

王 凡,陈为涛,王 敏等:利用 GPS 观测资料分析 2008 年于田  $M_s7.3$  地震的同震位移及震后形变. 地球物理学报, 2011, **54**(9):2250~2255, DOI:10.3969/j.issn.0001-5733.2011.09.007

Wang F, Chen W T, Wang M, et al. Coseismic and postseismic deformation of  $M_s7.3$  Yutian earthquake derived from GPS data. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2011, **54**(9):2250~2255, DOI:10.3969/j.issn.0001-5733.2011.09.007

# 利用 GPS 观测资料分析 2008 年于田 $M_s7.3$ 地震的同震位移及震后形变

王 凡<sup>1</sup>,陈为涛<sup>1</sup>,王 敏<sup>1\*</sup>,沈正康<sup>1,2</sup>,王阎昭<sup>1</sup>,万永革<sup>3</sup>

1 中国地震局地质研究所,地震动力学国家重点实验室,北京 100029

2 北京大学地球与空间科学学院地球物理系,北京 100871

3 防灾科技学院,河北三河 065201

**摘 要** 2008 年 3 月 21 日新疆于田发生  $M_s7.3$  级地震. 本文通过处理、分析 GPS 数据,得到破裂断层北侧 100 km 附近的同震位移及震后形变信息. 在观测区域 GPS 点监测到 10 mm 左右的同震位移,其中最大为南向 14 mm,东向 5 mm. 同震位移呈现一致性的东南向运动特征,证实于田地震存在显著的左旋走滑分量. 震后台站向西南方向运动,与同震位移方向不同,说明同震位移和震后形变具有不同的形变源. 近普鲁断裂两侧的 GPS 点震后运动方向存在明显差异,表明于田地震可能触发了普鲁断裂的左旋滑动. 普鲁断裂在于田地震发生后呈现的构造活动特征揭示普鲁断裂是康西瓦—西阿尔金断裂带的一部分,兼具左旋走滑与逆冲分量,吸收了青藏高原西北缘相对于塔里木盆地的东向逃逸与北向入侵作用.

**关键词** 于田地震, GPS, 同震位移, 震后形变, 普鲁断裂, 应力触发

DOI:10.3969/j.issn.0001-5733.2011.09.007

中图分类号 P315, P227

收稿日期 2011-01-22, 2011-09-02 收修定稿

## Coseismic and postseismic deformation of $M_s7.3$ Yutian earthquake derived from GPS data

WANG Fan<sup>1</sup>, CHEN Wei-Tao<sup>1</sup>, WANG Min<sup>1\*</sup>, SHEN Zheng-Kang<sup>1,2</sup>,

WANG Yan-Zhao<sup>1</sup>, WAN Yong-Ge<sup>3</sup>

1 State Key Laboratory of Earthquake Dynamics, Institute of Geology, China Earthquake Administration, Beijing 100029, China

2 Department of Geophysics, School of Earth and Space Science, Peking University, Beijing 100871, China

3 Institute of Disaster Prevention Science and Technology, Sanhe Heibei 065201, China

**Abstract** We use GPS data to study coseismic and postseismic deformation of the 21 March 2008  $M_s7.3$  Yutian earthquake occurred in southern Xinjiang, western China. The coseismic displacements recorded at GPS sites located ~100 km north of the fault show clearly a coherent southeastward motion, and reveal that the Yutian earthquake had a significant left-lateral slip component. The GPS postseismic displacements show a different pattern from the one of coseismic displacements, suggesting that the coseismic and postseismic displacements observed at GPS sites were induced

**基金项目** 中央级公益性科研院所基本科研业务专项(IGCEA0910)、中国地震局地质研究所基础科研业务专项(DF-IGCEA-0608-2-14)联合资助.

**作者简介** 王 凡,女,1984 年生,博士生,主要从事 GPS 数据分析与地壳形变方向的研究. E-mail: wangfan0003@gmail.com

**\* 通讯作者** 王 敏,女,1964 年生,研究员,主要从事 GPS 数据分析与地壳形变方向的研究. E-mail: mawang@gps.gov.cn

by different sources. Although the Pulu fault has been considered primarily a thrust fault, the spatial distribution of postseismic deformation field of the Yutian earthquake implies that sinistral afterslip might have been triggered along the Pulu fault. The postseismic deformation field suggests active tectonic deformation along the Pulu fault, and attests that this fault is part of the Karokash-Western Altyn Tagh fault system, accommodating the eastward extrusion of the northern Tibetan plateau with respect to the Tarim basin.

**Keywords** Yutian earthquake, GPS, Coseismic displacement, Postseismic displacement, Pulu fault, Stress triggering

## 1 引言

2008 年 3 月 21 日北京时间 06 时 33 分,新疆维吾尔自治区于田县发生  $M_s7.3$  级地震,震中位于  $35.6^\circ\text{N}$ ,  $81.6^\circ\text{E}$  (<http://www.ceic.ac.cn/eq.jsp?id=99265>[2011-01-22]). 此次地震发生在青藏高原西北缘,位于西昆仑地震带和阿尔金地震带的交汇区内靠近西昆仑山区的边缘部分,地质结构较为复杂(图 1). 这次地震后又发生一系列余震,其中最大震级为 6.2 级.

前人的研究认为位于阿什库勒盆地的阿尔金断裂西南分支即郭扎错断裂是这次地震的发震构造<sup>[1~3]</sup>. 聂晓红<sup>[4]</sup>根据近场地震波数据和 USGS 与 Harvard CMT 根据远场地震波数据给出的震源机制解,虽然在节面解和应力轴方位有较大差别,但断错性质基本一致,都是略带走滑分量的正断层(图 1). 地震后李海兵等<sup>[5]</sup>在震中区进行了野外科考,发现地表破裂长度约 32 km,几何形态复杂. 徐锡伟等<sup>[3]</sup>根据高分辨率卫星影像解译和野外考察同样给出地表破裂带长约 31 km,近 N-NNW 走向,兼有左旋走滑和正断倾滑分量,测量到得最大左旋走滑位移 1.8 m,最大垂直位移约 2.0 m. 洪顺英等<sup>[6]</sup>基于 ASAR 二轨法差分干涉测量同样得到这次地震以正断层破裂为主并兼有左旋走滑分量,NW 盘沉降量 67~84 cm,SE 盘隆升量 13~37 cm.

利用 GPS 观测获得震区形变场是认识和理解地震发生机理、研究发震断裂运动学性质的重要手段之一. 于田地震发生后,我们在地震临近区域布设了 3 个临时 GPS 连续观测点并进行了为期半年的观测,以研究断层带和地壳介质的流变学结构及其对地震的动态响应. 同时复测了中国地壳运动观测网络(以下简称 CMONOC)的 4 个区域流动 GPS 点,导出了这 4 个点的同震位移. 由于震区地理位置这一客观因素的限制,观测点与震源有几十至上百

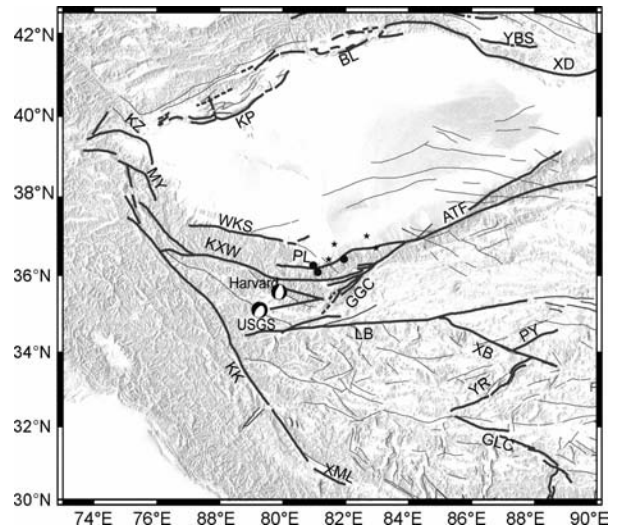


图 1 地震附近区域地质构造图

五角星表示流动 GPS 点,实心圆表示连续 GPS 点,断裂缩写如下:YBS-焉耆盆地南缘断裂,XD-兴地断裂,BL-北轮台断裂,KZ-卡兹克阿尔特断裂,KP-柯坪断裂,WKS-西昆仑断裂,ATF-阿尔金断裂,MY-米牙断裂,PL-普鲁断裂,KXW-康西瓦断裂,GGC-贡嘎错断裂,KK-喀喇昆仑断裂,LB-龙木错-邦达错断裂,GLC-格林错断裂,PY-琵琶湖-映天湖断裂.

Fig. 1 Epicenter location and regional faults map

Pentagram represents campaign GPS site, solid circle means continuous GPS site, abbreviations of fault names: YBS-Yanqi basin southern fringe fault, XD-Xingdi fault, BL-North Luntai fault, KZ-Stewart Katz Yasar fault, KP-Keping fault, WKS-West KunLun fault, ATF-Altyn Tagh fault, MY-Miya fault, PL-Pulu fault, KXW-Kangxiwa fault, GGC-Gonggacuo fault, KK-Kelakunlun fault, LB-Longmucuo-Bangdacuo fault, GLC-Gelincuo fault, PY-Pipa Lake-Yingtian Lake fault.

公里距离,获得的形变资料有限,但通过对这些资料的分析,依然有助于我们加深对于于田地震破裂机制及对周边断层影响的认识.

## 2 GPS 原始数据的处理

GPS 原始数据的处理采用 GAMIT/GLOBK 软件包完成<sup>[7,8]</sup>. 为了保证数据处理的可靠性,我们

对本研究涉及的所有 GPS 原始观测数据都采用相同的模型、参量和方法进行统一处理,其中包括与于田地震震区观测数据同步的全球 IGS 站和 CMONOC 基准站的数据.为了提高数据处理的效率,数据处理分为全球、全国和区域 3 个层次进行,然后通过公共 GPS 点的坐标参数和卫星轨道参数结合起来,由此获得一系列包括全球 IGS 站、CMONOC 基准站和震区区域 GPS 点的单日解.单日解给出了这些站点的坐标、极移和卫星轨道参数的松弛解及其方差-协方差矩阵,是求解同震位移和震后位置时间序列的准观测值.更详尽的方法介绍参见文献[9].

## 3 结 果

### 3.1 同震位移

震后复测的 4 个区域流动 GPS 点在震前已有 4 期观测(1999、2001、2004 和 2007),由此我们可以通过震前及震后观测数据导出这 4 个点的震前运动速率和同震位移.

GPS 点震后速度场相对震前有明显变化,这种变化的变化率表现出随时间逐渐衰减的特征.如果震后位移以对数函数模拟, $t_{eq}$  表示地震时刻,那么 GPS 点震后  $t_i$  时刻的位置分量  $y(t_i)$  可表示成:

$$y(t_i) = y(t_0) + v(t_i - t_0) + c + p \lg[1 + (t_i - t_{eq})/\tau] + r_i \quad t_i > t_{eq}, \quad (1)$$

其中, $t_0$  时刻的位置  $y(t_0)$ 、长期构造运动速度  $v$ 、地震的同震位移  $c$ 、震后位移系数  $p$  和时间常数  $\tau$  都是待定参数, $r_i$  表示残差.由于这 4 个点震后观测数据很少,不足以解算震后位移系数  $p$  和时间常数  $\tau$ ,考虑到其 2008 年的震后复测是在地震发生后的 20 天左右完成的,所以在此忽略震后形变的影响,只求解线性的构造运动速率和同震位移.于田地震的正断性质意味着破裂断层的两侧存在明显的垂向运动,但由于这 4 个 GPS 点位于破裂断层的北侧,距破裂断层  $\sim 100$  km,垂直位移仅在 mm 量级<sup>[6]</sup>,GPS 目前的垂直定位精度尚不足以捕捉到这样量级的垂直运动;鉴于此,本文仅讨论水平方向的位移及形变.

4 个 GPS 点的同震水平位移见图 2.从图 2 可以看出 4 个 GPS 点的同震位移显现出一致性的东南向运动特征.如果本次地震为纯正断型破裂,考虑这 4 个点所处的位置,其同震位移方向应主要指向南南西(关于地表形变场与震源破裂机制关系可参见 Okada<sup>[10]</sup>).因此这些站点东南向的运动表明这

次地震除张性断裂外确实具有左旋走滑性质,而且不容忽略. I070 点同震位移南向 14 mm, 东向 5 mm, 是 4 个点中最大的,与其所处的地理位置相符.

### 3.2 震后位移时间序列

为了更直观地认识震后形变的特征,我们通过全球 IGS 站获得了震区 GPS 连续观测站在全球参考框架下的位置时间序列,从位置时间序列中去除长期构造运动成份,得到震后位移时间序列.震后新建 3 个临时 GPS 连续观测站的长期构造运动速率采用区域速度场的内插值,内插方法见沈正康等<sup>[11]</sup>. 4 个区域流动 GPS 点在 2009 年亦有复测,同样我们也得到了其震后位移的时间序列.

与同震位移相比,震后形变信息比较微弱,而且通常与区域性非构造运动信息混淆在一起<sup>[12, 13]</sup>. 分别距震中约 650 km 和 800 km 的 CMONOC 基准站 WUSH 和 TASH 的“震后位移”序列呈现出一致性的波动就是证明.我们选择 TASH 为参考站滤去这些非构造运动信息,最终获得的震区 GPS 站点震后位移时间序列见图 3.

从图 3 可以看出,这些站点震后呈现出比较一致性的南西向运动.由于 3 个临时连续站和 4 个区域流动点的观测时间段不同,为了便于比较与分析,我们采用(1)式对震后位移时间序列进行拟合,其中  $t_0$  时刻的位置  $y(t_0)$  和同震位移  $c$  作为一个参数求解,相对于震前运动速率(速率是由内插方法得到的,已在时间序列中扣除)的线性参数设为零并予以 1 mm/a 的约束.震后位移系数  $p$  和时间常数  $\tau$  具有较强的相关性,并且  $\tau$  为非线性参数,很难与  $p$  同时反演确定.我们尝试在一定的范围内遍历时间常数  $\tau$ ,在每一次遍历中利用最小二乘方法反演  $p$ ;在所有的遍历中,取残差最小时对应的时间常数  $\tau$  为最佳时间常数.结果表明最佳时间常数为 15 天, F 检验获得 70% 置信期间范围为 4~29 天(见图 4).震后位移系数  $p$  标示于图 2.

## 4 讨论与结论

图 2 清晰地揭示于田地震的震后形变波及到了距破裂断层  $\sim 100$  km 的普鲁断裂邻域地区,而且普鲁断裂两侧的形变,特别是平行于断裂的分量,存在明显的差异性.这种差异性在断裂的东段表现得更为明显.利用拟合得到的参数与公式(1)可以推算出震后 1 年各 GPS 站点的位移量,将此位移量投影到平行于断裂的方向,我们得到普鲁断裂平均每年

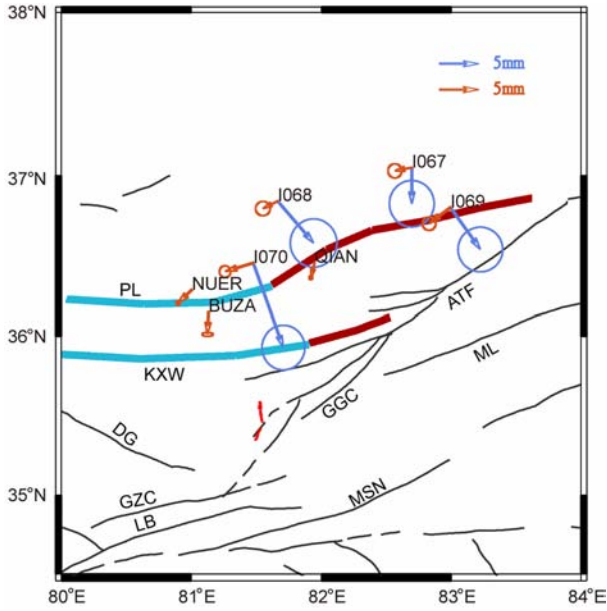


图 2 GPS 点的同震位移及震后形变

红色虚线表示地表破裂带<sup>[3]</sup>. 蓝色箭头表示同震位移, 橙色箭头表示震后位移系数. 误差椭圆表示 70% 置信期间. 红色粗线表示断层上库伦应力增加, 大约增加 20000 Pa, 蓝色粗线表示断层上库伦应力减少, 大约减少 90000 Pa. ML-木兹鲁克-鲤鱼断裂, DG-大红柳滩-郭扎错断裂, GZC-郭扎错断裂, LB-龙木错-邦达错断裂, MSN-墨石北湖断裂.

Fig. 2 Coseismic and postseismic displacements of the GPS sites

Red dashed line is the surface ruptures<sup>[3]</sup>. Blue arrows show coseismic displacements, orange arrows show postseismic displacements modulus. Error ellipses represent regions of 70% confidence. Red thick line presents an increase of the coulomb stress on the fault about 20000 Pa, blue thick line presents a decrease of the coulomb stress on the fault about 90000 Pa. ML-Muziluke-Liyu fault, DG-Dahongliutan-Guozhacuo fault, GZC-Guozhacuo fault, LB-Longmucuo-Bangdacuo fault, MSN-Moshi north lake fault.

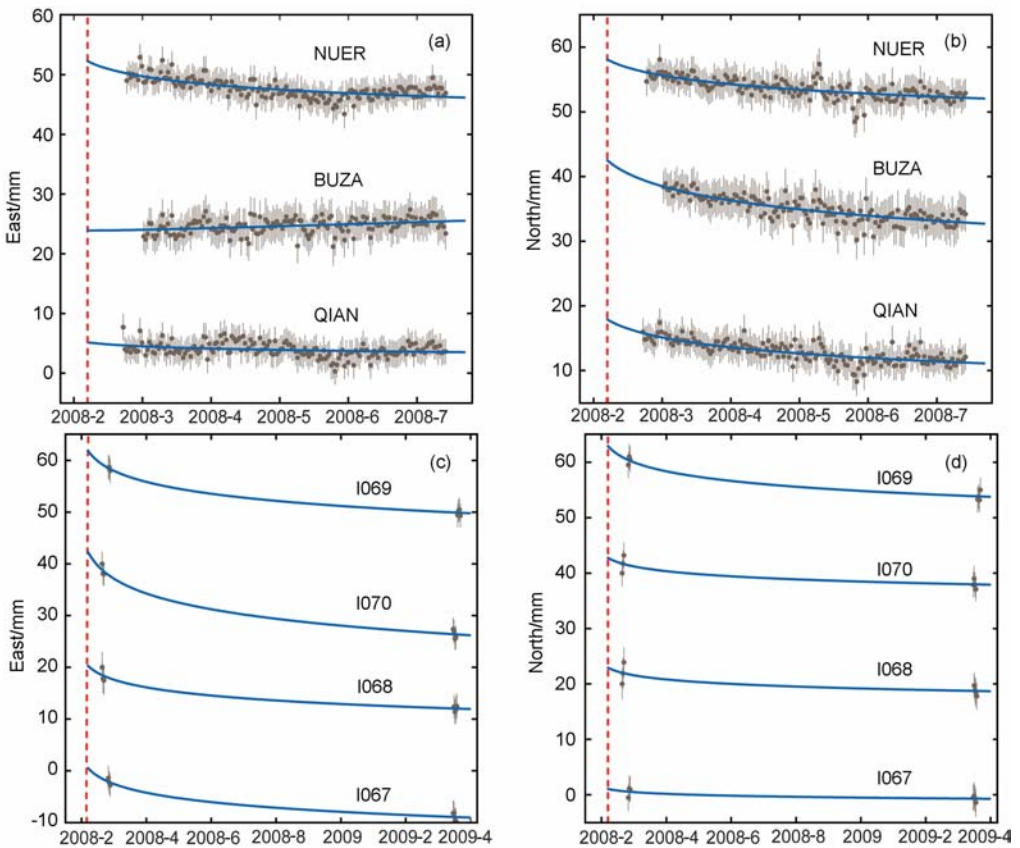


图 3 GPS 站点震后形变时间序列

红色虚线表示地震发生时刻, 蓝色曲线表示时间常数为 15 天的对数衰减模型理论值.

(a, b) 3 个临时连续站 (NUER, BUZA, QIAN) 结果; (c, d) 4 个区域流动点 (I069, I070, I068, I067) 的观测结果.

Fig. 3 Postseismic displacement time series of the GPS sites

Red dotted lines mark the epoch of earthquake occurrence, blue curves are postseismic displacements predicted by a logarithmic relaxation model with a time constant of 15 days.

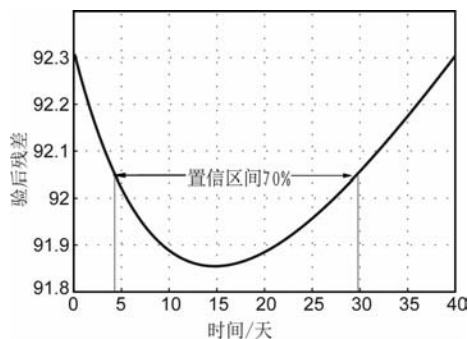


图4 震后形变时间常数拟合的F检验结果

Fig. 4 The estimation F test result for time constant of logarithmic relaxation model

2.8 mm的左旋走滑. 如果这个左旋走滑是震间形变, 那么与地质学上对普鲁断裂纯逆冲的活动性质的认识是有差异的<sup>[14]</sup>. 于田地震前 GPS 站点在研究区域内没有形成跨普鲁断裂的基线, 因此缺少根据 GPS 方法对普鲁断裂的研究成果. 如果普鲁断裂的活动没有受到震后形变的影响, 通常其活动基本呈现近似稳态, 可以用线性模型描述.

通过 F 检验, 我们发现与线性模型相比, 对数衰减模型能更好地拟合震后的形变时间序列, 对数衰减模型参数的显著性水平为 60% (对数衰减模型较线性模型具有较多的未知参量, 因此计算显著性水平采用增量 F 检验法). 这表明普鲁断裂两侧 GPS 站点的震后形变在一定程度上呈现了随时间衰减的特征, 并非是长期的构造运动.

4 个区域流动 GPS 点震后向西南方向运动, 与同震位移方向(东南方向)不符(图 2), 表明导致这 4 个 GPS 点发生同震和震后位移的形变源并不相同, 震后形变不是于田地震破裂断层的震后余滑造成的. 而普鲁断裂两侧 GPS 站点的震后位移在平行于断层方向上有明显的差异, 因此我们推断这些 GPS 站点的震后位移可能是普鲁断裂的活动造成的.

已有的 GPS、InSAR、地质学的研究表明康西瓦-阿尔金断裂带具有左旋走滑的活动特征, 并且 GPS 与 InSAR 揭示的形变场有可能不仅限于康西瓦断裂, 而是涵盖康西瓦断裂及其邻域的西昆仑构造带<sup>[15~17]</sup>. 普鲁断裂处于这一构造带北缘, 也具有相似的左旋活动的可能性, 而我们震后形变观测结果亦揭示了这种可能的现实存在. 进一步, 我们计算了于田地震对普鲁断裂上走滑分量和逆冲分量所产生的库伦应力变化(计算方法和地震参数的选取与万永革等<sup>[18]</sup>相同), 结果表明于田地震对普鲁断裂走滑分量的应力触发作用远远大于对逆冲分量的触发作用. 在走滑分量上, 普鲁断裂东段库伦应力增加

~20000 Pa, 断裂西段的库伦应力减少~40000 Pa. 而图 2 中的震后形变结果也表明普鲁断裂东段(I067、I068、I069 相对 QIAN)的震后左旋走滑表现得强于西段(NUER 相对 BUZA), 与库伦应力变化的结果一致. 因此, 有理由推断于田地震触发了普鲁断裂的活动, 增强了普鲁断裂的左旋滑移.

通过分析于田地震前、后的 GPS 观测资料, 我们得出如下结论:

(1) 位于于田地震破裂断层北侧 100 km 附近的 GPS 点监测到了 10 mm 左右的同震位移. 同震位移呈现一致性的东南向运动特征, 表明于田地震确实存在显著的左旋走滑分量.

(2) 跨普鲁断裂两侧, 震后形变呈现明显的差异性, 特别是平行于断裂的左旋分量更为显著. 考虑同震位移与震后形变方向的差异, 推断可能是于田地震触发了普鲁断裂的左旋滑移. 进一步, 考虑到近断裂的 GPS 站点明显地捕捉到了断层的滑动, 表明这种滑移可能发生在地壳浅部.

(3) 普鲁断裂在于田地震发生后呈现的构造活动特征表明, 普鲁断裂是康西瓦-西阿尔金断裂带的一部分, 兼具左旋走滑与逆冲分量; 与康西瓦-西阿尔金断裂带一起吸收了青藏高原西北缘相对于塔里木盆地的东向逃逸与北向入侵.

**致谢** 感谢中国地壳运动观测网络数据中心提供 2009 年区域流动 GPS 点的观测数据.

## 参考文献(References)

- [1] 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 M<sub>7.3</sub> earthquake on March 21, 2008, Xinjiang. *Earthquake Research in China* (in Chinese), 2009, **25**(2): 199~205
- [2] 尹光华, 蒋靖祥, 吴国栋. 2008 年 3 月 21 日于田 7.4 级地震的构造背景. 干旱区地理, 2008, **31**(4): 543~549  
Yin G H, Jiang J X, Wu G D. Tectonic background of the M<sub>7.4</sub> earthquake at Yutian on March 21. *Arid Lang Geography* (in Chinese), 2008, **31**(4): 543~549
- [3] 徐锡伟, 谭锡斌, 吴国栋等. 2008 年于田 M<sub>7.3</sub> 地震地表破裂带特征及其构造属性讨论. 地震地质, 2011, **33**(2): 462~471  
Xu X W, Tan X B, Wu G D, et al. Surface rupture features of the 2008 Yutian M<sub>7.3</sub> earthquake and its tectonic nature. *Seismology and Geology* (in Chinese), 2008, **33**(2): 462~471
- [4] 聂晓红. 新疆于田 7.4 级地震震源机制结果. 内陆地震,

- 2008, **22**(2): 114
- Nie X H. Focal mechanism of the Yutian  $M_s7.4$  earthquake, Xinjiang. *Inland Earthquake* (in Chinese), 2008, **22**(2): 114
- [5] Li H B, Tapponnier P, Klinger Y, et al. Field study of the 20/03/2008,  $M_w7.2$  Ashikule earthquake rupture (Xinjiang, China). AGU Abstract, 2009
- [6] 洪顺英, 申旭辉, 单新建等. 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. 国土资源遥感, 2010, **84**(4): 98~102
- Hong S Y, Shen X H, Shan X J, et al. 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. *Remote Sensing for Land & Resources* (in Chinese), 2010, **84**(4): 98~102
- [7] Herring T A. GLOBK, Global Kalman Filter VLBI and GPS Analysis Program, Version 10.1. Cambridge: Massachusetts Institute of Technology, 2005
- [8] King R W, Bock Y. Documentation for the GAMIT GPS analysis software, release 10.3. Cambridge: Massachusetts Institute of Technology, 2006
- [9] 王 敏, 沈正康, 甘卫军等. GPS 连续监测鲜水河断裂形变场动态演化. 中国科学(D辑: 地球科学), 2008, **38**(5): 575~581
- Wang M, Shen Z K, Gan W J, et al. GPS monitoring of temporal deformation of the Xianshuihe fault. *Science in China (Series D: Earth Sciences)* (in Chinese), 2008, **51**(9): 1259~1266
- [10] Okada Y. Internal deformation due to shear and tensile faults in a half-space. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 1992, **82**(2): 1018
- [11] 沈正康, 王 敏, 甘卫军等. 中国大陆现今构造应变率场及其动力学成因研究. 地学前缘, 2003, **10**(U08): 93~100
- Shen Z K, Wang M, Gan W J, et al. Contemporary tectonic strain rate field of Chinese continent and its geodynamic implications. *Earth Science Frontiers* (in Chinese), **10**(U08): 93~100
- [12] Dong D N, Fang P, Bock Y, et al. Anatomy of apparent seasonal variations from GPS—derived site position time series. *J. Geophys. Res.*, 2002, **107**(B4): ETG9-1-ETG9-16
- [13] 王 敏, 沈正康, 董大南. 非构造形变对 GPS 连续站位置时间序列的影响和修正. 地球物理学报, 2005, **48**(5): 1045~1052
- Wang M, Shen Z K, Dong D N. Effects of non-tectonic crustal deformation on continuous GPS position time series and correction to them. *Chinese J. Geophys.*, 2005, **48**(5): 1121~1129
- [14] 邓起东, 冉勇康, 杨晓平等. 中国活动构造图. 北京: 地震出版社, 2007
- Deng Q D, Ran Y K, Yang X P, et al. Map of Active Tectonics in China (in Chinese). Beijing: Seismological Press, 2007
- [15] Shen Z K, Wang M, Li Y X, et al. Crustal deformation along the Altyn Tagh fault system, western China, from GPS. *J. Geophys. Res.*, 2001, **106**(B12): 30607~30621
- [16] Wright T J, Parsons B, England P C, et al. InSAR observations of low slip rates on the major faults of western Tibet. *Science*, 2004, **305**(5681): 236~239
- [17] 付碧宏, 张松林, 谢小平等. 阿尔金断裂系西段——康西瓦断裂的晚第四纪构造地貌特征研究. 第四纪研究, 2006, **26**(2): 228~235
- Fu B H, Zhang S L, Xie X P, et al. Late Quaternary tectono-geomorphic features along the Kangxiwar fault, Altyn Tagh fault system, Northern Tibet. *Quaternary Sciences* (in Chinese), **26**(2): 228~235
- [18] 万永革, 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 Z S, et al. The mechanical effects of the 2008  $M_s7.3$  Yutian, Xinjiang earthquake on the neighboring faults and its tectonic origin of normal faulting mechanism. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), **53**(2): 280~289

(本文编辑 胡素芳)