

张友谊,叶小兵,顾成壮.强震区震后泥石流物源起动机制研究现状[J].灾害学,2020,35(3):144-149.[ZHANG Youyi, YE Xiaobing and GU Chengzhuang. Research Status of Initiation Mechanism of Debris Flow Provenance after Earthquake in Meizoseismal Area[J]. Journal of Catastrophology, 2020, 35(3): 144-149. doi: 10.3969/j.issn.1000-811X.2020.03.027.]

强震区震后泥石流物源起动机制研究现状^{*}

张友谊,叶小兵,顾成壮

(西南科技大学 土木工程与建筑学院,四川 绵阳 621010)

摘要:汶川特大地震对震区山体结构的破坏导致震后泥石流物源激增,次生泥石流灾害频发。为进一步探究震后泥石流物源起动机制,通过资料收集与分析的方法,概述了强震区震后泥石流物源起动机制研究现状,从野外调查、物理模拟试验、数值模拟分析三个方面总结了目前震后泥石流物源起动机制研究的主要进展及理论成果,在此基础上,提出针对震后泥石流物源起动机制进一步研究的建议:模型试验应加强降雨过程、降雨类型等相似律的研究;数值模拟分析计算模型应注重考虑侵蚀和挟带影响,同时加强区域大尺度复杂地形泥石流起动的模拟分析;此外,应重视地质环境脆弱山区高位物源成灾机理研究。

关键词:强震区;泥石流物源;起动机制;研究进展

中图分类号:P694; X43; X915.5 **文献标志码:**A **文章编号:**1000-811X(2020)03-0144-06

doi: 10.3969/j.issn.1000-811X.2020.03.027

汶川强震区地处青藏高原与川西北盆地过渡地带,区内断裂构造发育、地形高陡,泥石流沟道纵比降大、发育条件好^[1]。物源作为泥石流产生的三个必要条件之一,是泥石流灾害的重要组成部分,汶川8.0级特大地震直接引发了大量的崩塌、滑坡等同震地质灾害^[2],加之强震对震区山体结构的震裂破坏导致震后泥石流物源动储量激增^[3-4]。受强震“后效应”影响,震后次生泥石流灾害进入活跃期^[5],震后数个水文年内,在强降雨作用下,震区多地暴发大规模群发性泥石流灾害,并造成灾难性后果^[6-7]。泥石流物源起动研究对泥石流物源动储量评价及灾害预警预报具有重要意义^[8-9]。为进一步提高震后地质环境脆弱山区泥石流防灾减灾工作的科学性,许多学者在震后迅速开展震区泥石流物源起动机理的相关研究工作,在野外调查的基础上,通过物理模拟试验及数值模拟分析等方法对不同类型泥石流物源的起动模式进行研究,极大地推动了震后次生泥石流灾害的研究进展。本文通过对相关研究成果的收集和分析,总结了震后泥石流物源起动机制研究工作的主要进展,针对研究现状,为震区泥石流研究工作进一步开展提供相关参考,同时也为震后泥石流防治工作提供理论指导。

1 现状与进展

受强震影响,震区发生强地面破坏。同震地

表破裂诱发大量崩塌、滑坡等次生地质灾害直接对沟道物源进行补给^[10-13],此外,由于地震波的放大效应,在山体分水岭、高陡地貌突出部分的产生了大量震裂山体物源以及在山体斜坡表层产生了大量震散坡面物源^[14-17]。泥石流起动是泥石流研究的重要组成部分,目前关于震后泥石流物源起动机制研究方法主要包括野外调查、物理模拟试验、数值模拟分析等^[18]。

1.1 野外调查法

野外调查是掌握泥石流流域地质环境条件(地形地貌、地层岩性、地质构造等)、物源条件(分布范围、发育特征、总量及动储量等)、水文地质条件等的重要手段,对沟域内物源的现场调查可初步建立物源的成因机制和起动模式,同时由各种先进野外调查设备实时采集的各种数据是科研人员深入研究物源起动机制的重要资料。

汶川地震后,不少学者利用各种野外调查设备对震区泥石流物源特征展开调查。崔鹏等^[3]利用高分辨率遥感影像分析了震后次生泥石流灾害的发育情况并总结了沟道堵溃型物源的起动模式;胡卸文等^[19]通过对汶川桃关沟的现场勘查,提出震区崩滑物源、沟道物源、坡面物源的成灾机理。除了常规泥石流勘查手段, GIS^[20]技术、INSAR^[21]技术、RS^[22]技术、倾斜航空摄影测量技术^[23]等为空间较大范围的物源识别、地质建模及危险性评价提供了有力支持。此外,也有部分国外学者利用视频跟踪监控系统实时实地记录泥石流起动过

* 收稿日期:2019-12-19 修回日期:2020-03-26

基金项目:国家重点研发计划(2018YFC1505401);国家自然科学基金面上项目(41877524)

第一作者简介:张友谊(1980-),男,安徽宿州人,副教授,博士,研究方向为地质灾害成因机理。E-mail: 53437391@qq.com

程, 结合动态影像资料、水压力变化数据、降雨数据研究泥石流起动机制^[24~25]。

在野外调查的基础上, 科研人员利用收集到的相关数据(流域特征参数、气象水文数据、区域地质三维模型等)可对震区物源发育规律和起动模式进行分析^[26], 也可利用收集的数据进行泥石流起动物理模拟试验及相关数值模拟分析。

1.2 物理模拟试验

泥石流暴发常具有突然性, 野外难以观测到其起动过程, 因此物理模拟试验成为研究泥石流起动过程、动力学特征以及致灾机理的重要手段^[27~29]。降雨是泥石流起动的关键因素^[30], 近年来, 在明确泥石流孕灾条件的前提下, 不少专家学者进行了泥石流降雨起动的物理模拟试验, 主要包括野外源地试验和室内模型试验。野外源地试验通常以源地坡面物源或沟道物源为研究对象, 通过设置不同降雨条件观察源地物源起动过程; 室内模型试验是研究多个因素(降雨强度、沟道坡度、物源级配等)控制下泥石流起动机制的有效手段。

1.2.1 野外源地泥石流起动物理模拟试验

我国大型野外泥石流起动模拟试验最早始于1960年代结合成昆铁路沿线泥石流防治研究进行的羲农河、黑沙河、三滩沟等泥石流起动模拟试验^[31]。随后在1990年代有学者在云南东川蒋家沟^[32~33]、九寨沟县树正沟^[34]进行了多组源地崩滑堆积体斜坡降雨(冲刷)起动的物理模拟试验, 初步对泥石流形成条件、起动机制进行探索; 同期, Iverson^[35]等在美国圣海伦斯火山观测站进行了滑坡型泥石流的模拟试验, 揭示了滑坡型泥石流的形成过程。

随着试验条件的逐渐完善, 近几年, 国内外陆续开展了数据采集更为全面的源地试验。从设计思路和开展方式看, 野外源地泥石流起动物理模拟试验通常选取泥石流沟域内自然斜坡松散表层(坡面物源)以及沟道松散堆积体(沟道物源)作为试验材料, 通过设置不同的降雨条件(放水强度)研究松散坡面物源“降雨-产流-沟蚀、面蚀-深切-失稳起动-泥石流”的起动过程或沟道物源“降雨-产流-沟蚀-深切、侧蚀-失稳起动-泥石流”的起动过程。通过对起动过程的分析, 张丽萍^[33]等认为堆积体坡度、坡面汇水、降雨过程中坡面物源的坍滑是控制坡面物源起动的主要因素; 陈晓清^[36]等的研究成果表明坡面泥石流的形成与降雨条件下土体特征参数的改变密切相关; 胡明鉴^[37]认为高含水量堆积土体在降雨及表面径流冲刷侵蚀作用下失稳滑动是滑坡转化为泥石流的必要条件; 倪化勇^[38]认为降雨强度是影响水体入渗及坡面冲蚀的主要因素, 且降雨强度与土体破坏方式关系密切。同时, 也有部分学者进行震区源地滑坡坝侵蚀试验, 分析不同堆积密度, 堆积深度土体侵蚀特征^[39]。

1.2.2 室内泥石流起动物理模拟试验

泥石流起动的不同过程和特征是泥石流起动

机制的外在表现, 揭示了泥石流起动机制的多样性^[40]。室内模型试验是研究多个因素控制下泥石流起动机制的有效手段, 自1980年以来, 中国科学院水利部成都山地灾害与环境研究所及成都理工大学等教育科研单位陆续建成大型泥石流模拟试验厅, 为泥石流起动机制机及动力特性研究提供了试验条件。除大型模拟试验厅外, 多数学者选择根据相似比设计制作直斜水槽或模型箱, 同时进行降雨强度、降雨过程、界面糙率、颗粒级配等因素的相似处理, 研究不同因素组合控制下泥石流沟道物源或坡面物源起动机制。

(1) 沟道类物源起动物理模拟试验

强震引发的大量崩塌、滑坡直接对震区泥石流沟道物源进行补给, 导致沟道物源动储量剧增, 泥石流冲出规模加大^[3], 按照震前物源统计结果进行设防的工程大量失效。掌握沟道物源的起动机制是震区泥石流防灾减灾工作的重要基础, 国内部分学者进行了沟道物源起动的物理模拟试验, 并取得丰富的成果(表1)。

从模拟对象看, 国内学者大多选择震区典型泥石流沟域作为研究对象; 从试验装置看, 目前沟道物源起动模拟试验主要参考模拟对象规模并结合实际条件设计小比例缩尺模型, 其中模型槽长一般为1~5 m, 宽0.2~0.5 m, 高0.2~0.5 m, 侧面板材料一般采用钢化玻璃制作, 便于观察土体破坏特征, 可调节的坡度范围为10~35°, 并配有人工降雨和放水冲刷装置。在试验过程中土体水势、孔隙水压力、土体受侵蚀失稳过程等参数(影像)均被实时记录; 从试验材料来看, 除部分学者直接采用剔除某一粒径震区源地土之外, 大多数学者选择根据震区源地土体特征参数(级配、容重、含水率等)进行配制。

从研究内容及主要结论来看, 目前室内模拟试验主要考虑坡度、汇水条件、降雨条件、颗粒级配对沟道物源起动过程的影响, 通过试验, ZHUNG J Q^[41]等发现沟道坡度是控制泥石流起动过程的主要因素, 在同样的放水强度下, 当沟道坡度为10±2°时, 物源起动过程为“沟蚀-下切-斜坡失稳-滑坡坝-滑坡坝失稳-泥石流”, 当沟道坡度为15±3°时, 物源起动方式主要是在水流侵蚀作用导致堆积体体积膨胀失稳破坏产生浅层滑坡, 当沟道坡度为21±4°时, 物源起动以面蚀为主, 主要表现为松散物源液化失稳破坏; 降雨是泥石流物源起动的主要诱发因素, 震后泥石流激发雨量较震前明显下降^[45], 孟华君^[42]等基于水力类泥石流起动机制建立了泥石流预警雨量阈值模型; 此外, 部分学者^[43]考虑地形地貌对沟道物源起动模式的影响, 研究震区急陡沟道物源起动模式, 也有部分学者^[44]通过对比试验研究强震区物源起动雨强、起动流量均远小于非强震区。

(2) 坡面物源起动物理模拟试验

震后山体斜坡表层土体密实度下降, 在强降雨作用下饱和度迅速升高、孔隙水压力升高、基

质吸力迅速降低，坡表土体易失稳起动形成坡面泥石流或发生坍滑补给泥石流沟道物源。坡面物源是震区广泛分布的一类土质物源，目前对于震区坡面物源起动机制试验研究已取得一定进展(表2)。

从模拟对象看，目前国内学者大多选择强震区典型泥石流沟域坡面物源作为研究对象；从试验装置来看，多数学者选择可调节坡度的变坡装置，变坡装置一般长为3 m，宽2 m，可调节的坡度范围为10~42°，下垫面使用水泥砂浆抹面并镶嵌碎石的方式模拟基覆界面；从试验材料来看，为保证材料的相似性，多数学者选择源区土(剔除某些粒径)作为试验材料。

从研究内容来看，目前室内模型试验主要考虑坡度及雨强对坡面物源起动过程的影响，其中坡度是坡面物源起动的主要影响因素，乔建平^[46]等将坡面物源起动模式分为陡坡(坡度>42°)起动模式及中缓坡度(32°~37°)起动模式两类，在陡坡强降雨组合条件下坡面物源最易失稳起动；降雨是诱发坡面物源起动的关键因素^[50]，李驰^[47]等通过室内试验，发现降雨入渗条件下，坡脚最先发生失稳起动；此外，部分学者^[48]从震区砾石土力学特征出发，研究降雨起动的临界状态，研究表明砾石土干密度是砾石土起动模式与起动机制的主要影响因素，也有部分学者^[49]以震区滑坡物源为研究对象，利用3D激光扫描技术分析滑坡物源在径流侵蚀下的起动过程。

1.3 数值模拟分析

常规泥石流物理模拟试验往往基于试验材料

宏观失稳破坏现象定性描述泥石流物源起动过程，并辅以降雨强度、土体水势、岩土体特征参数的监测数据作为泥石流物源起动的量化判据，而泥石流作为固-液两相介质，其起动过程包含复杂的动力学特征，物理模拟试验难以全面反映起动过程中物源内部应力、位移等参数的变化特征，因此，随着数值计算方法的发展，基于复杂物理力学过程的数值模拟分析方法成为研究泥石流起动机制的重要手段。

汶川震后，在野外调查的基础上，不少学者利用数值模拟分析程序对强震区泥石流物源起动-运移-堆积所包含的动力学过程进行分析，并取得一定的成果(表3)。

从模拟对象来看，部分学者选择震区泥石流沟域滑坡坝及沟道松散物源为研究对象^[51]；也有部分学者基于沟域特殊地形地貌特征，以震区典型“急陡型^[52]”和“宽缓型^[53]”沟道物源作为研究对象，此外，多数学者以源区崩滑物源为研究对象^[54~58]。从研究内容来看，一方面，部分学者基于沟床侵蚀起动机制和滑坡坝堵溃放大效应探究震区“侵蚀-溃决型”泥石流起动-运移-堆积过程所包含的动力学特征；另一方面，部分学者结合震区泥石流流域特征参数(纵坡坡降、平均宽度、流域面积)，探究特殊地形条件沟道型泥石流致灾机理；同时，部分学者研究沟域内滑坡补给型物源起动机制及沿程刮铲放大效应，此外，也有学者研究沟域内震裂斜坡剪切破坏机制。

表1 代表性沟道类物源起动室内模拟试验

模拟对象	试验装置	试验材料	研究内容	文献
魏家沟	直斜槽	源区土	沟床坡度对沟道物源起动的影响	[41]
王家沟	直斜槽	源区土	沟道物源起动降雨阈值	[42]
高家沟	模型箱	配制土体	急陡沟道物源起动机制	[43]
烧火坪沟	直斜槽	配制土体	坡度、级配对沟道物源起动影响	[44]

表2 代表性坡面物源起动机制室内模拟试验

模拟对象	试验装置	试验材料	研究内容	文献
银洞子沟	变坡箱	碎石土	坡面物源降雨起动过程	[46]
魏家沟	模型槽	源区滑坡土体	滑坡物源起动临界雨强	[47]
牛圈沟	直斜槽	源区砾石土	砾石土起动临界状态	[48]
魏家沟	模型槽	源区坡面土体	坡面物源起动机制	[49]

表3 代表性强震区泥石流物源起动机制数值分析

模拟对象	研究内容	计算模型	文献
红椿沟	沟道堰塞体侵蚀溃决机制	FLO-2D、BREACH 模型	[51]
瓦窑沟	急陡沟道型泥石流起动、侵蚀、堆积过程	FLO-2D	[52]
桃关沟	“宽缓”沟道型泥石流致灾机理	CFX	[53]
魏家沟	泥石流运移过程所包含的动力学特征	SPH 模型	[54]
文家沟	源区崩滑物源运移过程	DAN3D	[55]
肖家沟	源区滑坡物源起动、运移、堆积过程	FLO-2D	[56]
牛眠沟	源区崩滑物源运移过程	DAN3D	[57]
魏家沟	震裂斜坡剪切破坏机制	FDM	[58]

从主要研究结论来看, 唐川^[51]认为沟道堰塞体溃决是泥石流冲出量剧增的主要原因; 陡坡降和“消防管”效应是“急陡”沟道型泥石流冲淤能量大、水动力强的主要原因^[52], 此外, 韩玲^[53]等认为在降雨条件下沟道内崩滑堆积物源受洪水侧蚀失稳、沟床侵蚀下切、岸坡溯源侵蚀是“宽缓”沟道型泥石流物源的主要补给方式; 流域内存在的高位崩滑类物源运移过程中的刮铲放大效应直接导致物源体积明显增加, 大量进入沟道形成堰塞体或崩滑堆积物源, 是沟道物源的重要补给来源。

从计算模型(程序)来看, 对于沟道类物源, 主要使用二维数值模型 FLO-2D 模拟分析泥石流起动-运移-堆积演化过程; 对于崩滑类物源, 目前主要使用 DAN3D 软件将滑体等效为连续介质流体, 模拟分析其动力学过程、刮铲效应、堆积特征等; 对于震裂斜坡一类物源, 主要使用有限差分法研究其失稳过程所包含的动力学特征; 此外, 对于震裂山体一类岩质物源, 常利用 Geostudio^[59] 或 FLAC^[60-61] 软件进行降雨条件下岩质边坡稳定性分析; 对于具有散粒体基本特征的一类松散堆积物源, 常利用颗粒流程序(PFC)^[62] 进行堆积松散物源起动过程模拟。

2 展望与建议

本文通过对强震区震后泥石流物源起动机制研究现状的系统总结, 主要形成以下几点结论及建议:

(1) 模型试验应加强相似律研究

由于泥石流本身物质组成的复杂性且起动受多个因素控制, 目前尚未建立成熟的泥石流相似律。纵观近年来开展的泥石流物理模拟试验, 大多通过控制缩尺比例设计实验装置以达到几何相似, 同时依据源地土级配曲线按比例配制试验土体以达到材料相似, 然而, 为进一步保证模型试验与实际情况的吻合度, 在今后的震区泥石流物源起动模型试验开展中, 还应加强源地土体特征参数、边界条件等的相似处理研究, 以达到更为可靠的模拟效果。

(2) 重视不同降雨过程影响

目前泥石流物理模拟试验大多采用特定雨强持续降雨的方式, 未考虑前期降雨对泥石流起动的影响, 不同的降雨过程、降雨类型与泥石流土体的渗流及强度变化关系密切, 在今后的物理模型试验中, 应充分考虑泥石流降雨过程、降雨类

型、雨强、雨量等因素的影响, 在增加降雨过程相似性的同时向水土耦合机制、土体参数动态变化更精细化的方向发展。

(3) 重视复杂地形的影响

目前多数空间大尺度模拟分析软件与对地形信息均进行了不同程度的简化处理, 而复杂地形对泥石流起动-运移所包含的动力学特征具有一定影响, 未来空间较大尺度的泥石流动力学模拟应向地形建模更加精细化的方向发展, 充分考虑地形影响。

(4) 加强高位震裂物源起动机制的研究

目前常规泥石流物源调查主要针对沟道物源及空间分布位置较低的坡面物源, 而对于高位震裂物源常常因为受限于地形条件等客观因素而难以查明其发育特征。事实证明, 高位物源暴发隐蔽性强, 破坏性大。目前关于此类物源的结构、物理力学性质以及转化为泥石流所需的外界条件的研究尚不多见, 因此, 对未来应加强对震后高位物源野外辨识及起动机制的研究, 进一步完善对强震区震后次生泥石流的防治工作。

3 结语

(1) 泥石流物理模拟试验是研究泥石流起动机理的重要手段之一。近年来泥石流物理模拟试验的开展情况可总结为两类, 即野外源地试验和室内模型试验。野外源地试验主要研究了不同降雨强度(放水强度)下源地土体失稳破坏过程, 该方法优点是对源地土体结构扰动破坏小、试验结果与实际较符合, 不足在于研究的影响因素较单一、试验成本开销大。与之相比, 室内模型试验可研究多个因素组合条件对泥石流起动机理的影响, 优点是机动灵活, 不足在于目前还没有成熟的泥石流相似律, 试验设计容易受到设备尺寸、材料的限制, 且试验土体与实际情况存在较大差异。野外源地试验与室内模型试验的开展对量化研究泥石流起动机理提供了重要参考。

(2) 数值模拟方法应结合研究对象的物质组成和动力学特征选择合适的计算模型。在对于小尺度的泥石流起动机理研究中可与模型试验相互验证并作参数补充, 在较大空间尺度的泥石流模拟中, 所面临的关键问题是地形信息的进一步细化处理。

(3) 强震区地质环境脆弱、山高坡陡, 震后高位震裂物源广泛分布, 掌握高位物源孕灾环境提

高其野外辨识度对震区泥石流防治工作具有重要的参考价值。

参考文献：

- [1] 殷跃平, 张永双, 伍法权, 等. 汶川地震地质灾害调查成果与展望[J]. 中国地质调查, 2014, 1(1): 1–9.
- [2] 黄润秋. 汶川地震地质灾害后效应[J]. 工程地质学报, 2011, 19(2): 145–151.
- [3] 崔鹏, 庄建琦, 陈兴长, 等. 汶川地震区震后泥石流活动特征与防治对策[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2010, 42(5): 10–19.
- [4] 张世殊, 裴向军, 张雄, 等. 强震区泥石流坡面物源发育规律与侵蚀坡度效应研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2016, 35(S2): 4139–4147.
- [5] 崔鹏, 韦方强, 陈晓清, 等. 汶川地震次生山地灾害及其减灾对策[J]. 中国科学院院刊, 2008(4): 317–323.
- [6] 马煜, 余斌, 李彩侠, 等. 汶川强震区群发性泥石流特征研究——以四川省都江堰龙池“8·13”群发泥石流为例[J]. 灾害学, 2014, 29(3): 218–223.
- [7] TANG C, ZHU J, LI W L, et al. Rainfall – triggered debris flows following the Wenchuan earthquake[J]. Bulletin of engineering geology and the environment, 2009, 68 (2): 187–194.
- [8] 乔建平, 黄栋, 杨宗信, 等. 汶川地震极震区泥石流物源动储量统计方法讨论[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2012, 23(2): 1–6.
- [9] HU K H, TIAN M, MA C. Comparison of debris – flow volume and activity under different formation conditions[J]. Natural Hazards, 2013, 67(2): 261–273.
- [10] 周荣军, 黄润秋, 雷建成, 等. 四川汶川 8.0 级地震地表破裂与震害特点[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(11): 2173–2183.
- [11] 蒋志林, 朱静, 常鸣, 等. 汶川地震区红椿沟泥石流形成物源量动态演化特征[J]. 山地学报, 2014, 32(1): 81–88.
- [12] 孔应德, 郭晓军, 邹强, 等. 汶川县古溪沟“7.10”泥石流形成特征及防治工程的影响[J]. 山地学报, 2014, 32(3): 320–326.
- [13] 徐梦珍, 王兆印, 漆力健. 汶川地震引发的次生灾害链[J]. 山地学报, 2012, 30(4): 502–512.
- [14] 冯文凯, 黄润秋, 许强. 地震波效应与山体斜坡震裂机理深入分析[J]. 西北地震学报, 2011, 33(1): 20–25.
- [15] 冯文凯, 许强, 黄润秋. 斜坡震裂变形力学机制初探[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(S1): 3124–3130.
- [16] 顾文韬, 裴向军, 裴钻, 等. 极震区震后泥石流物源特征研究[J]. 自然灾害学报, 2015, 24(2): 107–114.
- [17] 潘聪. 汶川县七盘沟泥石流斜坡物源启动模式及动储量预测研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2015.
- [18] 贺拿, 陈宁生, 曾超. 泥石流起动机理研究现状及趋势[J]. 灾害学, 2013, 28(1): 121–125.
- [19] 胡卸文, 韩政, 梁敬轩, 等. 汶川震区桃关沟 2013–07–10 泥石流成灾机理[J]. 西南交通大学学报, 2015, 50(2): 286–293.
- [20] 黄健, 巨能攀, 何朝阳, 等. 基于 WebGIS 的汶川地震次生地质灾害信息管理系统[J]. 山地学报, 2012, 30(3): 355–360.
- [21] HUANG Y, YU M, XU Q, et al. InSAR – derived digital elevation models for terrain change analysis of earthquake – triggered flow – like landslides based on ALOS/PALSAR imagery[J]. Environmental Earth Sciences, 2015, 73(11): 7661–7668.
- [22] CHANG M, TANG C, NI H Y, et al. Evolution process of sediment supply for debris flow occurrence in the Longchi area of Dujiangyan City after the Wenchuanearthquake [J]. Landslides, 2015, 12(3): 611–623.
- [23] 王帅永, 唐川, 何敬, 等. 无人机在强震区地质灾害精细调查中的应用研究[J]. 工程地质学报, 2016, 24(4): 713–719.
- [24] Imaizumi F, Tsuchiya S, Ohsaka O. Field observations of debris – flow initiation processes on sediment deposits in a previous deep – seated landslide site[J]. Journal of Mountain Science, 2016, 13(2): 213–222.
- [25] Tecca P R, Genevois R. Field observations of the June 30, 2001 debris flow at Acquabona (Dolomites, Italy) [J]. Landslides, 2009, 6(1): 39–45.
- [26] ZHU J, TANG C, CHANG M, et al. Field Observations of the Disastrous 11 July 2013 Debris Flows in Qipan Gully, Wenchuan Area, Southwestern China [M]// Engineering Geology for Society and Territory – Volume 2. Springer International Publishing, 2015.
- [27] HUANG R Q, HUANG J, JU N P, et al. WebGIS – based information management system for landslides triggered by Wenchuan earthquake[J]. Natural Hazards, 2013, 65(3): 1507–1517.
- [28] HUANG X, TANG C. Formation and activation of catastrophic debris flows in Baishui River basin, Sichuan Province, China[J]. Landslides, 2014, 11(6): 955–967.
- [29] GUO C X, ZHOU J W, CUI P, et al. A theoretical model for the initiation of debris flow in unconsolidated soil under hydrodynamic conditions[J]. Natural Hazards & Earth System Sciences Discussions, 2014, 2(6): 4487–4524.
- [30] ZHOU W, TANG C, ZHOU C H, et al. Rainfall – triggering response patterns of post – seismic debris flows in the Wenchuan earthquake area [J]. Natural Hazards, 2014, 70 (2): 1417–1435.
- [31] 崔鹏. 我国泥石流防治进展[J]. 中国水土保持科学, 2009, 7(5): 7–13, 31.
- [32] 陈晓清, 崔鹏, 冯自立, 等. 滑坡转化泥石流起动的人工降雨试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(1): 106–116.
- [33] 张丽萍, 唐克丽, 张平仓, 等. 泥石流源地松散体起动人工降雨模拟及放水冲刷实验[J]. 山地学报, 1999, 17(1): 46–50.
- [34] CUI P. Study on conditions and mechanisms of debris flow initiation by means of experiment[J]. Chinese Science Bulletin, 1992, 37(9): 759–759.
- [35] Iverson R M, Reid M E, Lahusen R G. Debris – Flow Mobilization from Landslides[J]. Annual Review of Earth and Planetary Sciences, 1997, 25(1): 85–138.
- [36] 陈晓清, 崔鹏, 韦方强. 泥石流起动原型试验及预报方法探索[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2006, 17 (4): 73–78, 96.
- [37] 胡明鉴, 汪稔. 蒋家沟流域暴雨滑坡泥石流共生关系试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(5): 824–828.
- [38] 倪化勇. 人工降雨条件下冲沟型泥石流起动试验研究[J]. 工程地质学报, 2015, 23(1): 111–118.
- [39] CHANG D S, ZHANG L M , XU Y , et al. Field testing of erodibility of two landslide dams triggered by the 12 May Wenchuan earthquake[J]. Landslides, 2011, 8(3): 321–332.
- [40] Ringsby T H , Saether B E , Jensen H , et al. Debris flow characteristics and relationships in the Central Spanish Pyrenees [J]. Natural Hazards & Earth System Sciences, 2003, 3 (6): 683–691

- [41] ZHUANG J Q , CUI P , PENG J B, et al. Initiation process of debris flows on different slopes due to surface flow and trigger - specific strategies for mitigating post - earthquake in old Beichuan County, China [J]. ENVIRONMENTAL EARTH SCIENCES, 2013, 68(5): 1391 – 1403.
- [42] 孟华君, 姜元俊, 张向营. 基于模型试验的震区沟道泥石流阈值研究[J]. 人民黄河, 2017, 39(7): 80 – 85, 95.
- [43] 龚凌枫, 唐川, 李宁, 等. 急陡沟道物源起动模式及水土耦合破坏机制分析[J]. 地球科学进展, 2018, 33(8): 842 – 851.
- [44] 陈怀强, 邓辉, 李文智, 等. 汶川强震区泥石流起动模型试验分析[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2014, 25(3): 20 – 25.
- [45] LI T T, HUANG R Q , PEI X J . Variability in rainfall threshold for debris flow after Wenchuan earthquake in Gaochuan River watershed, Southwest China[J]. Natural Hazards, 2016, 82(3): 1967 – 1980.
- [46] 乔建平, 李明俐, 杨宗信, 等. 基于模型试验的泥石流坡面物源启动预警模型[J]. 水科学进展, 2018, 29(1): 64 – 72.
- [47] 李驰, 朱文会, 鲁晓兵, 等. 降雨作用下滑坡转化泥石流分析研究[J]. 土木工程学报, 2010, 43(S1): 499 – 505.
- [48] 廖丽萍, 朱颖彦, 杨志全, 等. 震区砾石土泥石流起动临界状态与力学性状[J]. 山地学报, 2017, 35(4): 506 – 516.
- [49] HU W, XU Q, RUI C, et al. An instrumented flume to investigate the initiation mechanism of the post - earthquake huge debris flow in the southwest of China[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2015, 74(2): 393 – 404.
- [50] LI Y F, WANG Z Y , SHI W J, et al. Slope debris flows in the Wenchuan Earthquake area [J]. 山地科学学报(英文版), 2010, 7(3): 226 – 233.
- [51] 黄勋, 唐川. 强震区侵蚀 – 溃决型泥石流的动力特性定量分析[J]. 工程地质学报, 2017, 25(6): 1491 – 1500.
- [52] 陈明, 唐川, 甘伟, 等. 震区急陡沟道型泥石流特征及动力过程研究——以汶川瓦窑沟为例[J]. 云南大学学报(自然科学版), 2018, 40(2): 272 – 278.
- [53] 韩政. 汶川震区“宽缓”与“窄陡”沟道型泥石流致灾机理研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2016.
- [54] HUANG Y, CHENG H L, DAI Z L, et al. SPH – based numerical simulation of catastrophic debris flows after the 2008 Wenchuanearthquake[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2015, 74(4): 1137 – 1151.
- [55] XINGA G , YUAN X Y, XU Q , et al. Characteristics and numerical runout modelling of a catastrophic rock avalanche triggered by the Wenchuan earthquake in the Wenjia valley, Mianzhu, Sichuan, China[J]. Landslides, 2017, 14(1): 83 – 98.
- [56] CHEN H X , ZHANG L M , ZHANG S , et al. Hybrid simulation of the initiation and runout characteristics of a catastrophic debris flow [J]. Journal of Mountain Science, 2013, 10 (2): 219 – 232.
- [57] XING A G, XU Q, GAN J J. On characteristics and dynamic analysis of the Niumian valley rock avalanche triggered by the 2008 Wenchuan earthquake, Sichuan, China[J]. Environmental Earth Sciences, 2015, 73(7): 3387 – 3401.
- [58] LU X B , CUI P , CHEN X Q , et al. Evolution of shear zones using numerical analysis at the May 12th Wenchuan Earthquake Site, China[J]. Environmental Earth Sciences, 2012, 65 (4): 1029 – 1036.
- [59] 桂勇, 邓通发, 罗嗣海, 等. 基于蒙特卡罗边坡稳定二元体系的建立与应用[J]. 岩土力学, 2014, 35(7): 1979 – 1986
- [60] 张友谊. 不同降雨条件下峡谷滑坡稳定性研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2007.
- [61] 刘洋, 裴向军, 罗璟, 等. 地震与强降雨条件下云南鲁甸王家坡震裂山体稳定性分析[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2018, 29(1): 23 – 33.
- [62] 胡明鉴, 汪稔, 陈中学, 等. 泥石流启动过程 PFC 数值模拟[J]. 岩土力学, 2010, 31(S1): 394 – 397, 43.

Research Status of Initiation Mechanism of Debris Flow Provenance after Earthquake in Meizoseismal Area

ZHANG Youyi, YE Xiaobing and GU Chengzhuang

(Southwest University of Science and Technology Department of Civil Engineering and Architecture, Sichuan 621010, China)

Abstract: The “5. 12” Wenchuan Earthquake caused damage to the mountainous structure of the meizoseismal area, which led to a surge in post-seismic provenance of debris flow in the meizoseismal area. The secondary debris flow disaster occurred frequently after the earthquake. In order to further explore the initiation mechanism of debris flow provenance after the earthquake, we summarize the research status of initiation mechanism of post-seismic debris flow provenance in the meizoseismal area. Based on data collection and analysis, Advances in the field investigation, physical simulation test and numerical simulation analysis were summarized in detail. In the end of this paper, some related advice on future research on the initiation mechanism of post-seismic provenance of debris flow were put forward in the following aspects: to further improve similarity of experimental condition, such as rainfall process and rainfall type, to further study the effect of erosion and entrainment in numerical simulation model, and to further study the simulation analysis of large-scale debris flow initiation process in complex terrain. In addition, the research on the mechanism of high-level source disaster in fragile mountainous areas should be strengthened.

Key words: meizoseismal area; debris flow provenance; initiation mechanism; research progress