

王卫民, 赵连锋, 李娟等. 四川汶川 8.0 级地震震源过程. 地球物理学报, 2008, 51(5):1403~1410

Wang W M, Zhao L F, Li J, et al. Rupture process of the M_s 8.0 Wenchuan earthquake of Sichuan, China. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2008, 51(5):1403~1410

四川汶川 8.0 级地震震源过程

王卫民¹, 赵连锋², 李娟², 姚振兴²

1 中国科学院青藏高原研究所, 北京 100085

2 中国科学院地质与地球物理研究所, 北京 100029

摘 要 2008 年 5 月 12 日在青藏高原与四川盆地交界的龙门山山脉发生了 M_s 8.0 级强烈地震, 引发山体滑坡等地质灾害, 造成了巨大的人员伤亡和经济损失. 本文利用远场体波波形记录结合近场同震位移数据, 根据地质资料和地震形成的地表破裂轨迹, 构造了一个双“铲状”有限地震断层模型, 利用反演技术重建地震的破裂过程. 结果显示汶川大地震主要是沿龙门山构造带的映秀—北川断裂和灌县—江油断裂发生的逆冲兼右旋走滑破裂事件. 断层面的滑动分布显示两个高滑动区先后发生在地震破坏最为严重的映秀和北川地区, 最大滑动量高达 1200~1250 cm, 且破裂过程也显示一定的复杂性. 地震破裂的平均走滑量略大于平均倾滑量, 与多种观测资料获得的震前龙门山断裂带构造变形相一致, 推断是由于长期区域应力场作用和龙门山地区特殊的物质组成和结构孕育了这次千年尺度的强烈地震.

关键词 汶川地震, 震源过程, 有限断层模型, 同震位移, 波形反演

文章编号 0001-5733(2008)05-1403-08

中图分类号 P315

收稿日期 2008-08-22, 2008-08-26 收修定稿

Rupture process of the M_s 8.0 Wenchuan earthquake of Sichuan, China

WANG Wei-Min¹, ZHAO Lian-Feng², LI Juan², YAO Zhen-Xing²

1 *Institute of Tibetan Plateau Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China*

2 *Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China*

Abstract On 12 May, 2008 the great Wenchuan earthquake with magnitude M_s 8.0 occurs on the Longmen Shan belt, which is located at the eastern margin of the Tibetan Plateau and northwestern Sichuan region of China. The strong shaking of the Wenchuan earthquake causes great disasters to life and property, and severe geologic damages, e. g. landslides and cracks to dams are inflicted. Based on the geologic studies and the surface rupture investigation, we constructed a more realistic double-listric finite-fault model, and reconstructed the source rupture process by combined inverting the teleseismic waveforms and local coseismic displacement. Results show that the Wenchuan earthquake is characterized mainly by thrust motion with right-lateral strike slip also, and two faults—Yingxiu-Beichuan fault and Guanxian-Jiangyou fault participated simultaneously during the rupture process. The estimated maximum slip on the fault can reach up to 12~12.5 m, and the distribution of slip on the faults with high magnitude can be projected to Yingxiu and Beichuan county which are severely damaged. The average strike-slip motion is a little larger than the slip motion, which is coincident with the deformation observation

along the Longmen Shan tectonic region. The long-time regional stress accumulation, the composition of this region and special tectonic structure might be the reason for this great Wenchuan earthquake with recurrence interval of thousand years.

Keywords Wenchuan earthquake, Source process, Finite-fault model, Coseismic displacement, Waveform inversion

1 引言

2008年5月12日,在四川龙门山地区汶川县境内发生了8.0级地震,造成了重大人员伤亡、地质灾害和经济损失。龙门山脉位于青藏高原东缘,是由青藏高原向东强烈挤压四川盆地而形成的高山地区。在横向不到50km的距离内该地区地形起伏达到5km以上,为青藏高原东缘最剧烈的地形梯度带。阿坝—双流人工地震剖面^[1]可看到,从青藏高原东缘松潘甘孜地块跨过龙门山到四川盆地的地壳界面起伏较大,显示为一较陡的斜坡带,地壳厚度从60~62km降至42~44km。地质学研究^[2]表明,在龙门山断裂带内主要有三条断层带,从北西向南东分别为:沿汶川—茂县的龙门山后山断裂带;沿映秀—北川的龙门山中央主断裂带;沿灌县—江油的龙门山前山断裂带(图1)。在垂直剖面上,这三条断层呈铲式叠瓦状向四川盆地推覆,在地表出露处断层倾角较高(60°~70°),沿北西方向断层倾角随着深度增加而减小。在龙门山构造带西侧深度介于20~30km处的中地壳存在一厚度为10km的低速层,这可能是地壳深部物质滑脱的拆离带^[1],这三条断层最后在深度20~30km处收敛合并成一条剪切带。地质调查表明^[2,3],龙门山构造带的几条主断裂带自晚第四纪以来均显示由北西向南东的逆冲运动,并伴有显著的右旋走滑分量。单条断层平均水平滑动量与垂直滑动量大致相当,约为1mm/yr左右。GPS观测到的跨龙门山断裂带十年时间尺度的现今构造变形不超过~2mm/yr^[4],与地质尺度的观测一致。因此在长期的北西—南东方向区域构造应力场的作用下,在龙门山断裂带积累的应变能最终以大地震的方式释放,造成极大破坏。

本文利用地震波形记录 and 同震位移资料,重建汶川大地震发生时地震断层的滑动情况,通过地震的运动学特征探讨汶川地震的发生机理。

2 有限断层模型

本文将基于有限断层震源模型^[5~9],求解汶川

地震震源破裂过程。使用的资料为:(1)地震断层的地质信息;(2)远场地震波形记录;(3)近场同震位移。

大地震发生后,通过网络从地震数据中心可及时获得全球数字地震台网地震波形记录。以四川汶川地震为例,大地震发生后约4h,从IRIS(美国地震学研究联合会)地震台网中心有较完整的汶川地震的地震波形记录资料可供下载。远场地震波形记录对地震震源破裂的时间过程有较高分辨,因此根据远场地震波形记录可迅速测定地震的破裂过程。例如美国地质调查局纪晨等于地震发生7h,在网上发布了汶川地震震源破裂过程及等震线分布结果(http://earthquake.usgs.gov/eqcenter/eqinthenews/2008/us2008ryan/finite_fault.php)。在基于有限断层震源模型求解时,断层面的走向和倾角需预先给定。我们可根据点源模型的震源机制解,或者根据野外地质调查结果,来确定断层面走向和倾角,这样可以使构造的有限断层震源模型更加符合实际情况。近场GPS同震位移和强震记录可提供较高的空间分辨率解,但资料的公开与获取往往需要较长时间,而且在多数情况下没有这方面的资料可用。

2.1 资料

对龙门山断裂的地质调查结果显示^[4,10],汶川地震发生时沿龙门山中央主断裂带从映秀镇至北川长200km的断裂贯通,产生最大垂直位移为5m,最大右旋走滑位移为4.8m,龙门山前山断裂带从都江堰至汉旺镇段长60km也发生了贯通。图2是我们使用27个P波波形记录和18个P波初动符号反演获得的震源机制解,地震矩 $M_0 = 0.652 \times 10^{21} \text{ N} \cdot \text{m}$,震源深度 $h = 15.4 \text{ km}$,其中走向229°、倾角32°、滑动角118°的一组解与龙门山断裂带的特征一致(图1),为地震断层面解,作为构造有限地震断层震源模型时的参考。点源解表明四川汶川地震时断层活动具有逆冲兼右旋走滑性质。同时,我们使用一种快速的地震破裂持续时间测定方法^[11],利用获得的远场垂向波形记录估算出汶川地震主震震源时间过程的持续时间,结果如图3所示,显示这次强烈地震的断层破裂持续时间长达110~120s。

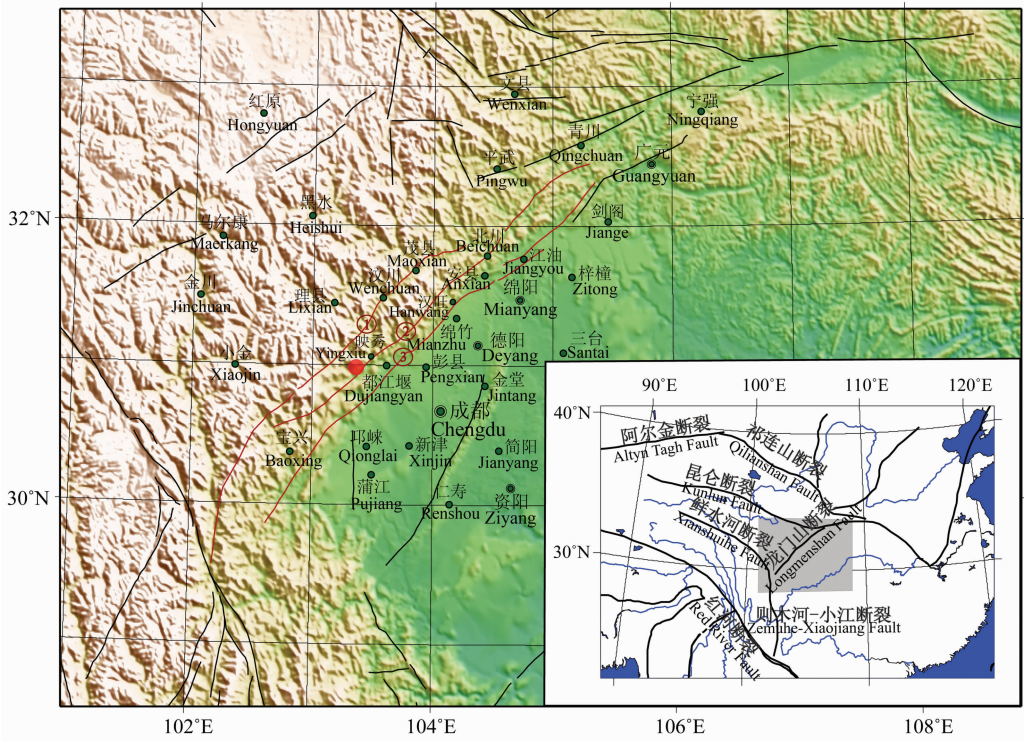


图 1 汶川地震区域构造背景

①汶川—茂县断裂,②映秀—北川断裂,③灌县—江油断裂.红色线段为龙门山断裂带^[9].红色圆圈为震中位置.

Fig. 1 Tectonic map of the Longmen Shan region, where the Wenchuan earthquake occurred

① Wenchuan - Maoxian fault, ② Yingxiu - Beichuan fault, ③ Guanxian - Jiangyou fault.

Red lines indicate the Longmen Shan fault belt region, and the epicenter of the earthquake is marked with a red circle.

2008-05-12-06:28:01

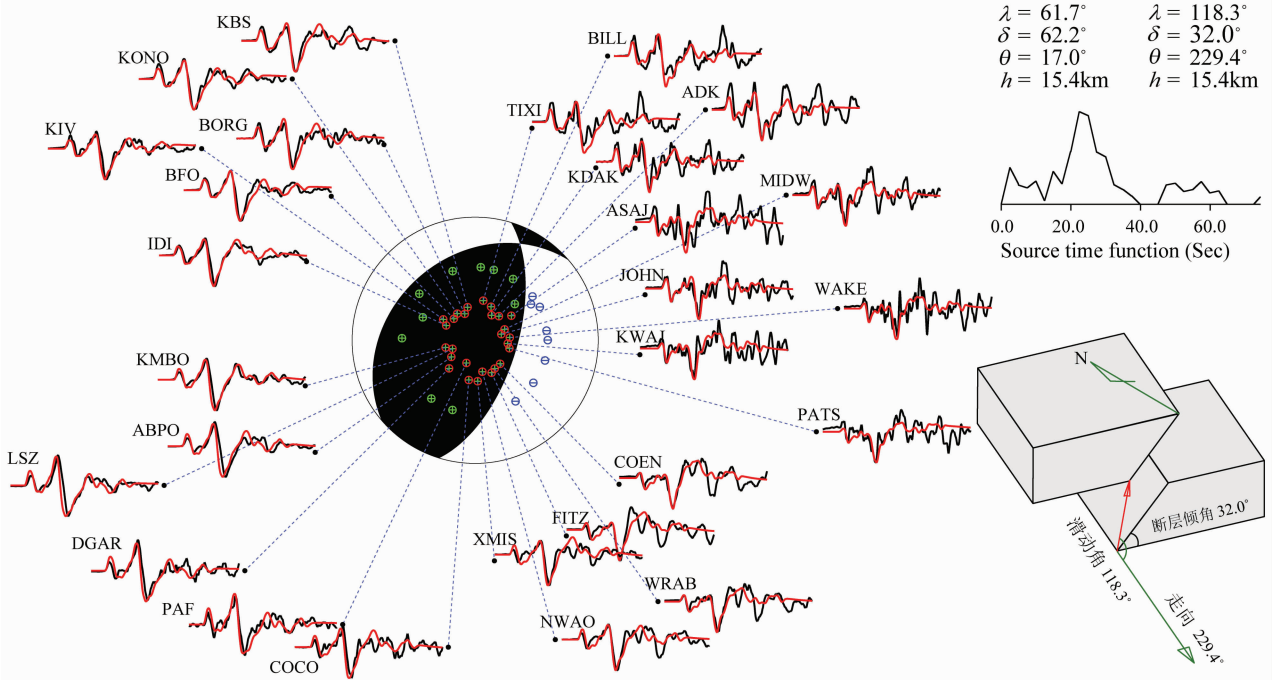


图 2 汶川地震主震震源机制解

采用下半球投影,同时给出了点源模型的 P 波垂向位移理论图(红线)与资料(黑线)的拟合情况。“+”(绿)和“-”(兰)的圆圈表示资料的初动极性及其投影位置,红色圆圈表示用于波形反演的台站的投影位置.机制解右上方给出了两组节面解($\lambda, \delta, \theta, h$ 分别表示错动倾角、断层倾角、断层走向、震源深度)和点源模型的震源时间函数.右下为断层错动示意图.

Fig. 2 Focal mechanism of the Wenchuan earthquake

Lower-hemisphere projection is used here. The observed P wave records (black line) and the synthetic seismogram (red line) based on the simple point model are compared. The green and blue circles with “+” and “-” indicate the polarity of the direct P wave, and the red circles are the projection of the stations. The parameters of two possible fault planes are listed also, with $\lambda, \delta, \theta, h$ indicating the rake angle, dip angle, strike direction and source depth respectively.

The obtained source time function and the schematic map of fault motion are plotted.

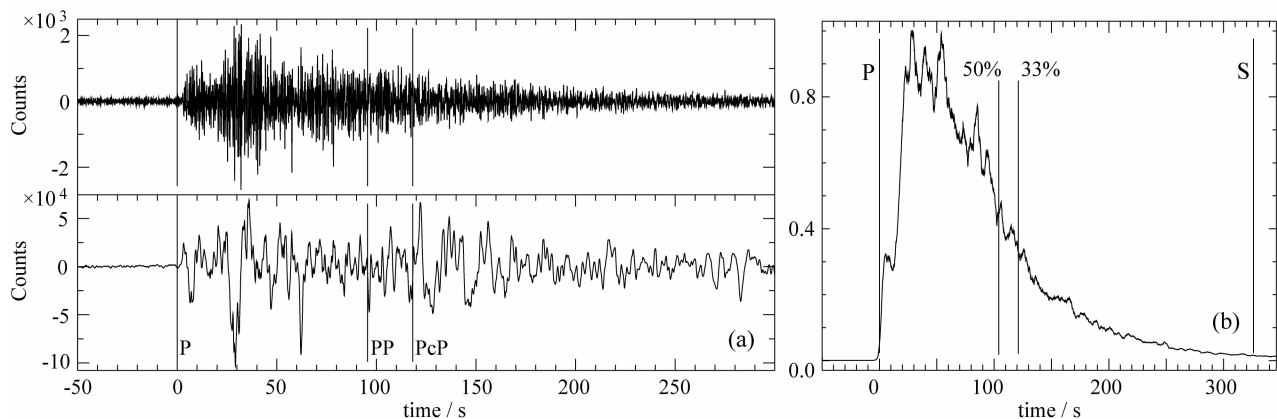


图3 利用P波高频能量测定汶川地震主震震源持续时间

(a) XMIS 台站的速度垂向波形记录(下)和1 Hz 带通滤波后的波形(上);(b) 多个远场速度记录经1 Hz 带通滤波、取平方、光滑后叠加^[11]的包络,其中标出了50%和33%包络峰值指示的震源持续时间.图中同时标出了IASPEI91模型计算的P、PP、PcP和S震相的到时.

Fig. 3 Estimation of the source duration time of Wenchuan earthquake based on the high-frequency energy of P wave

(a) For example, the recorded vertical velocity at station XMIS is shown (lower) and a narrow-band filter with central frequency of 1.0 Hz is applied to get the high-frequency components (upper), which is used for the following energy-based rupture duration estimation.

(b) After apply the processing steps-filter with 1 Hz central frequency-band, square the velocity time-series, smooth velocity-squared envelope^[11], and stack the velocity-squared envelope for all the stations, we get the estimation of the rupture duration. The 33% and 50% indicate the estimated source end time at envelope levels of 33 and 50 percent of the peak value, respectively, which give a robust estimation of the source duration. The arrival time of P, PP, PcP and S phases based on the IASP91 model are marked also.

2.2 模型几何参数

根据地质资料^[4,10]和震源机制解我们构造了一个双铲状有限断层震源模型(图4)用以模拟汶川地震时龙门山中央主断层和前山断层的破裂情况.野外地表出露的破裂面轨迹形状十分复杂,主断层面在地表的位置用一折线近似.图4给出了我们构造的断层模型的几何参数.模拟龙门山主断裂的断层长308 km,断层面宽40 km,剖分成14 km×8 km的110个子断层;模拟龙门山前山断裂带的断层长84 km,断层面宽32 km,剖分成14 km×8 km的24个子断层.起始破裂点取中国地震局发布的震源位置 $\lambda=103.364^\circ\text{E}$, $\varphi=30.986^\circ\text{N}$;深度 $h=15.5\text{ km}$.

2.3 反演结果

以野外地质调查结果作为约束,根据远场P波和SH波波形记录及37个近场同震位移观测值(资料未公开),采用非线性反演一模拟退火法,求解汶川地震发生时断层面上破裂滑动的分布情况^[8,9],结果如图5所示.图6为P与SH波理论地震图与实际记录图比较.同震位移采用Okada公式计算^[12],最终获得的理论同震位移与观测资料的水平向平均误差为3.6 cm、垂直向平均误差为5.8 cm.

由于Okada公式给出了一个矩形静力学位错在地表产生位移的解析表达式,因此在计算静态位移时无需像Liu et al.^[13]那样将断层面元划分成更小的单元.在图7中我们把双断层面震源模型投影到地面上,而其中的圆点为3.5级以上余震分布.

3 地震震源破裂过程

根据双断层面震源模型的反演结果,得到汶川地震的标量地震矩 $M_0=1.04\times 10^{21}\text{ N}\cdot\text{m}$,按Kanamori给出的公式^[14],计算相应的矩震级 $M_w=7.9$,换算成面波震级 $M_s=7.9$.沿龙门山中央主断裂带,破裂扩展的平均速度为2.7 km/s,破裂从震源向北东方向扩展至断层东北边界持续时间为110 s,与前文(图3)测定的地震震源过程持续时间一致.图8给出了在空间上汶川地震破裂随时间的扩展过程.图9为地震发生时,地震矩随时间的释放过程(相当于点源模型的震源时间函数).主震发生后7.2 s,龙门山前山断层从都江堰北部开始错动.断层面上错动矢量分布如图5箭头所示,错动以逆冲和右旋走滑为主,平均的错动量 $\Delta\bar{D}=223.4\text{ cm}$,其

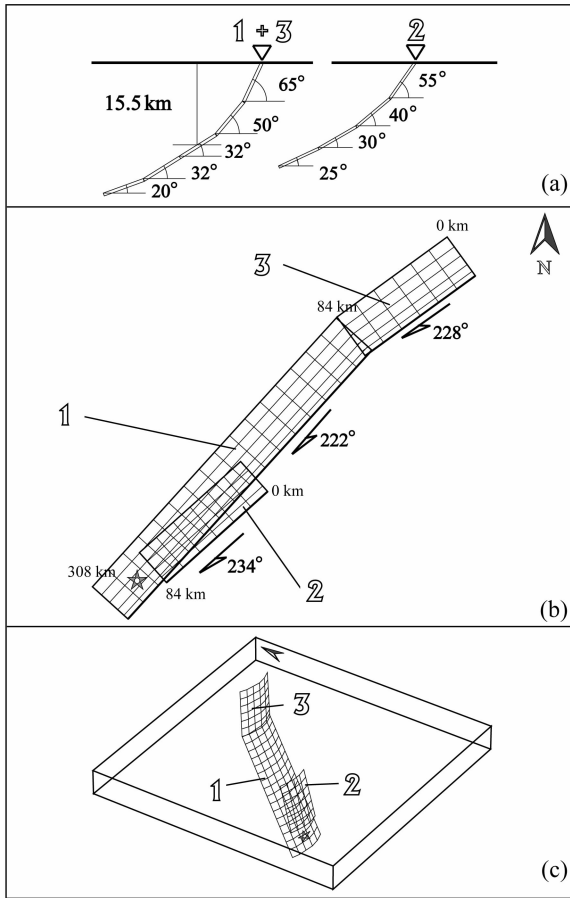


图 4 汶川地震双铲状有限断层震源模型

模型断层单元 1 和 3 模拟龙门山中央主断层,单元 2 模拟前山断层.

(a) 断层模型剖面,给出了断层面元的倾角随深度的变化,以及初始破裂的深度;(b) 断层模型的地表投影,给出了各断层单元的走向以及长度;(c) 断层模型的三维示意图.

Fig. 4 Double-lictric finite-fault model used in slip inversion for Wenchuan earthquake

Model unit 1 and 3 modeling the Longmen Shan central main fault, and unit 2 modeling the Longmen Shan front range fault.

(a) Cross section of the fault model. The dip angle varies with depth, and the initial depth of rupture is shown also;

(b) Surface projection of fault model, the strike direction and length of each subfaults are shown;

(c) 3D view of the fault model.

中平均走滑量 $\Delta D_{//} = 155.0$ cm, 倾滑量 $\Delta D_{\perp} = 118.6$ cm. 在断层面上错动分布是不均匀的,呈现几个集中区,其中两个大的破裂滑动在地面上的投影分别对应映秀—汉旺一带和北川县附近,在时间上发生在地震开始后的 12~34 s 和 40~66 s,释放的地震矩分别占到地震总能量的 37% 和 23%. 在映

秀—汉旺段,龙门山中央主断裂和前山断裂都发生了错动,前山断层在深度 9.1 km 处错动最大,达到 516 cm,中央主断层在深度 15.5 km 处达到 1249 cm 的最大错动. 龙门山前山断裂的破裂程度小于中央主断裂,这与野外观测结果^[10]相一致. 地震破裂沿龙门山主断层继续扩展至北川附近时,中央主断层深度 3.6 km 和 10.3 km 处最大错距分别达到 1043 cm 和 1200 cm. 地震断层的错距大、埋深浅、持续时间长等特点造成了该地区程度上最剧烈的地表破坏. 从图 9 可以发现,在北川附近的破裂(图 8)具有时间上的复杂性;在地震发生后约 52 s,破裂滑动出现 2~4 s 的“停滞”,然后继续向北东方向发展. 产生这种现象的原因可能是由于该区域存在某种“障碍物”,如断层几何形态发生变化,或存在与地震断层相交的隐伏断层等,这一结果有待增加时间和空间分辨率更高的近场强地面运动资料再做进一步分析和验证. 地震发生后 70 s,破裂继续向北东方向发展,但地震矩释放明显减小,95 s 后地震破裂扩展至青川县,虽未造成地表破裂,但在该地区 15.5 km 深处仍发生最大 406 cm 的错动. 110 s 后主震基本结束. 四川盆地位于逆冲断层的下盘,所以遭受的地震破坏相对较小.

4 讨论

从图 6 可以看到,基于双铲状有限断层震源模型计算得到的远场 P、SH 波理论地震图与该地震 P、SH 波波波形记录之间,近场水平、垂直方向地表的理论位移(大小和方向)与地震同震位移观测资料均能较好地吻合,说明该模型较好地反映了汶川地震发生时沿龙门山中央主断层和前山断层的破裂情况. 汶川地震是多条断层活动的结果,映秀—北川断裂和灌县—江油断裂的共同错动是导致地震产生的主要原因. 从滑动分布来看,在整个地震断层的南端,即中央主断裂的映秀周边包括前山断裂的都江堰—汉旺段,错动以逆冲为主,具有较小的走滑分量;而其他地区,除个别地段(如北川西南断层错动以逆冲为主)外,错动以逆冲兼右旋走滑为主,走滑量大于或等于倾滑量. 从地震破裂的时间过程来看,则表现为先逆冲后转为右旋走滑兼逆冲的地震事件. 这些结果与地表地质调查有很好的相关性^[10],且与龙门山山脉自晚第四纪以来的构造变形相一

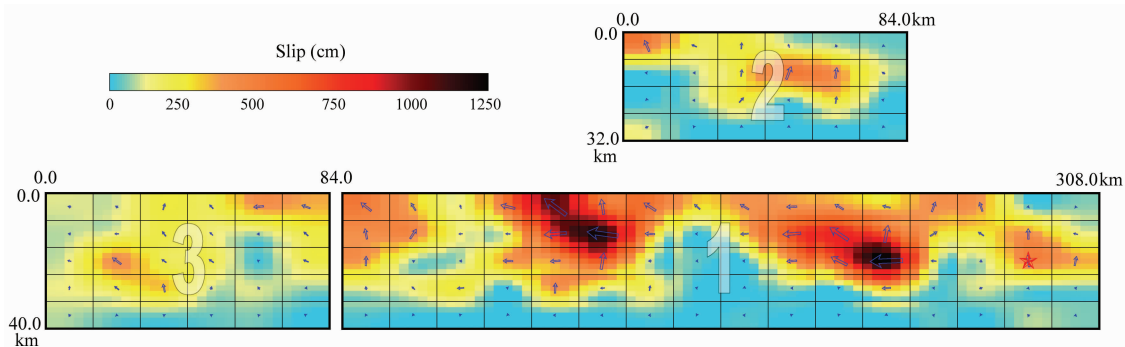


图 5 断层面上的破裂滑动分布
Fig. 5 Inverted slip distribution on the fault

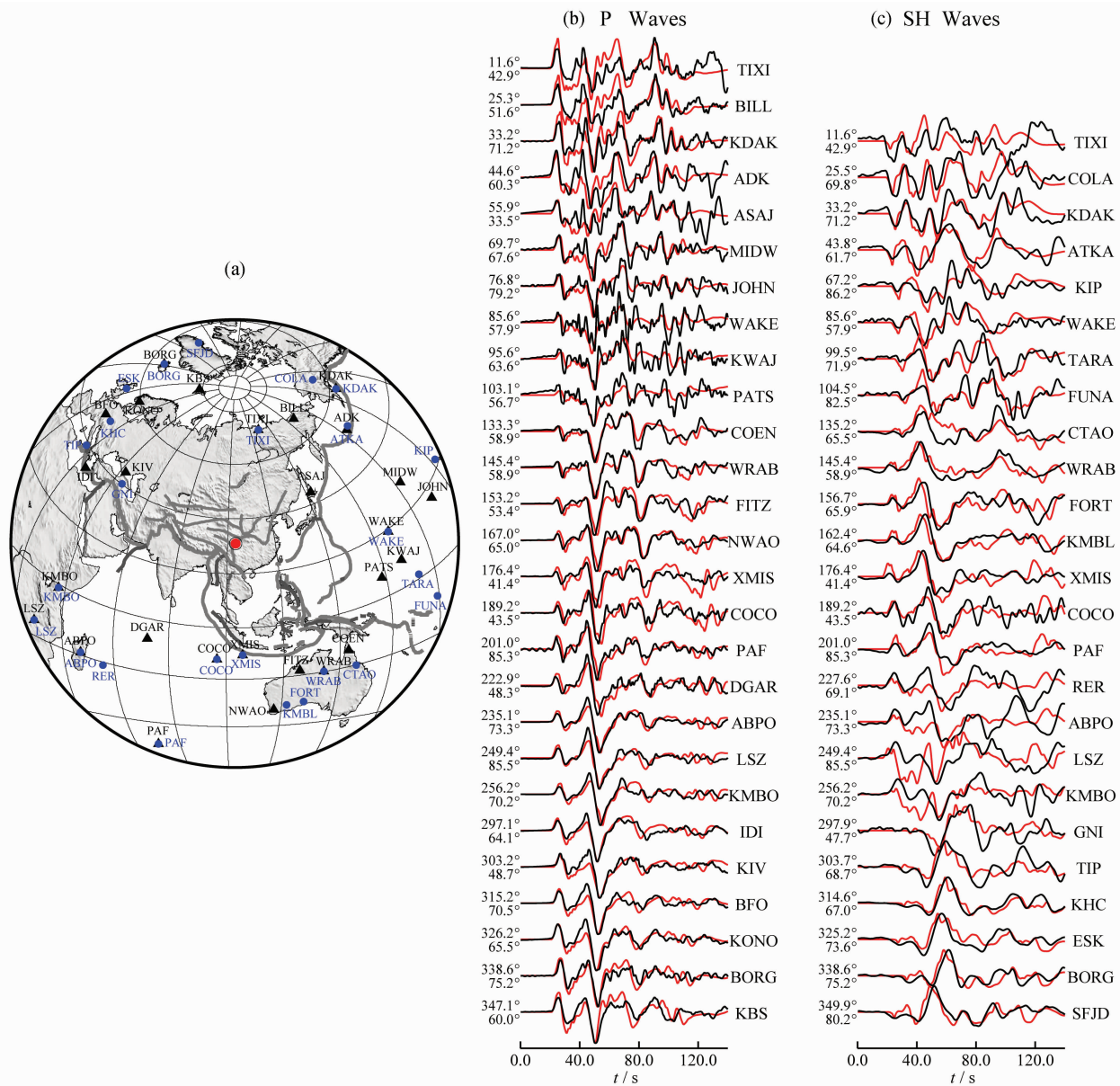


图 6 有限断层模型的远场 P 和 SH 波形拟合
(a) 台站分布, 其中黑色三角为选用 P 波记录的台站, 蓝色圆为选用 SH 波记录的台站; (b) P 波垂向位移理论图 (红线) 与记录 (黑线) 的对比; (c) SH 波切向位移理论图 (红线) 与记录 (黑线) 的对比; (b, c) 图中给出了每个记录的方位角 (左上)、震中距 (左下) 和台站名 (右)。
Fig. 6 Comparison of the observed teleseismic P and SH records with the synthetic waveforms
(a) The location of the stations (upper panel); the black triangles and blue circles represent the stations used for P wave and SH wave inversion respectively. Comparison of observed (black) and synthetic waveforms (red) for P vertical components (b), and SH components (c) are shown. The azimuth (left top), epicentral distance (left below) and station name (right) are also indicated for each waveform pairs.

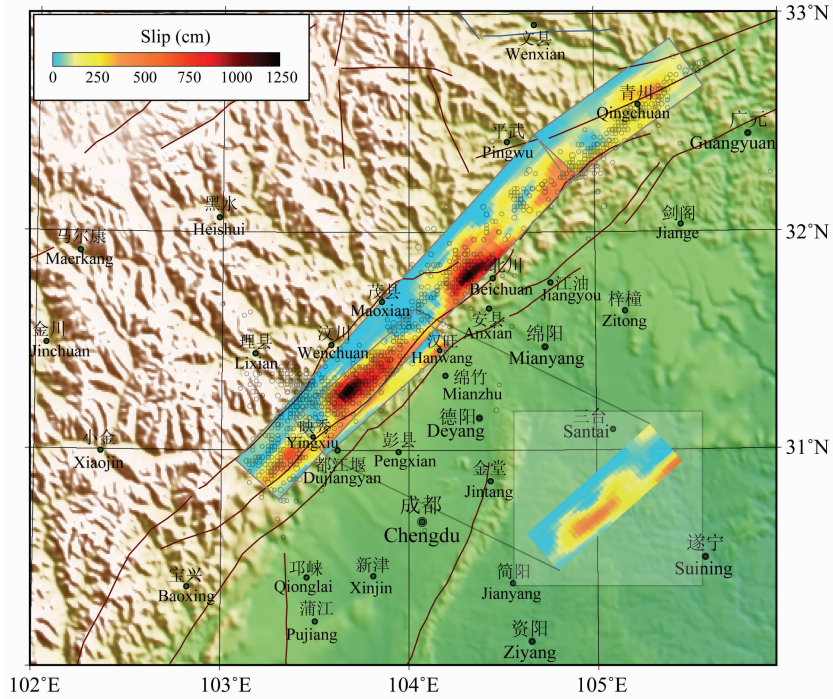


图 7 有限断层模型的破裂滑动分布投影
 黑色圆圈为主震后一月内的 3.5 级以上余震分布.

Fig. 7 Projection of rupture slip on the fault inverted by the double-lictric finite-fault model
 Aftershocks occurred in one month after Wenchuan earthquake with magnitude greater than 3.5 are marked with black circles.

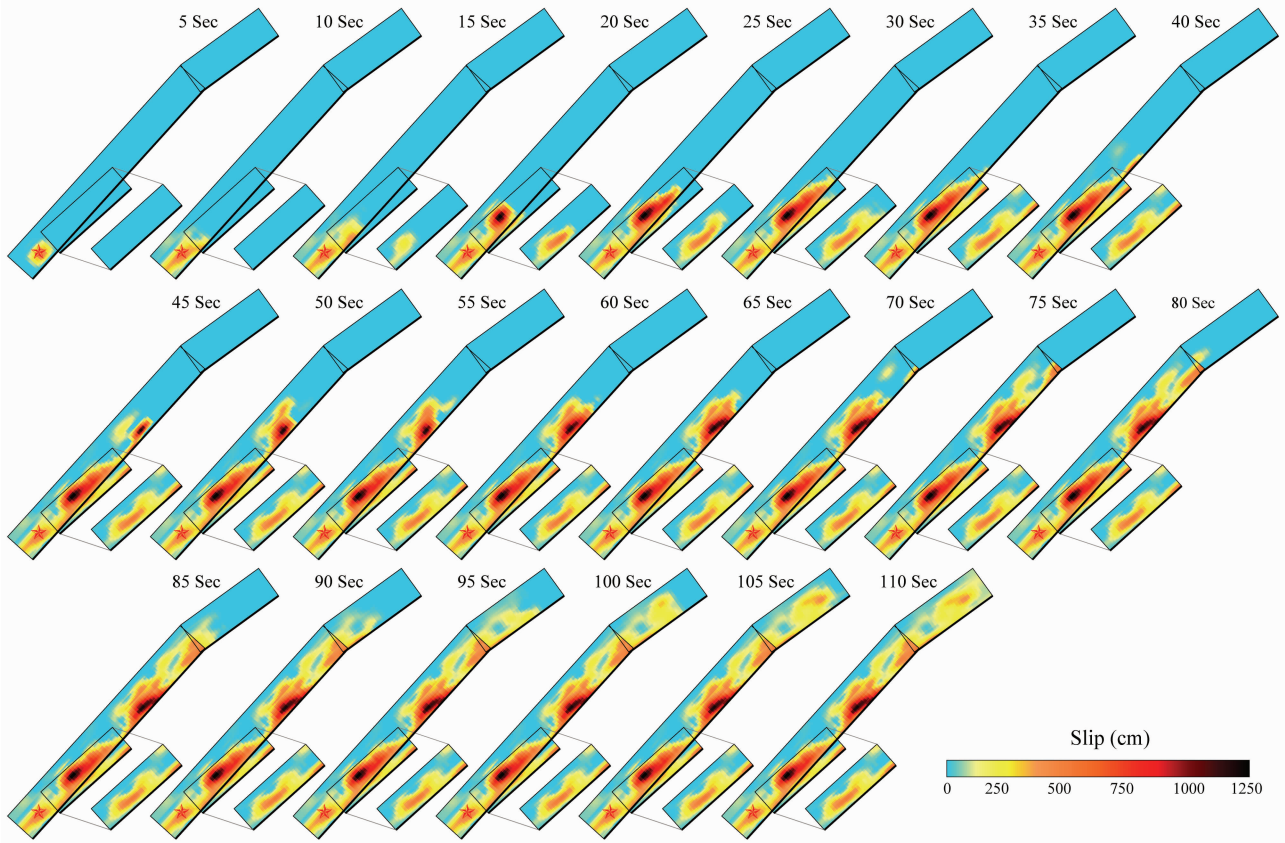


图 8 汶川地震震源破裂过程(地表投影)

Fig. 8 Rupture process snapshots of Wenchuan earthquake

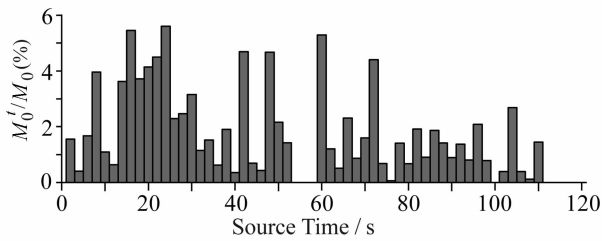


图9 汶川地震标量地震矩与时间的关系
Fig. 9 Released seismic moment varies with time for Wenchuan earthquake

致^[2,4,10],表明四川汶川地震是该地区呈北西—南东方向挤压的区域应力场长期作用的结果.震前GPS观测表明龙门山山脉单条断层带的活动速率不超过 ~ 2 mm/yr,与地震地质和历史地震记录相符^[2~4].按本文所求得平均滑动量223 cm计算,汶川地震的孕育时间已近千年.由于构成龙门山山脉的物质主要为强度特别大的变质杂岩体^[4],因而能够在很长的时间范围内积累足够大的能量,最终以大地震的形式释放.

参考文献(References)

- [1] 朱介寿. 汶川地震的岩石圈深部结构与动力学背景. 成都理工大学学报(自然科学版), 2008, **35**(4): 348~356
Zhu J S. The Wenchuan earthquake occurrence background in deep structure and dynamics of lithosphere. *Journal of Chengdu University of Technology* (Science & Technology Edition)(in Chinese), 2008, **35**(4): 348~356
- [2] 周荣军, 李勇, Alexander L等. 青藏高原东缘活动构造. 矿物岩石, 2006, **26**(2): 40~51
Zhou R J, Li Y, Alexander L, et al. Active tectonics of the eastern margin of the Tibet plateau. *J. Mineral Petrol* (in Chinese), 2006, **26**(2): 40~51
- [3] 李勇, 周荣军, Densmore A等. 青藏高原东缘大陆动力学过程与地质响应. 北京: 地质出版社, 2006
Li Y, Zhou R J, Densmore A, et al. Geodynamic Process of Eastern Margin of the Tibetan Plateau and Its Geological Responses (in Chinese). Beijing: Geological Publishing House, 2006
- [4] 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. 地球物理学报, 2008, **51**(4): 1066~1073
Zhang P Z, Xu X W, Wen X Z, et al. 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. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2008, **51**(4): 1066~1073
- [5] Hartzell S H, Heaton T H. Inversion of strong ground motion and teleseismic waveform data for the fault rupture history of the 1979 Imperial Valley, California earthquake. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 1983, **73**: 1153~1583
- [6] 姚振兴, 纪晨. 时间域有限地震断层的反演问题. 地球物理学报, 1997, **40**(5): 691~701
Yao Z X, Ji C. The inverse problem of finite fault study in time domain. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 1997, **40**(5): 691~701
- [7] Ji C, Wald D J, Helmberger D V. Source description of the 1999 Hector Mine, California earthquake, Part I: Waveform domain inversion theory and resolution analysis. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 2002, **92**(4): 1192~1207
- [8] Wang W M, He Y M, Yao Z X. Complexity of the coseismic rupture for 1999 Chi-Chi, Taiwan, Earthquake from inversion of GPS observations. *Tectonophysics*, 2004, **382**: 151~172
- [9] 王卫民, 赵连锋, 李娟等. 1999年台湾集集地震震源破裂过程. 地球物理学报, 2005, **48**(1): 132~147
Wang W M, Zhao L F, Li J, et al. Rupture process of the Chi-Chi (Taiwan) earthquake in 1999. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2005, **48**(1): 132~147
- [10] 李勇, 周荣军, 董顺利等. 汶川地震的地表破裂与逆冲走滑作用. 成都理工大学学报(自然科学版), 2008, **35**(4): 404~413
Li Y, Zhou R J, Dong S L, et al. Surface rupture, thrusting and strike-slipping in the Wenchuan earthquake of Sichuan, China. *Journal of Chengdu University of Technology* (Science & Technology Edition) (in Chinese), 2008, **35**(4): 404~413
- [11] Lomax A, Michelini A, Piatanesi A. An energy-duration procedure for rapid determination of earthquake magnitude and tsunamigenic potential. *Geophys. J. Int.* 2007, **170**: 1195~1209
- [12] Okada Y. Surface deformation due to shear and tensile fault in a half-space. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 1985, **75**: 1135~1154
- [13] Liu P C, Custodio S, Archuleta R J. Kinematic inversion of the 2004 $M_{6.0}$ Parkfield earthquake including an approximation to site effects. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 2006, **96**(4B): S143~S158
- [14] Kanamori H. The energy release in great earthquakes. *J. Geophys. Res.*, 1977, **82**: 2981~2987

(本文编辑 胡素芳)