

魏文薪, 武艳强, 江在森, 刘晓霞, 赵静. 2014. 2014 年新疆于田 $M_s7.3$ 地震前地壳变形特征研究. 地震学报, **36**(4): 595–601. doi:10.3969/j.issn.0253-3782.2014.04.006.

Wei W X, Wu Y Q, Jiang Z S, Liu X X, Zhao J. 2014. Study on crustal deformation characteristics before Xinjiang Yutian $M_s7.3$ earthquake in 2014. *Acta Seismologica Sinica*, **36**(4): 595–601. doi:10.3969/j.issn.0253-3782.2014.04.006.

2014 年新疆于田 $M_s7.3$ 地震前 地壳变形特征研究^{*}

魏文薪^{1,2)} 武艳强^{1,2),*} 江在森^{1,2)} 刘晓霞^{1,2)} 赵 静³⁾

1) 中国北京 100036 中国地震局地震预测研究所

2) 中国北京 100036 中国地震局地震预测重点实验室

3) 中国北京 100045 中国地震台网中心

摘要 利用 1999—2007 年和 2009—2013 年两期 GPS 速度场资料, 采用最小二乘配置方法分别计算了 2008 年和 2014 年新疆两次于田 $M_s7.3$ 地震前新疆及周边地区的主应变率、面应变率及最大剪应变率, 分析了该区域的变形动态特征, 并结合速度剖面分析方法给出了震源区的构造变形特征. 速度场及应变率场动态结果表明: 新疆天山地区的地壳变形特征整体表现为由南向北缩短, 相对运动速率表现为由南向北、由西向东逐渐减小; 震源区东侧的左旋剪切变形明显大于西侧; 2008 年与 2014 年两次于田 $M_s7.3$ 地震的震源区均处于拉张与挤压变形的过渡地带, 易于强地震的发生; 2008 年于田 $M_s7.3$ 地震的张性兼有少量剪性破裂的发生使得阿尔金断裂的左旋剪切变形增强. GPS 速度场剖面分析结果表明, 2014 年于田 $M_s7.3$ 地震前震源区西侧的变形宽度大于东侧, 剪切应变积累程度西侧高于东侧. 综合分析认为, 震源周边构造区应变积累的差异性有利于强震的孕育, 2008 年于田 $M_s7.3$ 地震对 2014 年于田 $M_s7.3$ 地震可能有促进作用.

关键词 GPS 地壳变形 GPS 剖面 应变积累

doi:10.3969/j.issn.0253-3782.2014.04.006

中图分类号: P315.72⁺5

文献标志码: A

Study on crustal deformation characteristics before Xinjiang Yutian $M_s7.3$ earthquake in 2014

Wei Wenxin^{1,2)} Wu Yanqiang^{1,2),*} Jiang Zaisen^{1,2)} Liu Xiaoxia^{1,2)} Zhao Jing³⁾

1) Institute of Earthquake Science, China Earthquake Administration, Beijing 100036, China

2) China Earthquake Administration Key laboratory of Earthquake Prediction, Beijing 100036, China

3) China Earthquake Networks Center, Beijing 100045, China

Abstract: This paper calculates the principal strain rate, plane strain rate and maximum shear strain rate in Xinjiang and its vicinity by using the least squares method with GPS data set during 1999—2007 and 2009—2013. The crustal

^{*} 基金项目 中国地震局地震预测研究所基本科研业务专项(2012IES0308)和国家自然科学基金课题(41274008)资助.

收稿日期 2014-03-03 收到初稿, 2014-05-14 决定采用修改稿.

⁺ 通讯作者 e-mail: chdgyw@126.com

tectonic deformation characteristics in this area before 2008 and 2014 Yutian $M_s7.3$ earthquakes are also analyzed comprehensively. The dynamic results of velocity field and strain rate field indicate that the crust shortening decreases gradually from south to north and from west to east, suggesting that the sinistral shear deformation in the eastern side is significantly greater than that in the western side around focal area. The source areas of 2008 and 2014 $M_s7.3$ Yutian earthquakes are located in the transitional zone of the tensile and compressive deformation, which is prone to occurrence of a great earthquake. The surface rupture in 2008 Yutian earthquake, which is mainly tensile with little shear component, strengthened the sinistral shear deformation of Altyn Tagh fault. The GPS velocity profiles show that the deformation width of western side is greater than that of the east in the hypocentral region before 2014 Yutian $M_s7.3$ earthquake, consistent with the degree of shear strain accumulation. In conclusion, this difference between two sides in strain accumulation are easy for the nucleation process of 2014 Yutian earthquake. And it is inferred that the 2008 Yutian $M_s7.3$ earthquake may play a role in promoting the 2014 Yutian $M_s7.3$ earthquake.

Key words: GPS; crustal deformation; GPS profile; strain accumulation

引言

据中国地震台网测定,北京时间 2014 年 2 月 12 日,在新疆维吾尔自治区和田地区于田县(36.1°N , 82.5°E)发生 $M_s7.3$ 地震. 此次地震的发震构造初步确定为阿尔金断裂带西南段的北东向左旋走滑正断层(徐锡伟, 于贵华, 2014); 据 USGS(2014)显示,本次地震的矩震级为 $M_w6.9$,震源深度为 $10(\pm 1.7)$ km,为走滑型地震. 在距离此次地震约 100 km 处,2008 年 3 月 21 日曾发生 $M_s7.3$ 地震,震源深度 12 km(USGS, 2008). 通过地表变形调查(徐锡伟等, 2011)、干涉测量方式提取同震形变场(洪顺英等, 2010)、发震构造和震前地震活动(李志海等, 2009)以及震源机制解(Global Centroid Moment Tensor, 2008)等研究表明,2008 年于田地震的破裂方式以拉张为主,兼有少量的左旋走滑分量. 因此,对于 2008 年于田(拉张型)地震对 2014 年于田(走滑型)地震的影响,以及 2014 年于田地震前的地壳变形特征等问题的研究有利于加深对此次于田地震发震机理的认识.

针对上述问题,本文首先利用中国地壳运动观测网络 1999—2007 年和 2009—2013 年两期的 GPS 速度场资料,分析区域速度场动态特征;然后利用最小二乘配置方法(武艳强等, 2009; 江在森, 刘经南, 2010; Wu *et al.*, 2011)求解应变参数,以分析 2014 年于田地震前区域地壳变形动态特征;进而通过数据覆盖较为密集的 2009—2013 年 GPS 速度剖面结果分析与此次于田地震相关的构造变形特征;最后讨论两次于田地震的关系.

1 2014 年于田 $M_s7.3$ 地震前区域地壳变形动态特征

1.1 区域速度场动态特征

为了分析 2014 年于田 $M_s7.3$ 地震前的地壳变形特征,图 1 给出了中国地壳观测网络 1999—2007 年和 2009—2013 年两期 GPS 速度场结果,两期 GPS 速度场解算共用到了 1999, 2001, 2004, 2007, 2009, 2011 和 2013 年的观测数据(每期每点观测 3 天以上). 解

算按以下步骤进行：首先采用 GAMIT 软件(Herring *et al.*, 2006a, b)解算每期区域网、连续站、中国大陆周边 IGS 站的测站坐标和卫星轨道的单日松弛解；然后利用 QOCA 软件融合上述 GPS 站点的单日松弛解，平差得到国际地球参考框架下的 GPS 速度场(Dong *et al.*, 1998；武艳强等, 2012)；最后通过基准变换扣除整体运动，得到中国大陆参考基准的速度场。

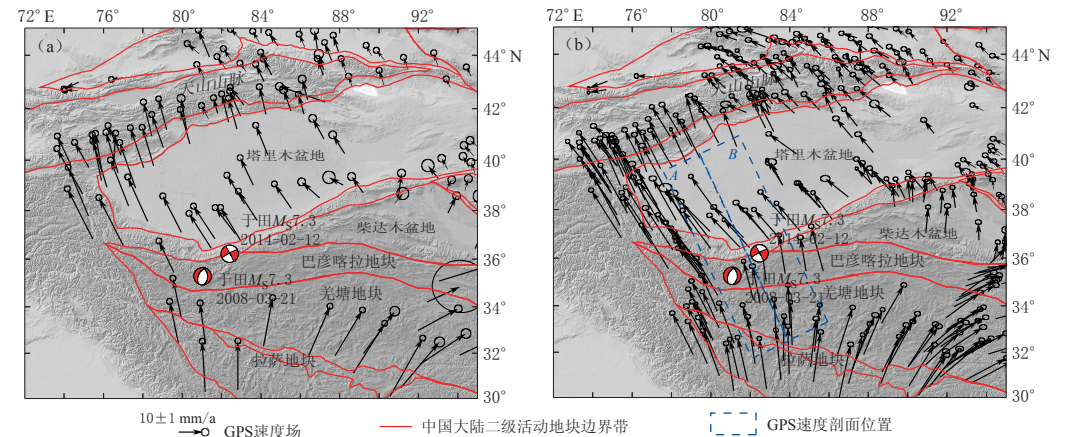


图 1 新疆及周边地区 1999—2007 年(a)与 2009—2013 年(b)GPS 速度场结果

Fig.1 GPS velocity fields in Xinjiang and its adjacent areas during 1999—2007 (a) and 2009—2013 (b)

从两期的 GPS 速度场图像可以看出，受兴都库什—帕米尔构造结直接动力作用影响，新疆天山地区的地壳变形特征均表现为由南向北缩短，相对运动速率表现为由南向北、由西向东逐渐减小。该现象表明板块作用力随着远离板块边界，推挤力逐渐减弱。整个区域的整体变形特征与前人的研究成果(王琪等, 2000；王晓强等, 2005；牛之俊等, 2007；杨少敏等, 2008)相一致，因此最新 GPS 速度场结果在一定程度上反映了地壳变形具有长期稳定性和继承性。另外，从测点分布较为密集的图 1b 中可看出，2014 年于田地震震源区的左旋剪切变形东侧明显大于西侧，表明此次地震发生在左旋剪切变形由快转慢的过渡地区。

1.2 区域应变场动态特征

依据上述两期 GPS 速度场资料，利用最小二乘配置方法求解区域应变率参数，给出面应变率和主应变率的动态演化结果(图 2)。2008 年于田 $M_s7.3$ 地震前，震源区域位于面应变率拉张—挤压的过渡地带。主应变率的分布结果表明，震源区周边的北西向拉张变形自西向东呈衰减变化的特征，该应变率分布有利于近 NS 向构造发生正剪切破裂(图 2a)。2009—2013 年面应变率结果表明，2008 年于田地震(正断层发震)震源区 WNW 向变形幅度明显大于前一期，但其影响范围有限，在震源区周边呈现空间分布不均匀的特征。该现象表明 2008 年于田地震的发生有利于增强柴达木—巴彦喀拉地块的东向运动，并且面应变率结果表明 2014 年于田 $M_s7.3$ 地震震中仍处于拉张与挤压变形的过渡地带，有利于阿尔金断裂带左旋走滑型地震的孕育(图 2b)。

最大剪应变率动态演化结果(图 3)表明，两次于田地震均位于最大剪应变率由高值到低值的过渡地区。江在森等(2003)研究表明，与主断裂的构造活动背景相一致的剪应变率高值区或边缘区容易发生大地震。由于 2008 年于田地震的发震构造为近 NS 向拉张性断

裂, 该区最大剪应变率分布特征与主震破裂方式关系不大. 两期动态演化结果均表明, 震源区附近最大剪应变率维持较高水平, 2008 年于田地震并没有减缓该区剪切变形的积累. 根据两次于田地震震源机制分析认为, 随着 2008 年于田地震张性破裂(带有少量剪切)的发生及震后的影响, 震中及周边区域张性变形加强, 进而导致阿尔金断裂带的左旋剪切应变积累增强. 本文认为 2008 年于田地震可能对 2014 年于田地震有促进作用.

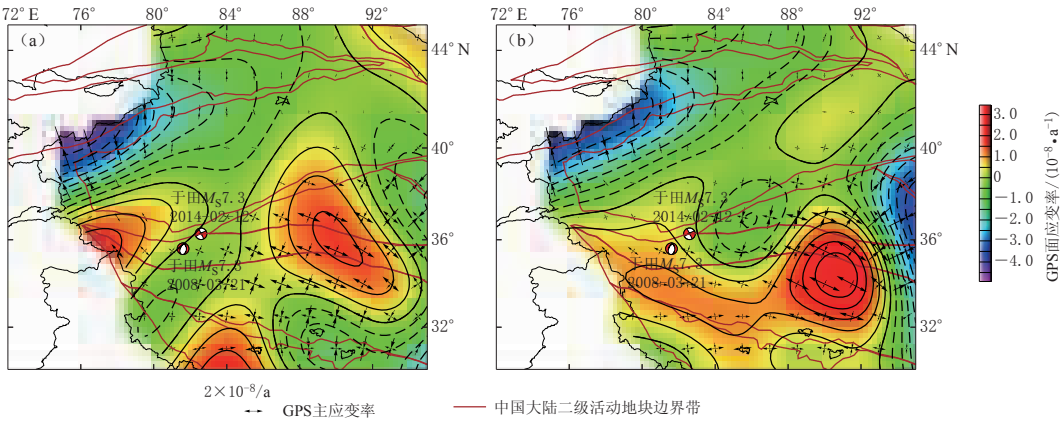


图 2 1999—2007 年(a)与 2009—2013 年(b)区域面应变率和主应变率结果
Fig. 2 Plane strain rate and principal strain rate results in Xinjiang and its adjacent areas during 1999—2007 (a) and 2009—2013 (b)

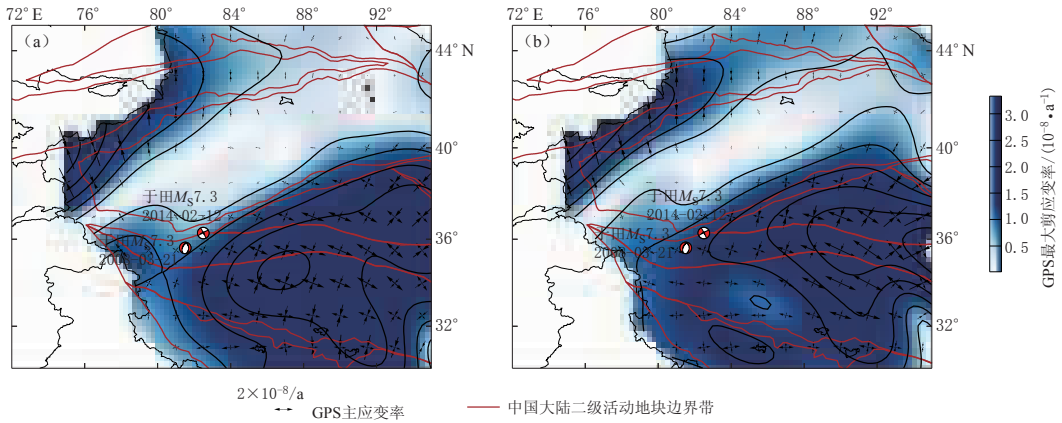


图 3 1999—2007 年(a)与 2009—2013 年(b)区域最大剪应变率和主应变率结果
Fig. 3 Maximum shear strain rate and principal strain rate results in Xinjiang and its adjacent areas during 1999—2007 (a) and 2009—2013 (b)

2 2014 年于田 $M_s7.3$ 地震前构造变形的 GPS 速度剖面

利用震间的 GPS 数据分析断裂带的现今变形特征, 可以给出远场断裂带稳定的滑动速率, 也可以给出近场断裂带随时间衰减的滑动速率, 而与地震有关的变形特征及应变积累则集中在断裂带附近的几千米或者几十千米的较窄范围内(Meade, Hager, 2005; 魏文薪等, 2012). 为了进一步分析震源区附近的构造变形特征, 图 4 给出了基于数据分布较为密集的 2009—2013 年 GPS 剖面及拟合结果(剖面 A 和剖面 B 位置见图 1).

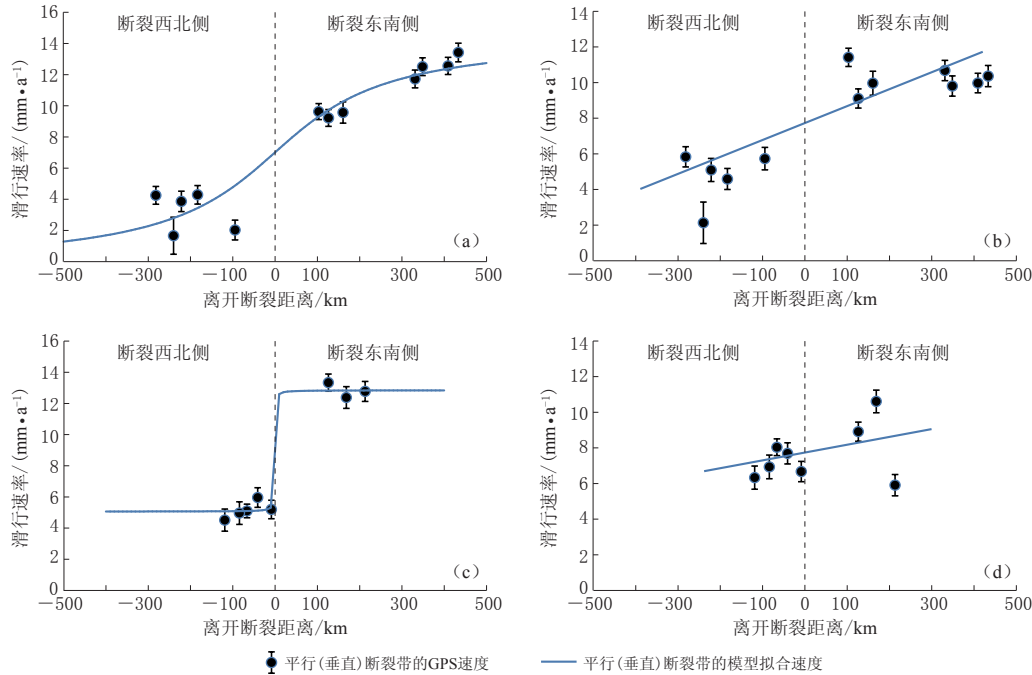


图 4 横跨断裂带的 2009—2013 年 GPS 站速度剖面 and 拟合结果

(a) 剖面 A 平行断裂带结果；(b) 剖面 A 垂直断裂带结果；
(c) 剖面 B 平行断裂带结果；(d) 剖面 B 垂直断裂带结果

Fig. 4 GPS velocity profiles cross fault during 2009–2013, and model fitting results
(a) Results of profile A (parallel component); (b) Results of profile A (vertical component);
(c) Results of profile B (parallel component); (d) Results of profile B (vertical component)

图 4a 和图 4c 平行于断裂带的剖面表明，离开断裂带的远场速率约为 8 mm/a，表现为阿尔金断裂带长期稳定的运动特征。GPS 剖面拟合结果表明，剖面 A 的 NE 向断裂带的变形宽度较宽，剖面 B 的变形宽度较窄，即剖面 A 的断裂带剪切应变积累的程度高于剖面 B。这种显著的差异性说明同一断裂系统不同分段运动特征的不一致会导致区域构造的应变积累而发生强震。另外，东侧剖面(剖面 B)反映了断裂长期稳定的运动特性，应变积累水平较低，后续地震的发生可能仍需较长时间。垂直断裂带的剖面结果(图 4b 和图 4d)表明，剖面 A 的拉张变形特征明显大于剖面 B。综上，震源周边不同区域的应变积累的差异性易于强震孕育，区域变形特征与两次于田地震的破裂方式一致。

3 讨论与结论

本文通过区域速度场、应变率场和 GPS 剖面分析研究了 2014 年于田 $M_s7.3$ 地震震前的地壳变形特征，得到了以下认识：

- 1) 新疆天山地区的地壳变形总体表现为由南向北缩短，相对运动速率表现为由南向北、由西向东逐渐减小。于田地震震源区的地壳变形特征与天山地区存在明显差别，主要表现为 WNW 向拉张和 NNE 向挤压，且拉张变形幅度大于挤压变形。该变形背景有利于近 NS 向断层发生张性破裂和 NE 向断层发生左旋剪切破裂。
- 2) 主应变率、面应变率、最大剪应变率的动态演化结果表明：2008 年和 2014 年于田

$M_s7.3$ 地震的震中区域均处于拉张与挤压变形的过渡地带, 均具有发生强震的背景; 2008 年于田地震张性(带有少量剪切)破裂的发生及震后影响使得震中及周边区域张性变形加强, 进而导致 NE 向阿尔金断裂左旋剪切变形增强. 因此认为, 2008 年于田 $M_s7.3$ 地震可能对 2014 年于田 $M_s7.3$ 地震有促进作用.

3) 剖面分析结果表明: 阿尔金断裂带远场速率约为 8 mm/a, 表现为长期稳定的运动特征; 两次地震震源区的构造剪切变形宽度西侧大于东侧, 这种应变积累的差异性有利于 2014 年于田地震的孕育.

参 考 文 献

- 洪顺英, 申旭辉, 单新建, 刘智荣, 戴娅琼, 荆凤. 2010. 基于升降轨 ASAR 的于田 $M_s7.3$ 级地震同震形变场信息提取与分析[J]. 国土资源遥感, **4**(3): 98–102.
- Hong S Y, Shen X H, Shan X J, Liu Z R, Dai Y Q, Jing F. 2010. The calculation and analysis of the co-seismic deformation field of Yutian $M_s7.3$ earthquake basing on the ascending and descending orbit ASAR data[J]. *Remote Sensing for Land & Resources*, **4**(3): 98–102 (in Chinese).
- 江在森, 刘经南. 2010. 应用最小二乘配置建立地壳运动速度场与应变场的方法[J]. 地球物理学报, **53**(5): 1109–1117.
- Jiang Z S, Liu J N. 2010. The method in establishing strain field and velocity field of crustal movement using least squares collocation[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, **53**(5): 1109–1117 (in Chinese).
- 江在森, 马宗晋, 牛安福, 张晓亮, 王双绪, 陈兵. 2003. GPS 技术应用于中国地壳运动研究的方法及初步结果[J]. 地学前缘, **10**(1): 71–79.
- Jiang Z S, Ma Z J, Niu A F, Zhang X L, Wang S X, Chen B. 2003. Approaches and preliminary results of crust movement researches based on the GPS in China[J]. *Earth Science Frontiers*, **10**(1): 71–79 (in Chinese).
- 李志海, 马宏生, 曲延军. 2009. 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[J]. 中国地震, **25**(2): 199–205.
- Li Z H, Ma H S, Qu Y J. 2009. Study on seismogenic structure and seismic activity characteristics before the Yutian $M7.3$ earthquake on March 21, 2008, Xinjiang[J]. *Earthquake Research in China*, **25**(2): 199–205 (in Chinese).
- 牛之俊, 游新兆, 杨少敏. 2007. 利用 GPS 分析天山现今地壳形变特征[J]. 大地测量与地球动力学, **27**(2): 1–9.
- Niu Z J, You X Z, Yang S M. 2007. Analysis of contemporary crustal deformation characteristics with GPS data of Tianshan mountain[J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, **27**(2): 1–9 (in Chinese).
- 王琪, 丁国瑜, 乔学军, 王晓强, 游新兆. 2000. 天山现今地壳快速缩短与南北地块的相对运动[J]. 科学通报, **45**(14): 1543–1547.
- Wang Q, Ding G Y, Qiao X J, Wang X Q, You X Z. 2000. Crustal shortening in Tianshan area and relatively movement of north and south block[J]. *Chinese Science Bulletin*, **45**(14): 1543–1547 (in Chinese).
- 王晓强, 李杰, 王琪, Alexander Z. 2005. 天山现今地壳运动的形变场分析[J]. 大地测量与地球动力学, **25**(3): 63–68.
- Wang X Q, Li J, Wang Q, Alexander Z. 2005. Analysis of present-day crustal deformation of Tianshan[J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, **25**(3): 63–68 (in Chinese).
- 魏文薪, 江在森, 武艳强, 赵静. 2012. 利用 GPS 数据研究川滇块体东边界主要断裂带运动特性[J]. 武汉大学学报: 信息科学版, **37**(9): 1041–1044.
- Wei W X, Jiang Z S, Wu Y Q, Zhao J. 2012. Motion characteristics of major faults in east boundary of Sichuan–Yunnan Block obtained with GPS data[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, **37**(9): 1041–1044 (in Chinese).
- 武艳强, 江在森, 杨国华, 方颖, 王武星. 2009. 利用最小二乘配置球面上整体解算 GPS 应变场的方法及应用[J]. 地球物理学报, **52**(7): 1707–1714.
- Wu Y Q, Jiang Z S, Yang G H, Fang Y, Wang W X. 2009. The application and method of GPS strain calculation in whole mode using least square collocation in sphere surface[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, **52**(7): 1707–1714

(in Chinese).

- 武艳强, 江在森, 杨国华, 赵静. 2012. 南北地震带北段近期地壳变形特征研究[J]. 武汉大学学报: 信息科学版, **37**(9): 1045–1048.
- Wu Y Q, Jiang Z S, Yang G H, Zhao J. 2012. Deformation characteristics of north section of North–South Seismic Zone in recent period [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, **37**(9): 1045–1048 (in Chinese).
- 徐锡伟, 谭锡斌, 吴国栋, 陈建波, 沈军, 方伟, 宋和平. 2011. 2008 年于田 $M_s7.3$ 地震地表破裂带特征及其构造属性讨论[J]. 地震地质, **33**(2): 462–471.
- Xu X W, Tan X B, Wu G D, Chen J B, Shen J, Fang W, Song H P. 2011. Surface rupture features of the 2008 Yutian $M_s7.3$ earthquake and its tectonic nature[J]. *Seismology and Geology*, **33**(2): 462–471 (in Chinese).
- 徐锡伟, 于贵华. 2014. 新疆维吾尔自治区和田地区于田县(北纬 36.1 度, 东经 82.5 度)7.3 级地震构造图[EB/OL]. [2014-03-01]. [http://www.eq-igl.ac.cn/admin/upload/files/%E5%8F%91%E9%9C%87%E6%9E%84%E9%80%A0%E5%9B%BE\(1\).jpg](http://www.eq-igl.ac.cn/admin/upload/files/%E5%8F%91%E9%9C%87%E6%9E%84%E9%80%A0%E5%9B%BE(1).jpg).
- Xu X W, Yu G H. 2014. Yutian County, Hotan Prefecture, Xinjiang (latitude 36.1 degree, longitude 82.5 degree) 7.3 earthquake seismogenic structure diagram[EB/OL]. [2014-03-01]. [http://www.eq-igl.ac.cn/admin/upload/files/%E5%8F%91%E9%9C%87%E6%9E%84%E9%80%A0%E5%9B%BE\(1\).jpg](http://www.eq-igl.ac.cn/admin/upload/files/%E5%8F%91%E9%9C%87%E6%9E%84%E9%80%A0%E5%9B%BE(1).jpg) (in Chinese).
- 杨少敏, 李杰, 王琪. 2008. GPS 研究天山现今变形与断层活动[J]. 中国科学: D 辑, **38**(7): 872–880.
- Yang S M, Li J, Wang Q. 2008. The deformation pattern and fault rate in the Tianshan Mountains inferred from GPS observations[J]. *Science in China: Series D*, **38**(7): 872–880 (in Chinese).
- Dong D, Herring T A, King R W. 1998. Estimating regional deformation from a combination of space and terrestrial geodetic data[J]. *J Geophys Res*, **72**(4): 200–214.
- Global Centroid Moment Tensor. 2008. Global CMT Catalog: Southern Xinjiang, China[EB/OL]. [2008-04-01]. <http://www.globalcmt.org/cgi-bin/globalcmt-cgi-bin/CMT4/form?itype=y&yr=2008&mo=3&day=1&oyr=2008&omo=3&oday=30&jyr=1976&jday=1&ojyr=1976&ojday=1&otype=nd&nday=30&lmw=6&umw=10&lms=6&ums=10&lmb=6&umb=10&llat=-90&ulat=90&llon=-180&ulon=180&lhd=0&uhd=1000<s=-9999&uts=9999&lpe1=0&upe1=90&lpe2=0&upe2=90&list=0>.
- Herring T A, King R W, McClusky S C. 2006a. GAMIT Reference Manual, Release 10.3. Massa Chussetts Institute [CP/OL]. [2014-03-02]. <http://www-gpsg.mit.edu/~simon/gtgk/docs.htm>.
- Herring T A, King R W, McClusky S C. 2006b. GLOBK Reference Manual, Release 10.3. Massa Chussetts Institute [CP/OL]. [2014-03-02]. <http://www-gpsg.mit.edu/~simon/gtgk/docs.htm>.
- Meade B J, Hager B H. 2005. Block models of crustal motion in southern California constrained by GPS measurements [J]. *J Geophys Res*, **110**(B3): B03403. doi:10.1029/2004JB003209.
- USGS. 2008. $M7.2$ -Xinjiang–Xizang border region (BETA)[EB/OL]. [2008-03-22]. http://comcat.cr.usgs.gov/earthquakes/eventpage/pde20080320223257930_10#scientific_moment-tensor.
- USGS. 2014. $M6.9$ -272 km ESE of Hotan, China (BETA)[EB/OL]. [2014-02-20]. http://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eventpage/usc000mnvj#scientific_moment-tensor.
- Wu Y Q, Jiang Z S, Yang G H, Wei W X, Liu X X. 2011. Comparison of GPS strain rate computing methods and their reliability[J]. *Geophys J Int*, **185**(2): 703–717.