

任惠茹, 李国胜, 崔林林, 等. 2016. 近 60 年来渤海海域波候变化及其与东亚环流的联系 [J]. 气候与环境研究, 21 (4): 490–502. Ren Huiru, Li Guosheng, Cui Linlin, et al. 2016. Wave climate changes in Bohai Sea related to the East Asian circulation oscillations over the last sixty years [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 21 (4): 490–502, doi: 10.3878/j.issn.1006-9585.2016.15281.

近 60 年来渤海海域波候变化及其与东亚环流的联系

任惠茹^{1,2} 李国胜¹ 崔林林^{1,2} 张悦^{1,2} 欧阳宁雷^{1,2}

¹ 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101

² 中国科学院大学, 北京 100049

摘 要 研究海洋的波候变化是了解海洋动力过程对气候变迁响应的关键。渤海所处特殊的地理位置, 使其波候在长期风场变化影响下存在阶段性变化特征。文章采用 1950~2011 年 NCEP 再分析资料中的渤海海域 10 m 风场资料, 利用 SWAN 模式模拟逐月渤海波浪的有效波高、波向、波周期, 分析该海区波候的变化特征。分析结果显示: 1950~2011 年期间渤海海域的有效波高呈现下降的趋势; 波向角度均呈现上升的趋势, 波周期相对平稳, 略有上升; 有效波高平均下降 0.3 cm/a, 波向角度平均增加 0.12°/a。有效波高在 1968 年前后显现突变点, 波向角度约在 1960 年突变, 波周期在 1965 年左右出现突变点。渤海波候变化与海气振荡密切相关, 是大尺度的大气环流变异导致的结果, 长期气候变化背景下, 东亚环流天气系统的长期变化 (包括东亚季风强度、夏季风北界的移动, 西太平洋副热带高压面积与强度的变化、脊点位置西伸与北进, 以及西风指数的强弱变化等), 是影响和控制渤海海域波气长期变化的主要原因。

关键字 波候 有效波高 西太平洋副高 西风环流 东亚季风

文章编号 1006-9585 (2016) 04-0490-13

中图分类号 P47

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2016.15281

Wave Climate Changes in Bohai Sea Related to the East Asian Circulation Oscillations over the Last Sixty Years

REN Huiru^{1,2}, LI Guosheng¹, CUI Linlin^{1,2}, ZHANG Yue^{1,2}, and OUYANG Ninglei^{1,2}

¹ Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101

² University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049

Abstract Researching on wave climate change is the key to understanding the dynamic processes of the ocean when climate has changed. Bohai Sea is located on the northern edge of the East Asian Circulation, and the characteristics of wave climate stage change in this area has been influenced in long-term wind change. Multi-scale variability characteristics of wave climate from 1950 to 2011 are studied based on NCEP reanalysis data. Wave climate in the Bohai Sea during 1950 to 2011 have been simulated by SWAN model. Results showed that: the significant wave height decreased in past 62 years; wave direction increased and wave period changed smoothly. The average decrease in significant wave height was 0.3 cm/a, and the increase in the wave angle was 0.12°/a. The abrupt of significant wave height occurred around 1968; the abrupt change of wave direction occurred around 1960; the abrupt change of wave period occurred in 1965. Wave climate in Bohai Sea is mainly determined by oscillation of the large-scale atmospheric

收稿日期 2015-12-24; **网络预出版日期** 2016-04-22

作者简介 任惠茹, 女, 1983 年出生, 博士研究生, 主要从事海岸带环境演变与数模研究。E-mail: renhr.12b@igsrr.ac.cn

通讯作者 李国胜, E-mail: ligs@igsrr.ac.cn

资助项目 国家自然科学基金 41271026

Funded by National Natural Science Foundation of China (Grant 41271026)

circulation. Because of its unique geographic location, wave climate is affected and controlled by all three weather systems (e.g., the East Asian monsoon, the West Pacific subtropical high, and the Westerly wind belt) mentioned above.

Keywords Wave climate, Significant wave height, Western Pacific subtropical high, Westerly circulation, East Asia monsoon

1 引言

波候 (wave climate) 是指气候变化背景下, 海洋波浪参数 (波高、波浪周期、波浪方向等) 的长期平均统计特征及其随时间的变化 (Bacon and Carter, 1991; Haxel and Holman, 2004)。在天气过程至气候变化尺度上, 海域波浪参数 (波高、波浪周期、波浪方向等) 所形成的波候变化与海—气相互作用过程密切相关 (Gelfenbaum and Kaminsky, 2010)。海—气的相互作用是复杂的动力、热力过程, 虽然局地海区的波浪受当地风场的影响, 但是就长期趋势而言, 其波候的决定因素来自于大尺度大气环流振荡 (Camus et al., 2011)。区域乃至全球气候变化可以通过改变大气环流系统而“诱发”波候的长期变化。因此, 波候变化是海—气相互作用研究的核心问题之一 (Goodwin et al., 2006), 同时, 波候变化研究也为深入理解长期气候变化以及大气环流系统变动对海洋动力过程的影响提供了一种全新的方法途径。

渤海海域位于 ($37^{\circ}07'N \sim 41^{\circ}00'N$, $117^{\circ}35'E \sim 121^{\circ}10'E$) 之间。渤海上空处于东亚夏季风场影响区域的北端, 夏季风北界的移动范围位于 $38^{\circ}N \sim 42^{\circ}N$ 之间, 其年际、年代际的波动变化对渤海波浪改变有着显著的影响 (徐建军等, 1997; Wang et al., 2008)。由于渤海所处特殊的地理位置 (季风边缘活动带), 渤海海域近地面的风场条件及其伴随的波候特征 (波高、波浪周期、波浪方向等), 随着气候的长期变化, 呈现复杂的变化。同时, 渤海海区也是西太平洋副热带高压北抬所能影响的北部边缘势力范围, 同时海区高空又受到西风环流的影响。在上述 3 种环流系统 (东亚环流系统) 的长期共同影响下, 渤海海域风场存在多尺度的振荡, 这种风场的多尺度振荡引起该海区波候的复杂变化 (图 1)。因此, 对渤海海域波候变化的研究, 为深入理解长期气候变化以及东亚环流系统变动对近岸海洋动力过程及海岸地貌演化的影响, 提供了一个最佳的“靶区”以及全新的方法途径。

2 资料与方法

2.1 分析方法

2.1.1 波浪计算方法

由于海上测高的台站、浮标、船测的数量相对较少, 长时期的海面波候观测数据少且不连续, 需要借助模型来完成长时间序列波浪数据的收集。SWAN 模型适用于近海海域的波浪数值模拟, 通过已给定的地形、风场、水深以及流场等条件进行波浪参数的模拟 (Ou et al., 2002; 李燕和薄兆海, 2005), 故采用 SWAN 模型模拟渤海 1950~2011 年内逐月的有效波高、波向以及波周期的数值。以动谱密度为未知变量, 考虑由地形以及水流引起的浅水和折射; 由障碍物引起的波浪绕射; 白浪、底面摩擦以及波浪破碎引起的能量衰减与非线性波—波相互作用。SWAN 模型的控制方程为动谱密度的

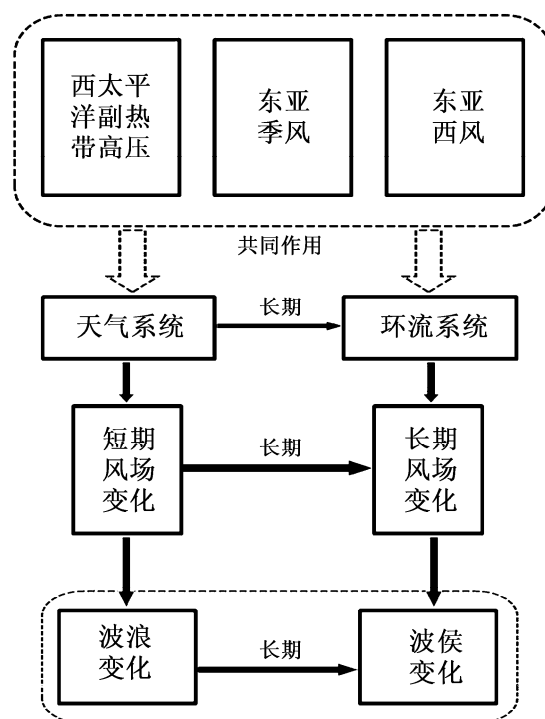


图 1 渤海波候与东亚环流关系示意图

Fig. 1 Diagram of the relationship between wave climate and the East Asian circulation system

守恒方程,在笛卡尔坐标下的表达方式为

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

其中, $\partial N / \partial t$ 为动谱密度随时间的变化; C_x 、 C_y 分别是波浪在 x 、 y 方向的传播速度, $(\partial / \partial x) C_x N$ 、 $(\partial / \partial y) C_y N$ 为动谱密度在 x 、 y 方向的传播; C_δ 、 C_θ 分别为波浪在 δ 、 θ 方向的传播速度, $(\partial / \partial \delta) C_\delta N$ 、 $(\partial / \partial \theta) C_\theta N$ 为波浪受地形以及水流作用在 δ 、 θ 方向的变形。 S 为动谱密度表示的源项; δ 是波浪的相对频率。 $N = N(\delta, \theta)$ 是波作用密度谱, 采用波作用密度谱 $N(\delta, \theta)$ 而不选能量密度谱 $E(\delta, \theta)$ 来建立方程, 是因为当流存在时波作用密度是一个守恒量, 而能量密度不守恒。SWAN 模型中, 采用 JONSWAP 谱作为边界条件, 假定陆边界不产生波浪并且能够完全吸收跨过或离开海岸线的波浪, 水边界设定为开边界不向计算区域传递波浪, 而计算区域内的波浪可以通过开边界向外海传播 (Hargreaves et al., 2002)。模型中计算网格的空间分辨率为 0.05° (约为 5.5 km), 波谱划分 25 个频率, 频率设定最小频率 0.05 Hz , 最大频率 1 Hz , 波向区分为 360 个方向, 每个方向区分为 1° 。

2.1.2 环流数据计算方法

东亚季风影响渤海波候变化, 主要表现在冬、夏季风强度与夏季风北界位置两个方面, 数据提取的方法: $20^\circ\text{N} \sim 50^\circ\text{N}$ 内各纬度上 110°E 海平面气压减 160°E 海平面气压, 对差值 $\leq -5 \text{ hPa}$ 的各纬度值累加; 其中夏季风指数 (乘以 -1), 这样冬、夏季风指数均表现为指数越大强度越大。夏季风北界提取 850 hPa 平均南风风速为 2 m/s 且满足该高度场的 $\theta_{se} \geq 335 \text{ K}$ (黄荣辉等, 2005)。

西太平洋副热带高压的面积、强度与位置造成风场的变化影响波候, 因此分别计算西太平洋副热带高压的面积指数、强度指数、脊点的西伸位置和脊点的南北位置指数。西太平洋副高面积指数计算大于或是等于 586 gpm 的格点数总和; 强度指数为各格点高度值减去 585 gpm 后的累加值; 西伸指数读取 586 gpm 线 (或 587 gpm 线) 在西太平洋西边界的经度为西太平洋副高的西伸脊点, 而此点所在的纬度则取为脊点的南北位置 (陈月娟等, 2001)。

西风环流对亚洲季风有很大的影响, 渤海位于西风环流范围内, 计算西风的强度指数分析西风对

渤海波候的影响。冬、夏季西风强度指数根据 Rossby 西风指数公式计算西风强度指数:

$$I_R = H_{35} - H_{55}, \quad (2)$$

其中 H_{35} 、 H_{55} 分别为 35°N 、 55°N 的 500 hPa 高度值。

2.2 数据来源

2.2.1 地形数据

渤海位于中国的东北部, 东西长大约 300 km 、南北长 480 km , 总面积约为 $7.7284 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。整个渤海分为北部辽东湾、西部渤海湾、南部莱州湾、东部渤海海峡以及中部的渤海盆地。作为中国唯一的陆架型浅海, 除了东面的渤海海峡与黄海连通外, 其余的三面均被陆地包围, 平均水深 18 m 。20 m 以浅的浅海面积占一半以上, 最大深度的海峡在北部的老铁山水道附近, 约 86 m 。其海底地势大致从 3 个海湾向海盆及海峡倾斜, 坡度平缓 (陈义兰等, 2013)。渤海海底地形数据参考美国 National Geophysical Data Center (NGDC) 提供的地形数据以及中国人民解放军海司航海保证部所提供的渤海实测水深数据, 经重采样精度为 0.05° (纬度) $\times 0.05^\circ$ (经度)。

2.2.2 风场数据

渤海波浪主要以风浪为主, 其出现的频率在 90% 以上 (孙涛和陶建华, 2004; 郑崇伟和潘静, 2012)。海表风是渤海波浪运动的主要驱动力, 风的发展和变化过程较大程度上决定海区波浪场的主要特征 (Wang et al., 1999)。因此, 收集该海区上空的风场数据, 与地形数据进行同化处理。风场数据来自 NCEP/NCAR 再分析数据, 提取全球 10 m 层经向风、纬向风资料, 空间水平分辨率 1.875° (纬度) $\times 1.905^\circ$ (经度), 所用时段为 1950~2011 年。模型输入前采用网格线性插值的方法将风场经向风 (v)、纬向风 (u) 插值, 精度为 0.05° (纬度) $\times 0.05^\circ$ (经度), 得到渤海海域上空逐月的风场 (u 、 v) 数据。

2.2.3 气象数据

渤海波候的变化受大尺度环流变化影响, 收集长期气象数据分析波候与环流联系。气象数据均来自 NCEP 再分析资料 1950~2011 年的逐月高度场数据。东亚季风提取冬季 (12 月至次年 2 月)、夏季 (6~8 月) 500 hPa 高度场数据, 范围 ($10^\circ\text{N} \sim 50^\circ\text{N}$, $100^\circ\text{E} \sim 160^\circ\text{E}$)。西太平洋副热带高压数据提取冬季 (12 月至次年 2 月)、夏季 (6~8 月) 500

hPa 高度场数据, 范围为 ($0^{\circ}\sim 40^{\circ}\text{N}$, $110^{\circ}\text{E}\sim 180^{\circ}$)。西风数据 1950~2011 年内冬季(12 月至次年 2 月)、夏季(6~8 月) 500 hPa 高度场 ($25^{\circ}\text{N}\sim 65^{\circ}\text{N}$, $110^{\circ}\text{E}\sim 180^{\circ}$) 平均格点资料。

2.3 模拟结果与对比验证

在不考虑流等作用的情况下, SWAN 模式中波浪场的模拟主要基于风场数据驱动, 模拟 1950~2011 年渤海海区逐月的波浪场的有效波高(HS)、波向(θ)、波周期(TP), 模拟月数据精度为 0.05° (纬度) $\times 0.05^{\circ}$ (经度), 以 1950 年 1 月为例(图 2)。渤海地区波向分布基本上与风向一致, 有效波高等值线与风速等值线的走向趋势相似, 但不完全相同。

SWAN 模型模拟的有效波高与卫星高度计反演的有效波高进行对比验证。已获取的 Jason-1 卫星高度计反演的有效波高频率为 10 d, 精度为 1° (纬度) $\times 1^{\circ}$ (经度), 时间跨度 2002~2014 年。模型模拟结果为月平均数据, 精度为 0.05° (纬度) $\times 0.05^{\circ}$ (经度), 时间跨度 1950~2011 年。对研究区模拟结果与卫星数据进行数据同化, 时间跨度

2002~2011 年, 精度为 1° (纬度) $\times 1^{\circ}$ (经度), 对比验证结果见图 3a。模拟结果与高度计反演有效波高呈现很好的重合与变化趋势, 对两组数据进行相关性分析, 得到相关系数 $r=0.92$, 表明两组数据显著相关, SWAN 模型模拟的数据具有很高的准确性(见图 3b)。其中存在的误差一方面可能是由网格精度与插值方法所造成的, 另一方面可能是由于深层水流与地形导致的。

3 渤海海域波候的变化特征

3.1 波候的趋势特征

对 1950~2011 年内渤海逐月的有效波高(HS)、波向(θ)、波周期(TP)的值分别相加求和取平均得到各参数长时间序列变化值, 即波浪的有效波高、波向以及波周期的长时间变化曲线, 作为分析波候变化的基础(图 4)。可以看到, 有效波高、波向、波周期在年内存在明显的季节波动变化特征。有效波高冬季达到一年中最大值, 夏季有效波高最小。冬季渤海海域受偏北风的驱动, 主要盛

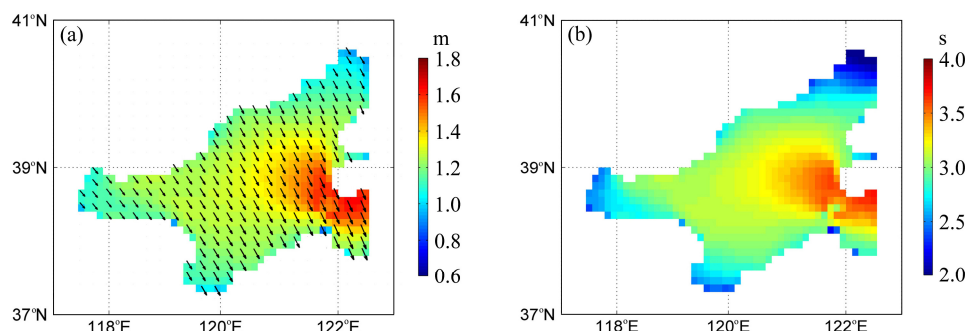


图 2 1950 年 1 月渤海波浪月平均 (a) 有效波高与波向、(b) 波周期

Fig. 2 Monthly-average (a) significant wave height and wave direction and (b) wave period in Bohai Sea in Jan 1950

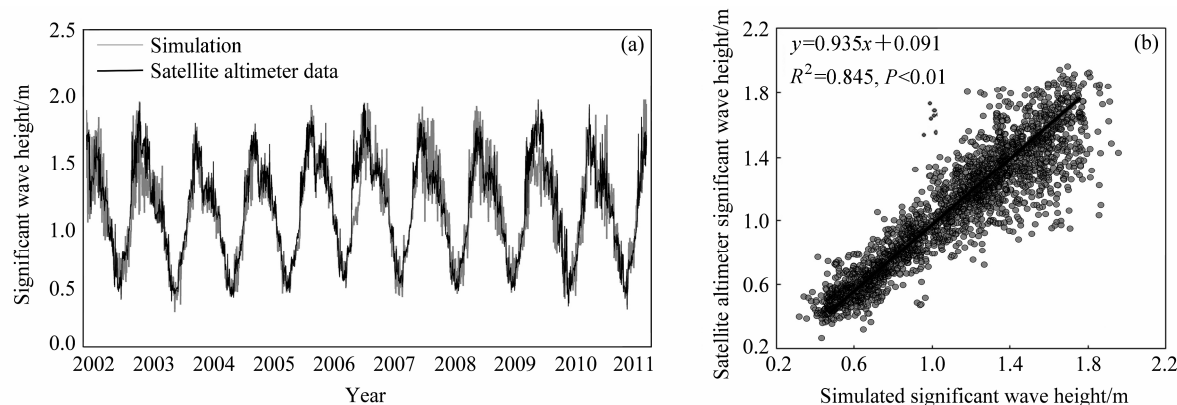


图 3 2002~2011 年模拟有效波高与卫星高度计反演有效波高对比验证图

Fig. 3 Comparison between simulated and satellite retrieved significant wave height from 2002 to 2011

行西北向的海浪,夏季受偏南风的作用,波向转为东南向。波周期也呈现冬季波周期较大,夏季波周期较小的特点。

分析渤海海区波候的年变化趋势,对逐月数据进行冬季、夏季、全年平均,6~8月为夏季,12月至次年2月为冬季(图5)。图5a3、b3、c3分别为年平均变化的有效波高、波向与波周期的变化曲

线,对有效波高、波向角度、波周期年值进行线性回归分析,利用线性趋势回归判断62年渤海波候的变化趋势。得到有效波高的线性回归系数为-9.509,波向角度的线性回归系数为4.406,波周期的线性回归系数为3.521。渤海海域有效波高、波向、波周期均通过显著水平 $\alpha=0.05$ 的 t 检验。由此可见,1950~2011年期间渤海海域的有效波高呈现

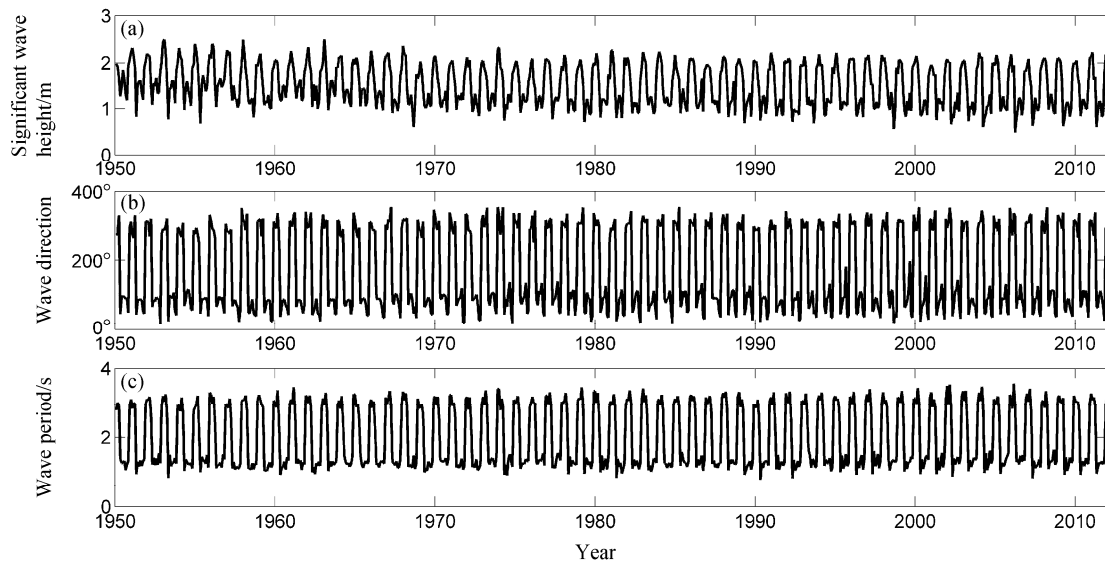


图4 1950~2011年逐月渤海海域波浪(a)有效波高、(b)波向角度、(c)波周期曲线图

Fig. 4 Temporal variations of monthly mean (a) significant wave height, (b) wave direction, and (c) wave period from 1950 to 2011

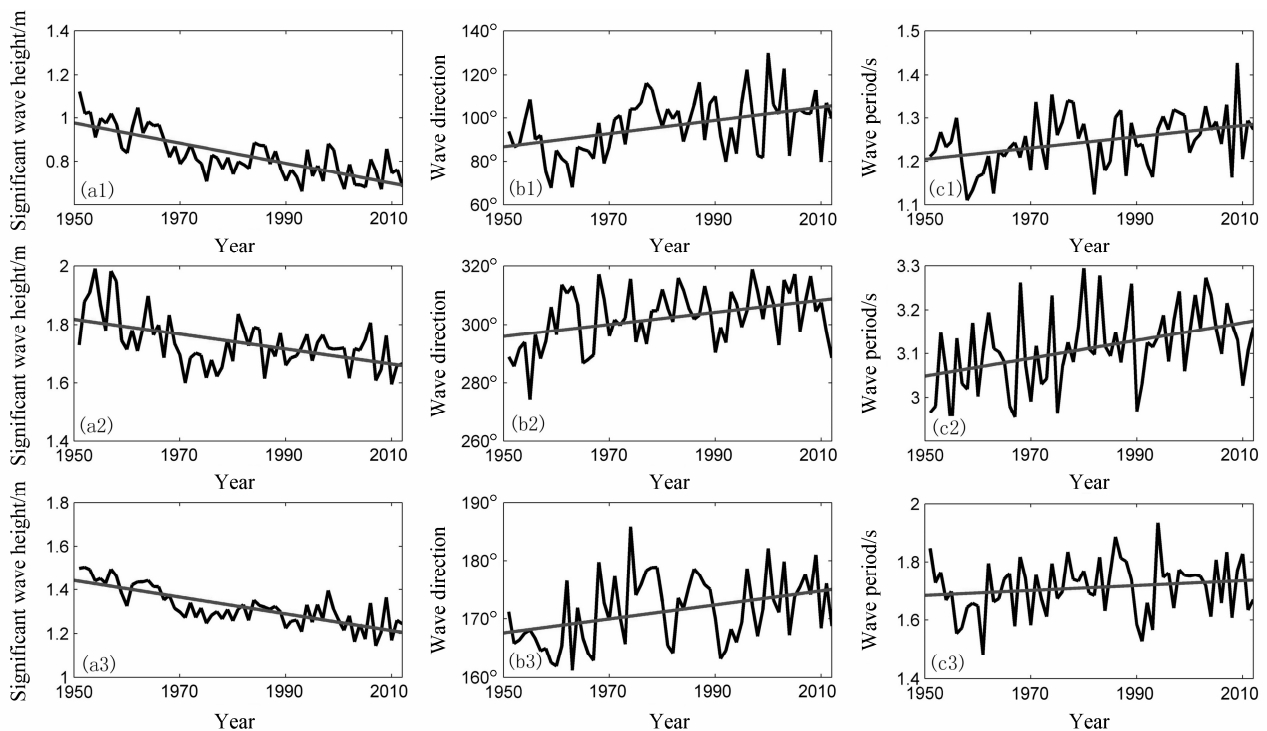


图5 1950~2011年渤海海区夏季(上)、冬季(中)、年平均(下)有效波高(左列)、波向角度(中列)、波周期(右列)趋势

Fig. 5 The significant wave height (left column), wave direction (middle column), and wave period (right column) in summer (up), winter (middle), and annual average (down) during 1950 to 2011

下降的趋势, 而波向角度略有上升的趋势, 波周期变化略有上升相对较稳定。有效波高平均下降 0.3 cm/a , 波向角度平均增加 $0.12^\circ/\text{a}$ 。有效波高的变化与该海区上空的风速降低有关, 波向角度的增加与上空局地风场的风向变化相关, 而风速与风向的变化与大尺度的环流息息相关。

3.2 波候的突变特征

对有效波高、波向角度、波周期长时间序列进行突变分析。突变是长时间序列从一种稳定态跳跃转变到另一种稳定态的现象, Mann-Kendall 法广泛用于检测时间序列的变化趋势及其计算突变时间 (Hamed and Rao, 1998)。分别计算顺序、逆序时间序列的秩序 (见图 6), 1950~2011 年渤海海区年均有效波高存在下降趋势, 下降突变主要出现在 1968 年前后。波向角度有偏转, 平均角度值有增加的趋势, 突变出现在 1960 年附近。波周期在这 62

年内也存在上升的趋势, 在 1960 年、1965 年出现突变点。有效波高、波周期、波向角度的突变点均通过 $\alpha = 0.05$ 的 t 检验, 突变点均为显著突变点。虽然有效波高、波向角度、波周期的突变点存在差异, 但基本上集中出现在 20 世纪 60~70 年代。可能是由于 20 世纪 70 年代左右由于全球气候变化的影响, 我国的临近海区冬、夏季风变弱, 尤其是经向风应力, 从而引起冬、夏季海洋波候的变化 (蔡榕硕等, 2011)。

3.3 波候的阶段特征

对渤海波候变化趋势与突变特征研究发现, 有效波高变化相对较大, 以有效波高为例, 进一步分析其与环流之间的联系。从整体看, 1950~2011 年渤海有效波高总体呈现下降趋势。大尺度的风场, 尤其是季风 (夏季风), 在过去的 60 年具有明显的年代际尺度的减弱, 这种风场的减弱也影响了渤海海区, 渤海海区的波浪以风浪为主, 风速的降低以及风向的变化都对该海区的波浪场有着重要的影响 (丁一汇等, 2013)。利用 Mann-Kendall 法逐步对 62 年来有效波高进行突变分析, 得到二级突变点发生在 1958 年、1985 年, 三级突变点发生在 1974 年、1997 年。其中, 1950~1968 年冬、夏季波高相对较大, 为正距平值, 1968 年附近冬、夏季波高呈现迅速降低的现象, 1975~1985 年波高略有回升, 1986 年以后冬、夏季波高发展相对较平稳 (图 7)。因此, 根据冬、夏季有效波高的变化曲线把有效波高划分为 4 个变化阶段, 即 1950~1968 年、1969~1974 年、1975~1985 年与 1986~2011 年这四个阶段。

4 渤海波候变化与环流联系

4.1 波候的影响因素确定

有效波高的长期变化与海—气振荡密切相关, 大尺度的大气环流变异是导致其变化的主要动力因素 (Young, 1999; Dan et al., 2009; Ruggiero et al., 2010)。渤海受控于大尺度的环流系统下: 一个是位置偏西的东亚季风, 即大气环流、海陆热力差异等相互作用下在东亚地区的表现 (祝从文等, 2000; 张庆云和陶诗言, 2003)。冬季风在陆地高压系统的作用下形成了强大的偏北风可达中国南海热带地区, 夏季风由热带海洋的暖湿气流随行星尺度环流系统北移, 可以延伸至中蒙边界 (Huang et al.,

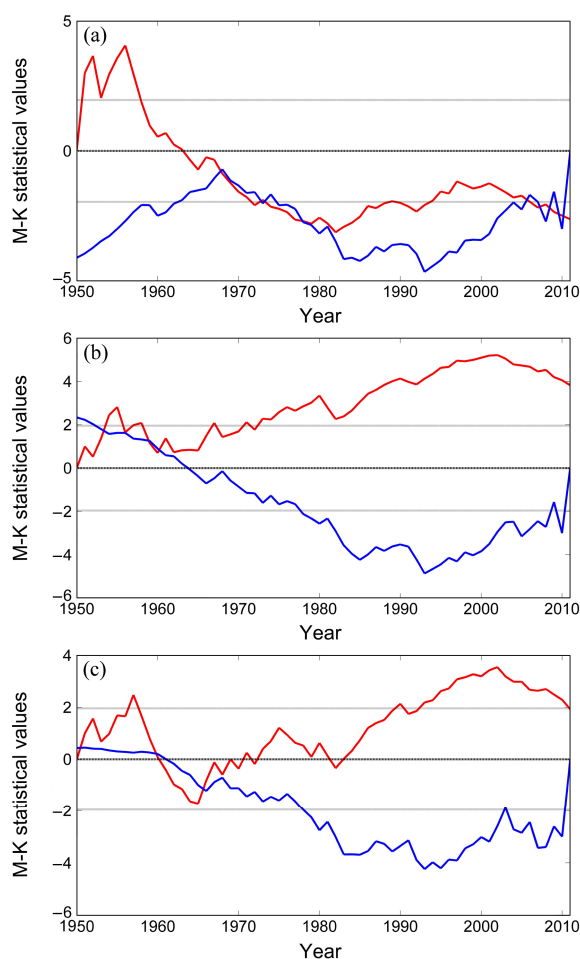


图 6 渤海海区 (a) 有效波高、(b) 波向角度与 (c) 波周期突变分析 (红色曲线为顺序, 蓝色为逆序, 虚线为显著水平 $\alpha = 0.05$ 的 t 检验线)

Fig. 6 Mann-Kendall test for (a) significant wave height, (b) wave direction, and (c) wave period of Bohai Sea

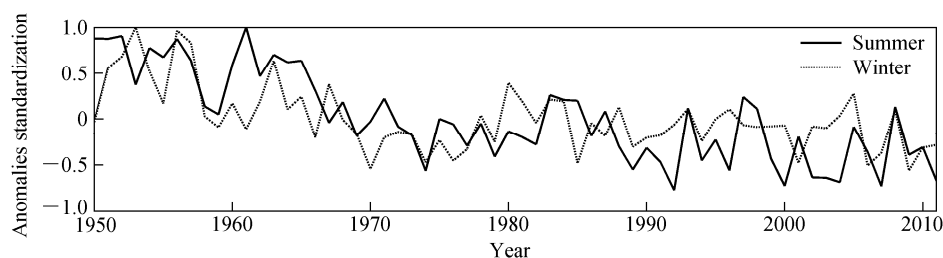


图7 1950~2011年(a)冬、(b)夏季渤海有效波高的变化

Fig. 7 Temporal variation of significant wave height in (a) winter and (b) summer from 1950 to 2011

2003; Chen et al., 2005)。一个是位置偏南的西太平洋副热带高压, 副高与夏季风之间相互影响与反馈, 其强度以及位置的变化对东亚地区夏季风系统造成一定影响(吴国雄等, 2003; 韦道明等, 2011)。还有位置偏北的副热带西风环流, 东亚西风异常变化会影响欧亚地区的相关环流, 从而造成海洋上空环流变异, 影响海洋动力过程(蔡琼琼等, 2011)。

提取西太平洋副高、东亚西风以及季风强度与北界位置指数作为影响因素变量。利用偏最小二乘回归对波高与各个影响因素进行分析, 以变量投影重要性指标 V_{IPj} 进行测试:

$$V_{IPj} = \sqrt{\frac{\rho}{R_d(Y; t_{1...m}, t_h)} \sum_{h=1}^m [R_d(Y; t_h) \omega_{hj}^2]}, \quad (3)$$

其中, ω_{hj} 是轴 ω_h 的第 j 个分量, t_h 对 Y 的影响能力大, 则 t_h 的边际贡献 x_j 在构造 t_h 是起了重要作用, 说明 x_j 对 Y 影响能力强。 R_d 是相对偏差。对于 ρ 个自变量 x_j ($j=1, 2, \dots, \rho$), 如果它们在解释 Y 的作用都相同, 则所有的 V_{IPj} 均等于 1; 否则对于 V_{IPj} (>1) 很大的 x_j , 它在解释因变量 Y 时就有更加重要的作用。

分析 1950~2011 年渤海海区冬、夏季有效波高与波高影响因子之间的相关关系, 得到各个因素对有效波高变化的变量投影重要性指标(见表 1)。 V_{IPj} 表示各个影响因素对有效波高的影响, 其值越大表明该因素对波高变化越重要, 对波高的变化贡献越大, R^2 表示回归模型分析的可行性程度, 其值越大, 表明回归分析越可行, R^2 大于临界值 0.0975, 即认为回归分析合理。分析得到, 夏季对有效波高的影响从大到小依次为夏季西太平洋副热带高压的面积、强度、西风强度、季风强度、副高位置的西伸与北抬、以及夏季季风的边界移动, 且回归分析的可行性合理; 冬季, 有效波高受影响主要为东亚季风的强度以及西风的强度, 虽然冬季波高与影响因素之间的回归分析可行性通过检验, 但其可行性程度较低。

表1 1950~2011年渤海有效波高与各个影响因素的相关关系

Table 1 Correlation between indices of the East Asian circulation and the significant wave height in Bohai Sea during 1950 to 2011

波候	影响因素	变量投影重要性指标
冬季有效波高	冬季季风强度指数	1.09
	冬季西风强度指数	0.65
	夏季副高面积指数	1.62
	夏季副高强度指数	1.16
	夏季西风强度指数	1.03
夏季有效波高	夏季季风强度指数	0.92
	夏季副高西伸指数	0.69
	夏季副高北抬指数	0.66
	夏季季风北界指数	0.45

注: 回归分析的可能性程度: 夏季 $R^2=0.3274$; 冬季 $R^2=0.1052$ 。

4.2 波候的影响因素分析

1950~2011 年, 冬、夏季的渤海海区有效波高在长期的西太平洋副热带高压、西风、东亚季风的波动变化, 此消彼长的共同影响下存在突变特征, 呈现一定的阶段性变化, 不同阶段的波高变化其主导因素也各不相同。详细分析 62 年来东亚季风、西太平洋副高、西风之间的变化及其与有效波高的联系; 结合东亚环流与波高变化特征划分波高变化的不同时段以及分析不同时段的主要影响因素。

4.2.1 冬季波高的影响因素

渤海冬季有效波高变化的主要影响因素有两个, 季风强度与西风强度。冬季季风强度在 1950~2011 年间指数波动较大, 整体趋势略显下降, 强度指数在 1990 年达到最低, 之后指数有所上升(图 8a)。冬季波高有明显的下降趋势, 冬季风 1950~1970 年间与有效波高波动变化曲线相似, 1970 年以后冬季风强度与波高波动变化曲线对应性较差。西风强度指数总体特征表现为上升趋势(图 8b), 1950~1975 年冬季西风强度指数偏低, 冬季西风强度在 1976 年达到最低值后呈现上升的状态。冬季西风增强会影响东亚冬季风的强度(况雪源

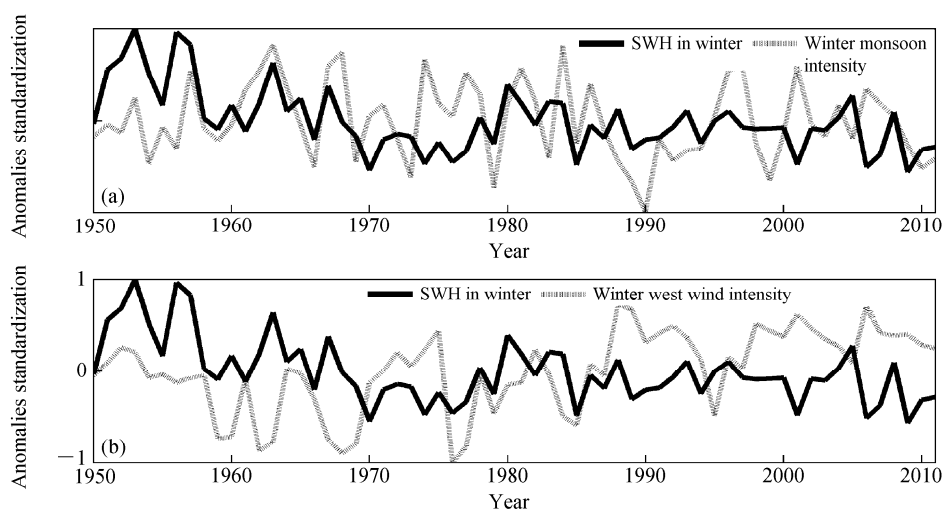


图 8 1950~2011 年 (a) 冬季有效波高与季风强度、(b) 冬季有效波高与西风强度曲线图

Fig. 8 Variations of (a) significant wave height and intensity index of East Asian monsoon in winter and (b) significant wave height and intensity index of westerly wind in winter during 1950 to 2011

等, 2008), 间接影响渤海海区有效波高的变化。

4.2.2 夏季波高的影响因素

夏季, 有效波高的变化整体呈现下降趋势。首先分析有效波高与西太平洋副热带高压各个指数的联系。1950~1974 年西太平洋夏季副高面积指数、强度指数相对较弱; 1975 年以后, 其面积开始增加、强度增大 (图 9a、9b); 副高强度与面积指数弱时, 渤海有效波高偏高, 1950~1970 年波高与副高强度、面积变化曲线相对应。1950~1958 年期间, 夏季的副高脊点位置偏西, 1959~1967 年副高脊点的经度位置偏东, 1968 年以后, 副高位置开始呈现西进状态, 尤其是 1980 年以后, 副高较强的年份, 副高西伸脊点的位置偏西、偏北 (图 9c、9d)。西太平洋副高面积、强度偏强, 位置西伸北进, 影响东亚夏季风的强度减弱, 位置南退, 导致夏季渤海波高在 1968 年以后呈现下降趋势。

夏季风对渤海海区波浪的长期影响主要在强度的变化与北界位置的移动两个方面。1950~2011 年夏季风强度指数与波高均呈现降低趋势, 其中在 1970~1994 年之间, 夏季风指数与波高变化曲线有很好的对应关系 (图 9e)。季风北界位置在 1950~1964 年偏北, 此时段季风的北界位置变化曲线与渤海波高变化曲线对应较好; 1970 年以后, 季风边界相对 1970 年以前位置偏南, 分别在 1980 年和 1993 年位置最南。其中, 1975~1985 年间, 季风强度有弱增强, 夏季边界有北进趋势, 导致 1975 年之前较低的波高略有回升, 然而强度并未明显增大, 波

高回升缓慢 (图 9f)。分析得到夏季风北进、强度大时, 渤海波高偏高, 有增高趋势; 季风南退、强度小时, 波高偏低, 有降低的趋势。东亚季风边界的南北移动与季风强度的变化影响了渤海海区的风场条件, 导致该海区的波高波动。

夏季, 西风强度指数总体特征表现为下降趋势 (图 9g)。西风指数在 1950~1958 年与 1970~1985 年之间西风强度指数偏弱, 有利于夏季风推进, 渤海波高偏高, 相比上一时段略有上升; 1960~1969 年, 夏季西风强度指数偏强, 夏季风强度偏弱且出现边界南退, 渤海波高偏低; 1985 年以后, 西风强度指数相对较弱, 1998 年以后夏季西风指数波动平缓, 波高变化不大。中纬度夏季西风的减弱, 有利于夏季风的建立与北进。西风强度指数的变化反映了中纬度西风带槽脊波动的特征, 南北气压差的大小变动使得槽脊南北抬伸, 造成中纬度风向、风速的变化 (曾刚等, 2010; 余丹丹等, 2014), 影响夏季风的强弱与边界的推进, 从而影响渤海海区波高的变化。

4.2.3 不同时段夏季波高变化的影响因素分析

由于冬季有效波高的影响因素回归分析可行性程度较低, 因此以夏季有效波高为研究对象分析不同时段环流各因素对波高的影响。通过小波分析夏季有效波高变化存在年际、年代际变化周期。不同时间段的夏季有效波高的划分不能利用单一周期划定, 多周期性导致有效波高难以界定变化时段。利用 Mann-Kendall 分析方法对夏季有效波高进行分析, 逐段找到二级突变点 (1958 年、1985 年)、

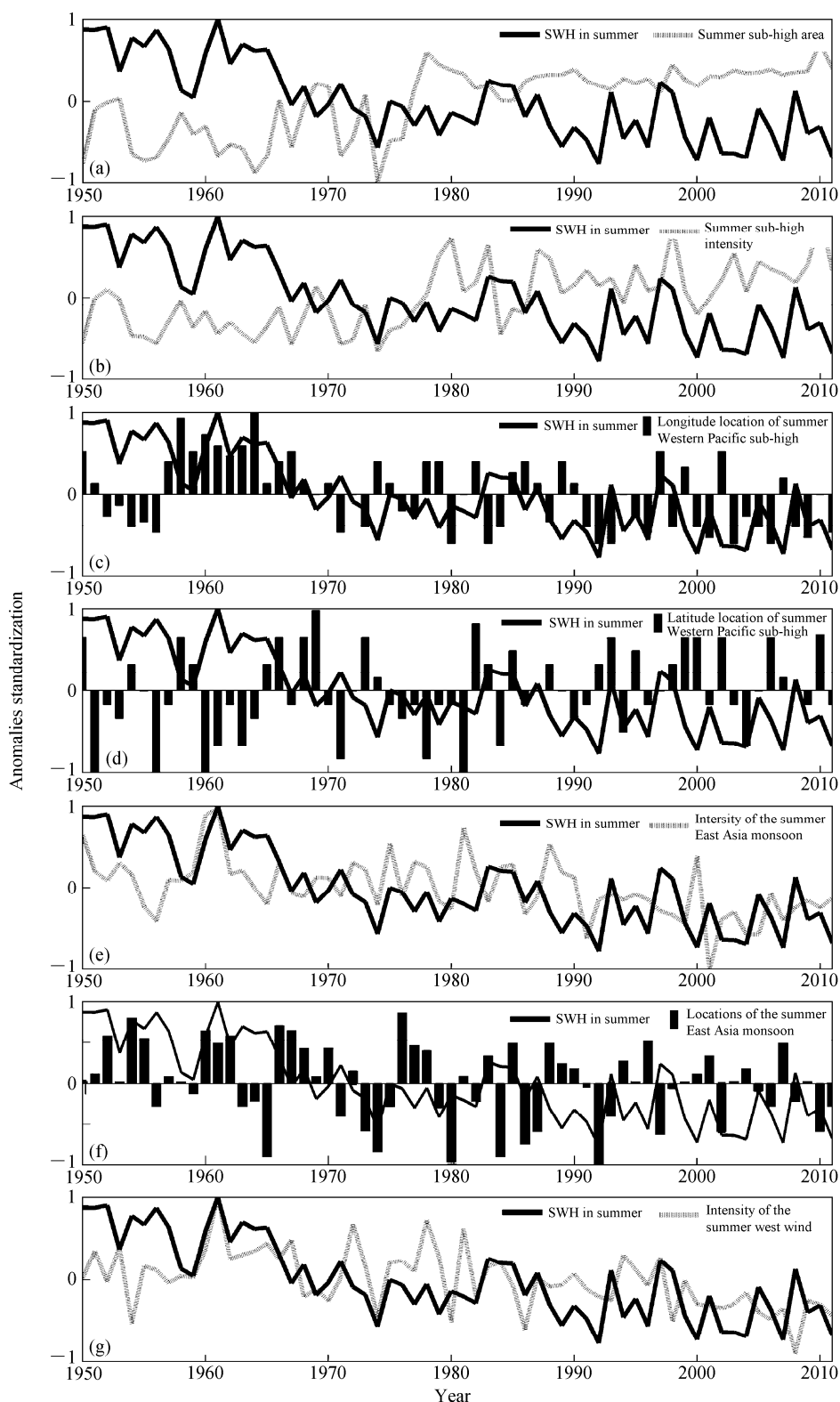


图9 1950~2011年夏季 (a)有效波高与副高面积指数、(b)有效波高与副高强度指数、(c)有效波高与副高西伸指数、(d)有效波高与副高南北位置指数、(e)有效波高与东亚季风强度指数、(f)有效波高与东亚季风北界移动指数、(g)有效波高与西风强度指数曲线图

Fig. 9 (a) Significant wave height and area index of Western Pacific subtropical high, (b) significant wave height and intensity index of Western Pacific subtropical high, (c) significant wave height and longitude location of Western Pacific subtropical high, (d) significant wave height and latitude location of Western Pacific subtropical high, (e) significant wave height and intensity index of the East Asia monsoon, (f) significant wave height and northern edge of the East Asia monsoon, and (g) significant wave height and intensity index of westerly wind in summer during 1950 to 2011

三级突变点（1974 年、1997 年），结合上述分析将夏季有效波高的影响要素划分为 6 个不同的变化时段（表 2），对夏季波高各影响因素距平标准值进行变量筛选法，采取逐步回归的方法，找到不同时段内波高变化的主导因素。在划定的时段中首先求 y 与 x_i 个变量的多元线性回归方程， t 检验水平 $\alpha=0.1$ ，其中 σ 均小于 0.1，且回归系数均通过信度 90% 的 t 检验。表 2 为不同时段夏季波高对应的两个主导影响因素，分析得到，不同时间段内有效波高的变化受控于不同天气系统。

4.3 波候的环流影响模式

在东亚季风、西太平洋副高以及西风环流共同构建的东亚环流天气系统长期变化的影响下，渤海海域 1950~2011 年期间的波候变化呈现出了有效波高总体下降，以及在 1968 年突变的特征。通过分析 1950~2011 年期间渤海海域夏季有效波高的变化，及其有效波高与东亚季风（北界、强度）、西太平洋副热带高压（面积、强度、脊点位置）、

表 2 不同阶段夏季有效波高的主要影响因素的回归系数及显著性检验值

Table 2 Correlation coefficients and significance test values between indexes of the East Asian circulation and significant wave height in Bohai Sea during 1950 to 2011

时段	变量名称	回归系数	σ	变量名称	回归系数	σ
1950~1958 年	季风强度	0.52	0.05	季风北界	0.49	0.08
1959~1967 年	季风强度	0.47	0.02	副高西伸	-0.34	0.03
1968~1974 年	副高面积	-0.64	0.03	季风北界	-0.29	0.06
1975~1985 年	季风强度	0.38	0.02	副高南退	0.25	0.07
1986~1997 年	季风北界	0.36	0.04	副高强度	-0.27	0.03
1998~2011 年	副高强度	-0.45	0.06	西风强度	0.31	0.09

西风环流（强度）的联系，可以建立起渤海波候受东亚环流影响的 4 种模式（见图 10）：

第一种模式，西太平洋副热带高压的面积小、强度偏弱，脊点位置偏东偏南，位于（18°N~22°N，135°E~140°E）范围。夏季风偏强，季风北界在 41°N 以北，副高位置偏东南，对渤海海区的天气系统影响较弱，有效波高主要受季风影响，波高相对较高，

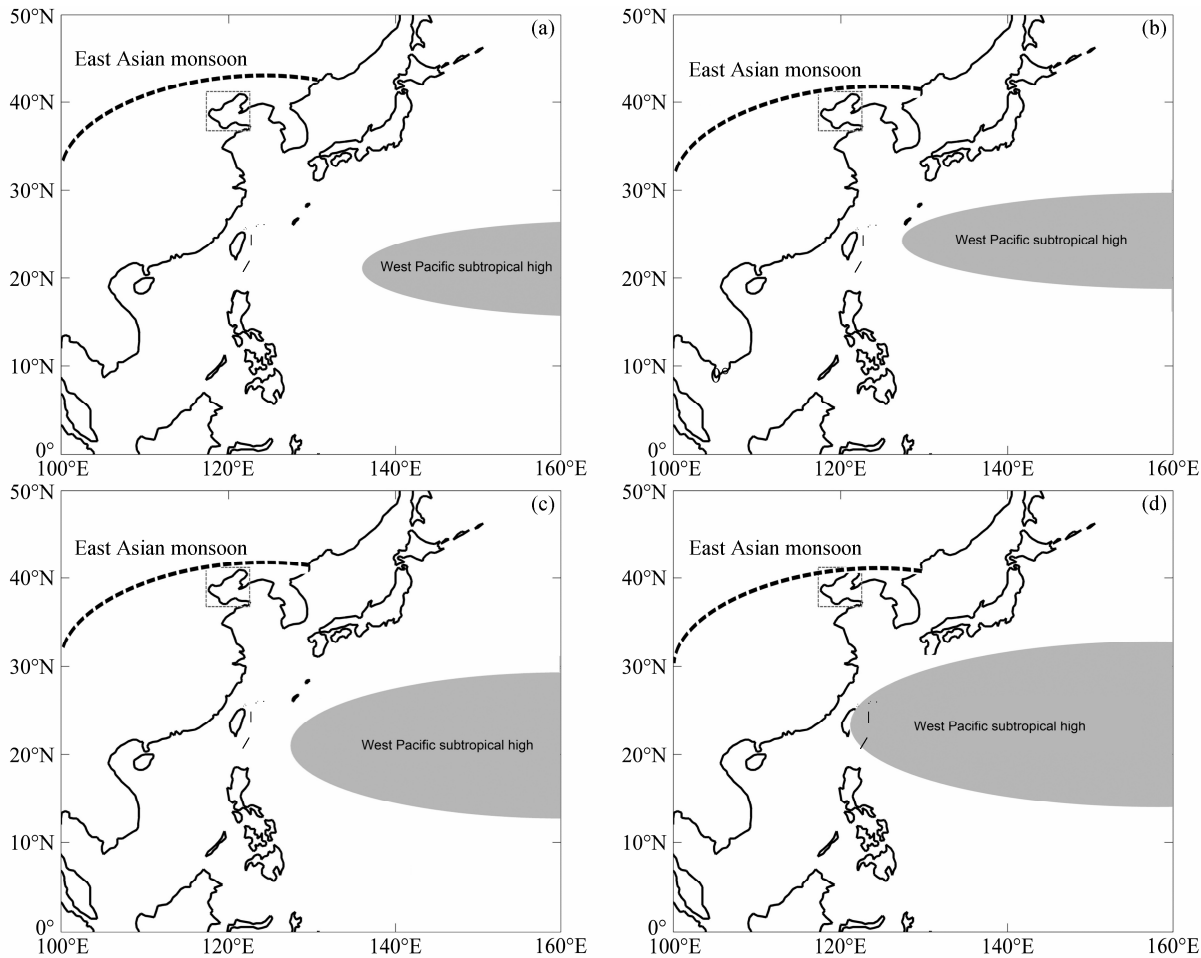


图 10 影响渤海波候的 (a) 第一种模式、(b) 第二种模式、(c) 第三种模式、(d) 第四种模式示意图
Fig. 10 (a) The first mode, (b) the second mode, (c) the third mode, and (d) the fourth mode of the East Asian circulation affecting the wave climate in Bohai Sea

随着夏季风强度的减弱,波高变化呈现下降趋势,表现年份为 1950~1958 年与 1959~1967 年,其中 1959~1967 年副高脊点位置偏东,在 140°N 附近。夏季副高位置东西移动的年际变化影响季风的强弱,1950~1967 年夏季风偏强,副高东退,直接导致此阶段有效波高偏高。

第二种模式,西太平洋副热带高压的面积较 1968 年之前略有增加,副高脊点移动范围在 (20°N~25°N, 125°E~130°E),副高呈现西伸、北进趋势。夏季风强度明显降低,夏季风北界南移,主要活动范围在 40°N 附近。受夏季风强度降低与季风北界南移的影响,波高较 1968 年前有了明显的降低,主要集中在 1968~1974 年之间。

第三种模式,西太平洋副热带高压的面积和强度明显增加,副高脊点位置西进,在 125°E~130°E 范围活动,副高中心位置偏南,在 20°N~22°N 附近。夏季风较前一个时段强度略有增加,但季风北界波动明显,位于 38°N~42°N 之间,总体呈现南退的趋势。夏季,波高在 1968 年突变迅速减低后略有回升,主要集中在 1975~1985 年。

第四种模式,西太平洋副热带高压的面积偏大、强度偏强,副高脊点夏季西伸至 120°E~122°E 附近,脊点夏季北进至 20°N~24°N 附近。副高西伸北进与东亚夏季风之间相互影响相互制约,副高西进夏季风偏弱,夏季风北界退至 40°N 以南,且夏季风强度低。夏季西风强度指数偏弱,副高面积强度增加,位置西伸北进,季风偏弱,影响渤海海区波高变化长期波动,整体偏低,主要集中在 1986~1997 年与 1998~2011 年,两个时段区别在于后一阶段副高北进较明显。

5 结论

海洋的波候变化是海洋动力过程对气候变迁的响应,其对海洋动力环境与海岸带演化过程都起着关键的作用。基于全球 NCEP 再分析资料中 1950~2011 年渤海海域 10 m 风场的风速与风向资料,利用 SWAN 模式对研究区波浪场进行模拟,对波候进行统计,分析 62 年来渤海海域波候的变化特征以及与东亚环流之间的关系。

1950~2011 年渤海海域的有效波高呈现下降的趋势;波向角度与波周期均呈现上升的趋势;有效波高平均下降 0.3 cm/a,波向角度平均增加

0.12°/a,波周期变化相对稳定。波候存在突变性与周期性,有效波高在 1968 年前后显现突变点,波向角度约在 1960 年突变,波周期在 1970 年左右出现突变点。

1950~2011 年期间,渤海海域有效波高呈现整体下降趋势,冬季波高变化受季风与西风的影响较大;夏季波高变化主要影响因素排序为西太平洋副热带高压的面积>副高强度>西风强度>季风强度>副高位置的西伸与北抬>夏季季风的边界移动。波高夏季变化呈出现 4 种组合状态,这种变化主要受制于所在区域长期气候变化背景下东亚环流天气系统的长期变动,特别是东亚季风强度变化以及北界位置的移动两个方面,对渤海海域 1950~2011 年期间波候的长期变化格局产生了重要的影响。东亚季风北界的南退以及东亚季风强度的降低,改变了渤海海区的风场条件,尤其对夏季有效波高的影响更为明显。同时,西太平洋副高的面积增加、强度增大,以及脊点位置的西进北移,进一步削弱了东亚季风的夏季风强度,加之西风带变化对东亚季风北界的控制作用,共同构成了东亚环流天气系统长期变动对渤海海域 1950~2011 年期间波候长期变化的主导控制因素。

参考文献 (References)

- Bacon S, Carter D J T. 1991. Wave climate changes in the North Atlantic and North Sea [J]. *International Journal of Climatology*, 11 (5): 545-558, doi: 10.1002/joc.3370110507.
- 蔡琼琼, 周天军, 吴波, 等. 2011. 东亚副热带西风急流及其年际变率的海气耦合模式模拟 [J]. *海洋学报*, 33 (4): 38-48. Cai Qiongqiong, Zhou Tianjun, Wu Bo, et al. 2011. The East Asian subtropical westerly jet and its interannual variability simulated by a climate system model FGOALS_gl [J]. *Acta Oceanologica Sinica (in Chinese)*, 33 (4): 38-48.
- 蔡榕硕, 陈际龙, 谭红建. 2011. 全球变暖背景下中国近海表层海温变异及其与东亚季风的关系 [J]. *气候与环境研究*, 16 (1): 94-104. Cai Rongshuo, Chen Jilong, Tan Hongjian. 2011. Variations of the sea surface temperature in the offshore area of China and their relationship with the East Asian monsoon under the global warming [J]. *Climatic and Environmental Research (in Chinese)*, 16 (1): 94-104, doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2011.01.09.
- Camus P, Mendez F J, Medina R. 2011. A hybrid efficient method to downscale wave climate to coastal areas [J]. *Coastal Engineering*, 58 (9): 851-862, doi:10.1016/j.coastaleng.2011.05.007.
- Chen W, Yang S, Huang R H. 2005. Relationship between stationary planetary wave activity and the East Asian winter monsoon [J]. *J. Geophys. Res.*, 110 (D14): D14110, doi: 10.1029/2004JD005669.
- 陈月娟, 张弘, 周任君, 等. 2001. 西太平洋副热带高压的强度和位置与

- 亚洲地表温度之关系 [J]. 大气科学, 25 (4): 515–522. Chen Yuejuan, Zhang Hong, Zhou Renjun, et al. 2001. Relationship between the ground surface temperature in Asia and the intensity and location of subtropical high in the Western Pacific [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 25 (4): 515–522, doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.2001.04.08.
- 陈义兰, 吴永亨, 刘晓瑜, 等. 2013. 渤海海底地形特征 [J]. 海洋科学进展, 31 (1): 75–82. Chen Yilan, Wu Yongting, Liu Xiaoyu, et al. 2013. Features of seafloor topography in the Bohaisea [J]. Advances in Marine Science (in Chinese), 31 (1): 75–82, doi: 10.3969/j.issn.1671-6647.2013.01.009.
- Dan S, Stive M J F, Walstra D J R, et al. 2009. Wave climate, coastal sediment budget and shoreline changes for the Danube Delta [J]. Marine Geology, 262 (1–4): 39–49, doi:10.1016/j.margeo.2009.03.003.
- 丁一汇, 孙颖, 刘芸芸, 等. 2013. 亚洲夏季风的年际和年代际变化及其未来预测 [J]. 大气科学, 37 (2): 253–280. Ding Yihui, Sun Ying, Liu Yunyun, et al. 2013. Interdecadal and interannual variabilities of the Asian summer monsoon and its projection of future change [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 37 (2): 253–280, doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.2012.12302.
- Gelfenbaum G, Kaminsky G M. 2010. Large-scale coastal change in the Columbia River littoral cell: An overview [J]. Marine Geology, 273 (1–4): 1–10, doi:10.1016/j.margeo.2010.02.007.
- Goodwin I D, Stables M A, Olley J M. 2006. Wave climate, sand budget and shoreline alignment evolution of the Iluka-Woody Bay sand barrier, northern New South Wales, Australia, since 3000 yr BP [J]. Marine Geology, 226 (1–2): 127–144, doi:10.1016/j.margeo.2005.09.013.
- Hamed K H, Rao A R. 1998. A modified Mann-Kendall trend test for autocorrelated data [J]. J. Hydrol., 204 (1–4): 182–196, doi: 10.1016/S0022-1694(97)00125-X.
- Hargreaves J C, Carter D J T, Cotton P D, et al. 2002. Using the SWAN wave model and satellite altimeter data to study the influence of climate change at the coast [J]. Journal of Atmospheric and Ocean Science, 8(1): 41–66, doi: 10.1080/713717484.
- Haxel J H, Holman R A. 2004. The sediment response of a dissipative beach to variations in wave climate [J]. Marine Geology, 206 (1–4): 73–99, doi: 10.1016/j.margeo.2004.02.005.
- Huang R H, Zhou L T, Chen W. 2003. The progresses of recent studies on the variabilities of the East Asian monsoon and their causes [J]. Advances in Atmospheric Sciences, 20 (1): 55–69, doi: 10.1007/BF03342050.
- 黄荣辉, 顾雷, 徐予红, 等. 2005. 东亚夏季风爆发和北进的年际变化特征及其与热带西太平洋热状态的关系 [J]. 大气科学, 29 (1): 20–36. Huang Ronghui, Gu lei, XuYuhong, et al. 2005. Characteristics of the interannual variations of onset and advance of the East Asian summer monsoon and their associations with thermal states of the Tropical Western Pacific [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 29 (1): 20–36, doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.2005.01.04.
- 况雪源, 张耀存, 刘健. 2008. 对流层上层副热带西风急流与东亚冬季风的关系 [J]. 高原气象, 27 (4): 701–712. Kuang Xueyuan, Zhang Yaocun, Liu Jian. 2008. Relationship between subtropical upper-tropospheric westerly jet and East Asian winter monsoon [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 27 (4): 701–712.
- 李燕, 薄兆海. 2005. SWAN 模式对黄渤海海域浪高的模拟能力试验 [J]. 海洋预报, 22 (3): 75–82. Li Yan, Bo Zhaohai. 2005. The simulation test of SWAN model in the wave height in the Huang-Bo sea areas [J]. Marine Forecasts (in Chinese), 22 (3): 75–82, doi:10.3969/j.issn.1003-0239.2005.03.013.
- Ou S H, Liao J M, Hsu T W, et al. 2002. Simulating typhoon waves by SWAN wave model in coastal waters of Taiwan [J]. Ocean Engineering, 29 (8): 947–971, doi:10.1016/S0029-8018(01)00049-X.
- Ruggiero P, Buijsman M, Kaminsky G M, et al. 2010. Modeling the effects of wave climate and sediment supply variability on large-scale shoreline change [J]. Marine Geology, 273 (1–4): 127–140, doi: 10.1016/j.margeo.2010.02.008.
- 孙涛, 陶建华. 2004. 波浪作用下渤海湾近岸海域污染物的输移扩散规律 [J]. 海洋与湖沼, 35 (2): 110–119. Sun Tao, Tao Jianhua. 2004. The study of pollutant transport on the action of waves in the near-shore area of Bohai bay [J]. Oceanologia et Limnologia Sinica (in Chinese), 35 (2): 110–119, doi: 10.3321/j.issn:0029-814X.2004.02.002.
- Wang L, Sarnthein M, Erlenkeuser H, et al. 1999. East Asian monsoon climate during the Late Pleistocene: High-resolution sediment records from the South China Sea [J]. Marine Geology, 156 (1–4): 245–284, doi: 10.1016/S0025-3227(98)00182-0.
- Wang Y J, Cheng H, Edwards R L, et al. 2008. Millennial- and orbital-scale changes in the East Asian monsoon over the past 224,000 years [J]. Nature, 451 (7182): 1090–1093, doi: 10.1038/nature06692.
- 韦道明, 李崇银, 谭言科. 2011. 夏季西太平洋副热带高压南北位置变动特征及其影响 [J]. 气候与环境研究, 16 (3): 255–272. Wei Daoming, Li Chongyin, Tan Yanke. 2011. Variation features and the impact of the latitudinal position of the western Pacific subtropical high in summer [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 16 (3): 255–272, doi: 10.3878/j.issn.1006-9585.2011.03.01.
- 吴国雄, 丑纪范, 刘屹岷, 等. 2003. 副热带高压研究进展及展望 [J]. 大气科学, 27 (4): 503–517. Wu Guoxiong, Chou Jifan, Liu Yimin, et al. 2003. Review and prospect of the study on the subtropical anticyclone [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 27 (4): 503–517, doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.2003.04.06.
- 徐建军, 朱乾根, 施能. 1997. 近百年东亚季风长期变化中主周期振荡的奇异谱分析 [J]. 气象学报, 55 (5): 620–627. Xu Jianjun, Zhu Qiangeng, Shi Neng. 1997. The singular spectral analysis of periodic oscillation in long-term variation of East Asian monsoon in recent century [J]. Acta Meteorological Sinica (in Chinese), 55 (5): 620–627, doi:10.11676/qxxb1997.060.
- Young I R. 1999. Seasonal variability of the global ocean wind and wave climate [J]. International Journal of Climatology, 19 (9): 931–950, doi: 10.1002/(SICI)1097-0088(199907)19:9<931::AID-JOC412>3.0.CO;2-O.
- 余丹丹, 张韧, 赵越超, 等. 2014. 西太平洋副高的东西进退与东亚夏季风系统的相互影响与关联 [J]. 大气科学学报, 37 (3): 304–312. Yu Dandan, Zhang Ren, Zhao Yuechao, et al. 2014. Correlation between the subtropical high abnormal longitudinal position and the East Asian summer monsoon system [J]. Transactions of Atmospheric Sciences (in Chinese), 37 (3): 304–312, doi: 10.3969/j.issn.1674-7097.2014.03.007.
- 曾刚, 孙照渤, 林朝晖, 等. 2010. 不同海域海表温度异常对西北太平洋副热带高压年代际变化影响的数值模拟研究 [J]. 大气科学, 34 (2): 307–322. Zeng Gang, Sun Zhaobo, Lin Zhaohui, et al. Numerical

- simulation of impacts of sea surface temperature anomaly upon the interdecadal variation in the northwestern Pacific subtropical high [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 34 (2): 307–322, doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.2010.02.06.
- 张庆云, 陶诗言. 2003. 夏季西太平洋副热带高压异常时的东亚大气环流特征 [J]. 大气科学, 27 (3): 369–380. Zhang Qingyun, Tao Shiyan. 2003. The anomalous subtropical anticyclone in Western Pacific and their association with circulation over East Asia during summer [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 27 (3): 369–380, doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.2003.03.07.
- 郑崇伟, 潘静. 2012. 全球海域风能资源评估及等级区划 [J]. 自然资源学报, 27 (3): 364–371. Zheng Chongwei, Pan Jing. 2012. Wind energy resources assessment in global ocean [J]. Journal of Natural Resources (in Chinese), 27 (3): 364–371, doi: 10.11849/zrzyxb.2012.03.002.
- 祝从文, 何金海, 吴国雄. 2000. 东亚季风指数及其与大尺度热力环流年际变化关系 [J]. 气象学报, 58 (4): 391–402. Zhu Congwen, He Jinhai, Wu Guoxiong. 2000. East Asian monsoon index and its inter-annual relationship with large scale thermal dynamic circulation [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 58 (4): 391–402, doi:10.11676/qxxb2000.042.