

天然河道洪水演进数值模拟及动态可视化研究

陈德敏¹, 何建东², 陈鸣³

(1. 河海大学 水利水电学院, 江苏 南京 210098; 2. 河海大学 力学与材料学院, 江苏 南京 210098; 3. 南京水科院 水文水资源研究所, 江苏 南京 210024)

摘要:为使洪水演进中计算获得的枯燥的水文数据变得直观形象,进一步丰富洪水演进可视化手段,运用以一维水动力学为理论基础的 MIKE11 HD 模型对北江流域白石窑坝下至连江口段洪水演进进行了数值模拟,借助 MIKE11 GIS 的“纽带”作用,结合 ArcGIS 平台实现了洪水演进过程的动态可视化。结果表明模拟计算精度和可视化精度良好,反映出洪水在滞洪区和峡谷区演进过程中的不同演进特点。直观形象的洪水演进过程有利于决策者全面把握洪水进程,提高流域防洪决策能力。

关键词:MIKE11; ArcGIS; 洪水演进; 可视化; 北江流域

中图分类号:TV143 **文献标志码:**A

作为非工程防洪措施的重要组成部分,洪水演进的数值模拟及洪水风险图的制作一直是研究热点,丹麦水力研究所研制的 MIKE 系列和 ESRI 公司开发的 ArcGIS 软件成为其研究的重要工具。许多学者运用 MIKE 软件模拟了洪水过程^[1-3],将计算结果绘于表格和图形中,这种表达方式不够直观生动;也有前人基于 ArcGIS 制作洪水淹没图^[4-5],或结合水文模型并对 ArcGIS 进行二次开发实现洪水演进可视化^[6],但对水动力学模型与 ArcGIS 结合的研究相对较少。因此,基于 MIKE11 和 ArcGIS,结合水动力学模型的计算功能和地理信息系统的可视化功能,实现天然河道洪水演进动态可视化,可进一步丰富洪水演进数字化内容,对决策者全面了解洪灾程度的空间分布、实时变化有较大帮助。

1 MIKE11 和 ArcGIS 相关简介

MIKE11 是 MIKE 系列软件里开发最为成熟的商业软件,主要用于河流、河口、灌溉系统和其他内陆水域的水文学、水力学、水质和泥沙传输模拟,在洪水预报、水量水质管理、水利工程规划等方面得到广泛应用^[7]。而 ArcGIS 独特的地理空间分析能力、强大的图

形处理和表达以及与之结合的相关学科的推动,使其在测绘制图、资源管理、城乡规划、灾害预测、宏观决策等方面表现出强大的生命力^[8]。

1.1 MIKE11 HD 与理论基础

MIKE11 HD 水动力学模型是 MIKE11 的核心模块,它的理论基础为明渠非恒定流控制方程,即圣维南方程组,由连续方程和运动方程组成^[7]:

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial A}{\partial t} = q \quad (1)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{Q^2}{A} \right) + gA \frac{\partial h}{\partial x} + g \frac{Q|Q|}{C^2 AR} = 0 \quad (2)$$

式中, t 为时间坐标; x 为空间坐标; Q 为流量; h 为水位; C 为谢才系数; A 为过流断面面积; R 为水力半径; g 为重力加速度; q 为单位长度旁侧入流流量。

MIKE11 HD 使用 6 点 Abbott - Ionescu 格式离散圣维南方程组,并运用追赶法求解。该离散方法的特点就是将河网离散为交替网格,在每一个网格节点按顺序交替计算水位和流量。

1.2 ArcGIS 与可视化

GIS 是在计算机软硬件支持下,对整个或者部分地球表层空间中的有关地理分布数据进行采集、存储、

管理、运算、分析、显示和描述的技术系统^[8]。常见的 GIS 系统中, ArcGIS 以其强大的分析能力占据了大量市场, 成为主流的 GIS 系统。 ArcGIS 强大的空间信息处理和分析功能使其具有空间性和动态性的可视化功能, 可以为洪水演进模拟的可视化研究提供更直观的地表空间分析手段, 同时友好的数据兼容性可实现与 MIKE 数据的交互, 可视化表现水动力学模型计算成果。

2 洪水模型应用

模型应用区域位于北江流域白石窑坝下至连江口段。北江地处亚热带气候区, 是珠江的第二大水系, 它的行洪调控对保障广州、佛山等重要城市和珠江三角洲的防洪安全至关重要^[9]。

2.1 模型建立

MIKE11 HD 模型运行需要河网资料、断面资料、边界条件及相关水动力学参数, 最后通过模拟文件把它们联系起来。白石窑坝下到连江口段干流长约 43 km, 划分为 67 个断面, 上下游边界都采用水位过程。由于相连支流错综复杂, 进一步概化后保留翁江和连江两大汇入支流, 长湖站是翁江的控制站, 距其交汇口约 11 km, 该支流划分为 9 个断面, 边界条件为水位过程; 高道站为连江的控制站, 距其交汇口约 23 km, 该支流划分为 20 个断面, 边界条件为流量过程。河网概化见图 1。在模拟文件中选用稳态启动, 根据边界点上的水位流量数据, 利用稳态假设计算各节点上的初始水位流量。

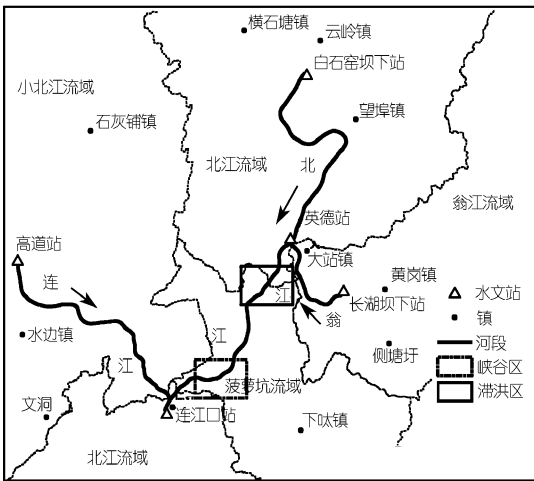


图 1 河网示意

2.2 模型率定和验证

模型率定工作主要是通过调整河床糙率使模拟的水位流量与实测值一致, 河床糙率必须基于流域实际情况在合理的范围内进行调整。本模型采用 2002 年

5 月 21 日 12:00 至 5 月 23 日 11:00 水文资料做为边界条件, 将英德站和高道站的水位实测数据用于率定, 最终河床糙率取值范围为 0.021 ~ 0.039, 英德站率定结果如图 2(a) 所示。模型验证的方法是保持模型所有率定参数不变, 仅改变边界条件, 将模型计算结果与实测数据进行比较。本模型验证时段为 2002 年 7 月 2 日 8:00 至 7 月 4 日 7:00, 英德站验证结果如图 2(b) 所示。由图可见, 计算结果与实测值拟合较好, 最大误差值为 0.27 m, 符合《水文情报预报规范》要求。

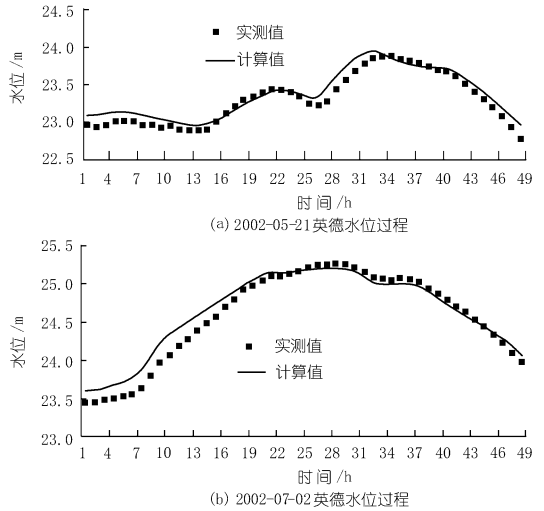


图 2 模型率定验证结果对比

3 洪水演进可视化

随着计算机技术的发展和信息数字化技术的发展, 洪水演进必然会上升到模拟仿真的高度, 仅仅使用文字和图表等形式表达显得冗长而枯燥。利用 MIKE11 GIS 的“纽带”作用, 借助 ArcGIS 具有的空间性和动态性的可视化功能, 通过分层、设色等形式, 二维、三维的视角, 即可形象、直观地显示计算结果。

3.1 三维地形概况

原始数据包括 10 m 精度等高线图、水下地形点图、山地高程点图、县界边界图等矢量图层, 1:50 000 广东省飞来峡水利枢纽防洪综合影像图。由于计算机配置条件所限, 不可能对整个流域(约 1 300 km²)进行高精度模拟, 故选择两个典型区域做为示范区, 一是英德站下游的滞洪区, 另一个为距白石窑坝下约 32 km 的鸦鹰头峡谷区, 如图 1 所示。

在 ArcMap 中将影像图进行坐标配准后做为底图, 由于洪水演进多与河道内部及周边地形密切相关, 故根据河道走势合理插值加密水下高程点, 同时精减远离河道的等高线图层, 在保证地形概况的前提下进一步减少数据量。利用处理后的等高线图层、水下地

形点图层、山地高程点图层以及两区域的裁切多边形生成各自的 TIN(不规则三角网)图层,在 ArcScene 打开 TIN 图层,为凸显地形效果将其高程夸张系数设置为 3,经生成“外墙”和底面后最终效果如图 3 所示。

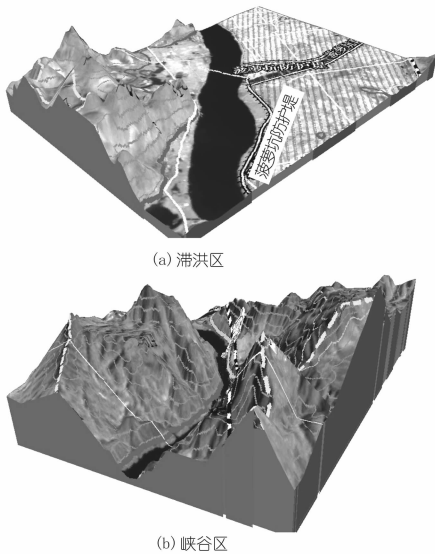


图 3 滞洪区和峡谷区三维地形

3.2 二维洪泛图制作与分析

应用 MIKE11 GIS 搭建的 MIKE11 和 ArcGIS 间互通“桥梁”,一般用于通过 GIS 资料提取程序运行所需的河网、断面等文件,更可应用于时间序列和洪水地图的可视化。利用 MIKE11 GIS 将滞洪区和峡谷区的地形图转化为 dfs2 格式,根据 *.dfs2 文件在 MIKE11 水动力参数的 MAPS 标签下设置洪泛图生成坐标范围、地图类型等,程序运行后将结果通过 TimeSeries Presentation 工具导入 ArcMap,即可实现动态洪泛图的可视化。

为凸显淹没范围的变化,模型采用洪水过程较为明显的验证期水文资料进行计算,并用分层设色方式绘制出滞洪区在本区域出现最低水位和最高水位时水深变化图、峡谷区在本区域出现最低水位和最高水位时流速变化图。如图 4 和图 5 所示,周边区域为 ArcGIS 中形成的 TIN 地形图,中间区域为 MIKE11 计算所得的河道洪水淹没图。由图 4 和图 5 可看出滞洪区比峡谷区的淹没范围明显更广,且沿断面方向上淹没宽度变化更为明显,变幅基本都在 50 m 以上,而峡谷区水面宽度变化范围都在 20 m 以内,这决定了防洪工作的重心必然要放在保障滞洪区的防洪安全上。图 5 中的二维形式流速变化图由 MIKE11 将计算所得的断面平均流速按 DEM 地形空间布局插值绘制而成,为了使流速对比更为形象明显,将流速在 0.92 ~ 1.92 m/s 的区域段用深色进行渲染,可以看出峡谷区虽然淹没

范围较小,但在图 5(a)最低水位时只有若干小区内流速表示成深色,而在图 5(b)最高水位时整个峡谷区流速值基本都在 0.92 m/s 以上,流速变化极大,这也与峡谷区洪水演进规律相符。

在动态显示方面,既可以人工控制跳帧显示,也可按时间序列自动演示。由于本模型较为精细,形成的文件较大,对图形动态显示速度略有影响,一个显示时间步长约需 2 s。

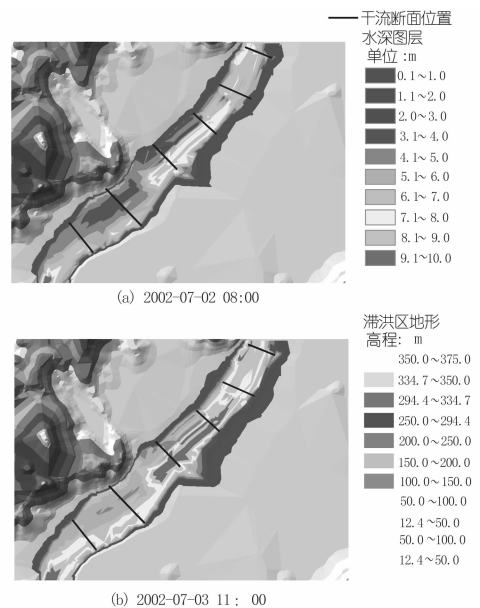


图 4 滞洪区水深变化示意

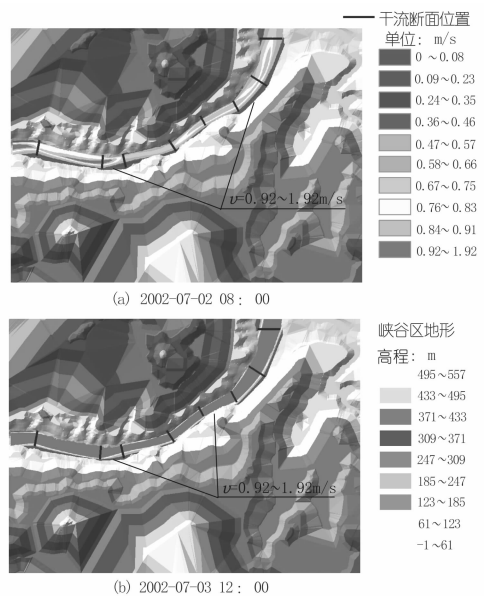


图 5 峡谷区流速变化示意

为进一步验证可视化的精度,可利用测量工具量取断面上的淹没宽度与 MIKE11 计算值进行对比,在两区域中各选 3 个断面进行检验,结果如表 1 所示。图 4 和图 5 中断面编号按水流方向由北向南递增,由表 1 看出,可视化效果较为理想。

表 1 可视化精度验证

区域	断面编号	计算值/ m	可视化值/ m	相对误差/ %
滞洪区	1	635/719	644/703	1.5/2.3
	3	745/918	684/863	8.2/6.0
	6	644/695	649/704	0.8/1.3
峡谷区	1	355/369	345/361	2.9/2.0
	5	171/177	157/159	8.3/10.0
	8	227/236	224/234	1.2/0.9

注:表中出现的 a/b 形式数据中, a 对应最低水位, b 对应最高水位。

3.3 三维形式动态可视化

为实现整个干流洪水演进的可视化,可进一步缩小地形资料精度以保证模型成功运行,新建 MIKE Animator 工程后将运行结果添加其中即可实现具三维地形效果的洪水演进动态可视化,如图 6 所示。借助 MIKE Animator 还可以实现漫游功能,并将可视化进程存储为多媒体格式。

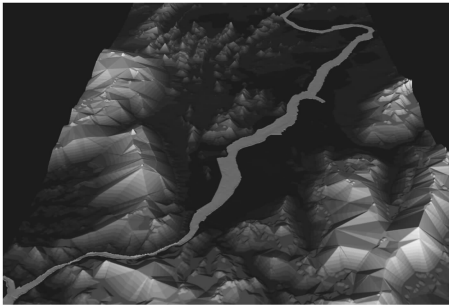


图 6 干流三维形式洪水演进

4 结论

利用 MIKE11 HD 水动力学模型为计算工具,结合

ArcGIS 强大的可视化功能,进行洪水演进可视化是可行的。结果表明模型计算结果和可视化精度良好;绘制出滞洪区和峡谷区的三维地形图,结合地形资料将洪水演进一维数值模拟计算结果表现成动态洪泛图形式,验证了滞洪区和峡谷区不同的行洪特点。该方法具有较高的准确性、较好的可操作性,表达方式直观形象,有利于决策者全面把握洪水进程,提高流域防洪决策能力,为防洪规划、抢险救灾等工作提供科学依据。

参考文献:

- [1] 段唯鑫, 闵要武, 陈力, 等. 长江上游梯级水库建成后的三峡水情预报[J]. 人民长江, 2011, 42(4): 1-4.
- [2] Bennett T H, Walton R, Dickerson P D, et al. Comparison of HEC-RAS and MIKE11 unsteady flow modeling for the Tillamook Valley [Z]. Salt Lake City, UT, United states; 2004: 1300-1307.
- [3] Post D A, Kinsey Henderson A E, Stewart L K, et al. Optimising drainage from sugar cane fields using a one-dimensional flow routing model: A case study from Ripple Creek, North Queensland [J]. Environment Modelling and Software, 2003, (18): 713-720.
- [4] 孙阿丽, 徐林山, 石勇, 等. 基于 GIS 的洪水淹没范围模拟[J]. 华北水利水电学院学报, 2009, (2): 9-11.
- [5] 王军, 梁忠民, 施晔. 基于 GIS 的水库洪水风险图编制[J]. 河海大学学报: 自然科学版, 2010, (1): 20-25.
- [6] 葛小平, 许有鹏, 张琪, 等. GIS 支持下的洪水淹没范围模拟[J]. 水科学进展, 2002, (4): 456-460.
- [7] DHI. MIKE 11 - A modeling system for river and channels, user guide [M]. DHI Press, 2002.
- [8] 汤国安, 杨昕. ArcGIS 地理信息系统空间分析实验教程 [M]. 北京: 科学出版社, 2006.
- [9] 陈鸣, 唐海行, 陆家驹, 等. 飞来峡水利枢纽洪水预报模型研究[J]. 人民珠江, 2003, (5): 32-36.

(编辑: 常汉生)

Numerical simulation and dynamical visualization of flood routing in natural rivers

CHEN Demin¹, HE Jianjing², CHEN Ming³

(1. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. College of Mechanics and Materials, Hohai University, Nanjing 210098, China; 3. Hydrologic and Water Resources Department, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210024, China)

Abstract: In order to make tedious hydrological data from flood routing calculation more visualization and enrich visualization means, by applying 1-D hydraulic theory based on Mike 11 HD model, the flood routing of Beijiang River from Baishiyao Dam to Lianjiangkou Reach is numerically simulated and dynamic visualization of flood routing process is realized on ArcGIS platform with the help of Mike11 GIS as a link. The result shows that the simulation and visualization is highly accurate and can reflect different flood routing characteristics in flood detention regions and canyon regions. Visualized flood routing process facilitates decision-maker to understand flood routing process and improve decision making ability of flood control.

Key words: MIKE11; Arc GIS; flood routing; visualization; Beijiang River