

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2026.03.007

粤港澳大湾区雨潮复合灾害遭遇分析

戴驰航^{1,2}, 季小梅^{1,2}, 乔煜^{2,3}, 张蔚^{1,2}

(1. 河海大学江苏省海岸海洋资源开发与环境安全重点实验室; 2. 河海大学港口海岸与近海工程学院;
3. 中国交通建设集团有限公司)

摘要:通过分析粤港澳大湾区 1960—2020 年的降水量和潮位数据,并结合泰森多边形方法与相关性分析,揭示了雨潮复合灾害与风暴增水的非一致性现象及其空间分布特征。结果表明:大湾区风暴增水的非一致性显著,其中口门地区的变异点集中于 1987 年前后,上游流域的变异点则提前至 1975 年前后;雨潮复合灾害的变异点在口门处为 1987 年前后,中腹部流域延后至 1994 年;风暴增水的非一致性主要与气候变化、上游建闸和河口挖沙等人类活动相关,而复合灾害的变化显著受到风暴增水与降雨相互作用的影响。

关键词:雨潮复合灾害;风暴增水;非一致性;相关性分析;粤港澳大湾区

Analysis of rainfall-tide compound disasters in the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area

Dai Chihang^{1,2}, Ji Xiaomei^{1,2}, Qiao Yu^{2,3}, Zhang Wei^{1,2}

(1. Key Laboratory of Coast Ocean Resources Development and Environment Security, Hohai University;
2. College of Harbour, Coastal and Offshore Engineering, Hohai University;
3. China Communications Construction Company)

Abstract: By analyzing precipitation and tide level data of the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area (GBA) from 1960 to 2020, and combining the Thiessen polygon method with correlation analysis, the non-coincidence phenomena and spatial distribution characteristics of rainfall-tide compound disasters and storm surges were revealed. The results indicate that the non-coincidence of storm surges in the GBA is significant. Specifically, the variation points in the estuary regions are concentrated around 1987, whereas those in the upstream basins occur earlier, around 1975. For rainfall-tide compound disasters, the variation points are observed around 1987 in the estuary areas but are delayed to 1994 in the central basin. The non-coincidence of storm surges is primarily driven by climate change and human activities, such as upstream dam construction and estuarine sand mining. Furthermore, the variations in compound disasters are significantly influenced by the interaction between storm surges and rainfall.

Key words: rainfall-storm surge compound disaster; storm surge; non-coincidence; correlation analysis; the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area

当前全球海平面正处于加速上升状态,21 世纪海平面上升速率最快可达 $12.6\text{ mm/a}^{[1]}$,海平面大幅抬升将显著加剧沿海地区灾害风险^[2-3]。在全球气候变化背景下,近几十年来高强度人类活动持续扩张,大规模工程建设与快速城市化进程进一步加剧了自然生态环境扰动。受自然演化与人类活动双重驱动,全球气候变化速率显著加快,极端天气与气候异常事件频发、强度增强,全球范围内水文要素规律亦发生明显变异^[4-6],逐渐出现了以跳跃变异、趋势变异、周期变异为主的水文序列非一致性现象^[7-9]。

在当前的环境变化情形下,以水文条件一致性为前提的传统工程水文学方法界定的海岸警戒潮位线以及建设的海岸防洪工程体系都将面临极大的风险和挑战^[10]。非一致性研究旨在更全面地描述水文变量在变化环境中的随机性与相关性特征,弥补传统方法的局限性。基于 Copula 函数的联合分布模型被广泛应用于多变量相关性分析^[11],通过混合分布法、变异点诊断^[12]以及 Vine Copula^[13]等的引入,不仅解决了高维数据分析中的维数灾难问题,还显著提高了对复杂水文系统的描述能力。尽管当前基于 Copula 函数的复合灾

基金项目:国家重点研发计划项目(2023YFC3008100)

作者简介:戴驰航(2001—),男,硕士研究生,主要从事河口海岸水动力研究。E-mail:939948458@qq.com

通信作者:季小梅(1981—),女,副教授,博士,主要从事河口海岸水动力环境研究。E-mail:vastocean@hhu.edu.cn

害分析在风险评估中取得了一定进展,但在动态变化规律的捕捉、空间异质性分析以及复合机制研究方面仍存在不足,同时国内研究多集中于东南沿海及河口地区^[14],缺少对河口上游河网的进一步研究。针对这些问题,本文以粤港澳大湾区为研究对象,深入研究区域风暴增水及雨潮复合灾害的非一致性特征及其空间分布规律,以为区域防灾减灾提供科学依据。

1 研究区概况

粤港澳大湾区位于珠江三角洲,地处中国大陆南端,经纬度范围 21°31'N~23°10'N、112°45'E~113°50'E。珠江三角洲是中国最重要的经济区之一,也是全球知名的城市群聚集地,涵盖了广州、深圳、珠海、香港、澳门等多个重要城市(图 1)。该三角洲流域内河网水系密布,流域总面积约 17 200 km²,呈现“三江汇流、八口入海”的独特格局。西江、北江、东江等多条河流在此交汇,塑造了复杂多样的水文地貌,也给区域水资源配置、生态环境保护与防灾减灾工作带来多重挑战。区域内地势平坦低洼,沿海地带部分区域地面高程甚至低于海平面,对风暴潮、海平面上升及强暴雨等极端事件具有较高的暴露度与脆弱性。



图 1 粤港澳大湾区城市及主要站点分布

Fig.1 Distribution of cities and major stations in the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area

珠江三角洲属于典型的亚热带海洋季风气候,区域内年际温差较小,但季节变化明显,夏季湿热,冬季温和。多年平均降水量约为 1 200~2 200 mm,季节分布极为不均,主要集中在夏季和秋季,尤其是 6—9 月的暴雨季节,常伴随强降雨、雷暴和热带气旋,极大地增强了区域内的洪水风险。

珠江三角洲同时也是我国风暴潮灾害高发区域之一。每年夏秋季节(7—9 月),受台风及热带气旋影响,风暴潮灾害尤为集中。风暴潮多由强台风或热带风暴诱发,沿岸增水普遍达 60~280 cm^[15],极端条件下增水幅度更为显著。风暴潮不仅直接威胁沿海城市基础设施安全与居民生产生活,还易引发大范围内涝与河道漫溢,进一步放大洪涝灾害影响与致灾风险。在气候变化持续加剧的背景下,未来风暴潮灾害的发生频次与致灾强度均可能呈上升态势,对区域防灾减灾工作提出了更高要求。受海平面上升、风暴潮频发及极端降水事件增多的共同影响,珠江三角洲正面临日趋复杂的雨潮复合灾害风险。因此,开展该区域雨潮复合灾害的非一致性特征及其演变规律研究,对提升区域灾害防控能力、优化应急响应体系及支撑国土空间长远规划,具有重要的理论意义与实践价值。

2 研究数据与方法

2.1 研究数据

研究的基础数据包括潮位数据与降水量数据,其中潮位数据来自《中华人民共和国水文年鉴第 8 卷珠

江流域》,降水量数据来自中国国家级地面气象站(<https://data.cma.cn/>),香港站的潮位与降水量数据来自香港天文台(<https://www.hko.gov.hk/sc/cis/climat.htm>),各站点的分布如图 1 所示。风暴潮是引发海岸洪水的致灾因素之一,本文利用 T_Tide 调和分析方法^[16],从实测潮位序列中分离提取天文潮位,以潮位残差表征风暴潮效应,进而得到各潮位站的逐时风暴增水过程。

2.2 研究方法

2.2.1 泰森多边形

针对潮位与降水观测站点空间不匹配的问题,本文引入泰森多边形进行流域面积划分。泰森多边形是一个关于空间划分的基础数据结构,它通过一组由连接两邻点直线的垂直平分线组成的连续多边形构成,所有在平面上的点,按照最邻近原则划分平面^[17]。本文依据泰森多边形划分各个潮位站在三角洲范围内所控制的面均流域,并划分雨量站 i 在不同潮位站的控制流域内的面积占比 f_i ($i=1,2,\cdots,n;n$ 为雨量站总数),雨量站 i 在控制流域内的日降水量记为 x_i ,则各潮位站控制流域内的降水量 $\bar{x}$ 可表示为:

$$\bar{x}=(f_1x_1+f_2x_2+\cdots+f_nx_n)/(f_1+f_2+\cdots+f_n) \tag{1}$$

2.2.2 极值事件提取

为研究大湾区雨潮的极端灾害事件,需要提取灾害事件的极值样本序列,本文采用超门限峰值(POT)法每年提取 3~4 个超定量事件,构成各个潮位站的风暴增水时间序列。POT 法通过挑选超过某一门限值或者阈值的值,组成极值序列^[18]。确定阈值是最重要的一个环节,但是对于阈值的选取还缺乏公认的标准,常用的方法有百分位阈值法、去趋势波动分析法、平均每年多个超定量值的方法^[19],鉴于平均每年多个超定量值的方法具有操作简便的特点且被广泛应用,本文采用该方法来确定 POT 法的阈值。

2.2.3 相关性度量

为解决降雨表征值无法确定的问题,本文通过量化雨潮相关性,确定具有最高相关性的时间段作为降雨表征事件的时间范围。其中确定随机变量间相关性的方法有很多,本文采用 Pearson 线性相关系数、Spearman 秩相关系数、Kendall 秩相关系数确定变量之间的相关性。

2.3 非一致性识别检验

2.3.1 趋势分析方法

本文水文序列趋势性分析采用 Mann-Kendall(M-K)趋势检验法。该方法为世界气象组织推荐使用的非参数统计方法,适用性强,已在水文序列趋势识别中得到广泛应用^[20]。考虑到水文序列通常存在自相关性,可能影响检验结果的可靠性,本文先采用 Kulkarni 等^[21]提出的预置白处理(Pre-Whitening)消除序列自相关,再进行 M-K 趋势检验。在此基础上,通过计算各站点极端事件序列的 Hurst 系数,揭示其长持续性特征与变异程度。Hurst 系数最初由 Hurst 在研究尼罗河水文情势时提出,用于刻画时间序列的长程相关性与记忆性,目前已广泛应用于水文、气象及地质等领域^[22]。

2.3.2 单因子变异点检验方法

目前单因子水文序列的突变检测方法很多,且各种方法都有其显著的适用性和优缺点。本文参照时翠等^[23]的研究思路,综合采用累积距平法、有序聚类分析法、滑动 F 检验法及 M-K 突变分析法 4 种方法开展突变点识别。通过多方法相互验证、互补支撑,综合对比研判后确定最终的突变结果,可有效克服单一检验方法结果可靠性不足的问题。

2.3.3 复合灾害变异点检验方法

本文利用 Archimedean 型 Copula 函数具有较强的捕捉变量间非线性、非对称相关性的优点,构建雨潮复合灾害的联合分布^[24-25]。对于样本容量为 m 的 Archimedean 型 Copula 函数,样本序列为 $\{(x_1,y_1),(x_2,y_2),\cdots,(x_m,y_m)\}$,其变量的边缘分布函数分别为 $F(x)$ 和 $G(y)$,相应的边缘概率密度函数为 $f(x)$ 和 $g(y)$,其联合分布 $H(x,y)$ 的表达式为:

$$H(x,y)=C(F(x),G(y)) \tag{2}$$

设联合分布函数 $H(x,y)$ 对应的联合概率密度函数为 $h(x,y)$,表达式为:

$$h(x,y)=f(x)g(y)C_{12}(F(x),G(y)) \tag{3}$$

其中

$$C_{12}(u,v)=\frac{\partial}{\partial u}\frac{\partial}{\partial v}C(u,v)$$

Archimedean 型 Copula 函数中参数的极大似然估计为:

$$\lambda = \operatorname{argmax}_{\lambda \in \mathbf{R}} \sum_{j=1}^m \ln C_{12}(\lambda; F(x_j), G(y_j))$$

(4)

假设观测数据存在一个变异点,则原假设 H_0 和对立假设 H_1 分别为:

$$H_0: \lambda_1 = \lambda_2 = \cdots = \lambda_m \quad H_1: \lambda_1 = \cdots = \lambda_{k^*} \neq \lambda_{k^*+1} = \cdots = \lambda_m$$

(5)

式中: λ_k 、 λ_{k^*} 、 λ_m 分别为相应数据参数的极大似然估计。

若拒绝原假设,则 k^* 为序列最可能变异点。当 $k^* = k$, 可以建立极大似然估计法的 Copula 对数似然比统计量:

$$-2\ln\Lambda_k = \sum_{j=1}^k \ln C_{12}(\lambda_j; F(x_j), G(y_j)) + \sum_{j=k+1}^m \ln C_{12}(\lambda_j; F(x_j), G(y_j)) - \sum_{j=1}^m \ln C_{12}(\lambda_j; F(x_j), G(y_j))$$

(6)

根据似然比检验方法,统计量 Z_m 渐近分布为自由度约束个数的 χ^2 分布,即当检验一个变异点时, $Z_m \sim \chi^2(1)$ 。如果 k^* 未知,当统计量 $Z_m = \max_{1 \leq k \leq m} (-2\ln\Lambda_k)$ 在置信水平为 95% 下,大于 $\chi^2(1)$,拒绝原假设,即存在变异点^[24,26]。

3 结果与分析

3.1 大湾区风暴增水非一致性

3.1.1 风暴增水的趋势性分析

通过研究风暴增水的变化特征,量化分析多年风暴增水灾害的风险变化。首先选取各潮位站提取出的 POT 风暴增水序列,计算各序列的 Hurst 系数、Hurst 变异度以及 M-K 趋势值,结果见表 1。各潮位站的 Hurst 系数均大于 0.5,表明序列均呈现不同程度的正向持续性与变异特征,潮位站之间 M-K 趋势值所表现出的上升与下降趋势不同。

以三沙口站为例,M-K 趋势值为 2.26,通过了显著水平 0.05 的假设检验,风暴增水序列呈现显著上升趋势,具体约为每 10 年上升 16 mm,且三沙口站的 Hurst 系数为 0.9153,表现出很强的正向持续性,表明三沙口的风暴增水在未来仍持续上升的可能性较大,易造成更大的正向变化幅度。南沙、万顷沙西、横门、黄金、西炮台的风暴增水序列也同样呈现上升趋势,表明各潮位站风暴增水在未来均有持续上升的可能性。万顷沙西站的正向持续性较为明显,但序列的上升趋势不显著,表明万顷沙西站的风暴增水在未来将不会有大幅度的上升。黄金站的风暴增水上升趋势较为显著,但序列的正向持续性与变异程度较低,表明黄金站的风暴增水幅度在短期内仍会上升,而未来长期内仍呈上升趋势的可能性不大,存在未来风暴增水降低的可能性。

竹银、紫洞、三水、马口、香港的 M-K 趋势值均为负值,表明风暴增水在未来均有持续下降的可能性;其中紫洞、马口与香港 3 个站的下降趋势明显,马口与紫洞站均达到了每 10 年 30 mm 的下降幅度,且马口站的下降趋势通过了显著水平 0.01 的假设检验,但 3 个站的风暴增水序列在未来持续呈现下降趋势的可能性较小;同样,竹银与三水的序列趋势显著性较差,未来存在风暴增水上升的可能性。

3.1.2 风暴增水序列变异点识别

采用累积距平法、有序聚类分析法、滑动 F 检验法及 M-K 突变分析法对各潮位站的风暴增水序列进行计算,通过综合 4 种方法的检测结果,并结合各站点序列的实际变化情况,全面衡量比较得出最终结果(表 2)。

对于三沙口站,累积距平法、有序聚类分析法和 M-K 突变分析法的结果显示,1962—2017 年的风暴增水序列在 1987 年发生突变,滑动 F 检验法检测出 2012 年的突变点,结合实际数据可以发现,三沙口风暴增水序列在 1987 年前后的均值变化为 45.3%,大于 2012 年前后的均值变化 10.8%,因此最终确定三沙口风暴增

表 1 各潮位站风暴增水 Hurst 系数、变异度及 M-K 趋势值
Table 1 Hurst coefficient, variation, and M-K trend value of storm surge at each tide gauge station

潮位站	Hurst 系数	Hurst 变异度/%	M-K 趋势值
三沙口	0.9153	83.1	2.26
南沙	0.8781	75.6	1.29
万顷沙西	0.9019	80.4	0.62
横门	0.9028	80.6	1.91
黄金	0.7500	50.0	1.68
西炮台	0.8132	62.6	1.39
竹银	0.8108	62.2	-1.16
紫洞	0.6541	30.8	-3.08
三水	0.7730	54.6	-1.48
马口	0.7848	57.1	-4.40
香港	0.6475	29.5	-1.98

水序列的变异点为 1987 年。对于西炮台站,累积距平法和有序聚类分析法识别出序列在 1987 年发生突变, M-K 突变分析法识别出序列在 1978 年发生突变,而滑动 F 检验法未通过显著性检测,因此未检测出突变点,结合实际序列确定西炮台风暴增水序列的变异点为 1987 年。对于竹银站,4 种分析方法识别出 1967 年与 1986 年两个突变点,通过对实际序列分析,1967 年前后序列的变化幅度为 35.8%,大于 1986 年前后序列的变化幅度(21.6%),因此确定竹银风暴增水序列的变异点为 1967 年。万顷沙西风暴增水变异点如图 2 所示,其他站点的分析图由于篇幅原因不再给出。

表 2 各潮位站风暴增水变异点年份
Table 2 Years of storm surge variation point at each tide gauge station

潮位站	变异点年份				综合确定的 变异点年份
	累积距平法	有序聚类分析法	滑动 F 检验法	M-K 突变分析法	
三沙口	1987	1987	2012	1987	1987
南沙	1985	1985	2016	1980	1985
万顷沙西	1987	1987	2016	1985	1987
横门	1987	1987	2016	1983	1987
黄金	1987	1988	1975	1975	1975
西炮台	1987	1987	—	1978	1987
竹银	1986	1967、1986	1967	1967	1967
紫洞	1974	1974	2006	2000	1974
三水	1975	1975	2016	1975	1975
马口	1975	1975	2012	1975	1975
香港	2016	1965	2016	1965	1965

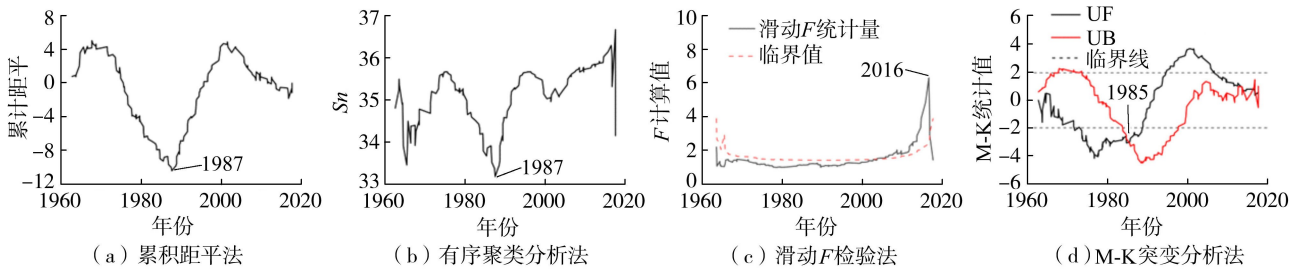


图 2 万顷沙西站风暴增水变异点识别

Fig. 2 Identification of variation points of storm surge at Wanqingshaxi Station

3.1.3 大湾区风暴增水非一致性特征

通过对大湾区各潮位站的风暴增水序列进行趋势性分析以及变异点识别,发现其非一致性存在明显的空间分布特征。趋势性方面,位于口门附近的三沙口、南沙、万顷沙西、横门及西炮台等站,近年来受风暴强度增强和海面气压降低的影响,风暴增水显著上升,壅水现象愈发突出。珠江口呈典型漏斗形河口特征,尤其是伶仃洋区域,自外海向内逐渐收窄且水深变浅,极易导致风暴潮能量集中、波高增强,并沿虎门方向上溯,加剧口门地区潮位抬升和局地增水效应^[27]。此外,近年来大湾区风暴潮灾害呈现频率增加和强度增强的趋势,热带气旋路径偏北偏西发展显著,进一步放大了下游及口门区域的致灾强度^[27-28]。位于中上游流域的紫洞、三水、马口等站,因距离河口较远、河道束窄及上游来流顶托作用,风暴增水呈现不同程度的下降趋势;位于外海的香港站,在海平面持续上升带来的水深增大作用下,使得风暴潮传播至近岸时的浅水作用减弱,增水极值减小^[29];同时也有研究^[30]表明,厄尔尼诺事件与气温变化均会在一定程度上影响风暴潮事件,尽管其影响机制还不够清晰,但气候变暖背景下的强台风活动加剧,使珠江三角洲风暴潮灾害的频率升高以及致灾强度增加已成趋势。

在变异点方面,大湾区风暴增水的变异点空间分布如图 3 所示,图中站点旁的标注为各潮位站点所识别出的变异点年份与序列变异度。位于口门附近的站点如三沙口、南沙、万顷沙西、横门及西炮台,变异点年份集中在 1987 年前后且序列均有较大的变异度,联系实际可以认为,20 世纪 80 年代的大范围挖沙活动极大改变了三角洲的地形^[31],进而影响各口门附近站点的风暴增水演变过程,造成风暴增水序列变异点的产生;黄金站的变异点识别过程虽也检测出 1987 年的变异点,但通过对实际序列的分析,认为黄金站在 1975 年发生的突变更为显著,反映了 20 世纪 70 年代珠江流域上游建闸和水库调控对下游风暴潮过程的影响;同样,

位于三角洲中腹部以上的站点如紫洞、三水及马口,其变异点也集中在 1975 年附近,进一步印证了上游水利工程建设引发的径潮相互作用变化^[32];稍靠下游的竹银站在上游径流与外海潮位的共同作用下,风暴增水的突变在 1967 年较为显著;对于外海的香港站,在海平面上升的作用下,风暴增水序列在 1965 年发生突变,尽管变异程度相对较小,但仍表明海平面变化对近岸风暴潮过程的影响不可忽视。

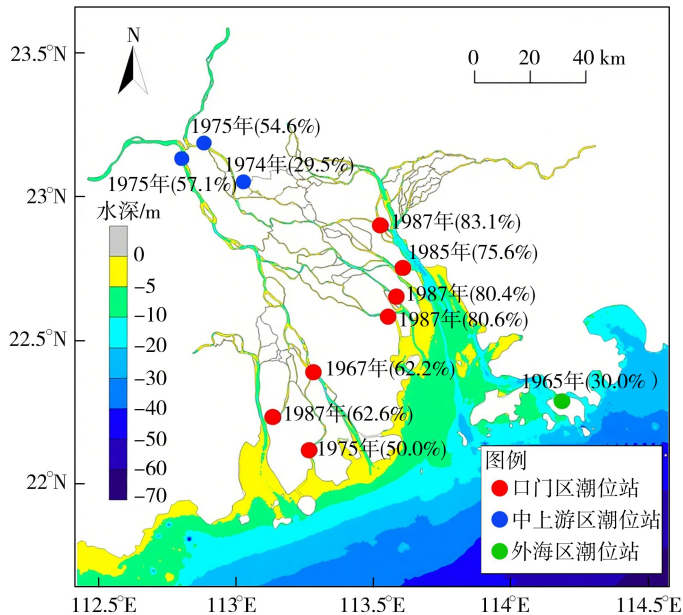


图 3 各潮位站风暴增水变异点空间分布

Fig. 3 Spatial distribution of variation points of storm surge at each tide gauge station

综上,大湾区风暴增水过程的非一致性演变既受到地形特征、上游来流和人类活动的显著影响,也与近年来区域风暴活动增强、气候变化驱动下的极端天气过程密切相关。该结论与已有研究^[32]对大湾区河口地貌、风暴潮动力响应及人类活动影响的认识基本一致,进一步证实大湾区风暴潮-降雨复合灾害风险正呈现空间非一致性加剧、结构性演变的发展态势。

3.2 雨潮复合灾害非一致性

3.2.1 降雨表征量确定

通过计算 Pearson、Spearman、Kendall 相关系数分析各复合灾害表征变量的相关性,为确保联合分布能够最大程度描述复合灾害的风险特性,优先考虑相关性最高的变量组合作为联合分布的构建序列。

基于泰森多边形法计算得到的各雨量站的面平均日降水量,并据此选取关键降雨特征指标,为后续分析奠定数据基础。通过统计选取了每一个极值增水事件期间的总降水量(P)、发生极值增水事件当天的降雨量(P_1)以及前后 3 天(P_3)、5 天(P_5)、7 天(P_7)的降水量作为降雨候选变量,计算 3 种相关系数以描述各降雨候选变量与风暴增水的相关性,绘制了相关关系散点图(图 4)。针对三沙口站:①基于显著性水平对各降雨候选变量与风暴增水的相关性进行筛选, P 、 P_1 、 P_2 序列与风暴增水之间的相关性显著(显著性水平均小于 0.05),通过 95%置信水平检验;②对相关系数绝对值进行比较, P_1 序列在 3 种相关系数下的相关系数绝对值均为最大,且相关方向一致为正,表明该变量与风暴增水的依赖关系最强、同步性最显著。综合显著性检验与相关系数评估,最终确定选择 P_1 序列作为降雨表征变量,参与三沙口站雨潮复合灾害的联合分布建模。同理,选择了 P_1 序列构成南沙、万顷沙西、横门的联合分布;选择 P 序列构成黄金、西炮台、竹银、三水、香港的联合分布;选择 P_7 序列构成紫洞、马口的联合分布。

3.2.2 大湾区雨潮复合灾害非一致性识别

本文以 Gumbel、Clayton 和 Frank3 种 Archimedean 型 Copula 函数为候选,主要考虑其结构简单、参数少,适用于样本量有限且变量间存在非线性相关性的情形,能有效描述雨潮过程中的联合特征。根据 Archimedean 型 Copula 函数的优选结果,以 Frank 型 Copula 函数构建三沙口、南沙、万顷沙西、横门、黄金、西炮台以及香港站的联合分布函数,以 Clayton 型 Copula 函数构建竹银、紫洞、三水以及马口的联合分布函数^[33],并运用基于 Archimedean 型 Copula 函数的似然比检验方法,对各潮位站的雨潮复合灾害 Copula 结构

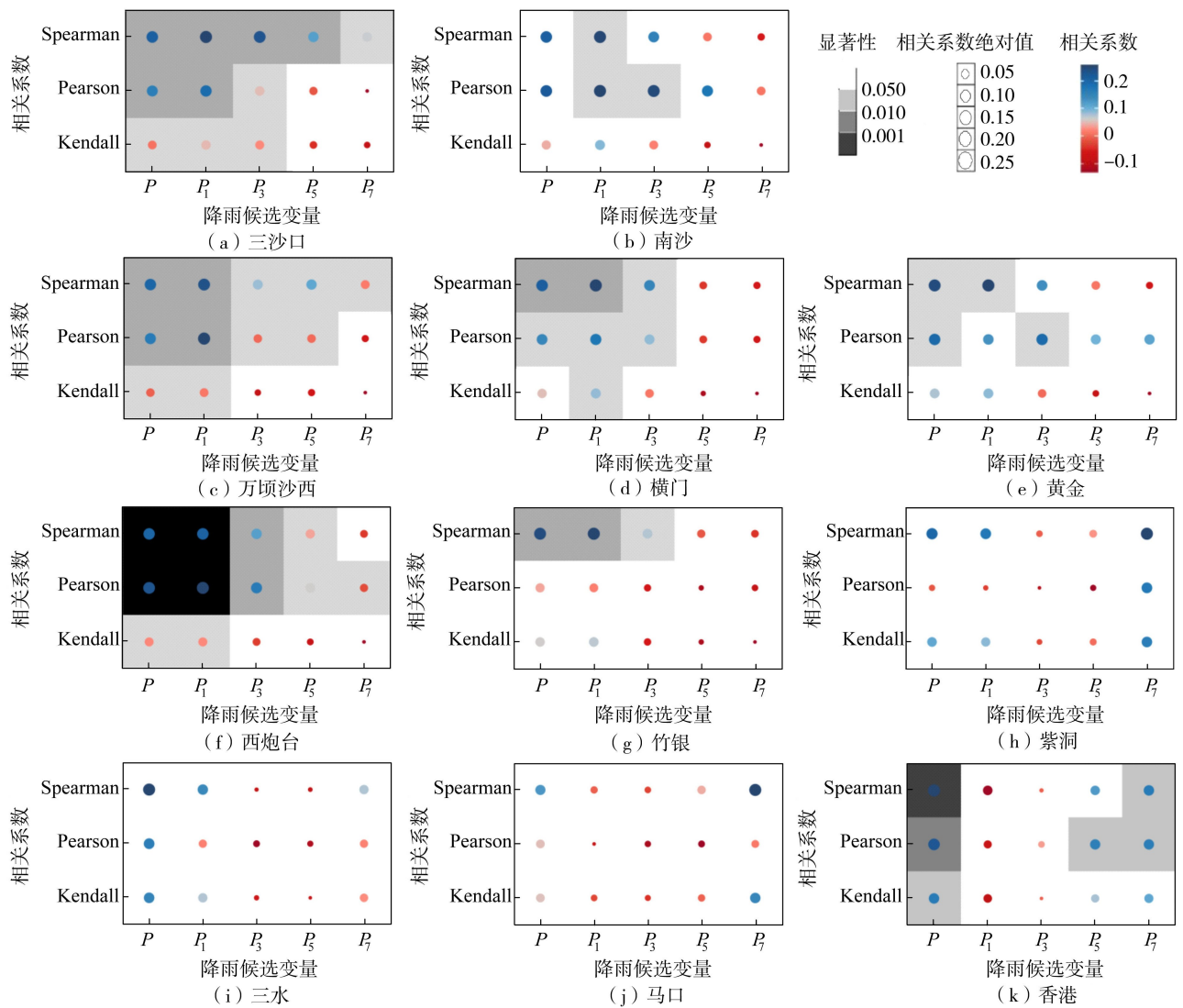


图 4 各潮位站相关关系散点图

Fig. 4 Scatter chart of relationship between each tide gauge station

进行分析,诊断大湾区复合灾害的变异情况。

根据计算结果可以确定各潮位站的复合灾害变异点年份(表 3),其中口门附近的三沙口、万顷沙西、横门以及黄金均在 1987 年前后发生显著突变现象,而南沙与西炮台站分别检测出在 2013 年与 2002 年的显著突变点;位于中上游流域的 4 个站点(竹银、紫洞、三水、马口)均在 1994 年前后发生突变,其中只有竹银站出现的突变点较为显著;外海的香港站检测出在 2016 年发生突变。

3.3 非一致性对雨潮相关性的影响

本文识别的联合分布变异点反映了各潮位站风暴增水与降水量之间依赖关系的变化特征,具体量化结果见表 3。口门附近潮位站及香港站的雨潮相关性在变异点后均显著降低,南沙站与香港站的变异点相对滞后,且在变异点后呈现负相关关系,指示出自 2013 年以来大湾区雨潮关系发生了显著变化。该特征的形成与区域复杂的河道地形特征及风暴过程变化

表 3 各潮位站复合灾害变异点年份及雨潮相关性
Table 3 Years of variation points of compound disasters and rainfall-storm surge correlation at each tide gauge station

潮位站	变异点年份	Kendall 秩相关系数		
		变异点前	变异点后	差值
三沙口	1987	0.419	0.146	-0.273
南沙	2013	0.195	-0.288	-0.483
万顷沙西	1987	0.361	0.117	-0.244
横门	1987	0.338	0.124	-0.214
黄金	1987	0.249	0.135	-0.114
西炮台	2002	0.126	0.620	0.494
竹银	1994	0.039	0.323	0.284
紫洞	1995	0.063	0.142	0.079
三水	1995	-0.082	0.351	0.433
马口	1993	0.079	0.214	0.135
香港	2016	0.308	-0.286	-0.594

密切相关。在下游区域,尽管风暴潮强度增强已在潮位趋势分析中体现,但雨潮关系变化的关键机制并非单纯来源于增水增强,而在于风暴潮对降雨排泄通道的持续阻断作用,使得降雨径流难以及时入海,雨潮关系从同步增强逐渐转变为脱耦甚至负相关,内涝风险显著上升^[34]。上游地区河道相对开阔,受风暴潮顶托效应减弱,降雨主导作用增强,径潮作用关系随时间推移发生变化,这与近年来中上游区域降雨主控风险加大的趋势相符^[27,34]。此外,受气候变化驱动,极端降雨事件频发,雨量集中且强度增强,尤其在南沙和香港等口门及外海区域,降雨过程与风暴潮的响应关系发生变化,表现出降雨过程增强而潮位受限的特征,雨潮相关性转为负相关,复合致灾机制趋于复杂化。综上,联合分布变异点的出现不仅揭示了降雨变化对雨潮关系的重要影响,更反映出大湾区复合型灾害风险已由简单叠加向非线性复杂响应演变。

4 结 论

a. 大湾区内大多数潮位站的风暴增水序列呈现显著上升趋势,特别是在口门地区。口门附近的6个站,其趋势性均表现显著上升,结合Hurst系数可认为这一上升趋势会持续较长时间,其变异点集中在1987年前后,结合实际情况认为20世纪80年代的大范围挖沙活动为变异点的主要成因;中上游及外海香港站点的风暴增水均呈负向变化趋势,表明其未来风暴增水总体呈下降态势。其中,中上游站点突变点集中出现在1975年前后,这一现象可归因于20世纪70年代珠江上游水库闸坝建设与蓄水截流,显著改变了上游来水条件;外海香港站点变异程度相对较弱,其1965年前后检测到的突变点,可能与海平面长期持续上升的累积效应有关。

b. 风暴增水与降水量之间具有显著的相关性,尤其是极值增水事件当天的降水量(P_1)与风暴增水之间的相关性最强。而在非一致性条件下,大湾区的雨潮相关性发生了不同程度的变化,特别是在1987年后,口门地区的风暴增水与降水量的相关性显著下降,甚至在部分站点出现了负相关现象,这反映了风暴潮强度的持续上升导致复合灾害风险显著增加。在中上游地区,风暴增水对复合灾害的影响减弱,而降雨的作用逐渐增强,尤其是在风暴增水和降雨的极值同时发生时,风险显著上升。

c. 降水量的时空分布对风暴潮有显著影响。在风暴潮强度增加的背景下,降雨的空间和时间变化进一步加剧了复合灾害的发生。降雨与风暴潮的极值叠加,导致了大湾区部分地区在特定时间段内(如1987年、1994年等)相关性发生变化,降雨和风暴潮的强度都达到了历史新高,它们相互叠加时产生了更大的灾害风险,显示出明显的非一致性特征。因此,未来的复合灾害风险评估必须考虑这种非一致性现象,以更好地应对日益复杂的极端气候事件。

参考文献:

[1] IPCC. AR6 Climate Change 2021: The Physical Science Basis[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2021.

[2] Declin A T, Pan J Y, Lin Hui. Tidal variability in the Hong Kong region[J]. Ocean Science, 2019, 15(4): 853-864.

[3] 刘丁蓉, 杨凯, 孙仕. 珠三角城市群内涝灾害韧性综合评估及障碍因子识别[J]. 水利经济, 2024, 42(4): 23-29. (Liu Dingrong, Yang Kai, Sun Shi. Comprehensive assessment and obstacle factor recognition of waterlogging disaster resilience in Pearl River Delta urban agglomeration[J]. Journal of Economics of Water Resources, 2024, 42(4): 23-29. (in Chinese))

[4] 陈晓宏, 涂新军, 谢平, 等. 水文要素变异的人类活动影响研究进展[J]. 地球科学进展, 2010, 25(8): 800-811. (Chen Xiaohong, Tu Xinjun, Xie Ping, et al. Progresses in the research of human induced variability of hydrological elements [J]. Advances in Earth Science, 2010, 25(8): 800-811. (in Chinese))

[5] 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))

[6] Ren Liliang, Yuan Shanshui, Yang Xiaoli, et al. Initiatives to clarify mechanisms of hydrological evolution in human-influenced Yellow River Basin[J]. Water Science and Engineering, 2023, 16(2): 117-121.

[7] Milly P C D, Betancourt J, Falkenmark M, et al. Stationarity is dead: whither water management? [J]. Science, 2008, 319: 573-574.

[8] 顾海挺. 基于跳跃变异的双非一致性洪水频率分析[D]. 武汉: 武汉大学, 2017.

[9] 隆院男, 黄春福, 莫军成, 等. 非一致性条件下松澧地区洪水遭遇规律分析[J]. 水利水电科技进展, 2024, 44(4): 14-22.

- (Long Yuannan, Huang Chunfu, Mo Juncheng, et al. Analysis of flood coincidence law in Song-Li Region under non-consistency conditions[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2024, 44(4): 14-22. (in Chinese))
- [10] 梁忠民, 胡义明, 黄华平, 等. 非一致性条件下水文设计值估计方法探讨[J]. 南水北调与水利科技, 2016, 14(1): 50-53. (Liang Zhongmin, Hu Yiming, Huang Huaping, et al. Study on the estimation of design value under non-stationary environment [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2016, 14(1): 50-53. (in Chinese))
- [11] 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))
- [12] 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))
- [13] 杨蕊, 吴时强, 高学平, 等. 基于 Vine Copula 函数的河湖连通水环境多因子联合风险识别研究[J]. 水利学报, 2020, 51(5): 606-616. (Yang Rui, Wu Shiqiang, Gao Xueping, et al. A vine copula-based study on identification of multivariate water environmental risk under different connectivity of rivers and lakes [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2020, 51(5): 606-616. (in Chinese))
- [14] Ji Tao, Li Guosheng, Liu Yangxiaoyue, et al. Spatiotemporal features of storm surge activity and its response to climate change in the southeastern coastal area of China in the past 60 years[J]. JGR Atmospheres, 2020, 125(23): e2020JD033234.
- [15] Fang Jiayi, Liu Wei, Yang Saini, et al. Spatial-temporal changes of coastal and marine disasters risks and impacts in China's mainland[J]. Ocean and Coastal Management, 2017, 139: 125-140.
- [16] Pawlowicz R, Beardsley B, Lentz S. Classical tidal harmonic analysis including error estimates in MATLAB using T_TIDE[J]. Computers and Geosciences, 2002, 28(8): 929-937.
- [17] 刘金义, 刘爽. Voronoi 图应用综述[J]. 工程图学学报, 2004(2): 125-132. (Liu Jinyi, Liu Shuang. A review of Voronoi diagram applications [J]. Journal of Engineering Graphics, 2004(2): 125-132. (in Chinese))
- [18] 杜鸿. 气候变化背景下淮河流域洪水极值时间概率分析与研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2014.
- [19] Lang M, Ouarda T B M J, Bobée B. Towards operational guidelines for over-threshold modeling[J]. 1999, 225(3/4): 103-117.
- [20] Goossens C, Berger A. Annual and seasonal climatic variations over the northern Hemisphere and Europe during the Last Century [J]. Annales Geophysicae, 1986, 4(4): 385-400.
- [21] Kulkarni A, Storch H. Monte Carlo experiments on the effect of serial correlation on the Mann-Kendall test of trend[J]. Meteorol Zeitschrift, 1995, 4(2): 82-85.
- [22] 雷旭, 谢平, 吴子怡, 等. 基于 Hurst 系数与 Bartels 统计量的水文变异性及其敏感性[J]. 应用生态学报, 2018, 29(4): 1051-1060. (Lei Xu, Xie Ping, Wu Ziyi, et al. Hydrological variability and sensitivity based on Hurst coefficient and Bartels statistic [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2018, 29(4): 1051-1060. (in Chinese))
- [23] 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))
- [24] 郭爱军, 黄强, 王义民, 等. 基于 Archimedean Copula 函数的流域降雨-径流关系变异分析[J]. 水力发电学报, 2015, 34(6): 7-13. (Guo Aijun, Huang Qiang, Wang Yimin, et al. Detection of variations in precipitation-runoff relationship based on Archimedean Copula [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2015, 34(6): 7-13. (in Chinese))
- [25] Huang Shengzhi, Chang Jianxia, Huang Qiang, et al. Identification of abrupt changes of the relationship between rainfall and runoff in the Wei River Basin, China[J]. Theoretical and Applied Climatology, 2015, 120(1/2): 299-310.
- [26] Xiong Lihua, Jiang Cong, Xu Chongyu, et al. A framework of change-point detection for multivariate hydrological series[J]. Water Resources Research, 2015, 51(10): 8198-8217.
- [27] 罗志发, 黄本胜, 邱静, 等. 粤港澳大湾区风暴潮时空分布特征及影响因素[J]. 水资源保护, 2022, 38(3): 72-79. (Luo Zhifa, Huang Bensheng, Qiu Jing, et al. Spatio-temporal distribution characteristics and influencing mechanisms of storm surge in Guangdong, Hong Kong and Macao Greater Bay Area[J]. Water Resources Protection, 2022, 38(3): 72-79. (in Chinese))
- [28] 罗锋, 汪忆, 杨洁, 等. 相似路径台风风暴潮过程对比[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2023, 51(6): 130-140. (Luo Feng, Wang Yi, Yang Jie, et al. Comparative study on storm surge processes caused by typhoons with similar tracks[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2023, 51(6): 130-140. (in Chinese))

Lower Yellow River[J]. Advances in Water Science,2022,33(3):506-517. (in Chinese))

[21] Sedláček J,Bábek O,Grygar T M,et al. A closer look at sedimentation processes in two dam reservoirs[J]. Journal of Hydrology, 2022,605:127397.

[22] Chen Peng,Deng Jinyun,Tan Guangming,et al. Prediction research on sedimentation balance of Three Gorges Reservoir under new conditions of water and sediment[J]. Scientific Reports,2021,11(1):19005.

[23] Yang Yunping,Zheng Jinhai,Zhu Lingling,et al. Influence of the Three Gorges Dam on the transport and sorting of coarse and fine sediments downstream of the dam[J]. Journal of Hydrology,2022,615:128654.

[24] 张金良,胡春宏,刘继祥. 多沙河流水库“蓄清调浑”运用方式及其设计技术[J]. 水利学报,2022,53(1):1-10. (Zhang Jinliang,Hu Chunhong,Liu Jixiang. Operation mode and design technology of “storing clean water and regulating muddy flow” of reservoirs in sediment-laden river[J]. Journal of Hydraulic Engineering,2022,53(1):1-10. (in Chinese))

[25] Moragoda N,Cohen S,Gardner J,et al. Modeling and analysis of sediment trapping efficiency of large dams using remote sensing [J]. Water Resources Research,2023,59(6):e2022WR033296.

[26] 黄志鸿,董增川,周涛,等. 面向生态友好的水库群调度模型[J]. 河海大学学报(自然科学版),2020,48(3):202-208. (Huang Zhihong,Dong Zengchuan,Zhou Tao,et al. Group operation model for ecological friendly reservoir[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences),2020,48(3):202-208. (in Chinese))

[27] Li Zhe,Lu Lunhui,Lyu Pingyu,et al. Imbalanced stoichiometric reservoir sedimentation regulates methane accumulation in China’s Three Gorges Reservoir[J]. Water Resources Research,2020,56(9):e2019WR026447.

[28] 张金良. 多沙河流水库淤积形态与库容分布耦合设计[J]. 水利水电科技进展,2024,44(4):45-50. (Zhang Jinliang. Coupling design for sedimentation pattern and storage capacity distribution of reservoirs in sediment-laden rivers[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2024,44(4):45-50. (in Chinese))

[29] Zhang Guoshuai,Deng Anjun,Lu Qin,et al. Analyzing the adjustment mechanism of daily sediment content under large reservoir operations[J]. Science of the Total Environment,2024,947:174729.

[30] Tan Guangming,Chen Peng,Deng Jinyun,et al. Review and improvement of conventional models for reservoir sediment trapping efficiency[J]. Heliyon,2019,5(9):e02458.

[31] Siyam A M,Kantoush S A, Saad A S. Development of a computational procedure for optimum sediment removal: application to case of roseires hydropower intakes[J]. FES Journal of Engineering Sciences,2021,10(1):28-36.

[32] Zhang Guoshuai,Deng Anjun,Chen Jianguo,et al. Impacts of climate change and human activities on sediment load in Longchuan River Basin, China[J]. Journal of Hydrology,2024,51:101613.

(收稿日期:2024 - 10 - 18 编辑:刘晓艳)

(上接第 59 页)

[29] 俞亮亮,陈可锋,陆培东,等. 海平面上升背景下辐射沙脊风暴潮增水研究[J]. 水利水运工程学报,2014(6):52-57. (Yu Liangliang,Chen Kefeng,Lu Peidong,et al. A study of storm surge in radial sand ridges under sea level rising [J]. Journal of Waterway and Harbor Engineering,2014(6):52-57. (in Chinese))

[30] Huang Mingfeng,Wang Qing,Liu Maofeng,et al. Increasing typhoon impact and economic losses due to anthropogenic warming in Southeast China[J]. Scientific Reports,2022,12(1):14048.

[31] 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))

[32] 谢平,陈广才,雷红富. 西北江三角洲马口站和三水站水文泥沙序列变异分析[J]. 水电能源科学,2006,24(3):18-22. (Xie Ping,Chen Guangcai,Lei Hongfu. Variation analysis of hydrological and sediment series in North River and West River Delta:case study of Makou Station and Sanshui Station [J]. Water Power and Energy Science,2006,24(3):18-22. (in Chinese))

[33] 乔煜,季小梅,张蔚. 台风事件下的雨潮复合灾害风险研究[J]. 地理科学进展,2023,42(6):1153-1161. (Qiao Yu, Ji Xiaomei,Zhang Wei. Compound flood risk of rainfall and storm surges during typhoon events [J]. Progress in Geography,2023, 42(6):1153-1161. (in Chinese))

[34] 袁竹,高亮,张文生,等. 风暴潮与极端暴雨叠加作用下九龙半岛内涝防控方法[J]. 水资源保护,2024,40(4):56-64. (Yuan Zhu,Gao Liang,Zhang Wensheng,et al. Waterlogging prevention and control methods in Kowloon Peninsula under superimposed effect of storm surge and extreme rainstorm[J]. Water Resources Protection,2024,40(4):56-64. (in Chinese))

(收稿日期:2025 - 01 - 09 编辑:刘晓艳)