

• 聚焦国家重点研发计划 •

DOI:10.15961/j.jsuese.201800967

山洪灾害监测预警关键技术与集成示范研究构想和成果展望

张平仓^{1,2}, 丁文峰^{1,2*}, 王协康³

(1.长江水利委员会长江科学院,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;
3.四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)

摘要:中国山洪灾害点多面广,发生频繁,但因山洪灾害问题的多样性和复杂性,目前在主要关键技术领域的研究仍处于起步和技术探索阶段,不能适应当前防御山洪灾害的实际需要。如何精准预报局地强降雨,研发山洪监测技术体系,提炼山洪灾害动态多预警指标,实现从注重灾后救助向灾前预防转变。如何研发因地制宜的山洪灾害预报模型,搭建风险评估平台,构建山洪灾害防御模式,提高山洪灾害预警和风险防范能力,是当前山洪灾害研究的前沿和热点问题,也是目前国家大力实施山洪灾害防治县级非工程措施项目建设必须要面对的现实问题。围绕上述问题,凝练如下3个关键研究目标:1)理清山洪灾害动力过程,建立山区局地暴雨预报模型和山洪动态模拟模型;2)研发构建山洪多要素立体监测技术与体系,实现山洪灾害预警与风险评估信息的实时动态传输与发布,解决山洪洪峰流量预报精度不高、预警期和应急抢险处置时效短等问题;3)构建多层次、多目标的山洪灾害动态预警与风险评估平台,提炼山洪灾害防灾减灾模式,并示范推广。通过研究实现以下创新:1)从揭示诱发山洪的中小尺度天气系统形成机理入手,研发山区短时临近暴雨预报技术,提高山区致灾洪水暴雨预报精度,有效延长山洪灾害预警期。2)通过研究多源遥感、雷达、微纳感知、智能识别等山区雨洪监测数据采集技术与适应、实用稳定的传统技术集成与融合,构建空天地一体化山洪多要素立体监测技术体系,实现技术创新,延长山洪预警期。3)通过解析山区暴雨洪水-灾变响应过程,阐明暴雨山洪形成过程及致灾动力机制,构建基于降雨预测和土壤含水量动态监测的山洪过程动态模拟模型,提高山洪灾害预警准确性与可靠性。4)以山区洪水的运移过程为切入点,建立山洪灾害多指标预警模型,研发山洪灾害实时动态分级预警技术,有效延长灾害预警期,提高应急抢险应对处置时效。基于以上内容,为目前实施的山洪灾害防治县级非工程措施改造升级完善布局建设,提升国家防灾减灾救灾能力,保障山丘区人民生命财产安全和社会经济可持续发展提供科技支撑。

关键词:山洪灾害;立体监测;动态预警;监测预警信息平台

中图分类号:X43

文献标志码:A

文章编号:2096-3246(2018)05-0001-11

Research Framework and Anticipated Results of the Key Technology and Integrated Demonstration of Mountain Torrent Disaster Monitoring and Early Warning

ZHANG Pingcang^{1,2}, DING Wenfeng^{1,2*}, WANG Xiekang³

(1.Changjiang River Scientific Research Inst. of Changjiang Water Resources Commission, Wuhan 430010, China;

2.Research Center on Mountain Torrent Geological Disaster prevention of Ministry of Water Resources, Wuhan 430010, China;

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

Abstract: Due to the diversity and complexity of mountain flood disasters, the research in key technical fields is still in the initial stage and cannot meet the actual needs of current mountain flood disasters. How to accurately forecast local heavy rainfall, develop a mountain flood monitoring technical system and a localized flood disaster prediction model, refine the dynamic warning indicators of mountain flood disasters, realize the transition from post-disaster relief to pre-disaster prevention, build a risk assessment platform, construct a mountain flood disaster prevention model, and improve mountain flood disaster warning and risk prevention capabilities are the frontiers and hot issues of current mountain flood dis-

收稿日期:2018-08-31

基金项目:国家重点研发计划资助项目(2017YFC1502500)

作者简介:张平仓(1961—),男,教授级高工。研究方向:山洪灾害。E-mail:zhangpc@mail.crsri.cn

*通信联系人 E-mail:dingwf@mail.crsri.cn

网络出版时间:2018-09-07 11:06:46

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/51.1773.TB.20180906.1517.001.html>

<http://jsuese.ijournals.cn>

<http://jsuese.scu.edu.cn>

aster research, and the practical problems that must be faced in the construction of county-level non-engineering measures for mountain flood disaster prevention which strongly implemented by the country. Focusing on the above issues, the following three key research objectives are summed up. The first one is clarifying the dynamic process of mountain flood disasters, establishing a local rainstorm forecast model and a mountain flood dynamic simulation model. The second one is developing and constructing a multi-element monitoring technology and system for mountain flood, realizing real-time dynamic transmission and release of mountain flood disaster warning and risk assessment information, solving the problem of low accuracy of mountain flood peak flow forecast, short warning period and short-term emergency response. The last one is building a multi-level and multi-target dynamic early-warning and risk assessment platform for mountain flood disasters, refining the disaster prevention and mitigation mode of mountain flood disasters, and demonstrating and promoting that to the public. The following innovations will be achieved through the research. Starting from revealing the formation mechanism of small and medium-scale weather systems that induce flood, short-term near-storm forecasting techniques in mountainous areas is developed, the prediction accuracy of floods and torrential rains in mountainous areas is improved, and the warning period of mountain flood disasters is effectively extended. By researching multi-source remote sensing, radar, micro-nano sensing, intelligent recognition and other mountain rainwater monitoring data acquisition technology and integration of adaptive, practical and stable traditional technologies, a multi-element three-dimensional monitoring technology system for air and land integration is built, technological innovation and extend the mountain flood warning period is realized. Through the analysis of the response process of flood catastrophe process in mountainous areas, the formation process of rainstorm mountain floods and the dynamic mechanism of disasters are clarified, and the dynamic simulation model of mountain flood process based on rainfall prediction and dynamic monitoring of soil water content is constructed to improve the accuracy and reliability of mountain flood warning. Taking the migration process of mountain floods as the entry point, a multi-index warning model for mountain flood disasters is established, real-time dynamic grading warning technology for mountain flood disasters is developed, the warning period of disasters is effectively prolonged, and the aging time for emergency rescue response is improved.

Key words: mountain flood disaster; three-dimensional monitoring; dynamic warning; monitoring and warning information platform

近年来,山洪灾害已成为国内外防灾减灾领域中关注的焦点。面对越来越严重的山洪灾害,许多国家已开始或正在研究与山洪过程有关的一系列问题^[1]。中国地处东亚季风区,暴雨频发,加之地质地貌复杂,人类活动影响强烈,山洪灾害频繁发生且预测预防难度大,已经成为当前防灾减灾和影响山丘区经济社会可持续发展的突出障碍之一^[2-4]。据统计,2000年以来,中国每年约1 000人因山洪灾害死亡,山洪灾害死亡人数占洪涝灾害死亡人数的70%左右^[1-2]。早在2002年,山洪灾害的频繁发生及其造成的危害就引起了党中央国务院的高度重视,相继开展了全国性的山洪灾害防治规划、山洪灾害非工程措施建设试点、山洪灾害调查评价等工作^[1]。但因中国山洪灾害问题的多样性和复杂性,以及近年来全球气候变化导致的极端降雨事件频发,山洪灾害成因机理更为复杂,国内在主要关键技术领域的研究仍处于起步和技术探索阶段。尤其是在山洪灾害预测预报、监测预警、应急响应方面更是缺乏实用、先进的技术支持,远远不能适应当前防御山洪灾害的实际需要。如何精准预报局地强降雨,研发山洪监测技术体系,提炼山洪灾害动态多预警指标,实现从注重灾后救助向灾前预防转变。如何研发因地制宜的山洪灾害预报模型,搭建风险评估平台,构建山洪灾害防御模式,提高山洪灾害预警和风险防范能力,是当前山洪灾害研究的前沿和热点问题,也是目前国家大力实施山洪灾害防治县级非工程措施项目建设必须要面

对的现实问题。

1 国内外研究现状及趋势

1.1 山洪成灾暴雨阈值确定方法

山洪灾害具有突发性,预见期短,预防难度大等特点,为获得较长的预见期,国内外普遍采用导致山洪灾害发生的临界雨量进行山洪灾害预报^[5]。临界雨量一般与降雨、土壤含水量及下垫面特性三大因素相关^[6-7],降雨包括场次降雨量、场次累积降雨量及降雨强度等因素;土壤含水量包括土壤含水量或者前期降雨等因素;流域下垫面特征包括地形、沟谷河道特征、植被、土壤等因素。国内外现有的研究工作基本是针对这三个因素,从不同侧重点、采用不同方法和模型展开的^[8-12]。欧美国家最有代表性的成果是美国FFG(Flash Flood Guidance)预警指标系列成果^[13-14],该方法较全面地考虑了降雨、土壤含水量以及下垫面特性三大因素,基于降雨、产流、汇流、演进、预警指标反推等环节,进行预警指标的计算。FFG方法由于考虑因素较全,算法具有物理机理,且提供预警指标的动态信息,故其成果在很多国家和地区得到广泛参考和运用^[14]。日本对临界雨量的拟定方法主要考虑降雨、土壤含水量这两个因素,主要有土壤雨量指数法、实效雨量法、汇流时间与降雨强度法、多重判别分析统计法等,这些方法都建立在假设降雨强度与有效累积雨量之间呈线性关系的基础上,采用临界雨量线法确定预警指标^[13]。中国台湾地

区在气候、地形地貌、植被、土壤方面更为单一,临界雨量拟定方法主要考虑降雨因素,采用降雨驱动指标值建立山洪灾害发生可能性的降雨警戒模式,该方法依据区域降雨事件的历史雨量资料,得到降雨驱动指标统计值,建立山洪灾害发生降雨警戒的下缘线及上缘线,以此确定降雨事件山洪灾害不同程度的发生可能性^[14]。

在中国大陆地区,降雨、土壤含水及下垫面特性这三大因素随地域的不同差异较大,且降雨、水文等基础性资料丰富程度不一,因此山洪灾害临界雨量的拟定方法主要基于统计归纳法^[6-12]。统计归纳法直接从降雨数据与山洪灾害数据推求临界雨量,方法简单,对数据的需求相对较少。但在同一地区采用不同统计归纳方法得到的临界雨量指标并不一致,多数情况下获得的临界雨量初值不能直接应用,需结合专家经验作进一步确认。

1.2 山洪灾害监测预警技术

在山洪灾害预警技术方面,国外的起步较早,主要是通过设立传感器感受山洪幅频信号,通过传输手段建立预警系统。美国水文研究中心(HRC)研发了山洪预警指南,已广泛应用于中美洲、韩国、湄公河流域四国、南非、罗马尼亚及美国加利福尼亚等地^[14];马里兰大学与美国国家河流预报中心研制了分布式水文模型山洪预报系统(HEC-DHM)^[13];日本国际合作社(JICA)开发了在加勒比海地区以社区为基础的山洪早期警报系统等^[13,15];世界气象组织(WMO)也在积极推进一体化洪水管理理念,并在南亚地区成功开展了示范区项目^[16-17]。中国的铁道系统和中科院也做过部分相关工作^[18-19],铁道科学院通过临界雨量值和设立传感器的形式完成预警,中国科学院将泥石流形成的临界判别式制成预报图进行临近预报。

随着社会经济的发展,城镇化进程的加快,流域单位面积上人口及财产分布更加密集,暴发同等规模的山洪所带来的损失将增大,现有的山洪监测预警技术存在有效期短、预警精度低等诸多问题。因此,利用现有的各种先进技术和手段,充分考虑山洪特点,研发高精度的山洪监测预警系统成为一种必然趋势。随着观测设备的不断进步和研发,不但可以有有效的监测强灾害性天气系统的形成及演变过程,而且在有利的大尺度背景下,使从更小尺度分析强灾害性天气系统、并为强灾害性天气系统的预报、预测成为可能。新一代多普勒天气雷达是一个重要的监测工具^[20-22],不仅能探测到降水回波强度的大小,而且还能探测到降水回波的径向速度和速度谱宽,可以描述降水云系内部的气流结构、小尺度流场特

征。随着我国新一代天气雷达网的布设,利用多普勒天气雷达资料实时监测强天气系统,给出强天气的影响范围,预报强天气的未来移动方向和位置,对灾害性天气系统进行监测和预警成为天气雷达的最主要用途之一^[23-29]。

1.3 山洪灾害形成机理与模拟模型

鉴于山洪主要发生小流域,往往没有或很少有观测资料,对其进行水文预报仍然是国际水文学界尚未解决的重大科学问题,并且,引发山洪的暴雨历时往往很短,降雨与径流之间的关系非常复杂,基于单位线或瞬时单位线的降雨-径流模型并不适用^[30-32]。随着计算机技术的快速发展,其性能不断提高,为对小流域进行精细水动力学数值模拟提供了条件,且水动力学模型所涉及的参数具有明确的物理意义,相对于水文模型中的众多参数易于作出合理的估计。所以,建立精细水动力学数值模拟技术以预报给定降雨条件下流域洪水的生成与演进过程是今后山洪预报的方向之一^[33-35]。目前已有学者运用完整的一维水动力学模型描述坡面产、汇流过程以及山洪的形成和演化过程^[36-39],这种方法虽然理论上能够描述水流主要的运动特性,反映山洪在河道中的演化过程,但无法描述不规则坡面上的水流参数的平面分布。基于运动波和扩散波的模型能够预报山洪区域的内部水位、流速过程,但由于其忽略了流动的力学因子,难以准确描述山洪的形成与演化过程。

相对于暴雨产汇流的数值模拟来说,对洪水演进的数值模拟研究更为广泛和深入^[40],平面二维数值模型已成为模拟洪水演进的主流手段^[41]。由于山丘区小流域地形坡度大,间断水流在计算区域几乎无处不在,因此山洪演进数值模型与溃坝洪水演进数值模型类似^[42],必须解决好间断波的捕捉问题。

2 山洪灾害监测预警关键技术与集成示范的研究内容

2.1 拟解决的关键科学问题与关键技术问题

2.1.1 暴雨山洪形成机理、致灾机制与过程不清

山区局地暴雨形成一直是难以解决的科学难题,但又是山洪形成的最基本源动力条件,通过国内外基本建成的卫星、雷达和地面监测网络,结合双偏振雷达、测雨雷达等新技术手段跟踪暴雨实时动态过程,建立数值气象模型,揭示山区暴雨形成机理是本项目首先要解决的关键科学问题。综合考虑山区小流域高度空间异质下垫面特别是不同类型土壤(包括枯枝落叶层)渗蓄对地表产、汇流的非线性影响,解析山区暴雨洪水形成过程,提高洪水预报精度

也是本项目重要的关键科学问题。

2.1.2 山洪多要素立体精准监测技术缺乏

如何保障山洪多要素监测数据的完整性和有效不间断传输对山洪灾害预报预警至关重要。目前全国山洪灾害以雨量和洪水位为主要对象的监测体系已基本形成,但由于山区地域环境的复杂性,现有监测手段和体系难以适应和实用,存在着人为、自然毁坏和稳定性差等问题,致洪要素的漏测、漏报、传输中断等时有发生。本项目拟借鉴微纳感知、智能识别等多源信息再分析、多链路数据远程传输、广域覆盖大规模组网技术,严格按照以小流域为单元,研发基于物联网和多源异构信息融合的山洪灾害多要素立体精准监测技术体系,实现数据采集、传输特别是应急传输的有效化。

2.1.3 山洪灾害过程实时动态精准预报预警精度不高

如何实现山洪灾害预报的准确性和预警的精确性一直是防灾减灾救灾的关键环节。目前山洪灾害预报预警主要采用暴雨量预警和洪水位预警,但由于山丘区环境的复杂性和山洪形成的多要素性,雨量和水位等预警指标的分析过程对土壤含水量考虑不足,水文预报的准确性不高,预警的及时性不够,

系统研究山区暴雨与土壤含水量动态变化下山洪致灾机制与预警指标变化,建立致灾山洪实时动态多指标预警模型,提出山洪致灾多指标临界阈值的确定方法,集成基于暴雨与土壤含水量动态变化的山洪灾害实时动态预报预警技术,开展山洪成灾实时预警诊断,实现山洪灾害预警期有效延长,提高山洪灾害时效性。

2.1.4 多空间尺度山洪灾害风险评估与应急抢险应对处置时效低

科学评估山洪灾害风险是有效进行山洪灾害风险管理的前提和基础,运用山洪灾害动力过程模拟模型和三维地形场景耦合,构建多空间尺度(小流域、区域)山洪灾害多目标动态风险评估模型,综合考虑不同区域经济发展水平山区城镇“自然-社会”二元结构特征,结合山洪实时动态多指标预警,提高山洪灾害应急抢险应对处置时效,降低灾害风险,提高灾害防御水平,发展和完善山洪灾害风险评估理论和方法是本项目的关键技术问题之一。

2.2 研究内容

围绕上述关键科学技术问题,开展以下6个方面的研究,研究内容分解图如图1所示。

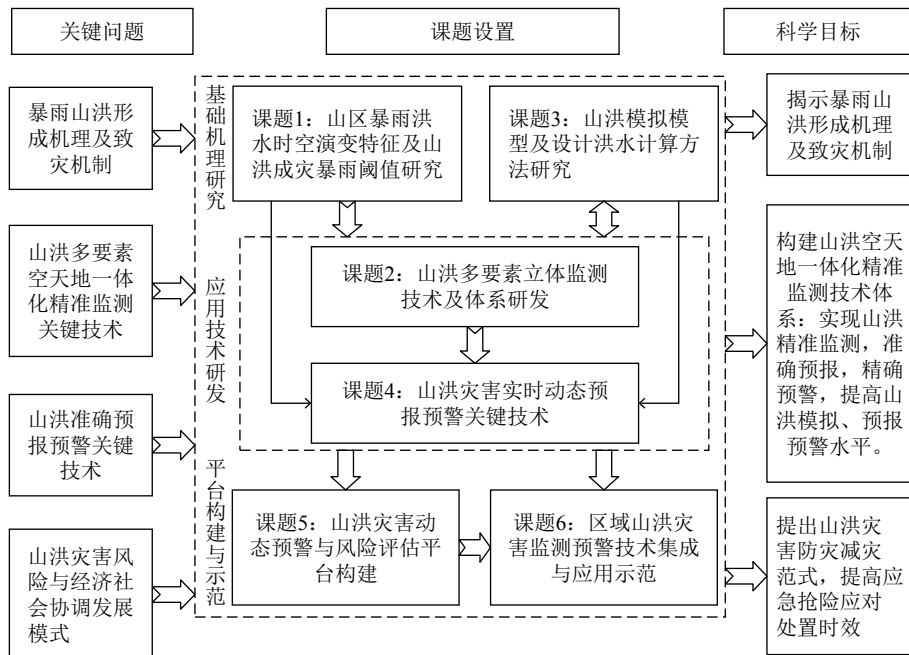


图 1 项目研究内容间的逻辑关系框图

Fig. 1 Diagram of the logical relationship between the project research content

2.2.1 山区暴雨洪水时空演变特征及山洪成灾暴雨阈值研究

研究目标:发展降雨多源信息融合技术,完成山区洪水及山洪致灾暴雨的时空分布特征分析,揭示典型山区致洪暴雨的形成机理及其时空演变规律,研发山区小流域暴雨短时临近预报技术和山洪致灾

暴雨阈值确定技术,编制山洪致灾暴雨阈值分布图。

研究内容:

1) 山区暴雨洪水时空演变特征

研发雷达、卫星遥感观测和地面观测的多源降雨数据融合技术与方法,建立耦合多源降雨观测数据的空间尺度降解模型;构建全国逐日降水数据集,

解析山洪灾害点和降水的匹配关系,揭示全国山洪灾害时空演变特征,绘制全国山洪灾害时空分布图;阐明全国尺度和区域尺度山洪致灾暴雨的多时空尺度分布演变特征,分析多尺度降水特征与山洪分布的关系,绘制全国山洪致灾暴雨的时空分布图。

2)山洪致灾暴雨发生机制

利用NCEP/NCAR再分析技术揭示典型区域中小尺度对流系统的时空分布特征及其移动变化规律;分析暴雨中小尺度对流系统(MCS)发展不同阶段的热力动力结构特征、发生发展机理、时空演变规律以及与降水场(尤其是暴雨)的关系,建立典型区域强降水天气系统发生发展的物理概念模型,探寻能反映中小尺度对流系统发生发展的预报因子;分析暴雨事件环境场对中小尺度组织结构和发展过程的影响,研究下垫面信息(植被覆盖、土地利用、地形等)与暴雨发生发展之间的关系,分析研究高低空中尺度急流耦合机理及特定中尺度地形对强降水量级和空间分布的影响等。

3)局地短时临近暴雨预报技术

发展基于金字塔层叠架构的LK光流技术,实现雷达回波的平流背景风场反演;发展基于强度守恒约束的半拉格朗日外推技术,构建快速雷达回波短临外推技术;基于深度学习神经网络的动态Z-R关系反演技术以及背景平流风场优化技术,实现动态强降水反演;通过上述技术研究实现基于雷达和地面观测数据的局地短时临近暴雨预报技术。

4)成灾山洪暴雨阈值确定技术

分析流域产汇流特性,结合当地防洪标准,综合考虑洪灾频率,提出研究区致灾水位,依据水位流量关系推求控制断面安全泄量;分析临近暴雨、初始土壤含水量以及安全泄量的关系,提出成灾山洪雨量动态阈值确定技术;提出不同示范区成灾山洪雨量的动态阈值拟定方法,绘制不同区域山洪致灾雨量动态阈值分布图。

2.2.2 山洪多要素立体监测技术及体系研发

研究目标:研发全天候、全过程、空天地一体化的山区暴雨、土壤含水量、山洪动态实时监测技术,广覆盖、大规模、分布式组网技术,多链路、多要素、多源异构数据远程实时应急传输技术,构建山区环境适应、实用、先进的山洪多要素立体监测技术体系,为山洪模型验证、精细化风险评估、预警和延长预警时间提供实时动态数据和技术支撑。

研究内容:

1)山洪多要素智能感知动态监测技术

研发基于多源遥感、雷达、微纳传感等手段的智能监测技术,及其与传统监测技术的融合技术;跟踪

监测暴雨云团、强对流天气动态演变过程,超前预测山洪发生,延长预警期。

2)复杂山区环境条件下山洪监测站网布设理论与优化技术

分析山区环境复杂的空间异质性、降雨-土壤水分-产汇流的梯度效应和时空变异性、局部地形变化对山洪过程及水位的影响、监测仪器设备的特点和使用局限性,探索适应复杂山区环境的山洪监测仪器配置(接触式、非接触式及固定式、移动式仪器的优化组合)、站网优化布局理论、方法与技术,研发山洪区流域/行政单元广覆盖、大规模、分布式组网技术,编制山洪灾害监测站网布局及仪器配置技术导则。

3)山洪监测信息实时应急多链路传输技术

研发有无公网覆盖和极端环境条件下山洪灾害多源监测信息的多链路(4G/5G等公网、星地数据链等)传输技术、通信保障链路智能切换技术,实现广域覆盖、多链路山洪灾害监测数据的实时、应急、有效、稳定、安全传输。

4)山区小流域山洪多要素立体监测技术体系构建

融合物联网“大智网云”理念,系统集成山洪多要素监测方法、数据实时应急传输技术与监测站网优化布局技术,构建空天地一体化的山区小流域山洪灾害多要素立体监测体系。

2.2.3 山洪模拟模型及设计洪水计算方法研究

研究目标:识别山区暴雨-洪水形成和演进过程关键要素,着重阐明高势能和高度异质下垫面条件下的山区暴雨-洪水形成及致灾机理;研制山区流域产汇流模型和山区河道洪水演进模型,确定在缺少水位和流量资料条件下的参数率定方法;提出山区设计洪水计算方法,为山洪灾害实时动态预报预警和风险分析提供理论基础。

研究内容:

1)山区暴雨-洪水形成及致灾机制

识别山区小流域径流形成和演进的关键因子;研究山区暴雨-地形-土壤-植被互馈驱动的径流形成机制,阐述蓄满产流与超渗产流条件下山洪过程的水动力特性,探索山区河(沟)道的洪水演进和致灾机制;提出山区暴雨洪水成灾的流域面积、土壤含水量、临界流量、临界水位等关键地理和水文阈值。

2)山区流域产汇流模型

研究山区小流域高度异质下垫面条件下植被冠层截留和蒸散发机制,明确降水-植被-土壤界面水分交换过程,分析土壤中的浸润锋面变化、土体饱水带的扩展及其空间分布特征,揭示山区小流域的非线性产流机制;研究山区松散堆积物对坡面汇流的

阻碍机理,提出基于分布式原理和水动力原理的坡面产汇流模型;确定在缺少流量和水位资料条件下,土壤含水量、下垫面特征、蒸散发等重要参数的遥感反演方法。

3)山区河道洪水演进模型

研究山洪在小流域河(沟)道的演进过程,探索山洪对不同承灾体的冲击、淹没和浸泡作用机制;确定动力波和运动波在山区洪水演进中的适用条件,结合山洪对承灾体的作用机制,开发适合于山区高势能条件的河(沟)道洪水演进水动力学模型;在缺少流量和水位资料的条件下,确定模型的糙率等关键参数的率定方法,模拟山洪对不同承灾体的淹没范围、历时和冲击力。

4)山区流域致灾设计洪水计算方法

利用典型致灾洪水过程线,确定根据流量和暴雨计算设计洪水的方法;基于山区暴雨洪水成灾的关键因素地理和水文阈值,结合山区流域产汇流模型和山区河道洪水演进模型,提出针对山区流域不同承灾体的设计洪水计算方法,编制山区流域设计洪水计算指南。

2.2.4 山洪灾害实时动态预报预警关键技术

研究目标:研究山区暴雨作用下土壤含水量动态变化特性,建立暴雨成灾山洪的降雨、水位/流量、流速预警指标,研发基于暴雨与土壤含水量动态变化的实时预报预警技术,提高山洪洪峰流量预报精度,构建考虑不同尺度流域洪水过程致灾与行政区划管理模式相结合的山洪灾害分区分级预警与防御技术,延长山洪灾害预警期,为山区暴雨山洪灾害高效预警与防御提供相关科学基础与技术支撑。

研究内容:

1)基于暴雨-土壤含水量动态变化的山洪预警指标构建

建立适用于山区的改进Green-Ampt降雨产流入渗模型(GAF),建立典型示范区土壤含水量动态变化模型,评估国家气象中心卫星遥感反演CLDAS的表层土壤含水量数据(0~10 cm)与深层(10~40 cm)关系,改进深层反演模型。基于土壤含水量动态变化的山洪过程与不同受灾体致灾机制,分析水流速度冲击破坏动力、水位/流量变化特征,系统分析不同条件下的预警指标阈值变化规律,构建暴雨与土壤含水量变化的暴雨山洪成灾动态预警指标。

2)山洪实时动态预报技术

结合暴雨山洪模拟过程,研究土壤含水量变化对暴雨山洪过程预报精度的影响,建立考虑土壤含水量动态变化的山区小流域暴雨山洪高精度预报模型。耦合小流域降雨预报及暴雨山洪预报模型与参

数实时校正技术,研发暴雨条件下降雨-土壤含水量-山洪过程的实时动态预报技术,分析不同示范区暴雨山洪过程与成灾山洪预见期变化特征。

3)致灾山洪多指标实时动态分级预警技术

研究不同流域尺度和暴雨条件对小流域洪水过程的影响及致灾机制,建立山洪成灾区受灾体的临界雨量、水位/流量等多指标预警模型。建立基于暴雨与土壤含水量动态监测的山洪灾害实时预警模型;建立融合大数据和专家知识的山洪灾害多指标联动预警方法,提出流域洪水过程与行政区划管理模式相结合的实时分区分级预警发布模式。

2.2.5 山洪灾害动态预警与风险评估平台构建

研究目标:研发多源异构数据同化与融合处理技术;构建基于致灾机理模型的山洪灾害演进过程三维模拟技术,开发局地短时临近暴雨预报模型、山洪实时动态预报模型、致灾山洪多指标实时动态分级预警模型的集成模块;研发山洪灾害风险预测模型、多目标风险动态评估模型;开发以山洪动态监测数据库、山洪灾害演进过程三维模拟、山洪灾害预报预警模块、风险评估模块、风险信息查询发布模块等为主的山洪灾害动态预警与风险评估平台,实现对山洪灾害应急抢险处置的决策支持。

研究内容:

1)山洪灾害多源异构数据同化与融合技术

采用现代智能同化算法,研究基于多监测手段、多站网、多传感器的多源数据同化技术;采用信息论、决策论、人工智能等方法,结合网络通讯技术、数据处理技术、云计算技术,研发多源异构数据的混合式时空融合技术、多源时空信息快速接入技术,提出基于特征级和决策级的多源数据深度融合技术;发展多源数据支持下的山洪灾害多维信息提取模型。

2)山洪灾害实时动态预报预警模型集成

建立山洪灾害动态监测数据、预报模型、预警模型的拓扑关系;构建基于致灾机理模型的山洪灾害演进过程三维模拟技术,揭示山洪灾害危险性动态变化规律;开发局地短时临近暴雨预报模型、山洪实时动态预报模型、致灾山洪多指标实时动态分级预警模型集成模块,实现基于山洪灾害演进过程的暴雨山洪预报预警一体化。

3)山洪灾害多目标动态风险评估模型研制

建立基于先验知识的山洪灾害风险预测,研发不同预警等级的山洪灾害风险预测模型;采用大数据挖掘技术,研究小流域承灾体属性的异质特征和动态变化规律,建立以物理毁损、人员伤亡、经济损失、生态影响为主的多目标风险动态评估模型;开发集成致灾因子强度与承灾体属性的灾情推演与风险

动态评估技术。

4)山洪灾害动态预警与风险评估平台开发

基于C/S构架,构建面向灾害过程的时空信息协同处理与聚焦服务模型;采用海量数据存储技术、分布式技术、实时数据库技术,开发以山洪动态监测数据库、山洪灾害演进过程三维模拟、山洪灾害预报预警模块、风险评估模块、风险信息查询发布模块为核心,构建由网络层、系统硬件层、数据资源层、信息处理层、应用层、业务层和访问层的山洪灾害动态预警与风险评估平台。

2.2.6 区域山洪灾害监测预警技术集成与应用示范

研究目标:选择西南地区都江堰市白沙河流域、黄土高原区子洲县岔巴沟流域、秦巴山地区丹江口市官山河流域、华南地区望谟县望谟河流域、东南沿海区高州市马贵河流域为对象,进行区域山洪多要素立体监测和实时动态预警预报示范应用,优化和完善区域山洪监测和灾害预警预报,提高山洪灾害预警预报精度和应急抢险应对处置时效性,构建可推广的区域山洪防灾减灾救灾范式。

研究内容:

1)山洪灾害立体监测体系应用示范

综合区域山洪要素监测体系建设现状和山洪灾害防治需求,评价现有山洪监测要素、手段和布局对山洪过程监测效果的影响,筛选和调整山洪监测要素,优化监测站网布局,对现有的山洪监测体系进行升级改造。

2)山洪灾害预警报技术应用示范

分析和评价现有预警预报体系的灾害预警效能和预报水平,运行山洪灾害立体监测体系,获取和分析流域山洪致灾要素数据,验证山洪灾害预警预报模型;构建不同区域尺度(小流域、村、镇、县、省、中央)山洪灾害预警报技术体系,实现区域山洪灾害的精准化预报、可视化管理和智能化决策。

3)山洪灾害应急抢险应对处置研究与示范

建立区域地质地貌、土壤植被、水文气象、社会经济、山洪监测设施效能、灾害预警预报水平和历史山洪灾害损失数据库,丰富和完善应急抢险应对处置措施与环节,建立最优山洪灾害应急抢险应对处置体系;完善和修订各级山洪灾害应急抢险和应对处置防御预案。

4)山洪灾害监测预警报技术集成与区域防灾减灾救灾范式

构建流域山洪监测和区域灾害预警报一体化技术体系,探索山洪灾害风险管理与区域社会发展需求的最优结合方式,提出引导群众、企业等民间力量参与山洪灾害防御的科学方式与创新机制,实现风

险管理和区域社会协同发展,构建可推广的区域山洪灾害防灾减灾救灾范式。

3 山洪灾害监测预警关键技术与集成示范的技术路线

3.1 研究思路

收集现有卫星遥感、雷达和地面观测多源降雨数据,运用统计分析、时间序列分析、空间尺度降解等技术,揭示山区暴雨形成机理,分析暴雨山洪时空演变特征,研发并提出适合山区复杂环境特点的多时空尺度山洪成灾暴雨阈值拟定方法,编制山洪致灾暴雨阈值分布图;针对山区自然、社会环境区域差异及山洪致灾机制,筛选影响山洪灾害发育、发生、成灾的关键因子,在现有山洪灾害监测站网基础上,进一步研发并集成系列适应实用且先进的空天地一体化山洪多要素精准数据信息采集、传输技术体系,并在典型小流域开展试验示范;以监测数据、原位实验观测、野外实地调查等为手段,结合数值模拟等方法,建立山区小流域山洪精细化过程模拟模型,根据流域承灾体分布及特征,揭示暴雨山洪致灾机制,构建山洪灾害风险评估方法,据此确定山洪灾害预报预警指标体系及阈值,提出预警实施方案;集成构建基于多源异构数据融合同化和多目标服务的山洪灾害动态预警与风险评估大数据云计算共享平台,并在不同山洪灾害防治类型区的不同尺度(小流域、县级、地区级、省级、中央级)开展示范应用,形成区域山洪灾害防灾减灾救灾模式。项目研究思路见图2。

3.2 技术路线

各个研究内容的具体技术路线为:

1)山区暴雨洪水时空演变及山洪成灾暴雨阈值研究

运用地面观测、探空、卫星、雷达资料以及NCEP/NCAR再分析资料,分析山区暴雨多尺度天气系统的基本形态和背景场环流特征,建立强降水天气系统发生发展的物理概念模型,揭示暴雨形成机理。运用中尺度数值模拟技术,分析地形对强降水量级和空间分布的影响。收集多年降雨资料,利用LK光流技术和Z-R关系反演技术,研究山区小流域暴雨短时临近预报技术。选用适用于示范小流域的水文模型,以出口断面流量超过安全泄量反推成灾山洪动态雨量阈值。

2)山洪多要素立体监测技术及体系研发

收集多普勒雷达、风廓线仪、双偏振雷达等监测资料以及ATOVS卫星反演产品,研发局地暴雨监测新技术与常规技术的集成与融合,构建卫星遥感-雷达-地面监测多源信息再分析技术;集成基于微纳感

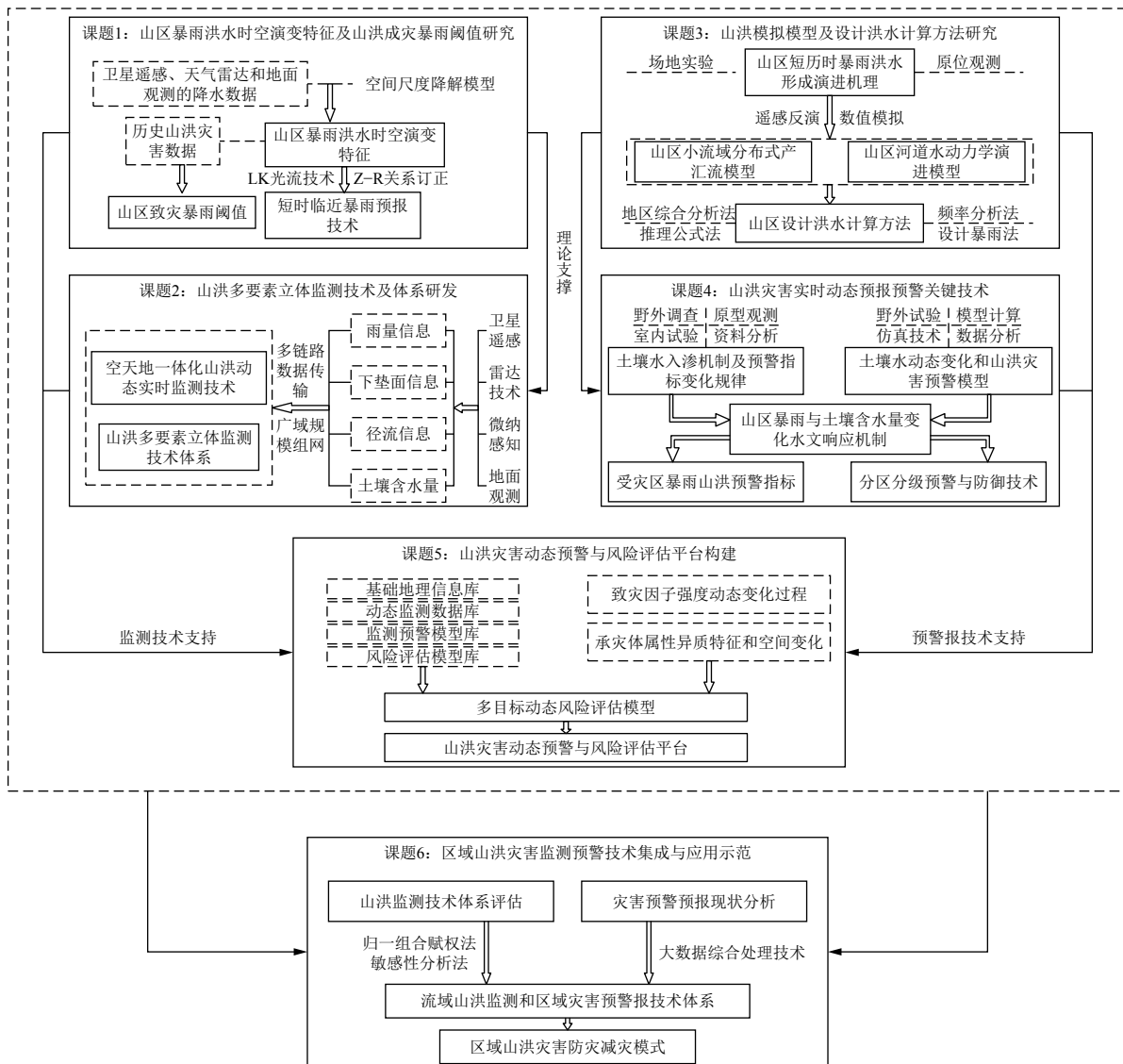


图 2 项目技术路线

Fig. 2 Technology roadmap of the project

知和北斗3号卫星的以土壤含水量为代表的流域下垫面监测技术,并与水文在线监测技术融合,实现流域洪水及下垫面的实时监测;运用系统论、信息熵、决策控制等原理,探索适应复杂山区环境的山洪监测仪器配置、站网优化布局理论和方法;基于“大智网云”理念,研发集成基于空天地一体化的山洪关键要素立体监测技术体系。

3) 山洪模拟模型及设计洪水计算方法研究

采用室内实验和原位观测等手段,运用水文学、水动力学理论,建立反映暴雨-地形-土壤(植被)-地表径流互馈驱动非线性机制的时变增益因子模型,揭示山区高势能、高速水流水动力特性及致灾机制。收集山区流域实测数据和洪水调查资料,运用模糊分析、聚类分析、多元回归等方法计算山区暴雨洪水成灾的流域特征、土壤含水量、流量、水位等关键参

数阈值;通过Volterra泛函级数和交替方向隐式迭代法,建立小流域河(沟)道洪水演进模型,揭示洪水演进过程中对承灾体的淹没、浸泡和冲击机制,提出山区小流域设计洪水计算方法。

4) 山洪灾害实时动态预报预警关键技术

基于暴雨山洪过程监测和数值模拟,研究小流域降雨、土壤含水量与洪水流量、水位的变化规律,分析成灾的临界指标变化,提出多级山洪预警动态指标,构建基于暴雨与土壤含水量动态变化的山洪实时预报模型。利用基于物联网和云平台实时传输的降雨、土壤含水量、山洪过程监测数据,建立暴雨山洪过程实时校正与预警指标动态变化的预警模型,采用云计算与数据挖掘融合技术,提出流域洪水过程与行政区划管理模式相结合的实时分区分级预警模式,建立区域山洪灾害风险控制与防御处置方案。

5) 山洪灾害动态预警与风险评估平台构建

采用特征提取、聚类分析等方法对多源数据进行融合和同化,提取山洪灾害孕灾环境和影响因素信息,建立基于动态构建算法的深度学习模型,定量预测山洪灾害的预警等级。基于水文学、自然灾害学以及大数据理论,通过山洪灾害动力过程模拟和三维地形场景构建,分析山洪灾害危险性随暴雨和土壤含水量的动态变化过程;结合大数据挖掘方法,分析承灾体属性的异质特征和空间动态变化,建立致灾因子强度与承灾体属性的灾情推演与风险动态评估模型,构建基于时空连续多源信息接收的山洪灾害监测预警大数据云共享储存、分析平台。

6) 区域山洪灾害监测预警技术集成与应用示范

采用归一组合赋权和敏感性分析,评估山洪灾害监测动态预警与风险评估平台对时空连续多源信息的采集、传输、预报、预警与发布的精准度,并开展各级防汛决策单元的应用示范;采用归一化处理方法和人工神经网络算法,对灾害应急抢险应对处置措施重要程度进行排序,建立最优山洪灾害应急抢险应对处置体系;采用“试验性运行-效果评价-反馈修正”方法,集成流域山洪监测和区域灾害预警报技术,构建区域山洪灾害风险管理与区域发展协调的防灾减灾救灾模式。

4 结论与展望

围绕目前中国山洪灾害研究中存在的暴雨山洪形成机理、致灾机制与过程不清,山洪多要素立体精准监测技术与体系缺乏,山洪灾害过程实时动态精准预报预警不高,多空间尺度山洪灾害风险评估与应急抢险应对处置时效性低等关键科学和技术问题展开攻关,最终在山区局地短时临近暴雨形成机理与预报、山洪多要素立体监测技术与体系、暴雨山洪致灾机制与模拟、山洪灾害多指标预警模型等方面取得突破和创新。为目前实施的山洪灾害防治县级非工程措施改造升级完善布局建设,提升国家防灾减灾救灾能力,保障山丘区人民生命财产安全和社会经济可持续发展提供科技支撑。

本研究成果直接为占全国国土面积一半以上的区域提供山洪灾害监测预警技术支撑,项目的实施能够有效提高我国山洪灾害监测预警水平,对于重大自然灾害监测预警与防范具有重大的社会效益,能为丰富和发展保障我国的防洪减灾的科学决策发挥重要作用,为国家制定防洪减灾救灾规划提供决策依据。

参考文献:

[1] 张平仓,赵健,胡维忠,等.中国山洪灾害防治区划[M].武

汉,长江出版社,2009.

- [2] The Yangtze River Water Resources Commission. The mountain torrent disaster prevention and control of the national planning report[R].2005.[全国山洪灾害防治规划编写组,长江水利委员会.《全国山洪灾害防治规划报告》[R].2005.]
- [3] Ma Meihong, He Bingshun, Guo Liang, et al. Mountain torrent disaster characteristics and problems of our country in 2012[J]. *China Flood & Drought Management*, 2014, 24(2): 15-18.[马美红,何秉顺,郭良,等.2012年我国山洪灾害特点及问题[J]. *中国防汛抗旱*, 2014, 24(2): 15-18.]
- [4] Ding Wenfeng, Du Jun, Chen Xiaoping, et al. Mountain torrent disaster hazard assessment and regionalization of sichuan province[J]. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2015, 32(12): 41-45.[丁文峰,杜俊,陈小平,等.四川省山洪灾害风险评估与区划[J]. *长江科学院院报*, 2015, 32(12): 41-45.]
- [5] Yoshimura C, Omura T, Furumai H, et al. Present state of rivers and streams in Japan[J]. *River Research and Applications*, 2005, 21(2/3): 93-112.
- [6] Li Changzhi, Guo Liang. Review on the method of critical rainfall flash floods determination[J]. *China Flood & Drought Management*, 2013, 23(6): 23-28.[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.]
- [7] Chen Guiya, Yuan Yaming. Study on method of critical rainfall calculation of mountain torrent disaster[J]. *Yangtze River*, 2005, 36(12): 40-43.[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.]
- [8] The mountain torrent disaster prevention and control of the national planning leading group office, Rules for critical rainfall calculation on Mountain torrent disaster[Z]. 2003.[全国山洪灾害防治规划领导小组办公室.山洪灾害临界雨量分析计算细则[Z]. 2003.]
- [9] 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.]
- [10] Ye Jinyin, Li Zhi Jia, Chang Lu. Research and application of flash flood early warning method based on dynamic critical precipitation[J]. *Meteorological Monthly*, 2014, 40(1): 101-107.[叶金印,李致家,常露.基于动态临界雨量的山洪预警方法研究与应用[J]. *气象*, 2014, 40(1): 101-107.]
- [11] Li Changzhi, Guo Liang, Liu Changjun, et al. Flash flood early-warning indicators based on distributed hydrological model[J]. *China Flood & Drought Management*, 2015, 25(1): 70-76.[李昌志,郭良,刘昌军,等.基于分布式水文模型的山

- 洪预警临界雨量分析[J].*中国防汛抗旱*,2015,25(1):70-76.]
- [12] Li Tiefeng,Cong Weiqing.A method for rainfall-induced landslides prediction based on Logistic regression and effective antecedent rainfall[J].*The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*,2006,17(1):33-35.[李铁锋,丛威青.基于Logistic回归及前期有效雨量的降雨诱发型滑坡预测方法[J].*中国地质灾害与防治学报*,2006,17(1):33-35.]
- [13] 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)*,2016,46(3):317-320.[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)*,2016,46(3):317-320.]
- [14] 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.]
- [15] Zhou Jinxing,Wang Lixian,Xie Baoyuan,et al.A review on the technique of forecasting and alarming flash flood and debris flow disaster[J].*Journal of Mountain Science*,2001,19(6):527-532.[周金星,王礼先,谢宝元,等.山洪泥石流灾害预报预警技术述评[J].*山地学报*,2001,19(6):527-532.]
- [16] Baum R L,Godt J W.Early warning of rainfall-induced shallow landslides and debris flows in the USA[J].*Landslides*,2010,7(3):259-272.
- [17] Gaume E,Bain V,Bernardara P,Newinger O,et al.A compilation of data on European flash floods[J].*Journal of Hydrology*,2009,367(1):70-78.
- [18] 国家防汛抗旱总指挥部办公室.中国科学院水利部成都山地灾害与环境研究所著.山洪泥石流滑坡灾害及防治[M].北京:科学出版社,1994.
- [19] Guo Liang,Tang Xuezhe,Kong Fanzhe.Research and application of mountain torrent disaster early warning and forecasting based on distributed hydrological model[J].*China Water Resources*,2007(14):38-41.[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其应用[J].*中国水利*,2007(14):38-41.]
- [20] Wang GaiLi,Liu Liping,Ruan Zheng.Application of doppler radar observation to rainfall nowcasting[J].*Meteorological Monthly*,2007,31(10):12-15.[王改利,刘黎平,阮征.多普勒雷达资料在暴雨临近预报中的应用[J].*应用气象学报*,2007,31(10):12-15.]
- [21] Wang GaiLi,Liu Liping,Ruan Zheng.Storm identification tracking and nowcasting techniques based on the radar mosaic data[J].*Plateau Meteorology*,2010,29(6):1546-1555.[王改利,刘黎平,阮征,等.基于雷达回波拼图资料的风暴识别、跟踪及临近预报技术[J].*高原气象*,2010,29(6):1546-1555.]
- [22] Zheng Yongguang,Chen Jong,Zhu Peijun.The mesoscale convective system distribution and its variation characteristics in China and surrounding areas in summer[J].*Chinese Science Bulletin*,2008,53(4):471-481.[郑永光,陈炯,朱佩君.中国及周边地区夏季中尺度对流系统分布及其日变化特征[J].*科学通报*,2008,53(4):471-481.]
- [23] Zheng L,Sun J,Zhang X,et al.Organizational modes of mesoscale connective systems over central east China[J].*Weather and Forecasting*,2013,28(5):1081-1098.
- [24] Koenig M.The MSG global instability indices product and its use as a nowcasting tool[J].*Weather Forecasting*,2009,24(1):272-285.
- [25] Duan Xu,Wang Man,Chen XinMei,et al.Localization of operational experiment on the WRF mesoscale numerical modeling system[J].*Meteorological Monthly*,2011,37(1):39-47.[段旭,王曼,陈新梅,等.中尺度WRF数值模式系统本地化业务试验[J].*气象*,2011,37(1):39-47.]
- [26] Fan Shuiyong,Guo Yongrun,Chen M,et al.Application of WRF 3D Var to a high resolution model over Beijing area[J].*Plateau Meteorology*,2008,27(6):1181-1188.[范水勇,郭永润,陈敏,等.高分辨率WRF三维变分同化在北京地区降水预报中的应用[J].*高原气象*,2008,27(6):1181-1188.]
- [27] Wang Xiaojun,Ma Hao.Progress of Application of the Weather Research and Forecast(WRF)Model in China[J].*Advances in Earth Sciences*,2011,26(11):1191-1199.[王晓君,马浩.新一代中尺度预报模式(WRF)国内应用进展[J].*地球科学进展*,2011,26(11):1191-1199.]
- [28] Liu Ruixia,Chen Hongbin,Chen Dehui,et al.A case study of impact of FY-2C satellite data in cloud analysis to improve short-range precipitation forecast[J].*Atmospheric and Oceanic Science Letters*,2014,7(6):527-533.
- [29] Lei Lu,Song Xingyuan,Luo Peng,et al.Variable unit hydrograph and Nash IUH In flood forecasting application[J].*Water Resources and Power*,2011,29(3):51-53.[雷璐,宋星原,罗鹏,等.变动单位线与纳西瞬时单位线在洪水预报中的应用[J].*水电能源科学*,2011,29(3):51-53.]
- [30] Tang Yongpeng.Research on critical rainfall of a flash flood disaster based on concentration model of GIUH- case of Chenjiahe watershed[D].Xi'an:Xi'an University of Science and Technology,2017.[唐永鹏.基于地貌瞬时单位线汇流模型的山洪灾害临界雨量研究-以陈家河流域为例[D].西安:西安理工大学,2017.]
- [31] An Kejun.Research on torrential rain and flash flood[D].Zhengzhou:North China Institute of Water Resources and Hydropower,2012.[安可君.小流域暴雨山洪预报模型研究[D].郑州:华北水利水电学院,2012.]

- [32] Mukhopadhyay B, Cornelius J, Zehner W. Application of kinematic wave theory for predicting flash flood hazards on coupled alluvial fan-piedmont plain landforms[J]. *Hydrological Processes*, 2003, 17(4): 839–868.
- [33] Wang Xin, Cao Zhixian, Tan Guangming. Shallow water hydrodynamic modelling of rainfall-induced flash flooding[J]. *Engineering Journal of Wuhan University*, 2009, 42(4): 413–416. [王鑫, 曹志先, 谈广鸣. 暴雨山洪水动力学模型及初步应用[J]. *武汉大学学报(工学版)*, 2009, 42(4): 413–416.]
- [34] El-Hames A, Richards K. An integrated, physically based model for arid region flash flood prediction capable of simulating dynamic transmission loss[J]. *Hydrological Processes*, 1998, 12(8): 1219–1232.
- [35] Hsu M H, Fu J C, Liu W C. Flood routing with real-time stage correction method for flash flood forecasting in the Tanshui River, Taiwan[J]. *Journal of Hydrology*, 2003, 283(1): 267–280.
- [36] Mudd S. Investigation of the hydrodynamics of flash floods in ephemeral channels: Scaling analysis and simulation using a shock-capturing flow model incorporating the effects of transmission losses[J]. *Journal of Hydrology*, 2006, 324(1/2/3/4): 65–79.
- [37] Esteves M, Faucher X, Galle S, Vauclin M. Overland flow and infiltration modelling for small plots during unsteady rain: numerical results versus observed values[J]. *Journal of Hydrology*, 2000, 228(3/4): 265–282.
- [38] Ajayi A, Van De Giesen N, Vlek P. A numerical model for simulating Hortonian overland flow on tropical hillslopes with vegetation elements[J]. *Hydrological Processes*, 2007, 22(8): 1107–1118.
- [39] Wang Zhili, Geng Yanfen, Jin Sheng. The two-dimensional flood routing simulation[J]. *Chinese Journal of Computational Mechanics*, 2007, 24(4): 532–538. [王志力, 耿艳芬, 金生. 二维洪水演进数值模拟[J]. *计算力学学报*, 2007, 24(4): 532–538.]
- [40] Hu Siyi, Shi Yong, Wang Yintang, et al. Numerical modeling of flood routing for the middle-lower Yangtze River system[J]. *Advances in Water Science*, 2002, 13(3): 278–286. [胡四一, 施勇, 王银堂, 等. 长江中下游河湖洪水演进的数值模拟[J]. *水科学进展*, 2002, 13(3): 278–286.]
- [41] Kong Jun, Song Zhiyao, Zhang Honggui. New non-struc-

ured numerical model for solving shallow water equation and its application[J]. *Journal of Hohai University (Natural Sciences)*, 2006, 34(4): 456–459. [孔俊, 宋志尧, 张红贵. 非结构型浅水方程数值模式的建立及应用[J]. *河海大学学报(自然科学版)*, 2006, 34(4): 456–459.]

- [42] Zhou J G, Causon D M, Mingham C G, et al. Numerical prediction of dam-break flows in general geometries with complex bed topography[J]. *ASCE Journal of Hydraulic Engineering*, 2004, 130(4): 332–340.



张平仓, 博士, 教授级高级工程师, 博士生导师。现任长江水利委员会长江科学院水土保持研究所所长, 水利部山洪地质灾害防治工程技术研究中心副主任, 水利部江湖治理与防洪重点实验室副主任, 九三长江水利委员会基层委副主委, 国务院三峡建设委员会陆地环境与生态专家组成员, 湖北省政府投资项目咨询专家、中国水土保持学会和中国土壤学会多个专委会常委或委员。近年来, 作为负责人先后主持完成了“十一五”科技支撑计划课题、“十二五”科技支撑计划专题、全国山洪灾害防治规划第一研究专题、“973”计划子题、自然科学基金重大项目课题专题、“948”项目、水利部科技创新项目、水利部公益行业科研专项、中央级科学事业单位修缮购置项目、科技部农业科技成果转化项目、水利部科技创新项目、长江流域水土保持科研规划、中国水土流失与生态安全综合科学考察长江流域水土流失动态抽样调查、全国水利普查水土保持普查专题、三峡水库科学调度关键技术研究课题等20余项国家、省部级项目。同时将科研成果运用于生产实践, 主持完成多项工程科研项目。主持编写完成多项水土保持规划、2项国际合作项目、水利部标准1部, 参编标准1部, 参编公报多份, 第一完成人获批国家发明专利3项、实用新型专利多项。出版专著7部, 公开发表论文60余篇, 培养博、硕士研究生20余名。先后获得中科院科技进步一等奖、中科院自然科学一等奖、中科院科技进步三等奖、中科院方树泉奖金理事会方树泉奖学金、长江水利委员会科技进步一等奖3项、大禹科技进步二等奖、科技部“十一五”国家科技计划执行突出贡献奖、长江水利委员会突出贡献奖和长江科学院突出贡献奖、湖北省“五一”劳动奖章。

(编辑 张琼)

引用格式: Zhang Pingcang, Ding Wenfeng, Wang Xiekang. Research framework and anticipated results of the key technology and integrated demonstration of mountain torrent disaster monitoring and early warning[J]. *Advanced Engineering Sciences*, 2018, 50(5): 1–11. [张平仓, 丁文峰, 王协康. 山洪灾害监测预警关键技术与集成示范研究构想和成果展望[J]. *工程科学与技术*, 2018, 50(5): 1–11.]