

Algorithm and Application of Inconsistent Flood Frequency Based on the MISOHRM Model (I): Principles and Algorithm*

Ping Xie, Bin Xu, Yu Liu, Xi'nan Li

State Key Laboratory of Water Resources and Hydropower Engineering Science, Wuhan University, Wuhan
Email: pxie@whu.edu.cn, taibaidugu@163.com

Received: May 2nd, 2012; revised: May 17th, 2012; accepted: May 29th, 2012

Abstract: With the higher and harder levees and no lakes to storage the flood at the middle stream of Xijiang River, the encounter and return to main channel of flood were strengthened and the frequency and intensity of flood were changed, and the consistency was affected. The Multiple Input Single Output Hydrological Relevant Model (MISOHRM) was used to analyze the affection of multiple affecters upstream to the certain hydrological station downstream, with the principles of inconsistent hydrological frequency calculation, the algorithm of inconsistent flood series frequency calculation was put forward. This algorithm could be useful to the construction of levees and the formulation of flood control planning in the changing environment nowadays.

Keywords: Hydrology; MISOHRM; Inconsistency; Frequency Analysis; Xijiang River

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*

谢平, 许斌, 刘宇, 李析男

武汉大学水资源与水电工程科学国家重点实验室, 武汉
Email: pxie@whu.edu.cn, taibaidugu@163.com

收稿日期: 2012年5月2日; 修回日期: 2012年5月17日; 录用日期: 2012年5月29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, 其一致性受到影响。多输入单输出水文相关模型(MISOHRM)可以较好地分析某一站点的水文要素受到其上游多个站点因素的影响情况, 结合非一致性水文频率计算原理, 提出适用于非一致性洪水序列的频率计算方法, 该方法将对变化环境下的堤防建设和流域防洪减灾规划制定, 具有一定的参考价值。

关键词: 水文; 多输入单输出; 非一致性; 频率计算; 西江

1. 引言

洪水一直以来都是影响人类经济发展、生态环

境、社会生活和国家事务的重大自然灾害之一。千百年来, 人们总结了无数的经验来抵御洪水的侵害。除了加强流域管理等非工程措施外, 修建提防、水库等各种水利工程, 仍是目前对洪水进行调蓄的主要手段。随着经济社会发展和科学技术的进步, 防洪工程

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

作者简介: 谢平(1963-), 男(汉), 湖北松滋人, 博士, 武汉大学教授, 主要研究方向为水文水资源。

的数量和标准也在不断提高, 在保护沿岸居民不受洪水侵害的同时, 它也引起下游断面出现洪水归槽和洪水遭遇等新的问题。

洪水归槽是指由于防洪工程减少了河道的滞洪容积, 增加了洪水在主河槽运动的能量, 从而引起下游断面涨水过程的洪峰流量增大、水位增高, 而退水过程的流量减小、水位降低的现象^[1]。受到洪水归槽和支流回水顶托作用的影响, 即使干、支流和区间的洪水量级不是很大, 但在洪水洪峰适时遭遇、组合下, 便会加大下游洪水的量级, 大大加剧洪水的危害, 并可能发展成为特大洪水。洪水归槽和遭遇的出现, 改变了原天然河道的洪水槽蓄关系, 使洪水形成和变化规律发生了变化, 洪水序列的一致性遭到破坏, 影响洪水发生的频率和强度, 加剧洪水灾害。

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, 西江中游浔江段没有一个湖泊调蓄洪水^[2]。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^[3,4]。

针对洪水遭遇问题, 黄夏坤^[1]等在防洪堤对西江洪水的影响研究中指出, 干支流洪水遭遇、区间降雨和雨洪重叠仍是形成西江中下游大洪水的主要因素, 应加强对西江流域洪水遭遇问题的研究。黄伟民^[3]等通过对西江流域近几十年来几场罕见特大洪水的形成研究发现, 几场洪水具体成因、流态虽有不同之处, 但洪水的遭遇作用是造成下游出现特大洪水的主要原因。因此, 研究西江洪水问题必须考虑洪水的遭遇作用。目前, 西江洪水遭遇问题的研究还不够深入, 已有研究仍仅限于定性分析暴雨洪水的过程及遭遇作用下的上下游各自洪水量级的变化情况, 而对于西江洪水干支流和区间洪水如何遭遇, 各遭遇因子对下游站点影响的大小以及定量分析在遭遇作用下下游控制站点洪水的变化趋势如何(洪水频率、量级变化)等问题仍缺乏系统性的研究。

针对洪水序列的非一致性问题, Singh et al. (2005)^[5]提出一种估计非一致性洪水序列中特大洪水概率的方法; Khaliq et al. (2006)^[6]利用时变参数法、Villarini et

al. (2009)^[7]采用方位、尺度和形状三参数的广义加法模型(GAMLSS)来计算非一致性水文资料的代表性分布和频率; Raff et al. (2009)^[8]利用 GCM 通过模拟降水预测未来条件下的洪水频率。上述方法虽然已经在美国不同的流域得到应用, 但是也存在一定的不足, 例如参数求解比较复杂、模型构建时需要的资料并非所有地区均可以满足等, 导致这些方法在应用中仍存在一定的难度。

谢平等(2005)^[9]提出了变化环境下非一致性水文频率计算原理, 该原理简单易懂, 且操作性强。基于该原理, 作者提出了基于多输入单输出水文相关模型(Multiple Input Single Output Hydrological Relevant Model, MISOHRM)的非一致性洪水频率计算方法, 在充分考虑了洪水遭遇的基础上, 对变化环境下西江中游的洪水频率进行计算, 并对堤防的防洪能力进行评价。由于篇幅较长, 以上研究内容共分四篇文章进行阐述。第一篇主要介绍非一致性水文频率计算原理和 MISOHRM 模型的构建方法; 第二篇主要介绍西江中游水文要素的时空变异规律; 第三篇是在前两篇的基础上, 对变化环境下的西江中游非一致性洪水序列进行频率计算; 第四篇即利用频率计算的结果, 对堤防的防洪能力进行评价。上述四篇文章较为系统和完整地阐述了变化环境下非一致性洪水序列频率计算方法, 并以西江中游为研究对象, 对该方法的可行性和可操作性进行验证。其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, 将具有一定的参考价值。

2. 研究区域概况

西江是珠江的干流, 她与我国其他大江大河的明显不同之处在于, 除了地处流域上游边缘高原地区的云南境内有几个湖泊外, 中下游没有一个湖泊调蓄洪水。西江最大的两条支流郁江、柳江汇入干流后, 历史上是通过浔江两岸和红(水河)、柳(江)、黔(江)三江汇流地带这两个天然洪泛区对洪水进行调蓄; 桂江、贺江汇入干流后, 洪水由西江两岸洪泛区进行调蓄。目前, 红、柳、黔汇流带除武宣县城建有 112 km 防洪堤外, 其他地方没有筑堤, 仍保持着对洪水调蓄的功能。但桂平至梧州的浔江段和梧州至高要的西江段则发生了很大的变化, 随着沿岸人口的增加和经济的

发展, 两岸防洪堤逐年兴建并加高加固, 致使遇一般洪水或较大洪水时原有的蓄滞洪水功能逐步丧失。西江段洪泛面积只有 200 km² 左右, 洪水归槽下泄对水文情势影响不大; 而浔江段洪泛面积达 1000 km², 洪水归槽下泄和新的洪水遭遇情势, 导致洪峰增大的非常明显^[10]。

3. 研究方法

3.1. 多输入单输出水文相关模型

在水文相关分析中, 对于某一站点的水文要素常常是受其上游多个站点因素的影响。相关模型是水文相关分析常用的一种模型, 其主要是通过建立输出因子 y 与各输入因子 x_i 的相关关系来研究随机变量 y_i 和 x_i 间相互关系, 同时分析输出因子与多个输入因子相互关系的密切程度并进行未来预测。在相关模型中, 非一致性水文序列在分析计算时, 将导致分析出来的水文规律失真, 引起防洪供水决策及判断失误, 危及区域水资源安全, 因此建立相关模型时, 要求水文序列具有一致性。

建立相关模型之前, 对建模因子时间序列的一致性进行检验是保证模型准确性的第一步, 若序列出现了非一致性, 则需要通过一定的手段进行预处理。对于满足一致性要求的输出因子 y 与各输入因子 x_i , 建立线性相关关系, 其方程如式(1)所示:

$$y_{\text{output}} = \sum_{i=1}^n \beta_i x_i + \beta_0 \quad (1)$$

式中: y_{output} 为输出因子, n 为模型输入因子个数, β_i 、 β_0 为未知参数。

水文相关模型参数具有一定的统计意义, 参数大小能够反映输入因子与输出因子的相关程度。模型参数的求解方法在很大程度上影响着模型的模拟精度。本文采用 SCE-UA(Shuffle Complex Evolution)全局优化算法对模型参数进行计算。

SCE-UA 算法是 Duan^[11,12]等人提出的一种结合了单纯形法、随机搜索、生物竞争进化以及混合分区等方法优点的全局优化算法, 其特点是收敛速度快、稳定性好, 可以一致、有效、快速地搜索到水文模型参数的全局最优解, 并能解决高维参数的全局优化问题, 在水文模型的参数优选中得到了广泛的应用。

SCE-UA 的主要步骤如下:

步骤 1 初始化。选择 $p \geq 1$ 和 $m \geq n + 1$ 。此处 p 是复杂形的个数, m 是每一个复杂形的点数, 计算样本数 $s = p \times m$ 。

步骤 2 产生样本。在可行空间 $\Omega \subset R^n$ 采取 s 个点 x_1, x_2, \dots, x_s 。计算在点 x_i 处的函数值 f_i 。在缺少前验信息的条件下, 采用均匀采样分布。

步骤 3 对点进行排序。将 s 个点以升序进行排列, 将它们存储到数组中: $D = \{x_i, f_i, i = 1, \dots, s\}$, $i = 1$ 代表目标最小的函数点。

步骤 4 复杂形划分。将 D 划分为 p 个复杂形 A^1, \dots, A^p , 每一个包括 m 个点, 使得

$$A^k = \{x_j^k, f_j^k \mid x_j^k = x_{k+p(j-1)}, f_j^k = f_{k+p(j-1)}, j = 1, \dots, m\}。$$

步骤 5 根据竞争复杂形演化算法对每一个复杂形进行演化。

步骤 6 混合复杂形。将 A^1, \dots, A^p 代替到 D 中, 以使 $D = \{A^k, k = 1, \dots, p\}$, 对 D 按目标函数的升序进行排列。

步骤 7 收敛性判断。如果满足手链条件则停止, 否则返回步骤 3。

当模型构建完成后, 需要对模型的模拟精度进行评价, 一般采用模型 Nash 效率系数 R^2 以及相对误差两个指标, 相对误差计算公式如下:

$$E = |Q_i - Q_c| / Q_i \quad (2)$$

式中: E 为相对误差; Q_i 为随机性成分原始值; Q_c 为随机性成分模拟值。

3.2. 非一致性洪水频率计算方法

水文序列一般是由两种或两种以上成分合成的序列。假定水文序列 X_t 的各个成分满足线性叠加特性^[13](即加法模型), X_t 可按式(3)表示。

$$X_t = Y_t + P_t + S_t \quad (3)$$

式中: Y_t 为确定性的非周期成分(包括趋势、跳跃等暂态成分以及近似周期成分等); P_t 为确定性的周期成分(包括简单的或复合周期的成分等); S_t 为随机成分(包括平稳的或非平稳的随机成分)。

根据谢平等^[9]提出的变化环境下非一致性年径流序列的水文频率计算原理, 本文针对洪水序列提出如下假设: 非一致性洪水序列由相对一致的随机性成分

和非一致性的确定性成分两部分组成, 即洪水序列的随机性规律反映一致性变化成分, 而确定性规律反映非一致性变化成分。

洪水序列分析的目的就是要推断序列中存在的各种成分的性质, 并从实际序列中分离各个组成分量。由于洪水序列中的其它成分可以通过一定的选样方法加以排除或减小它们对整个水文序列的影响, 如年最大值选样法基本上可以消除水文序列年内的周期性影响^[14]; 本文仅针对确定性非周期成分中的趋势或跳跃成分以及随机性成分中的平稳独立成分(即纯随机成分)作一些具体的分析。

非一致性洪水序列的频率计算问题可以归结为时间序列的分解与合成, 计算步骤如下:

1) 采用水文变异诊断系统^[15]识别洪水序列是否发生变异。如果没有变异, 则可以直接进行一致性洪水频率计算; 如果发生了变异, 则说明洪水序列是非一致性的, 需要进行非一致性洪水频率计算;

2) 通过 MISOHRM 模型对洪水序列进行分解计算, 得到频率域上的随机性成分和时间域上的确定性成分, 对洪水序列的随机性成分进行频率计算, 从而得到非一致性洪水序列在时间域上的确定性规律以及在频率域上的统计规律;

3) 根据确定性规律预测某个具体时间的确定性成分, 利用 Monte Carlo 法生成满足统计规律的纯随机序列, 将确定性成分与随机性成分进行合成;

4) 采用有约束加权适线法^[16]对合成序列进行 P-III 型频率曲线计算, 得到合成序列的频率分布及其参数, 并推求过去、现状和未来(三种情景)不同时期和不同频率的年最大洪峰流量。

4. 结语

本文针对洪水遭遇和归槽下泄造成的洪水序列非一致性问题, 提出了基于多输入单输出相关模型(MISOHRM)的非一致性洪水频率计算方法。该方法通过构建 MISOHRM 模型, 利用相关分析, 考虑了干支流洪水和区间暴雨的遭遇对下游站点洪水的影响作用和程度; 基于非一致性年径流序列的水文频率计算原理, 利用 MISOHRM 模型对洪水序列进行分解计算, 以得到频率域上的随机性成分和时间域上的确定性成分, 再对随机性成分进行频率计算, 从而得到非

一致性洪水序列在时间域上的确定性规律以及在频率域上的统计规律。

本文仅针对原理与方法部分进行了详细地阐述, 其在西江中游的应用结果, 将在该系列文章的后三篇中进行介绍。

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): 151-156. HUANG Xiakun, HAO Zhenchun, LIANG Caigui, et al. Studies on the influence of prevent-food dam on flood retaining to main channel. Acta Scientiarum Naturalium Iversitatis Sunyatseni, 2008, 47(Supple 2): 151-156. (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 at midstream and downstream of Xijiang 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. 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] 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, 2005, 增刊: 30-33. HUANG Wei-min, DU Wen-yin and ZHONG Hong-wei. Analysis of storm-floods of “94.6” “98.6” “05.6” in Xijiang River. Water Science and Hydropower Engineering, 2005, Supple: 30-32. (in Chinese)
- [5] SINGH, V. P., WANG, S. X. and ZHANG, L. Frequency analysis of non-identically distributed hydrologic flood data. Journal of Hydrology, 2005, 307: 175-195.
- [6] KHALIQ, M. N., OUARDA, T. B. M. J., ONDO, J. C., et al. Frequency analysis of a sequence of dependent and/or non-stationary hydro-meteorological observations: A review. Journal of Hydrology, 2006, 329: 534-552.
- [7] VILLARINI, G., SMITH, J. A., SERINALDI, F., et al. Flood frequency analysis for non-stationary annual peak records in an urban drainage basin. Advances in Water Resources, 2009, 32: 1255-1266.
- [8] RAFF, D. A., PRUITT, T. and BREKKE, L. D. A framework for assessing flood frequency based on climate projection information. Hydrology and Earth System Sciences, 2009, 6: 2005-2040.
- [9] 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)
- [10] 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 Jing-tang, WANG Kai-yuan. Discussion on counter measure of flood control and disaster mitigation of Pearl River. Pearl River, 1999, 4: 12-18. (in Chinese)
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] 丁晶, 邓育仁. 随机水文学[M]. 成都: 成都科技大学出版社, 1988.
DING Jing, DENG Yuren. *Random hydrology*. Chengdu: Press of Chengdu Technology University, 1988. (in Chinese)
- [14] 谢平, 陈广才, 雷红富, 等. 变化环境下地表水资源评价方法[M]. 北京: 科学出版社, 2009.
XIE Ping, CHEN Guangcai, LEI Hongfu, et al. *Surface water assessment method in the changing environments*. Beijing: Science Press, 2009. (in Chinese)
- [15] 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)
- [16] 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)