

第 1 章 绪 论

1.1 研究背景与意义

受全球变暖影响(王佳雯 等,2017),海陆热力差异进一步加剧,改变了大尺度环流结构,影响了水循环过程(宋晓猛 等,2013; 张建云 等,2016),重塑了强降雨空间分布(You et al.,2011)。同时,温度的升高也增强了大气保持水分的能力(Trenberth,1998),使得极端降雨的频率和强度普遍增加(Goswami et al.,2006),尤其是在北半球的中高纬度区域(Alexander et al.,2006)。此外,随着社会经济的快速发展,大量人口涌入城市,迫使城区面积不断扩张以满足人们对基础设施和公共服务的更大需求,由此出现了显著的城市化现象。联合国人居署发布的《2016 年世界城市状况报告》以全球 120 个城市为样本进行了统计分析,发现 1990—2000 年建成区面积增长率达到了 28%。在全球气候变化和持续城市化的双重驱动之下,洪水灾害逐渐演变成最为频繁的自然灾害(Jha et al.,2012),而更多的人口和财产也暴露在了洪水的威胁之下(Smith et al.,2019; Tellman et al.,2021; 程晓陶 等,2016)。

从全球来看,1970—2009 年共发生洪水及风暴灾害事件约 6200 起,造成近百万人死亡和超过 1.6 万亿美元的经济损失(WMO,2013)。2008—2014 年全球近 1.9 亿人因自然灾害无家可归,而其中的 55%则与洪水灾害相关(Center and Council,2015)。2006—2016 年洪水灾害在全球范围内造成的年均经济损失高达 500 亿美元,其中仅 2016 年洪水灾害导致的经济损失就达到 600 亿美元(Benfield,2016)。2021 年 7 月,德国西部发生特大洪水,造成约 180 人因灾死亡,另有约 150 人失踪;同年 9 月,美国纽约由于飓风“艾达”过境出现了极端暴雨,洪水淹没了道路进而涌入地铁,导致美国地铁全线停运。就我国而言,许多城市同样饱受洪水侵扰,甚至深受其害(Du et al.,2019; 姜灵峰,2018; 李超超 等,2019)。2012 年 7 月 21 日,北京及其周边地区突降 61 年来最强暴雨,暴雨所引发的洪涝灾害导致约 80

人死亡,160万人受灾,经济损失达到116亿元。2016年7月6日,暴雨突袭湖北武汉,致使75.7万人受灾,造成了高达22.65亿元的直接经济损失(夏军等,2017)。2021年7月17—23日,河南省遭遇历史特大暴雨,20个国家级气象监测站日降水量突破了历史极值,郑州20日16—17时降雨量达201.9 mm;洪涝灾害波及郑州、鹤壁和新乡等地,造成全省1478.6万人受灾,873.5千公顷农作物受灾,398人因灾死亡或失踪,直接经济损失高达约1200亿元。据2018年《中国水旱灾害公报》统计,21世纪以来我国因洪致死人数已经超过2万人,直接经济损失超过了3万亿元。以国内351座城市为样本,住房和城乡建设部针对2008—2010年的城市受淹情况进行了分析。结果表明,发生过洪涝灾害的城市占比超过了60%,更有约40%的城市发生三次以上,有57座城市的最长淹没时间达到了12 h。

由此可见,受全球气候变化和持续城市化影响(Miller et al., 2017; Pumo et al., 2017; Sofia et al., 2017),过去几十年极端暴雨事件明显增加,破坏性洪水发生频率显著升高(Oh et al., 2020; Slater et al., 2021; Smith et al., 2019; Westra et al., 2014; Yin et al., 2018),已经造成了巨大的经济损失和人员伤亡(Lyu et al., 2018a),引起了全球各地的广泛关注(Ashley et al., 2008; Paprotny et al., 2018)。更加重要的是,根据专家预测,到2030年发展中国家的城市人口将是现在的两倍,而建成区面积则将是现在的三倍(韩肖倩,2019)。到2050年,全球人口将突破90亿,城市人口将达到63亿,且这种人口快速增长的现象在发展中国家将更为显著(Heilig, 2012)。我国的城市化建设同样将进一步加速,以实现第三步战略目标(张建云,2012)。可以预见,未来随着人口和社会资产进一步聚集,洪水灾害的易损性必将进一步增大(Tanoue et al., 2016; Wing et al., 2020; 程晓陶等,2015),而洪水内涝也必将成为我国城市可持续发展中面临的一大痼疾(Chen et al., 2020; Hallegatte et al., 2013)。

由此可见在暴雨洪水日益频发的背景下,提高城市洪水风险应对能力,加强智慧水利、数字孪生和四预系统建设的重要性将进一步凸显(Acosta-Coll et al., 2018; 李娜等,2019b)。这就需要构建水安全全要素预报、预警、预演、预案的模拟分析模型,强化洪水演进等可视化仿真能力。而落在具体的城市片区或城市流域,高效准确的城市雨洪模拟技术便成为了关键。

1.2 国内外研究现状

1.2.1 城市雨洪模拟方法

科学合理的洪水风险管理需要结构性措施(强调防洪工程设施的建设)和非结构性措施(强调对人类活动行为的干预)共同发力(李娜等,2019a),而城市雨洪模拟技术则是非结构性措施建设中不可或缺的关键一环。同时,城市雨洪模拟技术也是增进城市水文循环理解的重要手段。因此,不断发展城市雨洪模拟技术对现代化城市规划、城市可持续发展及城市应急管理均具有重要意义。相较于自然流域,城市流域在产流、汇流、排水等各个方面均呈现出不同的特点。在过去几十年的时间里,中外学者对城市雨洪模拟技术进行了广泛的探索和研究。总体而言,城市雨洪模拟的全过程主要包括三个步骤(胡伟贤等,2010),首先是城市地表产流计算,其次是城市坡面汇流计算,最后是城市雨水管网及河道排水计算。

1. 城市地表产流计算方法

城市下垫面地表覆盖类型多样,空间分布破碎,存在着高度的空间异质性。就其类型而言,可分为透水面(如草地、灌木、乔木等)和不透水面(如建筑物、道路、不透水铺装等)两类。当前,统计分析法、下渗曲线法和模型法是城市产流计算中主流的三类方法。其中又以统计分析法中的SCS方法和下渗曲线法中的Green-Ampt方法与Horton方法应用最为广泛(宋晓猛等,2014)。

2. 城市坡面汇流计算方法

城市下垫面高楼林立、道路纵横,人工设施众多,情况复杂。这也造成了城市下垫面复杂的汇流条件(Singh,1994; Singh et al.,1997)。所谓“坡面汇流计算”,即采用系统概化的手段或完全基于物理过程用数学的方法对坡面净雨向排水区出口汇聚的过程进行定量描述。从计算原理的角度,城市坡面汇流方法包括水文学和水动力学两类。水文学方法以瞬时单位线法、等时流线法和非线性水库法等为代表,通常基于系统概化的方式建立输入-输出的关系。相关学者曾对现有基于水文学的坡面汇流计算方法进行了大量的对比分析,结果表明非线性水库法的表现相对更好(Kidd,1978; 任伯帜等,2006)。基于水文学原理的坡面汇流计算方法由于采用了概化

手段,故可以在计算精度和计算效率之间达到较好的平衡(任伯帜,2004)。而水动力学方法则更加强调微观物理机制(梁瑞驹等,1991),通过求解圣维南方程组或其简化形式对地表水流运动进行精细化的数学描述。但水动力学方法通常对计算的初始条件和边界条件有着严格的要求,同时在计算效率方面有明显降低(Mignot et al.,2006;申红彬等,2016)。

3. 城市管网及河道排水计算方法

雨水管网及人工衬砌河道的密集分布是城市流域的一大显著特点。当前主流的城市排水计算方法同样可分为水文学和水动力学两类(岑国平,1990;岑国平等,1995)。其中马斯京根法和瞬时单位线法是水文学方面的典型代表。但水文学方法难以考虑城市排水系统中回水、逆流等诸多复杂的水流现象,无法适应城市复杂排水系统的模拟需求。水动力学方法通过求解圣维南方程组对排水系统内的水流运动进行描述,根据对圣维南方程组简化程度的不同,可进一步细分为运动波方法、扩散波方法和动力波方法(张念强等,2017)。运动波方法忽略了运动方程中的惯性项和压力项,计算相对简单,但不能考虑下游回水的影响,因此一般多用于大坡度管道的情况;扩散波方法简化程度次之,仅忽略了惯性项而保留了压力项,但依然无法解决环状管网的水流计算问题;动力波方法则是通过求解完整的圣维南方程组对水流运动进行计算,可考虑回水、逆流和各种复杂的入流条件(芮孝芳等,2015)。

4. 国内外城市雨洪模型的发展

20世纪70年代早期,美国一些政府机构通过集成各种产汇流及排水算法率先开发了能够模拟水量和水质的城市雨洪模型。20世纪90年代,国内城市雨洪模型研发成果开始涌现(刘俊,1997;徐向阳,1998;周玉文等,1997)。纵观城市雨洪模型的发展史,由简入繁依次经历了黑箱模型、概念性模型和物理性模型三个阶段(胡伟贤等,2010;夏军等,2018)。其中黑箱模型基于输入-输出间的经验关系进行预测,欠缺对物理过程的分析,在大多数场合无法满足城市防洪决策的要求。概念性模型以水量平衡原理为基础,可以更好地考虑水文响应的物理过程,大多具备分布式特征。分布式概念模型通常将研究区划分为若干个小的排水区,而每个排水区则作为一个计算单元,然后利用集总式概念性模型计算每个集水口的入流过程,最后通过雨水管网或河道汇流演算到研究区出口。由于分布式概念性模型在

一定程度上考虑了物理机理,且一定程度上可以较好地考虑下垫面空间分布信息,所以自20世纪70年代起,其在城市排水设计和城市防洪规划等多个领域得到了广泛的应用(王小杰等,2022)。物理性模型则以水动力学为基础,通过求解偏微分方程对水流运动进行推演(侯精明等,2018b),具有较强的物理机制,但边界条件严格,且相对更加耗费计算资源。

总体来看,单纯的水文学方法难以准确描述城市管网水流和地表淹没;而单纯的水动力学方法则无法很好地考虑土壤的下渗作用。因此,综合利用水文学和水动力学方法,兼顾两者各自的优势发展水文水动力耦合的模拟技术成为城市雨洪模拟的必然选择。当前根据水文、水动力模型耦合机理的完善程度,耦合方法可分为三类:松散耦合、内部耦合、紧密耦合(徐宗学等,2021)。其中松散耦合通常是将水文学模型模拟得到的流量过程作为水动力学模型的上边界或旁侧入流,对地表-管网-河道之间的水量交互机制做了较大概化(余富强等,2019)。一般认为地表淹没是管网或河道节点溢流扩散的结果,当雨水管网及河道排水能力恢复后,溢流水量将再次回流到管网及河道。这种方法由于可操作性很强,因此也被广泛应用于城市雨洪管理的实践当中。紧密耦合是将水文和水动力学模型作为一个整体统筹考虑并联立求解。该方法在机理上最为完善,有利于更好地模拟城市复杂的洪涝过程,但方程组联立求解难度较大。内部耦合的技术复杂程度和过程概化程度则介于上述两者之间。

过去几十年间,国内外涌现出大量专业的城市雨洪模型(黄国如,2013;徐宗学等,2021)。国外模型根据其开放程度可分为三类:商业化、半商业化和免费使用。其中,加拿大水力计算研究所开发的PCSWMM模型、英国HR Wallingford开发的InfoWorks ICM模型和丹麦水利研究所开发的MIKE系列软件是高度商业化模型的典型代表。美国弗吉尼亚州海洋科学研究所开发的EFDC模型和荷兰代尔夫特水力研究院开发的Delft 3D模型均只对其图形用户界面(graphical user interface, GUI)进行了商业化,属于半商业化模型。当前,国际上可免费使用的城市雨洪模型包括美国环境保护局开发的SWMM模型、美国陆军工程兵团水文工程中心开发的HEC-RAS模型和英国布里斯托大学开发的LISFLOOD-FP模型。国内学者同样研发了一系列代表性模型,例如大连理工大学于2006年发布的HydroInfo模型(张南,2018)、珠江水利科学研究院于2007年发布的HydroMPM模型(宋利祥,2019)、西安理工大学于2013年发布的GAST模型(侯精明等,2018a)、中国水利水电科学研究院于2015年发布的IFMS/Urban模型(喻

海军等,2018),以及华南理工大学于2020年发布的IHUM模型(黄国如等,2021)。

1.2.2 建筑物的模型表征

建筑物的大面积存在是城市区域的关键特点之一,也是城市雨洪模拟研究的一个重点(Chen et al.,2012; Huang et al.,2014; Isidoro et al.,2012; Lee et al.,2016; Zhou et al.,2016)。当前研究主要聚焦在建筑物对水流的阻塞效应,即建筑物的存在会改变由重力方向决定的地表径流方向。为了考虑建筑物的阻塞效应,国内外学者提出了各种方法,例如增加建筑物所在局部区域的粗糙度(Connell et al.,2001; Vojinovic et al.,2011)、移除建筑物所在位置的模拟网格(Chen et al.,2008; Russo et al.,2012; Vojinovic,2009)或是增加建筑物所在网格的底部标高(Brown et al.,2007; Cea et al.,2010; Leandro et al.,2016)。McMillan et al. (2007)在城市淹没模拟中评估了建筑物的阻塞效应,指出了在低分辨率模型网格中考虑建筑物特征的必要性。Lee et al. (2016)进一步证实了建筑物模型表征的重要性,强调建筑阻塞效应不仅会改变排水区出口的水文过程线,而且会影响积水的空间分布。

Yu et al. (2010)利用机载LiDAR数据和基于对象的方法对休斯敦市中心的建筑密度进行了评估,结果表明超过40%的地块建筑覆盖率(building coverage ratio,BCR)超过了50%。Farreny et al. (2011)的研究则表明建筑屋面的高不透水性可以使92%的降雨直接转化为径流。由此可见,建筑物在阻碍地表水流的同时,其屋面产流也会对排水区出口贡献不可忽视的水量,继而影响城市水文响应过程。因此,除建筑物对水流的阻塞效应外,建筑屋面产流及其具体去向应当得到更多的关注。目前已有的研究均未细致地考虑屋面微尺度汇流过程,例如部分水力学模型直接不考虑屋面产流或强迫屋面产流沿地表最陡方向汇流,忽略了屋面微地形和墙侧雨落管的影响(Chen et al.,2008);部分水文学模型则是将建筑物、道路、不透水铺装等统一纳入子排水区的不透水区域而不做细分,或是将建筑物提取为单独的子排水区并为其分配一个特定的汇流出口(Park et al.,2008; Sun et al.,2014)。Leandro et al. (2016)和Chang et al. (2015)在传统城市雨洪模拟方法的基础上进行了改进,迫使屋面产流通过雨落管进入管网排水系统。但现实情况中建筑物通常会配备多个雨落管,且在源头减排理念影响下越来越多的雨落管采取断接的方式将屋面降雨排入草地或

其他低影响开发(low impact development, LID)措施,而非直排雨水管网(Lee et al., 2003; Voter et al., 2018; Woznicki et al., 2018)。

1.2.3 模型空间分辨率对城市雨洪模拟的影响

城市下垫面地表覆盖类型、土壤含水量等水文特征往往表现出显著的空间异质性(Cantone et al., 2011; Singh, 1997; Zhou et al., 2017),而复杂的微地形变化则在此基础上进一步增加了城市地表汇流过程的复杂性。由此可见,对于具有高度空间变异水文特性、高度复杂地表汇流路径的城市流域,模拟其水文过程无疑是极具挑战性的(Leandro et al., 2016; McPherson et al., 1974; Rodriguez et al., 2008; Salvatore et al., 2015)。因此,为提供城市下垫面的详细描述以捕捉城市关键要素的变化,高空间分辨率数据至关重要(Petrucci et al., 2014; 刘璐等, 2019)。当前,包括土地利用、地形地貌等在内的众多地理数据变得容易获得(Kim et al., 2019; Liu et al., 2018; Ozdemir et al., 2013),可以为模型提供更多的细节。然而综合建模效率、计算时间、高空间变异下的参数设置等多个方面(Chen et al., 2012; Fatichi et al., 2016; Shahed Behrouz et al., 2020),某些情景下依然限制着高分辨率模型的使用(Jan et al., 2018; Wang et al., 2020),例如大尺度城市洪水实时预报、陆-气耦合模拟等(Cao et al., 2020a)。

一般来说,模型空间分辨率的降低意味着对流域内各种水文地理要素空间变异性刻画能力的降低。其本质原因在于,分辨率降低后每一个模型网格单元对应了更大的现实区域和相应更加复杂的产汇流信息,但却无法将其清晰地表征,最终只能以均值、最大值等高度概化的方式呈现。鉴于城市地表覆盖类型高度破碎的空间分布,可以预见大多数网格内部必然存在不同的地表覆盖成分,而每个网格内不同区域的产流又会通过向相邻区域汇流继而引发径流入渗和径流填注的现象。例如某些网格单元所包含的地表覆盖成分会兼具草坪与道路,那么草坪产流则可能会进一步汇入道路发生径流填注(Voter et al., 2018; Woznicki et al., 2018);某些单元会同时包含建筑物和草坪,建筑物屋面产流可能会通过雨落管排向草坪发生径流入渗(Bai et al., 2019; Palla et al., 2015; Xiao et al., 2007)。如果模型不能很好地考虑这种次网格汇流过程,势必会给水文模拟结果带来影响。从流域的尺度来看,虽然参数率定的方法可以使低分辨率模型在一些情况下拥有较好的模拟表现,但对于缺资料或无资料地区这种方法显然不可实现。为提高无资料城市地区的洪水模拟精度(Warsta et al., 2017),首先需要厘

清模型网格尺度如何以及在多大程度上影响洪水模拟。此外,通过武断地改变模型参数来强迫模型提供更好的结果通常是不科学的。因为模型参数具有很强的尺度(模型网格单元大小)依赖性,这也进一步强调了揭示尺度效应机理的必要性(Ichiba et al., 2018)。

1960年起,国内外学者开始认识到加强模型空间分辨率效应理解的重要性,相继开展了大量的研究(Amoroch, 1961; Elliott et al., 2009; Minshall, 1960; Warwick et al., 1993; Wood et al., 1988; Zaghoul, 1981)。根据所采用的模拟方法,可归纳为基于排水分区划分的城市雨洪模拟研究和基于网格划分的城市雨洪模拟研究两类。对于第一类研究,大多将整个流域划分为多个子汇水区,然后通过对子汇水区进行聚集或进一步分解来构建不同的分辨率情景。Metcalf (1971)利用 SWMM 模型在美国诺斯伍德开展了研究,发现模型分辨率的降低会导致峰值流量的低估;但 Krebs et al. (2014)和 Goldstein et al. (2016)的研究结果则表明低分辨率模型会导致峰值流量的高估。上述研究之所以得到了不一致的结论,主要原因在于不同分辨率情景下变化的不仅是子汇水区面积,还有排水管网的密度。子汇水区面积的变化会影响坡面汇流过程,而排水管网密度的变化则会改变流域排水能力和管道蓄水量。在两个因素的联合作用下,空间分辨率效应在不同的条件下将可能导致相反的影响(Ghosh et al., 2012)。基于排水分区划分的模拟方法虽然可以在一定程度上降低计算消耗、减少模型参数,但难以考虑城市地表复杂的汇流信息,难以满足日益增长的精细化模拟需求(Chao et al., 2019)。因此随着网格自动划分技术的成熟(Warsta et al., 2017)和计算能力的提高,基于网格的城市雨洪模型得到了越来越广泛的使用(Zhang et al., 1994)。但 Ichiba (2016)指出,基于网格的城市雨洪模型由于考虑了更加详细的地表水文信息,会对空间分辨率的变化表现出更高的敏感性,这一发现强调了开展上述第二类研究的必要性。与第一类研究不同,第二类研究通常不涉及管网密度的变化,洪水模拟结果的变化仅与网格划分大小(即模型分辨率)有关。Warsta et al. (2017)的研究表明空间分辨率提高会导致峰值流量和径流总量增加;但是 Ichiba et al. (2018)的结论却与此相反,他们发现空间分辨率提高反而会导致峰值流量和径流总量减少。

1.2.4 降雨空间分辨率对城市雨洪模拟的影响

在城市冠层热力学和动力学效应的共同作用下(Fowler et al., 2021;

Masson et al., 2020), 城区降雨表现出高度的空间变异性 (Peleg et al., 2018; Wright et al., 2014)。同时, 城市流域不透水率高、地表覆盖成分复杂且具有人工排水系统, 水文响应对降雨的变化往往十分敏感 (Berne et al., 2004; Peleg et al., 2017)。因此精细化降雨信息对城市洪水模拟就变得尤为关键 (Fowler et al., 2021; Masson et al., 2020; Vos et al., 2018; 田富强 等, 2021)。Niemczynowicz (1988) 更是指出缺乏短历时降雨足够的空间分布信息是城市雨洪模拟一直以来最重要的误差来源。过去的几十年, 得益于新技术 (特别是天气雷达) 的发展, 降雨定量估计技术取得了长足的进步 (Leijnse et al., 2007; Otto et al., 2011; Van de Beek et al., 2010), 其被广泛应用于城市水文学研究 (Einfalt et al., 2004; Thorndahl et al., 2014)。然而获取高分辨率降雨信息总是有代价的, 更重要的是某些情况下一味提高降雨空间分辨率未必能持续改善雨洪模型的表现。因此有必要深入理解降雨空间分辨率的影响规律和精细化观测的现实意义 (Cristiano et al., 2017)。

20 世纪 90 年代, Schilling (1991) 提出一个发人深省的问题: “对于城市水文学, 我们究竟需要什么样的降雨数据?” 并指出回答这个问题需要气象界和水文界的共同努力。在降雨观测技术快速发展的驱动之下, 科学家们首先通过分析分辨率变化导致的降雨描述偏差来推测城市水文对降雨数据的需求 (Einfalt et al., 2004; Fabry et al., 1994)。随后, Berne et al. (2004) 利用统计的方法, 综合降雨观测和径流资料在六个不同的城市流域研究了降雨的空间分辨率需求, 但仍然没有使用城市雨洪模型。2010 年后, 依托城市雨洪模型的分析方法开始浮现。例如, Notaro et al. (2013) 使用雨量计降雨观测驱动半分布式城市水文模型, 在意大利一个 0.7 km^2 的城市流域分析了降雨空间分辨率的影响; 该研究认为 1.7 km 是城市水文应用中关键的降雨空间分辨率。Gires et al. (2014) 以 C 波段雷达降雨观测数据 (空间分辨率为 1 km) 为模型驱动, 分别检验了降雨空间分辨率变化对半分布式和全分布式城市雨洪模型的影响; 结果表明, 相对于半分布式模型, 全分布式模型对降雨空间分辨率表现出更高的敏感性。作者建议未来的研究有必要使用具有更高空间分辨率的 X 波段天气雷达数据, 以更好地揭示精细化降雨观测的价值。因此 Bruni et al. (2015) 基于 X 波段雷达定量降水估计 (quantitative precipitation estimation, QPE) 产品构建了具有不同空间分辨率的气象驱动场, 在欧洲一个 3.4 km^2 的城市流域重新审视了降雨空间分辨率对城市雨洪模拟的影响; 结果再次强调了精细化空间降

雨观测对重现城市水文响应过程的重要性。同年,Ochoa-Rodriguez et al. (2015)开展了类似的工作,但将研究扩展到了七个相似大小($3\sim 7\text{ km}^2$)的城市流域,旨在为高分辨率 QPE 产品的价值提供更多证据;研究发现降雨空间分辨率的影响会随着流域区面积的增加而减小。

1.3 已有研究的不足

由上述国内外研究现状可见,近年来城市雨洪模型的发展取得了巨大进步,精细化模拟的相关问题受到了广泛关注,对下垫面特征描述及降雨驱动带来的影响获得了一些基本的认识,但仍然存在以下几个方面的不足:

1. 城市水文学、水力学计算模块及其耦合技术已经较为成熟,可以满足河道洪水和地表积水模拟的基本需求,但针对精细化模拟具体需求的研究依旧缺乏,尚未考虑屋面微尺度汇流过程对集水区水文响应的影响。

2. 开展精细化城市雨洪模拟的必要性已经成为共识,但就模型网格尺度变化对雨洪模拟的影响仍然存在不一致的结论,且缺乏对其影响机理的认识。

3. 降雨空间分辨率不足是城市雨洪模拟误差的主要来源之一,需基于精细化降雨监测和雨洪模型,进一步厘清不同尺度下降雨数据空间分辨率对城市雨洪模拟的影响和相关机理。

1.4 本书研究思路及主要内容

为进一步提高城市暴雨洪水模拟精度,满足城市应急管理对风险预报精细化、精准化、高效化日益增长的需求,本书围绕精细化城市暴雨洪水模拟开展了系统的研究。图 1.1 展示了具体的研究思路和主要内容。

本书共 6 章,第 1 章阐述了研究的背景和意义,从城市雨洪模拟方法、建筑物的模型表征、模型空间分辨率的影响及降雨空间分辨率的影响四个方面梳理了国内外研究现状和不足,同时给出了本书的组织架构和研究思路。第 2 章提出了一种基于网格的精细化城市雨洪模拟方法,可考虑从屋面到地面、到排水管网、再到河网的立体化城市排水结构,具备精细化降雨驱动耦合功能,可实现对地表产流、坡面汇流、管渠排水和地表淹没等多个过程的模拟,这是后续研究的重要技术工具。第 3~5 章以精细化城市雨洪模拟为主线,从下垫面水文过程和降雨驱动数据两个方面开展了具体的理