

智慧城市视角下城市洪涝模拟研究综述

刘 勇¹, 张韶月¹, 柳 林^{1,2}, 王先伟¹, 黄华兵¹

(1. 中山大学地理科学与规划学院, 综合地理信息研究中心, 广州 510275;

2. 辛辛那提大学地理系, 辛辛那提 OH45221-0131, 美国)

摘 要:智慧城市是城市发展的新兴模式。然而,近年来频发的城市洪涝给智慧城市的管理和发展带来了严峻的挑战。暴雨洪涝模拟是城市防洪减灾的关键技术之一,也是智慧城市风险应急管理中重要的决策支持依据。本文首先分析了智慧城市以及智慧水务的内涵,探讨了智慧城市发展和管理对于城市洪涝模拟新的需求;在此基础上梳理了智慧城市发展给城市洪涝模型带来的新的数据支撑;面向智慧城市应急管理决策,对比分析了3种现有的水文模型方法,认为在智慧城市大数据和技术的支持下,基于物理基础的分布式模型是未来城市洪涝模拟的主流发展方向。最后,探讨了建立城市洪涝模型的建模机制、尺度、基础数据库的建立、更新和管理、地表与地下管网模拟并重等关键问题,分析认为精细化、与RS和GIS技术融合、注重时空过程和智慧服务是智慧城市背景下城市洪涝模拟发展的必然趋势。

关 键 词:城市洪涝;基础地理数据;洪涝模型;智慧城市;应急决策支持

1 引言

智慧城市承载“绿色发展、环境治理、生态文明,进而实现可持续发展的历史使命”(牛文元, 2014)。从城市管理角度来看,在物联网、移动互联网、云计算等新一代信息技术的支撑下,智慧城市应当实现可测量、可视化、多级高效联动的管理运营模式,科学地调度和决策,改善城市的生产和生活环境,提升资源的使用效率,保证城市的高效正常运行,进而推进城市向着“低碳、绿色、和谐和可持续发展的方向发展”(李德仁等, 2014)。智慧水务是智慧城市的重要分支,主要基于物联网数据监测仪等传感设备自动采集雨量、水位等水情信息,通过移动互联网实时传输给处理平台,在大数据、云计算以及3S(RS、GPS、GIS)空间信息技术的支持下高效完成海量监测数据的分析、预测、决策以及数据的可视化和动态实时发布,从而实现城市水务的

“智慧”管理和“智慧”服务。然而,近年来随着全球气候变化引发的城市极端降雨事件的增加以及中国快速城市化进程,诸多城市尤其是大城市内涝事件频发,给城市居民生命安全和财产带来了严重的损失(廖永丰等, 2012),同时也给智慧城市的管理和发展带来了严峻的挑战。

城市暴雨洪涝模拟是城市防洪减灾的关键技术之一,也是智慧城市水务规划和风险应急管理重要的决策支持依据。虽然智慧城市的发展给城市洪涝的模拟提供了更多高精度、实时、丰富的数据来源,也提供了更加高效的技术支撑,但同时也给城市洪涝的模拟提出了新的需求和挑战。城市是一个自然与人文现象耦合的复杂巨系统,城市中各个子系统是相互协调和制约的,面向智慧城市的发展和管理,内涝的发生不再是单一的自然现象,会引发后续的诸多城市管理问题,如交通堵塞、居民财产损失等,城市洪涝的研究需要将视角放在整个

收稿日期:2014-11;修订日期:2015-03。

基金项目:国家高技术研究发展计划(863计划)项目(2012AA121402, 2012AA121403);国家重点基础研究发展计划(973计划)项目(2012CB955903);国家自然科学基金项目(41301419);中山大学中央高校基本科研业务费青年教师培育项目(14lgpy09)。

作者简介:刘勇(1985-),男,河南遂平人,博士生,主要从事GIS应用研究,城市洪涝模拟, E-mail: liuyng86@mail2.sysu.edu.cn。

通讯作者:柳林(1965-),男,教授,博士生导师,主要从事GIS在智慧城市中的应用研究, E-mail: liulin2@mail.sysu.edu.cn。

引用格式:刘勇, 张韶月, 柳林, 等. 2015. 智慧城市视角下城市洪涝模拟研究综述[J]. 地理科学进展, 34(4): 494-504. [Liu Y, Zhang S Y, Liu L, et al. 2015. Research on urban flood simulation: a review from the smart city perspective[J]. Progress in Geography, 34(4): 494-504.]. DOI: 10.11820/dlkxjz.2015.04.011

城市的协调发展上。此时,准确及时的积水时空分布、每个积水点积水深度的变化过程、最大积水深度和积水体积,以及积水持续时长等详细的内涝过程信息的近实时发布对于城市管理决策来说尤为重要。而且城市洪涝的过程一般历时较短,在这样短时性的要求下,仍需为后续的城市管理提供科学的决策信息。因而,计算高效、注重内涝时空过程、实时准确地提供智慧服务是智慧城市发展和管理对城市洪涝模型新的需求。

然而,由于城市复杂的下垫面存在建筑物、街道、路边石等影响地表径流运动的地物,构建准确高效的洪涝模型一直是一个具有挑战性的工作(Ghimire et al, 2013)。因而,在智慧城市视角下探讨可靠实用的洪涝模拟技术方法,梳理城市洪涝模型近年来的发展和趋势,对于更好地模拟城市洪涝过程,构建适应城市环境的洪涝模拟模型,为智慧城市应急管理提供科学的决策依据具有重大的理论和现实意义。

2 智慧城市下城市洪涝模拟新的数据支撑

一般而言,构建城市洪涝模型主要需要4类数据:降雨数据、地表地形数据、地物水文参数以及排水管网数据。为了校验模型参数,验证模型的预测性,还需要地表及地下管网的水文监测数据。近年来,智慧城市关键技术的发展为城市洪涝的精细化模拟提供了更加详尽准确的数据支撑。

2.1 降雨数据

无论是自然流域还是城市区域,洪涝模拟与预报的精度很大程度上依赖于所输入降雨数据的质量(Hapuarachchi et al, 2011)。近年来,随着定量降雨估计(Quantitative Precipitation Estimates, QPEs)和定量降雨预报(Quantitative Precipitation Forecasts, QPFs)技术的发展,无论是降雨数据的范围、时空分辨率、准确性,还是降雨估计的提前量,高质量的降雨信息很大程度上克服了水文建模的局限性,提高了洪涝模拟的精度。智慧城市中高密度多类型的传感器为QPEs和QPFs提供了更为精准和详细的数据源,更有效地保证了城市洪涝模拟的准确性和提前量,能够提前为城市暴雨应急管理提供更准确的决策支持。雷达和卫星观测网络的不断发展使得降雨数据的时空分辨率有了很大程度的

提高,尽管会存在一定的系统误差;越来越多新技术(如数据同化等)的出现也进一步提高了QPEs的准确性(Sinclair et al, 2005)。基于微波和红外波段的高级算法也推进了高分辨率遥感数据在降雨信息获取的应用(Kubota et al, 2007);同时,混合利用多源信息(雷达、卫星和观测站点数据)的新技术(Gjertsen et al, 2004)更大程度地提高了QPEs的精度和时空分辨率。目前,QPFs技术的发展使得降雨预报能够达到1~6小时的提前量,可以满足快速洪涝预报对精度及提前量的要求(Rezacova et al, 2007)。

2.2 地形数据和地表水文参数

区别于自然流域,城市区域内复杂的地物如建筑物、道路、涵洞、明渠等相互交错,给城市洪涝的模拟带来了很大的困难。另外,水力学的变量如径流深度和速度等极易受到城市微地物的影响,地形数据很小的误差就有可能导致淹没区域的不同,因此城市洪涝模型对地形数据的敏感性极高(Wilson et al, 2005)。20世纪90年代之前,地形数据的获取比较困难,准确性低且空间分辨率较为粗糙(Wilson et al, 2005)。近年来,随着智慧城市空间信息技术的发展,机载激光测高(Marks et al, 2000)、合成孔径雷达干涉测量(Smith, 2002)等遥感技术的发展显著地提高了地形数据精度以及获取速度(Bates, Wilson 2004),推进了高空间分辨率洪涝模拟模型的快速发展(Bates, Horritt et al, 2004; LeFavour et al, 2005)。此外,尽管高精度地形数据(如LiDAR)获取较为方便,然而在快速城市化进程中的中国城市,区域下垫面日新月异,利用遥感的方法(孙绍骋, 2002)实时更新地形数据的成本过高,而智慧城市中大量的传感器监测数据可以快速地发现并局部更新原有的地形数据,能够有效地保证城市洪涝模拟中地形数据的准确性和时效性。

一直以来,水文模型中的水文参数大多依靠野外调查获得,这给模型的建立和校准带来了很大的困难。随着遥感技术的发展,不同的传感器被用来收集地表的多种信息(如土地利用类型、植被覆盖类型等),为水文模型中汇水区水文物理参数提供了更有效的获取方法,大大提高了模型的准确性和构建速度。

2.3 验证数据

城市区域的水文监测站点大多布置于城市上下游河道,用于监测河道的径流量和水位,然而,城

市洪涝模型主要关注城市内部区域的水流运动过程,基于这些监测数据很难准确地校准模型。由于缺乏内涝历史监测数据,很多洪涝模型的验证往往只能基于市政部门内涝抢险的少量文字记录,以发生内涝位置点多少来评估模型的精度(仇劲卫等, 2000; 李娜等, 2002; 王林等, 2004; 刘俊等, 2006)。其他一些模型直接用水力学模型的结果作为准确值,以此来校准和评估模型(Ghimire, 2013; Zhang, Wang et al, 2014)。这些验证数据缺乏城市内部积水点的积水和排水过程,不能够评估模型对内涝动态过程的模拟能力。随着智慧城市的发展,城市中高密度的多种传感器监测了城市日常运转,这些时空大数据可以为城市洪涝模型提供更为精细和丰富的验证数据(郑姗姗等, 2014),如电子水尺等传感器设备能够准确监测分钟级路面积水深度的变化过程(Liu et al, 2015);利用计算机图形学的方法可以从内涝点的视频监控数据提取内涝事件中地面积水和退水的整个过程,无论从时间上还是空间上都能够为城市洪涝模型提供更丰富的验证信息,从而提高模型的模拟精度,进一步提高城市洪涝预报的准确性,服务于智慧城市的管理和应急决策。

城市下垫面的复杂性加大了城市洪涝模拟的难度,因而数据支撑作用显得尤为重要。智慧城市物联网、移动互联网等技术的发展为城市洪涝的模拟提供了精细化数据的获取途径,保证了城市洪涝模拟的精度和稳定性,同时智慧城市的大数据和云计算等技术的发展也为海量的城市精细化数据的管理和分析提供了有力技术支撑。然而,目前大多数城市基础数据的收集和整理工作在不同的部门进行,数据的共享效率很低,如果没有相关数据的获取、共享和管理工作的相关机制,智慧城市下数据支撑的效果也很难实现,为此,智慧城市下城市洪涝的模拟应当重视和加强支撑数据的共享和管理。

综上,随着智慧城市信息化的日益加速,利用遥感测量、地理信息系统和全球定位系统等技术手段,实现水资源的空间信息管理已成趋势,这将给城市洪涝的模拟和验证、城市水务管理提供越来越多的数据支撑,有效地推进城市洪涝模拟方法的革新,对于城市管理和智慧服务具有重要意义。

3 面向智慧城市应急管理的模型评述

20世纪70年代以来,随着城市降雨水量和水

质管理的需求,城市洪涝模型应运而生,并得到了迅速的发展(Zoppou, 2001)。依据计算方法不同,城市洪涝模型可以被分为3种类型(胡伟贤等, 2010; Zhang, Pan, 2014):水文模型、水动力模型和简化模型。在智慧城市需求的视角下分析和讨论这些模型在城市洪涝模拟和预报中的适用性,可有效地指导不同城市构建适应自身需求的城市洪涝模型。

3.1 水文模型

一般而言,水文模型把城市区域按出水口划分为多个汇水子区,每个汇水子区作为一个独立的计算单元,运用“黑箱”或者经验的方法计算每个汇水子区的产流和汇流过程,然后通过管网或者河道演算到城市研究区的出水口(胡伟贤, 2010)。代表性的城市水文模型主要包括 SWMM(Storm Water Management Model)(Rossman, 2010)、UCURM(University of Cincinnati Urban Runoff Model)(Papadakis et al, 1972)、ILLUDAS(Illinois Urban Drainage Area Simulator)(Terstriep et al, 1974)等。由于这类模型对数据要求较低以及计算高效,在城市洪涝模拟和规划中得到了广泛的应用(刘俊等, 2006; 史蕊, 2010; 黄国如等, 2011)。然而,以 SWMM 模型为例,在实践中诸多学者认为 SWMM 建模具有很大的主观性,子汇水区的划分方式和汇水区之间流经路径的不同会对模拟结果和时间过程曲线有很大的影响(赵冬泉等, 2008)。为了提高子汇水区划分的客观性,减小 SWMM 建模的复杂性,一些学者将地理信息系统(GIS)与 SWMM 进行了耦合开发(史蕊, 2010; 黄国如等, 2011; 孟超等, 2012)。尽管如此,快速城市化背景下城市下垫面日新月异,城市的微地物、雨水口堵塞等极易影响水流路径,因而很难按照经验的水文学方法得到城市各个汇水区的产流和汇流规律。同时,为了得到更为准确的模拟结果,研究区域需要进一步细分,这也给模型参数的率定带来了呈几何形式增长的难度(胡伟贤, 2010)。最为重要的是,这类模型由于对计算单元进行了概化处理,不能够提供模型非节点处洪涝的动态过程,如地表积水深度的变化过程以及流速等,而这些信息对于内涝后的交通疏导等城市管理尤为重要,因而,这类模型并不能很好地为智慧城市的应急决策和管理提供足够的积水过程信息。

3.2 水力学模型

相比于水文模型,在复杂的城市下垫面区域,具有高空间分辨率的水力学模型在模拟城市洪涝方面有着更好的准确性和可信度。这类模型把城

市区域划分成空间格网(常见的如不规则三角形和正方形网格),基于水流运动的偏微分方程、边界条件来计算相邻格网之间的水量交互。依据模型表达地表和径流过程维度的不同,水力学模型可以分为1D、2D模型。

尽管1D模型计算效率非常高,但是这类模型在实践中存在诸多的局限性(Bates et al, 2000),如不能够模拟水波的横向扩散等。相应地,基于圣维南方程及其简化形式的2D模型的发展很好地解决了1D模型的不足。由于大部分的2D模型都是基于物理机制的,因此模型校验并不需要长时间的历史观测数据,适合于观测数据不完善的城市区域。随着遥感和计算机技术的发展,这类基于物理基础的分布式模型得到了长足的发展。然而,运用有限差分(Meis et al, 1981)、有限元(Zienkiewicz et al, 1965)或者有限体积法(Hirsch, 1990)求解圣维南方程会导致结果的不稳定和收敛问题(Hunter et al, 2007)。另外,在实践中,模型建模所需的很多基础数据难以获取(Hunter, Bates et al, 2005; Neal et al, 2009; Chen et al, 2012; Zhang, Pan, 2014),如详细的节点位置、管径,以及连接关系错综复杂的管道信息,河道形态等数据。事实上,在中国快速城市化的背景下,这些数据对于大多数城市尤其是老城区很难获取。因此,建立一个物理机制的水力学模型对于很多城市来说是比较困难的一件工作。此外,水力学模型中微分方程的求解需要花费大量的时间,这与城市暴雨的短历时性形成了一定的矛盾。很多学者也因此开发了很多方法来提高水力学模型的效率,包括网格粗化(Yu et al, 2006),并行计算(Lamb et al, 2009; Sanders et al, 2010; Yu, 2010),自适应网格算法(Hunter, Horritt et al, 2005; Wang et al, 2011)等。然而,粗化网格的方法会造成结果精度的丢失,因此一些学者用亚网格的处理方法来尽量多的保存原有的信息(Yu et al, 2006; Yu, 2010)。在诸多方法中,尽管非结构网格化的方法能够有效的表述地表地物,然而在模型构建中,数据的预处理比较复杂,尤其是在城市区域(Chen et al, 2012)。因而,尽管分布式水力学模型能够提供地表径流和积水的动态过程,然而由于此类模型需求数据复杂,建模难度大,计算效率不高,因而限制了这类模型在智慧城市内涝应急管理和决策方面的应用和推广(Zhang, Wang et al, 2014)。

3.3 简化模型

近些年来,许多快速洪水淹没模型开始付诸使

用。根据能否输出洪水淹没过程可将这些模型分为两类:第一类模型只能模拟最终的洪涝淹没范围,计算依据基于重力和地形主导的水力平衡和水力交换,如Krupka(2009)基于研究区的DEM构建了洪水存储单元矩阵,构建了快速洪水淹没模型(rapid flood inundation model);Lhomme等(2008)将研究区域划分为多种影响区域(Impact Zones),构建了快速洪水传播模型(rapid flood spreading model);Zhang, Pan(2014)基于对分布式水文模型的简化,提出了基于GIS的城市暴洪涝模拟方法。其他的此类模型还有基于GIS的城市淹没模型(GIS based urban inundation model)(Chen et al, 2009),串连计算模型(flood-connected domain calculation)(FCDC)(Zhang, Wang et al, 2014)等。尽管这些模型有很高的计算效率,但是仅能得到淹没范围,不能够提供智慧城市应急管理所需的水流和洪水淹没过程。

第二类简化模型一般基于Zanobetti等(1970)提出的存储单元概念,也叫元胞自动机模型(CA)。目前,已有诸多的CA模型被用来模拟网状河流(Thomas et al, 2002; Parsons et al, 2007)、河道(Coulthard et al, 2002)、泛洪区河流(LISFLOOD-FP)(Bates et al, 2000)、城市区域(Fewtrell et al, 2008, 2011)。这些模型将地表划分为规整的网格,基于统一的方程来计算网格间的流量,大多数是基于圣维南方程的简化(Bates et al, 2010)。其中LISFLOOD-FP模型得到了诸多的改进和发展。Horritt等(2001, 2002)提出LISFLOOD-FP模型,并与有限元的方法进行了比较,认为基于栅格的模型具有简单快速的优势。Hunter, Bates等(2005)运用不同的数据对LISFLOOD-FP模型进行了参数调整。为了解决LISFLOOD-FP模型中需要较小时间步长带来的计算效率较低的问题,Hunter, Horritt等(2005)提出了自动时间步长的方法。随后,经过一系列的改进,LISFLOOD-FP模型被用于城市区域,如Fewtrell等(2008)研究了LISFLOOD-FP模型在城市区域中的尺度效应。Fewtrell等(2011)利用高分辨率的地形数据测试了扩散波和惯性方程在LISFLOOD-FP模型中的应用,重申了高分辨率地形数据在城市洪涝模拟中的重要性,并且通过计算认为使用惯性方程可以提高模型的计算效率。Sampson等(2012)在一个小的城市区域比较了LISFLOOD-FP模型和ISIS-FAST模型,结果认为在不同的情境下两个模型表现各有不同。

表1对比分析了上述各类模型的优缺点。相对

集总式水文模型而言,基于物理机制的分布式水文模型往往具有较高的准确性和可信度。随着城市中物联网和移动互联网设施的完善,智慧城市的发展能够为城市洪涝模型的构建、验证提供海量实时准确的大数据,同时计算机软硬件性能的飞速发展,以及云计算技术的发展保证了城市洪涝模拟的计算效率,这无疑给分布式模型带来了极大的发展空间。同时,基于元胞自动机的模拟模型主要的需求数据为高精度地形数据,没有水文、水动力模型的需要数据限制性那么大,构建模型相对水力学模型简单,而且能够模拟径流的时空过程。因此,应对城市管理的部分问题,基于元胞自动机的城市洪涝模型是一个可能发展的方向。但是总体来讲,只要数据和技术支持,在智慧城市的背景下,基于物理机制的分布式水文模型理应是未来城市洪涝模拟的主流发展方向。

4 智慧城市背景下城市洪涝模拟关键问题探讨

4.1 建模机制

通常认为,相对于经验公式和概念模型,具有物理基础的数理方程更能真实地表述水流运动的真实过程,而且其模型参数一般可以通过实测或从

实际资料推算得到,具有一定的客观性。然而,“从分布式物理模型近 30 年的研究与应用情况来看,其对水文过程的模拟精度并不乐观,甚至不及简单的集总式模型,效果远远没有预想的那样好”(张金存等, 2007)。这也引发了诸多学者关于物理机制的讨论。Beven(2002)认为,物理机制的利用应当从已经建立的物理定律中推导,而且开发和应用水文模型的目标应该在准确性与其他重要的考虑因素之间达到平衡,如模型水力计算的负荷,获取模型需求数据的成本,模型构建的难易程度以及用户的需求(Beven, 2001)。Hunter 等(2007)和 Smith 等(2004)也认为,洪水淹没模型应该在精度上是可靠的,在计算成本和需求数据也是可行的,并能够依据需求提供水流运动的详细信息。张金存等(2007)也因此论述了概念性分布式水文模型的开发价值。然而,目前绝大多数城市对城市内部水文的监测非常薄弱,这给提取适合城市自身的水文经验公式带来了极大的困难。同时,随着中国快速城市化进程推进,本来就很复杂的城市下垫面日新月异,地表微地物对于城市地表汇流过程的影响又进一步限制了经验公式的适用性和通用性。因此,虽然前文中诸多基于圣维南方程简化形式的元胞自动机模型得到了广泛的发展和应用,但是在实践中仍然会存在长期争论(Fewtrell et al, 2008; Neal et al, 2009;

表 1 代表性城市洪涝模拟模型方法对比
Tab 1 Comparison of representative urban flood simulation models

模型名称/类型	地形划分单元	汇流算法	模型输入	模型输出	构建难易程度	计算效率	能否模拟积水过程
SWMM/水文模型 (Gironás et al, 2010)	子汇水区	非线性水库	降雨数据, DEM, 土壤属性, 土地利用, 详细的管网数据	管道水位流速的时空演化, 节点的积水体积变化	一般	快	否
二维水动力模型 (解以扬等, 2005)	无结构不规则网格	圣维南方程	降雨数据, DEM, 土地利用, 详细的管网数据	径流的时空演化过程	难	慢	能
RFSM/简化模型 (Lhomme et al, 2008)	基于地形划分的影响区域(impact zones)	计算影响区域自身的淹没, 多余的水量通过最低点流入相邻的影响区域	DEM, 影响区域最低点位置, 入流总体积	最终淹没范围	一般	快	否
FCDC/简化模型 (Zhang, Wang et al, 2014)	三角网格	搜索洪水连接点, 低于水面高程的区域被淹没	DEM, 水面高程或者洪水体积, 进入点位置	最终淹没范围	一般	快	否
LISFLOOD-FP/简化模型 (Bates et al, 2000)	DEM 网格	简化的圣维南方程	降雨数据, DEM, 入流曲线, 河道参数, 时间步长	径流的时空演化过程	一般	较快	能
CA 模型 (Ghimire et al, 2013)	DEM 网格	基于坡度和水力学方程计算元胞间的交换水量	降雨数据, DEM, 时间步长	径流的时空演化过程	容易	较快	能

Bates et al, 2010),即模型简化到什么程度仍然具有物理的真实性?事实上,一些基于简单重力规则的经验算法(Di Gregorio et al, 1999; D'Ambrosio et al, 2001; Ghimire et al, 2013)也能够得到令人满意的模拟结果。因而,由于城市水文过程高度的非线性和复杂性,及其与时空尺度的高度相关性,一个能够被广泛认可的城市地表径流模拟的建模机制仍需要水文学家长时间的实践和探讨。

4.2 尺度问题

基于大量的理论和实践研究,“水文现象在不同时空尺度上呈现出性质迥异的变化特征”已经成为众多水文学家的共识(夏军等, 2006; 徐宗学等, 2010)。如何从大、中尺度的流域水文的研究去认识和推求尺度城市水文变量及其变化特征,在理论和实践上都有重大意义。目前,GIS和RS等新技术的应用是水文模型的一个发展趋势,由于尺度问题的存在,这些数据源的时空分辨率直接影响着水文模型的精度。同时,对于尺度问题的研究也可以确定模型基础信息采集的分辨率。因而,探究符合小尺度城市地表径流的水文规律应该是城市洪涝模拟关注和研究的焦点之一,应当借鉴生态、气象等其他领域的原理和技术方法拓展水文尺度的研究思路,不断完善尺度理论、方法和技术(徐宗学, 2010)。如对于城市区域小尺度水文过程复杂的高密度立体化城区(如立交桥),相关研究(丛翔宇等, 2006; 刘畅等, 2014)一般通过数值模拟将水资源信息进行空间和时间上的二维离散化,以实现水文和水动力模型的互补、耦合,从而解决城市区域地形和空间异质性高的限制问题。

4.3 基础数据库的建立、更新与管理

城市洪涝模拟的基础数据库主要包括降雨资料、城市下垫面资料以及内涝监测数据等。数据的系统性、准确性和完整性将对城市洪涝的模拟以及进一步的城市规划、评估和建设产生深远的影响。随着GIS和计算机技术的发展,尽管已经有诸多结构合理、计算稳定的城市洪涝模型研制出来,然而由于大多数城市区域缺乏详细的暴雨径流实测资料,尤其是缺乏极端降雨事件的径流过程数据,导致这些洪涝模型没有足够的可靠数据进行校验,模型的精度和应用广度长期受限。智慧城市中多元传感器提供了监测城市运行的大数据,建立、更新和管理好城市的时空数据库是城市洪涝模拟发展和应用的基础,同时可为后续的危害风险评估等工作提供更为详尽的数据支撑。如前所述,智慧城市

的发展给降雨和城市下垫面资料的收集提供了方便可靠的技术支撑,然而,表征内涝过程及其损害的基础资料,如内涝点淹没积水深度变化过程、淹没范围以及对居民财产所造成的损失等信息对于大多数城市而言尚无成熟的收集和管理流程,这给城市洪涝模型的校验带来了很大的困难,也是城市洪涝模拟基础数据库建设的重点和难点,亟需城市管理部门在大量实践经验中加以完善。近年来,地理信息系统(GIS)的发展给城市基础数据的存储、分析和可视化提供了高效的管理平台。GIS可以高效地获取、创建和索引各类地理空间数据;同时,GIS的空间分析、3D分析以及水文分析模块等能够很方便地分析处理地理图形信息,在实时计算、模拟和预报方面能够实现全部流程的可视化操作,动态演示地面积水的涨消过程。越来越多国内外(Lhomme, 2004; 张书亮等, 2004; 赵冬泉等, 2008)的实践表明,GIS技术极大地推进了城市洪涝模型的发展,为智慧城市的应急管理决策提供了丰富可靠的内涝预测信息。

4.4 地表模拟与地下管网模拟并重

城市洪涝的模拟包括地表径流模拟和地下管网排水模拟两个部分。很多学者(解以扬等, 2005; Estupina-Borrell et al, 2006; 朱冬冬等, 2011; Zhang, Pan 2014)较为关注城市地表径流模拟。尽管有学者指出地下管网的模拟技术方法已经较为成熟(胡伟贤, 2010),但是事实上,目前国内城市洪涝模拟中一个主要的限制因素就是地下洪水模拟的资料、方法、验证不足(路玲玲等, 2008; 高铁军等, 2011),从而造成总体精度不够,进而降低了后续决策支持的可靠性。在一些较为发达的城市,如北京、上海、广州等,随着城市的快速扩张,地下管网以及排水设施能对城市洪涝的模拟造成很大的影响。也因此有学者讨论了隧道对于城市排水系统的完善作用(鲁朝阳等, 2013)。国内已有诸多城市(东莞、佛山、上海等)对地下管网基础信息进行普查,同时基于物联网建设了内涝监测预警实时采集系统,对重点路段和地下管网开始了监测。住房和城乡建设部也制定了《城市排水防涝设施普查数据采集与管理技术导则(试行)》(中华人民共和国住房和城乡建设部, 2013)。因而,在智慧城市关键技术的支持下,城市地表径流模拟和地下管网模拟并重,能够更加有效地提高城市洪涝的精细化模拟与校验,更好地为“智慧服务”提供动态实时准确的决策信息。

5 城市洪涝模拟发展趋势

随着全球气候的变化,频发的极端暴雨给中国城市管理和居民生命财产安全带了严峻的挑战。城市洪涝的模拟技术可为城市应急管理提供丰富有效的科学决策支撑依据,在智慧城市背景下,其主要发展趋势有以下几个方面。

5.1 精细化模拟

城市洪涝的模拟首先要以准确性为基础,才能为城市管理和应急决策提供可靠的信息支持。然而,城市复杂下垫面的水流运动极易受到微地形的影响,因而,精细化是城市洪涝模型发展的必然趋势。精细化模拟包括两个方面:一是尽可能详细真实地表达城市下垫面;二是在模型中详尽地表达水流在城市各种地物上的运动过程。测量技术的发展已经为模型提供了高时空分辨率的降雨和地形数据,随着这些高分辨率地形数据的运用,越来越多的研究认识到城市的建筑物(Schubert et al, 2012)、道路交叉口(Mignot et al, 2006)、雨水口(Aronica et al, 2005)等城市地物对于地表雨水运动有着不可忽略的影响,因而在模型中精细化地考虑城市地物能够有效地提高模型的准确性。

5.2 RS、GIS技术融合

分布式基于物理机制的城市洪涝模拟模型都需要大量时空数据的支持。遥感技术发展不仅能够提供DEM、土地利用等基础数据,而且在自然流域,而且还能够利用遥感手段获取降水时空分布、遥感水位和水面高程变化,极大地丰富了模型基础数据的获取手段和数据量(徐宗学等, 2010)。尽管在城市区域遥感技术还未被用来监测积水区域水位的变化,但更多新技术的发展为城市洪涝的模拟及验证提供了新的解决思路和技术支撑,如基于高分辨率的合成孔径雷达影像,Mason等(2014)利用双散射的方法探测了城市淹没区的位置。此外,GIS的发展也给大数据的城市时空基础数据库提供了专业化的管理平台。GIS的空间分析能够快速处理多元时空地理信息数据,极大地提高城市洪涝模型的建模效率,GIS的可视化功能能极大地提高城市洪涝模型的交互能力,为城市管理和应急决策提供丰富的过程信息。因此,遥感数据的利用及与GIS的耦合是城市洪涝模拟的必然趋势。

5.3 注重时空过程和智慧服务

暴雨内涝对于城市运行的影响是一个时空动态的过程。在同一场暴雨下,不同的地点在不同的

时刻会产生不同程度的积水,而不同的积水深度会不同程度地减低道路的通行能力,不同的积水持续时间也会给居民财产带来不同的损失。因而,制定切实可行的城市应急管理决策需要更多内涝的时空过程数据,如积水点的空间分布、出现时刻、积水变化过程以及积水持续时间等。相应地,城市洪涝的模拟也更应该在城市范围内关注内涝发生的具体位置和时间,在单个内涝产生区域关注积水产生和消退的整个过程。这些信息能够为内涝情况下的应急决策提供科学的参考依据,如防灾减灾物资的优化配置,严重灾点的交通疏导及人员财产疏散等。因而,在城市管理系统的建设上,诸多的城市(如东莞、深圳、佛山等)已经根据经验收集完善专家知识库,并依此自动生成应对风险灾害的初步预案,以“智慧服务”为目标完善城市水务的管理。

6 结论

本文讨论了智慧城市发展与管理对于城市洪涝模拟新的需求,分析了智慧城市物联网、移动物联网、云计算、大数据等核心技术对城市洪涝模型新的支撑,面向智慧城市应急管理决策评价对比了现有的3种水文模型方法,并探讨了城市洪涝模拟关键技术以及发展趋势。通过分析,主要结论为:

(1) 现代遥感测量和地理信息系统技术加速了智慧城市的建设,为城市洪涝的精细化建模提供了数据和技术支撑,推进了城市洪涝模拟方法的革新。精细化、与RS和GIS技术融合、注重时空过程和智慧服务是智慧城市背景下城市洪涝模拟方法的发展趋势。

(2) 由于城市水文过程高度的非线性和复杂性,一个能够被广泛认可的城市洪涝模拟建模机制仍需要水文学家和城市管理部门长期的实践和探讨。在智慧城市大数据和新技术支持下,基于物理机制的分布式水文模型是未来城市洪涝模拟的主流发展方向;同时,为了应对智慧城市的洪涝应急管理,基于元胞自动机的城市洪涝模型也有很强的实践和应用价值。

(3) 加强智慧城市数据库的建设,尤其是监测数据的收集、专家知识库的完善以及基础数据的更新、共享和管理,能够有效保证多源数据在城市洪涝模拟中的支撑作用。同时,在城市洪涝模型中将城市地表径流与地下管网模拟并重,能够更好地为智慧服务提供动态实时准确的决策信息。

对于智慧城市的建设而言,关键技术的创新与应用是手段和驱动力,智慧产业是载体,智慧服务是目标。面对当前频发的城市暴雨灾害,不仅要注重适应城市区域的水文理论研究,也要加强模拟技术和方法的实践,为智慧城市的规划改造、运行调度、防汛应急等提供智慧的决策支持。同时,必须指出的是,任何洪涝模型都不可能完全准确地模拟和预测,在这样的前提下,如何基于大数据科学地进行预测、决策和信息发布,进而服务于城市的管理和发展,更是智慧水务发展的内涵。

参考文献(References)

- 丛翔宇,倪广恒,惠士博,等. 2006. 城市立交桥暴雨积水数值模拟[J]. 城市道桥与防洪, (2): 52-55, 152. [Cong X Y, Ni G H, Hui Z B, et al. 2006. Simulation of storm waterlogging value of urban inter change bridges[J]. Urban Roads Bridges & Flood Control, (2): 52-55, 152.]
- 高铁军,吴立新. 2011. 论城市管网智慧管理研究范畴与关键技术[J]. 地理与地理信息科学, 27(4): 19-23. [Gao T J, Wu L X. 2011. On research domain and key technologies of city pipeline smart management[J]. Geography and Geo-Information Science, 27(4): 19-23.]
- 胡伟贤,何文华,黄国如,等. 2010. 城市雨洪模拟技术研究进展[J]. 水科学进展, 21(1): 137-144. [Hu W X, He W H, Huang G R, et al. 2010. Review of urban storm water simulation techniques[J]. Advances in Water Science, 21(1): 137-144.]
- 黄国如,黄晶,喻海军,等. 2011. 基于GIS的城市雨洪模型SWMM二次开发研究[J]. 水电能源科学, 29(4): 43-45, 195. [Huang G R, Huang J, Yu H J, et al. 2011. Secondary development of storm water management model SWMM based GIS[J]. Water Resources and Power, 29(4): 43-45, 195.]
- 李德仁,姚远,邵振峰. 2014. 智慧城市中的大数据[J]. 武汉大学学报: 信息科学版, (3): 631-640. [Li D R, Yao Y, Shao Z F. 2014. Big data in smart city[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, (3): 631-640.]
- 李娜,仇劭卫,程晓陶,等. 2002. 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, 11(2): 112-118. [Li N, Qiu J W, Cheng X T, et al. 2002. Study on simulation system of rainstorm waterlogging in Tianjin City[J]. Journal of Natural Disasters, 11(2): 112-118.]
- 廖永丰,聂承静,杨林生,等. 2012. 洪涝灾害风险监测预警评估综述[J]. 地理科学进展, 31(3): 361-367. [Liao Y F, Nie C J, Yang L S, et al. 2012. An overview of the risk assessment of flood disaster[J]. Progress in Geography, 31(3): 361-367.]
- 刘畅,周玉文,赵见. 2014. 下凹式立交桥内涝模型构建方法及原因分析[J]. 河北工业科技, 31(5): 389-394. [Liu C, Zhou Y W, Zhao J. 2014. Modeling method and reason analysis of urban flooding in concave-down overpass area [J]. Hebei Journal of Industrial Science and Technology, 31(5): 389-394.]
- 刘俊,郭亮辉,张建涛,等. 2006. 基于SWMM模拟上海市区排水及地面淹水过程[J]. 中国给水排水, 22(2): 64-70. [Liu J, Guo L H, Zhang J T, et al. 2006. Study on simulation of drainage and flooding in urban areas of Shanghai based on improved SWMM[J]. China Water & Wastewater, 22(2): 64-70.]
- 鲁朝阳,车伍,唐磊,等. 2013. 隧道在城市洪涝及合流制溢流控制中的应用[J]. 中国给水排水, 29(24): 35-40. [Lu C Y, Che W, Tang L, et al. Application of stormwater tunnel to control of urban flooding and combined sewer overflow[J]. China Water & Wastewater, 29(24): 35-40.]
- 路玲玲,吴晓明,任杰. 2008. 城市地下管网信息管理问题研究[J]. 地域研究与开发, 27(2): 47-50. [Lu L L, Wu X M, Ren J. Research of the urban underground pipeline information management[J]. Areal Research and Development, 27(2): 47-50.]
- 孟超,杨昆. 2012. SWMM模型与GIS集成技术研究[J]. 安徽农业科学, 40(10): 6286-6287, 6298. [Meng C, Yang K. 2012. Research on integration of SWMM model and GIS [J]. Journal of Anhui Agriculture Science, 40(10): 6286-6287, 6298.]
- 牛文元. 2014. 智慧城市是新型城镇化的动力标志[J]. 中国科学院院刊, 29(1): 34-41. [Niu W Y. 2014. Smart cities: convergence of urbanization and informatization[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 29(1): 34-41.]
- 仇劭卫,李娜,程晓陶,等. 2000. 天津市城区暴雨沥涝仿真模拟系统[J]. 水利学报, (11): 34-42. [Qiu J W, Li N, Cheng X T, et al. 2000. The simulation system for heavy rainfall in Tianjin City[J]. Journal of Hydraulic Engineering, (11): 34-42.]
- 史蕊. 2010. 基于GIS和SWMM的城市洪水模拟与分析[D]. 昆明: 昆明理工大学. [Shi R. 2010. Urban flood simulation and analysis based on GIS and SWMM[D]. Kunming, China: Kunming University of Science and Technology.]
- 孙绍聘. 2002. 遥感技术在洪涝灾害防治体系建设中的应用[J]. 地理科学进展, 21(3): 282-288. [Sun S P. 2002. Application of remote sensing in flooding alleviation system in China[J]. Progress in Geography, 21(3): 282-288.]
- 王林,秦其明,李吉芝,等. 2004. 基于GIS的城市内涝灾害分析模型研究[J]. 测绘科学, 29(3): 48-51. [Wang L, Qin Q M, Li J Z, et al. 2004. Study on the disaster analysis model of water logging in city based on GIS[J]. Science of Surveying and Mapping, 29(3): 48-51.]
- 夏军,左其享. 2006. 国际水文科学研究的新进展[J]. 地球科学进展, 21(3): 256-261. [Xia J, Zuo Q T. 2006. Advances in international hydrological science research[J]. Advances

- es in Earth Science, 21(3): 256-261.]
- 解以扬, 李大鸣, 李培彦, 等. 2005. 城市暴雨内涝数学模型的研究与应用[J]. 水科学进展, 16(3): 384-390. [Xie Y Y, Li D M, Li P Y, et al. 2005. Research and application of the mathematical model for urban rainstorm water logging[J]. Advances in Water Science, 16(3): 384-390.]
- 徐宗学. 2010. 水文模型: 回顾与展望[J]. 北京师范大学学报: 自然科学版, 46(3): 278-289. [Xu Z X. 2010. Hydrological models: past, present and future[J]. Journal of Beijing Normal University: Natural Science, 46(3): 278-289.]
- 徐宗学, 程磊. 2010. 分布式水文模型研究与应用进展[J]. 水利学报, 41(9): 1009-1017. [Xu Z X, Cheng L. 2010. Progress on studies and applications of the distributed hydrological models[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 41(9): 1009-1017.]
- 张金存, 芮孝芳. 2007. 分布式水文模型构建理论与方法述评[J]. 水科学进展, 18(2): 286-292. [Zhang J C, Rui X F. 2007. Discussin of theory and methods for building a distributed hydrologic model[J]. Advances in Water Science, 18(2): 286-292.]
- 张书亮, 曾巧玲, 姜永发, 等. 2004. GIS支持下的城市暴雨积水计算的可视化[J]. 水利学报, 12(12): 92-98. [Zhang S L, Zeng Q L, Jiang Y F, et al. 2004. GIS supported visualized calculation of urban retaining water due to rainstorm [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 12(12): 92-98.]
- 赵冬泉, 陈吉宁, 佟庆远, 等. 2008. 子汇水区的划分对SWMM模拟结果的影响研究[J]. 环境保护, 394(5): 56-59. [Zhao D Q, Chen J N, Tong Q Y, et al. Research on the impact of subcatchment division on simulation result of SWMM[J]. Environmental Protection, 394(5): 56-59.]
- 郑姗姗, 万庆, 贾明元. 2014. 基于STARMA模型的城市暴雨积水点积水短时预测[J]. 地理科学进展, 33(7): 949-957. [Zheng S S, Wan Q, Jia M Y. 2014. Short-term forecasting of waterlogging at urban storm-waterlogging monitoring sites based on STARMA model[J]. Process in Geography, 33(7): 949-957.]
- 朱冬冬, 周念清, 江思珉. 2011. 城市雨洪径流模型研究概述[J]. 水资源与水工程学报, 22(3): 132-137. [Zhu D D, Zhou N Q, Jiang S M. 2011. Research overview of runoff model for urban rainwater[J]. Journal of Water Resources & Water Engineering, 22(3): 132-137.]
- 中华人民共和国住房和城乡建设部. 城市排水防涝设施普查数据采集与管理技术导则(试行)的通知[EB/OL]. 2013-06-08[2015-04-09]. http://www.mohurd.gov.cn/zcfg/jsbwj_0/jsbwjcsjs/201306/t20130627_214141.html. [Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China (MOHURD). Technical guidance for city drainage facilities census data collection and management (Trail)[EB/OL]. 2013-06-08[2015-04-09]. http://www.mohurd.gov.cn/zcfg/jsbwj_0/jsbwjcsjs/201306/t20130627_214141.html.]
- Aronica G T, Lanza L G. 2005. Drainage efficiency in urban areas: a case study[J]. Hydrological Processes, 19(5): 1105-1119.
- Bates P D, De Roo A. 2000. A simple raster-based model for flood inundation simulation[J]. Journal of hydrology, 236(1): 54-77.
- Bates P D, Horritt M S, Aronica G, et al. 2004. Bayesian updating of flood inundation likelihoods conditioned on flood extent data[J]. Hydrological Processes, 18(17): 3347-3370.
- Bates P D, Horritt M S, Fewtrell T J. 2010. A simple inertial formulation of the shallow water equations for efficient two-dimensional flood inundation modelling[J]. Journal of Hydrology, 387(1-2): 33-45.
- Bates P D, Wilson M D. 2004. Assimilation of remote observations of surface water into large-scale hydraulic models [C]//AGU Fall Meeting Abstracts. San Francisco, CA: American Geophysical Union: 6.
- Beven K J. 2001. Dalton medal lecture: how far can we go in distributed hydrological modelling[J]. Hydrology and Earth System Sciences, 5(1): 1-12.
- Beven K J. 2002. Towards an alternative blueprint for a physically based digitally simulated hydrologic response modelling system[J]. Hydrological Processes, 16(2): 189-206.
- Chen A S, Evans B, Djordjević S, et al. 2012. Multi-layered coarse grid modelling in 2D urban flood simulations[J]. Journal of Hydrology, 470(23): 1-11.
- Chen J, Hill A A, Urbano L D. 2009. A GIS-based model for urban flood inundation[J]. Journal of Hydrology, 373(1): 184-192.
- Coulthard T J, Macklin M G, Kirkby M J. 2002. A cellular model of Holocene upland river basin and alluvial fan evolution[J]. Earth Surface Processes and Landforms, 27(3): 269-288.
- D'Ambrosio D, Di Gregorio S, Gabriele S, et al. 2001. A Cellular automata model for soil erosion by water[J]. Physics and Chemistry of the Earth, Part B: Hydrology, Oceans and Atmosphere, 26(1): 33-39.
- Di Gregorio S, Serra R. 1999. An empirical method for modelling and simulating some complex macroscopic phenomena by cellular automata[J]. Future Generation Computer Systems, 16: 259-271.
- Estupina-Borrell V, Dartus D, Ababou R. 2006. Flash flood modeling with the MARINE hydrological distributed model[J]. Hydrology and Earth System Sciences Discussions, 3(6): 3397-3438.
- Fewtrell T J, Bates P D, Horritt M, et al. 2008. Evaluating the effect of scale in flood inundation modelling in urban environments[J]. Hydrological Processes, 22(26): 5107-5118.
- Fewtrell T J, Duncan A, Sampson C C, et al. 2011. Benchmarking urban flood models of varying complexity and scale using high resolution terrestrial LiDAR data[J]. Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C, 36(7-8): 281-

- 291.
- Ghimire B, Chen A S, Guidolin M, et al. 2013. Formulation of a fast 2D urban pluvial flood model using a cellular automata approach[J]. *Journal of Hydroinformatics*, 15(3): 676-686.
- Gironás J, Roesner L A, Rossman L A, et al. 2010. A new applications manual for the Storm Water Management Model (SWMM)[J]. *Environmental Modelling & Software*, 25(6): 813-814.
- Gjertsen U, Šálek M, Michelson D B. 2004. Gauge adjustment of radar-based precipitation estimates in Europe[C]//*Proceedings 3rd European conference on radar in meteorology and hydrology*. Deutscher Wetterdienst, Institut für Physik der Atmosphäre: 7-11.
- Hapuarachchi H A P, Wang Q J, Pagano T C. 2011. A review of advances in flash flood forecasting[J]. *Hydrological Processes*, 25(18): 2771-2784.
- Hirsch H. 1990. Numerical computation of internal and external flows[J]. *Computational Methods for Inviscid and Viscous Flows*, 2: 536-556.
- Horritt M S, Bates P D. 2001. Predicting floodplain inundation: raster-based modelling versus the finite-element approach[J]. *Hydrological Processes*, 15(5): 825-842.
- Horritt M S, Bates P D. 2002. Evaluation of 1D and 2D numerical models for predicting river flood inundation[J]. *Journal of Hydrology*, 268(1-4): 87-99.
- Hunter N M, Bates P D, Horritt M S, et al. 2005. Utility of different data types for calibrating flood inundation models within a GLUE framework[J]. *Hydrology Earth System Sciences and Discussions*, 9(4): 412-430.
- Hunter N M, Bates P D, Horritt M S, et al. 2007. Simple spatially-distributed models for predicting flood inundation: a review[J]. *Geomorphology*, 90(3-4): 208-225.
- Hunter N M, Horritt M S, Bates P D, et al. 2005. An adaptive time step solution for raster-based storage cell modelling of floodplain inundation[J]. *Advances in Water Resources*, 28(9): 975-991.
- Krupka M. 2009. A rapid inundation flood cell model for flood risk analysis[D]. Edinburgh, UK: Heriot-Watt University.
- Kubota T, Shige S, Hashizume H, et al. 2007. Global precipitation map using satellite-borne microwave radiometers by the GSMap Project: production and validation[J]. *Geoscience and Remote Sensing*, 45(7): 2259-2275.
- Lamb R, Crossley M, Waller S. 2009. A fast two-dimensional floodplain inundation model[J]. *Proceedings of the ICE - Water Management*, 162(6): 363-370.
- LeFavour G, Alsdorf D. 2005. Water slope and discharge in the Amazon River estimated using the shuttle radar topography mission digital elevation model[J]. *Geophysical Research Letters*, 32(17): 195-221.
- Lhomme J, Bouvier C, Perrin J. 2004. Applying a GIS-based geomorphological routing model in urban catchments[J]. *Journal of Hydrology*, 299(3): 203-216.
- Lhomme J, Sayers P B, Gouldby B P, et al. 2008. Recent development and application of a rapid flood spreading method [C]//Samuels P, Huntington S, Allsop W, et al. *Flood risk management: research and practice*. Oxford, UK: Keble College: 15-24.
- Liu L, Liu Y, Wang X, et al. 2015. Developing an effective 2D urban flood inundation model for city emergency management based on cellular automata[J]. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 15: 381-391.
- Marks K, Bates P. 2000. Integration of high-resolution topographic data with floodplain flow models[J]. *Hydrological Processes*, 14(11-12): 2109-2122.
- Mason D C, Giustarini L, Garcia-Pintado J, et al. 2014. Detection of flooded urban areas in high resolution Synthetic Aperture Radar images using double scattering[J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 28(5): 150-159.
- Meis T, Marcowitz U. 1981. Numerical solution of partial differential equations[M]. New York: Springer-Verlag: 1-10.
- Mignot E, Paquier A, Haider S. 2006. Modeling floods in a dense urban area using 2D shallow water equations[J]. *Journal of Hydrology*, 327(1-2): 186-199.
- Neal J C, Bates P D, Fewtrell T J, et al. 2009. Distributed whole city water level measurements from the Carlisle 2005 urban flood event and comparison with hydraulic model simulations[J]. *Journal of Hydrology*, 368(1-4): 42-55.
- Papadakis C, Preul H C. 1972. University of Cincinnati urban runoff model[J]. *Journal of the Hydraulics Division*, 98(10): 1789-1804.
- Parsons J A, Fonstad M A. 2007. A cellular automata model of surface water flow[J]. *Hydrological Processes*, 21(16): 2189-2195.
- Rezacova D, Sokol Z, Pesice P. 2007. A radar-based verification of precipitation forecast for local convective storms [J]. *Atmospheric Research*, 83(2): 211-224.
- Rossman L A. 2010. Storm water management model user's manual[M]. Cincinnati, OH: National Risk Management Research Laboratory, Office of Research and Development, US Environmental Protection Agency: 1-285.
- Sampson C C, Fewtrell T J, Duncan A, et al. 2012. Use of terrestrial laser scanning data to drive decimetric resolution urban inundation models[J]. *Advances in Water Resources*, 41(2): 1-17.
- Sanders B F, Schubert J E, Detwiler R L. 2010. ParBreZo: a parallel, unstructured grid, Godunov-type, shallow-water code for high-resolution flood inundation modeling at the regional scale[J]. *Advances in Water Resources*, 33(12): 1456-1467.
- Schubert J E, Sanders B F. 2012. Building treatments for urban flood inundation models and implications for predictive skill and modeling efficiency[J]. *Advances in Water*

- Resources, 41(2): 49-64.
- Sinclair S, Pegram G. 2005. Combining radar and rain gauge rainfall estimates using conditional merging[J]. *Atmospheric Science Letters*, 6(1): 19-22.
- Smith L C. 2002. Emerging applications of interferometric synthetic aperture radar (InSAR) in geomorphology and hydrology[J]. *Annals of the Association of American Geographers*, 92(3): 385-398.
- Smith M B, Seo D, Koren V I, et al. 2004. The distributed model intercomparison project (DMIP): motivation and experiment design[J]. *Journal of Hydrology*, 298(1): 4-26.
- Terstriep M L, Stall J B. 1974. The Illinois urban drainage area simulator, ILLUDAS[M]. Urbana, IL: Illinois State Water Survey: 1-7.
- Thomas R, Nicholas A P. 2002. Simulation of braided river flow using a new cellular routing scheme[J]. *Geomorphology*, 43(3): 179-195.
- Wang J P, Liang Q. 2011. Testing a new adaptive grid-based shallow flow model for different types of flood simulations[J]. *Journal of Flood Risk Management*, 4(2): 96-103.
- Wilson M D, Atkinson P M. 2005. The use of elevation data in flood inundation modelling: a comparison of ERS interferometric SAR and combined contour and differential GPS data[J]. *International Journal of River Basin Management*, 3(1): 3-20.
- Yu D. 2010. Parallelization of a two-dimensional flood inundation model based on domain decomposition[J]. *Environmental Modelling & Software*, 25(8): 935-945.
- Yu D, Lane S N. 2006. Urban fluvial flood modelling using a two-dimensional diffusion-wave treatment, part 2: development of a sub-grid-scale treatment[J]. *Hydrological Processes*, 20(7): 1567-1583.
- Zanobetti D, Lorig   H, Preissman A, et al. 1970. Mekong delta mathematical model program construction[J]. *Journal of the Waterways, Harbors and Coastal Engineering Division*, 96(2): 181-199.
- Zhang S, Pan B. 2014. An urban storm-inundation simulation method based on GIS[J]. *Journal of Hydrology*, 517(5): 260-268.
- Zhang S, Wang T, Zhao B. 2014. Calculation and visualization of flood inundation based on a topographic triangle network[J]. *Journal of Hydrology*, 509(4): 406-415.
- Zienkiewicz O C, Cheung Y K. 1965. Finite elements in the solution of field problems[J]. *The Engineer*, 202: 507-510.
- Zoppou C. 2001. Review of urban storm water models[J]. *Environmental Modelling & Software*, 16(3): 195-231.

Research on urban flood simulation: a review from the smart city perspective

LIU Yong¹, ZHANG Shaoyue¹, LIU Lin^{1,2}, WANG Xianwei¹, HUANG Huabing¹

(1. Center of Integrated Geographic Information Analysis, School of Geography and Planning, SunYat-sen University, Guangzhou 510275, China; 2. Department of Geography, University of Cincinnati, Cincinnati, OH45221-0131, USA)

Abstract: Smart city is the emerging pattern of city development. However, in recent years, frequent urban floods have brought serious challenges to the management and development of smart cities. Urban flooding simulation is not only one of the key technologies of city flood control and mitigation, but also an important decision support tool for smart city disaster risk and emergency management. This article first indicates the connotation of smart city and smart water, and analyzes the new requirements of smart city development and management on urban flood inundation models. Second, it discusses the newly available data support of urban flood simulation models brought by the development of smart cities, and compares three existing hydrological models from the perspective of city emergency management decision-making. Third, this article points out that under the support of big data and technology of smart cities, the hydraulic-based distributed urban flood simulation models have a promising prospect in application. By analyzing the development of urban flood simulation models, we conclude that micro-level simulation, integration with remote sensing and GIS technologies, and emphasis on spatiotemporal process of flood inundation and smart service are the inevitable trend of development of urban flood simulation models.

Key words: urban flood; basic geographic data; flood simulation model; smart city; emergency response decision support