

游景方,钟舒豪,魏志雄,等.复合洪水多源风险组合关系识别研究[J].人民珠江,2026,47(3):67-77.

# 复合洪水多源风险组合关系识别研究

游景方<sup>1</sup>,钟舒豪<sup>1</sup>,魏志雄<sup>1</sup>,苏家业<sup>1</sup>,宋亮<sup>1</sup>,陈俊辉<sup>1</sup>,钟鸣<sup>2</sup>

(1.广东电网有限责任公司河源供电局,广东 河源 517000;2.中山大学地理科学与规划学院,广东 广州 510275)

**摘要:**沿海城市频繁遭受洪水灾害影响,往往并非单一灾种驱动,而是多种致灾因子相互影响的综合结果。为探究变化环境下复合洪水多灾种风险组合关系,采用Mann-Kendall检验法和小波分析法,分析水文序列的趋势性和周期性;为探究多变量的组合效应,通过Copula函数优选,提出了基于Kendall重现期的复合洪水组合致灾阈值计算方法。结果表明:①潮位、降雨、流量极值序列均呈现上升趋势,且整体处于枯-丰周期中的丰水年周期里;②多因子联合致灾阈值小于单因子致灾阈值,即相较于单一变量致灾效应而言,多致灾因子间的叠加放大等相互作用将复合洪水灾害影响范围扩大。聚焦复合洪水风险的叠加组合关系,开展组合致灾阈值计算,研究结果可为复合洪水预报预警提供更有效的科学依据。

**关键词:**复合洪水;致灾阈值;Kendall重现期;趋势性;周期性

**中图分类号:**TV122 **文献标识码:**A **文章编号:**1001-9235(2026)03-0067-11

在气候变化以及快速城市化的影响下,海平面上升、地面沉降、极端水文气象事件等自然灾害频发<sup>[1-2]</sup>。粤港澳大湾区经济发达、人口密度高,常受台风、暴雨、洪水、风暴潮等灾害侵袭<sup>[3]</sup>。IPCC报告中提出了复合事件的概念,并将其定义为两个或两个以上极端事件同时或相继发生的现象,复合灾害将放大极端事件影响。沿海城市所遭受的洪水灾害通常并非仅由单一致灾因子导致,在风暴潮洪水、河流洪水、暴雨内涝等多灾种的共同作用下,复合洪水灾害呈现复杂化和极端化的特征<sup>[4]</sup>。2018年第22号超强台风“山竹”引发台风风暴潮,造成损毁海堤、护岸24.99 km,直接经济损失23.70亿元。

为认识复合洪水灾害多致灾因子的组合特征,统计模型是广泛使用的方法之一,包括贝叶斯网络、多元线性回归法、秩相关系数、多变量联合概率分析等<sup>[5-6]</sup>。例如,Bracken等<sup>[7]</sup>开发了一个通用的贝叶斯网络框架来确定极端水文事件的发生概率,并且通过美国科罗拉多州泰勒公园大坝的年最大

雪水当量、年最大洪峰流量和年最高水库水位的联合概率分布模型证明了该框架的实用性。Zheng等<sup>[8]</sup>采用双变量逻辑阈值超额模型对澳大利亚沿海地区极端降雨和风暴潮事件的相关性进行研究。此外,联合概率模型作为多因子概率分析的统计建模方法之一,在复合灾害研究中应用广泛。由于灾害变量通常具有非线性、非对称性的特征,基于线性相关关系的传统模型难以对灾害风险进行准确分析,而Copula函数可通过构造多维联合概率分布分析变量的组合规律,适用于水文分析的多要素分析。例如,Zellou等<sup>[9]</sup>构建了摩洛哥布尔格雷格河口极端降雨和潮位的二维Copula联合洪水风险概率模型,分析了洪水风险的联合影响;Ghanbari等<sup>[10]</sup>考虑了海平面上升和河流流量之间的关系,通过Copula函数建立了海岸-河流复合洪水事件风险评估模型;Zhong等<sup>[11]</sup>考虑土壤水分和降雨的联合影响,将Copula函数应用于山洪风险联合概率分析。

综上所述,目前基于统计学方法对复合洪水灾

**基金项目:**国家自然科学基金项目(42571088);南方电网公司科技项目(031600KC23120010);广州市基础与应用基础研究项目(202201011132)

**收稿日期:**2025-07-21 **修回日期:**2025-09-12 **网络首发日期:**2025-10-23

**作者简介:**游景方(1986—),男,高级工程师,主要从事输电线路运行管理及防灾减灾等工作。

**联系作者:**致信rmzj@pearlwater.gov.cn,由期刊转接。

害的研究大多侧重于计算灾害风险概率,对于灾害间风险组合关系及致灾阈值的研究较少。因此,本文首先运用 Mann-Kendall 检验法和小波分析对水文序列的趋势性和周期性进行研究,并运用 Copula 函数量化多变量的组合概率关系,基于 Kendall 重现期计算了多灾种组合风险阈值,从而识别复合洪水中多过程的风险组合关系。

## 1 研究区概况

珠江三角洲河网复杂,自东向西包括虎门、蕉门、洪奇门、横门、磨刀门、鸡啼门、虎跳门、崖门八大口门,最终汇入南海。其中,磨刀门是珠江的主要入海口门,多年平均径流量达到 923 亿  $\text{m}^3$ ,约占珠江入海泄洪量的 28.37%,为八大入海口门之首。磨刀门水道流经珠海市,自斗门莲溪镇螺洲溪口入境,至横琴石栏洲入海,境内全长 42 km。该区域为感潮河段,频繁受到风暴潮、河流洪水、暴雨等灾害影响,因此,本研究选择磨刀门为研究区域。

## 2 研究方法

### 2.1 Mann-Kendall 趋势检验法

受土地利用变化、人类活动、气候变化等影响,降雨径流过程发生变化,因而水文要素序列也有了演变特征。已有的量化趋势演变特征的方法较多,其中 Mann-Kendall 检验法(简称 M-K 检验)是常用的非参数统计检验方法<sup>[12]</sup>,本研究采用 M-K 检验法分析年平均降雨序列、多年潮水位站特征水位序列和多年洪峰流量序列的趋势性。

假设某一要素时间序列为  $x_1, x_2, \dots, x_n$ , 则其统计量  $S$  定义为:

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \text{sgn}(x_j - x_i) \quad (1)$$

式中:  $x_i$  和  $x_j$  分别为序列第  $i$  年和第  $j$  年的值,所有的  $i, j \leq n$  且  $i+1=j$ ;  $\text{sgn}(\cdot)$  为符号函数,其计算公式为:

$$\text{sgn}(x_j - x_i) = \begin{cases} 1, & x_j - x_i > 0 \\ 0, & x_j - x_i = 0 \\ -1, & x_j - x_i < 0 \end{cases} \quad (2)$$

当  $n \geq 8$  时,  $S$  近似服从正态分布,其均值为 0, 方差  $\text{Var}(S)$  计算见式(3):

$$\text{Var}(S) = \frac{n(n-1)(2n+5)}{18} \quad (3)$$

MK 统计量  $Z$  则根据式(4):

$$Z = \begin{cases} (S-1)/\sqrt{\text{Var}(S)}, & S > 0 \\ 0, & S = 0 \\ (S+1)/\sqrt{\text{Var}(S)}, & S < 0 \end{cases} \quad (4)$$

当  $Z > 0$  时,要素序列表现为上升趋势;相反,当  $Z < 0$  时,要素序列表现为下降趋势。若满足  $|Z| \geq Z_{(1-\alpha/2)}$ , 则在该置信水平上要素序列的上升或下降趋势显著。

斜率是衡量趋势大小的指标,见式(5):

$$\beta = \text{Median}\left(\frac{x_i - x_j}{i - j}\right), \forall 1 \leq i \leq j \leq n \quad (5)$$

式中:  $\text{Median}(\cdot)$  表示中位值;  $\beta > 0$  表示序列呈现上升趋势,  $\beta < 0$  表示序列呈现下降趋势。

### 2.2 小波分析法

连续小波变换法可用于揭示和描述序列多时间尺度的周期性。本研究采用小波变换方法对现有的水文序列进行分析,以揭示复合洪水多致灾因子的特征和规律。小波函数的表达式如下:

$$\psi(t) \in L^2(R) \text{ 且满足 } \int_{-\infty}^{+\infty} \psi(t) dt = 0 \quad (6)$$

式中:  $\psi(t)$  为基小波函数,它可以通过尺度的伸缩和时间轴上的平移构成一簇函数系:

$$\psi_{a,b}(t) = |a|^{-1/2} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right), a, b \in R, a \neq 0 \quad (7)$$

式中:  $\psi_{a,b}(t)$  为子小波;  $a$  为尺度因子,反映小波的周期长度;  $b$  为平移因子,反映时间上的平移。

将时间域上关于  $a$  的所有小波变换系数的平方进行积分,即为小波方差:

$$\text{Var}(a) = \int_{-\infty}^{+\infty} |W_f(a, b)|^2 db \quad (8)$$

式中:  $a$  为伸缩尺度;  $b$  为平移参数。小波方差随尺度  $a$  的变化过程称小波方差图,反映了波动的能量随尺度的分布<sup>[13-14]</sup>。

### 2.3 基于 Kendall 重现期的风险组合阈值计算

重现期是水利工程中设计标准的概念,用于衡量水文事件的量级<sup>[15]</sup>。单变量重现期为频率的倒数,联合重现期 and 同现重现期在多要素致灾情景下

更具适用性。然而,这两类重现期分析也存在一定的局限<sup>[17]</sup>,联合重现期可能扩大了危险域,见图 1a,图中 B 点相对 A 点临界值来说,某一变量超越临界值较多,而另一变量则未超过临界值,在实际情况中,这种情况可能并未产生危险。相反,同现重现期则缩小了危险域,见图 1b, B 点的联合分布概率已超过 A 点所在等值线水平,但并未处于危险域中,与定义存在矛盾。为解决这一问题,引入 Kendall 分布函数,并划定全部事件于超临界区域、临界区域、亚

临界区域 3 个区域,见图 1c, Kendall 重现期则为事件发生在超临界区域的平均时间间隔长度,两变量 Kendall 重现期定义为:

$$T_k = \frac{1}{P[C(u_1, u_2) > t]} = \frac{1}{1 - K_c(t)} \quad (9)$$

$$K_c(t) = t - \frac{\varphi(t)}{\varphi'(t)} \quad (10)$$

式中:  $K_c$  为 Kendall 分布函数,其值为该分布函数在概率为  $t$  时的分位数;  $\varphi(t)$  为 Archimedean Copula 函数的生成元;  $\varphi'(t)$  为  $\varphi(t)$  一阶右导数。

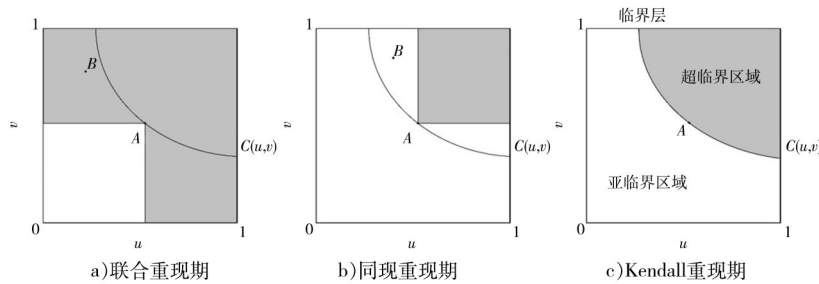


图 1 3 种重现期的定义图(阴影部分为危险域,空白部分为安全域)

Fig. 1 Definitions of three return periods (the shaded area represents the dangerous zone, and the blank area represents the safe zone)

本研究采用 Kendall 重现期来计算不同变量的风险组合阈值。采用极大似然法进行阈值计算,具体见式(11)、(12):

$$(X_{ml}, Y_{ml}) = \operatorname{argmax} f(x, y) \quad (11)$$

$$f(x, y) = C(u_x, u_y) f_x(x) f_y(y) \quad (12)$$

式中:  $C$  为 Copula 的概率密度函数;  $f_x(x)$  和  $f_y(y)$  分别为两变量的概率密度函数。

### 3 结果分析与讨论

#### 3.1 致灾因子趋势分析

在气候变化的大背景下,近年来对降雨、径流、气温、蒸散发等水文数据序列在不同时间尺度的趋势分析越来越重要。因此本研究基于现有数据筛选与处理,对灯笼山站 1959—2014 年最高潮位、竹仙洞站 1973—2014 年最大 1 日降雨量以及马口站 1951—2005 年最大日均流量进行趋势分析。灯笼山站年最高潮位变化趋势见图 2。由图可知,灯笼山站年最高潮位呈线性上升趋势,整体上升速率为

0.048 m/10a。从年际变化来看,近 30 a 出现超 2 m 潮位的频次明显增加,其中 1993、2008 年潮位均超过 2.5 m。

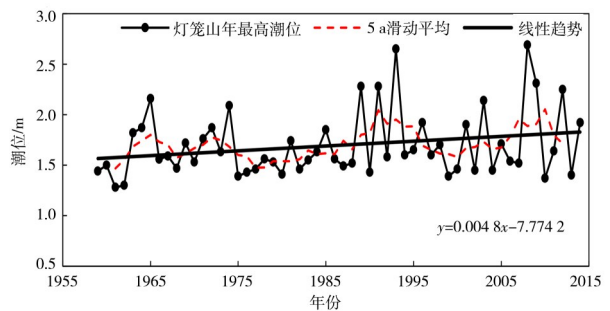


图 2 年最高潮位变化趋势

Fig. 2 Variation trend of annual highest tide level

竹仙洞站年最大 1 日降雨量变化趋势见图 3。由图可知,竹仙洞站年最大 1 日降雨量呈线性上升趋势,整体上升速率为 14.495 mm/10a。从年际变化来看,1982、1994、1996 年均出现超 500 mm 的极端降雨量。

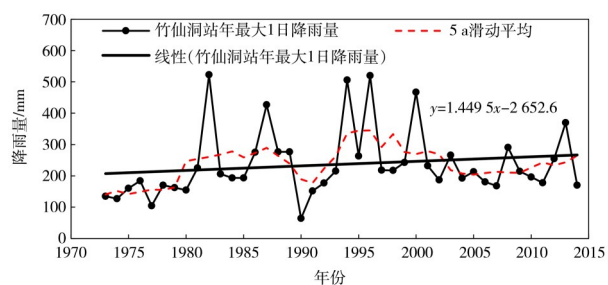


图3 年最大1日降雨量变化趋势

Fig. 3 Variation trend of annual maximum daily rainfall

马口站年最大日均流量变化趋势见图4。由图可知,马口站年最大日均流量呈不显著上升趋势,整体上升速率为 $1\ 128\ \text{m}^3/(\text{s}\cdot 10\text{a})$ 。从年际变化来看,近20 a流量极值超过 $40\ 000\ \text{m}^3/\text{s}$ 的年份显著增加,其中2005年极值超过 $50\ 000\ \text{m}^3/\text{s}$ ,表明流量发生极端事件的可能性增加。

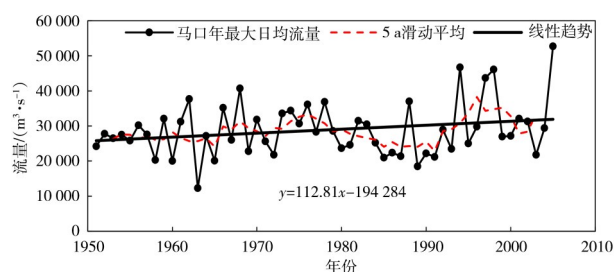


图4 年最大日均流量变化趋势

Fig. 4 Variation trend of annual maximum daily average flow rate

利用MK趋势检验法对各要素进行趋势分析并计算斜率,结果见表1,灯笼山潮位、竹仙洞降雨与马口流量的 $Z$ 值和 $\beta$ 值均大于0,表明其变化呈现上升趋势,与线性回归分析结果一致。所有要素的MK统计量 $|Z|$ 均小于置信水平为0.05时的相应临界值(1.96),变化趋势并不明显。气候变化影响下,海平面上升、降雨量增加、台风强度增强等驱动因素均可能带来区域水文气象要素呈上升趋势;在水利工程的防洪调度作用下,也可能带来下游流量时序分布发生变化;此外,在径潮动力耦合作用下,多要素的复合效应将加剧各要素的叠加放大效果。

### 3.2 致灾因子周期性分析

小波分析方法从时域和频域揭示时间序列的

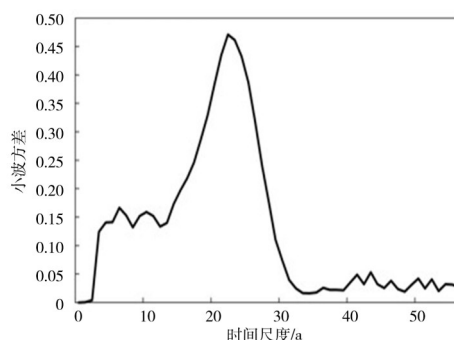
表1 常用Archimedean Copula函数表达式各要素MK趋势检验结果

Tab. 1 MK trend test results of each element of common Archimedean Copula function expressions

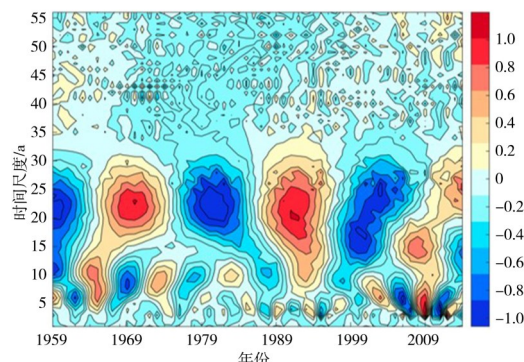
水文要素	统计量 $Z$	显著性水平 ( $\alpha=0.05$ )	斜率 $\beta$	趋势性
灯笼山潮位	1.34	不显著	$2.72\times 10^{-3}$	上升
竹仙洞降雨量	1.76	不显著	1.46	上升
马口流量	0.99	不显著	56.41	上升

局部特性,适合于研究具有多时间尺度变化特性和非平稳特性的水文时间序列。小波方差反映波动的能量分布,小波方差图的峰值反映序列的时间尺度。小波系数实部等值线图代表小波系数实部的强弱变化,反映水文序列的周期变化。本研究采用小波分析对复合洪水各水文要素的周期性进行分析。

图5为灯笼山站年最大高潮位周期分析,由图可知,灯笼山站年最大高潮位序列的主周期为22 a,次周期为5 a和10 a。



a)小波方差



b)小波系数实部等值线

图5 年最大高潮位周期分析

Fig. 5 Analysis of annual maximum high tide level cycle

图5中负值代表潮位偏低,正值代表潮位偏高。由图可知,在22 a尺度上,出现了潮位低-高交替的5次振荡,包括2个潮位偏高期和3个潮位偏低期;在5 a尺度上,出现了潮位高-低交替的20次振荡,包括10个潮位偏高期和10个潮位偏低期。在10 a尺度上,出现了潮位低-高交替的13次振荡,包括6个潮位偏高期和7个潮位偏低期。该区域潮位目前正处于低-高周期中的高水位周期里。

图6为竹仙洞站年最大1日降雨量周期分析,由图6可知:竹仙洞站年最大1日降雨量序列的主周期为42 a,次周期为17、6 a。

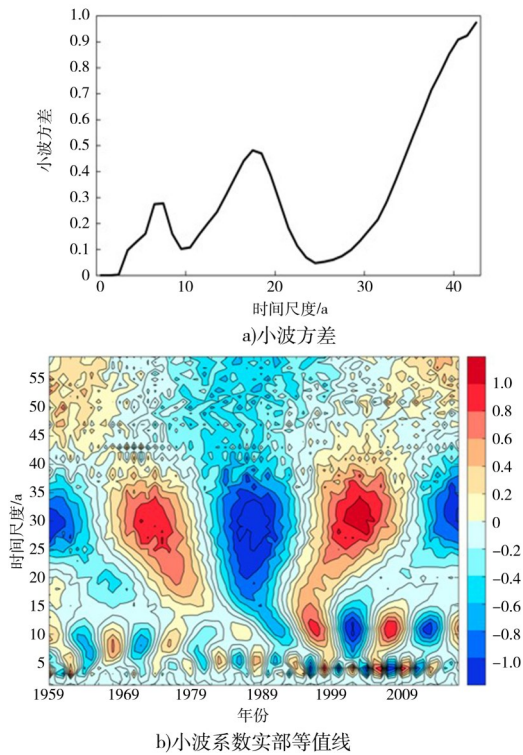


图6 年最大1日降雨量周期分析

Fig. 6 Analysis of annual maximum daily rainfall cycle

图6b为竹仙洞站年最大1日降雨量序列小波系数实部等值线,图中负值代表降雨减少,正值代表降雨增多。由图可知,在42 a尺度上,出现了降雨减少-增加交替的3次振荡,包括1个降雨增加期和2个降雨减少期;在17 a尺度上,出现了降雨减少-增加交替的7次振荡,包括3个降雨增加期和4个降雨减少期。在6 a尺度上,出现了降雨增加-减少交

替的14次振荡,包括7个降雨增加期和7个降雨减少期。该区域降雨量目前正处于降雨减少-增加周期中的降雨增加周期里。

图7为马口站年最大日均流量周期分析,由图可知:马口站年最大流量序列的主周期为38 a,次周期为10、4 a。图7b为马口站年最大流量序列小波系数实部等值线,图中负值代表流量偏枯,正值代表流量偏丰。由图可知,在38 a尺度上,出现了流量偏枯-偏丰交替的4次振荡,包括2个流量偏丰期和2个流量偏枯期;在10 a尺度上,出现了流量偏枯-偏丰交替的7次振荡,包括3个流量偏丰期和4个流量偏枯期;在4 a尺度上,出现了流量偏枯-偏丰交替的19次振荡,包括9个流量偏丰期和10个流量偏枯期。该区域径流量目前正处于枯-丰周期中的丰水年周期里。

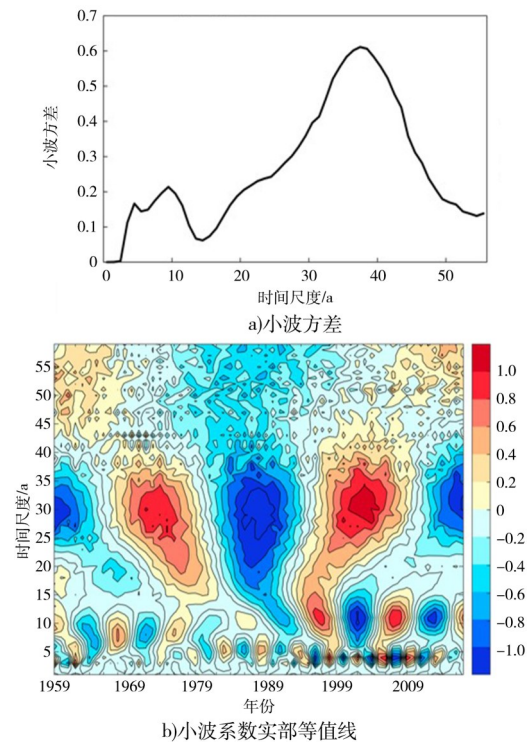


图7 年最大日均流量周期分析

Fig. 7 Analysis of annual maximum daily average flow rate cycle

### 3.3 不同重现期下风险组合致灾阈值确定

首先,计算各单致灾因子的相关系数,采用 Kendall 秩相关系数  $\tau$  描述变量间非线性的相关性。

结果显示,各个变量之间均存在一定的正相关关系,均达到极显著水平( $P < 0.01$ )。随后,选择具有代表性的几种边缘分布对单变量边缘分布函数进行优选。通过Kolmogorov-Smirnov检验、离差平方和最小准则法(Ordinary Least Square, OLS)、赤池信息准则(Akaike's Information Criterion, AIC)和决定系数 $R^2$ 进行拟合优度检验,确定潮位、流量和降雨的最佳边缘分布,检验结果见表2。结果表明:5种分布均通过了K-S检验,对潮位而言,OLS差异较

小,而Weibull分布的AIC值最小,为16.69,且 $R^2$ 最大,因此选择Weibull分布作为潮位的最优边缘分布;对流量而言,OLS值和AIC值相差很小,但Weibull分布的 $R^2$ 最大,因此选择Weibull分布作为流量的最优边缘分布;对降雨而言,OLS和AIC值差异较小,而P-III分布的 $R^2$ 最大,且K-S检验 $D$ 值最小, $P$ 值最大,因此选择P-III分布作为降雨的最优边缘分布。

表2 边缘分布拟合和检验

Tab. 2 Marginal distribution fitting and testing

水文变量	边缘分布	K-S 检验			OLS	$R^2$	AIC
		$H$	$P$	$D$			
潮位/m	P-III	0	0.99	0.08	1.18	0.78	17.09
	GEV	0	0.88	0.10	1.19	0.74	17.35
	Lognormal	0	0.21	0.18	1.22	0.90	17.23
	<b>Weibull*</b>	<b>0</b>	<b>0.06</b>	<b>0.22</b>	<b>1.21</b>	<b>0.95</b>	<b>16.69</b>
	Gamma	0	0.16	0.19	1.22	0.91	17.39
流量/( $m^3 \cdot s^{-1}$ )	P-III	0	0.96	0.08	21 285.10	0.80	663.74
	GEV	0	0.92	0.09	21 285.10	0.78	663.74
	Lognormal	0	0.98	0.08	21 285.11	0.82	661.74
	<b>Weibull*</b>	<b>0</b>	<b>0.62</b>	<b>0.13</b>	<b>21 285.13</b>	<b>0.89</b>	<b>661.74</b>
	Gamma	0	0.85	0.10	21 285.12	0.86	661.74
	P-III*	<b>0</b>	<b>0.98</b>	<b>0.08</b>	<b>70.24</b>	<b>0.79</b>	<b>286.62</b>
降雨/mm	GEV	0	0.92	0.09	70.23	0.71	286.62
	Lognormal	0	0.61	0.13	70.25	0.66	284.63
	Weibull	0	0.97	0.08	70.24	0.75	284.62
	Gamma	0	0.98	0.08	70.24	0.76	284.62

以流量与降雨量为例,开展两变量联合分布拟合和检验。选用Clayton Copula、Frank Copula、Gumbel Copula函数分别进行拟合,各函数的参数及拟合优度检验见表3。结果表明:3种Copula函数均通过K-S检验,其中Clayton Copula函数因其OLS、AIC值最小、 $R^2$ 值最大被确定为最优函数。为进一步验证模型可靠性,绘制Clayton Copula函数的理论联合分布概率与经验联合分布概率拟合图,见图8a。

表3 流量、降雨联合分布拟合和检验

Tab. 3 Joint distribution fitting and testing of flow and rainfalls

函数类型	K-S 检验			OLS	$R^2$	AIC
	$H$	$P$	$D$			
<b>Clayton Copula*</b>	<b>0</b>	<b>0.96</b>	<b>0.12</b>	<b>0.16</b>	<b>0.98</b>	<b>-196.47</b>
Frank Copula	0	0.40	0.21	0.27	0.98	-183.34
Gumbel Copula	0	0.81	0.15	0.23	0.98	-188.41

结果显示,数据点均匀分布在 $45^\circ$ 线附近,表明理论联合分布概率与经验联合分布概率拟合较好。因此,选择 Clayton Copula 为最优联合分布函数,并

绘制基于 Clayton Copula 的流量与降雨量的联合分布概率图,见图 8b。

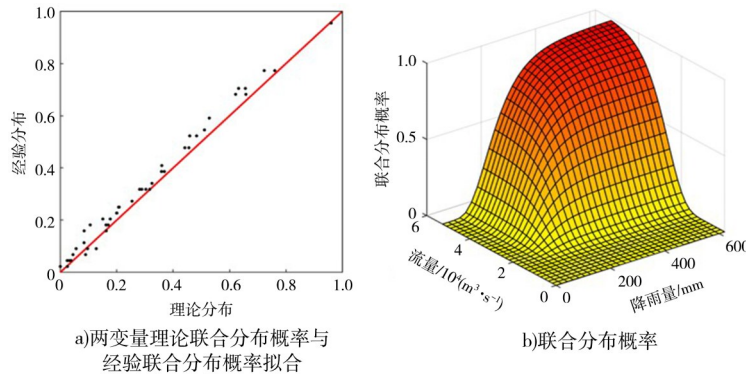


图 8 基于 Clayton Copula 函数的流量与降雨量组合概率分析

Fig. 8 Combined probability analysis of flow and rainfall based on Clayton Copula function

同理,可确定潮位和降雨量的最优联合概率函数为 Frank Copula,潮位与流量的最优联合概率函数也为 Frank Copula。接着基于优选的 Copula 函数计算潮位、降雨量与流量两变量的联合分布的 Kendall 重现期,并绘制重现期分布图和等值线图。

3.3.1 潮位与降雨量联合分布重现期

根据潮位和降雨量二维 Frank Copula 联合分布概率,计算出各重现期(表 4)并绘制 2、5、10、20、50 和 100 年等值线(图 9)。

表 4 潮位与降雨量 Frank Copula 联合分布重现期  
Tab. 4 Return period of joint distribution of tide levels and rainfall using Frank Copula

单位:a

重现期	$T_{OR}$	$T_{Kendall}$	$T_{AND}$
2	1.49	2.34	3.05
5	3.09	8.45	13.17
10	5.64	25.53	44.03
20	10.67	85.90	158.29
50	25.70	476.94	921.03
100	50.71	1 828.52	3 592.01

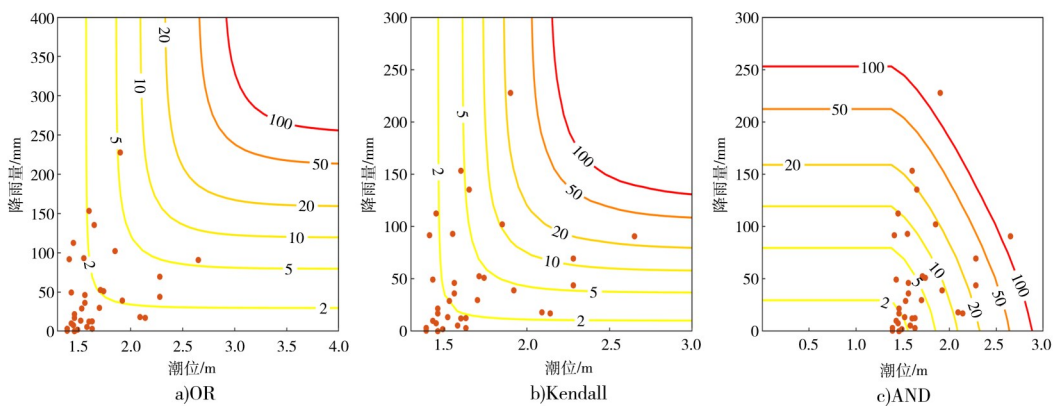


图 9 流量与降雨量 Frank Copula 联合分布“OR”“Kendall”和“AND”重现期等值线

Fig. 9 “OR”, “Kendall”, and “AND” return period contour maps of joint distribution of flow rate and rainfall using Frank Copula

3.3.2 潮位与流量联合分布重现期计算

根据潮位和流量二维 Frank Copula 联合分布概

率,计算出各重现期(表 5)并绘制 2、5、10、20、50 和 100 年等值线(图 10)。

3.3.3 流量与降雨量联合分布重现期  
根据流量和降雨量二维 Clayton Copula 联合分

布概率,计算出各重现期(表6)并绘制2、5、10、20、50和100年等值线(图11)。

表5 潮位与流量Frank Copula联合分布重现期

表6 流量与降雨量Clayton Copula联合分布重现期

Tab. 5 Return period of joint distribution of tide levels and flow rate using Frank Copula

Tab. 6 Return period of joint distribution of flow rate and rainfall using Clayton Copula

单位:a

重现期	$T_{OR}$	$T_{Kendall}$	$T_{AND}$
2	1.36	2.46	3.81
5	2.82	12.26	22.13
10	5.31	45.14	85.68
20	10.31	172.81	336.60
50	25.30	1 051.12	2 079.95
100	50.30	4 165.95	8 287.47

单位:a

重现期	$T_{OR}$	$T_{Kendall}$	$T_{AND}$
2	1.35	2.44	3.82
5	2.80	12.61	23.15
10	5.29	47.77	91.65
20	10.28	186.13	364.73
50	25.28	1 145.51	2 272.57
100	50.28	4 558.83	9 080.99

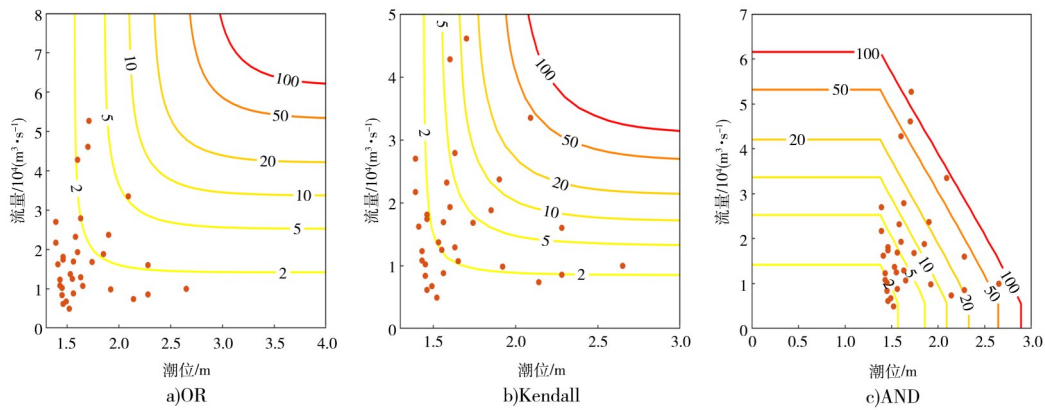


图10 潮位与流量Frank Copula联合分布“OR”“Kendall”和“AND”重现期等值线

Fig. 10 “OR”, “Kendall”, and “AND” return period contour maps of joint distribution of tide level and flow rate using Frank Copula

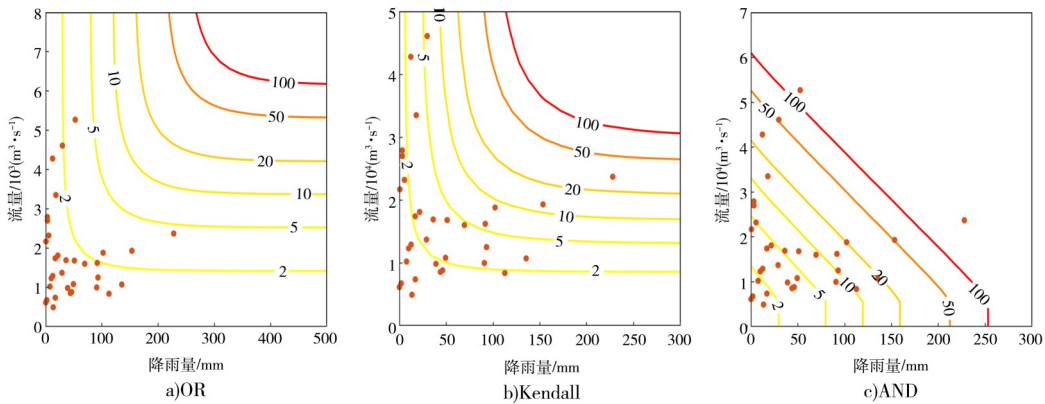


图11 流量与降雨量Clayton Copula联合分布“OR”“Kendall”和“AND”重现期等值线

Fig. 11 “OR”, “Kendall”, and “AND” return period contour maps of joint distribution of flow rate and rainfall using Clayton Copula

由表2、3、4可知,在3种双变量组合重现期中,其大小关系为 $T_{OR} \leq T_{Kendall} \leq T_{AND}$ 。Kendall重现期根据联合概率值划分危险域,避免多变量情况下对危险域或大或小的估计。

因此,采用Kendall重现期计算潮位-降雨量、潮位-流量、流量-降雨量的组合致灾阈值,见表7,结果表明:多致灾因子的组合致灾阈值低于单致灾因子的致灾阈值。例如,在重现期100年时,潮位、流

量和降雨的单变量致灾阈值分别为2.89、61 600  $m^3/s$ 和253.6 mm。潮位和流量的组合致灾阈值分别为2.23 m和38 800  $m^3/s$ ,流量和降雨的组合致灾阈值分别为38 400  $m^3/s$ 和140.8 mm。这一分析表明,传统的单灾种致灾阈值计算方法会低估实际的风险水平,多灾种间的耦合作用会引发显著的危害叠加放大效应。

表7 基于Kendall重现期的风险组合致灾阈值

Tab. 7 Risk combination disaster threshold based on Kendall return period

重现期/a	单变量致灾阈值			潮位-降雨量		潮位-流量		流量-降雨量	
	潮位/m	降雨量/mm	流量/ ( $m^3 \cdot s^{-1}$ )	潮位/m	降雨量/mm	潮位/m	流量/ ( $m^3 \cdot s^{-1}$ )	流量/ ( $m^3 \cdot s^{-1}$ )	降雨量/mm
2	1.57	30.1	14 200	1.54	24.1	1.52	13 300	13 200	22.0
5	1.86	80.2	25 300	1.75	60.4	1.69	19 600	19 500	51.2
10	2.10	119.5	33 700	1.90	86.6	1.82	24 200	24 000	72.3
20	2.33	159.5	42 100	2.04	111.3	1.95	28 700	28 400	93.2
50	2.65	212.9	53 200	2.23	142.1	2.11	34 500	34 100	120.3
100	2.89	253.6	61 600	2.36	164.4	2.23	38 800	38 400	140.8

## 4 结论

在多洪水过程的耦合作用下,沿海城市复合洪水频发,多致灾因子遭遇呈现叠加增强特征。本研究基于统计学方法开展了多致灾因子组合关系识别研究,主要结论如下。

a)采用MK检验和小波分析来探索多灾种致灾因子的趋势以及周期性。研究表明,潮位、降雨、流量极值序列均呈现上升趋势,且研究区处于枯-丰周期中的丰水年周期里。

b)采用Kendall重现期进行了不同重现期下风险组合致灾阈值的计算,由Kendall重现期推算的阈值均小于单变量直接推算的阈值。

本研究聚焦复合洪水风险的叠加组合关系,开展组合致灾阈值计算,研究结果可为复合洪水预报预警提供更有效的科学依据。

## 参考文献:

- [1] 王璐阳,张敏,温家洪,等. 上海复合极端风暴洪水淹没模拟[J]. 水科学进展,2019,30(4):546-555.  
WANG L Y, ZHANG M, WEN J H, et al. Simulation of extreme compound coastal flooding in Shanghai [J]. Advances in Water Science, 2019, 30(4): 546-555. (in Chinese)
- [2] GANGULI P, MERZ B. Extreme coastal water levels exacerbate fluvial flood hazards in Northwestern Europe [J]. Scientific Reports, 2019(9): 11-23.
- [3] 李晓迪,钟鸣,黎学优. 广州市复合洪水及衍生滑坡灾害风险评估及空间迁移规律研究[J]. 人民珠江,2023,44(10):1-12.  
LI X D, ZHONG M, LI X Y. Risk assessment and spatial migration patterns of compound flood and derived landslide disasters in Guangzhou, China [J]. Pearl River, 2023, 44(10): 1-12. (in Chinese)
- [4] 方建,陶凯,牟莎,等. 复合极端事件及其危险性评估研究进展[J]. 地理科学进展,2023,42(3):587-601.  
FANG J, TAO K, MOU S, et al. Progress of research on compound extreme event and hazard assessment [J]. Progress in Geography, 2023, 42(3): 587-601. (in Chinese)

- [5] 黄凯,冯平. 基于非一致性水文序列的水库极限防洪风险复核分析[J]. 水力发电学报,2016,35(1):28-37.  
HUANG K, FENG P. Recheck analysis of reservoir extreme flood control risk using inconsistent hydrological sequences [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2016, 35(1): 28-37. (in Chinese)
- [6] 赵玲玲,杨兴,刘丽红,等. 基于Kendall重现期的华南中小流域洪水峰量联合分布研究[J]. 水土保持通报,2020,40(1):162-169.  
ZHAO L L, YANG X, LIU L H, et al. Joint distribution of flood peaks in medium and small watersheds of South China based on Kendall's return period [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2020, 40(1): 162-169. (in Chinese)
- [7] BRACKEN C, HOLMAN K D, RAJAGOPALAN B, et al. A Bayesian hierarchical approach to multivariate nonstationary hydrologic frequency analysis [J]. Water Resources Research, 2018, 54(1): 243-255.
- [8] 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.
- [9] ZELLOU B, RAHALI H. Assessment of the joint impact of extreme rainfall and storm surge on the risk of flooding in a coastal area [J]. Journal of Hydrology, 2019, 569: 647-665.
- [10] GHANBARI M, ARABI M, KAO S C, et al. Climate change and changes in compound coastal-riverine flooding hazard along the US coasts [J]. Earths Future, 2021, 9(5): 112-123.
- [11] ZHONG M, ZENG T, JIANG T, et al. A Copula-based multivariate probability analysis for flash flood risk under the compound effect of soil moisture and rainfall [J]. Water Resources Management, 2021, 35(1): 83-98.
- [12] 戴振华,罗健,唐慧雅,等. 隽水河上游降雨径流演变特性分析[J]. 中国农村水利水电,2022(7):82-89.  
DAI Z H, LUO J, TANG H Y, et al. Analysis of rainfall and runoff evolution characteristics in the upper reaches of Junshui River [J]. China Rural Water and Hydropower, 2022(7): 82-89. (in Chinese)
- [13] 孙媛. 近50a新兴江流域降水变化的Morlet小波分析[J]. 广东水利水电,2021(3):26-30.  
SUN Y. Morlet wavelet analysis of precipitation changes in Xinxingjiang River Basin in the past 50 years [J]. Guangdong Water Resources and Hydropower, 2021(3): 26-30. (in Chinese)
- [14] 桑燕芳,王中根,刘昌明. 小波分析方法在水文学研究中的应用现状及展望[J]. 地理科学进展,2013,32(9):1413-1422.  
SANG Y F, WANG Z G, LIU C M. Applications of wavelet analysis to hydrology: status and prospects [J]. Progress in Geography, 2013, 32(9): 1413-1422. (in Chinese)
- [15] SALVADORI G, DURANTE F, DE MICHELE C. Multivariate return period calculation via survival functions [J]. Water Resources Research, 2013, 49(4): 2308-2311.

## Research on Identification of Multi-Source Risk Coupling Relationships in Compound Flooding

YOU Jingfang<sup>1</sup>, ZHONG Shuhao<sup>1</sup>, WEI Zhixiong<sup>1</sup>, SU Jiaye<sup>1</sup>, SONG Liang<sup>1</sup>, CHEN Junhui<sup>1</sup>, ZHONG Ming<sup>2</sup>

(1. Heyuan Power Supply Bureau of Guangdong Power Grid Co., Ltd., Heyuan 517000, China; 2. School of Geography and Planning, Sun Yat-Sen University, Guangzhou 510275, China)

**Abstract:** Coastal cities frequently suffer from flood disasters, which are often driven not by a single hazard but by the synergistic effects of multiple interacting factors. Under the changing environment, the temporal and spatial scope of compound disasters has shown a trend of expanding year by year, and their disaster combination and diffusion effects pose a major threat to regional sustainable development. To explore the risk coupling relationships of compound flooding under changing environments, this study employed the Mann-Kendall test and wavelet analysis to assess the trends and periodicities of hydrological series. The results indicate that: ① extreme values of tide level, rainfall, and discharge exhibit increasing trends, and the driving factors are likely to lead to an upward trend in regional hydro-meteorological elements. ② The overall hydrological regime is currently in a wet phase of dry-wet cycles. With TL as an example, the main period of the annual maximum TL sequence at the Denglongshan Station is 22 years, and the subperiods are 5 and 10 years. In the contour diagram of the real part of the wavelet coefficient, negative and positive values in the figure represent low and high TLs, respectively. On the 22-year scale, five oscillations of alternating low and high TLs, including three

periods of high TLs and three periods of low TLs, are present. On the 5-year scale, there are 20 oscillations of alternating high and low TLs, including 10 periods each of high and low TLs. On the 10-year scale, 13 oscillations of alternating low and high TLs are observed, including six periods of high TLs and seven periods of low TLs, respectively. Additionally, with the combined effect of runoff-tidal dynamics, the compounding of multiple factors will amplify their superimposed impacts; Kendall return periods are applied to compute the compound hazard thresholds of multi-driver flooding. Based on the characteristics of the coupling of multiple disasters in composite floods, a mathematical model of composite disaster risk combination and diffusion pattern integrating the Copula function is constructed by statistical methods, revealing the interaction relationship and diffusion pattern between multiple disasters in composite floods. For compound flooding, the Copula function is first used to establish a two-variable joint distribution probability model, and the Kendall recurrence period under the same recurrence level is calculated; then, the combined disaster threshold of multiple disaster factors is deduced. Results show that: ① The joint hazard threshold of multi-driver events is lower than that of single-factor extremes, indicating that interactive amplification effects among multiple drivers expand the impact scope of compound floods compared to univariate extremes. ② When the return period is 100 years, the single hazard thresholds for tide level, discharge, and precipitation are 2.89 m, 61 600 m<sup>3</sup>/s, and 253.6 mm, respectively. The combined hazard thresholds of tide level and precipitation are 2.36 m and 164.4 mm, and the combined hazard thresholds of tide level and discharge are 2.23 m and 38 800 m<sup>3</sup>/s. This study focuses on the superimposed coupling mechanisms of compound flood risks and quantifies their joint hazard thresholds, providing a more robust scientific basis for compound flood early warning systems.

**Keywords:** compound flooding; hazard threshold; Kendall return period; horological trend; periodicity

(责任编辑:高天扬)