

非一致性条件下松澧地区洪水遭遇规律分析

隆院男^{1,2}, 黄春福^{1,2}, 莫军成³, 黄 草^{1,2}, 宋昕熠^{1,2}, 闫世雄^{1,2}, 曹劲松^{1,2}

(1. 长沙理工大学水利与环境工程学院, 湖南 长沙 410114; 2. 洞庭湖水环境治理与生态修复湖南省重点实验室, 湖南 长沙 410114; 3. 湖南省水利水电勘测设计规划研究总院有限公司, 湖南 长沙 410007)

摘要:为研究澧水与松滋河洪水遭遇规律,根据澧水石门站和松滋河新江口站、沙道观站 1959—2020 年实测日均流量资料,采用非一致性 GAMLSS 模型优选了年最大洪峰和连续 7 d 年最大洪量的边缘分布,构建了基于 Copula 函数的二维联合分布模型,进而得出不同量级组合下的洪水遭遇概率。结果表明:松澧地区的洪水序列发生了显著变异,基于时变对数正态、伽马、威布尔分布以及 Copula 联合分布能够较好地反映区域实际洪水特征;松澧地区典型年洪水遭遇以松滋河洪水过程遭遇澧水洪水为主;澧水与松滋河的年最大洪峰或连续 7 d 年最大洪量的同现概率随着洪水量级的增大而减小,且澧水与松滋河东支的洪水遭遇概率更高;当澧水发生千年一遇大洪水时,与松滋河中小洪水的遭遇概率更高。

关键词:澧水;松滋河;Copula 函数;洪水遭遇;联合分布

中图分类号:TV122

文献标志码:A

文章编号:1006-7647(2024)04-0014-09

Analysis of flood coincidence law in Song-Li Region under non-consistency conditions//LONG Yuannan^{1,2}, HUANG Chunfu^{1,2}, MO Juncheng³, HUANG Cao^{1,2}, SONG Xinyi^{1,2}, YAN Shixiong^{1,2}, CAO Jinsong^{1,2} (1. School of Hydraulic and Environmental Engineering, Changsha University of Science and Technology, Changsha 410114, China; 2. Key Laboratory of Dongting Lake Aquatic Eco-Environmental Control and Restoration of Hunan Province, Changsha 410114, China; 3. Hunan Water Resources and Hydropower Survey, Design, Planning and Research Co., Ltd., Changsha 410007, China)

Abstract:To study the flood coincidence law of the Lishui River and Songzi River, based on the measured mean daily flow data at the Shimen Station in the Lishui River and at the Xinjiangkou Station and Shadaoguan Station in the Songzi River from 1959 to 2020, a non-uniform GAMLSS model was used to optimize the marginal distributions of the annual maximum flood peak and 7-day continuous annual maximum flood volume. A two-dimensional joint distribution model was constructed based on the Copula function, and the probability of flood coincidence under different combinations of magnitudes was calculated. The results show that the flood sequence in the Song-Li Region has undergone significant variation, and the actual flood characteristics of the region can be described by the time-varying log-normal distribution, Gamma distribution, Weibull distribution, and Copula joint distribution. The typical annual flood encountered in the Song-Li area is mainly the Songzi River flood process and the Lishui River flood. The probability of co-occurrence of the annual maximum flood peaks or 7-day continuous maximum flood volumes of the Lishui and Songzi rivers decreases with the increase of flood magnitude, and the probability of flood coincidence in the Lishui River and the eastern branch of the Songzi Rivers is higher. When a 1 000-year flood occurs in the Lishui River, the probability of co-occurrence of the 1 000-year flood in the Lishui River and small- and medium-sized floods in the Songzi River is higher.

Key words: Lishui River; Songzi River; Copula function; flood coincidence; joint distribution

近年来,各地洪涝灾害事件频发,造成严重的人员伤亡、经济损失和生态环境破坏。在此影响下,洪水遭遇的危险性逐渐增加,容易诱发流域灾害性特大洪水。如何防范化解洪涝灾害、科学应对和减缓损失是严峻的挑战。基于长序列历史实测资料对已发生的洪水进行统计分析,归纳洪水特征及遭遇规

律,是区域洪水遭遇问题的传统研究方法^[1-3]。然而,简单的统计分析方法只能定性描述洪水遭遇,无法全面地反映百年一遇或千年一遇等不同量级洪水的遭遇概率^[4]。因此,众多国内外学者采用包括经验频率法、非参数法、多元正态分布法及特定联合分布法等多变量分析方法对洪水遭遇问题进行研

基金项目:国家自然科学基金项目(52079010);湖南省重点研发计划项目(2020SK2130);湖南省研究生科研创新项目(CX20220910)

作者简介:隆院男(1985—),男,副教授,博士,主要从事水文水资源研究。E-mail:lynzhhb@csust.edu.cn

究^[5-7]。但上述方法同样存在一定的局限性,如无法准确刻画洪水遭遇事件的内在规律。随着多变量频率组合分析研究的不断深入,Copula 函数由于其结构灵活、易于构建的特点在洪水遭遇问题上得到了大量的应用^[8-12]。

随着全球性气候变化以及区域性人类活动影响加剧,流域水循环过程发生了显著变化,洪水序列不再满足传统水文频率分析的一致性假设要求。若洪水遭遇问题仍采用一致性模型拟合边缘分布,则可能会低估区域洪水遭遇概率。因此,有必要对洪水序列进行变异性检验,并对发生变异的序列进行非一致性频率分析。传统的水文序列非一致性频率分析主要是基于还原/还现方法将水文序列修正到变异前状态或变异后状态,以便对序列进行一致性分析。然而,该方法存在序列修正、分解等转化步骤烦琐的应用局限性^[13]。Rigby 等^[14]提出了基于位置、尺度和形状参数的广义可加模型 (generalized additive models for location, scale and shape, GAMLSS),该模型可以建立分布参数与时间之间的线性或非线性关系,被广泛应用于变化环境下极端降水、洪水和干旱频率分析^[15-17]。同时,随着 GAMLSS 工具包的不断发展完善,该模型能够更灵活地适应各种数据类型和分布,其在非一致性水文频率分析领域中具有良好的应用前景^[18]。

目前,对于松澧地区洪水遭遇情况的研究大多局限于规律统计分析^[19-20],缺乏在不同量级组合下澧水与松滋河洪水遭遇概率的定量分析。松澧地区受上游暴雨区影响,澧水干流与松滋河洪水互相遭遇易导致洪峰或流量产生不同程度的叠加,且松澧地区现有防洪标准仍然较低、抗洪能力差,遇特大洪水缺乏可靠的防御对策。因此,本文以澧水和松滋河为研究对象,引入具有时变性的 GAMLSS 拟合边缘分布,并通过 Archimedean Copula 函数分别构建两江洪水年最大洪峰和连续 7 d 年最大洪量的联合分布,系统地研究松澧地区洪水遭遇规律,以期为澧水和松滋河洪水实现错峰调度提供参考。

1 研究区域与数据来源

1.1 研究区域

松澧地区系指澧水下游尾间及松滋河下游交汇地带,西起临澧的新安、新合垸,东至安乡的安造、安垸,以虎渡河为界,北缘涪上、涪下、荆湘垸,南至沅澧大圈的民主阳城垸,区内共有大小堤垸 41 个,总面积 1 863.18 km²。松澧地区是湖南省洞庭湖区洪涝灾害最为严重的区域之一,自 1949 年新中国成

立以来,该区域发生了 17 次不同程度的溃垸灾害^[21]。该区域内洪水变化特征受长江松滋河和澧水的共同驱动作用,两江洪水在七里湖内遭遇频繁。澧水洪水来源于上游五峰暴雨区,干支流坡度大、汇流迅速、洪水涨落快,且由于流域形状及水系分布特征有利于造峰,导致洪峰持续时间短、峰形尖瘦。然而,自荆江南岸松滋口入松滋河道的洪水呈现峰形矮胖、持续时间长的特点。这两种差异显著的洪水过程特点增加了澧水和松滋河洪水遭遇的概率,易形成区域性大洪水,致使防洪情势复杂化,严重威胁松澧地区及下游防护对象的防洪安全。

1.2 数据来源

松澧地区洪水组成包括澧水洪水和长江分流的松滋河洪水,其中松滋河洪水自松滋口以下分为东、西两支,分别由新江口站和沙道观站控制。因此,本文选取澧水干流石门站及松滋河新江口站、沙道观站 3 个具有代表性的水文控制站 1959—2020 年共 62 年长序列实测日均流量资料,通过年最大值取样法获取各站点年最大洪峰、连续 7 d 年最大洪量时间序列。需要说明的是,虽然松滋河与澧水洪道串通、相互顶托,但只对澧水上游津市、澧县水位具有抬高作用,不会对石门、新江口和沙道观站造成影响,因此这 3 个水文控制站的洪水序列具有统计意义上的独立性。此外,考虑松滋河与澧水遭遇对下游防洪的可能影响,分别计算新江口站与沙道观站的洪峰、洪量时间序列之和作为松滋河口的洪水样本序列。实测洪水资料由湖南省水文水资源勘测中心提供。

2 研究方法

2.1 非一致性检验方法

受气候变化和人类活动的共同影响,水文序列非一致性问题日益突出,其非一致性检验包括趋势检验和突变点检验。Mann-Kendall 趋势检验法是一种非参数统计检验方法,由于其具有样本不需要遵循特定分布的优点,因此被广泛应用于水文气象特征变量的趋势检验^[22-23]。滑动 t 检验法根据两组子样本(序列长度分别为 n_1 和 n_2)平均值的差异是否显著来判断其突变情况,该方法应用灵活,对异常值具有较好的鲁棒性^[22]。因此,本文采用 Mann-Kendall 趋势检验法和滑动 t 检验法对松澧地区的洪峰和洪量极值序列进行非一致性分析。

2.2 GAMLSS 构建及优选

GAMLSS 的核心思想在于可加性假设,即响应变量概率分布参数为解释变量与随机效应的线性或

非线性函数之和。本文不考虑随机效应对分布参数的影响,即 GAMLSS 变成全参数模型,其数学表达式详见文献[15]。采用 RS 算法^[14]对模型分布参数进行估计,并以带有惩罚项的极大似然函数为寻优目标。通过引入全局拟合偏差(G_D)和广义 AIC 准则选择最优拟合分布模型和函数^[24-25]。当惩罚因子 $k = 2$ 和 $k = \ln n$ 时(n 为样本数量),广义 AIC 准则分别表示为 AIC 准则(其拟合优度为 G_{AIC})和 SBC(其拟合优度为 G_{SBC})准则。最后,通过计算正态标准化残差序列的均值、方差、偏态系数、峰态系数和 Filliben 相关系数等指标来评价 GAMLSS 的拟合效果。

2.3 Copula 函数构建及优选

Copula 函数是将多个随机变量的边缘分布连接起来的多元联合分布,能够准确刻画变量间的关联性,且具有边缘分布类型不受限制的特点^[13]。Copula 函数种类繁多,主要包括 Archimedean 型、椭圆型、二次型等,具体数学形式见文献[26]。其中,Archimedean Copula 函数簇因结构简单、形式多样、实用性强的特点在多变量水文频率分析领域应用广泛。本文选择 3 种常见的二维 Archimedean Copula 函数 (Clayton Copula、Gumbel Copula 和 Frank Copula) 构造澧水与松滋河之间不同量级洪水的联合分布。对于构建的二维 Copula 函数,采用极大似然法估计参数,并引入 Kolmogorov-Smirnov (K-S) 方法检验模型参数估计的质量。若 K-S 检验统计量小于临界值,则数据序列符合理论分布。进一步采用普通最小二乘法(其对应变量即因变量与预测变量之间残差的平方和最小值为 O_{LS})和 AIC 准则确定最优 Copula 模型。 O_{LS} 和 G_{AIC} 越小,表明 Copula 模型的经验理论和理论频率曲线拟合效果越好。

2.4 洪水遭遇概率度量指标

洪水遭遇是指干支流或区域多源洪水的洪峰或洪量在相差较短的时间内到达同一防洪控制断面的水文现象^[27]。在水文统计中,通常引入重现期(T)用于表示洪水的不同量级,并使用洪水遭遇概率(P)来描述不同量级洪水遭遇的可能性^[28-30]。本文选取联合、同现和条件 3 种模型,分别计算其概率和重现期,多角度体现不同量级洪水遭遇情况。假设 X 和 Y 分别为两江洪水的年最大洪峰或连续 7 d 年最大洪量, x 和 y 分别为两江洪水的年最大洪峰或连续 7 d 年最大洪量的设计值, u 和 v 分别为变量 X 、 Y 的边缘分布函数, $C(u, v)$ 为联合分布函数,则两变量的联合概率(P_1)及对应的重现期(T_1)分别表示为

$$P_1(X > x \cup Y > y) = 1 - C(u, v) \tag{1}$$

$$T_1 = 1/[1 - C(u, v)] \tag{2}$$

多变量水文频率分析可以集中于同现概率(P_2)及对应的重现期(T_2)。同现概率是指多个洪水特征变量同时大于设计值时事件发生的概率,同现概率及其对应的重现期计算公式分别为

$$P_2(X > x \cap Y > y) = 1 - u - v + C(u, v) \tag{3}$$

$$T_2 = 1/[1 - u - v + C(u, v)] \tag{4}$$

在获得多变量概率联合分布后,根据条件重现期的定义可以给定单变量设计值,再通过条件概率的计算方法估计另一变量在某一区间发生的概率。例如,当 $X > x$ 时, $Y > y$ 的条件概率(P_3)为

$$P_3(Y > y | X > x) = \frac{1 - u - v + C(u, v)}{1 - u} \tag{5}$$

对应的条件重现期(T_3)为

$$T_3(Y > y | X > x) = \frac{1 - u}{1 - u - v + C(u, v)} \tag{6}$$

3 结果与分析

3.1 洪水序列非一致性检验

3.1.1 趋势检验

采用 Mann-Kendall 趋势检验法对各控制点的洪峰和洪量极值序列进行趋势检验分析,结果如图 1 和表 1 所示,可见所有控制点的年最大洪峰和连续 7 d 年最大洪量序列均呈下降趋势。当显著性水平 $\alpha = 0.05$ 时,各控制点的年最大洪峰序列均呈显著下降趋势;而对于连续 7 d 年最大洪量序列,石门站、沙道观站和松滋河口均呈显著下降趋势,只有

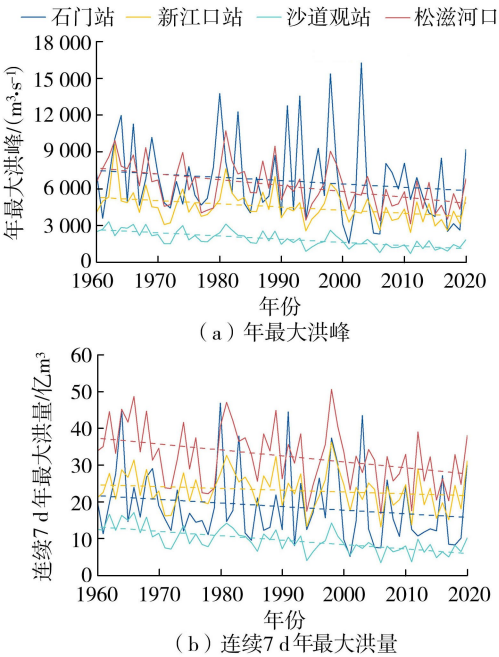


图 1 各控制点洪水特征变量的趋势变化

新江口站的下降趋势未表现出统计显著性。

表 1 各控制点洪水特征变量的 Mann-Kendall 趋势检验统计结果

控制点	年最大洪峰		连续 7 d 年最大洪量	
	统计量 Z	变化趋势	统计量 Z	变化趋势
石门站	-2.31	显著下降	-2.10	显著下降
新江口站	-2.89	显著下降	-1.48	不显著下降
沙道观站	-6.11	显著下降	-5.59	显著下降
松滋河口	-3.91	显著下降	-2.82	显著下降

3.1.2 突变检验

采用滑动 t 检验法对各控制点的洪峰和洪量极值序列进行突变诊断。考虑到该方法选取子序列长度具有主观性,容易造成突变点的漂移^[31],本文选取两个子序列长度($n_1 = n_2 = 5$ 和 $n_1 = n_2 = 10$)进行比较,以提高检验的可靠性,结果如图 2 和表 2 所示。对比两个子序列长度下的突变检验结果,除石门站的洪水特征变量无重合突变点外,其余控制点的年最大洪峰和连续 7 d 年最大洪量序列均存在相似的显著突变点。根据表 2 统计结果,各控制点洪水序列的变异点集中出现在 1969 年、1970 年和 1980 年。

3.2 基于时变 GAMLSS 的边缘分布

根据非一致性检验结果,松澧地区洪水序列发

生了明显变异,因此采用时变 GAMLSS 拟合洪水特征变量的边缘分布更符合实际情况。GAMLSS 具有多种备选分布,本文选取常用的 7 种两参数概率分布函数,包括对数正态 (Log-Normal) 分布、指数 (Exponential) 分布、正态 (Normal) 分布、耿贝尔 (Gumbel) 分布、逻辑斯蒂 (Logistic) 分布、伽马 (Gamma) 分布、威布尔 (Weibull) 分布。此外,采用三次样条函数(cubic spline, CS)拟合分布参数(均值 μ 和标准差 σ)与时间 t 之间的函数关系:① μ 与 σ 均为常数;② μ 为常数, σ 随 t 变化而变化;③ σ 为常数, μ 随 t 变化而变化;④ μ 和 σ 均随 t 变化而变化。为避免分布参数与解释变量之间的关系过于复杂,设置 4 种自由度:CS($t, 0$)、CS($t, 1$)、CS($t, 2$)、CS($t, 3$)。自由度为 0,则表明分布参数随时间呈线性变化。

根据 G_{AIC} 、 G_{SBC} 、 G_D 最小准则,选出不同概率分布类型和参数时变形态设置下各控制点的洪峰和洪量极值序列的最优 GAMLSS,结果如表 3 所示。对于年最大洪峰,石门、新江口站的概率分布类型均为 Log-Normal 分布,而沙道观站和松滋河口的概率分布类型则为 Gamma 分布;对于连续 7 d 年最大洪量,

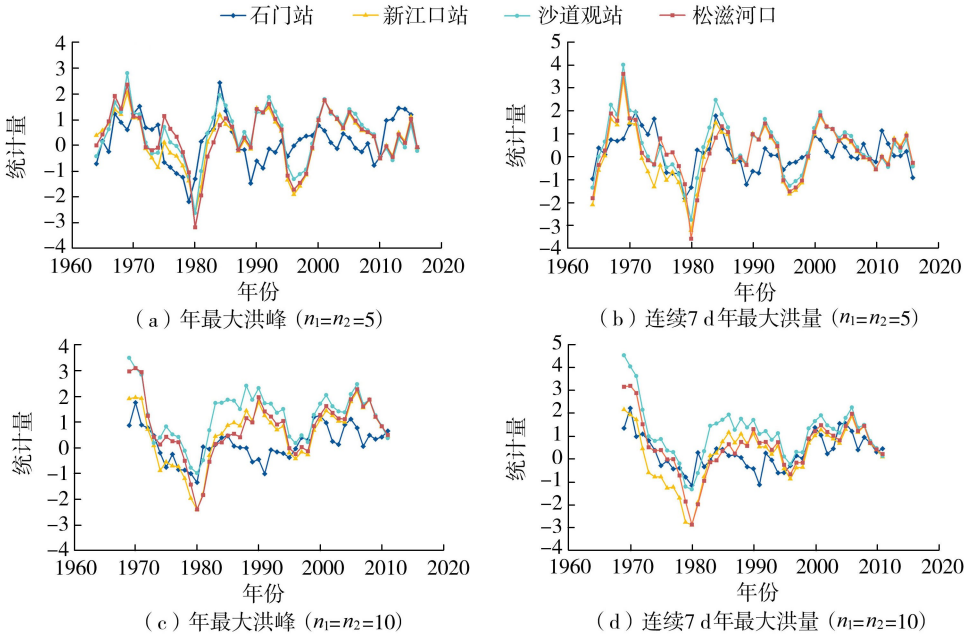


图 2 各控制点洪水特征变量的突变检验结果

表 2 各控制点洪水特征变量的可能突变点

控制点	年最大洪峰		连续 7 d 年最大洪量	
	$n_1 = n_2 = 5$	$n_1 = n_2 = 10$	$n_1 = n_2 = 5$	$n_1 = n_2 = 10$
石门站	1979 年、1984 年	无明显突变点	1971 年	1970 年
新江口站	1969 年、1980 年	1970 年、1980 年、2006 年	1964 年、1969 年、1980 年	1969 年、1979 年、1980 年
沙道观站	1969 年、1984 年	1969 年、1979 年、1971 年、1988 年、1990 年、2001 年、2005 年、2006 年	1967 年、1969 年、1970 年、1984 年、2001 年	1969 年、1970 年、1971 年、1972 年、2006 年
松滋河口	1969 年、1980 年	1969 年、1970 年、1971 年、1980 年、2006 年	1969 年、1980 年	1969 年、1970 年、1971 年、1980 年、2006 年

表 3 最优模型的概率分布类型及拟合优度检验

洪水特征变量	控制点	分布类型	G_{AIC}	G_{SBC}	G_D	均值	方差	偏态系数	峰态系数
年最大洪峰	石门站	Log-Normal	1 168. 083	1 174. 562	1 152. 168	0. 000	1. 016	0. 155	2. 134
	新江口站	Log-Normal	1 044. 752	1 051. 134	1 034. 599	-0. 000	1. 016	0. 197	2. 918
	沙道观站	Gamma	937. 162	944. 533	923. 533	0. 000	1. 017	-0. 146	2. 580
	松滋河口	Gamma	1 088. 910	1 095. 292	1 075. 062	0. 000	1. 016	-0. 068	2. 468
连续 7 d 年最大洪量	石门站	Log-Normal	2 722. 910	2 729. 075	2 709. 945	-0. 000	1. 016	0. 464	2. 533
	新江口站	Gamma	2 663. 358	2 668. 708	2 654. 571	-0. 052	1. 002	-0. 076	2. 424
	沙道观站	Weibull	2 573. 399	2 580. 005	2 563. 175	-0. 016	0. 975	0. 249	2. 827
	松滋河口	Gamma	2 716. 558	2 722. 940	2 706. 604	-0. 022	1. 012	-0. 263	2. 451

新江口站和松滋河口均服从 Gamma 分布,而石门站和沙道观站则分别服从 Log-Normal 和 Weibull 分布。根据残差指标统计结果可知,残差序列均值接近 0,方差接近 1,偏态系数接近 0,峰态系数接近 3,且 Filliben 系数均大于临界值 0. 978 ($\alpha = 0. 05$)。这表明各最优模型的残差序列符合标准正态分布,模型拟合效果较好,从而可以判断所构建的各最优拟合模型的分布类型和参数时变形态选择是合理的。

3.3 二维 Copula 联合分布

根据各控制点的最优边缘分布,可分别构造基于 Clayton Copula、Frank Copula 和 Gumbel Copula 函数的联合分布,并确定最佳拟合函数,结果如表 4 所示。由 K-S 检验结果可知,3 个 Archimedean Copula 函数均通过了假设检验。根据普通最小二乘法 and AIC 最小准则,石门站-新江口站的 Frank Copula 函数具有最小的误差,其年最大洪峰联合分布拟合效果最优,而石门站-沙道观站和石门站-松滋河口的最优 Copula 函数均为 Clayton Copula 函数。在连续 7 d 年最大洪量序列的曲线分布拟合中, Frank Copula 函数经验点与理论分布曲线拟合效果最优。此外,从图 3 中可以直观地看出,最优 Copula 函数

的经验点与理论频率曲线拟合效果较好。

3.4 松澧地区洪水遭遇分析

3.4.1 典型年洪水遭遇分析

澧水和松滋河的不同量级洪水遭遇情况可以通过年最大洪峰的联合重现期来反映。以 1969 年松澧地区的历史大洪水为例,石门站和新江口站于 7 月 12 日出现年最大洪峰流量,而沙道观站于 9 月 16 日出现年最大洪峰流量。根据两江洪水遭遇的定义^[32],澧水和松滋河西支于 1969 年 7 月 12 日发生了洪峰遭遇,其年最大日洪峰流量分别为 10 200、4 520 m³/s。年最大洪峰发生遭遇时,石门站洪峰重现期为 8. 2 a,新江口站重现期为 2. 2 a,说明遭遇年份两江洪水量级均不大。石门和新江口站的联合分布概率值为 0. 521,联合重现期为 2. 1 a,这在一定程度上说明澧水和松滋河西支至少有一条江的年最大洪峰超过 1969 年峰值的重现期为 2. 1 a。

统计松澧地区发生实际大洪水的典型年洪水过程遭遇情况,结果见表 5。统计的 6 个典型年中,松滋河连续 7 d 年最大洪量重现期只有 1998 年较大,其余年份均小于 6 年一遇。1998 年各控制点的连续 7 d 年最大洪量分别为 37. 53、36. 41、14. 39、

表 4 Copula 函数参数估计与拟合优度评价结果

洪水特征指标	控制点	Copula 函数	参数 θ	K-S 检验统计量	O_{LS}	G_{AIC}
年最大洪峰	石门站-新江口站	Clayton Copula	0. 70	0. 088 8	0. 035 4	-412
		Frank Copula	3. 05	0. 081 5	0. 032 2	-424
		Gumbel Copula	1. 30	0. 090 1	0. 037 7	-405
	石门站-沙道观站	Clayton Copula	0. 67	0. 083 2	0. 032 6	-422
		Frank Copula	2. 50	0. 074 6	0. 035 3	-413
		Gumbel Copula	1. 27	0. 096 5	0. 043 4	-387
	石门站-松滋河口	Clayton Copula	0. 64	0. 089 7	0. 030 5	-431
		Frank Copula	2. 65	0. 079 1	0. 031 5	-427
		Gumbel Copula	1. 32	0. 085 0	0. 036 3	-409
	石门站-新江口站	Clayton Copula	0. 48	0. 091 3	0. 038 2	-403
		Frank Copula	2. 25	0. 076 8	0. 033 0	-421
		Gumbel Copula	1. 29	0. 079 3	0. 035 5	-412
连续 7 d 年最大洪量	石门站-沙道观站	Clayton Copula	0. 77	0. 099 8	0. 039 4	-399
		Frank Copula	2. 88	0. 097 4	0. 036 1	-410
		Gumbel Copula	1. 31	0. 121 1	0. 045 7	-381
	石门站-松滋河口	Clayton Copula	0. 50	0. 099 8	0. 041 6	-392
		Frank Copula	2. 40	0. 085 4	0. 039 5	-399
		Gumbel Copula	1. 31	0. 081 0	0. 042 3	-390

注:加粗表示该函数为拟合最优的 Copula 函数。

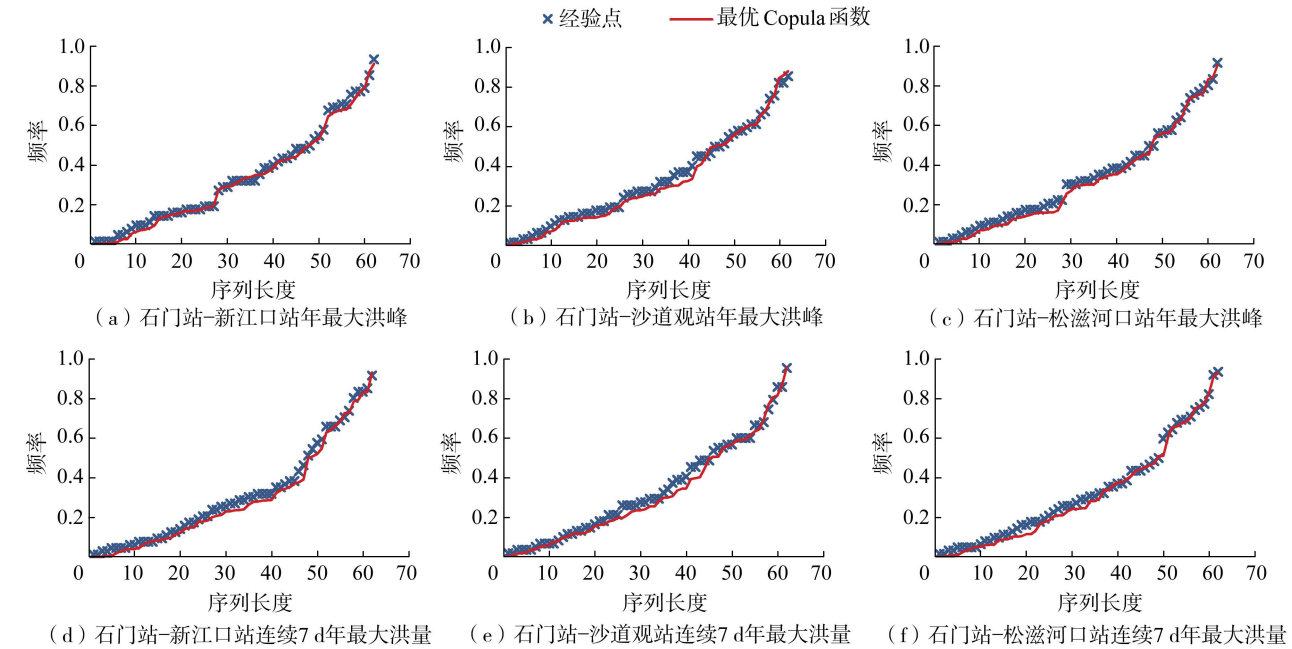


图3 最优 Copula 函数的经验点与理论拟合曲线

表5 松澧地区典型年洪水过程遭遇情况统计结果

年份	连续 7 d 年最大洪量/亿 m ³				联合概率			联合重现期/a		
	石门站	新江口站	沙道观站	松滋河口	石门站- 新江口站	石门站- 沙道观站	石门站- 松滋河口	石门站- 新江口站	石门站- 沙道观站	石门站- 松滋河口
1969	29.20(7.8)	20.89(1.4)	10.64(2.5)	31.48(1.9)	0.284	0.565	0.436	1.4	2.3	1.8
1980	47.05(57.9)	27.83(5.0)	12.88(5.3)	40.67(6.0)	0.788	0.803	0.824	4.7	5.1	5.7
1983	38.08(21.5)	25.55(3.0)	11.13(2.9)	36.64(3.4)	0.643	0.641	0.682	2.8	2.8	3.1
1991	44.67(44.7)	25.24(2.8)	10.56(2.5)	35.80(3.0)	0.632	0.591	0.659	2.7	2.4	2.9
1998	37.53(20.3)	36.41(60.3)	14.39(10.6)	50.79(39.8)	0.936	0.868	0.929	15.6	7.6	14.0
2003	43.62(39.9)	20.78(1.4)	7.52(1.3)	28.11(1.4)	0.289	0.251	0.295	1.4	1.3	1.4

注:括号中的数据为重现期,单位为 a。

50.79 亿 m³, 重现期分别为 20.3、60.3、10.6、39.8 a, 石门站-新江口站、石门站-沙道观站和石门站-松滋河口的联合重现期分别为 15.6、7.6、14.0 a。根据历史实测洪水资料,1998 年松澧地区未发生松滋河与澧水洪峰遭遇情况,但记录了有实测资料以来的最大洪水事件,主要是松滋河的洪水过程遭遇澧水,导致松澧地区出现了极为严重的防洪形势^[19]。此外,除 1998 年外,其余年份的两江 7 d 洪量大多为联合重现期小于 5 a 的小洪水,且与松滋河的单变量重现期相差不大,说明大部分典型年松澧地区洪水遭遇以松滋河洪水过程为主,这与宋平等^[21]的研究结论一致。

3.4.2 洪水遭遇的同现概率分析

考虑下游防洪安全,选取 10、20、50、100、200、1 000 a 重现期设计洪水,分别计算石门站与新江口站、沙道观站和松滋河口的同现概率,以确定松澧地区不同重现期标准下设计最大洪峰及设计最大 7 d 洪量的遭遇概率,结果如表 6 所示。在相同重现期的情况下,澧水与松滋河年最大洪峰遭遇的同现概

率随着洪水量级的增大而减小。具体而言,澧水与松滋河西支、东支和松滋河口同时发生 10 年一遇洪水的概率分别为 2.807%、2.841%、1.960%,同时遭遇 100 年一遇洪水的概率分别为 0.051%、0.078%、0.039%,同时遭遇 1 000 年一遇洪水的概率分别为 0.001%、0.002%、0.001%。当保持澧水石门站洪峰防洪设计标准一定时,增加松滋河 3 个控制点的洪峰设计标准,则两江洪水的同现概率均呈下降趋势。与此类似,松澧地区连续 7 d 年最大洪量的遭遇概率,呈现出重现期越长洪水遭遇概率越低的特征。此外,在相同的洪水发生量级组合下,与石门站发生年最大洪峰遭遇的概率从大到小依次为沙道观站、新江口站、松滋河口,而与石门站发生年最大洪量遭遇的概率从大到小依次为沙道观站、松滋河口、新江口站,这说明澧水洪水与松滋河东支洪水遭遇频率最高。值得注意的是,当松滋河口发生 1 000 年一遇大洪水时,石门站-松滋河口的不同量级洪峰遭遇概率反而大于石门站-新江口站的组合,而不同量级洪量遭遇概率的情况则与之相反。

表 6 不同重现期下松澧地区洪水遭遇的同现概率

控制点	重现期/a	石门站与各控制点发生某一量级洪水的概率/%											
		年最大洪峰						连续 7 d 年最大洪量					
		10 年一遇	20 年一遇	50 年一遇	100 年一遇	200 年一遇	1000 年一遇	10 年一遇	20 年一遇	50 年一遇	100 年一遇	200 年一遇	1000 年一遇
新江口站	10	2.807	1.473	0.625	0.332	0.180	0.047	2.112	1.138	0.488	0.254	0.132	0.029
	20	1.620	0.858	0.366	0.195	0.106	0.027	1.135	0.615	0.264	0.138	0.072	0.016
	50	0.754	0.402	0.172	0.092	0.050	0.013	0.507	0.275	0.119	0.062	0.032	0.007
	100	0.417	0.222	0.095	0.051	0.028	0.007	0.281	0.153	0.066	0.035	0.018	0.004
	200	0.229	0.122	0.052	0.028	0.015	0.004	0.159	0.086	0.037	0.020	0.010	0.002
	1000	0.056	0.030	0.013	0.007	0.004	0.001	0.045	0.024	0.011	0.006	0.003	0.001
沙道观站	10	2.841	1.433	0.594	0.314	0.169	0.044	4.251	2.285	0.978	0.510	0.265	0.057
	20	1.914	0.967	0.401	0.212	0.114	0.030	3.264	1.767	0.759	0.396	0.206	0.045
	50	1.097	0.555	0.230	0.122	0.066	0.017	2.305	1.255	0.542	0.283	0.147	0.032
	100	0.703	0.356	0.148	0.078	0.042	0.011	1.772	0.968	0.419	0.219	0.114	0.025
	200	0.442	0.224	0.093	0.050	0.027	0.007	1.361	0.746	0.323	0.169	0.088	0.019
	1000	0.142	0.072	0.030	0.016	0.009	0.002	0.735	0.405	0.176	0.092	0.048	0.010
松滋河口	10	1.960	0.990	0.411	0.217	0.117	0.030	2.429	1.310	0.562	0.293	0.152	0.033
	20	1.168	0.590	0.245	0.129	0.070	0.018	1.357	0.736	0.317	0.166	0.086	0.019
	50	0.590	0.298	0.124	0.065	0.035	0.009	0.614	0.335	0.145	0.076	0.039	0.009
	100	0.352	0.178	0.074	0.039	0.021	0.005	0.335	0.183	0.079	0.041	0.022	0.005
	200	0.211	0.107	0.044	0.023	0.013	0.003	0.182	0.099	0.043	0.023	0.012	0.003
	1000	0.064	0.032	0.013	0.007	0.004	0.001	0.044	0.024	0.011	0.006	0.003	0.001

3.4.3 洪水遭遇的条件概率分析

在松澧地区洪水事件中,关注当澧水石门站发生不同量级洪水时,松滋河各控制点发生某一量级洪水的条件概率有多大,对于认识了解区域洪水组成规律及保障下游防洪对象安全具有重要意义。如表 7 所示,当澧水发生某一量级的洪水时,松滋河发生小量级洪水比发生大量级洪水的概率更大。对于年最大洪峰,当澧水石门站发生 1 000 年一遇洪水时,新江口站、沙道观站和松滋河口发生 1000 年一遇洪水的概率分别为 0.649%、1.478%和 0.662%,

发生 100 年一遇洪水的概率分别为 4.820%、7.305%和 3.658%,发生 10 年一遇洪水的概率分别为 31.338%、29.358%和 20.281%;对于连续 7 d 年最大洪量,当澧水石门站发生 1000 年一遇洪水时,新江口站、沙道观站和松滋河口发生 1000 年一遇洪水的概率分别为 0.479%、8.051%和 0.479%,发生 100 年一遇洪水的概率分别为 3.004%、19.111%和 3.602%,发生 10 年一遇洪水的概率分别为 22.127%、44.293%和 25.497%。这在一定程度上说明澧水大洪水与松滋河中小洪水的遭遇概率更大。

表 7 不同重现期下松澧地区洪水遭遇的条件概率

控制点	重现期/a	石门站与各控制点发生某一量级洪水的概率/%											
		年最大洪峰						连续 7 d 年最大洪量					
		10 年一遇	20 年一遇	50 年一遇	100 年一遇	200 年一遇	1000 年一遇	10 年一遇	20 年一遇	50 年一遇	100 年一遇	200 年一遇	1000 年一遇
新江口站	10	28.250	29.793	30.724	31.037	31.198	31.338	20.215	21.131	21.720	21.928	22.036	22.127
	20	16.305	17.343	17.981	18.198	18.310	18.408	10.862	11.412	11.770	11.896	11.962	12.018
	50	7.591	8.125	8.457	8.571	8.630	8.682	4.851	5.113	5.284	5.345	5.377	5.404
	100	4.193	4.499	4.690	4.756	4.790	4.820	2.690	2.838	2.936	2.971	2.989	3.004
	200	2.299	2.470	2.578	2.614	2.634	2.650	1.519	1.604	1.660	1.679	1.690	1.699
	1000	0.561	0.604	0.630	0.640	0.644	0.649	0.428	0.452	0.468	0.473	0.476	0.479
沙道观站	10	28.587	28.985	29.212	29.287	29.325	29.358	40.681	42.439	43.543	43.928	44.126	44.293
	20	19.257	19.549	19.717	19.772	19.810	19.825	31.240	32.804	33.802	34.152	34.333	34.486
	50	11.037	11.217	11.320	11.354	11.372	11.387	22.059	23.311	24.120	24.406	24.555	24.681
	100	7.074	7.193	7.261	7.284	7.295	7.305	16.953	17.978	18.646	18.883	19.007	19.111
	200	4.452	4.528	4.572	4.586	4.594	4.600	13.023	13.847	14.388	14.580	14.681	14.766
	1000	1.429	1.454	1.469	1.473	1.476	1.478	7.038	7.514	7.829	7.942	8.001	8.051
松滋河口	10	19.727	20.012	20.176	20.230	20.257	20.281	23.244	24.326	25.019	25.264	25.391	25.497
	20	11.753	11.934	12.039	12.074	12.091	12.107	12.987	13.672	14.117	14.275	14.357	14.426
	50	5.936	6.032	6.088	6.106	6.115	6.123	5.878	6.213	6.433	6.511	6.552	6.587
	100	3.545	3.603	3.637	3.648	3.654	3.658	3.203	3.392	3.515	3.560	3.583	3.602
	200	2.118	2.153	2.174	2.180	2.184	2.187	1.743	1.847	1.915	1.940	1.952	1.963
	1000	0.641	0.652	0.658	0.660	0.661	0.662	0.424	0.450	0.467	0.473	0.476	0.479

4 结 论

a. 时变 GAMLSS 能够有效地反映变异条件下的松澧洪水特性。石门站和新江口站的年最大洪峰序列服从 Log-Normal 分布,而沙道观站和松滋河口则服从 Gamma 分布;对于连续 7d 年最大洪量而言,新江口站和松滋河口的 Gamma 分布拟合效果最优,而石门站和沙道观站的最优拟合分布分别为 Log-Normal、Weibull 函数。

b. Archimedean Copula 函数能较好地拟合两江洪水特征变量的联合分布。对于年最大洪峰序列,石门站-新江口站的 Frank Copula 函数拟合效果最好,石门站-沙道观站和石门站-松滋河口的 Clayton Copula 函数拟合效果最好;而连续 7 d 年最大洪量序列拟合效果最好的函数均是 Frank Copula 函数。

c. 根据典型年洪水遭遇统计,松澧地区以松滋河洪水过程遭遇澧水洪水为主。随着洪水量级的增大,澧水与松滋河的年最大洪水变量的同现概率逐渐减小。相比于松滋河西支和松滋河口,松滋河东支洪水更容易与澧水洪水遭遇。此外,澧水大洪水与松滋河中小洪水的遭遇概率更大。

参考文献:

[1] 孙亚楠. 嫩江、第二松花江洪水遭遇及顶托影响研究 [D]. 大连: 大连理工大学, 2019.

[2] 戴明龙, 沈燕舟. 长江上游与洞庭湖洪水遭遇规律研究 [J]. 水资源与水工程学报, 2010, 21(6): 117-120. (DAI Minglong, SHEN Yanzhou. Encountered regulation research on upstream flood of Yangtze River with Dongting Lake flood [J]. Journal of Water Research & Water Engineering, 2010, 21(6): 117-120. (in Chinese))

[3] 朱龙腾, 刘友春, 闫芳阶, 等. 南四湖流域洪水遭遇分析研究 [J]. 海洋湖沼通报, 2015(1): 149-154. (ZHU Longteng, LIU Youchun, YAN Fangjie, et al. Flood coincidence probability analysis for Nansi Lake Valley [J]. Transactions of Oceanology and Limnology, 2015 (1): 149-154. (in Chinese))

[4] 关帅, 林颖妍, 查悉尼, 等. 基于 Copula 函数的韩江流域干支流洪水遭遇分析 [J]. 中山大学学报 (自然科学版), 2015, 54(5): 130-137. (GUAN Shuai, LIN Yingyan, ZHA Xini, et al. Copula function-based flood coincidence probability analysis for mainstream and tributary of the Hanjiang River Basin [J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni, 2015, 54(5): 130-137. (in Chinese))

[5] FENG Y, SHI P, QU S, et al. Nonstationary flood coincidence risk analysis using time-varying Copula functions[J]. Scientific Reports, 2020, 10(1): 1-12.

[6] 冉啟香, 彭畅, 凌旋. 基于 Copula 函数的嘉陵江流域干支流洪水遭遇分析 [J]. 水资源研究, 2017, 6(5): 459-467. (RAN Qixiang, PENG Chang, LING Xuan. Flood coincidence probability analysis for mainstream and tributaries of the Jialing River Basin based on Copula function [J]. Journal of Water Resources Research, 2017, 6(5): 459-467. (in Chinese))

[7] PROHASKA S, ILIC A. Coincidence of flood flow of the Danube River and its tributaries [C]// Hydrological Processes of the Danube River Basin. [S.l.]: Springer, 2010.

[8] 郭晓亮, 李贵阳, 孙亚楠, 等. 嫩江、松花江洪水遭遇情况 [J]. 南水北调与水利科技 (中英文), 2020, 18(5): 102-108. (GUO Xiaoliang, LI Guiyang, SUN Yanan, et al. Flood coincidence problems in Nen River and Songhua River [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2020, 18(5): 102-108. (in Chinese))

[9] 蒋楠, 高成, 夏欢. 基于 Copula 函数的锦河与连锦河洪水遭遇分析 [J]. 水资源与水工程学报, 2019, 30(3): 85-91. (JIANG Nan, GAO Cheng, XIA Huan. Analysis of flood encounters in Jin River and Lianjin River based on Copula function [J]. Journal of Water Resources & Water Engineering, 2019, 30(3): 85-91. (in Chinese))

[10] 张超, 彭杨, 纪昌明, 等. 长江上游与洞庭湖洪水遭遇风险分析 [J]. 水力发电学报, 2020, 39(8): 55-68. (ZHANG Chao, PENG Yang, JI Changming, et al. Floods encountering risk analysis for upper Yangtze River and Dongting Lake [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2020, 39(8): 55-68. (in Chinese))

[11] 仇红亚, 李妍清, 陈璐, 等. 洞庭湖流域洪水遭遇规律研究 [J]. 水力发电学报, 2020, 39(11): 59-70. (QIU Hongya, LI Yanqing, CHEN Lu, et al. Study on the law of flood coincidence in the Dongting Lake Basin [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2020, 39(11): 59-70. (in Chinese))

[12] CHEN L, SINGH V P, SHENGLIAN G, et al. Flood coincidence risk analysis using multivariate copula functions[J]. Journal of Hydrologic Engineering, 2012, 17(6): 742-755.

[13] 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))

[14] RIGBY R A, STASINOPOULOS D M. Generalized additive models for location, scale and shape [J]. Journal of the Royal Statistical Society: Applied Statistics, 2005,

- 54(3): 507-54.
- [15] 鲁帆,肖伟华,戴雁宇,等. 黄河干流年径流量非一致性频率计算[J]. 水力发电学报, 2020, 39(12): 76-84. (LU Fan, XIAO Weihua, DAI Yanyu, et al. Study on non-stationary frequency calculations for the annual runoff of Yellow River mainstream[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2020, 39(12): 76-84. (in Chinese))
- [16] DAS J, JHA S, GOYAL M K. Non-stationary and copula-based approach to assess the drought characteristics encompassing climate indices over the Himalayan states in India[J]. Journal of Hydrology, 2020, 580: 124356.
- [17] 杜涛,熊立华,李帅,等. 基于风险的非一致性设计洪水及其不确定性研究[J]. 水利学报, 2018, 49(2): 241-253. (DU Tao, XIONG Lihua, LI Shuai, et al. Risk-based nonstationary design flood and uncertainty analysis [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2018, 49(2): 241-253. (in Chinese))
- [18] 王韩叶,黄生志,方伟,等. 考虑非一致性的多属性洪水风险评估[J]. 西安理工大学学报, 2020, 36(4): 507-515. (WANG Hanye, HUANG Shengzhi, FANG Wei, et al. Bivariate flood risk assessment considering non-stationary model [J]. Journal of Xi'an University of Technology, 2020, 36(4): 507-515. (in Chinese))
- [19] 黄云仙. 松澧地区洪水遭遇分析[J]. 湖南水利水电, 2012(3): 58-60. (HUANG Yunxian. Analysis of flood encounter in Song-Li region[J]. Hunan Hydro & Power, 2012(3): 58-60. (in Chinese))
- [20] 张琦. 澧水-松滋河湖南段河床演变与通航条件研究[D]. 长沙:长沙理工大学, 2020.
- [21] 宋平,钱湛,李觅. 松滋口建闸水文条件及其对减少松澧地区超额洪量作用分析[J]. 中国农村水利水电, 2019(3): 157-160. (SONG Ping, QIAN Zhan, LI Mi. Hydrological conditions for Songzi flood-regulating Sluice construction and analysis of reducing effect on excess flood volume of Song-Li region [J]. China Rural Water and Hydropower, 2019(3): 157-160. (in Chinese))
- [22] 黄强,孔波,樊晶晶. 水文要素变异综合诊断[J]. 人民黄河, 2016, 38(10): 18-23. (HUANG Qiang, KONG Bo, FAN Jingjing. Hydrological elements comprehensive detecting variation [J]. Yellow River, 2016, 38(10): 18-23. (in Chinese))
- [23] 吴国栋,刘廷玺,薛国儒. 一种基于 ITA 改进的水文气象序列趋势分析法[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2022, 50(1): 1-6. (WU Guodong, LIU Tingxi, XUE Heru. An improved trend analysis method for hydro-meteorological time series based on ITA [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2022, 50(1): 1-6. (in Chinese))
- [24] 郑锦涛,陈伏龙,张鑫厚,等. 基于 GAMLSS 模型的玛纳斯河设计年径流分析[J]. 气候变化研究进展, 2018, 14(3): 257-265. (ZHENG Jintao, CHEN Fulong, ZHANG Xinhou, et al. Analysis of design annual runoff of Manas River based on GAMLSS model [J]. Climate Change Research, 2018, 14(3): 257-265. (in Chinese))
- [25] 江聪,熊立华. 基于 GAMLSS 模型的宜昌站年径流序列趋势分析[J]. 地理学报, 2012, 67(11): 1505-1514. (JIANG Cong, XIONG Lihua. Trend analysis for the annual discharge series of the Yangtze River at the Yichang Hydrological Station based on GAMLSS [J]. Acta Geographica Sinica, 2012, 67(11): 1505-1514. (in Chinese))
- [26] 韩晓庆. Copula 函数的理论及其应用[D]. 温州:温州大学, 2013.
- [27] 张萍萍,张俊,田刚,等. 长江上游与洞庭湖洪水遭遇天气概念模型研究[J]. 人民长江, 2015, 46(12): 27-32. (ZHANG Pingping, ZHANG Jun, TIAN Gang. Research on weather conceptual model of upper Yangtze River flood encountering with Dongting Lake flood [J]. Yangtze River, 2015, 46(12): 27-32. (in Chinese))
- [28] JIANPING B, PENGXIN D, XIANG Z, et al. Flood coincidence analysis of Poyang Lake and Yangtze River: risk and influencing factors[J]. Stochastic Environmental Research and Risk Assessment, 2018, 32: 879-891.
- [29] 刘曾美,王尚伟,蔡玉婷,等. 感潮地区涝区暴雨与泄洪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))
- [30] 王磊之,崔婷婷,李笑天,等. 降水变化条件下沿海地区暴雨-潮位遭遇联合风险[J]. 水资源保护, 2022, 38(4): 110-116. (WANG Leizhi, CUI Tingting, LI Xiaotian, et al. Joint risks of rainstorm and tidal level under varying precipitation conditions in coastal areas [J]. Water Resources Protection, 2022, 38(4): 110-116. (in Chinese))
- [31] 杨富香,拾兵,王成见. 大沽河流域水文情势变化研究[J]. 水土保持研究, 2024, 31(2): 18-26. (YANG Fuxiang, SHI Bing, WANG Chengjian. Study on hydrological regime alteration of Dagou River Basin [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2024, 31(2): 18-26. (in Chinese))
- [32] 徐卫红. 洞庭湖区复杂防洪系统数值模拟模型研究与应用[D]. 北京:中国水利水电科学研究院, 2013.

(收稿日期:2023-04-05 编辑:骆超)