



DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdtqk.2017.05.007

王秀杰, 胡冰, 苑希民, 等. 洪水与风暴潮共同作用下的溃堤洪水一维、二维耦合模型及应用[J]. 南水北调与水利科技, 2017, 15(5): 43-49. WANG Xiu jie, HU Bing, YUAN Xi min, et al. A 1D-2D coupled model of the dam break flood under the joint action of flood and storm surge and its application[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2017, 15(5): 43-49. (in Chinese)

# 洪水与风暴潮共同作用下的溃堤洪水 一维、二维耦合模型及应用

王秀杰, 胡冰, 苑希民, 田福昌, 秦旭东

(天津大学 水利工程仿真与安全国家重点实验室, 天津 300350)

**摘要:** 为了解决复杂条件下河道洪水漫堤、溃堤和潮水倒灌的问题, 建立了在洪水和风暴潮共同作用下的天然河道漫溢洪水在防洪保护区的一二维水动力耦合模型。在兼顾计算效率和精度的基础上, 分区剖分网格, 设置合理的网格面积; 根据植被和地物的不同, 分区设置糙率; 通过宽顶堰的方式将河道一维模型和防洪保护区二维模型进行侧向耦合; 采用基于侵蚀的渐变溃破坏方式模拟河道溃堤过程, 实现了河道上游发生洪水和下游遭遇海外风暴潮的复杂情况下精细化模拟。实例研究表明, 所建模型可灵活处理复杂多变的水力条件, 模拟结果合理可靠, 可为防汛部门制定决策提供有力的科学依据。

**关键词:** 一二维耦合模型; 溃、漫堤洪水; 风暴潮; 渐变溃; 太阳河

**中图分类号:** TV122.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-1683(2017)05-0043-07

## A 1D-2D coupled model of the dam break flood under the joint action of flood and storm surge and its application

WANG Xiu jie, HU Bing, YUAN Xi min, TIAN Fu chang, QIN Xu dong

(State Key Laboratory of Hydraulic Engineering Simulation and Safety, Tianjin University, Tianjin 300350, China)

**Abstract:** In order to solve the problems of flood overflow, dam break, and back flow of tidal water in river channels in complex conditions, in this paper, we developed a one and two dimensional coupled hydrodynamic model to simulate the overflowing and dam break flood from natural river channels under the joint action of flood and storm surge in a flood control protection area. Taking into consideration both computational efficiency and precision, we generated grids of different zones, and set a reasonable grid area. According to different vegetation types and surface features, we set different roughness for different zones. We coupled the one dimensional model of the river channel and the two dimensional model of the flood control protection area through the broad crested weir, used the erosion-based gradual collapse method to simulate the dam breaking process of the river channel, and realized fine simulation in the complicated situation with flood in the upper reaches of the river and storm surge in the lower reaches. The case study showed that this model can flexibly deal with complicated and volatile hydraulic conditions, and can produce reasonable simulation results. It can provide a powerful basis for the decision making of flood prevention departments.

**Key words:** 1D-2D coupled model; overflowing and dam break flood; storm surge; gradual collapse; Taiyang River

收稿日期: 2016-08-02 修回日期: 2016-11-01 网络出版时间: 2017-08-29

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20170829.1916.002.html>

基金项目: 国家自然科学基金项目(51209158); 高等学校学科创新引智计划资助项目(B14012)

Funds: National Natural Science Foundation of China (51209158); Programme of Introducing Talents of Discipline to Universities (B14012)

作者简介: 王秀杰(1973), 女, 天津人, 副教授, 博士, 主要从事洪水风险、防洪减灾研究。E-mail: 790630886@qq.com

通讯作者: 胡冰(1990), 男, 主要从事防洪减灾研究。E-mail: hbbyzm@126.com

近几年,我国注重综合采用工程措施和非工程措施应对洪涝灾害,在全国各地推行洪水风险图编制项目,使得我国的水动力数学模型有了很大的进展。在我国,黄金池等<sup>[1]</sup>利用模型代替了多个单独使用的水动力学模型,模拟了土石坝溃坝后的洪水演进过程。宋霖云等<sup>[2]</sup>描述了模型参数和模型效率间的关系,为模型参数的合理设置提供了理论依据。李大鸣等<sup>[3]</sup>建立二维水动力学模型研究了桥涵概化尺度对洪水演进的影响。陈文龙等<sup>[4]</sup>通过构造并求解 Riemann 问题实现一维-二维模型耦合。苑希民等<sup>[5]</sup>建立了溃堤洪水的二维水动力学模型,模拟了黄河内蒙段南岸灌区溃堤洪水流速、流态及水深的变化情况。Lai 等<sup>[6]</sup>提出了适用于大尺度水动力模拟的一维-二维耦合方法,为模型的耦合提供了理论基础。孙秀丽等<sup>[7]</sup>采用标准连接的方式,建立了一维、二维耦合模型模拟溃堤洪水。而在国外,Paul D. Bates 等<sup>[8]</sup>学者基于浅水动力学模型的改进理论,研究出一种简单高效的二维水动力学模型。Maarten Breckpot 等<sup>[9]</sup>利用水文模型解决洪水问题,推动了洪水模型的多元发展。Morales-Hernandez 等<sup>[10-11]</sup>模拟并分析了浅水流的演进情况,系统地研究了水动力模型的机理,Dewals 等<sup>[12]</sup>将二维模型和集总模型结合模拟水库的溃堤。Dushmanta 等<sup>[13]</sup>运用有限差分法模拟了河流洪水漫堤过程。以上研究中,主要针对水库溃坝、河道溃堤洪水的模拟,并没有考虑风暴潮倒灌加剧河道洪水的影响。而我国沿海地区往往河流上游洪水伴随着区间降雨,入海口由于风暴潮的作用致使潮位顶托河道洪水,使洪涝灾害更加严重。而且在传统建模过程中,对地形、河道以及某些参数进行过度概化,造成了模拟结果的不准确性,如何准确地模拟洪水的发生过程成为当前亟需解决的问题<sup>[14]</sup>。基于此,本文建立上游洪水叠加外海风暴潮的一二维耦合精细化模型模拟复杂水力条件下洪水的漫堤、溃堤以及在防洪保护区的演进过程,为沿海地区制定正确防灾减灾措施提供科学依据。

## 1 一维、二维水动力耦合模型原理

### 1.1 一维水动力模型

单一河道非恒定流控制方程采用圣维南方程组,圣维南方程是反映有关物理定律的微分方程,包括连续方程和动量方程。

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

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial \left( \alpha \frac{Q^2}{A} \right)}{\partial x} + gA \frac{\partial h}{\partial x} + \frac{g|Q|Q}{c^2 AR} = 0 \quad (2)$$

式中:  $Q$  为流量( $\text{m}^3/\text{s}$ );  $A$  为过水面积( $\text{m}^2$ );  $q$  为侧向入流( $\text{m}^3/\text{s}$ );  $h$  为水位( $\text{m}$ );  $\alpha$  为动量修正系数;  $c$  为谢才系数;  $R$  为水力半径( $\text{m}$ )。

一维水动力学模块采用 Abbott-Ionescu 六点隐式有限差分格式对圣维南方程进行求解。Abbott-Ionescu 格式计算精度高、稳定性好,离散后的线性方程组用追赶法求解<sup>[15]</sup>。

### 1.2 二维水动力模型

二维水流数学模型的控制方程如下:

水流连续性方程

$$\frac{\partial Z}{\partial t} + \frac{\partial M}{\partial x} + \frac{\partial N}{\partial y} = 0 \quad (3)$$

$x$  方向水流运动方程

$$\frac{\partial M}{\partial t} + \frac{\partial uM}{\partial x} + \frac{\partial vM}{\partial y} = -gh \frac{\partial Z}{\partial x} + D \left( \frac{\partial^2 M}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 M}{\partial y^2} \right) - \frac{gn^2 M \sqrt{u^2 + v^2}}{h^{4/3}} \quad (4)$$

$y$  方向水流运动方程

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial uN}{\partial x} + \frac{\partial vN}{\partial y} = -gh \frac{\partial Z}{\partial y} + D \left( \frac{\partial^2 N}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 N}{\partial y^2} \right) - \frac{gn^2 N \sqrt{u^2 + v^2}}{h^{4/3}} \quad (5)$$

式中:  $h$  为水深( $\text{m}$ );  $Z$  为水位( $\text{m}$ );  $u$  和  $v$  分别为平面坐标  $x$  和  $y$  方向的垂线平均流速( $\text{m}/\text{s}$ );  $M$  和  $N$  为  $x$ ,  $y$  方向的单宽流量,  $M = uh$ ,  $N = vh$ ;  $n$  为 Manning 糙率系数;  $D$  为紊动黏性系数( $\text{m}^2/\text{s}$ );  $g$  为重力加速度( $\text{m}/\text{s}^2$ )。

二维水动力模型采用的数值方法是单元中心的有限体积法,可以模拟因各种作用力作用而产生的水位和流量变化及模拟任何忽略分层的二维自由表面流<sup>[16]</sup>。

### 1.3 一二维耦合模型

一二维耦合模型是通过将一维、二维模型的水力条件相互耦合,采用宽顶堰流公式进行连接。

宽顶堰的流量公式为:

$$Q = \mu b (h_1 - Z_c) (h_1 - h_2)^{1/2} \quad (6)$$

式中:  $b$  为堰顶宽度;  $\mu$  为流量系数;  $h_1$  和  $h_2$  分别为上游和下游水位;  $Z_c$  为堰顶高程。

一维、二维模型联解计算时,一维模型为二维模型提供水位及流量边界,二维模型则以旁侧入流的方式将边界流量传递给一维模型<sup>[17]</sup>。如图 1 所示,河道和洪泛区之间水量不断交换,达到动态平衡。

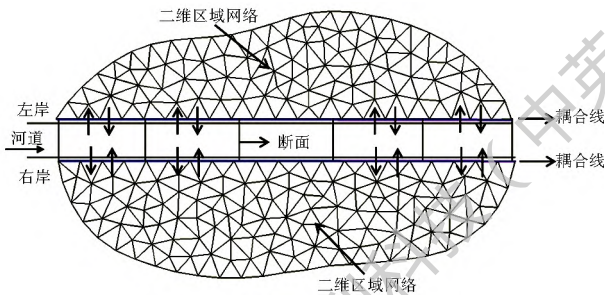


图1 一二维模型侧向耦合示意图

Fig.1 Sketch of lateral coupling of 1D-2D models

一二维耦合模型计算时,为提高计算效率,二维模型应选择基于 CFL (Courant Friedrichs Lewy) 条件的自适应时间步长模式<sup>[18]</sup>。为有效解决一维模型和二维模型时间步长不一致问题,以一维模型的固定时间步长为基准,二维模型时间步长进行自适应匹配。

## 2 研究实例

### 2.1 研究区概况

本次以海南省太阳河为研究对象。太阳河流域系海南岛暴雨区,年平均来水量 6.6 亿 m<sup>3</sup>,是万宁市最大的河流。万宁市位于海南省东南部,东濒南海,西毗琼中,南邻陵水,北与琼海接壤。万宁水库将太阳河分为上、下游两段,本研究区上游自万宁水库起,下游到太阳河入海口,流域面积 120 km<sup>2</sup>。图 2 为太阳河水系图。



图2 太阳河水系图

Fig.2 The map of Taiyang river system

### 2.2 精细化模型的构建

#### 2.2.1 一维河道模型

河道断面是对一维模型精确度影响最大的因素。由于河道洪水传播的不稳定性,因此使用尽可能多的横断面以尽可能准确地描述河道地形是非常必要的,特别是在横断面变化迅速的地方更应布置更多的断面。在一维模型创建过程中,增加河道的断面数量,减少两断面间的间隔里程,将会极大地提

高模型的精确性。本研究区域河长 16.2 km,共设置 70 个断面,平均断面间距 230 m。图 3 为太阳河下游段河道断面布置图。

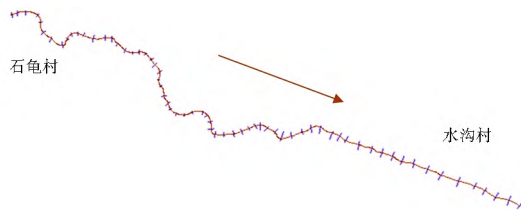


图3 太阳河下游段河道断面布置

Fig.3 Cross sections arrangement plan in the lower reaches of Taiyang River

#### 2.2.2 二维模型的构建

网格面积的大小是影响二维模型精确度的重要因素。通常情况下,网格面积越小,模型的计算结果更精确,但这将极大地延长模型的计算时间;而减少二维网格量,则不能真实反映地物地貌,计算误差较大<sup>[19]</sup>。考虑模拟结果的精确性又兼顾模型的计算效率,本模型采用了分区剖分网格的方式。在靠近河道和堤防的位置,水流交换频繁,所以进行网格细化处理;而远离河道的二维区域,适当地增大网格面积;对于洪水淹没不到的高坡或丘陵地带,可以不进行网格剖分,在模型中以“岛”的形式处理。图 4 为太阳河网格分区剖分示意图,共剖分网格 62 820 个,最大网格面积不足 1 000 m<sup>2</sup>,最小网格面积 50 m<sup>2</sup>。

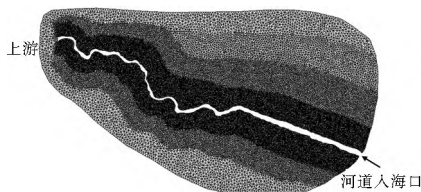


图4 太阳河网格分区剖分示意图

Fig.4 Grid generation of different zones of Taiyang River

#### 2.2.3 边界条件

通过对太阳河可能洪水来源与影响进行全面分析,最终明确太阳河一二维耦合模型上游入流边界为万宁水库设计泄洪过程(20 年一遇、50 年一遇和 100 年一遇),如图 5 所示。由于太阳河东濒南海,常年受到外海风暴潮的影响,致使潮位对河道水位顶托,为有效模拟河道洪水的漫溢、溃决和海水倒灌等情况,太阳河一二维耦合模型下游控制边界采用河口处潮位过程(20 年一遇、50 年一遇和 100 年一遇),如图 6 所示。由于太阳河地处海南省降雨丰沛区,为选出具有代表性的洪潮组合,本文选取 100 年一遇的水库设计泄洪过程和 100 年一遇的设计潮位分别作为模型上、下边界条件,可有效模拟最大化洪水风险,实现河道与防洪保护区水流的实时动态交

换,从而获得溃决和漫溢洪水的动态演进过程。

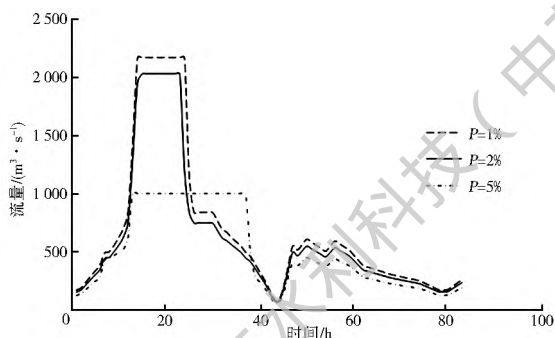


图 5 万宁水库设计泄洪过程

Fig. 5 Design flood discharge process of Wanning Reservoir

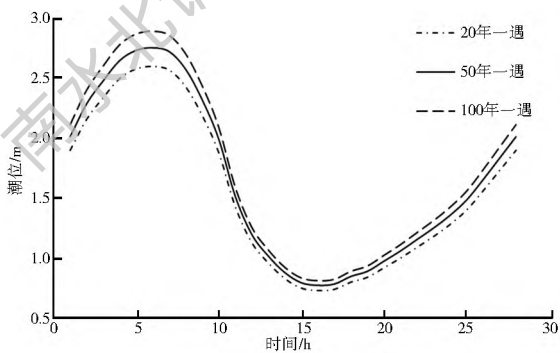


图 6 太阳河河口不同频率设计潮位过程

Fig. 6 Design tidal level process of Taiyang River estuary at different frequencies

### 2.2.4 溃堤方式

河道发生大洪水时,洪水往往先漫过堤防,在洪水侵蚀和水流冲击双重作用下,河道堤防开始发生破坏形成溃口,溃口形状可按梯形设置<sup>[20]</sup>。为准确地模拟实际情况,并考虑到太阳河堤防现状,将溃决时机选择在洪水开始漫过堤防的 4 h 后,此时洪水达到峰值,水流冲击力最大。

土堤溃决是横向展宽和纵向冲刷的过程,破坏方式一般为渐变溃<sup>[5]</sup>。本模型充分考虑太阳河堤坝的材料和强度问题,基于侵蚀使用泥沙输移公式的方法模拟溃堤的发展过程。图 7 为太阳河渐变溃溃口形成的示意图。

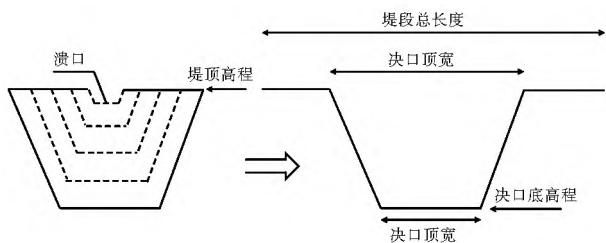


图 7 溃口形成过程

Fig. 7 The formation of a dam breach

### 2.2.5 糙率分区

实际区域内土地利用种类多且分布零散,二维

平面区域的地形地貌不同,农田、草地、林地、房屋建筑区等进行糙率分区处理。而一维河道在横向纵向方向糙率也不相同,沿横断面方向将中间河槽和两侧河滩分别赋予不同的糙率;沿河道里程,在纵向上根据河道地貌的不同进行糙率分区处理,以此来解决糙率分布差异的问题。不同下垫面类型的糙率参见表 1。

表 1 洪水风险区域糙率参照表

Tab. 1 Flood risk area roughness reference

序号	下垫面类型	糙率
1	堤、路、埝	0.045
2	果林	0.065
3	房屋	0.10
4	鱼池、水池	0.035
5	水田	0.04
6	条田、台田	0.065
7	河床、渠床	0.035
8	谷场	0.03
9	草地	0.04
10	菜地	0.035

## 2.3 计算结果

### 2.3.1 计算结果分析

当太阳河流域发生 100 年一遇的洪水同时外海发生 100 年一遇的风暴潮,由于外海风暴潮的顶托作用,太阳河堤防发生溃决时,主要表现为溃口的分流,提取溃口处分流流量,如图 8,实线为流域发生 100 年一遇的洪水万宁水库的调洪过程。由图可以分析得出,随着上游洪水流量不断增大,溃口分流流量呈递增趋势,峰值达到 1 510 m<sup>3</sup>/s,之后溃口分流流量随着上游洪水变少而缓慢减少,变化趋势相一致,可以看出,溃口分流过程呈正态分布,溃口的溃决时机和溃决方式选择合理。图 9 为溃口附近流场分布图,图中流速箭头分布均匀,可以看出流场均匀光滑,水流流态稳定,进一步证实了模型的稳定性。

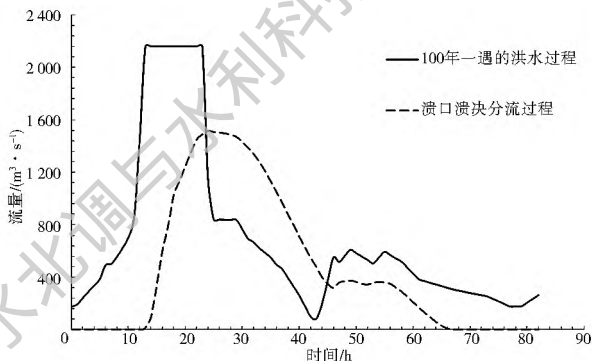


图 8 上游洪水和溃口分流过程

Fig. 8 Upstream flood and flow-splitting process of the dam breach



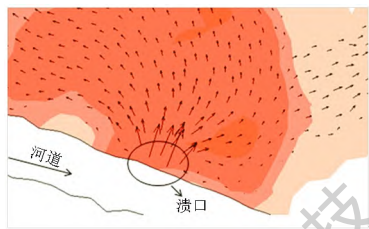
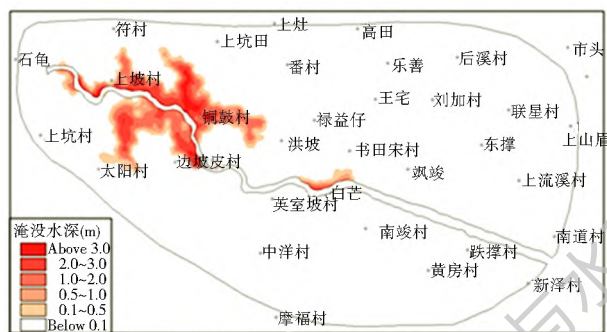


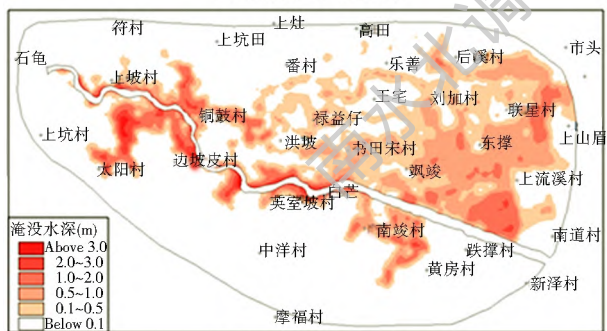
图9 溃口处流场分布

Fig. 9 Flow field distribution at the dam breach

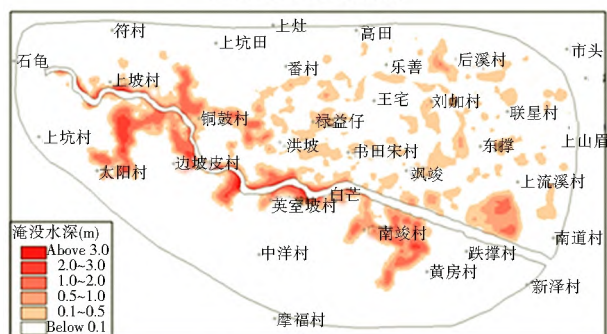
针对不同时刻得到的不同淹没水深过程图(图10),可以看出洪水的漫堤溃堤时刻及在洪泛区的演进过程。图10(a)为洪水演进10h的淹没水深图,由于现阶段太阳河上游段石龟村至英室坡村无河堤,在上游河段洪水发生漫堤,部分低洼区域开始积水。图10(b)为洪水演进30h的淹没水深图,由于外海潮水的倒灌和顶托作用,此时河段主要表现为溃口的溃决分流,洪水自溃口侧向入流进入二维区域,淹没面积38.99 km<sup>2</sup>,积水量6388.8万m<sup>3</sup>,此时绝大部分水深超过1m。图10(c)为洪水演进



(a) 洪水演进10h淹没水深



(b) 洪水演进30h淹没水深



(c) 洪水演进100h淹没水深

图10 不同时刻淹没水深

Fig. 10 Flooded depth at different times

100 h 的淹没水深图,此时外海潮位下降,二维区域内的大部分洪水沿河道或沟渠流入海洋,区域内洪水趋于稳定。

### 2.3.2 合理性分析

太阳河下游区域无历史实测降雨资料,无法进行一二维模型的严格率定和准确验证。为确保所构模型的可靠性,以保障方案计算结果的合理性和准确性,在整个建模过程中,主要从以下三方面来保障模型的可靠性和参数的准确性。

#### (1) 水量平衡分析。

模型是否合理,首先满足水量平衡。通过检验太阳河防洪保护区输入水量与蓄水量是否相等来验证水量平衡关系。表2为太阳河不同洪水计算方案下的保护区进洪量和蓄水量,分析误差可知,各方案均满足水量平衡要求。

表2 太阳河下游编制区进洪量与蓄水量对比

Tab. 2 The Sun River area into the flood water storage and preparation of comparison

洪水方案	进洪量/m <sup>3</sup>	蓄水量/m <sup>3</sup>	误差/m <sup>3</sup>
太阳河下游段遭遇20年一遇洪水	4.152×10 <sup>7</sup>	4.152×10 <sup>7</sup>	1.8×10 <sup>7</sup>
太阳河下游段遭遇50年一遇洪水	5.871×10 <sup>7</sup>	5.871×10 <sup>7</sup>	3.2×10 <sup>7</sup>
太阳河下游段遭遇100年一遇洪水	6.388×10 <sup>7</sup>	6.388×10 <sup>7</sup>	6.9×10 <sup>7</sup>

#### (2) 流场分布。

对于淹没区域而言,通过计算结果显示的流场分布与DEM整体高程比较分析,流场分布均匀一致,流速较大的区域集中在坡度变化大的地方,洪水流动的趋势遵循从高到低的原则,洪水态势较为准确,比较结果如图11、图12所示(太阳河下游遭遇100年一遇洪水为例)。

#### (3) 风险信息比较。

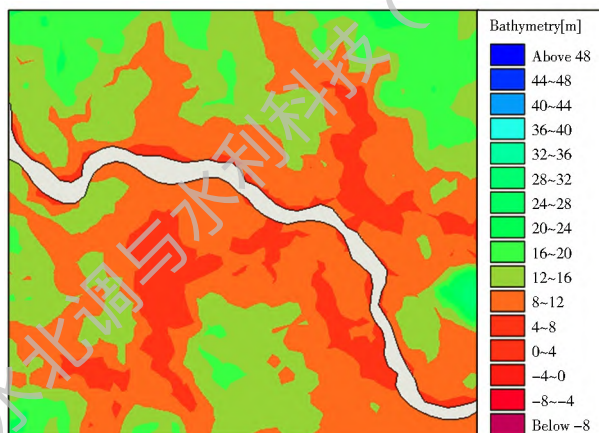


图11 DEM地形示意图

Fig. 11 Sketch of DEM

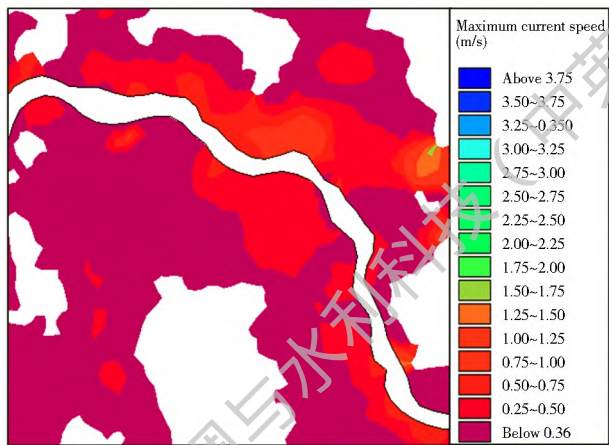
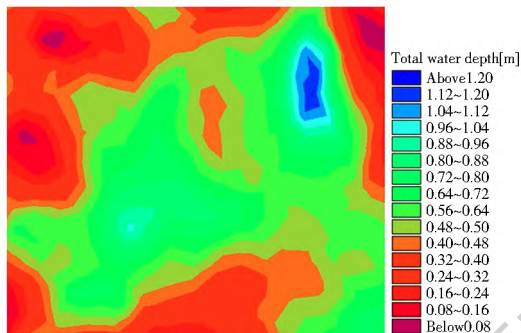


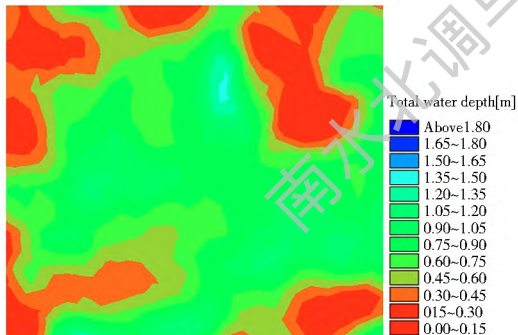
图 12 洪水最大流速示意图

Fig. 12 Sketch of maximum flood velocity

通过比较太阳河下游段遭遇 50 年一遇洪水和 100 年一遇洪水的洪水风险信息, 显示 100 年一遇洪水淹没水深略大于 50 年一遇洪水淹没水深, 结果说明模型计算较为合理, 比较结果如图 13 所示。



(a) 50 年一遇



(b) 100 年一遇

图 13 同一位置同一时刻淹没水深

Fig. 13 Flooded depths at the same location at the same time

从以上水量平衡, 流场分布和风险信息三方面分析可以看出, 模型模拟结果是合理的, 所建模型能够很好的模拟溃堤、漫堤和洪水演进过程。

### 3 结语

考虑到河流外部边界的特殊性和复杂性, 本文所建洪水与风暴潮共同作用下的溃堤洪水一维、二维耦合模型, 使用尽可能多的河道断面并分区剖分网格, 优化了传统的一、二维模型, 该模型对我国南

方沿海地区复杂水力条件下的河流实现了精细化高标准的数值模拟。在溃堤选择上, 通过优化溃决时机和溃决方式, 准确地模拟了溃堤的发展过程。本实例最终模拟的结果流场分布均匀, 流态稳定, 为复杂条件下的溃堤及漫堤洪水演进的统一计算提供了一条有效途径。

### 参考文献(References):

[1] 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): 222-226. (HUANG Jir chi, HE Xiaor yan. Unified 2D numerical model for simulating dam break wave propagation[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2006, 37(2): 222-226. (in Chinese)) DOI: 10.13243/j.cnki.slxh.2006.02.016

[2] 宋霁云, 张利平, 李武阶, 等. 水文模型参数优选方法比较与参数敏感性分析[J]. 水电能源科学, 2011, 29(4): 25-27. (SONG Ji yun, ZHANG li ping, LI Wu jie, et al. Comparative Study on Parameter Calibration Algorithms and Sensitivity Analysis for Conceptual Hydrological Model[J]. Water Resources and Power, 2011, 29(4): 25-27. (in Chinese))

[3] 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): 27-34. (LI Dar ming, GUAN Yong-kuan, LI Ling ling, et al. Flood routing mathematical model for flood detention basin[J]. Hydro Science and Engineering, 2011(3): 27-34. (in Chinese)) DOI: 10.16198/j.cnki.1009-640x.2011.03.009

[4] 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, 11(6): 848-855. (CHEN Wen long, SONG Li xiang, XING Lung hang, et al. A 1D-2D coupled mathematical model for numerical simulating of flood routine in flood protected zone[J]. Advance in Water Science, 2014, 11(6): 848-855. (in Chinese))

[5] 苑希民, 田福昌, 冯国娜, 等. 溃堤洪水的二维水动力模型及其应用[J]. 南水北调与水利科技, 2015, 13(2): 225-230. (YUAN Xi min, TIAN Fu chang, FEN Guo na, et al. Two dimensional hydrodynamic model and its application of levee breach flood [J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2015, 13(2): 225-230. (in Chinese)) DOI: 10.13476/j.cnki.nsbddq.2015.02.008

[6] 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. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2013.03.049

[7] 孙秀丽, 冯民权, 孙先锋. 溃坝洪水的一维、二维耦合模拟[J]. 华北水利水电学院学报, 2008, 29(4): 25-28. (SUN Xiur li, FENG Min quan, SUN Xiarr feng. One and two dimension coupling simulation on dam bursting flood[J]. Journal of North China Institute of Water Conservancy and Hydroelectric Power, 2008, 29(4): 25-28. (in Chinese))

[8] Bates P D, Horritt M S, Fewtrell T J. A simple inertial formulation of the shallow water equations for efficient two dimensional flood inundation modeling [J]. Journal of Hydrology, 2010, 387(1): 33-45. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2010.03.027

- [9] Breckpot M, Agudelo O M, Meert P, et al. Flood control of the Demer by using Model Predictive Control[J]. Control Engineering Practice, 2013, 21(12): 1776-1787. DOI: 10.1016/j.conengprac.2013.08.008
- [10] Morales Hernandez M, Garcia 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: 26-44. DOI: 10.1016/j.complfluid.2013.04.001
- [11] Finaud Guyot P, Delenne C, Guinot V, et al. 1D-2D coupling for river flow modeling[J]. Comptes Rendus Mécanique, 2011, 339(4): 226-234. DOI: 10.1016/j.crme.2011.02.001
- [12] Dewals B, Erpicum S, Detrembleur S, et al. Failure of dams arranged in series or in complex[J]. Natural Hazards, 2011, 56(3): 917-939. DOI: 10.1007/s11069-010-9600-z
- [13] 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: 1223-1237. DOI: 10.1002/hyp.6682
- [14] 郭凤清, 屈寒飞, 曾辉, 等. 基于 MIKE21 的滹江蓄滞洪区洪水危险性快速预测[J]. 自然灾害学报, 2013(6): 144-152. (GUO Fengqing, QU Hanfei, ZENG Hui, et al. Flood hazard forecast of Pajiang River flood storage and detention basin based on MIKE21[J]. Journal of Natural Disasters, 2013(6): 144-152. (in Chinese)) DOI: 10.13577/j.jnd.2013.0320
- [15] 杨志, 冯民权. 溃口近区二维数值模拟与溃坝洪水演进耦合[J]. 水利水电工程学报, 2015(1): 8-19. (YANG Zhi, FENG Minquan. 2D numerical simulation of breach area and coupling simulation of dam breach flood[J]. Hydro Science and Engineering, 2015(1): 8-19. (in Chinese)) DOI: 10.16198/j.cnki.1009-640X.2015.01.002
- [16] 衣秀勇. 洪水模拟技术应用与研究[M]. 中国水利水电出版社, 2014: 10-12. (YI Xiuyong. Application and Research of The Flood Simulation Technology[M]. China Water & Power Press, 2014: 10-12. (in Chinese))
- [17] 张大伟, 李丹勋, 陈稚聪, 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))
- [18] 宋利祥. 溃坝洪水数学模型及水动力学特性研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2012: 26-31. (SONG Lixiang. Research on mathematical model and hydrodynamic characteristics of dam break floods[D]. Wuhan: Huazhong University of Science & Technology, 2012: 26-31. (in Chinese))
- [19] 张防修, 韩龙喜, 王明, 黄瑞. 主槽一维和滩地二维侧向耦合洪水演进模型[J]. 水科学进展, 2014, 25(4): 560-566. (ZHANG Fangxiu, HAN Longxi, WANG Ming, HUANG Rui. Flood routing model with lateral coupling one dimensional channel and two dimensional floodplain simulation[J]. Advance in Water Science, 2014, 25(4): 560-566. (in Chinese)) DOI: 10.14042/j.cnki.32.1309.2014.04.017
- [20] 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, 2014, 26(1): 83-90. (YUAN Ximin, TIAN Fuchang, WANG Lina. Comprehensive two dimensional lateral associate hydrodynamic models for overflow and levee-breach flood and its application[J]. Advance in Water Science, 2014, 26(1): 83-90. (in Chinese)) DOI: 10.14042/j.cnki.32.1309.2015.01.011

(上接第 14 页)

- [14] 吕彩霞, 牛存稳, 贾仰文. 白洋淀流域气象要素和人类取水变化过程分析[J]. 南水北调与水利科技, 2011, 9(6): 23-26. (LV Caixia, NIU Cunwen, JIA Yangwen. Analysis of the Variations of the Meteorological Elements and Water Usage in the Baiyangdian Lake Basin[J]. South to North Water Diversion and Water Science & Technology, 2011, 9(6): 23-26. (in Chinese))
- [15] 赵翔, 崔宝山, 杨志峰. 白洋淀最低生态水位研究[J]. 生态学报, 2005, 25(5): 1033-1040. (ZHAO Xiang, CUI Baoshan, YANG Zhifeng. A study of the lowest ecological water level of Baiyangdian lake[J]. Acta Ecologica Sinica, 2005, 25(5): 1033-1040. (in Chinese))
- [16] 闫新兴, 张素珍, 李素丽, 等. 白洋淀水资源综合承载力最佳水位研究[J]. 南水北调与水利科技, 2009, 7(3): 8F83. (YAN Xinxi, ZHANG Suzhen, LI Suli, et al. Study on optimal water level of comprehensive bearing capacity to water resources in Baiyangdian[J]. South to North Water Diversion and Water Science & Technology, 2009, 7(3): 8F83. (in Chinese))
- [17] 尹健梅, 程伍群, 严磊. 白洋淀湿地水文水资源变化趋势分析[J]. 水资源保护, 2010, 25(1): 52-55. (YIN Jianmei, CHENG Wujun, YAN Lei. Change of water resources in the Baiyangdian wetland[J]. Water Resources Protection, 2010, 25(1): 52-55. (in Chinese))
- [18] 白洋淀湿地生态现状调查报告, 海河流域水资源保护局[R]. 2010. (Haihe Water Resources Protection Bureau, The ecological status report of Baiyangdian wetland[R]. 2010. (in Chinese))
- [19] 白洋淀健康评估报告, 海河流域水环境监测中心[R]. 2012. (Haihe River Water Environmental Monitoring Center, The report of Baiyangdian health assessment[R]. 2012. (in Chinese))
- [20] 王朝华, 王子璐, 乔光建. 跨流域调水对恢复白洋淀生态环境重要性分析[J]. 南水北调与水利科技, 2011, 9(3): 138-141. (WANG Chaohua, WANG Zilu, QIAO Guangjian. Analysis of importance of interbasin water diversion to restoration of ecological environment of Baiyangdian lake[J]. South to North Water Transfers and Water & Science Technology, 2011, 9(3): 138-141. (in Chinese))