

# 横断层作用下汶川地震与芦山地震发震机制新探

王伟锋<sup>1</sup>, 卿艳彬<sup>1</sup>, 朱传华<sup>1</sup>, 单新建<sup>2</sup>

(1. 中国石油大学(华东) 地球科学与技术学院, 山东 青岛 266580;

2. 中国地震局地质研究所 地震动力学国家重点实验室, 北京 100029)

**摘要:**在分析龙门山断裂带区域构造背景、青藏高原东缘新构造运动特征的基础上, 阐述龙门山断裂带的构造格局, 并利用横断层对龙门山断裂带进行分段; 同时, 对汶川地震与芦山地震的发震机制及其相互关系进行探讨, 并对未来强震危险区进行预测。结果表明: 汶川地震具有深部构造的控震作用, 其深部孕震机制十分复杂, 而芦山地震没有明显的地表破裂带, 为一次盲逆断层型地震; 卧龙—怀远一线为地壳物质运动方向和主断裂走滑方向发生反向的转换带, 发生在其两侧的地震是各自独立的, 即汶川地震与芦山地震相互独立; 汶川地震与芦山地震发震时, 龙门山断裂带中未活动的区域存在较高的地震危险性, 尤其是卧龙—怀远和小金横断层之间的断块为强震危险区, 虎牙断裂与主断裂交汇处也是强震较危险区。

**关键词:** 龙门山断裂带; 青藏高原东缘; 横断层; 汶川地震; 芦山地震; 发震机制

**中图分类号:** P315

**文献标志码:** A

## New Viewpoints of the Seismogenic Mechanism of Wenchuan and Lushan Earthquakes Under the Action of Transverse Fault

WANG Wei-feng<sup>1</sup>, QING Yan-bin<sup>1</sup>, ZHU Chuan-hua<sup>1</sup>, SHAN Xin-jian<sup>2</sup>

(1. School of Geosciences, China University of Petroleum, Qingdao 266580, Shandong, China; 2. State Key Laboratory of Earthquake Dynamics, Institute of Geology, China Earthquake Administration, Beijing 100029, China)

**Abstract:** Regional tectonic background of Longmenshan fault zone and characteristic of neotectonic movement in the eastern margin of Qinghai-Tibet Plateau were analyzed; the tectonic framework of Longmenshan fault zone was explained, and the transverse fault was used to segment Longmenshan fault zone; meantime, the seismogenic mechanism of Wenchuan and Lushan earthquakes and their relationship were discussed, and the dangerous area with great earthquake in the future was predicted. The results show that Wenchuan earthquake has the earthquake-controlling function of deep tectonic, and the deep seismogenic mechanism is very complex, but there is no obvious surface rupture in Lushan earthquake, which is a blind reverse-fault earthquake; the movement direction of crustal material and the strike-slip direction of main fault are reversed at Wolong-Huaiyuan, and the earthquakes occur on the sides of Wolong-Huaiyuan are independent, so that Wenchuan and Lushan earthquakes are independent of each other; the inactive area in Longmenshan fault zone during the occurrences of Wenchuan and Lushan earthquakes may have a high seismic risk, especially the fault blocks between Wolong-Huaiyuan and Xiaojin transverse faults are dangerous with great earthquakes, and the intersections of Huya fault and Longmenshan main faults are also dangerous

收稿日期: 2014-03-31

基金项目: 国家自然科学基金项目(41340008)

作者简介: 王伟锋(1958-), 男, 山东聊城人, 教授, 博士研究生导师, 工学博士, E-mail: wangwf@upc.edu.cn.

with great earthquakes.

**Key words:** Longmenshan fault zone; the eastern margin of Qinghai-Tibet Plateau; transverse fault; Wenchuan earthquake; Lushan earthquake; seismogenic mechanism

## 0 引言

汶川地震与芦山地震造成大量的人员伤亡和巨大的财产损失<sup>[1-2]</sup>。前人就两次地震的关系进行了广泛探讨。笔者也一直密切关注这两次地震发震机制及其相互关系。汶川地震余震仅朝 NE 向迁移且呈脉冲式发震,芦山地震仅朝 SW 向迁移,两次地震之间尚有大约 50 km 的余震空白段,未来强震区分布等问题的合理解释仍未见到令人信服的研究成果。为了弄清楚上述问题,笔者在分析国内外逆冲断裂带发震的震例基础上,在了解龙门山断裂带区域构造背景的前提下,研究青藏高原东缘新构造运动特征和龙门山断裂带构造格局,探讨汶川地震与芦山地震的发震机制及其相互关系,预测未来强震危险区,为龙门山地区的地震灾害防治提供参考。

## 1 区域构造背景

龙门山造山带位于青藏高原东缘与扬子地块的交接部位,NE 向延入秦岭造山带后为勉略断裂所截,北端在汉中附近,SW 向与康滇南北构造带的鲜水河断裂相接,南端在石棉附近,长度超过 600 km,东西宽 30~70 km(图 1)。该造山带 NW—SE 向发育有 4 条主干断裂:茂县—汶川断裂(后山断裂)、北川—映秀断裂(中央断裂)、安县—灌县断裂(前山断裂)和广元—大邑(隐伏)断裂(山前断裂)。龙门山断裂带具有东西分带、南北分段、上下分层及多期叠加的构造特征,邓起东等对此进行了大量研究<sup>[3-10]</sup>。

龙门山断裂带形成演化的动力是松潘—甘孜地块南北挤压派生的向东挤出力,这种挤出力作用在相对刚性的四川盆地西部边界上。由于反作用力的作用,沿龙门山断裂带不同段落,上盘块体运动方式和方向存在很大差异。松潘—甘孜地块喇叭状的平面几何形态特征表明,随着 SN 向持续挤压,松潘—甘孜地块西部越来越窄,挤出分力使东部越来越宽,块体不断沿龙门山断裂带呈 NE 和 SW 向运动,具体表现为断裂带北部逆冲右行滑动,中段正向逆冲推覆,南段逆冲左行走滑,NE 向和 SW 向走滑作用越来越强。

## 2 青藏高原东缘新构造运动特征

青藏高原东缘地壳变形和断裂作用强烈,并

伴随着频繁的地震活动,是研究热点区域。晚新生代以来,青藏高原东缘新构造运动对龙门山构造带的形成与演化起着至关重要的作用。因此,为了更好地研究汶川与芦山地震的发震机制及其关系,有必要分析青藏高原东缘构造运动模式、现今地壳运动特征和主要活动断裂特征。

### 2.1 构造运动模式

目前,对于青藏高原东缘晚新生代以来的构造运动主要存在 3 种模式:①向东逃逸模式,青藏高原内部板块以刚性滑动形式沿主干断裂向东整体滑动<sup>[11-12]</sup>,强调走滑断裂作用;②地壳增厚模式,在印度板块 NNE 向挤压作用下,青藏高原内部岩石圈以弹性或粘弹性性质通过连续形变方式向东挤出<sup>[13]</sup>,强调连续介质的内部应变和旋转;③下地壳通道流模式,上地壳通过与下地壳的耦合作用向东进行物质转移<sup>[14-18]</sup>,强调下地壳塑性物质的流动。Royden 等提出了中下地壳层流(Channel Flow)模型<sup>[14-16]</sup>,认为由于四川盆地高强度岩石圈的阻挡,使得下地壳物质在龙门山之下堆积形成巨厚的地壳和海拔 5 000 m 以上的地貌。

### 2.2 现今地壳运动特征

GPS 监测的速度场资料<sup>[19-22]</sup>显示:青藏高原东部地区现今速度场向东发生明显的“分流”现象,以南向南顺时针旋转,形成绕喜马拉雅东构造结涡轮状运动,以北呈 NE 向运动,即松潘—甘孜地块在向东运动时受秦岭造山带和四川盆地阻挡后呈 SE 向运动,在四川盆地西南侧地壳运动方向逐渐由 SE 向转向正南方向(图 2)。现今地壳运动的转向界线大致在汶川地震震中到芦山地震震中一带。

龙门山地区存在的下地壳流体受到四川盆地刚性基底的阻挡<sup>[23-25]</sup>,其向东运动时,在水平方向上发生分流,即沿四川盆地的西边界分别呈 NE 向和 SW 向运动。而分流线的位置大致在汶川地震震中一线(图 2 中黑色虚线箭头),这与地表地壳物质运动分界线基本吻合。例如,龙门山地区在新近纪晚期存在较大规模的右行走滑,与四川盆地东北侧下地壳流体的运动方向一致,说明右行走滑的成因机制可能与下地壳流体的运动有关,是下地壳流体的运动在地表的表现,即由于下地壳流体水平运动的拖曳作用,使其上部的上地壳物质也发生了同方向

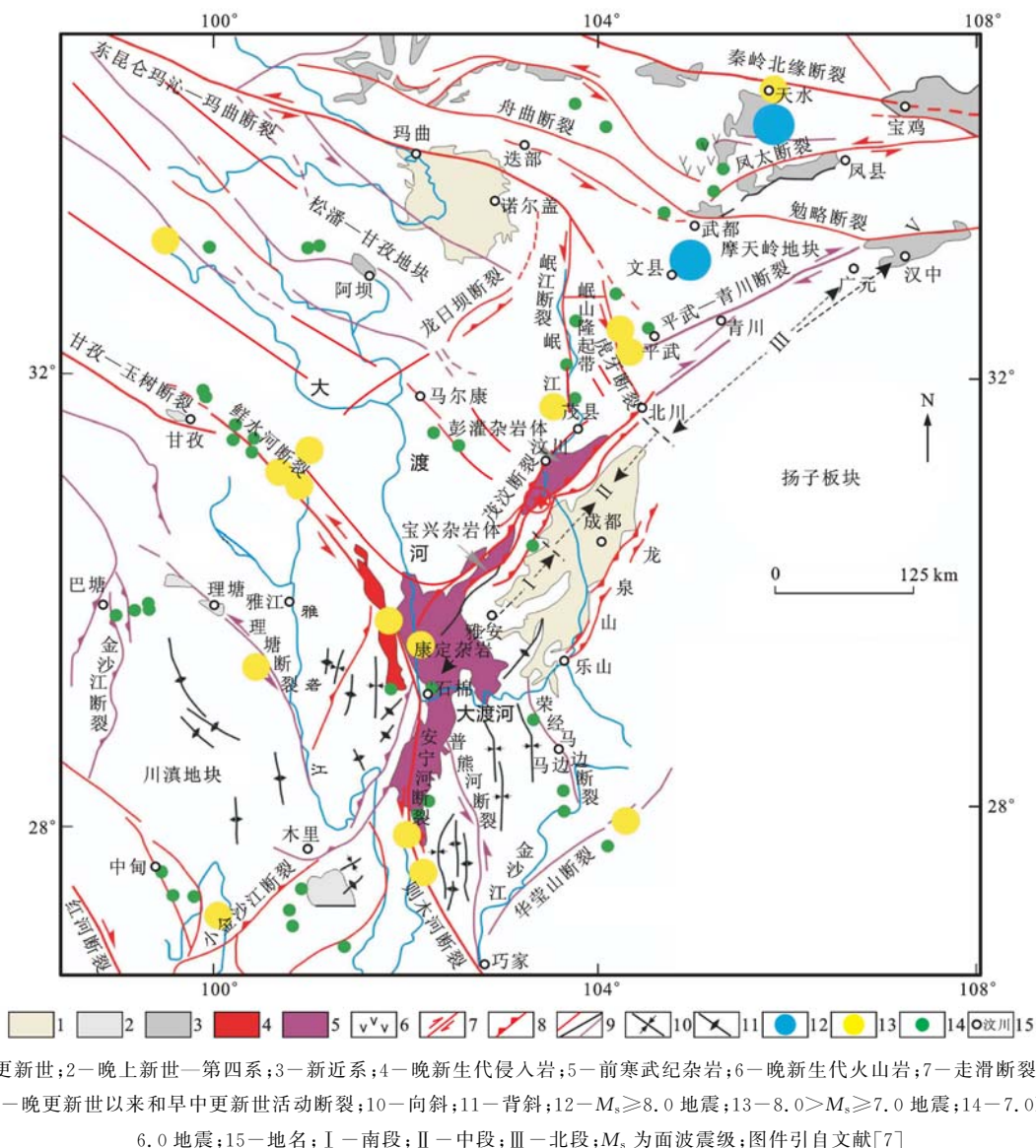


图1 青藏高原东缘活动构造纲要

Fig. 1 Active Tectonic Outline in the Eastern Margin of Qinghai-Tibet Plateau

的运动,从而在映秀—北川和汶川—青川等右行走滑—逆冲断层形成汶川主地震和向北迁移的系列余震<sup>[26]</sup>。此外,在龙门山造山带南段西侧发育大型南凸弧形逆冲带,表明该地区发生了强烈的由北向南逆冲作用(图3),这一作用无疑会使附近的龙门山断裂带南段发生左行压扭运动,再加上下地壳流动的拖拽,浅层断裂左行走滑运动也应该是显著的,因此,芦山地震余震向SW迁移。

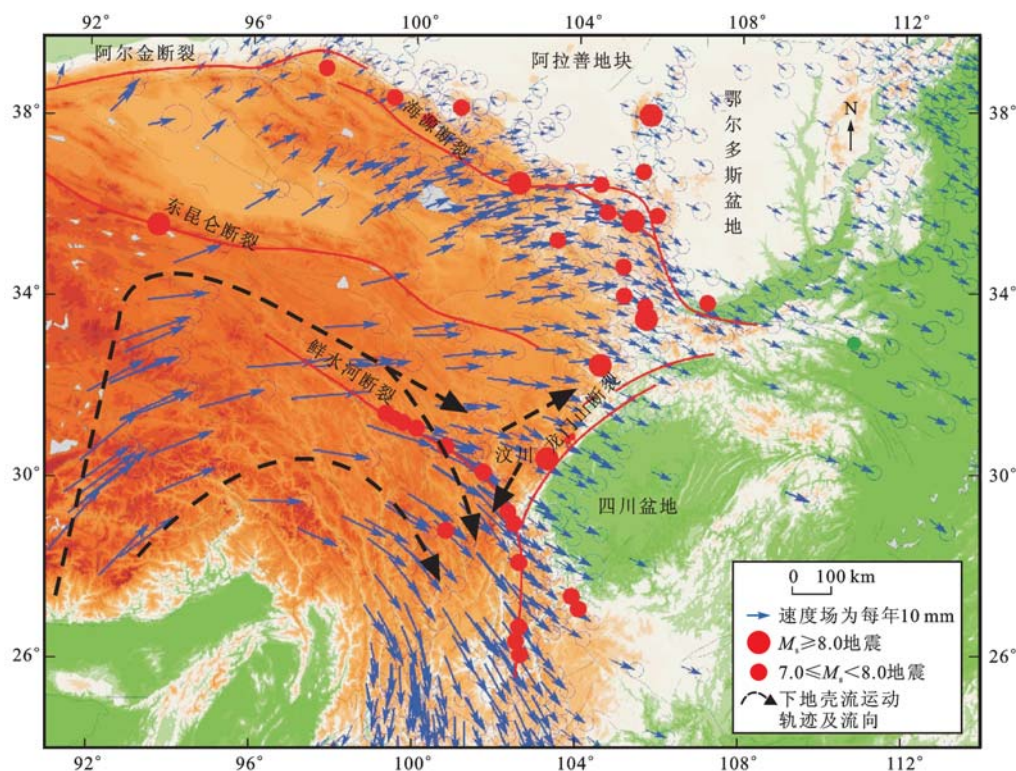
### 2.3 主要活动断裂特征

青藏高原东缘活动断裂十分发育,主要包括NW向、NE向和近NS向3组(图1)。北部NW向玛沁—玛曲断裂、南部NW向鲜水河断裂、东部近NS向岷山构造带和NE向龙门山构造带构成了松潘—甘孜地块(川青地块)的块体边界。这些边界断裂规

模大,活动性强。松潘—甘孜地块内部主要受到一系列NW向断裂切割,运动性质以走滑为主。青藏高原东缘活动断裂形态较为复杂,张岳桥等曾按照活动构造的组合样式和运动学转换关系<sup>[27]</sup>,将其划分为北段东昆仑—岷山—龙门山走滑—逆冲构造系统和南段鲜水河—安宁河—小江走滑—逆冲构造系统。

鲜水河断裂是一条大型的左旋走滑断裂,其滑动速率为每年6.5~12.1 mm<sup>[28]</sup>,活动性极强,导致地震频发。岷山构造带主要由岷江断裂和虎牙断裂两条活动断裂组成,运动性质以走滑为主,兼具逆冲分量。岷江断裂的平均垂直滑动速率为每年0.37~0.53 mm,左旋位错量与垂直位错量大致相当;而虎牙断裂的平均左旋滑动速率为每年1.4 mm,垂直滑动速率为每年0.3 mm。此外,这两条断裂地震





灰色箭头长度表示速度场大小,方向表示速度场方向;图件引自文献[29]和[30]

图2 青藏高原东缘的GPS速度场与下地壳流运动

Fig. 2 GPS Velocity Field and Movement of Lower Crust Flow in the Eastern Margin of Qinghai-Tibet Plateau

活动性均较强,如1933年在岷江断裂附近发生了7.5级叠溪地震,1976年在虎牙断裂带上发生了7.2级松潘—平武地震。龙门山构造带由茂汶—汶川断裂、北川—映秀断裂、彭县—灌县断裂等主干断裂组成,运动性质以逆冲为主,兼具一定的走滑分量。在龙门山构造带中,茂汶—汶川断裂、北川—映秀断裂和彭县—灌县断裂的平均垂直滑动速率均在每年1 mm左右,且这些主干断裂的右旋位错量与垂直位错量相当。自更新世以来,龙门山构造带活动强度相对较低,但具备孕育强震的危险性<sup>[4,31-32]</sup>。

### 3 龙门山断裂带构造格局

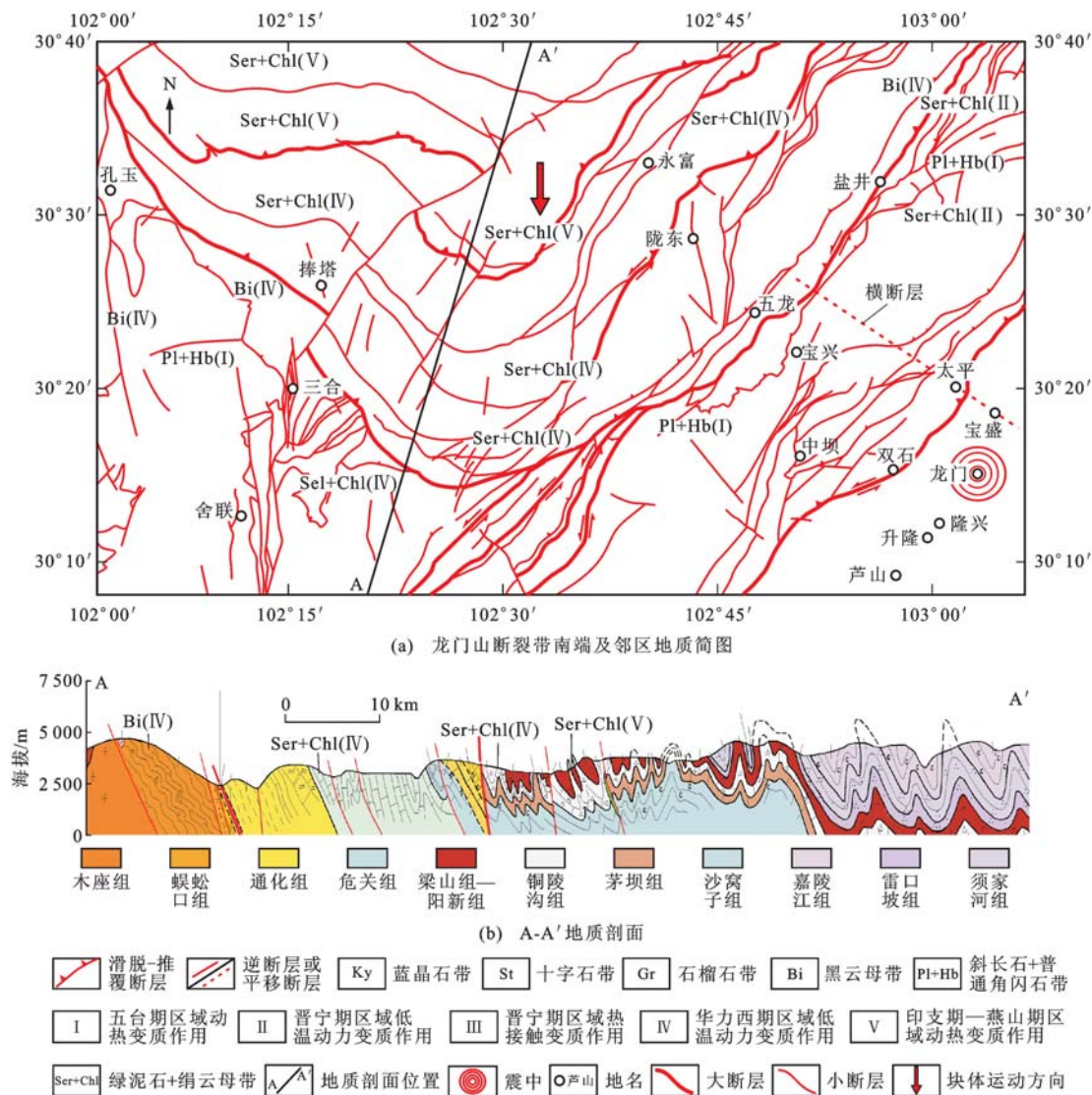
#### 3.1 东西分带

龙门山断裂带受自西向东的茂汶—汶川断裂、北川—映秀断裂、彭县—灌县断裂和广元—大邑(隐伏)断裂等4条主干逆冲断裂的阻隔,且呈现典型的東西分带性变形特征<sup>[5-6]</sup>。以上述4条主干断裂为界,可将龙门山断裂带自西向东划分为后龙门山造山带(后山带)、前龙门山造山带(前山带)、前陆扩展变形带(山前带),各带在物质组成、构造层次、变形样式等方面具有明显的差异。受NW—SE向构造应力的影响,龙门山构造带发生了NW—SE向的逆

冲推覆运动,导致各分带前缘的主干断裂呈高角度逆冲构造变形特征、典型的叠瓦状构造特征和前展式发育模式<sup>[33]</sup>。此外,龙门山构造带NW—SE向分带性特征总体表现为:构造层次逐渐变浅,从以韧性变形为主渐变为以脆性变形为主;变形强度逐渐降低,基底卷入构造变形渐变为薄皮叠瓦冲断构造变形等;构造变形卷入地层逐渐变新,山前带最新褶皱卷入地层为第四系红层<sup>[6]</sup>。

#### 3.2 南北分段

根据构造应力—应变场理论,龙门山断裂带为强挤压造山带,除了NE向主逆冲—褶皱变形以外,还应在斜交和垂直主逆冲—褶皱带方向上发育X型剪切断层与横张断层等伴生构造成分。部分横向断层已被发现并得到普遍认可,如SN向岷江断层和EW向雪山梁子等断裂属于斜交龙门山断裂带的X型剪切断层,NW向抚边河、米亚罗和虎牙等断层属于横张断层。另外,通过对区域构造演化、遥感资料解译、地球物理资料分析和野外实地考察证实,还有一些横切龙门山断裂带的横向断层存在,包括白龙江、南坝、清平、小鱼洞、小金、天全—荣经和金坪等断裂(图4)。这些伴生配套断裂在NE—SW向动力长期作用下,现今表现为压扭性质。横断层使龙门山断裂带南北



图件引自文献[34]

图 3 龙门山断裂带南端及邻区活动构造纲要

Fig. 3 Active Tectonic Outline in the South of Longmenshan Fault Zone and Its Adjacent Region

分段,前人已从地形地貌、地层发育特征、构造背景、构造变形特征、布格重力异常、断裂活动性、隆升特征、现今应力场和地震活动性等方面对此进行了分析,将其主要划分为3段(北段、中段、南段)。北段与中段以虎牙断裂为界,中段与南段以卧龙—怀远横断层为界。其他横断层将上述3段进一步分割为10个次级段落。

综上所述,龙门山造山带构造格局呈东西分带、南北分段、垂向分层、多期叠加的特点。此外,卧龙—怀远横断层是抚边河断层的东延部分,是一条演化历史长、切割深达下地壳的活动断层。GPS监测地壳运动方向转向、下地壳流向分界、龙门山主断裂走滑方向反向等的分界线(图4),均以该断层为界。因此,该断层是一条重要的地壳运动方向转换带。

## 4 汶川地震与芦山地震发震机制

### 4.1 汶川地震发震机制

汶川地震沿龙门山推覆构造带中央断裂和前山断裂形成了2条走向NE、长约240 km的北川—映秀断裂带和90 km的汉旺—白鹿断裂带,以及1条长约6 km、连结2条NE向地表破裂带西段、带有擦断层性质的NW向小鱼洞地表破裂带<sup>[35]</sup>。此外,汶川地震地表破裂呈现明显的逆冲兼走滑(斜向逆冲)运动特征,使得龙门山地区发生了强烈的构造缩短和隆升,其最大垂直位移量约为6.5 m,右旋走滑位移量约为4.9 m,同震地壳缩短量约为7.0 m<sup>[36]</sup>。

汶川地震发生后,众多学者对此开展了发震机制的探讨,做出了多种不同的解释。Royden等认为印



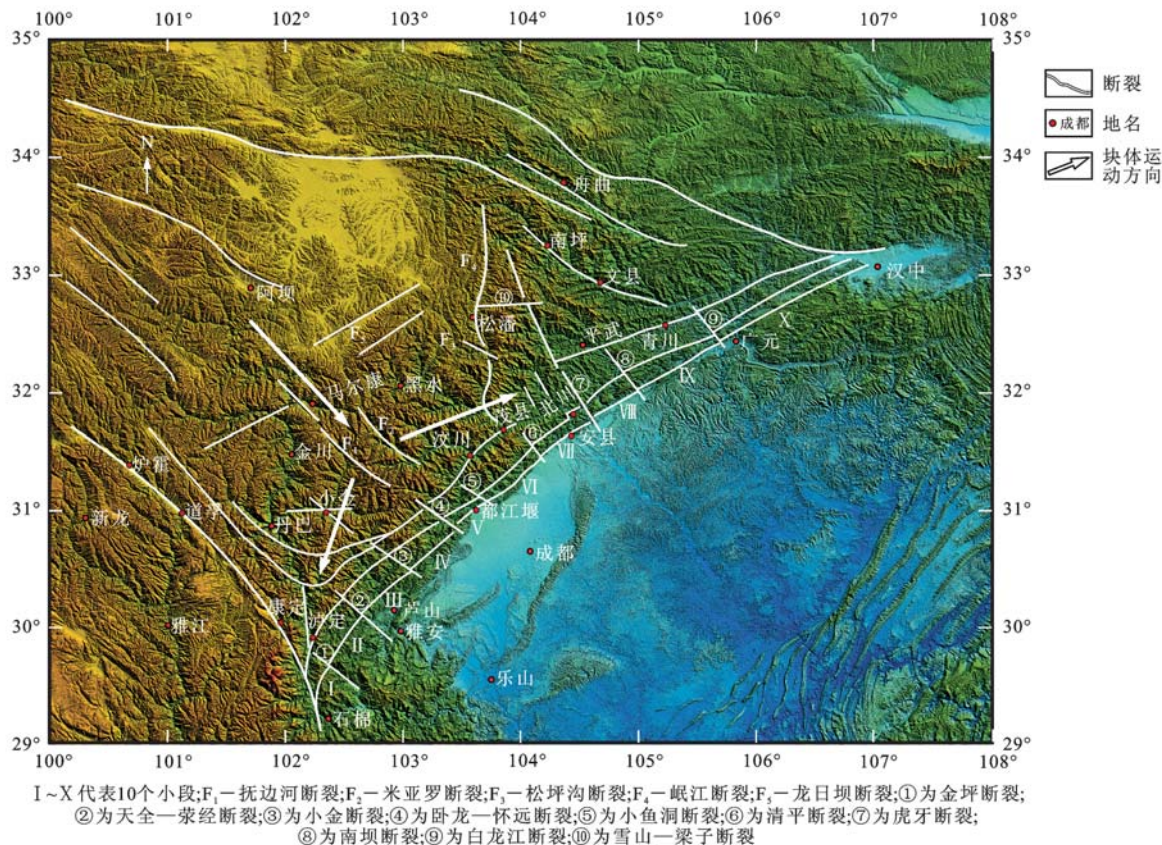


图4 青藏高原东缘断裂构造

Fig. 4 Fault Structures in the Eastern Margin of Qinghai-Tibet Plateau

度板块对欧亚板块的推挤作用造成了青藏高原物质的东向运动,高原柔性的中、下地壳物质在龙门山断裂带处遭到相对坚硬的四川盆地的阻挡之后,部分中、下地壳物质沿着龙门山断裂带向上逆冲推覆,导致应变在龙门山断裂带脆性地壳内高度积累,当应变能积累到一定程度时突然释放导致了地震的发生<sup>[37-39]</sup>。而 Hubbard 等则认为汶川地震是龙门山断裂带在构造挤压环境下再一次活动的结果,并强调地壳缩短是地震发生的首要机制<sup>[40]</sup>。同时,一些学者对汶川地震的发震机制提出了多种发震模式:张培震等提出多单元组合的孕震模式<sup>[41]</sup>;李勇等提出下地壳流动力学模型<sup>[42]</sup>;朱介寿提出中—下地壳物质流发震模式<sup>[24]</sup>。这些模式在深部力学机制上存在差异,但都最终导致上地壳的龙门山主干断裂逆冲而发震。由此可见,汶川地震具有深部构造的控震作用<sup>[43]</sup>,因此,亟需加强对青藏高原东缘深部介质与构造环境,深部物质与能量的交换、运移和深层动力过程的研究。

目前,对汶川地震的发震断层也存在一定的争议:张培震等认为映秀—北川断裂是汶川地震主震的发震断层<sup>[41,44-45]</sup>,茂汶—汶川断裂、彭灌断裂为强余震的发震断层<sup>[46-47]</sup>;蔡原林等提出发震断层可能

为倾向 SE 的深部地幔剪切带<sup>[48]</sup>;朱艾澜等甚至认为此次大震的主动盘不是映秀—北川主断裂的上盘,而是起因于其下盘的扬子地块的俯冲,并认为映秀—北川主断层的活动为左旋走滑<sup>[49]</sup>;而滕吉文等的最新研究成果认为,汶川地震的发震断裂带不是一条简单的线性断裂带,而是一半径为 5 km 左右的柱状震源体,沿 NE 向展布<sup>[50]</sup>。

#### 4.2 芦山地震发震机制

2013 年 4 月 20 日在汶川地震的亏空区发生了芦山地震。地震破裂过程研究表明:断层滑动面约为 30 km×30 km,最大滑动量为 1.6 m;破裂起始点接近于地震滑动量集中区,破裂面从震源处向下延伸至 20 km 左右的地方,破裂面并未到达地表,破裂过程无明显的方向性<sup>[51]</sup>。芦山地震震中位于双石断裂和彭灌断裂东侧,属双石断裂下盘,距双石断裂约 1.5 km,距彭灌断裂约 10.5 km,其 NE 向余震密集带切割了 NEE 向双石—大川断裂,但没有发现明显的地震地表破裂带,说明芦山地震的发震断层不是出露地表的双石—大川断裂或其他地表可见的活动断层;重新定位后,余震在剖面上呈向 NW 倾斜的密集带和逆断层震源机制解等基础数据,反

映出芦山地震为盲逆断层型地震,这已得到国内外学者的普遍认可<sup>[52-62]</sup>。

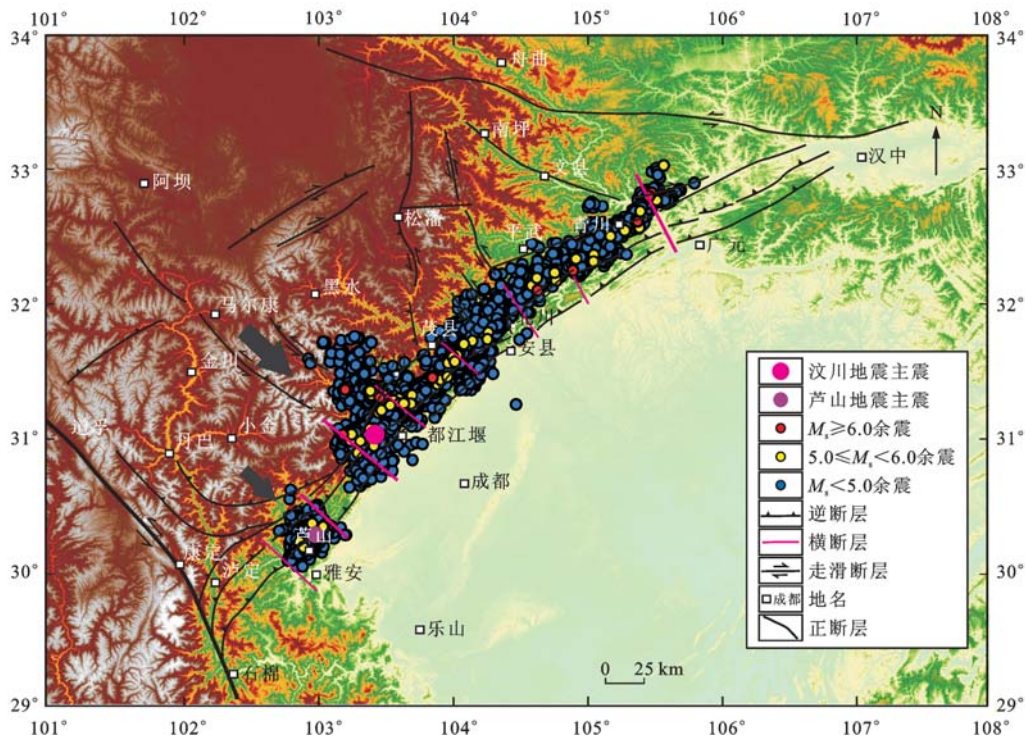
综上所述,汶川地震具有深部构造的控震作用,其深部孕震机制十分复杂,发震断层也尚存异议,发震机制有待进一步深入研究。芦山地震没有明显的地表破裂带,是一次盲逆断层型地震。

## 5 汶川地震与芦山地震的关系

### 5.1 汶川地震与芦山地震相互独立

杜方等认为汶川地震与芦山地震的震源错动均表现为主要的逆冲断层性质,都是由龙门山逆冲断裂

发震<sup>[55]</sup>,但芦山地震表现为纯逆冲错动类型,而汶川地震还兼具明显的右旋走滑错动分量。另外,汶川地震由龙门山推覆构造带中出露地表的彭灌断裂逆冲引发,主、余震释放的能量巨大,因此,地表破裂明显,余震及烈度都明显受龙门山断裂控制,呈 NE 向线状展布长约 240 km。而芦山地震由龙门山南部与四川盆地交接地区的隐伏断裂或新生断裂逆冲而引发,释放能量远远小于汶川地震,破裂未达地表。两次地震的主、余震时空分布正好相反,汶川地震余震向 NE 呈分段脉动式传播,而芦山地震余震呈现稍微向 SW 传播的趋势(图 5)。



图件中余震定位数据引自文献<sup>[52]</sup>

图 5 汶川地震与芦山地震及其余震分布

Fig. 5 Distribution of Wenchuan and Lushan Earthquakes and Their Aftershocks

此外,卧龙—怀远一线为地壳物质运动方向和主断裂走滑方向发生反向的转换带,而两次地震发生在其两侧,分别属于两个具有独立发震能力的不同地震破裂段落,即汶川地震与芦山地震震源破裂体在空间上没有重叠关系<sup>[36]</sup>,因此,汶川地震与芦山地震是相互独立的。

### 5.2 未来强震危险区预测

汶川地震与芦山地震已发震的断块应力得到释放,再次积累到强震发生的应力条件需要一个长期过程,近期不太可能再发强震。但未发震的断块存在地震危险性,尤其是汶川地震与芦山地震之间的余震“空白”断块是今后强震危险区。这一地段处于

现今地壳运动的转换区,也是正挤压地区,应力还在积累过程中,有可能随时释放,应引起高度重视。另外,虎牙断裂是一条地震活动性较强的断层,而在汶川地震时活动微弱,沿断裂带没有 5 级以上的强余震发生(图 5),说明其应力释放不彻底,特别是虎牙断裂与主干断裂交汇处也是强震较危险区域。

## 6 结 语

(1) 龙门山断裂带构造复杂,被 4 条主干断裂、多条横断层、多套滑脱层的切割而呈现东西分带、南北分段、上下分层的构造格局;因受下地壳流的拖拽作用及四川盆地的阻挡作用,该断裂带呈现 NE、SE



向分异运动的构造运动学特征。

(2)汶川地震具有深部构造的控震作用,其深部孕震机制十分复杂,发震断层也尚存异议,因此,汶川地震的发震机制有待进一步深入研究;芦山地震没有明显的地表破裂带,是一次盲逆断层型地震。

(3)由于卧龙—怀远一线为地壳物质运动方向和主断裂走滑方向发生反向的转换带,因此,发生在其两侧的地震是各自独立的,即汶川地震与芦山地震相互独立。

(4)汶川地震和芦山地震发震区域之外未发震的断块存在地震危险性,尤其是卧龙—怀远和小金横断层之间的断块是强震危险区。另外,虎牙断裂与主断裂交汇处也是强震较危险区域。

#### 参考文献:

#### References:

- [1] 谢和平,邓建辉,李碧雄.四川芦山地震灾害调查与灾后重建的相关问题分析[J].地球科学与环境学报,2013,35(2):1-7.  
XIE He-ping, DENG Jian-hui, LI Bi-xiong. Investigation of Lushan Earthquake Disasters and Analysis of Related Problems During Post-quake Reconstruction in Sichuan[J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2013, 35(2): 1-7.
- [2] 王运生,全清,罗永红,等.四川芦山  $M_s 7.0$  级地震的地质环境影响分析[J].地球科学与环境学报,2013,35(2):92-98.  
WANG Yun-sheng, QUAN Qing, LUO Yong-hong, et al. Geological Environmental Influence of Lushan  $M_s 7.0$  Earthquake in Sichuan[J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2013, 35(2): 92-98.
- [3] 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 Qi-dong, CHEN She-fa, ZHAO Xiao-lin. Tectonics, Seismicity and Dynamics of Longmenshan Mountains and Its Adjacent Regions[J]. Seismology and Geology, 1994, 16(4): 389-403.
- [4] 陈国光,计凤桔,周荣军,等.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,2007,29(3):657-673.  
CHEN Guo-guang, JI Feng-ju, ZHOU Rong-jun, et al. Primary Research of Activity Segmentation of Longmenshan Fault Zone Since Late-Quaternary [J]. Seismology and Geology, 2007, 29(3): 657-673.
- [5] 金文正,汤良杰,杨克明,等.川西龙门山褶皱冲断带分带性变形特征[J].地质学报,2007,81(8):1072-1080.

- JIN Wen-zheng, TANG Liang-jie, YANG Ke-ming, et al. Deformation and Zonation of the Longmenshan Fold and Thrust Zone in the Western Sichuan Basin[J]. Acta Geologica Sinica, 2007, 81(8): 1072-1080.
- [6] 刘树根,李智武,曹俊兴,等.龙门山陆内复合造山带的四维结构构造特征[J].地质科学,2009,44(4):1151-1180.  
LIU Shu-gen, LI Zhi-wu, CAO Jun-xing, et al. 4D Textural and Structural Characteristics of Longmen Intracontinental Composite Orogenic Belt, Southwest China[J]. Chinese Journal of Geology, 2009, 44(4): 1151-1180.
- [7] 刘健,熊探宇,赵越,等.龙门山活动断裂带运动学特征及其构造意义[J].吉林大学学报:地球科学版,2012,42(增2):320-330.  
LIU Jian, XIONG Tan-yu, ZHAO Yue, et al. Kinematic Characteristics of Longmenshan Active Fault Zone and Its Tectonic Implication[J]. Journal of Jilin University: Earth Science Edition, 2012, 42(S2): 320-330.
- [8] 孟文,陈群策,吴满路,等.龙门山断裂带现今构造应力场特征及分段性研究[J].地球物理学进展,2013,28(3):1150-1160.  
MENG Wen, CHEN Qun-ce, WU Man-lu, et al. Research on Segmentation and Characteristic of Tectonic Stress Field of Longmenshan Fault Zone[J]. Progress in Geophysics, 2013, 28(3): 1150-1160.
- [9] 楼海,王椿镛,姚志祥,等.龙门山断裂带深部构造和物性分布的分段特征[J].地学前缘,2010,17(5):128-141.  
LOU Hai, WANG Chun-yong, YAO Zhi-xiang, et al. Subsection Feature of the Deep Structure and Material Properties of Longmenshan Fault Zone[J]. Earth Science Frontiers, 2010, 17(5): 128-141.
- [10] 张红艳,谢富仁,崔效锋.四川芦山地震区域构造环境与构造应力场特征[J].地球科学与环境学报,2013,35(2):99-106.  
ZHANG Hong-yan, XIE Fu-ren, CUI Xiao-feng. Regional Characteristics of Tectonic Stress Field and Tectonic Setting of Lushan Earthquake in Sichuan [J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2013, 35(2): 99-106.
- [11] AVOUAC J P, TAPPONNIER P. Kinematic Model of Active Deformation in Central Asia[J]. Geophysical Research Letters, 1993, 20(10): 895-898.
- [12] TAPPONNIER P, XU Z Q, ROGER F, et al. Oblique Stepwise Rise and Growth of the Tibet Plateau[J]. Science, 2001, 294: 1671-1677.
- [13] ENGLAND P, MOLNAR P. Right-lateral Shear and



- Rotation as the Explanation for Strike-slip Faulting in Eastern Tibet[J]. *Nature*, 1990, 344: 140-142.
- [14] 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.
- [15] CLARK M K, ROYDEN L H. Topographic Ooze: Building the Eastern Margin of Tibet by Lower Crustal Flow[J]. *Geology*, 2000, 28(8): 703-706.
- [16] CLARK M K, BUSH J W M, ROYDEN L H. Dynamic Topography Produced by Lower Crustal Flow Against Rheological Strength Heterogeneities Bordering the Tibetan Plateau[J]. *Geophysical Journal International*, 2005, 162(2): 575-590.
- [17] BEAUMONT C, JAMIESON R A, NGUYEN M H, et al. Himalayan Tectonics Explained by Extrusion of a Low-viscosity Crustal Channel Coupled to Focused Surface Denudation[J]. *Nature*, 2001, 414: 738-742.
- [18] BEAUMONT C, JAMIESON R A, NGUYEN M H, et al. Crustal Channel Flows; 1. Numerical Models with Applications to the Tectonics of the Himalayan-Tibetan Orogen[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2004, 109(B6): B06406.
- [19] CHEN Z, BURCHFIEL B C, LIU Y, et al. Global Positioning System Measurements from Eastern Tibet and Their Implications for India/Eurasia Intercontinental Deformation[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2000, 105(B7): 16215-16227.
- [20] WANG Q, ZHANG P Z, FREYMUELLER J T, et al. Present-day Crustal Deformation in China Constrained by Global Positioning System Measurements[J]. *Science*, 2001, 294: 574-577.
- [21] ZHANG P Z, SHEN Z K, WANG M, et al. Continuous Deformation of the Tibetan Plateau from Global Positioning System Data[J]. *Geology*, 2004, 32(9): 809-812.
- [22] SHEN Z K, LU J N, WANG M, et al. Contemporary Crustal Deformation Around the Southeast Borderland of the Tibetan Plateau[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2005, 110(B11): B11409.
- [23] 滕吉文, 白登海, 杨 辉, 等. 2008 汶川  $M_s 8.0$  地震发生的深层过程和动力学响应[J]. *地球物理学报*, 2008, 51(5): 1385-1402.
- TENG Ji-wen, BAI Deng-hai, YANG Hui, et al. Deep Processes and Dynamic Responses Associated with the Wenchuan  $M_s 8.0$  Earthquake of 2008[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2008, 51(5): 1385-1402.
- [24] 朱介寿. 汶川地震的岩石圈深部结构与动力学背景[J]. *成都理工大学学报: 自然科学版*, 2008, 35(4): 348-356.
- ZHU Jie-shou. The Wenchuan Earthquake Occurrence Background in Deep Structure and Dynamics of Lithosphere[J]. *Journal of Chengdu University of Technology: Science and Technology Edition*, 2008, 35(4): 348-356.
- [25] 王椿镛, 吴建平, 楼 海, 等. 青藏高原东部壳幔速度结构和地幔变形场的研究[J]. *地学前缘*, 2006, 13(5): 349-359.
- WANG Chun-yong, WU Jian-ping, LOU Hai, et al. Study of Crustal and Upper Mantle's Structure and Mantle Deformation Field Beneath the Eastern Tibetan Plateau[J]. *Earth Science Frontiers*, 2006, 13(5): 349-359.
- [26] 李德威. 大陆板内地震的发震机理与地震预报: 以汶川地震为例[J]. *地质科技情报*, 2008, 27(5): 1-6.
- LI De-wei. Mechanism and Prediction of the Intraplate Earthquakes: An Example from Wenchuan Earthquake in Sichuan Province[J]. *Geological Science and Technology Information*, 2008, 27(5): 1-6.
- [27] 张岳桥, 杨 农, 施 炜, 等. 青藏高原东缘新构造及其对汶川地震的控制作用[J]. *地质学报*, 2008, 82(12): 1668-1678.
- ZHANG Yue-qiao, YANG Nong, SHI Wei, et al. Neotectonics of Eastern Tibet and Its Control on the Wenchuan Earthquake [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2008, 82(12): 1668-1678.
- [28] 唐文清, 陈智梁, 刘宇平, 等. 青藏高原东缘鲜水河断裂与龙门山断裂交会区现今的构造活动[J]. *地质通报*, 2005, 24(12): 1169-1172.
- TANG Wen-qing, CHEN Zhi-liang, LIU Yu-ping, et al. Present-day Tectonics Activity in the Intersection Area of the Xianshuihe Fault and Longmenshan Fault on the Eastern Margin of the Qinghai-Tibet Plateau[J]. *Geological Bulletin of China*, 2005, 24(12): 1169-1172.
- [29] 李德威. 东昆仑、玉树、汶川地震的发生规律和形成机理: 兼论大陆地震成因与预测[J]. *地学前缘*, 2010, 17(5): 179-192.
- LI De-wei. The Regularity and Mechanism of East Kunlun, Wenchuan, and Yushu Earthquakes and Discussion on Genesis and Prediction of Continental Earthquakes [J]. *Earth Science Frontiers*, 2010, 17(5): 179-192.
- [30] 许志琴, 李海兵, 吴忠良. 汶川地震和科学钻探[J]. *地质学报*, 2008, 82(12): 1613-1622.
- XU Zhi-qin, LI Hai-bing, WU Zhong-liang, et al. Wenchuan Earthquake and Scientific Drilling[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2008, 82(12): 1613-1622.
- [31] 周荣军, 李 勇, DENSMORE A L, 等. 青藏高原东缘活动构造[J]. *矿物岩石*, 2006, 26(2): 40-51.

- ZHOU Rong-jun, LI Yong, DENSMORE A L, et al. Active Tectonics of the Eastern Margin of the Tibet Plateau [J]. *Journal of Mineralogy and Petrology*, 2006, 26(2): 40-51.
- [32] DENSMORE A L, ELLIS M A, LI Y, et al. Active Tectonics of the Beichuan and Pengguan Faults at the Eastern Margin of the Tibetan Plateau [J]. *Tectonics*, 2007, 26(4): TC4005.
- [33] 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 Rong-jun, DENSMORE A L, et al. Continental Dynamic Processes and Geological Response in the Eastern Margin of the Qinghai-Tibet Plateau [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2006.
- [34] 四川省地质调查院. 中华人民共和国地质图: 1: 200 000 宝兴县幅 (H48C002001) [M]. 北京: 地质出版社, 2003.
- Institute of Geological Investigation of Sichuan Province. Geological Map of the People's Republic of China: 1: 200 000 Baoxing Geological Map (H48C002001) [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2003.
- [35] 徐锡伟, 闻学泽, 叶建青, 等. 汶川  $M_s 8.0$  地震地表破裂带及其发震构造 [J]. *地震地质*, 2008, 30(3): 597-629.
- XU Xi-wei, WEN Xue-ze, YE Jian-qing, et al. The  $M_s 8.0$  Wenchuan Earthquake Surface Ruptures and Its Seismogenic Structure [J]. *Seismology and Geology*, 2008, 30(3): 597-629.
- [36] 徐锡伟, 陈桂华, 于贵华, 等. 芦山地震发震构造及其与汶川地震关系讨论 [J]. *地学前缘*, 2013, 20(3): 11-20.
- XU Xi-wei, CHEN Gui-hua, YU Gui-hua, et al. Seismogenic Structure of Lushan Earthquake and Its Relationship with Wenchuan Earthquake [J]. *Earth Science Frontiers*, 2013, 20(3): 11-20.
- [37] ROYDEN L H, BURCHFIEL B C, VAN DER HILST R D. The Geological Evolution of the Tibetan Plateau [J]. *Science*, 2008, 321: 1054-1058.
- [38] BURCHFIEL B C, ROYDEN L H, VAN DER HILST R D, et al. A Geological and Geophysical Context for the Wenchuan Earthquake of 12 May 2008, Sichuan, People's Republic of China [J]. *GSA Today*, 2008, 18(7): 4-11.
- [39] ROBERT A, ZHU J, VERGNE J, et al. Crustal Structures in the Area of the 2008 Sichuan Earthquake from Seismologic and Gravimetric Data [J]. *Tectonophysics*, 2010, 491(1/2/3/4): 205-210.
- [40] 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.
- [41] 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、复发周期和构造成因 [J]. *地球物理学报*, 2008, 51(4): 1066-1073.
- ZHANG Pei-zhen, XU Xi-wei, WEN Xue-ze, 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.
- [42] 李 勇, 周荣军, 董顺利, 等. 汶川地震的地表破裂与逆冲-走滑作用 [J]. *成都理工大学学报: 自然科学版*, 2008, 35(4): 404-413.
- LI Yong, ZHOU Rong-jun, DONG Shun-li, et al. Surface Rupture, Thrusting and Strike-slipping in the Wenchuan Earthquake of Sichuan, China [J]. *Journal of Chengdu University of Technology: Science and Technology Edition*, 2008, 35(4): 404-413.
- [43] 彭建兵, 马润勇, 范 文, 等. 汶川大震的科学思考 [J]. *地球科学与环境学报*, 2009, 31(1): 1-29.
- PENG Jian-bing, MA Run-yong, FAN Wen, et al. Science Contemplation for Wenchuan Earthquake of 12 May, 2008 [J]. *Journal of Earth Sciences and Environment*, 2009, 31(1): 1-29.
- [44] 李海兵, 司家亮, 裴军令, 等. 汶川地震 ( $M_s 8.0$ ) 地表破裂过程探讨 [J]. *第四纪研究*, 2010, 30(4): 677-698.
- LI Hai-bing, SI Jia-liang, PEI Jun-ling, et al. Investigating the Surface Rupture Process of the Wenchuan Earthquake ( $M_s 8.0$ ) [J]. *Quaternary Sciences*, 2010, 30(4): 677-698.
- [45] XU X W, YU G H, CHEN G H, et al. Parameters of Coseismic Reverse- and Oblique-slip Surface Ruptures of the 2008 Wenchuan Earthquake, Eastern Tibetan Plateau [J]. *Acta Geologica Sinica: English Edition*, 2009, 83(4): 673-684.
- [46] MA Y S, LONG C X, TAN C X, et al. Co-seismic Faults and Geological Hazards and Incidence of Active Fault of Wenchuan  $M_s 8.0$  Earthquake, Sichuan, China [J]. *Acta Geologica Sinica: English Edition*, 2009, 83(4): 713-723.
- [47] ZHANG Y Q, DONG S W, YANG N. Active Faulting Pattern, Present-day Tectonic Stress Field and Block Kinematics in the East Tibetan Plateau [J]. *Acta Geologica Sinica: English Edition*, 2009, 83(4): 694-712.
- [48] 蔡学林, 曹家敏, 朱介寿, 等. 龙门山岩石圈地壳三维结构及汶川大地震成因浅析 [J]. *成都理工大学学报: 自然科学版*, 2008, 35(4): 357-365.



- CAI Xue-lin, CAO Jia-min, ZHU Jie-shou, et al. A Preliminary Study on the 3D Crust Structure for the Longmen Lithosphere and the Genesis of the Huge Wenchuan Earthquake, Sichuan, China[J]. Journal of Chengdu University of Technology: Science and Technology Edition, 2008, 35(4): 357-365.
- [49] 朱艾斓, 徐锡伟, 刁桂苓, 等. 汶川  $M_s 8.0$  地震部分余震重新定位及地震构造初步分析[J]. 地震地质, 2008, 30(3): 759-767.
- ZHU Ai-lan, XU Xi-wei, DIAO Gui-ling, et al. Relocation of the  $M_s 8.0$  Wenchuan Earthquake Sequence in Part: Preliminary Seismotectonic Analysis[J]. Seismology and Geology, 2008, 30(3): 759-767.
- [50] 滕吉文, 皮娇龙, 杨 辉, 等. 汶川—映秀  $M_s 8.0$  地震的发震断裂带和形成的深层动力学响应[J]. 地球物理学报, 2014, 57(2): 392-403.
- TENG Ji-wen, PI Jiao-long, YANG Hui, et al. Wenchuan-Yingxiu  $M_s 8.0$  Earthquake Seismogenic Faults and Deep Dynamic Response[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2014, 57(2): 392-403.
- [51] 柳 畅, 石耀霖, 朱伯靖, 等. 地壳流变结构控制作用下的龙门山断裂带地震发生机理[J]. 地球物理学报, 2014, 57(2): 404-418.
- LIU Chang, SHI Yao-lin, ZHU Bo-jing, et al. Crustal Rheology Control on the Mechanism of the Earthquake Generation at the Longmen Shan Fault[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2014, 57(2): 404-418.
- [52] 高 原, 王 琼, 赵 博, 等. 龙门山断裂带中南段的一个破裂空段——芦山地震的震后效应[J]. 中国科学: 地球科学, 2013, 43(6): 1038-1046.
- GAO Yuan, WANG Qiong, ZHAO Bo, et al. A Rupture Blank Zone in Middle South Part of Longmen-shan Faults—Effect After Lushan  $M_s 7.0$  Earthquake of 20 April 2013 in Sichuan, China[J]. Science China: Earth Sciences, 2013, 43(6): 1038-1046.
- [53] 徐锡伟, 闻学泽, 韩竹军, 等. 四川芦山 7.0 级强震: 一次典型的盲逆断层型地震[J]. 科学通报, 2013, 58(20): 1887-1893.
- XU Xi-wei, WEN Xue-ze, HAN Zhu-jun, et al. Lushan  $M_s 7.0$  Earthquake: A Blind Reverse-fault Earthquake[J]. Chinese Science Bulletin, 2013, 58(20): 1887-1893.
- [54] 陈立春, 冉勇康, 王 虎, 等. 芦山地震与龙门山断裂带南段活动性[J]. 科学通报, 2013, 58(20): 1925-1932.
- CHEN Li-chun, RAN Yong-kang, WANG Hu, et al. The Lushan  $M_s 7.0$  Earthquake and Activity of the Southern Segment of the Longmenshan Fault Zone[J]. Chinese Science Bulletin, 2013, 58(20): 1925-1932.
- [55] 杜 方, 龙 锋, 阮 祥, 等. 四川芦山 7.0 级地震及其与汶川 8.0 级地震的关系[J]. 地球物理学报, 2013, 56(5): 1772-1783.
- DU Fang, LONG Feng, RUAN Xiang, et al. The  $M_s 7.0$  Lushan Earthquake and the Relationship with the  $M_s 8.0$  Wenchuan Earthquake in Sichuan, China[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2013, 56(5): 1772-1783.
- [56] WANG Y Z, WANG F, WANG M, et al. Coulomb Stress Change and Evolution Induced by the 2008 Wenchuan Earthquake and Its Delayed Triggering of the 2013  $M_w 6.6$  Lushan Earthquake[J]. Seismological Research Letters, 2014, 85(1): 52-59.
- [57] LI Y Q, JIA D, WANG M M, et al. Structural Geometry of the Source Region for the 2013  $M_w 6.6$  Lushan Earthquake: Implication for Earthquake Hazard Assessment Along the Longmen Shan[J]. Earth and Planetary Science Letters, 2014, 390: 275-286.
- [58] 张岳桥, 董树文, 侯春堂, 等. 四川芦山 2013 年  $M_s 7.0$  地震发震构造初步研究[J]. 地质学报, 2013, 87(6): 747-758.
- ZHANG Yue-qiao, DONG Shu-wen, HOU Chun-tang, et al. Preliminary Study on the Seismotectonics of the 2013 Lushan  $M_s 7.0$  Earthquake, West Sichuan[J]. Acta Geologica Sinica, 2013, 87(6): 747-758.
- [59] 曾祥方, 罗 艳, 韩立波, 等. 2013 年 4 月 20 日四川芦山  $M_s 7.0$  地震: 一个高角度逆冲地震[J]. 地球物理学报, 2013, 56(4): 1418-1424.
- ZENG Xiang-fang, LUO Yan, HAN Li-bo, et al. The Lushan  $M_s 7.0$  Earthquake on 20 April 2013: A High-angle Thrust Event[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2013, 56(4): 1418-1424.
- [60] LI Z W, TIAN B F, LIU S, et al. Asperity of the 2013 Lushan Earthquake in the Eastern Margin of Tibetan Plateau from Seismic Tomography and Aftershock Relocation[J]. Geophysical Journal International, 2013, 195(3): 2016-2022.
- [61] JIA K, ZHOU S Y, ZHUANG J C, et al. Possibility of the Independence Between the 2013 Lushan Earthquake and the 2008 Wenchuan Earthquake on Longmen Shan Fault, Sichuan, China[J]. Seismological Research Letters, 2014, 85(1): 60-67.
- [62] PARSONS T, SEGOU M. Stress, Distance, Magnitude, and Clustering Influences on the Success or Failure of an Aftershock Forecast: The 2013  $M 6.6$  Lushan Earthquake and Other Examples[J]. Seismological Research Letters, 2014, 85(1): 44-51.