

# 溃口宽度和倒灌、退水对防洪保护区 洪水演进的影响

贺新娟, 徐国宾, 苑希民

(天津大学 水利工程仿真与安全国家重点实验室, 天津 300072)

**摘要:** 考虑沟渠倒灌、退水对防洪保护区溃堤洪水演进的影响, 采用有限体积法建立了防洪保护区的二维洪水演进模型, 分别采用二阶 TVD 格式和二阶 Runge-Kutta 方法对计算区域的空间离散和时间离散求解, 定量分析了溃口宽度和沟渠倒灌、退水对防洪保护区洪水演进及淹没范围的影响, 并用水面线平铺得到的淹没线对模型计算淹没范围进行了验证。研究表明: 溃口宽度每增加 50m, 区内蓄洪量相差 8% 左右, 溃口越宽, 水位上涨越高, 但最大水深随时间的变化不明显, 淹没范围的变化率较小, 最大淹没范围相差约 1.8%; 沟渠退水和支流倒灌的作用非常明显, 最大蓄洪量和最大淹没范围相差 60% 以上。与溃口宽度增大相比, 沟渠倒灌、退水会造成更大的淹没损失。

**关键词:** 溃堤洪水; 倒灌; 退水; 溃口宽度; 防洪保护区; 二维洪水演进模型

中图分类号: P333.2

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2016)02-0142-06

## Effect of levee-breach width and water intrusion and recession on flood routine in flood protected zone

HE Xinjuan, XU Guobin, YUAN Ximin

(State Key Laboratory of Hydraulic Engineering Simulation and Safety, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

**Abstract:** The paper built 2D model by using finite volume method (FVM) to analyze the effect of water intrusion and recession on levee-breach flood routine in flood protected zone quantitatively. It solved the space discretization and time discretization of calculation region by second-order TVD format and second-order Runge-Kutta method, and quantitatively analyzed the influence of water intrusion and recession on levee-breach flood routine and immerse scope in flood protected zone. The calculated submerged scope of the model is verified. The results show that when the levee-breach width increase 50 meters the flood storage quantity of flood protected zone decreases 8 percent. With the increase of breach width, the water level rises, but the maximum water depth does not change significantly with change of time. The change rate of submerged area is less, and the largest submerged area differs by 1.8%. The effect of water intrusion and recession is very obvious, the difference between the maximum flood volume and maximum submerged area is more than 60%. Water intrusion and recession will cause greater flood losses compared with the increase of levee-breach width in flood protected zone.

**Key words:** levee-breach flood; intrusion; recession; levee-breach width; flood protected zone; 2D flood routing model

随着城市化进程加快, 防洪保护区内的人口和财富越来越集中。而另一方面, 由于河流来水来沙条件的变化, 加上两岸开发建设, 造成河道淤积, 导致河道过流能力减弱, 洪水行进不畅, 呈现出高水

位、大流量持续时间长的河道洪水演进特点。这种洪水容易侵蚀甚至冲决堤防, 危害极其严重。因此, 研究堤防溃决以及防洪保护区内的洪水演进过程, 分析溃堤洪水淹没范围、最大水深和蓄洪量等特性,

收稿日期: 2015-09-18; 修回日期: 2015-10-20

基金项目: 国家自然科学基金创新研究群体科学基金项目 (51321065)

作者简介: 贺新娟 (1990-), 女, 山东滨州人, 硕士研究生, 主要从事河流动力学及防洪减灾方面的研究。

通讯作者: 徐国宾 (1956-), 男, 河北石家庄人, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事河流动力学及河床演变方面研究。

对于防洪减灾具有重要意义。

在求解圣维南方程组基础上建立水动力学模型,是目前最常用的洪水模拟方法。对于防洪保护区或蓄滞洪区内的洪水演进,多采用二维和一维、二维耦合模型进行数值模拟,可以很好地反映洪水要素在平面范围的分布。刘树坤等<sup>[1]</sup>用有结构网格和显格式差分法对小清河分洪区内的洪水演进过程进行了模拟计算;郭凤清等<sup>[2]</sup>基于蓄洪区洪水演进特点,构建了基于 MIKE21 FM 模型的蓄洪区洪水演进数值模型;张大伟等<sup>[3]</sup>采用非结构化的有限体积法以 HLL 格式的近似 Riemann 解为基础建立了具有实际地形的溃堤水流二维模型;苑希民等<sup>[4]</sup>根据全二维气相色谱理论,建立了考虑溃口线性展宽的河道——灌区漫溃堤洪水联算全二维水动力模型;Morales - Hernandez 等<sup>[5]</sup>、李大鸣等<sup>[6]</sup>、陈文龙等<sup>[7]</sup>分别基于有限体积法、堰流公式的水量守恒法、数值通量法等建立一维、二维耦合模型研究河道、分(滞)洪区的洪水演进。上述溃堤洪水演进模型均未考虑分(滞)洪区内支流倒灌和沟渠退水等对溃堤洪水演进的影响,本文借鉴水库支流倒灌模型<sup>[8]</sup>、干流倒灌支流模型<sup>[9]</sup>、灌区退水模型<sup>[10]</sup>等研究,以黄河宁夏段青铜峡河东防洪保护区为研究对象,考虑到黄河宁夏段干流发生溃堤洪水时,沿黄穿堤建筑物处易发生洪水倒灌现象,采用有限体积法建立防洪保护区的二维洪水演进模型,分别采用二阶 TVD 格式和二阶 Runge - Kutta 方法对计算区域进行空间和时间离散求解,真实表达大洪水发生时防洪保护区内溃堤洪水演进情况,定量分析溃口宽度以及沟渠倒灌、退水对防洪保护区洪水演进及淹没范围的影响,为防洪减灾提供决策依据。

## 1 二维洪水演进模型建立

### 1.1 基本控制方程

连续方程:

$$\frac{\partial H}{\partial t} + \frac{\partial M}{\partial x} + \frac{\partial N}{\partial y} = q \quad (1)$$

动量方程:

$$\frac{\partial M}{\partial t} + \frac{\partial(uM)}{\partial x} + \frac{\partial(vM)}{\partial y} = -gH \frac{\partial Z}{\partial x} - g \frac{n^2 u \sqrt{u^2 + v^2}}{H^{1/3}} \quad (2)$$

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial(uN)}{\partial x} + \frac{\partial(vN)}{\partial y} = -gH \frac{\partial Z}{\partial y} - g \frac{n^2 v \sqrt{u^2 + v^2}}{H^{1/3}} \quad (3)$$

式中:  $H$  为水深,  $m$ ;  $q$  为连续方程中的源汇项;  $M$  与  $N$  分别为  $x$  和  $y$  方向的垂向平均单宽流量,  $m^3/(s \cdot m)$ ;  $u$  和  $v$  分别为垂向平均流速在  $x$  与  $y$  方向的分量,  $m/s$ ;  $n$  为曼宁糙率系数,  $s/m^{1/3}$ ;  $g$  为重力加速度,  $m/s^2$ 。

### 1.2 模型求解方法

二维模型计算区域的空间离散采用有限体积法,细分为不重叠的三角形单元。上述方程的通用形式可以写为:

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

式中:  $U$  为守恒型物理向量;  $F$  为通量向量;  $S$  为源项。

对方程(4)的第  $i$  个单元积分,并应用 Gauss 原理可得出:

$$\int_D \frac{\partial U}{\partial t} dA + \oint_L (F \cdot n) ds = \int_D S dA \quad (5)$$

式中:  $D$  为单元面积;  $L$  为单元边界;  $ds$  为沿边界的积分向量。

分别使用单点求积法和中点求积法计算面积和边界积分,式(5)可以改写为:

$$\frac{\partial U_i}{\partial t} D + \sum_{j=1}^3 F_{ij} \Delta L_{ij} = S_i D \quad (6)$$

式中:  $U_i$  和  $S_i$  为第  $i$  个单元  $U$  和  $S$  的平均值;  $\Delta L_{ij}$  为第  $i$  个单元第  $j$  条边长度。

为避免数值振荡,二维模型使用了二阶 TVD 格式空间离散求解。时间离散采用二阶 Runge - Kutta 方法。具体求解过程参见文献[11-13]。

### 1.3 网格剖分及特殊问题的处理

计算区域采用不规则网格剖分,最大面积不大于  $0.05 \text{ km}^2$ 。考虑到道路、堤防、灌渠、沟渠等延伸较长建筑物的阻水作用,以及桥、过水涵洞等对水流形态的影响,对其进行单独的网格剖分和局部加密处理,适当调整网格节点位置,增减网格单元,保证相邻网格平滑过渡连接,提高模型计算的精确度。

### 1.4 模型参数设置

1.4.1 干湿水深及初始条件 基于干、湿水深通量计算理论,定义一个淹没边界。以单元 a 为例,有单元面 1、2 和 3 与单元 b、c、d 相连,单元面 2 被定义为淹没边界,如图 1 所示。每个网格单元的单元面和水深都会被监测以确定淹没边界,进而定义干、半干和湿单元,见表 1。对于二维平面区域,设定每个网格干水深  $H_{dry}$  为  $0.005 \text{ m}$ ,淹没水深  $H_{flood}$  为  $0.05 \text{ m}$ ,湿水深  $H_{wet}$  为  $0.1 \text{ m}$ ,溃口处、倒灌口处和退水口处初始水深为  $0.1 \text{ m}$ 。在每步计算前模型都将自动



位置的黄河断面水位作比较,曲线见图5,当黄河断面水位小于沟口计算水位时,倒灌/退水沟渠发生退水;当黄河断面水位大于沟口计算水位时,倒灌/退水沟渠发生倒灌。由图5(a)和5(b)分析可知模型稳定后清水沟口计算水位大于黄河断面水位,苦水河口的计算水位小于黄河断面水位,因此,清水沟处于退水状态,苦水河处于倒灌状态。

表3 计算方案设置情况

| 方案          | 计算洪水 | 溃口   | 倒灌/退水沟渠有无 |     | 其他 |
|-------------|------|------|-----------|-----|----|
|             |      | 宽度/m | 清水沟       | 苦水河 |    |
| 方案1         |      | 50   | 有         | 有   |    |
| 方案2         |      | 150  | 有         | 有   |    |
| 方案3黄河上游100年 |      | 200  | 有         | 有   |    |
| 方案4一遇洪水     |      | 250  | 有         | 有   | 相同 |
| 方案5         |      | 200  | 有         | 无   |    |
| 方案6         |      | 200  | 无         | 无   |    |

注:倒灌/退水沟渠有无是指倒灌/退水沟口处是否为开边界。

根据图3和图4淹没水深分布图直观显示来看,在不同的淹没水深分级标准下,淹没范围均是方案4>方案3>方案2>方案1,溃口宽度越大,淹没范围越大;淹没范围方案3>方案5,方案6>方案5,说明清水沟和苦水河的倒灌/退水作用对防洪保护区洪水演进作用明显,对不同溃口宽度和倒灌、退水对防洪保护区洪水演进及淹没范围的影响见下文详细分析。

2.4 计算成果分析

2.4.1 溃口宽度对洪水演进及淹没范围影响分析

溃口宽度为50、150、200和250m时,防洪保护区的蓄洪量、最大水深、淹没范围随时间的变化分别见图6(a)、6(b)、6(c)。

对比分析不同溃口宽度的结果(图3和6所示)可知:

(1)溃口宽度为50、150、200和250m时,防洪

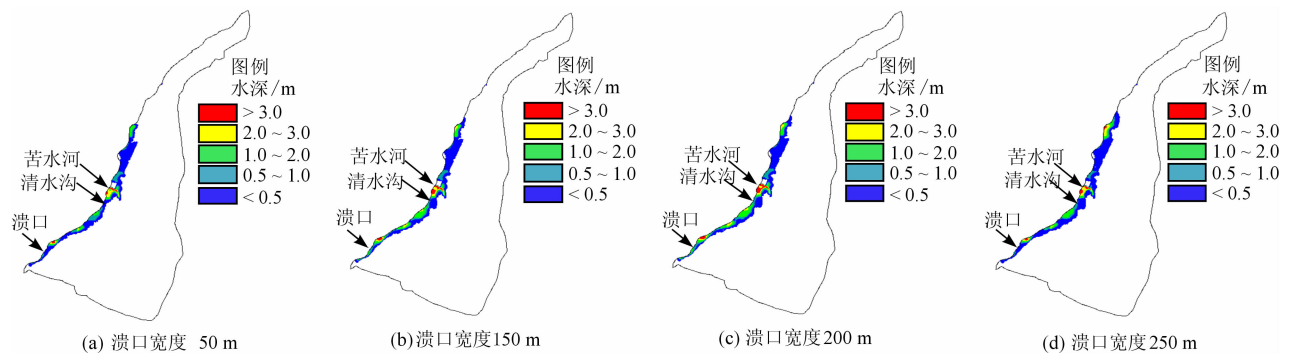


图3 不同溃口宽度的淹没水深分布

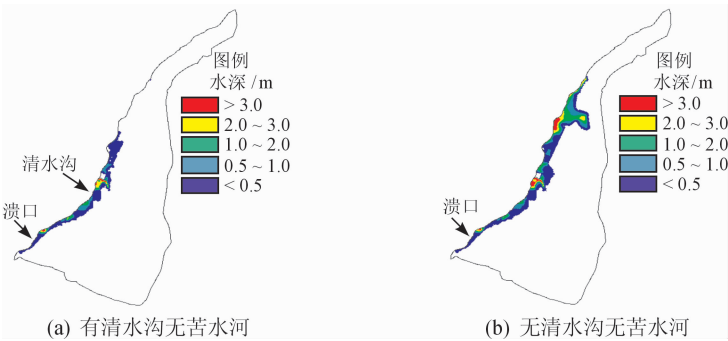


图4 倒灌、退水对洪水演进影响的水深分布

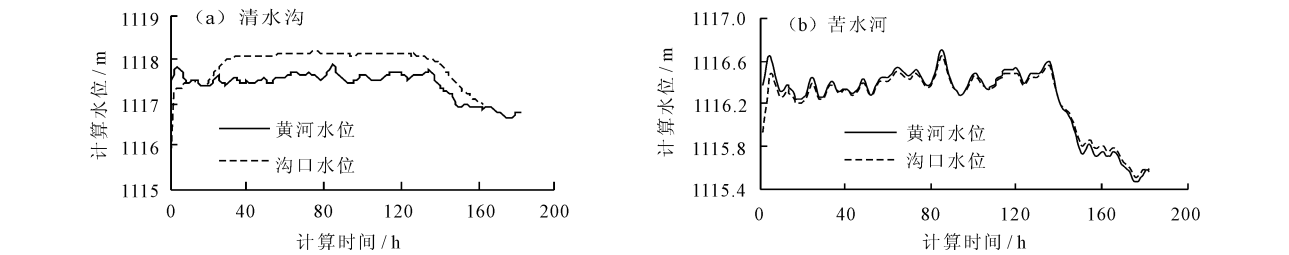


图5 倒灌/退水口水位变化过程曲线

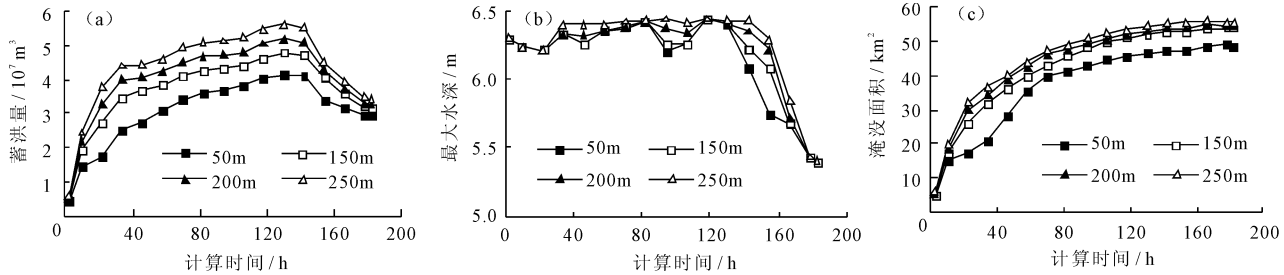


图6 不同溃口宽度时蓄洪量、最大水深、淹没范围随时间的变化

保护区的蓄洪量、最大水深和淹没范围随时间的变化趋势一致,对某一溃口宽度而言,随着溃口处的入流量逐渐增大至洪峰流量然后衰退以及退水沟的作用,防洪保护区的蓄洪量逐渐增大,在130~140 h之间达到最大值后逐渐减小;在溃口处的入流量到达洪峰之前,保护区的最大水深随时间的变化不大,洪峰过后,最大水深下降约1 m;淹没范围先随时间快速增大,然后上升缓慢,最后趋于稳定。

(2)对比不同溃口宽度结果,溃口越宽,进入防洪保护区的流量越大,防洪保护区的蓄洪量越大,溃口宽度相差50m时,蓄洪量相差8%,最大蓄洪量相差约400万m<sup>3</sup>;溃口宽度越宽,水位上涨越高,但最大水深随时间的变化不明显;溃口宽度越宽,防洪保护区的淹没范围越大,溃口宽度250 m时的淹没范围和溃口宽度50 m时最大相差15.69 km<sup>2</sup>,除溃口宽度50 m时防洪保护区的淹没范围与其他方案相差较大之外,150、200和250 m溃口宽度的淹没范围的变化率较小,最大淹没范围相差1.8%。

2.4.2 沟渠倒灌、退水对洪水演进及淹没范围影响

分析 分析沟渠倒灌、退水对洪水演进及淹没范围的影响,设置了3种方案,即方案3、5和6,计算结果见图4和7。对比分析方案3和5可知:从整个演进过程来看苦水河的倒灌洪水对区内洪水演进的影响明显,最大蓄洪量相差28%,约1470万m<sup>3</sup>;最大水深相差0.2 m左右;最大淹没范围相差38%,约22.03 km<sup>2</sup>。但是在分洪历时介于150~170 h之间时,由于溃堤洪水和倒灌洪水的相互作用,通过提取苦水河口的水位和黄河断面的计算水位(见图5(b))比较可知,苦水河的状态由倒灌变为了退水,使得分洪历时在166 h左右时,个别位置的最大水深出现方案5反而大于方案3的情况。

对比分析方案5和6可知:方案5和6计算的最大蓄洪量相差67%,约7530万m<sup>3</sup>,最大水深相差约0.8 m,最大淹没范围相差63%,约57.77 km<sup>2</sup>,而溃口宽度每增加50 m时,最大蓄洪量相差8%,最大水深相差0.1 m,最大淹没范围相差1.8%,充分说明与溃口宽度增大相比,清水沟的退水对区内洪水演进的影响非常显著。

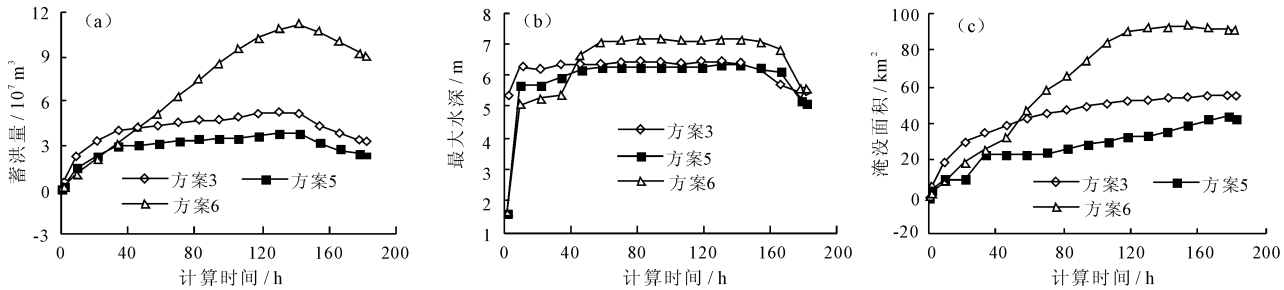


图7 3种方案下蓄洪量、最大水深、淹没范围随时间的变化

3 模型验证

3.1 水量平衡分析

为了检验模型计算是否满足水量平衡,分别统计各开边界的进(出)水量与保护区内蓄水量过程,如图8所示,图8中保护区进出水量为各开边界进出水量的差值,从统计结果来看,保护区进出水量与区内蓄

洪量过程吻合一致,水量的误差控制在0.015%,充分证明本次模型的计算结果满足水量平衡。

3.2 淹没范围合理性分析

根据资料统计,近30年来,宁夏出现具有代表性的洪水年份为1981年(青铜峡洪峰流量6040 m<sup>3</sup>/s)和2012年(青铜峡洪峰流量3070 m<sup>3</sup>/s)。由于缺乏历史调查的洪水淹没范围,根据水利部审核

通过的黄河干流宁夏段各站设计洪水流量(见表4),以青铜峡水文站和石嘴山水文站作为上下游控制站,计算黄河河道洪水水面线,然后平铺得到保护区的洪水淹没线(图9虚线所示)。

| 水文站 | 各频率设计洪峰流量 / (m <sup>3</sup> · s <sup>-1</sup> ) |        |        |
|-----|-------------------------------------------------|--------|--------|
|     | P = 1%                                          | P = 2% | P = 5% |
| 下河沿 | 6260                                            | 6050   | 5620   |
| 青铜峡 | 6160                                            | 6050   | 5620   |
| 石嘴山 | 6100                                            | 5990   | 5630   |

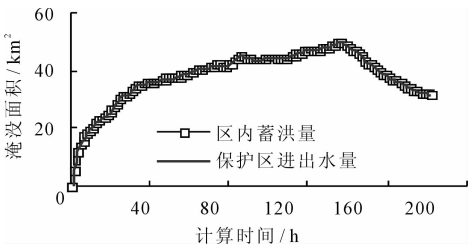


图8 防洪保护区进出水量与蓄洪量过程

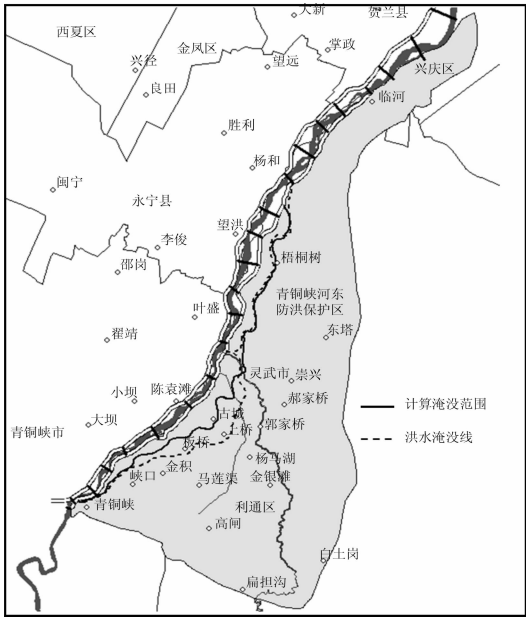


图9 防洪保护区淹没范围比较

图9中实线为方案2的计算结果,计算的淹没范围和平铺得到的洪水淹没线趋势一致,二者吻合效果较好,由于模型计算时清水沟的退水作用明显,苦水河上游防洪保护区计算的淹没范围较平铺得到的洪水淹没线范围小。该模型的计算精度较高,可用于其他防洪保护区洪水演进的数值模拟。

4 结 论

采用有限体积法建立了防洪保护区的二维洪水

演进模型,对倒灌、退水和溃口分洪同时发生的防洪保护区溃堤洪水演进进行数值模拟,模型计算精度较高,严格满足水量平衡。综合分析6种计算方案表明,发生大洪水时,随着溃口宽度增大,防洪保护区的蓄洪量、最大水深、淹没范围增大,但是变化率不大;沟渠退水和支流倒灌对洪水演进的影响非常明显,尤其是清水沟的排水作用对洪水淹没范围影响非常大,与溃口宽度的增大相比会造成更大的淹没损失,甚至会比溃堤洪水带来更大的灾害,因此在制定防汛措施时,沟渠倒灌和退水应当引起足够重视。

参考文献:

[1] 刘树坤,李小佩,李士功,等. 小清河分洪区洪水演进的数值模拟[J]. 水科学进展,1991,2(3):188-193.

[2] 郭凤清,屈寒飞,曾辉,等. 基于 MIKE21 FM 模型的蓄洪区洪水演进数值模拟[J]. 水电能源科学,2013,31(5):34-37.

[3] 张大伟,张超,王兴奎. 具有实际地形的溃堤水流数值模拟[J]. 清华大学学报(自然科学版),2007,47(12):2127-2130.

[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.

[5] Morales-Hernández M, García-Navarro P, Burguete J, et al. A conservative strategy to couple 1D and 2D models for shallow water flow simulation[J]. Computers & Fluids, 2013,81(9):26-44.

[6] 李大鸣,林毅,徐亚男,等. 河道、滞洪区洪水演进数学模型[J]. 天津大学学报(自然科学与工程技术版),2009,42(1):47-55.

[7] 陈文龙,宋利祥,邢领航,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.

[8] 张俊华,马怀宝,王婷,等. 小浪底水库支流倒灌与淤积形态模型试验[J]. 水利水电科技进展,2013,33(2):1-4+25.

[9] 伍超,黄国富,杨永全. 洪水演进中支流倒回灌研究[J]. 四川大学学报(工程科学版),2000,32(4):11-14.

[10] 刘晓岩,刘九玉,张学成,等. 宁夏灌区退水对黄河封河期防凌调度的影响[J]. 人民黄河,2010,32(5):4-7.

[11] 窦红,汪继文. 求解二维浅水方程的一种高分辨率有限体积法[J]. 应用数学与计算数学学报,2006,20(2):83-88.

[12] 宋松和,陈矛章. 二维非结构网格的一个 TVD 型有限体积方法[J]. 航空学报,2001,22(3):244-246.

[13] 刘玉玲,王玲玲,周孝德,等. 二维溃坝洪水波传播的高精度数值模拟[J]. 自然灾害学报,2010,19(5):164-169.