

吉中会, 吴先华. 山洪灾害风险评估的研究进展[J]. 灾害学, 2018, 33(1): 162–167, 174. [JI Zhonghui and WU Xian-hua. A Review about the Risk Assessment of Torrential Flood Disaster[J]. Journal of Catastrophology, 2018, 33(1): 162–167, 174. doi: 10.3969/j.issn.1000-811X.2018.01.029.]

# 山洪灾害风险评估的研究进展\*

吉中会, 吴先华

- (1. 南京信息工程大学 气象灾害预报预警与评估协同创新中心, 江苏 南京 210044;  
2. 南京信息工程大学 制造业研究院, 江苏 南京 210044)

**摘 要:** 在自然灾害风险评估的视角下, 分别从致灾因子危险性、临界雨量、承灾体脆弱性, 以及综合风险四大方面综述了山洪风险评估研究的进展。综合分析发现, 山洪灾害的致灾因子主要涉及气象、水文、地质、地貌等方面, 研究内容主要包括对影响因子的机理分析和相关影响程度大小分析; 临界雨量是山洪预警的重要参考指标, 主要通过降水历史资料分析、水文资料估计或机理模型来确定; 脆弱性评估对相关数据要求较高, 且需要经常更新, 才能保证其有效性; 山洪风险评估是一项综合研究, 相关学者基于 RS 和 GIS 技术提出了不同的统计模型和机理模型。此外, 基于历史资料分析和情景分析的风险评估对于山洪灾害管理也具有重要意义。

**关键词:** 山洪灾害; 致灾因子; 临界雨量; 脆弱性评估; 综合风险评估; 研究进展

**中图分类号:** P429; X43      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1000-811X(2018)01-0162-07

doi: 10.3969/j.issn.1000-811X.2018.01.029

山洪是指山区由于暴雨、融雪等原因造成的突发性洪水, 具有水量集中流速大、冲刷破坏力强, 水流中挟带泥沙甚至石块等特征, 常造成局部性的洪灾。由于人类活动范围的不断扩大, 山区许多未曾使用的土地被不断地开发占用, 山洪发生时造成的人员伤亡和财产损失很难避免。近年来由于山洪灾害的频繁发生, 相关研究在不断展开, 除了对山洪特征的定性描述和山洪防治的对策措施之外, 山洪风险评估对于区域山洪灾害管理的重要性也逐步凸显。山洪灾害风险评估是指通过分析流域内的自然环境条件, 在灾害发生前评估山洪灾害的危险程度, 并评估研究区内的社会经济环境、人类生产生活以及自然资源等方面的易损程度<sup>[1]</sup>。

山洪灾害评估研究是开展灾害防治工作的基础, 在国际上已有近 40 年的历史, 在我国则是近 20 多年来的一个热点<sup>[2-3]</sup>。山洪灾害风险评估的内容主要包括致灾因子的频率和强度分析, 及其相关因子, 如地形地貌、土地利用等自然要素的分析, 人和社会经济等的承灾体脆弱性分析, 以及基于 RS 和 GIS 等技术采用相关统计模型的综合风险分析。因此, 本文围绕山洪灾害风险评估主题, 从致灾因子危险性评估、临界雨量分析、脆弱性分析以及综合风险评估方面展开文献的综述,

为山洪灾害的风险管理工作提供理论参考。

## 1 山洪灾害危险性评估

早期山洪风险分析主要针对风险源而展开, 即现代风险评估定义中致灾因子危险性评估, 它是山洪灾害风险评估的重要组成部分之一。山洪致灾因子分析一般考虑的因素包括, 区域气象条件(如降水强度和特征)、水文(河流的形态学特征如, 水流顺序、强度、坡度等)、地质(岩相、岩石结构等)、地形地貌(如形状、延伸、循环率), 以及土壤条件(类型和属性等)等, 在致灾因子分析的基础之上确定山洪灾害的危险区范围<sup>[4]</sup>。

在致灾因子分析方面, 主要集中于对主要风险源的机理分析或影响因子相对重要性的比较。Rebetez<sup>[5]</sup>以瑞士阿尔卑斯山脉地区为例, 考虑了气象和气候因子对山洪泥石流的影响, 认为山洪的诱发机制包括过多的降水和融雪径流, 或者是这两者的综合, 其中尤其是极端降水的作用, 永久冻土区域温度升高趋势对坡度稳定性也有影响; Capello 等<sup>[6]</sup>通过分析气候和水文因子在山洪中的影响程度, 发现意大利热那亚城市的气候因子比

\* 收稿日期: 2017-06-07      修回日期: 2017-08-02

基金项目: 国家自然科学基金(41501555, 71373131, 91546117); 国家公益性行业专项(GYHY201506051); 国家社科基金重大项目(16ZDA047); 中国气象局气象软科学项目(气法函[2014]27号); 中国制造业发展研究院开放课题(SK20140090-3); 江苏高校优势学科建设工程资助项目

第一作者简介: 吉中会(1984-), 江苏盐城人, 讲师, 博士, 主要从事气象灾害风险管理研究. E-mail: zhonghuiji@mail.bnu.edu.cn

水文要素的影响更大;Azmeri 等<sup>[7]</sup>详细分析了印度尼西亚亚齐省贝萨尔县一个山区小流域诱发山洪的因素,包括洪峰流量、坡度、流域形状、河道比降、堤坝、排水管网密度、侵蚀性、坡度稳定性,以及水库容量,认为这些影响因素具有同等重要性。这些研究是识别山洪风险源的基础,但是由于区域地形和气候条件等方面的差异,致灾因子也各有不同,相同因子的影响程度也有差异。在未来研究中,需要对不同孕灾环境条件下致灾因子的特征及规律作进一步分析和归纳总结,以提高风险源识别和判定的准确度。

危险区范围划分方面,主要是在致灾因子分析的基础上,从定性或定量角度建立危险区范围的预测模型,以服务于区域山洪预警。在国际上,奥地利学者 H. 奥里茨基<sup>[8]</sup>根据防护对象受灾害影响的程度,将危险区划分成红色区(禁止建筑区)、黄色区及白色区(安全区),提出分类及危险区制图指数法,细划到了每一条山沟,在沟道里或沟口冲积堆上,根据山洪危险性质与等级对全国山洪沟进行山洪危险性区划,服务于山洪灾害预警预报。1980 年,瑞典 Eldeen<sup>[9]</sup>根据危险区图中的危险等级,将洪水易发区分为四个不同的危险区,每个区又分若干个亚区,以便于确定洪水灾害的发生范围。美国在 20 世纪 70 - 80 年代期间,对国内部分地区(如 Saratoga, Switzerland)展开山洪危险性编制工作,将危险性分为 5 个等级,从 1988 年开始将遥感技术应用到山洪危险度评价工作中<sup>[10-11]</sup>。英国的 Hansen<sup>[12]</sup>借助于 RS 和 GIS 技术完成了滑坡的编目、制图及危险度评价等。日本的足立胜治等<sup>[13]</sup>考虑地貌、流域形态和降雨等 3 个因子,进行了山洪发生可能性的判定研究;久保田哲等<sup>[14]</sup>根据短历时降雨的有效降水量和降水强度等因子来研究山洪和泥石流发生的概率。这些成果在山洪灾害空间预警预测方面起着重要的作用,并已广泛用于灾害保险、灾害预防和灾害救援等方面<sup>[15]</sup>。

我国山洪危险区区划工作始于 1980 年代,早期危险区划分主要有定性判定法和定量判定法两大类,这对当时山洪的危险区判定作出了重要贡献<sup>[8,16]</sup>。但是,定性判别法需要结合大量的实地调研,不利于大范围推广;而定量判定法需要选取不同指标进行综合,在权重确定方面人为主观性较强。GIS 和 RS 技术的发展为山洪危险性分析、评价以及可视化提供了便利。借助于 GIS 工具可以将山洪危险性因子分配不同的权重,并进行叠加分析,获得流域山洪灾害的危险性评价图<sup>[17-18]</sup>。此外, GIS、RS 等技术的强大空间分析功能可以从空间数据中提取水文、水力学分析计算中所需要的基础参数信息,使得水文水力学模型在山洪灾害危险性分析中的应用取得了较为理想的

效果<sup>[19-20]</sup>。

综上分析发现,山洪灾害的危险性因子权重的确定,大都采用专家经验或者等权等方式,主观性较强,而在实际应用中应根据实地情况和管理目标,选择更为客观有效的方法,这也是风险管理中不可忽略的环节。另外,山洪危险性的等级划分在国内外尚未有统一的标准,不利于区域横向比较和经验借鉴。

## 2 山洪临界雨量的研究

通过对山洪危险性的分析发现,区域的植被状况、山体坡度、地质地貌、土壤和降雨等诸多因素均与山洪灾害的发生有着密切的联系,其中降雨是引发山洪的最直接外动力<sup>[21]</sup>。当小流域中某时段内的降雨量达到或超过某一临界值时,形成的洪水流量恰好等于河道安全泄洪载荷,此临界值即为临界雨量<sup>[22]</sup>。临界雨量评估对于山洪管理至关重要,是山洪致灾因子危险性评估的必要环节。

随着理论和应用的深入与拓展,临界雨量逐步成为山洪预警公认的指标之一。国内外相关研究较多,主要可归纳为三大类:

(1) 历史资料统计推演法,即根据历史事件中与降水相关的统计指标,确定山洪临界雨量<sup>[23-26]</sup>。例如, Caine 搜集了全球 2 626 个降水引发的浅层滑坡和泥石流的事件作为数据库,构建临界雨量阈值曲线,建立降水强度、持续时间与滑坡泥石流发生之间的线性关系<sup>[23]</sup>; Chen 等<sup>[27]</sup>基于 49 年 678 个案例的山洪泥石流数据,生成 1 h 和 24 h 的临界雨量等值线地图;樊建勇等<sup>[28]</sup>根据 1950 - 2002 年的山洪灾害的过程资料和相关气象水文数据,测算了全省 1 045 个小流域的不同历时山洪致灾临界雨量。类似研究在我国还有实测雨量统计法、暴雨临界曲线法等,它们都需要丰富的历史数据支撑,且更新不易,在空间范围较小(可参考的历史数据极少)、异质性较高的区域,很难直接借鉴和应用。

(2) 水文资料估计法,直接根据水文观测资料估计临界雨量。以水位/流量反推法为例,假定降雨与洪水同频率,基于不同水位指标计算相应流量,再根据流量频率曲线,确定特征水位流量的洪水频率,最后再由降雨频率曲线确定临界雨量<sup>[29]</sup>,由于没有考虑前期的影响雨量,且主要依托水文资料,对于水文资料匮乏的山区,该类方法应用非常有限,难以推广。

(3) 机理模型法,即根据降雨、土壤含水量及流域下垫面特征等分析山洪发生的机理,采用水文水动力学模型设计相关参数,计算临界阈值。例如,美国国家气象局水文中心构建了山洪预警

指南系统(Flash Flood Guidance, FFG), 因算法考虑了山洪形成的物理机制, 覆盖面较广, 且能够提供预警指标信息的动态变化, 在欧美得到广泛的参考和应用<sup>[30-31]</sup>。日本及我国台湾地区因自然环境条件单一, 更关注土壤含水量和降水情况, 寻找降水强度与有效累积降水量之间的线性关系, 采用临界雨量线法确定预警指标<sup>[32]</sup>。文明章等<sup>[33]</sup>基于二维水动力模型“Floodarea”, 通过闽北地区山洪发生时的基础统计资料, 推算了山洪 6h 的致灾临界雨量; 刘鸣彦等<sup>[34]</sup>根据降水、地形及地貌等资料, 模拟清原地区特大暴雨的洪涝过程, 计算易涝点逐时的淹没深度与流域面雨量的关系, 推算不同风险等级易涝点的致灾临界雨量。卢燕宇等通过比较统计分析和水文模型两种方法估计临界雨量, 发现水文模型更为敏感, 估计值偏低, 而统计方法结果偏高, 认为在实际应用中两种方法结合预警效果会更好<sup>[35]</sup>。此外, 无数据记录的区域或山洪沟, 可以通过寻找其他具有相似降雨、地质、气象、水文等条件的山洪沟的临界雨量, 并将其作为参考标准。

虽然模型计算方法较好地考虑了物理机理, 可以更好地模拟山洪的形成及演化过程, 在理论和实际操作中更具有优势, 但也存在一些缺陷, 有待改进。例如, 某些阻力系数和下渗变量等模型参数的设定, 均会增加模型的不确定性。我国气候、地质地貌以及植被土壤的类型多样, 而降水、水文等资料完备程度不一, 以及管理思路和目标等方面的差异, 山洪临界雨量的确定尚未有适合大范围推广应用的方法。

### 3 山洪灾害脆弱性评估

山洪风险研究初期多从气候和地理环境条件入手, 重点分析暴雨洪涝强度对承灾体影响的结果<sup>[36-39]</sup>, 随着研究的深入, 风险区域承灾体的状况, 尤其是在不同强度灾害的影响下, 承灾体的敏感性和抵抗能力也逐步引起重视, 即现代风险评估中的脆弱性评估部分。脆弱性评估在风险评估中占有重要地位, 但是国际上对脆弱性的定义在不同领域各不相同。在灾害领域脆弱性的定义与物理脆弱性类似, 最常见的就是联合国救灾组织(United Nations Disaster Relief Organisation, UN-DRO)在 1984 年提出的灾害影响区域范围内给定要素或要素集的损失程度。一般用 0 ~ 1 表示, 0 表示没有损失, 1 表示全部损失<sup>[40]</sup>。同时, 脆弱性评估十分依赖于两大数据集, 一是灾害因子本身(如地质因子、地形地貌因子、土壤条件等); 另一个是承灾体(如建筑物和基础设施的清单、财物的经济价值等)<sup>[41]</sup>, 由于经济价值数据的来源或统计口径的差异等原因, 其可靠度很难检验。

承灾体脆弱性评估目前主要有三种方法, 分别是脆弱性矩阵法、脆弱性指标法, 以及脆弱性曲线法<sup>[42-44]</sup>。三种方法都需要考虑过程强度(碎屑沉积高度、速度、粘性、方向, 持续时间等)、承灾体特征及价值(如建筑物)、重置成本、经济损失等因素。其中脆弱性曲线方法一般用于面积大且建筑物多的区域, 在应用中水深和地表流速是较容易确定的。脆弱性曲线的可靠性高度依赖于大量的统计数据, 尤其是历史损失数据, 同时脆弱性曲线需要随着社会经济的发展进行不断的更新, 才能保证评估结果的准确性。例如, Fuchs 等<sup>[45]</sup>基于 SaTScan 软件, 采用顺序数据模型和正常数据模型从空间角度分析了澳大利亚 5 个单独的山洪事件的空间分布特征, 并评估了局地尺度的空间脆弱性。Totschnig 等<sup>[46]</sup>通过寻找不同类型建筑物的损失与山洪灾害强度之间的关系来构建脆弱性曲线, 研究发现居民住宅的脆弱性与山洪过程中携带的沉积物无关, 在脆弱性评估时不需要对沉积物加以区分。Papathoma - Köhle 等<sup>[47]</sup>关注洪流过程, 构建了一个终端用户的工具来评估山洪损失, 主要包括三大功能: 加强灾后损失数据的搜集、评估未来时间的损失, 以及不断更新和改进现有的脆弱性曲线, 实现了脆弱性评估和灾情记录的紧密结合。由此可以看出, 影响因素、区域特征和承灾体价值及损失等是进行脆弱性评估的组成部分。

由于山洪脆弱性评估需要综合考虑多方面因素<sup>[48]</sup>, 而这些因素之间存在复杂的联系, 在建立曲线时, 如何考虑因素之间的影响, 选取有代表性的因素构建有效模型难度较大, 亟待提出有效的方法。山洪承灾体特征的时空差异, 在较大的程度上限制了脆弱性模型的应用, 目前虽有一些通用的建筑物脆弱性曲线<sup>[49]</sup>, 但是由于区域其他自然或社会因素的差异, 而导致区域综合评估结果出现偏差, 影响了评估精度, 因此, 研究具有普适性的脆弱性评估方法是未来的重要理论方向。此外, 经济损失是脆弱性评估中缺一不可的部分, 目前在进行脆弱性评估时灾情仍然主要考虑有形的直接损失, 对于无形的、间接损失的考虑还比较欠缺<sup>[50]</sup>, 而这些方面又会影响到脆弱性评估的准确性, 因而在未来研究中山洪灾害的经济损失评估部分需要进一步加强。

### 4 山洪灾害综合风险评估

山洪灾害的风险评估是一项综合性很强的工作, 需要搜集大量的统计资料、分析危险源(致灾因子)危险程度、确定临界雨量、评估承灾体的脆弱性, 以及将这些组成部分通过选择合适的风险统计模型或构建有效的机理模型来实现风险的表

达。例如, Guzzetti 等<sup>[51]</sup>通过计算洪水和滑坡的死亡率并比较这些比率和其他自然、医学和人为诱发灾害的死亡率的大小,通过事件死亡人数的频率分布来确定社会风险的等级和频率,并通过贝叶斯模型来描述最终洪水和滑坡事件的风险概率。Compton 等<sup>[52]</sup>采用巨灾模型评价了维也纳山区突发洪水的风险,研究发现城市地铁系统的风险最高,并提出在减灾策略中结合有效措施来降低巨灾损失的可能性和不确定性。Fuchs<sup>[53]</sup>等分别从时间和空间的角度,提出了一个新的综合强度、频率、损失具有相同权重,并结合承灾体脆弱性的山区灾害动态风险评估的方法。王帆等<sup>[54]</sup>利用 DEM 数据进行自动建模及淹没特征分析,将基础水文数据作为模型运算的驱动条件,在模型建立后,选择在同一模型基础上根据频率暴雨或设定情景建立多种方案,且方案中的各个计算单元可以独立选择产汇流及演进计算方法,来实现湖北省咸宁市冷水坪社区的山洪风险评估。目前山洪综合风险评估模型方法较多,但是能够推广应用的甚少,表达风险程度的等级划分缺乏明确规范的标准,不利于区域宏观治理及区域之间的比较和借鉴参考。在未来研究中,需要结合区域特征不断总结归纳不同方法的优缺点,以提出和不断完善可以广泛应用的理论框架和模型,在考虑区域特色的基础上制定统一规范的风险等级划分标准。

RS 和 GIS 技术在评估建模和分析中发挥了重要作用,其在数据处理方面的优势使得山洪灾情数据收集、处理及分析评估的速度更快、准确性更高,因而在灾害评估中被广泛应用。例如, TANG 等<sup>[55]</sup>基于 GIS 的叠加技术考虑了坡角、暴雨日数、河流缓冲区、标准区域的最大径流排放、泥石流分布密度,以及洪灾历史六大要素,合成了红河上游流域山洪风险评估图。Youssef 等<sup>[56]</sup>利用遥感影像(ETM+、SRTM)结合地质地貌数据,利用形态测定分析法在 GIS 系统中进行埃及西纳南部的山洪风险评估。哈斯塔木嘎等<sup>[57]</sup>利用暴雨强度和频次来代替山洪灾害影响的强度和频次,同时考虑地形、水系、植被等孕灾环境因子,以及以人口密度、经济水平为代表的承灾体指标,利用 GIS 技术综合评价了正蓝旗区域暴雨山洪的风险。Elkhrachy<sup>[58]</sup>基于遥感影像和 GIS 技术,考虑径流、土壤类型、地表坡度和粗糙度、排水系统密度、沟渠距离,以及土地利用等要素利用层次分析法,分析了沙特阿拉伯纳季兰城市的山洪风险。GIS 技术在山洪风险综合评估中的应用,亦存在多要素权重分配的问题,尤其是如何确定危险性(自然因素)和脆弱性(人文因素)对风险的贡献程度,才能更客观地进行风险评估。

历史资料对于山洪风险分析不可或缺,相关

研究直接基于历史统计的事件资料进行分析,来评估区域山洪风险的大小。Copien 等<sup>[59]</sup>通过搜集记录账户、地图、以及照片等历史资料并分析的方式来实现巴伐利亚阿尔卑斯地区的山洪风险评估。Diakakis 等<sup>[60]</sup>重建了历史洪灾资料,结合区域脆弱性评估了希腊雅典城市的洪灾风险的空间分布,结果显示部分山区的洪灾风险较高。D'Agostino<sup>[61]</sup>认为山洪的历史资料的收集、整理,以及解释对于山洪灾害分析至关重要。Lepuschitz<sup>[62-63]</sup>从不同的角度分析了奥地利山洪和雪崩的统计记录,并以奥地利的一个省为例结合地形图进行了数据的空间显示,另外还深入介绍了为奥地利官方服务山洪风险的 TAC 系统。因此,在不断完善山洪历史资料的基础上,应注重规范当前发生的山洪事件的数据资料,为未来山洪风险的系统分析提供更为丰富和便利的资料,提高风险管理的效益。

由于历史资料的有限性,以及山洪灾害自身的突发性、难以预测性等特征,大大增强了山洪灾害管理的难度。因而,在山洪风险评估研究中出现了对各种情景的分析,其结果对实际管理实践具有指导意义。例如, Mazzorana 等<sup>[64]</sup>将自然致灾情景、暴露情景、脆弱情景、风险中的价值分析,以及合成的风险情景通过模糊集理论的嵌套方法来评估了欧洲阿尔卑斯山脉的山洪风险,由于模型考虑了确定因素以外的其他突发因子的概率,因而在应急处理决策中具有一定的优势。

风险评估中情景分析的不确定性分析直接影响风险评估结果的可靠性,因此,相关学者在情景分析时对可能的不确定性也展开了研究,取得了较好的效果。例如, Olga 等<sup>[65]</sup>学者在进行山洪风险的情景分析时,考虑到可能会由于潜在的桥梁阻塞、保护措施失效、运移物质数量的变化或相关有效信息的缺失等原因而导致评估结果出现较大的偏差,将最早由 Heinimann 等<sup>[66]</sup>提出的在泥石流的风险评估中采用的子情景(subscenarios)方法引用用于山洪灾害的风险评估中,通过考虑子情景中各种不确定性的情况,对结果进行比较,来分析风险大小。但是,山洪风险评估情景分析的不确定性研究目前仍处于理论尝试阶段,对情景分析模型适用性和可靠性的验证还很缺乏。因此,所涉及的模拟模型或设计程序仅能够在一定程度上解释山洪的成因和造成的影响。在未来的研究中,应当不断完善对其他可能的潜在不确定性因素的考虑,加强山洪灾情资料的整合,用实际案例检验情景分析模型的适用性和可靠性,以促进情景分析模型的推广和应用。

## 5 结论与讨论

本研究从现代灾害风险评估角度,分别从致灾因子危险性分析、临界雨量、承灾体脆弱性分析,以及综合风险分析方面综述了山洪风险评估研究的进展。通过对文献综合分析发现,山洪灾害的致灾因子危险性研究,主要涉及气象、水文、地质、地貌等方面,包括对影响因子的机理分析和相关影响程度大小分析;临界雨量的确定依赖于降水、水文资料及水文动力学模型,是山洪预警的重要指标;脆弱性评估对致灾因子和承灾体的相关数据要求较高,且需要经常更新才能保证其有效性;山洪综合风险评估是在以上各项分析的基础之上的一项综合研究,相关学者提出了不同的统计模型和机理模型,RS 和 GIS 技术对于风险评估的速度和精度具有很大的促进作用。此外,基于历史资料分析和情景分析的风险评估对于山洪灾害管理也具有重要意义。

在未来的山洪风险评估研究中,对风险源的识别与分析应当紧密结合区域特征,深度挖掘致灾因子的一般规律,规范危险性等级划分,促进不同区域的比较和经验借鉴;在山洪预警方面除了临界雨量指标外,是否有其他更优的指标,是否可以提出具有我国特色的确定山洪临界雨量的可推广方法等;脆弱性评估对数据的强依赖性是否可以通过易获取的其他资料进行替代,而达到理想的效果;综合风险评估方面仍然需要不断探索更多稳定性高、操作性强的模型及方法,并通过集成的系统平台尽早实现各地区山洪风险评估的应用推广。此外,山洪风险评估需要抓紧对历史资料数据的搜集、整理和更新,采用先进技术将其快速规范化处理,以便后续相关研究的顺利开展。

## 参考文献:

- [1] 崔鹏,杨坤,韦方强,等.泥石流灾情评估指标体系[J].自然灾害学报,2001,10(4):36-41.
- [2] 方秀琴,王凯,任立良,等.基于GIS的江西省山洪灾害风险评价与分区[J].灾害学,2017,32(1):111-116.
- [3] Jones D K C. Landslide hazard assessment in the context of development [M]//Geohazards. Springer Netherlands, 1992: 117-141.
- [4] Al Saud M. Flood Control Management for the City and Surroundings of Jeddah, Saudi Arabia[M]. Springer, 2015.
- [5] Rebetez M, Lugon R, Baeriswyl P A. Climatic change and debris flows in high mountain regions: The case study of the Ritigraben torrent (Swiss Alps) [J]. Climatic change, 1997, 36(3/4): 371-389.
- [6] Capello M, Cutroneo L, Ferretti G, et al. Changes in the physical characteristics of the water column at the mouth of a torrent during an extreme rainfall event[J]. Journal of Hydrology, 2016, 541: 146-157.
- [7] Azmeri, Hadihardaja I K, Vadiya R. Identification of flash flood hazard zones in mountainous small watershed of Aceh Besar Regency, Aceh Province, Indonesia[J]. The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science, 2016, 19(1): 143-160.
- [8] 王礼先,于志民.山洪及泥石流灾害预报[M].北京:中国林业出版社,2001.
- [9] Eldeen M T. Predisaster physical planning: integration of disaster risk analysis into physical planning - A case study in Tunisia[J]. Disasters, 1980, 4(2): 211-222.
- [10] Wiczorek G F. Evaluating danger landslide catalogue map[J]. Bulletin of the Association of Engineering Geologists, 1984, 1(1): 337-342.
- [11] Ellen S D, Wiczorek G F. Landslides, floods, and marine effects of the storm of January 3-5, 1982, in the San Francisco Bay region, California[R]. Geological Survey (US), 1988.
- [12] Hansen A. Landslide hazard analysis [M]. Slope instability. Wiley, New York, 1984: 523-602.
- [13] 足立胜治,德山久仁夫,中筋章人,等.土石流发生危险度的判定[J].新砂防,1977,30(16):7-16.
- [14] 久保田哲也,正务章,板垣昭彦.流域的任意地点短时间降雨预测手法-土石流发生危险度判定图的开发[J].新砂防,1990,42(6):11-17.
- [15] 李昌志,郭良.山洪临界雨量确定方法述评[J].中国防汛抗旱,2013,23(6):23-28.
- [16] 谭炳炎.山区铁路沿线暴雨泥石流预报的研究[J].中国铁道科学,1994(4):67-78.
- [17] 唐川,朱静.基于GIS的山洪灾害风险区划[J].地理学报,2005,60(1):87-94.
- [18] 杜俊,任洪玉,张平仓,等.大空间尺度山洪灾害危险评估的比较研究[J].灾害学,2016,31(3):66-72.
- [19] 杜俊,肖翔,蔡道明,等.汶川震区山洪泥石流灾害危险性评估[J].长江科学院院报,2015,32(3):77-83.
- [20] 姜智怀,章毅之,蔡哲,等.基于嵌入河道栅格的山洪灾害淹没模拟[J].气象,2014,40(8):1013-1018.
- [21] 李中平,张明波.全国山洪灾害防治规划降雨区划研究[J].水资源研究,2005,26(2):32-34.
- [22] 陈桂亚,袁雅鸣.山洪灾害临界雨量分析计算方法研究[J].人民长江,2005,36(12):40-43.
- [23] Caine N. The Rainfall Intensity: Duration Control of Shallow Landslides and Debris Flows [J]. Geografiska Annaler. Series A, Physical Geography, 1980, 62(1/2): 23-27.
- [24] Wiczorek G F, Glade T. Climatic factors influencing occurrence of debris flows [M]// Debris - flow hazards and related phenomena. Springer Berlin Heidelberg, 2005: 325-362.
- [25] Guzzetti F, Peruccacci S, Rossi M and Stark C P. The rainfall intensity - duration control of shallow landslides and debris flows: an update [J]. Landslides, 2008, 5(1): 3-17.
- [26] Brunetti M T, Peruccacci S, Rossi M, Luciani S, Valigi D and Guzzetti F. Rainfall thresholds for the possible occurrence of landslides in Italy [J]. Nat. Hazards Earth Syst. Sci., 2010, 10(3): 447-458.
- [27] Chen N, Yang C, Zhou W, et al. The critical rainfall characteristics for torrents and debris flows in the Wenchuan earthquake stricken area [J]. Journal of Mountain Science, 2009, 6(4): 362-372.
- [28] 樊建勇,单九生,管珉,等.江西省小流域山洪灾害临界雨量计算分析[J].气象,2012,38(9):1110-1114.
- [29] 王振忠,王国新.基于水位流量反推法确定山洪灾害雨量预警指标探讨[J].吉林水利,2016(8):33-35.

- [30] National Oceanic and Atmospheric Administration. Flash Flood Early Warning System Reference Guide[R]. University Corporation for Atmospheric Research, 2010, Denver.
- [31] Carpenter T M, Sperflage J A, Georgakakos K P, et al. National threshold runoff estimation utilizing GIS in support of operational flash flood warning systems[J]. *Journal of Hydrology*, 1999, 224(1): 21–44.
- [32] Terada H, Nakaya H. Operating methods of critical rainfall for warning and evacuation from sediment related disasters, Technical note of National Institute for Land and Infrastructure Management No. 5[J]. *National Institute for Land and Infrastructure Management*, 2001, 71.
- [33] 文明章, 吴滨, 张容焱, 等. 闽北山洪致灾临界雨量重现期分布及山洪风险分析[J]. *复旦学报(自然科学版)*, 2015, 54(5): 660–666.
- [34] 刘鸣彦, 王颖, 郑石, 等. 清原地区“0816”洪水灾害临界雨量分析[J]. *气象与环境学报*, 2015, 31(5): 25–30.
- [35] 卢燕宇, 谢五三, 田红. 基于水文模型与统计方法的中小河流致洪临界雨量分析[J]. *自然灾害学报*, 2016, 25(3): 38–47.
- [36] 刘志雨, 杨大文, 胡建伟. 基于动态临界雨量的中小河流域山洪预警方法及其应用[J]. *北京师范大学学报(自然科学版)*, 2010, 46(3): 317–321.
- [37] 唐余学, 廖向花, 李晶, 等. 基于 GIS 的重庆市山洪灾害区划[J]. *气象科技*, 2011, 39(4): 423–428.
- [38] 樊高峰, 何月, 顾骏强. 基于 GIS 的浙江省暴雨灾害及其危险性评价[J]. *中国农学通报*, 2012, 28(32): 293–299.
- [39] 谢立华, 赵寒冰. 洪涝灾害与地形的相关性研究—以肇庆市为例[J]. *自然灾害学报*, 2013, 22(6): 240–245.
- [40] Fuchs S, Kuhlicke C, Meyer V. Editorial for the special issue; vulnerability to natural hazards—the challenge of integration[J]. *Natural Hazards*, 2011, 58(2): 609–619.
- [41] Bendimerad F. Loss estimation; a powerful tool for risk assessment and mitigation[J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2001, 21(5): 467–472.
- [42] Papathoma – Köhle M, Totschnig R, Keiler M, et al. A new vulnerability function for debris flow – The importance of physical vulnerability assessment in alpine areas[C]//12th Congress Interpraevent. 2012: 1033–1043.
- [43] Birkmann J, Cardona O D, Carreño M L, et al. Framing vulnerability, risk and societal responses: the MOVE framework[J]. *Natural Hazards*, 2013, 67(2): 193–211.
- [44] Totschnig R, Sedlacek W, Fuchs S. A quantitative vulnerability function for fluvial sediment transport[J]. *Natural Hazards*, 2011, 58(2): 681–703.
- [45] Fuchs S, Ornetmüller C, Totschnig R. Spatial scan statistics in vulnerability assessment: an application to mountain hazards[J]. *Natural Hazards*, 2012, 64(3): 2129–2151.
- [46] Totschnig R, Fuchs S. Mountain torrents; quantifying vulnerability and assessing uncertainties[J]. *Engineering Geology*, 2013, 155: 31–44.
- [47] Papathoma – Köhle M, Zischg A, Fuchs S, et al. Loss estimation for landslides in mountain areas – An integrated toolbox for vulnerability assessment and damage documentation[J]. *Environmental Modelling & Software*, 2015, 63: 156–169.
- [48] Jakob M, Stein D, Ulmi M. Vulnerability of buildings to debris flow impact[J]. *Natural Hazards*, 2012, 60(2): 241–261.
- [49] Holub M, Suda J, Fuchs S. Mountain hazards: reducing vulnerability by adapted building design[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2012, 66(7): 1853–1870.
- [50] Meyer V, Becker N, Markantonis V, et al. Review article: Assessing the costs of natural hazards – state of the art and knowledge gaps[J]. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 2013, 13(5): 1351–1373.
- [51] Guzzetti F, Stark C P, Salvati P. Evaluation of flood and landslide risk to the population of Italy[J]. *Environmental Management*, 2005, 36(1): 15–36.
- [52] Compton K L, Ermolieva T, Linnerooth – Bayer J, et al. Modeling Risk and Uncertainty: Managing Flash Flood Risk in Vienna[M]//Integrated Catastrophe Risk Modeling. Springer Netherlands, 2013: 13–28.
- [53] Fuchs S, Keiler M, Sokratov S, et al. Spatiotemporal dynamics: the need for an innovative approach in mountain hazard risk management[J]. *Natural Hazards*, 2013, 68(3): 1217–1241.
- [54] 王帆, 何晓燕, 黄金池. 社区山洪风险评估系统开发及试点应用[J]. *中国防汛抗旱*, 2014, 24(4): 7–9.
- [55] Tang C, Zhu J. Torrent risk zonation in the Upstream Red River Basin based on GIS[J]. *Journal of Geographical Sciences*, 2006, 16(4): 479–486.
- [56] Youssef A M, Pradhan B, Hassan A M. Flash flood risk estimation along the St. Katherine road, southern Sinai, Egypt using GIS based morphometry and satellite imagery[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2011, 62(3): 611–623.
- [57] 哈斯塔塔嘎, 蔡云松, 石力伟. 基于 GIS 的暴雨山洪气象灾害风险评估[J]. *现代农业科技*, 2013(18): 240–241.
- [58] Elkhachy I. Flash Flood Hazard Mapping Using Satellite Images and GIS Tools: A case study of Najran City, Kingdom of Saudi Arabia (KSA)[J]. *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science*, 2015, 18(2): 261–278.
- [59] Copien C, Frank C, Becht M. Natural hazards in the Bavarian Alps: a historical approach to risk assessment[J]. *Natural Hazards*, 2008, 45(2): 173–181.
- [60] Diakakis M, Fountelis M, Gouliotis L, et al. Preliminary flood hazard and risk assessment in Western Athens metropolitan area[M]//Advances in the research of aquatic environment. Springer Berlin Heidelberg, 2011: 147–154.
- [61] D’Agostino V. Assessment of past torrential events through historical sources[M]//Dating torrential processes on fans and cones. Springer Netherlands, 2013: 131–146.
- [62] Lepuschitz E. Statistics about torrents in Lower Austria, status from May 2015[J]. *Data in brief*, 2015, 4: 630–635.
- [63] Lepuschitz E. Geographic information systems in mountain risk and disaster management[J]. *Applied Geography*, 2015, 63: 212–219.
- [64] Mazzorana B, Fuchs S. Fuzzy formative scenario analysis for woody material transport related risks in mountain torrents[J]. *Environmental Modelling & Software*, 2010, 25(10): 1208–1224.
- [65] Špačková O, Rimböck A, Straub D. Risk Management in Bavarian Alpine Torrents: A Framework for Flood Risk Quantification Accounting for Subscenarios[M]//Engineering Geology for Society and Territory – Volume 3. Springer International Publishing, 2015: 437–441.
- [66] Heinimann H R, BORTER P, BART R, et al. Risikoanalyse bei gravitativen Naturgefahren – Methode[J]. *Umwelt – Materialien*, 1999, 107.