

杜俊,任洪玉,林庆明,等. 山洪灾害防御研究进展[J]. 灾害学, 2019, 34(2): 161 - 167. [DU Jun, REN Hongyu, LIN Qingming, et al. Research Progress on the Prevention of Flash Flood Disasters[J]. Journal of Catastrophology, 2019, 34(2): 161 - 167. doi: 10.3969/j.issn.1000-811X.2019.02.029.]

山洪灾害防御研究进展*

杜俊^{1,2}, 任洪玉^{1,2}, 林庆明^{1,2}, 徐金鑫^{1,2}

(1. 长江科学院水土保持研究所, 湖北 武汉 430010;
2. 水利部山洪地质灾害防治工程技术研究中心, 湖北 武汉 430010)

摘 要: 从防治理念、预报预警和风险评估三个方面, 对当今国内外山洪灾害防御研究工作进行梳理, 总结和比较了国内外山洪防御研究现状与差异, 以期明晰我国现阶段山洪防御水平、找准未来工作重点提供参考。认为与先进国家相比, 我国山洪防治理念对保险和土地利用管理措施关注不够, 需在充实“非工程措施”内涵的基础上, 对相关工作进行深入探索和实践; 我国山洪预报预警的准确率与先进国家尚存一定差距, 落后的山区局地降雨监测预报支持系统和高度概化的预报预警模型是其中的重要原因; 要素风险评估技术在国内外山洪风险格局分析中得到了普遍应用, 不再是山洪防御工作的瓶颈, 而物理机制更强的过程风险评估的发展尚不能满足现实需求, 是今后研究中需要着力加强的部分。

关键词: 山洪; 灾害防御; 研究进展; 预报预警; 风险评估

中图分类号: X43; X915.5; P954 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-811X(2019)02-0161-07
doi: 10.3969/j.issn.1000-811X.2019.02.029

山洪在我国系指山丘区发生的暴涨陡落的地表强径流^[1], 一般由暴雨、融雪或堰塞湖、人工坝溃决等自然、人为因素引发。国外与之接近的概念为 flash flood, 直译为地势低洼地区发生的快速泛滥洪水^[2]。两者虽然在过程发生部位的表述上有所区别, 但都强调了洪水暴涨陡落的核心特征, 且在发育因素、防御方法等方面也有诸多相似之处, 因此本文将两者等同对待。

山洪过程历时短, 发生的流域面积一般较小, 对此欧美学界总结的时空上限为 6 h 和 400 km²^[2-4], 我国学界目前尚没有明确的相关界定, 但防汛部门一般将山洪沟限定在流域面积 200 km² 的范围内^[5]。由于山洪往往是短时间内蓄积洪水的集中释放, 洪峰流量很大, 流域面积在数十平方千米的山洪沟, 瞬时洪量可以达到 500 ~ 2 000 m³/s, 甚至更高^[6-10], 这也是山洪破坏力强, 容易诱发滑坡、泥石流的原因之一。据统计, 仅致死率方面, 山洪在美国是仅次于酷热 (extreme heat) 的第二大气象类灾害^[11], 在欧洲也是仅次于风暴潮 (storm-surge flood) 的第二大洪水类灾害^[12]。在我国, 山洪每年造成的死亡/失踪人口占洪涝灾害相应指标的比例长期超过 60%, 2010 年甚至达到了 87.6%^[13]。可见, 尽管存在一定的统计口径

偏差, 山洪在全世界范围内, 都是一个不可忽视的威胁。

面对山洪的长期侵扰, 世界各国, 特别是欧美及日本等发达国家和地区已经积累了一定的防御经验。我国在 2006 年《全国山洪灾害防治规划》^[14] 获得批复以后, 确立了“以防为主、防治结合”、“以非工程措施为主, 工程措施和非工程措施相结合”的防治理念, 也开始阶段化、系统性的推进山洪灾害防治工作。截至目前, 全国山洪灾害防治非工程措施项目、调查评价项目业已完成, 以“监测预警、群测群防”为特色的我国山洪灾害监测预警体系初步建立。然而, 在取得阶段性成绩的同时, 也应看到我国目前在山洪预报预警、风险评估结果的可靠性, 以及相关理念方面还存在不足。对这些方面的国内外研究现状进行梳理, 比较国内外山洪防御方法的异同, 了解最新的山洪防御进展和发展趋势, 对于明晰我国现阶段山洪防御水平、找准未来工作重点, 都具有一定的参考价值。据此, 本文尝试从防治理念、预报预警和风险评估三个方面, 对当前国内外山洪灾害防御进展进行介绍和总结。除防治理念方面必要的陈述以外, 本文不涉及山洪灾害工程治理方面的内容。

* 收稿日期: 2018-08-14 修回日期: 2018-12-12

基金项目: 国家重点研发计划(2018YFC1505201); 国家自然科学基金青年基金(41501109)

第一作者简介: 杜俊(1983-), 男, 安徽马鞍山人, 博士, 高级工程师, 研究方向为水沙灾害防治. E-mail: dxjx2006@126.com

1 山洪灾害防治理念

山洪灾害防治理念是开展相关工作的指导思想,与防治目标及措施选择紧密联系。由于山洪灾害的高致死率,绝大多数国家将保障民众的生命安全作为山洪防治的第一要务,然而对于实现这一目标的途径,各国在施用措施的侧重方面存在一定差异。

目前国内外主流的山洪防治措施可粗分为非工程措施、工程措施、保险措施和土地利用管理措施四类。非工程措施的概念在国内强调较多,本意包括监测预警、基层自组织防御(如群测群防、韧性社区等)、搬迁避让,以及相关法律法规建设等方面内容^[15-16],在我国当前实践中主要指监测预警和群测群防体系建设,侧重于“防”;工程措施包括堤防、水库塘坝、水土保持和相关拦排工程的修建/修缮以及河道疏浚等^[17-18],侧重于“治”;保险措施即通过灾害保险产品的价格机制实现对潜在承灾体质与量的市场调控^[19];土地利用管理则主要通过行政、立法等手段对沿河/沟滩涂地及冲洪积扇地区的开发和保护活动进行必要的优化、约束和规范^[20-21]。

多数国家将非工程措施,特别是其中的预报预警作为预防山洪的首要手段,在监测通讯、过程预报、预警指标等方面投入了大量的研究和应用工作,如我国的全国山洪灾害防治项目、美国的FFG项目^[22]、欧洲的HYDRATE项目^[12],等;此外,灾害保险在欧美等发达国家对山洪防御也发挥了较大影响;而工程措施则因为投资较高,很难将广泛发育的山洪沟/河完全覆盖,多针对特定时期或涉及较大规模人口聚落时施用,如巴西的里约热内卢在2014年世界杯前夕,为提高马拉卡纳球场及下游防御山洪的能力,在涉及的3条河流沿线修建了5座滞洪水库及引渠^[23];土地利用管理措施因涉及城镇化、法律法规制定、多级行政管理协调及土地补偿金支付等内容,目前各国均在摸索阶段。

从各类措施的应用效果来看,工程措施虽然能够提高洪水防御标准,但一方面需要耗费大量资金,另一方面,当水库、堤防等防护工程投入使用以后,人们往往认为相关地区的防洪安全得到了足够保证,反而可能激发更大规模的人口聚集和经济扩张^[21];保险措施也存在类似的问题,且即便承保灾种符合大数法则和引入了再保险制度以解决可能的资金缺口,当面临巨额损失时仍有难以为继的风险^[19];非工程措施(监测预警和群测群防)可在较低的投资背景下实现较高的山洪预

防效益,但其本质上只是临时性的规避措施,并未从根本上降低风险,且山洪预报预警难度远高于一般洪水,误报率和漏报率较高,因此仍有局限;土地利用管理措施的核心理念是“不与水争地,建立和谐人地关系”,与单纯被动避灾的“搬迁避让”相比,土地利用管理措施在被动防御工作中更强调提前规划,且当相关地区可以通过适当措施控制险情时,亦可允许区内一定类型和强度的开发利用,从根本上控制承灾体暴露量或减少自然威胁,甚至消除风险点,是未来山洪防治理念革新的一个方向。

2 山洪预报预警

该方面最具代表性的是美国的山洪预警指南系统(Flash Flood Guide, FFG)。FFG是对美国National Weather Service(NWS)下属的多个区域河流预报机构于不同时期开发的山洪预警系统系列的总称,依时间先后可分为1992年之前的原初系统(Original FFG, OFFG)和之后相继开发的集总式系统(Lumped FFG, LFFG)、山洪潜势指数(Flash Flood Potential Index, FFPI)、网格式系统(Gridded FFG, GFFG)和分布式系统(Distributed FFG, DFFG),其中除FFPI属于补充性质的山洪危险性要素分析的范畴以外,其余4类均以降雨-产流水文模型为基础,即狭义上的FFG。

狭义FFG十分重视前期降雨或土壤湿润程度对产流的影响,在早期的LFFG系统中即可根据实时监测雨量对萨克拉门托-土壤湿度模型(SAC-SMA)中的相关参数进行6h/次的动态更新^[24];在GFFG中引入土地利用和土壤类型地理空间数据计算曲线数(NRCS-CN),经计算后可进一步反映不同地块的产流潜势^[25];在DFFG中则直接使用连续前期降雨指数模型(API)代替了土壤湿度计算部分^[22]。

门槛(临界)流量也是该系统的一个重要考虑方面。狭义FFG的核心思想即是根据流域出口断面的门槛流量反推时段内的降雨量,此雨量即为临界雨量,当监测或预报的雨量超过该临界雨量,则系统认定山洪发生概率较大并发布相关预警^[22]。FFG的门槛流量一般使用出口断面的平滩流量,当没有断面测量数据时,可使用1~2年一遇的洪峰流量代替^[26]。

Flash Flood Monitoring and Prediction(FFMP)系统是FFG重要的降雨监测预报支持系统。该系统主要依托WSR-88Ds多普勒天气雷达,同时结合NWS的卫星和地面雨量站等监测网络,采用数值

模拟等手段,可针对山洪提供 0~1 h, 0~3 h 等多时段、空间分辨率最高约 5.2 km² 的降雨定量预报产品^[27],而最新的 Multi-Radar Multi-Sensor (MRMS) 系统甚至可以将监测的时空分辨率提高到 1 km²/2 min^[28]。

FFG 发布至今已在加勒比海 7 国和非洲、东南亚部分国家推广。作为开发历史较长、推广范围较大的山洪预报预警体系,分布式水文模型、动态化的土壤湿度/前期雨量计算模块、强大的降雨监测预报支持系统都是它的优势,但该系统也存在一些不足:一是它主要针对雨致山洪,且只有 0/1(即发生/不发生)预警,融雪、溃坝造成的山洪没有直接的应对方案;二是降雨预报产品和门槛流量对应的范围,在空间尺度上始终很难匹配,如 LFFG 门槛流量对应的流域面积一般在 300~5 000 km²,而降雨预报产品的空间分辨率要小得多,即便是 DFFG 的门槛流量也是一个集总值,无法在空间上有更多细化;三是门槛流量若采用平滩流量,会因为局地下垫面的不同而表现出很大的不确定性,而使用 1~2 年一遇洪水作为门槛流量,在很多时候并不符合实际;最后,地质地貌、土地利用、植被等下垫面要素对产流的作用也很突出,这些要素不做充分考虑,会对门槛流量计算成果的可靠性产生影响。所以,尽管有报道称 FFG 的准确率可达 65%^[29],但实际发生了山洪以后,洪水的规模有多大?是否可能成灾?具体在什么位置成灾?都不明确。

我国山洪灾害监测预警体系以 2010-2015 年大力建设的调查评价和非工程措施项目为软硬件依托^[30],在基本思路上汲取了国外先进经验,如在产流试算中采用设置多档扣损值等方式考虑前期土壤湿度;使用成灾水位-流量-暴雨频率反推法估算临界雨量,等等。与 FFG 体系相比,我国山洪灾害监测预警体系的优势主要体现在三个方面:一是“专群结合”,不仅有“专业机构监测与预报-指标临界识别-平台发布预警-群众规避”这样“自上而下”的传统预警模式,也有在沿河居民家中或河岸布设简易雨量或水位报警器,发动居民自发预警和组织规避的“自组织”式群测群防模式;二是对门槛流量起算水位的界定更为科学。不同于狭义 FFG 的平滩流量或低频洪水水位,我国门槛流量的起算水位与日本相似,均采用保护对象所处高程作为基准水位^[5,31],并且该水位下的河道断面是通过现场 RTK 测量得到的,较之于日本普遍采用的激光雷达测距精度更高,更有利于门槛流量的准确估算;三是不仅重视雨情预警,也兼顾河道水位预警,理论上预防山洪的类型更

为全面。

然而,在一些关键技术领域,我国山洪灾害监测预警体系与先进国家之间还有一定差距。一是山区局地降雨监测预报支持系统落后。目前我国进行山区局地降雨监测的主役仍是各类点式雨量站,据统计我国目前已建相关雨量站点约 36 万个,其中约 88% 是依托非工程措施项目建成和布设在沿河居民家中的简易雨量计,总体上建设密度低、位置布局不尽合理、监测范围小,对地形雨、山地夜雨等山区局地对流性暴雨天气监测能力有限。在此基础上,相关雨情的估算、预报多采用面上插值和统计方法,经验性强。而欧美及日本等国则普遍使用侦测范围较广的天气雷达作为雨情监测的主角,特别是日本基本普及了时空分辨率较高的 X 波段天气雷达,结合卫星遥感、点雨量实时数据的融合、同化和数值模拟,极大的提高了降雨定量估计和预报的精度和效率^[28,31]。其次,一般集总式水文模型在我国系统中的应用比例较高,不利于洪峰流量和预警水位/雨量的准确估算。尽管近年来国内诸如 HEC-RAS 等分布式水文模型的应用案例也有报道^[32-34],但在全国山洪灾害分析评价项目中,推理公式、铁一院公式、单位线、地区经验公式、曼宁公式等一般水文计算公式仍然是目前应用最为广泛的设计洪水和水位-流量关系计算方法,虽然这些方法在资料需求和计算耗时等方面有一定优势,但是对下垫面要素、洪水演进和区域差异的简化考量,使得计算结果很难满足山洪预报预警对动态化、差异化和可靠性方面的要求。

3 山洪灾害风险评估

自然灾害风险一般是指潜在在发灾过程造成的损失期望^[35],对自然灾害风险进行科学评估是一般防治工作的基础,也是灾害风险管理的一个重要环节。联合国人道主义事务部 1992 年提出的自然灾害风险概念及其计算公式^[36],以及国内史培军教授提出的自然灾害系统理论^[37],是相关工作普遍采用的基础理论。

山洪灾害风险评估目前按方法论的差异可分为(成因)要素分析法和过程分析法两类(表 1)。要素分析法根据山洪灾害与主要自然、社会因子的经验关系来确定评估对象的风险属性,一般使用 GIS 背景下的图层代数叠加方法,综合山洪形成与承灾体属性要素图层得到评估对象的风险度分布特征。

表 1 主要山洪灾害风险评估方法论的比较

类型	要素分析法	过程分析法
基本思想	根据山洪灾害成因要素,提取暴雨、地形、植被等相关图层叠加计算风险度	根据山洪灾害过程,估算流域产生洪水的规模频率、波及范围及损失
使用方法	地统计学、GIS、叠加分析、机器学习	气象学、水文学及动力学方法
适用尺度	灵活,擅长大空间、长历时状态分析	短历时、小流域尺度
研究难点	指标体系建立、指标赋权等	山洪灾害过程模拟
分析结果	风险相对值,区域分异程度的度量	风险绝对值,不同时频洪水对应的损失期望
可靠性	结果易验证、较高	结果不易验证、不确定性大
研究阶段	较成熟	不够成熟、简化模型框算为主
基础理论	自然灾害风险理论: 风险 = 自然过程危险性 × 承灾体易损性; 自然灾害系统理论: 风险 = 致灾因子危险性 × 孕灾环境 × 承灾体脆弱性	
相互联系	互相融合: 过程分析法的产出可以作为要素分析法的要素; 反之, 要素分析法的要素也可以作为过程分析法的输入	

指标体系及相关权重设计是该方法的两项核心内容,研究者通常基于学界对山洪灾害成因的定性、定量认知,从致灾因子、孕灾环境、承灾体属性、综合抗灾能力等方面,选取暴雨、地形、岩性、断裂、植被、土地利用、承灾体暴露量、历史灾害等方面的数据构建指标体系,如果有可靠、详实的历史灾害信息支持,可使用回归、信息量法、敏感性分析、灰色关联等方法估算各指标之于历史灾害的贡献^[38-40],辅助指标权重设计;反之,则多应用层次分析法(AHP)、熵值法、打分法等主客观或综合方法赋权^[41-44],最后在GIS中的叠加分析中完成出图。此外,还可使用人工神经网络、模糊推理、决策树或随机森林等机器学习方法,在设置好输入/输出参数、基本规则或分类逻辑的基础上,直接由输入的指标数据获得输出结果^[45-46]。

要素分析法本质上是一种经验统计方法,其理论框架成熟、应用对象灵活、可操作性很强,在国内外山洪灾害风险格局分析中均有较普遍的应用。该方法主要的不足有:①输出结果不够具体,风险值本身没有明确的物理意义(理论上是损失期望,实践中多为程度的表达),导致对保险产品的设计、山洪沟治理等工作的指导有限;②很难量化防御措施实施对降低风险的作用,不利于后期风险管理;③结果验证主要依赖历史灾害资料,若山洪发育环境发生较大改变则需一定时间应变。

过程分析法主要使用水文计算或动力学方法,输出结果可以具体到不同时频洪水的波及特征。过程分析法与山洪预报预警方法在内核上并无实质区别,均为对山洪灾害过程的模拟(图1),但由于前者着眼于损失期望,对时效性的宽容度较高,可以在物理机制上有更为细致的描述。

山洪灾害的细致描述离不开对其过程的解构,(雨致)山洪灾害的四大过程为暴雨、坡面产汇流、洪水传播和洪水与承灾体的互动。就暴雨模拟而

言,尺度是其中的关键问题。我国学界普遍认为暴雨是由不同尺度天气系统相互作用产生的中尺度现象^[47],因此相关研究也多在大中尺度。然而引发山洪灾害的暴雨大多与山区局地对流系统关系密切,时空尺度很小,一般的大中尺度数值模拟模式很难下探到需求尺度。另一方面,山区立体气候发育,局部雨量站信息也很难向面上推广。因此目前山区局地暴雨模拟最为可靠的方法,是应用多普勒雷达结合地面雨量站、卫星遥感数据对暴雨过程进行监测,基于实时数据动态修正各类数值模拟或统计模型的预测结果^[48-49]。

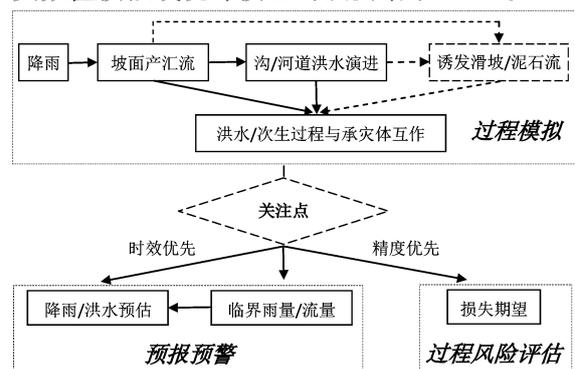


图 1 雨致山洪灾害过程模拟及与山洪预报预警和过程风险评估的关系

雨水落地经历填洼、植被截留、入渗和蒸散发,形成产汇流。学界基于水文学原理和GIS技术,已经对小流域产汇流机制及模拟开展了大量的工作,不论何种产流模式,都有方案可供应对^[50]。然而具体到山洪过程,特别在我国北方的干旱和半干旱地区,这些工作仍不能充分满足需求,主要问题在于参数确定:山洪易发区多为缺资料地区,产汇流模型中一些重要的下垫面参数需要依据经验估计或试验率定,然而作为小时空尺度水文过程,山洪洪峰往往对这些参数极为敏感,经验估计可能带来极大的不确定性^[51];而通过原位观测、试验等方法率定参数,考虑到我国

幅员辽阔和复杂的自然地理环境, 工作量很大。因此在国内实践中, 多采用净雨计算配合单位线等简易方法对产汇流进行框算^[52], 可靠性很难保证。

小股洪流从支沟汇入主干后即进入洪水传播过程, 其中的流速、波高等水力学要素直接决定了山洪向下游传播的冲击、淹没特征, 与山洪致灾的关系极为密切。目前山洪传播模拟主要的方法有水文学法和水力学法, 水文学法以水量平衡计算为基础, 常用方法有马斯京根法、线性回归法、汇流系数法等; 水力学法则以圣维南方程组为代表, 依运动方程中各分项的简化程度不同又可衍生出扩散波、运动波等方法。虽然水力学法拥有更好的物理基础, 且近年来学界在激波捕捉、动床模拟、水沙互作等方面取得较快进展^[53-55], 但其在资料获取、计算耗时等方面仍然要求较高。现实山洪往往挟带大量沙石和漂浮物, 洪水攀高、弯道超高现象也很普遍, 现有技术还很难在低运算量条件下对这些现象做出准确而全面的描述。

山洪与承灾体相互作用, 即可能成灾。房屋在洪水威胁中事关生命财产安全, 一直是山洪承灾体关注的重点。欧美部分国家得益于发达的保险业和政府有计划的案例调研, 对场次洪水覆盖的房屋类型、淹没范围, 甚至流速资料均有较完备的记录, 可针对不同时段洪水绘制出承灾体损失曲线^[56], 得到风险实值。但也有学者指出, 这类资料估算的损失, 会依房屋位置、社区规模和洪水大小表现出较强的不确定性^[57]。除了案例调研, 水槽试验和数值模拟也是常用的研究手段^[58-61], 这些工作以建筑物所承受的洪水或漂流物的冲击过程为研究中心, 为村镇居民点的布局和防洪设计提供了一定的科学依据, 但在深度和广度上仍有进一步拓展的空间, 且尚未给出适用于不同承灾体类型、分布、排列等情景下的损失估算方法。

纵观山洪灾害的各个环节, 都有需要突破的难点, 目前国内外尚没有一个完整的基于物理机制描述的山洪灾害全过程数学模型, 已有的、具有一定物理基础的过程分析法案例多来自分布式水文或动力学模型^[32-34, 62], 这些工作均以洪水淹深及相应临界雨量计算为重点, 在过程分析上的概化较为严重。然而, 山洪灾害作为小时空尺度发生的、受自然环境和社会经济双重影响的系统过程, 要素之间的敏感性及其相互作用机制十分复杂, 与其等待各个环节取得突破, 首先集中力量研发出全要素、全过程数学模型, 构建出较完善的基础运行环境, 再针对各地不同的自然、人文环境进行必要的简化或优化, 可能是一个效率更高的研究方案。

4 结论与建议

关于山洪防治理念, 我国强调“以防为主”, 现阶段突出非工程措施, 特别是预报预警在其中的位置。与先进国家相比, 我国还缺乏对保险措施和土地利用管理措施等方面的深入探索和实践。考虑到山洪致灾机制的复杂性、过程发育的不确定性, 以及广大山区缺资料的特点, 仅仅依靠山洪预报预警和有限的搬迁避让与工程治理, 很难将山洪灾害损失长期控制在一个较低的水平。因此, 建议我国山洪防治理念充实“非工程措施”的内涵, 落实保险和土地利用管理等方面内容, 多管齐下的开展山洪防治工作。土地利用管理措施强调人地和谐, 可从根本上控制承灾体暴露量或减少自然威胁, 是未来山洪防治理念革新的一个方向。

关于山洪预报预警, 目前我国山洪预报预警的准确率与先进国家尚存一定差距, 这种差距一方面来自落后的山区局地降雨监测预报支持系统, 另一方面与高度概化、经验性强的洪量及预警阈值计算方法也有关系。我国幅员辽阔, 山丘区国土面积占比较高, 在全国推广高分辨率天气雷达或高密度布设点型自动监测设施资金压力很大, 经济发达省市可尝试在下垫面特征较典型的局部山区进行小规模组网; 灾情较重、地质地貌条件复杂的中西部典型区亦可通过地方自筹和国家财政转移支付进行局部试点。在此基础上进一步培育、遴选若干国家级试验台站, 深化对典型区暴雨发生、产汇流及发灾机制的认知, 为地区模型选择及参数优化提供参考。同时, 也应加强对低成本、高可靠性监测设施的研发和推广力度, 为大规模装备覆盖提供可能。

关于山洪风险评估, 尽管在指标体系细化、科学赋权以及易损性分析等方面仍需深化, 要素风险评估技术已日趋成熟, 在国内外山洪风险格局分析领域发挥了应有的作用, 不再是山洪防御工作的瓶颈。相对而言, 过程风险评估的内涵更为丰富, 理论上对山洪防御的支撑作用也更大, 但是已有进展尚不能满足现实需求。山洪过程风险评估涉及到山区局地对流性天气、复杂下垫面产汇流机制、洪水与沙石、漂流物等的相互作用以及承灾体脆弱性等一系列机理性问题, 相关工作的推进一般只能依靠各个环节基础研究的突破, 然而如果能够从一开始即对模型的系统化、模块化和动态化加以考虑, 基于山洪灾害的全要素、全过程开发数学模型, 待构建出较完善的基础运行环境, 再针对各地不同的自然、人文环境进行简化或优化, 可能是一个效率更高的研究方案。

参考文献:

- [1] 赵士鹏. 中国山洪灾害系统的整体特征及其危险度区划的初步研究[J]. 自然灾害学报, 1996, 5(3): 93-99.
- [2] National Weather Service. NWS Glossary [EB/OL]. [2018-01-01]. <http://w1.weather.gov/glossary/index.php>.
- [3] Georgakakos K P. On the design of national, real-time warning systems with capability for site-specific, flash flood forecasts[J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 1986, 67(10): 1233-1239.
- [4] Marchi L, Borga M, Preciso E, et al. Characterisation of selected extreme flash floods in Europe and implications for flood risk management [J]. Journal of Hydrology, 2010, 394(1/2): 118-133.
- [5] 全国山洪灾害防治项目组. 山洪灾害调查技术要求[Z]. 北京: 中国水利水电科学研究院, 2014.
- [6] 甘建军, 孙海燕, 黄润秋, 等. 汶川县映秀镇红椿沟特大型泥石流形成机制及堵江机理研究[J]. 灾害学, 2012, 27(1): 5-16.
- [7] 李械, 陈德琴, 康志诚. 云南东川蒋家沟泥石流发生、发展过程的初步分析[J]. 地理学报, 1979, 34(2): 156-167.
- [8] 刘传正, 苗天宝, 陈红旗, 等. 甘肃周曲2010年8月8日特大山洪泥石流灾害的基本特征及成因[J]. 地质通报, 2011, 30(1): 141-150.
- [9] 苏鹏程, 韦方强, 谢涛. 云南贡山“8. 18”特大泥石流成因及其对矿产资源开发的危害[J]. 资源科学, 2012, 34(7): 1248-1256.
- [10] 唐川, 铁永波. 川震区北川县城魏家沟暴雨泥石流灾害调查分析[J]. 山地学报, 2009, 27(5): 625-630.
- [11] Ashley S, Ashley W. Flood fatalities in the United States[J]. Journal of Applied Meteorology and Climatology, 2008, 47: 806-818.
- [12] Borga M, Anagnostou E N, Bloschl G, et al. Flash flood forecasting, warning and risk management: the HYDRATE project[J]. Environmental Science and Policy, 2011, 14: 834-844.
- [13] 国家防汛抗旱总指挥部, 中华人民共和国水利部. 2013中国水旱灾害公报[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2013.
- [14] 水利部长江水利委员会. 全国山洪灾害防治规划报告[R]. 武汉: 水利部长江水利委员会, 2006.
- [15] 邱瑞田, 黄先龙, 张大伟, 等. 我国山洪灾害防治非工程措施建设实践[J]. 中国防汛抗旱, 2012, 22(1): 31-33.
- [16] Orencio P M, Fujii M. A localized disaster-resilience index to assess coastal communities based on an analytic hierarchy process (AHP) [J]. International Journal of Disaster Risk Reduction, 2013(3): 62-75.
- [17] 何秉顺, 黄先龙, 张双艳. 山洪沟治理工程设计要点探讨[J]. 中国水利, 2012(23): 13-15.
- [18] Kostadinov S, Dragičević S, Stefanović T, et al. Torrential flood prevention in the Kolubara river basin [J]. Journal of Mountain Science, 2017, 14(11): 2230-2245.
- [19] 孙南申, 彭岳. 自然灾害保险产品设计与制度构建[J]. 上海财经大学学报, 2010(3): 20-27.
- [20] Ali S A, Ikbal J, Aldharab H, et al. Watershed analysis and Landuse Management to Protect from Flash Flood in the Semi-Arid Region Udaipur, Northwestern India using Geospatial Techniques [J]. International Journal of Scientific Research in Science and Technology, 2018, 4(2): 601-612.
- [21] Barraqué B. The common property issue in flood control through land use in France [J]. Journal of Flood Risk Management, 2017, 10(2): 182-194.
- [22] Clark R, Gourley J, Flamig Z, et al. CONUS-wide evaluation of National Weather Service Flash Flood Guidance products [J]. Weather and Forecasting, 2014, 29(2): 377-392.
- [23] Ortigao A, Fonseca P, Duarte M. Flash flood control works around the Maracan stadium district in Rio de Janeiro, Brazil [J]. Proceedings of the Institution of Civil Engineers, 2013, 166(6): 44-48.
- [24] Sweeney T, Baumgardner T. Modernized flash flood guidance [R]. Report to NWS hydrology laboratory, 1999, 11.
- [25] Schmidt J, Anderson A, Paul J. Spatially-variable, physically-derived, flash flood guidance [C]// Paper 6B. 2, Proceedings of the 21st Conference on Hydrology, 87th Meeting of the American Meteorological Society, 2007, January 15-18, San Antonio, Texas.
- [26] Carpenter T, Sperflage J, Georgakakos K, et al. National threshold runoff estimation utilizing GIS in support of operational flash flood warning systems [J]. Journal of Hydrology, 1999, 224: 21-44.
- [27] Smith S B, Filiaggi M T, Roe J, et al. Flash flood monitoring and prediction in AWIPS Build and beyond [C]// Presented at 15th Conference on Hydrology, American Meteorological Society, 2000, January 9-14, Long Beach, California.
- [28] Gourley J, Flamig Z, Vergara H, et al. The Flash project: improving the tools for flash flood monitoring and prediction across the United States [J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 2017, 98: 361-372.
- [29] 孙东亚, 张红萍. 欧美山洪灾害防治研究进展及实践 [J]. 中国水利, 2012(23): 16-17.
- [30] 邱瑞田, 黄先龙, 褚明华, 等. 2015年全国山洪灾害防治工作进展 [J]. 中国防汛抗旱, 2016, 26(1): 41-44.
- [31] 何秉顺, 常清睿, 凌永玉. 日本中小河流山洪预报研究 [J]. 中国防汛抗旱, 2016, 26(6): 51-56.
- [32] 郭良, 唐学哲, 孔凡哲. 基于分布式水文模型的山洪灾害预警预报系统研究及应用 [J]. 中国水利, 2007(14): 38-41.
- [33] 包红军, 李致家, 王莉莉, 等. 基于分布式水文模型的小流域山洪预报方法与应用 [J]. 暴雨灾害, 2017, 36(2): 156-163.
- [34] 蔡维英, 刘兴朋, 张继权. 基于分布式SCS模型的山地景区山洪灾害模拟研究 [J]. 灾害学, 2016, 31(2): 15-18.
- [35] 刘希林, 莫多闻. 泥石流风险及沟谷泥石流风险度评价 [J]. 工程地质学报, 2002, 10(3): 266-273.
- [36] United Nations. Department of Humanitarian Affairs. Internationally agreed glossary of basic terms related to disaster management [Z], 1992, DNA/93/36, Geneva.
- [37] 史培军. 四论灾害系统研究的理论和实践 [J]. 自然灾害学报, 2005, 24(6): 1-7.
- [38] 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.
- [39] 李雪, 李井冈, 刘小利, 等. 三峡库首区滑坡空间分布特征分析及危险性评价 [J]. 大地测量与地球动力学, 2016, 36(7): 630-634.
- [40] 罗真富, 蒲达成, 谢洪斌, 等. 基于GIS和信息量法的泥石流流域滑坡危险性评价 [J]. 中国安全科学学报, 2011, 21(11): 144-150.
- [41] Youssef A M, Pradham 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.
- [42] ZENG Z, TANG G, LONG D, et al. A cascading flash flood guidance system: development and application in Yunnan Province, China[J]. *Natural Hazards*, 2016, 84(3): 2071–2093.
- [43] Zelenáková M, Gaňová L, Purc P, et al. Methodology of flood risk assessment from flash floods based on hazard and vulnerability of the river basin [J]. *Natural Hazards*, 2015, 79(3): 2055–2071.
- [44] 方秀琴, 王凯, 任立良, 等. 基于 GIS 的江西省山洪灾害风险评估与分区[J]. *灾害学*, 2017, 32(1): 111–116.
- [45] WANG X, NIU R. Spatial forecast of landslides in Three Gorges based on spatial data mining[J]. *Sensors*, 2009, 9(3): 2035–2061.
- [46] WANG Z, LAI C, CHEN X, et al. Flood hazard risk assessment model based on random forest[J]. *Journal of Hydrology*, 2015, 527: 1130–1141.
- [47] 陶诗言. 中国之暴雨[M]. 北京: 科学出版社, 1980.
- [48] Collier C G. Flash flood forecasting: What are the limits of predictability[J]. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 2007, 133(622): 3–23.
- [49] Rossa A M, Guerra F L D, Borga M, et al. Radar-driven high-resolution hydro-meteorological forecasts of the 26 September 2007 Venice flash flood[J]. *Journal of Hydrology*, 2010, 394(1/2): 230–244.
- [50] 赵玲玲, 刘昌明, 吴潇潇, 等. 水文循环模拟中下垫面参数化方法综述[J]. *地理学报*, 2016, 71(7): 1091–1104.
- [51] Yatheendradas S, Wagener T, Gupta H, et al. Understanding uncertainty in distributed flash flood forecasting for semiarid regions [J]. *Water Resources Research*, 2008, 44(5): 61–74.
- [52] 李昌志, 张森, 张启义, 等. 广西玉林市玉州区山洪灾害分析评价[J]. *中国防汛抗旱*, 2016, 26(4): 14–21.
- [53] 张大伟, 权锦, 马建明, 等. 基于非恒定流模型的山洪沟水面线计算[J]. *水利水电技术*, 2016, 47(2): 123–127.
- [54] 贺治国, 翁浩轩, 高冠, 等. 植被群影响下动床洪水数值模拟研究[J]. *应用基础与工程科学学报*, 2017(1): 17–27.
- [55] CAO Z X, XIA C C, Pender G, et al. Shallow water hydro-sediment-morphodynamic equations for fluvial processes [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2017, 143(5): 02517001.
- [56] Scorzini A R, Frank E. Flood damage curves: new insights from the 2010 flood in Veneto, Italy [J]. *Journal of Flood Risk Management*, 2015, 10(3): 381–392.
- [57] Merz B, Kreibich H, Thielen A, et al. Estimation uncertainty of direct monetary flood damage to buildings [J]. *Natural Hazards & Earth System Sciences*, 2004, 4(1): 153–163.
- [58] Haehnel R B, Daly S F. Maximum impact force of woody debris on floodplain structures [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2004, 130(2): 112–120.
- [59] 肖诗云, 杨留娟, 岳斌, 等. 山区乡村房屋模型洪水冲击试验研究[J]. *防灾减灾工程学报*, 2010, 30(3): 235–240.
- [60] 许仁义, 钟德钰, 吴保生. 山洪演进模拟中的建筑物附加阻力[J]. *水利学报*, 2012(S2): 74–78.
- [61] 曹留伟, 刘曙光, 钟桂辉. 基于结构及人身安全的住宅建筑洪水破坏分析[J]. *自然灾害学报*, 2013, 22(1): 67–74.
- [62] 张明达, 李蒙, 戴丛蕊, 等. 基于 FloodArea 模型的云南山洪淹没模拟研究[J]. *灾害学*, 2016, 31(1): 78–82.

Research Progress on the Prevention of Flash Flood Disasters

DU Jun^{1,2}, REN Hongyu^{1,2}, LIN Qingming^{1,2} and XU Jinxin^{1,2}

(1. *Department of Soil and Water Conservation, Yangtze River Scientific Research Institute, Wuhan 430010, China;*

2. *Research center on mountain torrent and geologic disaster prevention, Ministry of Water Resources, Wuhan 430010, China)*

Abstract: The review of current situations and differences between the domestic and foreign researches on flash flood disaster prevention has been made in order to provide a reference on understanding the domestic prevention level and the key points in the future work based on the three aspects, i. e. prevention and control idea, forecast and early warning and risk assessment. The paper concludes that the measures of insurance and landuse management had been paid little attention in the domestic prevention and control idea comparing with the advanced countries, thus the corresponding contents should be explored and implemented in the future. Besides, there is still a gap needed to be filled on the accuracy rate of flash flood forecast and early warning with the other advanced countries because of the undeveloped software and hardware system on local rainfall monitoring and forecast inner mountain area and the highly simplified hydrological model. The risk assessment based on cause analysis method, which has been used widely in the world, is no longer the bottleneck to the work of flash flood prevention. However, the development of risk assessment based on process analysis method, which has better mathematic expression on flash flood disaster processes, can still hardly meet the actual needs of prevention work, and this part should be strengthened in the future study.

Key words: Flash flood; disaster prevention; research progress; forecast and early warning; risk assessment