

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2023.06.015

# 黄海南部海域的极值波高推算

王亚欣,梁丙臣,邵珠晓

(中国海洋大学工程学院,山东 青岛 266100)

**摘要:**以黄海南部海域 1979—2018 年 SWAN 模型模拟的海浪后报数据为原始数据集,采用自动化法在原始数据集中提取独立的非热带气旋样本进行极值波高推算研究。选择年  $N$  大值法提取极值样本,匹配广义极值分布模型进行拟合,通过分析模型的拟合效果和外推有效波高的不确定性确定合理的  $N$  值范围,并采用阈值法的稳定阈值范围进行了验证。利用这种方法推算得到了黄海南部海域 50、100、150、200 a 重现期的极值波高,可为黄海南部海域海洋、海岸工程的设计施工提供参考。

**关键词:**极值波高;非热带气旋样本;年  $N$  大值法;阈值法;黄海

**中图分类号:**P731.22;TV139.2      **文献标志码:**A      **文章编号:**1000-1980(2023)06-0117-06

## Calculation of extreme wave height in southern Yellow Sea

WANG Yaxin, LIANG Bingchen, SHAO Zhuxiao

(College of Engineering, Ocean University of China, Qingdao 266100, China)

**Abstract:** The southern Yellow Sea is selected as the research area, and the hindcast of significant wave heights simulated by SWAN model during 1979-2018 are used as the initial database. The independent non-tropical cyclone samples are extracted from the original data set by the automated method to calculate the extreme wave height. The  $N$  largest maxima method is selected to extract the extreme sample and the generalized extreme value model is matched for fitting. By analyzing the model fitting results and the uncertainty of extrapolated effective wave height, a reasonable range of  $N$  value was determined and validated by the stable threshold range of the threshold method. By using this method, the estimated extreme wave heights of 50, 100, 150 and 200 a return periods in the southern Yellow Sea are obtained, which can provide reference for the design and construction of marine and coastal projects in the southern Yellow Sea.

**Key words:** extreme wave height; non-tropical cyclone samples;  $N$ -largest maxima method; threshold method; Yellow Sea

设计波高推算对海洋和海岸工程设计、安装和操作等活动十分重要<sup>[1]</sup>,推算出合理有效的设计波高值才能既保障工程安全,又降低工程成本。

设计波高的推算立足于优质的原始数据集。目前,常见的数据来源有浮标数据<sup>[2]</sup>、卫星数据<sup>[3]</sup>和后报数据<sup>[4-5]</sup>3 种。浮标直接测量实际海域的波浪参数,但这种测量方式仅限于测量布置浮标时间段和布置浮标位置的波浪数据,具有很大的局限性<sup>[6]</sup>。卫星提供的全球测量数据具有相对较高的空间分辨率和相对较长的持续时间<sup>[7]</sup>,在一定程度上弥补了浮标数据的不足,但高纬度地区和近岸区域缺乏卫星数据,观测数据的时间步长不规则<sup>[8]</sup>。后报数据在覆盖范围、持续时间和空间精度方面相较前两种都有所提升,得益于波浪模型的不断改进,后报数据被广泛用于设计波高的推算<sup>[9]</sup>。

极值理论要求极值数据严格满足独立同分布假设。为了从原始数据集中得到独立的样本,国内外学者开展了系列的研究,提出了不同的判定方法,如 Mazas 等<sup>[10]</sup>提出了双阈值法,Kapelonis 等<sup>[11]</sup>提出了最小时间间隔法,Gao 等<sup>[12]</sup>提出了固定窗口法。为了得到同分布的样本,Laface 等<sup>[13]</sup>建议不同方向中的风暴应该分开处理,因为它们的分布可能不同;Li 等<sup>[14]</sup>将样本分为了海洋学冬季样本和海洋学夏季样本。

**基金项目:** 中国博士后科学基金项目(2022M713002);青岛市应用研究项目(2021—2023);国家自然科学基金项目(52088102,51739010)

**作者简介:** 王亚欣(1998—),女,硕士,主要从事波高推算研究。E-mail: wangyx0020@163.com

**通信作者:** 邵珠晓(1990—),男,博士,主要从事波浪模拟和波高推算研究。E-mail: szx0617@163.com

**引用本文:** 王亚欣,梁丙臣,邵珠晓.黄海南部海域的极值波高推算[J].河海大学学报(自然科学版),2023,51(6):117-122.

WANG Yaxin, LIANG Bingchen, SHAO Zhuxiao. Calculation of extreme wave height in southern Yellow Sea[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2023, 51(6): 117-122.

通过合适的方法从独立同分布样本中提取极值样本,传统的取样方法包括年最大值法<sup>[15]</sup>、阈值法<sup>[16]</sup>、年  $N$  大值法<sup>[17]</sup> 3 种。年最大值法选取每年的最大波高值作为研究样本,通常匹配耿贝尔 (Gumbel) 分布模型<sup>[18]</sup>。年最大值法操作简单,但因其每年只选取一个极值样本,造成数据资料严重浪费,并且外推结果具有很大的不确定性<sup>[19]</sup>。阈值法选取某一特定波高以上的所有极值波高作为研究样本,常匹配广义帕累托分布 (generalized Pareto distribution, GPD) 模型<sup>[20]</sup>。阈值法有效扩充了样本容量,但阈值的选取工作较为复杂,且易受个人主观因素影响<sup>[21]</sup>。年  $N$  大值法介于前两种方法之间,即每年选取前  $N$  个极值作为研究样本,通常匹配广义极值 (generalized extreme value, GEV) 分布模型<sup>[22]</sup>。年  $N$  大值法在一定程度上弥补了年最大值法样本容量不足的问题,并且减少了阈值选择的复杂过程,但如何确定合理的  $N$  值仍是有待解决的问题, $N$  值选择过大可能导致样本的极端代表性较低,而  $N$  值过小可能导致推算设计波高的不确定性增大。

本文以 1979—2018 年 SWAN (simulating waves nearshore) 模型模拟的黄海南部海域海浪后报数据为原始数据集,对黄海南部海域的独立非热带气旋样本进行了分析。采用年  $N$  大值法提取极值样本,并选择 GEV 分布模型外推设计波高。通过分析在不同  $N$  值时极值波高的拟合效果和外推结果的不确定性,确定了合理的  $N$  值,并采用阈值法的稳定阈值区间进行了验证,以期为该区域海洋和海岸工程的设计施工提供参考。

1 研究区概况和研究数据

本文研究范围为北纬  $31.0^{\circ} \sim 37.0^{\circ}$ 、东经  $117.0^{\circ} \sim 125.5^{\circ}$ , 覆盖了黄海南部海域 (图 1)。采用经 SWAN 模型模拟的海浪后报数据为原始数据集。模型输入水深来自全球水深数据 (general bathymetric chart of the oceans, GEBCO), 空间精度为  $0.1^{\circ} \times 0.1^{\circ}$ ; 输入风场为 ERA-Interim 风场, 空间精度为  $0.125^{\circ} \times 0.125^{\circ}$ 。采用精度为  $0.1^{\circ} \times 0.1^{\circ}$  的规则网格进行计算。二维谱空间的频率以对数分布形式将  $0.03 \sim 1$  Hz 等分为 36 段, 谱空间的方向将  $360^{\circ}$  等分为 48 段。计算时间范围为 1979 年 1 月 1 日 0 时至 2018 年 12 月 31 日 23 时, 计算时间步长为 30 min, 输出时间步长为 1 h。选取位置 A ( $35.4^{\circ}\text{N}, 125.2^{\circ}\text{E}$ ) 作为研究点进行详细分析。

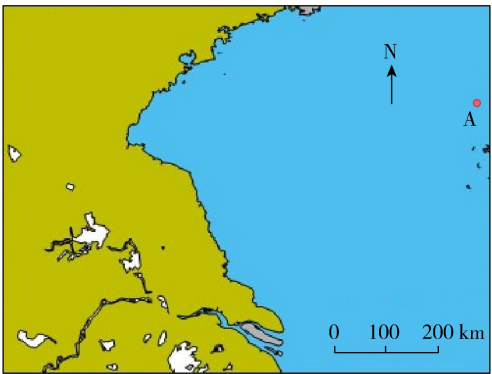


图 1 黄海南部海域  
Fig. 1 The southern Yellow Sea

2 研究方法

2.1 模型分布公式

采用年  $N$  大值法提取极值样本,匹配 GEV 分布模型进行极值波高的推算,计算公式为

$$H_1 = \exp \{ - [ 1 + \xi (H_s^* - \mu) / \sigma ]^{-1/\xi} \} \quad (1 + \xi (H_s^* - \mu) / \sigma > 0)$$
 (1)

式中:  $H_1$  为用 GEV 分布模型推算的极值波高;  $\mu$  为位置参数;  $\sigma$  为尺度参数;  $\xi$  为形状参数;  $H_s^*$  为极值波高。

在采用阈值法提取极值样本时,常匹配 GPD 模型进行极值波高的推算,计算公式为

$$H_2 = 1 - [ 1 + \xi (H_s^* - \mu) / \sigma ]^{-1/\xi} \quad (x \geq \mu, 1 + \xi (H_s^* - \mu) / \sigma > 0)$$
 (2)

式中  $H_2$  为用 GPD 模型推算的极值波高。

上述两分布公式的参数 ( $\mu, \sigma, \xi$ ) 均使用极大似然估计法进行估计。

重现期为  $P$  的有效波高返回值  $H_{sp}$  计算公式为

$$H_{sp} = \mu - \frac{\sigma}{\xi} \left\{ 1 - \left[ - \ln \left( 1 - \frac{1}{P\lambda} \right) \right]^{-\xi} \right\}$$
 (3)

式中  $\lambda$  为年平均样本数量。

2.2 提取独立性样本

图 2 为位置 A 处 1979—2018 年的时序极限波高,其中橙线代表所选取的初始阈值。本文使用初始阈值来提高提取样本的效率,筛除小浪过程,避免了小浪过程对大浪过程鉴定的干扰。通过调整初始阈值的大小,控制选取的样本数量。初始阈值的选取与年平均风暴数量有关,通常每年

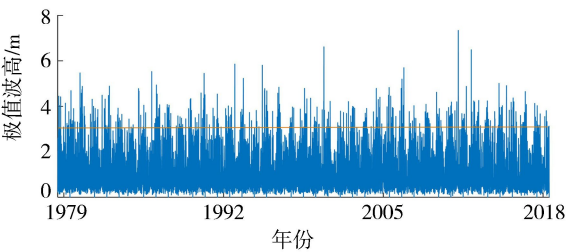


图 2 位置 A 处 1979—2018 年时序极值波高  
Fig. 2 Extreme wave heights of the time series from 1979 to 2018 at location A

选取 5~10 个样本<sup>[9]</sup>。为了避免遗漏极值样本且保证有效波高的样本数量,将样本选取的年平均数量控制在 12 个左右,共计 480 个样本。

为了满足极值理论独立性的要求,采用自动化法<sup>[23]</sup>对提取的 480 个样本进行处理。图 3 为位置 A 处出现的 3 种连续波浪过程,其中红线代表选取的初始阈值,绿线代表研究点时序极值波高的平均值。短限制(24 h)用于识别一个具有较短时间间隔的独立波浪过程,即时间序列的有效波高小于初始阈值(图 3(a));长限制(120 h)用于识别两个具有长时间间隔的连续独立波浪过程(图 3(b));当位于 24~120 h 间隔的波浪在初始阈值附近波动,且波浪间隔中的最小极值波高大于时序极值波高的平均值时,识别为一个独立波浪过程(图 3(c))。在位置 A 处的 480 个样本中提取出 451 个独立样本。

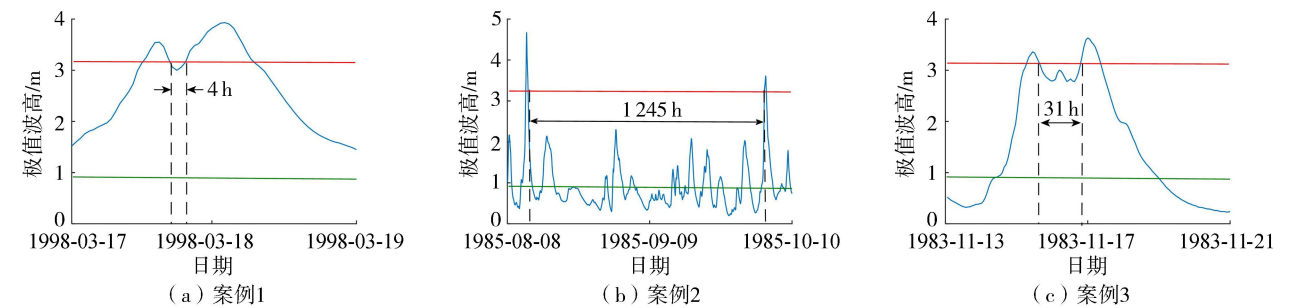


图 3 位置 A 处的 3 种连续波浪

Fig.3 Three kinds of continuous waves at location A

2.3 提取同质性样本

为了满足极值理论同分布的要求,对波高样本按天气系统进行分组。由于热带气旋的特征(如强度、频率等)与非热带气旋明显不同,因此由热带气旋产生的风暴和非热带气旋产生的风暴分开考虑<sup>[24]</sup>。当研究位置与热带气旋中心之间的距离小于 300 km 时,认为该位置受热带气旋影响并将与发生热带气旋时间相匹配的样本分类为热带气旋样本;其余均分类为非热带气旋样本<sup>[25]</sup>。Shao 等<sup>[23]</sup>研究比较了黄海海域独立的非热带气旋样本和冬季风暴样本及基于这些样本有效波高的外推值,得到样本相似且波高外推结果之间差异很小的结论。因此使用独立的非热带气旋样本对研究区域的有效波高进行评估,最终在位置 A 处的 451 个独立样本中提取出 408 个非热带气旋样本,如图 4 所示。

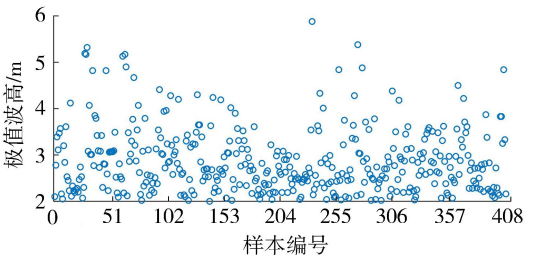


图 4 位置 A 处独立的非热带气旋样本

Fig.4 Independent non-tropical cyclone samples at location A

3 N 值的选取及区域极值波高推算

3.1 N 值的选取

当采用年  $N$  大值法提取极值样本时,确定合理的  $N$  值至关重要。图 5 为当  $N=2\sim7$  时,位置 A 处的波高分位数情况,它可以反映出提取的极值样本与 GEV 分布模型的拟合效果。在统计学里,分位数图用来比较一组数据的经验值和理论值的匹配程度,如果样本与选取的分布公式相匹配,则分位数点趋近于落在  $y=x$  线(图中红线)上。由图 5(a)和(b)可见,当  $N=2,3$  时,提取得到的极值样本的数量太少,拟合效果存在很强的不稳定性,往往无法进行可靠的外推;随着  $N$  增大,拟合效果的稳定性通常会逐渐增加,当  $N=4,5$  时,由图 5(c)和(d)可见,经验波高值和理论波高值之间的差异很小,拟合效果良好;由图 5(e)可见,当  $N=6$  时,出现的小值使拟合效果变差,因为随着  $N$  继续增大,拟合数据中增加了小值样本,小值样本开始偏离理论分布,这表明极值样本可能来自不同的波浪过程;由图 5(f)可见,当  $N$  取值继续增大时,拟合效果相对较好,但较多的样本数量往往无法保证极值样本的代表性。图 6 表明随着  $N$  的增大,样本容量不断扩大,样本的最小值在逐渐减小;当  $N=6$  时,样本最小值突减,猜测是引入了小值样本的缘故。

上述结论表明,位置 A 处的  $N$  取 4 或 5 时均较为合理。为了证实这一结论,应用阈值法并匹配 GPD 模型进行进一步验证,通过分析有效波高返回值对阈值的敏感性,确认合理的阈值范围。如图 7 所示,在位置

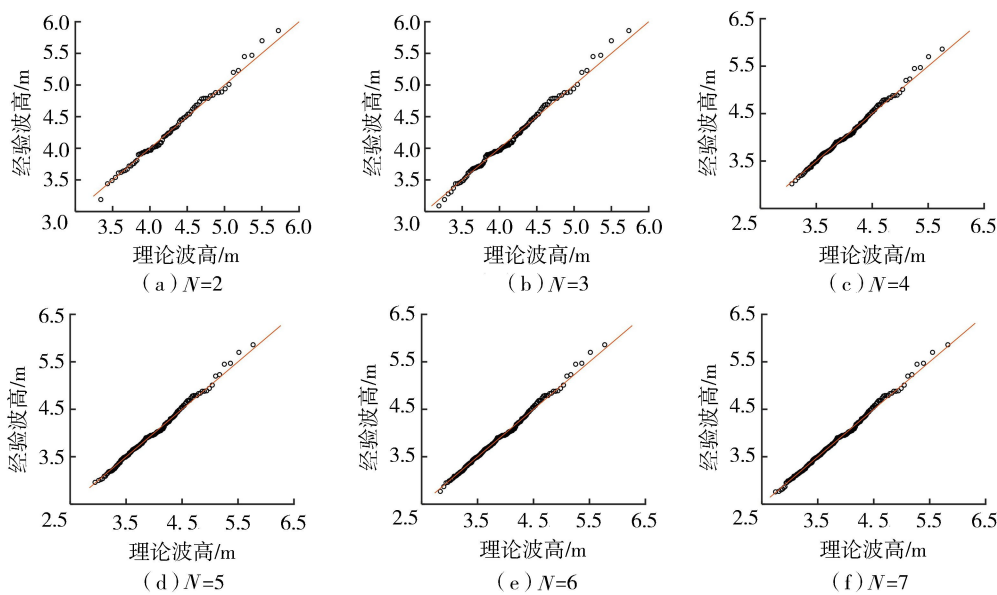


图 5 位置 A 处的波高分位数

Fig. 5 Quantile plots of wave height at location A

A 处,当阈值小于 2.94 m 时,随着阈值的增大,有效波高返回值也在逐渐增大,小值样本数量逐渐减少;当阈值范围为 2.94 ~ 3.37 m 时,有效波高返回值相对稳定,在这个范围内,移除样本并没有明显影响有效波高返回值,表明样本的数量足以代表极值波高,而样本的数量亦可作出可靠的外推;当阈值大于 3.37 m 时,有效波高的返回值随着样本的减少产生较大波动,虽然此时的样本值具有极端代表性,但因样本数量较少也无法进行合理的外推。

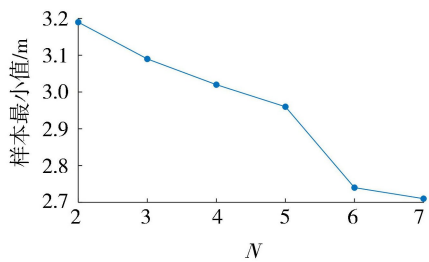


图 6  $N$  取不同值时位置 A 处提取样本的最小值

Fig. 6 Minimum of extracted samples at location A with respect to different  $N$  values

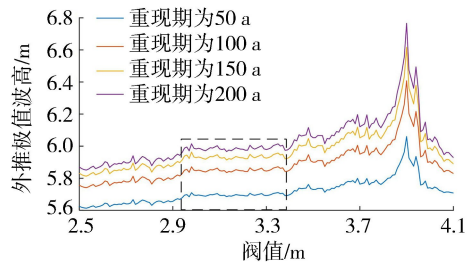


图 7 位置 A 处外推极值波高对阈值的敏感性

Fig. 7 Sensitivity of extrapolated significant wave heights to threshold at location A

为了验证上述阈值选取区间的合理性,在位置 A 处阈值<2.94、2.94 ~ 3.37、>3.37 m 3 个阈值区间内分别选取 2.60、3.15、3.80 m 进行分析。表 1 为位置 A 处不同阈值在 50、100、150、200 a 重现期的极值波高推算结果,同一阈值的推算结果随着重现期的增大而增大,置信区间宽度随之增加;相同重现期时推算结果随着阈值的增大而增大,置信区间宽度随之增加。阈值为 3.15 m 和 3.80 m 时对应的样本极值代表性更好,推算出的有效波高值更大;阈值为 2.60 m 和 3.15 m 对应的样本数量更多,推算出的有效波高值的置信区间更窄。基于上述结论可得,在阈值为 2.94 ~ 3.37 m(即稳定阈值区间)内选取阈值更为合适。

表 1 位置 A 处不同阈值时极值波高推算结果

Table 1 Calculated results of extreme wave height at location A with different thresholds

| 阈值/m | 有效波高/m          |                 |                  |                  |
|------|-----------------|-----------------|------------------|------------------|
|      | 重现期为 50 a       | 重现期为 100 a      | 重现期为 150 a       | 重现期为 200 a       |
| 2.60 | 6.82(6.25,7.39) | 7.19(6.61,7.77) | 7.38(6.80,7.96)  | 7.50(6.92,8.09)  |
| 3.15 | 6.86(6.21,7.52) | 7.39(6.72,8.05) | 7.68(7.01,8.34)  | 7.88(7.21,8.54)  |
| 3.80 | 7.23(5.87,8.58) | 8.21(6.84,9.59) | 8.85(7.46,10.23) | 9.32(7.93,10.71) |

注:括号中为推算结果 95% 的置信区间。

因此,选择 2.94 ~3.37 m 的作为位置 A 的合理阈值范围,当  $N=4,5$  时,样本的最小值分别为 3.02 m 和 2.96 m,在阈值选取的合理范围内;当  $N=6$  时,提取出样本的最小值为 2.74 m,小于合理阈值范围的最小值,因此,该样本不具备极端代表性,可能是小值样本,该结果与 GEV 分布模型拟合效果互相印证。为了增加极值样本的数量,减少有效波高返回值的不确定性,最终确定位置 A 处的  $N$  值为 5。

3.2 区域极值波高推算

通过确定合理  $N$  值并匹配 GEV 分布模型拟合提取出的极值样本,得到整个研究区域重现期分别为 50、100、150、200 a 的极值波高推算结果如图 8 所示。由图 8 可知,西部近岸区的极值波高普遍小于东部深海区域;南部区域至北部区域波高值无较大变化,仅在区域内位于东北部的较小范围和东南部区域的推算值表现出略高的水平。产生这种分布的原因可能与当地的波浪气候条件有关,可以通过波浪驱动天气的不同和水深等来解释。寒潮风暴是产生非热带气旋极值波浪的主要天气,寒潮在该海域的发生频次较多,除西侧近岸处受水深影响强度较小外,东侧寒潮强度的分布较为均匀;黄海的寒潮主要集中出现在每年 10 月至次年 3 月,该时期暖水舌路径由黄海南部逐渐向北,黄海的大部分海域水温都会因此受到影响,随着纬度的进一步升高,距离暖水舌根部越来越远的海域水温会逐渐降低,波高亦会因此受到影响。在寒潮发生时期于相关区域进行海上作业施工或海洋航行时,应考虑极值波高带来的危害。

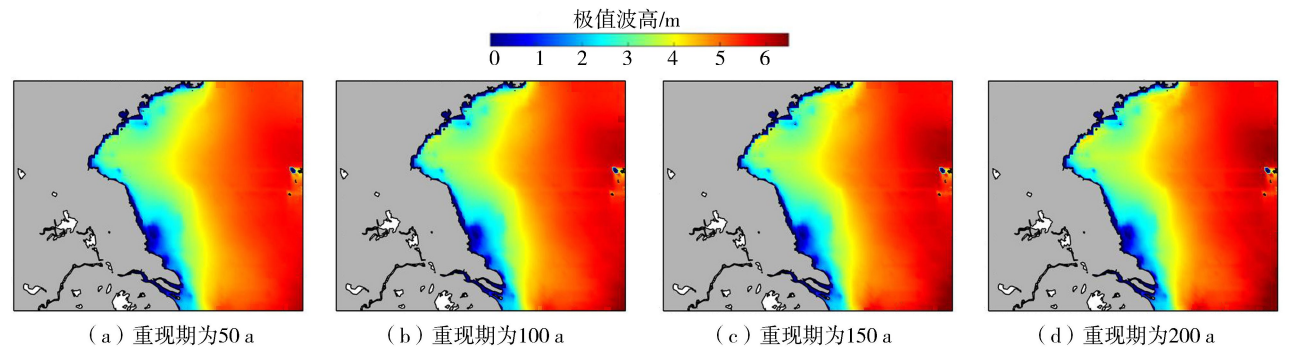


图 8 研究区域不同重现期的极值波高推算结果

Fig.8 Calculated results of extreme wave height in study area with different return periods

4 结 语

本文对黄海南部海域的极值波高进行了推算。采用自动化法提取独立非热带气旋样本,用年  $N$  大值法从独立样本中提取极值样本匹配 GEV 分布模型进行拟合,通过分析拟合效果和外推有效波高的不确定性,得到  $N$  值的合理取值范围,并采用阈值法对  $N$  值进行验证,利用外推有效波高对阈值的敏感性验证  $N$  值的合理性。当有多个  $N$  值满足要求时,为了增加极值样本的数量并减少外推有效波高的不确定性,选择最大值作为对应研究点的  $N$  值。最终推算得到黄海南部海域 50、100、150、200 a 重现期的极值波高,可为该区域海洋工程和海岸工程的设计施工提供参考。

参考文献:

[ 1 ] SHI Hongyuan,CAO Xuefeng,LI Qingjie,et al. Evaluating the accuracy of ERA5 wave reanalysis in the water around China[J]. Journal of Ocean University of China,2021,20(1):1-9.

[ 2 ] 毕玉明,马方方,江田田,等. 基于浮标观测的 2019 年暴雨过后秦皇岛近岸海域水质参数变化分析[J]. 海洋湖沼通报,2022,44(1):60-66. (BI Yuming,MA Fangfang,JIANG Tian Tian,et al. Changes of water quality parameters of buoys in Qinhuangdao sea area after a rainstorm in 2019[J]. Transactions of Oceanology and Limnology,2022,44(1):60-66. (in Chinese))

[ 3 ] 魏浩翰,何秀凤,郑加柱. 联合重力卫星数据及气候水文模型监测西南地区陆地水储量变化[J]. 河海大学学报(自然科学版),2013,41(6):488-492. (WEI Haohan,HE Xiufeng,ZHENG Jia Zhu. Terrestrial water storage variations in Southwest China revealed by gravity mission and hydrologic and climate model[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2013,41(6):488-492. (in Chinese))

[ 4 ] 莫忠璇,时闽生,吕迎雪,等. 基于 SWAN-MIKE21 嵌套模型在大连湾某工程区的波浪后报模拟应用[J]. 中国港湾建设,2021,41(2):20-23. (MO Zhongxuan,SHI Minsheng,LYU Yingxue,et al. Wave hindcast simulation based on SWAN-MIKE21

- nested model in an engineering area in Dalian Bay[J]. *China Harbour Engineering*, 2021, 41(2): 20-23. (in Chinese))
- [5] 周悦,董增川,徐伟,等. 基于SWAN模型的风生波河道防浪林消浪模拟[J]. *河海大学学报(自然科学版)*, 2019, 47(4): 323-328. (ZHOU Yue, DONG Zengchuan, XU Wei, et al. Wave attenuation simulation of vegetation based on the SWAN model in rivers[J]. *Journal of Hohai University (Natural Sciences)*, 2019, 47(4): 323-328. (in Chinese))
- [6] 王春晓,王旭,刘长华,等. 一种用于海洋综合观测浮标的多种通信方式集成系统[J]. *海洋科学*, 2020, 44(1): 142-147. (WANG Chunxiao, WANG Xu, LIU Changhua, et al. A multi-communication system used for an integrated marine observation buoy[J]. *Marine Sciences*, 2020, 44(1): 142-147. (in Chinese))
- [7] 李静,张鹰. 基于遥感测量的海岸线变化与分析[J]. *河海大学学报(自然科学版)*, 2012, 40(2): 224-228. (LI Jing, ZHANG Ying. Analysis of coastline change based on remote sensing measurement[J]. *Journal of Hohai University (Natural Sciences)*, 2012, 40(2): 224-228. (in Chinese))
- [8] 杨智翔,何秀凤. 基于改进的NDBI指数法的遥感影像城镇用地信息自动提取[J]. *河海大学学报(自然科学版)*, 2010, 38(2): 181-184. (YANG Zhixiang, HE Xiufeng. Automatic extraction of urban land-use information from remote sensing images based on improved NDBI method[J]. *Journal of Hohai University (Natural Sciences)*, 2010, 38(2): 181-184. (in Chinese))
- [9] 曹兵,王义刚. 三种设计波高计算方法比较[J]. *海洋工程*, 2006, 24(4): 75-80. (CAO Bing, WANG Yigang. Comparison of three commonly used methods for calculation of design wave height[J]. *The Ocean Engineering*, 2006, 24(4): 75-80. (in Chinese))
- [10] MAZAS F, HAMM L. A multi-distribution approach to POT methods for determining extreme wave heights[J]. *Coastal Engineering*, 2011, 58(5): 385-394.
- [11] KAPELONIS Z G, GAVRILIADIS P N, ATHANASSOULIS G A. Extreme value analysis of dynamical wave climate projections in the Mediterranean Sea[J]. *Procedia Computer Science*, 2015, 66: 210-219.
- [12] GAO Huijun, SHAO Zhuxiao, WU Guoxiang, et al. Study of directional declustering for estimating extreme wave heights in the Yellow Sea[J]. *Journal of Marine Science and Engineering*, 2020, 8(4): 8040236.
- [13] LAFACE V, ARENA F, SOARES C G. Directional analysis of sea storms[J]. *Ocean Engineering*, 2015, 107: 45-53.
- [14] LI F, VAN GELDER P H A J M, RANASINGHE R, et al. Probabilistic modelling of extreme storms along the Dutch coast[J]. *Coastal Engineering*, 2014, 86: 1-13.
- [15] 牛晨,王双银,吴素娟. 基于线性矩法的短历时暴雨频率分布研究[J]. *长江科学院院报*, 2019, 36(8): 55-60. (NIU Chen, WANG Shuangyin, WU Sujuan. L-moment analysis on frequency distribution of short-duration rainstorm[J]. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2019, 36(8): 55-60. (in Chinese))
- [16] 王涛,田林亚,侯建梅,等. 点云网格化滤波方法及其在隧道变形监测中的应用[J]. *河海大学学报(自然科学版)*, 2018, 46(5): 451-457. (WANG Tao, TIAN Linya, HOU Jianmei, et al. Method of the point clouds filtering by grid handling and its application in the deformation monitoring of tunnel[J]. *Journal of Hohai University (Natural Sciences)*, 2018, 46(5): 451-457. (in Chinese))
- [17] 曹兵,徐常三,高清清,等. 连云港海域极值波高统计资料年限初探[J]. *海洋通报*, 2015, 34(5): 508-517. (CAO Bing, XU Changsan, GAO Qingqing, et al. Preliminary study on the years of statistic data series of extreme wave heights at Lianyungang sea area[J]. *Marine Science Bulletin*, 2015, 34(5): 508-517. (in Chinese))
- [18] 毛明策,吴素良,范婧儿. 基于遗传算法的暴雨强度公式参数计算[J]. *陕西气象*, 2020(4): 50-52. (MAO Mingce, WU Suliang, FAN Jing. Parameter calculation of rainstorm intensity formula based on genetic algorithm[J]. *Journal of Shaanxi Meteorology*, 2020(4): 50-52. (in Chinese))
- [19] SHAO Zhuxiao, LIANG Bingchen, LI Huajun, et al. Study of sampling methods for assessment of extreme significant wave heights in the South China Sea[J]. *Ocean Engineering*, 2018, 168: 173-184.
- [20] 万仕全,周国华,潘柱,等. 南京过去100年极端日降水量模拟研究[J]. *气象学报*, 2010, 68(6): 790-799. (WAN Shiquan, ZHOU Guohua, PAN Zhu, et al. A simulative study of extreme daily rainfall in Nanjing for the past 100 years[J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 2010, 68(6): 790-799. (in Chinese))
- [21] SHAO Zhuxiao, LIANG Bingchen, LI Huajun, et al. Extreme significant wave height of tropical cyclone waves in the South China Sea[J]. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 2019, 19(10): 2067-2077.
- [22] 尤再进. 海洋重现期波高统一化计算方法[J]. *海洋与湖沼*, 2022, 53(4): 1015-1025. (YOU Zaijin. Unified approach for estimation of return ocean wave height[J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2022, 53(4): 1015-1025. (in Chinese))
- [23] SHAO Zhuxiao, LIANG Bingchen, GAO Huijun. Extracting independent and identically distributed samples from time series significant wave heights in the Yellow Sea[J]. *Coastal Engineering*, 2020, 158: 103693.
- [24] 李盛,孙三健,张慧,等. 热带气旋对琼中台重力非潮汐变化影响研究[J]. *地震工程学报*, 2016, 38(增刊1): 101-105. (LI Sheng, SUN Sanjian, ZHANG Hui, et al. Influence of tropical cyclones on the non-tidal gravity variation at Qiongzong Station[J]. *China Earthquake Engineering Journal*, 2016, 38(Sup1): 101-105. (in Chinese))
- [25] LIANG Bingchen, SHAO Zhuxiao, LI Huajun, et al. An automated threshold selection method based on the characteristic of extrapolated significant wave heights[J]. *Coastal Engineering*, 2019, 144: 22-32. (收稿日期: 2022-08-29 编辑: 熊水斌)