

张萍萍,王丽,张宁.武汉市城市积涝预警系统及其仿真模拟效果[J].暴雨灾害,2010,29(1):71-75,88

武汉市城市积涝预警系统及其仿真模拟效果

张萍萍,王丽,张宁

(武汉中心气象台,武汉 430074)

摘要:在建立武汉市城市排水管网地理信息系统的基础上,以城市地表与明渠、河道的水流运动为主要模拟对象,以二维非恒定流基本方程和无结构不规则网格划分技术为骨架,设计了适合武汉市的城市积涝仿真模型,并结合精细化降水预报业务和积水显示后处理系统,建立了武汉市城市积涝预警系统。另外,利用该系统对 2008 年 5 月 27—28 日武汉市特大暴雨引发的积涝进行预报预警,取得较好效果,其中最大积水落区预报成功率达 70%以上,模拟的积水深度误差主要分布在 20 cm 以内。

关键词:城市积涝;仿真模型;预警系统;武汉市

中图分类号:TP311.52 **文献标识码:**A **文章编号:**1004-9045(2010)01-0071-06

1 引言

强降水过程极易引起城市积涝,妨碍城市交通、居民生活和生产活动,造成很大经济损失和社会影响。因此,我国各地气象部门结合精细化预报业务的开展,纷纷建立了城市内涝预报预警系统,以实现城市积涝动态监测和预报。如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出城市暴雨内涝灾害仿真模型^[1],将水动力学与暴雨监测预报结合起来,直接模拟或预报暴雨造成的内涝灾害,使气象服务能力大为增强。辜晓青等^[2]在建立南昌市排水管网地理信息系统的基础上,建立了南昌市城市积涝预警预报服务系统,并投入业务试运行。郑传新等^[3]利用柳州市暴雨积涝灾害仿真模型,对不同类型降水过程造成的积涝灾害进行了数值模拟,并对柳州市积涝灾害风险作了初步量化评估。陈波等^[4]通过构建完整的武汉市暴雨内涝数学模型和概化城市地理信息,建立武汉城市强降水内涝仿真模拟系统,并通过与实测结果的对比分析,对仿真模型的模拟效果进行了验证。

武汉市(29°58′31″22″N、113°42′—115°04′E)是湖北省省会、华中地区最大都市和中心城市,长江及其最长支流汉江横贯市区;全市国土面积 8 467.11 km²,其中外环以内城区面积 1 171.70 km²,大部分地区海拔在 50 m 以下;武汉城区面积中水域面积约占 1/4,其城内有面积不等淡水湖数 10 个。近年来,随着武汉城市化发展进程不断加快,不透水面积增加,坑塘、湖泊减

少,城市雨水调蓄功能下降,城市人口增加,国民经济持续发展,用水量和排水量不断增加,现有排水系统建设相对滞后,一旦发生强降水过程,武汉市就会出现大面积积涝现象。如 2004 年 7 月 17—19 日、2008 年 5 月 27—28 日的降水过程曾给武汉市造成大面积积涝灾害。因此,建立武汉市城市积涝预警系统,实现武汉市积涝动态监测和预报迫在眉睫。为了掌握武汉市积涝变化特征和规律、减轻城市洪涝灾害,武汉中心气象台在湖北省科技厅“城市防灾减灾应急气象服务系统开发研究”项目的资助下,开发了武汉市城市积涝预警系统(以下简称系统),在 2007—2008 年汛期将其投入业务试运行,并取得良好效果。

2 系统结构与思路

根据武汉市积涝重点区域,武汉市城市积涝预警系统主要针对武汉城区而设计。该系统主要由城市排水管网地理信息系统、精细化降水监测及预报系统、城市积涝仿真模型、积水显示后处理系统 4 个子系统组成。

2.1 城市排水管网地理信息子系统

该子系统为武汉市城市积涝预警系统的数据基础,由基础地理信息、排水管网信息和下垫面属性信息三部分组成,系统比例尺 1:10 000。武汉市基础地理信息主要包括行政区域、公路、水系(河流、湖泊)、绿地、建筑物等多个图层;排水管网地理信息主要包括排水管道、河道、泵站等有关城市排水信息;下垫面属性信息包括地形高程、地面糙率、下垫面属性等。获取

收稿日期:2009-06-24;定稿日期:2010-02-08

基金项目:湖北省科技厅“城市防灾减灾应急气象服务系统开发研究”项目资助

作者简介:张萍萍,女,1980 年生,工程师,主要从事短期天气预报工作。E-mail: zpp7117@126.com

上述信息之后,对下垫面属性进行相应设置,对地形地物和排水管网进行概化处理。

2.1.1 地形地物概化

武汉市区地形地貌较为特殊,中间低平,大部海拔高度在 50 m 以下;北部多丘陵,为大别山绵延部分;海拔在 200 m 以上的山地面积约占全市面积 5% 左右,其余均属江汉平原,地势平坦低洼,长江汉水横亘其间,河道纵横交错,湖泊星罗棋布。如此复杂的地形地貌对暴雨产生的径流影响很大。为了更好地反映复杂地形下武汉市暴雨径流特点,对模型应用有限体

积法的思想,采用无结构、不规则网格设计计算区域^[5]。网格设计成三角形、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(图 1a)。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 ,在网格周边通道中点处计算流量 Q 。其中,水位具有网格平均值含义,流量具有通道平均值含义。另外,水位和流量在时间(T)上采取时间交错计算方式(图 1b)。根据该设计原则,将武汉城区概化为 2 660 个网格,生成 2 768 个节点和 5 762 条通道,并对相关属性进行设置。

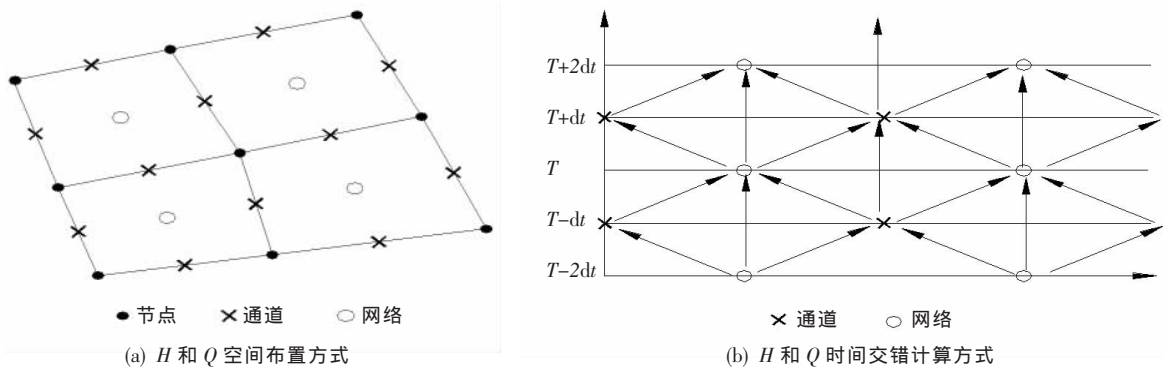


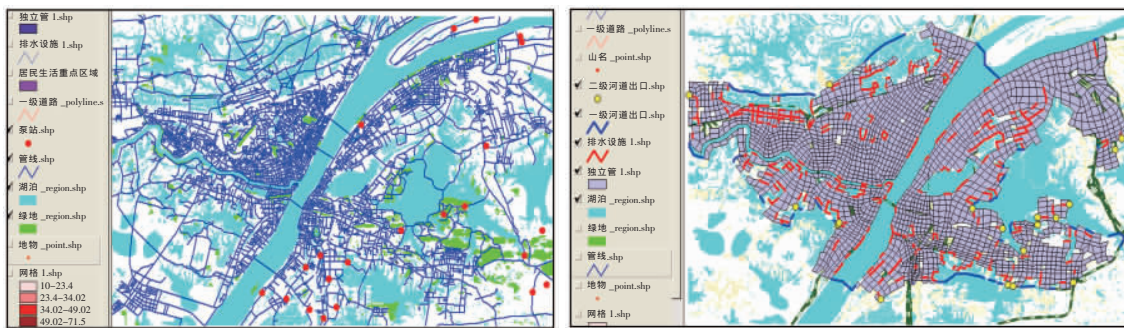
图 1 城市排水管网地理信息系统地形地物概化图

H 为水位, Q 为流量, T 为时间, dt 为时间间隔

2.1.2 排水管网概化

城市排水系统,包括排水管网、泵、闸等(图 2a),对城市暴雨内涝影响很大。因城市排水管网纵横复杂,如果完整模拟实际复杂管网水流运动,则模型信息和计算量巨大,仿真模型计算速度会减慢。因此,对实际排水管网,必须针对具体划分的网格单元进行合理

概化,以减少模型计算难度,同时使排水管网水流计算和地面网格单元计算同步进行。根据其原则,将排水系统概化为 45 套独立管网、71 个一级河道出口、17 个二级河道出口以及 100 多个排水设施(图 2b),并对相关属性进行设置。



(a) 排水管网及泵站地理信息图

(b) 排水管网分布图

图 2 武汉市城市排水管网地理信息系统排水管网概化图

2.2 精细化降水监测及预报子系统

自然降水是产生积水的主要原因之一。武汉市处长江中下游地区,夏季暴雨发生频繁,易使武汉市形成城市积涝。因此,做好武汉市积涝监测和预报,必先做好实时精细化降水监测和未来一定时段内精细化降水量预报。本文中实时精细化降水监测数据来源于武汉市加密自动雨量站以及雷达反演降水资料,加密雨量站每分钟采集一次降水实况资料,传送到数据

服务器,系统每小时从数据服务器提取数据并统计成小时累加雨量;雷达反演降水数据采样时间为每 6 min 一次,同样处理成以间隔较小经纬度为坐标的逐小时累积雨量。以上述两种方式可为动态模拟武汉市积涝演变提供自然降水信息。

精细化降水预报信息主要来源于数值模式预报的降水信息,主要提供 12 h 内武汉市降水量预报。其中数值模式预报的降水信息是由不同类型的数值模

式在特定初始气象场计算的降雨量资料, 主要包括 AREM 模式、T213 模式输出产品以及日本和德国降水预报产品。精细化降水预报采用灰色预测方法。其基本原理是, 以 T213、AREM、日本、德国等数值预报产品为基础, 用灰色关联度分析预报因子与预报对象的相关程度, 初步了解不同数值预报产品的可信度; 然后, 采用灰色系统理论的 GM(0, h) 模型, 建立武汉市精细化降水预报方程。其建立步骤如下:

(1) 建立预报量数据库。预报量 Y 为武汉市加密站点降水预报, 预报时效为 12 h 间隔预报。收集武汉市加密站点有记录以来的逐小时降水量实况资料, 通过 12 h 累加计算, 建立预报量数据库。

(2) 建立预报因子数据库。以 T213、AREM、日本、德国四种数值预报格点降水量预报场为基础, 采用多点插值算法, 分别计算上述四种数值预报产品对武汉市加密站点 12 h 间隔累积降水量预报, 计算完成前期样本资料的收集工作, 建立预报因子数据库。

(3) 样本积累。从数据库中提取前期时间序列长度为 n 的预报因子和预报量样本资料。样本长度采用有限记忆法, 即每增加一天新资料, 就删除样本第一天资料, 保持样本长度为一定数。根据经验, 取样本长度为 30 天左右即可。本研究中, 取定数 n 为 31 天。

(4) 模型运行。在程序中增加计划任务, 将实时更新的样本资料代入灰色预测模型。经检验可知, 通过灰色预测方法建立的武汉市精细化降水预报的 T_s 评分得到明显提高, 这在一定程度上可减小武汉市积涝预报与其实况的误差。

精细化降水预报模块可为武汉市未来逐 12 h 内积涝预报提供自然降水信息。雨量站观测的或预报的降雨量, 一般采用二次曲面插值方法, 转换成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。其中, 二次曲面的面雨量计算方法如下: 设雨量观测站数为 N , 对计算区域内任意位置 (x, y) , 可选取与之最近的 $n(n \leq N)$ 个观测点, 对这个观测点实测降雨量 q_1, q_2, \dots, q_n , 用最小二乘法拟合一个二次曲面, 其中点 (x, y) 降雨量可由该二次曲面确定。具体方法如下:

设二次曲面方程为

$$q(x, y) = a_1x^2 + a_2y^2 + a_3xy + a_4x + a_5y + a_6 \quad (1)$$

$$n \text{ 点的误差和}(R) \text{ 为 } R = \sqrt{\sum_{i=1}^n (q_i - q)^2}$$

由最小二乘法原理, 要使 n 点的误差和 R 最小, 则有

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

由式(2)求出 $a_i(i=1, 2, \dots, n)$, 再代入(1)中, 求出点

(x, y) 插值降雨量 q 。

2.3 城市积涝仿真模型

城市积涝仿真模型是整个武汉市城市积涝预警系统的核心部分。该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、跌水、管网有压流、管道无压流、有压流到无压流过渡过程, 以及地面向管道中泄流或从管道向地面涌水现象等多种工程情况及其相互连接问题, 是一个复杂的微观流域模型。其基本控制方程以平面二维非恒定流的基本方程为骨架。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一维明渠非恒定流方程的算法^[6]。三个基本控制方程如下:

(1) 二维非恒定流基本方程

$$\text{连续方程: } \frac{\partial H}{\partial t} + \frac{\partial M}{\partial x} + \frac{\partial N}{\partial y} = q \quad (3)$$

动量方程:

$$\frac{\partial M}{\partial t} + \frac{\partial(uM)}{\partial x} + \frac{\partial(vM)}{\partial y} + gH \frac{\partial Z}{\partial x} + g \frac{n^2 u \sqrt{u^2 + v^2}}{H^{1/3}} = 0 \quad (4)$$

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial(uN)}{\partial x} + \frac{\partial(vN)}{\partial y} + gH \frac{\partial Z}{\partial y} + g \frac{n^2 v \sqrt{u^2 + v^2}}{H^{1/3}} = 0 \quad (5)$$

式(3)~(5)中, H 为水深; Z 为水位, $Z = Z_0 + H$, Z_0 为底高程; q 为源汇项, 包括有效降雨量和排水强度两项; M 、 N 分别为 x 、 y 方向上的单宽流量, 且 $M = Hu$, $N = Hv$; u 、 v 分别为流速在 x 、 y 方向上的分量; n 为糙率; g 为重力加速度。

(2) 一维非恒定流基本控制方程

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial l} \left(\frac{Q^2}{A} \right) + gA \frac{\partial H}{\partial l} = -gA S_f \quad (6)$$

式(6)中, Q 为截面流量; A 为计算断面的过水面积; S_f 为摩阻坡降, 由曼宁公式可得:

$$S_f = \frac{U^2 n^2}{R^{4/3}} = \frac{n^2 Q |Q|}{A^2 R^{4/3}} \quad (7)$$

(3) 宽顶堰溢流公式

$$Q = m \sigma_s \sqrt{2g} H^{3/2} \quad (8)$$

式(8)中, Q 为堰顶单宽流量, m 为宽顶堰溢流系数, σ_s 为淹没系数, H 为堰顶上游水位。

2.4 积水显示后处理子系统

积水显示后处理系统是在 Arcview GIS 环境下主要进行模型仿真结果的显示处理, 最终生成各种积涝预报产品, 包括图形、表格、文本等形式。其预报产品主要有武汉市区降雨积水分布图(积水地点、范围、最大积水深度等)、积水随时间变化图、排涝关键区域积水图表和减灾措施等。此外, 为了更好地描述武汉积水沥涝灾害范围和程度, 参考武汉市历年积水资料和文献[7], 将暴雨积涝预报划分为四个等级(表 1)。

表 1 武汉市暴雨积涝预报等级划分

积水深度	积涝等级			
	无积涝	轻度积涝	中度积涝	重度积涝
w/m	$0.00 < w \leq 0.05$	$0.05 < w \leq 0.30$	$0.30 < w \leq 0.60$	$w > 0.60$

3 仿真模拟效果分析

以 2008 年 5 月 27—28 日武汉出现的一次大暴雨过程进行仿真模拟效果分析。从 5 月 27 日 08 时至 28 日 08 时,武汉本站 24 h 降水量达 101 mm,且多处地方出现明显积水,部分地段水深近 20 cm,车辆一时无法通行,一些遇暴雨必积水的路段一时形成若干“水塘”。据统计,积水较严重的地方有武昌南湖成功花园新千家街、公正路、新河街、三角路铁路桥下、民院路新竹路口,青山区工人村、建设村,汉口二七小路立交桥下、竹叶山铁路桥涵洞下、新华下路铁路桥下、舵落口铁路桥下、常码头,汉阳墨水湖北路等。使用上述模型,对此次降水过程造成的积水深度值进行了验证计算。

3.1 仿真模拟计算

从此次大暴雨过程武汉站逐时降水量变化图上可见(图 3),降水开始于 5 月 27 日 09 时,主要出现在 27 日 14 时至 28 日 02 时;强降水集中在 27 日 19—23 时(1 h 降水量超过 10 mm),其中 20 时雨强达 $20 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 。对此次过程所造成的积涝程度,利用武汉市城市积涝预警系统进行模拟,模拟时段为 27 日 14 时至 28 日 02 时,历时 12 h。

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协调,以使河道水位降低,排水

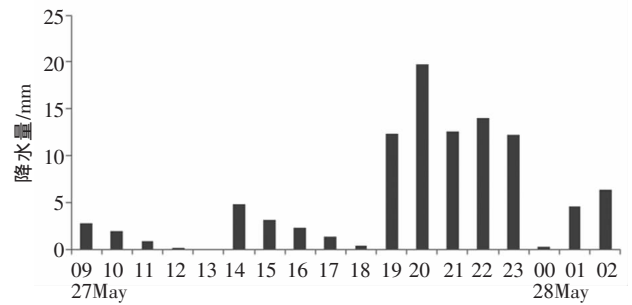


图 3 武汉站 2008 年 5 月 27 日 09 时至 28 日 02 时逐时降水量变化图

管道基本腾空。所以,本方案初始条件为:在模型中选取较低河道水位、几条河道出口处控制水位,使其均低于常年水位;所有排水泵站均开启。此外,为检验第 2.2 节中基于灰色预测方法的精细化降水预报系统在城市积涝预报中的优越性,分别从某一预报效果较好的数值预报产品(本文选取日本降水预报产品)和精细化降水预报系统中提取武汉市 27 日 14 时至 28 日 02 时的 12 h 降水资料,均采用二次曲面差值算法,计算出 2 660 个网格面雨量作为降雨边界条件。然后将上述初始条件代入仿真模型,计算出这次大暴雨过程中各网格最大积水深度。之后,将各网格最大积水深度代入模型后处理程序,最后得出由两种不同降水预报产品输出的武汉城区最大积涝落区等级图,并与最大积涝落区实况图进行比较(图 4)。经比较发现,两种产品总体模拟效果较好,从不同积涝等级的模拟效果看,输入精细化降水预报产品的模拟效果均好于输入日本降水预报产品的模拟效果;其中,轻度积涝的准确率提高 12%,中度积涝准确率提高 8%,重度积涝准确率提高 21%;其积水预报范围比实况范围总体略偏大。



图 4 2008 年 5 月 27 日 14 时至 28 日 02 时武汉城区最大积涝等级图

(a) 实况; (b) 日本数值模式模拟; (c) 精细化预报模拟

根据武汉市 9 个中心市辖区积涝实况和有无积水的标准,参照 T_i 评分方法,对两种最大积水落区模拟结果进行初步检验。结果表明,日本降水预报正确率为 65%,空报率为 26%,漏报率为 9%;精细化降水预报正确率为 73%,空报率为 19%,漏报率为 8%。显然,引入精细化降水预报产品的预报效果明显高于日本降水预报产品。

此外,对两种不同降水输入产品模拟产生的最大积水深度精度进行比较。在参与计算的 2 660 个网格

单元中,出现积水的网格有 114 个,其他网格没有形成积水,计算基本正确,因此对这 114 个网格的最大积水深度误差进行对比分析(表 2)。从表 2 中可见:两类产品的模拟精度误差在 20 cm 以内的格点数均超过 80%;日本降水预报模式有 10%的网格模拟的积水误差大于 30 cm,精细化降水预报只有 7%的网格。由以上模拟效果的对比分析可知,精细化降水预报的总体模拟精度高于日本降水预报,且精细化降水预报系统能有效提高武汉市城市积涝模拟效果。

表 2 2008 年 5 月 27 日 14 时至 28 日 02 时武汉市实测水深值与两类降水输入模拟水深(R)误差绝对值

降水输入	统计量	R/cm			
		$R \leq 10$	$10 < R \leq 20$	$20 < R \leq 30$	$R > 30$
日本降水 预报模式	网格数	75	20	8	11
	所占百分比	66%	18%	6%	10%
精细化 降水预报	网格数	78	22	6	8
	所占百分比	69%	19%	5%	7%

注: 所占百分比指各模拟水深网格占有出现积水网格的百分比

3.2 误差原因分析

通过上述误差分析发现, 积水预报范围要比实况范围偏大, 造成一些空报。分析误差产生原因, 其主要有四个方面。

(1) 精细化降水预报误差。城市短时暴雨往往在空间分布上存在较大变化, 而精细化降水预报有时难以细致反映降雨的空间分布特征, 从而使其与实况降水量之间存在较大误差, 这是形成预报误差的原因之一。

(2) 地形地物概化误差。地形地物概化时网格设计本应充分考虑地形、地貌特征, 网格内下垫面属性本应尽可能相同, 但由于实际地形地物下垫面非常复杂, 可能出现某种类型的网格下面覆盖了不同的下垫面, 而该区域地形高程则取了地势平均值, 使该网格属性设置出现误差; 其次, 由于积水区的通常分布对地形地物概化也会产生影响^[8-9], 即可根据不同地区通常内涝发生程度大小来加密或放宽网格, 而在实际地形地物概化中对其缺乏重视, 使内涝发生重灾区网格设计不够精细; 此外, 由于城市化进程加快, 系统所使用的武汉市地理信息部分未得到及时更新, 这也是产生误差的原因之一。

(3) 排水管网概化误差。由于城市排水管网是干、支网组成的复杂树枝状结构, 而在排水管网概化过程中, 每个格网可能包括几条干、支管, 但计算过程中均取概化值, 从而影响了计算精度; 此外, 在排水系统中, 泵站和闸门起非常重要的排水作用, 泵站的作用是抽取地面或排水管道积水; 闸门的作用是直接向河道泄水, 在概化过程中根据对不同地区泵站和闸门使用的调查结果, 将其属性设置成不同的开关状态, 但在实际运行过程中发现有些地区的泵站和闸门并未按时开启关闭, 因此使得仿真模型的排水能力出现误差。

(4) 积水观测误差。由于不同网格所覆盖的范围不同, 而实测积水时通常获取的是网格内局部积水深度, 从而使积水实况往往不能代表整个网格的积水深度。

4 小结

传统的洪水演算中, 一般都是采用规则矩形网格

或以一致的三角形网格对计算区域进行剖分。但考虑到城市局部地区地形复杂, 各种建筑物(特别是各种防洪工程措施)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, 本研究在设计武汉市城市积涝仿真模型时应用了有限体积法的思想, 采用无结构不规则网格设计计算区域。对武汉市城市积涝预警系统结构与思路及其仿真模拟效果小结如下:

(1) 根据武汉市地形、地貌及排水系统特征概化仿真系统的各类参数, 建立的武汉市积涝预警系统主要包括城市排水管网地理信息系统、精细化降水监测及预报系统、城市积涝仿真模型、积水显示后处理系统四个子系统。

(2) 利用该系统对 2008 年 5 月 27—28 日武汉市暴雨过程引起的城市积涝进行仿真模拟发现, 该系统能较好地模拟出城区不同地区的积水情况, 说明该系统具有较强的实用性, 此外发现利用灰色预测模型建立的精细化降水预报系统能够有效地提高模拟精度。

(3) 误差分析结果表明, 该系统的排水管网地理系统和精细化降水监测及预报两个子系统还有待于继续改进和完善, 包括不断提高精细化降水预报精度, 及时更新地理信息地图, 不断完善地形地物及排水管网概化中无结构不规则网格设计技术。只有这样, 才能不断改进仿真模拟效果。

天津市气象科学研究所所长解以扬对本研究提供了若干技术指导, 谨致谢忱。

参考文献:

- [1] 仇劲卫, 李娜, 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.
- [2] 辜晓青, 章毅之, 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.
- [3] 郑传新, 米浦强, 陈剑兵, 等. 柳州市积涝过程模拟及灾害风险评估[J]. 气象, 2007, 33(11): 72-75.
- [4] 陈波, 冯光柳. 武汉城市强降雨内涝仿真模拟系统研制[J]. 暴雨灾害, 2008, 27(4): 330-333.
- [5] 谭晓炎. 计算水动力学[M]. 北京: 清华大学出版社, 1998: 62-79.
- [6] 汪德灌. 计算水力学理论与应用[M]. 南京: 河海大学出版社, 1989: 4-123.
- [7] 马李文, 周虎, 等. 银川市城市内涝等级预报[J]. 城市道路与防洪, 2009, 4(4): 59-62.
- [8] Hsu M H, Chen S H, Chang Y J. Inundation simulation for urban drainage basin with storm sewer system [J]. Journal of Hydrology, 2000, 234(2): 21-37.
- [9] Li Da-ming, ZHANG Hong-ping, LI Bin, et al. Basic theory and mathematical modeling of urban rainstorm water logging [J]. Journal of Hydra, mechanics, Ser B, 2004, 16(1): 17-27.

(下转第 88 页)

- [J]. ITEM, 2000: 841-844.
- [9] R Briët. Lightning Myths and Misconceptions [J]. 2000 Department of Defense Electromagnetic Environments Effect (E3) Program Review, 2000(4): 11-14.
- [10] EN, Protection against lightning--Part 1: General principles (IEC 62305-1:2006)[S]. German version EN 62305-1, 2006:1-66.
- [11] 王卫华. 避雷针高度变化及其保护范围的确定[J]. 湖北气象, 2001(4): 31-32.
- [12] 卢友发, 刘翠芝. 建筑物顶避雷针滚球基准面的选取[J]. 河南气象, 2006, 29(1): 65.
- [13] 施广全, 王振会. 雷击灾害风险评估中等效截收面积计算方法研究[J]. 气象与环境科学, 2008, 31(2): 47-50.

Improvement of Calculating Lightning Protection Range by Rolling Sphere Method

TU Shan-shan^{1,2}, ZHANG Ke-jie¹, SHI Ya-jing¹, MA Chun-bo², AO Fa-liang²

(1. Hubei Lightning Protection Center, Wuhan 430074; 2. Information and Communication College, Guilin University of Electronic Technology, Guilin 541004)

Abstract: According to the maximum probability theory, the probability distribution of lightning point and region is quantitatively analyzed when the thunderstorm is moving near the high-rise buildings. The concepts of Critical height (Z_c), Critical range (ρ_c) and Probability effectiveness coefficient (E_{i0}) are advanced. On this basis the indexes of high probability lightning region are given: the area in where $E_{i0} > 1$ is dangerous; the area in where $E_{i0} < 1$ is safe and the area in where $E_{i0} = 1$ is critical. Simultaneously, a mathematical model of calculating lightning protection range is put forward based on the probability theory considering the limitation of Rolling Sphere Method.

Key words: Rolling sphere method; Lightning protection range; Lightning region; Probability coefficient

(上接第 75 页)

Study on the Early Warning System for Rainstorm Waterlogging in Wuhan City and its Simulated Results

ZHANG Ping-ping, WANG Li, ZHANG Ning

(Wuhan Central Meteorological Observatory, Wuhan 430074)

Abstract: Based on the geography information system for drainage network, a simulation model for waterlogging in Wuhan City was established on the basis of two-dimensional unsteady flow theory and the technique of nonstructural and irregular meshes. The surface water flow, open channel water flow and river flow in the city are the main objects to be simulated. Combined with the fine rainfall forecast operation and post-processing system of waterlogging display, an early warning and forecast system for rainstorm waterlogging was built. The system was tested in the rainstorm waterlogging process in Wuhan City in May 2008. The forecast accuracy of the max waterlogging area exceeds 70%, and the errors of the most waterlogging depth are within 20cm, which show that the simulated results mentioned above are better.

Key words: Rainstorm waterlogging in city; Simulation model; Early warning system; Wuhan city