

基于二维浅水模拟的河道滩地洪水淹没研究

许 栋¹,徐 彬¹,白玉川¹,符传君²,李龙兵²

(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.海南省水文水资源勘测局;海南 海口 570203)

摘 要:提出了一种河道滩地洪水淹没分析的多分辨率处理方法。该方法首先利用有限元数值求解二维浅水方程,模拟河道水流运动,并利用干湿判断处理河道动边界,获得不同流量情况下的河道水面线沿程变化;然后以水面线切割河道滩地高精度 DEM(数字高程)地形,利用图像分割及区域生长法识别陆域和水域。该方法实际应用于南渡江下游河口段的滩地洪水淹没分析,有效将二维浅水模拟的低分辨率网格(10m 精度)和局部滩地高分辨率地形(2m 精度)结合,获得了高精度的淹没范围计算结果。

关键词:二维浅水;数值模拟;淹没范围;动边界

中图分类号:TV122.9

文献标识码:A

文章编号:1000-0852(2015)06-0001-05

1 概述

洪水灾害是我国主要的自然灾害之一。为应对洪水灾害威胁,滨河城市需要对极端水文情况下的洪水淹没情况进行模拟计算,以定量分析洪水风险。淹没范围的确定是洪灾损失评估的核心环节^[1],研究方法可大致分为两类:第一类采用水文学中产汇流理论,如新安江模型,推算洪水流量过程;进而采用简化的一维非恒定流理论计算水位变化,并利用基于格网模型的洪水淹没连通算法等^[2-4],识别、判断水域和陆域,确定淹没范围,这类方法可简称为水文地理信息法;第二类通过数值求解河道水流运动的二维浅水方程,结合动边界处理,直接模拟洪水演进细节,由数值模拟直接获得淹没情况^[5],这类方法可简称为二维水动力法。

随着数值计算方法及地理信息系统(GIS)的快速发展,上述两种方法均在洪水淹没实际问题研究中有着广泛应用。第一类方法充分利用高精度的数字高程(DEM)数据,具有地形、地物的高分辨率,但水文学洪水推算往往对河道真实水面线的计算精度较低,尤其是在河流滩地众多且水流二维特性明显的宽浅河段,淹没范围预测结果不够准确;第二类方法克服了第一类的缺点,通过求解二维浅水方程来更为精准地预测

宽浅河道的水位,但受计算量和时间步长限制,计算网格一般不能够太小,网格空间分辨率受限,且动边界处理往往需要设置截断水深,造成在局部地形复杂的河道滩地处,淹没范围计算精度不够。针对该问题,目前已有将一维、二维模拟耦合改进的探索^[6-7]。

近年来河道水流模拟正在与地理信息系统融合^[1-2,8],高分辨地形数据、三维可视化洪水演进正得到越来越多的应用^[9-11],在该背景下,本文提出河道滩地洪水淹没分析的多分辨率处理方法,即利用二维浅水方程结合动边界模拟河道水流运动,获得空间低分辨率网格背景下的水面线,然后以水面线切割滩地高精度 DEM(数字高程)地形,利用图像分割及区域生长法识别陆域和水域,获得淹没面积的高精度计算结果。作为应用实例,所建模型应用于南渡江下游河口段滩地洪水淹没分析。

2 控制方程及其离散

2.1 河道水流运动的二维浅水方程

连续性方程

$$\frac{\partial Z}{\partial t} + \frac{\partial U h}{\partial x} + \frac{\partial V h}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

运动方程

收稿日期:2014-11-03

基金项目:国家自然科学基金创新研究群体项目(51021004);国家自然科学基金项目(51379144);天津市应用基础与前沿技术研究计划(12JCQN-JC05600, 12JCQNJC02600)

作者简介:许栋(1980-),男,山东单县人,副教授,研究方向为水力学及流体力学。E-mail:xudong@tju.edu.cn

通讯作者:白玉川(1967-),男,山西神池人,教授,研究方向为泥沙运动力学。E-mail:yichbai@tju.edu.cn

$$\frac{\partial U}{\partial t} + U \frac{\partial U}{\partial x} + V \frac{\partial U}{\partial y} = -g \frac{\partial Z}{\partial x} + fV - \frac{gU\sqrt{U^2+V^2}}{C_s^2 h} \quad (2)$$

$$\frac{\partial V}{\partial t} + U \frac{\partial V}{\partial x} + V \frac{\partial V}{\partial y} = -g \frac{\partial Z}{\partial y} + fU - \frac{gV\sqrt{U^2+V^2}}{C_s^2 h} \quad (3)$$

式中: x, y 为空间坐标; t 为时间; Z 为水位; U, V 为流速在 x, y 方向上的分量; h 为水深; f 为柯氏力; g 为重力加速度; C_s 为谢才系数, 取 $C_s = \frac{h^{\frac{1}{6}}}{n}$; n 为糙率。

控制方程采用有限元法进行离散, 为方便模拟复杂河道形态, 网格采用线性三角形单元, 时域离散采用时间分裂的显式差分格式, 详细离散格式见^[12-13]。

控制方程采用有限元法进行离散, 为方便模拟复杂河道形态, 网格采用线性三角形单元, 时域离散采用时间分裂的显式差分格式, 详细离散格式见^[12-13]。

2.2 动边界处理及淹没范围计算

在洪水传播过程中, 河道边界随水流运动而变动, 需要在数值模拟过程中进行动边界处理。处理动边界问题的数值方法主要有窄缝法和干湿判断法两类^[14, 15]。本文采用干湿判断法, 其基本思想是根据某时刻计算节点及相邻单元处的水位、水深等已知结果判断出下一时刻该单元的干湿状态, 对于干出单元作为固壁处理, 即令其法向流速为零。图 1(a) 中圆点代表网格节点 x_{i-1}, x_i, x_{i+1} 处的地形高度, 受二维浅水模型计算量和时间步长限制, 实际计算中网格单元不能够太小, 滩地处地形由周围网格插值获得, 插值后地形如图 1(a) 中粗虚线所示。地形高度全部位于水面以下的单元为“湿单元”, 需进行水流计算; 全部位于水面以上的为“干单元”, 不需计算; 而当单元部分位于水面以下时为“干湿交替单元”, 如图中 (x_i, x_{i+1}) 单元, 计算时首先预测该单元在下一时间步的水深 h , 然后与地形高度比较判断该单元是“干出”(drying) 还是“变湿”(wetting), 干湿边界的具体实施方法参见文献^[16]。值得注意的是, 为保证计算的数值稳定性, 所有参与水流计算的湿单元水深不能小于某一设定的临界水深 h_{cr} , 例如设 $h_{cr} = 0.05\text{m}$ 。通过水流数值模拟, 统计滩地处所有“湿”单元面积, 即可获得特定洪水情况下的淹没范围和面积。然而, 网格大小限制、地形插值处理以及临界水深设置使得河道中缓坡地形滩地的淹没范围模拟精度难以保证。

为了对淹没情况进行更为可靠、精确的描述, 本文提出在动边界水流数值模拟基础上, 利用数值模拟获得的河道整体水面线对滩地高精度三维地形进行切割, 如图 1(b), 并将切割后的地形投影到水平面上, 利用图像分析识别水域和陆域淹没范围, 统计淹

没面积。本文采用基于区域生长的递归算法识别淹没区域, 其基本思想是将具有相同性质的点集合起来构成区域, 此处采用区域生长的八邻域算法, 即区域生长过程中, 搜索点 (i, j) 的左、右、上、下、左上、左下、右上、右下 8 个位置, 相应的点坐标分别为 $(i-1, j), (i+1, j), (i, j-1), (i, j+1), (i-1, j-1), (i-1, j+1), (i+1, j-1), (i+1, j+1)$ 。

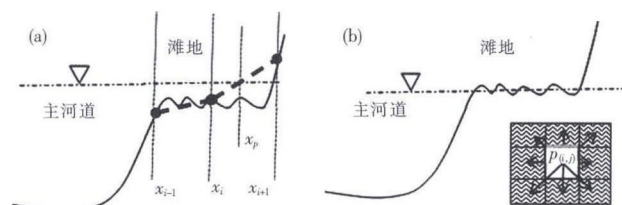


图 1 河道滩地淹没数值模拟

(a) 步骤 1—基于干湿判断的动边界处理

(b) 步骤 2—基于图像分割的淹没区识别

Fig.1 The numerical simulation of river beach submergence

(a) step 1—moving boundary treatment based on dry-wet judgement

(b) step 2—recognition of submerged area based on image segmentation

3 应用实例

本文所建数学模型应用于海南省南渡江下游河口段滩地洪水淹没分析。南渡江河口是典型的潮汐河口, 出海口河流断面宽浅, 滩地众多。随着沿岸社会经济的发展, 南渡江出海口附近大量滩地被无序占用, 使用方式主要包括农田种植、淡水鱼塘养殖等。近年来, 南渡江河口极端潮位、风暴潮及特大暴雨出现的频率呈上升趋势, 洪水淹没风险日益严峻。因此, 迫切需要极端情况下的洪水淹没风险问题进行数值模拟研究。

3.1 计算模型建立及其验证

针对所研究的问题, 选取南渡江自龙塘坝至出海口共长约 28km 的河段进行数值模拟, 计算域如图 2(a)。计算域共剖分三角形网格单元 17 669 个, 节点 9 372 个, 为了重点研究河道分汊点附近重点滩地的淹没情况, 在该河段进行网格局部加密, 见图 2(b)。为便于进行水位、流速、水深数据分析以及河床糙率调整, 在河道中线位置设置控制点 46 个, 用于糙率控制, 见图 2(a)。入口采用流量边界, 出口为潮位边界。计算工况按设计重现期 10 年一遇 ($6\ 255\text{m}^3/\text{s}$) 至 100 年一遇 ($9\ 712\text{m}^3/\text{s}$) 的入口流量与下游不同高潮位遭遇的情况进行组合。

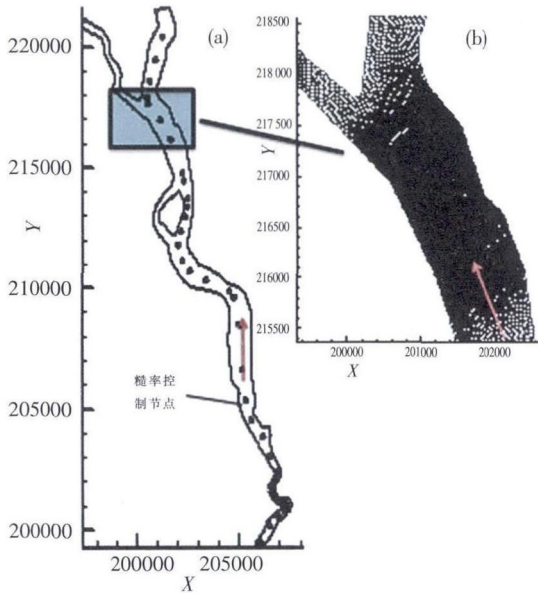


图2 计算域及网格划分(单位:m,海南省坐标系)
Fig.2 The computational domain and mesh (unit of coordination: m, Hainan local coordinates)

3.2 计算结果及分析

数值模拟获得的南渡江下游河道洪水、枯水情况下的典型水深分布如图4。从图中可以看出,在枯水来流与下游低潮位遭遇的情况下 ($Z=0.5m, Q=181m^3/s$),河道上游以及下游滩地附近有部分河床在计算中自动“干出”,变成陆域;而在洪水与下游高潮位遭遇的情况下($Z=3.2m, Q=9712m^3/s$),整个计算域为水域,50%以上的河道水深在6m以上。所建立的干湿判断模型有效重现了河道边界随水位的动态变化。

重点滩地附近的典型流场如图5。从图中可以看出,在枯水来流与下游低潮位遭遇的情况下($Z=0.5m, Q=181m^3/s$),河道下游滩地基本上未被水流淹没,水流绕滩地周围而行。而当流量增大到10年一遇,即 $6255m^3/s$ 时,滩地大部分被淹没,而且受滩地阻力的影响,浅滩部分有回流现象,局部床面阻力对滩地附近流速影响幅度甚大,河道中心线附近流速速率从低流量对应的 $0.1m/s$ 增大到 $1.5m/s$ 。而当流量增大到100年一遇,即 $9712m^3/s$ 时,滩地完全被淹没,河道支流和干流均出现 $2m/s$ 以上较大流速。

为对水流数值模拟结果进行验证,引用海南水文水资源勘测局编制的海南省重要河流2010年10月洪水调查报告相关数据,并采用相应的上游流量和下游水位数据,进行南渡江出海口段河道水流数值计算,计算过程中对糙率系数 n 进行分段控制和率定。率定后的南渡江下游河道糙率系数基本在 $0.023\sim 0.047$ 之间变化。最终河道水面线模拟结果和实测结果验证情况如图3。从图中可以看出,通过糙率系数的调整,各次洪水情况下的水位计算值与实测值符合较好,偏离误差均在7%以内,满足计算要求。

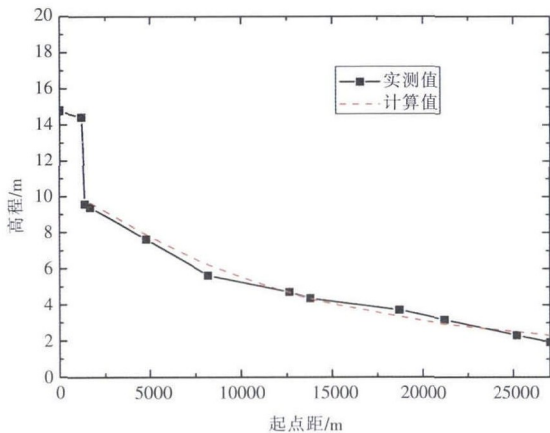


图3 河道中心线水面线验证 (2010年洪水,56 榆林基准高程)
Fig.3 The verification of water surface along the mid-line of the river (flood of 2010, 56-Yuling datum elevation)

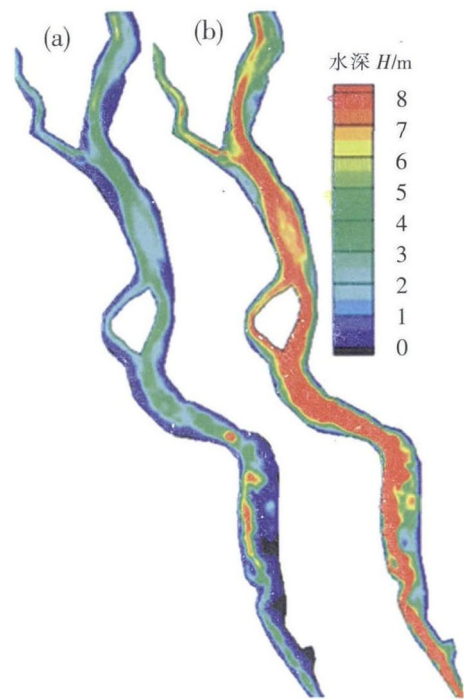


图4 数值模拟计算的水深分布
(a) $Z=0.5m, Q=181m^3/s$ (b) $Z=3.2m, Q=9712m^3/s$
Fig. 4 The water depth distribution from the numerical simulation
(a) $Z=0.5m, Q=181m^3/s$ (b) $Z=3.2m, Q=9712m^3/s$

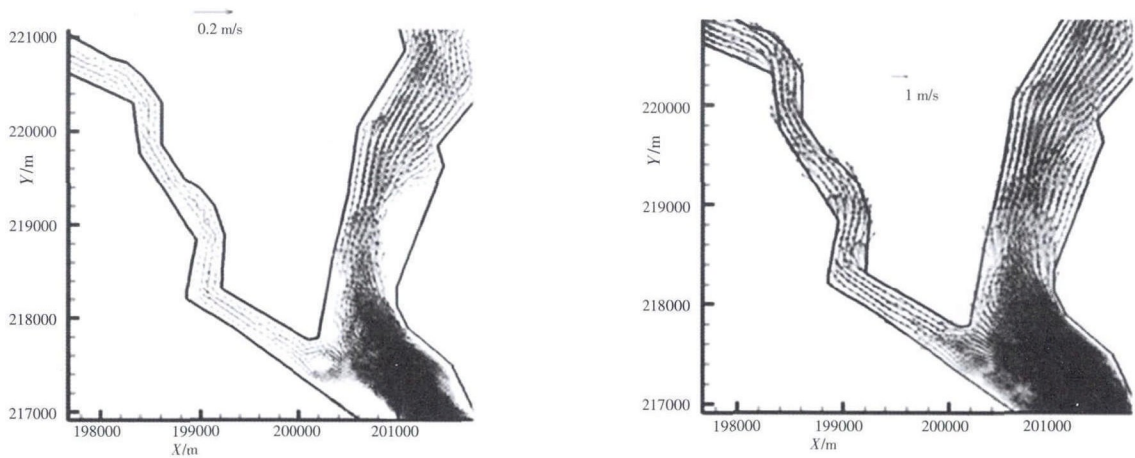


图5 局部水流流场矢量 (a) $Z=0.5m, Q=181m^3/s$ (b) $Z=3.2m, Q=9712m^3/s$
 Fig.5 The velocity distribution of the local flow (a) $Z=0.5m, Q=181m^3/s$ (b) $Z=3.2m, Q=9712m^3/s$

本文二维水流数值模拟网格边长约为 10m，对淹没范围的计算精度明显不够。为提高精度，进一步以水流模拟获得的水面线切割高精度的数字高程(DEM)数据(网格精度 $2m \times 2m$)，利用图像分割法进行精细的淹没面积计算，如图 6。计算结果表明，在 10 年一遇流量

($6255m^3/s$)情况下，滩地内已开始有洪水淹没，淹没范围占滩地总面积的 38.7%。该数值与滩地岸坡的情况密切相关，由于滩地内池塘众多，滩地一旦过水，淹没面积将迅速增大。当流量增大到 20 年一遇，滩地上已大范围过水，淹没范围占滩地总面积的 86.4%，平均淹没水深为 1m 左右。当流量增大至 50 年一遇，滩地基

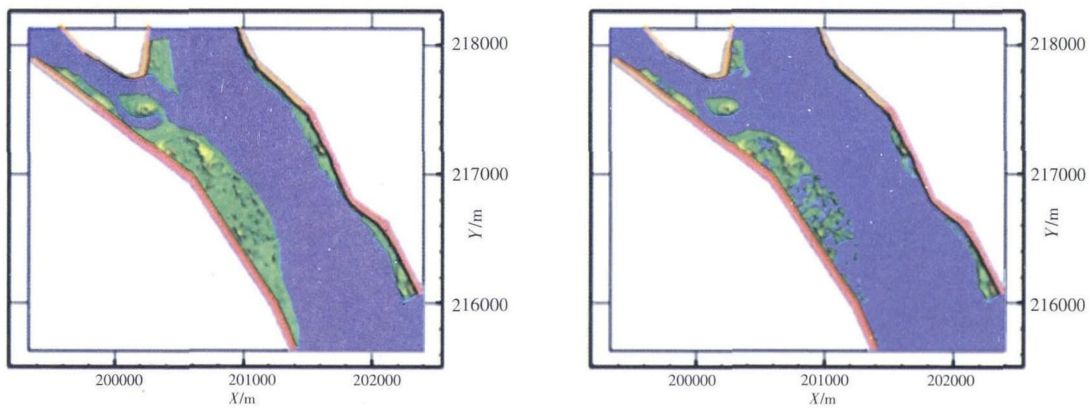


图6 典型滩地淹没范围计算结果 (a) $Z=3.2m, Q=6255m^3/s$ (b) $Z=3.2m, Q=9712m^3/s$
 Fig.6 The computational results of the typical beach submergence (a) $Z=3.2m, Q=6255m^3/s$ (b) $Z=3.2m, Q=9712m^3/s$

本被全部淹没，平均淹没水深在 2m 以上。

淹没范围随设计洪水流量的增长关系如图 7 所示。从图中可以看出，淹没范围随流量呈减速增长趋势，在淹没初期，淹没面积增长率最大，此时淹没面积对地形变化非常敏感，因此需要依赖高精度的 DEM 数据获得较可靠的评价结果。淹没面积 A 随流量 Q 的变化可以近似回归成指数关系： $A=C \times \exp(-Q/Q_0) + A_0$ ，其中有 C, Q_0, A_0 为常数。在本算例中： $C=-1.12 \times 10^5$ ； $Q_0=834.0$ ； $A_0=100.6$ 。

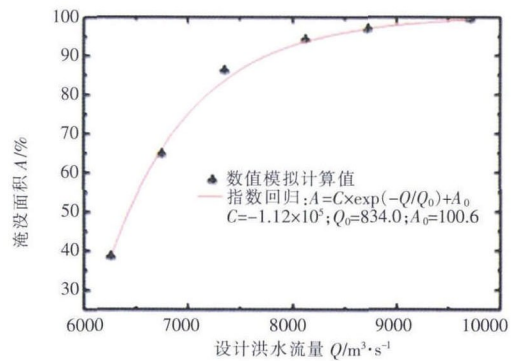


图7 淹没范围随设计洪水流量的增长
 Fig.7 The increase of the submergence areas with design flow rates

4 结论

本文提出了一种河道滩地洪水淹没分析的多分辨率处理方法,该方法将基于非结构网格的空间低分辨率二维浅水模拟与基于高分辨率 DEM 地形数据的图像分割处理有机结合,对河道滩地洪水淹没范围进行模拟计算。通过实际应用,得到以下结论:(1)该方法对于南渡江河口段进行模拟,能够有效将二维浅水模拟的低分辨率网格(10m)和局部滩地高分辨率地形(2m)结合,获得高精度的淹没范围计算结果。(2)淹没范围随流量呈减速增长趋势,在淹没初期,淹没面积增长迅速,此时淹没面积对地形变化敏感,淹没面积 A 随流量 Q 的变化近似呈指数关系。

参考文献:

- [1] 葛小平,许有鹏. GIS 支持下的洪水淹没范围模拟 [J]. 水科学进展, 2002,13(4):456-60.(GE Xiaoping, XU Youpeng. A method for flood submerged area simulation based on GIS [J]. Advances in Water Science, 2002,13(4):456-60. (in Chinese))
- [2] 丁志雄,李纪人,李琳. 基于 GIS 格网模型的洪水淹没分析方法 [J]. 水利学报, 2004,6(6):56-61.(DING Zhixiong, LI Jiren, LI Lin. Method for flood submergence analysis based on GIS grid model[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2004,6(6):56-61. (in Chinese))
- [3] 宋利祥,周建中,王光谦,等. 溃坝水流数值计算的非结构有限体积模型[J]. 水科学进展, 2011,22(3):373-81.(SONG Lixiang, ZHOU Jianzhong, WANG Guangqian, et al. Unstructured finite volume model for numerical simulation of dam-break flow [J]. Advances in Water Science, 2011,22(3):373-81. (in Chinese))
- [4] 孙东坡,廖小龙,王鹏涛,等. 河道生产堤对洪水影响的二维数值模拟研究[J]. 水动力学研究与进展:A 辑,2007,22(1):24-30.(SUN Dongpo, LIAO Xiaolong, WANG Pentao, et al. Influence of productive embankments on river flooding by 2-D Numerical simulation [J]. Journal of Hydrodynamics, series A, 2007,22(1):24-30. (in Chinese))
- [5] 张新华,隆文非,谢和平,等. 二维浅水波模型在洪水淹没过程中的模拟研究[J]. 四川大学学报:工程科学版, 2006,38(1):20-5.(ZHANG Xinhua, LONG Wenfei, XIE Heping, et al. Numerical simulation of flood inundation processes by 2D shallow water equations [J]. Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition), 2006,38(1):20-5. (in Chinese))
- [6] 黄金池,何晓燕. 溃坝洪水的统一二维数学模型 [J]. 水利学报, 2006,37(2):222-6.(HUANG Jinchu, HE Xiaoyan. Unified 2-D numerical model for simulating dam break wave propagation [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2006,37(2):222-6(in Chinese))
- [7] 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):190-214.(JIANG Xiaoming, LI Danxun, WANG Xingkui. Coupled one-and two-dimensional numerical modelling of levee-breach flows using the Godunov method[J]. Advances in Water Science, 2012,23(2):190-214. (in Chinese))
- [8] 许有鹏,葛小平,张立峰,等. 东南沿海中小流域平原区洪水淹没模拟[J]. 地理研究, 2005,24(1):38-45.(XU Youpeng, GE Xiaoping, ZHANG Lifeng, et al. Research of flood-inundated simulation on floodplain in coastal medium and small basins of Southeast China [J]. Geographical Research, 2005,24(1):38-45. (in Chinese))
- [9] 韩敏,陈明. 洪水演进模拟的三维可视化研究 [J]. 计算机应用, 2005,25(8):1906-7.(HAN Min, CHEN Ming. Three-dimension visualization research of flood routing simulation [J]. Computer Applications, 2005,25(8):1906-7. (in Chinese))
- [10] 李云,范子武,吴时强,等. 大型行蓄洪区洪水演进数值模拟与三维可视化技术 [J]. 水利学报, 2005,36(10):1158-64.(LI Yun, FAN Ziwu, WU Shiqiang, et al. Numerical simulation and 3-D visualization of flood propagation in large-scale detention basins[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2005,36(10):1158-64. (in Chinese))
- [11] 张尚弘,李丹勋,张大伟,等. 基于虚拟现实的城市溃堤洪水淹没过程仿真[J]. 水力发电学报, 2011,30(3):104-8.(ZHANG Shanghong, LI Danxun, ZHANG Dawei, et al. Simulation of levee-breach flow submergence based on virtual reality [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2011,30(3):104-8. (in Chinese))
- [12] 白玉川,杨建民,黄本胜. 二维水沙数学模型在复杂河道治理中的应用[J]. 水利学报, 2003,26(9):25-30.(BAI Yuchuan, YANG Jianmin, HUANG Ben-sheng. Application of 2-D mathematical model in training of complicated river channel [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2003,26(9):25-30. (in Chinese))
- [13] 白玉川,顾元桢,邢焕政. 水流泥沙水质数学模型理论及应用 [M]. 天津大学出版社, 2005.(BAI Yuchuan, GU Yuanyan, XING Huanzheng. Theory and Application of Mathematical Model for Water Flow Sediment and Quality [M]. Tianjin University Press, 2005. (in Chinese))
- [14] Heniche M, Secretan Y, Boudreau P, et al. A two-dimensional finite element drying-wetting shallow water model for rivers and estuaries [J]. Advances in Water Resources, 2000,23(4):359-72.
- [15] SONG L, ZHOU J, GUO J, et al. A robust well-balanced finite volume model for shallow water flows with wetting and drying over irregular terrain [J]. Advances in Water Resources, 2011,34(7):915-32.
- [16] Bunya S, Kubatko E J, Westerink J J, et al. A wetting and drying treatment for the Runge - Kutta discontinuous Galerkin solution to the shallow water equations[J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 2009,198(17-20):1548-62.

(下转第 23 页)

