

夏瑞彬, 路超越, 梁楚进, 等. 基于 WW3 的南海北部有效波高时空变化及其极值重现期估算方法分析[J]. 海洋学报, 2023, 45(2): 13–26, doi:10.12284/hyxb2023045

Xia Ruibin, Lu Chaoyue, Liang Chujin, et al. Analysis of the spatio-temporal variations of significant wave height in the northern South China Sea and the return period estimation methods of its extreme based on WW3[J]. Haiyang Xuebao, 2023, 45(2): 13–26, doi:10.12284/hyxb2023045

# 基于 WW3 的南海北部有效波高时空变化 及其极值重现期估算方法分析

夏瑞彬<sup>1</sup>, 路超越<sup>1</sup>, 梁楚进<sup>1\*</sup>, 王志勇<sup>2</sup>

(1. 南京信息工程大学海洋科学学院, 江苏南京 210044; 2. 自然资源部北海预报减灾中心, 山东青岛 266100)

**摘要:** 本文基于第 3 代海浪模式 WAVEWATCH III (WW3) 模拟的 1996–2015 年海浪后报数据, 分析了南海北部有效波高及其极值的时空变化特征, 并采用 Pearson-III 和 Gumbel 两种极值分布方法对该区极值波高重现期进行了估算。结果表明, 南海北部有效波高的季节变化和空间分布与季风风场基本一致, 呈现秋冬高春夏低, 并自吕宋海峡西侧向西南降低的特征, 与 ERA5 再分析数据结果高度相似。有效波高极值 (简称极值波高) 的时空分布特征受时间分辨率强烈影响, 采用极值数据的分辨率越高 (如逐小时), 所展现的台风型波浪特征越显著。扣除季节变化信号后的有效波高和年极值波高均体现出较强的线性增高趋势, 近 20 年升高的比例分别为 7.7% 和 31.6%, 值得警惕和关注。该区多年一遇极值波高存在若干个大值区, 且与台风的路径、强度有直接联系, 表明台风是引发该区域极端大浪的最主要机制。对比 Pearson-III 和 Gumbel 极值分布估算结果发现: 若极值波高较低, 频率随极值波高升高缓慢降低, 此时两种极值分布的估算都比较准确, 差异极小, 可忽略不计; 但当研究时间范围内, 某年极值波高远超其他年份时, Pearson-III 极值分布估算结果明显高于 Gumbel 极值分布估算结果, 且更接近实际极值波高, 即 Pearson-III 极值分布在此情况下表现更好。本研究表明对于特定海区, 在出现超强台风引发极值波高远超出其他年份时, 不同计算方法对极值波高的估算差异较大, 会显著影响重现期的评估。此外, 南海北部年极值波高的强烈增高趋势, 也可能给计算未来极值波高重现期和海上工程防护带来不可忽视的影响。

**关键词:** 南海北部; 有效波高; 极值波高; 重现期; Pearson-III 极值分布; Gumbel 极值分布

中图分类号: P731.22

文献标志码: A

文章编号: 0253-4193(2023)02-0013-14

## 1 引言

南海是全球最大的边缘海之一, 自然海域面积约为 350 万 km<sup>2</sup>, 平均深度约为 1 200 m, 最深处超过 5 500 m。南海占据着重要的地理位置, 其向南经过海运要道马六甲海峡与印度洋相连, 是海上丝绸之路的重要一环。运往我国的大半石油原油也要通过马

六甲海峡进入南海运输<sup>[1]</sup>。南海东部经吕宋海峡等狭窄水道与广阔的太平洋相邻, 吕宋海峡由于其独特的气候特点, 较大风浪和较深海槽的配置, 极度适合潜艇的进攻模式, 具有很高的军事和政治地位<sup>[2]</sup>。此外, 目前南海有多个油气田区正在或有待开发, 如南北康暗沙、万安滩、礼乐滩等, 油气储备量巨大, 其中石油资源储量约有 230×10<sup>8</sup>~300×10<sup>8</sup> t, 天然气储量在 8×

收稿日期: 2022-09-02; 修订日期: 2022-10-23。

基金项目: 自然资源部海洋环境信息保障技术重点实验室开放基金。

作者简介: 夏瑞彬(1987—), 男, 山东省威海市人, 主要从事物理海洋学、海气相互作用研究。E-mail: xiarb@nuist.edu.cn

\* 通信作者: 梁楚进(1966—), 男, 研究员, 主要从事大洋环流与海气相互作用方面的研究。E-mail: cjliang@nuist.edu.cn

$10^{12} \sim 10 \times 10^{12} \text{ m}^3$  之间<sup>[3]</sup>。近些年来已经陆续勘测发现诸多油气田,如珠江口盆地,水深约为 1 500 m,勘探预测可采储量  $1\,000 \times 10^8 \sim 1\,500 \times 10^8 \text{ m}^3$  的天然气。2010 年 4 月我国通过了首个超百米深级的海上工程——文昌油田开发工程<sup>[4]</sup>。预计至 2035 年,我国大陆和海洋浅层石油原油开采可达  $1.7 \times 10^8 \sim 1.9 \times 10^8 \text{ t}$ ,通过开发海上油气资源,可增加 6%~7% 的油气产量,持续为我国的石油开采发力,推动国家能源阶梯式发展<sup>[5]</sup>。因此,南海不仅是海上重要通道,也在我国的军事、国防、能源体系中占据着很高的地位。而作为航运、油气资源开采等工程建设的重要保障,海上大型设备受波浪侵蚀和撞击的预防和保护是重要的研究方向。其中,作为海浪的关键要素,有效波高及其对应的多年一遇极值波高是海洋航运和工程中的关键指标,研究其特征机制并准确估算极其必要。

南海地处亚热带和热带区域,属于亚洲季风区,具有典型的季风气候特征,冬季风(东北季风)最强,夏季风(西南季风)稍弱,春秋过渡季节持续时间短,平均风速也较小。前人研究采用各种观测、再分析或者模拟资料,均指出南海海浪的季节性分布和变化主要取决于海区季风风场。如齐义泉等<sup>[6]</sup>、Chu 等<sup>[7]</sup>、周良明等<sup>[8]</sup>分别利用 WAVEWATCH III(WW3)模式对南海的海浪要素进行了模拟,研究包括有效波高和浪向的季节变化、极值波高的统计分析等。裘沙怡等<sup>[9]</sup>对长时间序列卫星观测数据采用 EOF 分解模态分析的方法指出了南海波浪场与风场变化有很好的相关性。宗芳伊<sup>[10]</sup>、韩树宗等<sup>[11]</sup>利用 Weather Research and Forecasting Model(WRF)、ERA 等风场数据和第 3 代海浪模式 Simulating Waves Nearshore(SWAN),同样指出南海波浪的显著季节特征。多数研究表明,由于受冬季季风的影响,南海有效波高在冬季达到了最大值,最小值则出现在季风转换的春季,有效波高分布呈现东北-西南走向,多年平均有效波高最大值发生在南海的中部海域。

本文关注的南海北部是世界受台风影响最强的海区之一,台风对南海波浪的影响显著。来自西北太平洋的台风和局地“土台风”的频繁出现,是激发南海北部极端大浪的最关键要素,因此混合风场对于提高南海北部波浪要素的准确性至关重要。Ou 等<sup>[12]</sup>基于 SWAN 模式对台湾东、西部沿海地区的台风浪进行数值模拟,评估 SWAN 模式在沿海工程实践的适用性。徐尧<sup>[13]</sup>利用 WW3 研究了台风经过对浮标附近的台风特征影响。Kim 和 Lee<sup>[14]</sup>将 SWAN 和 WW3 在相同风场和非结构化网格条件下的台风浪计算结

果与实测数据进行对比,分析两种模式台风浪模拟精度。石洪源等<sup>[15]</sup>对不同台风合成风场方案在南海的适用性进行了分析,显示在南海地区采用 Jelesnianski 模型得出的风场和实际风场吻合度最好。林金波等<sup>[16]</sup>利用欧洲中期数值天气预报中心(ECMWF)背景风场及 Holland 理论风场构造混合风场驱动 SWAN 模式,对台风“天鸽”和“山竹”过境期间的南海台风波浪场进行计算,发现有效波高变化趋势及最大值结果与实测数据吻合良好,南海外海海面最大有效波高均达 10 m 以上,近岸台风浪有效波高分别在 9 m 和 8 m 以上。此外,各类研究<sup>[14-18]</sup>均表明了典型的台风浪场特征:北半球台风行进路线稍偏右前侧引起的波浪较高,且台风过境时极端大浪的频率更高。

综合季风、外海强迫(如黑潮入侵)、台风等要素,导致了南海北部风大、浪高的显著特征,对各类海上工程有着严重的影响,因此研究南海北部波浪要素特征以及极值波高的分布意义重大。多年来,国内外学者对于波浪多年一遇极值的估算方面已经有了许多研究。如侯瑞科<sup>[19]</sup>研究了 Gumbel 极值分布的参数估计方法。葛黎丽等<sup>[20]</sup>综合观测和数值模拟构建的同化数据集,采用 Weibull 极值统计模型推算了南海 4 个深水区的浪流多年一遇极值。江丽芳等<sup>[21]</sup>基于 WW3 和 SWAN 模式模拟的 1949-2005 年钦州湾区域的海洋波浪数据,通过 Pearson-III 方法研究了钦州湾多年一遇风浪极值,并对其耗散进行了研究,对于极值分布方法的计算过程也进行了详细的分析。王志旭和陈子燊<sup>[22]</sup>研究了 Weibull 极值分布的不同参数估计方法,并使用 Weibull 极值分布方法,利用涠洲站 34 年的实测波浪数据估算了该站点多年一遇波浪极值。宗芳伊<sup>[10]</sup>利用 Pearson-III 型分布曲线对南海海域的有效波高和平均周期的重现期极值进行了估计,结果显示 Pearson-III 型分布曲线对有效波高和平均周期的拟合效果较好。但也指出其研究只是针对袭击南海邻近海域的一次台风浪过程的数值模拟,其模拟结果是否具有典型意义,还需要更多的实际工程进行验证和说明。Liu 等<sup>[23]</sup>利用 Pearson-III-Pareto 分布模型对杭州湾 32 年的测量数据进行极值拟合,然后与多种分布函数进行比较,最终认为 Pearson-III-Pareto 联合分布能更合理地反映杭州湾的风暴潮极值。

总体来说,多年一遇极值波高的估算方法目前大致分为两类:一类类似于经验型,如经验频率函数分析和 Pearson-III 极值分布函数,另一类则依靠极值分布理论估算,如 Gumbel 和 Weibull 极值分布函数<sup>[24]</sup>。

其中, Pearson-III 型概率分布被认为是比较优秀的概率分布函数。我国《海港水文规范》<sup>[25]</sup>中写到:“一般采用 Pearson-III 曲线计算多年一遇极值”。而 Gumbel 和 Weibull 极值分布函数则是用纯粹的极值理论来估算多年一遇频率曲线。3 种分布方法主要区别在于: Pearson-III 并不是严格的按照分布曲线的概念计算出的, 而是在分布概念的基础上, 以实际数据作为依靠, 引入一些额外的参数, 通过经验频率的调整, 完成最终计算结果; 而 Gumbel 和 Weibull 极值分布则是严格按照极值分布的概念, 计算出的不同重现期的极值数据, 因此三者理论上存在本质差异。在对不同的极值估算方法分析时, 既有使用各海洋站实测数据的, 也有使用目前国际先进的、被普遍应用的波浪数值模式后报结果, 时间尺度方面从 15 年至 55 年的数据皆有存在。前人在极值估算分布方法的比较中的研究, 为后续深入研究应用提供了宝贵的经验。对于 Gumbel、Weibull 极值分布和 Pearson-III 极值分布来说, 三者都是同样优秀的极值计算方式, 各有其优势之处。

总之, 无论是对南海油气勘探开采工程, 抑或是国防军事需求, 南海区域波浪多年一遇波高的估算都不可或缺。其中, 南海北部距离我国沿岸近, 资源多, 且位于吕宋海峡和台湾海峡附近, 是季风和台风影响南海的关键区域, 然而目前已有研究在南海北部尚不够深入。本文将基于国际领先的 WW3 海浪模式数据, 与观测季风、台风、波浪场对比, 研究有效波高均值和极值的分布特征、季节和年际变化, 以及与不同类型风场关系, 评估数据的可信度。其次, 给出南海北部各区域波高的多年一遇重现期和极值分布。考虑到 Gumbel 与 Weibull 极值分布理论相似, 均由极值分布理论得出, 本文将只采用 Gumbel 和 Pearson-III 型极值分布两种方法。对比两种极值估算方法的差异性, 分析其各自的适用情况是本文的另一关键科学问题。本文研究结果将有助于深入开展对南海北部各类海洋工程对极端波浪的防护研究, 也为后续使用 Gumbel 和 Pearson-III 等极值分布方法提供参考。

## 2 数据方法

### 2.1 数据

本文的波高数据来源于 WAVEWATCH III(WW3) 的数值模拟结果, WW3 是基于 WAM 模式框架发展的第 3 代波浪模型, 是目前国际先进、通用的大尺度波浪的研究工具之一<sup>[26]</sup>。本文使用 WW3 后报数据对南海北部多年一遇极值波浪进行估算, 选用数据的时

间范围为 1996–2015 年(20 年), 时间分辨率为逐小时。空间范围为南海北部海区(13°~25°N, 105°~125°E), 空间分辨率为(1/8)°。

WW3 所采用的驱动风场来自 WRF 数值模式所得的(1/8)°网格的逐时后报风场。近年来, 全球气象再分析场的质量和分辨率已经有了显著提高。在开阔的外海和一般气象条件下, 使用散射计融合风场和全球再分析风场已经可以满足近海工程环境所需要的分辨率和质量。但是, 对于台风等极端海况事件, 已有的再分析产品不能满足需要。已有研究表明, 再分析风场或散射计融合风场在台风情形下同实际风场的强度和范围均有明显差别。因此本研究中的风场以欧洲中期天气预报中心(European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, ECMWF)的逐时风场为基础, 嵌套台风、寒潮等极端海洋动力过程构建的台风动力统计混合风场, 来改进对台风事件的模拟。前人已经利用这类新的混合风场驱动模式, 如林金波等<sup>[16]</sup>利用欧洲中期数值天气预报中心(ECMWF)背景风场及 Holland 理论风场构造混合风场, 以混合风场作为 SWAN(Simulating Waves Nearshore)模式的输入风场, 建立南海台风浪模型, 结果表明该混合风场模型模拟的台风“天鸽”和“山竹”过境期间的南海有效波高变化趋势及最大值结果与实测数据吻合良好。作者在设定模式驱动风场时也进行过台风个例的评估, 结果表明融合台风的混合风场对有效波高, 特别是 6 级以上狂浪区模拟更为合理(图未展示)。

为了对模式结果进行验证, 本文综合前人研究结论, 选用来自 ECMWF 的第 5 代全球气候再分析数据集(ECMWF Reanalysis v5, ERA5)的月平均风场和波浪场变量<sup>[27]</sup>, 空间分辨率分别为 0.25°和 0.5°, 为了对比准确, 和 WW3 模式一样选择 1996–2015 年时间范围进行平均和极值计算。为了更直观地反映南海北部波浪场和台风的关系, 本文选用了中国近海台风路径集合数据集(1945–2021)<sup>[28]</sup>。该数据集包含每个台风的真实路径信息、台风强度、气压、中心风速、移动速度、移动方向, 时间分辨率为 6 h, 对此感谢中国科学院海洋科学数据中心(<http://msdc.qdio.ac.cn>)提供的数据服务。

### 2.2 基本计算方法

#### 2.2.1 数据的基本对比标准

在对比 WW3 模式结果与 ERA5 有效波高时, 除了直接对比月平均结果, 还采用了平均偏差(Bias)、均方根误差(RMSE)和相关系数( $R$ )作为产品评价指标。假定  $P$  为 WW3 后报模拟值,  $B$  为 ERA5 再分析

资料值, 则各指标公式如下:

$$\text{Bias} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (P_i - B_i), \quad (1)$$

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (P_i - B_i)^2}, \quad (2)$$

$$R = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N \left( \frac{P_i - \mu_P}{\sigma_P} \right) \left( \frac{B_i - \mu_B}{\sigma_B} \right), \quad (3)$$

式中,  $i=1, 2, \dots, N$ ,  $N$  为样本数;  $\mu_P$  和  $\sigma_P$  分别是后报数据的均值和标准差;  $\mu_B$  和  $\sigma_B$  则分别是再分析数据的均值和标准差。

### 2.2.2 Gumbel 极值分布

Gumbel 首次将 Fisher-Tippett I 型极值分布应用于水文研究中, 故称之为 Gumbel 分布, 是经常用来求“多年一遇”水文、海洋极值数据的一类分布<sup>[29]</sup>。Gumbel 极值分布的密度函数为

$$f(x) = \begin{cases} a \times e^{-\alpha(x-\beta)} \times e^{-e^{-\alpha(x-\beta)}} & x \geq 0, \\ 0 & x < 0, \end{cases} \quad (4)$$

其分布函数为

$$F(x) = e^{-e^{-\alpha(x-\beta)}}, \quad (5)$$

式中,  $\alpha$  和  $\beta$  为参数, 其值的计算方法如下:

$$\alpha = 1.2826 / \delta_x, \quad (6)$$

$$\beta = \bar{x} - 0.5772 / \alpha, \quad (7)$$

式中,  $\delta_x$ 、 $\bar{x}$  分别为所用数据的标准差和数学期望, 计算出  $\delta_x$  与  $\bar{x}$  后即可带入公式, 求出  $\alpha$  和  $\beta$ 。将  $\alpha$ 、 $\beta$  带入上述分布函数, 经过公式整合, 得出多年一遇期望值  $x_p$  的计算公式<sup>[30]</sup>:

$$x_p = \bar{x}(1 + \phi C_v), \quad (8)$$

式中参数  $\phi$  和  $C_v$  的计算公式如下:

$$\phi = -0.7797 \times \{0.5772 + \ln[-\ln(1-p)]\}, \quad (9)$$

$$C_v = 1.2826 / (\alpha\beta + 0.5772), \quad (10)$$

式中,  $C_v$  为 Gumbel 偏差系数;  $p$  为设计频率, 其倒数即为重现期  $T$ ;  $\phi$  为 Gumbel 离差系数, 为设计频率  $p$  的函数。通过以上计算公式, 便可将研究数据按顺序排列, 依次求得其数学期望、标准差, 并带入式(5)至式(9), 求得研究对象不同重现期对应的极值。

### 2.2.3 Pearson-III 极值分布

英国学者 Pearson 在 19 世纪末对许多随机变量的频率分布总结出一组曲线, 称为 Pearson 分布族, 共包含 13 条曲线, 其中的第 3 条曲线被发现在水文分析中效果显著, 被称为 Pearson-III 型分布, 被后人多用于水文极值分析研究中<sup>[31]</sup>。其分布概率密度函数为

$$F(x) = \frac{\beta^\alpha}{\Gamma(\alpha)} (x-x_0)^{\alpha-1} e^{-\beta(x-x_0)} \quad x_0 \leq x < \infty, \quad (11)$$

式中  $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $x_0$  分别为 Pearson-III 分布的形状参数、尺度参数和位置参数;  $\Gamma(\alpha)$  为关于  $\alpha$  的伽马函数, 表达式为

$$\Gamma(\alpha) = \int_0^\infty x^{\alpha-1} e^{-x} dx. \quad (12)$$

依据统计学原理, 可用  $\bar{x}$ 、 $C_v$ 、偏态系数  $C_s$  求得  $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $x_0$ , 具体公式如下:

$$\alpha = 4/C_s^2, \quad (13)$$

$$\beta = 2/(\bar{x}C_vC_s), \quad (14)$$

$$x_0 = \bar{x}(1 - 2C_v/C_s). \quad (15)$$

对式(10)进行积分可得研究变量  $x$  与其对应出现概率  $P$  的对应关系:

$$P(x > x_p) = \frac{\beta^\alpha}{\Gamma(\alpha)} \int_{x_p}^\infty (x-x_0)^{\alpha-1} e^{-\beta(x-x_0)} dx, \quad (16)$$

通过公式的整理变换, 可得  $x_p$  与对应频率的关系如下:

$$x_p = (1 + \Phi_p \cdot C_v) \cdot \bar{x}, \quad (17)$$

式中,  $\Phi_p$  为离均系数, 在 MATLAB 中计算公式为<sup>[22]</sup>

$$\Phi_p = \frac{C_s}{2} \text{gaminv} \left( 1 - p, \frac{4}{C_s^2}, 1 \right) - \frac{2}{C_s}. \quad (18)$$

式中, `gaminv` 在 MATLAB 语言中代表伽玛分布的累加分布函数逆函数。如式(17)所示, 求研究对象  $x$  出现的对应频率时, 并不需要求得  $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $x_0$ , 只需要求得  $\bar{x}$ 、 $C_v$ 、 $C_s$  即可。通过以上公式便可计算研究对象  $x$  在不同重现期所出现的极值。需要注意的是, 其中  $C_v$  与  $C_s$  是用有限的数据量进行计算的, 在实际计算操作中, 需要引入适线法检验和调整, 通过实际数据的经验频率与计算值相比, 调整  $C_v$  与  $C_s$ , 使 Pearson-III 分布法计算出的曲线与经验频率点重合度更高。

## 3 结果分析

### 3.1 南海北部有效波高的季节变化特征及 WW3 数据评估

海洋中波浪的形成因素有很多, 比如: 海面风驱动、各星球引潮力驱动、附近火山爆发、大气异常变化带来扰动等等。但其中最主要的是风的驱动, 所以波浪能量主要由风输入<sup>[32]</sup>。南海北部波浪的有效波高主要受到季风和台风风场的双重影响, 其中平均有效波高的季节变化主要受控于季风控制, 这点已有众多研究佐证。无论是 ERA5 月平均的风场和有效波高(图 1a 至图 1d), 还是 WW3 驱动风场和有效波高(图 1e 至图 1h), 在季节尺度上都展现了非常好的一致性。对比图 1 还可以发现, 在月平均风场非常接近的两种情况下, WW3 模拟的有效波高季节平均结果

与 ERA5 结果非常接近, 其季节性变化特征具体如下: (1) 冬季(12月至翌年2月)受到强劲的信风和冬季风影响, 整个海区出现一致的东北风, 风速大, 风向稳定, 平均有效波高达到一年中最高(超过 2.5 m)。 (2) 春季风向迅速转换变得复杂, 南海北部平均风向为偏东风, 且风速大幅减小, 对应的有效波高迅速降低, 只在吕宋海峡西侧有 1.5 m 以上大浪。 (3) 夏季主要受西南季风影响, 平均风速较春季有提升, 但是有

效波高却继续降低至全年最小。 (4) 秋季主要表现为冬季风爆发后的东北风场, 风速和有效波高都逐渐升高。有效波高空间分布在 4 个季节具有一致性, 均为吕宋海峡以西出现极大值, 呈现出大值区域向西南方向延伸并逐渐降低, 近岸浅海区相对较低, 北部湾最低分布特征。 WW3 模拟结果很好地反映了上述时空特征, 与 ERA5 结果契合, 也与前人通过多种观测、模式数据的研究结果一致<sup>[9-11]</sup>。

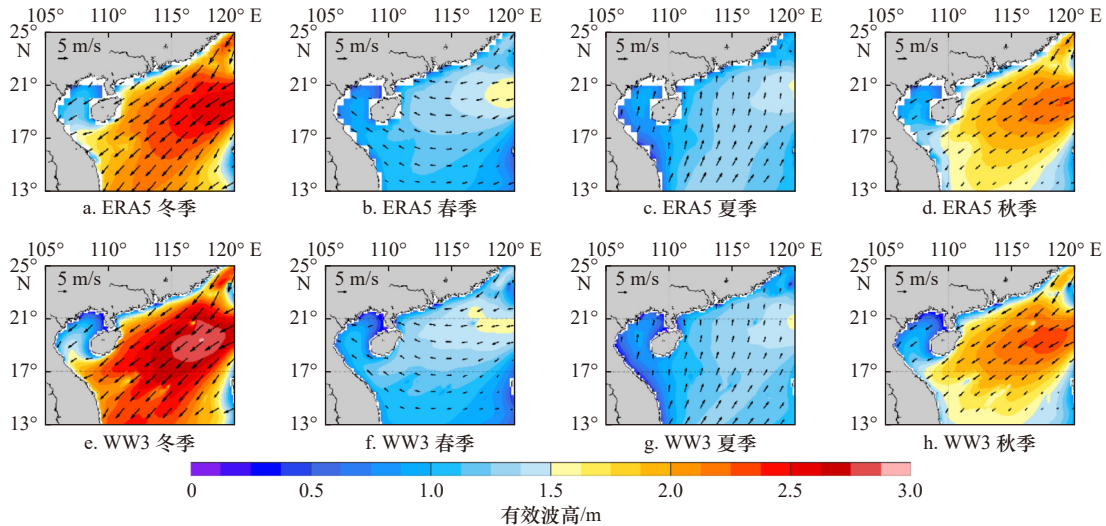


图1 南海北部有效波高和海面风的不同季节分布

Fig. 1 The seasonal distributions of the significant wave height and sea surface wind in the northern South China Sea

为了检验 WW3 后报数据, 我们采用了基本的误差统计量来分析, 包括平均偏差 (Bias)、均方根误差 (RMSE)、相关系数 ( $R$ ) 和散点图 (图 2)。计算方法详见第 2.2.1 节。图 2a 表明两组数据空间平均的时间序列匹配很好, 散点图 (图 2b) 也表明 WW3 模拟结果与 ERA5 的有效波高一一致性较好, 特别是在低值区。相关系数高达 0.991 4, 平均偏差为 0.042 3 m, 均方根偏差为 0.109 7 m。值得注意的是, 随着平均有效波高的升高, 两组数据的偏差是在逐步增大的, 当有效波高大于 2.5 m 时, WW3 结果高于 ERA5 结果约 0.1~0.2 m。这也充分说明引入台风的混合风场后, 对极端有效波高模拟的改善在平均值中也能得到一定体现。

值得注意的是, 夏季平均有效波高最低这一特征与前人结论不一致, 对夏季西南季风的响应似乎缺乏展现。为此我们专门分析了逐月平均风速和有效波高的时间序列 (图 3)。结合各月平均的空间分布场 (图未展示), 不难发现其实月平均海面风速大小 (图 3 蓝色线) 全年出现“双峰双谷”特征: 5 月第 1 次达到最小值, 6 月开始受西南季风和台风影响有小的回升, 之后缓慢下降至 9 月第 2 次达到最小值, 然后冬

季风爆发风速开始迅速增强, 12 月至翌年 1 月达到最高。有效波高季节变化趋势基本和风场对应, 但只有“单峰单谷”, 即在春季 (5 月) 达到最低, 夏季开始缓慢回升。换言之, 有效波高的季节变化与风场对应关系在春夏交替之际相对秋冬季节较差。此外, 图 3 的实线和虚线对比, 再次说明 WW3 平均风速、有效波高与 ERA5 平均风速、有效波高极为一致, 表明模式模拟结果是可靠的。

上述分析表明, 季节尺度平均的有效波高无法体现热带气旋对波浪场的影响, 因此这种时间尺度的分析对于极值波高是无效的, 更高分辨率的极值波高分析对海洋航运和工程十分必要。为了确认该海区海浪极值波高的关键影响要素, 并保证本文所采用的数据具备较高的正确性和可信度, 我们采用模式输出的逐小时有效波高来计算极值波高, 并和观测台风数据在南海北部的路径、强度进行比较分析。

### 3.2 南海北部有效波高极值的空间分布

为计算南海北部有效波高的空间分布以及分析有效波高极值的控制要素, 我们采用不同时间分辨率有效波高计算的 1996–2015 年间南海北部极值波

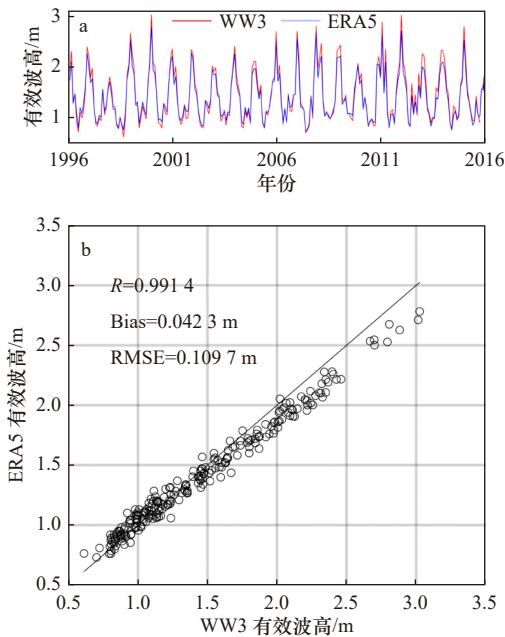


图2 WW3和ERA5月平均数据南海北部(13°~25°N, 105°~120°E)有效波高的对比

Fig. 2 The comparison of the significant wave height in the northern South China Sea (13°~25°N, 105°~120°E) in WW3 simulation and ERA5 monthly dataset

a. 时间序列; b. 散点图  
a. Time series; b. scatter diagram

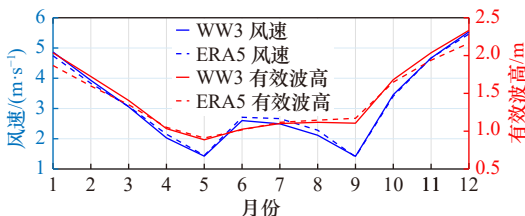


图3 南海北部(13°~25°N, 105°~120°E)海面风速和有效波高的多年月平均时间序列

Fig. 3 The seasonal variations of the significant wave height and sea surface wind in the northern South China Sea (13°~25°N, 105°~120°E)

高的空间分布(图4),分别计算了月平均有效波高统计各年极大值,然后做20年平均;月平均有效波高直接统计20年极大值;逐小时有效波高统计各年极大值,然后做20年平均;逐小时有效波高直接统计20年极大值。由图4我们可知以下两个结论:(1)图4a至图4d,4种算法所得极值波高依次增大,直接采用逐小时计算的极值显著大于月输出结果计算的极值,且计算多年一遇极值不应求各年份极值的平均,应直接采用逐小时结果的最大值。故本文以下均采用图4d对应的算法。

进一步,从图4中还能发现以下规律:利用月平

均计算极值(图4a,图4b),展示的空间分布和气候态平均有效波高以及季风风场的分布一致,表明此时季风型特征远大于台风型特征;而各年逐小时极值做20年平均空间分布(图4c)则属于过渡型,季风型特征和台风型特征同时可见;逐小时有效波高直接统计20年极大值(图4d)最大,对工程最合理,而其展现的条带状大值区和该区的极端强台风是一一对应的,其台风型特征远大于季风型特征。综上,不同时间尺度有效波高计算的极值,反映了两种关键风场在不同尺度上的作用,且台风引发的极值波高更大,对多年一遇波高计算更有效。即背景风场和所得波浪要素的时间分辨率越高,分析有效波高极值越准确。

### 3.3 南海北部有效波高及其极值的长期变化

图5给出了南海北部有效波高及对应极值的长期变化。采用月平均或日平均等分辨率时(如图5a,蓝色实线),有效波高的季节变化信号是最强信号,充分体现了季节风场的强烈影响。然而取年平均扣除季节变化后(图5b,蓝色实线),有效波高年际变化呈现出显著的上升趋势(图5b,蓝色虚线),气候态平均有效波高为1.3 m,20年增加约0.1 m(7.7%),增长速率约为0.5 cm/a,这一变化前人也有类似的研究结果。如王焕<sup>[32]</sup>采用ERA5逐小时数据集分析,指出在1979~2020年间,整个南海区域波浪混合场有明显的增长趋势,其增长速率约为0.18 cm/a。涌浪场变化趋势是关键原因,风浪场变化趋势不明显。与之相比,本文结果表明在南海北部近20年间,混合浪场有效波高的增长远大于全南海区域,且增速显著加快,这是自然变率还是对全球变暖的响应?特别地,我们发现,对应的极值波高(图5b,红色实线)也出现了较强的增长趋势(图5b,红色虚线),20年增加约3.6 m(31.6%),增长速率约为18 cm/a。这一变化是非常巨大的!势必影响多年一遇重现期的计算,值得警惕和进一步关注,对未来海上工程设计可能提出更高的要求。

### 3.4 南海北部有效波高极值与台风风场的对应性分析

通过分析1996~2015年间极值波高,本文选取了其中具备明显极值波高特征的4年与中国近海台风数据<sup>[28]</sup>进行分析(图6),依据强台风路径和对应极值波高的分布进行了简单的分类(表1)。

第一类是南北走向强台风引发的南北向极值波高区域,本文称之为南北型,代表年份是2006年和2010年。其中如图6a所示,2006年的极大值区域主要来自强台风“珍珠”的影响,其路径走向很有意思,在穿越菲律宾中部陆地进入南海后迅速增加为强台风,并

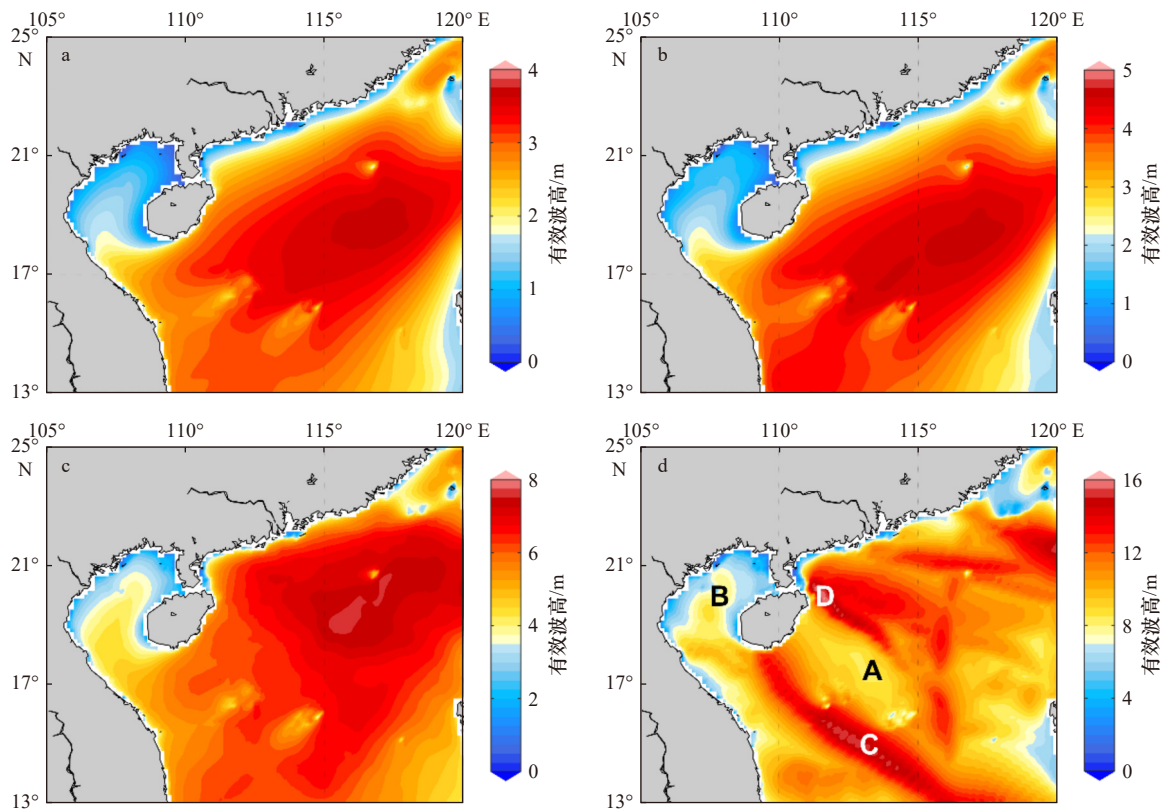


图 4 1996–2015 年 WW3 模拟结果南海北部有效波高不同极值算法比较

Fig. 4 The comparison of the significant wave height extreme values in different definitions over the northern South China Sea from 1996 to 2015 based on WW3 simulation

a. 月平均结果的年极值平均; b. 月平均结果的极大值; c. 逐小时结果的年极值平均; d. 逐小时结果的极大值  
a. Average by annual extreme of the monthly data; b. maximum value of the monthly data; c. average by annual extreme of the hourly data; d. maximum value of the hourly data

几乎向北偏折了 90°一路北上。在 14°~21°N 范围均保持在 13 级以上, 在台风东侧一路形成大浪区。注意到西南侧有一个大浪区是 0616 号强台风“象神”影响形成的, 该台风最大等级可达 16 级, 超过台风“珍珠”, 但是造成的风浪极值相对较低, 未能形成类似图 5c 中的南线极值型。这可能与该台风作用时间(区域)过短或模式模拟因素等有关, 需要进一步探讨。2010 年的极大值区域则主要来自 1013 号强台风“鲑鱼”的影响, 与 2006 年“珍珠”的影响一致。

第二类是强台风偏北, 引发的极值区也基本位于关注海区北部, 台湾海峡以南, 本文中称为北部型。1996 年与 2008 年(图 6b)类似, 但比 2008 年稍低, 主要在吕宋海峡至珠江口形成的一个东南-西北走向的带状区域内(18.5°~21.5°N, 113°~120°E), 出现了 10~13 m 的极值波高。这两个极值波高区都与当年两个强台风的路径和强度吻合。其中 1996 年(未展示)为编号 9615 的台风“莎莉”, 最高等级约为 16 级。该台风移动路径稳定, 发展迅速, 强度极大, 在 1996

年 9 月 9 日 11 时前后登陆我国大陆, 在珠江口至湛江一带带来最大约 12 级的大风, 造成了巨大的经济损失<sup>[33]</sup>。2008 年极值波高之所以更高, 主要原因是当年的超强台风更强; 而多个强台风出现是 2008 年极值波高范围扩大的主要原因(图 6b)。台风强度超 16 级的台风为编号 0814 的台风“黑格比”, 于 2008 年 9 月 23 日凌晨在南海北部造成大浪, 2008 年 9 月 24 日晨登录我国大陆。由于“黑格比”与 1996 年的台风“莎莉”许多特征相似, 因此有不少学者拿这两次台风做对比, 如邵佳爱等<sup>[34]</sup>指出近岸风暴潮与台风路径、强度和引潮力都有重要联系。综合可知, 两次台风路径相似, 波高分布也相似, 极值大小的不同取决于台风强度的差异。

第三类如图 6c 所示, 出现多条强台风路径, 对应极值波高大值区大致可分南、中、北 3 个带状区域, 大值范围几乎含盖整个南海北部, 本文称之为多区域混合型, 代表年份为 2001 年, 2005 年, 2012 年和 2013 年, 包含了第二类和下文所述的第四类台风路径。与

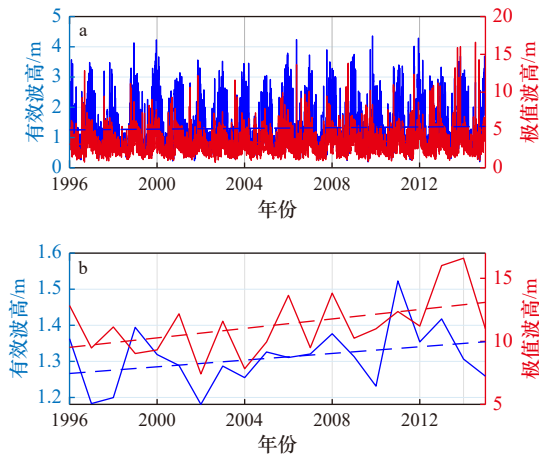


图5 WW3 中南海北部有效波高(蓝线)和极值波高(红线)的时间序列

Fig. 5 The long-time variations of the WW3 significant wave height (blue lines) and its extreme values (red lines) over the northern South China Sea

- a. 日平均和对应日极值; b. 年平均和对应年极值, 虚线为各曲线对应的线性趋势  
a. Daily average and its extremum; b. annual average and its extremum, the dashed line is linear trend of the corresponding curve

南部极值波高区对应的强台风是 1330 号台风“海燕”、1310 号台风“山竹”、1325 号台风“百合”; 与中部大值区对应的强台风有两个, 分别为 1311 号台风“尤特”、1329 号台风“罗莎”; 与北部大值区对应的是强度更高的超强台风——1319 号台风“天兔”。综合来看 3 个极值波高大值区域均与强台风路径、强度对应良好。

第四类则类似于第三类中的中部路径, 如图 6d 所示, 自吕宋海峡南端或菲律宾的台风进入南海, 向西北发展, 经琼州海峡附近达到最强, 能够显著影响北部湾, 最终登陆于两广沿海或海南岛。本文称之为中部型, 代表年份包括 2003 年, 2011 年和 2014 年。2014 年 1409 号超强台风“威马逊”和 1415 号强台风“海鸥”中心路径在 112°E 附近交叉, 导致琼州海峡东侧大范围的极强极值波高(超过 16 m)。

除上述 4 类代表年份外, 其余年份强台风基本没有出现, 极值波高较低(基本都小于 10 m)、大值区较小, 表 1 将其统计列为第五类低极值型, 对工程影响较小, 本文不再讨论。

经上述论证, 发现在有强台风经过的年份, 无论哪种类型, 或者说无论台风中心路径位置, 年波高大值均与台风中心路径和强度关系密切, 对应极好。这一方面进一步证明了极值波高与平均有效波高的不同, 显然受台风影响大于受季风影响, 多出现于夏

秋季节。另一方面, 也充分显示了本文所用 WW3 模拟结果对台风浪表现效果良好, 准确性较高, 进行多年一遇极值计算的可信度更高。

### 3.5 南海北部多年一遇极值波高的估算与分析

本文基于 1996–2015 年嵌套台风等动力过程的 WW3 后报数据, 运用 2.2 节介绍的 Gumbel 极值分布和 Pearson-III 极值分布推算出南海北部的多年一遇极值波高如图 7 所示。结果表明, 两种方法对 20 年一遇极值波高的估算(图 7a, 图 7b)在整体空间分布上十分接近。与模式数据直接求得的结果(图 4d)相比, 空间分布型非常一致, 但是极值普遍偏小, 且极值越高, 偏差越大。按照极值波高由低到高选择了典型区域代表点 A、B、C、D。可知 A、B 两个区域的极值波高较低, 两种算法估算值也与实际模拟结果差异不大。但 C、D 两个区域对应着大于 15 m 的极值波高, 而两种极值方法估算值都不足 14 m。说明两种极值算法都偏小。在推算更长时间重现期对应极值波高时, 两种算法结果差异会逐渐增大。考虑到水利工程或海上石油平台的设计使用年限一般在 50~150 年之间<sup>[35]</sup>, 并且以最大程度展示两种极值方法的差异, 本文在分析重现时期时稍微扩展上限至 300 年, 并采用 300 年重现期分布对比结果展示两种方法在较长时间后的差异性。在 300 年重现期时(图 7c, 图 7d), 两种方法的空间分布型仍然相似, 但极值差异已经十分显著。极值较低的海区(如 A、B 点), 两种算法差异变化不大。极值越大的海区, 两种算法差异越大(如 C、D 点), 且几乎所有区域 Pearson-III 结果均大于 Gumbel 结果。这初步表明对南海北部, 极值波高较低的海区, 两种方法估算都较为准确, 但对于极值波高特别高的海区, Pearson-III 算法推算的重现期极值波高可能更为适用。

为了进一步分析两种算法的准确性与适用性, 我们计算绘制了上述 4 点的多年一遇极值波高(图 8), 具体分析如下。

其中, A 点代表两个波高极大值区中间的低极值区域, B 点代表北部湾, A、B 两区空间特征较为一致, 对应的重现期曲线也类似(图 8a, 图 8b), 两种极值算法估算结果都和经验频率接近, 且随重现期增加, 两种方法差异变化不大。其中 A 点主要由于超强台风几乎都从其南北两侧经过, 形成了台风之间的“真空”低值区。在 300 年重现期下(图 7c, 图 7d) A 区的值仍不高, 两种算法极值分别为 11.13 m 和 11.61 m(表 2), 差异很小。而 B 点代表的北部湾则主要是由于三面陆地的地形阻挡作用, 减弱了强风影响, 极值

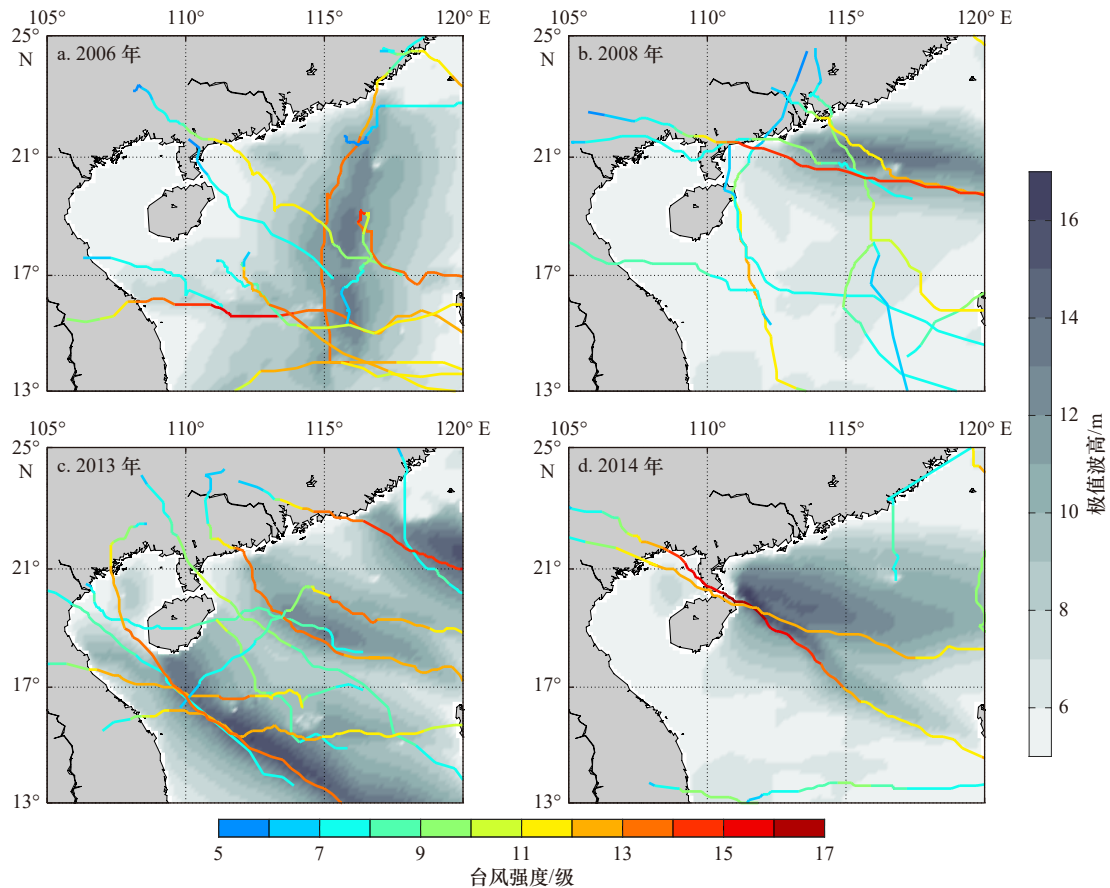


图6 南海北部典型年份的极值波高和台风路径

Fig. 6 The extreme wave height and typhoon path in typical years over the northern South China Sea

表1 南海北部年最强台风路径与对应极值波高的分类

Table 1 The classification of the yearly strongest typhoon path and corresponding extreme wave height over the northern South China Sea

分类	特征概述	典型年份
(1)南北型	如图6a所示,最强台风路径自南向北运动,对应极值波高大值区也是南北走向*	<b>2006, 2010</b>
(2)北部型	如图6b所示,最强台风出现于吕宋海峡北部至珠江口沿线,对应极值波高主要影响广东中东部沿岸,对北部湾影响较小	1996, <b>2008</b>
(3)多区域混合型	如图6c所示,一般于南海北部的北、中、南区域均出现超强台风,对应了3个极值波高的大值区域。	2001, 2005, 2012, <b>2013</b>
(4)中部型	如图6d所示,最强台风出现于吕宋海峡南部至雷州半岛沿线,对应极值波高主要影响雷州半岛海南省东侧,其次影响广东中东部沿岸,可能影响北部湾	2003, 2011, <b>2014</b>
(5)低极值型	全年台风均较弱,极值波高基本均低于10 m	1997–2000, 2002, 2004, 2007, 2009

注: 第3列中字体加粗的年份为图6中选用的代表年; \*2006年最强台风“象神”是东西走向,但对极值波高影响较小,所以仍计入第一类,详见正文。

波高最低,形成了南海北部最为“平静”的特征。在300年重现期下B区两种算法极值分别为9.65 m和11.52 m(表2),仍为最低。可以认为 Gumbel 极值分布和 Pearson-III 极值分布在 A、B 点的拟合效果均较为优秀。

C点代表相比B点地理位置更偏东南方向,此处的极值波高推算值高于A、B区域,呈现西北-东南走向的带状分布特征,20年一遇极值波高约为11 m,主

要源自3.4节中总结的南北型、多区域混合型中的南部强台风浪(图4a,图4c,表1)。D点则代表南海北部20年一遇极值波高最高、范围最大的区域,基本来自3.4节中总结的多区域混合型、中部型中的强台风浪(图4c,图4d,表1)。海域内20年一遇的极值波高约为12 m。如图8和表2所示,D区两种结果的推算差距在20年尚较小,但50年一遇的极值波高分别达到13.80 m和15.93 m,差异13.4%,随着重现期增长,

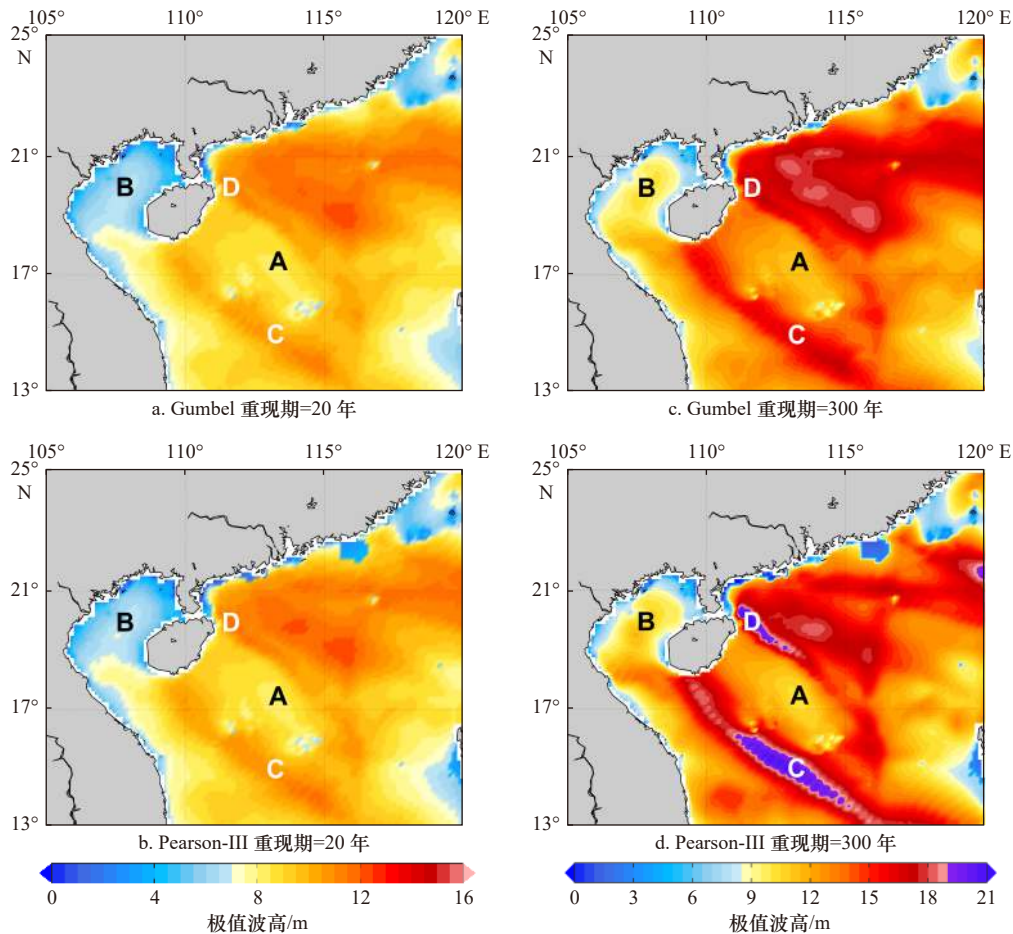


图 7 采用 Gumbel(a, c) 和 Pearson-III(b, d) 两种方法计算的南海北部不同重现期极值波高对比

Fig. 7 The extreme wave height in different return periods from Gumbel (a, c) and Pearson-III (b, d) methods over the northern South China Sea

白色字母 C, D 代表两个极值波高最大的海区, 黑色字母 A, B 代表两个极值波高较低的海区。为了方便对比, a 和 b 的色图取值范围与

图 3d 一致, 且 c 和 d 只在较 a 和 b 取值增大的范围内增加了新的紫色调, 在极值波高低于 16 m 时, 4 个分图的取色是完全一致的

The white letters C and D represent the two regions with the largest extreme wave height, while the black letters A and B represent the two regions with low extreme wave height. For the convenience of comparison, the color map of a and b is consistent with that of Figure 3d, and c and d only adds a new purple tone in the range of increasing value compared with a and b. When the extreme wave height is lower than 16 m, the color map of the four sub-graphs is completely consistent

这种差异不断扩大, 300 年一遇的极值波高推算差异约 23.5%, 且均为 Gumbel 算法较低。该区域的 12 级以上台风频发, 并出现多次 14 级以上的强台风。多年一遇极值波高受强台风频发的直接影响。总之, 这种受强台风影响的极值波高, 重现期越长, Gumbel 极值算法对极值的低估就越显著, 从工程安全考虑, 显然 Pearson-III 算法更适用。

值得注意的是, Gumbel 算法估算 300 年重现期的空间分布还存在一些异常的变化, 如图 7c 中 D 区东北侧的一个西北-东南向带状区域, 实际上是该算法最大极值出现位置。但在 Pearson-III 算法结果中, 该区极值很高, 但仍然低于 C、D 区。

C、D 区域中, 两种极值分布推算的多年一遇极

值波高为何会出现如此巨大的偏差? 分析波浪和台风特征可知, C、D 区在研究的 20 年时间范围内, 均出现过 1~2 次远超其他台风等级的超强台风, 如 C 区对应 2013 年超强台风“海燕”, D 区则对应了 2014 年超强台风“海鸥”、“威马逊”等。这种极端台风引发的台风浪导致了该年极值波高远超剩余 19 年。

总之, 本节分析可以得出结论: 在关注海区的研究时间范围内, 若极值波高较低, 无超强台风引发的极端台风浪, 则两种极值方法估算结果都较为准确, 差异很小。但如果出现了某一年超强台风引发极值波高远超出其他年份时, 将导致 Pearson-III 极值分布和 Gumbel 极值分布的估算值明显低于实际值, 低估程度取决于极端年份极值波高的强弱, 并且 Pearson-

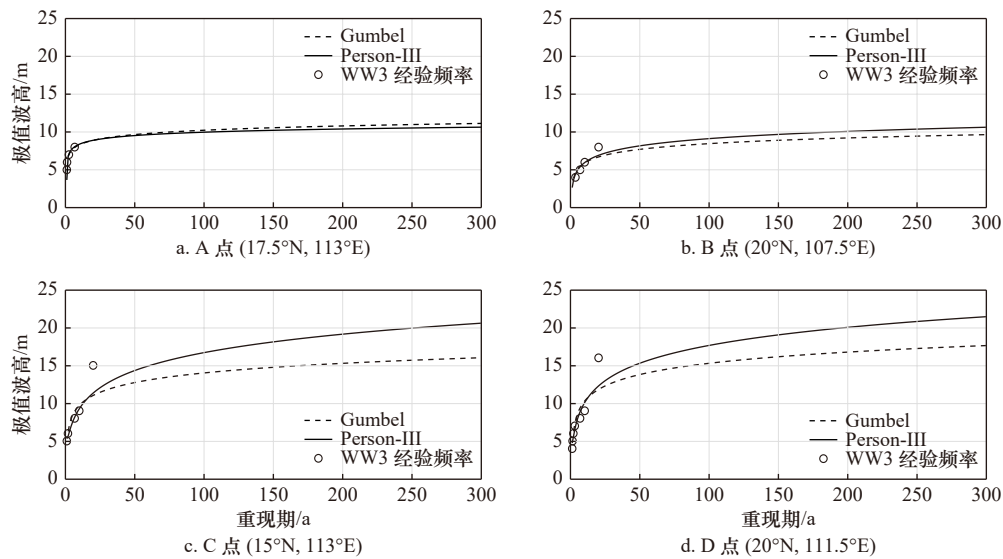


图8 南海北部4个关键区代表点的重现期-极值波高曲线

Fig. 8 The return period-extreme wave height curves of the representative points in the four key areas of the northern South China Sea

表2 南海北部4个关键区代表点不同重现期的极值波高统计(单位: m)

Table 2 The extreme wave height in different return periods of the representative points in the four key areas of the northern South China Sea (unit: m)

代表点	计算方法	重现期				
		20年	50年	100年	200年	300年
A	Gumbel	8.89	9.66	10.23	10.8	11.13
	Pearson-III	9.24	10.08	10.68	11.27	11.61
B	Gumbel	6.70	7.71	8.46	9.21	9.65
	Pearson-III	7.11	8.58	9.71	10.85	11.52
C	Gumbel	11.03	12.73	14.00	15.27	16.02
	Pearson-III	11.5	14.85	17.55	20.34	22.01
D	Gumbel	11.82	13.80	15.28	16.76	17.63
	Pearson-III	12.51	15.93	18.63	21.39	23.03

III 极值分布的估算值升高幅度远超 Gumbel 极值分布, 更接近实际结果, 此时相对来说, Pearson-III 极值分布更合理。

#### 4 小结与讨论

本文首先利用 ERA5 平均风速、有效波高等数据, 验证了 WW3 模式模拟结果的准确性。然后根据分辨率更高的 WW3 模拟结果分析了南海北部区域有效波高及其极值的分布特征和长期变化, 并通过 Gumbel、Pearson-III 两种极值分布方法, 对多年一遇

重现期进行了估算。本文研究拟为南海北部的极值波高估算、海洋工程、设备建设提供一定的数据支撑和方法支持。研究表明:

(1) 南海北部有效波高的季节变化主要受控于季风变化, 季节尺度平均的有效波高无法体现热带气旋对波浪场的影响。

(2) 不同时间尺度有效波高计算的极值, 反映了季风和台风两种关键风场在不同尺度上的作用。季节平均的有效波高, 季风型特征远大于台风型特征, 而采用逐小时数据给出有效波高或极值, 台风型特征远大于季风型特征。

(3) 1996–2015 年间, 南海北部有效波高及其极值均出现了显著的增长趋势。其中有效波高增长了约 7.7%, 而极值波高增加了 31.6%。这一巨大的变化势必影响多年一遇重现期的计算, 值得进一步监测和探究。

(4) 验证了该海区强台风路径、等级是引发极端大浪的最主要因素, 引发的极值波高远超季风引发的极值波高, 对多年一遇波高计算更有效。南海北部多年一遇极值波高可分成 4 个差别显著的关键区域来分析。其中 A、B 区的多年一遇极值波高则较低, 这与两区域受台风和强季风影响较弱相吻合。对 C、D 区而言, 强度极高的超强台风, 是引起多年极值波高整体较高的原因, 而极值范围大小则与强台风是否多发较为一致, 多个台风经过会导致极值区范围较大。

(5) 上述不同类型的极值波高分布也直接影响了采用两种方法估算重现期极值波高的准确性。在

关注海区的研究时间范围内,若极值波高较低,无超强台风引发的极端台风浪,则两种极值方法估算结果都较为准确,差异很小。但如果出现了某一年超强台风引发极值波高远超出其他年份时,将导致 Pearson-III 极值分布和 Gumbel 极值分布的估算值明显低于实际值,低估程度取决于极端年份极值波高的强弱,且 Pearson-III 极值分布估算值更接近实际结果,此时相对来说, Pearson-III 极值分布可能更合理。这种情况也暗示了,对于工程上更为关心的大波浪区极值波高,可能需要更多数据、改进方法,并采用更高的重现期极值来保证工程安全。

总之,对于工程上更为关心的大波浪区极值波高,由于极端台风引发的个例极值过高,经适线法修

订后 Pearson-III 极值分布方法,相比 Gumbel 极值分布方法与真实的情况更为接近。此外,目前国际上还有许多极值估算方法,如 Weibull 分布、广义极值分布<sup>[36]</sup>等。但何种最优,至今没有定论。未来拟进一步深入分析,为重现期极值波高的估算提供更准确可靠的判断方法。此外特别值得注意的,1996–2005 年间,南海北部有效波高及其极值均出现了显著的增长趋势。其中有效波高增长约 7.7%,而极值波高增强 31.6%。这一巨大的变化势必影响重现期的计算和精确性,计入该趋势可能放大多年一遇波高极值,对工程安全参考来说更合适,但偏差多少尚不确定,未来应进一步探究,提高多年一遇极值波高估算精确度,为海上工程安全提供更准确的参考。

### 参考文献:

- [1] 薛力. “马六甲困境”内涵辨析与中国的应对[J]. 世界经济与政治, 2010(10): 117–140.  
Xue Li. Malacca dilemma and China's response[J]. World Economics and Politics, 2010(10): 117–140.
- [2] 宋清润. 从“亚太再平衡”战略看美泰军事同盟关系[J]. 国际研究参考, 2015(2): 1–6.  
Song Qingrun. The US-Thailand military alliance from the perspective of “Asia-Pacific Rebalance” strategy[J]. International Study Reference, 2015(2): 1–6.
- [3] 宋建欣. 改革开放以来中国共产党维护南海主权权益研究[D]. 长春: 吉林大学, 2020.  
Song Jianxin. Study on Chinese communist party safeguarding the sovereignty and rights and interests of the South China Sea since the reform and opening-up[D]. Changchun: Jilin University, 2020.
- [4] 何小超, 王娟, 杨海军, 等. 南海深水油气资源的开发现状[C]/第十五届中国海洋(岸)工程学术讨论会论文集(上). 北京: 海洋出版社, 2011.  
He Xiaochao, Wang Xian, Yang Haijun, et al. Development status of deepwater oil and gas resources in the South China Sea[C]/Proceedings of the 15th China Ocean (Shore) Engineering Symposium. Beijing: China Ocean Press, 2011.
- [5] 王陆新, 潘继平, 杨丽丽. 全球深水油气勘探开发现状与前景展望[J]. 石油科技论坛, 2020, 39(2): 31–37.  
Wang Luxin, Pan Jiping, Yang Lili. Present conditions and prospect of global deepwater oil and gas exploration and development[J]. Petroleum Science and Technology Forum, 2020, 39(2): 31–37.
- [6] 齐义泉, 朱伯承, 施平, 等. WWATCH模式模拟南海海浪场的结果分析[J]. 海洋学报, 2003, 25(4): 1–9.  
Qi Yiquan, Chu P C, Shi Ping, et al. Analysis of significant wave heights from WWATCH and TOPEX/Poseidon Altimetry[J]. Haiyang Xuebao, 2003, 25(4): 1–9.
- [7] Chu P C, Qi Yiquan, Chen Yuchun, et al. South China Sea wind-wave characteristics. part I: validation of WAVEWATCH-III using TOPEX/Poseidon data[J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 2004, 21(11): 1718–1733.
- [8] 周良明, 吴伦宇, 郭佩芳, 等. 应用WAVEWATCH-III模式对南海的波浪场进行数值计算, 统计分析和研究[J]. 热带海洋学报, 2007, 26(5): 1–8.  
Zhou Liangming, Wu Lunyu, Guo Peifang, et al. Simulation and study of wave in South China Sea using WAVEWATCH-III[J]. Journal of Tropical Oceanography, 2007, 26(5): 1–8.
- [9] 裘沙怡, 梁楚进, 董昌明, 等. 南海海面风、浪场时空变化特征及其关系分析[J]. 海洋学研究, 2013, 31(4): 1–9.  
Qiu Shayi, Liang Chujin, Dong Changming, et al. Analysis of the temporal and spatial variations in the wind and wave over the South China Sea[J]. Journal of Marine Sciences, 2013, 31(4): 1–9.
- [10] 宗芳伊. 近20年南海波浪及波浪能分布、变化研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2015.  
Zong Fangyi. Research on distributions and variations of sea wave and wave energy in South China Sea during recent 20 years[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2015.
- [11] 韩树宗, 董杨杨, 张水平, 等. 南海波浪时空变化特征研究[J]. 海洋湖沼通报, 2020(2): 1–9.  
Han Shuzong, Dong Yangyang, Zhang Shuiping, et al. Study of the temporal and spatial variations of wave in South China Sea[J]. Transactions of Oceanology and Limnology, 2020(2): 1–9.
- [12] Ou S H, Liau J M, Hsu T W, et al. Simulating typhoon waves by SWAN wave model in coastal waters of Taiwan[J]. Ocean Engineering, 2002, 29(8): 947–971.
- [13] 徐尧. 南海台风浪与太平洋海浪的数值模拟[D]. 青岛: 中国科学院大学(中国科学院海洋研究所), 2017.  
Xu Yao. Numerical modelling of typhoon waves in the South China Sea and waves in the Pacific Ocean[D]. Qingdao: The Institute of

- Oceanology, Chinese Academy of Sciences, 2017.
- [14] Kim T R, Lee J H. Comparison of high wave hindcasts during typhoon Bolaven (1215) using SWAN and WAVEWATCH III Model[J]. *Journal of Coastal Research*, 2018, 85(S1): 1096–1100.
- [15] 石洪源, 尤再进, 胡聪, 等. 不同台风合成风场方案在南海的适用性研究[J]. *海洋湖沼通报*, 2018(6): 17–23.  
Shi Hongyuan, You Zaijin, Hu Cong, et al. A study on the applicability of different typhoon synthetic wind fields in the South China Sea[J]. *Transactions of Oceanology and Limnology*, 2018(6): 17–23.
- [16] 林金波, 毛鸿飞, 吴光林, 等. 基于混合风场的南海台风浪数值模拟[J]. *广东海洋大学学报*, 2021, 41(6): 44–52.  
Lin Jinbo, Mao Hongfei, Wu Guanglin, et al. Numerical modeling of typhoon waves in South China Sea based on mixed wind field[J]. *Journal of Guangdong Ocean University*, 2021, 41(6): 44–52.
- [17] 陈晓斌, 周林, 史文丽, 等. 台风“梅花”风浪场和涌浪场特征分析[J]. *海洋科学进展*, 2013, 31(1): 22–30.  
Chen Xiaobin, Zhou Lin, Shi Wenli, et al. Characteristics of wave and surge fields of Typhoon MUIFA[J]. *Advances in Marine Science*, 2013, 31(1): 22–30.
- [18] 郑崇伟, 陈志禄, 贾本凯, 等. 中国海海表风场、风浪、涌浪、混合浪场时空分布特征研究[J]. *中国科技信息*, 2011(10): 32–33.  
Zheng Chongwei, Chen Zhilu, Jia Benkai, et al. Characteristics of sea surface wind field and wave field analysis in the China Sea[J]. *China Science and Technology Information*, 2011(10): 32–33.
- [19] 候瑞科. 利用耿贝尔极值分布计算年最高水位[J]. *海洋通报*, 1993, 12(3): 126–129.  
Hou Ruike. The annual maximum water level was calculated using the distribution of Gumbel extreme values[J]. *Marine Science Bulletin*, 1993, 12(3): 126–129.
- [20] 葛黎丽, 屈衍, 张志旭, 等. 南海深水区风、浪、流多年一遇重现期极值的推算[J]. *中国海上油气*, 2009, 21(3): 207–210.  
Ge Lili, Qu Yan, Zhang Zhixu, et al. The calculation of the extreme wind, wave and current for return periods in the deep water area of the South China Sea[J]. *China Offshore Oil and Gas*, 2009, 21(3): 207–210.
- [21] 江丽芳, 尹毅, 齐义泉, 等. 钦州湾台风浪的多年一遇极值推算[J]. *热带海洋学报*, 2012, 31(4): 8–16.  
Jiang Lifang, Yin Yi, Qi Yiquan, et al. The extreme wave parameters in the Qinzhou Bay during typhoon passages[J]. *Journal of Tropical Oceanography*, 2012, 31(4): 8–16.
- [22] 王志旭, 陈子桑. 极值波高Weibull分布的参数估计方法对比分析[J]. *海洋通报*, 2013, 32(2): 127–132.  
Wang Zhixu, Chen Zishen. Comparative analysis on the parameter estimation methods of Weibull distribution of extreme wave heights[J]. *Marine Science Bulletin*, 2013, 32(2): 127–132.
- [23] Liu Guilin, Gao Zhikang, Chen Baiyu, et al. Extreme values of storm surge elevation in Hangzhou Bay[J]. *Ships and Offshore Structures*, 2020, 15(4): 431–442.
- [24] 韩树宗, 王海龙, 郭佩芳. 利用卫星高度计资料进行多年一遇极值波高推算的方法研究[J]. *青岛海洋大学学报*, 2003, 33(5): 657–664.  
Han Shuzong, Wang Hailong, Guo Peifang. A study of extreme SWH estimation method by using satellite altimeter data[J]. *Journal of Ocean University of Qingdao*, 2003, 33(5): 657–664.
- [25] 中华人民共和国交通部. JTJ 213-98, 海港水文规范[S]. 北京: 中华人民共和国交通部, 1999.  
Ministry of Transport of the People's Republic of China. JTJ 213-98, Code for sea port hydrology[S]. Beijing: Ministry of Transport of the People's Republic of China, 1999.
- [26] 吴萌萌, 王毅, 万莉颖, 等. WAVEWATCH III模式在全球海域的数值模拟试验及结果分析[J]. *海洋预报*, 2016, 33(5): 31–40.  
Wu Mengmeng, Wang Yi, Wan Liying, et al. Numerical simulation experiments and analysis using WAVEWATCH III in the global ocean[J]. *Marine Forecasts*, 2016, 33(5): 31–40.
- [27] Hersbach H, Bell B, Berrisford P, et al. ERA5 monthly averaged data on single levels from 1979 to present[R]. Reading: European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, 2019: 252–266.
- [28] 王彦俊. 中国近海台风路径集合数据集(1945–2021)[EB/OL]. (2022–06–10) [2022–09–01]. <http://dx.doi.org/10.12157/IOCAS.20210804.001>.  
Wang Yanjun. A dataset of typhoon tracks in offshore China (1945–2021)[EB/OL]. (2022–06–10) [2022–09–01]. <http://dx.doi.org/10.12157/IOCAS.20210804.001>.
- [29] 李明杰, 齐鹏, 侯一筠. 山东沿岸多年一遇最高水位计算[J]. *海洋科学*, 2009, 33(11): 78–81.  
Li Mingjie, Qi Peng, Hou Yijun. Computation of highest water levels of multiyear return periods along the coast of Shandong[J]. *Marine Sciences*, 2009, 33(11): 78–81.
- [30] 马智群. 陕西省淳化县暴雨强度公式推求研究[D]. 西安: 长安大学, 2019.  
Ma Zhiquan. The research of storm intensity formula in Chunhua country, Shanxi Province[D]. Xi'an: Chang'an University, 2019.
- [31] 孙玉芳. 基于Matlab开发环境的皮尔逊Ⅲ型频率曲线分析软件研发[J]. *山西水利科技*, 2014(2): 61–62, 70.  
Sun Yufang. Software development for analyzing pearson type III frequency curve based on matlab environment[J]. *Shanxi Hydrotechnics*, 2014(2): 61–62, 70.
- [32] 王焕. 南海海域波浪时空变化特征分析及有效波高预测研究[D]. 湛江: 广东海洋大学, 2021.  
Wang Huan. Analysis of spatial-temporal characteristics of waves and prediction of significant wave height in the South China Sea[D].

- Zhanjiang: Guangdong Ocean University, 2021.
- [33] 练江帆, 梁必骐, 郑新江. 9615号台风特点及其原因分析[J]. 中山大学学报(自然科学版), 1998, 37(2): 85–90.  
Lian Jiangfan, Liang Biqu, Zheng Xinjiang. The analysis of the characteristics and causes of typhoon sally[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni, 1998, 37(2): 85–90.
- [34] 邵佳爱, 张长宽, 宋立荣. 强台风0814(黑格比)和9615(莎莉)台风暴潮珠江口内超高潮位分析[J]. 海洋通报, 2009, 28(6): 14–18.  
Tai Jiaai, Zhang Changkuan, Song Lirong. Super high water levels due to intense typhoons 0814 (Hagupit) and 9615 (Sally) in the Peal River Estuary[J]. Marine Science Bulletin, 2009, 28(6): 14–18.
- [35] 中华人民共和国水利部. SL 654-2014, 水利水电工程合理使用年限及耐久性设计规范[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 2014.  
Ministry of Water Resources of the People's Republic of China. SL 654-2014, Code for rational service life and durability design of water resources and hydropower projects[S]. Beijing: China Water Conservancy and Hydropower Press, 2014.
- [36] Pham D T, Switzer A D, Huerta G, et al. Spatiotemporal variations of extreme sea levels around the South China Sea: assessing the influence of tropical cyclones, monsoons and major climate modes[J]. Natural Hazards, 2019, 98(3): 969–1001.

## Analysis of the spatio-temporal variations of significant wave height in the northern South China Sea and the return period estimation methods of its extreme based on WW3

Xia Ruibin<sup>1</sup>, Lu Chaoyue<sup>1</sup>, Liang Chujin<sup>1</sup>, Wang Zhiyong<sup>2</sup>

(1. School of Marine Science, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China; 2. North China Sea Marine Forecast and Hazard Mitigation Center of the Ministry of Natural Resources, Qingdao 266100, China)

**Abstract:** The spatio-temporal variations of significant wave height and its extremum in the northern South China Sea from 1996 to 2015 are analyzed based on the wave hindcast simulation by the third-generation wave model WaveWatch III (WW3). Two extreme value distribution methods, Pearson-III and Gumbel methods, have been used to estimate the return period of the extreme significant wave height in the northern South China Sea. The results show that the seasonal variation and spatial distribution of significant wave height in the northern South China Sea are consistent with the monsoon field, similar to the results of reanalysis data. It is high in autumn and winter and low in spring and summer, and decreases from the west part of the Luzon Strait to the southwest. But the extremum of significant wave height is strongly affected by the temporal resolution. The higher resolution (such as hourly), the more typhoon wave characteristics are displayed. After deducting the seasonal cycle signal, both the significant wave height and its annual extremum show an intense linear trend, increasing by 7.7% and 31.6% in the last 20 years respectively. There are several large value regions of the return period wave height in this area. They are related to the typhoon's track and intensity directly, indicating that typhoons are the primary mechanism causing extreme waves in this region. Comparing the Pearson-III and Gumbel distribution, it is found that if the extreme significant wave height was relatively low and the frequency decreased slowly with the growth of the extremum, the two methods are both accurate, with little difference which could be ignored. However, when the extreme significant wave height was much higher in one year than that in other years, the estimated result of the Pearson-III would be much higher than that of the Gumbel method, and also closer to the actual value. In other words, the Pearson-III extreme value distribution behaves better in this situation. This study shows that when the extreme significant wave height caused by a super typhoon is much higher than that in other years, the estimation from different methods differs greatly, which will significantly affect the assessment of the return period. Besides, the strong increasing trend of the extreme significant wave height in the northern South China Sea will also bring a non-negligible impact on the calculation of return period wave height and marine engineering protection in the future.

**Key words:** northern South China Sea; significant wave height; the extreme significant wave height; return period; Pearson-III extreme value distribution; Gumbel extreme value distribution