

# 基于 GIS 技术的城市暴雨积涝数值模拟与可视化<sup>\*</sup>

## ——以哈尔滨市道里区为例

陈 鹏<sup>1,2</sup>, 张继权<sup>1</sup>, 严登华<sup>3</sup>, 蒋新宇<sup>4</sup>, 包玉龙<sup>1</sup>

(1. 东北师范大学 城市与环境科学学院, 东北师范大学 自然灾害研究所, 吉林 长春 130024;  
2. 吉林师范大学 旅游与地理科学学院, 吉林 四平 136000; 3. 中国水利水电科学研究院, 北京 100038;  
4. 京都大学防灾研究所, 日本 京都府 宇治 611-0011)

**摘 要:**以哈尔滨市道里区为例,通过对城市暴雨积涝条件分析建立了城市暴雨积涝三层空间的概化模型;利用 GIS 技术作为可视化平台,以水动力学方法采用一维非恒定流对管道内水流进行模拟,以二维非恒定流对地面水流进行模拟,同时耦合一、二维非恒定流模型并结合无结构不规则网格,建立了城市暴雨积涝数值模拟模型,实现了对城市暴雨积涝的水深和积水范围模拟及可视化。

**关键词:**城市暴雨;积涝;数值模拟;可视化;GIS;水动力学;哈尔滨市道里区

**中图分类号:**P458.1<sup>+</sup>21.1; TP311.1 **文献标志码:**A **文章编号:**1000-811X(2011)03-0069-04

城市不仅是现代文明的重要标志,同时也是国家或特定区域的政治、经济和文化中心。然而城市又是人类受自然环境反馈作用最敏感的地方,一旦发生灾害,对城市造成的损失远远高于非城市地区。近些年来由于城市化导致的城市暴雨积涝灾害尤为严重,而对于城市积涝灾害研究国外进行得较早,主要的最有代表性的是城市暴雨雨水管理模型(SWMM),对城市排水系统有很强的模拟计算功能<sup>[1]</sup>。国内在城市积涝模型研究上起步较晚,主要是以国外成熟的模型为基础。随着计算机技术的快速发展,国内研究发展非常迅速,如中国水利水电科学研究院和天津市气象科学研究院联合开发的城市内涝积水计算模型——天津市沥涝仿真系统,就是基于水动力学方程的内涝计算模型,模型可以模拟暴雨情况下的内涝积水范围和积水水深<sup>[2]</sup>。景学义等利用一、二维非恒定流模型,结合无结构不规则网格建立哈尔滨市内涝监测预警系统<sup>[3]</sup>。但模型中对地下排水过程模拟只是给出概化的排水能力。景垠娜等采用城市高程模型,结合 scs 水文模型、降雨及排水因素,利用 GIS 栅格技术完成不同重现期下城市积水深度和积水范围模拟,由于缺乏排水管网数据,文中并没有对详细的排水过程进行模拟<sup>[4]</sup>。

邵尧明等应用地理信息系统(GIS)与调蓄法结合建立城市暴雨积涝数值模型,完成城市积水深度、积水范围、积水时间模拟,为城市积涝灾害研究提供了更为先进的研究方法<sup>[5]</sup>。

本文首先论述了城市暴雨积涝灾害致灾条件,然后利用水动力学方法耦合一、二维非恒定流,结合无结构不规则网格建立城市暴雨积涝灾害三层空间的数值模拟模型,通过分析研究区典型暴雨事件,利用城市暴雨积涝灾害数值模拟模型模拟出哈尔滨市道里区积水深度和积水范围并实现可视化,为城市暴雨积涝灾害预警提供决策支持依据。

## 1 城市暴雨积涝原因分析

### 1.1 城市暴雨积涝气象条件

城市暴雨积涝主要由暴雨产生,暴雨导致的城市积涝首先与降水强度有关<sup>[6]</sup>。按照暴雨的时空尺度特征,中国的暴雨大致可分为两类:①局地暴雨,一次过程几小时到十几小时,覆盖几千至几万平方米,中心强度大;②是大面积暴雨,持续时间长,范围大,降雨总量大。对于城市积

<sup>\*</sup> 收稿日期:2010-12-09

基金项目:国家自然科学基金(41071326);全球变化研究国家重大科学研究计划(2010CB951102);十一五国家科技支撑计划课题(2007BAC29B04);国家自然科学基金(40871236);十一五国家科技支撑重大项目(2008BAJ08B14);公益性行业(农业)科研专项(200903041)

作者简介:陈鹏(1980-),男,吉林四平人,博士研究生,主要从事自然灾害风险评价研究. E-mail:pp11290@163.com

通讯作者:张继权(1965-),男,吉林九台人,教授,博士生导师,从事自然灾害与生态环境风险评价和管理研究。

E-mail:zhangjq022@nenu.edu.cn

涝的产生大多数是由于短时强降雨或持续强降雨所导致的。

## 1.2 城市暴雨积涝下垫面条件

随着城市化进程加快,城市下垫面性质变化较大。由于城市的人口和社会经济活动的聚集效应,使得城市建设开始向郊区、空中和地下扩展,使原来的土路、林地、草地、水塘等生态环境改变为水泥、沥青、砖石、玻璃、金属等材料建造,致使城市下垫面渗透率降低,地表糙率变小,汇流时间大大缩短。另一方面由于城市大量开采地下水,国内多数城市已经开始出现地面沉降现象,这也为积涝产生提供了条件。

## 1.3 城市暴雨积涝排水设施条件

城市排水管网作为城市排水的重要设施在城市建设之初就已经开始设计和施工建设,最初设计时能够满足城市排水需要。然而近些年随着国民经济的快速发展,城市化进程加快,国内从1978-2005年全国城市总数从193个增加到661个,特大城市、大城市、中等城市数量都迅速增加。另一方面城市规模也在不断地扩展,高楼林立、城市交通与建筑的立体化正是城市迅速扩展的表现。正是由于城市快速的发展,而排水管网的规划建设仍为城市建设之初的模式,且多数为雨污混排模式。一旦遭遇短时强降雨很难及时排出道路积水,从而导致在城市低洼地段的道路大面积积水,形成灾害。

通过以上对积涝原因分析可知城市中积水主要是由于城市气候与全球气候变化的效应叠加导致极端天气即暴雨或是大暴雨事件更加频繁,另一方面由于城市下垫面性质变化使得城市原有的下垫面构造变化较大,致使雨水在地面上的产汇流时间大大缩短,同时由于城市排水管网不能满足城市的发展需要,一旦遇到短时强降雨不能及时排出道路积水,最终形成城市积涝灾害。针对以上分析,本文综合考虑城市积涝的形成过程建立了城市暴雨积涝三层空间的概化模型(图1)。

## 2 城市暴雨积涝数值模拟模型构建

以哈尔滨道里区为例,建立城市暴雨积涝数值模拟模型。模型中对于地面以二维非恒定流为基本骨架,以不规则网格概化地物,同时结合排水管网中一维非恒定流综合考虑建立暴雨积涝数值模型。模型具体构建如下。

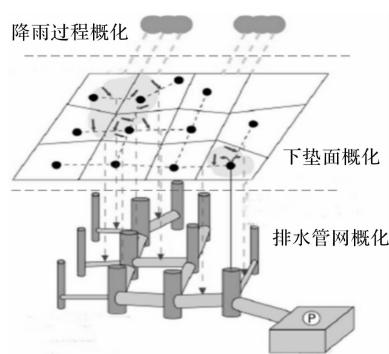


图1 城市暴雨积涝灾害三层空间概化模型

## 2.1 模型基本控制方程

城市暴雨积涝数值模型是以二维非恒定流骨架,结合无结构不规则网格建立的数值模型,在模型的解法上吸收了有限差分法和有限体积法的优点,在网格周边计算流量,在网格形心处计算水位<sup>[7]</sup>。

$$\text{二维非恒定流方程: } \frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial M}{\partial x} + \frac{\partial N}{\partial y} = q; \quad (1)$$

$$\text{连续方程: } \frac{\partial M}{\partial t} + \frac{\partial(uM)}{\partial x} + \frac{\partial(uN)}{\partial y} + gh \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{gn^2 u \sqrt{u^2 + v^2}}{h^{\frac{1}{3}}} = 0; \quad (2)$$

$$\text{动量方程: } \frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial(uN)}{\partial x} + \frac{\partial(vN)}{\partial y} + gh \frac{\partial H}{\partial y} + \frac{gn^2 v \sqrt{u^2 + v^2}}{h^{\frac{1}{3}}} = 0. \quad (3)$$

式中:  $h$  为水深;  $H$  为水位;  $q$  为源汇项,在模型中代表有效降雨强度;  $M$ 、 $N$  分别为  $x$ 、 $y$  方向上的单宽流量;  $u$ 、 $v$  分别为流速在  $x$ 、 $y$  方向的分量;  $n$  为糙率系数;  $g$  为重力加速度。

一维非恒定流基本控制方程

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial l} \left( \frac{Q^2}{A} \right) + gA \frac{\partial H}{\partial l} = -gAS_f, \quad (4)$$

式中:  $Q$  为截面流量;  $A$  为计算断面的过水面积;  $S_f$  为摩阻坡降。

宽顶堰溢流公式

$$Q = m\sigma_s \sqrt{2g} H_j^{3/2}, \quad (5)$$

式中:  $Q_j$  为堰顶单宽流量;  $m$  为宽顶堰溢流系数;  $\sigma_s$  为淹没系数;  $H_j$  为堰顶水位。

## 2.2 降雨过程模拟

以1998年8月4日降雨作为模拟输入。该降雨过程自午夜23:00起,上午07:00结束,日降雨量65.6 mm,是12年来日降雨量最大的一次(图2)。

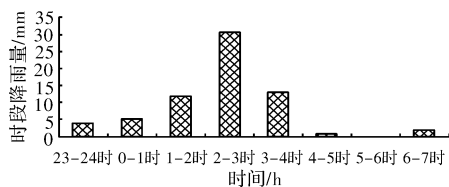


图2 降雨时程分布

### 2.3 城市地物概化与网格划分

城市积涝数值模拟模型对于地物概化较复杂, 对于连续性阻水建筑物, 如房屋、堤防、高于地面的街道、立交桥、铁路等, 在概化时需特殊考虑。本研究中并没有设置节点, 同时对于城内的二级河流, 也并未概化成为特殊通道, 而是按照其实际宽度概化成尺度比较小的网格, 分别在网格和通道属性中注明。其它设施如阻水建筑、排水设施等, 也分别在网格和通道属性中注明。

对于网格的划分, 根据地形、地物的特点, 将模拟范围划分为不规则网格, 以这些网格为基本单位, 利用有限体积法进行数值计算, 求解研究区内的积涝范围和水深<sup>[8-10]</sup>。因此, 网格划分是计算准确的基础。研究中以行政区图层、等高线图层、水系图层, 以及水文分析生成的小流域作为底图, 辅以快鸟影像数据, 对研究区进行网格划分, 并通过拓扑分析检查网格的准确性。而后, 利用 ARCGIS 的面线转换工具, 由网格生成通道。再利用空间关联建立网格与通道之间的拓扑关系, 即根据网格 ID 可以得出其四周通道 ID, 反之亦然。最后对网格和通道赋属性。由于网格与通道都是实体, 都可以储存数据, 并已建立拓扑关系, 研究区共划分网格 1 724 个, 通道 3 572 条。网格和通道及其属性如图 3 所示。

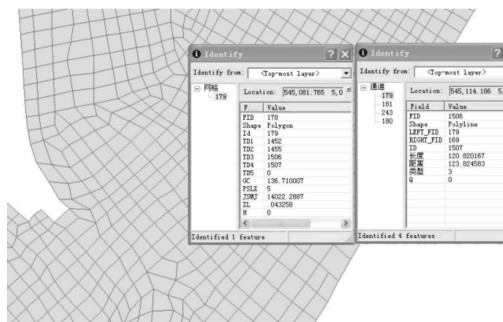


图3 网格和通道及其属性

### 2.4 排水管网概化

城市的排水设施对于城市及时排出积水极为重要, 国内城市中大多数排水系统包括排水管网、沟、渠等, 对城市暴雨积涝现象有很大的影响。本文在对排水管网概化采用网格单元划分时分为含管网和不含管网两种。对于含管网的网格单元,

将管道均概化为经过单元形心, 管道经过单元周边通道的重点与相邻的含管道的网格相连。排水管网中排水过程模拟国内外较成熟, 但在城市积涝灾害研究中一、二维非恒定流相结合的模拟方式还很少见。本研究对于地面的水流模拟采用二维非恒定流方程计算, 管道内采用一维非恒定流方程计算, 实现一、二维非恒定流耦合。

## 3 结果可视化

目前国内外对城市暴雨积涝数值模拟及可视化实现过程大多数为积涝数值模型与可视化过程相分离且自成体系, 未能真正实现模型与可视化过程动态相结合。本文采用的是利用 GIS 技术和暴雨积涝模型动态集成, 即城市暴雨积涝危险性模拟结果可视化过程采用 GIS 中的组件技术来完成, 利用 NET 平台完成积涝灾害数值计算程序建立, 计算结果以 CSV 输出, 作为与 GIS 组件的接口文件, 然后利用 GIS 组件 ArcEngine 完成暴雨积涝数值模型与 GIS 的无缝结合, 最后利用暴雨积涝数值模型模拟的水深结果制作城市积涝危险性专题图, 完成可视化结果。模型计算结果及可视化结果见图 4~图 5。



图4 暴雨积涝数值模拟界面及模拟水深结果

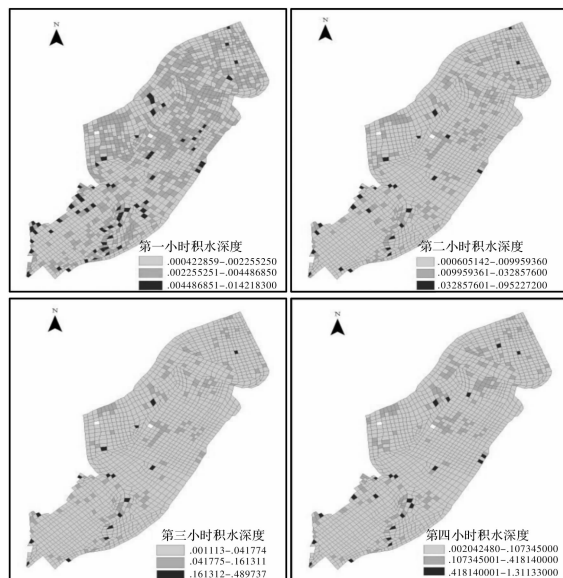


图5 暴雨积涝危险性可视化结果

## 4 结语

对城市暴雨积涝数值模拟与可视化研究表明,城市暴雨积涝的产生有其特殊原因,致灾因素如下:

(1)城市化进程加快导致城市小区域的气候变化非常大,由此导致城市热岛效应产生,加剧了城市暴雨的频次和强度;

(2)城市下垫面性质变化及城市建筑越来越密集且向空中和地下延伸,造成下垫面的糙率变小,阻水面积增大,导致地面产汇流时间大大缩短;

(3)另一方面由于城市发展较快,城市排水管网建设跟不上城市发展需要,一遇短时强降雨时很难排出地面积水。

本文中的城市暴雨积涝数值模拟研究过程吸取国内外在积涝数值模拟上的优点,提出基于三层空间的城市积涝灾害危险性模拟模型。模型对降雨过程进行分析,采用不同雨型来概化模型的降雨过程,下垫面采用二维非恒定流来模拟地面水流过程,同时利用 GIS 技术及无结构不规则网格完成下垫面的地物概化,排水管网管道内的水流过程采用一维非恒定流进行模拟。通过城市暴雨积涝模型的建立结合 GIS 技术实现城市暴雨积涝过

程可视化,并以哈尔滨市道里区作为研究区进行了实证研究,为城市暴雨积涝数值模拟上提出新的研究方法和思路。

## 参考文献:

- [1] Zaghoul N A. Flow simulation in circular pipes with variable roughness using SWMM 2EXTRAN model [ J ]. Journal of Hy2drographic Engineering, 1998, 124 ( 1 ): 73 - 76.
- [2] 李娜,仇劲卫,程晓陶. 天津市城区暴雨沥涝仿真模拟系统的研究[J]. 自然灾害学报, 2002, 11(2): 113 - 118.
- [3] 景学义,刘守正,王永波,等. 哈尔滨市城市内涝监测预警系统建设[J]. 灾害学, 2009, 24(1): 54 - 57.
- [4] 景垠娜,尹占娥,殷杰,等. 基于 GIS 的上海浦东新区暴雨内涝灾害危险性分析[J]. 灾害学, 2010, 25(2): 58 - 63.
- [5] 邵尧明,邵丹娜. 城市暴雨积水过程的计算方法[J]. 中国给水排水, 2008, 24(6): 54 - 55.
- [6] 王迎春,郑大玮,等. 城市气象灾害[M]. 北京:气象出版社, 2009.
- [7] 程晓陶,杨磊,陈喜军. 分蓄洪区洪水演进模型[J]. 自然灾害学报, 1996, 5(1): 34 - 40.
- [8] 井上和也. 豪雨による都市水害モデルの開発とその治水計画への応用[R]. 京都:京都大学防災研究所, 2001.
- [9] 解以扬,韩素琴,由立宏,等. 天津市暴雨内涝灾害风险分析[J]. 气象科学, 2004, 24(3): 342 - 349.
- [10] 蒋新宇,范久波,张继权,等. 基于 GIS 的松花江干流暴雨洪涝灾害风险评估[J]. 灾害学, 2009, 24(3): 52 - 55.

# Numerical Simulation and Visualization of Urban Rainstorm Waterlogging Based on GIS

## ——A Case Study of Daoli District in Haerbin City

Chen Peng<sup>1, 2</sup>, Zhang Jiquan<sup>1</sup>, Yan Denghua<sup>3</sup>, Jiang Xinyu<sup>4</sup> and Bao Yulong<sup>1</sup>

(1. College of Urban and Environmental Sciences, Natural Disaster Research Institute, Northeast Normal University, Changchun 130024, China; 2. Jilin Normal University, Travel and Geographical Sciences, Siping 136000, China; 3. China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China; 4. Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University, Yuzhi 611-0011, Japan)

**Abstract:** Taking Daoli District in Haerbin as an example, and by analyzing urban rainstorm waterlogging conditions, a generalized model of three-layer space of urban rainstorm waterlogging is established. Using GIS as a visualization platform, the pipeline flow and the surface flow are simulated respectively by the methods of one-dimensional unsteady flow and two-dimensional unsteady flow. Coupled with unstructured irregular grids, a numerical simulation model of urban rainstorm waterlogging is established which can calculate the depth and the scope of waterlogging, and make the process visualization simultaneously.

**Key words:** urban rainstorm; waterlogging; numerical simulation; GIS; visualization; Daoli District in Haerbin