

Algorithm and Application of Inconsistent Flood Frequency Based on the MISOHRM Model (III): Hydrological Frequency Analysis with Inconsistent Flood Series^{*}

Yu Liu, Ping Xie[#], Xi'nan Li, Bin Xu

State Key Laboratory of Water Resources and Hydropower Engineering Science, Wuhan University, Wuhan

Email: liuyu89zsu@163.com, [#]pxie@whu.edu.cn

Received: Jul. 5th, 2012; revised: Jul. 19th, 2012; accepted: Jul. 27th, 2012

Abstract: Due to both flood returning to main channel and the encounter experience of main and branch flood and interval flood, the flood could evolve into a deluge or catastrophic flood from a much smaller order of magnitude as it arrives from upstream to downstream, posing a significant threat to the drainage area's flood control as well as people's production and living on both sides. For studying the flood under the consideration of encounter experience of main and branch flood and interval flood in West River, the relevant model of multi-input and single-output are developed on the main and branch flood and the interval rainstorm, and using the relevant model to investigate the composition and impact factors of flood in Dahuangjiangkou and Wuzhou station from the perspective of causes. The station of Dahuangjiangkou in the West River as an example, the past and present as well as future frequency distributions of annual flood series were gained, and get flood frequency distribution on changing environment, which provide design basis that flood control planning and flood risk assessment.

Keywords: Flood; Encounter Experience; Relevant Model; Inconsistency; Frequency Calculation

基于MISOHRM模型的非一致性洪水频率计算方法及应用 III: 模型构建与非一致性洪水频率计算^{*}

刘 宇, 谢 平[#], 李析男, 许 斌

武汉大学水资源与水电工程科学国家重点实验室, 武汉

Email: liuyu89zsu@163.com, [#]pxie@whu.edu.cn

收稿日期: 2012 年 7 月 5 日; 修回日期: 2012 年 7 月 19 日; 录用日期: 2012 年 7 月 27 日

摘 要: 西江流域由于上游干、支流和区间洪水遭遇和洪水归槽问题, 导致上游量级不大的洪水到了下游则演变成大洪水或特大洪水, 给流域防洪工作以及两岸人民生活造成了巨大威胁。针对干支流和区间遭遇作用的西江洪水问题, 本文利用西江中游 7 个水文站 1958~2007 年的年最大洪峰流量序列和两个区间(武江区间和江梧区间)1958~2007 年的年最大一日降雨序列, 分别建立了西江中游两区间多输入单输出水文相关模型(MISOHRM); 从成因的角度探讨了西江中游干流控制站点大湟江口和梧州站洪水的组成和影响因子; 并应用该模型对西江梧州站年最大洪峰流量序列进行频率计算, 以得到过去、现状和未来条件(三种情景)下年最大洪峰流量序列的频率分布, 为防洪规划和洪水灾害风险评估

^{*}基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50979075; 51179131; 51190094; 50839005)。

[#]通讯作者。

作者简介: 刘宇(1989-), 女, 重庆人, 硕士研究生, 主要从事变化环境下的水文水资源研究。

提供设计依据。

关键词: 洪水; 遭遇问题; 相关模型; 非一致性; 频率计算

1. 引言

在气候变化和人类活动的共同作用下, 西江洪水的形成和变化规律发生了变异。研究变化环境下的西江洪水问题, 在了解研究区域洪水成因及其水文要素变异情况的基础上, 结合非一致性水文频率计算原理对洪水系列进行分析计算是西江流域防洪规划以及洪水灾害风险评价的核心。西江水文要素的变异使得流域干、支流洪水的组合遭遇对下游洪水量级的加大作用加剧, 即干、支流和区间的洪水量级即使不很大, 但在洪水洪峰适时遭遇、组合下, 便会加大下游洪水的量级; 加之内涝集水的洪水“归槽效应”和小支流的回水顶托, 则会进一步加剧洪水的危害, 并可能发展成为特大洪水。

本文针对文献[1]所提出的西江洪水问题, 结合基于 MISOHRM 模型的非一致性洪水频率计算方法及原理^[1], 构建多输入单输出水文相关模型, 分析下游输出站点洪水组成特性, 以及其受上游各输入因子的影响情况; 并利用该模型对西江梧州站进行非一致性洪水频率计算, 以推求该站过去、现状、未来(三种情景)变化环境下的洪水频率分布, 不仅对水循环和水安全研究具有重要的理论意义, 而且对于流域防洪规划和洪水灾害风险评估具有重要的实际应用价值。

2. 模型构建与分析

本文以西江中游为研究对象, 分别构建该河段武宣至大湟江口(简称武江区间)和大湟江口至梧州(简称江梧区间)两个区间段的多输入单输出水文相关模型。武江区间以大湟江口站年最大洪峰流量(Q_3)为输出因子, 上游武宣(Q_1)、贵港(Q_2)年最大洪峰流量以及该区间降雨(P_1)为输入因子; 江梧区间以梧州站年最大洪峰流量(Q_7)为输出因子, 上游大湟江口(Q_3)、太平(Q_4)、金鸡(Q_5)、平乐站(Q_6)年最大洪峰流量以及该区间降雨(P_2)为输入因子。各河段及水文站位置关系如图 1 所示。

由西江中游水文要素时空变异规律^[2]结果可知: 在第一显著性水平 $\alpha = 0.05$, 第二显著性水平 $\beta = 0.01$ 的条件下, 研究区域内 7 个站点的年最大洪峰流量序列和两个区间降雨序列发生了不同程度变异, 各水文要素变异诊断结果如表 1 所示。

发生变异的水文要素不满足模型构建的一致性要求, 因此需对西江中游水文要素中出现变异的序列进行预处理, 使其满足一致性。根据非一致性水文序列的分解与合成原理^[3]将水文序列中非一致的确定性成分剔除即可得到满足一致性要求的随机序列。由于西江中游各水文要素以跳跃变异为主, 因此, 本文

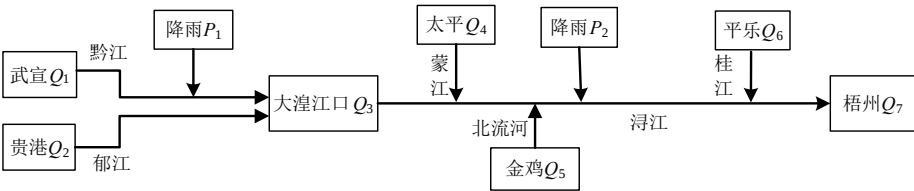


Figure 1. The general information of water system at Xijiang River
图 1. 西江中游各河段及水文站位置概化图

Table 1. Variance diagnosis of hydrological factors in Xijiang River middle reaches
表 1. 西江中游水文要素变异诊断结果

水文要素	武宣 Q_m	贵港 Q_m	武江区间 P	大湟江口 Q_m	太平 Q_m	金鸡 Q_m	平乐 Q_m	江梧区间 P	梧州 Q_m
变异程度	中变异	无变异	弱变异	中变异	中变异	弱变异	无变异	无变异	中变异
变异点	1991	-	-	1991	1993	1976	-	-	1991

注: Q_m 表示年最大洪峰流量序列, P 表示年最大一天降雨序列。

采用跳跃分析法^[4]提取序列中的确定性成分, 以得到满足建模要求的随机序列, 并以干流大湟江口站年最大洪峰流量序列为例对其计算过程进行说明。

对于大湟江口站而言, 第一个系列(过去)1958~1991 年的均值为 26205.9 m³/s, 第二个系列(现状)1991~2007 年的均值为 33937.5 m³/s, 两个系列的均值差为 7731.6 m³/s, 由此得出大湟江口站年最大洪峰流量序列的跳跃成分为:

$$Y_3 = \begin{cases} 0 & t \leq 1991 \\ 7731.6 & t > 1991 \end{cases} \quad (1)$$

根据非一致性水文序列的分解与合成原理, 随机性成分 $Q_3 = Q_{SC,3} - Y_3$, 因此当大湟江口站的年最大洪峰流量序列的跳跃成分由式(2)确定以后, 其随机性成分为:

$$Q_3 = \begin{cases} Q_{SC,3} & t \leq 1991 \\ Q_{SC,3} - 7731.6 & t > 1991 \end{cases} \quad (2)$$

式中 $Q_{SC,3}$ 表示大湟江口站年最大洪峰流量实测序列, Q_3 表示序列随机性成分(亦称随机性成分原始值)。

利用水文变异诊断系统^[5]对大湟江口站年最大洪峰流量序列去除跳跃成分后的随机性成分原始值进行变异诊断, 结果表明该序列无变异, 满足一致性要求, 可用于建立相关模型。

2.1. 多输入单输出水文相关模型

通过预处理之后得到的西江中游各水文要素的随机序列是具有相同物理成因的平稳序列, 反映了在过去状态下年最大洪峰流量的形成条件。分别以各区间上游和区间流量以及降雨为输入, 下游流量为输出, 建立各区间的多输入单输出水文相关模型, 以系统地分析下游输出站点年最大洪峰流量序列的组成和影响因子。由于年最大洪峰流量值与年最大一日降雨值的大小相差较大, 且各自单位不一致, 为避免其对模型合理性和精度的影响, 本文对数据进行归一化

处理。利用 SCE-UA^[6,7]全局优化算法, 可得武江区间和江梧区间多输入单输出相关关系如表 2 所示。

从 Nash 效率系数 R^2 来看, 两个相关模型效率系数皆在 70%以上, 精度较高, 武江区间相关模型的精度略低于武江区间。

2.2. 模型精度评定

本文采用 Nash 效率系数 R^2 以及相对误差 E 两个指标作为模型精度评定标准。在西江中游各站点中, 梧州站为干流浔江与各支流汇合后的主要控制站点, 因此本文选取江梧区间模型为例, 以相对误差为指标对输出因子梧州站的模拟精度进行分析。

利用文献[1]所述公式对江梧区间内下游输出梧州站年最大洪峰流量随机序列的相对误差进行计算, 然后进行合格率评定, 以相对误差不超过 20%为评定依据; 计算得到逐年相对误差见表 3。由相对误差计算结果可知, 各年份相对误差整体在 0~40%幅度左右变化, 在 0~20%范围内变化较为集中; 整个序列 1958~2007 年的合格率达 88%。误差评定结果与 Nash 效率系数结果显示江梧区间水文相关模型精度较高, 可用于模型预测等实际应用分析。

2.3. 模型分析

为满足模型对建模因子的一致性要求, 本文建立多输入单输出水文相关模型所用的资料是经提取确定性成分而得到的各序列平稳随机序列, 即相关模型揭示了在天然状态下各区间内上游和区间的输入对下游输出的影响程度。上游站点大湟江口、太平、金鸡、平乐天然状态下年最大洪峰流量($Q_3 \sim Q_6$)和区间降雨(P_2)与下游梧州站年最大洪峰流量(Q_7)的关系表示为:

$$Q_7 = 0.01 + 0.804*Q_3 + 0.081*Q_4 + 0.01*Q_5 + 0.01*Q_6 + 0.1*P_2 \quad (3)$$

由式(3)可知, 在上游干支流和区间遭遇的情况

Table 2. The interval relevant relations of Xijiang River middle reaches
表 2. 西江中游各区间相关关系

区间	输入因子	输出因子	相关模型	$R^2(\%)$
武江区间	$Q_1、Q_2、P_1$	Q_3	$Q_3 = 0.01 + 0.826*Q_1 + 0.069*Q_2 + 0.1*P_1$	74.23
江梧区间	$Q_3 \sim Q_6、P_2$	Q_7	$Q_7 = 0.01 + 0.804*Q_3 + 0.081*Q_4 + 0.01*Q_5 + 0.01*Q_6 + 0.1*P_2$	72.92

Table 3. Relative error calculations of Wuzhou station
表 3. 梧州逐年相对误差计算结果表

年份	相对误差(%)	年份	相对误差(%)	年份	相对误差(%)	年份	相对误差(%)	年份	相对误差(%)	年份	相对误差(%)
1958	1.19	1967	1.14	1976	3.22	1985	9.57	1994	0.79	2003	7.09
1959	0.43	1968	28.97	1977	13.45	1986	0.40	1995	20.31	2004	15.52
1960	14.81	1969	39.81	1978	9.18	1987	26.35	1996	23.74	2005	7.08
1961	5.09	1970	3.64	1979	6.17	1988	1.03	1997	13.81	2006	1.73
1962	2.48	1971	2.37	1980	5.59	1989	0.44	1998	15.09	2007	12.68
1963	11.87	1972	11.87	1981	2.50	1990	6.63	1999	3.12		
1964	7.22	1973	3.80	1982	15.61	1991	2.10	2000	10.10	合格率	88.00
1965	19.67	1974	4.52	1983	5.81	1992	5.29	2001	2.87		
1966	2.93	1975	4.06	1984	1.35	1993	5.84	2002	25.23		

下,控制站梧州的洪峰流量受上游干流上大湟江口站的洪峰流量影响最大,其次是区间降雨的影响,区间内支流上各站点的影响相对较弱。在各影响因子中,若其余各因子保持不变,则大湟江口站年最大洪峰流量每变化一个单位(增加或减少),相应会引起梧州站年最大洪峰流量变化(增加或减少)0.804 个单位;其余站点的变化对梧州站的影响作用依次类推。

3. 基于 MISOHRM 模型的非一致性洪水频率计算

3.1. 基于 MISOHRM 模型的随机性成分计算

将满足一致性要求的 $Q_3\sim Q_7$ 和 P_2 作为输入条件代入式(3),可模拟还原得到梧州站在过去状态下的一致性洪水序列,该序列即为梧州站的随机性成分(见图 2)。

采用水文变异诊断系统对模拟还原序列进行检验,取第一显著性水平 $\alpha = 0.05$,第二显著性水平 $\beta = 0.01$,对应的 Hurst 系数置信限分别为 $H_\alpha = 0.679$, $H_\beta = 0.724$,Hurst 计算值为 $H = 0.555$, $H < H_\alpha$, 证明该序列诊断无变异,满足一致性要求。

3.2. 年最大洪峰流量确定性成分计算

在变异点 1991 年以前,系列是稳定的随机序列,其确定性成分为零;令变异点以后某个年份梧州站年最大洪峰流量的随机性成分为 $S_1(t)$,该年实测的最大洪峰流量为 $S_2(t)$,则两者之差 $S_2(t)-S_1(t)$ 反映了变异点之后的确定性成分。即序列的确定性成分可由式(4)表示,计算结果见表 4,图 2。

$$Y_t = \begin{cases} 0 & t \leq 1991 \\ S_2(t) - S_1(t) & t > 1991 \end{cases} \tag{4}$$

3.3. 年最大洪峰流量随机性成分频率计算

对于满足一致性要求的梧州站年最大洪峰流量随机性成分,假设其服从 P-III型分布,采用有约束加权适线法^[8]计算分布参数,详见表 5,其频率曲线如图 3 中“过去”所示,频率计算结果见表 6 中“过去”。

3.4. 非一致性年最大洪峰流量序列合成计算

采用分布合成方法进行非一致性水文序列的合成计算。根据 MISOHRM 模型,计算得 2007 年现状条件下梧州站的确定性成分为 11,731 m³/s;根据梧州站随机性成分的统计规律,随机生成梧州站 N = 5000 个年最大洪峰流量合成样本点据,并统计大于等于每一个样本点据的次数 n,然后用期望公式计算每个样本点据的经验频率;采用有约束加权适线法得到现状条件下合成序列的参数和拟合效率见表 1,其频率曲线见图 3 中“现状”,计算结果见表 6 中“现状”。

由于 1992~2007 年确定性成分波动较大,变化规律不明显(图 2),难以对未来进行预测。因此,采用情景假设对未来确定性成分进行分析,即在确定性成分的波动范围内,分别取 1992~2007 年确定性成分的最大值 15,839 m³/s,均值 1771 m³/s 和最小值 8687 m³/s 对未来作三种情景分析,其参数计算结果见表 5,频率计算结果见图 3 和表 6。

3.5. 非一致性洪水频率分析

本方法对过去序列的频率复核以及对未来序列

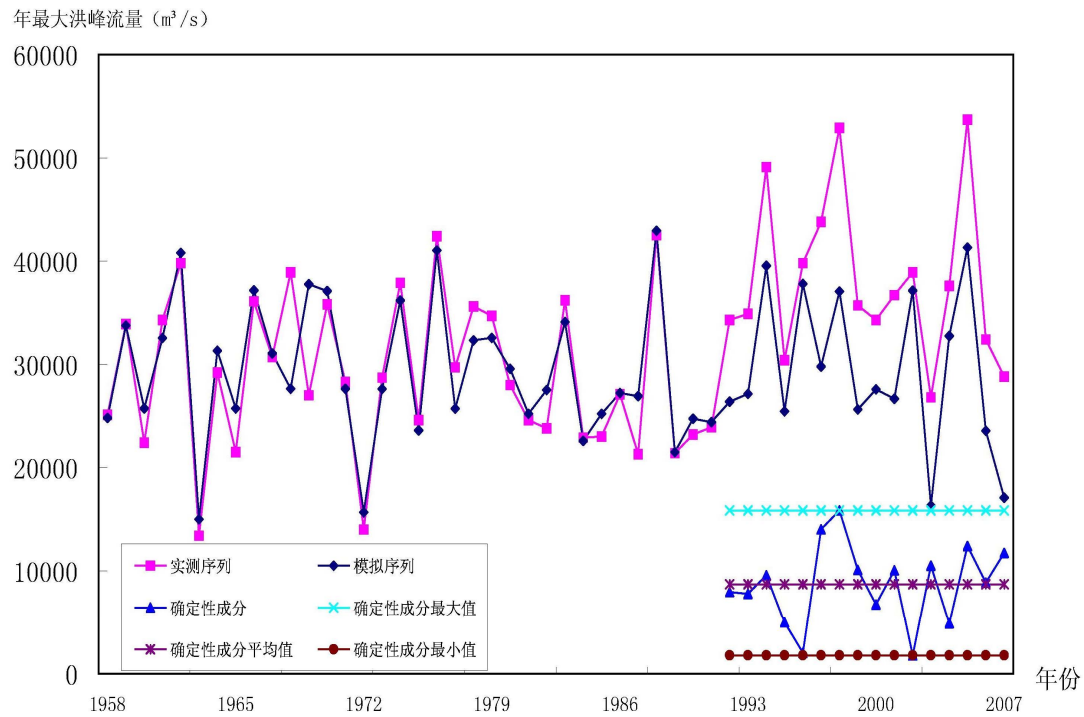


Figure 2. The change of annual maximum discharge deterministic component in study area
图 2. 梧州站年最大洪峰流量确定性成分变化图

Table 4. The results of deterministic component
表 4. 确定性成分计算结果表

年份	确定项	年份	确定项	年份	确定项	年份	确定项
<1992	0	1996	2000	2001	10,039	2006	8851
1992	7928	1997	14,021	2002	1771	2007	11,731
1993	7754	1998	15,839	2003	10,496	1992~2007	8687
1994	9565	1999	10,076	2004	4852	最大值	15,839
1995	4956	2000	6723	2005	12,397	最小值	1771

Table 5. The parameters of frequency curves in different periods
表 5. 不同条件下频率计算参数表

情景		参数			
		$\bar{x}$ (m³/s)	C_v	C_s	
未来 条件	过去条件	29,313	0.244	0.488	效率 R^2
	现状条件	40,999	0.176	0.485	96.37%
	情景 1	45,165	0.160	0.4527	99.99%
	情景 2	38,088	0.190	0.537	99.94%
	情景 3	31,092	0.229	0.457	99.97%

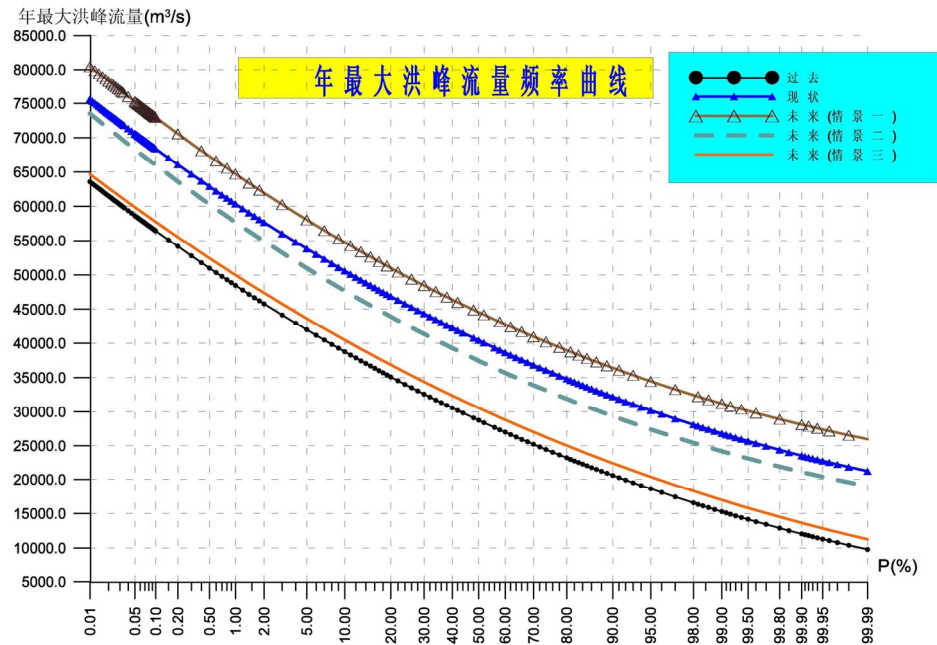


Figure 3. The frequency distribution curves of annual maximum discharge during the different periods
图 3. 梧州站年最大洪峰流量不同时期频率曲线

Table 6. The calculating results of annual maximum discharge frequency of study area during the different periods
表 6. 梧州站年最大洪峰流量不同时期频率计算结果

编号	频率 (%)	重现期 (年)	过去条件 (m³/s)	现状条件 (m³/s)	未来条件		
					情景 1: 确定性成分取最大值 (m³/s)	情景 2: 确定性成分取均值 (m³/s)	情景 3: 确定性成分取最小值 (m³/s)
1	1	100	48449.65	60342.9	64702.01	57680.28	49962.55
2	2	50	45788.18	57654.44	61953.14	54915.77	47362.23
3	3	33.333	44149.30	55998.75	60263.78	53217.6	45758.5
4	5	20	41975.28	53802.19	58026.98	50970.19	43627.91
5	10	10	38765.28	50558.37	54733.86	47663.8	40474.8
6	20	5	35097.89	46851.44	50987.18	43905.91	36860.51
7	25	4	33766.69	45505.62	49631.83	42547.65	35545.07
8	50	2	28733.64	40415.84	44533.28	37444.58	30551.92
9	99.9	1	12049.81	23517.1	28096.45	21107.79	13640.87

的频率预测, 针对的都是同一个随机性规律, 过去和未来环境的变化通过确定性规律来考虑。因此, 还原的天然序列, 其频率计算结果可以反映过去洪水序列形成的条件, 2007 年确定性成分与天然成分的合成, 可以反映现状的洪水序列形成条件, 未来不同确定性成分与随机成分的合成, 可以反映不同假设情景下未来的洪水序列形成条件。梧州站三个时期的频率分布曲线如图 3 所示, 计算结果见表 6。

采用基于 MISOHRM 模型的非一致性洪水频率计算方法对梧州站 50 年年最大洪峰流量资料进行水文频率计算。在情景 1 的条件下, 过去、现状和未来三个时期的年最大洪峰流量呈增加趋势; 变差系数 C_v 呈减小趋势, 说明年最大洪峰流量在多年平均情况下变化幅度减弱, 即多年最大洪水值之间的离散程度减弱。而在情景 2 和情景 3 的条件下, 未来洪峰流量将会降低, 且同等量级洪峰条件下的频率也会降低。偏

态系数 C_s 在数理统计中,用来描述频率分布的不对称性,通常采用三阶中心矩法进行计算,抽样误差较大,故本文不予讨论。

4. 结论

本文针对干支流和区间遭遇的洪水问题,建立西江中游 MISOHRM 模型。以江梧区间为例,探讨了下游输出站点受上游干支流和区间输入因子的影响作用;并基于该模型进行非一致性洪水频率计算,据此推求出过去、现状、未来(三种情景)三个时期的洪水频率分布,其主要结论如下:

1) 利用 SCE-UA 全局优化方法所得到的天然状态下的两个区间多输入单输出水文相关模型模拟精度较高, Nash 效率系数分别为 74.23%和 72.92%;从误差评定来看,梧州站与上游干支流和区间站点各因子的相关模型合格率达 88%,可用于模型预测等实际应用分析。

2) 通过相关模型分析可知,在干支流和区间遭遇的作用下,江梧区间对梧州站年最大洪峰流量影响作用最显著的是上游干流上站点大湟江口站,其次是区间降雨,支流上各站点的洪峰流量对下游输出的影响作用相对较弱,与文献[2]所得变异规律结论一致。

3) 通过频率计算结果可知,在情景 1 的情况下,当频率(重现期)相同时,三个时期的年最大洪峰流量呈增加趋势,且其洪峰流量的量级越来越大;在洪峰流量相同时,其洪峰流量发生频率越来越高,且重现期越来越短;变差系数 C_v 在三个时期呈减小趋势,说明年最大洪峰流量在多年平均情况下变化幅度减弱,洪峰流量趋于稳定波动。

4) 根据频率曲线,情景 2 和情景 3 的未来洪峰流量将会降低,且同等量级洪峰条件下的频率也会减小。

5) 本文所建立的考虑到了上游干支流和区间洪水的遭遇作用的相关模型,是从统计意义上对遭遇问题进行考虑,而并非实际物理过程的遭遇。

6) 本文对未来条件提出三种假设情景,是未来频率曲线变化的可能区间,其频率分析结果对变化环境下的水循环、水安全研究,以及西江水利工程建设和流域防洪减灾规划的制定,具有一定的参考价值。

参考文献 (References)

- [1] 谢平,许斌,刘宇,等. 基于 MISOHRM 模型的非一致性洪水频率计算方法及应用 I: 原理与方法[J]. 水资源研究, 2012, 1(4): 217-221.
XIE Ping, XU Bin, LIU Yu, et al. Algorithm and application of inconsistent flood frequency based on the MISOHRM model (I): Principals and algorithm. Journal of Water Resources Research, 2012, 1(4): 217-221. (in Chinese)
- [2] 李析男,谢平,许斌,等. 基于 MISOHRM 模型的非一致性洪水频率计算方法及应用(II): 西江中游水文要素时空变异规律[J]. 水资源研究, 2012, 1(5): 310-314.
LI Xinan, XIE Ping, XU Bin, et al. Algorithm and application of inconsistent flood frequency based on the MISOHRM model (II): Hydrological elements alteration regulation at the middle stream of Xi River from the temporal and spatial scale. Journal of Water Resources Research, 2012, 1(5): 310-314. (in Chinese)
- [3] 谢平,陈广才,夏军. 变化环境下非一致性年径流序列的水文频率计算原理[J]. 武汉大学学报(工学版), 2005, 38(6): 6-9.
XIE Ping, CHEN Guangcai and XIA Jun. Hydrological frequency calculation principle of inconsistent annual runoff series under Changing environments. Engineering Journal of Wuhan University, 2005, 38(6): 6-9. (in Chinese)
- [4] 谢平,陈广才,雷红富. 变化环境下基于跳跃分析的水资源评价方法[J]. 干旱区地理, 2008, 31(4): 588-593.
XIE Ping, CHEN Guangcai and LEI Hongfu. Assessment method of water resources based on jump analysis in changing environments. Arid Land Geography, 2008, 31(4): 588-593. (in Chinese)
- [5] 谢平,陈广才,雷红富,等. 水文变异诊断系统[J]. 水力发电学报, 2010, 29(1): 85-91.
XIE Ping, CHEN Guangcai, LEI Hongfu, et al. Hydrological alteration diagnosis system. Journal of Hydroelectric Engineering, 2010, 29(1): 85-91. (in Chinese)
- [6] DUAN, Q. Y., GUPTA, V. K. and SOROOSHIAN, S. Shuffled complex evolution approach for effective and efficient minimization. Optimization Theory and Application, 1993, 76(3): 501-521.
- [7] DUAN, Q. Y., GUPTA, V. K. and SOROOSHIAN, S. Effective and efficient global optimization for conceptual rainfall-runoff models. Water Resources Research, 1992, 28(4): 1015-1031.
- [8] 谢平,郑泽权. 水文频率计算有约束加权适线法[J]. 武汉水利电力大学学报, 2000, 33(1): 49-52.
XIE Ping, ZHENG Zequan. A constrained and weighted fitting method for hydrologic frequency calculation. Journal of Wuhan University of Hydraulic and Hydroelectric Engineering, 2000, 33(1): 49-52. (in Chinese)