

洪海春, 许汉刚, 宋峰, 章熙海, 李国浩. 2013. 2013 年芦山  $M_s7.0$  地震的地震地质灾害和发震断裂探讨. 地震学报, 35(5): 738-748.

Hong Haichun, Xu Hangang, Song Feng, Zhang Xihai, Li Guohao. 2013. Discussion on seismo-geological hazards induced by 2013 Lushan  $M_s7.0$  earthquake and its seismogenic fault. *Acta Seismologica Sinica*, 35(5): 738-748.

## 2013 年芦山 $M_s7.0$ 地震的地震地质 灾害和发震断裂探讨<sup>\*</sup>

洪海春<sup>\*</sup> 许汉刚 宋 峰 章熙海 李国浩

(中国南京 210014 江苏省地震局)

**摘要** 在对 2013 年 4 月 20 日芦山  $M_s7.0$  地震灾区大量地震地质灾害实地考察及调查的基础上,总结了滑坡、崩塌、砂土液化、地裂缝、地表变形等地震地质灾害的分布及发育特点,探讨了地震地质灾害与发震断裂之间的关系.极震区和重灾区的崩塌和滑坡特别严重,是地震巨大破坏作用的外在表现形式;砂土液化点较少,分布范围和规模有限;地裂缝和地表变形并非真正意义上的地震地表破裂带.根据极震区和重灾区地震地质灾害的分布和发育特点,认为芦山地震最有可能的发震断裂为龙门山前山断裂的双石—大川断裂,也有可能是龙门山山前隐伏断裂的大邑断裂,还有可能是双石—大川断裂与大邑断裂两者共同触发的结果.

**关键词** 芦山地震 地震地质灾害 发震断裂 双石—大川断裂 大邑断裂

doi:10.3969/j.issn.0253-3782.2013.05.012 中图分类号: TU753.8 文献标志码: A

### Discussion on seismo-geological hazards induced by 2013 Lushan $M_s7.0$ earthquake and its seismogenic fault

Hong Haichun<sup>\*</sup> Xu Hangang Song Feng Zhang Xihai Li Guohao

(Earthquake Administration of Jiangsu Province, Nanjing 210014, China)

**Abstract:** Based on the field survey and investigation on lots of seismo-geological hazards induced by Lushan, Sichuan Province,  $M_s7.0$  earthquake on April 20, 2013, this paper summarizes the distribution and development characteristics of landslide, collapse, sandy soil liquefaction, ground fissure and ground deformation. Meanwhile, the relationship between seismo-geological hazards and seismogenic faults of the earthquake is discussed. Collapse and landslide is specially serious in meizoseismal region and severely damaged region, which is exteriorly representative of the large destructive earthquake. The spots of sandy soil liquefaction are so few that their range and scale are limited. Ground fissure and ground deformation are not true sense of the earthquake surface rupture zone. According to the distribution and development characteristics of the seismo-geo-

<sup>\*</sup> 基金项目 国家自然科学基金青年科学基金项目(51208234)和中国地震局地震科技星火计划青年项目(XH12021Y)资助.

收稿日期 2013-06-14 收到初稿, 2013-08-15 决定采用修改稿.

<sup>\*</sup> 通讯作者 e-mail: haichunhong@126.com

logical disaster induced by Lushan earthquake in meizoseismal region and severely damaged region, we think that the Shuangshi–Dachuan fault, i.e., Longmenshan front-range fault, is the most possible seismogenic fault; and buried Dayi fault of the Longmenshan piedmont fault is also possible. On the other hand, the earthquake was possibly triggered by both of the faults.

**Key words:** Lushan earthquake; seismo-geological disaster; seismogenic fault; Shuangshi–Dachuan fault; Dayi fault

## 引言

2013 年 4 月 20 日 8 时 2 分, 在四川省雅安市芦山县( $30.3^{\circ}\text{N}$ ,  $103.0^{\circ}\text{E}$ )发生了  $M_s7.0$  地震, 震源深度约为 13 km. 中国地震局启动地震应急 I 级响应, 笔者根据江苏省地震局的安排, 当日奔赴芦山地震灾区, 进行了地震现场的烈度调查、震灾评估和地震科考等.

地震地质灾害是指在地震作用下, 地质体变形或破坏所引起的灾害. 地震地质灾害主要包括: ① 由于地震动作用导致的对工程有直接影响的地基基础失效, 包括饱和砂土液化、软土震陷等; ② 由于地震动作用导致的对工程有可能间接影响的工程场地失效, 包括岩体崩塌、岩体开裂、岩土滑坡等; ③ 由地震断层作用导致的地表错动、地裂缝与地面变形等地质灾害(卢寿德, 2006). 芦山地震极震区地震烈度高达 IX 度, VIII—IX 度重灾区主体呈北东方向展布. 地震地质灾害主要分布在极震区和重灾区, 距离宏观震中越近的区域, 其地震地质灾害越严重; 越远离宏观震中的区域, 地震地质灾害程度越轻. 在地震烈度衰减关系的短轴方向, 地震地质灾害点的数量明显减少或逐渐消失. 研究地震地质灾害的意义主要包括: ① 判断烈度; ② 判断宏观震中位置; ③ 评估地震地质灾害造成的人员伤亡及经济损失(胡聿贤, 1999); ④ 调查各类地震地质灾害的形态、大小及其空间展布等特征, 有利于发震构造的研究; ⑤ 有利于古地震和历史地震活动特点的研究.

世界范围内  $M_s \geq 6\frac{3}{4}$  的地震往往能在地表形成明显的地震破裂带, 也有少量的  $M_s \leq 6.5$  地震形成地表破裂(邓起东等, 1992). 由于本次芦山地震没有产生明显的地震地表破裂, 而用地质的方法判断发震构造最直接的证据是发现地震地表断层, 以便确定地震断层的同震活动参数(杨晓平等, 2008). 因此, 本文试图借助地震地质灾害的分布和发育特征(表 1), 探讨芦山地震的发震断裂.

表 1 地震地质灾害分布特征表

Table 1 Distribution of seismo-geological hazards induced by Lushan earthquake

地震地质灾害类型	经度/ $^{\circ}\text{E}$	纬度/ $^{\circ}\text{N}$	本文中插图
滑 坡	30.30321	103.04188	图 1
崩 塌	30.29120	103.04698	图 2
砂土液化	30.25000	102.91800	图 3, 4, 11
砂土液化	30.24930	102.91875	图 12
地裂缝	30.26137	102.84858	图 5, 6
地裂缝	30.25057	102.91882	图 9
地裂缝	30.31742	102.98902	图 17, 18
地表变形	30.31129	102.98805	图 7, 8
地表变形	30.25055	102.91880	图 10

本文在对芦山地震重灾区大量地震地质灾害实地考察及调查的基础上,总结了崩塌、滑坡、砂土液化、地裂缝、地表变形等地震地质灾害的分布和发育特征,探讨了地震地质灾害与发震断裂之间的关系。

## 1 芦山 $M_s7.0$ 地震的地震地质灾害

### 1.1 崩塌和滑坡

芦山  $M_s7.0$  地震发生在河流峡谷、断层谷地和坡度很陡的高山地区,极震区和重灾区出露的地层主要为古生界灰岩、晚三叠统含煤砂砾岩层、晚三叠统砂岩、晚白垩统一古近系砾岩层、震旦系一中三叠统海相地层、晚三叠统陆相地层等(张岳桥,李海龙,2010)。在地震力触发作用下,硬岩地层中通常发生的是崩塌类型的灾害,然而,软岩地层中通常以滑坡居多。当断裂两侧的岩石力学性质差别较大,地形、地貌差异显著时,地震触发产生的大量山体滑坡、基岩崩塌及滚石崩落是造成地震地质灾害比较严重的主要原因。崩塌和滑坡会造成道路损毁和阻塞、房屋摧毁、汽车砸坏、堰塞湖形成等,是典型的地震地质灾害。

滑坡和崩塌导致自然山体破碎斑驳,图1展示了芦山县宝盛乡政府大楼附近的玉溪河大桥西侧的新鲜滑坡体,同时,滑坡和崩塌也改变了山河的面貌;图2展示了芦山县宝盛乡玉溪河中被崩塌的滚石砸毁的中型卡车。芦山县宝盛乡凤头村有的直径达2 m左右的滚石从上百米的斜坡崩落下来,砸中坡体上的房屋,其中有的巨石从民居的屋顶贯穿至底层,导致居民死伤。



图1 新鲜滑坡体

Fig. 1 Fresh landslide



图2 被崩塌的滚石砸毁的中型卡车

Fig. 2 A truck smashed by huge rolling rock

从重灾区到极震区的山区公路两侧,崩塌和滑坡的地震地质灾害点从稀疏变得密集,规模呈现出从小到大的变化趋势,植被破坏由轻微破坏过渡到严重破坏。由于重灾区到极震区的地质构造发育、山高坡陡、雨水充沛,而且岩性脆弱、风化严重、岩体破碎,地质环境比较脆弱,使得崩塌和滑坡这两种形式的地震地质灾害特别严重,是地震巨大破坏作用的外在表现形式。

## 1.2 砂土液化

砂土液化是指在地震动作用下, 饱和砂土孔隙水压力升高, 其抗剪强度或对剪切变形的抵抗能力降低或完全丧失的现象。工程场地饱和砂土或饱和粉土由于地震而产生液化对工程建筑的危害是比较大的。砂土液化过程是饱水的砂、粉细砂在地震力往复震动下, 土层中孔隙水压增加, 颗粒发生位移, 内部结构重新改组的过程, 其结果必然会产生地面变形(胡聿贤, 1999)。因此, 研究砂土液化这种地震地质灾害现象具有重要意义。

在地震烈度为Ⅸ度的芦山县双石镇双河村, 堰坎组与林峡组之间的道路西北侧 500 m 处的树林里(包括竹子和水杉, 临近河道), 地震时喷砂冒水最严重。喷砂冒水的面积大约有 750  $\text{m}^2$ , 最大的喷砂孔的喷射直径约 3 m(喷砂孔孔径达到 30 cm)。根据水杉树上残留的砂粒判断喷射高度最低约 1.5 m, 但是, 根据目击村民的反映, 喷射高度最高达 2.0 m(图 3)。在相距约 100 m 的两处喷砂孔, 分别出现灰绿色和灰黄色两种不同颜色的砂土, 初步统计如图 4 所示的喷砂冒水点有 20—30 处。砂土液化主要表现为喷砂冒水孔, 多为圆形或椭圆形, 包括串珠状喷砂冒水孔、孤立的喷砂冒水孔、散布的喷砂冒水孔、层叠喷砂冒水孔等形式, 这与罗福忠等(2006)的研究成果是一致的。



图 3 喷砂孔的最大孔径(灰绿色的砂土)

Fig. 3 The biggest hole of sand boils with gray-green sand



图 4 喷砂孔喷出的灰黄色砂土

Fig. 4 Sand boils with gray-yellow sand

在芦山地震灾区, 沿着重灾区到极震区(从天全县仁义乡出发, 途经宝兴县灵关镇、芦山县双石镇、太平镇、宝盛乡、龙门乡、芦阳镇, 回到天全县城)进行砂土液化点调查, 仅在双石镇双河村发现了砂土液化现象, 其规模较大, 总体面积达到约 1000  $\text{m}^2$ 。有的科考队伍在雅安市雨城区上里镇箭杆林村(Ⅶ—Ⅷ度的过渡区域)发现了红色的砂土液化点。其主要原因在于场地的覆盖土层为粘土, 这种饱和和粘性土发生砂土液化的情况, 需要进一步深入研究。总体而言, 此次芦山地震造成的砂土液化点较少, 分布范围和规模有限, 对农村民居、农业生产和农民生活的破坏作用也比较有限。

## 1.3 地裂缝

地裂缝是指地震造成的没有明显错动的地面裂缝。在地震烈度为Ⅷ度的宝兴县灵关镇大鱼沟村, 少部分村民居住在山坡上, 大多数砖木结构房屋严重破坏或者毁坏, 房屋周边的坡体出现多条弧形地裂缝。此次地裂缝形成的原因主要是震动和重力作用, 不同地点的地裂缝走向各不相同, 裂缝最大宽度约 10 cm, 最大落差高度约 20 cm, 延伸长度有限, 最大延伸长度约 50 m(图 5, 6)。在极震区和重灾区的部分区域出现的这些地裂缝, 与边坡效应相关, 不是构造型地裂缝。





图 5 农村民居周边坡体弧形地裂缝

Fig. 5 An arc fissure around the rural building

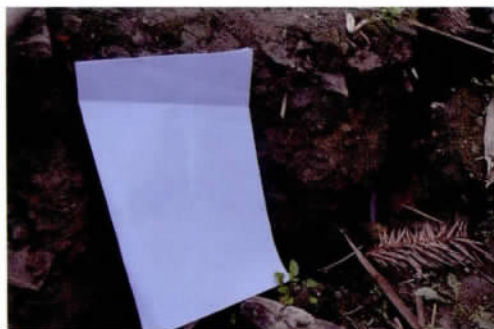


图 6 地裂缝落差高度约 20 cm

Fig. 6 Fissures with drop about 20 cm

在芦山地震灾区, 我们共发现弧形地裂缝 5 处. 然而, 弧形地裂缝的延伸方向不稳定, 其深度( $<1$  m)、宽度( $<20$  cm)、长度( $<100$  m)均比较有限, 与地质构造因素无关. 根据地裂缝带的分布及排列方式分析, 出现地裂缝的塌陷地段和“似正断层”型滑坡陡坎并未构成系列, 并非真正意义上的地震地表破裂带和构造型地裂缝.

#### 1.4 地表变形

在地震烈度为Ⅸ度的芦山县太平镇春光村附近, 水泥道路出现拱曲和小坎( $30.31129^{\circ}\text{N}$ 、 $102.98805^{\circ}\text{E}$ , 高程  $H=1039$  m). 相对于原始路面而言, 北西侧抬升, 变形最大高度约 20 cm, 水平错动约 5 cm, 推挤方向约为  $\text{N}10^{\circ}\text{E}$ , 显示出逆冲右旋错动的运动学特征(图 7). 在同一地点, 芦山地震发生后, 道路中间出现宽约 1 cm、长约 3 m 的裂缝. 这是此次途经芦山县清仁乡、宝兴县灵关镇、芦山县双石镇、太平镇、宝盛乡和龙门乡等极震区和重灾区野外调查过程中, 10 余处地表变形中最大的一处. 该处地面变形点距离芦山地震的微观震中( $30.3^{\circ}\text{N}$ 、 $103.0^{\circ}\text{E}$ )的直线距离仅 1.6 km. 该处地面变形点水泥道路两侧排水沟的水泥护堤出现弯曲与缩短现象. 同时, 震动和重力作用形成的道路两侧出现边坡张裂缝发育, 每层垂直落差约 20 cm, 滑坡陡坎总体下滑距离约 40 cm, 延伸长度约 2 m(图 8). 继续往两侧山体内部追踪, 未找到新的滑坡和地裂缝现象.



图 7 地表变形最大高度约 20 cm

Fig. 7 Ground deformation with largest height about 20 cm



图 8 滑坡体总体下滑约 40 cm

Fig. 8 A collapse generally falling about 40 cm

在芦山地震灾区, 沿着极震区和重灾区(调查路线同前)进行地表变形点调查, 共发现地表变形点 10 余处. 这些地表变形点的破坏形式主要是水泥道路的伸缩缝连接处出现拱

起、偏移和错动等。初步调查表明,地表变形这种地震地质灾害组成的形变点总体呈 NE 向点状分布,与中国地震局公布的地震烈度图中极震区和重灾区的长轴方向基本重叠。然而,地表变形和“似逆冲断层”并未构成系列,并非真正意义上的由地震作用产生的地表变形和地表破裂带。

## 2 芦山 $M_s7.0$ 地震的发震断裂讨论

### 2.1 双石—大川断裂(龙门山前山断裂)

双石—大川断裂为龙门山前山断裂南段的一条规模很大的区域性大断裂,其南东侧为一开阔的中新生界陆相盆地,北西侧为古生界地层组成的中高山区,在现代地貌景观和构造上都是一条自然分界线。该断裂切割了古生界、三叠系煤系以及白垩系砂砾岩等。断裂总体走向  $43^\circ$ , 倾向北西, 倾角  $45^\circ\text{—}65^\circ$  不等(杨晓平等, 1999)。在芦山县双石镇双河村附近出现的河床地裂缝、水泥道路变形、房屋毁坏、砂土液化等地质灾害现象,在北东方向呈线状成带分布,受灾严重和毁坏的地区基本位于双石—大川断裂带的两侧。

根据芦山县双石镇双河村堰坎组的村民反映,芦山地震发生后,4 月 22 日晚上大雨和 23 日白天中雨时,河床地裂缝并未导致其水位上升,这与地震前的雨后水位必然上涨形成强烈反差。河床出现多条相互接近平行的张性地裂缝,地裂缝的主体走向  $N47^\circ W$ , 多条地裂缝斜列组成的整体影响宽度约 2 m, 单条裂缝最大宽度约 15 cm, 其延伸长度约 50 m(图 9)。

横穿龙门山前山断裂谷地的水泥道路出现拱曲和小坎(破碎带),隆起幅度约 15 cm, 小坎走向  $N30^\circ E$ , 北西侧抬升、南东侧下降(图 10)。水泥道路破裂带南北两侧均出现喷砂冒水现象,西北侧冲沟壁上有喷砂冒水,西南侧喷出大量灰绿色和灰黄色河砂(图 3, 4)。在地震烈度为 IX 度的芦山县双石镇双河村,堰坎组与林峡组之间的道路变形带西北侧 500 m 处的树林里(包括竹子和水杉,临近河道),据当地村民反映,4 月 20 日芦山大地震的主震发生时,喷砂冒水(浑水)从 8 点 5 分开始,持续时间约 5 分钟。喷砂冒水的面积大约有  $750\text{ m}^2$ , 大小不同的喷砂孔成串珠状雁列分布,其总体走向约为  $N25^\circ E$ , 属于河流低阶地上的喷砂冒水现象(图 11)。再往西侧约 300 m 处,有浅埋煤系地层,在地震后有黑色污水冒出。芦山县双石镇双河村堰坎组道路变形带西南侧约 65 m, 村民房屋前方出现大量喷砂冒水现象,出现多条近平行走向裂缝,喷砂口成串珠状排列,主体走向  $N40^\circ E$ , 总体长约 10 m, 地面产生微变形(图 12)。



图 9 河床地裂缝

Fig. 9 Fissures of river bed



图 10 水泥道路变形

Fig. 10 Ground deformation of cement road



图 11 喷砂孔成串珠状分布(西北侧)

Fig. 11 Beads-shaped distribution of sand boils in the northwest



图 12 喷砂孔成串珠状分布(西南侧)

(引自韩竹军等, 2013)

Fig. 12 Beads-shaped distribution of sand boils in the southwest (after Han *et al.*, 2013)

芦山县双石镇双河村堰坎组和林峡组少数砖混结构房屋严重破坏, 内部承重墙体出现典型的“X”型裂缝, 宽度达到 15 cm, 屋顶瓦片基本被掀翻(图 13). 多数砖木结构房屋毁坏, 承重木构架多数严重破坏, 房屋结构全部或部分倒塌(图 14). 芦山县双石镇双河村林峡组的拱桥挤压隆起变形, 桥面出现宽约 1 cm 的贯穿型裂缝, 水泥桥面板内可见直径 12 cm 的螺纹钢筋弯曲变形. 桥上电缆的沙石垅受挤压缩短变形导致拱起与桥面脱离, 最高点距离桥面约 10 cm.



图 13 砖混结构房屋严重破坏

Fig. 13 Severely destroyed building of brick-concrete structure



图 14 砖木结构房屋毁坏

Fig. 14 Damaged building of brick-wood structure

总体来看, 芦山  $M_S7.0$  地震地表变形带表现不清楚. 双石—大川断裂附近的芦山县双石镇双河村堰坎组—林峡组为龙门山前山断裂谷地, 上述地面变形现象在其北东方向线状成带分布, 变形量级在 10—20 cm, 沿该断裂没有产生明显的地表破裂. 喷砂冒水现象发生在河流低阶地上或河漫滩上, 边坡附近张拉方向平行于最大坡向出现张性裂缝、滑坡体及其后缘和侧翼出现弧形陡坎等.

芦山  $M_S7.0$  地震的微观震中在双石—大川断裂附近, 该断裂是全新世活动逆断裂. 双石—大川断裂的地震活动相对强烈, 1970 年 2 月 24 日曾发生大邑西  $M_S6.2$  地震. 该地震在长石坝附近的极震区地表产生了北东和北西两个方向的地裂缝, 以北东向的地裂缝为



主, 长数十米, 一般宽 1—2 cm, 个别宽达 60—80 cm(唐荣昌等, 1991). 根据中国地震局发布的四川省芦山“4·20”  $M_s 7.0$  强烈地震烈度图, 芦山地震的宏观震中位于微观震中的西南侧约  $45^\circ$  方向, 距离微观震中( $30.3^\circ\text{N}$ 、 $103.0^\circ\text{E}$ )的直线距离约 4.5 km. 芦山大地震是汶川大地震后又一次发生在龙门山推覆构造带上的强破坏性地震(图 15)(徐锡伟等, 2013). 但是, 利用地貌错断和年代测定等资料分析, 龙门山断裂带南西段晚第四纪水平滑动速率为 2—3 mm/a(唐荣昌, 韩渭宾, 1993).

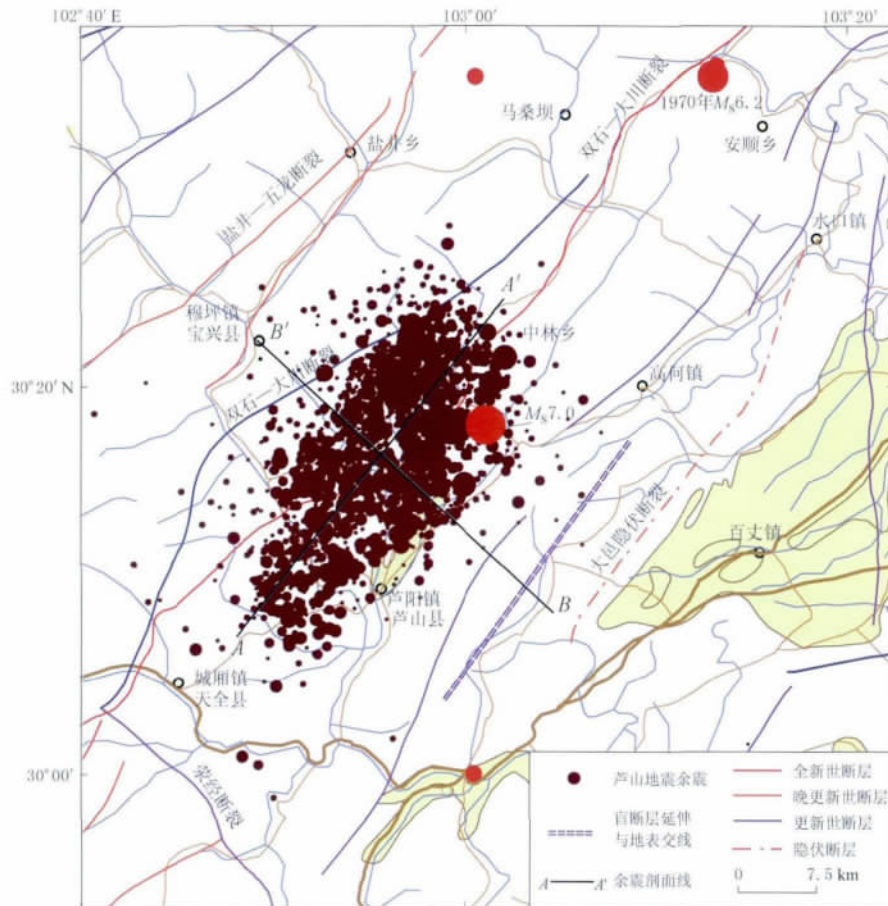


图 15 芦山  $M_s 7.0$  地震的地震构造与余震分布图(根据徐锡伟等(2013)修改)

Fig. 15 Seismotectonic and aftershock distribution in the epicenter of Lushan  $M_s 7.0$  earthquake (revised after Xu *et al.*, 2013)

截至 4 月 22 日 12 时, 根据中国地震局地球物理研究所采用双差定位方法提供的余震序列重新精确定位分布图资料(图 16), 202 次余震分布主体以宏观震中为中心, 呈椭圆形沿双石一大川断裂及其两侧展布, 余震呈  $N32^\circ\text{E}$  向密集条带状分布(徐锡伟等, 2013). 地震破裂长度约 35—45 km, 震源深度优势分布在地下 13—25 km. 横跨余震 NE 向密集带的 NW 向剖面图显示( $BB'$  剖面所示), 余震在 10—20 km 范围内出现一个缓倾角密集带(图 16). 震源深度剖面显示双石一大川断裂在深部向北西倾斜, 因此, 图 15 中  $AA'$  剖面的走向有可能就是芦山地震主破裂面的走向. 此外, 余震分布范围与中国地震局发布的四川



省芦山“4·20” $M_s7.0$  强烈地震烈度图中Ⅸ度区的范围相比要显得略微大一些.

综上所述, 根据已有的地震地质灾害发育和分布特点, 将此次芦山  $M_s7.0$  地震的发震构造推测为双石—大川断裂(龙门山前山断裂)具有较高的合理性.

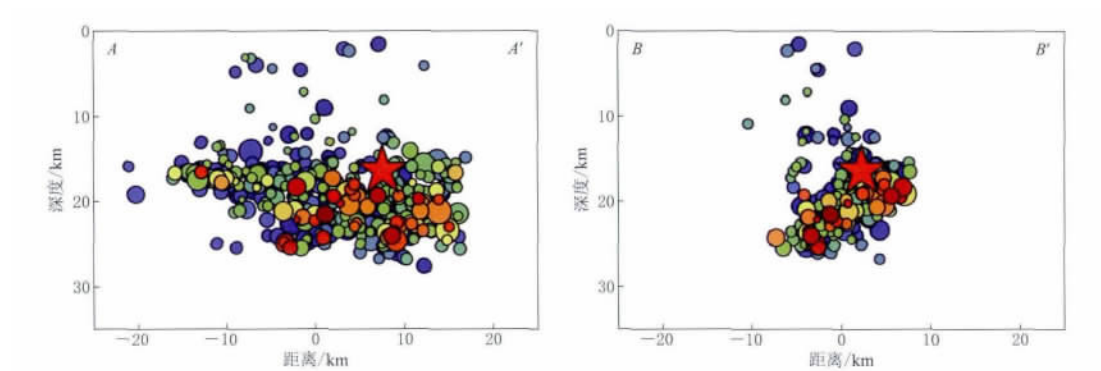


图 16 余震分布剖面图(引自房立华等, 2013)

Fig. 16 Vertical cross sections of aftershock distribution (after Fang *et al.*, 2013)

## 2.2 大邑断裂(龙门山山前隐伏断裂)

大邑活动断裂是龙门山山前隐伏断裂的重要组成部分, 走向  $N60^{\circ}-70^{\circ}E$ , 为隐伏的逆断裂. 由于大邑断裂很可能属于或部分属于龙门山前逆冲活动造成的盲断裂, 因此, 该断裂的最新活动迹象不易直接出露地表(董绍鹏等, 2008). 大邑断裂切割了Ⅱ—Ⅳ级河流阶地, 形成了断层陡坎、河道右行错断、砾石定向带、冲沟侧缘壁右行位错等地貌和断裂带特征, 具逆走滑运动性质(李勇等, 2006; Densmore *et al.*, 2007). 从地震地质角度分析, 2008 年汶川地震使龙门山断裂带中北段发生了破裂, 而其西南段保持不破裂, 表明这两段是相互独立的(张岳桥, 李海龙, 2010).

芦山县太平镇春光村附近的水泥道路出现裂缝( $30.31742^{\circ}N$ 、 $102.98902^{\circ}E$ , 高程  $H=949$  m), 相对于原始路基而言, 路基北侧向北偏东方向推挤, 裂缝的宽度约 20 cm, 向东变形最大位移量约 15 cm, 垂直错动约 5 cm, 裂缝深度约 100 cm. 水泥道路和东侧小路在地震时同时出现裂缝, 裂缝总体走向约  $N27^{\circ}W$ (图 17)(图中右下角为比例参照物). 在水泥道路西北侧的农田中出现宽约 5 cm 裂缝, 长度约 15 m. 农田中的裂缝仅有一条, 并没有雁列分布的多条裂缝, 而且, 裂缝在向西延伸方向基本逐渐消失. 自水泥道路的西侧农田裂缝至东侧小路裂缝, 总长度约 50 m(图 18)(图中右下角为比例参照物). 这些地裂缝和地表变形的痕迹并没有形成系列, 发育规模十分有限. 但是, 大部分地裂缝发育在平坦的农田中, 周围不存在斜坡地形. 地裂缝总体呈 NW 向分布, 与中国地震局公布的芦山  $M_s7.0$  地震烈度图中极震区和重灾区的短轴方向基本重叠, 但是与地震构造背景中的断层总体走向不一致(图 15), 断层效应也不明显.

2003 年 2 月 24 日巴楚—伽师  $M_s6.8$  地震中喷砂孔除在极震区广泛分布外, 沿地势较低洼地带以及沿河流密集地带, 直径 1—2 m 的喷砂孔多处可见, 最大的喷砂孔直径达 3 m, 喷出水柱高达 3 m. 由于砂土液化大量冒水, 多处积水成塘, 造成学校操场和大量农田被淹(罗福忠等, 2006). 此外, 2007 年 6 月 3 日宁洱  $M_s6.4$  地震的震中区产生大量有规律分布的地震地表裂缝和喷砂冒水点, 估计地震时喷砂孔水柱高度约 2 m(杨晓平等, 2008). 然而, 芦山县双石镇双河村喷砂孔孔径约 30 cm, 估计喷射高度最高为 2.0 m, 芦山

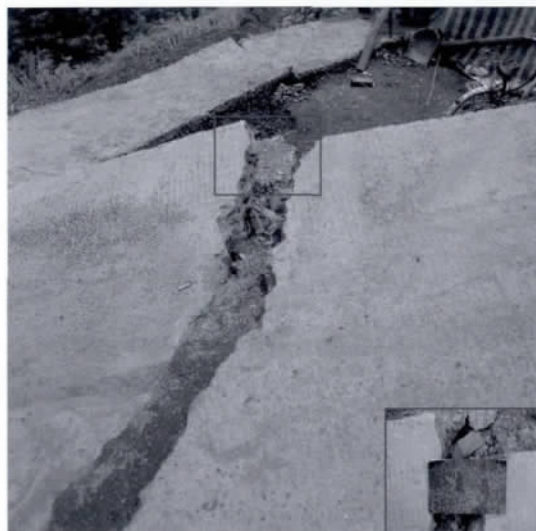


图 17 水泥道路和小路的裂缝

Fig. 17 Fissures in cement road and path



图 18 农田中的地裂缝

Fig. 18 Ground fissures in farm field

地震造成的砂土液化点较少, 分布范围和发育规模有限, 主要是发育在河流低阶地上或河漫滩上的喷砂冒水. 单纯从地震震级和能量上来说, 巴楚—伽师  $M_s6.8$  地震和宁洱  $M_s6.4$  地震均比芦山  $M_s7.0$  地震震级低、能量少, 但是, 这两次地震均在极震区和重灾区造成大量有规律分布的砂土液化, 其分布范围和发育规模均比芦山地震的砂土液化现象要严重很多. 这可能从另一个角度反映出此次芦山地震的发震断层为尚未出露地表、隐伏在地下的隐伏断裂.

研究表明, 宏观震中位置一般位于发震断层上或其附近, 在实际应用过程中可以认为宏观震中就在断层上(兰晓雯等, 2011). 总体上看, 大邑断裂是震中区的主要活动断层之一, 沿大邑断裂两侧地震地质灾害相对较重, 可能该断裂在地震期间有所活动, 但是, 活动迹象在地表出露不明显或者说规模小. 同时, 芦山  $M_s7.0$  地震的地震地表变形带和破裂带表现不清楚, 这与大邑断裂属于隐伏断裂是相对应的. 因此, 推测大邑断裂是此次芦山  $M_s7.0$  地震的发震断裂也具有一定的合理性.

### 3 结论

1) 双石—大川断裂沿线出现地裂缝、地表变形点、砂土液化区、建筑破坏严重、边坡张裂缝发育、滑坡或边坡坍塌现象明显, 特别是在芦山县双石镇两侧山体. 同时, 根据芦山  $M_s7.0$  地震的余震序列精确定位分布图, 可以看出余震主要展布在双石—大川断裂上, 且主要分布在主震的南侧, 主体方向为北东向. 因此, 双石—大川断裂最有可能是芦山地震的发震断裂.

2) 本次芦山地震时未产生明显的地震断层、地震鼓包、地震裂缝、地震沟槽等震源断层错动的痕迹, 未出现严格意义上的地震地表破裂带, 属典型的隐伏逆断层型地震. 其发震断层为尚未出露地表、隐伏在地下的隐伏断裂, 因此, 大邑断裂也可能是发震断裂.

3) 芦山  $M_s7.0$  地震震中地区的主要断裂是双石—大川断裂和大邑活动断裂等, 断裂

呈叠瓦状,而此次地震产生破裂的位置达到 13 km(震源深度),并且断裂带有一定的倾角,但尚未发现真正意义上的地震地表破裂。因此,双石—大川断裂(龙门山前山断裂)与大邑断裂(龙门山山前隐伏断裂)在地下深部(10—20 km 深处)可能相交,使得双石—大川断裂与大邑断裂收敛合并,共同触发了此次芦山地震。

本文中的图 12 由韩竹军、任治坤、王虎、王明明提供,图 16 由房立华、王长在、吴建平提供。在此一并表示感谢!

### 参 考 文 献

- 邓起东,于贵华,叶文华. 1992. 地震地表破裂参数与震级关系的研究[G]//《活动断裂研究》编委会编. 活动断裂研究理论与应用, (2). 北京:地震出版社: 247—264.
- 董绍鹏,韩竹军,尹金辉,李峰,安艳芬. 2008. 龙门山山前大邑断裂活动时代与最新构造变形样式初步研究[J]. 地震地质, 30(4): 996—1003.
- 房立华,王长在,吴建平. 2013. 余震序列精定位分布及深度剖面图[EB/OL]. [2013-06-20]. <http://www.cea.gov.cn/publish/dizhenj/468/553/100342/100354/20130422214113767883526/index.html>
- 韩竹军,任治坤,王虎,王明明. 2013. 来自地震现场的照片(五):四川芦山“4·20”7.0 级地震应急科考小组(韩竹军等)[EB/OL]. [2013-06-20]. [http://www.eq-igl.ac.cn/wwwroot/c\\_000000090002/index\\_2.htm](http://www.eq-igl.ac.cn/wwwroot/c_000000090002/index_2.htm)
- 胡聿贤主编. 1999. 地震安全性评价技术教程[M]. 北京:地震出版社: 154—169.
- 兰晓雯,田家勇,谢周敏,姜文亮,陆鸣,时振梁. 2011. 发震断层对微、宏观震中偏离的影响分析:以新疆地区为例[J]. 现代地质, 25(1): 114—121.
- 李勇,周荣军, Densmore A L, Ellis M A. 2006. 青藏高原东缘龙门山晚新生代走滑—逆冲作用的地貌标志[J]. 第四纪研究, 26(1): 40—51.
- 卢寿德. 2006. GB17741—2005《工程场地地震安全性评价》宣贯教材[M]. 北京:中国标准出版社: 51—53.
- 罗福忠,胡伟华,赵纯青,姜慧,尹力亚尔·阿不力孜. 2006. 巴楚—伽师 6.8 级地震地质灾害及未来地震地质灾害[J]. 内陆地震, 20(1): 33—39.
- 唐荣昌,韩渭宾主编. 1993. 四川活动断裂与地震[M]. 北京:地震出版社: 51—53.
- 唐荣昌,文德华,黄祖智,伍先国,林伟凡,陈国星,吴刚. 1991. 松潘—龙门山地区主要活动断裂带第四纪活动特征[J]. 中国地震, 7(3): 64—71.
- 徐锡伟,陈桂华,于贵华,程佳,谭锡斌,朱艾斓,闻学泽. 2013. 芦山地震震构造及其与汶川地震关系讨论[J]. 地学前缘, 20(3): 11—20.
- 杨晓平,陈立春,马文涛,陈慧,周挚,李岩峰,谢英情,施伟华,常祖峰. 2008. 2007 年 6 月 3 日宁洱 6.4 级地震地表变形的构造分析和解释[J]. 地震学报, 30(2): 165—175.
- 杨晓平,蒋溥,宋方敏,梁小华,陈献程,邓忠文. 1999. 龙门山断裂带南段错断晚更新世以来地层的证据[J]. 地震地质, 21(4): 341—345.
- 张岳桥,李海龙. 2010. 龙门山断裂带西南段晚第四纪活动性调查与分析[J]. 第四纪研究, 30(4): 699—710.
- Densmore A L, Ellis M A, Li Y, Zhou R J, Hancock G S, Richardson N. 2007. Active tectonics of the Beichuan and Pengguan faults at the eastern margin of the Tibetan Plateau[J]. *Tectonics*, 26(4): 1—17.

## 作者简介



郭 晓 中国地震局兰州地震研究所高级工程师。2005 年中国地震局兰州地震研究所固体地球物理学专业毕业，获硕士学位。主要从事卫星遥感在地震预测预报中的应用、数字化地震波资料处理与应用和地震活动性安全性评价等研究工作。中国地震学会会员。



徐 超 中国地震局地球物理研究所助理研究员。2006 年华中科技大学土木工程专业毕业，获学士学位；2009 年中国地震局地球物理研究所城市防灾减灾与防护工程专业毕业，获硕士学位；2012 年中国地震局地球物理研究所固体地球物理学专业毕业，获博士学位。主要从事地震动工程特性和结构抗震方面的研究。



洪海春 江苏省地震局高级工程师，国家二级注册地震安全性评价工程师，国家初级注册地震灾害调查评估师。2007 年河海大学岩土工程专业毕业，获博士学位。曾从事边坡岩体锚固工程方面的研究。现主要从事地震岩土工程、地震灾害预防和地震应急救援方面的研究与开发。江苏省地震学会会员。

注：孟令媛、刘瑞丰、蒋长胜、马钦忠、王玉石的简介分别见本刊：Vol. 33, No. 5；Vol. 25, No. 1；Vol. 27, No. 3；Vol. 26, No. 3；Vol. 32, No. 2。