

龙门山中段构造特征与汶川地震

刘树根 田小彬 李智武 孙 玮 郭 兵 刘 顺

(成都理工大学“油气藏地质及开发工程”国家重点实验室, 成都 610059)

[摘要] 通过地表地质调查、钻井资料和各种地球物理资料分析, 剖析了龙门山中段的构造特征和岩石圈结构特征的特殊性: (1) 10 Ma 以来龙门山中段隆升幅度和速率最大; (2) 龙门山中北段喜马拉雅期构造活动较南段弱; (3) 龙门山中段主构造带之下存在有大于 $10\,000\ \Omega \cdot \text{m}$ 的高阻异常体; (4) 龙门山中段具有 $+0.015\ \text{cm/s}^2$ 的剩余 ($60\ \text{km} \times 60\ \text{km} \sim 120\ \text{km} \times 120\ \text{km}$) 布格重力异常; (5) 龙门山中段为正的均衡重力异常区。在此基础上, 结合汶川地震主震和余震的分布特征, 得出: (1) 四川汶川地震主震和绝大多数余震震源多位于映秀-北川主断层下盘(扬子地块上), 断层活动的主动盘是下盘, 映秀-北川主断层的活动为俯冲兼左旋走滑; (2) 此次地震是扬子板块向西俯冲(L型俯冲)、四川盆地顺时针旋转和青藏高原隆升逆冲相互作用的产物; (3) 四川汶川地震有可能是构造地震的一种新类型, 其孕育巨大能量的最重要条件为地块坚硬(能量不易释放)和位于地块边缘(构造作用强烈, 有能量来源)。最后, 建议有关部门和地质界重视中国主要地块边缘的重力场, 尤其是剩余布格异常和均衡重力异常的研究。这也许对地震的长期预测有所帮助。

[关键词] 构造特征; 汶川地震; 龙门山; L型俯冲

[分类号] P315.2 **[文献标识码]** A

龙门山构造带位于扬子地(板)块的西缘, 其东、西侧分别为松潘-甘孜褶皱带和四川盆地, NE向止于秦岭造山带, 总体呈 NE-SW 向延伸, 为中国最典型的逆冲推覆构造之一^[1]。由于其所处的特殊的大地构造位置, 长期以来为地质学家所重视并在该区进行了大量的研究工作^{[1]~[8]}。龙门山中段是指界于北川和都江堰之间的部分, 以后山带出露彭灌杂岩和前山带发育飞来峰群为显著特征, 同时也是 2008 年 5 月 12 日四川汶川地震主震震中所在部位(图 1)。本文通过地表实地调查, 和地质-地球物理综合研究, 试图揭示龙门山中段构造特征和地腹地质结构的特殊性, 分析此次地震活动反映的构造活动性质, 并探讨此次大地震发生在龙门山的原因。

1 地表构造特征

龙门山构造带自 NW 向 SE 发育汶川-茂县断裂、映秀-北川断裂及都江堰-安县断裂。根据这三条主干断裂及其所夹块体变形强度和构造特征, 将龙门山构造带以中央断裂(映秀-北川断裂)为界分为前龙门山和后龙门山^[1]。前龙门山属于扬子地块, 而后龙门山则为青藏高原东缘。

1.1 主干断裂特征

汶川-茂县断裂(F_2)又称为后山断裂, 在龙门山中段沿汶川、茂县等地分布, 与龙门山构造带走向平行, 呈 NNE 向展布, 在地表倾角较陡, 向下逐渐变缓, 构成犁式断层。断层上盘为强变形变质的志留系茂县群。汶川-茂县断裂是茂县-汶川-陇东左旋韧性剪切带的东缘断裂。该韧性

[收稿日期] 2008 06 14

[作者简介] 刘树根(1965-), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 从事石油地质学与构造地质学的教学与科研工作,

E-mail: lsg@cdut.edu.cn.

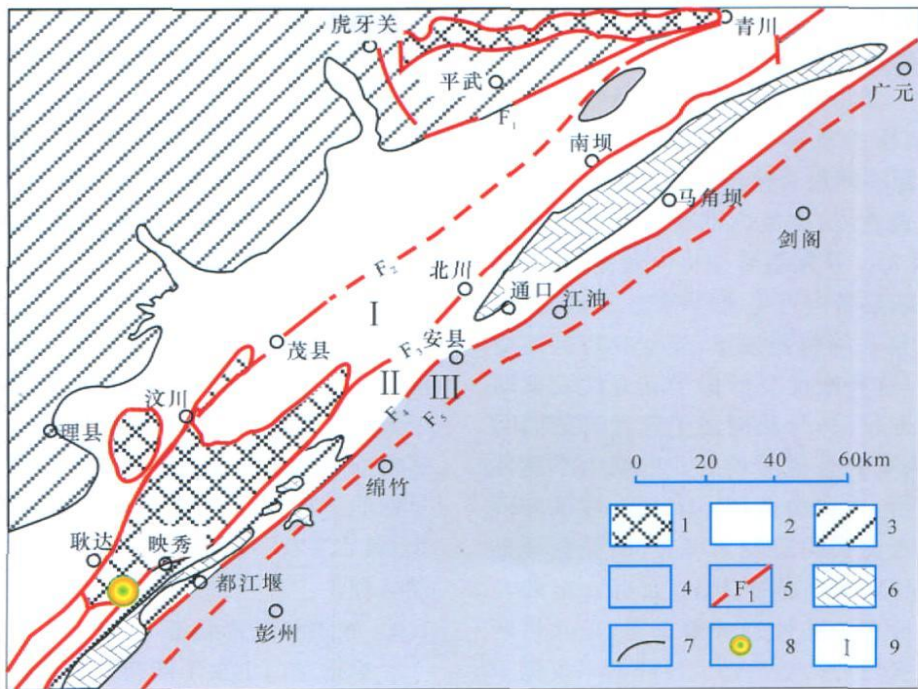


图 1 龙门山中段及邻区地质简图

Fig. 1 The geological map in the central segment of Longmen Mountains and adjacent areas
1. 前震旦系结晶基底; 2. 古生界; 3. 三叠系; 4. 侏罗- 古近系; 5. 主干断裂; 6. 滑覆体; 7. 地层界线; 8. 汶川主震震中; 9. 龙门山构造分区编号。F₁. 平武- 青川断裂; F₂. 汶川- 茂县断裂; F₃. 映秀- 北川断裂; F₄. 都江堰- 安县断裂; F₅. 山前隐伏断裂

剪切带吸收了从其西侧松潘- 甘孜造山带和青藏高原来的大部分构造作用力^[1]。

茂县- 汶川- 陇东韧性剪切带主要形成于印支期, 表现为左旋走滑特征^[1]。然而, 本次野外露头观测发现, 汶川- 茂县断裂带在早期为较深层次的韧性变形, 也具有右旋走滑特点。韧性右旋走滑特征在茂县县城南西约 7 km 的宗渠一带表现尤为明显。在宗渠震旦系硅质白云岩中, 可见韧性剪切带, 其中的黑色碳硅质条带清楚显示出右旋走滑特征(图 2)。在龙门山北段的后山断裂中, 发育的早期层间小褶皱和透镜体同样显示早期韧性剪切变形时的右旋走滑。茂县断裂带除有过早期右旋走滑韧性变形外, 还有过第二期半脆性逆冲和第三期的脆性左旋走滑兼逆冲。在宗渠震旦系灯影组白云岩及硅质白云岩中, 发育多次叠加的半脆性及脆性破碎带, 整个带宽约 200 m, 由碎裂化岩石组成, 其中贯穿有十余条断层面或断层带, 其表现为逆断层、正断层、平移断层、劈理带等。在志留系茂县群板岩中发育的 S₂ 褶皱轴面和 S₃ 逆断层面均倾向 NW, 反映了茂县断裂后期的两次逆冲活动。因此, 汶川- 茂县断裂带



图 2 茂县宗渠观测点震旦系硅质白云岩中右旋韧性剪切变形(镜头方向向下)

Fig. 2 The dextral shearing in Sinian siliceous dolomite in Zongqu of Maoxian

早期以韧性变形为主, 经历后期半脆性、脆性变形的叠加改造, 应形成于较深层次, 左旋和右旋特征均可见及。

映秀- 北川断裂(F₃) 又称为中央断裂, 展布于彭灌杂岩的南东缘, 是龙门山地区最重要的逆冲断裂。它不仅引起了龙门山后山带的强烈逆冲, 同时也构成了川西前陆盆地的北西边界, 是主

要的变形强度和构造几何学特征分界断裂^{[1],[9]}。本次野外工作仅在汉旺、什邡一带见该断裂的较好露头。映秀-北川断裂经历过多期变形与活动,早期为弱韧性逆冲兼右旋走滑。什邡头道金河观察点北川断裂断面直接出露,断层宽约 6 m,总体走向 25°,近直立,据其内部变形特征可分为 9 个变形带(图 3)。从断裂带中央向两侧,变形强度明显减弱。断层带内可见流动褶皱、旋转碎斑、劈理、透镜体、拉长等构造现象,显示具有韧性变形特征。当然,这种韧性变形由于其岩性较软弱而可能形成深度较浅,与花岗岩中劈理可能同时形成,因此称为弱韧性似糜棱岩。中期为半脆性逆冲兼左旋走滑,主要由劈理所表征。在汉旺清平麦棚子观察点此类构造较为多见,所见劈理显示以 NNE-SSW 挤压逆冲为主,兼有一定的左旋走滑分量。后期为脆性逆冲兼走滑,是北川断裂又一期较为强烈的构造活动。汉旺清平麦棚子观察点、王家坪观察点此类构造较为常见,主要表现为节理、破劈理、碎裂化和碎裂岩。NW 向挤压逆冲兼右旋走滑和 NE 向挤压逆冲兼左旋走滑同时出现,说明北川断裂曾有多期次活动。

映秀-北川断裂东、西两侧裂变径迹的年龄与径迹的长度关系有较大差异,也说明其是该区非常重要的一条断裂。通过龙门山造山带和川西前陆盆地岩石样品的裂变径迹和镜质体反射率的测定和计算机模拟得出^[10]:松潘-甘孜褶皱带中新世以来的平均隆升速率最低为 0.3~0.4 mm/a;北川-映秀断裂的上盘即 NW 盘龙门山逆冲推覆构造带 10 Ma 以来至少隆升了 5~6 km,隆

升速率最低为 0.5~0.6 mm/a;而其下盘(SE 盘)龙门山滑脱拆离带 60 Ma 以来隆升了 1~2 km,隆升速率为 0.016~0.032 mm/a。由此可以看出,映秀-北川断裂西侧的隆升速率是其东侧隆升速率的 40 倍,且远大于松潘-甘孜褶皱带的平均隆升速率,说明映秀-北川断裂在 10 Ma 以来仍处于较活跃状态^[10]。

都江堰-安县断裂(F₄)又称为前山断裂。前山断裂常因地表覆盖严重或者本身发育较差而难以找到良好露头观察,汉旺镇及其附近玉皇观两个观察点所见变形均为脆性变形。汉旺镇玉皇观观察点则整体表现为较强的碎裂化-碎块化带。早期的 NW-SE 挤压形成破劈理和碎裂-碎块化;稍后又有一次 NW↗SEE 逆冲活动切割早期劈理。

1.2 推覆体变形特征

根据龙门山主干断裂及其各推覆体各自独特的构造特征,将龙门山冲断带中段划分为三个推覆体(图 1):后山推覆体(I)、前山推覆体(II)及龙门山前缘推覆体(III)。其中,后山推覆体又进一步划分为九顶山推覆体和彭灌杂岩推覆体两个次级推覆体。

后山推覆体(I)介于汶川-茂县断裂(F₂)与映秀-北川断裂(F₃)之间,又称龙门山逆冲推覆构造带^[1],构成映秀-北川断裂的北西盘,由变质地层组成,内部变形复杂、强烈,韧性变形明显,显示较深层次变形特征。后山推覆体 SW 端主要出露彭灌杂岩体,而 NE 端则主要出露古生界,为两套截然不同的岩体,且在构造特征和成因上也相

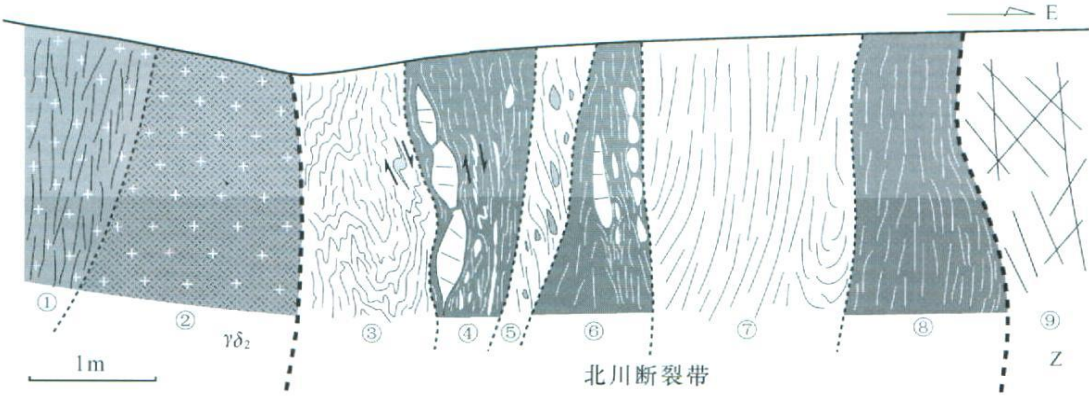


图 3 什邡头道金河观察点北川断裂剖面示意图

Fig. 3 The section of Beichuan fault in Toudaojinghe of Shifang

①劈理化花岗岩带;②碎裂化花岗岩带;③泥-炭-钙质似糜棱岩带;④炭质劈理化-糜棱化夹透镜体带;⑤泥质劈理化-透镜体带;⑥炭质劈理化-透镜体带;⑦钙泥质劈理化带;⑧炭质劈理化带;⑨震旦系节理破碎带

差很大, 故将后山推覆体进一步划分为九顶山推覆体和彭灌杂岩推覆体两个次级推覆体。

九顶山推覆体主要出露地层为古生界及少量震旦系灯影组灰岩。本次野外工作测制了从北川到茂县整条剖面(图 4)。虽然剖面路线并不是垂直于地层走向而成一定角度斜交, 但仍能清晰反映出九顶山推覆体的主要构造特征。从 NW 到 SE 变质程度逐渐减弱, 总体构造特征为一系列东陡西缓的歪斜、倒转褶皱, 反映出该区曾经受过强烈的挤压变形。推覆体内部志留系茂县群发生强变质作用, 所形成的变质岩主要为板岩、千枚岩、片岩及变砂岩等, 并发育多期透入性面理、节理、层间小褶皱及小型断层等。

彭灌杂岩推覆体由元古界彭灌杂岩、震旦系和上古生界—中、下三叠统碳酸盐岩组成。杂岩体早期以韧性变形为主, 后期叠加了脆性变形的改造, 表现为杂岩体内广泛分布一系列近叠瓦状的走向大致 NE、倾向以 NW 为主的断裂系统。这些断裂在平面上均具有相当好的延伸性和稳定的方向性^{[11]~[14]}。

前山推覆体(Ⅱ)介于映秀—北川断裂(F_3)与都江堰—安县断裂(F_4)之间, 又称为龙门山前陆滑脱拆离带^[1], 主要由三叠系及少量古生界组成, 构成映秀—北川断裂的 SE 盘。推覆体内以脆性变形为主, 发育一系列叠瓦状逆冲小断层及斜卧、斜歪、倾斜等褶皱, 变形程度相对较弱, 反映较浅层次变形特征。此外, 彭灌飞来峰群的发育为前山推覆体的另一大特征。在都江堰、彭州一带发育众多规模大小不一的飞来峰群, 主要表现为石炭、二叠系碳酸盐岩孤立于上三叠统须家河组原地系统之上。飞来峰内部岩体破碎, 小型构造发育。

龙门山前缘推覆体(Ⅲ)介于都江堰—安县断裂(F_4)与山前隐伏断裂(F_5)之间, 由上三叠统须

家河组和侏罗系组成的单斜构造为主, 地层主要倾向 SE。据地震勘探资料显示, 在侏罗系以下, 须家河组内部存在着一条隐伏逆冲断裂(F_5), 断裂上盘发育了一个平缓开阔的背斜构造^{[2],[9],[15]}。

2 地腹构造特征

通过地质、地球物理的综合研究, 发现龙门山地区岩石圈结构具层圈性。这一结构特征决定了龙门山冲断带深部的多级滑脱和浅层的多层次推覆^[16]。多层次的滑脱推覆不仅是地壳结构的基本特点, 而且可能是构造变形的主要原因之一。

2.1 龙门山地区沉积盖层构造特征

龙门山构造带是一个由断裂系统及其所夹持的内部结构复杂的构造块体所组成, 总体上表现为一个逆冲推覆构造带。其内部发育多种逆冲推覆带内的典型构造样式: 双重构造、三角带、滑脱构造、叠瓦状冲断带及断层相关褶皱构造样式等^[1]。2005 年中国石化钻探了龙深 1 井, 井深达 7 180 m, 是龙门山造山带内钻探最深的井, 因此对于我们了解龙门山造山带深层结构有着重要意义。龙深 1 井位于龙门山前陆滑脱拆离带天台山大圆包构造, 出露层位为飞来峰(C—P)地层(图 5)。通过钻井和地震资料的联合解释, 可把沉积盖层构造分成两大系统, 即三叠系雷口坡组和嘉陵江组滑脱面之上的冲断系统和之下的原地系统(图 5)。

冲断系统特征: (1) 冲断层发育。在冲断系统中发育一系列冲断层, 在剖面上呈叠瓦状展布。在钻井过程中, 断层处出现明显的泥浆漏失, 最多处漏失量达 939.7 m³。通过岩心观察, 发现节理、劈理较发育, 且有多期流体充注, 发育的一系列冲断层可能为流体运移的通道。(2) 地层多次重复。受冲断层的影响, 主滑脱层之上的地层多

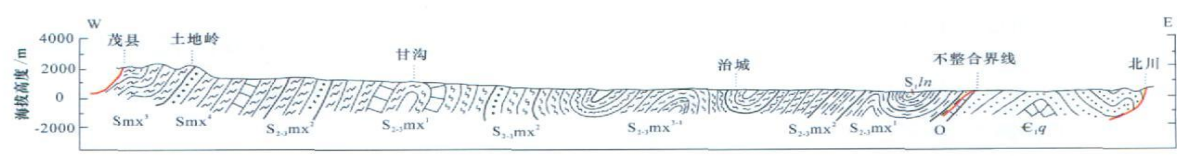


图 4 北川—茂县构造剖面
Fig.4 The structure section from Beichuan to Maoyan
(剖面位置见图 1)

Smx. 志留系茂县群; S₁ln. 志留系龙马溪群; O. 奥陶系; C_q. 寒武系清平组

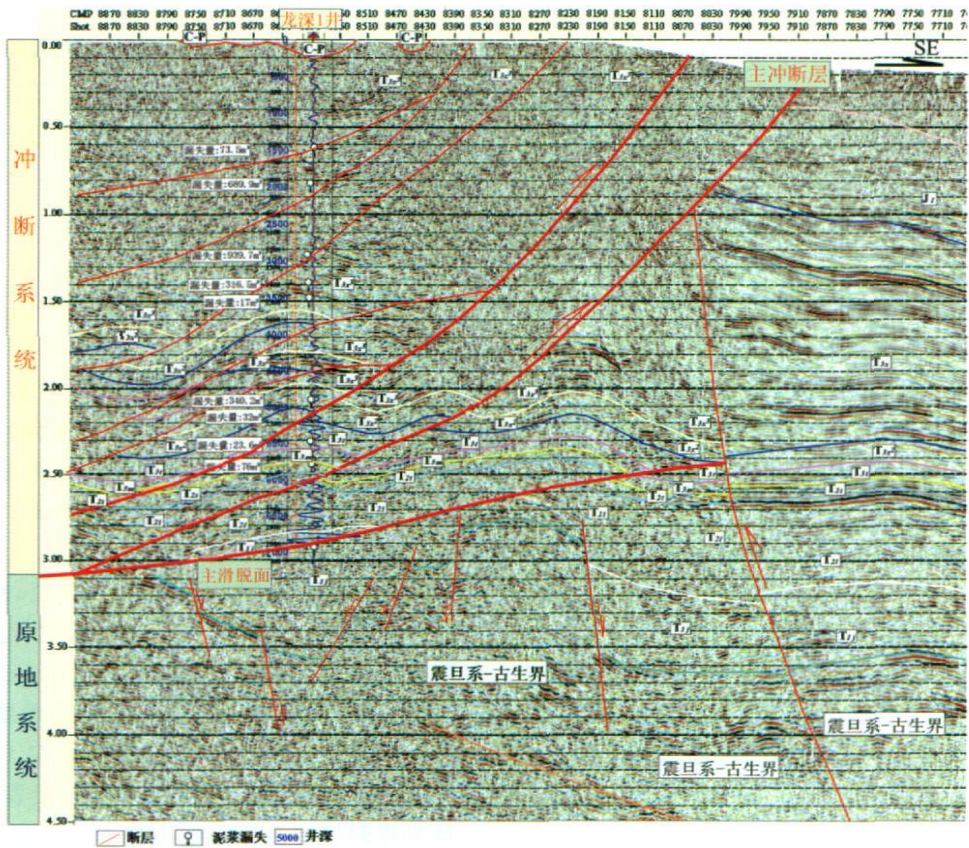


图 5 过龙深 1 井地震解释剖面图

Fig. 5 The seismic interpretative section across Well Longshen 1
(剖面位置见图 1)

J. 侏罗系; T_{3x} . 上三叠统须家河组; T_{3t} . 上三叠统小塘子组; T_{3m} . 上三叠统马鞍塘组; T_{2t} . 中三叠统天井山组; T_{2l} . 中三叠统雷口坡组; T_{1j} . 下三叠统嘉陵江组; C-P. 石炭-二叠系

次重复,造成巨厚的须家河组,并在断层两侧形成一系列牵引褶皱(图 5)。

原地系统特征:原地系统指主滑脱面之下的地层,从构造变形强度上来讲明显低于冲断系统变形强度,内部只发育一些规模较小的断层。从构造层次上来讲,两者明显不属于一个构造层次,冲断系统应属于浅层次构造,变形较强,形成较晚,为挤压变形;而原地系统则应属于较深层次,构造变形弱,形成较早,以张性变形为主(图 5)。

2.2 龙门山中段岩石圈深部构造特征

刘树根等(1990)详细研究了龙门山造山带的岩石圈结构^{[16],[17]}。在平面上,龙门山造山带的地壳构造可分四个区(图 6A):四川盆地西部平缓区(I);龙门山斜坡区(II);松潘-黑水坳陷区(III);若尔盖-红原-阿坝平缓区(IV)。

龙门山造山带上地幔构造分为三个区(图 6B):四川盆地西部慢坡缓倾区(I);龙门山慢坡

陡倾带(II);松潘-甘孜慢坡缓倾区(III)。

龙门山造山带的岩石圈在垂向上由浅部至深部可划分为以下五层(图 7):(1)上部地壳层(沉积盖层);(2)中部地壳层;(3)下部地壳层;(4)上地幔顶部层;(5)软流圈以下层。

由上可知,(1)龙门山造山带处于岩石圈深部构造由东向西的斜坡地带,即处在变化大的梯度带上;(2)在剖面上发育有壳内高导层;(3)在映秀断裂深部,存在高电阻异常体。

3 强震发生于龙门山的成因初探

3.1 龙门山中段特殊的地质地球物理特征

相对于龙门山南段(都江堰以南)和北段(安县以北),龙门山中段(都江堰-安县)具有下列特殊的地质地球物理特征:

a. 龙门山中段 10 Ma 以来隆升剥蚀了大于 6 km 的地层,均大于龙门山北段和南段,即 10 Ma

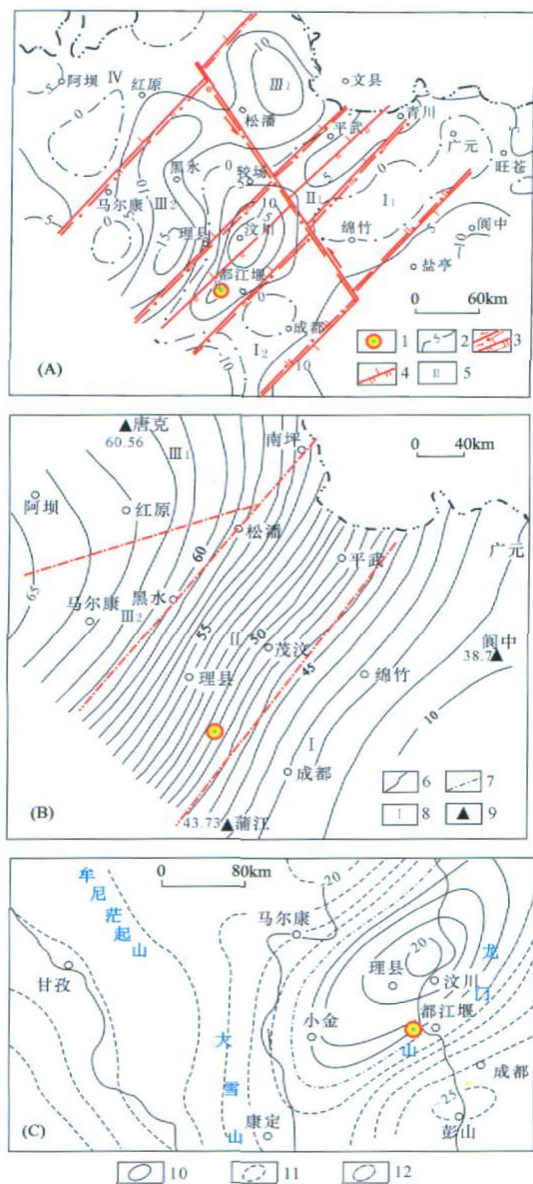


图 6 龙门山中北段岩石圈结构特征图

Fig. 6 The lithosphere characteristics in the central northern segments of Longmen Mountains (刘树根等, 1990)

(A) 龙门山中北段(60 km × 60 km ~ 120 km × 120 km) 剩余布格重力异常和地壳构造分区图; (B) 龙门山中北段莫霍面等深图和上地幔构造分区图; (C) 龙门山 120 km × 120 km 平均均衡异常(艾礼均衡模式, 异常以 $10 \text{ g} \cdot \mu$ 为单位)。1. 汶川主震震中位置; 2. 剩余布格异常等值线(10^{-3} cm/s^2); 3. 地壳构造分区界线和断裂带; 4. 断裂带; 5. 地壳构造分区编号; 6. 莫霍面等深线(km); 7. 上地幔构造分区界线; 8. 分区编号; 9. 地震测深点及莫霍面深度(km); 10. 正等值线; 11. 负等值线; 12. 零等值线

以来龙门山中段隆升幅度和速率最大^[10]。

b. 龙门山中北段喜马拉雅期构造活动较南段弱^[1]。此外, 位于龙门山前的川西前陆盆地上三叠统由于深埋、生烃增压和储层超致密化, 导致异常超高压。异常高压分布在白龙、柘坝场、老关庙、魏城、丰谷镇、八角场、孝泉、隆丰场等地区, 也即异常高压主要位于龙门山中北段前缘地区(压力系数 1.80 ~ 2.10); 而在川西前陆盆地南部, 上三叠统最大压力系数为 1.3 ~ 1.4。川西前陆盆地侏罗系异常高压主要分布于绵阳-德阳地区, 其中以孝泉构造最大, 压力系数可达 2.0, 其他广大地区压力系数为 1.0 ~ 1.4。川西前陆盆地南部地区, 侏罗系压力系数最低, 为 1.0 左右。这也说明龙门山南段喜马拉雅期构造活动强, 破坏了异常压力存在的封闭条件^[1]。

c. 大地电磁测深揭示, 在龙门山中段主构造带之下存在有大于 $10\,000 \Omega \cdot \text{m}$ 的高阻异常体, 2008 年 5 月 12 日 14 点 28 分四川汶川地震主震震源就位于此高阻异常体内(图 7)。

d. 龙门山中段具有 $+0.015 \text{ cm/s}^2$ 的剩余(60 km × 60 km ~ 120 km × 120 km) 布格重力异常(图 6A), 这反映龙门山中段地壳物质成分和起伏形态与龙门山南段和北段有所不同。

e. 龙门山中段为正的均衡重力异常区。这正的均衡异常呈北东走向, 长约 300 km, 宽 130 km, 极大值为 $+0.02 \text{ cm/s}^2$, 异常两侧的等值线密集, 梯度较大(图 6C)。

3.2 四川汶川主震和余震的分布特征

3.2.1 主震震源位于映秀-北川主断层下盘(扬子地块上)

四川汶川 Ms8.0 级地震震中为北纬 31.0° , 东经 103.4° (据中国地震台网中心, 2008), 位于龙门山中段, 地表震中位于映秀-北川主断层的西侧, 即主中央断层的上盘(图 8)。然而, 由于映秀-北川主断层向西北倾(倾角 $40^\circ \sim 45^\circ$), 按震源深度投在剖面上, 汶川地震主震的震源应在映秀-北川主断层的下盘(图 7)。由此可知, 此次大地震的主动盘不是映秀-北川主断裂的上盘而是下盘, 不是上盘逆冲, 而是下盘俯冲。现今映秀-北川主断裂, 是扬子地块的西界^[1], 即此次大地震主震震源应在扬子地块上。

3.2.2 此次映秀-北川主断层的活动为左旋走滑

龙门山造山带共有三条主要断裂带, 从西向

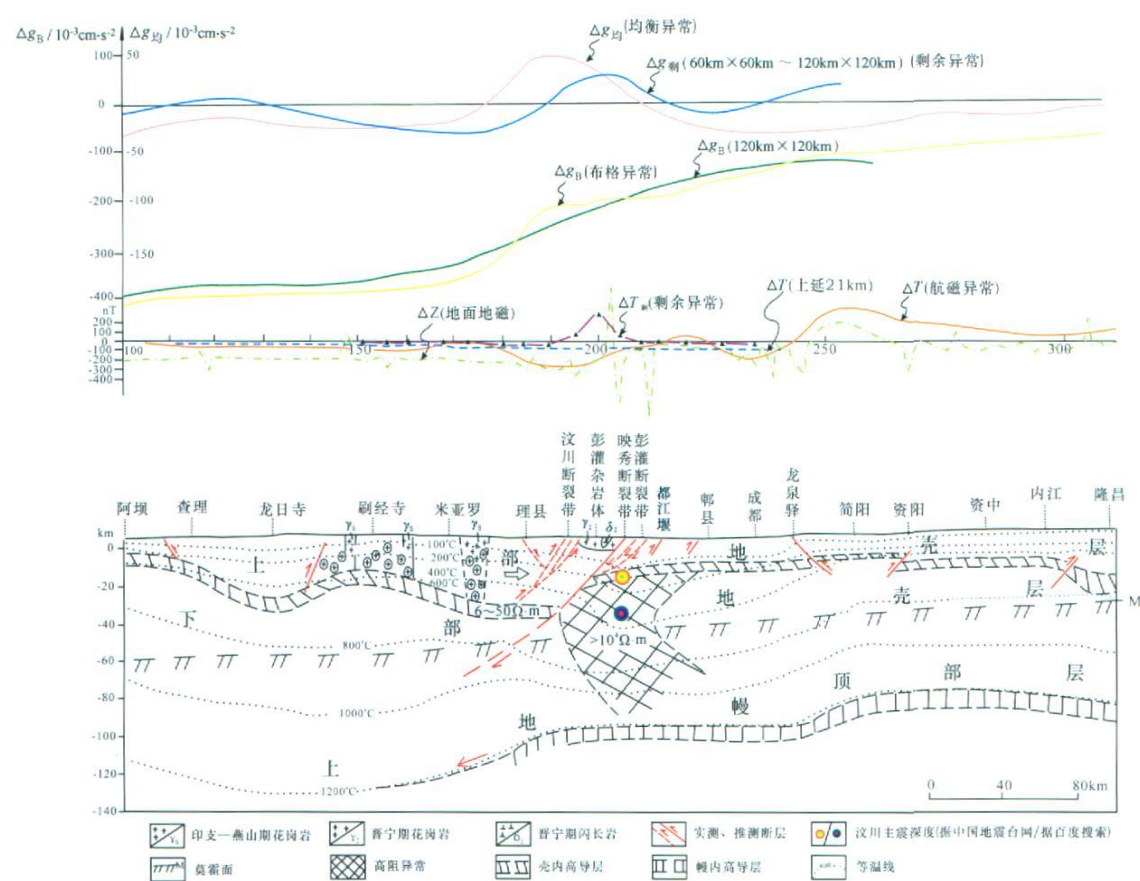


图 7 阿坝- 隆昌地球物理地质综合解释剖面图

Fig. 7 The combined interpretive section of geophysical information from Aba to Longchang (刘树根等, 1990)

大地电磁测深原始剖面据李立等; $\Delta g_{\text{均}}$, Δg_B , ΔT , ΔZ 据四川地矿局物探队(1985); 理县以西地表所见花岗岩体为北东方向 7~ 20 km 地表花岗岩在此剖面上对应的位置

东分别为汶川- 茂县断裂、映秀- 北川断裂和都江堰- 安县断层。这些断裂带均为北东走向, 西北倾, 地表倾角较陡, 往深部变缓。值得注意的是, 往深部映秀- 北川断裂与都江堰- 安县断裂相合并, 但并不与汶川- 茂汶断裂相合并(图 7)。

从地表看, 四川汶川地震的余震震中主要分布在映秀- 北川主断层与都江堰- 安县主断层之间的区域(图 8)。由于往深部, 映秀- 北川主断层与都江堰- 安县主断层合二为一(图 9), 因此可以说余震的分布与主震一样, 位于映秀- 北川主断层的下盘, 即位于扬子地块上。此外, 地震的活动是沿映秀- 北川主断层与都江堰- 安县主断层之间区域从南西向北东移动, 即映秀- 北川主断层的下盘由南西向北东移动, 据此映秀- 北川主断层应为左旋走滑(图 9), 而不是目前普遍认为的右旋走滑。这与现有报道的震源机制解不一

致, 也许是微观与宏观的区别, 有待于进一步研究。

3.3 强震发生于龙门山成因初探

四川汶川地震主震和余震主要由龙门山造山带中央断裂(映秀- 北川断层)的活动引起, 主震位于龙门山中段, 并且可知主震和绝大多数余震震源都位于扬子地块上。扬子地块是一刚性地块。从整体讲, 扬子地块由于其坚硬, 较稳定; 然而, 正因为扬子地块的坚硬才能长期聚集巨大能量, 一旦释放即可引起大地震的发生。这或许是四川汶川地震是新中国建国以来强度最大地震的原因。四川汶川主震震源即位于大于 $10\,000\ \Omega \cdot \text{m}$ 的坚硬异常体中(图 7)。前文已述, 龙门山中段具有龙门山造山带及其邻区最高的(60 km × 60 km ~ 120 km × 120 km)布格重力异常和正均衡异常, 这或许正是长期聚集巨大能量的反映。

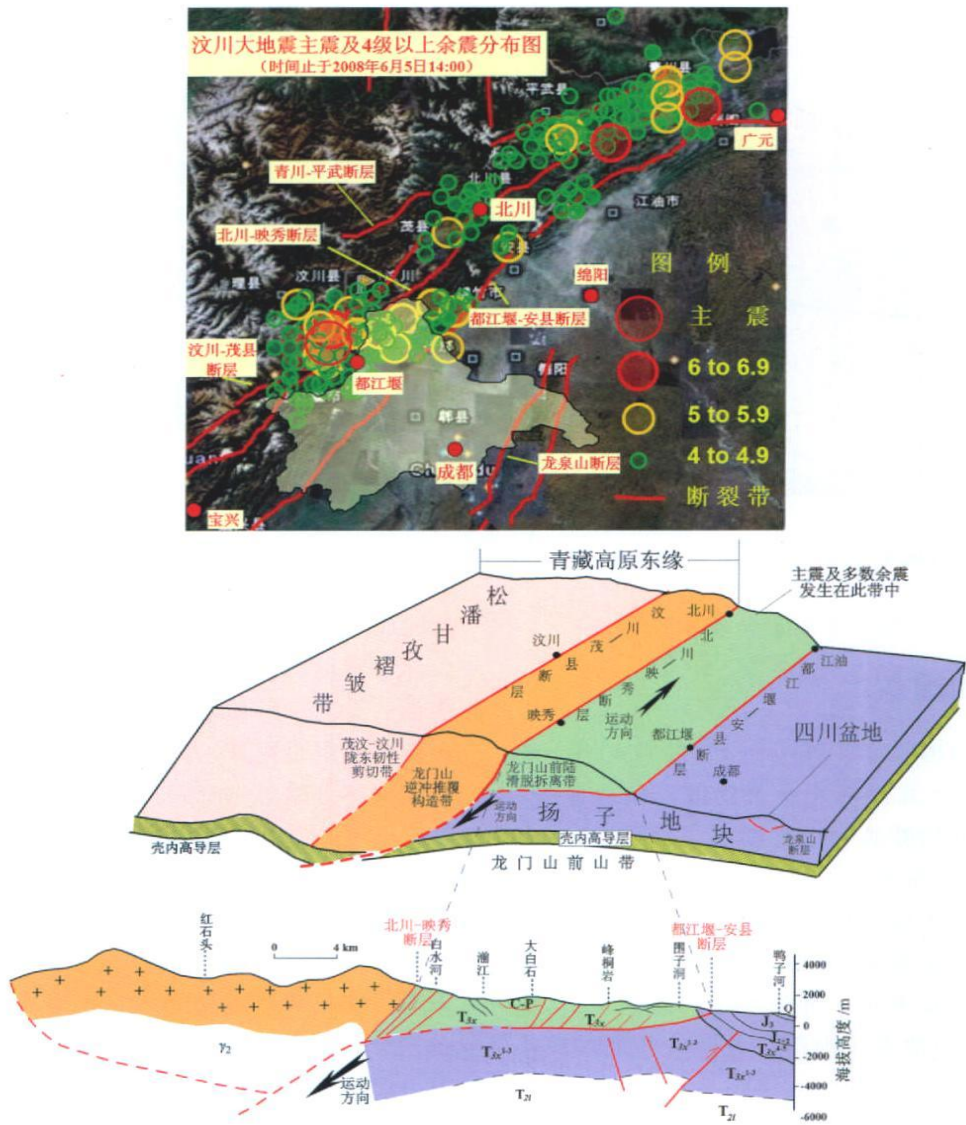


图 8 龙门山构造特征和四川汶川地震主震和余震震中分布关系图

Fig. 8 The relationship between the structural characteristics in Longmen Mountains and the distribution of the main and residual earthquakes in Wenchuan of Sichuan

Q. 第四系; J. 侏罗系; T_{3x}. 上三叠统须家河组; T_{2l}. 中三叠统雷口坡组; C-P. 石炭-二叠系; V₂. 晋宁期花岗岩

目前, 普遍认为四川汶川地震由印度板块俯冲, 青藏高原隆升产生的由西北往南东的逆冲引起。然而, 若是, (1) 在此次如此活动的大背景下, 为何同处龙门山造山带并且更向西的汶川-茂县断裂此次活动甚微, 如此稳定? (2) 若是逆冲作用引起, 理应映秀-北川主断层上盘更为活动, 这显然与前述的事实不符; (3) 为何余震只发生在龙门山中北段, 而南段甚少?

事实上, 前文已述, 此次地震主震和绝大多数余震均位于扬子地块上, 映秀-北川主断层的下盘是主动盘。准确地讲, 此次地震不是由于映秀

- 北川主断层上盘由西北往南东逆冲引起, 而是其下盘由南东向西北俯冲所致。因此, 可能多数学者过于强调了印度板块俯冲及青藏高原隆升对此次地震形成的影响。扬子板块自三叠纪以来向东北的整体移动^{[18], [19]} 和四川盆地顺时针旋转活动^{[19], [20]} 对此次地震的产生也有重要影响。因此, 我们认为四川汶川 M_s 8.0 地震及其余震是扬子板块向西俯冲(L型俯冲)^[21]、四川盆地顺时针旋转和青藏高原隆升逆冲相互作用产生的(图9)。其孕育巨大能量的最重要条件有: 地块坚硬(能量不易释放)和位于地块边缘(构造作用强烈, 有能量来源)。因此, 或许四川汶川地震是构造地

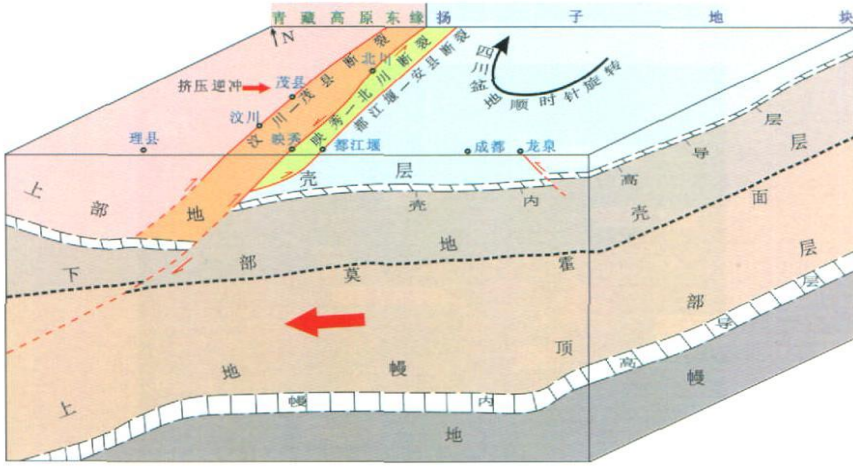


图 9 四川汶川地震孕育的动力学机制

Fig.9 The pregnant dynamical mechanism of the earthquake in Wenchuan of Sichuan

震的一种新类型,值得今后进一步探讨。

4 结论和建议

a. 龙门山构造带自 NW 向 SE 发育汶川-茂县断裂、映秀-北川断裂及都江堰-安县断裂。其中映秀-北川断裂为中央断裂,以西为青藏高原东缘地区,之东为扬子地块。

b. 龙门山中段沉积盖层可分成两大系统,即三叠系雷口坡组和嘉陵江组滑脱面之上的冲断系统和之下的原地系统。冲断系统内断裂发育,地层多次重复;原地系统内部只发育一些规模较小的断层。

c. 四川汶川 Ms8.0 级地震震中位于龙门山中段,地表震中位于映秀-北川主断层的西侧,即主中央断层的上盘(青藏高原东缘);但其震源位于映秀-北川主断层下盘(扬子地块上)。此次映秀-北川断层活动的主动盘是下盘,即为下盘俯冲。绝大多数余震是沿映秀-北川主断层与都江堰-安县主断层之间区域分布,指示所在地区从南西向北东移动,即映秀-北川主断层的下盘由南西向北东移动,应为左旋走滑。因此,此次映秀-北川主断层的活动为俯冲兼左旋走滑。

d. 四川汶川地震主震和绝大多数余震震源都位于扬子地块上。扬子地块由于其坚硬,才能长期聚集巨大的能量。此次地震是扬子板块向西俯冲(L型俯冲)、四川盆地顺时针旋转和青藏高原隆升逆冲相互作用产生的。

e. 龙门山中段具有龙门山造山带及其邻区最

高的(60 km×60 km~120 km×120 km)布格重力异常和正均衡异常,这或许正是长期聚集巨大能量的反应。因此,建议有关部门对龙门山中段重新开展重力测量,并进行震前和震后地质和地球物理场等的对比研究。

f. 四川汶川地震有可能是构造地震的一种新类型,其孕育巨大能量的最重要条件为地块坚硬(能量不易释放)和位于地块边缘(构造作用强烈,有能量来源)。这值得今后进一步探讨,并建议有关部门和地学界重视中国主要地块边缘重力场,尤其是剩余布格重力异常和均衡重力异常的研究。这也许对地震的长期预测有所帮助。

[参 考 文 献]

- [1] 刘树根. 龙门山冲断带与川西前陆盆地的形成演化[M]. 成都:成都科技大学出版社, 1993.
- [2] 罗志立, 龙学明. 龙门山造山带崛起和川西前陆盆地沉降[J]. 四川地质学报, 1992, 12(1): 1-17.
- [3] 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.
- [4] 安其美, 丁立丰, 王海忠, 等. 龙门山断裂带的性质与活动性研究[J]. 大地测量与地球动力学, 2004, 24(2): 115-119.
- [5] 贾东, 陈竹新, 贾承造, 等. 龙门山前陆褶皱冲断带构造解析与川西前陆盆地的发育[J]. 高校地质学报, 2003, 9(3): 402-410.
- [6] 龙学明. 龙门山中北段地史发展的若干问题[J]. 成都地质学院学报, 1991, 18(1): 8-15.
- [7] 邓康龄. 龙门山构造带印支期构造递进变形与变形时序[J]. 石油与天然气地质, 2007, 28(4): 485-490.
- [8] 刘树根, 罗志立, 赵锡奎, 等. 中国西部盆山系统的耦

- 合关系及其动力学模式——以龙门山造山带—川西前陆盆地系统为例[J]. 地质学报, 2003, 77(2): 177–186.
- [9] 陈社发, 邓起东, 赵小麟, 等. 龙门山中段推覆构造带及相关的演化历史和变形机制(一)[J]. 地震地质, 1994, 16(4): 405–412.
- [10] 刘树根, 罗志立, 戴苏兰, 等. 龙门山冲断带的隆升和川西前陆盆地的沉降[J]. 地质学报, 1995, 69(3): 205–214.
- [11] 周建文, 曾庆, 徐世琦, 等. 龙门山北段推覆构造带变形特征研究[J]. 天然气工业, 2005, 25(增刊A): 66–71.
- [12] 马永旺, 王国芝, 胡新伟, 等. “彭灌杂岩”推覆体的构造变形特征[J]. 四川地质学报, 1996, 16(2): 110–114.
- [13] 林茂炳, 苟宗海, 王国芝, 等. 四川龙门山造山带造山模式研究[M]. 成都: 成都科技大学出版社, 1996.
- [14] 林茂炳, 马永旺. 论龙门山彭灌杂岩体的构造属性[J]. 成都理工学院学报, 1995, 22(1): 42–46.
- [15] 唐荣昌, 黄祖智, 钱洪, 等. 成都断陷区活动断裂带基本特征及其潜在地震能力的判定[J]. 中国地震, 1996, 12(3): 285–293.
- [16] 刘树根, 罗志立, 宋鸿彪, 等. 四川龙门山冲断带中段岩石圈结构研究[J]. 石油与天然气地质, 1990, 11(1): 86–95.
- [17] 刘树根, 罗志立, 曹树恒. 四川龙门山冲断带(中北段)岩石圈的层圈性和多级滑脱推覆[J]. 四川地质学报, 1990, 10(3): 145–150.
- [18] 钱迈平, 厉建华, 孙万钊, 等. 三叠纪扬子板块的漂移导致下扬子区石膏、硬石膏矿床的形成[J]. 江苏地质, 2002, 26(3): 129–134.
- [19] 刘育燕, 杨巍然, 森永速男, 等. 华北陆块、秦岭地块和扬子地块构造演化的古地磁证据[J]. 地质科技情报, 1993, 12(4): 17–21.
- [20] 王二七, 孟庆任, 陈智, 等. 龙门山断裂带印支期左旋走滑运动及其大地构造成因[J]. 地学前缘, 2001, 8(2): 375–384.
- [21] 刘树根, 罗志立, 赵锡奎, 等. 龙门山造山带—川西前陆盆地系统形成的动力学模式及模拟研究[J]. 石油实验地质, 2003, 25(5): 432–438.

Structural features of the central Longmen Mountains and the Wenchuan earthquake in Sichuan, China

LIU Shu gen, TIAN Xiaobin, LI Zhiwu, SUN Wei, GUO Bing, LIU Shun

*State Key Laboratory of Oil And Gas Reservoir Geology and Exploitation,
Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China*

Abstract: The central Longmen Mountains has special structural features and lithospheric structure based on field geology, drilling data and geophysical data. The central Longmen Mountains has the fastest uplift rate and highest uplift scope in ~ 10 Ma. The central-northern parts of Longmen Mountains have weaker tectonic activities than the southern part during Himalayan period. There is a high resistive anomalous body ($> 10\,000\ \Omega \cdot m$), a $+0.015\text{ cm/s}^2$ residual Bouguer gravity anomaly ($60\text{ km} \times 60\text{ km} \sim 120\text{ km} \times 120\text{ km}$) and a positive isostatic gravity anomaly in the central Longmen Mountains. Comparing the distribution features of the epicenters of the Wenchuan main and aftershocks and the structural features in Longmen Mountains, the hypocenters of the Wenchuan main and aftershocks are located in the active footwall (on the Yangtze Block) of the Yingxiu-Beichuan main fault. The footwall subducts to the eastern Himalaya plateau margin with sinistral strike-slip. The Wenchuan earthquake occurred as a result of the synthesis of the L-type subduction of Yangtze Block, the clockwise rotation of Sichuan Basin and the thrust and uplift in Qinghai-Tibet Plateau. The Wenchuan earthquake is probably a new-typed tectonic earthquake locating on the margin of a stiff block. The authors suggest that more attention should be paid to the gravity field on the margins of main blocks in our country, especially the residual Bouguer gravity anomaly and isostatic gravity anomaly.

Key words: structural feature; Wenchuan earthquake; Longmen Mountains; L-type subduction