

# Algorithm and Application of Inconsistent Flood Frequency Based on the MISOHRM Model (II): Temporal and Spatial Alteration Analysis\*

Xi'nan Li, Ping Xie<sup>#</sup>, Bin Xu, Yu Liu

State Key Laboratory of Water Resources and Hydropower Engineering Science, Wuhan University, Wuhan  
Email: lixinan1985@126.com, <sup>#</sup>pxie@whu.edu.cn

Received: Aug. 5<sup>th</sup>, 2012; revised: Aug. 23<sup>rd</sup>, 2012; accepted: Sep. 4<sup>th</sup>, 2012

**Abstract:** With the higher and harder levees and no lakes to storage the flood at the middle Xi River, the encounter and return to main channel of flood were strengthened and the frequency and intensity of flood were changed. Because of the basic function of hydrological elements alteration analysis to the MISOHRM model and inconsistent flood frequency algorithm, with the hydrological series of 7 hydrological stations at the middle Xi River from the year of 1958 to 2007, the hydrological alteration diagnosis system was used to analyze the alteration regulation. The results show that, the relationship of the Wuxuan, Wuzhou and Da-huangjiangkou stations in the main stream is close and consistent, but the relationship between stations and regions in the tributary are not apparent.

**Keywords:** Hydrological Elements; Temporal and Spatial Scale; Alteration Regulations; Xi River

## 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\*

李析男, 谢平<sup>#</sup>, 许斌, 刘宇

武汉大学水资源与水电工程科学国家重点实验室, 武汉  
Email: lixinan1985@126.com, <sup>#</sup>pxie@whu.edu.cn

收稿日期: 2012年8月5日; 修回日期: 2012年8月23日; 录用日期: 2012年9月4日

**摘要:** 西江中游由于缺乏湖泊对洪水的调蓄, 加之防洪堤不断地加高加固引起洪水归槽, 加强了洪水遭遇效应, 导致洪水发生的频率和强度发生变化。为了解西江中游水文要素变异的驱动力和时空变异规律, 为多输入单输出水文相关模型(MISOHRM)的建立及非一致性洪水频率计算方法提供基础依据, 本文利用 1958~2007 年西江中游七个水文站两个区间的水文要素序列, 采用水文变异诊断系统对各要素进行变异分析。结果显示西江中游干流上的武宣、大湟江口和梧州站的洪峰流量序列关系密切, 变异点也较为一致; 而支流上的站点间以及站点和区间之间联系程度不紧密。

**关键词:** 水文要素; 时空尺度; 变异规律; 西江流域

\*基金项目: 国家自然科学基金项目(50979075; 51179131; 51190094; 50839005)。

<sup>#</sup>通讯作者。

作者简介: 李析男(1985-), 男, 博士研究生, 主要从事变化环境下的水文水资源研究。

## 1. 引言

洪水一直以来都是影响人类社会经济发展、生态环境的重大自然灾害之一。为了抵御洪水的侵害, 堤防、水库等各种水利工程措施便应运而生。随着防洪工程数量和标准的不断提高, 引起下游断面出现洪水遭遇和归槽等现象<sup>[1]</sup>, 洪水序列的一致性遭到破坏, 使洪水形成和变化规律发生了变异, 影响了洪水发生的频率和强度。

西江是珠江流域第一大水系, 由南盘江、红水河、黔江、浔江等河段所组成。除了上游高原地区的云南境内有几个湖泊外, 西江浔江段没有一个湖泊调蓄洪水<sup>[2]</sup>。随着沿岸人口的增加和经济的发展, 西江两岸防洪堤逐年兴建并加高加固, 洪水遭遇和归槽下泄导致洪峰增大显得十分明显: 短短 10 年左右时间, 西江下游已遭遇三次近百年和超百年一遇的特大洪水灾害<sup>[3]</sup>。由于堤防的防洪能力常用河道实测洪峰流量对应的洪水频率表示<sup>[4]</sup>, 因此, 变化环境下如何计算非一致性洪水序列的频率, 已成为非一致性洪水序列研究的核心问题。对于西江洪水问题, 干支流洪水和区间暴雨遭遇是下游灾害性洪水形成的主要原因。因此, 研究变化环境下的西江洪水变化规律, 应该从洪水成因出发, 以解决考虑洪水遭遇作用下的非一致性洪水问题。由基于 MISOHRM 模型的非一致性洪水频率计算原理和方法<sup>[5]</sup>研究可知: 针对西江洪水问题, 通过构建研究区域水文要素的多输入单输出水文相关模型(MISOHRM)考虑上游干支流洪水和区间暴雨的遭遇作用, 将相关分析与非一致性水文频率计算原理结合, 即可计算得到变化环境下的洪水发生频率, 从而揭示洪水变化规律。要构建考虑遭遇作用的 MISOHRM 模型, 首先必须对建模因子即研究区域内各水文要素序列进行变异分析, 了解各因子是否满足

模型对数据的要求, 以便进行进一步的处理分析。因此, 本文主要是针对西江中游 1958~2007 年七个水文站点的年实测最大洪峰流量序列和两个区间的年最大一日降水序列, 采用水文变异诊断系统对其进行变异分析, 了解水文要素变异驱动力和时空变异规律, 为构建 MISOHRM 模型提供基础依据。

## 2. 研究区域概况

西江流域由于中游河段(黔江、郁江和浔江)非一致性洪水问题最为突出, 因此, 本文选用 1958~2007 年西江中游七个站点(位于西江干流上的武宣、大湟江口和梧州, 位于西江的郁江、蒙江、北流河和桂江四个支流上的贵港、太平、金鸡和平乐)的实测年最大洪峰流量序列以及武宣至大湟江口(简称武江区间)和大湟江口至梧州(简称江梧区间)的年最大一日降水序列作为研究对象。各站点和区间的位置概化图如图 1 所示, 其中黔江段和郁江段分别从武宣和贵港到大湟江口, 浔江段则从大湟江口到梧州。

## 3. 水文变异诊断系统简介

水文变异诊断系统<sup>[6]</sup>考虑了趋势和跳跃两种变异形式, 由初步诊断、详细诊断和综合诊断三个部分组成。其基本思路是首先采用 Hurst 系数法等对序列进行初步检验, 判断序列是否可能存在变异; 如果可能存在变异, 再利用多种变异检验方法对水文序列进行详细诊断; 然后分别对趋势和跳跃诊断结论进行综合, 并根据效率系数评价水文序列与跳跃成分或趋势成分的拟合程度, 以效率系数较大者作为变异形式判断的结果; 最后结合实际水文调查分析, 对变异形式和结论进行确认, 从而得到最终的变异诊断结果。该系统可以解决单一方法有时检验结果不合理, 多种方法常常检验结果不一致的问题。

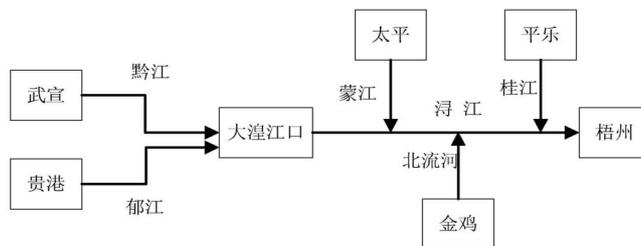


Figure 1. The general information of water system at the Xi River  
图 1. 西江中游各河段及水文站位置概化图

### 4. 水文要素时空变异规律分析

#### 4.1. 时间尺度变异分析

采用水文变异诊断系统, 在第一信度水平  $\alpha = 0.05$ 、第二信度水平  $\beta = 0.01$  的条件下, 对各站点 1958~2007 年的实测年最大洪峰流量序列和各区间的年最大一日降水序列进行变异分析。结果显示: 贵港和平乐站的实测年最大洪峰流量序列、江梧区间年最大一日降水序列均没有出现变异, 其它站点的变异情况如表 1 所示。

从表 1 可以看出, 在实测年最大洪峰流量序列中, 位于干流上的武宣、大湟江口和梧州站的洪峰流量序列变异形式保持一致, 即均在 1991 年发生了跳跃上升的中变异; 位于蒙江上的太平站于 1993 年出现了跳跃上升的中变异, 北流河上的金鸡站于 1976 年发生了跳跃下降的弱变异。在两个区间的年最大一日降水序列中, 仅武江区间年最大一日降水序列发生了弱变异。从上述变异情况分析得出, 西江中游干流上各站点间的洪水序列联系密切, 受支流的影响不是很大; 支流上各站点的水文变异形式差异较大。

**Table 1. Alteration diagnosis of the hydrological factors series at the middle stream of the Xi River**  
**表 1. 西江中游各水文要素序列诊断结果表**

水文要素		武宣 $Q_m$	武江区间 $P$	大湟江口 $Q_m$	太平 $Q_m$	金鸡 $Q_m$	梧州 $Q_m$	
序列		1958~2007						
初步诊断	Hurst 系数	0.729	0.723	0.769	0.735	0.724	0.771	
	整体变异程度	中变异	弱变异	中变异	中变异	弱变异	中变异	
	滑动 F 检验	1996(-)	2001(+)	1971(-)	2001(+)	1995(+)	1986(-)	
	滑动 T 检验	1991(+)	1993(+)	1991(+)	1993(+)	1976(+)	1991(+)	
	Lee-Heghinan 法	1991(0)	1993(0)	1991(0)	1993(0)	1976(0)	1991(0)	
	有序聚类法	1991(0)	1993(0)	1991(0)	1993(0)	1976(0)	1991(0)	
跳跃诊断	极差/标准差 RS	1990(0)	1998(0)	1990(0)	1981(0)	1978(0)	1984(0)	
	Brown-Forsythe	1991(+)	1993(-)	1991(+)	1993(-)	1997(-)	1991(+)	
	滑动游程检验法	1976(+)	1981(+)	1992(+)	1969(+)	1969(+)	1985(-)	
	滑动秩和检验	1991(+)	1993(-)	1991(+)	1993(+)	1976(+)	1991(+)	
详细诊断	最优信息二分割法	1987(0)	1974(0)	1997(0)	1980(0)	1979(0)	2005(0)	
	Mann-kendall	1992(+)	2000(+)	1993(+)	1993(+)	1986(+)	1995(+)	
	BSYES 方法	1991(+)	1993(+)	1991(+)	1993(+)	1976(+)	1991(+)	
	趋势变异程度	趋势微变异	无趋势变异	趋势微变异	趋势微变异	无趋势变异	趋势微变异	
	趋势诊断	相关系数法	+	-	+	+	-	+
Spearman		-	-	-	-	-	+	
Kendall		-	-	-	-	-	-	
综合诊断	跳跃点	1991	1993	1991	1993	1976	1991	
	跳跃	综合权重	0.69	0.69	0.69	0.73	0.57	0.69
		综合显著性	4(+)	0(-)	4(+)	3(+)	3(+)	4(+)
	趋势	综合显著性	1(-)	3(-)	1(-)	1(-)	3(-)	1(+)
		效率系数	16.13	9.48	22.88	17.19	10.66	24.85
	选择	(%)	7.77	0.64	9.77	9.88	5.22	11.9
诊断结论		1991(+) $\uparrow$	-	1991(+) $\uparrow$	1993(+) $\uparrow$	1976(+) $\downarrow$	1991(+) $\uparrow$	

注: 表中  $Q_m$  表示实测年最大洪峰流量序列,  $P$  表示区间年最大一日降水序列; “+”表示跳跃或趋势显著, “-”表示跳跃或趋势不显著, “0”表示不能进行显著性检验, “ $\uparrow$ ”表示上升, “ $\downarrow$ ”表示下降。

## 4.2. 空间尺度相关性分析

通过计算不同序列之间的相关系数, 可以有效地衡量序列之间的联系程度。为了进一步了解西江各水文要素之间的相互关系, 从空间尺度对各站点洪峰流量序列及区间降水序列存在的联系程度进行分析, 其相关系数计算结果如表 2 所示。

从表 2 可以看出, 在空间尺度上, 干流上武宣、大湟江口和梧州站之间的相关系数最高, 其中梧州和大湟江口站的相关系数为 0.907, 关系最为密切; 而梧州 - 武宣站、大湟江口 - 武宣站的相关系数分别为 0.878 和 0.876, 联系程度较为密切; 各支流站点之间、支流和干流站点之间、站点洪峰流量和区间降水序列之间的相关系数均在 0.6 以下, 联系程度比较一般。同时, 上述分析结论和时间尺度变异分析的结论具有一致性。

综上所述, 西江中游洪水序列所出现的变异, 无论是从空间尺度还是时间尺度上, 干流上的武宣、大湟江口和梧州站的洪峰流量序列关系密切, 变异点也较为一致; 其它站点之间、站点和区间之间的联系程度不紧密。

## 4.3. 物理成因分析

西江中游洪峰流量的变异是由多种原因造成的, 大致可以分为以下几个方面。

### 1) 全球及流域气候变化影响

近百年来, 全球气候变暖, 温度上升已成为不争的事实。黄嘉宏<sup>[7]</sup>经过分析得出, 近 50 年珠江流域的

气候变暖趋势与全球呈准同步变化。全球变暖, 使得水循环加快, 蒸发和降水增强, 加大河川径流, 洪涝灾害加剧, 20 世纪 90 年代是近千年以来最温暖的 10 年, 伴随着温度的升高, 西江流域洪水灾害频繁发生, 如梧州河段的“88.8”, “94.6”, “94.7”, “96.7”, “97.7”这五场洪水。

### 2) 降雨及干支流洪水遭遇影响

黄伟民等<sup>[8]</sup>通过对西江流域的“94.6”、“98.6”、“05.6”等几场特大暴雨分析, 发现其共同特征是降雨历时长、雨量大、暴雨覆盖范围大。在上述暴雨的影响下, 西江流域相继出现了大洪水。且这些洪水的特点如下: a) 暴雨中心走向与洪水汇流方向一致, 有利造峰; b) 长历时的降雨使各干流以及桂江、郁江、蒙江等支流先后起涨, 加上区间洪水, 导致干支流洪水遭遇, 最后演变成下游的大洪水。

### 3) 支流产汇流规律变化

由于山地植被变化、土地覆盖层的消减、农作物与耕作方式的变更, 造成了支流产汇流条件的变化。就柳州地区而言, 同样的一场暴雨, 形成区域性地面径流和干支流洪水的时间就缩短, 产汇流速度加快了。同时, 支流郁江、蒙江、北流江的河道坡降分别为 0.33‰、0.87‰、0.47‰, 大于黔江和浔江段的坡降, 洪水汇流速度快, 影响了干流的峰现时间和峰量, 对下游大洪水的形成有一定贡献。

### 4) 洪水归槽

随着人口的增加和经济的发展, 自上世纪五十年代起西江两岸防洪堤逐年兴建并加高加固。浔江沿岸

Table 2. Correlation coefficient of actual flood peak series at the middle stream stations of the Xi River

表 2. 西江中游各水文站及区间水文要素相关系数表

相关系数	武宣站	贵港站	大湟江口站	太平站	平乐站	金鸡站	梧州站	武江区间	江梧区间
武宣站	1.000	-0.010	0.876	0.510	0.443	0.086	0.878	0.435	0.314
贵港站	-0.010	1.000	0.140	-0.010	0.222	0.135	0.184	0.314	0.133
大湟江口站	0.876	0.140	1.000	0.525	0.386	-0.005	0.907	0.480	0.333
太平站	0.510	-0.010	0.525	1.000	0.525	0.096	0.597	0.435	0.574
平乐站	0.443	0.222	0.386	0.525	1.000	0.004	0.506	0.350	0.434
金鸡站	0.086	0.135	-0.005	0.096	0.004	1.000	-0.007	0.259	0.485
梧州站	0.878	0.184	0.907	0.597	0.506	-0.007	1.000	0.507	0.315
武江区间	0.435	0.314	0.480	0.435	0.350	0.259	0.507	1.000	0.567
江梧区间	0.314	0.133	0.333	0.574	0.434	0.485	0.315	0.567	1.000

自 1956 年其开始建筑防洪堤, 并不断加固加高, 至 1994 年, 沿岸堤防已按 80 年代编制的珠江流域综合规划拟定的 10 年一遇洪水防洪标准建成。浔江段堤防的不断兴建与加高使得下游归槽作用加剧, 梧州站的防洪压力增大, 尤其在 1994 年的加高加固之后, 从 1995 年到 2008 年的 14 年间, 梧州水文站出现 20 m 以上的洪水共 18 场。各类堤防工程虽然提高了受保护地区的防洪能力, 减少了直接经济损失, 但是形成洪水归槽, 抬升河道水位, 加剧洪水灾害。黄夏坤等<sup>[9]</sup>对近年所发生大洪水的实际研究表明, 浔江防洪堤的修建对西江中下游洪水产生一定程度的归槽影响。

总之, 在全球气候变化的大背景下, 西江流域的水文情势发生了变化。近年来历时长范围大的降雨、干支流洪水遭遇、产汇流规律的变化以及洪水归槽等因素, 共同导致了西江中游洪峰流量出现变异; 诊断系统所得到的结果与上述分析是相吻合的, 说明诊断结果是合理的。

## 5. 结语

本文主要对西江中游所选站点和区间水文要素的变异情况及物理成因进行分析, 为后续多输入单输出水文模型的构建打下基础, 所得到的主要结论如下:

1) 利用水文变异诊断系统对西江中游 1958~2007 年七个站点的洪峰流量序列及两个区间的年最大一日降水序列进行变异诊断, 结果表明干流上的武宣、大湟江口和梧州站的洪峰流量序列在 1991 年发生了跳跃上升的中变异; 位于蒙江上的太平站于 1993 年出现了跳跃上升的中变异, 北流河上的金鸡站于 1976 年发生了跳跃下降的弱变异; 其余站点的洪峰流量序列和区间降水没有发生变异。

2) 不同站点之间的相关系数表明, 干流上的梧州、大湟江口和武宣站之间的联系程度较为密切; 各支流站点之间以、支流干流站点之间以及站点洪峰流量和区间降水序列之间的联系程度比较一般。

3) 时间尺度的变异情况和空间尺度的相关系数均表明, 西江中游干流上的武宣、大湟江口和梧州站的洪峰流量序列关系密切, 变异点也较为一致。

4) 在全球气候变暖的大背景下, 西江流域的水文情势发生了变化, 一些极端气候事件发生的频率增加了。物理成因分析表明, 近年来西江流域历时长范围

大的强降雨、干支流洪水遭遇、产汇流规律的变化以及洪水归槽等因素, 共同导致了干流武宣、大湟江、梧州三个站点的洪峰流量出现变异, 使得区域洪水频发。但本文仅对西江中游洪水时空变异的物理成因进行了定性的分析, 而对于各站点间洪水遭遇、洪水归槽的定量分析, 将在下一篇文章中进行阐述。

## 参考文献 (References)

- [1] 黄夏坤, 郝振纯, 梁才贵, 等. 防洪堤对洪水的归槽影响研究[J]. 中山大学学报(自然科学版), 2008, 47(增刊 2): 151-157. HUANG Xiakun, HAO Zhengchun, LIANG Caigui, et al. Studies on the influence of prevent-flood dam on flood retaining to main channel. Acta Scientiarum Naturalium Iversitatis Sunyatseni, 2008, 47(Suppl. 2): 151-157. (in Chinese)
- [2] 吕忠华, 胥加仕, 刘建业. 西江中下游洪水归槽问题研究[J]. 人民珠江, 2002, 6: 37-40. LV Zhonghua, XU Jiashi and LIU Jianye. Study of flood retaining to main channel in the middle and lower reaches of Xi River. Pearl River, 2002, 6: 37-40. (in Chinese)
- [3] 水利部水文局, 水利部珠江水利委员会水文局编著. 2005 年珠江暴雨洪水[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2007. Hydrology, Ministry of Water Resource, Hydrology Bureau of Pearl River Conservancy Commission, Ministry of Water Resource. 2005 Pearl River storm and flood. Beijing: China Water Power Press, 2007. (in Chinese)
- [4] 李景堂, 王开元. 珠江防洪减灾对策探讨[J]. 人民珠江, 1999, 4: 12-18. LI Jingtang, WANG Kaiyuan. Discussion on counter measure of flood control and disaster mitigation of Pearl River. Pearl River, 1999, 4: 12-18. (in Chinese)
- [5] 谢平, 许斌, 刘宇, 等. 基于 MISOCRM 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, 1(4): 217-221. (in Chinese)
- [6] 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)
- [7] 黄嘉宏, 张勇, 罗忠宏. 广西 45 年来降水和气温的长期变化特征[J]. 广西气象, 2003, 24(4): 35-39. HUANG Jiahong, ZHANG Yong and LUO Zhonghong. Tendency characteristic of precipitation and temperature changes in the past 45 years in Guangxi. Journal of Guangxi Meteorology, 2003, 24(4): 35-39. (in Chinese)
- [8] 黄伟民, 杜文印, 钟红伟. 西江“94-6”、“98-6”、“05-6”暴雨洪水比较分析[J]. 水科学与工程技术, 2005: 30-32. HUANG Weimin, DU Wenyin and ZHONG Hongwei. Analysis of storm-floods of “94-6”, “98-6”, “05-6” in Xi River. Water Science and Hydropower Engineering, 2005: 30-32. (in Chinese)
- [9] 黄夏坤, 郝振纯, 梁才贵, 朱长军. 浔江防洪堤对西江中下游洪水的归槽影响[J]. 桂林工学院学报, 2009, 29(1): 53-57. HUANG Xiakun, HAO Zhenchun, LIANG Caigui and ZHU Changjun. Influence of Xun river flood embankment on flood retaining to main channel in the middle and lower reaches of Xi river. Journal of Guilin University of Technology, 2009, 29(1): 53-57. (in Chinese)