

文章编号:1672-3031(2018)03-0179-06

基于二维网格边元设置河道方法的蓄滞洪区洪水演进分析

喻海军^{1,2}, 吴俊峰³, 吴滨滨^{1,2}, 孙宏图⁴, 马建明^{1,2}, 高佳⁴

(1. 中国水利水电科学研究院, 北京 100038; 2. 水利部防洪抗旱减灾工程技术研究中心, 北京 100038;

3. 河北省水利水电第二勘测设计研究院, 河北 石家庄 050021; 4. 河北省防汛抗旱指挥部办公室, 河北 石家庄 050011)

摘要: 大型蓄滞洪区洪水数值模拟往往涉及众多中小河道, 需要构建一二维耦合水动力学模型。针对传统一二维耦合方式建模及计算效率低的问题, 本文基于二维网格边元设置河道的方法构建了一二维耦合模型; 并选择海河流域大陆泽、宁晋泊蓄滞洪区为典型应用区域, 对该方法进行了应用检验; 同时根据构建好的模型分析了下渗对于蓄滞洪区洪水演进的影响。研究结果表明下渗会显著减小蓄滞洪区洪峰水位, 缩短淹没时间, 在蓄滞洪区实际调度使用中应该考虑下渗的影响; 模型的成功应用表明基于边元设置河道的耦合方式可以有效地计算蓄滞洪区中小河道与地面水流的交互过程, 模型具有较好的应用推广价值。

关键词: 数值模型; 耦合方法; 洪水模拟; 蓄滞洪区; 下渗

中图分类号: TV877

文献标识码: A

doi: 10.13244/j.cnki.jiwhr.2018.03.003

1 研究背景

蓄滞洪区是我国江河防洪体系中的重要组成部分, 是保障重点城市和地区防洪安全, 减轻洪水灾害的有效措施^[1]。蓄滞洪区洪水数值模拟对蓄滞洪区洪水管理、洪水损失评估以及流域洪水调度决策等都具有重要的意义^[2-4]。近年来, 国内外学者在蓄滞洪区洪水数值模拟方面做了大量研究, 取得了丰硕成果。王秀杰等^[5]建立了河道与防洪保护区的全二维动态耦合模型, 实现了宽浅河道与防洪区的无缝衔接, 较好地模拟了水流流态的变化。李大鸣等^[6]采用一二维耦合水动力学模型实现了大清河五洼滞洪区的实时洪水调度分析。Vorogushyn等^[7]采用一维河道、溃堤和二维模型实现了溃堤洪水在蓄滞洪区内的演进模拟, 对德国 Elbe 河蓄滞洪区内的洪灾损失进行了评估。一般来说, 大型蓄滞洪区的洪水模拟一般需要构建一二维耦合模型^[6-7], 但往往由于面积大、河流众多等原因导致模型时效性比较差, 给实时预报分析带来一定的困难, 因而十分有必要研究相对精准且高效的数值模拟方法。本文采用基于二维网格边元上设置河道的方法构建一、二维耦合模型, 并选择海河流域最大的蓄滞洪区大陆泽宁晋泊蓄滞洪区为典型应用区域, 对本文建立的一、二维耦合模型进行了验证与应用, 并分析了下渗因素对蓄滞洪区行洪的影响。

2 模型原理

2.1 一维模型 河道洪水采用一维水动力学模型模拟, 控制方程为一维圣维南方程组:

$$\begin{cases} B \frac{\partial Z}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q \\ \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\alpha Q^2}{A} \right) + gA \frac{\partial Z}{\partial x} + gAS_f = 0 \end{cases} \quad (1)$$

式中: q 为旁侧入流; Q 为流量; B 为水面宽度; Z 为水位; A 为过水面积; α 为动量校正系数; S_f 为

收到日期: 2017-08-04

基金项目: 中国水利水电科学研究院科研专项(JZ0145B222017); 国家重点研发计划资助项目(2017YFC1502706)

通信作者: 喻海军(1988-), 男, 湖北大悟人, 博士, 高级工程师, 主要从事计算水力学及城市水文方向研究。

E-mail: leivi@gmx.com

摩阻比降。

采用基于有限体积法的 Godunov 格式对上述一维圣维南方程组进行离散^[8]。

2.2 二维模型 地表洪水演进采用二维水动力学模型，控制方程采用守恒型的二维浅水方程：

$$\frac{\partial \mathbf{U}}{\partial t} + \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial x} + \frac{\partial \mathbf{G}}{\partial y} = \mathbf{S} \quad (2)$$

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

$$\mathbf{S} = \mathbf{S}_b + \mathbf{S}_f = \begin{bmatrix} 0 \\ gh(S_{ox} - S_{fx}) \\ gh(S_{oy} - S_{fy}) \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中： h 、 u 、 v 、 b 分别为水深、 x 和 y 方向流速、底高程； S_b 是底坡项； S_{ox} 、 S_{oy} 分别是 x 和 y 方向的底坡比降； S_f 是摩阻项； S_{fx} 、 S_{fy} 分别是 x 和 y 方面的摩阻比降。

采用基于有限体积法的 Godunov 格式对上述二维浅水方程组进行离散求解，其中 Riemann 问题采用 Roe 格式的近似解进行计算，底坡源项采用特征分级离散，保证模型的守恒性，阻力源项采用隐式离散提高模型的稳定性，采用 MUSCL 空间重构和两步 Runge-Kutta 法使得模型具有时间和空间二阶精度，所有变量都定义在单元中心^[9-10]。

2.3 模型耦合 一维河道和二维地表水动力模型的水流交互采用边元耦合的方式(如图 1 所示)，即在二维网格边元上设置和建立一维河网模型，网格划分时不考虑河道宽度，因而河道宽度不影响网格单元划分，可以极大的提高网格质量，从而提高模型演算效率。相对于传统分别构建一二维模型，河道范围内不划分网格或者全部采用二维模型计算，河道处进行网格加密等方法，采用边元设置河道来耦合的方式无论从网格划分便捷性还是计算效率来看都得到了极大的提升，特别适用于在计算范围内存在较多对洪水演进有影响的中小河道的情形。

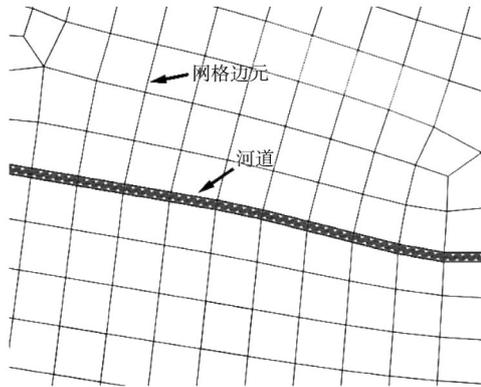


图 1 二维网格边元设置河道示意

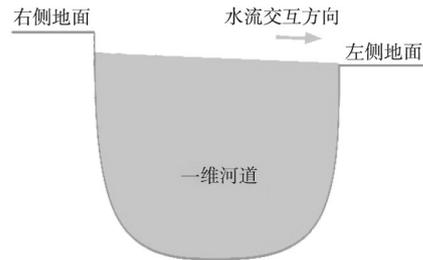


图 2 河道与地面水流交互示意

如图 2 所示，假设某时刻河道与地表网格水量通过侧向交换的方式交换的流量为 Q_l ，采用堰流公式近似计算交换流量的方法如下^[11]：

$$Q_l = \begin{cases} 0.35b_e h_{\max} \sqrt{2gh_{\max}} & \frac{h_{\min}}{h_{\max}} \leq \frac{2}{3} \\ 0.91b_e h_{\min} \sqrt{2g(h_{\max} - h_{\min})} & \frac{2}{3} < \frac{h_{\min}}{h_{\max}} \leq 1 \end{cases} \quad (4)$$

其中： h_{\max} 和 h_{\min} 分别采用下式计算：

$$\begin{aligned} h_{\max} &= \max(Z_r, Z_c) - Z_e \\ h_{\min} &= \min(Z_r, Z_c) - Z_e \end{aligned} \quad (5)$$

式中： Z_u 、 Z_d 分别为堰上、下游水位，分别取河道和二维网格单元的水位值； Z_e 为堰的高程，一般取河堤岸的高程； b_e 为堰的宽度，一般取单元格与河道相连边的边长。

3 模型构建与应用

3.1 区域概况 本文选择典型应用区域大陆泽及宁晋泊蓄滞洪区位于河北省南部(如图3所示)，海河流域子牙河水系支流滏阳河系中游，河北省邢台市东北部，是全国第三大蓄滞洪区，也是海河流域第一大蓄滞洪区和关键防洪工程，总面积约2041 km²，总滞洪量35.52亿 m³，涉及邢台市9个县区，135.27万人。上游河流多处于太行山迎风区，源短、坡陡、流急，洪水突发性、致灾性强。蓄滞洪区内分布有众多中小河流及堤坝，且堰闸、分区滞洪等调度规则复杂，导致一维河道与二维滞洪区洪水演进过程复杂。大陆泽、宁晋泊蓄滞洪区按50年一遇洪水设计，从建国后至今60多年的蓄滞洪区运用情况来看，大陆泽实际运用4次，最高蓄洪水位33.41 m，最大蓄洪水量10.40亿 m³，蓄洪历时57 d；宁晋泊实际运用3次，最高蓄洪水位30.70 m，最大蓄洪水量29.27亿 m³，蓄洪历时60 d。

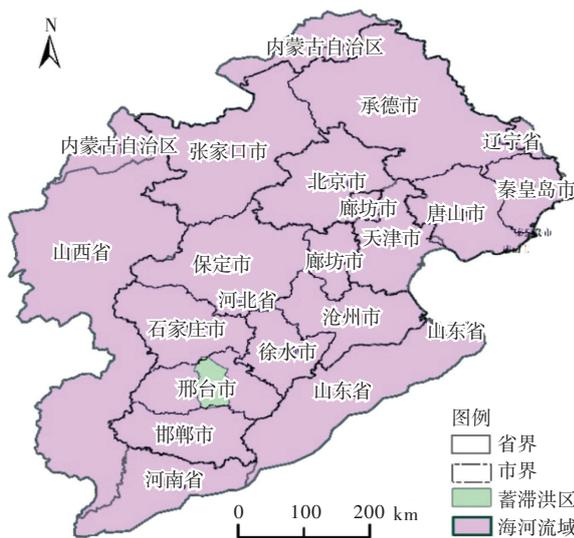


图3 大陆泽宁晋泊蓄滞洪区位置示意

3.2 模型构建

(1)网格划分。采用非结构四边形网格对整个研究区域进行网格剖分，将区域内高速公路、铁路和河流作为内部约束边界，最终共划分成约两万个网格。在网格插值时，将堤防、高速公路、铁路设置成线形阻水建筑物在网格边元上予以考虑，将测量的实际高程作为阻水建筑物的高度，采用堰流公式计算建筑物两侧的过流量。河道糙率取0.025，其它区域糙率取值范围在0.040~0.050之间。基于网格边元设置的河道分布如图4(a)所示，网格局部放大如图4(b)所示。

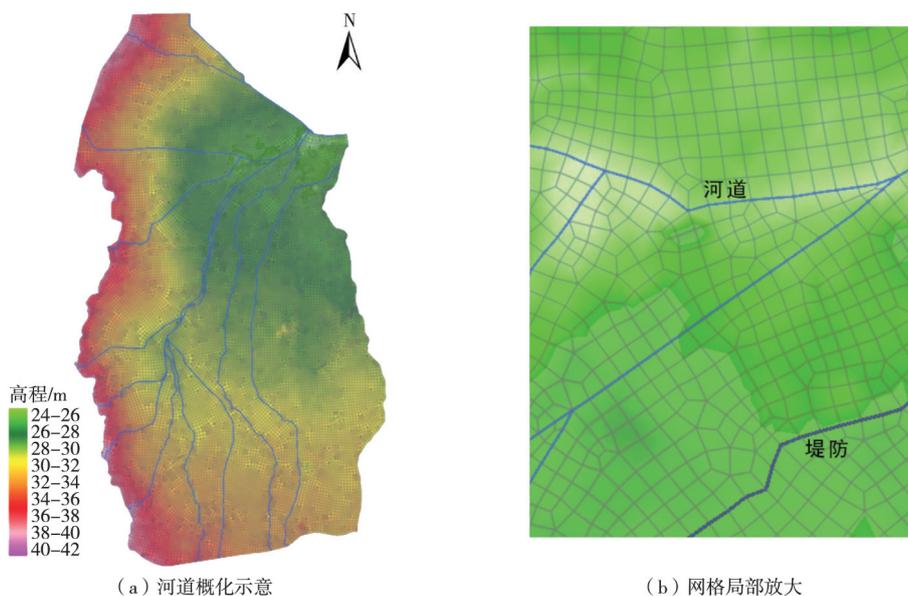


图4 研究区域网格示意

(2)边界条件。研究区域内一共包含滏阳河、留垒河、洺河、南澧河、顺水河(七里河)、牛尾河、马河(白马河、小马河和李阳河)、泚河、午河(洹河)、北沙河(槐河)、小漳河和洹河等12条中小河道。在实际模拟计算时,河道上游入流采用流量边界条件(典型洪水过程如图5所示),下游艾辛庄枢纽的出流采用水位流量关系边界(如图6所示)。

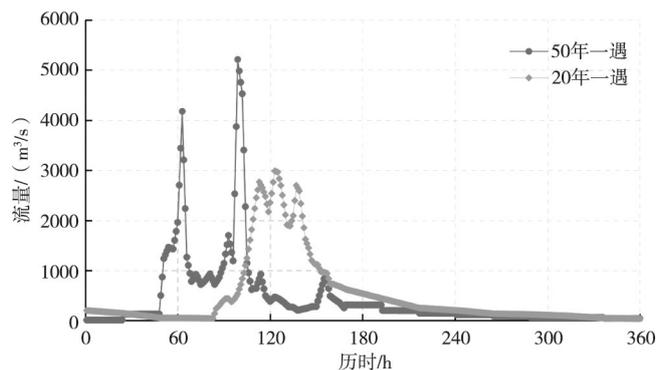


图5 典型洪水过程(洺河20年和50年一遇设计洪水过程)

(3)分区滞洪。大陆泽及宁晋泊蓄滞洪区被滏阳河右堤和小漳河右堤划成3个分区(如图7所示),在实际调度运行中,当分区1的水位达到29.4 m时,由小南堤分洪口门向分区二分洪,当分区二的水位超过29.4 m时由小漳河右堤分洪口门向分区三分洪。模型构建时考虑了蓄滞洪区分区滞洪的调度规则,两个分洪口门则采用溃口的方式进行概化考虑,达到设定的条件($h > 29.4$ m),自动进行分洪。

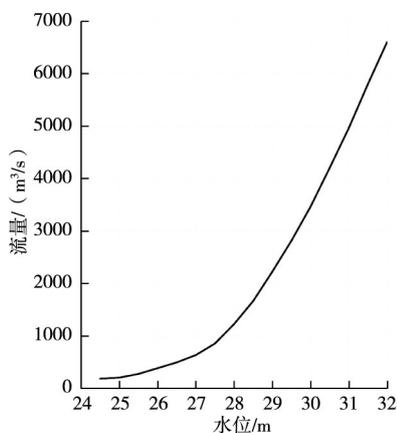


图6 艾辛庄枢纽水位流量关系



图7 分区滞洪示意

(4)模型验证。由于缺乏蓄滞洪区运用的实测数据,无法对构建的模型进行较为准确的率定验证,因而将模型计算结果与《子牙河系防洪规划》(2008年)以及《大陆泽、宁晋泊蓄滞洪区建设与管理可行性研究报告》(2014年)中的模拟结果进行对比分析,以对模型结果合理性进行检验。现状条件下,计算50年一遇洪水,采用位于蓄滞洪区上游的环水村(位于邢台市任县)以及下游艾辛庄两处(位置示意图7)的最高洪水水位进行对比,结果如表1所示。总体上,本次构建的模型与其它研究结果有一定差别,但水位差总体控制在0.15 m以内,表明模型结果是可信的,差别主要来源可能是模型算法和概化方法不完全一样。

表1 模拟结果对比

地点	本次模拟/m	防洪规划/m	研究报告/m
环水村	31.37	31.47	31.34
艾辛庄	29.59	29.48	29.50

3.3 模型应用

大陆泽及宁晋泊蓄滞洪区位于海河流域,属于干旱半干旱地区,近几十年由于地下水长期处于超采状态,地下水位持续下降,导致河道和地表行洪时下渗比较强烈,对洪水演进(如洪峰、洪水淹没时间等)有着重要的影响。由于以往针对大陆泽及宁晋泊蓄滞洪区的研究成果多没有考虑下渗的影响^[3],从洪水调度管理的角度来看,不考虑下渗属于偏安全的做法,存在一定的合理性,但由于蓄滞洪区一旦启用,蓄水时间长,下渗量就相对比较大,其影响不应被忽略。本文着重对比分析了考虑和不考虑下渗情况下,蓄滞洪区洪水演进情况的区别,下渗率取值参考程亮等^[12]在海河流域的研究成果,稳定下渗率取值12.3 mm/h。

图8给出了考虑和不考虑下渗两种情况下遭遇50年一遇洪水淹没范围。从图8中可以看出,在 $t = 50$ h时上下游已经有部分洪水从河道中溢出,但此时淹没深度均较小,随着时间增长,淹没范围

逐渐增大。总体上看,不考虑下渗时,50年一遇洪水需要启用全部的三个分洪区,而考虑下渗时则只需启用第一个分洪区,差别比较明显。分析同一时刻考虑和不考虑下渗两种情况,可以明显看出同一时刻不考虑下渗淹没范围和淹没深度均大于考虑下渗时,而考虑长历时洪水下渗对洪水淹没范围和淹没深度都有较大影响。

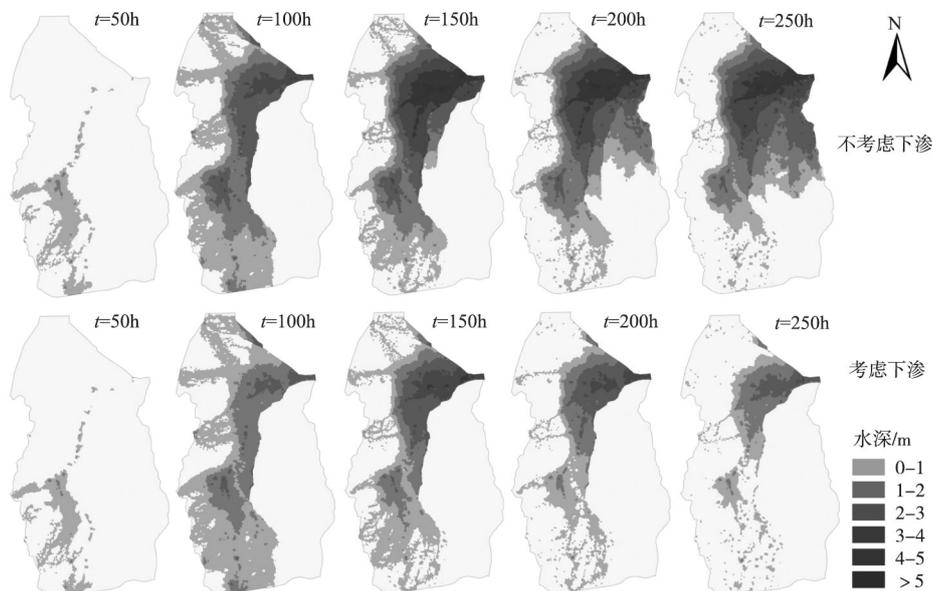


图8 50年一遇不同时刻淹没图

图9给出了20年一遇和50年一遇环水村附近洪水位变化过程。从图9可以看出,考虑下渗时的洪峰值明显小于不考虑下渗时,数值上分别减少了0.42 m和0.41 m,另外,考虑下渗时的退水时间与不考虑下渗时相比分别减少了195 h和296 h。从整个蓄滞洪区来看,以遭遇50年一遇洪水为例,不考虑下渗时蓄滞洪区需要约60 d的时间将洪水基本排尽,考虑下渗时,则只需要约36 d时间,减少了近24 d时间。

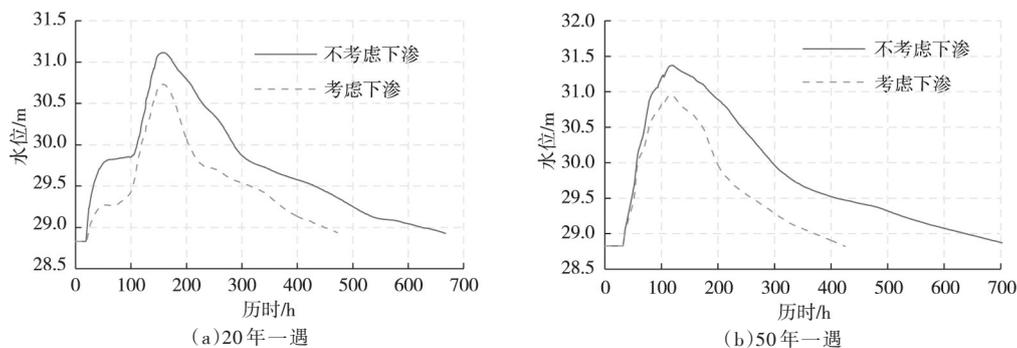


图9 环水村洪水变化过程

4 结论

(1)基于在二维边元设置河道方法,建立了大陆泽及宁晋泊蓄滞洪区二维耦合的地表和河道洪水数值模型,在与其它模型计算结果进行对比验证时,水位差总体控制在0.15 m以内,表明该模型结果是可信的,在此基础上对20年一遇和50年一遇洪水进行了模拟与分析。应用结果表明基于二维边元设置河道的一二维耦合模型能够很好的应用于中小河流较多的蓄滞洪区,具有广阔的应用前景。

(2)对比分析地表下渗对蓄滞洪区洪水的影响可见:考虑下渗作用时,蓄滞洪区50年一遇洪水只需要启用1个分区,而不考虑时则需要启用3个;考虑下渗时退水时间与不考虑下渗时相比也相应减少了近24 d。表明干旱半干旱地区下渗对蓄滞洪区行洪具有较大的影响,在蓄滞洪区实际调度应用

时, 应该考虑下渗因素对洪量减少的影响, 以较好发挥蓄滞洪区的效用。

参 考 文 献:

- [1] 李大鸣, 管永宽, 李玲玲, 等. 蓄滞洪区洪水演进数学模型研究及应用[J]. 水利水运工程学报, 2011(3): 27-35.
- [2] 吴滨滨, 刘凤彩, 喻海军, 等. 大陆泽及宁晋泊蓄滞洪区洪水风险实时分析系统研发[J]. 中国防汛抗旱, 2017, 27(2): 16-22.
- [3] 王晓磊, 韩会玲, 李洪晶. 宁晋泊和大陆泽蓄滞洪区洪水淹没历时及洪水风险分析[J]. 水电能源科学, 2013, 31(8): 59-62.
- [4] 马建明, 喻海军, 张大伟, 等. 洪水分析软件在洪水风险图编制中的应用[J]. 中国水利, 2017(5): 17-20.
- [5] 王秀杰, 王丽娜, 田福昌, 等. 基于时空动态耦合的漫滩、溃堤与防洪保护区洪水联算二维模型[J]. 自然灾害学报, 2015, 24(6): 57-63.
- [6] 李大鸣, 林毅, 周志华. 蓄滞洪区洪水演进一、二维数值仿真及其在洼淀联合调度中的应用[J]. 中国工程科学, 2010, 12(3): 82-89.
- [7] VOROGUSHYN S, LINDENSCHMIDT K E, KREIBICH H, et al. Analysis of a detention basin impact on dike failure probabilities and flood risk for a channel-dike-floodplain system along the river Elbe, Germany[J]. Journal of Hydrology, 2012, 436/437(3): 120-131.
- [8] 耿艳芬, 王志力, 金生. 一维浅水方程的高精度 GODUNOV 格式[J]. 水动力学研究与进展, 2005, 20(4): 507-512.
- [9] WANG Zhili, GENG Yanfen, JIN Sheng. An unstructured finite-volume algorithm for nonlinear two-dimensional shallow water equation[J]. Journal of Hydrodynamics(Ser.B), 2005, 17(3): 306-312.
- [10] WANG Z, GENG Y, LEI Y. Two-dimensional shallow water equations with porosity and their numerical scheme on unstructured grids[J]. Water Science and Engineering, 2013, 6(1): 91-105.
- [11] 喻海军. 城市洪涝数值模拟技术研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2015.
- [12] 程亮, 王宗志, 胡四一, 等. 强烈下渗条件下天然河道洪水演进模拟方法[J]. 中国科学: 地球科学, 2015, 45(2): 207-215.

Application of a new 1D-2D numerical model coupling strategy to flood simulation in flood storage-detention areas

YU Haijun^{1, 2}, WU Junfeng³, WU binbin^{1, 2}, SUN Hongtu, MA Jianming^{1, 2}, GAO Jia^{3, 4}

(1. China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China;

2. Research Center on Flood and Drought Disaster Reduction of the Ministry of Water Resources, Beijing 100038, China;

3. The Second Design and Research Institute of Water Conserancy and Hydropower of Hebei Province, Shijiazhuang 050021, China;

4. Hebei Province Office of Flood Control and Drought Relief Headquarters, Shijiazhuang 050011, China)

Abstract: A 1D-2D coupled hydrodynamic model is often necessary in numerical simulations of large flood storage-detention areas because of the existence of rivers. Aiming at the problem of low computational efficiency of traditional coupling method a coupling strategy that the rivers are generalized on the two-dimensional cell edges is proposed and applied in the Daluze and Ningjinbo a typical flood storage-detention area in Haihe River Basin. The influence of the infiltration on the flood routing is also analyzed based on the calibrated model. The results show that the infiltration will significantly reduce the peak water level and flooding time, and the successful application of the model shows that the present coupling strategy can effectively calculate the flow interaction between river and ground thus having a good potential for popularization.

Keywords: numerical model; coupling method; flood simulation; flood storage-detention district; infiltration

(责任编辑: 李福田)