

基于“H-E-V”框架的城市洪涝风险评估研究进展

张 会^{1,2}, 李 铖³, 程 炯³, 吴志峰^{4*}, 吴艳艳⁴

(1. 中国科学院广州地球化学研究所, 广州 510640; 2. 中国科学院大学, 北京 100049;
3. 广东省生态环境技术研究所, 广州 510650; 4. 广州大学地理科学学院, 广州 510006)

摘 要:在全球气候变化与城市扩张的背景下,城市洪涝问题频发并引发严重的社会问题与经济损失。当前城市洪涝管理的主要内容已从工程性防御性措施转向洪涝风险管理,而城市洪涝风险评估又是城市洪涝管理的关键环节。基于此背景,论文首先介绍了IPCC采纳的城市洪涝风险评估框架“危险性(Hazard)—暴露性(Exposure)—脆弱性(Vulnerability)”即“H-E-V”的概念内涵,在此基础上梳理了其危险性、暴露性、脆弱性3大要素的主要研究内容,探讨分析不同研究方法的优缺点。最后提出了城市洪涝风险评估的主要发展趋势及关键问题,主要有以下4个方面:①危险性方面,建立适应于城市地区的耦合型二维洪涝淹没模型是洪涝风险评估要求下的必然趋势;②暴露性分析在大数据及GIS技术支撑下正逐步精细化、动态化;③脆弱性正从早期侧重的物理维度定量评估转向社会、经济、文化、环境等多维度的评估;④此外,气候变化与城市扩张下的多情景城市洪涝风险评估是未来城市洪涝管理的研究热点与难题。

关键词:城市洪涝风险评估;危险性;暴露性;脆弱性;气候变化;城市扩张

在气候变化与城市化的背景下,全球城市洪涝灾害频发,造成严重的社会经济问题,如经济损失、交通堵塞、环境污染、居民出行及健康风险等(Wheater et al, 2009; IPCC, 2014; Kuklicke et al, 2016; Sofia et al, 2017)。城市化进程中以不透水面增加为主的土地利用变化,减少了地表下渗,增加了地表径流(Arnold et al, 1996; Gilroy et al, 2012)。而城市基础设施建设与城市发展不协调,如排水管网标准普遍偏低,导致城市洪涝问题的出现。以极端降雨及海平面上升为主要特征的气候变化又加剧了这一趋势。与此同时,城市化进程中人口与资产逐渐向城市聚集(张建云等, 2014; Slater et al, 2016),导致城市洪涝的影响范围及强度进一步增加。因此城市洪涝已成为城市管理亟需解决的问

题,受到各国政府部门及相关学者的关注(IPCC, 2012; Woodruff et al, 2013; 宋晓猛等, 2014; Adelekan et al, 2015; Slater et al, 2016)。

当前城市洪涝管理已从以灰色设施为主的工程性防御措施转变为以风险管理为主(Johnson et al, 2007)。城市洪涝风险评估与风险减轻是风险管理的两大组成部分(Schanze et al, 2007)。城市洪涝风险评估的目的是分析当前或未来的洪涝风险信息,识别高风险区域(Muis et al, 2015; Moritz et al, 2016),进而为洪涝减轻措施提供决策支撑,同时也是评估其减轻措施有效性的手段(Meyer et al, 2009; Zhou et al, 2012)。城市洪涝风险评估中主要框架有“概率(Probability)—后果(Consequence)”(Meyer et al, 2009)与“危险性(Hazard)—暴露性(Ex-

收稿日期:2018-03-30;修订日期:2018-09-14。

基金项目:广东省科技计划项目(2016A020223009);国家自然科学基金项目(41671430)。[Foundation: The Science and Technology Project of Guangdong Province, No. 2016A020223009; National Natural Science Foundation of China, No. 41671430.]

第一作者简介:张会(1987—),女,河南驻马店人,博士生,主要从事遥感与GIS应用研究、城市洪涝风险评估研究。

E-mail: huihui945726@163.com

*通信简介:吴志峰(1969—),男,湖南湘潭人,教授,主要从事地理学、土地科学与遥感与GIS应用研究。

E-mail: gzuwzf@163.com

引用格式:张会,李铖,程炯,等. 2019. 基于“H-E-V”框架的城市洪涝风险评估研究进展[J]. 地理科学进展, 38(2): 175-190. [Zhang H, Li C, Cheng J, et al. 2019. A review of urban flood risk assessment based on the framework of hazard-exposure-vulnerability. Progress in Geography, 38(2): 175-190.] DOI: 10.18306/dlkxjz.2019.02.003

posure)一脆弱性(Vulnerability)”即“H-E-V”(Merz et al, 2004; Haynes et al, 2008; IPCC, 2014; Giupponi et al, 2015)。相对于前者,“H-E-V”框架评估内容全面且明确,同时又具有较好的操作性,受到学者与研究机构的广泛使用。如IPCC采用此框架评估城市洪涝风险。“H-E-V”框架由危险性、暴露性、脆弱性三大内容组成:

洪涝风险=危险性(H)×暴露性(E)×脆弱性(V) (1)

危险性是洪涝风险分析的第一步,用于识别洪涝发生的空间位置及强度,包括淹没范围、深度、流速和时间等(Apel et al, 2008; Zhou et al, 2012)。暴露性指受洪涝危险性影响到的风险要素,具体指受影响的人、建筑、财产、经济活动与其他人类活动(Camarasa-Belmonte et al, 2012; IPCC, 2012; De Bono et al, 2014),是连接危险性与脆弱性的桥梁(Yin et al, 2014)。脆弱性概念涉及社会学、气候变化、灾害管理等不同学科及专业领域,由于不同学科的研究侧重点不同,所以目前为止,脆弱性还没有统一的概念(Birkmann, 2007; Kablan et al, 2017)。脆弱性的概念存在争议是当前城市洪涝风险评估最大的障碍之一(Mechler et al, 2014; Koks et al, 2015)。可持续科学中脆弱性分析框架(The Framework for Vulnerability Analysis in Sustainability Science, SUST) (Kasperson et al, 2003)、欧洲脆弱性改善框架(Method for the Improvement of Vulnerability in Europe, MOVE) (Birkmann et al, 2013)和一些学者的研究(Turner et al, 2003; Cutter et al, 2008; Krellenberg et al, 2016)认为脆弱性应包括城市在洪涝中的暴露性、易损性、应对/恢复能力。而有些研究则将暴露性(Koks et al, 2015; Li C et al, 2016; Löwe et al, 2017; Tapia et al, 2017)或应对/恢复能力(Foudi et al, 2015)排除在外,将二者作为城市洪涝风险评估中的独立部分。第5次IPCC报告认为脆弱性、危险性与暴露性是气候变化驱动下风险评估的三大核心内容,并将脆弱性定义为对洪涝不利影响的倾向性,包括易损性与应对/恢复能力(IPCC, 2014)。本文采用最近的IPCC报告中的脆弱性概念。易损性与应对/恢复能力两部分可通过物理、社会、经济、生态、文化、政策、风险认知等多维度特征进行评估(Cho et al, 2017; Kita, 2017)。

在当前城市洪涝风险评估的综述方面,涉及危险性方面的文章较多(Fletcher et al, 2013; Salvadore et al, 2015; Chalkias et al, 2016; Teng et al,

2017),而在暴露性、脆弱性方面较少。在危险性研究方面,Teng等(2017)将计算危险性的洪涝淹没模型分为经验模型、水动力学模型、简化模型三大类,分析其优点、局限性和如何处理不确定性问题,并讨论其最新进展及未来方向,但未详细陈述城市地区对洪涝建模的需求;刘勇等(2015)从智慧城市视角出发,认为城市雨季洪涝(内涝)建模精细化、与RS和GIS技术融合及注重时空过程和智慧服务是城市洪涝模拟发展的必然趋势,但未关注城市不同洪涝类型对建模的需求;Fletcher等(2013)与Salvadore等(2015)侧重分析城市水文过程及建模机理,认为城市水文建模应该注重其时空分辨率、水文过程交互和不确定性分析,但未对城市洪涝建模的应用进行深入探讨。在脆弱性研究方面,石勇等(2009)重点对洪涝灾害中能量化评估脆弱性物理维度的灾损率曲线展开分析,总结了灾损曲线的起源、建立方法和综合运用的趋势,但未关注脆弱性的社会等其他维度;Cho等(2017)分析了2006—2016年近10年间城市洪涝脆弱性中的物理维度、机构维度和社会维度,但是在方法的对比及未来研究展望方面探讨不充分。Yin等(2014)在“H-E-V”的基础上综述了中国在城市洪涝风险评估的研究进展,但未关注国外的研究现状。由于城市地区自然与社会方面的复杂性给城市洪涝造成了很大的不确定性,所以本文从城市洪涝管理的现实需求出发,全面梳理国内外城市洪涝风险评估的研究内容,分析其研究方法的适用范围及优缺点,并探讨其未来的发展趋势与面临的关键问题,旨在为城市洪涝管理提供科学的决策依据。

1 城市洪涝风险评估评述

1.1 危险性

危险性分析主要目的是获取城市洪涝的淹没范围、深度、流速等属性信息,为下一步的暴露性、脆弱性分析作准备,其中淹没深度、流速是最常用的属性(Schanze et al, 2007; Teng et al, 2017)。其主要方法有历史灾情法与模型模拟法(Koch et al, 2016)。在城市洪涝风险评估中需求的视角下分析和讨论这些方法的适用性,可有效指导不同城市构建满足自身需求的危险性计算方法。

(1) 历史灾情法是统计以往的洪涝事件中观测的淹没范围、深度、流速及产生此次洪涝事件的降

雨强度(Yang T H et al, 2015; Koch et al, 2016)。此方法有很强的时效性,通常认为其精度较高,只能提供事后的洪涝风险评估,但可为洪涝淹没模型提供验证数据。近年来机器学习与多次历史灾情数据结合成为新的研究热点。机器学习通过建立淹没结果(淹没范围、深度等)与洪涝的诱发因素(降雨、地形、土地利用等)之间的关系,预测以后的洪涝危险性强度(Wang et al, 2015; Lai et al, 2017; Mojaddadi et al, 2017)。如 Wang 等(2015)利用随机森林对东江流域多年洪涝危险性数据进行分析,识别了对危险性贡献最大的5个因子:3 d最大降雨量、径流深度、台风频率、高程和地形湿润指数。Mojaddadi等(2017)综合利用频率比与支持向量机的方法,识别与洪涝相关的因素,进而获取洪涝频率图,然后结合洪涝触发因子降雨与淹没深度,获取研究区的洪涝风险图。

(2) 模型模拟法是获取危险性信息的主流方法。城市洪涝风险下的淹没模型方法选择,不仅要考虑到模型模拟的结果输出,还需考虑城市面临的洪涝源的差异,如城市可能面临河流洪涝、雨季洪涝、沿海洪涝中的1种或多种叠加的情景(Glenis et al, 2013; Dieperink et al, 2016; Tapia et al, 2017)。城市洪涝淹没模型根据计算方法及其物理机制划分为水文模型、水力学模型和简化模型(张建云等, 2014; Teng et al, 2017)。水文模型通过子汇水区单元及排水系统概化处理只能得到最终的淹没范围及深度,不能模拟地表积水深度以及流速等非模型节点处的洪涝动态过程。但是水文模型对数据要求及计算成本都较低,所以目前其在洪涝模拟中的应用较广泛。水力学模型根据其模型空间表达的不同,模型可分为1D和2D模型(Teng et al, 2017),例如1D模型的空间单元为一系列的横断面;2D模型则有规则格网、非结构格网和弹性格网。在方法上,水力学模型采用圣维南方程与2D浅水方程模拟城市洪水的演进过程,能表达城市地区高度的空间异质性,如城市地形特征及建筑物空间分布,且能动态获取洪涝过程中的地表积水深度及流速(宋晓猛等, 2014),更能满足城市洪涝风险评估的需求。但是它对数据的要求与计算成本比较高,所以其实际应用受到一定的限制(刘勇等, 2015)。在一些较难获取数据的城市地区,对数据要求较低的简化模型不失为一种选择。这些模型通常简化降雨—径流—积涝的演进过程,以水体由高向低流动的

这一原理,利用GIS工具在研究区地形的基础上获取洪涝的淹没范围及深度。在城市洪涝风险评估中常用的简化模型有基于SCS的内涝简化模型(Yin et al, 2011; 权瑞松等, 2015)、HAND(Height Above the Nearest Drainage)模型(Nobre et al, 2016)和元胞自动机模型等(Ghimire et al, 2013)。

在城市面临的洪涝源方面,城市雨季洪涝则指强降雨引发城市内部排水管网能力不足造成的积水现象,现在的城市内涝多属于此类。常用的模型有SWMM、MIKE Urban、InfoWorks CS和CityCAT等(Petrucci et al, 2014; Gaudio et al, 2015; Bisht et al, 2016; Bertsch et al, 2017)。常用的水文模型SWMM能获取雨水口的溢流量,淹没深度与流速的获取还需借助GIS技术或耦合地表二维水利计算(黄国如等, 2015; 王昊等, 2018)。城市河流洪涝常用的模型有HEC-RAS、MIKE Flood和InfoWorks CS等(Costabile et al, 2015; Vojinovic et al, 2015; Patel et al, 2017)。如 Vojinovic 等(2015)、Patel 等(2017)分别根据已有HEC-RAS与MIKE Flood模型构建研究区城市河流洪涝模型,获取流速及淹没深度信息。而Koch等(2016)在1D圣维南方程与2D浅水方程的基础上构建城市河流洪涝淹没模型。沿海洪涝指由于台风引发的风暴潮或潮汐造成的海水倒灌现象。沿海洪涝模拟要借助于风暴潮模型(如ADCIRC)、潮汐模型(如Delft3D-FLOW)、综合的水动力学模型(如MIKE21)和GIS的“水位”法(Yin et al, 2014)。如Takagi等(2016)利用Delft3D-FLOW模型对海洋潮汐建模,并模拟了湄公河三角洲Can Tho城市地区的淹没深度及流速。

需要关注的是有些城市特别是沿海城市面临着2种及以上洪涝源同时发生的情景,并且多种洪涝源同时发生的趋势正逐渐增加(Dieperink et al, 2016),所以在这些城市的洪涝模型模拟中需要根据实际情况对城市可能发生洪涝源模型进行耦合。目前已开展相关研究耦合了两种洪涝源的模拟,如Apel等(2016)建立Can Tho市雨季与河流同时发生的综合洪涝模型;Olbert等(2017)建立沿海城市Cork由于潮汐、风暴潮、河流淹没引发的多尺度综合洪涝模型,估算了洪涝演进过程中的淹没范围、深度、流速的时空变化。但是目前对于3种洪涝源(河流、雨季、沿海)同时发生的综合洪涝淹没模型的研究案例较少,因此需加强沿海地区3种洪涝源淹没的耦合模拟,以使之适应不同情况的城市洪涝

风险评估。

中国目前在城市洪涝的危险性研究方面同国际上相似,侧重模型模拟。如朱呈浩等(2018)在水文模型SWMM的基础上模拟了西安市沣西新城区洪涝过程。而初祁等(2014)则利用MIKE系列模型构建北京天堂河下游地区1D和2D水动力学模型,耦合模拟了不同暴雨重现期下的淹没特性。吴旭树等(2016)耦合SWMM和2D水动力模型LIS-FLOOD-FP建立适宜华南沿海地区的暴雨洪涝模型,模拟了不同暴雨重现期(1~20 a)及极端环境(100 a暴雨重现期,地面沉降0.5 m和运河水位抬升0.7 m)下的淹没水深及范围。段丽瑶等(2014)通过改进城市内涝仿真模型使得模型能同时模拟内涝及风暴潮的淹没情景。张念强等(2013)耦合SCS、简化的城市排水模型、2D水动力模型,模拟了城市中河流洪涝、雨季洪涝及二者同时发生的洪涝风险危险性。中国水利水电科学研究院等单位(仇劲卫等, 2000)与陈洋波等(2015)分别自主开发了适用于天津与东莞的城市暴雨洪涝模型,模型都采用无结构化不规则网格单元划分法,利用2D非恒定流水力方程计算地表水流运动与内涝积水。综上所述,国内在城市洪涝的建模方面也开始关注城市多洪涝源同时发生的情景。目前主要的建模方法可归纳为2种:一是直接利用现有的1种或耦合多种洪涝模拟软件模拟危险性信息;二是根据水文水动力学方程自主开发城市洪涝模型。

1.2 暴露性

实地调查法与GIS空间分析方法(Chapin et al, 2008; Tran et al, 2009; Jalayer et al, 2014)是暴露性分析的主要方法。实地调查法可通过灾后走访或仪器监测,获取受灾体的暴露性信息。与危险性的历史灾情法类似,该方法只能提供事后评估。GIS空间分析法通过对研究对象与城市洪涝危险性结果图进行叠加分析,识别暴露在洪涝中的房屋、道路、人口的空间位置数量等信息。房屋建筑是城市暴露性分析中一直关注的内容(Quan et al, 2010; Hanson et al, 2011; Yin et al, 2011; Kebede et al, 2012; Shepard et al, 2012; Weis et al, 2016)。近年来,随着获取数据手段的增加及精度的提高,暴露性分析结果逐渐精细化、动态化。如常用的人口普查数据受到行政单元或时间维度分辨率不足的限制(Smith et al, 2014),不能满足实时动态的暴露性分析。Maantay等(2009)开发了新的人口制图方法

“基于专家系统的地籍分区密度”,这种方法根据建筑物分布通过降尺度分解人口普查数据,估算了纽约市100 a与500 a暴雨重现期洪涝的人口暴露性。这种方法虽然能获取精细尺度的人口分布,但获取的仍然是静态的人口。近年来,新的方法及数据的出现使得实时动态的人口获取成为可能。Smith等(2014)构建了南安普敦市200 m网格人口时空模型,分析了1天3个不同时间段的人口分布,结果表明由于工作人口的移动,造成河流洪涝与潮汐洪涝中人口暴露性的变化。另外大数据方面的人口热力图在人口暴露性动态化分析中有很大的应用潜力。一些学者也开展了城市洪涝中交通暴露性研究,如Pregolato等(2017)通过一系列观测和实验数据源建立洪水深度与车辆速度的函数关系,识别纽卡斯尔市在10 a与50 a一遇的城市雨季洪涝中的道路畅通情况。

国内研究在暴露性方面,除了关注城市不同用地类型的暴露性外(Yin et al, 2011; 权瑞松等, 2011; 石勇等, 2011),还关注了易受暴雨影响的城市交通,如地铁站等。如权瑞松等(2011)模拟上海市仓储、公共建筑等6种建筑类型与地铁(权瑞松, 2015)在不同暴雨情景下的淹没深度,在考虑不同积水深度的基础上建立暴露性指数来评价不同用地类型的暴露水平。但是目前国内在人口的暴露性方面研究较少。

1.3 脆弱性

洪涝风险评估的侧重点已从早期的危险性过渡到以脆弱性为主(Yin et al, 2014)。当前研究中脆弱性评估的主要方法是灾损曲线法(Merz et al, 2004; Meyer et al, 2009; Hsu et al, 2011; Domeneghetti et al, 2015; Glas et al, 2017)与多准则指标评价法(Müller et al, 2011; Castro et al, 2016; Kotzee et al, 2016; Fatemi et al, 2017; Kablan et al, 2017; Liang et al, 2017; Sadeghi-Pouya et al, 2017a)。

灾损曲线法通过统计洪涝事件发生后的洪涝损失后经数学计算发展而来,通过建立淹没深度与不同建筑物/土地利用类型损失值之间的函数关系,以货币形式量化估算不同土地利用类型或建筑物在洪涝事件中的损失值(Merz, 2010; Domeneghetti et al, 2015; Li C et al, 2016; Albano et al, 2017)。很多发达国家建立了完整的灾损曲线数据库(石勇等, 2009),使灾损曲线法在评估建筑物损失中得到广泛的应用(Apel et al, 2008; Vu et al, 2017)。此外,

城市洪涝灾害损失受多种因素的影响,只考虑淹没深度的灾损曲线会导致结果存在很大的不确定性(Thieken et al, 2016)。在数据挖掘技术的支撑下(Kreibich et al, 2017),基于多变量的灾损曲线法(Merz et al, 2004; Penning-Rowsell et al, 2005; Wahab et al, 2016; Chinh et al, 2017; Speight et al, 2017)考虑淹没时间、流速、建筑类型、建筑质量等对洪涝损失的影响,用来改善脆弱性评估结果。

多准则指标评价法涉及的关键问题是指标的选取及其权重的确定。其中指标的选取与洪涝类型、空间尺度、研究区特征等相关(Müller et al, 2011; Krellenberg et al, 2016; Tapia et al, 2017; Speight et al, 2017)。其中权重确定的方法有层次分析法(AHP)、模糊逻辑、主成分分析(PCA)、专家打分等(Kandiloti et al, 2011; Pradhan, 2011; Kotzee et al, 2016; Araya-Munoz et al, 2017)。上述方法能通过对指标归类并进行权重赋值以获取易损性与恢复/应对能力在物理、社会、经济、生态、政策、风险感知等维度的单独或综合脆弱性。与灾损曲线方法不同的是,指标评价法的内容更丰富,包括社会、经济、应对/恢复维度等,但是其不能完全量化分析,权重赋值在一定程度上存在主观性,而且关注研究尺度是城市社区及以上尺度。在城市洪涝脆弱性研究的内容方面,大部分侧重于基于灾损曲线法估算的脆弱性评估,但近年发达国家开始脆弱性的社会、经济、应对/恢复等多维度研究(Apel et al, 2008; Cho et al, 2017)。以下案例从脆弱性的不同维度出发开展相关研究:Rimba等(2017)综合遥感数据、GIS、AHP方法,选取降雨强度、排水密度、土壤类型、土地利用类型4类指标分析了日本冈崎市城市洪涝的物理脆弱性;Ajibad等(2013)利用描述性统计与卡方检验方法分析问卷调查数据,认为决定女性在洪涝风险意识与应对能力的主要因素不是性别而是经济社会地位、就业状况、医疗福利;Kotzee等(2016)选取了与社会-生态-基础设施-经济相关的24个指标,利用权重与主成分分析方法构建综合的洪涝弹性指数;Tapia等(2017)选取了61指标,利用因子分析和主成分分析获取指标权重,详细分析了欧洲城市在3种不同洪涝下(571个城市雨季洪涝,365个城市河流洪涝,92个沿海城市洪涝)的易损性及应对/恢复能力在物理、社会-经济维度的综合脆弱性。

国内脆弱性方面集中在基于灾损曲线的定量

化损失评估。但是由于国内在洪涝损失实际统计数据不足,还没建立普遍适用的灾损曲线数据库,大部分的灾损曲线是基于单个洪涝事件的现场问卷调查数据,还有部分研究是借鉴研究区外已有的灾损曲线,这进一步增大了脆弱性评估结果的不确定性并限制了灾损曲线的推广。如刘耀龙等(2011)、姜鏊鹏(2012)、石勇(2014)、王诗晨(2015)根据单个洪涝事件的实地问卷调查分别构建了温州市麻步镇和水头镇、口前镇、上海市、巢湖流域居民建筑内外部或商业住房的灾损曲线。而刘泽照(2018)则是借鉴尹占娥(2009)建立的上海市灾损-曲线绘制了西安钟元社区在不同暴雨情景下的脆弱性分布图。同时笔者注意到国内研究者在问卷调查的基础上开始关注基于多变量灾损曲线的建立,如石勇(2015)在实际问卷调查的基础上利用合成法构建基于不同收入阶层的脆弱性曲线,评估上海市龙华镇在潮位上升5 m、5.5 m和6 m等3种不同情景下的洪涝损失;曹诗嘉等(2015)在调查问卷的基础上不仅建立了台风风暴潮、暴雨降雨2种洪涝源共同引发的次生沿海洪水灾害的居民建筑与商业用房室内财产的灾损曲线,还评估了淹没时长、减灾措施等因素对损失率大小及脆弱性曲线不确定性的影响。此外,中国学者的研究还涉及电网的脆弱性与人口在洪涝中损失评估,如王峰渊等(2018)根据电网的暴雨灾害形成机制,选取反映孕灾环境敏感性、承灾体暴露性和防灾减灾能力的DEM、河网、植被、财政收入以及电网资料等指标,评估了临海地区的电网脆弱性分布;扈海波等(2014)建立了适用于暴雨灾害人员损失风险快速评估模型,并以北京市的“7·21”和“6·23”暴雨为案例,进行了模型的应用及检验分析。

1.4 综合洪涝风险评估

综合洪涝风险评估利用GIS技术(Zhou et al, 2012)和机器学习方法(Balbi et al, 2016; Araya-Munoz et al, 2017; Lai et al, 2017),综合前述的三大主要内容(危险性、暴露性、脆弱性),获取最终风险评估结果。根据评估结果形式的差异,分为定量与半定量风险评估(Foudi et al, 2015; Vojinovic et al, 2015)。定量风险评估是估算房屋建筑、城市基础设施等单体建筑或不同土地利用类型在洪涝事件中的物理损失。在执行过程中,首先根据城市洪涝淹没模型模拟出不同暴雨重现期或特定洪涝事件中危险性与受灾体暴露性信息,再结合评估内容的

脆弱性灾损曲线,计算出研究区域以货币形式量化的灾害损失,其结果通常以货币形式量化的损失——概率风险曲线(Damage-probability Curve)或预期平均损失(Expected Annual Damage, EAD)表达(Merz et al, 2009; Chinh et al, 2017; Glas et al, 2017; Haer et al, 2017)。半定量的风险评估(Vojinovic et al, 2015; Christie et al, 2017; Sadeghi-Pouya et al, 2017b)主要用于社会、文化、环境等不能直接以货币形式量化损失的内容。其方法与脆弱性估算的指标评价方法类似,不同的是综合洪涝评估方面需要对危险性、暴露性、脆弱性三大指标进行综合估算,根据权重分析最后获取研究区域的综合风险分布图,最终结果是风险评估级别图,常以高风险区、中风险区、低风险区呈现。

传统的风险评估关注不同淹没深度下的房屋等量化损失评估,忽视了暴露要素脆弱性的多维度属性及空间变异(Meyer et al, 2009; Koks et al, 2015),导致了洪涝风险评估的片面与不完整性。所以综合城市洪涝风险评估需要结合定量与半定量风险评估方法评估其直接损失与间接损失。近些年综合的洪涝风险评估逐渐得到重视,如Foudi等(2015)根据风险评估框架对Ebro河流域城市地区的居民区与非居民区、农业用地、人口健康和生态服务价值进行综合风险评估。Vojinovic等(2015)采用水文淹没模型、问卷调查等定性与定量相结合的方法评估了泰国大城府地区雨季洪涝在物理、社会、经济、文化、风险意识方面的综合洪涝风险。其他综合洪涝风险评估相关案例如表1所示。

国内在综合洪涝评估方法同国际相同,普遍采用定量与半定量的方法建立研究区域的综合风险评估。如陈鹏等(2016)选取反映哈尔滨城区危险性、暴露性、脆弱性的气象、水文、经济及社会18个指标,评估了2000—2009年间城市洪灾风险及其空间演变模式。李国芳等(2013)选取分析长江三角洲6个典型城市区域建立了12个反映洪涝危险性、暴露性、脆弱性的指标,采用AHP方法评估了研究区域内1991、2001及2006年的综合洪涝风险。扈海波等(2013)将历史降雨数据作为危险性评价指标,人口密度、地均GDP、重点防汛指标为暴露性指标,地形因子、不透水地表组成、河网密度为敏感性指标构建了北京市暴雨积涝综合风险指数。石勇等(2011)与尹占娥(2009)根据上海市内涝仿真模型与基于SCS的简化内涝模型获取研究区的淹没深度,

并在此基础上建立了居民住宅的暴露性指数及脆弱性指数,最后评估该地区不同暴雨重现期下的城市内涝综合风险评估。苏伯尼等(2015)构建了龙岩市新罗区的2D水力学模型,并在借鉴尹占娥等(2010)建立的上海市洪涝灾损曲线,分别评估新罗区在不同暴雨重现期(5 a、20 a、100 a)的经济损失。综上所述,国内城市洪涝风险评估大多基于城市尺度,较少深入到城市内部,如街道或社区等。同时综合洪涝风险评估多集中在指标评价法的半定量风险评估,以洪涝损失为结果的定量评估较少。

此外,气候变化与城市扩张的不确定性给未来的洪涝管理带来了很大挑战(Oddo et al, 2017),而洪涝风险评估被认为是解决由气候变化与土地利用变化驱动而增加的洪涝风险的最佳选择(Dawson et al, 2008; Kuklicke et al, 2016; Pfeifer et al, 2017)。因此,气候变化与城市扩张下的城市风险评估已成为当前研究热点与难点(Moore et al, 2016; Pregnolato et al, 2017; Santos et al, 2017)。降雨与海平面上升被认为是气候变化影响洪涝风险不确定性的2个主要方面(Budiyono et al, 2015)。减少其不确定性通常采用多情景模拟法。首先是结合IPCC的SRES或RCPs情景下的全球气候模式(CMIP5、ECHAM6等)或区域气候模式(RegCM4.0、CCLM、HadCMD3等),通过格局尺度(Pattern Scaling)与天气生成器(Weather Generators)等降尺度方法获取城市尺度上的气候变化情景(Dawson et al, 2009),确定研究区域的降雨变化强度及海平面上升的高度。城市扩张主要通过SRES、RCPs情景、城市扩张模型(如SLEUTH)模拟城市未来在人口、经济与城市空间发展的情景。如Sekovski等(2015)关注了城市扩张对城市洪涝风险的影响,他利用水文模型及SLEUTH城市扩张模型分析意大利Emilia-Romagna地区不同城市扩张情景下3个暴雨重现期(10 a、100 a、>100 a)的洪涝风险范围。而Lin等(2017)评估了纽约市在城市发展、海平面上升、风暴潮气候变化多情景驱动下的洪涝风险,认为人口增长及城市发展对纽约市未来的洪涝风险影响较小。如果该研究增加气候变化对降雨影响,可成为未来气候变化与城市扩张对沿海城市洪涝风险影响的研究范例。此外,洪涝减轻措施对未来洪涝风险评估的影响已成为新的研究热点。如Jenkins等(2017)在利用主体模型模拟大伦敦地区不同气候变化情景下城市雨季洪水风险和脆弱性的动

表1 城市洪涝风险评估研究案例方法介绍
Tab. 1 Methods used in urban flood risk assessment cases

案例	洪涝源类型	方法				气候变与 城市扩张	结果形式
		危险性	暴露性	脆弱性	综合		
Zonensein et al, 2008	城市雨季洪涝	水文水力学模型	基于普查数据,实地调查的GIS空间分析	多准则指标法	GIS的多准则指标法	—	风险等级图 (半定量)
Yin et al, 2011; Li C et al, 2016	城市雨季洪涝	SCS/UFSM模型	实地调查的GIS空间分析	灾损曲线	EAD	—	损失值(定量)
Lang et al, 2016	城市河流洪涝	MLFP-2D模型	土地利用图的GIS空间分析	灾损曲线	EAD	—	同上
Meyer et al, 2009	城市河流洪涝	FloodCalc模型	基于普查数据、实地调查的GIS空间分析	灾损曲线,指标法	预期损失函数/GIS的多准则指标法	—	风险等级图、 损失值
Camarasa-Belmonte et al, 2012	城市河流洪涝	水文地貌法	基于普查数据、实地调查的GIS空间分析	—	—	—	风险等级图
Domeneghetti et al, 2015	城市河流洪涝	Quasi-2D模型	基于普查数据、实地调查的GIS空间分析	灾损曲线,指标法	预期损失函数	—	损失值
Fekete et al, 2017	城市河流洪涝	历史灾情法	实地调查的GIS空间分析	多准则指标法	基于GIS的多准则指标法	—	风险等级图
Li M et al, 2016	沿海洪涝	MIKE 21模型	基于土地利用图GIS空间分析	实地调查	GIS空间分析	—	风险等级图
Araya-Muñoz et al, 2017	城市河流与沿海洪涝	—	多准则指标法	多准则指标法	空间模糊逻辑方法	—	风险等级图
Chinch et al, 2017	城市雨季河流洪涝	综合水文水力学模型	基于土地利用图的GIS空间分析	灾损曲线	EAD	气候变化	损失值
Zhou et al, 2012	城市雨季洪涝	MIKE Urban	GIS空间分析	灾损曲线	EAD	气候变化	损失值及成本 效益评估
Moore et al, 2016	城市雨季洪涝	SWMM	GIS空间分析	排水管网脆弱性	—	气候变化,城市扩张	成本效益评估

注：UFSM表示城市洪涝模拟模型(Urban Flood Simulation Model, UFSM); MLFP-2D表示2维多级洪涝传播模型 (Multi-Level Flood Propagation 2-D, MLFP-2D); “—”表示不含此部分内容。

态演化过程的同时,也评估了可持续排水系统、财产保护措施、新洪涝保险计划3种洪涝风险减轻措施对未来洪涝损失的影响。其他气候变化与城市扩张下的城市洪涝风险评估案例如表1所示。

近年来,国内学者也逐渐关注气候变化与城市扩张对洪涝风险的影响,如Yang L等(2015)分析珠三角地区在3种RCPs气候变化情景下的降雨、海平面上升、台风强度及极端天气频率,评估该区域城市群在这些气候变化情景下的洪涝风险,并提出了适应气候变化的洪涝响应措施,但并未考虑研究区的城市扩张情景。谢志清等(2018)利用FloodArea模型模拟了4种RCPs气候变化情景下南京地区土地利用改变带来的洪涝风险,结果显示在RCP 2.6与RCP 4.5情景下,南京都市圈在2010—2100年间城市建设用地规模无明显变化,而在RCP 6.0与RCP 8.5情景下,洪涝灾害高影响区的城镇面积增加了5.14 km²与9.65 km²,并集中在地势低洼的禄口机场、江宁东山和溧水区。彭建等(2018)以深圳市茅洲河流域为例,基于SCS与等体积淹没法的洪涝淹没模型及城市扩张模型CLUE-S分析了深圳市茅洲河流域在2013—2020年间不同情景下(10 a~100 a)的暴雨洪涝灾害风险。综上所述,国内外大部分研究考虑研究区未来可能面临的洪涝灾害情景的部分可能性,并开始在此基础上提出相应的减轻措施。在未来的研究中,还需结合研究区面临的洪涝源情况,尽可能全面分析其当前及未来的洪涝风险,为洪涝减轻措施提供详细全面的决策依据。

2 发展趋势及展望

在城市扩张与气候变化下,全球城市洪涝灾害问题日益严峻。洪涝风险评估能为当前与今后的城市洪涝管理特别是为洪涝减轻措施决策提供科学依据。在城市洪涝管理的需求下,城市洪涝风险评估主要有以下3个发展趋势:

(1) 发展适用于城市洪涝风险评估的综合洪涝淹没模型:水文水力学洪涝淹没模型是用来获取危险性信息的主流方法,是洪涝风险评估的第一步。其结果精确性程度直接关系到后面的暴露性、脆弱性及整个综合洪涝风险评估结果的有效性。能获得淹没深度、流速信息且能适应城市多种洪涝源的二维洪涝淹没模型是未来发展的必然趋势。首先,遥感技术及城市水文监测网络的发展为城市洪涝

模型的建立及验证提供了丰富的数据支持。如遥感高分影像能提供高时空分辨率的城市土地覆盖/利用图;无人机可以监测城市地区的积水变化;LiDAR能分辨出精细的城市地表特征;城市地区的管网数字化为城市小尺度上洪涝模型建立提供了数据基础。在城市水文机理方面,已有水文实验用于监测分析建筑屋顶、透水铺装、雨水口、城市绿地等的水文特征。此外,有效不透水面的量化及空间分布在影响地表产汇流方面也取得了丰富的研究成果。考虑到城市洪涝风险源的非单一性,一些适应城市多洪涝源同时发生的多情景耦合模型已出现,如沿海城市风暴潮与雨季洪涝耦合模型,及城市雨季洪涝与河流洪涝淹没耦合模型。

(2) 大数据支撑下精细化暴露性分析与多维度脆弱性评估:在暴露性分析方面,数据的时空分辨率一直是制约城市洪涝风险评估准确性、时效性的关键,比如人口分布、交通通行数据等。在脆弱性方面,中国应着手城市洪涝灾害损失数据库的建立,为脆弱性评估及定量化综合洪涝风险评估提供数据支撑。此外,国际上的洪涝风险管理开始重视易损性与应对/恢复能力的社会经济、环境、文化、政策等多维度特征对城市综合洪涝脆弱性方面的影响,特别是人的风险意识、应对/恢复能力。而大数据可为暴露性的精细化评估及脆弱性多维度的综合评估提供数据保障,如Google街景地图已用于识别房屋建筑在洪涝中的脆弱性特征,人口热力图在洪涝动态暴露性分析也有巨大的应用潜力。

(3) 建立长期与短期结合的城市动态化洪涝风险评估:城市发展、气候变化与洪涝事件三者共同决定了城市洪涝风险是一个动态变化的过程。气候变化与城市扩张是洪涝风险长期存在不确定性的两大来源。而特定的洪涝事件则是一个短期的动态化过程。作为洪涝风险减轻措施决策的基础与前提,准确的风险评估能为洪涝灾害事前准备、事中应对、事后恢复的各个阶段提供决策依据。所以建立短期与长期相结合的动态评估机制是决定洪涝减轻措施的必要条件。此外,沿海城市仍是今后需重点关注的区域。一是由于其地理位置更容易受到多种洪涝源与海平面上升的影响,对气候变化的敏感性高于内陆城市。如沿海城市在遭遇强台风时,可能同时面临风暴潮、河流水位暴涨、城市内涝的叠加影响。二是在世界范围内,沿海城市由于其良好的区位优势,聚集了大量的人口、建筑、产

业与经济等,这进一步加剧其洪涝风险。因此,今后的洪涝风险研究需耦合气候变化、城市扩张与城市洪涝模拟,实现长期与短期相结合的城市动态化洪涝风险评估,为后续的洪涝减轻措施与城市洪涝风险管理的科学决策提供依据。

3 结论

本文在全球范围内城市洪涝问题日益严峻的背景下,介绍了基于危险性—暴露性—脆弱性的城市洪涝风险评估框架,梳理了城市洪涝风险评估的主要研究内容,并对比分析了不同研究方法的优缺点,最后探讨了城市洪涝管理下城市洪涝风险评估的发展趋势。主要结论如下:

(1) 加强城市洪涝风险评估内容复杂性的理解。城市洪涝风险评估早期的主要内容是基于危险性信息的城市洪涝风险制图;随着实践的开展,人们逐渐认识到有人类活动及财产暴露的洪涝淹没区更值得关注,而且城市地区洪涝发生的区域及其受影响的人口对洪涝的应对能力、风险意识也会在很大程度上影响最终的城市洪涝风险评估结果。目前为止,在城市洪涝风险评估中已形成以“危险性—暴露性—脆弱性”研究框架。同时气候变化与城市扩张又对城市洪涝风险评估提出了新的要求。针对未来的城市洪涝管理,须考虑气候变化与城市扩张多情景下的城市洪涝风险估算,这样才能采取针对性的洪涝减轻措施。我们需要对城市洪涝风险框架持开放性的理念,应随着实践及新问题的出现,及时调整城市洪涝风险评估中需要关注的内容。

(2) 重视大数据在城市洪涝风险评估的应用。大数据的应用是洪涝风险评估三大内容未来发展的必要支撑。城市洪涝模型的建立与验证需要高时空分辨率的土地利用、降雨数据、高精度的地形数据、城市尺度上的排水管网数据、洪涝事件的实时淹没位置流速等信息。传统的静态数据不能满足洪涝淹没事件中承灾体的暴露性动态化及多维度的脆弱性估算要求,而来源于网络的、移动的大数据在实时、共享方面能弥补传统数据的不足,如基于热力图的人口动态图、城市交通监测数据和基于公众参与式地理信息系统(PGIS)等。目前为止,大数据只是初步用于城市洪涝风险评估,在今后有待进一步挖掘其应用潜力。

(3) 发展适用城市洪涝风险评估的方法体系。由于城市水文过程的高度复杂性,城市洪涝风险评估首先需要一个广泛认可的洪涝淹没模型,能综合城市多种洪涝源的二维洪涝淹没模型是未来的发展趋势。其次在脆弱性与综合洪涝风险评估中根据评估对象的内在要求,需要定性与定量方法的结合。这样才能提供可靠全面的城市综合洪涝风险评估结果,为解决城市洪涝问题提供科学合理的决策支持。

参考文献(References)

- 曹诗嘉, 方伟华, 谭骏. 2015. 基于海南省“威马逊”及“海鸥”台风次生海岸洪水灾后问卷调查的室内财产脆弱性研究 [J]. 灾害学, 31(2): 188-195. [Cao S J, Fang W H, Tan J. 2015. Vulnerability of building contents to coastal flooding based on questionnaire survey in hainan after typhoon Rammasun and Kalmeagi. Journal of Catastrophology, 31(2): 188-195.]
- 陈鹏, 张继权, 孙滢悦, 等. 2016. 哈尔滨市市区洪灾风险空间演变模式 [J]. 南水北调与水利科技, 14(6): 27-32. [Chen P, Zhang J Q, Sun Y Y, et al. 2016. Drought risk space evolution pattern in Haerbin. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 14(6): 27-32.]
- 陈洋波, 周浩澜, 张会, 等. 2015. 东莞市内涝预报模型研究 [J]. 武汉大学学报(工学版), 48(5): 608-614. [Chen Y B, Zhou H L, Zhang H, et al. 2015. Urban waterlogging model for Dongguan City. Engineering Journal of Wuhan University, 48(5): 608-614.]
- 初祁, 彭定志, 徐宗学, 等. 2014. 基于MIKE11和MIKE21的城市暴雨洪涝灾害风险分析 [J]. 北京师范大学学报(自然科学版), 50(5): 446-451. [Chu Q, Peng D Z, Xu Z X, et al. 2014. Risk analysis of urban flooding by using MIKE11 and MIKE21. Journal of Beijing Normal University (Natural Science), 50(5): 446-451.]
- 段丽瑶, 解以扬, 陈靖, 等. 2014. 基于城市内涝仿真模型的天津风暴潮灾害评估 [J]. 应用气象学报, 25(3): 354-359. [Duan L Y, Xie Y Y, Chen J, et al. 2014. Tianjin coastal storm surge disaster assessment based on urban waterlogging simulation model. Journal of Applied Meteorological Science, 25(3): 354-359.]
- 黄国如, 黄维, 张灵敏, 等. 2015. 基于GIS和SWMM模型的城市暴雨积水模拟 [J]. 水资源与水工程学报, 26(4): 1-6. [Huang G R, Huang W, Zhang L M, et al. 2015. Simulation of rainstorm waterlogging in urban areas based on GIS and SWMM model. Journal of Water Resources & Water Engineering, 26(4): 1-6.]

- 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. Pre-assessment of urban storm-water disaster risk in Beijing area. 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. Journal of Catastrophology, 29(1): 30-36.]
- 姜鑾鹏. 2012. 口前镇居民住宅洪涝灾害风险评价研究 [D]. 长春: 东北师范大学. [Jiang L P. Research on flood risk assessment of resident dwellings of Kouqian Town. Changchun, China: Northeast Normal University.]
- 李国芳, 郑玲玉, 童奕懿, 等. 2013. 长江三角洲地区城市化对洪灾风险的影响评价 [J]. 长江流域资源与环境, 22(3): 386-391. [Li G F, Zheng L Y, Tong Y Y, et al. 2013. Effects evaluation of urbanization on flood risk in the Yangtze River Delt. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 22(3): 386-391.]
- 刘耀龙, 陈振楼, 王军, 等. 2011. 经常性暴雨内涝区域房屋财(资)产脆弱性研究: 以温州市为例 [J]. 灾害学, 26(2): 66-71. [Liu Y L, Chen Z L, Wang J, et al. 2011. Study on property (capital) vulnerability of houses in regular rainstorm water-logging areas: Taking Wenzhou as a case study. Journal of Catastrophology, 26(2): 66-71.]
- 刘勇, 张韶月, 柳林, 等. 2015. 智慧城市视角下城市洪涝模拟研究综述 [J]. 地理科学进展, 34(4): 494-504. [Liu Y, Zhang S Y, Liu L, et al. 2015. Research on urban flood simulation: A review from the smart city perspective. Progress in Geography, 34(4): 494-504.]
- 刘泽照. 2018. 情景模拟视角下城市社区内涝灾害脆弱性分析 [J]. 中国公共安全(学术版), (2): 53-56. [Liu Z Z. 2018. Vulnerability analysis of rainstorm waterlogging in urban communities based on perspective of scenario simulation. China Public Security (Academy Edition), (2): 53-56.]
- 彭建, 魏海, 武文欢, 等. 2018. 基于土地利用变化情景的城市暴雨洪涝灾害风险评估: 以深圳市茅洲河流域为例 [J]. 生态学报, 38(11): 3741-3755. [Peng J, Wei H, Wu W H, et al. 2018. Storm flood disaster risk assessment in urban area based on the simulation of land use scenarios: A case of Maozhou Watershed in Shenzhen City. Acta Ecologica Sinica, 38(11): 3741-3755.]
- 仇劭卫, 李娜, 程晓陶, 等. 2000. 天津市城区暴雨涝仿真实模系统 [J]. 水利学报, (11): 34-42. [Qiu J W, Li N, Cheng X T, et al. 2000. The simulation system for heavy rainfall in Tianjin City. Journal of Hydraulic Engineering, (11): 34-42.]
- 权瑞松. 2015. 多情景视角的上海中心城区地铁暴雨内涝暴露性分析 [J]. 地理科学, 35(4): 471-475. [Quan R S. 2015. Exposure analysis of rainstorm waterlogging on subway in central urban area of Shanghai based on multiple scenario perspective. Scientia Geographica Sinica, 35(4): 471-475.]
- 权瑞松, 刘敏, 张丽佳, 等. 2011. 基于情景模拟的上海中心城区建筑暴雨内涝暴露性评价 [J]. 地理科学, 31(2): 148-152. [Quan R S, Liu M, Zhang L J, et al. 2011. Exposure assessment of rainstorm waterlogging on buildings in central urban area of Shanghai based on scenario simulation. Scientia Geographica Sinica, 31(2): 148-152.]
- 石勇. 2014. 基于情景模拟的居民住宅内部财产的水灾脆弱性评价 [J]. 水电能源科学, 32(8): 134-137. [Shi Y. 2014. Vulnerability assessment of property in residences in waterlogging disaster based on scenario simulation. Water Resources and Power, 32(8): 134-137.]
- 石勇. 2015. 城市居民住宅的暴雨内涝脆弱性评估: 以上海为例 [J]. 灾害学, 30(3): 94-98. [Shi Y. 2015. The vulnerability assessment of residences in rainstorm waterlogging in cities: A case study on Shanghai. Journal of Catastrophology, 30(3): 94-98.]
- 石勇, 许世远, 石纯, 等. 2009. 洪水灾害脆弱性研究进展 [J]. 地理科学进展, 28(1): 41-46. [Shi Y, Xu S Y, Shi C, et al. 2009. A review on development of vulnerability assessment of floods. Progress in Geography, 28(1): 41-46.]
- 石勇, 许世远, 石纯, 等. 2011. 基于情景模拟的上海中心城区居民住宅的暴雨内涝风险评价 [J]. 自然灾害学报, 20(3): 177-182. [Shi Y, Xu S Y, Shi C, et al. 2011. Risk assessment of rainstorm waterlogging on old-style residences downtown in Shanghai based on scenario simulation. Journal of Natural Disasters, 20(3): 177-182.]
- 宋晓猛, 张建云, 王国庆, 等. 2014. 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 [J]. 水科学进展, 25(5): 752-764. [Song X M, Zhang J Y, Wang G Q, et al. 2014. Development and challenges of urban hydrology in a changing environment: II. Urban stormwater modeling and management. Advances in Water Science, 25(5): 752-764.]
- 苏伯尼, 黄弘, 张楠. 2015. 基于情景模拟的城市内涝动态风险评估方法 [J]. 清华大学学报(自然科学版), 55(6): 684-690. [Su B N, Huang H, Zhang N. 2015. Dynamic urban waterlogging risk assessment method based on scenario simulations. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 55(6): 684-690.]
- 王峰渊, 王杰, 丁宇海, 等. 2018. 基于GIS的暴雨灾害电网脆弱性评估研究 [J]. 科技通报, 34(1): 79-83. [Wang F Y, Wang J, Ding Y H, et al. 2018. Vulnerability assessment of power grid based on rainstorm hazards. Bulletin of Science and Technology, 34(1): 79-83.]

- 王昊, 张永祥, 唐颖, 等. 2018 暴雨洪水管理模型的城市内涝淹没模拟 [J]. 北京工业大学学报, 44(2): 303-309. [Wang H, Zhang Y X, Tang Y, et al. 2018. Simulation investigation of urban waterlogging submergence on storm water management model. Journal of Beijing University of Technology, 44(2): 303-309.]
- 王诗晨. 2015. 巢湖流域洪涝灾害脆弱性评价研究 [D]. 合肥: 安徽师范大学. [Wang S C. 2015. Study on vulnerability assessment on flood disaster in Chaohu Basin. Hefei, China: Anhui Normal University.]
- 吴旭树. 2016. 变化环境下珠江三角洲地区暴雨内涝危险性时空演变研究: 以东莞市典型小区为例 [D]. 广州: 华南理工大学. [Wu X S. 2016. Research on spatiotemporal variability of urban water logging hazards in the Pearl River Delta under changing environment: A case study in a typical district, Dongguan. South China University of Technology.]
- 谢志清, 杜银, 曾燕, 等. 2018. 江淮流域年极端降水事件分类特征及其致洪风险 [J]. 中国科学(地球科学), 48(9): 1153-1168. [Xie Z Q, Du Y, Zeng Y, et al. 2018. Classification of yearly extreme precipitation events and associated flood risk in the Yangtze-Huaihe River Valley. Science China (Earth Sciences), 61: 1341-1356.]
- 尹占娥. 2009. 城市自然灾害风险评估与实证研究 [D]. 上海: 华东师范大学. [Yin Z E. 2009. Research of urban natural disaster risk assessment and case study. Shanghai, China: East China Normal University.]
- 尹占娥, 许世远, 殷杰, 等. 2010. 基于小尺度的城市暴雨内涝灾害情景模拟与风险评估 [J]. 地理学报, 65(5): 553-562. [Yin Z E, Xu S Y, Yin J, et al. 2010. Small-scale based scenario modeling and disaster risk assessment of urban rainstorm water-logging. Acta Geographica Sinica, 65 (5): 553-562.]
- 张建云, 宋晓猛, 王国庆, 等. 2014. 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, 25(4): 594-605. [Zhang J Y, Song X M, Wang G Q, et al. 2014. Development and challenges of urban hydrology in a changing environment: I. Hydrological response to urbanization. Advances in Water Science, 25(4): 752-764.]
- 张念强, 马建明, 陆吉康, 等. 2013. 基于多类模型耦合的城市洪水风险分析技术研究 [J]. 水利水电技术, 44(7): 125-128, 133. [Zhang N Q, Ma J M, Lu J K, et al. 2013. Multi-models coupling based study on urban flood risk analysis technology. Water Resources and Hydropower Engineering, 44(7): 125-128, 133.]
- 朱呈浩, 夏军强, 陈倩, 等. 2018. 基于SWMM模型的城市洪涝过程模拟及风险评估 [J]. 灾害学, 33(02): 224-230. [Zhu C H, Xia J Q, Chen Q, et al. 2018. SWMM-based urban flood modelling and risk evaluation. Journal of Catastrophology, 33(2): 224-230.]
- Adelekan I O, Asiyambi A P. 2015. Flood risk perception in flood-affected communities in Lagos, Nigeria [J]. Natural Hazards, 80: 445-469.
- Ajibade I, McBean G, Bezner-Kerr R. 2013. Urban flooding in Lagos, Nigeria: Patterns of vulnerability and resilience among women [J]. Global Environmental Change, 23: 1714-1725.
- Albano R, Mancusi L, Abbate A. 2017. Improving flood risk analysis for effectively supporting the implementation of flood risk management plans: The case study of "Serio" Valley [J]. Environmental Science & Policy, 75: 158-172.
- Apel H, Aronica G T, Kreibich H, et al. 2008. Flood risk analyses: How detailed do we need to be? [J]. Natural Hazards, 49: 79-98.
- Apel H, Trepel O M, Hung N N, et al. 2016. Combined fluvial and pluvial urban flood hazard analysis: Concept development and application to Can Tho City, Mekong Delta, Vietnam [J]. Natural Hazards and Earth System Sciences, 16: 941-961.
- Araya-Munoz D, Metzger M J, Stuart N, et al. 2017. A spatial fuzzy logic approach to urban multi-hazard impact assessment in Concepcion, Chile [J]. Science of the Total Environment, 576: 508-519.
- Arnold C L, Gibbons C J. 1996. Impervious surface coverage: The emergence of a key environmental indicator [J]. Journal of the American Planning Association, 62: 243-258.
- Balbi S, Villa F, Mojtahed V, Hegetschweiler K T, et al. 2016. A spatial Bayesian network model to assess the benefits of early warning for urban flood risk to people [J]. Natural Hazards and Earth System Sciences, 16: 1323-1337.
- Bertsch R, Glenis V, Kilsby C. 2017. Urban flood simulation using synthetic storm drain networks [J]. Water, 9: 925.
- Birkmann J. 2007. Risk and vulnerability indicators at different scales: Applicability, usefulness and policy implications [J]. Environmental Hazards, 7(1): 20-31.
- Birkmann J, Cardona O D, Carreño M L, et al. 2013. Framing vulnerability, risk and societal responses: The MOVE framework [J]. Natural Hazards, 67: 193-211.
- Bisht D S, Chatterjee C, Kalakoti S, et al. 2016. Modeling urban floods and drainage using SWMM and MIKE Urban: A case study [J]. Natural Hazards, 84: 1-28.
- Budiyo Y, Aerts J, Brinkman J J, et al. 2015. Flood risk assessment for delta mega-cities: A case study of Jakarta [J]. Natural Hazards, 75(1): 389-413.
- Camarasa-Belmonte A M, Soriano-García J. 2012. Flood risk assessment and mapping in peri-urban Mediterranean envi-

- ronments using hydrogeomorphology: Application to ephemeral streams in the Valencia Region (Eastern Spain) [J]. *Landscape and Urban Planning*, 104: 189-200.
- Castro C P, Sarmiento J P, Edwards R, et al. 2016. Disaster risk perception in urban contexts and for people with disabilities: case study on the city of Iquique (Chile) [J]. *Natural Hazards*, 86: 411-436.
- Chalkias C, Stathopoulos N, Kalogeropoulos K, et al. 2016. Applied hydrological modeling with the use of geoinformatics: Theory and practice [M]// Habib M. *Empirical modeling and its applications*. London, UK: InTech Open: 61-86.
- Chapin T, Deyle R, Baker E. 2008. A parcel-based GIS method for evaluating conformance of local land-use planning with a state mandate to reduce exposure to hurricane flooding [J]. *Environment & Planning B: Planning & Design*, 35: 261-279.
- Chinh D, Dung N, Gain A, et al. 2017. Flood loss models and risk analysis for private households in Can Tho City, Vietnam [J]. *Water*, 9: 313.
- Cho S Y, Chang H. 2017. Recent research approaches to urban flood vulnerability, 2006-2016 [J]. *Natural Hazards*, 88: 633-649.
- Christie E K, Spencer T, Owen D, et al. 2017. Regional coastal flood risk assessment for a tidally dominant, natural coastal setting: North Norfolk, southern North Sea [J]. *Coastal Engineering*, 134: 177-190.
- Costabile P, Macchione F. 2015. Enhancing river model set-up for 2-D dynamic flood modelling [J]. *Environmental Modelling & Software*, 67: 89-107.
- Cutter S L, Barnes L, Berry M, et al. 2008. A place-based model for understanding community resilience to natural disasters [J]. *Global Environmental Change*, 18: 598-606.
- Dawson R, Hall J, Barr S, et al. 2009. A blueprint for the integrated assessment of climate change in cities [R]. Tyn-dall Centre for Climate Change Research, Working Paper 129.
- Dawson R J, Speight L, Hall J W, et al. 2008. Attribution of flood risk in urban areas [J]. *Journal of Hydroinformatics*, 10: 275.
- De Bono A, Mora M G. 2014. A global exposure model for disaster risk assessment [J]. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 10: 442-451.
- Dieperink C, Hegger D L T, Bakker M H N, et al. 2016. Recur-rent governance challenges in the implementation and alignment of flood risk management strategies: A review [J]. *Water Resources Management*, 30: 4467-4481.
- Domeneghetti A, Carisi F, Castellarin A, et al. 2015. Evolution of flood risk over large areas: Quantitative assessment for the Po River [J]. *Journal of Hydrology*, 527: 809-823.
- Fatemi F, Ardalan A, Aguirre B, et al. 2017. Social vulnerability indicators in disasters: Findings from a systematic re-view [J]. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 22: 219-227.
- Fekete A, Tzavella K, Baumhauer R. 2017. Spatial exposure aspects contributing to vulnerability and resilience assess-ments of urban critical infrastructure in a flood and black-out context [J]. *Natural Hazards*, 86: 151-176.
- Fletcher T D, Andrieu H, Hamel P. 2013. Understanding, manage-ment and modelling of urban hydrology and its conse-quences for receiving waters: A state of the art [J]. *Advances in Water Resources*, 51: 261-279.
- Foudi S, Osés- Eraso N, Tamayo I. 2015. Integrated spatial flood risk assessment: The case of Zaragoza [J]. *Land Use Policy*, 42: 278-292.
- Gaudio R, Penna N, Viteritti V. 2015. A combined methodolo-gy for the hydraulic rehabilitation of urban drainage net-works [J]. *Urban Water Journal*, 13: 644-656.
- Ghimire B, Chen A S, Guidolin M, et al. 2013. Formulation of a fast 2D urban pluvial flood model using a cellular autom-ata approach [J]. *Journal of Hydroinformatics*, 15: 676.
- Gilroy K L, Mccuen R H. 2012. A nonstationary flood frequen-cy analysis method to adjust for future climate change and urbanization [J]. *Journal of Hydrology*, 414: 40-48.
- Giupponi C, Mojtahed V, Gain A K, et al. 2015. Integrated risk assessment of water-related disasters [M]// Paron P, Baldas-sarre G D. *Hydro-meteorological hazards, risks, and disas-ters*. Amsterdam, Netherlands: Elsevier: 163-200.
- Glas H, Jonckheere M, Mandal A, et al. 2017. A GIS-based tool for flood damage assessment and delineation of a methodology for future risk assessment: Case study for An-notto Bay, Jamaica [J]. *Natural Hazards*, 88: 1867-1891.
- Glenis V, Mcgough A S, Kutija V, et al. 2013. Flood modelling for cities using cloud computing [J]. *Journal of Cloud Computing Advances Systems & Applications*, 2(1): 7. doi: 10.1186/2192-113X-2-7.
- Haer T, Botzen W J W, de Moel H, et al. 2017. Integrating household risk mitigation behavior in flood risk analysis: An agent-based model approach [J]. *Risk Analysis*, 37: 1977-1992.
- Hanson S, Nicholls R, Ranger N, et al. 2011. A global ranking of port cities with high exposure to climate extremes [J]. *Climatic Change*, 104: 89-111.
- Haynes H, Haynes R, Pender G. 2008. Integrating socio-econ-omic analysis into decision- support methodology for flood risk management at the development scale (Scot-

- land) [J]. *Water & Environment Journal*, 22: 117-124.
- Hsu W K, Huang P C, Chang C C, et al. 2011. An integrated flood risk assessment model for property insurance industry in Taiwan [J]. *Natural Hazards*, 58: 1295-1309.
- IPCC. 2012. Managing the risks of extreme events and disasters to advance climate change adaptation: Special report of the intergovernmental panel on climate change [M]. Cambridge, UK: Cambridge University Press.
- IPCC. 2014. Climate change: Impacts, adaptation, and vulnerability. Part A: Global and sectoral aspects. Contribution of working group II to the Fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change [M]. Cambridge, UK: Cambridge University Press.
- Jalayer F, Risi R D, Paola F D, et al. 2014. Probabilistic GIS-based method for delineation of urban flooding risk hot-spots [J]. *Natural Hazards*, 73: 975-1001.
- Jenkins K, Surminski S, Hall J, et al. 2017. Assessing surface water flood risk and management strategies under future climate change: Insights from an agent-based model [J]. *Science of the Total Environment*, 595: 159-168.
- Johnson C, Penning-Rowsell E, Parker D. 2007. Natural and imposed injustices: The challenges in implementing "fair" flood risk management policy in England [J]. *Geographical Journal*, 173: 374-390.
- Kablan M K A, Dongo K, Coulibaly M. 2017. Assessment of social vulnerability to flood in urban Côte d'Ivoire using the MOVE framework [J]. *Water*, 9: 292. doi: 10.3390/w9040292.
- Kandilioti G, Makropoulos C. 2011. Preliminary flood risk assessment: The case of Athens [J]. *Natural Hazards*, 61: 441-468.
- Kasperson R E, Matson P A, McCarthy J J, et al. 2003. A framework for vulnerability analysis in sustainability science [J]. *PNAS*, 100: 8074.
- Kebede A S, Nicholls R J. 2012. Exposure and vulnerability to climate extremes: Population and asset exposure to coastal flooding in Dar es Salaam, Tanzania [J]. *Regional Environmental Change*, 12: 81-94.
- Kita S M. 2017. Urban vulnerability, disaster risk reduction and resettlement in Mzuzu city, Malawi [J]. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 22: 158-166.
- Koch A, Corsiez K, Defroidmont J, et al. 2016. Evaluation of flow speed in urbanized areas and flood hazard mapping in flood risk prevention schemes [M]// Gourbesville P, Cunge J, Caignaert G. *Advances in Hydroinformatics*. Singapore: Springer: 47-58.
- Koks E E, Jongman B, Husby T G, et al. 2015 Combining hazard, exposure and social vulnerability to provide lessons for flood risk management [J]. *Environmental Science & Policy*, 47: 42-52.
- Kotzee I, Reyers B. 2016. Piloting a social-ecological index for measuring flood resilience: A composite index approach [J]. *Ecological Indicators*, 60: 45-53.
- Kreibich H, Botto A, Merz B, et al. 2017. Probabilistic, multi-variable flood loss modeling on the mesoscale with BT-FLEMO [J]. *Risk Analysis*, 37: 774.
- Krellenberg K, Welz J. 2016. Assessing urban vulnerability in the context of flood and heat hazard: Pathways and challenges for indicator-based analysis [J]. *Social Indicators Research*, 132: 709-731.
- Kuklicke C, Demeritt D. 2016. Adaptive and risk-based approaches to climate change and the management of uncertainty and institutional risk: The case of future flooding in England [J]. *Global Environmental Change*, 37: 56-68.
- Lai W L, Wang H L, Wang C, et al. 2017. Waterlogging risk assessment based on self-organizing map (SOM) artificial neural networks: A case study of an urban storm in Beijing [J]. *Journal of Mountain Science*, 14: 898-905.
- Lang M, Longo E, Aronica G T, et al. 2016. Assessing fluvial flood risk in urban environments: A case study [C]. *E3S Web of Conferences*, 7: 11007.
- Li C, Cheng X, Li N, et al. 2016. A framework for flood risk analysis and benefit assessment of flood control measures in urban areas [J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 13(8): 787.
- Li M, Wu W, Wang J, et al. 2016. Simulating and mapping the risk of surge floods in multiple typhoon scenarios: A case study of Yuhuan County, Zhejiang Province, China [J]. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 31: 645-659.
- Liang Y, Jiang C, Ma L, et al. 2017. Government support, social capital and adaptation to urban flooding by residents in the Pearl River Delta area, China [J]. *Habitat International*, 59: 21-31.
- Lin N, Shullman E. 2017. Dealing with hurricane surge flooding in a changing environment: Part I. Risk assessment considering storm climatology change, sea level rise, and coastal development [J]. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 31: 2379-2400.
- Löwe R, Urlich C, Sto. Domingo N, et al. 2017. Assessment of urban pluvial flood risk and efficiency of adaptation options through simulations: A new generation of urban planning tools [J]. *Journal of Hydrology*, 550: 355-367.
- Maantay J, Maroko A. 2009. Mapping urban risk: Flood hazards, race, & environmental justice in New York [J]. *Applied Geography*, 29: 111-124.

- Mechler R, Bouwer L M, Linneroothbayer J, et al. 2014. Managing unnatural disaster risk from climate extremes [J]. *Nature Climate Change*, 4: 235-237.
- Merz B. 2010. Review article "Assessment of economic flood damage" [J]. *Natural Hazards & Earth System Sciences*, 10: 735-740.
- Merz B, Elmer F, Thielen A H. 2009. Significance of "high probability/low damage" versus "low probability/high damage" flood events [J]. *Natural Hazards & Earth System Sciences*, 9: 1033-1046.
- Merz B, Kreibich H, Thielen A, et al. 2004. Estimation uncertainty of direct monetary flood damage to buildings [J]. *Natural Hazards & Earth System Sciences*, 4: 153-163.
- 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.
- Mojaddadi H, Pradhan B, Nampak H, et al. 2017. Ensemble machine-learning-based geospatial approach for flood risk assessment using multi-sensor remote-sensing data and GIS [J]. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 8: 1080-1102.
- Moore T L, Gulliver J S, Stack L, et al. 2016. Stormwater management and climate change: Vulnerability and capacity for adaptation in urban and suburban contexts [J]. *Climatic Change*, 138: 491-504.
- Moritz H, White K, Gouldby B. 2016. An updated USACE approach to the evaluation of coastal total water levels for present and future flood risk analysis [J]. *E3S Web of Conferences*, 7: 01012. doi: 10.1051/e3sconf/20160701012.
- Muis S, Güneralp B, Jongman B, et al. 2015. Flood risk and adaptation strategies under climate change and urban expansion: A probabilistic analysis using global data [J]. *Science of the Total Environment*, 538: 445-457.
- Müller A, Reiter J, Weiland U. 2011. Assessment of urban vulnerability towards floods using an indicator-based approach: A case study for Santiago de Chile [J]. *Natural Hazards and Earth System Science*, 11: 2107-2123.
- Nobre A D, Cuartas L A, Momo M R, et al. 2016. HAND contour: A new proxy predictor of inundation extent [J]. *Hydrological Processes*, 30: 320-333.
- Oddo P C, Lee B S, Garner G G, et al. 2017. Deep uncertainties in sea-level rise and storm surge projections: Implications for coastal flood risk management [J]. *Risk Analysis*. doi: 10.1111/risa.12888.
- Olbert A I, Comer J, Nash S, et al. 2017. High-resolution multi-scale modelling of coastal flooding due to tides, storm surges and rivers inflows: A Cork City example [J]. *Coastal Engineering*, 121: 278-296.
- Patel D, Ramirez J, Srivastava P, et al. 2017. Flood risk assessment through 1D/2D couple HEC- RAS hydrodynamic modeling-A case study of Surat City, Lower Tapi Basin, India [C]// *Geophysical Research Abstracts*, Vol. 19, EGU 2017-1702. Vienna, Austria: EGU General Assembly: 1702.
- Petrucci G, Bonhomme C. 2014. The dilemma of spatial representation for urban hydrology semi-distributed modelling: Trade-offs among complexity, calibration and geographical data [J]. *Journal of Hydrology*, 517: 997-1007.
- Pfeifer H R, Amiguet A, Brandvold V, et al. 2017. Water-related risks in the area of Dakar, Senegal: Coastal aquifers exposed to climate change and rapid urban development [M]// *Sudmeier-Rieux K, Fernández M, Gaillard J, et al. Identifying emerging issues in disaster risk reduction, migration, climate change and sustainable development*. Basel, Switzerland: Springer: 53-65.
- Pradhan B. 2011. GIScience tools for climate change related natural hazards and modelling [M]// *Joshi P K, Singh T P, Joshi P K, et al. Geoinformatics for Climate Change Studies*. New Delhi, India: TERI Press: 337-392.
- Pregolato M, Ford A, Glenis V, et al. 2017. Impact of climate change on disruption to urban transport networks from pluvial flooding [J]. *Journal of Infrastructure Systems*, 23: 04017015. doi: 10.1061/(ASCE)IS.1943-555X.0000372.
- Quan R S, Liu M, Lu M, et al. 2010. Waterlogging risk assessment based on land use/cover change: A case study in Pudong new area, Shanghai [J]. *Environmental Earth Sciences*, 61: 1113-1121.
- Rimba A, Setiawati M, Sambah A, et al. 2017. Physical flood vulnerability mapping applying geospatial techniques in Okazaki city, Aichi Prefecture, Japan [J]. *Urban Science*, 1: 7. doi: 10.3390/urbansci1010007.
- Sadeghi-Pouya A, Nouri J, Mansouri N, et al. 2017a. An indexing approach to assess flood vulnerability in the western coastal cities of Mazandaran, Iran [J]. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 22: 304-316.
- Sadeghi-Pouya A, Nouri J, Mansouri N, et al. 2017b. Developing an index model for flood risk assessment in the western coastal region of Mazandaran, Iran [J]. *Journal of Hydrology and Hydromechanics*, 65(2): 134-145.
- Salvadore E, Bronders J, Batelaan O. 2015. Hydrological modelling of urbanized catchments: A review and future directions [J]. *Journal of Hydrology*, 529: 62-81.
- Santos L B L, Carvalho T, Anderson L O, et al. 2017. An RS-GIS-Based comprehensive impact assessment of floods: A case study in Madeira River, Western Brazilian Amazon [J]. *IEEE Geoscience & Remote Sensing Letters*, 14: 1-4.
- Schanze J, Zeman E, Marsalek J. 2007. Flood risk management: Hazards, vulnerability and mitigation measures [M].

- Vol. 67. Dordrecht, Netherlands: Springer: 3-4.
- Sekovski I, Armaroli C, Calabrese L, et al. 2015. Coupling scenarios of urban growth and flood hazards along the Emilia-Romagna coast (Italy) [J]. *Natural Hazards and Earth System Science*, 15: 2331-2346.
- Shepard C C, Agostini V N, Gilmer B, et al. 2012. Assessing future risk: Quantifying the effects of sea level rise on storm surge risk for the southern shores of Long Island, New York [J]. *Natural Hazards*, 60: 727-745.
- Slater L J, Villarini G. 2016. Recent trends in U.S. flood risk [J]. *Geophysical Research Letters*, 43(24): 12428-12436. doi: 10.1002/2016GL071199.
- Smith A, Martin D, Cockings S. 2014. Spatio-temporal population modelling for enhanced assessment of urban exposure to flood risk [J]. *Applied Spatial Analysis and Policy*, 9: 145-163.
- Sofia G, Roder G, Dalla Fontana G, et al. 2017. Flood dynamics in urbanised landscapes: 100 years of climate and humans' interaction [J]. *Scientific Reports*, 7: 40527. doi: 10.1038/srep40527.
- Speight L J, Hall J W, Kilsby C G. 2017. A multi-scale framework for flood risk analysis at spatially distributed locations [J]. *Journal of Flood Risk Management*, 10: 124-137.
- Takagi H, Tsurudome C, Thao N D, et al. 2016. Ocean tide modelling for urban flood risk assessment in the Mekong Delta [J]. *Hydrological Research Letters*, 10: 21-26.
- Tapia C, Abajo B, Feliu E, et al. 2017. Profiling urban vulnerabilities to climate change: An indicator-based vulnerability assessment for European cities [J]. *Ecological Indicators*, 78: 142-155.
- Teng J, Jakeman A J, Vaze J, et al. 2017. Flood inundation modelling: A review of methods, recent advances and uncertainty analysis [J]. *Environmental Modelling & Software*, 90: 201-216.
- Thieken A H, Kienzler S, Kreibich H, et al. 2016. Review of the flood risk management system in Germany after the major flood in 2013 [J]. *Ecology and Society*, 21(2): 51. doi: 10.5751/ES-08547-210251.
- Tran P, Shaw R, Chantry G, et al. 2009. GIS and local knowledge in disaster management: A case study of flood risk mapping in Viet Nam [J]. *Disasters*, 33: 152-169.
- Turner B L, Kasperson R E, Matson P A, et al. 2003. A framework for vulnerability analysis in sustainability science [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 100: 8074-8079.
- Vojinovic Z, Hammond M, Golub D, et al. 2015. Holistic approach to flood risk assessment in areas with cultural heritage: A practical application in Ayutthaya, Thailand [J]. *Natural Hazards*, 81: 589-616.
- Vu T T, Ranzi R. 2017. Flood risk assessment and coping capacity of floods in central Vietnam [J]. *Journal of Hydro-environment Research*, 14: 44-60.
- Wahab R, Tiong R. 2016. Multi-variate residential flood loss estimation model for Jakarta: An approach based on a combination of statistical techniques [J]. *Natural Hazards*, 86: 779-804.
- Wang Z, Lai C, Chen X, et al. 2015. Flood hazard risk assessment model based on random forest [J]. *Journal of Hydrology*, 527: 1130-1141.
- Weis S W M, Agostini V N, Roth L M, et al. 2016. Assessing vulnerability: An integrated approach for mapping adaptive capacity, sensitivity, and exposure [J]. *Climatic Change*, 136: 615-629.
- Wheater H, Evans E. 2009. Land use, water management and future flood risk [J]. *Land Use Policy*, 26: S251-S264.
- Woodruff J D, Irish J L, Camargo S J. 2013. Coastal flooding by tropical cyclones and sea-level rise [J]. *Nature*, 504: 44.
- Yang L, Scheffran J, Qin H, et al. 2015. Climate-related flood risks and urban responses in the Pearl River Delta, China [J]. *Regional Environmental Change*, 15(2): 379-391.
- Yang T H, Yang S C, Ho J Y, et al. 2015. Flash flood warnings using the ensemble precipitation forecasting technique: A case study on forecasting floods in Taiwan caused by typhoons [J]. *Journal of Hydrology*, 520: 367-378.
- Yin J, Ye M, Yin Z, et al. 2014. A review of advances in urban flood risk analysis over China [J]. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 29: 1063-1070.
- Yin Z E, Yin J, Xu S, et al. 2011. Community-based scenario modelling and disaster risk assessment of urban rainstorm waterlogging [J]. *Journal of Geographical Sciences*, 21: 274-284.
- Zhou Q, Mikkelsen P S, Halsnæs K, et al. 2012. Framework for economic pluvial flood risk assessment considering climate change effects and adaptation benefits [J]. *Journal of Hydrology*, 414-415: 539-549.
- Zonensein J, Miguez M, De Magalhães L, et al. 2008. Flood risk index as an urban management tool [C]. 11th International Conference on Urban Drainage. Edinburgh, UK: 1-10.

A review of urban flood risk assessment based on the framework of hazard–exposure–vulnerability

ZHANG Hui^{1,2}, LI Cheng³, CHENG Jiong³, WU Zhifeng^{4*}, WU Yanyan⁴

(1. Guangzhou Institute of Geochemistry, CAS, Guangzhou 510640, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

3. Guangdong Key Laboratory of Integrated Agro-environmental Pollution Control and Management, Guangdong Institute of Eco-environmental Science and Technology, Guangzhou 510650, China;

4. School of Geographical Sciences, Guangzhou University, Guangzhou 510006, China)

Abstract: In the context of global climate change and urban expansion, urban floods frequently cause serious social problems and economic losses. Flood risk assessment as the main content of urban flood management has received extensive attention. This article first presents the conceptual framework of urban flood risk assessment and the function of hazard, exposure, and vulnerability. It then reviews their main research contents respectively, analyzes the strengths and limitations of different research methods in the perspective of urban flood risk management. We conclude that the development trends of urban flood risk assessment include the following four aspects: 1) With regard to flood hazard evaluation, developing the two-dimensional hydraulics flood inundation model incorporating different sources of floods in urban areas such as pluvial, fluvial, and coastal floods is imperative for urban flood risk assessment. 2) Exposure evaluation is moving towards more refined and dynamic evaluation with the support of big data and GIS. 3) Vulnerability assessment is shifting from the quantitative evaluation of the physical dimension to multi-dimensional assessments, such as social, economic, cultural, environmental, and others. 4) In addition, semi-quantitative and quantitative urban flood risk assessment combined with climate change and urban expansion considerations under multiple scenarios is also an important component of future urban flood management.

Keywords: urban flood risk assessment; hazards; exposure; vulnerability; climate change; urban expansion