

汶川震区北川 9.24 暴雨泥石流特征研究*

唐川 梁京涛

(成都理工大学地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室 成都 610059)

摘要 2008年9月24日汶川震区的北川县暴雨导致区域性泥石流发生,这次9.24暴雨泥石流灾害导致了42人死亡,对公路和其他基础设施造成严重损毁。本研究采用地面调查和遥感解译方法分析地震与暴雨共同作用下的泥石流特征,获取的气象数据用于分析泥石流起动的临界雨量条件。本文探讨了研究区泥石流起动和输移过程,并根据野外调查,分析了泥石流形成的降雨、岩石和断层作用,特别是强降雨过程与物源区对泥石流发生的作用。根据应急调查发现北川县境内暴雨诱发的泥石流72处,其分布受岩石类型、发震断层和河流等因素控制。根据对研究区震前和震后泥石流发生的临界雨量和雨强的初步分析,汶川地震后,该区域泥石流起动的前期累积雨量降低了14.8%~22.1%,小时雨强降低25.4%~31.6%。震区泥石流起动方式主要有二种,一是由于暴雨过程形成的斜坡表层径流导致悬挂于斜坡上的滑坡体表面和前缘松散物质向下输移,进入沟道后转为泥石流过程;二是“消防水管效应”使沟道水流快速集中,并强烈冲刷沟床中松散固体物质,导致沟床物质起动并形成泥石流过程。调查和分析发现沟内堆积的滑坡坝对泥石流的阻塞明显,溃决后可导致瞬时洪峰流量特别大。研究结果表明了汶川震区已进入一个新的活跃期。因此,应该开展对汶川地震区的泥石流风险评估和监测、早期预警,采取有效的工程措施控制泥石流的发生和危害。

关键词 汶川地震 暴雨 泥石流 分布规律 起动过程

中图分类号:P642.23 文献标识码:A

CHARACTERISTICS OF DEBRIS FLOWS IN BEICHUAN EPICENTER OF THE WENCHUAN EARTHQUAKE TRIGGERED BY RAINSTORM ON SEPTEMBER 24, 2008

TANG Chuan LIANG Jingtao

(State Key Laboratory of Geo - Hazard Prevention and Geo - Environment Protection, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059)

Abstract The intense rainfall on 24th September 2008 initiated widespread debris flows in Beichuan County, the epicenter of the Wenchuan Earthquake. These debris flows greatly impacted the community of the Beichuan County and caused 42 fatalities. The debris flows also damaged many roads and other infrastructures in the mountainous areas. Field reconnaissance and interpretations of aerial photographs were used to identify debris flow occurrences. Precipitation data were then utilized to analyze critical rainfall conditions leading to the debris flow initiation. This study examines the process of debris - flow initiation and transport in the study areas and presents field observations on the roles of rainfall, lithology, and faults. Particular emphasis is given to the roles of intense precipitation and source areas. The character and spatial distribution of lithology, faults and topography appear to control the initia-

* 收稿日期:2008-11-10;收到修改稿日期:2008-12-10.

基金项目:国家自然科学基金(40772206)和国家重点基础研究发展计划(2008CB425801).

第一作者简介:唐川,研究方向:地质灾害、环境地质、遥感与GIS应用. Email: tangc@edut.edu.cn

tion processes of debris flows in the mountainous area. The study results show that after the Wenchuan Earthquake, critical accumulated precipitation and hourly rainfall intensity necessary to initiate debris flow reduced to as low as 14.8% ~ 22.1% and 25.4% ~ 31.6% respectively comparing with those before the earthquake. Through emergency field investigation, 72 debris - flows triggered by the rainfall were identified. Almost all debris flow gullies in the drainage basins have contained many seismic landslides, which supply debris flow source areas with huge loose material. Two types of failure mechanisms initiated the debris flows: the first initiation involved the mobilization of shallow landslides and the second process, which was explained with term of the "fire - hose effect" initiated debris flows. The overland flow of water resulting from intense rainfall was concentrated in steep channels and scoured debris from gully - bed loose deposits. The study also indicated that the region affected by the Wenchuan Earthquake become more vulnerable to debris flows in this period. Therefore it is important to assess debris flow risk and take hazard monitoring and early warning in the earthquake areas. The control work is also necessary for debris flow hazard mitigation.

Key words Wenchuan Earthquake, Rainstorm, Debris flow, Distribution, Initiation process, Beichun county, Post - earthquake geohazards

1 引言

2008年9月24日汶川地震区中心位置的北川一带突降暴雨,导致区域性泥石流的暴发,位于北川老县城附近的西山坡沟暴发大规模泥石流过程,泥石流冲入县城,几乎全部淤埋老县城,给今后北川县城遗址纪念馆的建设带来了很大的困难。原北川中学后山任家坪沟暴发泥石流,掩埋村庄和原北川中学宿舍区,并直接威胁其下游居住有300多人的灾民安置区。这次9.24暴雨泥石流灾害导致了42人死亡、失踪,由于通往乡村道路几乎被泥石流全毁,使4000多人被围困山里。此外,沿岷江等河流两岸新暴发的泥石流比比皆是,多处堆积扇对主河道造成顶托,加之河流泥沙含量高,水位上涨快速,使两岸低地居民安置区被洪水淹没和道路毁坏等受到严重威胁。

笔者等人在灾后汇同其他专家对泥石流重灾区进行了调查,对灾情进行了评估,分析了这次汶川地震后泥石流的空间分布特征和存在的潜在危险性,指导泥石流危险区群众的撤离,并部署监测预警等应急防灾减灾措施,以最大限度减轻泥石流的灾害。

本文主要采取野外调查方法对区域泥石流的分

布、数量进行调查。选择了典型的泥石流流域进行地面详细测量与调查,对泥石流起动区的物源条件,流通区和堆积扇特征进行分析。在流通区沟段选择了保留泥石流泥痕的典型横断面进行测绘,为计算泥石流的流量和冲出量提供数据。

2 研究区

研究区处于汶川地震灾区的中心位置,距离成都以北160km,地理位置为东经 $103^{\circ}44'$ ~ $104^{\circ}44'$,北纬 $31^{\circ}41'$ ~ $32^{\circ}14'$,研究区东西方向长度92km,南北为59km,总面积 $2,865\text{km}^2$,人口约16.1万人。研究区出露的地层有寒武系、志留系、泥盆系、石炭系及新生界第四系松散堆积层。岩石类型包括寒武系的砂岩、砂页岩、泥质灰岩;志留系的板岩、千枚岩、灰岩;泥盆系和石炭系的碳酸岩盐;第四系松散堆积层广泛分布于河流两侧和山前沟口地带的阶地和洪积扇上。研究区地质构造以NE走向为主,受构造走向控制,岩层走向亦以NE走向为主。位于研究区东南部为映秀—北川断层,是导致5.12汶川地震活动的断层。该性质为推覆逆冲断层,断层倾向NW,倾角 60° ~ 70° (图1)。

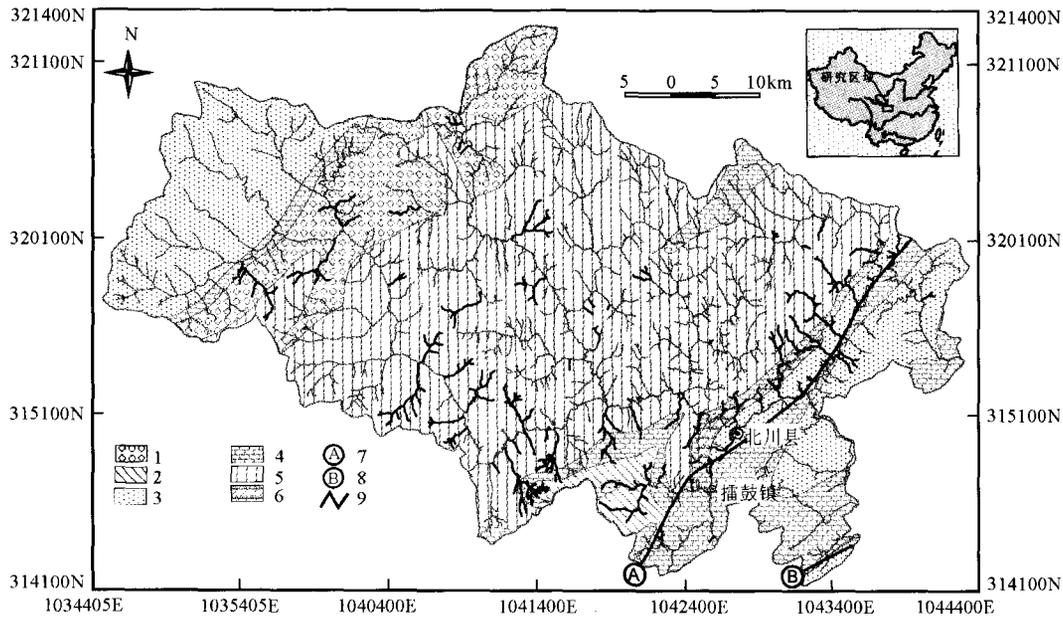


图1 北川县地质特征和9.24暴雨泥石流分布图

Fig. 1 Map of geology and debris flow distribution in Beichuan county

- 1. 硅质岩;2. 千枚岩;3. 砂岩;4. 碳酸盐岩;5. 千枚岩-板岩;6. 砂页岩;7. 北川-映秀断裂带;
- 8. 江油-灌县断层带;9. 泥石流沟沟道

北川县地处四川盆地向川西高原的过渡带上,以山地为主,北西部为侵蚀构造中山地形,中部为侵蚀构造中山地形,南东部主要为侵蚀溶蚀低中山地形。研究区最高山为位于西部的撮箕山,海拔高4036m,次高山为位于研究区的南西部的铧头山,海拔高程3997m,海拔最低处位于湔江,海拔高程523m。湔江是研究区的主要河流,发源于研究区西北山区,从东南角流出最后注入涪江;湔江在北川县内全长47.9km,流域面积455.80km²,天然落差为203m,湔江多年平均径流量102.7m³·s⁻¹,年平均输沙量400~500万t,流域内年平均侵蚀模数达

7072.61t·km⁻²·a⁻¹。

研究区位于亚热带湿润季风气候区,多年平均气温15.6℃(表1)。该区又属四川区域著名的鹿头山暴雨区,雨量充沛,年均降雨量1399.1mm,年最大降雨量2340mm(1967年),日最大降雨量101mm,小时最大降雨量42mm;降雨集中在6~9月(表1),占全年降雨量83%,最大占90%(1981年);从历年时间上看,图2反映了1971~2000年北川县30a的降雨量分布特征,说明研究区年降雨分布不均;在空间分布上,北川区域具有东南向北西年均降雨量变小的规律。

表1 1971年至2000年北川县平均气温和降雨量

Table 1 Mean temperature and rainfall amount from 1971 to 2000 in Beichuan

月份	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	全年
气温/(℃)	5.3	7.0	11.3	12.9	20.4	21.6	24.4	24.4	20.2	16.0	11.3	6.8	15.6
降雨量/mm	5.9	11.4	22.8	52.6	97.3	135.3	370.8	350.4	206.6	64.4	18.6	4.1	1399.1

3 9.24 泥石流暴发的雨量临界条件

汶川地震前,研究区有2处气象站,分别是北川县城附近的北川观测站和擂鼓观测站,2008年5月12日地震后,由于气象观测仪器损坏,部分时段没有

获取观测数据。地震后,在唐家山滑坡位置设置了自动气象观测站,用于监测堰塞湖水文动态变化和分析溃坝洪水的可能性。

2008年9月23日之前相当长一段时间降水量偏少,北川站观测的7月和8月降雨量分别是125.7mm和234.7mm。上述雨量与表1中的7,8月份的

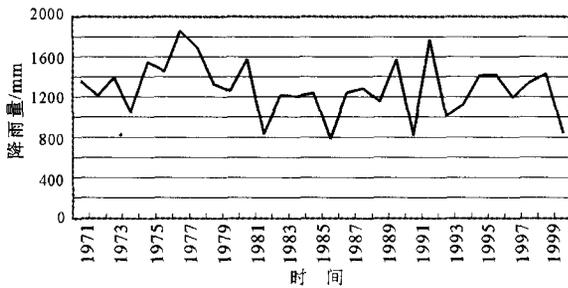


图2 1971年至2000年北川县年降雨量分布
Fig. 2 Annual rainfall amount from 1971 to 2000 in Beichuan

多年平均月雨量对比,北川站7,8月份雨量分别减少了66%和33%。9月1~22日北川区域处于异常干燥期,北川站记录的雨量仅为57mm,擂鼓站记录的雨量仅为40mm。

泥石流发生的前一天,即9月23日,北川区域开始大面积降雨,唐家山自动雨量站记录是173.8mm(图3)。擂鼓镇和北川站以人工观测为主,部分时段缺报。9月24日凌晨0:00~5:00唐家山站记录雨量为57.9mm,可能最终诱发大范围泥石流的雨量是在5:00~6:00,其雨强达到41mm,图3反映了这种雨量分布特征,降雨量为20a一遇。居住在任家坪一带村民描述凌晨5点多沟内响声如雷,地面颤动,大规模洪水夹杂着泥沙石块冲入老县城地震废墟,到了凌晨6点多随后声音渐小,整个过程持续了近1h;天亮以后,沟内洪水仍然涨得较高,一直持续到10点多。因此判断北川老县城附近的西山坡沟泥石流和擂鼓镇附近的赵家沟泥石流均是在9月24日凌晨5~6点这一时段暴发的。

笔者查阅了2003年的“北川县地质灾害调查与区划”报告(四川省国土资源厅,2003),并参考了泥石流发生临界雨量研究成果,震前数据表明该区域泥石流发生的前期累积雨量320~350mm,泥石流发生的临界雨强为55~60mm·h⁻¹。该区域泥石流发生的临界雨量在震前、震后有所变化,2008年9月23日~24日区域泥石流发生的前期累积雨量为272.7mm,本次激发泥石流的临界雨强为41mm·h⁻¹。上述震前与震后泥石流发生的临界降雨条件有所变化,汶川地震后,该区域泥石流启动的前期累积雨量降低大约14.8%~22.1%,小时雨强降低约25.4%~31.6%。这种特征还表现在1999年台湾集地震区,震后泥石流启动的小时雨强和临界累积雨量比震前降低1/3^[1]。

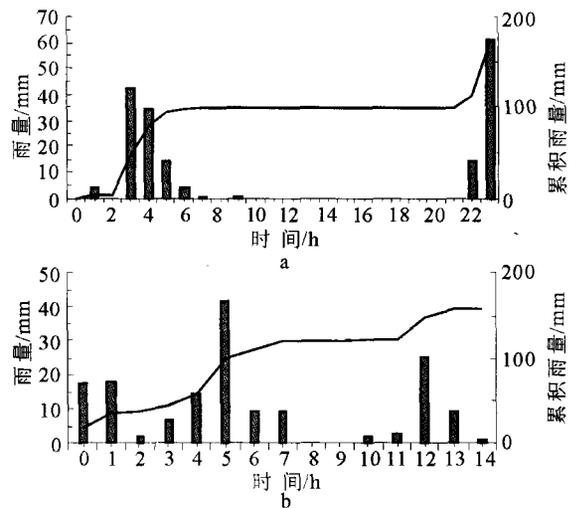


图3 2008年9月23日~24日唐家山雨量站降雨记录

Fig. 4 Rainfall records of tangjiashan in 9, 23 and 24, 2008
a. 2008年9月23日; b. 2008年9月24日

4 区域泥石流分布规律

为了研究北川区域2008年9月24日降雨诱发的泥石流空间分布和特征,笔者主要沿公路和河流进行应急调查,共发现72条沟谷型泥石流(图1,图4);坡面型泥石流分布广泛,数量众多,难以记数,作为今后进一步研究内容。

为了分析区内地层岩性对泥石流空间分布的影响,笔者将9.24暴雨泥石流源地位置与岩石类型分布进行了叠加,结果表明46处泥石流源区(64%)分布在志留系的千枚岩、板岩中;11处泥石流源区(15%)分布在寒武系的砂岩、砂页岩中,仅有8处泥石流源区(11%)分布在泥盆系和石炭系的石灰岩中,此外,还有7处泥石流源区(9%)分布在硅质岩中(图1)。由于使用的地质图为1:10万比例尺,所表示的第四系地层仅是沿主河分布的较大面积的图斑,在多数泥石流流域内无法确定其分布位置。上述统计说明千枚岩、板岩对于泥石流形成的敏感性最高,因为该区域历经构造运动,褶皱和断裂极为发育,从而导致千枚岩、板岩整体性很差,抗风化能力弱,往往形成较厚的风化层,吸水性和可塑性较大,易于风化成富含粘土矿物的物质,为泥石流的形成提供了大量松散物质。

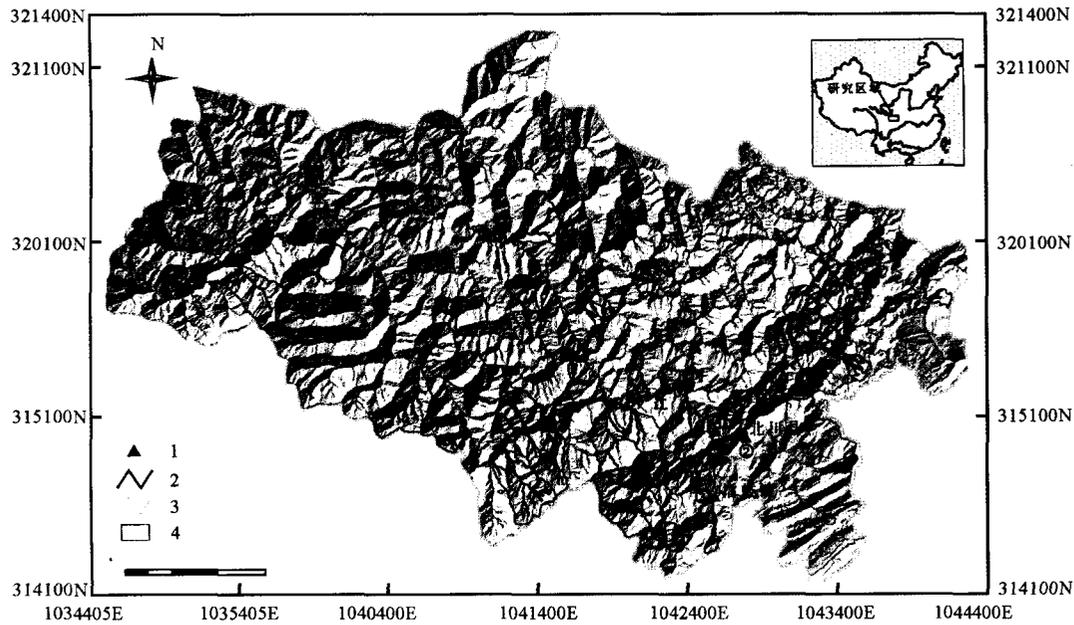


图4 北川区域9.24暴雨泥石流的流域系统

Fig. 4 Drainage system of debris flows in Beichuan area

1. 雨量站;2. 泥石流沟沟道;3. 河流;4. 泥石流沟汇水流域

①. 北川气象观测站;②. 为擂鼓气象观测站;③. 为唐家山雨量观测站

从图1也可看出,绝大多数泥石流分布在映秀—北川断层的上盘,仅7条泥石流位于断层的下盘。泥石流沟在空间上呈现沿断层和河流成“带状”分布特点,共有17条泥石流沟紧靠映秀—北川断层西北端呈“带状”展布;此外,泥石流沟沿岷江等河流两岸分布密度也较高;反映出断层和水系对泥石流空间分布特征的控制性。泥石流的流域面积在0.3~26.3km²不等,大约50%的泥石流流域面积小于3km²,其中流域面积小于1km²的泥石流沟有12条(图5)。

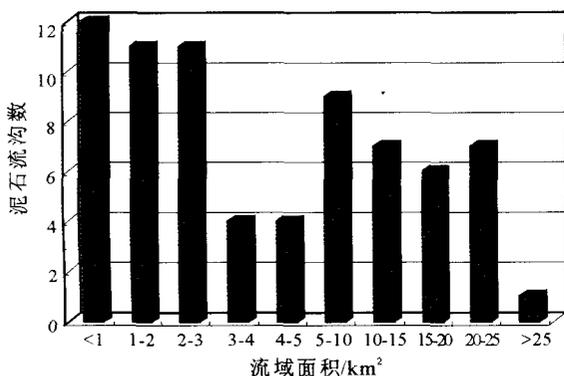


图5 北川区域泥石流流域面积特征

Fig. 5 Characters of watershed area for debris flow gully in Beichuan area

5 泥石流形成特征分析

通过笔者对泥石流形成区源地的调查和分析,将泥石流起动机制可以概括为两大类:(1)经降雨作用形成的地表径流导致悬挂于斜坡上的滑坡体表面和前缘松散物质,向下输移,进入沟道后转为泥石流过程;(2)用“消防水管效应”^[2,3]解释泥石流起动过程,首先是位于陡峻基岩流域上游暴雨产生沟道径流如同“消防水管”导致水流快速集中,并强烈冲刷沟道中滑坡堆积体及其他松散固体物质,导致沟道固体物质起动并形成泥石流过程。

震区泥石流的形成发育最显著而典型的特点就是强震作用下为泥石流流域提供大量松散固体物质来源^[4]。野外调查发现研究区泥石流沟内地震诱发崩塌、滑坡等不良物理地质过程十分普遍,几乎每条泥石流沟上游谷坡均发育规模不同的斜坡失稳体,主要以二种方式补给泥石流,一是强震导致崩塌、滑坡整体失稳下滑,堆积于沟道中;二是强烈变形局部位移后,“悬挂”于陡峻的斜坡上,一旦遭遇强降雨过程,或是整体下滑,或是滑坡表层及前缘松散体物质输移到沟床中,参与泥石流过程。此外,补给泥石流松散物质还包括沟谷两岸第四系松散堆积层或风化层,在强震作用下,表层整体结构遭到破

坏,土体裂缝、孔隙增大,变得更加“疏松”,在降水或地表水渗入作用下,形成软弱带,极易产生表层侵蚀输入泥石流沟道中。

根据对北川县城至擂鼓镇一带泥石流灾害现场调查发现,震后泥石流形成区的松散固体物质似乎特别多,以西山坡沟为例,该沟流域面积 1.54km^2 ,主沟长 2.3km ;根据 0.5m 分辨率的震后 2008 年 5 月 18 日拍摄的航空图像分析,并结合实地调查,泥石流流域上游分布有 2 处平面面积大于 $100,000\text{m}^2$ 地震滑坡,另外有 10 多处规模较小的崩塌、滑坡(图 6);对泥石流形成最有贡献的是分布在 $950 \sim 1000\text{m}$ 处的滑坡整体下滑,滑体长 410m ,宽 250m ,平均厚度 $10 \sim 15\text{m}$,由此估计该滑坡体积大约为

110万 m^3 ;由于滑坡几乎整体下滑并严重堵塞沟道,沿沟道堆积长度约 120m ,堆积高度 $5 \sim 10\text{m}$ 。另外一处滑坡位于沟谷上游,滑坡体悬挂于斜坡上,估计总体积有 120万 m^3 ;此外,在起动区沟谷两岸基岩风化层和第四系坡积堆积层也因为强烈地震作用可作为泥石流松散物源,根据航空照片解译和现场的初步测量,这部分松散物源体积可达 120万 m^3 以上,由此推算该流域可提供泥石流活动松散固体物质可达 350万 m^3 。根据 2003 年完成的“北川县地质灾害调查与区划”报告,当时估算该泥石流沟的松散固体物质储量仅 5万 m^3 ,说明了震前与震后泥石流沟的松散物质相差是如此巨大。

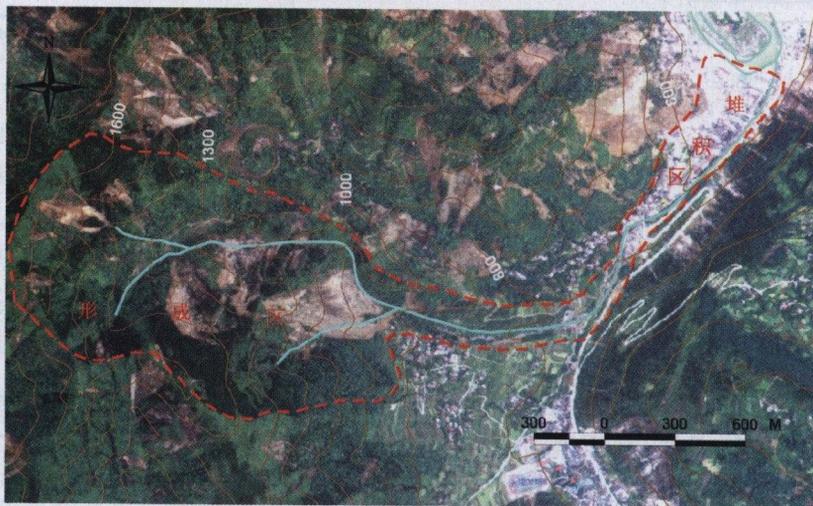


图 6 西山坡泥石流沟流域航空影像图

Fig. 7 Areal photograph of Xishanpo debris flow gully

笔者还对原北川中学后山的任家坪沟流域进行调查,该沟流域面积 0.52km^2 ,主沟长 1.05km ,泥石流物源主要来源于流域内地震滑坡,该滑坡体表面面积达 0.226km^2 ,占该泥石流流域总面积的 42% ,估计滑坡体积达 270万 m^3 ,滑坡整体下滑并堆积于沟谷中,直接参与 9.24 暴雨泥石流过程主要是堆积于沟道中的滑坡前缘堆积体,方量约为 30万 m^3 。图 7 反映了该泥石流流域中的大型滑坡体分布位置及堆积泛滥区。擂鼓镇的赵家沟泥石流的流域面积 1.04km^2 ,沟内亦发育多处滑坡、崩塌体,其方量也可达 200万 m^3 以上。

6 泥石流运动与堆积特征

9.24 暴雨泥石流在运动过程中的流量、侵蚀、

搬运等有其独特之处。这次北川泥石流的运动过程的特点之一是沟床中地震滑坡堰塞体溃决效应导致的瞬时洪峰流量放大现象。现场调查及震后 5 月 18 日航片解译发现许多泥石流沟中上游通常分布有大型滑坡体,这些滑坡整体或前缘下滑堵塞沟道,形成暂时性的堰塞体,例如西山坡沟泥石流起动区位于海拔 $1250 \sim 1150\text{m}$ 位置,流体沿上游沟道运动到海拔 1050m 处,受到堆积于沟道滑坡松散堆积堰塞体的阻挡,快速淤积后导致部分滑坡坝溃决,使泥石流的洪峰流量瞬时增大。为了了解泥石流在该沟段的流量特征,在流通区测量了 2 个泥痕断面,第一个断面位于海拔 900m 处的流通区上段,横断面呈梯形,长度 14m ,深度 5m ;第二个断面位于位于海拔 780m 处的流通区下段,横断面呈矩形,横向长度 32m ,深度 2.2m ;由此推测泥石流洪峰流量可达

$260\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$,这个流量对于流域面积仅 1.54km^2 泥石流沟似乎偏大,但是由于滑坡坝的溃决导致瞬间流量剧烈加大是有可能的,此外,根据对堆积区的地

面调查,这次泥石流的冲出量达 34万 m^3 ,再反推计算其洪峰流量,也说明西山坡沟发生的这场泥石流洪峰流量较大。



图7 任家坪泥石流沟流域航空影像图

Fig. 7 Aerial photograph of Renjiaping debris flow gully

泥石流运动中表现出了强大的侵蚀能力^[5],流体携带的巨大石块强烈冲蚀、铲刮沟岸和沟床,使沟道普遍加宽,沟床下切深度加大。此外,泥石流过程也产生了溯源侵蚀,泥石流的下切侵蚀迅速加深沟谷后,沟谷源头因重力侵蚀作用加强而不断向分水岭方向后退,使沟谷长度不断增加,形成溯源侵蚀。上述侵蚀作用表现在坡面泥石流的形成也很典型,发生在北川老县城内的王家岩滑坡体上的坡面泥石流,由于强大的水流侵蚀,在松散的滑坡堆积体表面下切形成细沟,随着沟道的不断加深拓宽和溯源侵蚀,最后塑造成典型的坡面泥石流,这种斜面泥石流地貌现象在北川区域十分常见,成为掩埋房屋和淤埋公路的主要泥石流类型之一。

9.24北川泥石流的搬运输移能力也十分巨大,在流域的面积较小,沟谷长度较短的条件下,仍然具有巨大的输移能力,所搬运的直径1m以上粗大石块随处可见,一次搬运泥砂、石块可达几十至上百万立方米以上,例如西山坡沟泥石流一次冲出量高达 34万 m^3 。这次北川泥石流运动输移特征与源地丰富松散物质供给、较陡沟床比降有密切关系。泥石

流这种惊人的搬运输移能力及冲淤幅度,一般洪水过程需几年,甚至几十年才能完成,因此泥石流过程是山区塑造地貌最强的外营力之一。

由于9.24北川泥石流的流量和冲出量比通常要大,所以形成的堆积扇具有一定规模,堆积扇的平面形态受堆积地带边界控制,例如西山坡泥石流主要沿狭长的低洼地形有选择性堆积,在北川老县城形成舌状堆积扇,其堆积长度900m,宽度150~200m,面积 0.17km^2 ;擂鼓镇赵家沟堆积区相对较开阔,形成相对栎型扇形地,堆积区总长498m,总面积约为 0.22km^2 。这次大多数泥石流形成的堆积扇由于容重较高,其纵坡降也较大,多为6.5%~8.5%,其扇顶的堆积厚度可达10~15m,在主流线上堆积厚度较大,高程明显的上凸形微地貌向边缘及前缘厚度逐渐减小。例如西山坡泥石流堆积厚度在上段达10~12m,在中段主流线附近约7~8m,在堆积体前端主要集中了较大块石和树木。图8反映了北川县城泥石流发生前后的堆积变化情况,泥石流堆积厚度可达三层楼高。

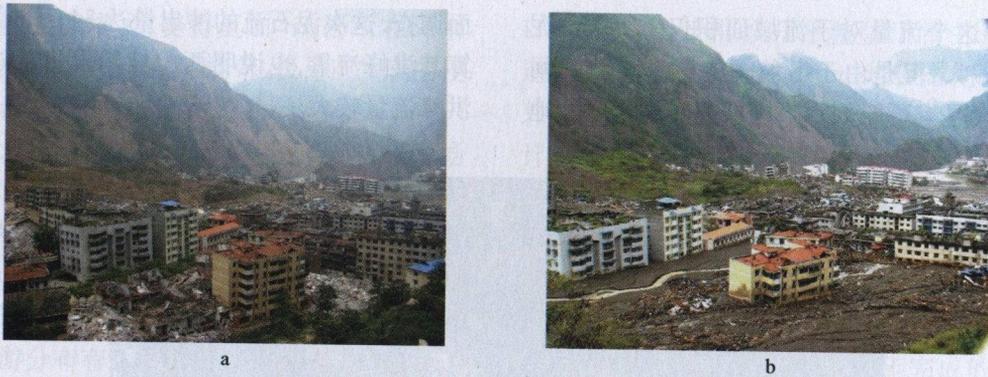


图8 北川县城泥石流发生前后的堆积变化特征

Fig. 8 Charators for the deposition change before and after debris flow occurrence in Beichuan city

a. 6月12日拍摄; b. 9月24日拍摄

7 结 论

(1) 汶川地震作用诱发了大量的崩塌、滑坡,为泥石流的形成提供了重要的松散物质。根据应急调查发现北川县境内9.24暴雨诱发的泥石流72处,这些泥石流导致了42人死亡,毁坏公路,并对地震灾民安置区构成了严重威胁。

(2) 地震后的强降雨过程是诱发泥石流的动力因素,泥石流暴发是大量前期累积雨量和当次激发雨强共同作用下的结果。根据对研究区震前和震后泥石流发生的临界雨量和雨强的初步分析,震前与震后泥石流发生的临界降雨条件有所变化,汶川地震后,该区域泥石流起动的前期累积雨量降低大约14.8%~22.1%,小时雨强降低约25.4%~31.6%。

(3) 岩石类型是影响泥石流的发生和分布的重要因素,特别是64%的泥石流沟分布在志留系的千枚岩、板岩中,该类岩石在断裂和褶皱影响下,容易破碎、风化,形成富含粘土矿物的物质,为泥石流的形成提供了大量松散物质,也为泥石流携带大粒径块石远距离运动提供必要条件。此外,发震断层和河流对泥石流空间分布也有一定的控制作用。

(4) 震区泥石流起动方式主要有二种,一是由于暴雨过程形成的斜坡表层径流导致悬挂于斜坡上的滑坡体表面和前缘松散物质向下输移,进入沟道后转为泥石流过程;二是“消防水管效应”使沟道水流快速集中,并强烈冲刷沟床中松散固体物质,导致沟床物质起动并形成泥石流过程。调查和分析发现沟内堆积的滑坡坝对泥石流的阻塞明显,溃决后可导致瞬时洪峰流量特别大。此外,由于震后泥石流流域松散物质特别丰富,即使较小流域面积泥石流

的冲出量比一般泥石流似乎大得多,因此,震区泥石流的堆积泛滥危险范围更大,对位于扇形地的居住区、道路等其他基础设施的风险性也明显提高。

9.24北川暴雨泥石流的发生表明了汶川震区的泥石流已进入一个新的活跃期,未来5~10a该区域泥石流发生将更加频繁。因此,应该加强对汶川地震区的泥石流沟的识别调查,在对其进行危险评估基础上,重点开展城镇泥石流灾害风险评估;同时加强风险管理,在潜在高危险泥石流流域建立监测、预警系统;根据泥石流易损性分析与风险评估结果,采取有效的工程措施控制泥石流的发生和危害。

参 考 文 献

- [1] Lin C W et al. . Impact of Chi - Chi earthquake on the occurrence of landslides and debris flows: example from the Chenyulan River watershed, Nantou, Taiwan [J]. *Engineering Geology*, 2003, (71):49~61.
- [2] Coe J A, Glancy P A, Whitney J W. Volumetric analysis and hydrologic characterization of a modern debris flow near Yucca Mountain Nevada [J]. *Geomorphology*, 1997, (20):11~28.
- [3] Griffiths P G, Webb R H, Melis T S. Frequency and initiation of debris flows in Grand Canyon, Arizona [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2004, (109):321~336.
- [4] 钟敦伦. 论地震在泥石流活动中的作用. 泥石流论文集(1). 重庆:科技文献出版社重庆分社, 1981, 30~35.
Zhong Dengleng. The role of earthquake influence on debris flow occurrence. *Articles collection of debris flow (1)*. Chongqing: Chongqing Branch of Publishing House for Scientific Reference, 1981, 30~35.
- [5] 唐邦兴. 中国泥石流灾害 [M]. 北京:商务印书馆, 2002, 72~95.
Tang Bangxing. *Debris flow hazards in China*. Beijing: The Commercial Press, 2002, 72~95.