

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2022.04.016

降水变化条件下沿海地区暴雨-潮位遭遇联合风险

王磊之¹, 崔婷婷¹, 李笑天², 李伶俐¹, 刘克强³, 李曦亭¹

(1. 南京水利科学研究院水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 江苏 南京 210029;
2. 水利部水资源管理中心, 北京 100038; 3. 太湖流域管理局水利发展研究中心, 上海 200434)

摘要:为辨识沿海地区极端降水变化特性,并定量揭示其对暴雨-潮位遭遇风险的影响,以华南沿海地区的深圳市为例,采用 Pettitt 方法检测 1965—2016 年极值降水的变异情况,根据变异年份划分研究时段,基于 Copula 函数构建了深圳市暴雨-潮位的联合分布模型,对比分析了不同时期暴雨-潮位遭遇的联合风险的变化情况。结果表明:1985 年为深圳年最大 1 d 降水量的突变点;受极端降水特性变化的影响,对同一重现期的暴雨-潮位组合而言,1985 年之后暴雨-潮位遭遇风险较 1985 年之前显著增大;Copula 函数求解简便、适应性强,能够定量求解沿海城市暴雨-潮位遭遇的联合风险。

关键词:极值暴雨;潮位;遭遇;Copula 函数;联合分布;深圳市

中图分类号:P333.2 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-6933(2022)04-0110-07

Joint risks of rainstorm and tidal level under varying precipitation conditions in coastal areas//WANG Leizhi¹, CUI Tingting¹, LI Xiaotian², LI Lingjie¹, LIU Keqiang³, LI Xiting¹ (1. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China; 2. Water Resources Management Center, Ministry of Water Resources, Beijing 100038, China; 3. Water Conservancy Development Research Center, Taihu Basin Authority, Shanghai 200434, China)

Abstract: In order to identify the variation characteristics of extreme precipitation and quantitatively reveal its impact on the encounter probability of rainstorm and tidal level in coastal areas, using Shenzhen City in the coastal area of South China as the study area, the variation of extreme precipitation from 1965 to 2016 was investigated with the Pettitt method. A joint distribution model of rainstorm and tidal level was constructed based on the Copula function with the study period divided into different stages by the change year. The changes of the joint risks of encounter of rainstorm and tidal level at different stages were compared and analyzed. The results show that 1985 was the abrupt change point of the maximum one-day precipitation in Shenzhen City. The risk of encounter of rainstorm and tidal level with a same return period after 1985 was significantly higher than that before 1985 due to changes in extreme precipitation characteristics. The Copula function, which is easy to solve and has strong adaptability, can be used to quantitatively solve the joint risk of rainstorm and tidal level in coastal cities.

Key words: extreme rainstorm; tidal level; encounter; Copula function; joint distribution; Shenzhen City

沿海地区受海洋性季风的影响,降水较多,加上外海高潮位的顶托作用,强降水、高潮位“碰头”的情况时有发生,因此沿海城市的防洪排涝工程系统设计不仅受区间暴雨的影响,亦要考虑外海潮位的顶托效应。暴雨-潮位的遭遇在重现期意义上直接影响了沿海地区防洪排涝工程设计标准,而两者的

遭遇分析通常以其遭遇的联合分布为基础^[1]。长久以来,水文学者对两者遭遇的联合重现期开展了不少研究,早期黄国如等^[2]基于频率组合法,以面平均雨量和潮位为研究对象建立了 2 个因素的水位函数,推求了感潮河段的设计洪水位,但其推求的假设条件为降雨和潮位相互独立;林荣等^[3]采用正态

基金项目:国家重点研发计划(2017YFC1502705,2021YFC3000101-02);国家自然科学基金(52109028);江苏省自然科学基金(BK20210042)

作者简介:王磊之(1991—),男,高级工程师,博士,主要从事城市水文和防洪排涝研究。E-mail:leizhi668@foxmail.com

通信作者:崔婷婷(1985—),女,高级工程师,硕士,主要从事流域和城市水文研究。E-mail:ttcui@nhri.cn

变换法研究了黄浦江风暴潮位与强降雨遭遇的概率,但该方法在原始数据处理过程中会造成部分信息失真。近年来,Copula 函数因其计算过程可逆、推求结果相对可靠、灵活性和适应性较强等优势,在极端水文事件研究,如极端暴雨^[4]、洪水分析^[5-6]、水文干旱^[7]等方面得到广泛应用。在暴雨-潮位遭遇研究方面也出现了不少应用 Copula 函数计算暴雨-潮位遭遇风险概率的案例。例如:任锦亮等^[8]运用 Copula 函数构建了上海市台风降水和潮位的联合分布模型,对最大 1 d 降水量与相应潮位的遭遇风险概率进行了研究;刘曾美等^[9]应用 Copula 函数计算了中山市中珠联围设计暴雨和承泄区潮位的遭遇概率,结果表明,每年 6—7 月中珠联围的暴雨有较大概率遭遇西江高潮位;万永静等^[10]、张卫国等^[11]分别应用 Copula 函数分析了南京市、甬江流域设计极值暴雨与长江最高潮位的遭遇概率;Fu 等^[12]采用 Copula 函数生成降水过程和评估排水系统的效果;刘曾美等^[1]、Zheng 等^[13]、Xu 等^[14]、徐宗学等^[15]分别利用 Copula 函数探索了广东阳山、澳大利亚、海口市、深圳市等地沿海地区暴雨和风暴潮对洪涝灾害的复合驱动作用。

当前对沿海地区暴雨-潮位遭遇的研究大多集中在采用 Copula 函数探讨分析长系列极端水文事件要素之间的联合分布特征,而对于其联合分布特征变异情况的研究却较为少见。然而,受全球气候变化的影响,极端水文事件有明显增加趋势^[16],吴燕娟^[17]通过分析我国不同地区站点的最大 1 d 降水量资料,发现我国东南地区大雨和暴雨均呈显著上升趋势。政府间气候变化专门委员会(IPCC)第 5 次评估报告指出,在未来全球气候变暖的背景下,极端气象水文事件还将进一步增加^[16-18],因此直接采用长系列数据研究暴雨-潮位组合问题无形中忽略了降水特性变化对遭遇特征的影响。本文选择华南沿海地区的深圳市为研究区域,采用 Pettitt 方法^[19]分析检测极值暴雨的变异情况,对比分析了不同时期深圳市暴雨-潮位遭遇联合风险的变化情况,以期沿海地区的防洪排涝工作提供参考。

1 研究区概况与数据来源

深圳市地处华南地区、珠江口东岸,东临大亚湾和大鹏湾,西濒珠江口和伶仃洋,南隔深圳河与香港相连。作为中国的经济中心城市和国际化城市,深圳拥有中国最多的口岸数量和最多的出入境人员,发达的经济社会以及人口和财富的高度聚集凸显了深圳市洪涝灾害的暴露性和脆弱性,加之深圳市濒临南海,受季风气候影响,洪涝灾害多发,并易受海

洋风暴潮影响,在汛期容易出现极端暴雨、高潮位“碰头”的情况,使得洪涝灾害更为严重。因此本文选择深圳市作为典型沿海地区,重点研究区域暴雨和外来高潮位遭遇联合风险的变化情况。

根据 1965—2016 年的《中华人民共和国水文年鉴》,深圳市沿海地区分布着若干潮位站,其中位于伶仃洋的赤湾站拥有较长系列的潮位及降水数据记录,故本文选择赤湾站作为研究深圳极值暴雨-高潮位遭遇特征的代表性站点。对深圳市而言,城市防洪除涝对短历时的最大 1 d 降水量响应程度较高,因此利用赤湾站 1965—2016 年的逐日降水量、高潮位资料,提取了该站年最大 1 d 降水量及其对应的最高潮位系列。值得注意的是,由于本文研究的是极值降水、高潮位“碰头”的情况,因此,相应的高潮位序列在年最大 1 d 降水量发生日期内进行提取。

2 研究方法

2.1 突变性诊断

以极值降水(年最大 1 d 降水量)作为分析降水变化响应的特征指标。采用 Pettitt 方法对深圳赤湾站长系列最大 1 d 降水量突变性进行诊断,该方法与 Mann-Kendall 法相似,是一种基于 Mann-Whitney 统计量的非参数检验方法,其诊断步骤如下:

步骤 1 构造 Mann-Kendall 秩序列:

$$S_{\tau} = \sum_{i=1}^{\tau} \sum_{j=\tau+1}^n \text{sgn}(x_j - x_i) \quad (\tau = 1, 2, \dots, n-1) \quad (1)$$

式中: τ 为 Kendall 秩相关系数; n 为时间序列的长度; x 为极值降水序列。

步骤 2 把所构造的秩序列取得最大值 S 的时刻计为 T ,认为 T 为突变时刻, T 和 S 的表达式分别为

$$T = \text{argmax} |S_{\tau}| \quad (2)$$

$$S = \max_{1 \leq \tau \leq n} |S_{\tau}| \quad (3)$$

步骤 3 计算显著性统计量 P :

$$P \approx 2 \exp[-6S^2(n^3 + n^2)] \quad (4)$$

若 $P \leq 0.5$,则认为检测出来的突变点在统计意义上是显著的。

2.2 分布拟合与优选

2.2.1 分布拟合

a. 边缘分布。采用在水文学中常用的 5 类分布(Normal 分布、Lognormal 分布、Gamma 分布、Logistic 分布和 Weibull 分布)作为赤湾站极值降水和相应高潮位系列边缘分布的备选拟合线型,边缘分布拟合模型的采纳与否通过 K-S 检验的统计量 D 确定。

b. 联合分布。Copula 函数是边缘分布为 $[0, 1]$ 区间均匀分布的联合分布函数,利用 Copula 函数可以将多个随机变量的边缘分布连接起来,得到它们的联合分布。采用水文学中常用的 Archimedean Copula 函数族作为联合分布的备用函数,它是一类重要的 Copula 函数,求解简便,适应性强,常用的 Archimedean Copula 函数主要包含 Clayton Copula、Gumbel Copula 和 Frank Copula 3 类。二维 Archimedean Copula 函数的联合累积分布、参数 θ 和 Kendall 秩相关系数 τ 的关系表达式见表 1,其中, $F(p, z)$ 、 $C(u, v)$ 均为各联合分布的累积分布,前者对应于实际的二维变量, p, z 分别为 2 个二维变量;后者对应于相应的 Copula 函数, u, v 分别为二维 Copula 函数中的 2 个变量。

2.2.2 分布优选

拟合优度评价是选择联合概率分布函数的重要指标^[20],常用的拟合优度评价是对经验概率和理论概率进行比较,具体可采用直观图形分析法、赤池信息准则(AIC)和离差平方和最小准则(OLS)等^[21]进行拟合优度评价。本文采用 AIC 优选出极值暴雨-潮位联合分布的最优 Copula 函数,再采用直观图形分析法检验优选出的分布是否能够满足拟合精度的要求。

对于二维实测数据集,其经验累积频率由下式计算:

$$F_{\text{emp}}(z_i, q_j) = P(Z \leq z_i, Q \leq q_j) = \frac{n_{ij}}{N + 1} \quad (5)$$

式中: z_i, q_j 为二维变量的取值; Z, Q 为二维变量对应的事件; n_{ij} 为所有实测值对中同时小于或等于 (z_i, q_j) 的频次; N 为联合实测值总对数。

AIC 为评估、衡量统计模型“拟合”资料优良性的一种标准,AIC 值计算公式为

$$I = 2k - 2\ln L \quad (6)$$

式中: I 为 AIC 值; k 为参数的数量; L 为似然函数。 I 值越小,说明 Copula 函数拟合精度越高。

2.3 联合风险概率

降水量 Z 和潮位 Q 中有一个变量超过某一量级的概率称为联合风险概率,相应的重现期称为联

合重现期。 $Z \geq z$ 和 $Q \geq q$ 的联合风险概率计算公式为

$$P(Z \geq z, Q \geq q) = 1 - F(z, q) \quad (7)$$

式中: $P(Z \geq z, Q \geq q)$ 为联合风险概率; $F(z, q)$ 为 Copula 函数计算的联合分布概率。

3 结果与分析

3.1 降水突变分析

图 1 为深圳赤湾站 1965—2016 年年最大 1 d 降水量序列及其 Pettitt 统计量的变化趋势,可见年最大 1 d 降水量呈现明显增加趋势,同时,对年最大 1 d 降水量的突变检测表明:Pettitt 统计量在 1985 年取得最小值,因此选择 1985 年作为深圳市年最大 1 d 降水量变化的突变点。这一突变年份与涂新军等^[22-23]在长江流域、珠江流域降水变异情况的研究结论是较为一致的。

根据年最大 1 d 降水量序列的突变情况,将研究时段分为 1965—1985 年和 1986—2016 年 2 个阶段,计算 2 个阶段的年最大 1 d 降水量均值分别为 138.2 mm 和 170.7 mm,第二阶段均值明显大于第一阶段均值。

3.2 分布拟合与优选

3.2.1 边缘分布

a. 分布线型优选。采用 5 类备选边缘分布线型拟合了赤湾站 1965—2016 年年最大 1 d 降水量和高潮位系列,并将拟合的边缘分布结果采用 K-S 检验和 AIC 值进行优选,结果见表 2。由表 2 可知,各线型拟合均通过了 95% 的 K-S 检验,均可作为备选线型;由 AIC 值可知 Lognormal 线型是拟合赤湾站极值暴雨的最优线型,因此选择 Lognormal 分布作为赤湾站极值暴雨的边缘分布。采用相同方法得出年最大 1 d 降水量对应高潮位的边缘分布为 Normal 分布。

b. 不同阶段分布线型变化。依据分布线型优选结果,采用 Lognormal 线型、Normal 线型分别拟合不同阶段赤湾站年最大 1 d 降水量及其对应伶仃洋高潮位的边缘分布。为直观描述 1965—1985 年和

表 1 二维 Archimedean Copula 函数累积分布及 θ 和 τ 的关系

Table 1 Cumulative distribution and relationship between θ and τ of two-dimensional Archimedean Copula function

Copula 函数	联合累积分布模式	τ 与 θ 的关系
Clayton Copula	$F(p, z) = C(u, v) = (u^{-\theta} + v^{-\theta} - 1)^{-1/\theta}$	$\tau = \frac{\theta}{2 + \theta} \quad (\theta \in (0, \infty))$
Gumbel Copula	$F(p, z) = C(u, v) = \exp \left\{ - \left[(-\ln u)^\theta + (-\ln v)^\theta \right]^{1/\theta} \right\}$	$\tau = 1 - \frac{1}{\theta} \quad (\theta \in (1, \infty))$
Frank Copula	$F(p, z) = C(u, v) = -\frac{1}{\theta} \ln \left[1 + \frac{(e^{-\theta u} - 1)(e^{-\theta v} - 1)}{e^{-\theta} - 1} \right]$	$\tau = 1 + \frac{4}{\theta} \left(\frac{1}{\theta} \int_0^\theta \frac{t}{e^t - 1} dt - 1 \right) \quad (\theta \in R)$

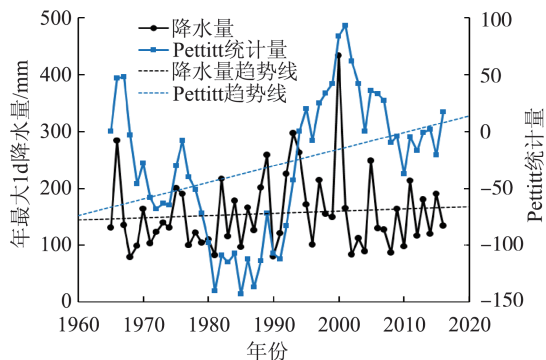


图1 赤湾站年最大1 d 降水量及相应 Pettitt 统计量年际变化

Fig.1 Inter-annual variation of annual maximum one-day precipitation and corresponding Pettitt statistics at Chiwan Station

表2 赤湾站年最大1 d 降水量系列拟合优度比较

Table 2 Goodness-of-fit comparison of maximum one-day precipitation at Chiwan Station

边缘分布线型	D 统计量	是否接受	AIC 值
Normal	0.158	是	558.3
Lognormal	0.114	是	538.4
Gamma	0.133	是	542.8
Logistic	0.131	是	553.2
Weibull	0.137	是	552.3

1986—2016 年 2 个阶段赤湾站降水量、潮位边缘分布的变化,图 2(a)(b)分别给出了 2 个阶段中降水量、潮位的边缘分布。由图 2(a)可知,在 2 个阶段中,赤湾站年最大 1 d 降水量的边缘分布发生了显著变化,如 200 mm 的年最大 1 d 降水量在第一阶段和第二阶段中的对应重现期分别约为 10 a 和 3 a,同样量级的降水量在第二阶段中的重现期比在第一阶段中要小得多。即同样量级的降水量在第二阶段发生的概率明显更高。由图 2(b)可知,赤湾站年最大 1 d 降水量对应高潮位在 2 个阶段的差别要小于年最大 1 d 降水量,在潮位较高时(高于 3.2 m),同量级潮位在不同阶段的重现期相差较小,但在潮位较低时,在第二阶段中的重现期要明显更小。可见不同阶段赤湾站最大 1 d 降水量及其对应潮位的边缘分布均发生了较大变化,同量级的降水量在第二阶段中的重现期均小于在第一阶段中的重现期。这说明,深圳市短历时极值暴雨在新时期内均呈现出增大的趋势。

3.2.2 联合分布

基于不同阶段赤湾站年最大 1 d 降水量及其对应高潮位边缘分布,构建赤湾站年最大 1 d 降水量和潮位的联合分布,联合分布组合共 2 个(1965—1985 年和 1986—2016 年),备选的 Archimedean Copula 函数包括 Frank Copula、Gumbel Copula 和 Clayton Copula

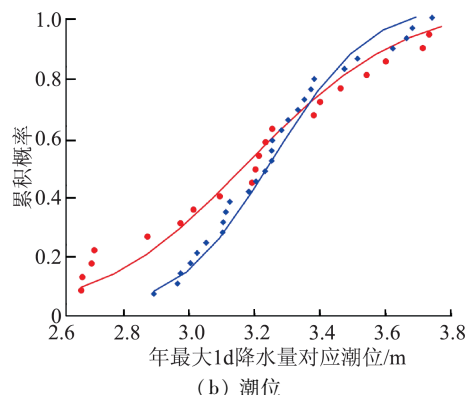
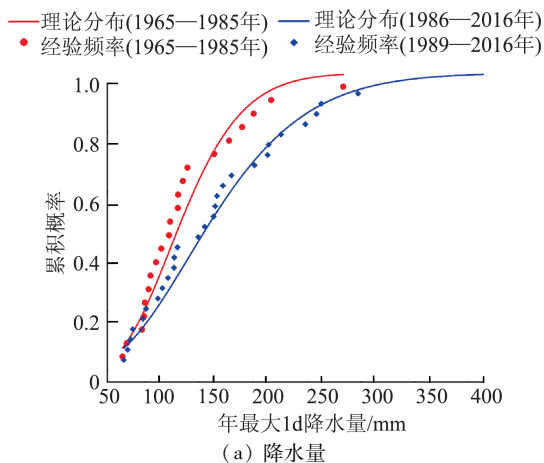


图2 赤湾站年最大1 d 降水量和相应潮位边缘分布对比

Fig.2 Comparison of marginal distributions of annual maximum one-day precipitation and corresponding tidal level at Chiwan Station

3 类,则共计构建 6 个联合分布。联合分布类型的优选采用 AIC 法。赤湾站在不同阶段年最大 1 d 降水量和相应高潮位遭遇的 Copula 函数参数计算结果如表 3 所示。

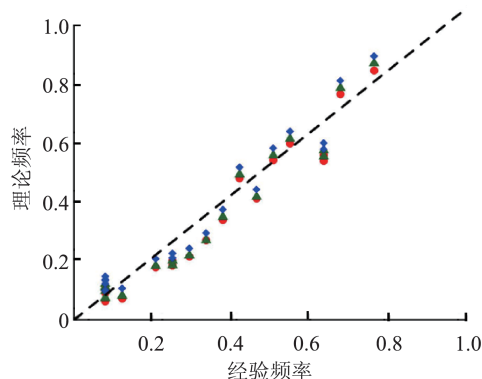
表3 赤湾站年最大1 d 降水量及相应潮位系列 Copula 函数参数

Table 3 Copula function parameter of annual maximum one-day precipitation and corresponding tidal level at Chiwan Station

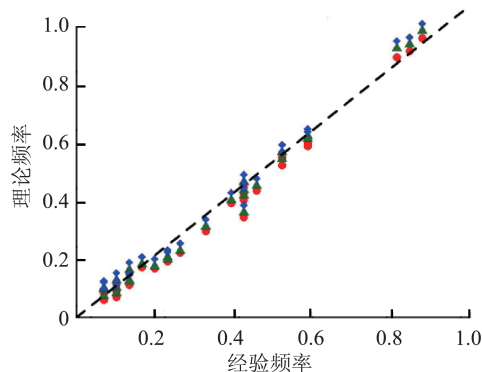
阶段	Copula 函数参数值		
	Frank Copula	Gumbel Copula	Clayton Copula
1965—1985 年	1.817	1.209	0.442
1986—2016 年	2.717	1.438	0.692

利用表 3 中的 Copula 函数参数分别构建了 2 个阶段赤湾站年最大 1 d 降水量和对应最高潮位的联合分布,并采用各 Copula 函数的累积概率公式分别计算了历年最大 1 d 降水量及对应潮位组合的理论概率。图 3 为 3 类 Copula 函数计算的赤湾站年最大 1 d 降水量和对应高潮位经验频率和理论频率的对比,3 类 Copula 函数拟合的理论-经验数据点基本集中在 $y = x$ 附近,可见 3 类 Copula 函数对深圳年最大 1 d 降水量与对应高潮位的拟合效果均较好。

● Frank Copula ▲ Gumbel Copula ◆ Clayton Copula



(a) 1965—1985 年



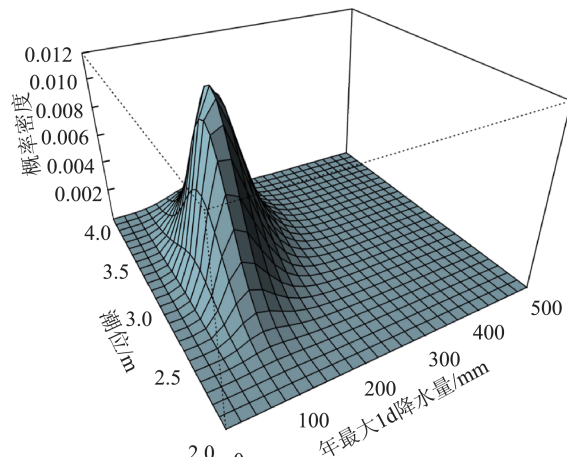
(b) 1986—2016 年

图3 赤湾站年最大1d降水量与对应潮位 Copula 经验频率和理论频率对比

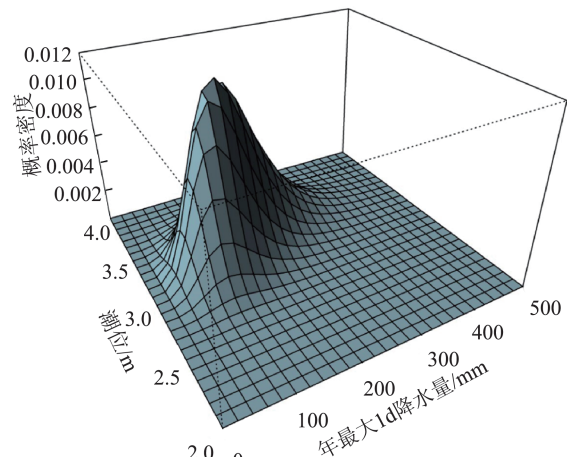
Fig.3 Comparison of experimental and theoretical frequencies of annual maximum one-day precipitation and corresponding tidal level at Chiwan Station

采用式(6)计算了各 Copula 函数拟合暴雨-潮位联合分布的经验-理论频率的 AIC 值, Frank Copula、Clayton Copula、Gumbel Copula 拟合的 AIC 值分别为 -176.3、-172.3 和 -168.3, 可知 Frank Copula 拟合的精度略高于其余 2 类 Copula 函数。因此, 本文采用基于 Frank Copula 函数的联合分布模型构建赤湾站年最大 1 d 降水量-高潮位联合分布。

将赤湾站暴雨-潮位区间划分为若干网格, 计算了 2 个阶段联合分布的概率密度和累积分布, 结果分别如图 4 和图 5 所示。由图 4 和图 5 可知, 同样的暴雨-潮位组合在 2 个阶段中的概率密度和累积分布具有明显不同, 总体来说, 暴雨-潮位遭遇在第二阶段的概率密度要超过第一阶段, 这导致其在第二阶段的累积分布也超过第一阶段。从图 5 进一步可以看出, 年最大 1 d 降水量的变化对累积分布曲面施加的影响明显更加强烈, 而相应高潮位的变化对累积分布曲面施加的影响相对较小, 这一表现与前文年最大 1 d 降水量以及潮位边缘分布的变化情况是一致的。



(a) 1965—1985 年



(b) 1986—2016 年

图4 赤湾站不同阶段年最大1d降水量与相应高潮位概率密度

Fig.4 Probability densities of annual maximum one-day precipitation and corresponding high tidal level at Chiwan Station at different stages

3.3 暴雨-潮位遭遇联合风险分析

年最大 1 d 降水量选择 50 a、20 a 重现期, 相应的高潮位选择 50 a、20 a、10 a、5 a、2 a 重现期, 在两两组合的情景下分别计算了赤湾站在不同阶段年最大 1 d 降水量与相应潮位遭遇的联合风险, 并给出了第二阶段风险值相对于第一阶段的变化率, 结果见表 4。值得注意的是, 同样重现期的年最大 1 d 降水量及相应潮位是指在全系列 (1965—2016 年) 中的重现期, 因此在前后 2 个阶段是统一的。由表 4 可知: ①1986—2016 年不同的暴雨-潮位遭遇的联合风险高于 1965—1985 年, 如对于 5 a 一遇年最大 1 d 降水量, 联合风险增长率为 71% ~ 128%, 这意味着同样规模的暴雨-潮位组合在第二阶段的联合风险要远超第一阶段; ②高潮位重现期越大的暴雨-潮位组合, 第二阶段联合风险的增长率相对越小, 如对于 50 a 一遇年最大 1 d 降水量, 随着极值暴雨遭遇的潮位重现期从 50 a 一遇降低为 2 a 一遇, 第二阶段相

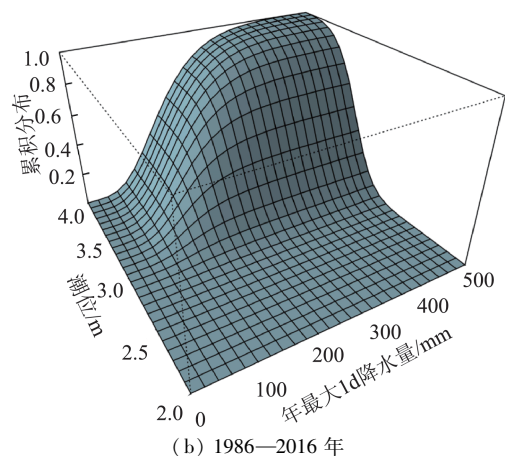
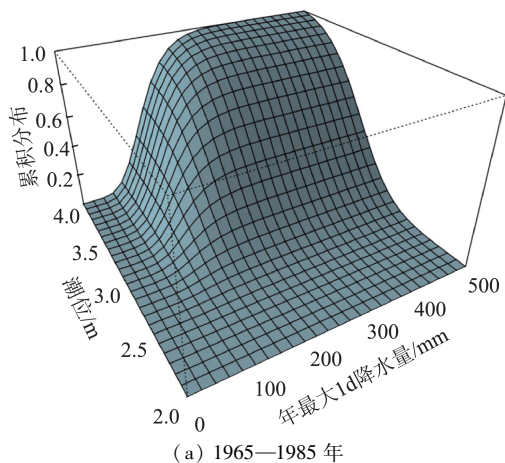


图5 赤湾站不同阶段年最大1 d降水量与相应高潮位累积分布

Fig.5 Cumulative distributions of maximum one-day precipitation and corresponding high tidal level at Chiwan Station at different stages

表4 赤湾站年最大1 d降水量与相应潮位遭遇联合风险
Table 4 Joint risks of encounter of maximum one-day precipitation and tidal level at Chiwan Station at different stages

降水重现期/a	高潮位重现期/a	联合风险/%		增长率/%
		1965—1985 年	1986—2016 年	
50	50	2.857	4.897	71
50	20	4.465	8.925	100
50	10	7.713	16.792	118
50	5	11.271	25.188	123
50	2	20.854	47.501	128
20	50	2.937	5.108	74
20	20	4.600	9.154	99
20	10	8.293	17.903	116
20	5	12.258	27.327	123
20	2	21.859	49.452	126

对于第一阶段联合风险的增长率相应从71%增大至128%。

4 结 论

a. 1985 年为深圳市年最大1 d降水序列的突

变年份,以该年份为依据划分研究时段为前后2个阶段(1965—1985年和1986—2016年)。经优选,确定Lognormal线型、Normal线型分别为不同阶段赤湾站年最大1 d降水量、相应高潮位的最优边缘分布,而Frank Copula为赤湾站年最大1 d降水量-高潮位联合分布的最优联合分布函数。

b. 当年最大1 d降水量重现期为50 a一遇和20 a一遇时,1985年后年最大1 d降水量和不同重现期相应高潮位遭遇的联合风险相对于1985年前增加了71%~128%,这意味着同样的暴雨-潮位组合在第二阶段的联合风险远超第一阶段,这一风险的显著增加值得水利和市政部门的关注。

c. Copula函数作为一类求解简便、适应性强的联合分布分析工具,可用于定量分析深圳市暴雨-潮位遭遇的联合风险的变化情况,也可对其他沿海城市和地区的防洪排涝工作提供参考。

参考文献:

- [1] 刘曾美,陈子燊. 区间暴雨和外江洪水位遭遇组合的风险[J]. 水科学进展, 2009, 20(5): 619-625. (LIU Zengmei, CHEN Zishen. Risk study of the bivariate encounter of interzone rainstorm and flood level of the outer river[J]. Advances of Water Resources, 2009, 20(5): 619-625. (in Chinese))
- [2] 黄国如,芮孝芳. 感潮河段设计洪水位计算的频率组合法[J]. 水电能源科学, 2003, 21(2): 72-74. (HUANG Guoru, RUI Xiaofang. Design flood water level for tidal reach with frequency combination method[J]. Journal of China Hydroelectric Energy, 2003, 21(2): 72-74. (in Chinese))
- [3] 林荣,李国芳. 黄浦江风暴潮位、区间降雨量和上游来水量遭遇分析[J]. 水文, 2000, 20(3): 1-5. (LIN Rong, LI Guofang. Occurrence of storm tide level, regional rainfall and upstream inflow of the Huangpujiang River[J]. Journal of China Hydrology, 2000, 20(3): 1-5. (in Chinese))
- [4] CUI Tingting, WANG Leizhi, WANG Yintang, et al. A method to identify the risk probability of synchronous occurrence of extreme rainfalls of different hydro-zones [C] // Proceeding of the IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. IOP Publishing Ltd., 2018: 13-21.
- [5] 冯平,李新. 基于Copula函数的非一致性洪水峰量联合分析[J]. 水利学报, 2013, 44(10): 1137-1147. (FENG Ping, LI Xin. Bivariate frequency analysis of non-stationary flood time series based on Copula methods [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2013, 44(10): 1137-1147. (in Chinese))
- [6] 李子远,冯平,苑希民. 黄河宁夏段干支流非一致性洪

- 峰遭遇风险分析[J]. 水利水电科技进展, 2016, 36(6): 51-57. (LI Ziyuan, FENG Ping, YUAN Ximin. Coincidence risk analysis for non-stationary flood peak of Yellow River and its tributaries in Ningxia Hui Autonomous Region [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2016, 36(6): 51-57. (in Chinese))
- [7] 陆桂华, 闫桂霞, 吴志勇, 等. 基于 copula 函数的区域干旱分析方法[J]. 水科学进展, 2010, 21(2): 188-193. (LU Guihua, YAN Guixia, WU Zhiyong, et al. Regional drought analysis approach based on copula function[J]. Advances in Water Science, 2010, 21(2): 188-193. (in Chinese))
- [8] 任锦亮, 李琼芳. 上海市台风降雨和潮位遭遇组合概率研究[J]. 水电能源科学, 2013, 31(7): 1-4. (REN Jinliang, LI Qiongfang. Joint probability investigation of encounter typhoon rainfall and tide level in Shanghai City [J]. Water Resources and Power, 2013, 31(7): 1-4. (in Chinese))
- [9] 刘曾美, 王尚伟, 蔡玉婷, 等. 感潮地区涝区暴雨与承泄区上游洪水的遭遇规律[J]. 水资源保护, 2021, 37(2): 89-94. (LIU Zengmei, WANG Shangwei, CAI Yuting, et al. Coincidence rules of rainfall in waterlogging area of tide-affected area and upstream flood in flood area of drainage receiver [J]. Water Resources Protection, 2021, 37(2): 89-94. (in Chinese))
- [10] 万永静, 刁秀媚, 刘俊, 等. 基于 Copula 函数的暴雨潮位组合分析[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2017, 45(3): 211-217. (WAN Yongjing, DIAO Xiumei, LIU Jun, et al. Combined analysis of rainstorm and tide level based on Copula function[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2017, 45(3): 211-217. (in Chinese))
- [11] 张卫国, 朱从飞, 江雨田, 等. 基于 Copula 函数的甬江流域雨潮遭遇组合分析[J]. 水电能源科学, 2018, 36(1): 24-27. (ZHANG Weiguo, ZHU Congfei, JIANG Yutian, et al. Encounter analysis of flood and tide of Yongjiang River Basin based on Copula function [J]. Water Resources and Power, 2018, 36(1): 24-27. (in Chinese))
- [12] FU G, BUTLER D. Copula-based frequency analysis of overflow and flooding in urban drainage systems [J]. Journal of Hydrology, 2014, 510: 49-58.
- [13] ZHENG F F, WESTRA S, Sisson S A. Quantifying the dependence between extreme rainfall and storm surge in the coastal zone[J]. Journal of Hydrology, 2013, 505: 172-187.
- [14] XU H, XU K, LIAN J, et al. Compound effects of rainfall and storm tides on coastal flooding risk [J]. Stochastic Environmental Research and Risk Assessment, 2019, 33(7): 1249-1261.
- [15] 徐宗学, 任梅芳, 陈浩. 我国沿海城市洪潮组合风险分析[J]. 水资源保护, 2021, 37(2): 10-14. (XU Zongxue, REN Meifang, CHEN Hao. Analysis on urban flooding risk caused by flood tide combination in coastal cities [J]. Water Resources Protection, 2021, 37(2): 10-14. (in Chinese))
- [16] 杨涛, 陆桂华, 李会会, 等. 气候变化下水文极端事件变化预测研究进展[J]. 水科学进展, 2011, 22(1): 279-286. (YANG Tao, LU Guihua, LI Huihui, et al. Advances in the study of projection of climate change impacts on hydrological extremes [J]. Advances in Water Science, 2011, 22(1): 279-286. (in Chinese))
- [17] 吴燕娟. 气候变化背景下我国极端降水的时空分布特征和未来预估[D]. 上海: 上海师范大学, 2016.
- [18] 秦大河, STOCKER T. IPCC 第五次评估报告第一工作组报告的亮点结论[J]. 气候变化研究进展, 2014, 10(1): 1-6. (QIN Dahe, STOCKER T. Highlights of the IPCC Working Group I Fifth Assessment Report [J]. Advances in Climate Change, 2014, 10(1): 1-6. (in Chinese))
- [19] 冯平, 崔广涛, 钟昀. 城市洪涝灾害直接经济损失的评估与预测[J]. 水利学报, 2001, 8(3): 64-68. (FENG Ping, CUI Guangtao, ZHONG Yun. On the evaluation and prediction of urban flood economic loss [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2001, 8(3): 64-68. (in Chinese))
- [20] 武传号, 黄国如, 吴思远. 基于 Copula 函数的广州市短时暴雨与潮位组合风险分析[J]. 水力发电学报, 2014, 33(2): 33-40. (WU Chuanhao, HUANG Guoru, WU Siyuan. Risk analysis of combinations of short duration rainstorm and tidal level in Guangzhou based on Copula function [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2014, 33(2): 33-40. (in Chinese))
- [21] 方彬, 郭生练, 肖义, 等. 年最大洪水两变量联合分布研究[J]. 水科学进展, 2008, 19(4): 505-511. (FANG Bin, GUO Shenglian, XIAO Yi, et al. Annual maximum flood occurrence dates and magnitudes frequency analysis based on bivariate joint distribution [J]. Advances in Water Science, 2008, 19(4): 505-511. (in Chinese))
- [22] 涂新军, 杜奕良, 陈晓宏, 等. 滨海城市雨潮遭遇联合分布模拟与设计[J]. 水科学进展, 2017, 28(1): 49-58. (TU Xinjun, DU Yiliang, CHEN Xiaohong, et al. Modeling and design on joint distribution of precipitation and tide in the coastal city [J]. Advances in Water Science, 2017, 28(1): 49-58. (in Chinese))
- [23] 陈潜, 郑群峰, 陈训来, 等. 1953—2019 年深圳市暴雨的气候特征[J]. 广东气象, 2020, 42(4): 6-9. (CHEN Qian, ZHENG Qunfeng, CHEN Xunlai, et al. Climatological characteristics of hard rain in Shenzhen from 1953 to 2019 [J]. Guangdong Meteorology, 2020, 42(4): 6-9. (in Chinese))

(收稿日期: 2021-04-10 编辑: 俞云利)