

· 综合 ·



长江口徐六泾水文站极值水位研究^{*}

徐 昕¹, 殷成团², 章卫胜², 熊梦婕², 张金善², 张 帆³, 刘传杰¹

(1. 水利部长江水利委员会水文局, 长江口水文水资源勘测局, 上海 200136;

2. 南京水利科学研究院, 水灾害防御全国重点实验室, 江苏 南京 210029;

3. 中国人民解放军 92295 部队, 广东 湛江 524000)

摘要: 在气候变化背景下, 极端天气和水位事件频发。为了分析长江口极端潮位的长周期特征, 研究基于极值理论相关方法, 采用近 33 a 实测资料对长江口极值潮位趋势性和重现期进行分析, 结果表明: 长江口徐六泾站年极值水位呈轻微下降趋势, 直接原因是大通流量减少导致当地年均海面的下降; 区分组模型结果显示, 台风“温妮”期间长江口造成的风暴潮位为 100 a 一遇, 而 POT 模型计算结果仅为 60 a 一遇, 100 a 一遇重现期潮位约 7.0 m; 潮位重现期的计算本质是一种用频率代替概率、从样本推求整体的过程, 具有一定不确定性。其意义在于以可获取的数据为基础, 计算事件发生的风险率, 旨在为工程设计或风险管理提供依据。

关键词: 长江口; 极值水位; 趋势性; 重现期

中图分类号: P732; U61

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2024)04-0001-08

Extreme water level at Xuliujiang hydrological station in the Yangtze Estuary

XU Xin¹, YIN Chengtuan², ZHANG Weisheng², XIONG Mengjie², ZHANG Jinshan²,
ZHANG Fan³, LIU Chuanjie¹

(1. Yangtze Estuary and Water Resources Survey Bureau, Changjiang Water Resources Commission, Shanghai 200136, China;

2. The National Key Laboratory of Water Disaster Prevention, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China;

3. Unit 92295 of the People's Liberation Army, Zhanjiang 524000, China)

Abstract: In the context of climate change, extreme weather and water level events occur frequently. To study the long-term evolution characteristics of extreme tide levels in the Yangtze Estuary, this paper analyzes the tendency and the return period of the extreme tide level in the Yangtze Estuary based on the methods of the extreme value theory, using the observed data in the last 33 years. The results show that the annual extreme water level at Xuliujiang station shows a slight downward trend, which is directly caused by the decrease of local mean sea level due to the reduced river discharge of Datong station. The storm tide level caused by Typhoon Winnie in the Yangtze Estuary is estimated to be a once-in-a-century event according to the Block Maximum model. However, it is projected to occur once in 60 years based on the results of the POT model, with the once-in-a-century return period tide level reaching 7.0 m. Calculation of the return period of tide level is essentially a process of replacing probability with frequency and extrapolating from sample to the whole, with a certain degree of uncertainty. Its significance lies in using obtainable data to calculate the risk rate of an event, providing a basis for engineering design or risk management.

Keywords: Yangtze Estuary; extreme water level; tendency; return period

收稿日期: 2023-08-17

*基金项目: 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金项目(Y123008)

作者简介: 徐昕 (1981—), 男, 硕士, 高级工程师, 从事海洋水文与海洋测绘研究。

在气候变化背景下,极端天气和水位事件频发^[1],对人民生命安全和社会发展构成重大威胁,已经引起世界范围内的高度关注^[2]。沿海极端水位频现主要受台风暴潮强化和全球海平面上升的影响。20世纪70年代以来,全球海洋持续变暖^[3],超强台风出现的比例明显变大,东亚和东南亚沿海地区登陆的强台风数量明显增加^[4-6]。到2100年,西北太平洋的平均台风强度可能增大14%^[7]。与此同时,全球变暖导致的海平面上升抬高了沿海基础水位,增加风暴潮灾害的潜在风险^[8]。海平面上升不仅会改变风暴潮的发生时间,而且会使风暴潮幅度增大6%~10%^[9]。许炜宏和蔡榕硕^[10]分析不同气候情景下的预测数据,发现未来我国沿海极值水位的重现期较当前将明显缩短;庄圆等^[11]发现在RCP8.5路径情景下,中国沿海极值水位重现期缩短最为显著,到2100年,中国沿海地区潮位站的100 a一遇极值水位将变为1~18 a一遇;Tebaldi等^[12]发现海平面上升会在很大程度上改变美国沿海防洪基础设施的设计频率,原来100 a一遇的设计潮位将退化为10 a一遇;Sweet和Park^[13]研究表明,无论何种代表路径下的预测结果,在海平面上升的影响下,美国大多沿海站点潮位均会在未来几十年内超过临界值。

河口海岸地区处于海陆交互作用的洪水灾害脆弱地带,受径流、降雨、天文潮和风暴潮等多种动力要素影响,是洪涝灾害最活跃的地区之一^[14]。研究河口极值水位的特征和变化规律,可为沿海防洪、海洋工程设计、滩涂利用规划和气候变化适应性提供重要的科学依据。

1 数据与方法

1.1 数据介绍

选择长江口徐六泾水文站作为研究对象。徐六泾水文站的水位数据主要由每日高低潮位和风暴潮期间逐时水位两部构成(1988—2020年)。采用三角插值法将高低潮位插值为逐时水位序列,风暴潮期间水位用实测水位替代。

1.2 极值理论

1.2.1 广义极值分布(GEV)与区分组最大值模型

设 X_1, X_2, \dots, X_n 为n个独立同分布的随机变量,分布函数为 $F(x)$,令 $M_n = \max\{X_1, \dots, X_n\}$ 为n个随机变量的最大值,则

$$P(M_n \leq x) = \Pr(X_1 \leq x, \dots, X_n \leq x) = F^n(x) \quad (x \in R) \quad (1)$$

式中: R 为实数集。

根据Fisher-Tippett极值类型定理,如果存在常数列 $\{a_n > 0\}$ 和 $\{b_n\}$,使得式(2)成立:

$$\lim_{n \rightarrow \infty} P\left(\frac{M_n - b_n}{a_n} \leq x\right) = G(x) \quad (x \in R) \quad (2)$$

其中 $G(x)$ 为非退化的分布函数,则 $G(x)$ 的表达式为:

$$G(x; \mu, \sigma, \xi) = \exp\left\{-\left(1 + \xi \frac{x - \mu}{\sigma}\right)^{-1/\xi}\right\} \quad (3)$$

式中: G 为广义极值分布(generalised extreme value distributions, GEV), μ 为位置参数(location parameter), σ 为尺度参数(scale parameter), ξ 为形状参数(shape parameter), $\mu, \xi \in R, \sigma > 0, 1 + \xi(x - \mu)/\sigma > 0$ 。当形状参数为0时,该分布即为Gumbel分布(极值I型分布);当形状参数大于0,该分布为Frechet分布(极值II型分布);当形状参数小于0时,该分布称为Weibull分布(极值III型分布)^[15-16]。

1.2.2 广义帕利托分布(GPD)与阈值模型

区分组最大值模型可以有效地解决数据独立性问题,但也会造成数据浪费。为了最大程度地利用数据中的极值信息,可采用超过某个阈值(很大的值)的所有数据来建立模型,即阈值模型。设 X_1, X_2, \dots, X_n 是独立同分布的随机变量序列,分布函数 F 支持的上端是 x^* ,称某固定大值 $u < x^*$ 为阈值(threshold),若 $X_i > u$,则称超阈值(exceedance),称 $X_i - u$ 为超出量(excess)。实际应用中随机变量的分布函数可以考虑超出量的极限分布——广义帕利托分布,即如果随机变量 X 的分布函数为:

$$G(x; \mu, \sigma, \xi) = 1 - \left(1 + \xi \frac{x - \mu}{\sigma}\right)^{-1/\xi} \quad (x \geq \mu, 1 + \xi(x - \mu)/\sigma > 0) \quad (4)$$

则称 X 服从广义 Pareto 分布(generalised pareto distribution), 简记为 GPD 或 GP 分布。其中 $\mu \in R$ 为位置参数, $\sigma > 0$ 为尺度参数, $\xi \in R$ 为形状参数。

2 极端潮位趋势性分析

为了研究气候变化背景下河口动力的长期演变特性, 以年为单位, 对河口极值潮位长周期趋势性特征进行分析。由图 1 可见, 徐六泾站年极值水位呈轻微下降趋势, 速率为 -1.6 mm/a 。年极值水位

变化较大, 最低极值水位 4.51 m (2006 年), 最高极值水位 4.97 m (1998 年)。年均水位基本维持在 $2.70 \sim 2.85 \text{ m}$ 之间, 从长期看亦呈波动下降趋势, 速率为 -0.7 mm/a (图 2)。可见, 徐六泾站附近平均海面的降低是极值潮位下降的原因之一。国内外学者对极值潮位长期变化进行研究, 发现全球大部分验潮站的极值潮位呈现上升趋势, 但减去平均海平面变化后这种趋势大幅减弱, 因此认为极值水位的变化主要由平均海面上升所致^[17]。

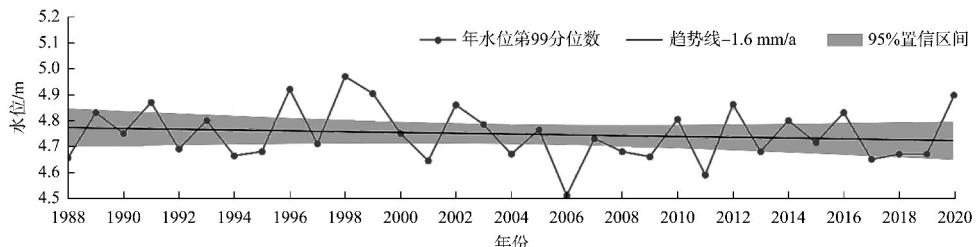
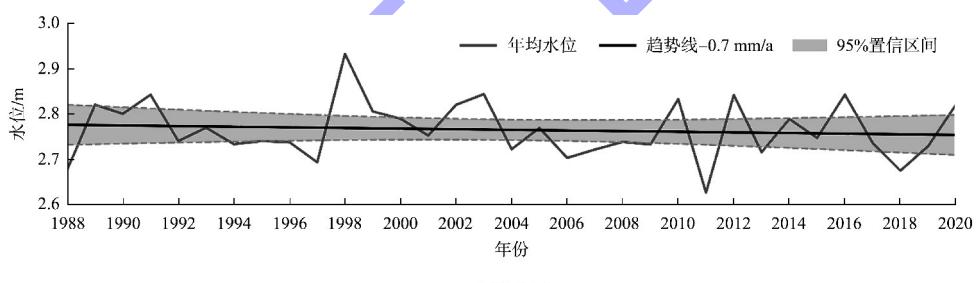
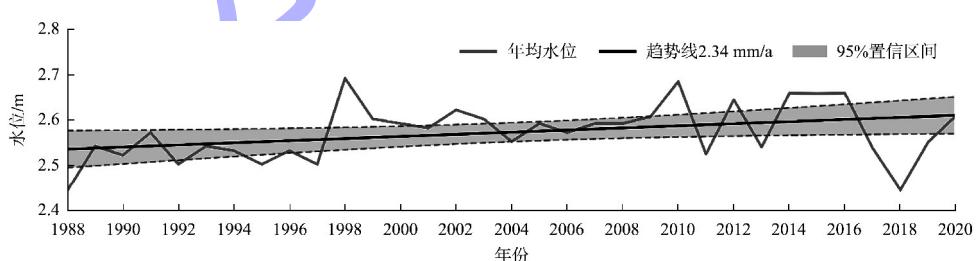


图 1 徐六泾站年水位第 99 分位数年际变化



a) 徐六泾



b) 杨林

图 2 近 33 a 间平均海平面变化

尽管徐六泾站平均海面的下降趋势微弱, 但这与全球气温上升、冰山融化、海平面上升导致全球海平面变化趋势相反。1980—2021 年中国东黄海连云港、大戢山和坎门站平均海面变化见图 3^[18]。可知, 中国东、黄沿海海平面逐年上升, 其中大戢

山站距长江口最近, 近 42 a 海平面平均上升速率为 3.15 mm/a 。长江口受上游径流和外海潮汐的共同作用, 长江口内平均海面上升速率减缓甚至与外海平面变化趋势相反的原因与上游径流量变化有关。杨林平均海面长期变化趋势上升, 尽管比

外海平均海面上升速率低 30% 左右, 见图 2b), 杨林站在徐六泾站下游 40 km 处, 外海潮动力影响更强。图 4 为徐六泾站年均水位与大通站年均径流量关系。由图可知, 近 30 a 中大通年均径流量呈下降趋势, 每年平均下降速率为 $-460 \text{ m}^3/\text{s}$, 与

徐六泾站年均水位变化趋势相同。平均水位的年际变化趋势和大通流量基本一致, 即徐六泾年均水位与上一年相比随着大通流量增加而增加, 随大通流量减少而下降, 两者相关性较强(相关系数 $r=0.823$)。

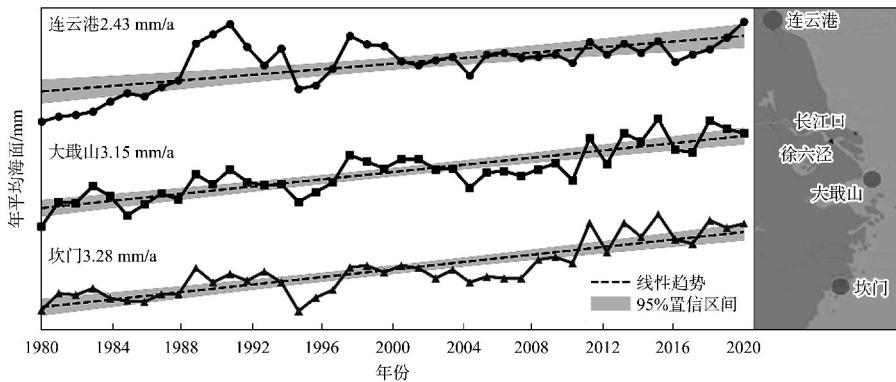


图 3 1980—2021 年中国东黄海连云港、大戢山和坎门站平均海面变化

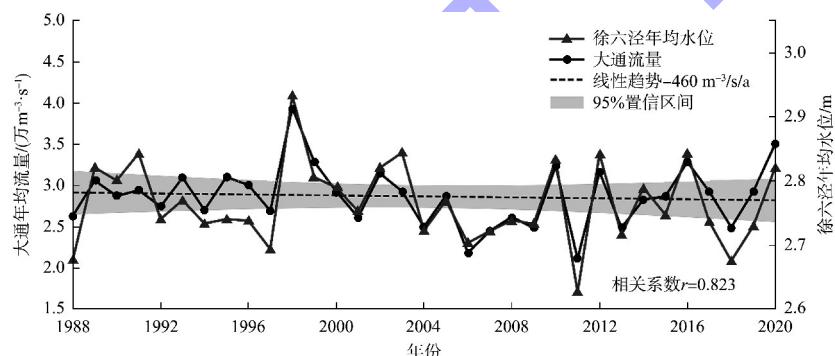


图 4 近 33 a 间徐六泾站年均水位与大通站年均流量关系

3 极端潮位重现期分析

3.1 基于区分组最值模型的潮位重现期分析

长江口的极端潮位一般由天文大潮和台风暴雨共同作用所致。天文潮为极端潮位提供了基础水位(可预测), 台风增水是极值潮位随机性的主要原因。极值分布的选择一直是沿海极值水位研究的重点问题。一般近似认为每年的极值潮位是独立的, 本节采用广义极值(GEV)分布和耿贝尔(Gumbel)分布对长徐六泾站年极值潮位的分布和重现期进行拟合和估计(年极值法)。表 1 为不同分布函数计算的重现期结果。采用 GEV 分布计算的 100、50 和 30 a 重现期潮位分别为徐六泾 6.85、6.57 和 6.38 m; 采用 Gumbel 分布计算的 100、50

和 30 a 重现期潮位分别为徐六泾 6.50、6.34 和 6.23 m。可以看出, 采用 GEV 分布计算的潮位重现期比 Gumbel 分布大 0.10~0.30 m。JTS 145—2015《港口与航道水文规范》中规定高(低)潮位的频率分布曲线首选 Gumbel 曲线, 而图 5a) 拟合结果表明, GEV 分布对上尾数据拟合更好。Gumbel 分布是 GEV 分布的一个特例, 在拟合时令 $\xi=0$, 拟合曲线与经验点整体上的误差必然增大。从表 2 中拟合参数可知, 尽管 GEV 和 Gumbel 分布的位置和尺度参数较为相近, 前者的最大似然函数对数值明显大于后者。由表 1 可知, GEV 分布的置信区间比 Gumbel 分布更宽, 且计算的重现期越长, 置信区间越宽。

表1 长江口徐六泾站年极值水位重现水平

分布	重现期	95%LCI/m	潮位/m	95%UCI/m
广义极值分布	30 a一遇	5.85	6.38	6.91
	50 a一遇	5.86	6.57	7.29
	100 a一遇	5.81	6.85	7.89
耿贝尔分布	30 a一遇	5.98	6.23	6.47
	50 a一遇	6.07	6.34	6.62
	100 a一遇	6.18	6.50	6.82

注: 以吴淞冻结为基面, 95% LCI 和 95% UCI 分别为 95% 置信区间的上下限。

表2 长江口徐六泾极值潮位分布函数参数

分布	位置参数	尺度参数	形状参数	最大似然函数对数值
广义极值分布	5.45	0.21	0.15	-3.35
耿贝尔分布	5.47	0.22	-	-4.07

当区分组大小为 1 a 时, 每年仅有 1 个极值潮位数据参与分布参数的估计, 只计入年极值可能造成重要数据的浪费^[19]。如 5—11 月每月各发生 1 场台风, 年极值法仅采用 1 a 中最大的潮位值。在并不要求数据严格独立的前提下, 可以取区分组大小为月, 采用“月极值”法进行重现期的估计。图 5b) 为 1988—2020 年徐六泾站月极值潮位 GEV 分布和 Gumbel 分布的拟合结果。可知由于月极值的加入, 均值参数 μ 减小, 尺度参数 σ 增大。GEV 分布的形状参数 ξ 由正变负(从 Fréchet 分布变成 Weibull 分布)。从拟合效果看, GEV 分布对数据的整体和上尾的拟合效果均较好, 而 Gumbel 分布与上尾偏离较大。通过 GEV 分布计算的徐六泾 30、50 和 100 a 重现期潮位分别为 6.40、6.50 和 6.70 m; 通过 Gumbel 分布计算的徐六泾 30、50 和 100 a 重现期潮位分别为 6.80、7.00 和 7.30 m, 重现水平结果明显偏大。从置信区间宽度看, 参与计算的数据量增多、拟合方差减小、置信区间变窄。

相较于 GEV 分布, 采用年极值法时 Gumbel 分布估计值偏小, 采用月极值时 Gumbel 分布估计值偏大。尽管 Gumbel 分布估计结果的不确定性较小, 但 GEV 分布的拟合效果优于 Gumbel 分布。

Marcos 和 Woodworth^[20]在北大西洋和墨西哥湾沿岸极端海平面重现期的研究中也得到类似结论, 只有 27% 的潮位站采用 Gumbel 分布拟合结果更好, 多数站点更适合 GEV 分布。基于年极值和月极值区分组最值模型的结果, 徐六泾 100 a 一遇极值潮位约 6.80 m。从近 30 a 历史实测极值潮位来看, 台风温妮(No. 9711)是导致长江口徐六泾站 100 a 一遇风暴潮的台风。

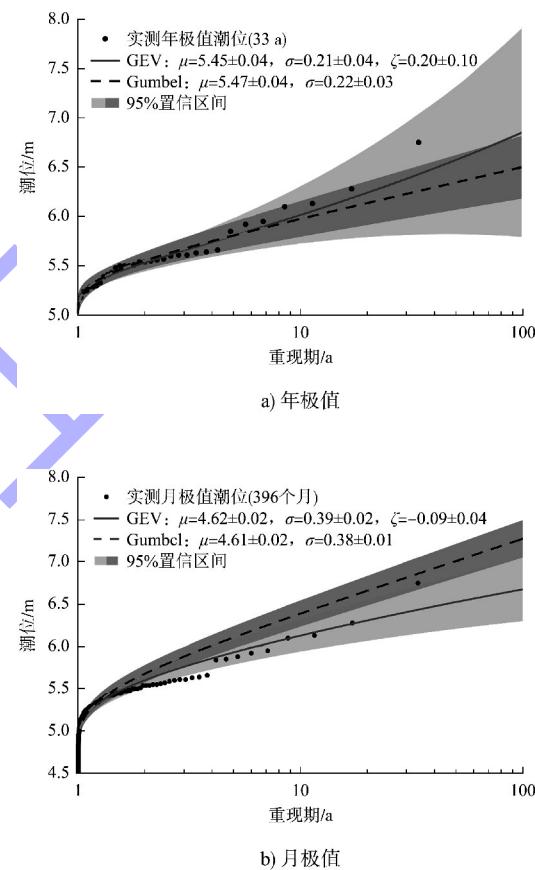


图 5 1988—2020 年徐六泾站极值潮位 GEV 和 Gumbel 分布拟合

3.2 基于 POT 模型的潮位重现期分析

风暴潮期间某些时刻的潮位虽未达到峰值, 但其值仍比天文潮大很多。不论采用年极值或月极值潮位法, 均未考虑这些极值附近的次高潮位。因此, 基于逐小时潮位, 采用 POT (peak over threshold model, 峰值超阈值模型) 模型对极值潮位重现期进行估计。极值事件一般会成簇出现。如台风期间极值水位并不是瞬时值, 而是持续一段

时间。洪水往往在达到一定高度且持续一段时间后才会导致灾害性的淹没。POT 模型的计算方法首先选择适当的阈值 u ，提取超阈值的极值生成新的时间序列；其次将新时间序列分簇，需确定相邻簇间最小时间间隔 T_0 ，潮位数据的时间差小于 T_0 则记为同一簇，否则为不同簇；最后选择每簇中的最大值参与模型计算。分簇的主要目的是确保参与计算的极值符合独立同分布假设，近似地服从 GPD 分布。为了确保不同簇数据间的独立性，当两簇潮位数据的时间间隔小于 3 d 则视为同一簇数据^[21]。阈值 u 的选择在很大程度上影响极值模型的结果。主要原因是估计的偏差和方差难以达到统一。阈值过大将导致极值样本数量太少、方差偏大（置信区间宽度偏大）、不确定性增加；阈值过小将导致极值样本数量过多，难以满足对数据独立同分布的假设要求，难以向广义极值分布逼近。

阈值 u 的选择具有一定主观性，可参考平均超出函数图和参数稳定性图的结果来确定（图 6）。图 6a) 描述的是平均超出量和阈值的关系，当两者之间近似呈线性关系时，则超过阈值部分的子数据集满足 GPD 分布。阈值 u 选择在 5.2~5.4 或 5.4~5.5 之间均较为合理。参数稳定性图描述的是尺度参数 σ 和形状参数 ξ 两者与阈值 u 的关系。随着 u 增大， σ 和 ξ 近似不发生改变时，则超过阈值部分的子数据集满足 GPD 分布。由图 6b)、6c) 可见，当阈值 u 在 5.4~5.5 之间时两参数较为稳定； u 超过 5.5 后，两参数均变化剧烈，说明参照该阈值提取的数据样本量过少，进行参数估计时不确定性较大。阈值 u 的选择标准是阈值既要足够大，又要有足够的超出数据满足 GPD 分布。因此，在 POT 模型中将阈值 u 定为 5.4 m，此时参与计算的子数据集共 70 簇，见图 7。

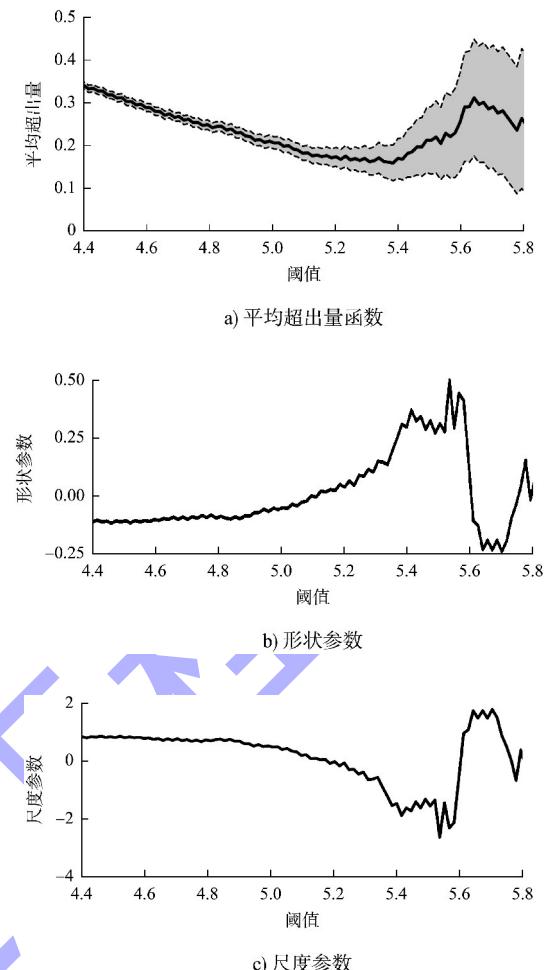


图 6 阈值与平均超出量和形状、尺度关系

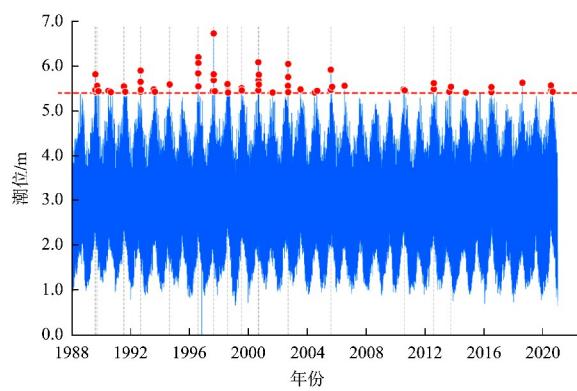


图 7 POT 模型中超阈值数据簇数

图 8 为 POT 模型估计分布的结果。由图可知，相较于分区组最值模型，POT 模型拟合的分布曲线更符合经验点，表明在徐六泾水文站极值潮位

计算过程中, POT模型中GPD分布对超过阈值簇最大值的拟合优于区分组最大模型。通过GPD分布计算的徐六泾站30、50和100 a重现期潮位分别为6.43、6.56和7.01 m。可见POT模型计算的重现期作为设计依据更保守, 台风温妮(No. 9711)在徐六泾站造成的极值风暴潮位仅为60 a一遇。

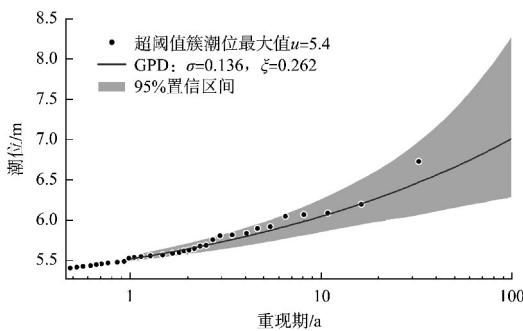


图8 1988—2020年徐六泾站潮位的GPD拟合

综上, 对于徐六泾站潮位重现期的计算, GEV分布拟合结果优于Gumbel分布, POT模型拟合结果优于区分组最值模型。因此, 当仅能获取到年或月极值潮位时, 宜采用GEV分布(相较于Gumbel分布); 若能获取到逐时潮位, 宜在参考区分组最值模型结果的基础上采用POT模型。

采用33 a的潮位数据估计100 a一遇的重现期必然存在一定偏差。重现期的计算实质是一种数据的外推, 即假设每年的潮位极值服从同一分布, 用已知年极值潮位估计分布的参数, 进而推求未知年份的极值潮位。从统计学角度看, 这是一个用样本去估计整体的过程, 具有一定的不确定性。使用的实测数据年份的不同、数据长度的增减、分布类型和估计方法的选择, 都会造成结果偏差。重现期通过样本频率计算事件发生的概率, 样本是否具有代表性仍不确定(尽管假设有)。重现期的意义在于以现有数据为基础, 计算事件发生的概率(风险率), 为工程设计或风险管理等提供依据。

4 结语

1) 近33 a间徐六泾站年极值水位呈轻微下降

趋势(-1.6 mm/a), 直接原因是当地平均海面的下降(-0.7 mm/a), 平均海面下降的主要原因是大通流量的减少。

2) 区分组最值模型结果表明, 台风温妮造成的风暴潮位为100 a一遇; POT模型计算结果仅为60 a一遇, 较为保守, 100 a一遇重现期潮位约7.0 m。

3) 潮位重现期的计算本质是一种用频率代替概率、从样本推求整体的过程, 具有一定不确定性。以可获取的数据为基础, 计算事件发生的概率(风险率), 旨在为工程设计或风险管理等提供依据。

参考文献:

- [1] FRAME D J, ROSIER S M, NOY I, et al. Climate change attribution and the economic costs of extreme weather events: a study on damages from extreme rainfall and drought[J]. Climatic change, 2020, 162(2): 781-797.
- [2] MARTIN C L, MOMTAZ S, GASTON T, et al. Estuarine cultural ecosystem services valued by local people in New South Wales, Australia, and attributes important for continued supply[J]. Ocean & coastal management, 2020, 190(6): 105160. 1-105160. 9.
- [3] CHENG L J, TRENBERTH K E, FASULLO J, et al. Improved estimates of ocean heat content from 1960 to 2015[J]. Science advances, 2017, 3(3): e1601545.
- [4] MEI W, XIE S P. Intensification of landfalling typhoons over the northwest Pacific since the late 1970s[J]. Nature geoscience, 2016, 9(10): 753-757.
- [5] LI C Y, ZHOU W, SHUN C M, et al. Change in destructiveness of landfalling tropical cyclones over China in recent decades[J]. Journal of climate, 2017, 30(9): 3367-3379.
- [6] LIU M F, VECCHI G A, SMITH J A, et al. Causes of large projected increases in hurricane precipitation rates with global warming[J]. NPJ Climate and atmospheric science, 2019, 2(1): 1-5.
- [7] MEI W, XIE S P, PRIMEAU F, et al. Northwestern

- Pacific typhoon intensity controlled by changes in ocean temperatures[J]. *Science advances*, 2015, 1(4): e1500014.
- [8] SHEPARD C C, AGOSTINI V N, GILMER B, et al. Assessing future risk: quantifying the effects of sea level rise on storm surge risk for the southern shores of Long Island, New York[J]. *Natural hazards*, 2011, 60(2): 727-745.
- [9] 张敏, 米婕, 戴志军, 等. 海平面上升对北部湾风暴潮增水影响研究: 以 2012 年台风“山神”为例[J]. *海洋通报*, 2021, 40(3): 309-318.
- [10] 许炜宏, 蔡榕硕. 不同气候情景下中国滨海城市海岸极值水位重现期预估[J]. *海洋通报*, 2022, 41(4): 379-390.
- [11] 庄圆, 纪棋严, 左军成, 等. 海平面上升对中国沿海地区极值水位重现期的影响[J]. *海洋科学进展*, 2021, 39(1): 20-29.
- [12] TEBALDI C, STRAUSS B H, ZERVAS C E. Modelling sea level rise impacts on storm surges along US coasts [J]. *Environmental research letters*, 2012, 7(1): 014032.
- [13] SWEET W V, PARK J. From the extreme to the mean: Acceleration and tipping points of coastal inundation from sea level rise[J]. *Earth's future*, 2014, 2(12): 579-600.
- [14] 王军, 谭金凯. 气候变化背景下中国沿海地区灾害风险研究与应对思考[J]. *地理科学进展*, 2021, 40(5): 870-882.
- [15] COLES S, BAWA J, TRENNER L, et al. *An introduction to statistical modeling of extreme values* [M]. Berlin: Springer, 2001.
- [16] 史道济. *实用极值统计方法* [M]. 天津: 天津科学技术出版社, 2006.
- [17] Menéndez M, WOODWORTH P L. Changes in extreme high water levels based on a quasi-global tide-gauge data set[J]. *Journal of geophysical research (Oceans)*, 2010, 115(C10): (C10011: 1- C10011: 15).
- [18] 自然资源部海洋预警监测司. 2021 年中国海平面公报[R]. 北京: 自然资源部, 2022.
- [19] SANTOS V M, WAHL T, JANE R, et al. Assessing compound flooding potential with multivariate statistical models in a complex estuarine system under data constraints[J]. *Journal of flood risk management*, 2021, 14(4): e12749.
- [20] MARCOS M, WOODWORTH P L. Spatiotemporal changes in extreme sea levels along the coasts of the North Atlantic and the Gulf of Mexico [J]. *Journal of geophysical research (Oceans)*, 2017, 122 (9): 7031-7048.
- [21] HAIGH I D, WADEY M P, WAHL T, et al. Spatial and temporal analysis of extreme sea level and storm surge events around the coastline of the UK [J]. *Scientific data*, 2016, 3(1): 160107.

(本文编辑 赵娟)



著作权授权声明

本刊已许可《中国学术期刊(光盘版)》电子杂志社有限公司、北京万方数据股份有限公司、重庆维普资讯有限公司、北京世纪超星信息技术发展有限责任公司以数字化方式复制、汇编、发行、信息网络传播本刊全文。本刊支付的稿酬已包含上述公司著作权使用费, 所有署名作者向本刊提交文章发表之行为视为同意上述声明。

《水运工程》编辑部