

汶川 8 级地震地表破裂带特征及其构造意义^{*①}

任俊杰^{1,2)} 张世民¹⁾

(1)中国地震局地壳应力研究所,北京 100085
(2)中国地震局地质研究所,北京 100029)

摘 要 利用差分 GPS 对汶川 8 级地震的地表破裂带进行了详细测量,获得了汶川地震地表破裂的空间展布特征:地震在北川-映秀断裂上形成了长约 200 km 的地表破裂带,同时也触发了灌县-江油断裂的活动,形成了长约 75 km 的破裂带。地表破裂空间展布特征表明,汶川地震起始破裂以向北东方向逆冲为主,右旋走滑量不明显,之后向北东方向破裂。

关键词 汶川 8 级地震;地表破裂带;龙门山构造带;构造意义;青藏高原

中图分类号:P315.2;P551

文献标识码:A

CHARACTERISTICS OF SURFACE RUPTURE ZONE OF WENCHUAN Ms8.0 EARTHQUAKE AND ITS TECTONIC SIGNIFICANCE

Ren Junjie^{1,2)} and Zhang Shimin¹⁾

(1) *Institute of Crustal Dynamics, CEA, Beijing 100085*
(2) *Institute of Geology, CEA, Beijing 100029*

Abstract On the basis of detail geological investigations of the surface rupture zone caused by Wenchuan Ms8.0 earthquake by use of differential GPS measurement, the characteristics of spatial distribution of surface rupture zone are known that a 200 km-long surface rupture was formed along the Beichuan-Yingxiu fault in the Wenchuan Ms8.0 earthquake. It also triggered the activity of the Guanxian-Jiangyou fault as indicated by an 75 km-long surface rupture. The distribution of earthquake surface rupture shows that the initial rupture is mainly north-east-strike thrust with a little dextral slip and the subsequent rupture is a slip with the almost equal vertical and horizontal displacement.

Key words: Wenchuan Ms8.0 earthquake; surface rupture zone; Longmenshan fault zone, tectonic implication; Tibetan plateau

1 引言

汶川 Ms8.0 地震发生在四川龙门山逆冲推覆构造带内。该构造带位于扬子板块和松潘-甘孜块体的分界线上,它北起广元、南到天全,全长 500

km,宽约 30 km^[1,2]。该构造带经历了长期的地质演化历史,具有十分复杂的结构和构造^[3,4],主要由 3 条断裂组成,自西向东依次为后山断裂(汶川-茂县断裂)、中央断裂(北川-映秀断裂)和前山断裂(灌县-江油断裂),长期的地质平均滑动速率不超过

* 收稿日期:2008-08-30

基金项目:中国地震局地壳应力研究所中央级公益性科研院所基本科研业务专项(ZDJ2007-12;ZDJ2008-37)

作者简介:任俊杰:助理研究员,博士研究生,主要研究方向为活动构造、构造地貌和地震危险性分析. E-mail: renjunjie@gmail.com

① 马保超研究员、何仲太、黄学猛、毛吕伟等一起进行野外调查和 GPS 测量工作。

1 mm/a^[5-8],但近来的 GPS 观测结果表明,断裂活动具有分段性,且南段的活动性强(5.23 mm/a),中段次之(2.77 mm/a),北段最弱(1.54 mm/a)^[9]。3 条断裂在垂直剖面上呈叠瓦状向四川盆地逆冲推覆,断裂近地表现为高角度逆冲断层,随深度向下逐渐变缓,在地下约 20 km 处 3 条断裂收敛为一条剪切带,成为青藏高原推覆于四川盆地之上的主控构造。四川盆地与龙门山之间形成的陡峭的地形差异也是该构造带新生代强烈活动的产物^[3,4]。

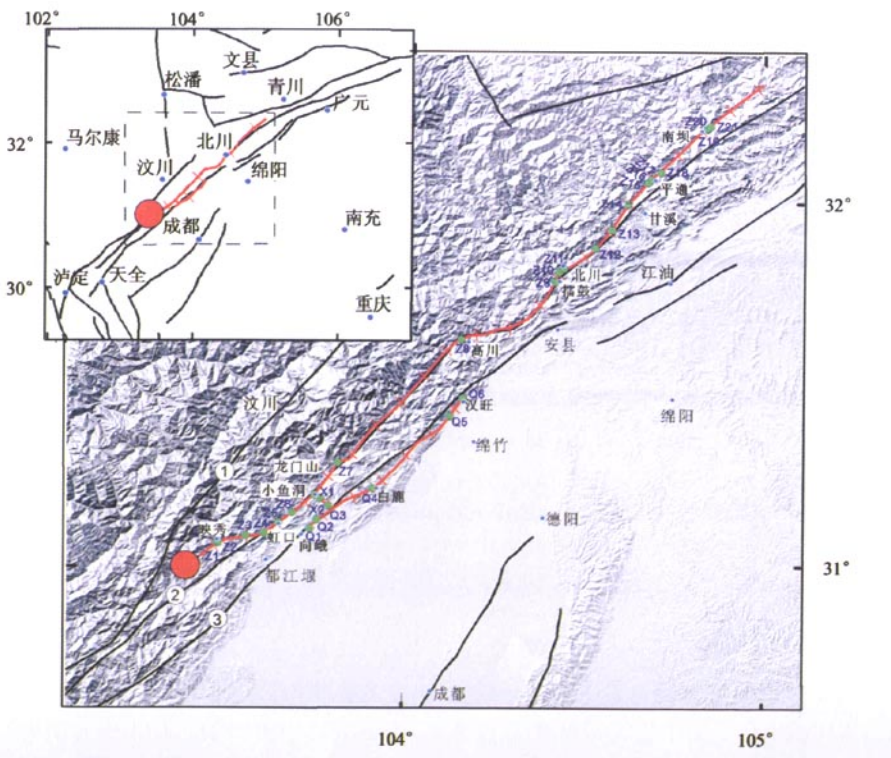
汶川 8 级特大地震发生后,我们立即开展了地震地质科学考察,第一次主要是对地震地表破裂的基本特征进行调查和测量,第二次采用差分 GPS 对第一次确定的调查点进行了详细的高精度的测量。本文通过对汶川地震地表破裂空间展布特征的分析,阐述其破裂的构造意义。

2 汶川大地震地表破裂特征

汶川大地震后,我们对映秀南至青川、广元一带的地震地表破裂情况进行了详细的调查,共确定了

29 个调查点(图 1、表 1);随后又利用南方差分 GPS 9200 测量仪和 Trimble R8 GNSS 测量仪对调查点的地表断错的水平位错和垂直位错进行了测量。南方 9200 差分测量仪测量精度在 20 cm 以内,Trimble R8 GNSS 测量仪是可以接收 GLONASS 卫星的实时差分(RTK)测量系统,测量精度在 2 cm 以内。调查点由 GPS 手持仪定位,定位精度小于 10 m。

调查结果表明,汶川大地震是龙门山断裂带的中央断裂错动的结果,地表上形成了 200 多千米长的地表破裂带;前山断裂在地震中也发生了活动,形成了长约 75 km 长的地表破裂。中央断裂和前山断裂上的地表破裂走向基本在 30°~60°之间,与断裂走向一致,水平滑动为右旋(图 1、图 2、表 1)。中央断裂地表破裂的展布与已有断裂位置在虹口至陈家坝基本重合,但在虹口以南和陈家坝以北则为新生破裂。前山断裂中段地表破裂也与已有断裂位置不一致。此外,在小鱼洞附近中央断裂上发育一条次级断裂,走向 300°~325°,水平滑动为左旋(图 2(f))。



红圈表示汶川 8 级地震微观震中,红线表示地震地表破裂带,绿点为调查点;Z1-Z21 为中央断裂带调查点,Q1-Q6 为前山断裂调查点,X1-X2 为北西向次级断裂调查点,黑线为断裂: ①后山断裂,②中央断裂,③前山断裂

图 1 汶川 Ms8.0 地震地表破裂带及区域构造特征

Fig.1 Surface rupture zone of the Wenchuan Ms8.0 earthquake and its regional tectonic characteristics

表1 汶川 Ms8.0 地震地表破裂带破裂特征一览表
Tab.1 The characteristics of surface rupture zone of the Wenchuan Ms8.0 earthquake

编号	地点	垂直位移 (m)	水平位移 (m)	水平位移性质	走向	断错标志
Z1	映秀镇西南	1.5	-	-	60°	路面
Z2	映秀镇西北	2.0	-	-	70°	路面
Z3	龙池镇南岳村	1.4	0.12	右旋	80°	路面
Z4	虹口镇深溪沟	2.75	4.8	右旋	45°	路面
Z5	虹口镇附近	2.54	2.79	右旋	45°	河流阶地
Z6	虹口镇八角庙	4.2~4.5	-	-	40°~50°	河流阶地和河漫滩
Z7	龙门山镇东林寺九峰村	2.2	2.6~4.6	右旋	45°	路面
Z8	高川乡	2.0~3.5	1.6~4.0	右旋	50~65°	河漫滩和河床倒换
Z9	擂鼓镇石燕村	1.9	1.2	右旋	50°、305°	田埂
Z10	擂鼓镇坪上村	5.1~6.1	5.9~6.9	右旋	60°	阶地
Z11	擂鼓镇凉风垭	4.5	-	-	20°	S105 省道
Z12	北川县城	3~4	-	-	40°	河流阶地
Z13	黄家坝	2.7	1.4	-	40°	河床
Z14	陈家坝镇	1.8~2.2	2.0~2.4	右旋	40°	河流阶地
Z15	桂溪镇凤凰村	2.3	2.9	右旋	40°	路面和河流阶地
Z16	平通镇木耳地	3.4~3.7	3.6~4.0	右旋	40°	阶地
Z17	平通镇西	2.2	2	右旋	30~50°	阶地和鱼池边界
Z18	平通镇大松	1	1.2	右旋	50°	路面
Z19	南坝乡一带	1.5	2.5	右旋	60°	路面
Z20	南坝乡磨湾村	1.2	1.6	右旋	45°	房院地面
Z21	南坝乡李子坝	0.85	1.3~1.4	右旋	50°	阶地
Q1	向峨镇红火村	0.2~0.3	-	-	40°	田地
Q2	向峨镇皇城村	0.2	0.45	右旋	90°	房院地面
Q3	通济镇草坝村	0.7	0.3~0.5	右旋	25°	田埂
Q4	白鹿镇	2.3	0.2~0.4	右旋	55°	河漫滩
Q5	九龙镇九龙山庄	1.5	-	-	30°	路面
Q6	汉旺镇	0.9~1.2	0.45	右旋	45~50°	阶地和路面
X1	小鱼洞镇罗阳村	1.5	1.3~1.5	左旋	325°	河流阶地
X2	小鱼洞大桥附近	1.1	0.5	左旋	300°	河漫滩

注:表中“-”表示位移量和水平运动不明显,位移范围由调查点附近区域多个地点量测得到。

在虹口八角庙(调查点 Z6)发现三叠系须家河组煤层中的断层面,断面上发育多组擦痕(图 2(b)),走向 25°~40°,倾向北西,倾角 75°~81°,侧伏向南东,侧伏角大部分 60°~90°,少数为 30°~50°,表明断层滑动以逆冲为主兼有右旋运动成分,也有两组显示逆冲兼有左旋运动,表明地震时断层曾经历过一个复杂的构造运动过程。

从汶川大地震地表破裂空间展布特征来看(表 1、图 3),中央断裂上地表破裂的垂直位移从映秀镇开始较小(小于 2 m),向北东方向逐渐增大,至虹口镇垂直位移量达到 4 m 多,之后经高川、擂鼓、北川至平通,垂直位移量基本保持在 3~4 m,再向北东方向,垂直位移逐渐减小,至南坝东北垂直位移降到

1 m 以下(表 1);水平位错从映秀起始不明显,虹口以东开始出现明显的水平位错,除北川部分地段外,水平位移与垂直位移大体相当。在青川县西南调查未见地表位错,仅发现大量的地表裂缝。中央断裂带上的破裂存在两个峰值的地方,分别在虹口和北川附近(图 3(a))。总体看来,主破裂带上的平均垂直位错量与水平位错量约为 2~3 m。

前山断裂地表破裂带垂直位错量自向峨的几十厘米向北东方向逐渐变大,至白鹿达到最大,之后向汉旺方向逐渐减小;水平位错在前山断裂表现不明显,大多在几十厘米的量级上。自汉旺以东,前山断裂的活动不明显,断裂通过处地表未见地裂缝(图 3(b))。



图中红色箭头为地震断坎；(a)虹口八角庙陡坎(Z6)，镜向 NW；(b)Z6 断层面及擦痕，镜向 N；(c)高川河床上抬高，原来的河漫滩变成河床(Z8)，镜向 SW；(d)擂鼓镇石燕村跌水(Z9)，镜向 S；(e)平通陡坎及右旋位错(Z16)，镜向 NW；(f)陈家坝 T1 阶地断坎和油菜籽地右旋水平位错(Z14)镜向 NW；(g)白鹿河床断坎(Q4)，镜向 NW；(h)小鱼洞断坎和玉米行左旋位错(X1)，镜向 SW

图 2 汶川 Ms8.0 地震典型地表破裂

Fig. 2 Typical surface rupture of the Wenchuan Ms8.0 earthquake

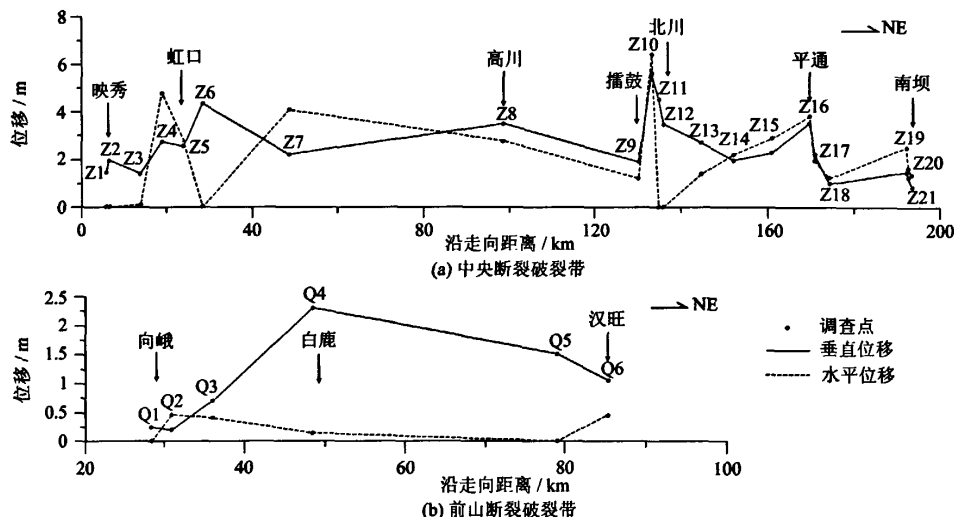


图3 汶川8级地震地表位移展布图

Fig. 3 Distribution of surface displacement of the Wenchuan Ms8.0 earthquake

3 汶川8级地震破裂的构造意义

地震地表破裂调查结果表明,汶川地震是龙门山中央断裂的中段和北段发生破裂导致的,主要是龙门山逆冲推覆体向四川盆地的逆冲作用产生了大的地表垂直位错,同时还伴有右旋滑动,即推覆体相对四川盆地向东、向北运动。这也与GPS观察结果相一致^[10,11]。从大的构造特征来看,汶川地震的最根本动力是青藏高原和华南地块之间相对运动在断裂带上产生的能量积累和释放。印度板块向北推挤,形成了青藏高原,其平均海拔超过5 000 m,地壳厚度达到60~70 km,较四川盆地(厚40 km)的地壳厚20~30 km,在这种状态下,青藏高原不易再向上升高和向下增厚,高原内部的地壳物质就会向东和向北扩展,导致高原在这两个方向上的增生^[12,13]。另外,由于强硬四川盆地的阻挡,造成下地壳物质在龙门山之下的堆积,使得青藏高原向东挤出。汶川地震的发生对青藏高原东缘的差异抬升和相对四川盆地的北东向运动起着调节作用。GPS资料显示上地壳以大约15~20 mm/a的速率从青藏高原中部向东运动而进入高原东部地区^[3]。

另外,从破裂特征的展布特征来看,汶川地震属于单向破裂,自映秀开始向北东方向破裂,起初以逆冲作用为主;之后水平右旋运动开始变强,倾滑分量和走滑分量基本相当。这与通过地震波反演结果基本一致^②。

龙门山地区近两千年以来无7级以上的强震发生,且龙门山断裂带长期平均滑动速率不大,这表明

龙门山构造带经过数千年的应变低速积累,当其超过龙门山断裂带和龙门山地壳物质的强度之后,沿龙门山断裂带的中央断裂突发破裂,从而形成巨大的汶川地震。

5 结论

汶川大地震导致了从映秀至南坝东北200 km长的地表破裂带,同时前山断裂在向峨至汉旺也形成了长约75 km地表破裂。该地震属单向破裂,从映秀开始,以倾滑作用为主,向东北方向水平位移与垂直位移基本相当。该地震的发震断裂应为中央断裂,前山断裂的破裂是中央断裂触动的结果。

从地表破裂形迹与已有断裂位置关系来看,地震的地表破裂不仅沿着已有断裂的位置发生破裂,而且在部分段落形成了新生的断裂,这应与断裂构造的受力状况变化有关。

致谢 感谢田勤俭研究员、郑文俊博士及叶建青研究员给予的帮助!

参 考 文 献

- 1 罗志立,等. 龙门山造山带的崛起和四川盆地的形成与演化[M]. 成都:成都科技大学出版社,1994.
- 1 Luo Zhili, et al. Uplift of Longmen Mountain orogenic belt and the formation and evolution of Sichuan basin [M]. Chengdu: Press of Chengdu University of Science and Tech-

② 陈运泰,等. 2008年5月12日汶川特大地震震源特性分析报告[R]. 2008.

- nology, 1994. (in Chinese)
- 2 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.
 - 2 Deng Qidong, Chen shefa and Zhao Xiaolin. Tectonics, seismicity and dynamics of Longmenshan mountains and its adjacent regions[J]. Seismology and Geology, 1994, 16(4): 389-403. (in Chinese)
 - 3 Burchfiel B C, et al. Tectonics of the Longmenshan and adjacent regions, central China[J]. International Geology Review, 1995, 37(8): 661-735.
 - 4 Burchfiel B C, 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.
 - 5 Densmore A L, et al. Active tectonics of the Beichuan and Pengguan faults at the eastern margin of the Tibetan Plateau [J]. Tectonics, 2007, TC4005, doi: 10. 1029/2006TC001987.
 - 6 Zhou R J, et al. Active tectonics of the Longmenshan region on the eastern margin of the Tibetan plateau[J]. Acta Geologica Sinica - English Edition, 2007, 81: 593-604.
 - 7 马保起, 等. 利用岷江阶地的变形估算龙门山断裂带中段晚第四纪滑动速率[J]. 地震地质, 2005, 27(2): 234-242.
 - 7 Ma Baoqi, et al. Late quaternary slip rate in the central part of the Longmenshan fault zone from terrace deformation along the Minjiang river[J]. Seismology and geology, 2005, 27(2): 234-242. (in Chinese)
 - 8 张培震, 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): 1 066-1 073.
 - 8 Zhang Peizhen, 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): 1 066-1 073. (in Chinese)
 - 9 唐文清, 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): 57-59.
 - 9 Tang Wenqing, et al. GPS study on Longmenshan fault zone [J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2004, 24(3): 57-59. (in Chinese)
 - 10 唐荣昌, 韩渭滨. 四川活动断裂与地震[M]. 北京: 地震出版社, 1993.
 - 10 Tang Rongchang and Han Weibin. Active faults and earthquakes in Sichuan Province [M]. Beijing: Seismological Press, 1993. (in Chinese)
 - 11 Zhang P, et al. Continuous deformation of the Tibetan Plateau from global positioning system data [J]. Geology, 2004, 32(9): 809-812.
 - 12 Royden L H, Burchfiel B C and van der Hilst R D. The geological evolution of the Tibetan Plateau [J]. Science, 2008, 321: 1 054-1 058.
 - 13 Clark M K, et al. Late cenozoic uplift of southeastern Tibet [J]. Geology, 2005, 33 (6): 525-528.

(上接第 46 页)

参 考 文 献

- 1 张四新, 刘文意, 王双绪. 四川西部现今地壳形变与地震[J]. 地壳形变与地震, 1998, 18(4): 48-54.
- 1 Zhang Sixin, Liu wenyi and Wang Shuangxu. Current crustal deformation field and earthquake of the west Sichuan [J]. Crustal Deformation and Earthquake, 1998, 18(4): 48-54. (in Chinese)
- 2 焦青, 等. 汶川 8.0 级地震前后龙门山断裂活动特征浅析[J]. 大地测量与地球动力学, 2008, 28(4): 7-11.
- 2 Qiao Qing, et al. Preliminary study on motion characteristics of Longmenshan fault befor and after Ms8. 0 Wenchuan earthquake[J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2008, 28(4): 7-11. (in Chinese)
- 3 唐文清, 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): 57-59.
- 3 Tang Wenqing, et al. GPS study on Longmenshan fault zone [J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2004, 24(3): 57-59. (in Chinese)
- 4 唐荣昌, 韩渭滨. 四川活动断裂与地震[M]. 北京: 地震出版社, 1993.
- 4 Tang Rongchang and Han Weibin. Active faults and earthquakes in Sichuan [M]. Beijing: Seismological Press, 1993. (in Chinese)
- 5 安其美, 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 An Qimei et al. Research of property and activity of Longmenshan fault zone[J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2004, 24(2): 115-119. (in Chinese)
- 6 陈运泰, 等. 2008 年 5 月 12 日汶川特大地震震源特征分析报告[R]. 中国地震信息网 (<http://www.xsi.ac.cn//sichuan/>), 2008-05.
- 6 Chen Yuntai, et al. Analysis report about the hypocenter characteristic of the Wenchuan earthquake happened on May 12th, 2008 [R]. China Seismic Information Net (<http://www.xsi.ac.cn//sichuan/>), 2008-05.
- 7 云南省地震局. 滇西地震预报试验场. 一九九六年丽江地震[M]. 北京: 地震出版社, 1998.
- 7 Seismological Bureau of Yunnan Province, China. The Western Yunnan Earthquake Prediction Study Area, China, The 1996 Lijiang earthquake in Yunnan, China [M]. Beijing: Seismological Press, 1998. (in Chinese)