

汶川 8.0 级特大地震震源断裂特征及其动力学分析

蔡学林^{1,2} 王绪本^{2,3} 朱介寿^{2,3} 曹家敏² 程先琼²
余 年² 张 伟² 鲁 霞² 庞 溯² 张振宇²

(1. 成都理工大学地球科学学院, 四川 成都 610059; 2. 成都理工大学地球探测与信息技术教育部重点实验室, 四川 成都 610059; 3. 成都理工大学油气藏地质与开发工程国家重点实验室, 四川 成都 610059)

摘要:笔者根据地壳表层地质构造和地震地质研究与地震测深和大地电磁测深成果,运用现代构造解析理论与方法,论证了汶川 8.0 级特大地震的深部构造环境,探讨了汶川 8.0 级特大地震震源区的地震断裂和震源断裂基本特征与相互关系,及其形成的地球动力学问题。笔者认为龙门山碰撞造山带深处隐伏壳幔韧性剪切带可能是汶川 8.0 级特大地震主震区的震源断裂,而地壳表层发育的映秀断裂带、北川断裂带和彭县—灌县断裂带等可能是汶川 8.0 级特大地震主震区的地震断裂,该区震源断裂与地震断裂既有显著区别,又有密切联系。研究表明,在印度板块与太平洋板块和菲律宾海板块对欧亚板块俯冲碰撞的动力学作用下,形成上扬子地块向青藏高原东缘碰撞—楔入以及青藏高原东缘向东仰冲,深部向东俯冲的动力学态势,造成龙门山碰撞造山带切割莫霍界面的壳幔韧性剪切带向中上地壳扩展,应力高度集中与能量快速释放破裂,从而引起汶川 8.0 级特大地震的发生,以及大型同震地表破裂带的形成。探索震源断裂与地震断裂区别与联系,对进一步研究地震机制与发震动力学以及防震减灾有重要意义。

关键词:震源断裂;地震断裂;地表破裂带;岩石圈;地壳;壳幔韧性剪切带;主震震源区;汶川 8.0 级特大地震

中图分类号:P542.73

文献标志码:A

文章编号:1000-3657(2010)04-0952-15

2008 年 5 月 12 日 14 时 28 分在四川汶川发生的 8.0 级特大地震是新中国成立以来中国大陆地区地震强度最大、余震持续时间长、最多最复杂、波及范围最广、破坏最强烈、损失最惨重、次生灾害最严重、救灾最困难、灾后重建难度最大的一次强烈的大陆板内浅源构造地震,引起了全球最广泛的关注与救援,以及众多地质学家、地球物理学家和地震学家参与研究^[1-22]。笔者在研究龙门山碰撞造山带及邻区地壳表层地质构造基础上^[23-27],运用现代解析构造学的理论与方法^[28-30],对龙门山及邻区较多的地震

测深剖面^[31-34]、天然地震面波层析成像^[35,36]和大地电磁测深剖面^[11,37-42]等研究成果进行了系统地综合构造解析,建立起青藏高原及邻区(图 1)的地壳、岩石圈及软流圈三维结构及其动力学型式与构造分区^[34,43-47]。汶川 8.0 级特大地震发生后,为了进一步研究主震区地壳,特别是上地壳细结构及地震深部构造环境,已实施了米亚罗—郫县等 4 条大地电磁测深剖面^①,并进行了成都市地震活动断层研究^②。本文在这些研究的基础上,重点讨论了龙门山碰撞造山带及邻区岩石圈地壳三维结构及汶川 8.0 级特大地震区深部构

收稿日期:2010-05-10;改回日期:2010-07-05

基金项目:国家自然科学基金重点项目(49734150、40234047、40839909)、国土资源部专项计划项目(20001010206)、中石化西南油气分公司项目(GJ-114-0828)和成都市防震减灾局“成都市地震活动断层研究”项目联合资助。

作者简介:蔡学林,男,1935 年生,教授,从事构造地质学和深部地质研究与教学工作;E-mail:caixuelin_1935@sohu.com。

①王绪本、李书兵,等. 龙门山深部地球物理结构及油气选区研究报告. 中石化西南油气分公司,成都理工大学,2009:22-105.

②朱介寿、蔡学林、曹家敏,等. 成都市地震活动断层研究报告. 成都理工大学深部地球物理研究所,2009:1-112.

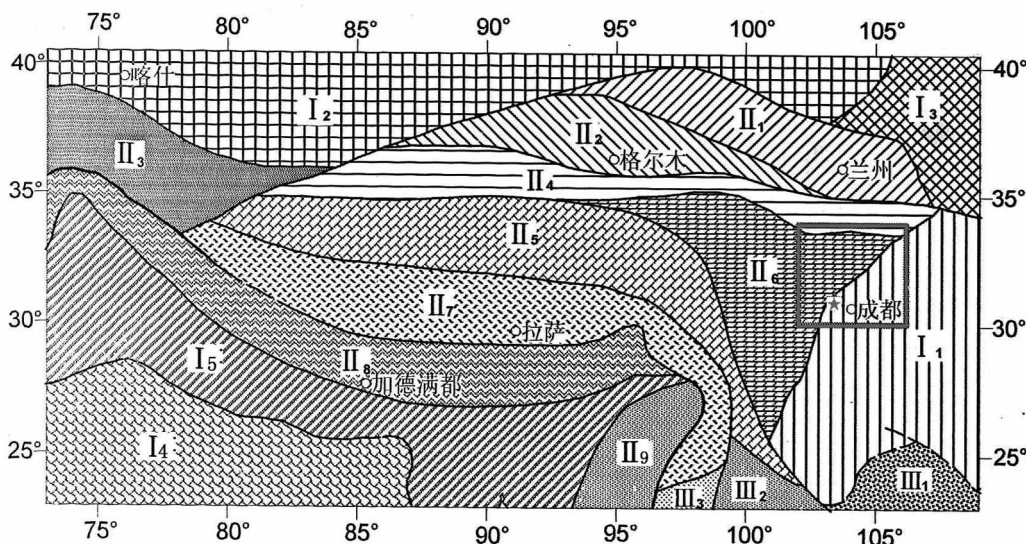


图 1 青藏高原及邻区岩石圈地壳构造分区略图

I—大陆克拉通型地壳构造区: I₁—上扬子地块; I₂—塔里木地块; I₃—鄂尔多斯地块; I₄—印度地块; I₅—西瓦利克构造带; II—大陆增厚型地壳构造区: II₁—祁连山构造带; II₂—柴达木地块; II₃—西昆仑构造带; II₄—东昆仑—西秦岭构造带; II₅—羌塘地块; II₆—松潘—甘孜地块; II₇—拉萨地块; II₈—喜马拉雅构造带; II₉—若开山构造带; III—大陆减薄型地壳构造区: III₁—赣湘桂构造带; III₂—印支地块; III₃—掸泰地块。图框内示研究区位置,星点示汶川 8.0 级大地震主震区位置

Fig.1 Crustal tectonic divisions of lithosphere in the Qinghai-Tibet Plateau and its surrounding areas

I—Tectonic division of the cratonic-type crust in continent; I₁—upper Yangtze block; I₂—Tarim block; I₃—Ordos block; I₄—Indian block; I₅—Xiwalik tectonic zone; II—Tectonic division of the thickening type crust in continent; II₁—Qilianshan tectonic zone; II₂—Qaidam block; II₃—Western Kunlun tectonic zone; II₄—East kunlun—West Qinling tectonic zone; II₅—Qiangtang block; II₆—Songpan—Garze block; II₇—Lasa block; II₈—Himalaya tectonic zone; II₉—Ruokaishan tectonic zone; III—Tectonic division of the thinning type crust in continent; III₁—Jiangxi-Hunan-Guangxi tectonic zone; III₂—Indosinian block; III₃—Shantai block

造环境、主震区地震断裂和震源断裂的基本特征与相互关系,以及地震形成的动力学等。

1 地震断裂与震源断裂

1.1 岩石圈两套断裂系统

地壳表层地质构造研究、众多地震测深剖面 and 深地震反射剖面的构造解析^[31,33-34,43-46,48-49]显示,大陆岩石圈存在既有显示区别又有密切联系的两套断裂系统(图 2~4):一是以地壳表层脆性剪切带为主的浅层断裂系统;另一是以切割莫霍界面或壳幔过渡带的韧性剪切带为主的深部断裂系统,称壳幔韧性剪切带^[43-46,49]或岩石圈韧性剪切带^[50]。研究结果表明,现今大陆岩石圈及地壳的构造变形,特别是岩石圈内断裂带的形成与扩展,可能存在双向扩展变形动力学态势:一是地表脆性断裂带由地壳表层向深部逐渐扩展;另一是隐伏断裂带或岩石圈壳幔韧性剪切带由上地幔顶部向下地壳到中上地壳方向扩展^[49,51]。由此表明,系统深入探讨岩石圈地壳变形动力学有利

于大陆地震动力学研究。

1.2 构造地震活动断裂带的两种扩展型式

通常将大陆地区地壳表层晚第四纪以来正在活动的断裂带作为构造地震发震构造研究的重点内容之一。随着地震活动带深地震探测技术、大地电磁探测技术等方法的改进与发展,以及研究的不断深入,发现地震活动断裂带可能存在 2 种扩展型式:某些构造地震活动可能是地壳表层断裂带向深处延伸扩展,能量集中与快速释放引起的;另一些构造地震活动带的发震构造并不完全是地表活动断裂带向深部延伸扩展的结果,而是某些隐伏断裂带^[51]或年轻的褶皱构造深处盲逆断裂突发性位错引起的^[52],或切割莫霍界面的壳幔韧性剪切带^[9,43,45,49]由地壳下部向地壳中、上部扩展,应力逐渐集中与快速释放破裂引起的。例如,深地震反射探测显示地震区地壳细结构表明,1966 年邢台 7.2 级地震^[53]和 1769 年三河—平谷 8.0 级地震^[54]的发震构造是切割莫霍界面或壳幔过渡带的壳幔韧性剪切带或隐伏深层断裂带向上地

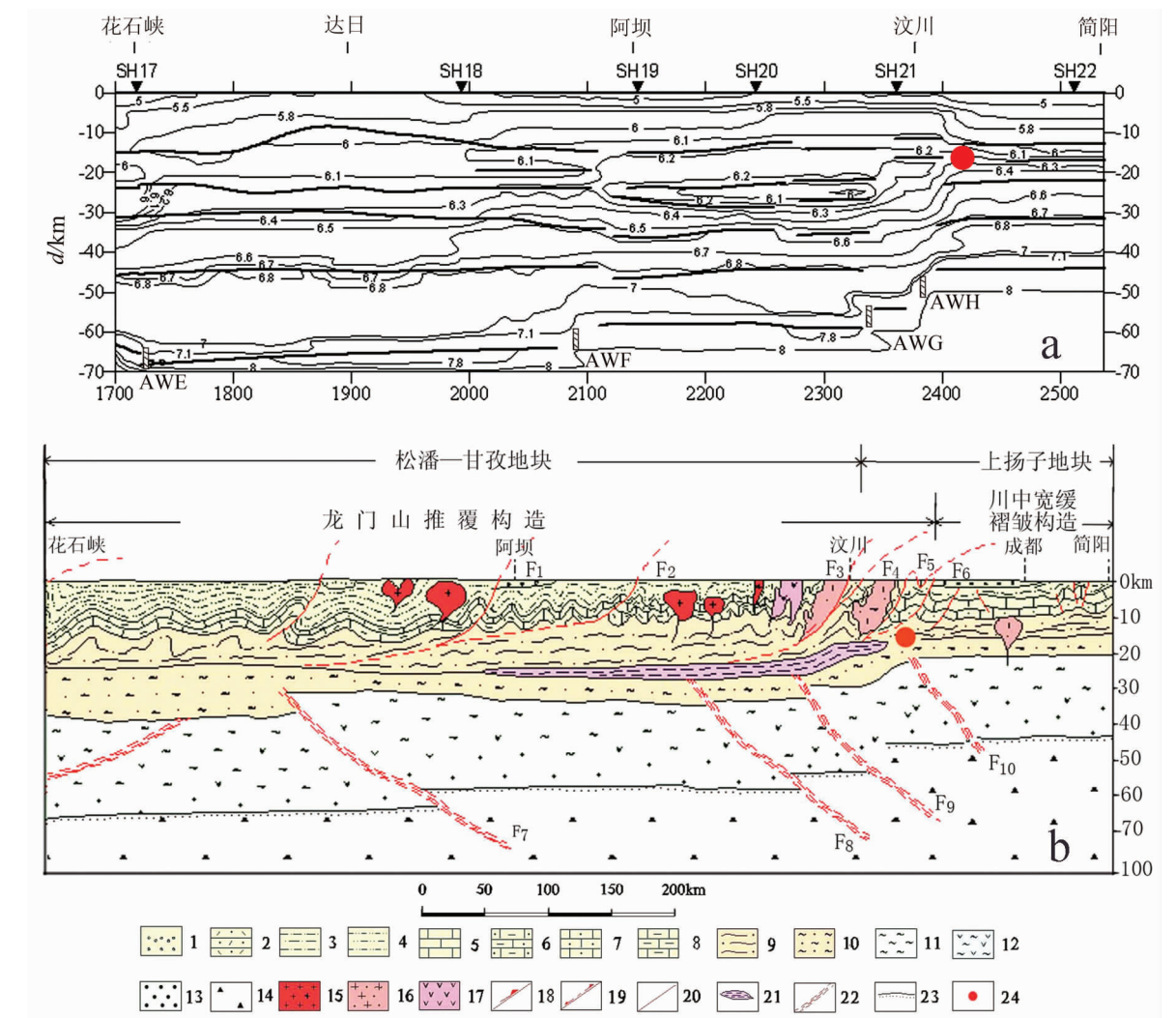


图2 青海花石峡—四川简阳地壳结构与动力学模式

a—地震测深剖面^[34]; b—构造解析剖面

1—新生界碎屑沉积岩系; 2—下侏罗统中酸性火山碎屑沉积岩系; 3—上三叠统至白垩系碎屑沉积岩系; 4—松潘—甘孜地区三叠系浅变质碎屑沉积岩系; 5—上古生界—中三叠统碎屑—碳酸盐岩沉积岩系; 6—松潘—甘孜上古生界碎屑—碳酸盐岩沉积岩系; 7—上新元古界—下古生界碎屑—碳酸盐岩沉积岩系; 8—松潘—甘孜地区上新元古界至下古生界浅变质碎屑沉积岩系; 9—中元古界至新元古界下部中浅变质岩系; 10—古元古界至新太古界中深变质岩系; 11—古太古至中太古界深变质岩系; 12—中下地壳闪长质深变质岩系; 13—下地壳下部基性麻粒岩类; 14—尖晶石二辉橄榄岩类; 15—印支—燕山期花岗岩类; 16—晋宁期花岗岩类; 17—印支—燕山期闪长岩类; 18—逆冲断裂带; 19—早期逆冲断裂带, 晚期正断裂带; 20—实测断裂带; 21—壳内低速层; 22—壳幔韧性剪切带; 23—莫霍界面; 24—汶川8.0级大地震震源区。F₁—阿坝断裂带; F₂—龙日坝断裂带; F₃—茂汶断裂带; F₄—九顶山断裂带; F₅—映秀断裂带; F₆—彭灌断裂带; F₇—久治壳幔韧性剪切带; F₈—安岳壳幔韧性剪切带; F₉—绵阳壳幔韧性剪切带; F₁₀—都江堰壳幔韧性剪切带

Fig.2 Crustal structure and dynamic model of Huashixia (Qinghai) - Jianyang (Sichuan) area

a—Seismic sounding section^[34]; b—Section of structural analysis: 1—Cenozoic clastic sedimentary series; 2—Lower Jurassic volcanic-clastic sedimentary series; 3—Triassic-Cretaceous clastic sedimentary series; 4—Triassic low-grade metamorphic clastic sedimentary series in the Songpan-Garze area; 5—Upper Paleozoic-Middle-Triassic clastic-carbonate sedimentary series; 6—Upper Paleozoic clastic-carbonate sedimentary series in Songpan-Garze area; 7—Upper Neoproterozoic-Lower Paleozoic clastic-carbonate sedimentary series; 8—Upper Neoproterozoic-Lower Paleozoic low-grade metamorphic volcanic-clastic sedimentary series in Songpan-Garze area; 9—Meso- and Neoproterozoic low-grade metamorphic-sedimentary series; 10—Neoproterozoic medium- and high-grade metamorphic series; 11—Meso- and Paleoproterozoic high-grade metamorphic series; 12—Dioritic high-grade metamorphic series in the middle and lower crust; 13—Basic granulite in the lower crust; 14—Spinel hercynite; 15—Indosinian-Yanshanian granitoids; 16—Jinningian granitoids; 17—Indosinian-Yanshanian diorites; 18—Thrust fault zone; 19—Thrust fault zone in the early stage and extensional normal fault zone in the late stage; 20—fault zone; 21—Intracrustal low-velocity layer; 22—Crust-mantle ductile shear zone; 23—Moho; 24—Earthquake focus of the Ms8.0 Wenchuan Earthquake. F₁—Aba thrust fault zone; F₂—Longriba thrust fault zone; F₃—Maoxian-Wenchuan thrust fault zone; F₄—Jiudingshan thrust fault zone; F₅—Yingxin thrust fault zone; F₆—Pengxian-Guanxian thrust fault zone; F₇—Jiuzhi crust-mantle ductile shear zone; F₈—Anxian crust-mantle ductile shear zone; F₉—Mianyang crust-mantle ductile shear zone; F₁₀—Dujiangyan crust-mantle ductile shear zone

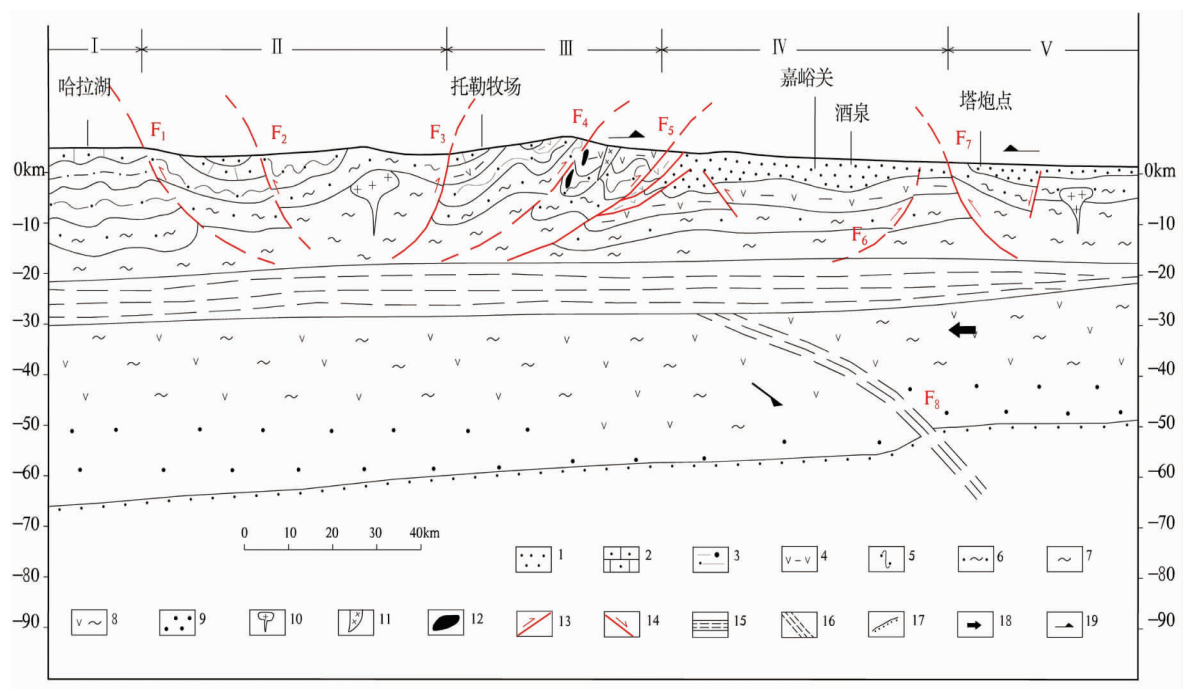


图 3 祁连山造山带地壳结构与动力学模式
(据地震测深剖面^[33]的构造解析)

1—侏罗系—新生界碎屑沉积岩系;2—上古生界至三叠系碎屑—碳酸盐岩沉积岩系;3— 新元古界—下古生界浅变质碎屑—碳酸盐岩沉积岩系;4—新元古界—下古生界浅变质火山沉积岩系;5—中元古界中浅变质岩系;6—古元古界中深变质岩系;7—太古宙深变质岩系;8—中下地壳闪长质深变质岩类;9—下地壳基性麻粒岩类;10—花岗岩类;11—加里东期闪长岩类;12—蛇绿岩;13—逆冲断裂带;14—伸展正断裂带;15—壳内低速层;16—壳幔韧性剪切带;17—莫霍界面;18—块体相对流变方向;19—地壳浅层块体相对运移方向。F₁—中祁连山缘断裂带;F₂—托来南山断裂带;F₃—中祁连北缘断裂带;F₄—北祁连断裂带;F₅—北祁连北缘断裂带;F₆—宽滩山断裂带;F₇—龙首山断裂带;F₈—酒泉壳幔韧性剪切带;I—南祁连构造带;II—中祁连构造带;III—北祁连构造带;IV—河西走廊构造带;V—阿拉善地块

Fig.3 Crustal structure and dynamic model in the Qilian Mountains orogenic belt
(structural analysis of the seismic sounding section^[33])

1-Jurassic-Cenozoic clastic sedimentary series; 2-Upper Paleozoic-Triassic clastic-carbonate sedimentary series; 3-Neoproterozoic-Lower Paleozoic low-grade metamorphic clastic-carbonate sedimentary series; 4-Neoproterozoic-Lower Paleozoic low-grade metamorphic volcanic-clastic-sedimentary series; 5-Middle Mesoproterozoic medium- and low-grade metamorphic series; 6-Lower Proterozoic medium- and high-grade metamorphic series; 7-Archean high-grade metamorphic series; 8-Dioritic high-grade metamorphic series in the middle and lower crust; 9-Basic granulite in the low crust; 10-Granitoids; 11-Caledonian diorites; 12-Ophiolite; 13-Thrust fault zone; 14-Extensional normal fault zone; 15-Intracrustal low-velocity layer; 16-Crust-mantle ductile shear zone; 17-Moho; 18-Direction of relative flow movement of blocks; 19-Direction of relative movement of shallow-level crust blocks. F₁-Thrust fault zone of the southern margin of middle Qilian; F₂-Tuolainanshan thrust fault zone; F₃-Thrust fault zone of the northern margin of Middle Qilian; F₄-North Qilian thrust fault zone; F₅-Thrust fault zone of the northern margin of North Qilian; F₆-Kuantanshan thrust fault zone; F₇-Longshoushan thrust fault zone; F₈-Jiuquan crust-mantle ductile shear zone. I-South Qilian tectonic zone; II-Middle Qilian tectonic zone; III-North Qilian tectonic zone; IV-Hexizoulang tectonic zone; V-Alashan block

壳扩展、应力集中与快速释放破裂引起的(图 4)。

1.3 地震断裂与震源断裂含义

基于上述科学研究思路,本文拟将地震断裂与震源断裂加以区分。震源断裂是指由于断裂直接活动或扩展形成端点的应力集中,当超过了弹性极限,在端点能量快速释放,从而引起地震活动的断裂称为震源断裂或发震断裂^[55]。地震断裂是指深层震源断裂活动错动发生地震时,引起地表原断裂带的重新活动或新产生的同震地表破裂带^[55]。震源断裂与地震断裂是完全不同的两个概念,二者既有显著区

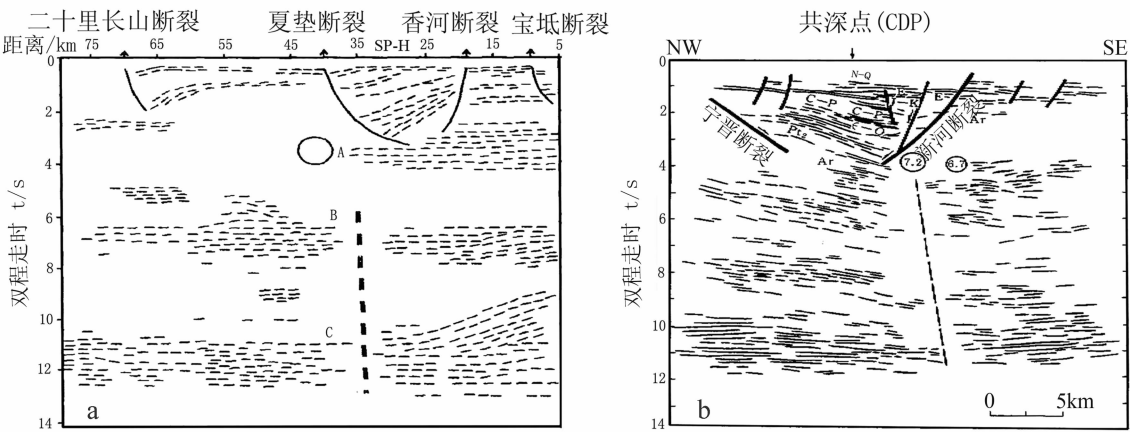


图 4 地震活动区深地震反射剖面线划图
a—三河—平谷地震区 SP-1 深反射剖面线划图^[54];b—邢台地震区深反射剖面线划图^[53]
Fig.4 Deep seismic reflection profiling of the earthquake area

a—SP-1 deep seismic reflection of the Shanhe-Pinggu earthquake area^[54];b—Deep Seismic reflection profiling of the Xintai earthquake area^[53]

别,又有密切联系,研究构造地震过程中应加以区分,有利于防震减灾,以及地震机制与地震原因的探讨与研究。

2 汶川 8.0 级特大地震主震区地震断裂分析

多数地质学家、地球物理学家和地震学家认为地壳表层发育的映秀断裂带、北川断裂带、彭县—灌县断裂带等是汶川 8.0 级特大地震主震区的发震构造或发震断裂^[1-4,7-8,14,16,18-20]。笔者根据地壳表层地质构造、地震地质、地震测深和大地电磁测深等深部地质结构的综合研究表明,映秀断裂带、北川断裂带和彭县—灌县断裂带等不是汶川 8.0 级特大地震主震区的震源断裂或震源构造^[9,10],而是地震断裂^[9]。

2.1 龙门山碰撞造山带地壳表层构造格局

地壳表层地质构造三维几何结构研究表明^[23-27],龙门山碰撞造山带岩石圈壳内低速、低阻、高导层以上地壳表层存在大型走滑-逆冲推覆-滑脱构造,它可能是东昆仑—秦岭巨型推覆构造体系的一部分^[9,24-25,34,43]。龙门山大型走滑-逆冲推覆-滑脱构造以主推覆滑脱脱离面——映秀断裂带为界,断裂带西北方向走滑-逆冲推覆构造带内存在众多鳞片状推覆体,包括彭灌推覆体、唐王寨推覆体、宝兴推覆体、金汤推覆体和轿子顶推覆体等(图 5)。各鳞片状

推覆体被相互叠置与截交的映秀逆冲断裂带、雁门坝逆冲断裂带、九顶山—北川逆冲断裂带、小关子逆冲断裂带、五龙逆冲断裂带、茂汶逆冲断裂带和青川逆冲断裂带所分割与围限,构成较典型的鳞片状叠瓦式三维几何结构组合^[9,24-25](图 5)。这些断裂带汇聚于不同深度的滑脱带上,各推覆体与各逆冲断裂带构成后展式扩展,构造变形强烈。映秀逆冲断裂带和北川逆冲断裂带及其以东的川西前陆构造带方向依次出现盆缘叠瓦逆冲断裂构造带(包括龙门山边缘众多飞来峰构造)、盆内断层三角构造带、盆内冲起构造带,以及川中宽缓褶皱构造带等(图 5,6)。它们构成前展式扩展,构造变形逐渐减弱^[9,24-27,34,43]。

2.2 映秀逆冲断裂带三维几何结构样式

映秀逆冲断裂带总体呈北东—南西向展布,倾向北西,地表倾角较陡,倾角 70°左右(图 6),向深部延伸至 1~2 km 以下逐渐变缓,该断裂带由 1~2 km 宽的各种断层构造岩组成,以脆性变形为主,局部表现为韧性变形,下盘以上三叠统陆相沉积岩系为主,上盘以元古宙彭灌杂岩为主,整体由北西向南东逆冲推覆和滑覆^[25,56](图 2,6)。研究表明^[25],映秀逆断裂带向北东方向延伸至高川附近可能与九顶山—北川逆冲断裂带切交,被轿子顶推覆体覆盖;其向南西延伸至三江附近可能与五龙逆冲断裂带切交,被金汤推覆体覆盖(图 5)。

①蔡学林,魏显贵,张朝文,等.阿尔泰—台湾剖面泉州—花石峡地质构造研究报告.成都理工大学档案馆,1989:1-116.

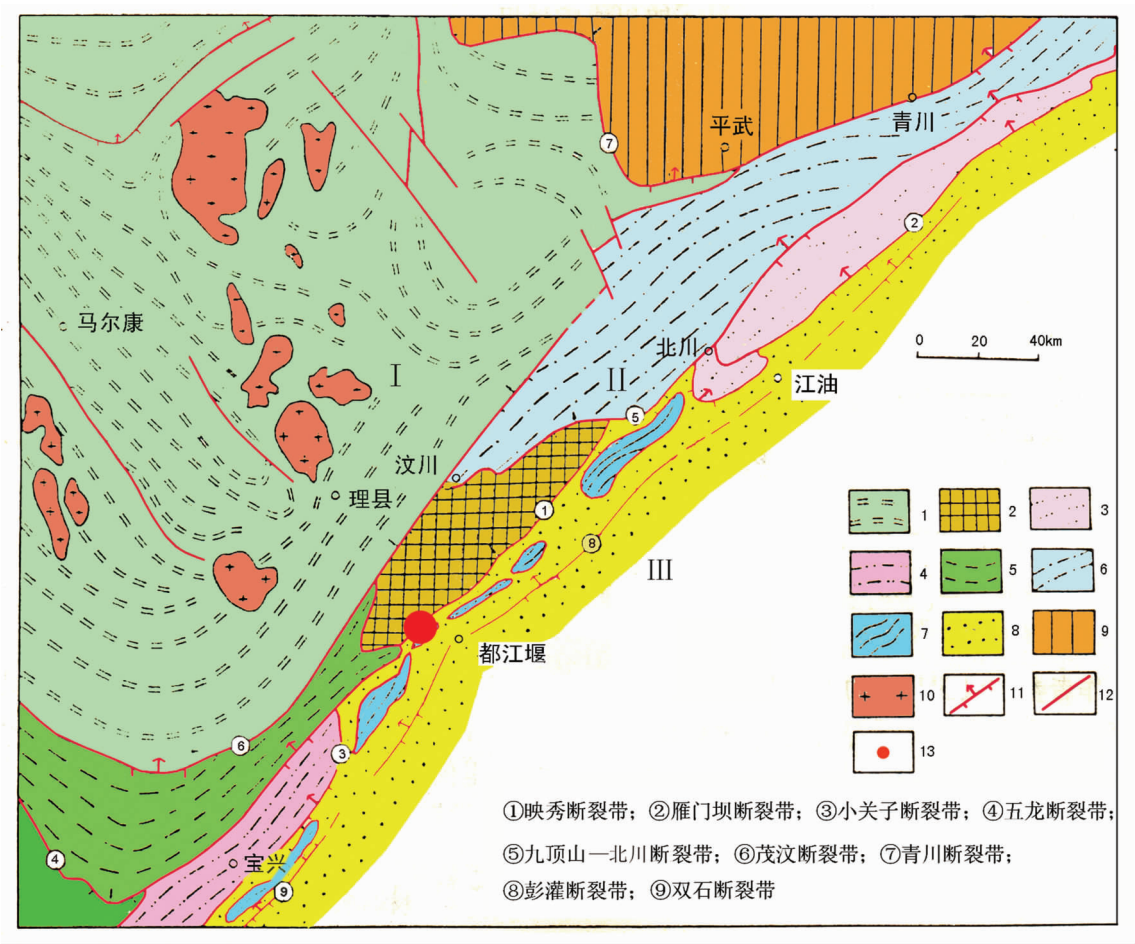


图 5 龙门山推覆构造略图

1—挤压—伸展花岗岩体构造带;2—彭灌推覆体;3—唐王寨推覆体;4—宝兴推覆体;5—金汤推覆体;
6—轿子顶推覆体;7—飞来峰;8—逆冲—叠瓦褶皱断带;9—摩天岭推覆构造带;10—中生代花岗岩体;
11—逆冲断裂带;12—实测断裂带;13—汶川 8.0 级大地震震中

Fig. 5 Nappe structure of the Longmen orogenic belt

1-Compressional-extensional granitoid structure belt; 2-Pengxian-Guanxian nappe; 3-Tangwangzhai nappe; 4-Baoxing nappe; 5-Jintang nappe; 6-Jiaoziding nappe; 7-Klippe; 8-Thrust-imbricate fold-fault belt; 9-Motionling nappe structure belt; 10-Mesozoic granite; 11-Thrust fault belt; 12-Fault belt; 13-Great Ms8.0 Wenchuan Earthquake

地震测深成果^[31,34,43]显示,映秀逆冲断裂带向深部延伸,逐渐变缓,过汶川后,消失在中上地壳之间的壳内低速层中(图 2)。石油地震测深^[56-57]表明映秀断裂、北川断裂带和彭县—灌县断裂带等,向深处延伸 2~3 km 以下逐渐平缓。汶川 8.0 级特大地震发生后,实施的地震科学钻 WFSD1 井区电性结构^②显示,映秀逆冲断裂带由地表向北西延伸 1 km 后,在 1.2 km 深处,该断裂带逐渐变缓,呈近水平状态。跨过龙门山碰撞造山带,实施的 4 条大地电磁测深剖

面电性结构^[11,41]的构造解析表明,映秀逆冲断裂带向北西延伸呈阶梯状几何结构型式存在,并处于震源体上方^[11](图 7),在映秀镇北,断裂带在表层倾角较陡,向深处逐渐变缓,在映秀北北西 5 km 深处,断裂带逐渐变缓与彭县—灌县逆冲断裂带相交汇,向北北西延伸 6 km 银杏乡深处,断裂带又由缓变陡,向北北西延伸至彻底关深处又由陡变缓,再向西北延伸至蒲溪乡附近 12 km 深处,再由缓变陡,在该处茂汶逆冲断裂带与映秀逆冲断裂带汇交,至理

①四川石油管理局地球物理勘探公司. 龙门山构造带构造模式及有利勘探圈闭评价研究,2005.

②王绪本,李书兵,等. 龙门山深部地球物理结构及油气选区研究报告. 中石化西南油气分公司,成都理工大学,2009:22-105.

县附近 20~25 km 深处,断裂带逐渐变为近水平延伸,并消失在壳内低阻高导层中。由此表明,映秀逆冲断裂带这一结构特征,很难形成能量高度聚集,但它与壳内低速低阻高导层一起构成上扬子地块西缘与松潘—甘孜地块最重要的动力学边界条件之一^[34](图 2)。

2.3 主震源区与映秀逆冲断裂带空间几何关系

中国地震台网测定,汶川 8.0 级特大地震微观震中位于东经 103.4°,北纬 31.0°^[2],地理位置处于汶川县漩口镇八角庙村桂子坪古溪沟尾处。微观震中地表处于映秀逆冲断裂带西北盘上盘,该处系彭灌杂岩英云闪长岩与细粒辉长岩的交界处^①,距映秀逆冲断裂带垂直距离仅 1 km(图 6)。汶川 8.0 级特大地震是大陆板内浅源地震,主震区震源深度在 14~19 km^[1-5,14],利用双差定位法重新精确定位,其主震震源深度为 16.7 km(王志面告, 2010)或 16 km^[14],余震优势深度集中在 5~20 km^[14]。这些数据表明,该主震震源区位于映秀断裂带和彭县—灌县断裂带下盘(图 2,6,7),距映秀断裂带垂直深度约 13 km。综上所述,映秀断裂带不是汶川特大地震主震区的震

源断裂。

2.4 同震地表破裂带基本特征

汶川 8.0 级特大地震发生后,大量地表地震地质调查^[4,15-16,21]显示,沿映秀断裂带、北川断裂带和彭县—灌县断裂带发生破裂和位移外,主要形成两条同震地表破裂带。这些地表破裂带具有如下特征:1)映秀断裂带的地表破裂带和彭县—灌县断裂带的地表破裂带均处于断裂带的下盘^[16,21],最大距离可达 7 km^[16],并与老断裂带近平行延伸;2)地表破裂带在南段以逆冲为主,右旋走滑次之,北段以右旋走滑为主兼有逆冲变形^[15];3)在龙门山中段原有断裂带与同震地表破裂带在剖面上构成叠瓦式组合,形成前展式扩展,在虹口周家坪地区存在反向逆冲地表破裂带^[21]。据此推断深部隐伏震源断裂活动,引起地表原有断裂的位移及同震地表破裂带的形成,因此,映秀断裂带等应为地震断裂。

3 汶川 8.0 级特大地震震源断裂分析

3.1 汶川 8.0 级特大地震深部构造背景

笔者根据多年在该区进行地质构造研究,以及

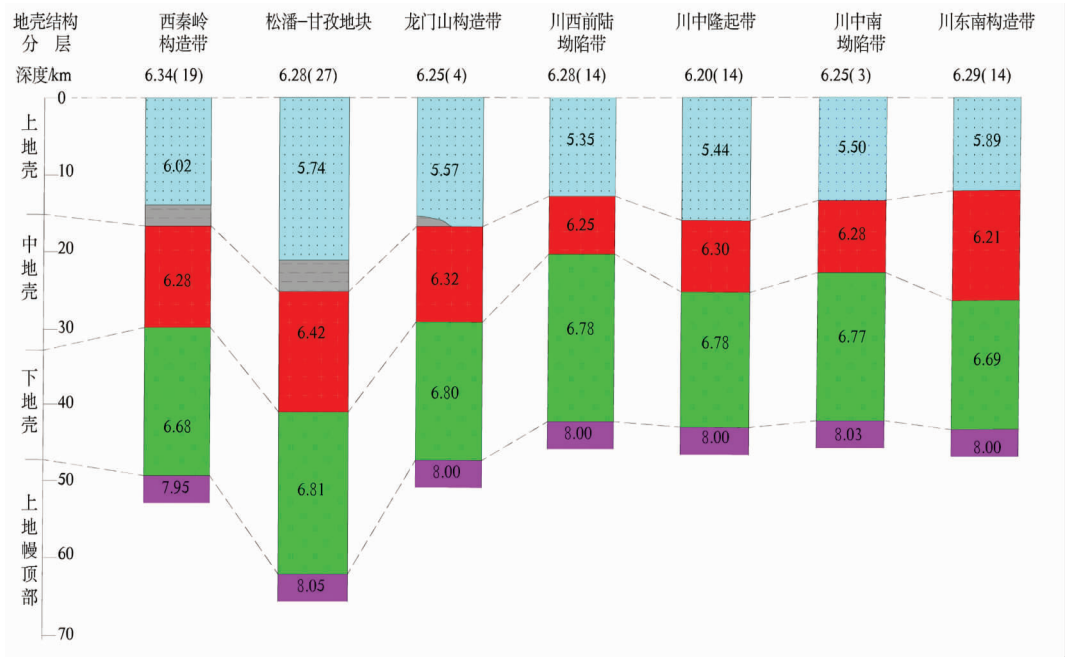


图 8 上扬子地块西缘及邻区地壳厚度与速度(km/s)结构模型
(括弧内数据代表参加平均数,图中断线表示壳内低速层)

Fig.8 Model of the crustal thickness and P-wave velocities (km/s) structure of the western margin of Upper Yangtze and its adjacent areas

① 成都理工大学区域地质调查队.映秀幅 1:5 万区域地质图,1996.

地震测深和大地电磁测深等的综合构造解析表明,汶川 8.0 级特大地震主震区可能与处于岩石圈地壳特殊的构造环境有关。首先,主震区位于上扬子克拉通型地壳与青藏高原增厚型地壳^[46]的结合带(图 1,2,8),龙门山以东的川中地块克拉通型地壳 v_s 速度平均值为 6.24 km/s,地壳厚度平均值为 44.60 km,龙门山以西的松潘—甘孜地块增厚型地壳 v_s 速度平均值为 6.28 km/s,地壳厚度平均值迅速增大到 62.73 km(图 8),这一结合带有利于现今应力活动与聚集。其次,地震测深显示,龙门山碰撞造山带以东的川中地块(包括川西前陆构造带)克拉通型地壳壳内低速层不发育(图 2,8,9),表明地壳处于相对稳定状态,映秀断裂带以西的松潘—甘孜地块中上地壳之间普遍存在壳内低速层(图 2,8,9)。壳内低速层

埋深由西北的阿坝向东南汶川壳内低速层埋深逐渐变浅,从 26 km 到 19 km 左右,从汶川到映秀镇北约 15 km 深 17~18 km 处消失,主震震源区不存在壳内低速层(图 2)。第三,大地电磁测深电性结构显示,壳内低阻高导层仅在汶川以西的中上地壳之间存在(图 7),主震区内由 4 个高阻块体构成^①,较多的大地电磁测深剖面显示龙门山碰撞造山带深处存在高阻块体^[11,37,38,41](图 7),由深变质岩构成的高阻地块有利于地应力的集中。第四,地震测深与大地电磁测深构造解析显示,汶川 8.0 级特大地震主震源区位于深、浅断裂相互对应而又不连通的高速高阻块体边缘的范围内(图 2,7)。第五,多条地震测深剖面 and 大地电磁测深剖面电性结构的构造解析表明,上扬子地块西缘与松潘—甘孜地块东缘结合部龙门山造

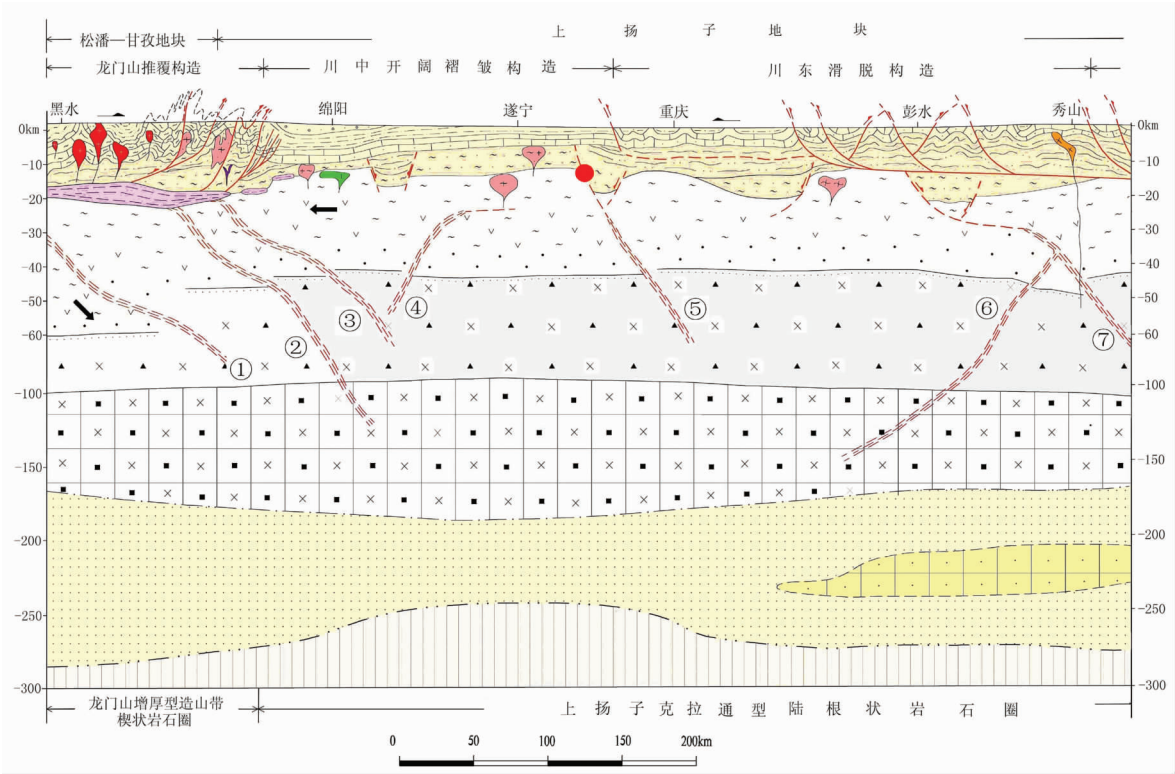


图 9 黑水—秀山岩石圈结构与动力学模式图
(图中红点示遂宁磨溪 5.0 级地震震源位置)

- ①—久治壳幔韧性剪切带;②—安县壳幔韧性剪切带;③—绵阳壳幔韧性剪切带;④—龙泉山壳幔韧性剪切带;
⑤—合川壳幔韧性剪切带;⑥—西阳壳幔韧性剪切带;⑦—秀山壳幔韧性剪切带

Fig.9 Structures and dynamic model of lithosphere and asthenosphere in Heishui-Xiushan area, Sichuan Province
①—Jiuzhi crust-mantle ductile shear zone; ②—Anxian crust-mantle ductile shear zone; ③— Mianyang crust-mantle ductile shear zone; ④—Longquanshan crust-mantle ductile shear zone; ⑤—Hechuan crust-mantle ductile shear zone; ⑥—Youyang crust-mantle ductile shear zone; ⑦—Xiushan crust-mantle ductile shear zone

①王绪本,李书兵,等. 龙门山深部地球物理结构及油气选区研究报告.中石化西南油气分公司,成都理工大学,2009:22-105.

山带岩石圈中上部存在楔状结构或鳄鱼状结构^[34,43,46](图 2,9),龙门山造山带地壳表层向北西倾斜、向南东逆冲推覆兼走滑的彭县—灌县断裂带、映秀断裂带、九顶山—北川断裂带向北西向深处延伸,多消失在中、上地壳之间的壳内低速低阻高导层中,与地壳底部向东南倾斜切割莫霍界面的安县壳幔韧性剪切带、绵阳壳幔韧性剪切带和都江堰壳幔韧性剪切带向北西向上延伸到壳内低速低阻高导层之间所围限的空间构成楔形体,楔形体是上扬子地块的一部分,楔形体尖端指向龙门山造山带或青藏高原东缘,在岩石圈断面上,构成较典型的楔状结构或鳄鱼状结构(图 2,9)。龙门山碰撞造山带岩石圈这一结构特征为汶川 8.0 级特大地震提供了最基本的动力学边界条件之一。

3.2 壳幔韧性剪切带与汶川 8.0 级特大地震的关系

根据地震测深、大地电磁测深以及小震双差定位分析显示,汶川 8.0 级特大地震主震震源区下方中下地壳及上地幔顶部存在切割莫霍面向东倾斜的隐伏断裂带^[58]或壳幔韧性剪切带^[34,43,46]。其中安县壳幔韧性剪切带和绵阳壳幔韧性剪切带向东南倾斜,向下延伸进入上地幔,向北西向上延伸消失在中上地壳之间的壳内低速低阻高导层中,因此,它们不利于能量高度聚集。东南倾斜切割莫霍界面的都江堰壳幔韧性剪切带向北西向上延伸到中地壳顶部,其上端点位于主震震源深变质岩区,有利于能量高度聚集,它正好位于主震震源深度 16 km 左右(图 2)。在区域挤压动力学作用下,壳幔韧性剪切带向中上地壳扩展时,在深变质岩区有利于地应力高度聚集,当达到岩石破裂极限时,发生能量释放,破裂形成汶川 8.0 级特大地震,与此同时引起地壳表层断裂的重新活动与位移,以及同震地表破裂带的形成。中国地震台网测定 2010 年 1 月 31 日 5 时 36 分四川盆地中央遂宁磨溪发生 5.0 级中强地震,震源深度 10 km。根据笔者对地震测深剖面的构造解析^[43]①发现,它可能是合川壳幔韧性剪切带^[43]向中上地壳扩展引起早期古断裂重新活动引起的(图 9)。综上所述,龙门山碰撞造山带深层发育的壳幔韧性剪切带可能是汶川 8.0 级特大地震的震源断裂或发震断裂之一。

4 汶川 8.0 级特大地震动力学分析

通过龙门山碰撞造山带及邻区地质构造研究、地震断裂与震源断裂特征研究、GPS 同震位移数据分析、人工地震测深与天然地震层析成像和大地电磁测深电性结构等系统构造解析,对汶川 8.0 级特大地震形成动力学作如下推断。

4.1 区域地球动力学态势

研究表明^[9,43-47],新生代以来,澳大利亚板块和印度板块由南向北向欧亚大陆板块俯冲—碰撞—楔入与太平洋板块和菲律宾海板块由东向西向欧亚大陆板块俯冲—碰撞—楔入动力学作用是亚洲大陆中南部岩石圈最基本的地球动力学态势,亦是汶川 8.0 级特大地震形成最基本的地球动力学条件之一。

4.2 地块的相向运动状态

汶川 8.0 级特大地震区处于欧亚大陆板块内部青藏高原松潘—甘孜地块增厚型岩石圈地壳与上扬子地块克拉通型岩石圈地壳结合带的龙门山碰撞造山带(图 1,8,9)。松潘—甘孜地块与上扬子地块运动状态存在两种不同认识:一是强调青藏高原东缘松潘—甘孜地块向东运移受上扬子地块阻挡^[1-4];另一是强调上扬子地块向西俯冲^[57]。根据地壳表层地质构造研究与 GPS 同震位移数据分析,松潘—甘孜地块与上扬子地块存在相向运动状态^[9,10](图 6,7)。

从松潘—甘孜地块地壳表层地质构造研究表明,龙门山走滑—逆冲推覆构造由北西向南东逆冲推覆滑动,形成较典型的逆冲推覆构造^[9,10,25,34,43,56,57]。从上扬子地块区域构造变形特征显示^[25-27,34],雪峰山推覆构造、川东南滑脱构造带、川中宽缓褶皱构造带均具有沿不同深度的构造滑脱层由南东东向北西西逆冲推覆与构造滑脱。此外,根据石油地震勘探成果^②显示,龙泉山背斜构造带中北段是不生根的,在深处被龙泉山西侧逆冲断层切割(图 6),在晚新生代以来,龙泉山背斜由南东东向北西西运移,最大运移宽度达 3.5 km,平均每年向西运移 1cm。由此表明,新生代晚期以来上扬子地块与松潘—甘孜地块存在相同的运动特征。

汶川特大地震震前 10 年间 GPS 观测结果表

①蔡学林,等,四川盆地岩石圈地壳结构及遂宁磨溪 5.0 级地震发震断裂探讨,2010。

②朱介寿,蔡学林,曹家敏,等,成都市地震活动断层研究报告,成都理工大学深部地球物理研究所,2009:1-112。

明,垂直于龙门山碰撞造山带中段存在水平挤压和缩短^[9]。GPS 同震位移观测^[1]揭示,以映秀断裂带和北川断裂带为界,以西的松潘—甘孜地块同震水平位移向南东 104°~150°方向运移了 23.1~81.75 mm;以东的上扬子地块西缘同震水平位移向北西西 278°~304°方向运移了 98.78~361.91 mm^[1]。这些数据表明,两地块发生相向运移,形成地壳强烈水平方向缩短^[1];上扬子地块西缘向北西西运移的距离比松潘—甘孜地块向南东东运移的距离大得多。

4.3 汶川 8.0 级特大地震形成动力学模式

在上述动力学与运动学背景下,推断上扬子地块西缘向青藏高原东缘龙门山造山带岩石圈持续碰撞—楔入过程中,相应地引起青藏高原东缘地壳表层岩块和物质沿壳内低速低阻高导层向龙门山造山带仰冲推覆(图 2,7,9),与此同时,发生高原东部地壳中下部及上地幔顶部向龙门山造山带和上扬子地块西缘岩石圈深部俯冲^[26,34,38,43,49](图 2,9),引起龙门山碰撞造山带岩石圈内部切割莫霍界面的震源断裂—壳幔韧性剪切带向中上地壳扩展,在高速高阻块体边缘深变质岩区,应力高度聚集与能量快速释放破裂,从而引起汶川 8.0 级特大地震的形成。与此同时,沿映秀断裂带、北川断裂带、彭县—灌县断裂带活动与位移,并在上述断裂带的下盘形成两条同震地表破裂带,与原有断裂带一起构成前展式扩展,局部发育地表反冲破裂带^[21]。

5 结论与建议

(1)地质构造和地震地质研究与地震测深剖面速度结构和大地电磁测深剖面电性结构的构造解析显示,龙门山碰撞造山带岩石圈地壳表层的映秀逆冲断裂带、北川逆冲断裂带及彭县—灌县逆冲断裂带应为主震区的地震断裂,而切割莫霍界面的壳幔韧性剪切带实为主震区震源断裂或发震断裂,将震源断裂与地震断裂加以区分研究,对地震的成因、动力学机制和地震预防与减灾等研究有重要科学和实际意义。

(2)龙门山碰撞造山带存在的隐伏壳幔韧性剪切带可能是汶川 8.0 级特大地震主震区的震源断裂或发震断裂之一。在印度板块由南向北向欧亚板块俯冲—碰撞—楔入与太平洋板块和菲律宾海板块向西向欧亚板块俯冲—碰撞—楔入的动力学作用下,上扬子地块向青藏高原东缘碰撞—楔入,相应出现青

藏高原东缘地壳表层岩块与物质向龙门山造山带仰冲推覆滑脱与走滑位移,青藏高原东缘中下地壳及上地幔顶部向龙门山造山带和上扬子地块西缘岩石圈深处俯冲,引起切割莫霍界面的壳幔韧性剪切带向中上地壳扩展,应力聚集与能量快速释放破裂从而发生汶川 8.0 级特大地震。与此同时,引起地表原有断裂带的活动与位移,形成两条同震地表破裂带,并与原有断裂带构成前展式扩展。

(3)建议加强上扬子地块西缘地区地震断裂与震源断裂几何关系与成因联系的研究,实施主震区高分辨率深地震反射探测与大地电磁测深探测,进一步加强地震活动断裂带与地壳三维精细结构的研究为防震减灾提供科学依据。

参考文献(References):

[1] 国家重大科学工程《中国地壳运动观测网络》项目组. GPS 测定的 2008 年汶川 MS 8.0 地震的同震位移 [J]. 中国科学 (D 辑), 2008, 38(10):1195-1206.
The Group of National Important Project on the science *Crustal Movement observation Network of China*. The Co-seismic displacement setting of the Wenchuan Ms8.0 Earthquake produced by GPS measurement ,2008 [J]. Science in China (Series.D), 2008, 38(10): 1195-1206(in Chinese).

[2] 张培震, 徐锡伟, 闻学泽, 等. 2008 年汶川 8.0 级地震的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 Longmenshan 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).

[3] 张培震. 青藏高原东缘川西地区的现今构造变形、应变分析与深部动力学过程[J]. 中国科学(D 辑), 2008, 38(9):1041-1056.
Zhang Peizhen. Modern tectonic deformations, strain partitions and deep dynamic processes in western Sichuan of eastern margin of Qinghai-Tibet Plateau[J]. Science in China (Series.D), 2008, 38(9): 1041-1056 (in Chinese).

[4] 徐锡伟, 闻学泽, 叶建青, 等. 汶川 MS8.0 地震地表破裂带及发震构造[J]. 地震地质, 2008, 30(3):597-629.
Xu Xiwei, Wen Xueze, Ye Jianqing, et al. The Ms 8.0 Wenchuan earthquake surface ruptures and its seismogenic structure [J]. Seismology and Geology, 2008, 30 (3):597-629 (in Chinese with English abstract).

[5] 刘启元, 陈九辉, 李顺成, 等. 汶川 MS 8.0 地震:川西流动地震台阵观测数据的初步分析[J]. 地震地质, 2008, 30(3):584-596.
Liu Qiyuan, Chen Jiuhui, Li Shuncheng, et al. The MS8.0 Wenchuan earthquake: Preliminary results from the Western

- Sichuan mobile seismic array observation [J]. Seismology and Geology, 2008, 30(3):584–546(in Chinese with English abstract).
- [6] 邓起东. 关于四川汶川 8.0 级地震的思考 [J]. 地震地质, 2008, 30(4):811–827.
- Deng Qidong. Some thoughts on the MS8.0 Wenchuan, Sichuan earthquake [J]. Seismology and Geology, 2008, 30 (4):811–827 (in Chinese with English abstract).
- [7] 滕吉文, 白登海, 杨辉, 等. 2008 年汶川 MS8.0 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 Jiwen, Bai Denghai, Yang Hui, et al. Deep processes and dynamic responses associated with the Wechuan Ms8.0 earthquake of 2008[J]. Chinese Journal Geophysics, 2008, 51(5):1385–1402.
- [8] 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 Jieshou. The Wenchuan earthquake occurrence background in deep structure and dynamics of lithosphere [J]. Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition), 2008, 35(4):348–356(in Chinese with English abstract).
- [9] 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 Xuelin, Cao Jiamin, Zhu Jieshou, et al. A preliminary study on the 3–D crust structure for the Longmenshan lithosphere and the genesis of the huge Wenchuan earthquake, Sichuan, China [J]. Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition), 2008, 35(4):357–365(in Chinese with English abstract).
- [10] 刘树根, 田小彬, 李智武, 等. 龙门山中段构造特征与汶川地震 [J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 2008, 35(4):388–397.
- Liu Shugen, Tian Xiaobin, Li Zhiwu, et al. Structural features of the central Longmen Mountains and the Wenchuan earthquake in Sichuan, China [J]. Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition), 2008, 35(4):388–397 (in Chinese with English abstract).
- [11] 王绪本, 朱迎堂, 赵锡奎, 等. 青藏高原东缘龙门山逆冲构造深部电性结构特征[J]. 地球物理学报, 2009, 52(2):564–571.
- Wang Xuben, Zhu Yingtang, Zhao Xikui, et al. Deep conductivity characteristics of the Longmenshan, Eastern Qinghai–Tibet Plateau [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2009, 52 (2):564–571 (in Chinese with English abstract).
- [12] 田勤俭. 汶川 8.0 级地震的地震构造问题 [C]//汶川 8.0 级地震地壳动力学研究专辑. 北京:地震出版社, 2009:302–311.
- Tian Qinjian. Discussion on tectonic background of the Wechuan Ms8.0 earthquake [C] // Crustal dynamics of the Wenchuan Ms8.0 earthquake. Beijing:Seismological Press, 2009:302–311(in Chinese with English abstract).
- [13] 张勇, 冯万鹏, 许力生, 等. 2008 年汶川大地震的时空破裂过程 [J]. 中国科学(D 辑), 2009, 38(10):1186–1194.
- Zhang Yong, Feng Wanpeng, Xu Lisheng, et al. Rupture process of space–time of the Wenchuan strong earthquake in 2008 [J]. Science in China (Series.D), 2009, 30(10):1186–1194.
- [14] 黄媛, 吴建平, 张天中, 等. 汶川 8.0 级大地震及余震序列重定位研究[J]. 中国科学(D 辑), 2008, 38(10):1242–1249.
- Huang Yuan, Wu Jianping, Zhang Tianzhong, et al. Relocation of the Ms8.0 Wenchuan earthquake and its aftershock sequence [J]. Science in China (Ser.D), 2008, 51(12):1703–1711.
- [15] 李海兵, 司家亮, 付小方, 等. 2008 年汶川地震同震滑移特征、最大滑移量及构造意义[J]. 第四纪研究, 2009, 29(3):387–402.
- Li Haibing, Si Jialiang, Fu Xiaofang, et al. Co–seismic rupture and maximum displacement of the 2008 Wenchuan earthquake and its tectonic implications[J]. Quaternary Sciences, 2009, 29(5):387–402 (in Chinese with English abstract).
- [16] 李勇, 黄润秋, Densmore A L, 等. 龙门山彭县—灌县断裂的活动构造与地表破裂[J]. 第四纪研究, 2009, 29(3):403–415.
- Li Yong, Huang Runqiu, Densmore A L, et al. Active tectonics and surface rupture of the Pengxian–Guanxian fault Longmen mountain, Sichuan, China [J]. Quaternary Sciences, 2009, 29(3):403–415(in Chinese with English abstract).
- [17] 张瑞青, 吴庆举, 李永华, 等. 汶川中强余震震源深度的确定及其意义[J]. 中国科学(D 辑), 2008, 38(10):1234–1241.
- Zhang Ruiqing, Wu Qingju, Li Yonghua, et al. Focal depths for moderate–sized aftershocks of the Wenchuan MS8.0 earthquake and their implications[J]. Science in China (Ser.D), 2008, 51(12):1694–1702.
- [18] 楼海, 王椿镛, 吕智勇, 等. 2008 年汶川 Ms8.0 级地震的深部构造环境:远震 P 波接收函数和布格重力异常的联合解释[J]. 中国科学(D 辑), 2008, 38(10):1207–1220.
- Lou Hai, Wang Chunyong, Lv Zhiyong, et al. The deep structural environment of the 2008 MS8.0 Wenchuan earthquake: A joint interpretation of teleseismic P–wave receiver function and Bouguer gravity anomaly [J]. Science in China (Series.D), 2008, 38(10):1207–1220 (in Chinese).
- [19] 杜方, 闻学泽, 张培震, 等. 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, 2009, 52 (11):2729–2738.
- Du Fang, Wen Xueze, Zhang Peizhen, et al. Interseismic deformation across the Longmenshan fault zone before the 2008 MS8.0 Wenchuan earthquake [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2009, 52(11):2729–2738(in Chinese with English abstract).
- [20] 张世民, 谢富仁, 黄忠贤, 等. 龙门山地区上地壳的拱曲冲断作用及其深部动力学机制探讨[J]. 第四纪研究, 2009, 29(3):449–463.
- Zhang Shimin, Xie Furen, Huang zhongxian, et al. Bending and thrusting of the upper crust in Longmenshan area and its deep dynamics[J]. Quaternary Sciences, 29(3):449–463(in Chinese with English abstract).
- [21] 刘静, 孙杰, 张智慧, 等. 汶川地震映秀—北川地表破裂带虹口乡段精细填图、位移特征和地震构造分析[J]. 第四纪研究, 2010, 30(1):1–29.
- Liu Jing, Sun Jie, Zhang Zhihui, et al. Detailed mapping of surface

- rupture of the Wenchuan Ms8.0 earthquake near Hongkou and seismotectonic implications [J]. *Quaternary Sciences*, 2010, 30(1): 1–29 (in Chinese with English abstract).
- [22] 张致伟, 程万正, 阮祥, 等. 汶川 8.0 级地震前龙门山断裂带的地震活动性和构造应力场特征[J]. *地震学报*, 2009, 31(2): 117–127. Zhang Zhiwei, Cheng Wanzheng, Ruan Xiang, et al. Seismicity and tectonic stress of the Longmenshan fault zone before 2008 Wenchuan MS8.0 earthquake [J]. *Acta Seismologica Sinica*, 2009, 31(2): 117–127 (in Chinese with English abstract).
- [23] 袁学诚, 左恩, 蔡学林, 等. 华南板块岩石圈构造与地球物理[C]//八十年代中国地球物理学进展. 北京: 学术书刊出版社, 1989: 243–249.
- Yuan Xuecheng, Zuo Yu, Cai Xuelin, et al. The structure of the lithosphere and the geophysics in the South China plate [C]// *Geophysics in China in the Eighties*. Beijing: Learning Publication Press, 1989: 243–249 (in Chinese with English Abstract).
- [24] 蔡学林, 石绍清, 吴德超, 等. 武当山推覆构造的形成与演化[M]. 成都: 成都科技大学出版社, 1996: 1–207.
- Cai Xuelin, Shi Shaoqing, Wu Dechao, et al. Formation and Tectonic Evolution of the Wudangshan Nappe Structure [M]. Chengdu: Press of Chengdu University of Science and Technology, 1995: 1–207 (in Chinese with English abstract).
- [25] Cai Xuelin, Wei Xiangui, Liu Yuanchao, et al. On the wedging–in orogenesis[C]// *Progress in Geology of the China (1993–1996)–Papers to 30th IGC*. Beijing: China Ocean Press, 1996: 314–320.
- [26] 蔡学林, 曹家敏, 刘援朝, 等. 青藏高原多向碰撞–楔入隆升地球动力学模式[J]. *地学前缘*, 1999, 6(3): 181–189.
- Cai Xuelin, Cao Jiamin, Liu Yuanchao, et al. Geodynamic models of multidirectional collision–wedging uplift of the Qinghai–Tibet Plateau[J]. *Earth Science Frontiers*, 1999, 6(3): 181–189 (in Chinese with English abstract).
- [27] 蔡学林, 曹家敏. 四川盆地变形构造格局及其对地震活动的控制作用[J]. *四川地震*, 1998, 20(3): 26–34.
- Cai Xuelin, Cao Jiamin. The deformed structures framework control function on earthquake in Sichuan basin [J]. *Earthquake Research in Sichuan*, 1998, 20(3): 26–34 (in Chinese with English abstract).
- [28] 马杏垣. 中国岩石圈动力学地图集[M]. 北京: 中国地图出版社. 1989: 1–68.
- Ma Xingyuan. Atlas of the Lithosphere Dynamics of China [M]. Beijing: China Cartographic Publishing House, 1989: 1–68 (in Chinese).
- [29] 马杏垣. 解析构造学[M]. 北京: 地质出版社, 2004: 10–421.
- Ma Xingyuan. Analytical Tectonics [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2004: 10–421 (in Chinese).
- [30] 付昭仁, 蔡学林. 变质岩区构造地质学 [M]. 北京: 地质出版社, 1996: 1–239.
- Fu Zhaoren, Cai Xuelin. Structural Geology of Metamorphic Terrain [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1996: 1–239 (in Chinese).
- [31] 曹家敏, 王有学. 阿尔泰–台湾剖面茂汶–邵阳段地壳结构[C]//阿尔泰–台湾地学断面论文集, 武汉: 中国地质大学出版社, 1997: 82–86.
- Cao Jiamin, Wang Youxue. Crustal velocity structure of Maowen–Shaoyang part of Altay–Taiwan profile [C]// *Collected papers of geoscience transect in Altay–Taiwan*. Wuhan: China University of Geosciences Press, 1997: 82–86 (in Chinese with English abstract).
- [32] 王椿镛, 吴建平, 楼海, 等. 川西藏东地区的地壳 P 波速度结构[J]. *中国科学(D 辑)*, 2003, 33(增刊): 181–189.
- Wang Chunyong, Wu Jianping, Lou Hai, et al. The crustal P–wave velocity structure of the western Sichuan and eastern Tibet[J]. *Science in China (Series D)*, 2003, 33(supp.): 181–189 (in Chinese).
- [33] 崔作舟, 李秋生, 吴朝东, 等. 格尔木–额济纳旗地学断面的地壳结构与深部构造[J]. *地球物理学报*, 1995, 38(增刊 II): 15–28.
- Cui Zuozhou, Li Qiusheng, Wu Chaodong, et al. The crustal and deep structures in Golmud–Ejinqi GGT[J]. *Acta Geophysics Sinica*, 1995, 38 (supp. II): 15–28 (in Chinese with English abstract).
- [34] 蔡学林, 曹家敏, 朱介寿. 新疆可托托海–四川简阳地学断面岩石圈与软流圈结构[J]. *中国地质*, 2008, 35(3): 375–391.
- Cai Xuelin, Cao Jiamin, Zhu Jieshou. Lithosphere and asthenospheric structures of the koktokay of Xinjiang to Jianyang of Sichuan geoscience transect [J]. *Geology in China*, 2008, 35(3): 375–391 (in Chinese with English abstract).
- [35] 朱介寿, 曹家敏, 蔡学林, 等. 东亚西太平洋边缘海高分辨率面波层析成像[J]. *地球物理学报*, 2002, 45(5): 446–464.
- Zhu Jieshou, Cao Jiamin, Cai Xuelin, et al. High resolution surface wave tomography in East Asia and West Pacific marginal seas [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2002, 45(5): 446–464 (in Chinese with English abstract).
- [36] 朱介寿, 曹家敏, 严忠琼. 中国及邻区瑞利面波高分辨率层析成像及其地球动力学意义[J]. *中国地质*, 2007, 34(5): 759–767.
- Zhu Jieshou, Cao Jiamin, Yan Zhongqiong, et al. High–resolution Rayleigh surface wave tomographic imaging of China and adjacent regions and its geodynamic implications [J]. *Geology in China*, 2007: 34(5): 759–767 (in Chinese with English abstract).
- [37] 李立, 金国元. 攀西裂谷带及龙门山断裂带地壳上地幔的大地电磁测深研究[J]. *物探与化探*, 1987, 11(3): 161–169.
- Li Li, Jin Guoyuan. Telluric electromagnetic sounding study of crust and Upper mantle in the Panxi “Rift Zone” and the Longmenshan fault zone [J]. *Geophysical & Geochemical Exploration*, 1987, 11 (3): 161–169 (in Chinese with English abstract).
- [38] 孙洁, 晋光文, 白登海, 等. 青藏高原东缘地壳、上地幔结构探测及其构造意义[J]. *中国科学(D 辑)*, 2003, 33(增刊): 173–180.
- Sun Jie, Jin Guangwen, Bai Denghai, et al. Sounding of electrical structure of the crust and upper mantle along the eastern border of Qinghai–Tibet Plateau and its tectonic significance [J]. *Science in China (Ser.D)*, 33 (Supp.): 173–180 (in Chinese with English abstract).
- [39] 汤吉, 詹艳, 赵国泽, 等. 青藏高原东北缘玛沁–兰州–靖边剖

- 面地壳上地幔电性结构研究[J]. 地球物理学报, 2005, 48(5): 1205–1216.
- Jang Ji, Zhan Yan, Zhao Guoze, et al. Electrical conductivity structure of the crust and upper mantle in the northeastern margin of the Qinghai–Tibet plateau along the profile Maqen–Lanzhou–Jingbian[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2005, 48(5):1205–1216 (in China with English abstract).
- [40] 詹艳, 赵国泽, 王继军, 等. 青藏高原东北缘海原弧形构造区地壳电性结构探测研究[J]. 地震学报, 2005, 27(4):431–440.
- Zhan Yan, Zhao Guoze, Wang Jijun, et al. Crustal electric structure of Haiyuan arcuate tectonic region in the northeastern margin of Qinghai–Tibet Plateau, China [J]. Acta Seismologica Sinica, 2005, 27(4):431–440 (in Chinese with English abstract).
- [41] 王绪本, 余年, 朱迎棠, 等. 龙门山逆冲构造带大地电磁测深初步成果[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 2008, 33(4):398–403.
- Wang Xuben, Yu Nian, Zhu Yingtang, et al. Preliminary result of magnetotelluric sounding in the Longmen thrust belt of West Sichuan, China [J]. Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition), 2008, 35(4):398–403(in Chinese with English abstract).
- [42] 赵国泽, 陈小斌, 汤吉, 等. 龙门山断裂带和汶川地震区深部结构电磁探测初步研究 [C]//第九届中国国际地球电磁学术讨论会. 桂林:桂林理工大学, 2009:211–213.
- Zhao Gaoze, Chen Xiaobin, Jang Ji, et al. Preliminary study of the crustal structure beneath the Longmenshan and Wenchuan Ms8.0 earthquake epicentre using MT [C]// The 9th China International Geo–Electromagnetic Workshop. Guilin:Guilin University of Technology, 2009:211–213(in Chinese with English abstract).
- [43] 蔡学林, 朱介寿, 曹家敏, 等. 四川黑水—台湾花莲断面岩石圈与软流圈结构 [J]. 成都理工大学学报 (自然科学版), 2004, 31(5):44–51.
- Cai Xuelin, Zhu Jieshou, Cao Jiamin, et al. Structures of lithosphere and asthenosphere in Heishi of Sichuan–Hualian of Taiwan profile [J]. Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition), 2004, 35(5):441–451 (in Chinese with English abstract).
- [44] 蔡学林, 朱介寿, 曹家敏, 等. 华南地区岩石圈三维结构类型与演化动力学[J]. 大地构造与成矿学, 2003, 27(4):299–310.
- Cai Xuelin, Zhu Jieshou, Cao Jiamin, et al. Three–dimensional tectonic types and evolutionary dynamics lithosphere of South China [J].Geotectonica et Metallogenia, 2003, 27(4):299–310(in Chinese with English abstract).
- [45] 朱介寿, 蔡学林, 曹家敏, 等. 中国华南及东海地区岩石圈三维结构及演化[M]. 北京:地质出版社, 2005:30–296.
- Zhu Jieshou, Cai Xuelin, Cao Jiamin, et al. The Three – Dimensional Structure of Lithosphere and its Evolution in South China and East China Sea [M]. Beijing:Geological Publishing House, 2005:30–296 (in Chinese with English abstract).
- [46] 蔡学林, 朱介寿, 曹家敏, 等. 中国大陆及邻区岩石圈地壳三维结构与动力学型式[J]. 中国地质, 2007, 34(4):543–557.
- Cai Xuelin, Zhu Jieshou, Cao Jiamin, et al. 3D structure and dynamic types of the lithosphere crust in continental China and its adjacent region [J]. Geology in China, 2007, 34 (4):543–557 (in Chinese with English abstract).
- [47] 蔡学林, 朱介寿, 曹家敏, 等. 东亚西太平洋岩石圈三维结构及其地幔动力学[J]. 地学前缘, 2007, 14(3):21–38.
- Cai Xuelin, Zhu Jieshou, Cao Jiamin, et al. Three–dimensional tectonics of lithosphere and mantle dynamics East Asia West Pacific [J]. Earth Science Frontiers, 2007, 14 (3):21–38 (in Chinese with English abstract).
- [48] 刘昌铨, 嘉世旭. 唐山地震区地壳上地幔结构特征[J]. 地震学报, 1986, 8(4):341–353.
- Liu Changquan, Jia Shixu. Structural property of the crust and the upper mantle in the Tangshan earthquake region [J]. Acta Seismologica Sinica, 1986, 8(4):341–353(in Chinese with English abstract).
- [49] 蔡学林, 曹家敏, 朱介寿, 等. 中国大陆岩石圈壳幔韧性剪切带系统[J]. 地学前缘, 2008, 15(3):36–54.
- Cai Xuelin, Cao Jiamin, Zhu Jieshou, et al. System of crust–mantle ductile shear zone in the continental lithosphere in China [J]. Earth Science Frontiers, 2008, 15 (3):36–54 (in Chinese with English abstract).
- [50] Downs H. Shear zone in the upper mantle –relation between geochemical enrichment and deformation in mantle peridotites [J]. Geology, 1990, 18:374–377.
- [51] 马宗晋, 高祥林. 大陆多震层的研究与震源体的破裂发展[C]//大陆多震层研究. 北京:地震出版社, 1992:1–8.
- Ma Zongjin, Gao Xianglin. Studies on the continental seismogenic layer and rupture extending of the source [C]//Studies on the continental seismogenic layer. Beijing: Seismological Press, 1992: 1–8 (in Chinese with English abstract).
- [52] 邓起东, 冯先岳, 张培震, 等. 天山活动构造[M]. 北京:地震出版社, 2000:302–321.
- Deng Qidong, Feng Xianyue, Zhang Peizhen, et al. Active Tectonics in Tianshan [M]. Beijing: Seimological Press, 2000: 302–321 (in Chinese).
- [53] 王椿楠, 王贵美, 林中洋, 等. 用深地震反射方法研究邢台地震区地壳细结构[J]. 地球物理学报, 1993, 36(4):445–452.
- Wang Chunyong, Wang Guimei, Lin Zhongyang, et al. A study on fine crustal structure in Xingtai earthquake area based on deep seismic reflection profiling[J]. Acta Geophysics Sinica, 1993, 36(4): 445–452 (in Chinese with English abstract).
- [54] 张先康, 赵金仁, 刘国华, 等. 三河—平谷 8.0 级大地震区震源细结构的深地震反射探测研究[J]. 中国地震, 2002, 18(2):326–336.
- Zhang Xiankang, Zhao Jinren, Liu Guohua, et al. Study on fine crustal structure of the Sanhe–Pinggu earthquake (M8.0) region by deep seismic reflection profiling [J]. Earthquake Research in China, 2002, 18(2):326–336(in Chinese with English abstract).
- [55] 地球科学大辞典编委会. 地球科学大辞典:基础学科卷[M]. 北

京:地质出版社, 2006:956-990.

Editorial Board of the Dictionary of Earth-Science. The Dictionary of Earth-Science: Volume of the Foundation Science [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2006:956-990 (in Chinese).

[56] 林茂炳. 汶川大地震与龙门山构造带[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 2008, 35(4):366-370.

Lin Maobing. The huge Wenchuan earthquake and Longmen tectonic belt [J]. Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology), 2008, 35 (4):366-370 (in Chinese with English abstract).

[57] 罗志立, 雍自权, 刘树根, 等. 四川汶川大地震与 C 型俯冲的关系和防震减灾的建议 [J]. 成都理工大学学报 (自然科学版), 2008, 35(4):337-347.

Luo Zhili, Yong Ziquan, Liu Shugen, et al. Relationship between C-subduction and the Wenchuan earthquake and suggestions on preventing earthquakes and mitigating disasters [J]. Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition), 2008, 35(4):337-347(in Chinese with English abstract).

[58] 朱艾斓, 徐锡伟, 周永胜, 等. 川西地区小震重新定位及其活动构造意义[J]. 地球物理学报, 2005, 48(3):629-636.

Zhu Ailan, Xu Xiwei, Zhou Yongsheng, et al. Relocation of small earthquakes in western Sichuan, China and its implications for active tectonics [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2005, 48(3): 629-636 (in Chinese with English abstract).

Characteristics and geodynamic analysis of the focal fault for the Great 8.0 Ms Wenchuan Earthquake

CAI Xue-lin^{1,2}, WANG Xu-ben^{2,3}, ZHU Jie-shou^{2,3}, CAO Jia-min², CHENG Xian-qiong², YU Nian², ZHANG Wei², LU Xia², PANG Su², ZHANG Zhen-yu²

(1. College of Earth Science, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, Sichuan, China; 2. Key Laboratory of Earth Exploration and Information Techniques of MOE, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, Sichuan, China; 3. State Key Laboratory of Oil & Gas Reservoir Geology and Exploitation, College of Information Engineering, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, Sichuan, China)

Abstract:Based on surface geological structure of the crust, researches on seismic geology and seismic sounding, and the result of magnetotelluric prospecting, the authors deal with the environment and characteristics of the deep structure and the result of geodynamic analysis of the Great 8.0 Ms Wenchuan earthquake. It is indicated that the concealed crust-mantle ductile shear zone under the Longmen mountain collisional orogenic belts is the focal fault, while Yingxiu fault, Beichuan fault and Pengxian-Guanxian fault formed at surface are earthquake faults in the main focal region of the Great 8.0 Ms Wenchuan Earthquake, which are distinct and connected. Studies show that Great 8.0 Ms Wenchuan Earthquake and surface ruptures might be attributed to the conflict of the Yangtze block with the Qinghai-Tibet plateau and the eastward obduction of the east edge of Qinghai-Tibet plateau and the eastward subduction of its deep part under the dynamic action of India Plate, Pacific Plate and Philippine Plate conflicting with Eurasia plate, which caused Longmen Mountain collisional orogenic belts to cut the Moho-crust-mantle ductile shear zone and expand to the middle-upper crust, thus resulting in high-degree stress concentration and rapid energy release. The study of the relationship between the focal fault and the earthquake fault is of great significance in the investigation of earthquake mechanism, dynamics of earthquake and earthquake disaster prevention and mitigation.

Key words:focal fault; earthquake fault; surface rupture; lithosphere; crust; crust-mantle ductile shear zone; main focal region; Great Ms8.0 Wenchuan Earthquake

About the first author:CAI Xue-lin, male, born in 1935, professor, mainly engages in the study of structural geology and deep geology;E-mail:Caixuelin 1935@sohu.com.