

• 聚焦国家重点研发计划 •

DOI:10.15961/j.jsuese.202000859



本刊网刊

# 山区暴雨山洪水沙灾害预报预警关键技术研究构想与成果展望

刘超<sup>1,2</sup>, 聂锐华<sup>1,2</sup>, 刘兴安<sup>1</sup>, 许唯临<sup>1\*</sup>

(1.四川大学水力学与山区河流开发保护国家重点实验室, 四川成都 610065; 2.四川大学水利水电学院, 四川成都 610065)

**摘要:**山洪灾害为全球重大自然灾害之一, 21世纪全球因山洪灾害造成的经济损失已高达每年460多亿美元。中国山洪灾害防治区面积约占陆地面积的40%, 山洪灾害造成的人员死亡约占洪涝灾害死亡人数的70%。近年来, 中国全面开展山洪灾害防治项目建设, 目前已基本建成了专群结合的山洪灾害防治体系, 山洪灾害监测预警技术水平明显提升。山区暴雨山洪灾害实例表明, 重大人员伤亡与重大财产损失的山洪灾害事件往往源于洪水和泥沙的共同作用, 然而, 以往在进行山洪灾害防治时, 大多仅关注洪水的作用, 忽视了洪水和泥沙共同作用将显著增大山洪灾害的致灾风险, 甚至出现“小洪水大灾害”。为了进一步提高山洪灾害防控能力, 完善山洪灾害防御体系, 亟需深入研究暴雨山洪水沙灾害预报预警关键技术。“山区暴雨山洪水沙灾害预报预警关键技术与示范”项目, 以洪水和泥沙共同作用为切入点, 凝练了4个需攻克的关键科学技术问题: 1)山区暴雨作用下流域产流产沙异变机制、水沙过程与沟床剧变耦合致灾机制; 2)山区暴雨山洪水沙灾害早期识别与致灾要素一体化智能监测技术; 3)山区暴雨山洪水沙运动过程模拟与快速预报技术; 4)基于山洪水沙灾害动力过程的灾害风险动态评估与预警防控技术。围绕关键科学技术问题的内涵, 提出5个需开展的重点研究内容: 1)山区暴雨产流产沙过程与水沙耦合致灾机制研究; 2)山区暴雨山洪水沙灾害早期识别与智能监测技术; 3)山区暴雨山洪水沙运动过程模拟与快速预报技术; 4)山区暴雨山洪水沙灾害风险动态评估与预警技术; 5)山区暴雨山洪水沙灾害预报预警防控平台构建与示范。研究成果将揭示山区暴雨产流产沙过程与水沙耦合致灾机制, 提出山区暴雨山洪水沙灾害早期识别方法、山区暴雨山洪水沙灾害智能监测技术体系、山洪水沙运动过程模拟与快速预报技术、山洪水沙灾害风险动态评估与预警技术等, 构建集早期识别、风险评估及综合防控一体化的暴雨山洪水沙灾害预报预警防控平台, 提升中国暴雨山洪灾害监测预警与防控的实时性、精准度和智能化水平。

**关键词:**山洪灾害; 山洪水沙灾害; 暴雨洪水; 监测预警; 泥沙补给; 风险评估

中图分类号:TV122;TV143

文献标志码:A

文章编号:2096-3246(2020)06-0001-08

## Research Conception and Achievement Prospect of Key Technologies for Forecast and Early Warning of Flash Flood and Sediment Disasters in Mountainous Rainstorm

LIU Chao<sup>1,2</sup>, NIE Ruihua<sup>1,2</sup>, LIU Xingnian<sup>1</sup>, XU Weilin<sup>1\*</sup>

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

2.College of Water Resource & Hydropower, Sichuan Univ., Chengdu 610065, China)

**Abstract:** The mountain flood disaster is one of the major natural disasters in the world. The global economic loss caused by flash floods in the 21st century has reached more than 46 billion US dollars per year. The area of mountain flood disaster prevention and control accounts for about 40% of the land in China, whereas the fatality caused by mountain flash floods account for approximately 70% of the death toll from flood disasters. In recent years, the construction of mountain torrent disaster prevention and control projects have been carried out in an all-round way in

收稿日期:2020-10-09

基金项目:国家重点研发计划项目(2019YFC1510700)

作者简介:刘超(1975—),男,教授。研究方向:水利水电工程。E-mail: liuchao@scu.edu.cn

\*通信联系人 E-mail: xuwl@scu.edu.cn

网络出版时间:2020-11-09 15:28:47

网络出版地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/51.1773.TB.20201106.1318.001.html>

China. A mountain torrent disaster prevention and control system combining specialists and groups has been basically established, and the technical level of mountain torrent disaster monitoring and early warning has been significantly improved. Examples of torrential rain and flash flood disasters show that the flash flood disasters with heavy casualties and property losses often result from the combined effects of flood and sediment. In the past, scientists mostly paid attention to the flood's role while ignoring that the combined effect of flood and sediment would significantly increase the risk of mountain torrent disasters. To further improve the ability to prevent and control mountain flood disasters, it is urgent to study the critical technologies of flood and sediment disaster forecasting and early warning. The project "Research and Demonstration of Key Technologies for Forecasting and Early Warning of Flash Flood and Sediment Disasters in Mountainous Rainstorms" focuses on the joint action of flood and sediment and condenses four critical scientific and technological issues: 1) mutation mechanism of runoff and sediment yield and disaster-causing coupling mechanism of the flood-sediment process and gully-bed drastic change in mountainous area under heavy rain; 2) early identification of flood and sediment disasters and integrated intelligent monitoring technology for disaster-causing elements in mountainous rainstorms; 3) simulation and rapid prediction technology of flash flood and sediment movement process in a mountainous rainstorm; and 4) disaster risk dynamic assessment and early warning and prevention technology based on the dynamic process of mountain flood and sediment disaster. Focusing on the connotation of critical scientific and technological issues, we proposed five key research contents including 1) study on the process of runoff and sediment production in mountainous areas and the disaster mechanism of flood and sediment coupling; 2) early identification and intelligent monitoring technology for flood and sediment disasters in mountainous areas; 3) simulation and rapid prediction technology of flood and sediment movement process in a mountainous rainstorm; 4) dynamic assessment and early warning technology of flood and sediment disaster risk in mountainous areas; 5) construction and demonstration of a platform for forecasting, early warning, and prevention of flood and sediment disasters in mountainous areas. The research results will improve the real-time accuracy and intellectual level of monitoring, early warning, prevention and control of heavy rain and flash flood disasters in China.

**Key words:** flash flood disaster; flash flood and sediment disaster; flash flood; monitoring and early warning; sediment supply; risk assessment

山洪灾害为全球重大自然灾害之一, 21世纪全球因山洪灾害造成的经济损失已高达每年460多亿美元<sup>[1]</sup>。中国山洪灾害防治区面积约占陆地面积的40%, 山洪灾害造成的人员死亡约占洪涝灾害死亡人数的70%。2009年至今, 中国全面开展山洪灾害防治项目建设, 目前已基本建成了专群结合的山洪灾害防治体系, 山洪灾害监测预警技术水平明显提升<sup>[2-4]</sup>。根据《中国水旱灾害公报》相关数据统计: 山洪灾害防治项目实施前, 2000—2010年中国山洪灾害死亡人数年均1 178人; 山洪灾害防治项目实施后, 2011—2018年中国山洪灾害死亡人数年均354人, 降幅70%。这表明, 中国山洪灾害防治项目建设成效显著。然而, 通过对比中国历史山洪灾害与全国山洪灾害防治区综合风险图发现, 在1949年以来中国5.3万次历史山洪灾害中, 只有不到20%发生在风险等级设置为“高”的区域, 不到30%发生在风险等级设置为“中”的区域, 却有近一半发生在风险等级设置为“较低”及风险区之外的区域, 这表明, 中国当前对山洪灾害的风险预判仍然不够准确。风险预判不够准确的一个主要原因在于, 以往在进行山洪灾害防治时, 大多仅关注暴雨-洪水的作用, 忽视了泥沙淤积沟床导致水位急剧升高、溢出沟道等的影响。四川叙永“8·17”山洪灾害、贵州望谟“6·6”山洪灾害、四川普格“8·8”山洪灾害等山区暴雨山洪灾害实例表明, 重大人员伤亡与重大财产损失的山洪灾害事件往往源于洪水和泥沙的共同作用, 洪水和泥沙共

同作用将显著增大山洪灾害的致灾风险乃至出现“小洪水大灾害”, 例如, 2017年8月8日, 四川省凉山州普格县荞窝镇耿底村突发暴雨, 耿底村并行两条沟, 一条沟超量产沙淤堵沟道引发山洪灾害, 造成惨重的财产损失和人员伤亡(25人死亡, 5人受伤), 另一条沟只有洪水没受泥沙影响而未形成灾害<sup>[5]</sup>, 如图1所示。为了进一步提高山洪灾害防控能力, 需要深入研究暴雨山洪水沙灾害预报预警关键技术。



图1 四川省普格县“8·8”山洪灾害

Fig. 1 Flash flood disaster on August 8, 2017 in Puge County, Sichuan Province

## 1 研究现状

近年来, 以四川大学为代表的国内外科科研机构, 针对山洪水沙灾害的监测预警技术、致灾机制、易灾区早期识别、水沙运动模拟及防控技术等进行了研究, 取得了明显进展<sup>[6]</sup>。

山洪水沙灾害监测预警技术方面,美国从1970年代开始研究建立山洪灾害预警指导系统(FFGS),目前已在南非、黑海和中东等地区推广应用;欧洲部分国家建立了基于洪水预报的山洪灾害预报预警系统;日本基本形成了一套较为完善的山洪灾害防治体系和防御模式<sup>[7-8]</sup>。中国山洪灾害防治起步较晚,2010—2016年才初步建成了山洪预警系统和群策群防体系。就监测系统而言,目前中国进行山区局地降雨监测的主要仍是各类点式雨量站,总体上建设密度偏低,位置布局不尽合理,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,而欧美及日本等国家则普遍使用监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,极大地提高了降雨定量估计和预报的精度和效率<sup>[9]</sup>。同时,山洪水沙灾害涉及“雨-水-沙”多要素,目前的监测主要集中在雨量和水位方面,对泥沙尤其是推移质监测,监测站网和监测技术均较为缺乏。虽然地声、次声、图像等先进的探测技术在水沙灾害监测中的应用日渐增多<sup>[10]</sup>,但复杂山区环境中山洪水沙监测站网优化布局理论、传输技术及智能化水平均需进一步提升。就预报预警方法而言,目前国内外主要有两类,一是基于动态临界雨量的山洪预报预警,二是基于分布式水文模型的山洪预报预警,这两类方法本质上均是按照雨量-流量-水位的思路,确定临界雨量阈值或预警水位,现有的方法主要考虑了水的影响,很少辨析泥沙在山洪灾害中的作用,亟需发展考虑水沙共同影响下的预警技术。

山洪水沙灾害致灾机制方面,Fan<sup>[11]</sup>、聂锐华<sup>[12]</sup>、侯极<sup>[13]</sup>等指出,山区流域强降雨致使大量泥沙进入河道,造成河道急剧调整,从而导致严重的山洪水沙灾害。Gan等<sup>[14]</sup>基于2015年四川叙永县山洪灾害现场调查,指出暴雨引发的强输沙往往显著放大了山洪灾害的成灾效应。王协康等<sup>[5]</sup>基于山洪灾害现场调查与资料分析,初步概括了山区暴雨洪水产沙输移诱发山洪成灾模式为:强降雨引起的洪水汇集、暴雨洪水诱发滑坡与沟道超量产沙、水沙相互作用引起沟床冲淤突变、沟床泥沙淤堵导致水位陡增、人类活动区受灾。

山洪水沙易灾区早期识别方面,曹叔尤<sup>[15]</sup>、李彬<sup>[16]</sup>、张晨玲<sup>[17]</sup>等指出,山区干支流交汇区、宽窄相间河段和比降骤变河段是强输沙水流泥沙淤积的重点区域,且这些部位的河床调整与突变响应存在临界点。许唯临<sup>[18]</sup>、王协康<sup>[19-20]</sup>等指出了判别重点淤积河段的临界条件,并据此提出了山区流域山洪泥

沙灾害易灾区的识别方法,提高了山洪泥沙灾害防治区识别的准确性。

山洪水沙运动模拟方面,目前围绕洪水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<sup>[9]</sup>。近年来,很多学者<sup>[21-24]</sup>围绕山洪水沙数学模型展开了研究,取得了明显进展,但现有技术还很难在低运算量条件下对水沙运动过程做出准确全面的描述。

山洪水沙灾害防控技术方面,曹叔尤等<sup>[15]</sup>提出水沙灾害降阶防控原理、原则和方法,通过采用水沙错峰、水沙分离等防控技术,调控洪峰时段成灾河段卵石沙量补给条件,使得特大山洪水沙灾害致灾不确定性降到可防控范围。

近年来,围绕山区暴雨山洪水沙灾害的相关研究取得明显进展,但由于山洪水沙运动的复杂性,暴雨山洪水沙灾害防控的实时性、精准度和智能化水平亟需进一步提高,因此,有必要针对山区暴雨山洪水沙灾害预报预警关键技术,进行系统研究,以提升中国山洪水沙灾害监测预警与防范的水平 and 能力。

## 2 研究内容

### 2.1 拟解决的关键科学技术问题

1) 关键科学问题1: 山区暴雨作用下流域产流产沙异变机制、水沙过程与沟床剧变耦合致灾机制

针对暴雨山洪水沙致灾过程历时短、强度高、过程复杂的难题,弄清楚暴雨山洪径流激增和泥沙补给突变过程、沟床剧变与水沙运动互馈过程对成灾模式的复杂影响,揭示山区暴雨作用下流域产流产沙异变机制、泥沙异变条件下水沙耦合机理与沟床响应机制及水沙耦合致灾机制,是山洪水沙灾害早期识别、监测预警与防控的关键科学问题与基础支撑。

2) 关键技术问题1: 山区暴雨山洪水沙灾害早期识别与致灾要素一体化智能监测技术

针对山洪水沙灾害突发性强、致灾因子复杂,且多易发于山区资料缺乏区域的难点,研发山洪水沙灾害早期精准识别技术是实现山洪水沙灾害布点监测、有效躲避、高效防控的关键,可为水利、国土、交通等部门规划设计、防控治理等提供支撑。在暴雨山洪水沙运动各要素时空变化极其剧烈的环境下,研发集成一套暴雨山洪水沙过程多要素智能变频数据监测采集系统是开展山洪水沙耦合致灾机制研究和提前预警预报的关键。

### 3)关键技术问题2:山区暴雨山洪水沙运动过程模拟与快速预报技术

针对山区暴雨山洪水沙预报精度低、时效要求高、可靠性低的问题,建立高精度暴雨山洪水沙过程模拟与实时校正模型,研发集多源数据快速融合、自适应式数据立方体快速算法、方案模型库快速匹配等技术,实现山区暴雨山洪水沙运动过程快速模拟与预报。

### 4)关键技术问题3:基于山洪水沙灾害动力过程的灾害风险动态评估与预警防控技术

由于山洪水沙灾害的突发性、复杂性和不确定性,常用的灾害评估方法在山洪水沙灾害评估中并不适用,亟需开发基于水沙因子辨析的山洪水沙灾害风险评估模型及动态评估技术。山洪水沙灾害具有“暴雨—洪水—泥沙—沟床响应—水位升高”链式致灾

特征,临界雨量等山洪灾害常用预警指标不能满足山洪水沙灾害动态预警的要求,提出多指标山洪水沙灾害预警模式和临界阈值确定方法,建立基于山洪水沙灾害动态风险评估的多过程—多指标联动分级预警技术是山洪水沙灾害预警与防控的关键。

## 2.2 主要研究内容

针对上述关键科学技术问题,拟开展主要研究内容包括:1)山区暴雨产流产沙过程与水沙耦合致灾机制研究;2)山洪水沙灾害早期识别与智能监测技术研究;3)山洪水沙运动过程模拟与快速预报技术研究;4)山洪水沙灾害风险动态评估与预警技术研究;5)山洪水沙灾害预报预警防控平台构建与应用示范研究。

围绕上述研究内容,设置了5个课题,课题间的逻辑关系见图2。

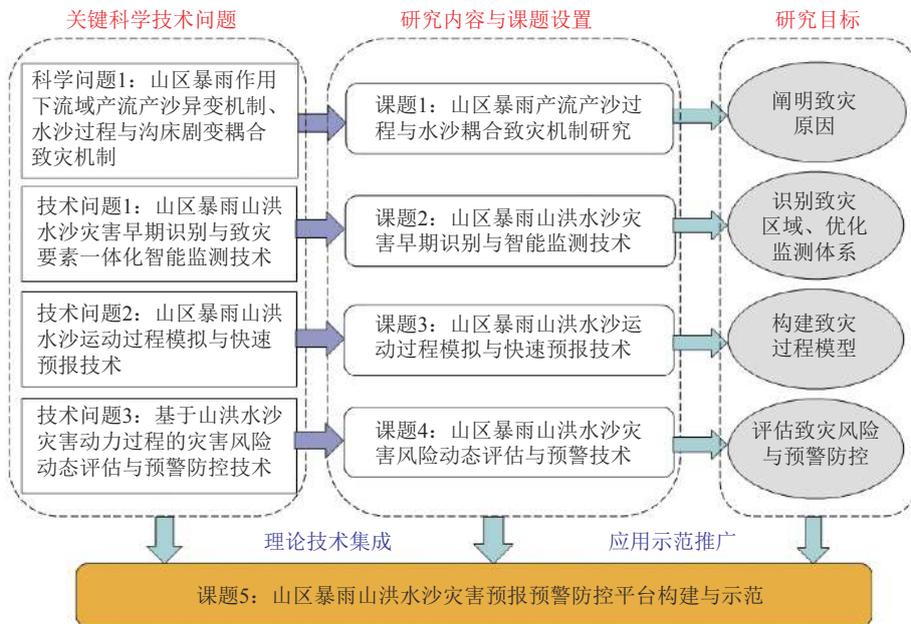


图 2 课题设置

Fig. 2 Division of the project

课题1“山区暴雨产流产沙过程与水沙耦合致灾机制研究”针对关键科学问题1。该课题通过研究山区暴雨山洪径流激增突变非线性机制、山区暴雨洪水演变过程中的泥沙补给突变机制、沟床急剧演变过程与水沙运动互馈机制、山洪水沙耦合致灾机制及面向暴雨山洪的水沙灾害成灾模式,揭示山区暴雨作用下流域产流产沙异变机制、水沙过程与沟床剧变耦合致灾机制。该课题同时为课题2、课题3、课题4的研究提供理论基础支撑。

课题2“山区暴雨山洪水沙灾害早期识别与智能监测技术”针对关键技术问题1。该课题通过研究多源异质遥感数据融合与固体物源智能识别、山洪水沙灾害易灾区早期精准识别技术、面向水沙灾害易

灾区的“雨—水—沙”多要素监测优化布局理论方法、山洪水沙多要素一体化智能监测与传输技术及基于“空—天—地”一体化监测的山区暴雨短时临近预报技术,提出山区暴雨山洪水沙灾害早期识别与评估方法,提高山区暴雨山洪水沙灾害早期识别精度,构建山区暴雨山洪水沙灾害智能监测技术体系。该课题的实时监测数据成果可为课题3、课题4提供数据支撑,相关监测技术成果可为课题5提供技术支撑。

课题3“山区暴雨山洪水沙运动过程模拟与快速预报技术”针对关键技术问题2。该课题通过研究基于降雨预报的洪水过程模拟与实时校正、暴雨洪水坡面产沙过程模拟、水沙互馈与沟床急剧变化模拟、山区暴雨山洪水沙过程快速预报、山洪水沙模拟与

预报不确定性分析,提出山区暴雨山洪水沙耦合致灾预报技术,提升山洪水沙灾害预报精度和速度。该课题同时为课题4、课题5提供技术支撑。

课题4“山区暴雨山洪水沙灾害风险动态评估与预警技术”针对关键技术问题3。该课题通过研究山洪水沙灾害风险因子辨识与指标体系、基于水沙因子辨析的山洪灾害风险评估模型、泥沙补给下山洪水沙灾害的动态风险评估、水沙耦合作用下山洪水沙灾害动态预警技术及基于山洪水沙灾害风险评估的综合防控技术体系,提出山洪暴雨水沙灾害动态风险评估方法,建立山洪水沙灾害动态分级预警技术体系,提高山洪水沙灾害预警处置时效性。该课题为课题5提供技术支撑。

课题5“山区暴雨山洪水沙灾害预报预警防控平台构建与示范”为研究成果的综合集成。该课题通过集成前4个课题研究成果,搭建一套集早期识别、风

险评估及综合防控一体化的暴雨山洪水沙灾害预报预警防控平台,实现山洪水沙灾害监测预警预报的平台化和可视化,并进行应用示范。

### 3 研究方法与技术路线

采取多学科交叉的方法,通过野外观测与调查、模型试验、数值模拟、遥感、雷达、机理分析、大数据技术、信息融合、深度学习、物源识别、数据同化、不确定性分析、风险评估等方法,围绕理论机理、方法技术、平台示范,按照“致灾机理认知—智能识别监测—灾害模拟预报—动态评估预警—工程应用示范”的思路,先进行致灾机理的研究,再进行识别监测、灾害模拟、评估预警技术的研究,最后进行工程应用示范研究,最终形成山区暴雨山洪水沙灾害成因理论、预警和防控技术。所采取的研究方法与技术路线见图3。

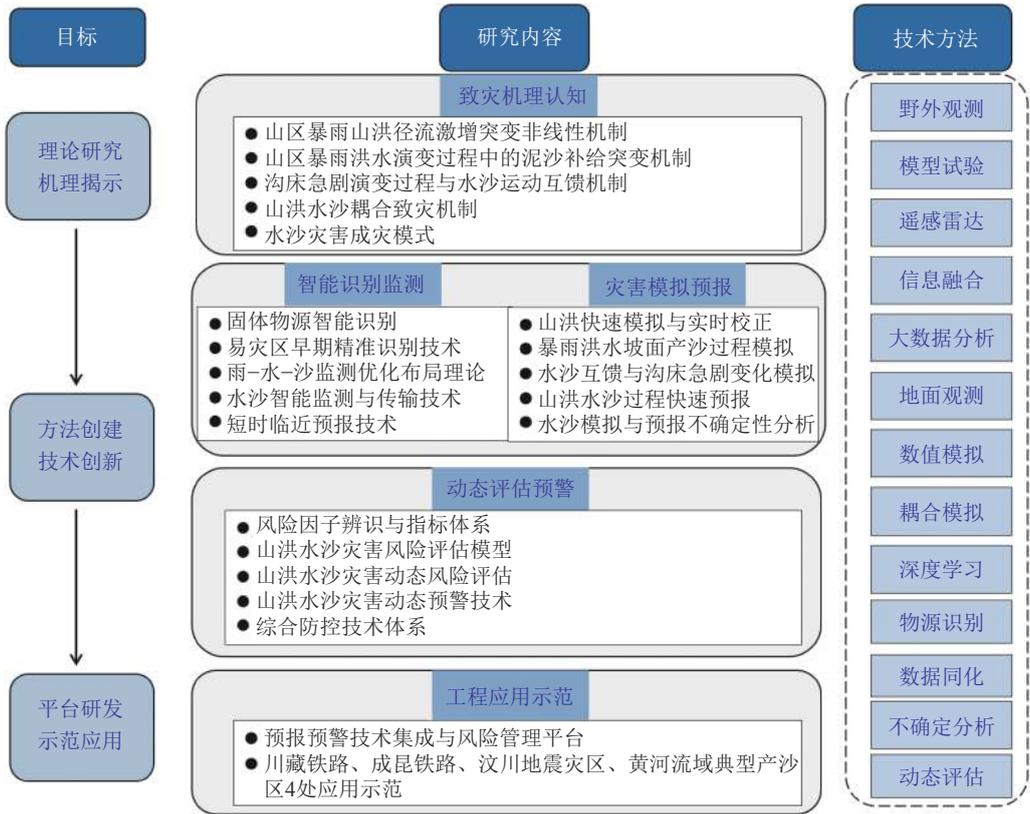


图3 研究方法与技术路线

Fig. 3 Research methods and technical route

#### 1) 致灾机理认知

拟通过野外观测与调查、模型试验的方法,结合数值模拟和理论分析,研究山区暴雨山洪径流激增突变非线性机制、山区暴雨洪水演变过程中的来沙突变机制,基于原型观测数据、模型试验,观测泥沙补给突变条件下的沟床形态演变过程,研究水沙运动互馈机制、山洪水沙耦合致灾机制及面向暴雨山

洪的水沙灾害成灾模式等。

#### 2) 智能识别监测

拟运用面向对象的影像分析方法,建立实用的固体物源自动/半自动识别知识表达模型,基于云数据曲面局部特征量的八叉树数据滤波技术等,构建基于多源固体物源特征加权自适应的智能化分析与提取技术。采用大数据智能挖掘技术、水沙动力学机

制及知识图谱的方法,构建山洪水沙灾害易灾区早期识别技术。运用地理学、系统论、信息熵、决策控制等原理,探索适应复杂山区环境的雨-水-沙监测仪器配置、站网优化布局理论。利用神经网络深度学习技术分析暴雨山洪水沙过程各要素之间的相关性,实现山洪水沙过程各要素智能变频监测采集。根据现有流域公网覆盖现状,研发结合GPRS、4G公网和物联网等技术的多链路数据传输结构。采用非正态的贝叶斯方法和决策树回归模型,改进卫星、雷达和地面站估测降水的融合算法。运用3维滤波技术发展天气雷达非降水杂波去除方法,研究基于层叠架构的Lucas-Kanade光流技术和强度守恒约束的Semi-Lagrangian平流技术,构建雷达外推模型。基于深度学习神经网络建立面向不同降雨类型的动态雷达回波-降雨映射关系,实时自动订正雷达外推临近定量降水预报。

### 3) 灾害模拟预报

基于高时空分辨率的多源降雨数据和短临降雨预报产品,建立耦合降雨预报的洪水过程模拟模型;基于大数据分析驱动模型参数智能化调整,构建山洪预报实时校正技术。基于历史数据、野外调查、模型试验,研究坡面泥沙运动规律及坡面产沙模型,建立沟床水沙耦合运动流速、水位、输沙率、床面变形等变量数据库,采用机器学习方法,建立1、2维动态智能组网水沙动力学模型。基于历史资料库及精细化模型,构建不同情景模式下山洪水沙预报方案库,研究相似山洪水沙过程的快速精准匹配,实现快速预报。

### 4) 动态评估预警

基于水文学、水力学、河流动力学原理和遥感技术,分析洪水成灾过程;基于数理统计、模型模拟与实时情景分析,梳理山洪水沙灾害危险性、易损性因子,提出山洪水沙灾害风险评价指标体系,构建山洪水沙灾害风险评估模型;基于灰色聚类法和神经网络等方法的指标组合方式和权重赋值方法,建立山洪水沙灾害风险等级评判方法;基于数理统计、模型模拟与实时情景分析,构建山洪水沙灾害动态风险评估模式;采用蒙特卡罗法等不确定分析方法,研究降雨等驱动信息、预报与评估模型、灾害防控措施的不确定性对动态风险评估的影响;融合大数据和专家知识等方法,提出基于暴雨、坡沟产输沙过程及沟床响应调整等动态过程的多过程-多指标联动分级预警技术。

### 5) 工程应用示范

工程应用示范坚持“边研究、边示范”的原则,示范区拟选择川藏铁路、成昆铁路、长江流域汶川地震

灾区及黄河流域绥德典型河沟,示范工作与各课题的研究紧密联系。搭建暴雨山洪水沙灾害预报预警防控平台,针对平台中山洪水沙灾害多源异构大数据采集、存储和计算的难点,研究山洪水沙灾害大数据的清洗、数据规范化、数据质量评估等关键技术;采用自适应理论,研究山洪水沙灾害大数据分布式计算引擎,实现多源异构数据计算资源的智能优化与调度计算。针对应用示范区,利用现代化的前端感知设备,获取示范区的基础信息,利用课题研发的集成与风险管理智能合作平台,对监测数据进行预处理,实现数据的查询、统计和可视化。在此基础上,在平台上加载课题1至课题4研发的产流产沙模型、易灾区识别方法、水沙耦合模拟方法、山洪水沙灾害风险动态评估模型等,最终对示范区内的潜在承灾对象提供预报预警服务。

## 4 主要创新点

### 1) 山区暴雨山洪水沙耦合致灾理论方法创新

将“水-沙”耦合作用贯穿于山区暴雨山洪水沙灾害孕育、演化、成灾全过程,将传统的“暴雨-洪水-水位”研究提升为“暴雨-洪水-泥沙-沟床响应-水位升高”研究,突出山区暴雨诱发来沙变化对山洪水沙灾害的关键作用,探明暴雨山洪与沟床输沙相互作用诱发沟床急剧响应的机理,揭示山区暴雨山洪水沙耦合致灾机制与动力灾变过程。

### 2) 山区暴雨山洪水沙灾害早期精准识别与智能监测技术创新

研发集卫星遥感与3维扫描的多源异质遥感数据融合与固体物源智能识别技术,发展山洪水沙灾害易灾区早期精准识别技术,提出山洪水沙灾害“雨-水-沙”致灾要素监测优化布局体系,构建暴雨山洪水沙多要素智能监测与传输技术。

### 3) 山区暴雨山洪水沙灾害运动模拟与快速预报技术创新

建立坡面产流产沙过程模拟模型、山区河道强输沙过程模拟模型,突破山洪水沙灾害过程模拟核心算法与瓶颈技术,实现暴雨条件山区沟谷产输沙、水沙耦合及运动致灾的全过程模拟;通过多源数据快速融合、方案模型库快速匹配等技术,实现山区暴雨山洪水沙快速模拟预报。

### 4) 山区暴雨山洪水沙灾害风险评估方法创新

聚焦于水沙灾害风险动态变化特征,创立山区暴雨山洪水沙耦合致灾风险动态评估理论方法,研发基于“暴雨-洪水-泥沙-沟床响应-水位升高”完整链式灾害过程模拟的山洪水沙灾害风险评估技术,实现山洪水沙灾害风险动态评估。

### 5) 山区暴雨山洪水沙灾害预警防控技术创新

提出多指标山洪水沙灾害预警模式和指标临界阈值确定方法,建立基于山洪水沙灾害动态风险评估的多过程-多指标联动分级预警技术。创新发展“水沙分治”的山洪水沙灾害防控理念,提出水沙错峰和水沙分离等山洪水沙灾害风险降阶技术的综合防控技术体系,提高山洪水沙灾害防控能力。

## 5 结论与展望

围绕中国山洪灾害监测预警与防范的国家重大战略需求,针对当前中国山洪灾害防治中,对洪水和泥沙共同作用显著增大山洪灾害的致灾风险关注不够这一现状,提出以洪水和泥沙共同作用为切入点,系统研究山区暴雨山洪水沙灾害预报预警关键技术。介绍了山区暴雨山洪水沙灾害研究的背景、研究内容、研究方法和技术路线。

研究成果将揭示山区暴雨产流产沙过程与水沙耦合致灾机制,提出山区暴雨山洪水沙灾害早期识别方法,构建山区暴雨山洪水沙灾害智能监测技术体系,建立山洪水沙运动过程模拟与快速预报技术,提出山洪水沙灾害风险动态评估与预警技术,构建集早期识别、风险评估及综合防控一体化的暴雨山洪水沙灾害预报预警防控平台,提升中国暴雨山洪灾害监测预警与防控的实时性、精准度和智能化水平。

### 参考文献:

[1] Li Haichen, Xie Jiabi, Guo Liang, et al. A review of the study on flash flood early warning in China[J]. Pearl River, 2017, 38(6): 29-35. [李海辰, 解家毕, 郭良, 等. 中国山洪预警研究综述[J]. 人民珠江, 2017, 38(6): 29-35.]

[2] Guo Liang, Ding Liuqian, Sun Dongya, et al. Key techniques of flash flood disaster prevention in China[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2018, 49(9): 1123-1136. [郭良, 丁留谦, 孙东亚, 等. 中国山洪灾害防御关键技术[J]. 水利学报, 2018, 49(9): 1123-1136.]

[3] Guo Liang, Zhang Xiaolei, Liu Ronghua, et al. Achievements and preliminary analysis on China national flash flood disasters investigation and evaluation[J]. Journal of Geo-information Science, 2017, 19(12): 1548-1556. [郭良, 张晓蕾, 刘荣华, 等. 全国山洪灾害调查评价成果及规律初探[J]. 地球信息科学学报, 2017, 19(12): 1548-1556.]

[4] Zhang Zhitong. Mountain torrent disaster prevention and control measures and their effects[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2016, 47(1): 1-5. [张志彤. 山洪灾害防治措施与成效[J]. 水利水电技术, 2016, 47(1): 1-5.]

[5] 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.]

- [6] Xie Heping, Xu Weilin, Liu Chao, et al. Water disasters and their countermeasures in mountains[J]. Advanced Engineering Sciences, 2018, 50(3): 1-14. [谢和平, 许唯临, 刘超, 等. 山区河流水灾问题及应对[J]. 工程科学与技术, 2018, 50(3): 1-14.]
- [7] Sun Dongya, Zhang Hongping. Research progress and practice of mountain flood disaster prevention in Europe and America[J]. China Water Resources, 2012(23): 16-17. [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.]
- [8] Liu Zhiyu, Yang Dawen, Hu Jianwei. Dynamic critical rainfall based torrential flood early warning for medium-small rivers[J]. Journal of Beijing Normal University(Natural Science), 2010, 46(3): 317-321. [刘志雨, 杨大文, 胡健伟. 基于动态临界雨量的中小河流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.]
- [9] 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. [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.]
- [10] Hu Yuhao, Yuan Lu, Ma Dongtao, et al. Research progress on debris flow infrasound warning[J]. Advances in Earth Science, 2018, 33(6): 606-613. [胡雨豪, 袁路, 马东涛, 等. 泥石流次声警报研究进展[J]. 地球科学进展, 2018, 33(6): 606-613.]
- [11] Fan D, Cai G, Shang S, et al. Sedimentation processes and sedimentary characteristics of tidal bores along the north-bank of the Qiantang Estuary[J]. Chinese Science Bulletin, 2012, 57(13): 1578-1589.
- [12] Nie Ruihua, Wang Xiaofan, Liu Faming, et al. Study on fluvial processes of piedmont rivers damaged by strong earthquakes[J]. Advanced Engineering Sciences, 2018, 50(3): 105-111. [聂锐华, 王小凡, 刘发明, 等. 强震受损山前河流河床演变研究[J]. 工程科学与技术, 2018, 50(3): 105-111.]
- [13] Hou Ji, Liu Xingnian, Jiang Beiha, et al. Experimental study of water depth in steep channel flow carrying sediments by mountain torrents[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2012, 43(Supp2): 48-53. [侯极, 刘兴年, 蒋北寒, 等. 山洪携带泥沙引发的山区大比降河流水深变化规律研究[J]. 水利学报, 2012, 43(增刊2): 48-53.]
- [14] Gan Binrui, Liu Xingnian, Yang Xingguo, et al. The impact of human activities on the occurrence of mountain flood hazards: Lessons from the 17 August 2015 flash flood/debris flow event in Xuyong County, south-western China[J]. Geomatics Natural Hazards & Risk, 2018, 9(1): 816-840.
- [15] Cao Shuyou, Liu Xingnian. Adaptive adjustment and muta-

- tion response of river bed within changing sediment supply in mountain river[J].*Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition)*,2016,48(1):1-7.[曹叔尤,刘兴年.泥沙补给变化下山区河流河床适应性调整与突变响应[J].*四川大学学报(工程科学版)*,2016,48(1):1-7.]
- [16] Li Bin,Gu Aijun,Guo Zhixue,et al.Experimental study of water level in steep channel flow under high sediment concentration[J].*Journal of Sichuan University(Engineering Science Edition)*,2015,47(Supp2):34-39.[李彬,顾爱军,郭志学,等.强输沙对陡坡河道水位激增的影响试验研究[J].*四川大学学报(工程科学版)*,2015,47(增刊2):34-39.]
- [17] Zhang Chenling,Guan Jianchao,Fang Chunming,et al.Experimental study on the response of river to water and sediment supply processes[J].*Journal of Sediment Research*,2018,43(2):15-20.[张晨玲,关见朝,方春明.山区河流形态对不同来沙过程的响应试验研究[J].*泥沙研究*,2018,43(2):15-20.]
- [18] 许唯临,刘兴年,王协康,等.山区流域山洪泥沙灾害易灾区识别方法:ZL2018104684183[P].2018-08-24.
- [19] 王协康,许泽星,刘兴年,等.基于山区河流形态与主流流量比变化的交汇区山洪泥沙灾害易灾区识别方法:ZL2019108343248[P].2020-02-07.
- [20] 王协康,刘兴年,许泽星,等.基于山区河流形态与洪水位变化的宽窄相间河段山洪淹没灾害易灾区识别方法:ZL2019108343106[P].2020-01-24.
- [21] Chen R D,Liu X N,Cao S Y,et al.Numerical simulation of deposit in confluence zone of debris flow and mainstream[J].*Science China Technological Sciences*,2011,54(10):2618-2628.
- [22] Lei Ming,Zhao Tao,Zhou Jiawen,et al.Numerical simulation of riverbed deformation based on CFD and DEM coupling method[J].*Journal of Sediment Research*,2018,43(3):75-80.[雷明,赵涛,周家文,等.基于CFD与DEM耦合方法的河床变形数值模拟[J].*泥沙研究*,2018,43(3):75-80.]
- [23] Zhou Yu,Qian Honglu,Cao Zhixian,et al.Applicability of a quasi-steady flow model for alluvial rivers[J].*Engineering Journal of Wuhan University*,2018,51(5):377-382.[周宇,钱红露,曹志先,等.冲积河流分级恒定水沙数学模型的适用性研究[J].*武汉大学学报(工学版)*,2018,51(5):377-382.]
- [24] Zheng X G,Chen R D,Luo M,et al.Dynamic hydraulic jump and retrograde sedimentation in an open channel induced by sediment supply:Experimental study and SPH simulation[J].*Journal of Mountain Science*,2019,16(8):1913-1927.



刘超,四川大学水利水电学院教授,原四川大学水利水电学院院长,现为四川大学科学技术发展研究院院长。兼任中国水利学会理事、中国大坝工程学会理事、四川省水利学会副理事长、教育部高等学校水利类专业教学指导委员会委员。国家重点研发计划“山区暴雨山洪水沙灾害预报预警关键技术研究及示范”项目负责人,宝钢优秀教师奖获得者。主要从事水利水电工程领域和农业水利工程领域的理论研究、技术开发和工程应用研究。

(编辑 张琼)

引用格式: Liu Chao,Nie Ruihua,Liu Xingnian,et al.Research conception and achievement prospect of key technologies for forecast and early warning of flash flood and sediment disasters in mountainous rainstorm[J].*Advanced Engineering Sciences*,2020,52(6):1-8.[刘超,聂锐华,刘兴年,等.山区暴雨山洪水沙灾害预报预警关键技术研究构想与成果展望[J].*工程科学与技术*,2020,52(6):1-8.]