

吴微微,梁明剑,龙锋,等. 2023. 青川断裂及邻区现今地震活动性研究[J]. 地震研究, 46(2): 188–203, doi:10.20015/j.cnki.ISSN1000-0666.2023.0035.

Wu W W, Liang M J, Long F, et al. 2023. Analysis of the present-day activity of the Qingchuan Fault and its vicinity[J]. *Journal of Seismological Research*, 46(2): 188–203, doi:10.20015/j.cnki.ISSN1000-0666.2023.0035.

## 青川断裂及邻区现今地震活动性研究\*

吴微微, 梁明剑, 龙 锋, 苏金蓉<sup>♣</sup>, 陈学芬

(四川省地震局, 四川 成都 610041)

**摘要:**近年来, 青川断裂及邻区多次发生4.0级以上地震, 为进一步研究该区现今地震活动性, 结合现场地震地质调查和无人机摄影方法测绘构造地貌, 揭示青川断裂的构造变形信息; 采用CAP方法反演2008年5月17日至2021年12月31日研究区32次 $M_w \geq 4.0$ 地震的震源机制解, 进一步讨论断裂的构造变形特征; 使用 $\omega^2$ 模型拟合震源谱方法获得研究区十年尺度的应力降动态演化, 分析3次强震前后研究区的应力调整过程; 通过三维P波速度结构反演, 探讨研究区深部孕震背景; 最后综合地质学和地震学研究结果分析青川断裂及邻区的现今活动性。结果表明: ①地震地质调查和震源机制解的结果均反映青川断裂的运动性质为走滑兼挤压。②2008年汶川8.0级和2013年芦山7.0级强震前、后, 研究区的应力水平在一段时间内呈现出升高–回落的调整过程。③体波层析成像的结果显示研究区的地壳浅层高低速异常表现以龙门山断裂带为分界线的空间分布特征。④青川断裂具有潜在地震发生的构造背景与能力, 但目前该断裂及邻区的地震活动正处于强震序列衰减阶段,  $M4.0$ 以上地震活动呈逐渐减弱的趋势, 高应力降地震事件明显减少, 区域整体应力水平较低。

**关键词:** 青川断裂及邻区; 汶川地震; 震源机制解; 应力降; 速度结构; 地震活动性

**中图分类号:**      **文献标识码:**      **文章编号:** 1000-0666(2023)02-0188-16

doi:10.20015/j.cnki.ISSN1000-0666.2023.0035

## 0 引言

青川断裂是龙门山断裂带北段的分支断裂之一, 与北川—映秀断裂呈左阶排列, 西起平武东部, 经青川、宁强至勉县境内, 全长约250 km (樊春等, 2008; 杜建军等, 2013)。2008年5月12日四川汶川8.0级地震前, 沿青川断裂发生的地震活动频度低、震级小, 区域研究程度相对较低。地震后, 主震在北川—映秀断裂上产生的地表破裂带越过了虎牙断裂带, 向北东终止于青川断裂南侧 (Xu et al, 2009), 而余震活动一直延伸

到青川县城附近, 并切过青川断裂继续向NE延展近40 km。最大余震2008年5月25日青川6.4级地震就发生在余震条带与青川断裂的交汇处。之后, 随着2013年芦山、2017年九寨沟两次7.0级地震的相继发生, 青藏高原东缘活动断裂的地震危险性更受关注 (Toda et al, 2008; 单斌等, 2009; 程佳等, 2018; 盛书中等, 2019), 青川断裂开始受到广泛重视。

然而, 地震学家对青川断裂活动性及地震危险性的认识存在分歧。汶川8.0级地震前的地震地质调查结果认为, 岷山隆起对龙门山断裂带北段具有屏障作用, 导致龙门山断裂北段晚第四纪不

\* 收稿日期: 2022-11-22.

**基金项目:** 中国地震局地震科技星火计划项目 (XH202302); 震情跟踪定向工作任务 (2021020102); 国家重点研发计划项目 (2018YFC1504501-02)。

**第一作者简介:** 吴微微 (1982-), 正高级工程师, 主要从事地震监测、数字地震学应用等方面研究。

E-mail: 673065247@qq.com.

**♣通讯作者简介:** 苏金蓉 (1971-), 正高级工程师, 主要从事地震监测预警、地震学应用研究。

E-mail: sujr0816@163.com.

再有新活动(邓起东等, 1994; 李传友等, 2004), 而青川断裂作为龙门山断裂带北段的后缘断裂未来地震活动性不强。汶川地震后的一些研究成果则认为青川断裂是全新世活动断裂, 存在多期古地震事件(Sun, 2015; Lin *et al.*, 2012, 2014, 2016)。Liang等(2018)通过古地震研究, 认为青川断裂受岷山断块隆起的影响, 其发震能力减弱, 断裂的变形主要是对北川—映秀断裂强震活动的同震响应所产生的近地表变形。

震源机制解结果显示青川断裂附近的地震类型具有复杂性。发生在该区域的余震既有走滑型, 也有逆冲型(郑勇等, 2009; Long *et al.*, 2012; 易桂喜等, 2012), 汶川8.0级主震及其44个强余震则以逆冲型为主(胡幸平等, 2008)。2013年芦山7.0级地震后, 该区域也多次发生 $M \geq 4.0$ 地震, 其地震类型同样具有多样性: 2017年7月17日青川 $M_s 4.9$ 地震为带逆冲分量的走滑型, 发震空间位置偏离汶川余震密集带; 9月30日的青川 $M_s 5.4$ 地震为带走滑分量的逆冲型, 发生在汶川余震密集带; 10月13日青川 $M_L 4.3$ 地震为纯走滑型, 空间上也偏离余震密集带。

前人的研究表明, 以青川为界其北侧莫霍面深度更接近于四川盆地, 而南侧更类似于青藏高原(龙锋等, 2011)。龙门山断裂带及邻区的地壳各向异性研究结果表明, 青川断裂周边区域应力场方向复杂(石玉涛等, 2013)。这也许意味着青川断裂带及邻区的地震活动不仅受区域构造应力场的影响, 也与其局部复杂构造有一定关系。

本文以青川断裂作为研究对象, 通过详细的现场地震地质调查, 采用无人机摄影技术对断裂沿线的构造变形地貌进行测绘, 获得断裂活动的构造变形信息; 通过震源机制解算, 获得对震源区局部断层性质的认识, 进而讨论青川断裂的构造变形特征; 使用双差地震层析成像方法(tomodd)(Zhang, Thurber, 2003, 2006)对研究区域中小地震进行重新定位, 结合震源应力降绘制汶川余震区十年尺度的应力分布图像, 讨论汶川、芦山和九寨沟地震对青川断裂及邻区应力水平的影响; 通过对青川断裂及邻区速度结构的反演, 探讨深部孕震背景; 最后通过地质学和地震学方法综合分析青川断裂及邻区的现今活动性, 为深

入研究龙门山断裂带北段深部介质状态和强震孕育、发生机理提供基础支撑。

## 1 区域主要断裂

龙门山断裂带主要由3条主干断裂构成: 后山断裂、主中央断裂、前山断裂(图1)。后山断裂由青川断裂( $F_1$ )、茂汶—汶川断裂和耿达—陇东断裂构成; 中央断裂由北川—映秀断裂( $F_2$ )、茶坝—林庵寺断裂( $F_3$ )与盐井—五龙断裂构成; 前山断裂由灌县—江油断裂( $F_4$ )、江油—广元断裂和双石—大川断裂构成。

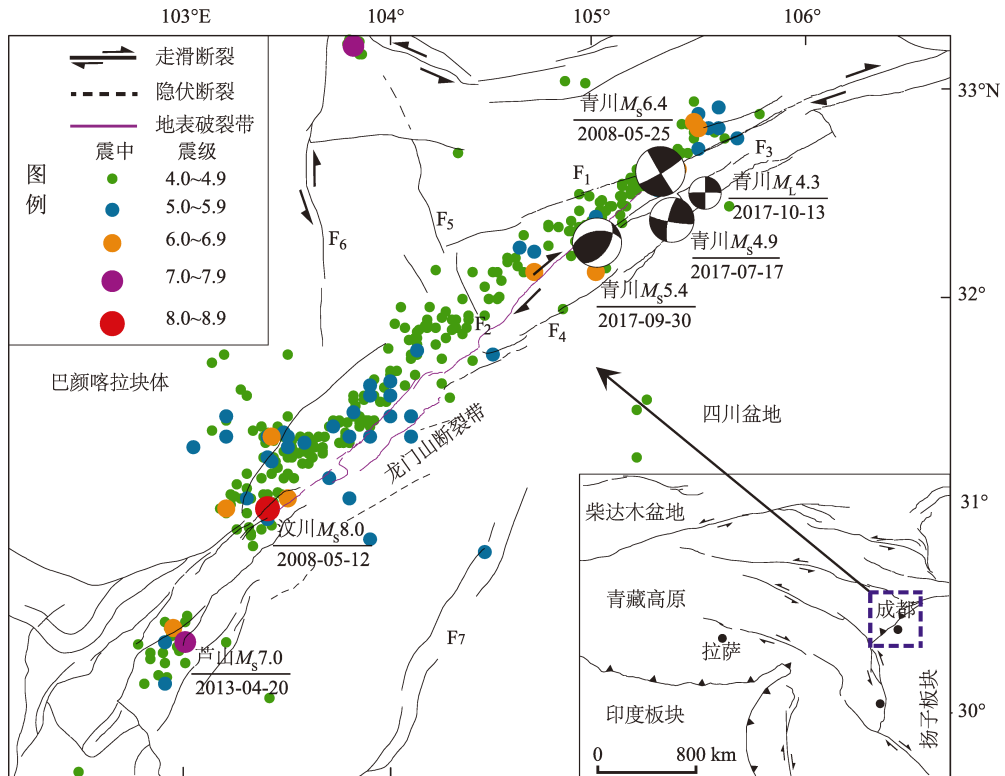
北川—映秀断裂( $F_2$ )线性特征明显, 沿断裂发育断错地貌、断层槽沟和断塞塘, 晚更新世晚期以来有强烈活动(陈国光等, 2007; Gao *et al.*, 2016)。探槽结果揭露该断裂平均强震复发周期为2 960—2 865 a(Ran *et al.*, 2010, 2013), 以兼有右旋走滑分量的逆断层型破裂为主(徐锡伟等, 2008)。

茶坝—林庵寺断裂( $F_3$ )是右旋走滑断裂, 在卫星影像上主要表现为陡崖、断层三角面、断层槽地和断层眉脊等构造地貌(谢小平等, 2019)。汶川地震前的研究认为该断裂没有晚更新世以来的地表活动证据(李传友等, 2004; 陈国光等, 2007)。汶川地震中该断裂发生破裂, 以走滑为主(Xu *et al.*, 2009; Shen *et al.*, 2009; Feng *et al.*, 2017), 具有右旋挤压特征(谢小平等, 2019)。汶川地震后, 地震学家通过开挖探槽揭露出包括汶川地震在内的3次地震(Ran *et al.*, 2014)。

灌县—江油断裂( $F_4$ )主要发育在三叠系和侏罗系地层, 汶川地震后沿该断裂连续展布的地表破裂带长约72 km, 最长可达90 km, 显示出典型的纯逆断层型地表破裂特征(徐锡伟等, 2008)。

## 2 现场地震地质调查

青川断裂呈NE走向, 几何结构连贯, 线性地貌显著, 没有明显阶区, 显示出良好的连续性和高成熟度(李传友等, 2004; Lin *et al.*, 2012; Sun, 2015)。与龙门山断裂带的其它断裂相比, 青川断裂的走滑运动作用更为显著, 自中新世晚期



F<sub>1</sub>: 青川断裂; F<sub>2</sub>: 北川—映秀断裂段; F<sub>3</sub>: 茶坝—林庵寺断裂; F<sub>4</sub>: 灌县—江油断裂; F<sub>5</sub>: 虎牙断裂

图1 汶川8.0级地震余震密集区示意图及青川断裂4次中强地震震源机制解 (修改自 Liang *et al*, 2018)  
Fig.1 Schematic diagram of aftershock-intensive area of the Wenchuan  $M_s 8.0$  earthquake and focal mechanism solution of four moderate-strong earthquakes in the Qingchuan fault (modified from Liang *et al*, 2018)

以来平均右旋滑动速率约为  $1.5 \text{ mm/a}$  (Wang *et al*, 2008; 孙浩越, 2015)。汶川8.0级地震之后, 人们通过探槽研究揭露青川断裂呈张性运动性质, 并认为这是断裂全新世活动的证据 (Lin *et al*, 2014, 2016; Sun, 2015), 而 Liang 等 (2018) 认为这种张性变形是青川断裂对北川—映秀断裂强震活动的同震响应所产生的地表变形, 并不是青川断裂自身最新活动的表现。

为了进一步确定青川断裂的运动性质, 我们在青川断裂上选了9个典型测点开展详细的地质地质调查, 并采用无人机摄影技术对断裂沿线的构造变形地貌进行测绘, 结合地貌点附近的地质剖面, 揭示青川断裂的运动特性。测点位置及信息如图2、表1所示, 各测点的典型构造地貌、无人机航拍及出露地质剖面如图3~6所示。

测点①位于青川县城西蒿溪乡大湾里村一带, 无人机获取的构造地貌显示青川断裂切过山腰和山前洪积扇, 形成反向槽谷和线性良好的坡折坎, 呈现出走滑断层的典型地貌 (图3a、b)。测点②

位于大湾里村东土地庙的断层剖面, 剖面显示断裂发育于志留系千枚岩与前泥盆系片岩之间, 断裂带由片理化带、构造角砾、断层泥等组成, 断裂运动性质为走滑兼挤压 (图3c)。

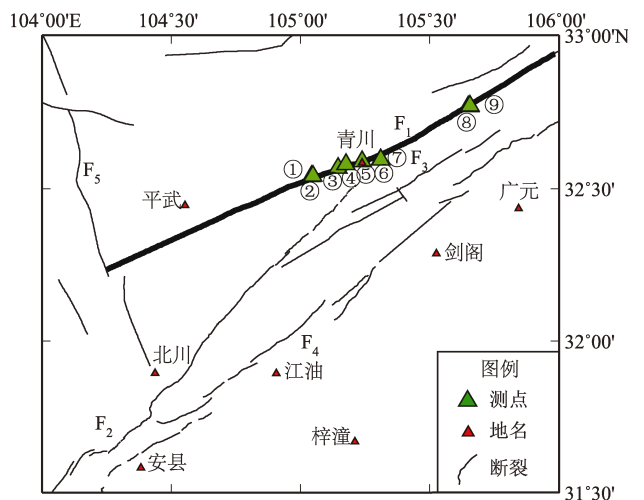


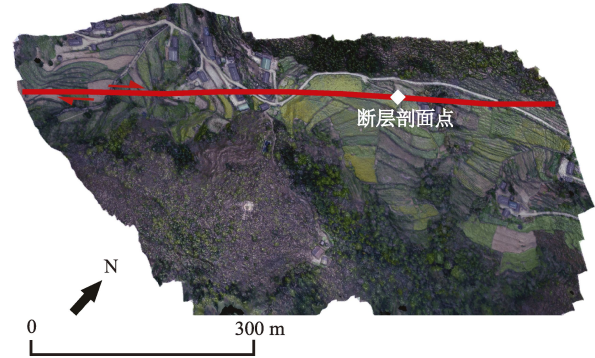
图2 沿青川断裂的地质调查测点分布  
Fig.2 Geological survey points along the Qingchuan fault

表 1 现场调查测点信息  
Tab. 1 Information of the geological survey points

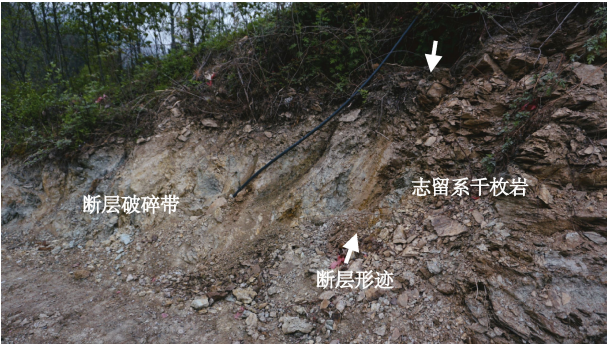
测点编号	$\lambda_E/(^{\circ})$	$\varphi_N/(^{\circ})$	测点信息	剖面物质	断裂性质
①	105. 04	32. 54	大湾里村构造地貌、无人机拍摄图	—	—
②	105. 04	32. 54	大湾里青川断裂出露剖面	片理化带、构造角砾、断层泥	走滑兼挤压
③	105. 14	32. 56	西光辉村青川断裂出露剖面	片理化带、构造角砾、断层泥	走滑兼挤压
④	105. 17	32. 57	小西坝青川断裂出露剖面	片理化带、断层泥	剪切滑动
⑤	105. 23	32. 58	乔庄河青川断裂出露剖面	片理化带、构造角砾	走滑兼挤压
⑥	105. 31	32. 59	黄土包村无人机拍摄图	—	—
⑦	105. 31	32. 59	黄土包村青川断裂出露剖面	片理化带、构造角砾	走滑兼挤压
⑧	105. 65	32. 76	路家沟村无人机拍摄图	—	—
⑨	105. 66	32. 77	路家沟村青川断裂出露剖面	片理化带、构造角砾、碎裂岩	走滑兼挤压



(a) 大湾里村一带青川断裂构造地貌 (测点①)



(b) 大湾里村无人机测绘地貌，底图基于无人机测绘数据形成 (测点①)



(c) 大湾里村青川断裂出露剖面 (测点②)

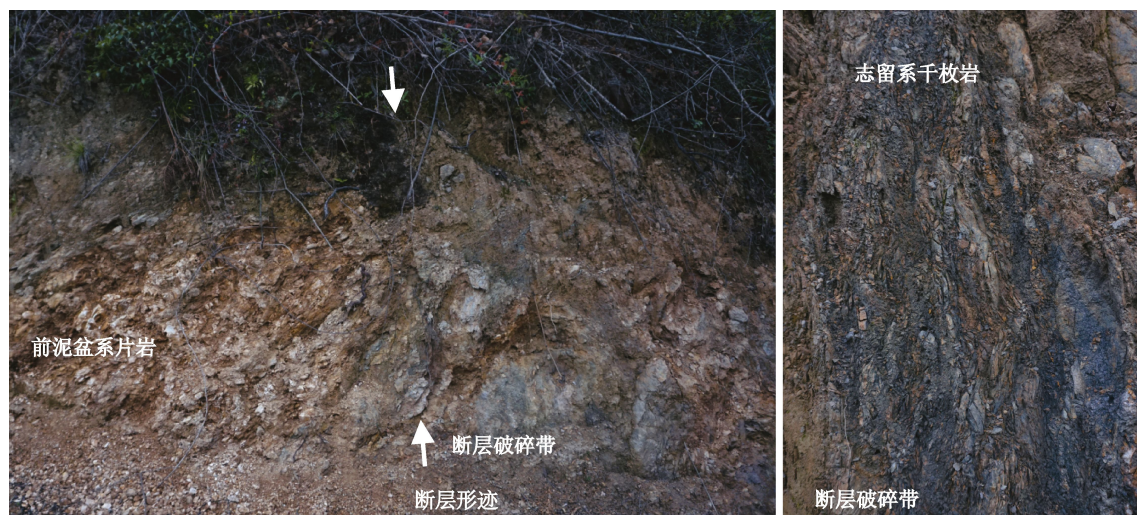
图 3 大湾里村一带青川断裂的构造地貌和断层剖面

Fig. 3 The structural geomorphology and outcrop section of the Qingchuan fault in Dawanli Village

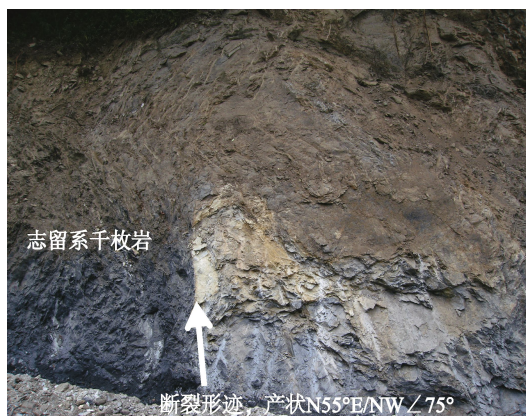


测点③、④、⑤分别是青川断裂在青川县城西光辉村、小西坝和乔庄河河床一带的出露剖面(图4)。其中,西光辉村附近断裂发育于志留系千枚岩与前泥盆系片岩之间,断层破碎带宽约6.0~8.0 m,由片理化带、构造角砾、断层泥带等组成,显示断裂运动性质为走滑兼挤压(图4a)。小西坝

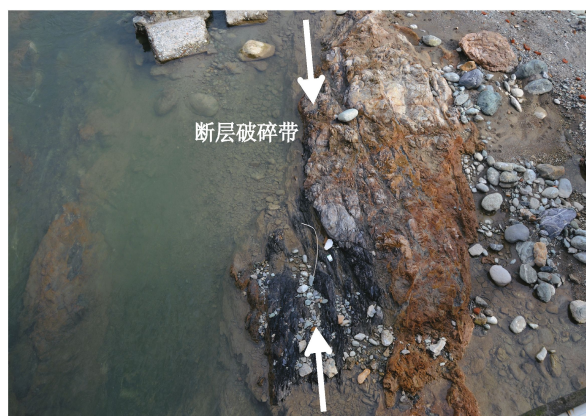
附近的断裂呈高角度,产状 $N55^{\circ}E/NW\angle 75^{\circ}$ ,断层带由片理化带、断层泥组成,显示断裂运动性质为剪切滑动(图4b)。乔庄河河床附近的断裂破碎带宽3.0~4.0 m,主要由剪切片理化带和构造角砾组成,同样显示断裂运动性质为走滑兼挤压(图4c)。



(a) 西光辉村出露剖面(测点③)



(b) 小西坝出露剖面(测点④)



(c) 乔庄河出露剖面(测点⑤)

图4 青川断裂在青川县城西光辉村、小西坝和乔庄河河床的出露剖面

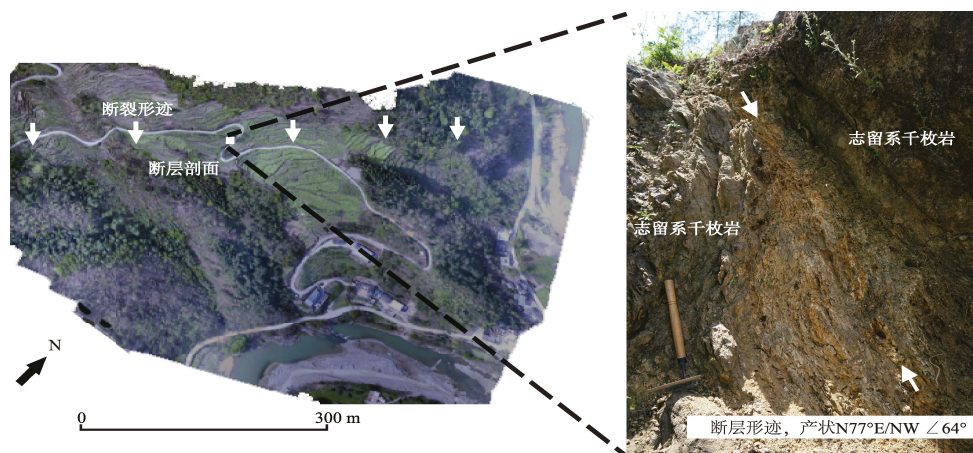
Fig. 4 Outcrop Sections of the Qingchuan fault in Xiguanghui Village, at Xiaoxiba and beside the Qiaozhuang river

测点⑥位于青川县城黄土包村一带,无人机获取的地形地貌为线性的坡折坎和断层槽谷(图5a)。测点⑦是黄土包村西侧发现的断层剖面(图5a中白色正方形位置),主断裂面宽约0.5~1.0 m,主要由片理化带和构造角砾组成(图5b),显示断裂运动性质为走滑兼挤压。

测点⑧位于广元市路家沟村附近,无人机获

取的地形地貌为线性良好的断层槽谷(图6a、b),是走滑断层的典型地貌。测点⑨是青川断裂在路家沟东约2.5 km的出露剖面(图6c),断裂带宽约7.0~8.0 m,发育于志留系千枚岩和远古界青白口系变质砂岩之间,断层破碎带由片理化带、构造角砾岩、碎裂岩等组成,显示断裂运动性质为走滑兼挤压。

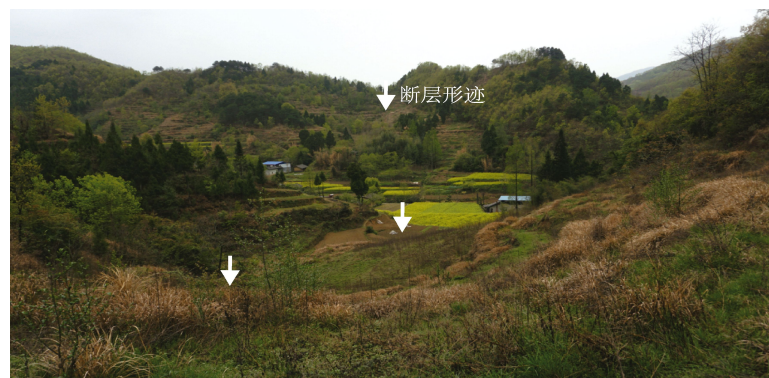




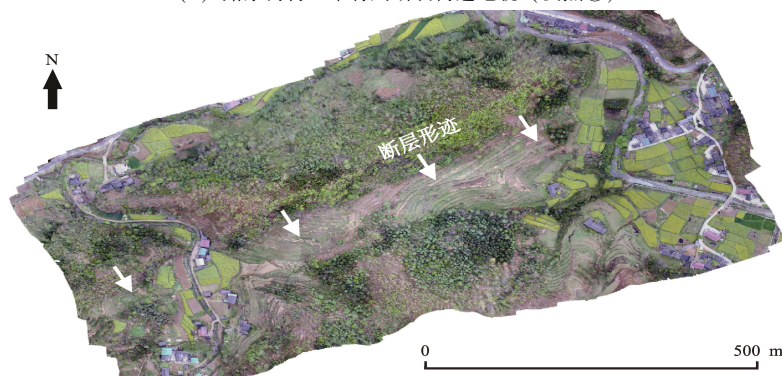
(a) 黄土包村无人机测绘地貌，底图基于无人机测绘数据形成（测点⑥） (b) 黄土包村青川断裂出露剖面（测点⑦）

图5 黄土包村附近青川断裂的构造地貌和断层剖面

Fig. 5 Structural geomorphology and outcrop section of the Qingchuan fault near Huangtubao Village



(a) 路家沟村一带青川断裂构造地貌（测点⑧）



(b) 路家沟村无人机测绘地貌，底图基于无人机测绘数据形成（测点⑧）



(c) 路家沟村青川断裂出露剖面（测点⑨）

图6 路家沟村一带青川断裂的构造地貌和断层剖面

Fig. 6 Structural geomorphology and outcrop section of the Qingchuan fault near Lujiagou Village

综上所述,青川断裂在地貌上表现为线性良好的断层槽谷、坡折带、断层垭口等典型的走滑断层特征,这些线性地貌主要发育于高台地或山坡、山腰处,而断裂沿线的低阶地未见发育。出露的断裂剖面显示,断裂带主要由片理化带、断层泥为主,局部见构造角砾,同样显示断裂以走滑运动为主,兼有一定逆冲分量的运动特征。

### 3 地震学分析

基于现场地震地质调查获得的研究区构造变形信息,本文结合震源机制解所反映的中强地震错动特征,进一步讨论两种方法所获得的研究区构造变形差异。再综合汶川、芦山、九寨沟等多次强震前后研究区应力降动态分布演化过程和三维P波速度结构特征,综合探讨青川断裂及邻区的现今地震活动性。

#### 3.1 震源机制解结果

本文利用四川数字地震台网最新观测资料,挑选信噪比较高、初动清晰、震中距小于250 km的宽频带地震台站波形数据,采用CAP方法(Zhao, Helmberger, 1994; Zhu Helmberger, 1996; Tan *et al.*, 2006)反演2008年5月17日至2021年12月31日青川断裂及邻区32次 $M_w \geq 4.0$ 地震的震源机制解,见表2。表中编号1~14是2008年的地震,编号15~23是2009—2013年的地震,编号24~32是2014—2021年的地震,震中位置为采用tomoDD方法(Zhang, Thurber, 2003, 2006)重新定位后的结果。根据断层面解和活动断裂分布推测所得的发震断裂列于表2。

计算时,将区域近震波形旋转后分解为体波(Pnl)和面波,Pnl部分取30 s窗长截取波形、采用0.05~0.20 Hz的滤波频带,面波部分取60 s窗长截取波形、采用0.05~0.1 Hz的滤波频带,使用4阶巴特沃斯带通滤波器滤波(Zoback, 1992; Pasyanos *et al.*, 1996),选用F-K方法(Zhao, Helmberger, 1994; Zhu Helmberger, 1996; Tan *et al.*, 2006)计算格林函数,并最终通过网格搜索获得每个地震的最优断层面解和主应力轴。经过比测发现,编号1~14的震源机制解结果与前人的研究相近(郑勇等, 2009; Long *et al.*, 2012; 易桂喜等, 2012),验证了计算结果的可靠性。

根据应力轴仰角参数划分断层性质(Zoback, 1992)得出,32次地震中有11次中强地震为走滑型( $P$ 轴仰角 $<40^\circ$ 、 $T$ 轴仰角 $\leq 20^\circ$ 或 $P$ 轴仰角 $\leq 20^\circ$ 、 $T$ 轴仰角 $<40^\circ$ ),17次地震为逆断型地震( $P$ 轴仰角 $\leq 35^\circ$ 且 $T$ 轴仰角 $\geq 52^\circ$ ),1次地震(编号2)为带走滑分量的逆断型地震( $P$ 轴仰角 $\leq 20^\circ$ 且 $T$ 轴仰角在 $40^\circ \sim 50^\circ$ ),另有3次地震(编号18, 19, 22)不在Zoback(1992)分类标准中(表2,图7)。

基于地质构造、活动断裂几何展布及地震活动分布特征,将青川断裂及邻区划分成3个构造单元(图7):其中,A区是北川—映秀断裂( $F_2$ )、灌县—江油断裂( $F_4$ )和茶坝—林庵寺断裂( $F_3$ )交会的区域,为汶川8.0级地震主破裂区的东段;B区是青川断裂( $F_1$ )北东段,为龙门山断裂带北段的余震密集区;C区是汶川余震序列向北东的扩展区。2008年汶川8.0级地震以来,已发生的中强地震主要集中在A区和B区,地震活动优势分布与构造线的北东向延伸方向比较一致(图1)。

在汶川8.0级地震主破裂区的东段(A区),震源机制解类型(表2,图7)主要为:北川—映秀断裂( $F_2$ )、灌县—江油断裂( $F_4$ )附近的地震,以逆冲错动为主,未在分类标准中的一次地震(编号19)也具有较大的逆冲分量,震源机制解的结果与地质考察显示的北川—映秀断裂( $F_2$ )、灌县—江油断裂( $F_4$ )的逆断层性质比较吻合(徐锡伟等, 2008);茶坝—林庵寺断裂( $F_3$ )上发生的5次中强地震既有逆断型(编号23、27、31)也有走滑型(编号26、28),与该断裂以走滑运动为主的破裂特征和右旋兼挤压性质比较一致(Xu *et al.*, 2009; Shen *et al.*, 2009; Feng *et al.*, 2017; 谢小平等, 2019);在青川断裂( $F_1$ )、北川—映秀断裂( $F_2$ )和虎牙断裂( $F_5$ )围限的三角形区域内,既有走滑型地震(编号13、20)、也有逆断型(编号25、29)和未在分类标准中的一次地震(编号18),推测可能的发震断裂是区域衍生的次级断裂。

在青川断裂( $F_1$ )北东段附近(B区),已发生的中强地震既有走滑型,也有带走滑分量的逆断型和纯逆断型地震(表2,图7),表现出较多种类的断层面解和破裂特征。野外调查发现青川断裂的破碎带物质以剪切滑动运动形成的片理化

带、断层泥为主，局部见挤压作用形成的构造角砾，具有以走滑为主、兼一定挤压逆冲分量的错动特点（表 1，图 3），推测 B 区发生的走滑型余震可能是青川断裂的剪切运动特征在地震学上的反映。而 B 区带走滑分量的逆断型地震和逆断型地震也许可以从水压致裂地应力研究中得到解释。地应力研究认为汶川地震影响了龙门山断裂带的构造应力场，在近地表至上地壳 15 km 深度范围内，

表 2 青川断裂及邻区中强地震震源机制解

Tab. 2 Focal mechanism solution of moderate- and strong-earthquakes of the Qingchuan fault and its vicinity area

序号	发震日期	<i>M</i>	<i>M<sub>w</sub></i>	节面 I			震源机制解类型	可能的发震断裂	区域
				倾角/ (°)	走向/ (°)	滑动角/ (°)			
2	2018-05-19	5.9	5.2	66	211	147	带走滑分量的逆断型	F <sub>1</sub>	B 区
4	2008-05-25	6.4	6.1	88	149	6	走滑型	F <sub>1</sub>	B 区
5	2008-05-27	5.4	5.2	88	245	163	走滑型	F <sub>1</sub>	B 区
6	2008-05-27	5.7	5.5	75	354	-17	走滑型	F <sub>1</sub>	B 区
7	2008-07-24	5.6	5.5	51	157	68	逆断型	F <sub>1</sub>	B 区
10	2008-08-05	6.2	6	47	151	78	逆断型	F <sub>1</sub>	B 区
14	2008-12-10	5.0	5.1	70	266	123	逆断型	F <sub>1</sub>	B 区
17	2009-10-29	5.3	4.5	50	341	144	逆断型	F <sub>1</sub>	B 区
21	2010-11-15	4.9	4.2	64	26	170	走滑型	F <sub>1</sub>	B 区
22	2011-05-15	5.0	4.5	71	209	134	未分类	F <sub>1</sub>	B 区
30	2018-09-12	5.5	5.3	81	167	5	走滑型	F <sub>1</sub>	B 区
32	2020-03-06	4.5	4.5	69	5	4	走滑型	F <sub>1</sub>	B 区
9	2008-08-01	6.1	5.7	67	213	108	逆断型	F <sub>2</sub>	A 区
11	2008-08-07	5.3	4.9	47	232	90	逆断型	F <sub>2</sub>	A 区
15	2009-03-12	5.2	4.5	44	129	71	逆断型	F <sub>2</sub> 的次级断裂	A 区
19	2010-08-03	4.2	4.2	55	236	107	未分类	F <sub>2</sub>	A 区
24	2014-06-10	5.0	4.8	50	97	76	逆断型	F <sub>2</sub> 的局部拐弯	A 区
23	2011-11-01	5.5	5.0	50	79	108	逆断型	F <sub>3</sub>	A 区
26	2017-07-17	4.9	4.9	76	192	8	走滑型	F <sub>3</sub>	A 区
27	2017-09-30	5.6	5.1	57	263	135	逆断型	F <sub>3</sub>	A 区
28	2017-10-13	4.3	4.3	87	270	180	走滑型	F <sub>3</sub>	A 区
31	2019-12-27	4.3	4.3	61	214	56	逆断型	F <sub>3</sub>	A 区
1	2008-05-18	6.1	5.8	47	236	103	逆断型	F <sub>4</sub> 的次级断裂	A 区
3	2008-05-20	5.0	4.9	53	22	57	逆断型	F <sub>4</sub> 的次级断裂	A 区
13	2008-11-16	5.1	5	87	346	172	走滑型	F <sub>1</sub> 、F <sub>2</sub> 和 F <sub>5</sub> 围限的三角地带衍生的次级断裂	A 区
18	2010-06-30	4.8	4.5	26	250	26	未分类	F <sub>1</sub> 、F <sub>2</sub> 和 F <sub>5</sub> 围限的三角地带衍生的次级断裂	A 区
20	2010-08-18	4.3	4.3	64	114	31	走滑型	F <sub>1</sub> 、F <sub>2</sub> 和 F <sub>5</sub> 围限的三角地带衍生的次级断裂	A 区
25	2017-04-11	4.2	4.0	69	0	96	逆断型	F <sub>1</sub> 、F <sub>2</sub> 和 F <sub>5</sub> 围限的三角地带衍生的次级断裂	A 区
29	2018-06-29	4.7	4.7	55	290	54	逆断型	F <sub>1</sub> 、F <sub>2</sub> 和 F <sub>5</sub> 围限的三角地带衍生的次级断裂	A 区
8	2008-07-24	6.0	5.6	79	17	165	走滑型	NE 向不知名次级断裂	C 区
12	2008-09-12	5.5	5.1	49	155	88	逆断型	NE 向不知名次级断裂	C 区
16	2009-09-19	5.2	5.2	37	150	40	逆断型	NE 向不知名次级断裂	C 区



北川—青川一带的震后地应力状态显示为逆走滑型, 在 15 ~ 20 km 深度范围内该区域的震后应力状态由逆冲型占主导 (丰成君等, 2018)。综上所述, 现场地震地质调查和震源机制解结果表明青川断裂的运动性质以走滑兼挤压为主, 没有表现出明显的张性运动特征。

C 区是汶川余震序列向北东的扩展区 (表 2, 图 7), 地震活动以逆冲错动为主。《中国及邻近地区地震构造图》(徐锡伟等, 2016) 显示, 这里存在一条 NE 向不知名次级断裂, 易桂喜等 (2012) 的研究指出汶川主震后调整过程中发生较多的逆冲型地震是应力在断裂带垂向方向上的补充和协调。

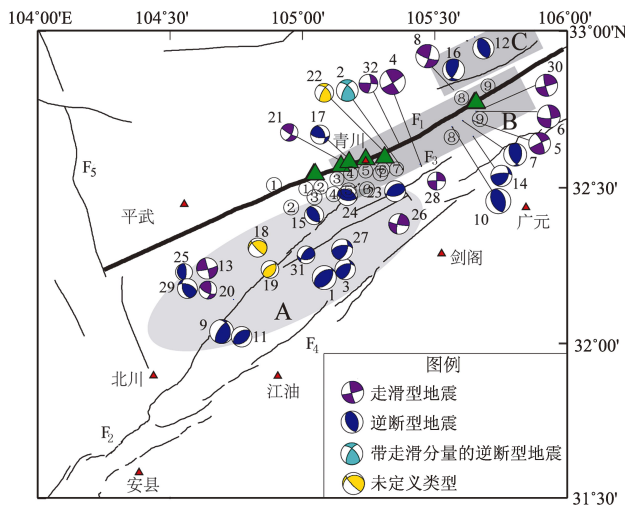


图 7 不同类型震源机制解的平面投影及构造分区  
Fig. 7 Plane projection of the focal mechanisms and the distribution of the structural segmentations

### 3.2 强震前后的应力降变化

汶川地震后, 龙门山断裂带及邻区相继发生芦山和九寨沟 2 次 7.0 级地震, 强震活动在周边断层上引起的库仑应力调整和加卸载作用受到广泛关注 (Toda *et al.*, 2008; 单斌等, 2013; 程佳等, 2018; 盛书中等, 2019)。本文采用  $\omega^2$  模型拟合震源谱获得 2009—2020 年青川断裂及邻区 3 285 次  $1.5 \leq M_L \leq 5.9$  地震的应力降值  $\Delta\sigma$ , 从 10 年尺度的应力降动态演化上分析汶川、芦山和九寨沟地震前、后青川断裂及邻区的应力调整过程和现今活动性。为了解决数据取值范围过大导致的配色问题, 统一将应力降数据取对数后绘于图

8。基于中小地震的应力降具有随震级增大而升高的特征 (赵翠萍等, 2011; 吴微微等, 2017; Wu *et al.*, 2020)。在分析比较不同地震的应力降与区域应力的关系时采用如下原则: 震级相当时, 应力降值相对高的震源区应力水平高; 应力降值相近时, 震级较低的震源区应力水平高。为了更直观地描述应力较高的区域, 取各时间段中  $\Delta\sigma \geq 1.0$  MPa (即  $\lg\Delta\sigma \geq 0$  MPa) 的应力降绘于图 9, 约定  $0 \text{ MPa} \leq \lg\Delta\sigma \leq 0.8$  MPa 的应力降为“中等应力降”,  $\lg\Delta\sigma > 0.8$  MPa 的应力降为“高应力降”。地震事件的应力降空间位置采用经 TomoDD 方法 (Zhang, Thurber, 2003, 2006) 重新定位后的结果。

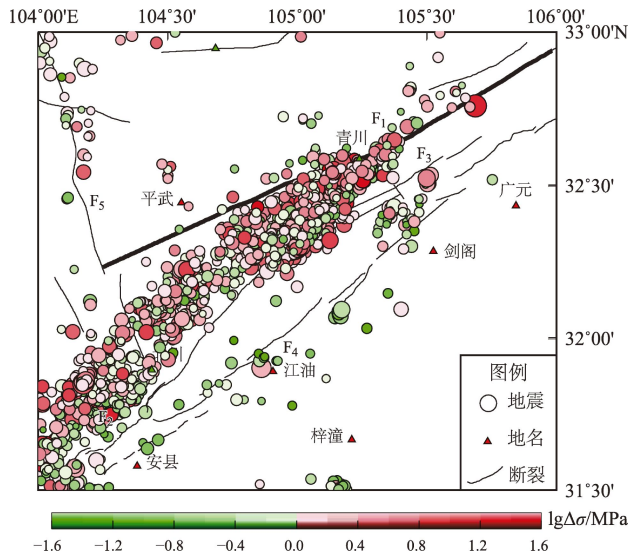


图 8 应力降空间分布  
Fig. 8 Spatial distribution of stress drop

图 8 显示, 在龙门山断裂带北东段上, 应力降  $\Delta\sigma \geq 1.0$  MPa 的地震事件主要分布在青川断裂 ( $F_1$ )、北川—映秀断裂 ( $F_2$ ) 北东段和茶坝—林庵寺断裂 ( $F_3$ ) 之间的区域, 与汶川余震序列北段的优势分布比较一致。另有一些  $\Delta\sigma \geq 1.0$  MPa 的地震事件分布在虎牙断裂 ( $F_5$ ) 附近, 而灌县—江油断裂 ( $F_4$ ) 东南侧靠近四川盆地的区域几乎没有  $\Delta\sigma \geq 1.0$  MPa 的地震事件分布。

在时间上, 区域中小地震应力降表现出与强主震较为相关的阶段性变化特征 (图 9)。阶段一为 2009—2012 年, 为汶川 8.0 级地震发生后到芦山 7.0 级地震发生前的应力变化过程。期间青川断



裂( $F_1$ )与茶坝—林庵寺断裂( $F_3$ )之间集中了较多的高应力降地震事件。汶川地震前、后应力数据也有类似结果。汶川地震前,青川测点的水平最大主应力为21~22 MPa(郭啟良等,2009),震后复测结果仍高达15~16 MPa(郭啟良等,2009),远高于龙门山断裂带南段宝兴测点的应力9.8 MPa(吴满路等,2010)。2012年开始,随着汶川余震活动的持续衰减,青川断裂及邻区高应力降事件几乎消失、中等应力降地震事件明显减少。

2013—2014年,在芦山7.0级主震发生前(2013年1月至4月19日)出现高应力降事件短暂消失的现象。4月20日芦山7.0级地震后,高应力降事件集中在距离7.0级主震较近的北川—映秀断裂( $F_2$ )附近,区域中等应力降事件明显增多、空间分布广泛,这种现象持续至2014年,期间在北川、青川分别发生多次高应力降事件,北东段应力水平呈两端高、中间低的“哑铃状”分

布格局。

从2015年开始,随着地震序列的持续衰减,地震活动逐渐减弱,几乎没有高应力降事件发生。2017年九寨沟7.0级地震对研究区应力水平没有明显影响,该地震距离青川断裂( $F_1$ )约115 km,距离北川—映秀断裂( $F_2$ )约150 km。库仑应力相关研究得出九寨沟地震仅在岷江断裂北段、塔藏断裂和虎牙断裂南段造成较明显的同震库仑应力变化(汪建军,许才军,2017)。GNSS观测的同震位移数据表明九寨沟地震对龙门山断裂带影响非常小(王阅兵等,2018)与本文的计算结果一致。

十年尺度的应力降动态演化表明,强震前、后震源区及邻区的应力水平存在明显调整过程:余震密集期的地震,其应力降普遍较震前的地震更高;余震衰减期的地震,其应力降值则相对较低。总的来说,在强主震发生后,余震序列的应力降在一段时间内呈现出升高—回落的变化过程。

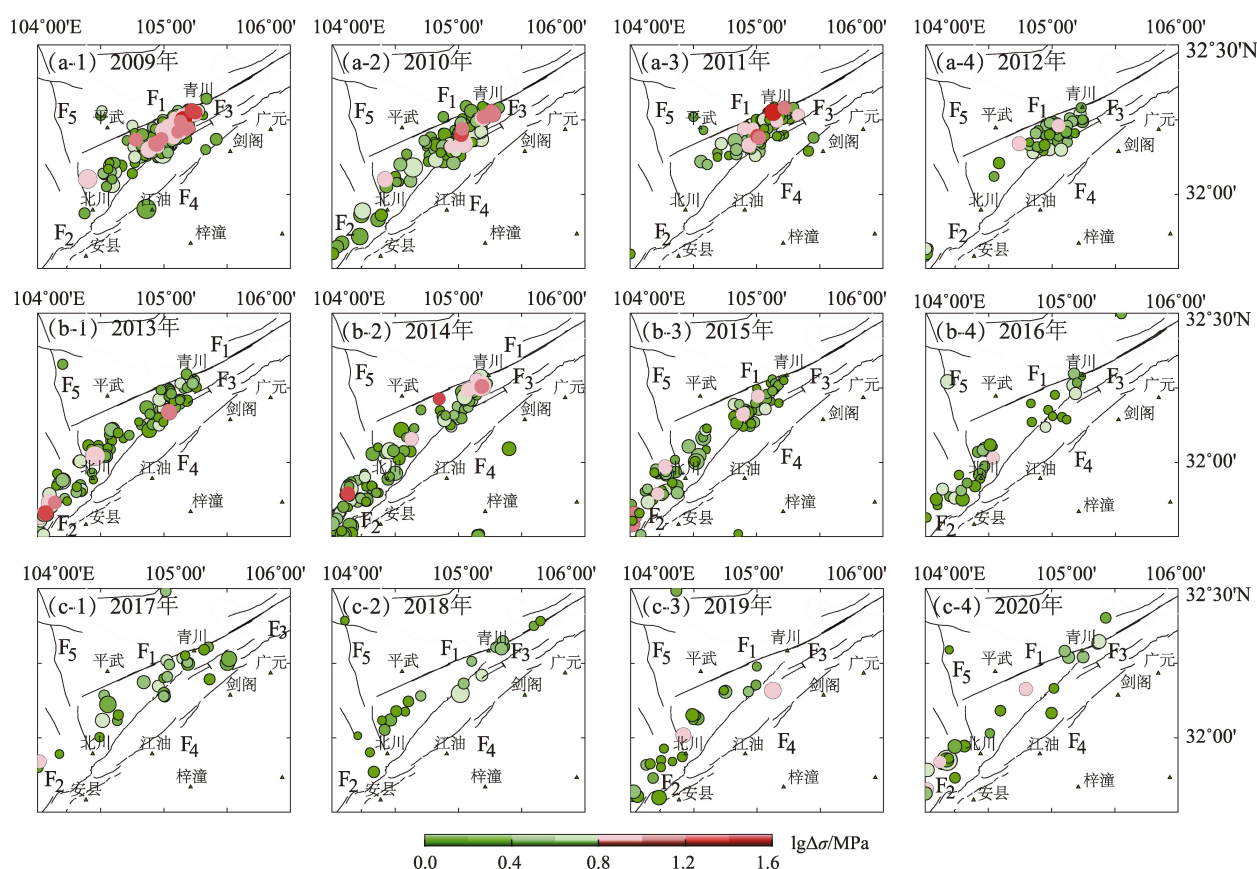


图9 2009—2012年(a)、2013—2016年(b)及2017—2020年(c)应力降时空演化( $\lg\Delta\sigma \geq 1.0$  MPa)

Fig. 9 Spatial and temporal evolution of stress drop ( $\lg\Delta\sigma \geq 1.0$  MPa) in 2009—2012 (a)

2013—2016 (b) and 2017—2020 (c)

### 3.3 速度结构特征

对汶川早期余震的研究表明, 应力积累水平的差异和龙门山断裂带不同段落间介质物性的差异可能在汶川地震的孕育与控制破裂扩展的过程中起着重要作用 (易桂喜等, 2011)。为了研究青川断裂及邻区的最新波速结构特征, 本文收集了 2009—2020 年  $M_L \geq 1.5$  的观测资料, 采用 TomoDD 双差层析成像方法 (Zhang, Thurber, 2003, 2006) 反演青川断裂及邻区 ( $31.5^\circ \sim 33.5^\circ \text{N}$ ,  $104.0^\circ \sim 106.5^\circ \text{E}$ ) 的三维 P 波速度结构, 并与汶川地震序列早期余震区波速特征进行比较。反演过程中, 挑选出至少有 4 个以上台站记录的地震事件共 7 897 个, 采用规则网格节点构建初始模型,

其中水平网格为  $0.2^\circ \times 0.2^\circ$ , 垂直网格节点为 0、5、10、15 和 20 km。正演走时计算选用伪弯曲射线追踪技术, 反演求解使用阻尼最小二乘分解算法 (LSQR) (Paige, Saunders, 1982), 阻尼因子 300, 平滑权重 40。依据前人研究成果 (赵珠等, 1997; 邓文泽等, 2014) 建立 P 波初始速度模型, 波速比为 1.71。定位过程中共拾取 P 波震相对 99 万个、S 波震相对 97 万个、事件对 14 万个, 最终获得定位地震数 7 858 个。经检测板测试, 模型中心大部分区域能够分辨  $0.2^\circ$  左右的速度异常。

遥感影像解译显示 (谢小平等, 2019), 青川断裂两侧的断块高程差异最为明显、地形起伏最大, 茶坝—林庵寺断裂及北川—映秀断裂北东段

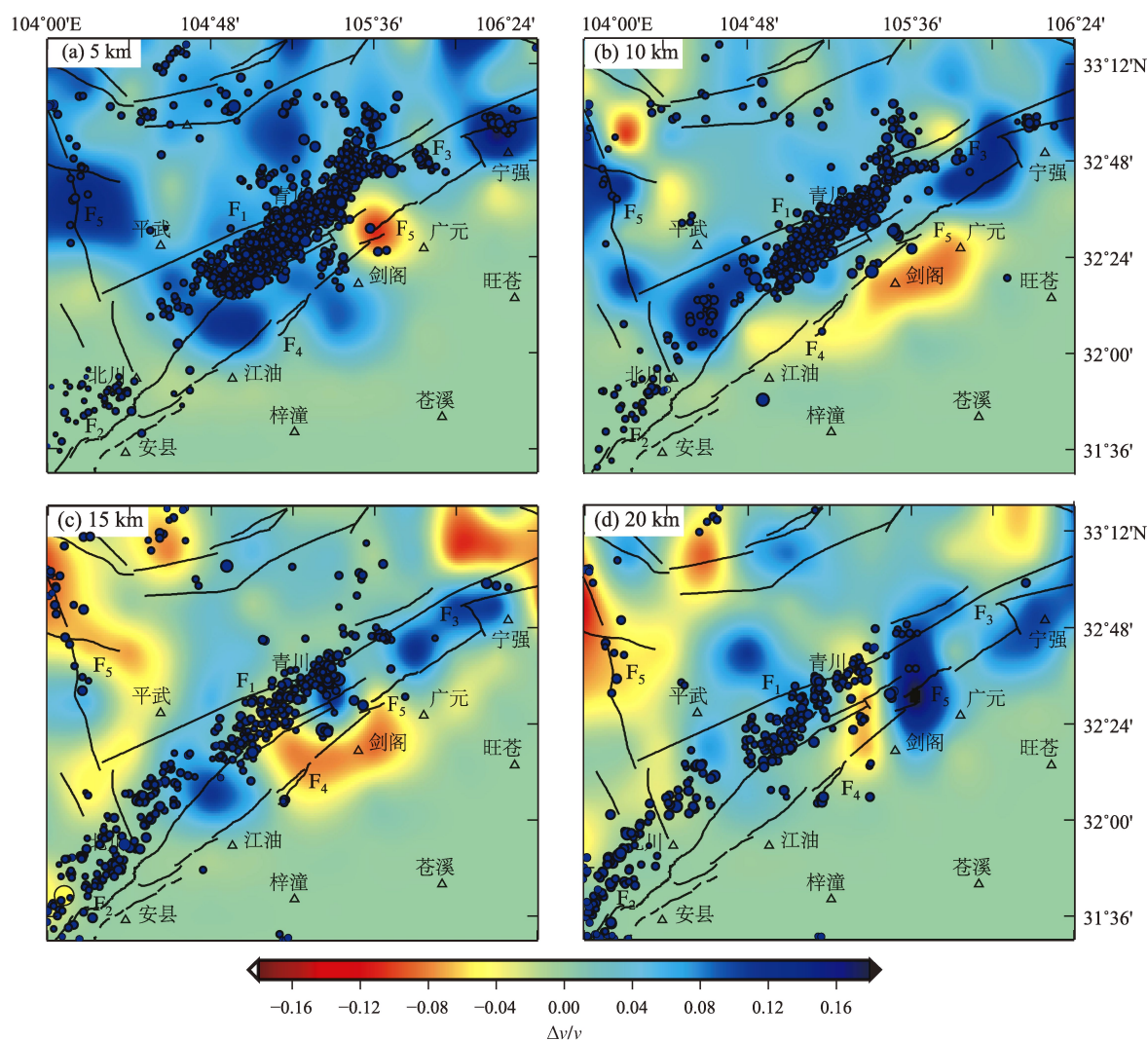


图 10 青川断裂及邻区不同深度范围的 P 波速度异常分布

Fig. 10 Distribution of the P-wave velocity anomaly at different depths beneath the Qingchuan fault and its vicinity

两侧断块高程差异次之，广元—江油断裂两侧断块的高程差异最小、地形起伏程度显著降低。在浅部上地壳深度范围内，P波速度结构图像也表现出与上述断裂的不同地形地貌、地质构造和岩相岩体特征相关的横向不均匀性（图10）。

在5 km深度层上（图10a），青川断裂（ $F_1$ ）西南段、茶坝—林庵寺断裂（ $F_3$ ）西南段、北川—映秀断裂（ $F_2$ ）北东段均为高速异常区。地质资料显示，青川断裂尾端与北川—映秀断裂之间存在地貌上的隆升区（樊春等，2008），P波速度的高速异常反映了平武、北川之间存在局部隆升和坚硬介质。青川断裂的东侧分布着广元低速异常体和宁强高速异常体，两个异常体在汶川地震序列余震阶段的研究中也有体现（吴建平等，2009）。在10 km深度上（图10b），高速异常体主要沿虎牙断裂、龙门山断裂带北段一线分布，反映在此深度上主要构造带具有高强度的特征；青川断裂西侧的高速异常范围明显缩小，整体表现为弱高速特征，局部地区出现低速异常体，形成尺度不同、高低速相间的分块结构；青川断裂西南段和北川—映秀断裂北东段的高速异常体集中在平武—北川一带，茶坝—林庵寺断裂除东北端外整体显示为弱高速异常。在15 km深度上（图10c），青川断裂与北川—映秀断裂之间的高速异常区逐渐缩小，宁强一带的高速异常程度减弱。在20 km深度上（图10d），青川断裂与北川—映秀断裂之间的高速异常区趋于消失或缩小，其它地区基本保持15 km深度的速度分布特征。

综上所述，在中、上地壳深度范围内青川断裂（ $F_1$ ）、北川—映秀断裂（ $F_2$ ）北东段和茶坝—林庵寺断裂（ $F_3$ ）之间的区域为高速异常区，与汶川地震余震早期阶段的研究结果一致（郭飏等，2009；刘启元等，2009），该区域既是汶川余震序列在龙门山断裂带北东段的优势分布区，也是震源应力降 $\Delta\sigma \geq 1.0$  MPa的地震事件的集中发生区，其高速特征反映了龙门山断裂带北东段的强度明显高于南段，这种高速坚硬岩体的发育更有利于应变能的积累与集中释放（刘启元等，2009）。

## 4 讨论

青川断裂在地表迹线可循，具备明显的多期

活动特征，说明该构造具有潜在地震发生的构造背景与能力，这揭示了汶川地震序列早期余震区北段5、6级地震频发本身所具有的构造因素，另一方面也昭示潜在震级上限可能不止6级。同时，青川断裂的线性构造地貌十分发育，显示出典型的走滑运动特性，出露的断裂剖面也显示青川断裂以走滑运动为主，兼有一定的挤压运动分量，与前人探槽开挖揭露的断层张性运动特征（Sun, 2015；Lin *et al.*, 2014, 2016；Liang *et al.*, 2018）并不一致。震源机制解结果支持青川断裂具有走滑兼挤压的运动特征，12次 $M_w \geq 4.0$ 地震中有11次走滑型或逆断型地震。沿北川—映秀断裂（ $F_2$ ）、灌县—江油断裂（ $F_4$ ）和茶坝—林庵寺断裂（ $F_3$ ）向东北延伸至青川断裂（ $F_1$ ）北东段，逐渐出现较多的走滑型地震，显示出区域应力场由逆冲过渡到走滑的变化过程。地应力研究同样显示，8~10 km和10~15 km深度范围内，上地壳应力状态在青川附近从带逆冲分量的走滑型过渡为纯走滑型，15~20 km深度范围内从逆冲型过渡到带逆冲分量的走滑型（丰成君等，2018）。这与龙门山断裂带的运动学模式（张培震等，2008）是一致的，即巴颜喀拉块体SE向运移受刚性四川盆地阻挡，在龙门山断裂带南段形成叠瓦状大型逆冲断裂带，造成地壳缩短（杜方等，2009），部分物质运动余量沿NE-SW向龙门山断裂带NE向侧移，逐渐形成由逆冲到走滑的动力学过程。

从地震活动的时空分布上看，已发生的中强地震主要集中在2个区域：一个位于青川断裂南东侧的北川—映秀断裂、灌县—江油断裂和茶坝—林庵寺断裂的交会地带（图7中A区）；另一个沿青川断裂走向展布（图7中B区），地震活动优势分布与构造线的NE向延伸方向基本一致（图1）。上述断裂呈近平行分布，多为走滑断裂或兼有走滑分量，一些研究表明发生在平行分布的走滑型构造中的中强地震往往有较强触发作用（龙锋等，2021），这可能是该区域中强地震频发的原因之一。

强震前后应力降结果表明，汶川8.0级、芦山7.0级2次强震改变了青川断裂附近的应力场，但九寨沟7.0级地震对该区域几乎没有影响。汶川、芦山地震的震后应力释放过程主要沿构造带走向发生，高应力降地震事件集中分布在主震或强余

震震中附近, 2014 年鲁甸 6.5 级和景谷 6.6 级地震有、后也有类似现象(周少辉, 蒋海昆, 2017)。芦山 7.0 级主震发生前(2013 年 1 月至 4 月 19 日), 研究区出现高应力降地震事件短暂消失的现象; 在芦山地震早期余震密集阶段, 高应力降地震事件多, 且集中在余震密集区; 在地震序列衰减阶段, 地震活动明显减少, 几乎没有高应力降地震事件发生。尽管研究样本有限, 但仍然可以看出应力降的时空变化对后续地震活动趋势有一定指示意义, 同等震级条件下余震密集期的中小地震应力降值往往高于余震衰减期, 而余震区中高应力降事件的明显减少表明区域的应力水平逐渐降低, 这也许意味着地震序列开始进入衰减期, 近期发生强震的可能性较小。

体波层析成像的结果显示, 青川断裂及邻区的地壳浅层高低速异常表现出以青川断裂带为分界线的空间分布特征, 高速异常体与局部隆升和坚硬介质比较相关。随着深度增加, 局部地区出现低速异常体, 形成尺度不一的分块结构。其中, 青川断裂表现为高速异常体, 体现了该断裂具有较高强度。15 km 深度处的青川断裂 NE 端表现为强度较弱的低波速区, 这个深度是汶川地震序列在北段的深度下限, 较弱的结构阻止了破裂的持续扩展。

## 5 结论

本文以青川断裂为研究对象, 通过详细的地质调查, 采用无人机摄影技术对断裂沿线的构造变形地貌进行测绘, 获得断裂活动的构造变形信息; 通过震源机制解反映的地震错动特征, 讨论青川断裂的构造变形特征; 采用应力降绘制汶川余震区十年尺度的应力降动态分布图像, 分析汶川、芦山和九寨沟地震对青川断裂及邻区应力水平的影响; 通过对青川断裂及邻区速度结构进行反演, 探讨深部孕震背景; 最后综合地质学和地震学研究结果分析青川断裂及邻区的现今活动性。研究表明:

(1) 青川断裂在地貌上呈现出走滑特征, 断层沿线出露的剖面主要以片理化带、断层泥为主, 局部见挤压作用形成的构造角砾。

(2) 青川断裂 NE 段为 2008 年汶川 8.0 级地

震余震北延段的密集区, 余震错动性质既有走滑型, 也有走滑兼逆断型。

(3) 震源机制解和地质地貌调查的结果均反映青川断裂的运动性质是走滑兼挤压, 而并非前人探槽所揭露的断层张性活动特征。

(4) 汶川、芦山两次强震发生前后, 青川断裂及邻区的应力水平在一段时间内呈现出升高—回落的调整过程。

(5) 体波层析成像的结果显示青川断裂及邻区的地壳浅层高低速异常表现以龙门山断裂带为分界线的空间分布特征。

(6) 虽然青川断裂具有潜在地震发生的构造背景与能力, 但目前该断裂及邻区的地震活动正处于强震序列衰减阶段,  $M_{4.0}$  以上地震活动呈逐渐减弱的趋势, 高应力降地震事件明显减少, 区域整体应力水平较低。

## 参考文献:

- 陈国光, 计凤枯, 周荣军, 等. 2007. 龙门山断裂带晚第四纪活动性分段的初步研究[J]. 地震地质, 29(3): 657-673.
- 程佳, 姚生海, 刘杰, 等. 2018. 2017 年九寨沟地震所受历史地震黏弹性库仑应力作用及其后续对周边断层地震危险性的影响[J]. 地球物理学报, 61(5): 2133-2151.
- 邓起东, 陈社发, 赵小麟. 1994. 龙门山及其邻区的构造和地震活动及动力学[J]. 地震地质, 16(4): 389-403.
- 邓文泽, 陈九辉, 郭飏, 等. 2014. 龙门山断裂带精细速度结构的双差层析成像研究[J]. 地球物理学报, 57(4): 1101-1110.
- 杜方, 闻学泽, 张培震, 等. 2009. 2008 年汶川 8.0 级地震前横跨龙门山断裂带的震间形变[J]. 地球物理学报, 52(11): 2729-2738.
- 杜建军, 马寅生, 尹成明, 等. 2013. 龙门山北部陕甘川交界三角构造区断裂活动特征研究[J]. 地震学报, 35(4): 520-533.
- 樊春, 王二七, 王刚, 等. 2008. 龙门山断裂带北段晚新近纪以来的右行走滑运动及其构造变换研究——以青川断裂为例[J]. 地质科学, 43(3): 417-433.
- 丰成君, 戚帮申, 张鹏, 等. 2018. 汶川  $M_{8.0}$  地震后龙门山断裂带地壳应力场及其构造意义[J]. 地质力学学报, 24(4): 439-451.
- 郭飏, 刘启元, 陈九辉, 等. 2009. 川西龙门山及邻区地壳上地幔远震 P 波层析成像[J]. 地球物理学报, 52(2): 346-355.
- 郭敬良, 王成虎, 马洪生, 等. 2009. 汶川  $M_{8.0}$  级大震前后的水压致裂原地应力测量[J]. 地球物理学报, 52(5): 1395-1401.
- 胡幸平, 俞春泉, 陶开, 等. 2008. 利用 P 波初动资料求解汶川地震及其强余震震源机制解[J]. 地球物理学报, 51(6): 1711-1718.
- 李传友, 宋方敏, 冉勇康. 2004. 龙门山断裂带北段晚第四纪活动性讨论[J]. 地震地质, 26(2): 248-258.
- 刘启元, 李昱, 陈九辉, 等. 2009. 汶川  $M_{8.0}$  地震: 地壳上地幔 S 波



- 速度结构的初步研究[J]. 地球物理学报, 52(2): 309–319.
- 龙锋, 倪四道, 闻学泽. 2011. 用远震接收函数研究龙门山断裂带与其邻区的莫霍面深度及波速比分布[J]. 地球学报, 32(4): 438–446.
- 龙锋, 祁玉萍, 易桂喜, 等. 2021. 2021年5月21日云南漾濞  $M_s 6.4$  地震序列重新定位与发震构造分析[J]. 地球物理学报, 64(8): 2631–2646.
- 单斌, 熊熊, 郑勇, 等. 2009. 2008年5月12日  $M_w 7.9$  汶川地震导致的周边断层应力变化[J]. 中国科学: 地球科学, 39(5): 537–545.
- 单斌, 熊熊, 郑勇, 等. 2013. 2013年芦山地震导致的周边断层应力变化及其与2008年汶川地震的关系[J]. 中国科学: 地球科学, 43: 1002–1009.
- 盛书中, 万永革, 徐锡伟, 等. 2019. 用大量地震震源机制解检验2008年汶川地震对后续地震的触发作用[J]. 地球物理学报, 62(12): 4588–4603.
- 石玉涛, 高原, 张永久, 等. 2013. 松潘—甘孜地块东部、川滇地块北部与四川盆地西部的地壳剪切波分裂[J]. 地球物理学报, 56(2): 481–494.
- 孙浩越. 2015. 青川断裂晚第四纪活动性及其对区域构造运动模式的约束[D]. 北京: 中国地震局地质研究所, 59.
- 汪建军, 许才军. 2017. 2017年  $M_w 6.5$  九寨沟地震激发的同震库仑应力变化及其对周边断层的影响[J]. 地球物理学报, 60(11): 4398–4420.
- 王阅兵, 甘卫军, 陈为涛, 等. 2018. GNSS观测的九寨沟7.0级地震同震位移初步结果[J]. 地球物理学报, 61(1): 161–170.
- 吴建平, 黄媛, 张天中, 等. 2009. 汶川  $M_s 8.0$  地震余震分布及周边区域P波三维速度结构研究[J]. 地球物理学报, 52(2): 320–328.
- 吴满路, 张岳桥, 廖椿庭, 等. 2010. 汶川地震后沿龙门山断裂带原地应力测量初步结果[J]. 地质学报, 84(9): 1291–1299.
- 吴微微, 魏娅玲, 龙锋, 等. 2020. 2017年8月8日四川九寨沟  $M 7.0$  地震及其余震序列的震源参数[J]. 地震地质, 42(2): 492–512.
- 吴微微, 吴朋, 魏娅玲, 等. 2017. 川滇活动块体中—北部主要活动断裂带现今应力状态的分区特征[J]. 地球物理学报, 60(5): 1735–1745.
- 谢小平, 白毛伟, 陈芝聪, 等. 2019. 龙门山断裂带北东段活动断裂的遥感影像解译及构造活动性分析[J]. 国土资源遥感, 31(1): 237–246.
- 徐锡伟, 韩竹军, 杨晓平, 等. 2016. 中国及邻近地区地震构造图[M]. 北京: 地震出版社.
- 徐锡伟, 闻学泽, 叶建青, 等. 2008. 汶川  $M_s 8.0$  地震地表破裂带及其发震构造[J]. 地震地质, 30(3): 597–629.
- 易桂喜, 龙锋, 张致伟. 2012. 汶川  $M_s 8.0$  地震余震震源机制时空分布特征[J]. 地球物理学报, 55(4): 1213–1227.
- 易桂喜, 闻学泽, 辛华, 等. 2011. 2008年汶川  $M_s 8.0$  地震前龙门山—岷山构造带的地震活动性参数与地震视应力分布[J]. 地球物理学报, 54(6): 1490–1500.
- 张培震, 徐锡伟, 闻学泽, 等. 2008. 2008年汶川8.0级地震发震断裂的滑动速率、复发周期和构造成因[J]. 地球物理学报, 51(4): 1066–1073.
- 赵翠萍, 陈章立, 华卫, 等. 2011. 中国大陆主要地震活动区中小地震震源参数研究[J]. 地球物理学报, 54(6): 1478–1489.
- 赵珠, 范军, 郑斯华, 等. 1997. 龙门山断裂带地壳速度结构和震源位置的精确修订[J]. 地震学报, 19(6): 615–622.
- 郑勇, 马宏生, 吕坚, 等. 2009. 汶川地震强余震( $M_s \geq 5.6$ )的震源机制解及其与发震构造的关系[J]. 中国科学: 地球科学, 39(4): 413–426.
- 周少辉, 蒋海昆. 2017. 景谷6.6级、鲁甸6.5级地震序列应力降变化对比研究[J]. 中国地震, 33(1): 23–37.
- Feng G C, Jónsson S, Klinger Y. 2017. Which fault segments ruptured in the 2008 Wenchuan earthquake and which did not? New evidence from near-fault 3D surface displacements derived from SAR image offsets[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 107(3): 1185–1200.
- Gao M X, Zeilinger G, Xu X W, et al. 2016. Active tectonics evaluation from geomorphic indices for the central and the southern Longmen-shan range on the Eastern Tibetan Plateau, China[J]. Tectonics, 35(8): 1812–1826.
- Liang M J, Ran Y K, Wang H, et al. 2018. A possible tectonic response between the Qingchuan Fault and the Beichuan–Yingxiu Fault of the Longmen Shan Fault Zone? evidence from geologic observations by Paleoseismic trenching and radiocarbon dating[J]. Tectonics, 37: 4086–4096.
- Lin A M, Chen P, Satsukawa T, et al. 2016. Millennium recurrence interval of morphogenic earthquakes on the Qingchuan fault, northeastern segment of the Longmen Shan Thrust Belt, China[J]. Journal of Seismology, 20(2): 535–553.
- Lin A M, Gang R, Bing Y. 2012. Field evidence of rupture of the Qingchuan Fault during the 2008  $M_w 7.9$  Wenchuan earthquake, northeastern segment of the Longmen Shan Thrust Belt, China[J]. Tectonophysics, 522–523: 243–252.
- Lin A M, Gang R, Bing Y. 2014. Structural analysis of the right-lateral strike-slip Qingchuan fault, northeastern segment of the Longmen Shan thrust belt, central China[J]. Journal of Structural Geology, 68: 227–244.
- Long F, Yi G X, Wen X Z. 2012. Spatio-temporal variation of the stress field in the Wenchuan aftershock region[J]. Earthquake Science, 25(S1): 517–526.
- Paige C C, Saunders M A. 1982. LSQR: An algorithm for sparse linear equations and sparse least squares[J]. ACM Transactions on Mathematical Software(TOMS), 8(1): 43–71.
- Pasyanos M E, Dreger D S, Romanowicz B. 1996. Towards real-time estimation of regional moment tensors[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 86(5): 1255–1269.
- Ran Y K, Chen L C, Chen J, et al. 2010. Paleoseismic evidence and repeat time of large earthquakes at three sites along the Longmenshan fault



- zone[J]. Tectonophysics, 491(1-4):141-153.
- Ran Y K, Chen W S, Xu X W, *et al.* 2013. Paleoseismic events and recurrence interval along the Beichuan - Yingxiu fault of Longmenshan fault zone, Yingxiu, Sichuan, China [J]. Tectonophysics, 584: 81-90.
- Ran Y K, Chen W S, Xu X W, *et al.* 2014. Late Quaternary paleoseismic behavior and rupture segmentation of the Yingxiu - Beichuan Fault along the Longmenshan fault zone, China[J]. Tectonics, 33(11): 2218-2232.
- Shen Z K, Sun J, Zhang P, *et al.* 2009. Slip maxima at fault junctions and rupturing of barriers during the 2008 Wenchuan earthquake[J]. Nature Geoscience, 2(10): 718-724.
- Sun H Y. 2015. Late quaternary activity of the Qingchuan fault; Implications for the tectonic movement mechanism in regional area[D]. Beijing: Institute of Geology, China Earthquake Administration.
- Tan Y, Zhu L P, Helmberger D V, *et al.* 2006. Locating and modeling regional earthquakes with two stations[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 111(B1): B01306.
- Toda S J, Lin J, Meghraoui M, *et al.* 2008. 12 May 2008  $M = 7.9$  Wenchuan, China, earthquake calculated to increase failure stress and seismicity rate on three major fault systems[J]. Geophysical Research Letters, 35(17): L17305.
- Wang Y Z, Wang E N, Shen Z K, *et al.* 2008. GPS - constrained inversion of present - day slip rates along major faults of the Sichuan - Yunnan region, China [J]. Science in China Series D: Earth Sciences, 51(9): 1267-1283.
- Wu W W, Long F, Liang M J, *et al.* 2020. Spatial and Temporal Variations in Earthquake Stress Drops between the 2008 Wenchuan and 2013 Lushan Earthquakes[J]. Acta Geologica Sinica (English edition), 94(5): 1635-1650.
- Xu X W, Wen X Z, Yu G H, *et al.* 2009. Coseismic reverse- and oblique-slip surface faulting generated by the 2008  $M_w 7.9$  Wenchuan earthquake, China[J]. Geology, 37(6): 515-518.
- Zhang H J, Thurber C H. 2003. Double - difference tomography: The method and its application to the Hayward fault, California[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 93(5): 1875-1889.
- Zhang H J, Thurber C H. 2006. Development and applications of double - difference seismic tomography[J]. Pure and Applied Geophysics, 163(2): 373-403.
- Zhao L S, Helmberger D V. 1994. Source estimation from broadband regional seismograms[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 84(1): 91-104.
- Zhu L P, Helmberger D V. 1996. Advancement in source estimation techniques using broadband regional seismograms[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 86(5): 1634-1641.
- Zoback M L. 1992. First - and second - order patterns of stress in the lithosphere: The world stress map project[J]. Journal of Geophysical Research, 97(B8): 11703-11728.

## Analysis of the Present-day Activity of the Qingchuan Fault and Its Vicinity

WU Weiwei, LIANG Mingjian, LONG Feng, SU Jinrong, CHEN Xuefen  
(Sichuan Earthquake Agency, Chengdu 610041, Sichuan, China)

### Abstract

In recent years, earthquakes ( $M \geq 4.0$ ) have been repeatedly occurring on the Qingchuan fault and in its adjacent region. Firstly, we conduct a geological investigation and carry out a surveying and mapping of landforms area by the unmanned aviation vehicle in the study in order to obtain the tectonic deformation of the Qingchuan fault. Secondly, we use the cut-and-paste method to invert the focal mechanisms of 32 earthquakes ( $M_w \geq 4.0$ ) occurring during May 17 – December 31, 2008 in the study area, and further study the tectonic features of the Qingchuan fault. Thirdly, we use the  $\omega^2$  model to fit the source spectra to obtain the dynamic evolution of the stress drop in 10-year span in the study area. Then we analyze the stress variation before and after the 2008 Wenchuan earthquake, the 2013 Lushan earthquake, the 2017 Jiuzhaigou earthquake. Fourthly, we invert the P – wave velocity structure in the study area to discuss the tectonic settings for the earthquake genesis in the deep. Finally, on the basis of the above the geological and seismological results we analyze the present-day activity of the Qingchuan fault. We find that: ①The geological survey and the focal mechanism solution show that movement property of the Qingchuan fault is mainly strike-slip, with a certain compressive component. ②Before and after the 2008 Wenchuan earthquake and the 2013 Lushan earthquake, the stress in the study area experienced a rise – fall period. ③Spatially, the body-wave tomography shows that the high-speed anomaly and low-speed anomaly in the shallow Crust are divided by the Longmenshan fault. ④The Qingchuan fault is an earthquake-prone structure because of its tectonic settings. So far, the strong-earthquake activity is in the weakening period; the seismicity ( $M \geq 4.0$ ) takes on a trend of gradual attenuation. High stress-drop events are significantly lessening and the overall stress level in the study area is relatively low.

**Keywords:** the Qingchuan fault and its vicinity; the Wenchuan  $M_s 8.0$  earthquake; focal mechanism; stress drop; velocity structure; earthquake activity