

文章编号:1004-9045(2008)04-0330-04

# 武汉城市强降水内涝仿真模拟系统研制

陈波,冯光柳

(中国气象局武汉暴雨研究所,武汉 430074)

**摘要:**通过采集武汉市城市地理、河道地形、工程设施、气象监测、防洪调度等基础空间信息,构建完整的武汉市暴雨内涝数学模型,反映了降雨量分布、产汇流原理、地面流、河道明渠流、堰流等多种工程情况及其相互连接问题。此外,选择典型的暴雨个例作为降雨边界条件,代入模型中进行计算,将模型的计算结果和实测结果进行比较,分析两者的绝对误差及误差分布特征。结果表明:城市暴雨内涝仿真模拟系统的模拟结果基本可信,模型具有良好的适用性。

**关键词:**暴雨内涝;仿真系统;武汉市

**中图分类号:**P412.2      **文献标识码:**A

## 1 引言

暴雨内涝灾害是由于雨量过多,地势低洼,积水不能及时排除而形成的自然灾害。城市是暴雨内涝灾害风险变化最迅速、最显著的区域<sup>[1]</sup>。近年来,高速发展的城市化进程引起城市水文特性的显著变化:市区房屋建筑密集,混凝土覆盖面积增大,雨水渗透减少,雨水滞留与调蓄功能下降,而“城市热岛效应”又造成市区降水频率增大,雨时延长。使以往设计的排水系统排涝标准降低,雨水更易积漫,排涝历时加长。城市经济类型的多元化及资产的高密集性使城市的综合承灾能力脆弱,即使在同等致灾条件下其损失总量必然增大。因此,采用科学方法建立城市暴雨洪涝监测、预报、灾害风险评估一体化的防汛风险信息系统是十分必要的。

国外在城市降水径流模型及城市排水系统的数值计算模型的开发上,最有代表性的是美国城市暴雨雨水管理模型(SWMM)<sup>[2]</sup>,对城市排水系统有很强的模拟计算功能。模型为动态降雨径流模拟模型,对径流量水质进行单一事件模拟或者连续模拟。模型将排水流域划分为若干子流域,通过计算子流域中产生的径流,以及在管道和明渠中的流速、水深和水质等来估价整个流域径流情况。SWMM 曾在美国二十多个城市使用,解决当地排水流域的水量水质问题,并且在加拿大、欧洲和澳大利亚也有广泛应用。

我国虽然起步较晚,但发展迅速,天津气象科研

所与中国水利水电科学研究院减灾中心、天津大学建筑工程学院合作,研制了天津市城区沥涝仿真模型<sup>[3]</sup>,该模型具备了一定的沥涝动态监测预报能力,在国内处于领先地位,部分成果达到国际先进水平。本文通过构建完整的武汉市暴雨内涝数学模型、概化城市地理信息,从而建立武汉城市强降水内涝仿真模拟系统。并通过与实际情况的对比分析,验证仿真模型的模拟效果。

## 2 城市暴雨内涝仿真模型的基本原理

模型以城市地表与明渠河道水流运动为主要模拟对象,基本控制方程以平面二维非恒定流的基本方程为骨架<sup>[4-6]</sup>。同时,针对小于离散网格尺度的排水渠涌或河道,在二维模型中结合采用了一维明渠非恒定流方程的算法<sup>[7-12]</sup>。

城市局部地区地形复杂,各种建筑物,特别是各种防洪工程设施对暴雨径流影响较大。为了更好地反映城市暴雨径流的特点,该模型应用有限体积法<sup>[13]</sup>的思想,采用无结构不规则网格设计计算区域<sup>[14]</sup>。网格可以设计成三边形、四边形或五边形。网格各边定义成通道,其法线方向可为任意方向。如图 1 所示。按照有限体积法,取单元网格为控制体,在网格中心处计算水位  $H$ ,在网格周边通道的中点处计算流量  $Q$ 。其中,水位采用的是网格平均值,流量则为通道平均值。另外,水位和流量在时间上采取时间交错计算方式(图 1)。

收稿日期:2008-04-17;定稿日期:2008-06-15

基金项目:中央级公益类科研院所基本科研业务专项中国气象局武汉暴雨研究所(0607)、湖北省科技攻关计划(2007AA301B57)、中小流域洪水预警预报方法研究及中国气象局武汉暴雨研究所暴雨研究开放基金(IHR2005K05)共同资助

作者简介:陈波,男,1976 年生,高级工程师,主要从事暴雨应用研究。E-mail:chenbo@whihr.com.cn

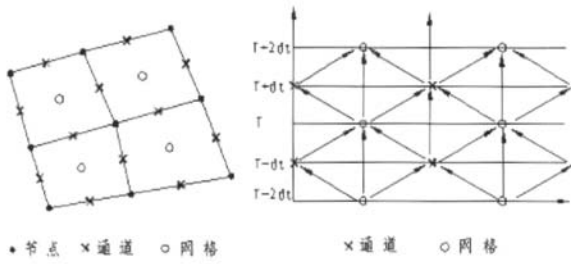


图 1  $H$  和  $Q$  的空间布置方式(左)和时间交错计算方式(右)

模型采用无结构不规则网格技术,根据地形地物的特征,将城市地表及尺度较大的一级河道,划分成不规则的网格单元,形成陆地型、湖泊型、河道型网格。同时根据网格内所含的地物特征,赋网格糙率数值,根据网格内房屋所占网格面积的比例,赋网格的建筑面积修正率,取值范围 0~100。对于不同类型的通道,可以采用不同的方法对其控制方程进行简化和离散<sup>[15-16]</sup>。

连续方程根据高斯定理对任意多边形网格的显式离散格式为:

$$H_i^{T+2dt} = H_i^T + \frac{2dt}{A_i} \sum_{k=1}^K Q_{ik} L_{ik} + 2dtq_i^{T+dt} \quad (1)$$

式中,  $A_i$  为网格面积;  $L_{ik}$  为通道长度,即多边形网格的边长;  $Q_{ik}$  为通道上的流量;  $q_i$  为源汇项。

河道型通道的动量方程,可以忽略对流项,离散为:

$$Q_j^{T+dt} = Q_j^{T-dt} - 2dtgH_j \frac{Z_{j1}^T - Z_{j2}^T}{dL_j} - 2dtg \frac{n^2 Q_j^{T-dt} |Q_j^{T-dt}|}{H_j^{7/3}} \quad (2)$$

式中,  $Z_{j1}^T, Z_{j2}^T$  为通道两侧单元的水深;  $g$  为重力加速度;  $H_j$  为通道上的平均水深,  $dL_j$  取通道两侧单元中心至通道中点距离之和。

地面型通道的动量离散方程:

$$Q_j^{T+dt} = \text{sign}(Z_{j1}^T - Z_{j2}^T) H_j^{5/3} \left( \frac{|Z_{j1}^T - Z_{j2}^T|}{dL_j} \right)^{1/2} \frac{1}{n} \quad (3)$$

连续堤或缺口堤的通道,其流量采用宽顶堰流公式计算,即:

$$Q_j^{T+dt} = m\sigma_s \sqrt{2g} H_j^{3/2} \quad (4)$$

城市内二级河道模拟成特殊通道,以反映水流沿河而流以及河道与两侧陆地之间水量交换的现象。特殊通道与两侧网格之间的流量,采用宽顶堰流公式计算;沿河道的单宽流量采用河道型通道计算公式计算,计算特殊单元的水深公式如下:

$$H_{di}^{T+2dt} = H_{di}^T + \frac{2dt}{A_{di}} \left( \sum_{k=1}^N Q_{ik}^{T+dt} b_{ik} + \sum_{j=1}^{2N} Q_{ij}^{T+dt} L_{ij}/2 \right) + 2dtq_{di}^{T+dt} \quad (5)$$

式中,  $A_d$  为特殊单元的面积;  $q_d$  为特殊单元上的源汇项,即特殊单元上的降雨强度,可以取特殊节点处的降雨强度作为整个单元的平均值;  $b$  为特殊通道的宽度;  $L$  为特殊通道的长度;  $Q_{ik}$  为沿通道上的单宽流量,  $\sum_{k=1}^N Q_{ik}^{T+dt} b_{ik}$  为沿通道上的流量之和;  $Q_{ij}$  为通道与

网格之间的单宽流量,  $\sum_{j=1}^{2N} Q_{ij}^{T+dt} L_{ij}/2$  为通道与网格之间交换的流量之和。

雨量站观测的或预报的降雨量,必须采用有效的插值方法,得到面雨量,作为降雨边界条件。因此,提出了适用的二次曲面雨量计算方法。设雨量观测站的个数为  $N$ 。对计算区域内任意一位置  $(x, y)$ , 可以选取与之最近的  $n (n \leq N)$  个观测点,由这  $n$  个观测点的实测降雨量  $q_1, q_2, \dots, q_n$ , 用最小二乘法拟合一个二次曲面,  $(x, y)$  点的降雨量可以由这个二次曲面来确定。

仿真模型的地表径流量由下式计算:

$$q = Rf/A_{XY} \quad (6)$$

式(6)中  $q$  为地表径流量,  $A_{XY}$  为面积修正值,  $R$  为网格面雨量,  $f$  为径流系数。仿真模型以地表径流量为源信息。

### 3 武汉市城市地理信息概化

武汉市暴雨内涝模型以武汉市中环线以内为计算范围。根据武汉市的地形、地貌特点,将长江、汉江划分为若干河道型网格,城区的一些湖泊、水体划分成湖泊型网格,其余划分成面积不等的不规则陆地型网格。对城市中心地区以及容易积水地区采用较密的网格,其他地区采用较稀疏的网格。共划分 2336 个不规则网格,计算通道 6031 个,节点 3209 个,网格单元分布见图 2。

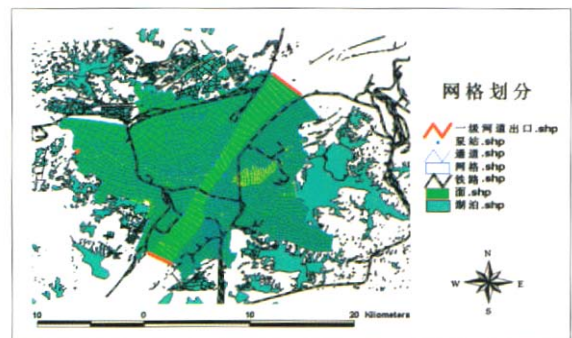


图 2 武汉市区网格设计示意图

模型中按照武汉市排水体系,划分了 17 个主要的独立管网,独立管网的分布如图 3。当出现积水时,武汉市各泵站向河道抽排地面和管道内的积水,积水

多时直接开闸门向河道泄流。

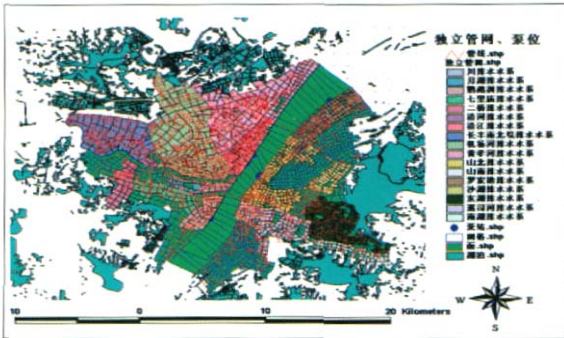


图 3 武汉市暴雨积涝模型独立管网、泵站位置示意图

### 4 武汉市 2004 年 7 月 17—19 日特大暴雨的验证

本次暴雨过程,降雨主要集中在 17 日 21 时至 19 日 21 时,区域的最大逐时雨量值达到 33.2 mm,过程累计降雨量达到 243.9 mm,造成了武汉市区的内涝灾害。根据武汉气象中心提供的降水资料和积水资料,模型对这场暴雨过程进行了验证计算。选取市区雨量站逐时降雨过程资料(图 4),通过二次曲面插值算法,计算出各个网格的面雨量,作为降雨边界条件。

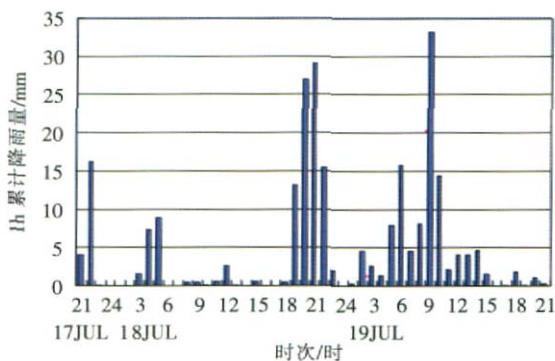


图 4 2004 年 7 月 17—19 日降雨过程图

根据武汉市汛期排水运作规则,汛期泵站、管道、河道要做到上下游排水的协调,达到河道水位低,排水管道基本腾空。本方案的计算初始条件为:外河道长江、汉江河道水位为汛期较高水位 24.0 m;巡司河、罗家港等二级河道水位为 23 m;所有闸门关闭、排水泵站均开启。

图 5 和图 6 分别为本次暴雨过程的计算结果和暴雨积水实况。对比两图可以看出,计算积水区的分布与实况比较接近。

对各网格单元的计算水深和实际水深的误差进行统计。在参与计算的 2336 个网格单元中,河道、湖泊共占有 218 个。河道、湖泊为储水载体。本次验证将这些网格除外,只对其余的 2118 个网格单元的验证结果进行统计。实测水深值与计算水深值比较的误差绝对值如表 1 所示。

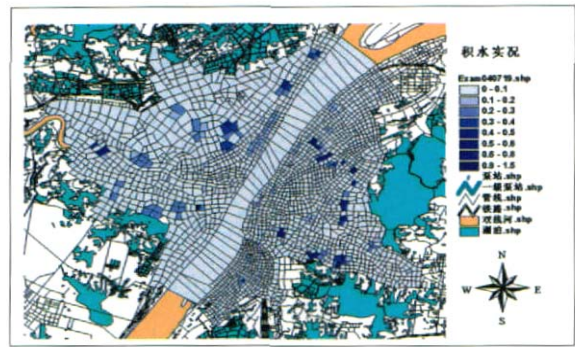


图 5 2004 年 7 月 17—19 日暴雨过程积水分布实况图

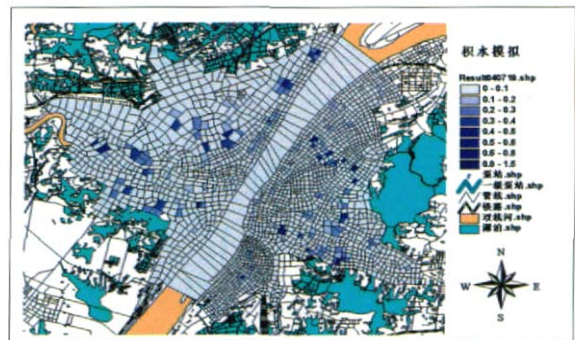


图 6 2004 年 7 月 17—19 日暴雨过程积水分布模拟图

表 1 实测水深值与计算水深值误差的绝对值(R)

	(R)/m			
	R ≤ 0.1	0.1 < R ≤ 0.2	0.2 < R ≤ 0.3	R > 0.3
所占网格数/个	1292	402	85	339
所占百分比/%	61%	19%	4%	16%

由表 1 可见,模拟的积水误差主要分布在 20 cm 以内,大约占 80%。但也不应忽视还有 16% 的网格模拟的积水误差 > 30 cm。在这些 > 30 cm 的误差中,85% 为计算积水偏小。

分析产生误差的原因,主要有以下几点:

(1) 城区雨量信息时间、空间密度不够。城市短时暴雨往往在空间分布上存在较大变化。本次降雨过程,降雨历时 48 h。而同期武汉市仅有一个气象站可以提供准确的雨量资料,因此由插值法求得的雨量空间场强化了降雨观测“点”的作用,未必能完全反映降雨的空间分布特征,也是形成计算误差的原因之一。

(2) 模型网格化下垫面地理信息引起的概化误差。模型网格大小的设计主要考虑市区街道、建筑物和地形分布,模型在武汉市中心城区加密网格,而在内环以外放大了网格。考虑到模拟计算稳定性和计算时间的要求,网格尺度不能过小。因此如果积水片面积较小,则包含此区域的网格高程就会坦化该处地势,使计算水深值不能反映出局部低洼点的实际积水深度。

(3) 排水管网参数化误差。城市排水管网是由支、主管网组成的非常复杂的树枝状系统,管道间水体流动

主要由管道坡度决定,管道的间距主要由市区道路的分布决定,因此管道的分布间距远远小于网格的尺度。由于仿真模型中每个网格都包含几条支管或几条支管与干管,管道参数就成为概化值,从而影响计算的精度。

(4)积水观测误差。实测积水时一些人为因素会造成误差,如实测水深值的精度只达到分米,积水的来退水时间主要由人估计得到。

## 5 结论

该文给出了城市暴雨内涝仿真模拟系统的建设思路并应用该模型对武汉市的暴雨过程进行了验证。结果表明:城市暴雨内涝仿真模拟系统的模拟结果基本可信,模型具有良好的适用性。尤其是仿真系统较好地再现了历史罕见的特大暴雨。主要结论如下。

(1)以城市地表与明渠河道水流运动为主要模拟对象,以平面二维非恒定流的基本方程为骨架,针对小于离散网格尺度的排水渠涌或河道,结合一维明渠非恒定流方程的算法,设计城市暴雨内涝仿真模型系统。

(2)根据武汉市的地形、地貌及排水系统特征概化仿真系统的各类参数,应用有限元体积法的思想,采用无结构不规则网格作为模型的计算单元,设计了具有武汉市特点的暴雨内涝仿真数据结构。

(3)对2004年7月17—19日武汉市特大暴雨过程内涝积水的情况进行仿真模拟,其模拟效果与实测值基本吻合,模型可以较好地模拟降雨渍涝的积水深度、积水范围。

## 参考文献:

- [1] 解以扬,韩素芹,由立宏.天津市暴雨内涝灾害风险分析[J].气象科学,2004,24(3):342-349.
- [2] Lewis A Rossman. Storm Water Management Model User's Manual Version 5.0[M]. U.S:ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY,2004.
- [3] Li Daming,Zhang Hongping,Li Bingfei,et al. Basic Theory and Mathematical Modeling of Urban Rainstorm Water Logging [J]. Journal of Hydramechanics, Ser.B,2004,16(1):17-27.
- [4] 谭维炎.计算浅水动力学[M].北京:清华大学出版社,1998.
- [5] 李娜,仇劲卫,程晓陶,等.天津市城区暴雨内涝仿真模拟系统的研究[J].自然灾害学报,2002,11(2):112-118.
- [6] 汪德罐.计算水力学理论与应用[M].南京:河海大学出版社,1989.
- [7] 辜晓青,章毅,殷剑敏,等.南昌市城市积涝预警系统研究[J].江西农业大学学报,2005,27(3):477-480.
- [8] 高新科.明渠恒定流的系统仿真[J].系统仿真学报,1996,8(1):47-52.
- [9] 徐向阳,刘俊,郝庆庆,等.城市暴雨积水过程的模拟[J].水科学进展,2003,14(1):193-196.
- [10] 刘俊.城市雨洪模型研究[J].河海大学学报,1997,25(6):21-24.
- [11] 刘俊,徐向阳.城市雨洪模型在天津市区排水分析计算中的应用[J].海河水利,2001(1):9-11.
- [12] 刘俊,方正杰,陆剑峰.连续模拟在城市排水设计中的应用探讨[J].河海大学学报(自然科学版),2003,31(6):609-611.
- [13] 王立辉,胡四一,龚春生.二维浅水方程的非结构网格数值解[J].水利水电工程学报,2006,1:8-13.
- [14] 景思睿,张鸣远.流体力学[M].西安:西安交通大学出版社,2001.
- [15] 吴江航,韩庆书.计算流体力学理论方法及应用[M].北京:科学出版社,1988.
- [16] 蔡亦钢.流体传输管道动力学[M].杭州:浙江大学出版社,1990.

# A Study on Simulating System of Rain Storm Water-logging in Wuhan City

CHEN Bo,FENG Guang-liu

(Wuhan Institute of heavy rain,CMA,Wuhan 430074)

**Abstract:** Collected basic space information in Wuhan city such as city geography, riverway terrain, engineering constructions, weather monitoring, prevent water-logging scheduling and so on, the integrated mathematical model about rainstorm water-logging of Wuhan city is constructed. The model includes many manifold engineering instances such as the phenomenon of rainfall distribution, runoff yielding and water routing principle, surface runoff, riverway open channel river, weir flow and their interlink.

As the rainfall boundary condition, the rainstorm case is selected to be applied in the model calculation. Compared with the observations, the result of model is analyzed in both the absolute error and error distribution characteristic to show that the simulation result of simulating system of rain storm water-logging in urban is basically credible, so the model has a good applicability.

**Key words:** Rainstorm waterlogging; Simulational system; Wuhan city