

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2025.02.009

基于 C-Vine Copula 的城市洪涝多致灾因子遭遇风险分析

薛联青^{1,2}, 潘桐¹, 刘远洪³

(1. 河海大学水文水资源学院, 江苏 南京 210098; 2. 皖江工学院水利工程学院, 安徽 马鞍山 243031;
3. 河海大学农业科学与工程学院, 江苏 南京 210098)

摘要:基于 C-Vine Copula 构建了无锡市主城区历时分别为 1、3、7 d 的降水量、水位及上游流量 3 种致灾因子的高维联合分布模型,采用相关性系数和尾部依赖系数验证变量组合间复杂的非线性结构和依赖性,计算不同遭遇情景下变量组合的联合遭遇风险率和联合遭遇重现期,探讨了多致灾因子遭遇对城市洪涝灾害的协同影响和动态反馈。结果表明:无锡市主城区 7 d 三变量组合相关性最高,尤其在高极值风险上表现较强的依赖性,其上尾依赖系数高达 0.6718;三变量组合的联合遭遇风险率最大,双变量组合次之,单变量最小,当降水量、水位、流量重现期均为 10 a 时,7 d 三变量组合的联合遭遇风险率为 21.26%,双变量组合的联合遭遇风险率分别为 18.39%、18.37%、13.27%;对于三变量组合的联合重现期缩减率,1 d 三变量组合主要受上游流量的影响,最大联合重现期缩减率为 29.2%,3、7 d 三变量组合主要受降水量的影响,最大联合重现期缩减率分别为 29.4%、32.7%。

关键词:城市洪涝;致灾因子;C-Vine Copula;尾部依赖性;联合遭遇风险率;联合遭遇重现期;无锡市
中图分类号:P339 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-6933(2025)02-0077-11

Encounter risk analysis of multi-hazard factors of urban flood based on C-Vine Copula//XUE Lianqing^{1,2}, PAN Tong¹, LIU Yuanhong³(1. College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. School of Hydraulic Engineering, Wanjiang University of Technology, Maanshan 243031, China; 3. College of Agriculture Science and Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: Based on the C-Vine Copula, a high-dimensional joint distribution model was constructed for three hazard factors in the main urban area of Wuxi City, including precipitation, water level, and upstream flow, with durations of 1, 3, and 7 d. The complex nonlinear structures and dependencies between variable combinations were verified using correlation coefficients and tail dependence coefficients. The joint encounter risk rates and joint encounter return periods of variable combinations under different scenarios were calculated to explore the synergistic effects and dynamic feedback of multi-disaster-causing factors on urban flood disasters. The results show that the 7d three-variable combination in the main urban area of Wuxi City has the highest correlation, particularly demonstrating strong dependence in high extreme-value risks, with an upper tail dependence coefficient as high as 0.6718. The joint encounter risk rate is the highest for the three-variable combination, followed by the two-variable combination, and the lowest for the single-variable combination. When the return periods of precipitation, water level, and flow are all 10 a, the joint encounter risk rate for the 7d three-variable combination is 21.26%, while those for the two-variable combinations are 18.39%, 18.37%, and 13.27%, respectively. For the joint return period reduction rate of the three-variable combination, the 1 d combination is mainly influenced by upstream flow, with a maximum joint return period reduction rate of 29.2%, while the 3d and 7d combinations are primarily influenced by precipitation, with maximum joint return period reduction rates of 29.4% and 32.7%, respectively.

Key words: urban flood; hazard factor; C-Vine Copula; tail dependency; joint encounter risk rate; joint encounter recurrence period; Wuxi City

基金项目:江苏省水利科技项目(2024045);国家重点研发计划项目(2023YFC3206804);新疆生产建设兵团科技合作项目(2022BC001)
作者简介:薛联青(1973—),女,教授,博士,主要从事生态水文与环境水文研究。E-mail:lqxue@hhu.edu.cn
通信作者:刘远洪(1991—),男,助理研究员,博士,主要从事生态水文研究。E-mail:lyh910926@163.com

洪涝灾害是世界范围内高频发生的自然灾害。自 1998 年特大洪水后,我国持续投入水利工程建设,有效提升了流域防洪标准,减小了流域性洪涝灾害的威胁^[1]。但 21 世纪以来,受城市化进程加快和全球极端气候变化影响,城市区域的洪涝灾害事件频发,严重干扰了社会经济可持续发展,对人民生命财产造成严重威胁。因此,城市洪涝灾害已成为现代全球广泛关注的重大挑战之一^[2]。城市洪涝灾害作为一种受多变量影响的随机水文事件,具有显著的不确定性和随机性^[3]。灾害的形成受多种致灾因子的影响^[4],如城市历经短历时强降雨或长历时降雨、水利工程建设导致城市内部水位增高、上游客水来袭时城市外排能力不足等^[5]。因此,明确各致灾因子之间的遭遇关系,通过概率量化分析不同程度的城市灾害事件发生的可能性,有助于城市管理者清晰地了解灾害的风险,对保障城市水安全具有重要意义^[6]。

在描述复杂的城市洪涝事件时,单因素无法对其进行准确描述,需选取存在相关关系的多个变量对其进行描述^[7]。Copula 函数可以将具有依赖关系且符合不同边缘分布的多个随机变量连接起来建立联合分布函数,并在此基础上研究该联合分布函数在不同重现期下的条件概率。目前,对复杂水文事件的多变量联合分析取得了一定的研究成果,国内大部分研究集中在基于 Copula 函数的雨潮分析或暴雨、外江水位等双变量对沿海、滨江城市洪涝的影响^[8]。例如,武传号等^[9]基于 Archimedean Copula 建立了广州市短历时强降雨和高潮位联合概率模型,得到了雨潮组合风险概率及其重现期;李晓英等^[10]依据区间暴雨和外江高水位的不同步性,采用非对称 Copula 探究以暴雨为主、以洪水为主的两组合中沿江城市雨洪遭遇风险规律;许翰卿等^[11]采用 Copula 函数构建了中国沿海城市因极端降雨和高潮位引发的复合灾害联合分布模型,揭示了中国沿海地区雨潮复合灾害的时空变化规律,为沿海地区复合灾害预警提供了定量化评估;周子滢等^[12]基于 C-Vine Copula 对沿海城市台风灾害链事件进行了联合概率分布研究,构建了舟山市台风灾害事件中“风-雨-潮”3 种致灾因子间的复杂依赖关系和动态变化机制;Xiao 等^[13]利用 Copula 函数构建了总降水量和峰值降水量的联合概率分布模型,并结合马尔可夫链得到城市短时暴雨的联合风险概率和状态演化特征;Sharma 等^[14]基于藤 Copula 建立了极端降雨特征量的多元分布,探究雨量、雨强等特征量之间相互作用关系,并提供了可用于构建随机降雨模型 Bayesian 工具。由此可见,Copula 函数是构建

多变量水文分析计算模型的有效工具,具有良好的适用性。

近年来,将 Copula 函数应用于复合洪涝灾害事件的分析较多,但基于高维 Copula 函数考虑多致灾因子组合对我国平原城市洪涝事件影响的研究仍较少。因此,本文利用 C-Vine Copula 构建多变量联合分布,考虑历时分别为 1、3、7 d 的降水量、水位及上游流量 3 种城市洪涝致灾因子的相关关系,利用尾部依赖系数验证致灾因子间的复杂相依性,量化多致灾因子遭遇风险,以期为城市防洪排涝规划的制定和洪涝灾害的评估提供参考。

1 研究区概况与数据来源

1.1 研究区概况

无锡市位于长江中下游的太湖流域,北依长江、南濒太湖、西接常州、东临苏州,是典型的平原城市。无锡市梅雨期经常发生长历时降雨,与上游洪水压力、城市水位壅高等多因素叠加,导致主城区面临暴雨致灾的风险。因此,选取无锡市主城区为研究区,包括梁溪区、锡山区、滨湖区等,研究区概况见图 1。研究区境内水系发达,河网密布,降水充沛,受海洋季风影响,春夏之交多梅雨,夏末初秋有台风,强台风、长历时梅雨、短历时强降雨是造成研究区洪涝灾害的主要原因^[15]。例如,2016 年无锡市进入超长梅雨季,长达 32 d;2020 年恰逢长江大洪水,上游支流来水猛增,无锡市内部河湖水位迅速上涨;2021 年受台风及 7 次强降雨影响,无锡市河湖库水位全面超警超限,无锡站汛期最高水位达 4.81 m。此外,研究区人口密集,城市用地和不透水区快速扩张,当短时间内降水量超过城市外排能力,城区内部河流水位迅速雍高,就有发生洪涝灾害的危险^[16]。

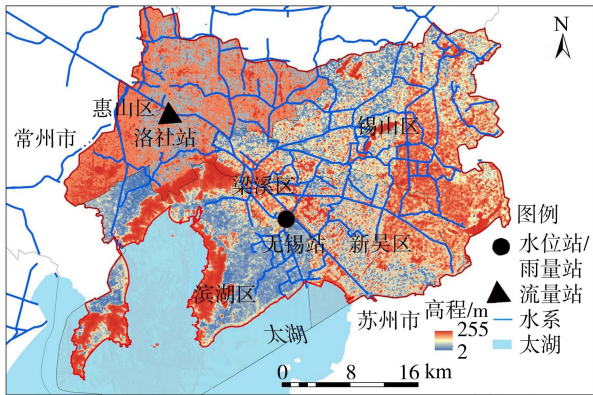


图 1 研究区概况

Fig. 1 Overview of study area

1.2 数据来源

降雨资料和水位资料来源于无锡站,无锡站位于江苏省无锡市仙蠡桥南水利枢纽,地处无锡市主

要行洪通道——京杭大运河河段,是能够反映研究区内部水位变化的主要控制点。流量资料来源于洛社站,洛社站位于无锡市惠山区洛社镇,地处大运河河段无锡市上游,常年为西北向东南流向,能够反映研究区受上游来水压力。两个站点均位于研究区内部,能够较好地表征城市内部水文特征的变化,其水文数据均已通过一致性检验。

降雨资料采用 2000—2021 年逐日数据,定义降水量不小于 1 mm 为湿日,设研究期内湿日 95%分位降水量平均值为阈值,基于该阈值选取 1、3、7 d 降水量构成 3 组降水量时间序列 U_{1d} 、 U_{3d} 、 U_{7d} ,用于表征不同历时的降雨情况;基于逐日水位资料选取 1、3、7 d 降水量对应的水位构成 3 组水位时间序列 V_{1d} 、 V_{3d} 、 V_{7d} ,用于表征不同历时的城市内水位情况;基于逐日流量资料选取 1、3、7 d 降水量对应流量构成 3 组流量时间序列 W_{1d} 、 W_{3d} 、 W_{7d} ,用于表征不同历时的上游来水情况。

2 研究方法

2.1 C-Vine Copula

Copula 函数是用于描述多随机变量之间的依赖结构的数学工具^[17]。常见的 Copula 函数如表 1 所示。二维 Copula 函数能够描述两个随机变量之间的相依性,但在非线性关系上缺乏灵活性^[18],因此 Joe^[19]提出 Vine Copula 概念,Vine Copula 能够更加全面地捕捉两个以上随机变量之间依赖关系,其通过构建多层次藤结构来分解多变量联合分布,将 n 维多元概率分布分解为 $n(n-1)/2$ 个二维双变量概率分布,且可以在考虑核心变量的情况下量化遭遇风险,更加精准地计算不同遭遇情景下的联合概率。

C-Vine Copula 使用树状结构来表示变量之间的依赖关系,其中最重要的变量位于树的根节点,其他变量依次连接到根节点和中间节点^[19]。本文选取降水量 U 为中心变量,第一层树 1 以 U 为根节点,分别与水位 V 、上游流量 W 配对形成边 (U,V) 、 (U,W) ,构建 Copula 函数 $C(U,V)$ 、 $C(U,W)$ 描述其二维依赖关系;第二层树 2 中在给定 U 的条件下,

形成 V 和 W 之间的边 $(V,W|U)$,构建 $C(V,W|U)$ 函数描述三维依赖关系。具体结构如图 2 所示。

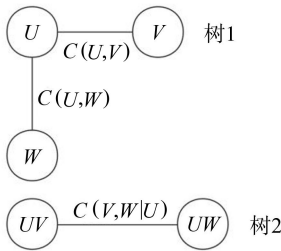


图 2 C-Vine 藤结构
Fig. 2 C-Vine vine structure

对于 n 维 C-Vine 结构,其联合概率密度函数可以表示为

$$f(x_1, x_2, \dots, x_n) = \prod_{k=1}^n f_k(x_k) \prod_{i=1}^{n-1} \prod_{j=1}^{n-i} C_{j,i+j|1:(i-1)} [F(x_j | x_1, x_2, \dots, x_{j-1}), F(x_{i+j} | x_1, x_2, \dots, x_{j-1})] \quad (1)$$

式中: $f(\cdot)$ 为联合概率密度函数; $f_k(x_k)$ 为随机变量 x_k 的边缘函数; $C_{i,i+j|1:(i-1)}(\cdot)$ 为每个节点的 Copula 概率密度函数; i 为树的序列; j 为边的序列; $F(\cdot|\cdot)$ 为条件分布函数。

采用 Kolmogorov-Smirnov (K-S) 检验、赤池信息准则 (Akaike information criterion, AIC)、修正赤池信息准则 (Akaike information criteria corrected, AICc)、贝叶斯信息准则 (Bayesian information criterion, BIC) 和对数似然函数 (loglikelihood, LogL) 等进行 Copula 函数的拟合精度检验,从而优选出变量的最优拟合函数。其中,AIC、BIC 和 AICc 均遵循值越小模型越优的判定原则,LogL 则为绝对值越大模型越优。

2.2 尾部依赖性

Kendall、Pearson、Spearman 相关系数是描述线性分布或椭圆分布的最佳选择,但对于多变量非椭圆分布的描述,这类相关系数具有一定的误导性^[20]。因此,本文在这 3 种相关系数的基础上,采用尾部依赖性来描述多变量在其分布尾部的相关程度^[21],即变量在出现极值的情况下的相关性。尾部依赖性用上尾依赖系数 λ_U 和下尾依赖系数 λ_L 来表征,其计算公式为

$$\lambda_U = \lim_{q \rightarrow 1^-} P[X > f_X^{-1}(q) | Y > f_Y^{-1}(q)] \quad (2)$$

表 1 常见的 Copula 函数
Table 1 Common Copula functions

Copula 函数	表达式	说明
Frank Copula	$C(u, v; \theta) = -\frac{1}{\theta} \left[1 + \frac{(e^{-\theta u} - 1)(e^{-\theta v} - 1)}{(e^{-\theta} - 1)} \right]$	$\theta \in R$
Gaussian Copula	$C(u, v) = \varphi[\varphi^{-1}(u)\varphi^{-1}(v)]$	φ 为标准正态分布
Joe Copula	$C(u, v; \theta) = 1 - [(1-u)^\theta + (1-v)^\theta + (1-u)^\theta(1-v)^\theta]^{1/\theta}$	$\theta \in [1, \infty)$
BB1 Copula	$C(u, v; \theta, \delta) = \{1 + [(u^{-\theta} - 1)^\delta + (v^{-\theta} - 1)^\delta]^{1/\delta}\}^{-1/\theta}$	$\theta > 0; \delta \geq 1$

注: $C(\cdot)$ 为 Copula 函数; u, v 为边缘分布概率; θ 为相关性参数,描述变量间相关性; δ 为形态参数,决定变量间尾部依赖性及非线性关系。

$\lambda_L = \lim_{q \rightarrow 0^+} P[X \leq f_X^{-1}(q) \mid Y \leq f_Y^{-1}(q)]$ (3)

式中: X, Y 为随机变量; q 为 0~1 的随机概率值; f_X, f_Y 为 X, Y 边缘分布函数; $f_X^{-1}(q), f_Y^{-1}(q)$ 为 X, Y 的分位数函数; $P(\cdot)$ 为概率函数。 $\lambda_U = 0$ 或 $\lambda_L = 0$ 说明在出现极高值或极低值的情况下两变量相互独立; $\lambda_U = 1$ 或 $\lambda_L = 1$ 说明在出现极高值或极低值的情况下两变量同时发生; $0 < \lambda_U < 1$ 或 $0 < \lambda_L < 1$ 则说明在出现极高值或极低值的情况下两变量具有相关性, 参数值越大相关性越强。

2.3 多变量联合遭遇风险率及联合遭遇重现期

假定 $X_1, X_2, \dots, X_n$ 为具有相关关系的变量序列, 本文中指降水量、水位、流量序列; $x_1, x_2, \dots, x_n$ 为变量对应的设计值序列, 本文中指特定重现期下降水量、水位、流量的设计值序列。联合遭遇风险率为降水量、水位、流量序列超过设计值的概率, 表达式见式(4)。在得到联合遭遇风险率的基础上, 计算降水量、水位、流量序列的联合遭遇重现期, 计算公式见式(5)。

$$P_L(X_1 > x_1, X_2 > x_2, \dots, X_n > x_n) = 1 - C[f_1(x_1), f_2(x_2), \dots, f_n(x_n)] \quad (4)$$

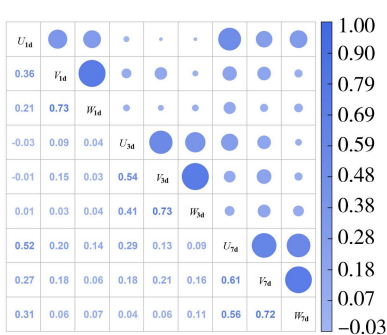
$$T(X_1, X_2, \dots, X_n) = 1 / \{1 - C[f_1(x_1), f_2(x_2), \dots, f_n(x_n)]\} \quad (5)$$

式中: $P_L(\cdot)$ 为联合遭遇风险率函数; $T(\cdot)$ 为联合遭遇重现期函数。

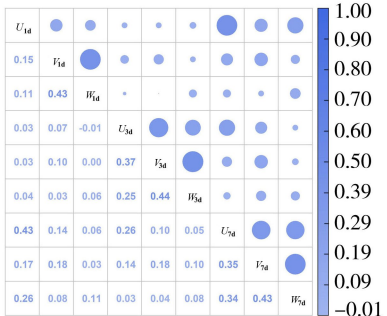
3 结果与分析

3.1 相关性检验

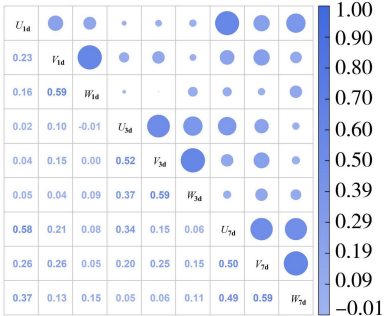
选取研究区不同历时 1、3、7 d 的降水量、水位及上游流量作为 3 种城市洪涝致灾因子, 计算 3 种致灾因子的 Kendall 系数 τ 、Pearson 系数 γ 和 Spearman 系数 ρ , 结果见图 3。由图 3 可见, 对角线上表现出较高的相关性, 且同历时条件下的三变量组合呈明显的正相关关系, 其中 (U_{7d}, V_{7d}, W_{7d}) 组合表现出的相关性最强, 而 (U_{1d}, V_{1d}, W_{1d}) 组合表现出的相关性最弱; $\gamma(U_{1d}, V_{1d})$ 为 0.36, $\gamma(U_{3d}, V_{3d})$ 为 0.54, $\gamma(U_{7d}, V_{7d})$ 为 0.61, 可见降水量与水位的相关性随着历时的增加逐渐增强; $\gamma(V_{1d}, W_{1d})$ 为 0.73, $\gamma(V_{3d}, W_{3d})$ 为 0.73, $\gamma(V_{7d}, W_{7d})$ 为 0.72, 可见研究区上游来水与城市河流水位之间具有较高的相关性。一旦汛期降水量增加, 大运河上游流量显著增加, 导致研究区内水量迅速汇集到河流, 下游的研究区河道内的水位将会随之上升。因此降水量、水位、上游流量作为研究区暴雨内涝灾害事件的重要致灾因子, 之间存在复杂的依赖关系。



(a) Kendall 相关系数



(b) Pearson 相关系数



(c) Spearman 相关系数

图 3 致灾因子的相关系数

Fig. 3 Correlation coefficient of hazard factors

3.2 边缘分布函数优选

Copula 函数能够灵活地连接不同的边缘分布, 摆脱了联合多变量时边缘函数必须相同的限制^[22]。选取 Lognormal、Inverse Gaussian、Birnbaum Saunders、Gamma、GEV (generalized extreme value)、Loglogistic、Nakagami、Logistic、Rician、Normal、t、Weibull、Extreme value、GPD (generalized Pareto distribution)、Rayleigh、Exponential 等 16 种边缘分布函数, 对研究区 2000—2021 年历时分别为 1、3、7 d 的降水量、水位及上游流量的单变量进行拟合。采用 K-S 非参数检验法对所有边缘分布函数进行初步检验, 并对通过 K-S 检验的边缘分布函数计算其 LogL、BIC、AIC、AICc 检验统计量, 结果如表 2 所示。根据检验统计量的判定原则, 优选出 9 个单变量的边缘分布函数。

利用经验分布函数对优选出的边缘函数进行验证, 如图 4 所示, 图中散点表示经验分布频率, 曲线表示优选出的边缘函数。由图 4 可见, 对于所有单

单变量	Copula 函数	LogL	BIC	AIC	AICc
U_{1d}	GEV	1204.5	2405.8	2394.9	2395.0
	GPD	1195.9	2408.6	2397.7	2397.8
	Inverse Gaussian	1201.9	2415.0	2407.7	2407.8
V_{1d}	GEV	63.5	124.0	113.1	113.1
	Loglogistic	60.6	132.4	125.2	125.2
	t	62.6	142.1	131.2	131.3
W_{1d}	Nakagami	1187.0	2365.3	2358.0	2358.1
	GPD	1179.5	2375.8	2364.9	2365.0
	Weibull	1183.5	2378.2	2371.0	2371.0
U_{3d}	Inverse Gaussian	1394.7	2799.4	2792.1	2792.1
	GEV	1391.3	2799.5	2788.6	2788.7
	Birnbaum Saunders	1394.0	2800.6	2793.3	2793.4
V_{3d}	GEV	107.9	192.7	181.7	181.8
	Loglogistic	96.2	203.7	196.4	196.4
	Lognormal	100.4	212.0	204.7	204.8
W_{3d}	GEV	1316.6	2610.1	2599.2	2599.2
	t	1301.0	2618.9	2608.0	2608.1
	Logistic	1307.6	2626.4	2619.1	2619.2
U_{7d}	Inverse Gaussian	1583.4	3172.3	3164.9	3164.9
	Birnbaum Saunders	1580.6	3172.6	3165.2	3165.2
	Lognormal	1581.5	3174.4	3167.0	3167.0
V_{7d}	GEV	64.5	86.2	75.1	75.1
	Loglogistic	61.7	134.8	127.4	127.4
	t	65.5	148.1	137.0	137.1
W_{7d}	GEV	1393.0	2803.2	2792.0	2792.1
	t	1393.2	2803.6	2792.4	2792.5
	Logistic	1409.0	2829.5	2822.1	2822.1

变量,经验分布频率散点均匀散落在边缘函数曲线周围,表明选取的边缘分布函数均具有良好的拟合效果。因此,确定 U_{1d} 、 V_{1d} 、 V_{3d} 、 W_{3d} 、 V_{7d} 、 W_{7d} 的最优拟合边缘分布函数为 GEV, W_{1d} 的最优拟合边缘分布函数为 Nakagami, U_{3d} 、 U_{7d} 的最优拟合边缘分布函数为 Inverse Gaussian。

3.3 二维 Copula 函数优选

要建立三维 C-Vine Copula,需先针对双变量组合建立二维 Copula 函数联合分布,完成藤结构第一层树 1 和双边 $C(U,V)$ 、 $C(U,W)$ 的构建^[23]。首先,创建双变量 Copula 家族,本文 Copula 家族包括 Frank Copula、joe Copula、BB1、rotated BB1 0° (90°、180°、270°) 等 20 种多元 Copula 函数。其次,基于该家族,利用 AIC、BIC、LogL 准则选取不同双变量组合的最优 Copula 函数,并计算其尾部依赖系数,结果如表 3 所示。由表 3 可见, (U_{1d}, V_{1d}) 和 (U_{1d}, W_{1d}) 的最优 Copula 函数为 Frank Copula 和 Gaussian Copula,这两种函数本身对称且不具备尾部依赖性^[24],因此其上、下尾依赖系数为 0。 (V_{1d}, W_{1d}) 、 (U_{3d}, V_{3d}) 、 (U_{3d}, W_{3d}) 的最优 Copula 函数均为 BB8 Copula 函数,其为典型的双参数函数,两个参数分别控制依赖性的强度和方向,从而可以更加灵活地捕捉变量间的复杂依赖性^[25]。其中, (V_{1d}, W_{1d}) 的上、

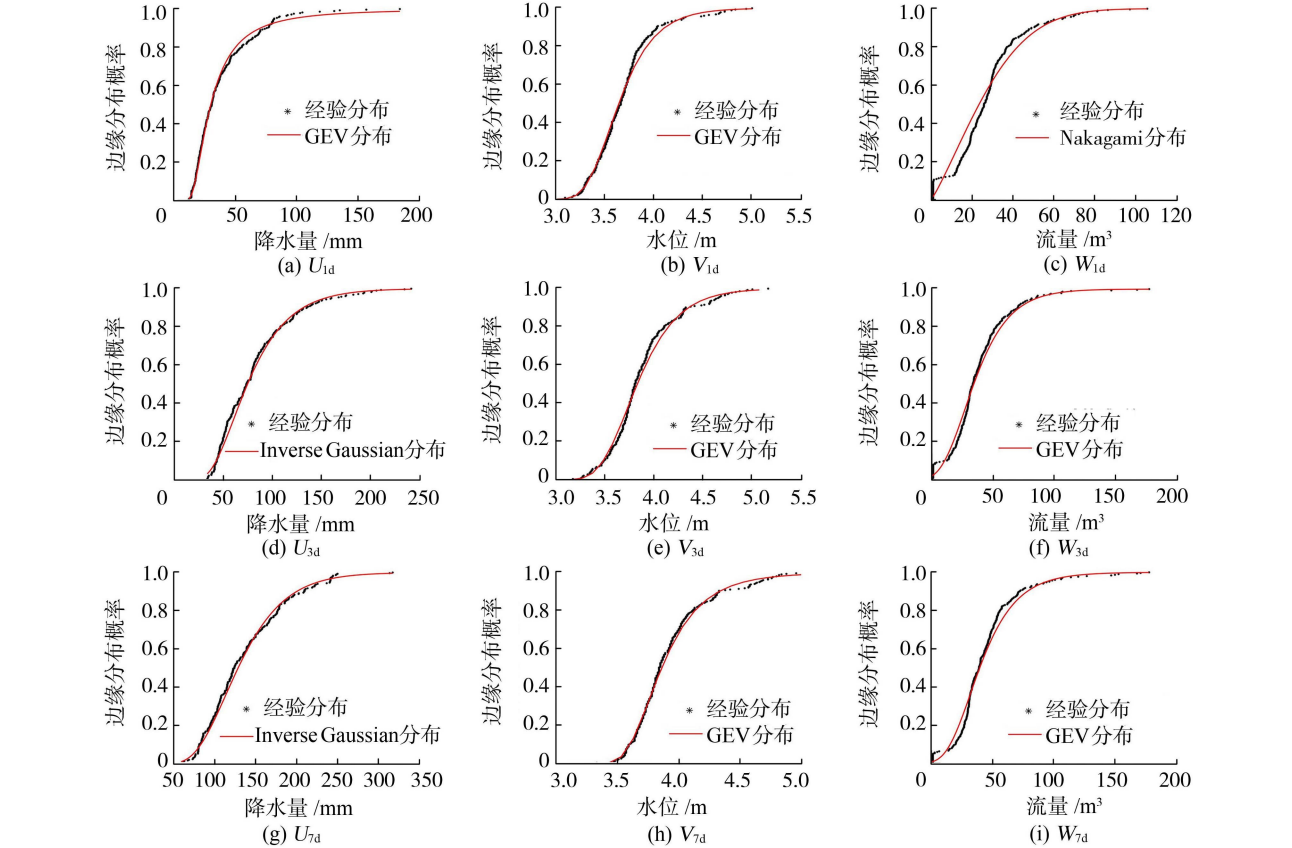


图 4 单变量优选边缘分布函数验证结果

Fig. 4 Verification results of univariate optimal marginal distribution function

表 3 双变量组合二维 Copula 函数检验统计量及尾部依赖系数

Table 3 Test statisticsand tail dependence coefficients of bivariate combinations two-dimensional Copula function						
双变量组合	Copula 函数	AIC	BIC	LogL	λ_L	λ_U
(U_{1d}, V_{1d})	Frank	-12. 29	-8. 66	7. 14	0	0
(U_{1d}, W_{1d})	Gaussian	-7. 91	-4. 28	4. 95	0	0
(V_{1d}, W_{1d})	BB8	-193. 14	-185. 89	98. 57	0	0
(U_{3d}, V_{3d})	BB8	-91. 07	-83. 77	47. 53	0	0. 263 8
(U_{3d}, W_{3d})	BB8	-46. 28	-38. 98	25. 14	0	0. 102 5
(V_{3d}, W_{3d})	Joe	-259. 02	-253. 37	130. 50	0	0. 688 8
(U_{7d}, V_{7d})	Survival Clayton	-153. 70	-149. 99	77. 85	0	0. 480 7
(U_{7d}, W_{7d})	Survival BB1	-139. 15	-131. 73	71. 58	0. 1978	0. 342 5
(V_{7d}, W_{7d})	Joe	-256. 13	-252. 41	129. 10	0	0. 671 8

下尾依赖系数均为 0,说明历时为 1 d 的情况下水位与流量在出现极值的情况下关联性不强; (U_{3d}, V_{3d}) 的上尾依赖系数为 0. 263 8,说明历时为 3 d 的情况下降水量与水位在出现极高值时表现出一定的相关性; (U_{3d}, W_{3d}) 的上尾依赖系数为 0. 102 5,说明历时为 3 d 的情况下降水量与流量在出现极高值时也存在一定的相关性。 (V_{3d}, W_{3d}) 的最优 Copula 函数为 Joe Copula 函数,其本身特别适用于具有非对称依赖性结构的数据,尤其在捕捉上尾依赖性方面非常敏感,上尾依赖系数达到 0. 688 8,表明历时为 3 d 的情况下水位与流量在出现极高值时有较高的相关性。历时为 1 d 的情况下,变量组合的下尾依赖系数均为 0,这表明研究区内低水位事件和低流量事件并不一定因降水量低而发生,同理低水位事件的发生也并一定由上游低流量导致。历时为 7 d 的情况下, (U_{7d}, V_{7d}) 的最优 Copula 函数为 Survival Clayton Copula 函数,其上尾依赖系数达 0. 480 7; (U_{7d}, W_{7d}) 的最优 Copula 函数为 Survival BB1 Copula 函数,其上尾依赖系数达 0. 342 5、下尾依赖系数达 0. 197 8; (V_{7d}, W_{7d}) 的最优 Copula 函数为 Joe Copula 函数,其上尾依赖系数达 0. 671 8,说明降水量、水位、流量 3 个变量在出现极高值情况下的关联性较高。

利用经验 Copula 函数对双变量组合选取的最优 Copula 函数进行验证,如图 5 所示,图中横轴表示利用经验 Copula 函数计算的双变量组合联合分布概率,纵轴表示利用优选出的 Copula 函数计算的双变量组合联合分布概率。由图 5 可见,所有双变量组合的散点均匀沿对角线分布,可见选取的二维 Copula 函数均可以很好地构建双变量组合的联合分布。

3.4 三维 C-Vine Copula 建立

在建立双变量组合的二维 Copula 函数的基础上,针对 C-Vine Copula 的第二层树 2 结构,计算以降水量为中心节点的条件概率密度^[26],同理,基于

AIC、BIC、LogL 检验的统计量优选出树 2 结构的最优 Copula 函数,最终构建完整的 C-Vine Copula 藤结构,如表 4 所示。由表 4 可见,对于树 2,边 $(V_{1d}, W_{1d}|U_{1d})$ 选取 BB8 Copula 函数进行拟合,其上尾依赖系数为 0. 109 6,与 (V_{1d}, W_{1d}) 的双变量组合的尾部依赖性不同,在考虑降水量的条件下 BB8 Copula 函数捕捉到变量 V_{1d} 和 W_{1d} 在出现极高值时存在一定的相关性;边 $(V_{3d}, W_{3d}|U_{3d})$ 选取 Joe Copula 函数进行拟合,其上尾依赖系数为 0. 607 3,说明在考虑降水量的条件下 Joe Copula 能够捕捉到变量 V_{3d} 和 W_{3d} 之间在出现极高值时存在依赖性,且依赖性表现较强,与 (V_{3d}, W_{3d}) 双变量组合的依赖系数相差不大;边 $(V_{7d}, W_{7d}|U_{7d})$ 选取 BB8 Copula 函数进行拟合,其上尾依赖系数为 0. 357 7,与 (V_{7d}, W_{7d}) 双变量组合相比依赖系数降低,这实际上与选取的 Copula 函数有关,不同的 Copula 函数对尾部依赖性的敏感程度也不尽相同。

3.5 联合遭遇风险率与联合遭遇重现期

3.5.1 二维联合遭遇风险率与联合遭遇重现期

图 6 为双变量组合联合遭遇风险率。由图 6 可见,随着变量边缘分布函数值的增加,其联合遭遇风险随之增大。图 6(a)(b)(c)散点分布较为均匀,图 6(g)(h)(i)的散点沿对角线更加集中,表明历时为 7 d 的双变量组合相关性较为显著,即在历时为 7 d 的情况下,降水量、水位、流量 3 种致灾因子中两两联合遭遇的风险较大。

极端情形发生时仅考虑单变量的重现期存在高估重现期的风险。根据研究区防洪排涝规划标准,对降水量、水位、流量 3 种致灾因子的设计重现期分别设置为 10、20、50 a,计算不同设计重现期组合下 3 种致灾因子的双变量组合联合遭遇重现期,结果如表 5 所示,其中设计重现期为(10 a,10 a,10 a)表示降水量、水位、流量的设计重现期均取 10 a 的情况,以此类推。由表 5 可见,对于不同历时而言,双变量组合的联合遭遇重现期从大到小的顺序依次

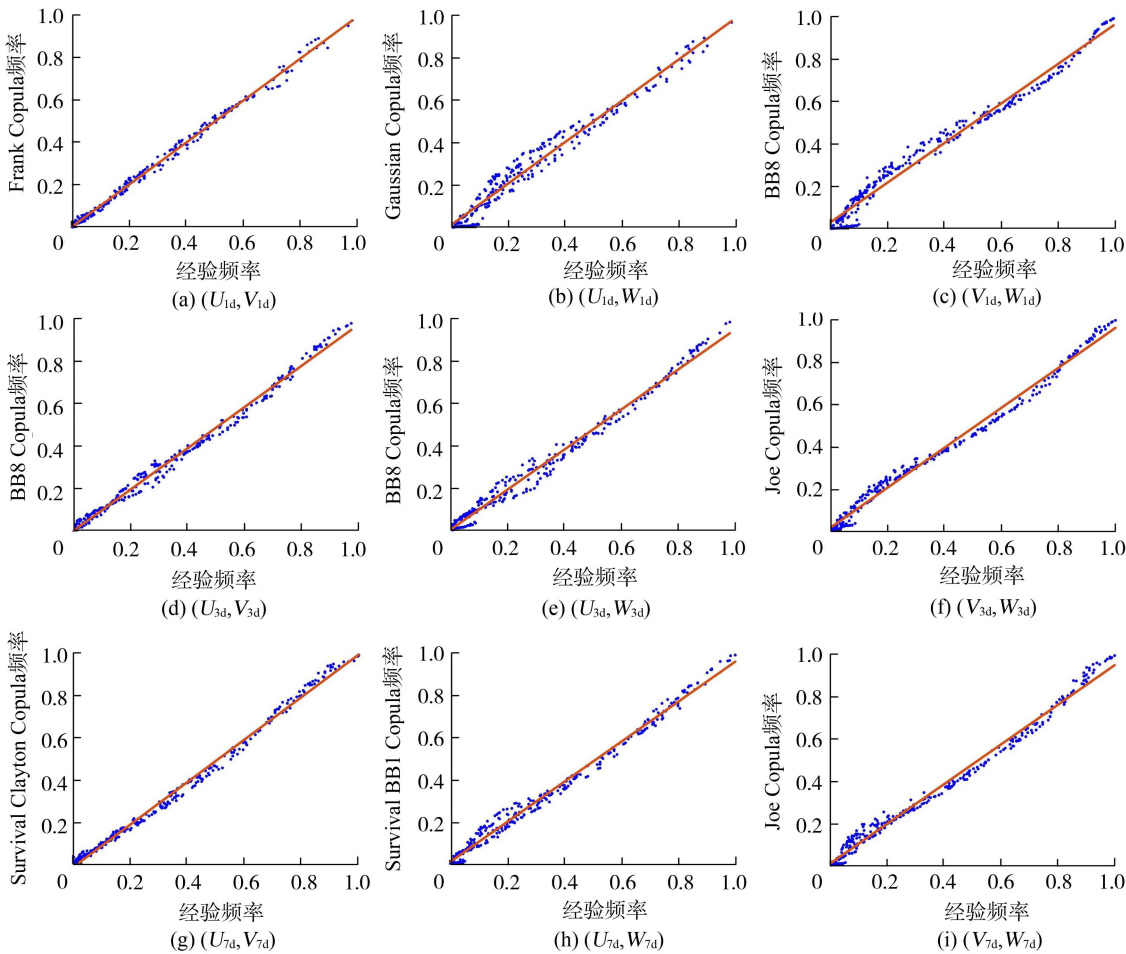


图 5 双变量组合优选二维 Copula 函数验证结果

Fig. 5 Verification results of two-dimensional Copula function for bivariate combinations

表 4 三变量组合 C-Vine Copula 藤结构及尾部依赖系数

Table 4 Three variable combination C-Vine Copula vine structure and tail dependence coefficients

三变量组合	树 1		树 2		λ_L	λ_U
	边 1	Copula 函数	边 2	Copula 函数		
(U_{1d}, V_{1d}, W_{1d})	(U_{1d}, V_{1d})	Frank	$(V_{1d}, W_{1d} U_{1d})$	BB8	0	0.1096
	(U_{1d}, W_{1d})	Gaussian				
(U_{3d}, V_{3d}, W_{3d})	(U_{3d}, V_{3d})	BB8	$(V_{3d}, W_{3d} U_{3d})$	Joe	0	0.6073
	(U_{3d}, W_{3d})	BB8				
(U_{7d}, V_{7d}, W_{7d})	(U_{7d}, V_{7d})	Survival Clayton	$(V_{7d}, W_{7d} U_{7d})$	BB8	0.1458	0.3577
	(U_{7d}, W_{7d})	Survival BB1				

为：1 d 双变量组合、3 d 双变量组合、7 d 双变量组合。

结合图 6 与表 5 进行分析,历时为 7 d 的情况下,10 年一遇降水量与 10 年一遇水位的联合遭遇风险率最大,为 18.39%,对应的联合遭遇重现期为 5.4 a,相比于只考虑单变量重现期缩减了 46%;20 年一遇降水量与 20 年一遇水位的联合遭遇风险率为 9.57%,对应的联合遭遇重现期为 10.5 a,相比于单变量重现期缩减了 47.5%;50 年一遇降水量与 50 年一遇水位的联合遭遇重现期为 25.5 a,相比于单变量重现期缩减了 49%。因此,历时为 7 d 的情况下,降水量与水位的联合遭遇重现期最小,因此两者

的联合遭遇风险率最高。历时为 3 d 和 1 d 的情况下,则是降水量与流量的联合遭遇风险率最高。由此可见,双变量组合联合重现期明显低于单变量重现期,对于较长历时的城市洪涝过程,需注意防范强降雨与城市内部高水位叠加影响下的洪涝灾害效应。

3.5.2 三维联合遭遇风险率与联合遭遇重现期

C-Vine Copula 的联合分布概率计算需要考虑条件概率以及对概率密度函数多元积分,本文采用蒙特卡洛法生成 100 万个样本数据点,运用循环结构绘制三维 C-Vine Copula 的联合遭遇风险率切片图,如图 7 所示。

同样对降水量、水位、流量 3 种致灾因子的设计

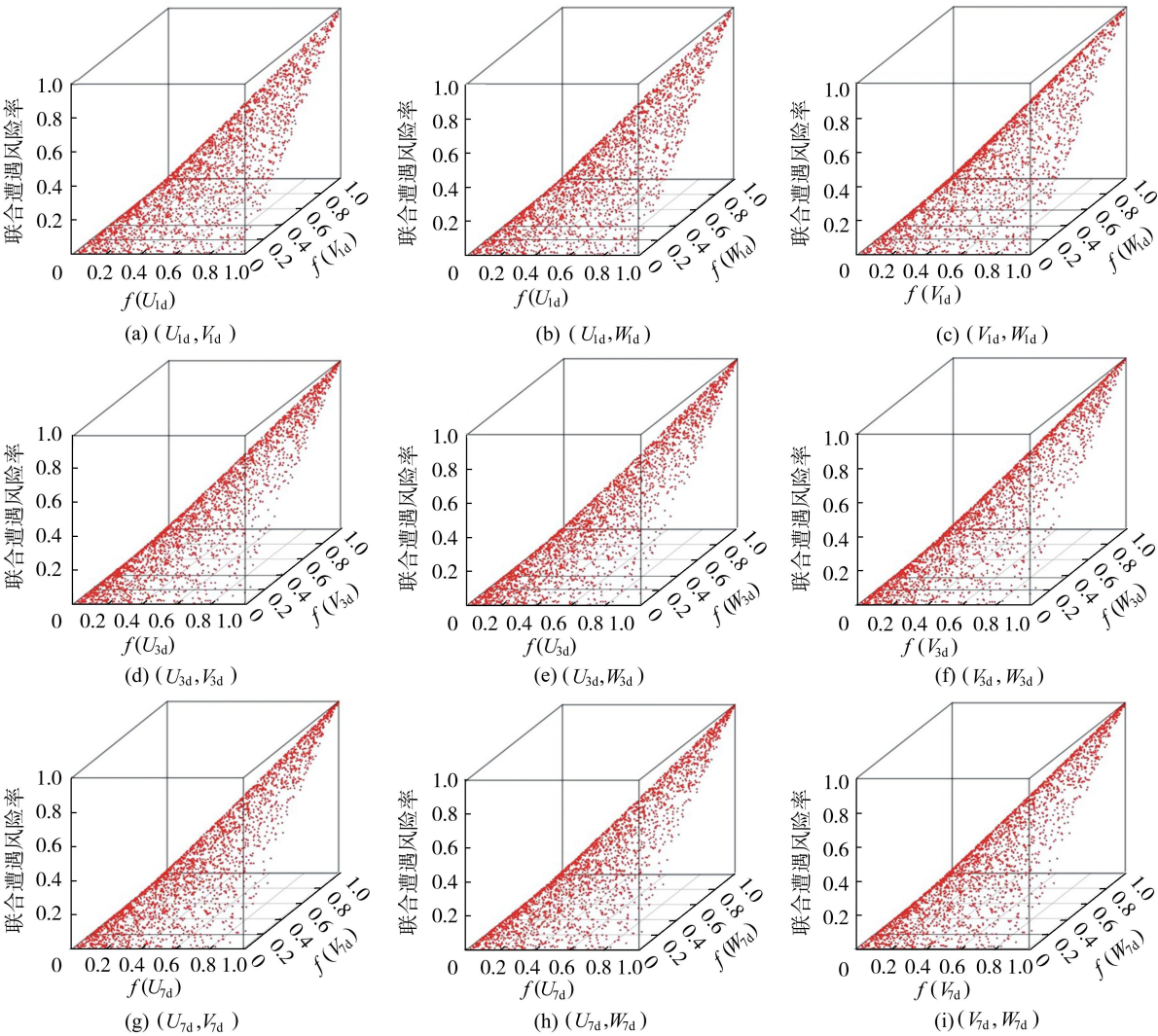


图 6 双变量组合联合遭遇风险率
Fig. 6 Joint encounter risk of bivariate combinations

表 5 双变量组合联合遭遇重现期
Table 5 Bivariate combination joint encounter recurrence period

设计重现期	单位: a								
	unit: a								
	(U _{1d} , V _{1d})	(U _{1d} , W _{1d})	(V _{1d} , W _{1d})	(U _{3d} , V _{3d})	(U _{3d} , W _{3d})	(V _{3d} , W _{3d})	(U _{7d} , V _{7d})	(U _{7d} , W _{7d})	(V _{7d} , W _{7d})
(10 a, 10 a, 10 a)	6.7	6.4	7.5	6.2	6.0	7.6	5.4	5.4	7.5
(20 a, 10 a, 10 a)	8.6	8.2	7.5	7.8	7.6	7.6	7.1	7.1	7.5
(20 a, 20 a, 10 a)	13.3	8.2	9.3	11.5	7.6	9.4	10.4	7.1	9.3
(20 a, 20 a, 20 a)	13.3	12.5	15.1	11.5	11.2	15.3	10.4	10.5	14.9
(50 a, 50 a, 20 a)	33.0	17.1	19.2	26.7	15.3	19.3	25.5	14.7	19.0
(50 a, 50 a, 50 a)	33.0	30.8	37.6	26.7	26.4	38.1	25.5	25.6	36.4

重现期分别设置为 10、20、50 a, 计算不同设计重现期组合下 3 种致灾因子三变量组合联合遭遇重现期, 结果如表 6 所示。由表 6 可见, 对于不同历时而言, 三变量组合的联合遭遇重现期从大到小的顺序依次为: 1 d 三变量组合、3 d 三变量组合、7 d 三变量组合, 这与双变量二维联合遭遇重现期的规律相同, 说明 (U_{7d}, V_{7d}, W_{7d}) 组合的联合遭遇风险率较高, 研究区尤其需要注意长历时梅雨天气的累积效应存在引发城市洪涝灾害的风险。

表 6 三变量组合联合遭遇重现期 单位: a
Table 6 Three variable combination joint encounter recurrence period unit: a

设计重现期	(U _{1d} , V _{1d} , W _{1d})	(U _{3d} , V _{3d} , W _{3d})	(U _{7d} , V _{7d} , W _{7d})
(10 a, 10 a, 10 a)	5.5	5.2	4.7
(20 a, 10 a, 10 a)	6.5	6.2	5.8
(20 a, 20 a, 10 a)	7.7	7.2	6.7
(20 a, 20 a, 20 a)	10.7	9.6	8.9
(50 a, 50 a, 20 a)	16.2	14.6	14.1
(50 a, 50 a, 50 a)	25.9	22.2	21.3

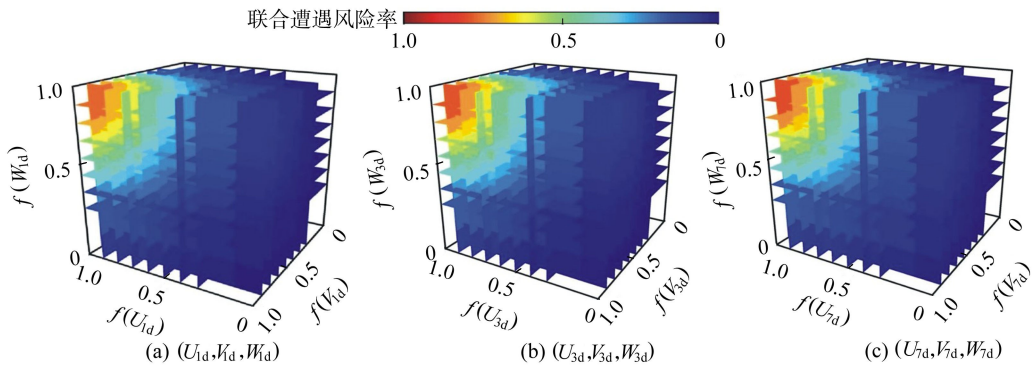


图7 三维 C-Vine Copula 联合遭遇风险切片图

Fig.7 3D C-Vine Copula joint encounter risk slice diagram

结合图7与表6进行分析,相比于单变量和双变量组合,三变量组合的联合遭遇重现期更低,对应的联合遭遇风险率更高,且各致灾因子对不同历时组合的影响也不尽相同。计算三维联合遭遇重现期相对于二维联合遭遇重现期及单变量重现期的缩减率,当降水量、水位、流量的设计重现期均为10a时, (U_{7d}, V_{7d}, W_{7d}) 的联合遭遇风险率为21.3%,对应联合遭遇重现期为4.7a,相比只单变量的重现期缩减了53%,相比于不考虑上游流量的 (U_{7d}, V_{7d}) 的重现期缩减了13.5%,相比于不考虑水位的 (U_{7d}, W_{7d}) 重现期缩减了13.6%,相比于不考虑降水量的 (V_{7d}, W_{7d}) 重现期缩减了37.6%。就不同设计重现期组合下重现期缩减率的平均值而言,对于 (U_{1d}, V_{1d}, W_{1d}) 组合,相比于不考虑上游流量的 (U_{1d}, V_{1d}) 平均缩减率最大,为29.2%,相比于不考虑水位的 (U_{1d}, W_{1d}) 平均缩减率最小,为12.6%,可见上游流量是影响 (U_{1d}, V_{1d}, W_{1d}) 的关键因素。对于 (U_{3d}, V_{3d}, W_{3d}) 组合,相比于不考虑降水量的 (V_{3d}, W_{3d}) 平均缩减率最大,为29.4%,相比与不考虑水位的 (U_{3d}, W_{3d}) 平均缩减率最小,为11.8%,可见降水量是影响 (U_{3d}, V_{3d}, W_{3d}) 的关键因素。对于 (U_{7d}, V_{7d}, W_{7d}) 组合,相比于不考虑降水量的 (V_{7d}, W_{7d}) 平均缩减率最大,为32.7%,相比于不考虑水位的 (U_{7d}, W_{7d}) 平均缩减率最小,为12.2%,可见降水量是影响 (U_{7d}, V_{7d}, W_{7d}) 的关键因素。另外,随着设计重现期的增加,多致灾因子极端事件联合遭遇风险率逐渐减小,但当单个致灾因子极值越高,引发复合灾害的风险则越大。综上,当无锡市遭遇极端洪涝事件时,需要注意多致灾因子的协同作用,必要时应采取多种工程或非工程措施减少极端事件遭遇给城市带来的更大的风险。

4 结 论

a. 针对无锡市主城区历时分别为1、3、7d的降

水量、水位和上游流量3种致灾因子,采用相关性系数和尾部依赖系数验证变量组合间复杂的非线性结构和依赖性。同历时条件下的三变量组合呈明显的正相关关系, (U_{7d}, V_{7d}, W_{7d}) 组合相关性最强, (U_{3d}, V_{3d}, W_{3d}) 组合次之, (U_{1d}, V_{1d}, W_{1d}) 相关性最弱。尾部依赖系数分析表明, (U_{7d}, V_{7d}, W_{7d}) 的上尾依赖系数高达0.6718,3种致灾因子在历时为7d出现高极值情况下具有较强相关性。

b. 基于LogL、BIC、AIC、AICc等检验统计量进行Copula函数优选。双变量组合 (U_{1d}, V_{1d}) 和 (U_{1d}, W_{1d}) 分别优选 Frank Copula 和 Gaussian Copula; (V_{1d}, W_{1d}) 、 (U_{3d}, V_{3d}) 、 (U_{3d}, W_{3d}) 均优选 BB8 Copula; (V_{3d}, W_{3d}) 和 (V_{7d}, W_{7d}) 优选 Joe Copula; (U_{7d}, V_{7d}) 优选 Survival Clayton Copula; (U_{7d}, W_{7d}) 优选 Survival BB1 Copula。三维 C-Vine Copula 优选 BB8 Copula 描述边 $(V_{1d}, W_{1d} | U_{1d})$ 和边 $(V_{7d}, W_{7d} | U_{7d})$, 优选 Joe Copula 描述边 $(V_{3d}, W_{3d} | U_{3d})$, 从而构建了三变量高维联合分布模型。

c. 联合遭遇风险率及联合遭遇重现期计算结果表明, (U_{7d}, V_{7d}, W_{7d}) 组合的联合遭遇重现期最小,对应联合遭遇风险率最高,需要注意无锡市长历时降雨的累积效应存在增加城市洪涝灾害的风险。联合遭遇重现期缩减率计算结果表明, (U_{1d}, V_{1d}, W_{1d}) 组合主要受上游流量的影响,最大联合遭遇重现期缩减率为29.2%, (U_{3d}, V_{3d}, W_{3d}) 和 (U_{7d}, V_{7d}, W_{7d}) 组合主要受降水量的影响,最大联合遭遇重现期缩减率分别为29.4%和32.7%。

参考文献:

[1] 黄华兵,王先伟,柳林.城市暴雨内涝综述:特征、机理、数据与方法[J].地理科学进展,2021,40(6):1048-1059. (HUANG Huabing, WANG Xianwei, LIU Lin. A review on urban pluvial floods: characteristics, mechanisms, data, and research methods [J]. Progress in Geography, 2021, 40(6): 1048-1059. (in Chinese))

- [2] 徐宗学,卢兴超,施奇妙.城市暴雨洪涝灾害特征与风险评估研究进展[J].水利水电科技进展,2025,45(1):1-9. (XU Zongxue, LU Xingchao, SHI Qimiao. Research progress on urban flooding disaster characteristics and risk assessment [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2025, 45(1):1-9. (in Chinese))
- [3] 郭生练,刘章君,熊立华.设计洪水计算方法研究进展与评价[J].水利学报,2016,47(3):302-314. (GUO Shenglian, LIU Zhangjun, XIONG Lihua. Advances and assessment on design flood estimation methods[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2016, 47(3):302-314. (in Chinese))
- [4] 徐宗学,陈浩,任梅芳,等.中国城市洪涝致灾机理与风险评估研究进展[J].水科学进展,2020,31(5):713-724. (XU Zongxue, CHEN Hao, REN Meifang, et al. Progress on disaster mechanism and risk assessment of urban flood/waterlogging disasters in China[J]. Advances in Water Science, 2020, 31(5):713-724. (in Chinese))
- [5] 宋晓猛,徐楠涛,张建云,等.中国城市洪涝问题:现状、成因与挑战[J].水科学进展,2024,35(3):357-373. (SONG Xiaomeng, XU Nantao, ZHANG Jianyun, et al. Urban flooding in China: current status, causes and challenges[J]. Advances in Water Science, 2024, 35(3):357-373. (in Chinese))
- [6] 张建云,王银堂,贺瑞敏,等.中国城市洪涝问题及成因分析[J].水科学进展,2016,27(4):485-491. (ZHANG Jianyun, WANG Yintang, HE Ruimin, et al. Discussion on the urban flood and waterlogging and causes analysis in China[J]. Advances in Water Science, 2016, 27(4):485-491. (in Chinese))
- [7] 隆院男,黄春福,莫军成,等.非一致性条件下松辽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))
- [8] 刘章君,郭生练,许新发,等. Copula 函数在水文水资源中的研究进展与述评[J].水科学进展,2021,32(1):148-159. (LIU Zhangjun, GUO Shenglian, XU Xinfa, et al. Application of Copula functions in hydrology and water resources: a state-of-the-art review [J]. Advances in Water Science, 2021, 32(1):148-159. (in Chinese))
- [9] 武传号,黄国如,吴思远.基于 Copula 函数的广州市短历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 combination of short duration rainstorm and tidal level based on Copula function in Guangzhou [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2014, 33(2):33-40. (in Chinese))
- [10] 李晓英,姜紫萍,樊红霞,等.基于非对称乘积 Copula 函数的城市雨洪遭遇风险分析[J].水资源保护,2024,40(6):78-84. (LI Xiaoying, JIANG Ziping, FAN Hongxia, et al. Risk analysis of urban rain-flood encounter based on asymmetric product Copula function [J]. Water Resources Protection, 2024, 40(6):78-84. (in Chinese))
- [11] 许瀚卿,谭金凯,李梦雅,等.中国沿海地区雨潮复合灾害联合分布及危险性研究[J].地理科学进展,2022,41(10):1859-1867. (XU Hanqing, TAN Jinkai, LI Mengya, et al. Joint distribution and risk of the compound disaster caused by rainfall and storm surge across Chinese coastal region [J]. Progress in Geography, 2022, 41(10):1859-1867. (in Chinese))
- [12] 周子滢,杨赛霓,刘晓燕,等.基于 C-Vine Copula 函数的台风灾害链“风-雨-潮”联合概率分布研究[J].热带地理,2024,44(6):1036-1046. (ZHOU Ziyi, YANG Saini, LIU Xiaoyan, et al. Joint probability distribution of typhoon disaster chain “strong wind-rainstorm-storm surge” based on C-Vine Copula function [J]. Tropical Geography, 2024, 44(6):1036-1046. (in Chinese))
- [13] XIAO Honglin, ZHANG Jinping, FANG Hongyuan. A Copula-based framework for joint encounter and state evolution analysis of urban short-duration rainstorm characteristics [J]. Journal of Hydrology, 2024, 631:130823.
- [14] SHARMA A, WANG Huaan, ZHANG Jie, et al. Constructing multivariate distribution of rainfall characteristics: a Bayesian vine algorithm [J]. Journal of Hydrology, 2024, 637:131392.
- [15] 张耀华,孙雯,朱喜,等.太湖流域平原城市洪涝防治思路[J].江苏水利,2016(1):56-60. (ZHANG Yaohua, SUN Wen, ZHU Xi, et al. Thoughts on flood control in plain cities of the Taihu Lake Basin [J]. Jiangsu Water Resources, 2016(1):56-60. (in Chinese))
- [16] 王强,许有鹏,杨龙,等.太湖平原地区洪水特征变化及驱动机理[J].地理学报,2023,78(5):1088-1103. (WANG Qiang, XU Youpeng, YANG Long, et al. Changes in flood characteristics and their driving mechanisms in the Taihu Plain region [J]. Acta Geographica Sinica, 2023, 78(5):1088-1103. (in Chinese))
- [17] GENEST C, OKHRIN O, BODNAR T. Copula modeling from Abe Sklar to the present day [J]. Journal of Multivariate Analysis, 2024, 201:105278.
- [18] GENEST C, FAVRE A C, BÉLIVEAU J, et al. Metaelliptical copulas and their use in frequency analysis of multivariate hydrological data [J]. Water Resources Research, 2007, 43(9):W09401.
- [19] JOE H. Multivariate models and multivariate dependence concepts [M]. New York: Chapman and Hall/CRC, 1997.
- [20] HAFF I H, FRIGESSI A, MARAUN D. How well do regional climate models simulate the spatial dependence of

precipitation?: an application of pair-copula constructions [J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2015, 120(7): 2624-2646.

[21] JI Liuyan, TAN Kenseng, YANG Fan. Tail dependence and heavy tailedness in extreme risks [J]. Insurance: Mathematics and Economics, 2021, 99: 282-293.

[22] 刘章君, 郭生练, 何绍坤, 等. 基于 Copula 函数的多变量水文不确定性处理器[J]. 水利学报, 2018, 49(3): 332-342. (LIU Zhangjun, GUO Shenglian, HE Shaokun, et al. Multivariate hydrologic uncertainty processor based on Copula function [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2018, 49(3): 332-342. (in Chinese))

[23] CZADO C, NAGLER T. Vine copula based modeling[J]. Annual Review of Statistics and Its Application, 2022, 9: 453-477.

[24] KAO S C, GOVINDARAJU R S. Trivariate statistical analysis of extreme rainfall events via the Plackett family of copulas[J]. Water Resources Research, 2008, 44(2): W02415.

[25] OAKES D. Multivariate survival distributions[J]. Journal of Nonparametric Statistics, 1994, 3(3/4): 343-354.

[26] 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(1/2/3/4): 245-268. (收稿日期: 2024 - 07 - 20 编辑: 王芳)

+++++

(上接第 64 页)

[9] 赵勇, 黄可静, 高学睿, 等. 黄河流域粮食生产水足迹及虚拟水流动影响评价[J]. 水资源保护, 2022, 38(4): 39-47. (ZHAO Yong, HUANG Kejing, GAO Xuerui, et al. Evaluation of grain production water footprint and influence of grain virtual water flow in the Yellow River Basin[J]. Water Resources Protection, 2022, 38(4): 39-47. (in Chinese))

[10] 宋晓娜, 经小川, 张峰. 水生态文明建设质量的时空演化评估[J]. 水资源保护, 2023, 39(3): 246-252. (SONG Xiaona, JING Xiaochuan, ZHANG Feng. Evaluation on spatiotemporal evolution of water ecological civilization construction quality [J]. Water Resources Protection, 2023, 39(3): 246-252. (in Chinese))

[11] 陈梅, 刘泽星, 王若男, 等. 建立健全地方节水制度政策的措施与建议[J]. 中国水利, 2024(7): 17-21. (CHEN Mei, LIU Zexing, WANG Ruonan, et al. Measures and suggestions for establishing and enhancing local water conservation system and policy [J]. China Water Resources, 2024(7): 17-21. (in Chinese))

[12] 左其亭, 邱曦, 马军霞, 等. 黄河治水思想演变及现代治水方略[J]. 水资源与水工程学报, 2023, 34(3): 1-9. (ZUO Qiting, QIU Xi, MA Junxia, et al. Evolution of flood control thought and modern flood control strategy in the Yellow River Basin[J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2023, 34(3): 1-9. (in Chinese))

[13] 王若禹, 赵志轩, 黄昌硕, 等. “四水四定”水资源管控理论研究进展[J]. 水资源保护, 2023, 39(4): 111-117. (WANG Ruoyu, ZHAO Zhixuan, HUANG Changshuo, et al. Research progress on water resources management theory of “basing four aspects on water resources” [J]. Water Resources Protection, 2023, 39(4): 111-117. (in Chinese))

[14] 吴凤平, 宋妍, 黄蕊. 新发展理念下水利新质生产力评价指标体系构建[J]. 水资源保护, 2025, 41(1): 85-91. (WU Fengping, SONG Yan, HUANG Rui. Construction of evaluation index system of new quality productive forces of water conservancy under new development concept [J]. Water Resources Protection, 2025, 41(1): 85-91. (in Chinese))

[15] 田贵良, 盛雨, 吴继云, 等. 最严格水资源管理制度对长江经济带水资源利用效率的影响研究[J]. 南京工业大学学报(社会科学版), 2020, 19(5): 90-103. (TIAN Guiliang, SHENG Yu, WU Jiyun, et al. Impact of the strictest water resource management system ever on the water resource use efficiency in Yangtze River Economic Zone [J]. Journal of Nanjing Tech University (Social Science Edition), 2020, 19(5): 90-103. (in Chinese))

[16] 王浩, 许新发, 成静清, 等. 水资源保护利用“四水四定”: 基本认知与关键技术体系[J]. 水资源保护, 2023, 39(1): 1-7. (WANG Hao, XU Xinfu, CHENG Jingqing, et al. “Basing four aspects on water resources” in water resources protection and utilization: basic cognition and key technology system [J]. Water Resources Protection, 2023, 39(1): 1-7. (in Chinese))

[17] 景晓栋, 田贵良. 面向未来的水利新质生产力: 内涵解读、研究框架与关键路径[J]. 水资源保护, 2024, 40(6): 113-120. (JING Xiaodong, TIAN Guiliang. Future oriented new quality productivity forces of water conservancy: connotation interpretation, research framework and key paths [J]. Water Resources Protection, 2024, 40(6): 113-120. (in Chinese))

[18] 景晓栋, 田贵良, 程飞. 耐心资本推动水利新质生产力发展的逻辑机理与协同路径[J]. 水资源保护, 2025, 41(1): 99-106. (JING Xiaodong, TIAN Guiliang, CHENG Fei. Logical mechanism and collaborative path of patient capital promoting development of new quality productive forces of water conservancy [J]. Water Resources Protection, 2025, 41(1): 99-106. (in Chinese)) (收稿日期: 2024 - 09 - 20 编辑: 王芳)