

李超超, 田军仓, 申若竹. 洪涝灾害风险评估研究进展[J]. 灾害学, 2020, 35(3): 131–136. [LI Chaochao, TIAN Juncang and SHEN Ruozhu. Review on Assessment of Flood and Waterlogging Risk[J]. Journal of Catastrophology, 2020, 35(3): 131–136. doi: 10.3969/j.issn.1000–811X.2020.03.025.]

洪涝灾害风险评估研究进展^{*}

李超超¹, 田军仓¹, 申若竹²

(1. 宁夏大学 土木与水利工程学院, 宁夏 银川 750021; 2. 北京首创股份有限公司, 北京 100044)

摘要: 在气候变化与城市化背景下, 洪涝灾害频发造成了严重经济损失和社会问题。科学的洪涝灾害风险评估是洪涝灾害风险管理的前提和需求。首先对国内外典型洪涝灾害进行介绍, 用数据和实例说明洪涝灾害的影响之广与损失之巨。然后从理论和方法两个方面, 对洪涝灾害风险评估国内外研究现状进行综述。重点介绍了洪涝灾害评估方法, 包括: 数理统计法、指标体系法、不确定性分析法和情景模拟法。情景模拟风险评估法是当前自然灾害风险评估研究的主流方向, 该方法需要以暴雨洪涝模拟和洪灾损失评估为基础, 后续梳理了雨洪仿真模型与损失评估模型研究进展。最后提出洪涝灾害风险评估的未来研究方向, 主要有三个方面: 风险评估综合指标体系的建立与评估指标权重的确定; 风险评估框架的构建及模型适应性研究; 区域洪涝风险演变趋势及驱动机制研究。

关键词: 洪涝灾害; 风险评估; 情景模拟法; 雨洪仿真模型; 损失评估模型

中图分类号: X43; X915.5; S42; P642 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000–811X(2020)03–0131–06

doi: 10.3969/j.issn.1000–811X.2020.03.025

在全球气候变化与城镇化背景下, 极端气候水文事件的发生频率、影响范围和影响程度都有所增加, 洪涝灾害经济财产损失呈显著上升趋势, 成为影响国家中长期发展的重大风险之一^[1–3]。近几年, 极端气象事件增多, 城市暴雨内涝灾害频发, 引发社会的广泛关注; 城镇化地区暴雨洪涝防治面临巨大的压力与挑战, 因此, 洪涝灾害研究成为热点。采用科学的风险评估方法, 才可能对变化环境下暴雨洪涝灾害的防治做出明智的决策, 及时、有效、持续加大洪涝灾害的综合治理力度^[4]。梳理国内外典型洪涝灾害事件, 了解国内外洪涝灾害风险评估研究现状, 把握未来主要发展趋势, 可为洪涝灾害风险管理决策的制定提供科学依据^[5]。

1 国内外典型洪涝灾害

根据1970–2018年全球洪水灾害频次统计, 全球范围内洪涝灾害发生的频次有增长的趋势^[6]。《天气、气候和与水相关的极端事件造成的人员伤亡和经济损失地图集》显示1970–2012年间暴雨和洪水引发的灾害占自然灾害总数的79%, 造成的

死亡占55%, 经济损失达到86%^[7]。

2002年8月欧洲大洪水, 捷克全国约有22万人紧急避难, 水灾经济损失约达30亿欧元。奥地利经济损失达25~30亿欧元。德国约34万人受灾, 水灾经济损失达到92亿欧元^[8]。2005年卡特里娜飓风引发的洪灾造成了840亿美元经济损失以及1836人死亡, 路易斯安娜州的新奥尔良市是重灾之首, 飓风引发的风暴潮使新奥尔良市的防洪堤多处溃决, 导致80%的城区被淹没, 城市生命线系统全面瘫痪, 危化品泄漏导致水源污染, 疾病蔓延, 继而社会动乱^[9]。2011年7–9月, 中南半岛的大部分地区降雨量骤然增多, 是往年的1.2~1.8倍。洪灾造成泰国900万人受灾, 708人死亡。曼谷60%~70%的街道被淹没, 交通全面中断。巨灾严重影响了泰国的经济增长, 2011年泰国全年GDP增长率仅为0.1%^[10]。2013年11月8日超强台风“海燕”在菲律宾登陆, “海燕”造成6057人死亡, 失踪近1800人, 近千万人口受灾, 其中, 因灾被迫转移的灾民数量超过440万。受损房屋64.8万间, 造成基础设施和农作物经济损失约2.75亿美元^[11]。

我国地处东亚大陆, 受大陆性季风气候影响,

^{*} 收稿日期: 2019–12–27 修回日期: 2020–04–08

基金项目: 国家自然科学基金青年基金项目(51809143); 宁夏回族自治区重点研发计划重大项目(2018BBF02022); 宁夏自然科学基金项目(2018AAC03041)

第一作者简介: 李超超(1988–), 女, 宁夏银川人, 副教授, 博士, 主要从事水灾害与水安全研究。

E-mail: lichaochao@nxu.edu.cn

降雨量年内分布不均,暴雨洪涝灾害突出,大约2/3的国土面积受不同类型和不同程度洪涝灾害的影响^[12]。我国洪涝灾害的分布与降雨的时空分布高度一致,东部多,西部少,沿海多,内陆少,平原湖区多,高原山地少,夏季多,冬季少。根据《2018年中国水旱灾害公报》^[13],我国自1990年以来的洪涝灾害直接经济损失总体呈上升趋势^[14]。2010年、2012年与2013年洪涝灾害直接经济损失分别达3 745.43亿元、2 675.32亿元与3 155.74亿元^[15]。

2007年7月16-18日,重庆市主城区最大24 h降雨达267 mm,大暴雨造成农作物受灾面积200 km²,成灾面积117 km²,倒塌房屋3万间,受灾人口643万,因灾死亡56人,直接经济损失31亿元。2007年7月18-19日,济南市区最大1 h降雨量151 mm,市区道路损坏1.4万 m²,近1万 m²的地下商城在不到20 min内积水1.5 m,全市33.3万人受灾,因灾死亡37人,直接经济损失13.2亿元。2010年广州“5.7”特大暴雨期间,全市平均降雨107.7 mm,市区平均降雨128.5 mm,受暴雨影响,全市102个镇(街)受水浸,109间房屋倒塌,17.1 km²农田受淹,受灾人口32 166人,因洪涝次生灾害死亡6人,直接经济损失5.4亿元^[16]。2012年7月21日,北京、天津、河北等地出现特大暴雨过程,过程最大点雨量北京房山区河北镇541 mm。北京、天津、河北受灾人口540万人,因灾死亡115人、失踪16人,农作物受灾面积530千公顷,倒塌房屋3万间,北京市区形成积水点426处,天津中心城区形成积水点10处,河北9座城市的低洼地区积水受淹,直接经济损失331亿元^[17]。2016年受前期多次降雨影响,武汉市在6月30日至7月7日又遭受新一轮强降雨过程中,出现严重渍涝,南湖、汤逊湖周边因湖泊水位满溢,出现较严重持续渍水,紧邻南湖的一些地势低洼的居民小区渍水严重,影响了交通和市民生活。暴雨造成武汉市62.71万人受灾,13.24万人紧急转移,直接经济损失53.03亿元。

2 洪涝灾害风险评估

2.1 风险理论研究

如图1所示,洪涝灾害风险评估的基本流程是:①风险识别,找出洪涝灾害成灾的风险来源。②风险分析,其主要内容有:危险性分析(致灾因子分析)、脆弱性分析(易损性分析)和暴露性分析。③风险评估,根据风险的定义“一定概率自然灾害所造成的后果”,风险一般表达为灾害发生的可能性与造成损失的乘积。确定风险的表达形式,然后给出定量分析结果,为风险管理提供依据。

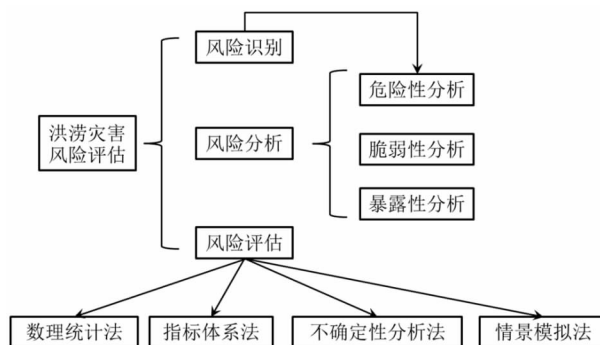


图1 洪涝灾害风险评估流程与方法

不同学科对洪涝灾害风险定义的侧重点有所不同。水文学者强调洪水危险性随时间的不确定性,采用水文频率分析方法,计算洪涝灾害事件发生的概率。水力学学者强调超标准洪水危险性空间分布的不均匀性,采用数值模拟手段,计算洪水的淹没范围、淹没历时、洪水到达的时间、流速等风险要素,综合这些要素进行风险区划。水利工程学者强调风险是工程失效及其造成不利后果的可能性,采用故障树等分析方法,计算工程失效的概率及其后果。即使在灾害学领域,基于不同的理论,洪涝灾害风险也有着不同的定义。基于概率论,风险被定义为洪涝灾害发生的概率。基于损失论,风险被定义为洪涝灾害可能造成的损失。基于系统论的定义,如风险三角形理论^[18],风险被定义为危险性(Hazard)、脆弱性(Vulnerability)和暴露性(Exposure)的综合表征。洪涝灾害有别于地震和火山爆发等自然灾害,其发生过程具有一定的可预见性与可控性^[19],同时针对承灾体的脆弱性与暴露性,也可以采取增强韧性与适应性的措施来减少风险,这就必须要全面加强防灾力(Capacity)的建设^[20]。

危险性分析也被称为致灾因子分析,顾名思义是对致灾因子的特征进行分析,以掌握不同频率灾害的强度、影响范围以及持续时间。风险图是危险性分析成果的一般表现形式,包括淹没范围、深度、流速或淹没历时等信息。脆弱性分析又称为易损性分析,由“Vulnerability”一词翻译而来。脆弱性与很多词汇相关,比如敏感性(Sensitivity)、适应性(Adaptive Capacity)和恢复力(Resilience)等,不同学者对脆弱性的理解有所不同。李鹤^[21]等人对脆弱性的概念及研究进展进行了阐述。刘婧^[22]等人对恢复力研究进展做了梳理,阐释了脆弱性和恢复力的关系。如图2所示,总结了脆弱性概念的发展趋势。最初的脆弱性是指特定承灾体对特定类型灾害的物理敏感性。而后,敏感性与应对能力构成脆弱性概念的双重结构。随后暴露性也被归为脆弱性的范畴,形成多元结构。脆弱性概念进一步发展为自然、社会、经济、环境共同决定的综合特性。本文将脆弱性概念定义为在一定自然、社会、经济、环境背景下,承灾体

受到自然灾害外力影响下表现出的易于受到伤害和损失的性质^[23]。承灾体包括不同类型的财产如住房、农业、工业、商业、交通等, 其承灾能力不同, 所以损失率会有较大区别。一般用历史数据统计法^[24]、指标体系评估法^[25]或实地调查灾害损失率^[26]等方法来分析。暴露性分析是对暴露在自然灾害影响下的人口或财产等进行评估。首先要对研究区域内的承灾体进行判断和分类, 然后统计暴露在危险中的承灾体数量, 以便结合脆弱性分析结果进一步评估灾害损失^[27]。

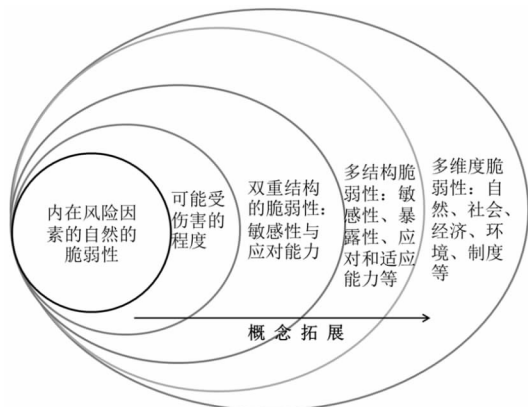


图2 脆弱性概念的发展

2.2 洪涝灾害风险评估方法

国内外对于洪涝灾害风险评估方法可归纳为4大类: 数理统计法、指标体系法、不确定性分析法和情景模拟法^[28]。

(1) 数理统计法

数理统计风险评估方法是基于历史洪涝灾害数据统计规律的分析, 对灾害风险进行评估和预测。黄崇福^[29]以历史灾情资料为依据提出了农业自然灾害风险评估方法。Benito^[30]提出了基于古洪水和历史洪水资料的洪水风险分析方法。王静静^[31]以我国东南沿海4省市为研究对象, 利用1951-2000年暴雨洪涝资料绘制了暴雨洪涝灾害风险性评价图。

(2) 指标体系法

指标体系风险评估方法首先选取风险指标, 建立风险评估指标体系, 然后通过权重的计算对评估体系进行优化, 最终确定风险指数。Okazawa^[32]基于洪涝灾害的自然属性与社会属性, 建立了通用的洪灾风险评估指标体系。Seiler^[33]建立了标准化的洪灾风险指标体系, 可用于流域不同空间分辨率的洪灾风险评估。

(3) 不确定性分析法

不确定性方法主要包括模糊数学方法、灰色系统方法、人工神经网络方法等^[34], 已有许多学者将这些方法应用于洪涝灾害风险评估^[35-37]。Zou^[38]等人将模糊数学方法应用于洪灾风险评估。Shao^[39]等人基于灰色系统分析法对中国洪涝灾害风险进行了评估。颜峻^[40]等人利用模糊隶属度函数和层次分析法构建了自然灾害风险评估指标体

系。Li^[41]等人将信息扩散与人工神经网络法成功运用于洪水风险评估。Apel^[42]等人基于蒙特卡洛方法构建了与灾害链相关的综合洪水风险评估模型。

(4) 情景模拟法

情景模拟风险评估方法基于GIS (Geographic Information System) 和RS (Remote Sensing) 建立雨洪仿真模型与损失评估模型, 实现对洪涝灾害风险的动态评估^[43]。国内外学者将基于GIS洪水风险评估模型成功应用于全球^[44]、流域^[45-46]、区域、城市^[47]与社区^[48-49]等不同尺度的风险评估工作中。

上述前3种评估方法, 很难反映灾害系统中各要素的联系和灾害演变过程, 无法模拟复杂灾害系统的动态性。情景模拟风险评估法是当前自然灾害风险评估研究的主流方向。该方法需要对洪水信息和社会经济信息进行空间叠加分析, 以研究区域暴雨洪涝模拟和洪灾损失评估为基础, 模型的建立需要比较精细的地理信息数据、水文资料与社会经济数据^[50]。

2.3 雨洪仿真模型

城镇化地区地表覆盖与地下管网的复杂性给雨洪仿真模拟带来很大的困难。雨洪模拟方法大致分为3种^[51]。①水文-水力学耦合方法, 模拟地面产流、河道与管网水流运动情况^[52-53]。该方法的计算单元是集水区, 计算结果仅能反映计算范围内关键位置或断面的水位流量过程。②水动力学方法, 通过求解圣维南方程组, 计算出雨水地面径流过程, 不受集水区划分的影响^[54-55]。③基于GIS技术洪水淹没计算方法。计算结果是洪水淹没的最终状态, 不能反映洪水的运动过程^[56-57]。

城市雨洪径流及排水系统的数值模拟计算始于1960年代。国外对城市洪涝模型研究成果已有较高应用价值, 常用数值模型有美国环境保护署EPA提出的暴雨洪水管理模型SWMM (Storm Water Management Model)^[58], 丹麦的DHI-MIKE, 英国Wallingford主营的InfoWorks CS等^[59]。SWMM模型的本地化应用很多, 从2010年开始北京、天津、武汉、深圳、广州等大城市相继开展了基于SWMM模型的城市内涝研究^[60-63]。目前, 洪涝灾害仿真模型建立过程中, 存在的主要困难是缺乏足够的实测数据, 包括洪水淹没范围、淹没水深与淹没历时等数据。因此, 模型率定和验证会受到一定程度的限制。

2.4 洪涝灾害损失评估模型

损失评估是风险评估的重要内容之一, 洪涝灾害损失评估包括经济损失和非经济损失评估。其中经济损失是洪灾评估的主要内容, 它包括直接经济损失和间接经济损失。在国外一些发达国家, 洪水保险比较普及, 社会经济资料和各种行业财产的损失率资料比较完整, 对洪涝灾害的风险评估也由定性逐步向半定量或定量评估转化。而国内, 由于没有相对完整可靠的历史洪涝灾害

数据及社会经济数据, 所以开展洪涝灾害损失评估工作比较困难^[64]。

对洪涝灾害损失评估, 多针对直接经济损失。评估的方法大致上分为 3 类: ①传统的统计调查法; ②基于数学方法的损失评估模型^[65]; ③基于 GIS 和 RS 技术的损失评估模型^[66]。传统的统计调查法是建立洪灾损失数据库的基础。灾后调查需要在洪灾发生后立即到当地展开实地调研, 会消耗较多的人力与物力。基于数学方法的损失评估模型可以做到快速评估。该方法又可以分为两个子类。一类是损失率模型, 即通过构建各种行业财产损失率与淹没水深的关系来评估损失; 另一类是快速评估模型, 即通过人工智能等方法评估损失^[67]。Penning - Rowsell^[68] 和 Parker^[69] 构建了 140 种洪灾脆弱性曲线。最为典型自然灾害损失评估模型是美国风险评估软件 MH - HAZUS, 构建了近 900 组脆弱性曲线, 包含了 3 种灾害(洪灾、飓风和地震)的损失评估。加拿大学者考虑了预报时间、淹没历时和水流速度的影响, 对损失率曲线进行了修正^[70]。国内学者施国庆^[71]总结了 3 种洪灾损失率确定方法: 多元回归分析法、逐步回归分析法和洪灾损失率综合值计算法。基于数学方法的快速评估法有很多, 例如模糊综合评判法^[72], 灰关联法^[73], 神经网络法等^[74-76]。这类算法对历史洪灾数据的可靠性要求较高。目前, 我国洪水损失数据与社会经济数据库没有建立, 许多历史洪灾损失是专家凭个人经验估算的结果, 所以基于快速评估法的洪灾损失计算结果可能缺乏可靠性。伴随着 GIS 与 RS 技术的应用推广, 结合水文模型与水力学模型的综合损失评估模型得以实现^[77]。这类模型通过社会经济数据与洪水信息的空间叠加分析^[78], 实现了风险的动态评估, 但对基础地理、水文等数据的要求较高。

间接损失的成灾机制复杂, 涉及的内容和范围十分广泛, 评估较为困难。经验系数法是常用的间接损失评估法, 但该法经验化、概化成分较重, 不能有效地反映间接损失的成灾机制^[79]。调查估值法是灾后评估间接损失的方法之一, 但该方法工作量大, 需要的人力物力较多。在间接损失评估方面国内外学者也从其他角度做了一些探索性的尝试。例如, Penning - Rowsell^[80]初步分析了由于交通、通讯线路等中断造成的间接影响, 其中线路的敏感度(Susceptibility)、依赖性(Dependency)与饱和度(Redundancy)等都是评估时所参考的重要因素。

3 展望

学者们对洪涝灾害风险评估已开展了许多研究工作, 但由于洪涝灾害发生和发展的过程复杂, 仍有许多科学问题需要解决。本文归纳了以下三个方面:

(1) 风险评估综合指标体系的建立与评估指标权重的确定。洪涝灾害是一个多因素指标综合过程, 一些研究给出了洪涝灾害风险评估的指标体系, 但是尚未建立一个统一综合指标体系。尤其是对于脆弱性的评估, 需要综合社会、经济、生态、环境等多维度进行综合评估。确定各评价指标的权重是该项研究的重点也是难点。许多研究中的指标权重是通过专家打分, 利用层次分析法 (Analytic Hierarchy Process, 简称 AHP) 来确定权重, 主观性较重。

(2) 风险评估框架的构建及模型适应性研究。风险评估框架的构建需要综合考虑致灾因子、孕灾环境、承灾体等要素的变化。风险评估的方法应该根据研究区域特点及数据掌握情况来选择, 而构建多方法集成的风险评估框架, 可以拓展风险评估模型的适用范围。气候变化与城市化背景下多情景洪涝灾害风险评估是洪涝灾害管理研究的热点与难点。三类雨洪仿真模型就有其各自的优缺点和局限性^[81]。未来建立基于 RS 和 GIS 技术的精细化、动态化的适用于城市化地区的洪涝仿真模型会是变化环境下洪涝风险评估方法发展的必然趋势^[82]。

(3) 区域洪涝风险演变趋势及驱动机制研究^[83]。洪涝灾害的经济损失会受到自然因素与社会因素的共同影响。这些因素对洪涝灾害风险演变的作用方式、作用程度都不同, 因此对洪涝灾害风险演变趋势的研究具有复杂性和不确定性。目前对洪涝灾害风险演变趋势的研究较少, 特别是对自然与社会因素共同作用下的风险演变趋势及其驱动机制的研究亟需深入。基于驱动机制的研究, 可以更好地把握风险演变趋势, 对风险做出科学预测, 在规划中采取合理的减灾措施以抑制风险增长的趋势。该项研究可以拓展风险评估的时间与空间尺度。

参考文献:

- [1] IPCC. 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, 2014.
- [2] 邱海军, 曹明明, 胡胜, 等. 近 60a 来中国洪涝灾情变化趋势持续性 and 周期性研究[J]. 地球与环境, 2014, 42(1): 17-24.
- [3] 徐宗学, 程涛. 城市水管理与海绵城市建设之理论基础——城市水文学研究进展[J]. 水利学报, 2019, 50(1): 53-61.
- [4] 李超超, 程晓陶, 申若竹, 等. 城市化背景下洪涝灾害新特点及其形成机理[J]. 灾害学, 2019, 34(2): 58-62.
- [5] 张会, 李铖, 程炯, 等. 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, 2019, 38(2): 175-190.
- [6] EM - DAT: The OFDA/CRED international disaster database. [EB/OL]. <http://www.emdat.be> - Universite Catholique de Louvain, Brussels - Belgium.
- [7] Golnaraghi M, Etienne C, Sapir D G, et al. Atlas of mortality and

- economic losses from weather, climate and water extremes (1970 – 2012). World Meteorological Organization. [EB/OL]. http://www.wmo.int/pages/prog/drr/transfer/2014.06.12-WMO1123_Atlas_120614.pdf, 2014-08-06.
- [8] 程晓陶. 2002 年 8 月欧洲特大洪水概述——兼议我国水灾应急管理体制的完善[J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2003 (4): 247 – 254.
- [9] 王晓东, 王冠军, 姜付仁. 卡特里娜飓风的影响及启示[J]. 水利发展研究, 2005, 5(12): 8 – 13.
- [10] Marks D. Climate change and Thailand: impact and response [J]. Contemporary Southeast Asia A Journal of International & Strategic Affairs, 2011, 33(33): 229 – 258.
- [11] Yoshimitsu T, Tomohiro Y, Benitom P, et al. Initial report of JSCE – PICE joint survey on the storm surge disaster caused by Typhoon Haiyan [J]. Coastal Engineering Journal, 2014, 56(1): 40 – 54.
- [12] 田国珍, 刘新立, 王平, 等. 中国洪水灾害风险区划及其成因分析[J]. 灾害学, 2006, 21(2): 1 – 6.
- [13] 国家防汛抗旱总指挥部, 中华人民共和国水利部. 2018 年中国水旱灾害公报[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2018.
- [14] 姜付仁, 程晓陶, 向立云, 等. 美国 20 世纪洪水损失分析及中美 90 年代比较研究[J]. 水科学进展, 2003, 14(3): 384 – 388.
- [15] 程晓陶, 李超超. 城市洪涝风险的演变趋向、重要特征与应对方略[J]. 中国防汛抗旱, 2015, 25(3): 6 – 9.
- [16] 李娜, 韩松, 王艳艳. 广州市特大暴雨洪灾谈城市雨洪灾害防治[J]. 中国防汛抗旱, 2010, 20(5): 57 – 58.
- [17] 国家防汛抗旱总指挥部, 中华人民共和国水利部. 2013 年中国水旱灾害公报 [M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2013.
- [18] Crichton D. The risk triangle [C]//Ingleton J. (Ed.): Natural Disaster Management. London: Tudor Rose, 1999: 102 – 103.
- [19] 程晓陶. 新时期大规模的治水活动迫切需要科学理论的指导——论有中国特色的洪水风险管理[J]. 水利发展研究, 2001(4): 1 – 6.
- [20] 张继权, 冈田宪夫, 多多纳裕. 综合自然灾害风险管理——全面整合的模式与中国的战略选择[J]. 自然灾害学报, 2006, 15(1): 29 – 37.
- [21] 李鹤, 张平宇, 程叶青. 脆弱性的概念及其评价方法[J]. 地理科学进展, 2008, 27(2): 18 – 25.
- [22] 刘婧, 史培军, 葛怡, 等. 灾害恢复力研究进展综述[J]. 地球科学进展, 2006, 21(2): 211 – 218.
- [23] CHO S Y, CHANG H. Recent research approaches to urban flood vulnerability, 2006 – 2016 [J]. Natural Hazards, 2017, 88: 633 – 649.
- [24] 蒋勇军, 况明生, 匡鸿海, 等. 区域易损性分析、评估及易损度区划——以重庆市为例[J]. 灾害学, 2001, 16(3): 59 – 64.
- [25] 樊运晓. 区域减灾的承灾体脆弱性综合评价研究[D]. 北京: 中国地质大学, 2000.
- [26] 尹占娥, 许世远, 殷杰, 等. 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, 2010, 65(5): 553 – 562.
- [27] Plate E J. Flood risk and flood management[J]. Journal of Hydrology, 2002, 267: 2 – 11.
- [28] 尹占娥. 城市自然灾害风险评估与实证研究[D]. 上海: 华东师范大学, 2009.
- [29] 黄崇福, 刘新立. 以历史灾情资料为依据的农业自然灾害风险评估方法[J]. 自然灾害学报, 1998, 7(2): 1 – 9.
- [30] Benito G, Ouara T B M J, Bárdossy A. Applications of palaeo-flood hydrology and historical data in flood risk analysis[J]. Journal of Hydrology, 2005, 313(1): 1 – 2.
- [31] 王静静, 刘敏, 权瑞松, 等. 中国东南沿海地区暴雨洪涝风险分区及评价[J]. 华北水利水电学院学报, 2010, 31(1): 14 – 16.
- [32] Okazawa Y, Yeh P J F, Kanae S, et al. Development of a global flood risk index based on natural and socio – economic factors [J]. Hydrological Sciences Journal, 2011, 56(5): 789 – 804.
- [33] Seiler R A, Hayes M, Bressan L. Using the standardized precipitation index for flood risk monitoring [J]. International Journal of Climatology, 2002, 22(11): 1365 – 1376.
- [34] 刘家福, 张柏. 暴雨洪灾风险评估研究进展[J]. 地理科学, 2015, 35(3): 346 – 351.
- [35] ZHU M L, FU J M. Comparison between fuzzy reasoning and neural network method to forecast runoff discharge [J]. Journal of Hydroscience and Hydraulic Engineering, 1994, 12(2): 131 – 141.
- [36] Nayak P C, Sudheer K P, Ramasastri K S. Fuzzy computing based rainfall – runoff model for real time flood forecasting [J]. Hydrological Processes, 2005, 19(4): 955 – 968.
- [37] 刘新立. 区域风险评估的理论与实践[D]. 北京: 北京师范大学, 2000.
- [38] ZOU Q, ZHOU J, ZHOU C, et al. Comprehensive flood risk assessment based on set pair analysis – variable fuzzy sets model and fuzzy AHP [J]. Stochastic Environmental Research and Risk Assessment, 2013, 27(2): 525 – 546.
- [39] SHAO M, GONG Z, XU X. Risk assessment of rainstorm and flood disasters in China between 2004 and 2009 based on gray fixed weight cluster analysis [J]. Natural Hazards, 2014, 71(2): 1025 – 1052.
- [40] 颜峻, 左哲. 自然灾害风险评估指标体系及方法研究[J]. 中国安全科学学报, 2010, 20(11): 61 – 65.
- [41] LI Q, JIANG X, LIU D. Analysis and modeling of flood risk assessment using information diffusion and artificial neural network [J]. Emu Official Organ of the Australasian Ornithologists Union, 2012, 39(1): 643 – 648.
- [42] Apel H, Thieken A H, Merz B, et al. Flood risk assessment and associated uncertainty [J]. Natural Hazards & Earth System Sciences, 2004, 4(2): 295 – 308.
- [43] Prudhomme C, Wilby R L, Crooks S, et al. Scenario – neutral approach to climate change impact studies: Application to flood risk [J]. Journal of Hydrology, 2010, 390(3): 198 – 209.
- [44] Hirabayashi Y, Mahendran R, Koirala S, et al. Global flood risk under climate change. Nature Climate Change 2013, (3): 816 – 821.
- [45] WU Y, ZHONG P A, ZHANG Y, et al. Integrated flood risk assessment and zonation method: a case study in Huaihe River basin, China [J]. Natural Hazards, 2015, 78(1): 635 – 651.
- [46] 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.
- [47] 暴雨杰. 基于情景的上海浦东暴雨洪涝灾害脆弱性评估[D]. 上海: 上海师范大学, 2009.
- [48] 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.
- [49] YIN Z E, YIN J, XU S Y, et al. Community – based scenario modeling and disaster risk assessment of urban rainstorm waterlogging [J]. Journal of Geographical Sciences, 2011, 21(2): 274 – 284.
- [50] 尹占娥. 自然灾害风险理论与方法研究[J]. 上海师范大学学报(自然科学版), 2012, 41(1): 99 – 103.
- [51] 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.
- [52] 徐向阳, 刘俊, 郝庆庆, 等. 城市暴雨积水过程的模拟[J]. 水科学进展, 2003, 14(2): 193 – 196.
- [53] Hsu M H, CHEN S H, CHANG Y J. Inundation simulation for urban drainage basin with storm sewer system [J]. Journal of Hydrology, 2000, 234(2): 21 – 37.
- [54] 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.

- [55] 李娜, 孟雨婷, 王静, 等. 低影响开发措施的内涝削减效果研究——以济南市海绵试点区为例[J]. 水利学报, 2017, 49(12): 55–68.
- [56] 刘仁义, 刘南. 基于 GIS 的复杂地形洪水淹没区计算方法[J]. 地理学报, 2001, 68(1): 1–6.
- [57] 丁志雄, 李纪人, 李琳. 基于 GIS 格网模型的洪水淹没分析方法[J]. 水利学报, 2004, 35(6): 56–60.
- [58] Huber W C, Dickinson R E, Barnwell T O, et al. The USEPA SWMM4 Stormwater Management Model: Version 4 User's Manual [J]. 1989, 4(4): 206–207.
- [59] Bisht D S, Chatterjee C, Kalakoti S, et al. Modeling urban floods and drainage using SWMM and MIKE Urban: a case study [J]. Natural Hazards, 2016, 84: 10–13.
- [60] 梅超, 刘家宏, 王浩, 等. SWMM 原理解析与应用展望 [J]. 水利水电技术, 2017, 48(5): 33–42.
- [61] 陈晓燕, 张娜, 吴芳芳, 等. 雨洪管理模型 SWMM 的原理、参数和应用[J]. 中国给水排水, 2013(4): 4–7.
- [62] 冯艳杰, 肖建华. SWMM 模型在城市排水系统中的应用[J]. 地理空间信息, 2011, (5): 125–126.
- [63] 黄国如, 黄晶, 喻海军, 等. 基于 GIS 的城市雨洪模型 SWMM 二次开发研究[J]. 水电能源科学, 2011, 29(4): 43–45.
- [64] 冯民权, 周孝德, 张根广. 洪灾损失评估的研究进展[J]. 水资源与水工程学报, 2002, (1): 32–36.
- [65] Dutta D, Herath S, Musiak K. A mathematical model for flood loss estimation[J]. Journal of Hydrology, 2003, 277: 24–49.
- [66] 韩平, 程先富. 洪水灾害损失评估研究综述[J]. 环境科学与管理, 2012, 37(4): 61–64.
- [67] Das S, Lee R. A nontraditional methodology for flood stage damage calculation[J]. Water Resources, 1988, 24(6): 263–272.
- [68] Penning – Rowsell E C, Chatterton J B. The benefits of flood alleviation: a manual of assessment techniques [J]. Geographical Journal, 1977, 145(3): 951–952.
- [69] Parker D J, Green C H, Thompson P M. Urban flood protection benefits: a project appraisal guide [M]. England: Gower technical press, 1987.
- [70] Sujit D, Russell L. A nontraditional methodology for flood stage – damage calculations [J]. Water Resources Bulletin, 1998, 24(6): 1263–1272.
- [71] 施国庆. 洪灾损失率及其确定方法探讨[J]. 水利经济, 1990, (2): 37–42.
- [72] 任鲁川. 灾害损失定量评估的模糊综合评判方法[J]. 灾害学, 1996, (4): 5–10.
- [73] 陈亚宁. 自然灾害的灰色关联灾情评估模型及应用研究[J]. 地理科学进展, 1999, 18: 158–162.
- [74] 金菊良. 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, 28(3): 39–42.
- [75] 唐明, 邵东国. 基于遗传程序设计的洪水灾害损失评估及自动建模[J]. 武汉大学学报, 2007, 40(3): 26–30.
- [76] 黄涛珍, 王晓东. BP 神经网络在洪涝灾损失快速评估中的应用[J]. 河海大学(自然科学版), 2003, 31(4): 457–460.
- [77] SU M D, KANG J L, CHANG L F et al. A grid – based GIS approach to regional flood damage assessment [J]. Journal of Marine Science and Technology, 2005, 13(3): 184–192.
- [78] Jonkman S N, Bockarjova M, Kok M et al. Integrated hydrodynamic and economic modeling of flood damage in the Netherlands [J]. Ecological Economics, 2008, 66: 77–90.
- [79] 王艳艳, 刘树坤. 洪水管理经济评价研究进展[J]. 水科学进展, 2013, 24(4): 598–606.
- [80] Penning – Rowsell E C, Johnson C, Tunstall S, et al. The benefits of flood and coastal risk management: a manual of assessment techniques [J]. Rowsell, 2005.
- [81] Teng J, Jakeman A J, Vaze J, et al. Flood inundation modelling: A review of methods, recent advances and uncertainty analysis [J]. Environmental Modelling & Software, 2017, 90: 201–216.
- [82] 刘勇, 张韶月, 柳林, 等. 智慧城市视角下城市洪涝模拟研究综述 [J]. 地理科学进展, 2015, 34(4): 494–504.
- [83] 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.

Review on Assessment of Flood and Waterlogging Risk

LI Chaochao¹, TIAN Juncang¹ and SHEN Ruozhu²

(1. College of Civil and Hydraulic Engineering, Ningxia University, Yinchuan 750021, China;

2. Beijing Capital Co., LTD, Beijing 100044, China)

Abstract: In the context of climate change and rapid urbanization, frequent flood and waterlogging disasters have caused serious economic losses and social problems. It is the premise as well as the requirements of risk managing to perform a scientific and reasonable risk assessment. Firstly, the typical global flood disaster events are introduced to prove the scope of impact and the scale of damage. From the perspective of theory and method, the research status of flood and waterlogging risk assessment is summarized. The four typical flood risk assessment methods include mathematical statistics method, index system method, uncertainty analysis method and scenario simulation method. The last one is the mainstream research direction of natural disaster risk assessment, which is based on inundation simulation and damage assessment. Finally, the future research directions of flood risk assessment are prospected: 1) the comprehensive index system and determination of index weight; 2) the framework of risk assessment and model adaptability; 3) the evolution trend and driving mechanism of regional flood risk.

Key words: flood and waterlogging disaster; risk assessment; scenario simulation method; flood simulation model; flood damage assessment model