

王卫民,李 丽,赵连锋等. 2003 年 2 月 24 日新疆伽师 M_s 6.5 级地震震源破裂过程研究. 地球物理学报, 2005, 48(2): 343 ~ 351
Wang W M, Li J, Zhao L F et al. Rupture process of Jiashi, Xinjiang earthquake (M_s 6.5) of Feb. 24, 2003. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2005, 48(2): 343 ~ 351

2003 年 2 月 24 日新疆伽师 M_s 6.5 级 地震震源破裂过程研究

王卫民¹, 李 丽², 赵连锋¹, 李 娟¹, 姚振兴¹

¹ 中国科学院地质与地球物理研究所, 北京 100029

² 中国地震局分析预报中心, 北京 100036

摘 要 利用中国数字地震台网和 Incorporated Research Institutions for Seismology (IRIS) 提供的远场宽频带 P 波垂向记录, 基于有限地震断层方法, 反演了 2003 年 2 月 24 日新疆伽师 6.5 级地震震源破裂过程. 结果表明, 本次地震为北倾低角度稍具左移分量的逆冲破裂事件, 断层面走向 300° , 倾角 28° , 震源深度 7.5 km. 其震源机制与 1997 ~ 1998 年伽师强震群有明显区别, 而与 1996 年阿图什地震相似. 推断该地震是由塔里木盆地向北挤压, 在天山造山带引发逆冲断层活动造成的.

关键词 伽师地区, 有限地震断层方法, 震源过程, 模拟退火算法

文章编号 0001 - 5733(2005)02 - 0343 - 09 **中图分类号** P315 **收稿日期** 2003 - 08 - 18, 2004 - 11 - 12 收修定稿

Rupture process of Jiashi, Xinjiang earthquake (M_s 6.5) of Feb. 24, 2003

WANG Wei-Min¹, LI Li², ZHAO Lian-Feng¹, LI Juan¹, YAO Zhen-Xing¹

¹ Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China

² Center for Analysis and Prediction, China Earthquake Administration, Beijing 100036, China

Abstract The rupture process of Jiashi, Xinjiang earthquake of Feb. 24, 2003 was estimated by the finite fault model using far field broadband P wave records of CDSN and IRIS. The results indicate that the earthquake focus a north-dipped thrust fault with left-lateral strike slip. The fault plane has a strike of 300° and a dip of 28° . The focal depth is 7.5 km. The focal mechanism of this earthquake is different from that of the earthquakes occurred in 1997 and 1998, but similar to that of Artux, Xinjiang earthquake of 1996. We proposed that this earthquake was caused by thrust fault due to the northward pushing of Tarim basin and orogeny of Tianshan Mountain.

Key words Jiashi region, Finite seismic fault model, Rupture process, SA method

1 引 言

1996 年 3 月 19 日阿图什地震之后, 位于帕米尔高原东北侧、南天山山前、塔里木盆地北缘的喀什凹陷及周边地区, 进入一个新的地震活动期^[1]. 处于该

区域的新疆伽师地区在 1997 年 1 月至 4 月间连续发生了 6 次 6 级以上强震, 1998 年 8 月再次发生 6.4 级地震. 1996 年发生在南天山山前构造带的阿图什地震是由一个断层面走向 252° 倾角 30° , 具有较小走滑分量的单侧逆冲破裂事件引起, 破裂过程较复杂^[2]; 而 1997 ~ 1998 年伽师强震群发生在南天山南

基金项目 国家自然科学基金项目(40374016)和中国科学院院长基金(957 号)联合资助.

作者简介 王卫民, 男, 1971 年生, 1993 年桂林工学院勘查地球物理系毕业, 2000 年在中国地质大学(北京)获硕士学位, 2003 年在中国科学院地质与地球物理研究所获博士学位, 主要从事地震学方面的研究. E-mail: wangwm@mail.igcas.ac.cn

缘塔里木盆地一侧的平原地区,地震多为走滑,部分为正断层机制,与阿图什地震有明显差异,这些地震破裂过程简单,持续时间短,表现为快速的脆性破裂特征,每次地震的应力降偏低^[3,4].伽师地区强震活动频繁,与该区所处的大地构造环境和局部特殊的地壳、上地幔结构密切相关,天山造山带夹持在古老而稳定的准格尔地块和塔里木地块之间,持续隆起并向两侧扩展,向南逆冲于塔里木地块之上,在南天山山前和塔里木盆地北缘形成逆冲断裂和褶皱带^[5];在伽师地区地壳厚度变化显著,上地幔存在局部隆起^[6],中下地壳存在低速带^[7,8].

在塔里木向北、南天山向南和帕米尔向东北的联合推挤作用下,2003年2月24日伽师地区又发生 $M_s 6.5$ 级地震.本文根据全球和中国数字地震台网的远场 P 波记录,用波形反演方法给出该地震断层的滑动矢量(错距与倾伏角)分布、破裂轨迹等结果,并根据该区域的构造地质背景、GPS 年变数据及余震分布特征,讨论该地区中强地震与构造活动的关系,尝试对此次地震的发震机理给予合理的解释.

2 地震断层的破裂过程与反演

地震断层的破裂从震源处开始沿断层面面向外扩展.由于断层面上介质物理性质的变化,破裂向外扩展过程并不均匀.断面上的粗糙部位(称为凹凸面)、破裂方向的改变及其他复杂性特征等因素都会对断层破裂造成障碍,这些阻碍破裂传播的部位也被称为障碍物.在破裂沿断层面传播过程中,有些障碍被克服;有些障碍保持不破,破裂前锋可以绕过未破裂的障碍物在远处造成破裂,破裂面继续向外扩展.这些未破裂障碍物也可能在主震结束之后一段时间再发生破裂,形成余震^[9-11].由此可见,若能清晰地认识中强地震震源破裂过程,则有可能对判断伴随强余震发生位置有所帮助,且障碍物在断面上的分布情况也将为地震应力触发研究提供定量的依据^[12,13].

对于一个中强地震,可用 $L \times W$ 的矩形断层描述(L 和 W 分别为断层的长度(沿走向)和宽度(沿倾向)).断层面走向和倾角可根据 P 波初动符号,等震线长轴方向及余震分布确定.为了描述地震断层的破裂过程,可将断层面划分成 $N_L \times M_W$ 块断层面元(N_L 、 M_W 分别为沿断层走向和倾向方向的块数).叠加每个断层面元的理论地震图,可获得有限地震断层产生的理论地震记录.根据实际地震记录,由波

形反演最终可求解出地震断层的破裂过程.

Hartzell et al.^[14]、Hertzell 和 Liu^[15]、姚振兴和纪震^[16]、何玉梅等^[2]的研究工作结果表明,使用远场宽频带数字地震记录,利用波形反演方法可获得有限地震断层破裂过程的详细情况,这是因为宽频带数字地震仪 BH 频道所含高频成分较为丰富之故.但前人的工作经常使用带通滤波对记录资料进行预处理,舍弃了其中的高频成分,这就有可能造成振幅谱的畸变,降低结果的分辨率.本文不对记录作滤波处理,采用 0.1s 采样间隔的记录波形进行反演,以期获得较高分辨率的结果.

2.1 正演计算

2.1.1 面元的格林函数

在震中距 (Δ) 范围为 $30^\circ < \Delta < 90^\circ$ 的远场范围内,根据广义射线理论^[17],P 波垂直方向的位移 w_z 为

$$w_z = \frac{M_0}{4} \sum_{m=0}^2 A_m(\Delta, \delta, \phi) G_m(t) * I(t) * A(t, t^*),$$

$$G_m = \left(\frac{R_{pz}}{R} \right) [P_m^+ \dot{S}(t) + P_m^- r_{pp} (\dot{S}(t - t_p)) + SV_m^- r_{sp} \left(- \dot{S}(t - t_s) \right)], \quad (1)$$

这里,

$$A_m = \left[\frac{1}{2} - p^2 \right]^{\frac{1}{2}},$$

$$= \left[\frac{1}{2} - p^2 \right]^{\frac{1}{2}},$$

$$t_p = 2h,$$

$$t_s = h(\delta + \phi),$$

其中 M_0 为标量地震矩, ρ 为介质密度, $A_m(\Delta, \delta, \phi)$ 为方向性因子, δ 为断层面倾角, ϕ 为错动方向倾伏角, Δ 为断层走向的方位角; G_m 分别表示 45° 倾滑 ($m=0$), 正倾滑 ($m=1$) 和走滑 ($m=2$) 断层对应的格林函数; $I(t)$ 为仪器脉冲响应, $A(t, t^*)$ 为吸收因子. R_{pz} 为 P 波接收函数, $1/R$ 为几何扩散因子, $\dot{S}(t)$ 为远场震源时间函数, P_m^+ , P_m^- 和 SV_m^- 分别表示下行 P 波、上行 P 波和上行 SV 波的震源系数; r_{pp} , r_{sp} 分别为 pP 波和 sP 波在自由表面的反射系数. t_p 为 pP 波相对直达 P 波的走时差, t_s 为 sP 波相对直达 P 波的走时差, h 为震源相对自由表面的深度, v_p 、 v_s 分别为介质的 P 波和 S 波速度, p 为与震中距有关的射线参数.

2.1.2 面元的叠加过程

在将断层面划分成 $N_L \times M_W$ 块面元后,叠加每

个断层面元的理论地震图,可获得有限地震断层产生的理论地震记录,有

$$f(t) = \sum_{i=1}^{N_L} \sum_{j=1}^{N_W} \left[\frac{M_0}{4} A_m(\theta, \phi, \delta) G_m(t - t_{i,j}) \right]_{i,j} * I(t) * A(t, t^*), \quad (2)$$

这里,

$$t_{i,j} = - \left[(x_s \sin A_Z + y_s \cos A_Z) p + y_s \sin A_Z \right] + R_s / v,$$

$$x = x_s \sin A_Z + y_s \cos A_Z \cos \delta,$$

$$y = x_s \cos A_Z - y_s \cos A_Z \sin \delta,$$

$$R_s = \sqrt{x_s^2 + y_s^2},$$

其中, $t_{i,j}$ 为面元 (i, j) 的破裂开始时间相对破裂起始处 (i_s, j_s) 的时间延迟, A_Z 为台站方位角, x_s, y_s 和 R_s 分别为面元 (i, j) 相对破裂起始处 (i_s, j_s) 沿 x 方向(沿断层走向)、 y 方向(沿断层倾向)和断层面的距离, v 为破裂传播速度。

2.2 反演计算

反演采用模拟退火算法(SA 算法),该方法适于解决非线性反演问题,具体步骤如下:

(1) 给定模型 m 每一分量 m_i 的变化范围 $[A_i, B_i]$, 在这个范围内随机选择一个初始模型 m_0 , 计算相应的目标函数 $E(m_0)$, 目标函数 e 采用观测记录与理论地震图的相关系数,它对地震体波振幅的绝对大小并不敏感,而强调波形拟合,有

$$e = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \left[1 - \frac{\int f_k(t) O_k(t) dt}{\sqrt{\int (f_k(t))^2 dt \int (O_k(t))^2 dt}} \right], \quad (3)$$

其中, N 为反演使用的台站数, $f_k(t), O_k(t)$ 分别为第 k 个台站的理论和观测垂向纪录。

(2) 对当前模型 m_0 进行扰动,产生一个新的模型 m , 并计算相应的目标函数 $E(m)$,

$$m_i = m_i + (B_i - A_i) u,$$

其中, u 是柯西分布函数

$$= T \text{sign}(u - 0.5) ((1 + 1/T)^{|u-0.5|} - 1),$$

式中 m_i 为当前模型第 i 个分量, m_i 为新模型的第 i 个分量, u 为 $[0, 1]$ 之间均匀分布的随机数, T 为温度, $\text{sign}(x)$ 为 x 的符号函数。

(3) 计算 $E = E(m) - E(m_0)$, 若 $E < 0$ 则接收新模型 m , 若 $E > 0$, 则新模型 m 按概率 $e^{(-E/T)}$ 进行接收。当模型 m 被接收, 则置 $m_0 = m$, $E(m_0) = E(m)$ 。

(4) 在温度 T 下, 重复一定次数的扰动过程, 即重复(2)和(3)。

(5) 按一定规律缓慢地降低温度 T 。

(6) 重复(2)~(5), 直至满足收敛条件。

在断层面走向、倾角固定条件下, 对于每一断层元, 共有 4 个变量, 分别为倾伏角 δ , 错距 D , 破裂传播速度 v 和上升时间 t_0 , 因此共有 $4 \times N_L \times N_W$ 个变量待求解。

3 结果分析

许多研究机构和学者给出了 2003 年 2 月 24 日新疆伽师 6.5 级地震的震源参数(见表 1)。本文采用中国地震局地球物理研究所定位结果^[18](北纬 39.58°, 东经 77.33°)作为震源位置(图 1)。根据 P 波初动和一个单断层模型试算, 我们确定的地震断层走向为 300°, 倾角 28°, 滑动方向 95°, 震源为一北倾逆冲断层。

表 1 2003 年 2 月 24 日新疆伽师地震震源参数

Table 1 The mechanism solution of the February 24, 2003 Jiashi, Xinjiang earthquake

| | 经度(°) | 纬度(°) | 地震矩(10^{18} N m) | 走向(°) | 倾角(°) | 滑动方向(°) | 深度(km) | |
|----------------------|-------|-------|---------------------|-------|-------|---------|--------|----|
| 中国地震目录 | 77.33 | 39.58 | | | | | 8 | |
| 美国哈佛大学 (Harvard) | 77.24 | 39.37 | 3.7 | 节面 | 239 | 33 | 62 | 24 |
| | | | | 节面 | 92 | 61 | 107 | |
| USGS | 77.23 | 39.61 | 2.8 | 节面 | 273 | 6 | 99 | 6 |
| | | | | 节面 | 84 | 84 | 89 | |
| 高国英等 ^[19] | 77.27 | 39.62 | | 节面 | 272 | 50 | 134 | |
| | | | | 节面 | 47 | 50 | 48 | |
| 本文 | 77.33 | 39.58 | 4.9 | 300 | 28 | 95 | 7.5 | |

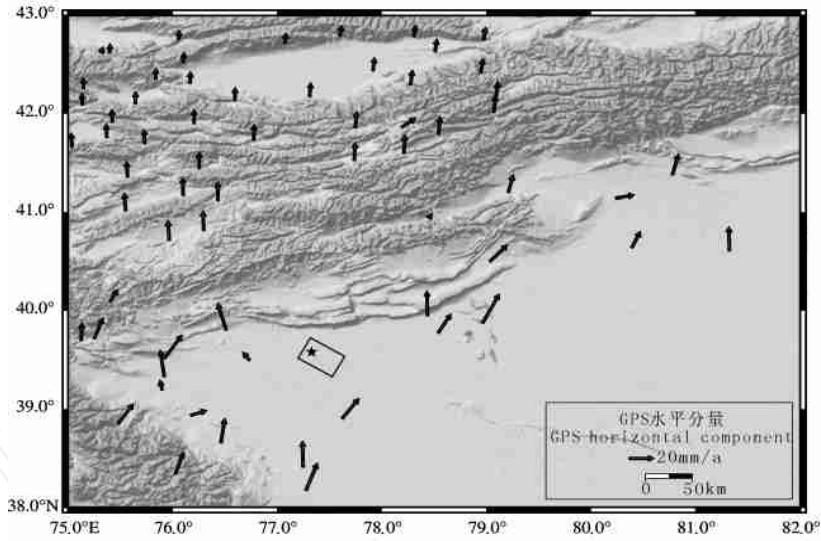


图 1 新疆伽师地区地形及 2003 年 2 月 24 日 6.5 级地震震源位置

图中星号代表主震震源位置 (中国地震局地球物理研究所定位结果) (下同). 箭头表示该地区相对于欧亚大陆板块的 GPS 水平位移速度场 (1991 ~ 2001 年)^[20]. 黑线框为本次研究采用的有限断层模型在地表的投影.

Fig. 1 Topography of Jiashi, Xinjiang and epicenter of Feb. 24, 2003 earthquake

Star indicates the epicenter (Results from IGPCEA). Arrows indicate GPS horizontal velocity vectors with respect to stable Eurasia (1991 ~ 2001)^[20]. Black line frame denote the projected region of finite fault model on surface.

图 2 为地震断层的几何模型. 首先采用 $6\text{ km} \times 6\text{ km}$ (7×5 块) 的有限断层模型 (M1) 进行反演. 从波形拟合结果来看 (图 3), M1 可以较好地合成该地震的远场 P 波垂向记录, 但记录资料和理论图的振幅谱分析 (图 4) 则显示模型 M1 的理论图振幅谱在 $0.5 \sim 1.0\text{ Hz}$ 段明显偏低, 且未能反映记录资料振幅谱的细节.

为了有效利用宽频带记录信息, 进一步获得破裂的细节. 我们根据模型 M1 的结果采用 $2\text{ km} \times 2\text{ km}$ (21×15 块) 断层模型 (M2) 进行反演. 记录的拟合度 (图 3) 较模型 M1 有明显改善, 从振幅谱可以看出, 模型 M2 的理论图振幅谱与记录的频谱吻合较好, 在 $0.5 \sim 1.0\text{ Hz}$ 段较模型 M1 有明显改善 (图 4). 当频率 $f > 1\text{ Hz}$ 时, 无论模型 M1 还是模型 M2 理论图的振幅谱均小于记录图的振幅谱, 这是因为在计算理论图时, 我们仅采用了简单的半无限介质模型, 没有考虑地壳结构对波传播的影响.

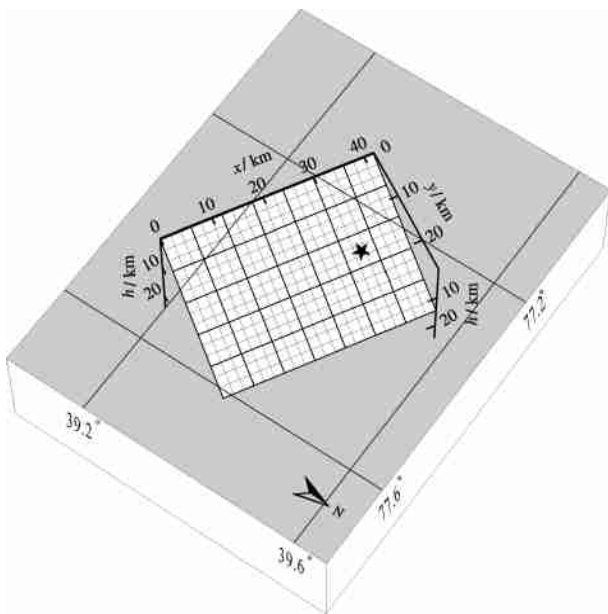


图 2 断层几何模型

Fig. 2 Geometry of the earthquake fault model

图 5a 和 5b 分别为反演计算得到的模型 M1 和模型 M2 断层面上剪切滑动分布. 模型 M1 的结果反映了地震断层剪切滑动的宏观分布, 模型 M2 的结果则进一步刻画了断层破裂的细节. 从破裂的时空过程来看 (图 6), 这次地震主要表现为由西向东扩展的单侧破裂特征, 发震后 $0 \sim 5\text{ s}$ 破裂主要沿断面向东侧和浅部扩展, 平均滑动量约 40 cm , $5 \sim 10\text{ s}$ 模型中部段层面上出现一个滑动较小的“间隙”, $10 \sim 14\text{ s}$ 在震源东侧约 20 km 处出现面积较大的滑动量高值区, 最大滑动量约 97 cm ; 16 s 以后破裂基本不再扩展. 从滑动分布来看, 这次地震主要有两个相距约 20 km 的高滑区, 其中西侧破裂较小, 而东侧破裂幅值和梯度都较大.

图 5c 和 5d 分别为反演得到地破裂前锋和滑动

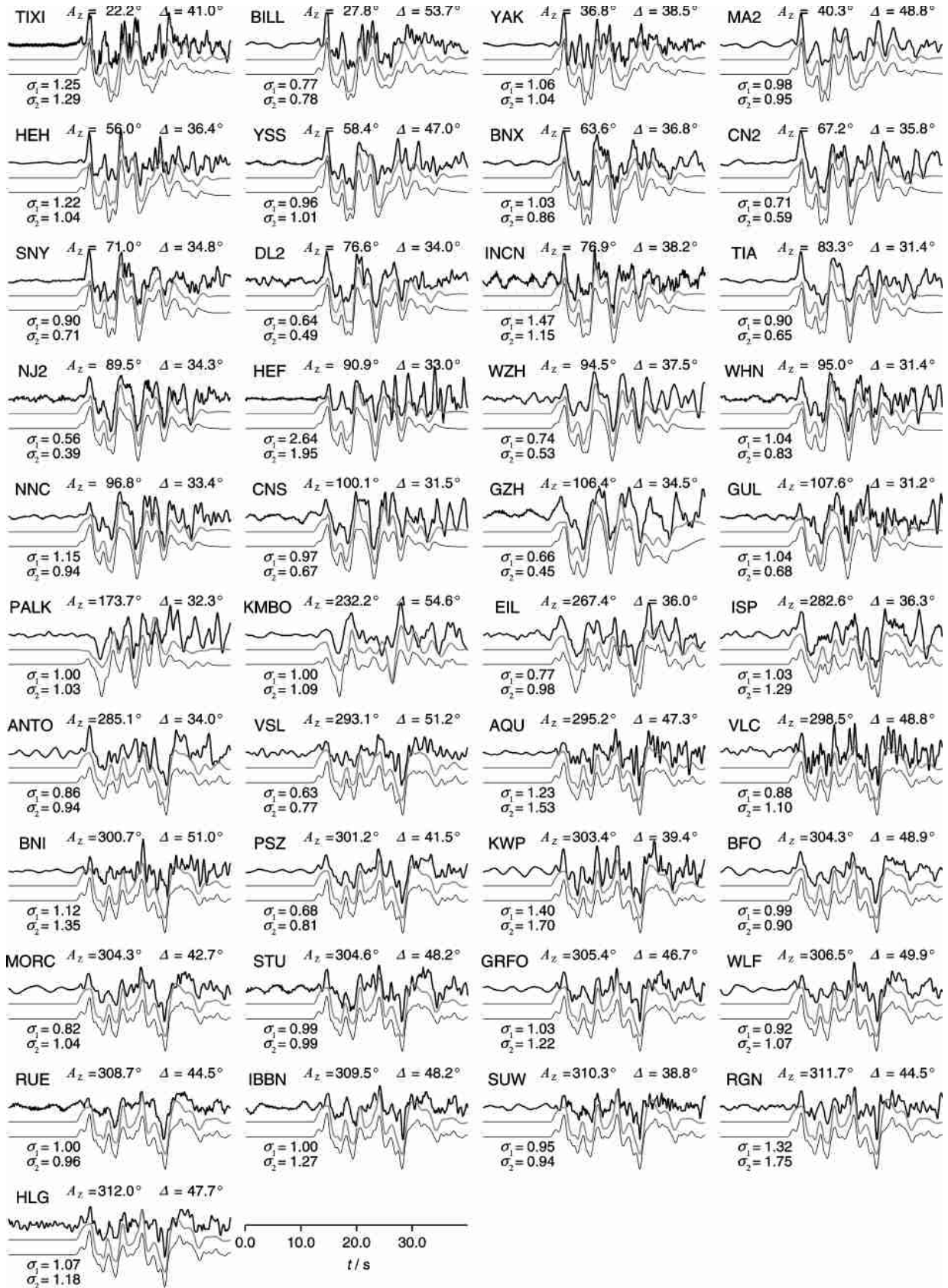


图3 不同尺度有限断层模型的理论地震图与观测波形的对比

σ_1 和 σ_2 分别为模型 M1 和 M2 的观测记录与理论波形振幅比, TIXI, BILL 等为台站, 黑色粗线为归一化宽带带垂向地震记录, 黑色细线为模型 M2 的归一化理论垂向波形, 灰色线为模型 M1 的归一化理论垂向波形.

Fig. 3 Comparison of the observed and synthetic records for multi-scale finite fault models

σ_1 and σ_2 indicate the amplitude ratio of observed and synthetic records for Model M1 and M2, respectively; TIXI, BILL etc. are stations; Black heavy lines indicate the normalized observed BHZ records, black light lines indicate the normalized synthetic BHZ records of Model M2, and gray lines indicate the normalized synthetic BHZ records of Model M1.

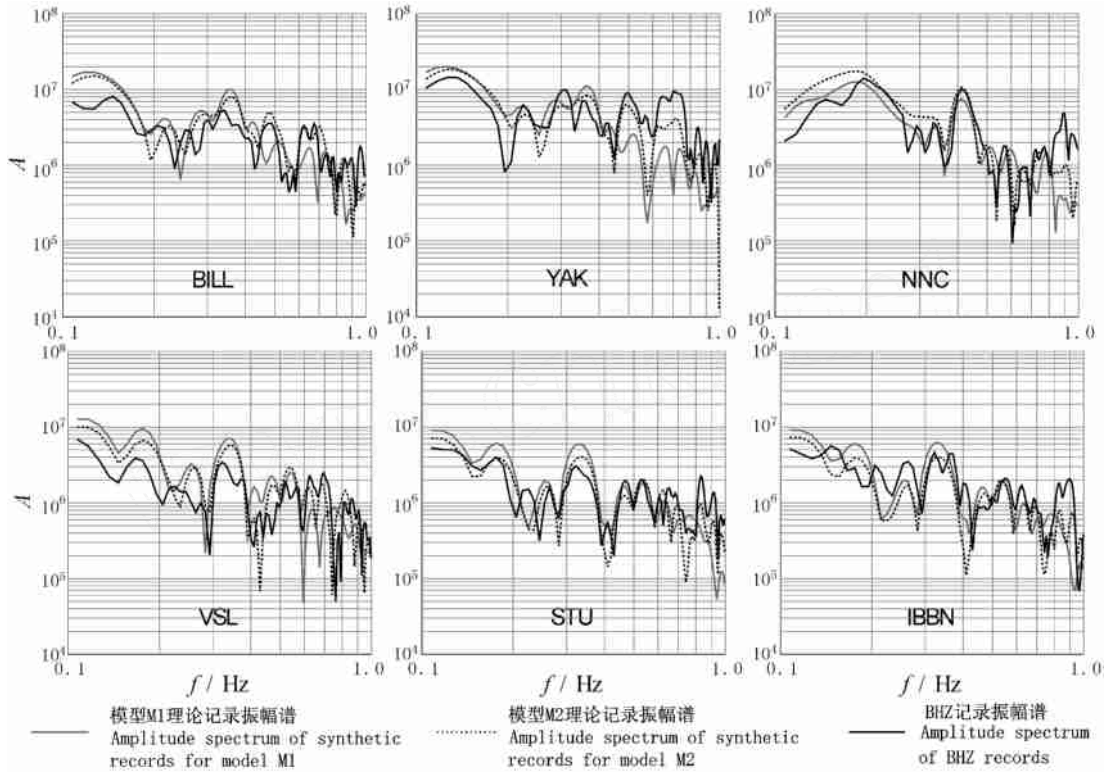


图 4 部分台站 P 波记录与理论波形振幅谱 A
Fig. 4 Amplitude spectrum of observed and synthetic records in some stations

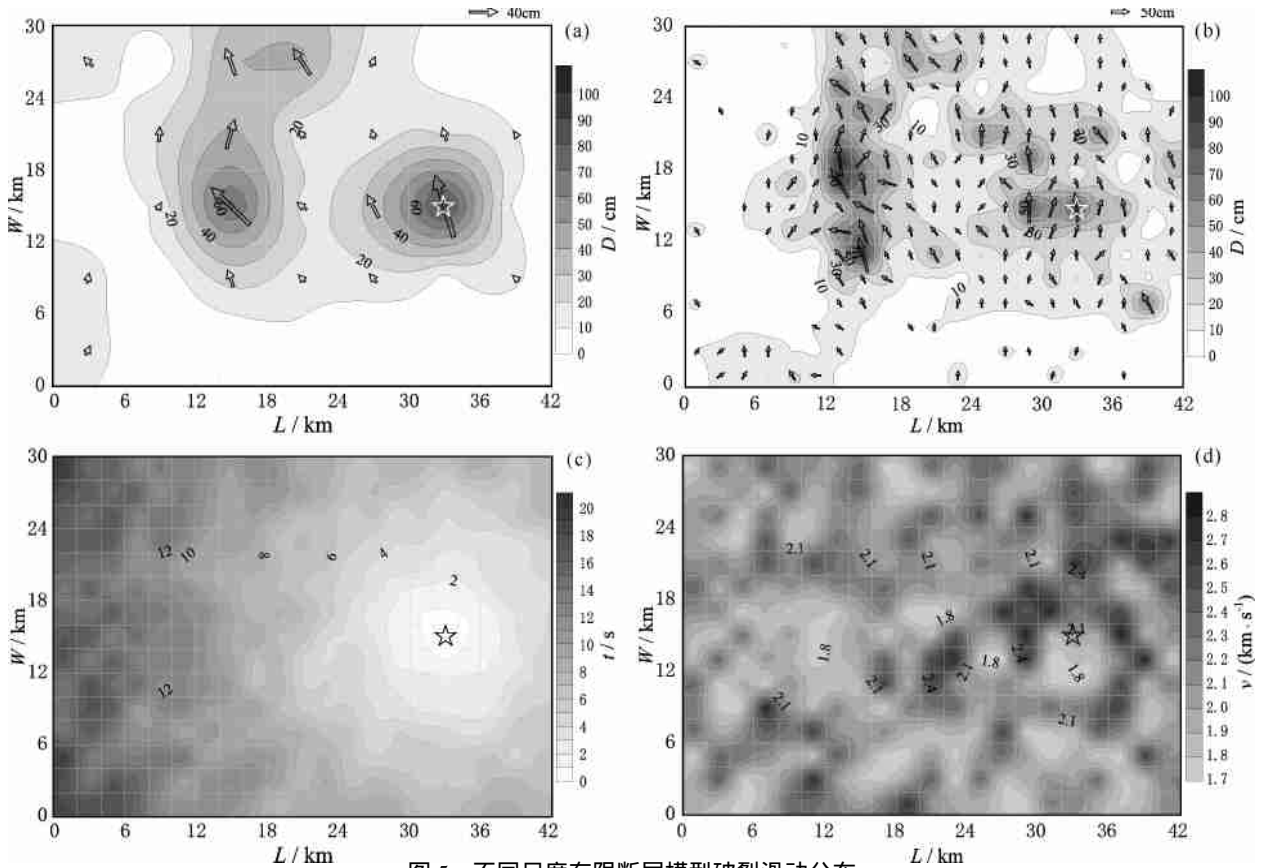


图 5 不同尺度有限断层模型破裂滑动分布
(a) 模型 M1 破裂滑动分布; (b) 模型 M2 破裂滑动分布; (c) 模型 M2 破裂前锋; (d) 模型 M2 破裂速度分布; 箭头表示断层面上破裂滑动方向和幅值大小。
Fig. 5 Slip distribution for multi scale finite fault models
(a) Distribution of shear slip for Model M1; (b) Distribution of shear slip for Model M2; (c) Rupture front for Model M2; (d) Distribution of rupture velocity for Model M2; Vectors indicate rake and amplitude of shear slip.

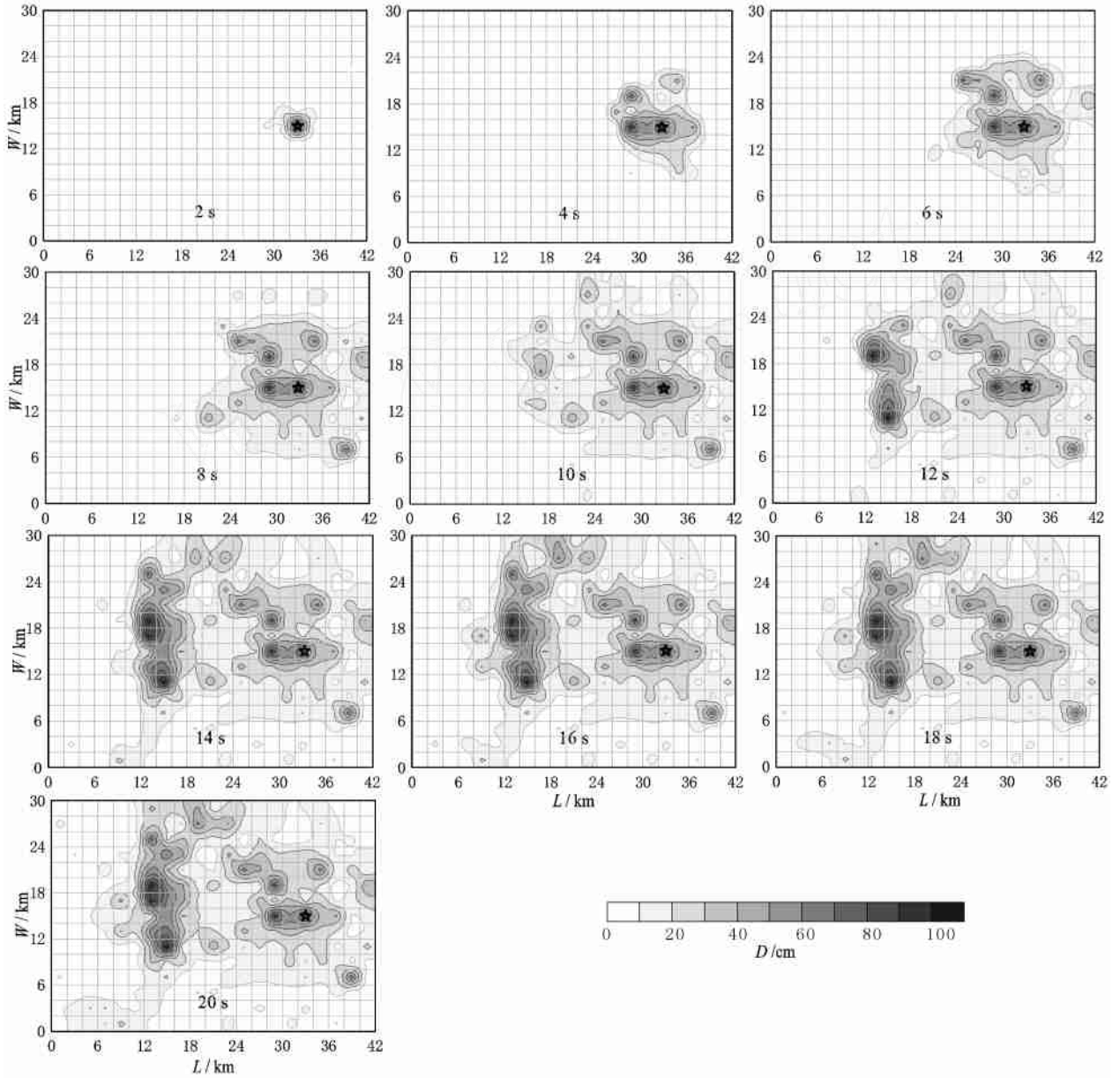


图 6 震源破裂过程(模型 M2)
 Fig. 6 Rupture process (Model M2)

速度分布. 根据反演结果计算的标量地震矩为 $4.9 \times 10^{18} \text{ N m}$.

对比图 7 中给出的 2003 年 2 月 24 日伽师 M_s 6.5 级地震余震分布(中国地震台网目录, 2003 年 2~6 月), 反演得到的剪切滑动和余震大体呈负相关分布, 即模型断层东北侧和西南侧滑动量较小, 而余震发生频繁; 在破裂滑动幅值变化较大的梯度带上也分布较多的余震. 以上说明这些位置在主震发生时, 由于存在“障碍物”, 破裂发展受到阻挡, 应力降较少, 易引发余震.

4 讨论

近期 GPS 观测资料^[20,21] 显示南天山以及塔里木均向北运动, 但形变速率不同, 表现为由南向北逐渐递减(图 1). 天山地区的山体抬升至今仍在继续, 而塔里木则处于沉降区^[8]. 表明天山造山带地壳构造形变十分剧烈, 而地壳形变速率相差最大的造山带与盆地的结合部位, 也正是地震活动比较强烈的地区. 对比该地区 1996 年至今发生的 6 级以上地震可以发现, 1996 年 3 月 19 日阿图什 M_s 6.9 级地震^[2]

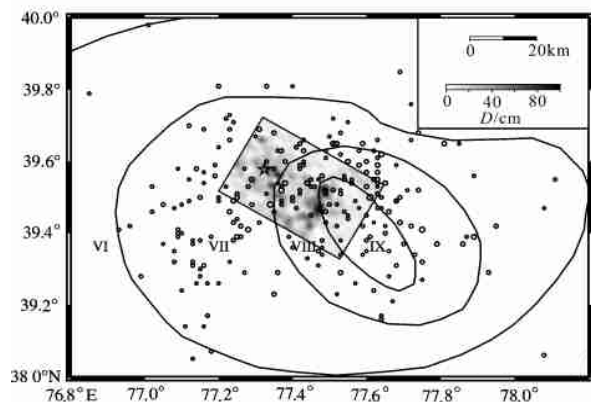


图 7 反演得到的剪切滑动(模型 M2)与余震分布(中国地震目录)

图中同时给出了地震烈度等震线(VI, VII, VIII, IX)^[19].

Fig. 7 Distributions of shear slip from inversion (model M2) and aftershocks (CSN)

The isoseismals (VI, VII, VIII and IX) are also plotted on figure.

与本次地震都属于主余型地震,且震源机制(北倾、低角度、具左移分量的逆冲型断层,由西向东的单侧破裂)、余震分布,甚至远场 P 波记录等特征都十分相似. 1996 年阿图什地震发生在靠近天山的已知活动断层上,而本次地震发生在靠近塔里木盆地一侧的戈壁深部,说明这一碰撞挤压过程向南一直延伸到塔里木盆地内部. 从 2003 年 2 月 24 日这次地震的滑动分布来看(图 5),主震发生时东侧的高滑动区没有进一步向东扩展,可能是受一条北东向的隐伏构造带阻挡,形成一个滑动量突降的梯度带.

刘启元等^[6]利用流动台站获得的新疆伽师强震群区地壳上地幔速度结构表明:从塔里木盆地到南天山山前褶皱区地壳厚度明显增大,塔里木北缘存在明显的不均匀性,壳幔界面与地表地形特征有较好的相关性. 本次地震的发生可能和 1996 年阿图什地震同为塔里木盆地向北挤压,天山造山带活动、山体抬升形成的逆冲断层造成,其分别发生在碰撞造山带的南北两侧. 而 1997 到 1998 年伽师强震群^[3]多发生于上述两地震之间的地区,且它们的震源机制差别较大,应属于天山造山带次级构造活动和该地区壳幔上部的不均匀性共同作用的结果.

参考文献(References)

[1] 马淑田,姚振兴,纪晨. 1996 年 3 月 19 日新疆伽师 M_S 6.9 地震的震源机制及相关问题研究. 地球物理学报, 1997, 40(6): 783~789
Ma S T, Yao Z X, Ji C. The focal mechanism solution for March 19, 1996 M_S 6.9 earthquake in Xinjiang, Jiashi region and related problems. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 1997, 40(6):

783~789

- [2] 何玉梅,郑天愉,单新建. 1996 年 3 月 19 日新疆阿图什 6.9 级地震:单侧破裂过程. 地球物理学报, 2001, 44(4): 510~519
He Y M, Zheng T Y, Shan X J. The 1996 Artux, Xinjiang, earthquake: a unilateral-rupture event. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2001, 44(4): 510~519
- [3] 单新建,何玉梅,朱燕等. 新疆伽师强震群的震源破裂特征. 地震地质, 2002, 24(1): 59~68
Shan X J, He Y M, Zhu Y, et al. Characteristics of focal rupture of the Jiashi strong earthquake swarm. *Seismology and Geology* (in Chinese), 2002, 24(1): 59~68
- [4] 周仕勇,许忠淮. 由震源谱推断 1997 年新疆伽师强震群破裂特性. 地震学报, 2000, 22(2): 113~124
Zhou S Y, Xu Z H. Fracture characteristics of the 1997 Jiashi, Xinjiang, China, earthquake swarm inferred from source spectra. *Acta Seismologica Sinica* (in Chinese), 22(2): 113~124
- [5] 张培震,邓启东,张国民等. 中国大陆的强震活动与活动地块. 中国科学(D 辑), 2003, 33(增刊): 12~20
Zhang P Z, Deng Q D, Zhang G M, et al. Active tectonic blocks and strong earthquakes in China continent. *Science in China* (Ser. D) (in Chinese), 2003, 33 (Suppl.): 12~20
- [6] 刘启元,陈九辉,李顺成等. 新疆伽师强震群区三维地壳上地幔 S 波速度结构及其地震成因的探讨. 地球物理学报, 2000, 43(3): 356~365
Liu Q Y, Chen J H, Li S C, et al. Passive seismic experiment in Xinjiang Jiashi strong earthquake region and discussion on its seismic genesis. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2000, 43(3): 356~365
- [7] 张先康,赵金仁,张成科等. 帕米尔东北侧地壳结构研究. 地球物理学报, 2002, 45(5): 665~671
Zhang X K, Zhao J R, Zhang C K, et al. Crustal structure at the northeast side of the Pamirs. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2002, 45(5): 665~671
- [8] 胥颐,刘福田,刘建华等. 天山地震带的地壳结构与强震构造环境. 地球物理学报, 2000, 43(2): 184~193
Xu Y, Liu F T, Liu J H, et al. Crustal structure and tectonic environment of strong earthquake in the Tianshan earthquake belt. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2000, 43(2): 184~193
- [9] Takeo M. Rupture process of the 1980 Ius-Hantoro-Toho-Oki earthquake deduced from strong motion seismograms. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 1988, 78(3): 1074~1091
- [10] Yoshida S. Waveform inversion for rupture process using a non-flat seafloor model: application to 1986 Andreanof Island and 1985 Chile earthquake. *Tectonophysics*, 1992, 211(1): 45~59
- [11] Zeng Y, Anderson J G. A composite source modeling of the 1994 Northridge earthquake using genetic algorithm. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 1996, 86(1B): S71~S81
- [12] Nalbant S S, Hubert A, King G C P. Stress coupling between earthquake in northwest Turkey and north Aegean Sea. *J. Geophys. Res.*, 1998, 103: 24469~24486

- [13] US Geological Survey, Southern California Earthquake Center, California Division of Mines and Geology. Preliminary report on the 16 October 1999 $M7.1$ Hector Mine, California, earthquake. *Seismol. Res. Lett.*, 2000, **71**: 11 ~ 23
- [14] Hartzell S. Comparison of seismic waveform inversion results for the rupture history of a finite fault: application to the 1986 North Palm Springs, California, earthquake. *J. Geophys. Res.*, 1989, **94**: 7515 ~ 7534
- [15] Hartzell S, Liu P C. Calculation of earthquake rupture histories using a hybrid global search algorithm: application to the 1992 Landers, California, earthquake. *Phys. Earth Planet. Inter.*, 1996, **95**: 79 ~ 99
- [16] 姚振兴, 纪 晨. 时间域内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
- [17] Langston C A, Helmberger D V. A procedure for modeling shallow dislocation source. *Geophys. J.* 1975, **42**: 117 ~ 130
- [18] 陈培善. 全球大震和中国及邻区中强震地震活动(2003年2~3月). 地震学报, 2003, **25**(4): 449 ~ 450
Chen P S. Strong earthquake activity all over the world and strong-moderate earthquake activity within and near China (February, 2003 ~ March, 2003). *Acta Seismologica Sinica*, 2003, **25**(4): 449 ~ 450
- [19] 高国英, 聂晓红, 夏爱国. 2003年伽师6.8级地震序列特征和震源机制的初步研究. 中国地震, 2004, **20**(2): 179 ~ 186
Gao G Y, Nie X H, Xia A G. Preliminary Study on Characteristics of the Jiashi Earthquake Sequence with M_s 6.8 and Its Focal Mechanism Solution in 2003. *Earthquake Research in China* (in Chinese), 2004, **20**(2): 179 ~ 186
- [20] Wang Q, Zhang P Z, Jeffrey T F, et al. Present-day crustal deformation in China constrained by Global Positioning System measurements. *Science*, 2001, **294**: 574 ~ 577
- [21] Addrakhmatov K Y, Aldazhanov S A, Hager B H, et al. Relatively recent construction of the Tien Shan inferred from GPS measurements of present-day crustal deformation rates. *Nature*, 1996, **384**(5): 450 ~ 453