

# 独山子山前断层现今活动特征与形变异常研究<sup>\*</sup>

刘冠中<sup>1</sup>, 王建军<sup>1</sup>, 王在华<sup>2</sup>, 蒋靖祥<sup>2</sup>, 谢周敏<sup>1</sup>, 陈兆亮<sup>3</sup>

(1. 中国地震局地壳应力研究所, 北京 100085; 2. 新疆维吾尔自治区地震局, 乌鲁木齐 830011;  
3. 新疆伊犁州地震局奎屯地震台, 新疆 奎屯 833200)

**摘要:** 利用新疆独山子台跨断层形变观测资料, 对独山子山前断层的活动速率、活动特征及区域应力场进行了分析, 结合震源机制解的研究成果进行了对比验证, 同时应用“速率累加”分析方法进行了异常提取。结果显示: ① 独山子—安集海断裂垂直位移年平均变化量为 0.106 mm, 沿基线方向的水平位移年平均变化量为 0.189 mm, 沿断层走向的水平走滑年平均变化量为 -0.883 mm, 断层活动以右旋走滑为主兼具逆冲分量; ② 1993~2007 年独山子断层的最大水平主压应力方向在 339.85°~346.78°之间, 平均为 344.23°; ③ 乌苏 5.1 级地震前, 独山子台的形变记录曲线有较明显的速率异常变化与同震形变波动。

**关键词:** 跨断层形变观测; 微量位移; 主应力方向; 前兆异常; 独山子—安集海断裂

**中图分类号:** P315.72+5

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1000-0666(2009)02-0125-07

## 0 前言

跨断层观测是获取震前断层活动信息的重要方法。断层形变测量是通过直接测定活动断层两侧参考点水平距离和相对高差的微小变化来推断断层两侧介质的三维运动, 从而确定断层的运动方式、运动速率以及两者随时间演变的过程(中国地震局监测预报司, 2003)。许多学者对断层局部运动与跨断层观测进行了较深入的研究, 取得了较多的成果(薄万举等, 1999; 李杰等, 2001; 王建军, 2004; 蒋靖祥等, 2005; 荆燕等, 2005a; 李祖宁等, 2007)。张超(1981)建立了断层形变观测物理模型, 并针对不同的测线布设情况给出了断层微量位移的计算方法; 郭良迁(1998)利用断层形变资料, 在应力应变关系的基础上给出了断层活动水平主压应力的计算公式, 其计算示例结果与震源机制解基本一致; 荆燕等(2005b)给出了由断层水平及垂直方向观测值变化量计算断层水平滑动量的计算公式, 并分析了独山子—安集海断裂的运动特征和滑动速率; 杨永林等(2005)利用四川及邻区的流动短水准、短基线资料计算了川滇块体内各活动构造带的水平拉张量与垂直上升量, 并分析了它们的活动特征。20 世

纪 80 年代至今, 中国地震局地壳应力研究所先后在独山子—安集海断裂上布设了水平、垂直及横向位移观测仪器, 用以监测断层的活动。由断层的水平与垂直变形量可以确定断层的运动性质, 由横向位移测量仪可以监测断层两盘垂直于测线方向上的位移变化, 因而对断层活动信息的获取更加细致与全面。目前上述三种观测仪器的采样率达到了“分钟”量级, 灵敏度达到 0.001 mm。

本文利用新疆独山子台的垂直向与水平向观测资料, 根据荆燕等(2005b)提出的断层微量位移计算公式, 计算了 1993~2007 年独山子山前断层的垂直、水平及走滑运动分量, 分析其现今活动特征, 并利用郭良迁(1998)计算断层活动主应力轴的方法, 计算了 1993~2007 年期间该断层的水平最大主压应力方向, 讨论了断层主应力轴的变化特征, 并利用震源机制解所得到的区域应力主轴方向进行了对比验证, 最后运用“速率累加”方法提取异常。

## 1 资料概况

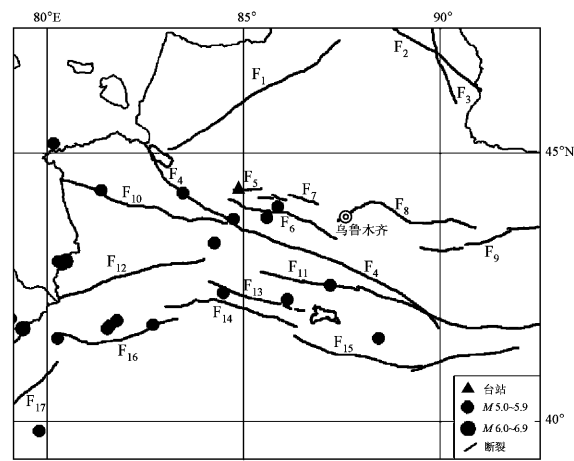
独山子—安集海断裂位于独山子、哈拉安德和安集海背斜北翼, 是由多条断层及上盘反冲断层构成的断裂带。在其西段的奎河路检查站为 4.9 km 长

<sup>\*</sup> 收稿日期: 2008-03-26.

基金项目: 中国地震局地壳应力研究所基本科研业务费专项(ZDJ2007-32)资助.

东西向的山前断层，它断错了奎屯河I、II级河流阶地和戈壁面且南倾；中段呈断续出露的断坎；东段发育有反冲断层（《新疆通志·地震志》编撰委员会，2002）。1989年乙烯工程地震安全性评价工作中挖掘的多个探槽表明，该断层具有4次6级左右强震错动位移的遗迹，是由多条断层及上盘反冲断层构成的断裂带。在近1万年的砾石堆积中保持了强震形成的破裂形变达4次，带宽1.25 m，垂直错距1.2 m，故每次垂直错动25~35 cm，平均垂直形变位移0.16 mm/a（朱海之等，1990）。

独山子跨断层定点连续形变观测站跨独山子—安集海断裂西段的独山子背斜北翼断层（简称独山子山前断层）。断层总体走向为110°，倾向西南，倾角20°。台站位于独山子石油化工总厂西南3 km处，距离独山子泥火山喷发点2 km、奎屯河东岸2 km，高程824.7 m，场地条件为第四纪松散沉积层（图1）。



F<sub>1</sub>: 达尔布特断裂; F<sub>2</sub>: 额尔齐斯断裂; F<sub>3</sub>: 二台可可托海断裂; F<sub>4</sub>: 婆罗科努断裂; F<sub>5</sub>: 独山子—安集海断裂; F<sub>6</sub>: 清水河断裂; F<sub>7</sub>: 霍尔果斯—吐谷番断裂; F<sub>8</sub>: 博格达北缘断裂; F<sub>9</sub>: 巴里坤断裂; F<sub>10</sub>: 科古琴断裂; F<sub>11</sub>: 包儿图—黑尖山断裂; F<sub>12</sub>: 哈尔克断裂; F<sub>13</sub>: 红水沟断裂; F<sub>14</sub>: 北轮台断裂; F<sub>15</sub>: 兴地断裂; F<sub>16</sub>: 秋立塔格断裂; F<sub>17</sub>: 柯坪断裂

图1 独山子台地理位置、周边活动断裂分布及1993年以来5级以上地震分布情况  
Fig. 1 The geographic location of Dushanzi station, distributions of active faults and  $M_s \geq 5$  earthquakes since 1993 in surrounding area of Dushanzi

观测室为地下廊道，宽2.5 m，高2.3 m，上覆土层约1.3 m，总长37.9 m。仪器测线方位为N50°E，长34.3 m，与断层交角约60°。1989年11

月架设了MD4211BA型岩体变形测量仪和MD4212B型浮子式垂直变形测量仪，分别观测断层两盘水平和垂直位移变化。经试运行后，1993年正式开始观测，观测方式为模拟纪录。1998实现了实时遥测记录和有线传输改造，改造后仪器为MD4412型浮子式垂直变形测量仪及MD4211型岩体变形测量仪。2003年7月至9月对地下廊道进行了保温改造，并于10月安装DFG、DSG型岩体变形测量仪，架设GDW型岩体变形测量仪测量横向位移。在断层两盘仪器墩及廊道中部架设了DS18B20数字温度计，对断层两盘温度及观测室温度进行辅助监测，测量场地布设见图2。台站至今已有15年的连续观测数据，仪器在运行期间状况良好，数据质量可靠，观测曲线年变清晰。多年的经验及研究成果表明，独山子台的跨断层形变观测资料是可以用来研究独山子断层的性质、运动方式及它们随时间的演化过程的（荆燕等，2005b；焦青等，2007）。

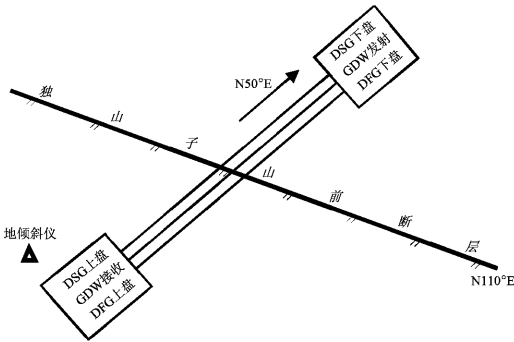


图2 台站仪器测线布设示意图  
Fig. 2 The schematic diagram of seismic line layout of the instrument at Dushanzi station

## 2 断层微量位移计算方法与应力轴方位求取

现实中大部分断裂都有一个相对广阔的破碎带，可达数千米，断层面也远非一个简单的“平面”，断裂在不同深度的运动情况也会有所不同，且其运动方式比较复杂，因此在计算断层活动量时需要一定的假设条件：

- (1) 仪器架设部位的断层几何结构简单，测线跨越整条断层；
- (2) 断层两盘无弹性变形，跨断层点位间的

位移是由断层两盘相对运动造成的；

(3) 断层两盘只沿断层面做相对运动，不存在旋转及沿断层面法线方向的运动。

虽然假设与现实情况有差距，在应用中存在一定的局限性，但基于此种假设所得到的结果是可以反映断层活动的相对量或部分信息的。本文

采用荆燕等（2005b）推导断层微量位移的思路，计算断层的走滑运动分量与水平拉张分量，进而利用走滑分量、水平拉张分量与断层活动主应力轴方向之间的关系（郭良迁，1998），计算断层活动的水平主应力轴方位（图3）。

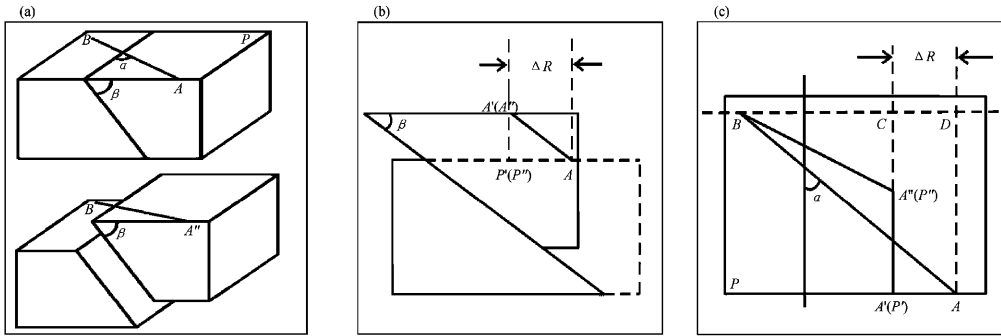


图3 断层上盘相对下盘运动的几何关系

(a) 两盘相对滑动前后测点位置示意图；(b) A点运动轨迹前视图；(c) A点运动轨迹俯视图

Fig. 3 The geometric relation of fault's relative movement

在图3a中，设基线上两观测点为A和B。为便于研究，假设观测点A位于断层模型的边缘，断层走向逆时针旋转至与基线之间的夹角为 $\alpha$ ，断层倾角为 $\beta$ ，观测点A与B的水平距离为 $L_{AB}$ ，测点A、B位于水平面P上。视断层下盘静止，上盘相对下盘作如图所示的运动，运动后观测点A移动至A''，将此过程分解为沿断层面上方的滑动和沿断层面走向的扭动，在垂直方向上（图3b），观测点A的运动轨迹为 $A \rightarrow A' \rightarrow A''$ （图中加黑部分），点A'与A''在水平面P上的铅垂投影分别为P'和P''，其中点A'与A''重叠且点A'在前，点P'与P''重叠且点P'在前；在水平方向上（图3c），观测点A的运动轨迹亦为 $A \rightarrow A' \rightarrow A''$ ，其中点A'与P'重叠且点A'在上，点A''与P''重叠且点A''在上。

根据图3中A点在垂直和水平方向上的运动轨迹，可以得到断层微量位移五面体模型（图4）。从模型中可以更直观地看出断层活动过程中的各种位移参数，其中的已知量： $L_{AB}$ 为初始基线长度； $\Delta L$ 为沿基线方向的水平位移变化量； $\Delta H$ 为垂直方向观测值变化量，正值表示断层下盘相对上盘上升； $\alpha$ 为断层走向逆时针旋转至斜跨断层基线之间的角度； $\beta$ 为断层倾角。

根据几何关系进一步计算求得的参数：

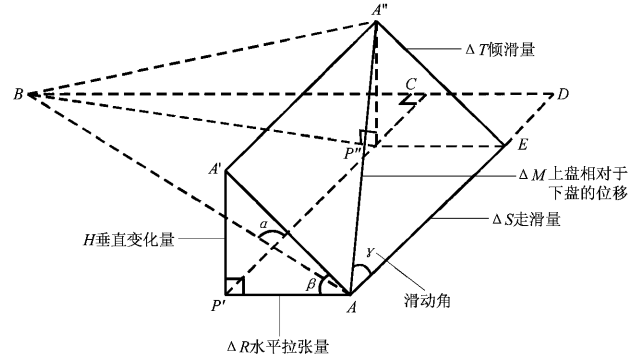


图4 断层微量位移五面体模型

Fig. 4 The pentahedral model of fault's micro-displacement

测点A移动至A''后基线长度

$$L_{AB} = L_{AB} + \Delta L.$$

沿断层走向的水平走滑分量

$$\Delta S = L_{AE} = L_{P'P''} = L_{P'C} - L_{P'C}. \quad (1)$$

矩形AP'PE中：

$$L_{P'C} = L_{AD} = L_{AB} \cos \alpha. \quad (2)$$

直角三角形BP''C中：

$$L_{P'C} = \sqrt{L_{BP''}^2 - L_{BC}^2}. \quad (3)$$

直角三角形  $BP''A''$  中:

$$L_{BP''} = \sqrt{L_{A''B}^2 - L_{A''P''}^2} = \sqrt{L_{A''B}^2 - \Delta H^2}, \tag{4}$$

$$L_{BC} = L_{AB} \sin \alpha - \Delta R = L_{AB} \sin \alpha - \Delta H \tan \beta. \tag{5}$$

综合式 (1) ~ (5) 可解算出沿断层走向的水平走滑量  $\Delta S$  关于已知量的表达式:

$$\Delta S = L_{AB} \cos \alpha - \sqrt{(L_{AB} + \Delta L)^2 - \Delta H^2 - (L_{AB} \sin \alpha - \Delta H \tan \beta)^2}.$$

式中  $\Delta S$  的计算结果为正表示断层上盘相对下盘左旋运动。

断层倾向上水平拉张量  $\Delta R = \Delta H \tan \beta$ , 即垂直于断层走向的水平位移由垂直方向观测值变化量与断层倾角得到。

由走滑量  $\Delta S$  和断层倾向上的水平拉张量  $\Delta R$ , 根据郭良迁 (1998) 计算断层活动水平主压应力的方法, 可得到观测期间断层的主应力轴方位。

以往的研究结果表明, 独山子台跨断层观测资料受室内外气温和局部热效应不平衡的影响较大 (王在华等, 2005), 所以本文对原始观测数据采用傅立叶滑动去年周期方法去除了年变干扰, 之后对去除了年周变的数据进行了切比雪夫曲线拟合, 最后根据拟合曲线求各年的垂直和水平变化量 (图 5), 并在此基础上, 进一步计算断层走滑量、水平拉张量及主应力轴方位。

3 计算结果与分析

利用第 2 部分的计算方法, 得到独山子山前断层 1993 ~ 2007 年的微量位移参数及水平最大主压应力方位 (表 1)。

由表 1 可知, 独山子断层在观测期间垂直位移年平均变化量为 0.106 mm, 沿基线方向的水平位移年平均变化量为 0.189 mm, 沿断层走向的水平走滑年平均变化量为 -0.883 mm, 各方向的活动速率均呈现减小—增大—减小的变化特征。近年来断层活动水平明显较低, 以右旋走滑为主兼具逆冲分量。

独山子断层观测期间受压性应力作用, 主压应力轴方向介于  $339.85^\circ \sim 346.78^\circ$  之间, 平均为  $344.23^\circ$  (图 6)。崔效锋等 (2005) 利用大量  $M \geq 6$  地震的震源机制解分析了新疆应力区的构造应

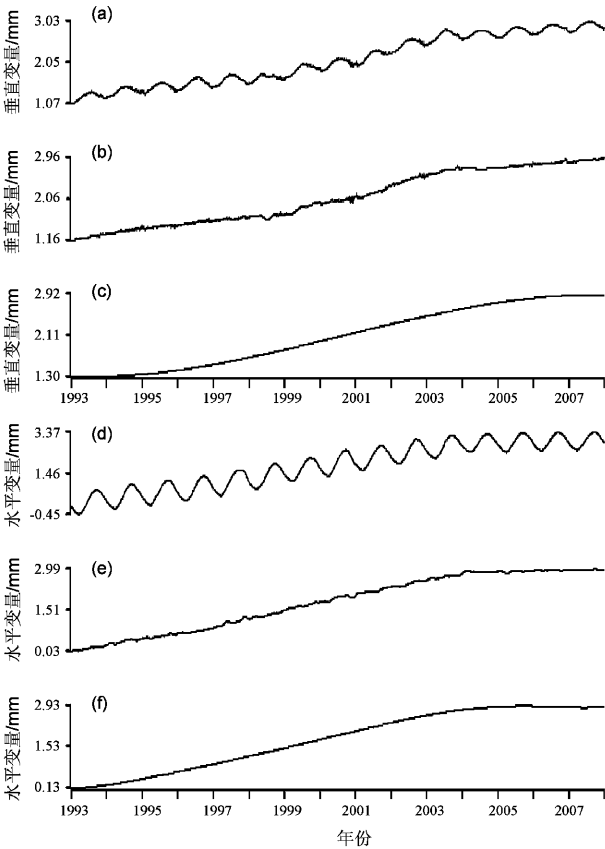


图 5 垂直向与水平向观测资料去除年周变影响后曲线及各自的拟合值

Fig. 5 The vertical and horizontal deformation data and its fitted value without annual variation influence

(a) 垂直向原始曲线; (b) 垂直向傅立叶滑动去年周变; (c) 垂直向切比雪夫拟合值; (d) 水平向原始曲线; (e) 水平向傅立叶滑动去年周变; (f) 水平向切比雪夫拟合值

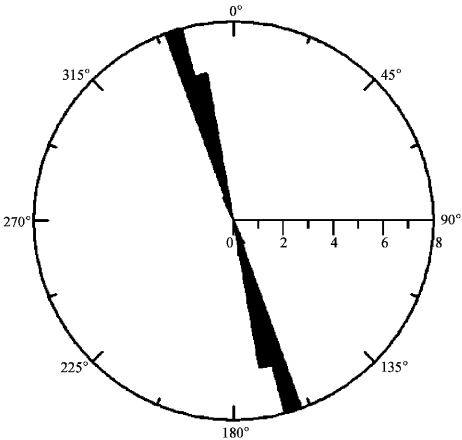


图 6 独山子台水平最大主压应力方位玫瑰图  
Fig. 6 Rose diagram of the maximum horizontal stress orientation at Dushanzi station

表 1 独山子断层形变观测资料计算结果

Tab. 1 Calculation results of fault deformation observation data at Dushanzi

时间	垂直位移 变化量 $\Delta H/\text{mm}$	沿基线方向的 水平位移变化量 $\Delta L/\text{mm}$	沿断层走向的 水平走滑变化量 $\Delta S/\text{mm}$	断层倾向上的 水平拉张变化量 $\Delta R/\text{mm}$	滑移角 $/(^{\circ})$	主应力 P 轴方位 $/(^{\circ})$	断层活动特征
1993	0.030	0.109	-0.361	-0.082	13.62	341.93	右旋走滑为主兼具逆冲
1994	0.100	0.208	-0.892	-0.275	18.15	344.23	右旋走滑为主兼具逆冲
1995	0.098	0.244	-0.954	-0.269	16.70	343.50	右旋走滑为主兼具逆冲
1996	0.083	0.257	-0.906	-0.227	14.91	342.59	右旋走滑为主兼具逆冲
1997	0.084	0.264	-0.926	-0.229	14.78	342.52	右旋走滑为主兼具逆冲
1998	0.110	0.276	-1.075	-0.302	16.63	343.46	右旋走滑为主兼具逆冲
1999	0.154	0.290	-1.312	-0.423	18.93	344.63	右旋走滑为主兼具逆冲
2000	0.200	0.297	-1.545	-0.549	20.70	345.52	右旋走滑为主兼具逆冲
2001	0.226	0.286	-1.648	-0.621	21.85	346.10	右旋走滑为主兼具逆冲
2002	0.218	0.251	-1.541	-0.600	22.51	346.44	右旋走滑为主兼具逆冲
2003	0.170	0.187	-1.185	-0.468	22.80	346.59	右旋走滑为主兼具逆冲
2004	0.092	0.102	-0.643	-0.253	22.73	346.55	右旋走滑为主兼具逆冲
2005	0.016	0.017	-0.110	-0.044	23.19	346.78	右旋走滑为主兼具逆冲
2006	0.005	0.031	-0.086	-0.014	9.52	339.85	右旋走滑为主兼具逆冲
2007	0.005	0.016	-0.059	-0.015	15.18	342.72	右旋走滑为主兼具逆冲
均值	0.106	0.189	-0.883	-0.291	18.15	344.23	右旋走滑为主兼具逆冲

注： $\Delta H > 0$  表示断层上盘相对下盘上升； $\Delta L > 0$  表示测线伸长； $\Delta S < 0$  表示断层右旋运动； $\Delta R < 0$  表示断层受压性应力作用。

力场的方向特征（数据截至 2003 年），给出了新疆地区震源机制解水平最大主应力方位的分布，主要为近 SN 向（优势方位为  $350^{\circ}$ ），同时在 NW 和 NE 向上也有分布。许忠淮等（1989）利用多个小地震的 P 波初动方向数据（1966 ~ 1986 年），推断了新疆部分地区的区域平均构造应力的主轴方向，结果显示独山子台所处的 72 应力分区的最大主压应力方位为  $N18^{\circ}W$ （ $342^{\circ}$ ）。本文得到的应力主轴方向与上述研究结果基本吻合，虽然在时间范围上有所不同，但考虑到在无大地震发生的情况下，区域构造应力场在时间和空间上具有相对稳定性，可以进行相互的对比和验证。

笔者曾利用“形变速率累加分析”对独山子台垂直观测资料进行了处理，初步给出了物理意义明确的前兆异常提取方法（刘冠中等，2007）。其思路是将低于“正常值”的活动速率进行剔除，对异常数据进行积分放大，排除短暂、非“连续”的速率变化，使在某时段内较为频繁的速率异常变化更为直观和突出，异常幅度更显著。目前台站的观测资料已更新至 2008 年 1 月，针对 2005 年 10 月 8 日巴基斯坦 7.8 级强震与 2006 年 11 月 23 日新疆乌苏 5.1 级地震，笔者对独山子台 2004 ~ 2007 年的横向观测数据进行了“速率累加分析”，

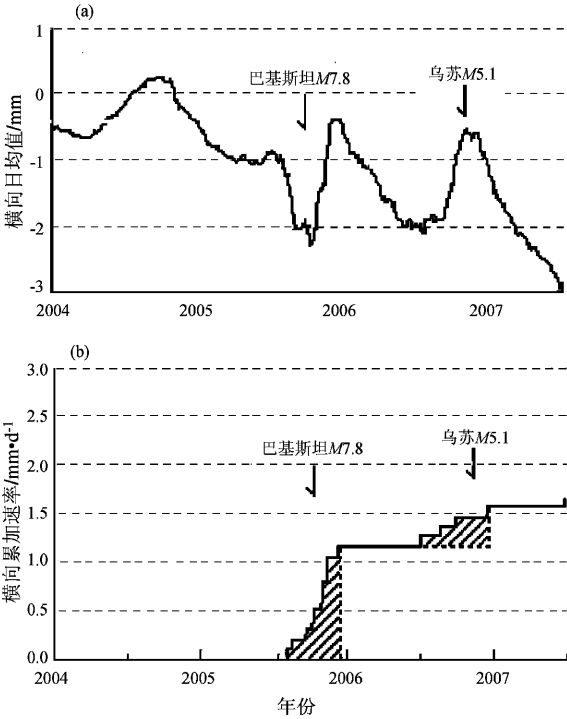


图 7 独山子台横向观测曲线与其“速率累加分析”异常示意图

Fig. 7 The transverse observation curve in Dushanzi station and abnormal schematic diagram of “Rate Cumulative Analysis”

对比提取效果,日活动速率的限差取 3 倍标准差,累加速率异常(图 7)。图中阴影部分表示累加速率异常,呈快速上升形态,异常幅度分别为 1.16 mm 和 0.41 mm,两次地震均发生于异常持续过程中,地震后 76 天、39 天异常结束。巴基斯坦 7.8 级地震后约 15 分钟,独山子台的 MD 系列数字化跨断层形变测量仪均记录到了同震变化(焦青, 2007);2006 年 11 月 23 日 19 点 04 分乌苏 5.1 级地震后 5 分钟,独山子台垂直向分钟值观测曲线也发生明显的同震形变波动(图 8)。

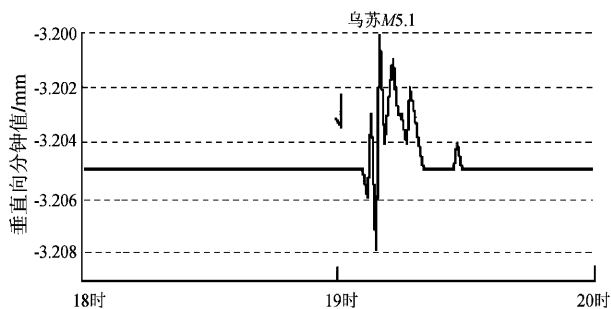


图 8 独山子垂直向分钟值 2006 年 11 月 23 日 18 时至 20 时观测曲线

Fig. 8 Minute-value curve of Vertical deformation from 6 P. M to 8 P. M on Nov 23, 2006 at Dushanzi station

## 4 结论

(1) 独山子断层在观测期间垂直位移年平均变化量为 0.106 mm,沿基线方向的水平位移年平均变化量为 0.189 mm,沿断层走向的水平走滑年平均变化量为 -0.883 mm。近年来断层活动水平明显较低,以右旋走滑为主兼具逆冲分量。

(2) 独山子断层观测期间受压性应力作用,主压应力轴方位介于  $339.85^{\circ} \sim 346.78^{\circ}$  之间,平均为  $344.23^{\circ}$ ,与用强震及小震震源机制解推断的区域主应力轴方位基本一致。

(3) 乌苏 5.1 级地震前,独山子台垂直向分钟值记录到了明显的同震形变波动,对横向观测日均值的“速率累加分析”提取到了较明显的震前异常。

跨断层观测一般为地表或浅地表廊道观测,受气象、人为等干扰因素影响较大,如何对干扰因素进行识别与定量消除将是下一步工作的重点。

笔者得到中国地震局地壳应力研究所焦青、荆燕的帮助和指导,在此表示诚挚的谢意!

## 参考文献:

- 薄万举,李延兴,杨国华,等.1999.滨海附近地区 GPS 和断层形变与地震关系研究 [J]. 华北地震科学, 17 (2): 66-71.
- 崔效锋,谢富仁,赵建涛.2005.中国及邻区震源机制解的分区分特征 [J]. 地震地质, 27 (2): 298-307.
- 郭良迁.1998.断层活动应力轴的确定及首都圈应力场 [J]. 东北地震研究, 14 (3): 50-57.
- 蒋靖祥,王在华,温和平,等.2005.2003 年昭苏  $M_s 6.0$  地震定点形变异常初步分析 [J]. 地震, 25 (2): 83-90.
- 焦青,张鸿旭,宋光甫,等.2007.巴基斯坦 7.8 级地震前新疆独山子台跨断层位移变化初析 [J]. 地震, 27 (1): 77-83.
- 荆燕,任金卫,王辉.2005a.用活断层资料分析中国大陆及其邻区晚更新世以来的构造应变特征 [J]. 地震研究, 28 (4): 353-358.
- 荆燕,赵营海,张鸿旭,等.2005b.独山子—安集海断裂单基线双分量斜跨断层监测研究 [J]. 地震研究, 28 (2): 185-188.
- 李杰,马玉香.2001. MD 数字化断层形变测量仪资料的应用分析 [J]. 地壳形变与地震, 21 (4): 95-105.
- 李祖宁,吴绍祖,陈光,等.2007.利用点荷载叠加方法研究天马跨断层短水准异常资料 [J]. 地震研究, 30 (1): 35-38.
- 刘冠中,蒋靖祥,王建军,等.2007.跨断层定点形变观测资料“速率累加分析”及其异常初步提取方法 [J]. 内陆地震, 21 (3): 230-237.
- 王建军.2004.跨断层形变自动化观测技术的研究与应用 [J]. 岩石力学与工程学报, 23 (2): 261-266.
- 王在华,孔德锋,宋光甫.2005.断层形变测量资料与辅助温度观测资料相关分析 [J]. 内陆地震, 19 (2): 188-190.
- 《新疆通志·地震志》编撰委员会.2002.新疆通志第 11 卷·地震志 [M]. 乌鲁木齐:新疆人民出版社.
- 许忠淮,汪素云,黄雨蕊,等.1989.由大量的地震资料推断的我国大陆构造应力场 [J]. 地球物理学报, 32 (6): 636-647.
- 杨永林,苏琴,朱航.2005.短水准短基线观测资料反映出的川滇几个断层活动特点 [J]. 四川地震, (3): 17-21.
- 张超.1981.跨断层位移测量与局部断层活动 [J]. 地震, (5): 24-25.
- 中国地震局监测预报司主编.2003.地壳形变数字观测技术 [M]. 北京:地震出版社.
- 朱海之,陈杰.1990.新疆独山子山前活断层和活褶皱及古地震研究 [J]. 内陆地震, 4 (2): 97-106.

## Movement Character and Deformation Anomaly Research of Dushanzi-Anjihai Fault Nowadays

LIU Guan-zhong<sup>1</sup>, WANG Jian-jun<sup>1</sup>, WANG Zai-hua<sup>2</sup>, JIANG jing-xiang<sup>2</sup>,  
XIE Zhou-min<sup>1</sup>, CHEN Zhao-liang<sup>3</sup>

(1. *Institute of Crustal Dynamics, China Seismological Bureau, Beijing 100085, China*)

(2. *Seismological Bureau of Xinjiang Uygur Autonomous Region, Urumqi 830011, Xinjiang, China*)

(3. *Kuitun Seismostation, Earthquake Administration of Xinjiang Yili Prefecture, Kuitun 833200, Xinjiang, China*)

### Abstract

Using the cross-fault deformation data from Dushanzi station, this paper makes a preliminary analysis on movement rate, movement character and regional tectonic stress field of Dushanzi-Anjihai fault, and compares with the results of focal mechanism solutions for verification. The result shows that: (1) The nowadays movement of Dushanzi-Anjihai fault is characterized by right-lateral thrust motion, the average annual change of vertical movement is 0.106mm, the average annual change of horizontal movement is 0.189mm, and the average annual change of right-lateral slipping movement is -0.883mm. (2) The direction of maximum principal stress is between 339.35° and 346.78°, the average is 344.23°. (3) Dushanzi deformation station recorded preliminary anomaly and co-seismic variation before the WuSu  $M_s 5.1$  earthquake.

**Key words:** Across-fault deformation observation; Micro-displacement; Principal stress's direction; Preliminary anomaly; Dushanzi-Anjihai fault