

李晓, 裴向军, 刘洋, 2017. 2014 年 8 月云南鲁甸 M_S 6.5 地震典型地表破裂特征. 震灾防御技术, 12 (2): 338—345.
doi: 10.11899/zzfy20170210

2014 年 8 月云南鲁甸 M_S 6.5 地震典型地表破裂特征¹

李 晓 裴向军 刘 洋

(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 北京时间 2014 年 8 月 3 日 16 时 30 分, 云南省鲁甸县发生了 M_S 6.5 地震, 本次地震的发震构造为包谷垭-小河断裂。野外调查发现, 王家坡不稳定斜坡上的地表破裂在整个破裂带中比较具有代表性, 其地表破裂带整体走向 $N45^\circ W-N50^\circ W$, 并且由剪切破裂、张剪切破裂、压剪切破裂、张性破裂以及鼓包等典型地表破裂组成。其中左、右地表破裂边界与发震断层的出露位置一致, 由断层错动造成; 而部分地表破裂与断层的位置不重合, 其成因分为 2 种, 一种是发震断层导致的一些次级地表破裂, 另一种是地震引发的滑坡后缘破裂。地表破裂类型和基本组合特征显示出王家坡潜在不稳定斜坡上的地表破裂带具有左旋走滑的性质。

关键词: 鲁甸地震 地震地表破裂 破裂特征 成因初析

引言

2014 年 8 月 3 日 16 点 30 分, 云南省昭通市鲁甸县发生强烈地震 (简称鲁甸“8·03”地震), 震中位于 $27.1^\circ N, 103.3^\circ E$, 震级 M_S 6.5, 震源深度 12km (民政部国家减灾中心, 2014)。根据民政部门的统计, 地震造成 617 人死亡, 112 人失踪, 3143 人受伤, 大量房屋损毁。本次地震震级高, 震源浅, 震区地质环境复杂, 地形陡峻, 诱发了大量崩塌、滑坡等次生山地灾害 (李西等, 2014; 陈兴长等, 2015)。本文旨在野外调查和实地勘测的基础上, 分析地表破裂的方式和性质, 为地震次生山地灾害预测与减灾提供依据。

1 研究区域

地震发生在青藏高原东南缘著名的鲜水河-安宁河-则木河-小江断裂带东侧的昭通-莲峰断裂系上 (李西等, 2014; 王腾文等, 2015)。区内断裂发育 (图 1), 构造对工程区域稳定存在影响的断裂主要有则木河断裂 (线走向主要为 NE 向, F13)、大凉山断裂 (F4)、小江断裂 (F17)、昭通-鲁甸断裂 (F11)、五莲峰断裂 (F10)、马边-盐津断裂 (F8)、会泽-彝良断

1 基金项目 国土资源部公益性行业专项 (201211055) 和国家自然科学基金项目 (40972195) 共同资助

[收稿日期] 2017-01-03

[作者简介] 李晓, 男, 生于 1992 年。硕士研究生。主要从事地质灾害评价与预测研究。E-mail: 576009560@qq.com

[通讯作者] 裴向军, 男, 生于 1970 年。博士, 教授, 博士生导师。研究方向: 地质灾害评价与防治。E-mail: 379975180@qq.com

裂 (F19) 和包谷埡-小河断裂 (F28) 等。

王家坡不稳定斜坡位于红石岩堰塞湖的北东方向, 红石岩村的北面, 牛栏江的右岸, 河流流向在此由近南北向转为近东西向, 不稳定斜坡处于河流转弯的弧形下部。研究区多属构造侵蚀、溶蚀为主的高中山区和中山区, 这里山高谷深, 地形陡峻, 切割剧烈, 基岩多裸露, 岩体主要为强风化白云岩、白云质灰岩和风化残坡积土。地势总体上呈西高东低之势。地区的相对高差在 1000m 以上, 属于强侵蚀高中山峡谷地形地貌区。山脉延伸方向与地层及构造线走向大体一致, 河谷深切多呈“V”型或“U”型河谷, 谷底比降较大, 天然比降约 6.6‰。

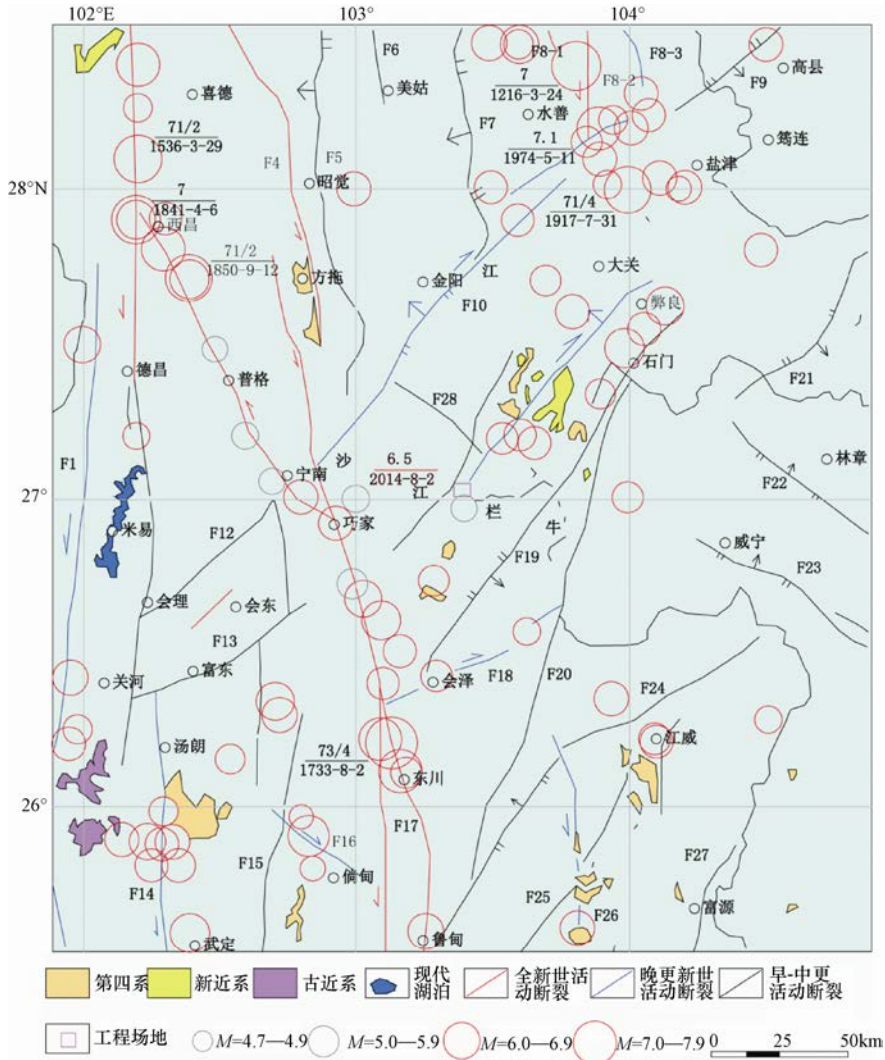


图 1 区域地震构造图

Fig. 1 Regional seismotectonic map of the study area

2 发震构造

根据云南地震实测资料 (图 2), 2014 年 8 月 3 日地震震中东西向最大水平加速度达 985gal

(刘爱文等, 2014), 垂直加速度约 504gal, 震中及枢纽工程区地震影响烈度为 IX 度。本次地震 VI 度及以上烈度区总面积为 10350km², 极震区烈度达 IX 度(帅向华等, 2014), 包括龙头山镇大部分地区及火德红镇和包谷埡乡部分区域。等震线长轴呈 NNW 至 NW 向展布, 反映出引起地震灾害的地震动沿 NNW 至 NW 向衰减较 NEE 向慢, 衰减较慢的方向一般与发震断层走向或破裂扩展方向一致, 故根据等震线长轴走向判断发震断裂为 NW 向的包谷埡-小河断裂。该断裂位于川滇块体东侧的凉山次级块体南缘的昭通-莲峰断裂带内, 断层走向 NNW, 近直立, 由数条断续展布的断层组成, 南东起于包谷埡以北的月亮山一带, 北西经龙头山、乐红、小河、满天星, 止于东坪一带, 长度约 47km(王腾文等, 2015)。据现场调查, 断裂地表线性构造不明显, 破碎带宽约 5—20m, 主要由断层角砾岩、片状岩及构造透镜体组成, 含少量糜棱岩及断层泥, 胶结中等。断裂形成于加里东期, 断错了寒武系至二叠系等各地层单元, 具有长期的活动历史。

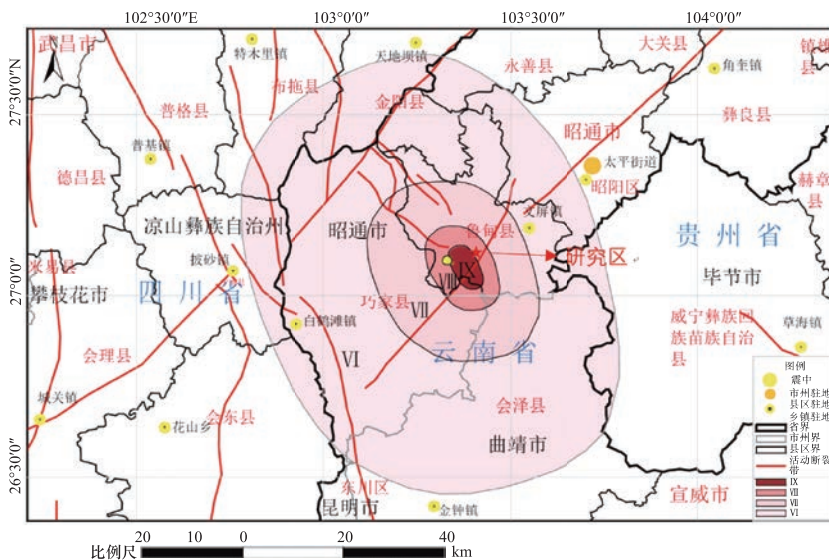


图2 2014年8月3日云南省鲁甸 M_s 6.5 地震构造及等烈度图

Fig. 2 Earthquake intensity contour lines of the Ludian "8-03" earthquake in Yunnan Province

3 地表破裂特征

3.1 地表破裂分布

鲁甸地震造成的王家坡强变形区地表破裂带大致位于 27°06'30"N, 103°27'20"E, 是一条整体走向 N45°W—N50°W 的左旋走滑破裂带, NW 走向的具有明显左行走滑特征的包谷埡-小河断裂为 2014 鲁甸地震的发震构造(李西等, 2014), 现场调查发现, 单条地表破裂又以 2 组方向为主, 一组为 N45°W—N55°W, 另一组为 N25°E—N65°E(图 3), 其中部分地表破裂走向与主断裂近平行, 主要分布在强变形区两侧, 部分地表破裂走向与主断裂斜交, 少量与主断裂垂直。

该区域发育有 3 条主要的同震地表破裂, 可划分为长约 444m 的北东段、长约 294m 的中段和长约 381m 的南西段等 3 个相对独立的地震地表破裂段, 分别为强变形区的左侧地表破裂边界、后缘地表破裂和右侧地表破裂边界, 最大左旋位移分别为 0.33m、0.62m 和 0.55m。除后缘地表破裂延伸方向为 N60°W 外, 左侧地表破裂边界、右侧地表破裂边界的延伸方向

均为 $N40^\circ W$ ，后缘地表破裂将左、右 2 条地表破裂边界相连。地表破裂的延伸长度普遍较长，总体在 6m 以上，最长的一条地表破裂长度可达 320m，在延伸过程中以塌陷坑、拉裂槽出露。根据现场勘查及推断，该条地震地表破裂带南东起于王家坡滑坡后缘，北西止于斜坡缓坡、基岩出露的交界处。张开程度在垂直方向上呈现上宽下窄的形态，向深部逐渐尖灭。在平面形态上，北西向地表破裂张开程度较小，南东向张开程度较大，具有从深部沿 SSE 方向向浅地表逐步扩展的破裂过程。破裂缝内充填物主要有 2 类，一类为第四系残积土泥质填充，另一种充填物为全-强风化碎石土填充（图 4（a）及（b））。

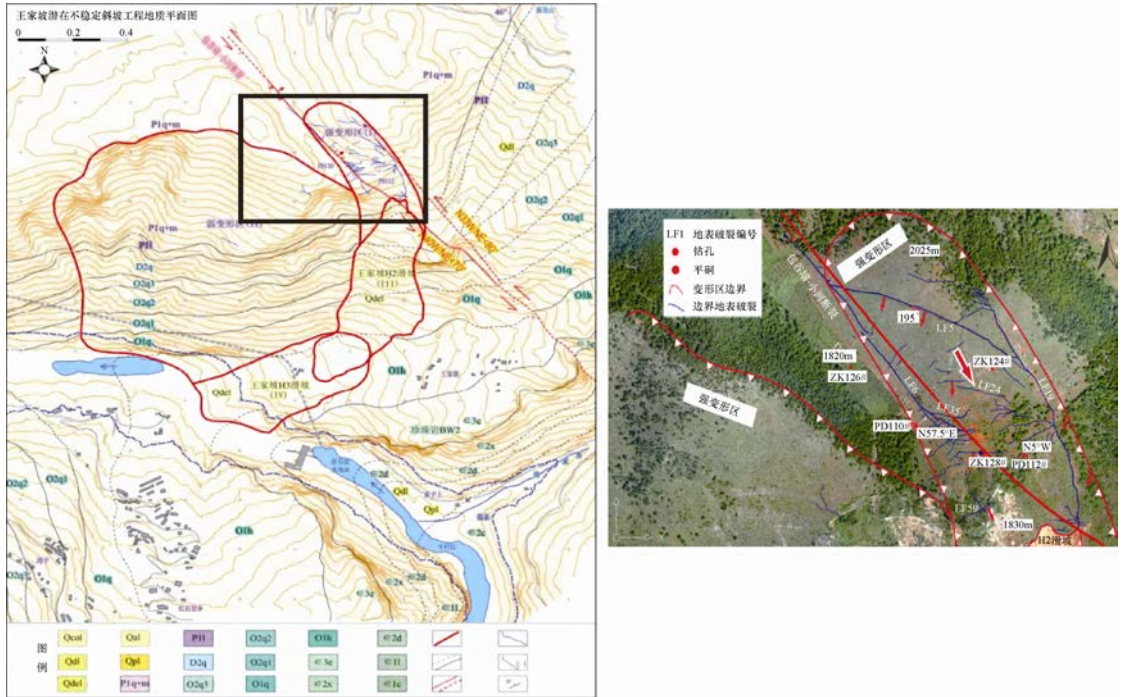


图 3 地震地表破裂分布（右图为左图黑框区域的放大图）

Fig. 3 Distribution of surface rupture of the earthquake

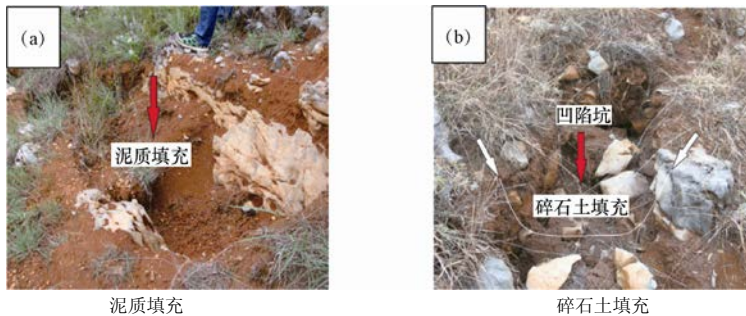


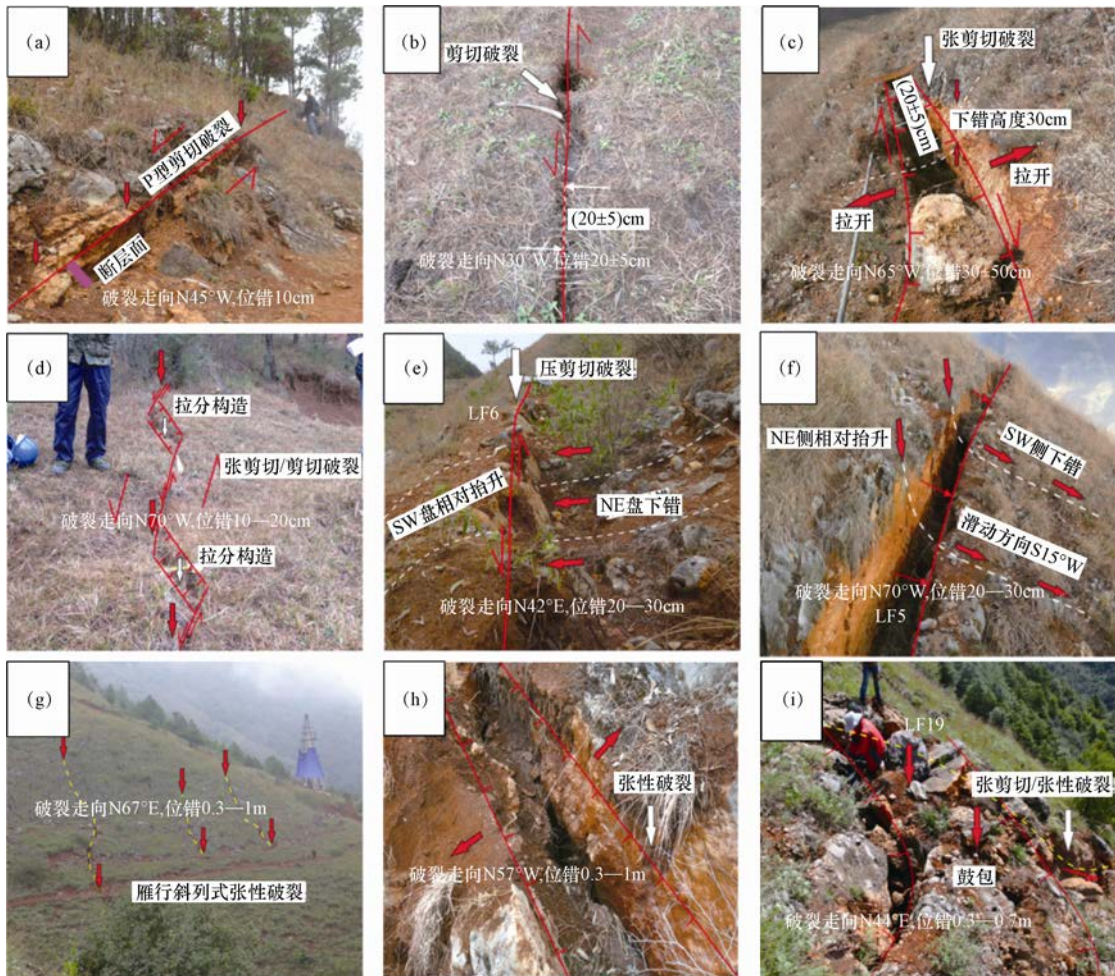
图 4 填充方式

Fig. 4 Filling way of the surface fracture

3.2 典型地表破裂性质

根据现场调查，王家坡地表破裂方式主要有剪切破裂、张剪切破裂、压剪切破裂、张性

破裂和地震鼓包等(孙鑫喆等, 2010, 2012; 张桂芳等, 2011)。其中, 最典型的剪切破裂发育在强变形区北西侧, 主要为 LF6 的北西段(破裂位置见图 3), 以及一种仅见左旋走滑分量的地表破裂单元, 例如 P 型剪切破裂(图 5 (a)), 其主要特征是破裂走向与发震断层走向基本一致, 破裂面近于直立, 两侧以同震左旋走滑位移为主, 差异升降运动不明显, 并伴随产生一些次级地表破裂(图 5 (b))。王家坡地表破裂带最为发育的基本破裂单元是张剪切破裂, 其走向 $N50^{\circ}W \pm 20^{\circ}$, 同时兼有左旋走滑分量和垂直于破裂走向的张开分量或正断倾滑分量, 局部地段伴随有南西盘数十厘米的正断层状下降现象。主要集中在强变形区中、后侧(图 5 (c))。王家坡张剪切破裂常呈雁行或左行右阶斜列状组合, 呈整体走向 $N65^{\circ}W \pm 5^{\circ}$ 的地震地表破裂带, 拉开宽度 20—30cm, 与地表破裂带之间存在着小于等于 30° 的夹角。最典型的张剪切破裂为 LF5, 走向 $N70^{\circ}W$, 整体呈现北东盘上升、南西盘下降的趋势, 可见相关的小拉分盆地或陷落坑(图 5 (d))。压剪切破裂主要分布在王家坡地表破裂带南西侧, 以 LF6 南东



(a) P 型剪切破裂; (b) 次级地表破裂; (c) 张剪切破裂; (d) 拉分构造; (e) 压剪切破裂;
(f) 后缘地表破裂; (g) 雁行斜列式张性破裂; (h) 张性破裂; (i) 地表鼓包

图 5 破裂方式

Fig. 5 Rupture mode of the surface fracture

段为主, 走向 $N42^\circ E-N48^\circ E$, 与地表破裂带整体走向基本一致, 形成了南西盘抬升、北东盘下降的陡坎 (图 5 (e))。与之对应的后缘地表破裂 LF5, 其南西盘相对北东盘出现很明显的下错 (图 5 (f)), 这在一定程度上说明了强变形区的变形方向及变形程度, 经现场实测, 整体的滑动方向为 $S10^\circ W-S20^\circ W$ 。王家坡张性破裂走向一般为 $N65^\circ E-N80^\circ E$, 呈张开状或出现南侧盘块体下降现象 (图 5 (g)), 与剪切破裂之间的差异在于张性破裂呈雁行斜列。张性破裂主要分布在 2 处, 一处为地表破裂带南西侧, 为王家坡坡度陡缓交接的部位; 另外一处为王家坡滑坡后缘, 在接近后壁的地方形成张性地表破裂 (图 5 (h))。王家坡地表破裂带上的鼓包主要出现在 LF19 处。在地震作用下, LF19 同震左旋走滑位移逐渐增大, 不断挤压临近的基岩, 造成裂缝前缘隆起, 局部形成鼓包, 从形态特征上看, 多为圆弧状鼓包 (图 5 (i))。

4 地表破裂组合方式

通过对王家坡不稳定斜坡的高分辨率遥感影像的分析, 以及野外考察表明, 王家坡不稳定斜坡的地表破裂是由剪切破裂、张剪切破裂、压剪切破裂、张性破裂和鼓包等基本破裂单元组合而成, 在不同的区域有着不同的组合方式 (董彦芳等, 2012; 周春景等, 2014; 李海兵等, 2015; 罗文行等, 2015)。王家坡地表破裂主要的排列组合方式有 3 种。第一种, 由强变形区右侧主要的 3 条走向为 $N45^\circ W-N50^\circ W$ 的左旋走滑破裂组成, 呈左行左阶羽列, 也是该区域最为常见的排列组合方式。第二种为左行右阶羽列, 多为出现于局部的地表破裂。第三种为雁行斜列式, 主要由强变形区 SW 侧前缘张性破裂构成, 在雁列区局部出现拉分构造。地表破裂类型和基本组合特征等显示出王家坡潜在不稳定斜坡上的地表破裂带具有左旋走滑的性质。

5 成因初析

通过对以上几个典型地表破裂的调查研究发现, 地表破裂在一般情况下被认为是断层在地表的表现 (Yeats 等, 1997; Xu 等, 2006; Zhang 等, 2010), 根据地表破裂的特征可以发现, 其中左、右地表破裂边界与发震断层的出露位置一致, 是断层错动引起的; 而部分地表破裂与断层的位置不重合, 其成因分为 2 种, 一种是发震断层导致的一些次级地表破裂, 另一种是地震引发的滑坡后缘破裂。

6 结论

(1) 根据野外调查和分析, 2014 年 8 月 3 日 16 点 30 分发生的云南鲁甸地震, 在王家坡潜在不稳定斜坡上所造成地表破裂带是一条总体走向为 $N45^\circ W-N50^\circ W$ 的地表破裂带。

(2) 该地震地表破裂带由剪切破裂、张剪切破裂、压剪切破裂、张性破裂和鼓包等典型破裂样式所组成, 由左旋走滑破裂 (左行左阶羽列)、左行右阶羽列和雁行斜列式等组合方式。地表破裂类型和基本组合特征显示出王家坡潜在不稳定斜坡上的地表破裂带具有左旋走滑的性质。

(3) 地表破裂的产生方式有 2 种, 一种是同震地表破裂, 另一种是震后形成的滑坡后缘破裂。

致谢: 感谢裴向军教授在野外关于地表破裂分析所提出的宝贵意见。

参考文献

- 民政部国家减灾中心, 2014. 云南省鲁甸县 6.5 级地震. 中国减灾, **15** (8): 40—41.
- 陈兴长, 胡凯衡, 葛永刚等, 2015. 云南鲁甸“8·03”地震地表破裂与大型地震滑坡. 山地学报, **33** (1): 65—71.
- 董彦芳, 袁小祥, 王晓青等, 2012. 2010 年青海玉树 M_S 7.1 地震地表破裂特征的高分辨率遥感分析. 地震, **32** (1): 82—92.
- 李海兵, 潘家伟, 孙知明等, 2015. 2014 年于田 M_S 7.3 地震地表破裂特征及其发震构造. 地质学报, **89** (1): 180—194.
- 李西, 张建国, 谢英情等, 2014. 鲁甸 M_S 6.5 地震地表破坏及其与构造的关系. 地震地质, **36** (4): 1280—1291.
- 刘爱文, 帅向华, 吕红山等, 2014. 鲁甸地震生命线工程震害特点及应急抢修. 震灾防御技术, **9** (3): 359—367.
- 罗文行, 钱莉莉, 李德威等, 2015. 地震地表破裂成因分析——以玉树地震为例. 人民长江, **46** (15): 69—73.
- 帅向华, 姜立新, 侯建盛等, 2014. 云南鲁甸 6.5 级地震灾害特点浅析. 震灾防御技术, **9** (3): 340—358.
- 孙鑫喆, 徐锡伟, 陈立春等, 2010. 青海玉树 M_S 7.1 地震两个典型地点的地表破裂特征. 地震地质, **32** (2): 338—344.
- 孙鑫喆, 徐锡伟, 陈立春等, 2012. 2010 年玉树地震地表破裂带典型破裂样式及其构造意义. 地球物理学报, **55** (1): 155—170.
- 王腾文, 李勇, 李敬波等, 2015. 包谷垭-小河断裂——2014 年 8 月 3 日云南鲁甸 M_S 6.5 地震发震构造. 防灾科技学院学报, **17** (2): 1—7.
- 张桂芳, 屈春燕, 单新建等, 2011. 2010 年青海玉树 M_S 7.1 级地震地表破裂带和形变特征分析. 地球物理学报, **54** (1): 121—127.
- 周春景, 吴中海, 尼玛次仁等, 2014. 青海玉树 M_S 7.1 级地震同震地表破裂构造. 地质通报, **33** (4): 551—566.
- Xu X. W., Yu G. H., Klinger Y., et al., 2006. Reevaluation of surface rupture parameters and faulting segmentation of the 2001 Kunlunshan earthquake (M_W 7.8), northern Tibetan Plateau, China. *Journal of Geophysics Research*, **111**(B5): B05316, doi: 10.1029/2004JB003488.
- Yeats R. S., Sieh K., Allen C. R., 1997. *The geology of earthquakes*. Oxford: Oxford University Press, 568.
- Zhang Y., Xu L. S., Chen Y. T., 2010. Source process of the 2010 Yushu, Qinghai, earthquake. *Science China Earth Sciences*, **53**(9): 1249—1251. doi: 10.1007/s11430-010-4045-5.

Characteristics of Surface Rupture of the Ludian M_S 6.5 Earthquake in Yunnan Province

Li Xiao, Pei Xiangjun and Liu Yang

(State Key Laboratory of Geohazard Prevention and Geoenvironment Protection,
Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China)

Abstract At 16:30 on August 3, 2014, M_S 6.5 earthquake occurred in Ludian County, Yunnan Province, and the Baogunao-Xiaohe Fault is the causative structure of this earthquake. Through the field investigation, we found that the surface rupture on Wangjia slope is of typical characteristics of the earthquake, with the surface fracture zone overall trending $N45^\circ W$ — $N50^\circ W$ fracture zone and consisting of shear cracks, transtensional cracks, transpressional cracks, tension cracks and mole tracks. The boundary between the left and the right surface rupture is consistent with the location of the fault, and is caused by the fault movement. The partial surface rupture segment is not coincident with the location of the fault, which could be caused by the following two reasons. The first is that the seismogenic fault results in some secondary surface ruptures, and the second is that the seismogenic fault produces the earthquake landslide trailing edge fracture. The surface rupture types and basic characteristics indicate that the zone is characterized by left-lateral strike-slip mode.

Key words: Ludian earthquake; Earthquake surface rupture; Rupture characteristics; Cause analysis