

# 溃堤洪水分析的一、二维水动力耦合模型及应用

苑希民<sup>1</sup>, 薛文字<sup>1</sup>, 冯国娜<sup>2</sup>, 李长跃<sup>1</sup>

(1. 天津大学水利工程仿真与安全国家重点实验室, 天津 300072; 2. 天津大学前沿技术研究院有限公司, 天津 301700)

**摘要:**建立一、二维水动力耦合数学模型以模拟溃堤洪水的演进过程, 其中一维模型采用 Preissmann 格式离散, 二维模型利用基于非结构网格的 Roe 格式离散。将道路、灌渠等特殊边界概化为宽顶堰并作线性处理, 利用非结构网格与特殊边界的耦联, 建立具有真实地形的耦合模型, 并采用干湿水深理论对模型进行优化。将模型应用于黄河青铜峡河西灌区溃堤洪水的模拟, 较为真实地再现了洪水在计算区域内的演进过程与淹没范围, 体现了道路、灌渠等特殊边界的阻水效果与桥涵的过水效果。

**关键词:**耦合模型; 特殊边界; 非结构网格; 干湿水深; 青铜峡河西灌区

中图分类号: TV131.2

文献标志码: A

文章编号: 1006-7647(2016)04-0053-06

**A coupled one- and two-dimensional hydrodynamic model for analysis of levee-breach flood and its application//** YUAN Ximin<sup>1</sup>, XUE Wenyu<sup>1</sup>, FENG Guona<sup>2</sup>, LI Changyue<sup>1</sup> (1. State Key Laboratory of Hydraulic Engineering Simulation and Safety, Tianjin University, Tianjin 300072, China; 2. Frontier Technology Research Institute Corporation Limited of Tianjin University, Tianjin 301700, China)

**Abstract:** A coupled one- and two-dimensional hydrodynamic model was developed to simulate the flood wave propagation through the breaches. The Preissmann scheme was used for the one-dimensional model and the Roe scheme on unstructured meshes was used for the two-dimensional model. The special boundaries, such as roads and irrigation ditches, were generalized as broad crested weirs and were linearized. A coupled model with real terrain was established through coupling the unstructured mesh and special boundaries, and the dry and wet depth theory was used to optimize this model. The model was applied to simulation of a levee-breach flood that occurred in the West Irrigation Area of the Qingtongxia Gorge of the Yellow River. The results show that the model can truly simulate the flood wave propagation and flood inundation area in the calculation area, and can simulate the water-blocking effect of roads and irrigation ditches and water-passing effect of bridges and culverts.

**Key words:** coupled model; special boundary; unstructured mesh; dry and wet depth; West Irrigation Area of Qingtongxia Gorge

采用水动力学数值模型来模拟溃堤洪水的演进过程, 不仅可以为防洪预案的制定提供数据来源, 还可以指导洪水调度方案的制定。一维水动力模型通常是将河道划分成若干个断面节点, 通过求解断面节点数据来完成河道洪水的模拟, 具有较高的计算效率和准确性。而水流通过堤防溃决向防洪保护区演进时, 其二维特性使一维模型不再适用, 需利用二维模型进行模拟。但由于一维河道与二维防洪保护区的水位相互影响, 单独计算会使误差增大。为此, 引入一、二维水动力耦合模型, 将河道一维模型与防洪保护区二维模型进行侧向型耦合, 实现一、二维模型间的动量传递, 达到较理想的模拟效果。

近年来, 一、二维水动力耦合模型得到了广泛应用, 有了较大的发展。姜晓明等<sup>[1]</sup>采用基于黎曼近似解的一、二维耦合水动力学模型对松花江干流胖头泡溃堤洪水进行了模拟计算; 田志静等<sup>[2]</sup>根据洪水传播和运动的特性建立了二维水动力模型, 并对沁河高庄段的水流进行了模拟; 付成威等<sup>[3]</sup>利用建立的一、二维耦合水动力模型模拟了谷堆圩蓄滞洪区溃堤洪水的演进过程; 苑希民等<sup>[4]</sup>建立了漫溃堤联算的全二维水动力模型, 并对黄河宁蒙段河道以及两岸的灌区进行了漫溃堤洪水的模拟计算; 张弛等<sup>[5]</sup>将其建立的二维数值模型应用到甘肃舟曲的山洪灾害模拟中, 并采用了基于 leap-frog 有限差分

基金项目: 高等学校学科创新引智计划(B14012)

作者简介: 苑希民(1968—), 男, 教授, 博士, 主要从事防洪减灾及水利信息化等研究。E-mail: yxm300072@163.com

通信作者: 薛文字(1991—), 男, 助理工程师, 主要从事防洪减灾研究。E-mail: xuewenyu0907@163.com

格式的网格流出修正法来保证计算稳定; Dushmanta 等<sup>[6]</sup>采用有限差分法的一、二维耦合模型模拟了渭公河的漫顶洪水演进情况; Liang 等<sup>[7]</sup>采用动态链接库技术,建立二维模型并通过与一维模型进行耦合,模拟了黄河东明段溃堤水流的演进过程;蔡新等<sup>[8-9]</sup>建立了基于元胞自动机的洪水演进模型以及荆江洞庭湖洪水演进数学模型,并对洪水的演进进行了模拟;槐文信等<sup>[10]</sup>建立一、二维水动力学模型对渭河下游河道及洪泛区洪水进行数值仿真模拟;张大伟等<sup>[11-13]</sup>利用耦合模型对溃堤洪水在二维平面区域内的运动情况进行模拟。

一、二维耦合模型模拟洪水演进过程时,保护区内道路、灌渠堤防等特殊边界处理方法的准确性将直接影响到洪水演进的模拟效果。道路与渠堤处的洪水的流态与宽顶堰流较为接近,可将其概化为宽顶堰。采用非结构网格来离散二维计算区域,并将其与特殊边界进行耦联,在耦联处加密剖分网格,同时赋予实际高程,建立具有真实地形的一、二维耦合模型。同时利用干湿边界理论进行优化处理,提高了模型的计算效率及稳定性。

## 1 数值模型

### 1.1 一维水动力学模型

一维河道水流运动的控制方程采用描述明渠非恒定流的圣维南方程组:

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

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \alpha \frac{Q^2}{A} \right) + gA \frac{\partial Z}{\partial x} + gA \frac{|Q|Q}{K^2} = 0 \quad (2)$$

式中: $Q$ 为断面过水流量; $A$ 为过水面积; $x$ 为沿程距离, $t$ 为时间; $q_t$ 为区间来水; $Z$ 为断面水位; $\alpha$ 为动量修正系数; $K$ 为流量模数。

采用四点隐式的 Preissmann 格式对控制方程进行离散<sup>[14]</sup>。

### 1.2 二维水动力学模型

二维平面区域的溃堤洪水可采用 Navier-Stokes 方程沿水深积分的平面二维浅水方程来描述<sup>[15-16]</sup>,其表达式为

$$\frac{\partial \mathbf{U}}{\partial t} + \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial x} + \frac{\partial \mathbf{G}}{\partial y} = \mathbf{S} \quad (3)$$

其中

$$\mathbf{U} = \begin{bmatrix} h \\ hu \\ hv \end{bmatrix} \quad \mathbf{E} = \begin{bmatrix} hu \\ hu^2 + \frac{gh^2}{2} \\ huv \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{G} = \begin{bmatrix} hv \\ huv \\ hv^2 + \frac{gh^2}{2} \end{bmatrix} \quad \mathbf{S} = \begin{bmatrix} 0 \\ gh(S_{ox} - S_{fx}) \\ gh(S_{oy} - S_{fy}) \end{bmatrix}$$

$$S_{ox} = -\partial z_b / \partial x \quad S_{oy} = -\partial z_b / \partial y$$

$$S_{fx} = n^2 u \sqrt{u^2 + v^2} h^{-4/3}$$

$$S_{fy} = n^2 v \sqrt{u^2 + v^2} h^{-4/3}$$

式中: $h$ 为水深; $u$ 、 $v$ 分别为 $x$ 、 $y$ 方向的流速; $S_{ox}$ 为底坡; $S_{fx}$ 、 $S_{fy}$ 分别为 $x$ 、 $y$ 方向上的摩擦阻坡降; $z_b$ 为底高程; $n$ 为 Manning 糙率因数。方程未考虑科氏力和风力的影响。

计算区域的空间离散采用有限体积法,将该区域细分为不重叠的三角形单元,把变量设在单元的中心,对上式在控制体 $V$ 中进行积分:

$$\int_V \frac{\partial \mathbf{U}}{\partial t} dV + \int_V \nabla \cdot \mathbf{F} dV = \int_V \mathbf{S} dV \quad (4)$$

运用 Gauss 原理重写为沿控制体周界的线积分:

$$\Delta \mathbf{U} = -\frac{\Delta t}{A} \sum_{j=1}^4 (\mathbf{F}_j^* \cdot \mathbf{n}_j) \Delta S_j + \frac{\Delta t}{A} \int_V \mathbf{S} dV \quad (5)$$

式中: $\Delta S_j$ 为单元各边长度; $\mathbf{n}_j$ 为单元各边的外法向向量; $A$ 为计算单元的面积; $\mathbf{F}_j^*$ 为通过第 $j$ 边的数值通量; $j$ 为单元边的个数。

采用 Roe 格式对界面通量进行求解:

$$\mathbf{F}^* \mathbf{n} = \frac{1}{2} [ (\mathbf{E}, \mathbf{G})_{\mathbf{R}} \mathbf{n} + (\mathbf{E}, \mathbf{G})_{\mathbf{L}} \mathbf{n} - |\bar{\mathbf{J}}| (\mathbf{U}_{\mathbf{R}} + \mathbf{U}_{\mathbf{L}}) ] \quad (6)$$

式中: $|\bar{\mathbf{J}}|$ 为 Roe 平均的 Jacobian 矩阵,其中 $\mathbf{J} = \partial(\mathbf{F}^* \mathbf{n}) / \partial \mathbf{U}$ , $\bar{\mathbf{J}}$ 矩阵的特征值记为 $\bar{\lambda}_k (k=1, 2, 3)$ ,与之对应的特征向量记为 $\bar{\mathbf{e}}_k (k=1, 2, 3)$ ; $\mathbf{U}_{\mathbf{L}}$ 、 $\mathbf{U}_{\mathbf{R}}$ 分别为界面左右两侧的守恒型变量<sup>[17-19]</sup>。

### 1.3 非结构网格与特殊边界耦联

#### 1.3.1 非结构网格离散

堤坝溃决水流数值模拟常采用结构网格和非结构网格两类网格。结构网格便于组织数据结构,但边界概化痕迹过于明显。非结构网格具有很强的边界适应能力,能够对任意形状和联通区域进行网格剖分,便于控制网格密度,易于修改和调整,更容易获得高质量网格。本文所建立的模型选用任意三角形网格来离散计算区域。

#### 1.3.2 特殊边界概化

计算区域中的道路、灌渠渠堤等线状地物在洪水演进过程中起阻挡作用,影响区域流场。通过实地测量上述地物的地理坐标和高程参数,并将各坐标点用折线连接,从而建立具有真实地形的模型,实现道路、渠堤等特殊边界在非结构网格中的准确定位。道路与渠堤处的洪水流态与宽顶堰流较为接近,可将其概化为宽顶堰(图1),其计算公式为

$$Q = WC(H_{us} - H_w)^k \left[ 1 - \left( \frac{H_{ds} - H_w}{H_{us} - H_w} \right) \right]^{0.385} \quad (7)$$

式中： $Q$  为通过建筑物的流量； $W$  为宽度； $C$  为堰系数，默认值为 1.838； $k$  为堰指数系数，可取 1.5； $H_{us}$  为上游水位； $H_{ds}$  为下游水位； $H_w$  为堰顶高程。

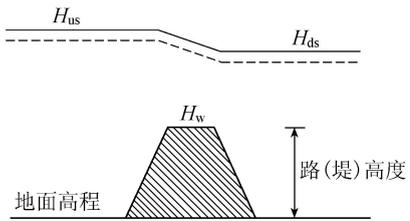


图 1 特殊边界概化示意图

### 1.3.3 几何位置耦联

在实际的计算过程中，实测特殊边界线往往不能与网格边线重合，将与特殊边界线相交的网格边线作为特殊边界的位置实际参与数值计算，由此达到非结构网格与特殊边界的耦联（图 2）。

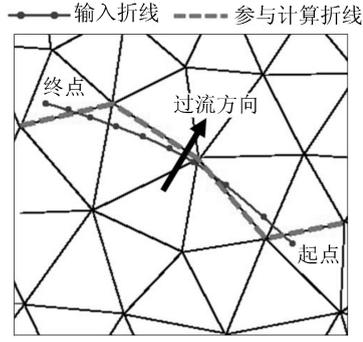


图 2 几何位置耦联示意图

非结构网格与特殊边界耦联，并赋予实际高程，使整个计算区具有真实的地形。当对特殊边界所在区域进行界面通量计算时，存在边界顶部过流与不过流两种情况<sup>[19]</sup>。当边界顶部过流时（图 3(a)）， $H_1 \geq H_3, H_2 < H_4$ ，即边界左侧相邻处网格的计算水位大于或等于边界顶部水位，且网格表面高程小于边界顶部高程时，可直接按照 Roe 格式进行正常求解；

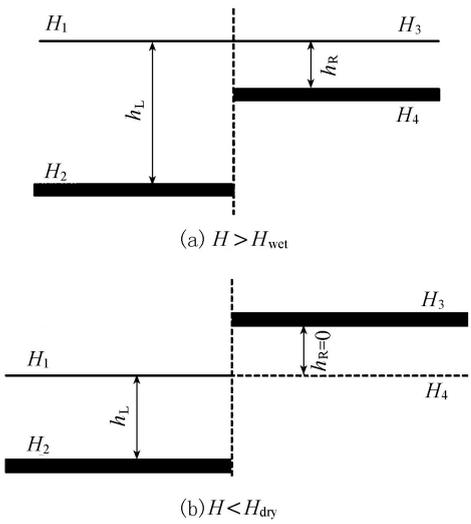


图 3 真实地形过流示意图

当边界顶部不过流时（图 3(b)）， $H_1 < H_3, H_2 < H_4$ ，不能继续按照 Roe 格式进行求解，需特殊处理。此种情况下不存在动量交换，可令  $u = v = 0$ ，并将边界顶部高程降至与网格水位相齐平的位置，以保证计算中水量平衡，此时满足  $H_4 - H_2 = -(h_R - h_L)$ 。

### 1.4 干湿边界

当计算区域处在干湿边交替区时，通过设定干水深  $H_{dry}$  和湿水深  $H_{wet}$ ，可以提高计算效率，避免计算不稳定，干湿边界定义如图 4 所示。设定的干湿水深与洪水深  $H_{flood}$  需满足如下关系： $H_{dry} < H_{flood} < H_{wet}$ 。当网格水深  $H < H_{dry}$  且无湿边时，该网格不参与计算；当网格水深  $H < H_{dry}$ ，有湿边且  $H_{dry} < H < H_{wet}$  时，该网格动量通量设定为零，只计算质量通量；当网格水深  $H > H_{wet}$  时，需同时计算动量通量和质量通量。

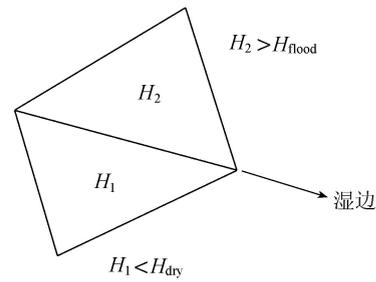


图 4 湿边定义示意图

### 1.5 一维、二维耦合模型计算

河道一维模型与保护区二维模型通过侧向联解进行耦合，耦合方式如图 5 所示。在堤防规模较大的情况下，溃堤洪水的流态与宽顶堰流较为接近，溃口流量可采用宽顶堰公式<sup>[3,6]</sup>计算：

$$Q = \begin{cases} 0.35h_1\sqrt{2gh_1}l_b & \frac{2}{3} \leq \frac{h_2}{h_1} \text{ (自由出流)} \\ 0.91h_2\sqrt{2g(h_1 - h_2)}l_b & \frac{2}{3} > \frac{h_2}{h_1} \text{ (淹没出流)} \end{cases} \quad (8)$$

其中  $h_1 = \max(Z_1, Z_2) - Z_b$   
 $h_2 = \max(\min(Z_1, Z_2) - Z_b, 0)$   
 式中： $Z_1, Z_2$  分别为二维模型在耦合界面处的水位； $Z_b$  为耦合界面的底高程； $l_b$  为溃口的宽度。

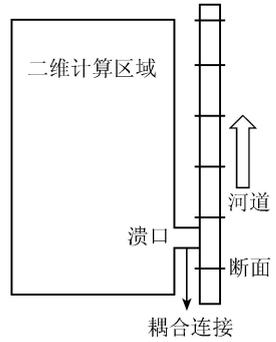


图 5 一、二维模型耦合示意图

计算中,先进行一维模型计算,得到耦合边界上、下游断面的水位,将其传递到二维模型;接着进行二维模型计算,得到耦合边界的流量值,并作为旁侧入流返回一维模型。

## 2 模型应用

### 2.1 模拟区域概况

青铜峡河西灌区地处宁夏北部,黄河上游左岸,为宁夏平原地势最低之处。灌区从南至北,涉及青铜峡市、永宁县、银川市、贺兰县、平罗县和惠农区,总面积4283.8 km<sup>2</sup>。青铜峡市的侯娃子滩险工段位于黄河转弯处,河道主流顶冲左岸,河岸淘刷严重,且堤后分布大量农田,人口密度较大,如若溃堤将会对下游造成较大的淹没影响。故选择河西灌区内青铜峡市、永宁县所在约103 km<sup>2</sup>的灌区作为计算区域进行模拟,溃口位置为侯娃子滩。

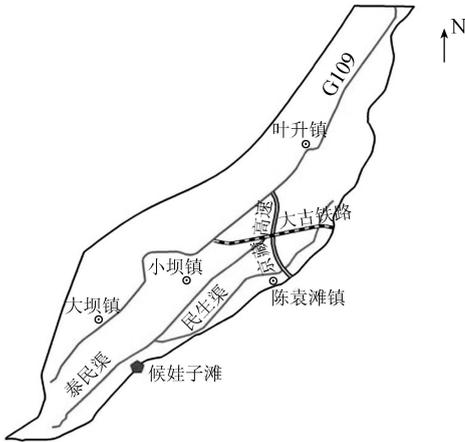


图6 计算区域示意图

### 2.2 模型基本情况及计算条件确定

黄河青石段一维河道模拟范围从青铜峡水文站至石嘴山水文站,河段长192 km,分别以青铜峡水文站和石嘴山水文站为上、下控制边界,利用河道上45个实测大断面建立模型。选取2012年8月实测洪水过程,以叶盛水位站和石坝水位站的实测水位进行参数率定和模型验证。结果显示,水位误差范围为0.004~0.196 m,准确合理。

二维模型模拟面积约为103 km<sup>2</sup>,采用非结构三角形网格进行剖分,网格边长设置为300 m,在道路、渠堤等特殊边界处采用100 m边长的网格加密处理,共剖分网格10149个,节点5247个,采用Kriging法将从DEM中提取的高程数据赋予到计算网格中。

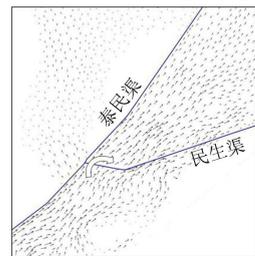
采用2012年实测洪水过程作为典型洪水,按同倍比放大方法获得青铜峡水文站100年一遇的洪水流量过程。一维模型上边界条件为青铜峡站100年一遇设计洪水流量过程,下边界条件为石嘴山站的

水位-流量关系,计算时间步长为30 s,每1 h输出一次计算结果。二维模型中,耦合界面设置为水位边界,其余为固壁边界。堤防溃决时刻确定为河道水位达到堤防设计水位时,水位降落至堤后地面高程时停止分洪,溃决形式为瞬间溃决。通过调查历史溃堤记录,结合河势、河宽及水头差等因素确定溃口宽度为100 m。按照土地利用情况进行糙率分区:村庄0.1;农田0.04;湖泊等水域0.035。设置干湿边界条件:干水深0.005 m,湿水深0.09 m。模型计算时间步长为30 s。

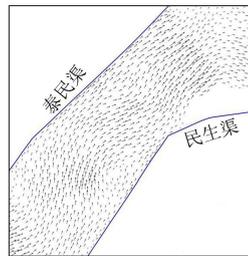
模拟区域内的特殊边界主要有京藏高速、G109、大古铁路、泰民渠和民生渠,通过实地勘察测量获取道路、桥涵、灌渠的地理坐标及高程参数,根据过水桥涵的位置将道路分段,将数据输入模型中,建立起具有真实地形的模拟区域。

### 2.3 计算结果分析

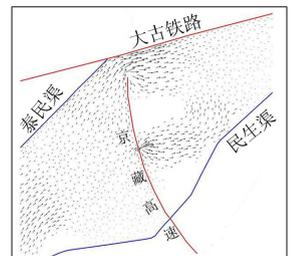
图7为线状地物及桥涵影响下的流场,其中图7(a)中上游的水位大于民生渠和泰民渠的渠堤,洪水漫过渠堤向下游演进。图7(b)中洪水水位小于民生渠和泰民渠的渠堤,堤顶未过流,洪水沿两条灌渠的渠堤之间向下游演进。由图7(c)可见京藏高速桥涵具有明显的过水效果。



(a) 线状地物顶部过流



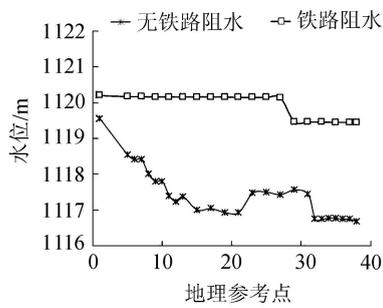
(b) 线状地物阻水



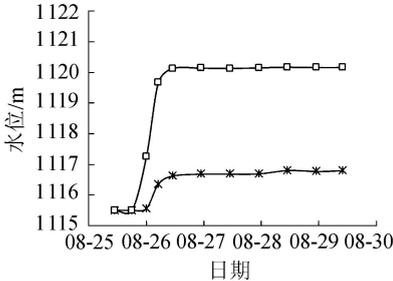
(c) 道路桥涵过水

图7 线状地物及桥涵影响下流场分布

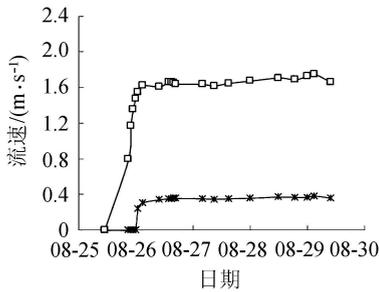
以大古铁路为例,对做了特殊边界处理及未做特殊边界处理两种情况的水位及流速过程进行对比,以说明模拟的效果。图8(a)为溃堤洪水分洪结束时刻,大古铁路各地理参考点的水位值,由该图可知,由于铁路的阻水作用使路前的洪水不再继续向下游演进,处理后水位较处理前高。图8(b)为大古铁路上某点水位过程,由该图可知,由于铁路的阻水作用,处理后的水位较处理前高。图8(c)为大古铁



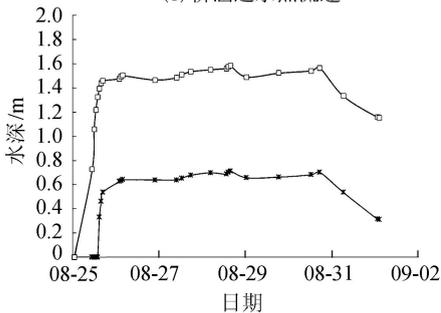
(a) 铁路各参考点水位



(b) 铁路固定点水位



(c) 桥涵过水点流速



(d) 桥涵阻水点水深

图8 特殊边界水位及流速对比

路上某过水桥洞内某点流速过程,由该图可知,由于桥洞两侧铁路的阻水作用,处理后的流速较处理前高。道路上虽然存在过水桥涵,但过水能力有限,除部分洪水通过桥涵演进至下游外,其余洪水不能通过,在桥涵处发生明显的雍水现象,水深逐渐增加,由图8(d)的水深对比可知,桥涵也具有阻水的作用。由此可见,做了特殊边界处理后,模拟效果更具真实性,计算精度更高。

图9为溃堤洪水在不同时刻的淹没水深图,由图9可以看出,在侯娃子滩险工段发生溃堤以后,洪水迅速进入河西灌区,形成了较大的淹没范围,淹没面积达74.76 km<sup>2</sup>,最终积水量0.427亿 m<sup>3</sup>,受灾人口2.82万人,其中农田淹没面积2335.23 hm<sup>2</sup>,房屋淹

没面积497.21万 m<sup>2</sup>,受影响GDP为93089.37万元。在模拟的整个淹没过程中,大坝镇、陈袁滩镇和叶升镇受灾较严重。

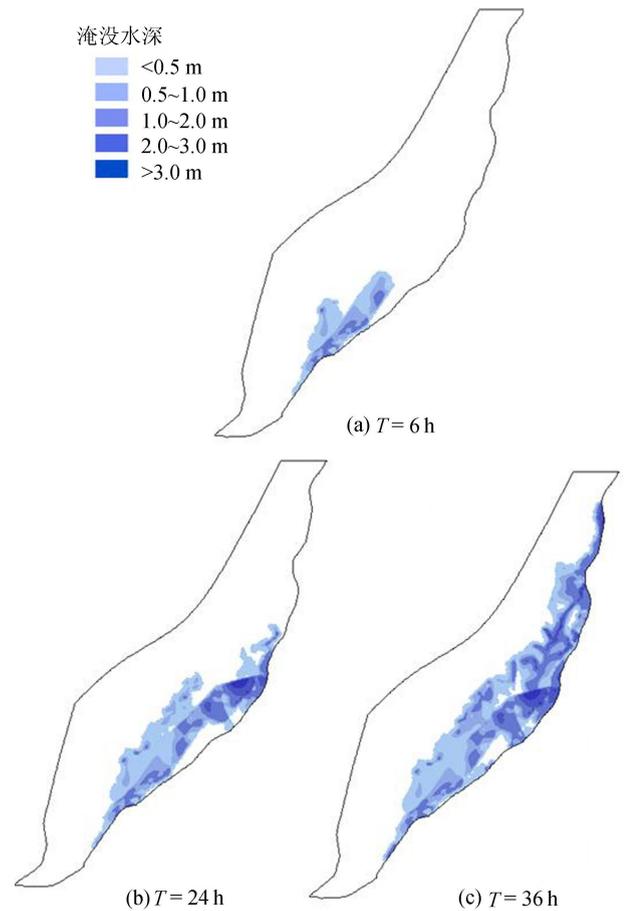


图9 青铜峡河西灌区模拟洪水淹没水深

### 3 结 语

将一维与二维水动力模型进行耦合,对计算区内溃堤洪水的演进过程进行模拟。计算区域内道路、渠堤等建筑物在洪水演进过程中起阻挡作用,对区域洪水的演进影响较大。为获得较为真实的模拟效果,将道路、渠堤等特殊边界概化为宽顶堰,并将特殊边界与非结构网格耦联,建立了具有真实地形的溃堤洪水模型。采用干湿边界理论对模型进行优化,提高了计算效率。将建立的模型应用于青铜峡河西灌区,对可能发生溃堤的洪水进行模拟,结果表明模型对灌区内道路、渠堤等建筑物阻水,以及桥涵过水拥有良好的模拟效果,可有效模拟溃堤洪水的实际演进过程。

### 参考文献:

[1] 姜晓明,李丹勋,王兴奎. 基于黎曼近似解的溃堤洪水一维-二维耦合数学模型[J]. 水科学进展,2012,23(2): 214-221. (JIANG Xiaoming, LI Danxun, WANG Xingkui. Coupled one-and two-dimensional numerical

- modeling of levee-breach flows using the Godunov method [J]. *Advances in Water Science*, 2012, 23(2): 214-221. (in Chinese)
- [2] 田志静,冯民权,赵明登. 沁河高庄段洪水漫堤二维模拟. [J]. *武汉大学学报(工学版)*, 2013, 46(4): 414-422. (TIAN Zhijing, FENG Minquan, ZHAO Mingdeng. 2D simulation of dike overtopping in Gaozhuang Reach of Qinhe River [J]. *Engineering Journal of Wuhan University*, 2013, 46(4): 414-422. (in Chinese))
- [3] 付成威,苑希民,杨敏. 实时动态耦合模型及其在洪水风险图中的应用[J]. *水利水运工程学报*, 2013(5): 32-38. (FU Chenwei, YUAN Ximin, YANG Min. A real-time dynamic coupling model for flood routing and its application to flood risk charting [J]. *Hydro-science and Engineering*, 2013(5): 32-38. (in Chinese))
- [4] 苑希民,田福昌,王丽娜. 漫溃堤洪水联算全二维水动力模型及应用. [J]. *水科学进展*, 2015, 26(1): 83-90. (YUAN Ximin, TIAN Fuchang, WANG Lina. Comprehensive two-dimensional associate hydrodynamic models for overflow and levee-breach flood and its application [J]. *Advances in Water Science*, 2015, 26(1): 83-90 (in Chinese))
- [5] 张弛,张家华,王浩. 基于网格流出修正法的山洪演进数值模拟. [J]. *河海大学学报(自然科学版)*, 2014, 42(2): 107-113. (ZHANG Chi, ZHANG Jiahua, WANG Hao. Numerical simulation of flash flood routing based on grid outflow correction method [J]. *Journal of Hohai University(Natural Sciences)*, 2014, 42(2): 107-113. (in Chinese))
- [6] DUSHMANTA D, JAHANGIR A, KAZUO U, et al. A two-dimensional hydrodynamic model for flood inundation simulation; a case study in the Lower Mekong River Basin [J]. *Hydrological Progresses*, 2007, 21(9): 1223-1237.
- [7] LIANG D, FALCONER R A, LIN B. Linking one-and two-dimensional model for free surface flows [J]. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Water Management*, 2007, 160(3): 145-151.
- [8] CAI Xin, LI Yi, GUO Xingwen, et al. Mathematical model for flood routing based on cellular automaton [J]. *Water Science and Engineering*, 2014, 7(2): 133-142.
- [9] XIE Zuotao, YANG Fangli, FU Xiaoli. Mathematical model for flood routing in Jingjiang River and Dongting Lake network [J]. *Water Science and Engineering*, 2012, 5(3): 259-268.
- [10] 槐文信,赵振武,童汉毅,等. 渭河下游河道及洪泛区洪水演进的数值仿真(1): 数学模型及其验证 [J]. *武汉大学学报(工学版)*, 2003, 36(4): 10-14. (HUAI Wenxin, ZHAO Zhenwu, TONG Hanyi, et al. Numerical simulation on flood in downstream of Weihe River and flooded area (I): Mathematic model and its calculation method. [J]. *Engineering Journal of Wuhan University*, 2003, 36(4): 10-14. (in Chinese))
- [11] 张大伟,李丹勋,陈雅聪,等. 溃堤洪水的一维、二维耦合水动力模型及应用 [J]. *水力发电学报*, 2010, 29(2): 149-154. (ZHANG Dawei, LI Danxun, CHEN Zhicong, et al. Coupled one-and two-dimensional hydrodynamic models for levee-breach flood and its application [J]. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2010, 29(2): 149-154. (in Chinese))
- [12] 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: 228-243.
- [13] 陈文龙,宋利祥,刑领航,等. 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, 25(6): 848-855. (CHEN Wenlong, SONG Lixiang, XING Linghang, et al. A 1D-2D coupled mathematical model for numerical simulating of flood routine in flood protected zone [J]. *Advances in Water Science*, 2014, 25(6): 848-855. (in Chinese))
- [14] 汪德燿. 计算水力学理论及应用 [M]. 南京:河海大学出版社, 1989.
- [15] 赖锡军,李纪人. 洪水淹没范围数据与动力学模型的融合 [J]. *河海大学学报(自然科学版)*, 2009, 37(5): 529-533. (LAI Xijun, LI Jiren. Assimilation of flood extent data into hydrodynamic model [J]. *Journal of Hohai University(Natural Sciences)*, 2009, 37(5): 529-533. (in Chinese))
- [16] 贲鹏,虞邦义,倪晋,等. 淮河干流正阳关至吴家渡段水动力数学模型及应用 [J]. *水利水电科技进展*, 2013, 33(5): 42-46. (BEN Peng, YU Bangyi, NI Jin, et al. Development and application of hydrodynamic model in the main reach of Huaihe River from Zhengyangguan to Wujiadu [J]. *Advances in Science and Technology of Water Resources*, 2013, 33(5): 42-46. (in Chinese))
- [17] MURILLO J, BURGUETE J, BRUFAU P, et al. Coupling between shallow water and solute flow equations; analysis and management of source terms in 2D [J]. *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, 2005, 49(3): 267-299.
- [18] 刘刚,金生. 基于修正 Roe 格式的有限体积法求解二维浅水方程 [J]. *水利水运工程学报*, 2009(3): 29-33. (LIU Gang, JIN Sheng. Finite volume model for the 2D shallow water equations using modified Roe scheme [J]. *Hydro-Science and Engineering*, 2009(3): 29-33. (in Chinese))
- [19] 张大伟,王兴奎,李丹勋. 建筑物影响下的堤坝溃决水流数值模拟方法 [J]. *水动力学研究与进展*, 2008, 23(1): 48-54. (ZHANG Dawei, WANG Xingkui, LI Danxun. Numerical modeling of dam-break flow under the influence of buildings [J]. *Journal of Hydrodynamics*, 2008, 23(1): 48-54. (in Chinese))

(收稿日期:2015-05-28 编辑:郑孝宇)