

基于 ERA5 再分析数据的中国邻近海域极端波高特征分析*

杜文彦¹ 张旭日¹ 张丽丽¹ 尤再进² 石洪源¹

(1. 鲁东大学水利工程学院 山东烟台 264000; 2. 大连海事大学港口与航运安全协同创新中心 辽宁大连 116000)

摘要 极端波浪对沿海地区基础设施有着深远的影响,了解它们的变化规律是进行海岸带风险分析和灾害预防的基础。文章基于欧洲中期天气预报中心(European Centre for Medium-Range Weather Forecasting, ECMWF)第五代再分析数据集(ECMWF reanalysis v5, ERA5),对中国邻近海域 1979~2018 年间极端波高展开时空特征分析,并统计了 40 a 厄尔尼诺系数,利用广义极值分布(generalized extreme value, GEV)函数探究了近 40 a 厄尔尼诺现象对我国海域极端波高的影响,结果显示:统计 1979~2018 年整个研究区域前 2%极端波浪年均值在 6~10 m 间浮动,且整体趋势递增,在四季趋势变化中,春夏极端波高增长趋势较秋冬高,且波动明显,在年际极端波高变化趋势中有较大波动时大多伴随着厄尔尼诺或是拉尼娜现象的发生,结合厄尔尼诺现象对 GEV 分布中位置参数的影响分布图和极端波高年、季节际趋势变化分布图,厄尔尼诺现象影响大的地区极端波高大多呈现增长趋势,表明厄尔尼诺现象对极端波高有较高影响。

关键词 极端波高;厄尔尼诺;中国海;ERA5 (ECMWF 第五代再分析数据集)

中图分类号 P576 doi: 10.11693/hyh20220100003

海浪会对海岸结构物、近海泥沙运输、海岸侵蚀等造成影响。因此,它是沿海灾害的一个重要因素。大浪叠加潮汐将进一步增加沿海地区的脆弱性(Wang *et al.*, 2012)。海浪由风产生,很多学者已经研究了全球波高的历史变化趋势(Patra *et al.*, 2016; Patra *et al.*, 2017)。此外,年际气候变化模式如厄尔尼诺-南方涛动(El Niño-Southern Oscillation, ENSO)、北大西洋涛动(North Atlantic Oscillation, NAO)等将造成大气环流的改变,最终影响整个全球海洋表面的风应力(Dodet *et al.*, 2010)。因此,气候变化通过影响海洋-大气相互作用、风和台风活动来影响全球波浪的变化(Hemer *et al.*, 2010; Bromirski *et al.*, 2013)。

极端波浪对沿海地区基础设施有着深远的影响,了解它们的变化规律是进行海岸带风险分析和灾害

预防的基础。然而,关于气候变化对全球范围内极端波浪影响的研究十分有限。众所周知,气候变化对平均波高具有影响,但由于短时间尺度的相关分析噪声较大,它们对极端波浪的影响尚未被深刻认识。此外,由于极端波浪的非正态性,简单线性回归分析不能应用于其研究。因此,学者们开始使用极端函数理论研究气候变化与极端波浪的相关性。Izaguirre 等(2011)对卫星高度计数据集的月最大显著波高(significant wave heights, SWH)进行了非平稳广义极值(generalized extreme value, GEV)分析,将气候变化指数作为 GEV 位置参数的附加协变量。分析了 ENSO、NAO 等 10 种大尺度气候变化对全球年极端波高的影响,但尚未评估对极端波高的季节贡献。Kumar 等(2016)基于欧洲中期天气预报中心再分析数

* 基于我国资源特性的海洋能高效利用创新技术研发, 2018YFB1501901 号; 山东省滨海沙滩防护工程环境灾害及防灾减灾对策研究, U1806227 号; 山东省粉沙质海岸港口工程骤冲骤灾及防灾减灾措施研究(课题 1), U1906231 号。杜文彦, 硕士研究生, E-mail: 910718958@qq.com

通信作者: 石洪源, 硕士生导师, 讲师, E-mail: shihongyuan1234@163.com

收稿日期: 2022-01-03, 收修改稿日期: 2022-03-10

据集 ERA-Interim 和 ERA-20C 再分析数据, 利用 GEV 分析研究了 ENSO 和 PDO 对北方冬季(11 月到次年 2 月)期间的极端波高的影响。Kumar 等(2019) 利用相同的方法及 ERA-20C 再分析数据, 研究了印度洋上的极端 SWH 对 ENSO、SAM 的季节性反应, 发现了同样的物理机制。Patra 等(2020)等利用同样的方法及卫星和欧洲中期天气预报中心第五代再分析数据集(ECMWF reanalysis v5, ERA5), 分析了 ENSO 等 10 余种气候变化对全球极端波高的影响。

目前, 针对中国近海波浪特征的研究很多, 有的基于实测数据(吴迪茜等, 2021), 有的基于卫星遥感资料(李文博等, 2017)和数值模型(郑崇伟等, 2013), 也有的基于再分析数据(乔守文等, 2020; 邱文博等, 2021), 研究结果指出, 我国海域波浪呈现出明显的季节特征, 其中秋冬季节波高大, 春夏季节波高小。因全球变暖等因素, 厄尔尼诺现象发生频率及影响程度不断增强, 目前有关我国海域极端波高的变化特征研究较少, 更鲜有研究定量指出厄尔尼诺现象与极端波高之间的关联性。因此, 本文采用 ERA5 数据分析我国极端波高的变化特征, 并利用 GEV 函数探究厄尔尼诺现象对我国海域极端波高的影响。

1 数据资料

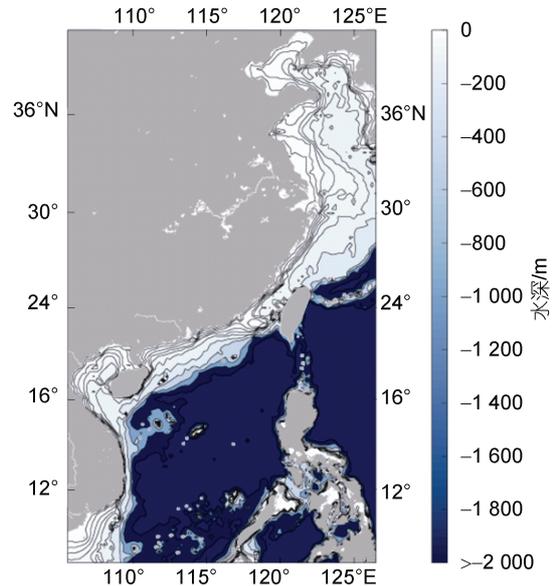
1.1 研究区域

中国近海海域包括渤海、黄海、东海和南海以及台湾东侧的太平洋部分海域, 位于北太平洋西部的边缘地区南北跨越 44 个纬度, 本文研究的中国临近海范围为(7°~41°N, 105.5°~126.5°E)(图 1)。

1.2 数据来源

ECMWF 是全球几家最主要的再分析数据中心之一。ERA5 是 ECMWF 第五代再分析数据集。它是欧洲中期天气预报中心最新的再分析产品。ERA5 涵盖了 1979 年到最近的再分析数据, 目前还在不断更新中。相比 ERA-Interim, ERA5 同化系统使用了若干专为再分析而开发的综合预报系统(integrated forecasting system, IFS cycle 41r2), 数据准确性得到了显著改善。ERA5 数据具有高分辨率: 水平分辨率为 31 km (~0.25°), 垂向为从地表开始 137 层。以往 ERA 数据产品在波浪波高模拟中普遍存在偏低的现象, 而 ERA5 数据已经有较大的改进(李朝等, 2021), ERA5 提供的变量从 ERA-Interim 的 100 个增加到 240 个, 其中包括耦合波浪模型提供的波高和波向, 使用户能够更准确地分析过去的大气和海洋状态。许

多研究人员将其用于大气和海洋研究(Stopa *et al.*, 2013)。ERA5 在我国的适用性已有学者(Shi *et al.*, 2021)研究, 因此, 本文选择 ERA5 再分析数据用于本文相关研究。



审图号: GS (2016) 1611号

图 1 研究区域地形水深图

Fig.1 Topography and bathymetry of the study area

本文按照世界气象学会的定义, 四季划分标准为: 春季(MAM), 包括 3、4 和 5 月; 夏季(JJA), 包括 6、7 和 8 月; 秋季(SON), 包括 9、10 和 11 月; 冬季(DJF), 包括 12、1 和 2 月。

2 研究区域极端波高时空变化特征分析

2.1 极端波高的年特征分析

早期的文章对极端波高的定义是, 在总体波高数据中选取一个最大值数据, 但由于台风等极端天气对这种极值的影响极大, 故这种方法可能会提供不可靠的极端样本值的估计。为克服这一缺点, 本文采用了波高大于整体数据阈值的波高均值来定义极端波高, 所选阈值为每个数据点的所有波高数据的第 98 个百分点(Menéndez *et al.*, 2008)。

2.1.1 极端波高年趋势变化空间分布 通过对 1979~2018 年前 2%极端波高统计和推算, 得出极端波高年均值图、波高年趋势变化分布图和 50 年一遇及 100 年一遇(图 2)。由图 2 可见, 渤海及黄海海域的极端波高年均值约在 3 m, 东海南部、台湾海峡周边及南海东北部海域极端波高年均值较大, 约在 5~6 m。

由图 2 可见, 台湾岛东北部地区及东海南部大部分地区极端波高呈明显增长趋势, 增长幅度在 0.025 m/a 左右, 南海大部分海域也处于增长趋势, 增长幅度基本在 0.01 m/a 左右浮动, 渤海、黄海大部分海域及海南岛周边海域呈减小趋势, 其削减幅度

在 0.005 ~0.010 m/a 左右。在 50 年一遇和 100 年一遇极值波高图中, 渤海和黄海大部分海域的波高在 4~6 m, 可以看出波高大值区域集中在东海水域, 南海大部分海域波高在 10 m 左右, 在东沙群岛和巴士海峡附近波高较大, 在 11~14 m 左右。

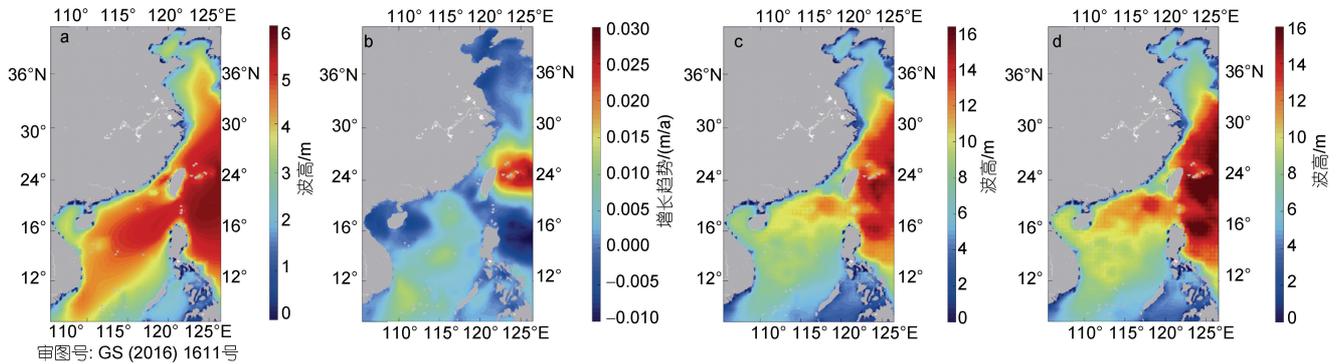


图 2 1979~2018 年极端波高年均值图(a)、极端波高年趋势变化空间分布图(b)、50 年一遇极值波高推算图(c)和 100 年一遇极值波高推算图(d)

Fig.2 Annual averages of extreme wave heights (a), spatial distribution of extreme wave height trend (b), 50-year (c)- and 100-year (d) projection of extreme wave height from 1979 to 2018

2.1.2 极端波高年际变化分布 图 3 为 1979~2018 年间本文研究区域 2%极端年均波浪高度的变化情况, 整个区域逐小时的有效波高累加求平均, 可以看出

本文研究海域 2%极端年均波浪在 3~4 m 间浮动, 且整体趋势递增, 其中 1988 年和 1996 年波高值出现较大波动。

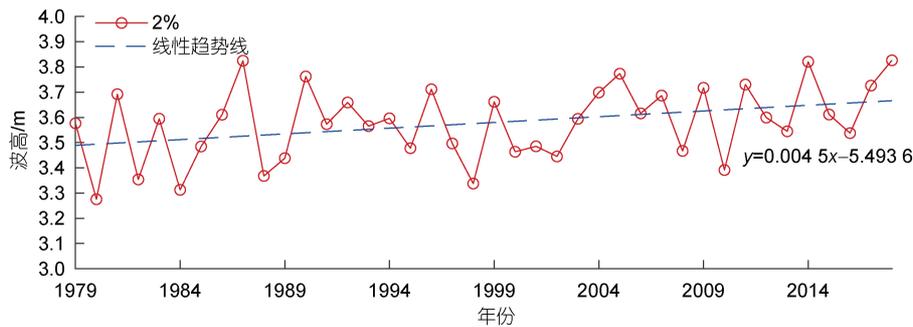


图 3 1979~2018 年极端波高季节变化趋势图

Fig.3 Seasonal trend of extreme wave height from 1979 to 2018

2.2 极端波高的季节特征分析

2.2.1 极端波高季节趋势变化空间分布 通过对 40 年季均前 2%极端波高统计, 得出极端波高季均分布图及波高季节趋势变化分布图(图 4~5)。由图 4 可见, 春季和夏季的季节均值极端波高较秋季和冬季小, 春季大部分海域极端波高在 3.5~4 m 左右, 台湾海峡西侧极端波高较高在 4.5 m 左右; 夏季东海南部极端波高值在 5 m 以上在四个海域中最为显著; 秋季研究海域较大值集中在东海南部和南海中北部; 冬季整个研究区域极端波高值普遍较高, 大部分海域极端波高在 4~4.5 m 左右。

1979~2018 年极端波高各季节趋势变化分布图显示, 春季渤海及黄海呈下降, 其下降幅度约在 0.005 m/a, 太平洋西部地区则为增长趋势, 增长幅度在 0.035 m/a 左右, 南海大部分地区增长幅度在 0.02 m/a; 在夏季和秋季, 南海西南部为下降趋势, 在 0.02 m/a 左右, 而东海南部及西部则为增长趋势, 夏季在台湾岛东部增长趋势明显, 约在 0.04 m/a, 秋季台湾岛东北部及东海中南部增长趋势幅度约为 0.03 m/a; 冬季期间, 渤海地区呈现下降趋势, 幅度在 0.01 m/a 左右浮动, 台湾海峡南侧及西沙群岛周边海域则为明显的上升趋势, 上升幅度在 0.025 m/a 左右。

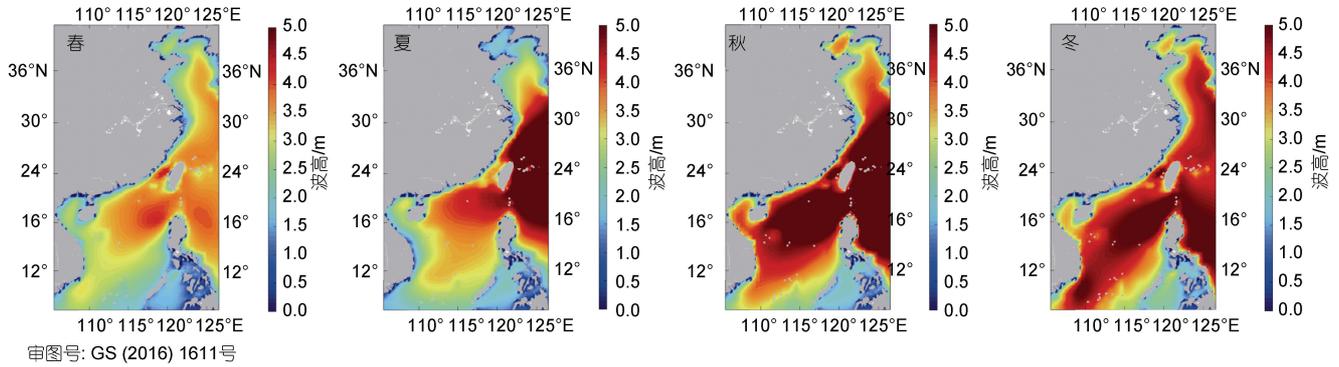


图4 1979~2018年极端波高四季均值分布图

Fig.4 Mean distribution of extreme wave height in four seasons from 1979 to 2018

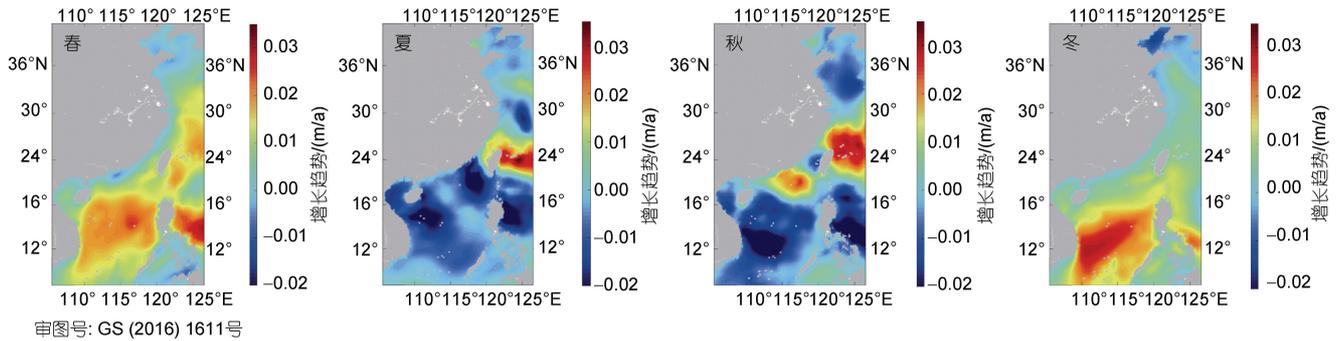


图5 1979~2018年极端波高四季趋势变化空间分布

Fig.5 Spatial distribution of extreme wave height trend in four seasons from 1979 to 2018

2.2.2 极端波高季节变化分布 为了体现变化趋势的季节性差异, 本文还分析了近 40 a 期间研究区域海域逐春季、逐夏季、逐秋季、逐冬季 2% 极端波浪的变化趋势(图 6)。由图 6 可见, 大部分海域的大浪频率表现出显著性递增趋势; 春季波高波动幅度最大, 幅度最显著时能达到 1 m, 在 1.9~3.5 m 之间且整体波高较小, 其中在 1991、1996、2005、2006 和 2011 年波动较为明显; 夏季波浪高度波动明显, 极端波高在 1.5~3.9 m 左右, 其中 1987、1988、1998、2010 和 2015 年波动值显著, 最大可达到 2 m 左右; 夏季和秋季极端波高变化趋势较春季和冬季相对平缓, 秋季极端波高较大在 3~4.5 m 之间浮动, 其中在 1983、1993、2007、2009 和 2015 年出现突变值, 最大波动在 1983 年出现可达到 1.4 m 左右; 冬季极端波高变化趋势为上升趋势, 波高在 3~4.2 m 左右浮动, 在 1981、1988、1991、1993 和 1999 年出现明显波动, 在 1993 年发生波动最显著, 达到 0.8 m。

3 厄尔尼诺现象对研究区域极端波高的影响

3.1 厄尔尼诺系数(Niño3.4)统计分析

本文使用 Niño3.4 区域平均的海表面温度异常作

为厄尔尼诺指数。根据中国气象局颁布的《厄尔尼诺/拉尼娜事件判定方法》, 定义 Niño3.4 指数 ≥ 0.5 $^{\circ}\text{C}$ 并持续 5 个月以上为一次厄尔尼诺事件, Niño3.4 指数 ≤ -0.5 $^{\circ}\text{C}$ 并持续 5 个月以上为一次拉尼娜事件。另外, 定义事件峰值强度绝对值达到或超过 2.5 $^{\circ}\text{C}$ 的事件为超强事件。为研究 ENSO 的影响, 本文利用美国国家海洋和大气管理局 (National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA)-气候预测中心 (Climate Prediction Center, CPC)(<https://www.cpc.ncep.noaa.gov/data/indices/ersst5.nino.mth.81-10.ascii>) 每月的 Niño3.4 指数(海表面温度在 $5^{\circ}\text{S}\sim 5^{\circ}\text{N}$, $170^{\circ}\sim 120^{\circ}\text{W}$ 上的平均异常, 基于 ERST.v5 计算)进行研究分析。从图 7 可看出 1979~2018 年的厄尔尼诺指数。根据厄尔尼诺事件的定义, 1979~2018 年共发生了 10 次厄尔尼诺事件和 10 次拉尼娜事件, 其中 1982/1983、1986/1987、1991/1992、1994/1995、1997/1998、2002/2003、2004/2005、2006/2007、2009/2010、2015/2016 为厄尔尼诺事件; 1983/1984、1984/1985、1988/1989、1995/1996、1998/2000、2005/2006、2007/2008、2010/2011、2011/2012、2017/2018 为拉尼娜事件。其中, 2015/2016 年厄尔尼诺事件峰值强度为 2.8 $^{\circ}\text{C}$, 是一次超强厄尔尼诺事件。

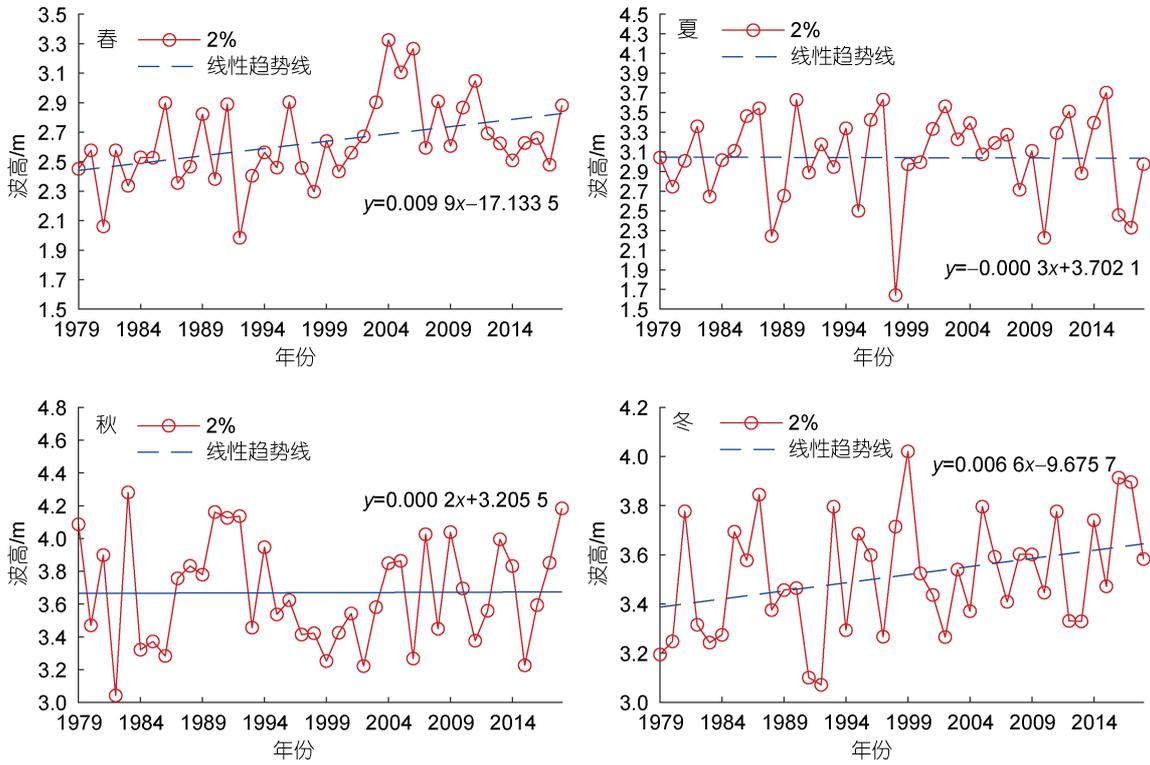


图 6 1979~2018 年极端波高季节变化趋势图

Fig.6 Seasonal trend of extreme wave height from 1979 to 2018

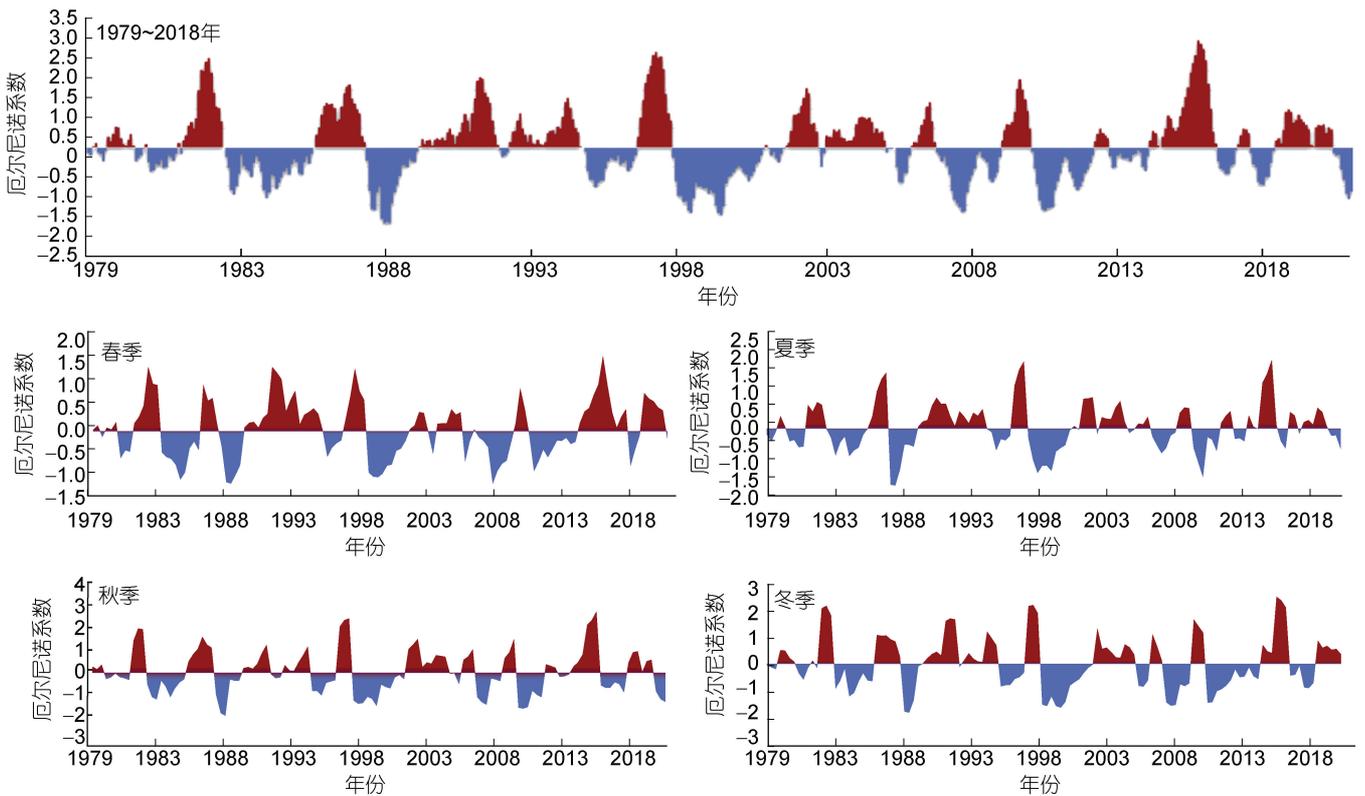


图 7 1979~2018 年厄尔尼诺系数(Niño3.4)统计

Fig.7 Statistics of El Niño coefficient (Niño3.4) from 1979 to 2018

3.2 极端波高特征与厄尔尼诺系数相关性分析

3.2.1 研究方法 极值理论(extreme value theory, EVT)是统计学的重要分支之一,在气象和水文极端中得到了广泛的应用(Shinyie *et al.*, 2013; Vasiliades *et al.*, 2015)。极值统计中有两个最基本的分布,广义极值分布(generalized extreme value, GEV)和广义帕累托分布(generalized Pareto distribution, GPD)。GEV 分布用统一的形式来表示 Gumbel 分布、Frechet 分布和 Weibull 分布三种极值分布类型,通常选取数据中的“年最大值”或“区组最大值”数据来建立模型。GEV 累积分布函数 F 表示为

$$F(x, \mu_t, \sigma_t, \xi_t) = \begin{cases} \exp\left[-\exp\left(-\frac{x-\mu_t}{\sigma_t}\right)\right], & \xi_t = 0, \\ \exp\left[-\left(1+\xi_t\frac{x-\mu_t}{\sigma_t}\right)^{-\frac{1}{\xi_t}}\right], & \xi_t \neq 0, \left(1+\xi_t\frac{x-\mu_t}{\sigma_t}\right) > 0, \end{cases} \quad (1)$$

其中, μ_t, σ_t, ξ_t 分别为位置参数、尺度参数和形状参数。我们采用最大似然法进行 Kolmogorov-Smirnov 检验,以确保该时期的波浪极端与 GEV 模型吻合良好。为了检验气候变化对季节极端值的影响,使用了一个气候变率指数 v (本研究中的 ENSO 指数)作为 GEV 参数的协变量。以往的研究发现,气候变率对极端值的影响主要是通过位置参数,而尺度和形状参数几乎没有影响。因此,本文仅考虑位置参数 μ_t 随时间(t)的变化:

$$\mu_t = \mu_0 + \mu_1(v_t - v_0), \quad (2)$$

其中, v_t 和 v_0 分别为 t 时刻和 t_0 时刻的气候变率指数, μ_0 为 t_0 时刻的位置参数, μ_1 为位置参数回归系数。

3.2.2 研究区域极端波高与厄尔尼诺系数相关性分析

3.2.2.1 相关性年空间分布 厄尔尼诺现象的变化通过地理位置参数的变化使 GEV 分布发生左右偏

移,在栅格基础上对波高进行 GEV 分析,得出位置参数回归系数 μ_1 [公式(2)]的空间分布(图 8)。图 8 显示了 1979~2018 年厄尔尼诺对全年极端波高的影响,图中显示了极端波高的 GEV 位置参数[公式(2)中的 μ_1]回归系数对全年 Niño3.4 指数的空间分布。在这期间,南海大部分地区出现了显著的正相位,黄海北部和东北部出现正相位,而东海大部分地区以及黄海西南部则出现了相反的相位。这与 Kumar 等(2016)基于不同时期 ERA-Interim 和 ERA-20C 数据集研究全球极值波浪与气候变化之间的关联性时的发现一致。

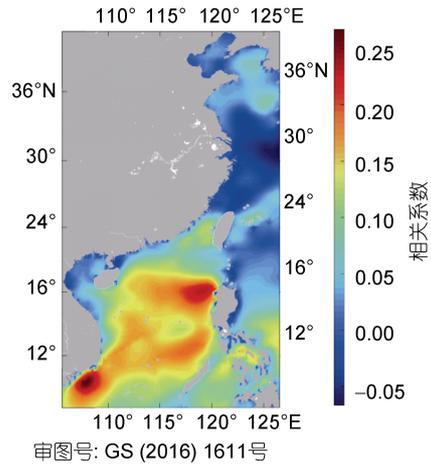


图 8 1979~2018 年相关性年空间分布
Fig.8 Spatial distribution of correlation years from 1979 to 2018

3.2.2.2 相关性季节空间分布 Niño3.4 极端波响应模式的季节变化如图 9 所示。GEV 分析使用位置参数和 Niño3.4 的回归系数季节平均指数。显著的厄尔尼诺事件影响全年持续,并且在不同季节的空间范围有所不同。春季中国渤海、黄海以及太平洋西部地区受气候指数影响大;在夏季,气候指数对南海东南部、东海东部及南部影响较大;在秋季,南海北部地

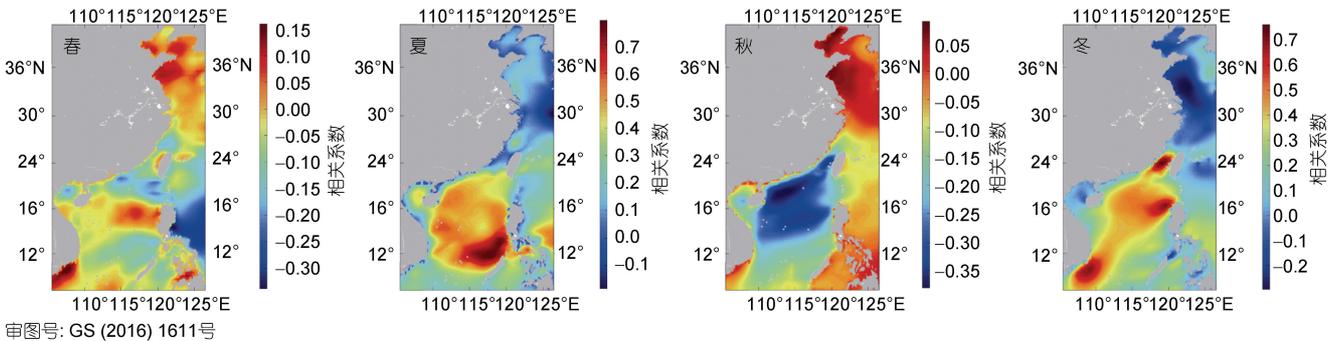


图 9 1979~2018 年相关性四季空间分布
Fig.9 Spatial distribution of correlation in four seasons from 1979 to 2018

区可以看到强烈的气候指数影响; 冬季期间, 黄海东南部、东海部分海域、渤海地区、台湾海峡西侧及西沙群岛周边海域受气候指数影响较大。结合 2.2.1 中极端波高季节趋势变化分布, 可以看出在厄尔尼诺现象影响大的地区极端波高普遍具有较大幅度波动。

4 结论

基于研究海域 ERA5 后报资料, 本文详细分析了 2% 极端波浪的空间分布情况、长期年均变化趋势及变化趋势的空间分布情况, 极端波浪季节分布、趋势变化空间分布以及极端波浪的季均变化趋势和厄尔尼诺系数变化, 并通过 GEV 极值波高与厄尔尼诺系数回归方程结合分析得出厄尔尼诺现象对极端波高的影响分布, 结果表明:

(1) 由 2% 极端波高的数值年际变化可以看出, 在长期变化趋势中, 本文研究海域 2% 极端波浪年均值在 3~4 m 间浮动, 且整体趋势递增, 其中 1988 和 1996 年波高值出现的波动最为显著。渤海及黄海海域的极端波高年均值约在 3 m, 东海南部、台湾海峡周边及南海东北部海域极端波高年均值较大, 约在 5~6 m。

在四季趋势变化中, 春夏极端波高增长趋势较秋冬高, 且波动明显。春季在 1.9~3.5 m 之间且整体波高较小, 其中在 1991、1996、2005、2006 和 2011 年波动明显, 幅度最显著时能达到 1 m; 夏季波浪高度波动明显, 极端波高在 1.5~3.9 m 左右, 其中 1987、1988、1998、2010 和 2015 年波动值显著, 最大可达到 2 m 左右。春季和夏季的季均极端波高较秋季和冬季小, 春季大部分海域极端波高在 3.5~4 m 左右; 夏季和秋季极端波高变化趋势较春季和冬季相对平缓; 秋季研究海域较大值集中在东海南部和南海中北部; 冬季整个研究区域极端波高普遍较高, 大部分海域极端波高在 4~4.5 m 左右。

结合厄尔尼诺系数变化趋势和极端波高的数值年际变化, 极端波高出现显著波动值的 1988 和 1995 年可以看到, 1994 和 1995 年都发生了厄尔尼诺和拉尼娜现象, 且 1987 年整年都为厄尔尼诺现象; 而在四季极端波高有较大波动时大多伴随着厄尔尼诺或是拉尼娜现象的发生。

(2) 在 2% 极端波高年际趋势变化分布中, 南海与东海为增长趋势, 渤海海域及黄海部分海域呈下降趋势。在极端波高季节际趋势变化分布中, 春季和冬季

渤海及黄海呈下降趋势, 太平洋西部地区 and 南海大部分地区则为增长趋势; 在夏季, 南海西南部为下降趋势, 而台湾岛东部为明显增长; 秋季台湾岛东北部及东海南部增长趋势, 南海西南部为下降趋势。

(3) 在极端波高的 GEV 位置参数对全年 Niño3.4 指数回归系数的空间分布中, 东海大部分海域及南海海域受气候变量影响较大; 在不同季节回归系数分布中, 夏秋冬季气候变量对南海的影响较大, 冬春对东海海域影响较大。结合厄尔尼诺现象对 GEV 分布中位置参数的影响分布图和极端波高年、季节际趋势变化分布图, 可以看出在厄尔尼诺现象影响大的地区极端波高普遍具有较大幅度波动。

参 考 文 献

- 乔守文, 孙嘉诚, 石洪源, 等, 2020. 基于 ERA5 的黄渤海附近海域波浪能资源时空特征分析[J]. 海洋与湖沼, 51(6): 1350-1358.
- 李文博, 张坤兰, 吴克俭, 2017. 基于卫星资料的南海波候特征研究[J]. 海洋湖沼通报(6): 11-20, doi: 10.13984/j.cnki.cn37-1141.2017.06.002.
- 李朝, 侯一筠, 李水清, 等, 2021. 两类典型台风路径影响下的黄、渤海海浪场特征研究[J]. 海洋与湖沼, 52(1): 51-65.
- 吴迪茜, 陈智杰, 2021. 平潭岛东部海域波浪特征及波浪能分析[J]. 应用海洋学学报, 40(2): 293-302.
- 邱文博, 李冠宇, 徐俊臣, 等, 2021. 黄渤海海域波浪时空变化特征分析[J]. 海洋科学, 45(7): 1-8.
- 郑崇伟, 林刚, 邵龙潭, 2013. 1988—2010 年中国海大浪频率及其长期变化趋势[J]. 厦门大学学报(自然科学版), 52(3): 395-399.
- BROMIRSKI P D, CAYAN D R, HELLY J, *et al*, 2013. Wave power variability and trends across the North Pacific [J]. Journal of Geophysical Research: Oceans, 118(12): 6329-6348, doi: 10.1002/2013JC009189.
- DODET G, BERTIN X, TABORDA R, 2010. Wave climate variability in the North-East Atlantic Ocean over the last six decades [J]. Ocean Modelling, 31(3/4): 120-131, doi: 10.1016/j.ocemod.2009.10.010.
- HEMER M A, CHURCH J A, HUNTER J R, 2010. Variability and trends in the directional wave climate of the Southern Hemisphere [J]. International Journal of Climatology, 30(4): 475-491, doi: 10.1002/joc.1900.
- IZAGUIRRE C, MÉNDEZ F J, MENÉNDEZ M, *et al*, 2011. Global extreme wave height variability based on satellite data [J]. Geophysical Research Letters, 38(10): L10607, doi: 10.1029/2011GL047302.
- KUMAR P, KAUR S, WELLER E, *et al*, 2019. Influence of natural climate variability on the extreme ocean surface wave heights over the Indian Ocean [J]. Journal of Geophysical Research: Oceans, 124(8): 6176-6199, doi: 10.1029/2019JC015391.
- KUMAR P, MIN S K, WELLER E, *et al*, 2016. Influence of

- climate variability on extreme ocean surface wave heights assessed from ERA-interim and ERA-20C [J]. *Journal of Climate*, 29(11): 4031-4046, doi: 10.1175/JCLI-D-15-0580.1.
- MENÉNDEZ M, MÉNDEZ F J, LOSADA I J, *et al*, 2008. Variability of extreme wave heights in the northeast Pacific Ocean based on buoy measurements [J]. *Geophysical Research Letters*, 35(22): L22607, doi: 10.1029/2008GL035394.
- PATRA A, BHASKARAN P K, 2016. Trends in wind-wave climate over the head Bay of Bengal region [J]. *International Journal of Climatology*, 36(13): 4222-4240, doi: 10.1002/joc.4627.
- PATRA A, BHASKARAN P K, 2017. Temporal variability in wind-wave climate and its validation with ESSO-NIOT wave atlas for the head Bay of Bengal [J]. *Climate Dynamics*, 49(4): 1271-1288, doi: 10.1007/s00382-016-3385-z.
- PATRA A, MIN S K, SEONG M G, 2020. Climate variability impacts on global extreme wave heights: seasonal assessment using satellite data and ERA5 reanalysis [J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 125(12): e2020JC016754, doi: 10.1029/2020JC016754.
- SHI H Y, CAO X F, LI Q J, *et al*, 2021. Evaluating the accuracy of ERA5 wave reanalysis in the water around China [J]. *Journal of Ocean University of China*, 20(1): 1-9.
- SHINYIE W L, ISMAIL N, JEMAIN A A, 2013. Semi-parametric estimation for selecting optimal threshold of extreme rainfall events [J]. *Water Resources Management*, 27(7): 2325-2352.
- STOPA J E, CHEUNG K F, TOLMAN H L, *et al*, 2013. Patterns and cycles in the Climate Forecast System Reanalysis wind and wave data [J]. *Ocean Modelling*, 70: 207-220, doi: 10.1016/j.ocemod.2012.10.005.
- VASILIADES L, GALIATSATOU P, LOUKAS A, 2015. Nonstationary frequency analysis of annual maximum rainfall using climate covariates [J]. *Water Resources Management*, 29(2): 339-358.
- WANG X L, FENG Y, SWAIL V R, 2012. North Atlantic wave height trends as reconstructed from the 20th century reanalysis [J]. *Geophysical Research Letters*, 39(18): L18705, doi: 10.1029/2012GL053381.

CHARACTERISTICS OF EXTREME WAVE HEIGHT IN CHINA'S MARGINAL SEAS BASED ON ERA5 REANALYSIS DATA

DU Wen-Yan¹, ZHANG Xu-Ri¹, ZHANG Li-Li¹, YOU Zai-Jin², SHI Hong-Yuan¹

(1. School of Hydraulic Engineering, Ludong University, Yantai 264000, China; 2. Centre for Ports and Maritime Safety, Dalian Maritime University, Dalian 116000, China)

Abstract Extreme waves have a profound impact on coastal infrastructure, and it is the basis of understanding of their variation law and prevention of disasters in coastal zones. Based on the ECMWF reanalysis the fifth generation ERA5 data set, the spatio-temporal characteristics of extreme wave heights in China's marginal seas from 1979 to 2018 were analyzed and the 40-year El Niño coefficients calculated. The GEV (generalized extreme value) function was used to explore the influence of El Niño event on extreme wave height in the study area in recent 40 years. Results show that the annual mean value of extreme waves in the top 2% of the whole research area fluctuated between 6 m and 10 m from 1979 to 2018 and the fluctuation is increasing in overall, which is more obvious in spring and summer for having greater extreme wave height than in autumn and winter duo reasonably to the El Niño or La Nina works. Combining the influence of El Niño on the location of GEV distribution and the interannual and inter-seasonal trends of extreme wave heights, we found that most of the extreme wave heights in areas where El Niño has a great influence show an increasing trend, which indicates that El Niño has a greater impact on extreme wave heights.

Key words extreme wave height; El Niño; China Sea; ERA5 (ECMWF reanalysis v5)