

石岛海域海浪数值模拟及特征分析

苑福利¹, 刘子洲¹, 刘 晓², 翟方国¹, 李培良³

(1. 中国海洋大学 海洋与大气学院, 山东 青岛 266100; 2. 山东理工大学 资源与环境工程学院, 山东 淄博 255049; 3. 浙江大学 海洋学院, 浙江 舟山 316021)

摘要: 本文基于 SWAN(Simulating Waves Nearshore)模式研究了 2001~2016 年石岛海浪有效波高的季节和年际变化特征, 评估了不同区域风场对其贡献, 并探讨了其与 ENSO 的关系。结果表明, 石岛有效波高受黄海季风系统的影响呈现显著的季节变化: 12 月份最大, 6 月份最小, 1%大波有效波高季节变化不显著。石岛有效波高年际变化信号显著, 其与风速年际变化之间的关系存在季节性差异: 石岛有效波高和石岛、黄海区域平均风速不同月份的年际异常分别在 7、10 月份相关性较高, 而石岛 1%大波有效波高和石岛、黄海区域平均 1%大风风速不同月份的年际异常则在 8 月份左右相关性最高。不同区域风场对石岛有效波高场的影响也呈现了季节性差异: 夏季, 黄海南部区域风场对石岛海浪的贡献较大, 而石岛风场的贡献较小; 冬季, 石岛风场的贡献较大。ENSO(El Niño-Southern Oscillation)事件会对石岛有效波高的年际变化产生一定的影响, 但影响比较小。本研究旨在对石岛海浪在季节和年际尺度上的变化特征以及风场等影响因素进行研究, 对该海域海浪场进行了详细的认识, 对了解该海域海浪有重要意义。

关键词: 石岛海浪; 季节和年际变化; 风场影响; ENSO

中图分类号: P731.22 文献标识码: A 文章编号: 1000-3096(2018)12-0001-14

DOI: 10.11759/hyxx20180424002

石岛海域位于山东半岛成山头近海, 处于北黄海和南黄海分界地带(图 1)。其北侧靠近渤海海峡, 水深相对较浅, 海底地形相较黄海其他区域变化较为剧烈, 东向临近黄海海槽。石岛海域是国家级海洋牧场示范区重点建设的区域之一, 建有全国最大的海水养殖区, 是全国海参、鲍鱼和高档海水鱼类的主要养殖基地。石岛海域靠近进出渤海的航道, 其附近有许多重要的渔港。因此, 深入研究该区域的海浪特征, 对航海、海岸和海洋资源开发、海水养殖等都具有非常重要的意义。

石岛海域地处黄海区域, 前人们利用卫星观测资料^[1-4]和数值模式等手段^[5-19]对黄海区域海浪的研究已经进行了一些工作。近些年, 随着第三代海浪模式 SWAN(Simulating Waves Nearshore)^[5-15]、WAVEWATCH III^[7, 16-19]等的发展, 数值模拟成为国内外科学工作者研究黄海区域海浪的重要手段, 大量关于数值模式对黄海海浪模拟效果的研究为提高对黄海海浪场的模拟能力提供了参考。李燕^[6]比较了不同风场资料应用在 SWAN 模式中对黄海海浪场模拟的效果。梅婵娟等^[7]比较了 WAVEWATCH 和 SWAN 对黄海区域海浪场的模拟能力, 结果表明 SWAN 模式模拟结果

总体更好。局部加密的非结构网格下相比于矩形网格也可以有效地提高对黄海海浪场的模拟精度^[10]。

目前为止, 对黄海海浪场的研究主要集中在时空变化特征和波浪能的研究上。李训强等^[17]的研究指出黄海区域有效波高在冬季最大、春季最小, 这和陈红霞等^[3]利用 TOPEX 卫星高度计资料研究得出的结果有所不同, 后者指出黄海海域波高在冬季最大, 夏季最小。陈国光等^[15]利用 SWAN 模拟结果进一步指出黄海有效波高最小值基本出现在 6、7 月份, 而最大值出现的月份在黄海不同区域有所差异。对黄海区域波浪能的研究上, 李永博等^[12]利用 SWAN 模

收稿日期: 2018-04-24; 修回日期: 2018-06-30

基金项目: 山东省海洋生态环境与防灾减灾重点实验室开放基金(201608); 山东省自然科学基金(ZR2014DQ005, ZR2015DQ006)

[Foundation: Open Fund of Shandong Provincial Key Laboratory of Marine Ecology and Environment & Disaster Prevention and Mitigation, No.201608; Shandong Provincial Natural Science Foundation, No. ZR2014DQ005, No. ZR2015DQ006]

作者简介: 苑福利(1992-), 男, 河南周口人, 硕士研究生, 研究方向为海洋动力学与数值模拟, 电话: 15712734978, E-mail: yuanfuli@stu.ouc.edu.cn; 刘子洲, 通信作者, 实验师, 主要从事物理海洋学和海洋调查方面的教学与研究, 电话: 13708954171, E-mail: lzz2013@ouc.edu.cn

式对成山头海域的波浪能进行了评估, 结果表明其存在明显的季节变化。黄海区域的波浪能也存在显著的季节变化^[18]。Zheng 等^[19]利用 1988~2011 年的 WAVEWATCH 模拟结果, 分析并指出了黄海区域的波浪能存在增强的长期趋势, 而且这种长期趋势在不同季节上存在差异。

总的来看, 前人对黄海季节变化特征的研究上存在一定的争议, 而且对黄海区域有效波高年际变化的研究比较缺少。本文选定研究的区域为石岛海域, 在前人工作的基础上, 利用第三代海浪模式 SWAN 对石岛海域有效波高的季节和年际变化特征及风场的影响作用进行了研究, 并探讨了其与 ENSO(El Niño-Southern Oscillation)事件的关系。

1 模式与观测

1.1 模式的选取与设置

本文研究所选用的是 41.01 版本的第三代海浪模式 SWAN^[15]。在 SWAN 模式中, 利用二维波作用

量 $N(\sigma, \theta)$ 来对随机波浪场进行描述, 该模式采用如公式(1)所示的波作用平衡方程:

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} C_x N + \frac{\partial}{\partial y} C_y N + \frac{\partial}{\partial \sigma} C_\sigma N + \frac{\partial}{\partial \theta} C_\theta N = \frac{S}{\sigma}, \quad (1)$$

其中, $N(\sigma, \theta) = E(\sigma, \theta) / \sigma$; $E(\sigma, \theta)$ 为能谱密度; σ 为相对频率; θ 为波向。 C_x 、 C_y 分别代表波作用量在 x 、 y 方向上的传播速度。 C_σ 、 C_θ 代表波作用量在谱空间 (σ, θ) 上的传播速度。 S 为源汇项, 具体如公式(2)所示:

$$S = S_{wind} + S_{quad} + S_{wcap} + S_{triad} + S_{bottom} + S_{breaking} \cdot (2)$$

公式(2)右侧各项依次代表海面风输入的能量、四波非线性相互作用传输的能量、白冠耗散的能量、三波非线性相互作用传输的能量、底摩擦耗散的能量、深度诱导破碎的能量。模拟区域为: 117°~130°E, 25°~40°N(图 1), 时间范围为 2001 年 1 月 1 日 00:00~2016 年 12 月 31 日 24:00, 输出变量包括海浪有效波高(Significant Wave Height, SWH)、波周期、波向等。其他设置见表 1。

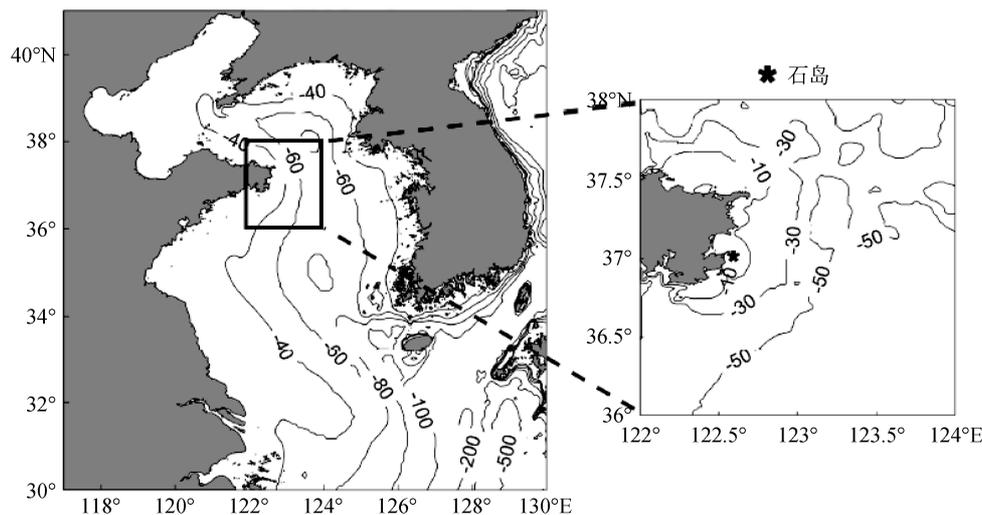


图 1 模拟区域及石岛区域水深(m)分布图

Fig. 1 Bathymetry (m) of the computation region and Shidao

表 1 SWAN 模式设置

Tab. 1 Configuration of the SWAN wave model

计算网格分辨率	0.1°×0.1°
网格格点数/个	151×131
频率范围/Hz	0.04~1.0
波向分辨率/°	5
输出时间步长/h	6

模式地形数据采用 SRTM(Shuttle Radar Topography Mission)数据集^[20]。其空间分辨率为 1/120°×

1/120°, 为提高模式的模拟效果, 本文对该地形数据在石岛近岸区域的水深进行了订正, 订正水深数据来自船讯网(<http://www.shipxy.com/>), 订正后的海底地形见图 1。

模式采用的风场数据是欧洲中尺度天气预报中心 ECMWF(European Center for Medium-Range Weather Forecasts) Interim^[21]再分析风场资料。风场数据的变量包括海表面 10 m 处的纬向风速和经向风速, 时间分辨率为 6 h, 空间分辨率是 0.125°×0.125°,

时间范围为 2001 年 1 月 1 日 00:00~2016 年 12 月 31 日 24:00。

1.2 观测资料介绍

1.2.1 浮标实测数据

我们利用 SZF 型波浪浮标对石岛海域的海浪进行了连续观测, 观测站位经纬度为 122°32'54"E, 36°59'24"N, 具体如图 1 中星号所示。观测参数包括有效波高、波向、波周期等。观测时间间隔为 3 h, 选取的时间范围为 2006 年 6 月 17 日~2006 年 8 月 25 日。

1.2.2 卫星数据

为了验证 SWAN 模式对黄海海浪场的模拟效果, 我们还利用了卫星观测数据。卫星数据下载自 AVISO 网站(<http://www.aviso.altimetry.fr/en/home.html>)。该数据是由多个卫星产品融合的有效波高数据, 其空间分辨率为 1°×1°, 时间分辨率为 1 d, 本文所用数据的时间范围为 2009 年 9 月 14 日~2016 年 12 月 31 日。

2 SWAN 模拟结果的验证

本文采用浮标和卫星等观测数据对 SWAN 模式

后报结果进行了验证分析。并采用一些统计量进行量化: 平均误差 R_{bias} 、均方根误差 R_{rmse} 、散射系数 R_{si} 、相关系数 R_r ^[22], 计算公式如下:

$$R_{bias} = \frac{1}{n} \sum (H_{1i} - H_{2i}), \quad (3)$$

$$R_{rmse} = \frac{1}{n} \sqrt{\sum_{i=1}^n (H_{1i} - H_{2i})^2}, \quad (4)$$

$$R_{si} = \frac{R_{rmse}}{H_{2i}}, \quad (5)$$

$$R_r = \frac{\sum_{i=1}^n (H_{1i} - \bar{H}_1)(H_{2i} - \bar{H}_2)}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (H_{1i} - \bar{H}_1)^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (H_{2i} - \bar{H}_2)^2}}, \quad (6)$$

其中, H_{1i} 和 H_{2i} 分别代表模式模拟值和观测值, \bar{H}_1 和 \bar{H}_2 是它们的平均值, n 是样本的数量。

图 2a 比较的是浮标观测和模式模拟结果的日平均值, 二者的相关系数为 0.81(除特殊说明外, 文中列出的相关系数均通过了 95%水平的置信检验), 平均误差、均方根误差和散射系数分别为 0.09 m、

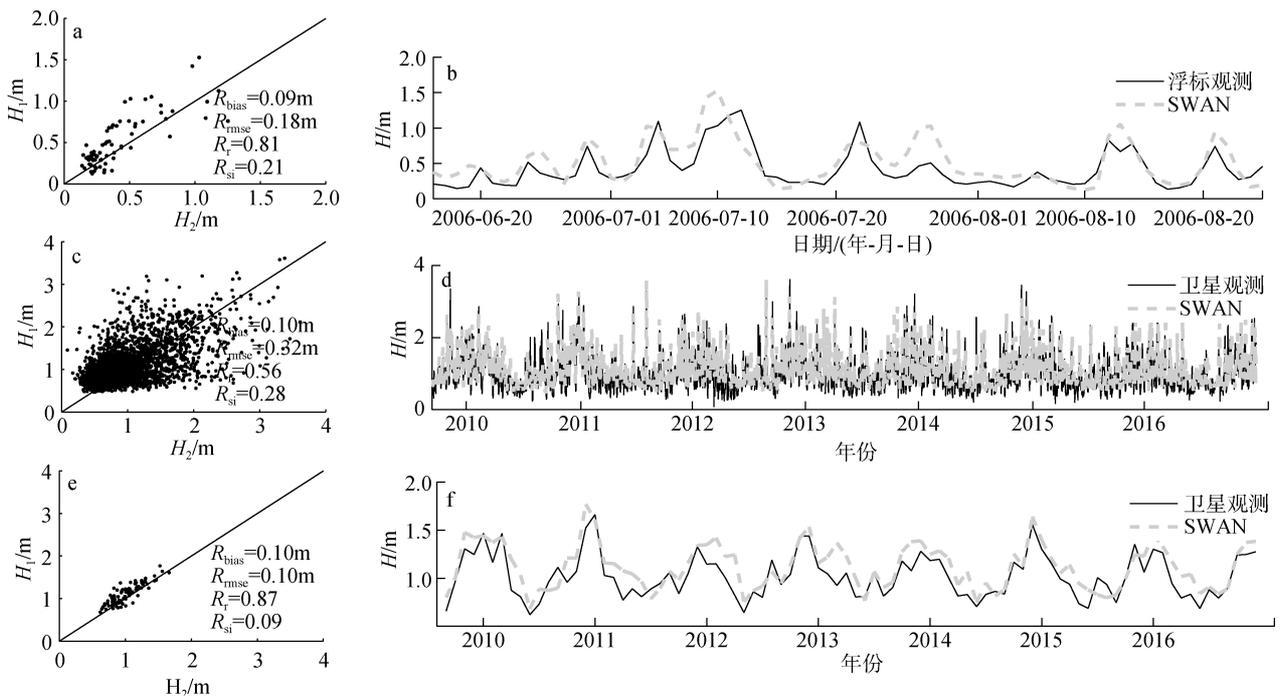


图 2 有效波高观测值和 SWAN 模拟结果的对比图

Fig. 2 Comparison of the observed SWHs with those simulated by SWAN

注: a、b 为石岛站位的浮标观测值和模式模拟有效波高值日平均的对比, a 为二者的散点图, b 为二者的时间序列; c、d 和 e、f 分别为黄海区域平均的卫星观测和模式模拟有效波高的日平均、月平均有效波高的对比, c、e 为二者的散点图, d、f 为二者的时间序列; R_{bias} 为平均误差, R_{rmse} 为均方根误差, R_{si} 为散射系数, R_r 为相关系数

Note: a and b are the comparisons of daily buoy-measured SWHs with those simulated by SWAN; c, d and e, f are the comparison of daily and monthly buoy-measured SWHs with those simulated by SWAN, respectively. R_{bias} is average error, R_{rmse} is RMS error, R_{si} is scattering coefficient, R_r is correlation coefficient

0.18 m 和 0.21, 这个结果表明模式对石岛站位模式模拟的结果比较好。图 2b 和图 2c 进一步比较了黄海区域平均的卫星观测和模式模拟结果, 日平均和月平均时间序列的相关系数分别为 0.56 和 0.87, 平均误差均为 0.10 m, 均方根误差分别为 0.32 m 和 0.10 m, 散射系数分别为 0.28 和 0.09, 日平均的模拟结果和卫星观测对比效果不是很好, 这可能与卫星高度计在浅水区域误差较大有一定关系^[23], 但从月平均数据的对比来看, 模式和观测符合良好, 后文的研究基于月平均数据来进行, 从这个方面来看模式对黄海海浪场的模拟结果还是很可靠的。以上结果表明, 在石岛以及更大范围的黄海区域, SWAN 模式模拟结果和观测值在时间变化和量值上基本是一致的, SWAN 模式对石岛及其附近海域的海浪场有较好的模拟能力, 这为接下来利用 SWAN 模式后报结果对该海域海浪特征进行分析和以及利用模式进行数值实验提供了基础。

3 季节和年际变化特征

3.1 季节变化特征

本文利用了 2001~2016 年的 SWAN 模式模拟结果来研究石岛站位月平均有效波高和极值有效波高的变化特征。极值有效波高对近海海洋工程以及当

地海洋牧场都具有非常重要的意义。本文中月平均极值有效波高的计算参考 Sasaki 等^[24]的方法为: 将每一格点每个月的有效波高模拟结果从大到小进行排列, 取其前 1%有效波高的平均值作为该格点该月份的极值有效波高, 记作 1%大波有效波高。这里需要补充的一点是之所以选择前 1%有效波高而不是前 10%有效波高来计算极值有效波高, 是因为就当地波浪条件来看, 前 1%有效波高更具有破坏性, 对当地的海浪防灾减灾更具有意义。1%大风风速的计算方法和 1%大波有效波高的一致。

图 3 展示的是石岛站位有效波高和 1%大波有效波高的气候态月平均时间序列。结果显示, 石岛站位有效波高季节变化特征明显, 在 12 月达到最大, 6 月份达到最小, 其标准差为 0.066 m。而 1%大波有效波高在 4 月份和 8 月份相对较大, 其他月份相对较为平均, 标准差为 0.092 m, 季节变化特征不明显。另外, 从 2001~2016 年各月份月平均时间序列的标准差上来看, 有效波高各月份的标准差总体值在 0.1 m 左右, 其中 1~3 月份、10~12 月份值稍大。1%大波有效波高各月份的标准差则在 7、8 月份达到 1 m 左右, 明显大于其它月份, 说明 1%大波有效波高在不同年份的 7、8 月份差异较大, 这可能和低纬度的气旋活动的年际差异有关。

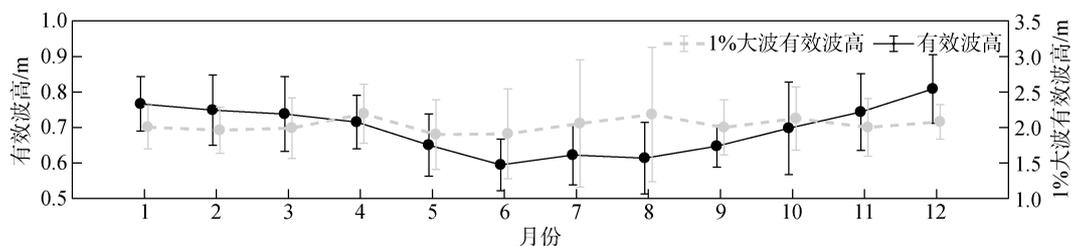


图 3 石岛站位气候态月平均有效波高和 1%大波有效波高

Fig. 3 Climatological monthly mean SWHs and 1% SWHs

上文对石岛站位有效波高的季节变化特征进行了描述, 下面进一步结合黄海区域海浪场和风场进行探讨。图 4 展示了黄海区域气候态月平均的有效波高和海表面风场, 黄海区域有效波高值呈现沿等深线从近岸向外海、从高纬度向低纬度逐渐增大的空间分布, 同时季节变化特征显著: 6~9 月份整体值较小, 其中黄海大部分区域有效波高于 6 月份达到最小, 有效波高值的南北梯度也较小; 11~3 月份整体值较大, 其中整个黄海区域有效波高于 12 月份达到最大, 有效波高值的南北梯度也较大。黄海区域和

石岛站位有效波高的季节变化特征基本上是一致的。黄海区域有效波高最小值出现的月份和陈国光等^[15]的研究基本是一致的, 而最大值出现的月份则有所不同。黄海区域有效波高的这种季节变化特征主要和背景风场有关, 冬季月份, 黄海区域盛行偏北大风, 造成了整体有效波高值较大而且南北梯度大, 夏季月份则相反。

黄海 1%大波有效波高和有效波高的空间分布特征基本类似(图 5), 但是其南北向的梯度明显要更小。黄海大部分区域 1%大波有效波高于 12 月份达

到最大, 6 月份达到最小, 这和有效波高的季节变化特征基本一致。1%大波有效波高在黄海大部分区域有明显的季节变化, 但在石岛站位季节变化不明显, 这种现象的可能原因是波浪在传播到近岸的过程, 波陡越大时, 底摩擦的作用导致波浪变形, 波浪破

碎的衰减作用越大, 导致石岛近岸区域 1%大波有效波高在各季节相对较为平均, 季节变化不明显。综合以上分析, 石岛站位有效波高主要是受到了黄海区域的季风系统的影响而呈现明显的季节变化, 而 1%大波有效波高的季节变化不明显。

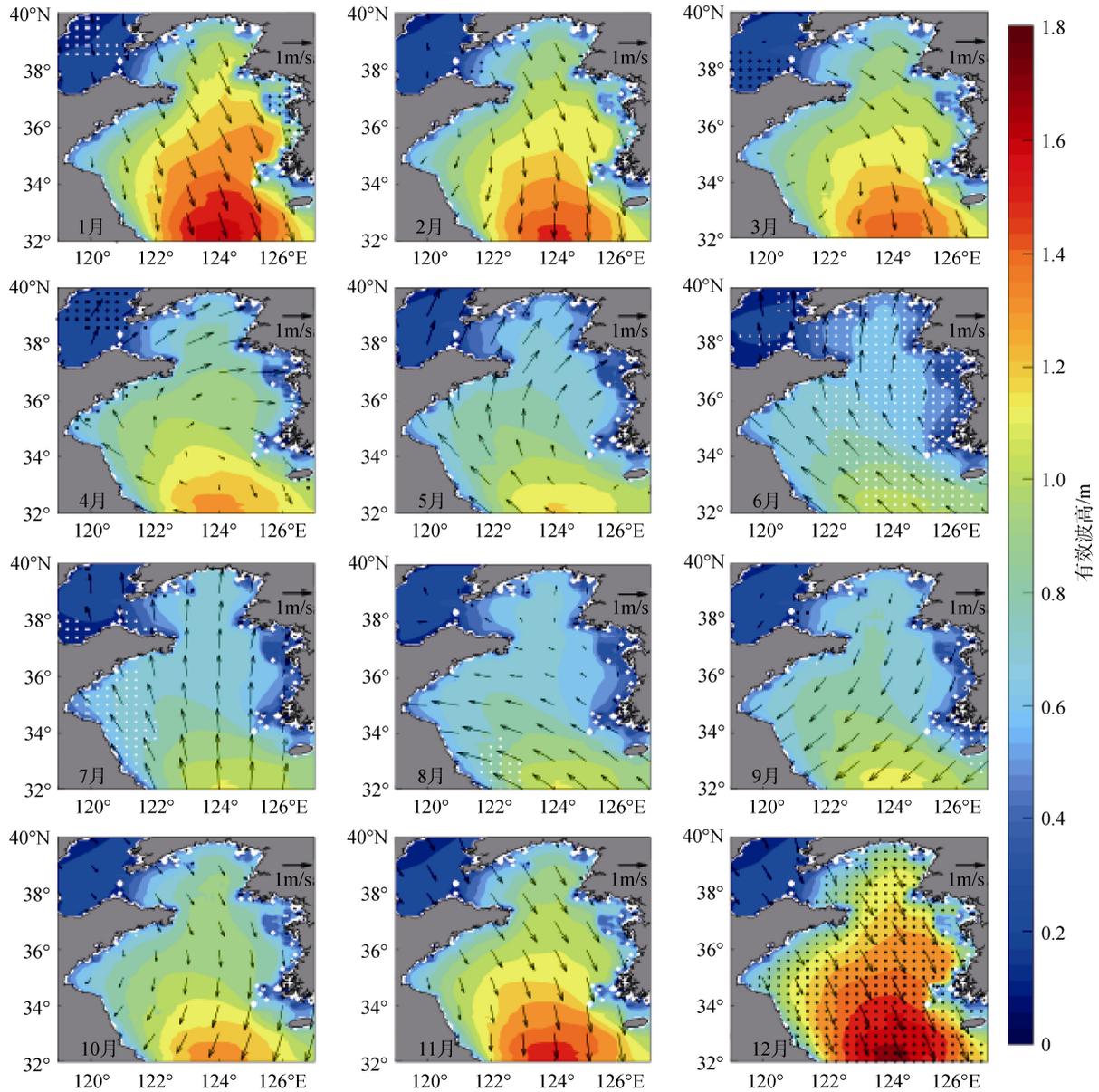


图 4 气候态月平均有效波高和海表面风场

Fig. 4 Climatological monthly mean SWHs and wind field

注: 黑点和白点分别代表该月份该点达到最大值和最小值

Note: The black and white dots represent the months in which the SWHs reach their maxima and minima, respectively

3.2 年际变化特征

进一步对石岛站位有效波高的年际变化特征进行探讨, 有效波高年际异常信号的提取方法如下: 将月平均时间序列减去气候态月平均值以去掉年循

环信号, 进行 13 个月的滑动平均以去掉季节信号, 再去掉前 6 个月和后 6 个月值, 将得到的时间序列去掉趋势项, 最后得到了月平均有效波高的年际异常时间序列。

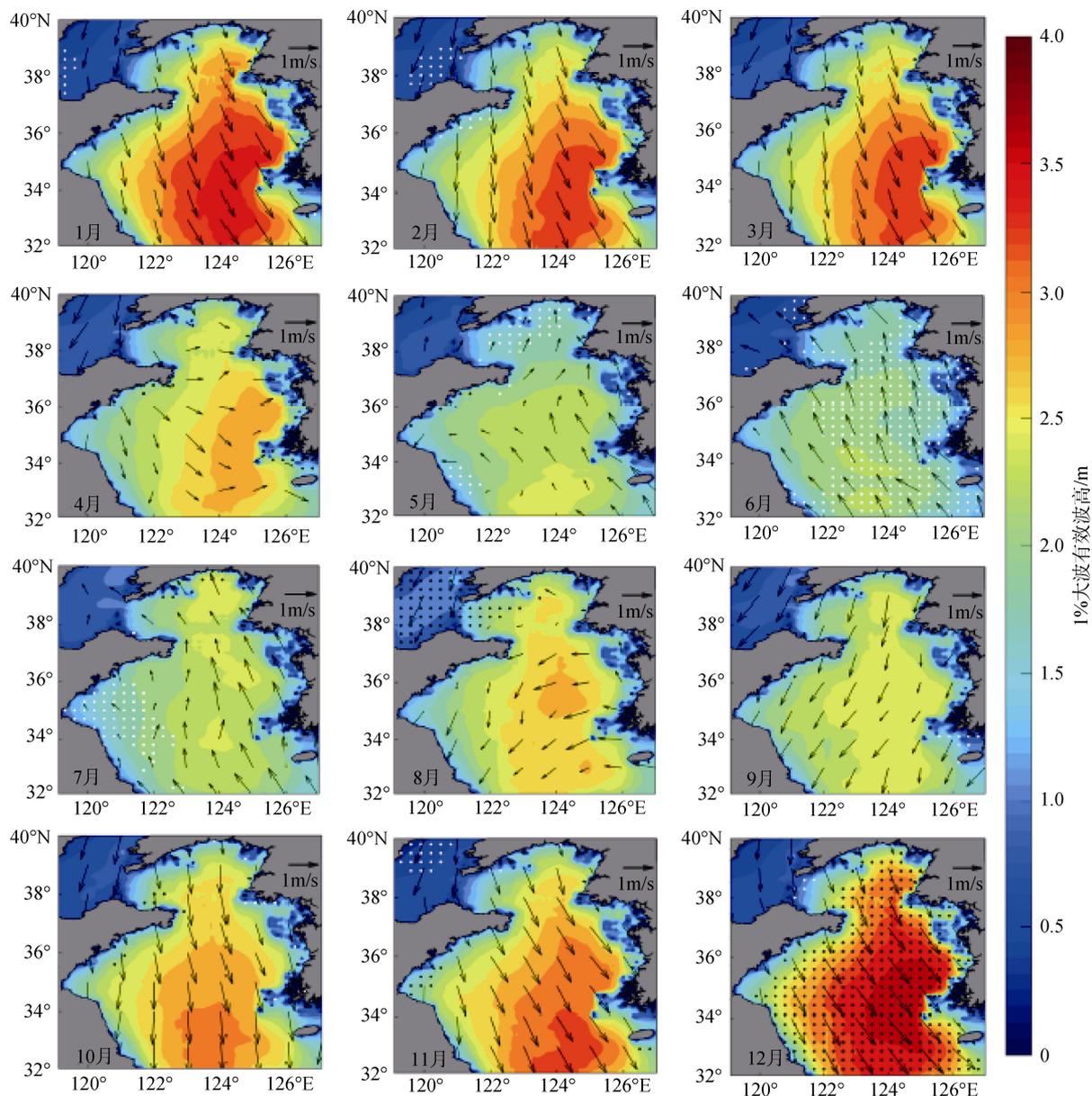


图 5 气候态月平均 1%大波有效波高和海表面 1%大风风场
Fig. 5 Climatological monthly mean 1% SWHs and 1% wind field

注: 黑点和白点分别代表该月份该点达到最大值和最小值

Note: The black and white dots represent the months in which the SWHs reach their maxima and minima, respectively

图 6 展示了石岛站位有效波高和风速年际异常时间序列。石岛站位有效波高的年际异常标准差为 0.026 m, 年际变化显著, 其在 2002 年之后呈现整体上升的趋势, 2005~2007 年递减, 2007 年和 2009 年趋于平稳, 2009 年之后的年际变化幅度较大, 2013~2015 年呈现很大的下降趋势。而石岛站位 1%大波有效波高的年际异常标准差为 0.086 m, 年际变化也很显著, 但其与有效波高的年际变化不同步, 其在 2001~2003 年先上升后下降, 2004 年左右有所上升, 2005~2009 年

趋于平稳, 2010 年前后又呈现先下降后上升变化, 之后到 2014 年较为平稳, 2015 年之后又呈现下降趋势。

石岛站位和黄海区域平均的风速、1%大风风速也呈现了明显的年际变化(图 6)。石岛站位有效波高年际异常在超前石岛站位、黄海区域平均风速年际异常 5、0 个月时, 与后者正相关达到最大, 相关系数分别为 0.37、0.49(图 7a), 石岛站位有效波高与黄海区域平均风速年际异常之间具有一定同期的相关性, 但是相关性不显著。石岛站位 1%大波有效波高

年际异常在滞后石岛站位 1%大风风速年际异常 2 个月、超前黄海区域平均 1%大风风速年际异常 1 个月时，与后者正相关达到最大，相关系数分别为 0.76、

0.62(图 7b)，这个结果说明石岛站位 1%大波有效波高年际异常与石岛站位以及黄海区域平均的 1%大风风速之间有一定准同期相关关系。

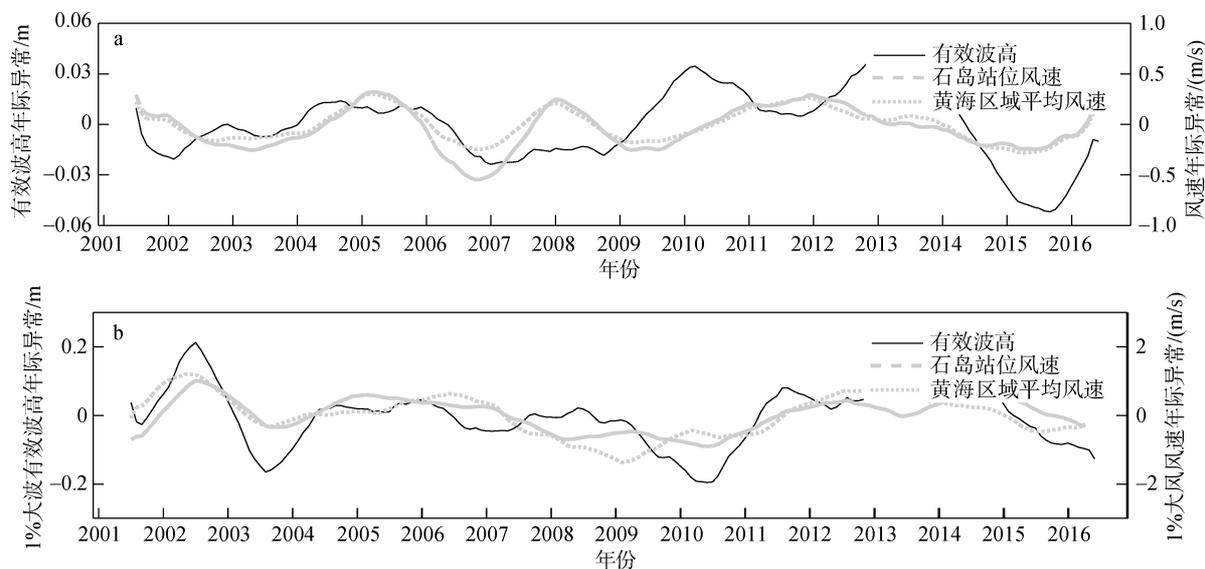


图 6 石岛站位有效波高、风速年际异常时间序列
Fig. 6 Annual anomaly of SWHs and wind speed time series

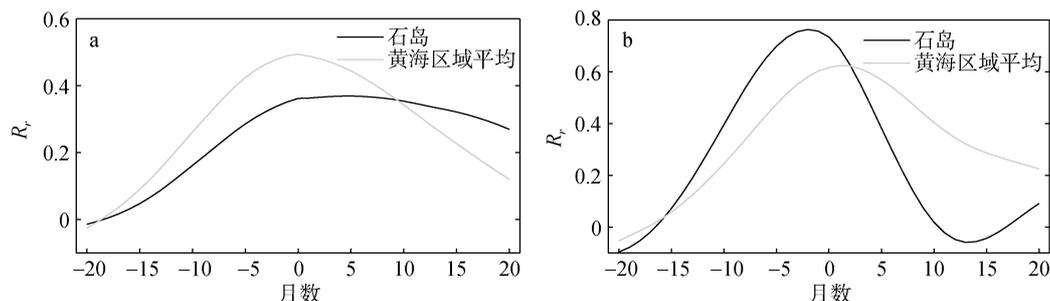


图 7 石岛站位有效波高和风速年际异常超前滞后相关
Fig. 7 Lead-lag correlation between interannual anomaly of SWHs and wind speed

注: a 为石岛站位有效波高和石岛站位、黄海区域平均风速年际异常的超前滞后相关; b 为石岛站位 1%大波有效波高和石岛站位、黄海区域平均 1%大风风速年际异常的超前滞后相关

Note: a is the lead-lag correlation between interannual anomaly of SWHs and wind speed; b is the lead-lag correlation between interannual anomaly of 1% SWHs and 1% wind speed

石岛站位有效波高和石岛风速、黄海区域平均风速的年际异常之间的相关性不高，但石岛区域为东亚季风系统控制，其有效波高与风场的年际变化会存在季节性差异，石岛站位有效波高和风速年际异常之间的关系季节性差异需要进一步探究。石岛站位有效波高和石岛站位、黄海区域平均风速年际异常之间的相关性在不同季节均存在很大差异(图 8a)，其相关系数在 7、10 月份达到 0.6 以上，相关性较高，而在 3、8 和 9 月份的季风转向期间以及 11、12 月份较低。而石岛站位 1%大波有效波高和石岛站

位 1%大风风速的相关系数则在 7~9 月份达到 0.7 以上(图 8b)，相关性较高，和黄海区域平均 1%大风风速的相关系数则在 1、2 月份有比较大的负相关，在 8 月份有最大正相关，相关系数在 0.7 左右。整体来看，石岛站位 1%大波有效波高和石岛站位以及黄海区域平均 1%大风风速在 8 月份左右年际异常相关性均比较强，这可能跟在 8 月份台风活动比较频繁，石岛站位 1%大波有效波高和 1%大风风速均受台风活动的强烈影响，导致二者年际变化信号也在这个时间比较同步。

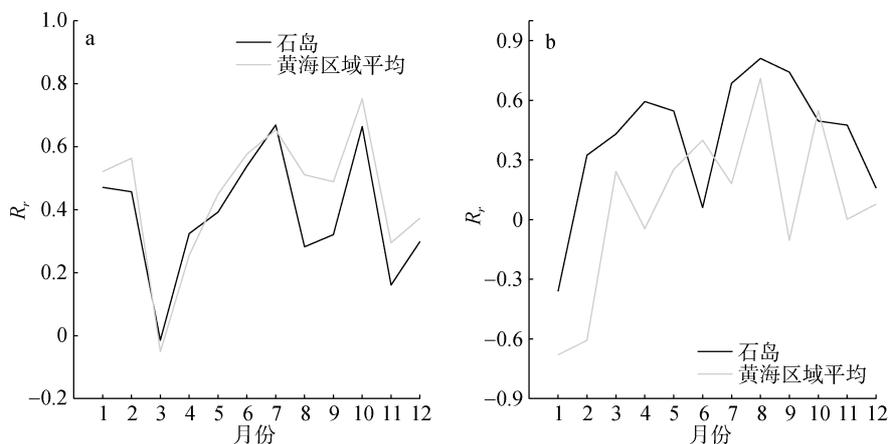


图 8 石岛站位有效波高和风速各月份年际异常的相关系数

Fig. 8 Correlation coefficient between annual anomaly of SWHs and wind speed in months

注: a 为石岛站位有效波高和石岛站位、黄海区域平均风速各月份年际异常的相关系数; b 为石岛站位 1% 大波有效波高和石岛站位、黄海区域平均 1% 大风风速各月份年际异常的相关系数

Note: a is the correlation coefficient between monthly annual anomaly of SWHs and wind speed in months; b is the correlation coefficient between interannual anomaly of 1% SWHs and 1% wind speed in months

4 风场影响石岛区域海浪的机制探讨

前文的分析结果表明石岛站位和黄海区域风场对石岛站位有效波高的季节和年际变化都有很大的影响。本节将对不同区域风场对石岛区域海浪的影响进行评估。图 9 展示了石岛站位与黄海区域有效波高月平均时间序列之间的相关系数的分布情况。相关系数以石岛站位为中心向外递减。其中, 在图中的红框区域(122°~124°E; 36°~38°N)相关系数达到 0.9 以上, 表明其海浪变化特征基本上一致。本文选取该区域作为石岛区域来区分石岛当地风场和其它区域风场, 并在此基础上设计数值实验来评估石岛区域和其它区域风场对石岛站位海浪的影响。

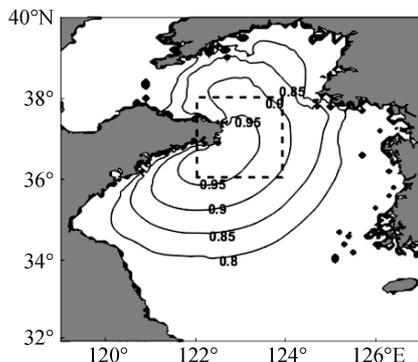


图 9 石岛站位与附近海域有效波高的同期相关系数

Fig. 9 Correlation coefficient of SWHs between Shidao station and adjacent areas

数值实验内容具体如下: 把石岛区域(122°~124°E; 36°~38°N)的风场值设置为零, 其他区域风场和模式的设置均保持不变, 进行一次数值实验, 下文把该实验记作风场实验, 为作区分, 之前模拟结果记作正常模拟结果。

图 10 对比了石岛站位气候态月平均的风场实验结果和正常模拟结果。结果表明, 和模拟结果相比, 风场实验结果中的石岛站位有效波高各月份均是降低的(图 10a), 但 6、7、8 月份相比于其他月份降低幅度较小, 这造成了有效波高 7 月份最大, 1 月份最小。风场实验结果中的石岛站位 1% 大波有效波高各月份也是降低的(图 10b), 和有效波高类似, 在 4~8 月份下降较小, 其他月份下降较大, 导致 1% 大波有效波高在 4~7 月份较大, 其他月份较小。

以上风场实验的结果表明, 去除石岛区域风场后, 对石岛有效波高的影响在不同季节是有明显差异。为进一步探讨这种季节差异, 需要进一步结合整个黄海区域的海浪场以及背景风场进行分析。去除风场后, 石岛区域有效波高在 10~3 月份下降了 0.4 m 左右(图 11), 4~5 月份和 8~9 月份下降在 0.2 m 左右, 而在 6、7 月份几乎没有下降。对有效波高出现的这种冬季月份下降大、夏季月份下降小的季节性差异, 本文作出的解释是: 夏季月份, 整个黄海区域季风风向为偏南风, 石岛区域的海浪场是由来自其南部广大海区和石岛区域的风场共同作用产生的, 由于石岛区域和其南部海区相比面积较小, 海浪成长的风

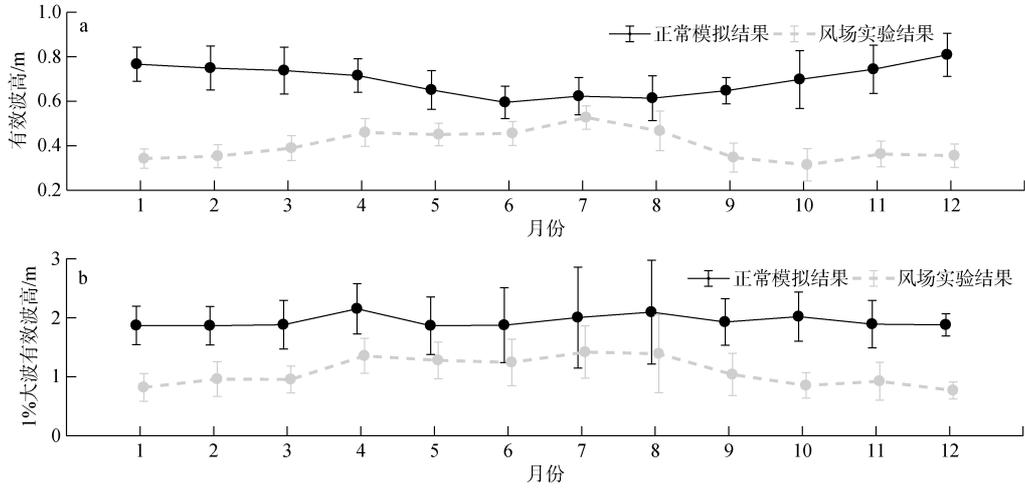


图 10 石岛站位模式正常模拟和风场实验气候态月平均有效波高时间序列

Fig. 10 Times series of climatological monthly average SWHs

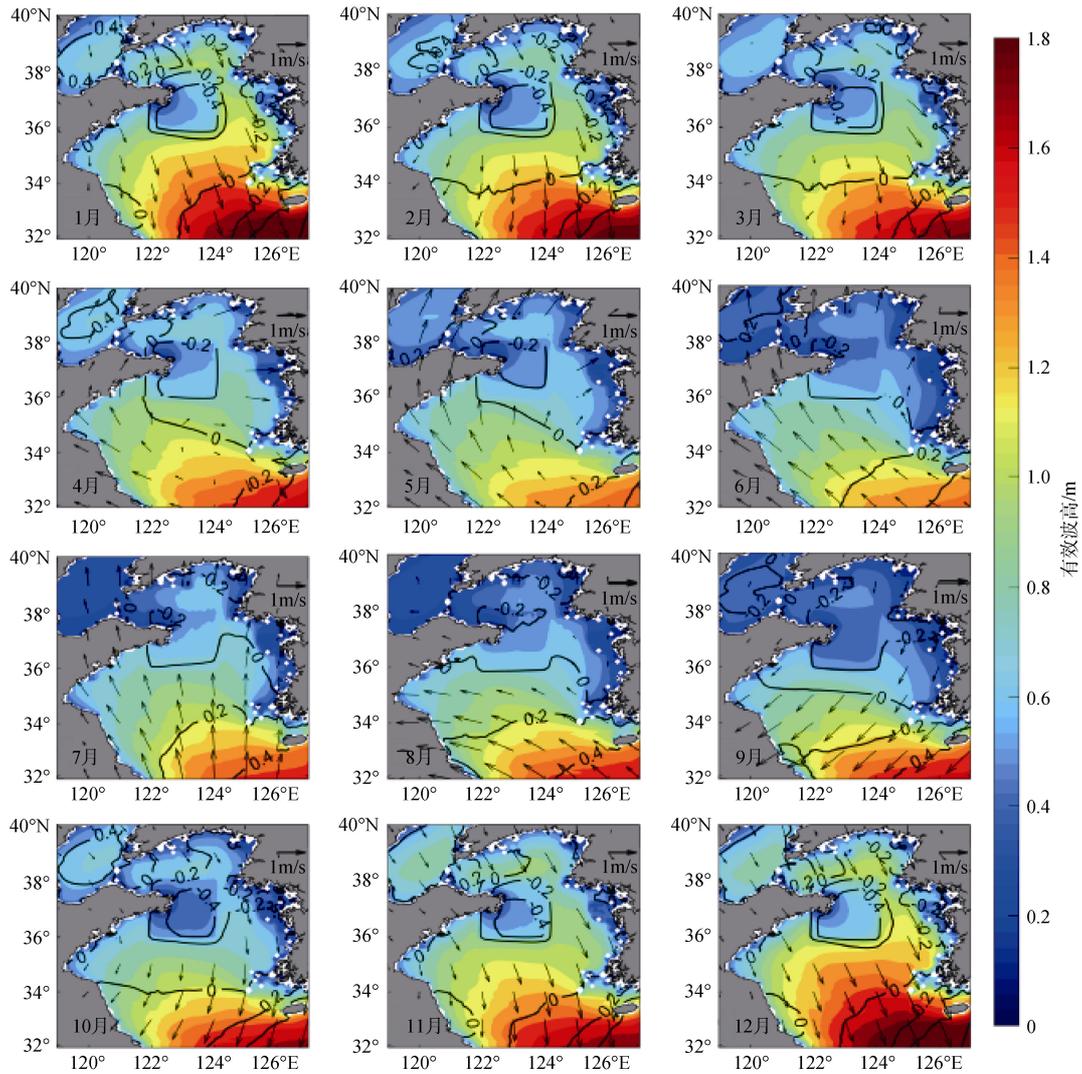


图 11 风场实验的气候态月平均有效波高和海表面风场

Fig.11 Climatological monthly mean SWHs and wind field

注：黑色等值线为风场实验结果和模式正常模拟结果的平均误差

Note: the black contour lines denote the average errors of the experiment and SWAN hindcast

区也相对比较小,所以在缺失石岛风场后,对海浪场的影响较小。而在冬季月份,整个黄海区域季风为偏北风,由于石岛区域和其北部海区相比面积相当,海浪成长的风区也相当,所以在缺失石岛风场后,对海浪场的影响较大。

石岛区域 1%大波有效波高在去除风场后的变

化也存在季节性差异(图 12),4~6月份下降了 0.5 m 左右,12~1 月份下降在 1.5 m 左右,其他月份下降 1.0 m 左右。石岛区域 1%大波有效波高的这种差异原因和有效波高的解释类似,当 1%大风风向为偏北风时,石岛海域海浪成长的风区也相对比较小,石岛 1%大波有效波高下降较大,偏南风时则相反。

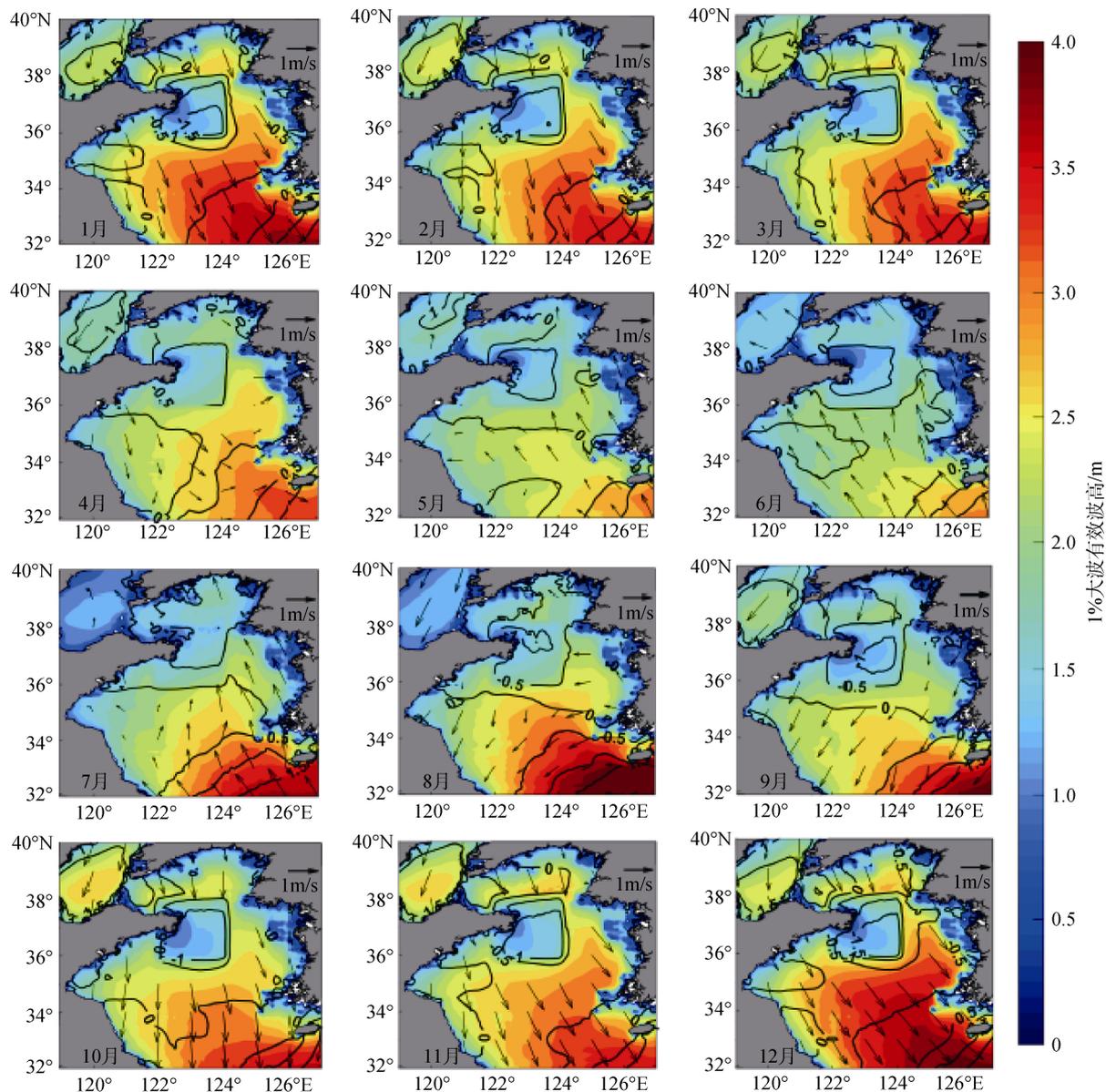


图 12 风场实验的气候态月平均 1%大波有效波高和海表面 1%大风风场

Fig. 12 Climatological monthly mean 1% SWHs and 1% wind field

注: 黑色等值线为风场实验结果和模式正常模拟结果的平均误差

Note: the black contour lines denote the average errors of the experiment and SWAN hindcast

5 讨论

通过上文的分析,我们发现石岛区域有效波高

的年际变化和黄海区域风场有密切关系,而 ENSO 在年际尺度上会对黄海区域风场有影响(郭艳军等^[25])。

ENSO 对石岛区域有效波高的年际变化有何种程度

的影响, 需要进一步进行详细地探究。本文选用了 Niño 3.4 区的 ENSO 指数进行相关的研究, 选用的 ENSO 指数下载自 <http://www.cpc.ncep.noaa.gov/data/indices/>。

图 13 给出了 Niño 指数与石岛站位有效波高年际异常、石岛站位风速以及黄海区域平均风速年际异常的超前滞后相关关系。ENSO 指数在超前石岛站位有效波高年际异常约 5 个月时与后者达到最大的负相关, 相关系数大约为-0.44(图 13a), 分别在超前

石岛站位、黄海区域平均风速年际异常 2、3 个月时与后者达到最大负相关, 相关系数分别为-0.46、-0.56(图 13b), 相关性均不高。ENSO 指数超前风场 1-7 个月时, 与黄海区域风速年际异常呈现一定程度上的负相关, 这意味着随着 El Niño(La Niño)事件的发展, 黄海区域风速减弱(加强)。而石岛有效波高与黄海风速的年际异常存在一定的同期的正相关, 这是导致 ENSO 指数在超前石岛站位的有效波高年际异常约 5 个月时与后者达到最大的负相关的重要原因。

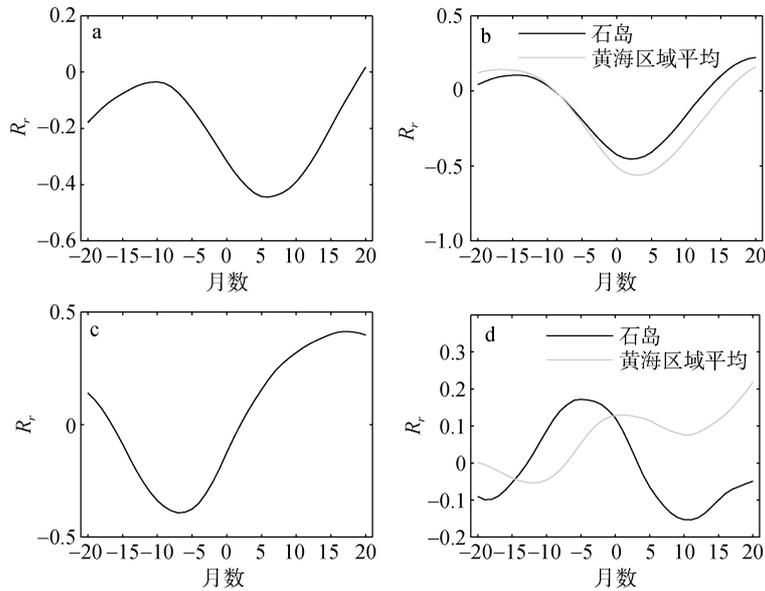


图 13 Niño 指数与石岛站位有效波高、石岛站位风速以及黄海区域平均风速年际异常的超前滞后相关关系

Fig. 13 Lead-lag correlation between Niño index and SWHs and wind speed interannual anomaly

注: a, c 分别为 Niño 指数与石岛站位有效波高和 1%大波有效波高年际异常的超前滞后相关; b, d 分别为 Niño 指数和石岛站位、黄海区域平均风速和 1%大风风速年际异常的超前滞后相关

Note: a and c are the lead-lag correlation between Niño index and annual anomaly of SWHs and 1% SWHs, respectively; b and d are the lead-lag correlation between Niño index and annual anomaly of wind speed and 1% wind speed, respectively

而 ENSO 指数在滞后石岛站位 1%大波有效波高年际异常约 7 个月时与后者达到最大的负相关, 相关系数大约为-0.39(图 13c), 但是 ENSO 指数和石岛站位以及黄海区域平均的 1%大风风速年际异常的相关系数很小(图 13d), 这说明 ENSO 也会对石岛站位的 1%大波有效波高产生一定程度的影响, 但是这种影响和石岛以及黄海区域平均 1%大风风速的关系很小。

6 结论

本文基于 SWAN 模式研究了 2001~2016 年石岛海域海浪的季节和年际变化特征, 评估了风场对该海域海浪场的影响, 并进一步探讨了 ENSO 对该海

域海浪的影响。得出以下结论:

(1) 石岛站位海浪受到黄海区域季风系统的影响而呈现显著的季节变化: 有效波高在 12 月份最大, 6 月份最小。而 1%大波有效波高仅在 4、8 月份较大, 其季节变化不显著。

(2) 石岛站位海浪的年际变化也很明显。石岛站位有效波高年际异常与黄海区域平均风速年际异常具有一定的同期相关性, 但其相关性不高, 而 1%大波有效波高年际异常与石岛站位以及黄海区域平均的 1%大风风速之间均有一定准同期相关关系。石岛站位有效波高和风速年际异常之间的相关性存在明显的季节差异: 7、10 月份的石岛站位有效波高和石岛站位风速、黄海区域平均风速年际异常的相关相

关性较高。而石岛站位 1%大波有效波高和石岛站位、黄海区域平均 1%大风风速的年际异常则在 8 月份的相关性较高。

(3) 石岛站位海浪在不同季节受到石岛区域和黄海其它区域风场的影响有所不同。夏季, 石岛区域风场对石岛区域海浪场的贡献比较小, 而黄海南部的区域风场的贡献较大。而在冬季, 石岛区域风场对石岛区域海浪的贡献较大。

(4) ENSO 事件会通过影响黄海区域风速的年际变化对石岛有效波高的年际变化产生一定的影响, 但是这种影响比较有限, ENSO 事件对石岛 1%大波有效波高的影响也很小。

本文中, 研究的石岛区域水深较浅, 今后为提高近海海浪场模拟精度有效的做法还有很多, 如选用非结构网格、提高地形精度、考虑潮汐对浅水区域水深变化影响等。另外, 模式模拟选用的 ERA-Interim 风场数据在浅水区域对波高的大值有一定的高估^[26], 这会在一定程度上影响石岛极值有效波高的季节和年际变化特征。而在讨论 ENSO 事件和石岛海浪场之间关系时, 分析所选用数据时间长度对结果的影响会比较大, 今后通过利用更长时间的模拟结果来进一步认识二者之间的关系。

参考文献:

- [1] Paul A H, Steven M B, William J T, et al. Winds and waves in the Yellow and East China seas: a comparison of spaceborne altimeter measurements and model results[J]. *Journal of Oceanography*, 1999, 55: 307-325.
- [2] 王静, 齐义泉, 施平, 等. 基于 TOPEX/Poseidon 资料的南海海面高度场的时空特征分析[J]. *热带海洋学报*, 2003, 22(4): 26-33.
Wang Jing, Qi Yiquan, Shi Ping, et al. Characteristics of seasurface height in South China Sea based on data from Topex/Poseidon[J]. *Journal of Tropical Oceanography*, 2003, 22(4): 26-33.
- [3] 陈红霞, 华锋, 袁立业. 中国近海及临近海域海浪的季节特征及其时间变化[J]. *海洋科学进展*, 2006, 24(4): 407-415.
Chen Hongxia, Hua Feng, Yuan Yeli. Seasonal characteristics and temporal variations of ocean wave in the Chinese offshore waters and adjacent Sea Areas[J]. *Advances In Marine Science*, 2006, 24(4): 407-415.
- [4] Wan Yong, Zhang Jie, Meng Junmin, et al. A wave energy resource assessment in the China's seas bases on multi-satellite merged radar altimeter data[J]. *Acta Oceanol Sin*, 2015, 34(3): 115-124.
- [5] 徐福敏, 张长宽, 陶建峰. 浅水波浪数值模型 SWAN 的原理及应用综述[J]. *水科学进展*, 2004, 15(4): 538-542.
Xu Fumin, Zhang Changkuan, Tao Jianfeng. Mechanism and application of a third generation wave model SWAN for shallow water[J]. *Advances In Water Science*, 2004, 15(4): 538-542.
- [6] 李燕. 第三代浅水波浪数值预报模式及其在黄渤海域的应用[J]. *气象科学*, 2006, 26(3): 265-271.
Li Yan. The SWAN model and its application in Huang Hai and Bo Hai[J]. *Scientia Meteorologica Sinica*, 2006, 26(3): 265-271.
- [7] 梅婵娟, 赵栋梁, 史剑. 两种海浪模式对中国黄海海域浪高模拟能力的比较[J]. *海洋预报*, 2008, 25(2): 92-98.
Mei Chanjuan, Zhao Dongliang, Shi Jian. The analysis of Yellow Sea wave with WAVEWATCH and SWAN model[J]. *Marine Forecasts*, 2008, 25(2): 92-98.
- [8] 张宏伟, 康海贵. SWAN 波浪模型在黄海三角洲海域的应用[J]. *水运工程*, 2008, 12: 24-28.
Zhang Hongwei, Kang Haigui. Application of SWAN model at the sea of the Yellow River delta[J]. *Port & Waterway Engineering*, 2008, 12: 24-28.
- [9] 王道龙, 华锋, 江志辉. SWAN 近岸海浪模式在辽东湾的应用[J]. *海洋科学进展*, 2010, 28(3): 285-291.
Wang Daolong, Hua Feng, Jiang Zhihui. Application of coastal wave model SWAN to Liaodong bay[J]. *Advances In Marine Science*, 2010, 28(3): 285-291.
- [10] 史剑, 王璞, 钟中, 等. 两种网格下的 SWAN 模式对黄渤海海浪模拟比较[J]. *海洋预报*, 2011, 28(4): 48-56.
Shi Jian, Wang Pu, Zhong Zhong, et al. Comparison of ocean wave simulation with SWAN wave model using two kinds of computational grid in the Bohai Sea and the Yellow Sea[J]. *Marine Forecasts*, 2011, 28(4): 48-56.
- [11] 郑崇伟, 郑宇艳, 陈洪春. 基于 SWAN 模式的近 10 年南海北部波浪能资源研究[J]. *亚热带资源与环境学报*, 2011, 6(2): 54-59.
Zheng Chongwei, Zheng Yuyan, Chen Hongchun. Research on wave energy resources in the northern south China sea during recent 10 years using SWAN wave model[J]. *Journal of Subtropical Resources and Environment*, 2011, 6(2): 54-59.
- [12] 李永博, 吴克俭, 毕凡, 等. 基于 SWAN 模式的成山头海域波浪能资源评估[J]. *海洋湖沼通报*, 2013, 3: 1-9.
Li Yongbo, Wu Kejian, Bi Fan, et al. Wave energy resources assessment in the Chengshan cape sea during the last 20 years by using SWAN wave model[J]. *Transactions of Oceanology and Limnology*, 2013, 3: 1-9.

- [13] 郑崇伟, 刘铁军, 钱粤海. 中国海海表风场、海浪场与 El Niño 的相关性分析[J]. 云南大学学报(自然科学版), 2014, 36(2): 214-223.
Zheng Chongwei, Liu Tiejun, Qian Yuehai. The relationship between sea surface wind field, wave field and El Nino in the China Sea[J]. Journal of Yunnan University, 2014, 36(2): 214-223.
- [14] 宗芳伊, 吴克俭. 基于近 20 年的 SWAN 模式海浪模拟结果的南海波浪能分布、变化研究[J]. 海洋湖沼通报, 2014, 3: 1-12.
Zong Fangyi, Wu Kejian. Research on distributions and variations of wave energy in South China Sea based on recent 20 years' wave simulation results using SWAN-wave model[J]. Transactions of Oceanology and Limnology, 2014, 3: 1-12.
- [15] 陈国光, 翟方国, 李培良, 等. 黄海海浪季节变化数值模拟研究[J]. 海洋科学, 2016, 40(11): 155-168.
Chen Guoguang, Zhai Fangguo, Li Peiliang, et al. Numerical study of wave height seasonality in the Yellow Sea[J]. Marine Sciences, 2016, 40(11): 155-168.
- [16] 徐艳清, 尹宝树, 杨德周, 等. 东中国海海浪数值模式的研究[J]. 海洋科学, 2005, 29(6): 42-47.
Xu Yanqing, Yin Baoshu, Yang Dezhou, et al. Study of wave numerical model in East China Sea[J]. Marine Sciences, 2005, 29(6): 42-47.
- [17] 李训强, 郑崇伟, 苏勤, 等. 1988-2009 年中国海波候、风候统计分析[J]. 中国海洋大学学报, 2012, 42: 1-9.
Li Xunqiang, Zheng Chongwei, Su Qin, et al. Wave climate and wind climate analysis in the China Sea from 1988 to 2009[J]. Periodical of Ocean University of China, 2012, 42: 1-9.
- [18] Liang Bingchen, Fan Fei, Liu Fushun, et al. 22-Year wave energy hindcast for the China east adjacent seas[J]. Renewable Energy, 2014, 71: 200-207.
- [19] Zheng Chongwei, Li Chongyin. Variation of the wave energy and significant wave height in the China Sea and adjacent waters[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2015, 43: 381-387.
- [20] Tom G.F, Paul A R, Edward C, et al. The Shuttle Radar Topography Mission[J]. Reviews of Geophysics, 2007, 45(2): 1-33.
- [21] Dee D, Uppala S, Simmons A, et al. The ERA-Interim reanalysis: Configuration and performance of the dataassimilation system[J]. Quart J Roy Meteor Soc, 2011, 137: 553-597.
- [22] Guo Lanli, Sheng Jinyu. Statistical estimation of extreme ocean waves over the eastern Canadian shelf from 30-year numerical wave simulation[J]. Ocean Dynamics, 2015, 65: 1489-1507.
- [23] Wan Yong, Zhang Jie, Meng Junmin, et al. A wave energy resource assessment in the China's seas based on multi-satellite merged radar altimeter data[J]. Acta Oceanol Sin, 2015, 34(3): 115-124.
- [24] Sasaki W, Iwasaki S I, Matsuura T, et al. Recent increase in summertime extreme wave heights in the western North Pacific[J]. Geophys Res Lett, 32(15): 291-310.
- [25] 郭艳军, 倪允琪. ENSO 期间赤道太平洋对流活动异常对我国冬季风的影响[J]. 气象, 1998, 24(9): 1-7.
Guo Yanjun, Ni Yunqi. Effects of the tropical Pacific convective activities on China's winter monsoon[J]. Meteorological Monthly, 1998, 24(9): 1-7.
- [26] Shanas P R, Sanil Kumar V. Comparison of ERA-Interim waves with buoy data in the eastern Arabian Sea during high waves[J]. Indian Journal of Marine Sciences, 2014, 43(7): 1343-1346.

Numerical simulation and analysis of the characteristics of significant wave height in Shidao

YUAN Fu-li¹, LIU Zi-zhou¹, LIU Xiao², ZHAI Fang-guo¹, LI Pei-liang³

(1. College of Oceanic and Atmospheric Sciences, Ocean University of China, Qingdao 266100, China; 2. College of Resource and Environmental Engineering, Shandong University of Technology, Zibo 255049, China; 3. Ocean College, Zhejiang University, Zhoushan 316021, China)

Received: Apr. 24, 2018

Key words: significant wave height in Shidao; seasonal and interannual variability; influence of wind; ENSO

Abstract: In this study, we investigate the seasonal and interannual variabilities of significant wave height (SWH) in Shidao (SD) and assess the contribution of wind to SWHs in different areas by using the Simulating Waves Nearshore wave model. The relationship between SWHs and El Niño–Southern Oscillation (ENSO) is further explored. The results are as follows: SWHs in SD are significantly affected by the monsoon system in the Yellow Sea (YS) and show seasonal variations, with SWHs reaching their maxima in December and minima in June. Meanwhile, 1% SWHs are not significant. The relationship between annual anomaly of SWHs and wind speed exhibits seasonal variations. Generally, the relationship is high in July and October, and their maxima appear in August for 1% SWHs and 1% wind speed. In winter, the wind in SD area has a considerable contribution to SWHs in SD. Meanwhile, in summer, the contribution of the wind from the southern part of SD is prominent. Furthermore, ENSO events have a slight influence on the interannual variations of SWHs in SD by affecting the wind in the YS. This research will be a useful reference for further research on SD wave.

(本文编辑: 李晓燕)