

城市暴雨内涝数学模型的研究与应用

解以扬¹, 李大鸣², 李培彦¹, 沈树勤³, 殷剑敏⁴, 韩素芹¹, 曾明剑³, 辜晓青⁴

(1. 天津市气象科学研究所, 天津 300074; 2. 天津大学建工学院, 天津 300072;

3. 江苏省气象台, 江苏 南京 210008; 4. 江西省气象科学研究所, 江西 南昌 330046)

摘要: 以城市地表与明渠、河道水流运动为主要模拟对象, 研制了模拟城市暴雨内涝积水的数学模型。模型以平面二维非恒定流的基本方程和无结构不规则网格划分技术为骨架, 同时, 针对小于离散网格尺度的河道或明渠, 应用了一维非恒定流方程的算法。采用分类简化处理的方法, 将通道分为河道型、路面型、特殊通道型(城市内的二级河道), 根据不同类型简化动量方程, 求任意网格各个通道上的单宽流量。采用一维非恒定流方程模拟地下排水管网内的水流, 并给出泵站、闸门、淹没出流管道等排水系统的处理方法。根据无结构不规则网格的设计思路, 按照天津、南京、南昌三市的地形地貌特征分别设计多边形的计算网格。介绍了城市面雨量的计算方法以及数学模型在天津市、南京市、南昌市的应用情况和误差分析。

关 键 词: 城市暴雨; 内涝灾害; 数学模型; 天津; 南京; 南昌

中图分类号: P333.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-6791(2005)03-0384-07

近年来, 暴雨造成的城市内涝灾害日益突出, 不仅加重了城市的防汛排涝的任务, 对经济建设和人民生活也造成较大影响。为进一步提高城市气象服务水平和能力, 天津市气象科学研究所曾与中国水利水电科学研究院合作研制了城市暴雨内涝灾害仿真模型^[1], 将水动力学与暴雨监测和预报结合起来, 直接模拟或预报暴雨造成的内涝灾害, 增强了气象服务的能力。在此基础上, 天津市气象科学研究所又与天津大学建筑工程学院、江苏省气象台、江西省气象科学研究所等单位合作, 共同开发了适用的城市暴雨内涝数学模型, 分别建立了天津、南京、南昌三市的城市暴雨内涝灾害的仿真模拟系统, 并于 2003 年汛期在 3 个城市开展了准业务试验。

1 城市暴雨内涝数学模型的基本原理及网格划分

城市暴雨内涝数学模型以城市地表与明渠、河道水流运动为主要模拟对象, 其基本控制方程以平面二维非恒定流的基本方程为骨架^[2]。同时, 针对小于离散网格尺度的排水渠系或河道, 在二维模型中结合一维明渠非恒定流方程的算法。

传统的数值模式计算, 通常采用规则矩形网格或拟一致的三角形网格对计算区域进行剖分。但是城市局部地区地形复杂, 街道、河流分布各异, 各种建筑物, 特别是各种防洪排涝工程设施在南方和北方城市差异很大, 对暴雨形成径流影响较大。为了更好地反映城市暴雨径流的特点, 模型应用有限体积法的思路, 采用无结构不规则网格^[3]。根据城市不同的地形地貌特征将网格设计成三角形、四边形或五边形, 网格各边定义成通道。取网格单元为控制体, 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 。水位具有网格平均值的含义, 流量具有通道平均值的含义。另外, 水位和流量在时间上采取时间交错计算方式。

根据天津、南京、南昌三市不同的地形地貌特征分别设计计算网格。天津市地形平缓, 海河较宽的一级河道贯穿全市, 设为河道型网格, 较窄的二级河道和明沟为特殊通道。南昌市地形也较平缓, 市内较窄的河道均设为特殊通道, 较大的坑塘设为湖泊型网格。南京市内小丘较多, 将其划分成沿山脚的多边形网格, 网格高程

收稿日期: 2004-02-20; 修订日期: 2004-05-30

作者简介: 解以扬(1955-), 女, 天津人, 高级工程师, 主要从事天气预报研究。E-mail: tjxyy2002@yahoo.com.cn

取山脚高程以避免较大的地形差；长江为外边界，市内河道均为特殊通道。天津、南京、南昌三市的计算区域的网格数分别为2281、678、646个。

2 基本方程的离散格式

连续方程根据高斯定理转化为

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

式中 A_i 为 i 单元网格面积； L_{ik} 为 i 单元第 k 条通道长度，即多边形网格的边长； Q_{ik} 为 i 单元第 k 条通道上的流量； H_i 为 i 单元的水深； q_i 为 i 单元的源或汇； dt 为 T 时刻的时间增量。

Q_{ik} 按简化的动量方程离散格式计算。在平面浅水运动中，对流项作用很小，通常可忽略不计。对不规则网格，如严格按动量方程计算任意方向通道上的流量，计算量较大。模型中采用分类简化处理的方法。假定同一时段内同一网格的水位变化不大，采用分类处理的方法求任意网格各个通道上的单宽流量。通道分为河道型、路面型、特殊通道型（城市内的二级河道）、其他型（含堤坝、泵站、闸门、淹没出流管道等），根据不同类型简化动量方程，计算流量^[4,5]。

河道型通道的动量离散方程：

$$Q_{ik}^{T+dt} = Q_{ik}^{T-dt} - 2gH_i \frac{Z_{ik2}^T - Z_{ik1}^T}{dL_{ik}} dt - 2g \frac{n_{ik}^2 Q_{ik}^{T-dt} / |Q_{ik}^{T-dt}|}{H_i^{7/3}} dt \quad (2)$$

式中 Z_{ik1} 、 Z_{ik2} 分别为 i 单元第 k 条通道两侧 1、2 断面的水位； dL_{ik} 为 i 单元第 k 条通道两侧单元形心距离； n_{ik} 为 i 单元第 k 条通道上的糙率； g 为重力加速度。

地面型通道的动量离散方程：

$$Q_{ik}^{T+dt} = \text{sign}(Z_{ik1}^T - Z_{ik2}^T) H_i^{5/3} \left(\frac{|Z_{ik1}^T - Z_{ik2}^T|}{dL_{ik}} \right)^{1/2} \frac{1}{n_{ik}} \quad (3)$$

有连续堤或缺口堤的通道，其流量采用宽顶堰流公式计算^[6]，即

$$Q_{ik}^{T+dt} = m_{ik} n_{ik} \sqrt{2g} H_i^{3/2} \quad (4)$$

式中 m_{ik} 为 i 单元第 k 条通道流量系数； n_{ik} 为 i 单元第 k 条通道下游淹没系数。

城市内较窄河道为特殊通道，它与两侧网格之间的流量，采用宽顶堰流公式(4)计算；沿河道的单宽流量 Q_s 采用与河道型通道动量离散方程式(2)相似的公式进行计算；特殊单元的水深按以下离散格式计算：

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

式中 A_{di} 为 i 特殊单元的面积； q_{di} 为 i 特殊单元上的源汇项，即特殊单元上的降雨强度，可取特殊节点处的降雨强度作为整个单元的平均值； H_{di} 为 i 特殊单元的水深； Q_{dij} 为 i 通道周边的单宽流量； L_{dij} 为 i 通道周边的边长。

3 城市排水系统的模拟

城市排水系统由管道、水井、明沟、泵站、闸门等组成，排水管道纵横交错，通过雨水井承担接收地面来水。管道水的排出由泵、闸或淹没出流管道来实现，城市的一级、二级河道、明沟和坑塘、湖泊接纳泵站、闸门或淹没出流管道的来水。

地下排水管网内的水流，采用一维非恒定流方程计算^[7]，自成体系。地下排水管网与地面单元的水量交换，可通过连续方程的源汇项控制，即将源汇项分解成为有效降雨强度和单元排水强度两部分。单元排水量根

据降雨强度、单元积水深度,以及单元最大排水能力来确定:当降雨强度小于单元最大排水能力且单元积水较浅时,降雨量全部转化为排水量进入地下管网,单元的排水强度为降雨强度;反之,当降雨强度大于单元最大排水能力或单元积水较深时,单元的排水强度达到最大排水强度,降雨强度与单元最大排水强度之差转化为地表径流量。

管道内的流量计算采用一维非恒定流方程的离散形式:

$$Q_{pi}^{T+dt} = Q_{pi}^{T-dt} - 2gA_{pi} \frac{Z_{i2}^T - Z_{i1}^T}{dL_i} dt - 2g \frac{n^2 Q_{pi}^{T-dt} |Q_{pi}^{T-dt}|}{A_{pi} R_{pi}^{4/3}} dt \quad (6)$$

式中 Q_{pi} 为管道计算断面的流量(非单宽流量); dL_i 为相临两网格形心到通道中点距离之和; R_{pi} 为水力半径;当管道为明渠流动时, A_{pi} 为管道计算断面的过流面积; Z_{i1} 、 Z_{i2} 分别为相临两网格管道中的水位;当管道为有压流动时, A_{pi} 为管道计算断面的断面面积; Z_{i1} 、 Z_{i2} 分别为相临两网格管道窄缝中的压强水头值。

管道内的水深(或压力水头值)计算采用连续方程的离散形式:

$$H_{pi}^{T+2dt} = H_{pi}^T + \frac{2dt}{A_{pi}} \sum_{k=1}^N Q_{pk}^{T+dt} + 2q_l^{T+dt} \frac{A}{A_{pi}} dt \quad (7)$$

式中 H_{pi} 为管道的水深或压力水头; q_l 为管道的排水强度; N 为单元内有排水管道通过的通道数; A_{pi} 为计算单元内管道的等效底面积。

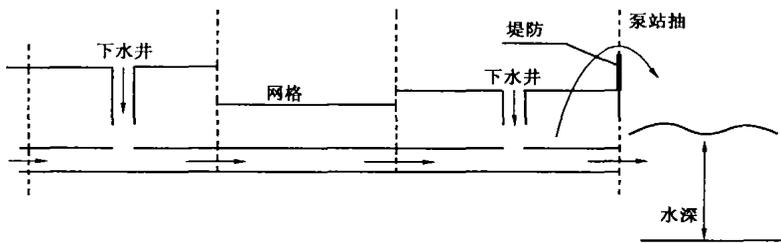


图1 排水管道系统中泵站、闸门和堰的示意图

Fig.1 Scheme of bumping station, dam and weir in drainage system

模型将排水泵站、闸门或淹没出流管道概化在相应的通道上。在降雨过程中,地面积水向管道内汇集,管道沿管网系统汇合至出口处,出口处由闸门或泵站向河道泄水,形成“雨水-地面积水-管道汇水泵、闸门、淹没出流管道排水-河道汇水”的模拟过程,如图1所示。

泵站的排水量以抽排水的管道内水量为控制条件,当排水能力大于管道内水量时,泵的排水量自动调节。闸门的排水量同样按自流口门的设计流量和管道内水量为条件进行调节。淹没出流管道的排水量按管道与河道的水位差进行调节,当管道水位高于河道水位时管道水流向河道,反之则出现倒流。

天津、南京、南昌三市的排水系统有所差异,天津市的排水以泵站闸门抽排管网水为主;南京市和南昌市以泵站逐级抽排河道水为主,管网以淹没出流方式排水。本文在排水系统概化时均予以考虑。

4 城市面雨量的计算

对自动雨量站观测、雷达观测或用不同方法预报的降雨量,必须采用有效的插值法,转换成为无结构不规则网格的面雨量,以此作为仿真系统的降雨边界条件。本文采用二次曲面方法作面雨量计算。

设雨量观测站的个数为 N 。对计算区域内任意一位置 (x, y) , 可选取与之最近的 n ($n < N$) 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) 点的降雨量可由这个二次曲面来确定。具体为

设二次曲面方程为

$$q(x, y) = a_1 x^2 + a_2 y^2 + a_3 xy + a_4 x + a_5 y + a_6 \quad (8)$$

n 点的误差和为

$$R = \sqrt{\sum_{i=1}^n (q - q_i)^2} \quad (9)$$

由最小二乘法的原理, 要使 n 点的误差和 R 达最小, 则有

$$\frac{\partial R}{\partial a_i} = 0 \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (10)$$

由式(10)求出 $a_i (i = 1, 2, \dots, n)$ ，再代入式(8)中，求出 (x, y) 的插值降雨量 q 。

5 模型调试和验证^[8]

暴雨造成的内涝灾害，通常可用最大积水深度来衡量。因此，模型的验证的方法是选择不同的暴雨个例，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。

城市暴雨内涝模型首先应用于天津市区，天津市暴雨积涝模型以天津市外环线以内为计算范围，包括市区六大区，及北运河、子牙河、南运河、新开河、海河等市区一级河道，计算面积共计 323.67 km²，模型网格、特殊通道、积水片位置如图 2 所示。

模型选择 1995 年 8 月 16~17 日的暴雨个例，对模型进行调试，调试结果见表 1，在调试的基础上选择 1998 年 4 月 22 日暴雨资料进行验证(表 2)。模型调试、验证结果趋势正确，大部分精度符合要求。

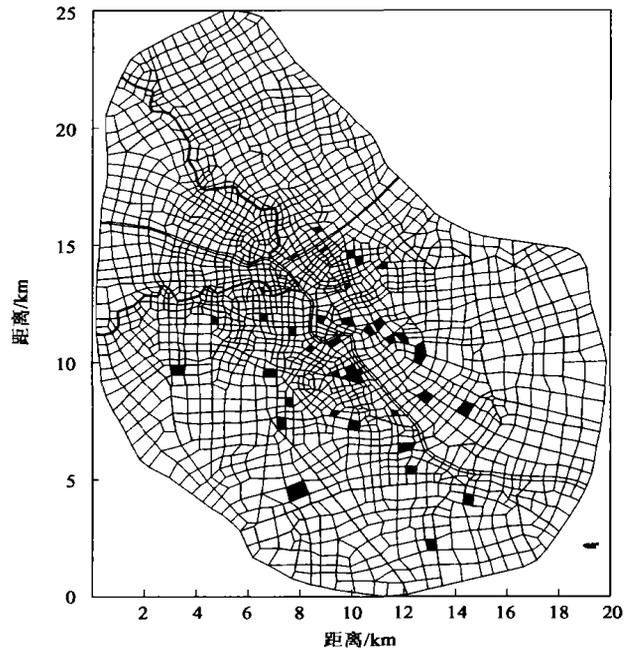


图 2 天津市暴雨积涝模型网格、特殊通道、积水片位置示意图

Fig. 2 Scheme of meshes special passage and logging site in the model in Tianjin

表 1 最大水深的调试结果

Table 1 Correct result of maximal water depth

积水位置	实测值 /m	计算值 /m	绝对误差 /m	相对误差 /%	积水位置	实测值 /m	计算值 /m	绝对误差 /m	相对误差 /%
王串场地区	0.40	0.36	- 0.04	- 0.1	中国戏院	0.70	0.67	- 0.03	0.0
建国道	0.60	0.52	- 0.08	- 0.1	黄河戏院	0.60	0.62	0.02	0.0
南大道	0.90	0.84	- 0.06	- 0.1	卫津路	0.30	0.29	- 0.01	0.0
城隍庙	0.70	0.60	- 0.10	- 0.1	二号路	0.20	0.20	0.00	0.0
大沽路	0.10	0.10	0.00	0.0	八一礼堂	0.40	0.37	- 0.03	- 0.1
起士林	0.25	0.28	0.03	0.1	西南楼	0.50	0.46	- 0.04	- 0.1
烟台道	0.15	0.15	0.00	0.0	老河口	0.20	0.20	0.00	0.0
小海地	0.30	0.29	- 0.01	0.0	福建路	0.30	0.29	- 0.01	0.0
劳动道	0.40	0.41	0.01	0.0	纪庄子	0.25	0.25	0.00	0.0
大桥道	0.40	0.38	- 0.02	- 0.1	洪泽路	0.15	0.15	0.00	0.0
程林庄地道	0.30	0.29	- 0.01	0.0	永安道	0.40	0.36	- 0.04	- 0.1
富强道	0.40	0.36	- 0.04	- 0.1	平山道	0.30	0.29	- 0.01	0.0
小王庄	0.50	0.45	- 0.05	- 0.1	新开路	0.40	0.38	- 0.02	- 0.1
昆纬路	0.55	0.56	0.01	0.0	华兴街	0.30	0.29	- 0.01	0.0
杨桥街	0.30	0.29	- 0.01	0.0	互助道(中山门)	0.45	0.41	- 0.04	- 0.1
刘家花园	0.35	0.33	- 0.02	- 0.1	同仪大街	0.35	0.31	- 0.04	- 0.1
北站地道	0.30	0.29	- 0.01	0.0	复兴庄大街	0.35	0.33	- 0.02	0.0
烈士路	0.40	0.37	- 0.03	- 0.1					

表 2 最大水深的验证结果

Table 2 Testing result of maximal water depth

积水位置	实测值	计算值	绝对误差	相对误差	积水位置	实测值	计算值	绝对误差	相对误差
	/m	/m	/m	/%		/m	/m	/m	/%
中山门	0.45	0.50	0.05	0.1	黄河戏院	0.60	0.78	0.18	0.3
谦德庄桥	0.40	0.33	-0.07	-0.2	吴家窑二号路	0.50	0.49	-0.01	0.0
福建路	0.30	0.26	-0.04	-0.1	中国戏院	0.70	0.84	0.14	0.2
王串场	0.40	0.46	0.06	0.1	音乐厅	0.60	0.78	0.18	0.3
掩骨会	0.90	0.82	-0.08	-0.1	西站	0.55	0.61	0.06	0.1
城隍庙	0.70	0.64	-0.06	-0.1	放生院小马路	0.50	0.51	0.01	0.0
烈士路	0.40	0.46	0.06	0.2	昌和里	0.40	0.52	0.12	0.3

对于南京市,选择 1999 年 8 月 30 日的暴雨个例,对模型进行调试,在调试的基础上选择 2002 年 7 月 22 日暴雨资料进行验证。对于南昌市,选择 2002 年 4 月 24 日的暴雨个例进行模型调试,选择 2003 年 4 月 12 日暴雨资料进行验证。两个城市的模型调试、验证结果趋势正确,与天津市的结果相似(表略)。

6 仿真系统应用情况

应用本文研究的理论,在天津、南京、南昌三市分别建立了城市暴雨内涝灾害的仿真模拟系统后,于 2003 年汛期在 3 个城市开展了准业务试验。试验期间,3 个城市均出现了罕见的大暴雨,为仿真系统的验证提供了实例。

(1) 天津市“2003.10.10~12”暴雨过程的内涝积水情况的模拟 2003 年 10 月 10~12 日,天津市出现了百余年以来汛后降水持续时间最长、降水量最多、降水范围最广的暴风雨天气。降雨持续近 48 h,市区最大降水达 160.6 mm。强降雨过程使天津市出现大范围内涝,100 余条主干道有不同程度积水,部分地区积水达 1 m 多深,因路面积水深,交通严重受阻,车辆趴窝、倒进水情况时有发生,损失惨重。

对这次暴雨过程进行模拟。由于本次暴雨发生在秋季,因此在设置模型初始条件时,排水运作取非汛期状态,泵站均未开启,又由于前期无降水,泵站、河道取低水位(海河等一级河道水位为 1.0 m),排水管道取腾空状态。

在天津市的 2281 个计算单元中,河道型网格 177 个,其余网格均为陆地型。本文对 2104 个陆地型网格的模拟效果进行统计,实测水深值与计算水深值的误差绝对值,如表 3 所示。

(2) 对南京市“2003.7.4~5”特大暴雨过程内涝积水情况的模拟 2003 年 7 月 4~5 日,南京出现连续暴雨到大暴雨天气,4 日 20 时至 5 日 20 时,南京降雨量达 207.2 mm,创南京市自有气象资料以来日降水量之最。百年一遇的特大暴雨使城区大部分地区一片汪洋,齐膝深甚至过腰深的积水淹没了街面、底层住宅,市区低洼处积水深度曾一度达 0.50~1.20 m。

根据南京市汛期排水运作规则,汛期泵站、管道、河道要作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:外河道长江河道水位为常水位 7.0 m;秦淮河等二级河道水位为 5.0 m;所有排水泵站均开启。

对南京市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 678 个网格单元中,河道、湖泊、山地共占有 106 个。河道、湖泊为储水载体,山地通常不积水。本次验证将这些网格除外,只对其余的 572 个网格单元的模拟效果进行统计。实测水深值与计算水深值比较的误差绝对值,如表 4 所示。

表 3 天津市实测水深与计算水深及其误差

Table 3 Absolute error distribution of the actual and the simulated water depth in Tianjin

绝对误差	0.1 m	0.1~0.2 m	0.2~0.3 m	>0.3 m
所占网格数	1947	94	55	8
所占百分比	92.5%	4.5%	2.6%	0.4%

表 4 南京市实测水深与计算水深及其误差

Table 4 Absolute error distribution of the actual and the simulated water depth in Nanjing

绝对误差	0.1 m	0.1~0.2 m	0.2~0.3 m	>0.3 m
所占网格数	331	144	30	61
所占百分比	58%	26%	5%	11%

表4表明, 模拟的积水误差主要分布在20 cm以内, 大约占84%。但也不应忽视还有11%的网格模拟的积水误差>30 cm。通过仔细分析, 发现在这些>30 cm的误差中, 92%为计算积水偏小。

(3) 对南昌市“2003.6.23~24”特大暴雨过程内涝积水情况的模拟 2003年6月23~24日南昌市平均降雨量达到150 mm, 导致市区许多街道一片汪洋, 许多居民家中、店铺进水。北京西路、八一大道、南京西路等36个路段积水较深, 最深的地方没过成人胸部, 交通严重阻塞, 阻塞的车辆长达近100 m, 给南昌市的排涝设施造成了巨大的压力, 暴雨的侵袭凸现了南昌市城市排涝能力的不足, 情况令人担忧。

南昌市的泵站不多, 只有青山湖和新洲两个电排站, 但排涝能力很强, 分别为 $76 \text{ m}^3/\text{s}$ 和 $30.2 \text{ m}^3/\text{s}$ 。河道排水靠地势自然泄流。本方案的计算初始条件为: 在模型中取河道出口处的控制水位为10 m, 均低于常水位。

对南昌市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646个网格单元中, 出现积水的网格41个, 其他地区不是主要积水区, 未收集到积水实况, 因此只对有实测积水深度的41个网格单元的模拟效果进行统计(表5)。

表5 南昌市实测水深与计算水深及其误差
Table 5 Absolute error distribution of the actual and the simulated water depth in Nanchang

绝对误差	0.1 m	0.1~0.2 m	0.2~0.3 m	>0.3 m
所占网格数	28	6	1	6
所占百分比	68%	15%	2%	13%

表5表明, 模拟的积水误差在20 cm以内, 大约占83%。有5%的网格模拟的积水误差>30 cm。在误差>30 cm的6个网格中, 计算积水均为偏小, 其中除了347和368号网格由于靠近河道泄水较快没有形成积水外, 其他4个网格均计算出20~120 cm的积水深度, 比实况偏小。

7 积水深度的模拟误差产生原因

(1) 城市降雨空间分布不均 城市短历时暴雨往往在空间分布上存在较大差异。南京市和南昌市市区计算区域范围内仅有1个雨量站, 天津市的自动雨量站也只有11个且分布不均, 难以确切地反映降雨的空间分布, 是形成计算误差的原因之一。

(2) 模型网格误差 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。但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。网格尺度大, 该区域的地形高程通常取地势的平均值, 而计算水深不能反映局部低洼点的实际积水深度。

(3) 排水管网概化误差 城市排水管网是由干、支管网组成的非常复杂的树枝状系统。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, 为计算方便, 管道参数取概化值, 从而影响计算的精度。

(4) 积水观测误差 实测积水时往往在最深处测量水深, 如南京市“凤凰西街223号积水70 cm”, 这种局部积水深度, 往往不能代表整个网格的平均积水深度。

对比表3、表4、表5, 可发现天津市的计算误差较小, 这是因为天津市建立数学模型比南京市和南昌市早, 有充分时间调整各类概化值, 故模拟精度相对较高。相信通过调整完善会改进模拟效果。

8 结 论

(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, 设计城市暴雨内涝数学模型。

(2) 利用城市暴雨内涝数学模型对天津、南京、南昌三市的暴雨过程进行了验证。验证结果表明: 城市暴雨内涝数学模型的模拟结果是可靠、可信的, 说明模型具有良好的适用性。数学模型在三市都经历了历史罕见的大暴雨的考验, 更证明了模型的实用性。该模型还有待在实际应用中不断调试、完善, 相信会取得更好的效果。

参考文献:

- [1] 仇劲卫, 李娜, 程晓陶, 等. 天津市城区暴雨沥涝仿真模拟系统[J]. 水利学报, 2000(11): 34 - 42.
- [2] 汪德懋. 计算水力学理论与应用[M]. 南京: 河海大学出版社, 1989. 4 - 123.
- [3] 谭维炎. 计算浅水水动力学[M]. 北京: 清华大学出版社, 1998. 62 - 79.
- [4] 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. 138 - 157.
- [5] 蔡亦钢. 流体传输管道动力学[M]. 杭州: 浙江大学出版社, 1990. 15 - 120.
- [6] 天津大学水力学及水文学教研室. 水力学(下册)[M]. 北京: 人民教育出版社, 1980. 45 - 109.
- [7] Hsu M H, Chen S H, Chang YJ. Inundation simulation for urban drainage basin with storm sewer system[J]. Journal of Hydrology, 2000, 234(2): 21 - 37.
- [8] Li Da-ming, Zhang Hong-ping, Li Bing-fei, et al. Basic theory and mathematical modeling of urban rainstorm water logging[J]. Journal of Hydrmechanics, Ser. B, 2004, 16(1): 17 - 27.

Research and application of the mathematical model for urban rainstorm water logging

XIE Yi-yang¹, LI Da-ming², LI Pei-yan¹, SHEN Shu-qin³, YIN Jiar-min⁴, HAN Su-qin¹, ZENG Ming-jian³, GU Xiao-qing⁴

(1. Institute of Tianjin Meteorological Bureau, Tianjin 300074, China; 2. School of Civil Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China;
3. Observatory of Jiangsu Meteorological Bureau, Nanjing 210008, China; 4. Institute of Jiangxi Meteorological Bureau, Nanchang 330046, China)

Abstract: In this paper, a mathematical model for urban rainstorm water logging is established, the round flow and river flow in the city are the main objects to be simulated. The model is established on the basis of two-dimensional unsteady flow theory and the technique of nonstructural and irregular meshes. A method on the basis of one-dimensional unsteady flow theory is proposed to deal with small scale river. The different discrete forms of momentum equations are derived for different types of passages which are divided into the river type, the ground type and the special passage type (small river in the cities). And the discharge per unit width in each passage of any grid is computed by the different discrete forms of momentum equations. The flow in the drainage pipe network is simulated by one-dimensional unsteady flow theory, and the calculation of the pumping stations, the water gates and submersed pipes is indicated. According to the idea of the nonstructural and irregular meshes, the topographies are considered and the calculation domains that involve any polygon are designed respectively in Tianjin City, Nanjing City and Nanchang City. The application and error analysis of the mathematical model in Tianjin, Nanjing and Nanchang are showed, too.

Key words: urban rainstorm; flood of water logging; mathematical model; Tianjin; Nanjing; Nanchang