

杨思茹, 杨洋央, 方佳毅, 等. 海平面上升下沿海极值海水位非平稳性特征演变分析[J]. 水利水电技术(中英文), 2026, 57(2): 95-106. DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2026.02.007

YANG Siru, YANG Yangyang, FANG Jiayi, et al. Non-stationary evolutionary characteristic analysis of coastal extreme water levels under sea level rise[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2026, 57(2): 95-106. DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2026.02.007

海平面上升下沿海极值海水位非平稳性特征演变分析

杨思茹¹, 杨洋央¹, 方佳毅^{1,2}, 莫芷慧¹, 朱思颖¹, 张峰^{3,4}, 胡潭高^{1,2}

(1. 杭州师范大学 遥感与地球科学研究院, 浙江 杭州 311121; 2. 全省湿地智慧监测与生态修复重点实验室, 浙江 杭州 311121; 3. 自然资源部第二海洋研究所, 浙江 杭州 310012; 4. 浙江大学 海洋学院, 浙江 舟山 316021)

摘要: 【目的】全球海平面上升破坏了沿海观测水位的平稳性假设, 导致沿海极值水位重现期和重现水平发生巨变。因此, 需要在非平稳性假设下分析海平面上升对极值水位的影响, 为沿海地区海岸防护工程设计提供科学参考。【方法】以浙江温台沿海的验潮站为例, 通过趋势分析, 检验验证温州、瑞安、坎门三个验潮站观测数据的非平稳性; 构建广义极值分布(GEV)和广义帕累托分布(GPD)非平稳模型, 以时间协变量表征参数时变特征, 利用贝叶斯框架下的马尔可夫链蒙特卡罗(MCMC)方法估计参数后验分布; 通过赤池信息量准则(AIC)和贝叶斯信息量准则(BIC)评估模型性能, 并结合有效重现水平(ERL)和预期等待时间(EWT)分析非平稳条件下的致灾风险。【结果】结果表明: 浙江沿海的三个验潮站数据具有明显的趋势性, 因此选用非平稳极值理论模型更为合理; GPD模型在拟合优度上优于GEV模型; 非平稳条件下, 百年一遇极值水位重现期显著缩短。【结论】GPD模型因对尾部高频极值的敏感性, 更适合非平稳条件下的风险预测。模型阈值的选取会影响极值水位的预估结果。在海平面上升条件下, 沿海地区面临的洪水灾害风险的频率和强度将显著增大, 建议动态调整沿海工程防洪标准。研究成果为非平稳极值理论在气候变化的应用以及海防工程设计提供参考。

关键词: 极值理论; 重现期; 非平稳性; 重现水平; 极值水位; 气候变化; 洪水

DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2026.02.007

开放科学(资源服务)标志码(OSID):

中图分类号: TV213.4

文献标志码: A

文章编号: 1000-0860(2026)02-0095-12



听语音
聊科研

Non-stationary evolutionary characteristic analysis of coastal extreme water levels under sea level rise

YANG Siru¹, YANG Yangyang¹, FANG Jiayi^{1,2}, MO Zhihui¹, ZHU Siying¹,
ZHANG Feng^{3,4}, HU Tangao^{1,2}

(1. Institute of Remote Sensing and Earth Sciences, Hangzhou Normal University, Hangzhou 311121, Zhejiang, China; 2. Zhejiang Provincial Key Laboratory of Wetland Intelligent Monitoring and Ecological Restoration, Hangzhou 311121, Zhejiang, China; 3. Second Institute Of Oceanography, MNR, Hangzhou 310012, Zhejiang, China; 4. Ocean College,

收稿日期: 2024-12-02; 修回日期: 2025-05-02; 录用日期: 2025-05-05; 网络出版日期: 2025-05-15

基金项目: 国家自然科学基金项目(42001096)

作者简介: 杨思茹(2004—), 女, 助理研究员, 学士, 主要从事非平稳性和极值理论分析研究。E-mail: yangsiru0911@163.com

通信作者: 方佳毅(1991—), 女, 副教授, 博士, 主要从事极端复合灾害和风险评估研究。E-mail: jfyang@hznu.edu.cn

©Editorial Department of Water Resources and Hydropower Engineering. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license.

Abstract [Objective]The rising global sea level has undermined the stationary assumption in coastal water level observations, [Results]ing in significant alterations in the return period and return level of extreme water levels in coastal regions. Hence, it is imperative to assess the impact of sea level rise on extreme water levels under a non-stationary framework, offering scientific insights for coastal protection engineering design in these areas. [Methods]Tidal observation from the tide gauges in Wenzhou and Taizhou in Zhejiang Province was analyzed. Non-stationary assumption was validated via trend analysis. Non-stationary Generalized Extreme Value (GEV) and Generalized Pareto Distribution (GPD) models were constructed with time-dependent parameters, and Bayesian Markov Chain Monte Carlo (MCMC) sampling was applied for posterior parameter estimation. Model performance was evaluated using Akaike (AIC) and Bayesian (BIC) information criteria, while risk dynamics were quantified through effective return levels (ERL) and expected waiting time (EWT). [Results]Distinct trends were detected in all three stations, making the adoption of non-stationary extreme value theory models more appropriate. The GPD model outperformed GEV. Under non-stationary, the return period of the 100-year extreme water level is projected to reduce dramatically. [Conclusion]The GPD model is more suitable for non-stationary risk prediction due to its sensitivity to high-frequency extremes. The estimation result of extreme water levels are impacted by the selection of model thresholds. With the rise in sea level, the frequency and intensity of flood disaster risks in coastal areas will significantly increase, necessitating dynamic updates of coastal defense standards. The findings advances the method ological application of non-stationary extreme value theory in climate change adaptation and serves as a reference for coastal defense engineering design.

Keywords: extreme value theory; return period; non-stationary; return level; extreme sea level; climate change; flood

0 引言

海陆交错带是全球变化研究的热点和前沿领域。全球变暖背景下,海平面上升叠加极端灾害事件对沿海地区造成巨大影响,已经引起世界各国政府组织和学术界的高度重视^[1]。全球海平面上升,破坏了观测水位的平稳性假设,全球范围内许多地区的水文时间序列均发生了显著变化^[2],导致沿海极值水位重现期和重现水平发生巨变。已有大量观测结果显示,沿海验潮站水文观测数据呈现明显的非平稳变化特征,给沿海工程设防水平设计、水文统计与模拟、水资源评价规划等带来新的挑战。水文过程非平稳性分析——以时变矩为代表的非一致性水文频率分析^[3],正逐渐成为国际水文学界的研究热点,尤其是全球变化研究领域重点关注的科学问题之一。

基于极值理论分析的极值水位频率研究可分为直接方法和间接方法^[4]。直接方法是基于总观测水位展开频率分析,而间接方法针对对天文潮、余水位、海浪等多要素或同一要素的持续时间、强度等多方面,展开条件概率或联合概率分布计算重现期^[5-6]。间接方法计算得到重现期更多表征的是其强度,而非极值水位的高度,不是本研究关注点,本研究关注基于验潮站总观测水位数据序列展开海岸洪水频率分析。常见的极值水位概率模型形式多样,如《海堤工程设计规范》中推荐 Gumbel 分布或 P-III 型分布。

Gumbel 分布因其形式简单计算方便,在 IPCC 系列报告以及相关的极值水位频率分析中有重要的应用^[7]。然而,采用传统洪水频率分析方法,需要满足一个前提假设,即要求时间序列满足平稳性(又称一致性, Stationary)假设,洪水事件的概率分布或统计规律始终保持不变^[8-10]。然而,气候变化直接打破了现行防洪极值频率分析的平稳性假设。海平面上升破坏了观测潮位序列的平稳性,不能客观反映风暴潮灾害的风险^[11]。已有研究表明,海平面上升对极值水位的影响不容忽视,在平稳性假设下并不能正确预估未来海平面上升对海岸洪水极值水位的频率^[12-14]。

预估极值水位的发生频率对于海岸工程设计至关重要。尽管国内外学者在海岸洪水极值水位频率的研究方面取得了积极进展^[15-18],但早期的研究往往忽视了非平稳性的影响。这些研究在没有对观测数据进行去趋势处理,忽略了观测数据的非平稳性。在平稳性假设下,观测值来自具有恒定参数的概率分布函数,即极值的统计量不随时间或其他协变量改变。在非平稳模型中,概率分布函数的参数会随着协变量而变化,其重现期和风险的概念也与常规的平稳时间序列有所区别^[19]。已有相关研究基于验潮站的观测资料开展了非平稳性分析。谢东梅等^[20]基于全球十个验潮站历史水位观测资料,结合非平稳序列极值理论,验证历史平均海平面长期变化与高、低水位耿贝尔分布位置参数变化的一致性以及构建方法的合理

性; 庄圆等^[21]利用条件分布联合概率方法、Log-Pearson Type III (LP3)、数值模型、Gumbel 方法等分析验潮站在不同条件下(如不同潮汐条件、海平面上升、风暴潮)的极值水位,为全球海域极值水位预测提供思路,但特定海域的预测需要更加精确的海平面上升数据;李健等^[22]基于验潮站数据的相关性情况分别采用相关分析、数值模拟和调和分析方法建立年极值水位序列,结合极值 I 型计算并核定警戒潮位。徐昕等^[23]基于徐六泾站潮位值,分析了阈值与平均超出量和形状、尺度关系。目前已有相关工具开展非平稳极值分析,如 R-package ismev^[24]、extRemes^[25]、GAMLESS^[26]、基于贝叶斯框架的 NEVA^[27]、tsEVA^[28-29]等。以上研究选择单个阈值开展分析,然而,用不同阈值提取的极端序列的差异会影响极值水位的预估结果^[30]。以上研究为沿海地区非平稳分析提供了宝贵的研究思路和框架,但鉴于沿海水位数据显著的非平稳性变化特征,对长期趋势模型预测结果引入的系统性偏差不容忽视,亦需考虑非平稳模型本身的不确定性。

因此,本研究基于非平稳性假设,以浙江温州台州沿海 3 个验潮站为例,通过趋势检验确认水位序列的非平稳特征后,运用广义极值分布(the Generalized Extreme Value distribution, GEV)和广义帕累托分布(the Generalized Pareto distribution, GPD)两种极值理论模型,重点解决 3 个科学问题:一是建立考虑海平面上升协变量的非平稳极值模型;二是量化阈值选取对预测结果不确定性的影响;三是对比不同分布模型在区域尺度上的适应性差异。通过引入有效重现水平和预期等待时间两个概念,系统分析极端水位事件的发生频率,为沿海工程韧性设计提供更可靠的极值水位预测方法支撑。

1 数据及方法

1.1 研究区概况

本研究聚焦于浙江省东南沿海的 3 个验潮站点:温州、瑞安和坎门。研究区(120°58'E—121°28'E, 27°75'N—28°10'N)处于台风和风暴潮等极端事件频发区。由于海平面上升,抬高潮位,使得超警戒风暴潮次数持续增加,特别是 1990 年以后有加速上升趋势,同时沿海海平面已经比 50 年代升高了十几厘米,浙南沿海增幅高于浙中及浙北地区,是一典型研究区^[31]。

1.2 数据及预处理

坎门验潮站数据来源于全球高频海平面观测

GELSA-3 数据集,时间覆盖范围是 1975—1997 年,时间分辨率为逐小时。GELSA-3 数据集覆盖并融合了全球多套公开海水位观测数据集^[32],可用于评估潮汐、风暴潮、极端海平面和其他过程的海洋学和海岸工程相关研究。温州以及瑞安验潮站的日高低潮数据从浙江省水利厅获取,时间序列为 2005—2020 年。各站点数据都经过了质量控制,通过可视化工具进行目视检查,以识别出虚假跳跃和故障值的数据。移除异常数据后,将水位数据通过三角插值法处理为逐小时数据。各站点所用的水位高程系对于该地区的同类研究具有参考意义。坎门站,潮汐计零点比 1985 国家高程基准基面低 3.684 m;温州站,表内潮位(测站基面以上米数)比 1985 国家高程基准基面以上米数高 1.801 m;瑞安站,表内潮位(测站基面以上米数)比 1985 国家高程基准基面以上米数高 1.855 m。

1.3 方法

本研究采用非平稳极值分析工具(Process-informed Nonstationary Extreme Value Analysis, ProNEVA)进行极值理论分析^[33]。ProNEVA 能够估计广义极值(GEV)、广义帕累托分布(GPD)和 Log-Pearson Type III(LP3)分布的参数及量化不确定性,此工具可以有效解析极值水位序列的非平稳特征及其演化规律。

具体模型构建中,GEV 分布通过位置参数(μ)、尺度参数(σ)和形状参数(ξ)表征极值统计特性,其参数化形式能够兼容左偏、右偏及对称分布类型,对非平稳时间序列的时变尾部特征具有较强适应性;GPD 分布专注于超阈值序列建模,通过尺度参数(σ)和形状参数(ξ)刻画极端事件的尾部行为。在非平稳性假设下进行极值拟合主要把非平稳性分布参数从常数转为以时间为协变量的时变模型^[2]。本研究中选择位置参数与尺度参数以时间变量为协变量,建立分布参数与时间的函数关系。

GEV 分布函数用于模拟块状最大值(Block Maximum)的时间序列。它的累积分布函数形式为

$$\Psi(x|X_c) = \exp - \left\{ \left(1 + \xi(X_c) \cdot \left(\frac{x - \mu(X_c)}{\sigma(X_c)} \right) \right)^{\frac{-1}{\xi(X_c)}} \right\} \quad (1)$$

式中, X_c 为协变量; $\mu(X_c)$ 为位置参数,指定分布的中心; $\sigma(X_c)$ 为尺度参数,决定了位置参数周围偏差的大小; $\xi(X_c)$ 为形状参数,控制 GEV 分布的尾部行为。

在本研究拟合 GEV 模型时,位置参数是以时

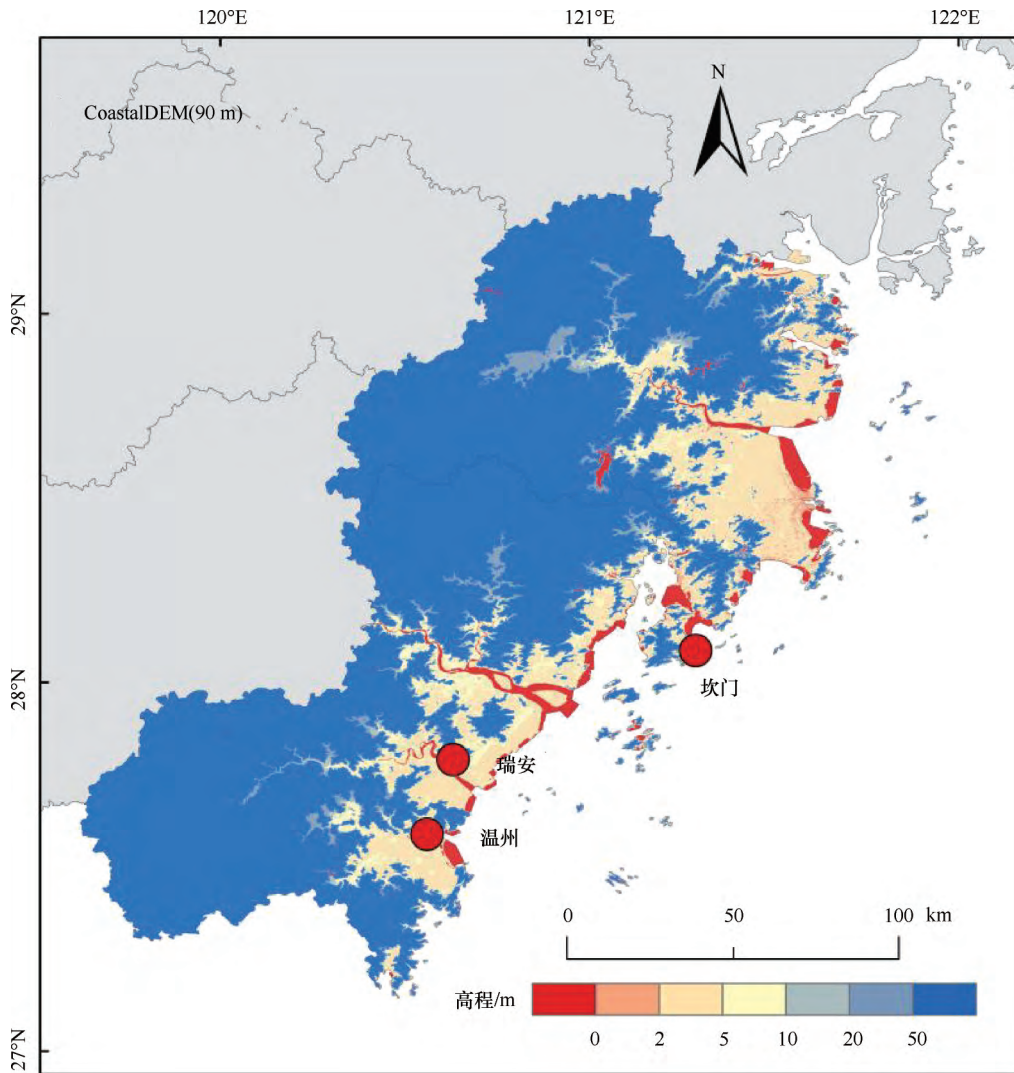


图1 研究区概况
Fig. 1 Study areas

间协变量的线性函数 $\mu(X_c) = \mu_1 \cdot X_c + \mu_2$, 尺度与形状参数保持不变。

GPD 与 GEV 不同, GPD 模型假设给定一个阈值, 只有超过该阈值的极端观测值才会被考虑。对于 POT 应遵循合适的阈值选择方案, 非常高的阈值可以提高 GPD 的渐进近似的有效性, 但同时, 由于样本集较小, 会增加参数估计的方差。相比之下, 非常低的阈值可能会增加模型错误指定的偏差^[34-35]。给定一个独立随机变量序列 Y , 对于足够大的临界值 u , 超出 $Y_c = Y - u$ 的累积分布函数形式^[33]为

$$\Psi GP(y_c | X_c) = 1 - \left(1 + \xi(X_c) \times \left(\frac{y_c(X_c)}{\sigma(X_c)} \right) \right)^{-\frac{1}{\xi(X_c)}} \quad (2)$$

式中, X_c 为协变量; $y_c(X_c) = Y - U(X_c)$; $\sigma(X_c)$ 为尺度参数; $\xi(X_c)$ 为形状参数。

拟合 GPD 模型时, 设置尺度参数为时间的线性

函数 $\sigma(X_c) = \sigma_1 \times X_c + \sigma_2$, 位置与形状参数恒定。

技术路线如图 2 所示, 包含预处理、趋势检验、极值采样、参数估计及拟合精度评估。

1.3.1 趋势检验

本研究采用 MK 趋势检验 (Mann-Kendall Test) 和 White 检验对坎门站验潮站数据的趋势和突变进行分析。MK 趋势检验是一种非参数检验方法, 用于检验时间序列数据是否存在单调趋势, 无需对数据的概率分布做出任何假设。White 检验可用于检验时间序列数据是否存在异方差, 即时间序列数据中方差不稳定的情况。在本研究中, 分别对原始观测数据、日最大值、年极值水位及阈值分位数为 99.75% 的日最大极值水位进行趋势检验。在极值样本提取时考虑了聚类效应, 选择间隔 3 d 以上的极值样本。

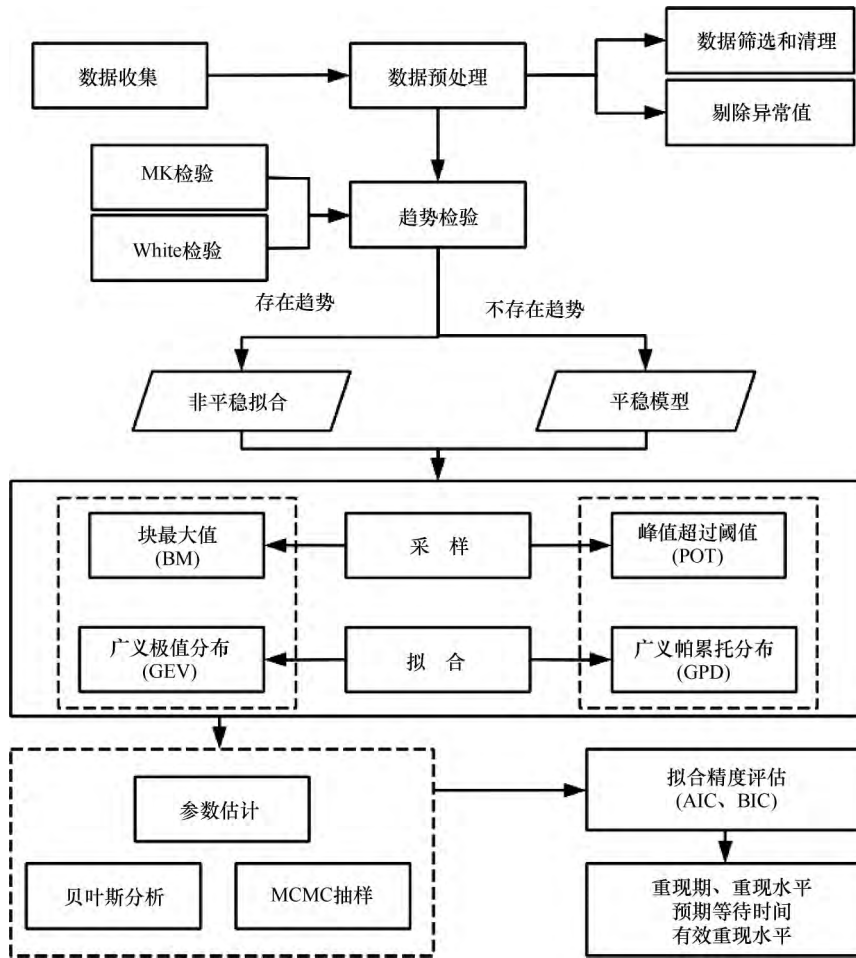


图2 基于非平稳性极值理论模型的应用评估流程

Fig. 2 Flowchart of non-stationary extreme value analysis application

1.3.2 参数估计

ProNEVA 模型建立在混合进化马尔可夫链蒙特卡罗 (MCMC) 方法上, 用于数值参数估计和不确定性评估^[36-37]。利用贝叶斯分析, 在先验参数估计中的先验选项包括均匀分布、正态分布和伽马分布。先验参数分布拟合中假定参数是独立的, 因此每个参数都需要自己的先验值。通过为每个分布的参数选择合适的函数形式, 结合先验分布和观测向量, 借此来描绘后验分布, 从而对参数进行估计和不确定性评估, 并得到来自输入误差和模型选择的潜在不确定性的稳健表征。

1.3.3 模型评价

为了检查模型对数据的拟合性能, 可以用不同的评价指标进行拟合优度 (Goodness Of Fit, GOF) 评估^[37]。常见的评价指标有用于图形评估的分位数和概率图、双样本 Kolmogorov-Smirnov (KS) 检验、Akaike 信息标准 (AIC)、贝叶斯信息标准 (BIC)、最大似然 (ML)、均方根误差 (RMSE) 和纳什-萨特克利夫效率 (NSE) 系数等。本研究选取 AIC、BIC

判断非平稳模型的拟合效果, 更低的 AIC/BIC 的值表明拟合结果更优。AIC 和 BIC 考虑模型中的参数数量, 并在拟合优度和模型复杂性之间进行权衡^[38], 有助于筛选出具有良好拟合度, 在保持模型简洁性的同时, 确保其泛化能力和预测效能。

1.3.4 非平稳条件下的回归曲线

重现水平 (Return Level, RL) 是指某种特定规模的极端事件 (如洪水、风暴潮等) 在概率统计角度上平均每隔多长时间出现。重现水平 (Return Period, RP) 是指在特定重现期下, 预期会出现水文极端事件的规模或水平。

给定一个年最大值的时间序列, 重现水平被定义为分位数 Q_i , 其中, 年最大值超过选定分位数概率是 q_i ^[39]。例如, 假设年最大极值水位高度 ($P = p_1, \dots, p_n$) 的概率分布为 F_p 。分位数 Q_i 是一个极值水位高度, 使得 $Pr(P \geq Q_i) = 1 - F_p(Q_i) = q_i$ 。在平稳假设下, 统计模型的特性保持不变, 意味着分位数 Q_i 的概率 q_i 无年变化趋势。在本研究中, 分位数 Q_i 的重现期被定义为其超越概率的倒数, 即 $T_i = 1/q_i$ 。

在年最大极值水位高度 P 的示例中, Q_i 为水位高度的分位数, 使得每年超过该值的概率为 $Pr(P \geq Q_i) = 1 - F_p(Q_i) = q_i = 0.01$ 。那么, Q_i (或重现水平) 的重现期是 $T_i = 1/q_i = 1/0.01 = 100 \text{ a}$ 。

本文引入了 ProNEVA 集成的两个概念: 有效重现水平曲线^[40] (Effective Return Level, ERL) 以及预期等待时间^[28] (Expected Waiting Time), 用于表征非平稳条件下极值水位的致灾效应。有效重现水平是指随着某个协变量 (如时间或物理变量) 的变化而变化的分位数, 通过考虑系统变化导致的极端事件的频率变化对极端事件频率的影响, 提供了一种更准确的风险评估。有效重现水平通过一个曲线图展示了对于一个给定的重现期 $RP = 1/q$, 随着协变量 X_c 的变化分位数 $Q_q(X_c)$ 的变化情况。例如, 如果一个极端水位的年超越概率为 $1/q$, 那么随着时间的推移或其他物理因素的变化, 这一事件的有效重现水平也会相应变化。预期等待时间用于描述在非平稳条件下, 通过累积计算每一年极端事件的发生概率, 从当前时间点开始, 得到在未来某一时间点之前首次发生该事件的平均等待时间。通过计算预期等待时间, 可以更好地理解在海平面上升背景下极值水位的变化动态, 并做出

有针对性的应对。

2 结果与讨论

2.1 趋势检验 (检验非平稳性假设)

首先利用 MK 趋势检验和 White 异方差检验方法, 系统评估了浙江东南沿海典型验潮站的水位数据特性。对坎门验潮站 1975—1997 年的水位数据, 以及温州、瑞安站点 2005—2020 年的高低潮位资料进行分析, 通过构建多时间尺度分析框架, 包括原始小时序列、日最大值序列、年极值序列以及阈值分位数为 99.75% 的超阈值日极值序列, 判断数据是否存在趋势及异方差问题, 决定是否采用非平稳极值理论方法。MK 检验结果显示, 坎门站小时序列与年极值序列均呈现显著上升趋势; White 结果表明, 各站点不同时间尺度序列均无异方差问题, 其残差方差保持相对恒定。基于 COLES^[41] 提出的极值理论建模准则, 当时间序列存在显著趋势项且满足方差齐性时, 传统平稳极值分布的尺度参数将产生系统性偏差, 因此研究结论支持在浙江沿海极端水位预测中采用非平稳极值模型。

2.2 重现期与重现水平的重新估算

基于趋势检验结果, 确定各个站点水位序列均存

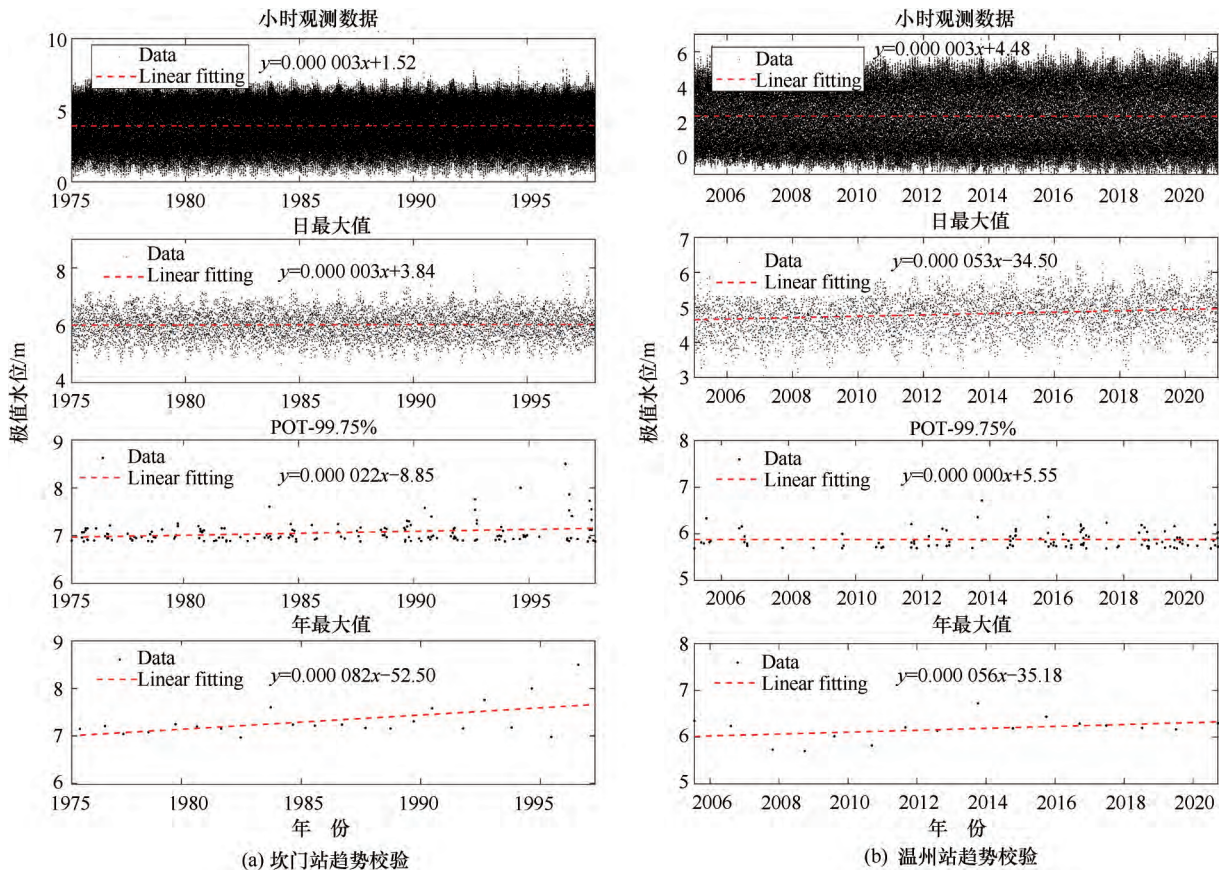
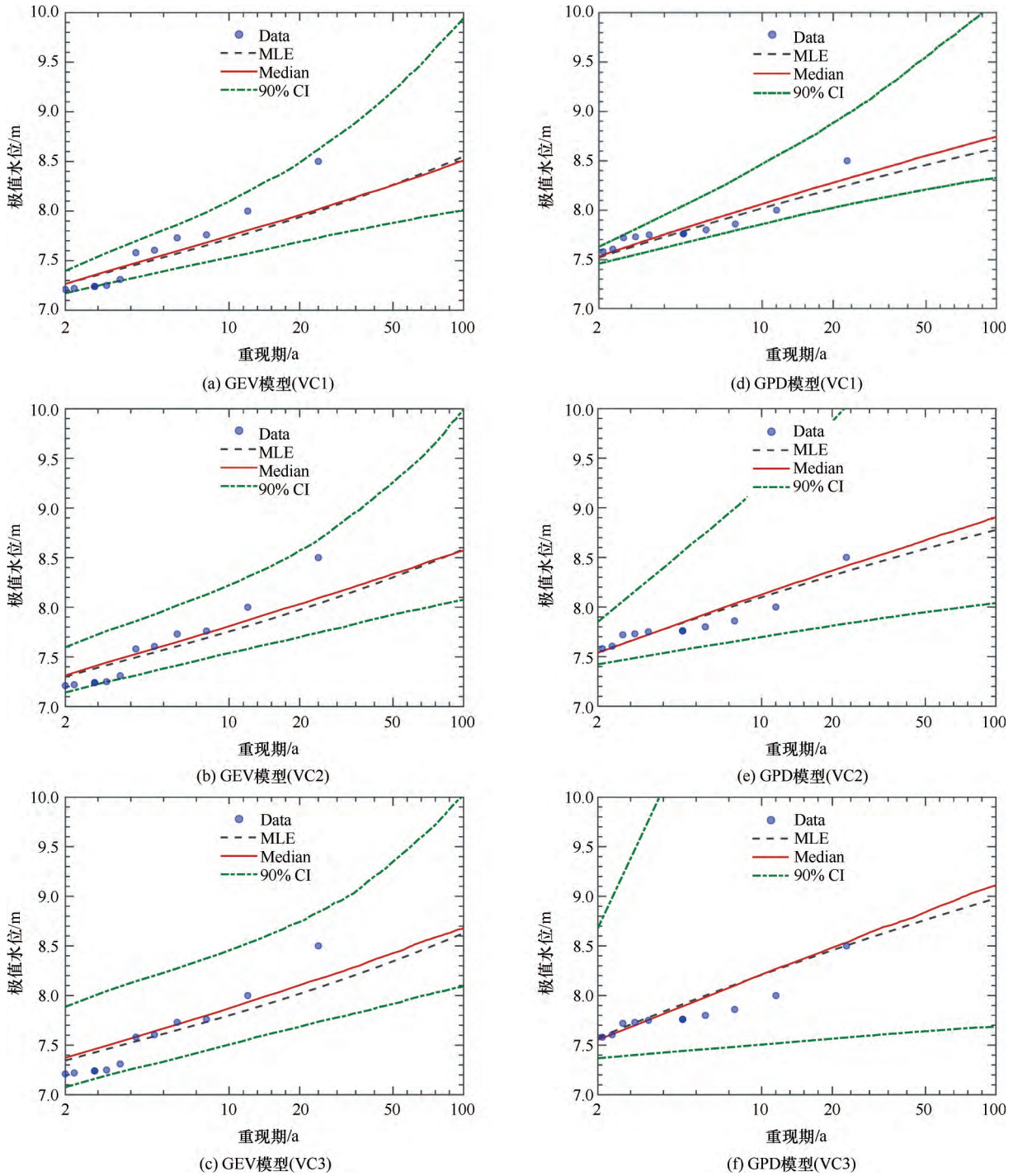


图3 坎门站和温州站水位趋势检验

Fig. 3 Chart for trend analysis of water level data at Kanmen and Wenzhou Station



VC1 取的是时间的中位数; VC2 取的是时间的 95%分位数; VC3 是超出观测时间后的中位数

图 4 非平稳假设下坎门站 GEV、GPD 模型模拟极值水位的重现水平

Fig. 4 Under non-stationary assumptions, the return level of extreme water stages at the Kanmen Station simulated by GEV and GPD models

在趋势性, 据此采用 GEV 分布与 GPD 分布模型进行极值水位建模。参数估计结果显示, 原始数据序列、最大似然估计曲线及数据中值线均位于 90% 的置信区间内, 验证了模型结构的合理性。为量化时间协变量不确定性对模型预测的影响, 本研究设计 3 种典型情景: VC1(时间中位数) 表征历史基准状态, VC2

(时间的 95%分位数) 评估极端时间条件下的模型响应结果, VC3(超出观测时间后的中位数) 探讨未来气候变化情景下的水位变化。通过对比分析发现, 相同重现期对应的极值水位在不同时间情景间呈现显著时序差异, 表明时间协变量的非平稳特征对灾害风险评估具有实质性影响。

模型评价方面, 基于 AIC 与 BIC 的综合比较(见表 1), GPD 模型在本研究选取的三个站点表现更优的拟合效果。尽管 GEV 模型能较好地捕捉水位极值的整体分布形态, 但 GEV 模型可能会遗漏一些有效观测信息, 导致低估尾部极值的发生概率, 而 GPD 模型对超阈值数据的关注, 表明在非平稳条件下 GPD 模型能更有效地利用尾部观测信息。

表 1 各站点模型指标评价

Table 1 Evaluation of model metrics by site

站 点	GEV		GPD	
	AIC	BIC	AIC	BIC
坎 门	10.27	14.81	0.17	3.31
温 州	3.55	6.64	-151.54	-143.38
瑞 安	12.29	15.38	-148.19	-140.06

基于非平稳极值模型的参数估计对样本敏感性分析表明, 阈值选取策略显著影响极值推断的可靠性(见图 5)。图 5(a) 对比了不同年抽样数量(每年 1~7 个最大值)下 GEV 模型重现期水位估计的变化特征。结果显示, 随着样本量越大, 预测的极值水位重现水平越低, 表明过度纳入次极值事件将低估重现期水位。对于 GPD 分布模型, 图 5(b) 系统评估了阈值分位数(95.0%~99.5%)对尾部拟合的影响, 当阈值从 99.5% 降至 95% 时, 100 a 一遇的水位值估计下降 22.4%, 证实阈值降低会削弱模型对极值尾部的捕捉能力。模型间对比显示, GPD 模型拟合所得的极值水位范围较为集中, 且总体低于 GEV 模型所拟合的结果, 该差异源于两类模型的数学结构本质差异。因此, 在进行不同站点极值水位的拟合时, 要关注原始

数据的特征, 选择合适的非平稳极值模型。

2.3 非平稳性模型的致灾效应分析

基于 GEV 模型构建的有效重现水平[见图 6(a)] 分析揭示了海平面上升条件下极值水位在不同重现期下的风险重构特征。与传统静态重现水平相比, 有效重现水平通过对位置参数耦合时间协变量函数: $\mu(x_c) = \mu_1 \cdot x_c + \mu_2$, 实现了对水位趋势与极端事件发生概率的联合建模。模拟结果显示, 在设定的观测水位时间范围内, 不同重现期的极值水位随时间推移呈现增长趋势。在特定的年份, 观测数据点相对于不同重现期曲线的分布情况, 揭示了实测的极值水位与基于重现期预测的极值水位之间的偏差。若某年的数据点位于某条重现期曲线之上, 则表示在该年份发生了超出该重现期预期的事件。

在非平稳模型中, 考虑时间协变量的影响, 可以评估特定重现期下的预期等待时间。图 6(b) 显示了在一定频率的极值水位事件情况下, 坎门站水位达到某一阈值(t_0) 的预期等待时间。当前定义的 20 a、50 a 及 100 a 一遇水位极值(7.8 m、8.1 m、8.5 m) 的预期等待时间分别缩短至 11 a、30 a 和 57 a。相同的, 对温州站, 20 a、50 a 及 100 a 一遇水位极值(6.4 m、6.5 m、6.7 m) 的预期等待时间分别缩短至 5 a、15 a 和 30 a; 对瑞安站, 20 a、50 a 及 100 a 一遇水位极值(6.6 m、6.8 m、6.9 m) 的预期等待时间分别缩短至 17 a、40 a 和 80 a。随着重现期的增大, 其与预期等待时间之间的差异也随之增大。换言之, 海平面上升会导致极值水位重现期的显著缩短, 加剧沿海地区的洪涝发生频率风险。有效重现水平

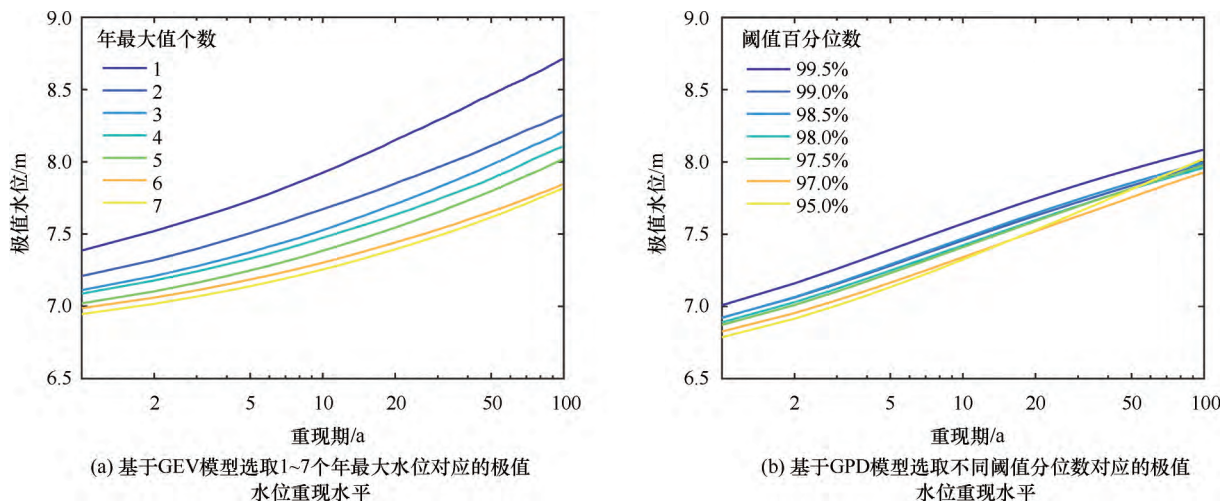
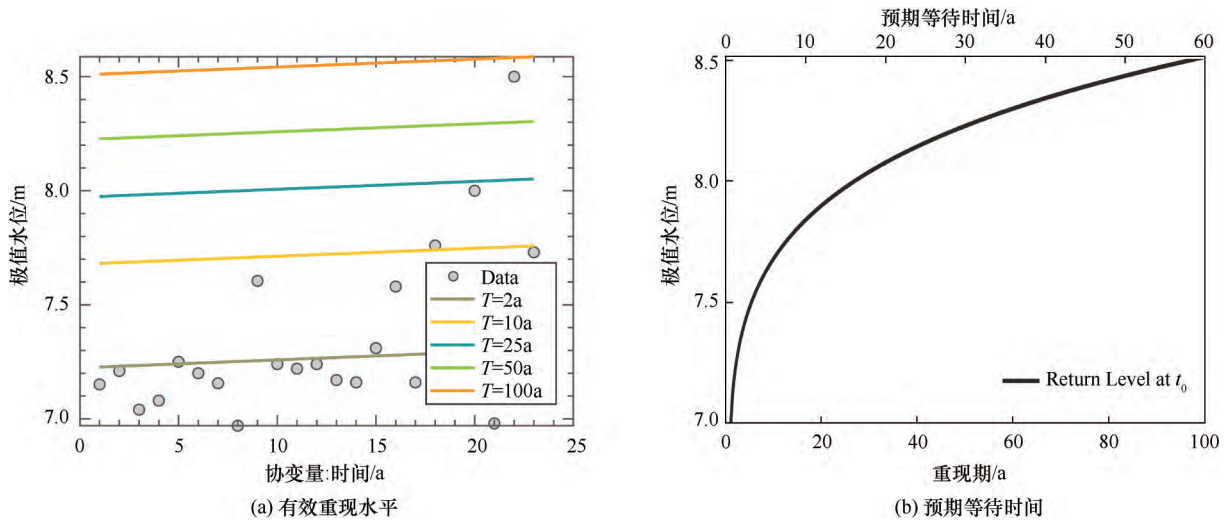


图 5 坎门站非平稳假设下极值采样方法对极值拟合的不确定性

Fig. 5 the uncertainty in extreme values fitting using different extreme value sampling methods under non-stationary assumption in Kanmen



极值水位的有效重现水平随着协变量(时间)的变化, 数据点代表各年份的年最大水位值, T 表示重现期; 极值水位达到某一阈值时的重现期与预期等待时间的差异

图 6 坎门站 GEV 分布下极值水位的有效重现水平与预期等待时间

Fig. 6 Effective return levels and expected waiting time of extreme sea levels under GEV distribution in Kanmen

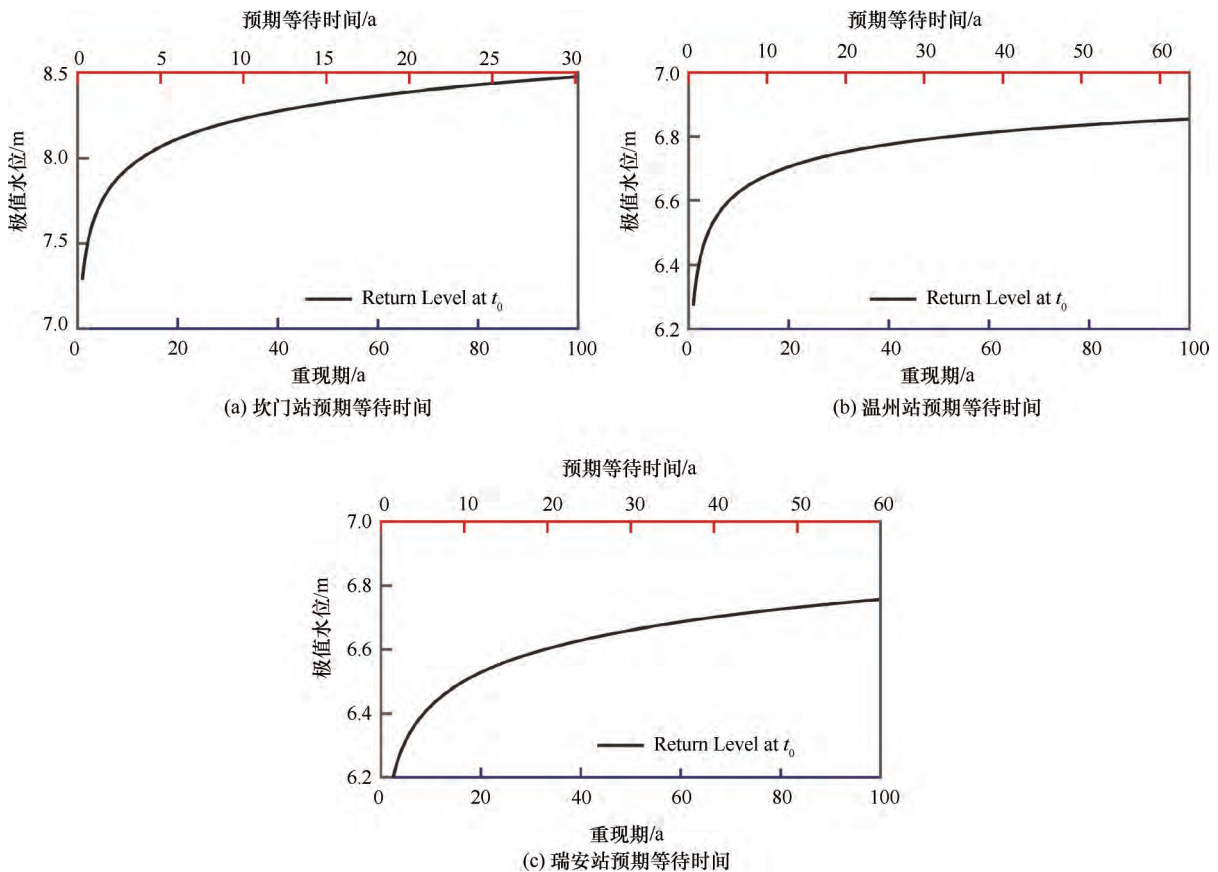


图 7 GPD 分布下极值水位的预期等待时间

Fig. 7 The expected waiting time for extreme sea levels under GPD

和预期等待时间对于理解和预测未来洪水灾害的风险具有重要意义, 其结果为相关防洪减灾策略的制定和实施提供了科学依据。

基于 GPD 模型的预期等待时间(见图 7)表明, 相较于 GEV 模型, 相同极值水位阈值下的重现期呈现整体性缩短特征。对于坎门站 8.5 m 极值水位,

GPD 模型预测的重现期为 31 a, 较 GEV 模型预测的 57 a 降低 45.6%; 温州、瑞安两站在 GPD 模型下预测的重现期较 GEV 模型均有不同程度的缩短。因此对研究建议海岸带风险管理应优先考虑采用 GPD 模型, 特别是在与本研究相同高程基准的区域, 其预测结果可提前识别沿海防洪标准失效风险。

3 结果讨论

本研究基于 GEV 与 GPD 分布模型, 系统评估了海平面上升背景下浙江沿海极值水位的非平稳性演变特征。通过温州、瑞安、坎门验潮站数据分析, 发现水位序列存在显著上升趋势, 验证了非平稳模型的必要性。模型拟合结果表明, GPD 模型在非平稳条件下具有更优的统计性能, 如坎门站 GPD 模型的 AIC/BIC 为 0.17/3.31, 显著优于 GEV 模型的 10.27/14.81。这归因于 GPD 模型通过超阈值采样法充分提取高频尾部数据, 而 GEV 模型依赖年最大值序列易遗漏次极值信息, 造成有限观测数据的巨大浪费, 从而导致极端事件发生频率被低估, 如坎门站原百年一遇水位重现期从 100 a 缩短至 57 a。敏感性分析显示, 阈值分位数降低 4.5% (99.5% 降至 95%) 会导致坎门站百年一遇水位估计下降 22.4%, 表明阈值选择对极值推断的系统性影响。

相较于传统平稳模型(如 Gumbel 分布), 本研究通过引入时间协变量构建非平稳模型, 动态调整分布参数, 更符合实际趋势。研究表明传统模型忽略海平面上升效应时, 对坎门站百年一遇事件的实际重现期被低估 43%。与单一阈值分析方法相比, 本研究量化了阈值对结果的影响, 并提出需结合多阈值交叉验证以提高可靠性。此外, 通过引入有效重现水平和预期等待时间, 系统解析了非平稳条件下“强度-频率”协同增强效应, 即极值水位阈值抬升与重现期缩短并存的风险特征(见图 6), 为动态防洪标准提供了依据。

但本研究仍存在一定局限性。首先, 本研究仅以时间作为协变量, 只能基于历史数据进行推算, 对反映未来长时期的变化规律较为有限。非平稳模型虽能统计表征趋势, 但无法解析极端水位的主控因子, 后续研究需引入与极值水位具有成因关系的多因子驱动机制(如降水、下垫面变化参数、气候变化指数等)^[42], 结合水动力模型进行混合建模, 并探索深度学习模型对复杂协变量关系的建模能力, 以提升长期预测可靠性。其次, 由于验潮站点的时间覆盖度和空间覆盖度的有限性, 无法获取长时间序列的高频验潮

站数据, 后续可考虑基于数据驱动模型重建长时间序列的观测数据。

基于研究结果, 建议沿海地区在制定防洪规划和设计时, 应考虑非平稳性的影响, 采用更为稳健的预测模型来评估极端洪水事件的风险。在数据长度不足或阈值稳定性未经验证的区域, 需辅以多模型进行结果交叉验证。同时, 应定期复核工程设计水位, 结合有效重现水平与预期等待时间动态调整设防致灾阈值, 以应对气候变化引发的极端事件频发风险。

4 结论

本研究采用非平稳假设下的广义极值分布(GEV)模型和广义帕累托分布(GPD)模型, 对浙江省东南沿海典型验潮站的海平面观测数据进行拟合分析, 旨在探讨海平面上升对极值水位重现期与重现水平的影响, 揭示海平面上升对沿海洪水风险的放大机制, 其结论对气候变化适应策略及沿海防灾规划制定具有重要参考价值。本研究得出以下结论。

(1) 通过对水位观测数据的趋势检验, 研究发现温州、瑞安、坎门验潮站的水位序列呈现出明显的非平稳性特征, 表明采用非平稳极值理论模型是恰当且必要的。

(2) 在对数据进行采样及非平稳模型拟合的过程中, 本研究利用赤池信息量准则(AIC)和贝叶斯信息量准则(BIC)作为拟合优度评估指标。结果表明, 对于研究区三个站点, GPD 模型更适用于非平稳条件下的极值建模, 其通过充分提取高频极值水位数据, 弥补了 GEV 模型仅依赖年最大值序列的局限性, 使 GPD 模型能够更灵敏地捕捉水位波动的动态特征, 为沿海防洪工程提供更可靠的设计参数。

(3) 非平稳模型量化了海平面上升对极值水位统计特征的系统性影响。一方面, 相同重现期对应的极值水位阈值显著抬升, 导致现有防洪标准防御能力衰减; 另一方面, 固定水位阈值对应的预期等待时间大幅缩短, 表明极端事件发生频率加快。这种“强度-频率”的协同增强效应, 使得低概率-高影响洪水事件的突增风险显著提升。例如, 坎门站历史百年一遇水位在当前海平面上升速率下, 实际重现期已压缩至不足 60 年。因此, 应当定期复核致灾阈值, 结合有效重现水平与预期等待时间动态调整沿海设防工程设计水位。

参考文献(References):

- [1] 方佳毅, 史培军. 全球气候变化背景下海岸洪水灾害风险评估

- 研究进展与展望[J]. 地理科学进展, 2019, 38(5): 625-636.
- FANG Jiayi, SHI Peijun. A review of coastal flood risk research under global climate change [J]. Progress in Geography, 2019, 38(5): 625-636.
- [2] 李珠, 杨默远, 桑燕芳, 等. 密云水库流域降水径流非平稳特征识别及归因[J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2024, 22(2): 331-338.
- LI Z, YANG M Y, SANG Y F, et al. Detection and attribution of the non-stationary characteristics of precipitation-runoff processes in the Miyun Reservoir basin [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2024, 22(2): 331-338.
- [3] 王易, 姚蕊, 孙鹏, 等. 基于 Copula 函数的淮河流域非平稳气象干旱特征研究[J]. 水利水电技术(中英文), 2024, 55(11): 26-38.
- WANG Yi, YAO Rui, SUN Peng, et al. Characterization of non-stationary meteorological drought in Huaihe River Basin based on Copula function [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2024, 55(11): 26-38.
- [4] ARNS A, DANGENDORF S, JENSEN J, et al. Sea-level rise induced amplification of coastal protection design heights [J]. Scientific Reports, 2017, 7: 40171.
- [5] 石先武, 谭骏, 国志兴, 等. 风暴潮灾害风险评估研究综述[J]. 地球科学进展, 2013, 28(8): 866-874.
- SHI Xianwu, TAN Jun, GUO Zhixing, et al. A review of risk assessment of storm surge disaster [J]. Advances in Earth Science, 2013, 28(8): 866-874.
- [6] 陈子煜, 刘德辅, 王风清. 中国南海极端海况概率预测及海洋工程防灾标准研究[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2019, 49(1): 115-120.
- CHEN Ziyu, LIU Defu, WANG Fengqing. Study of probability prediction of extreme sea hazard and disaster prevention design criteria at South China Sea [J]. Periodical of Ocean University of China, 2019, 49(1): 115-120.
- [7] MUIS S, VERLAAN M, WINSEMIUS H C, et al. A global reanalysis of storm surges and extreme sea levels [J]. Nature communications, 2016, 7(1): 1-12.
- [8] 梁忠民, 胡义明, 王军. 非一致性水文频率分析的研究进展[J]. 水科学进展, 2011, 22(6): 864-871.
- LIANG Zhongming, HU Yiming, WANG Jun. Advances in hydrological frequency analysis of nonstationary time series [J]. Advances in Water Science, 2011, 22(6): 864-871.
- [9] 郭生练, 刘章君, 熊立华. 设计洪水计算方法研究进展与评价[J]. 水利学报, 2016, 47(3): 302-314.
- GUO Shenglian, LIU Zhangjun, XIONG Lihua. Advances and assessment on design flood estimation methods [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2016, 47(3): 302-314.
- [10] 杜涛, 欧阳硕, 李帅, 等. 考虑气象协变量的非一致性设计枯水流量研究[J]. 长江科学院院报, 2018, 35(11): 26-31.
- DU Tao, OUYANG Shuo, LI Shuai, et al. Nonstationary design low-flow analysis in consideration of climate covariates [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2018, 35(11): 26-31.
- [11] 张月霞, 王辉. 台风风暴潮灾害风险评估研究综述[J]. 海洋预报, 2016, 33(2): 81-88.
- ZHANG Yuexia, WANG Hui. Review of risk assessment of typhoon storm surge disaster [J]. Marine Forecasts, 2016, 33(2): 81-88.
- [12] 汪杨骏, 侯太平, 张韧, 等. 基于动态极值理论和 Copula 函数的极端海平面高度预测建模[J]. 海洋工程, 2016, 34(4): 62-70.
- WANG Yangjun, HOU Taiping, ZHANG Ren, et al. Prediction modeling of extreme sea level based on dynamic extreme value theory and Copula function [J]. The Ocean Engineering, 2016, 34(4): 62-70.
- [13] 汪杨骏, 张韧, 钱龙霞, 等. 海平面上升引发的极端高水位的频率风险评估模型及其应用: 以宁波为例[J]. 灾害学, 2016, 31(1): 213-218.
- WANG Yangjun, ZHANG Ren, QIAN Longxia, et al. Model for probabilistic risk assessment in extreme high water level caused by rising sea level and its application: A case study in Ningbo [J]. Journal of Catastrophology, 2016, 31(1): 213-218.
- [14] GHANBARI M, ARABI M, OBEYSEKERA J, et al. A coherent statistical model for coastal flood frequency analysis under nonstationary sea level conditions [J]. Earth's Future, 2019, 7(2): 162-177.
- [15] 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.
- XU Weihong, CAI Rongshuo. Estimating the return period of extreme water level in coastal cities of China under different climate scenarios [J]. Marine Science Bulletin, 2022, 41(4): 379-390.
- [16] 许炜宏, 蔡榕硕. 海平面上升、强台风和风暴潮对厦门海域极值水位的影响及危险性预估[J]. 海洋学报, 2021, 43(5): 14-26.
- XU Weihong, CAI Rongshuo. Impacts of sea level rise, strong typhoon and storm surge on extreme sea level in coastal waters of Xiamen and hazards estimation [J]. Haiyang Xuebao, 2021, 43(5): 14-26.
- [17] ROHMER J, THIEBLEMONT R, COZANNET G L. Revisiting the link between extreme sea levels and climate variability using a spline-based non-stationary extreme value analysis [J]. Weather and Climate Extremes, 2021, 33: 100352.
- [18] BALDAN D, CORACI E, CROSATO F, et al. Importance of non-stationary analysis for assessing extreme sea levels under sea level rise [J]. Hazards Earth System Science, 2022, 22(11): 3663-3677.
- [19] FANG J Y, WAHL T, ZHANG Q, et al. Extreme sea levels along coastal China: Uncertainties and implications [J]. Stochastic Environmental Research and Risk Assessment, 2021, 35(2): 405-418.
- [20] 谢冬梅, 潘军宁, 王红川, 等. 考虑海平面上升影响的极值水位计算[J]. 海洋学报, 2023, 45(4): 17-30.
- XIE Dongmei, PAN Junning, WANG Hongchuan, et al. Calculation of extreme water level with the effect of sea level rise [J]. Haiyang Xuebao, 2023, 45(4): 17-30.
- [21] 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.
- ZHUANG Yuan, JI Qiyang, ZUO Juncheng, et al. Effects of sea-level

- rise on the recurrence periods of extreme water levels in coastal areas of China[J]. *Advances in Marine Science*, 2021, 39(1): 20-29.
- [22] 李健, 刘清容, 连喜虎, 等. 警戒潮位核定中建立年极值水位序列的方法研究[J]. *海洋开发与管理*, 2017, 34(6): 77-80.
LI Jian, LIU Qingrong, LIAN Xihu, et al. Precautions on the establishment of annual extreme water level series for approved warning water level[J]. *Ocean Development and Management*, 2017, 34(6): 77-80.
- [23] 徐昕, 殷成团, 章卫胜, 等. 长江口徐六泾水文站极值水位研究[J]. *水运工程*, 2024(4): 1-8.
XU Xin, YIN Chengtuan, ZHANG Weisheng, et al. Extreme water level at Xuliujing hydrological station in the Yangtze Estuary[J]. *Port & Waterway Engineering*, 2024(4): 1-8.
- [24] GILLELAND E, RIBATET M, STEPHENSON A G. A software review for extreme value analysis[J]. *Extremes*, 2013, 16(1): 10-119.
- [25] GILLELAND E, KATZ R W. Extremes 2.0: An extreme value analysis package in R[J]. *Journal of Statistical Software*, 2016, 72(8): 1-39.
- [26] VILLARINI G, SERINALDI F, SMITH J A, et al. On the stationarity of annual flood peaks in the continental united states during the 20th century[J]. *Water Resource Research*, 2009, 45(8): 1-17.
- [27] WIGLEY T M L. The effect of changing climate on the frequency of absolute extreme events[J]. *Climate Change*, 2009, 97(1): 67-76.
- [28] SALAS J D, OBEYSEKERA J. Revisiting the concepts of return period and risk for nonstationary hydrologic extreme events[J]. *Journal of Hydrologic Engineering*, 2013, 19(3): 554-568.
- [29] MENTASCHI L, VOUSDOKAS M, VOUKOUVALAS E, et al. The transformed-stationary approach: a generic and simplified methodology for non-stationary extreme value analysis[J]. *Hydrology Earth System Sciences*, 2016, 20(9): 3527-3547.
- [30] YUE Z Z, XIONG L H, ZHA X N, et al. Impact of thresholds on nonstationary frequency analyses of peak over threshold extreme rainfall series in Pearl River Basin, China[J]. *Atmospheric Research*, 2022, 276: 106269.
- [31] 孙志林, 卢美, 聂会, 等. 气候变化对浙江沿海风暴潮的影响[J]. *浙江大学学报(理学版)*, 2014, 41(1): 90-94.
SUN Zhilin, LU Mei, NIE Hui, et al. Impacts of climatological change on storm surge in Zhejiang coastal water[J]. *Journal of Zhejiang University (Science Edition)*, 2014, 41(1): 90-94.
- [32] HAIGH I D, MARCOS M, TALKE S A, et al. A major update to the global higher frequency sea level dataset[J]. *Geoscience Data Journal*, 2023, 10(3): 293-314.
- [33] RAGNO E, AGHAKOUCHAK A, CHENG L Y, et al. A generalized framework for process-informed nonstationary extreme value analysis[J]. *Advances in Water Resources*, 2019, 130: 270-282.
- [34] RADFAR S, GALIATSATOU P. Influence of non-stationarity and dependence of extreme wave parameters on the reliability assessment of coastal structures: A case study[J]. *Ocean Engineering*, 2023, 273: 113862.
- [35] MACKAY E, JONATHAN P. Assessment of return value estimates from stationary and non-stationary extreme value models[J]. *Ocean Engineering*, 2020, 207: 107406.
- [36] STEPHENSON A, TAWN J. Bayesian inference for extremes: accounting for the three extremal types[J]. *Extremes*, 2004, 7: 291-307.
- [37] COLES S, POWELL E A. Bayesian methods in extreme value modelling: A review and new developments[J]. *International Statistical Review*, 1996, 64: 119-136.
- [38] LI D Y, MARSHALL L, ZHOU Y, et al. Enhancing probabilistic hydrological predictions with mixture density networks: Accounting for heteroscedasticity and non-gaussianity[J]. *Journal of Hydrology*, 2024, 641: 131737.
- [39] COOLEY D. Return periods and return levels under climate change[J]. *Extremes in a Changing Climate*, 2013, 65: 97-114.
- [40] KATZ R W, PARLANGE M B, NAVEAU P. Statistics of extremes in hydrology[J]. *Advances in Water Resources*, 2002, 25(8): 1287-1304.
- [41] COLES S G. *An Introduction to Statistical Modeling of Extreme Values* [M]. London: Springer, 2001.
- [42] 高斌. 长江上游极端降水非平稳拟合及致灾效应分析[J]. *水利水电技术(中英文)*, 2025, 56(2): 1-14.
GAO Bin. Non-stationary fitting of extreme precipitation in the upper reaches of the Yangtze River and analysis of its disaster causing effects[J]. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 2025, 56(2): 1-14.

(责任编辑 王海锋)