

“23·10”九洲江流域暴雨洪水分析

郎喜白

广东省水文局湛江水文分局

DOI:10.12238/hwr.v9i8.6537

[摘要] 为分析2023年10月台风“三巴”对九洲江流域暴雨洪水的影响,基于流域内雨量及水文站数据,分析了暴雨时空分布特征;采用Muskingum-Cunge法进行洪水分割,结合下渗曲线与水量平衡还原天然径流,并运用HEC-RAS进行一维非恒定流数值模拟。结果表明,缸瓦窑断面最高洪峰流量推定为 $3740\text{m}^3/\text{s}$,突破历史记录,洪水重现期约52年。模拟水面线与实测洪痕吻合良好,表明该方法可有效重现洪水过程,为流域防洪减灾与水资源管理提供科学依据。

[关键词] 23.10暴雨洪水; 一维数值模拟; 防洪减灾; 九洲江; 缸瓦窑

中图分类号: TV87 **文献标识码:** A

Analysis of “23.10” Rainstorm Flood in Jiuzhoujiang River

Guangdong Provincial Bureau of Hydrology, Zhanjiang Hydrological Branch

Xibai Lang

[Abstract] To analyze the impact of Typhoon SANBA in October 2023 on the storm-induced flood in the Jiuzhou River Basin, rainfall and hydrological station data across the basin were used to examine the spatiotemporal characteristics of the rainfall event. The Muskingum-Cunge method was applied for flood routing segmentation, infiltration curves and water balance methods were employed to restore natural runoff, and one-dimensional unsteady flow numerical simulation (HEC-RAS) was conducted. The results indicate that the estimated peak discharge at the Gangwayao section reached $3740\text{ m}^3/\text{s}$, setting a historical record, with an approximate flood return period of 52 years. The simulated water surface profile showed good agreement with measured flood marks, demonstrating that this method can effectively reconstruct the flood process. The findings provide a scientific basis and technical support for flood control, disaster reduction, and water resource management in the basin.

[Key words] Rainstorm Flood; 1-d numerical simulation; flood prevention and disaster reduction; Jiuzhoujiang River; Gangwayao

引言

2023年第16号台风“三巴”的前身热带低压于2023年10月17日在南海生成,于10月18日下午加强为热带风暴级,于10月19日上午9时前后在海南省东方市沿海登陆,同日夜加强为强热带风暴级。于10月20日上午9时45分前后在广东省遂溪县沿海再次登陆,减弱后的热带低压于同日夜间19时40分许在海南省临高县第三次登陆,最终于当晚23时被中央气象台停止编号。受台风“三巴”和弱冷空气共同影响,湛江市北部普降暴雨,其中九洲江流域、遂溪河流域、鉴江流域平均雨量超过300mm,使九洲江控制站缸瓦窑站达到建站以来最高实测水位和最大实测流量,经推流后洪峰流量达到历史资料序列的第三位。通过对本轮暴雨洪水情况进行分析总结,进一步掌握九洲江暴雨洪水特点,为今后九洲江防汛抗洪、水资源规划以及提高“四预”能力等提

供参考。

1 暴雨分析

本场暴雨的主要特点是降雨空间集中、降雨强度大、降雨时程分布集中,具体分析如下:(1)降雨空间集中。暴雨主要发生在塘蓬河流域中上游、九洲江上游,有2个明显的暴雨中心,即以上山站为主中心,最大24小时降雨量超过400mm,和以石角为中心的次中心,最大24小时降雨量超过330mm,整体分布呈明显的马鞍形。(2)降雨强度大。本次暴雨过程有14个站点的4d过程雨量超过400mm,9个站超过450mm,1个站超过500mm。(3)暴雨时程持续时间长且集中。此次暴雨过程自10月18日8时开始,在暴雨中心站点的最大720min雨量占过程累积雨量的45%以上,最大1440min雨量占过程累积雨量的75%以上。

2 洪水分析

2.1 洪水分割

缸瓦窑断面由于鹤地、武陵、长青岭背下、长青仙人域4宗大中型水库溢洪的原因,需利用一维非恒定流计算方法,推断溢洪流量演进至缸瓦窑断面的流量过程,从而分割缸瓦窑断面天然径流与溢洪流量。Muskingum-Cunge法是由Cunge在1969年提出的,它结合了马斯京根法的简单性和圣维南方程的物理基础,成为一种更加精确和物理基础更加扎实的河道洪水演算方法。基本方程形式为:

$$O_{j+1} = C_0 I_{j+1} + C_1 I_j + C_2 O_j \quad (1)$$

其中, $C_0 = \frac{1}{2} \frac{\Delta t - Kx}{K - Kx + \frac{1}{2} \Delta t}$, $C_1 = \frac{1}{2} \frac{\Delta t + Kx}{K - Kx + \frac{1}{2} \Delta t}$, $C_2 = \frac{K - Kx - \frac{1}{2} \Delta t}{K - Kx + \frac{1}{2} \Delta t}$, K, X 的计算基于河道的物理特性:

$$K = \frac{\Delta x}{c} \quad (2)$$

$$X = \frac{1}{2} \left(1 - \frac{Q}{BSc\Delta x} \right) \quad (3)$$

其中, Δx 为河段长度, c 为波速, Q 为参考流量, B 是河道宽度, S 是河床坡度。波速 c 由曼宁公式计算:

$$c = \frac{51}{3n} R^{2/3} S^{1/2} \quad (4)$$

其中, n 为曼宁粗糙系数, R 为断面水力半径, S 为水力坡度。为确保计算稳定,需满足以下条件:

$$\frac{\Delta t}{\Delta x} \leq \frac{2KX}{c\Delta x} \quad (5)$$

缸瓦窑断面流量由鹤地、武陵、岭背下、仙人域水库溢洪流量和干支流区间汇流合成。越精细的断面间距就有越精细的洪水传播过程,以鹤地、武陵、岭背下、仙人域溢洪道出口至缸瓦窑断面分别建立汇流路径,根据实测河道地形图,以1km距离划分河段,利用HEC-RAS横断面编辑器自动提取断面,每个断面设定合适的左右岸距离、曼宁系数,用HEC-RAS一维恒定流计算各水库溢洪情况下每个断面河宽、比降、曼宁系数等参数,以Muskingum-Cunge法逐断面计算水库溢洪至缸瓦窑断面的洪水演算,缸瓦窑断面实测流量减去溢洪洪水出流量即得还原流量,根据计算成果,20日23时20分,缸瓦窑断面实测流量达到3740m³/s,相应溢洪合成流量1748.4m³/s,即天然流量为1990m³/s,21日3时55分,溢洪合成流量洪峰为1878.8m³/s,相应断面流量3507m³/s。

2.2 基流分割

基流分割方法根据基流计算的原理,分为图解法、物理化学法、数学物理法、水文模型法和数值模拟法。常用的数值模拟法有数字滤波法、BFI法、HYSEP法、PART法和加里宁法。数字滤波法利用数字滤波器将径流过程划分为直接径流和基流两个部分。直接径流代表快速响应特征,与数字信号中的高频部分相似,而基流代表慢速响应特征,与数字信号中的低频部分相似。该方法包括单参数滤波法和双参数滤波法(又称递归数字滤波

法)。典型的单参数数字滤波法有由Lyne和Hollick于1979年首次提出的Lyne-Hollick滤波法,并由Nathan和McMahon于1990年引入到水文中进行基流分割,其基流分割方程为:

$$Q_d(i) = fQ_d(i-1) + \frac{1+f}{2}(Q(i) - Q(i-1)) \quad (6)$$

$$Q_b(i) = Q(i) - Q_d(i) \quad (7)$$

其中, Q_d 为 i 时刻直接径流, Q_i 为 i 时刻径流, Q_b 为 i 时刻基流, f 为滤波参数。

2.3 流域蒸发和下渗曲线

移用鹤地站历年逐日蒸发量资料,求出各月最大日蒸发量,计算逐月最大日蒸发量的均值,作为流域蒸发能力。取流域土壤最大蓄水量 I_m 为100mm,折减系数 K 计算公式为:

$$K = 1 - \frac{E_m}{I_m} \quad (8)$$

则前期逐日影响雨量公式为:

$$P_{a,t+1} = K(P_{a,t} + P_t) \quad (9)$$

蓄满产流模型要求每次径流和降雨达到水量平衡,但由于水库调蓄的原因,缸瓦窑历年流量摘录并没有分割天然径流与水库溢洪,故难以根据历史资料建立降雨径流模型。可利用超渗产流下渗曲线方式计算下渗量。常用下渗曲线公式有霍顿(Horton)公式:

$$f = f_c + (f_0 - f_c)e^{-Kt} \quad (10)$$

其中, f_0 为初始下渗率, f_c 为稳定下渗率, K 为递减指数。

2.4 水量平衡法计算净雨

流域平均下渗曲线可用降雨径流资料根据水量平衡方程分析求得:

$$\sum_{t=1}^T P_t - \sum_{t=1}^T TR \cdot Q_t = \sum_{t=1}^T f_t \cdot \Delta t + WS_t \quad (11)$$

其中, Q_t 为流域出口断面流量, TR 为流量转换径流深的单位转换函数, WS_t 为流域地面与河槽的蓄水量。通过调整式(10)的 f_0, f_c, K , 可使(11)式的逐时过程达到水量平衡,即得净雨过程 WS_t , 图1为净雨和基流分割结果。

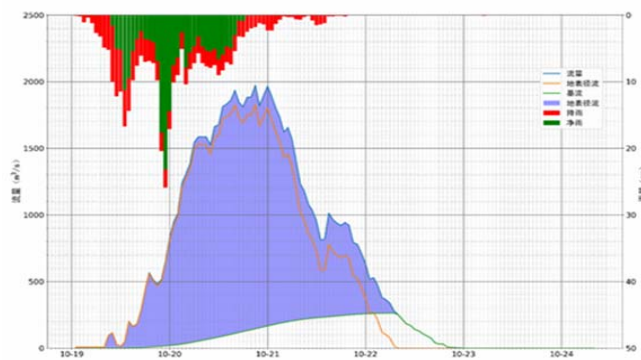


图1 缸瓦窑站净雨与径流分割

2.5 洪水频率分析

缸瓦窑站1955年建站观测, 设站之初, 对断面附近进行了水文调查, 1959年根据实测水位流量资料对调查成果进行还原计算, 得到1906年7月5680m³/s, 1914年7月4320m³/s, 1942年7月3420m³/s三个历史洪水成果, 但未考证年限; 1960、1961年改为水位站, 1962年起缺测, 1969年重新开始水位观测, 1970年重新开始流量测验。为尽量补完缺测流量, 以邻近年份最大洪水的峰前峰后水位流量关系拟合, 插补1961年、1969年最大流量, 得到排序后洪水序列, 则序列包含3个调查数据, 1955~2003年中69a的监测序列, 其中60a的实测数据, 1961~1968、1982年共9a的缺测。对1955~1960、1969~2023两个样本进行独立样本的Kolmogorov-Smirnov检验。得到p-value为0.66, 大于显著性水平0.05, 说明可以接受中断监测前后为同一概率分布总体的假设。

由样本的特征推算和估计总体的特征而引起的误差, 就属于抽样误差。据抽样原理, 从频率曲线上读得的值是点估计值, 在其两侧有一定的波动范围, 相应的变数值 x_p 有一个分布(条件分布)。设在频率曲线上读的估计值为 x_p , 其值取决于采用的不同适线方法。当取一置信概率, 可得 x_p 两侧的置信上限和置信下限。此置信区间可用蒙特卡罗法或bootstrap法得到。

对于非连续序列, 假定考证期限250a, 则3740m³/s相应重现期为53年一遇; 由于调查的最久年份为1906年, 在设站之初的重现期相当于50年一遇, 1958年开始上游兴建鹤地水库、长青水库二宗大型水库及武陵、江头二宗中型水库, 以水利工程控制为一致性条件的适线结果, 则3740m³/s相应重现期为52年(频率曲线见图2)。

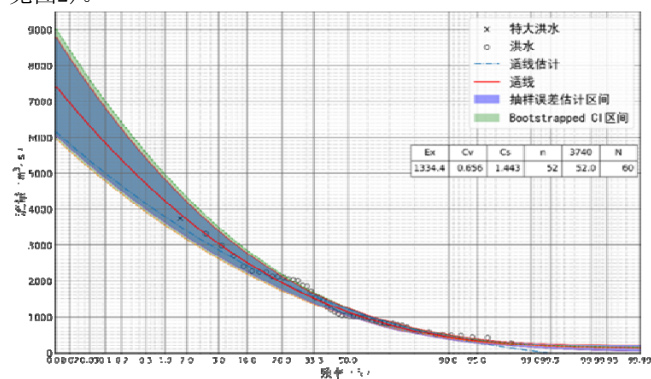


图2 缸瓦窑站年最大流量频率曲线与置信区间

3 缸瓦窑断面以下河段的一维数值模拟

缸瓦窑以下河段, 在缸瓦窑断面下游约3.2km处分汊为安铺河和营仔河, 其中, 分别在安铺镇大桥和河水闸处设立有自动水位监测设备, 结合缸瓦窑断面的流量入流过程, 满足河段一维非恒定流水动力学模拟条件。HEC-RAS中一维非恒定流水动力学的

基本方程为连续方程:

$$\frac{\partial A_T}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q_t \quad (12)$$

动量守恒方程:

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial(QV)}{\partial x} + gA \left(\frac{\partial z_s}{\partial x} + S_f \right) = 0 \quad (13)$$

$$S_f = \frac{Q|Q|n^2}{2.208R^{4/3}A^2} \quad (14)$$

其中, z_s 为河床高程, S_f 为河床摩擦坡度, n 为曼宁糙率系数, R 为水力半径, 可见, 在HEC-RAS提取断面后, 调整每个断面的曼宁糙率系数, 以洪痕为约束条件, 可得较好的拟合结果。故以缸瓦窑断面实测水位流量过程为上边界, 安铺站和河水闸站水位为下边界, 以5min时间步长对缸瓦窑-安铺/河水闸河段进行一维非恒定流数值计算, 得到区间最高水面线及分流流量过程, 其中洪峰流量安铺河占比0.45; 因入海口水位未知, 以非恒定流计算水面线为已知水面高程, 以安铺站、河水闸站计算流量为入口流量, 安铺、营仔断面以下河段边界条件设置比降为0.001, 得到最大水深时水面范围。

4 结束语

依赖于高时间精度的监测数据和适当的监测站点布置, 九洲江“23·10”洪水是九洲江第一次进行完整水动力学非恒定流模拟的洪水。相对于工程设计常用的恒定流模拟, 非恒定流模拟能提供更精细的洪水分割, 确定洪水组成, 结合水量平衡方程反推流域净雨, 可利用GIS拟合基于土地利用栅格、地形坡度影响的等流时单位线。通过子流域产汇流和水库调蓄组合的水文水动力学模型, 可在流域数字孪生模型中进行更复杂的水库调度模拟, 为提高“四预”能力奠定基础; 通过对暴雨洪水的分析, 进一步认识九洲江流域暴雨洪水特性, 可为流域的防洪减灾、水资源规划、工程设计和建设等提供可靠的水文数据以及技术支撑。

参考文献

- [1]《水利水电工程设计洪水计算规范》SL 44-2006[S].北京:中国水利水电出版社,2006.
- [2]金光炎.论水文频率计算中的适线法[J].水文,1990(2):1-6.
- [3]刘攀,郭生练,胡安焱.线性矩法估计参数的保证修正值系数B的推求[J].水文,2006(6):27-29.

作者简介:

郎喜白(1979--),男,汉族,河南邓州人,大学本科,高级工程师。研究方向为水文水资源。