

# 碱坪沟地震次生泥石流形成特征与发展趋势

杨成林<sup>1,2</sup>, 陈宁生<sup>1</sup>, 邓明枫<sup>1,2</sup>, 邓虎<sup>3</sup>, 余涛<sup>4</sup>

(1. 中国科学院 水利部 成都山地灾害与环境研究所 山地灾害与地表过程重点实验室,

四川 成都 610041; 2. 中国科学院 研究生院, 北京 100049; 3. 成都理工大学

地球科学学院, 四川 成都 610059; 4. 中国地质科学院 探矿工艺研究所, 四川 成都 611734)

**摘 要:**“5·12”汶川地震后,龙溪河碱坪沟流域内堆积了大量的松散固体物质,成为参与泥石流形成的主要物源。碱坪沟于 2009—2010 年先后 3 次暴发大规模泥石流灾害。通过对碱坪沟的地形、水源和物源条件的分析发现,该流域地形和水源条件满足泥石流形成的条件,且在地震前后未发生显著变化,而物源条件已经成为影响该区域泥石流形成与发展的主要因素。基于流域物源量与物源固结效应的研究结果表明,在 5 a 内碱坪沟泥石流灾害较活跃,可能暴发大规模泥石流灾害。5~10 a 后,在降雨条件不发生较大变化以及不暴发大地震的情况下,流域内泥石流规模和频率会逐渐减小,只有在低频率暴雨作用下才可能暴发大规模泥石流灾害。

**关键词:** 碱坪沟; 泥石流; 形成条件; 趋势

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2011)06-0059-05

中图分类号: P642.23

## Characteristics and Trend of Earthquake-induced Debris Flow Initiation in Jianping Gully

YANG Cheng-lin<sup>1,2</sup>, CHEN Ning-sheng<sup>1</sup>, DENG Ming-feng<sup>1,2</sup>, DENG Hu<sup>3</sup>, SHE Tao<sup>4</sup>

(1. Key Lab of Mountain Hazards and Surface Processes, Institute of Mountain Hazards and Environment,

Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610041, China; 2. Graduate University of Chinese Academy of

Sciences, Beijing 100049, China; 3. College of Earth Science, Chengdu University of Technology, Chengdu,

Sichuan 610059, China; 4. The Institute of Exploration Technology, CAGS, Chengdu, Sichuan 611734, China)

**Abstract:** After the “5·12” Wenchuan Earthquake, plenty of loose soil materials accumulated in Jianping Basin of Longxi River, which is the main source material for debris flows initiation. Three large-scale debris flows occurred in Jianping Gully in 2009 and 2010. In contrast with the pre-earthquake conditions, the terrain and rainfall have not changed a lot and are appropriate for the initiation of debris flow, so loose materials can be regarded as the most significant impact factor for the debris flow characteristics and its development trend. The results based on the analysis of loose materials and its consolidation impact shows that debris flows in Jianping Gully will occur frequently in 5 years. The possibility of catastrophic debris flow will be high. In the next 5~10 years, the frequency and scale of debris flows in Jianping Gully will decline if there is no significant change for the rainfall and no strong earthquake, while large-scale debris flows can also occur under extremely rainfall with low frequency.

**Keywords:** Jianping Gully; debris flows; initiation condition; trend

碱坪沟位于素有“成都后花园”之称的都江堰虹口—龙池景区内,为龙溪河中游左岸的一级支沟。其流域面积 3.44 km<sup>2</sup>,主沟沟长 1.70 km,自东北向西南于北纬 31°05′19.0″,东经 103°33′48.3″处汇入龙溪

河。碱坪沟流域内植被茂密,森林覆盖率较高,历史上较少有泥石流暴发,灾害多以山洪为主。

2008 年“5·12”汶川地震使碱坪沟流域生态环境遭到巨大破坏,同时诱发大量的崩塌滑坡。这些崩

收稿日期:2010-12-14

修回日期:2011-03-28

资助项目:水利部科技推广计划项目“山洪灾害监测预警实用系统”(TG1069);中国科学院成都分院—都江堰院地合作项目“都江堰市龙溪—虹口景区泥石流监测预警指标研究与示范”

作者简介:杨成林(1983—),男(汉族),四川省三台县人,博士研究生,研究方向为山地灾害形成机理及防治。E-mail:chlyang@imde.ac.cn。

通信作者:陈宁生(1965—),男(汉族),福建省南安县人,博士,研究员,博士生导师,研究方向为山地灾害形成机理及防治。E-mail:chennsh@imde.ac.cn。

滑体等松散固体物质为该沟泥石流形成提供了物质基础。从 2009 年雨季开始,碱坪沟泥石流进入活跃期。2009 年 7 月 17 日、2010 年 8 月 13 日和 17 日,碱坪沟先后 3 次暴发大规模泥石流<sup>[1]</sup>,泥石流淤埋道路,冲毁房屋,给当地带来重大的人员伤亡和财产损失。碱坪沟泥石流具有成都龙门山区地震次生泥石流的典型代表性。通过对碱坪沟地震次生泥石流形成与发展趋势的研究可以更好地掌握虹口—龙池景区泥石流的活动规律,为研究地震次生泥石流形成与发展趋势提供依据。

目前常用的泥石流形成特征与发展趋势分析是综合考虑泥石流形成的降水条件、地形地貌条件和区域地质与松散固体物质条件,参考已有发生的泥石流灾害特点并采用实地调查结合权重的方法<sup>[2-5]</sup>来进行的,这种方法不仅要考虑一系列与泥石流发生相关的地质、地貌、水文等因素<sup>[6-8]</sup>,同时还需要对泥石流灾害历史进行分析,成本较高且耗时,难以在交通不便的溪沟上游山区进行。近年来,国内外许多学者开始尝试使用遥感(RS)以及地理信息系统(GIS)方法进行地质灾害危险性评估<sup>[9-13]</sup>。尤其在汶川地震以后,大量学者采用遥感以及地理信息系统手段进行灾害影响范围调查<sup>[14-15]</sup>,堰塞湖评估<sup>[16-17]</sup>和灾害决策分析<sup>[18]</sup>等。遥感以及地理信息系统方法不仅便于对难以到达的溪沟上游山区进行快速调查,还善于进行空间分析及成果演示,是灾害调查分析的有力手段。本研究对地震次生泥石流的形成特征进行分析,并结合

遥感以及地理信息系统方法从客观上分析碱坪沟物源条件及泥石流的发展趋势。

## 1 碱坪沟泥石流灾害历史与现状

通过实地调访发现,汶川地震前的百年内的碱坪沟均未发生过泥石流,而以山洪或水石流为主要灾害。在碱坪沟下游左岸发育有一处高 20~50 m 不等的老泥石流台地。这说明该沟在地质历史上曾暴发过泥石流,而且有一段时间十分活跃。结合气候和地形变化的长期性,碱坪沟的老泥石流堆积台地说明该区域具有泥石流形成的降水和地形条件,但物源条件的改变使碱坪沟在震前百年内均未暴发过泥石流,这也说明物源是影响该区域泥石流形成的主要因素。

2008 年虹口—龙池景区总体上降雨偏少,没有出现大规模泥石流,但在 2009 和 2010 年,碱坪沟先后 3 次暴发大规模泥石流。

本研究通过 2009 年 7 月 19 日和 2010 年 8 月 20 日两次碱坪沟实地调查测量,获取了碱坪沟泥石流灾害的相关资料(表 1)。据龙池镇南岳村四组村民介绍,2009 年 7 月 17 日强降雨导致碱坪沟暴发泥石流,泥石流淤埋都江堰—龙池旅游公路,堵塞涵洞,损坏居民住宅 2 幢,堵塞河道使主河龙溪河淤积,河床抬高 1~3 m,严重威胁沿途的村庄。2010 年 8 月 13 日和 17 日碱坪沟先后 2 次爆发大规模泥石流,泥石流规模明显增大,搬运的石块的最大粒径达 14.0 m,体积 756.0 m<sup>3</sup>,重达 2 004.0 t。

表 1 2009—2010 年碱坪沟典型泥石流运动参数

暴发时间	容重/ (g·cm <sup>-3</sup> )	出山口流速/ (m·s <sup>-1</sup> )	峰值流量/ (m <sup>3</sup> ·s <sup>-1</sup> )	一次泥石流固体物质总量/ (10 <sup>4</sup> m <sup>3</sup> )
20090717	1.80	4.0~5.0	120.0	6.0
20100813	1.76	7.5	280.0	10.0

## 2 泥石流形成条件

### 2.1 地形条件

在泥石流形成的 3 个基本条件中,地貌条件是相对稳定的,其变化也较缓慢。据统计,形成区的沟床比降大于 250%或是岸坡坡度大于 25°,流域相对高差超过 1 000 m 的泥石流沟在诱发因素作用下就可暴发泥石流<sup>[19-20]</sup>。碱坪沟流域内东北高西南低,最高海拔 2 153 m,最低海拔 1 050 m。通过 ArcGIS 软件对碱坪沟 DEM 数据的分析可知,主沟沟床平均比降为 284%;而流域内平均岸坡坡度为 31.7°,均满足泥石流形成的地形条件。“5·12”汶川大地震虽然对流

域造成极大影响,甚至局部地形地貌条件有所改变,但总体比降和特征变化不大。

### 2.2 降雨条件

2.2.1 年降水变化 泥石流发生和水源的关系极为密切,碱坪沟泥石流的主要水源来自降雨。根据中国气象科学数据共享服务网相关资料,从都江堰年降雨的变化情况(图 1)发现,近 50 a 来整个地区的年降雨量有下降趋势,基本上仍维持在 800~900 mm。

2.2.2 泥石流临界雨量 降雨通过前期降雨和激发降雨影响泥石流的形成<sup>[21-22]</sup>。前期雨量可以定义为激发泥石流以前的降雨。前期雨量的作用在于使松散土体含水量增加甚至饱和,从而极大降低土体的强

度。激发雨强是促使泥石流产生的雨强,其作用主要是通过超渗产流形成一定深度的面流,使土体的孔隙水压力迅速增加,强度快速降低,导致土体液化。

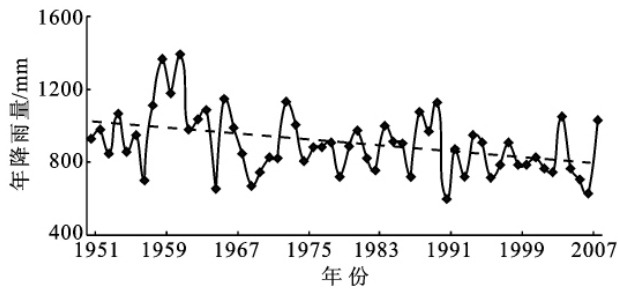


图1 研究区1951—2009年年降雨量变化趋势

根据位于白沙河流域内的成都市水文水资源勘测局杨柳坪水文站2010年8月15—18日降雨数据可知,“8·17”碱坪沟泥石流暴发之前经历了长历时的降雨,降雨过程线如图2所示。

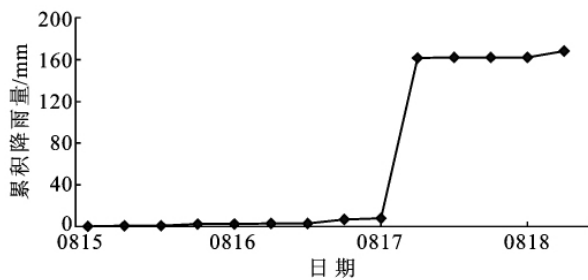


图2 碱坪沟“8·17”泥石流前后降雨累积线

泥石流灾害普遍发生于山区,而目前我国气象台站大都位于平缓地带的县城,两者降雨过程差异极大,所以远离县城的山区泥石流的实际降雨过程资料十分短缺。通过多年的泥石流调查研究成果,特别根据四川省山洪规划的资料表明,当1 h 临界雨强大于等于9 mm 时,发生山洪泥石流的概率为42.9%~75%。目前能收集到的关于碱坪沟“8·17”泥石流的降雨资料只有6 h 雨强,无法判断泥石流暴发的临界雨量。根据《四川省中小流域暴雨洪水计算手册》降雨资料<sup>[23]</sup>,碱坪沟流域最大10 min 暴雨均值为12.5~17.5 mm,最大1 h 暴雨均值为20~45 mm,最大24 h 暴雨均值为50~160 mm,完全满足泥石流形成的临界降雨条件。虽然近年来该区域年降雨量呈下降趋势,但短期内没有大规模突变的迹象,区域降雨仍然能满足泥石流形成的临界雨量条件。

### 2.3 物源条件

碱坪沟位于北川—映秀断裂带(即龙门山中央断裂),流域与断裂带呈 $40^{\circ}\sim 50^{\circ}$ 夹角。流域处于断裂带的上盘,受构造运动的影响,断裂现象明显。流域

内发育着大量的元古代震旦系下统火山岩组安山岩类和辉长辉绿岩;元古代晋宁期花岗岩和少量的三叠系须家河组砂岩。“5·12”汶川地震对流域影响极大,碱坪沟附件的上下盘垂直错动1~2 m,断层经过的农田出现10~30 mm宽的拉伸裂隙,可见深度20~40 mm。地震使流域内大量的火成岩风化壳崩落,形成泥石流松散堆积物物源。物源特征的改变是汶川地震对碱坪沟流域造成的最大影响。

## 3 物源特征对泥石流形成的影响

### 3.1 震后物源分布情况

汶川地震使碱坪沟流域内产生了大量的崩塌和滑坡。这些崩塌和滑坡物质非常松散,孔隙率高,渗透性大,颗粒级配不连续,呈宽级配特征,是形成泥石流的主要物源,在前期降雨,短历时暴雨激发或径流冲刷下极易引发泥石流。松散固体物质的增加改变了原有的泥石流激发条件,导致部分的山洪沟转化为泥石流沟。在地震灾区降雨量以及地形坡度变化不大的情况下,大量增加的松散固体物质就成了灾区泥石流暴发的主导因素,流域有效物源的数量成为决定泥石流暴发与否的关键。根据对碱坪沟流域 SPOT-5 遥感影像(2009年5月20日影像,分辨率10 m)的分析,获得了地震后该流域内的松散物源分布(图3)。

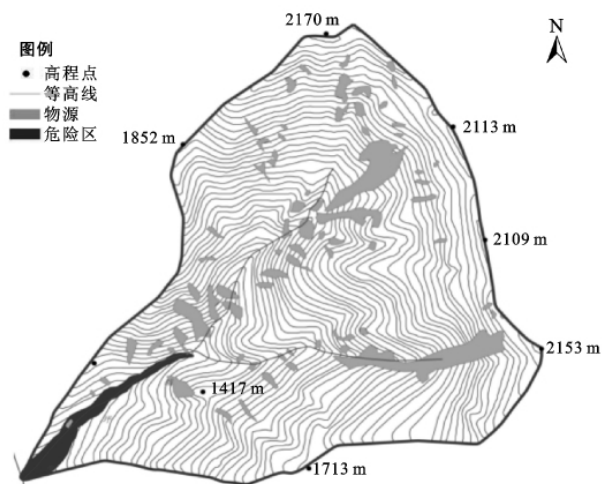


图3 碱坪沟物源分布图

流域内新增崩塌滑坡等不良地质体的面积为 $0.165\text{ km}^2$ 。滑坡、崩塌等地质灾害体的分布与面积很容易获取,但体积的量算却很困难。这主要是因为地质灾害所发生的地形、地质条件不同,各灾体堆积状况差异较大。而较为准确的获取灾害体的体积,对指导灾害的治理和灾后重建有着重要的现实意义,也为次生灾害的发生发展研究提供基础可靠的资料。Guzzetti等<sup>[24-25]</sup>提供了的滑坡面积( $A_L$ )与松散固体物质总量( $V_L$ )的关系:

$$V_L = 0.074 \times A_L^{1.450} \quad (1)$$

根据公式(1)得碱坪沟地震后新增松散固体物质约  $2.72 \times 10^6 \text{ m}^3$ , 2009 和 2010 年暴发的 3 次泥石流的固体物质按表 1 中计算为  $1.6 \times 10^5 \text{ m}^3$ , 碱坪沟仍存在松散固体物质约  $2.56 \times 10^6 \text{ m}^3$ , 单位面积物源方量约  $0.731 \text{ m}^3/\text{m}^2$ 。

### 3.2 物源量对泥石流性质的影响

泥石流是土水混合组成的两相流, 泥石流形成需要源区有充足的松散固体物质。根据泥石流的启动形式, 泥石流可以分为土力类和水力类<sup>[26-27]</sup>。土力类泥石流是土体滑动、错落、崩塌引起土石体失稳启动形成的泥石流; 水力类泥石流是特大洪水冲刷河床质形成的泥石流。从土力类和水力类泥石流的启动过程可以看出, 土力类泥石流的形成过程中, 大量的土源是必要条件, 而水力类泥石流需要有充足的水流量。通过对我国西部山区 50 条泥石流沟松散物质量与泥石流性质关系的统计分析, 陈宁生等<sup>[28]</sup>提出用流域单位面积的松散固体物质方量来判别泥石流沟, 并以平均单位面积内松散固体物质数量  $0.1 \text{ m}^3/\text{m}^2$  作为泥石流沟的判别指标,  $2 \text{ m}^3/\text{m}^2$  作为黏性泥石流的判别指标(表 2)。

表 2 松散固体物质量与泥石流类型关系统计<sup>[28]</sup>

泥石流流域面积/ $\text{km}^2$	单位松散物质量/ $(\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-2})$	泥石流类型
1~30	<0.1	—
	0.1~0.3	稀性
	0.3~2.0	大部分稀性(74%)
	2.0~5.0	稀性—黏性
	5.0~10.0	大部分黏性(80%)
	10.0~20.0	黏性
	>20.0	黏性

注: 74% 表示在统计资料中单位松散物质量在  $0.3 \sim 2.0 \text{ m}^3/\text{m}^2$  的泥石流沟中, 稀性泥石流占 74%; 80% 表示单位松散物质量在  $5.0 \sim 10.0 \text{ m}^3/\text{m}^2$  的泥石流沟中, 黏性泥石流占 80%。

目前, 碱坪沟单位面积物源方量约  $0.674 \text{ m}^3/\text{m}^2$ 。由表 2 可以看出, 碱坪沟为稀性泥石流沟, 在现有物源条件下, 有进一步发展的趋势。

### 3.3 物源有效性分析

强震后形成的崩塌滑坡堆积物一般疏松多孔, 在长期的自重作用下, 土体固结, 使土体孔隙率降低, 强度提高, 使得土体启动形成泥石流的难度增加, 土体只有在更长历时的降雨或更大的雨强下启动产流。除洪水冲刷的水力类泥石流之外, 泥石流的形成均存在土体强度大量减弱和土体破坏的过程。影响泥石流形成的宽级配砾石土土体强度的降低需要经过土

体在吸水过程中湿陷、体积收缩同时孔压不消散等过程而最终实现。野外现场降雨试验表明, 天然容重大于  $1.9 \text{ g}/\text{cm}^3$  的土体, 在  $70 \sim 100 \text{ mm}/\text{h}$  的降雨的作用下, 历时数小时土体湿陷收缩量依然很小, 土体难以破坏启动形成泥石流。而天然容重为  $1.5 \sim 1.7 \text{ g}/\text{cm}^3$  或更小的宽级配砾石土体, 如崩塌滑坡和人工新近开挖的松散土体, 在一定的雨强( $70 \text{ mm}/\text{h}$ )的作用下, 容易启动产生泥石流。

经调查, 震后碱坪沟内崩塌滑坡堆积物物质松散, 天然密度较低, 普遍介于  $1.5 \sim 1.6 \text{ g}/\text{cm}^3$ , 在降雨作用下容易湿陷收缩, 孔压增加, 土体强度迅速降低, 发生破坏并形成泥石流。随着时间推移, 土体在自重和降雨作用下, 孔隙减小, 密度和强度增加, 当土体密度增加到  $1.9 \text{ g}/\text{cm}^3$  以上时, 这些土体在一般的降雨下很难启动转化为泥石流, 只有在极低频率的大强度降雨的作用下, 才有可能形成泥石流。土体的这种转变使部分土体由泥石流形成的有效物源转变为无效物源, 这种有效与无效的说法是界定在同级别的雨强条件下, 当雨强增大时, 有效物源范围也会相应扩大<sup>[29]</sup>。

## 4 泥石流发展趋势

从长远来看, 在碱坪沟流域的降雨量以及地形坡度变化不大的情况下, 松散固体物质成为该沟泥石流形成与发展的主导因素。泥石流发展趋势的预测主要依赖于对松散固体物质数量变化的评估。

从地震泥石流的发展规律分析可知, 一般地震次生泥石流活跃期约为 5 a。碱坪沟流域内泥石流物源储量十分丰富, 泥石流灾害将至少在 5 a 内活跃。随着时间的推移, 松散固体物质在自重和降雨作用下发生固结, 在同频率的暴雨下所能启动产生泥石流的物源量不断减小, 泥石流源区固体物质在暴雨下启动转化为泥石流的可能性降低。预测在 5~10 a 内, 在碱坪沟降雨不发生大规模变化以及不暴发大地震的情况下, 流域内高频泥石流将向低频泥石流转变, 泥石流规模逐渐降低, 性质由稀性泥石流转变为高挟沙水流。在极低频率暴雨作用下, 仍有可能暴发大规模泥石流灾害。

## 5 结论

通过野外调查和遥感技术对碱坪沟的地形、水源和物源条件的研究发现, 该流域地形和水源条件满足泥石流形成的条件, 且在地震前后未发生显著变化, 而物源条件已经成为影响该区域泥石流形成与发展的主要因素。基于流域物源量与物源固结效应的研究结果表明, 5 a 内的碱坪沟泥石流灾害较活跃, 可能

暴发大规模泥石流灾害。5~10 a后,在降雨条件不发生较大变化以及不暴发大地震的情况下,流域内泥石流规模和频率会逐渐减小,只有在低频率暴雨作用下才可能暴发大规模泥石流灾害。

#### [ 参 考 文 献 ]

- [1] 许强. 四川省“8·13”特大泥石流灾害特点、成因与启示[J]. 工程地质学报, 2010, 18(5):596-608.
- [2] Benda L, Cundy T. Predicting deposition of debris flows in mountain channels[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1990, 27: 409-417.
- [3] Auer K, Shakoor A. A statistical approach to evaluate debris avalanche activity in central Virginia[J]. Engineering Geology, 1993, 33:305-321.
- [4] Cheng K Y, Lin L K, Chang S Y. The filed investigation and GIS application in a potential hazardous area of debris flow[C]//Debris-Flow Hazards Mitigation: Mechanics, Prediction, and Assessment. New York: Proceedings of the First International Conference. ASCE, 1997:83-92.
- [5] Nakagawa H, Takahashi T. Estimation of a debris-flow hydrograph and hazard area[C]//Debris-Flow Hazards Mitigation: Mechanics, Prediction, and Assessment. New York: Proceedings of First International Conference. ASCE, 1997:64-73.
- [6] Lin P S, Feng T Y, Lee C M. A study on the initiation characteristics of debris flow in gravelly deposits[J]. Journal of Chinese Soil and Water Conservation, 1993, 24(1):55-64.
- [7] Lin P S, Lin J Y, Hung J C, et al. Assessing debris-flow hazard in a watershed in Taiwan[J]. Engineering Geology, 2002, 66:295-313.
- [8] Di B F, Chen N S, Cui P, et al. GIS-based risk analysis of debris flow: An application in Sichuan, southwest China[J]. International Journal of Sediment Research, 2008, 23:138-148.
- [9] 唐川. 基于 GIS 技术对云南省泥石流的风险评估[J]. 地理科学, 2002, 22(3):300-304.
- [10] Melelli L, Taramelli A. An example of debris-flows hazard modeling using GIS[J]. Natural Hazards and Earth System Sciences, 2004, 4:347-358.
- [11] Wang C X, Esaki T, Xie M W, et al. Landslide and debris-flow hazard analysis and prediction using GIS in Minamata-Hougawachi area, Japan [J]. Environ. Geol., 2006, 51:91-102.
- [12] Han Y S, Liu H J, Zhong D L, et al. GIS-based risk assessment of debris flow disasters in the upper reach of Yangtze River[J]. Wuhan University Journal of Natural Sciences, 2007, 12(4):657-662.
- [13] Di B F, Zeng H J, Zhang M H, et al. Quantifying the spatial distribution of soil mass wasting processes after the 2008 earthquake in Wenchuan, China: A case study of the Longmenshan area[J]. Remote Sensing of Environment, 2010, 114:761-771.
- [14] 范建蓉, 田兵伟, 程根伟, 等. 基于多源遥感数据的“5·12”汶川地震诱发堰塞体信息提取[J]. 山地学报, 2008, 26:257-262.
- [15] 王文杰, 潘英姿, 徐卫华, 等. 四川汶川地震对生态系统破坏及其生态影响分析[J]. 环境科学研究, 2008, 21:110-116.
- [16] 陈晓清, 崔鹏, 程尊兰, 等. “5·12”汶川地震堰塞湖危险性应急评估[J]. 地学前缘, 2008, 15: 244-249.
- [17] 童立强. “5·12”汶川大地震极重灾区地震堰塞湖应急遥感调查[J]. 国土资源遥感, 2008, 3:71-64.
- [18] 崔鹏, 韦方强, 何思明, 等. “5·12”汶川地震诱发的山地灾害及减灾措施[J]. 山地学报, 2008, 26(3):280-282.
- [19] 中国科学院成都山地灾害与环境研究所. 泥石流研究与防治[M]. 四川 成都:四川科学技术出版社, 1989.
- [20] 周必凡, 李德基, 罗德富, 等. 泥石流防治指南[M]. 北京:科学出版社, 1991.
- [21] 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. 山洪泥石流滑坡灾害及防治[M]. 北京:科学出版社, 1994.
- [22] Chen N S, Yang C L, Zhou W, et al. The critical rainfall characteristics for torrents and debris flows in the Wenchuan earthquake stricken area [J]. Journal of Mountain Science, 2009, 6(4):362-372.
- [23] 四川省水利水电厅. 四川省中小流域暴雨洪水计算手册[M]. 四川 成都:四川省水利水电厅, 1984.
- [24] 陈宁生, 第宝锋, 李战鲁, 等. “5·12”汶川地震龙门山风景区地震次生山地灾害特征与处理建议[J]. 山地学报, 2008, 26(3):272-275.
- [25] Guzzetti F, Ardizzone F, Cardinali M, et al. Landslide volumes and landslide mobilization rates in Umbria, central Italy[J]. Earth and Planetary Science Letters, 2009, 279:222-229.
- [26] 唐邦兴等. 中国泥石流[M]. 北京:商务印书馆, 2000.
- [27] 康志成, 李焯芬, 马蔼乃, 等. 中国泥石流研究[M]. 北京:科学出版社, 2004.
- [28] 陈宁生, 黄蓉, 李欢, 等. 汶川“5·12”地震次生泥石流沟应急判识方法与指标[J]. 山地学报, 2009, 27(1): 108-114.
- [29] 陈宁生, 陈清波. 有限物源流域不同规模的泥石流频率分析[J]. 成都理工大学学报:自然科学版, 2003, 30(6):612-616.