

孙章丽, 朱秀芳, 潘耀忠, 等. 洪水灾害风险分析进展与展望[J]. 灾害学, 2017, 32(3): 125–130, 136. [SUN Zhangli, ZHU Xiufang, PAN Yaozhong, et al. Flood Risk Analysis: Progress, Challenges and Prospect[J]. Journal of Catastrophology, 2017, 32(3): 125–130, 136. doi: 10.3969/j.issn.1000-811X.2017.03.022.]

# 洪水灾害风险分析进展与展望\*

孙章丽<sup>1,2,3</sup>, 朱秀芳<sup>1,2,3\*</sup>, 潘耀忠<sup>1,2,3</sup>, 刘宪锋<sup>4</sup>

(1. 北京师范大学 地表过程与资源生态国家重点实验室, 北京 100875; 2. 北京师范大学 遥感科学与工程研究院, 北京 100875; 3. 北京师范大学 地理科学学部, 北京 100875; 4. 陕西师范大学 旅游与环境学院, 陕西 西安 710119)

**摘要:**洪水灾害是目前国际上面临的主要灾害之一, 洪灾风险分析是减轻灾害损失与影响的重要途径。在前人研究总结的基础上, 分析了洪灾风险概念与内涵, 介绍了洪灾风险发展历程, 从历史数据、系统指标, 以及遥感数据的角度总结了洪灾风险分析模型与方法, 并介绍了其中常用模型与方法的特点与不足, 包括概率统计法, 情景模拟法, 神经网络模型等。最后基于目前洪灾风险分析的挑战与不足, 从4个方面对其未来发展方向进行了展望, 即明晰洪灾机理研究、拓展洪灾风险分析模型与方法、加强3S技术在洪灾风险分析中的应用, 以及加强综合灾害风险的研究。

**关键词:**洪水灾害; 风险分析; 研究进展; 研究展望

**中图分类号:** X43; P4; P954 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-811X(2017)03-0125-07

doi: 10.3969/j.issn.1000-811X.2017.03.022

国际减灾十年委员会(IDNDR)指出, 洪水灾害是人类面临的损失最严重的自然灾害之一<sup>[1]</sup>, 占自然灾害引起的死亡人数的55%, 占自然灾害引起的经济损失的31%<sup>[2]</sup>, 且随着洪泛区人口的增加, 经济的发展, 财产的聚集, 洪灾损失呈逐年上升趋势<sup>[3-4]</sup>。对地形复杂且自然灾害频发的中国而言, 洪灾更是目前面临的最主要的自然灾害, 全国约有50%的人口、70%的财产分布在洪水威胁区内<sup>[5]</sup>, 每年造成的经济损失占国民经济总产值的35%左右<sup>[6]</sup>, 尤其从1990年开始, 洪灾损失更呈上升趋势<sup>[7]</sup>。如何减轻洪灾损失俨然成为中国乃至全球亟待解决的问题。

1994年5月在日本横滨召开的第一次世界减轻自然灾害国际会议制定了“横滨行动纲领十条原则”, 并指出“风险评价是充分而又成功的灾害减轻政策和措施运用的必要步骤”<sup>[8]</sup>。洪灾风险研究势在必行, 洪灾风险分析模型与方法也在近年来发展迅速。国际上早在1950-1960年就已开展洪灾风险分析研究, 对洪灾风险分析模型与方法也有较多研究。回顾以往综述文献发现, 当前研究多从洪灾风险分析模型应用的角度回顾洪灾风险, 对于洪灾风险研究领域的全面认识尚未完全形成, 有必要对洪灾风险分析历程及方法模型进行全面梳理。基于此, 本文将系统梳理洪灾风险概念与内涵, 介绍洪灾风险分析的发展历

程, 在此基础上以数据源为基础介绍目前常用的洪灾风险分析模型与方法, 并提出洪灾风险分析的挑战与不足, 并对其未来的发展方向进行归纳和展望, 以期通过进一步梳理洪灾风险分析理论与未来方向, 促进防洪减灾的发展, 为政府部门提供决策支持。

## 1 洪灾风险分析进展

### 1.1 洪灾风险理论与发展历程

(1) 概念和内涵。自从风险理论引入洪灾系统以来, 对洪灾风险定义的争议就没有停止过, 不同学者有不同的理解<sup>[8-10]</sup>(表1)。从早期的Maskrey<sup>[11]</sup>认为灾害风险是灾害发生后的总损失, 到后期的亚洲减灾中心(Asian Conference on Disaster Reduction, ADRC)<sup>[12]</sup>认为风险是危险性、暴露性和脆弱性的函数, 风险的核心都离不开灾害发生的空间、时间、强度和损失的可能性。随着研究的不断发展, 越来越多的学者开始认可联合国人道主义事务部(United Nations Department of Humanitarian Affairs, UNDHA)<sup>[13]</sup>在1992年给出的定义, 即洪灾风险是不同强度洪水发生的概率及其可能造成的洪灾损失, 其风险表达式为:

风险(Risk) = 危险性(Hazard) × 易损性(Vulnerability)。 (1)

\* 收稿日期: 2016-12-03 修回日期: 2017-02-23

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金项目“服务于快速理赔的农作物灾害损失遥感评估方法研究”(41401479); 国家“高分辨率对地观测系统”重大专项资助项目(211400015)

第一作者简介: 孙章丽(1986-), 女, 汉族, 四川资阳人, 博士研究生, 主要从事洪灾风险分析。E-mail: sunzhangli@mail.bnu.edu.cn

通讯作者: 朱秀芳(1982-), 女, 汉族, 浙江天台人, 副教授, 主要从事农业监测、灾害监测等。E-mail: zhuxiufang@bnu.edu.cn

表 1 国际上关于灾害风险较有影响的定义

作者及时间	风险定义
Maskrey (1989) <sup>[11]</sup>	风险度 = 危险度 + 易损性, 风险是某一灾害发生后所造成的总损失
Smith (1996) <sup>[18]</sup>	风险度 = 概率 × 损失, 风险是某一灾害的发生概率
Helm (1996) <sup>[17]</sup>	风险度 = 可能性 × 结果
Tobin (1997) <sup>[19]</sup>	风险是灾害发生的概率和期望损失的乘积
Deyle (1998) <sup>[20]</sup>	风险度 = 危险度 × 结果, 风险是某一灾害发生的概率与其结果的描述
Crichton (1999) <sup>[21]</sup>	风险是损失的概率, 与危险性、脆弱性和暴露性有关
Granger (1999) <sup>[14]</sup>	风险度 = 危险性 × 风险要素 × 脆弱性
Clarke (1999) <sup>[22]</sup>	风险是由于某种选择导致可能发生的时间的可能范围, 风险的一般形式是事件发生的可能性, 具体形式是不良后果发生的概率
Tiedemann (1991) <sup>[23]</sup>	风险是预期出现的伤亡人数、财产损失和对经济活动的破坏, 这种预期归因于特定的自然现象和因此产生的风险要是
Downing (2001) <sup>[24]</sup>	风险是在一定时间和区域内某一致灾因子可能导致的损失
Carreno (2005) <sup>[25]</sup>	风险度 = 损失 × 危险性, 风险是物质破坏与影响因子的乘积
ADRC (2005) <sup>[12]</sup>	风险是危险性、暴露性、脆弱性的函数
UNDHA (1992) <sup>[13]</sup>	风险度 = 危险度 × 易损度, 风险是某一区域某一时段生命、财产、经济的期望损失, 是危险度和易损度的产物

注: “风险度”表示对灾害风险的定量表达式<sup>[26]</sup>。

其中危险性是灾害规模和发生概率的函数, 为灾害的自然属性; 易损性是社会经济、生态环境的函数, 为灾害的社会属性; 而风险是危险性和易损性的乘积, 具有自然和社会这两方面的双重属性。

后期有学者引入了风险元素的概念, 将风险表达式修正为<sup>[14]</sup>:

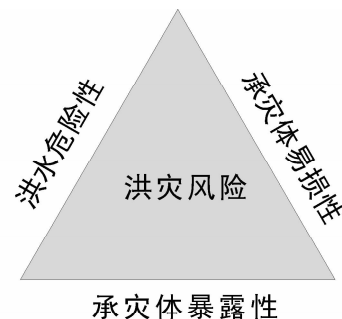
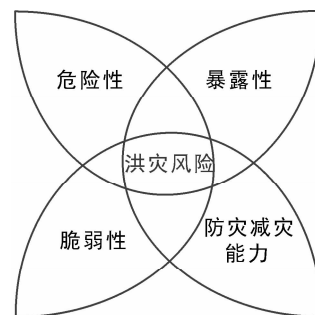
风险 (Risk) = 危险性 (Hazard) × 易损性 (Vulnerability) × 风险要素 (Elements-at-risk)。(2)

风险要素指灾害环境中的各类物体, 包括人口、建筑、工程结构, 基础设施、公共服务及经济活动<sup>[15]</sup>。国内更多的用承灾体来表达风险要素, 用暴露性来刻画承灾体的数量特征。暴露性的引入使风险的数学表达在概念上更为明确和完整, 但由于易损性评估总是建立在承灾体调查的基础上, 在应用中通常默认暴露性已知<sup>[16]</sup>, 因此上述两式没有本质的区别。另外, 在洪灾风险领域, 危险性通常采用损失概率描述, 易损性与风险元素的结合则是灾害损失后果, 因此上式又有另一种表达式<sup>[17]</sup>:

风险 (Risk) = 可能性 (Probability) × 损失 (Consequences)。(3)

风险表达式隐含了洪灾风险的构成要素, 洪灾风险的概念模型更能直观地体现其内涵。基于上述分析, 目前比较常见的概念模型有两种形式。一是 Crichton<sup>[27]</sup>等从自然风险的定义出发建立的洪灾风险三角形概念模型 (图 1), 认为洪灾风险与特定地区的人与财产在危险因素中的暴露程度, 即暴露性 (Exposure) 有关, 风险大小由洪水危险性、暴露性和易损性三个要素决定。风险三要素构成了洪水风险的三角形, 任何一边的增长或缩短都会影响三角形的大小即洪灾风险的大小。另一种形式是张会等<sup>[28]</sup>为代表的四花瓣形 (图 2), 该概念模型将防灾减灾能力加入了洪水风险中, 指出洪灾风险是由危险性、暴露性、脆弱性和防灾减灾能力构成。另外史培军<sup>[29]</sup>等根据灾害系统三因素组成: 致灾因子、孕灾环境和承灾体, 认为灾

害风险评估狭义上是对致灾因子的评估, 广义上是对三因素的综合评估。

图 1 洪灾风险“三角形”概念模型<sup>[27]</sup>图 2 洪灾风险“四花瓣”概念模型<sup>[28]</sup>

(2) 发展历程。“风险”一词最早可见于 19 世纪末的西方经济学研究中<sup>[30]</sup>, 20 世纪中期, 风险研究被逐步引入自然灾害领域<sup>[31]</sup>。1990 年, 联合国倡议的国际减灾十年 (IDNDR) 活动开展, 自此灾害风险的研究有了突破性进展。我国的自然灾害风险分析研究工作大约始于 1950 年代<sup>[26]</sup>, 早期研究多以灾害本身或评估其损失为主, 而未与社会、经济特性等结合起来考虑<sup>[26]</sup>。在国际减灾十年之后, 开始关

表 2 自然灾害风险评估发展阶段

阶段	时间段	名称	目标	特点
第一阶段	1920 – 1980 年代	“灾变”研究	致灾因子研究	单灾种研究, 侧重灾害的自然属性, 忽略了承灾体脆弱性
第二阶段	1980 年代起	“灾度” <sup>[33]</sup> 研究	社会属性研究	灾害具有自然和社会双重属性
第三阶段	1990 年代起	“灾害风险”研究	综合研究	灾害损失与影响预测研究, 灾害系统的风险研究

注灾害风险的研究。总体来说, 我国灾害风险的理念经历了一个漫长的过程, 大致可以分为 3 个发展阶段<sup>[30, 32]</sup>: “灾变”研究阶段, “灾度”研究阶段和“灾害风险”研究阶段, 如表 2 所示。

洪水灾害风险是自然灾害风险研究中的重要组成部分, 早期的洪灾风险分析侧重灾害的自然属性, 如洪灾的形成机制、变化规律和时空危险性, 风险分析主要是对致灾因子的定性分析以得出风险的高、中、低, 考虑的仅是风险的相对等级; 1980 年代以来洪灾风险开始关注社会属性, 意识到“灾害具有自然与社会双重属性”<sup>[30]</sup>, 灾害损失与影响的定量评估也开始进行, “灾度”即是对自然灾害损失绝对量的分级标准<sup>[34]</sup>; 1990 年代以后, 灾害社会属性研究的范畴不断扩展, 灾害损失与影响的预测研究开始发展起来, 灾害中的不确定性问题开始突显, 洪灾风险的研究开始引起减灾界的重视, 并在此后迅速发展起来。

## 1.2 洪灾风险分析模型与方法

数据是进行风险评价的基础, 根据数据源的不同, 可以将洪灾风险分析模型分为基于历史数据的洪灾风险分析, 基于系统指标的洪灾风险分析, 以及基于遥感数据的洪灾风险分析。

### 1.2.1 基于历史数据的洪灾风险分析

洪水灾害的发生有一定的历史规律, 同一区域过去的历史事件能够为未来灾害提供参考, 即可以根据研究区域的历史洪灾数据研究未来洪灾风险情况。目前主要有三种形式: ①历史数据回归分析法, 即对历史洪涝灾情资料和相关气象数据进行回归分析, 建立相关模型, 评估研究区域的风险。这种方法受历史数据的影响, 需要较大的灾情、降雨等历史数据, 模型的选择也大多根据前人的经验总结。目前使用也较为广泛, 如 Aronica GT<sup>[35]</sup>、Harvey JE<sup>[36]</sup>、赵思健<sup>[37]</sup>等都使用过该方法; ②历史水灾法<sup>[38]</sup>, 洪水灾害具有比较显著的区域自然特征和重现规律, 对某一特定区域历史上曾经发生过的典型洪水灾害进行研究分析, 所得规律可延用于预测该区域现在和未来的洪灾风险<sup>[16]</sup>。该方法简便实用, 通常用于复杂地形的洪灾风险分析, 从某种程度上说也是一种特殊指标体系评估法, 但因历史情景与现实情况存在差异, 结果往往需要修正; ③历史灾情数据法<sup>[8]</sup>, 由于灾情本身即为洪水与承灾体相互作用的结果, 因此无须考虑洪水特性、地理和社会经济背景, 直接用历史灾情数据预测现在和未来的区域洪灾风险。该方法要求有大样本历史资料数据, 特点是直接“从灾害研究灾害”, 思路清晰、计算简单, 但由于数据获取困难, 按历史行政单元统计的灾情数据难以适应更小尺度, 且数据统

计的一致性难以保证, 因此应用范围有较大限制。

从分析数据的不同手段分析, 目前比较常用的有概率统计法, 信息扩散法等。概率统计法属于历史水灾法, 即利用数理统计方法对历史洪灾数据进行分析, 给出历史灾情的概率分布估计, 并预测未来的洪灾风险。根据黄崇福统计的联合国大学环境与人类安全研究所推荐的 18 个风险定义中, 可能性和概率类定义最多(占 78%)<sup>[39]</sup>, 基于概率统计的洪灾风险分析占有举足轻重的地位。在水文学界该方法更多地被叫做洪水频率分析, 大约始于 1880 年代<sup>[40-42]</sup>, 目前已被广泛应用于洪水风险分析<sup>[43-46]</sup>。概率统计法以纯数学计算为基础<sup>[47]</sup>, 适用于具有长时间灾情记录的宏观尺度洪灾风险, 缺点是评估结果不能精确反映风险的区域差异, 且长时间序列的数据较难获取, 历史情况与未来情景并非完全一致, 需进行一致性检验与数据序列的还原/还现修正<sup>[48]</sup>。目前概率统计方法的发展方向主要在于非一致性水文频率和区域水文频率方面, 以及频率曲线、参数估计等方面的优化选择。值得一提的是目前我国大部分河流洪水资料都采用 P-Ⅲ型曲线, 这也是经长期研究和实践<sup>[26, 49]</sup>得出, 但随着水文资料的增加和极端洪水事件的发生, P-Ⅲ型曲线已不能完全适应这样的变化<sup>[26]</sup>, 在今后的频率曲线选择中应更加慎重。

信息扩散模型是在历史灾情数据的基础上, 利用样本模糊信息对样本进行极值化的模糊数学处理。信息扩散模型属于模糊数学方法, 是灾害风险评估方法发展的阶段产物, 最初由黄崇福<sup>[50-51]</sup>提出, 目前已广泛应用于洪灾风险分析中<sup>[44-45]</sup>。该方法最大优点是能够克服小样本事件进行风险评估, 但只适合单因子分析, 通常不同时考虑致灾因子的概率分布和风险承受体的脆弱性, 在综合风险分析方面存在局限, 且无法分析防洪减灾措施效果。严格来说, 该方法不能算是完整的风险评估方法, 它只能完成风险评价的部分而非全部。因此, 有学者将其与其他风险分析模型相结合<sup>[52]</sup>对综合风险进行评价, 既可弥补模型在综合性方面的不足, 又能避免可能存在的灾损超越概率被高估的倾向。

### 1.2.2 基于系统指标的洪灾风险分析

基于系统指标的洪灾风险分析是根据研究区域和洪灾的特性, 选择多个指标因子, 构建综合评价指标体系, 实现对不同因素综合影响的表达, 以此界定风险大小。该方法多被称为指标体系法或地理信息叠加法。各指标因子的组合形式主要有三种: ①乘积法:  $R = H \times V$ 。②加权求和法:  $R = m \times H + n \times V$ 。③幂和法:  $R = H^m + V^n$ 。其中  $H$  为危险性,  $V$  为易损性,  $R$  为风险,  $m, n$  为危险

性和易损性的权重。该方法简单易行,可根据不同区域不同类型洪灾特点针对性地构建指标体系,操作方便灵活,适于综合评价,在早期灾害风险评价中运用十分广泛,蒋新宇<sup>[53]</sup>、扈海波<sup>[54]</sup>等都曾用指标体系法对特定区域洪水灾害风险进行分析。但其指标体系的构建和指标权重的设定与研究者的知识背景密切相关,存在着较大的主观性和不确定性,因此历来存在较大的争议。

为了减少指标体系构建和指标权重设定的主观性,近年逐渐发展起一种基于神经网络模型的指标处理方法,从灾害风险度的角度,运用数学分析根据选取的指标进行神经网络模拟。具体来说,该方法通过划分典型评价单元,选定评价指标,使用网络进行训练获得权重,并将剩余单元指标输入网络仿真,以获得每个评价单元的灾害风险度。目前在洪灾风险评价中大多应用的是 BP 神经网络<sup>[55-56]</sup>。该方法能够自动调节连接权值,在一定程度上避免了主观赋权所带来的误差,具有运算速度快、求解效率高、自学习能力强、适应面宽等优点。但它的核心也是通过指标来评判风险的大小,指标选取规则难以说明,模型内部参数缺乏定义,参数关联性也难以明确,且有可能因为收敛速度慢而导致训练结果存在差异<sup>[57]</sup>。

灰色聚类法是另一种指标处理方法,通过对“部分”已知信息的生成、开发,以灰色关联度为基础,按照一定的标准对研究对象进行聚类,应用灰色聚类法评价灾害风险等级,实现对系统运行行为、演化规律的正确描述和有效监控。该方法思路清晰,过程简便快捷且易于程序化,适用于数据不充分不完备的情况,它对数据不要求有特殊的分布,计算过程简单,可得到较多信息,国内有不少学者使用该方法对洪灾风险进行评价<sup>[58-59]</sup>,而国外研究较少应用这种方法,对该方法的适用性争议颇大<sup>[57,60]</sup>。

### 1.2.3 基于遥感数据的洪灾风险分析

地理信息技术的发展为洪灾定量分析提供了新的机会,为洪涝灾害风险时空研究提供了技术支持<sup>[10]</sup>。RS 技术为洪灾风险分析空间信息的获取提供了支撑,GIS 技术利用其强大的空间分析功能进行洪灾风险因子的分析,并对洪灾风险的评价结果进行可视化表达<sup>[61-62]</sup>。目前已有多种遥感数据应用于洪水危险性因子及下垫面特征提取,Rehman 和 Md Monirul Islam 等利用 NOAA AVHR 影像提取洪水淹没深度和范围,并评价洪水危险性<sup>[63-64]</sup>,Joy Sanyal 等结合 ETM 和 ERS-1 提取下垫面信息,并根据 ETM 数据提取洪水淹没范围<sup>[65]</sup>,另外还有欧洲遥感卫星(ERS)、海事观察卫星(MOS)、SPOT 以及 SAR 系统、ASAR 系统、Envisat 等都被用于流域性和区域性洪水的观测<sup>[66]</sup>。使用遥感技术能够快速准确获取洪灾风险分析信息,对于大型洪灾风险研究比较实用,而中小型洪灾由于其水灾过程短,遥感数据大尺度和长时间分辨率的特性不能捕捉到洪灾具体过程,不过遥感监测代替野外测量省去了大量人力财力,且快速准确,加上地理信息系统为空间分析与洪

灾风险制图提供了方便快捷的渠道,今后随着地理信息技术的不断发展,基于 RS 和 GIS 技术的洪灾风险分析将成为热门方向。

情景模拟是 3S 技术应用于洪水风险分析的一个实例,该方法基于水文水力学原理,通过遥感影像采集区域下垫面因子,并依靠地面高程模型,地理信息系统等平台分析洪水淹没范围、淹没深度、淹没时间等属性。该方法基于明确的洪水成灾物理机制,能够全过程、动态地模拟洪水成灾过程,能够适应不同尺度的区域洪灾风险评估<sup>[38]</sup>,模拟过程能够充分考虑各类防洪措施的作用,并能方便地与传统防洪研究成果结合。但由于该方法需要大量的数据支撑,如降雨、径流、河流的地形地貌等,且计算量大,计算过程复杂。目前国外学者已广泛使用情景模拟分析洪灾风险<sup>[67-68]</sup>,国内华东师范大学灾害研究团队对灾害风险情景模拟研究有显著成效<sup>[69-76]</sup>。该方法是当前和未来洪灾风险评估研究领域的一个主要方向<sup>[38]</sup>,但黄崇福<sup>[77]</sup>认为“该类模型和方法貌似科学,但对左右风险的不确定性缺乏宏观把握手段,对复杂的社会系统更是无能为力,……充其量可称为灾情预测或模拟,但不是风险分析”。

## 2 洪灾风险分析的挑战与展望

洪灾风险研究发展至今已有近百年历史,风险分析模型与方法也多种多样,新的方法层出不穷,但每种方法都有其适用条件,风险类型不同,风险研究目的也不同,至今没有一种方法适合大多数情况的洪灾风险分析。“接受风险值永远不可能精确估计的现实”<sup>[78]</sup>,洪灾风险分析模型与方法的优化与创新是提高风险分析精度的重要途径。从数据源的角度分析,无论是历史数据,或是系统指标,还是遥感数据,都能够表征洪水灾害风险,但又都存在一定的局限性。历史数据是过去洪灾事件的真实数据,但由于灾害系统的变化,尤其是社会经济系统的变化,过去的规律不一定适用于未来,通过还原/还现的处理方法并不能完全修复这种改变,且由于历史原因或技术问题,很多区域的历史记录并不完整,而基于历史数据的风险分析模型大多需要较长时间序列的历史数据(如概率统计分析法至少需要 30 个样本),从而限制了这种模型方法的发展。基于系统指标的洪灾风险分析是在洪水灾害系统及社会经济系统中提取洪灾风险相关指标,根据指标的组合并赋予相关权重能够简单快速的进行风险评估,然而指标的选取过于主观,权重值更是与专家知识密切相关,新兴的神经网络或灰色聚类模型并不能改变指标选取主观性的问题。遥感数据应用于洪灾风险的研究是多学科交叉的结果,快速准确的遥感信息能够为洪灾风险分析提供详细的区域下垫面因子,但却受限于时空分辨率及影像获取条件。大范围及几天甚至半个月一次的观测使得很难抓住洪灾过程,且洪灾一般伴随恶劣的气候,限制了光学遥感器的监测,而雷达卫星缺乏灵活性,

观测周期更长。目前在中小型洪灾分析中, 遥感数据尚未广泛使用。基于目前洪灾风险管理的迫切需求与发展趋势, 洪灾风险分析在理论和技术方面均需有所突破, 具体来说, 可能应从以下 4 个方面进行强化和拓展。

(1) 明晰洪灾机理研究。洪灾的本质是水到了不该到的地方, 这里的“水”可能是降雨, 可能是强风带来的海水, 也可能是河湖中的水。不同来源的水造成的洪灾机理不同, 研究方法思路也不同。洪灾过程的机制研究是洪灾风险研究的重要内容, 只有深入了解洪灾的驱动机制, 才能采取有效措施来降低风险。目前对此方面的研究较少, 洪灾与降雨、温度、蒸散发等气候因子的相互响应机制仍不明确。另外, 对于洪灾系统本身而言, 其致灾因子, 承灾体, 孕灾环境与地理基础信息及社会经济系统密切相关, 洪灾的发生离不开社会, 而不断发展的社会经济系统与洪灾的相互响应关系分析仍是目前一大难题, 多学科的交互发展将会是未来解决洪灾机理的发展方向。从另一个角度来说, 洪灾机理仍属于水文水力学研究范畴, 这也是目前洪灾研究的瓶颈, 洪灾的发生与前期土壤水分, 地表蒸散发量, 以及产流、汇流、下渗等过程都密切相关, 复杂的水循环过程及大量的陆表参数, 加上水动力方程的不精确及复杂的数学原理严重制约着洪水机理研究的发展, 如何精确水文水力学理论, 提高数学分析能力, 打破这个瓶颈对明晰洪灾的机理有巨大意义, 今后应强化这方面的研究。

(2) 拓展风险分析模型和方法。目前洪灾风险研究模型多种多样, 不同的模型各有所长, 结合使用多种模型能够取长补短, 在用传统方法进行风险评价的同时, 一些新兴方法也可运用到风险评价当中。如神经网络, 支持向量机等, 后者在解决洪灾非线性和高维性方面有很好的优势。在多种模型相结合方面, 水文水力学与地理信息系统结合的洪灾情景模拟可实时、动态地模拟洪水演进过程, 有效提高洪水风险评估的精度和水平。遥感技术与地理信息技术的结合能够快速形象地描绘出洪灾风险的范围、深度、时间等要素。另一方面, 风险评估方法大多以数学计算为基础, 随着数学理论的提升, 高精度数值模拟、动态评价、组合数学模型等将成为洪灾风险分析模型研究的热点, 但要警惕过分依赖数学方法而忽视风险事件本身的特点。

(3) 加强 3S 技术在洪灾风险评价中的应用。随着 3S 等空间信息技术的日益成熟, GIS 技术和数学方法的结合能更好地揭示洪灾空间分布特征, 遥感监测技术的优化和数据时空分辨率的改善使得利用遥感技术提取洪灾风险信息的研究日益增多。光学卫星如国产 HJ 减灾星系列、ZY 卫星系列, 以及最新发射的 GF 系列等对地观测卫星能够快速、准确地采集区域下垫面因子, 且逐渐提高的时空分辨率使得洪灾变化过程的监测成为可能。国外广泛使用的对地观测卫星系列如 Landsat 系列、Spot 卫星系列等由于发射时间较早, 拥有长时

间的历史数据, 除了能监测当下洪灾过程, 还能基于过去洪灾事件的研究为洪灾风险提供参考。微波遥感系列卫星由于不受天气的影响, 能够在恶劣天气环境下对洪灾进行实时监测。值得一提的是, 由于不受地球外部环境的影响, 目前重力卫星应用于洪灾风险的研究开始增多<sup>[79]</sup>, 且随着时空分辨率的提高, 以及数据延迟获取时间的缩短, 基于重力卫星的洪灾风险分析将会成为今后发展的一个热点方向。

(4) 加强综合灾害的风险分析。洪灾的发生不是独立事件, 势必造成其他灾害的发生或由其他灾害引发, 综合灾害的风险分析能更准确地评判自然灾害风险结果。由单灾种风险评价的形式逐渐向综合灾害风险分析转变是自然灾害风险分析发展的必然趋势。目前的综合灾害无论是风险组成要素的综合还是风险评估结果的综合, 都涉及多种致灾因子, 如何选择综合风险分析模型即成为一大难题, 且大多数的综合灾害风险评估只是求出了相对风险水平, 得到的只是等级值, 没有实际的概率意义<sup>[80]</sup>, 不能满足实际需求。对于灾害链, 其形成机理复杂, 各灾害相互响应关系至今未能厘清, 其风险评估更是处于起步阶段<sup>[81-82]</sup>。如何明晰各灾种直接的相互作用关系, 并在多灾种及灾害链风险评估中选择合适的模型方法, 对于综合灾害的风险研究极为关键。目前随着计算机技术的进步及灾害数据库的扩展, 未来综合灾害的风险研究能够在足够的历史数据及高精度遥感数据基础上, 采用一定的数学模型, 构建出综合灾害风险评估模型, 计算出更为客观和准确的综合灾害风险水平, 利于区域科学发展规划及防灾减灾体系的建立。

## 参考文献:

- [1] 方建, 李梦婕, 王静爱, 等. 全球暴雨洪水灾害风险评估与制图[J]. 自然灾害学报, 2015, 24(1): 1-8.
- [2] 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.
- [3] Stanley a Changnon Jr. Research agenda for floods to solve policy failure[J]. Journal of Water Resources Planning and Management, 1985, 111(1): 54-64.
- [4] El Jabi, N, J Rousselle. A flood damage model for flood plain studies[J]. JAWRA Journal of the American Water Resources Association, 1987, 23(2): 179-187.
- [5] 周寅康. 流域性洪涝及其指标研究[J]. 灾害学, 1995, 10(3): 6-10.
- [6] 曹永强, 杜国志, 王方雄. 洪灾损失评估方法及其应用研究[J]. 辽宁师范大学学报(自然科学版), 2006, 29(3): 355-358.
- [7] 丁志雄. 基于 RS 与 GIS 的洪涝灾害损失评估技术研究[D]. 北京: 中国水利水电科学研究院, 2004.
- [8] 黄大鹏, 刘闯, 彭顺凤. 洪灾风险评价与区划研究进展[J]. 地理科学进展, 2007, 26(4): 11-22.
- [9] 陈颢, 史培军. 自然灾害[M]. 北京: 北京师范大学出版社, 2007.
- [10] 程先富, 戴梦琴, 郝丹丹. 区域洪涝灾害风险评估研究进展[J]. 安徽师范大学学报(自然科学版), 2015, 38(1): 74-79.
- [11] Maskrey A. Disaster Mitigation: A Community Based Approach[M]. UK: Oxfam GB, 1989.
- [12] ADRC. Total Disaster Risk Management: Good Practice 2005, Kobe[M]. Japan: Asian Disaster Reduction Center, 2005.
- [13] DHA U. Internationally agreed glossary of basic terms related to disaster management[R]. UN DHA (United Nations Department of Humanitarian Affairs), Geneva, 1992.
- [14] Granger K, TG Jones, M Leiba, et al. Community risk in Cairns: a multi-hazard risk assessment[J]. 1999, 14(2): 25-26.
- [15] Papatoma-köhle M, Nerhäuser B, Batvinger K, et al. Elements

- at risk as a framework for assessing the vulnerability of communities to landslides[J]. *Natural Hazards and Earth System Science*, 2007, 7(6): 765-779.
- [16] 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.
- [17] Helm P. Integrated risk management for natural and technological disasters[J]. *Tephra*, 1996, 15(1): 4-13.
- [18] Smith K. *Environmental Hazards: Assessing Risk and Reducing Disaster*[M]. UK: Routledge, 2013.
- [19] Tobin G. A. *Natural Hazards: Explanation and Integration*[M]. US: Guilford Press, 1997.
- [20] Deyle RE, SP French, RB Olshansky, et al. *Hazard Assessment: the Factual Basis for Planning and Mitigation*[M]. Washington, DC: National Academy Press, 1998.
- [21] Crichton, D. The risk triangle[J]. *Natural Disaster Management*, 1999: 102-103.
- [22] Clarke L. Mission improbable: Using Fantasy Documents to Tame Disaster[M]. University of Chicago Press, 1999.
- [23] Tiedemann H. *Earthquakes and Volcanic Eruptions: a Handbook on Risk Assessment*[M]. Swiss Reinsurance Company, 1991.
- [24] Downing T, R Butterfield, S Cohen, et al. *Vulnerability indices: climate change impacts and adaptation*[R]. UNEP Policy Series, UNEP, Nairobi, 2001.
- [25] Cardona OD. *Indicators of Disaster Risk and Risk Management: Program for Latin America and the Caribbean: Summary Report*[R]. Inter-American Development Bank, 2005.
- [26] 李琼. 洪水灾害风险分析与评价方法的研究及改进[D]. 武汉: 华中科技大学, 2012.
- [27] Crichton D, C Mounsey. How the insurance industry will use its flood research[C]. in *Proceedings of the Third MAFF Conference of Coastal and River Engineers*, 1997.
- [28] 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——以辽河中游地区为例[J]. *自然灾害学报*, 2005, 14(6): 141-146.
- [29] 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.
- [30] 苏桂武, 高庆华. 自然灾害风险的分析要素[J]. *地学前缘*, 2003, 10(S1): 272-279.
- [31] 郭恩亮, 张继权, 孙仲益, 等. 农业洪涝灾害风险评价研究综述[C]//中国灾害防御协会风险分析专业委员会第六届年会, 中国内蒙古呼和浩特, 2014.
- [32] 景根娜. 自然灾害风险评估[D]. 上海: 上海师范大学, 2010.
- [33] 马宗晋. 中国自然灾害和减灾对策(之六)[J]. *防灾科技学院学报*, 2008, 10(1): 1-6.
- [34] 赵阿兴, 马宗晋. 自然灾害损失评估指标体系的研究[J]. *自然灾害学报*, 1993, 2(3): 1-7.
- [35] Aronica GT, A Candela, P Fabio, et al., Estimation of flood inundation probabilities using global hazard indexes based on hydrodynamic variables[J]. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 2012, 42: 119-129.
- [36] Rodda HJE. The development and application of a flood risk model for the czech republic[J]. *Natural Hazards*. 2003, 36(1): 207-220.
- [37] 赵思健, 张峭. 东北三省农作物洪涝时空风险评估[J]. *灾害学*, 2013, 28(3): 54-60.
- [38] 程卫帅, 陈进, 刘丹. 洪灾风险评估方法研究综述[J]. *长江科学院院报*, 2010, 27(9): 17-24.
- [39] 黄崇福, 刘安林, 王野. 灾害风险基本定义的探讨[J]. *自然灾害学报*, 2010, 19(6): 8-16.
- [40] 金光炎. 水文频率分析述评[J]. *水科学进展*, 1999, 10(3): 319-327.
- [41] 李扬. 水文频率新型计算理论与应用研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2013.
- [42] 林小丽. 区域洪水频率分析在淮河流域的应用研究[D]. 南京: 河海大学, 2005.
- [43] 汪丽娜, 陈晓宏, 李艳. 洪水频率计算的比较研究[J]. *华南师范大学学报(自然科学版)*, 2011(4): 130-135.
- [44] 王剑峰. 洪水超定序列表频率分析计算[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2010.
- [45] 戴昌军, 梁忠民, 梁承梅, 等. 洪水频率分析中 PDS 模型研究进展[J]. *水科学进展*, 2006, 17(1): 136-140.
- [46] 熊立华, 郭生练. L-矩在区域洪水频率分析中的应用[J]. *水力发电*, 2003, 29(3): 6-8.
- [47] 王天化. 水库大坝安全应急管理区划风险分析及损失评估方法研究[D]. 武汉: 长江科学院, 2010.
- [48] 梁忠民, 胡义明, 王军. 非一致性水文频率分析的研究进展[J]. *水科学进展*, 2011, 22(6): 864-871.
- [49] 王春霞, 黄振平, 马军建, 等. 几种频率曲线稳健性初步研究[J]. *河海大学学报(自然科学版)*, 2004, 32(4): 380-383.
- [50] 黄崇福. 自然灾害风险分析与管理[M]. 北京: 科学出版社, 2012.
- [51] Chongfu H. Information Matrix and application[J]. *International Journal of General Systems*, 2001, 30(6): 603-622.
- [52] 毛熙彦, 蒙古军, 康玉芳. 信息扩散模型在自然灾害综合风险评估中的应用与扩展[J]. *北京大学学报(自然科学版)*, 2012, 48(3): 513-518.
- [53] 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.
- [54] 扈海波, 张艳莉. 暴雨灾害人员损失风险快速预评估模型开发及应用初探[C]//创新驱动发展 提高气象灾害防御能力, 第 30 届中国气象学会年会, 南京, 2013.
- [55] 程先富, 匡毅, 赵阳. 基于 BP 神经网络的洪涝灾害风险评价——以杭埠河流域为例[J]. *皖西学院学报*, 2015, 31(2): 1-4.
- [56] Chen K, R Blong, C Jacobson. Towards an integrated approach to natural hazards risk assessment using GIS: with reference to bushfires[J]. *Environmental Management*, 2003, 31(4): 0546-0560.
- [57] 巫丽芸, 何东进, 洪伟, 等. 自然灾害风险评估与灾害易损性研究进展[J]. *灾害学*, 2014, 29(4): 129-135.
- [58] 王博, 崔春光, 彭涛, 等. 暴雨灾害风险评估与区划的研究现状与进展[J]. *暴雨灾害*, 2007, 26(3): 281-286.
- [59] 姚俊英, 朱红蕊, 南极月, 等. 基于灰色理论的黑龙省暴雨洪涝特征分析及灾变预测[J]. *灾害学*, 2012, 27(1): 59-63.
- [60] 叶金玉, 林广发, 张明锋. 自然灾害风险评估研究进展[J]. *防灾科技学院学报*, 2010, 12(3): 20-25.
- [61] Sanyal J, X Lu. GIS-based flood hazard mapping at different administrative scales: A case study in Gangetic West Bengal, India[J]. *Singapore Journal of Tropical Geography*, 2006 27(2): 207-220.
- [62] Okoduwa A. An application of GIS to flood prediction: a case study of Benin city, Nigeria[C]//Unpublished B Sc. Dissertation, Department of Geography and Planning University of Benin, Nigeria, 1999.
- [63] Rahman N, S Ochi, S Murai, et al. Flood risk mapping in Bangladesh - flood disaster management using remote sensing and GIS[C]//Application of remote sensing in Asia and Oceania - environmental change monitoring. Asian Association of Remote Sensing, Tokyo, 1991.
- [64] Islam MM, K Sado. Development priority map for flood countermeasures by remote sensing data with geographic information system[J]. *Journal of Hydrologic Engineering*, 2002, 7(5): 346-355.
- [65] Sanyal J, X Lu. Remote sensing and GIS - based flood vulnerability assessment of human settlements: a case study of Gangetic West Bengal, India[J]. *Hydrological Processes*, 2005, 19(18): 3699-3716.
- [66] 陈鹏霄. 基于 GIS 和遥感数据的洪水风险分析[J]. *水利水电快报*, 2008, 29(8): 15-21.
- [67] Preuss J, J Godfrey. Guidelines for Developing an Earthquake Scenario[R]. EERI, 2006.
- [68] Camarasa Belmonte AM, J Soriano - García. 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.
- [69] 陈晶晶. 基于情景模拟的天津市中心城区暴雨内涝风险分析与管理[D]. 上海: 华东师范大学, 2010.
- [70] 刘耀龙. 多尺度自然灾害情景风险评估与区划[D]. 上海: 华东师范大学, 2011.
- [71] 石勇. 灾害情景下城市脆弱性评估研究[D]. 上海: 华东师范大学, 2010.
- [72] 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.
- [73] 赵庆良, 许世远, 王军, 等. 沿海城市风暴潮灾害风险评估研究进展[J]. *地理科学进展*, 2007, 26(5): 32-40.
- [74] 石勇, 许世远, 石纯, 等. 城市居民建筑洪涝灾害脆弱性研究初探[J]. *华北水利水电学院学报*, 2009, 30(1): 34-37.
- [75] 刘耀龙, 陈振楼, 王军, 等. 经常性暴雨内涝区域房屋财产脆弱性研究——以温州市为例[J]. *灾害学*, 2011, 26(2): 66-71.
- [76] 殷杰, 尹占娥, 于大鹏, 等. 风暴洪水主要承灾体脆弱性分析——黄浦江案例[J]. *地理科学*, 2012, 32(9): 1155-1160.
- [77] 黄崇福, 郭君, 艾福利, 等. 洪涝灾害风险分析的基本范式及其应用[J]. *自然灾害学报*, 2013, 22(4): 11-23.
- [78] 黄崇福, 张俊香, 陈志芬, 等. 自然灾害风险区划图的一个潜在发展方向[J]. *自然灾害学报*, 2004, 13(2): 9-15.
- [79] Molodtsova T, S Molodtsov, A Kirilenko, et al. Evaluating flood potential with GRACE in the United States[J]. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 2016, 16(4): 1011-1018.
- [80] 明晓东, 徐伟, 刘宝印, 等. 多灾种风险评估研究进展[J]. *灾害学*, 2013, 28(1): 126-132+145.
- [81] 张卫星, 周洪建. 灾害链风险评估的概念模型——以汶川 5·12 特大地震为例[J]. *地理科学进展*, 2013, 32(1): 130-138.
- [82] 哈斯. 张继权, 佟斯琴, 等. 灾害链研究进展与展望[J]. *灾害学*, 2013, 31(02): 131-138.