

南海-北印度洋波高的长期变化:II.趋势的区域性、季节性差异

高占胜¹, 郑崇伟^{1,2}, 李训强², 刘文鹏¹

(1. 海军大连舰艇学院 航海系, 辽宁 大连 116018; 2. 解放军理工大学气象海洋学院, 江苏 南京 211101)

摘要: 利用ERA-40海表10 m风场驱动WAVEWATCH-III(WW3)海浪模式, 模拟得到南海-北印度洋1957年9月—2002年8月的海浪资料, 采用一元线性回归方法, 分析了该海域有效波高的长期趋势, 以期研究全球气候变化、波浪能资源开发、防灾减灾等提供参考。结果表明:(1)1958—2001年期间, 该海域的SWH有线性递增趋势, 递增率为0.0017 m/a, 且变化趋势表现出很大的区域性差异: 仅部分小范围海域呈显著性递减, 其余大部分海域的SWH呈显著性递增;(2)SWH的变化趋势存在较大的季节性差异: 各个季节呈显著性递减的区域范围都较小; 低纬度的递增趋势主要体现在春季和冬季, 尤其冬季几乎整个南海-北印度洋的SWH均呈显著性递增趋势; 索马里以东一近似圆形海域的递增趋势主要体现在夏季。

关键词: WAVEWATCH-II 海浪模式; 线性趋势; 区域性差异; 季节性差异

中图分类号: P731.22 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-0239(2016)02-0039-00

1 引言

海洋对人类的生产生活^[1-3]、以及军事行动^[4]都有着重要影响, 随着“一带一路”战略正式展开, 南海-北印度洋的重要性愈发凸显^[5-7]。有效波高(Significant Wave Height, SWH)的长期变化趋势对全球气候变化、波浪能资源开发、防灾减灾等都有着重要的影响。前人对在资料匮乏的情况下对SWH的长期变化趋势做了较多工作, Gulev等^[8]利用综合海洋大气数据集(International Comprehensive Ocean-Atmosphere Data Set, ICOADS)资料, 分析发现1958—2002年期间, 北大西洋和北太平洋中纬度海域的SWH在冬季呈显著性递增, 趋势为10—40 cm/decade。Dodet等^[9]发现在1953—2009年期间, 大西洋东北部海域的SWH以20 cm/decade的速度显著性递增。Semedo等^[10]研究发现1957—2002年期间, 北大西洋和北太平洋大部分海域的SWH表现出显著的递增趋势。郑崇伟等^[11-12]研究发现1988—2009年期间, 中国海的SWH和波

浪能流密度均呈显著性逐年线性递增。郑崇伟等^[13]在国内首次对南海-北印度洋SWH的长期变化趋势展开研究, 发现在1979—2014年期间, 整个南海SWH的递增趋势强劲, 大部分海域在0.4 cm/(s·a)以上, 大值区分布于南海北部、台湾东南部近海, 在0.6 cm/(s·a)以上。北部湾北部、泰国湾北部近海的SWH没有显著的变化趋势。孟加拉湾、印度半岛西部大范围海域的SWH没有表现出显著的变化趋势。在阿拉伯海西部海域、印度洋15°S—0°大范围海域表现出显著性递增, 趋势为0.1—0.4 cm/(s·a)。仅部分零星海域的SWH表现出显著性递减趋势。

南海-北印度洋对我国至关重要, 它不仅仅是重要国际航线, 也是我国亚丁湾护航的必经之地、重要的能源通道之一。本文利用ERA-40海表10 m风场驱动WAVEWATCH-III(WW3)海浪模式, 模拟得到南海-北印度洋1957年9月—2002年8月的海浪资料, 采用一元线性回归方法, 分析了该海域SWH的线性趋势、以及变化趋势的区域性和季节性差异, 以期可为研究全球气候变化、波浪能资源开

收稿日期: 2015-07-12

基金项目: 国家自然科学基金项目(41205073, 41275099)

作者简介: 高占胜(1965-), 男, 副教授, 硕士, 主要从事船舶操纵的理论和方法及军事海洋环境方面的研究。E-mail: 1310615779@qq.com

发、防灾减灾等提供参考。

2 资料与方法

本文利用模拟得到的近 45 a(1957 年 9 月—2002 年 8 月)的海浪数据,计算了南海-北印度洋 SWH 的长期变化趋势,主要计算了该海域 SWH 的整体变化趋势、变化趋势的区域性差异。数据来源:以 ERA-40 海表 10 m 风场驱动第三代海浪数值模式 WW3,模拟得到南海-北印度洋近 45 a 逐 3 h 的海浪场数据。计算范围为 10°S—30°N, 40°—140°E,地形分辨率取 0.5°×0.5°,计算时间从 1957 年 9 月 1 日 00:00 时(世界时,下同)—2002 年 8 月 31 日 18:00 时。积分步长 900 s,每 3 h 输出一次结果,模拟的海浪资料的已经过与 ICOADS 资料对比检验^[7],精度较高。ERA-40 海表 10 m 风场来自欧洲中期天气预报中心(European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, ECMWF),其时间分辨率为 6 h,空间分辨率为 2.5°×2.5°。该数据的空间范围覆盖全球,时间范围从 1957 年 9 月 1 日 00:00 时—2002 年 8 月 31 日 18:00 时。

3 南海-北印度洋 SWH 的长期变化趋势

3.1 SWH 的整体变化趋势

将整个南海-北印度洋的 SWH 从 1958—2001 年进行逐年区域平均,分析近 44 a 期间该海域 SWH

的整体变化趋势,见图 1。长期变化趋势的具体计算方法如下:

回归方程

$$y = a + bx \quad (1)$$

式中线性趋势的回归系数为 $b = \frac{L_{xy}}{L_{xx}}$

$$L_{xx} = \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 = \sum_{i=1}^n x_i^2 - n\bar{x}^2 \quad (2)$$

$$L_{xy} = \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y}) = \sum_{i=1}^n x_i y_i - n\bar{x}\bar{y} \quad (3)$$

$$L_{yy} = \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 = \sum_{i=1}^n y_i^2 - n\bar{y}^2 \quad (4)$$

$$\text{相关系数 } r = \frac{L_{xy}}{\sqrt{L_{xx}L_{yy}}} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i y_i - n\bar{x}\bar{y}}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (5)$$

由图 1 可见,变化趋势的相关系数 $|r|=0.63 > r_{0.05} = 0.29$,通过了 95% 的信度检验,表明该海域 SWH 的线性递增趋势显著,回归系数为 0.0017,即 1958—2001 年期间,南海-北印度洋海域的 SWH 整体上以 0.0017 m/a 的速度显著性逐年线性递增。在 1958—1969 年的 10 余年期间,SWH 的波动较为剧烈,在 1969—1978 年的 10a 期间表现出较为明显的递增趋势(0.0076 m/a),1979—1986 年期间的变化较为平缓,1987—1990 年期间为第二波递增趋势显著的时间段(0.035 m/a),1990—2001 年期间便显出缓慢的递减趋势。从图 1 不难发现,SWH 的长期递增趋势较为缓慢,梅勇等^[14]对该海域的海表风速、有效波高

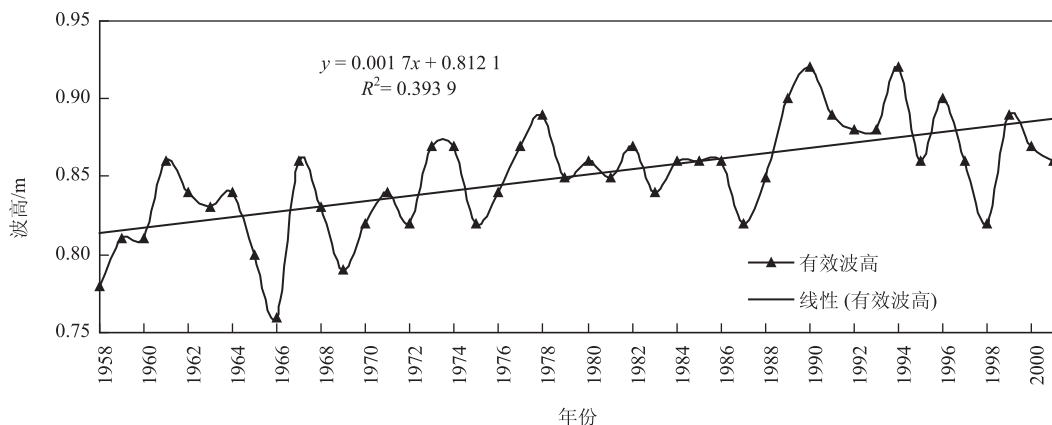


图 1 1958—2001 年南海-北印度洋的逐年平均有效波高及其变化趋势

进行过 EOF 分析,发现二者的第一模态时间序列都呈递增趋势,增速缓慢,本文的发现与梅勇等^[14]吻合。郑崇伟等曾对南海重要岛礁的波候特征、海浪发电的可行性展开过论证^[15-16],并率先对第一岛链的波候(海浪气候态)特征展开了系统性研究^[17],发现该岛礁的 SWH 呈递增趋势。郭随平等^[18]曾发现南海的海浪场变化与厄尔尼诺存在相关,在以后的工作中,可借鉴该方法,深入分析南海-北印度洋 SWH 长期变化趋势的物理机制。

3.2 SWH 变化趋势的区域性差异

近年来,对大洋 SWH 变化趋势的研究已有不少,但多是区域平均后分析整体变化趋势,很难体现出不同海域变化趋势的区域性差异,这种分析方法往往会将某些重点海域的变化特征忽略,本文将南海-北印度洋 $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ 逐网格点上的 SWH 从 1958—2001 年取逐年平均,分析每个网格点上 SWH 的逐年线性趋势,分析变化趋势的区域性差异,见图 2。

近 44 a 期间,南海-北印度洋大部分海域的 SWH 表现出显著性递增趋势,主要有苏门答腊岛-索马里一带的大范围海域、吕宋海峡-中南半岛东南海域一带海域、吕宋岛东北部海域;仅部分小范围海域呈显著性递减趋势,其余海域则无明显的变化趋势。递增趋势较强的海域主要分布于:吕宋岛东北部近海 ($0.003—0.005 \text{ m/a}$)、吕宋海峡 ($0.002—0.004 \text{ m/a}$)、中南半岛东南海域(即传统的南海大风区,趋势为 $0.003—0.004 \text{ m/a}$)、斯里兰卡至苏门答腊岛一带的大范围海域 ($0.003—0.006 \text{ m/a}$)、索马

里以东的一椭圆形海域 ($0.002—0.005 \text{ m/a}$); SWH 在泰国湾、北部湾、孟加拉湾的递减趋势基本在 -0.002 m/a 左右,爪哇海的递减趋势较为强劲,约 $-0.003—-0.005 \text{ m/a}$ 。

3.3 SWH 变化趋势的季节性差异

本文还将 SWH 从 1958—2001 年进行逐季节平均,分析逐春季、逐夏季、逐秋季、逐冬季的变化趋势,比较 SWH 变化趋势的季节性差异,见图 3。

逐春季:近 44 a 期间,印度洋低纬海域、阿拉伯半岛东部近海、印度半岛 15°N 西部近海、琉球群岛附近海域的 SWH 表现出显著性递增趋势,尤其是在印度洋 $80^\circ—100^\circ\text{E}$ 低纬海域,递增趋势较为强劲,达到 $0.004—0.007 \text{ m/a}$; SWH 呈显著性递减的范围较小,主要分布于:北部湾(约 -0.002 m/a)、泰国湾 ($-0.003—-0.001 \text{ m/a}$)、加里曼丹岛西部近海(约 -0.001 m/a)、加里曼丹岛北部近海 ($-0.004—-0.002 \text{ m/a}$)、亚丁湾(约 -0.002 m/a),以及一些零星海域,详见图 3a。

逐夏季:SWH 呈显著性递增的区域主要分布于苏门答腊岛-索马里一带、吕宋岛东部大范围海域,以及一些散乱的小范围海域,递增趋势较强的海域分布于:苏门答腊岛-斯里兰卡之间一椭圆形海域 ($0.004—0.006 \text{ m/a}$)、索马里东部一圆形海域 ($0.004—0.008 \text{ m/a}$); 呈显著性递减的区域主要分布于:几乎整个孟加拉湾 ($-0.006—-0.004 \text{ m/a}$)、加里曼丹岛南部和西南部海域 ($-0.008—-0.01 \text{ m/a}$),以及一些零星海域,尤其是加里曼丹岛南部的爪哇海,递减趋势尤为强劲,达到 -0.012 m/a 左右,详见

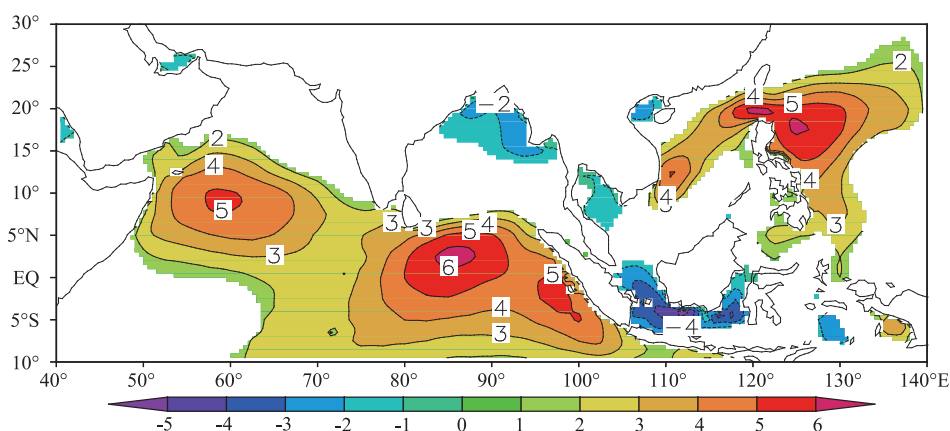


图2 1958—2001年南海-北印度洋有效波高的变化趋势(单位: 10^{-3} m/a),彩色区表示通过了95%的信度检验

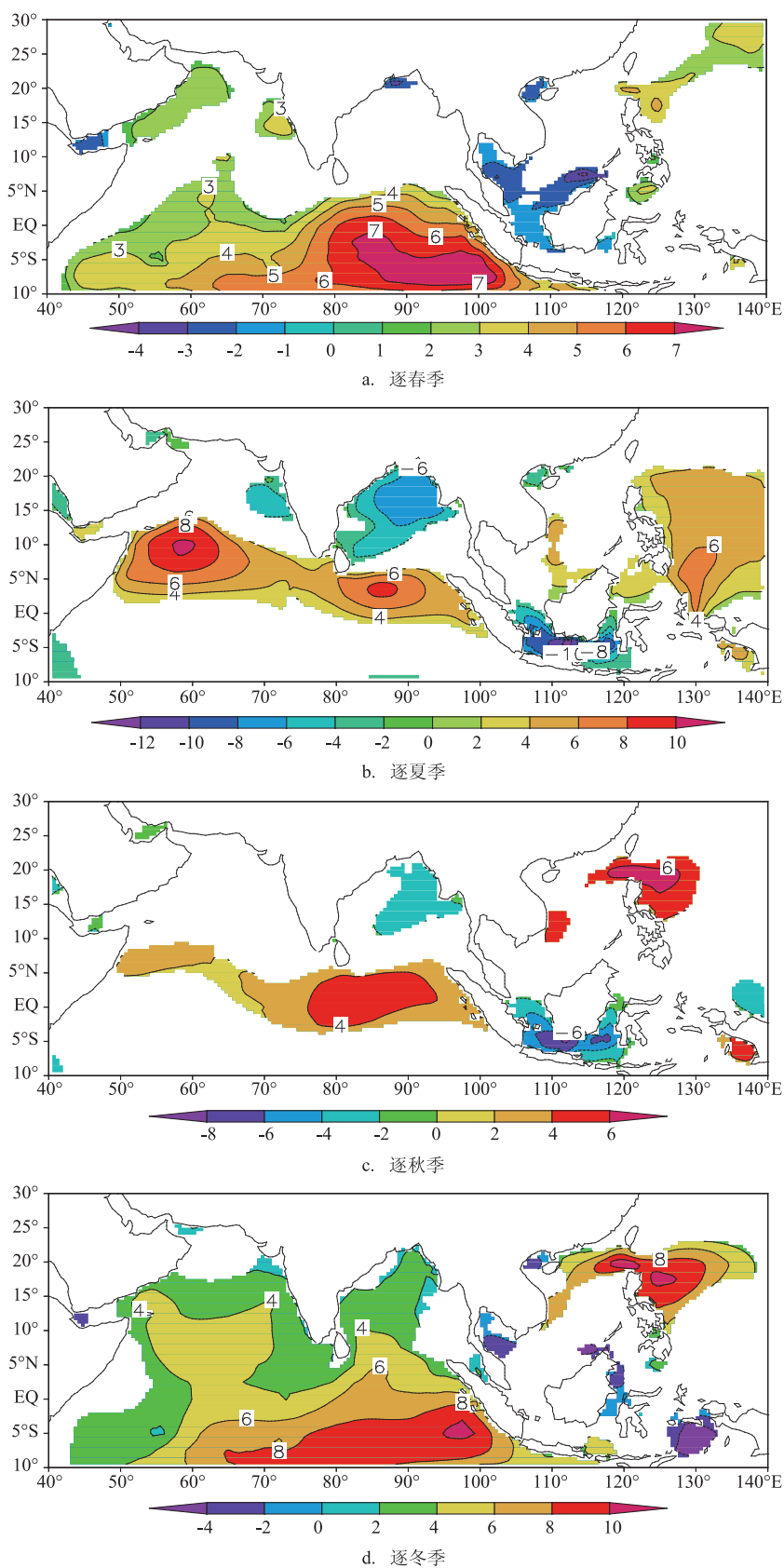


图3 1958—2001年期间不同季节有效波高变化趋势(单位: 10^{-3} m/a),彩色区表示通过了95%的信度检验

图3b。

逐秋季: SWH呈显著性递增的区域主要分布于苏门答腊岛-索马里一带、吕宋海峡及其东部近海, 以及一些零星海域, 递增趋势较强的海域分布于: 斯里兰卡南部一椭圆形海域(约0.004 m/a)、吕宋海峡及其东部近海(约0.006 m/a); 呈显著性递减的区域主要分布于: 孟加拉湾中部和东北部海域(约-0.004 m/a)、加里曼丹岛南部和西南部海域(-0.006—-0.002 m/a), 以及一些零星海域, 尤其是加里曼丹岛南部的爪哇海, 递减趋势较为强劲, 达到-0.006 m/a左右, 详见图3c。

逐冬季: 几乎整个南海-北印度洋海域的SWH均呈显著性递增, 基本在0.002 m/a以上, 递增趋势较为强劲的海域分布于: 印度洋低纬度中东部海域(约0.008 m/a)、吕宋海峡(0.008—0.01 m/a)、吕宋岛东北部近海(0.006—0.01 m/a); 仅部分小范围零星海域的SWH表现出显著性递减趋势, 详见图3d。

对比不难发现不同海域SWH的变化趋势由不同季节占主导。

4 结论

本文利用ERA-40海表10 m风场驱动WW3海浪模式, 模拟得到南海-北印度洋1957年9月—2002年8月的海浪资料, 采用一元线性回归方法, 分析了该海域SWH的长期趋势, 主要计算了各个区域的逐年变化趋势, 以及各个季节的变化趋势, 结果表明:

(1) 1958—2001年期间, 该海域的SWH有线性递增趋势, 递增率为0.0017 m/a, 且变化趋势表现出很大的区域性差异: 仅部分小范围海域呈显著性递减趋势, 其余大部分海域的SWH呈显著性递增, 其中递增趋势较强的海域集中分布于吕宋岛东北部近海(0.003—0.005 m/a)、吕宋海峡(0.002—0.004 m/a)、南海大风区(0.003—0.004 m/a)、斯里兰卡至苏门答腊岛一带的大范围海域(0.003—0.006 m/a)、索马里以东的一椭圆形海域(0.002—0.005 m/a);

(2) 近44 a期间, 南海-北印度洋海域SWH的变化趋势存在较大的季节性差异, 不同海域SWH的变化趋势由不同季节主导。各个季节呈显著性递减的区域范围都较小, 仅夏季的范围略大于其余季节, 递减的强度也稍强于其余季节。低纬度的递

增趋势主要体现在春季和冬季, 尤其冬季几乎整个南海-北印度洋的SWH均呈显著性递增趋势; 索马里以东一近似圆形海域的递增趋势主要体现在夏季。

参考文献:

- [1] 高占胜. 台风“菲特”期间T639预报风场在东中国海的有效性检验[J]. 海洋学研究, 2015, 33(1): 9-15.
- [2] 高占胜. Grads在中国近海大浪频率统计中的运用[J]. 海洋科学前沿, 2014, 1: 50-54.
- [3] 许富祥. 海浪预报知识讲座. 海洋预报, 2001, 18(1): 82-84.
- [4] 郑崇伟, 潘静, 黄刚. 利用WW3模式实现中国海击水概率数值预报[J]. 北京航空航天大学学报, 2014, 40(3): 314-320.
- [5] 郑崇伟, 潘静, 孙威, 等. 经略21世纪海上丝路之海洋环境特征系列研究[J]. 海洋开发与管理, 2015, 32(7): 4-9.
- [6] 郑崇伟, 李训强, 高占胜, 等. 经略21世纪海上丝路之海洋环境特征: 风候统计分析[J]. 海洋开发与管理, 2015, 32(8): 4-11.
- [7] 郑崇伟, 高占胜, 张雨, 等. 经略21世纪海上丝路之海洋环境特征: 极值风速和极值波高[J]. 海洋开发与管理, 2015, 32(11): 4-11.
- [8] Gulev S K, Grigorjeva V. Variability of the Winter Wind Waves and Swell in the North Atlantic and North Pacific as Revealed by the Voluntary Observing Ship Data[J]. Journal of Climate, 2006, 19(21): 5667-5685.
- [9] Dodet G, Bertin X, Taborda R. Wave Climate Variability in the North-East Atlantic Ocean over the Last Six Decades[J]. Ocean Modelling, 2010, 31(3-4): 120-131.
- [10] Semedo A, Sušelj K, Rutgersson A, et al. A Global View on the Wind Sea and Swell Climate and Variability from ERA-40[J]. Journal of Climate, 2011, 24(5): 1461-1479.
- [11] 郑崇伟, 李训强. 基于WAVEWATCH-III模式的近22年中国海浪能资源评估[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2011, 41(11): 5-12.
- [12] Zheng C W, Zhuang H, Li X, et al. Wind Energy and Wave Energy Resources Assessment in the East China Sea and South China Sea [J]. Science China Technological Sciences, 2012, 55(1): 163-173.
- [13] 郑崇伟, 付敏, 芮震峰, 等. 经略21世纪海上丝路之海洋环境特征: 波候统计分析[J]. 海洋开发与管理, 2015, 32(10): 1-7.
- [14] 梅勇, 宋帅, 周林. 北印度洋—南海海域海浪场、风场的年际变化特征分析[J]. 海洋预报, 2010, 27(5): 27-33.
- [15] 郑崇伟, 李崇银. 中国南海岛礁建设: 重点岛礁的风候、波候特征分析[J]. 中国海洋大学学报: 自然科学版, 2015, 45(9): 1-6.
- [16] 郑崇伟, 李崇银. 中国南海岛礁建设: 风力发电、海浪发电[J]. 中国海洋大学学报: 自然科学版, 2015, 45(9): 7-14.
- [17] 郑崇伟, 陈璇, 李崇银. 朝鲜半岛周边海域波候观测分析[J]. 中国海洋大学学报: 自然科学版, 2015, 45(9): 21-27.
- [18] 郭随平, 庄卉, 郑崇伟, 等. 南海海浪场与厄尔尼诺的相关性分析[J]. 海洋预报, 2012, 29(6): 37-43.

Long-term trend of SWH from year 1958 to 2001 in the South China Sea and the North Indian Ocean

GAO Zhan-sheng¹, ZHENG Chong-wei^{1,2}, LI Xun-qiang², LIU Wen-peng¹

(1. People's Liberation Army Dalian Naval Academy, Dalian 116018 China;

2. College of Meteorology and Oceanography, People's Liberation Army University of Science and Technology, Nanjing 211101 China)

Abstract: In this study, the wave in the South China Sea and North Indian Ocean from was simulated from December 1957 to August 2002 by using WAVEWATCH-III (WW3) wave model with ERA-40 wind data as the driving field. The long-term trend of SWH was analyzed based on the linear regression method to provide references for studying the global climate change, wave energy resource development and disaster prevention and reduction. Results show that: (1) During 1958 to 2001, the averaged SWH in the study area exhibits a significant increasing trend, with a rate of 0.0017m/a. The change trend of SWH also has obvious regional difference, increasing in most areas, while decreasing in a small-scale area. (2) The variation trend of SWH has a significant seasonal difference. The scale of waters with decreasing trend of SWH is small in each season. The increasing trend of SWH in lower latitudes mainly reflected in the spring and winter, especially in the winter almost the entire South China Sea-North Indian Ocean SWH showed a statistically significant increasing trend.

Key words: WAVEWATCH-III wave model; linear trend; regional difference; seasonal difference