

2014 年新疆于田 $M_s 7.3$ 地震的地壳构造变形背景*

杨 博, 朱 爽, 楼关寿, 周海涛

(中国地震局第一监测中心, 天津 300180)

摘要: 利用 2011 ~ 2013 年的流动 GNSS 观测资料及处理结果, 获得了 2014 年于田 $M_s 7.3$ 地震区域水平形变场。结果显示: (1) 于田 $M_s 7.3$ 地震发生在构造活动较强烈的阿尔金断裂带西端, 其两侧的形变差异运动为 8 ~ 9 mm/a, 左旋运动是差异运动的主要成份; (2) 发震区域的主应变是全区最突出的区域, 张压大小相对均等, 主张方向为南东东—北西西; (3) 该地震发生在左旋形变的高梯度带上, 其北部的塔里木盆地为较弱的右旋形变, 其南部约 150 km 以外几乎无旋形变; (4) 地震发生的部位为面应变性质转变的过渡带, 其西为面膨胀区, 其东为面收缩区。

关键词: GNSS 观测资料; 于田 $M_s 7.3$ 地震; 构造形变

中图分类号: P315.72

文献标识码: A

文章编号: 1000-0666(2015)03-0384-05

0 引言

2008 年 3 月 21 日在新疆于田 (35.6°N , 81.6°E) 发生了 $M_s 7.3$ 地震 (震源深度 13 km)。2014 年 2 月 12 日同样在新疆于田 (36.1°N , 82.5°E) 发生了 $M_s 7.3$ 地震 (震源深度 12 km), 前一天几乎在相同的地域 (36.1°N , 82.4°E) 发生了一次 5.4 级地震 (震源深度 11 km), 并被视为 $M_s 7.3$ 地震的前震 (程佳等, 2014)。6 年内于田地区连续发生了 2 次 7 级以上地震, 不仅表明了该区域中强地震出现了空前活跃, 同时该区域构造活动得到进一步关注。万永革等 (2010) 给出了 2008 年于田 $M_s 7.3$ 地震正断层机制的构造区域解释, 认为是青藏高原沿阿尔金断裂的整体东向运动与兴都什块体的西北向运动共同作用的结果; 王凡等 (2011) 得到了破裂断层北侧 100 km 附近的同震位移及震后形变信息, 认为该地震在原有的基础上导致了北侧断裂带的左旋位移; 冀战波等 (2014) 反演了该地震的破裂过程, 指出破裂区以正断左旋走滑为主的双侧破裂, 最大破裂为 151 cm, 为以东西向拉张为主并与左旋张扭作用的结果。程佳等 (2014) 指出 2014 年于田 $M_s 7.3$ 地震为左旋走滑的破裂模式, 与前次地震相比震源机制完全不同 (王晓欣等, 2014), 为一次典型的

盲断层地震。这可能说明区域构造活动在空间上存在着差异。本文利用 2011 ~ 2013 年区域流动 GNSS 复测资料以及多核函数法对该区域形变进行描述, 以便较清晰地了解于田地区强震发生的地壳形变背景。

1 数据处理方法

原始观测数据采用 GMAIT/GLOBK/QOCA 软件包计算获得 ITRF 框架下运动结果, 之后可利用多核函数法在球面上进行运动场的数值解析:

$$\begin{cases} f(\lambda, \varphi) = \sum c_j s_j(\lambda, \varphi, \lambda_j, \varphi_j) = \mathbf{S}^T \mathbf{C}, \\ s_j(\lambda, \varphi, \lambda_j, \varphi_j) = d_j^{1,1} + 1. \end{cases} \quad (1)$$

式中, d_j 为球面上两点间的大地线长度 (以 km 为单位), (λ_j, φ_j) 为核点位置坐标, $\mathbf{S}^T = (s_1, s_2, \dots, s_{n_s})$ 为核函数阵 (该式侧重线性性), $\mathbf{C}^T = (c_1, c_2, \dots, c_{n_s})$ 为系数阵。

在获得解析式的基础上分别对东向和北向进行网格化数值计算, 然后对它们进行滤波处理以获得水平运动的解析式:

$$\begin{cases} F_e(\lambda, \varphi) = \sum a_i s_i(\lambda, \varphi, \lambda_i, \varphi_i) = \mathbf{S}^T \mathbf{A}, \\ F_n(\lambda, \varphi) = \sum b_i s_i(\lambda, \varphi, \lambda_i, \varphi_i) = \mathbf{S}^T \mathbf{B}, \\ s_j(\lambda, \varphi, \lambda_i, \varphi_i) = \exp(-(d_i/780)^{2.8}). \end{cases} \quad (2)$$

* 收稿日期: 2014-07-18.

基金项目: 地震行业科研专项 (201308009, 201208006) 和科技支撑项目 (2012BAK19B01-2) 联合资助.

式中, $\mathbf{S}^T = (s_1, \dots, s_{n_x})$ 为核函数阵 (该式侧高度重光滑性)、 $\mathbf{A}^T = (a_1, \dots, a_{n_x})$ 、 $\mathbf{B}^T = (b_1, \dots, b_{n_x})$ 、 $\mathbf{C}^T = (c_1, \dots, c_{n_x})$ 均为待定系数, (λ_i, φ_i) 为核点位置坐标, d_i 为两点间的大地线长度; 在此基础上依据下式便可获得相关的应变与旋转量结果等:

$$\begin{cases} \varepsilon_e(\lambda, \varphi) = \frac{\partial F_e(\lambda, \varphi)}{\partial S_\lambda} - \frac{F_n(\lambda, \varphi)}{R} \tan \varphi, \\ \varepsilon_n(\lambda, \varphi) = \frac{\partial F_n(\lambda, \varphi)}{\partial S_\varphi}, \\ \gamma_{en}(\lambda, \varphi) = \frac{1}{2} \left[\frac{\partial F_n(\lambda, \varphi)}{\partial S_\lambda} + \frac{\partial F_e(\lambda, \varphi)}{\partial S_\varphi} + \frac{F_e(\lambda, \varphi)}{R} \tan \varphi \right], \\ \omega(\lambda, \varphi) = \frac{1}{2} \left[\frac{\partial F_n(\lambda, \varphi)}{\partial S_\lambda} - \frac{\partial F_e(\lambda, \varphi)}{\partial S_\varphi} - \frac{F_e(\lambda, \varphi)}{R} \tan \varphi \right]. \end{cases} \quad (3)$$

式中, R 为地球的平均半径, S_λ 和 S_φ 分别为经向和纬向的弧长, $\varepsilon_e(\lambda, \varphi)$ 为东西向应变, $\varepsilon_n(\lambda, \varphi)$ 为南北向应变, $\gamma_{en}(\lambda, \varphi)$ 为它们之间的剪应变, $\omega(\lambda, \varphi)$ 为旋转量。在 (3) 式的基础上便可得到:

$$\begin{cases} d(\lambda, \varphi) = \varepsilon_e(\lambda, \varphi) + \varepsilon_n(\lambda, \varphi), \\ \gamma_{\max}(\lambda, \varphi) = (\varepsilon_{\max}(\lambda, \varphi) - \varepsilon_{\min}(\lambda, \varphi))/2, \\ \varepsilon_{\max}(\lambda, \varphi) = (\varepsilon_e(\lambda, \varphi) + \varepsilon_n(\lambda, \varphi) + \sqrt{4\gamma_{en}^2(\lambda, \varphi) + (\varepsilon_n(\lambda, \varphi) - \varepsilon_e(\lambda, \varphi))^2})/2, \\ \varepsilon_{\min}(\lambda, \varphi) = (\varepsilon_e(\lambda, \varphi) + \varepsilon_n(\lambda, \varphi) - \sqrt{4\gamma_{en}^2(\lambda, \varphi) + (\varepsilon_n(\lambda, \varphi) - \varepsilon_e(\lambda, \varphi))^2})/2, \\ \theta(\lambda, \varphi) = \arctg((\varepsilon_{\max}(\lambda, \varphi) - \varepsilon_e(\lambda, \varphi))/\gamma_{en}(\lambda, \varphi)). \end{cases} \quad (4)$$

式中, d 、 γ_{\max} 、 ε_{\max} 、 ε_{\min} 、 θ 分别为面应变、最大剪切应变、最大主应变、最小主应变及最大主应变方位角。其中, ε_e 、 ε_n 分别为时刻东向和北向位置变化值。在获得有关数值结果后生成图像结果 (图 1)。

2 水平运动与形变场

中国地壳运动观测网络于 1998 年在中国大陆

范围内布设了 GPS 流动测站, 用于监测地壳形变及其动态变化, 但是新疆地区测站密度非常稀疏, 2008 年又进行了加密布设, 使该区流动观测站的数量有了一定程度的增加, 接近 50 个。到目前为止已进行了 3 次观测, 分别为 2009、2011 和 2013 年。考虑到 2008 年于田 $M_s 7.3$ 地震对周围地区可能产生的影响, 本文只取用 2011 和 2013 年两期观测资料来获取该研究区的基本运动与形变状态, 此时间段内该区域未发生过强震。根据上述数据处理流程首先利用 GAMIT/GLOBK/QOCA 软件获得该时段 ITRF 参考框架下的运动结果; 然后以此获得相对于区域无旋转基准的运动结果 (杨国华等, 2005), 接下来再对研究区相对运动速度及误差结果进行数值逼近; 在此基础上, 结合以经、纬步长均为 30 km 计算网格点上的运动结果, 在核点经、纬步长为 150 km 等间隔的条件下, 进行水平运动的滤波计算和形变场的有关参数计算等。

图 1a 为 2011~2013 年相对于区域整体无旋转基准的水平运动场。由此不难看出, 差异运动不但非常明显而且有序, 清晰地凸显了于田及周围地区的水平向构造活动状态。从运动的有序性来看, 大体以阿尔金断裂带为界, 南、北两侧块体均呈顺时针运动, 但两侧旋转中心有所不同, 北块在其北, 南块则在其南, 因此形成了两块 (体) 交汇地域的差异运动, 大约在 150 km 的宽度内由西向东存在着 4~8 mm/a 的左旋运动 (东大西小); 然而, 垂直于该形变带的张压性活动在空间上则存在性质上的差别, 表现为西段为张性活动, 中段与东段为压性活动, 量级约 2 mm/a。北块 (塔里木盆地的南边缘) 的运动整体性相对较好, 南块运动则不同, 有较大的差异性, 主要表现在东向分量上, 最大可达 5 mm/a, 为拉张性质。研究区这种运动状态充分说明了该区构造活动的强烈性与复杂性。这两次强震的震中位置或位于构造活动强烈的部位, 或位于活动性质出现转变的过渡部位, 因此有着深刻的构造活动含义。

图 1b 为以应变张量形式展现主应变方向和大小的空间分布状态。区域主压方向在空间上有一定程度的变化, 研究区南部 (35°N 以南) 由西向东表现为北东—南西向、近南北向的变化过程, 研究区中部 (35°N 以北, 塔里木盆地以南) 由西向东表现为北东—南西向、北北东—南南西向、近南北向的变化过程。就大小而言, 研究区南部

压应变相对较弱,一般在 $1 \times 10^{-8}/a$ 之内,空间上的变化也不明显;张性应变相对较大些,基本上在 $2 \times 10^{-8}/a$ 之内,但空间上的变化是可见的,其东区几乎为零,中区和西区较大,表现为明显的东西向拉张。研究区中部的应变在全区最为突出,

最大可达 $4 \times 10^{-8}/a$,基本上位于阿尔金断裂带及附近的南部区带。所有这些表明,应力的方向在空间上虽存在一些变化,但较为有序平稳,而应变则主要集中在断裂带上。除此之外,在震中以南也存在着张性应变较大的地域,且向东则很快就消失了,

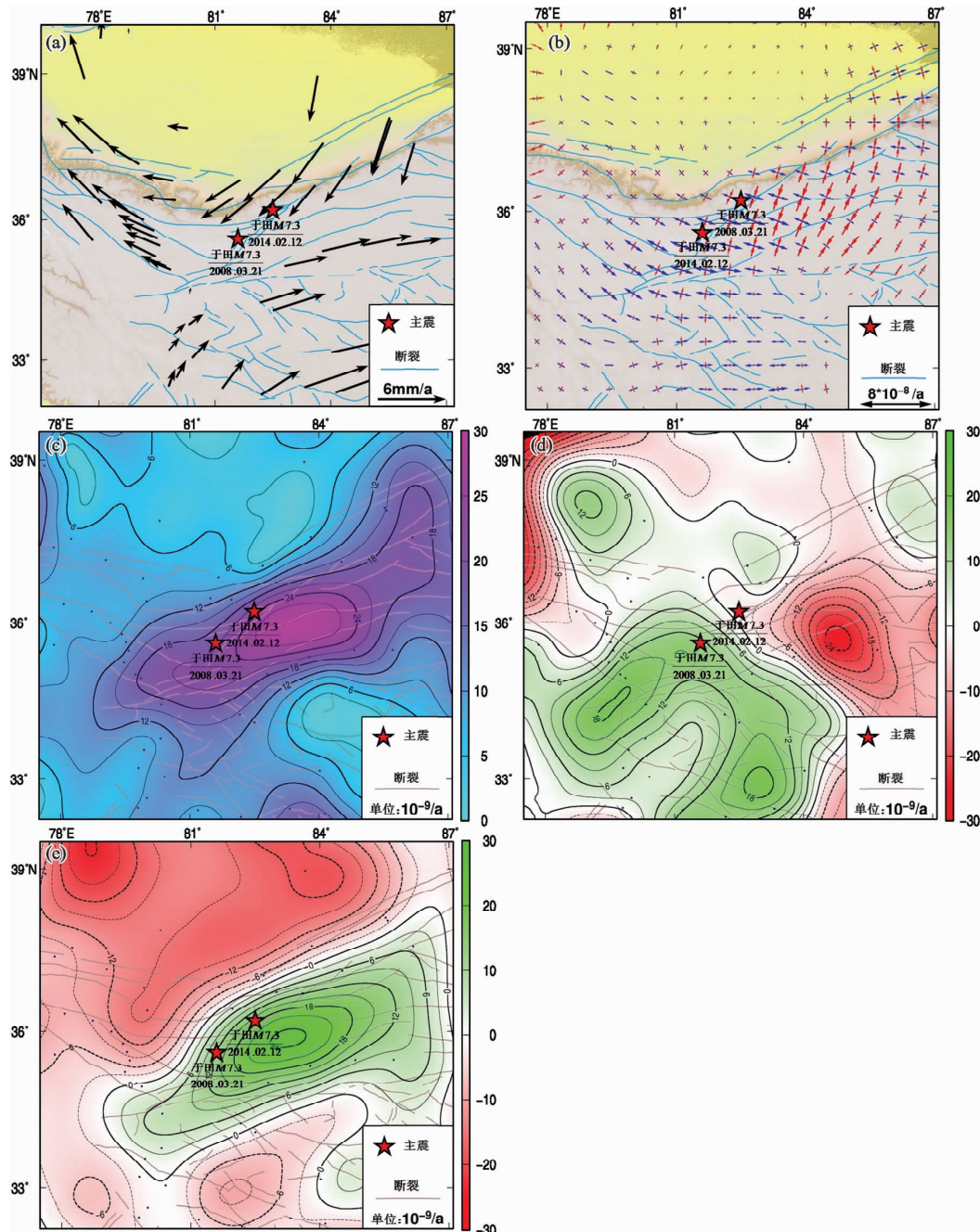


图1 于田周边地区2011~2013年相对于区域无旋转基准的水平运动(a)、主应变方向及大小(b)、最大剪切应变率(c)、水平旋转率(d)、面应变率(e)

Fig. 1 Horizontal movement relative to regional non-rotation reference frame (a), main strain value and its direction (b), maximum shear strain rate (c), horizontal rotation rate (d), and plane strain rate (e) in the surrounding area of Yutian $M_s 7.3$ earthquake from 2011 to 2013

这一结果似乎有某种特定的地球物理含义。

由图 1c 可知, 最大剪切应变率大小的空间分布具有带状特征, 其值最大近 $3 \times 10^{-8}/a$, 强震就发生在最大值的附近地域。这一分布特征表明高值剪切应变主要发生在阿尔金断裂带及附近区域, 其他区域则相对较小。研究区西侧的断层剪切应变较小, 这预示着这些断层的走滑活动较弱, 相应发生走滑型强震的几率也会相对较低。其南部区域也是如此, 张性错断型地震可能是这一区域主要的地震错断方式。

图 1d 为水平旋转率的空间分布结果, 其差异变化所反映的是旋剪形变, 其值大于 0 时表示为左旋旋剪形变 (绿色区域), 反之表示为右旋旋剪形变 (红色区域), 它可清晰地刻画旋剪形变的大小与性质。由图可知, 西北地区 (塔里木盆地) 为右旋活动区, 其右旋活动最大值为 $25 \times 10^{-9}/a$, 但由于区内的梯度较小, 表明该区域以整体旋转活动为主, 旋剪变形较弱。阿尔金断裂带及附近地区为左旋活动区段, 最大值也为 $25 \times 10^{-9}/a$, 但空间变化梯度较大, 因此主要表现的是旋剪变形而不是整体旋转活动。南部地区旋转量最小, 且左、右旋的优势均不突出。两次于田强震不仅发生在左旋旋剪形变带内, 同时也位于高梯度带上, 表明它们与剪切形变有一定的关系。

面应变率的空间分布如图 1e 所示, 从图中可以看出, 北部地区 (塔里木盆地) 整体上最弱, 究其原因为该区的刚性强度较高 (胥颐等, 2001), 因此是一个弱形变地域。事实上, 描述形变的各个物理参数都表明了这一点。研究区南部虽是一个形变强度较高的地区, 但在形变性质上并非一致, 东部为面收缩应变区, 西部为面膨胀应变区, 这样的区域性状态反映了形变的不均衡特征, 或许更有利于能量以不同形变方式的积累。2014 年于田地震位于面膨胀与收缩的过渡区。

新疆地区布设了 30 余个 GNSS 连续观测站, XJYT 站是距 2014 年于田 $M_s7.3$ 强震震中最近的测站, 相距约 60 km, 位于其西北部, 其它测站距震中都超过了 300 km。数据处理表明, 除 XJYT 站外, 其它测站均未发现可识别的同震变化。

图 2 为 XJYT 站自观测以来 E、N、U 三分量的时间序列结果。图中可以看出, 地震前在测站位置上并没有出现通常意义下的形变前兆或异动, 各个分量均保持在各自原有的线性状态下。震时

存在着同震位移, 东向约 -20 mm, 北向约 10 mm, 法向 0 mm。由于其他站无变化, 从空间域的角度看似显现为张性的左旋错动迹象, 这还有待于进一步观察, 因为这与震源机制解的左旋错动并非完全一致。由于震源区及周围地域震后尚未进行复测, 所以目前还无法给出本次地震同震位移的空间范围、大小和确切的性质。

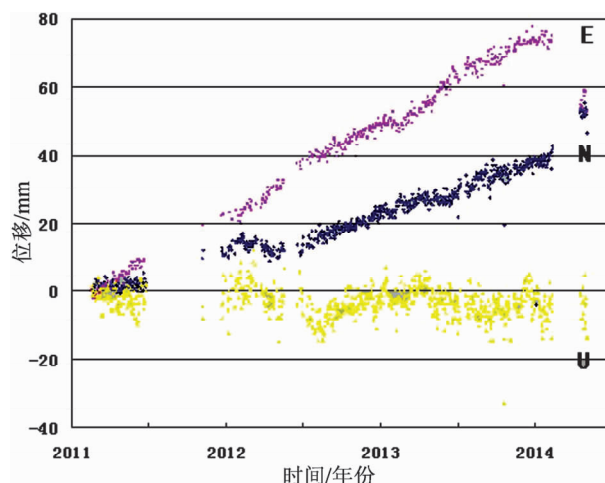


图 2 XJYT 测站的 3 分量的时序结果

Fig. 2 Time sequence results of three component at XJYT station

3 讨论

综上所述, 6 年内于田地区发生了两次 7 级以上地震, 表明了该区域构造活动是非常活跃的。本文所得出的 GNSS 结果较详细地勾画了该区域构造形变的基本形态, 进一步证明了该区的构造活动是较为强烈的。除此之外, 也揭示了研究区的变形并非单一性质的, 而是比较复杂的。即存在运动模式的分群性 (以阿尔金断裂带为界南区与北区的运动), 又存在同一运动模式下的不同步性 (南区东部与西部的运动)。不论是剪切应变还是旋剪形变都说明了具有剪切性质的变形只发生在阿尔金断裂带及附近的区域上, 其他区域相对较小。此外, 研究区南部形变的非协调性也比较突出, 存在着形变比较明显的西部膨胀区 (东西向的较大拉张所致) 和东部收缩区 (北北东与南南西较大的挤压所致)。所有这些都表明了研究区地震的活动及其性质均有深刻的构造活动背景。

Shen 等 (2001) 曾给出阿尔金断裂带的相对

运动,与本文的结果基本一致,似乎表明2014年于田地震之前并没有发现形变的闭锁或亏损,至少不太显著,如汶川地震(杨国华等,2015)。一方面,这可能与该地震为盲地震有关(孟令媛等,2014),因此在地表上显现的不够明显;另一方面,本文的结果只是一个时间段的结果,早期的结果测站有限,故而不能发现较小的差异变化。除此之外,XJYT站的同震位移结果与震源机制解的差异也让我们有所疑问。因此,目前还不能给出非常肯定的看法,需要通过今后的对测站的复测与分析来获得较全面的认知。

感谢杨国华研究员的指导与帮助,感谢审稿专家的辛勤付出。

参考文献:

- 程佳,杨文,刘杰,等.2014.2014年2月12日新疆于田 $M_s7.3$ 地震序列及其构造背景研究[J].地震学报,36(3):350-361.
- 冀战波,赵翠萍,王琼,等.2014.2008年3月21日新疆于田 $M_s7.3$ 地震破裂过程研究[J].地震学报,36(3):339-349.
- 孟令媛,周龙泉,刘杰,等.2014.2014年2月12日新疆于田 $M_s7.3$ 地震近断层强地面运动模拟及烈度分布估计[J].地震学报,36(3):362-371.
- 万永革,沈正康,盛书中,等.2010.2008年新疆于田7.3地震对周围断层的影响及其正断层机制的区域构造解释[J].地球物理学报,53(2):280-289.
- 王凡,陈为涛,王敏,等.2011.利用GPS观测资料分析2008年于田 $M_s7.3$ 级地震的同震位移及震后形变[J].地球物理学报,54(9):2250-2255.
- 王晓欣,刘瑞丰,邹立晔,等.2014.2014年2月12日新疆于田 $M_s7.3$ 地震参数测定[J].地震学报,36(3):522-528.
- 胥颐,刘福田,刘建华,等.2001.中国西北大陆碰撞带的深部特征及其动力学意义[J].地球物理学报,44(1):40-47.
- 杨国华,江在森,武艳强,等.2005.中国大陆整体无净旋转基准及其应用[J].大地测量与地球动力学,29(4):6-10.
- 杨国华,朱爽,梁洪宝,等.2015.芦山 $M_s7.0$ 级地震震前及同震地表形变[J].武汉大学学报(信息科学版),40(1):121-127.
- Shen Z. K., Wang M., Li Y. X. et al. 2001. Crustal Deformation along the Altyn Tagh Fault System, Western China, from GPS [J]. J. Geophys. Res., 106 (B12):30607-30621.

Research on Crustal Tectonic Deformation Background of Xinjiang Yutian $M_s7.3$ Earthquake in 2014

YANG Bo, ZHU Shuang, LOU Guan-shou, ZHOU Hai-tao
(The First Monitoring and Application Center, Tianjin 300180, China)

Abstract

Using the flow GNSS observation data and its processing results from 2011 to 2013, we obtained the result of the horizontal deformation field of Yutian $M_s7.3$ earthquake in 2014 as follows: (1) The Yutian $M_s7.3$ earthquake occurred in the west end of Arkin fracture zone where the active structure is strong, the differential movement on both sides of Arkin fracture zone is about 8 mm/a and its main component is the left-lateral movement. (2) The principal strain in the epicenter area is the most prominent in the study area, the tensile strain is relatively equal to the compressive strain and the direction of main tensile strain is SEE-NWW. (3) The Yutian $M_s7.3$ earthquake occurred in the high gradient belt of the left-lateral deformation, the Tarim Basin in the north of it has weak right-lateral deformation and the area about 150 km away from the Basin in the south of it has little rotary deformation. (4) The epicenter was located at a transition zone of the property transition of plane strain, that is, the surface expansion area is gradually varied to the surface contraction area from the west to the east of the epicenter.

Key words: GNSS observation data; Yutian $M_s7.3$ earthquake; tectonic deformation