

# 耦合洪水演进模型在太平溪流域中的应用研究

苏志伟<sup>1</sup>, 祝 敏<sup>2</sup>, 许忠东<sup>2</sup>, 孙德勇<sup>3</sup>, 谈亚琦<sup>4</sup>

(1. 河海大学水利水电学院, 江苏 南京 210098; 2. 安吉县水利局, 浙江 湖州 313300;  
3. 浙江河海测绘院, 浙江 杭州 310008; 4. 杭州诚禹水利科技有限公司, 浙江 杭州 310008)

**摘要:** 太平溪小流域位于太湖流域暴雨点内, 汛期暴雨洪水量大且较为迅猛, 对该区域安全产生较大影响。为提高该区域防洪安全系数, 提出基于有限体积法的一维、二维耦合洪水演进模型, 以 10% 设计暴雨为例, 通过耦合演进模型对该区域洪水进行模拟分析, 得到洪水淹没的范围、历时以及深度等信息, 研究成果可为该区域防洪安全管理提供理论依据和技术支撑。

**关键词:** 洪水演进; 耦合模型; 太平溪流域; 防洪安全

**中图分类号:** TV122+.1      **文献标识码:** B      **文章编号:** 1007-7839 (2017) 06-0001-05

## Study of the coupled flood routing model in Taipingxi river watershed

SU Zhiwei<sup>1</sup>, ZHU Min<sup>2</sup>, XU Zhongdong<sup>2</sup>, SUN Deyong<sup>3</sup>, TAN Yaqi<sup>4</sup>

( 1.College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, Jiangsu; 2. Anji Water Conservancy Bureau, Huzhou 313300, Zhejiang;  
3. Hohai Institute of Surveying and Mapping, Hangzhou 310008, Zhejiang;  
4. Cheng Yu Water Technology Co., Ltd, Hangzhou 310008, Zhejiang )

**Abstract:** The Taiping River watershed is located in the Taihu River Basin. The storm flood in flood season is large and relatively fast. In order to improve the regional flood control safety factor, one dimensional and two dimensional coupled floods routing model based on finite volume method is put forward. Taken 10% design storm as an example, the regional flood is simulated and analyzed by the coupled evolution model. The range duration and depth of the flood is gained. The results can provide theoretical basis and technical support for the regional flood control safety management.

**Key words:** flood routing; coupled model; Taipingxi river watershed; flood control safety

## 0 引言

水动力学方法是基于水量平衡方程与动力学方程的洪水演进计算方法, 在防洪保护区防洪风险分析中应用较为广泛。由于河道—防洪保护区洪水耦合作用, 针对长河段的防洪保护区, 若采

用二维演进模型, 存在计算数量大、计算效率低、时间步长小等问题。将河道—防洪保护区洪水演进过程概化为一、二维演进过程并进行耦合处理, 可有效提高模型的计算速度、减少网格数量。近年来, 一、二维水动力学耦合模型得到了广泛认可和应用。Bladé E 等<sup>[1]</sup>, 基于有限体积法分别

收稿日期: 2017-05-05

基金项目: 国家重点计划研发课题 (2016YFC0400909, 2016YFC0402605)

作者简介: 苏志伟 (1992-), 男, 在读硕士, 研究方向为水资源系统规划与动能经济。

建立了一维、二维水动力学模型,并提出了基于数值通量的耦合方法,加强了一维、二维模型之间的动量传递,并在位于西班牙的埃布罗河进行验证;Lai X等<sup>[2]</sup>,提出了基于流体力学分析的一维、二维耦合模型,并在长江中游流域的河湖水体进行了模拟;陈文龙等<sup>[3]</sup>,建立了基于侧向联解的一维、二维耦合水动力学模型,该模型有效克服了基于堰流公式的传统方法难以处理模型间动量交换的缺点,也避免了堰流公式中流量系数选取的不确定性;曲红玲<sup>[4]</sup>建立了一维河道溃堤与二维溃堤波耦合的水力模型,计算结果比较接近实际真实溃堤过程。

本文针对复杂河网条件下的防洪保护区洪水演进数值模拟,采用圣维南方程组作为一维水动力学模型的控制方程,运用 Preissmann 四点隐式差分格式进行求解;应用水流运动的质量守恒以及能量守恒原理推导出平面二维非恒定流数值模型的基本方程组,从而建立二维水动力学模型,并通过有限体积法建立起一维、二维耦合水动力学模型,该方法可有效克服堰流公式等传统方法无法表达的模型间动力传递等问题,可为防洪保护区洪水演进计算提供一种有效的途径,为区域防洪安全管理提供理论依据和技术支撑。

## 1 模型控制方程

### 1.1 一维模型控制方程

一维水动力学模型采用的基本方程为圣维南方程组。该方程组由法国科学家圣维南于1871年提出。该方程组表示了明渠非恒定流断面水力要素随着时间和空间变化的函数关系,不考虑旁侧入流的方程表示如下:

$$B \frac{\partial Z}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \alpha \frac{Q^2}{A} \right) + gA \frac{\partial Z}{\partial x} = -g \frac{Q|Q|}{c^2 AR} \quad (2)$$

其中:  $Q$  为流量 ( $\text{m}^3/\text{s}$ ),  $A$  为断面面积 ( $\text{m}^2$ ),  $B$  为河道水面宽度 ( $\text{m}$ )。

由式(1)、式(2)和初始条件、边界条件,构成了圣维南方程组的定解问题。对于这类问题,有限差分方法是目前使用最多的数值求解方法,本文采用经典的 Preissmann 格式对上式进行求解。图

1 为 Preissmann 差分格式的示意图。

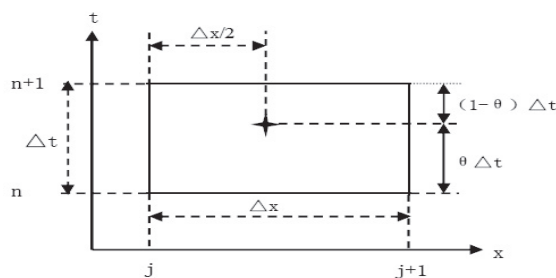


图1 Preissmann 格式示意图

根据 Preissmann 差分格式的基本原理可以得到以下差分方程:

$$f|_M = \frac{\theta}{2} (f_{j+1}^{n+1} + f_j^{n+1}) + \frac{1-\theta}{2} (f_{j+1}^n + f_j^n) \quad (3)$$

$$\frac{\partial f}{\partial x}|_M = \theta \left( \frac{f_{j+1}^{n+1} + f_j^{n+1}}{\Delta x} \right) + (1-\theta) \left( \frac{f_{j+1}^n + f_j^n}{\Delta x} \right) \quad (4)$$

$$\frac{\partial f}{\partial t}|_M = \theta \left( \frac{f_{j+1}^{n+1} + f_j^{n+1} - f_{j+1}^n - f_j^n}{2\Delta x} \right) \quad (5)$$

将式(3)、式(5)代入式(1)、式(2)中,并且忽略河段编号,可以得到任一河段的差分方程:

$$Q_{j+1} - Q_j + C_j Z_{j+1} + C_j Z_j = D_j \quad (6)$$

$$E_j Q_j + G_j Q_{j+1} + F_j Z_{j+1} - F_j Z_j = \Theta_j$$

其中:

$$C_j = \frac{B_j + \frac{1}{2} \Delta x}{2\Delta t \theta} \quad (7)$$

$$D_j = \frac{q_j + \frac{1}{2} \Delta x_j}{\theta} - \frac{1-\theta}{\theta} (Q_{j+1}^n - Q_j^n) + C_j (Z_{j+1}^n - Z_j^n) \quad (8)$$

$$E_j = \frac{\Delta x_j}{2\theta \Delta t} - (\alpha u)_j^n + \left( \frac{g|u|\Delta x}{2\theta c^2 R} \right)_j^n \quad (9)$$

$$G_j = \frac{\Delta x_j}{2\theta \Delta t} + (\alpha u)_{j+1}^n + \left( \frac{g|u|\Delta x}{2\theta c^2 R} \right)_j^n \quad (10)$$

$$F_j = (gA)_{j+\frac{1}{2}}^n \quad (11)$$

$$\Theta_j = \frac{\Delta x_j}{2\theta \Delta t} (Q_{j+1}^n + Q_j^n) - \frac{1-\theta}{\theta} \left[ (\alpha u Q)_{j+1}^n - (\alpha u Q)_j^n \right] - \frac{1-\theta}{\theta} (gA)_{j+\frac{1}{2}}^n (Z_{j+1}^n - Z_j^n) \quad (12)$$

上式中的系数均可由初值计算得到,故式(6)

属于常系数线性方程组。对于一条由  $L2-L1$  个河段组成的河道(图2),则有  $2(L2-L1+1)$  个未知变量,而根据式(6)可以列出  $2(L2-L1)$  个方程,再加上河道两端的边界条件就可以形成一个封闭的代数方程组式(13),根据该方程组可以将  $2(L2-L1+1)$  未知变量全部解出。



图2 计算河道示意图

## 1.2 二维模型控制方程

与一维水动力学模型基本方程的推导相类似,根据水流运动的质量守恒以及能量守恒原理可以推导出平面二维非恒定流数值模型的基本方程组,该方程组由连续性方程以及 X、Y 方向的动量方程组成。

$$\begin{cases} \frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial hu}{\partial x} + \frac{\partial hv}{\partial y} = hS \\ \frac{\partial hu}{\partial t} + \frac{\partial hu^2}{\partial x} + \frac{\partial huv}{\partial y} = fvh - gh \frac{\partial \eta}{\partial x} - \frac{gh^2}{2\rho_0} \frac{\partial \rho}{\partial x} + \frac{\tau_{sx}}{\rho_0} - \frac{\tau_{bx}}{\rho_0} + \frac{\partial(hT_{xx})}{\partial x} + \frac{\partial(hT_{xy})}{\partial y} + hu_s S \\ \frac{\partial hv}{\partial t} + \frac{\partial hv^2}{\partial y} + \frac{\partial huv}{\partial x} = -fuh - gh \frac{\partial \eta}{\partial y} - \frac{gh^2}{2\rho_0} \frac{\partial \rho}{\partial y} + \frac{\tau_{sy}}{\rho_0} - \frac{\tau_{by}}{\rho_0} + \frac{\partial(hT_{xy})}{\partial x} + \frac{\partial(hT_{yy})}{\partial y} + hv_s S \end{cases} \quad (13)$$

其中:  $h$  为实际水深 (m),  $u$  和  $v$  分别为  $x$  方向和  $y$  方向的流速 (m/s),  $S$  为源汇项 ( $m^2/s$ ),  $\rho_0$  为水的密度 ( $kg/m^3$ ),  $\tau_{sx}$  和  $\tau_{sy}$  分别为  $x$  方向和  $y$  方向风切应力,  $\tau_{bx}$  和  $\tau_{by}$  分别为方向和方向底部切应力。

## 2 模拟实例

太平溪小流域位于安吉县南部的山川乡,是太湖流域西南部北苕溪流域的源头支流,安吉县境内区域受馒头山水库控制,控制范围内的集雨面积约  $27.6 km^2$ ,河流长约  $11.9 km$ 。该流域所属区域包括安吉县山川乡大里村、船村、九亩村 3 个行政村,东界余杭市,南邻临安市,西北与天荒坪接壤。

太平溪流域内山多地少,由于当地开垦了大量的坡耕地,造成较严重的水土流失,使生态环境恶化。本世纪初以来,通过修建堰坝、治理河道以及植树造林、修建梯地等水利水保工程,使水土流失面积有一定程度减小,河道防洪能力得以提

高。随着安吉县社会经济的发展,对太平溪流域防洪安全提出了更高的要求。尤其是该区域位于太湖流域暴雨点内,汛期暴雨洪水量大、迅猛,对区域安全产生较大影响。

## 3 耦合模型构建

### 3.1 边界条件

二维洪水演进模型的边界可以分为开边界与陆地边界,开边界就是指流量过程、水位过程等人为设定一部分水体所形成的有界计算域;而陆地边界是指水流运动的边界,一般使用无滑移边界来设定,认为水流不能越过陆地边界,水深在边界的法向方向没有变化,而水流速度在边界的法向方向的倒数为 0<sup>[5]</sup>。

### 3.2 太平溪流域网格划分

本文基于无结构网格来生成太平溪流域坡

面二维洪水演进的计算网格,为了生成太平溪流域的计算网格,本文首先根据太平溪干流生成了  $500 m$  范围的缓冲区(图3),根据遥感影像的叠置分析可以发现该缓冲区已包含了流域内的居住区,这也是洪水淹没风险的重点关注区域<sup>[6]</sup>。

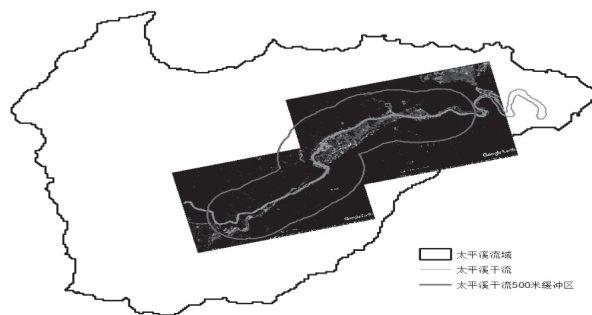


图3 太平溪流域二维洪水演进计算范围示意图

本文将该缓冲区的边界作为陆地边界,认为水流无法越过该缓冲区,根据太平溪流域历史发生洪水的情况来看,该假设是较为合理的。根据缓冲区的边界生成了二维洪水演进的计算网格,每个网格的最大面积限制在  $150 m^2$  以内,以保证

模拟的精度。生成网格后将太平溪内的高程信息插值至各计算网格,结果如图4所示。

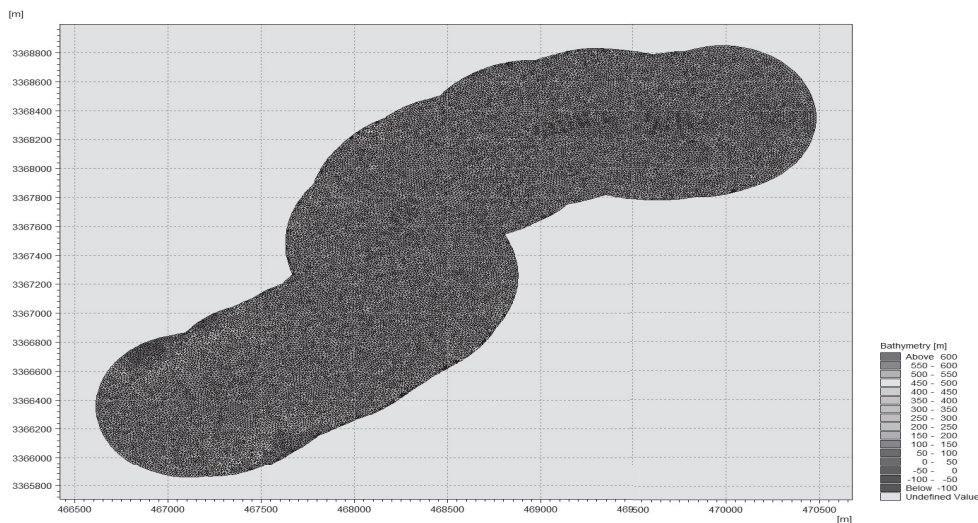


图4 太平河流域二维洪水演进网格示意图

### 3.3 模型参数设置和率定

水动力学模型的重点是河床糙率的率定,其率定过程十分复杂,不仅要通过现场调研以了解当地的河床材料,还要考虑模型概化的方法。本文根据资料调研将一维模型中河道的初始整体糙率的曼宁系数设定为0.028,对于二维模型,根据实际经验和相关文献选取为:建筑物为0.200、道路0.060、河道湖泊0.030,再根据实际情况局部进行调整<sup>[7]</sup>。

### 3.4 一维、二维耦合方式

以侧向连接的方式完成一维洪水演进模型与二维洪水演进模型的耦合,即通过河道边界进行水力因子的传递,以模拟干流漫滩以及滩面水流归槽的情况。侧向连接通过堰流公式<sup>[8]</sup>进行计算:

$$q = WC(H_{us} - H_{ds})^k \left[ 1 - \left( \frac{H_{ds} - H_w}{H_{us} - H_w} \right) \right]^{0.385} \quad (14)$$

其中:  $q$  为一维和二维模型交换水量 ( $m^2/s$ ),  $W$  为宽度 ( $m$ ),  $C$  为堰流系数,  $k$  为堰指数,  $H_{us}$  为堰上游水位 ( $m$ ),  $H_{ds}$  为堰下游水位 ( $m$ ),  $H_w$  为堰顶高程 ( $m$ )。

## 4 耦合洪水演进动态模拟

基于生成的网格可以构建太平河流域二维洪水演进模型。本文构建的二维洪水演进模型需要与一维洪水演进模型进行耦合后,才能对可能出

现的漫滩等风险进行模拟。为了对构建模型的合理性进行验证,本文对  $P=10\%$  设计暴雨(如表1

所示)条件下的洪水演进进行模拟。

表1 太平河流域设计暴雨过程

时段 (h)	降雨量 (mm) $P=10\%$	时段 (h)	降雨量 (mm) $P=10\%$	时段 (h)	降雨量 (mm) $P=10\%$
1	2.93	14	5.81	26	0
2	3.02	15	6.96	27	0
4	3.11	16	9.89	28	0
5	3.21	17	14.42	29	0
6	3.32	18	20.20	30	0
7	3.44	19	69.84	31	0
8	3.57	20	11.61	32	0
9	3.88	21	8.70	33	0
10	4.06	22	6.32	34	0
11	4.26	23	5.39	35	0
12	4.48	24	4.74	36	0
13	5.04	25	0		

图5(a)为暴雨开始17.5 h后的洪水演进情况,从图中可以看出在船村附近,太平溪干流曲率较大的区域,由于水流运动不畅已出现漫滩的情况。而随着时间的推移,洪水再向下游演进的同时也沿着坡面向船村运动,造成洪水风险,从图5(b)



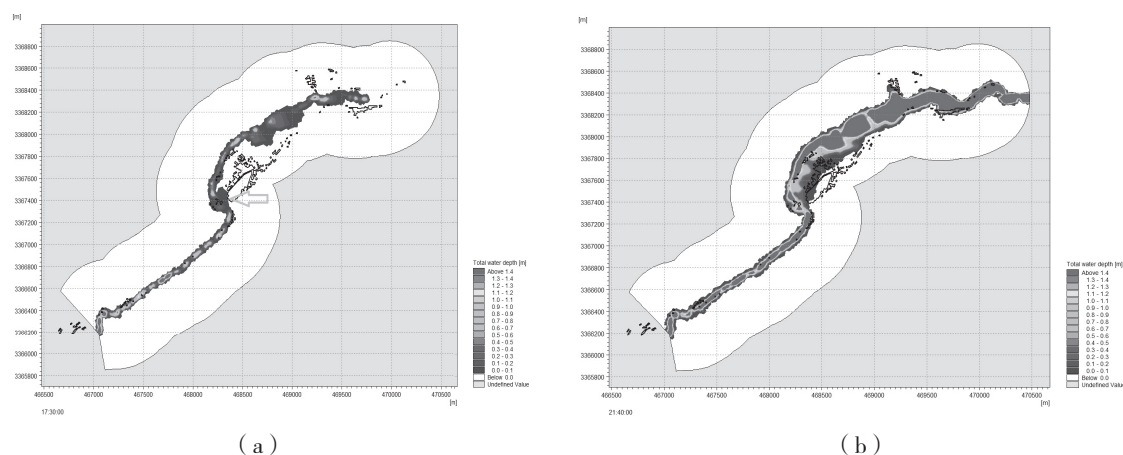


图5 太平河流域设计暴雨洪水演进过程图

可以看出在暴雨开始 21.67 h 后船村大部分已被洪水淹没,但淹没深度较浅,最大淹没深度约为 0.3 m,且离太平溪干流越远淹没深度越小。

## 5 结语

采用基于有限体积法的一维、二维耦合洪水研究模型,考虑了流域内复杂的工况信息和地形特征,较好地模拟流域内洪水的演进状况,达到满意的模拟程度。基于建立的模型对太平河流域 P=10% 设计暴雨条件下的洪水演进进行模拟,以洪水动态演进直观地反映出了在此暴雨条件下 14 h 内该区域产生漫滩面积、积水深浅、洪水溢出演进方向等水情信息,为太平河流域防洪决策调度提供了参考依据。

### 参考文献:

[1] Bladé E, Gómez-Valentín M, Dolz J, et al. Integration of 1D and 2D finite volume schemes for computations of water flow in natural channels[J]. *Advances in Water Resources*, 2012, 42 (3):17-29.

[2] Lai X, Jiang J, Liang Q, et al. Large-scale hydrodynamic modeling of the middle Yangtze River Basin with complex river-lake interactions[J]. *Journal of Hydrology*, 2013, 492 (492):228-243.

[3] 陈文龙,宋利祥,邢领航,张文明,周建中.一维、二维耦合的防洪保护区洪水演进数学模型[J].*水科学进展*, 2014 (06):848-855.

[4] 曲红玲.河道溃堤与溃堤波的一、二维耦合计算数值模拟[J].*水利水运工程学报*, 2007 (04):49-54.

[5] 陈智洋,厉海斌,李玲.基于一二维耦合水动力模型的横阳支江洪水演进数值模拟[J].*浙江水利科技*, 2015 (03):34-37.

[6] 苑希民,薛文宇,冯国娜,李长跃.溃堤洪水分析的一、二维水动力耦合模型及应用[J].*水利水电科技进展*, 2016 (04):53-58.

[7] 范玉,陈建,李大鸣.一、二维洪水演进数学模型在滞洪区的应用[J].*华北水利水电学院学报*, 2009 (04):12-15.

[8] 范玉,李大鸣,赵明雨.一二维衔接洪水演进模型在永定河泛区的应用研究[J].*中国农村水利水电*, 2014 (11):39-42.

(责任编辑:徐丽娜)