

复杂河网中洪水演进二维数值仿真及其应用*

王晓玲¹, 李明超², 周潮洪³, 夏中华³

(1. 天津大学环境科学与工程学院, 天津 300072; 2. 天津大学建筑工程学院, 天津 300072;
3. 天津市水利科学研究所, 天津 300061)

摘要: 为了模拟复杂河网中分洪后水流在较大平面范围内的流动情况, 在考虑河床、进出口和动边界等复杂边界条件下, 建立了二维洪水演进数学模型, 并采用交替方向隐式(ADI)法进行离散和求解. 结合流域实时洪水调度仿真系统的总体框架和调用, 建立了模拟洪水在蓄滞洪区内任意位置的水位、流速、淹没水深、历时等演进过程的二维洪水演进数值仿真系统. 该系统对永定河分洪区进行了二维洪水实时演进模拟, 并结合大清河实测资料进行了模型合理性分析. 结果表明, 该系统能够适应复杂的边界条件, 可为复杂河网实时洪水预报计算和实时洪水调度提供支持.

关键词: 洪水演进; 蓄滞洪区; 二维数值仿真; 交替方向隐式法

中图分类号: TV873 **文献标志码:** A **文章编号:** 0493-2137(2005)05-0416-06

2D Numerical Simulation of Flood Routing in Complex River Network and Its Application

WANG Xiao-ling¹, LI Ming-chao², ZHOU Chao-hong³, XIA Zhong-hua³

(1. School of Environment Science and Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China;
2. School of Civil Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China;
3. Tianjin Water Conservancy Scientific Research Institute, Tianjin 300061, China)

Abstract: Based on the complex conditions on riverbed, inlet, outlet and mobile-boundary, a 2D flood routing model to simulate flow behaviors of flood in a large area coverage in the complex river network was proposed. The model was calculated by using the alternate direction implicit (ADI) method. A corresponding simulation system of the 2D flood routing model was set up in consideration of the total frame of flood optimization regulation. Any position's water level, flow speed, water height and submerged time can be acquired from it. The system was used in Yongding River and its detention basins, and reasonable agreement was found between the measured data and the calculated data of Daqing River. These results demonstrated that the system can be applied to complication topography conditions and flood forecast in time in the complex river network. It will offer necessary support to real time flood regulation.

Keywords: flood routing; detention basin; 2D numerical simulation; alternate direction implicit

洪水演进是洪水波的波形、波高、传播速度等特征量在河道或河网等区域沿固体边界向前演进变化的过程. 为了制定有效的防洪减灾策略和措施, 必须对河道或河网进行洪水演进计算, 深入科学地认识其规律. 这

也是水文预报的重要研究课题之一^[1].

行洪过程是洪水演进的非恒定流动和泥沙冲淤以及与之相应的河床变形的综合结果, 这一过程的数值计算仿真涉及数字流域技术、水文学及水力学等多个

* 收稿日期 2004-08-17; 修回日期 2004-12-27.

基金项目: 天津市自然科学基金资助项目(043605611).

作者简介: 王晓玲(1968—), 女, 博士, 副教授, Wangxl@tju.edu.cn.

学科,是综合交叉问题,而依据它们寻求洪水演进过程中水位、河床、泥沙之间相互作用产生的边界条件和参数,则是计算模拟真实洪水演进的难点和基础^[2]。复杂河网由主河流、众多支流和相应的蓄滞洪区构成,其洪水演进问题的求解最为复杂^[3],一般将其分为两类进行处理^[4]。①确定整个河网中非均匀河道洪水运动的总趋势和蓄滞洪区分洪后的效果,用于洪水的综合调度,主要采用一维圣维南方程来求解;②模拟分洪或溃堤后水流在较大平面范围内的流动情况,处理水流漫堤、过涵洞、干河床等复杂地形条件下的洪水运动情况,获得更详尽的水力计算结果,这需要采用二维洪水演进模型进行仿真来获得解答。在复杂河网的洪水演进和调度仿真中,这两类问题都不可忽视,并需要综合考虑两者来建立系统。

笔者试图对第二类问题进行研究,以二维浅水方程为基础进行数学建模,考虑河床、进出口、动边界等复杂边界条件,分别采用逆风守恒格式的有限差分法、交替方向隐式法(ADI)进行离散和求解。同时本模型作为流域实时洪水调度仿真系统的重要组成部分,结合系统总体框架和调用,建立了完善的数值仿真系统,并在实践中进行了有效地应用和分析。

1 二维洪水演进数学建模

1.1 基本控制方程

为了满足在整个蓄滞洪区内质量和动量守恒,采用二维非恒定浅水运动方程^[5]为基本控制方程。由于蓄滞洪区内洪水一般是平面大范围的自由表面流动,水深尺度远小于平面尺度,引入 3 点浅水假设简化基本方程:①假定压力沿水深方向服从静水压力分布规律;②忽略哥氏力和风成应力;③不考虑水深方向的有效切应力。

结合上述分析和假设,采用满宁公式计算谢才系数,可导出二维浅水方程。

水流连续性方程为

$$\frac{\partial z}{\partial t} + \frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

水流动量方程为

$$\frac{\partial q_x}{\partial t} + \frac{q_x}{h} \frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{q_y}{h} \frac{\partial q_x}{\partial y} + gh \frac{\partial z}{\partial x} + g \frac{n^2 q_x \sqrt{q_x^2 + q_y^2}}{h^{7/3}} = 0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial q_y}{\partial t} + \frac{q_x}{h} \frac{\partial q_y}{\partial x} + \frac{q_y}{h} \frac{\partial q_y}{\partial y} + gh \frac{\partial z}{\partial y} +$$

$$g \frac{n^2 q_y \sqrt{q_x^2 + q_y^2}}{h^{7/3}} = 0 \quad (3)$$

式中 h 为水深; z 为水位; q_x 、 q_y 分别为 x 、 y 方向的单宽流量; n 为糙率系数; g 为重力加速度。

1.2 基本约束条件

初始条件 初始条件分为两部分:①有水流流动的计算网格,根据实测资料或资料分析给出水位和流速;②没有水流流动的部分,即干河床部位,可直接赋值水位为河床高程,流速为零。

进出口边界条件 计算域边界分为开边界和闭边界两类。开边界是指计算域中与外界发生水体交换的那部分边界,边界的选取应满足 $\partial U \cdot \mathbf{n} / \partial n = 0$,在开边界处 $q = q(t)$ 或 $z = z(t)$ 给定,其中 $q(t)$ 和 $z(t)$ 为 t 时刻实测流量和水位。在复杂河网二维洪水演进模拟中,对进水口门给出流量作为其边界条件,根据一维河网模型的计算结果来确定;对出水口门则可给出流量或水位过程作为边界条件。而闭边界即为实际存在的陆边界,在计算中可取水力要素法向偏导为 0。

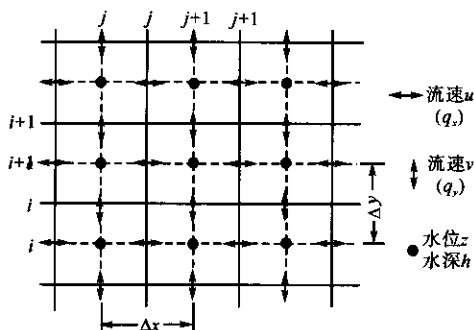
内边界条件 在蓄滞洪区内,有建筑工程或几个蓄滞洪区之间需要通过分洪口门分洪时,其水流流动模拟一般不能按照圣维南方程组进行求解,可采用堰流和闸孔出流公式来描述^[6]。

糙率系数 糙率 n 是水流和河床相互作用过程中反映河道边界粗糙情况、河道形态等所有影响水流阻力因素的综合参数,其取值的正确与否直接影响到水力计算结果的精度。在河道二维水流模型中,目前常采用李义天处理的方法,在计算过程中求出糙率沿河宽分布^[7];在蓄洪区内洪水演进模拟中,糙率则需要根据区内计算单元的实际地形情况和植被情况等,由实测资料分析并参考对比其他数据^[6]得到。

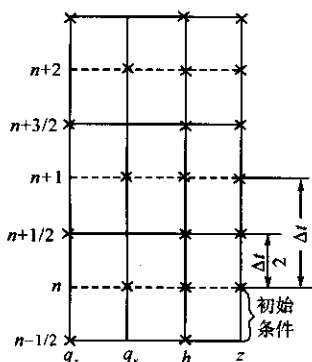
2 模型方程的数值求解

为了满足计算过程中水量和动量守恒,本模型方程采用逆风守恒格式的有限差分方法^[8]进行离散。该计算格式能节约计算内存,提高计算速度,且更符合洪水流动的实际情况^[9]。求解采用 ADI 方法^[10],该方法通过多重运算求解若干未知变量,本模型中即为 q_x 、 q_y 、 z 和 h 等 4 个变量。计算的网格系统是在空间和时间上交错的网格,如图 1 所示。图 1(a)为空间交错网格,每个子网格对应变量 q_x 、 q_y 、 z 和 h ,空间指数 i 和 j 表示子网格的位置。图 1(b)为时间交错网格,每一时间步长 Δt 被分为两部分,变量 q_x 和 q_y 只在每个 Δt 处给出,且错开 $\Delta t/2$,而 z 和 h 则在每个 $\Delta t/2$ 处给出,所

需的初始条件在时刻 $(n-1/2)$ 处为 q_x 和 h , 在时刻 n 处为 q_y 、 z 和 h .



(a) 空间交错网格



(b) 时间交错网格

图 1 ADI 方法物理量网格布置

Fig. 1 Grid layout of physical quantities by ADI method

将相应变量值向前推进 Δt , 这一步需要分为两部分: 前半步先对 x 方向的偏导项采用隐格式离散求解, 后对 y 方向的偏导项离散求解; 后半步则反之.

2.1 方程的离散与求解

在前半步 $n\Delta t \rightarrow (n+1/2)\Delta t$ 中, 对式(1)和式(2)进行离散联立求解 $z_{i,j}^{n+1/2}$ 和 $(q_x)_{i+1/2,j}^{n+1/2}$, 把求得的 z 和 q_x 作为当前计算时段已知值代入式(3), 离散求解 $(q_y)_{i,j+1/2}^{n+1/2}$.

离散时采用时间前差和空间中心差, 对流项采用逆风格式. 离散后式(1)和式(2)分别表示为

$$(a_1)_{i,j} (q_x)_{i-1/2,j}^{n+1/2} + (b_1)_{i,j} z_{i,j}^{n+1/2} + (c_1)_{i,j} (q_x)_{i+1/2,j}^{n+1/2} = (f_1)_{i,j} \quad (4)$$

$$(a_2)_{i,j} (q_x)_{i-1/2,j}^{n+1/2} + (b_2)_{i,j} z_{i,j}^{n+1/2} + (c_2)_{i,j} (q_x)_{i+1/2,j}^{n+1/2} + (d_2)_{i,j} z_{i+1,j}^{n+1/2} + (e_2)_{i,j} (q_x)_{i+3/2,j}^{n+1/2} = (f_2)_{i,j} \quad (5)$$

式中 $(a_1)_{i,j} = -\Delta t / \Delta x_{i,j}$; $(b_1)_{i,j} = 1$;

$$(c_1)_{i,j} = -(a_1)_{i,j};$$

$$(f_1)_{i,j} = \frac{\Delta t}{\Delta y_{i,j}} [(q_y)_{i,j+1/2}^n - (q_y)_{i,j-1/2}^n];$$

$$(a_2)_{i,j} = -\max[(q_x)_{i+1/2,j}^n \rho] \frac{\Delta t}{\bar{h}_{i+1/2,j}^n \Delta x_{i,j}};$$

$$(b_2)_{i,j} = -g \bar{h}_{i+1/2,j}^n \frac{\Delta t}{\Delta x_{i,j}};$$

$$(c_2)_{i,j} = 1 + |(q_x)_{i+1/2,j}^n| \frac{\Delta t}{\bar{h}_{i+1/2,j}^n \Delta x_{i,j}} + \frac{g n_{i,j}^n \Delta t}{(\bar{h}_{i+1/2,j}^n)^{7/3} \sqrt{((q_x)_{i+1/2,j}^n)^2 + ((\bar{q}_y)_{i+1/2,j}^n)^2}};$$

$$(d_2)_{i,j} = -(b_2)_{i,j};$$

$$(e_2)_{i,j} = -\max(-(q_x)_{i+1/2,j}^n \rho) \frac{\Delta t}{\bar{h}_{i+1/2,j}^n \Delta x_{i,j}};$$

$$(f_2)_{i,j} = (q_x)_{i+1/2,j}^n - \frac{(\bar{q}_y)_{i+1/2,j}^n \Delta t}{2 \bar{h}_{i+1/2,j}^n \Delta y_{i,j}}.$$

$$[(q_x)_{i+3/2,j+1}^n - (q_x)_{i+1/2,j-1}^n];$$

$$\bar{h}_{i+1/2,j}^n = \frac{1}{2} (h_{i,j}^n + h_{i+1,j}^n);$$

$$(\bar{q}_y)_{i+1/2,j}^n = \frac{1}{4} [(q_y)_{i,j-1/2}^n + (q_y)_{i,j+1/2}^n +$$

$$(q_y)_{i+1,j-1/2}^n + (q_y)_{i+1,j+1/2}^n];$$

结合初始条件和边界条件, 式(4)和式(5)的系数矩阵为主对角占优的带状矩阵, 采用双向扫描法^[11], 每次进行一行, 直到所要求的行数为止, 可求解得到 $(n+1/2)\Delta t$ 时的 $z_{i,j}^{n+1/2}$ 和 $(q_x)_{i+1/2,j}^{n+1/2}$. 然后把所求得值代入式(3)进行离散求解相应时刻的 $(q_y)_{i,j+1/2}^{n+1/2}$, 仍采用隐格式方法计算. 式(3)可离散为

$$(a_3)_{i,j} (q_y)_{i-1/2,j+1/2}^{n+1/2} + (b_3)_{i,j} (q_y)_{i,j+1/2}^{n+1/2} + (c_3)_{i,j} (q_y)_{i+1/2,j+1/2}^{n+1/2} = (f_3)_{i,j} \quad (6)$$

式中:

$$(a_3)_{i,j} = -\frac{\Delta t}{2 \Delta x_{i,j}} \frac{(\bar{q}_x)_{i,j+1/2}^{n+1/2}}{\bar{h}_{i,j+1/2}^{n+1/2}}; (c_3)_{i,j} = -(a_3)_{i,j};$$

$$(f_3)_{i,j} = (q_y)_{i,j+1/2}^n - g \bar{h}_{i,j+1/2}^{n+1/2} \cdot$$

$$\frac{\Delta t}{\Delta y_{i,j}} (z_{i,j+1}^{n+1/2} - z_{i,j}^{n+1/2});$$

$$(b_3)_{i,j} = 1 + \frac{\Delta t}{2 \bar{h}_{i,j+1/2}^{n+1/2} \Delta y_{i,j}} [(q_y)_{i,j+3/2}^n -$$

$$(q_y)_{i,j+1/2}^n] + \frac{g (n_{i,j}^n)^2}{(\bar{h}_{i,j+1/2}^{n+1/2})^{7/3}} \cdot$$

$$\sqrt{((q_y)_{i,j+1/2}^n)^2 + ((\bar{q}_x)_{i,j+1/2}^{n+1/2})^2};$$

$$\bar{h}_{i,j+1/2}^{n+1/2} = \frac{1}{2} (h_{i,j}^{n+1/2} + h_{i,j+1}^{n+1/2});$$

$$(\bar{q}_x)_{i+1/2,j}^{n+1/2} = \frac{1}{4} [(q_x)_{i-1/2,j}^{n+1/2} + (q_x)_{i+1/2,j}^{n+1/2} +$$

$$(q_x)_{i-1/2,j+1}^{n+1/2} + (q_x)_{i+1/2,j+1}^{n+1/2}];$$

结合约束条件, 式(6)的系数矩阵同样为一主对角占优的矩阵, 采用双向扫描法即可得到 $(n+1/2)\Delta t$

时的 $(q_y)^{n+1/2}_{i,j+1/2}$ 。
在后半步 $(n+1/2)\Delta t \rightarrow (n+1)\Delta t$ 中,利用在前半步求解所得的 $z^{n+1/2}$ 、 $(q_x)^{n+1/2}$ 和 $(q_y)^{n+1/2}$,对式(1)和式(3)进行离散联立求解 z^{n+1} 和 $(q_y)^{n+1}$,对式(2)离散采用隐格式求解 $(q_x)^{n+1}$ 。其计算过程与前半步相同,只需要按列进行求解。

2.2 动边界问题的处理

在二维洪水演进模拟中,洪水在干河床上演进计算问题,即动边界问题,是模拟中的主要难点之一。动边界是计算域中有水和无水区域的界线,在仿真中对动边界的处理有两种方法:①追踪动边界的准确位置,然后把计算域分为有水和无水区域进行计算,该方法理论上较严谨,但在程序中处理起来不实用;②让整个计算域均参与计算,通过某些技巧对干河床网格进行处理,如窄缝法、冻结法及最小水深假设等方法^[12,13],可大大简化程序。但在模拟蓄滞洪区干河床洪水演进过程中,直接采用上述方法有一定的局限性。窄缝法中窄缝的宽度难以确定,会产生较大误差,而采用隐格式离散方程时,直接用冻结法和最小水深假设,对地形较复杂的情况,在洪水还未传播到的地方会产生水流虚假流动。为取得更好的仿真效果,本模型提出水位平铺假设对干河床网格进行处理,即在计算中,对洪水还未传播到的网格进行水位假定,使计算能向前进行且合理。其具体思路为:判断干河床网格周围是否有水,若

有水就采用冻结法进行处理,把动边界简化为固定边界计算,若均无水,则进行水位平铺假设,假定该网格的水位为其所在行或列中距该网格最近的有水和无水网格交接处的水位,假设有一最小水深($h_{\min}=0.001\text{ m}$),同时将该网格的糙率加至无穷大,等水流到该网格后,再把糙率恢复到真实糙率。

3 二维洪水演进数值仿真系统的实现

实时洪水调度仿真系统由复杂河网一维模型、二维洪水演进模型、灾害损失评估模型和优化调度模型4个模型分别形成的子系统构成,各部分有机结合又相互独立。二维洪水演进数值仿真系统作为其中重要的一环,主要任务是利用实测资料和一维河网模型计算的数据,通过建立的数值模型计算洪水在蓄滞洪区内任一位置的水位、流速、淹没水深和历时,并模拟其演进过程,为进一步洪灾评估、GIS可视化分析和优化调度提供可靠的数据^[4]。该系统基本结构功能如图2所示。

该系统通过VC++和Fortran混合编程来实现,系统设计界面如图3所示。主要是由数据输入(包括基本参数、蓄洪区数据、入水口门信息、时段及流量数据和网格属性等)、数据查看、计算和计算结果分析等4个子模块构成。

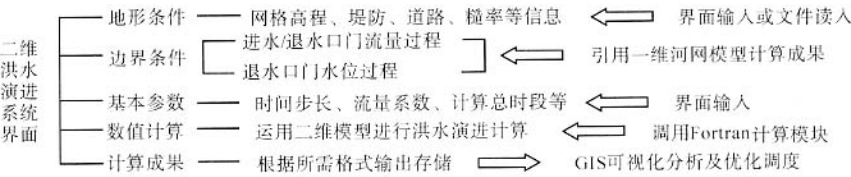


图2 系统基本功能结构

Fig. 2 Basic functional architecture of the system

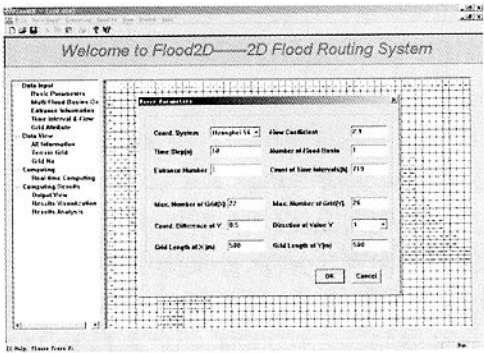


图3 系统界面设计

Fig. 3 Interface design of the system

万方数据

4 系统应用及分析

4.1 永定河分洪区二维洪水演算分析

永定河是海河流域最大的水系之一,官厅水库以下至三家店是永定河的暴雨中心区,洪水来得猛涨得快,对下游威胁很大,是京津冀地区防洪的重点和难点。为了掌握永定河的洪水运动规律,提出相应的防洪减灾措施,利用本系统对永定河泛区中的7个分洪小区和3个蓄滞洪区(三角淀、淀北、西七里海)进行了二维洪水演算,可获得在永定河发生不同频率洪水时,采用不同的分洪措施后各区的洪水演进过程。由于计

算量大,计算成果较多,现选择典型的淀北蓄滞洪区方案进行计算分析。

4.1.1 基本计算条件

淀北蓄滞洪区位于永定新河左岸(如图4所示),总面积 215 km^2 ,共有3个分洪口门,即22+200口门、7+100口门和郎园口门。当西七里海已经运用,永定新河右堤出现险情水位仍继续上涨,先启用22+200口门分洪。当西七里海口门及22+200口门已分洪,仍不能解决永定新河泄流不畅问题时,利用7+100口门向淀北分洪。而郎园口门则在解决永定河超标准洪水时运用。

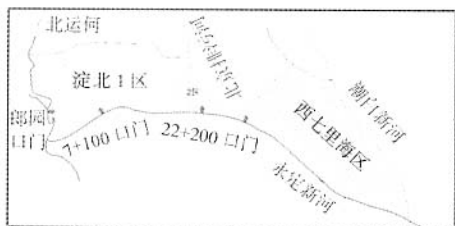


图4 淀北示意

Fig.4 Sketch map of Dianbei

计算时,高程系统采用黄海56标准,在1:10 000地形图上,将蓄滞洪区剖分成 $500\text{ m} \times 500\text{ m}$ 均匀正方形网格(共880个)。蓄滞洪区土地利用信息共分为10类,通过类比各类下垫面情况,确定相应的糙率值,取值在0.035~0.09之间。计算中进水口门采用一维河网模型求得的流量过程线,退水口门根据口门内外的水位差计算,口门外河道水位采用一维河网模型的计算结果。笔者分析50年一遇来水,北运河控泄流量为 $200\text{ m}^3/\text{s}$,北京排污河和潮白新河入汇流量分别为 $200\text{ m}^3/\text{s}$ 和 $2100\text{ m}^3/\text{s}$,口门开启条件以校核水位控制,此时淀北7+100口门和22+200口门打开。

4.1.2 计算结果分析

通过二维模型计算,可获得洪水在滞洪区内的演进过程、传播速度及区内任一位置任一时刻的水位、流速、水深和淹没损失等成果。在上述给定方案计算条件下,淀北分洪量较大,图5显示了该方案下淀北不同位置的水位过程线。22+200口门一开始就开口,开始时进水流量较大,7+100口门在第402 h开口,分洪流量较大。22+200口门打开后水流逐渐向引滦明渠方向流动,并越过明渠向淀北中部扩散,100 h到400 h之间进水量很小,水位基本是平的。400 h以后,上游来流量增大,7+100口门分洪流量迅速加大,22+200口门的进水量也加大,水流由东南和西南两个方向同时向淀北内部流动,到计算结束时,整个淀北滞洪区的水

位基本一致,最高水位达到4.75 m,远超过淀北设计滞洪水位。

图6是淀北蓄滞洪区最大水深分布图。由图可知,受地势东南低西北高的影响,最大水深仍发生在明渠东南,大于3.5 m;明渠以西附近水深在3.0~3.5 m左右,7+100口门附近、郎园以北、京山铁路以东宽约4 km的长条形区域水深在2.5~3.0 m左右,其他区域水深小于2.5 m。

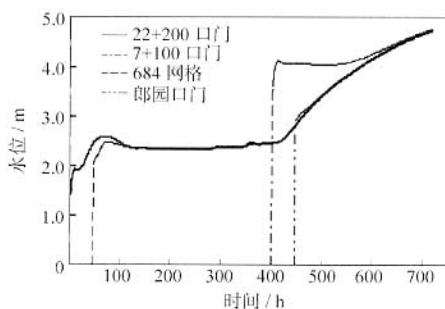


图5 淀北典型位置水位过程线

Fig.5 Level hydrograph of several typical locations in Dianbei

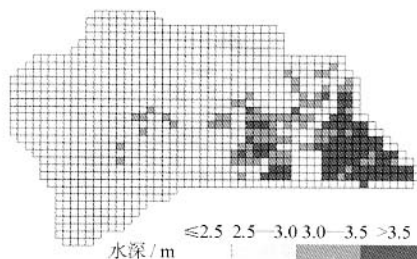


图6 淀北最大水深分布图

Fig.6 Distribution map of maximum water depth in Dianbei

4.2 模型合理性分析

由于永定河自1963年后未来过大水,蓄滞洪区没有启用,缺乏验证所需的资料,而同属海河流域的大清河系于1996年8月来了一场大洪水,启用东淀蓄滞洪区(如图7所示)分洪,得到一些宝贵的实测资料,可对模型的合理性进行验证分析。

东淀蓄滞洪区总面积 377.26 km^2 ,东西长40 km,南北宽约7 km。大清河系北支来水,除入白洋淀外,主要从新盖房枢纽向东淀分洪。1996年8月6日20点,新盖房站开始向东淀分洪,分洪流量 $1100\text{ m}^3/\text{s}$,最大达 $1355\text{ m}^3/\text{s}$,进入东淀的水量为6.03亿 m^3 。洪水到达台头镇的时间是8月14日8点,8月16日20点第六堡见水,8月19日2点洪水到达独流减河进洪闸,第六堡最高水位6.39 m。

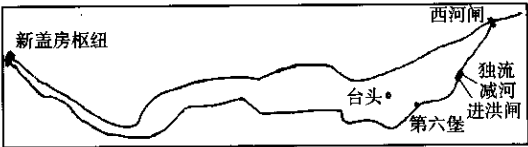


图 7 东淀示意
Fig.7 Sketch map of Dongdian

在东淀 1:10 000 地图上划分 500 m×500 m 网格,新盖房分洪过程作为进水边界条件.8 月正是高杆作物长势茂盛的时候,加之东淀内沟渠纵横,因此适当加大糙率值.糙率取值为:村庄 0.15,树丛 0.14,河道 0.035,行洪道 0.09,芦苇 0.15,旱地 0.13.计算结果见表 1,与实测数据相比,数值计算得到的时间有所超前,这可能是数值求解方法引起计算洪水波峰面相对于实际波峰面的坦化效应.但从洪水传播速度看,计算结果的误差在可接受范围内,表明模型基本合理.

表 1 东淀计算与实测的洪水演进过程对比

Tab.1 Comparison of flood routing between the calculated and the measured in Dongdian

测站	台头镇	第六堡	独流减河进洪闸
实测见水时间	8 月 14 日 8 点	8 月 16 日 20 点	8 月 19 日 2 点
计算见水时间	8 月 13 日 2 点	8 月 16 日 7 点	8 月 18 日 19 点

5 结 语

洪水灾害是人类所面临最严重的自然灾害之一,为了能及时获得防汛信息,准确地作出洪水预报,科学地进行防洪调度决策,有必要建立一套功能强大、使用方便的实时洪水调度仿真系统.为了能够模拟分洪后洪水在分洪区内的演进过程,获得任一时刻、任一位置的水位、流量和淹没损失等信息,笔者考虑多种约束条件,进行了数学建模,并根据洪水演进模拟对速度要求高的特点,采用 ADI 法求解,从而实现了二维洪水演进数值仿真系统的建立.该系统在永定河分洪区二维洪水演进中的应用表明其能够适应复杂的地形条件,具有较好的稳定性和通用性,并对模型合理性进行了分析,结果可信.

参考文献:

[1] Blackburn J ,Hicks F E. Combined flood routing and flood level forecasting [J]. *Can J Civ Eng* ,2002 ,29(2) : 64—75.
[2] Hsua M H ,Fua J C ,Liu W C. Flood routing with real-time stage correction method for flash flood forecasting in the Tanshui River , Taiwan [J]. *Journal of Hydrology* ,2003 ,283

(1—4) : 267—280.
[3] Feng P ,Rui X F. Method of flood routing for multibranch rivers [J]. *ASCE Journal of Hydraulic Engineering* ,1999 ,125(3) : 271—276.
[4] 周潮红. 防汛实时优化调度系统的建立与初步应用 [D]. 武汉 :武汉大学水利水电学院,2002.
Zhou Chaohong. Establishment and Introduction to Application of Real Time Optimization Flood Regulation System [D]. Wuhan :School of Water Resource and Hydropower , Wuhan University ,2002 (in Chinese).
[5] 谭维炎. 计算浅水动力学 [M]. 北京 :清华大学出版社,1998.
Tan Weiyan. *Computational Shallow Water Dynamics* [M]. Beijing :Tsinghua University Press ,1998 (in Chinese).
[6] 吴持恭. 水力学(上册) [M]. 北京 :高等教育出版社,1993.
Wu Chigong. *Hydraulics* (Vol. 1) [M]. Beijing :High Education Press ,1993 (in Chinese).
[7] 李义天,谢鉴衡. 冲积平原河流平面流动的数值模拟 [J]. *水利学报* ,1986(11) : 9—15.
Li Yitian ,Xie Jianheng. Numerical simulation of two-dimensional flow in alluvial rivers [J]. *Journal of Hydraulic Engineering* ,1986(11) : 9—15 (in Chinese).
[8] Holt M. *Numerical Methods in Fluid Dynamics* [M]. Berlin : Springer-Verlag ,1984.
[9] 金忠青. N-S 方程的数值解和紊流模型 [M]. 南京 :河海大学出版社,1989.
Jin Zhongqing. *Numerical Solution and Turbulent Flow Model of N-S Equation* [M]. Nanjing : Hohai University Press ,1989 (in Chinese).
[10] Stelling G S. On the Construction of Computational Methods for Shallow Water Flow Problems [D]. Delft :Delft University of Technology , the Netherlands ,1983.
[11] Cunge J A ,Holly F M ,Vewey A. *Practical Aspects of Computational River Hydraulics* [M]. Boston :Pitman ,1980.
[12] 何少苓,王连祥. 窄缝法在二维边界变动水域计算中的应用 [J]. *水利学报* ,1986(12) : 11—19.
He Shaoling , Wang Lianxiang. Application of the slot method in the computation of two dimensional flow with transient boundary [J]. *Journal of Hydraulic Engineering* ,1986(12) : 11—19 (in Chinese).
[13] 程文辉,王船海. 用正交曲线网格及“冻结法”计算河道流速场 [J]. *水利学报* ,1986(6) : 18—25.
Cheng Wenhui , Wang Chuanhai. The calculation of flow pattern in rivers by the orthogonal curvilinear coordinates and “ condensation ” technique [J]. *Journal of Hydraulic Engineering* ,1986(6) : 18—25 (in Chinese).