

遥感技术在城市洪涝模拟中的应用进展

徐宗学^{1,2*}, 程涛^{1,2*}, 洪思扬^{1,2}, 王林霞³

1. 北京师范大学水科学研究院, 北京 100875;

2. 城市水循环与海绵城市技术北京市重点实验室, 北京 100875;

3. 济南市水文局, 济南 250014

* 联系人, E-mail: zxxu@bnu.edu.cn; tao_cheng@mail.bnu.edu.cn

2017-01-17 收稿, 2017-04-23 修回, 2017-04-23 接受, 2018-07-17 网络版发表

国家自然科学基金(51579007)、济南市海绵城市水循环演变与水文过程模拟项目和北京市科学技术委员会2017年度创新基地培育与发展专项(Z171100002217080)资助

摘要 对基于遥感的气象水文数据和地表信息在洪涝模拟中的应用进行了梳理综述, 介绍了激光测高(LiDAR)、合成孔径雷达干涉测量(InSAR)技术以及倾斜摄影和高光谱遥感等目前使用较多且精度较高的遥感数据源及其相关应用, 进一步对城市洪涝模拟中基于遥感的基础信息的相关热点技术和方法进行了总结. 最后以实例阐述了基于遥感的城市洪涝模拟基础信息提取框架, 并对遥感技术在城市洪涝模拟中的应用前景以及面临的问题与挑战进行了展望.

关键词 遥感技术, 城市洪涝模拟, 气象水文数据, 地表信息, 基础数据

改革开放以来, 中国经济社会快速发展, 城市面积不断扩大, 城市人口持续增长, 伴随而来的是一系列诸如水资源短缺、洪水内涝、水环境污染和水生态破坏的城市水问题, 水安全形势十分严峻^[1]. IPCC报告指出, 全球气候变化很大程度上增大了极端暴雨和洪涝事件发生的可能性, 使得城市面临着更为严峻的洪涝灾害问题. 2007~2013年, 全国超过360个城市遭遇内涝, 其中六分之一单次内涝淹水时间超过12 h, 淹水深度超过0.5 m, 北京、广州、济南等城市甚至发生了造成人员伤亡的严重内涝. 特别是近年来, 城市“看海”层出不穷, 逢雨必涝逐渐演变为我国很多大中城市的痼疾^[2]. 因此, 针对我国严峻的洪涝形势, 及时有效的暴雨洪涝预报预警技术能够提供科学技术支撑, 而利用城市洪涝模型进行雨洪模拟, 进而划分洪水高风险区以助力防洪减灾, 已成为当前较为常用的一种方法^[3,4].

常规的雨洪模拟利用水文学方法或者基于地形分析的方法进行城市洪涝模拟能够获取城市洪涝淹没范围或者最终淹没水深, 但随着社会经济的发展, 城市洪涝风险预警对模型精细化的要求越来越高. 基于物理机制的城市洪涝水文水动力学模拟模型能够提供暴雨洪涝期间较为详细的地表流速和水深过程信息^[5~7]. 然而, 由于城市区域地形和地物构造复杂, 城市洪涝发生时, 水流在道路系统中的流态具有很强的各向异性特征, 流速和水深分布也会呈现十分复杂的状态, 因此, 很难对城市区域的洪涝状况和风险水平进行精确的评估. 为了能够较为合理地反映城市地形和地物特征(图1), 提高洪涝模拟精度以精确评估建筑物受损和人员伤害风险, 对诸如城市地形(DEM)、城市道路、建筑物、植被分布和水体信息等进行准确的表征十分重要^[8,9]. 一直以来, 水文模拟中的水文参数信息大多通过野外调查或者研究

引用格式: 徐宗学, 程涛, 洪思扬, 等. 遥感技术在城市洪涝模拟中的应用进展. 科学通报, 2018, 63: 2156–2166

Xu Z X, Cheng T, Hong S Y, et al. Review on applications of remote sensing in urban flood modeling (in Chinese). Chin Sci Bull, 2018, 63: 2156–2166, doi: 10.1360/N972018-00239



图1 地表特征及其对洪涝模拟的作用^[8]

Figure 1 Urban surface characteristics and their impact on flood simulation

者经验确定,这给水文模型建模和参数的率定带来很大困难和不确定性,随着遥感技术的发展,不同的传感器通过卫星遥感用于获取多种城市表面信息(如城市地表覆盖、土地利用类型和地物高度等),为城市洪涝模拟提供完备的基础输入数据^[10]。

1 遥感数据在洪涝模拟中的应用研究进展

遥感技术在洪涝模拟中的应用主要包括:(1)基于遥感的气象水文数据,如遥感雷达定量降雨预测预报、卫星遥感土壤水反演、遥感蒸散发反演以及洪涝过程信息等^[11];(2)基于遥感的地表信息,如精细地形信息、土地利用信息、数字化河流和流域以及基于上述信息提取得到的水文水力学参数信息等。随着遥感技术的发展和洪涝模拟精细化的需求,遥感技术在洪涝模拟中得到越来越多的应用。

1.1 基于遥感的气象水文数据

在基于遥感的气象水文数据应用方面,遥感技术能够大范围地观测水文状态变量^[11]。基于空间卫星技术的定量降雨预报在过去十几年发展很快,其时空分辨率和精度不断提升,为大、中尺度的水循环研究和无资料流域降雨观测提供了极有价值的信息,研究者围绕全球和局域尺度的水文模拟研究开展了众多的工作^[12-14]。Khan等人^[15]利用卫星遥感获取的降雨、土地利用和地形等分布式水文模型基础数据,驱动CREST(coupled routing and excess storage)水文模型模拟非洲维多利亚湖某流域的洪涝过程,并应用基于遥感获取的洪涝范围信息验证模型,表现出较好的效果,显示出遥感数据在缺资料和无资料地区的广泛应用前景。王兆礼等人^[16]利用地面雨量站

点数据评估了最新一代TRMM 3B42-V7卫星降水反演数据产品在珠江流域的精度和适用性,产品表现出较好的精度,并利用该数据率定VIC水文模型,效果比较理想。天气雷达是一种地基主动微波遥感技术,主要用于监测几十到几百平方千米范围内的短时强降雨信息^[17],具有测量范围广、时效性强、维护方便等特点^[18],广泛地用于天气预报和暴雨洪涝预报预警^[19,20]。朱弋等人^[21]介绍了国内外利用雷达降雨数据进行暴雨洪水预报的有关研究和应用,认为雷达降雨预测预报数据能够提高暴雨洪涝模型预见期,在城市洪涝模拟中具有很大的应用前景,同时指出应进一步提高雷达临近降雨预报的可靠性,利用C波段雷达探测范围广、准确性高的优势和X波段雷达高分辨率、低成本的特点,提升城市防汛减灾能力。遥感土壤水和遥感蒸散发反演主要用于流域尺度水循环研究、农田干旱监测以及城市热岛效应方面^[22-28]。如程涛等人^[29]利用MODIS卫星遥感植被指数和地表温度数据,基于VI-TS(植被指数和地表温度)特征空间和线性混合模型构建植被冠层温度反演算法,估算的冠层温度与手持式红外测温仪实地测量数据一致。吴学伟等人^[30]基于Landsat TM/ETM+遥感进行地表亮温反演,分析哈尔滨市城市热岛空间分布特征和时空演变规律,探究城市化与热岛效应之间的内在关系。刘佳明^[31]基于Landsat热波段遥感数据,采用单窗算法反演地表温度,并进一步计算蒸散发,用于城市洪涝模拟。在基于遥感的洪涝过程信息方面,洪水范围、水深等可用于防洪减灾以及洪涝模型验证和率定^[11,32],众多学者在这方面开展了很多研究和应用工作^[15,33-35]。Mason等人^[36]基于TerraSAR-X合成孔径雷达(SAR)遥感数据估测英国Tewkesbury城区一场150年一遇洪水的淹没范围,并结合机载激光测高(LiDAR)技术对房屋和树木阴影遮挡区域洪水面积进行识别,与航空图像对比发现,TerraSAR-X可见区域洪水的正确判读率达到76%,考虑遮挡区域栅格时则为58%,研究认为遥感获取的洪水范围能够为洪涝模型验证和率定提供较为可靠的信息。

1.2 基于遥感的地表信息

基于遥感的地表信息为水文模型提供了大量的基础地理信息,如数字高程信息(DEM)、地表覆被分类信息(land use)、数字化流域信息等^[37],为数字化水

文模拟^[38]和大尺度水循环研究提供了数据基础。如基于DEM技术发展的数字水文模拟技术,为基于物理机制的分布式水文模型研究提供了可能^[38],高精度的DEM和高分辨率、高光谱、多时相遥感影像,为定量描述流域空间信息提供了日益丰富的数据源,人们对流域地貌、水文、生物过程等物理特征的理解不断加深^[38,39],基于遥感技术的水文模拟和水循环过程研究取得了巨大的进展^[39~42]。如Gashaw等人^[43]基于不同时期的Landsat影像数据提取土地利用,分析土地覆被变化对流域水文过程的影响。Zope等人^[44]利用多期Landsat/ETM遥感影像数据分析土地利用变化和城市化对印度孟买区域的Oshiwara河流域径流变化和洪涝特征的影响,表明建成区面积在过去43年间增加了74.84%,径流峰值和总量变化不大,但高洪水风险区的范围增加了64%。

随着全球城市化进程的不断推进,近来出现了一些新的城市水问题,其中,城市洪涝问题因其形成机制复杂且社会影响广泛,引起了较多的关注,相关学者开展了大量的研究^[45~53]。与自然流域的洪涝过程相比,城市区域的地物分布错综复杂,建筑物、道路、涵洞、明渠等相互交错,城市洪涝的形成机制尚不明晰,洪涝模拟面临较大困难。另外,水力学要素如洪水深度和速度等极易受到城市地物和微地形的影响,微小的地形误差就可能导致不同的模拟结果,城市洪涝模型对地形数据表现出极高的敏感性^[54]。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^[54]。近年来,随着空间遥感技术的发展,机载激光测高、合成孔径雷达干涉测量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^[34]。如机载激光雷达在大尺度范围内能够提供米级别分辨率的地形数据^[55],在城市尺度范围内,则能够提供分米甚至毫米级别的地形数据,一些研究^[56]利用精细的LiDAR点云开展精细建筑物轮廓提取和微地形识别,推进了高空间分辨率洪涝模拟模型的快速发展。

1.3 城市遥感信息获取的热点技术

除了地形数据之外,城市洪涝模拟的基础资料还包括土地利用类型等下垫面资料、降雨资料及受灾情况。测绘技术的发展使获取精确的地形、土地利用类型、街道位置、管网布置等下垫面资料更为方便快捷,城市雨量站点的建立也使准确获取城区分布式

降雨资料成为可能^[57]。然而,这些数据往往掌握在不同的部门,且由于涉及到行政审批和数据安全等问题,很难获取到全面且具有较高精度的基础数据,这对城市洪涝模拟和相关研究造成较大的困难。遥感数据因其较为开放获取的特点,获得性较好,通过间接提取方法,可以生成高精度城市地形、土地利用、地物三维特征等基础地理信息,实现高精度的城市洪涝模拟。激光测高(LiDAR)、合成孔径雷达干涉测量(InSAR)技术以及倾斜摄影和高光谱遥感等是目前使用较多且精度较高的遥感数据源。

LiDAR可以提供三维点云信息,通过滤波算法获取地表点云并进一步生成数字地形,而非地面点云可通过一系列算法获取包括建筑物轮廓、道路边界、植被等城市地物信息,利用LiDAR生成的数字表面模型的高程精度可达10 cm甚至更小,空间分辨率可达1 m,可以满足房屋检测等高精度数据的需要^[58],国外很多研究者基于LiDAR进行城市地形地物的提取并应用于城市洪涝模拟之中^[59~62],而在国内,朱祖乐^[63]利用车载激光雷达提取郑州市某积水路段的高精度地形信息,基于精细地形信息,采用“等体积法”,将SWMM模型的溢流量转换为地表淹没水深和范围,并利用城市三维模型实现洪涝过程三维可视化。图2(a)为车载激光雷达和基于LiDAR的城市三维建模,图2(b)为基于精细地形的洪涝模拟和三维可视化。InSAR方法利用图像的相位信息作为处理和分析对象,使用源于射电天文干涉技术来提取地形信息^[64]。利用高分辨率SAR图像提取建筑物的方法多基于像元的灰度、相位、极化3类信息,如利用灰度信息提取建筑物的方法与遥感图像数据处理的方法类似;而用极化信息提取建筑物多从SAR影像中建筑物二次散射量占优的机制出发进行考虑,因此多采用利用极化分解后的特征通过分类器进行建筑区提取;含有相位信息的雷达复数InSAR影像可通过相位相干性特征进行建筑物的提取^[65]。倾斜摄影技术是最近十几年发展起来的一项高新技术,该技术通过从1个垂直、4个倾斜、5个不同的视角同步采集影像,获取到丰富的建筑物顶面及侧视的高分辨率纹理^[66]。多视影像密集匹配能得到高精度高分辨率的数字表面模型DSM,充分地表达了地形地物起伏特征,已经成为新一代空间数据基础设施的重要内容^[67]。刘佳明^[31]基于双视获取的立体像对数据,利用ENVI软件提取城市5 m分

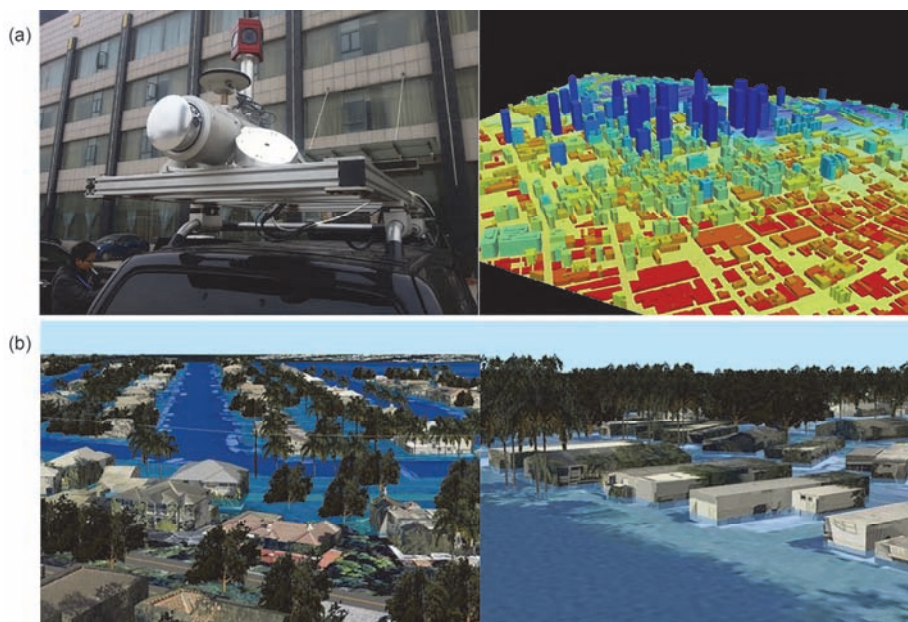


图 2 (网络版彩色) 基于车载激光雷达获取洪涝模拟基础地形信息. (a) 车载激光雷达与城市三维建模 (<http://s3.sinaimg.cn/large/9c87863fhd6beedb95fa2&690> 及 <https://iq.intel.com/technology-that-lets-self-driving-cars-robots-see>); (b) 三维洪涝模拟与可视化 (<https://nemoc.unca.edu/three-dimensional-gis-flood-visualizations>)

Figure 2 (Color online) Basic terrain information for flood simulation gathered by on-vehicle laser radar. (a) Vehicle-mounted LiDAR and 3D City Model (<http://s3.sinaimg.cn/large/9c87863fhd6beedb95fa2&690> & <https://iq.intel.com/technology-that-lets-self-driving-cars-robots-see>); (b) 3D flood modeling and visualization (<https://nemoc.unca.edu/three-dimensional-gis-flood-visualizations>)

分辨率DEM, 并用地面实测值进行比较, 发现提取结果较为可靠, 并将提取的DEM用于城市洪涝模拟. 高光谱影像数据因其光谱分辨率较高, 对地物的分辨识别能力大大提高, 使得“异物同谱”与“同谱异物”的现象减少, 能够提取更为精细的城市地物分类信息^[68,69], 然而, 由于影像光谱分辨率较高时, 其空间分辨率相对较粗^[70,71], 难以满足城市区域的复杂地物分类提取, 虽然图像融合技术为生成高空间分辨率的高光谱数据提供了可能^[72], 但其又进一步增加了数据处理的复杂度. 最近, 西安理工大学李怀恩教授团队利用无人机航测技术, 获取了陕西省西安市西咸新区高分辨率的地形和高精度的地表分类数据(1 m分辨率), 2天内航测12 km², 为西咸新区海绵城市内涝模拟与风险评估奠定了基础, 并将该数据用于城市二维洪涝模拟, 取得了较好的效果^[73], 该研究是国内城市雨洪模拟基础数据获取方面开创性的举措(图3).

2 基于遥感的城市洪涝模拟基础信息提取框架

目前在获取城市地表信息方面, 机载雷达具有

强大的优势, 不仅可以获取地面高程信息, 还能获取丰富的诸如反射率、回波强度、波形等信息. 然而, 由于机载激光雷达数据价格昂贵, 航空LiDAR又涉及到飞行许可问题, 而立体像对数据相对易于获取, 提取方法也较为容易且精度较高. 高光谱遥感广泛用于地表覆盖分类, 但由于空间分辨率一般较低且价格较高, 故采用较易获取的高分辨率遥感影像作为替代, 进行城市地物分类提取. 本文以GeoEye-1立体像对和高分辨率遥感影像为例提取城市地形和地物信息, 包括城市DEM的提取、建筑物轮廓和高度的提取、道路和植被等的提取等, 提取的基本流程如图4所示.

(1) 基于立体像对提取城市地形信息. 可以通过立体像对数据获取类似于LiDAR的高程点云信息, 其与通过机载LiDAR获取的点云不同的是仅仅包含高程信息, 而不含有诸如光谱、反射率、波形特征等信息. 对采集到的高程点云进而插值, 生成数字地表模型(DSM), 该DSM包含陆地表面所有物体的高程信息, 如屋面高度、树木高度等; 通过对上述点云数据进行滤波处理可得到地面点云和非地面点云, 地面点云进一步处理可以得到数字高程模型(DEM);



图 3 (网络版彩色)基于无人机技术获取洪涝模拟地面基础信息

Figure 3 (Color online) Basic surface information for flood simulation gathered by unmanned aerial vehicle

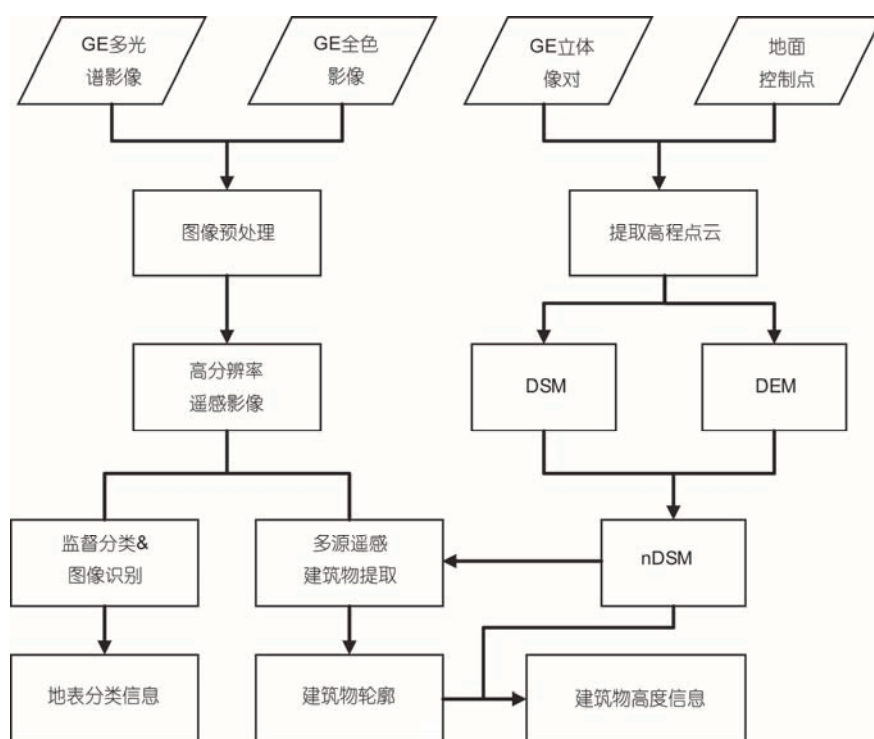


图 4 遥感信息提取流程图

Figure 4 Schematic diagram of remote sensing information extraction

将DSM与DEM叠置后将前者与后者作差运算，得到nDSM(normalized digital surface model)，以消除地形作用，直接反映地物高度信息，可用于下一步辅助提

取建筑物、植被等信息以及建筑物高度等。

(2) 基于面向对象的都市地物提取。 高分辨率的航空影像中包含了平面空间结构、地物边界、色彩

属性等重要建筑物信息,然而非建筑物地物通常也包含类似的几何和色彩线索,给建筑物的识别造成了一定困难.通过立体像对获取的高程点云能够提供建筑物三维信息,但由于其分辨率仅能达到亚米级,不能反映建筑物细微特征.因此,融合高分辨率遥感影像和立体像对提取的高程点云信息进行城市地物的提取能够克服两者的缺陷,实现较高分辨率的城市地物提取.城市地物的提取包括地面地物(道路、水面、裸土、绿地等)和非地面地物(建筑物和树木等),前者主要通过高分辨率遥感图像进行监督分类结合图像识别(如道路边界特征)提取,后者通过高程点云融合高分辨率图像以及MODIS-NDVI进行提取.

董彦芳等人^[69]的研究表明,融合nDSM进行遥感图像监督分类的效果明显高于单一利用遥感图像进行分类,该研究分别利用MLC(maximum likelihood method, 最大似然法)和SVM(support vector machine, 支持向量机)方法进行监督分类,显示前者较后者良好,故采用其中分类效果较好的MLC方法进行监督分类.对于道路这类具有典型几何特征的地面地物类型,通过融合图像识别技术,抓取图像中的道路边界平行特征进行道路提取,该提取结果也可以与前述监督分类提取的道路信息进行相互验证.

对于非地面地物,需要将建筑物与高大的树木进行分离,常用的是采用NDVI进行分离^[8,69,74].对建筑物的分离采用如下准则^[69]: (1) 面积 $>100\text{ m}^2$, (2) 高度 $>3\text{ m}$, (3) $\text{NDVI}<0.2$.对于树木和草地等植被,采用MODIS-NDVI代表城市地表植被分布情况,NDVI也可作为计算植被冠层截留的一个重要输入.NDVI数据可直接通过MODIS数据官方网站下载获取得到.由于NDVI数据的栅格大小可能与后续二维洪涝模拟的计算网格不一致,因此将计算网格与NDVI栅格数据叠置,计算网格的NDVI值以叠置对应NDVI栅格的值为准.分离后的建筑物还需要利用图像边缘识别和多边形构建生成规则的建筑物图层,可以参考程效军等人^[75]的方法,融合高分辨率遥感图像和建筑物点云进行建筑物轮廓的识别.

通过上述步骤提取到建筑物等城市地物信息后,进一步转化为矢量文件,可用于洪涝模型的研究区划分和边界设定.同时,将建筑物轮廓信息与nDSM进行叠置,取建筑物轮廓内的平均值作为建筑物高度.

3 结论与展望

多源遥感基础信息已广泛应用于洪涝模拟的研究,而城市区域相对于自然流域相对复杂,其应用具有广阔的前景.随着城市化进程的进一步推进,城市水问题愈加突出,尤其是城市洪涝问题,基于精细信息的城市洪涝模拟极为重要.由于过去在城市区域的水文监测和相关研究较为缺乏,对城市流域进行洪涝模拟和分析存在着更大的困难和不确定性.基于多源遥感的城市基础地理信息和相关气象水文信息能够提供精细且全面的洪涝模拟基础资料,为数字化的洪涝模拟和智能化的洪水风险管理奠定了坚实的基础.随着科学技术进步以及人工智能技术和互联网的大潮进一步推进,研究人员发展出众多的数据获取方法,如利用无处不在的移动通信网络进行降雨观测^[76,77],基于网络新闻信息的洪涝淹没点信息等^[78],基于多种来源(常规测站、遥感、传感器、以及网络大数据等)的数据信息将使城市洪涝模拟与管理更加方便有效.

丰富的数据来源为城市洪涝模拟奠定了坚实的基础,但同时也带来了巨大的挑战.(1) 数据的处理、存储与管理:全球对地观测数据量高达EB级,现有的遥感数据处理分析技术难以满足遥感大数据的需求^[79],快速增长的高分辨率遥感大数据对数据存储和管理提出更大挑战,而高性能的分布式存储技术和数据处理技术可为遥感大数据存储和管理提供解决方案^[80].(2) 不同来源信息的数据同化:除了传统遥感信息,与城市洪涝有关的网络大数据(包括传感器、图像和视频,也是广义上的遥感大数据)也是很大的信息来源^[81],然而由于这些数据信息具有高度的非结构化特性^[82],海量的数据和低下的处理利用能力会造成了巨大的资源浪费,基于机器学习和数据同化等数据分析方法,将海量多源数据进行整合,形成城市洪涝模拟综合基础数据库,能够为现代化城市建设与管理提供科学技术支撑.(3) 高分辨率洪涝模拟计算效率:随着气象水文数据和地理信息数据时空分辨率趋于精细化,高精度城市洪涝模拟的计算时间消耗也成指数增加,这对城市快速有效的暴雨洪涝预警预报是不可接受的,高性能的并行计算技术能够很大程度上加快洪涝模拟效率,如基于CUDA平台的GPU并行计算在水动力学计算方法得到了广泛应用^[83,84],具有广阔前景.

参考文献

- 1 Liu J H, Wang H, Gao X R, et al. Review on urban hydrology (in Chinese). *Chin Sci Bull*, 2014, 59: 3581–3590 [刘家宏, 王浩, 高学睿, 等. 城市水文学研究综述. 科学通报, 2014, 59: 3581–3590]
- 2 Xu Z X, Cheng T, Ren M F. Farewell to urban flooding: A brief discussion on the functions and features of Sponge City (in Chinese). *Chin Flooding Drought Manage*, 2017, 27: 64–66 [徐宗学, 程涛, 任梅芳. “城市看海”何时休——兼论海绵城市功能与作用. 中国防汛抗旱, 2017, 27: 64–66]
- 3 Cheng T, Xu Z X, Song S L. Rainfall-runoff simulations for Xinglong sponge city pilot area of Jinan (in Chinese). *J Hydroelectr Eng*, 2017, 36: 1–11 [程涛, 徐宗学, 宋苏林. 济南市海绵城市建设兴隆示范区降雨径流模拟. 水力发电学报, 2017, 36: 1–11]
- 4 Cheng T, Xu Z X, Hong S Y, et al. Flood risk zoning by using 2D hydrodynamic modeling: A case study in Jinan city. *Mathem Probl Eng*, 2017, 2017: 1–8
- 5 Song X M, Zhang J Y, Wang G Q, et al. Development and challenges of urban hydrology in a changing environment: II: Urban storm-water modeling and management (in Chinese). *Adv Water Sci*, 2014, 25: 752–764 [宋晓猛, 张建云, 王国庆, 等. 变化环境下城市水文学的发展与挑战——II. 城市雨洪模拟与管理. 水科学进展, 2014, 25: 752–764]
- 6 Teng J, Jakeman A J, Vaze J, et al. Flood inundation modelling: A review of methods, recent advances and uncertainty analysis. *Environ Model Softw*, 2017, 90: 201–216
- 7 Li W F, Chen Q W, Mao J Q. Study on flood risk modeling of Beijing Olympic Village (in Chinese). *Chin Sci Bull*, 2009, 54: 321–328 [李伟峰, 陈求稳, 毛劲乔. 北京奥运村洪水淹没风险模型研究. 科学通报, 2009, 54: 321–328]
- 8 Tsubaki R, Fujita I. Unstructured grid generation using LiDAR data for urban flood inundation modelling. *Hydrol Process*, 2010, 24: 1404–1420
- 9 Yan W Y, Shaker A, El-ashmawy N. Urban land cover classification using airborne LiDAR data: A review. *Remote Sens Environ*, 2015, 158: 295–310
- 10 Liu Y, Zhang S Y, Liu L, et al. Research on urban flood simulation: A review from the smart city perspective (in Chinese). *Prog Geogr*, 2015, 34: 494–504 [刘勇, 张韶月, 柳林, 等. 智慧城市视角下城市洪涝模拟研究综述. 地理科学进展, 2015, 34: 494–504]
- 11 Schmugge T J, Kustas W P, Ritchie J C, et al. Remote sensing in hydrology. *Adv Water Resour*, 2002, 25: 1367–1385
- 12 Haile A T, Rientjes T H M. Effects of LiDAR DEM resolution in flood modelling: A model sensitivity study for the city of Tegucigalpa, Honduras. *ISPRS WGIII/3, III/4, v/3 workshop Laser scanning*, 2005, 3: 12–14
- 13 Naumann G, Barbosa P, Carrao H, et al. Monitoring drought conditions and their uncertainties in Africa using TRMM data. *J Appl Meteorol Clim*, 2012, 51: 1867–1874
- 14 Tang G Q, Li Z, Xue X W, et al. A study of substitutability of TRMM remote sensing precipitation for gauge-based observation in Ganjiang River basin (in Chinese). *Adv Water Sci*, 2015, 26: 340–346 [唐国强, 李哲, 薛显武, 等. 赣江流域 TRMM 遥感降水对地面站点观测的可替代性. 水科学进展, 2015, 26: 340–346]
- 15 Khan S I, Hong Y, Wang J, et al. Satellite remote sensing and hydrologic modeling for flood inundation mapping in lake victoria basin: Implications for hydrologic prediction in ungauged basins. *IEEE T Geosci Remote*, 2011, 49: 85–95
- 16 Wang Z L, Zhong R D, Lai C G, et al. Evaluation of TRMM 3B42-V7 satellite-based precipitation data product in the Pearl River basin, China, Dongjiang River and Beijiang River basin as examples (in Chinese). *Adv Water Sci*, 2017, 28: 174–182 [王兆礼, 钟睿达, 赖成光, 等. TRMM 卫星降水反演数据在珠江流域的适用性研究——以东江和北江为例. 水科学进展, 2017, 28: 174–182]
- 17 Li Z. Multi-source precipitation observations and fusion for hydrological applications in the Yangtze River Basin (in Chinese). Dissertation for Doctoral Degree. Beijing: Tsinghua University, 2015 [李哲. 多源降雨观测与融合及其在长江流域的水文应用. 博士学位论文. 北京: 清华大学, 2015]
- 18 Lu J T. Study on precipitation estimation and nowcasting based on weather radar (in Chinese). Dissertation for Master Degree. Beijing: Tsinghua University, 2011 [卢江涛. 利用天气雷达估测和预报降雨分布的研究. 硕士学位论文. 北京: 清华大学, 2011]
- 19 Zhang H Q, Wei W Q. Application of weather radar in flood warning report (in Chinese). *Adv Sci Technol Water Res*, 1996, 16: 21–25 [张火青, 魏文秋. 天气雷达在洪水预警报中的应用. 水利水电科技进展, 1996, 16: 21–25]
- 20 Li D J. Application of doppler weather radar and TRMM satellite-based detection in studying the rainfall in South-west China (in Chinese). Dissertation for Master Degree. Kunming: Yunnan University, 2008 [李德俊. 多普勒天气雷达和 TRMM 卫星探测在西南地区降水研究中的应用. 硕士学位论文. 昆明: 云南大学, 2008]
- 21 Zhu Y, Pan W, Gao L, et al. Application and expectation of radar data in real time hydraulic model of urban waterlogging (in Chinese). *Urban Road Bridges Flooding Control*, 2016, (2): 181–184 [朱弋, 潘炜, 高磊, 等. 雷达数据在城市内涝实时模型中的应用与展望.

- 城市道桥与防洪, 2016, (2): 181–184]
- 22 Zheng W W. Inversion of evapotranspiration on urban land surface based on remote sensing data (in Chinese). Dissertation for Master Degree. Changsha: Central South University, 2012 [郑文武. 城市地表蒸散发遥感反演研究. 硕士学位论文. 长沙: 中南大学, 2012]
 - 23 Fang B, Lakshmi V. Soil moisture at watershed scale: Remote sensing techniques. *J Hydrol*, 2014, 516: 258–272
 - 24 Rajib M A, Merwade V, Yu Z. Multi-objective calibration of a hydrologic model using spatially distributed remotely sensed/*in-situ* soil moisture. *J Hydrol*, 2016, 536: 192–207
 - 25 Nicolai-shaw N, Zscheischler J, Hirschi M, et al. A drought event composite analysis using satellite remote-sensing based soil moisture. *Remote Sens Environ*, 2017, 203: 216–225
 - 26 Kullberg E G, Dejonge K C, Chvez J L. Evaluation of thermal remote sensing indices to estimate crop evapotranspiration coefficients. *Agric Water Manage*, 2017, 179: 64–73
 - 27 Coutts A M, Harris R J, Phan T, et al. Thermal infrared remote sensing of urban heat: Hotspots, vegetation, and an assessment of techniques for use in urban planning. *Remote Sens Environ*, 2016, 186: 637–651
 - 28 Herman M R, Nejadhashemi A P, Abouali M, et al. Evaluating the role of evapotranspiration remote sensing data in improving hydrological modeling predictability. *J Hydrol*, 2018, 556: 39–49
 - 29 Cheng T, Sun W C, Xu Z X, et al. Monitoring crop condition in northeast China by using canopy temperature derived from MODIS remote sensing data (in Chinese). *Chin Rural Water Hydropower*, 2017, (8): 9–13 [程涛, 孙文超, 徐宗学, 等. 基于 MODIS 遥感反演冠层温度在东北地区的应用. *中国农村水利水电*, 2017, (8): 9–13]
 - 30 Wu X W, Xu Y M, Gong W F. Graphical information characteristics of urban heat island spatial pattern and its change (in Chinese). *Geomat Inf Sci Wuhan Univ*, 2017, 42: 1711–1718 [吴学伟, 徐亚明, 龚文峰. 城市热岛空间格局及其变化的图形信息特征分析. *武汉大学学报(信息科学版)*, 2017, 42: 1711–1718]
 - 31 Liu J M. Research on the amplified hydrological effect and distributed model of urban stormwater (in Chinese). Dissertation for Doctoral Degree. Wuhan: Wuhan University, 2016 [刘佳明. 城市雨洪放大效应及分布式城市雨洪模型研究. 博士学位论文. 武汉: 武汉大学, 2016]
 - 32 Sanyal J, Lu X X. Application of remote sensing in flood management with special reference to Monsoon Asia: A Review. *Nat Hazards*, 2004, 33: 283–301
 - 33 Horritt M S, Bates P D. Evaluation of 1D and 2D numerical models for predicting river flood inundation. *J Hydrol*, 2002, 268: 87–99
 - 34 Bates P D. Remote sensing and flood inundation modelling. *Hydrol Process*, 2004, 18: 2593–2597
 - 35 Hostache R, Matgen P, Schumann G, et al. Water level estimation and reduction of hydraulic model calibration uncertainties using satellite SAR images of floods. *IEEE T Geosci Remote*, 2009, 47: 431–441
 - 36 Mason D C, Speck R, Devereux B, et al. Flood detection in urban areas using TerraSAR-X. *IEEE T Geosci Remote*, 2010, 48: 882–894
 - 37 Yang S T, Zhan C S. Remote Sensing Application in Hydrology (in Chinese). Beijing: Science Press, 2015 [杨胜天, 赵长森. 遥感水文. 北京: 科学出版社, 2015]
 - 38 Xu Z X. Advanced Hydrology (in Chinese). Beijing: Beijing Normal University Press, 2013 [徐宗学. 现代水文学. 北京: 北京师范大学出版社, 2013]
 - 39 Wang W, Lu H. Progress in application of remote sensing data in hydrological simulation (in Chinese). *Remote Sens Technol Appl*, 2015, 30: 1042–1050 [汪伟, 卢麾. 遥感数据在水文模拟中的应用研究进展. *遥感技术与应用*, 2015, 30: 1042–1050]
 - 40 Zhao S H, Qiu G Y, Yang Y H, et al. Advances in the coupled model of remote sensing and hydrology (in Chinese). *Ecol Environ*, 2006, 15: 1391–1396 [赵少华, 邱国玉, 杨永辉, 等. 遥感水文耦合模型的研究进展. *生态环境学报*, 2006, 15: 1391–1396]
 - 41 Jiang S K, Li F, Chen L F. Research progress of remote sensing technology application in distributed hydrological model (in Chinese). *J Water Resour Water Eng*, 2013, 24: 174–180 [姜尚堃, 李飞, 陈立峰. 遥感技术在分布式水文模型中的应用研究进展. *水资源与水工程学报*, 2013, 24: 174–180]
 - 42 Xu Z X, Cheng L. Progress on studies and applications of the distributed hydrological models (in Chinese). *J Hydraul Eng*, 2010, 39: 1009–1017 [徐宗学, 程磊. 分布式水文模型研究与应用进展. *水利学报*, 2010, 39: 1009–1017]
 - 43 Gashaw T, Tulu T, Argaw M, et al. Modeling the hydrological impacts of land use/land cover changes in the Andassa watershed, Blue Nile Basin, Ethiopia. *Sci Total Environ*, 2017, 619: 1394–1408
 - 44 Zope P E, Eldho T I, Jothiprakash V. Impacts of land use-land cover change and urbanization on flooding: A case study of Oshiwara River Basin in Mumbai, India. *Catena*, 2016, 145: 142–154
 - 45 Cheng T, Xu Z X, Hong S Y, et al. Simulation of rainstorm waterlogging in the piedmont plains of Jinan City (in Chinese). *J Beijing Norm Univ (Nat Sci)*, 2018, 54: 246–253, 148 [程涛, 徐宗学, 洪思扬, 等. 济南市山前平原区暴雨内涝模拟. *北京师范大学学报(自然科学版)*, 2018, 54: 246–253, 148]
 - 46 Elliott A H, Trowsdale S A. A review of models for low impact urban stormwater drainage. *Environ Model Software*, 2007, 22: 394–405

- 47 Zhang J Y. The vital problems for the urbanization and urban hydrology today (in Chinese). *Hydrol Sci Eng*, 2012, (1): 1–4 [张建云. 城市化与城市水文学面临的问题. *水利水运工程学报*, 2012, (1): 1–4]
- 48 Zhang J Y, Song X M, Wang G Q, et al. Development and challenges of urban hydrology in a changing environment: I: Hydrological response to urbanization (in Chinese). *Adv Water Sci*, 2014, 25: 594–605 [张建云, 宋晓猛, 王国庆, 等. 变化环境下城市水文学的发展与挑战——I. 城市水文效应. *水科学进展*, 2014, 25: 594–605]
- 49 Zhang J Y, Wang Y T, He R M, et al. Discussion on the urban flood and waterlogging and causes analysis in China (in Chinese). *Adv Water Sci*, 2016, 27: 485–491 [张建云, 王银堂, 贺瑞敏, 等. 中国城市洪涝问题及成因分析. *水科学进展*, 2016, 27: 485–491]
- 50 Zhang J Y, Wang Y T, Liu C S, et al. Discussion on the standards of urban flood and waterlogging prevention in China (in Chinese). *J Hydroelectr Eng*, 2017, 36: 1–6 [张建云, 王银堂, 刘翠善, 等. 中国城市洪涝及防治标准讨论. *水力发电学报*, 2017, 36: 1–6]
- 51 Bach P M, Rauch W, Mikkelsen P S, et al. A critical review of integrated urban water modelling – Urban drainage and beyond. *Environ Model Software*, 2014, 54: 88–107
- 52 Yin J, Ye M, Yin Z, et al. A review of advances in urban flood risk analysis over China. *Stoch Environ Res Risk Assess*, 2015, 29: 1063–1070
- 53 Hammond M J, Chen A S, Djordjević S, et al. Urban flood impact assessment: A state-of-the-art review. *Urban Water J*, 2015, 12: 14–29
- 54 Wilson M D, Atkinson P M. Prediction uncertainty in elevation and its effect on flood inundation modelling. *Adv Acoust Vibr*, 2005, 104: 355–368
- 55 Teng J, Vaze J, Dutta D, et al. Rapid inundation modelling in large floodplains using LiDAR DEM. *Water Resour Manage*, 2015, 29: 2619–2636
- 56 Evans B. Automated bridge detection in DEMs via LiDAR data sources for urban flood modelling. *Proc 11th Int Conf on Urban Drainage*. Edinburgh, Scotland, UK, 2008
- 57 Hu W X, He W H, Huang G R, et al. Review of urban storm water simulation technique (in Chinese). *Adv Water Sci*, 2010, 21: 137–144 [胡伟贤, 何文华, 黄国如, 等. 城市雨洪模拟技术研究进展. *水科学进展*, 2010, 21: 137–144]
- 58 Tang G A, Li F Y, Liu X J. Digital Elevation Model-Third Edition (in Chinese). 3rd ed. Beijing: Science Press, 2016 [汤国安, 李发源, 刘学军. 数字高程模型教程. 第3版. 北京: 科学出版社, 2016]
- 59 Abdullah A F, Vojinovic Z, Price R K, et al. A methodology for processing raw LiDAR data to support urban flood modelling framework. *J Hydroinform*, 2012, 14: 75–92
- 60 Leit O J P, Moy D V M, Scheidegger A, et al. Assessing the quality of digital elevation models obtained from mini-unmanned aerial vehicles for overland flow modelling in urban areas. *Hydrol Earth Syst Sci*, 2015, 20: 1637–1653
- 61 Sampson C C, Fewtrell T J, Duncan A, et al. Use of terrestrial laser scanning data to drive decimetric resolution urban inundation models. *Adv Water Resour*, 2012, 41: 1–17
- 62 Abdullah A, Vojinovic Z, Price R, et al. Improved methodology for processing raw LiDAR data to support urban flood modeling-accounting for elevated roads and bridges. *J Hydroinform*, 2012, 14: 253–269
- 63 Zhu Z L. Three dimensional scene simulation of rainstorm flood in ponding areas of Zhengzhou urban roads based on WebGL (in Chinese). Dissertation for Master Degree. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2016 [朱祖乐. 基于 WebGL 的郑州市区积水路段暴雨洪水三维场景模拟. 硕士学位论文. 郑州: 郑州大学, 2016]
- 64 Jing C L, Li H C, Hu S Y, et al. Methodology of DEM generation with SAR imagery and its accuracy analysis (in Chinese). *Sci Surv Mapp*, 2010, 35: 170–172 [荆创利, 李何超, 胡绍永, 等. 使用 SAR 影像生成 DEM 的精度分析. *测绘科学*, 2010, 35: 170–172]
- 65 Zhang B, Wang C, Zhang H, et al. A review on building extraction and reconstruction from SAR Image (in Chinese). *Remote Sens Technol Appl*, 2012, 27: 496–503 [张波, 王超, 张红, 等. SAR 影像建筑物提取与高度反演研究综述. *遥感技术与应用*, 2012, 27: 496–503]
- 66 Li A F, Zeng Z X, Wu X M. The analysis of the development of oblique photography technique in China (in Chinese). *Geomatics Spat Inform Technol*, 2014, 37: 57–59 [李安福, 曾政祥, 吴晓明. 浅析国内倾斜摄影技术的发展. *测绘与空间地理信息*, 2014, 37: 57–59]
- 67 Yang G D, Wang M S. The tilt photographic measurement technique and expectation (in Chinese). *Geomatics Spat Inform Technol*, 2016, 39: 13–15 [杨国东, 王民水. 倾斜摄影测量技术应用及展望. *测绘与空间地理信息*, 2016, 39: 13–15]
- 68 Jiang F X. Extracting urban land use information based on hyperspectral remote sensing data (in Chinese). Dissertation for Doctoral Degree. Hangzhou: Zhejiang University, 2012 [姜方鑫. 基于高光谱遥感的城市用地信息提取研究. 博士学位论文. 杭州: 浙江大学, 2012]
- 69 Dong Y F, Pang Y, Xu L N, et al. Feature extraction based on fusion of hyperspectral image and airborne LiDAR data (in Chinese). *Remote Sens Inform*, 2014, 29: 73–76 [董彦芳, 庞勇, 许丽娜, 等. 高光谱遥感影像与机载 LiDAR 数据融合的地物提取方法研究. *遥感信息*, 2014, 29: 73–76]

- 70 Ma Y W. Research on hyperspectral remote sensing image fusion and quality evaluation method (in Chinese). Dissertation for Master Degree. Zhengzhou: The PLA Information Engineering University, 2010 [马一薇. 高光谱遥感图像融合技术与质量评价方法研究. 硕士学位论文. 郑州: 解放军信息工程大学, 2010]
- 71 Man W, Chen S J. Research on high spatial and high spectral resolution remote sensing image fusion (in Chinese). *Surv Mapp*, 2010, 33: 243–246 [满旺, 陈绍杰. 高空间分辨率与高光谱分辨率遥感数据融合研究. *测绘*, 2010, 33: 243–246]
- 72 Dong G J. Research on fusion algorithms of hyperspectral and high resolution remote sensing data (in Chinese). Dissertation for Master Degree. Zhengzhou: The PLA Information Engineering University, 2004 [董广军. 高光谱与高空间分辨率遥感信息融合技术研究. 硕士学位论文. 郑州: 解放军信息工程大学, 2004]
- 73 Hou J M, Wang R, Li G D, et al. High-performance numerical model for high-resolution urban rainfall-runoff based on dynamic wave method (in Chinese). *J Hydroelec Eng*, 2018, 37: 40–49 [侯精明, 王润, 李国栋, 等. 基于动力波法的高效高分辨率城市雨洪过程数值模型. *水力发电学报*, 2018, 37: 40–49]
- 74 Zhao Z Z, Zhang Y J. Building extraction from airborne laser point cloud using NDVI constrained watershed algorithm (in Chinese). *Acta Opt Sin*, 2016, 36: 495–503 [赵宗泽, 张永军. 基于植被指数限制分水岭算法的机载激光点云建筑物提取. *光学学报*, 2016, 36: 495–503]
- 75 Cheng X J, Cheng X L, Hu M J, et al. Buildings detection and contour extraction by the fusion of aerial images and LIDAR point cloud (in Chinese). *Chin J Lasers*, 2016, 43: 247–255 [程效军, 程小龙, 胡敏捷, 等. 融合航空影像和 LIDAR 点云的建筑物探测及轮廓提取. *中国激光*, 2016, 43: 247–255]
- 76 Zohidov B, Andrieu H, Servires M, et al. Retrieval of rainfall fields in urban areas using attenuation measurements from mobile phone networks: A modeling feasibility study. *Hydrol Earth Syst Sci Dis*, 2016, 1–30
- 77 Zohidov B, Andrieu H, Servièrès M, et al. Rainfall retrieval in urban areas using commercial microwave links from mobile networks: A modelling feasibility study. *EGU General Assembly Conference Abstracts*. 2014, 16
- 78 Lin T, Liu X, Song J, et al. Urban waterlogging risk assessment based on internet open data: A case study in China. *Habitat Int*, 2018, 71: 88–96
- 79 Xu G H, Liu Q H, Chen L F, et al. Remote sensing for China's sustainable development: Opportunities and challenges (in Chinese). *J Remote Sens*, 2016, 20: 679–688 [徐冠华, 柳钦火, 陈良富, 等. 遥感与中国可持续发展: 机遇和挑战. *遥感学报*, 2016, 20: 679–688]
- 80 Li D R, Zhang L P, Xia G S. Automatic analysis and mining of remote sensing big data (in Chinese). *Acta Geodaet Cartogr Sin*, 2014, 43: 1211–1216 [李德仁, 张良培, 夏桂松. 遥感大数据自动分析与数据挖掘. *测绘学报*, 2014, 43: 1211–1216]
- 81 Milanesi L, Pilotti M, Bacchi B. Using web-based observations to identify thresholds of a person's stability in a flow. *Water Resour Res*, 2016, 52: 7793–7805
- 82 Li D R, Ma J, Shao Z F. The application of spatial temporal big data (in Chinese). *Satell Appl*, 2015, (9): 7–11 [李德仁, 马军, 邵振峰. 论时空大数据及其应用. *卫星应用*, 2015, (9): 7–11]
- 83 Liu J Z, Zhu A X, Qin C Z, et al. Review on parallel computing of distributed hydrological models (in Chinese). *Prog Geogr*, 2013, 32: 538–547 [刘军志, 朱阿兴, 秦承志, 等. 分布式水文模型的并行计算研究进展. *地理科学进展*, 2013, 32: 538–547]
- 84 Xu D, Xu B, Payet D, et al. Numerical simulation of shallow water motion based on parallel computation using GPU (in Chinese). *Chin J Comput Mech*, 2016, 33: 113–120 [许栋, 徐彬, Payet D, 等. 基于 GPU 并行计算的浅水波运动数值模拟. *计算力学学报*, 2016, 33: 113–120]

Summary for “遥感技术在城市洪涝模拟中的应用进展”

Review on applications of remote sensing in urban flood modeling

Zongxue Xu^{1,2*}, Tao Cheng^{1,2*}, Siyang Hong^{1,2} & Linxia Wang³

¹ College of Water Sciences, Beijing Normal University, Beijing 100875, China;

² Beijing Key Laboratory of Urban Hydrological Cycle and Spongy City Technology, Beijing 100875, China;

³ Jinan Hydrology Bureau, Jinan 250014, China

* Corresponding authors, E-mail: zxxu@bnu.edu.cn; tao_cheng@mail.bnu.edu.cn

Urban flooding is serious in China. More than 360 cities have suffered rainstorm floods from 2007 to 2013. Floods in Beijing, Guangzhou, Jinan, et al. have caused serious casualties. In recent years, sea-views in cities have repeated here and there, and rainstorm induced flood has gradually become a chronic illness in many large and medium-sized cities in China. Simulation model for floods is a key technology for urban flood control and land use planning, and play a crucial role in the construction of urban water conservancy projects and infrastructures such as urban drainage system and sponge city. With the continuous and rapid development of the economics and society, urban flood risk warning and management requires a higher demand on the efficiency and elaboration of flood simulation. Obviously, the degree of elaboration on flood simulation highly depends on the temporal and spatial resolution of the basic input data. Rainfall data with smaller time intervals will present more comprehensive rainfall characteristics and further reflect the characteristics of flood processes. Meanwhile, higher resolution terrain data can reflect subtle ground features of urban surface such as buildings, curbs, bridges, etc. By summarizing and analyzing the literature on the researches of hydrological modeling with the utilization of remote sensing data, the application of remote sensing data (including meteorological and hydrological data, and surface information based on remote sensing) in flood simulation is reviewed. Frequently used remote sensing data sources with relatively high precision such as LiDAR (light imaging, detection, and ranging), InSAR (interferometric synthetic aperture radar), oblique photography and hyperspectral remote sensing as well as their applications are presented. Advanced technologies and methods (airborne LiDAR and UAV Oblique Photography) producing basic remote sensing information used in urban flood modeling are presented. Finally, an example is given to illustrate the extraction framework of the basic information of urban flood simulation based on remote sensing, and the prospect to apply remote sensing technology in urban flood simulation is also presented. It is pointed out that flood simulation will be more effective and refined with the support of massive multi-source data in the future. At the same time, rich data sources also bring the following challenges and opportunities: (1) Rapidly increasing amount of high-resolution remote sensing data poses greater challenges to data storage and management, while high-performance distributed storage technologies and data processing technologies can provide solutions for this objective. (2) Massive data and the relatively low processing and utilization capacity will cause a huge waste of resources. Based on data analysis methods such as machine learning and data assimilation, massive multi-source data will be integrated to form a comprehensive database for urban flood modeling, which can provide scientific and technological support for modern urban construction and management. (3) Urban flood simulation with high resolution is extremely computational intensive that the time consumption will exponentially increase. However, this is unacceptable for rapid and efficient urban flood forecasting and early warning. High-performance computing technology such as GPU-based parallelization on CUDA platform will greatly benefit for urban flood simulation.

remote sensing, urban flood modeling, hydrometeorology data, ground information, basic data

doi: 10.1360/N972018-00239