

汶川 8.0 级大地震震源机制与构造运动特征

徐纪人 赵志新

(中国地质科学院地质研究所, 北京 100037)

摘要:根据地震震源机制、断层参数结果,结合 GPS 测定的同震位移场与构造研究的最新结果,综合分析研究了 2008 年汶川 8 级大地震汶川地震发生的地震活动背景、震源应力场、断层构造运动特征及其动力学机制。地震活动性分析研究表明,2008 年汶川 8 级大地震是在青藏高原与其周边地域构造运动剧烈,2001 年起始的地震活动高潮期的背景下发生的。其长达 300 km 的地震震源断层填补了青藏高原东缘 1900 年以来存在的 8 级地震活动的空区。震源机制与区域应力场特征及其动力学机制研究表明,汶川 8 级地震震源处于南北地震带中南段东部,青藏高原东向扩张与四川盆地的抵抗是该区构造运动的主要特征。汶川地震及其强余震是在一个稳定的、主压应力 P 轴以北西西—东南东方向为主的震源应力场控制下发生的。说明汶川地震震源区域主要受到四川盆地、华南块体区域应力场的控制并发震的。龙门山断裂带西侧的青藏高原相对于四川盆地发生的东向上升;而东侧的四川盆地相对于青藏高原发生的西向下降构造运动是 2008 年汶川 8 级地震发生的主要地震成因即地震发生机制。

关键词:汶川 8 级大地震;地震活动性;震源应力场;地震发生机制

中图分类号:P542 **文献标志码:**A **文章编号:**1000-3657(2010)04-0967-11

1 引言

中国地处欧亚板块的东南部,在印度洋板块、菲律宾板块、太平洋板块相对于欧亚板块的作用下,使中国成为世界上地震活动多发且受地震灾害最为严重的国家之一^[1]。特别是自中、新生代以来青藏高原的强烈持续隆升,构成了全球最为壮观的岩石圈构造运动事件之一,同时使青藏高原及其周围地区成为了世界大陆内部地震活动最频繁、最强烈的地区之一。青藏高原内部及其周围的各个岩石圈块体在板块动力作用下,存在着不同程度与不同方式的构造运动,在岩石圈内产生大量应力的积累与释放,致使地震活动频繁发生。2008 年 5 月 12 日发生在中国南北地震带中南段、青藏高原东缘的龙门山断裂带上的汶川 8 级地震是其中的典型震例。

迄今为止,尽管科学家们对于青藏高原及其周围近期的地震活动与地壳构造运动特征进行了大量研究并得到了一些结果^[1-13]。然而,由于汶川 8 级强烈地震发生在晚第四纪构造运动速率较低的龙门山构造带上,以至于科学界对其潜在地震危险性认识不足。由于缺乏汶川 8 级大地震孕育、发生机制的认识,导致震前预报失败,灾区地震损失巨大。

中国大陆南北地震带中南段、青藏高原东缘的龙门山断裂带上发生汶川 8 级地震并非偶然事件,而是在青藏高原与其周边区域构造运动以及应力长期积累背景下发生的巨大地震事件。本文在分析研究 1900 年以来青藏高原地震活动性以及地震震源机制的基础上,结合 GPS 测定的汶川地震同震位移场等最新研究结果,对汶川地震发生的地震活动背景、震源应力场、断层构造运动特征等进行综合分析

收稿日期:2010-06-19;改回日期:2010-08-06

基金项目:国土资源部公益性行业科研专项(200811037)、国家自然科学基金项目(40674026)和中国地质调查局地质大调查项目((2009)05-06-11)联合资助。

作者简介:徐纪人,女,1947 年生,研究员,日本京都大学理学博士,地球物理学专业,主要从事地震发生机制、构造应力场与地球动力学、地壳地幔地震层析成像、强地面模拟与地震灾害分析研究等;E-mail:xujiren@ccsd.cn。

研究。试图对该地震的特征、成因及其动力学机制等问题进行探讨研究。

2 青藏高原地震活动性与汶川 8 级大地震

众所周知,中国大陆地震活动频度高、强度大,是世界上遭受地震灾害最为严重的国家之一。其中,中国大陆西部的青藏高原及其周围地区是世界注目的地震活动区。中国大陆东部的华北地区强震活动频度较高;而华南地区的地震活动性则相对较弱^[4]。2008年汶川 8 级大地震正是发生在构造运动剧烈、强地震活动频发的青藏高原与相对稳定、地震活动水平较弱的华板块之间交界的龙门山断裂带上。

根据美国地质调查局 USGS 和中国地震观测报告的地震资料,1900 年以来至 2008 年 10 月期间,喜马拉雅、青藏高原及其周围地域共发生 M5 级以上的地震 2184 次;M6 级以上的地震 434 次;M7 级以上大地震 68 次;M8 级以上巨大地震 9 次,其中最大的一次地震 1950 年 8 月 15 日发生的西藏察隅

M8.6 级巨大地震;而受害损失最重的是 2008 年 5 月发生的汶川 8 级大地震。根据区域地震活动性分析和地震能量的初步计算结果,青藏高原及其周围区域 1900 年以来释放的地震能量要高于世界大陆地区的平均值。图 1 是喜马拉雅、青藏高原及其周围发生的 M7 级以上大地震(1900 年—2008 年 10 月)的震中分布。图 2 为图 1 内所示地震的震级 M 与时间 T 变化关系的 M-T 图。本文采用的地震震级,1900—2005 年期间是美国 USGS 的矩震级,2006—2008 年期间则是中国地震观测报告的面波震级。

青藏高原及其周围地域的震中分布显示(图 1),M7~8 级大地震遍布于青藏高原及其边缘地区,而 8 级地震基本上均发生在青藏高原边缘与内部的一些深大断裂带上。值得注意的是,2008 年汶川大地震之前的 100 余年内,青藏高原东缘的龙门山断裂带及其周围没有发生过 8 级以上巨大地震。也就是说,汶川大地震的发生填补了青藏高原东缘地区 8 级地震的空区。从震级-时间变化 M-T 图(图 2)

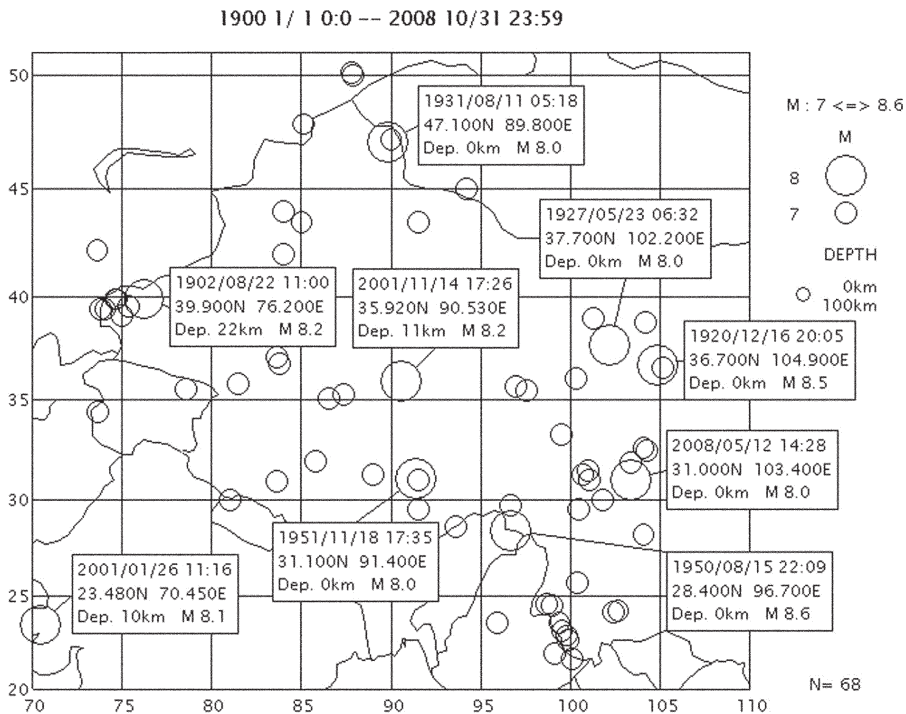


图 1 1900 年 1 月—2008 年 10 月期间青藏高原及其周围(即北纬 20~50°,东经 70~110°)区域发生的 M7 级以上大地震的震中分布

(地震资料来自美国地质调查局 USGS 和中国地震观测报告)

Fig.1 Epicentral distribution of earthquakes (M7~8.6) during January 1900–October 2008 in and around Tibet(20~50°N,70~110°E) (data from the Chinese Earthquake Network Center and USGS)

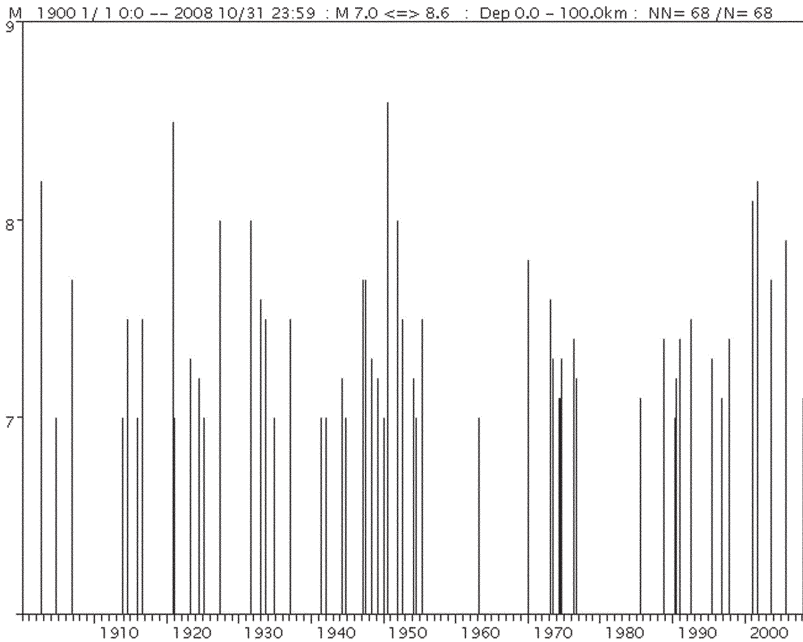


图 2 1900 年 1 月-2008 年 10 月期间青藏高原及其周围(即北纬 20~50°,东经 70~110°)区域发生的 M7 级以上大地震的震级与时间变化(M-T)图
(地震资料来自美国地质调查局 USGS 和中国地震观测报告)

Fig.2 M-T chart of large earthquakes (M7~8.6) occurring in and around Tibet during 1900-October 2008
(data from the Chinese Earthquake Network Center and USGS)

可以看出,地震资料比较完整的 1900 年起到 2008 年 10 月为止,青藏高原及其周围地域的地震活动高潮大体集中于 4 个时期,它们分别是 1902—1906 年、1920—1931 年、1947—1955 年、1970—1976 年。每个活动高潮期间内均有 8 级左右的大地震发生,持续时间为 5~12 年。1977 年以后直至 2000 年的 20 余年里,青藏高原及其周围地域没有 7.5 级以上的大地震发生,是青藏高原及其周围地域的地震活动的相对平静期。从 2001 年的印度南部的 M8.1 级大地震起,青藏高原及其周围接连发生了 2001 年 11 月的昆仑山 M8.2 级大地震、2008 年汶川 8 级地震等,形成一个新的地震活动高潮期。汶川大地震以及 2010 年 4 月玉树 M7.1 级地震均发生在这个新的地震活动高潮期内。

地震活动性分析研究结果表明,汶川 8 级大地震是在青藏高原与其周边地域处于构造运动剧烈、地震活动高潮期的背景下发生的重大地震事件。该地震的发生,填补了青藏高原东缘即高原与四川盆地边界地带的龙门山断裂带的 8 级地震活动空区。汶川大地震发生前,青藏高原及其周边地域已经处

在地震活动的高潮期。2001 年印度南部的 M8.1 级大地震、2001 年 11 月的昆仑山 M8.2 级大地震的发生,促进了青藏高原东缘龙门山断裂带地震能量的加速积累。汶川大地震发生时,主破裂沿龙门山中央主断裂带从震源向东北方向扩展,震源区域长期积累的应变能最终以大地震的方式在 1~2 min 瞬间内得以释放,造成极大破坏与极为严重的地震灾害。

3 地震震源机制结果反映的青藏高原与汶川大地震的构造运动特征

众所周知,大地震的孕育与发生是岩石圈内部大量应力积累与释放的结果。地震震源机制的解析研究结果能够定性定量地反映出地震震源应力场。通过系统研究大地震震源机制结果能够认识青藏高原与汶川大地震震源区域的岩石圈区域应力场与构造运动特征,是目前研究地壳深部应力场与构造运动的优势方法。为了探明最近的地震活动高潮期间的青藏高原及其周缘区域应力场与构造运动的区域特征,笔者详细、系统研究了青藏高原及其周围地区历史上,特别是 2001 年以来所发生主要地震的震源

机制解,进而研究汶川地震震源区域以及其他地区的区域构造运动和地球动力学特征。本文中所用的地震震源机制结果主要来自美国哈佛大学和美国地质调查局的 CMT 解、中国地震局解析处理发表的结果,以及日本东京大学、名古屋大学地震研究所等单位处理的结果。

地震活动性分析统计研究结果表明,2001—2008 年期间,青藏高原及其周围地域,即北纬 20~50°,东经 70~110°的范围内,共计发生 M5 级以上的地震 423 次;M6 级以上的地震 58 次;M7 级以上大地震 10 次;M8 级以上巨大地震 3 次。2001 年接连发生了印度南部的 M8.1 级大地震和 2001 年 11 月的昆仑山 M8.2 级大地震,2008 年又发生了汶川 M8 级地震等,形成一个新的青藏高原及其周围地域 8 级大地震活动的高潮期。

在青藏高原及其周围地域地震活动与应力场长期研究的基础^[14]上,本文重点研究 2001 年以来的地震活动高潮期间,青藏高原及其周围地域的地震应力场与构造运动特征。图 3 显示了 2001 年 1 月印度南部的 M8.1 级地震起至 2010 年 4 月玉树 M7.1 级

地震为止,青藏高原及其周围发生主要地震的震源机制结果的震源球投影图。笔者主要采用了美国地质调查局以及哈佛大学解析的 CMT 结果,同时参考引用了国内作者发表的解析结果^[14]。有关 2008 年汶川 8 级大地震的震源机制结果,已经发表了多个解析结果^[15-17]。本文采用的是得到广泛认可美国地质调查局解析的 CMT 结果。2010 年 4 月玉树 M7.1 级地震采用的是陈运泰研究小组利用全球 31 个台站的波形资料反演得到的震源机制和破裂过程结果^[18]。图 3 包括了 2001 年印度南 M8 级地震、2008 年汶川 8 级大地震、2008 年 10 月新疆乌恰 M6.6、西藏当雄 M6.6 级地震和 2010 年 4 月玉树 M7.1 级地震等 8 个地震的震源机制结果。图 4 是图 3 中地震震源机制解的主压应力 P 轴(实线)与张应力 T 轴(点线)的水平投影分布。图 5 为根据震源机制结果得到的主要地震造成的滑动矢量的水平投影,显示了地震发生直接产生的震源断层运动位移矢量的平面分布。

从图 3~4 可以看出,2001 年以来青藏高原及其周围地域的主要地震震源机制结果,反映出在新地震活动高潮期间,青藏高原整体及其周围地域构造

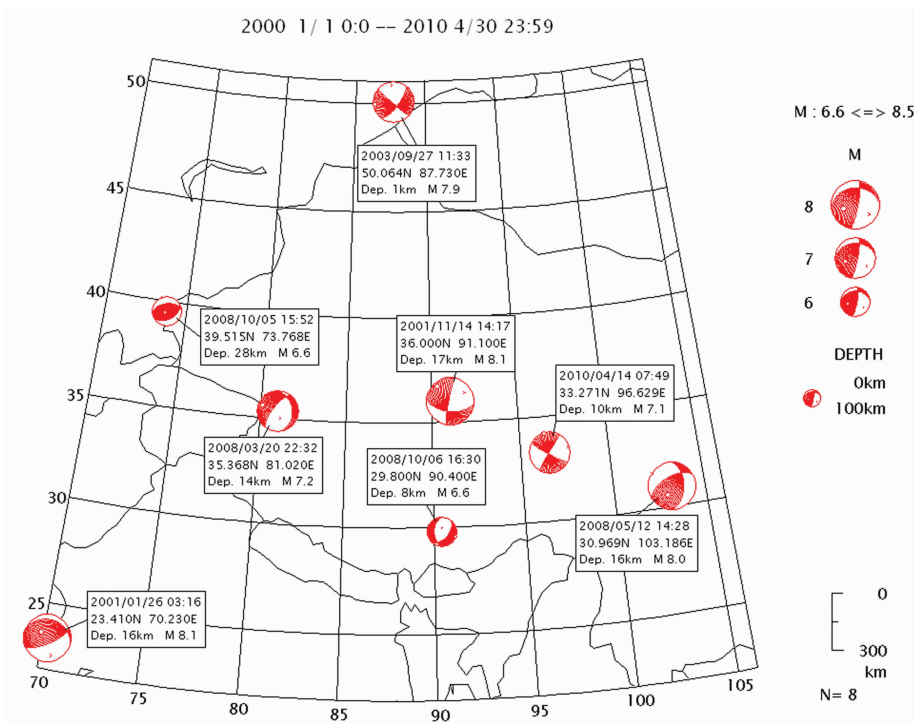


图 3 2001—2010 年期间青藏高原及其周围发生主要地震(M6.6~8.2,包括汶川 8 级地震)的震源机制结果

Fig.3 Distribution of the focal mechanism solutions of large earthquakes (M6.6~8.2) occurring in and around Tibet during 2001–April 2010

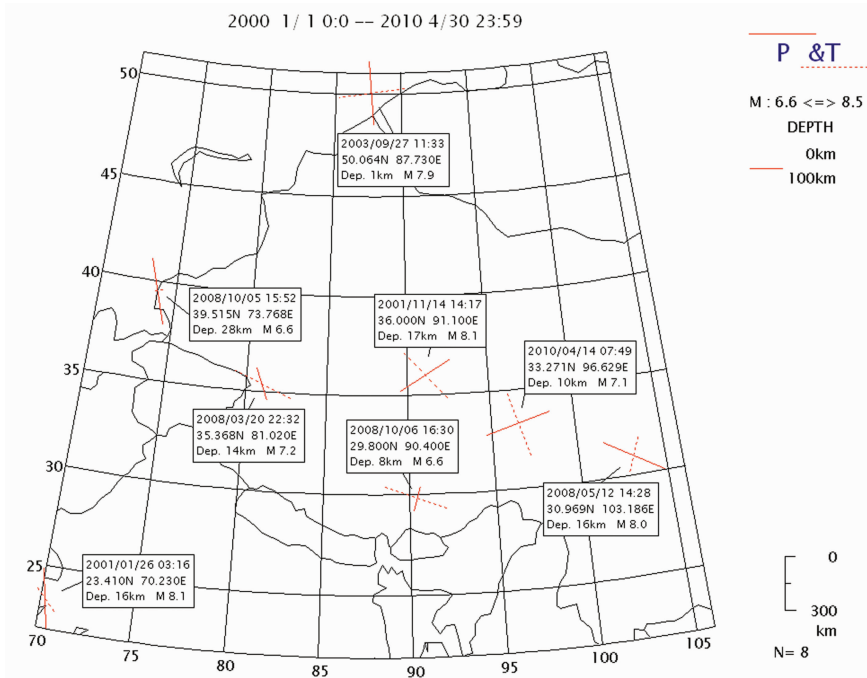


图 4 2001—2010 年期间青藏高原及其周围发生的主要地震(M6.6~8.2,包括汶川 8 级地震)的震源机制解的主压应力 P 轴(实线)与张应力 T 轴(点线)的水平投影分布

Fig.4 Distribution of P-axes (real lines) and T-axes (broken lines) of the focal mechanism solutions of the Wenchuan M8 Earthquake and other large earthquakes (M6.6~8.2) occurring in and around Tibet during 2001–April 2010

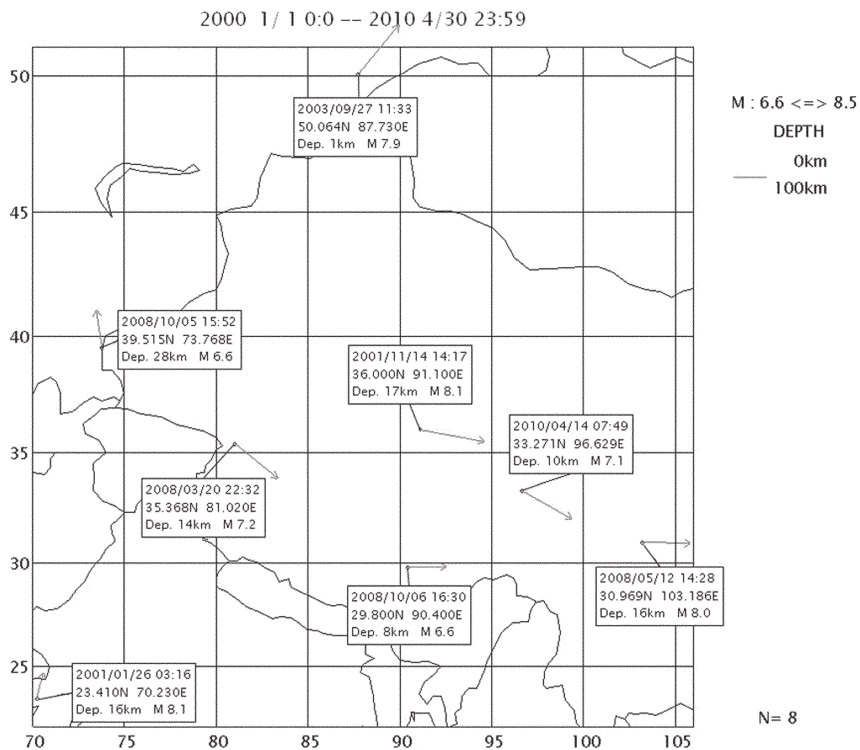


图 5 2001 年以来青藏高原及其周围发生的主要地震(包括 2008 年汶川主震)断层滑动矢量的水平投影分布
 Fig.5 Horizontal projections of slip vectors of the focal mechanism solutions of the large earthquakes (M6.6~8.6) and the Wenchuan M8 Earthquake occurring in and around Tibet during 2001–April 2010

运动的基本特征。首先,2001年1月印度的M8级大地震是一个典型的逆断层型地震,属于印度板块与欧亚板块之间的板间地震。其震源机制解反映出印度板块的北向运动以及与欧亚板块之间强烈挤压的构造运动特征。也可以说,2001年以来的地震活动新高潮期初始于这次印度板块与欧亚板块之间的板间大地震。随后发生的2001年11月昆仑山M8.2级大地震,是一个以走滑运动为主的地震。反映了在印度板块的强烈挤压作用下,青藏高原中东部的北向运动在昆仑山受阻,产生了东向走滑移动,沿昆仑山段裂带发生了大规模的左旋走滑构造运动。其最大水平位移达到6.6 m以上^[9]。而青藏高原西部在印度板块的强烈挤压作用下继续向东北方向上构造运动,在阿尔泰附近受阻形成应力积累,于2003年9月发生俄蒙交界的M7.9级地震。这是一个以走滑运动为主的地震,其北东向水平位移达到4.3 m以上^[9]。汶川地震为典型的逆断层型地震,反映了东向扩张青藏高原巴颜喀拉块体在其东缘的龙门山断裂带遭遇到四川盆地的抵抗,当两者间长期应力积累超出岩层的破裂强度时发生的巨大地震。最大滑动位移达6.7 m^[9]。汶川地震后发生的2008年10月西藏当雄M6.6级地震为近东西扩张的正断层型地震,有可能反映了在青藏高原东缘地带发生强烈逆断层型地震后,影响并引发了高原内部高海拔地区存在着的近东西方向的扩张构造运动。

图5为2001年以来青藏高原及其周围发生的主要8个大地震的滑动矢量的水平投影分布图,即地震时沿地震断层面发生的滑动位移矢量的水平投影。沿地震断层面滑动位移矢量的水平投影长度,除了与震级大小有关外,还与地震震源机制类型相关。与垂直向运动强烈的正、逆断层型地震相比,走滑型大地震有较大的水平滑动位移量。图5显示了青藏高原及其周围的南、北及西缘3个大地震,即2001年的印度南部的M8.1级大地震、2003年9月发生俄蒙交界的M7.9级地震和2008年10月新疆乌恰地震滑动位移矢量的运动方向以北向或北东向为主,大体与印度板块的北向运动方向相符;而青藏高原中、东部5个大地震,包括2001年11月昆仑山大地震、2008年汶川大地震、2008年新疆于田和西藏当雄以及2010年青海玉树地震等滑动矢量均以东向或东南方向移动为主,反映出青藏高原中、东部地区存在着整体向东移动的构造运动特征。地震滑动

矢量分布图(图5)清楚地显示了青藏高原西部以北向运动为主;而中、东部则以东向或东南方向运动为主的现代构造运动区域特征。

综上所述,在青藏高原周缘海拔较低的地区,地震主要是以逆断层型或走滑逆断层型活动发生。显示了在印度板块向欧亚大陆挤压碰撞的作用下,青藏高原周缘地区具有不断隆升以及西部向北、中、东部向东运动的构造运动特征。青藏高原内部高海拔地区地震主要是以正断层型或者走滑正断层型活动发生。反映出高原中部高海拔地区有沿断层面滑移与东向或东南方向运动趋势,促使不断隆升的青藏高原整体基本保持着重力均衡状态^[9]。

值得注意的是,位于青藏高原东缘2008年汶川8级地震的滑动矢量水平投影位于近东西方向,显示出地震发生时,位于断层面上盘的青藏高原相对于下盘的四川盆地是从西向东方向运动。这与青藏高原东缘整体现代构造运动特征相符(图5)。

4 2008年汶川大地震震源应力场及其成因机制探讨

如前所述,2008年汶川8级大地震引起世界地质界的广泛重视,已经发表了用不同方法解析处理得到的多个解析结果^[15-17]。整体来看,不同科研单位得到的结果基本一致,没有矛盾。例如,汶川8级大地震的P轴的方位分别定为 111° ^[15]、 103° (哈佛大学), 302° (美国地质调查局)等,也就是说,汶川地震主震震源应力场的P轴方位位于北西西-南东东方向。有关2008年汶川8级大地震的震源机制结果,本文采用的是得到广泛认可美国地质调查局解析的CMT结果。根据震源机制结果以及利用地震波远场体波模拟反演方法^[19]得到的地震断层结果,地震断层的走向、倾向和滑动角分别为 230° 、 30° 和 128° ;地震矩为 6.8×10^{20} Nm ($M_w = 7.8$);震源深度为11 km;主破裂持续时间为110 s;断层面积为 260×50 km;最大滑动位移为6.7 m。该解析结果与震后现场地质考察结果基本相符^[20]。

为了探明汶川大地震震源应力场及其成因机制,笔者进行了汶川地震系列震源机制研究,并重点研究了汶川主震后2周内发生的M6以上强余震的震源机制结果^[15]。图6显示了汶川地震系列震源机制研究结果,表明汶川主震后的4个M6以上强余震的震源机制结果与主震基本相似。汶川强余震震

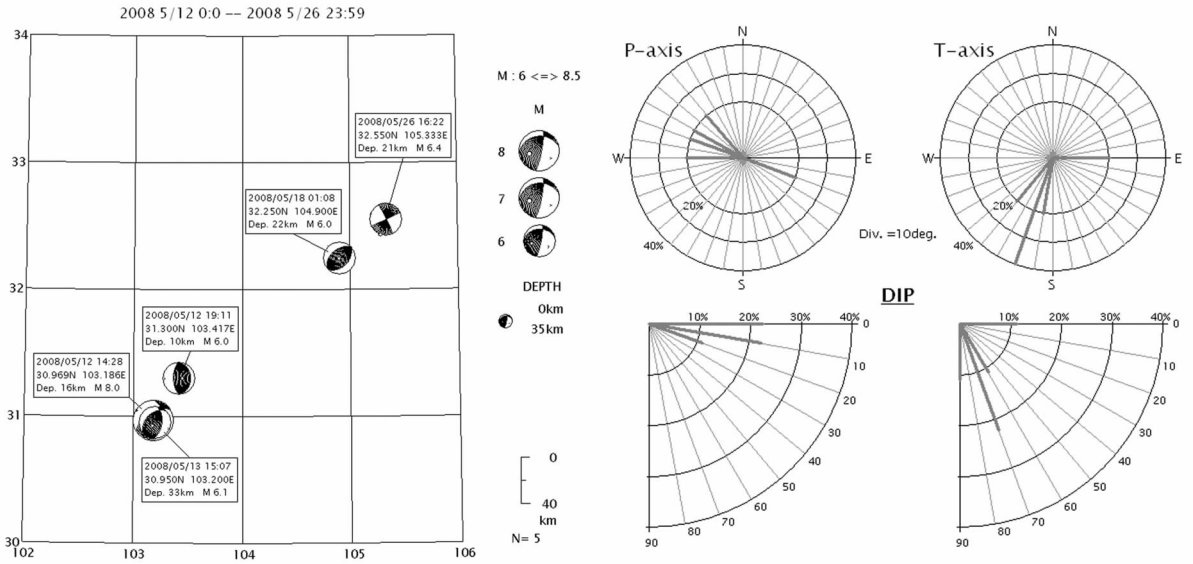


图 6 2008 年汶川 8 级大地震与 M6 以上强余震的震源机制(左)及其震源应力场的 P、T 轴方位、倾角(右)
 Fig.6 Focal mechanism solutions (left) and statistics of azimuths and dips of the Wenchuan M8 Earthquake and its 4 aftershocks (M≥6)

源应力场的 P 轴方位均位于 $295^{\circ}\pm 20^{\circ}$ 方向,倾角为 $10^{\circ}\pm 10^{\circ}$,与主震基本相同。震源断层类型除了 2008 年 5 月 26 日发生在青川附近的 Ms6.4 级余震为走滑地震,其余为逆断层型地震。系列震源机制结果研究可以证明,汶川地震及其强余震是在一个稳定的、主压应力 P 轴以北西西-东南东方向为主的震源应力场控制下发生的。也就是说,汶川地震震源应力场完全不同于青藏高原其他大地震,青藏高原地震应力场的基本特征之一是,主压应力 P 轴以北-北东方向为主(图 2,3,6),与印度板块北向运动挤压方向一致。

汶川地震发生在中国南北地震带的中南部—龙门山断裂带的南段。其西侧的青藏高原隆起、并向东推挤,而其东侧的四川盆地沉降,震源区处于两构造块体差异运动十分强烈的地带。笔者曾对南北地震带中南段应力场特征及其成因进行过深入研究^[2]。1933 年以来中、强震的震源机制与区域应力场特征研究结果表明,根据震源机制类型以及 P、T 轴方位的一致性分布特征,处于青藏高原东缘与华南块体之间的南北地震带中南段,可以划分为东 1、东 2、东 3、东 4(即图 7 中的 E₁、E₂、E₃、E₄)和西 1、西 2、西 3(即 W₁、W₂、W₃)等 7 个分区。图 7 是根据震源机制结果划分的南北地震带南段的 7 个分区空间位置以及各个分区统计计算得到的平均主压应力 P 轴

方位^[2]。从图 7 表明,南北地震带南段西部的 3 个分区的 P 轴方位从南到北为北北东、北东、北东东方向,与青藏高原中东部的 P 轴方位基本一致;而东部 4 个分区的 P 轴方位,从南到北为北北西、北西、北西西和近东西方向。特别是纬度 28° 以上的 E₃ 和 E₄ 分区的统计平均 P 轴方位分别为 297° 和 296°,与华南块体的 295° 的平均 P 轴方位基本相符。

从汶川地震震中位置(31.0°N,103.4°E)及其地震断层考察结果来看,2008 年汶川 8 级大地震发生在南北地震带南段东部的 E₃ 分区范围内。并且其震源机制结果的震源应力场的 P 轴方位与该区的地壳区域应力场特征基本相同(图 3,7)。汶川大地震主要余震的震源机制结果大多反映了与主震相同的震源应力场特征,其主压应力轴基本上位于北西西-南东东方向^[15]。震源机制资料分析研究结果证明,位于龙门山断裂带上的汶川 8 级大地震震源区主要受到其东部的华南块体地壳应力场的控制并发生地震的。

GPS 测定的 2008 年汶川 8 级地震的同震位移场研究结果表明^[22],水平同震位移场最显著的特征是以龙门山断裂带的映秀—北川断裂为核心的相向运动和地壳缩短,而断裂以西的所有站点显示向东运动,而断裂以东的所有站点都显示大幅度地西向运动,如距断裂带 28 km 的郫县站的向西位移幅度

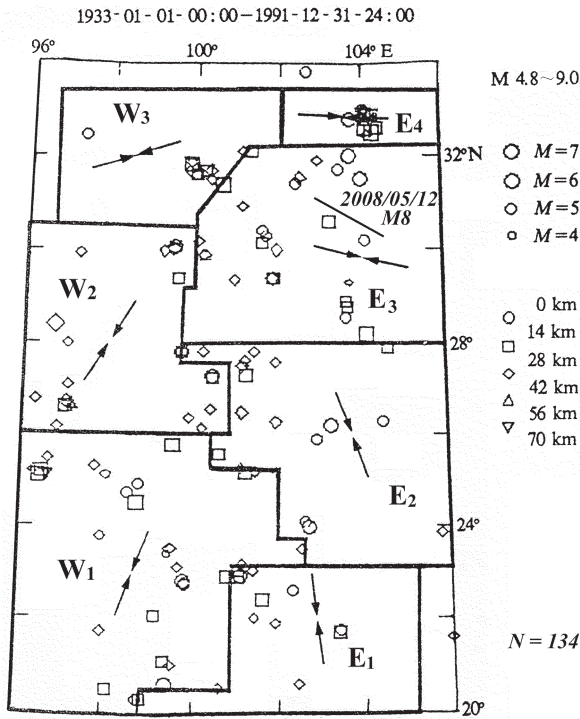


图7 根据1933年以来地震震源机制结果的P轴和T轴方位的一致性分布特征,得到的南北地震带南段的分区

东1、东2、东3、东4(E₁, E₂, E₃, E₄)和西1、西2、西3(W₁, W₂, W₃)分别为其东、西部的分区。图中箭头→←表示每个分区以及各分区的平均P轴方位。直线表示2008年汶川8级地震震源机制结果得到的主压应力P轴方位(USGU的CMT结果)

Fig.7 Distribution of subregions in the southern part of the NS-trending seismic belt, which are the E₁, E₂, E₃, E₄ in the east and the W₁, W₂, W₃ in the west

达到了563 mm。在龙门山断裂带形成强烈的地壳水平方向的缩短的同时,垂直同震位移则以西升东降为主,观测到的最大幅度位于成都平原北川县城以东靠断裂带附近,最大幅度达675 mm。青藏高原及其周围主要地震的滑动矢量的水平投影分布等资料(图5)可以进一步解释震源模式。汶川8级地震的滑动矢量水平投影位于近东西方向,显示了地震发生时,位于断层上盘的青藏高原相对于下盘的四川盆地的构造运动方向是从西向东的;而下盘的四川盆地相对于高原有着从东向西的构造运动。根据GPS测定的垂直同震位移分布结果与区域应力场特征分析等,龙门山断裂带西侧的青藏高原相对于四川盆地发生的东向上升运动;而东侧的四川盆地相对于青藏高原发生的西向下降的构造运动可能是2008年汶川8级地震发生的主要地震成因即地震

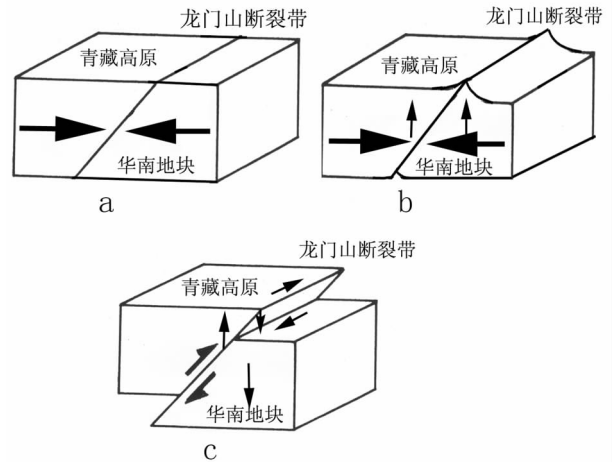


图8 汶川8级地震发生模式

(a)、(b)、(c)分别为地震前、地震孕育过程中以及震时沿龙门山断裂带地震震源断层周围位移分布

Fig.8 Model of the Wenchuan M8 Earthquake
a- Before generation; b- In generation; c- Co-seismism

发生机制。

简单的震源模式可以说明2008年汶川8级地震震发震机制以及震前、孕育过程中以及发生时产生相对位移变化(图8)。汶川8级地震孕育过程中,震源断层的上下盘处于紧密闭锁状态,巨大的挤压应力致使上下两盘均小幅度隆起上升。而地震发生致使东侧的四川盆地大幅度下降和显著的西向运动的同时,西侧的青藏高原发生东向或北东向水平位移。垂向位移则不尽相同,虽然断层西盘整体可能上升,而断层边缘处有可能小幅度下降。

由于早更新世晚期以来印度洋洋脊持续扩张,印度板块向北挤压,导致青藏高原持续隆升,高原边界断裂和内部的走滑断裂也一直在活动,这些活动断裂就是青藏高原及其周缘地震活动发生的背景。印度大陆板块向北漂移并和欧亚大陆板块碰撞挤压,形成了世界屋脊喜马拉雅与青藏高原。青藏高原平均海拔高度达5000 m,巨大的青藏高原深部地壳的岩石在高温高压下发生部分熔融,在重力作用下,挤压下向四边周界涌动一样,向高原的周缘挤流。古老的四川盆地下面坚硬的岩石圈与青藏高原强烈碰撞,强烈挤压形成了龙门山。古老并且相对稳定的四川盆地受到了来自菲律宾海板块与欧亚板块之间碰撞挤压边界的台湾纵谷地区构造应力的影响和控制。该应力经华南块体,直到中国南北地震带中南段东部形成了广阔地域的方位为110~120°的挤压构

造应力,影响了南北地震带南段东侧的孕震应力场^[14, 23-25]。当四川盆地西缘岩石圈已经不堪负重时,2008 年汶川 8 级地震震源断层就发生了急剧破裂,随着上下盘青藏高原与四川盆地的相对运动,释放了巨大的应变能量,给极震区造成惨重的地震灾害。汶川 8 级地震发生后,沿地震断层附近形成了一个应力释放区,即汶川地震的余震区。然而,由于在该区青藏高原扩张和四川盆地抵抗的区域构造运动特征不会发生根本变化,其南、北端部有可能形成新的应力集中区,曾推测今后有可能发生大地震的区域。果然,于 2010 年 4 月在与汶川地震同属于巴颜喀拉块体东南边缘的鲜水河断裂带,发生了玉树 M7.1 级地震。考虑到汶川 8 级地震的发生会对华南块体地壳应力场可能产生的影响,应在华南地区等更大范围内加强监视与研究。

5 结论

本文根据中国地震观测报告和美国地质调查局 USGS 的地震资料、美国地质调查局、日本名古屋大学以及中国地震学家们发表的地震震源机制和断层参数结果,结合 GPS 测定的同震位移场研究结果和地质构造研究结果,分析研究了汶川地震发生的地震活动背景、震源应力场、断层构造运动特征和地震发生机制区域构造成因。初步结论如下:

(1)地震活动性分析研究结果表明,2008 年汶川 8 级大地震是在青藏高原与其周边地域处于构造运动剧烈,2001 年起始的地震活动高潮期的背景下发生的。该地震的发生填补了青藏高原东缘 1900 年以来存在的 8 级地震的活动空区。

(2)震源机制与区域应力场特征及其动力学机制研究表明,汶川 8 级地震震源处于南北地震带中南段东部,青藏高原东向扩张与四川盆地的抵抗是该区构造运动的主要特征。系列震源机制结果研究证明,汶川地震及其强余震是在一个稳定的、主压应力 P 轴以北西-东南东方向为主的震源应力场控制下发生的。说明汶川地震震源区域主要受到四川盆地、华南块体区域应力场的控制并发生震的。

(3)震源机制、地震断层参数及 GPS 测定的同震位移场研究等结果表明,龙门山断裂带西侧的青藏高原相对于四川盆地发生的东向上升;而东侧的四川盆地相对于青藏高原发生的西向下降的构造运动是 2008 年汶川 8 级地震发生的主要地震成因即

地震发生机制。

谨以本文恭贺李廷栋院士 80 华诞。

参考文献 (References):

- [1] Eldridge M Moores, Robert J Twiss. Tectonics [M]. New York: W. H. Freeman and Company, 1995.
- [2] Molnar P. A review of the seismicity and the rates of active underthrusting and deformation at the Himalaya [J]. Journal of Himalayan Geology, 1990, 1:131-154.
- [3] 汪一鹏. 青藏高原活动构造基本特征[C]//马宗晋,汪一鹏等主编. 青藏高原岩石圈现今变动与动力学. 北京:地震出版社, 2001: 251-262.
Wang Yipeng. Principal features of the active tectonics in Qinghai-Xizang Plateau [C]// Ma Zongjin, Wang Yipeng, et al(ed.). Study on the recent deformation and dynamics of the lithosphere of Qinghai-Xizang Plateau. Beijing: Seismological Press, 2001: 251-262 (in Chinese with English abstract).
- [4] 许忠淮. 东亚地区现今构造应力图的编制[J]. 地震学报, 2001, 23 (5):492-501.
Xu Zonghuai. A present-day tectonic stress map for eastern Asia region [J]. Acta Seismologica Sinica, 2001, 23 (5):492-501 (in Chinese with English abstract).
- [5] 徐纪人, 赵志新. 青藏高原及其周围地区区域应力场与构造运动特征[J]. 中国地质, 2006, 33(2), 275-285.
Xu Jiren, Zhao Zhixin. Regional characteristics of stress field and tectonic motions in and around the Tibetan Plateau [J]. Geology in China, 2006. 33(2), 275-285(in Chinese with English abstract).
- [6] 王勇, 许厚泽. 青藏高原印度洋板块向欧大陆俯冲速率的研究—GPS 观测资料的反演结果 [J]. 地球物理学报, 2003, 46 (2):185-190.
Wang Yong, Xu Houze. A study on convergence rate of the India plate to Eurasia subduction beneath Qinghai-Xizang plateau - Inversion results from GPS observational data[J]. Chinese J. Geophys, 2003, 46(2):185-190 (in Chinese with English abstract).
- [7] 许忠淮, 汪素云, 黄雨蕊, 等. 由大量地震的资料推断我国大陆构造应力场[J]. 地球物理学报, 1989, 32 (6):636-647.
Xu Zhonghuai, Wang Suyun, Huang Yurui, et al. The tectonic stress field of China continent deduced from a great number of earthquake[J]. Chinese J. Geophys. 1989, 32(6):636-647(in Chinese with English abstract).
- [8] Xu Jiren, Zhao Zhixin, Oike Kazuo. Tectonics Characteristics of Seismogenic Stress Field in East Asia [C]//Fujinawa a Y, et al (eds.). Seismotectonics in Convergent Plate Boundary. Tokyo: Terra Scientific Publishing Company, 2002: 481-497.
- [9] Tapponnier P. et al. Propagating extrusion tectonics in Asia: New insights from simple experiments with plasticine [J]. Geology, 1982, 10 (2):614-616.
- [10] Molnar P, Tapponnier P. A possible dependence of tectonic strength on the age of the crust in Asia [J]. Earth and Planetary Science

- Letters, 1981; 52:107-114.
- [11] Froidevaux C, Ricard Y. Tectonic evolution of high plateau [J]. Tectonophysics, 1987, 134:227-238.
- [12] Zhao Z X, Oike K, Matsumura K. Stress field in the continental part of China derived from temporal variations of Seismic activity [J]. Tectonophysics, 1990, 178:357-372.
- [13] 曾融生, 丁志峰, 吴庆举. 喜马拉雅及南藏的地壳俯冲带—地震学证据[J]. 地球物理学报, 2000, 43(2):590-599.
Zeng Rongsheng, Ding Zhifeng, Wu Qingju. Seismological evidence for the multiple incomplete crustal subductions in Himalaya and south Tibet [J]. Chinese J. Geophys, 2000, 43(2): 590-599(in Chinese with English abstract).
- [14] 徐纪人, 赵志新, 石川有三. 中国大陆地壳应力场与构造运动区域特征研究[J]. 地球物理学报, 2008, 51(3):770-781.
Xu Jiren, Zhao Zhixin, Ishikawa Y. Regional characteristics of crustal stress field and tectonic motions in and around Chinese Mainland [J]. Chinese J. Geophys. 2008, 51:861-869 (in Chinese with English abstract).
- [15] 胡幸平, 俞春泉, 陶开, 等. 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, 2008, 51 (6):1711-1718.
Hu Xingping, Yu Chunquan, Tao Kai, et al. Focal mechanism solutions of Wenchuan earthquake and its strong aftershocks obtained from initial P-wave polarity analysis[J]. Chinese J. Geophys, 2008, 51 (6):1711-1718 (in Chinese with English abstract).
- [16] 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), 2008, 38 (10):1186-1194.
Zhang Yong, Feng Wanpeng, Xu Lisheng, et al. Spatio-temporal rupture process of the 2008 great Wenchuan earthquake[J]. Science in China(Series D), 2009,52(2):145-154
- [17] 陈运泰. 汶川特大地震的震级和断层长度[J]. 科技导报 2008, 26 (10):26-27.
Chen Yuntai. On the magnitude and the fault length of the great Wenchuan earthquake[J]. Science & Technology Review, 2008, 26 (10): 26- 27(in Chinese with English abstract).
- [18] 陈运泰研究小组:第四版玉树地震震源机制和破裂过程快报,2010. http://www.csiac.cn/manage/html/28861611c5c2ba0111c5c558b00001/_content/10_04/17/1271488288058.html.
- [19] Yamanaga Y. http://www.seisnagoya-u.ac.jp/sanchu/Seismo_Note/.
- [20] 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 Peizhen, Xu Xiwei, Wen Xueze. 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 J. Geophys, 2008, 51 (4):1066-1073(in Chinese with English abstract).
- [21] 徐纪人, 尾池和夫. 南北地震带南段应力场特征及其与板块运动的关系[J].地震学报, 1995, 17(1):31-40.
Xu Jiren, Oike K. Earthquake mechanisms and its implication for tectonic stress field in the Southern part of the North-South Seismic Belt in China [J]. Acta Seismologica Sinica, 1995, 17(1): 31-40(in Chinese with English abstract).
- [22] 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 Ms8.0 级地震的同震位移场[J]. 中国科学(D 辑) 2008, 38(1):1195-1206.
Group of Crustal movement observation. Coseismic displacement field for the 2008 Wenchuan Ms 8.0 earthquake determined by GPS[J]. Science in China (Series D), 2008, 38 (1):1195-1206(in Chinese).
- [23] Xu Jiren, Zhao Zhixin, Kazuo Oike. Spatio-temporal distributions of seismic activity in East Asian and its relation to the regional stress field[J]. Acta Seismologica Sinica, 1992, 5(2):263-269.
- [24] 赵志新, 松村一男, 尾池和夫, 等. 東アジアにおける地震活動変化の地域特徴と関連性について、(3) 中国西部と隣接地域 [J]. 地震, 1988, 第 2 輯, 41:389-400.
Zhao Zhixin, Matsumura K, Oike K, et al. Regional characteristics of temporal variations of seismic activity in east Asia and their mutual relations (3) West China and its Neighboring regions [J]. Zisin, 1987, (40):593-604 (in Japanese with English abstract).
- [25] Xu J R, Zhao Z X, Ishikawa Y, et al. Properties of the stress field in and around west China derived from earthquake Mechanism solutions [J]. Bulletin of the Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University, 1988, 38:49-78.

Causative mechanism and related tectonic movement of the 2008 Wenchuan M8 Earthquake

XU Ji-ren, ZHAO Zhi-xin

(Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China)

Abstract: In this study, seismicity background, stress fields, seismogenic tectonics and dynamics for the 2008 Wenchuan M8 Earthquake were investigated employing earthquake focal mechanisms, source fault parameters and coseismic displacements from GPS. The results suggest that the 2008 Wenchuan M8 event occurred under the tectonical motion in and around the Qinghai-Tibet plateau during a seismically active period since 2001. The Wenchuan M8 event with the 300 km long earthquake fault occurred on the eastern edge of the Qinghai-Tibet plateau, which filled the seismicity gap zone lacking M8 event from 1990. The eastward extensional motions of the Tibetan plateau and the counter action constitute the main tectonic property. The M8 Wenchuan event and its strong aftershocks occurred under a seismogenic stress field where P-axes align stably in NWW-SEE direction. It implies that the seismogenic stress field for the Wenchuan M8 event is mainly attributable to the actions of the stress fields lying on the southern segment of NSSB, the Shichuan basin and the South China block. The results from the source fault parameters and coseismic displacements from GPS suggest that the tectonic movement of the up-eastward slip of the Qinghai-Tibet plateau on the western side of the Longmen Mountain and the relative down-westward slip of the Sichuan basin might have been the causative mechanism of the 2008 Wenchuan M8 event.

Key words: Wenchuan M8 earthquake; seismicity; seismogenic stress field; earthquake mechanism

About the first author: XU Ji-ren, female, born in 1947, senior researcher and doctor, mainly engages in the study of earthquake mechanism, tectonic stress field and geodynamics as well as some other fields related to earthquake studies; E-mail: xujiren@ccsd.cn.