

DOI:10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.2016.04.07

基于遥感影像的四川石棉“7·4”后沟泥石流 形成机理与堵河过程分析

宋 志^{1,2}, 陈泽硕²

(1. 中国地质调查局成都地质调查中心, 四川 成都 610081; 2. 西南交通大学, 四川 成都 610031)

摘要: 本文以 2013 年 7 月 4 日四川石棉县后沟堵河型泥石流为研究对象, 通过泥石流堵河前后对比研究、前期与当日降雨分析、理论计算, 认为后沟泥石流为强降雨自然诱发、矿渣物源补给的复合型泥石流。后沟泥石流的启动过程主要表现为: 强降雨→启动点产生→沟道侵蚀、拉槽→沿程流量加大→矿渣物源参与→规模突增→淤积与下切交错→堵塞楠桧河。通过灾后的实地调查, 后沟泥石流堵断楠桧河溃坝后, 在堆积区形成 2 个堆积扇和 3 个对冲淤积点, 保存着泥石流顶冲对岸形成堰塞体的形态特征, 具有典型泥石流堵河特征。通过经验公式计算, 后沟堵河程度在堵河可能性小和严重堵塞之间, 与历史频率、实地调查、遥感分析具有较好的适应性。

关键词: 石棉; 泥石流; 遥感; 堵河

中图分类号: P642.23

文献标识码: A

文章编号: 1003-8035(2016)04-0038-06

Mechanism of formation and blocking river of debris flow disaster on 04 July, 2013 in Hougou of Shimian, Sichuan using remote sensing images

SONG Zhi^{1,2}, CHEN Zeshuo²

(1. Chengdu Center of China Geological Survey, Chengdu, Sichuan 610081, China;

2. Southwest JiaoTong University, Chengdu, Sichuan 610031, China)

Abstract: Heavy rainfall occurred in the county on 04 July, 2013 in Shimian, which caused the outbreak of the debris flow. The mass of debris flow disaster caused serious human and property losses. Select the debris flow in Hougou as the research object, by comparative analyzed The theoretical calculation of the critical value of the start of the debris flow in the Hougou meteorological rainfall data; remote sensing image in the region before and after the debris flow, the debris flow is a typical slag type induced by heavy rainfall. The starting process of debris flow expressed as strong rainfall→Hydrodynamic enhancement, soil saturation and anti-slip capability weakened→start point generating→gully erosion→flow increase→slag provenance participation→scale sudden increased→deposition and cutting→blocked Nanya River. Through field survey we found, after the debris flow blocking off Nanya River, forming 2 stacked fan and 3 points in the accumulation area of erosion and deposition. 3 points of erosion and deposition kept rushing across the formation of morphological characteristics of debris flow damming body. Calculation by empirical formula, the possibility of blocking the river between small and serious blockage, agree with field survey and remote sensing analysis.

Keywords: Shimian; debris flow; remote sensing; blocking the river

收稿日期: 2016-01-22; 修订日期: 2016-02-23

第一作者: 宋 志(1982-), 男, 四川宣汉人, 高级工程师, 主要从事岩土工程、地质灾害研究。E-mail: 35842126@qq.com

0 引言

2013年7月4日,石棉县特大暴雨来袭,诱发了沿大渡河和楠桧河多处泥石流暴发。灾难性的泥石流包括熊家沟、马颈子沟、出路沟、后沟等,造成了巨大的人员伤亡和财产损失。后沟泥石流位于“7·4”暴雨中心,在前期有效降雨量累计达52 mm时,于7月4日晚8:30小时雨强36.6 mm,激发了后沟泥石流的启动、运移、扩大,最终冲出沟口,冲毁桥梁,威胁民房,淤积公路,堵塞楠桧河,造成局部水位抬高,直接威胁石棉县城,位置图见图1。

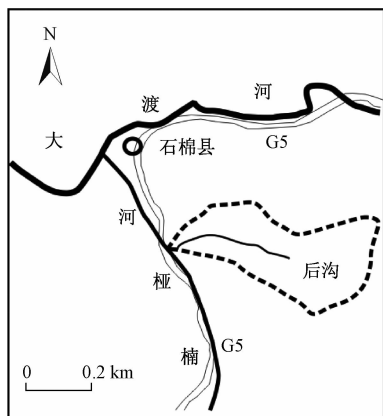


图1 四川石棉后沟位置图

Fig.1 The location map of Houkou

在“7·4”后沟泥石流发生前,大量学者与勘查技术人员均对后沟进行了详尽调查研究,得出了两点结论:①后沟为一条典型的弃渣型泥石流,即为人为性泥石流,物源集中于下游右侧废弃矿渣;②由于汛期楠桧河流量强、主河宽,后沟泥石流堵断楠桧河的可能性小,据综合资料显示,后沟在2013年“7·4”洪灾前历史上均未发生堵塞主河案例^[1-3]。

本文试图结合实地调查、遥感解译、机理分析等手段,还原后沟泥石流形成的机理,分析后沟泥石流堵河成因与趋势,以期对类似矿渣型泥石流机理分析与堵河的早期识别提供实践方法和理论。

1 地质环境背景

从地形上,受大地构造运动的控制与南桧河、后沟等河流切割的影响,流域地势总体呈现出东高西低、岭高谷深的特点。最高点位于工区东侧分水岭附近,海拔2 820 m,最低点位于工区西北端的南桧河出境处,海拔为970 m,最大相对高差为1 850 m,具有泥石流发生的共性地形条件。

从地层岩性上,流域内出露的地层及岩性较简单,基岩主要由岩浆岩组成,地层主要有震旦系苏雄-开建桥组(Zas-k)和第四系。第四系成因相对较复杂,主要包括冲积、洪积、残坡积、崩坡积、泥石流堆积和人工堆积,其中人工堆积为废弃矿渣,占熊家沟主要泥石流物源。

从构造运动上,石棉-马前门断裂直接从后沟前缘楠桧河通过,断层走向近东西,倾东,倾角在60°以上,断层两盘有含石棉的超基性岩体,造成流域构造作用强烈,岩体破碎,为泥石流形成提供物源。地震从流域所在区域上,断层带纵横交错,地层破碎,因而地震频繁,地震动反应谱特征周期0.40s,对应地震基本烈度为Ⅷ度。

从人类工程活动上,人类活动较频繁,对地质环境带来不利影响的主要是矿产开采。在20世纪40~90年代,区内尤其是下游的矿区和河谷地区采矿、修路建房等人类活动频繁而剧烈,乱砍滥伐、任意倾倒采矿形成的废土、废石、矿渣的现象屡见不鲜,由此对区内尤其是下游沟域的地质环境造成了较大破坏,致使下游沟域泥石流频发^[1,4]。

2 “7·4”洪灾后沟泥石流形成机理

2.1 “7·4”泥石流动力学特征

历史上,后沟为一条中-高频泥石流沟,曾于1973年、1983年、1992年、1993年、1998年、2004年、2009年、2011年爆发规模不等泥石流灾害,存在2~5年的周期性,与人类采矿工程活动密切相关。

“7·4”洪灾前,据估算,后沟泥石流下游右岸的矿渣总储量约为 $350 \sim 400 \times 10^4 \text{ m}^3$ (图2),洪灾后,矿渣物源 $35 \times 10^4 \text{ m}^3$ 参与到泥石流运动中。据沟口桥涵过流断面计算,流速为6~8 m/s,断面峰值流量为 $280 \sim 350 \text{ m}^3/\text{s}$,容重约为 $1.70 \text{ t}/\text{m}^3$ 。通过对堆积扇量测,自桥涵以下冲出固体物质总量为 $15 \sim 18 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。相对历史上数次泥石流特征,“7·4”后沟泥石流物源补给丰富,流速快流量大,一次冲出量规模为大型。可见,“7·4”洪灾,后沟泥石流的动力学特征值已达到历史峰值。

2.2 泥石流形成特征遥感分析

泥石流的启动点是泥石流产生的运移力与抗力的极限平衡点,也是判断泥石流形成类型(自然、人为)的重要依据。在“7·4”洪灾之前,后沟的泥石流启动点均在矿渣堆积最高点,泥石流的形成完全是矿渣参与而形成^[5-7]。

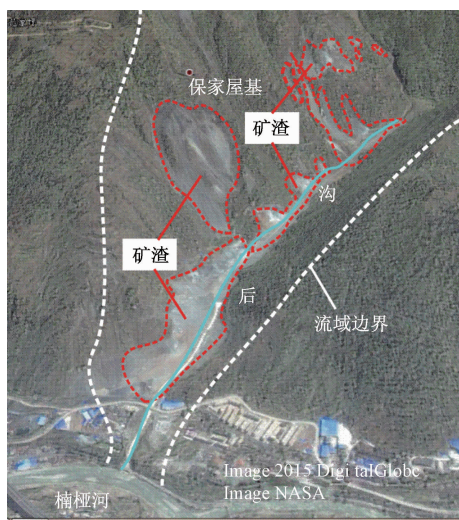


图2 后沟下游右岸矿渣集中分布遥感三维示意图

Fig.2 The remote sensing 3D sketch map of slag distribution at downstream of Houkou

通过数据采集,获取了2013年5月12日谷歌遥感影像和2013年7月7日无人机航拍影像,分别代表后沟泥石流“7·4”洪灾前、洪灾后物源区遥感影响图。由于前后影像时间差不到2个月,影像图较好地还原了“7·4”后沟泥石流启动的形成过程(图3、图4)。



图3 2013年7月(“7·4”洪灾后)遥感图

Fig.3 The remote sensing images after “7·4” flood

通过遥感图分析,在“7·4”洪灾前,后沟矿渣堆积处往上游植被覆盖好,达100%,无明显沟道特征,常



图4 2013年5月(“7·4”洪灾前)遥感图

Fig.4 The remote sensing images before “7·4” flood

年无流水,无崩滑不良地质现象,为典型的清水区。后沟泥石流的启动点位于采矿活动处,为一典型人为矿渣型泥石流。在“7·4”洪灾后,后沟原处于清水区的无水沟道冲切出宽8~10m的泥石流沟槽,泥石流运动过程有冲有淤,但整体上有不断拉槽拓宽的趋势。当泥石流抵达原矿渣型泥石流的启动点时,泥石流过流断面已拓宽至20~30m,已形成中等规模泥石流,具备典型泥石流所具备的共性特征。在后沟泥石流暴发的同时,同处于楠桠河流域的马颈子沟等多条沟道发生泥石流灾害,并表现出规模突增、群发效应、极易发性。

综合强降雨资料、流域类似沟道对比,遥感解译分析,“7·4”洪灾后,处于暴雨中心的后沟泥石流的形成类型由人为矿渣型泥石流变为由强降雨诱发的自然灾害,泥石流的启动过程表现为:强降雨→水动力增强、土体饱和和抗滑减弱→启动点产生→沟道侵蚀、拉槽→沿程流量加大→矿渣物源参与→规模突增→淤积与下切交错→堵塞楠桠河。

2.3 泥石流形成与强降雨

降雨是激发泥石流产生的重要因素,也是泥石流形成的三大要素之一。泥石流的发生与前期降水量,特别是10 min和1 h的短历时雨强有十分密切的关系,它对泥石流的激发起着重要的控制作用。对后沟泥石流,采用高桥堡公式计算该沟域黏性泥石流发生的临界雨强值^[8-9],公式如下:

$$H_r = \frac{3.6}{A} \left(\frac{8g \sin \theta}{f_r} \right)^{\frac{1}{2}} \left\{ c^* \left(\frac{\sigma}{\rho} - 1 \right) \left(\frac{tg \varphi}{tg \theta} - 1 \right) - 1 \right\}^{\frac{3}{2}} d_m^{\frac{3}{2}} B$$

式中: H_r ——泥石流发生的1小时临界雨强值/mm;

A ——流域面积/ km^2 ;

f_r ——摩擦损失系数;

g ——重力加速度/ (m/s^2) ;

θ ——沟床坡度;

c^* ——堆积层体积浓度;

ρ ——水的密度/ (g/cm^3) ;

σ ——颗粒密度/ (g/cm^3) ;

φ ——内摩擦角;

d_m ——砂砾平均粒径/m;

B ——泥石流沟沟宽/m。

在上式中,根据后沟泥石流流域以及动力学特征,取 $\theta = 13.3^\circ$, $c^* = 0.9$, $\sigma = 2.65 \text{ g}/\text{cm}^3$, $\varphi = 35^\circ$, $d_m = 0.35 \text{ m}$, $B = 25 \text{ m}$, $A = 9.265 \text{ km}^2$, $f_r = 1.05$ 。经计算, $h_r = 22.1 \text{ mm}$,即当1小时雨强大于22.1 mm时广元堡沟域内即可能发生泥石流。

在“7·4”后沟泥石流暴发前,累计雨量已达到52 mm,激发前实测小时雨强为36.6 mm,远超过理论计算的22.1 mm小时雨强,直接激发后沟泥石流的启动。

3 泥石流堵河过程分析

泥石流入汇河流并造成河流暂时性堵塞是泥石流危害之一,要求泥石流能在河流中运动、淤积下来,并且泥石流固体物质淤积量要大于河流对泥石流的冲刷量,泥石流短时间讲大量固体物质注入到河流中,会束窄河流过流断面甚至发生堵塞而形成堰塞湖。

受强降雨与矿渣参与的影响,“7·4”后沟泥石流峰值在沟口突增,以近180°扩散角冲入楠桧河,形成长80~100 m、宽约300 m、平均厚度6~8 m的巨大堆积扇,直接堵塞楠桧河,使得主流被迫靠左岸偏移,过流断面被束窄至4~5 m。随着泥石流冲出量与流量的抛物线的增减,后沟泥石流在数分钟内曾发生短时完全堵断楠桧河,造成上游回水近20 m,形成暂时性堰塞湖。通过对泥石流堆积物的物质分析,矿渣来源占冲出物80%以上,可见后期矿渣物源的集中补给对后沟泥石流流量突增贡献巨大。强降雨是直接诱发后沟泥石流的启动的因素,而下游矿渣物源的进入,使后沟泥石流由自然型转变为人为-自然叠加型,最终,以强流量高方量入汇并堵断主河-楠桧河。矿山开采造成山体斜坡失稳,产生大量崩塌、滑坡等松散物质堆积

体;同时矿渣任意倾倒给泥石流的形成带来了大量的固体物质来源。

3.1 遥感与堵河过程分析

通过实地调查与遥感比对,后沟泥石流堵塞楠桧河后形成2个堆积扇和3个对冲淤积点(图5)。在后沟泥石流堵塞主河前,泥石流以常规方式在堆积扇上呈对称分布淤积,扇两侧为45°,见图堆积扇(1)。在后续矿渣参与运动、流量陡增的工况下,后沟泥石流以强大的势能对冲至楠桧河对岸,最终完全堵断楠桧河。堵河的过程表现为:挤压→堵塞→断面束窄→堵断的渐进式的运动过程。当后沟泥石流完全堵塞楠桧河后,水位上涨0.5~1 m,主河流水漫过后沟泥石流堆积扇前缘向下游排泄。在10~20 min后,楠桧河在左岸束窄处冲出一缺口,形成主河过流通道。在后沟泥石流物源持续补给下,能量逐渐变缓,主河束窄断裂流量增强,已无法保持完全堵断状态,泥石流物质沿楠桧河右岸持续流动,形成了堆积扇(2)的带状淤积区。泥石流与主河的交汇过程,是一场复杂的多因素耦合作用的结果,对有些现象无法用常规的理论解释。在经过主河短时溃决后,在后沟对岸、楠桧河左岸留下3处明显的泥石流淤积点,如图淤积点(1)、(2)、(3)所示。该淤积点分别位于后沟正对方、沟口下游80 m、沟口下游150 m处。三处淤积点形态相似性较好,平均长、宽为50 m、35 m。据现场痕迹分析,在后沟泥石流堵断楠桧河后,对岸淤积形态应为沿主河呈带状分布形态。现场调查发现顶冲对岸痕迹,说明当时后沟泥石流的流速和流量较大,冲入河流后直达对岸。大流速大流量有利于泥石流堵塞楠桧河。堵河发生时,顶冲对岸长条堆积体长为180 m、宽为35~40 m。

3.2 堵河可能性分析

对后沟泥石流堵河影响程度,按张金山等^[10]堵河可能性的经验公式判别。按下式进行计算:

$$R = \frac{PQ_n J_n}{K_z Q_z J_z}$$

式中: R ——泥石流堵塞度,即泥石流堵断主河可能性;

P ——泥石流暴发频率;

K_z ——堆积区主河宽度;

Q_n ——泥石流流量;

Q_z ——主河流量;

J_n ——泥石流主沟比降;

J_z ——主河比降。

在后沟堵塞楠桧河计算中,取 $P = 100$ (百年一

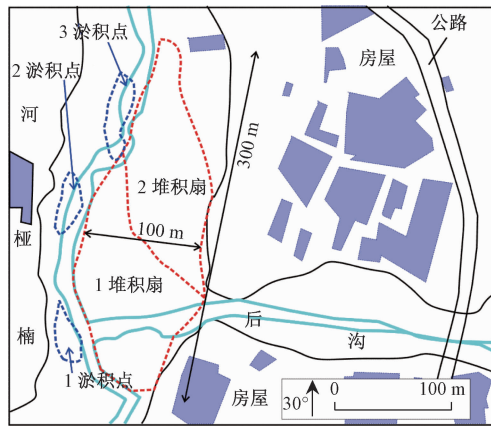


图5 “7·4”洪灾(3日后)后沟泥石流堆积区遥感分析图

Fig.5 The remote sensing images of debris flow deposit area (3 days after “7·4” flood)

遇)、 $K_z = 100 \text{ m}$ 、 $Q_n = 350 \text{ m}^3/\text{s}$,根据楠桧河多年流量资料,主河洪峰流量取 $Q_z = 200 \text{ m}^3/\text{s}$ 、 $J_n = 46.5\%$ 、 $J_z = 19.5\%$ 。根据计算,泥石流堵断主河可能性 $R = 4.17$ 。根据该经验公式的研究成果, R 小于5则堵河的可能性小,多产生轻微堵塞,介于5~10可对主河造成较严重的堵塞。“7·4”后沟泥石流为轻微堵塞主河,介于堵河可能性小与严重堵塞之间,与实地调查、遥感分析较好的适应性。

4 结论与建议

(1)“7·4”洪灾,处于暴雨中心的后沟泥石流的形成类型由人为矿渣型变为由强降雨诱发的自然灾害,泥石流的启动过程表现为:强降雨→水动力增强、土体饱和抗滑减弱→启动点产生→沟道侵蚀、拉槽→沿程流量加大→矿渣物源参与→规模突增→淤积与下切交错→堵塞楠桧河。

(2)“7·4”洪灾前,历史上后沟泥石流的启动点均位于废弃矿渣上游高程点,而“7·4”洪灾时,启动点位于废弃矿渣上游无人工程活动地段。通过理论计算,后沟泥石流启动小时雨强临界值为22.1 mm,而“7·4”后沟泥石流暴发的实测小时雨强为36.6 mm,超过临界雨强达65%。强降雨是后沟泥石流暴发主导因素。

(3)后沟泥石流堵断楠桧河后,在堆积区形成2个堆积扇和3个对冲淤积点。堆积扇分为常规堆积与溃坝带状单侧堆积;3个对冲淤积点保存着泥石流顶冲对岸形成堰塞体的形态特征。通过经验公式计算,后沟堵河程度在堵河可能小与严重堵塞之间,与堵河实地调查与遥感分析较好的适应性。

参考文献:

- [1] 地矿眉山工程勘察院. 四川省雅安市石棉县广元堡泥石流治理工程补充勘察报告[R]. 成都: 地矿眉山工程勘察院, 2011.
Geological Engineering Investigation Institute, MeiShan. Supplementary exploration report for govern project of Guangyuanbaogou debris flow in Shimian, Sichuan [R]. Chengdu: Geological Engineering Investigation Institute, MeiShan, 2011.
- [2] 王征强, 邓辉, 姚进. 四川省石棉县“7.4”后沟泥石流形成机制分析[J]. 甘肃水利水电技术, 2013, 49(11): 17-19.
WANG Zhengqiang, DENG Hui, YAO Jin. The 4 July 2013 Houkou debris flows in Shimian, Sichuan Province: forming mechanism [J]. Gansu Water Resources and Hydropower Technology, 2013, 49(11): 17-19.
- [3] 宋志, 符浩, 巴仁基, 等. 四川泸定县城羊圈沟泥石流动力学特征与监测预警初探[J]. 灾害学, 2010, 28(4): 114-119.
SONG Zhi, FU Hao, BA Renji, et al. Dynamic characteristics and preliminary monitoring of the debris flow of Yangjuan gully of luding in Sichuan [J]. Journal of Catastrophology, 2010, 28(4): 114-119.
- [4] 胡玉禄, 魏嘉, 任翠爱, 等. 致灾营力当量预警预报方法探讨—以山东省地质灾害气象预警预报为例[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2006, 17(2): 119-122.
HU Yulu, WEI Jia, REN Cuiai, et al. Discussion on the causing ageuey equivalence of geological hazard their forecast—an example of Shandong province [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2006, 17(2): 119-122.
- [5] Zhi Song, Wanmo Zheng, Renji Ba, et al. Analysis on blocking of Dadu river by extra massive debris flows at moxi river [J]. Landslide Science for a Safer Geoenvironment, 2014.
- [6] 唐得胜, 杨永红, 常鸣. 藏东南地区冰湖溃决泥石流灾害链成因分析及防治措施[J]. 水电能源科学, 2013, 31(12): 174-178.
TANG Desheng, YANG Yonghong, CHANG Ming. Cause analysis and preventive measures of debris flow disaster-chain due to glacial lake outburst in southeastern Tibet [J]. Water Resources and Power, 2013, 31(12): 174-178.
- [7] 刘传正, 刘艳辉, 温铭生, 等. 中国地质灾害气象预

- 警实践:2003-2012[J]. 中国地质灾害与防治学报,2015,26(1):1-8.
- LIU Chuanzheng, LIU Yanhui, WEN Mingsheng, et al. Early warning for regional geo-hazards during 2003-2012, China [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2015, 26(1):1-8.
- [8] 张永双, 姚鑫, 郭长宝, 等. 青藏高原东部地震地质灾害成灾背景[M]. 科学出版社, 2014.
- ZHANG Yongshuang, YAO Xin, GUO Changbao, et al. Geological disasters and earthquake disaster background in eastern Tibetan Plateau [M]. Science Press, 2014.
- [9] 唐川, 丁军, 梁京涛. 汶川震区北川县城泥石流源地特征的遥感动态分析[J]. 工程地质学报, 2010, 18(1):1-7.
- TANG Chuan, DING Jun, LIANG Jingtao. Remote sensing images based observational analysis on characters of debris flow source areas in Beichuan County of Wenchuan earthquake epicenter region [J]. Journal of Engineering Geology, 2010, 18(1):1-7.
- [10] 张金山, 谢洪. 岷江上游泥石流堵河可能性的经验公式判别[J]. 长江流域资源与环境, 2008, 17(4):651-655.
- ZHANG Jinshan, XIE Hong. Calculation of the possibility of river-blocking due to debris flow in the upper reaches of MinJiang river [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2008, 17(4):651-655.

(上接第23页)

- [6] 王亚军, 王亚民, 朱宏斌. 河北省平山县大柳树村崩塌地质灾害治理设计[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2009, 20(4):7-12.
- WANG Yajun, WANG Yamin, ZHU Hongbin. The designing about geological disaster of rockfall reatment work in Daliushu village of Pingshan county, Hebei province [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2009, 20(4):7-12.
- [7] 赵雅娜, 齐欣, 余志祥, 等. 主被动混合式柔性防护网联合作用效果初步分析[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2016, 27(1):111-116.
- ZHAO Yana, QI Xin, YU Zhixiang, et al. Preliminary study of hybrid flexible rockfall protection net [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2016, 27(1):111-116.
- [8] 赵世春, 余志祥, 韦韬, 等. 被动柔性防护网受力机理试验研究与数值计算[J]. 土木工程学报, 2013, 46(5):122-128.
- ZHAO Shichun, YU Zhixiang, WEI Tao, et al. Test study of force mechanism and numerical calculation of safety netting system [J]. China Civil Engineering Journal, 2013, 46(5):122-128.
- [9] 刘成清, 陈林雅, 陈驰, 等. 落石冲击作用下被动柔性防护网整体结构试验[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2014, 25(4):37-43.
- LIU Chengqing, CHEN Linya, CHEN Chi, et al. Experimental study on the passive flexible protection under the rock-fall impact [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2014, 25(4):37-43.
- [10] 胡厚田. 崩塌与落石[M]. 北京: 中国铁道出版社, 1989:1-183.
- HU Houtian. Collapse and rockfall [M]. Beijing: China Railway Press, 1989:1-183.
- [11] 陈洪凯. 危岩防治原理[M]. 北京: 地震出版社, 2006:1-180.
- CHEN Hongkai. Principle of prevention and control of dangerous rock [M]. Beijing: Seismological Press, 2006:1-180.
- [12] 铁路沿线斜坡柔性安全防护网(TB/T3089—2004). 北京: 中国铁道出版社, 2004.
- The flexieble safety net for protection of slope along the line (TB/T3089—2004). Beijing: China Railway Press, 2004.