

•科学前沿•

DOI:10.12454/j.jsuese.202400218



本刊网刊

# 极端降雨与强人类活动复合作用下山洪灾害 研究构想和成果展望

王协康

(四川大学 山区河流保护与治理全国重点实验室, 四川 成都 610065)

**摘要:** 全球气候变暖导致山丘区极端降雨事件多发, 降雨强度与量级不断突破区域历史极值, 同时叠加区域脆弱环境和强人类活动影响, 致使山洪形成及演进致灾成因复杂多变, 由此加重了暴雨山洪引发的人员伤亡和财产损失。山洪灾害具有显著的自然和社会双重属性, 其形成发展是山丘区环境孕灾承灾因子复合作用的结果。中国山丘区局地气候独特, 地质地貌类型众多, 溪河水系复杂, 人类活动影响突出。大量重大山洪灾害事件表明, 极端降雨诱发的山洪过程及致灾特征各异, 给山洪灾害预报预警防御造成极大困扰, 山洪灾害研究仍是当前重大自然灾害防控的重点和难点。长期以来, 中国山洪灾害研究多偏重于雨水情时空变化规律, 着重研究降雨影响的山洪洪水淹没特征, 据此推算山洪灾害防治区的临界雨量与水位阈值, 在山洪灾害防治实践中取得了较为显著的成效, 山洪灾害事件导致的人员伤亡数总体显著下降。然而, 受山丘区降雨特征、下垫面组成、溪流形态及人类活动等多因素影响, 山洪洪水形成演进时挟带大量泥沙, 从而表现为山洪水沙、山洪泥石流等物理过程, 导致的局地冲毁、淤埋、淹没等致灾成因及阈值与山洪洪水致灾也存在本质差异, 这也是近年来中国重大山洪灾害事件多发的主要原因。针对极端降雨诱发多类型山洪形成演进与强人类活动复合作用致灾防御难题, 亟需利用气象学、水文学及河流动力学等多学科知识, 采用现场调查、物理试验、数值模拟及理论分析相结合的方法, 从传统单一的山洪洪水灾害研究扩展为全类型山洪灾害(山洪洪水灾害、山洪水沙灾害、山洪泥石流灾害)研究, 开展全类型山洪引发的冲毁—淤埋—淹没等复合致灾研究, 系统探究中国重灾省区重大山洪灾害事件的强降水时空演变规律, 剖析极端降雨与强人类活动复合作用下多类型山洪形成及其演进致灾范围、规模特征, 揭示气象水文溪流响应与强人类活动影响的不同类型山洪灾害致灾成因, 建立气象水文水沙动力过程模拟方法, 辨识山丘区流域全类型山洪冲毁—淤埋—淹没风险, 提出不同类型山洪灾害易发区识别方法, 构建山洪洪水灾害、山洪水沙灾害及山洪泥石流灾害分区分级多指标预警防御方法。该研究有利于提升中国山洪灾害理论技术研究水平, 进一步完善中国山洪灾害防治对策。

**关键词:** 山区流域; 极端降雨; 强人类活动; 山洪灾害; 致灾成因

**中图分类号:** TV122.1; TV143

**文献标志码:** A

**文章编号:** 2096-3246(2024)04-0001-09

近年来, 受极端降雨叠加脆弱下垫面及强人类活动作用, 中国特大暴雨诱发的群死群伤山洪灾害事件频发。例如: 2020年6月12日, 贵州省正安县碧峰镇发生特大暴雨事件, 碧峰镇最大1 h降雨量为163.3 mm, 为贵州省有气象记录以来的最大值, 暴雨山洪引发枯木阻塞桥涵、淤床洪水漫滩淹没致灾, 死亡、

失联13人。2020年6月26日, 四川冕宁暴雨山洪引发泥沙淤床、河流改道、洪水漫滩造成9 880余人受灾, 死亡、失联22人, 经济损失7.38亿元。2021年7月18日18时至21日0时, 河南郑州突然出现持续性强降雨过程, 全市普降大暴雨、特大暴雨, 在此期间, 郑州市单日降雨量达552.5 mm, 最大1 h降雨量达201.9 mm

收稿日期:2024-03-29 修回日期:2024-05-09 网络出版日期:2024-05-15

基金项目:国家自然科学基金重点项目(52239006); 国家自然科学基金委员会-中华人民共和国水利部-中国长江三峡集团有限公司长江水科学研究联合基金项目(U2340201)

作者简介:王协康(1970—), 男, 研究员。研究方向:水力学及河流动力学。E-mail: wangxiakang@scu.edu.cn

(7月20日16时至17时),突破中国大陆小时降雨量历史极值(198.5 mm,河南林庄,1975年8月5日),郑州国家观测站最大日降雨量达624.1 mm,接近该站年平均降雨量641 mm,相当于一天下了将近一年的雨量。其中,河南荥阳王宗店暴雨山洪引起村委会临河断面洪水陡涨7.15 m,淹没洪水造成重大人员伤亡和财产损失。2021年8月12日,湖北省随州市随县柳林镇发生极端降雨和洪水淹没集镇,最大降雨量1 h和3 h分别达105 mm、374 mm,淹没洪水造成25人死亡、失联。2022年7月11—12日,四川省绵阳市平武县木座藏族乡因短历时极端强降雨导致“7·12”黑水沟山洪泥石流灾害,上游强降雨引发山洪及沟道冲刷和泥石流淤积,叠加桥涵阻塞壅水等影响,致使水位抬高、山洪泥石流改道冲毁居民房屋(图1),造成18人死亡、失联。



图1 2022年四川平武“7·12”山洪灾害

Fig. 1 “7·12” flash flood disaster in Pingwu, Sichuan, 2022

全球气候变暖环境影响下,极端降雨及其诱发的山洪灾害事件频发、多发,世界上已有100多个国家将山洪灾害损失排在自然灾害前两位。Jonkman<sup>[1]</sup>分析1975—2002年全球1 816场洪水灾害数据,洪水造成的人员死亡17.5万人,灾害影响超2.2亿人,其中,河流洪灾致死率为0.49%,山洪灾害致死率达3.6%。Wallemacq等<sup>[2]</sup>分析联合国防灾减灾署(UNDRR)1998—2017年自然灾害资料表明,暴雨诱发洪涝成灾28.2%,近20年间气象水文灾害死亡人数达1 300万人,受影响居民达4.4亿人。目前,中国山洪灾害防治区总面积为 $386 \times 10^4 \text{ km}^2$ ,其中:重点防治区面积为 $120 \times 10^4 \text{ km}^2$ ,约17万个村,6 746万人;一般防治区面积为 $266 \times 10^4 \text{ km}^2$ ,约40万个村,2.3亿人<sup>[3]</sup>。Liu等<sup>[4]</sup>分析中国2000—2015年的山洪灾害事件表明,四川、云南、贵州等地是中国山洪灾害的主要成灾省区。涂勇等<sup>[5]</sup>分析中国2011—2019年全国山洪灾害事件表明,四川、云南、湖南、贵州、广西、陕西、广东、甘肃、河北、福建山洪灾害导致的死亡人员占全国的69%。张晓蕾等<sup>[6]</sup>结合

中国历史山洪灾害事件,指出全国高风险区主要分布于6个区域,其中,四川、云南、贵州、广西、陕西等地较多且频发。Blöschl等<sup>[7]</sup>基于1960—2010年欧洲3 738个河流测站水文气象资料分析,发现气候变化已导致除欧洲南部外所有地区极端降雨洪灾显著增加。Rentschler等<sup>[8]</sup>指出,自1985年以来,受城镇化和极端气候影响,东亚地区的乡村/城镇洪水高风险区增加了60%。Ombadi等<sup>[9]</sup>指出,全球大约有四分之一的人口生活在山丘区,全球变暖山丘区强降雨趋势增加,频繁引发洪水灾害,且极端洪水发生的可能性大大升高。练继建等<sup>[10]</sup>基于山洪灾害研究指出,复杂下垫面的降雨径流关系、山洪灾害形成机理及山洪灾害防御等仍是当前世界各国防洪减灾研究的热点问题。由此可见,极端降雨与强人类活动复合影响下山洪灾害防治研究仍存在短板和薄弱环节,亟需开展深入系统研究。

## 1 暴雨山洪形成致灾成因及防御研究进展

暴雨山洪灾害具有自然和社会双重属性,其形成发展致灾受降雨、下垫面和人类活动等多因素复合作用,山洪易灾区是由山丘区暴雨山洪形成演进与人类活动区叠加的结果(图2)。王协康<sup>[11]</sup>将暴雨山洪定义为山丘区小流域短历时降雨诱发沟床发生特大洪水或水位/泥位急剧上涨(沟床可能伴随剧烈冲刷)的洪流。暴雨山洪本质上是降雨在山丘区小流域的产汇流过程,暴雨山洪致灾影响因素包括自然条件和不合理的强人类活动。总结归纳山洪形成致灾成因及防御研究进展是当前山洪灾害有效防控研究的重要前提。

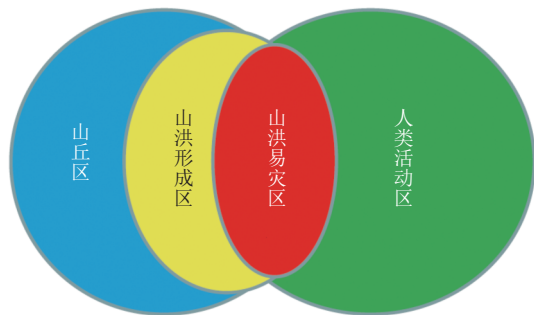


图2 暴雨山洪形成演进与人类活动复合影响易灾区示意图  
Fig. 2 Schematic diagram of the disaster area caused by the evolution of torrential rain and flash flood formation and the compound impact of human activities

### 1.1 暴雨山洪形成致灾成因

短时强降水是诱发暴雨山洪的关键因子,触发的天气过程具有中小尺度、突发性等特点,极端降雨诱发的暴雨山洪成因复杂。如:Gaume等<sup>[12]</sup>通过评述欧洲7个地区1946—2007年间578场山洪事件,发现局

地降雨强度一般在几小时内超过100 mm。2004年8月16日发生在英国威尼斯流域博斯卡斯尔镇的暴雨山洪事件,小流域集水面积约20 km<sup>2</sup>,5 h降雨量达200 mm,洪水在几分钟内陡涨1.0~1.5 m,约1.5 h内小镇洪水漫滩3.0 m<sup>[13]</sup>。2005年6月10日,黑龙江省宁安市沙兰镇沙兰河上游局部地区突降200年一遇暴雨,3 h降雨量达120 mm,此次形成的特大山洪造成117人死亡。Garambois等<sup>[14]</sup>通过分析地中海中北部地区的11个中小流域的60场山洪灾害,发现中小尺度天气和地形条件对西北部和东南部区域的山洪激发降雨阈值具有突出影响。Abdel-Fattah等<sup>[15]</sup>明确指出暴雨山洪形成依赖于气象条件和下垫面条件的气象水文响应过程。李强等<sup>[16]</sup>认为局地性强降水是大尺度天气系统和中小尺度天气系统配合形成的,开展短时强降水事件研究,可对短时强降水落区和时效的灾害防御提供支撑。熊俊楠等<sup>[17]</sup>分析中国西南地区1960—2015年山洪灾害数据,得出山洪灾害影响因素具有突出的空间差异性,各类因素的影响大小依次为降雨因子、人类活动因子、地表环境因子,其中降雨因子中1 h降雨量对山洪的影响最强。Min等<sup>[18]</sup>采用WRF模式研究了天山地形对伊犁河流域一次极端降雨事件的影响,指出地形通过影响风场和局部水汽输送导致区域降水量变化。Dano<sup>[19]</sup>采用层次分析方法探讨了沙特阿拉伯Dammam地区山洪灾害成灾因子,表明降雨条件的影响占比32%,但流域下垫面及人类活动也是重要影响因素。

暴雨山洪灾害突发性强,破坏力大,国内外的典型山洪灾害事件表明,暴雨山洪致灾成因复杂,一方面受流域面积、下垫面及强人类活动等因素综合影响,同时山洪挟带的泥沙、枯枝漂木、车辆淤堵桥涵抬高水位,以及特殊河段(干支交汇河段、宽窄相间河段、弯曲河段、陡变缓河段等)剧烈冲淤也频繁放大山洪灾害规模<sup>[20]</sup>。如:谢洪等<sup>[21]</sup>分析四川甘孜康定城区1995年6月15日、7月3日和7月7日连续3次遭受山洪灾害的关键原因是强降雨洪水挟带大量泥沙淤床,城区处于河流交汇区和占滩建房等不当的强人类活动。2001年7月28日,四川马边极端降雨引发挖黑河与先家普河山洪携带大量泥沙在两河交汇处淤积,河床抬高7.5 m,致使50年一遇洪峰达到了千年一遇洪水位,进而淹没波罗水电站发电厂房,造成经济损失超2.0亿元<sup>[20]</sup>。Fenn等<sup>[13]</sup>探讨了2004年英国博斯卡斯尔镇“8·16”山洪灾害,指出受支流汇合、干流大比降和桥涵枯枝阻塞综合影响,灾害造成建筑冲毁和几十辆车被冲进大海,超千余人受洪灾影响。李细生等<sup>[22]</sup>分析湖南“5·31”特大暴雨山洪导致88人死亡、33人失踪的原因,认为是受龙山河暴雨洪水陡涨,

河道堵塞及居民水患意识薄弱的综合影响。2010年8月8日0时12分,甘肃省舟曲县城区及上游村庄遭受特大山洪泥石流流灾害,灾害造成1 467人遇难和298人失踪,灾后调查表明,致灾原因之一是舟曲县城快速城市化过程中部分建筑占据了山洪进入白龙江的通道<sup>[23]</sup>。Kotlyakov等<sup>[24]</sup>调查发现克雷姆斯克镇“7·6”山洪灾害主要为挟沙山洪在局部河段淤堵抬升水位成灾。Mahmood等<sup>[25]</sup>分析苏丹Khartoum State城镇2013—2014年发生的特大山洪灾害(48人死亡,21万人受灾),发现极端降雨及Khartoum State城镇位于河流交汇区是致灾的重要因素。Diakakis等<sup>[26]</sup>利用地空观测数据反演希腊曼德拉镇“11·15”山洪灾害过程,致灾表现为两河汇口区水流顶托及卵石淤堵桥涵引起水位大幅抬升淹没冲毁成灾。宋云天等<sup>[27]</sup>以北京“7·21”山洪为例,认为泥沙输移显著影响最高洪水位、最大流速等洪水特征值空间分布,放大了局部河段山洪危险。何秉顺等<sup>[28]</sup>基于2019年广西凌云县“6·17”山洪灾害调查,认为非山洪灾害监测预警区和流动人员缺乏山洪灾害避险自救防御是此次致灾的主要原因。孙桐等<sup>[29]</sup>反演分析了中都河流域“8·16”山洪致灾机理,发现是当地居民围滩造地侵占河道,河床束窄引发水位陡涨致灾。徐少军等<sup>[30]</sup>基于调查指出湖北柳林镇“8·12”特大山洪灾害成因主要是极端降雨和浪河干流桥梁、河道两侧房屋、河滩内厂房及支流太平河镇区段河道改暗涵等强人类活动的影响。陈颖冰等<sup>[31]</sup>基于房山区“23·7”特大暴雨山洪灾害现场勘察,指出道路房屋挤占行洪空间、跨沟涵管阻水导致的壅水致灾效应显著。郝思佳等<sup>[32]</sup>采用水文水动力模拟和灾后调查表明,桥梁阻塞、路基壅水溃决洪水对河南王宗店“7·20”山洪致灾影响突出。尚全民等<sup>[33]</sup>探讨了2020年贵州正安“6·12”、四川冕宁“6·26”、陕西洛南“8·6”3处山洪灾害,认为特大暴雨引发超标山洪及河势地形等因素导致灾害放大效应。何秉顺<sup>[34]</sup>针对2021年河南郑州“7·20”特大暴雨灾害的山区4市(新密、荥阳、登封、巩义)在山洪灾害防御预案、山洪风险认知、山洪灾害防治体系运行等方面进行了较为系统的分析,指出山洪灾害防御工作亟需进一步完善。王协康等<sup>[35]</sup>分析指出暴雨山洪灾害事件成灾模式主要表现为“暴雨—洪水—水位陡涨”型山洪洪水灾害、“暴雨—洪水—泥沙—沟床响应”型山洪泥沙灾害及“暴雨—泥石流—冲毁淤埋”型山洪泥石流灾害,其中,水沙耦合作用及人类活动影响显著放大了山洪灾害规模及人员伤亡和财产损失。

## 1.2 暴雨山洪灾害防御方法

目前,国内外山洪灾害防御较多采用基于水文

水动力模型山洪预警和临界雨量/水位的预警方法。中国山洪灾害预警一般以降雨量/水位为预警指标,如水位-流量反推法<sup>[36]</sup>、成灾水位-流量-降雨关系的雨量预警<sup>[37]</sup>。孙东亚等<sup>[38]</sup>指出中国当前初步形成了符合中国国情的山洪灾害防御方法,但整体上尚处于初级阶段。刘昌军等<sup>[39]</sup>针对小流域暴雨山洪精细模拟问题,提出小流域时空变源混合产流模型,构建了暴雨山洪分布式模拟模型。Kirstetter等<sup>[40]</sup>结合自适应网格技术研究了2维圣维南方程组对山洪洪水的模拟应用。受流域侵蚀产沙影响,山洪形成及其演进具有突出的挟沙特征,甚至演变为山洪泥石流输移,因而亟需研发考虑泥沙输移的山洪模拟方法。Chen等<sup>[41]</sup>模拟分析了马边河波罗电站山洪过程,发现山洪携带的泥沙输移对洪水位抬升具有显著作用。闫旭峰等<sup>[42]</sup>基于山洪水沙模拟揭示了宽窄相间河段泥沙淤床及水位陡增致灾特性。Yang等<sup>[43]</sup>分析了2018年四川“8·16”中都河洪水过程,指出泥沙变化及河床变形对洪水灾害规模具有显著影响。Yussouf等<sup>[44]</sup>指出暴雨山洪预报主要取决于准确的降雨和精细的下垫面参数,这种水文气象因素耦合响应过程亟需气象学和水文学研究者联合研究,从而为暴雨山洪灾害防治研究提供扎实的科学依据。Gourley等<sup>[45]</sup>指出美国山洪灾害受极端降雨和流域下垫面的水文响应及人类活动复合作用,因而山洪灾害防御研究亟

需必将同时考虑气象水文响应过程、人类活动易灾区识别及灾害预警研究。叶金印等<sup>[46]</sup>基于土壤含水量和降雨重现期变化,提出了山洪灾害气象风险预警方法。朱锡松等<sup>[47]</sup>指出受降雨、下垫面等影响,不同类型河流区域的山洪灾害成灾机制存在显著差异,为构建适用的山洪灾害防御方法,当前的山洪灾害调查评价危险分区方法亟需按致灾成因做进一步完善。王协康等<sup>[48]</sup>根据中都河小流域及白沙河小流域山洪灾害特点,充分考虑雨-水-沙变化诱发多类型山洪致灾的研究思路,提出山洪洪水灾害预警区、山洪水沙灾害预警区和山洪泥石流灾害预警区的防御方法。此外,山洪沟的工程治理也是山洪灾害防御的有效手段。何秉顺等<sup>[49]</sup>认为山洪沟治理的工程措施需针对有城镇、居民点、基础设施等的重要河段,并以岸坡防护和消能防冲为治理重点。

## 2 极端降雨与强人类活动复合作用下暴雨山洪灾害研究构想

### 2.1 亟需解决的关键科学技术问题

针对中国山洪灾害频发、多发及灾害损失巨大的重大难题,结合不同区域气象水文溪河响应及人类活动影响的山洪洪水灾害、山洪水沙灾害、山洪泥石流灾害本质差异,暴雨山洪灾害防控研究亟需解决的关键科学技术问题(图3)主要包括:



图3 拟解决的关键科学技术问题

Fig. 3 Key scientific and technical issues to be addressed

1) 中国重灾省区极端降雨时空演变规律。全球变暖引起的极端降雨时空变化主要取决于中小尺度天气系统变化,制约山洪灾害的致灾范围、致灾程度及发生时刻,系统探究中国重灾省区山洪灾害事件的强降水时空演变规律,可为山区流域气象水文过程和暴雨山洪形成研究提供科学依据。

2) 极端降雨与强人类活动复合作用下的山洪灾

害致灾成因。极端降雨作用下,不同流域大小及下垫面形成山洪量级、过程及致灾成因千差万别。系统剖析中国特大暴雨山洪灾害案例,揭示极端降雨与强人类活动复合作用下山洪洪水、山洪水沙及山洪泥石流等不同类型暴雨山洪冲毁、淤埋、淹没等致灾成因,可为构建山洪灾害防御技术提供理论支撑。

3) 极端降雨—水文—溪河响应致灾过程评估方

法。基于极端降雨作用下山洪形成—演进—致灾全过程研究, 辨识和评估人类活动区山洪灾害风险, 识别山洪灾害易发区, 构建适用于不同区域的重大山洪灾害防御方法, 为中国重灾省区提供防灾减灾决策建议。

## 2.2 亟需开展的重点研究内容

1) 中国重灾省区山洪灾害典型成灾特征研究: 结合文献收集、现场调查及理论分析, 厘清山洪灾害类型及其致灾因子, 剖析特大暴雨山洪灾害成灾特征。

2) 中国重灾省区极端降雨时空演变规律研究: 分析山洪致灾强降水的精细化演变规律; 揭示中国特大山洪灾害事件的强降水多尺度发生发展机理; 建立面向暴雨山洪灾害事件的强降水短时预报技术。

3) 极端降雨与强人类活动复合作用下山洪灾害致灾成因研究: 结合典型山洪灾害案例调查、物理试验、数值模拟及理论分析方法, 揭示极端降雨与强人类活动复合作用下山洪洪水、山洪水沙及山洪泥石流等不同类型暴雨山洪引发的冲毁、淤埋、淹没致灾成因, 阐明枯枝漂木/车辆等影响的山洪致灾放大效应。

4) 极端降雨—水文—溪河响应致灾过程评估方法: 结合极端降雨—水文—溪河响应的暴雨山洪过程特征和强人类活动区防灾对象, 提出山丘区暴雨山洪灾害易发区早期识别方法, 构建相适用的防灾减灾方法。

## 2.3 新问题与新方法

针对中国重灾省区山洪灾害致灾特点及当前防灾减灾面临的迫切问题, 着重从特大暴雨山洪灾害成灾特征、致灾成因及灾害防御方面开展研究, 创新方面主要表现在:

1) 机理研究创新: 从单一山洪洪水灾害研究扩展为全类型山洪灾害(山洪洪水灾害、山洪水沙灾害、山洪泥石流灾害)研究, 突出山丘区极端降雨与强人类活动影响, 将传统山洪洪水淹没致灾研究拓展为冲毁、淤埋、淹没、多类型多要素致灾成因研究。

2) 技术研究创新: 耦合气象学、水文学及河流动力学多学科知识, 建立气象—水文—水沙动力过程模拟方法, 辨识山丘区流域暴雨山洪冲毁、淤埋、淹没风险, 提出山洪灾害易发区识别方法, 构建山洪洪水灾害、山洪水沙灾害及山洪泥石流灾害分区、分级多指标预警防御方法。

## 3 研究展望

聚焦中国自然灾害综合防控国家重大战略需求, 针对重灾省区在山洪灾害防治理论、技术与管理方面的薄弱环节, 掌握重灾省区山洪灾害成灾特征, 揭

示重灾省区气象水文溪河响应的不同类型山洪灾害致灾成因; 建立短时强降水预报技术、气象水文水动力模拟模型及易发区识别方法和山洪灾害分区预警指标, 构建强人类活动区的暴雨山洪灾害防灾减灾方法, 提出基于中国山洪灾害重灾省区极端降雨与强人类活动复合影响的山洪灾害防御对策, 提高中国山洪灾害防御理论技术研究水平。研究展望主要包括:

1) 剖析中国重灾省区山洪灾害典型成灾模式及其关键作用因子。

2) 揭示中国重灾省区诱发暴雨山洪灾害的极端降雨时空变化规律及其中小尺度天气发生、形成机理, 建立山洪灾害易发区短时强降水预报技术。

3) 阐明中国重灾省区极端降雨与强人类活动复合作用下不同类型暴雨山洪引发的冲毁、淤埋、淹没灾害致灾成因。

4) 识别中国重灾省区典型孕灾环境及山洪灾害易发区, 提出山丘区暴雨山洪灾害易发区早期识别方法, 构建基于极端降雨—水文—溪河响应过程的山洪灾害防御方法。

## 参考文献:

- [1] Jonkman S N. Global perspectives on loss of human life caused by floods[J]. *Natural Hazards*, 2005, 34(2): 151–175.
- [2] Wallemacq P, House R. Economic losses, poverty and disasters 1998—2017[R]. Undrr and Cred, Geneva, 2018.
- [3] Sun Dongya. Some thoughts on the construction of national mountain torrent disaster prevention and control projects in the new period[J]. *China Flood & Drought Management*, 2020, 30(S1): 18–21. [孙东亚. 新时期全国山洪灾害防治项目建设若干思考[J]. *中国防汛抗旱*, 2020, 30(增刊1): 18–21.]
- [4] Liu Yesen, Yang Zhenshan, Huang Yaohuan, et al. Spatiotemporal evolution and driving factors of China's flash flood disasters since 1949[J]. *Science China Earth Sciences*, 2018, 61(12): 1804–1817.
- [5] Tu Yong, Wu Zebin, He Bingshun. Analysis on the characteristics of mountain torrents in China from 2011 to 2019[J]. *China Flood & Drought Management*, 2020, 30(S1): 22–25. [涂勇, 吴泽斌, 何秉顺. 2011—2019年全国山洪灾害事件特征分析[J]. *中国防汛抗旱*, 2020, 30(增刊1): 22–25.]
- [6] Zhang Xiaolei, Li Changzhi, Sun Dongya, et al. Study on risk zoning of mountain torrents in China based on investigation and evaluation of big data[J]. *China Flood & Drought Management*, 2020, 30(S1): 61–63. [张晓蕾, 李昌志, 孙东亚, 等. 基于调查评价大数据的全国山洪灾害风险分区研究[J].

中国防汛抗旱,2020,30(增刊1):61–63.]

- [7] Blöschl G, Hall J, Viglione A, et al. Changing climate both increases and decreases European River floods[J]. *Nature*, 2019, 573(7772):108–111.
- [8] Rentschler J, Avner P, Marconcini M, et al. Global evidence of rapid urban growth in flood zones since 1985[J]. *Nature*, 2023, 622(7981):87–92.
- [9] Ombadi M, Risser M D, Rhoades A M, et al. A warming-induced reduction in snow fraction amplifies rainfall extremes[J]. *Nature*, 2023, 619:305–310.
- [10] Lian Jijian, Yang Weichao, Xu Kui, et al. Advances and prospect of flash flood forecasting[J]. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2018, 37(11):1–14. [练继建, 杨伟超, 徐奎, 等. 山洪灾害预警研究进展与展望[J]. *水力发电学报*, 2018, 37(11):1–14.]
- [11] 王协康. 暴雨山洪形成及其过程模拟技术[M]. 北京: 科学出版社, 2022.
- [12] Gaume E, Bain V, Bernardara P, et al. A compilation of data on European flash floods[J]. *Journal of Hydrology*, 2009 (367):70–78.
- [13] Fenn C R, Bettess R, Golding B, et al. The boscastle flood of 16 August 2004: Characteristics, causes and consequences[C]// Proceedings of 40th defra flood and coastal management conference. Heslington: University of York, 2005.
- [14] Garambois P A, Larnier K, Roux H, et al. Analysis of flash flood-triggering rainfall for a process-oriented hydrological model[J]. *Atmospheric Research*, 2014, 137:14–24.
- [15] Abdel-Fattah M, Saber M, Kantoush S A, et al. A hydrological and geomorphometric approach to understanding the generation of Wadi flash floods[J]. *Water*, 2017, 9(553):1–27.
- [16] Li Qiang, Zhang Yaping, He Yue, et al. Diurnal variation of the short-duration strong rainfall events in Sichuan and Chongqing during the main flood season[J]. *Journal of Southwest University(Natural Science Edition)*, 2018, 40(7):144–152. [李强, 张亚萍, 何跃, 等. 川渝盆地主汛期短时强降雨事件日变化特征研究[J]. *西南大学学报(自然科学版)*, 2018, 40(7):144–152.]
- [17] Xiong Junnan, Li Jin, Cheng Weiming, et al. Spatial-temporal distribution and the influencing factors of mountain flood disaster in southwest China[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2019, 74(7):1374–1391. [熊俊楠, 李进, 程维明, 等. 西南地区山洪灾害时空分布特征及其影响因素[J]. *地理学报*, 2019, 74(7):1374–1391.]
- [18] Min Yufang, Huang Wanlong, Ma Minjin, et al. Simulations in the topography effects of Tianshan Mountains on an extreme precipitation event in the Ili River valley, China[J]. *Atmosphere*, 2021, 12(6):750.
- [19] Dano U L. An AHP-based assessment of flood triggering factors to enhance resiliency in Dammam, Saudi Arabia[J]. *GeoJournal*, 2022, 87(3):1945–1960.
- [20] Wang Xiekang, Liu Xingnian, Zhou Jiawen. Research framework and anticipated results of flash flood disasters under the mutation of sediment supply[J]. *Advanced Engineering Sciences*, 2019, 51(4):1–10. [王协康, 刘兴年, 周家文. 泥沙补给突变下的山洪灾害研究构想和成果展望[J]. *工程科学与技术*, 2019, 51(4):1–10.]
- [21] Xie Hong, Zhong Dunlun, Wang Shige, et al. Flood causes in town proper of Kangding in 1995[J]. *Journal of Mountain Research*, 1997, 15(2):129–131. [谢洪, 钟敦伦, 王士革, 等. 1995年康定城区洪灾成因分析[J]. *山地研究*, 1997, 15(2):129–131.]
- [22] Li Xisheng, Liu Hongnian, Zhang Hua, et al. Cause and countermeasure of the heavy rain flush flood in Hunan Province on 31 May[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2006, 13(4):68–71. [李细生, 刘红年, 张华, 等. 湖南“5·31”特大暴雨山洪成因及对策[J]. *水土保持研究*, 2006, 13(4):68–71.]
- [23] Liu Chuanzheng, Miao Tianbao, Chen Hongqi, et al. Basic feature and origin of the “8·8” mountain torrent-debris flow disaster happened in Zhouqu County, Gansu, China, Aug. 8, 2010[J]. *Geological Bulletin of China*, 2011, 30(1):141–150. [刘传正, 苗天宝, 陈红旗, 等. 甘肃舟曲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.]
- [24] Kotlyakov V M, Desinov L V, Dolgov S V, et al. Flooding of July 6–7, 2012, in the town of Krymsk[J]. *Regional Research of Russia*, 2013, 3(1):32–39.
- [25] Mahmood M I, Elagib N A, Horn F, et al. Lessons learned from Khartoum flash flood impacts: An integrated assessment[J]. *Science of the Total Environment*, 2017, 601/602:1031–1045.
- [26] Diakakis M, Andreadakis E, Nikolopoulos E I, et al. An integrated approach of ground and aerial observations in flash flood disaster investigations. The case of the 2017 Mandra flash flood in Greece[J]. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 2019, 33:290–309.
- [27] Song Yuntian, Zeng Xin, Zhang Yu, et al. Effect of sediment transport on the temporal and spatial characteristics of flash

- floods:A case study of “7·21” flood in Beijing[J].*Journal of Tsinghua University(Science and Technology)*,2019,59(12):990–998.[宋云天,曾鑫,张禹,等.泥沙输移对山洪特征值时空分布的影响——以北京“7·21”山洪为例[J].*清华大学学报(自然科学版)*,2019,59(12):990–998.]
- [28] He Bingshun,Zhang Dawei.Investigation and thinking on “June 17th, 2019” mountain torrential disaster in Lingyun County,Guangxi[J].*China Flood & Drought Management*,2020,30(S1):26–30.[何秉顺,张大伟.广西凌云县“2019.6.17”山洪灾害调研与思考[J].*中国防汛抗旱*,2020,30(增刊1):26–30.]
- [29] Sun Tong,Yang Po,Xu Zexing,et al.Analysis on the disaster mechanism of “8·16” flash flood in Zhongdu River Basin[J].*Advanced Engineering Sciences*,2021,53(1):132–138.[孙桐,杨坡,许泽星,等.中都河流域“8·16”山洪致灾机理分析[J].*工程科学与技术*,2021,53(1):132–138.]
- [30] Xu Shaojun,Jiang Yansheng,Jiang Hao,et al.Investigation and reflection on “2021.8.12” flood disaster in Liulin Town, Sui County,Hubei Province[J].*China Flood & Drought Management*,2022,32(2):54–58.[徐少军,江炎生,江浩,等.湖北省随县柳林镇“2021.8.12”洪灾调研与思考[J].*中国防汛抗旱*,2022,32(2):54–58.]
- [31] Chen Yingbing,Li Zhaoyong,Li Yongkun,et al.Analysis, thoughts and advice on the investigation of torrential flood in the “23·7” extreme rainstorm:A case study in Fangshan District[J].*China Flood & Drought Management*,2023,33(6):1–5.[陈颖冰,李兆永,李永坤,等.“23·7”特大暴雨山洪灾害调查分析[J].*中国防汛抗旱*,2023,33(6):1–5.]
- [32] Hao Sijia,Wang Wenchuan,Ma Qiang,et al.A numerical rehearsal strategy of flash flood disaster with hydrological and hydrodynamic modelling:Case study of “7·20” flash flood disaster in Wangzongdian Village,Henan Province[J].*Water Resources and Hydropower Engineering*,2023(6):1–11.[郝思佳,王文川,马强,等.基于水文水动力模型的山洪灾害复盘策略:以河南王宗店村“7·20”山洪为例[J].*水利水电技术(中英文)*,2023(6):1–11.]
- [33] Shang Quanmin,Tu Yong,Wu Zebin,et al.Investigation and thoughts on typical flash flood disasters in 2020[J].*China Flood & Drought Management*,2021,31(2):1–4.[尚全民,涂勇,吴泽斌,等.2020年典型山洪灾害事件调研与思考[J].*中国防汛抗旱*,2021,31(2):1–4.]
- [34] He Bingshun.Thoughts and suggestions on the investigation of “7·20” extreme rainstorm disaster of four cities in mountainous area of Zhengzhou in Henan Province in 2021 [J].*China Flood & Drought Management*,2022,32(3):37–40.[何秉顺.河南郑州山区4市2021年“7·20”特大暴雨灾害调查的思考与建议[J].*中国防汛抗旱*,2022,32(3):37–40.]
- [35] Wang Xiekang,Liu Xingnian,Yang Po,et al.Discussion on flash flood disaster in southwest mountainous area of China [C]//*Proceedings of the 31th National Hydrodynamics Symposium(Volume I)*.Shanghai:Journal of Hydrodynamics Research and Development,2020:112–117.[王协康,刘兴年,杨坡,等.西南山区暴雨山洪致灾机理探讨[C]//第三十一届全国水动力学研讨会文集(上册).上海:《水动力学研究与进展》编辑部,2020:112–117.]
- [36] Ye Yong,Wang Zhenyu,Fan Boqin.An analysis method for ascertain critical rainfall of mountain flood disaster of small watershed in Zhejiang Province[J].*Journal of China Hydrology*,2008,28(1):56–58.[叶勇,王振宇,范波芹.浙江省小流域山洪灾害临界雨量确定方法分析[J].*水文*,2008,28(1):56–58.]
- [37] Tao Juehui,Wang Shengkai,Hu Mingdong,et al.Analysis method of rainfall warning indexes based on surveys of flash flood disasters[J].*China Flood & Drought Management*,2017,27(3):50–53.[陶珏辉,王胜凯,胡鸣东,等.基于山洪灾害调查成果的雨量预警指标分析方法[J].*中国防汛抗旱*,2017,27(3):50–53.]
- [38] Sun Dongya,Guo Liang,Kuang Shangfu,et al.Formation and development of theoretical and technical system for prevention and control of mountain torrents in China[J].*China Flood & Drought Management*,2020,30(S1):5–10.[孙东亚,郭良,匡尚富,等.我国山洪灾害防治理论技术体系的形成与发展[J].*中国防汛抗旱*,2020,30(增刊1):5–10.]
- [39] Liu Changjun,Wen Lei,Zhou Jian,et al.Comparative analysis of hydrological and hydrodynamic calculation method for flash flood in small watershed[J].*Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research*,2019,17(4):262–270.[刘昌军,文磊,周剑,等.小流域暴雨山洪水文模型与水动力学方法计算比较分析[J].*中国水利水电科学研究院学报*,2019,17(4):262–270.]
- [40] Kirstetter G,Delestre O,Lagrée P Y,et al.B-flood 1.0:An open-source Saint-Venant model for flash-flood simulation using adaptive refinement[J].*Geoscientific Model Development*,2021,14(11):7117–7132.
- [41] Chen Ridong,Shao Songdong,Liu Xingnian.Water-sediment flow modeling for field case studies in Southwest China[J].*Natural Hazards*,2015,78(2):1197–1224.
- [42] Yan Xufeng,Xu Zexing,Sun Tong,et al.Numerical experi-

ment of flash flood related to sediment transport at local diverging-converging sections in mountainous rivers[J]. *Advanced Engineering Sciences*, 2021, 53(6): 148–154. [闫旭峰, 许泽星, 孙桐, 等. 山区河流宽窄相间河段山洪水沙输移二维数值试验[J]. *工程科学与技术*, 2021, 53(6): 148–154.]

[43] Yang Q, Liu T, Zhai J, et al. Numerical investigation of a flash flood process that occurred in Zhongdu river, Sichuan, China [J]. *Frontiers in Earth Science*, 2021(9): 686925.

[44] Yussouf N, Wilson K A, Martinaitis S M, et al. The coupling of NSSL warn-on-forecast and FLASH systems for probabilistic flash flood prediction[J]. *Journal of Hydrometeorology*, 2020, 21(1): 123–141.

[45] Gourley J J, Flamig Z L, 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(2): 361–372.

[46] Ye Jinyin, Li Zhijia, Liu Jing, et al. Identification of early meteorological risk warning indicators for flash flood disasters [J]. *Torrential Rain and Disasters*, 2016, 35(1): 25–30. [叶金印, 李致家, 刘静, 等. 山洪灾害气象风险预警指标确定方法研究[J]. *暴雨灾害*, 2016, 35(1): 25–30.]

[47] Zhu Xisong, Huang Zhenguo, Yang Jiang. Analysis and thinking on the correlation and integration of non-engineering measures system and disaster prevention system in Sichuan Province[J]. *China Flood & Drought Management*, 2020, 30(S1): 123–126. [朱锡松, 黄振国, 杨江. 四川省山洪灾害防治非工程措施系统与防灾体制机制关联融合的分析与思考[J]. *中国防汛抗旱*, 2020, 30(增刊1): 123–126.]

[48] Wang Xiekang, Yang Po, Sun Tong, et al. Study on division early warning of flash flood disaster caused by rainstorm in

mountainous small watersheds[J]. *Advanced Engineering Sciences*, 2021, 53(1): 29–38. [王协康, 杨坡, 孙桐, 等. 山区小流域暴雨山洪灾害分区预警研究[J]. *工程科学与技术*, 2021, 53(1): 29–38.]

[49] He Bingshun, Li Qiang, He Deshun. Dialectical thoughts and main points of flash flood gulley prevention-interpretation of “Technical code for flash flood gulley prevention engineering” [J]. *China Flood & Drought Management*, 2020, 30(9/10): 95–96. [何秉顺, 李强, 何德舜. 山洪沟防洪治理的辩证思路与要点——兼解读《山洪沟防洪治理工程技术规范》[J]. *中国防汛抗旱*, 2020, 30(9/10): 95–96.]



王协康, 四川大学山区河流保护与治理全国重点实验室研究员、博士生导师, 水动力实验室主任、水力学教研室主任, 教育部“新世纪优秀人才支持计划”入选者、四川省学术和技术带头人、“霍英东教育基金会第十届高等院校青年教师奖”获得者, 国家级精品课程《水力学》主讲教师。主要

从事水力学及河流动力学、河流地貌学等领域的教学与科研工作, 在山区河流水流结构、泥沙运动及河床演变、暴雨山洪灾害等方面具有长期的研究积累。主持和参与多项国家级科研项目, 曾获全国优秀教材二等奖、四川省教学成果一等奖、教育部科技进步奖一等奖和二等奖, 发表SCI收录论文60余篇。兼任中国水土保持学会滑坡泥石流防治专业委员会副主任委员、国际水文科学协会中国委员会陆地侵蚀分会副主席、中国水利学会流域发展战略专业委员会副秘书长、国际山洪计划指导委员会委员, *Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics* 副主编, *Journal of Hydrodynamics*、*La Houille Blanche-Hydroscience Journal* 等期刊编委。

## Research Framework and Anticipated Outcomes of Flash Flood Disasters Due to the Combined Effects of Extreme Rainfall and Intense Human Activities

WANG Xiekang

(State Key Lab. of Hydraulics and Mountain River Eng., Sichuan Univ., Chengdu 610065, China)

**Abstract:** Global warming has led to frequent extreme rainfall events in hilly areas, with rainfall intensity and magnitude constantly breaking regional historical records. Simultaneously, the fragile environment and intense human activities in these areas exacerbate the formation and evolution of flash floods, complicating the situation and increasing casualties and property losses. Flash flood disasters have significant natural and social attributes, resulting from the complex interaction of environmental factors in hilly areas. The local climate in the mountainous regions of our country is unique, characterized by diverse geological and geomorphic types, complex river systems, and prominent human activities. Numerous major flash flood events have demonstrated that the processes and characteristics of flash floods induced by extreme rainfall vary significantly, posing substantial challenges for prediction, warning, and defense. Research on flash floods remains a critical and difficult aspect of natural disaster prevention and control. Historically, flash flood research in China has focused on the spatiotemporal changes of rainfall and the inundation characteristics of water floods. This research has led to the calculation of critical rainfall/water level thresholds for flood disaster prevention and control, yielding significant practical results and reducing the overall number of casualties from water flood disasters. However, in mountainous

areas, the formation and evolution of flash floods are influenced by multiple factors, including rainfall characteristics, surface composition, river morphology, and human activities. These floods often carry large amounts of sediment, manifesting as water floods, water-sediment floods, and debris floods. The causes and thresholds for local erosion, siltation, and inundation differ fundamentally between water-sediment and debris floods compared to water floods, contributing to the frequent occurrence of major flash flood disasters in China in recent years. To address the challenges of disaster prevention caused by extreme rainfall and human activities, a combination of field investigation, physical experiments, numerical simulation, and theoretical analysis is adopted. Utilizing interdisciplinary knowledge from meteorology, hydrology, and river dynamics, research has expanded from the traditional study of water floods to include all types of flash floods, such as water-sediment and debris floods. This research aims to understand the composite disasters caused by these floods, including erosion, sedimentation, and inundation. We will systematically explore the spatiotemporal evolution of heavy precipitation in major flash flood-prone provinces and regions of China, analyze the formation and evolution of multiple types of flash floods under extreme rainfall and strong human activities, and reveal the disaster mechanisms associated with meteorological, hydrological, and river responses. This involves establishing simulation methods for meteorological, hydrological, and sediment dynamic processes, identifying the risks of flash flood erosion, deposition, and inundation in mountainous areas, and developing methods to identify prone areas for different types of flash floods. Additionally, we aim to construct a multi-index early warning and defense method for zoning and grading water floods, water-sediment floods, and debris floods. This study is expected to enhance the theoretical and technical research on flash flood disasters in China and improve strategies for their prevention and control.

**Key words:** mountainous watershed; extreme rainfall; intense human activities; flash flood disasters; disaster causes

(编辑 张 琼)

引用格式: Wang Xiekang. Research framework and anticipated outcomes of flash flood disasters due to the combined effects of extreme rainfall and intense human activities[J]. *Advanced Engineering Sciences*, 2024, 56(4): 1–9. [王协康. 极端降雨与强人类活动复合作用下山洪灾害研究构想和成果展望[J]. *工程科学与技术*, 2024, 56(4): 1–9.]