

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2023.02.020

华南中小流域设计暴雨洪水同频率检验与重现水平推算

赵玲玲^{1,2}, 张鑫辉^{1,2,3}, 刘昌明^{4,5}, 杨 兴⁶

(1. 广东省科学院广州地理研究所, 广东 广州 510002;
2. 广东省科学院广州地理研究所广东省地理空间信息技术与应用公共实验室, 广东 广州 510070;
3. 西北农林科技大学水利与建筑工程学院, 陕西 杨凌 712100; 4. 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101;
5. 北京师范大学水科学学院, 北京 100875; 6. 安徽省交通勘察设计院有限公司, 安徽 合肥 230000)

摘要:暴雨洪水同频率假定是否成立和暴雨洪水遭遇概率分布是中小流域设计洪水计算的依据, 为检验其合理性, 采用鉴江上游曹江流域典型强降水流域 1967—2013 年逐时暴雨洪水观测资料, 分析了华南中小流域最大面雨量 R 和对应场次最大洪峰流量 Q 的边缘分布和联合分布的遭遇概率, 并推算其设计重现水平。研究表明:暴雨和洪水同频遭遇概率较小;对于特定设计频率,洪峰流量与流域面雨量的遭遇概率随流域面雨量增大而增大;流域面雨量和洪峰流量的遭遇条件概率显示存在着多种防洪风险管理选择;相对于“或”联合重现期和“且”重现期,二次重现期更准确地反映 R - Q 组合的风险率。

关键词:设计暴雨洪水;同频率假设;Kendall 重现期;重现水平;中小流域;曹江流域

中图分类号:TV22 **文献标志码:**A **文章编号:**1000-1980(2023)02-0157-07

Same frequency test and recurrence level estimation of design storm flood in a small and medium-sized basin of South China

ZHAO Lingling^{1,2}, ZHANG XinHui^{1,2,3}, LIU Changming^{4,5}, YANG Xing⁶

(1. Guangzhou Institute of Geography, Guangdong Academy of Sciences, Guangzhou 510002, China;
2. Guangdong Open Laboratory of Geospatial Information Technology and Application, Guangzhou Institute of Geography, Guangdong Academy of Sciences, Guangzhou 510070, China;
3. College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest A & F University, Yangling 712100, China;
4. Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China;
5. College of Water Sciences, Beijing Normal University, Beijing 100875, China;
6. Anhui Traffic Survey and Design Institute Co., Ltd., Hefei 230000, China)

Abstract: Whether the assumption of the same frequency of storm and flood is true or not and the probability distribution of encountering the storm and flood are the basis for the design flood calculation of small and medium-sized basins. To validate the rationality, based on the hourly rainstorm and flood observation data from 1967 to 2013 in the typical heavy rainfall basin of Caojiang River in the upper reaches of Jianjiang River, this paper firstly analyzes the marginal distribution of the maximum surface rainfall and the maximum flood peak discharge, then analyzes the encounter probability of the joint distribution of rainstorm and flood peak, and calculates the design recurrence level. The main conclusions are as follows: the probability of the same frequency of rainstorm and flood is small in this basin; for a specific design frequency, the encounter probability of flood peak discharge and watershed surface rainfall increases with the increment of watershed surface rainfall; the encounter probabilities of rainfall and flood peak flow show that there are many management options for flood risk; compared with the ‘OR’ return period and the ‘AND’ return period, the secondary return period more accurately reflects the risk rate of R - Q combination.

Key words: design storm flood; same frequency hypothesis; Kendall recurrence period; recurrence level; small and medium-sized basin; Caojiang Watershed

基金项目: 国家自然科学基金(42271091,41977413,41771044,41501046); 广东省水利科技创新项目(2016-14)

作者简介: 赵玲玲(1980—),女,研究员,博士,主要从事流域水文循环模拟研究。E-mail:linglingzhao@foxmail.com

引用本文: 赵玲玲,张鑫辉,刘昌明,等. 华南中小流域设计暴雨洪水同频率检验与重现水平推算[J]. 河海大学学报(自然科学版),2023,51(2):157-163.

ZHAO Lingling,ZHANG XinHui,LIU Changming,et al. Same frequency test and recurrence level estimation of design storm flood in a small and medium-sized basin of South China [J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences),2023,51(2):157-163.

华南地区的台风暴雨过程常导致山区中小河流山洪灾害频发,造成严重的社会经济损失。而中小流域多属于无资料流域,缺少径流观测数据,设计洪水常通过设计暴雨推求,计算过程均建立在暴雨洪水同频率^[1-2]假定基础上,该假设是当前水利水电工程设计规范中暴雨洪水计算的前提。所以暴雨洪水同频率假设的合理与否直接关系防洪安全。

暴雨洪水同频率既是水文学的科学问题,同时又是一关系工程和经济社会安全的现实问题。现有的暴雨洪水同频率假设研究中,均针对特定流域的暴雨洪水事件的概率分布开展研究,而未研究暴雨洪水同频率假定的合理性。前期研究采用数据序列较短,随着近年暴雨洪水记录的不断刷新,基于长序列场次洪水资料,运用概率联合分布理论开展暴雨洪水同频率假定研究十分必要。

Salvadori 等^[3]利用 Copulas 研究了多变量水文事件的“或”联合重现期(首次重现期)和“且”联合重现期。基于 Copulas 总结了非独立的多变量水文事件联合重现期的普遍理论框架。相关研究证明 Copulas 计算十分简便^[4-5],且具有较强的适用性,可用于定量分析流域雨洪遭遇概率^[6-7],为风险分析提供了一种非常简单而又有效的方法。针对首次重现期在危险域或安全域划分上存在的问题,Salvadori 等^[3]引入了一个新的可与特定事件联合重现期相关联的分布函数——Kendall 分布函数,可以视其为首次重现期超过阈值事件的平均到达时间(临界事件),定义了亚临界事件、临界事件和超临界事件以及二次重现期(secondary return periods)的涵义,为处理潜在危险(破坏性)的随机事件的频率分析领域提供了新成果^[8-11]。

本文基于鉴江上游曹江流域 1967—2013 年的水文数据,采用 Copula 和 Kendall 分布函数,估算不同历时暴雨洪水遭遇频率,进而针对暴雨洪水事件开展暴雨洪水同频率验证,检验暴雨洪水同频率假定的合理性,推算暴雨洪水组合遭遇条件下的设计水平值,以期能为防洪风险管理提供更多的选择。

1 研究区域与数据

取广东典型中小流域——曹江流域作为示例研究。曹江是粤西独流入海的鉴江一级支流,发源于高州马贵镇山心村的蓝蓬岭^[12]。曹江中上游分别设有厚园、马贵、白马、大坡、下桐和大拜 6 个雨量站,其中大拜同时为水文站(图 1),出口断面大拜水文站集水面积 394 km²。曹江中上游雨量充沛,是广东的暴雨高区之一,台风暴雨导致洪水灾害频发,常造成严重的社会经济损失。

根据曹江 6 个雨量站 1967—2013 年水文摘录数据,提取 6 个雨量站暴雨数据和相应场次的洪峰流量,按泰森多边形方法计算流域(面)雨量,选取大拜水文站的 111 场洪峰流量和相应流域面雨量作为分析样本。

2 研究方法

2.1 暴雨洪水边缘分布计算方法

采用皮尔逊三型分布(PE3)、广义极值分布(GEV)、广义正态分布(GNO)、广义 logistic 分布(GLO)分别拟合洪峰流量和流域面雨量样本。经验频率分布使用 Gringorten 公式计算,参数估计使用 L-矩方法,拟合优度采用均方根误差(RMSE)和概率点据相关系数(PPCC)加以检验优选边缘分布函数^[13]。

2.2 Copula 函数与联合分布重现期

分别定义随机变量洪峰流量(Q)和流域面雨量(R)边缘分布的重现期 T_Q 、 T_R 为

$$T_Q = \frac{E(L)}{1 - F_Q(q)} \quad T_R = \frac{E(L)}{1 - F_R(r)}$$

(1)

式中: $E(L)$ 为历次洪水时间间隔的期望值; L 为时间间隔; q 和 r 分别为 Q 和 R 的临界值。

根据 Sklar 定理^[14-15],若 $F(\cdot)$ 是一个二维随机变量(Q, R)的累积分布函数,其边缘分布函数是连续函数 $u = F_Q(q)$ 、 $v = F_R(r)$,则有唯一的 Copula 函数 C 使得:

$$F(q, r) = P(Q \leq q, R \leq r) = C(F_Q(q), F_R(r)) = C(u, v)$$

(2)

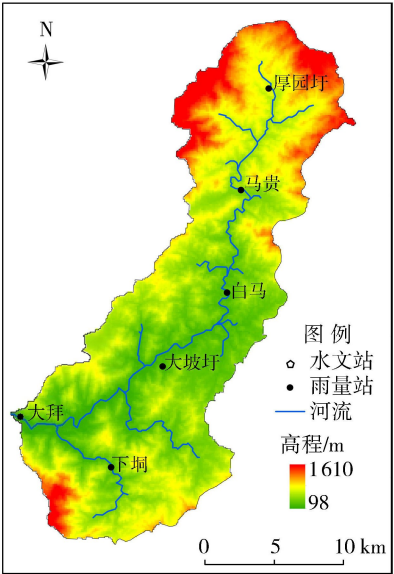


图 1 曹江流域地形与测站位置

Fig.1 Topography and survey stations of Caojiang River watershed

采用算符“ $\vee$ ”定义极端事件 $E_{QR}^{\vee}:E_{QR}^{\vee}=\{Q>q\vee R>r\}$,表示两变量任一变量超过临界值。则极端事件 $E_{QR}^{\vee}$ 的“或”联合重现期(首次重现期,primary return periods)^[6]为

$$T_{\text{OR}}(q,r)=\frac{E(L)}{1-C(F_Q(q),F_R(r))}$$

(3)

以“ $\wedge$ ”定义“且”极端事件 $E_{QR}^{\wedge}:E_{QR}^{\wedge}=\{Q>q\wedge R>r\}$,表示两变量同时超过临界值,则极端事件 $E_{QR}^{\wedge}$ 的“且”联合分布重现期为

$$T_{\text{AND}}(q,r)=\frac{E(L)}{1-F_Q(q)-F_R(r)+C(F_Q(q),F_R(r))}$$

(4)

2.3 Kendall 分布函数与二次重现期

由于首次重现期不同的 u,v 组合只要其累积概率相同都可产生相同的重现期,因此存在着安全域或危险域的误判情况。为此,Salvadori 等^[3,16]利用 Nelsen^[17]定义的与首次重现期相关联的 Kendall 函数,将二维的极值事件投射为一维分布,划分出了研究域内的亚临界(安全域)、临界(警戒事件)和超临界(危险域)3 种情景。通过求 Copula 累积概率小于或等于某临界概率(t)的(u,v)组合,Kendall 分布函数 K_c 可表达为^[3]

$$K_c(t)=t-\frac{\varphi(t)}{\varphi'(t)}\quad(0<t\leqslant 1)$$

(5)

式中: $\varphi(t)$ 为 K_c 生成元; $\varphi'(t)$ 为 $\varphi(t)$ 的右导数。由 Kendall 分布函数确定的重现期为二次重现期:

$$T_K(x,y)=\frac{E(L)}{1-K_c(t)}$$

(6)

2.4 联合分布设计值

对于给定的重现期,单变量频率分析通常可通过概率分布的反函数直接推算对应的设计值。对于多变量的随机极端水文事件,由于不存在联合分布的反函数显式而无法直接推算。因此,如何根据一定的准则推算多变量联合分布的设计值成为防洪工程应用中的一个关键问题。本文采用文献[18-19]提出的公式推算联合分布设计值^[18-19]:

$$(u_m,v_m)=\underset{(u,v)\in S_p^{\vee}}{\operatorname{argmax}}f(u,v)$$

(7)

其中

$$f(u,v)=c(u,v)f(u)f(v)$$

式中: (u_m,v_m) 为两变量联合概率密度 $f(u,v)$ 达到最大值时的组合设计值; $c(u,v)$ 为二维 Archimedean Copula 的概率密度函数; $f(u)$ 和 $f(v)$ 分别为洪峰流量与流域面雨量的概率密度函数。

3 结果分析

3.1 边缘分布

选用 GNO、GEV、GLO 和 PE3 对 111 场洪水的洪峰流量 Q 与相应流域面雨量 R 最大暴雨量概率分布加以分析。拟合的概率分布参数与优度检验结果见表 1,综合比较拟合优度可知,PE3 和 GLO 分别适用于流域面雨量和洪峰流量,二者的概率分布如图 2 所示。

表 1 边缘分布参数与拟合优度检验值

Table 1 Parameters of the marginal distribution and values of goodness of the fit test

概率 分布函数	形态参数		尺态参数		位置参数		RMSE		PPCC	
	Q	R	Q	R	Q	R	Q	R	Q	R
GNO	465.282	143.708	194.992	83.389	-0.905	-0.421	92.252	8.146	0.967	0.996
GEV	416.916	118.197	140.463	69.511	-0.359	-0.052	82.494	9.107	0.974	0.995
GLO*	475.635	145.433	113.327	47.27	-0.423	-0.204	79.491	14.839	0.979	0.988
PE3	314.319	9.152	0.614	2.64	0.002	0.017	114	6.693	0.949	0.997

注: * 号表示该分布拟合效果最好。

3.2 联合分布

采用相关性指标法计算洪峰流量和流域面雨量联合分布的 4 种 Archimedean Copula 函数:Gumbel-Hougaard(G-H) Copula、Frank Copula、A-M-H Copula 和 Clayton Copula 相依参数 θ 的估计值,相应的 Akaike 信息准则法(AIC)和最小二乘法准则(OLS)拟合优度检验见表2。以相对最优的G-Hcopula构建洪峰流量和

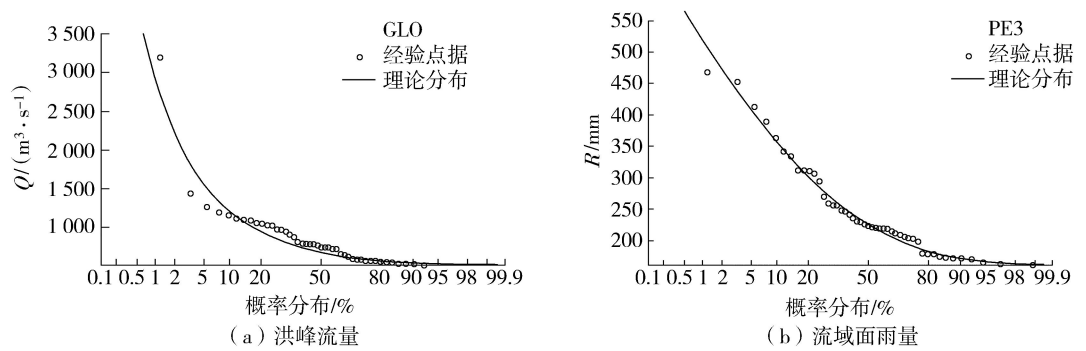


图 2 洪峰流量和流域面雨量的概率分布

Fig. 2 Probability distribution diagrams of flood peak flows and basin surface rainfall

流域面雨量的联合分布模式如下：

$$C(F_Q(q), F_R(r)) = \exp \{ - [(-\ln F_Q(q))^{1.634} + (-\ln F_R(r))^{1.634}]^{1/1.634} \}$$

(8)

3.3 雨洪同频联合重现期

由设定重现期标准下 Q - R 联合分布的 3 种重现期计算结果(表 3),对于设定的某一重现期 T ，“或”重现期、“且”重现期和二次重现期之间存在 $T_{OR} \leq T_K \leq T_{AND}$ 的关系。Graler 等^[20]对定义的 3 种联合重现期(JRP)的理论比较作了图示说明。以大拜水文站为例,预定重现期为 100 a 的防洪标准, Q - R 遭遇情景下洪峰流量超标致灾宜采用 123 a 的二次重现期标准,而非 77 a 的“或”重现期标准或 142 a 的“且”重现期标准。另以研究期间 2010 年出现的最大洪峰流量和相应的流域雨量进行分析比较。洪峰流量为 $3\,200\,m^3/s$ (重现期 128.1 a),相应的流域雨量为 468 mm(重现期 47 a),二者显然远非同频率遭遇。 Q - R “或”重现期、“且”重现期和二次重现期分别为 42.2 a、185.6 a 和 107.9 a,符合 3 个重现期之间大小关系。

3.4 雨洪设计值

表 4 列出了大拜水文站的洪峰流量和流域面雨量的单变量设计值和联合分布的“或”、“且”和二次重现期 3 种重现期的同频设计值。由表 4 可见,设定重现期下单变量洪峰流量与 3 种联合重现期的设计值存在以下关系: $Q_{OR} > Q > Q_K > Q_{AND}$ 。设计暴雨值也存在此不等关系。由此可见,按目前有关规范设计要求的单变量雨洪设计值已属于高标准。对比单变量设计值,依二次重现期推算的联合设计值具有更坚实的防洪工程设计与风险管理依据。

表 4 洪峰流量与流域暴雨设计值

Table 4 Design values of flood peak flows and basin rainstorms

重现期/a	边缘分布		“或”重现期		“且”重现期		二次重现期	
	$Q/(m^3 \cdot s^{-1})$	R/mm	$Q_{OR}/(m^3 \cdot s^{-1})$	R/mm	$Q_{AND}/(m^3 \cdot s^{-1})$	R/mm	$Q_K/(m^3 \cdot s^{-1})$	R/mm
200	3 822	568	4 420	603	2 582	526	3 016	538
100	2 902	521	3 348	556	2 002	479	2 306	490
50	2 214	472	2 536	507	1 498	434	1 770	441
20	563	406	1 782	442	1 096	367	1 270	376
10	1 209	355	1 374	392	877	316	999	325
5	941	301	1 064	339	703	264	794	274

3.5 暴雨洪水同频率假设合理性检验

定义特定流域雨量条件下出现洪峰流量的遭遇概率,给定 $R \geq r$ 时, $Q \geq q$ 的遭遇条件概率为

表 2 4 种 Copula 参数估计及拟合优度检验

Table 2 Parameter estimation and goodness-of-fit test for four Copulas

Copula 参数估计	θ	OLS	AIC
Clayton	1.268	0.423	-189
A-M-H	0.990	0.033	-762
G-H	1.634	0.023	-841
Frank	4.000	0.024	-825

表 3 洪峰流量和流域暴雨联合分布的重现期

Table 3 Joint recurrence periods of flood peak flows and basin rainstorms

T/a	T_{OR}/a	T_{AND}/a	T_K/a
200	131.0	422.2	335.7
100	65.6	210.2	167.1
50	32.9	104.2	82.8
20	13.3	40.6	32.2
10	6.7	19.5	15.4
5	3.5	9.0	7.1

$$P(Q \geq q | R \geq r) = \frac{P(Q \geq q, R \geq r)}{P(R \geq r)} = \frac{1 - F_Q(q) - F_R(r) + F(q, r)}{E(L)(1 - F_R(r))} \tag{9}$$

遭遇条件概率实质上表示了在大于流域某特定雨量设计值条件下超过洪峰流量设计值的风险率。表 5 表示以流域 6 个设计暴雨值 301 mm、355 mm、406 mm、472 mm、521 mm、568 mm(重现期分别为 5 a、10 a、20 a、50 a、100 a、200 a)为条件下与洪峰流量的遭遇风险概率。当出现概率大于等于 20%、10%、5%、2%、1%、0.5% 的流域面雨量时,大拜水文站洪峰流量超过相应标准的条件概率 $P(Q \geq q | R \geq r)$ 。

随着设计流域面雨量增大,其与特定设计频率的洪峰流量的遭遇概率随之增大。以重现期 100 a 的洪峰流量 2 901.9 m³/s 为例,其与重现期分别为 5 a、10 a、20 a、50 a、100 a、200 a 的设计流域面雨量的遭遇概率从 0.046 增大至 0.629; Q - R 同频率遭遇的概率介于 0.473 ~ 0.506,表明二者同频率遭遇的概率不大,主对角线以上二者遭遇的概率则大于 0.629,显示存在着多种防洪风险管理的 Q - R 组合。

表 5 设计洪峰流量与设计流域面雨量的遭遇概率

Table 5 Encountering probabilities of design flood peak flows and basin rainstorms

$Q/(m^3 \cdot s^{-2})$	$P(Q \geq q R \geq r)$					
	$R = 301\text{ mm}$	$R = 355\text{ mm}$	$R = 406\text{ mm}$	$R = 472\text{ mm}$	$R = 521\text{ mm}$	$R = 568\text{ mm}$
940.7	0.506	0.658	0.775	0.873	0.918	0.947
1 209.2	0.329	0.489	0.643	0.793	0.866	0.913
1 562.5	0.194	0.321	0.480	0.678	0.788	0.862
2 214.2	0.087	0.159	0.271	0.475	0.630	0.753
2 901.9	0.046	0.087	0.158	0.315	0.473	0.629
3 822.0	0.024	0.046	0.086	0.188	0.314	0.473

对于可能存在着不同重现期的流域面雨量和洪峰流量的组合,按出现概率最大的原理进一步推算二者不同重现期组合下的二次重现期设计值(表 6),二者组合设计值显示出以下特点:①同频率流域面雨量和洪峰流量组合设计值显示二者具有显著的正相关,相关系数高达 0.976。洪峰流量随雨量增大而呈现非线性增大。②不同重现期的流域暴雨与洪峰流量大小组合具有较明显的随机性,此应与流域产汇流过程有关。③同频率流域雨量和洪峰流量组合设计值同表 4 中的二次重现期设计值。

从上述遭遇概率组合来看,主对角线以上二者遭遇概率较大,推算的不同重现期最可能设计流域面雨量和设计洪峰流量组合可为流域防洪提供了更多的风险管理依据。

表 6 洪峰流量与流域暴雨组合下不同重现水平组合的设计值

Table 6 Design flood peak flows and rainstorm quantiles for different return level combinations

R 重现期/a	Q 重现期 200 a		Q 重现期 100 a		Q 重现期 50 a		Q 重现期 20 a		Q 重现期 10 a		Q 重现期 5 a	
	R/mm	$Q/(m^3 \cdot s^{-1})$	R/mm	$Q/(m^3 \cdot s^{-1})$	R/mm	$Q/(m^3 \cdot s^{-1})$	R/mm	$Q/(m^3 \cdot s^{-1})$	R/mm	$Q/(m^3 \cdot s^{-1})$	R/mm	$Q/(m^3 \cdot s^{-1})$
200	538 *	3 016 *	510	2 369	503	1 731	503	1 165	503	902	503	712
100	455	2 624	490 *	2 306 *	462	1 818	455	1 218	455	921	455	720
50	422	2 625	405	2 014	441 *	1 770 *	407	1 305	405	964	405	737
20	501	2 790	363	2 014	341	1 551	376 *	1 270 *	347	1 026	339	792
10	492	2 744	451	2 135	310	1 552	291	1 119	325 *	999 *	297	818
5	484	2 708	442	2 099	400	1 637	249	1 119	242	884	274 *	794 *

注: * 为同频率流域面雨量和洪峰流量组合设计值。

3.6 讨论

设计暴雨和设计洪水同频率是缺乏资料地区由暴雨资料间接推求设计洪水一种主要方法,在中小流域山洪灾害防治中起着重要作用^[21-22]。已有实证表明,由暴雨资料求得的设计洪水并非同频率。由于此涉及设计暴雨计算中典型暴雨的选择、点面关系的分析、设计净雨计算中设计初损值和设计前期影响雨量的确定、降雨径流关系曲线的制定以及河道行洪能力,还涉及不同历时设计暴雨与设计洪水关系。对此,拟另文从产汇流理论方面进行进一步分析总结。本文从设计暴雨和设计洪水联合分布实证了二者同频率遭遇较低,此为流域与下游的水库洪水风险管理提供了有益的科学依据。

4 结 论

a. 曹江流域相应场次面雨量和洪水同频概率较小,随着设计流域面雨量增大,其与特定设计频率的洪

峰流量的遭遇概率随着增大。

b. 对比“或”联合重现期和“且”重现期,Kendall 重现期可更准确地反映洪水和流域面雨量组合的风险率。

c. 以出现最大概率原理推算的不同流域面雨量和洪峰流量遭遇概率组合的 Kendall 重现期设计值为多种防洪标准选择与风险管理提供了更多的参考依据。

参考文献:

[1] 严方家,李琼芳,王燕,等. 镇江市中长历时设计暴雨计算[J]. 水资源保护,2021,37(2):108-111. (YAN Fangjia, LI Qiongfang, WANG Yan, et al. Medium and long duration design rainstorm calculation in Zhenjiang City [J]. Water Resources Protection, 2021, 37(2):108-111. (in Chinese))

[2] 郑德凤,高敏,李钰,等. 基于 GIS 的大连市暴雨洪涝灾害综合风险评估[J]. 河海大学学报(自然科学版),2022,50(3):1-8. (ZHENG Defeng, GAO Min, LI Yu, et al. Comprehensive risk assessment of rainstorm-flood disaster in Dalian City based on GIS [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2022, 50(3):1-8. (in Chinese))

[3] SALVADORI G, DE MICHELE C. Frequency analysis via copulas: theoretical aspects and applications to hydrological events[J]. Water Resources Research, 2004, 40(12): W12511.

[4] 王文圣,覃光华,梁瀚续,等. 基于 Copula 函数推求的管运洪水防洪标准探讨[J]. 水资源保护,2023,39(1):79-82. (WANG Wensheng, QIN Guanghua, LIANG Hanxu, et al. Probe on flood control standards of manage-flood based on Copula function [J]. Water Resources Protection, 2023, 39(1):79-82. (in Chinese))

[5] 李航,宋松柏,石继海. 指数 Gamma 分布参数估计方法对比研究[J]. 水力发电学报,2019,38(4):96-107. (LI Hang, SONG Songbai, SHI Jihai. Comparison of parameter estimation methods for exponential Gamma distribution [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2019, 38(4):96-107. (in Chinese))

[6] 刘曾美,王尚伟,蔡玉婷,等. 感潮地区涝区暴雨与承泄区上游洪水的遭遇规律[J]. 水资源保护,2021,37(2):89-94. (LIU Zengmei, WANG Shangwei, CAI Yuting, et al. Coincidence rules of rainfall in waterlogging area of tide-affected area and upstream flood in flood area of drainage receiver [J]. Water Resources Protection, 2021, 37(2):89-94. (in Chinese))

[7] 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))

[8] ZHANG L, SINGH V P. Bivariate flood frequency analysis using the copula method [J]. Journal of Hydrologic Engineering, 2006, 11(2):150-164.

[9] 方彬,郭生练,肖义,等. 年最大洪水两变量联合分布研究[J]. 水科学进展,2008,19(4):505-511. (FANG Bin, GUO Shenglian, XIAO Yi, et al. Annual maximum flood occurrence dates and magnitudes frequency analysis based on bivariate joint distribution [J]. Advances in Water Science, 2008, 19(4):505-511. (in Chinese))

[10] 姚瑞虎,覃光华,丁晶,等. 洪水二维变量重现期的探讨[J]. 水力发电学报,2017,36(10):35-44. (YAO Ruihu, QIN Guanghua, DING Jing, et al. Preliminary study on flood return periods based on bivariate variables [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2017, 36(10):35-44. (in Chinese))

[11] SALVADORI G, DURANTE F, DE MICHELE C. Multivariate return period calculation via survival functions [J]. Water Resources Research, 2013, 49:2308-2311.

[12] 于琦,赵玲玲,熊晨晓,等. 曹江中上游流域水文要素的气候变化特征[J]. 人民珠江,2016,37(12):1-7. (YU Qi, ZHAO Lingling, XIONG Chenxiao, et al. Climate characteristics change of hydrological elements in the middle and upper reaches of the Cao River Basin [J]. Pearl River, 2016, 37(12):1-7. (in Chinese))

[13] 郭生练,尹家波,李丹,等. 丹江口水库设计洪水复核及偏大原因分析[J]. 水力发电学报,2017,36(2):1-8. (GUO Shenglian, YIN Jiabo, LI Dan, et al. Rational check of design floods for Danjiangkou Reservoir [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2017, 36(2):1-8. (in Chinese))

[14] 陈子桑,黄强,刘曾美. 基于非对称 Archimedean copula 与 kendall 分布函数的三变量洪水风险评估[J]. 水科学进展,2016,27(5):763-771. (CHEN Zisheng, HUANG Qiang, LIU Zengmei. Risk assessment of trivariate flood based on asymmetric Archimedean Copulas [J]. Advances in Water Science, 2016, 27(5):763-771. (in Chinese))

[15] SKLAR A. Fonctions de répartition à n dimensions et leurs marges[J]. Publ. Inst. Statist. Univ. Paris, 1959, 8:229-231.

[16] SALVADORI G, MICHELED C, DURANTE F. On the return period and design in a multivariate framework [J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2011, 15:3293-3305.

[17] NELSEN R B. An introduction to Copulas;Springer series in statistics[M]. NewYork:Springer,,1999.

[18] VANDENBERGHE S,VERHOEST N E C,ONOF C,et al. A comparative copula-based bivariate frequency analysis of observed and simulated storm events;a case study on Bartlett-Lewis modeled rainfall[J]. Water Resources Research,2011,47(7):197-203.

[19] SRAJ M,BEZAK N,BRILLY M. Bivariate flood frequency analysis using the copula function;a case study of the Litija station on the Sava River[J]. Hydrological Processes,2015,29(2):225-238.

[20] GRALER B,VAN DEN BERG M J,VANDENBERGHE S,et al. Multivariate return periods in hydrology;a critical and practical review focusing on synthetic design hydrograph estimation[J]. Hydrology and Earth System Sciences,2013,17:1281-1296.

[21] 陈子桑,黄强,刘曾美. 变化环境下西江北江枯水流量联合分布分析[J]. 水科学进展,2015,26(1):20-26. (CHEN Zisheng,HUANG Qiang,LIU Zengmei. Analysis on the return level of joint distribution of low water flow of Xijiang River and Beijiang River under changing environment[J]. Advances in Water Science,2015,26(1):20-26. (in Chinese))

[22] 郭良,丁留谦,孙东亚,等. 中国山洪灾害防御关键技术[J]. 水利学报,2018,49(9):1123-1136. (GUO Liang,DING Liuqian,SUN Dongya,et al. Key techniques of flash flood disaster prevention in China[J]. Journal of Hydraulic Engineering,2018,49(9):1123-1136. (in Chinese))

(收稿日期:2022-03-21 编辑:刘晓艳)

(上接第 16 页)

[37] LIERSCH S,TECKLENBURG J,RUST H,et al. Are we using the right fuel to drive hydrological models? A climate impact study in the Upper Blue Nile[J]. Hydrology and Earth System Sciences,2018,22(4):2163-2185.

[38] 贺新月,曾献奎,王栋. 融合 AR 模型和 MCMC 方法的水文模拟不确定性分析[J]. 河海大学学报(自然科学版),2020,48(2):116-122. (HE Xinyue,ZENG Xiankui,WANG Dong. Uncertainty analysis of hydrological simulation with auto regressive model and MCMC method[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2020,48(2):116-122. (in Chinese))

[39] BASTOLA S,MURPHY C,SWEENEY J. The role of hydrological modelling uncertainties in climate change impact assessments of Irish River catchments[J]. Advances in Water Resources,2011,34(5):562-576.

[40] 刘冀,覃巍,郑定湘,等. 卫星降雨在流域水文设计中适用性分析[J]. 水电能源科学,2019,37(6):12-15. (LIU Ji,QIN Wei,ZHENG Dingxiang,et al. Simulatting extreme streamflow for hydrological calculation using satellite-based precipitation forcing[J]. Water Resources and Power,2019,37(6):12-15. (in Chinese))

[41] LIU J,XIA J,SHE D,et al. Evaluation of six satellite-based precipitation products and their ability for capturing characteristics of extreme precipitation events over a climate transition area in China[J]. Remote Sensing,2019,11(12):1477.

[42] ZHANG Y,LI Y,JI X,et al. Evaluation and hydrologic validation of three satellite-based precipitation products in the upper catchment of the Red River Basin,China[J]. Remote Sensing,2018,10(12):1881.

[43] THIEMIG V,ROJAS R,ZAMBRANO-BIGIARINI M,et al. Hydrological evaluation of satellite-based rainfall estimates over the Volta and Baro-Akobo Basin[J]. Journal of Hydrology,2013,499:324-338.

[44] 晁丽君,张珂,陈新宇,等. 基于多源降水融合驱动的 WRF-Hydro 模型在中小河流洪水预报中的适用性[J]. 河海大学学报(自然科学版),2022,50(3):55-64. (CHAO Lijun,ZHANG Ke,CHEN Xinyu,et al. Applicability of WRF-Hydro model based by multi-source precipitation merging in flood forecasting for small and medium-sized watersheds[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2022,50(3):55-64. (in Chinese))

[45] SEYYEDI H,ANAGNOSTOU E N,BEIGHLEY E,et al. Hydrologic evaluation of satellite and reanalysis precipitation datasets over a mid-latitude basin[J]. Atmospheric Research,2015,164:37-48.

[46] LU J,LIU Z,LIU W,et al. Assessment of CFSR and CMADS weather data for capturing extreme hydrologic events in the Fuhe River Basin of the Poyang Lake[J]. JAWRA Journal of the American Water Resources Association,2020,56(5):917-934.

[47] HUANG Y,XIAO W,HOU B,et al. Hydrological projections in the upper reaches of the Yangtze River Basin from 2020 to 2050 [J]. Scientific Reports,2021,11(1):1-21.

(收稿日期:2022-04-06 编辑:刘晓艳)