期间的 4 个站位处的海浪观测数据。2013 年 19 号台风“天兔”于 9 月 17 号生成于西北太平洋菲律宾东部海域, 并在 22 号登陆广东, 造成了严重的灾害, 台风路径见图 2。模拟得到的海浪与实测结果的对比见图 3。可以看出, 耦合模式很好的模拟出了该台风过程中 4 个站位处的波高变化, 4 个站位处有效波高极值模拟的相对误差平均为 21%, 由于考虑了时空变化的流场和水位, 4 个站位处的海浪的模拟结果也出现了和实测资料一致的波动信号。

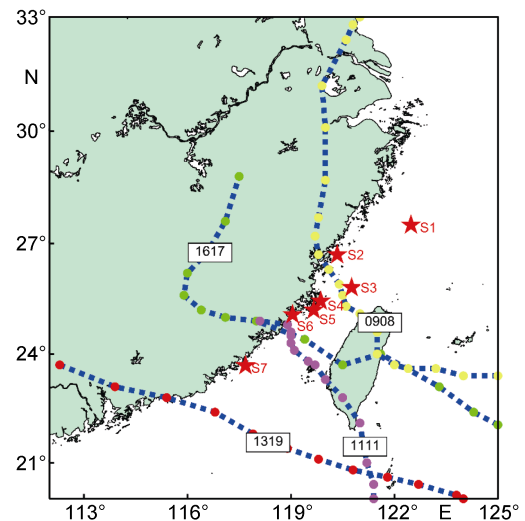


图 2 模式验证采取的 4 个台风过程路径及 7 个海浪观测站位分布

Fig.2 Distribution of the four typhoon paths and 7 wave observation stations

2.2 4 个典型台风过程期间的海浪模拟结果验证

为对模拟结果作进一步的验证, 将 0908 号、1111 号、1319 号和 1617 号台风过程中的海浪模拟结果与搜集到的对应观测资料进行了对比。这 4 个台风的路径以及用来验证的海洋观测站点分布如图 2 所示。验证结果如图 4 所示。海浪模拟结果和观测结果二者相关系数为 0.79, 图 4 中拟合曲线倾斜率为 0.83, 并且通过了 100% 的显著性检验。说明海浪模拟结果和观测结果吻合较好。

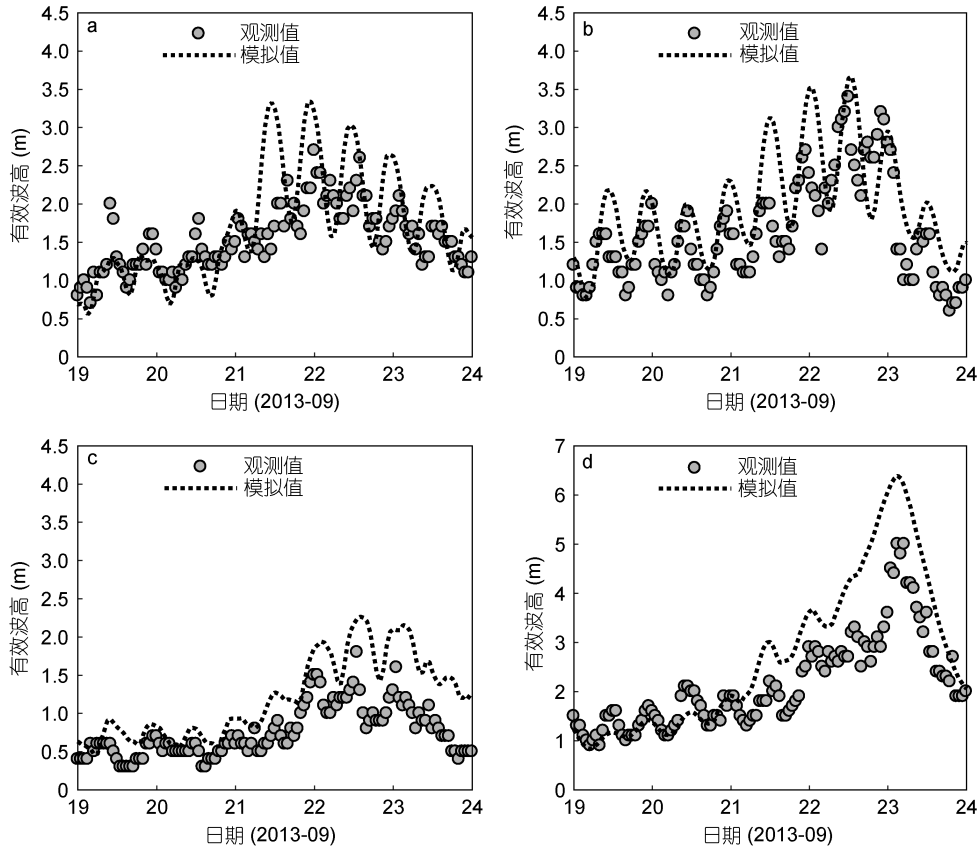


图3 1319号台风“天兔”期间海浪有效波高模拟结果和实测结果在4个站位处的对比。a: S2;b: S4;c: S6;d: S7
 Fig.3 Simulated and observed significant wave height during typhoon “Usagi” at stations of a: S2; b: S4; c: S6; d: S7

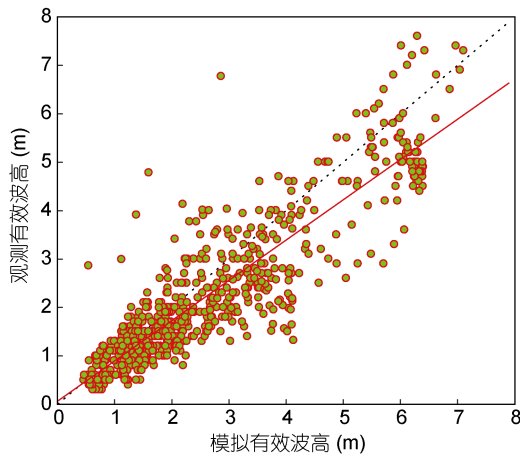


图4 4个台风过程期间海浪有效波高模拟结果和实测结果在7个站位处的对比结果
 Fig.4 Simulated and observed significant wave height during four typhoons at seven stations

3 结果与分析

对模拟得到的浙江福建海域1997—2016年共20年间对研究区域有影响的158个台风过程期间的海浪模拟结果进行了统计,分析了研究海域台风浪的

变化趋势及其与 ENSO 指数的关系。为了分析研究海域海浪的变化趋势,特选取了研究海域岸线上的172个点位处的海浪波高序列进行分析,这些点位的分布如图5所示。

3.1 台风浪年极值趋势分析

对1997—2016年20年间模拟得到的台风浪进行统计,得到图5中172个站位处的台风浪有效波高年极值序列。之后,对每个站位处的浪高年极值进行趋势分析,分析结果见图6。可以看出,台风浪高极值的最大正增长趋势值为0.05m/年,通过了95%的显著性检验,该值出现在26.1°N附近,位于福建省岸线的闽江口附近海域。进一步分析可以看出,增长趋势为正值,且通过90%显著性检验的位置大都位于福建省岸线的中部海域,这说明,该海域的台风浪极值有显著增长的趋势。图6也有增长趋势为负值的区域,但极少有通过90%的显著性检验。对于其他海域,台风浪极值的变化趋势大都不明显,没有通过70%的显著性检验。总体来看,福建北部海域岸线台风浪极值具有增长的趋势。

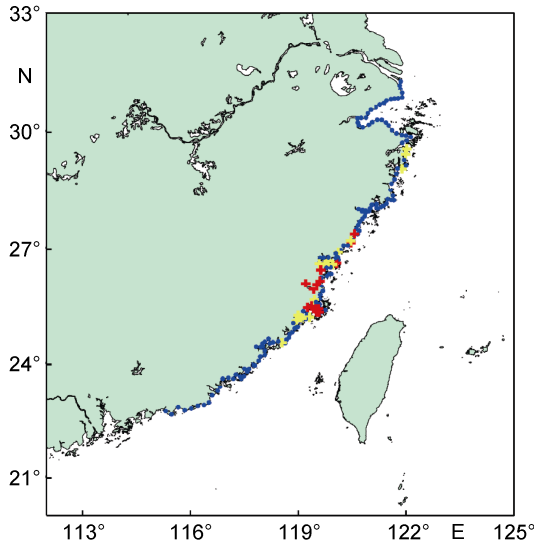


图 5 分析台风浪模拟结果所涉及的研究海域岸线上 172 个点位

Fig.5 Distribution of the 172 stations, on which the wave results are analyzed along the coast of the study area
 注: 其中 $t_{Hs>1}$ 变化趋势通过 90% 显著性检验, 趋势为正显示为红色+号, 趋势为负显示为红色-号; $t_{Hs>1}$ 变化趋势显著性检验结果位于 70% 至 90% 之间, 趋势为正显示为黄色+号, 趋势为负显示为黄色-号; 其他没有显著趋势的显示为蓝色·。($t_{Hs>1}$ 代表每年台风浪有效波高大于 1m 的持续时间)

3.2 台风浪有效波高大于 1m 的持续时间变化趋势分析

海浪浪高大于某个值的持续时间, 也是影响海浪致灾程度的一个重要因素。因此, 本研究还统计了图 5 中各个站位处, 每年台风浪有效波高大于 1m 的时间 ($t_{Hs>1}$), 并做了趋势分析, 结果见图 7。为了更清晰的分析图 7 的结果, 在图 5 中, 本文将 $t_{Hs>1}$ 变化趋势通过 90% 显著性检验, 趋势为正显示为红色+号, 趋势为负显示为红色-号; $t_{Hs>1}$ 变化趋势显著性检验结果位于 70% 至 90% 之间, 趋势为正显示为黄色+号, 趋势为负显示为黄色-号; 其他没有显著趋势的显示为蓝色·。由图 5 可以看出, $t_{Hs>1}$ 变化趋势为负的站位, 都没有通过 70% 的显著性检验, 变化趋势为正, 且通过 90% 显著性检验的站位基本都位于福建北部海域。浙江中部海域有若干站位具有显著性位于 70% 至 90% 之间的正的增长趋势。其他站位的 $t_{Hs>1}$ 没有显著性变化趋势。进一步分析图 7 的结果可以发现, 通过 90% 显著性检验的正的增长趋势值基本位于 0.54 至 1.72h/a 之间, 主要位于纬度为 25.4°—27.3°N, 该区域对应着福建北部海域, 说明该海域的海浪灾害有增加的风险。

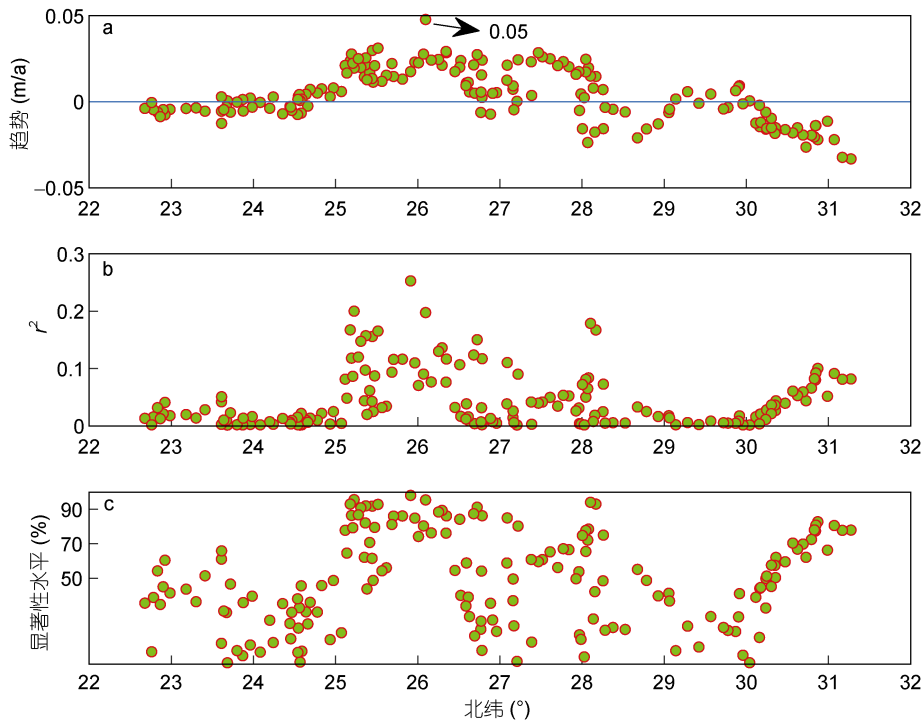


图 6 172 个站位处的台风浪有效波高年极值变化趋势及其对应的显著性检验结果

Fig.6 Trends of the extreme typhoon significant wave height and the corresponding significance test results for the 172 selected stations

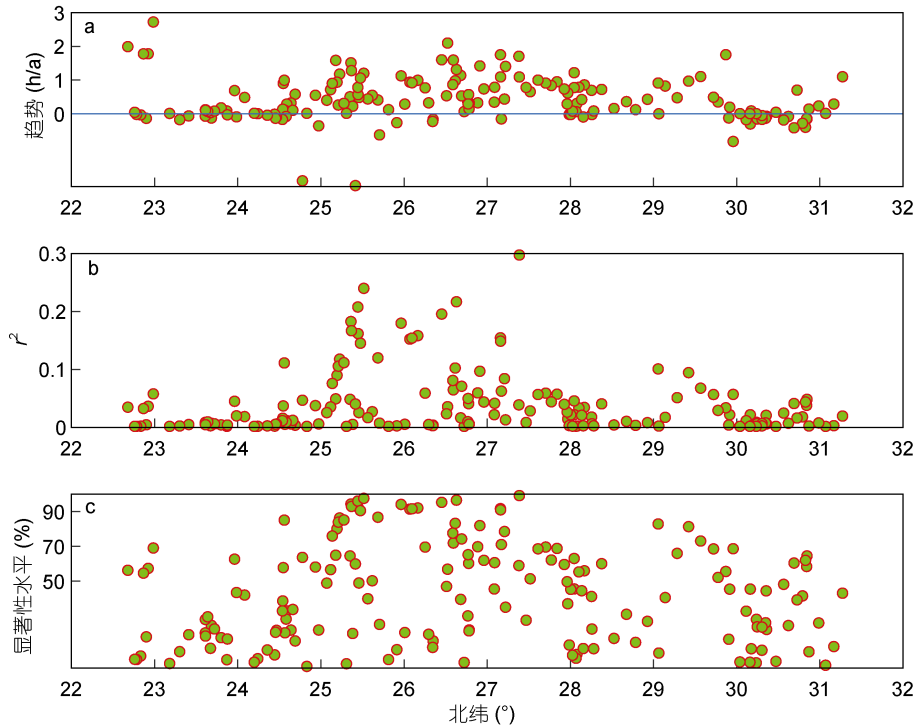


图 7 172 个站位处的台风浪有效波高大于 1m 的持续时间($t_{H_s>1}$)年变化趋势及其对应的显著性检验结果

Fig. 7 Trends in the duration of significant wave height greater than 1m and the corresponding significance test results for the 172 selected stations

3.3 台风浪有效波高大于 1.5m 的持续时间变化趋势分析

本文还对台风浪有效波高大于 1.5m 的时间($t_{H_s>1.5}$)做了趋势分析,结果见图 8。由图 8 可以看出, $t_{H_s>1.5}$ 与 $t_{H_s>1}$ 的变化趋势在空间上的分布比较相似,变化趋势为负的站位,都没有通过 70% 的显著性检验,变化趋势为正,且通过 90% 显著性检验的站位基本都位于福建北部海域。同样,浙江中部海域也有若干站位具有显著性位于 70% 至 90% 之间的正的增长趋势。其他站位的 $t_{H_s>1.5}$ 没有显著性变化趋势。台风浪有效波高大于 1.5m 的时间($t_{H_s>1.5}$)通过 90% 显著性检验的正的增长趋势值基本位于 0.19 至 1.50h/a 之间,要小于 $t_{H_s>1}$ 的增长趋势。

3.4 ENSO 对台风浪的影响

为了研究台风浪的年变化规律以及 ENSO 信号对台风浪的影响,将图 5 中不同站位处每年台风浪有效波高大于 1m 的持续时间($t_{H_s>1}$)与 ENSO 指数做相关性分析,其中采用的 ENSO 指数为来自美国的 NCEP 资料 (http://origin.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/ensostuff/ONI_v5.php, 2018)。结果见图 9。可以看出, $t_{H_s>1}$ 与 ENSO 指数的相关系数最大可达 0.43, 并且通过了 94% 的显著性检验。这说

明, ENSO 信号对台风浪的影响在研究海域的某些岸段还是比较明显。图 9 显示, 在纬度为 23.0°—25.0°N 以及 29.0°—30.5°N 区间内一些站位的 $t_{H_s>1}$ 与 ENSO 指数的相关性较显著, 这两个区域分别对应着福建省南部以及浙江省北部海域, 具体为福建省南部海域台风浪与 ENSO 指数有较显著的负相关, 浙江省北部海域台风浪与 ENSO 指数有较显著的正相关。同时, 对比图 7 和图 9 可以看出, 在 $t_{H_s>1}$ 的增长趋势显著的海域, $t_{H_s>1}$ 与 ENSO 指数的相关性却不显著。

4 结论

本文基于海浪-海流耦合模式, 研究了浙江和福建海域台风浪的变化特征和趋势, 该研究对于这两个海域的台风浪长期预报以及防灾减灾具有重要的意义, 主要结论如下:

(1) 针对浙江和福建海域建立了高分辨率的海浪-海流耦合数值模式, 海浪模拟结果与实测结果对比较好, 可以用来研究该海域的台风浪变化特征和趋势。

(2) 基于该耦合模式模拟了 1997—2016 年 20 年间对研究区域有影响的 158 个台风过程期间的海浪过程, 并对模拟结果进行了统计, 发现福建北部海域

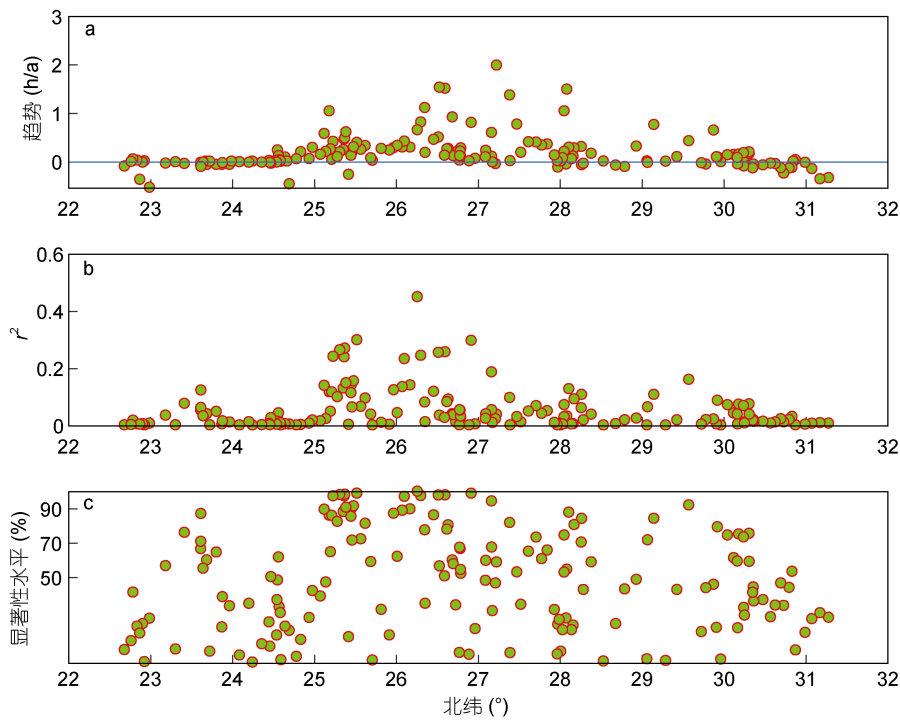


图 8 172 个站位处的台风浪有效波高大于 1.5m 的持续时间($t_{Hs>1.5}$)年变化趋势及其对应的显著性检验结果
Fig.8 Trends in the duration of significant wave height greater than 1.5m and the corresponding significance test results for the 172 selected stations

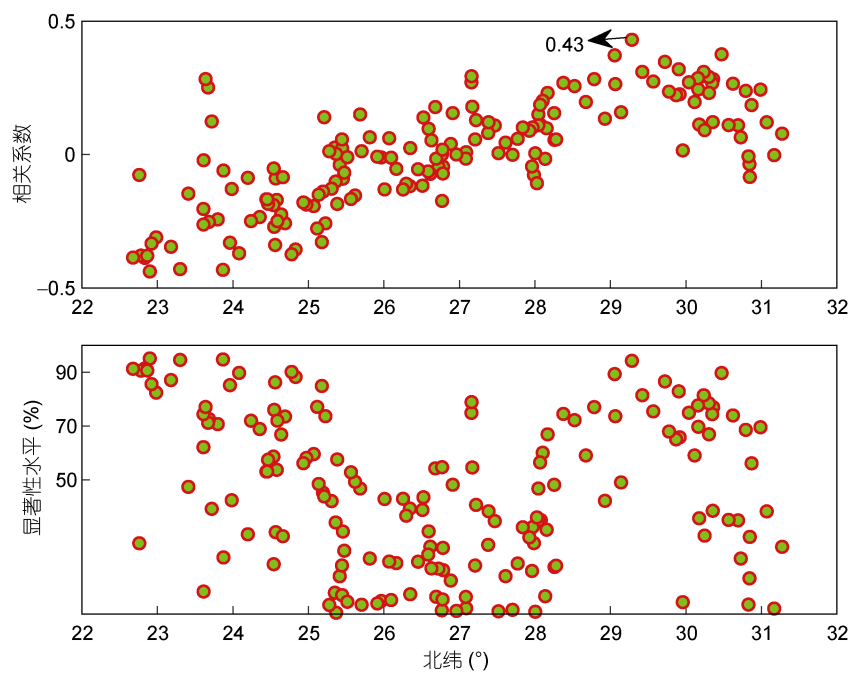


图 9 172 个站位处的年台风浪有效波高大于 1m 的持续时间($t_{Hs>1}$)与 ENSO 指数之间的相关系数及其对应的显著性检验结果
Fig.9 Correlation coefficient between $t_{Hs>1}$ (duration of significant wave height greater than 1m) and annual ENSO index, and the corresponding significance test results for the 172 selected stations

台风浪极值和台风浪有效波高大于 1m 和 1.5m 的持续时间有增长的趋势。

(3) 分析台风浪有效波高大于 1m 的持续时间及其与 ENSO 指数的关系发现, 福建省南部海域台风浪与 ENSO 指数有较显著的负相关, 浙江省北部海域台风浪与 ENSO 指数有较显著的正相关。ENSO 信号对这两个海域的台风浪有较显著的影响。

致谢 本文的数值模拟是在中国科学院海洋研究所的高性能计算平台上完成的, 特此致谢。

参 考 文 献

- 李 硕, 陶爱峰, 吴 迪等, 2017. 近 15 年中国海浪灾害特性分析. 第十八届中国海洋(岸)工程学术讨论会论文集(上), 195—197
- 彭 冀, 陶爱峰, 齐可仁等, 2013. 近十年中国海浪灾害特性分析. 第十六届中国海洋(岸)工程学术讨论会论文集(上), 805—808
- 石永芳, 杨永增, 吴克俭等, 2014. 1993—2011 年北大西洋与北太平洋的波浪变化及其原因探究. 海洋与湖沼, 45(4): 685—694
- Atkinson G D, Holliday C R, 1975. Tropical Cyclone Minimum Sea Level Pressure/Maximum Sustained Wind Relationship for the Western North Pacific. *Monthly Weather Review*, 105(4): 25
- Dietrich J C, Zijlema M, Westerink J J *et al*, 2011. Modeling hurricane waves and storm surge using integrally-coupled, scalable computations. *Coastal Engineering*, 58(1), 45—65
- Donelan M, Dobson F, Smith S *et al*, 1993. On the Dependence of Sea Surface Roughness on Wave Development. *Journal of Physical Oceanography*, 23(9), 2143—2149
- Donelan M, Haus B, Reul N *et al*, 2004. On the limiting aerodynamic roughness of the ocean in very strong winds. *Geophysical Research Letters*, 31(18), 355—366
- Feng X, Yin B, Yang D, 2016. Development of an unstructured-grid wave-current coupled model and its application. *Ocean Modelling*, 104, 213—225
- Garratt J R, 1977. Review of drag coefficients over oceans and continents. *Monthly Weather Review*, 105(105), 915—929
- He H, Song J, Bai Y *et al*, 2018. Climate and extrema of ocean waves in the East China Sea, *SCIENCE CHINA Earth Sciences*, <https://doi.org/10.1007/s11430-017-9156-7>
- Huang Y, Weisberg R H, Zheng L, 2010. Coupling of surge and waves for an Ivan-like hurricane impacting the Tampa Bay, Florida region. *Journal of Geophysical Research C: Oceans*, 115, C12009
- Jelesnianski C, 1965. A numerical computation of storm tides induced by a tropical storm impinging on a continental shelf. *Monthly Weather Review*, 93(6), 343—358
- Matsumoto K, Takanezawa T, Ooe M, 2000. Ocean Tide Models Developed by Assimilating TOPEX/POSEIDON Altimeter Data into Hydrodynamical Model: A Global Model and a Regional Model around Japan. *Journal of Oceanography*, 56(5), 567—581
- Westerink J J, Luettich R A, Baptista A M *et al*, 1991. Tide and storm surge predictions using finite element model. *Journal of Hydraulic Engineering*, 118(10), 1373—1390
- Ying M, Zhang W, Yu H *et al*, 2014. An Overview of the China Meteorological Administration Tropical Cyclone Database. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 31(2), 287—301
- Zijlema M, 2010. Computation of wind-wave spectra in coastal waters with SWAN on unstructured grids. *Coastal Engineering*, 57(3), 267—277

THE CHANGE AND TREND OF THE TYPHOON WAVES IN ZHEJIANG AND FUJIAN COASTAL AREAS OF CHINA

FENG Xing-Ru^{1,2,3}, YANG De-Zhou^{1,2,3}, YIN Bao-Shu^{1,2,3,4}, LI Ming-Jie⁵

(1. *Institute of Oceanology, Chinese Academy of Science, Qingdao 266071, China*; 2. *Key Laboratory of Ocean Circulation and Waves, Chinese Academy of Science, Qingdao 266071, China*; 3. *Function Laboratory for Ocean Dynamics and Climate, Qingdao National Laboratory for Marine Science and Technology, Qingdao 266237, China*; 4. *University of Chinese Academy of Science, Beijing 100049, China*; 5. *National Marine Environmental Forecasting Center, Beijing 100081, China*)

Abstract The unstructured wave-current coupled model SWAN+ADCIRC (Simulating Waves Nearshore+ Advanced Circulation model) has been used to simulate the typhoon waves along the coast of Zhejiang and Fujian Provinces for the past 20 years (1997—2016). The simulated results compared well with the in situ observation data during 4 typhoon processes. The simulated wave results were used to analyze the extreme of significant wave height and the duration of the significant wave height greater than 1.0 and 1.5m. Results show that the extreme of significant wave height and duration of the significant wave height greater than 1.0m ($t_{Hs>1}$) had an increasing trend along the coastal area of northern Fujian Province. The extreme significant wave height trends reached up to 0.05m/a, and the increasing trend of the duration of significant wave height greater than 1.0m ($t_{Hs>1}$) ranged from 0.54 to 1.72h/a. Further analysis showed that the duration of the significant wave height greater than 1.0m and the annual ENSO index had a significant negative correlation for the coastal area of southern Fujian Province, and had a significant positive correlation for the coastal area of northern Zhejiang Province, which means the ENSO signal affects the typhoon waves significantly for these two coastal areas. The results of this study are useful for the coastal management by the government, prevention and mitigation of the marine disasters and also for the long-term forecasting of the typhoon waves.

Key words typhoon waves; coupled model; trends; Zhejiang and Fujian coastal areas