

文章编号: 1009-3850(2012)04-0106-05

汶川地震后龙门山断裂带活动特征

唐文清, 张清志, 刘宇平, 潘忠习, 李 军, 杨 成

(成都地质矿产研究所, 四川 成都 610081)

摘要: 利用地震后 2009 ~ 2011 年 GPS 监测数据, 获得了龙门山断裂带所在地区 2009 ~ 2010 年、2010 ~ 2011 年以及 2009 ~ 2011 年 GPS 测站运动速度场, 分析了区域地壳运动总体趋势及形变特征; 通过分析龙门山断裂带北段、中段、南段横切剖面的测站运动速度变化, 探讨了汶川地震后龙门山断裂带运动特征。分析表明: 汶川地震前后, 地壳运动总体趋势未变, 作顺时针旋转; 断裂带西侧 GPS 测站运动速度变大, 东侧运动速度变小; 龙门山断裂带的断裂性质地震前后都为右旋走滑挤压, 断裂带运动速率受汶川地震影响较大, 震后运动速率较震前有显著的增加。龙门山断裂带震后各段次级断裂活动不同, 中南段以前山断裂运动为主, 其它各段以后山断裂运动为主。地震后龙门山断裂带表现出的运动特征主要与地震活动有关。受汶川地震的影响, 区域动力学、运动学平衡被打破, 龙门山断裂带东侧震后初期弹性回返, 表现为低速反向运动。龙门山断裂带西侧震后松弛为拉张区, 运动速度加大。地震对断裂带的影响不同, 导致断裂带各段及次级断裂表现出不同的运动特征。

关键词: 汶川地震; 龙门山断裂带; GPS 监测; 运动速度

中图分类号: P315.61

文献标识码: A

2008 年 5 月发生的四川汶川 8.0 级强烈地震波及我国大部分地区, 造成了巨大破坏。随着地震能量的释放, 区域地壳的运动学、动力学平衡被打破。作为发震构造的龙门山断裂带, 地震错动显著、地表破裂长, 断裂带运动特征地震后发生明显的改变。

GPS 监测能提供高精度、大范围和实时的地壳运动定量数据, 使得在短时间内获取现代地壳运动形变成为可能^[1-2]。成都地质矿产研究所在龙门山断裂带的 GPS 监测起始于 1991 年, 地震前进行了多期观测, 积累了丰富的观测数据。汶川地震后, 借助于“青藏高原东缘地壳形变 GPS 监测”项目, 在龙门山断裂带增设了 GPS 监测站, 龙门山断裂带的监测由断裂带细化到分段及次级断裂。

通过对 2009 ~ 2011 年三期 GPS 测站监测及数据处理, 得到了龙门山断裂带 2009 ~ 2010 年、2010 ~ 2011 年、2009 ~ 2011 年欧亚框架下区域地壳运动

速度场, 反映了地震后龙门山断裂带活动特征。同时通过横穿龙门山断裂带前山断裂、中央断裂、后山断裂剖面 GPS 测站运动速度大小和方向变化的分析, 具体探讨地震后断裂带各分段及次级断裂的运动特征, 对震后龙门山断裂带的构造运动形变特征及区域地球动力学、运动学的研究, 具有重要意义。

1 龙门山断裂带地质背景

龙门山断裂带位于青藏高原东缘中部, 地处青藏高原和四川盆地之间, 是由一系列压性、压扭性断裂及褶皱组成的逆冲断裂带^[3], 控制着区域现代地形、地貌和地震活动^[4-6]。龙门山断裂带是活动强烈的青藏块体与活动较弱的华南块体挤压拼接的交汇部位之一^[7-8], 体现了青藏高原对华南地块挤压的构造特征和四川盆地作为前陆盆地的演化过程^[9-10]。龙门山断裂带同时也是我国南北地震带的组成部分^[11], 汶川地震发生在此断裂。

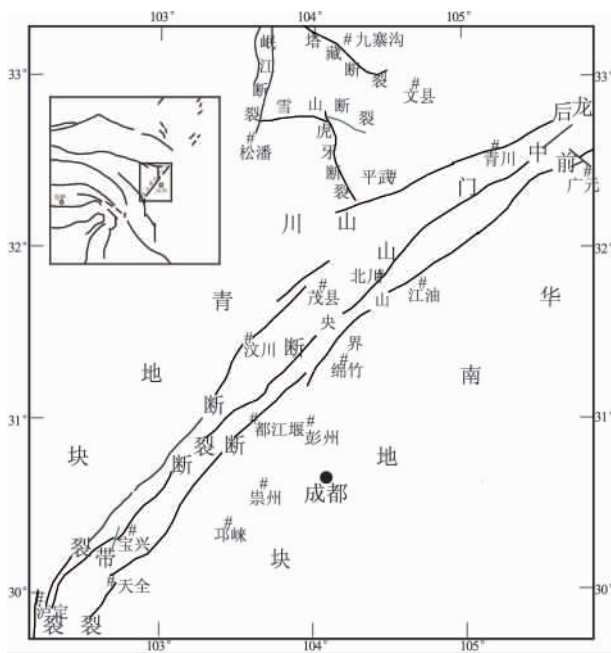


图 1 龙门山断裂带构造略图

Fig. 1 Tectonic setting of the Longmenshan fault zone

龙门山断裂带南起泸定、天全,与北西向的鲜水河断裂相聚,沿四川盆地西缘呈北东-南西向延伸,经宝兴、都江堰、江油、广元进入陕西,与昆仑-秦岭东西向构造带成斜角相交(图 1)。在横向上分为西支、中央和东支 3 条断裂。根据出露位置和形成时间顺序,习惯上以主中央断裂为界,将龙门山断裂分为前山和后山断裂,自西向东依次称为后山断裂、中央断裂、前山断裂。后山断裂在地貌上处于龙门山的最高部位,占据了龙门山的主脊线,印支期以来为挤压逆冲性质;中央断裂位于后山与前山断裂之间,在断裂两侧发育一系列与之平行的次级断层,剖面上呈叠瓦状,显示明显的压性特征;前山断裂位于四川盆地西侧,组合比较复杂,常呈断续左行雁列,挤压形变特征比较明显,沉积盆地被逆掩于断裂之下。各主干断裂总体走向为 NE 向,倾向北西;主干断裂由多条次级断裂组成,而次级断裂又由若干更次级的断裂构成。龙门山断裂在纵向上由几个不同的段落组成,划分为北、中、南三段。每一段包括大断裂的次一级断裂。龙门山断裂北段指白龙江以北四川广元至陕西勉县、宁强一段。此段包括后山断裂的青川-平武断裂、中央断裂的北川-广元朝天驿断裂、前山断裂的马角坝断裂。龙门山断裂中-南段,是龙门山极具构造特色的部分,在次级断裂中,以青川-茂汶断裂、北川-保兴断裂、江油-灌县断裂规模较大。龙门山断裂中段包括了后山断裂的汶川-茂汶断裂、中央断裂的映秀-北川断裂、前山断裂的灌县-江油断裂;断裂南段包括了龙门山后山断裂的耿达-陇东断裂、龙门山中央断

裂的盐井-五龙断裂、龙门山前山断裂的南段大川-双石断裂。

龙门山断裂带历史悠久且具有多期活动^[12]。挤压运动始于晚三叠世,从侏罗纪到第四纪一直在活动,主要断裂现在仍在活动。新构造运动主要表现为挤压特征。地质研究显示,新生代和第四纪以来东北段活动减弱,而龙门山断裂中段和西南段晚第四纪以来仍在活动。

2 水平运动速度场及测站速度剖面

汶川地震后,龙门山断裂带高精度 GPS 监测已进行了三期(2009、2010、2011 年)。数据处理采用 GAMIT/GLOBK 软件。首先,用 GAMIT 进行单日解算,得到测站坐标、位置轨道和地球定向参数等的松弛解;然后,用 GLOBK 进行多时段综合解算,以获得 GPS 网平差结果,并计算重复度及评估数据质量;最后,选定参考框架,得出欧亚框架下的测站运动速度。测站运动速度场相对精度为 $10^{-8} \sim 10^{-9}$,绝对精度为 mm/yr,能满足地壳运动形变研究的需要。通过计算,分别得到了地震后 2009 ~ 2010 年、2010 ~ 2011 年度以及 2009 ~ 2011 年的欧亚框架下测站运动速度场(图 2 图 3 图 4)。

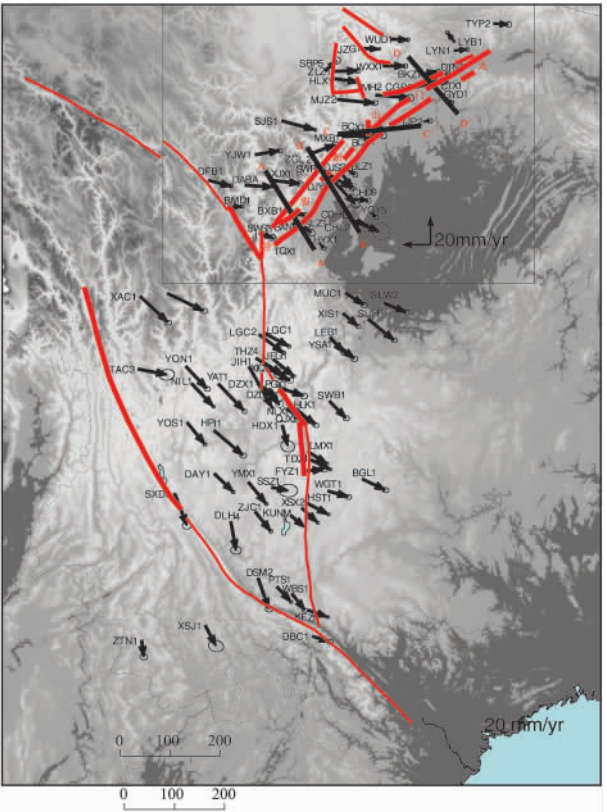


图 2 2009 ~ 2010 年欧亚框架下测站运动速度场

Fig. 2 Velocity field of the GPS stations in Eurasian reference frame (2009-2010)

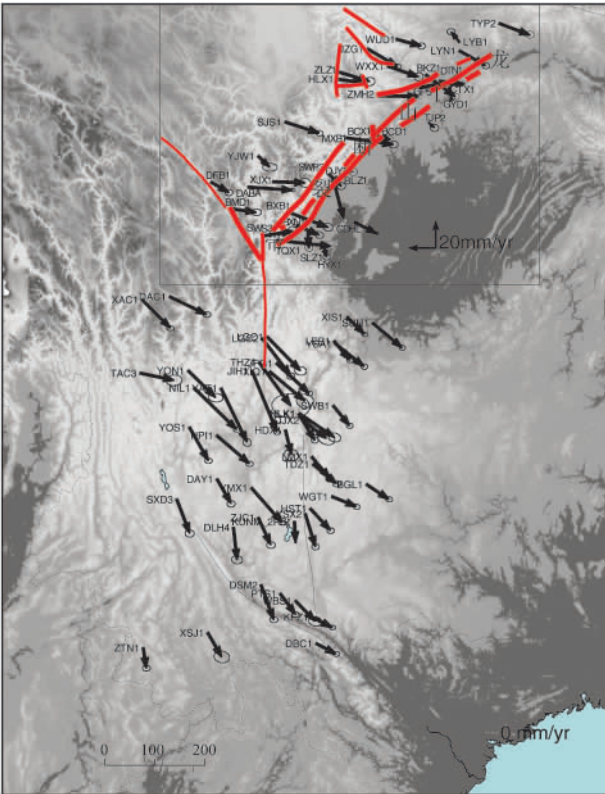


图3 2010 ~ 2011 年欧亚框架下 GPS 测站运动速度场
Fig.3 Velocity field of the GPS stations in Eurasian reference frame (2010-2011)

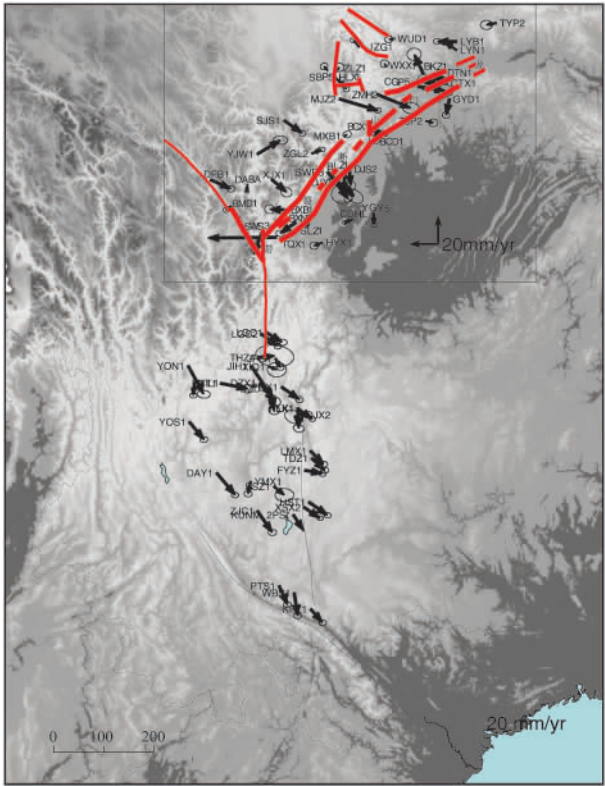


图4 2009 ~ 2011 年欧亚框架下 GPS 测站运动速度场
Fig.4 Velocity field of the GPS stations in Eurasian reference frame (2009-2011)

为了更好地研究龙门山断裂带的震后构造活动特征,截取了横穿断裂带的4条剖面(A-A'、B-B'、C-C'、D-D')(图4)。以2009~2011年欧亚框架下测站运动速度场作为研究基础,分别做出龙门山断裂南段(XJS-BXB-BXN-SLZ-HYX)(A-A'剖面)、中南段(ZGL-SWP-DJY-DJS)(B-B'剖面)、中北段(MXB-BCX-BCD-TJP)(C-C'剖面)、北段(BKZ-DTN-CTX-GYD)(D-D'剖面)横穿前山断裂、中央断

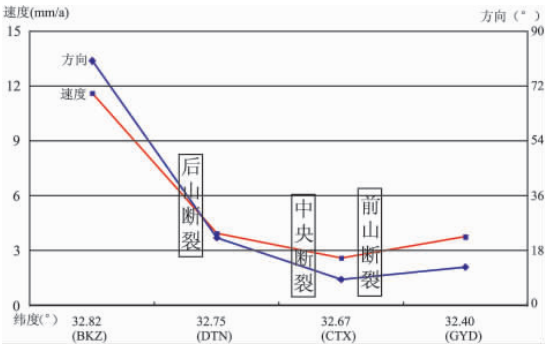


图5 龙门山断裂带南段测站速度剖面(A-A')
Fig.5 Velocity section A-A' in the southern part of the Longmenshan fault zone

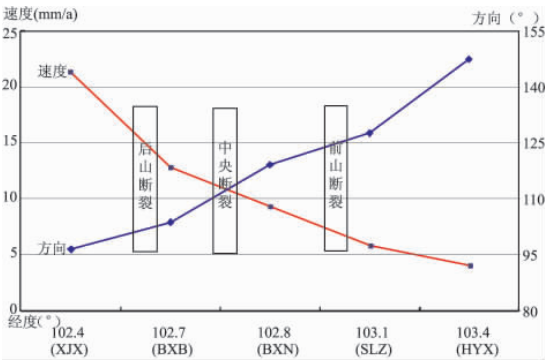


图6 龙门山断裂带中南段测站速度剖面(B-B')
Fig.6 Velocity section B-B' in the south-central part of the Longmenshan fault zone

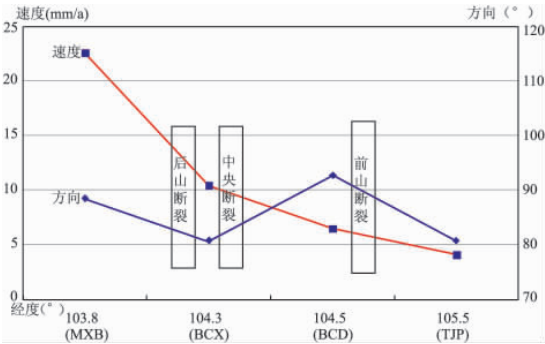


图7 龙门山断裂带中北段测站速度剖面(C-C')
Fig.7 Velocity section C-C' in the north-central part of the Longmenshan fault zone

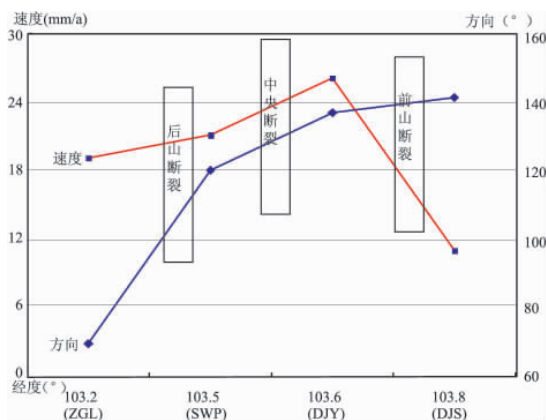


图8 龙门山断裂带北段测站速度剖面(D-D')

Fig.8 Velocity section D-D' in the northern part of the Longmenshan fault zone

裂、后山断裂的测站运动速度剖面图(图5,图6,图7,图8)。各剖面反映了经过不同构造部位的测站运动速度大小、方向变化特征。

3 分析及讨论

GPS 监测获得的地壳运动速度场清晰地揭示了地震后上部地壳构造运动变形特征。从汶川地震后龙门山断裂带 2009 ~ 2010 年、2010 ~ 2011 年度的欧亚框架下测站运动速度场以及地震后 2009 ~ 2011 年运动速度场(图2,图3,图4)可以看出:总体上看,龙门山断裂带 GPS 测站运动方向为 SE 向,由西到东,测站运动方向逐渐变大,测站运动方向逐渐由 SEE 向变为 SE 向,作顺时针旋转;龙门山断裂带 GPS 测站运动速度西侧大,东侧小,西侧的运动速度明显高于东侧,说明西侧的川青地块活动大于东侧的华南地块。地震后龙门山断裂带两侧 GPS 测站速度及方向的变化反映出龙门山断裂带的总体性质为右旋挤压走滑,与地震前断裂带运动特征相似。

具体到逐个 GPS 测站,龙门山断裂带及周围区域内测站运动速度大小、方向变化较大,显得较为零乱。GPS 测站运动大小、方向变化各年度表现不同。2009 ~ 2010 年度变化较大,断裂带东侧 GPS 测站甚至出现了反向运动。2010 ~ 2011 年度则稍好;2009 ~ 2011 年测站运动场表现得较有规律。这些特征表明:龙门山断裂带受汶川地震及其余震的影响大。早期的东侧 GPS 出现的测站反向运动,为地震发生、应力释放后的弹性回返。随着应力释放以及被地震打破的运动学、动力学平衡的逐渐恢复,逐渐表现出原来的特征。

龙门山断裂带作为重要的分界断裂,其活动大小一直受到人们的关注。地震地质研究表明,龙门

山断裂的晚更新世以来(万年尺度)的活动强度相对较低,整个龙门山断裂带的滑动速率不超过 2 ~ 3 mm/yr^[13];用地质方法得出的龙门山断裂中南段滑动速度 1 ~ 2 mm/yr、地貌法得出的 1 ~ 5 mm/yr^[12];地震前 GPS 研究得出龙门山断裂带的总体运动不大,龙门山断裂的挤压缩短速率只有 (6.7 ± 3.0) mm/yr^[14]、0 ~ 7 mm/yr^[15]、断裂带为 2.3 mm/yr,北段为 1.54 mm/yr,中段为 2.77 mm/yr,南段为 5.23 mm/yr,性质主要表现为挤压走滑断裂带^[16,17]。

龙门山断裂带各段横穿次级断裂的 GPS 测站剖面运动速度、方向变化(图5,图6,图7,图8)可以反映出震后龙门山断裂带运动特征。地震后,龙门山断裂带整体运动速度明显变大,达到 10 ~ 20 mm/yr 左右,性质为右旋挤压走滑,与地震前相似。由西向东,各剖面测站速度总体上逐渐变小。测站剖面速度突变处却不同,龙门山断裂带的北段、中北段以及南段,都以后山断裂的运动速度差最大,表明地震后龙门山断裂带以后山断裂的运动为主;在离震中较近的龙门山中南段则以前山断裂的运动为主,究其原因,可能与龙门山中南段处为地震震中有一定的关系。剖面测站运动方向变化大,龙门山断裂带的南段及中南段由西向东,剖面测站运动方向逐渐变大;断裂带的北段,剖面测站运动方向却逐渐变小;而处于两者之间的断裂带的中北段,变化特征不明显。一定程度表明断裂性质为南段及中南段为右旋走滑挤压特征。龙门山断裂带呈现出这种剖面测站运动方向差异变化特征,可能与龙门山断裂带南段地震后应力释放而北段运动受到阻挡有关。

4 结论

(1) 龙门山断裂带所在地区地震前后区域地壳运动总体趋势没变,作顺时针旋转;断裂带西侧 GPS 测站运动速度变大,东侧测站运动速度变小,西侧运动速度大于东侧。

(2) 龙门山断裂带的断裂性质地震前后都为右旋走滑挤压;断裂带运动速率受汶川地震影响较大,地震后运动速率较地震前有显著的增加。

(3) 地震后龙门山断裂带各段次级断裂活动,中南段以前山断裂的运动为主,其它各段以后山断裂的运动为主。

(4) 龙门山断裂带地震后表现出的运动特征,主要是受汶川地震的影响。由于动力学、运动学平衡被打破,早期龙门山断裂带东侧弹性回返,表现

为低速反向运动; 龙门山断裂带西侧震后松弛为拉张区, 运动速度加大, 由于地震的影响的不同, 使得的断裂带运动特征发生改变。随着应力应变的释放, 在区域构造作用下, 又进行与地震前相似的地壳运动形变。

参考文献:

- [1] 马宗晋, 张进, 任金卫, 等. 全球 GPS 矢量场的分区描述及规律性分析[J]. 地质学报, 2006, 80(8): 1089–1100.
- [2] 张培震, 王琪, 马宗晋. 中国大陆现今构造变形的 GPS 速度与活动地块[J]. 地学前缘, 2002, 9(2): 430–441.
- [3] 林茂炳, 苟宗海. 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.
- [4] 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.
- [5] 唐文清, 孙志明. 四川松潘西缘岭-漳腊盆地新构造运动[J]. 特提斯地质, 1999, 23: 103–107.
- [6] 赵小麟, 邓起东, 陈社发, 等. 龙门山逆断裂带中段的构造地貌学研究[J]. 地震地质, 1994, 16(4): 422–428.
- [7] 陈社发, 邓起东, 赵小麟. 龙门山中段推覆构造带及相关构造的演化历史和变形机制(一)[J]. 地震地质, 1994, 16(4): 404–412.
- [8] 许志琴, 侯立玮, 王宗秀. 中国松潘-甘孜造山带的造山过程[M]. 北京: 地质出版社, 1992.
- [9] BURCHFIELD B C, CHEN Z L, LIU Y P et al. Tectonics of the Longmenshan and adjacent regions [J]. International Geological Review, 1995, 8: 661–735.
- [10] CHEN SHEFA, WILSON C J L et al. Active faulting and movement associated with large earthquakes in the Min Shan and Longmen Mountains, northeastern Tibetan Plateau [J]. Journal of Geophysical Research, 1994, 9(12): 24 025–24 038.
- [11] 张培震. 青藏高原东缘川西地区的现今构造变形、应变分配与深部动力过程. 中国科学(D 辑) [J] 2008, 38(9): 1–15.
- [12] 唐荣昌, 韩渭宾主编. 四川活动断裂与地震[M]. 北京: 地震出版社, 1993: 67–138.
- [13] 张培震, 闻学泽, 徐锡伟, 等. 2008 年汶川 8.0 级特大地震孕育和发生的多单元组合模式[J]. 2009, 54(7): 944–953.
- [14] 王琪, 张培震, 牛之俊, 等. 中国大陆现今地壳运动和构造变形[J]. 中国科学(D 辑) 2001, 31(7): 529–536.
- [15] 陈智梁, 张选阳, 沈凤, 等. 中国西南地区地壳运动的 GPS 监测[J]. 科学通报, 1999, 44(8): 851–854.
- [16] 唐文清, 刘宇平, 陈智梁, 等. 龙门山断裂构造带 GPS 研究[J]. 大地测量与地球动力学, 2004, 24(3): 57–60.
- [17] 唐文清, 陈智梁, 刘宇平, 等. 鲜水河-龙门山断裂交汇区现今构造 GPS 研究[J]. 地质通报, 2005, 24(12): 1169–1172.

Active faulting along the Longmenshan fault zone after the 8.0 magnitude Wenchuan earthquake in Sichuan

TANG Wen-qing, ZHANG Qing-zhi, LIU Yu-ping, PAN Zhong-xi, LI Jun, YANG Cheng
(Chengdu Institute of Geology and Mineral Resources, Chengdu 610081, Sichuan, China)

Abstract: The overall trend and deformation of the regional crustal movements are examined on the basis of the velocity fields from the GPS monitoring stations along the Longmenshan fault zone in the years of 2009–2010, 2010–2011 and 2009–2011, respectively in combination with 2009–2011 GPS measurements after the 8.0 magnitude Wenchuan earthquake in Sichuan. The measurements of the velocity fields with GPS show that compared with the regimes of movements before the Wenchuan earthquake, no distinctive differences are observed after that about the overall trend of the regional crustal movements; the regional crustal movements still display the patterns of clockwise rotation and dextral strike slip and compression. However, the velocities of movements are noticeably increasing. The regional equilibrium of dynamics and kinematics has been destructed because of the influence of the Wenchuan earthquake. The low-velocity reverse movements occurred on the eastern side of the Longmenshan fault zone due to elastic inversion at the onset of the earthquake, while the western side of it has been in the extensional area with higher velocities of movements. The crustal movement and deformation are progressively reconstructed to the regional states before the earthquake in response to the stress-strain release in the study area.

Key words: Wenchuan earthquake; Longmenshan fault zone; GPS monitoring; velocity of movement