

2014年鲁甸 M_s 6.5 地震龙头山镇场地 高密度电法勘探*

庞卫东, 杨润海, 陈俊磊, 李正光, 卢吉高

(云南省地震局, 云南 昆明 650224)

摘要: 鲁甸 M_s 6.5 地震造成大量房屋损毁及人员伤亡, 其中龙头山镇房屋损毁最严重、人员伤亡最多。地震后, 骡马口场地被选为恢复重建的主要场所。应用高密度电法分别对鲁甸震区龙头山场地、骡马口场地进行了勘探作业, 初步认为勘探场区内地质构造复杂, 断裂发育, 构造展布以北东、北西向为主。龙头山场地地层较为破碎, 场地内存在一洪积扇, 是造成其上建筑物破坏严重的重要因素; 骡马口场地地形开阔、地势平坦, 是地震恢复重建的有利场所, 场地内存在断裂活动的迹象, 建筑选址时应注意避让。同时, 认为高密度电法具有高效快捷, 资料分析处理相对简单, 便于震后断裂构造快速判断和场地快速评估。

关键词: 鲁甸地震; 龙头山镇; 高密度电法

中图分类号: P319.2

文献标识码: A

文章编号: 1000-0666(2016)04-0622-08

0 引言

2014年8月3日, 云南省鲁甸县发生 M_s 6.5 地震, 震中位于龙头山镇 (27.1°N , 103.3°E), 震源深度 12 km, 造成 617 人死亡, 112 人失踪, 数千人受伤, 震区多处山体滑坡、崩塌, 大量房屋损坏, 极震区烈度达 IX。位于极震区的龙头山镇是此次地震造成房屋损毁最严重、人员伤亡最多的地方, 死亡人数达 472 人。龙头山镇财政所内强震台记录到 EW 向加速度值 948 gal (近 1 个重力加速度), 是我国大陆迄今为止在极震区记录到的最大地面加速度峰值 (崔建文等, 2015)。震害调查表明, 在极震区龙头山城镇附近不大的范围内, 存在震害差异较大的现象, 对出现该现象的原因有必要进行深入研究。查明震区内断裂空间展布、场地条件, 可为龙头山镇恢复重建提供参考, 为有针对性地开展防震减灾工作, 在同样的环境下减轻地震灾害提供可借鉴经验。

高密度电阻率法作为地球物理勘探应用的一个分支, 早在 20 世纪 70 年代, 英国学者就着手研制电测深偏移系统。80 年代后期, 我国地矿等部

门也先后将理论和实际相结合的方式开展了该方法的研究和应用, 探讨完善相关方法及有关技术 (祁民等, 2006)。高密度电法与常规电阻率法工作原理基本相同, 在数据采集及操作方面具有操作方便、测点多、自动化采集、采集数据量大、工作效率高、解释方便、成本低等优点, 在国内各工程领域得到了广泛应用 (董浩斌, 王传雷, 2003; 王喜迁等, 2011; 杜良等, 2012; 王振兴等, 2012; 张光保, 2012; 杨海等, 2014; 陈军等, 2015)。本文采用高密度电法对震区龙头山镇场地进行探测, 并结合场地内勘探钻孔资料, 以期获得场区内断裂构造展布状态及地层分布情况, 为后期的工程建设提供科学翔实的地质资料, 也为防震减灾规划工作提供资料参考。

1 工区地质概况

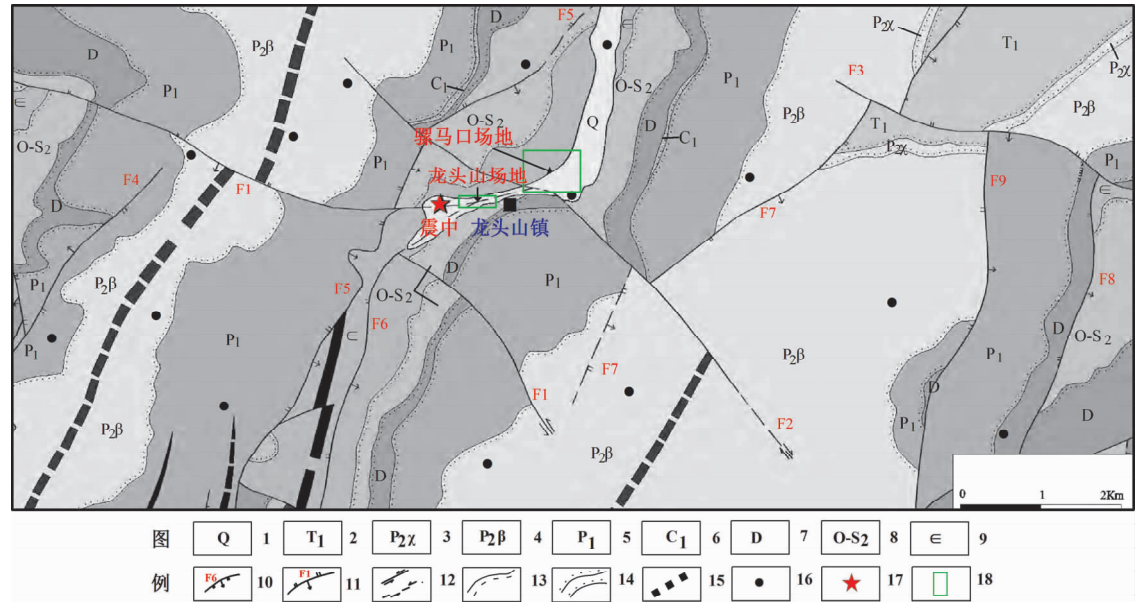
工区所处的鲁甸震区属于青藏高原东缘南北地震带的中南段, 地质构造复杂, 主要发育北东向及北西向断裂构造, 北东向构造主要为昭通—鲁甸断裂, 由 3 条右阶雁列展布的次级断裂组成, 倾向北西及南东 (徐锡伟等, 2003, 2005;

* 收稿日期: 2016-04-10.

基金项目: 鲁甸震区地震科学考察项目、云南省青年地震科学基金项目 (201401)、国家自然科学基金项目 (41574059) 和云南省地震局地震科技专项基金项目 (基于背景噪声的弱信号提取技术及中强震前后波速变化研究) 共同资助。

闻学泽等, 2013); 北西向断裂为包谷垭—小河断裂, 由数条左阶雁列展布的短小断层组成 (李克昌等, 1981)。工作区龙头山镇刚好处于昭通—鲁甸断裂和包谷垭—小河断裂相交汇部位, 地层主要由含碎块石粉质粘土, 白云质灰岩、粉砂质泥岩及白云质砂岩块石组成第四系松散堆积层 (Q_4)、二叠系下统栖霞组 (P_1q) 白

云质灰岩、中泥盆统曲靖组 (D_2q) 灰色白云质灰岩、中奥陶统上巧家组 (O_2q) 粉砂质泥岩及下奥陶下巧家组二段 (O_1q_2) 青灰色白云岩夹粉砂质泥岩等构成。区内北西向和北东向构造发育, 北西向构造主要有白石岩平移逆断层、骡马口平移断层, 北东向有龙泉河平移逆断层、小寨正断层等, 如图 1 所示。



1. 粉砂、粘土、砂粒; 2. 碎屑岩建造; 3. 类磨拉石建造; 4. 陆相火山岩建造; 5. 碳酸盐岩、碎屑岩、含煤建造; 6. 碳酸盐岩、含煤建; 7-9. 碳酸盐岩碎屑岩建造; 10. 正断层; 11. 逆断层; 12. 平移断层; 13. 整合岩层界线; 14. 不整合岩层界线; 15. 背斜、向斜构造; 16. 村镇; 17. 震中; 18. 场地位置

图 1 鲁甸县龙头山镇地质构造图 (据 1989 年 1:5 万地质构造图 G-48-27-D, 龙头山幅修改)
Fig. 1 Geological structure map of the Longtoushan Town, Ludian County (modified from 1:50000 geological structure map in 1989, G-48-27-D, Longtoushan)

2 常见岩土层电阻率

各种岩石地层在外加电场作用下其导电能力各不相同, 导电能力的强弱可以用岩石的电阻率表示, 而岩石电阻率只与导体的材料性质有关, 因此可以以岩石的电学性质差异为基础, 通过测量研究与这些电性差异有关的电场分布来查明地下地质构造。表 1 为常见岩石电阻率值。

3 野外数据采集

野外勘探工作采用重庆地质仪器厂生成的 DUK-2A 高密度电法测量系统, 该仪器由多路电极转换器 DUK-2 和多功能直流电法仪 DZD-6 组

表 1 常见岩石电阻率参数	
Tab. 1 Resistivity parameters of common rocks	
介质名称	电阻率/ $\Omega \cdot m$
粘土	10 ~ 30
砂质、粉质粘土	40 ~ 100
砾石、圆砾	50 ~ 300
粉砂质泥岩	100 ~ 800
砂岩	100 ~ 1 000
白云质灰岩	500 ~ 2 000
灰岩、白云岩	1 000 ~ 5 000

成。测量采用温纳装置, 最大隔离系数 20, 120 道接收, 5 m 电极距, 最大勘探深度达 100 m。本次勘探工作由于受场地及周边设施建筑限制, 测线布置只能因地制宜主要沿河谷布设, 同时考虑测

区内构造以北东和北西向为主,测线方向主要为北西和北东向,以分别控制相应构造。选取龙头山、骡马口 2 个场地进行勘探作业,共完成 5 条测线、12 个电测剖面的勘探。

4 资料解译与成果分析

高密度电阻率二维反演剖面图是高密度电法勘探产出的主要图件,也是资料解释的重要依据。电阻率反演所使用数据的处理采用骄佳技术公司开发的 GeogigaRTomo 高密度电阻率数据处理系统。对数据进行预处理及地形改正后,设置反演参数进行反演成像,一般反演 1~3 次,拟合误差控制在 8% 以下,最后得到二维反演电阻率剖面。根据

电阻率分布状况和常见岩石电阻率范围,将电阻率小于 $100 \Omega \cdot \text{m}$ 视为粘土或含粘土的沉积层(第四系松散堆积层)或断层破碎带, $100 \sim 300 \Omega \cdot \text{m}$ 为冲积泥沙和砾石,大于 $300 \Omega \cdot \text{m}$ 为基岩或较大干燥的漂砾等。工作场区地处较大断裂构造带上,多组断裂交会,岩石较为破碎,从反演获得的剖面上看,电阻率剖面整体较为凌乱。

4.1 龙头山场地

龙头山勘探场地(图 2)共布设了 2 条测线:LTS-L1、LTS-L2 呈十字交叉状展布,其中,LTS-L1 测线沿龙泉河自西南向东北布置,主要用于控制北西向的断裂构造,由 3 个电测剖面组成,测线长度 1 200 m; LTS-L2 测线沿龙头山干沟自东南向西北布置,测线长度 600 m。

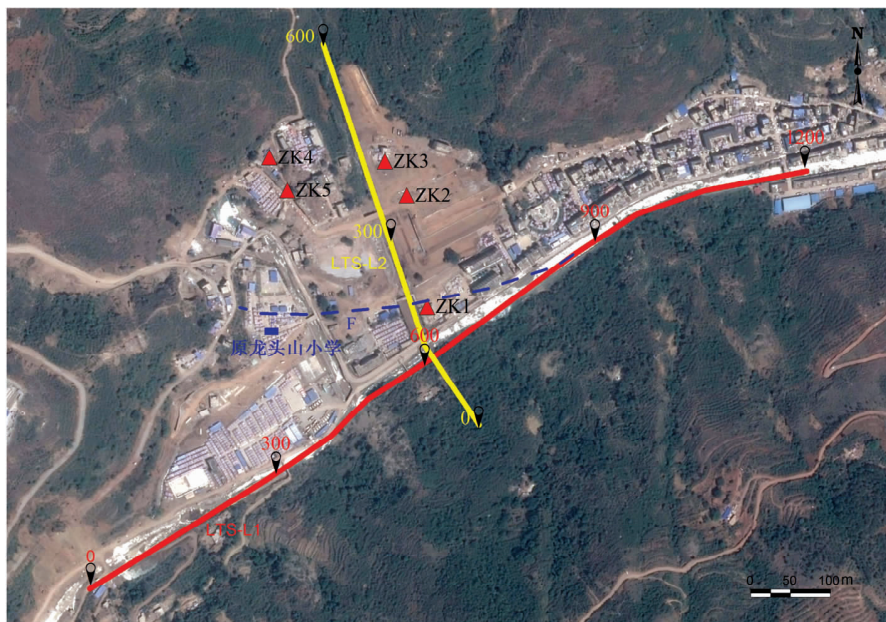


图 2 龙头山场地测线及钻孔位置示意图

Fig. 2 Sketch map of the distribution of measuring lines and the position of drill holes in Longtoushan site

由 LTS-L1 反演电阻率剖面(图 3)可见,该测线整体上可以分为 2 部分:西南部 0~800 m 段表现为相对高阻层,应为河流冲积泥沙、砾石及基岩,这与测线布置在龙泉河河床相对应,该段 200~400 m 存在一个电阻率相对低的区域,可能是受节理破碎影响(不排除存在断层破碎带的可能)造成;800~1 200 m 段剖面内电阻率普遍较低且埋深大,可能处于昭通—鲁甸断裂北西向包谷垱—小河断裂分支与北东向龙树断裂分支的交会部位(常祖峰等, 2014),图 3 中红色三角形标注区域为推测断层破碎带位置。从 LTS-L2 反演

电阻率剖面(图 4)可见,0~150 m 处测线位于龙泉河一侧的山坡上,电阻率剖面上表现为低阻层,应为坡积物的反映,其中 80~100 m 处的高阻层可能为基岩;150~240 m 处呈现为整体高阻。结合鲁甸地震科学考察钻探钻孔(图 2、4、5)所揭露资料,ZK1 钻孔位于龙头山镇龙泉中学篮球场,紧邻测线,其柱状图表明孔深 9 m 以下主要为砂岩、白云质灰岩等地层,对应层波速 $>500 \text{ m/s}$,该高阻段应该为测线下方砂岩、白云质灰岩等基岩的反映。同时钻孔岩心揭露断层角砾岩,推测该处断裂发育,可能为山前龙泉河断裂的反映,

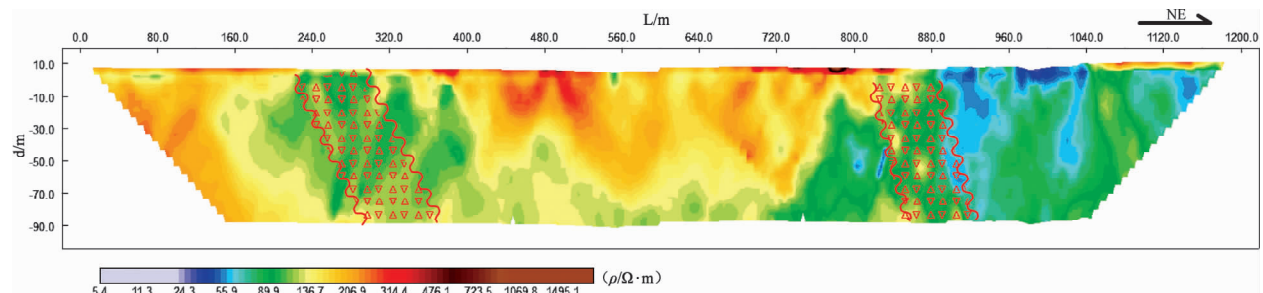


图 3 LTS-L1 测线反演电阻率剖面及推测断层位置

Fig. 3 Section graph of inversion resistivity of line LTS-L1 and the location of the supposed fault fracture zone

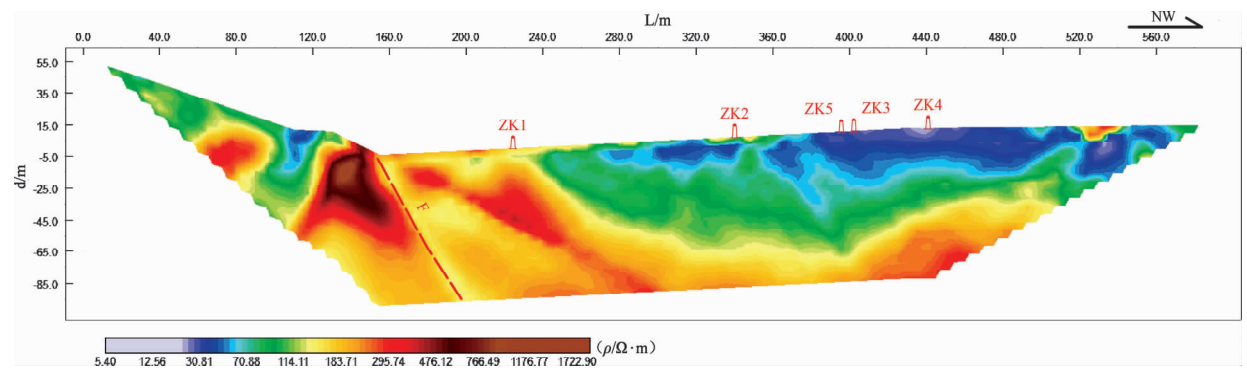


图 4 LTS-L2 测线反演电阻率剖面及推测断层、钻孔位置图

Fig. 4 Section graph of inversion resistivity of line LTS-L2 and the location of the supposed fault and drill holes

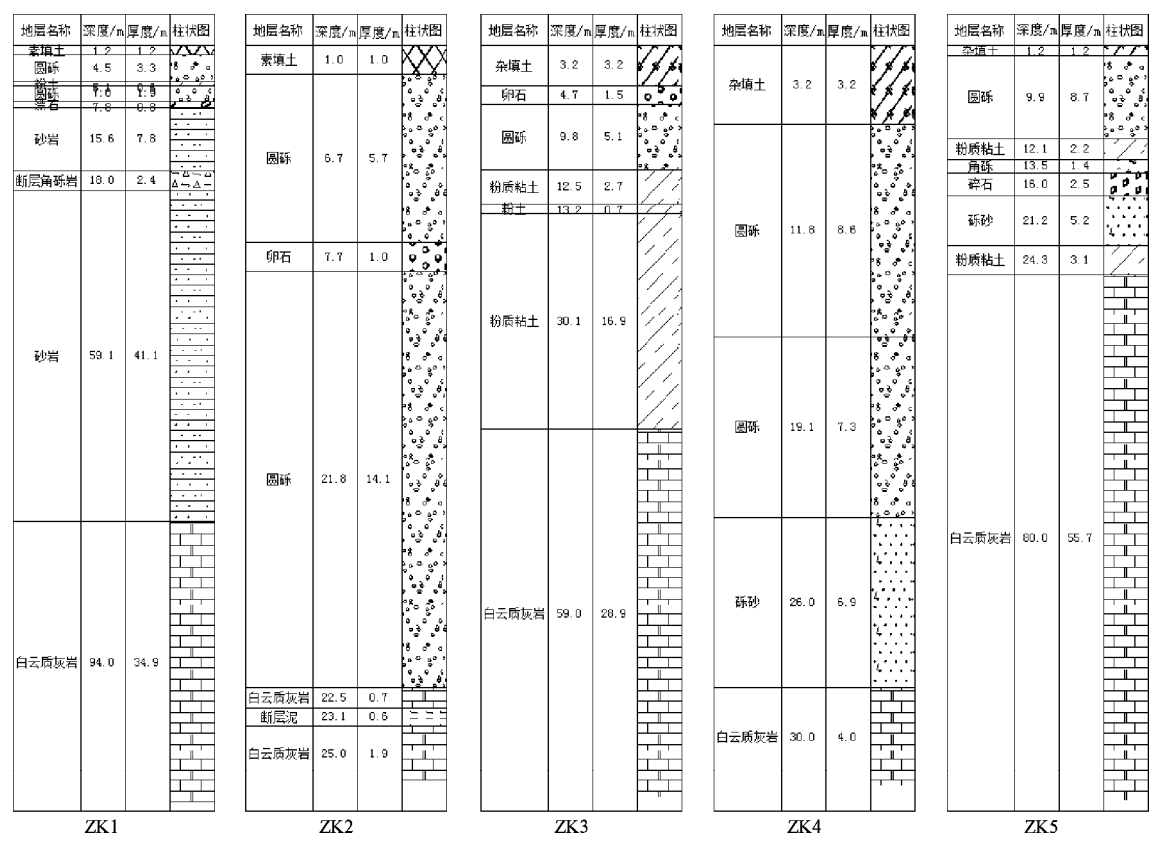


图 5 LTS-L2 测线两侧钻孔柱状图

Fig. 5 The drilling histogram on both sides of LTS-L2 line

其位置如图4红色虚线标示;200~600 m处电阻率低,表现为明显沉积凹陷,深度约20~70 m,该段测线右侧与龙头山镇政府、财政所对应,是房屋损毁最为集中、破坏最为严重的区域。有研究表明该区段为一洪积扇堆积区域(李西等,2014),测线两侧的钻孔资料(ZK2~5)也揭示该处堆积有数十米厚的粘土、圆砾、砂砾层(图5)。堆积层厚、场地条件差等不利因素在地震破坏中起到放大效应,再加上该位置地处北东向与北西断裂构造交会部位,这可能是该区域房屋损毁最为严重的原因所在。

结合 LTS-L1、LTS-L2 测线反演电阻率剖面及解译结果,将 LTS-L1 测线之 800 m 点与 LTS-L2 测线之 240 m 点连线,并将该连线延伸。房屋震害调查也表明,该线两侧龙泉中学、龙头山小学教学楼等建筑物均发生严重破坏、毁坏,推测

此线可能为昭通—鲁甸断裂经过龙头山场地的位置所在,如图2蓝色虚线所示。

对于龙头山场地,电法勘探结果及钻孔资料表明该场区地下地质构造复杂、断裂发育、地层较为破碎、连续性差。

4.2 骡马口场地

骡马口勘探场地(图6)位于龙头山勘探场地东北侧,是震后龙头山镇恢复重建的场地。该勘探场地布置了3条测线: LMK-L1、LMK-L2 及 LMK-L3 测线。LMK-L1 测线沿龙泉河北东—北北东向布置,为 LTS-L1 测线的延伸,由4个电测剖面组成,测线长度1500 m; LMK-L2 测线自东南向北西垂直于龙泉河布置,由2个电测剖面组成,测线长度900 m; LMK-L3 测线沿北东向骡马口农田布置,由2个电测剖面组成,测线长度900 m。

反演电阻率剖面(图7)表现的较为凌乱,整

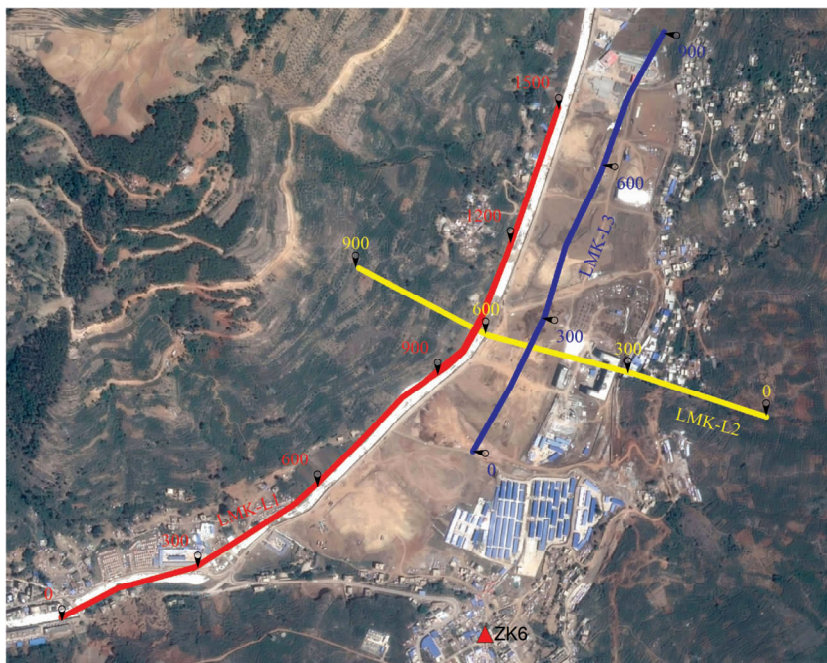


图6 骡马口场地测线及钻孔位置示意图

Fig. 6 Sketch map of the distribution of measuring lines and the position of drill holes in Luomakou site

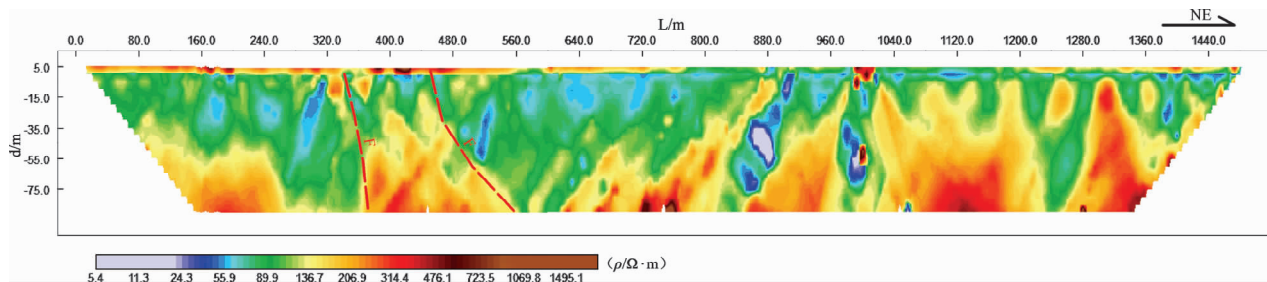


图7 LMK-L1 测线反演电阻率剖面及推测断层位置

Fig. 7 Section graph of resistivity inversion of line LMK-L1 and the location of supposed fault

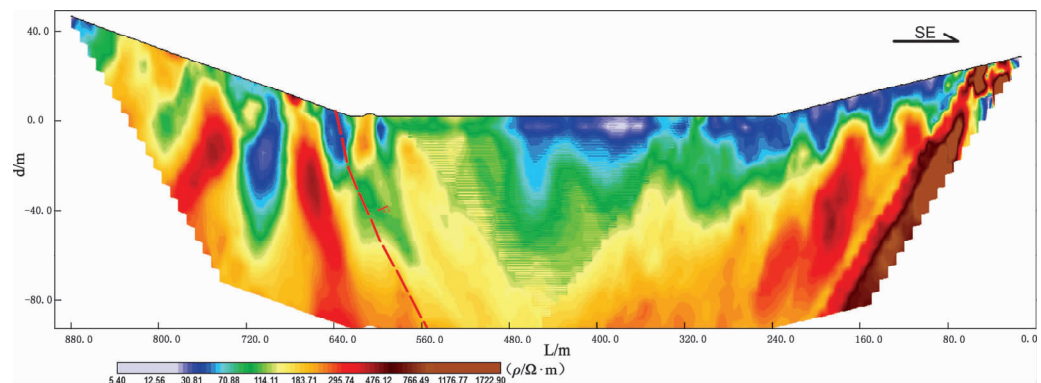


图 8 LMK-L2 测线反演电阻率剖面推测断层位置

Fig. 8 Section graph of resistivity inversion of line LMK-L2 and the location of supposed fault

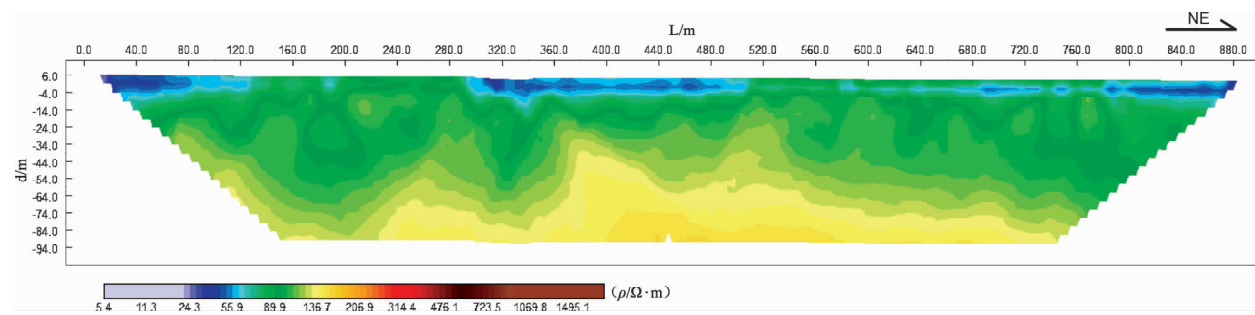


图 9 LMK-L3 测线反演电阻率剖面

Fig. 9 Section graph of resistivity inversion of line LMK-L3

体电阻率低，可能是测线沿北东向断裂破碎带布设的缘故，240~800 m 处电阻率低，且整体较深，从测线布设方向（北东）看，该处存在北西向构造破裂通过的可能，推测断层如图 7 虚线标示，应为骡马口断层的反应。从 LMK-L2 测线反演电阻率剖面（图 8）看，西侧 640 m、720 m 处存在北西走向、向下延伸较深、陡立的低阻带，显示西侧有断层活动迹象，并伴有同生沉积现象，推测断层分布如图 8 红色虚线所示。LMK-L3 测线反演剖面（图 9）内电阻率浅低深高，低阻层应为埋深 30~70 m 不等的松散堆积层的反应，未见明显的断裂构造活动痕迹。场区内 ZK6（图 6、10）钻孔资料表明场地存在有数十米厚的第四系松散堆积层的沉积，主要由粉质粘土、砾砂、含砾粉质粘土组成，其底部基岩为白云质灰岩。勘探结果表明骡马口场区地形较为开阔、地势平坦，北西走向骡马口断裂从场区穿过，通过电法勘探结合 LMK-L1 测线两侧地质地貌现象，推测沿该测线方向存在山前断裂展布的迹象，应为龙泉河断裂构造的反应，场地内部地层平坦、连续、沉积厚度稳定，上部主要为粘土、砾砂、含砾粉质粘土连续沉积，底部为白云质灰岩基岩。

地层名称	深度/m	厚度/m	柱状图
素填土	1.0	1.0	
粉质粘土	4.4	3.4	
粘土	6.5	2.1	
粉质粘土	9.2	2.7	
砾砂	10.8	1.6	
粘土	11.6	0.8	
砾砂	13.7	2.1	
粉质粘土	18.7	5.0	
白云质灰岩	26.5	7.8	
白云质灰岩	30.0	3.5	

图 10 ZK6 钻孔柱状图

Fig. 10 The drilling histogram of ZK6

5 结论与认识

通过本次野外高密度电法勘探和研究工作,对鲁甸 $M_s6.5$ 地震震区龙头山镇场地初步形成了以下结论及认识:

(1) 通过野外现场调查、踏勘及电法勘探工作,认为鲁甸震区龙头山镇场区内地质构造复杂,断裂较为发育,构造展布以北东、北西向为主,且各级断裂相互交会,地层较为破碎。勘探查明了昭通—鲁甸断裂经过龙头山场地位置所在。骡马口勘探场地,由于本次工作只有一条测线揭示到了骡马口断裂位置,未能给出该断裂的走向展布,同时,勘探结果表明沿 LMK-L1 测线存在山前断裂活动的迹象。

(2) 骡马口勘探场地相较龙头山场地地形开阔、地势平坦,区内第四系沉积层厚度相对稳定,有利进行震后恢复重建,但在进行建筑选址时应注意场地内不利位置的避让。

(3) 龙头山场区内存在一洪积扇,龙头山镇政府的建(构)筑物就建在其上,因其存在较厚松散堆积物产生的地震放大效应,致使该场所成为鲁甸 $M_s6.5$ 地震房屋损毁最为严重的区域。在今后的建筑选址及工程抗震设计应用中应该注意此现象。

综上,通过对鲁甸 $M_s6.5$ 地震极震区场地(龙头山场地、骡马口场地)开展高密度电法勘探,对区内断裂构造的展布状态及地层状况有了初步认识,并依据勘探结果对建筑物造成严重破坏的原因进行了分析。本研究为后期的工程建设提供了一定资料参考,也可为有针对性地开展防震减灾工作提供借鉴经验。勘探方法方面,高密度电法具有高效快捷,资料分析处理相对简单,便于震后断裂构造快速判断和场地快速评估。

两名审稿专家对本文提出了十分中肯的修改意见和建议,在此表示衷心的感谢!

参考文献:

- 常祖峰,周荣军,安晓文等. 2014. 昭通—鲁甸断裂晚第四纪活动及其构造意义[J]. 地震地质, 36(4): 1260–1279.
- 陈军,杨川,陈泽元. 2015. 地下隐蔽水库的高密度电法探测研究[J]. 地球物理学进展, 30(2): 934–939.
- 崔建文,刘琼仙,段建新等. 2014. 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, 37(4): 542–548.
- 董浩斌,王传雷. 2003. 高密度电法的发展与应用[J]. 地学前缘, 10(1): 171–176.
- 杜良,葛宝,朱丽丽等. 2012. 综合物探技术在隐伏断层探测中的研究与应用[J]. 工程勘察, 40(1): 81–85.
- 李克昌,侯学英,赵维城等. 1981. 滇东北地区地震地质特征[J]. 地震研究, 4(1): 53–59.
- 李西,张建国,谢英情等. 2014. 鲁甸 $M_s6.5$ 地震地表破坏及其与构造的关系[J]. 地震地质, 36(4): 1280–1291.
- 祁民,张宝林,梁光河等. 2006. 高分辨率预测地下复杂采空区的空间分布特征——高密度电法在山西阳泉某复杂采空区中的初步应用研究[J]. 地球物理学进展, 21(1): 256–262.
- 王喜迁,孙明国,张皓等. 2011. 江玉乐高密度电法在岩溶探测中的应用[J]. 煤田地质与勘探, 39(5): 72–75.
- 王振兴,李向全,侯新伟等. 2012. 太行山前严重缺水地区地下水勘查实践:以灵寿县丘陵区为例[J]. 南水北调与水利科技, 10(3): 127–132.
- 闻学泽,杜方,易桂喜等. 2013. 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, 56(10): 3362–3373.
- 徐锡伟,闻学泽,郑荣章等. 2003. 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:地球科学, 33(增刊1): 151–162.
- 徐锡伟,张培震,闻学泽等. 2005. 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, 27(3): 446–461.
- 杨海,葛良全,罗耀耀等. 2014. 高密度电法在茶园沟填埋场选址中的应用[J]. 地球物理学进展, 29(1): 447–451.
- 张光保. 2012. 褚家营巨型滑坡的高密度电法勘察及效果分析[J]. 地球物理学进展, 27(6): 2716–2712.

High Density Resistivity Exploration Method for Ludian $M_s6.5$ Earthquake in Area of Longtoushan Town in 2014

PANG Weidong, YANG Runhai, CHEN Junlei, LI Zhengguang, LU Jigao
(*Earthquake Administration of Yunnan Province, Kunming 650224, Yunnan, China*)

Abstract

The Ludian $M_s6.5$ earthquake on Aug. 3, 2014 caused severe damages to a large number of houses and heavy casualties. Among the earthquake affected area, the most serious damage to houses and the most casualties was in Longtoushan Town. After the earthquake, the Luomakou site was chosen to be the main place for restoration and reconstruction. We explored the Longtoushan and Luomakou sites in Ludian stricken area by high density resistivity method respectively, and found that the geological structure is complex, the fault tectonic develops mainly in NE and NW direction in the exploration area. The stratum is broken, and there is a alluvial fan in Longtoushan site, which is an important factor in causing serious damage to buildings. The Luomakou site with open and flat terrain is a favorable location for earthquake recovery and reconstruction. However, there exist the signs of fault activity in the site, so we should pay attention to avoid it when we select the construction site. Meanwhile, the high density resistivity method has the advantages of high efficiency and fast data analysis and processing, which is easy to handle, judge and evaluate the site rapidly.

Key words: Ludian earthquake; Longtoushan Town; high density resistivity method