

刁桂苓, 王晓山, 高国英等. 以震源机制类型划分汶川、玉树地震构造块体归属. 地球物理学报, 2010, **53**(8):1778~1783, DOI: 10.3969/j.issn.0001-5733.2010.08.003

Diao G L, Wang X S, Gao G Y, et al. Tectonic block attribution of Wenchuan and Yushu earthquakes distinguished by focal mechanism type. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2010, **53**(8):1778~1783, DOI:10.3969/j.issn.0001-5733.2010.08.003

以震源机制类型划分汶川、玉树地震构造块体归属

刁桂苓¹, 王晓山¹, 高国英², 聂晓红², 冯向东¹

¹ 河北省地震局, 石家庄 050021

² 新疆维吾尔自治区地震局, 乌鲁木齐 830011

摘 要 2001 年 11 月 14 日昆仑山口 7.8 级地震、2008 年 3 月 21 日于田 7.1 级和 5 月 12 日的汶川 7.9 级地震, 全部发生在青藏高原中部, 构成新的地震活动组. 昆仑山口和汶川地震分别位于巴颜喀拉活动地块的北部和东部边界, 于田地震发生在该地块的西端. GPS 的观测资料分析表明该块体整体向东运动. 发生在块体不同部位的昆仑山口、于田和汶川 3 次大地震震源机制类型体现了巴颜喀拉块体活动力学的一致性. 汶川主震和强余震发生之前, 出现于田序列余震的强度和频度显著增高, 进一步证实同一活动地块地震之间的内在联系. 2010 年 4 月 14 日玉树发生 6.9 级地震, 连同 1996 年 11 月 19 日的喀喇昆仑山口 6.9 级地震和 1997 年 11 月 18 日玛尼 7.5 级地震, 都发生在巴颜喀拉活动地块的南部边界上, 震源机制表现为一致的左旋走向滑动, 证实它们属于羌塘块体向东运动的结果. 事实表明活动块体具有整体运动的性质, 而整体运动也是两组各自 3 次大地震成组活动的原因.

关键词 汶川地震, 玉树地震, 震源机制, 构造块体归属, 成组活动, 块体整体活动

DOI:10.3969/j.issn.0001-5733.2010.08.003

中图分类号 P315

收稿日期 2010-04-30, 2010-07-16 收修定稿

Tectonic block attribution of Wenchuan and Yushu earthquakes distinguished by focal mechanism type

DIAO Gui-Ling¹, WANG Xiao-Shan¹, GAO Guo-Ying², NIE Xiao-Hong², FENG Xiang-Dong¹

¹ Earthquake Administration of Hebei Province, Shijiazhuang 050021, China

² Earthquake Administration of Xinjiang Uygur Autonomous Region, Urumqi 830011, China

Abstract The November 14, 2001 M_w 7.8 Kunlun Mountain Pass earthquake, the March 21, 2008 M_w 7.1 Yutian earthquake and the May 12, 2008 M_w 7.9 Wenchuan earthquake all occurred in the middle of Tibet Plateau and formed a new seismicity group. The epicenter of Kunlun Mountain Pass Earthquake and Wenchuan Earthquake was located at the northern and eastern boundary of Bayankala Block respectively and the Yutian earthquake on the western end of it. GPS observational data indicate that this block moves to east. The rupture characteristics of the three large earthquakes in different parts of the block suggest the mechanical consistency of the Bayankala block motion. The intensity and frequency of Yutian aftershocks significantly increased before the main shock and the stronger aftershock of Wenchuan earthquake, which proves that there is an internal relation between the three large earthquakes. The April 14, 2010 M_w 6.9 Yushu earthquake, the November 19, 1996 M_w 6.9 Karakorum mountain earthquake and the November 18, 1997 M_w 7.5 Mani earthquake all occurred on the southern boundary of Bayankala block, and their focal mechanisms are consistently left-lateral strike slip, which were caused by

the eastward motion of Qiangtang block and formed a new strong earthquake group. The results show that the block has the character of rigid body motion which is the common origin of the two large earthquake groups.

Keywords Wenchuan earthquake, Yushu earthquake, Focal mechanism, Tectonic block attribution, Group activity, Rigid body motion

1 引言

华北地区自公元前 780 年至 1978 年发生的 6 级以上地震存在时间相近、地点集中、成组发生的现象,成组地震占全部地震的比例达到 73%^[1]. 同样,中国大陆西部自公元前 193 年至 1991 年的 7 级以上地震,以成组活动的概率也达到 70%^[2]. 青藏高原的变形和构造活动是当今地质研究的热点之一,大地震则是构造最新活动的表现. 自 2001 年 11 月 14 日昆仑山口 7.8 级地震起,2008 年 3 月 21 日于田 7.1 级和 5 月 12 日的汶川 7.9 级地震,全部发生在青藏高原中部. 根据中国大陆形成于晚新生代、晚第四纪至现今强烈活动的构造带所分割和围限、具有相对统一运动的地质单元划分出活动地块^[3],青藏高原是一级活动地块,进一步将青藏高原由南向北分别划分为 6 个二级活动地块:喜马拉雅、拉萨、羌塘、巴颜喀拉、柴达木和祁连. 昆仑山口地震和汶川地震都位于巴颜喀拉活动地块的边界上,于田地震发生在该地块的西端,构成一个强震成组活动. 2010 年 4 月 14 日玉树发生 6.9 级地震,连同 1996 年 11 月 19 日的喀喇昆仑山口 6.9 级地震和 1997 年 11 月 18 日玛尼 7.5 级地震,都发生在巴颜喀拉活动地块的南部边界上,也形成一个强震成组活动. 因此许多人认为这些都属于巴颜喀拉地块的活动. 但是后一组强震活动从破裂类型上看都是左旋走向滑动,与巴颜喀拉块体向东的运动方式矛盾. 本文将从震源机制解的类型出发,探讨这两组强震活动的构造块体归属,进而分析这两组强震活动的动力学成因.

2 震源机制类型分析

2001 年 11 月 14 日昆仑山口 7.8 级地震的野外考察发现^[4]:地震地表破裂带沿 $N100^{\circ} \pm 10^{\circ}E$ 走向线性展布,全长约 426 km. 显示出纯剪切走滑的破裂特征,最大左旋水平位移 7.6m. 和哈佛大学 CMT 解近 EW 向的直立节面纯左旋走滑的运动方

式一致(图 1). 2008 年 3 月 21 日于田 7.1 级地震的 CMT 解是正断层错动,根据 $M_s \geq 4.0$ 余震震中分布区长轴呈 NE 方向,判断西倾的 NE 向节面是断层面^[5],断层的 NW 盘下降(图 1). 汶川地震形成了长达 300 km 的破裂带,其中 240 km 出露地表,破裂带具有逆冲抬升和右旋走滑双重属性,最大垂直错距和右旋水平错距分别达到 6.2 m 和 4.9 m^[6,7]. 破裂显示 NW 盘仰冲至地表,CMT 解也是逆断层错动(图 1). 玉树、喀喇昆仑山口和玛尼地震都位于巴颜喀拉地块的南部边界上,但是它们的破裂类型都是左旋走向滑动,与该块体向东的运动方式矛盾.

汶川地震发生时于田震区仍然有余震活动,根据新疆维吾尔自治区地震局编制的于田序列目录,取 $M_L 2.0$ 级以上地震做震级—时间分布和日频次图(图 2). 图 2 下方是于田序列地震日频次 N ,总体看衰减比较快,但在 5 月份有 3 次起伏(柱状图填充黑);图 2 上方将 5 月 10 日至 30 日的资料放大,黑色箭头标示汶川主震和强余震发生的时间,资料取自美国地质调查局(www.usgs.gov[2010-04-20]),震级 $M_w \geq 5.8$,并附上哈佛大学 CMT 解. 汶川地震当天余震比较多,为清楚起见只标注主震 CMT 解. 从图中可以看出,5 月 12 日 14 时 28 分汶川地震之前,于田序列的余震强度和频度有增高趋势,尤其在 18 日 $M_w 5.8$ 强余震前 24 h,于田震区的余震活动频度和强度在快速衰减的背景下出现显著增强. 此外,25 日的强余震之前重复出现类似现象,但不如前面两次起伏显著,时间间隔也比前两次稍长,可能与震源机制类型有关,前面两次震源机制类型为逆冲,25 日地震震源机制类型为走滑. 汶川主震和强余震发生前于田震区地震频度强度显著增强不是偶然的巧合,系内在的力学因素所致,表明巴颜喀拉块体存在整体的向东运动,并且是西部显示在先,东部响应在后,可以从 2 个地震序列中体现出来.

从 1976 年以来于田震区哈佛矩张量解可以看出(图 3),发生在该地震周围的震源机制以正断层机制为主,走滑断层机制的地震也伴有正断分量. 万永革等^[8]对于田地震正断层机制的构造解释认为,沿着阿尔金断裂的左旋走滑速率较大,喀喇昆仑断

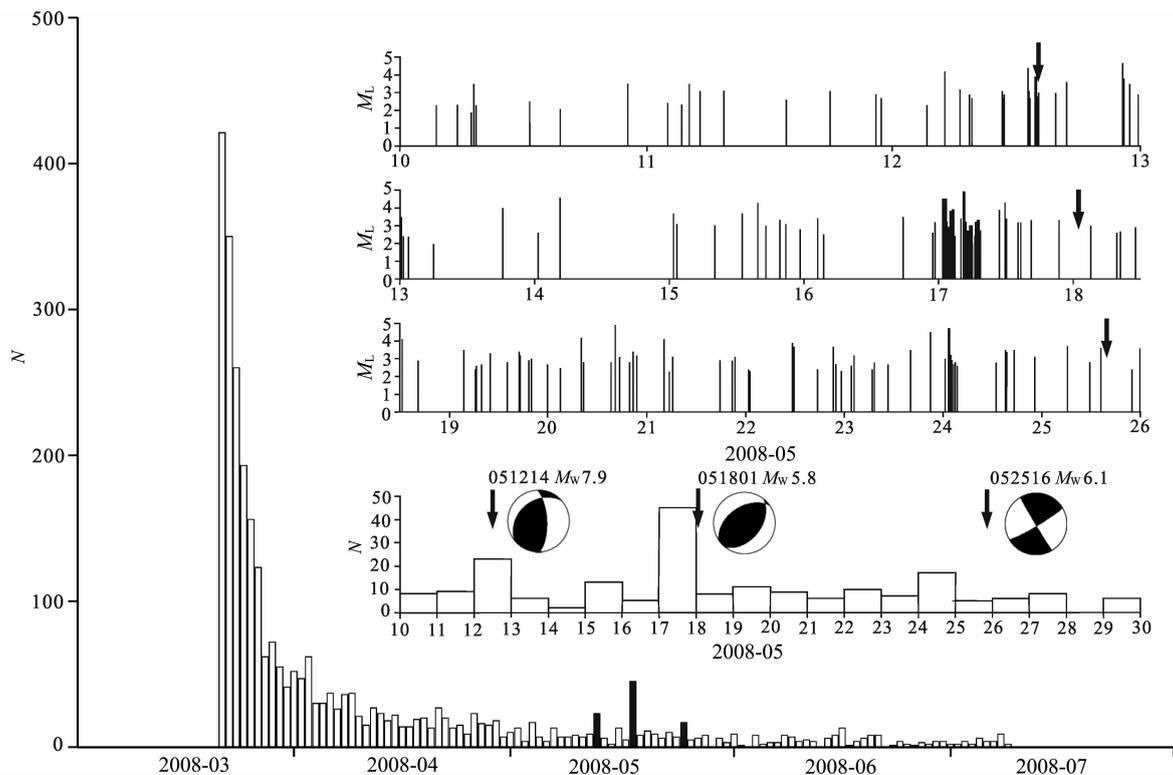


图 2 于田地震序列的日频次和震级—时间分布. 箭头标示汶川主震和强余震发生的时间

Fig. 2 Magnitude-time distribution and day frequency of the Yutian earthquake sequence, arrowhead show the occurrence time of the mainshock and strong aftershocks in Wenchuan earthquake sequence in May 2008

裂右旋走滑的速率较小,且沿北北西方向,两个运动方向合成使得贡嘎错断裂呈现为左旋张扭的运动模式,与喀喇昆仑右旋走滑断裂模式形成对比,致使该地震震源区域呈现东西向拉张的应力状态. 王琼等^[9]对于于田地震前区域地震活动和应力状态进行分析,发现在于田 7.3 级地震前新疆和于田震区及其附近具有正断层性质的中地震增多,区域应力场和震源区及其附近局部应力场的应力状态发生了一定程度的改变,拉张作用力相对挤压作用力有所加强. 特别是在 2007 年 11 月至 2008 年 3 月 20 日于田 7.3 级地震前,新疆 23 次 3 级以上地震中走滑型地震占 13 次(8 次具有拉张分量);逆断型地震 1 次;正断型地震 9 次,拉张断错性质的地震明显增多. 同时于田地震前组成密集条带和孕震空区的 3.5 级以上地震中近半数具有拉张分量,也在一定程度表明了于田 7.3 级地震前震源区应力场受张应力作用有所加强. 2001 年昆仑山口地震 EW 向的左旋走滑运动,位于巴颜喀拉活动块体中部北缘的南盘向东,使得巴颜喀拉块体西端受到拉张作用,该地区的应力场主要以拉张为主,也是发生于田正断层地震的原因之一. 于田余震的震源机制解主要以正断层类型为主,表明拉张作用一直持续,巴颜喀拉块体的

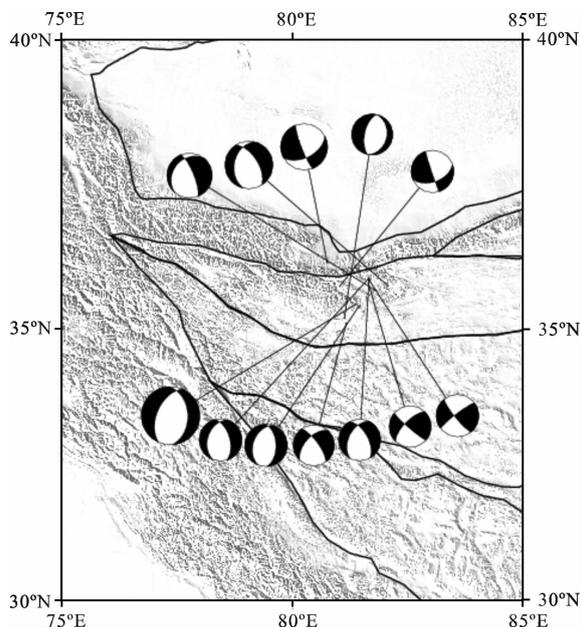


图 3 于田震区 1976 年以来的震源机制解. 图上方为 2001 年昆仑山口地震以前震源机制,下面为于田序列的震源机制

Fig. 3 Focal mechanisms in Yutian hypocenter region since 1976. Up are the focal mechanisms before the 2001 Kunlun Mountain mass earthquake.

Down are the focal mechanisms of the Yutian earthquake sequences in 2008

东向运动最终在块体的东边界发生了汶川逆冲型地震.

取青藏地块 1900 年以来 6 级以上地震的矩张量解投影于图 4^[10, 11]. 总体来看, 逆冲类型地震都发生在青藏地块边界地带, 如北部的柴达木和南部的

喜马拉雅块体, 以及巴颜喀拉块体的东端. 正断层发生在各个块体的内部(巴颜喀拉、羌塘、拉萨、川滇). 走滑类型地震多数分布在块体的边界带上, 如柴达木和巴颜喀拉块体之间、巴颜喀拉和羌塘块体之间、巴颜喀拉和川滇块体之间(鲜水河).

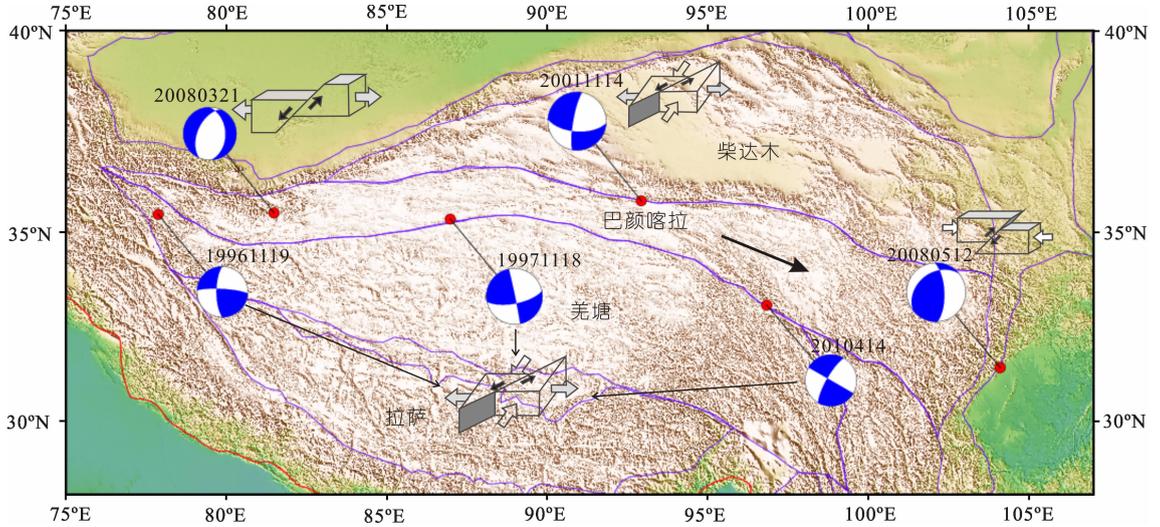


图 1 近年青藏高原 6 次强震分布及其错动类型. 红色实心圆为震中, 黄色线为一级活动块体边界, 蓝色线为二级活动块体边界, 箭头表示巴颜喀拉块体相对于柴达木块体的运动方向

Fig. 1 Epicenter location and fault type of six strong earthquakes in Tibetan Plateau in the recent years. Red solid circle is epicenter location; yellow line is the first active block boundary; blue line is the second active block boundary; the vector shows the block motion direction of Bayankala block relative to the Qaidam block

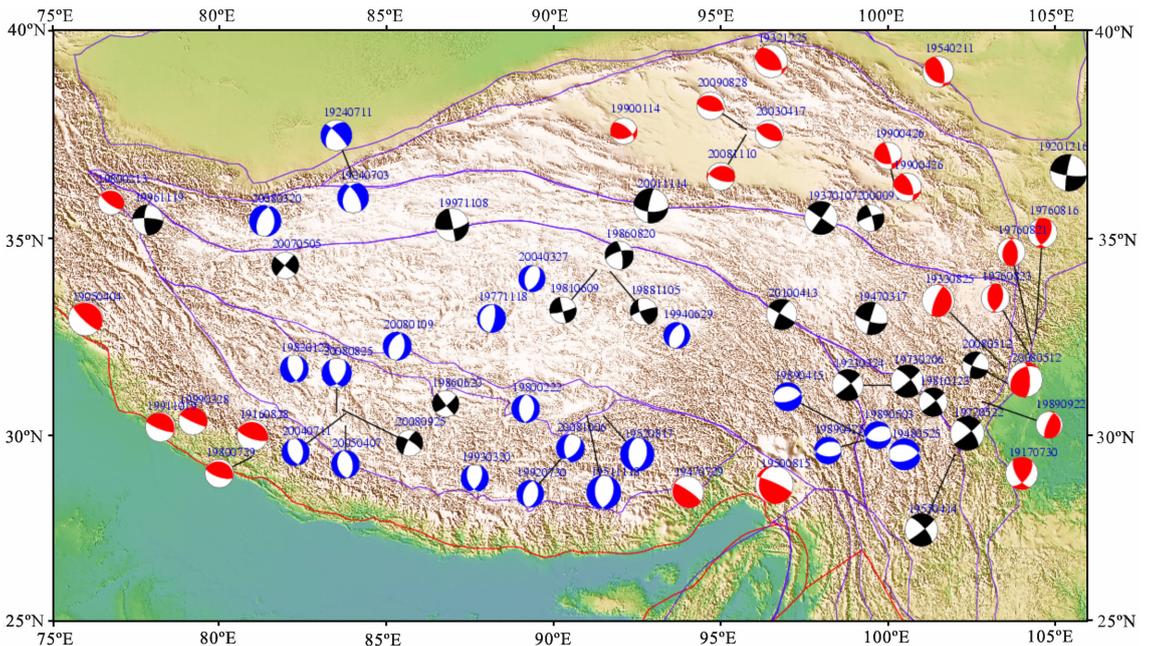


图 4 青藏块体矩张量最佳双力偶解投影(红色—逆冲、蓝色—正断、黑色—走滑)

Fig. 4 The projection of the best double-couple solution of the moment tensor in Qinghai-Tibet block. Focal mechanism type is distinguished by color: red is thrust type, blue is normal fault type and black is strike slip type, respectively

根据矩张量解的应力轴空间取向可以得出以下结论:青藏地块受印度板块向 NNE 向的推挤,其中各个块体表现并不一致.柴达木显示向 NE 方向推挤;巴颜喀拉向东运动,西部呈 EW 向拉张,东部 SEE 向推挤,北部边界带左旋走滑;羌塘北部左旋走滑,中部 SEE 向拉张,呈向东运动;拉萨 EW 向拉张;喜马拉雅 NNE 向推挤.川滇东北边界(鲜水河)左旋走滑,北部 SSE 向拉张,总体呈 SSE 向运动.

3 结论与讨论

昆仑山口 7.8 级地震是 EW 向构造产生左旋走向滑动,位于巴颜喀拉活动块体中部北缘的南盘向东,使得块体的西部受拉张,东部受挤压,因而先后产生在块体西部于田地震的正断层错动和块体东端的汶川地震逆冲断层错动.同样位于羌塘块体北边界的喀喇昆仑山口、玛尼、玉树 3 次强震表现为一致的左旋走向滑动.包括汶川、玉树在内近期发生的 6 次强震,虽然都发生在巴颜喀拉块体边界,分析它们的破裂性质应当分别归属于 2 个活动块体(巴颜喀拉、羌塘),都表现为向东运动.

两组强震,每组的 3 个地震同在活动地块的边界相继发生,依据震源机制类型划分了每组地震的构造块体归属,大地震破裂特征提供了块体活动力学一致性的证据.证实块体是作为整体活动的,因此块体整体运动是地震共同的动力成因.地震成组发生,意味着它们是同时孕育、相互关联,因此不宜局限于单一构造分析地震的重复性,或者寻找小范围的前兆现象,只有扩大视野,从块体整体活动的认识出发,才能更客观、全面地了解地震的孕育、发生过程.

利用中国及其邻区近十年的 1683 个 GPS 测站的观测资料,建立由 31 个活动地块组成的大陆变形运动学模型^[12].块体内部变形十分有限,说明块体的旋转运动而非连续分布变形是大陆构造的主要活动方式.巴颜喀拉块体存在较大的旋转速度($-0.583^\circ/\text{Ma}$)和运动速率(16.5 mm/a),方向角为 -82.8° ,顺时针旋转,块体整体向东运动.羌塘块体东部存在更大的旋转速度($-1.135^\circ/\text{Ma}$)和运动速率(18.1 mm/a),方向角为 -82.9° ,顺时针旋转,块体也是整体向东运动.

青藏高原的构造变形模式存在侧向逃逸和压缩增厚两种学说,前者强调青藏高原不同级别块体通过大型走滑断裂带的高速滑动实现向东挤出,调节

青藏高原近南北向的缩短^[13].后者则强调印度板块的向北推挤导致韧性下地壳增厚和上地壳发育大量缓慢滑动断层,发生分布式连续变形^[14, 15].高原中北部的岩石圈下方存在剪切变形^[16, 17].Zhang 等^[18]研究表明,现今构造变形以连续变形为特征,印度板块和欧亚板块之间的相对运动主要被青藏周边的地壳缩短和内部的走滑剪切所吸收.Wang 等^[19]分析给出青藏高原内部活动地块的运动方式是分块的,各块之间或者运动方向不同,或者运动速度不同.近年发生的汶川、于田和昆仑山口 3 次强震,以及喀喇昆仑山口、玛尼、玉树 3 次强震的力学联系支持青藏高原内部的变形主要发生在活动块体边界.但是青藏地块内部发生的大量正断层地震显示的拉张性质,上述两种学说尚难以给出满意解释,需要进一步分析研究.

致谢 审稿人提出的修改意见使本文得以很大改进,特此致谢!

参考文献(References)

- [1] Li Q Z, Yu X C. Occurrences of major earthquake by groups in North China. *Tectonophysics*, 1982, **85**: 61~74
- [2] 李钦祖,于利民,王吉易等. 中国大陆强地震的成组活动和概率预报. 中国科学(B辑),1993,**23**(5):519~526
Li Q Z, Yu L M, Wang J Y, et al. Grouping occurrences and probability prediction of the strong earthquakes in Chinese mainland. *Science in China (Series B)* (in Chinese), 1993, **23**(5): 519~526
- [3] 张培震,邓起东,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. Strong earthquake activity and active blocks in China mainland. *Science in China (Series D)* (in Chinese), 2003, **33**(Suppl.): 12~20
- [4] Xu X W, Yu G H, Klinger Y, et al. Reevaluation of surface rupture parameters and faulting segmentation of the 2001 Kunlunshan earthquake ($M_w7.8$), northern Tibetan Plateau, China. *J. Geophys. Res.*, 2006, **111**, B05316, doi:10.1029/2004JB003488
- [5] 李志海,马宏生,曲延军. 2008年3月21日新疆于田 7.3 级地震发震构造与震前地震活动特征研究. 中国地震,2009,**25**(2):199~205
Li Z H, Ma H S, Qu Y J. Study on seismogenic structure and seismic activity characteristics before the Yutian $M7.3$ earthquake on March 21, 2008, Xinjiang. *Earthquake Research in China* (in Chinese), 2009, **25**(2):199~205
- [6] 徐锡伟,闻学泽,叶建青等. 汶川 $M_s8.0$ 地震地表破裂带及其发震构造. 地震地质,2008,**30**(3):597~629
Xu X W, Wen X Z, Ye J Q, et al. The $M_s8.0$ Wenchuan earthquake surface ruptures and its seismogenic structure. *Seismology and Geology* (in Chinese), 2008, **30**(3):597~

629

- [7] 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
- [8] 王永革,沈正康,盛书中等. 2008 年新疆于田 7.3 级地震对周围断层的影响及其正断层机制的区域构造解释. 地球物理学报, 2010, **53**(2):280~289
Wan Y G, Shen Z K, Sheng S Z, et al. The mechanical effects of the 2008 M_s 7.3 Yutian, Xinjiang earthquake on the neighboring faults and its tectonic origin of normal faulting mechanism. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2010, **53**(2): 280~289
- [9] 王琼,聂晓红,温和平. 2008 年新疆于田 M_s 7.3 地震前区域地震活动和应力状态特征初步研究. 地震学报, 2009, **31**(3):235~244
Wang Q, Nie X H, Wen H P. Preliminary research on the characteristics of regional seismic activity and stress state before the 2008 M_s 7.3 earthquake in Yutian, Xinjiang of China. *Acta Seismologica Sinica* (in Chinese), 2009, **31**(3): 235~244
- [10] Selva J, W Marzocchi. Focal parameters, depth estimation and plane selection of the worldwide shallow seismicity with $M_s \geq 7.0$ for the period 1900~1976. *Geochem. Geophys. Geosyst.*, 2004, **5**, Q05005, doi:10.1029/2003GC000669.
http://www.globalcmt.org/CMTsearch.html[2010-04-20]
- [11] 王伟,王琪. GPS 观测约束下的中国大陆活动块体地块运动学模型. 大地测量与地球动力学, 2008, **28**(4):74~82
Wang W, Wang Q. Kinematical model of crustal blocks of China continent revealed by GPS measurements. *Journal of Geodesy and Geodynamics* (in Chinese). 2008, **28**(4): 74~82
- [12] Tapponnier P, Xu Z Q, Roger F, et al. Oblique stepwise rise and growth of the Tibet Plateau. *Science*, 2001, **294**: 1671~1677
- [13] Royden L H, Burchfiel B C, King R W, et al. Surface deformation and lower crustal flow in eastern Tibet. *Science*, 1997, **276**:788~790
- [14] Shen F, Leigh H R, Burchfiel B C. Large-scale crustal deformation of the Tibetan Plateau. *J. Geophys. Res.*, 2001, **106**, 6793~6816, doi:10.1029/2000JB900389
- [15] Thatcher W. Microplate model for the present-day deformation of Tibet. *J. Geophys. Res.*, 2007, **112**, B01401, doi:10.1029/2005JB004244
- [16] Meade B J. Present-day kinematics at the India-Asia collision zone. *Geology*, 2007, **35**: 81~84
- [17] Zhang P Z, Shen Z K, Wang M, et al. Continuous deformation of the Tibetan Plateau from global positioning system data. *Geology*, 2004, **32**: 809~812
- [18] Wang Q, Zhang P Z, Freymueller J T, et al. Present-day crustal deformation in China constrained by Global Positioning System measurements. *Science*, 2001, **294**(5542):574~577

(本文编辑 胡素芳)