

西江流域极端降水演变规律及其对洪水径流的影响

谢志高¹, 贾文豪^{2,3}, 王霞雨³, 刘晋^{2,3}, 黄金华³, 刘夏³

(1. 深圳市东部水源管理中心, 广东 深圳 518116; 2. 水利部珠江河口治理与保护重点实验室, 广东 广州 510611;
3. 珠江水利委员会珠江水利科学研究院, 广东 广州 510611)

摘要:为探究西江流域水文气象要素演变规律,分析极端降水对洪水径流的影响,基于西江流域1956—2019年水文气象资料,综合利用趋势分析、突变检验等方法剖析了西江流域极端降水、年均径流和年最大日平均流量的演变规律,并采用Pearson相关系数与双累积曲线法评估了极端降水指标与年均径流、年最大日平均流量的相关性,探讨了极端降水对洪涝灾害损失的影响。结果表明:相较于上游高海拔地区,西江流域中下游低海拔地区极端降水的变化更为明显,表现为极端降水频率增大以及降水强度增大;Rx1day、R99p和SDⅡ呈现显著上升趋势,极端降水指标多在1992年发生突变,年均径流和年最大日平均流量均呈现不显著的上升趋势,且均有两个突变点;PRCPTOT、R25、R10、R95p与年均径流呈显著相关关系,R95p、R99p、CDD和R25对洪涝灾害指标的影响相对较大;2002年后极端降水指标同洪涝灾害指标的相关关系发生了显著改变。

关键词:极端降水;洪水径流;洪涝灾害;时空演变规律;西江流域

中图分类号:P426.6;TV121⁺.1 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-7647(2023)06-0128-09

Evolution characteristics of extreme rainfall and influence on flood runoff in Xijiang River Basin//XIE Zhigao¹, JIA Wenhao^{2,3}, WANG XiaYu³, LIU Jin^{2,3}, HUANG Jinhua³, LIU Xia³ (1. Shenzhen East Water Source Management Center, Shenzhen 518116, China; 2. Key Laboratory of the Pearl River Estuary Regulation and Protection of Ministry of Water Resources, Guangzhou 510611, China; 3. Pearl River Water Resources Research Institute, Guangzhou 510611, China)

Abstract: In order to explore the evolution law of the hydrological and meteorological elements in the Xijiang River Basin and to study the potential impact of extreme rainfall on flood runoff, based on the hydrological and meteorological data of the basin from 1956 to 2019, the evolution laws of extreme rainfall, annual runoff, and annual maximum 1-day flood volume were comprehensively analyzed using methods such as trend analysis and mutation test. The Pearson correlation coefficient and double cumulative curve method were used to evaluate the relationship between extreme rainfall and annual runoff. The impact of extreme rainfall on flood disaster losses was discussed. The results show that compared with the upper reaches of the high-altitude area, the changes of extreme rainfall in the middle and lower reaches of the Xijiang River Basin are more obvious, showing increasing frequency and intensity of the extreme rainfall. Rx1day, R99p, and SDⅡ show a significant upward trend, with extreme rainfall indicators mostly experiencing sudden changes in 1992. The average annual runoff and maximum annual flood do not significantly increase, and there exist two mutation points. PRCPTOT, R25, R10, and R95p are significantly correlated with runoff, while R95p, R99p, CDD, R25 have a relatively significant impact on flood disaster indicators. After 2002, the correlation between extreme rainfall indicators and flood disaster indicators has significantly changed.

Key words: extreme rainfall; flood runoff; flood disasters; temporal and spatial evolution characteristic; Xijiang River Basin

联合国政府间气候变化专门委员会(IPCC)第六次评估报告指出,全球气候变暖导致极端降水风险增大^[1-2]。已有研究^[3]表明,我国极端降水也呈现出多发、频发的趋势。极端降水往往伴随着内涝、山洪、滑坡、泥石流等灾害^[4],高强度、长历时的极端降水会使河流水位快速上涨^[5-6],容易超过堤防的防御能力而发生漫堤,淹没沿岸的城市、农田等,造成人员伤亡和财产损失。大范围的极端降水更可能

会造成流域性大洪水^[7],严重威胁流域社会经济的高质量发展^[8]。此外,极端降水还给流域的水资源管理^[9]、水旱灾害防御等提出了新的挑战^[10]。

学者们基于 Copula 函数^[11-12]与累积量斜率变化率法^[13]、经验统计分析法^[14]等分析了降水-径流关系的变化特征,并定量解析了气候变化与人类活动对于径流的影响^[13]。然而,已有研究多集中于降水与径流系列均值的关系^[14-15],降水和径流极值之间的关系研究相对较少。极端降水指标通常用来描述极端降水事件的特征^[16-18]。然而由于不同研究区域自然地理条件的差异,不同极端降水指标间的分析可能存在信息冗余。此外,目前有关极端降水的影响研究多集中在极端降水时空变化^[19-23]及其对径流与输沙量的影响^[24-27]等方面,缺少对受灾人口、直接经济损失等洪涝灾害指标的影响分析。实际上,在极端降水事件不断加剧、流域水利工程体系日益完善、非工程措施不断加强等多重因素的影响下,亟待挖掘洪涝灾害指标的演变规律及其与极端降水指标的相关性。

珠江是我国七大江河之一,受流域地理位置、东南季风与西南季风等天气系统以及复杂地形地貌变化的综合影响,汛期易出现强度大、次数多、历时长的暴雨,严重威胁流域特别是人口稠密、城镇集中、经济发达的下游三角洲地区的防洪安全^[28-29]。粤港澳大湾区位于珠江三角洲地区,《粤港澳大湾区发展规划纲要》提出了建设国际一流湾区,打造高质量发展典范的目标,对大湾区水安全保障提出了新的更高要求。因此,在气候风险不断加剧的背景下,研究珠江流域极端降水演变规律及其潜在影响可为流域与粤港澳大湾区的水旱灾害防御提供支撑^[30]。西江是珠江的主流,流域面积约占珠江流域的80%,且流域暴雨中心多位于西江,已有关于西江流域极端降水的研究多集中在极端降水频率、时空演变规律^[31-32]和驱动因素^[30]等方面,尚缺少针对极端降水变化与年均径流、年最大日平均流量变化,特别是与洪涝灾害指标关系的研究。

本文采用传统 Mann-Kendall (M-K) 与创新趋势分析 (innovative trend analysis, ITA) 法分析极端降水指标、年均径流和年最大日平均流量的演变趋势,利用 M-K、滑动 t 法等进行系列的突变检验,在对各类暴雨指标进行综合全面分析的同时,探究西江流域年均径流与年最大日平均流量的演变规律,并综合利用 Pearson 相关系数、双累积曲线法分析极端降水与年均径流、年最大日平均流量之间的相关关系,评估不同极端降水指标之间的相关性,量化极端降水对洪涝灾害指标的影响。

1 流域概况

西江发源于云南省曲靖市马雄山东麓,自西向东流经云南、贵州、广西和广东4省(自治区),至广东省佛山市三水区的思贤滘与北江汇合后流入珠江三角洲网河区,全长2 075 km,流域集水面积为35.31万 km²,多年平均水资源量为2 302亿 m³,占珠江流域多年平均水资源量的68%,主要5大支流为北盘江、柳江、郁江、桂江和贺江。西江流域受东南季风和西南季风影响,具有典型的亚热带气候特征。流域地势总体西北高、东南低。上游南盘江段位于云贵高原和高原斜坡区,红水河和黔江段位于高原斜坡和中低山丘陵盆地区,下游的浔江和西江段位于低山丘陵盆地区。

2 数据与方法

2.1 数据来源

西江流域44个气象站点1956—2019年日尺度降水资料来源于国家气象信息中心 (<http://data.cma.cn/>),梧州站逐日径流数据来源于《中华人民共和国水文年鉴》第8卷第2册,即《珠江流域水文资料西江下游区(郁江口以下)》,洪涝灾害损失数据(1992—2019年)来自水利部珠江水利委员会。在统计分析前,先采用 RCLimDex 软件对气象数据进行质量审查,主要包括不合理值处理及数据系列一致性检验,并利用 ArcGIS 的泰森多边形法计算各站点的权重,得到流域面平均值。

2.2 研究方法

2.2.1 极端降水指标

降水超过阈值连续天数等特征指标均可用于定义极端降水事件^[33]。世界气象组织明确了10种常用的极端降水事件指标,并划分为强度指标、持续时间指标和频率指标3类,由于不同指标在分析时考虑的极端降水特征值、时间尺度各不相同,因此,本文先选用全部的10种指标进行分析,采用 Pearson 相关系数计算极端降水指标与年均径流、年最大日平均流量、洪涝灾害指标的相关性,并基于不同指标的计算结果以及指标间的相关性,筛选出代表性指标。极端降水指标符号与含义如表1所示。

2.2.2 趋势与突变分析

传统趋势分析方法如线性回归法、Sen's slope 法、M-K 法已得到了广泛的应用^[34-35],但这些方法在应用中往往需要数据系列满足一定的假设,如服从正态分布、不受数据系列自相关性的影响等,此外,难以进一步挖掘系列中不同频率下的变化趋势。因此,本文在采用传统 Sen's slope 法、M-K 法的基

表 1 极端降水指标

分类	指标符号	指标名称	定义
强度指标	Rx1 day	1 d 最大降水量	年内 1 d 最大降水量
	Rx5 day	5 d 最大降水量	年内连续 5 d 最大降水量
	R95p	强降水量	日降水量大于 95% 分位数的降水总和
	R99p	极强降水量	日降水量大于 99% 分位数的降水总和
	PRCPTOT	总降水量	每年总降水量
持续时间指标	SD II	降水强度	雨天平均降水量
	CDD	持续干旱日数	最长连续日降水量小于或等于 0.1 mm 日数
	CWD	持续湿润日数	最长连续日降水量大于 0.1 mm 日数
频率指标	R10	中雨日数	日降水量大于 10 mm 的日数
	R25	大雨日数	日降水量大于 25 mm 的日数

础上,引入 ITA 法进行趋势分析^[36-37]。

ITA 法指标 S 的计算公式为

$$S = 2(\bar{y}_2 - \bar{y}_1)/n \tag{1}$$

式中: $\bar{y}_1$ 、 $\bar{y}_2$ 分别为两子系列的均值; n 为数据系列的总数。 $S>0$ 说明数据系列呈上升趋势, $S<0$ 则表示系列呈下降趋势。

突变是指从一种稳定状态变化到另一种稳定状态。由于不同突变检验方法对数据系列进行检验时可能得到不同的结果^[38],因此,本文综合运用 M-K 法与滑动 t 法识别数据系列的突变点。

2.2.3 双累积曲线法

双累积曲线法是时间系列分析中的一种常用方法^[39],已广泛用于流域降水径流分析的研究。本文根据突变点前实测资料,采用极端降水指标与年均径流累积值和年最大日平均流量累积值,分别建立累积极端降水指标与年均径流和年最大日平均流量的回归方程,将突变点后的极端降水指标累积值代入回归方程,计算年均径流累积值或年最大日平均

流量累积值的拟合值;根据突变点后的计算年均径流(或计算年最大日平均流量)和实测年均径流(或实测年最大日平均流量)求出极端降水指标对两者改变的贡献率。

3 结果与分析

3.1 极端降水指标演变规律

极端降水指标的趋势分析结果如表 2 所示。从强度指标来看,西江流域 1956—2019 年 Rx1 day、R99p 和 SD II 呈显著上升趋势,其余指标除 PRCPTOT 外,均呈现不显著上升趋势;从持续时间指标来看,CDD 呈不显著上升趋势,而 CWD 呈不显著下降趋势;从频率指标来看,R25 呈不显著上升趋势而 R10 呈不显著下降趋势。因此,西江流域的极端降水整体呈现强度增大且强降水更为集中的特点。

图 1 为西江流域 44 个气象站点的极端降水指标 M-K 趋势分析结果的空间分布。从不同极端降水指标的变化趋势来看,就降水强度而言,Rx1 day 与 R99p 相较于 Rx5 day、R95p 更为敏感,SD II 增大而 PRCPTOT 变化不显著,且 Rx1 day 与 R99p 识别出呈现显著性的站点分布极为相似。从持续时间来看,CDD 整体变化不显著,CWD 在北盘江、南盘江、红水河区域呈显著下降趋势。此外,采用西江流域东南部地区站点系列数据计算得到的SD II、R25、R99p、R95p、Rx1 day 呈现明显上升趋势,而大多数流域西部站点的 PRCPTOT、R10 则呈现明显下降趋势。结合西江流域西北高、东南低的地势分布可知,西江流域中下游低海拔地区发生极端降水的概率和强度增大,发生洪涝灾害的风险也有所增大,这一结果同已有针对西江流域极端降水的研究结果^[40]一致。

表 2 1956—2019 年西江流域极端降水指标年际变化趋势分析结果

极端降水指标	均值	变差系数	Z	β	S	ITA 显著性判别标准
Rx1 day	101.80 mm	0.102	2.567 **	0.167	0.172 *	0.068
Rx5 day	171.42 mm	0.113	0.550	0.080	0.113	0.116
R95p	376.78 mm	0.201	1.558	0.847	0.824 *	0.374
R99p	120.92 mm	0.329	2.010 **	0.547	0.535 *	0.172
PRCPTOT	1 358.40 mm	0.111	0.492	0.426	-0.328	0.640
SD II	12.48 mm	0.070	3.401 ***	0.017	0.020 *	0.008
CDD	33.18 天	0.177	0.377	0.013	0.051 *	0.028
CWD	8.06 天	0.126	-1.512	-0.011	-0.007 *	0.006
R10	38.96 天	0.111	-0.191	-0.006	-0.035 *	0.015
R25	15.21 天	0.141	0.991	0.016	0.014 *	0.011

注: Z 为 M-K 趋势检验统计量, β 为 Sen's slope 法指标值;*、**、*** 分别表示通过了 90%、95% 和 99% 置信度的显著性检验。下同。

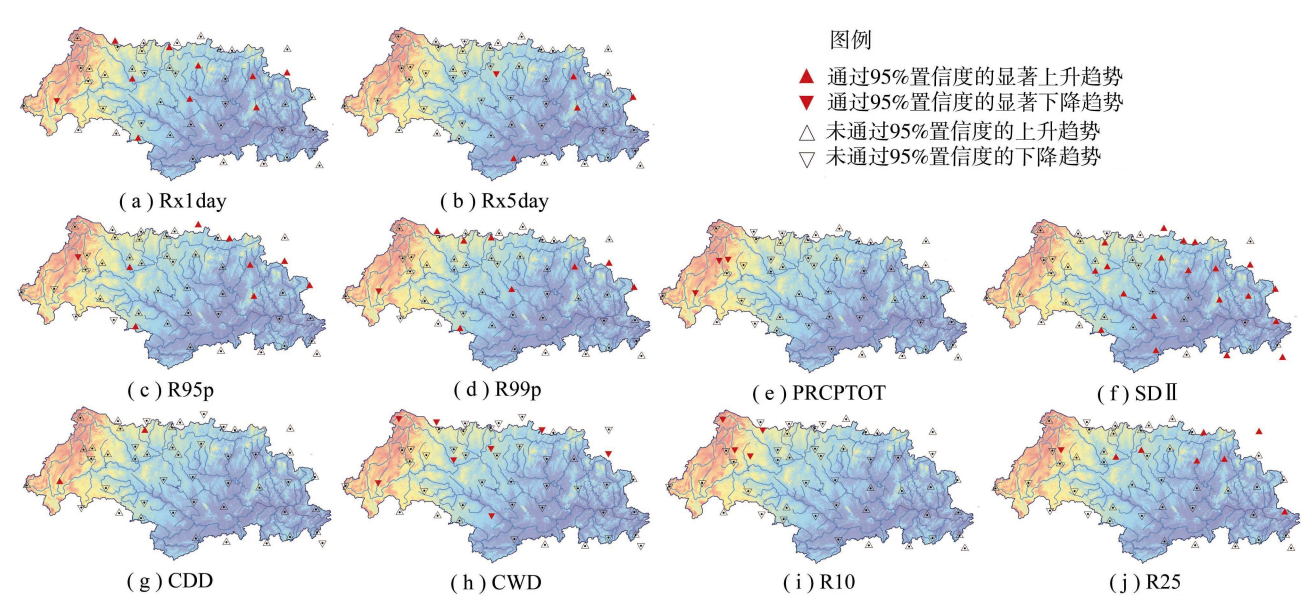


图1 西江流域极端降水指标 M-K 趋势分析结果的空间分布

此外,其他流域的研究同样有低海拔地区极端降水变化更为显著的规律。安文杰^[41]研究表明,嘉陵江流域极端降水强度表现为从东南到西北递减,空间上与嘉陵江流域北高南低的地理特征相符。张海宁等^[42]研究发现,渭河流域极端降水量呈增加趋势的站点同样主要集中在海拔相对较低的渭河流域干流东部和下游及渭河流域东南部。由此可见,极端降水变化趋势的差异性同区域位置与地形密切相关,其中,地形对降水分布的影响十分复杂,地势抬高形成的地形雨会导致降水量逐渐增多,但上升到一定的海拔高度后,空气里的水汽由于大量的降水而减少,降水量就会随着海拔的继续上升而减少。

极端降水指标的突变检验结果如表3所示,可以看出,根据滑动 t 检验,西江流域极端降水的强度指标多在1992年发生突变,而M-K突变检验结果表明,Rx5day(1993年)、PRCPTOT(1994年)、SD II(1992年)同样在1992年左右发生突变;CWD两种突变检验方法得到的突变点分别为1999年与1998年;而根据滑动 t 检验,频率指标在1983年以及1992年发生突变。

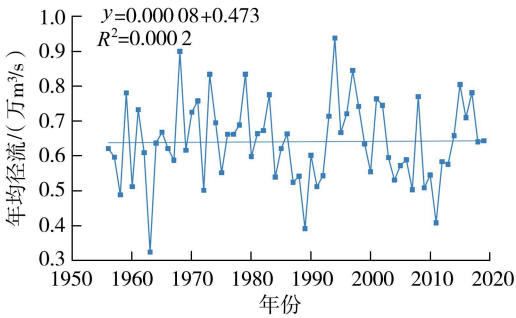
表3 西江流域极端降水指标突变检验结果

极端降水指标	突变年份	
	M-K 突变检验	滑动 t 检验
Rx1day	1966年、1986年、1989年	1992年
Rx5day	1960年、1971年、1993年、2008年	1992年
R95p	1967年、1971年、1984年、2003年	1992年
R99p	1965年、1985年、1989年	1992年
PRCPTOT	1964年、1984年、1994年	2013年
SD II	1992年	1992年
CDD	1958年、1966年、1972年	1985年
CWD	1999年	1998年
R10	1958年、1984年、2015年	1983年
R25	1960年、1965年、1984年、1992年、2003年	1992年

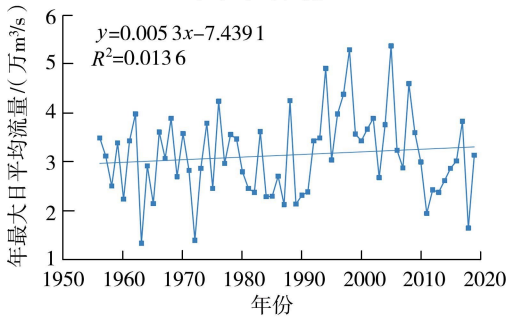
3.2 年均径流和年最大日平均流量演变规律

如图2(a)所示,西江流域年均径流呈不显著上升趋势,年均变化速率为 $0.85 \text{ m}^3/\text{s}$,年均径流的年际波动变化大致分为4个阶段:1989—1994年和2012—2019年呈迅速上升趋势;1968—1989年和1994—2012年呈波动下降趋势。M-K趋势检验表明,年均径流无显著变化趋势,突变检验的结果表明年均径流在1992年和2002年发生突变。

西江流域年最大日平均流量呈不显著上升趋势(图2(b)),年均变化速率为 $53 \text{ m}^3/\text{s}$ 。年最大日平均流量的年际波动变化大致分为3个阶段:1956—



(a) 年均径流



(b) 年最大日平均流量

图2 1956—2019年西江流域年均径流和年最大日平均流量变化趋势

1976 年呈波动上升趋势,1976—1982 年呈下降趋势,1982—2019 年则是先波动上升再下降。M-K 趋势检验表明, Z 统计量绝对值为 0.59。两种突变检验方法所得的结果一致,均为 1979 年和 2010 年。

3.3 极端降水对径流影响分析

3.3.1 极端降水指标与年均径流的相关性

极端降水指标是世界气象组织推荐并被广泛应用的指标,强度指标、持续时间指标、频率指标反映了极端降水的不同特征,不同指标在分析时考虑的极端降水特征值、时间尺度各不相同,其中也有 PRCPTOT、SD II、R10、R25 等反映年尺度降水特征的指标,因此极端降水指标与年均径流也存在一定的关联性。此外,年均径流关系到西江流域水资源量的变化,因此,评估极端降水指标与年均径流的相关性同样可为流域的水旱灾害防御提供支撑。

在径流突变分析的基础上,根据 1992 年与 2002 年两个突变点将数据系列划分为基准期(1956—1992 年)、突变期 I(1993—2002 年)、突变期 II(2003—2019 年)3 个阶段,并对比不同时期极端降水指标与年均径流相关性的差异,结果如表 4 所示。除 CDD 外,极端降水指标与年均径流均呈显著的正相关关系,其中又以 PRCPTOT 相关性最强。CDD 和 Rx1day 与年均径流的关系在基准期通过了显著性检验,而在突变期均未通过检验。因此,极端降水指标中 PRCPTOT、R25、R10、R95p 与年均径流的相关性较强,而 CDD、Rx1day 对年均径流的影响相对较小。

表 4 不同时期年均径流与极端降水指标的相关系数

极端降水指标	1956—2019 年	1956—1992 年	1993—2002 年	2003—2019 年
Rx1day	0.50 ***	0.50 ***	0.56	0.42
Rx5day	0.66 ***	0.66 ***	0.65 **	0.57 **
R95p	0.72 ***	0.69 ***	0.75 **	0.80 ***
R99p	0.57 ***	0.56 ***	0.52	0.56 **
PRCPTOT	0.88 ***	0.87 ***	0.86 ***	0.93 ***
SD II	0.60 ***	0.68 ***	0.69 **	0.69 **
CDD	-0.29 **	-0.35 **	0.16	-0.39
CWD	0.61 ***	0.53 ***	0.80 ***	0.59 **
R10	0.83 ***	0.81 ***	0.76 **	0.89 ***
R25	0.85 ***	0.85 ***	0.86 ***	0.90 ***

3.3.2 极端降水指标与年最大日平均流量的相关性

根据年最大日平均流量 1979 年与 2010 年两个突变点,将数据系列划分为基准期(1956—1979 年)、突变期 I(1980—2010 年)、突变期 II(2011—2019 年)3 个阶段,相关性分析结果如表 5 所示。除 CDD、R10 外,极端降水指标与年最大日平均流量均呈显著的正相关关系,且 Rx5day 与年最大日平均流量的相关系数最大,R99p 次之。Rx5day

和 R99p 与年最大日平均流量的强相关性反映了在短时间内发生强降水时,会导致河流水位猛涨,地表径流量迅速增加,进而引发洪水灾害。

表 5 不同时期年最大日平均流量与极端降水指标的相关系数

极端降水指标	1956—2019 年	1956—1979 年	1980—2010 年	2011—2019 年
Rx1day	0.50 ***	0.64 ***	0.49 ***	0.40
Rx5day	0.63 ***	0.73 ***	0.65 ***	0.58
R95p	0.46 ***	0.61 ***	0.47 ***	0.48
R99p	0.52 ***	0.61 ***	0.56 ***	0.36
PRCPTOT	0.36 ***	0.45 **	0.38 **	0.60
SD II	0.45 ***	0.51 * *	0.53 ***	0.42
CDD	0.09	0.01	0.02	-0.47
CWD	0.48 ***	0.41 * *	0.54 ***	0.58
R10	0.24	0.24	0.29	0.59
R25	0.38 ***	0.41 **	0.45 **	0.59

极端降水指标与年最大日平均流量的相关性也受到以下因素的影响:①流域的地形地貌、土壤类型等因素会影响产汇流过程。从降水到形成径流需要经历流域蓄渗、坡面漫流和河槽集流 3 个阶段,由于每次降水的强度和持续时间不同,加之流域下垫面的影响,径流形成需要一定的时间。即使降水强度很大,但如果流域的产汇流特征使得水量无法迅速汇集,则无法形成“峰高量大”的洪水过程。②水库的调蓄作用会显著影响洪水的形成和峰值流量。水库可以削减洪峰,拦蓄洪量,从而降低最大洪量。

3.3.3 极端降水指标对年均径流与年最大日平均流量影响的定量评估

采用极端降水指标与年均径流(年最大日平均流量)双累积曲线法定量分析了极端降水指标对年均径流与年最大日平均流量的影响,结果如表 6 所示,除 CDD 外,突变期内各极端降水指标对年均径流改变的贡献率都在 86% 以上,对年最大日平均流量改变的贡献率都在 50% 以上,且绝大多数极端降水指标在突变期 I(1980—2010 年)对年最大日平均流量改变的贡献率低于突变期 II(2011—2019 年),对年均径流则是突变期 I 多数高于突变期 II。同时,伴随着水利工程体系的不断完善以及下垫面条件的不断变化,人类活动对极端降水与年均径流和年最大日平均流量的关系会产生一定的影响。

4 讨论

4.1 极端降水指标间的相关性

利用 Pearson 相关系数分析不同极端降水指标间的相关关系,结果如图 3 所示。由图 3 可见,极端降水强度指标之间存在高度自相关性,特别是 Rx1day、Rx5day、R95p、R99p 4 个指标之间的相关系数均大于 0.74,且都通过了显著性检验;而持续时

表6 西江流域极端降水指标对年均径流与年最大日平均流量改变的贡献率

极端降水指标	实测年均径流/(万 m ³ /s)	计算年均径流/(万 m ³ /s)	对年均径流改变的贡献率/%	实测年最大日平均流量/(万 m ³ /s)	计算年最大日平均流量/(万 m ³ /s)	对年最大日平均流量改变的贡献率/%
Rx1say	23.29/7.33/10.89	23.95/7.13/11.74	101.26/93.18	73.01/104/23.89	71.7/96.19/28.87	74.81/89.86
Rx5day	23.29/7.33/10.89	23.50/6.75/10.98	103.64/99.25	73.01/104/23.89	71.68/91.70/27.44	60.29/92.78
R95p	23.29/7.33/10.89	23.55/7.55/11.76	98.62/92.99	73.01/104/23.89	72.15/95.75/31.45	73.38/84.61
R99p	23.29/7.33/10.89	23.39/8.62/12.63	91.94/85.93	73.01/104/23.89	71.83/99.53/33.50	85.57/80.44
PRCPTOT	23.29/7.33/10.89	23.50/6.76/10.66	103.57/101.90	73.01/104/23.89	71.96/90.66/28.07	56.95/91.50
SD II	23.29/7.33/10.89	23.71/6.74/11.60	103.72/94.25	73.01/104/23.89	71.82/95.22/28.85	71.66/89.91
CDD	23.29/7.33/10.89	24.16/6.31/11.34	74.91/96.40	73.01/104/23.89	72.34/100.59/24.56	88.99/98.64
CWD	23.29/7.33/10.89	23.65/6.43/9.86	105.65/108.31	73.01/104/23.89	71.49/89.55/24.63	53.39/98.49
R10	23.29/7.33/10.89	23.43/6.57/10.44	104.75/103.61	73.01/104/23.89	71.88/88.85/27.52	51.11/92.61
R25	23.29/7.33/10.89	23.45/7.10/11.14	101.47/97.97	73.01/104/23.89	72.41/92.39/29.44	62.53/88.7

注:表中第2、3、5、6列3个数据分别为基准期、突变期Ⅰ和突变期Ⅱ的统计值,第4、7列两个数据分别为突变期Ⅰ和突变期Ⅱ各极端降水指标对年均径流(年最大日平均流量)相较于基准期改变的贡献率。

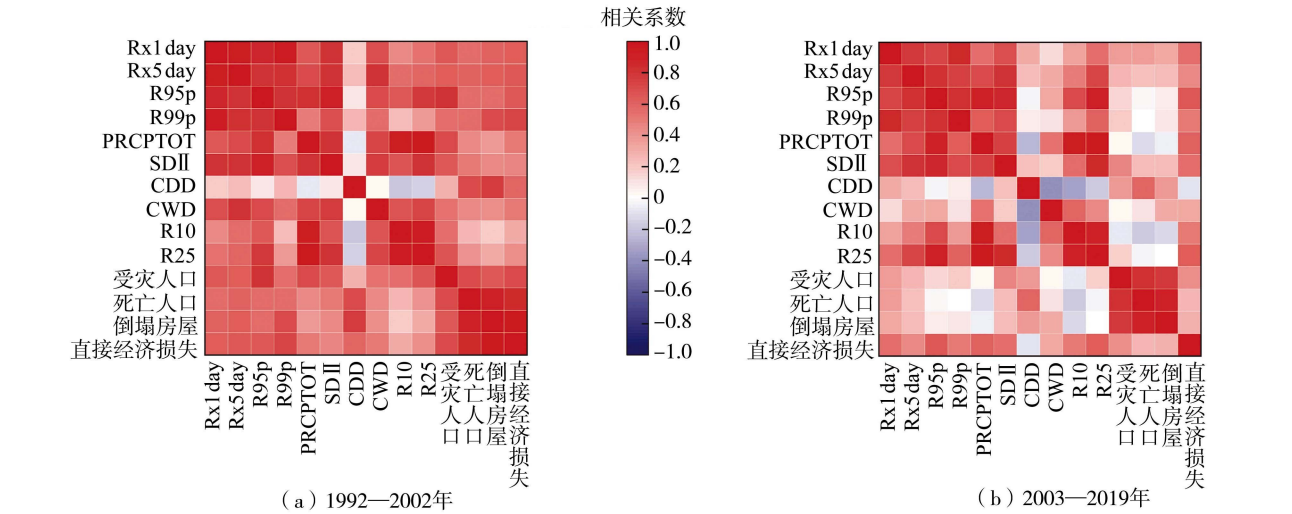


图3 极端降水指标与洪涝灾害指标 Pearson 相关系数检验结果

间指标 CDD 与 CWD 与其他指标的相关关系具有明显差异;两个频率指标 R10 与 R25 与其他指标的相关关系相似,且 R25 相对更为敏感。由此可见,指标间相关性很强,在进行西江流域极端降水分析时,可选择代表性指标进行分析:采用 R99p、SD II 进行强度指标分析,采用 CDD、CWD 进行持续时间指标分析,采用 R25 进行频率指标分析,从而在保证分析结果合理性的基础上,减少极端降水指标间信息的冗余。

4.2 极端降水指标同洪涝灾害指标的相关性

极端降水指标与洪涝灾害指标的相关性分析结果如图 3 所示。1992—2002 年所有极端降水指标都与洪涝灾害指标呈正相关关系,其中 R95p 和受灾人口的相关系数最高,CDD 和死亡人口、倒塌房屋相关系数分别为 0.71 和 0.77,R99p 和倒塌房屋、直接经济损失相关系数分别为 0.71 和 0.73。由此可见,R95p、CDD 和 R99p 同洪涝灾害指标的相关性较强。2003—2019 年极端降水指标和灾害损失的相关性显著降低,其中 R25、R95p 和直接经济

损失的相关系数最高,均为 0.64。

由此可见,极端降水指标同洪涝灾害指标的相关关系在 2002 年后已经发生了显著改变。这种关系的改变一方面是受气象条件本身变化的影响,由极端降水指标的演变规律分析可知,西江流域极端降水在 20 世纪 90 年代发生了突变,短时间内发生更强烈、更集中暴雨的可能性不断增大,从而使得倒塌房屋、直接经济损失等洪涝灾害损失不断增大。同时,社会经济的不断发展、人口经济的不断聚集等条件的变化也会使得极端降水带来的损失呈现增大趋势。另一方面,防洪工程体系的不断完善、防灾减灾救灾思路的转变、预报预警预演预案能力的提升等大大提升了流域水旱灾害防御水平,从而能够有效降低极端降水带来的灾害损失。

为了进一步探究径流突变前后极端降水致灾规律的变化及主要驱动要素,基于收集到的 1992—2019 年由洪涝灾害导致的受灾人口、死亡人口、倒塌房屋和直接经济损失归一化数据,对比了突变前后洪涝灾害指标的变化,结果如图 4 所示。与径流

突变前相比,不同洪涝灾害指标的变化呈现显著差异,具体表现为:2002 年后受灾人口、死亡人口和倒塌房屋明显降低,而直接经济损失则略微增大。由此可见,随着 2002 年西江流域的骨干水库龙滩、百色等开工建设以及流域防洪工程体系不断完善,预报预警预演预案能力不断提高,在极端降水不断加剧的背景下,受灾人口、死亡人口和倒塌房屋均有所降低,特别是死亡人口明显下降。但同时,随着流域社会经济的快速发展,人口密集区不断扩张,城市化进程日渐加快,再加上极端水文气象事件的加剧,直接经济损失有所增大。

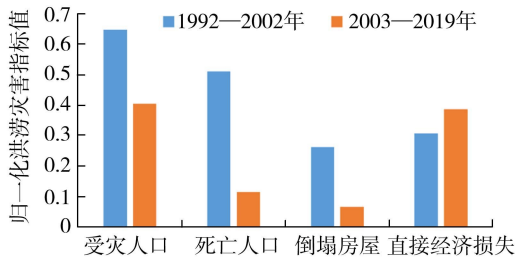


图 4 1992—2002 年与 2003—2019 年洪涝灾害指标对比

5 结 论

- a. 西江流域极端降水整体呈现强度增大、强降水更为集中的特点;中下游低海拔地区相较于上游高海拔地区极端降水事件增多、降水强度增大的趋势更为明显,年均径流和年最大日平均流量的变化趋势同极端降水整体基本相同;极端降水指标在 20 世纪 90 年代出现突变,其中,强度指标多在 1992 年发生突变;西江流域年均径流与年最大日平均流量呈现不显著上升的趋势,突变点分别为 1992 年、2002 年和 1979 年、2010 年。
- b. 相关性分析结果表明,PRCPTOT、R25、R10、R95p 是影响流域径流变化的主要极端降水指标,Rx5day 和 R99p 是与年最大日平均流量最为相关的极端降水指标;R95p、R99p、CDD 和 R25 同洪涝灾害指标的相关性相对更强。
- c. 综合考虑不同极端降水指标的变化趋势及指标间的相关性,可选择 R99p、SD II、CDD、CWD 和 R25 进行西江流域极端降水分析,从而在保证结果合理性的同时,减少指标间信息的冗余。
- d. 2002 年后极端降水指标和洪涝灾害损失的相关性显著降低,极端降水指标同洪涝灾害指标的相关关系已经发生了显著改变;随着防洪工程体系的不断完善、防灾减灾救灾思路的转变、预报预警预演预案能力的提升等,流域水旱灾害防御水平大大提升,受灾人口、死亡人口和倒塌房屋显著降低;此外,在极端水文气象事件不断加剧的背景下,流域社

会经济的快速发展、人口密集区不断扩张、城市化进程日渐加快导致直接经济损失有所增大。

参考文献:

[1] VU T M, MISHRA A K. Nonstationary frequency analysis of the recent extreme precipitation events in the United States[J]. Journal of Hydrology, 2019, 575: 999-1010.

[2] BERNAI R R. Managing the risks of extreme events and disasters to advance climate change adaptation [J]. Economics of Energy & Environmental Policy, 2013, 2 (1): 101-112.

[3] 贺冰蕊,翟盘茂. 中国 1961—2016 年夏季持续和非持续性极端降水的变化特征[J]. 气候变化研究进展, 2018, 14 (5): 437-442. (HE Bingrui, ZHAI Panmao. Characteristics of the persistent and non-persistent extreme precipitation in China from 1961 to 2016 [J]. Climate Change Research, 2018, 14(5): 437-442. (in Chinese))

[4] 张鑫,刘康琦,王克树,等. 2021 年全球典型极端降雨灾害事件对比及综合防御[J]. 人民长江, 2022, 53 (8): 23-29. (ZHANG Xin, LIU Kangqi, WANG Keshu, et al. Comparison of global typical extreme rainfall disaster events in 2021 and comprehensive defense measures [J]. Yangtze River, 2022, 53(8): 23-29. (in Chinese))

[5] KUNDZEWICZ Z W. Changes in flood risk in Europe [M]. London: CRC Press, 2012.

[6] MERZ R, BLÖSCHL G. Flood frequency hydrology: 1. Temporal, spatial, and causal expansion of information [J]. Water Resources Research, 2008, 44(8): W08432.

[7] 杨卫,张利平,闪丽洁,等. 汉江流域极端水文事件时空分布特征[J]. 气候变化研究进展, 2015, 11(1): 15-21. (YANG Wei, ZHANG Liping, SHAN Lijie, et al. Spatiotemporal distribution features of extreme hydrological events in the Hanjiang River Basin [J]. Progressus Inquisitiones De Mutatione Climatis, 2015, 11(1): 15-21. (in Chinese))

[8] 陈融旭,韩冰,赵凌栋,等. 极端降雨条件下濮阳市马颊河流域水灾害风险研究[J]. 水利水电技术, 2022, 53 (6): 34-43. (CHEN Rongxu, HAN Bing, ZHAO Lingdong, et al. Study on water disaster risk of Majiahe River Watershed in Puyang City under extreme rainfall [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2022, 53(6): 34-43. (in Chinese))

[9] CHEN Y D, ZHANG Q, XIAO M, et al. Precipitation extremes in the Yangtze River Basin, China: regional frequency and spatial-temporal patterns [J]. Theoretical and Applied Climatology, 2014, 116(3): 447-461.

[10] 孔锋,吕丽莉,孙劭,等. 地球工程对中国极端降雨致灾人口风险的影响研究[J]. 灾害学, 2019, 34 (1): 99-106. (KONG Feng, LYU Lili, SUN Shao, et al. Impact of geoengineering on population risk of extreme rainfall in

- China[J]. Journal of Catastrophology, 2019, 34(1): 99-106. (in Chinese))
- [11] 毛海涛,邹敏,何涛,等. 基于 Copula 函数的三峡库区万州段蓄水前后降雨径流关系分析[J]. 泥沙研究, 2021, 46(3): 57-63. (MAO Haitao, ZOU Min, HE Tao, et al. Study on the relationship of rainfall-runoff before and after impoundment of the Three Gorges Reservoir based on copula function in the Wanzhou City [J]. Journal of Sediment Research, 2021, 46(3): 57-63. (in Chinese))
- [12] 郭爱军, 畅建霞, 王义民, 等. 近 50 年泾河流域降雨-径流关系变化及驱动因素定量分析[J]. 农业工程学报, 2015, 31(14): 165-171. (GUO Aijun, CHANG Jianxia, WANG Yimin, et al. Variation characteristics of rainfall-runoff relationship and driving factors analysis in Jinghe River Basin in nearly 50 years [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2015, 31(14): 165-171. (in Chinese))
- [13] 郑金丽, 严子奇, 李东, 等. 黄河流域降雨-径流关系时空演变研究[J]. 水资源与水工程学报, 2021, 32(4): 77-85. (ZHENG Jinli, YAN Ziqi, LI Dong, et al. Spatio-temporal evolution of the rainfall-runoff relationship in the Yellow River Basin [J]. Journal of Water Resources & Water Engineering, 2021, 32(4): 77-85. (in Chinese))
- [14] 程娅姗, 王中根, 刘丽芳, 等. 近 50 年潮河流域降雨-径流关系演变及驱动力分析[J]. 南水北调与水利科技, 2018, 16(2): 45-50. (CHENG Yashan, WANG Zhonggen, LIU Lifang, et al. Analysis of rainfall and runoff variations and the driving factors identification over the past 50 years in Chaohe River Basin [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2018, 16(2): 45-50. (in Chinese))
- [15] 刘丽芳, 王中根, 姜爱华, 等. 近 50 年济南三川流域降雨-径流关系变化分析[J]. 南水北调与水利科技, 2018, 16(1): 22-27. (LIU Lifang, WANG Zhonggen, JIANG Aihua, et al. Analysis of rainfall-runoff relationship variation characteristics in Sanchuan Watershed in Jinan City over recent 50 years [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2018, 16(1): 22-27. (in Chinese))
- [16] CAVALCANTE R B, DA SILVA FERREIRA D B, PONTES P R M, et al. Evaluation of extreme rainfall indices from CHIRPS precipitation estimates over the Brazilian Amazonia [J]. Atmospheric Research, 2020, 238: 104879.
- [17] CROITORU A E, PITICAR A, BURADA D C. Changes in precipitation extremes in Romania [J]. Quaternary International, 2016, 415: 325-335.
- [18] 田焯. 气候变化对极端径流影响评估中的不确定性研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2013.
- [19] 高冰, 任依清. 鄱阳湖流域 1961—2010 年极端降水变化分析[J]. 水利水电科技进展, 2016, 36(1): 31-35.
- (GAO Bing, REN Yiqing. Changes of extreme precipitation events in Poyang Lake Basin from 1961 to 2010 [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2016, 36(1): 31-35. (in Chinese))
- [20] 马嘉忆, 董增川, 蒋飞卿, 等. 城镇化背景下太湖流域极端降雨时空演变特征[J]. 水电能源科学, 2022, 40(3): 1-4. (MA Jiayi, DONG Zengchuan, JIANG Feiqing, et al. Spatio-temporal variation characteristics of extreme rainfall in Taihu Lake Basin under urbanization [J]. Water Resources and Power, 2022, 40(3): 1-4. (in Chinese))
- [21] 杨家桢, 杨云川, 杨淇淇, 等. 1951—2015 年广西极端降雨时空演变特征[J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2020, 18(5): 84-93. (YANG Jiazhen, YANG Yunchuan, YAN Qiqi, et al. Spatial and temporal evolution characteristics of extreme rainfall in Guangxi from 1951 to 2015 [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2020, 18(5): 84-93. (in Chinese))
- [22] 张俊, 高雅琦, 徐卫立, 等. 长江流域极端降雨事件时空分布特征[J]. 人民长江, 2019, 50(8): 81-86. (ZHANG Jun, GAO Yaqi, XU Weili, et al. Spatial and temporal analysis of extreme precipitation events in Yangtze River Basin [J]. Yangtze River, 2019, 50(8): 81-86. (in Chinese))
- [23] 张菁, 张珂, 王晟, 等. 陕甘宁三河源区 1971—2017 年极端降水时空变化分析[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2021, 49(3): 288-294. (ZHANG Jing, ZHANG Ke, WANG Sheng, et al. Spatiotemporal variation analysis of extreme precipitation in the Three River Source Area of the Shaanxi-Gansu-Ningxia Contiguous Region from 1971 to 2017 [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2021, 49(3): 288-294. (in Chinese))
- [24] 钟科元, 郑粉莉, 吴红艳, 等. 松花江流域极端降雨变化对流域输沙量的影响[J]. 农业机械学报, 2017, 48(8): 245-252. (ZHONG Keyuan, ZHENG Fenli, WU Hongyan, et al. Effects of precipitation extremes change on sediment load in Songhua River Basin [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(8): 245-252. (in Chinese))
- [25] 邱德勋, 穆兴民, 赵广举, 等. 渭河流域极端降雨变化趋势及其对水沙情势的影响[J]. 水土保持研究, 2022, 29(6): 65-72. (QIU Dexun, MU Xingmin, ZHAO Guangju, et al. Effects of precipitation extremes change on streamflow and sediment load in Weihe River Basin [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2022, 29(6): 65-72. (in Chinese))
- [26] 翟婷婷, 赵广举, 穆兴民, 等. 黄河中游典型流域极端降雨条件的水沙过程变化[J]. 泥沙研究, 2021, 46(1): 57-63. (ZHAI Tingting, ZHAO Guangju, MU Xingmin, et al. Processes of water and sediment in the representative catchments of the middle Yellow River under extreme rainfalls [J]. Journal of Sediment Research, 2021, 46(1):

- 57-63. (in Chinese))
- [27] 周才钰,何毅,穆兴民,等. 黄河中游极端降雨对输沙量影响的时序分析[J]. 人民黄河,2019,41(3):6-10. (ZHOU Caiyu, HE Yi, MU Xingmin, et al. Time series analysis of rainfall extremes change on sediment discharge in the middle Yellow River[J]. Yellow River,2019,41(3):6-10. (in Chinese))
- [28] 王宝恩. 坚持人民至上 守护珠江安澜:珠江委全力抗击珠江“22·6”特大洪水[J]. 中国水利,2022(22):5-7. (WANG Baoen. Putting people at the center to safeguard the Pearl River: the Pearl River Water Resources Commission fights against the “June 2022” extraordinary flood in the Pearl River with full force[J]. China Water Resources,2022(22):5-7. (in Chinese))
- [29] 陈文龙,马志鹏,袁菲,等. 粤港澳大湾区水安全协同调控理论框架研究[J]. 水资源保护,2023,39(1):22-31. (CHEN Wenlong, MA Zhipeng, YUAN Fei. Theoretical framework of water security collaborative regulation and control in Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area [J]. Water Resources Protection,2023,39(1):22-31. (in Chinese))
- [30] 吴孝情,陈晓宏,唐亦汉,等. 珠江流域非平稳性降雨极值时空变化特征及其成因[J]. 水利学报,2015,46(9):1055-1063. (WU Xiaoping, CHEN Xiaohong, TANG Yihan, et al. Spatiotemporal variations and the causes of non-stationary extreme precipitation in the Pearl River Basin[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2015, 46(9):1055-1063. (in Chinese))
- [31] 黄国如,陈易偲,姚芝军. 高度城镇化背景下珠三角地区极端降雨时空演变特征[J]. 水科学进展,2021,32(2):161-170. (HUANG Guoru, CHEN Yisi, YAO Zhijun. Spatial and temporal evolution characteristics of extreme rainfall in the Pearl River Delta under high urbanization[J]. Advances in Water Science, 2021, 32(2):161-170. (in Chinese))
- [32] 彭俊台,张强,陈晓宏,等. 珠江流域极端降雨时空演变特征分析[J]. 灾害学,2011,26(4):24-28. (PENG Juntao, ZHANG Qiang, CHEN Xiaohong, et al. Spatial and temporal evolution characteristics of extreme rainfalls in the Pearl River Basin[J]. Journal of Catastrophology, 2011, 26(4):24-28. (in Chinese))
- [33] SHE Dunxian, SHAO Quanxi, XIA Jun, et al. Investigating the variation and non-stationarity in precipitation extremes based on the concept of event-based extreme precipitation [J]. Journal of Hydrology, 2015, 530:785-798.
- [34] 徐宗学,班春广,张瑞. 雅鲁藏布江流域径流演变规律与归因分析[J]. 水科学进展,2022,33(4):519-530. (XU Zongxue, BAN Chunguang, ZHANG Rui. Evolution laws and attribution analysis in the Yarlung Zangbo River Basin[J]. Advances in Water Science, 2022, 33(4):519-530. (in Chinese))
- [35] 章延武,丛振涛,倪广恒. 基于中国气象资料的趋势检验方法对比分析[J]. 水科学进展,2013,24(4):490-496. (ZHANG Danwu, CONG Zhentao, NI Guangheng. Comparison of three Mann-Kendall methods based on the China's meteorological data [J]. Advances in Water Science, 2013, 24(4):490-496. (in Chinese))
- [36] 张印,王汉岗,余敦先,等. 基于创新趋势分析方法的黄河年季降水变化特征研究[J]. 中国农村水利水电,2023(3):30-38. (ZHANG Yin, WANG Hangang, SHE Dunxian, et al. Characteristics of annual and seasonal precipitation change in the Yellow River Basin based on the innovative trend analysis method [J]. China Rural Water and Hydropower, 2023(3):30-38. (in Chinese))
- [37] 吴国栋,刘廷玺,薛河儒. 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))
- [38] 张媛,李常斌,王刘明,等. 几种河川径流序列突变检验方法的对比[J]. 水利水电技术,2020,51(2):38-47. (ZHANG Yuan, LI Changbin, WANG Liuming, et al. Application and comparison of several test methods for change points diagnosis in streamflow variations[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2020, 51(2):38-47. (in Chinese))
- [39] 穆兴民,张秀勤,高鹏,等. 双累积曲线方法理论及在水文气象领域应用中应注意的问题[J]. 水文,2010,30(4):47-51. (MU Xingmin, ZHANG Xiubin, GAO Peng, et al. Theory of double mass curves and its applications in hydrology and meteorology [J]. Journal of China Hydrology, 2010, 30(4):47-51. (in Chinese))
- [40] 江洁,周天军,张文霞. 近 60 年来中国主要流域极端降水演变特征[J]. 大气科学,2022,46(3):707-724. (JIANG Jie, ZHOU Tianjun, ZHANG Wenxia. Temporal and spatial variations of extreme precipitation in the main river basins of China in the past 60 Years [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2022, 46(3):707-724. (in Chinese))
- [41] 安文杰. 嘉陵江流域极端降水时空变化特征研究[D]. 北京:华北电力大学(北京),2022.
- [42] 张海宁,周旗,毛雨唯,等. 渭河流域极端降水特性指标分析[J]. 水土保持研究,2022,29(3):128-134. (ZHANG Haining, ZHOU Qi, MAO Yuwei, et al. Analysis of extreme precipitation characteristics in Weihe River Basin[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2022, 29(3):128-134. (in Chinese))

(收稿日期:2023-06-15 编辑:熊水斌)