

# 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

宋晓猛<sup>1,2</sup>, 张建云<sup>1,2</sup>, 王国庆<sup>1,2</sup>, 贺瑞敏<sup>1,2</sup>, 王小军<sup>1,2</sup>

(1. 南京水利科学研究院水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 江苏 南京 210029;

2. 水利部应对气候变化研究中心, 江苏 南京 210029)

**摘要:** 全球气候变化和快速城市化改变了城市水循环过程, 加剧了城市暴雨洪涝问题。从城市雨洪模型构建的角度, 回顾了降雨观测与预报技术、城市雨洪产汇流计算方法以及城市雨洪模型的发展历程, 总结了各种技术的特点、适用性和局限性, 指出城市雨洪模型在机理认识和数据管理方面的不足, 提出了城市雨洪模型的概念性框架与基本流程。从雨洪资源化的角度, 介绍了城市雨洪管理基本理念和策略, 分析了城市雨洪管理的主要技术方案。阐明了城市雨洪模拟与管理的发展趋势及前景, 未来应该强化高精度降雨观测和临近定量降雨预报能力, 探索城市化流域的产汇流机理和响应机制, 开发有效的城市雨洪模型系统, 发展多源信息耦合技术, 开展城市雨洪模拟预报及资源化利用研究, 实现城市可持续发展以及保障城市水安全。

**关键词:** 城市水文学; 定量降雨预报; 城市洪水; 城市雨洪管理; 水安全

**中图分类号:** TV124; TU992      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1001-6791(2014)05-0752-13

近年来, 全球气候变化和强烈的人类活动使得全球水安全问题日益凸显, 人类社会正面临着越来越严重的水资源短缺、水环境污染、洪涝和干旱灾害等<sup>[1]</sup>。由于城市化作为人类社会发展的一个重要标志<sup>[2]</sup>, 城市区域的水安全问题更加突出, 引起社会各界的广泛关注<sup>[3-4]</sup>。然而城市基础设施建设与城市自身发展不协调, 导致城市自然灾害风险和损失持续攀升, 加之全球气候变化的不利影响, 加剧了城市自然灾害发生的频次、风险及损失, 尤其是城市暴雨洪涝问题特别显著<sup>[5]</sup>。近年来, 城市暴雨洪涝灾害频发, 如2013年1月印度尼西亚首都雅加达地区, 6月加拿大西部地区、印度北部地区、中欧地区, 7月中国西南地区, 8月阿富汗和巴基斯坦部分地区以及印度尼西亚, 9月美国西南部地区(科罗拉多州和新墨西哥州), 10月中国长三角沿海地区等。因此, 如何应对和管理城市暴雨洪涝灾害风险成为当前迫切需要解决的问题<sup>[6-8]</sup>, 有效开展城市暴雨洪水预警预报和综合雨洪管理研究成为城市水文学研究的前沿课题。目前国内外在降雨观测与模拟, 城市暴雨洪水模拟与预报预警以及城市雨洪利用及综合管理方面取得了一系列成果, 本文对此进行介绍和评述, 并指出变化环境下城市雨洪模拟和管理方面研究的挑战, 展望未来的主要研究趋势。

## 1 降雨观测与预报

众所周知, 降雨是水循环过程的关键因素之一, 是水文模型研究的基础资料和水文计算与预报最重要的输入项, 也是陆面水文过程的主要输入驱动。因此, 高精度的降雨时空分布观测与预报是城市雨洪模拟及预警预报研究的基础和先决条件。一般而言, 持续性降雨或短历时高强度降雨是城市雨洪内涝的主要驱动因子, 加之城市化流域汇流面积相对较小(一般数百到数千平方公里), 汇流时间相对较短(几小时甚至几十分

**收稿日期:** 2014-01-14; **网络出版时间:** 2014-08-06

**网络出版地址:** <http://www.cnki.net/kcms/detail/32.1309.P.20140806.0837.012.html>

**基金项目:** 国家重点基础研究发展计划(973计划)资助项目(2010CB951103); 南京水利科学研究院研究生学位论文基金项目(LB51302)

**作者简介:** 宋晓猛(1987—), 男, 江苏徐州人, 博士研究生, 主要从事水文水资源方面研究。

**E-mail:** xmsong@nhri.cn

钟)。因此,城市雨洪模拟对降雨资料的要求较高,即需要更精细的时间和空间分辨率以充分表现降雨的时空变异特征,如时间尺度往往从数分钟到数十分钟不等,空间尺度则为数百米到数千米之间<sup>[9]</sup>。然而,由于降雨过程的高度时空变异性以及城市区域站点分布和观测范围的限制,尚不能满足城市洪水预报的资料需求,即城市降雨观测及预报已成为城市雨洪模拟与预警预报的主要瓶颈<sup>[10]</sup>。

### 1.1 降雨观测

目前降雨观测的手段很多,主要包括地面站点观测、卫星遥感和天气雷达估测等。这3种方法的最大差别在于站点观测主要基于地面某一点记录,而天气雷达和卫星系统则从侧面或上部遥测降雨。地面观测雨量直接以空间均值用于洪水计算,而天气雷达和卫星观测数据需要通过特定处理算法计算地面降雨量。这3种方法各有优点及不足,在具体应用中往往相互补充与佐证<sup>[11]</sup>。

为提高降雨观测精度,最初是通过增加地面观测站点以及调整站网布局等手段来解决观测的局限性。国内外开展了诸多研究探讨降雨站点密度的最佳配置问题,如 Berne 等<sup>[12]</sup>和 Einfalt 等<sup>[13]</sup>建议城市流域径流模拟研究需要的时间和空间分辨率分别为1~5 min和1~3 km<sup>2</sup>;而 Schilling<sup>[14]</sup>指出城市水文学者对于降雨资料的需求(如时间序列>20年,时间分辨率1 min,空间分辨率1 km<sup>2</sup>,雨量精度误差<3%等)属于理想主义追求,但其同时强调气象雷达的发展与推广将有助于提高降雨观测技术,也必将成为降雨观测的主要手段。此外,诸多研究结果证实传统的站点观测(如倾斗式雨量计和称重式雨量计)存在各种误差<sup>[15]</sup>,特别在降雨时空变异性<sup>[16]</sup>以及单个站点代表性方面<sup>[10,14]</sup>。随着英国天气雷达网、美国下一代天气雷达系统(NEXRAD)、欧盟高级天气雷达网联合研究计划(COST75)及其他发达国家新一代雷达网的建设,雷达降雨观测技术得到了长足发展,如英国水文所开发了河流预报系统(RFFS)和水文雷达系统(HYRAD)组成实时降雨和洪水预报系统;美国开展了水文降雨分析项目(HRAP),将雷达降雨用于水文预报全面业务化等;中国也于2000年开始建设新一代天气雷达网,以提高天气预报精度和增强洪涝灾害监测预报能力。雷达降雨观测的发展为城市水文学研究提供了重要支撑,进一步增强了城市雨洪模拟及预报能力<sup>[17-18]</sup>。如 Berne 等<sup>[12]</sup>分析了雷达测雨与站点观测降雨的时空变异特征,指出雷达测雨更能描述降雨时空变异特征;中国在淮河和黄河流域重点防洪地段开展雷达测雨与洪水预报应用研究<sup>[19]</sup>。因此,雷达测雨可以提供更多不同时空尺度的降雨特征,为城市水文学研究提供更多支撑<sup>[16]</sup>。但由于雷达数据存在更复杂的误差特征<sup>[14]</sup>以及监测网络不健全等问题,使得雷达测雨在城市水文学中的应用并不广泛<sup>[17,19]</sup>。为此,又发展了新的探测方法和资料处理技术,如微波中继器更适合于城市区域的水文应用以及更高频率的观测要求<sup>[20-22]</sup>。虽然以 TRMM(Tropical Rainfall Measuring Mission)为代表的卫星降雨产品数据在大尺度流域水文模拟及预报方面开展了诸多应用<sup>[23]</sup>,但在城市水文学上的应用尚不多见。总之,以雷达测雨技术为代表的新型观测手段取得了诸多进展为城市水文学研究及城市雨洪模拟与预报提供了重要支撑<sup>[14]</sup>。因此,加强地面站点观测、天气雷达测雨和卫星遥感测雨等多源信息融合分析和应用,推动城市水文学及城市雨洪预报研究,提高水文预报精度和增长预报预见期,进一步完善和发展预警预报技术是未来城市水文学发展的一个重要方面<sup>[24-25]</sup>。

### 1.2 降雨预报

精确地降雨预报是突发性洪水预报的关键因素,如城市区域短历时、强降雨的定量预报(Quantitative Precipitation Forecasts, QPF)是城市暴雨洪水预报预警的重要前提<sup>[26]</sup>。目前国际上已经发展了许多先进的QPF系统,融合了地面中尺度观测资料、探空资料、闪电资料、风廓线资料、雷达数据以及中尺度数值天气预报等以提高预报的时空精度<sup>[27]</sup>。随着观测和预报技术的不断发展,数值模式时空分辨率的不断提高以及模式物理过程的不断改进,QPF的时空分辨率、预报时效及精度有了很大提高;以集合预报为基础的概率QPF和即时QPF预报技术以及数值模式实施检验与订正技术的发展,支撑着极端强降雨灾害预警预报研究,为应对突发灾害性天气提供了有力支撑<sup>[28]</sup>。QPF技术包含很多,如线性回归、分位数回归法、Logistic回归法、基于先验气候分布的层次模型、耦合气象雷达和数值天气模式结果的集成方法、人工神经网络以及基于贝叶斯的统计方法等。虽然这些方法在城市水文学中的应用日益增多<sup>[9,29-31]</sup>,特别是降雨集成预报技术以及多源信息耦合分析等<sup>[31-32]</sup>,但QPF预报精细化及准确率离应用的需求仍有差距,尚缺乏系统的综合研究<sup>[9]</sup>,

如评价各种方法的优缺点及适用性和预报结果的不确定性等。因此,需要水文学者与气象学者开展密切合作,集合城市水文学和气象学的知识开发适应城市水文研究尺度的预报方法,为城市雨洪预警预报研究提供基础。

## 2 城市雨洪模拟技术

城市雨洪模型在城市雨洪管理、防洪排涝、雨洪利用和水污染控制等方面发挥了重要作用。城市的产汇流机制远比天然流域复杂,且城市排水系统内具有多种水流状态,包括重力流、压力流、环流、回水、倒流和地面积水等<sup>[33]</sup>。需要采用水文学和水力学相结合的途径,充分利用数值模拟技术,研制能够模拟复杂流态的城市排水系统的数学模型。根据预报的降雨过程,利用研制的模型模拟和预测城市地面的积水过程,以满足城市防汛减灾工作对水情和涝情预测计算的要求。

### 2.1 城市雨洪产汇流计算

城市雨洪产汇流计算是城市雨洪模拟的关键和基础,主要包括城市雨洪产流计算、城市雨洪地表汇流计算和城市雨洪管网水流计算<sup>[4,34]</sup>,如表 1 所示。城市地表覆盖分布不均,不透水面与透水面之间错综复杂的空间分布,加之对城市地区复杂下垫面产流规律认识不足和资料短缺导致城市雨洪产流计算精度偏低。目前多采用一些简单的经验性公式或数据统计分析拟合公式。虽说国内外展开了诸多试验和应用研究探讨城市下

表 1 城市雨洪产汇流计算方法汇总

Table 1 Summary of methods for urban stormwater runoff calculation

计算方法	主要特点		
产流计算	SCS 方法	以一个反映流域综合特征的参数 CN 计算降雨径流关系,结构简单,资料需求少,应用较广	
	统计分析法	降雨径流相关法	建立径流与降雨量、不透水面积、降雨强度等因素的相关关系,可靠性偏低
	下渗曲线法	径流系数法	依据不同地表类型的降雨径流系数结合降雨强度计算降雨损耗,应用广泛,精度较高
		$\Phi$ 指数法	通过给定 $\Phi$ 指数判断降雨强度与指数关系分析径流量,属于下渗现象的概化描述
		下渗公式	由透水地面的下渗公式计算降雨的下渗损失,如 Green-Ampt、Horton 和 Philip 下渗曲线
模型法	概念性降雨径流模型	采用概念性降雨径流关系或统计公式计算透水地面的产流过程,计算相对复杂,要求较高	
地表汇流计算	水动力学方法		基于圣维南方程组模拟地表坡面汇流过程,计算相对复杂耗时,但物理过程明确
	推理公式法		假定降雨径流面积线性增长,径流系数不变,只关注洪峰而不关注流量过程变化
	等流时线法		基于相同的汇流时间计算区域汇流面积,对于城市地面汇流计算划分相对较难
	水文学方法	瞬时单位线法	参数计算复杂,无法非线性化处理,效果较差,资料依赖性较大
线性水库		参数计算相对简单,不考虑过程的非线性特征,效果一般	
管网水流计算	非线性水库		物理概念明确,参数相对简单,计算精度相对较高
	水动力学方法	运动波	计算简单,适用于坡度大、下游回水影响小的管道,理论解没有扩散作用,峰值不会衰减
		扩散波	不适用于各种流态共存的城市环状管网的水流运动,计算精度与动力波相差较小
		动力波	计算精度较高,适用于各种管道坡度和入流条件,考虑峰值在管道中传播的衰减和回水影响,计算复杂,资料要求较高
	水文学方法	马斯京根法	计算相对简便,参数少,应用较广,与水动力学计算方法效果较为接近,资料要求较少
瞬时单位线法		计算简单,参数与雨水管道特性之间的关系规律性较差,调试难度较大	

垫面类型的产流规律<sup>[35-36]</sup>, 但单点尺度或实验室尺度研究与实际状况仍存在较大差距。如城市区域不透水表面的空间分布以及不透水表面的连通性直接影响到城市的产流特征, 如何确定上述因素对城市区域产流规律的影响是今后需要努力的方向。对于城市地表汇流计算, 诸多结果证实水动力学计算模型所需初始和边界条件复杂, 计算繁琐, 在应用方面较为困难<sup>[37-40]</sup>; 而水文学方法计算简单, 但物理机制方面尚不明晰<sup>[34,37]</sup>。如传统推理法可用于城市设计洪峰流量计算, 但不能反映雨洪流量过程; 单位线法对实测资料依赖性较大, 不易于计算流量过程线; 线性水库未考虑非线性特征, 计算结果可靠性不足; 非线性水库和等流时线法相对计算比较简单, 应用方便且精度较高。针对两类方法的局限性, 迫切需要开展城市水文-水动力耦合模型研究<sup>[41]</sup>, 综合考虑水文学方法的简便快捷以及水动力学方法的准确性, 建立适合城市区域的地表汇流计算方法, 提高城市地表汇流计算精度<sup>[4]</sup>。然而现有的研究并未给出一种合适或理想的紧密耦合方式以解决上述问题, 需要经过长期深入的研究以求较好的途径完成上述目标。城市雨水管网汇流计算方面则相对成熟, 包括简单的水文学方法和复杂的水动力学方法。根据已有研究成果分析, 若精度要求较高, 资料条件好, 可采用动力波或扩散波进行模拟计算, 反之则可采用马斯京根法进行计算<sup>[34,38,42]</sup>。

## 2.2 城市雨洪模型

20 世纪 60 年代起, 计算机模型开始广泛用于流域水文模拟, 至今已经发展了上百种流域水文模型<sup>[43]</sup>。而城市雨洪模型则主要起步于 20 世纪 70 年代, 最初由部分政府机构(如美国环保署)组织开展模型研发工作, 目前已经发展了多种城市雨洪模型, 如表 2 所示, 由简单的概念性模型到复杂的水动力学模型, 由统计模型到确定性模型<sup>[44]</sup>。一般而言, 模型都包括降雨径流模块、地表汇流模块和地下管网模块等。

表 2 主要城市雨洪模型总结  
Table 2 Summary of urban storm water models

模型名称	开发者	主要计算方法			主要特点
		产流计算	地表汇流	管网汇流	
SWMM	美国环保署 EPA	下渗曲线法和 SCS 方法	非线性水库	恒定流、运动波和动力波	动态降雨径流模型, 适用水量水质模拟, 主要分透水地面、有滞蓄和无滞蓄的不透水地面 3 个部分, 应用广泛
STORM	美国陆军工程兵团 HEC	SCS 方法, 降雨损失法	单位线法	水文学方法	城市合流制排水区的暴雨径流模型, 分为透水和不透水区模拟降雨径流及水质变化过程, 可模拟排水管网溢流问题
ILLUDAS	伊利诺斯州	降雨损失法	时间-面积曲线	线性运动波	为 TRRL 模型的改进版本, 可以考虑渗水地区地表径流
ISS	伊利诺斯州	-	-	圣维南方程	主要用于雨水管道系统模拟
IUHM <sup>[45]</sup>	Cantone 和 Schmidt	Green-Ampt 下渗公式	地貌瞬时单位线	水动力学法	通过集合地貌瞬时单位线方法, 分析高度城市化区域水文响应关系, 适用于资料不足地区的水文过程模拟
DR3M-QUAL	美国地质调查局 USGS	Green-Ampt 下渗公式	运动波	运动波	分为地面流、河道、管网和水库单元, 可分析城市区域降雨、径流和水质变化过程, 对下垫面地形和市政排水管网资料要求较多
UCURM	美国辛辛那提大学	Horton 下渗公式	水文学方法	水文学方法	将流域概化为不透水区和透水区两部分, 主要由入渗和洼地蓄水、地表径流、边沟流和管道演算 5 个子模块
RisUrSim <sup>[39]</sup>	德国凯撒斯劳滕工业大学	标准的降雨径流换算法	二维浅水水流运动方程	动力波方法	主要用于城市排水系统模拟、设计与管理, 包括降雨径流模块、水文学地面汇流模块、水力学地面汇流模块和动力管道演算模块
Wallingford	英国 Wallingford 水力学研究所	修正推理公式	非线性水库、蓄泄演算、SWMM 径流计算模块	马斯京根和隐式差分求解浅水方程	包括降雨径流模块、简单管道演算模块、动力波管道演算模块和水质模拟模块, 可用于暴雨系统、污水系统或雨污合流系统设计及实时模拟, 分为铺砌表面、屋顶和透水区 3 个部分

续表 2

模型名称	开发者	主要计算方法			主要特点
		产流计算	地表汇流	管网汇流	
TRRL	英国公路研究所	降雨损失法	时间-面积曲线法和线性水库	线性运动波	可连续或单次模拟城市区域的降雨径流过程,仅考虑不透水区域与管道系统连接的部分产流,洪峰和径流量可能偏低
MIKE-SWMM	丹麦水力学研究所 DHI	下渗曲线法和 SCS 方法	非线性水库	隐式差分一维非恒定流	主要是 MIKE11 模型代替了 SWMM 中的 EXTRAN 模块,比 SWMM 适应范围更广、更稳定,与 DHI 其他模型相兼容
MIKE Urban 或 MOUSE	丹麦水力学研究所 DHI	降雨入渗法	运动波,单位线,线性水库	动力波,扩散波,运动波	包括管道流模块,降雨入渗模块,实时控制模块,管道设计模块,沉积物传输模块,对流弥散模块和水质模块,用途相对广泛
InfoWorks CS <sup>[46]</sup>	英国 Wallingford 软件公司	固定比例径流模型,SCS 曲线,下渗曲线	双线性水库,SWMM 径流计算模块	圣维南方程	主要采用分布式模型模拟降雨径流过程,基于子集水区划分和不同产流特性的表面组成进行径流计算
SSCM <sup>[47]</sup>	岑国平	Horton 下渗曲线	运动波和变动面积-时间曲线法	扩散波	不透水区产流计算中注蓄量当做一个随累积雨量变化而变化的参数,透水区产流采用 Horton 公式,地表汇流采用运动波法和变动面积-时间曲线法,管道采用扩散波演算
CSYJM <sup>[48]</sup>	周玉文和赵洪宾	降雨损失法	瞬时单位线	运动波	主要用作设计、模拟和排水管网工况分析
UFDSM <sup>[49]</sup>	解以扬等	概念性降雨径流关系	水动力学方法	二维非恒定流方程	以城市地表与明渠、河道水流运动为主要模拟对象,以水力学模型为基础,引入“明窄缝”的概念,地表概化为不规则网格结构
平原城市雨洪模型 <sup>[50]</sup>	徐向阳	降雨损失和 Horton 下渗	非线性水库法	运动波	分为透水区和不透水区,地表汇流采用非线性水库,管道汇流采用运动波方程,河网汇流采用一维圣维南方程组进行演算
城市雨洪水动力耦合模型 <sup>[51]</sup>	耿艳芬	降雨损失和经验公式法	二维水动力和一维河网耦合模型	一维圣维南方程	一维和二维耦合模型,既可以模拟地面河道与集水区之间的水量交换,也可以模拟地面径流和地下管网之间的水量交换

纵观城市雨洪模型的发展,模型大致可以分成以下 3 类<sup>[52]</sup>: ① 将水文学方法和水力学方法相结合,分别用于模拟城市地面产汇流过程及雨水在排水管网中的运动,该方法基本单元是水文概念上的集水区域,所以其计算结果仅能反映计算范围内关键位置或断面的洪涝过程; ② 采用一、二维水动力学模型模拟城市内洪水的演进过程,该方法可以充分考虑城市地形和建筑物的分布特点,较好地模拟城区洪水的物理运动过程,并可详细提供洪水演进过程中各水力要素的变化情况; ③ 利用 GIS 的数字地形技术分析洪水的扩散范围、流动路径,从而确定积水区域,该方法以水体由高向低运动的原理作为计算的基本依据,所提供计算结果仅能反映城市洪水运动的最后状态,不能详细描述洪水的运动过程。对比国内外城市雨洪模型的特点可知: 在性能方面,国内自主开发的软件功能相对比较单一,主要围绕某个特定问题展开,而国外模型相对成熟且功能较强,集合水量水质模拟及排水防洪规划等多方面内容; 在通用性方面,国内则突出重点地区的应用研发,通用性较差,国外模型则广泛用于城市排水设计、规划和管理等诸多工作,形成了一系列商业性软件或工具,为成果推广应用提供可能<sup>[4]</sup>。城市雨洪模型发展至今已经形成了较为完善的概念框架和流程,如图 1 所示。总体上,城市雨洪模型框架主要包括数据收集与处理模块、城市雨洪计算分析模块和成果输出与综合可视化模块三大类,主要流程包括: ① 确定模型总体结构,一般含输入输出、模型运算和服务模块等; ② 确定模型微观结构,如降雨径流模块的计算结构、管网系统模块的计算组成以及各模块的耦合问题等; ③ 整理数据,结合模型结构,确定数据集或建立相适应的数据库; ④ 确定模型参数及边界条件,进行参数率定和验证; ⑤ 成果输出与展示,结合 GIS 空间分析处理功能,耦合城市雨洪模型,实现成果可视化展示。

### 2.3 模型参数优化与不确定性分析

模型参数优化与不确定性分析是数学模型应用的关键环节。模型的不确定性可能来源于模型结构、模型输入数据以及模型参数<sup>[53]</sup>,如图 2 所示。特别是城市雨洪模型,由于模型结构相对于流域水文模型更为复

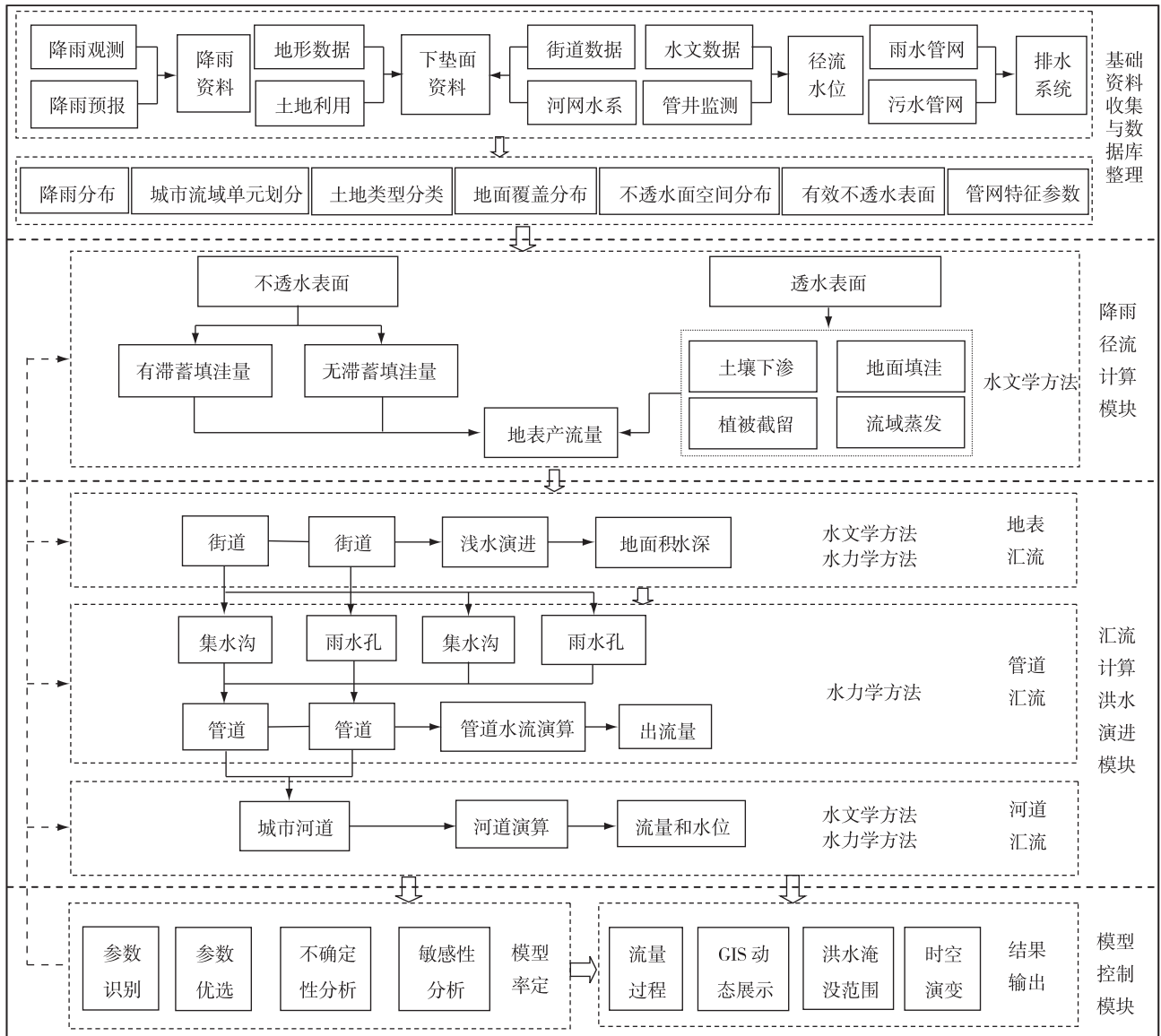


图 1 城市雨洪模拟的概念框架和基本流程

Fig. 1 Conceptual framework and flowchart for urban storm water modeling

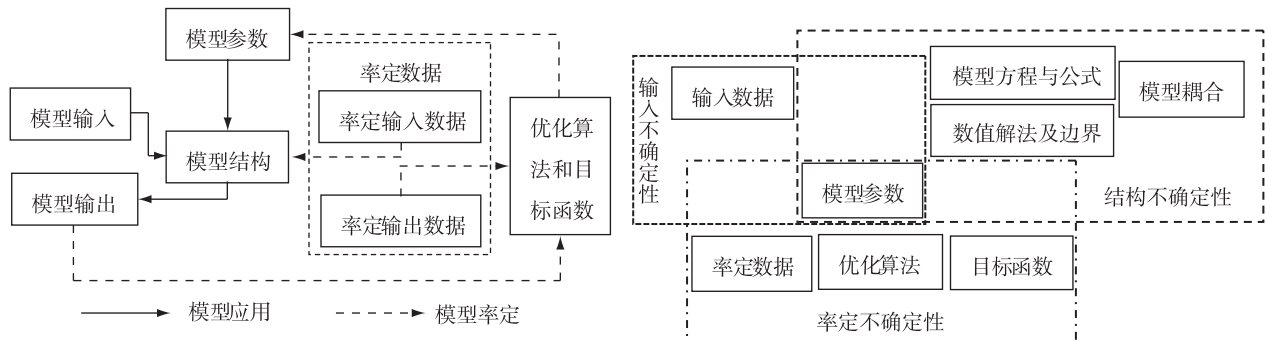


图 2 模型优化流程与不确定性来源

Fig. 2 Calibration flowchart and key sources of uncertainties in urban drainage models

杂,且资料的缺失或不全可能导致输入的不确定性,以及参数众多带来的参数不确定性问题,这些都成为城市雨洪模型应用过程中的主要难题之一。因此,模型率定、敏感性和不确定性分析是评估模型结果精度和可靠性的关键<sup>[9]</sup>。目前,重点针对模型参数问题已经开展了诸多研究,如Barco等<sup>[54]</sup>针对SWMM模型进行自动优化,Dotto等<sup>[55]</sup>评估了MUSIC模型的参数敏感性,Thorndahl等<sup>[56]</sup>探讨了MOUSE模型的参数优化及不确定性问题,Khu等<sup>[57]</sup>分析了不同优化方法在BEMUS模型中的应用,Deletic等<sup>[58]</sup>提出了全局不确定性评估框架,应用在水量水质耦合模型中。尽管在不确定性方面取得了一些共识,如图2所示,但在理论和实践方面仍存在诸多挑战和困难。随着城市水循环理论的不完善,城市雨洪模型计算模块逐渐增多,数据资料需求难度增大,加之气候变化等外界因素干扰,致使模型复杂度急剧增加,不确定性问题更加凸显<sup>[59]</sup>。因此,如何综合处理上述不确定性问题将成为今后模型研究和应用推广的一个重点方向。

### 3 城市雨洪管理与利用

雨水作为城市水循环系统中的重要环节,对调节地区水资源和改善生态环境极为关键。诸多研究证实城市雨洪管理是解决城市防洪排涝、减缓水污染、缓解水资源短缺和构建人水和谐城市景观的有效途径<sup>[1,60]</sup>,然而不合理的城市发展与规划致使严重的城市水资源短缺和雨洪灾害问题。因此,如何有效开展城市雨洪管理与利用成为城市水文学研究的热点话题<sup>[61]</sup>。在过去的几十年中,欧美部分发达国家已形成了较为完善的城市雨洪管理体系,如美国通过最佳管理措施(BMP)和低影响开发(LID)的应用大幅度削减了城市面源污染,英国利用可持续排水系统(SUDS)大大改善了城市水生态环境,澳大利亚实施的水敏感型城市设计(WSUD)也极大地缓减了城市供水紧张等问题<sup>[3]</sup>。近年来,为综合应对未来城市发展挑战,坚持可持续发展的原则,中国也尝试开展城市雨洪管理体系研究与探索,如“十一五”期间北京和上海等特大城市率先开展城市雨水资源化利用研究与试点。虽然在一定程度上取得了良好效果,但尚未形成体系,缺乏综合有效的管理技术、相关法规及政策支持。因此,鉴于中国城市化发展现状及水资源安全问题,国内城市雨洪管理研究面临着重要的机遇及挑战,应结合实施的最严格水资源管理制度和水生态文明建设等相关政策,深入探讨中国城市雨水综合利用与管理技术,为建设生态文明城市及保障城市水安全提供技术支撑。

#### 3.1 城市雨洪管理目标

一般认为城市雨洪管理可分为水量管理、水质管理、水生态管理和可持续管理,如图3所示。从国外城市雨洪利用与管理体系分析,城市雨洪管理体系经历了传统排水管理体系和生态排水管理体系两个阶段。传统排水管理体系以管道快排快放,保障城镇和住区洪涝安全为主;生态排水管理体系则主要以生态收集与处理的技术措施为主,同时考虑雨水的资源化和降雨径流污染控制。Fletcher等<sup>[9]</sup>总结了城市雨水管理的主要目标为:①以可持续的方式管理控制城市水循环过程;②尽可能地维持天然状态下的径流体制;③保护和

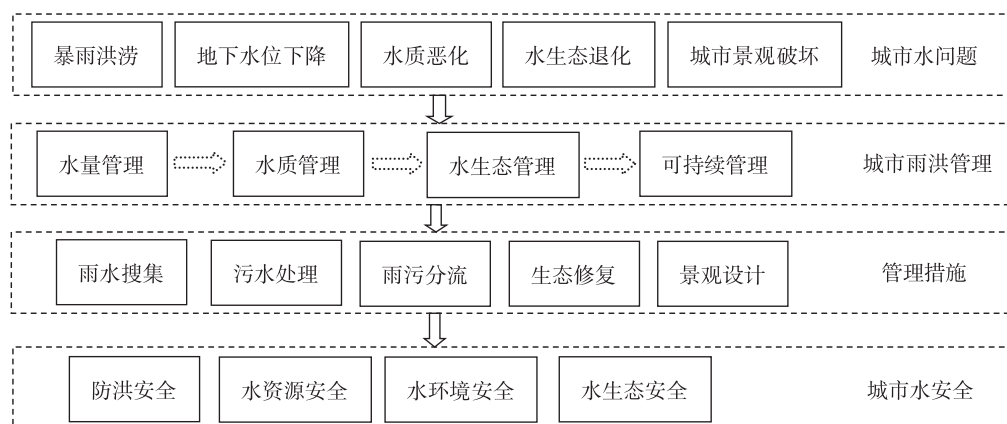


图3 城市雨水管理的基本原则与目标

Fig. 3 Principles and objectives for urban stormwater management

修复水质环境;④保护和修复水体生态系统;⑤雨水资源化利用;⑥强化城市景观设计和基础设施建设。结合中国正在开展的城市排水(雨水)防涝综合规划编制工作,国内城市雨洪管理的基本目标主要是雨水径流量控制、雨水污染控制和雨水资源化利用。

### 3.2 城市雨洪管理技术

城市雨洪管理技术主要包括两种:一是建立雨水集蓄利用系统,通过雨水集蓄设备收集雨水经处理后用作杂用水;二是修建雨水地表入渗系统,由入渗池、入渗井、绿地和透水路面等组成的系统进行导渗,使地下水得到补给<sup>[9]</sup>。这些技术方案包括源头控制、中途控制和末端控制三类,其中源头控制是从雨水的源头上控制,如屋顶绿化、雨水花园、透水铺装和雨水收集器等;中途控制则主要围绕溢流污染控制和合流制改造等问题;末端控制包括了河道末端集中储存处理技术、人工湿地、生态堤岸和雨水塘等。总结国外诸多城市雨洪管理技术方案的主要特点,如表3所示。近年来,国内学者也结合现有的城市雨洪管理技术开展试点应用研究,如贾海峰等<sup>[62]</sup>提出了城市降雨径流控制 LID BMPs 规划方法体系,许萍等<sup>[63]</sup>提出了中国低影响开发城市雨洪管理模式的推广策略,潘安君等<sup>[64]</sup>提出了北京市城市雨洪管理的初步构想以实现防洪减灾、雨洪利用和改善环境的三大目标等。虽然国内已开展了诸多有益的尝试,但仍有很多工作需要深入探讨。

表3 主要城市雨洪管理技术总结

Table 3 Summary of main techniques for urban stormwater management

名称	主要特点	应用国家或地区
BMP	从系统的角度出发,以关注水质问题为重点,在降雨径流进入水体前开展流域尺度的控制,主要通过工程性和非工程性措施方法预防或减少城市化发展对不同尺度(流域、街区和场地尺度)的环境造成的负面影响,实现城市雨洪综合管理	北美, 欧洲
LID	雨水管理和可持续发展思想以及精明增长理论相结合的产物,主要在源头采用分散式、小尺度的技术手段管理雨洪径流,重点在微观区域通过在源头采用多种工程和保护措施控制径流污染,实现环境保护和经济的双赢效果	美国, 加拿大, 欧洲, 日本
WSUD	将城市整体水文循环和城市发展和建设过程相结合,旨在减小城市发展对水文环境的负面影响以保护自然水系统,结合雨水处理和景观设计以保护水质和水生态系统,强调雨水的社会价值和资源价值	澳大利亚
SUDS	指导思想是尽可能模仿场地开发之前的自然水文过程,处理雨水径流以清除污染物,不仅关注控制地表径流和污染物,还注重改善社区的居住环境,综合考虑了降低洪水风险、改善水质、回灌地下水、提供生物栖息地和满足社区需要等长期环境和社会影响的因素	英国, 瑞典
LIUDD	来源于 LID,但融合了水资源的三水管理理念,倡导雨水的就地收集、回收和利用	新西兰

因此,在借鉴发达国家先进经验的基础上,结合中国城市降雨特征与城镇化快速发展的特点,逐步改变传统的雨水快排理念,基于经济和生态的角度构建“径流减排—污染控制—积蓄回用—生态处置”等多目标的科学管理系统,实现源头控制、中途控制和末端治理相结合的城市雨洪综合管理体系,需要加强以下工作:①统一以源头管理和生态处置技术为主,最大程度模仿自然的雨水生态排水管理理念;②加强法规和政策研究,从制度和机制上引导和保障雨水生态排水体系的建设和实施;③加快城市雨水排水方式转变,从规划层面构建城市雨水生态处理和可持续循环利用模式;④加大雨水生态收集处理技术和设施的本土化研究力度,通过建立一大批工程的示范效应,推广雨水生态排水方式的应用;⑤重视技术和设施的标准化建设工作,加快推进雨水生态排水技术的规模化应用进程。

## 4 面临的主要挑战及关键问题

综观近年来国内外研究成果,尽管城市雨洪模拟及管理的理论和实践研究已取得了长足的进步,研究方法也不断完善,但仍面临着诸多挑战和困难,特别是全球气候变化和城市化进程的不断加快,使得全球范围城市洪涝灾害问题突出。因此,当前城市雨洪模拟与管理研究还应该加强以下3个方面工作:

(1) 城市暴雨洪水监测与预测预警技术方法 城市暴雨洪水监测与预测预警技术研究是城市雨洪



模拟的关键,也是城市水文学研究的主要难题之一。需要探讨城市水文站网布设与城市排水系统监测网络的规划设计,实现城市暴雨洪水过程全方位多角度监测,并开展多源信息技术集合应用和临近降雨定量预报研究;强化城市雨洪模拟技术和模型方案的系统研究,耦合随机性模型与确定性模型,集合水文学和水动力学方法,结合一维和二维模型,基于理论分析、试验研究和数值模拟技术建立能够模拟城市地区水循环规律和地下垫面变化条件下的产汇流特征以及城市管网水流运动规律的城市雨洪模型,实现地表-地下水耦合以及地面汇流与管网汇流的耦合演进;并系统开展缺资料或无资料信息条件下的城市雨洪模型参数优化与不确定性评估,形成城市雨洪模型集合预报方案,减小模型预测结果的不确定性,提高预报精度及可靠性;耦合地面观测、气象雷达、遥感卫星、地形地貌、排水管网及城市发展等多源信息,基于 GIS 的空间分析和可视化模块,构建城市暴雨洪水监测与预测预警综合系统,为城市防洪减灾和应急应对提供决策依据。

(2) 城市雨洪管理和资源化利用技术 城市雨洪管理是城市水文学研究的一个前沿与热点问题,特别是对于城市化快速发展的发展中国家和地区,正面临着越来越多的城市洪涝灾害和水资源危机,如何有效应对城市洪涝灾害,管理城市雨洪,控制雨水污染、实现资源化利用,成为变化环境下城市雨洪管理的重点。在管理理念上,坚持以可持续性发展、接近自然状态和多功能的雨洪管理理念为基本原则,改变单独的排洪蓄涝模式,形成以防洪减灾、污染控制和预防、水生态系统修复和保护以及城市环境美化与水资源综合利用等多功能管理模式;在技术层面上,加强源头控制技术和预防措施的研究和实践,结合工程性措施和非工程性措施,建立长期监测与评估技术,保证城市雨洪管理技术的有效性和适应性以提高城市雨洪管理水平;在法律政策方面,构建高效的雨水管理体制,制定雨水利用和管理的法律法规和条例,调整城市雨洪协调管理模式,改变“多龙治水,无人负责”的混乱管理局面,实施水务一体化建设,保证可持续的城市雨洪管理技术方案的实施和推广;在应用与规划方面,根据城市总体规划,协调人口、经济、资源和生态环境之间的发展,综合考虑城市自然条件、土地利用、基础设施建设和经济发展水平等因素,建立合适的城市雨洪管理技术方案,以应对变化环境下的城市雨洪问题。

(3) 变化环境下的城市洪涝风险与水安全研究 城市水问题成为影响城市发展的主要瓶颈,如城市水资源短缺、水质污染和洪涝干旱灾害等。此外由于气候变化和城市化快速发展使得城市供水安全、水质安全和防洪安全面临巨大挑战<sup>[65]</sup>,因此,开展变化环境下城市水安全研究是城市水文学关注的焦点。需要结合分布式水文模型、管网水力模型、河道水力学模型的相互响应关系与耦合建立集成模型,建立洪涝灾害损失评估与风险分析模型,并基于风险管理理念开展城市雨洪优化管理与利用;考虑气候变化和城市化发展对城市水安全的影响机制,开展城市水安全的影响驱动因素定量评估分析,明确变化环境下城市水安全问题的主要成因,探讨可持续性城市水安全应对措施;基于洪涝风险和水安全研究,分析建立城市综合水资源管理系统,保证城市水安全和水生态文明建设,促进城市人水和谐发展。

## 5 结论与展望

城市雨洪模拟和管理是城市水文学研究的热点问题,经过几十年的发展,在降雨观测与模拟、城市雨洪模拟技术和城市雨洪管理方面已取得了丰硕的成果,形成了较为完善的模型框架体系和技术管理方案。相较于国外的成熟技术,国内在城市雨洪模拟与管理方面存在许多不足之处,如中国目前尚未建立有效的城市雨洪预警预报系统以及行之有效的城市雨洪管理体系,而且在城市暴雨洪水监测方面存在薄弱环节以及数据缺失可能影响城市雨洪研究的精度及可靠性问题。因此,中国城市雨洪模拟与管理研究仍面临着诸多挑战,在今后的研究中,需要综合利用地面观测、天气雷达及遥感卫星技术,实现城市暴雨洪水过程的监测及定量降雨预报;通过试验分析和数学模型方法探讨城市暴雨洪水过程响应机理,建立有效的城市暴雨洪水过程模拟模型;结合成熟的城市雨洪管理方案,建立适合中国城市发展情况的雨洪管理技术和雨水资源化利用方案,为构建可持续的城市综合水资源管理提供基础。

## 参考文献:

- [1] GRANT S B, SAPHORES J D, FELDMAN D L, et al. Taking the “waste” out of “wastewater” for human water security and ecosystem sustainability [J]. *Science*, 2012, 337(6095): 681-686.
- [2] BLOOM D E, CANNING D, FINK G. Urbanization and the wealth of nations [J]. *Science*, 2008, 319(5864): 772-775.
- [3] 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[J]. *水科学进展*, 2014, 25(4): 594-605. (ZHANG Jianyun, SONG Xiaomeng, WANG Guoqing, et al. Development and challenges of urban hydrology in a changing environment: I: hydrological response to urbanization [J]. *Advances in Water Science*, 2014, 25(4): 594-605. (in Chinese))
- [4] 胡伟贤,何文华,黄国如,等.城市雨洪模拟技术研究进展[J].*水科学进展*,2010,21(1): 137-144. (HU Weixian, HE Wenhua, HUANG Guoru, et al. Review of urban storm water simulation techniques [J]. *Advances in Water Science*, 2010, 21(1): 137-144. (in Chinese))
- [5] 宋晓猛,张建云,占车生,等.气候变化和人类活动对水文循环影响研究进展[J].*水利学报*, 2013, 44(7): 779-790. (SONG Xiaomeng, ZHANG Jianyun, ZHAN Chesheng, et al. Review for impacts of climate change and human activities on water cycle [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2013, 44(7): 779-790. (in Chinese))
- [6] HALLEGATTE S, GREEN C, NICHOLLS R J, et al. Future flood losses in major coastal cities [J]. *Nature Climate Change*, 2013, 3(9): 802-806.
- [7] HIRABAYASHI Y, MAHENDRAN R, KOIRALA S, et al. Global flood risk under climate change [J]. *Nature Climate Change*, 2013, 3(9): 816-821.
- [8] WOODRUFF J D, IRISH J L, CAMARGO S J. Coastal flooding by tropical cyclones and sea-level rise [J]. *Nature*, 2013, 504(7478): 44-52.
- [9] FLETCHER T D, ANDRIEU H, HAMEL P. Understanding, management and modeling of urban hydrology and its consequences for receiving waters: A state of the art [J]. *Advances in Water Resources*, 2013, 51: 261-279.
- [10] NIEMCZYNOWICZ J. Urban hydrology and water management: Present and future challenges [J]. *Urban Water*, 1999, 1: 1-14.
- [11] SENE K. Flash floods: Forecasting and warning [M]. London: Springer, 2013.
- [12] BERNE A, DELRIEU G, CREUTIN J-D, et al. Temporal and spatial resolution of rainfall measurements required for urban hydrology [J]. *Journal of Hydrology*, 2004, 299(3/4): 166-179.
- [13] EINFALT T, ARNBJERG-NIELSEN K, GOLZ C, et al. Towards a roadmap for use of radar rainfall data in urban drainage [J]. *Journal of Hydrology*, 2004, 299(3/4): 186-202.
- [14] SCHILLING W. Rainfall data for urban hydrology: What do we need? [J]. *Atmospheric Research*, 1991, 27: 5-21.
- [15] LANZA R, STAGI L. High resolution performance of catching type rain gauges from the laboratory phase of the WMO Field Inter-comparison of rain intensity gauges [J]. *Atmospheric Research*, 2009, 94: 555-563.
- [16] EMMANUEL I, ANDRIEU H, LEBLOIS E, et al. Temporal and spatial variability of rainfall at the urban hydrological scale [J]. *Journal of Hydrology*, 2012, 430/431: 162-172.
- [17] BERNE A, KRAJEWSKI W F. Radar for hydrology: Unfulfilled promise or unrecognized potential? [J]. *Advances in Water Resources*, 2013, 51: 357-366.
- [18] KRAJEWSKI W F, SMITH J A. Radar hydrology: Rainfall estimation [J]. *Advances in Water Resources*, 2002, 25: 1387-1394.
- [19] 杨扬,张建云,戚建国,等.雷达测雨及其在水文中应用的回顾与展望[J].*水科学进展*, 2000, 11(1): 92-98. (YANG Yang, ZHANG Jianyun, QI Jianguo, et al. Review and prospect on the application of weather radar in hydrology[J]. *Advances in Water Science*, 2000, 11(1): 92-98. (in Chinese))
- [20] UPTON G J G, HOLT A R, CUMMINGS R J, et al. Microwave links: The future for urban rainfall measurement? [J]. *Atmospheric Research*, 2005, 77: 300-312.
- [21] OVEREEM A, LEIJNSE H, UIJLENHOET R. Measuring urban rainfall using microwave links from commercial cellular communication networks [J]. *Water Resources Research*, 2011, 47: W12505.
- [22] FENICIA F, PFISTER L, KAVETSKI D, et al. Microwave links for rainfall estimation in an urban environment: Insights from an experimental setup in Luxembourg-city [J]. *Journal of Hydrology*, 2012, 464/465: 69-78.
- [23] 杨云川,程根伟,范继辉,等.卫星降雨数据在高山峡谷地区的代表性与可靠性[J].*水科学进展*,2013, 24(1): 24-33.

- (YANG Yunchuan, CHENG Genwei, FAN Jihui, et al. Representativeness and reliability of satellite rainfall dataset in alpine and gorge region [J]. *Advances in Water Science*, 2013, 24(1): 24-33. (in Chinese))
- [24] 张建云. 中国水文预报技术发展的回顾与思考 [J]. *水科学进展*, 2010, 21(4): 435-443. (ZHANG Jianyun. Review and reflection on China's hydrological forecasting techniques [J]. *Advances in Water Science*, 2010, 21(4): 435-443. (in Chinese))
- [25] WRIGHT D B, SMITH J A, VILLARINI G, et al. Long-term high-resolution radar rainfall fields for urban hydrology [J]. *Journal of the American Water Resources Association*, 2013. [doi: 10.1111/jawr.12139]
- [26] NIELSEN J E, THORND AHL S, RASMUSSEN M R. A numerical method to generate high temporal resolution precipitation time series by combining weather radar measurements with a nowcast model [J]. *Atmospheric Research*, 2014, 138: 1-12.
- [27] 陈明轩, 俞小鼎, 谭晓光, 等. 对流天气临近预报技术的发展与研究进展 [J]. *应用气象学报*, 2004, 15(6): 754-766. (CHEN Mingxuan, YU Xiaoding, TAN Xiaoguang, et al. A brief review on the development of nowcasting for convective storms [J]. *Journal of Applied Meteorological Science*, 2004, 15(6): 754-766. (in Chinese))
- [28] 宗志平, 代刊, 蒋星. 定量降水预报技术研究进展 [J]. *气象科技进展*, 2012, 2(5): 29-35. (ZONG Zhiping, DAI Kan, JIANG Xing. The research progress of quantitative precipitation forecast [J]. *Advances in Meteorological Science and Technology*, 2012, 2(5): 29-35. (in Chinese))
- [29] ACHLEITNER S, FACH S, EINFALT T, et al. Nowcasting of rainfall and of combined sewage flow in urban drainage systems [J]. *Water Science and Technology*, 2009, 59: 1145-1151.
- [30] LIGUORI S, RICO-RAMIREZ M A, SCHELLART A N A, et al. Using probabilistic radar rainfall nowcasts and NEP forecasts for flow prediction in urban catchments [J]. *Atmospheric Research*, 2012, 103: 80-95.
- [31] CHANG F J, CHIANG Y M, TSAI M J, et al. Watershed rainfall forecasting using neuro-fuzzy networks with assimilation of multi-sensor information [J]. *Journal of Hydrology*, 2014, 508: 374-384.
- [32] VASILOFF S, SEO D J, HOWARD K, et al. Improving QPE and very short term QPE [J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2007, 88(12): 1899-1911.
- [33] 徐向阳, 刘俊, 郝庆庆, 等. 城市暴雨积水过程的模拟 [J]. *水科学进展*, 2003, 14(2): 193-196. (XU Xiangyang, LIU Jun, HAO Qingqing, et al. Simulation of urban storm water logging [J]. *Advances in Water Science*, 2003, 14(2): 193-196. (in Chinese))
- [34] 张小娜. 城市雨水管网暴雨洪水计算模型研制及应用 [D]. 南京: 河海大学, 2007. (ZHANG Xiaona. Development and application of the storm flood computation model for urban storm-water [D]. Nanjing: Hohai University, 2007. (in Chinese))
- [35] 岑国平, 沈晋, 范荣生, 等. 城市地面产流的试验研究 [J]. *水利学报*, 1997(10): 47-52. (CENG Guoping, SHEN Jin, FAN Rongsheng, et al. Experimental study on urban surface runoff yield [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 1997(10): 47-52. (in Chinese))
- [36] SHUSTER W D, PAPPAS E, ZHANG Y. Laboratory-scale simulation of runoff response from pervious-impervious systems [J]. *Journal of Hydrologic Engineering*, 2008, 13(9): 886-893.
- [37] 任伯帆. 城市设计暴雨及雨水径流计算模型研究 [D]. 重庆: 重庆大学, 2004. (REN Bozhi. Study on the urban design rainstorm and rainfall runoff calculation model [D]. Chongqing: Chongqing University, 2004. (in Chinese))
- [38] MARK O, WEESAKUL S, APIRUMANEKUL C, et al. Potential and limitations of 1-D modeling of urban flooding [J]. *Journal of Hydrology*, 2004, 299(3/4): 284-299.
- [39] SCHMITT T G, THOMAS M, ETTRICH N. Analysis and modeling of flooding in urban drainage systems [J]. *Journal of Hydrology*, 2004, 299(3/4): 300-311.
- [40] MIGNOT E, PAQUIER A, HAIDER S. Modeling floods in a dense urban area using 2-D shallow water equations [J]. *Journal of Hydrology*, 2006, 327(1/2): 186-199.
- [41] LI Weifeng, CHEN Qiuwen, MAO Jingqiao. Development of 1-D and 2-D coupled model to simulate urban inundation: An application to Beijing Olympic Village [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2009, 54(9): 1613-1621.
- [42] REN B, ZHANG X, ZHOU H. The urban unsteady and non-pressure rain pipe flow routing by the dynamical-wave method [J]. *Applied Mechanics and Materials*, 2012, 212/213: 593-599.
- [43] SINGH V P, WOOLHISER D A. Mathematical modeling of watershed hydrology [J]. *Journal of Hydrologic Engineering*, 2002, 7(4): 270-292.

- [44] ZOPPOU C. Review of urban storm water models [J]. *Environmental Modelling & Software*, 2007, 16: 195-231.
- [45] CANTONE J, SCHMIDT A. Improved understanding and prediction of the hydrologic response of highly urbanized catchments through development of the Illinois urban hydrologic model [J]. *Water Resources Research*, 2011, 47: W08538.
- [46] 黄国如,吴思远.基于 InfoWorks CS 的雨水利用措施对城市雨洪影响的模拟研究[J]. *水电能源科学*, 2013, 31(5): 1-4, 17. (HUANG Guoru, WU Siyuan. Simulation study on effect of rainwater utilization measures on urban stormwater based on InfoWorks CS [J]. *Water Resources and Power*, 2013, 31(5): 1-4, 17. (in Chinese))
- [47] 岑国平.城市雨水径流计算模型[J].*水利学报*, 1990(10): 68-75. (CEN Guoping. A model to simulate stormwater runoff in urban area [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 1990(10): 68-75. (in Chinese))
- [48] 周玉文,赵洪宾.城市雨水径流模型研究[J].*中国给水排水*, 1997, 13(4): 4-6. (ZHOU Yuwen, ZHAO Hongbin. A study on urban storm runoff model [J]. *China Water and Wastewater*, 1997, 13(4): 4-6. (in Chinese))
- [49] 解以扬,李大鸣,李培彦,等.城市暴雨内涝数学模型的研究与应用[J].*水科学进展*, 2005, 16(3): 384-390. (XIE Yiyang, LI Daming, LI Peiyan, et al. Research and application of the mathematical model for urban rainstorm waterlogging [J]. *Advances in Water Science*, 2005, 16(3): 384-390. (in Chinese))
- [50] 徐向阳.平原城市雨洪过程模拟[J].*水利学报*, 1998(8): 34-37. (XU Xiangyang. Simulation of storm runoff process for plain urban [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 1998(8): 34-37. (in Chinese))
- [51] 耿艳芬.城市雨洪的水动力耦合模型研究[D].大连:大连理工大学,2006. (GEN Yanfen. A Coupled hydraulic numerical models on the urban rain flood [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2006. (in Chinese))
- [52] 王静,李娜,程晓陶.城市洪涝仿真模型的改进与应用[J].*水利学报*, 2010, 41(12): 1393-1400. (WANG Jing, LI Na, CHENG Xiaotao. Improvement and application of numerical model for the simulation of flooding in urban area [J]. *Journal Hydraulic Engineering*, 2010, 41(12): 1393-1400. (in Chinese))
- [53] 宋晓猛,占车生,孔凡哲,等.大尺度水循环模拟系统不确定性研究进展[J].*地理学报*, 2011, 66(3): 396-406. (SONG Xiaomeng, ZHAN Chesheng, KONG Fanzhe, et al. A review on uncertainty analysis of large-scale hydrological cycle modeling system [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2011, 66(3): 396-406. (in Chinese))
- [54] BARCO J, WONG K M, STENSTROM M K. Automatic calibration of the US EPA SWMM model for a large urban catchment [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2008, 134: 466-474.
- [55] DOTTO C, DELETIC A, FLETCHER T D, et al. Calibration and sensitivity analysis of urban drainage models: MUSIC rainfall/runoff module and a simple stormwater quality model [J]. *Australia Journal of Water Resources*, 2011, 15: 85-94.
- [56] THORNDahl S, BEVEN K J, JENSEN J B, et al. Event based uncertainty assessment in urban drainage modeling, applying the GLUE methodology [J]. *Journal of Hydrology*, 2008, 357: 421-437.
- [57] KHU S T, DI P F, SAVIC D, et al. Incorporating spatial and temporal information for urban drainage model calibration: An approach using preference ordering genetic algorithm [J]. *Advances in Water Resources*, 2006, 29: 1168-1181.
- [58] DELETIC A, DOTTO C B S, MCCARTHY D T, et al. Assessing uncertainties in urban drainage models [J]. *Physics and Chemistry of the Earth*, 2012, 42/43/44: 3-10.
- [59] SEMADENI-DAVIES A, HERNEBRING C, SVENSSON G, et al. The impacts of climate change and urbanization on drainage in Helsingborg, Sweden: Suburban stormwater [J]. *Journal of Hydrology*, 2008, 350: 114-125.
- [60] GRIMM N B, FAETH S H, GOLUBIEWSKI N E, et al. Global change and the ecology of cities [J]. *Science*, 2008, 319(5864): 756-760.
- [61] 孙艳伟,魏晓妹, POMEROY C A. 低影响发展的雨洪资源调控措施研究现状与展望 [J]. *水科学进展*, 2011, 22(2): 287-293. (SUN Yanwei, WEI Xiaomei, POMEROY C A. Review of current research and future directions of low impact development practices for storm water [J]. *Advances in Water Science*, 2011, 22(2): 287-293. (in Chinese))
- [62] 贾海峰,姚海蓉,唐颖,等.城市降雨径流控制 LID BMPs 规划方法及案例 [J]. *水科学进展*, 2014, 25(2): 260-267. (JIANG Haifeng, YAO Hairong, TANG Ying, et al. Urban runoff control LID BMPs planning methodology and case study [J]. *Advances in Water Science*, 2014, 25(2): 260-267. (in Chinese))
- [63] 许萍,张丽,张雅君,等.中国低影响开发城市雨水管理模式推广策略 [J]. *土木建筑与环境工程*, 2012, 34(增刊 1): 165-169. (XU Ping, ZHANG Li, ZHANG Yajun, et al. Extension strategy of low impact development city rainwater management pattern in China [J]. *Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering*, 2012, 34(Suppl 1.): 165-169. (in Chinese))

- [64] 潘安君,张书函,孟庆义,等.北京城市雨洪管理初步构想[J].中国给水排水,2009, 25(22): 9-12. (PAN Anjun, ZHANG Shuhan, MENG Qingyi, et al. Initial concept of stormwater and flood management in Beijing city[J]. China Water & Wastewater, 2009, 25(22): 9-12. (in Chinese))
- [65] MCDONALD R I, GREEN P, BALK D, et al. Urban growth, climate change, and freshwater availability[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2013, 108(15): 6312-6317.

## Development and challenges of urban hydrology in a changing environment: II: Urban stormwater modeling and management \*

SONG Xiaomeng<sup>1,2</sup>, ZHANG Jianyun<sup>1,2</sup>, WANG Guoqing<sup>1,2</sup>, HE Ruimin<sup>1,2</sup>, WANG Xiaojun<sup>1,2</sup>

(1. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China; 2. Research Center for Climate Change, Ministry of Water Resources, Nanjing 210029, China)

**Abstract:** Cities are suffering from extremely heavy rain and urban waterlogging disaster in recent years, due to the change in the natural hydrologic processes impacted by global climate change and rapid urbanization. The development and application of precipitation observation and forecasting, calculation methods for runoff generation and flow concentration, and urban stormwater simulation techniques are reviewed in the context of hydrological processing and modeling. The features, applicability and limitations of these techniques are discussed. The shortcomings and gaps of approaches on urban stormwater modeling, such as the lack of knowledge and the data to understand the response mechanism of the rainfall-runoff processes in the urban areas, are pointed out. The conceptual framework and flowchart for urban stormwater modeling is presented. Viewing from the prospective of rainwater utilization, essential principles and strategies on the urban stormwater management are presented, and the techniques and measures are also discussed. Then, the main future development direction and challenges in urban stormwater modeling and management are highlighted. Further research into the high spatio-temporal resolution observation and forecasting of urban rainfall are required to improve storm-term rainfall prediction. The performance of urban stormwater modeling technologies remain poorly quantified, which need a multisource information-fusion-based approach to the efficient estimation of urban runoff. The mechanism also remains poorly understood, which need much more research to understand the rainfall-runoff response relationship in the urban areas. In addition, urban stormwater is now increasingly regarded as a resource. The methods of harvesting, utilization and management of urban stormwater also need to pay more attention to, which imposes a requirement to ensure that stormwater management systems are adaptable and resilient to changes.

**Key words:** urban hydrology; quantitative precipitation forecasting; urban flood; urban stormwater management; water security

---

\* The study is financially supported by the National Basic Research Program of China (No. 2010CB951103).