



# 基于蒙特卡洛法的波浪极值 推算不确定性分析\*

闫志铎, 夏运强, 段成林, 甄 珠  
(中国人民解放军91053部队, 北京100070)

**摘要:** 港口防波堤的设计标准一般需要通过推算波浪极值来确定, 然而极值推算具有一定的不确定性。为了清晰地了解和把握推算结果的不确定性, 分析观测误差、数据量和推算模型3种因素对推算结果造成的影响。基于蒙特卡洛法生成随机样本模拟3种因素, 分别对应极值推算中的物理不确定性、统计不确定性和模型不确定性。结果表明, 物理不确定性越大, 极值推算结果越不稳定并有略微增大的趋势, 且对短重现期极值的影响更大。较大的样本容量具有较小的统计不确定性, 对于长重现期极值影响更大。对于短重现期, Pearson-III分布具有较小的模型不确定性; 对于长重现期, Weibull分布具有较小的模型不确定性。

**关键词:** 蒙特卡洛法; 极值推算; 不确定性分析; 设计标准; 重现期

中图分类号: U656.2

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2026)02-0029-08

## Uncertainty analysis of wave extreme value estimation based on the Monte Carlo method

YAN Zhiduo, XIA Yunqiang, DUAN Chenglin, ZHEN Zhu  
(No. 91053 Unit of PLA, Beijing 100070, China)

**Abstract:** The design standards of port breakwaters are generally determined by calculating the extreme values of waves, but the calculation of extremes has a certain degree of uncertainty. To clearly understand and grasp of the uncertainty of the calculation results, the influences of three factors, namely observation errors, data volume and calculation models, on the calculation results are analyzed. Based on the Monte Carlo method, stochastic samples are generated to simulate these three factors, corresponding to the physical uncertainty, statistical uncertainty, and model uncertainty in the extreme wave calculation. The results show that the greater the physical uncertainty, the more unstable the extreme wave calculation results are and there is a slight increasing trend, and the impact on short return period extreme waves is greater. Moreover, a larger sample size has smaller statistical uncertainty and has a greater impact on long return period extreme waves. For short return periods, the Pearson-III distribution has smaller model uncertainty, and for long return periods, the Weibull distribution has smaller model uncertainty.

**Keywords:** Monte Carlo method; extreme value calculation; uncertainty analysis; design standard; return period

波浪对防波堤的设计至关重要<sup>[1-4]</sup>, 一般需要通过推算波高和波周期的重现期极值来确定防波堤的设计标准<sup>[5-6]</sup>。然而在推算过程中, 波浪要素的数据观测、样本选取以及推算模型等存在较多

的不确定性, 导致同一个海域的波浪要素使用不同的数据或模型可能推算出不同的结果, 如果差异较大对设计标准的确定带来困难。JTS 145—2025《港口与航道水文规范》<sup>[7]</sup>第6.4.5条规定, 波

收稿日期: 2025-06-05 录用日期: 2025-07-25

\*基金项目: 国家重点研发计划项目(2022RDC2012301)

作者简介: 闫志铎(1991—), 男, 博士, 工程师, 从事波浪模拟、极值推算研究等工作。

高和周期的频率曲线可采用 Pearson-III 型曲线。有条件时,也可以选配极值 I 型分布(Gumbel 分布)、对数正态分布和 Weibull 分布等其他的理论频率曲线,以确定不同重现期的设计波浪。Yan 等<sup>[8-9]</sup>使用了不同的数据、概率分布函数和参数估计方法推算极值风速,结果有明显的差异,并且随着重现期的增长,这种差异逐渐增大,其中使用对数正态分布和 Weibull 分布推算时,3 个计算点 100 a 一遇风速相差均在 10 m/s 以上,而对数正态分布和 Weibull 分布均为 JTS 145—2025《港口与航道水文规范》推荐的分布函数,因此难以确定最优的设计参数。

极值推算中的不确定性是无法避免的,并且当重现期较长时,不同计算之间的差异更大,当推算超长重现期极值时,为了减少这种不确定性,可以使用推演法<sup>[10-11]</sup>。陈慧娜等<sup>[12]</sup>的研究表明,蒙特卡洛法在不确定性分析中的应用具有明显的优势。于思源<sup>[13]</sup>提出了一种尾部修正蒙特卡洛方法,经过验证显示,该方法具有良好的计算精度,尤其是在稳定性方面具有显著优越性。李文斌等<sup>[14]</sup>使用 Pearson-III 型和极值 I 型分布推算了不同重现期的最大日降雨量,发现使用极值 I 型分布推算的 5~50 a 一遇最大日降雨量的结果与实有年份滑动平均值的拟合程度更高。王丽萍等<sup>[15]</sup>对 Gumbel、Pearson-III 以及考虑台风影响的 Poisson-Gumbel、Poisson-Weibull 等分布模式进行比较和检验,以整体不确定度作为检验上述几种模式优劣的度量,给出了度量结果,并在不同条件下给出设计波高的计算值。段忠东等<sup>[16]</sup>将极值风速看作随机变量,提出了一种新的抽样方法,可以弥补实测日最大风速资料的不足,得到了不同重现期、不同置信水平的极值风速区间,为合理确定海洋平台结构的设计风荷载提供了依据。

极值推算的不确定性一般是由于物理不确定性、统计不确定性和模型不确定性造成的。本文分析 3 种不确定性对极值推算结果造成的影响,

比较长重现期和短重现期推算结果影响程度,探索由于观测误差、数据量和推算模型而影响极值推算结果的规律,旨在加强对不确定性的把握,减少因推算结果的不确定性而使设计参数不合理。本文的创新点为采用蒙特卡洛方法对波浪极值推算的不确定性进行分析,使用随机生成的误差叠加历史样本模拟物理不确定性,分析物理不确定性对极值推算结果造成的影响;使用不同样本容量的随机样本分析统计不确定性对极值推算结果造成的影响;使用不同概率分布模型拟合样本分析模型不确定性对极值推算结果造成的影响。

## 1 研究方法

### 1.1 蒙特卡洛法

蒙特卡洛法又称随机模拟方法,是一种基于概率统计理论,通过构造概率模型或随机过程,利用大量随机模拟试验来求解问题的数值计算方法<sup>[17]</sup>。本文使用蒙特卡洛法分析物理不确定性、统计不确定性和模型不确定性对极值推算结果的影响。

在极值推算中,推算结果的差异主要是由于物理不确定性、统计不确定性和模型不确定性造成的。其中物理不确定性指自然界中客观存在的、本质上的不确定性。波浪的物理不确定性表现为海面波浪的随机性,其本质可以看作是不同周期和振幅的正弦波叠加而成。统计不确定性是由于数据的有限性和随机性导致的。JTS 145—2025《港口与航道水文规范》中规定“进行波高或周期的频率分析时,应取近期连续的资料,年数不宜少于 20 a”。目前现存的有效观测数据一般不超过 80 a,有限的样本造成了统计不确定性。模型不确定性是指由于所使用的模型不能完全准确地描述真实系统或过程而产生的不确定性。任何概率分布曲线都只能近似地对样本进行拟合,这就造成了模型不确定性。

将极值推算的物理不确定性模拟为样本值的

随机误差(一般服从正态分布),将现有样本加上随机误差后形成随机样本,比较不同随机样本推算结果的差异性,分析物理不确定性对推算结果的影响。随机选取不同样本容量的样本,比较推算结果的差异性,分析统计不确定对推算结果的影响。选取黄海海域100组样本,分别使用不同的概率分布曲线进行拟合,比较推算结果的差异性,分析模型不确定性对推算结果的影响。

### 1.2 极值推算模型

在非台风多发海区波浪的极值推算中,一般选取计算点处每年波浪要素的最大值作为样本,然后使用概率分布函数对样本进行拟合,推算其重现期极值。本文主要使用 Weibull 分布、GEV 分布和 Pearson-III 曲线分布对有效波高样本进行拟合,见式(1)~(3)。

Weibull 分布函数:

$$H_3(x; \mu, \sigma, \alpha) = \begin{cases} \exp\left[-\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^\alpha\right], & x \leq \mu \\ 1, & x > \mu \end{cases} \quad \alpha > 0 \quad (1)$$

GEV 分布函数:

$$H(x; \mu, \sigma, \xi) = \exp\left[-\left(1 + \xi \frac{x-\mu}{\sigma}\right)^{-1/\xi}\right], 1 + \xi(x-\mu)/\sigma > 0 \quad (2)$$

Pearson-III 型概率分布的密度函数:

$$f(x) = \frac{\beta^\alpha}{\Gamma(\alpha)} (x-a_0)^{\alpha-1} e^{-\beta(x-a_0)} \quad (3)$$

$$\Gamma(\alpha) = \int_0^\infty t^{\alpha-1} e^{-t} dt \quad (4)$$

式中:  $\alpha$ 、 $\xi$  为形状参数;  $\mu$  为位置参数;  $\sigma$  为尺度参数;  $x$  为函数自变量;  $\Gamma(\alpha)$  为  $\alpha$  的伽马函数;  $a_0$  为曲线起点的横坐标值, 待定参数;  $\alpha$ 、 $\beta$  为待定参数。

### 1.3 统计量

本文使用的统计量主要有均值、标准差、最大值、最小值和变异系数。均值  $\mu$  描述了样本数

据相对集中的中心位置; 标准差  $\sigma$  描述了样本数据的离散程度; 变异系数是衡量数据资料中各变量观测值变异程度的一个统计量, 其定义为标准差与平均数的比值, 即  $\sigma/\mu$ 。计算公式为:

$$\mu = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i \quad (5)$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (X_i - \mu)^2} \quad (6)$$

式中:  $X$  为样本值。

## 2 不确定性分析

### 2.1 数据来源

本文使用的数据来源于 ERA5 数据库。欧洲中期天气预报中心(ECMWF)向全球提供最新的大气数值预报再分析数据, 其中 ERA5 是利用 ECMWF 综合预报系统 CY41R2 中的 4D-Var 资料同化产生的, 提供大量的逐时大气、陆地和海洋气候变量, 并利用先进的建模和数据同化系统将大量的历史观测数据结合到全球估计中。从地表到 80 km 高空分为 137 个高度解析了大气模型。ERA5 降低了空间和时间分辨率对所有变量造成的不确定性。该数据库收录了 1949—2024 年的数据, 并不断更新中。本文所使用的是 ERA5 数据库中风浪和涌浪叠加的有效波高, 时间分辨率为 1 h, 空间分辨率为 0.5°。不失一般性, 本文选取的计算点经纬度分别为 120.5°E、36°N, 位于青岛东南侧海域, 见图 1。

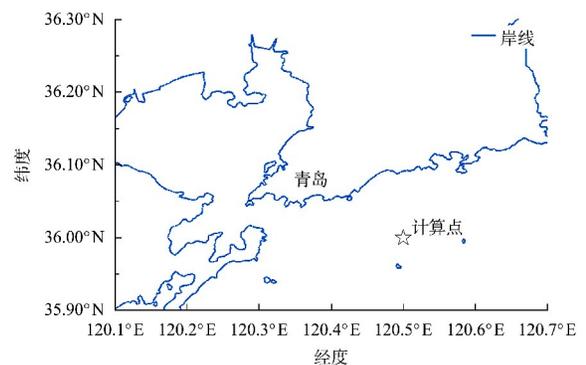


图1 计算点位置

Fig. 1 Position of calculated point

选取计算点 1949—2024 年的有效波高年最大值作为样本，有效波高样本值在 2~4 m，主要集中在 2.3~3.2 m，见图 2、3。基于此样本进行极值推算的不确定性分析。

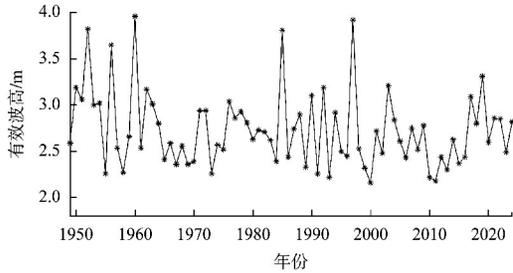


图 2 历年有效波高样本值

Fig. 2 Sample values significant wave height over the years

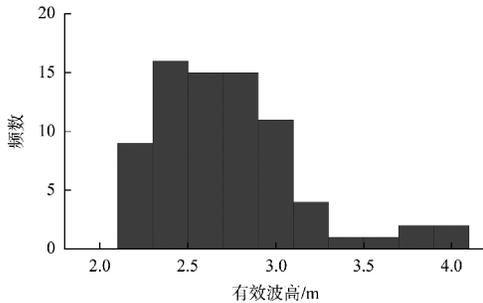


图 3 历史样本频数直方图

Fig. 3 Historical sample frequency histogram

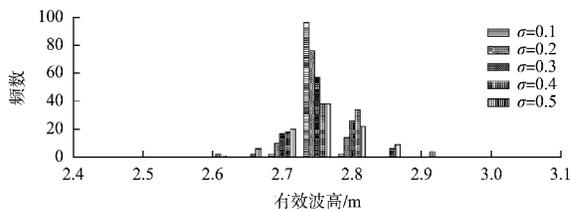
## 2.2 物理不确定性分析

由于物理不确定性的存在，观测的样本值总会存在误差，其一般服从均值为 0 的正态分布。20 世纪 90 年代末期之前我国海洋系统沿海波浪观测资料的获得几乎全部采用人工或借助于岸用测波仪的目测方法<sup>[18]</sup>，对波高的观测误差(误差的标准差)一般为 0.1~0.3 m。为了分析观测误差以及误差更大时对结果造成的影响，分别从均值  $\mu = 0$ ，标准差  $\sigma$  为 0.1、0.2、0.3、0.4、0.5 的正态分布中随机抽取 100 组样本，作为偏差叠加到原样本值中，使用 Weibull 分布进行拟合推算。不同的  $\sigma$  值代表了不同的误差大小， $\sigma$  值越大表示观测的误差越大。为分析误差的大小对推算结果造成的影响，对不同  $\sigma$  值样本推算的 2 a 一遇和 100 a 一遇波高的 100 组结果进行分析得知，随着  $\sigma$  值的增大，100 组 2 a 一遇和 100 a 一遇推算结果的均值略有增大，标准差、最大值、变异系数也在增大，见表 1。 $\sigma$  值的增大会使推算结果的分布更加分散，推算结果更加不稳定，见图 4。图 4a) 的组距为 0.05 m，图 4b) 的组距为 0.10 m。因此，观测误差的增大会使推算结果的不确定性增大。

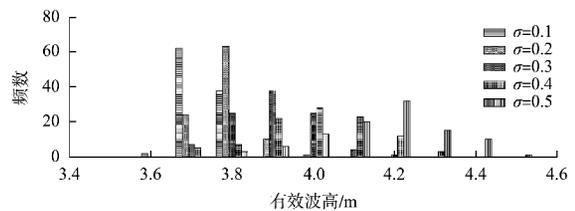
表 1 100 组不同  $\sigma$  值有效波高推算结果统计值

Tab. 1 Statistical values of 100 groups of significant wave height calculation results with different  $\sigma$  values

$\sigma$	2 a 一遇					100 a 一遇				
	均值	标准差	最大值	最小值	变异系数/%	均值	标准差	最大值	最小值	变异系数/%
0.1	2.750	0.012	2.784	2.721	0.89	3.739	0.033	3.831	3.651	0.43
0.2	2.752	0.022	2.816	2.707	1.43	3.781	0.054	3.957	3.621	0.79
0.3	2.755	0.032	2.82	2.676	2.55	3.897	0.100	4.198	3.708	1.15
0.4	2.757	0.049	2.869	2.575	3.34	4.001	0.134	4.284	3.674	1.77
0.5	2.757	0.058	2.908	2.591	3.58	4.162	0.149	4.495	3.753	2.10



a) 2 a 一遇



b) 100 a 一遇

图 4 不同  $\sigma$  值有效波高推算结果分布

Fig. 4 Distribution of calculation results of the significant wave heights with different  $\sigma$  values

通过以上分析可知, 物理不确定越大, 推算结果的不确定性越大。可以使用推算结果变异系数衡量不确定性的 大小, 变异系数越大表明数据之间差异越大, 结果越不稳定。比较表 1 中的变异系数可以看出, 相对于长重现期极值, 同样的物理不确定性使短重现期极值结果的不确定性更大。在极值推算中, 应该尽可能提高观测精度、减小误差、使样本值更加精确, 以减小物理不确定性对推算结果造成的影响。

### 2.3 统计不确定性分析

在现实条件下, 往往只能获取有限的样本进行统计分析, 不同样本容量的样本推算结果的稳定性不同, 是由于统计不确定性造成的。本文使用的数据年限为 1949—2024 年, 共 76 a。选取每年有效波高最大值作为样本, 样本容量为 76。对该 76 个样本值进行无放回的随机抽样, 分别抽取样本容量为 10、20、30、40、50、60、70 的样本, 使用 Weibull 分布拟合进行极值推算, 此步骤重复 100 组。对不同容量样本推算的 2 a 一遇和 100 a 一遇波高的 100 组结果进行分析可知, 随着

样本容量的增大, 100 组推算结果的分布越来越集中, 见图 5。图 5a) 的组距为 0.05 m, 图 5b) 的组距为 0.15 m。随着样本容量的增大, 100 组推算结果的标准差和变异系数越来越小, 均值没有明显的增减趋势, 见表 2。可见, 样本容量增大会使推算结果的不确定性减小。

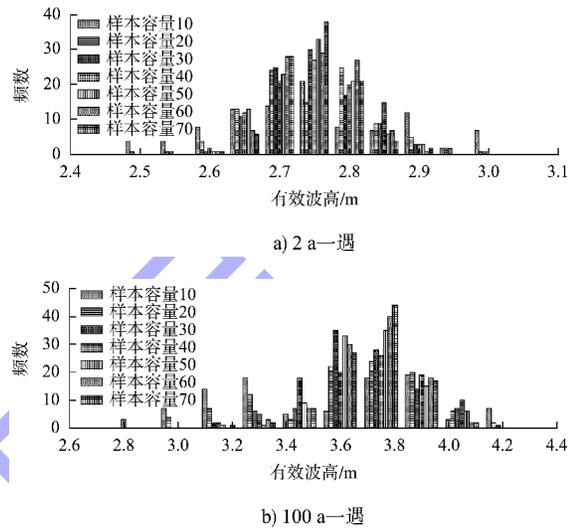


图 5 不同样本容量有效波高推算结果分布  
Fig. 5 The distribution of calculation results of significant wave heights with different sample sizes

表 2 100 组不同样本容量有效波高推算结果统计值

Tab. 2 Statistical values of significant wave height calculation results for 100 groups of different sample sizes

样本容量	2 a 一遇					100 a 一遇				
	均值	标准差	最大值	最小值	变异系数/%	均值	标准差	最大值	最小值	变异系数/%
10	2.753	0.131	3.132	2.477	4.75	3.559	0.379	4.263	2.827	10.66
20	2.749	0.086	2.987	2.524	3.12	3.633	0.284	4.219	2.967	7.83
30	2.754	0.073	2.979	2.569	2.67	3.684	0.203	4.141	3.084	5.50
40	2.756	0.069	2.904	2.584	2.49	3.696	0.213	4.094	3.173	5.76
50	2.747	0.061	2.905	2.624	2.20	3.709	0.164	4.059	3.144	4.43
60	2.752	0.055	2.899	2.612	2.01	3.707	0.153	4.030	3.270	4.12
70	2.748	0.052	2.887	2.608	1.89	3.700	0.150	4.082	3.146	4.06

比较表 2 中的变异系数, 100 a 一遇结果的变异系数均较 2 a 一遇结果的变异系数大, 表明同样的统计不确定性使长重现期极值结果比短重现期极值结果的不确定性更大。变异系数随着样本容量的增大不断减小, 表明较大的样本容量具有较小的统计不确定性。当样本容量小于 30 时, 变异系数明显高于样本容量大于 30 时的变异系数; 当样本容量大于 30 时, 随着样本容量的增加变异系数减小的速率明显变缓。ISO 19901-1:2015 *Petroleum and Natural Gas Industries-Specific Requirements for*

*Offshore Structures-Part 1: Metocean Design and Operating Considerations*<sup>[19]</sup> 指出, 为获得较准确的海洋环境参数推算结果, 重现期不应超过数据年限长度的 4 倍, 即推算 100 a 一遇所使用的数据不应少于 25 a。JTS 145—2025《港口与航道水文规范》规定, 进行波高或周期的频率分析时, 年数不宜少于 20 a。从本文的分析可以看出, 当样本容量小于 30 时, 统计不确定性会急剧增大, 因此建议在波浪极值推算中样本容量一般不要小于 30。

### 2.4 模型不确定性分析

使用不同概率分布函数拟合样本一般会有不同的极值推算结果，这是由于模型不确定性引起的。分别使用 Pearson-III 分布、Weibull 分布和 GEV 分布拟合样本，3 条曲线与样本拟合均较好，见图 6。10 a 及以下重现期，Weibull 分布推算的结果最大，Pearson-III 分布次之，GEV 分布推算的结果最小；25 a 及以上重现期，GEV 分布推算的结果最大，Pearson-III 分布次之，Weibull 分布推算的结果最小，见表 3。

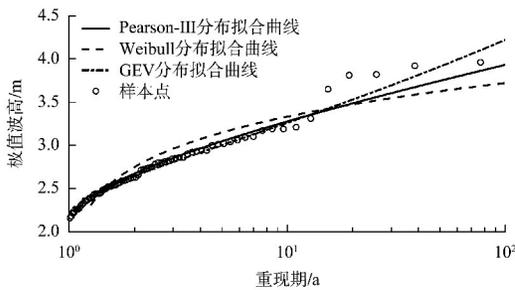


图 6 不同概率分布曲线拟合有效波高样本

Fig. 6 Significant wave height samples fitted with different probability distribution curves

表 3 不同分布有效波高极值推算结果

Tab. 3 Calculation results of extreme values of significant wave heights for different distributions m

分布模式	重现期	重现期	重现期	重现期	重现期	重现期
	2 a	5 a	10 a	25 a	50 a	100 a
Pearson-III 分布	2.673	3.045	3.275	3.551	3.745	3.931
Weibull 分布	2.749	3.146	3.331	3.514	3.626	3.721
GEV 分布	2.643	2.999	3.259	3.619	3.909	4.219

不同极值推算模型一般也会导致推算结果具有不同的不确定性。从黄海海域选取 100 个计算点，同样每个计算点选取 1949—2024 年波高最大值作为样本，共有 100 组样本，选取点的位置见图 7。分别使用 Pearson-III 分布、Weibull 分布和 GEV 分布拟合 100 组样本，推算 2 a 一遇和 100 a 一遇结果，见图 8。

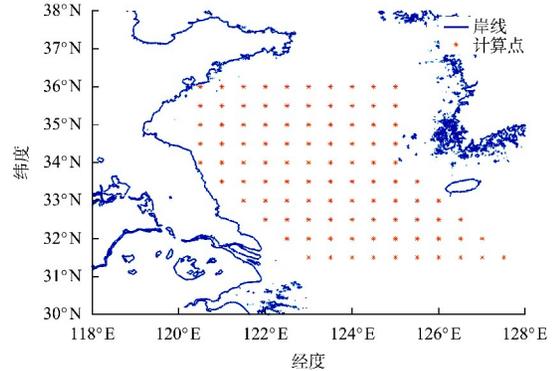


图 7 黄海海域 100 个计算点位置

Fig. 7 Positions of 100 calculation points in the Yellow Sea area

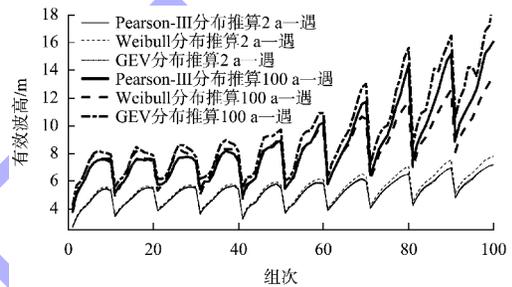


图 8 100 组 2 a 一遇和 100 a 一遇有效波高推算结果

Fig. 8 Calculation results of 100 sets of significant wave heights that occur once in two years and once in a hundred years

100 组随机样本推算的结果具有相似的规律，使用 Weibull 分布推算的 2 a 一遇结果最大，Pearson-III 分布和 GEV 分布的结果相近；使用 GEV 分布推算的 100 a 一遇结果最大，Pearson-III 分布次之，Weibull 分布推算的结果最小，见表 4。在港口设计中，一般泊稳设计标准参考波浪 2 a 一遇结果，防波堤设计标准参考波浪 50 a 一遇或者 100 a 一遇结果。因此，实际工程中如果更加注重泊稳时，可以使用 Weibull 分布推算的结果，如果更加注重防波堤的结构安全时，可以使用 GEV 分布推算的结果，而使用 Pearson-III 分布推算的结果是一个折中的选择。

表 4 100 组样本推算结果统计值

Tab. 4 Statistical values of the calculation results of 100 groups of samples

分布模式	2 a 一遇					100 a 一遇				
	均值	标准差	最大值	最小值	变异系数/%	均值	标准差	最大值	最小值	变异系数/%
Pearson-III 分布	5.225	0.923	7.206	2.673	17.66	8.587	2.692	16.122	3.931	31.36
Weibull 分布	5.417	1.036	7.786	2.749	19.13	8.230	2.027	13.733	3.721	24.63
GEV 分布	5.173	0.926	7.142	2.643	17.90	9.482	3.09	19.237	4.219	32.59

分析表4中的变异系数,100 a一遇的结果比2 a一遇的结果具有更大的变异系数,表明同样的模型不确定性使长重现期极值结果比短重现期极值结果的不确定性更大。而对于不同的极值分布,2 a一遇的结果中 Pearson-III 分布具有较小的变异系数,100 a一遇的结果中 Weibull 分布具有较小的变异系数。因此,对于短重现期, Pearson-III 分布具有较小的模型不确定性;对于长重现期, Weibull 分布具有较小的模型不确定性。

### 3 结论

1) 观测误差越大,物理不确定性越大,极值推算结果越不稳定且有略微增大的趋势,这种不确定性对短重现期极值的影响更大。在极值推算中,应该尽可能提高观测精度、减小误差、使样本值更加精确,以减小物理不确定性对推算结果造成的影响。

2) 较大的样本容量具有较小的统计不确定性,并且使极值推算结果更加稳定,统计不确定性对于长重现期极值比短重现期极值的影响更大。当样本容量小于30时,统计不确定性会急剧增大,因此建议用于极值推算的样本容量不要小于30。

3) 对于短重现期, Pearson-III 分布具有较小的模型不确定性, Weibull 分布推算的结果较大;对于长重现期, Weibull 分布具有较小的模型不确定性, GEV 分布推算的结果较大。实际工程中如果更加注重泊稳时,可以使用 Weibull 分布推算的结果;如果更加注重防波堤的结构安全时,可以使用 GEV 分布推算的结果。

### 参考文献:

- [1] 刘铭祎,王亥索,陈雨.中英直立式防波堤设计标准比较研究[J].中国水运,2024(8):78-80.  
LIU M Y, WANG H S, CHEN Y. Comparative study on

design standards of vertical breakwater between China and Britain[J]. China water transport, 2024(8): 78-80.

- [2] 蒋美娇,吴曼涓.复杂海床地形条件下的斜坡堤设计方案[J].水运工程,2025(5):141-148.  
JIANG M J, WU M J. Design scheme of sloping breakwater in complex seabed terrain[J]. Port & waterway engineering, 2025(5): 141-148.
- [3] 蒋美娇,李冠星.提高已建防波堤防护标准的技术改造方案[J].水运工程,2025(4):99-105.  
JIANG M J, LI G X. Technical transformation schemes for improving protection standards of existing breakwater[J]. Port & waterway engineering, 2025(4): 99-105.
- [4] 夏悟民,王毅,万志男.滨海核电站厂海工建筑物设计标准探讨[J].水运工程,2019(9):206-210,221.  
XIA W M, WANG Y, WAN Z N. Discuss on design standard for marine structure of coastal nuclear power plant[J]. Port & waterway engineering, 2019(9): 206-210, 221.
- [5] 王付坤,杨汜,刘鹏飞.吉布提 LNG 厂址波浪极值推算[J].水运工程,2020(5):98-104.  
WANG F K, YANG F, LIU P F. Calculation of wave extreme value in Djibouti LNG plant site [J]. Port & waterway engineering, 2020(5): 98-104.
- [6] 赵津京,李继选.飓风极值波浪数值模拟[J].水运工程,2017(6):39-44.  
ZHAO J J, LI J X. Numerical simulation of extreme hurricane waves [J]. Port & waterway engineering, 2017(6): 39-44.
- [7] 港口与航道水文规范:JTS 145—2015(2022 版)[S].北京:人民交通出版社股份有限公司,2022.  
Code of hydrology for harbour and waterway: JTS 145-2015 (2022 ed.) [S]. Beijing: China Communications Press Co., Ltd., 2022.
- [8] YAN Z D, PANG L, DONG S. Analysis of extreme wind speed estimates in the northern South China Sea [J]. Journal of applied meteorology and climatology, 2020, 59(10): 1625-1635.

- [9] YAN Z D, WANG Z L, PANG L. Study of the wind conditions in the South China Sea and its adjacent sea area[J]. Journal of Ocean University of China, 2022, 21(2): 264-276.
- [10] YAN Z D, LIANG B C, WU G X, et al. Ultra-long return level estimation of extreme wind speed based on the deductive method [J]. Ocean engineering, 2020, 197: 106900.
- [11] 程雨佳, 庞亮, 董胜. 台风条件下南海海域超长重现期波高推算的研究[J]. 中国海洋大学学报, 2019, 49(S2): 125-132.
- CHENG Y J, PANG L, DONG S. The study on the estimation of very long return-period significant wave height during hurricane in the region of China South Sea[J]. Periodical of Ocean University of China, 2019, 49(S2): 125-132.
- [12] 陈慧娜, 刘清秀. 蒙特卡洛模拟法在建设项目不确定性分析中的运用[J]. 内蒙古科技与经济, 2025(4): 35-39.
- CHEN H N, LIU Q X. Application of Monte Carlo simulation method in uncertainty analysis of construction project[J]. Inner Mongolia science technology & economy, 2025(4): 35-39.
- [13] 于思源. 水下柔性结构尾部修正蒙特卡洛极值预测与可靠性分析方法研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2024.
- YU S Y. Research on tail-corrected Monte Carlo extreme value prediction and reliability analysis method for underwater flexible structure[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2024.
- [14] 李文斌, 吴振强, 史成, 等. 用两种极值推断法推算粤中上百年一遇最大日降雨量[J]. 广东气象, 2014, 36(1): 51-54.
- LI W B, WU Z Q, SHI C, et al. Estimation of maximum daily rainfall amount at the frequency of once in 100 years in central Guangdong Province using two methods of extreme inference[J]. Guangdong meteorology, 2014, 36(1): 51-54.
- [15] 王莉萍, 王莉, 孙效光, 等. 极值分布模式在设计波高推算中的应用[C]//中国海洋工程学会. 第十五届中国海洋(岸)工程学术讨论会论文集. 北京: 海洋出版社, 2011: 637-642.
- WANG L P, WANG L, SUN X G, et al. Application of extreme value distribution pattern in design wave height calculation [C]//China Ocean Engineering Society. Proceedings of the 15th China Marine (Shore) Engineering Academic Symposium. Beijing: China Ocean Press, 2011: 637-642.
- [16] 段忠东, 周道成, 欧进萍. 渤海和南海海域极值风速的置信区间[J]. 海洋通报, 2003, 22(2): 17-24.
- DUAN Z D, ZHOU D C, OU J P. Confidence interval of extreme wind speed for the Bohai Sea and the South China Sea [J]. Marine science bulletin, 2003, 22(2): 17-24.
- [17] STEVENS A. Monte-Carlo simulation: an introduction for engineers and scientists[M]. Leiden: CRC Press, 2022.
- [18] 水运工程波浪观测和分析技术规程: JTJ/T 277—2006[S]. 北京: 人民交通出版社, 2006.
- Technical regulations for wave observation and analysis in port and waterway engineering: JTJ/T 277-2006[S]. Beijing: China Communications Press, 2006.
- [19] Petroleum and natural gas industries: specific requirements for offshore structures: part 1: Metocean design and operating considerations: ISO 19901-1: 2015 [S]. Geneva: International Organization for Standardization, 2015.

(本文编辑 王传瑜)