

城市暴雨积涝灾害风险突增效应研究进展

扈海波

(中国气象局北京城市气象研究所, 北京 100089)

摘要:城市暴雨积涝风险突增效应研究对揭示此类风险与人类活动所导致的城市化过程的关系,及用于城市地区灾害风险识别及风险预警均有重要价值。本文从城市因素(地表粗糙度、气溶胶及城市热岛等)影响城市地区降水过程,以及城市地区土地利用和土地覆盖变化(LUCC)影响城市地表水文反应过程2个方面综合论述风险突增效应研究的进展及主要结论。在研究方法上,总结了现有文献所用的暴雨危险性的主要评估模型,认为暴雨危险性计算需要结合雨强及暴雨持续时间。城市地表对暴雨积涝的敏感性分析需借助城市水文模型;在模型分析过程中,应注重雨量数据的有效性,以及城市排水管网、土地利用和土地覆盖等资料的可获取性及概化。为定量评估城市暴雨积涝风险突增效应,需要使用更高时空分辨率的数据资料分析暴雨危险性特征,通过细化及发展城市水文模型,完成敏感性实验分析;在此基础上,综合危险性 & 敏感性特征,评估城市地区暴雨积涝风险,揭示暴雨积涝风险在城市地区的空间分布差异及风险突增效应。相关成果可用于城市暴雨积涝的风险识别、评估、预警及风险管理。

关键词:暴雨积涝;风险评估;水文模型;研究进展

1 引言

城市是一个充分展现地气交互过程严重受人为特征影响的地区。事实上城市气候变化已被看作为全球气候变化的一个缩影(Price et al, 1994; Changnon et al, 1996; Mills, 2007)。城市扩展对气候造成的影响不只是城市人口增多产生更多的CO₂等温室气体排放,还有城市化过程所形成的城市不透水地表的扩展使得城市气候及环境发生迅猛的改变。据联合国开发计划署统计,截至2008年,世界首次出现超过一半的人口,即大概33多亿人口居住在城市地区。预计2030年,将有50亿人口成为城市居民(United Nations Population Fund, 2007)。全球性城市化过程的加快,城市人口增多、城市面积迅猛扩张,导致城市区域性气候特征改变已是不争的事实。尤其城市化可导致城市地区降水过程改变逐渐成为研究的热点。其核心在于城市化对降水过程的影响及城市地表特征的改变是否导致

暴雨灾害风险特征发生改变,是否为近年来频繁发生的城市暴雨积涝事件的主要诱因。

近年来,全球许多城市遭遇极端暴雨过程的袭击,造成了巨大的人员伤亡及财产损失(Shepherd et al, 2011; Zhou et al, 2013; 扈海波等, 2014)。其中影响比较严重的有2011年泰国曼谷的洪涝灾害(Peterson et al, 2012)、2012年北京“7.21”暴雨(Zhou et al, 2013; 扈海波等, 2014)等。这些突发于城市地区或城市群地区的极端暴雨洪涝灾害,受到广泛关注。多数学者认为全球气候变化背景下,极端天气及气候事件增多是暴雨灾害事件频发的主要诱因(Allen et al, 2002; IPCC, 2007; Bouwer, 2011)。这类城市暴雨积涝风险突增的原因,除了气候变化等自然因素外,还有城市化对暴雨过程的改变等人为因素导致的“致灾因子”危险性的变化。城市土地利用及土地覆盖变化所形成的城市地表水文特征,也使得城市地区对暴雨积涝灾害更加敏感。而且城市地区人口及财产的集中加大了风险的暴露性(扈

收稿日期:2016-02;修订日期:2016-05。

基金项目:国家自然科学基金项目(41175099);北京自然科学基金项目(8142019) [Foundation: National Natural Science Foundation of China, No.41175099; Beijing Natural Science Foundation, No.8142019]。

作者简介:扈海波(1970-),男,贵州遵义人,研究员,主要从事城市气象灾害研究, E-mail: hbhu@ium.cn。

引用格式:扈海波. 2016. 城市暴雨积涝灾害风险突增效应研究进展[J]. 地理科学进展, 35(9): 1075-1086. [Hu H B. 2016. Research progress of surging urban flood risks[J]. Progress in Geography, 35(9): 1075-1086.]. DOI: 10.18306/dlkxjz.2016.09.003

海波等, 2014)。另外, 城市基础设施建设参照旧的排水标准造成城市管网排洪能力不足, 也是城市地区暴雨积涝灾害频发的重要因素。

因此, 城市化过程对致灾因子的影响及城市不透水地表的扩展导致其对暴雨敏感性的改变是积涝风险突增效应研究的重点。通过展开这两方面的研究, 才能从灾害风险的层面揭示城市暴雨过程给城市带来的灾害性影响及风险后果, 估测城市化对城市暴雨积涝风险造成的影响程度, 为城市暴雨积涝风险识别、评估及预警提供技术支撑。总之, 深入研究城市暴雨积涝风险的影响, 亦即城市化对暴雨过程的影响以及城市地表土地利用和土地覆盖变化对城市水文反应的影响, 进而导致城市积涝风险突增的现象及成因, 可为降低城市暴雨积涝风险及其风险防控摸索有效的思路及方法, 并为相关研究提供有益借鉴和启示。

2 城市化过程导致的暴雨积涝危险性增强效应

为阐述城市化对降水过程的影响, 及其导致城市地区暴雨危险性特征发生的改变, 需要在充分认识城市化对降水过程影响的基础上, 用合理的暴雨致灾因子强度评估方法, 正确分析城市化影响下暴雨危险性的时空变化特征。

2.1 城市化影响降水过程的研究概述

政府间气候变化专门委员会(IPCC)研究报告指出, 城市化过程对区域性降水的影响已成为人与自然环境关系研究的热门问题(Trenberth et al, 2007)。城市化特征影响对流性降水过程的主导因素有: ①城市地区气溶胶浓度增加, 产生了更多的降水凝结核(CCN, Cloud Condensation Nuclei)物质(Borys et al, 2000; Ramanathan et al, 2001; Andreae et al, 2004; Mölders et al, 2004); ②城市地表粗糙度加大, 增强了城市地区降雨过程的动力条件(Bornstein et al, 2000; Rozoff et al, 2003); ③城市冠层影响城市降水系统分化及转换(Tim et al, 1977; Bornstein et al, 2000); ④城市提供水汽输送条件(Dixon et al, 2003); ⑤城市边界层热岛效应(UHI)所产生的显热和潜热扰动影响干湿对流条件(Shepherd et al, 2002; Rozoff et al, 2003; Shepherd et al, 2003; 蒙伟光等, 2007)等。上述城市化特征从一个和多个方面影响城市降水过程, 几乎每个因素对城市降水都

起着重要作用(Shepherd, 2005)。

不少研究表明, 城市化增强了城市地区尤其是下风方的暴雨过程(Shepherd, 2005; Mote et al, 2007; Stallins et al, 2008)。但也有学者提出不同的观点。如Kaufman等(2007)认为, 城市化过程改变了城市地表水文状况使得珠江三角洲城市群地区的降水减少; Zhang等(2009)认为, 城市地区的快速城市化过程会使得地表蒸发减弱, 显热增加, 潜热减少, 从而导致大气对流活动趋弱。尽管这种降水总量的减少很可能是由大尺度的气候变化造成的, 但城市环境仍会对暴雨过程起局部增强作用(Yu et al, 2010; Hu, 2015)。如Guo等(2006)发现, 北京地区的年降水量也在逐年减少, 尤其在城市地区, 但降水强度较高中心仍在城市下风向; Yu等(2010)分析华北地区的降水后认为, 近年来该地区降水总量减少的原因是夏季风趋弱。

城市地区降水特征会受到大尺度气候变化的影响, 城市化对暴雨过程的影响研究需要叠合局地气候变化及天气条件进行诊断分析。Yu等利用逐时降水资料分析中国东部沿海地区的降水模式, 发现近年来华北地区尽管年降水总量在减少, 但是雨强及过程雨量却在增加。然而, 年降水量减少并不意味着城市积涝灾害风险减少, 过程雨量的增加反而会诱发更多的城市积涝灾害(Yu et al, 2010)。除极端暴雨天气会导致城市积涝外, 短时强降水甚至是局地强降水同样可导致积涝的发生(Smith et al, 1994; Aryal et al, 2009)。因此, 城市暴雨危险性增强效应的研究应从城市化对极端暴雨天气甚至是对局地暴雨及短时强降水的影响入手, 侧重于降水强度时空变化特征。从更精细的时空模式出发, 用较高时间及空间分辨率的气象资料分析城市地区强降水的时空分布状况, 如雷达及卫星资料的应用(Sun et al, 2000; Shepherd et al, 2002; Sharif et al, 2006)。表1为现有的雷达定量降水估计(QPE)、自动站雨量、卫星遥测、闪电定位等资料对城市暴雨积涝危险性研究需求的满足情况。

2.2 城市暴雨致灾因子强度评估

城市化对暴雨过程的影响机理或是城市化因子对暴雨过程的影响程度需要进行较为完整及全面的诠释(Shepherd, 2005)。依据黑箱理论, 研究城市化对降水的总体影响程度需要评估雨强及雨量在城市空间上的分布差异所造成的城市暴雨危险性变化。城市化对降水过程的影响是否确实导致

表1 常规及非常规观测资料及其满足城市暴雨积涝危险性研究需求一览表

Tab.1 Characteristics of regular and irregular observation data and their suitability for urban flood hazards research			
资料类型	基本特征	不确定性特征及满足研究需求情况	文献来源
气候站资料	空间分辨率受站点分布密度的影响,总体上较粗,需插值到格点上。	插值会产生较大偏差,不确定性较大。单独使用很难满足研究需求,从日降雨量等资料中很难提取降水持续时间等信息。	Prudhome et al, 1999
地基雷达定量降水估计(QPE)	雷达数据的网格大小可达1 km×1 km,分辨率较高。	探测误差及雨量反演时(不正确 ZR 关系)可产生数据不确定性;可单独使用,用自动站雨量资料订正后效果更好,可减少数据不确定性。能提取雨量、雨强及降水持续时间等信息。	Sun et al, 2000; Sharifetal,2006
自动站雨量计资料	自动站点分布较密,可反映降水在空间上的细微差别;数据的时空分辨率都较好;使用时需要插值,局部会产生一定的偏差,部分站的系统误差大。	同样在空间插值上会产生不确定性。在分布较密地区可单独使用,主要用于订正雷达定量降水估计(QPE);能提取时空信息;一些站点的数据质量不太理想,出现的系统误差不容易被发觉及剔除。	Yu et al, 2010
闪电定位资料	大致体现雷暴的激烈程度,可以网格化后使用。	因探测仪及组网性能,在空间定位及探测效率上产生较大的不确定性。其推导出的闪电密度分布可用于辅助分析城市化对暴雨过程的影响。	Stallins et al, 2008; Hu et al, 2014
TRMM 卫星遥感资料	TRMM 卫星的雷达反演降水(Rain Rate)资料的格点大小为0.25°×0.25°,分辨率很低,但能完整观测较大尺度的雷暴天气过程。	会忽略2.3%的近地面降水,但与地基雷达探测结果基本一致。分辨率不高,很难单独用于城市暴雨危险性研究。	Shepherd et al, 2002

了城市地区极端暴雨危险性的增加,进而造成暴雨积涝风险在时空分布上的变化,则需作重点研究。为此,首先需要将雨量及雨强信息转化为数值化的危险性指标。暴雨危险性的测算常利用气候资料进行概率统计分析。Beguería 等(2005)用极限阈值法(POT)计算极端暴雨超越概率雨量阈值来判定危险性等级,认为可用地形因素来回归危险性指数。只是该文献未给出回归的相关算例。Krishnamurthy 等(2009)在分析极端暴雨的频次及强度的时空关系时,采用 90%和 99%的分位数来确定极端暴雨的强度及危险性等级。分位数法对暴雨阈值的确定需结合历史灾情来判断危险性大小,否则对暴雨危险性的评估只具有统计学意义,会产生明显的不确定性。这是因为单纯的统计学方法会遗漏一些可导致城市积涝的降水过程,也会过多统计一些并不形成危险的一般降水过程。因此,需要客观化方法来确定暴雨的危险性阈值,并且阈值最好应综合考虑雨量及雨强。

扈海波等(2013)将雨量及雨强等指标转换成危险性指标,把一定时段内的降雨量统一成可比较的量纲值,比如将一小时或多小时的降雨量统一换算成日雨量,然后再用线性及非线性拟合方法,将其换算为危险性指数。一般可采用指数法计算暴雨危险性指标值与雨量、雨强值之间存在的几何级数非线性递增关系。当然,用雨强资料来确定暴雨危险性指数时,还应参考暴雨洪涝及积涝的历史灾情信息。Meyer 等(2009)统计出的极端暴雨出现概率与期望损失值之间的曲线关系表明,其期望损失值

大小随着雨强及雨量的增加呈现指数级数的递增(图 1)。Hu(2015)也曾统计北京地区自 1950 年以来的暴雨洪涝历史灾情资料,将灾情进行损失定量评估,用灰色关联法来计算其损失值。最后拟合得出暴雨雨量与期望损失值(灰色关联值)的关系曲线,该曲线可用高斯函数来表示(类似图 1 的结果)。

可见,通过“雨强和雨量值”与暴雨“危险性”指数值之间的定量换算公式,即可把城市化对暴雨过程导致的雨强及雨量在城市区域内的时空分布差别,换算成暴雨危险性指数的时空差别。当然这种方法最好用在需进一步叠加承灾体脆弱性、敏感性及风险暴露因子的暴雨危险性评估(扈海波等, 2013)。

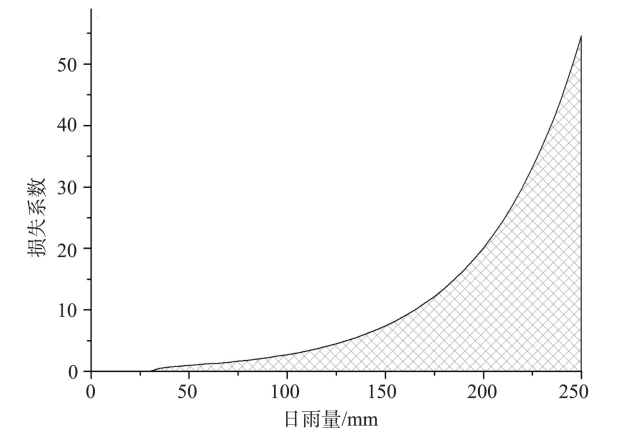


图1 暴雨日雨量对应期望损失系数数值曲线
(Meyer et al, 2009)

Fig.1 Relationship between daily precipitation and expected damage (Meyer et al, 2009)

表2总结了目前国内外文献中介绍的可用于暴雨危险性分析的通用计算方法,当然其有效性还需在实际工作中作进一步验证。

2.3 城市化对暴雨危险性影响的空间化评估分析

为进一步分析暴雨危险性增减效应在城市空间上的不平衡分布或空间差异,需要在较高空间分辨率的单元上测算降水强度在城市空间上的分布状况。暴雨危险性的增减效应首先体现在城市空间上的不平衡分布或空间差异。Diem等(2003)采用108年的长时间序列雨量资料研究美国菲尼克斯(Phoenix)城市化对降水的影响,发现城市特征导致了城市下风向地区降水的明显增加,而且这种雨量异常情况主要出现在城市化进程较快的1950-2003年间,并统计出城市特征可增加城市下风向11%~14%的夏季降水。Hu等(2014)利用闪电定位资料分析北京地区地闪密度分布状况时,发现北京城市地区夏季风的下风向存在一个高值区域。Shepherd等(2002)利用TRMM星载雷达资料识别城市地区的降水空间模式,发现城市中心下风向30~75 km

地区因受城市因素的影响,降水过程得到不同程度的增强。Hand等(2009)将美国俄克拉荷马划分成9个大的空间网格区域,计算网格之间的空间相关性来评价城市区域的降水不均衡状况,结果显示,该市下风向网格单元的多数降水过程雨量均较其他方向网格单元高。

在形成机理上,城市粗糙地表可加强暴雨过程的动力条件,加之城市热岛对城市地区的边界层不稳定性扰动,形成午后时刻城市地区的风场辐合(Stallins et al, 2008)等,均可增强城市地区的暴雨过程。从城市地区降水过程的雨量分布情况来看,城市化对降水确实有明显的增强效应(Shepherd et al, 2002; Shepherd et al, 2003; Stallins et al, 2008; Shepherd et al, 2011; Hu, 2015)。通过空间统计分析及气象资料处理,易估算出暴雨的频次及强度在城市空间上的分布状况。结合前面介绍的暴雨危险性指数计算方法,将这种“强度”信息转化为暴雨的致灾因子危险性特征,可显示城市空间范围内暴雨对城市系统构成的威胁及相应的空间变化情况。叠合

表2 通用暴雨危险性计算模型方法一览表

Tab.2 General rainstorm hazard assessment models

方法	简介	特点	文献来源
统一雨量 量纲法	首先计算降水持续时间 D (单位为h)的雨量值(R)和日降雨量(R_d)间的定量转换: $R_d = 4.216RD^{-0.475}$, 在得到不同降雨时段内的等效日雨量后,利用下式计算致灾因子危险性指数: $\begin{cases} H=0, & P < p' \\ H = \text{Exp}(P/p'), & P > p' \end{cases}$ 式中: P 为降水量; p' 为累计降水阈值; H 为降水过程所引起的危险性指数;设定日雨量或等效日雨量超过50 mm才有影响,即 $p' = 50 \text{ mm}$ 。	方法基本上定量化,为下一步的风险评估方程提供输入参数。该方法需叠加脆弱性、敏感性及风险暴露因子等来综合评估暴雨灾害风险;综合了雨量及降雨持续时间信息。	扈海波等, 2013; Hu, 2015
分位数法	建立每个格点的雨量序列,计算格点的90%或99%的分位数值,以此判断所在格点的暴雨洪涝危险性大小,同时还可建立时间序列做Mann-Kendall (M-K)分析,检验格点的雨量增强趋势。	比较常用的极端天气及气候分析方法,能较好表现暴雨危险性的时空变化特征,但未较好体现与灾害性后果之间的关联;未作概率密度分析。	Krishnamurth et al, 2009
极限阈值 法(POT)	用皮尔逊-通用普拉图(Poisson-generalized Pareto)概率密度函数计算超越概率,确定暴雨危险性的阈值,用最大似然法作参数估计,可借助Matlab等软件完成。Begueria等(2005)还利用“地形”等为影响因子的回归方程来估算暴雨危险指数。	较常用的极端气象要素值分析方法,用超越概率(重现期)确定暴雨危险性阈值。	Begueria et al, 2005
历史灾情 法	基于危险性越大,灾情期望损失越大的原则,统计历史灾害损失的情况,确定危险性指数。Meyer等(2009)运用这一方法得出历史灾情损失曲线与极端暴雨出现概率呈自然指数形式的非线性递减的规律。	可直接由灾害期望损失来反映灾害风险,并可判定对应的极端暴雨雨量的阈值,对历史灾情资料的数据质量有很高的要求。	Meyer et al, 2009
洪涝指数 模型(Index Flood Model)	采用通用极值(Generalized Extreme Value, GEV)的概率分布型函数,用累计函数(CDF)计算超越概率。其中洪涝指标可采用GEV的位置参数 $\zeta(s)$ 、统计均值及中位数。	确定连续性区域的危险性指数,不用针对单个格点进行统计;采用的GEV分布型较合适极端暴雨的雨量分布。	Buonomo et al, 2007; Goubanova et al, 2007; Hanel et al, 2009
Copulas模 型方法	Copulas模型非常适合暴雨危险性特征分析,其关键是建立雨强和降雨持续时间的概率关联来推算暴雨危险性指数。Copulas运用GEV分布型来建立雨强和持续时间的概率分布函数,然后建立关联,而二者之间的关联主要有: Frank's族方法(Frank, 1979; Nelson, 1999); Gumbel族方法(Bonazzi et al, 2012); Clayton、AMH、FGM、A12和A14 copulas族(Genest et al, 2007)。	该方法可基于多维变量来计算暴雨危险性,有比较成熟的理论和方法体系;通常采用雨量和降雨持续时间的统计关联来建立二维信息的暴雨概率密度方程;方法比较客观并可定量化。	Nelsen, 1999; Genest et al, 2007; Bonazzi et al, 2012

敏感性、风险暴露因子及脆弱性因素,可评估城市地区暴雨积涝风险的分布情况(扈海波等, 2013)。Hu(2015)分析了北京地区的暴雨危险性时空变化特征,发现该地区尽管年降水量在逐年增多,但自1984年快速城市化以来暴雨危险性却逐年增加,而且同样地,在北京夏季风的下风向的暴雨危险性指数呈增涨趋势。这些研究个例都证明了部分地区城市化对暴雨危险性的增强效应。

3 城市特殊地表水文特征对城市暴雨积涝的敏感性

城市化影响暴雨过程,使得暴雨危险性在城市空间分布产生差异。而城市地区不透水地表会改变城市水文反应过程,造成城市地表对积涝的敏感。研究城市地区暴雨积涝敏感性,探讨城市地表水文特征对暴雨积涝风险的放大效应十分必要。暴雨积涝敏感性与危险性的叠合能综合地反映城市地区暴雨积涝的风险特征。

3.1 城市水文特征对形成暴雨积涝的作用

在自然环境中,降水通常被植被吸收或截留在土壤中,通过蒸腾作用,散发或缓慢渗入地表径流。城市地区植被的减少和不透水地表的扩大,导致地表径流及积水的增加,地表出现峰值径流的反应时间缩短,地表水的汇集加速使得城市地区的积涝灾害频繁发生(Smith et al, 2002; Beighley et al, 2003; Smith, Baek et al, 2005; Smith, Miller et al, 2005; Tang et al, 2005)。城市积涝在城市地区形成的威胁远大于城郊和农村地区(Kunkel et al, 1999; Easterling et al, 2000)。Ogden等(1997)记载了一个经典案例:1997年7月27日美国Fort Collins城区发生了严重暴雨积涝事件,郊区的暴雨强度比城区要大,但却没有出现任何人员伤亡及实质性经济损失事件。中国许多城市也发生过类似的情况(Zhou et al, 2013; 扈海波等, 2014)。造成这种情况的原因除了城市地区承灾体比较集中外,城市地表对暴雨积涝的敏感性也不容忽视。

从机理上探究城市水文过程对城市积涝的影响及作用十分必要,而关键是如何去估测城市化特征(土地覆盖与土地利用类型、排水管网)对城市积涝形成的贡献。城市化扩展效应影响城市地表径流模式的研究很多(Arnold et al, 1996; Gregory et al, 2006; Yang et al, 2010),关于城市地表水文效应

(Hydrological Response)在城市积涝形成中作用的相关文献报道也很多(Changnon et al, 1996; Moscrip et al, 1997; Lee et al, 2003)。如Sheeder等(2002)选用典型区域对比不同城市化地区的地表水文特征,发现城市地区在流域地表径流峰值大小及峰值出现的快慢程度方面与非城市地区存在明显差别。而正是这种差别导致城市地表特征对暴雨致灾因子的响应及敏感性要大于郊区。因此,研究城市地区的暴雨积涝对地表的敏感性首先要全面了解城市地区的地表水文特征,才能更好地诠释其与形成暴雨积涝的内在联系及发生机理。

3.2 城市水文模型对城市水文特征的模拟分析

仅靠水文观测资料对比不同发展阶段城市的产流量、流量峰值和峰值出现时间分析城市化对水文特征的影响是有难度的(Yang et al, 2010),因为许多水文站点均无法提供完整的长时间序列(至少50年)的观测资料。短时间序列的资料难以证实这种变化趋势是气候多样性造成的,还是城市化的结果。Pielk等(2007)认为,单纯分析城市地区产流量的变化是无法认定城市水文特征随城市化变化的确切原因,因为除土地利用和土地覆盖类型的改变是影响城市水文特征的因素外,还有气候变化的因素存在。而水文模型的定量模拟能对比土地利用和土地覆盖变化对地表水文特征的影响及趋势(Bowling et al, 2000; Pielk et al, 2007; Yang et al, 2010)。Yang等(2010)用可变渗透容量(Variable Infiltration Capacity, VIC)模型模拟对比不同城市化阶段,不同流域的地表水文特征,发现当城市不透水地表达达到3%~5%时,就会影响城市水文状况。Shepherd等(2011)认为,通过耦合大气—陆面模式的数值模拟可估测在城市极端暴雨事件中,不同土地覆盖类型中的水汽容量等参数对城市地表水文特征及整个事件的影响。因此,用水文模型模拟分析城市地表水文特征,演算不同土地覆盖类型下的地表水文反应,对研究城市地表对暴雨积涝的敏感性特征是非常有必要的。城市水文模型能模拟城市小流域范围内降雨与地表径流量之间的定量关系,推算地表径流反应时间等参数。但城市水文模型要较好地实现敏感性分析的目的,对资料的准确性及分辨率有较高的要求(Wright et al, 2012)。这类资料涉及雨量资料、城市地表土地利用与土地覆盖类型数据及城市排水管网分布与排水能力分析等。

3.3 城市水文模型模拟与暴雨积涝敏感性分析与评估

城市水文模型除分析不同土地利用及土地覆盖下的城市地表水文特征外,还需要重视排水管网的排水能力及排水情况对暴雨积水的影响(Turner-Gillespie et al, 2003)。城市管网的排水能力对减缓城市积涝风险有一定的作用,应属于风险规避的范畴。城市不同地区管网排水能力的差异,可影响到城市积涝的风险大小。Graf(1977)认为,大多数评估者只注重不透水地表在城市水文过程中的作用,而忽视城市排水管网系统对积涝风险的影响。城市管网分布及排水能力的改变会显著影响城市区域的积水状况(Wolff et al, 1994; Smith et al, 2002)。选用合适的城市水文模型进行敏感性分析,能更好地模拟城市积水,也是决定敏感性实验分析是否可行的关键。同时,还涉及到敏感性实验的工作量,甚至对资料的需求。由于城市管网资料的获取较为困难,加之管网资料的整理及概化的工作量较大,因此资料的可获取和质量(精度)直接影响到研究的可行性和效果。表3为国内外文献介绍的几种可用于城市积水情景模拟分析的水文模型的技术特征及满足敏感性研究的需求情况,其中能否准确、可行地分析城市管网的排水能力也是研究的一

个关键。

需要特别说明的是,部分城市排水管网是基于多年前的雨洪标准设计的,如北京地区通常按照标准制定时期的1~5年重现期雨量作为设计管网排涝标准。但近年来由于气候变化等因素,按照旧的城市雨洪排泄标准设计的城市管网普遍不能适应城市气候变化引起雨量和雨强变化而造成的暴雨致灾因子强度的增强。而且不同地区气候特征不一样,其重现期的雨量计算方法也不同。以中国为例,广州多雨地区的水文模型重现期雨量计算公式通常为(吴思远, 2013)

$$q=\frac{3081.665(1+0.4791\lg P)}{(t+11.628)^{0.718}}\tag{1}$$

式中: q 为设计暴雨强度/($L/S\cdot hm^2$); t 为降雨历时/min; P 为重现期/a。

式(1)显然不适用中国北方地区,如北京的回归期雨量计算公式为(周玉文, 2011)。

$$i=\frac{A_1(1+c\lg P)}{(t+b)^n}\tag{2}$$

式中: i 为暴雨强度/(mm/min); A_1 、 b 、 c 、 n 为常量系数; t 为降雨历时/min; P 为重现期/a。此暴雨强度公式对应的参数方法见表4。

城市水文模型的重要功能是模拟城市地表的

表3 文献介绍的几种水文模型对满足城市暴雨积涝风险评估需求情况
Tab.3 Existing hydrology models and their ability to meet the needs of urban flood risk assessment

模型	技术特征	满足研究需求情况	文献来源
SWMM	美国环境保护署(EPA)开发的的城市地表水文模型。基于汇水区(Watershed)计算,需事先给出汇水区域及汇流路径,然后计算汇流量(Runoff)及水深	精度高,但工作量大,尤其是汇水区域的划分。如模拟的区域范围小,仅涉及几个小流域面(Catchment),还能基本完成。但要完成一个城市区域范围内所有汇水斑块的划分较为困难。运用矢量格式的排水管线或其他数据,如汇流路径由计算机辅助生成。对数据的要求较高。	Hsu et al, 2000; Rossman, 2010
Aquacycle	同SWMM	同SWMM	Yu et al, 2010
天津沥涝模型	同SWMM	同SWMM	解以扬等, 2005
GSSHA Model	美国工程兵团(Army Corps)开发使用的分布式物理网格化地表水文分析模型(Gridded Surface/Subsurface Hydrologic Analysis Model, GSSHA),该模型考虑土地利用类型及水文参数的空间分布,包括排水能力等。模型在网格基础上用de St-Venant方程计算二维地表积水及一维管道排水。网格精度可达30 m分辨率或更高。	能使用ANC(Auto-NowCasting,短临预报)的QPE(Quantitative Precipitation Estimation,定量降水估计)和(Quantitative Precipitation Forecast,定量降水预报)作强迫。能够较好地模拟城市水文过程。分析城市不透水地表组成、城市管网排水能力等因素对汇流点的流量影响。需要概化城市排水管网资料,可以叠加比较详细的城市排水地物目标,比如排水井/口、涵洞等的分布数据。	Ogden et al, 2000; Sharif et al, 2006
其他(SWAT、TOPMODEL等)	这类非分布式水文模型(半分布式或集中式)能较好地模拟水流过程和部分水文反应过程(Franchini et al, 1991; Johnson et al, 2003)。	SWAT没有子流域范围内水文反应的水流量,因此不能决定不同地表表面(Variable Source Areas, VSAs)上的径流量(Arnold et al, 2005)。而集中式水文模型TOPMODEL能给出大尺度上不同地表表面饱和面积,但不能给出土壤湿度及地表径流,尤其是城市地表的径流状况(Beven, 1997)。	Easton et al, 2007; Beven, 1997V

注:更多技术细节请参考相关文献。

积水深度,依据推算的积水深度进行城市积涝风险分析,甚至损失值的预评估(Sun et al, 2000; Apel et al, 2004; Scawthorn et al, 2006; Kuball et al, 2009; Jongman et al, 2012; 江净超等, 2014)。一些城市积涝的预警模型正是基于这套思路,结合短临数值预报模式和城市水文模型,用雷达反演的雨量(QPE)或雨强值作为水文模型的输入来模拟城市积水,对城市暴雨积涝事件进行实时监测及预警(Ogden et al, 2000; Tilford et al, 2002; Hu, 2014)。需要特别注意的是,城市水文模型对城市积水深度的模拟必须重视雨量资料的不确定性,尤其应谨慎使用落区位置及雨量大小存在较大误差的预报资料,如数值预报模式雨量及雷达定量降水预报雨量(Quantitative Precipitation Forecasting, QPF)。但预报资料有超实时的时间提前量,对预警很关键。因此,数值预报产品质量的提升对基于城市水文模型模拟的城市积涝灾害预警十分重要。Sharif等(2006)认为,结合城市水文模型与ANC(Auto-NowCasting)等短时临近预报产品进行城市积涝灾害的预警还是可行的,主要是由于积水过程的延迟效应,即积水峰值明显会落后降水峰值。根据该研究,一般的暴雨过程大概有20~40 min的积水延迟,也就是说即便采用实况雨量(Forcing)来做积涝风险预警,也能达到一定的时间提前量。20~40 min的提前量对一些应急能力较强的城市来说,还是能减缓不少积涝灾害的影响及损失的。

利用城市水文模式,根据不同降水条件和陆面资料,以情景为驱动,可对比不同土地覆盖及土地利用条件下地表水文状况的差异(Aron et al, 1990; Valeo et al, 1999; Sheeder et al, 2002)。这种差异可能会导致城市地区频繁发生普通雨量条件下的小规模城市积涝,但对极端暴雨导致的大型洪涝灾害的影响不会太大(Hollis, 1975)。Prosdociimi等(2015)认为,与普通降雨相比,极端暴雨可使透水地表的“下渗”和“饱和水”缓冲作用显得微乎其微,使

得透水地表和不透水地表的差别不大。即便如此,分析城市不透水面积扩大对现有城市排水系统条件下暴雨积涝的敏感性特征仍有必要。

从风险区划应用的角度来看,基于气候资料的城市水文模型的模拟及敏感性研究,如直接用气候资料中的雨量值作为输入参数进行模拟,显然是不恰当的。这种看似直接了当的处理方法,其结果与风险的关联性以及对风险的解释效果都不好。Wetterhall等(2011)提出一种“自下而上”的方法来解决这一难题,亦即利用城市水文模型进行敏感性分析实验,估算出不同城市化地区或单元可导致暴雨积涝的阈值,再结合气候资料评估灾害风险。该方法如应用于积涝的监测和预警,其效果应该不错,且计算量要少得多。

总之,借助模型的模拟进行城市暴雨积涝的敏感性分析是必要和可行的。运用城市水文模型可模拟不同城市化地区在不同降水情景或降水强度条件下的城市积水程度,以及发生城市积涝的可能性大小,甚至可以得出一个典型城市化地区可能会导致积涝的降水强度临界值或雨量阈值(图2)。通过城市水文模式的模拟测算城市化特征对积涝的敏感性,评估这种敏感性对积涝风险的影响和作用,是突增效应的重要研究内容。将城市地区暴雨积涝危险性特征与敏感性分析结果相叠合,可反映出暴雨风险在城市地区的分布特征及差异,更好地揭示城市化对暴雨积涝风险的增强作用效果。

4 研究展望

城市化从暴雨危险性及敏感性特征增强这2个方面影响暴雨积涝的形成和发展。认识这种影响的方式、增强效应及程度,需要从灾害风险层面认识城市暴雨危险性变化及城市地表水文反应特征,进而得出城市化过程对城市暴雨积涝风险增强的影响。由此,一方面将城市化引起城市降水的变化解读为积涝灾害危险性的改变,可用于城市灾害风险的识别、防范和减灾工作。另一方面,认识不同城市化地区对城市积涝的敏感性,揭示城市人造环境^①在面对自然灾害冲击下的脆弱性及其对自然灾害的放大效应,对城市规划及城市灾害风险管理等具有实用价值。

表4 北京城市排水管网暴雨强度设计推算参数表
Tab.4 Parameters of designed drainage capacity in Beijing urban area under different rainstorm intensities

选择方法	A_i	b	c	n
年多样本法	14.688	13.8	0.761	0.739
年最大值法	11.442	12.6	0.891	0.708

①因为城市化对自然灾害风险的增强,这里可理解为:a.城市地表粗糙度加大所引发的暴雨过程增强;b.城市排水问题;c.人口及财富集中所形成的风险暴露性增大的问题;d.不透水地表的问题等。

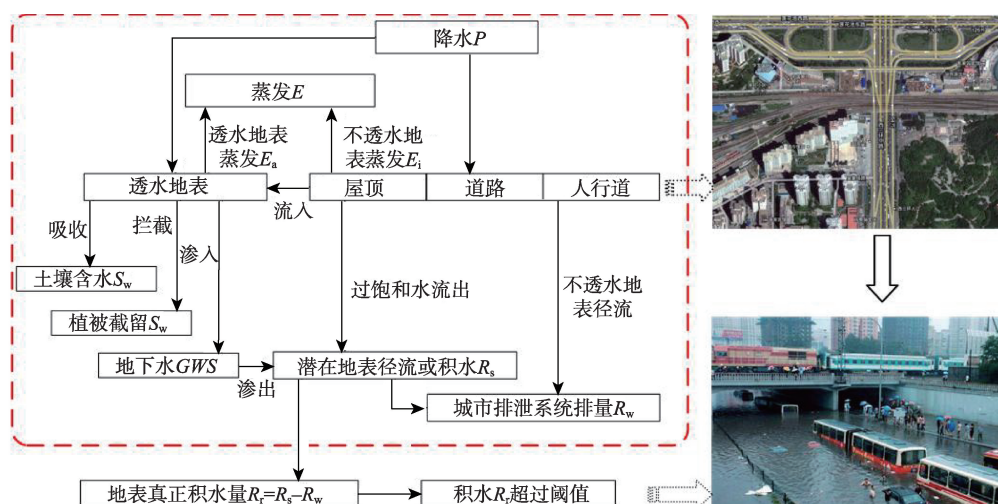


图2 城市地表水文反应特征及流程对应城市积涝的关系及结构示意图

Fig.2 Schematic diagram of urban hydrologic response to urban land cover and land use characteristics, and relation to urban floods

现有文献资料从城市气候学、天气学及灾害学等多个领域涉及城市暴雨积涝灾害风险突增效应。城市特征会改变城市降水过程,影响降水强度(包括极端降水)在城市空间范围的分布,使得城市及城市下风向的降水增多。城市地表土地利用和土地覆盖的变化也会改变城市水文反应过程。现有研究定性地发现城市化对暴雨积涝的突增现象,而今后的研究还需要从定量化的角度上回答以下问题:城市化过程导致城市降水的变化对城市积涝致灾因子强度到底能起多大的增强作用,不同城市化地区的地表土地利用和土地覆盖状况及城市排水能力对极端暴雨风险的改变程度或敏感性有多大,城市化特征总体上对暴雨积涝风险会产生多大的增强效应?为此,需从形成灾害的自然状况和机理上去认识城市暴雨积涝的致灾因子特征及敏感性因素,评估城市化所产生的风险突增效应。因此,本文认为可从以下几个方面展开重点研究:

(1) 充分认识暴雨危险性增强效应在城市空间的不均衡分布及差异,在较高空间分辨率的单元上分析降水强度在城市空间上的分布状况。城市地区暴雨危险性的增强效应研究可从城市化特征对极端暴雨天气,甚至是对局地暴雨及短时强降水的影响着手,侧重于降水强度时空分布的变化。从更加精细的时空模式角度出发,用较高时空分辨率的气象资料分析城市地区强降水的时空分布。多数城市积涝由局地强降水引起,这类局地性强、尺度小、雨量分布极不均匀的强降水,除对普通降水资

料进行降尺度等处理外,还需要综合使用更加精细的常规及非常规观测资料,尤其是短时临近预报系统的QPE等雷达雨量资料,以及具有较好时空特征的卫星反演雨量资料(如TRMM雨量)等。

(2) 需发展能精细处理城市地表水文参数特征的高时空分辨率城市水文模型,分析城市排水状况及地表特征等对城市暴雨积涝的敏感性。城市水文模型的城市地表参数需从大比例尺城市基础地理信息数据、高分辨率城市地区土地覆盖及土地利用遥感反演分类图中提取,如城市屋顶、城市道路及铺设人行道等不透水地表参数,以及城市绿地、裸露地面等透水地表参数。根据模型计算单元内的不透水和透水地表的组成比例来设计地表水分蒸发、下渗等方案。另外,还需对城市排水管网资料进行概化,并将其应用于城市水文模型的积水模拟。通过城市水文模式的模拟及检验可得出不同强度的降水过程在不同城市化地区可能产生地表积水的情景,获取典型城市地区的积涝灾害的降水阈值,完成敏感性实验。

(3) 发展充分结合暴雨危险性特征及敏感性分析的城市暴雨积涝风险评估及风险预警模型,用于城市暴雨积涝的风险识别、评估、预警及风险管理,减缓城市地区暴雨积涝的危害。结合危险性及敏感性分析,将城市水文模型的模拟结果直接反馈给危险性分析,确定对应区域(单元)的暴雨危险性标准或阈值,再根据新的阈值划分标准,统计不同城市化区域可承受降水强度或雨量临界值下的暴雨

频次,从而得到合理的危险性指数。最终达到量化评估城市地区暴雨积涝风险的突增效应,用于城市地区暴雨积涝预报及预警。

参考文献(References)

- 扈海波, 轩春怡, 诸立尚. 2013. 北京地区城市暴雨积涝灾害风险预评估[J]. 应用气象学报, 24(1): 99-108. [Hu H B, Xuan C Y, Zhu L S. 2013. The pre-event risk assessment of Beijing urban flood[J]. Journal of Applied Meteorological Science, 24(1): 99-108.]
- 扈海波, 张艳莉. 2014. 暴雨灾害人员损失风险快速预评估模型[J]. 灾害学, 29(1): 30-36. [Hu H B, Zhang Y L. 2014. Quick assessing model on casualty loss in rainstorms[J]. Journal of Catastrophology, 29(1): 30-36.]
- 江净超, 朱阿兴, 秦承志, 等. 2014. 分布式水文模型软件系统研究综述[J]. 地理科学进展, 33(8): 1090-1100. [Jiang J C, Zhu A X, Qin C Z, et al. 2014. Review on distributed hydrological modelling software systems[J]. Progress in Geography, 33(8): 1090-1100.]
- 蒙伟光, 闫敬华, 扈海波. 2007. 城市化对珠江三角洲强雷暴天气的可能影响[J]. 大气科学, 31(2): 364-376. [Meng W G, Yan J H, Hu H B. 2007. Possible impact of urbanization on severe thunderstorms over Pearl River Delta[J]. Chinese Journal of Atmospheric Science, 31(2): 364-376.]
- 吴思远. 2013. 广州市城市暴雨内涝成因及雨洪利用技术研究[D]. 广州: 华南理工大学. [Wu S Y. 2013. Research on the reasons of urban rainstorm waterlogging and the technology of flood utilization in Guangzhou City[D]. Guangzhou, China: South China University of Technology.]
- 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.]
- 周玉文, 翁窈瑶, 张晓昕, 等. 2011. 应用年最大值法推求城市暴雨强度公式的研究[J]. 给水排水, 37(10): 40-44. [Zhou Y W, Weng Y Y, Zhang X X, et al. 2011. Feasibility study on deriving the urban storm intensity formula through annual maximum value method[J]. Water & Wastewater Engineering, 37(10): 40-44.]
- Allen M R, Ingram W J. 2002. Constraints on future changes in climate and the hydrologic cycle[J]. Nature, 419: 224-232.
- Andreae M O, Rosenfeld D, Artaxo P, et al. 2004. Smoking rain clouds over the Amazon[J]. Science, 303: 1337-1342.
- Apel H, Thieken A H, Merz B, et al. 2004. Flood risk assessment and associated uncertainty[J]. Natural Hazards and Earth System Sciences, 4(2): 295-308.
- Arnold C L Jr, Gibbons C J. 1996. Impervious surface coverage: The emergence of a key environmental indicator[J]. Journal of the American Planning Association, 62(2): 243-258.
- Arnold J G, Fohrer N. 2005. SWAT 2000: Current capabilities and research opportunities in applied watershed modeling [J]. Hydrological Processes, 19: 563-572.
- Aron G, Lakatos D F. 1990. Penn state runoff model- users manual[D]. University Park, PA: The Pennsylvania State University.
- Aryal S K, Bates B C, Campbell E P, et al. 2009. Characterizing and modeling temporal and spatial trends in rainfall extremes[J]. Journal of Hydrometeorology, 10(1): 241-253.
- Beguiria S, Vicente-Serrano S M. 2005. Mapping the hazard of extreme rainfall by peaks over threshold extreme value analysis and spatial regression techniques[J]. Journal of Applied Meteorology and Climatology, 45(1): 108-124.
- Beighley R E, Moglen G E. 2003. Adjusting measured peak discharges from an urbanizing watershed to reflect a stationary land use signal[J]. Water Resources Research, 39 (4): doi: 10.1029/2002WR001846.
- Beven K. 1997. TOPMODEL: A critique[J]. Hydrological Processes, 11(9): 1069-1085.
- Bonazzi A, Cusack S, Mitas C, et al. 2012. The spatial structure of European wind storms as characterized by bivariate extreme-value copulas[J]. Natural Hazards and Earth System Sciences, 12(5): 1769-1782.
- Bornstein R, Lin Q L. 2000. Urban heat islands and summertime convective thunderstorms in Atlanta: Three case studies[J]. Atmospheric Environment, 34(3): 507-516.
- Borys R D, Lowenthal D H, Mitchell D L. 2000. The relationships among cloud microphysics, chemistry, and precipitation rate in cold mountain clouds[J]. Atmospheric Environment, 34(16): 2593-2602.
- Bouwer L M. 2011. Have disaster losses increased due to anthropogenic climate change[J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 92(1): 39-46.
- Bowling L C, Storck P, Lettenmaier D P. 2000. Hydrologic effects of logging in western Washington, United States[J]. Water Resources Research, 36(11): doi: 10.1029/2000WR900138.
- Buonomo E, Jones R, Huntingford C, et al. 2007. On the robustness of changes in extreme precipitation over Europe from two high resolution climate change simulations[J]. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 133: 65-81.
- Changnon S A, Demissie M. 1996. Detection of changes in streamflow and floods resulting from climate fluctuations and land use-drainage changes[J]. Climatic Change, 32(4):

- 411-421.
- Diem J E, Brown D P. 2003. Anthropogenic impacts on summer precipitation in central Arizona, U.S.A[J]. *The Professional Geographer*, 55(3): 343-355.
- Dixon P G, Mote T L. 2003. Patterns and causes of Atlanta's urban heat island-initiated precipitation[J]. *Journal of Applied Meteorology*, 42(9): 1273-1284.
- Easterling D R, Meehl G A, Parmesan C, et al. 2000. Climate extremes: Observations, modeling, and impacts[J]. *Science*, 289: 2068-2074.
- Easton Z M, Gérard-Marchant P, Walter M T, et al. 2007. Hydrologic assessment of an urban variable source watershed in the northeast United States[J]. *Water Resources Research*, 43(3): doi: 10.1029/2006WR005076.
- Franchini M, Pacciani M. 1991. Comparative analysis of several conceptual rainfall-runoff models[J]. *Journal of Hydrology*, 122(1-4): 161-219.
- Frank M J. 1979. On the simultaneous associativity of $F(x, y)$ and $x+y-F(x, y)$ [J]. *Aequationes Mathematicae*, 19(1): 194-226.
- Genest C, Favre A C, Béliveau J, et al. 2007. Metaelliptical copulas and their use in frequency analysis of multivariate hydrological data[J]. *Water Resources Research*, 43(9): doi: 10.1029/2006WR005275.
- Goubanova K, Li L. 2007. Extremes in temperature and precipitation around the Mediterranean Basin in an ensemble of future climate scenario simulations[J]. *Global and Planetary Change*, 57(1-2): 27-42.
- Graf W L. 1977. Network characteristics in suburbanizing streams[J]. *Water Resources Research*, 13(2): doi: 10.1029/WR013i002p00459.
- Gregory J H, Dukes M D, Jones P H, et al. 2006. Effect of urban soil compaction on infiltration rate[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 61(3): 117-124.
- Guo X L, Fu D H, Wang J. 2006. Mesoscale convective precipitation system modified by urbanization in Beijing City[J]. *Atmospheric Research*, 82(1-2): 112-126.
- Hand L M, Shepherd J M. 2009. An Investigation of warm-season spatial rainfall variability in Oklahoma City: Possible linkages to urbanization and prevailing wind[J]. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 48(2): 251-269.
- Hanel M, Buishand T A, Ferro C A T. 2009. A nonstationary index flood model for precipitation extremes in transient regional climate model simulations[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 114(D15): doi: 10.1029/2009JD011712.
- Hollis G E. 1975. The effect of urbanization on floods of different recurrence interval[J]. *Water Resources Research*, 11(3): doi: 10.1029/WR011i003p00431.
- Hsu M H, Chen S H, Chang T J. 2000. Inundation simulation for urban drainage basin with storm sewer system[J]. *Journal of Hydrology*, 234(1-2): 21-37.
- Hu H B. 2014. An algorithm for converting weather radar data into GIS polygons and its application in severe weather warning systems[J]. *International Journal of Geographical Information Science*, 28(9): 1765-1780.
- Hu H B. 2015. Spatiotemporal characteristics of rainstorm-induced hazards modified by urbanization in Beijing[J]. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 54(7): 1496-1509.
- Hu H B, Wang J, Pan J. 2014. The characteristics of lightning risk and zoning in Beijing simulated by a risk assessment model[J]. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 14(8): 1985-1997.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). 2007. Climate change 2007: The physical science basis. Contribution of working group I to the fourth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change[M]. Cambridge, UK: Cambridge University Press.
- Johnson M S, Coon W F, Mehta V K, et al. 2003. Application of two hydrologic models with different runoff mechanisms to a hillslope dominated watershed in the northeastern US: A comparison of HSPF and SMR[J]. *Journal of Hydrology*, 284(1-4): 57-76.
- Jongman B, Kreibich H, Apel H, et al. 2012. Comparative flood damage model assessment: Towards a European approach[J]. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 12(12): 3733-3752.
- Kaufmann R K, Seto K C, Schneider A, et al. 2007. Climate response to rapid urban growth: Evidence of a human-induced precipitation deficit[J]. *Journal of Climate*, 20(10): 2299-2306.
- Krishnamurthy C K B, Lall U, Kwon H H. 2009. Changing frequency and intensity of rainfall extremes over India from 1951 to 2003[J]. *Journal of Climate*, 22(18): 4737-4746.
- Kubal C, Haase D, Meyer V, et al. 2009. Natural hazards and earth system sciences integrated urban flood risk assessment-adapting a multicriteria approach to a city[J]. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 9(6): 1881-1895.
- Kunkel K E, Pielke R A Jr, Changnon S A. 1999. Temporal fluctuations in weather and climate extremes that cause economic and human health impacts: A review[J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 80(6): 1077-1098.
- Lee J G, Heaney J P. 2003. Estimation of urban imperviousness and its impacts on storm water systems[J]. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 129(5): 419-426.

- Meyer V, Scheuer S, Haase D. 2009. A multicriteria approach for flood risk mapping exemplified at the Mulde River, Germany[J]. *Natural Hazards*, 48(1): 17-39.
- Mills G. 2007. Cities as agents of global change[J]. *International Journal of Climatology*, 27(14): 1849-1857.
- Mölders N, Olson M A. 2004. Impact of urban effects on precipitation in high latitudes[J]. *Journal of Hydrometeorology*, 5(3): 409-429.
- Moscip A L, Montgomery D R. 1997. Urbanization, flood frequency, and salmon abundance in Puget Lowland streams [J]. *Journal of the American Water Resources Association*, 33(6): 1289-1297.
- Mote T L, Lacke M C, Shepherd J M. 2007. Radar signatures of the urban effect on precipitation distribution: A case study for Atlanta, Georgia[J]. *Geophysical Research Letters*, 34(20): L20710.
- Nelsen R B. 1999. An introduction to copulas[M]. New York: Springer-Verlag.
- Ogden F L, Sharif H O, Senarath S U S, et al. 2000. Hydrologic analysis of the Fort Collins, Colorado, flash flood of 1997[J]. *Journal of Hydrology*, 228(1-2): 82-100.
- Peterson T C, Hoerling M P, Stott P A, et al. 2013. Explaining extreme events of 2012 from a climate perspective[J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 94(9): S1-S74.
- Pielke R A, Adegoke J, Beltrán-Przekurat A, et al. 2007. An overview of regional land- use and land-cover impacts on rainfall[J]. *Tellus: Chemical and Physical Meteorology*, 59 (3): 587-601.
- Price C, Rind D. 1994. Possible implications of global climate change on global lightning distributions and frequencies [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 99 (D5): doi: 10.1029/94JD00019.
- Prosdoci I, Kjeldsen T R, Miller J D. 2015. Detection and attribution of urbanization effect on flood extremes using nonstationary flood-frequency models[J]. *Water Resources Research*, 51(6): doi: 10.1002/2015WR017065.
- Prudhomme C, Reed D W. 1999. Mapping extreme rainfall in a mountainous region using geostatistical techniques: A case study in Scotland[J]. *International Journal of Climatology*, 19(12): 1337-1356.
- Ramanathan V, Crutzen P J, Kiehl J T, et al. 2001. Aerosols, climate, and the hydrological cycle[J]. *Science*, 294: 2119-2124.
- Rossman L A. 2010. Storm water management model user's manual, version 5.0. Tech Rep. EPA/600/R- 05/040[M]. Cincinnati, OH: U.S. EPA National Risk Management Research Laboratory.
- Rozoff C M, Cotton W R, Adegoke J O. 2003. Simulation of St. Louis, Missouri, land use impacts on thunderstorms[J]. *Journal of Applied Meteorology*, 42(6): 716-738.
- Scawthorn C, Flores P, Blais N, et al. 2006. HAZUS- MH flood loss estimation methodology. II. Damage and loss assessment[J]. *Natural Hazards Review*, 7(2): 72-81.
- Sharif H O, Yates D, Roberts R, et al. 2006. The use of an automated nowcasting system to forecast flash floods in an urban watershed[J]. *Journal of Hydrometeorology*, 7(1): 190-202.
- Sheeder S A, Ross J D, Carlson T N. 2002. Dual urban and rural hydrograph signals in three small watersheds[J]. *Journal of the American Water Resources Association*, 38(4): 1027-1040.
- Shepherd J M. 2005. A review of current investigations of urban-induced rainfall and recommendations for the future [J]. *Earth Interactions*, 9(12): 1-27.
- Shepherd J M, Burian S J. 2003. Detection of urban-induced rainfall anomalies in a major coastal city[J]. *Earth Interactions*, 7(4): 1-16.
- Shepherd J M, Mote T, Dowd J, et al. 2011. An overview of synoptic and mesoscale factors contributing to the disastrous Atlanta flood of 2009[J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 92(7): 861-870.
- Shepherd J M, Pierce H, Negri A J. 2002. Rainfall modification by major urban areas: Observations from spaceborne rain radar on the TRMM satellite[J]. *Journal of Applied Meteorology*, 41(7): 689-701.
- Smith J A, Baack M L, Meierdiercks K L, et al. 2005. Field studies of the storm event hydrologic response in an urbanizing watershed[J]. *Water Resources Research*, 41(10): doi: 10.1029/2004WR003712.
- Smith J A, Baack M L, Morrison J E, et al. 2002. The regional hydrology of extreme floods in an urbanizing drainage basin[J]. *Journal of Hydrometeorology*, 3(3): 267-282.
- Smith J A, Bradley A A, Baack M L. 1994. The space-time structure of extreme storm rainfall in the southern plains [J]. *Journal of Applied Meteorology*, 33(12): 1402-1417.
- Smith J A, Miller A J, Baack M L, et al. 2005. Extraordinary flood response of a small urban watershed to short-duration convective rainfall[J]. *Journal of Hydrometeorology*, 6 (5): 599-617.
- Stallins J A, Rose L S. 2008. Urban lightning: Current research, methods, and the geographical perspective[J]. *Geography Compass*, 2(3): 620-639.
- Sun X, Mein R G, Keenan T D, et al. 2000. Flood estimation using radar and raingauge data[J]. *Journal of Hydrology*, 239(1-4): 4-18.
- Tang Z, Engel B A, Pijanowski B C, et al. 2005. Forecasting land use change and its environmental impact at a watershed scale[J]. *Journal of Environmental Management*, 76

- (1): 35-45.
- Tilford K A, Fox N I, Collier C G. 2002. Application of weather radar data for urban hydrology[J]. *Meteorological Applications*, 9(1): 95-104.
- Tim L, Bornstein R D. 1977. Observations of mesoscale effects on frontal movement through an urban area[J]. *Monthly Weather Review*, 105(5): 563-571.
- Trenberth K E, Jones P D. 2007. Observations: Surface and atmospheric climate change[M]//Solomon S, Qin D, Manning M, et al. *Climate change 2007: Working group I: The physical science basis*. Cambridge, UK: Cambridge University Press: 235-336.
- Turner-Gillespie D F, Smith J A, Bates P D. 2003. Attenuating reaches and the regional flood response of an urbanizing drainage basin[J]. *Advances in Water Resources*, 26(6): 673-684.
- United Nations Population Fund. 2007. Growing up urban: state of world population 2007: Youth supplement[M]. New York: United Nations Publications.
- Valeo C, Moin S M A. 1999. Variable source area modelling in urbanizing watersheds[J]. *Journal of Hydrology*, 228(1-2): 68-81.
- Wetterhall F, Graham L P, Andréasson J, et al. 2011. Using ensemble climate projections to assess probabilistic hydrological change in the Nordic region[J]. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 11(8): 2295-2306.
- Wolff C G, Burges S J. 1994. An analysis of the influence of river channel properties on flood frequency[J]. *Journal of Hydrology*, 153(1-4): 317-337.
- Wright D B, Smith J A, Villarini G, et al. 2012. Hydroclimatology of flash flooding in Atlanta[J]. *Water Resources Research*, 48(4): doi: 10.1029/2011WR011371.
- Yang G X, Bowling L C, Cherkauer K A, et al. 2010. Hydroclimatic response of watersheds to urban intensity: An observational and modeling-based analysis for the White River Basin, Indiana[J]. *Journal of Hydrometeorology*, 11(1): 122-138.
- Yu R C, Li J, Yuan W H, et al. 2010. Changes in characteristics of late-summer precipitation over eastern China in the past 40 years revealed by hourly precipitation data[J]. *Journal of Climate*, 23(12): 3390-3396.
- Zhang C L, Chen F, Miao S G, et al. 2009. Impacts of urban expansion and future green planting on summer precipitation in the Beijing Metropolitan Area[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 114(D2): doi:10.1029/2008JD010328.
- Zhou T J, Song F F, Lin R P, et al. 2013. The 2012 north china floods: Explaining an extreme rainfall event in the context of a longer-term drying tendency[J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 94(9): S49-S52.

Research progress of surging urban flood risks

HU Haibo

(Institute of Urban Meteorology, China Meteorological Administration, Beijing 100089, China)

Abstract: Due to the frequent occurrence of floods in urban areas, it is imperative to investigate their causes and determine whether they are mainly the result of global climate change or urbanization induced by human activities. Existing research on the impact of urbanization on urban floods focuses on hazards assessment as well as sensitivity tests. They are critical to risk reduction and severe weather early warning. Precipitation intensity downwind or over cities may be enhanced. Meanwhile the increased areal coverage of impervious surfaces in urban areas can alter the natural hydrologic response. In order to reveal the spatiotemporal characteristics of elevated flood risks in urban areas, by examining published work on the topics, we put forward the following thoughts on future research direction. The first is to use high spatial resolution observation data to determine the distribution of hazards induced by rainstorms in urban areas. The second is to develop suitable hydrological models using high resolution urban land surface data for simulating the hydroclimatic sensitivity of watersheds. The third is to combine rainstorm hazards and sensitivity in risk assessment to reveal the discrepancy of flood risks in urban areas, as well as effects induced by urbanization. Risk assessment identifies flood risks in urban areas and can be useful for risk management, which is essential in risk mitigation.

Key words: flash flood; risk assessment; hydrological model; research progress