



测绘地理信息科技出版资金资助

CEHUI DILI XINXI KEJI CHUBAN ZIJIN ZIZHU

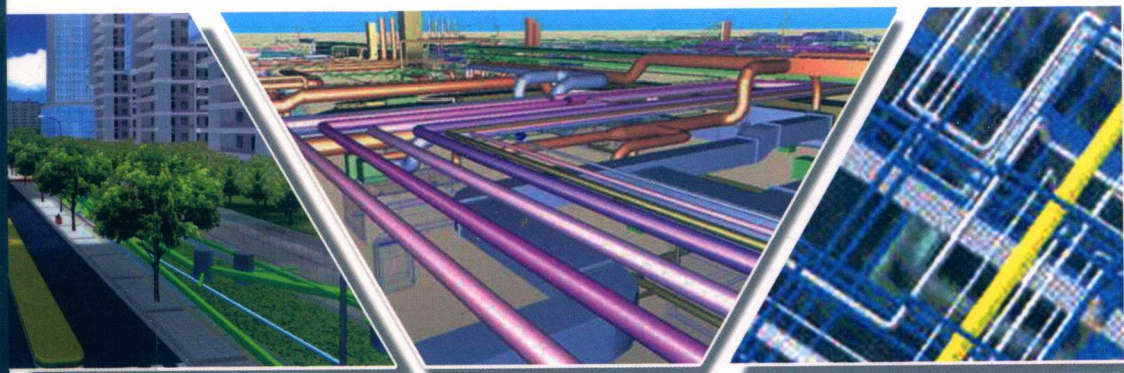


测绘科技应用丛书

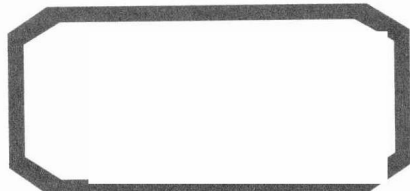
城市内涝淹没建模与过程模拟

Urban Flood Inundation Modelling and Process Simulation

李志锋 吴立新 著



测绘出版社



测绘科技应用丛书

测绘地理信息科技出版资金资助

城市内涝淹没建模与过程模拟

Urban Flood Inundation Modelling and Process Simulation

李志锋 吴立新 著

贵州师范学院内部使用

测绘出版社

· 北京 ·

© 李志锋 吴立新 2019
所有权利(含信息网络传播权)保留,未经许可,不得以任何方式使用。

内容简介

本书是地理信息科学与技术在城市内涝模拟研究与分析应用方面的交叉成果,阐述了一套顾及地表细节及约束特征的城市内涝淹没分析与过程模拟理论、方法及关键技术。主要内容包括基于约束不规则三角网的城市地表形态精细建模方法,顾及约束特征的面一点、面一边汇水模式与城区汇水单元空间划分方法,汇水单元产汇流建模,以及基于三棱柱二分数值求解算法的城市内涝淹没时空过程模拟方法与分析技术。结合所开发的软件系统,以北京市城区为例进行了实际验证与应用分析。

图书在版编目(CIP)数据

城市内涝淹没建模与过程模拟/李志锋,吴立新著. —北京:测绘出版社,2019.3
(测绘科技应用丛书)
ISBN 978-7-5030-4142-6

I. ①城… II. ①李… ②吴… III. ①城市—暴雨—水灾—系统建模②城市—暴雨—水灾—过程模拟 IV. ①P426.616

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 270134 号

责任编辑	雷秀丽	执行编辑	侯杨杨	封面设计	李伟	责任校对	赵媛
出版发行	测绘出版社			电 话	010—83543965(发行部)		
地 址	北京市西城区三里河路 50 号				010—68531609(门市部)		
邮政编码	100045				010—68531363(编辑部)		
电子信箱	smp@sinomaps.com			网 址	www.chinasmp.com		
印 刷	北京建筑工业印刷厂			经 销	新华书店		
成品规格	169mm×239mm			彩 插	2		
印 张	7			字 数	137 千字		
版 次	2019 年 3 月第 1 版			印 次	2019 年 3 月第 1 次印刷		
印 数	001—800			定 价	42.00 元		

书 号 ISBN 978-7-5030-4142-6
本书如有印装质量问题,请与我社门市部联系调换。

前 言

随着全球气候变化与极端天气事件增多,城市雨岛效应逐渐增强、影响越来越大,城市化过程所带来的环境与灾害问题日益突出。对于人口密集、财产集中和作为地区文化中心的大城市,内涝灾害带来的直接和间接损失尤为严重。近年突发、多发的城市内涝灾害暴露出来的城市建设发展缺陷,以及城区内涝淹没过程模拟难、内涝隐患推演分析难等问题,已成为城市防涝减灾与应急决策的瓶颈。目前,城市内涝模拟分析技术主要有:结合水文学产汇流和水动力学的城区“双排水系统”技术、一维-二维水动力方程法、基于地理信息系统的内涝淹没过程模拟技术等。

上述技术方法各有优缺点,但其应用过程中普遍存在城市地表形态精细建模能力差、内涝模型率定所需实测数据要求高、排水管网精细数据可获性低、淹没过程数值模拟耗时长、仿真推演与隐患分析难等问题。作者在北京市自然科学基金重点项目(No. 8111003)、国家科技部 863 重点课题(No. 2011AA120302)、水资源安全北京实验室项目的联合支持下,开展了地理信息科学与城市内涝模拟技术的交叉研究。本书系统介绍此项研究成果,包括:基于约束特征集理论形成的一套城市内涝地表数据测量、组织和管理方法,进而采用约束不规则三角网来构建精细城市地表的关键技术;顾及影响地表径流和淹没的各关键约束特征,划分城区汇水单元以作为模拟的基本计算单元,对汇水单元内的产汇流进行建模的方法;基于三棱柱的二分数值求解算法对城市内涝淹没时空过程进行动态模拟的技术方法与软件系统等。本书以北京市城区为例,采用本书模型、方法与所开发的软件系统对试验区的内涝过程进行模拟验证。本书成果可为城市内涝模拟提供精细建模、动态模拟、预案设计及风险研判的成套技术与参考资料。

本书将对基于地表细节及精细模型的城市内涝模拟与风险推演的原理、方法、空间模型、核心算法与软件平台分别阐述。全书共分为 5 章。第 1 章介绍城市内涝模拟与风险推演的技术现状;第 2 章介绍城市地表形态精细约束特征数据采集、组织、管理与无缝集成建模方法;第 3 章介绍顾及城市地表形态精细约束特征的汇水单元划分技术;第 4 章介绍基于时间切片的汇水单元产汇流模型及淹没分析方法;第 5 章介绍基于地理信息系统的城市内涝淹没风险与隐患推演分析系统及其应用。

本项研究及本书出版得到了科技部、教育部、原国家测绘地理信息局、北京市自然科学基金委、北京师范大学、中南大学的共同资助。研究团队成员李京、王植、宫阿都、朱伟、侯妙乐、郑建春、余接情、杨宜舟、张振鑫、许志华等在项目研究过程中从不同侧面为本项研究做出了贡献；本书部分内容吸纳了有关专家的宝贵建议，引用了同行的文献资料。在此，一并表示感谢！

目前，城市内涝分析模拟研究及风险推演技术尚处于发展过程中，并且不同的模型分析与技术方法各有优缺点，本书旨在发挥地理信息科学技术的优势，探索城市内涝淹没分析与过程模拟关键问题的一种解决方案。在本书撰写过程中作者力求严谨客观，但仍难免存在瑕疵和纰漏，希望能“抛砖引玉”，不妥之处欢迎读者批评指出。

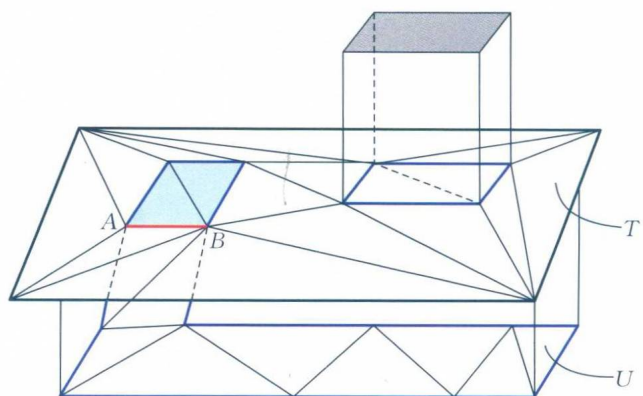


图 2.17 地下空间的双层 CD-TIN 结构示意图

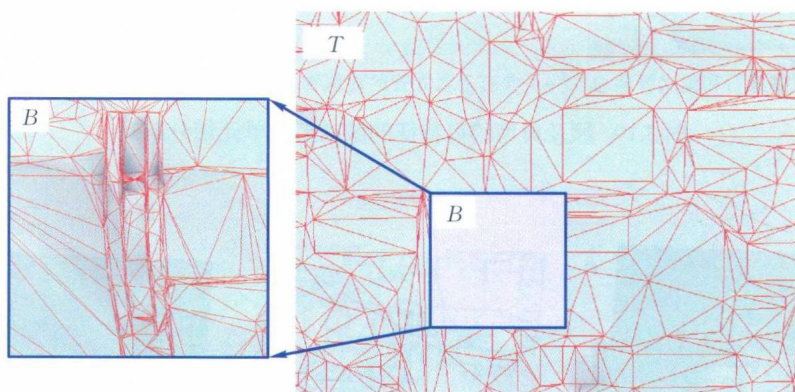


图 2.18 地表立交桥区双 CD-TIN 无缝集成建模示例

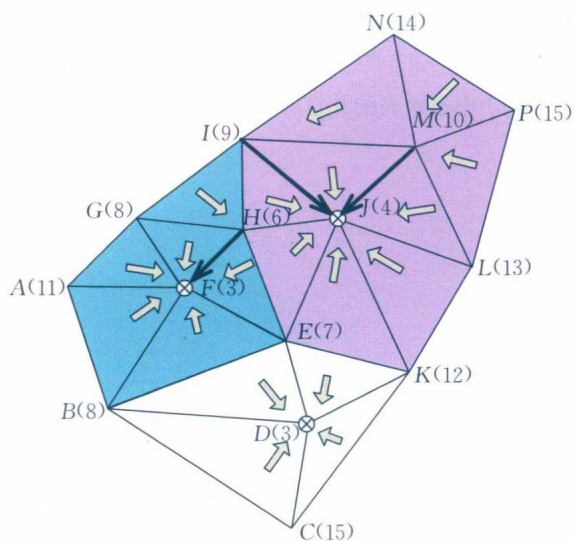


图 3.2 面—点汇流模式

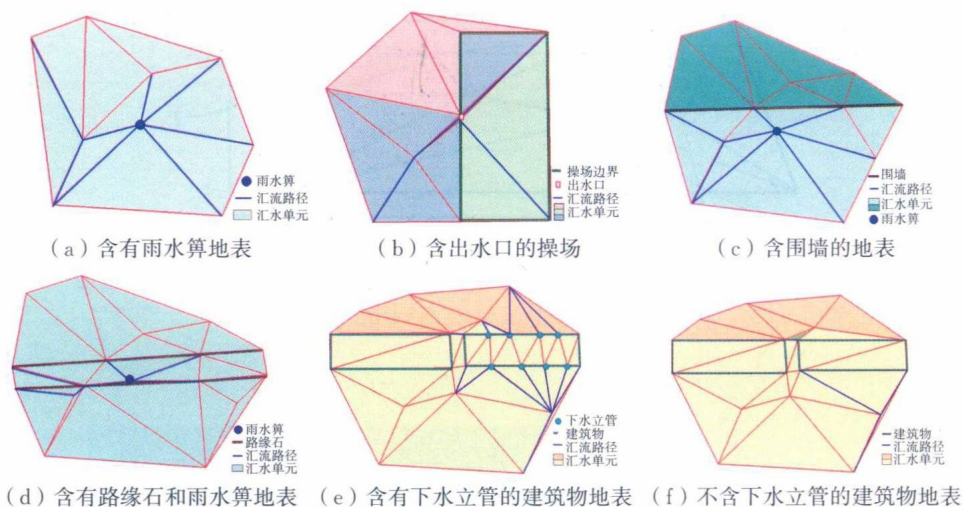


图 3.19 顾及典型约束特征的城区汇水单元划分结果

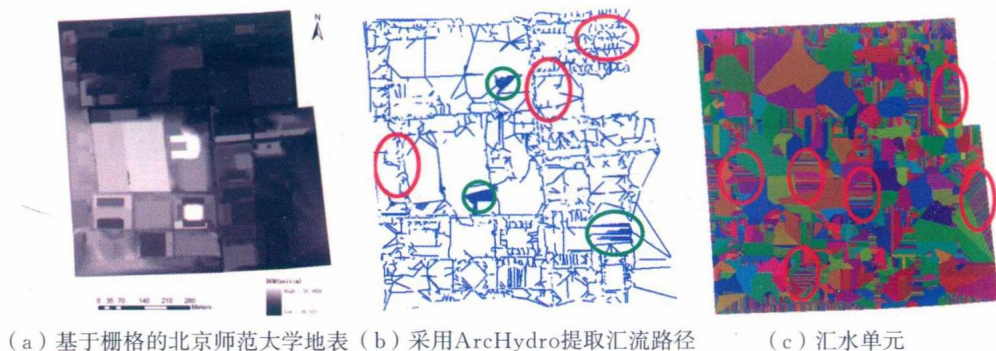


图 3.23 基于栅格地表的北京师范大学校汇流路径和汇水单元

目 录

第 1 章 绪 论	1
1.1 结合水文学产汇流理论和水动力学的城区“双排水系统”	5
1.2 采用一维-二维水动力学方法的城区内涝过程模拟技术	7
1.3 基于地理信息系统的内涝淹没分析与过程模拟方法	9
第 2 章 基于 CD-TIN 的城区地表无缝集成精细建模方法	16
2.1 城区地表细节及约束特征分析	16
2.2 城区地表细节及约束特征数据采集与组织	17
2.3 城区地表三维无缝集成的精细建模	28
第 3 章 顾及地表细节及约束特征的城市汇水单元划分方法	40
3.1 传统栅格数字地表的汇水单元划分	40
3.2 基于面一点模式的城区汇水单元划分	41
3.3 基于面一边模式的城区汇水单元划分	50
3.4 北京市试验区汇水单元划分	57
第 4 章 基于时间切片的汇水单元产汇流模型及淹没分析方法	64
4.1 基于水量平衡原理的汇水单元产汇流计算模型	64
4.2 基于时间切片和三棱柱集的淹没空间模拟方法	70
第 5 章 基于地理信息系统的城市内涝淹没风险及隐患推演技术	78
5.1 城市内涝淹没分析与模拟推演系统	78
5.2 北京市试验区内涝淹没风险序列分析	82
5.3 北京市试验区内涝重点隐患推演分析	84
参考文献	94
附录:符号表	104

Contents

Chapter 1 Introduction	1
1.1 Urban “Dual Drainage System” Combines Hydrological Theory of Runoff Generation and Hydrodynamics Methods	5
1.2 1D and 2D Hydrodynamics Methods to Simulate Urban Inundation Process ...	7
1.3 Flood Inundation Simulation Methods Based on GIS	9
Chapter 2 CD-TIN Based Seamless Integrated Fine Modeling Urban Surface	16
2.1 Analysis of Surface Details and Constraint Features on Urban Areas	16
2.2 Data Acquisition and Organization of Urban Surface with Details of Constraint Features	17
2.3 Fine Modeling of Urban Surface with 3D Seamless Integration	28
Chapter 3 Division of Urban Catchment Units with Fine Scaled Constraint Features	40
3.1 Division of Catchment Units on the Traditional Raster Surface	40
3.2 Division of Urban Catchment Units Based on Facet-Node Model	40
3.3 Division of Urban Catchment Units Based on Facet-Edge Model	50
3.4 Case Study of Division of Catchment Units in Beijing Experimental Area	57
Chapter 4 Catchment Runoff Generation and Inundation Analysis Based on Time Slices 	64
4.1 Runoff Generation and Confluence in Catchments Based on Balance Principle	64
4.2 Spatial Inundation Simulation Method Based on Time Slices and Tri-Prism Sets	70
Chapter 5 Urban Flood Inundation Modelling and Incipient Faults Deductive Analysis Based on GIS	78
5.1 Urban Flood Inundation Analysis and Simulation System	78
5.2 Inundation Scenario Analysis of Flood Risk in Beijing Experimental Areas ...	82
5.3 Deduction and Analysis of High Risk Areas in Beijing Experimental Areas ...	84
References	94
Appendix: Table of Symbols	104

第1章 绪 论

全球变化背景下城市化过程所带来的环境与灾害问题日益突出。随着全球气候变化(IPCC,2013),极端天气事件的增多(IPCC,2012),海平面上升与城市热岛、雨岛效应逐渐增强并不断凸显(Daniel,2000),洪水灾害事件频发并造成的损失逐年增长。据全球紧急灾难数据库(emergency events database,EM-DAT)数据显示:全球洪水灾害受灾人口最严重的 10 次灾害事件中有 9 次发生在中国,共造成约 13 亿人受灾(图 1.1);全球洪水灾害经济损失最严重的 10 次灾害事件中有 3 次发生在中国,共造成约 606 亿美元的经济损失(图 1.2)。而洪水等自然灾害未来将持续增强(Alexander,2006),严重威胁人民生命财产安全。

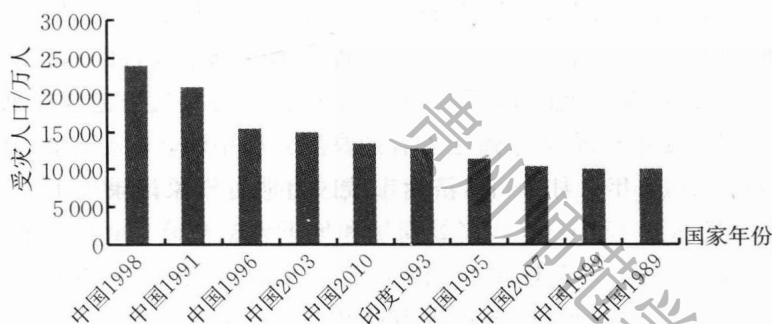


图 1.1 全球 TOP10 洪水事件受灾人口(数据源自 EM-DAT)

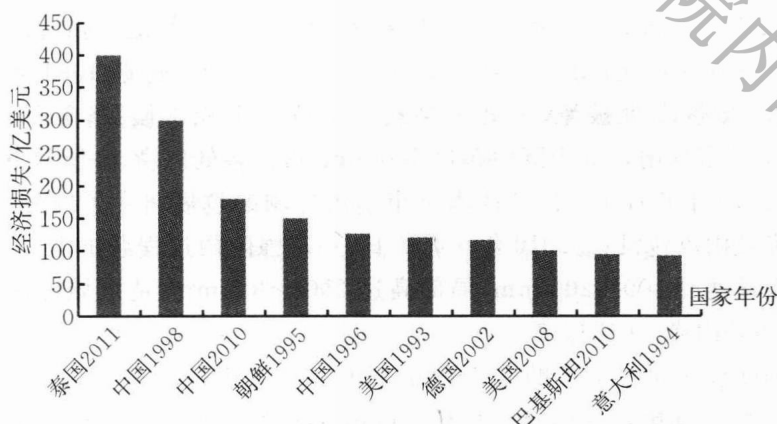


图 1.2 全球 TOP10 洪水事件经济损失(数据源自 EM-DAT)

自古至今,暴雨及其衍生灾害一直是中华民族的心腹大患(王静爱 等,2005)。城市作为人口密集、财产和文化的集中地,遭遇洪水灾害将带来严重的直接和间接

损失(Li et al., 2012; Shi et al., 2005)。研究表明,由于城市城区气温高、空气中粉尘大,周边上升气流形成向城市汇聚性运动。一旦上升的热气流遭遇高空强对流的冷气团,就会形成以城市为中心的暴雨,即所谓城市雨岛效应(Daniel, 2000)。据分析,城市雨岛效应是城市热岛效应与尾气颗粒综合作用,导致城市上空经过的冷空气加速凝结而降雨(Changnon, 1979)。因此,大型、超大型城市的市区形成暴雨的频率与强度高于周边地区的现象,将会长期存在。我国城市化进程中过多的绿地转变为建筑用地,增大了地表径流系数。同时,部分排水管网的淤塞失修,使得原本排水能力设计不足的排水系统变得更加脆弱。以上各因素使得城市洪灾的致灾力大为加强,导致城市这一传统上人类生存的“安全地带”,在暴雨引发的内涝面前显得非常脆弱。

据住房和城乡建设部对 351 个城市的专项调研结果显示:2008—2010 年间我国 62%的城市发生过内涝,137 个城市致灾超过 3 次;其中积水深度在 15 cm 以上(即可能淹没小轿车排气管)的多达 90%,最深处超过 50 cm 的占 74.6%;积水时间逾半小时的占 78.9%,有 57 个城市的积水历时最长超 12 h。近年,我国城市暴雨致涝的典型案例分析有:①2004 年 6 月 25 日,南京市连降暴雨,部分路段大量积水,地下通道被淹;②2007 年 7 月 16 日,重庆市主城区遭遇有气象记录以来的最强降雨,24 h 降雨量达 266 mm,多条通往外省的高速公路中断,56 人罹难,直接经济损失达 31 亿元;③2007 年 7 月 18 日,济南市城区遭遇有气象记录以来的最强降雨,市区最大降雨量达到 151 mm/h,多处商场和地下设施被淹,34 人罹难,经济损失达 12 亿元;④2010 年 5 月 7 日、9 日至 14 日,广州市区一周之内遭遇 3 场暴雨,降雨量达到 440 mm,其中 1 h 和 3 h 最大雨量分别达到 99 mm 和 199 mm,是广州市 1908 年有气象记录以来汛期从未出现过的极端天气状况,中心城区 118 处地段出现内涝浸水,7 人罹难,35 个地下车库被淹没,地铁口雨水倒灌、地铁隧道渗水,全市经济损失约 5.4 亿元;⑤2010 年 5 月 13 日,江西新余市遭遇 1984 年以来的最强暴雨侵袭,城区多处被淹,一处下穿式立交桥桥下积水漫顶;⑥2010 年 6 月 9 日,广西梧州市暴雨,3 h 内降雨超过 100 mm,市区多处内涝,一所地下在建车库遭水淹;⑦2010 年 6 月 15 日,广西南宁市暴雨冲刷的垃圾堵塞了部分排水管,导致部分街道被雨洪淹没;⑧2010 年 7 月 9 日,一次强降雨过程袭击重庆市主城区,大部城区雨量达到 100~200 mm,局部高达 250~300 mm,造成城区部分路面积水达 3 m,多处内涝,交通拥堵。

作为国际现代化大都市的北京近年来也多次发生极端暴雨天气:①2004 年 7 月 10 日的特大暴雨,2 h 内降雨超过 100 mm,导致北三环、西三环、莲花桥等多处地下通道、下穿式立交桥被淹,城市顷刻陷于混乱状态;②2006 年 7 月 31 日,北京城区遭遇入夏以来最强暴雨,数处立交桥下出现严重积水,首都机场高速路迎宾桥下积水深达 1.5 m,机场高速路 10 年来首次被迫双向断路;③2009 年 7 月

13日,急雨突袭京城,最大降水量接近80 mm,多处下穿式桥区积水,导致40余条路段拥堵;④2010年7月9日,北京城区遭遇最大降雨,导致在建地铁8号线西三旗站路面雨水流入站内、高水压积水冲破隔离桩间土,使地下形成空洞并造成地表塌陷;⑤2012年7月21日,北京及其周边地区遭遇61年来最强暴雨及洪涝灾害,根据北京市政府举行的灾情通报会的数据显示,此次暴雨造成房屋倒塌10 660间,160.2万人受灾,经济损失达116.4亿元。

此外,随着城市发展与城市交通网络的不断完善,立交桥不断增多(Abdullah et al., 2011a)。其中,下穿式立交桥约占我国已建成立交桥75%以上,其天然缺陷就是积水问题。近年,不断有报道指出:暴雨导致的下穿式立交桥积水深达1~3 m,车辆熄火,交通严重堵塞,甚至威胁到人们的生命。北京经常发生积水的城区环路下穿式立交桥就多达42处。城市的地下空间发达,出入口高度敏感,以北京为例,其地下空间正以平均每年3万平方米的速度增加,占市内总新增建筑面积的10%。地下空间出入口是地下空间安全的“咽喉”,一旦“咽喉”被淹,地下空间将迅速被淹。因此,地下空间出入口高程相对于周围地面及雨水井口和雨水算的高差,是地下空间安全的关键和敏感因素。

城市内涝灾害使交通系统顷刻瘫痪、生产活动停顿、基础设施损毁、居民生活受困,直接威胁着人类生存与城市发展(李伟峰等,2009)。暴雨成灾已成为中国城市集体面对的现代性难题,尤其是老城市、大城市显得尤其脆弱,若发生十年一遇、百年一遇的暴雨则会大概率发生严重内涝灾害事件。暴雨频繁导致城区内涝灾害向各大城市敲响了警钟。本书可为城市内涝淹没过程模拟提供一套新模型、技术和方法,进行内涝淹没风险分析和隐患推演分析,进而降低灾情,起到防范与预警作用,最大程度减少经济损失。

对于人口密集、财产集中的(特)大城市,内涝灾害带来的直接和间接损失难以估算。同时,在突发的城市内涝灾害过程中暴露出来的城区内涝灾情模拟分析难、内涝隐患推演难等问题,成为城市防涝减灾与应急决策的瓶颈,是危及城市公共安全与城市安全运行的不利因素,是亟待解决的重大问题。

《国家综合防灾减灾规划(2011—2015年)》指出要进一步完善自然灾害检测预警预报能力、不断提高灾害风险评估和应急管理能力,《国家中长期科学和技术发展规划纲要(2006—2020年)》强调了公共安全是国家和社会稳定的基石。城市的内涝情景模拟与隐患预警,是我国城市公共安全面对的严峻挑战,是科学界与政府面前的紧迫任务,是对现代科学技术的重大挑战(李纪人等,2004;李京等,2008)。城市作为政治、经济、文化、历史的集聚中心,亟须研发暴雨致涝的城区水情淹没推演与灾情过程模拟方法,定制快速有效的内涝预警机制与指标体系,形成以风险分析、水情模拟、灾情推演、隐患分析、及时预警为主线的城市内涝模拟仿真与隐患评估预警体系,为构建城市重大灾害与公共安全高效处置应急决策指挥

平台提供支撑,为城区内涝风险分析和隐患推演提供决策依据,提高城市的防涝减损能力。

因此,本书是在城区地表复杂多样、下垫面不透水性各异、立交桥和地下空间持续增多的现实背景下,在城市暴雨内涝灾害日益频发的严峻形势下,针对城区雨岛效应所致暴雨内涝集中增强等复杂问题,而综合分析提出的,具有基础性和前瞻性。本书将为城区合理规划与建设、城区内涝隐患推演分析、内涝排水方案改进、城市下垫面结构设计、城市预警系统建设及城市应急预案制定与演练等提供新模型和新方法,包括空间模型、核心算法、技术参数和软件系统等,做到未雨绸缪,防患于未然。具体而言,在城市汛期前夕,通过本书方法和软件系统模拟推演在不同暴雨重现期、不同暴雨预警等级下的内涝淹没情况,可为风险分析、交通预警、灾害救助提供决策依据;对于较为脆弱的易受灾地带(地下空间、下穿式立交桥等),采用本书模型、方法和软件系统,可对其防涝救灾、排水设施的改造和新建进行科学指导;基于约束不规则三角网(constrained Delaunay triangular irregular network, CD-TIN)构建精细的集成城市地表,便于城区下垫面新增建筑物的表达与地表更新,通过模拟推演,可为新城区建设中的承灾体脆弱性分析提供依据,提升新建城区的抗灾能力。

国内外学者对城区内涝模拟推演进行了大量研究,依研究角度、所用数据、模型假设、方法参数和模拟对象的不同,可概括为三种主要方法(图 1.3):结合水文学产汇流理论和水动力学的城区“双排水系统”模式、一维-二维水动力学法,以及基于地理信息系统(geographic information system, GIS)的内涝淹没过程模拟法。

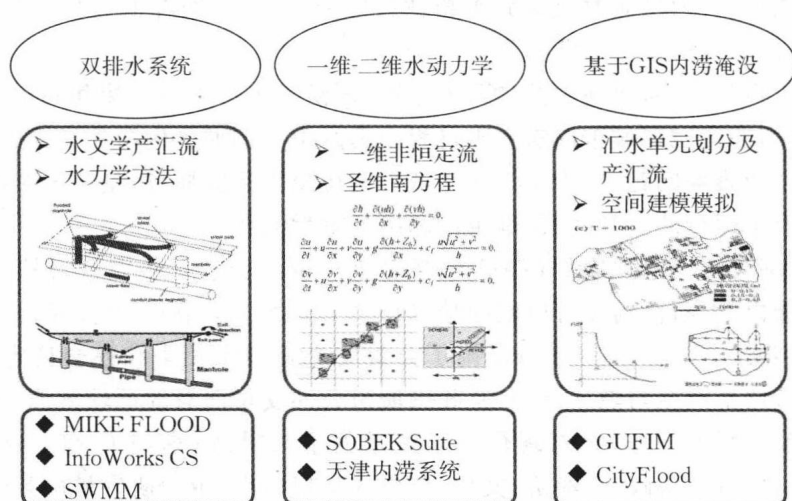


图 1.3 城市暴雨内涝淹没模拟主要方法概况

1.1 结合水文学产汇流理论和水动力学的城区“双排水系统”

Djordjević 等(1999)提出城区双排水系统的概念,指出城区排水系统分为地上和地下两部分:地上排水系统主要指城区地表的天然或人工的排水渠道、街道等;地下排水系统主要指排水管网。在该模式下,地上、地下排水系统主要通过排水立管的入口(manhole)进行水量的交互(Schmitt et al., 2004; Smith, 2006),如图 1.4 所示。

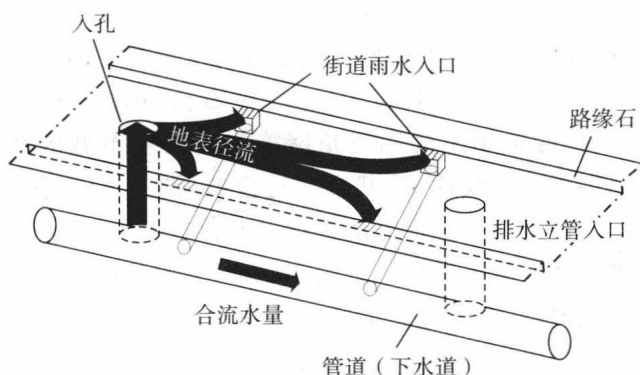


图 1.4 地上、地下排水系统的水量交互示意(Schmitt et al., 2004)

Djordjević 等(2005)和 Maksimović 等(2009)采用 1 维-1 维方法对经过排水立管入口的地上、地下交互水量进行了模拟;有学者对地面街道、沟渠等积水的汇流进行模拟(Mark et al., 2004)。顾及地表实际汇流情况,较多的学者采用 1 维-2 维方法对地下管网溢水的地表积水漫流淹没进行模拟(Carr et al., 2006; Chen et al., 2005; Chen et al., 2007; Dey et al., 2007; Seyoum et al., 2012; 李伟峰等, 2009),并有学者对两种方法进行了对比分析,表明了 1 维-2 维方法的先进性(Leandro et al., 2009)。

英国洪涝风险管理研究联盟(Flood Risk Management Research Consortium, FRMRC)2004—2012 年对城区内涝进行了系统研究,从地表数据获取(Smith et al., 2006)、模型构建与分析、快速模拟与预警等(Chang et al., 2010; Ghimire et al., 2011)进行了一系列的研究。就数据获取而言,英国帝国理工大学的 Maksimović 等基于激光雷达(light detection and ranging, LiDAR)获取的高精度数字高程模型(digital elevation model, DEM),提出了一种新的地表汇流路径自动提取方法,并研发了相应的系统应用于城市内涝模拟(Alitt et al., 2009; Maksimović et al., 2009)。Abdullah 等给出了一整套处理 LiDAR 测量数据构建城市内涝地表的新方法,用于支持城区内涝模拟的方法,包括了对立交桥等复杂城

区地物的处理(Abdullah et al., 2011a; Abdullah et al., 2011b)。

此外,Djokic 和 Maidment(1991)给出了基于三角网的城区地表对城区内涝进行模拟,采用不规则三角网(TIN)结构无缝集成地下排水系统的方法并进行了城区地表积水分析。

由于该类方法能够较为合理地模拟城区内涝淹没场景(Nielsen et al., 2008),很多商业软件采用该方法进行研发,如 DHI 公司的 MIKE FLOOD、Deltares 公司的 SOBEK Suite、Innovyze 公司的 InfoWorks CS。美国国家环境保护局(Environmental Protection Agency, EPA)的暴雨洪水管理平台 SWMM(storm water management model)同样采用了该类方法,并开发了开源软件包,可方便相关学者和工程师调用(Hsu et al., 2000; Ying-Po et al., 2012)。英国环境部门联合相关院校,对当前存在的十余种软件和模型进行了定量化的测试与分析,发现模拟结果各异且适用条件不同(Néelz et al., 2010; Zoppou, 2001)。

InfoWorks CS 软件采用不规则三角网格构建的基本城区地形(Shewchuk, 2002),能较好地解决排水管线建模、城市内涝模拟(图 1.5)。有学者利用该软件模拟了城区内涝淹没情景并与其他方法进行了对比(Alitt et al., 2009),发现该软件在数据较为完善的情况下可解决一定的问题,但是对各类数据要求较多;因采用基于三角网格的地表模型,可实现无特征选择的大量的离散点(如激光点云点)的建模,但冗余数据较多,未能突出城区地表各精细约束特征,尤其是路缘石对汇水的影响。



图 1.5 InfoWorks CS 2D 耦合排水设施的淹没模拟(Alitt et al., 2009)

分析归纳双排水系统法对城市内涝研究成果(表 1.1),认为虽然该方法可充分顾及汇水单元内的地下排水系统,可较为真实准确地模拟城区内涝淹没,但是,该方法的基本计算元为汇水单元,仅能模拟计算范围内的指定位置和断面的内涝过程(王静等, 2010)。同时,该方法对水文参数和排水管网数据要求较高,尤其是需要精细的排水管网空间分布和相关设计参数,以及多种用于模拟参数率定的实测数据(Leandro et al., 2009)。

表 1.1 双排水系统法对城市内涝研究成果归纳

学者年份	研究成果	典型软件
Djordjević et al. ,1999	提出城区双排水系统概念:地面排水系统主要指城区地表的天然或人工的排水渠道、街道等,地下排水系统主要指排水管网	DHI 公司的 MIKE FLOOD
Schmitt et al. ,2004;Smith,2006	地上、地下排水系统主要通过排水立管的入口进行水量的交互	DHI 公司的 MIKE FLOOD; Innovyze 公司的 InfoWorks CS
Djordjević et al. ,2005; Maksimović et al. ,2009; Mark et al. ,2004	采用一维-二维方法对经过排水立管入口的地上、地下交互水量进行了模拟,同时对地面街道、沟渠等积水的汇流进行了模拟,顾及地表实际汇流情况	DHI 公司的 MIKE FLOOD
Chen et al. , 2005;Carr et al. , 2006; Chen et al. , 2007;Dey et al. , 2007; 李伟峰等, 2009;Seyoum et al. , 2012	用一维-二维方法对地下管网溢水的地表积水漫流淹没进行模拟,给出了地下和地表网格结合处耦合的建模计算	DHI 公司的 MIKE FLOOD; EPA 环境保护署的 SWMM
Maksimović et al. , 2009	基于 LiDAR 获取的高精度 DEM,提出了一种新的地表汇流路径自动提取方法	Innovyze 公司的 InfoWorks CS
Djokic et al. ,1991	采用 TIN 结构无缝集成地下排水系统的方法,进行了城区地表积水分析	Innovyze 公司的 InfoWorks CS

1.2 采用一维-二维水动力学方法的城区内涝过程模拟技术

一维-二维水动力学方法采用流域洪涝淹没模拟中常用的一维-二维水动力学方程对城区内涝淹没进行推演。其能充分顾及城市地形和建筑物的空间分布特征(Amaguchi et al. ,2012),能较好地模拟城区洪水的物理运动过程(Mignot et al. , 2006),并可模拟洪水演进过程中各水力要素值(Amaguchi et al. ,2012; El Kadi Abderrezzak et al. ,2009; 王静 等,2010)。程晓陶研究团队对此进行了深入的研究(仇劲卫 等,2000)并不断改进完善(王静 等,2010),研发的城市洪涝模拟仿真软件(李娜 等,2002)在多个城市进行了推广应用(仇劲卫 等,2000; 李帅杰 等,2011);Vojinovic 等(2009)给出了1维和2维耦合对城市内涝进行模拟,并提供了供用户使用的方案和模块。

随着高精度栅格地表数据的可获性提高,一些学者逐渐提出了基于 LiDAR

采集的城区地表模型用于内涝模拟方法,如 Mason 等(2007)融合了现有基础地理数据和 LiDAR 扫描数据对城区内涝进行建模;Turner 等(2013)从多源激光 LiDAR 生成地表的角度,结合 HEC-RAS 分析了航空和地面 LiDAR 不同平台下的城市内涝淹没情况;Sampson 等(2012)基于车载 LiDAR 采集的高精度地表,应用 LISFLOOD-FP 模型(Bates et al., 2000)和 ISIS-FAST(Groppa et al., 2013)模型对城区内涝进行淹没模拟,选用不同栅格分辨率进行对比分析发现城区微小精细特征(如路缘石、隔离带等)对模拟结果影响较大。由于不同栅格分辨率对地表表达的多样性,如图 1.6 所示,不同的数据源有不同的分辨率导致地表起伏大有不同,基于此地形进行模拟必然导致不确定性的结果。此外,水动力学方程的数值求解方法可利用 10 cm 栅格分辨率下的城区精细地表模型,但建模数据量巨大且在高性能机上耗时较长(运行约 100 h)。

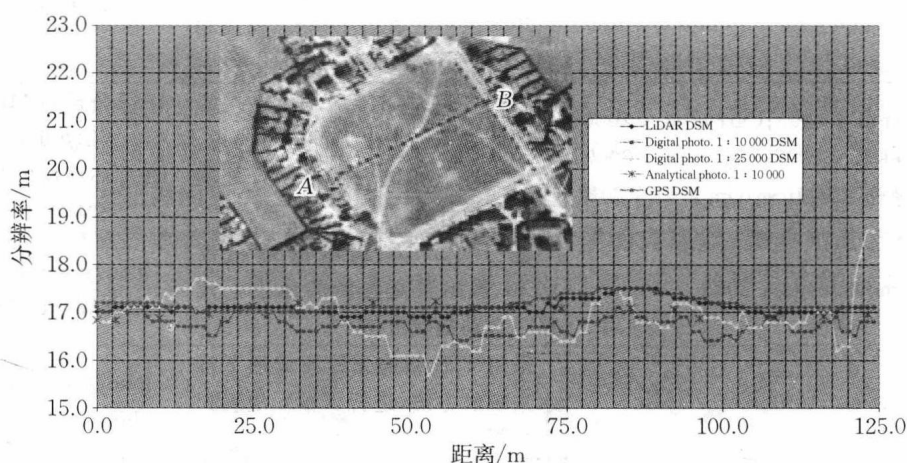


图 1.6 城区地表在不同数据源分辨率下的地形起伏差异(Asal, 2003)

采用该方法解决城区内涝模拟的商业软件和开源包中,较为出名的是澳大利亚国立大学的 ANUGA、BMT WBM 公司的 TUFLOW FV 软件包,其能够实现洪水的推演、排水系统的设计与优化等建模和模拟。

分析认为:该类方法对地下管网数据做了概化处理,并且模拟精度过多依赖于水文参数率定的效果。水动力学方程数值求解中依赖于空间和时间的间隔,计算量大且复杂。虽有部分学者采用算法简化(Chen et al., 2012)、高性能计算(Neal et al., 2009)、硬件加速(Kalyanapu et al., 2011)等方式解决了部分效率问题,但仍无法满足快速模拟与仿真分析的需求。研究表明(Fewtrell et al., 2011; Sampson et al., 2012):城区地表微小关键特征对城市内涝淹没模拟结果影响较大。虽然可通过提升栅格地表的分辨率来区分关键地物,但会带来海量数据、计算复杂等负面问题。因此,需要采用 CD-TIN 数据结构来构建精细城市地表,以较少的关键数据来构建城区关键精细地物特征,从而实现城市内涝的快速模拟与仿真。