

• 特约稿 •

DOI:10.15961/j.jsuese.201900261

泥沙补给突变下的山洪灾害研究构想和成果展望

王协康, 刘兴年, 周家文

(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:全球山地面积占陆地面积的30%, 每年有超过5 000人死于山洪灾害。中国山洪灾害防治区面积占陆地面积的48%, 居住人口占全国人口的44.2%。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。山地区域地形险峻, 地表破碎, 表层风化层厚, 局地暴雨频发, 洪水陡涨猛落, 沟床冲淤调整剧烈, 山洪水沙运动耦合致灾突出。山洪灾害防治已成为中国工农业、能源、交通、国防安全等国家重大工程基础建设、区域社会经济发展和人民生命财产安全面临的突出难题, 暴雨山洪灾害研究仍是中国当前防洪减灾工作的重点和难点。面对严峻的山洪水沙灾害风险形势, 传统忽略泥沙运动影响的防灾理论与技术难以解决山洪水沙耦合致灾问题, 无法满足目前重大山洪水沙灾害防治的实际需求, 突出表现为泥沙补给突变对重大山洪灾害的成灾效应认识不够、山洪水沙运动耦合成灾区识别不清、山洪水沙灾害防治技术针对性不强、山洪水沙运动防灾减灾的区域联动性考虑不全等。因此, 急需通过系统梳理暴雨山洪水沙运动规律, 实现山洪水沙耦合成灾理论创新, 提出重大山洪水沙灾害的源头治理和区域全面防范的有效措施, 显著提高中国山洪水沙灾害防治技术水平, 为保障国家重大工程安全和人民生命财产安全提供理论基础和技术支撑。长期以来的暴雨山洪灾害预报预警理论及防治技术研究多以降雨-径流-水位分析为主, 以临界降雨/水位阈值条件为判据, 较少涉及泥沙补给突变引发的沟床剧烈调整致灾机制, 而大量的暴雨山洪灾害现场表明泥沙补给与洪水的耦合作用是重大山洪灾害的关键源动力。“泥沙补给突变下的山洪灾害研究”项目以山区暴雨山洪灾害现场调查与灾害试验反演模拟为基础, 采用水文学、土力学、水力学及河流动力学等理论方法和水沙运动数值模拟技术, 突出研究山区小流域暴雨洪水、坡地破坏产沙、宽级配卵砾石输沙以及沟床来沙超量补给的水沙运动耦合致灾过程。通过系统研究山地区域暴雨洪水及其产沙特征、复杂沟床输沙动力, 以及超量泥沙补给下的水沙运动及其沟床响应规律, 以揭示山地区域暴雨山洪过程与泥沙补给突变的沟床响应致灾机理, 为山地区域山洪灾害预警及灾害防治提供依据, 并及时丰富和完善暴雨山洪灾害所涉及的水沙运动规律与沟床响应致灾防治技术。

关键词:山区流域; 暴雨洪水; 泥沙补给; 山洪灾害; 成灾机理

中图分类号:TV122.1; TV143

文献标志码:A

文章编号:2096-3246(2019)04-0001-10

Research Framework and Anticipated Results of Flash Flood Disasters Under the Mutation of Sediment Supply

WANG Xiekang, LIU Xingnian, ZHOU Jiawen

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

Abstract: The mountain area accounts for 30% of the land area globally, with more than 5 000 people dying each year from flash floods. China's flash flood disaster control zone covers 48% of the land area, with the living population accounting for 44.2% of the country's population. Since 2 000, about 1 000 people in China have died each year as a result of flash floods, and the number of deaths from flash floods accounts for about 70% of the death toll from flood disasters. A mountain area often shows the characteristics of steep terrain, broken surface, thick soil layer and frequent rainstorm, and thus, the mountain flood and sediment movement coupling causes the disaster to be prominent because of the steep rise and fall of the flood and the dramatic changes of riverbeds. The prevention and control of flash flood disaster has become a prominent problem to China's major infrastructure constructions such as agriculture, energy, transportation and national defense security, regional social and economic develop-

收稿日期:2019-03-25

基金项目:国家自然科学基金重点项目(51639007); 国家重点研发计划课题(2017YFC1502504)

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: wangxiekang@scu.edu.cn

网络出版时间:2019-06-18 09:21:45

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/51.1773.TB.20190617.0932.001.html>

<http://jsuese.ijournals.cn>

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

ment and the safety of people's lives and property. The study of rainstorm and flash flood disaster is still the focus of flood control and disaster reduction in China. Facing the severe disaster risk situation of flood and sediment transport, it is difficult to solve the problem of disaster prevention using the traditional theory and technology of sediment movement, which do not consider the actual coupling process of flood and sediment. In fact, there is not enough understanding of the catastrophic effect of sediment supply mutation on major flash flood disaster. Nowadays, the mechanism between flood and sediment transport coupled into the disaster area identification is unclear, and the prevention and control technology of flood and sediment disaster is not perfect in mountain area. Therefore, it is urgent to systematically sort out the law of flood and sediment transport in rainstorm mountain, by realizing the theoretical innovation of the coupling disaster of flood and sediment movement, putting forward the effective measures of source control and regional comprehensive prevention of major flood and sediment disasters, and significantly improving the technical level of flood and sediment disaster prevention and control in China. It will provide theoretical basis and technical support for safeguarding the safety of major projects in the country and the safety of people's lives and property. The research on early warning theory and prevention and control technology of rainstorm and flash flood disaster has been studied mainly by rainfall-runoff-water level analysis, taking the critical rainfall/water level threshold condition as the criterion, and less involving the severe adjustment mechanism of riverbed caused by the mutation of sediment supply. But a large number of rainstorm flash flood disaster scene shows that the coupling between sediment supply and flood is the key source power of major flash flood disaster. The project "Research on flash flood disaster under the mutation of sediment supply" is based on the field investigation of rainstorm and flood disaster in mountainous areas and the inversion simulation of disaster experiment. Through the theoretical analysis of hydrology, soil mechanics, hydraulics and river dynamics, in combined with the numerical simulation, the applicants will investigate the coupling disaster process of storm flood in typical small watersheds, sediment from landslide, gravel and pebble transport with a large range of size distribution and the excess sediment supply in a gully. The characteristics of storm flood and sediment in mountain regions, the complex transport power of the riverbed, the water and sediment motion and channel response patterns with excessive sediment supply will be systematically investigated. The response disaster mechanism of rainstorm flood process in the mountain region and the mutation of sediment supply will be clarified. The forgoing researches will provide theoretical and technical support for the early warning and prevention of flood disaster in the mountain region, and will enrich and perfect the hydrological sediment motion and the disaster prevention method during the flood disaster.

Key words: mountainous area; storm flood; sediment supply; flash flood disaster; disaster mechanism

山洪灾害是指由于降雨在山丘区引发的洪水灾害及由山洪诱发的泥石流、滑坡等对国民经济和人民生活财产造成损失的灾害,具有突发性、水量集中、破坏力大等特点。全球山地面积占陆地面积的30%,全球每年有超过5 000人死于山洪灾害,世界上已有100多个国家将山洪灾害损失排在自然灾害的前两位,山洪灾害已成为世界各类自然灾害的主要灾种。中国是一个多山的国家,山洪灾害防治区面积占陆地面积的48%,防治区居住人数约有5.5亿人,占全国总人口的44.2%。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。山洪灾害点多面广,发生频繁,严重危害公共安全,制约着山丘区经济社会发展,是中国防洪减灾工作的重点和难点。

中国山洪灾害重点防治区主要分布在受东部季风影响的山丘区,以西南高原山地丘陵、秦巴山地以及江南、华南、东南沿海的山地丘陵区分布最为集中。西南地区是中国山洪灾害发生最严重的地区,随着人们对山区资源利用强度的加大和自然环境的改变,使得山洪灾害呈现加剧的趋势。近年来,西南山区受地形、地貌及汶川、芦山、鲁甸地震及次生灾害的影响,山洪灾害事件极为突出。如2010年8月12日

至14日,四川省出现强降雨,绵竹市清平乡、汶川县映秀镇等地震重灾区多处发生特大山洪,河床淤高、洪水位陡涨,大量的汶川地震灾民安置房和基础设施受到破坏,导致71人死亡、失踪,直接经济损失11.6亿元。2010年8月18日,云南省怒江州贡山县普拉底乡东月各河暴发特大山洪灾害,松散物质冲入怒江,导致怒江短暂阻断,堆积体局地区域水位上升6 m,堰塞体溃决后水位下降,但仍比原水位高3 m左右,灾害造成死亡10人,失踪82人,直接经济损失1.4亿元。2011年6月6日贵州望谟县在短短的两个小时内,部分乡镇降雨量达300 mm以上,引发了特大山洪灾害,因灾死亡、失踪52人,造成直接经济损失20.7亿元。2014年7月9日至10日,芦山地震灾区遭遇强降雨,过程最大降雨点的太平镇雨量达154.1 mm,导致该镇百合溪沟暴发山洪,水位陡涨,大量民房被淹。2015年5月10日8时13分,云南省福贡县持续强降雨,使帕腊腊吐底河河水暴涨,造成房屋损毁14栋、腊吐底河电站被淹,直接经济损失3.9亿元。2015年8月16日泸州叙永县遭受强降雨袭击,致使全县13个乡镇受灾,居民房屋被山洪冲毁,人员伤亡20余人,直接经济损失3.2亿元。2017年8月8日四川省普格县山洪灾害造成157户不同程度受灾,人员死亡20余人。

据统计,西南山区山洪灾害的平均成灾频次占全国的53%,而四川为全国最高,占全国总数的30%。李中平等^[1]指出长江上游地区山洪灾害易发区主要分布在四川盆地西北部。四川省历来是中国暴雨洪水频繁的省份,由于山地面积较大,山洪及其伴生的泥石流在洪灾中造成的损失最为巨大。2012年,四川、云南由于降雨强度大,地处板块交界处、地形起伏大,山洪灾害发生次数、死亡人数最多,分别占全国总数的39.0%、35.9%^[2]。

长期以来,中国的山洪灾害问题得到了党中央、国务院的高度重视。2002年9月,中央对防御山洪灾害工作做出重要批示:“山洪灾害频发,造成损失巨大,已成为防灾减灾工作中的一个突出问题。必须把防治山洪灾害摆在重要位置,认真总结经验教训,研究山洪发生的特点和规律,采取综合防治对策,最大限度地减少灾害损失”。2003年水利部牵头五部委联合编制了《全国山洪灾害防治规划》,2006年国务院批复《全国山洪灾害防治规划》,并启动实施了山洪灾害防治试点建设,2013年10月,水利部、财政部又启动了总投资340亿元的“全国山洪灾害防治项目”。《中华人民共和国国民经济和社会发展第十二个五年规划纲要》^[3]在第二十五章中强调坚持保护优先和自然修复为主,加大生态保护和建设力度,从源头上扭转生态环境恶化趋势;第二十六章中提出当前急需加强和提高山洪预测预警及灾害防治的能力。《中华人民共和国国民经济和社会发展第十三个五年规划纲要》^[4]在坚持绿色发展、着力改善生态环境方面突出强调了系统整治江河流域,加强地质灾害防治研究。2018年,为解决中国灾害多发频发难题,国务院组建应急管理部,为防范化解重特大安全风险,提高防灾减灾救灾能力奠定了坚实基础。

总体来讲,中国山区受地形地貌、局地气候及强人类活动作用,山区流域受暴雨作用引发的洪水产输沙严重,暴雨洪水与泥沙运动的共同作用,加剧沟床局部淤堵调整,水位陡增,引发大范围的淤埋、淹没及冲毁,山洪水沙耦合致灾常造成重大人员伤亡和财产损失。长期以来采用的降雨-流量-水位关系推求的山洪灾害防治区及其防灾技术,由于忽略泥沙补给突变的影响,常难以真实揭示山洪水沙共同致灾机制,从而显著降低了山洪灾害防治的有效性与可靠性。面向重大自然灾害防灾减灾国家重大战略需求,亟需系统分析暴雨山洪水沙运动共同致灾机理,为防灾减灾提供理论依据与技术支持。

1 国内外山洪灾害水沙运动研究进展

山洪灾害是全球最频繁和最有破坏力的自然灾

害之一,受局地气候、地形地貌、强人类活动等因素综合影响,与降雨洪水、泥沙运动及河床响应密切相关,且影响因素复杂多变。迄今为止,暴雨山洪致灾机制得到了丰富的研究积累。

1.1 山洪过程降雨径流特性

美国气象协会^[5]将山洪定义为在没有或者预警时间极短的情况下,在较小区域内发生的由于强降雨导致洪水迅速涨落的现象。众多研究者指出降雨是山洪灾害形成的主要诱发因素。Borga等^[6]将山洪看作是一种快速泛滥的洪水,多数是由于局部地区短历时强降雨引起,其产汇流过程极其迅速,一般仅持续几个小时。高延超等^[7]认为一般的山洪是指在流域面积较小的溪沟或者周期性流水的荒溪中快速强大的地表径流。丁海容等^[8]对岷江上游15个水文站降水量-径流量相关关系以及该流域2010年内两场洪水的发育情况和汶川地震对洪水发育的影响进行分析,发现强降雨是地震后该地区山洪暴发的主要诱因,且地震后该流域洪水发生的临界雨量明显降低,洪水量和发生频率增加。Barredo^[9]分析认为欧洲1950—2006年间40%的洪水灾害是由暴雨山洪引起。曹叔尤等^[10]将山洪大致分为暴雨山洪和大坝溃决两大类,主要表现为溪河洪水上涨、泥石流以及山体滑坡等。杜俊等^[11]认为溪河洪水和滑坡型山洪灾害取决于降雨。

众多学者通过不同的研究方法对山区小流域暴雨山洪径流特性进行了研究。Brauer等^[12]调查分析指出强降雨过程制约着山洪洪峰量级。江锦红等^[13]认为山洪流量是累计降雨量和降雨强度共同作用的结果,指出由于前期降雨的不同,相同降雨强度常有不同的产流结果。Kundzewicz等^[14]认为降雨的时空分布对于山洪的形成同等重要。Whitfield等^[15]分析了2013年加拿大Upper Bow的山洪过程,探讨了山区河流洪峰变换现象。潘佳佳等^[16]通过2维水动力学模型及其简化模型(运动波模型和扩散波模型)对暴雨山洪过程进行了模拟,发现水动力学模型计算结果稳定,能够较好地反映暴雨山洪的迅速上涨、快速消退特征。Radice等^[17]以意大利阿尔卑斯山区河流为例,对水文形态学模型在灾害治理方面的限制进行了研究。Apel等^[18]对一般水流到洪水灾害采用了相似的模型序列,但并没有考虑泥沙的影响。Neuhold等^[19]在模拟过程中缺少对模型河段中泥沙补给的量化,而把泥沙补给量假定为随机量。Marchi等^[20]认为由于缺乏山洪过程的准确模拟,阻碍了山洪过程预测预警及有效灾害防治措施的实施。

1.2 山洪过程产沙特性

山洪形成过程中,受水蚀作用下引起的坡面冲

刷和沟槽侵蚀,造成下游河道的来沙条件改变^[21]。在基岩河床或沟床上,山洪对其的影响表现为河床下切和河道横向侵蚀,而在冲积河床上则表现为河岸崩塌和河道内的泥沙运移^[22]。此外,山区流域受地震及次生灾害作用,坡体常具有大量的松散堆积物,在极端气候造成的短历时强降雨作用下,山洪携带大量泥沙进入河道,使得河流中的来沙量急剧增加。日本关东地震^[23]、台湾集集地震^[24]和汶川地震^[25]等灾害表明:震后一段时间内,进入河道的沙量呈现显著的陡增现象。Wang等^[26]指出汶川地震中产生近6万处山体滑坡,大多数滑坡物质至今还在震区的山坡和谷地滞留。Parker等^[27]认为汶川地震后大量的崩塌、滑坡和泥石流产生的松散物源体积高达 $5\sim 15\text{ km}^3$,如此巨量的松散堆积物日后必将成为该区域新一轮山洪灾害的物质来源。丁海容等^[28]指出汶川地震后植被覆盖率降低以及水土流失的加剧是河流来沙量增加的重要条件。Tang等^[29]指出文家沟泥石流灾害,主要是由汶川地震后产生的大量滑坡松散堆积物在强降雨条件下造成的,堆积扇体积高达 $7\times 10^6\text{ m}^3$,大量泥沙直接汇入绵远河,导致绵远河被堵塞,河床大幅抬高,同时也为下游河道提供大量的泥沙来源。常鸣等^[30]分析了地震前后位于都江堰市龙溪河沟道变化,指出地震以来滑坡面积增加了36.62%,并且受该地区强降雨影响,滑坡面积持续增加,滑坡带来的巨量松散堆积物为龙溪河提供了超量泥沙补给来源。

总的来讲,暴雨洪水来沙特性主要与地质条件、坡沟侵蚀、河床粗化层及结构有关,泥沙补给制约着河床形态变化,尤其是某些特殊河道形态(如河流交汇区或宽窄相间)河段排洪输沙能力较弱,洪水过程中大量泥沙补给作用下引起局部河段淤堵,导致河床形态急剧调整,改变河势及水流条件,造成的水沙灾害远大于洪水的作用。

1.3 山洪水沙运动及河床响应致灾

山区流域极端降雨致使大量宽级配卵砾石进入河道,造成河道急剧调整,从而带来严重的山洪水沙灾害^[31]。研究表明,暴雨洪水和泥沙补给条件的改变使得原稳定河相破坏^[32]。侯极等^[33]指出山洪携带大量泥沙进入河道,增大了水流阻力从而抬高水位。李彬等^[34]通过水槽试验表明上游陡坡河道的强输沙水流,进入下游较缓河段时,常导致河床大范围淤高,提高局部河段洪水位。Roca等^[35]针对地中海山区一次山洪所在河流中的一段 90° 交汇区进行实地调查和2维数值模拟研究,发现泥沙的加入使山洪运动变的更为特殊,不仅干支流床面糙度有所增加,泥沙输移也决定了交汇区的地形变化。Swanson等^[36]分析山洪

暴发后干支流纵剖面 and 泥沙资料,指出交汇区干流河宽缩窄,床面形成粗化表层,主河道纵剖面坡度变化较大且与河床形态和支流来水来沙量密切相关。

山区河床物质组成多为宽级配卵砾石颗粒,山洪过程中泥沙补给的区域性、突变性使得河床形态调整复杂多变。Recking^[37]指出在坡度超过5%的山区河流中,虽然不能准确预测泥沙补给量和其对应的输沙率,但是补给量越充足,输沙率就越高。Dietrich等^[38]指出泥沙补给条件不同造成了卵石粗化河床表层调整过程与卵石推移质输移规律也尽不相同。Madej等^[39]认为河道来沙量的变化影响河床响应,其冲淤的本质是泥沙补给与输沙能力的再平衡过程。Chatanantavet等^[40]过野外调查与室内试验,指出泥沙补给、河道比降及卵砾石组成是控制沟床冲淤的主要因素。Elgueta-Astaburuaga等^[41]发现河床调整主要受到泥沙补给量的大小和频率所控制。Podolak等^[42]发现床面形态随来沙量的增加而进行适应性调整,局部坡度和平均切应力也都随输沙率变化而变化,以适应新的输沙平衡,并指出泥沙补给超量会引起河床局部淤积,床沙组成及河床形态也会随之改变。Zen等^[43]认为河宽变化对河道中的洲滩形成和演变极其重要,尤其是在洪水发生的高峰期。Billi^[44]通过分析典型山洪事件资料,指出大比降河流的山洪过程具有突出的强输沙特征,强来沙过程剧烈调整河床并诱发灾害^[45-47]。Long^[48]阐明了暴雨山洪较大幅度增加了山溪性河流卵砾石的泥沙来量。Ortega-Becerril等^[49]认为山洪演进挟带的泥沙将急剧改变河床地貌形态。Gan等^[50]以2015年四川叙永县山洪灾害调查为基础,指出暴雨引发的强输沙显著放大了山洪灾害的成灾效应。曹叔尤等^[51]等指出,来沙变化是重大山洪水沙灾害主要诱因。

2 典型山洪水沙灾害事件成灾机理分析

基于西南山区山洪灾害现场调查和资料分析,对暴雨诱发的泥沙补给突变山洪致灾机理进行了系统分析,初步阐明了“暴雨—洪水—泥沙—沟床响应”突变下的山洪成灾特征,为下一步的试验设计、数值模拟、理论分析奠定了坚实基础。

2.1 四川波罗水电站“7.28”山洪灾害

2001年7月27—28日四川省马边县马边河上游遭遇特大暴雨,沿河山体滑坡产沙非常严重,波罗电站厂房全淹,厂房内泥沙淤积高程达826.5 m,致灾水位达828.5 m,使电站完全失去发电能力,损失近2亿元。经分析,波罗水电站“7.28”山洪灾害主要原因:暴雨集中,强度大,6 h时降雨量达79.5 mm,24 h降雨

量达94.4 m, 挖黑河及先家普河洪水猛涨, 挖黑河及先家普河来的大量泥沙在交汇区淤积, 电站尾水断面淤积高程达822 m, 即抬高河床7.5 m。厂房内淤积高程达826.0 m, 厂房内洪水位高程达到828.5 m, 比电站校核洪水位824.80 m高3.7 m, 成灾原因主要为暴雨产沙-交汇区泥沙淤堵-水位陡增成灾, 如图1所示。

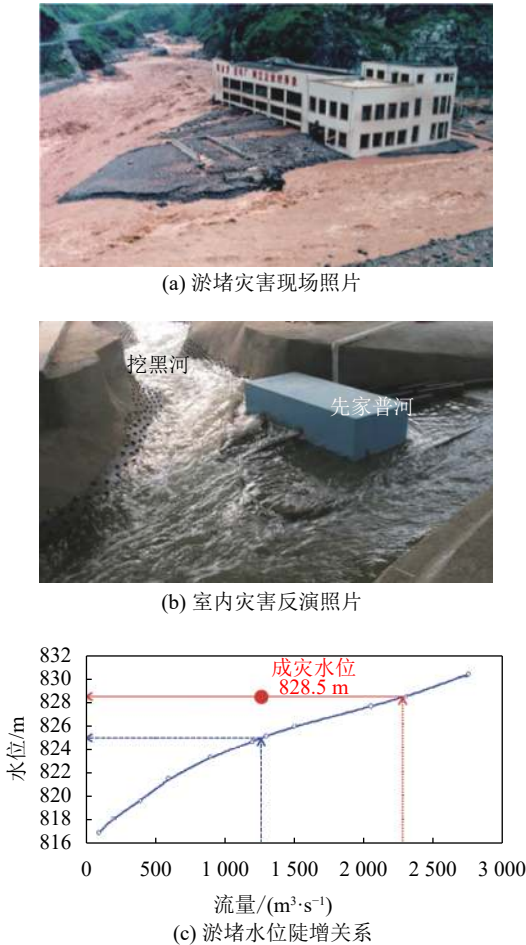


图 1 四川马边波罗电站山洪灾害

Fig. 1 Flash flood disaster at Boluo power station in Mabi-an county, Sichuan

2.2 岷江支流白沙河和龙溪河山洪灾害

“5.12”汶川特大地震发生后, 岷江支流白沙河和龙溪河流域内坡沟破坏严重, 两岸山体多处垮塌, 坡面堆积大量松散固体物质。强降雨发生后, 地表径流挟带大量泥沙进入沟道和主河道, 山洪灾害频发。2010年8月13至14日, 都江堰地区遭遇大面积强降雨, 引发龙池镇、虹口镇大规模山洪灾害, 成灾过程表现为暴雨产沙-干流河道淤堵挤压河道水沙漫滩成灾, 如图2所示。

2.3 贵州望谟“6.6”山洪灾害

2011年6月5日夜晚至6日凌晨, 贵州省黔西南州望谟县因持续强降水引发特大暴雨山洪灾害, 造成

8万人受灾, 21人死亡, 31人失踪, 直接经济损失16.4亿元。其中, 望谟县城广场急弯缩窄河段: 受河段急弯缩窄影响, 凸岸泥沙淤积, 洪水位陡增, 左岸房屋顶冲毁坏成灾, 致灾河段主要表现为河段急弯缩窄、凸岸淤积, 弯道顶冲成灾, 如图3所示。



(a) 白沙河庙坝灾害现场照片



(b) 龙溪河龙池镇灾害现场照片

图 2 四川白沙河庙坝和龙溪河龙池镇暴雨山洪灾害
Fig. 2 Flash flood disasters at Miaoba and Longchi villages in Baisha River and Longxi River, Sichuan



(a) 望谟县城广场河段灾害现场照片



(b) 房屋水毁现场照片

图 3 贵州望谟“2011-06-06”山洪灾害
Fig. 3 Flash flood disaster on “6 June, 2011” in Wangmo county, Guizhou

2.4 四川叙永“8.17”山洪灾害

2015年8月16日20时至17日8时, 泸州叙永县遭受强降雨, 白腊苗族乡受灾最为严重, 人员伤亡20余

人,直接经济损失3.9亿元。其中,尽头沟村民房屋位于公路桥涵下游,块石淤堵涵洞,水流漫顶冲毁房屋,造成6人死亡。致灾主要为沟道桥涵淤堵,水流漫顶冲毁成灾,如图4所示。



(a) 石板沟灾害现场照片



(b) 尽头沟灾害现场照片

图 4 四川叙永“2015-08-17”山洪灾害

Fig. 4 Flash flood disaster on “17 August, 2015” in Xuyong county, Sichuan

2.5 四川普格“8.8”山洪灾害

2017年8月8日凌晨5点左右,四川省凉山州普格县荞窝镇耿底村突发暴雨,造成惨重的财产损失和人员伤亡(25人死亡,5人受伤)。耿底村并行两条沟,一条超量产沙引发山洪灾害,另一条未形成灾害,成灾方式主要为超量产沙淤堵沟道成灾,如图5所示。

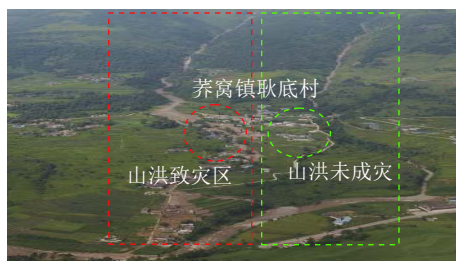


图 5 四川普格“2017-08-08”山洪灾害

Fig. 5 Flash flood disaster on “8 August, 2017” in Puge county, Sichuan

2.6 山区“暴雨—洪水—泥沙—沟床响应”水沙耦合作用成灾机理分析

基于山洪灾害现场调查与资料分析,山区暴雨洪水产沙输移诱发山洪成灾模式可初步概括为: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、水沙相互作用引起的沟床冲淤突变、人类活动区受灾。泥沙补给突变条件下,诱发沟床泥沙淤堵水位陡增,致使原设计洪水的防洪安全区突变为成灾区,如图6所示。



(a) 小流域暴雨集水



(b) 暴雨侵蚀产沙



(c) 沟床冲淤



(d) 水沙运动耦合致灾

图 6 暴雨超量产沙诱发的山洪泥沙耦合致灾特征

Fig. 6 Characteristics of flash flood induced by excess sediment supply with storm

3 泥沙补给突变下暴雨山洪水沙耦合致灾研究构想

3.1 关键科学问题

暴雨山洪过程对坡地及沟床的破坏力大,引发沟床形态急剧变化,携带大量的卵砾石泥沙颗粒进入沟道,时常淤堵交汇和宽窄相间排洪输沙能力受限河段,阻碍河道行洪,进一步降低河流输沙排洪能力。泥沙淤积导致河宽缩窄、河床淤高、水位陡增,形成漫滩洪水,造成严重的山洪灾害。虽然,大量学者就山洪灾害进行了较多的研究,但大多忽略了泥沙

补给突变在山洪致灾过程中的作用,从而难以准确识别山洪水沙耦合作用引发的山洪灾害易灾区,给山洪灾害防治带来极大困扰。暴雨山洪致灾机理研究是山洪灾害防治的关键问题^[52-54]。暴雨山洪过程制约沟床冲淤过程,泥沙补给突变成为洪水过程中水沙运动、河床响应、尤其是洪水位变化的关键要素。因而泥沙补给引起的河床冲淤与水位变化是山洪灾害研究不可忽略的关键问题。长期以来,暴雨山洪灾害防治研究常以分析临界降雨特性及洪水量与水位关系为条件判据,如实测雨量统计法^[55]、水位-流量反推法^[56]、暴雨临界曲线法^[57]、临界雨量洪水预警^[58]。

总体来讲,当前暴雨山洪成灾机制研究多以水文过程的降雨-径流-水位内在关系为基础,以分析洪水位变化为研究目标和应用指导,缺乏考虑泥沙补给突变对山洪预警指标的影响。然而山地区域暴雨山洪过程常挟带大量泥沙,且山洪演进过程中泥沙补给量与输沙能力不断变化,引起沟床的急剧响应调整,致使原来的单一洪量水位关系难以真实反映受灾区域的防洪水位与流路安全要求,从而频繁发生严重的暴雨山洪灾害。为此拟解决的关键科学问题主要包括:

1)暴雨山洪激发泥沙补给突变的水沙动力学机制:突出分析暴雨洪水对坡体的破坏滑塌条件、沟床急剧冲刷粗化层破坏条件以及由此引起的泥沙超量补给动力学机理。

2)暴雨山洪与沟床输沙动力相互作用诱发沟床急剧响应机理:系统研究泥沙超量补给在不同沟床形态条件下的输沙特性、沟床冲淤响应模式及相应的计算方法。

3)沟床淤堵条件下洪水位陡增山洪致灾机理:揭示泥沙补给突变下水位-流量变化的关键要素,界定沟床冲淤条件下洪水位变化及暴雨山洪淹没范围,以解决常用预警指标无法考虑泥沙补给突变的影响。

3.2 重点研究内容

以大量山区暴雨山洪案例分析为基础,突出研究暴雨山洪演进过程中超量泥沙的来源、输移、淤积对沟床形态的影响,以及由此引发的洪水冲刷、沟床淤堵、洪水漫滩等水沙运动规律,以揭示山地区域暴雨洪水演变过程与泥沙补给突变的山洪灾害致灾机理。内容包括:

1)暴雨山洪激发泥沙补给突变的水沙动力学机制:突出分析暴雨洪水过程特性、水流结构变化、水沙冲击动力特性、洪水对坡体的破坏滑塌条件、沟床急剧冲刷粗化层破坏条件以及由此引起的泥沙超量补给动力学机理。

2)暴雨山洪与沟床输沙动力相互作用诱发沟床急剧响应机理:主要研究泥沙超量补给在不同沟床形态条件下的水沙运动特性、推移质输沙能力特性、沟床冲淤响应模式及相应的计算方法。

3)沟床淤堵条件下洪水位陡增的暴雨山洪致灾机理:突出研究泥沙补给突变下沟床演变过程,阐明水位-流量变化的关键要素,揭示泥沙超量补给引起洪水位陡增致灾机理,建立沟床冲淤条件下洪水位变化及暴雨山洪淹没范围。

3.3 主要创新点

1)研究思路创新:基于山洪灾害由洪水与泥沙共同作用致灾的本质,为此由传统的“暴雨+洪水”研究转变为“暴雨+洪水+泥沙”研究。

2)研究机理创新:以往侧重“降雨—径流—山洪”演变过程的单向响应,未来突出研究泥沙补给突变与山洪演变的耦合致灾机制。

3)研究方法创新:将传统以水文学、河流动力学为基础的研究方法发展到水文学、岩土力学及河流动力学多学科交叉,系统揭示暴雨诱发泥沙补给突变下山洪致灾机理。

4 研究成果展望

以当前山洪灾害泥沙补给突变问题为切入点,突出研究暴雨洪水作用下的山区小流域坡沟破坏产沙机制;揭示泥沙补给突变下的河床响应机制及洪水泥沙共同作用致灾机理;构建暴雨山洪过程演变模型,评估山区小流域在泥沙补给突变下的山洪灾害致灾风险,以解决山区暴雨诱发泥沙补给突变下山洪灾害防治中的重大问题。主要预期成果包括:

1)揭示暴雨山洪过程中坡体破坏滑塌、沟床粗化层破坏条件下的超量泥沙补给机制及沟床宽级配卵砾石起动输移规律,提出超量泥沙补给动力学条件及计算方法。

2)揭示暴雨山洪演变过程泥沙补给与不同沟床形态宽级配卵砾石输移动力相互制约的沟床响应规律,建立暴雨山洪过程的沟床冲淤判定条件。

3)确定不同沟床冲淤条件下水沙运动及河床响应规律,揭示沟床冲淤、洪水漫滩与流路改道的洪水位陡增致灾机制。

4)系统揭示山地区域暴雨山洪过程泥沙补给突变的致灾机理,研发暴雨山洪演变过程与沟床响应的全流域水沙运动与沟床演变的数值模拟方法,提出相适应的减灾防灾方法。

5)在以上4个方面成果的基础上,重点揭示暴雨山洪过程与泥沙补给突变条件下的沟床响应致灾机理,为山洪灾害防治提供理论支持。

参考文献:

- [1] Li Zhongping, Bi Hongwei, Zhang Mingbo. Studies on precipitation distribution in mountain flood-prone areas in China[J]. *China Water Resources*, 2007(14): 25–27. [李中平, 毕宏伟, 张明波. 我国山洪灾害高易发降雨区分布研究[J]. *中国水利*, 2007(14): 25–27.]
- [2] Ma Meihong, He bingshun, Guo Liang, et al. The characteristics and problem of flash flood on 2012 in China[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.]
- [3] 中华人民共和国国民经济和社会发展第十二个五年规划纲要[R]. http://www.gov.cn/2011h/content_1825838-7.htm, 49–50.
- [4] 中华人民共和国国民经济和社会发展第十三个五年规划纲要[R]. <http://wcwy.ahxf.gov.cn/village/s4newContent.asp?webid=5264&ClassID=76115&id2066705>.
- [5] Huschke R E. Glossary of meteorology[M]. Boston: American Meteorological Society, 2000.
- [6] Borga M, Boscolo P, Zanon F, et al. Hydrometeorological analysis of the 29 August 2003 flash flood in the eastern Italian Alps[J]. *Journal of Hydrometeorology*, 2007, 8(5): 1049–1067.
- [7] Gao Yanchao, He Jie, Chen Ningsheng, et al. Analysis of characters of torrent disasters in the wowns of the mountain areas, Sichuan, China[J]. *Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition)*, 2006, 33(1): 84–89. [高延超, 何杰, 陈宁生, 等. 四川省山区城镇山洪灾害特征分析[J]. *成都理工大学学报(自然科学版)*, 2006, 33(1): 84–89.]
- [8] Ding Hairong, Li Yong, Zhao Guohua, et al. Analysis of flash flood formation character and cause in the upper reaches of Minjiang river after Wenchuan earthquake[J]. *Journal of Catastrophology*, 2013, 28(2): 14–19. [丁海容, 李勇, 赵国华, 等. 汶川地震后岷江上游山洪发育特征与成因分析[J]. *灾害学*, 2013, 28(2): 14–19.]
- [9] Barredo J I. Major flood disasters in Europe: 1950–2005[J]. *Natural Hazards*, 2007, 42(1): 125–148.
- [10] Cao Shuyou, Liu Xingnian, Huang Er, et al. Mechanism and assessment factors for flash floods induced by earthquakes[J]. *Journal of Southwest University(Natural Science Edition)*, 2008, 34(6): 1077–1082. [曹叔尤, 刘兴年, 黄尔, 等. 地震诱发山洪形成机理与评估指标初探[J]. *西南民族大学学报(自然科学版)*, 2008, 34(6): 1077–1082.]
- [11] Du Jun, Ding Wenfeng, Ren Hongyu. Relationships between different types of flash flood disasters and their main impact factors in the Sichuan Province[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2015, 24(11): 1977–1983. [杜俊, 丁文峰, 任洪玉. 四川省不同类型山洪灾害与主要影响因素的关系[J]. *长江流域资源与环境*, 2015, 24(11): 1977–1983.]
- [12] Brauer C C, Teuling A J, Overeem A, et al. Soil buffer limits flash flood response to extraordinary rainfall in a Dutch lowland catchment[J]. *Hydrology & Earth System Sciences Discussions*, 2011, 8(1): 111–150.
- [13] Jiang Jinhong, Shao Liping. Standard of mountain flood warning based on the precipitation observation data[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2010, 41(4): 458–463. [江锦红, 邵利萍. 基于降雨观测资料的山洪预警标准[J]. *水利学报*, 2010, 41(4): 458–463.]
- [14] Kundzewica Z W, Kanae S, Seneviratne S I, et al. Flood risk and climate change: Global and regional perspectives[J]. *International Association of Scientific Hydrology Bulletin*, 2014, 59(1): 1–28.
- [15] Whitfield P H, Pomeroy J W. Changes to flood peaks of a mountain river: Implications for analysis of the 2013 flood in the upper bow river, Canada[J]. *Hydrological Processes*, 2016, 30(25): 4657–4673.
- [16] Pan Jiajia, Cao Zhixian, Wang Xiekang, et al. Comparative study of simplified and full hydrodynamic models for flash floods[J]. *Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition)*, 2012, 44(Supp1): 77–82. [潘佳佳, 曹志先, 王协康, 等. 暴雨山洪水动力学模型及其简化模型的比较研究[J]. *四川大学学报(工程科学版)*, 2012, 44(增刊1): 77–82.]
- [17] Radice A, Longoni L, Papini M, et al. Generation of a design flood-event scenario for a mountain river with intense sediment transport[J]. *Water*, 2016, 8(12): 597.
- [18] Apel H, Thielen A H, Merz B, et al. A probabilistic modelling system for assessing flood risks[J]. *Natural Hazards*, 2006, 38(1/2): 79–100.
- [19] Neuhold C, Stanzel P, Nachtbel H P. Incorporating river morphological changes to flood risk assessment: Uncertainties, methodology and application[J]. *Natural Hazards and Earth System Science*, 2009, 9(3): 789–799.
- [20] 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.
- [21] Lin G W, Chen H, Hovius N, et al. Effects of earthquake and cyclone sequencing on landsliding and fluvial sediment transfer in a mountain catchment[J]. *Earth Surface Processes & Landforms*, 2008, 33(9): 1354–1373.
- [22] Izmailow B, Kamykowska M, Krzemien K. The geomorphological effects of flash floods in mountain river channels[J]. The Case of the River Wilsznia (Western Carpathian Mountains), 2006, 116: 89–97.
- [23] Koi T, Hotta N, Ishigaki I, et al. Prolonged impact of earthquake-induced landslides on sediment yield in a mountain

- watershed:The Tanzawa region,Japan[J].*Geomorphology*, 2008,101(4):692–702.
- [24] Ddadson S J,Hovius N,Chen H,et al.Earthquake-triggered increase in sediment delivery from an active mountain belt[J].*Geology*,2004,32(8):733.
- [25] Cui P,Chen X Q,Zhu Y Y,et al.The Wenchuan Earthquake (May 12,2008),Sichuan Province,China,and resulting geohazards[J].*Natural Hazards*,2009,56(1):19–36.
- [26] Wang J,Jin Z,Hilton R G,et al.Controls on fluvial evacuation of sediment from earthquake-triggered landslides[J].*Geology*,2015,43(2):115–118.
- [27] Parker R N,Densmore A L,Rosser N J,et al.Mass wasting triggered by the 2008 Wenchuan earthquake is greater than orogenic growth[J].*Nature Geoscience*,2011,4(7):449–452.
- [28] Ding Hairong,Li Yong,Yan Liang,et al.Influences of disaster chain driven by Wenchuan earthquake on sediment discharge in upper reaches of Minjiang river,Sichuan,China[J].*Journal of Chengdu Univeristy of Technology (Science & Technology Edition)*,2013,40(6):712–720.[丁海容,李勇,闫亮,等.汶川地震驱动的灾害链对岷江上游输沙量的影响[J].*成都理工大学学报(自然科学版)*,2013,40(6):712–720.]
- [29] Tang C, Van Asch T W J, Chang M, et al. Catastrophic debris flows on 13 August 2010 in the Qingping area, southwestern China: The combined effects of a strong earthquake and subsequent rainstorms[J].*Geomorphology*,2012,139–140: 559–576.
- [30] Chang Ming, Tang Chuan, Jiang Zhilin, et al. Dynamic evolution process of sediment supply for debris flow occurrence in Longchi of Dujiangyan, Wenchuan Earthquake area[J].*Mountain Research*,2014,32(1):89–97.[常鸣,唐川,蒋志林,等.强震区都江堰市龙池镇泥石流物源的遥感动态演变[J].*山地学报*,2014,32(1):89–97.]
- [31] 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.
- [32] Nie Ruihua,Liu Xingnian,Yang Kejun,et al.Experimental investigation on the maximum bedload transport rate during the process of armor layer destruction[J].*Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition)*,2013,45(2): 1–5.[聂锐华,刘兴年,杨克君,等.粗化层破坏过程中的最大推移质输沙率试验研究[J].*四川大学学报(工程科学版)*,2013,45(2):1–5.]
- [33] Hou Ji,Liu Xingnian,Jiang Beihan,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.]
- [34] 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.]
- [35] Roca M,Martin-Vide J P,Moreta P J M.Modelling a torrential event in a river confluence[J].*Journal of Hydrology*,2009, 364(3/4):207–215.
- [36] Swanson B J,Meyer G.Tributary confluences and discontinuities in channel form and sediment texture:Rio Chama, NM[J].*Earth Surface Processes & Landforms*,2014, 39(14):1927–1943.
- [37] Recking A.Influence of sediment supply on mountain streams bedload transport[J].*Geomorphology*,2012, 175/176(6):139–150.
- [38] Dietrich W E,Kirchner J W,Ikeda H,et al.Sediment supply and the development of the coarse surface layer in gravel-bedded rivers[J].*Nature*,1989,340(6230):215–217.
- [39] Madej M A,Sutherland D G,Lisle T E,et al.Channel responses to varying sediment input:A flume experiment modeled after Redwood Creek,California[J].*Geomorphology*,2009,103(4):507–519.
- [40] Chatanantivat P,Parker G.Experimental study of bedrock channel alluviation under varied sediment supply and hydraulic conditions[J].*Water Resources Research*,2008, 44(12):37–42.
- [41] Elgueta-Astaburuaga M A,Hassan M A.Experiment on temporal variation of bed load transport in response to changes in sediment supply in streams[J].*Water Resources Research*,2017,53(1):763–778.
- [42] Podolac C J P,Wilcock P R.Experimental study of the response of a gravel streambed to increased sediment supply[J].*Earth Surface Processes and Landforms*,2013, 38(14):1748–1764.
- [43] Zen S,Zolezzi G,Tubino M.A theoretical analysis of river bars stability under changing channel width[J].*Advances in Geosciences*,2014,39:27–35.
- [44] Billi P.Flash flood sediment transport in a steep sand-bed ephemeral stream[J].*International Journal of Sediment Research*,2011,26(2):193–209.
- [45] Owczarek P.Hillslope deposits in gravel-bed rivers and their effects on the evolution of alluvial channel forms:A case study from the Sudetes and Carpathian Mountains[J].*Geomorphology*,2008,98(1/2):111–125.
- [46] Tarolli P,Fontana G D.Hillslope-to-valley transition morphology:New opportunities from high resolution DTMs[J].*Geomorphology*,2009,113(1/2):47–56.
- [47] Huang R Q,Fan X M.The landside story[J].*Nature*

Geoscience,2013,6(5):325–326.

- [48] Long D G F.Evidence of flash floods in Precambrian gravel dominated ephemeral river deposits[J].Sedimentary Geology,2017,347:53–66.
- [49] Ortega-Becerril J A,Garzon G,Bejar-Pizarro M,et al.Towards an increase of flash flood geomorphic effects due to gravel mining and ground subsidence in Nogalte stream (Murcia,SE Spain)[J].Natural Hazards and Earth System Sciences,2016,16(10):2273–2286.
- [50] 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.
- [51] Cao Shuyou,Liu Xingnian.Adaptive adjustment and mutation 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.]
- [52] Smith J A,Baeck M L,Steiner M,et al.Catastrophic rainfall from an upslope thunderstorm in the central Appalachians: The Rapidan storm of June 27,1995[J].Water Resources Research,1996,32(10):3099–3113.
- [53] Gaume E,Livet M,Desbordes M,et al.Hydrological analysis of the river Aude,France,flash flood on 12 and 13 November 1999[J].Journal of Hydrology,2004,286(1):135–154.
- [54] Brauer C C,Teuling A J,Overeem A,et al.Anatomy of extraordinary rainfall and flash flood in a dutch lowland catchment[J].Hydrology and Earth System Sciences,2011,15(6): 1991–2005.
- [55] Chen Guiya,Yuan Yaming.Research on critical precipitation amount computation method of mountain torrential flood 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.]

- [56] 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.]
- [57] Li Changzhi,Sun Dongya.Determination of flood warning index for mountain flood[J].China Water Resources, 2012(9):54–56.[李昌志,孙东亚.山洪灾害预警指标确定方法[J].中国水利,2012(9):54–56.]
- [58] Lee K T,Chen N C,Chung Y R.Derivation of variable IUH corresponding to time-varying rainfall intensity during storm[J].Hydrological Sciences Journal,2008,53(2): 323–337.



王协康,四川大学研究员、博士生导师,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项目和横向生产项目,发表SCI收录论文30余篇。2001年被国务院三峡工程建设委员会评为“三峡工程研究”先进工作者,2002—2003年度获四川省科技进步三等奖2项、2010年度获教育部科技进步一等奖1项,2013年获教育部科技进步二等奖1项。

(编辑 张 琼)

引用格式: 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.]