

珠江三角洲河网区极端水位事件风险传递规律

范敏韬^{1,2}, 余贞燕^{2,3}, 余龙飞^{1,2}, 陈晓宏^{1,2}, 刘智勇^{1,2}

(1. 中山大学土木工程学院水资源与环境研究中心, 广东 广州 510275; 2. 南方海洋科学与工程广东省实验室(珠海), 广东 珠海 519082; 3. 中山大学海洋工程与技术学院河口海岸研究所, 广东 珠海 519082)

摘要:为研究珠江三角洲河网区极端水位事件的风险传递规律,基于13个水位站点1957—2016年的月水位资料,利用pair-copula结构构建珠三角河网区水位的风险传递模型,分析不同情景下极端水位在空间上的风险传递机制及其时间变化规律。结果表明:在低降水量条件下,珠三角河网区低水位风险顺向(上游至下游)和逆向(下游至上游)传递的概率均显著增大;高降水量条件下夏季丰水期的高水位顺向传递风险更高,低降水量条件下冬季枯水期的低水位顺向和逆向传递风险均较高;受人类活动影响,在高降水量条件下,1987—2016年夏季丰水期的高水位顺向传递风险比1957—1986年显著增强;在低降水量条件下,1987—2016年冬季枯水期低水位的顺向和逆向传递风险比1957—1986年显著增强。

关键词:极端水位;风险传递模型;pair-copula结构;珠江三角洲河网区

中图分类号:P332.3

文献标志码:A

文章编号:1004-6933(2024)02-0081-09

Risk transfer law of extreme water level events in river network area of the Pearl River Delta//FAN Mintao^{1,2}, SHE Zhenyan^{2,3}, YU Longfei^{1,2}, CHEN Xiaohong^{1,2}, LIU Zhiyong^{1,2}(1. Center for Water Resources and Environment, School of Civil Engineering, Sun Yat-Sen University, Guangzhou 510275, China; 2. Southern Marine Science and Engineering Guangdong Laboratory (Zhuhai), Zhuhai 519082, China; 3. Institute of Estuarine and Coastal Research, School of Ocean Engineering and Technology, Sun Yat-Sen University, Zhuhai 519082, China)

Abstract: In order to study the risk transfer law of extreme water level events in the river network area of the Pearl River Delta, based on the monthly water level data of 13 water level stations from 1957 to 2016, a risk transfer model of water level in the river network area of the Pearl River Delta was constructed using the pair-copula structure, and the risk transfer mechanism in space and the temporal variation law of extreme water level under different scenarios were analyzed. The results show that under low precipitation conditions, the probability of both forward (upstream to downstream) and backward (downstream to upstream) transfer of low water level risk in the river network area of the Pearl River Delta significantly increases. Under high precipitation conditions, the risk of forward and backward transfer of high water levels during the summer flood season is higher, while under low precipitation conditions, the risk of forward and backward transfer of low water levels during the winter dry season is higher. Affected by human activities, under high precipitation conditions, the risk of forward transfer of high water levels during the summer flood season of 1987-2016 was significantly increased compared to 1957-1986. Under low precipitation conditions, the risk of forward and backward transfer of low water levels during the winter dry season of 1987-2016 was significantly increased compared to 1957-1986.

Key words: extreme water level; risk transfer model; pair-copula structure; river network area of the Pearl River Delta

水位是与水文灾害紧密联系的水文随机变量^[1]。水位过高可能引发洪水,造成群众的生命与财产损失以及人们被迫大规模迁移等不良影响^[2];水位过低可能导致干旱,影响人类日常及生产的供水,并对生态系统造成破坏^[3]。在全球气候变暖大

背景下,伴随着大规模的人类活动和其他因素的综合作用,极端水文气候事件的强度和频率日渐增加已成为亟须解决的难题^[4]。目前,关于极端水文事件发生风险的研究主要集中在流域划分洪旱风险区、计算极端事件重现期、单站点灾害特征等方面,

基金项目:国家重点研发计划项目(2021YFC3001000);国家自然科学基金项目(52179031);珠江人才计划团队项目(2019ZT08G090);广东省杰出青年基金项目(2023B1515020116)

作者简介:范敏韬(1998—),男,硕士研究生,主要从事水文水资源研究。E-mail:fanmt5@mail2.sysu.edu.cn

通信作者:刘智勇(1985—),男,教授,博士,主要从事水文水资源研究。E-mail:liuzhiy25@mail.sysu.edu.cn

如 Asadi 等^[5]研究发现河网中两个站点的极端水文事件在空间上存在依赖关系,且随着距离的增加而减小。许多学者利用频率分析、物理模型等方法,构建洪旱灾害的决策支持系统或评估区域内的灾害风险^[6]。Eslamian 等^[7]通过 L-Moments 模型进行干旱指数的区域频率分析;黄强等^[8]基于多变量区域频率分析的方法对评估干旱风险;肖祖香等^[9-10]利用 Mann-Kendall 趋势检验法分析了干旱与植被的时空演变趋势。随着洪水和干旱等灾害事件历时的增加,灾害从一个区域转移或扩散到其他区域的风险也随之增加,灾害风险传递的特征也随孕灾环境的变化而变化。因此,需要研究区域内风险传递机制,以便更加深入地分析极端水文气候事件的时空分布及演变规律。

珠江三角洲是由西江、北江、东江等共同冲积而成的复合型三角洲,属于典型的河网型三角洲,具有相对闭合的地形地貌。围海造田造就了发达且弯曲交错的水系河网,使珠江三角洲的水文生态和环境十分复杂。近年来,受全球气候剧变以及人类对珠江三角洲大范围开发的影响,珠江三角洲的水文与地貌特征均在不同程度上发生了变异,使得洪涝事件、咸潮入侵等灾害更加频繁^[10-11]。陈晓宏等^[12]结合水文特征资料,发现近年来珠江三角洲局部地区水位特征发生了显著变化,剧烈的人类活动是主要原因。根据珠江三角洲水位资料、洪水数据以及航道平面测图,发现珠江三角洲河网区年际潮差变化显著,许多站点水位极大值变得更大,极小值变得更小,局部地区洪水位异常壅高,导致珠江三角洲洪水风险增大、咸潮频发^[13-17]。顾西辉等^[18]采用滑动秩和检验以及累积距平曲线法研究了珠江流域洪水频率变化特征,肖名忠等^[19]基于多变量 Copula 函数分析了珠江流域干旱时间演变特征,均发现近年来珠江三角洲洪水风险强度及频次出现显著升高,干旱高风险区域也有所增加。关于珠江三角洲水位的研究主要集中在以单个站点水位分析区域水位变化趋势、极端事件频率及变化、灾害重现期、咸潮上溯特征等方面^[1,15-16,20-21],缺少对于复杂河网区极端水位在空间上的传递机制以及变化的研究。

鉴于此,本文以珠江三角洲河网区水位资料为研究对象,利用 pair-copula 结构^[22-23]构建河网区极端水位风险传递模型,计算站点间水位传递概率,分析极端水位在空间上的传递机制,并从降水、气候、时间等角度对比在不同情景下极端水位不同的传递机制,以期对珠江三角洲防洪抗旱、压咸补淡措施的制定和风险评估提供参考。

1 研究区概况与数据来源

珠江三角洲濒临南海,位于东经 $112^{\circ}45' \sim 113^{\circ}50'$,北纬 $21^{\circ}31' \sim 23^{\circ}10'$ 。珠江水系的西江、北江、东江及其支流潭江、绥江、增江常年堆积泥沙,最终在珠江河口湾内堆积形成该复合型三角洲,内有大量的丘陵、台地和残丘。本文选取珠江三角洲河网区 13 个水位站点 1957—2016 年的月平均水位观测资料进行研究,水位站分布如图 1 所示。降水数据来源于国家气象信息中心(<http://www.nmic.cn>)发布的中国地面气候资料日值数据集(V3.0)。

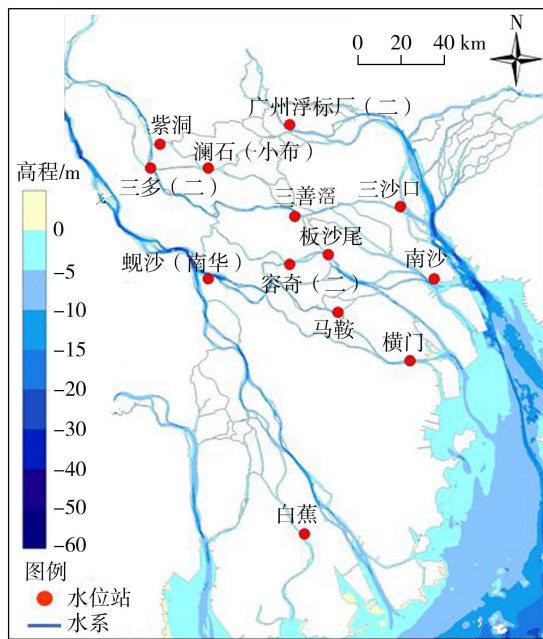


图 1 研究区水位站分布

Fig.1 Distribution of water level stations in research area

2 研究方法

2.1 Copula 函数和 pair-copula 结构

Copula 函数来源于 Sklar 定理^[24],是一个在 $[0, 1]$ 上均匀分布的多元分布函数,能够连接多个随机变量的边缘分布,构造这些变量的联合分布。Copula 函数在水文干旱识别、降雨和径流预测等领域已经得到了广泛应用^[25-29]。在水文水资源多变量联合分布模拟中应用较多的 Copula 函数包括 3 类:椭圆型、Archimedean 型和二次型^[30-32]。

现有的 Copula 函数大多只针对二维情况,对于更高的维度,普通的 Copula 函数往往不能直接运用^[33-34]。为此,Joe^[35]在 1996 年提出了 pair-copula 结构,利用链式法则将一个 n 维多元密度分解为 $n(n-1)/2$ 个二元 Copula 密度,从而将高维分布分解成多个二维条件分布。为了准确描述 pair 之间的关系,Bedford 等^[36]引入了藤状图建模工具 vine

copula, 本文选用最为常用的藤联结方式 Canonical vine (C-vine) 模拟极端水位风险从一个站点传递给其他站点的概率。

2.2 风险传递概率计算

本研究中随机变量为水位站点的月平均降水量和水位时间序列, 对每个站点的时间序列拟合累积分布函数 $C(u_1, u_2, \dots, u_n)$ 。当站点 1 发生极端事件时, 这个事件传递到站点 2 的概率可以表示为

$$h_1(u_2 | u_1; \theta) = P(U_2 \leq u_2 | U_1 = u_1) = \frac{\partial C(u_1, u_2; \theta)}{\partial u_1} \tag{1}$$

式中: $h_1(u_2 | u_1; \theta)$ 为条件概率函数; θ 为 Copula 函

数的参数; U_1 为站点 1 发生的极端事件; U_2 为站点 2 发生的极端事件。

在实际计算时, 采用 0.25 和 0.75 分位数阈值定义低值事件 (概率分位数 $u < 0.25$) 和高值事件 (概率分位数 $u > 0.75$), 并将边缘分布函数转化为泊松分布。对于本研究中需要计算的在两个站点都处于极端降水的情况下, 其中一个站点发生极端水位事件, 传递给另一个站点的条件概率 $P(u_4 | u_1, u_2, u_3)$, 可以通过式 (1) 递推得到, 对应不同的条件 pair-copula 结构, 根据赤池信息量准则 (Akaike information criterion, AIC) 从以下 6 种形式中择取最优的一种:

$$P(u_4 | u_1, u_2, u_3) = h \left\{ h[h(u_3 | u_1; \theta_{13}) | h(u_2 | u_1; \theta_{12}); \theta_{231}] | h[h(u_4 | u_1; \theta_{14}) | h(u_2 | u_1; \theta_{12}); \theta_{2411}]; \theta_{34112} \right\} \tag{2}$$

$$P(u_4 | u_1, u_2, u_3) = h \left\{ h[h(u_3 | u_1; \theta_{13}) | h(u_2 | u_1; \theta_{12}); \theta_{231}] | h[h(u_4 | u_1; \theta_{14}) | h(u_3 | u_1; \theta_{13}); \theta_{3411}]; \theta_{24113} \right\} \tag{3}$$

$$P(u_4 | u_1, u_2, u_3) = h \left\{ h[h(u_3 | u_2; \theta_{23}) | h(u_1 | u_2; \theta_{21}); \theta_{1312}] | h[h(u_4 | u_2; \theta_{24}) | h(u_1 | u_2; \theta_{21}); \theta_{1412}]; \theta_{34112} \right\} \tag{4}$$

$$P(u_4 | u_1, u_2, u_3) = h \left\{ h[h(u_3 | u_2; \theta_{23}) | h(u_1 | u_2; \theta_{21}); \theta_{1312}] | h[h(u_4 | u_2; \theta_{24}) | h(u_3 | u_2; \theta_{23}); \theta_{3412}]; \theta_{14123} \right\} \tag{5}$$

$$P(u_4 | u_1, u_2, u_3) = h \left\{ h[h(u_1 | u_3; \theta_{31}) | h(u_2 | u_3; \theta_{32}); \theta_{1213}] | h[h(u_4 | u_3; \theta_{34}) | h(u_1 | u_3; \theta_{31}); \theta_{1413}]; \theta_{24113} \right\} \tag{6}$$

$$P(u_4 | u_1, u_2, u_3) = h \left\{ h[h(u_1 | u_3; \theta_{31}) | h(u_2 | u_3; \theta_{32}); \theta_{1213}] | h[h(u_4 | u_3; \theta_{34}) | h(u_2 | u_3; \theta_{32}); \theta_{2413}]; \theta_{14123} \right\} \tag{7}$$

式中: u_1, u_2 为站点 1、站点 2 发生的极端降水事件; u_3, u_4 为站点 1、站点 2 发生的极端水位事件。6 个公式对应着 6 种四维变量的 C-vine 联合密度函数结构, 构建过程如图 2 所示, 图中圆表示单变量节点, 椭圆表示联结后形成的变量节点, 联结的线上为结构名称, Tree 为形成的结构。模型的预测性能受模型结构、双变量 Copula 函数家族和应用用于每对变量

的参数影响。

在模拟结构的过程中根据 AIC 选择最优拟合的双变量 Copula 函数以及 C-vine 结构。AIC 统计量越小代表该分层 vine copula 结构的双变量 Copula 函数越优。研究中使用的双变量 Copula 函数包括 Gaussian、Student- t 、Gumbel、Joe 等。借助 R 语言完成 pair-copula 结构构建以及风险传递概率计算。

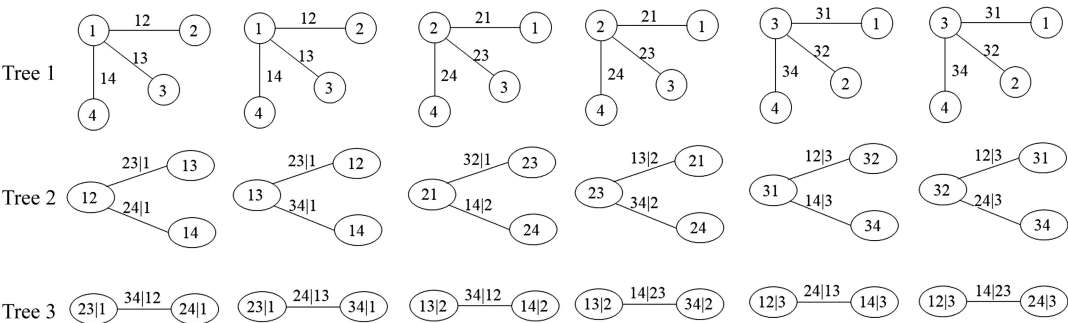


图 2 具有 3 个 Tree 的四维变量的 C-vine 结构

Fig. 2 C-vine structure of four-dimensional variables with three Trees

3 结果与分析

3.1 水位站之间的相关关系

利用 Kendall 秩相关系数检验方法对珠江三角洲河网区 1957—2016 年 13 个水位站的月平均水位数据进行分析,研究 13 个站点水位时间序列的空间相关性,并绘制相关系数矩阵(图 3)。由图 3 可见,研究区各水位站的水位之间相关性较强,Kendall 相关系数基本上超过了 0.6,当其中一个站点水位超过某一阈值,其他站点的情况也可能相同,表明研究区多地发生极端水位事件的风险较大。

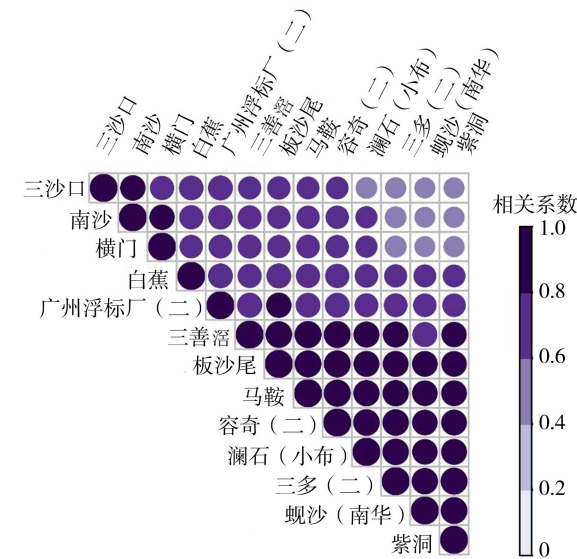


图 3 各水位站之间相关系数矩阵

Fig.3 Correlation coefficient matrix between water level stations

3.2 水位风险传递模型

基于 pair-copula 结构构建水位风险传递模型,进一步探究珠江三角洲河网区水位风险传递机制及规律。首先将 13 个水位站的水位时间序列各自拟合成合适的边缘分布。本文采用 10 种常见的分布类型对水位时间序列进行拟合:正态分布(Normal)、伽马分布(Gamma)、对数正态分布(Lognormal)、威布尔分布(Weibull)、增长分布(Logistic)、柯西分布

(Cauchy)、指数分布(Exp)、卡方分布(Chisq)、贝塔分布(Beta)以及几何分布(Geom),选取其中卡方检验最优的边缘分布函数。卡方统计量最小且 p 值大于定义的显著性水平(本文采用 $\alpha=0.05$)的分布为最优分布。边缘分布拟合完成后,采用多种 Copula 函数联结站点的分布,根据 AIC 构建 pair-copula 结构^[37],进而计算当上游站点发生极端水位事件时,传递给下游站点的概率。

在计算低水位风险传递时,第一个站点发生极端低水位的概率作为 u_1 ,第二个站点发生极端低水位事件的概率作为 u_2 ,计算出低水位风险传递的具体概率值。本文基于阈值水平方法确定极端高水位和极端低水位事件,定义边缘分布中大于 75% 分位数的部分为极端高水位事件,小于 25% 分位数的部分为极端低水位事件。绘制风险传递概率的散点图(图 4),概率值越大表示极端水位风险传递的可能性越大。在珠江三角洲河网区,除了会发生极端水位风险从上游至下游(以下简称顺向)传递的现象,当河道水位较低时,由于受到咸潮入侵的影响,还可能发生低水位风险从下游至上游(以下简称逆向)传递的现象,故低水位事件应考虑风险的顺向与逆向传递两种情况。由图 4 可见,高水位风险传递与低水位风险逆向传递的可能随着距离的增大而减小,这一现象基本符合 Tobler 第一定律^[38],与 Liu 等^[39]的研究中提到的珠江流域两点间水文要素越接近越相似的结论一致。

为了更直观深入地展示极端水位风险传递的机制,绘制水位风险传递的流向图(图 5),用流向线条连接水位站,红色线条表示该路径的风险传递处于较高水平,蓝色线条表示该路径的风险传递处于较低水平,其他颜色线条处于居中水平。由图 5 可见,高水位事件顺向传递风险较高的路径基本从上游站点如紫洞、三多(二)、澜石(小布)发出,且传递距离普遍较短,逆向传递风险较高的路径基本从临海站点如横门、南沙发出,随着路径距离变远风险降低。

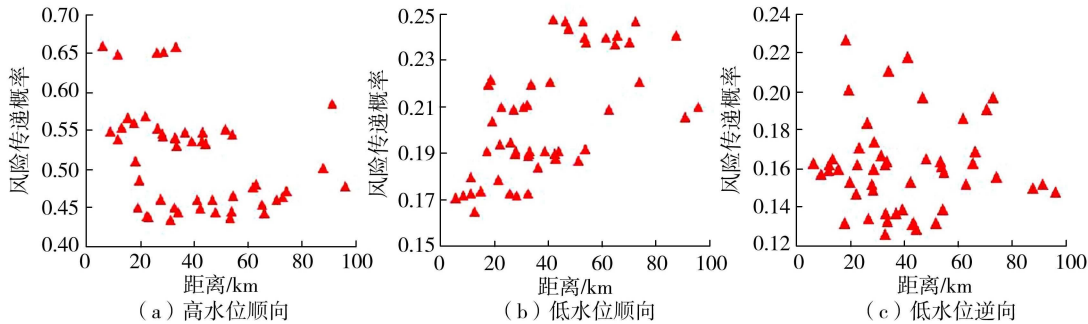


图 4 水位风险传递概率散点图

Fig.4 Scatter plot of water level risk transfer probability

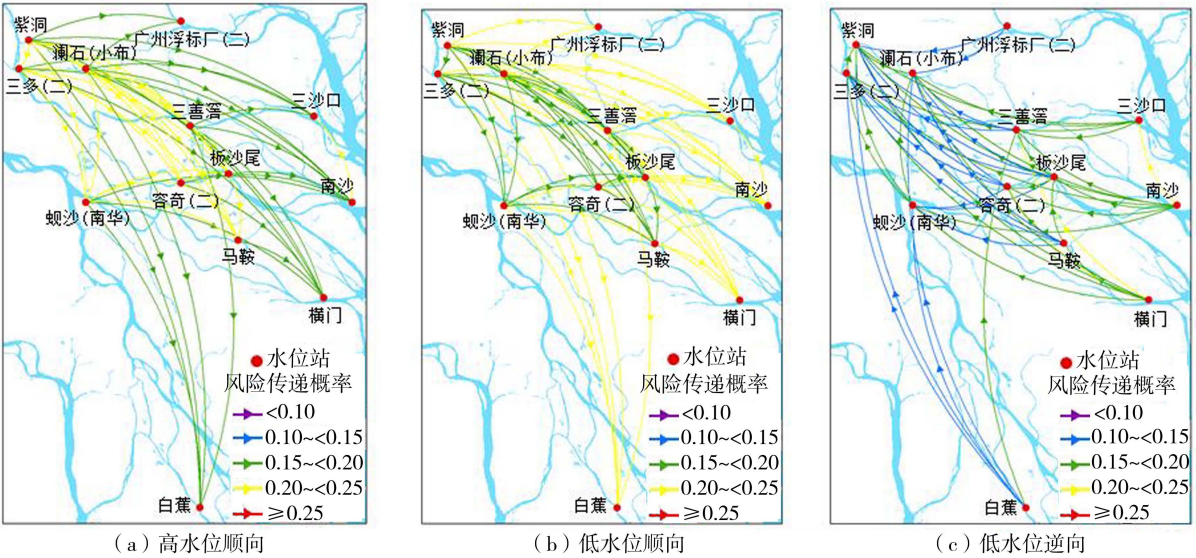


图5 水位风险传递流向
Fig.5 Water level risk transfer directions

3.3 极端水位风险传递机制

3.3.1 不同降水条件下的极端水位风险传递

除了上游来水,珠三角河网区水位也受到本地降水、河床、水系等方面的影响。本文主要考虑降水这一对河道水位影响较强的气象因素^[4],构建不同降水条件下的水位风险传递模型,计算不同降水条件下一个站点发生极端水位事件时,传递给其他站点的概率。在计算低降水量条件下低水位风险传递时,两个站点发生极端低降水量事件的概率作为 u_1 和 u_2 ,第一个站点发生极端低水位的概率作为 u_3 ,第二个站点发生极端低水位事件的概率作为 u_4 ,计算低水位风险传递的概率值。图6为不同降水条件下水位风险传递流向,由图6可见,低水位顺向风险传递的概率比图5中大,这表明风险传递的可能性

与降水存在影响关联。高水位事件传递风险较大的路径从上游站点如紫洞、三多(二)、澜石(小布)发出,低水位事件逆向传递风险较大的路径从临海站点如横门、南沙发出,这一现象与不考虑降水时的水位风险传递情况一致。

3.3.2 不同季节下的极端水位风险传递

降水与水位都是存在季节差异性的水文要素,洪旱灾害在季节上的演变特征也较为明显^[40-41]。选择夏季丰水期(6、7、8月)与冬季枯水期(12、1、2月)的月平均降水数据与月平均水位数据,建立两个时期不同降水条件下水位风险传递模型,进一步探究珠江三角洲河网区在夏季丰水期和冬季枯水期的水位风险传递机制。

高降水量与高水位事件基本发生在夏季丰水

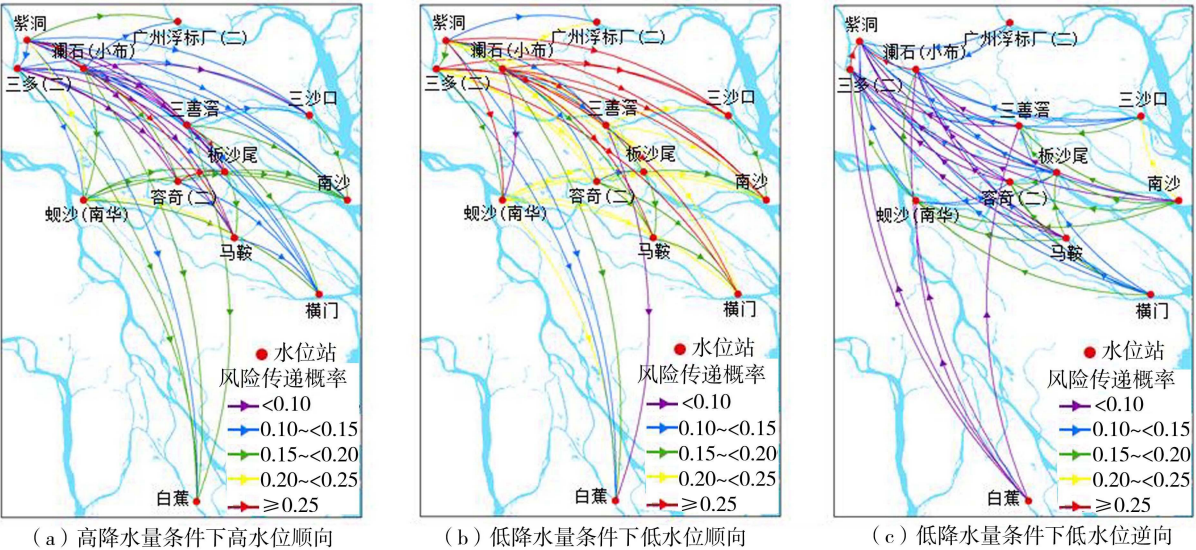


图6 不同降水条件下水位风险传递流向

Fig.6 Water level risk transfer directions under different rainfall conditions

期,而低降水量与低水位事件基本发生在冬季枯水期^[6-7],构建相应的模型计算不同降水条件下夏季丰水期高水位顺向风险传递概率以及冬季枯水期低水位顺向、逆向风险传递概率,结果见图7。对比图7与图6发现,在对应的时期,3种情境下极端水位事件风险传递的可能性都显著增加。可见当一个地方发生了洪涝灾害后,容易向下游传递形成多地灾害并发的场景,说明在夏季丰水期,研究区发生大面积洪涝灾害的风险较大;在冬季枯水期,上游发生旱灾同样容易向下游传递,下游发生旱灾也更容易逆向传递给上游。

3.3.3 水位风险传递机制时间演变规律
受人类活动和气候变化等多重因素的共同作

用,珠江三角洲河网区的水文特征在时间上发生了变异。20世纪80年代中期前后,珠江三角洲气温开始缓慢转暖,加上大规模河道采沙活动极不均衡地改造了河网区河道边界条件,极端水文事件的频率和强度显著增大。因此,以1986年作为时间节点,将降水与水位时间序列分为1957—1986年、1987—2016年两个时期,以探究人类活动是否影响了研究区极端水位风险传递机制。

图8(a)为1957—1986年不同降水条件下夏季丰水期水位风险传递流向,图9(a)为1987—2016年不同降水条件下夏季丰水期水位风险传递流向。由图8(a)与图9(a)对比可见,在1987—2016年红色线条明显增多,不同降水条件下夏季丰

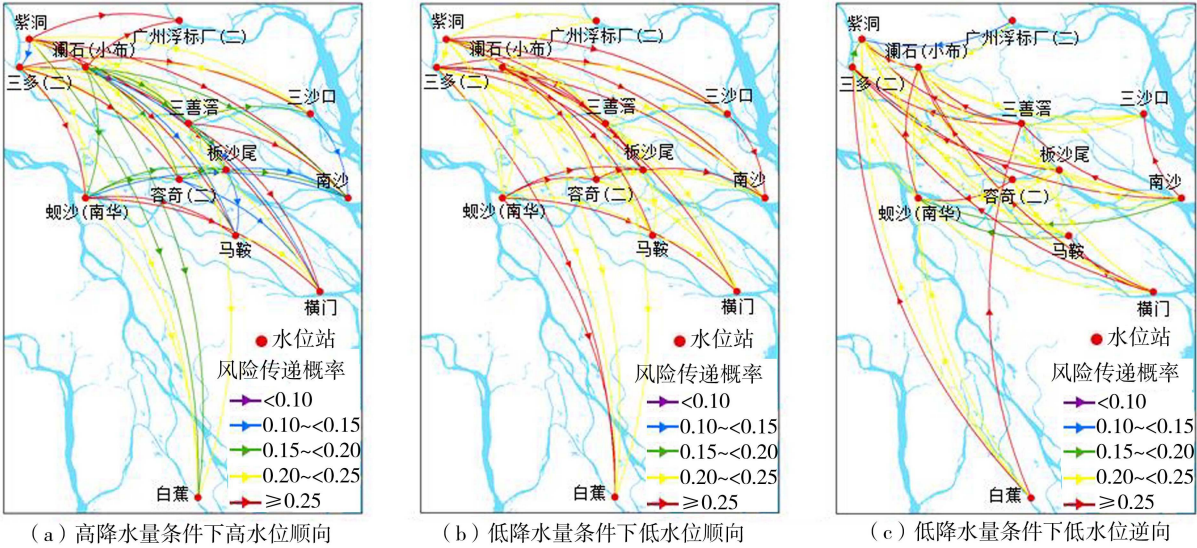


图7 不同降水条件下夏季丰水期和冬季枯水期水位风险传递流向

Fig.7 Water level risk transfer directions of summer flood season and winter dry season under different rainfall conditions

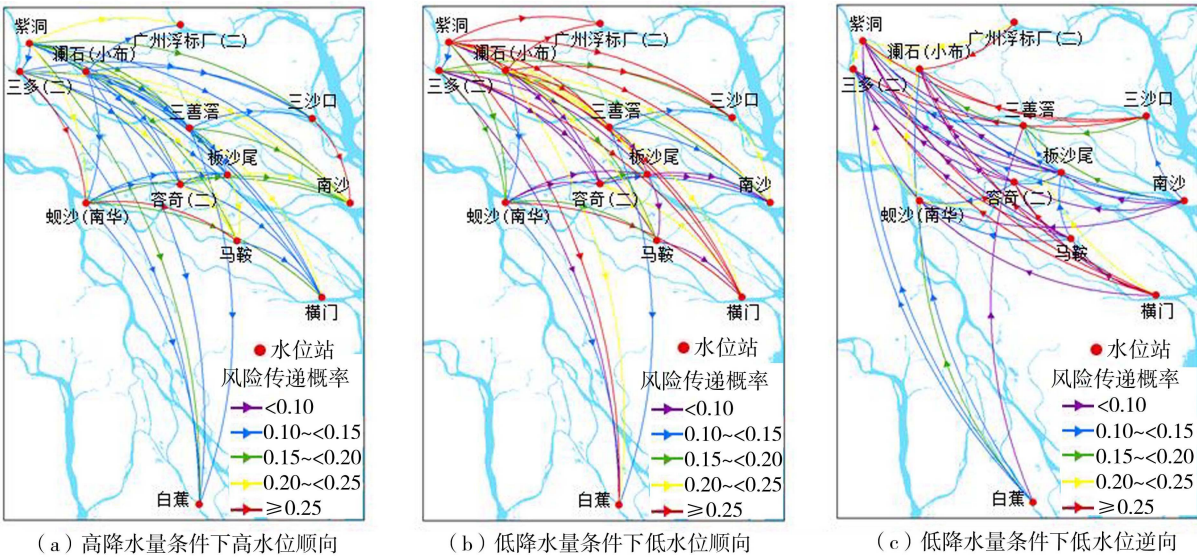


图8 1957—1986年不同降水条件下夏季丰水期和冬季枯水期水位风险传递流向

Fig.8 Water level risk transfer directions of summer flood season and winter dry season under different rainfall conditions from 1957 to 1986

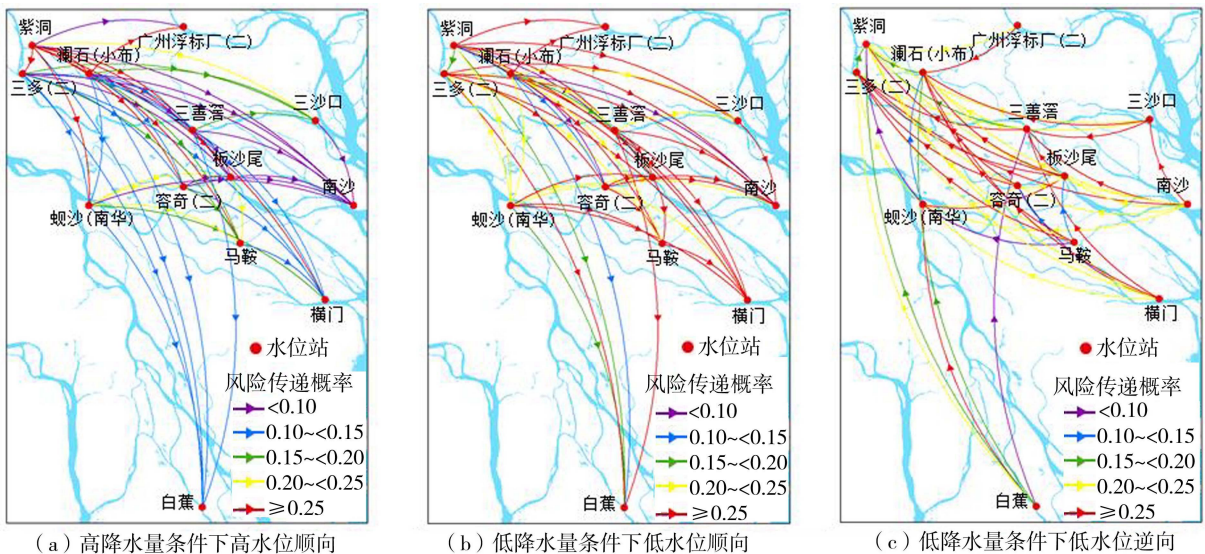


图9 1987—2016年不同降水条件下夏季丰水期和冬季枯水期水位风险传递流向

Fig. 9 Water level risk transfer directions of summer flood season and winter dry season under different rainfall conditions from 1987 to 2016

水期高水位顺向传递的风险比1957—1986年显著增大。图8(b)与图9(b)对比也呈现出相同的变化,不同降水条件下冬季枯水期低水位顺向传递的风险也有所增大。图8(c)与图9(c)的对比最为强烈,传递流线整体均变成了红色与黄色,这说明1987—2016年不同降水条件下冬季枯水期低水位逆向传递风险极大程度增大,传递风险均处于高风险水平。两个时期分处于珠江三角洲城市建设鼎盛期的前后,在20世纪80年代中期河道大规模挖沙,使得三角洲的河床急剧下切,河道冲淤的规律也随之改变。20世纪80年代前河网区冲淤基本处于平衡状态,到90年代,河网区河道明显变为冲刷状态,加上人为围垦河滩地,河床宽度也不断变窄。除此之外,河床表面受到航道整治工程直接作用,减缓河床自然演变并使河床下切进一步恶化,大规模联围筑闸使得河系简化,泄流水面宽度大幅减少,农业用地大量向城市用地转化,增加了地表不透水面积,研究区的产汇流过程发生了很大的变化。剧烈的人类活动间接改变了珠江三角洲河网区水位空间分布特征,深刻改变了洪水孕灾环境系统^[42],整个区域的水位在空间上的联系更加紧密,从而使得极端水位的顺向传递风险增大。同时,人类活动也改变了研究区的水动力环境,河床下切导致水道纳潮量明显增大,加上气候变暖导致的海平面上升,咸潮上溯被大大加强。珠江三角洲河网区在20世纪80年代中期之后的咸潮活动强度增大,水中氯化物含量剧增,持续时间变得更长,发生频率变得更高,上溯距离变得更远,在枯水期尤为严重。受咸潮上溯的影响,冬季枯水期极端水位逆向传递的风险也随之增大。

4 结 论

a. 珠江三角洲河网区紫洞、三多(二)、澜石(小布)等上游水位站点顺向传递出的高水位风险最大,横门、南沙、三沙口等临海站点逆向传递出低水位传递风险最大,两种传递风险均随着传递距离增长而降低。

b. 极端水位风险传递机制与变化分析表明,降水影响着极端水位风险传递。在低降水量条件下,低水位风险顺向与逆向传递的概率显著增大。极端水位风险传递在不同季节也呈现出不同的特征,高水位顺向传递风险在夏季丰水期更大,低水位顺向、逆向传递风险在冬季枯水期更大。

c. 受挖砂、围垦、筑闸等人类活动影响,珠江三角洲河网区极端水位风险顺向传递格局在20世纪80年代中期发生了较大改变。在高降水量条件下,夏季丰水期高水位在1987—2016年的顺向传递风险比1957—1986年显著增强;在低降水量条件下,冬季枯水期低水位在1987—2016年的顺向传递风险比1957—1986年显著增强。咸潮活动加强直接影响了珠江三角洲河网区极端水位风险逆向传递格局,在低降水量条件下,冬季枯水期低水位在1987—2016年的逆向传递风险比1957—1986年显著增强,风险变大的时期与咸潮活动更为强烈的时期相吻合。

参考文献:

- [1] 陈晓宏,陈泽宏. 洪水特征的时间变异性识别[J]. 中山大学学报(自然科学版), 2000(1): 96-101. (CHEN Xiaohong, CHEN Zehong. Recognition on the variability of

- hydrological time series[J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni*,2000(1): 96-101. (in Chinese))
- [2] BERGHUIJS W R, WOODS R A, HUTTON C J, et al. Dominant flood generating mechanisms across the United States[J]. *Geophysical Research Letters*,2016,43(9): 4382-4390.
- [3] 张长征,沈婷,徐慎晖,等. 极端天气下特大型城市“水资源-能源-粮食”安全风险研究[J]. *水利经济*,2023,41(1):55-61. (ZHANG Changzheng, SHEN Ting, XU Shenhui, et al. Study on the security risk of “water-energy-food” in mega cities under extreme weather[J]. *Journal of Economics of Water Resources*,2023,41(1): 55-61. (in Chinese))
- [4] IPC C. Climate change 2007: the physical science basis [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2007.
- [5] ASADI P, DAVISON A. C, ENGELKE S. Extremes on river networks [J]. *The Annals of Applied Statistics*, 2015,9(4):2023-2050.
- [6] MOUNT J, ALABBAD Y, DEMIR I. Towards an integrated and realtime wayfinding framework for flood events[C]// *Proceedings of the 2nd ACM SIGSPATIAL International Workshop on Advances on Resilient and Intelligent Cities*. New York: Association for Computing Machinery, 2019: 33-36.
- [7] ESLAMIAN S, HASSANZADEH H, ABEDI-KOUPAI J, et al. Application of L-moments for regional frequency analysis of monthly drought indexes [J]. *Journal of Hydrologic Engineering*, 2012,17(1): 32-42.
- [8] 黄强,陈子荣,刘占明,等. 珠江流域区域干旱风险评估[J]. *中山大学学报(自然科学版)*, 2013,52(5): 140-147. (HUANG Qiang, CHEN Zishen, LIU Zhanming, et al. Regional drought risk assessment across the Pearl River Basin [J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni*, 2013,52(5): 140-147. (in Chinese))
- [9] 肖祖香,朱双,罗显刚,等. 三江源区多尺度水文干旱特征及植被的响应[J]. *河海大学学报(自然科学版)*, 2021,49(6):515-520. (XIAO Zuxiang, ZHU Shuang, LUO Xiangang, et al. Multi-scale hydrological drought characteristics and vegetation responses in the Three-River-Source Region [J]. *Journal of Hohai University (Natural Sciences)*,2021,49(6):515-520. (in Chinese))
- [10] 唐亦汉,陈晓宏,邓攀攀. 气候变化下珠江三角洲网河区洪潮耦合高水位的集中期特征及变异规律[J]. *水文*,2017,37(3):42-47. (TANG Yihan, CHEN Xiaohong, DENG Panpan. High water level seasonality under influence of changing climate driven flood-tide coupling mechanism: a case study of Pearl River Delta[J], *Journal of China Hydrology*,2017,37(3):42-47. (in Chinese))
- [11] 陆永军,季荣耀,王志力,等. 珠江三角洲网河区低水位时空变化规律[J]. *水科学进展*,2019,30(6):800-809. (LU Yongjun, JI Rongyao, WANG Zhili, et al. Spatial-temporal variation of low water level in the channel network system of the Pearl River Delta[J]. *Advances in Water Science*,2019,30(6):800-809. (in Chinese))
- [12] 陈晓宏,陈永勤. 珠江三角洲网河区水文与地貌特征变异及其成因[J]. *地理学报*,2002,57(4):429-436. [J]. (CHEN Xiaohong, CHEN Yongqin. Hydrological change and its causes in the river network of the Pearl River Delta [J]. *Acta Geographica Sinica*,2002,57(4):429-436. (in Chinese))
- [13] 刘霞. 珠江三角洲水文特性变异及原因浅析[J]. *水利规划与设计*,2004(4):9-13. (LIU Xia. Variation of hydrological characteristics in the Pearl River Delta and its causes [J]. *Water Resources Planning and Design*,2004(4):9-13. (in Chinese))
- [14] 时翠,陈晓宏,张强. 近几十年来珠江三角洲1月和7月水位变异分析[J]. *热带地理*,2012,32(3):233-240. (SHI Cui, CHEN Xiaohong, ZHANG Qiang. Change-points of water levels in the Pearl River Delta in january and july for the last decades [J]. *Tropical Geography*, 2012, 32(3):233-240. (in Chinese))
- [15] 杨清书,罗章仁,张修杰. 珠江三角洲近几十年水位变化趋势研究[J]. *热带海洋*,1998,17(2):9-14. (YANG Qingshu, LUO Zhangren, ZHANG Xiujie. Secular trend of water level change in Zhujiang River Delta in recent decades[J]. *Tropical Oceanology*,1998,17(2):9-14. (in Chinese))
- [16] 张蔚,严以新,郑金海,等. 珠江三角洲年际潮差长期变化趋势[J]. *水科学进展*,2010,21(1):77-83. (ZHANG Wei, YAN Yixin, ZHENG Jinhai, et al. Interannual tidal range trend in Pearl River Delta [J]. *Advances in Water Science*,2010,21(1):77-83. (in Chinese))
- [17] 周作付,罗宪林,罗章仁,等. 近年珠江三角洲网河区局部河段洪水位异常壅高主因分析[J]. *热带地理*,2001,21(4):319-322. (ZHOU Zuofu, LUO Xianlin, LUO Zhangren, et al. The analysis on the major reason about local exceptional rise of flood water level in the pearl river delta in recent years [J]. *Tropical Geography*, 2001, 21(4):319-322. (in Chinese))
- [18] 顾西辉,张强,刘剑宇,等. 变化环境下珠江流域洪水频率变化特征、成因及影响(1951—2010年)[J]. *湖泊科学*,2014,26(5):661-670. (GU Xihui, ZHANG Qiang, LIU Jianyu, et al. Characteristics. causes and impacts of the chanaes of the flood freauency in the Pear River drainade basin from 1951 to 2010 [J]. *Journal of Lake Sciences*,2014,26(5):661-670. (in Chinese))
- [19] 肖名忠,张强,陈晓宏. 基于多变量概率分析的珠江流域干旱特征研究[J]. *地理学报*,2012,67(1):83-92. (XIAO Mingzhong, ZHANG Qiang, CHEN Xiaohong. Spatial-temporal patterns of drought risk across the Pearl River Basin [J]. *Acta Geographica Sinica*,2012,67(1):83-92. (in Chinese))
- [20] 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))
- [21] 张敏,陈钰祥,罗军,等. 珠江河口枯季咸潮上溯特征与机制分析[J]. *海洋预报*, 2021, 38(5): 8-16. (ZHANG Min, CHEN Yuxiang, LUO Jun, et al. Analysis on the characteristics and mechanism of saltwater intrusion in the dry season in the Pearl River Estuary [J]. *Marine Forecasts*, 2021, 38(5): 8-16. (in Chinese))
- [22] 范敏韬,谢宇莹,余贞燕,等. 基于 pair-copula 结构的珠江三角洲河网区水位空间依赖性分析[J]. *水资源保护*, 2023, 39(3): 222-228. (FAN Mintao, XIE Yuying, SHE Zhenyan, et al. Analysis of spatial dependence of water level in river network area of Pearl River Delta based on pair-copula construction [J]. *Water Resources Protection*, 2023, 39(3): 222-228. (in Chinese))
- [23] 肖洋,王艳,徐辉荣,等. 珠江三角洲洪水就近入海防洪治理方案[J]. *河海大学学报(自然科学版)*, 2021, 49(3): 257-264. (XIAO Yang, WANG Yan, XU Huirong, et al. Analysis on flood control scheme for flood discharge from nearer route in the Pearl River Delta [J]. *Journal of Hohai University (Natural Sciences)*, 2021, 49(3): 257-264. (in Chinese))
- [24] ABE S. Fonctions de répartition à dimensions et leurs marges[J]. *Publications de l'Institut de Statistique de l'Université de Paris*, 1959, 8: 229-231.
- [25] LIU Zhiyong, TÖRNROS T, MENZEL L. A probabilistic prediction network for hydrological drought identification and environmental flow assessment [J]. *Water Resources Research*, 2016, 52(8): 6243-6262.
- [26] BARDOSSY A. Copula-based geostatistical models for groundwater quality parameters [J]. *Water Resources Research*, 2006, 42(11): W11416.
- [27] 何朝飞,王晓云,陈伏龙,等. 玛纳斯河不同峰量组合下的融雪洪水风险分析[J]. *水利水电科技进展*, 2023, 43(1): 15-21. (HE Chaofei, WANG Xiaoyun, CHEN Fulong, et al. Risk analysis of snowmelt flood under different combination of flood peaks and flood volumes in Manas River [J]. *Advances in Science and Technology of Water Resources*, 2023, 43(1): 15-21. (in Chinese))
- [28] CHENG Linyin, HOERLING Martin, LIU Zhiyong, et al. Physical understanding of human-induced changes in US hot droughts using equilibrium climate simulations [J]. *Journal of Climate*, 2019, 32(14): 4431-4443.
- [29] HA O Z, SINGH V P. Modeling multisite streamflow dependence with maximum entropy copula [J]. *Water Resources Research*, 2013, 49(10): 7139-7143.
- [30] LIU Zhiyong, ZHOU Ping, CHEN Xiuzhi, et al. A multivariate conditional model for streamflow prediction and spatial precipitation refinement [J]. *Journal of geophysical research. Atmospheres*, 2015, 120(19): 10116-10129.
- [31] BEVACQUA E, MARAUN D, HAFF I H, et al. Multivariate statistical modelling of compound events via pair-copula constructions: analysis of floods in Ravenna (Italy) [J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2017, 21(6): 2701-2723.
- [32] BRUNNER M I, FURRER R, FAVRE A C. Modeling the spatial dependence of floods using the Fisher Copula [J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2019, 23: 107-124.
- [33] JOE H. Dependence modeling with Copulas [M]. Boca Raton: Chapman & Hall, 2014.
- [34] AA S K, CZADO C, FRIGESSI A, et al. Pair-copula constructions of multiple dependence [J]. *Insurance: Mathematics and Economics*, 2009, 44(2): 182-198.
- [35] JOE H. Families of m-variate distributions with given margins and m(m-1)/2 bivariate dependence parameters [J]. *Lecture Notes-Monograph Series*, 1996, 28: 120-141.
- [36] BEDFORD T, COOKE R M. Probability density decomposition for conditionally dependent random variables modeled by vines [J]. *Annals of Mathematics and Artificial Intelligence*, 2001, 32(1): 245-268.
- [37] BEVACQUA E, MARAUN D, HAFF I H, et al. Multivariate statistical modelling of compound events via pair-copula constructions: analysis of floods in ravenna [J]. *Hydrology and Earth System Science Discussion*, 2017, 21(6): 2701-2723.
- [38] TOBLER W R. A computer movie simulating urban growth in the Detroit region. [J]. *Economic Geography*, 1970, 2(46): 234-240.
- [39] LIU Zhiyong, XIE Yuying, CHENG Linyin, et al. Stability of spatial dependence structure of extreme precipitation and the concurrent risk over a nested basin [J]. *Journal of Hydrology*, 2021, 602: 126766.
- [40] 吴志勇,白博宇,何海,等. 珠江流域 1981—2020 年水文干旱时空特征分析 [J]. *河海大学学报(自然科学版)*, 2023, 51(1): 1-9. (WU Zhiyong, BAI Boyu, HE Hai, et al. Temporal and spatial characteristics of hydrological drought in the Pearl River Basin from 1981 to 2020 [J]. *Journal of Hohai University (Natural Sciences)*, 2023, 51(1): 1-9. (in Chinese))
- [41] 杭宜铖,范敏韬,刘智勇. 基于 REOF 的珠江三角洲河网区水位时空变异特征分析 [J]. *水资源保护*, 2022, 38(2): 139-146. (HANG Yicheng, FAN Mintao, LIU Zhiyong. Spatiotemporal variation of water level in Pearl River Delta network area based on REOF [J]. *Water Resources Protection*, 2022, 38(2): 139-146. (in Chinese))
- [42] 彭涛,陈晓宏,刘霞,等. 珠江三角洲洪水孕灾环境变化及其洪水响应 [J]. *水文*, 2008, 28(5): 57-60. (PENG Tao, CHEN Xiaohong, LIU Xia, et al. Flood Response to Changes of Flood Disaster Formative Environment in the Pearl River Delta [J]. *Journal of China Hydrology*, 2008, 28(5): 57-60. (in Chinese))

(收稿日期: 2023-03-12 编辑: 王芳)