

地质构造对汶川大地震山地灾害发育的影响

田述军^{1,2,3}, 孔纪名^{1,2}, 阿发友^{1,2,3}, 崔云^{1,2,3}

(1. 中国科学院 水利部成都山地灾害与环境研究所, 四川 成都 610041;

2. 中国科学院 山地灾害与地表过程重点实验室, 四川 成都 610041; 3. 中国科学院 研究生院, 北京 100039)

摘要: 通过对汶川大地震灾区的调查和遥感解译, 在 GIS 平台上对 4 945 个灾害点进行统计, 分析了山地灾害与地震烈度、距中央断裂带距离、岩性等地质构造因素的关系, 研究了地震条件下地质构造对山地灾害发育的影响。结果表明: (1) 地震能量主要沿中央断裂带释放, 在短轴方向上能量衰减很快, 灾害密度在距中央断裂 0~12 km 范围内较大, 然后锐减, 灾害点呈条带状分布与中央断裂走向一致。中央断裂带逆冲走滑造成其上盘灾害发育明显高于下盘, 而前山断裂带逆冲走滑与中央断裂的影响叠加造成中央断裂下盘灾害发育密度呈先降低后升高再降低的变化特点。(2) 灾害总数的 99.29% 集中分布在地震烈度 VII 度及其以上地区, 中央断裂带两侧高地震烈度的 XI 和 X 区灾害不仅数量多, 密度大, 而且灾害规模也大, 反映地震能量在形成灾害方面具有重要作用。(3) 灾害密度顺序为: 硬岩岩层 > 偶滑岩层 > 易滑岩层 > 较易滑岩层, 当软硬岩层相间时, 特别是硬岩在上时, 在地震波的作用下容易发生开裂、崩塌和滑坡, 且分别在硬质岩层和软弱岩层中较为发育。

关键词: 山地灾害; 发震断裂; 地震烈度; 汶川大地震

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2010)06-0052-04

中图分类号: P694

Geological Structure Effects on Development of Mountain Hazards in Wenchuan Earthquake

TIAN Shu-jun^{1,2,3}, KONG Ji-ming^{1,2}, A Fa-you^{1,2,3}, CUI Yun^{1,2,3}

(1. *Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences, Chengdu*

Sichuan 610041, China; 2. Key Laboratory of Mountain Hazards and Earth Surface Processes, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610041, China; 3. Graduated University of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

Abstract: 4 945 earthquake-induced mountain hazards in Wenchuan Earthquake were identified by field investigation and interpretation of remote-sensing images. GIS techniques were used to finish the statistical data analysis for the relationship between distribution of mountain hazards and environmental factors, including distance from middle faults, seismic intensity, and lithology. Research on the geological structure effects on the development of mountain hazards in earthquake was then conducted. The main results are summarized as follows: (1) The zonal distribution of mountain hazards was consistent with strike of middle faults and seismic energy was mainly released along the middle faults which caused the attenuation of energy obvious in the minor axis perpendicular to middle faults. The high density of hazards was distributed within the distance 12 km from middle faults. The density in hanging walls of middle faults was obviously higher than that in footwalls because the middle faults belong to reversed thrust faults. The density appeared as reduction-increase-reduction in the footwalls of middle faults because of the combined action of middle faults and front faults which both belong to reversed thrust faults. (2) The mountain hazards, well developed at XI and X seismic intensities, were obviously responsive with seismic energy, and about 99.29% of the mountain hazards were distributed in the areas where seismic intensity was greater than VII (3) The density appeared in the order of calculous rock > solid rock > loose rock > soft rock. Calculous rock was easy to disintegrate, especially the

收稿日期: 2010-04-15

修回日期: 2010-05-14

资助项目: 中国科学院知识创新工程重要方向项目“地震次生山地灾害监测预警及综合防治技术”(KCCX1-YW-03)

作者简介: 田述军(1980—), 男(汉族), 四川省新津县人, 博士研究生, 主要从事山地灾害评估和减灾研究。E-mail: tsj19800702@163.com。

通信作者: 孔纪名(1956—), 男(汉族), 重庆市人, 研究员, 主要从事山地灾害发生理论、灾害区域预测与评估、岩土工程与地质灾害防治方法与技术研究。E-mail: jimink@imde.ac.cn。

alternative distribution of calculous rock and soft rock by the effect of seismic wave. Many collapses were well developed in calculous rocks and landslides were well developed in loose rocks.

Keywords: mountain hazards; seismic fault; seismic intensity; Wenchuan Earthquake

2008年5月12日,以四川省汶川县映秀镇为震中发生了 M_s 8.0级大地震,是新中国建国以来发生的最大的一次地震,地震造成了巨大的人员伤亡和经济损失。由于地震震级大、震源浅,触发了大量的滑坡、崩塌和泥石流等山地灾害。这些山地灾害点不仅已经造成巨大的人员伤亡和经济损失,而且严重威胁灾后重建工程选址,并在以后数年到数十年将不断发生灾变,形成新的灾害点和灾害类型。

国内外对于地震山地灾害的研究注重从地震波传播和地震能量的分布来揭示灾害与地震之间的关系,而更多的学者主要通过统计和分析灾害分布与震中的距离、地震烈度和构造条件等方面的关系,对地震山地灾害分布规律进行研究¹⁻⁸。由于地震能量是影响山地灾害发育的主导因素,因此地震能量在空间上的传播和分布将在宏观上影响灾害的发育密度、灾害类型、规模大小等。调查分析表明,山地灾害的数量、类型、分布面积和发育密度与地震烈度、距中央断裂带距离、岩性等地质构造因素有密切的关系,通过分析山地灾害的分布规律和变化特点,研究地震作用下地质构造对山地灾害发育的影响和形成机制,这对于灾后重建选址和工程建设灾害危险性评价具有重要意义。

1 研究区的选择和统计方法

研究区位于四川省西北部,川西高原向盆地过渡地带,涉及四川省成都、绵阳、德阳、广元、阿坝5个市(州),总土地面积73 023 km²,人口为1 379.85万人,包括北川、汶川县、绵竹市等44个受灾严重的县(区)。调查和遥感的判译的4 945个典型滑坡和崩塌灾害点,利用GIS平台对这些典型地震山地灾害点进行统计分析。分别对影响灾害分布的岩性、距中央断裂带距离、地震烈度等主要地质构造因子进行统计分析,研究地质构造对汶川大地震山地灾害发育的影响。环境资料采用了1:200 000水文地质图和1:50 000地形图,分别提取岩性和断层数据。地震烈度采用中国地震局2008年8月29日正式公布的《汶川8.0级地震烈度分布图》,并根据野外实地考察资料对数据进行校正。然后对提取的各类数据进行分级,统计各类各级中灾害点的分布状况(图1)。

2 地质构造对山地灾害发育的影响

2.1 灾害集中分布在中央断裂带两侧和断裂带上盘
汶川大地震断层长度大约为300 km,以压性逆冲

为主,属于单向破裂地震,由SW向NE迁移,致使余震向NE方向扩张。地震破裂面南段以逆冲为主兼具右行走滑分量,北段以右行走滑为主兼具逆冲分量,该破裂面从震中汶川县映秀镇开始破裂,向北偏东49°方向传播,最大错动量达9 m,震源深度约12~19 km。震源破裂滑动量较大的区域有两处,为地震破坏最为严重的汶川映秀和北川附近的地区。彭县—灌县断裂(前山断裂带南段),发育一条长约40~50 km的地表破裂带⁹⁻¹⁰。对山地灾害距离中央断裂等距分级的分布特点进行统计,结果如表1及图1所示。

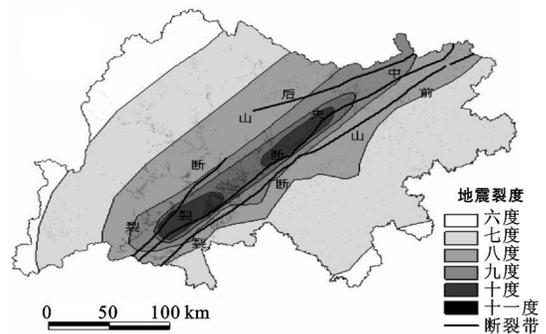


图1 研究区地震烈度图

灾害点沿中央断裂呈条带状分布,其延伸方向与中央断裂走向一致。灾害点集中分布在距中央断裂0~20 km范围内,集中了灾害总数的56.07%,而灾害点在距中央断裂0~4 km距离内个数和密度最大,灾害数量和密度随距离的增大而逐渐减小。灾害密度在距中央断裂4~12 km范围内变化不大,在距离超过12 km后锐减,可见,在距中央断裂0~12 km范围内地震山地灾害对断裂带破裂响应明显,这一区域集中了灾害总数的39.13%,地震能量在距中央断裂12 km附近可能有较大的衰减(表1)。

表1 灾害分布与距中央断裂距离的关系

距中央断裂 距离/km	上盘 个数	下盘 个数	总数	面积/ km ²	密度/ (个·km ⁻²)
0~4	493	240	733	2 841.23	0.26
4~8	403	209	612	2 824.76	0.22
8~12	335	255	590	2 786.12	0.21
12~16	262	212	474	2 747.60	0.17
16~20	240	123	363	2 734.19	0.13

由表1和图2—3可知,两盘和上盘灾害密度及占全部灾害的百分比都随距中央断裂带距离的增加

而减小,反映了地震能量大小对灾害发育程度的影响;同时,等距划分上,上盘各距离灾害点个数和密度都明显高于相应的下盘,其中在 0~4 km 范围上盘灾害数量为下盘的 2 倍多,根据震后实际调查,在许多仅一线之隔的地方,上盘的建筑完全被毁,而下盘仅轻微受损或安然无恙,汶川大地震主发断裂中央断裂在地震以逆冲走滑为主,地震烈度大致以中央断裂为中心成椭圆状分布(图 1),距离中央断裂带越近,地震能量越强。而逆冲断层破裂的上盘有利于应力释放的开放空间,结构面发育,岩体破碎,有利于山地灾害的发育。因此,在距离中央断裂较近的上盘区域灾害大量发育,且孕育了许多大型和特大型地震山地灾害,它们受发震断层控制,强大的地震能量和地震加速度是孕育大型和特大型地震山地灾害的主导因素。这些与前人研究逆冲断裂发震中断层的上、下盘效应是一致的^[11-12];进一步研究下盘灾害的分布特点:在距中央断裂超过 8 km 后,灾害点数量和密度反而增大,其后又锐减,这是由于中央断裂距前山断裂约 14 km,前面提到在汶川大地震中,除中央断裂带发生破裂以外,前山断裂南段发育一条长约 40~50 km 的地表破裂带,其特点也是以逆冲走滑为主,前山断裂破裂上盘(中央断裂下盘)对灾害的影响同样大于下盘,这种影响与中央断裂的影响相叠加,形成了中央断裂下盘灾害数量先减小后增大的分布特点,前山断裂破裂程度相对较弱,使得其影响范围并不大。

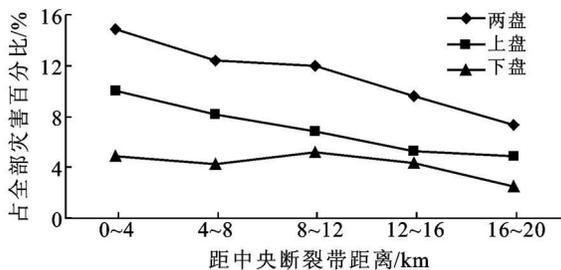


图 2 距中央断裂距离处灾害占全部灾害百分率

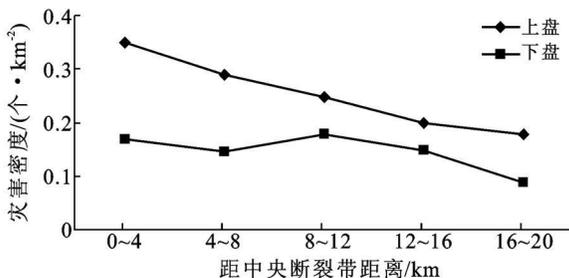


图 3 上、下盘距中央断裂不同距离处灾害密度

同时,地震能量的释放具有长短轴效应,与地震烈度的椭圆分布规律相似,地震能量主要沿断裂释放,造成地震破坏在垂直于断裂的方向上衰减很快,

山地灾害密度在距离中央断裂带大于 12 km 后迅速减小,说明地震能量的释放在短轴的传播在距离中央断裂带大于 12 km 后衰减的更快。

2.2 灾害集中分布在高地震烈度区

地震时研究区各位置地震能量的大小虽然无法确定,但可以通过震后对各区域地震烈度划分大致还原和模拟地震能量的分布情况,通过地震烈度的分布分析和研究地震能量对山地灾害形成和发育的影响。根据中国地震局正式公布的汶川地震烈度分布图,研究区山地灾害在各地震烈度分布如图 1 和表 2 所示,灾害主要集中在地震烈度 VII 度及其以上地区,这一区域面积为 65 046.96 km²,占研究区面积的 89.08%,发生灾害 4 910 处,占灾害总数的 99.29%。高地震烈度的 XI 和 X 区密度都远较 IX 度及其以下地区,可以看出高地震烈度对山地灾害响应明显,反映了地震能量在形成灾害方面具有重要作用。

表 2 灾害分布与地震烈度

地震烈度	个数	面积/km ²	密度/(个·km ⁻²)
XI	588	2 419.00	0.243
X	1 139	3 144.00	0.362
IX	881	6 675.47	0.132
VIII	1 533	1 8549.59	0.083
VII	769	34 258.90	0.022
VI	35	7 975.67	0.004

其中映秀 XI 度区沿汶川—都江堰—彭州方向分布,长轴约 66 km,短轴约 20 km,这一区域以都汶公路沿线最为典型,由于灾害数量多,规模大,公路曾长时间被崩塌、滑坡和泥石流等掩埋,严重影响了抗震救灾的进度。由于公路修建和岷江的切割使得坡体临空面增大,有利于地震能量卸荷,因此,这一区域灾害大规模发育,如位于震中附近的规模约 3.30×10^6 m³ 的牛圈沟碎裂滑坡滑动达 2.3 km^[13]。北川 XI 度区沿安县—北川—平武方向分布,长轴约 82 km,短轴约 15 km,这一区域以岷江支流湔江两岸禹里—漩坪—北川县城成灾最为典型,省道 302 沿湔江两岸修建,北川县城大量的伤亡人数和唐家山堰塞湖排险,使得这一区域成为汶川大地震受灾最为严重的地区。由于汶川大地震的主发断裂在北川发生二次破裂,使得地震能量优先选择沿着河流切割和公路形成的坡体进行释放,在这一线崩塌和滑坡强烈发育,而一些规模较大的滑坡高速远程滑动堵塞湔江,形成众多的堰塞湖,如唐家山滑坡、苦竹坝滑坡、东溪沟口滑坡等形成的堰塞湖,以及王家岩滑坡和北川县新中滑坡等,这些滑坡灾害不仅规模大而且危害严重,如唐家

山滑坡约 $2.00 \times 10^7 \text{ m}^3$, 形成著名的唐家山堰塞湖直接威胁绵阳市百万人的安全, 王家岩滑坡 $1.00 \times 10^7 \text{ m}^3$ 造成 1 600 多人死亡。

2.3 灾害在硬质岩层中最为发育

研究区出露岩层从震旦纪至第四纪, 将不同地层按岩性划分为 4 类, 易滑岩层(软弱岩层): 土层、砾石、泥岩, 薄—厚层砂岩、砂砾岩、石英砂岩; 较易滑岩层(中硬软岩层): 页岩, 千枚岩; 偶滑岩层(中软硬岩层): 泥质白云岩, 泥质灰岩, 角砾岩, 硅质岩; 稳定岩层(硬岩岩层): 石灰岩, 白云岩, 花岗岩, 闪长岩。分别统计灾害点在这 4 类岩层中分布特点(图 4, 表 3)。

表 3 灾害分布与岩性的关系

岩层	灾害个数	面积/ km^2	密度/(个· km^{-2})
易滑	804	12 070.03	0.07
较易滑	2 403	45 352.13	0.05
偶滑	836	8 223.66	0.10
坚硬	896	7 376.81	0.12

灾害点数量上表现为: 较易滑岩层> 硬岩岩层> 偶滑岩层> 易滑岩层, 这与较易滑岩层分布面积较大有关, 而密度则表现为: 硬岩岩层> 偶滑岩层> 易滑岩层> 较易滑岩层, 这与非地震山地灾害的分布规律有所不同。根据现场调查, 本次地震所发生的山地灾害大多是坡体中上部岩石在强烈的地震波作用下首先发生开裂, 在重力作用下带动山坡上的岩土一起运动, 当软硬岩层相间时, 特别是硬岩在上时, 在地震波的作用下容易发生开裂, 这种崩滑型的灾害发生厚度并不大, 呈现所谓“山剥皮”的特点; 地震山地灾害发生类型上, 崩塌在硬质岩层中较为发育, 滑坡则在软弱岩层中较为发育。

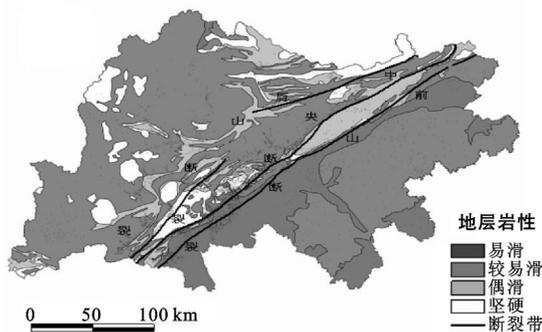


图 4 研究区地层岩性分布图

在后山断裂与中央断裂之间地层主要由志留系—泥盆系浅变质岩和前寒武系杂岩构成, 这些地层中以坚硬岩层灾害发育密度和规模最大, 尤其是坚硬的碳酸岩和花岗岩, 而当岩层走向与坡向垂直时, 更

有利于灾害的发育, 这一区域是灾害发育最为集中, 密度最大的区域, 也发育了一些大型的滑坡和崩塌灾害, 其中汶川大地震中规模最大的滑坡大光包滑坡就发育在这一区域, 大光包滑坡其滑坡规模初步估计为 $7.42 \times 10^8 \text{ m}^3$, 滑坡区地层主要由碳酸盐岩组成, 斜坡岩层走向与坡面近于垂直, 层面延展性极好, 构成滑动面形成的基础^[4]。

3 结论

汶川大地震山地灾害的发育和形成与地震能量的分布和传播联系紧密, 山地灾害宏观分布集中在地震能量强烈或有利于地震能量卸荷的地区。地震能量的释放具有长短轴效应, 使地震能量主要沿中央断裂带释放, 造成地震破坏在垂直于断裂的方向上衰减很快, 灾害密度在垂直距离中央断裂带大于 12 km 后迅速减小, 反映了地震能量的释放在短轴的传播在距离中央断裂带大于 12 km 后衰减的更快, 这个距离与地震烈度 IX 度的边界相当, 因此地震能量的分布可能与地震烈度的椭圆分布规律相似。山地灾害发育在地质构造影响下的分布规律主要表现在以下几个方面。

(1) 距中央断裂的距离是决定“5·12”汶川大地震山地灾害分布规律的主导因素, 灾害对其响应机制明显: 灾害沿中央断裂呈条带状分布, 在距中央断裂 0~12 km 范围内响应明显, 在大于 12 km 距离, 这种响应明显减弱; 上盘灾害发育密度明显高于下盘, 反映了逆冲断层破裂的上盘有利于应力释放的开放空间, 结构面发育, 岩体破碎, 山地灾害发育, 而下盘则相对受约束, 灾害发生的条件次之, 山地灾害发育密度较低。在中央断裂带与前山断裂之间, 中央断裂下盘(前山断裂上盘)山地灾害的发育密度经历了先降低后升高再降低的变化, 这一变化特点反映了前山断裂逆冲破裂对上盘灾害分布的影响大于下盘, 这与中央断裂对山地灾害的影响机制一致, 也是逆冲断裂控制灾害分布的有利证据。

(2) 汶川大地震中, 山地灾害在硬质岩层中最为发育, 类型以崩滑为主, 灾害发生类型上崩塌在硬质岩层中较为发育, 滑坡则在软弱岩层中较为发育。后山断裂带和中央断裂之间(中央断裂带破裂的上盘)沿中央断裂破裂方向且靠近中央断裂带区域坚硬岩层分布面积较大, 山地灾害在这一区域分布密集。

(3) 中央断裂带两侧高地震烈度的 X 度和 XI 度区域山地灾害不仅数量多, 密度大, 而且灾害的规模也大, 反映了地震能量在形成灾害方面具有重要作用。

(下转第 59 页)

(表1)与土壤水分扩散率的关系为:在相同土壤含水量条件下,土壤水分扩散率随 Cl^- , Na^+ 离子含量的增大而增大。

4 结论

(1) 土壤水分扩散率随土壤含水量的增大呈现单调增加。

(2) 幂函数和指数函数不能从理论上很好拟合两者之间的关系,本研究公式可以很好地拟合两者的关系,当含水量接近饱和时,水分扩散率趋于无穷。

(3) 土壤盐分对土壤入渗特性的影响主要表现为:随着土壤含盐量的增加和钠吸附比的增大,相应的土壤水分扩散率也呈增加趋势。

[参 考 文 献]

- [1] 雷志栋, 杨诗秀, 谢森传. 土壤水动力学[M]. 北京: 清华大学出版社, 1988; 231-236.
- [2] 雷志栋, 杨诗秀, 谢森传. 水平土柱入渗法测定土壤导水率[J]. 水利学报, 1991; 22(5): 1-7.
- [3] Bruce R R, Klute A. The measurement of soil moisture diffusivity[J]. Soil Sci. Soc. Am. Proc., 1956 20: 458-462.
- [4] Kirkham D, Powers W L. Advanced soil physics[M]. New York: Wiley-Interscience, 1972; 256-264.
- [5] Clothier B E, Scotter D R, Green A E. Diffusivity and one-dimensional absorption experiments [J]. Soil Sci. Soc. Am. J., 1983, 47: 641-644.
- [6] Shao M A, Horton R. Soil water diffusivity determination by general similarity theory[J]. Soil Sci., 1996, 161: 727-734.
- [7] 刘新平, 张铜会, 何玉惠, 等. 不同粒径沙土水分扩散率[J]. 干旱区地理, 2008 31(2): 249-253.
- [8] 宋新山, 何岩, 邓伟. 松嫩平原盐碱土水分扩散率研究[J]. 土壤与环境, 2000, 9(3): 210-213.
- [9] 肖干明, 王延松, 张王龙, 等. 棕壤和草甸土水分扩散率的研究[J]. 土壤, 1995, 27(6): 301-303, 310.
- [10] 朱首军, 丁艳芳. 渭北旱塬农林复合生态系统土壤水分扩散率研究[J]. 水土保持通报, 1999, 19(3): 26-28.
- [11] 宋新山, 何岩, 邓伟. 松嫩平原盐碱土水分扩散率研究[J]. 土壤与环境, 2000, 9(3): 210-213.
- [12] 魏飒, 任树梅. 承德围场地区土壤水分扩散率的研究[J]. 中国农村水利水电, 2007(1): 55-56, 61.

(上接第55页)

[参 考 文 献]

- [1] Keefer D V. Landslides caused by earthquakes[J]. Geological Society of America Bulletin, 1984, 95(4): 406-421.
- [2] Keefer D V. Statistical analysis of an earthquake-induced landslide distribution: The 1989 Loma Prieta California event[J]. Engineering Geology, 2000, 58(3/4): 231-249.
- [3] Romeo R. Seismically induced landslide displacements: A predictive model[J]. Engineering Geology, 2000, 58(3/4): 337-351.
- [4] Papadopoulos G A, Plessa A. Magnitude-distance relations for earthquake-induced landslide in Greece[J]. Engineering Geology, 2000, 58(3/4): 377-386.
- [5] 孔纪名. 滑坡稳定性判别的非计算方法[J]. 山地学报, 2001, 19(5): 446-451.
- [6] 黄建梁, 王威中, 薛宏交. 坡体地震稳定性的动态分析[J]. 地震工程与工程震动, 1997, 17(4): 113-122.
- [7] 辛鸿博, 王余庆. 岩土边坡地震崩滑及其初判准则[J]. 岩土工程学报, 1999, 21(5): 591-594.
- [8] Zhou B G, Zhang Y M. Some characteristics of earthquake-induced landslide in southwestern China [J]. Northwestern Seismological Journal, 1994, 16(1): 95-103.
- [9] 陈运泰. 汶川特大地震的震级和断层长度[J]. 科技导报, 2008 26(10): 26-27.
- [10] 李勇, 周荣军, 董顺利. 汶川地震的地表破裂与逆冲: 走滑作用[J]. 成都理工大学学报: 自然科学版, 2008, 35(4): 404-412.
- [11] Abrahamson N A, Somerville P G. Effects of the hanging wall and footwall on ground motions recorded during the Northridge earthquake[J]. Bull Seism Soc. Amer., 1996, 86(1B): S93-S99.
- [12] 俞言祥, 高孟潭. 台湾集集地震近场地震动的上盘效应[J]. 地震学报, 2001, 23(6): 615-621.
- [13] 孔纪名, 阿发友, 吴文平. 汶川地震滑坡类型及典型实例分析[J]. 水土保持学报, 2009, 23(6): 66-70.
- [14] 黄润秋, 裴向军, 李天斌. 汶川地震触发大光包巨型滑坡基本特征及形成机理分析[J]. 工程地质学报, 2008 16(6): 730-741.