

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2014.02.003

基于网格流出修正法的山洪演进数值模拟

张 驰^{1,2}, 张家华³, 王 浩^{1,2}

(1. 河海大学计算机与信息学院, 江苏 南京 210098; 2. 南京马也信息技术有限公司, 江苏 南京 210038;
3. 南京晓庄学院数学与信息技术学院, 江苏 南京 211171)

摘要:为解决山洪泥石流灾害二维数值模拟中,由地形陡峭、水流量急速变化造成的计算数值不稳定甚至计算发散而得不到结果的问题,提出基于 leap-frog 有限差分格式的网格流出修正法。该方法通过对网格流出率进行循环修正,确保整个计算过程中的质量守恒,提高数值计算的稳定性。在局部溃坝模型下,将网格流出修正法与隐式交替方向算法进行质量守恒对比,模拟结果表明,网格流出修正法能够确保陡峭地形与动边界条件下的模拟精度与数值计算稳定性。基于网格流出修正法,对2010年发生在甘肃省舟曲县的特大山洪灾害过程进行模拟分析,模拟结果与灾后遥测估计值的对比表明,洪水演进时间、速度及流动深的偏差均在±5%以内,演进路径一致性良好。

关键词:山洪;数值模拟;二维浅水波方程;网格流出修正法;数值计算稳定性;甘肃省舟曲县

中图分类号:TV131.4 **文献标志码:**A **文章编号:**1000-1980(2014)02-0107-07

Numerical simulation of flash flood routing based on grid outflow correction method

ZHANG Chi^{1,2}, ZHANG Jiahua³, WANG Hao^{1,2}

(1. College of Computer and Information Technology Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;
2. Nanjing Maye Information Technology Co., Ltd., Nanjing 210038, China;
3. School of Mathematics and Information Technology, Nanjing Xiaozhuang University, Nanjing 211171, China)

Abstract: As floods often occur in steep terrain and water flow changes rapidly, the calculated values in two-dimensional numerical simulations of flash flood disasters are unstable and even the calculation diverges in the simulation. To solve these problems, we present a grid outflow correction method, which is based on the leap-frog finite difference format. Through circular modification of the outflow rate of the grid, this method ensures mass conservation over the whole process of computation and improves the stability of numerical calculation. While using the local dam bursting model, we conducted mass conservation comparison between the simulated result of the grid outflow correction method and that of the algorithm of the implicit alternating direction. The results show that the grid outflow correction method can ensure simulation accuracy and numerical stability under the conditions of steep terrain and a moving boundary. Based on the proposed method, simulation of the process of the extreme flash flood disaster that occurred in 2010 in Zhouqu County, in Gansu Province was carried out. The comparison of simulation results and the results of remote sensing estimation after the disaster shows that the deviation of the flood evolution time, speed, and impact height were within ±5%, and the evolution path was consistent.

Key words: flash floods; numerical simulation; two-dimensional shallow water wave equation; grid outflow correction method; stability calculation numerical; Zhouqu County in Gansu Province

收稿日期: 2013-01-07

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973计划)(2010CB951102); 国家自然科学基金(51021066); 南京晓庄学院校级科研项目(2013NXY04)

作者简介: 张驰(1968—),男,江苏宜兴人,高级工程师,博士,主要从事地质灾害数值模拟研究。E-mail:chizhang@okuyama.co.jp

通信作者: 张家华,讲师。E-mail:jhzhhu@163.com

山洪灾害是指山丘地区在强降雨影响下,短时间内形成具有较大洪峰流量的洪水^[1]。我国地处东亚季风区,山区和丘陵地区占国土面积的 66.7%。其中,山洪灾害的优先预防面积达 97 万 km²,影响人口 1.3 亿。近年山洪灾害造成的死亡人数占全国洪涝灾害死亡人数的比例超过 70%,成为造成人员伤亡的主要灾种^[2]。随着社会经济的发展,山洪灾害的防治工作越来越受到重视^[3-4]。

早先,国际通用的山洪灾害预测技术是对沟道、沟口进行实地采样,根据有可能的灾害种类和等级确定危险指数^[5]。最具代表性的是 Aulitzky^[6] 提出的荒溪分类及危险区制图指数法,该方法通过收集 9 种指标 51 个具体因子划分出不同等级危险区。随着地理信息系统、数字高程模型、遥感和卫星遥测等现代科学技术的高速发展,基于二维浅水波方程的模拟方法被广泛应用于流域内洪水、山洪及泥石流等灾害的预测和定量分析中。该方法不受模型实验相似性理论的限制,可快速、精确地揭示灾害发生的原因及过程。最常用的二维模拟数值方法包括有限元法^[7]、有限体积法^[8]和有限差分法^[9-10]。针对洪水模拟,Satofuka 等^[11]提出了使用二阶迎风格式离散动量方程的非线性对流项和使用二阶 leap-frog 格式离散线性对流项以模拟 Nakdong 流域的泛滥过程。Nakatani 等^[12]提出一种 MacCormack+TVD 格式的边界拟合数值模型,通过检测每个时间步长下的水深是否达到干枯临界值判定动边界范围。丹麦 DHI 水资源与环境研究院采用隐式交替方向算法开发了水动力学模拟软件 Mike21^[13]。

对于山洪泥石流灾害二维数值模拟,由于流域地形陡峭,水流量急速变化,在较大计算时间步长下的动边界处理过程中将流动深简单的归零处理会导致负水深,造成模拟过程中质量与动量不守恒^[14-15],最终导致计算数值不稳定,甚至计算发散而得不到结果。近年来,Satofuka 等^[11]采用一维数值模型计算了明渠山洪对山区河床、水坝造成的影响。Nakatani 等^[12]与张驰等^[16]采用二维数值模拟模型,基于山洪淹没深度和沉降的变化对其形成的冲积扇进行了模拟计算。鉴于此,笔者提出一种网格流出修正算法,通过对有限差分 leap-frog 格式网格流出率进行修正,使整个计算过程中的质量守恒,减小动量守恒误差,确保陡峭地形动边界条件下的模拟精度与数值计算的稳定性。

1 基础方程

目前,对山洪泥石流进行描述的力学模型可分为 2 类,即伪一相模型(包括黏塑流体模型、宾汉模型、膨胀流体模型、混合流体模型等)和两相流模型^[17-19],其中两相流模型在实际应用中通常简化为单流体模型^[20]。笔者基于伪一相黏塑流体模型,着重解决山洪泥石流演进过程和泛滥范围的二维数值模拟的数值格式易发散难题。

质量连续性方程:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial M}{\partial x} + \frac{\partial N}{\partial y} = 0 \tag{1}$$

动量连续性方程:

$$\begin{cases} \frac{\partial M}{\partial t} + \beta \frac{\partial (uM)}{\partial x} + \beta \frac{\partial (vM)}{\partial y} = -gh \frac{\partial H}{\partial x} - \frac{\tau_{bx}}{\rho} + A_h \left(\frac{\partial^2 M}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 M}{\partial y^2} \right) \\ \frac{\partial N}{\partial t} + \beta \frac{\partial (uN)}{\partial x} + \beta \frac{\partial (vN)}{\partial y} = -gh \frac{\partial H}{\partial y} - \frac{\tau_{by}}{\rho} + A_h \left(\frac{\partial^2 N}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 N}{\partial y^2} \right) \end{cases} \tag{2}$$

其中

$$\tau_{bx} = \rho g \frac{\eta^2 M \sqrt{M^2 + N^2}}{h^{\frac{7}{3}}} \quad \tau_{by} = \rho g \frac{\eta^2 N \sqrt{M^2 + N^2}}{h^{\frac{7}{3}}} \quad H = h + \zeta$$

式中: h ——流动深; M 、 N —— x 、 y 方向上的单宽流量; β ——动量修正系数; u 、 v —— x 、 y 方向的垂线平均流速; H ——自由水面的海拔高度; g ——重力加速度; τ_{bx} 、 τ_{by} ——底部摩擦力在 x 、 y 方向上的分量; A_h ——水平涡动黏性系数; ρ ——流体密度; η ——糙率 Manning 系数; ζ ——河床海拔高度。

2 数值方法

2.1 leap-frog 格式

直接求解基础方程很困难,笔者采用有限体积法对二维浅水波方程进行数值离散。为了提高计算速度和稳定性,采用 staggered 交错网格变量配置方式^[19], h 定义在网格中心, M 和 N 定义于网格的 4 条边中点

(图1)。线性项采用显式 leap-frog 格式进行离散,leap-frog 时空交错格式如图2所示。使用 n (偶数)时刻水深与 $n+1$ (奇数)时刻流速计算 $n+2$ 时刻水深;进而使用 $n+1$ 时刻流速与 $n+2$ 时刻水深计算出 $n+3$ 时刻流速,如此递推计算。

质量连续性方程在时间上采用前进差分格式,空间上采用二阶中心差分格式。动量连续性方程的时间项采用前进差分格式,非线性对流项采用三阶精度迎风差分格式,压力项采用中心差分格式。为避免 vasiliev 数值不稳定现象,摩擦项采用隐式差分格式进行数值离散。

2.2 边界条件设定

使用越流法处理复杂地形下的动边界问题,则流体单宽流量为

$$M_0 = \begin{cases} \mu h_1 \sqrt{2gh_1} & \text{溯上} \\ \mu h_h \sqrt{gh_h} & \text{流下} \end{cases} \quad (3)$$

式中: μ ——越流系数,取 0.35; h_1 、 h_h ——流体溯上(图3(a))、流下(图3(b))时的越流水深。

2.3 网格流出修正

由于山洪发生地的地形陡峭且凹凸不平,因此洪水的边界范围、流速和水深都急剧变化。在以往的动边界计算中,经常发生水面标高低于地面标高的情况(计算后的水深为负值),从而导致质量不守恒,数值计算稳定性变差,甚至计算发散而得不到结果。因此,笔者提出网格流出修正法校正网格流出量,从而消除负水深,保证质量守恒,提高数值计算稳定性,方法步骤如下:

- a. 对质量连续性方程进行数值离散化处理:
$$h_{i+\frac{1}{2},j+\frac{1}{2}}^{n+3}(\Delta x \Delta y) = h_{i+\frac{1}{2},j+\frac{1}{2}}^{n+1}(\Delta x \Delta y) + 2\Delta t[(M_{i,j+\frac{1}{2}}^{n+2} - M_{i+1,j+\frac{1}{2}}^{n+2})\Delta y + (N_{i+\frac{1}{2},j}^{n+2} - N_{i+\frac{1}{2},j+1}^{n+2})\Delta x] \quad (4)$$
式中: $h_{i+\frac{1}{2},j+\frac{1}{2}}^{n+3}$ 、 $h_{i+\frac{1}{2},j+\frac{1}{2}}^{n+1}$ —— $n+1$ 时刻、 $n+3$ 时刻网格 $(i+\frac{1}{2},j+\frac{1}{2})$ 的水深; $M_{i,j+\frac{1}{2}}^{n+2}$ 、 $M_{i+1,j+\frac{1}{2}}^{n+2}$ 、 $N_{i+\frac{1}{2},j}^{n+2}$ 、 $N_{i+\frac{1}{2},j+1}^{n+2}$ —— $n+2$ 时刻网格 $(i,j+\frac{1}{2})$ 、 $(i+1,j+\frac{1}{2})$ 、 $(i+\frac{1}{2},j)$ 、 $(i+\frac{1}{2},j+1)$ 的单宽流量。

- b. 当网格水深出现负值时,判断 M 、 N 是流入还是流出,并计算网格的流入量 Q_{in} 和流出量 Q_{out} :

$$h_{i+\frac{1}{2},j+\frac{1}{2}}^{n+3} = h_{i+\frac{1}{2},j+\frac{1}{2}}^{n+1} + \frac{Q_{in} - \lambda Q_{out}}{\Delta x \Delta y} = 0 \quad (5)$$

- c. 求修正系数:

$$\lambda = \frac{\Delta x \Delta y h_{i+\frac{1}{2},j+\frac{1}{2}}^{n+1} + Q_{in}}{Q_{out}} \quad (6)$$

- d. 由于相邻网格的流入量减少,可能引起相邻网格的水深变为负数。在这种情况下需要不断地重复计算,直到所有的负水深网格修正为零,再转入下一个时间步长。

3 模拟实例

3.1 局部溃坝模型试验

堰塞坝多出现在高山峡谷之中,坝体组成颗粒既有砾石,也有直径大于 1 m 的大块岩石。即使在湍急的水

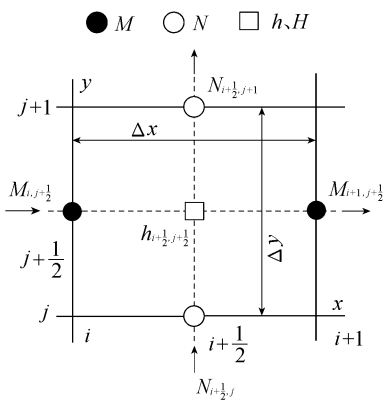


图1 计算网格定义
Fig. 1 Computing grid definition

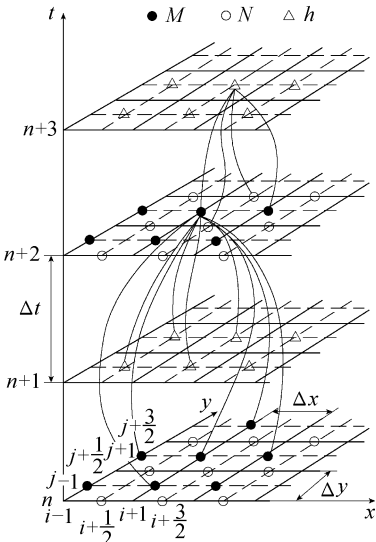


图2 leap-frog 时空交错格式
Fig. 2 Spatio-temporal staggered format of leap-frog

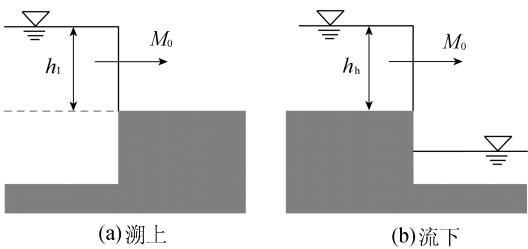


图3 动边界条件
Fig. 3 Moving boundary conditions

流作用下,残余的坝体也能在粗颗粒的阻力消能达到平衡,而不至于完全溃决。笔者基于 Fraccrollo 等^[17]提出的局部溃坝物理模型进行模拟试验,并将结果与隐式交替方向算法的模拟结果进行质量守恒性对比。

物理模型为 100 m×100 m 的正方形容器,在距容器上游边界 35 m 处设置 1 块厚度不计的挡板,该挡板中央能够在极短时间内开启宽度为 20 m 的缺口,瞬间形成向下游推进的正波和向坝内传播的负波,从而构成对称式局部溃坝模型(图 4)。为验证算法在陡峭地形下的稳定性,将下游泛滥区坡度 I 设置为 0°、10°、25°和 45°共 4 种情况。

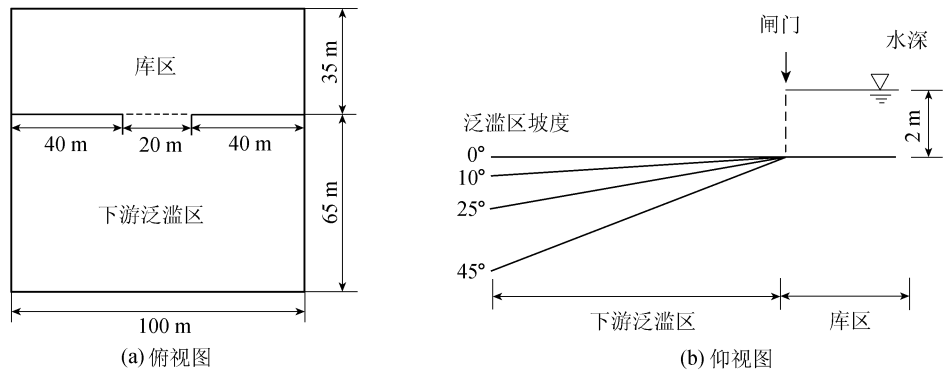


图 4 局部溃坝数值试验模型

Fig. 4 Local dam bursting experimental model for numerical simulation

计算域及网格划分:选择整个正方形区域作为数学模型计算区域;划分为 100×100 个边长 1 m 的正方形网格。

初始条件:上游水深 2 m,下游水深为 0 m,整个流场流速为 0 m/s。

边界条件:挡板下游 3 面为开边界,容器内除挡板处为开边界外,其余为闭边界,容器内水量一定。

主要参数:干涸深度(水深小于此深度不参与计算)与泛滥深度(重新参与计算的深度)设置为最小值 0.01 m 和 0.02 m。计算时间步长分别设置为 0.01 s、0.05 s、0.10 s 和 1.00 s,不计风速和底部摩擦。局部溃坝模型下,采用隐式交替方向算法模拟的质量相对误差见表 1。

表 1 局部溃坝模型下采用隐式交替方向算法模拟的质量相对误差

Table 1 Quality relative errors simulated by implicit alternating direction algorithm in local dam bursting model												
时间步长/s	模拟 5 s 后质量相对误差				模拟 15 s 后质量相对误差				模拟 30 s 后质量相对误差			
	$I=0^{\circ}$	$I=10^{\circ}$	$I=25^{\circ}$	$I=45^{\circ}$	$I=0^{\circ}$	$I=10^{\circ}$	$I=25^{\circ}$	$I=45^{\circ}$	$I=0^{\circ}$	$I=10^{\circ}$	$I=25^{\circ}$	$I=45^{\circ}$
0.01	0.02	0.06	0.06	0.05	0.08	0.07	0.05	0.05	0.17	0.08	0.06	0.04
0.05	0.02	0.06	0.05	0.11	0.08	0.07	0.06		0.17	0.08	0.07	
0.10	0.02	0.06	0.05	1.71	0.08	0.07			0.17	0.08		
1.00	0.05	56.33	49.28	40.17	230.24							

从表 1 可以看出由于时间步长以及坡度设置的增大,导致随着计算时间的延续,非修正算法的计算结果发生大幅度跳动并最终导致发散,使计算无法进行。故以 $I=15^{\circ}$ 、时间步长为 0.01 s 的水深分布为基准,将时间步长为 0.05 s 修正前的水深分布相对误差与时间步长为 0.1 s 时经过修正后的水深分布相对误差进行对比(图 5)。可以看出,随着时间步长的加大,所提修正方法并未降低水深分布计算的准确性。以所提方法在时间步长为 0.01 s、 $I=25^{\circ}$ 时的水深分布作为基准,计算在 $I=25^{\circ}$ 时不同时间步长下的水深分布相对误差,结果如图 6 所示。可以看出,修正后计算初期的水深分布误差在时间步长 0.05 s 下为 0.07%, 时间步长 0.1 s 下为 0.25%, 时间步长 1 s 下为 0.45%, 均趋向收敛。

通过局部溃坝模型下的洪水演进模拟试验可以看出,未经修正的数值格式会产生不可避免的质量不守恒问题,从而导致地形坡度越大时计算越容易发散,使模拟计算无法继续进行。而采取网格流出修正处理

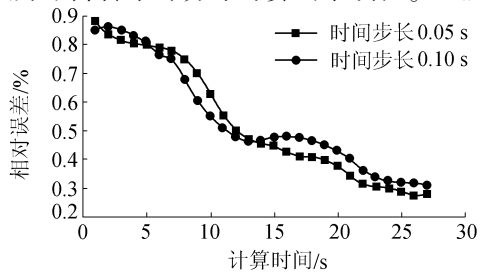


图 5 修正前后的水深分布相对误差对比

Fig. 5 Comparison of relative errors of water depth distribution before and after correction

后,不仅消除了模拟前后的质量不守恒,而且可使用更大的时间步长,在保证模拟精度与稳定性的同时缩短了计算时间,使陡峭地形动边界条件下的山洪演进数值模拟成为可能。

3.2 舟曲特大山洪灾害可视化模拟

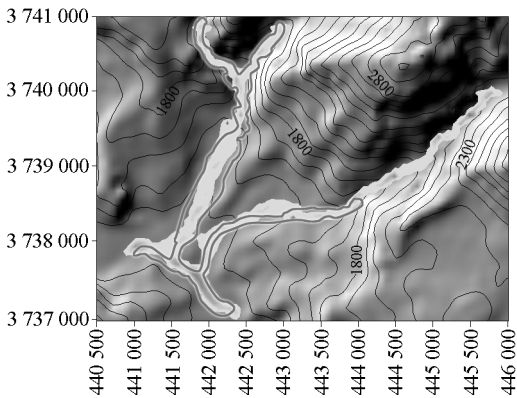
选择发生在我国甘肃省舟曲县城后山三眼峪沟和罗家峪沟的特大山洪泥石流灾害为例,采用本文修正方法加入泥沙黏性项进行模拟,并与灾后遥感数据进行对比。

2010 年 8 月 7 日 23:00—24:00 舟曲县城东北部山区突降特大暴雨,持续 40 min,降雨强度达 96.77 mm/h。三眼峪沟和罗家峪山洪泥石流流出山后的平均流量分别为 $q_1=1\,219.8\text{ m}^3/\text{s}$, $q_2=457.67\text{ m}^3/\text{s}$ 。超强暴雨形成的径流于 2010 年 8 月 8 日 0:12 在 2 个流域分别汇聚成巨大的高位洪水,沿狭窄山谷快速向下游冲击。在向 2 km 外的白龙江奔流的过程中,沿途村庄几乎全部被毁灭,数百公顷良田被淹。三眼峪主沟中、上游及支沟断面呈 V 字形,平均纵坡降 30.0%,区域最大相对高差 2 488 m;罗家峪沟谷两岸山坡坡角平均 50°,沟床比降平均为 33.4%,最大相对高差 2 474 m,地形地势陡峭复杂。

基于美国航天局(NASA)与日本经济产业省(METI)2009 年共同推出的 30 m 分辨率数字高程地形模型(DEM)数据对舟曲特大山洪泥石流进行模拟,模拟范围为 5 500 m×4 000 m,中心位于 E33.812 315°、N104.354 715°,模拟时间步长为 0.10 s, $\eta=0.020$,黏性系数为 0.028 N·s/m²。图 7(a)为 2010 年 8 月 8 日灾害发生后无人机航空摄影图像;图 7(b)为模拟受灾区域与航空摄影受灾区域对比结果,粗实线标注范围对应图 7(a)中航空拍摄的受灾区域。



(a) 灾后无人机航空摄影图像



(b) 模拟受灾区域与航空摄影受灾区域对比
(UTM投影坐标系,单位:m)

图 7 舟曲特大山洪泥石流灾后影像与模拟结果对比

Fig. 7 Comparison of remote sensing image and simulation result of extreme flash flood disaster in Zhouqu County

模拟偏差产生的原因如下:(a)遥感卫星提取山体陡峭的地区地貌信息过程中,当山体背坡坡度较大时会导致雷达阴影从而造成数据缺失,仅通过内插方法填补这些空洞点,造成了图 7 中出山口峡谷急转弯处模拟的误差;(b)模拟所采用的 DEM 数据为 30 m 分辨率,一定程度上会造成建筑物密集地区的数字地形相对于实际地形更平滑,而笔者在计算中采用统一糙率,故造成模拟结果中的下游房屋、桥梁密集地区的受灾范围比遥感图像中的实际受灾范围更大;(c)水体和泥石流黏性系数取值会影响模拟分析结果,其影响状况有待进一步研究。

通过灾后遥感结果与数值模拟结果的对比分析可以看出舟山山洪泥石流灾害的总体特点为:(a)短时间内降雨量大且成洪快,实地分析山洪前锋冲出山口到达县城的时间约为 120 s^[17],模拟结果为 127 s;(b)速度快,根据灾后现场情况,舟曲山洪灾害流速遥感测算值与格子流出修正法计算值在几处关键位置的流速对

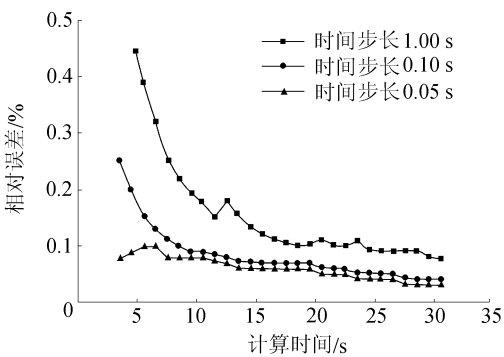


图 6 修正后不同时间步长下水深分布误差对比
Fig. 6 Comparison of water depth distribution errors in different time steps after correction

比见表2;(c)流动深大,根据灾后现场情况,测算出山口水位高度约为8 m,本文所提方法模拟结果为7.67 m,与遥感测算值偏差为4.125%;(d)路径直,山洪冲出山口后主体部分并未沿西侧的原排洪沟道方向演进,而是基本保持一条直线飞跃南下。

表2 “8.8”舟曲山洪流速遥感测算值与网格流出修正法计算值对比

Table 2 Comparison of remote sensing estimated flow rate of flash flood in Zhouqu County and calculated value with grid outflow correction method

位 置	三眼峪沟山洪流速			位 置	罗家峪沟山洪流速		
	遥感 测算值/ ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	模拟 计算值/ ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	偏差/ %		遥感 测算值/ ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	模拟 计算值/ ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	偏差/ %
大眼峪 H2 崩塌体跌水段 (高程 1 700 ~ 1 600 m)	19.24	18.73	-2.65	罗家峪峡谷出山口 (高程 1 800 ~ 1 600 m)	14.76	14.93	1.15
三眼峪主沟段 (高程 1 600 ~ 1 500 m)	12.60	12.13	-3.73	罗家峪出山后路径中段 (高程 1 600 ~ 1 400 m)	4.37	4.52	3.43
到达县城 1 340 m 高程处 (高程 1 500 ~ 1 340 m)	4.25	4.38	3.06	到达舟曲县城 (高程 1 400 ~ 1 320 m)	4.10	4.29	4.63

4 结 语

提出了一种网格流出修正算法,通过对有限差分 leap-frog 格式网格流出率修正,使整个计算过程中的质量守恒,减小了动量守恒的误差,且可使用更大的计算时间步长,在保证模拟精度与计算数值稳定性的同时缩短计算时间。

在局部溃坝模型下,将网格流出修正法的模拟结果与隐式交替方向算法进行质量守恒对比,结果表明,修正法能够确保陡峭地形与动边界条件下的模拟精度与计算数值稳定性。基于网格流出修正法,对 2010 年甘肃省舟曲县的特大山洪灾害过程进行模拟分析,模拟结果与遥感测试估计值的对比表明,洪水演进时间、速度及流动深的偏差均在±5%以内,演进路径一致性良好,从而验证了算法的有效性。

本文面向山洪泥石流演进过程和泛滥范围的平面二维数值模拟,着重解决其数值格式计算易发散的难题,依据 Manning 紊流法则近似处理流体剪应力的变化。在今后的工作中,非牛顿流体三维流动中剪应力的解析表达式和各种形态流体的平衡条件等问题将是进一步深入研究的方向。

参考文献:

[1] 水利部水文局(水利信息中心). 中小河流山洪监测与预警预测技术研究[M]. 北京:科学出版社, 2010: 26-27.

[2] SUN Dongya, ZHANG Dawei, CHENG Xiaotao. Framework of national non-structural measures for flash flood disaster prevention in China[J]. Water, 2012, 4(1):272-282.

[3] CARPENTER T M, SPERFSLAGE J A, GEORGAKAKOS K P, et al. National threshold runoff estimation utilizing GIS in support of operational flash flood warning systems[J]. Hydrology, 1999, 224:21-44.

[4] 刘传正, 苗天宝, 陈红旗,等. 甘肃舟曲 2010 年 8 月 8 日特大山洪泥石流灾害的基本特征及成因[J]. 地质通报, 2011, 31(1):141-150. (LIU Chuazheng, MIAO Tianbao, CHEN Hongqi, et al. Basic feature and origin of the “8 · 8” mountain torrent-debris flow disaster happened in Zhouqu County, Gansu, China, Aug. 8, 2010[J]. Geological Bulletin of China, 2011, 31(1):141-150. (in Chinese))

[5] ELDEEN M T. Interpretation of disaster risk analysis into physical planning: a case study in Tunisia[J]. Disasters, 1980, 4(2): 211-222.

[6] AULITZKY H. Hazard mapping and zoning in Austria: methods and legal implications [J]. Mountain Research and Development, 1994, 14(4):307-313.

[7] BAKER A J. Finite element computational fluid mechanics[M]. New York: McGraw-Hill, 1983: 109-112.

[8] 陶文铨. 计算传热学的近代进展[M]. 北京: 科学出版社, 2000: 45-46.

[9] RICHTMYER R D, MORTON K W. Difference methods for initial problems[M]. New York: Interscience Publisherd, 1967: 72-76.

[10] LEE J W, LEE S O, CHO Y S. Numerical simulation of flood estimation for gis-based local inundation map[J]. Advances in Water Resources and Hydraulic Engineering, 2009, 1: 98-101.

[11] SATOFUKA Y, MIZUYAMA T. Numerical simulation on a debris flow in a mountainous river with a Sabo dam[J]. Journal of the Japan Society of Erosion Control Engineering, 2005, 58(1):14-19.

[12] NAKATANI K, WADA T, SATOFUKA Y, et al. Development of “Kanakano 2D (Ver. 2.00)”, a user-friendly one-and two-dimensional debris flow simulator equipped with a graphical user interface [J]. International Journal of Erosion Control Engineering, 2008, 1(2):62-72.

[13] DALIBOR C, MARKO P, EVA O. Modelling of wave interaction with submerged breakwater using MIKE 21 BW [C]// International Symposium on Water Management and Hydraulic Engineering. Macedonia:JOFI Sken,2009:1-5.

[14] 叶金印, 吴勇拓, 李致家, 等. 湿润地区中小河流山洪预报方法研究与应用[J]. 河海大学学报:自然科学版, 2012, 40(6): 615-621. (YE Jinyin, WU Yongtuo, LI Zhijia, et al. Forecasting methods for flash floods in medium and small rivers in humid regions and their applications[J]. Journal of Hohai University: Natural Sciences, 2012, 40(6): 615-621. (in Chinese))

[15] 岩佐義朗, 徐義人. 水理學數值解析法[M]. 臺北市:國立編譯館, 2001: 93-95.

[16] 張馳, 岩堀康希, 阿部真郎, 等. 急勾配地形を有する場における. 洪水氾濫の数值解析[J]. 水工論文集, 2004, 48:625-630. (ZHANG Chi, YASUNORJ I, SHINRO A B E, et al. Numerical simulation of flooding in area with steep slope[J]. Proceedings of hydraulic engineering, 2004, 48: 625-630. (in Japanese))

[17] FRACCROLLO L, TORO E F. Experimental and numerical assessment of the shallow water model for two-dimensional dam-break type problems[J]. Journal of Hydraulic Research, 1995, 33(6):843-864.

[18] SADOTJMY R. The dynamics of finite-difference models of the shallow-water equations[J]. Journal of the Atmospheric Sciences, 1975, 32(4): 680-689.

[19] HU Jian, KUANG Shangfu, XU Yongnian. 2-D numerical simulation of viscous debris flows[J]. Journal of Sediment Research, 2006, 6:32-39.

[20] WANG Chunxiang, BAI Shiwei, ESAKI T, et al. GIS-based two-dimensional numerical simulation of debris flow[J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, 7:41-48.

· 简讯 ·

河海大学力学与水工程实验教学中心入选 国家级虚拟仿真实验教学中心

教育部 2014 年 2 月 26 日公布了首批国家级虚拟仿真实验教学中心名单(全国高校共有 100 个实验教学中心入选),河海大学力学与水工程实验教学中心入选。

开展国家级虚拟仿真实验教学中心建设工作,旨在贯彻落实《教育部关于全面提高高等教育质量的若干意见》精神和《教育信息化十年发展规划(2011—2020 年)》,推动高等学校实验教学改革与创新,全面提高大学生的创新精神和实践能力。河海大学力学与水工程虚拟仿真实验教学中心依托虚拟现实、多媒体、人机交互、数据库和网络通讯等技术,通过构建高度仿真的虚拟实验环境和实验对象,开发了“创新研究型”、“专业实践型”、“基础扩展型”三大类虚拟仿真实验项目,实现真实实验不具备或难以完成的教学功能,使大学生通过在虚拟环境中开展实验,达到教学大纲所要求的教学效果,同时增加学生的动手机会,提高学生创新和实践能力。

(本刊编辑部供稿)