

城市雨洪模型及应用

Urban Storm Water Model
and its Application

黄国如 冯杰 刘宁宁 喻海军 著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

城市雨洪模型及应用

黄国如 冯杰 刘宁宁 喻海军 著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

内 容 提 要

本书主要介绍了城市雨洪模型及其在济南市和广州市城市暴雨洪水模拟和预警中的应用。其内容包括介绍了城市雨洪模型研究发展概况,分析了济南市城市化对暴雨洪水的影响,探讨了珠三角地区城市暴雨内涝成因;阐述了 SWMM 模型的基本原理、结构及其计算方法,运用 SWMM 构建济南市城市雨洪模型;针对济南市特殊地形,建立了基于格子波尔兹曼方法的的城市雨洪模型,该模型由流域水文模型、坡面汇流模型、洼地调蓄模型和河道洪水演算模型构成;运用 MIKE 21 建立了济南市城市暴雨洪水模型,分析洪水在济南市城区淹没过程、淹没水深和流速等,构建各种设计暴雨情形下的防洪预案;研制了基于 GIS 平台的济南城市暴雨洪水预警预报系统,该系统以各类城市雨洪模型为核心,可以实现济南市城市暴雨洪水预警预报;基于 InfoWorks 开发了广州市新河浦社区城市雨洪模型,并进行雨洪利用效应评估。

本书可供从事水利、水务、市政、规划、环境等科研工作者和工程技术人员参考,也可供相关专业的大学本科生和研究生使用和参考。

图书在版编目 (C I P) 数据

城市雨洪模型及应用 / 黄国如等著. -- 北京 : 中国水利水电出版社, 2013. 12
ISBN 978-7-5170-1633-5

I. ①城… II. ①黄… III. ①城市—暴雨模式 IV. ①P333. 2

中国版本图书馆CIP数据核字 (2013) 第319411号

书 名	城市雨洪模型及应用
作 者	黄国如 冯杰 刘宁宁 喻海军 著
出版发行	中国水利水电出版社 (北京市海淀区玉渊潭南路 1 号 D 座 100038) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sales@waterpub.com.cn
经 售	电话: (010) 68367658 (发行部) 北京科水图书销售中心 (零售) 电话: (010) 88383994、63202643、68545874 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	北京三原色工作室
印 刷	三河市鑫金马印装有限公司
规 格	170mm×240mm 16 开本 18 印张 323 千字
版 次	2013 年 12 月第 1 版 2013 年 12 月第 1 次印刷
定 价	65.00 元

凡购买我社图书,如有缺页、倒页、脱页的,本社发行部负责调换
版权所有·侵权必究

前 言

城市化的快速发展与全球气候变化导致城市地区遭受突发性强暴雨洪水的几率加大,面对日益严峻的城市洪涝灾害,模拟和预报城市洪水是防洪措施中必不可少的非工程措施之一。然而,目前城市化进程迅猛,城市防洪基础研究薄弱,我国长期沿用的雨洪计算方法只适用于地面情况比较单一、管网系统较为简单、汇流面积较小的区域,但城市地区既有纵横交错的排水管道,又有明渠暗沟的设计要求,因此,其计算精度已远不能满足现代城市这种下垫面情况十分复杂的状况。因此,有必要深入研究反映城市地区雨洪特点的计算模型。本书在深入分析济南市和广州市暴雨洪涝灾害成因的基础上,建立城市暴雨洪水模型,力求模拟洪水过程及可能造成的淹没情况,为业务部门快速决策提供科学依据,最大限度地减少洪涝灾害所造成的损失,实现城市防汛与城市建设及社会经济的协调发展。

本书共有 8 章。第 1 章为绪论,主要介绍城市雨洪模型研究目的和意义、城市雨洪模型发展概况。第 2 章为济南城市暴雨洪水形成影响因子分析,对济南市城区地形地貌进行较为系统的介绍,分析济南市城区主要河道基本情况,较为系统地探讨济南市暴雨洪水形成机理,分析济南市城市化对暴雨洪水的影响。第 3 章介绍了珠三角地区城市暴雨内涝成因,主要从自然因素和人为因素进行了论述,分析了珠三角地区短历时强降雨演变特征,对短历时降雨与潮位组合的内涝风险进行了较为深入的研究。第 4 章为 SWMM 模型,主要介绍 SWMM 模型基本原理、结构及其基本计算方法,验证了 SWMM 模型强大的水文水动力模拟和双层排水能力,建立基于 SWMM 模型的济南城市雨洪模型。第 5 章为济南市城市雨洪模型,针对济南市特殊的地形条件,建立了由流域水文模型、坡面汇流模型、洼地调蓄模型和河道洪水演算模型等四个子模型组成的济南市城市雨洪模型,着重介绍利用格子波尔兹曼方法进行坡面汇流和河道洪水演算。第 6 章为 MIKE 21 模型,通过地形概化、边界设定、参数选取等,构建基于 MIKE 21 的济南市城区暴雨洪

水模型，分析了洪水在济南市城区的淹没过程、淹没范围及水深等，研制了包括城市设计暴雨、短时定量降水预报、四级预警暴雨、短期天气预报等4大类的17个预案。第7章研制了基于GIS平台的济南城市暴雨洪水预警预报系统，该系统以各类城市雨洪模型为核心，可以实现济南市城市暴雨洪水预警预报。第8章主要介绍了基于InfoWorks的广州市新河浦社区雨洪模型，并利用其进行雨洪利用效应评估。全书由黄国如统稿。

本书的研究成果是我们科研团队长期努力的结晶，本书其他作者主要为胡伟贤、何文华、黄晶、吴思远、何泓杰、武传号、李健华等。本书在研究过程中，有幸得到了河海大学芮孝芳教授的悉心指导，特此表示最衷心的感谢。另外，河海大学罗健副教授、江苏科技大学张东辉副教授等为本书的完成做了大量的工作；本书在撰写过程中，参考和引用了国内外许多专家和学者的研究成果，在此一并表示最衷心的感谢。

本书的研究得到了水利部公益性行业科研专项经费项目（200801033、201301093）和华南理工大学亚热带建筑科学国家重点实验室自主研究课题（2012CZ09、2014CZ09）等项目的大力资助，在此表示感谢。限于作者的研究水平，书中难免存在疏漏之处，恳请同仁批评指正。

作者

2013年8月10日

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 研究的目的意义	1
1.2 暴雨内涝成因研究进展	4
1.3 城市雨洪模拟技术研究进展	5
1.3.1 城市雨洪产汇流计算方法	5
1.3.2 城市雨洪模型建模方法	7
1.3.3 代表性城市雨洪模型评述	9
1.3.4 城市雨洪模拟基础数据收集与管理	11
1.4 研究展望	12
第 2 章 济南城市暴雨洪水形成影响因子分析	13
2.1 济南市概况	13
2.1.1 自然地理	13
2.1.2 暴雨洪水特性	13
2.1.3 河流水系	15
2.2 济南城市暴雨洪涝灾害成因	17
2.2.1 城市发展概况	17
2.2.2 特殊的地形条件	18
2.2.3 暴雨时空变化规律	18
2.2.4 城区河道特征	18
2.2.5 马路行洪	19
2.3 济南城市化对汛期降雨特征的影响	19
2.3.1 基本资料	20
2.3.2 济南城区汛期降雨量特征分析	20
2.3.3 济南城、郊同期汛期降雨特征分析	22

2.3.4	城市化对汛期不同降雨强度等级的影响	25
2.4	济南城市化对洪水的影响	26
2.4.1	城市化对洪水影响的影响因子	26
2.4.2	济南市城市化对洪水影响特征分析	27
2.4.3	年最大 1d 降雨量和年最大洪峰流量	28
2.4.4	多场次暴雨洪水比较	29
2.5	小结	30
第 3 章	珠三角地区城市暴雨内涝成因	31
3.1	自然因素	31
3.1.1	强降雨	31
3.1.2	外江洪水及潮水顶托	32
3.2	人为因素	32
3.2.1	热岛效应对城区气候的影响	32
3.2.2	城市扩张改变水文产汇流规律	33
3.2.3	排水排涝标准不衔接	33
3.2.4	排水系统维护不到位	34
3.3	珠三角地区短历时强降雨序列特征分析	34
3.3.1	研究区域内涝概况	35
3.3.2	短历时暴雨特征分析	36
3.4	珠三角地区短历时降雨与潮位组合的内涝风险分析	48
3.4.1	雨潮联合分布函数构建	49
3.4.2	雨潮组合风险概率模型	57
3.5	小结	64
第 4 章	SWMM 模型	65
4.1	SWMM 模型概述	65
4.1.1	模型结构	65
4.1.2	模型功能	65
4.2	SWMM 模型构建原理	66
4.2.1	地表产汇流计算	67
4.2.2	流量传输计算	69
4.2.3	地表积水模拟	71
4.3	SWMM 模型模拟能力及精度验证	72
4.3.1	降雨产汇流模拟	72

4.3.2	明满过渡流模拟.....	75
4.3.3	大坡度情况下管道水力模拟.....	75
4.3.4	有回水情况下管网水力模拟.....	77
4.3.5	双层排水系统模拟.....	78
4.4	下垫面离散程度及模型参数对模拟结果的影响.....	82
4.4.1	子汇水区划分对模型模拟结果的影响.....	82
4.4.2	模型参数对模拟结果的影响.....	83
4.5	地理空间数据库与地图建立.....	86
4.5.1	地理空间数据库组成.....	86
4.5.2	地理空间数据库设计原则.....	87
4.5.3	系统数据库设计方案.....	88
4.5.4	地图设计.....	92
4.6	SWMM 模型与 ArcGIS 平台集成.....	92
4.6.1	SWMM 模型与 ArcGIS 的集成方式.....	92
4.6.2	SWMM 模型与 ArcGIS 平台的集成框架.....	93
4.7	基于 SWMM 的济南城市雨洪模型构建.....	95
4.7.1	流域下垫面信息提取及概化.....	96
4.7.2	流域降雨径流资料选取及预处理.....	102
4.7.3	模型参数取值预估.....	102
4.7.4	基于 GIS 的济南市 SWMM 雨洪模型建立.....	104
4.7.5	SWMM 模型参数率定及校核.....	106
4.8	SWMM 模型在济南城区防洪减灾中的应用.....	115
4.8.1	济南市城市雨水排水系统排水盲点标识.....	115
4.8.2	济南市应对突发性暴雨防灾减灾规划合理性分析.....	120
4.9	小结.....	121
第 5 章	基于 Boltzmann 的城市雨洪模型.....	123
5.1	Boltzmann 方法.....	123
5.1.1	粒子速度分布函数.....	123
5.1.2	Boltzmann 方程.....	124
5.1.3	Lattice BGK 方程及 Chapman-Enskog 展开.....	125
5.1.4	Lattice Boltzmann 方法的离散速度模型.....	127
5.1.5	修正的 Burgers 方程的还原.....	128
5.1.6	Lattice Boltzmann 方法的边界条件.....	131

5.1.7 含有源项的 Lattice Boltzmann 方法	133
5.2 坡面流的 Lattice Boltzmann 解	135
5.2.1 坡面流运动波方程	135
5.2.2 坡面流问题的 Lattice Boltzmann 解	136
5.2.3 坡面流问题的其他解法	138
5.2.4 算例及结果分析	140
5.3 扩散波洪水演算问题的 Lattice Boltzmann 解	146
5.3.1 扩散波方程	146
5.3.2 扩散波方程的 Lattice Boltzmann 解	146
5.3.3 扩散波方程的其他解法	148
5.3.4 算例及结果分析	150
5.4 济南市城市雨洪模型构建	154
5.4.1 济南市地形特点	154
5.4.2 济南市雨洪模型结构	155
5.4.3 流域水文模型	157
5.4.4 街巷洪水汇流	159
5.4.5 洼地调蓄模型	160
5.4.6 河道洪水演算模型	161
5.5 城市雨洪模型计算流程设计	162
5.6 模型参数率定及验证	168
5.6.1 模型 A 结果	168
5.6.2 模型 B 结果	170
5.6.3 模型 C	172
5.7 基于 GIS 平台的济南城市雨洪模型	176
5.8 小结	179
第 6 章 MIKE 21 模型	181
6.1 MIKE 21 模型简介	181
6.2 二维水动力学基本原理	182
6.2.1 模型控制方程	182
6.2.2 MIKE 21 模型数值解法	183
6.2.3 MIKE 21 模型基本参数	186
6.3 基于 MIKE 21 的济南城市雨洪模型构建	187
6.3.1 模型构建的基本步骤	187

6.3.2	计算网格生成	187
6.3.3	定解条件构成	193
6.3.4	建立城市雨洪模型	194
6.4	MIKE 21 模型计算结果分析	195
6.4.1	济南城区淹没情况	195
6.4.2	模拟结果误差分析	199
6.5	济南城市防洪预案构建	199
6.5.1	防洪预案类型设计	199
6.5.2	防洪预案降雨过程	200
6.5.3	防洪预案洪水模拟	203
6.6	小结	208
第 7 章	济南城市暴雨洪水预警预报系统	209
7.1	系统功能设计	209
7.1.1	系统结构设计	209
7.1.2	系统数据库设计	210
7.2	背景与地理信息	211
7.3	雨水情工情查询	213
7.4	基于 SWMM 模型的城市雨洪预警预报	215
7.4.1	SWMM 模型构建	215
7.4.2	计算结果表达	217
7.4.3	计算结果统计分析	218
7.5	基于济南市城市雨洪模型的预警预报	219
7.5.1	计算模块	219
7.5.2	计算结果显示模块	219
7.6	基于 MIKE 21 模型的防洪预案	224
7.6.1	降雨过程	224
7.6.2	预警结果	224
7.6.3	预警显示	225
7.7	小结	226
第 8 章	基于 InfoWorks CS 的雨洪模型及雨洪利用	227
8.1	城市雨洪模型 InfoWorks CS	227
8.1.1	InfoWorks CS 概述	227
8.1.2	InfoWorks CS 主要计算模块	227

8.1.3	InfoWorks CS 建模所需的基础数据	230
8.1.4	集水区参数	230
8.2	广州市新河浦社区雨洪模型构建	232
8.2.1	资料收集及处理	232
8.2.2	InfoWorks CS 建模过程	233
8.2.3	InfoWorks 模型运行设置	238
8.2.4	模型主要影响参数	239
8.2.5	InfoWorks 模型模拟结果	240
8.3	基于 InfoWorks CS 的雨洪利用效应评估	244
8.3.1	雨洪利用技术	244
8.3.2	新河浦社区雨水水量平衡分析	245
8.3.3	新河浦社区雨洪利用方案	246
8.3.4	雨洪利用技术效应评估	250
8.4	小结	251
	参考文献	252

第 1 章 绪论

1.1 研究的目的意义

社会经济的快速发展和工业化程度的提高,使得农村人口大规模向城市转移。城市化是人类社会发展的重要阶段,它主要表现在城市人口迅速集中,工业化规模不断扩大,城市面积急剧膨胀,使城市及其附近区域的自然、文化和生态系统发生显著改变,这其中也包括对水文过程所产生的影响。根据联合国人口基金会(2007)发表的《2007 年世界人口状况报告》的数据显示:到 2030 年,全球城市人口将达到 50 亿人,约占世界人口的 60%。根据中国社会科学院发表的《国际城市发展报告 2012》(屠启宇,2012),2011 年末我国城镇人口占总人口比重首次超过 50%,在统计学意义上,中国已成为“城市化”国家,预计到 2020 年,这一比例将达到 55%。城市化水平的提高一方面推动了城市经济的迅猛发展,但同时也带来了地区人口密度的急剧加大,城市生态环境条件被破坏,进而引起局部气候和城市水循环条件发生变化,即城市化水文效应。

水文过程是气象因子与下垫面因素共同作用的结果,城市化引起的土地利用变化、不透水面积增加正不断地改变气象与下垫面要素,城市化对水文过程的影响主要包括如下内容(徐光来等,2010;许有鹏,2012):

(1) 对降雨的影响。人口集中、建筑密集、地面不透水增加等特点使城市地区土壤热容量变大,地温高于郊区,温度上升,与郊区温差增大,近地面风速递减,城区的绝对湿度和相对湿度逐渐减少,即出现“热岛效应”。受城市气候的热岛效应、凝结核效应以及高层建筑物阻碍效应影响,城市“雨岛效应”明显(于淑秋,2007)。根据国内外众多研究成果,城市区域能够明显增加或诱发降水,其中对最大日降水量影响最为显著(Shepherd, 2006; 李娜等, 2006; 许有鹏等, 2009)。

(2) 对径流的影响。一方面,在城市化过程中,城市土地使用类型改变以及下垫面不透水率增加,使下渗量、截留量、蒸发量、基流和地下水位减少或降低,从而影响城市区域的产流。另一方面河流渠化、防洪堤坝等水利工程措施共同作用使河道结构、河网形态改变,从而影响河道汇流。城市化对径流的影响主要表

现为径流量增加, 汇流时间缩短, 洪峰流量增大(张建云, 2012)。

由于城市化所带来的水文效应以及全球气候变化、人口增长等原因, 城市暴雨洪水的出现频率与潜在风险在不断地增大。城市的快速发展使得人口、产业、财富快速地向城市地区聚集, 在相同的洪涝灾害条件下, 城市洪涝灾害的损失明显比以前增加, 间接损失和社会影响不断增大。城市洪涝灾害是由于短时强降水或过程雨量偏大造成径流过多, 在地势低洼、排水不畅等情况下而形成积水的城市自然灾害。世界上大部分城市都经常遭受不同程度的暴雨洪水的袭击, 在西方发达国家城市多以局部排水不畅导致的小规模洪水为主, 而在部分发展中国家, 由于地下排水设施标准偏低以及城市管理水平较低, 城市洪水问题则显得更为严重。目前, 全国城市已由新中国成立初期的 150 多座发展至 600 多座, 其中人口在 100 万以上的特大城市有 32 座, 人口在 50 万~100 万的大城市有 41 座。同时, 我国长江三角洲、珠江三角洲等地区的区域城市化建设也在迅速发展。据统计, 我国国民收入的 50%、工业产值的 70%、工业利税的 80%集中在城市。这些城市和经济发达区域大多地处江河湖畔或海滨, 一旦遭受洪涝灾害, 就会给人民生命和国家财产造成巨大损失。

近年来我国各大城市内涝问题日益突出, 城市内涝灾害发生几率日益增加, 灾害损失也以前所未有的速度增长。2007 年 7 月 18 日, 山东省济南市城区突降大暴雨, 最大 3h 降雨量达到 180mm, 至少 34 人因此丧生, 济南市因洪涝灾害引起的直接经济损失达 12 亿元。2010 年 5 月 7 日, 广州市城区降雨量超过 200mm 的雨量站点达 11 个, 最大 1h 和最大 3h 降雨量分别为 99.1mm 和 199.5mm, 全市因洪涝次生灾害死亡 6 人, 经济损失约 5.4 亿元。2012 年 7 月 21 日, 北京市遭遇特大暴雨, 为 61 年以来最大, 全市平均降雨量 164mm, 造成 78 人死亡, 190 万人受灾, 全市经济损失近百亿元。另外, 近年来南京、重庆、武汉等城市也相继发生了突发性强暴雨, 给当地社会经济发展带来很大损失。根据 2010 年住房和城乡建设部在全国范围内组织过对 351 个城市的调研结果, 在 2008—2010 年的 3 年间, 全国有 62%的城市都曾发生过内涝事件, 内涝发生 3 次以上的城市有 137 个。逢大雨必涝, 现在已成为很多大城市的通病。不同城市洪涝灾害频繁发生的原因可能有所不同, 但归结起来主要有以下几点(耿艳芬, 2006; 陈刚, 2010):

(1) 自然原因。近些年来, 全球气候变化影响以及城市化导致的雨岛效应, 部分城市暴雨强度及频率有加大的趋势。沿海城市多属感潮河网地区, 地势平坦, 如暴雨时恰逢外河道发生高水位时, 会影响到城市排水能力, 内河水无法外排, 水位上升, 为保护防汛墙设施, 防止河水漫溢, 防汛泵站停泵, 从而造成暴雨积水。一些城市的地面沉降形成一些排水不通畅甚至排水困难的洼地, 容易造成暴

雨积水。

(2) 排水设施能力不足。在我国大多城市,特别是老城区地下管网的设计标准严重偏低,普遍不到2年一遇,排水能力不足直接导致暴雨时积水。另外,很多地方排水系统为雨污合流制,由于污染物沉淀及附着的原因,一些管道有效过水面积减少现象很严重。同时由于更新改造不及时,有的地方虽然设计标准很高,但由于局部管道老化或者管径偏小,导致整体排水能力达不到设计排准。

(3) 人为因素。城市化进程使得城区面积增大以及不透水比例增加,这些直接导致径流系数增大以及汇流时间变短,从而导致内涝加剧。街面垃圾清理不及时,城市施工工地泥浆、油污违章排放等原因导致进水口堵塞、损坏或管道堵塞,使管道排水不畅,造成暴雨水无法排除,有时甚至会影响整个排水管网的效率(Aronica、Lanza, 2005)。

城市化的快速发展与全球气候变化导致城市地区遭受突发性强暴雨洪水的几率加大,影响程度和影响范围加深,导致国家公共安全遭受一定程度的威胁。公共安全是国家安全和社会稳定的基石,我国公共安全受到暴雨洪水灾害的严峻挑战,对水利科技提出重大战略需求。因此,为了加强对突发性强暴雨洪水事件作出快速反应和应急处置,以信息化、智能化技术应用为先导,研究突发性强暴雨洪水形成机理,并对城市暴雨洪水预警预报技术进行系统深入地探讨,为我国的城市防洪减灾工作,为国家公共安全提供重要的技术支撑。面对日益严峻的城市洪涝灾害,模拟和预报城市洪水是防洪措施中必不可少的非工程措施之一。然而,目前城市化进程迅猛,城市防洪基础研究薄弱,高新技术应用少,我国长期沿用的雨洪计算方法只适用于地面情况比较单一、管网系统较为简单、汇流面积较小的区域,但城市地区既有纵横交错的排水管道,又有明渠暗沟的设计要求,因此,其计算精度已远不能满足现代城市这种下垫面情况十分复杂的状况。另外,现有的雨洪计算方法也不能体现城市发展和人类活动对水文情势的影响,因此,有必要深入研究反映城市化地区雨洪特点的计算模型。

本书以济南市和珠江三角洲为例,就城市化对暴雨洪水的影响、城市暴雨内涝成因、城市暴雨洪水模拟技术进行了系统地探讨。通过总结城市暴雨特性,分析暴雨洪涝灾害成因,建立城市暴雨洪水模型,力求模拟洪水过程及可能造成的淹没情况,为业务部门快速决策提供科学依据,提前采取有效措施,最大限度地减少洪涝灾害所造成的损失,可提高城区防汛管理的现代化水平,实现城市防汛与城市建设及社会经济的协调发展。同时,本研究成果对于其他城市洪水模拟具有较好的参考意义。

1.2 暴雨内涝成因研究进展

由于地理环境、气候条件、城市化水平等因素的差异,城市化对水文要素的影响程度以及城市内涝成因机理不同。暴雨内涝成因研究主要包括以下四个方面的内容:城市化对暴雨内涝产生的影响;城市暴雨内涝对全球或者区域气候变化的响应规律;城市暴雨内涝的成因分析;城市暴雨内涝的时空变化规律。对城市暴雨内涝机理的研究,常用的方法主要有三类:数理统计法、模型反演法和情景分析法。

1. 数理统计法

数理统计方法主要是通过调查与收集城市不同区域的长序列水文气象数据以及历史灾情数据,采用数理统计方法并结合 GIS 技术进行相关研究。研究内容包括降雨径流时间变化规律、气温与降水的相关关系、城郊降雨的差异性、城市化前后降雨洪涝时空分布规律变化等,通过一系列数据分析揭示暴雨内涝对区域气候变化的响应机制以及城市化对暴雨洪水的影响(张利茹等,2011;陈茜,2012)。数理统计方法通过分析历史水文气象以及灾情资料,结果较为可靠,但是长序列的水文气象数据以及历史灾情数据一般不容易获取,这极大地限制了方法的应用(孙阿丽,2011)。

2. 模型反演法

模型反演方法通过解译不同历史时期遥感影像资料或者分析历史统计调查资料,得出城市不同历史时期的土地利用情况,结合水文模型研究不同历史时期的产汇流情况,经过纵向对比揭示城市化下垫面变化或者土地利用对降雨产汇流的影响规律(李胜,2005;刘兰岚,2007;任明磊,2009)。模型反演方法所需要的遥感影像资料较易获取,但遥感影像的解译精度还不十分令人满意,需要通过实地调查进行检验与修正。另外,遥感影像技术只是近几十年来才发展起来,能够获取的遥感影像数据也只有近几十年。因此,通过此方法只能够研究城市化历史并不久的年轻型城市,对于早已经历城市化、发展变化不大的稳定型城市不适用。

3. 情景分析法

情景分析法主要结合城市区域实际情况,构建城市水文、水动力学模型,从而分析各种情况下城市淹没情况。输入历史降雨或者设定不同的暴雨情景,通过模型评估城市各区域排水系统排水能力,分析不同历时和不同量级的暴雨产生洪水淹没的区别,分析城市外江水位、潮位对城市排水的影响等,从而研究和总结城市暴雨内涝产生机理(刘兰岚,2007;任明磊,2009;孙阿丽,2011;张杰,2012)。情景分析法结合数值模型方法,不需要太多历史数据,精度高,使用比较

广泛。但该方法对区域的地理背景资料(地质、地貌、地形、河网等)要求较高,计算复杂,工作量较大。

除了以上方法,对城市暴雨内涝机理研究还包括现场实验以及室内实验,然后结合模型研究。实际上,对暴雨内涝机理的研究往往是根据研究区域实际情况,采用多种方法相结合的方式来进行的。对暴雨内涝机理的研究有助于认识内涝本质特征,从而能够采取更加有效的应对措施,并指导城市暴雨洪水内涝模拟。

1.3 城市雨洪模拟技术研究进展

1.3.1 城市雨洪产汇流计算方法

城市雨洪的产汇流计算是建立城市雨洪模型的基础,城市地区的产汇流特性有别于天然流域。国内外学者根据长期的观察和研究,把城市雨洪的产汇流计算归纳为城市雨洪产流计算、城市雨洪地面汇流计算以及城市雨洪地下管流计算等三方面内容(胡伟贤,2010;胡伟贤等,2011)。

1. 城市雨洪产流计算方法

城市是受人类活动影响最大的区域,城市地表覆盖物种类多且分布复杂,产流很不均匀,这给城市雨洪产流计算带来很大麻烦。城市地表复杂的下垫面可分为不透水地面及透水地面两部分。Elliott 和 Trowsdale (2007)通过总结现今使用的 10 个城市雨洪模型对产流部分的处理,发现对不透水部分均采用相同的处理方法,即产流量为降雨量扣除填洼、截留、蒸发等损失量;而对透水部分则出现了多种计算方法,如径流系数法、概念性降雨径流法、SCS 法以及 Green-Ampt 法等。虽然这些方法广泛应用于建模实践,如 STORM 模型中的径流系数法、MOUSE 模型中的概念性降雨径流法以及 SWMM 模型中的 SCS 法、Green-Ampt 法等,但由于缺乏对城市地区复杂下垫面产流规律的系统认识,城市雨洪模型子流域总产流量的计算仅停留在不透水地面产流量和透水地面产流量简单叠加的阶段。如何准确而系统地描述城市雨洪产流过程以提高城市雨洪产流计算的精度成为近年来国内外学者的努力方向。岑国平等(1997)采用室内模拟降雨试验对各种城市地面如土地面、草地、混凝土地面及其多种组合的产流特性作了系统试验,分析了降雨强度与历时、土壤湿度与密实度、地面覆盖、不透水面积比例与位置等因素对产流的影响,并定量分析了径流系数随雨强、土壤前期含水率、不透水面积比例的变化规律,为城市雨洪产流计算提供可靠的依据。Shuster 等(2008)针对土壤前期含水率、不透水面积比例(0、25%、50%)与位置等因素进行了更

为细致详尽的室内试验,得出类似的结论,并且发现在不透水面积比例为 25%时,土壤前期含水率为影响产流的主要因素;在不透水面积为 50%并且产流经透水部分流到出口时,透水部分会出现回归流。

上述对城市复杂下垫面产流规律进行的探索对认清城市产流规律具有重要意义,然而室内试验条件与天然状况毕竟存有差异,在进一步研究城市地区产流规律时有必要结合室外降雨径流观测资料共同研究。

2. 城市雨洪地面汇流计算方法

雨降落到地表产流后到流入雨水管道系统的集水口,这一过程称为雨水地面汇流过程。城市地表覆盖的复杂性给城市排水区域内集水口流域的边界划定及地面汇流计算带来很大困难。针对城市地面汇流特点,学术界出现了两类解决方法,即水文学方法和水动力学方法。

水文学方法采用系统分析的途径,把汇水区域当作黑箱或灰箱系统,建立输入和输出之间的关系以模拟坡面汇流,常用的有推理公式法、等流时线法、瞬时单位线法、线性水库法及非线性水库法等。任伯帜和邓仁建(2006)采用长沙市实测雨洪资料,对以上几种方法进行了验证,得出了类似的结论。

水动力学方法基于微观物理定律,直接求解圣维南方程组或其简化形式,从而得出较水文学方法详尽的雨水地面径流过程。复杂的下垫面情况以及缺乏稳定可靠的有效解法使得该类方法目前应用不多,然而由于其能够提供更为详尽的城市雨洪地表非恒定流过程的良好前景,学者们进行了许多有益的探索。Mark 等(2004)利用有限差分法隐式求解圣维南方程组,建立起强降雨条件下城区街道系统与地下管网系统联动的一维水动力学模型,成功模拟出地表非恒定流一维流动过程并分析了该方法的潜力及局限性,指出地下管网系统与地表二维水动力学模型相耦合的发展方向。随后, Schmitt 等(2004)利用基于三角网有限体积法离散求解浅水方程组,并与地下管网系统相耦合,成功模拟出暴雨条件下城市地表径流二维非恒定流过程。Mignot 等(2006)对所建立的二维城市地表径流模型的多个模型参数、地形参数及网格变化等进行敏感性分析,基于 1988 年资料修正模型并将其应用于 2002 年一场大暴雨,得出与 1988 年那场洪水相近的结果,更为可贵的是通过此种分析为希望建立城区雨洪模型的研究者提供网格疏密程度、边界条件数据收集及处理、地表摩阻系数选择等方面的建议。国内一些学者基于不同的离散方法对城市地表二维非恒定流过程进行过模拟,但在精度及深度上与国外存有一定差距(张新华等, 2007; 周浩澜、陈洋波, 2011)。随着计算技术的发展,可以预见基于有限体积法的城市地表二维非恒定流过程的模拟将逐渐成熟,然而由于城市地区缺乏足够的实测数据,特别是极端暴雨过程中城区的淹没范围、淹