

二维非恒定流数学模型在赣江河流治导线研究中的应用

陈 龙,李友辉,李明辉,罗 蔚

(江西省水利规划设计院,江西 南昌 330029)

摘要:为了给赣江河流治导线研究提供科学的决策依据,以赣江吉安水文站至峡江坝址河段为例,采用二维非恒定流数学模型研究了河道洪水特性,获得研究区域内全河段水位、水深、流场和水流动力轴线等信息,根据不同时刻的二维模型计算结果得到洪水淹没范围,并结合河湾形态及水流动力轴线弯曲半径确定了迎流顶冲河段。研究表明:计算河段的水位变幅沿河道总体趋势从上游至下游逐渐增大,下游峡江坝址附近水位变幅约为2 m,上游吉安水文站处水位变幅约1.4 m,各断面洪峰流量从上游至下游依次出现,上、下游最大流量出现时间相差约10 h;受河道两岸圩堤、山体、高地等条件控制,洪水基本被约束在河道内,部分低洼、平坦地区洪水淹没范围较广。依据研究结果,在研究区域内确定了7处迎流顶冲段的位置和范围。

关键词:治导线;二维非恒定流数学模型;水流动力轴线;迎流顶冲河段;赣江

中图分类号:TV212.5⁺2 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-7647(2013)04-0018-04

Application of a two-dimensional unsteady flow model in research of regulation line of Gan River//CHEN Long, LI Youhui, LI Minghui, LUO Wei (*Jiangxi Provincial Water Conservancy Planning and Designing Institute, Nanchang 330029, China*)

Abstract: In order to provide a scientific basis for the study on regulation line of Gan River, taken the reach from Ji' an hydrology station in the upstream of Gan River to dam site of Xia River as an example, flood characteristics including water level, water depth, flow field, and flow hydrodynamic axis were studied by using a two-dimensional unsteady flow model. The flood submerged range was gained from calculation results by this model, and then the river band scoured reaches were determined through the river band morphology and the bending radius of flow hydrodynamic axis. Research results show that: water-level variations of the study reach gradually increases from upstream to downstream, the water-level variations near the dam site of Xia River is about 2 m, and the water-level variations of the Ji' an hydrology station is about 1.4 m. The peak flow of each section sequentially appears from upstream to downstream, and the time for the maximum peak flow occurring between upstream and downstream is 10 h. Restricted by both sides of riverbank, massif, and highland, the flood of the reach is almost retrained in the watercourse, and the flood submerged range is relatively board in some flat low-lying region. According to the above research results, the position and range of the seven river band scoured reaches were determined.

Key words: regulation line; two-dimensional unsteady flow model; flow hydrodynamic axis; river band scoured reach; Gan River

《中华人民共和国防洪法》规定:“整治河道和修建控制引导河水流向、保护堤岸等工程,应当兼顾上下游、左右岸的关系,按照规划治导线实施,不得任意改变河水流向。”可见河流治导线是确定河道整治工程位置及布设的依据,决定着河道整治工程的作用和效果^[1-4]。河流治导线是在分析河道基本流线的基础上经多方面权衡确定的,主要依据河势演变规划及发展趋势的研究成果以及已有工程及天

然节点靠河机遇与控导作用的分析成果^[2],因而深入研究河流洪水特性及河道水动力特征是确定河流治导线的一项基础工作。目前,洪水特性分析方法主要有地貌学方法、历史洪水法、模型试验法和水文水力学法^[5],其中水文水力学法也就是数值模拟法,是基于水量平衡及动量守恒原理来模拟洪水非恒定流演进过程,该方法能够提供更丰富、更精确的洪水信息^[6-8]。本文在前人研究成果的基础上,以赣

江吉安水文站至峡江坝址段为例,根据实测河道地形图,采用二维非恒定流数学模型研究河道的洪水特性,得到研究区域内全河段的水位、水深、流场、水流动力轴线及洪水淹没范围等信息,并结合海湾形态及水流动力轴线弯曲半径确定迎流顶冲河段,为赣江河流治导线的研究提供科学的决策依据。

1 流域概况

赣江是江西省第一大河流,纵贯江西南北,亦为流入鄱阳湖的五大河流之首,是长江八大支流之一。赣江发源于石城县洋地乡石寮崇(赣源崇),流域面积 82 809 km²,主河道长 823 km,流经 47 个县(市),沿岸城市密布,在江西省社会经济中占有举足轻重的地位。目前有关赣江河流治导线和洪水特性的研究成果较少,且大多仅限于一维模拟或采用水文站洪水资料运用频率法获得特定区域的洪水要素^[9-11]。因此,开展赣江河流治导线方面的研究工作具有重要意义。

2 数学模型

2.1 基本原理

2.1.1 基本控制方程

水流连续性方程:

$$\frac{\partial Z}{\partial t} + \frac{\partial(hu)}{\partial x} + \frac{\partial(hv)}{\partial y} = 0 \tag{1}$$

水流运动方程:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = -g \frac{\partial Z}{\partial x} + \frac{1}{h} \left[\frac{\partial(h\tau_{xx})}{\partial x} + \frac{\partial(h\tau_{xy})}{\partial y} \right] - \frac{\tau_{bx}}{\rho h} + f_{Cor}v \tag{2}$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = -g \frac{\partial Z}{\partial y} + \frac{1}{h} \left[\frac{\partial(h\tau_{yx})}{\partial x} + \frac{\partial(h\tau_{yy})}{\partial y} \right] - \frac{\tau_{by}}{\rho h} - f_{Cor}u \tag{3}$$

式中: Z 为水位; h 为水深; u 和 v 分别为沿 x 和 y 方向的垂线平均流速; τ_{xx} 、 τ_{xy} 、 τ_{yy} 为沿水深积分的雷诺应力; τ_{bx} 、 τ_{by} 为河床与水流交界面间的剪切力; ρ 为水的密度; g 为重力加速度; f_{Cor} 为柯氏力。

2.1.2 计算区域、网格划分及参数率定

计算区域为吉安水文站至峡江坝址段,长约 58 km,区间考虑乌江(流域面积 3 883 km²)、同江(流域面积 960 km²)入汇及峡江枢纽调洪,其余支流的洪峰、洪量相对于干流均较小,本次研究不予考虑。干流设计洪水过程以吉安水文站 1968 年的洪水为典型洪水,经同频率缩放求得,支流乌江、同江设计洪水过程采用与吉安水文站同时段的实测值经水文比拟法求得。

计算网格采用贴体正交网格形式,沿河道纵向布置 500 条网格线,河槽横向布置 85 条网格线,在河滩较宽且平坦的河段布置多个子块,网格间距纵向为 31 ~ 240 m,横向为 8 ~ 64 m。

模型计算参数包括数值参数和物理参数。本文采用 2008 年实测的水文资料率定模型参数。经率定,赣江吉安水文站至峡江坝址段河道综合糙率取 0.026 ~ 0.04。

2.2 水动力计算条件

2.2.1 边界条件

入流边界(吉安水文站、乌江和同江)采用设计洪水过程线,根据江西省水利规划设计院“防洪规划”成果选定典型洪水^[12],推求 20 年一遇 3 日设计洪水过程。出流边界(峡江坝址)根据设计洪水成果及峡江水利枢纽运行调度方式确定出流边界即是峡江水利枢纽泄洪闸泄流能力曲线^[13]。

2.2.2 初始条件

模型所需要的初始条件主要为计算区域的初始水位,即反映了初始时刻河道水流要素的稳定分布状况,包含河道地形、平面形状、地貌特征等因素对水流的影响,采用初始时刻恒定流计算结果作为非恒定流计算的近似初始条件。

2.3 模型验证

根据赣江吉安水文站实测的流量和水位资料(2006 年 6 月 8—11 日),对模型模拟水位结果进行验证。以实测水位为参考,采用 Nash-Sutcliffe 系数 N 对模型的精确性进行检验:

$$N = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - x')^2}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x}_i)^2} \tag{4}$$

式中: x_i 为实测值; $\bar{x}_i$ 为实测系列的均值; x' 为模拟值。

经计算实测值与模拟值最大误差为 0.13 m,最小误差为 0.001 m,平均误差为 0.004 m,如图 1 所示。实测值与模拟值的相关系数为 0.97, Nash-Sutcliffe 系数为 0.94,模拟结果可靠。

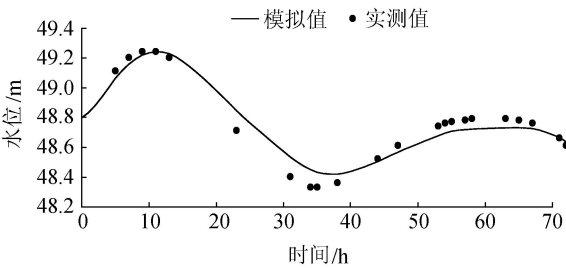


图 1 赣江吉安水文站水位验证

3 结果分析

3.1 计算河段水位变化特性

20 年一遇洪水条件下不同时刻典型河段水面线变化见图 2。可以看出,30 h 前为涨水期,40 h 后为退水期。涨水波和退水波均从上游向下游传播。下游水位变化幅度大于上游,峡江坝址附近水位变幅约为 2 m,上游吉安水文站水位变幅约为 1.4 m,水位变幅沿河道总体趋势从上游至下游逐渐增大,造成这种特性的主要原因是峡江坝址两岸均有山体控制,河道行洪断面相对较窄,致使洪水期水位变幅相对较大。

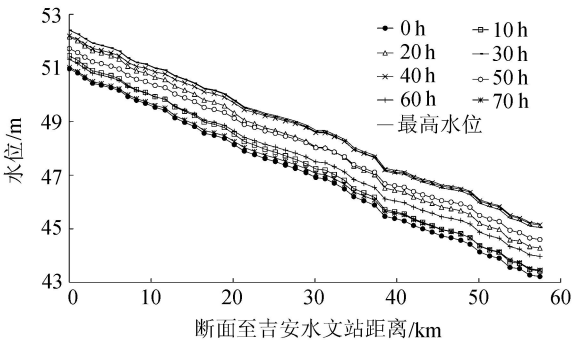


图 2 赣江典型河段水面线变化情况

20 年一遇洪水条件下典型河段各断面的流量变化过程见图 3,图中距离为各断面与吉安水文站的距离。各断面洪峰流量从上游至下游依次出现,上、下游最大流量出现的时间相差约 10 h。吉安水文站下游 20 km 处各时刻洪峰流量均大于上边界吉安水文站断面,这是由于中间有赣江支流乌江(流域面积 3 883 km²) 汇入,使得下游河道洪峰流量显著增加。

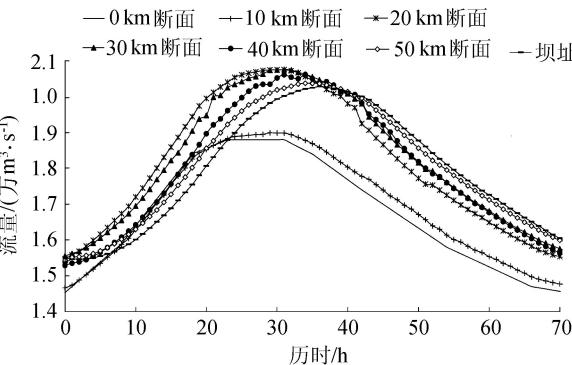


图 3 赣江典型河段各断面流量过程线

3.2 计算河段洪水淹没范围

河道在某一时刻的水面边界即为河水此刻淹没范围线,对于设计洪水过程,河流水面边界始终处于动态变化之中,那么河流洪水淹没范围线也就是相应时期内河流水面边界的外包线。河流洪水淹没范围线反映了洪灾空间分布特征,对于河流规划建设

和防洪保安都具有重要意义。河流洪水淹没范围线的计算方法如下:根据不同时刻的二维模型计算结果,可求得模型网格节点的水位最高值,根据河床高程计算出各网格节点的水深,然后利用等值线程序生成零水深等值线,即得水面边界外包线,再结合地形与涉河建筑进行适当修正。通过上述方法求得 20 年一遇洪水条件下赣江典型河段洪水淹没范围。经分析,受河道两岸圩堤、山体、高地等控制,洪水基本被约束在河道内,部分低洼、平坦地区洪水淹没范围较广。

3.3 迎流顶冲段

河流的水流动力轴线是指水流流程各断面内最大垂线平均流速的连线。一个河湾的来水条件、地质地貌及河床河岸的地质组成等因素决定了该河湾的河道形态及其水流动力轴线走向^[14]。水流动力轴线变化会引起河湾顶冲点的移动。为确定江岸迎流顶冲段的位置和范围,需分析河湾水流动力轴线弯曲特性。本文主要根据河湾形态、水流动力轴线弯曲半径、水面比降等条件确定迎流顶冲位置及范围。由于二维数学模型可以获取研究区域内全河段水位、水深、流场等信息,因此计算水流动力轴线弯曲半径所需的水面比降、流量、过水断面面积等参数均根据模拟成果确定,其他参数如河湾半径等从河道平面图分析而得。根据水流动力轴线弯曲半径大小确定河段迎流顶冲位置,见表 1。采用公式(5)计算水流动力轴线弯曲半径 R_0 ^[14]:

$$R_0 = f(\sqrt{B}/H)^\beta \left[\sqrt{\frac{1}{\varphi J g} \left(R \frac{Q_n}{A} \right)^2} \right]^\gamma \quad (5)$$

式中: B 为水面宽; H 为平均水深; φ 为河道的弯曲度或河湾中心角; J 为水流动力轴线处的水面纵比降; g 为重力加速度; R 为河湾半径; Q_n 河段造床流量; A 为过水断面面积; f, β, γ 为经验参数,分别取 4.52、0.20、0.76。

表 1 赣江典型河段迎流顶冲段基本情况

序号	起点	终点	位置	长度/km
1	彭家村北	梅林村	右岸	1.85
2	螺湖桥村北	白塔山油库	左岸	3.02
3	排头新村	水南背村	右岸	2.45
4	元石村	李家村	右岸	3.10
5	窑里	邓家村北	左岸	2.15
6	江口村	元潭观	右岸	3.53
7	小江村	同江	左岸	2.79

4 结 论

a. 通过二维非恒定流数学模型得到赣江典型河段洪水基本特性。计算河段的水位变幅沿河道总体趋势从上游至下游逐渐增大,峡江坝址附近水位

变幅约 2 m, 上游吉安站水位变幅约 1.4 m, 各断面洪峰流量从上游至下游依次出现, 上下游最大流量出现时间相差约 10 h。

b. 根据不同时刻的二维模型计算结果, 确定了设计洪水条件下赣江典型河段两岸淹没范围。受河道两岸圩堤、山体、高地等条件控制, 洪水基本被约束在河道内, 部分低洼、平坦地区洪水淹没范围较广。

c. 基于河湾形态、水流动力轴线弯曲半径、水面比降等条件, 在研究区域内确定了 7 处迎流顶冲段的位置及范围, 为合理布置河道整治工程提供了理论依据。

参考文献:

[1] 毛桂囡, 龚政, 赵立梅, 等. 江苏入海河道河口治导线研究[J]. 河海大学学报: 自然科学版, 2010, 38(4): 462-466. (MAO Guinan, GONG Zheng, ZHAO Limei, et al. Regulation lines of sea entering estuaries in coastal zone of Jiangsu Province[J]. Journal of Hohai University: Natural Sciences, 2010, 38(4): 462-466. (in Chinese))

[2] 张翠萍, 张润民, 姜乃迁, 等. 渭河下游河道整治治导线规划与修订[J]. 泥沙研究, 2009(5): 47-51. (ZHANG Cuiping, ZHANG Runmin, JIANG Naiqian, et al. Review on planned and revised alignments of channel regulation in the lower Weihe River[J]. Journal of Sediment Research, 2009(5): 47-51. (in Chinese))

[3] 王恺忱, 王卫红. 对桃花峪—花园口河段治导线的讨论[J]. 人民黄河, 2009, 31(4): 21-22. (WANG Kaichen, WANG Weihong. Discussion on regulation line from Taohuayu to Huayunkou reach[J]. Yellow River, 2009, 31(4): 21-22. (in Chinese))

[4] 唐洪武, 丁兵, 杨明远. 河口治导线放宽率的确定[J]. 水利学报, 2008, 39(1): 59-65. (TANG Hongwu, DING Bing, YANG Mingyuan. Determination of widening rate of estuarine regulation line[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2008, 39(1): 59-65. (in Chinese))

[5] 杨佩国, 杨勤业, 吴绍洪, 等. 基于数值模拟的黄河下游不同情景溃堤洪水特性[J]. 地理研究, 2007, 26(2): 328-337. (YANG Peiguo, YANG Qinye, WU Shaohong, et al. The analysis of embankment-break flood characteristics of the lower Yellow River based on the numerical simulation in different scenarios[J]. Geographical Research, 2007, 26(2): 328-337. (in Chinese))

[6] 张秋霞, 王义成. 二维非恒定洪水演进模拟模型开发及应用[J]. 水利水电技术, 2009, 40(3): 62-65. (ZHANG Qiuxia, WANG Yicheng. Development and application of two-dimensional unsteady flood routing model[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2009, 40(3): 62-65. (in Chinese))

[7] 汪定扬, 陈飞勇. 三峡工程日调节二维非恒定流数值模

型研究[J]. 长江科学院, 1991, 8(1): 36-43. (WANG Dingyang, CHEN Feiyong. Numerical modelling of 2-D unsteady flow relative to the daily pondage of Three-Gorge Project[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 1991, 8(1): 36-43. (in Chinese))

[8] 任东红, 郭亚梅, 韩凤霞. 河网二维非恒定流数模在防洪规划中的应用[J]. 水利水电工程设计, 2000, 19(2): 24-25. (REN Donghong, GUO Yaomei, HAN Fengxia. Application of two-dimensional unsteady river network model in flood control planning[J]. (in Chinese))

[9] 杨荣清, 胡立平, 史良云. 赣江流域水文特性分析[J]. 水资源研究, 2003, 24(1): 35-37. (YANG Rongqing, HU Liping, SHI Liangyun. Analysis of hydrological characteristics in Gan River basin[J]. Water Resources Research, 2003, 24(1): 35-37. (in Chinese))

[10] 靳书源, 陈家霖. 赣江流域洪水预报系统[J]. 江西水利科技, 1999, 25(1): 16-22. (JIN Shuyuan, CHEN Jialin. Flood forecasting system in Gan River basin[J]. Jiangxi Hydraulic Science & Technology, 1999, 25(1): 16-22. (in Chinese))

[11] 张耀新, 韦直林, 吴卫民. 赣江万安水电站下游一维非恒定流水沙数学模型[J]. 广西电力工程, 1999(4): 71-76. (ZHANG Yaixin, WEI Zhilin, WU Weimin. One-dimensional unsteady flow and sediment mathematical model at the downstream of Wan'an Hydropower Station in Gan River basin[J]. Guangxi Electric Power Engineering, 1999(4): 71-76. (in Chinese))

[12] 李明辉. 江西省防洪规划简要报告[R]. 南昌: 江西省水利规划设计院, 2000.

[13] 张建华, 詹寿根, 陶柏强, 等. 江西省峡江水利枢纽工程可行性研究报告[R]. 南昌: 江西省水利规划设计院. 2009.

[14] 覃莲超, 余明辉, 谈广鸣, 等. 河湾水流动力轴线变化与切滩撇弯关系研究[J]. 水动力学研究与进展: A 辑, 2009, 24(1): 29-35. (TAN Lianchao, YU Minhui, TAN Guangming, et al. Discussion on the relation between the change of the flow dynamic axis and the bend bypassing and shoal cutting in the bend river course[J]. Journal of Hydrodynamics: Ser A, 2009, 24(1): 29-35. (in Chinese))

(收稿日期: 2012-08-09 编辑: 周红梅)

