

DOI: 10.13745/j.esf.yx.2016-11-52

# 鲁甸 $M_s$ 6.5 地震发震断层地表破裂特征、相关古地震的发现和年代测定

李 西<sup>1</sup>, 徐锡伟<sup>2</sup>, 张建国<sup>1</sup>, 谢英情<sup>1</sup>, 于 江<sup>1</sup>, 张彦琪<sup>1</sup>

1. 云南省地震局, 云南 昆明 650224

2. 中国地震局 地质研究所 活动构造与火山重点实验室, 北京 100029

LI Xi<sup>1</sup>, XU Xiwei<sup>2</sup>, Zhang Jianguo<sup>1</sup>, XIE Yingqing<sup>1</sup>, YU Jiang<sup>1</sup>, ZHANG Yanqi<sup>1</sup>

1. Earthquake Administration of Yunnan Province, Kunming 650224, China

2. Key Laboratory of Active Tectonics and Volcano, Institute of Geology, China Earthquake Administration, Beijing 100029, China

LI Xi, XU Xiwei, Zhang Jianguo, et al. Surface rupture characteristics of the seismogenic structure of the Ludian  $M_s$  6.5 earthquake and identification and dating of related paleoearthquakes. *Earth Science Frontiers*, 2018, 25(1): 227-239

**Abstract:** After the Ludian  $M_s$  6.5 earthquake occurred, the distribution of aftershocks presented two possible directions, causing intensive debate over whether the seismogenic structure was the NE oriented Zhaotong – Ludian fault or a NW oriented secondary fault. Through detailed field investigation, we found that there were estimated 8 km long surface ruptures oriented  $N22^\circ W - N55^\circ W$  along the line connecting Xiejiayingpan and Guangming villages and Wangjiapo. These ruptures are right-stepwise and left-lateral and with strike-slip components of 30 – 35 cm overall and 40 – 60 cm locally, demonstrating that the Baogunao – Xiaohe fault is the seismogenic structure of the Ludian  $M_s$  6.5 earthquake. A large trench along the Xiaoyakou fault trough of the seismogenic structure opened, from which we identified four paleoearthquakes including the 2014 Ludian  $M_s$  6.5 earthquake and named them E1 through E4 from the oldest to the youngest. Eight charcoal samples were dated to constrain the ages of E1, E2 and E3 at 9190 – 8870 BC, 1000 BC – 900 AD, and 910 – 1240 AD, respectively, and the youngest event E4 was associated with the 2014 Ludian  $M_s$  6.5 earthquake. This study illustrates that a 6.5 magnitude earthquake in the Yunan Region could produce surface rupture and leave its trace in the geologic record. Based on the surface rupture characteristics, image geometric discontinuity and the characteristic adelmorphic footprint of the paleoseismics found on the trench walls, it may conclude that the activity of the Baogunao – Xiaohe fault was not very strong historically, and this fault represents a seismogenic structure of a moderately strong earthquake.

**Key words:** the Ludian earthquake; surface rupture; seismogenic structure; rupture characteristics; paleo-earthquake

**摘 要:** 鲁甸  $M_s$  6.5 级地震发生后, 余震分布呈现两个优势方向, 其发震断层是 NE 向的昭通—鲁甸断裂, 还是 NW 向的次级断裂, 引起了广泛的讨论。详细的野外调查发现, 从龙头山镇南东方向的谢家营盘—光明村—王家坡一线  $N22^\circ W \sim N55^\circ W$  走向断续展布长约 8 km 地表破裂带, 呈左行右阶排列, 伴有 30~35 cm 左右的走滑分量, 局部走滑分量达 40~60 cm, 表明此次地震的发震构造为北西走向的包谷垭—小河断裂。探槽工程揭露出发震构造光明村—小垭口段 4 次古地震事件; 8 个炭屑样品的  $^{14}C$  测年分析表明, 事件 E1 可能发生在 9190—8870 BC, E2 为 1000 BC 至 900 AD, E3 为 910—1240 AD, 最新一次事件 E4 为 2014 年鲁甸  $M_s$  6.5 级地震。该研究表明, 云南地区 6.5 级强震可以产生地表破裂并可能在地质记录中留下遗迹。结合本次地表破裂特征, 影像几何不连续以及探槽剖面揭露出古地震断面信息容易隐形等特征表明, 包谷垭—小河断

收稿日期: 2016-03-21; 修回日期: 2016-12-28

基金项目: 科学技术部国际科技合作项目(2015DFA21260); 中国地震局鲁甸地震科学考察专项(2014008)

作者简介: 李 西(1975—), 男, 博士, 高级工程师, 主要从事活动构造、古地震研究。E-mail: lixgj@126.com

裂在历史活动中强度不大,属中强地震发震构造。

**关键词:**鲁甸地震;地表破裂;发震断层;破裂特征;古地震

**中图分类号:**P315.2 **文献标志码:**A **文章编号:**1005-2321(2018)01-0227-13

2014年8月3日16时30分,云南鲁甸发生了 $M_s$  6.5( $M_w$  6.2)地震。此次地震的震中( $103.3^\circ\text{E}$ ,  $27.1^\circ\text{N}$ )位于包谷垭—小河断裂及昭通—鲁甸断裂附近(图1),震源深度12 km,主震及4次强余震震源机制解、精定位余震序列分布表明此次地震为一次高倾角左旋走滑型地震<sup>[1-2]</sup>。位于龙头山镇财政所内的强震台获取的地面加速度时程,其东西向最大加速度峰值达 $948.5\text{ cm/s}^2$ ,是我国大陆在极震区内获取的第一条PGA近1g的近场强地面运动记录<sup>[3]</sup>。加之此次地震震源浅、震区人口密度高( $212\text{ 人/km}^2$ ,是云南省平均人口的两倍)、建筑物抗震能力差(农村普遍分布“土墙抬梁”“石墙抬梁”结构房,或无构造柱砖房),震后又发生了滑坡、泥石流等次生地质灾害,地震共造成617人死亡,112人失踪,3 000多人受伤,以及大量房屋损毁,是云南近年来典型的“小震”致大灾事件<sup>[4]</sup>。地震发生后,国内外学者<sup>①</sup>对此次地震是否有地表破裂,发震断层是北东向的昭通—鲁甸断裂还是北西向的次级断裂都存在争议<sup>[5-6]</sup>。由于没有明确的地表破裂证据,有学者认为,影像上清晰且较具规模的北东走向的昭通—鲁甸断裂为发震断层<sup>[7]</sup>。本文旨在通过地震应急科学考察及后期对重灾区断层剖面、地裂缝、滑坡等详细考察,为发震断层的判定、地震破裂模式分析提供地质证据。同时,在发震断层上开挖探槽,开展古地震研究,为发震断层破裂历史研究提供参考资料。

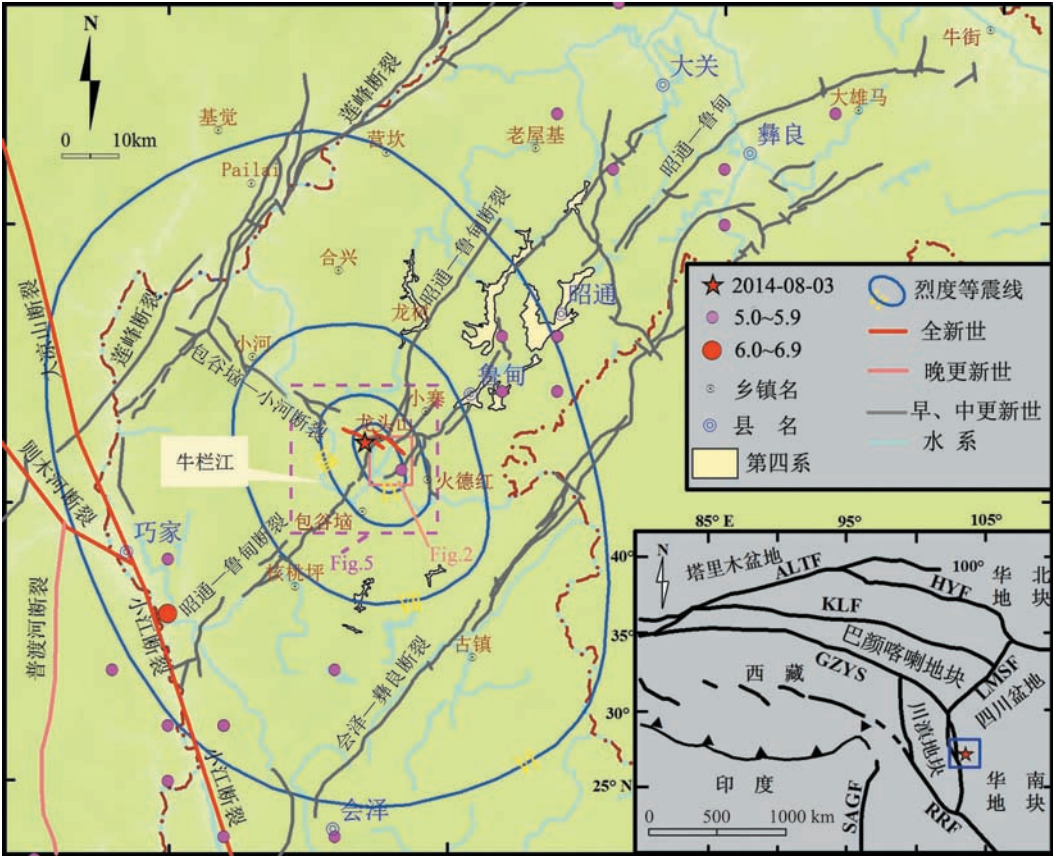
在区域构造上,云南鲁甸 $M_s$  6.5地震发生在南北地震带南段,青藏高原东南缘鲜水河—小江断裂系以东走向NE向昭通—莲峰断裂带西段,北临NNW至近NS向大凉山断裂和马边—盐津断裂,属青藏高原东南部川滇菱形块体与华南地块之间I级块体边界构造带<sup>[8-11]</sup>。鲁甸震区处于川滇地块以东,华南块体内部,主要受到北西向区域构造应力场控制<sup>[12-15]</sup>。区内发育北东向、近南北向和北西向多组断裂构造,形成菱形断块<sup>[16-19]</sup>,其中,北东向的莲峰断裂、昭通—鲁甸断裂为震区主体构造,北西向断裂为包谷垭—小河断裂(图1)。

## 1 地震构造背景

川滇交界东段的NE向昭通—莲峰断裂带是一

条地震研究程度相对较低的活动构造带,是川滇—华南地块边界带的一部分,也是活动及变形的大凉山次级块体与相对稳定的华南地块之间的边界带<sup>[20-21]</sup>。昭通—莲峰断裂带由莲峰断裂、昭通—鲁甸断裂和会泽—彝良断裂等3条NE向右旋走滑逆断裂组成,1999至2007年期间GPS监测给出的应变速率具有西南大北东小的变化特点:其西南段垂直于断裂走向的地壳挤压缩短率为 $4\sim 6\text{ mm/a}$ ,右旋剪切应变速率 $2\sim 3\text{ mm/a}$ ;北东段挤压缩短率 $2\sim 3\text{ mm/a}$ ,右旋剪切应变速率 $0\sim 1\text{ mm/a}$ 。从NNW至近NS向安宁河断裂、小江断裂、大凉山断裂和马边—盐津断裂地表迹线展布可知,这些断裂明显切割先存的昭通—莲峰断裂带。第四纪断错地貌测量、古地震研究和GPS监测数据等分析表明,安宁河断裂左旋走滑速率约为 $(6.5\pm 1)\text{ mm/a}$ ,南段地表破裂型古地震复发间隔平均值为 $(700\pm 100)\text{ a}$ ,北段最近几次地表破裂型地震平均复发间隔约为 $(590\pm 70)\text{ a}$ ;大凉山断裂左旋走滑速率约为 $(3.3\pm 0.7)\text{ mm/a}$ ,最新一次地表破裂型地震发生在距今 $1\,530\sim 1\,780\text{ a}$ ,最近2次地震的复发间隔为 $(750\pm 50)\text{ a}$ ;则木河断裂左旋走滑速率约为 $(6.4\pm 0.6)\text{ mm/a}$ ,同时带有一定的正断倾滑分量,最新一次地震为1850年西昌7.5级地震,复发间隔介于 $1\,000\sim 1\,800\text{ a}$ ;小江断裂左旋走滑速率 $(10\pm 1)\text{ mm/a}$ ,中段东支和南段历史上不曾记录到地表破裂型地震<sup>[22-25]</sup>。值得指出的是,近SN向安宁河断裂和NW向则木河断裂及其东侧的大凉山断裂和马边—盐津断裂一起构成青藏高原东缘最新构造变形带,分解了青藏高原东缘近南北向的左旋走滑运动分量,使安宁河断裂的左旋走滑运动速率明显小于其北的鲜水河断裂和其南的小江断裂。其中,鲜水河断裂左旋滑动速率约为 $12\text{ mm/a}$ ,小江断裂左旋滑动速率约为 $10\text{ mm/a}$ ,减少的部分约有 $3.3\text{ mm/a}$ 分解到了大凉山断裂<sup>[26]</sup>。由此可见,尽管没有获得马边—盐津断裂的地质滑动速率,但由运动学平衡原理可知其左旋滑动速率约为 $1\text{ mm/a}$ <sup>[11]</sup>。

① WALTER D M. Recent earthquakes. 昆明:云南省地震局, 2014-09-17.



ALTF—阿尔金断裂;HYF—海原断裂;KLF—昆仑山断裂;GZYS—甘孜—玉树断裂;LMSF—龙门山断裂;RRF—红河断裂;SAGF—实皆断裂。

图 1 震区构造简图  
Fig. 1 Tectonic map of the seismic area

鲁甸地震震区的昭通—莲峰断裂带及与其交汇、切割的马边—盐津断裂是  $M_s$  6.0 级左右中等强度地震频发区,最大地震为发生在马边—盐津断裂与莲峰断裂交汇部位的 1974 年 5 月大关北 7.1 级地震和 1216 年 3 月马湖 7 级地震<sup>[11,27]</sup>。有史料记载以来,大凉山断裂沿线没有记录到 6.5 级以上破坏型地震发生,地表迹线连续性差,但存在古地震遗迹,也是一条形成时代较安宁河断裂要晚的新生断裂带<sup>[28]</sup>。GPS 变形图像、小震精定位等反映昭通—莲峰断裂带已不同程度闭锁<sup>[21,29-30]</sup>。近 10 a 来,该构造带及其附近发生的中强地震明显增多,计有 2003 年云南鲁甸  $M_s$  5.0 和 5.1 级地震、2004 年鲁甸  $M_s$  5.6 级地震、2006 年云南盐津两次  $M_s$  5.1 级地震以及 2012 年云南彝良  $M_s$  5.7 和 5.6 级地震<sup>[4,21]</sup>。

包谷垭—小河断裂是北东向的莲峰断裂、昭通—鲁甸断裂带及近南北走向的小江断裂相配套的次级断裂,走向为  $N30^{\circ}W\sim N60^{\circ}W$ ,由数条断续展布的断裂组成(图 1)。东南起于包谷垭以北的月亮

山一带,北西经龙头山、乐红、小河、满天星,止于东坪一带,总长约 40 km。沿断裂表现为断层垭口、断层槽地等断层地貌,如龙头山—翠屏一线沿断裂表现为较为平直的断层槽地。翠屏村见断层露头剖面,破碎带以断层角砾岩为主,断面擦痕清晰,指示断裂具有左旋走滑兼逆冲性质。

2 重灾区地质调查

鲁甸  $M_s$  6.5 地震发生后,我们围绕重灾区(Ⅷ度、Ⅸ度)开展了大量野外地质地貌调查工作,发现自谢家营盘—光明村—王家坡一线  $N22^{\circ}W\sim N55^{\circ}W$  走向断续展布的长约 8 km 地表破裂带,呈左行右阶排列(图 2),伴有 30~35 cm 走滑分量,局部段落伴有 15~25 cm 倾滑分量。

野外调查发现从龙头山镇以南的谢家营盘—光明村—王家坡一段断续展布的地表破裂带主要分布在此次地震Ⅸ度区内,整体呈右阶展布(图 2),局部段落呈现左行右阶斜裂特征。

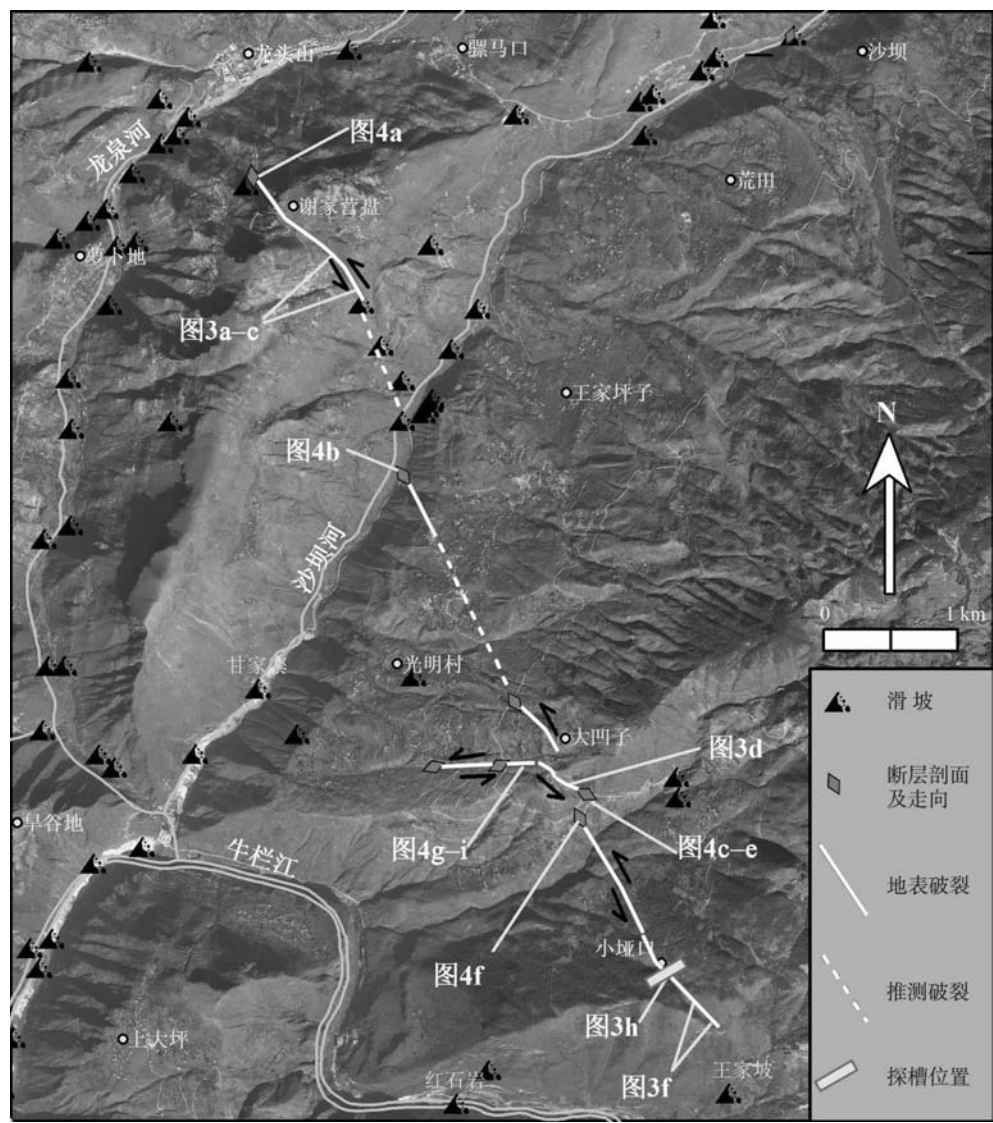


图 2 北西向地表破裂分布图  
Fig. 2 The distribution of NW direction surface ruptures

2.1 谢家营盘地表破裂特征

谢家营盘地表破裂带位于龙头山镇以南大山上,该变形带长约 800 m,地裂缝主要沿槽谷边上发育,整体呈右阶斜列(图 3a),裂缝总体走向 N30°W~N50°W。图 3b、c 指示该裂缝具有左行走滑运动特征,该段最大左行位移约 30 cm(图 3c)。同时,我们在地表强变形带北西方向,发现一 N8°W 走向、倾向 NE、倾角 52°断层剖面(图 4a,具体位置见图 2),沿断面新生构造裂缝明显,表明该剖面具有明显同震活动迹象。

2.2 沙坝河垂直公路地裂缝

地震产生两条与沙坝河及沿河公路近垂直的地裂缝(见图 2 中图 4b 处),裂缝走向为 N65°W。图

4b 中红色箭头指示断裂所在位置,图片中可以清楚地看到地震新产生的构造裂缝沿着老的断裂带发育。我们对图 4b 中垂直公路两条地裂缝进行了测量,左边地裂宽度为 42~60 cm;右边一条地裂缝较前一条窄,裂缝宽 10~40 cm,呈左阶斜裂。

2.3 光明村大明子南东地表破裂特征

地震应急科学考察期间,我们发现图 4c—e 所示沿公路边北西走向断层陡坎、新生构造裂缝。图 4d 为图 4c 所示陡坎中蓝色矩形框内放大照片,新露陡坎面高约 15 cm;与图 4c 陡坎相距约 15 m 处的碎裂状玄武岩剖面上有一条新生构造裂缝(图 4e),裂缝倾向、走向与图 4c 陡坎一致,倾向北东,走向北西,且裂缝倾向与边坡方向(南西)相反。在后





(a)—(c)谢家营盘地表破裂;(d)、(e)一大凹子南地表破裂;(f)——(i)小垭口段地表破裂。照片(h)镜向东南。  
图 3 鲁甸地震北西向地表破裂典型照片

Fig. 3 NW striking typical surface ruptures of Ludian earthquake

期科学考察中,我们沿着图 4c 陡坎顶部(北西方向)追踪,发现了图 3d 所示,北西走向的地表破裂带(见图 2 中图 3d 所示位置)。该破裂带长约 500 m,具有明显的左行倾滑特征,地裂缝总体走向  $N40^{\circ}W \sim N50^{\circ}W$ 。我们对图 3d 位错明显部位进行了位错量测,测得左行位错约 33 cm(图 3e),北东倾滑分量约 25 cm(图 3d)。图 4f 位于光明村—火德红段公路边上的断层剖面,断面产状  $60^{\circ} \angle 60^{\circ}$ ,沿该断面新生构造裂缝显示该断面在此次地震中具有明显同震活动迹象,该剖面所处位置见图 2 中图 4f。

此外,我们在大凹子西还发现一段长约 1 km

的地表破裂带(图 2,图 4g—i),整体呈左行右阶排列,走向近东西,见图 4g—i 公路边水渠被左行位错约 35 cm,伴有 15 cm 向北的倾滑分量。

2.4 光明村小垭口地表破裂特征

光明村小垭口段地表破裂带(图 2)沿槽谷边上发育(图 3f),整体呈右阶排列,且具有明显的左行走滑特征,该段破裂长度近 2 km。该段地表破裂走滑特征主要表现为近水平擦痕<sup>[31-32]</sup>,田埂左行拉裂(图 3g)以及菱形拉裂(图 3h、i)。通过对图 3h 上位错测量,田埂左行位错约 35 cm(图 3g),菱形拉裂位错约为 33 cm(图 3i)。该段地表破裂在个别地方左





(a)——谢家营盘断裂剖面,断裂走向 N8°W,倾向 NE,倾角 52°,图中红色箭头指示断裂所在位置;(b)——沙坝河边地裂缝及剖面,红色箭头指示断裂位置;(c)——大凹子北西向断裂陡坎(N27. 058 36°,E103. 407 05°,海拔 1 797 m),走向 N60°W,倾向 NE,倾角 81°,镜向北西;(d)、(e)——指示该断裂陡坎具有同震活动迹象;(f)——大凹子南东断裂剖面(N27. 056 52°,E103. 406 58°,海拔 1 792 m),走向 N30°W,倾向 NE,倾角 60°,图片中较长红色箭头指示断裂所在位置,较短箭头指示新生构造裂缝;(g)——(i)——大凹子北东东向地表破裂。

图 4 北西走向断层剖面(陡坎)同震活动(a—f)及北东东向破裂(g—i)证据

Fig. 4 Coseismic activity shown on NW striking fault sections(fault scarps) (a – f), and NNE direction surface ruptures(g – i)

旋位错量达 40~60 cm<sup>[32]</sup>。

3 发震构造分析

3.1 地震烈度长轴方位与地震裂缝

据中国地震局发布的云南鲁甸  $M_s$  6.5 地震烈度图<sup>①</sup>可知,地震极震区最高烈度为Ⅸ度,等震线长轴呈 NNW 至 NW 向展布(图 1),反映出引起地震灾害的地震动沿 NNW 至 NW 向衰减较 NEE 向要慢,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<sup>[33]</sup>。地震应急科考及震后重灾区断裂科学考察表明,鲁甸地震造成的地表强形变带主要沿龙头山镇的谢家营盘—光明村—王家坡一带,集中分布在鲁甸地震Ⅸ度高烈度区(图 2、5),总体走向 N20°W~N65°W,局部呈右阶左行走滑(倾滑、逆走滑)排列,左行走滑分量 30~35 cm<sup>[31]</sup>。野外调查发现,地表破裂带多沿老旧槽谷发育,且与山脊走向垂直,与断层剖面或陡坎走向联系紧密<sup>[4]</sup>。我们在王家坡北西方向的光明村小垭口槽谷边发现的长度

近 2 km 的地表破裂带上擦痕、菱形左旋拉张、田埂左旋位错等多处可见,该地表破裂带向北西方向延伸可与图 2 中图 4f 所示的断层剖面相连,野外观测发现,该断层剖面上新生构造裂缝直接断错了其上覆地层,由此表明该断层剖面与小垭口强变形带具有同震变形特征。

3.2 精定位余震序列分布及震源机制解

王未来等<sup>[34]</sup>采用双差定位方法对云南鲁甸  $M_s$  6.5 地震震后 16 d(2014-08-03—2014-08-19)的地震序列进行重定位研究。重定位结果显示,主震位于 27. 11°N,103. 35°E,震源深度约 15 km;地震序列主要呈倒“L”形优势分布,分为 SSE 向和近 EW 向两支,并均呈现近垂直的震源分布特征,显示此次地震为走滑型,并存在两个不同方向的破裂面。虽然此次地震发生于 NE 向昭通断裂及其反冲断裂(龙树断裂、大岩洞断裂)附近,但这些断裂均为逆冲

① 中国地震局官网. <http://www.cea.gov.cn/publish/dizhenj/464/478/20140807085249557322083/index.html>.

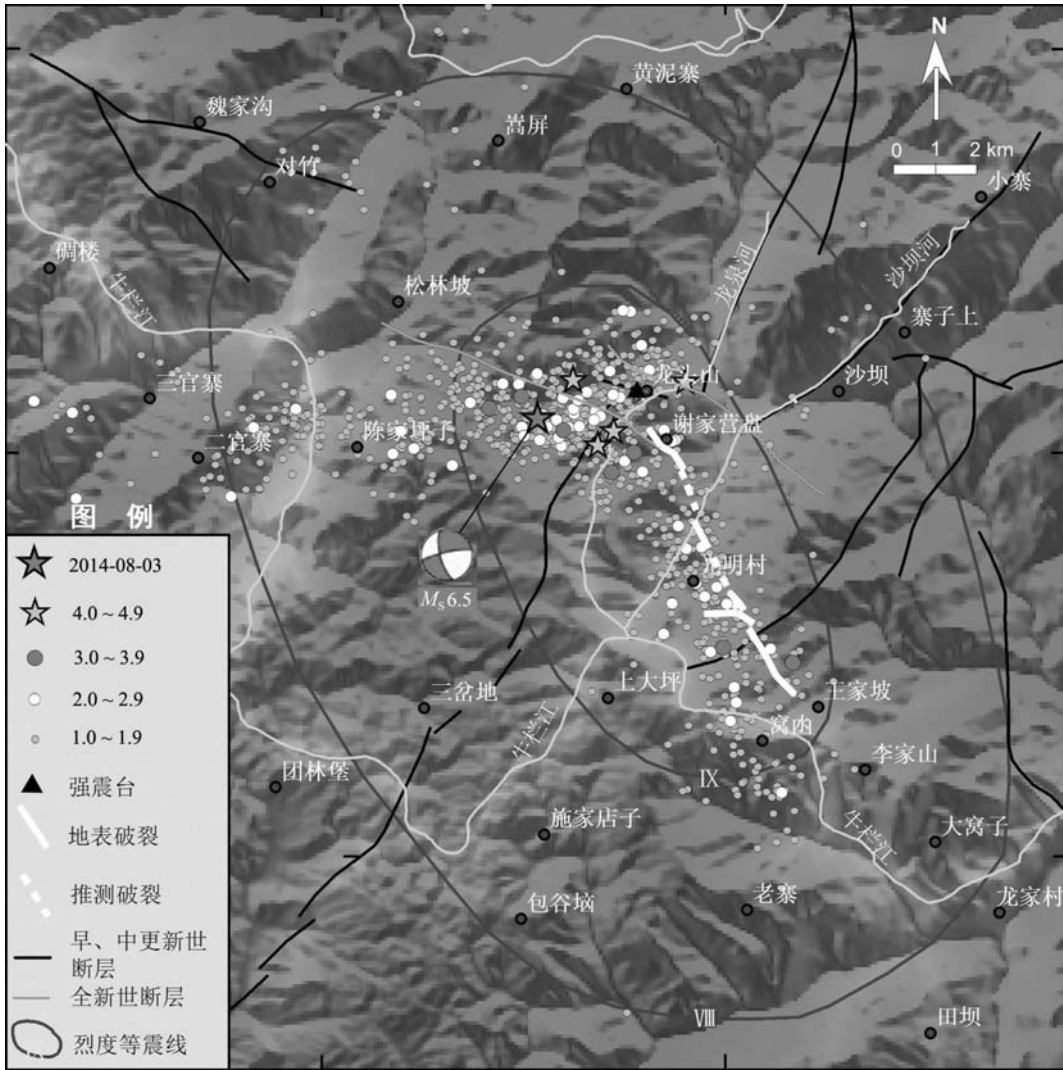


图 5 鲁甸地震综合图  
(精定位余震序列分布引自文献[34])  
Fig. 5 Comprehensive map of Ludian earthquake

型断裂,被排除了作为发震断裂的可能性;鲁甸地震发生在呈放射性分布的多条断裂的交汇部位,SEE向破裂分支与包谷垭断裂的方向一致,近EW向破裂分支与小河断裂南端的走向一致。鲁甸地震可能已将包谷垭断裂和小河断裂在深部贯通<sup>[34-35]</sup>。主震及4级强余震震源机制结果显示两个节面的走向分别为北东和北西方向,结合余震的空间展布认为北西向的节面(图5所示,据USGS主震震源机制解中的两个双力偶节面参数,节面I:走向72°/倾角84°/滑动角176°;节面II:走向162°/倾角86°/滑动角6°)为实际破裂面可能性大。基于此认识,此次地震主震应是一次高倾角左旋走滑型地震<sup>[36]</sup>。

3.3 近场强震动记录

位于极震区龙头山镇政府所在地的强震台(图

5中黑色小三角所示)获取的地面加速度时程,其东西向最大加速度峰值达948.5 cm/s<sup>2</sup>,是我国大陆在极震区内获取的第一条PGA近1g的近场强地面运动记录。龙头山强震动记录分析表明地震时地面运动位移轨迹图显示地面运动从20s开始(相对时间)到23s,运动主要呈北西向,为23~24s,运动从北西向转为北东向,并在24~25s间产生了强烈的北东向运动,此后主要呈北东方向运动<sup>[3]</sup>。

综合地表破裂特征,余震序列分布,烈度等震线长轴展布方向(图5)以及近场强震动记录显示最先是强烈的北西向运动,之后为强烈的北东向运动的位移特征分析<sup>[3]</sup>与张勇等<sup>[37]</sup>震源破裂过程分析都具有较好的一致性表明,鲁甸M<sub>s</sub>6.5地震发震断层为北西走向的包谷垭—小河断裂<sup>[11,38]</sup>。

4 发震断层古地震研究

4.1 探槽地点的选择

前文通过综合研究表明,2014 年 8 月 3 日鲁甸  $M_s$  6.5 地震的发震断裂为包谷垭—小河断裂。鲁甸地震之前,在该断裂带上没有 6 级以上地震仪器记录及历史记录(图 1),那么在地质记录中有没有强震发生过呢? 如果有,最近一次离逝时间是什么时候,震级强度如何,复发周期有多长? 鉴于此研究目的,在包谷垭—小河断裂带上小垭口段槽谷上开挖了一个大型探槽,探槽位置见图 2 中小垭口附近矩形框所示。此次地表破裂经过小垭口段时并不是全部从槽谷内通过,如图 6b 所示,地表破裂沿槽谷的东边通过,而没有进入槽谷,往北西发展时,正好从槽谷内经过,见图 6c 箭头指示位置为破裂经过的地方。因此,我们在选择探槽开挖地点时,选择了地表破裂经过槽谷内部地段如图 6a、c 所示位置。选择此处开挖探槽的理由是:(1)此处有新的松散沉积物,而且处在槽谷相对低洼的位置,有利于记录古地震事件;(2)虽然槽谷两边都是灰岩区,但两侧的植被比较丰富,有利于样品的采集;(3)鲁甸地震地表破裂经过此处,有利于我们研究最新地表破裂在深部剖面的反映及其与古地震事件的对比研究。

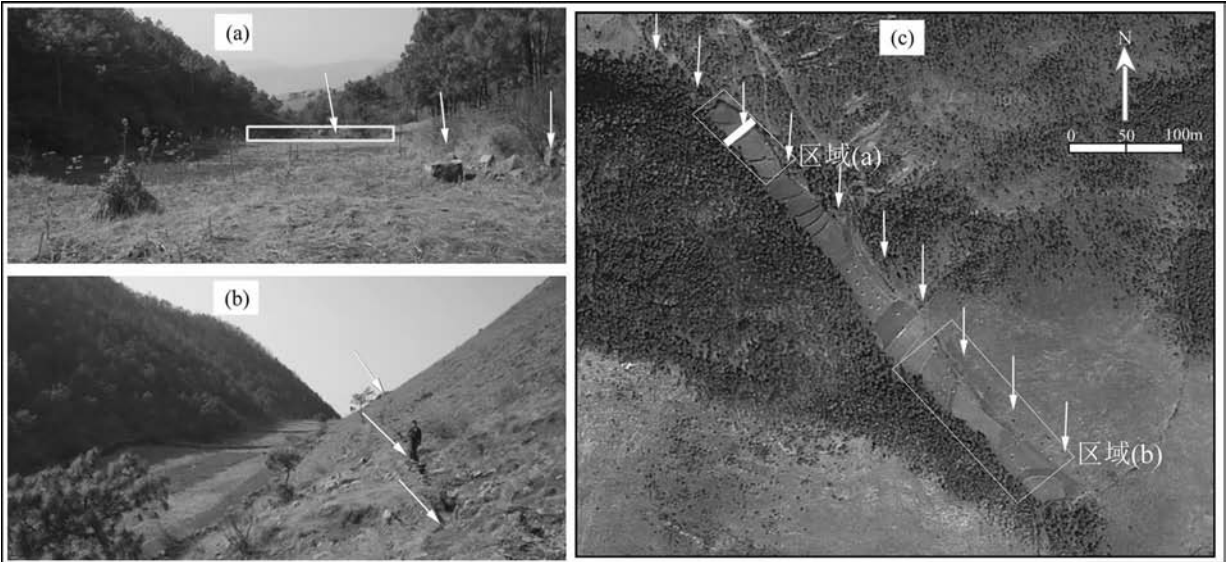
4.2 探槽剖面

(1)地层序列。小垭口探槽横跨槽谷,与槽谷近垂直(图 6a、c)。探槽全长为 16 m,平均深度为 2.5~3.0 m,探槽走向  $N55^\circ E$ 。整个探槽揭露出 9 套地层(U1—U9),详细地层描述按照由老到新的顺序分别描述如下:U1,角砾状灰岩,含方解石;U2,暗紫色(含铁)黏土;U3,浅褐色黏土,局部含棱角状灰岩砾石,风化后成黄绿色砂质,在探槽中平均厚度超过 1 m;U4,锈斑状风化残积层;U5,黄色或灰黄色黏土质粉砂质层,含炭屑;U6,浅灰色含碳质黏土,含个别角砾状灰岩砾石;U7,浅灰至灰褐色黏土层,含大量团块质及角砾状灰岩砾石;U8,灰黑色含碳质黏土;U9,耕作土。

(2)古地震事件分析。基于探槽剖面揭露的地层序列及古地震信息,我们发现该探槽至少揭露出 4 次地震事件,从老到新我们按 E1—E4 进行编号。事件分析如下:

E1:从探槽的南东壁(图 8a、b)第 10~12 m 可以清楚地看到一条紫红色条带将地层 U3 错断,该事件后形成一个相对低洼环境,静水堆积了黄色砂质层 U5。因此,限定这次事件的地层即为被断错的 U3 地层和盖层 U5。

E2:在探槽北西壁第 13 m 附近,见图 7b 黄色矩形框内及其放大图(图 7a)所示,断裂断错 U1 地层形成非常清楚的断裂面,断错 U3 黏土层虽然容

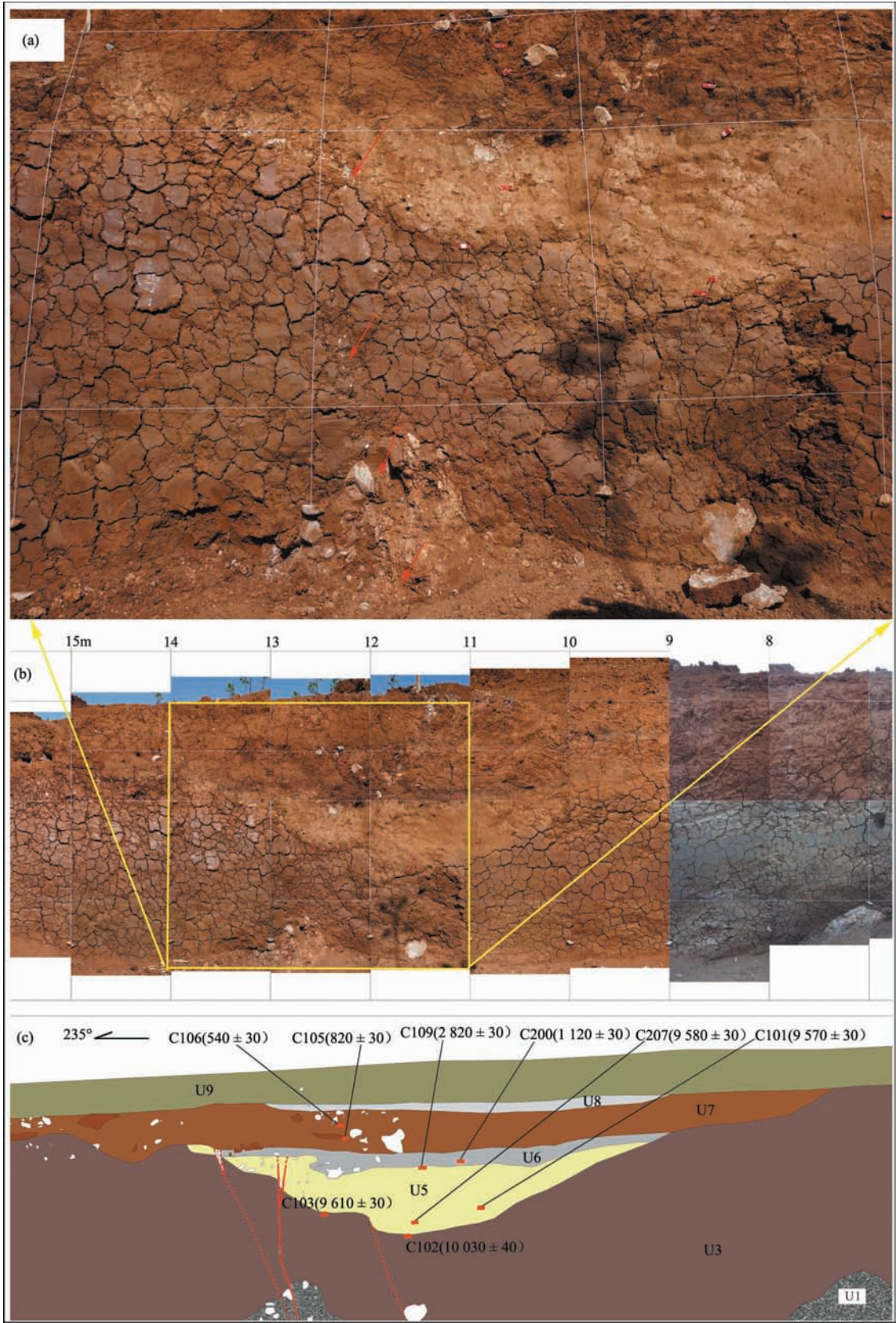


(a)—白色矩形框为探槽位置,镜向北西;(b)—槽谷及地表破裂照片,镜向北西;(c)—小垭口段整个槽谷地貌,白色填充小矩形框代表探槽位置。图中箭头指示地表破裂所在的位置。

图 6 小垭口槽谷地貌及探槽位置

Fig. 6 Xiaoyakou fault trough and the trench site



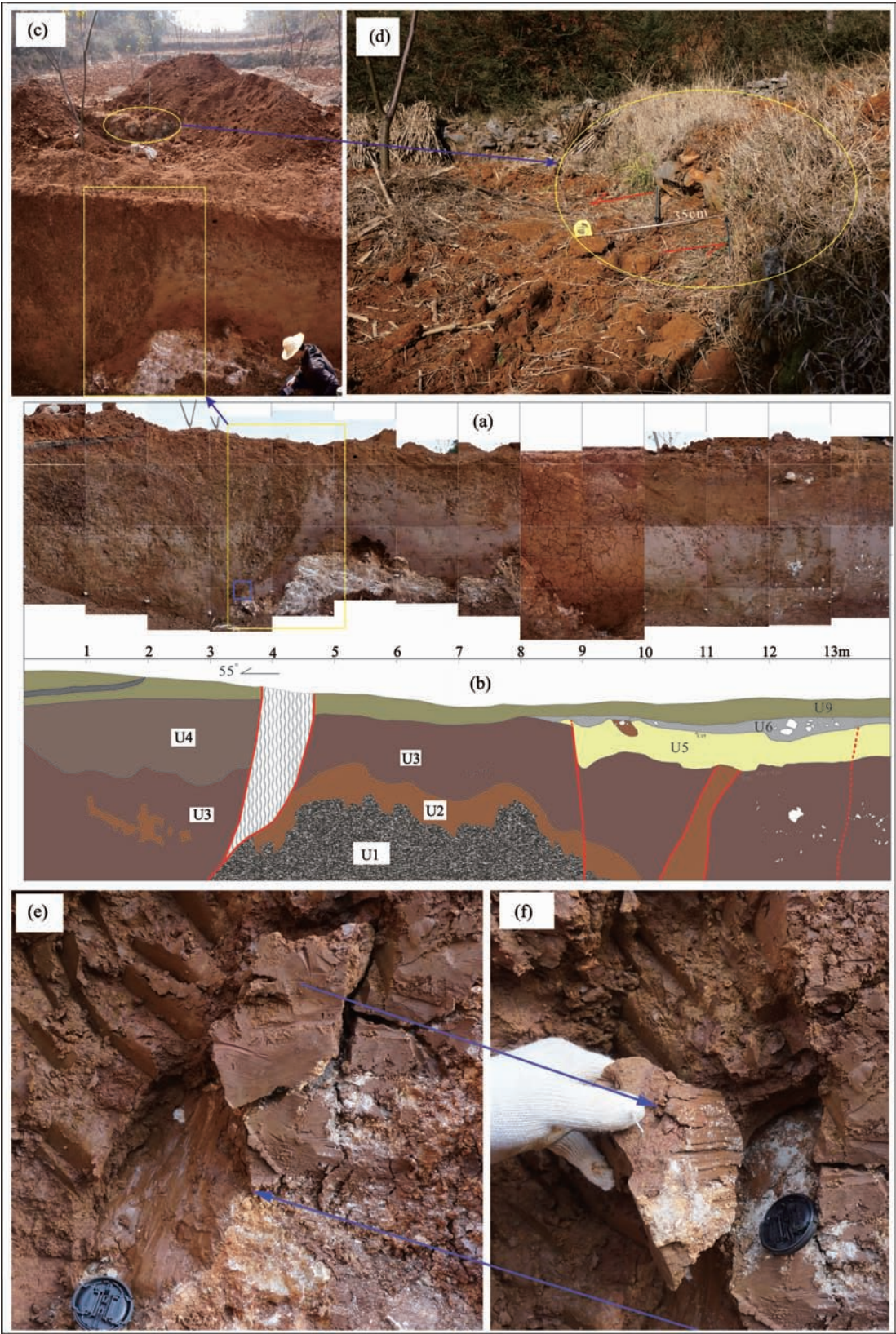


(a)—探槽北西墙(b)中黄色矩形框放大图,图中红色箭头指示断裂所在的位置;(b)—探槽北西墙;(c)—探槽北西墙(b)解译图,红色线条表示断裂,红色虚线表示推测断裂,红色小方块为C样品位置,C106(540±30)表示样品代号为C106的炭屑样品<sup>14</sup>C测年结果(a BP)。

图7 小垭口探槽北西墙原始照片及解译图

Fig. 7 The preliminary photograph of the NW wall of Xiaoyakou trench and the interpretation of the photograph





(a)—探槽南东墙 0~14 m 原始照片;(b)——南东墙(a)解译图,红色线条表示断裂,红色虚线表示推测断裂;(c)——探槽南东墙(a)中黄色矩形框在槽谷中的相对位置图;(d)——图(c)中椭圆形区域田埂左行位错图;(e)——图(a)中黄色矩形框内蓝色小矩形框中断层竖向擦痕;(f)——图(a)中黄色矩形框内蓝色小矩形框中断层近水平向擦痕。

图 8 小垭口探槽南东墙原始照片及解译图

Fig. 8 The preliminary photograph of the SE wall of Xiaoyakou trench and the interpretation of the photograph

易隐形,但事件在 U3 地层形成的灰白色小颗粒砾石定向仍很清楚(图 7a),同时断错 U5 黄色砂质层时也形成了砾石定向。事件断错 U5 地层后其顶界与地层 U6 底界呈不整合接触,U6 在断面右边具有明显的沉积加厚(图 7),其顶界相对平直。事件 E2 在探槽南东壁第 8~9 m 之间断错 U5 地层被 U6 地层覆盖也很清晰(图 8b)。因此,我们将事件 E2 定在 U5 地层沉积之后 U6 地层沉积之前,利用 U5、U6 地层来限定事件 E2。

E3:在探槽北西壁第 13~14 m(图 7),虽然断面不及 E2 清楚,但事件断错了浅灰色含碳质黏土层 U6,以及黄色砂质层 U5 冲到了 U6 之上(图 7a、c),其盖层 U7 大量团块状物质及角砾状灰岩砾石沉积,均表明 U6 地层之后有一次明显的地震事件。

E4:事件 E4 为 2014 年 8 月 3 日鲁甸  $M_s$  6.5 级地震。探槽的南东壁第 3~5 m 清晰地揭露出最新一次事件的断层面,在图 8a 黄色区域可以清楚看到断层带间的劈理面,该断裂与地表破裂有着很好的对应(图 8c、d)。此外,小垭口探槽揭露出多次地震事件证据还可以从断层擦痕中发现(图 8e、f)。我们沿图 8a 黄色矩形框左下角即蓝色框内断裂面开

挖,发现该断面早期可能具有倾滑运动证据(图 8e),以及明显的走滑运动证据(图 8f),我们判断走滑运动特征擦痕可能跟 2014 年鲁甸 6.5 级地震相关。

(3)古地震事件年代约束。在小垭口探槽剖面内我们采集到大量炭屑样品。前后送出 14 个样品到美国 Beta 实验室进行测试,对于炭屑样品采用加速质谱仪 AMS 方法,8 个样品获得明确的测年结果(见表 1)。表 1 和探槽解译图(图 7c)给出 Beta 常规测试年龄。我们通过 Oxcal 3. 10 软件(Bronk-Ramsey,1998)对常规年龄进行校正,分别给出了  $1\sigma$ (置信度为 68.2%)和  $2\sigma$ (置信度为 95.4%)的校正范围(表 1)。从样品测试的常规年龄看,样品测试的年代与地层序列对应较好,没有出现明显的地层年龄倒置现象(见图 7c 及表 1)。因此,我们认为样品测试结果比较可靠。

事件 E1:前文述及事件 E1 发生在地层 U3 之后,U5 之前,我们在地震 U3 顶界采得两个碳屑样品,C102 及 C103 作为事件 E1 底界年龄,地层 U5 共有 3 个样品作为顶界年代。利用 Oxcal 3. 10 对 Beta 实验室的测试年龄进行了校正,在  $2\sigma$  及 95.4%校正置信度下 U3 地层中两个样品校正年龄是 C102

表 1 小垭口样品测试结果及校正结果

Table 1 Radiocarbon dating ages and calibration result of samples from Xiaoyakou trench							
样品编号	实验室编号	$^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ (o/oo)	测试年龄结果 ( $\pm 1\sigma$ )/a BP	再校正年龄结果		样品描述	采样地层
				$1\sigma$	$2\sigma$		
XYK-C106	409577	-25.0	540 $\pm$ 30	1325—1340 AD	1310—1360 AD(29.4%)	charred material	U7
				1395—1430 AD	1380—1440 AD(66.0%)		
XYK-C105	409576	-23.6	820 $\pm$ 30	1205—1260 AD	1160—1270 AD	charred material	U7
XYK-C200	407992	-22.6	1 120 $\pm$ 30	890—905 AD	820—850 AD(1.8%)	charred material	U6
				910—975 AD	860—1000 AD(93.6%)		
XYK-C109	409578	-25.0	2 820 $\pm$ 30	1010—925 BC	1070—890 BC	charred material	U5
XYK-C101	407991	-24.3	9 570 $\pm$ 30	9130—8990 BC	9140—8790 BC	charred material	U5
				8920—8830 BC			
				9140—9110 BC			
				9090—9040 BC			
XYK-C207	407993	-25.7	9 580 $\pm$ 30	9030—8980 BC	9150—8800 BC	charred material	U5
				8930—8830 BC			
				9180—9110 BC			
YK-C103	411667	-25.1	9 610 $\pm$ 40	9080—9050 BC	9220—8820 BC(95.4%)	charred material	U3
				9020—8840 BC			
XYK-C102	411666	NA	10 030 $\pm$ 40	9740—9730 BC	9800—9370 BC(95.4%)	charred material	U3
				9760—9440 BC			

注:所有样品数据的处理、分析都在美国佛罗里达州迈阿密 Beta 公司进行,所有放射性碳的  $2\sigma$  年龄校正都由 Oxcal 3. 10 软件进行,年龄数据中距今年龄(BP)都相对于 1950 年而言。



(9800—9370 BC)及 C103(9220—8820 BC),U5 地层中的 3 个样品校正年龄分别是 C207(9150—8800 BC),C101(9140—8790 BC),C109(1070—890 BC),利用 Oxcal 3. 10 软件约束事件 E1 可能发生在 9190—8870 BC。

事件 E2:事件 E2 发生在地层 U5 之后,地层 U6 沉积之前。因此,我们通过地层 U5 中采集的 3 个样品 C207,C101,C109 年龄作为事件 E2 的底界年龄,以地层 U6 样品 C200 年龄(表 1)作为事件 E2 的顶界年龄,并利用 Oxcal 3. 10 软件对事件 E2 进一步约束为 1000 BC 至 900 AD(图 9)。

事件 E3:事件 E3 发生在地层 U6 沉积之后,U7 地层沉积之前。因此,我们通过地层 U6 地层样品 C200 年龄作为事件 E3 的底界年龄,利用 U7 中样品 C106,C107 年龄(表 1)作为顶界年龄来限定事件 E3,并利用 Oxcal 3. 10 软件对事件 E3 进一步约束为 910—1240 AD(图 9)。

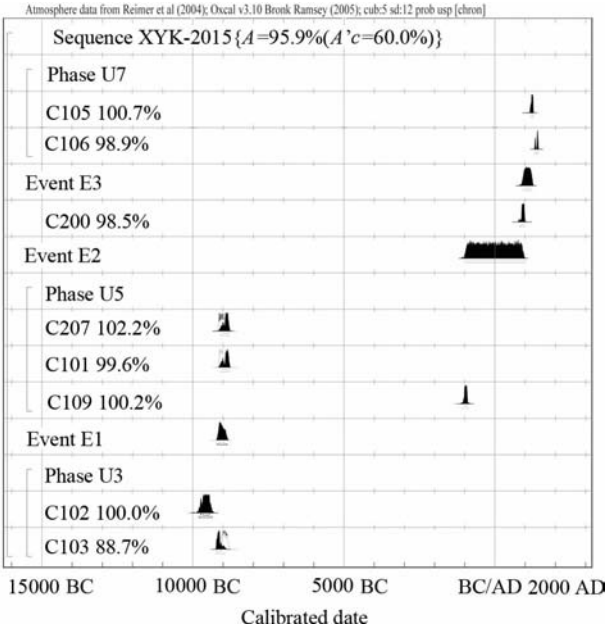


图 9 小垭口探槽<sup>14</sup>C 样品年代校正分布图  
Fig. 9 Oxcal software analysis of radiocarbon dates of samples from Xiaoyakou trench

5 结论及认识

基于详细的野外地质地貌调查、探槽工程及古地震研究,我们取得了以下几点结论及认识:

(1)2014 年鲁甸  $M_s$  6. 5 地震产生了自龙头山镇以南谢家营盘—光明村—王家坡一段长约 8 km 断续展布的地表破裂带,破裂带总体呈左行右阶排

列,伴有 30~35 cm 左行走滑分量,局部左旋分量达 40~60 cm。综合地质地貌证据、精定位余震序列分布、地震烈度长轴展布方向以及近场强震动记录位移特征表明,NW 走向具有明显左行走滑特征的包谷垭—小河断裂为 2014 年鲁甸  $M_s$  6. 5 地震发震构造,为徐锡伟等<sup>[11]</sup>、曾佐勋等<sup>[38]</sup>的类似结论提供了新的证据。

(2)小垭口段探槽剖面揭露出包括 2014 年鲁甸 6. 5 级地震在内全新世期间强地震遗迹 4 次,从老到新分别是事件 E1:9190—8870 BC;E2:1000 BC 至 900 AD;E3:910—1240 AD;E4 为 2014 年鲁甸 6. 5 级地震,最近两次事件 E3、E4 的复发间隔为 770~1 100 a。探槽剖面揭露出包括此次地震在内的多次地震遗迹表明,云南地区 6. 5 级强震可以产生地表破裂并可能在地质记录中留下遗迹。

(3)鲁甸地震地表破裂特征及断层剖面信息揭示包谷垭—小河断裂带呈左行右阶展布特征,其线性影像也表现为几何不连续,表明包谷垭—小河断裂带还未完全贯通,以分段破裂为主;探槽剖面揭露出古地震断面信息容易隐形以及最新破裂长约 8 km,表明该断裂带在历史活动中可能强度不大,属中强地震发震构造。

昭通市和鲁甸县防震减灾局对野外工作给予了大力支持和配合,常祖峰、许冲、林国梁、周挚、于江、张彦琪等同志参加了部分野外工作,冉勇康、陈立春研究员以及王虎博士给予了非常有益的指导,审稿专家提出的宝贵修改意见及建议对提高本文质量发挥了重要作用,在此一并表示衷心的感谢!

参考文献

[ 1 ] 房立华,韩立波,吴建平. 强余震震源机制解[EB/OL]. (2014-08-06)[2014-11-09]. <http://www.cca.gov.cn/publish/dizhen/468/553/100821/100831/20140806194711614124070/index.html>.

[ 2 ] CHENG J, WU Z L, LIU J, et al. Preliminary report on the 3 August 2014,  $M_w$  6. 2/ $M_s$  6. 5 Ludian, Yunnan - Sichuan Border, Southwest China earthquake[J]. Seismological Research Letters, 2015, 86(3): 750-763.

[ 3 ] 崔建文,刘琼仙,段建新,等. 2014 年云南鲁甸 6. 5 级地震强震动观测记录及初步分析[J]. 地震研究, 2014, 37(4): 542-548.

[ 4 ] 李西,张建国,谢英情,等. 鲁甸  $M_s$  6. 5 地震地表破坏及其与构造的关系[J]. 地震地质, 2014, 36(4): 1280-1291.

[ 5 ] 李响,刘维. 地科院专家:鲁甸地震为走滑型破裂地震[N].

- 中国国土资源报, 2014-08-09(2).
- [6] 倪思洁. 鲁甸余震带状分布明显切割断裂带[N]. 中国科学报, 2014-08-07(1).
- [7] 常祖峰, 周荣军, 安晓文, 等. 昭通—鲁甸断裂晚第四纪活动及其构造意义[J]. 地震地质, 2014, 36(4): 1260-1279.
- [8] ZHANG P Z, DENG Q D, ZHANG G M, et al. Active tectonic blocks and strong earthquakes in the continent of China [J]. Science in China: Series D, 2003, 46(Suppl 2): 13-24.
- [9] 邓起东, 高翔, 陈桂华, 等. 青藏高原昆仑: 汶川地震系列与巴颜喀喇断块的最新活动[J]. 地学前缘, 2010, 17(5): 163-178.
- [10] 邓起东, 程绍平, 马冀, 等. 青藏高原地震活动特征及当前地震活动形势[J]. 地球物理学报, 2014, 57(7): 2025-2042.
- [11] 徐锡伟, 江国焰, 于贵华, 等. 鲁甸 6.5 级地震发震断层判定及其构造属性讨论[J]. 地球物理学报, 2014, 57(9): 3060-3068.
- [12] 阚荣举, 张四昌, 晏凤桐, 等. 我国西南地区现代构造应力场与现代构造活动特征的探讨[J]. 地球物理学报, 1977, 20(2): 96-109.
- [13] 阚荣举, 王绍晋, 黄崑, 等. 中国西南地区现代构造应力场与板内断块相对运动[J]. 地震地质, 1983, 5(2): 79-90.
- [14] 韩德润. 马边—永善地震带构造形式及地震特征[J]. 地震地质, 1993, 15(3): 253-260.
- [15] 侯治华, 钟南才, 赵建荣. 马边—永善地震带及邻区新构造应力场和现代构造应力场的探讨[J]. 地壳构造与地壳应力文集, 2004(17): 16-23.
- [16] 朱成男, 陈承照. 1974 年云南省昭通地震破裂机制[J]. 地球物理学报, 1976, 19(4): 317-329.
- [17] 刘正荣, 雷素华, 胡素华. 1974 年 5 月 11 日云南省永善—大关地震[J]. 地球物理学报, 1977, 20(2): 110-114.
- [18] 刘树人. 菱形断块演化及其对滇东北地区铅锌矿床控制的初步分析[J]. 云南地质, 1986, 5(1): 39-45.
- [19] 张四昌, 王绍晋, 刁桂苓, 等. 1974 年永善—大关地震序列的破裂特征[J]. 地球物理学报, 1994, 37(增刊): 170-176.
- [20] 徐锡伟, 张培震, 闻学泽, 等. 川西及其邻近地区活动构造基本特征与强震复发模型[J]. 地震地质, 2005, 27(3): 446-461.
- [21] 闻学泽, 杜方, 易桂喜, 等. 川滇交界东段昭通、莲峰断裂带的地震危险背景[J]. 地球物理学报, 2013, 56(10): 3362-3373.
- [22] 任金卫. 则木河断裂晚第四纪位移及滑动速率[J]. 地震地质, 1994, 16(2): 146-155.
- [23] 宋方敏, 汪一鹏, 俞维贤, 等. 小江活动断裂带[M]. 北京: 地震出版社, 1998: 1-237.
- [24] RAN Y K, CHEN L C, CHENG J W, et al. Late Quaternary surface deformation and rupture behavior of strong earthquake on the segment north of Mianning of the Anninghe fault [J]. Science in China: Series D, 2008, 51(9): 1223-1237.
- [25] WANG H, RAN Y K, LI Y B, et al. A 3400-year-long paleoseismologic record of earthquakes on the southern segment of Anninghe fault on the southeastern margin of the Tibetan Plateau[J]. Tectonophysics, 2014, 628: 206-217.
- [26] 徐锡伟, 闻学泽, 郑荣章, 等. 川滇地区活动块体最新构造变动样式及其动力来源[J]. 中国科学: D 辑, 2003, 33(增刊): 151-162.
- [27] ZHANG P Z. A review on active tectonics and deep crustal processes of the Western Sichuan region, eastern margin of the Tibetan Plateau[J]. Tectonophysics, 2013, 584: 7-22.
- [28] HE H L, IKEDA Y, HE Y L, et al. Newly-generated Daliangshan Fault Zone: short cutting on the central section of Xianshuihe—Xiaojiang fault system[J]. Science in China: Series D, 2008, 51(9): 1248-1258.
- [29] 朱艾斓, 徐锡伟, 周永胜, 等. 川西地区小震重新定位及其活动构造意义[J]. 地球物理学报, 2005, 48(3): 629-636.
- [30] 闻学泽, 范军, 易桂喜, 等. 川西安宁河断裂上的地震空区[J]. 中国科学: D 辑, 2008, 38(7): 797-807.
- [31] LI X, XU X W, RAN Y K, et al. Compound fault rupture in the 2014  $M_s$  6.5 Ludian, China earthquake, and significance to disaster mitigation [J]. Seismological Research Letters, 2015, 86(3): 764-774.
- [32] XU X W, XU C, YU G H, et al. Primary surface ruptures of the Ludian  $M_w$  6.2 earthquake, southeastern Tibetan Plateau[J]. Seismological Research Letters, 2015, 86(6): 1622-1635. DOI: 10.1785/0220150038.
- [33] 张肇诚. 中国地震震例(1966—1975)[M]. 北京: 地震出版社, 1988: 1-222.
- [34] 王未来, 吴建平, 房立华, 等. 2014 年云南鲁甸  $M_s$  6.5 地震序列的双差定位[J]. 地球物理学报, 2014, 57(9): 3042-3051.
- [35] 张广伟, 雷建设, 梁姗姗, 等. 2014 年 8 月 3 日云南鲁甸  $M_s$  6.5 级地震序列重定位与震源机制研究[J]. 地球物理学报, 2014, 57(9): 3018-3027.
- [36] 房立华, 吴建平, 王未来, 等. 云南鲁甸  $M_s$  6.5 地震余震重定位及其发震构造[J]. 地震地质, 2014, 36(4): 1173-1185.
- [37] 张勇, 许力生, 陈运泰, 等. 2014 年 8 月 3 日云南鲁甸  $M_w$  6.1( $M_s$  6.5)地震破裂过程[J]. 地球物理学报, 2014, 57(9): 3052-3059.
- [38] 曾佐勋, 刘根深, 李献瑞, 等. 鲁甸地震( $M_s$  6.5)临震预测、中期预测及中地壳流变结构[J]. 地球科学: 中国地质大学学报, 2014, 39(12): 1751-1762.