

陈军飞, 丁佳敏, 邓梦华. 城市雨洪灾害风险评估及管理研究进展[J]. 灾害学, 2020, 35(2): 154-159, 166. [CHEN Jun-fei, DING Jiamin and DENG Menghua. Research Progress on Risk Assessment and Management for Urban Stormwater [J]. Journal of Catastrophology, 2020, 35(2): 154-159, 166. doi: 10.3969/j.issn.1000-811X.2020.02.028.]

城市雨洪灾害风险评估及管理研究进展^{*}

陈军飞^{1,2,3}, 丁佳敏¹, 邓梦华^{1,3}

(1. 河海大学 商学院, 江苏 南京 211100; 2. 河海大学 长江保护与绿色发展研究院, 江苏 南京 210098;
3. 江苏长江保护与高质量发展研究基地, 江苏 南京 210098)

摘要:近年来城市雨洪灾害频发,造成了严重的社会经济损失,为降低雨洪灾害损失,同时实现雨洪的资源化,实现社会经济的可持续发展,需要对雨洪灾害风险进行评估并提出相应的管理对策。为此,该文首先分析了雨洪灾害的形成机理;接着,总结和归纳了雨洪灾害风险评估的主要方法,并指出了各种方法存在的优缺点和适用情形;在此基础上,通过对雨洪风险管理技术和措施的分析,构建了雨洪灾害管理框架。最后,根据城市雨洪管理评估研究的重点和难点,提出从大数据智慧城市、自然水生态可持续发展和雨洪灾害风险分散机制等方面进一步开展城市雨洪的风险管理工作。

关键词:城市;雨洪灾害;风险评估;雨洪管理

中图分类号: X43; X915.5; S42; TU998; P237 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-811X(2020)02-0154-07
doi: 10.3969/j.issn.1000-811X.2020.02.028

随着全球气候变化以及城市化进程的加快,城市雨洪灾害风险与日俱增,严重威胁了城市社会经济发展及居民的生命财产安全。根据国际灾害数据库 EM-DAT 显示,从 1998-2017 年,超过 170 多个国家和 20 多亿人受到雨洪灾害影响,并造成高达 6560 亿美元的经济损失^[1]。在联合国开展的国际减灾十年中,专家指出雨洪灾害是最主要的自然灾害之一。IPCC 在其系列报告中指出全球气候变化导致的极端降水是雨洪灾害频繁发生的主要影响因素之一。极端降水一方面导致城市下垫面大量积水甚至形成洪涝,给城市的社会和经济发展造成了灾害,另一方面也为城市带来了宝贵的水资源^[2]。为此,如何有效地对城市雨洪进行管理,以减少其灾害性,提高其利用效率,目前已成为政府和学术界关注的热点问题。本文基于国内外研究,对城市雨洪灾害的风险评估以及管理进行了总结和分析,在此基础上,从数据智慧城市、自然水生态可持续发展和雨洪灾害风险分散机制等方面对城市雨洪研究的发展趋势进行了展望。

1 城市雨洪灾害风险概述

风险的概念是进行风险评估研究的基础,不同学科领域的研究目的不同,对于风险的定义也

不一样。Wilson R 等^[3]认为风险是对灾害可能造成的损失与损害程度的大小的不确定性。Maskrey A^[4]提出风险是灾害发生之后所造成的损失之和。Bruno M 等^[5]将风险归为灾害的危险程度,危险越大,风险越大。城市雨洪灾害属于自然灾害的一种,它是一个复杂的灾害系统,是由自然系统与人类社会相互作用的产物^[6]。针对雨洪灾害风险,Crichton D 等^[7]提出的洪灾风险三角图的概念模型,认为风险取决于三个因素,危险性,易损性以及暴露性。张会等^[8]认为除了上述三者外,防灾减灾能力也与之共同构成了洪灾风险。史培军等^[6]认为致灾因子、承灾体以及孕灾环境三者共同作用而形成了风险。

在全球变暖的影响下,城市局部气候特征发生了改变,水汽分布与降水格局的改变,使得极端暴雨的发生频率不断增加^[10]。同时,位于沿海地区以及地势较低的城市在自然地形的影响下,暴雨频发的概率与强度更甚一筹^[11]。从长远角度看,Bronstert A^[12]认为在不断增加的降雨频率之下,地表土壤的结构会产生一定的变化,水土流失严重,这将会使得雨水径流增大,洪峰流量增加,加剧雨洪灾害。同时,在城市化建设中,硬地化比例不断上升,自然河道被侵占,河道的蓄洪泄洪能力降低^[13]。大量地表水由排水管网聚集汇入河流,而管网建设标准低,导致其排水能力

^{*} 收稿日期: 2019-10-31 修回日期: 2020-01-05

基金项目: 国家自然科学基金项目(41877526); 国家重点研发计划项目(2019YFC0409000); 江苏省水利科技项目(2017060)

第一作者简介: 陈军飞(1973-),男,浙江武义人,教授,博士,主要从事管理科学,城市雨洪管理,资源与环境管理。

E-mail: chenjunfei@hhu.edu.cn

不足^[14-16]。城市化导致的一系列“岛效应”,影响了水的蒸散,增加了城市降雨的频率与强度,城市雨洪灾害频发^[17]。除此之外,城市的人口分布、经济发展水平以及防灾减灾能力与城市雨洪灾害的发生也密切相关^[18]。

风险评估是对识别出的风险进行进一步的分析,对其进行衡量和评价,为风险管理及决策提供重要的科学依据,将系统的风险控制在可接受范围内^[19]。雨洪风险的评估主要是从雨洪致灾因子的危险性、孕灾环境的脆弱性以及承灾体的易损性进行分析来评价雨洪造成的风险大小。通过方法运用计算出对应的危险性程度以及对应的灾害损失结果,将其以风险安全临界值进行比较得出风险分级结果,从而决定是否需要雨洪风险管理措施。

雨洪风险管理是分析、评价、预防和处理雨洪灾害风险的一项复杂的系统工程^[20]。进行雨洪风险的管理是为了实现人与水的自然和谐发展,通过认识了解雨洪形成的自然规律,综合运用法律、行政、经济、教育以及工程手段,合理调整人与洪水的利害关系,增强自身适应与承受风险的能力,将洪水损失降到最低。城市雨洪风险管理是连续循环的过程,它反映了人类对城市暴雨响应的全过程。管理的最终目标是为了实现城市整体的长远利益协调。

2 城市雨洪风险评估方法进展

城市雨洪灾害给城市带来了巨大的风险与损失,风险评估涉及的因素复杂众多,评估的方法众多,通常可以将评估方法分为基于历史灾情梳理统计、基于遥感数据结合 GIS、基于指标体系以及基于水文水力模型的风险评估方法等四类^[21]。

2.1 基于历史灾情数理统计的风险评估法

基于历史灾情数理统计评估法是对某一特定区域历史上曾经发生过的典型灾害进行研究,找出其历史灾害数据的规律,用于对该地区的未来灾害风险进行预测^[22]。对于城市雨洪灾害的研究,主要是对其降雨规律及淹没受损范围等的数据统计分析研究。周魁一^[23]提出“历史模型”方法,将其用于洪水灾害的风险评估研究。马建明等^[24]将历史水灾记载资料进行量化,研究了区域洪水灾害风险。Benito G 等^[25]结合多学科方法,利用古洪水技术提供的信息以及历史洪水数据和规范记录对洪水风险评估进行了讨论。Harvey JE^[26]收集整理了历史洪涝事件的灾情资料数,建立模型进行了回归分析,研究评估了捷克的洪涝风险。刘新立等^[19]对长江流域受灾县的历史数据应用马尔科夫链模型进行了风险分析评估。

利用历史数据进行灾害评估简单直接,不需要考虑地理背景等因素。对于城市雨洪灾害来说,历史灾情数据多是基于历史统计数据,但是随着

城市化的推进,降雨受环境影响的规律在不断改变,利用历史资料预测未来城市雨洪灾害的发生有一定的偏差。今后的研究需要综合考虑各类历史数据信息以及对未来情景的预测,采用先进的数据信息分析方法研究。

2.2 基于遥感数据结合 GIS 的风险评估法

随着科学技术的发展,遥感技术逐渐成熟,它能够快速准确地获取空间信息,同时 GIS 为雨洪灾害的风险分析提供可视化表达。3S 技术也不断结合城市雨洪的模拟与仿真进行风险评估研究。

Islam M 等^[27]利用遥感技术(NOAA)获取洪水淹没深度以及范围,基于 GIS 分析数据演示了开发洪水灾害图,进行了洪水灾害风险的评估,为洪水风险管理、规划、设计和运行提供了借鉴。Lhomme J 等^[28]基于 GIS 建立地貌路径模型代替了传统物理模型,根据空间数据,模拟了城市雨水径流,进行了风险的预测。Chubey M 等^[29]利用来自 RADARSAT 遥感图像和其他卫星数据基于 GIS 建立了洪水预报模型,证实可替代传统水文预报方法进行雨洪风险的预测评估。王林等^[30]根据气象水文水利等专业知识利用 GIS 技术,结合数据可和数学计算模型,建立了城市内涝灾害风险分析模型。唐川等^[31]应以高分辨率遥感卫星影像为数据源,使用 GIS 进行了山洪灾害损失评估和风险评估。蒋新宇等^[32]综合运用 GIS 空间分析和灾害风险评估数学方法,研究利用遥感数据和社会经济数据,对黑龙江省内松花江流域的暴雨洪涝风险进行了评价。同时利用遥感数据进行情景模拟也是风险评估的有效方法之一^[33]。

GIS 能够高效地获取、创建、分析和显示各种类型的地理和空间信息数据,将数据与图像有效结合,实现风险可视化操作,对风险的评估提供重要支撑^[34]。但使用该方法需要大量数据的支撑,地形地貌、降雨、淹没时常、范围、深度等。而有些数据的获取技术暂不成熟,例如淹没深度等无法准确利用遥感技术进行测量。但随着信息科技地不断发展,该技术对于城市雨洪风险的评估研究也会不断深入。

2.3 基于指标体系的风险评估法

指标体系评估法是从灾害形成机理出发,结合区域的特定条件,研究者凭借参考以及经验选取适当的指标,构建该地区的综合评价指标体系,建立数学模型,研究评价指标,以此来判定风险大小。

Haruyama S^[35]选取了地貌特征指标,三角洲,潮坪,沼泽,天然堤,原河道等,对其数据进行主成分分析,制作了洪水风险区划图,以评价洪水灾害。何报寅等^[36]选取降雨、地形、河网密度、耕地面积覆盖和史上洪灾发生的频率对湖北省的洪水灾害风险进行了评价。翁莉等^[37]从致灾因子、孕灾环境和承灾体三方面选取八个指标构建了南京暴雨灾害风险评价体系,并建立了二级模糊综合评价模型,对南京暴雨灾害风险进行了评估。

金菊良等^[38]选取实例指标数据,基于遗传算法的洪水灾情评估神经网络模型对洪水风险进行了评估。姚俊英等^[39]选取了黑龙江省雨洪灾害关联度最大的前三个指标,暴雨发生平次、农作物受灾面积、可比经济损失作为评价因子,利用灰色关联度算法,评估并预测了黑龙江省的雨洪灾害风险。石晓静等^[40]在实地调查的基础上,选取了八个指标,采用云模型,建立了基于云模型和熵权法的洪水灾害风险评价模型,评价分析安康市各县区的洪水灾害风险。王贺等^[41]构建了最大 24h 降雨量、平均淹没水深、淹没历时、受灾人口率、受灾面积率、GDP 损失率 6 个指标体系,建立了基于正态云模型的极端雨洪下城市洪水风险综合评价模型,对景德镇洪水灾害进行风险评价,找出引发洪水的关键因素。

指标体系法用于评估洪水灾害较为广泛,适用于宏观大区域的综合评价。但是对于城市雨洪灾害的评估来说,评估指标选取的主观性较强,各城市地区选取的指标各不相同,指标不够完善,精确度不够。并且其通过数学模型计算得出的风险评估结果物理意义不清晰。在今后的研究中需要加强指标选取的科学性以及评估模型的研究。

2.4 基于水文水力模型的风险评估法

利用水文水力模型方法进行洪水暴雨的灾害评估,是根据现有降雨数据,利用水文水力模型进行分析计算,模拟仿真洪水暴雨致灾的过程,包括可能淹没范围、深度、时间等,能够显示雨洪风险的时空动态。广泛应用于城市暴雨洪水下的灾害情景分析。

国外对于水文水力模型的研究较早,在进行了大量工作之后,现有的模型应用已经比较成熟^[42-44]。国内研究起步较晚,九十年代岑国平^[45]提出了我国第一个完整的自主开发的城市雨水径流计算模型 SSCM。之后也有许多学者进行了更进一步的自主研究与开发^[46-47]。其中,在城市雨洪风险评估中应用最为广泛的是由美国环境保护署提出的动态降雨径流模拟模型 SWMM,众多学者用其进行城市的雨洪模拟,并利用得出的水文要素数据进行了风险评估,取得了较好的效果。Tsihrintzis, V. A.^[48]利用 SWMM 中的 RUNOFF 区块模拟了佛罗里达州四个小站点的城市暴雨径流数量与质量,验证了该模型在小亚热带城市集水区的适用性。董欣等^[49]对城市排水系统进行模拟计算,以深圳河湾区为例,讨论了 SWMM 的应用情况。刘俊等^[50]以 SWMM 为基础,针对上海市城区排水系统的特点,开发出了适合上海市区产流、排水及防汛管理要求的城市雨洪模型,模拟结果较为理想,评估结果较为准确。同时随着一系列空间信息技术的发展,将城市雨洪模型与 GIS 等相结合,研究城市雨洪的模拟与仿真,进一步提高了风险评估的准确性。赵冬泉等^[51]基于 GIS 对 SWMM 城市排水管网模型进行快速构建,模拟结果与监测数据达到较好拟合。刘德儿等^[52]将

SWMM 模型与 GIS 组建无缝耦合,研究显示其在规划效率、管网布局、水力参数计算等方面,相比之前有巨大优势。

运用模型模拟进行雨洪风险的评估,展示的信息较为丰富,但是其数据要求高,计算复杂,城市雨洪模拟的精确度与深度受到限制。目前模型多数应用于城市雨洪的模拟与规划,较少从风险和管理角度进行分析。对于模型的可靠性、精确性的进一步强化以及与信息技术等多种模型相结合是今后研究的重点,提高我国城市雨洪模型的通用性以及多功能性成为亟需解决的问题。

3 城市雨洪风险管理进展

对城市雨洪风险进行评估,是为了更好地进行雨洪管理。城市水资源的短缺与雨洪灾害问题如何进行有效调节是城市雨洪管理亟待解决的问题。依托先进理论和技术开展城市雨洪风险管理,在满足城市发展的同时,加强水环境系统规划,实现城市绿色可持续协调发展。

3.1 城市雨洪管理技术

发达国家在过去的几十年中,可持续雨洪管理理念和技术已经得到大范围的应用和实践,形成了比较完善的城市雨洪管理体系。在 20 世纪 70 年代美国提出了最佳管理措施(BMP),该方法首先应用于水污染控制,后来也被应用于雨洪控制,主要通过工程和非工程措施方法,在降雨流入水体前展开流域尺度控制。在此基础上美国又提出了低影响开发(LID)理念,主要在源头采用分散式、小尺度的技术手段管理雨洪径流。同期,英国提出应用可持续排水系统(SUDS)进行雨洪管理,综合考虑了雨洪风险、改善水质、满足社区需要等环境和社会影响因素。澳大利亚的水敏感城市设计(WSUD)以及新西兰的低影响城市设计与开发(LIUD)技术都被广泛应用到城市雨洪管理中^[53-55]。

近年来,随着气候的变化以及城市化的不断进展,城市雨洪发生的频率不断增加,问题日益突出,我国相关专家在借鉴其他国家管理技术模式上也展开了大量的研究工作,取得了许多研究成果,提出了许多适应我国城市特点的雨洪管理技术。罗红梅等^[56]具体论述了 BMP 中的一项雨水花园技术,展望了其在我国城市建筑不透水区域以及农村、生态旅游村的应用。车伍等^[57-58]借鉴发达国家的暴雨管理体系,研究适合各种路面的雨洪管理方式,并基于 LID/GSI 的绿色道路,确定了杭州道路雨洪调控方案。贾海峰等^[59]通过对国外城市降雨径流低影响开发最佳管理措施的研究和分析,提出了城市降雨径流控制 LID BMPs 规划方法体系。

3.2 城市雨洪管理措施

应对城市不断发展的挑战,建立多目标综合

科学的雨洪管理体系, 将其灾害性减轻到最小, 发挥其优势作用, 成为重要的研究方向。在管理上主要从工程措施、非工程措施进行加强与改进。

(1) 工程措施。在城市雨洪管理中, 技术方案基本都由源头、中途以及末端控制三类所组成。在建设中加强雨水的源头控制, 推进绿色生态建设, 包括屋顶花园、公园绿地、渗透铺装、雨水桶等。张云路等^[60]以通辽市为例, 研究优化了城市绿地系统, 探索其对城市雨洪管理功能指引。Laurent M 等^[61]利用长时期水文低影响开发模型分析了不同比例的多孔路面和雨桶、水箱改造等低影响开发措施在城市雨洪调控方面的效果和影响, 并在此基础上提出了雨洪管理的相关对策。于卫红^[62]提出改进城市排水管网建设, 结合各城市地区道路河流特征, 进行区域划分排水, 采取雨污分流或分流与截流相结合的方式缓解雨水压力。张书涵等^[63]认为在末端控制中, 建立雨水储存收集装置、人工湿地或利用天然河湖进行雨水的集中调蓄。此举能有效减弱地表径流, 减轻排水管网压力, 减少道路积水, 同时经过处理的雨水还可以进行重复利用。将城市建筑、园林、交通、环保、水利等与雨洪管理合力统筹规划, 建设一体化的绿色生态循环城市, 降低雨洪风险。

(2) 非工程措施。除了在工程措施上加强城市的防涝排涝, 在管理上, 需要根据城市的整体规划, 协调各方因素, 建立适合该城市的城市雨洪管理技术方案, 并明确各设施的标准^[56]。加强宣传教育, 提高人民群众的防灾意识, 建立洪涝应急方案, 进行防汛实时监测并及时发布信息。在法律政策上, 需要建立一系列的法律法规来保障方案的实施与推广。可以借鉴西方国家的雨水排放收费制度, 进行经济调控管制^[64]。同时周宏等^[65]认为城市暴雨洪水的监测、灾害的预测预报以及应急响应技术对于城市的雨洪管理来说也是不可或缺的。建立雨水站点的动态采集与监测系统, 利用地理信息技术以及遥感技术等获取收集各方位信息, 基于物联网大数据建立集成数据库, 利用评估预报模型针对不同情况下的暴雨情况进行分析, 为防汛部门展开雨洪管理决策提供支持。

3.3 城市雨洪管理决策系统

为有效的利用物联网大数据, 需要从数据收集、数据存储、风险评估和风险调控决策层等方面构建城市雨洪风险综合管理决策系统框架(图1)。该框架中, 数据收集主要负责收集整理城市降雨、地物水文、地表地形、排水管网、应急能力、社会经济以及历史灾情数据。将以上数据进行收集之后, 建立共享数据库, 实现各相关部门数据的实时调用和共享。Ai 等^[66]通过构建水利数据的存储和共享平台, 实现了多源异构水利大数据的动态应用配置。余帅^[67]利用分布式计算和存储的开源软件框架 Hadoop 分析城市 DEM 数据来科学合理的布置城市洪涝监测点, 以及利用物联网

平台 IoT 实时监测并处理渍水点水位数据, 并在此基础上设计了一个城市洪涝实时监控的方案。在风险评估数据库基础上, 通过建立风险评估的指标体系, 实现雨洪风险评估和等级划分。Chen 等^[68]基于信息扩散模型对淮河流域相关区域洪水风险进行了评估并划分了风险等级。李文彬等^[69]根据洪水灾害形成机理, 用致灾因子的危险性和承灾体的脆弱性辅以地形因子快速地评估了上海市的洪水灾害风险以便做出及时的响应对城市雨洪风险的评估之后。在雨洪风险评估之后, 根据评估结果, 提出相应的综合应对措施, 为相关部门对雨洪风险进行迅速反应, 实行高效运转的管理机制提供支撑, 并进一步提高整个社会应付雨洪灾害的能力。

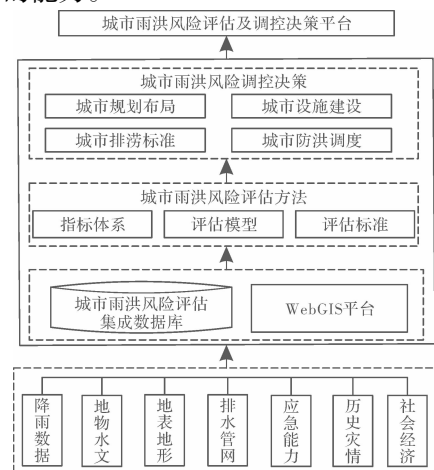


图1 城市雨洪风险综合管理决策系统框架

4 城市雨洪风险评估及管理研究展望

城市雨洪的风险评估与管理是城市发展以及水环境研究的热点问题, 许多学者都开展过大量研究, 同时也进行了一定的实践。纵观其研究现状以及应用前景, 未来对于城市雨洪的风险评估及管理研究可以从大数据智慧城市、自然水生态可持续发展和雨洪灾害风险分散机制等方面进行研究。

(1) 大数据智慧城市。随着信息技术的迅猛发展, 物联网、大数据、云计算等技术应用越来越广泛, 水利大数据的研究应用也越来越多。水利大数据分析是利用计算集群对数据进行处理、挖掘、预测、以及可视化操作等^[70]。在今后的研究中, 收集并耦合城市各方位的信息, 集成数据库, 利用物联网大数据技术进行分析, 并构建城市雨洪的预警预报系统, 为城市防洪减灾管理提供支撑。目前, 在城市防汛管理方面, 水利部门已经建设了防汛相关的监测系统, 用于雨情、汛情、工情等监测与管理。但由于雨洪管理涉及复杂海量的大数据, 目前的监测系统对这种雨洪管理大数据分析处理的功能还不够完善, 风险管理和调

控功能还存在欠缺,需在数据分析基础上,进一步拓展雨洪风险评估和调控相关的功能。

城市雨洪的管理并不仅仅是雨水资源的管理,它涉及到城市的各方面。通过大数据进行城市计算,将城市的规划、交通、能源、环境以及社会经济融合规划来解决城市面临的挑战,将会为城市的雨洪综合管理提供更多的机遇与广阔的前景。城市计算通过不断获取、整合和分析城市中多种异构大数据来解决城市问题,主要涉及但不限于城市规划、城市能耗、城市经济、城市安全^[71]。通过城市计算,合理规划城市雨水管理设计,可以自动操作和维护水利基础设施,在应对突发雨洪灾害中能够及时感知并预警,做出提前的决策和管理。例如根据天气预报以及实时降水量,提前清空水库,增强蓄水能力,保障城市安全。并将会随着大数据时代的发展而不断创新提升,为城市雨洪管理提供帮助。

(2) 自然水生态可持续发展。改变传统雨水快排理念,从城市雨洪的管理上将暴雨的灾害性减轻到最小,发挥其优势作用,改进水污染,实现水资源的可持续利用,减轻水资源短缺压力,进行水资源的调控与配置。随着海绵城市理念的提出,重塑城市结构,恢复自然生态的可持续绿色发展得到越来越多的关注,在此基础上合理规划设计城市建设发展,并同时加强对城市雨洪灾害形成机理的研究,从根源上管理控制雨洪风险。

在保护城市原有的水生态系统之上,加快对已被破坏生态的修复,并新建城市“海绵体”。城市高密度开发区,根据不同的用地情况采用透水铺装来降低地面的不透水率,增强雨水下渗。除了屋顶以外,加强建筑物的立面雨水收集,合理安排雨水调蓄池的位置与体积。结合 LID 开发,充分发挥城市生态对雨水的渗透、储蓄、净化以及缓释作用。

(3) 雨洪灾害风险分散机制。从被动预防的危机管理到主动应对的风险管理是今后雨洪灾害管理发展的必然趋势。建立雨洪灾害风险的分散机制也是管理模式中重要一环。雨洪灾害给城市造成直接经济损失的同时,对于灾后的再修复经济成本也带来了巨大增长。其中最常见的是保险与再保险。同时随着金融工具与金融产品的不断发展,逐渐演变为洪水灾害风险证券化,其中主要包含灾害债券、互换、期权以及期货。灾害风险证券化在资本市场和保险市场能够有效地转移巨灾风险,同时需要通过合理的洪涝灾害债券定价与法律机制的保障对其进行进一步完善^[72]。目前,我国风险分散机制主要依靠政府补偿,而近年来频繁发生的城市雨洪灾害使得其经济压力不断上涨,由于目前我国资本市场还未完全成熟,且雨洪灾害具有特殊性,因此构建由政府主导的,公众与市场参与合作的风险分散机制,并完善相关的法律法规来保障与规制债券的设计发行,对于雨洪灾害的管理以及经济社会的可持续发展具有

十分重要的作用。

参考文献:

- [1] EM-DAT. Economic losses, poverty and disaster 1998-2017 [R/OL]. [2019-05-07]. <https://www.nejm.org/doi/10.1056/NEJMsa180397>.
- [2] 宫永伟,李俊奇,师洪洪,等.城市雨洪管理新技术中的几个关键问题讨论[J].中国给水排水,2012,28(22):50-53.
- [3] Wilson R, Crouch E A. Risk assessment and comparison: an introduction [J]. Science, 1987, 236(4799): 267-270.
- [4] Maskrey A. Disaster mitigation: a community based approach [M]. Oxford England Oxfam, 1989.
- [5] Bruno M, Thieken A H. Flood risk curves and uncertainty bounds [J]. Natural Hazards, 2009, 51(3): 437-458.
- [6] 史培军. 三论灾害研究的理论与实践[J]. 自然灾害学报, 2002, 11(3): 1-9.
- [7] Crichton D. The risk triangle [C]. In Ingleton J. (Ed.), Natural Disaster Management. London: Tudor Rose, 1999: 102-103.
- [8] 张会,张继权,韩俊山.基于GIS技术的洪涝灾害风险评估与区划研究-以辽河中下游地区为例[J].自然灾害学报, 2005, 14(6): 141-146.
- [9] YENB C. Urban flood hazard and its mitigation [M]. Elsevier Inc, 1995.
- [10] IPCC. Managing the risks of extreme events and disasters to advance climate change adaptation: a special report of working groups I and II of the intergovernmental panel on climate change [R]. Cambridge, UK and New York, NY, USA: Cambridge University Press, 2012.
- [11] 殷杰,尹占娥,王军,等.基于GIS的城市社区暴雨内涝灾害风险评估[J].地理与地理信息科学,2009,25(6): 92-95.
- [12] Bronstert A. Floods and climate change: interactions and impacts [J]. Risk Analysis An Official Publication of the Society for Risk Analysis, 2010, 23(3): 545-557.
- [13] 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.
- [14] Leopold L B. Hydrology for urban land planning-a guidebook on the hydrologic effects of urban land use [R]. Washington DC: United States Geological Survey Circular 554, 1968.
- [15] Chester L, Arnold J R, Gibbons C J. Impervious surface coverage: the emergence of a key environmental indicator [J]. Journal of the American Planning Association, 1996, 62(2): 243-258.
- [16] 李海燕,梅慧瑞,徐波平.北京城市雨水管道中沉积物的状况调查与分析[J].中国给水排水,2011,7(6): 36-39.
- [17] Carle M V, Patrick N, Stow C A. Patterns of watershed urbanization and impacts on water quality [J]. JAWRA Journal of the American Water Resources Association, 2005, 41(3): 693-708.
- [18] 张冬冬,严登华,王义成,等.城市内涝灾害风险评估及综合应对研究进展[J].灾害学,2014,29(1): 144-149.
- [19] 刘新立,史培军.区域水灾风险评估模型研究的理论与实践[J].自然灾害学报,2001,10(2): 66-72.
- [20] 陈军飞,王慧敏.水旱灾害风险管理理论方法及应用[M].南京:河海大学出版社,2012.
- [21] 程卫帅.基于致灾过程的区域洪灾风险评估方法及其应用研究[D].武汉:武汉大学,2010.
- [22] 黄崇福.自然风险评价理论与实践[M].北京:科学出版社,2002.
- [23] 周魁一.“历史模型”与灾害研究[J].自然灾害学报,2002,11(1): 10-14.
- [24] 马建明,周魁一,陆吉康.水灾史料量化与区域洪水灾害风险分析[J].中国水利水电科学研究院学报,1997,1(2): 101-108.

- [25] Benito G, LANG M, Barriendos M, et al. Use of systematic, palaeoflood and historical data for the improvement of flood risk estimation. review of scientific methods [J]. *Natural Hazards*, 2004, 31(3): 623-643.
- [26] Rodda H J E. The development and application of a flood risk model for the Czech Republic [J]. *Natural Hazards*, 2005, 36(1): 207-220.
- [27] Islam M, Sado K. Development priority map for flood countermeasures by remote sensing data with geographic information system [J]. *Journal of Hydrologic Engineering*, 2002, 7(5): 346-355.
- [28] Lhomme J, Bouvier C, Perrin J. Applying a gis-based geomorphological routing model in urban catchments [J]. *Journal of Hydrology*, 2004, 299(3/4): 203-216.
- [29] Chubey M, Hathout S. Integration of radarsat and gis modelling for estimating future red river flood risk [J]. *GeoJournal*, 2004, 59(3): 237-246.
- [30] 王林, 秦其明, 李吉芝, 等. 基于 GIS 的城市内涝灾害分析模型研究[J]. *测绘科学*, 2004, 29(3): 48-51.
- [31] 唐川, 师玉娥. 城市山洪灾害多目标评估方法探讨[J]. *地理科学进展*, 2006, 25(4): 13-21.
- [32] 蒋新宇, 范久波, 张继权, 等. 基于 GIS 的松花江干流暴雨洪涝灾害风险评估[J]. *灾害学*, 2009, 24(3): 51-56.
- [33] Camarasa-Belmonte A M, Soriano-García J. Flood risk assessment and mapping in peri-urban mediterranean environments using hydrogeomorphology. Application to ephemeral streams in the Valencia region (eastern Spain) [J]. *Landscape and Urban Planning*, 2012, 104(2): 189-200.
- [34] 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.
- [35] Haruyama S, Ohokura H, Simking, T. Geomorphological zoning for flood inundation using satellite data [J]. *GeoJournal*, 1996, 38(3): 273-278.
- [36] 何报寅, 张海林, 张穗, 等. 基于 GIS 的湖北省洪水灾害危险性评价[J]. *自然灾害学报*, 2002, 11(4): 84-89.
- [37] 翁莉, 马林, 徐双凤. 城市暴雨灾害风险评估及防御对策研究--以江苏省南京市为例[J]. *灾害学*, 2015, 30(1): 130-134.
- [38] 金菊良, 魏一鸣, 杨晓华. 基于遗传算法的洪水灾情评估神经网络模型探讨[J]. *灾害学*, 1998, 13(2): 6-11.
- [39] 姚俊英, 朱红蕊, 南极月, 等. 基于灰色理论的黑龙江市暴雨洪涝特征分析及灾变预测[J]. *灾害学*, 2012, 27(1): 59-63.
- [40] 石晓静, 查小春, 刘嘉慧, 等. 基于云模型的汉江上游安康市洪水灾害风险评价[J]. *水利水电科技进展*, 2017, 37(3): 29-34, 48.
- [41] 王贺, 刘高峰, 王慧敏. 基于云模型的城市极端雨洪灾害风险评价[J]. *水利经济*, 2014, 32(2): 15-18.
- [42] Christopher Z. Review of urban storm water models [J]. *Environmental Modelling & Software*, 2001, 16(3): 195-231.
- [43] Terstriep M L, Stall J B. The illinois urban drainage area simulator, illudas[M]. *Bull State ILL Dep Regist Educ ILL State Water Surv*, 1974.
- [44] Otienof A O, Kibata N. Application of the trrl flood estimation model in hydrological forecasting for catchments with limited data; a case study [J]. *International Journal of Sediment Research*, 1998, 13(4): 70-80.
- [45] 岑国平. 城市雨水径流计算模型[J]. *水利学报*, 1990(10): 68-75.
- [46] 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.
- [47] 李娜. 天津市城区暴雨沥涝仿真模拟系统的研究[J]. *自然灾害学报*, 2002, 11(2): 112-118.
- [48] Tsihrintzis V A, Hamid R. Runoff quality prediction from small urban catchments using swmm [J]. *Hydrological Processes*. 1998, 12(2): 311-329.
- [49] 董欣, 陈吉宁, 赵冬泉. SWMM 模型在城市排水系统规划中的应用[J]. *给水排水*, 2006, 32(5): 106-109.
- [50] 刘俊, 郭亮辉, 张建涛, 等. 基于 SWMM 模拟上海市区排水及地面淹水过程[J]. *中国给水排水*, 2006(21): 64-66, 70.
- [51] 赵冬泉, 陈吉宁, 佟庆远, 等. 基于 GIS 构建 SWMM 城市排水管网模型[J]. *中国给水排水*, 2008, 24(7): 88-91.
- [52] 刘德儿, 袁显贵, 兰小机, 等. SWMM 模型与 GIS 组件的无缝耦合及应用[J]. *中国给水排水*, 2016, 32(1): 106-111.
- [53] Dietz M E. Low impact development practices: a review of current research and recommendations for future directions [J]. *Water, Air, and Soil Pollution*. 2007, 186(1): 351-363.
- [54] Elliott A H, Trowsdale S A. A review of models for low impact urban stormwater drainage [J]. *Environmental Modeling & Software*, 2007, 22(3): 394-405.
- [55] 宋晓猛, 张建云, 王国庆, 等. 变化环境下城市水文学的发展与挑战--II. 城市雨洪模拟与管理[J]. *水科学进展*, 2014, 25(5): 752-764.
- [56] 罗红梅, 车伍, 李俊奇, 等. 雨水花园在雨洪控制与利用中的应用[J]. *中国给水排水*, 2008, 24(6): 48-52.
- [57] 车伍, 吕放放, 李俊奇, 等. 发达国家典型雨洪管理体系及启示[J]. *中国给水排水*, 2009, 25(20): 12-17.
- [58] 何卫华, 车伍, 杨正, 等. 城市绿色道路及雨洪控制利用策略研究[J]. *给水排水*, 2012, 48(9): 42-47.
- [59] 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.
- [60] 张云路, 李雄, 邵明, 等. 基于城市绿地系统优化的绿地雨洪管理规划研究--以通辽市为例[J]. *城市发展研究*, 2018, 25(1): 97-102.
- [61] Ahiablame L M, Engel B A, Chaubey I. Effectiveness of low impact development practices: literature review and suggestions for future research [J]. *Water, Air & Soil Pollution*, 2012, 223(7): 4253-4273.
- [62] 于卫红. 城市排水规划的热点问题探讨[J]. *中国给水排水*, 2006, 22(8): 16-18.
- [63] 张书函, 孟莹莹, 陈建刚. 城市雨水利用措施的灾害防御作用[J]. *水利水电科技进展*, 2010, 30(5): 19-23.
- [64] Alsharif K. Construction and stormwater pollution: policy, violations, and penalties [J]. *Land Use Policy*, 2010, 27(2): 612-616.
- [65] 周宏, 刘俊, 高成, 等. 我国城市内涝防治现状及问题分析[J]. *灾害学*, 2018, 33(3): 147-151.
- [66] AI P, YUE Z X. A framework for processing water resources big data and application [J]. *Applied Mechanics and Materials*, 2014(519/520): 3-8.
- [67] 余帅. Hadoop 和物联网技术在城市洪涝实时监测中的应用研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2015.
- [68] CHEN J, LIU G, WANG H, et al. Research on flood risk zoning based on information diffusion and entropy theory in the Huaihe River Basin, China [J]. *Disaster Advances*, 2012, 5(4): 1224-1230.
- [69] 李文彬, 覃东华, 翟高鹏. 区域洪水灾害风险快速评估研究--以上海市为例[J]. *安全与环境工程*, 2012, 19(6): 93-96, 100.
- [70] 陈军飞, 邓梦华, 王慧敏. 水利大数据研究综述[J]. *水科学进展*, 2017, 28(4): 622-631.
- [71] ZHENG Y, Capra L, Wolfson O, et al. Urban computing: concepts, methodologies, and applications [J]. *Acm Transactions on Intelligent Systems & Technology*, 2014, 5(3): 1-55.
- [72] CHEN J, LIU G, YANG L, et al. Pricing and simulation for extreme flood catastrophe bonds [J]. *Water Resources Management*, 2013, 27(10): 3713-3725.