

DOI: 10.19797/j.cnki.1000-0852.20210131

# 极端高潮位情景对上海吴淞口设计高潮位影响研究

刘宏宽<sup>1,2</sup>

(1.上海市水利工程设计研究院有限公司, 上海 200061; 2.上海滩涂海岸工程技术研究中心, 上海 200061)

**摘要:**为研究极端高潮位对上海吴淞口设计高潮位(千年一遇)的影响,采用无偏估计计算初值、P-III型曲线目估适线,研究了吴淞口 1985—2018 年逐年设计高潮位变化。结果表明 9711 和 0012 台风期间产生的极端高潮位分别提升设计高潮位 0.184 m 和 0.128 m。对未来情景,采用 MCMC 和 Metropolis-Hastings 抽样生成 1000 组与历史序列趋势一致的样本序列,研究了未来 30 年出现 0 次、1 次、2 次极端高潮位对 2050 年吴淞口设计高潮位的影响,结果较现状 (2018)6.58 m 分别约提升 2 cm、14 cm 和 24 cm。平均每遇到一次极端高潮位,吴淞口设计高潮位上升约 10~12 cm。

**关键词:**设计高潮位;吴淞口;Metropolis-Hastings 算法;极端高潮位;随机模拟

**中图分类号:**TV11

**文献标识码:**A

**文章编号:**1000-0852(2022)03-0027-05

## 0 引言

极端高潮位是影响设计高潮位的关键因素<sup>[1]</sup>,张弘等<sup>[2]</sup>根据吴淞站 1912—2010 年实测最高潮位序列,利用 P-III 拟合计算了吴淞口千年一遇设计高潮位 (6.44 m),结果显著高于现状采用的 1985 年规定的设防水位 (6.27 m)。现状的设计高潮位 (千年一遇)极有可能满足不了未来的防洪要求。

受海平面上升和地面沉降等诸多因素影响,上海相对海平面上升速率为 0.5~0.8 cm/a<sup>[3-4]</sup>,未来上海面临极端高潮位的风险将会增加<sup>[5-6]</sup>。Kang 等<sup>[7]</sup>基于历史资料利用统计学的方式建立了海平面上升和潮位变化的回归关系;Lee<sup>[8]</sup>利用 BP 神经网络模型对台湾中港潮位进行长期预测;黄永俊<sup>[9]</sup>利用多种方法对广西沿海未来 20—100 年的设计高潮位分别进行预测。但大多数研究仅考虑海平面上升等因素带来的影响,未针对极端高潮位出现频次对设计高潮位影响做定量分析。

长系列年最高潮位预测精度低且难度大,但序列具备相应的水文规律<sup>[10]</sup>。因此,可借助水文学的思想预测符合规律的潮位序列<sup>[11]</sup>,从而得到设计潮位。本文基于 Metropolis-Hastings 算法和 P-III 分布,考虑历史、现状和未来三种尺度极端高潮位情景,定量分析极端

高潮位频次对上海吴淞口设计高潮位的影响,为上海防汛防潮工作相关工程设计提供一定的理论方法和技术参考。

## 1 数据来源和情景设计

研究区域位于黄浦江与长江交汇处 (见图 1),其潮位受天文大潮、风暴潮、上游太湖流域洪水以及沿岸雨洪水等因素共同影响。

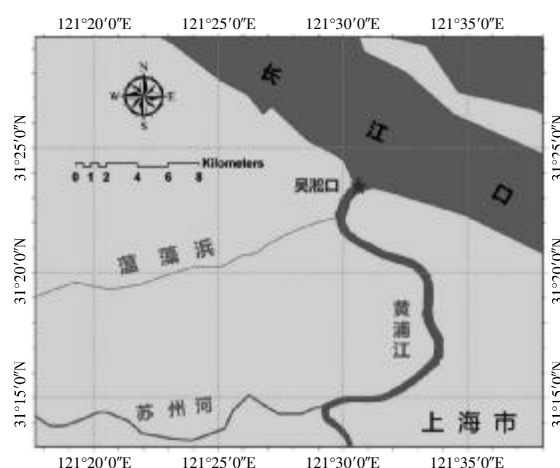


图1 吴淞口区位示意图

Fig.1 The sketch map of Shanghai Wusong estuary

收稿日期:2021-03-15

网络首发时间:2022-04-20

网络首发地址:https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1814.P.20220419.1240.001.html

基金项目:上海市科学技术委员会科研资助项目(19DZ1201500,20DZ1204400);上海市水务局科研资助项目(沪水科 2018-01)

作者简介:刘宏宽(1995—),男,江西萍乡人,硕士,助理工程师,主要从事水文、水环境方面的工作。E-mail:2013301580001@whu.edu.cn

### 1.1 数据来源

来源于吴淞站 1912—2018 年连续年最高潮位数据序列,并根据上海市测绘部门公布的地面沉降量进行修正,资料具备可靠性(见图 2)。

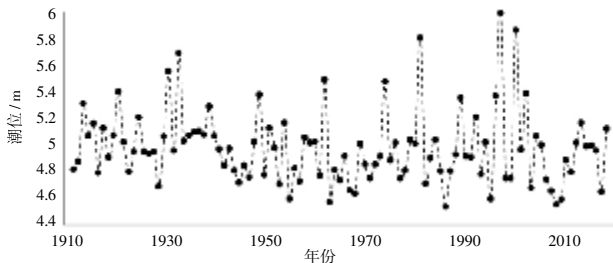


图2 吴淞口 1912~2018 年最高潮位序列(修正后)

Fig.2 The highest tidal level sequence of Wusong estuary from 1912 to 2018 (Revised)

### 1.2 极端高潮位情景

吴淞口历史上出现过 3 次 5.80 m 以上的极端高潮位,分别发生在 8114 号台风、9711 号台风和 0012 号台风期间。极端高潮位约平均 40 年发生一次,且近 20 年未发生,未来 30 年极端高潮位存在再发生 0~2 次的可能性。

吴淞口历史上出现的最高潮位为 5.99 m。据此,设计未来 30 年吴淞口可能再出现 5.99 m 极端高潮位频次(0~2 次),分别对应 3 种未来尺度下的极端高潮位情景(见表 1)。

表1 极端高潮位设计情景

Table1 The design scenarios of extreme high water level

设计情景	时间	5.80 m 以上出现频次	5.99 m 再出现频次
历史	1912~1999 年	2	0
现状	1912~2018 年	3	0
未来 1	1912~2050 年	3	0
未来 2	1912~2050 年	3	1
未来 3	1912~2050 年	4	2

## 2 研究方法

采用随机模型与 P-Ⅲ 适线拟合法研究各极端高潮位情景下的设计高潮位。对历史、现状和未来三种尺度 5 种情景,首先分别对修正后的实测样本序列的一致性、趋势性、马尔科夫性进行检验;对未来情景,另外采用 Metropolis-Hastings 算法构建随机模型插补各未来情景的年最高潮位,形成新的序列(1912~2050),并

保证新序列同原序列具有相同的趋势;最终,利用 P-Ⅲ 型曲线对检验合格的序列进行频率分析计算,得到千年一遇设计高潮位。

### 2.1 一致性检验

Von Neumann ratio 法和累计偏差法都可用来进行水文序列一致性分析,分别利用统计量  $N$  和  $R/\sqrt{n}$  来评估,其临界值分布如表 2 所示。

表2 Von Neumann ratio 方法临界值( $\alpha=0.05$ )

Table2 Critical values of Von Neumann ratio method ( $\alpha=0.05$ )

临界值	方法	50	70	100	138	150
$N$	Von Neumann ratio	1.54	1.61	1.67	1.74	1.76
$R/\sqrt{n}$	累计偏差法	1.54	1.61	1.67	1.74	1.76

如果  $N$  值小于某临界值水平,则序列在该水平上不具备一致性<sup>[12]</sup>;如果值大于某临界值水平,则序列在该水平上不具备一致性<sup>[13]</sup>。

### 2.2 趋势性分析

在时间序列趋势分析中,Mann-Kendall 检验是世界气象组织推荐并已被广泛使用的非参数检验方法,最初由 Mann 和 Kendall 提出,现已被很多学者用来分析潮位时间序列的趋势变化。检验统计量  $Z$  为正值表示增加趋势,负值表示减少趋势, $Z$  的绝对值在大于等于 1.28、1.64、2.32 时表示分别通过了置信度为 90%、95%、99% 下的趋势性检验<sup>[14]</sup>。

### 2.3 随机模拟

在外界因素处于相对稳定的情况下,河湖的年最高水位过程属于马尔可夫过程,可以依据其转移概率进行预测<sup>[15]</sup>。吴淞口各年最高潮位序列过程可视为在相同条件下进行的随机试验结果,这个随机过程可以看成含有若干个状态的马尔可夫过程。可依据序列  $Y_i$  的均值  $EX$  和均方差  $\sigma$  分为五个状态(见表 3)。

表3 潮位序列状态分级

Table3 State classification of tidal level sequence

分级	含义	取值区间
1	特高	$Y_i > (EX + \sigma)$
2	高	$(EX + \sigma) \geq Y_i > (EX + 0.5\sigma)$
3	一般	$(EX + 0.5\sigma) \geq Y_i > (EX - 0.5\sigma)$
4	低	$(EX - 0.5\sigma) \geq Y_i > (EX - \sigma)$
5	特低	$(EX - \sigma) \geq Y_i$

随机序列的马尔科夫性用 $\chi^2$ 检验法检验,给定显著性水平 $\alpha$ ,若:

$$\chi^2 > \chi_{\alpha}^2 [(m-1)^2] \quad (1)$$

即该随机过程服从自由度为 $(m-1)^2$ 的 $\chi^2$ 分布,该过程满足马尔科夫性<sup>[16]</sup>。给定显著性水平 $\alpha=0.01$ ,状态 $m=5$ ,查 $\chi^2$ 分布表临界值为32.0。

### 2.3.1 Markov Chain Monte Carlo 法

马尔科夫链蒙特卡洛方法(Markov Chain Monte Carlo),简称MCMC,该方法是将马尔科夫(Markov)过程引入到 Monte Carlo 模拟中,实现抽样分布随模拟的进行而改变的动态模拟,在潮位预测等很多领域到广泛的应用<sup>[17]</sup>。马尔科夫链的状态转移的概率只依赖于前一个状态,其数学表达为:

$$P(X_{t+1}=x|X_t, X_{t-1}, \dots) = P(X_{t+1}=x|X_t) \quad (2)$$

马尔科夫链的收敛和初始概率分布无关,仅由概率转移矩阵 $P$ 决定。当 $n$ 足够大的时候,矩阵 $P^n$ 的每一行都是相等的向量 $\pi$ (平稳分布):

$$\pi = [\pi(1), \pi(2), \dots, \pi(j), \dots] \quad \sum_{i=1}^{\infty} \pi_i = 1 \quad (3)$$

$$\pi(j) \sum_{i=1}^{\infty} \pi(i) P_{ij} \quad (4)$$

式中: $P_{ij}$ 为序列从状态 $i$ 转移到状态 $j$ 的频率。通常情况下 $P_i P_{ij} \neq P_j P_{ji}$ ,定义接受率 $\alpha_{ij}$ ,使得: $P_i P_{ij} \alpha_{ij} = P_j P_{ji} \alpha_{ji}$ 。记 $Q_{ij} = P_{ij} \alpha_{ij}$ , $Q_{ji} = P_{ji} \alpha_{ji}$ ,其平稳分布为 $P(x)$ ,可得到一个转移序列 $x_0, x_1, \dots, x_n, x_{n+1}, \dots$ ,马尔科夫链在第 $n$ 步收敛,则 $\pi(x)$ 的样本为 $x_n, x_{n+1}, \dots$ 。

### 2.3.2 Metropolis-Hastings 算法

为避免因为接受率偏小可能导致的MCMC算法大量产生拒绝跳转现象,缩减马氏链遍历所有状态空间要花费的时间,加快收敛时间,Metropolis-Hastings算法在MCMC基础之上,将接受率 $\alpha_{ij}$ 和 $\alpha_{ji}$ 同比例放大,使较大者为1<sup>[18]</sup>,取新的接受率:

$$\alpha_{ij} = \min \left\{ \frac{P_j P_{ji}}{P_i P_{ij}}, 1 \right\} \quad (5)$$

## 2.4 P-III型分布

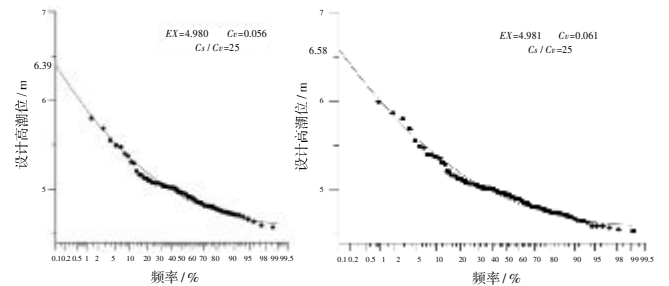
依据相关研究经验及《水利水电工程水文计算规范》,采用皮尔逊Ⅲ型(P-Ⅲ型)分布来设计潮位<sup>[19-20]</sup>。

## 3 吴淞口设计高潮位研究

### 3.1 现状及历史设计高潮位变化

对历史和现状两个情景,在95%置信水平下分别用 Von Neumann ratio 法和累计偏差法检验一致性;在

90%置信水平下用 Mann-Kendall 法检验趋势性;在99%置信水平下 $\chi^2$ 值,检验马尔科夫性,结果如表4所示;经目估后的P-Ⅲ拟合曲线及参数如图3所示,两种情景下的千年一遇设计高潮位分别为6.389 m和6.582 m,较6.27 m提升0.129 m和0.282 m。



(a) 历史情景(1912—1999)

(b) 现状情景(1912—2018)

图3 历史和现状情景下年最高潮位P-Ⅲ拟合结果

Fig.3 P-III fitting results of annual maximum tide level under historical and current scenarios

为进一步分析历史上发生的极端高潮位对千年一遇设计高潮位的影响,采用 $C_s$ 与 $C_v$ 比值(25.0)固定不变、无偏估计计算均值、变异系数同倍比放大的方式,计算1985—2018年吴淞口的千年一遇高潮位(见图4)。历史上9711台风和0012台风分别给吴淞口带来5.99 m和5.87 m的极端高潮位,而图4曲线在1997年和2000年各有一次跳跃(对应的设计高潮位分别为6.576 m和6.690 m),极端高潮位对设计高潮位影响极大。

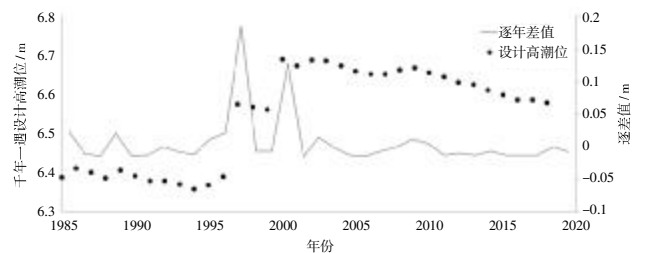


图4 1985~2018年设计高潮位变化

Fig.4 Variation of design high tide level from 1985 to 2018

### 3.2 2050年设计高潮位研究

未来3种情景的千年一遇设计高潮位计算成果如表4所示。结果显示,每多出现一次极端高潮位,序列均值抬升约1‰,抬升幅度较小;变异系数约5%,抬升较大;千年一遇设计高潮位提升极大,分别抬升13.7 cm和26.7 cm。

表4 各情景检验及潮位设计成果

Table4 The results of design maximum tide level in different testing scenarios

情景	Von Neumann ratio		累计偏差法		Mann-Kendall		$\chi^2$ 检验		统计参数		设计高潮位 (千年一遇)
	统计值	一致性	统计值	一致性	统计值	趋势性	统计值	马氏性	均值	$Cv$	
历史	2.068	满足	1.464	满足	-2.203	满足	50.841	满足	4.980	0.056	6.389 m
现状	2.001	满足	1.114	满足	-1.997	满足	71.695	满足	4.981	0.061	6.582 m
未来 1	2.010	满足	1.019	满足	-1.312	满足	73.948	满足	4.979	0.062	6.605 m
未来 2	2.007	满足	0.998	满足	-1.477	满足	76.686	满足	4.981	0.065	6.719 m
未来 3	1.962	满足	1.048	满足	-1.548	满足	78.707	满足	4.987	0.068	6.849 m

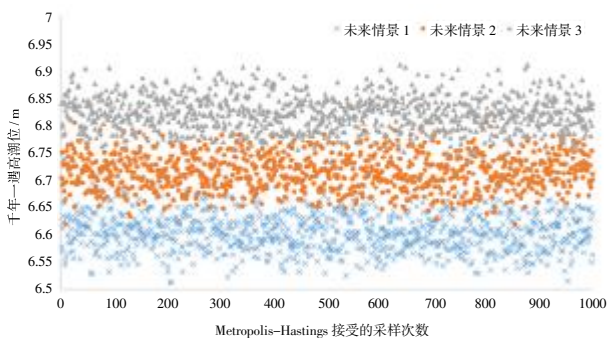


图5 3种未来情景各1000次设计高潮位结果

Fig.5 1000 design high water level results for each of the three future scenarios

为降低随机模拟带来的误差,保证定量研究的代表性,对三种未来情景,分别采用相同方法,随机生成满足相同置信水平下的一致性、趋势性和马尔科夫性的1000组随机序列,计算生成的设计高潮位情况(见图5)。三种情景序列的均值分别为6.605 m、6.717 m、6.823 m;标准差分别为0.034 m、0.033 m、0.031 m,基本可以认为吴淞口未来30年内发生0次、1次、2次极端高潮位情景下,吴淞口2050年千年一遇设计高潮位约为6.60 m、6.72 m、6.82 m。利用P-III拟合的现状吴淞口设计高潮位为6.582 m,因此,未来30年间,若不再出现极端高潮位,吴淞口设计高潮位基本不变;若发生1次、2次计算高潮位情景,吴淞口设计高潮位变化极大,分别抬升约14 cm和24 cm,相对现状设防水位,分别高出0.45 m和0.55 m。

#### 4 结论

通过研究极端高潮位对吴淞口历史、现状及未来情景下千年一遇设计高潮位的影响,主要有以下结论:

(1)现状吴淞口千年一遇潮位为6.582 m,远高于其设防水位6.27 m。

(2)极端高潮位是设计高潮位的重要影响因素,9711和0012两次台风期间产生的极端高潮位分别将吴淞口设计高潮位抬升18.4 cm和12.8 cm。

(3)未来30年内如不出现大于5.80 m的极端高潮位,2050年吴淞口千年一遇高潮位与现状基本保持一致。

(4)未来30年内,吴淞口出现1、2次极端高潮位时,其千年一遇设计高潮位相对现状设防水位分别高出0.45 m和0.55 m,存在极大的防洪档潮安全隐患。

极端高潮位的产生受海平面上升、风暴潮、天文大潮、区间洪水等共同影响,未来情景下的其他极端高潮位情景(5.90 m、6.10 m等)对设计高潮位的影响,有待进一步研究。此外,本研究范围较小,仅为上海吴淞口,适用性有限。对于更多地区的相应结论,有待进一步研究。

#### 参考文献:

- [1] 贾良文,任杰,余丹亚.广东省沿海地区年最高设计潮位计算与分析[J].水运工程,2012(6):8-14. (JIA Liangwen, REN Jie, YU Danya. Calculation and analysis of annual design highest tidal level in coastal area of Guangdong [J]. Water Transport Engineering, 2012(6): 8-14. (in Chinese))
- [2] 张弘,李琼芳,虞美秀,等.变化环境下黄浦江年最高潮位频率分析[J].水电能源科学,2014,32(7):1-5. (ZHANG Hong, LI Qiongfang, YU Meixiu, et al. Frequency analysis of annual maximum tide level in Huangpu River in times of intense change [J]. Hydropower Energy Science, 2014,32(7):1-5. (in Chinese))
- [3] CHENG H Q, CHEN J Y, CHEN Z J, et al. Mapping sea level rise behavior in an estuarine delta system: a case study along the Shanghai coast [J]. Engineering, 2018,4(1):156-163.
- [4] 凌铁军,祖子清.气候变化影响与风险:气候变化对海岸带影响与风险研究[M].北京:科学出版社,2017. (LING Tiejun, ZU Ziqing. Impacts and Risks of Climate Change: Impacts and Risks of Climate Change on Coastal Zone [M]. Beijing: Science Press, 2017. (in Chinese))

- [5] WU Shaohong, FENG Aiqing, GAO Jiangbo, et al. Shortening the recurrence periods of extreme water levels under future sea-level rise [J]. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 2017,31(10).
- [6] 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 level in coastal areas of China [J]. *Advances in Marine Science*, 2021,39(1):20–29. (in Chinese))
- [7] KANG J W, MOON S R, PARK S J, et al. Analyzing sea level rise and tide characteristics change driven by coastal construction at Mokpo Coastal Zone in Korea [J]. *Ocean Engineering*, 2008,36(6).
- [8] LEE T L. Back-propagation neural network for long-term tidal predictions [J]. *Ocean Engineering*, 2004,31(2):225–238.
- [9] 黄永俊. 环境变化条件下的海堤设计高潮位研究—以广西沿海为例 [D]. 南宁: 广西大学, 2017. (HUANG Yongjun. Research on Sea Dike Design High Water Level under Environmental Change - Taking Coastal Area of Guangxi as an Example [D]. Nanning: Guangxi University, 2017. (in Chinese))
- [10] 陈其幸. 上海市水情长期预测方法比较研究[D]. 南京: 河海大学, 2005. (CHEN Qixing, Study on Methods of Long-Range Hydrologic Forecast by Comparison in Shanghai [D]. Nanjing: Hohai University, 2005. (in Chinese))
- [11] WU C, HUANG G, WU S. Risk analysis of combination of short duration rainstorm and tidal level based on Copula function in Guangzhou [J]. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2014,33(2): 33–40.
- [12] BARTELS R. The rank version of von Neumann's ratio test for randomness [J]. *Publications of the American Statistical Association*, 1982,77(377):40–46.
- [13] JBABDI S. Metropolis Hastings [J]. *Nuclear Science & Engineering the Journal of the American Nuclear Society*, 2006,154(2): 1112–1115.
- [14] 张悦, 李国芳. 长江口潮位非一致性及对水文设计的影响研究[J]. *长江科学院院报*, 2015(5):25–31+40. (ZHANG Yue, LI Guofang. Nonstationarity of tidal level and its impacts on hydrologic design in Yangtze River estuary [J]. *Journal of the Yangtze River Academy of Sciences*, 2015(5):25–31,40. (in Chinese))
- [15] 王渺林,傅华,刘德春. 寸滩站年最高水位预测模型研究[J]. *重庆交通学院学报*, 2005,24(4):121–123. (WANG Miaolin, FU Hua, LIU Dechun. Study on prediction model of annual maximum water level at Cuntan station [J]. *Journal of Chongqing Jiaotong University*, 2005,24(4):121–123. (in Chinese))
- [16] DBBM K. A  $\chi^2$  goodness-of-fit test for Markov renewal processes-goodness-of-fit test for Markov renewal processes [J]. *Annals of the Institute of Statistical Mathematics*, 1973.
- [17] G, W R, RICHARDSON S, SPIEGELHALTER D. Markov Chain Monte Carlo in Practice [M]. CRC Press: 2013–04–18.
- [18] CHRISTIAN P R, GEORGE C. Monte Carlo Statistical Methods [M]. Springer, New York, NY: 2004–01–01.
- [19] 华家鹏. 上海黄浦江口设计潮位的分析[J]. *水文*, 1985(3):11–18. (HUA Jiapeng. Analysis of design tide level of Huangpu estuary in Shanghai [J]. *Journal of China Hydrology*, 1985(3):11–18. (in Chinese))
- [20] SL/T 278–2020, 水利水电工程水文计算规范[S]. (SL/T 278–2020, Specification for Hydrologic Computation of Water and Hydropower Projects [S]. (in Chinese))

## Influence of Extreme High Tide Scenario on Design High Tide Level in Shanghai Wusong Estuary

LIU Hongkuan<sup>1,2</sup>

(1. Shanghai Water Engineering Design and Research Institute Company Limited, Shanghai 200061, China;

2. Shanghai Engineering Research Center of Coastal Zones, Shanghai 200061, China)

**Abstract:** To research the influence of extreme high tide level on the design high tide level (once in a thousand years) at Shanghai Wusong estuary, this paper studied its annual design high tide level from 1985 to 2018 by using unbiased estimation to calculate the initial value of P-III statistics. The results show that the extreme high tide level generated during Typhoon 9711 and 0012 increase by 0.184m and 0.128m respectively. For the future scenario, MCMC and metropolis Hastings are used to generate 1000 groups of sample sequences that are consistent with the trend of historical series, and analyze the influence of three different times of extreme high tide levels on the design high tide level in 2050 for the next 30 years, the results are about 2cm, 14cm and 24cm higher than the current 6.58m (2018). On average, for every extra extreme high tide that encountered, the design high tide level rises about 10–12cm.

**Keywords:** design high tide level; Wusong estuary; Metropolis-Hastings; extreme high tide level; random simulation