

裴军令, 周在征, 李海兵, 等. 汶川地震断裂带多次地震活动新证据[J]. 中国地质, 2016, 43(1): 43-55.

Pei Junling, Zhou Zaizheng, Li Haibing, et al. New evidence of repeated earthquakes along Wenchuan earthquake fault zone[J]. Geology in China, 2016, 43(1): 43-55(in Chinese with English abstract).

汶川地震断裂带多次地震活动新证据

裴军令¹ 周在征¹ 李海兵² 王 焕² 刘 锋¹ 盛 美¹ 赵 越¹

(1. 国土资源部古地磁与古构造重建重点实验室, 中国地质科学院地质力学研究所, 北京 100081;

2. 中国地质科学院地质研究所, 北京 100037)

摘要:虹口乡八角庙出露完整的映秀—北川断裂带剖面断层岩, 高分辨率磁化率测试揭示出多个具有高磁化率特征的断层岩带。系统的岩石磁学分析证明一层褐色断层岩相对围岩具有最大的磁化率值, 存在新生成的磁铁矿和拥有相似天然剩磁(NRM)和非磁滞剩磁(ARM)强度衰减过程。高磁化率特征是含铁顺磁性矿物受到断层滑移过程产生摩擦生热作用生成磁铁矿所致。同时断层岩还获得了热剩磁, 记录了地震活动磁学信息。结合汶川地震科学钻探项目 1 号孔(WFSD-1)磁化率和岩石磁学研究结果, 说明映秀—北川断裂带包含多层具有高磁化率特征的断层岩, 暗示了多次强震的发生。具有高磁化率特征的断层岩可以作为判定地震活动的标志之一。

关键词:汶川地震断裂带; 映秀—北川断裂带; 断层岩; 磁化率; 摩擦生热

中图分类号: P315.2 文献标志码: A 文章编号: 1000-3657(2016)01-0043-13

New evidence of repeated earthquakes along Wenchuan earthquake fault zone

PEI Jun-ling¹, ZHOU Zai-zheng¹, LI Hai-bing²,
WANG Huan², LIU Feng¹, SHENG Mei¹, ZHAO Yue¹

(1. Key Laboratory of Paleomagnetism and Tectonic Reconstruction of Ministry of Land and Resources, Institute of Geomechanics, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100081, China; 2. Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China)

Abstract: High resolution magnetic susceptibility and detailed rock magnetism studies of the Yingxiu-Beichuan fault zone were conducted on the field section at Bajiaomiao, Hongkou Town. The systematic analysis reveals the existence of quite a few high magnetic susceptibility fault rock zones. A brown layer fault rock has the following features: (1) the highest magnetic susceptibility, (2) significant characteristics of magnetite new formation, and (3) similar demagnetization behavior of natural remanent magnetization and anhysteretic remanent magnetization. The principal mechanism responsible for the high magnetic susceptibility of the brown fault rock was most likely caused by the production of new magnetites from iron-bearing paramagnetic minerals. These new magnetites might be formed by frictional heating on slip planes along a seismic fault. Combined with the analytical result of the core from the first drill hole of the Wenchuan Earthquake Fault Scientific Drilling Project (WFSD-1), the authors hold that the

收稿日期: 2015-02-15; 改回日期: 2015-04-30

基金项目: 国家自然科学基金项目(41172177, 41330211)和国家科技支撑项目“汶川地震断裂带科学钻探”资助。

作者简介: 裴军令, 1977年生, 男, 博士, 副研究员, 构造地质专业, 主要从事区域构造及构造地貌研究; E-mail: jlpei@qq.com。

presence of high magnetic susceptibility fault gouges in the same country rock can be considered to be an indicator of earthquakes or seismic signatures. Quite a few layers of high magnetic susceptibility fault rocks indicate that strong earthquake repeatedly occurred along Wenchuan earthquake fault zone.

Key words: Wenchuan earthquake fault zone; Yingxiu–Beichuan fault zone; fault rocks; magnetic susceptibility; frictional heating

About the first author: PEI Jun–ling, male, born in 1977, associate professor, mainly engages in the study of tectonic geomorphology and neotectonics; E–mail: jlpei@qq.com.

Fund support: Supported by National Natural Science Foundation of China (No. 41172177, No. 41330211) and National Science & Technology Pillar Program “Wenchuan Earthquake Fault Scientific Drilling Project”.

龙门山是青藏高原东缘边界山脉,北起广元,南至天全,长约500 km,宽约30 km,呈北东–南西向展布,北东与大巴山相交,南西被鲜水河断裂相截。龙门山构造隆升的地球动力学机制主要有地壳通道流(Channel flow)^[1,2]、地壳挤压缩短变形(Crustal shortening)机制^[3]、地壳均衡反弹机制^[4]或者是多种机制共同作用^[5]。最近数值模拟研究认为地壳均衡反弹量对龙门山现今高程贡献率约占30%^[6],曾认为是气候因素驱动的侵蚀导致山脉快速隆升,最终使雅鲁藏布江绕海拔7782 m的南迦巴瓦峰形成落差大于2000 m的大拐弯峡谷最新研究证明是2.5 Ma以来南迦巴瓦块体加速构造隆升驱使大峡谷内的高侵蚀速率^[7],也支持多种机制共同作用模式。汶川地震造成的位移说明斜向逆冲作用可能是龙门山快速隆升的重要机制^[8],多年GPS的滑动速率^[9]、多个探槽^[10,11]及古地震构造地貌遗迹^[12]研究揭示龙门山断裂带具有千年尺度的大地震复发周期,并且探槽的研究说明汶川地震造成的变形主要是转化成了隆升的形式^[11]。但是开挖探槽通常只能通过辨认破裂面关系揭示距今较近历史时期内几次的古地震次数,只有能够证明地质历史上多次大地震的发生才可能导致造成龙门山隆升的垂直位移量。在四川省都江堰市虹口乡八角庙地区地表由于汶川地震后的洪水作用出露了完整的映秀–北川断裂带剖面^[13]。作为汶川地震的主发震断裂,该断裂带断层岩种类齐全,发育多层不同特征断层泥,厚度从几毫米到25 cm不等。根据断层岩分布特征,认为断裂带记录了近200次的地震活动和多个活动集中区域^[13]。同样,汶川地震科学钻探项目在该位置附近的2个钻孔岩心也揭示了完整的断裂带,包括多种类断层岩,不同特征、厚度的多层断层泥^[13–15]。深部岩心与地表露头揭示的百余米厚、具有多个应变带核心特征的映秀–北川断裂带

中包含多层断层泥极可能是10~15 Ma以来长期地震活动及其演化的结果,长期多次的地震活动造就了龙门山的崛起^[15]。断层泥形成可以是地震过程的快速滑移作用生成,也可能是断层蠕滑作用等非地震因素生成^[16],如果能够确定以上发现的断层泥确实是地震过程滑移作用所产生,那么相对探槽所揭示的较近时期内几次地震记录,整个映秀–北川断裂带由地震滑移作用产生的多层断层泥可以将地震记录拓展至映秀–北川断裂最早活动时期。

通过断层泥的物理特征描述、矿物成分、粒度分析、显微结构构造、分形研究等方法,可以在一定程度上间接分析推断断层泥与地震活动的关系。近年将岩石磁学方法应用到断层岩研究中取得突破性进展,在地震引起的断裂活动过程中由于摩擦生热造成的高温可能引起矿物变化或新的磁性矿物生成,从而导致滑移带附近断层岩发生磁性矿物的转变,导致多个岩石磁学参数变化^[17–21]。虹口乡八角庙剖面中发育于彭灌杂岩中的假玄武玻璃及碎裂岩的研究则说明岩石磁学方法可以有效地证明断层岩是否经历了摩擦生热作用^[22]。映秀–北川断裂带赵家沟等地表破裂断层泥岩石磁学研究说明多与地震活动关系密切^[23–25],汶川地震科学钻探一号孔岩心研究显示除汶川地震主滑移带外,还有多层断层泥具有明显高磁化率特征^[26]。虹口乡八角庙地表露头揭示映秀–北川断裂带中包含的多层断层泥是否同样具有高磁化率特征正是本文主要研究目的,并在此基础之上探讨龙门山隆升过程。

1 地质背景

青藏高原东缘龙门山断裂带,由3条主要逆冲断裂组成,由西北向东南分别为:汶川–茂县断裂(后山断裂)、映秀–北川断裂(中央断裂)和安县–灌县断裂(前山断裂)^[27]。龙门山不仅是青藏高原东

部和成都平原地形地貌的界限,也是中国重要的地震活动带之一^[28]。龙门山断裂带沿汶川—茂县断裂发育一条早白垩世的大型韧性拆离带,该拆离带主要导致了龙门山彭灌杂岩体和宝兴杂岩体的构造挤出^[29]。龙门山逆冲断裂带的运动性质为走滑—逆冲型,中新世以来表现为脆性逆冲—右旋走滑作用为特征^[32-35]。龙门山快速崛起发生在最近5~10 Ma,并经历了多幕式的隆升过程,其中发生在上新世早期(4.0~3.6 Ma)和上新世晚期(大约2.5 Ma)和早、中更新世(1.2~0.8 Ma)是最重要的构造变动幕,在龙门山山前的成都平原分别记录了3套冲积砾岩

沉积:上新世的大邑砾岩、早更新世的名山砾岩和中更新世的雅安砾岩^[27]。

2008年5月12日汶川地震是世界上发生在陆内的最大逆冲型地震之一,沿映秀—北川断裂和灌县—安县断裂形成同震地表破裂带(图1),发震断裂机制主要为逆冲作用(由NW向SE逆冲),沿映秀—北川断裂带的同震地表破裂带伴随右旋走滑^[4,8,9,32-35]。虹口乡八角庙段映秀—北川断裂带主要涉及地层为彭灌杂岩和上三叠统须家河组。彭灌杂岩呈透镜状分布于北自汶川、南达映秀一带,位于北川—映秀断裂和汶川—茂汶断裂之间,总体呈北东—南西

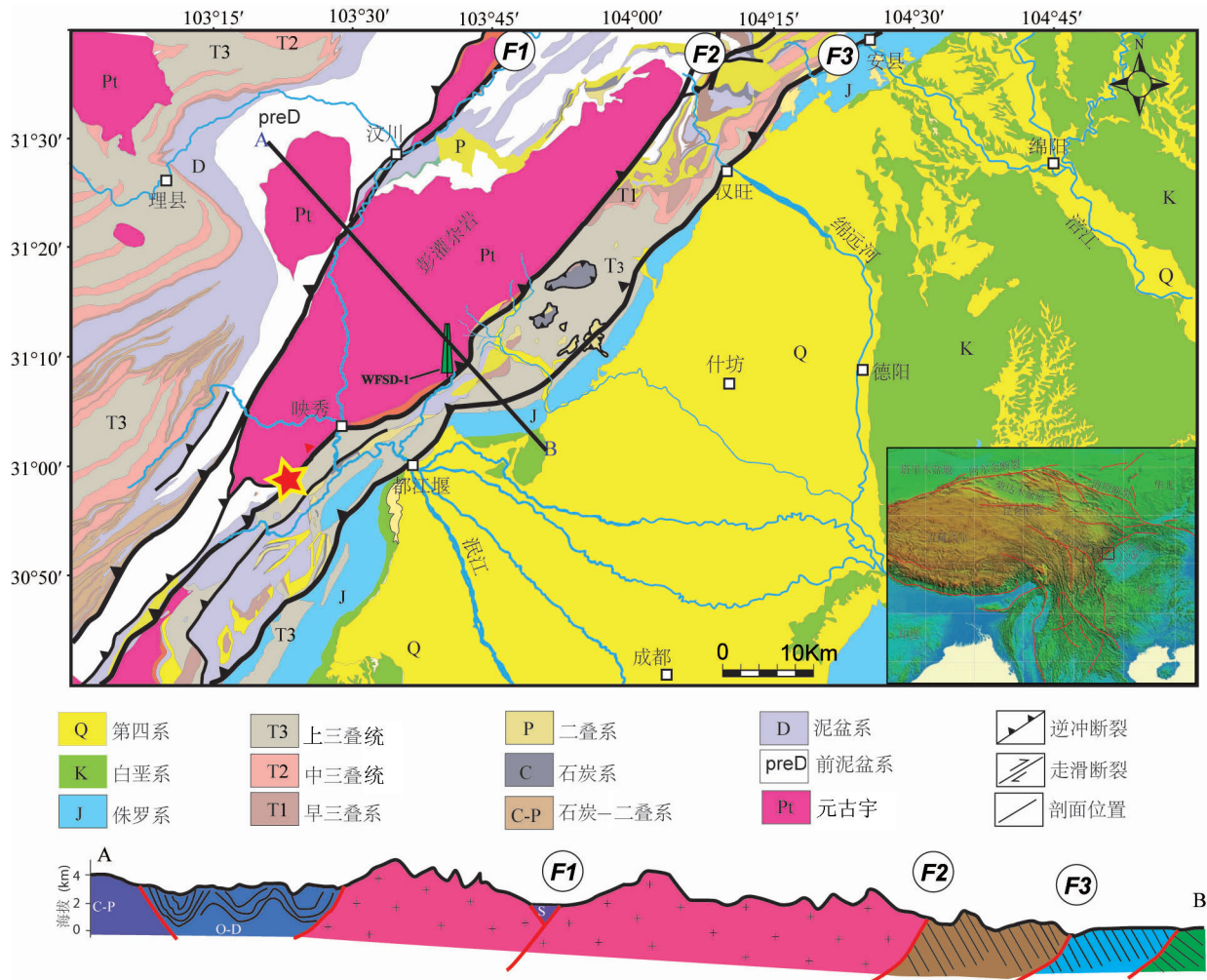


图1 青藏高原东缘活动构造及汶川地震同震地表破裂分布图(据文献[30,31]修改)
(F1—汶川—茂县断裂;F2—映秀—北川断裂;F3—安县—灌县断裂)

Fig. 1 Geological map of Longmen Mountain and the western Sichuan basin area, showing the position of the Wenchuan Earthquake Fault Scientific Drilling, and two faults of the Longmen Mountain thrust fault system (F1, Wenchuan—Maonian Fault; F2, Yingxiu—Beichuan Fault; F3, Anxian—Guanxian Fault). Cross sections across the central LMS (modified after [30] and [31])

向分布,长约105 km,宽8~28 km。彭灌杂岩主要为一套混合岩化变质岩和混合岩。变质岩主要为斜长角闪岩、变粒岩、浅粒岩、片岩等;混合岩以角砾状混合岩、条带-条纹状混合岩以及均质混合岩为主,其岩石成分主要为黑云母斜长花岗质混合岩、角闪斜长混合岩、黑云母斜长混合岩及二长花岗质混合岩等。彭灌杂岩中二长花岗岩、钾长花岗岩、英云闪长岩和辉长岩等样品的铅石U-Pb年龄为850~750 Ma^[36],表明彭灌杂岩为新元古代岩浆活动的产物。须家河组岩石组合主要为灰色、浅灰色细-中粒长石岩屑石英砂岩、岩屑石英砂岩、长石石英砂岩、岩屑砂岩夹粉砂岩、深灰色泥岩、砂质泥岩和煤线。汶川地震在八角庙造成的同震地表破裂最大垂直位移量为6.0~6.7 m,出露的破裂带的断裂表面可以清晰地看到两期擦痕^[8,13]。该处地表破裂带沿三叠系中软弱的含炭质泥岩层产生滑动^[37],断层滑动面及其两盘岩层均为上三叠统须家河组的岩层,其岩性主要为砾岩、砂泥岩夹泥灰岩,含炭质泥岩仅以薄层状夹于上述岩层之中。在破裂带不同地段发现有早期地震活动形成的断层泥^[37]。八角庙出露的包含有汶川地震发震断裂在内的完整断

裂带剖面为深入分析映秀-北川断裂带的岩性、结构特征提供了难得的研究素材^[13,38,39]。

须家河组沉积岩中发育有很多次级小规模断裂,主要由断层角砾岩、碎裂岩和断层泥组成,断层泥厚度统计显示整个断裂带包括7个密集断层区域(图2-A、B、D)。断层泥固结程度不一,厚度由几毫米到25 cm不等,部分含有方解石脉体,局部可见摩擦镜面构造(图2-E~G)^[13]。彭灌杂岩中发育的断层岩包括碎裂岩和假玄武玻璃,相对围岩具有显著的高磁化率现象^[20]。

2 实验与结果

在野外现场,首先清理天然剖面,获得表面平整的连续剖面以方便使用Bartington MS2磁化率仪对断层岩及其围岩进行了磁化率的测量。该测量是非破坏性的,在裸露岩石表面实现高分辨率测量。该探头的灵敏区域是在3.8 mm×10.5 mm的矩形区域内,可以实现1 cm间隔的高分辨率的表面测量(图2-E~G)。根据初步结果,选取代表性断层泥及围岩采集手标本和岩石磁学样品,主要是利用标准古地磁样品无磁塑料盒扣取采集(图2-C)。室内

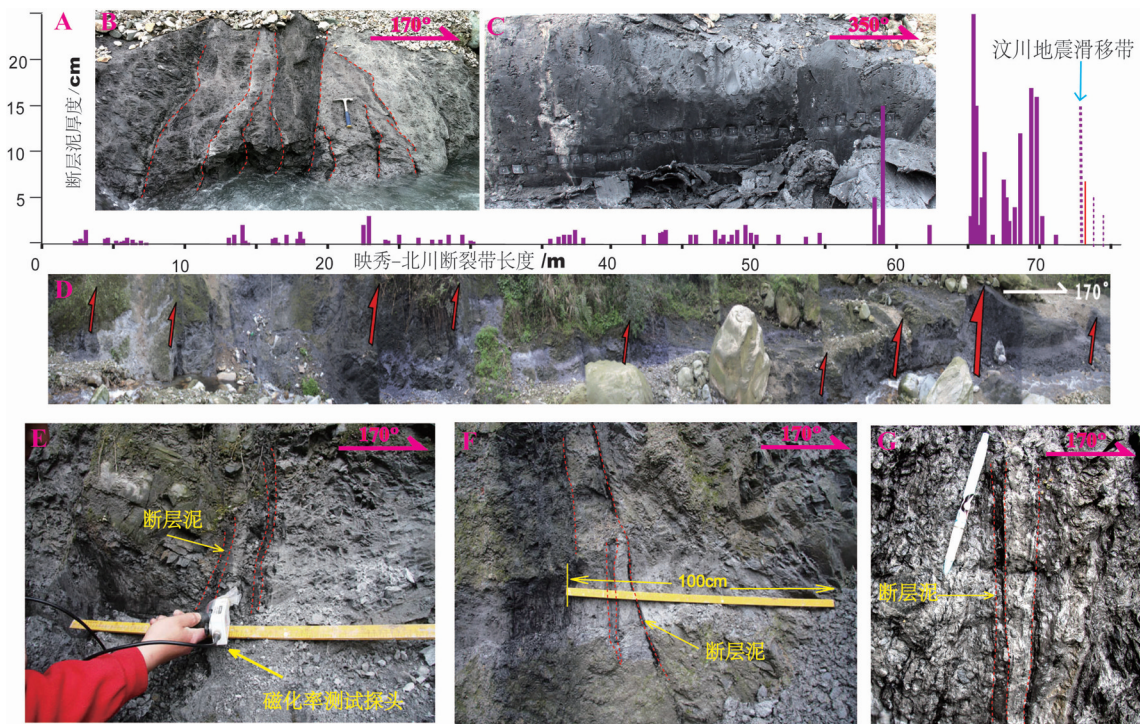


图2 虹口乡八角庙剖面断层岩代表照片

Fig.2 Typical photographs of fault rocks on section at Bajiaomiao, Hongkou Town

测试包括样品的质量磁化率、热磁分析、磁滞回线等,主要在国土资源部古地磁与古构造重建重点实验室、地震局综合地球物理实验室、中国科学院地质与地球物理研究所岩石圈演化国家重点实验室完成实验测试。

选取代表性样品在国土资源部古地磁与古构造重建重点实验室进行样品的磁化率、剩磁退磁、磁化率-温度曲线、三轴饱和等温剩磁的系统热退磁等测试。磁化率是使用剩磁卡帕桥(kappabridge-4),2G-755R立式和2G-760卧式超导磁力仪。热磁分析所用仪器为Bartington MS2温度磁化率系统,样品测试以10°C/min速率在空气和现今地磁场环境中,将样品自室温连续加热至700°C,再以相同速率冷却到室温,连续测试样品在加热和冷却过程中磁化率的变化,以获得样品的K-T曲线。三轴饱和和等温剩磁的系统热退磁使用脉冲磁力仪分别沿着三个互相垂直的轴施以2.4 T、0.4 T、0.12 T的加场,然后使用JR6数字旋转磁力仪对样品进行系统热退磁。有一些磁性矿物,如磁黄铁矿、胶黄铁矿

以及某些钛磁铁矿,最大解阻温度都在300°C~400°C,利用三轴等温剩磁法不易将它们分开,低温实验可弥补这一缺点。在低温条件下,一些磁性矿物常常表现出特征的相变,从而引起矿物的磁学性质发生突变,磁铁矿在118 K(-155°C)左右的Verwey转变、赤铁矿在263 K(-10°C)左右的Morin转变、磁黄铁矿在34K(-239°C)左右的34-Kelvin转变,胶黄铁矿在低温下没有类似的磁性转变特征^[40]。低温实验测试利用中国科学院地质与地球物理研究所岩石圈演化国家重点实验室的低温岩石磁学测试系统(MPMS XP-5)完成的。磁滞曲线是利用地震局综合地球物理实验室的MicroMag 3900磁力仪完成,磁滞现象是铁磁性矿物的一个重要特征,磁性矿物特征的主要磁参数(饱和磁化强度 M_s ,剩余磁化强度 M_{rs} ,矫顽力 H_c ,剩磁矫顽力 H_{cr})可由磁滞曲线获得。

八角庙剖面表面磁化率按1 cm间隔采集(图3),18.4 m左右出现的最高值对应表面具有铁氧化现象一薄层断层泥(图4),剔除此层极高值,可以更

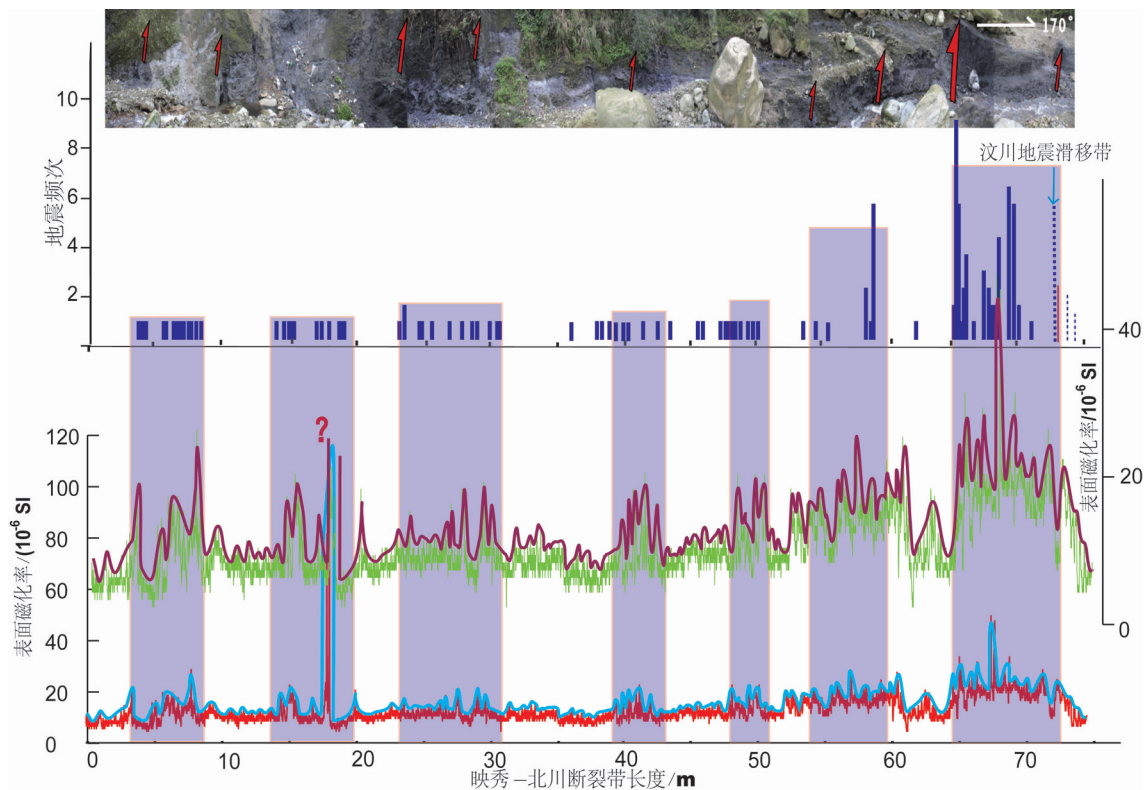


图3 八角庙剖面表面磁化率

Fig.3 Surface magnetic susceptibility on Bajiaomiao section

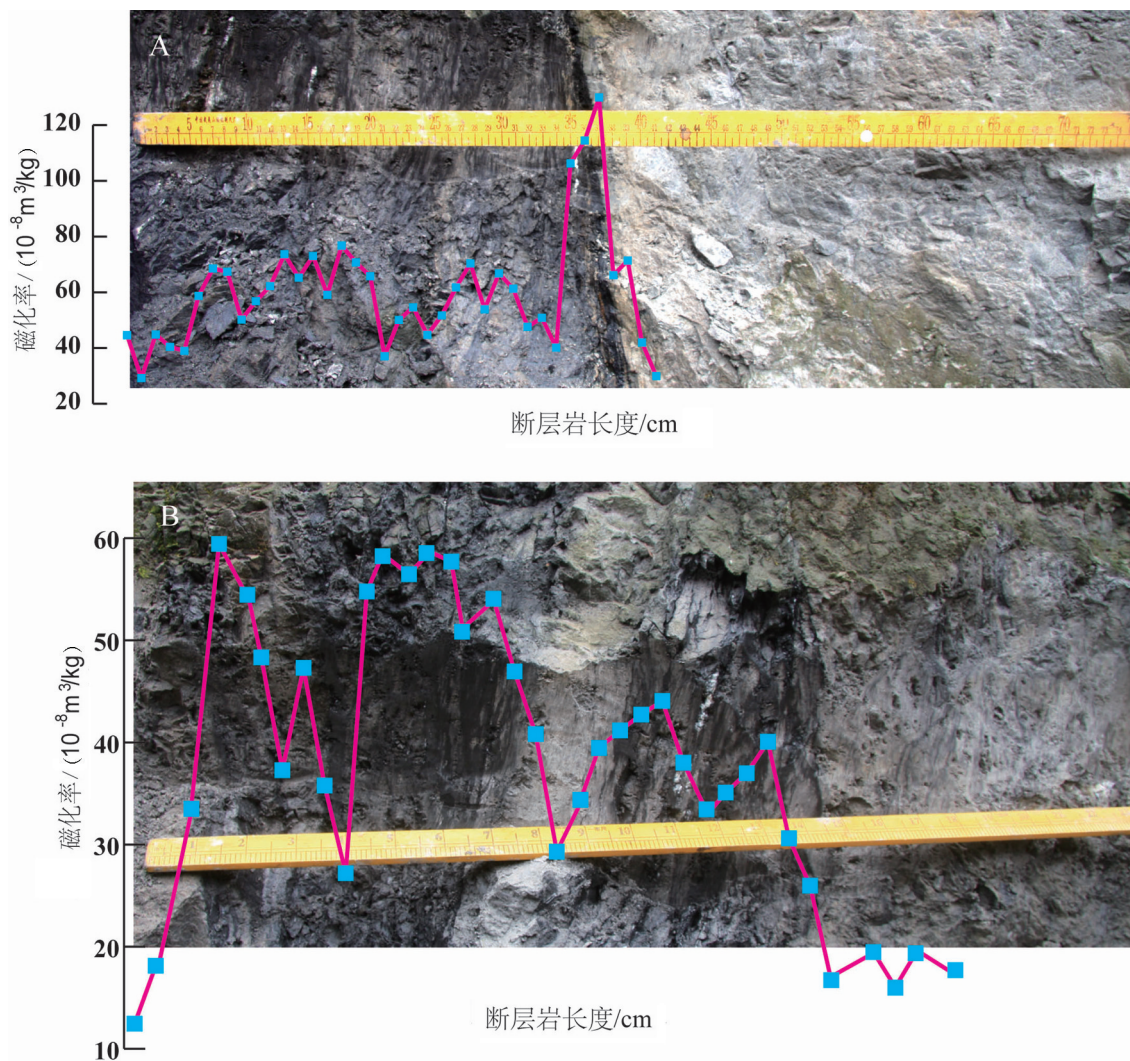


图4 八角庙剖面代表断层岩质量磁化率

Fig.4 Mass magnetic susceptibility of typical fault rocks on Bajiaomiao section

好突出磁化率整体变化特征。按照每次地震形成2 cm 断层泥统计出八角庙剖面发生地震次数分布图^[13],显然地震频次密集区与高磁化率值区域对应一致。表面磁化率受剖面平整程度、相邻区域互相干扰等因素影响,因此针对断层密集区、磁化率异常区采集样品于室内开展质量磁化率测试。

表面铁氧化现象断裂带质量磁化率在 $25 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg} \sim 118 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$ 之间变化(图4-A),另一典型断裂带包含方解石脉,质量磁化率在 $12 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg} \sim 59 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$ 之间变化(图4-B)。总体上断层泥对应磁化率高值,相对表面磁化率避免了互相干扰影响,断层泥高磁化率现象更明显。

汶川地震在八角庙剖面形成地表破裂,为了揭示

地表破裂附近断裂带特征,垂直于地表破裂走向开挖了探槽(图5)。探槽揭露多个断层岩类型,断层角砾岩、碎裂岩相对黑色断层泥颜色稍浅。断层泥主要的4层,汶川地震地表破裂面发育的断层泥颜色最深、较松软、未固结,其他断层泥具有弱面理化现象,含细煤层。磁化率测试是在探槽开挖完成后开展,获得磁化率曲线显示断层泥处具有高磁化率特征,断层泥中夹有煤层则对应磁化率极低值(图5)。

3 讨论

3.1 识别断层摩擦生热作用

断层泥高磁率特征在多个断裂带发现,根据断层泥与围岩中磁性矿物变化,认为多是由于地震过

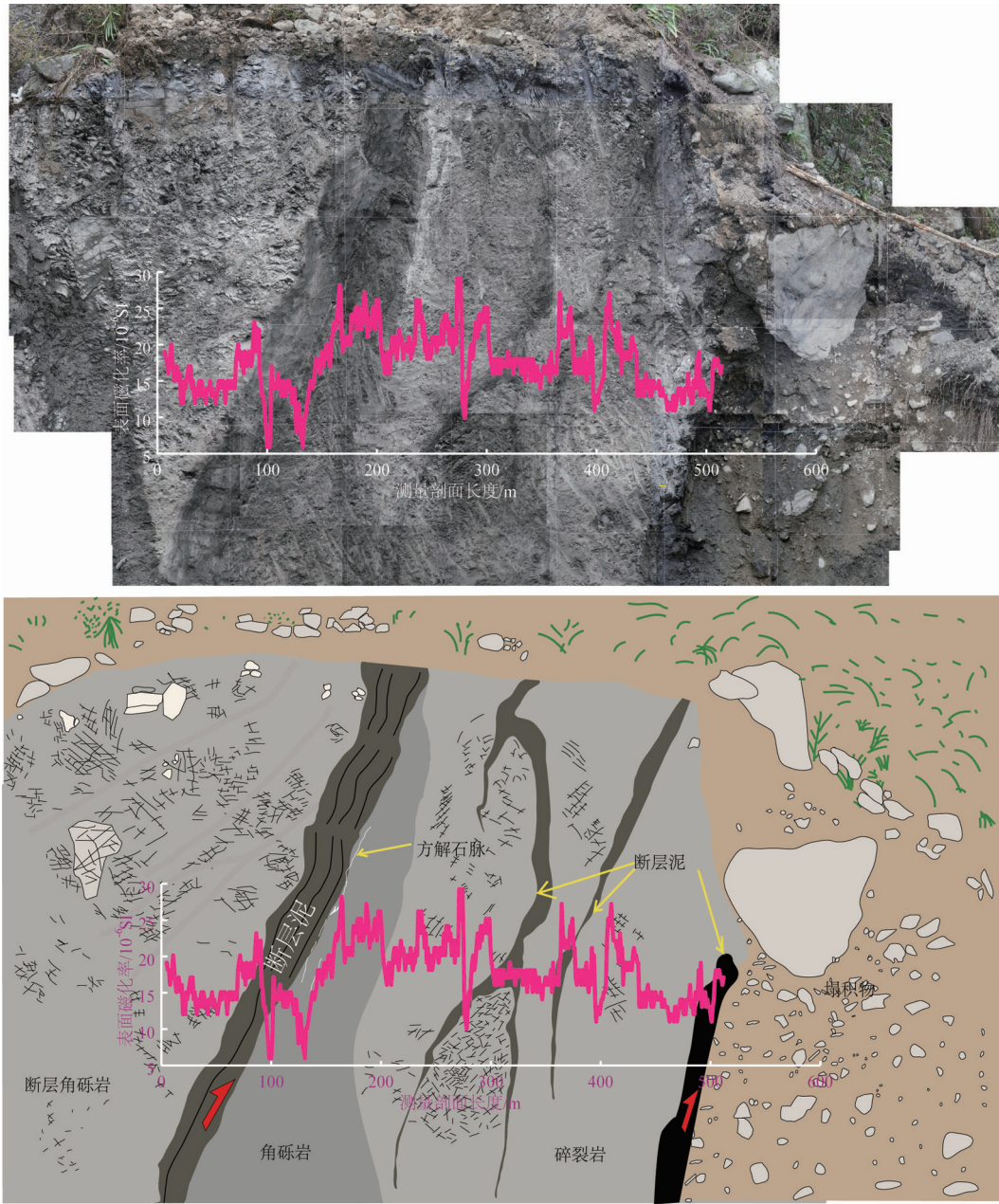


图5 八角庙地表破裂探槽表面磁化率

Fig.5 Surface magnetic susceptibility of trench crossing the rupture at Bajiaomiao

程中的细粒化、摩擦生热及流体作用等导致^[17-21]。地震过程引起的断层滑移作用通常会产生摩擦生热作用,不同磁性矿物具有不同的居里点,受摩擦生热作用会沿滑移面发生磁性矿物转变。根据断层岩磁学信息记录的变化,可以探索引起高磁化率的机制,证明断层岩磁化率变化与地震活动的关系。

映秀—北川断裂带的彭灌杂岩中发育的断裂岩在八角庙剖面出露完整(31°8.789'N、103°41.472'

E),沿滑移带发育一层约2 cm厚褐色层断层岩,相邻发育厚度不等的黑色断层岩,褐色层出现磁化率峰值,黑色层次之,围岩磁化率仅为最大值1/6(图6-A~C)^[20,22]。围岩与褐色层的K-T曲线(图6-D)、三轴饱和等温剩磁(图6-F)、低温磁学(图6-E)、磁滞曲线直观上表现出了明显的区别。通过上述实验,可以确定相对褐色层断层岩,顺磁性矿物对围岩的磁化率贡献更大;褐色层中有磁铁矿,而围岩

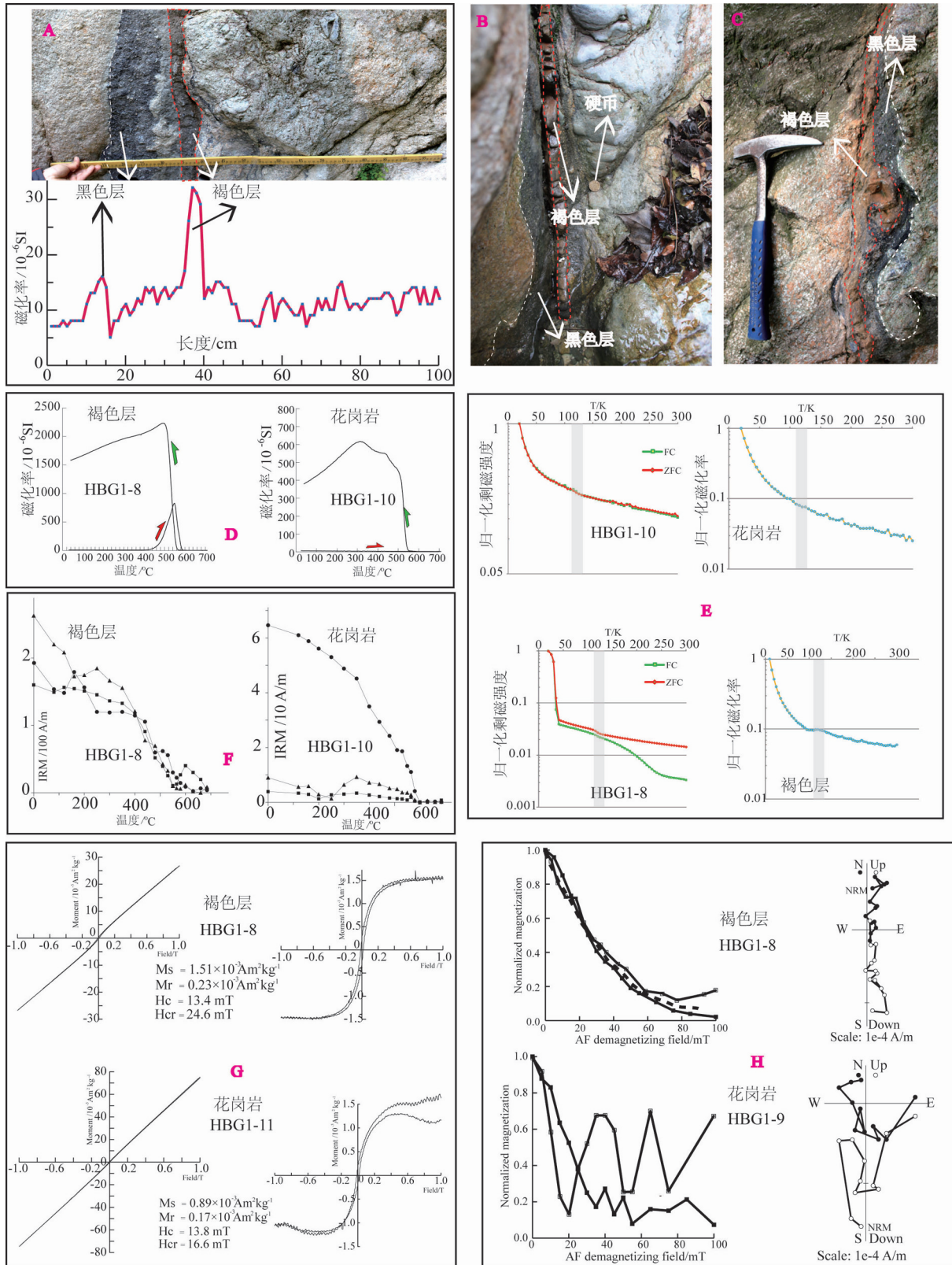


图6 断层岩摩擦生热作用的岩石磁学证据
Fig.6 Magnetic evidence revealing frictional heating from fault rocks

的实验结果无法检测出磁铁矿信号。褐色层中磁铁矿的产生极可能是由菱铁矿、含铁顺磁性矿物新生成的,是摩擦生热还是流体作用的结果通过天然剩磁 NRM 和非磁滞剩磁 ARM 退磁过程特征可以说明。图 6-G 所示,褐色层 NRM 退磁 Z 矢量图只有一个分量, NRM 和 ARM 表现出相似的强度衰减行为,而围岩 NRM 退磁 Z 矢量图分量不明, NRM 和 ARM 表现出不同的强度衰减特征,说明褐色层携带的为热剩磁,围岩携带的比较复杂,可能主要为化学剩磁。

上述实验说明褐色断层岩的高磁化率是受到断层滑移作用过程产生的摩擦生热使菱铁矿和含铁顺磁性矿物生成磁铁矿所致。在深部岩心中已证明汶川地震的断层滑移作用使主滑移带的断层泥磁化率升高^[22]。沿映秀—北川断裂带赵家沟等剖面也鉴定出断层泥的高磁化率特征与地震活动有关^[23-25]。显然,在八角庙剖面地表露头和探槽中识别出的多层高磁化率特征断层泥应该最可能是地震活动的结果。汶川地震破裂带地应力方向^[41]、断层泥微—纳米级颗粒和结构研究也指示了地震断层滑动作用,并且可能与摩擦加热有关^[42]。

3.2 映秀—北川断裂带断层岩与地震活动

虹口乡八角庙出露的映秀—北川断裂带包含多个小规模的对称型次级的断裂带,断层泥、碎裂岩、断层角砾岩发育,根据断层泥密集程度可划分为 7 个小的区域,暗示可能存在不同的地震活跃期^[13]。沿滑动面发育的断层泥具有最高的磁化率,距离断层主滑移面稍远的碎裂岩或/和断层角砾岩磁化率变化则较小^[20]。图 3 中多个磁化率峰谷变化与整个剖面的多个小型次级断裂带特征非常一致,说明多个断层滑移面经历了摩擦生热作用,暗示沿映秀—北川断裂带曾发生过多次强震活动。

汶川地震科学钻探项目于映秀—北川断裂带八角庙剖面附近设置了 2 个钻孔,2 个钻孔岩心的断层岩特征、断裂密度统计及断裂带结构分析说明岩心所揭示的深部映秀—北川断裂带宽度大,包含多层断层泥为核心的小型断裂带,多层断层泥岩性特征、显微结构及成分均有差别。钻孔岩心揭示映秀—北川断裂带具有多核结构特征,同样暗示沿映秀—北川断裂带曾发生过多次强震活动^[13,14,43]。

对 WFS-1 总计 1337.86 m 岩心开展了高精度

磁化率测试,辨别出与断层泥、碎裂岩相对应的磁化率异常带多处(图 7)。在已确定的 FZ590 断裂带 589.2~589.3 m 处,磁化率从上下约 15×10^{-5} 增至约 35×10^{-5} SI;在深度 618.3 m 附近约 7 cm 的乌黑色断层泥处磁化率从上下约 10×10^{-5} 增至约 25×10^{-5} SI;在深度 732.57~732.61 m 灰色断层泥处磁化率为 12×10^{-5} ~ 14×10^{-5} SI,上下围岩磁化率则在 6×10^{-5} ~ 8×10^{-5} SI 之间。另外,在 708.89~710.01 m 之间也属于碎裂岩段,磁化率在 6×10^{-5} ~ 11×10^{-5} SI 之间,而上部完整岩心的磁化率在 15×10^{-5} SI 左右,同样的现象在 743.8~744.26 m 之间也属于碎裂岩段,磁化率在 2 ~ 11×10^{-5} SI 之间,而上下部较完整岩心的磁化率在 20×10^{-5} ~ 30×10^{-5} SI 之间为主。FZ590 断裂带为汶川地震滑移带,岩石磁学研究说明其高磁化率特征是受摩擦生热作用导致含铁粘土矿物等生成磁铁矿所致,多层不同岩性、结构特征的高磁化率特征断层泥则暗示多次强震的发生^[26]。

无论深部岩心还是地表露头揭示的映秀—北川断裂带,在八角庙附近识别出多层具有高磁化率的断层泥。八角庙剖面断层泥高磁化率现象是断裂的滑移作用产生摩擦热并达到了较高的温度所致,而能产生较高摩擦温度的断裂滑移作用往往与强大地震密不可分,因为慢速蠕变作用引起的断层岩通常不会产生摩擦温度。那么在映秀—北川断裂带地表发育的具有高磁化率特征的断层岩暗示曾经发生过多次强震活动。

3.3 龙门山隆升作用

沿映秀—北川断裂带已证明曾发生过多次地震断裂活动,而关于具体活动时代或是地震活跃期时代目前还没有研究能够精确确定。根据构造地貌特征、多期砾岩时代、隆升年代还等研究成果,认为龙门山的快速隆升主要有 35~30 Ma 和 15~10 Ma 两个阶段,映秀—北川断裂带的形成时代可能对应 15~10 Ma 快速隆升,35~30 Ma 快速隆升则主要为汶川—茂县断裂带活动^[44,45]。最近数值模拟研究认为地壳均衡反弹量对龙门山现今高程贡献率约占 30%^[6],曾认为是气候因素驱动的侵蚀导致山脉快速隆升,最终使雅鲁藏布江绕海拔 7782 m 的南迦巴瓦峰形成落差大于 2000 m 的大拐弯峡谷,最新研究证明是 2.5 Ma 以来南迦巴瓦块体加速构造隆升驱使大峡谷内的高侵蚀速率^[7],也支持多种机制

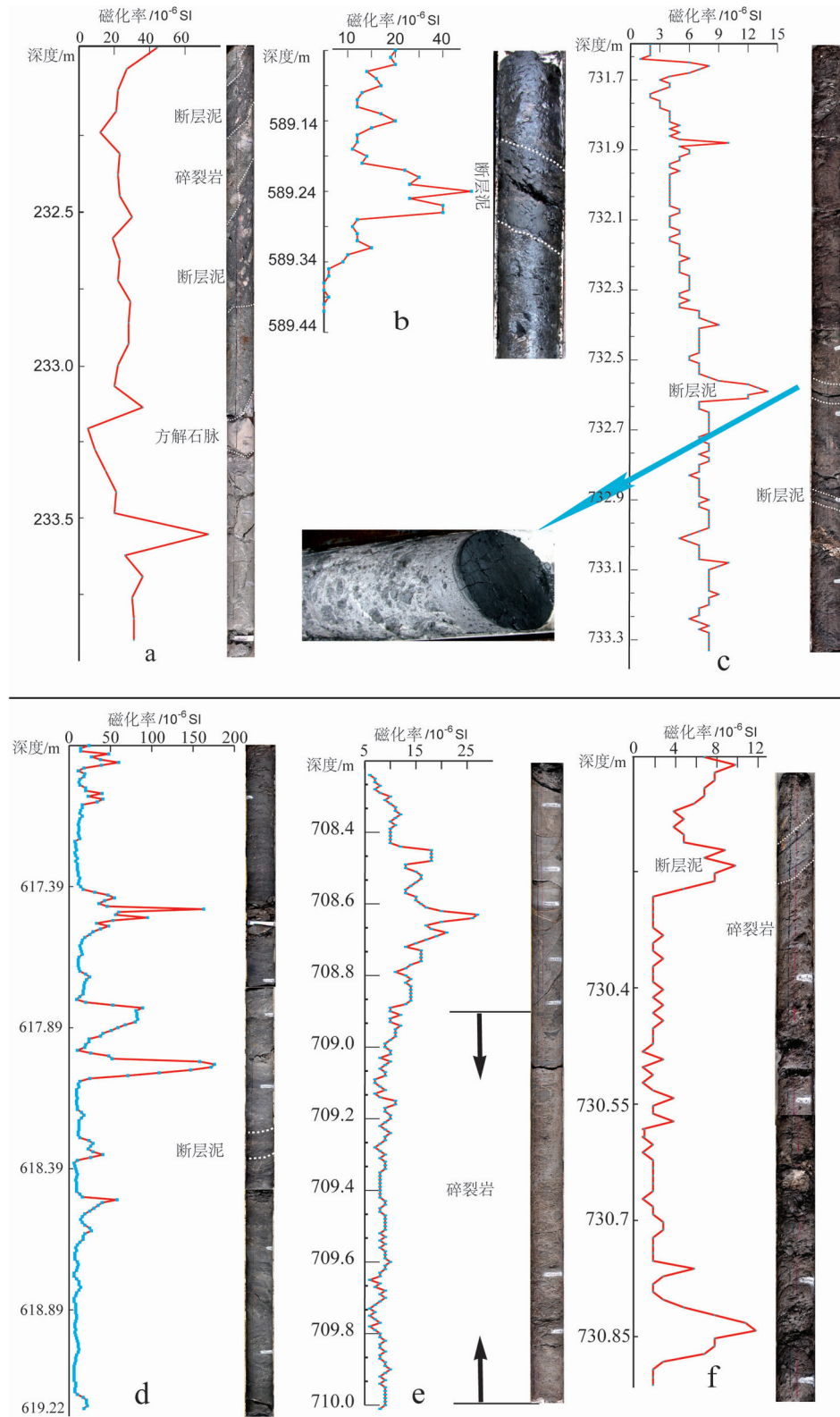


图7 WFSD-1孔岩心中代表性断层岩磁化率结果

Fig.7 Magnetic susceptibility logs of the WFSD-1 core, showing high magnetic susceptibility gouges at depths of approximately 589.25 m, 618 m, 709 m, 730 m, and 732.5 m

共同作用模式。根据映秀—北川断裂带中发育的厚达100~240 m、具有多核特征的断裂岩推断沿映秀—北川断裂带重复发生过多次强地震活动,多次地震活动造成的地表抬升的累积使得龙门山快速抬升^[13,14,43]。本文证实具有高磁化率特征断层岩是地震过程中断层快速滑移过程摩擦生热作用的结果,因此支持沿映秀—北川断裂带发生过多次强地震活动的观点。龙门山地区类似于汶川地震的强震复发周期为3000 a左右^[8-12],显然多次的强震造成的抬升足以支持龙门山隆升和持续的剥蚀作用。汶川地震同时于映秀—北川断裂带和安县—灌县断裂带产生地表破裂(垂直抬升),汶川—茂县断裂带为主要发震断层时也可能造成同时两条断裂活动,这样的模式更利于龙门山快速的隆升。

4 结 论

断层岩的形成是发震断裂滑移作用下岩石经历复杂物理化学过程的结果。断层泥高磁化率特征如果是由于矿物分解形成磁铁矿等高磁化率新矿物而造成的,则说明经历了高温过程。虹口乡八角庙地表剖面与汶川地震科学钻探项目1、2号孔岩石深部发育断层岩的岩石磁学研究取得以下认识:

(1)映秀—北川断裂带包括多个以具有高磁化率特征断层泥为核心的小型断裂带。

(2)地表与深部断层岩磁化率增强现象是由于断裂滑移作用产生的较高摩擦温度使得围岩中部分磁性矿物发生变化而产生新的高磁化率矿物所致,高磁化率断层岩可以作为判定地震活动的标志之一。

(3)多层磁化率显著升高的断层岩说明沿映秀—北川断裂带曾多次发生过类似汶川地震的强震。

(4)龙门山断裂带多条断裂发生的多次强震引起的位移量足以支持龙门山隆升和持续的剥蚀作用。

致谢:江苏省地质六队黄尧野外提供了帮助,匿名审稿人及编辑部李亚萍老师提出了建设性意见和细致的修改,在此表示衷心的感谢!

参考文献 (References):

- [1] Royden L H, Burchfiel B C, King R W, et al. Surface deformation and lower crustal flow in Eastern Tibet[J]. *Science*, 1997, 276: 788-790.
- [2] Clark M K, Royden L H. Topographic ooze: building the eastern

margin of Tibet by lower crustal flow[J]. *Geology*, 2000, 28:703-706.

- [3] Hubbard J, Shaw J H. Uplift of the Longmen Shan and Tibetan Plateau, and the 2008 Wenchuan ($M=7.9$) earthquake[J]. *Nature*, 2009, 458: 194-197.
- [4] Fu B H, Shi P L, Guo H D, et al. Surface deformation related to the 2008 Wenchuan earthquake, and mountain building of the Longmen Shan, eastern Tibetan Plateau[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2011, 40: 805-824.
- [5] 刘汉湖. RS与GIS支持下的汶川县城周边地质灾害危险性评价[J]. *中国地质*, 2012, 39(1): 243-251.
- Liu Hanhu. The assessment of geohazard danger in Wenchuan County based on RS and GIS[J]. *Geology in China*, 2012, 39(1): 243-251(in Chinese with English abstract).
- [6] 王岩,刘少峰. 龙门山晚新生代均衡反弹隆升的定量研究[J]. *现代地质*, 2013, 27(2): 239-247.
- Wang Yan, Liu Shaofeng. Quantitative research on Longmen Shan uplift caused by late Cenozoic isostatic rebound[J]. *Geoscience*, 2013, 27(2): 239-247(in Chinese with English abstract).
- [7] Wang P, Scherler D, Jing LZ, et al. Tectonic control of Yarlung Tsangpo Gorge revealed by a buried canyon in Southern Tibet[J]. *Science*, 2014, 346(6212): 978-981.
- [8] 李海兵,付小方, VAN DER WOERD,等. 汶川地震($M_s 8.0$)地表破裂及其同震右旋斜向逆冲作用[J]. *地质学报*, 2008, 82(12): 1623-1643.
- Li Haibing, Fu Xiaofang, VAN DER WOERD, et al. Co-seismic surface rupture and dextral-slip oblique thrusting of the $M_s 8.0$ Wenchuan earthquake[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2008, 82(12): 1623-1643(in Chinese with English abstract).
- [9] 张培震,徐锡伟,闻学泽,等. 2008年汶川8.0级地震发震断裂的滑动速率、复发间隔和构造成因[J]. *地球物理学报*, 2008, 51(4): 1066-1073.
- Zhang Peizhen, Xu Xiwei, Wen Xueze, et al. Slip rates and recurrence intervals of the Longmen Shan active fault zone, and tectonic implications for the mechanism of the May 12 Wenchuan earthquake, 2008, Sichuan, China[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2008, 51(4): 1066-1073 (in Chinese with English abstract).
- [10] 戴宗明,孙传敏,张宽忠,等. 松潘甘孜地块四姑娘山花岗岩锆石U-Pb年代学证据及与汶川地震的关系[J]. *中国地质*, 2011, 38(3): 623-636.
- Dai Zongming, Sun Chuanmin, Zhang Kuanzhong, et al. U-Pb dating of zircons from the Four-Girl Mountain Pluton in the Songpan-Garzê Terrane, and the relationship between the pluton and the Wenchuan $M_s 8.0$ Earthquake of 2008[J]. *Geology in China*, 2011, 38(3): 623-636(in Chinese with English abstract).
- [11] 徐纪人,赵志新. 汶川8.0级大地震震源机制与构造运动特征[J]. *中国地质*, 2010, 37(4): 967-977.
- Xu Jiren, Zhao Zhixin. Causative mechanism and related tectonic

- movement of the 2008 Wenchuan M8. 0 Earthquake[J]. *Geology in China*, 2010, 37(4): 967–977(in Chinese with English abstract).
- [12] 李勇,周荣军, Densmore A L, 等. 青藏高原东缘大陆动力学过程与地质响应[M]. 北京:地质出版社, 2006.
- Li Yong, Zhou Rongjun, Densmore A L, et al. *Geodynamic Processes of Eastern Margin of the Tibetan Plateau and its Geological Responses*[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2006(in Chinese).
- [13] 王焕,李海兵,裴军令,等. 汶川地震断裂带结构岩性特征及其与地震活动的关系[J]. *第四纪研究*, 2010, 30(4): 768–778.
- Wang Huan, Li Haibing, Pei Junling, et al. *Structural and lithologic characteristics of the Wenchuan earthquake fault zone and its relationship with the seismic activity*[J]. *Quaternary Sciences*, 2010, 30(4): 768–778(in Chinese with English abstract).
- [14] 张伟,李海兵,黄尧,等. 四川汶川地震断裂带科学钻探2号孔(WFSD-2)岩性特征和断裂带的结构[J]. *地质通报*, 2012, 31(8): 1201–1218.
- Zhang Wei, Li Haibing, Huang Yao, et al. *Lithologic characteristics and fault zone structure revealed by No.2 hole cores of the Wenchuan Earthquake Fault Zone Scientific Drilling (WFSD-2)* [J]. *Geological Bulletin of China*, 2012, 31(8): 1201–1218(in Chinese with English abstract).
- [15] 李海兵,许志琴,王焕,等. 汶川地震主滑移带(PSZ): 映秀—北川断裂带内的斜切逆冲断裂[J]. *中国地质*, 2013, 40(1): 121–139.
- Li Haibing, Xu Zhiqin, Wang Huan, et al. *The principle slip zone of the 2008 Wenchuan earthquake: A thrust fault oblique cutting the Yingxiu–Beichuan fault zone*[J]. *Geology in China*, 2013, 40(1): 121–139(in Chinese with English abstract).
- [16] 吕德徽,侯康明. 昌马断裂带断层岩研究及其粘滑、蠕滑特征[J]. *内陆地震*, 1995, 9(1): 29–34.
- Lv Dehui, Hou Kangming. *Stick and creeping slip and fault rocks of Changma fracture zone*[J]. *Inland Earthquake*, 1995, 9(1): 29–34(in Chinese with English abstract).
- [17] Mishima T, Hirono T, Soh W, et al. *Thermal history estimation of the Taiwan Chelungpu fault using rock–magnetic methods*[J]. *Geophysical Research Letters*, 2006, 33: L23311. doi:10.1029/2006GL028088.
- [18] Hirono T, Lin W, Yeh E, et al. *High magnetic susceptibility of fault gouge within Taiwan Chelungpu fault: Nondestructive continuous measurements of physical and chemical properties in fault rocks recovered from Hole B, TCDP*[J]. *Geophysical Research Letters*, 2006, 33: L15303. doi:10.1029/2006GL026133.
- [19] Tanikawa W, Mishima T, Hirono T, et al. *High magnetic susceptibility produced by thermal decomposition of core samples from the Chelungpu fault in Taiwan*[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2008, 272 (1/2): 372–381.
- [20] 裴军令,李海兵,孙知明,等. 汶川地震断裂带断层滑移作用——来自高磁化率断层岩的信息[J]. *第四纪研究*, 2010, 30(4): 750–758.
- Pei Junling, Li Haibing, Sun Zhiming, et al. *Fault slip in the Wenchuan earthquake fault zone information from fault rocks with higher magnetic susceptibility* [J]. *Quaternary Sciences*, 2010, 30 (4): 759–767 (in Chinese with English abstract).
- [21] Chou Y M, Song S R, Aubourg C, et al. *An earthquake slip zone is a magnetic recorder*[J]. *Geology*, 2012, 40: 551–554.
- [22] Pei Junling, Zhou Zaizheng, Dong Shuguo, et al. *Magnetic evidence revealing frictional heating from fault rocks in granites*[J]. *Tectonophysics*, 2014, 637: 207–217.
- [23] Yang T, Chen J Y, Wang H Q, et al. *Rock magnetic properties of fault rocks from the rupture of the 2008 Wenchuan Earthquake, China and their implications: Preliminary results from the Zhaojiagou outcrop, Beichuan County (Sichuan)* [J]. *Tectonophysics*, 2012, 530–531: 331–341.
- [24] Yang T, Chen J Y, Wang H Q, et al. *Magnetic properties of fault rocks from the Yingxiu–Beichuan fault: Constraints on temperature rise within the shallow slip zone during the 2008 Wenchuan Earthquake and their implications*[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2012, 50: 52–60.
- [25] Yang T, Chen J Y, Yang X S, et al. *Differences in magnetic properties of fragments and matrix of breccias from the rupture of the 2008 Wenchuan earthquake, China: relationship to faulting*[J]. *Tectonophysics*, 2013, 601: 112–124.
- [26] Pei Junling, Li Haibing, Wang Huan, et al. *Magnetic properties of the Wenchuan Earthquake Fault Scientific Drilling Project Hole–1 (WFSD–1), Sichuan Province, China*[J]. *Earth, Planets and Space*, 2014, 66: 23.
- [27] 李勇,周荣军, Densmore A L, 等. 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*, 2006, 26 (1): 40–52.
- Li Yong, Zhou Rongjun, Densmore A L, et al. *Geomorphic evidence for the late Cenozoic strike–slipping and thrusting in Longmen Mountains at the eastern margin of the Tibetan Plateau*[J]. *Quaternary Sciences*, 2006, 26 (1): 40–52(in Chinese with English abstract).
- [28] 邓起东,陈社发,赵小麟. 龙门山及其邻区的构造和地震活动及动力学[J]. *地震地质*, 1994, 16 (4): 389–403.
- Deng Qidong, Chen Shefa, Zhao Xiaolin. *Tectonics, seismismity and dynamics of Longmenshan Mountains and its adjacent regions*[J]. *Seismology and Geology*, 1994, 16 (4): 389–403(in Chinese with English abstract).
- [29] 许志琴,李化启,侯立玮,等. 青藏高原东缘龙门山—锦屏造山带的崛起: 大型拆离断层和挤出机制[J]. *地质通报*, 2007, 26 (10): 1262–1276.
- Xu Zhiqin, Li Huaqi, Hou Liwei, et al. *Uplifting of Longmen Shan and Jinping Shan, eastern margin of the Tibetan Plateau: large scale detachment faults and their extrusion mechanism*[J]. *Geological Bulletin of China*, 2007, 26 (10): 1262–1276(in Chinese with English abstract).
- [30] Tian Y T, Kohn B P, Gladow A J W, et al. *Constructing the*

- Longmen Shan eastern Tibetan Plateau margin: Insights from low-temperature thermochronology[J]. *Tectonics*, 2013, 32: 576–592.
- [31] Wang E Q, Meng K, Su Z, et al. Block rotation: Tectonic response of the Sichuan basin to the southeastward growth of the Tibetan Plateau along the Xianshuihe–Xiaojiang fault[J]. *Tectonics*, 2014, 33:686–717.
- [32] 李海兵,王宗秀,付小方,等. 2008年5月12日汶川地震(Ms 8.0)地表破裂带的分布特征[J]. *中国地质*, 2008, 35(5): 803–813.
Li Haibing, Wang Zongxiu, Fu Xiaofang, et al. The surface rupture zone distribution of the Wenchuan earthquake (Ms 8.0) happened on May 12th, 2008[J]. *Geology in China*, 2008, 35(5): 803–813(in Chinese with English abstract).
- [33] 裴军令,李海兵,司家亮,等. 汶川地震(Ms8.0)地表建筑体变形特征及其构造意义[J]. *第四纪研究*, 2009, 29(3): 513–523.
Pei Junling, Li Haibing, Si Jialiang, et al. Surface building deformation caused by Wenchuan earthquake (Ms8.0) and its tectonic implications[J]. *Quaternary Sciences*, 2009, 29(3): 513–523(in Chinese with English abstract).
- [34] Liu Zeng J, Zhang A, Wen L, et al. Co-seismic surface ruptures of the 12 May 2008 Ms 8.0 Wenchuan earthquake, Sichuan: East-west crustal shortening on oblique, parallel thrusts along the eastern edge of Tibet[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2009, 286: 355–370.
- [35] Jia D, Li Y Q, Lin A M, et al. Structural model of 2008 Mw 7.9 Wenchuan earthquake in the rejuvenated Longmen Shan thrust belt, China[J]. *Tectonophysics*, 2009 doi:10.1016/j.tecto.2009.08.040.
- [36] Yan Q R, Hanson A D, Wang Z Q, et al. Neoproterozoic subduction and rifting on the northern margin of the Yangtze plate, China: Implications for Rodinia reconstruction[J]. *International Geology Review*, 2004, 46 (9): 817–832.
- [37] 付碧宏,王萍,孔屏,等. 四川汶川5.12大地震同震滑动断层泥的发现及构造意义[J]. *岩石学报*, 2008, 24(10) : 2237–2243.
Fu Bihong, Wang Ping, Kong Ping, et al. Preliminary study of coseismic fault gouge occurred in the slip zone of the Wenchuan Ms 8.0 earthquake and its tectonic implications[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2008, 24(10) : 2237–2243(in Chinese with English abstract).
- [38] Togo T, Shimamoto T, Ma S L, et al. Internal structure of Longmenshan fault zone at Hongkou outcrop, Sichuan, China, that caused the 2008 Wenchuan earthquake[J]. *Earthquake Science*, 2011, 24(3):249–265.
- [39] Wang H, Li H B, Si J L, et al. Internal structure of the Wenchuan earthquake fault zone, revealed by surface outcrop and WFSD-1 drilling core investigation[J]. *Tectonophysics*, 2014, 619–620: 101–114.
- [40] Dunlop DnJ, özdemir ö. *Rock Magnetism: Fundamentals and frontiers*[M]. Cambridge Univ. Press, Cambridge, UK, 1997:573.
- [41] 孙东生,林为人,王连捷,等. 汶川地震断裂带科学钻二号孔 ASR 法地应力测量[J]. *中国地质*, 2013, 40(3): 840–845.
Sun Dongsheng, Lin Weiren, Wang Lianjie, et al. In-situ stress measurement by the anelastic strain recovery method in WFSD-1[J]. *Geology in China*, 2013, 40(3): 840–845(in Chinese with English abstract)..
- [42] 袁仁茂,张秉良,徐锡伟,等. 汶川地震剪切滑动面微-纳米级颗粒的特征、形成机制及地震意义[J]. *中国科学(D辑)*, 2014, 44: 1821–1832.
Yuan Renmao, Zhang Binliang, Xu Xiwei, et al. Features and genesis of micro-nanometer-sized grains on shear slip surface of the 2008 Wenchuan earthquake[J]. *Science in China(Series D)*, 2014,57: 1961–1971.
- [43] 王焕,李海兵,司家亮,等. 汶川地震断裂带结构特征与龙门山隆升的关系[J]. *岩石学报*, 2013, 29(6): 2048–2060.
Wang Huan, Li Haibing, Si Jialiang, et al. The relationship between the internal structure of the Wenchuan earthquake fault zone and the uplift of the Longmenshan[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2013, 29(6) : 2048–2060(in Chinese with English abstract).
- [44] Godard V, Pik R, Lav J, et al. Late Cenozoic evolution of the central Longmen Shan, eastern Tibet Insight from (U–Th)/He thermochronometry[J].*Tectonics*, 2009, 28, TC5009.
- [45] 葛肖虹,刘俊来,任收麦,等. 青藏高原隆升对中国构造-地貌形成、气候环境变迁与古人类迁徙的影响[J]. *中国地质*, 2014, 41 (3): 698–714.
Ge Xiaohong, Liu Junlai, Ren Shoumai, et al. Tectonic uplift of the Tibetan Plateau: Impacts on the formation of landforms, climate changes and ancient human migration in China[J]. *Geology in China*, 2014, 41(3): 698–714(in Chinese with English abstract).