

艾力夏提·玉山, 乔学军, 王晓强, 李杰, 刘代芹, 李桂荣, 陈丽, 2015. 基于 InSAR 技术的喀什-乌恰交汇区地壳垂直形变特征分析. 震灾防御技术, 10 (增刊): 732—738. doi: 10.11899/zzfy2015s104

基于 InSAR 技术的喀什-乌恰交汇区 地壳垂直形变特征分析¹

艾力夏提·玉山¹⁾ 乔学军²⁾ 王晓强¹⁾
李杰¹⁾ 刘代芹¹⁾ 李桂荣¹⁾ 陈丽¹⁾

1) 新疆维吾尔自治区地震局, 乌鲁木齐 830011

2) 中国地震局地震研究所, 武汉 430071

摘要 利用喀什-乌恰交汇区 2004—2010 年间的 ENVISAT ASAR 数据, 采用层叠 InSAR 技术获得了喀什-乌恰交汇区地壳垂直形变速度场, 并结合研究区 GPS 观测数据结果, 分析了喀什-乌恰交汇区地壳形变特征。结果显示, 喀什-乌恰交汇区地壳垂直形变速率约为 $-1\sim 2\text{mm/a}$, 其中, 乌恰南边的山区形变量最大, 形变速率达到 2mm/a , 是整个研究区中隆升最明显的区域; 而喀什、阿图什一带形变量比较小, 基本在 $0\sim 1\text{mm/a}$ 。卡兹克阿尔特和阿图什南翼断裂为乌恰以南的隆升区域到喀什、阿图什垂直形变平稳区域的梯度带, 这个区域吸收了 $1\sim 2\text{mm/a}$ 的垂直形变能量和 $7\sim 9\text{mm/a}$ 的水平形变能量, 是喀什-乌恰交汇区中主要的地壳形变能量消耗地带。

关键词: 层叠 InSAR 喀什 乌恰 垂直形变

引言

喀什-乌恰交汇区位于天山褶皱带、帕米尔弧形构造与塔里木地块 3 个构造单元的交界, 是青藏高原块体边缘地带新构造运动与形变最为强烈的地区之一 (张先康等, 2002)。新生代以来, 印度板块以 $40\sim 50\text{mm/a}$ 的速率挤入欧亚板块 (Burtman 等, 1993; Molnar 等, 1975), 导致欧亚大陆地壳形变运动强烈, $40\sim 50\text{mm/a}$ 的地壳运动速率中的 $10\sim 15\text{mm/a}$ 形变量在中帕米尔高原被吸收 (Yang 等, 2008; Zubovich 等, 2010; Ischuk 等, 2013), 引起帕米尔高原等区域地壳隆升, 尤其是帕米尔高原、西南天山及塔里木盆地的交汇区构造变形强烈, 地震频繁。地质构造研究表明, 该区域是第四纪及现今的活动变形主要集中区之一 (陈杰等, 2011), 也是我国强震活动高发区。历史上在这个区域经常发生中强以上地震, 如 1902 年在阿图什发生的 8 级大地震、1974 年乌恰西南的 7.3 级地震、1985 年乌恰 7.4 级地震、1990 年疏附 6.4 级地震、1996 年阿图什 6.8 级地震、2003 年巴楚-伽师 6.8 级地震和 2008 年 10 月 5

1 基金项目 国家自然科学基金 (41374030, 41474016, 41274036, 41474097), 地震科技星火计划 (XH14054Y), 新疆地震科学基金 (201410, 201411, 201412) 共同资助

[收稿日期] 2015-06-05

[作者简介] 艾力夏提·玉山, 男, 生于 1984 年。工程师, 硕士。主要从事地壳形变研究工作, E-mail: irxat@163.com

[通讯作者] 刘代芹, 男, 生于 1979 年。高级工程师。主要研究方向: 地壳形变研究。E-mail: 709708459@qq.com

日乌恰 6.8 级地震等。此外，1997 年 1 月至 5 月短短的 4 个月时间里，在伽师地区先后发生了 7 次 6.0—6.9 级地震，这种强震群在我国极为少见。从历史地震情况来看，喀什-乌恰交汇区是新疆境内破坏性地震发生最多的区域（图 1）。

大量 GPS 研究表明，塔里木盆地西北边缘与南天山西段之间由逆冲和褶皱变形引起的地壳缩短速率达为 6—8mm/a（Abdrakhmatov 等，1996；Wang 等，2001），虽然喀什-乌恰交汇区有大量 GPS 研究成果，但 GPS 仅给出了水平速度场，而研究断层的褶皱变形和逆冲作用，垂直形变同样具有很重要的意义，乔学军等（2011）利用 GPS 和 InSAR 技术研究了喀什拗陷及邻区的地壳垂直运动特征。本文在前人的研究基础上，利用 InSAR 技术获取近几年该地区高精度、高时空分辨率的 LOS（雷达视线方向）向形变场，从形变场的角度来分析该地区的褶皱变形和逆冲作用运动特征，并在此基础上与其他已有的研究成果进行分析对比，开展相应的构造活动研究。

1 InSAR 技术基本原理

合成孔径雷达测量（InSAR）技术是指卫星在相邻或相同轨道上飞行过程中，在不同时间对地面同一区域发射电磁波来获取同一地区不同角度的两幅 SAR 图像，对两幅 SAR 影像进行干涉处理，再对干涉相位解缠来获取 SAR 图像对应区域的高程信息（寇程等，2013）。差分干涉雷达测量技术（D-InSAR）是合成孔径雷达测量技术的发展，是指利用同一地区形变前后的两幅 SAR 图像获取该地区的干涉图像，然后通过两幅干涉图像进行差分处理来获取地表在卫星视线方向的形变量的测量技术。合成孔径雷达与普通光学遥感测量的最主要区别是，合成孔径雷达主动发射电磁波，具有不受天气气候影响，全天候作业等优势，与水准测量等其它形变测量手段相比，具有空间连续性，覆盖面广等优势。根据地形相位的消除方式，D-InSAR 方法主要分为二轨法（双轨法）、三轨法和四轨法。

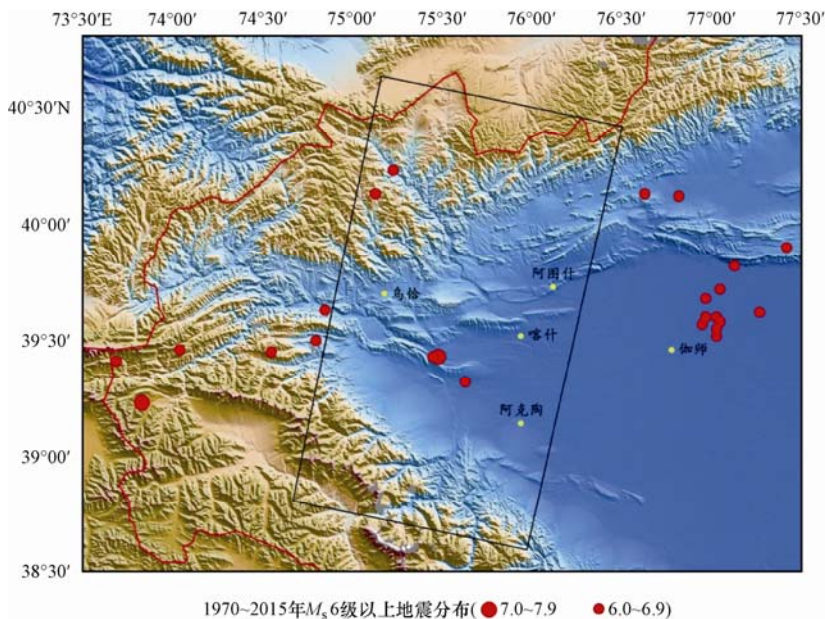


图 1 喀什-乌恰交汇区地形、地震分布、InSAR 数据分布图

Fig. 1 Map showing the topography, earthquakes and InSAR data area of Kashgar-Wuqia intersection zone

2 InSAR 数据与处理方法

本文利用欧空局 (ESA) 提供的喀什-乌恰交汇区的 42 景 ENVISAT 数据, 时间跨度为 2004 年到 2010 年, 全部为降轨数据, 空间位置在东经 74.4°—76.3°和北纬 38.3°—40.4°之间 (图 1 中黑色矩形区域), 采用二轨法进行干涉处理, 即利用美国宇航局发布的 SRTM (90m 分辨率) DEM 数据去除地形, 其绝对垂直精度为 16m (<http://srtm.usgs.gov/Mission/missionsummary.php>)。干涉处理前, 根据空间基线和时间基线最优选择方法, 选择参加干涉处理的影像对; 为了提高干涉的相干性并降低大气延迟的影响, 确保处理结果的可靠性, 干涉像对尽量选择在同一季节, 时间基线介于 150—560 天 (允许有个别影像对时间基线超过 560 天), 空间基线 < 150m, 最终选出共 20 对干涉影像组合 (表 1)。

表 1 参加干涉处理的影像配对表

Table 1 SAR pairs for interferometric processing

主影像	辅影像	空间垂直基线 (m)	时间基线 (天)	主影像	辅影像	空间垂直基线 (m)	时间基线 (天)
20040112	20050620	-79.39	525	20060220	20070416	-12.83	420
20040112	20050725	117.82	560	20060501	20070903	110.68	490
20040531	20050516	-118.00	350	20070312	20090907	-62.59	910
20040531	20050725	75.49	420	20070416	20090420	28.39	735
20040913	20050829	-77.65	350	20070903	20090907	38.99	735
20041018	20051107	72.10	385	20071112	20091116	-44.96	735
20050307	20060501	32.41	420	20080505	20090420	-113.76	350
20050516	20070312	94.25	665	20090209	20091221	43.20	315
20050620	20070903	-3.71	805	20090629	20100510	-33.15	315
20051003	20071008	129.15	735	20090907	20100927	-4.49	385

采用美国喷气推进实验室 (JPL) 和加州理工学院研发的开源软件 ROI_PAC 3.0 (Rosen 等, 2004) 对以上原始数据进行处理, 相位解缠采用斯坦福大学的统计费用网络流算法程序 SNAPHU (Chen 等, 2000; 2001; 2002) 完成。该算法以统计方法为基础, 以最大后验概率求解最佳相位模糊度, 可以完成整幅干涉图的相位解缠。获取研究区各时段的干涉图以后, 采用层叠 InSAR 技术 (Ivana, 2006; Chang 等, 2011) 获取研究区在总时间段内的 LOS 向形变速度场。层叠 InSAR 技术能够有效地降低大气延迟误差 (Massonnet 等, 1995; Biggs 等, 2007), 是一种获取地表形变速度场的有效方法。所有干涉结果进行叠加分析, 可得到整个时间段 LOS 向总形变量; 然后, 统计各像素点形变量所代表的时间长度; 最后, 总形变量除以时间长度可得到每个像素点的形变速率。其计算公式为:

$$V_{ij} = \frac{\sum_{k=1}^n [(Los)_{ij}]_k}{\sum_{k=1}^n [(Time)_{ij}]_k}$$

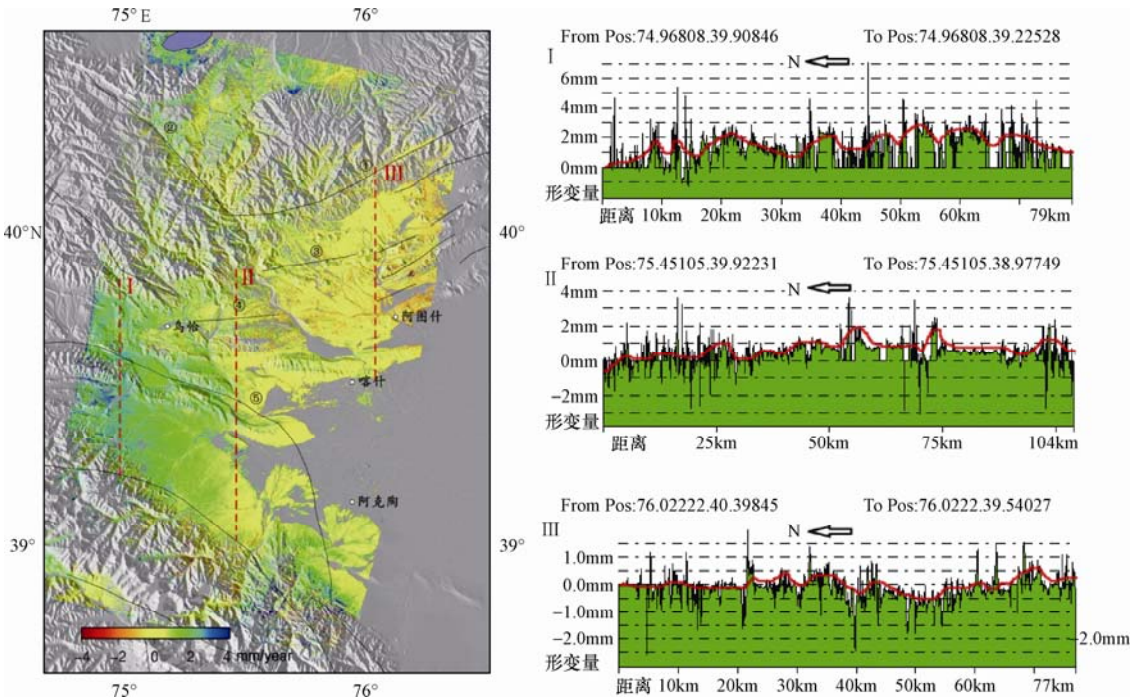
式中, V_{ij} 为第 ij 个像素点的形变速率; $[(Los)_{ij}]_k$ 为第 k 个差分干涉图像中第 ij 个像素点在 LOS 方向的形变量; $[(Time)_{ij}]_k$ 为第 k 个差分干涉图像中第 ij 个像素点的时间长度。

为了获取每一个像素点准确的形变速度, 叠加的各干涉图像中像素点必须一一对应, 而

且每一个像素点必须代表地面上的同一地点。因此，生成干涉图时，以第一个干涉图像对(20040112—20050620)的主图像作为基准，将其他所有 SAR 图像进行偏移量估算，配准到主图像，并生成干涉图。在消除平地效应和地形的时候，也使用第一干涉图像对所采用的数据进行处理，从而提高形变速度场的精度。同时，为了确保形变速度场的准确性，在计算每个像素点的形变速率时，给时间长度限定一个下限，本文所采用的 SAR 数据总时间跨度为 7 年，因此，时间长度限定设为 3 年，即时间长度小于 3 年的像素点不参与形变速度场的计算。

3 InSAR 数据处理结果与分析

因塔里木盆地中部是沙漠，边缘是绿洲带，南天山西段和西昆仑海拔较高区域常年降雪覆盖，其相干性很差，无法获取这些区域的垂直形变干涉结果。本文获取的 LOS 向形变场主要分布在塔里木盆地和南天山西段以及帕米尔高原交界地带(见图 2)。所采用的 SAR 数据全部为 ENVISAT 卫星降轨右视模式的 ASAR 数据，ENVISAT 卫星在 Image 常规模式下生成 SAR 图像的入射角为 23°。由于 LOS 向形变量是水平和垂直 2 个分量的矢量和，而大量 GPS 监测结果(图 3)显示(王琪等, 2000; 王晓强等, 2005; 李杰等, 2012)，本文所涉及的研究区水平形变速率方向为近 NNW 向、NNW 向水平形变对卫星 LOS 向(23°入射角)的形变贡献非常小，因此笔者认为本研究所获取的 LOS 向形变量可基本代表该区域的垂直形变特征。



①迈丹断裂；②塔拉斯-费尔干纳断裂；③托特拱拜孜-阿尔帕雷克断裂；④阿图什南翼断裂；⑤卡兹克阿尔特断裂

图 2 喀什-乌恰交汇区 LOS 向形变速率和剖面图

Fig. 2 LOS velocity map and profiles of Kashgar-Wuqia zone

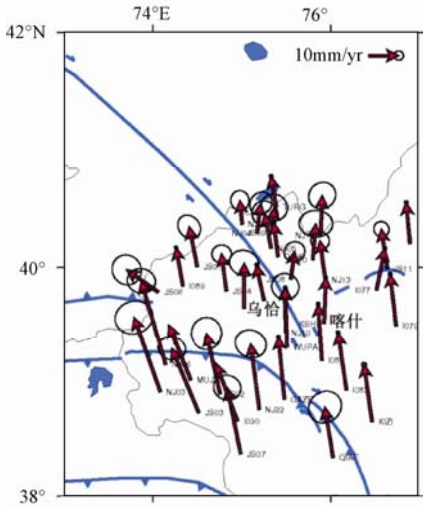


图3 喀什-乌恰交汇区相对于欧亚块体水平运动速率图
Fig. 3 Horizontal velocity map of Kashgar-Wuqia zone relative to Eurasian plate

什南翼断裂开始到卡兹克阿尔特断裂垂直形变速率从 0mm/a 增加到 2mm/a ，而整个剖面的平均速率在 1mm/a 左右；剖面III是穿过研究区最稳定的地区，其垂直形变速率基本上在 0mm/a ，而在阿图什附近出现局部地壳垂直变形负值区。从 3 个剖面图中可以看出，研究区地壳垂直形变速率由北向南逐步增加，形变场呈西南隆升，东北比较稳定或局部下降的特征。

4 讨论

从 1970 年以来，在研究区内的 SAR 数据覆盖范围内共发生了 5 次 6 级以上地震（见图 1），其中 1985 年的乌恰 7.1 级和 6.6 级地震、1993 年的 6.6 级地震就发生在研究区地壳隆升与平稳地区的交替带——卡兹克阿尔特断裂上（冯先岳等，1987）。从图 2 中可以看到，卡兹克阿尔特断裂和阿图什南翼断裂之间地带是乌恰-喀什交汇区地壳垂直形变从隆升变为平稳或下降的过渡地带，卡兹克阿尔特断裂是一条倾滑型的走滑逆断层，是西昆仑山前坳陷带与塔里木地块的分界断裂（冯先岳等，1987）。利用 1998 年至 2011 年 10 余期的“中国地壳运动观测网络”GPS 数据和新疆维吾尔自治区地震局于 2007 至 2011 年观测得到的 2 期 GPS 数据，李杰等（2012）获取了喀什-乌恰交汇区相对于欧亚块体的水平运动速率。结果显示，卡兹克阿尔特断裂至阿图什南翼断裂区域水平运动速率有明显梯度变化特征（图 3），卡兹克阿尔特断裂以南水平运动速率在 20mm/a 以上，而断裂以北的乌恰以西地区水平运动速率减少为十几毫米，每年 $7\text{—}9\text{mm/a}$ 左右的水平运动能量和 $1\text{—}2\text{mm/a}$ 的垂直运动能量在这一地带被吸收。不管是从本文研究所得到的研究区垂直形变速率，还是 GPS 数据反映的地壳水平运动速率，从历史地震活动性来看，喀什-乌恰交汇区中地壳形变梯度变化和强震都发生在卡兹克阿尔特断裂附近，因此认为卡兹克阿尔特断裂和阿图什南翼断裂是帕米尔高原及南天山与塔里木盆地基底交界的界线。

从图 2 中可以看出，整个喀什-乌恰交汇区垂直形变速度场在 $-1\text{—}2\text{mm/a}$ 。从整体形变趋势来看，主要以隆升为主，乌恰以南的山区隆升最为明显，年均形变量达到 2mm/a ，喀什、阿图什等平原地区相对比较稳定，形变量在 $0\text{—}1\text{mm/a}$ 之间。其中，阿图什市周围区域有局部下降，但出现下降的区域和下降量不大，最高下降量在 1mm/a 以内。从研究区中选出具有不同形变特征的地区画出 3 个垂直形变剖面图，其中，剖面 I 位于乌恰以西的地壳隆升区；剖面 II 位于研究区中间的隆升和稳定区交替区；剖面 III 位于研究区西边喀什-阿图什一带，该区域地壳垂直形变特征为稳定或局部下降。除了剖面 III 中出现局部负值以外，其他剖面垂直形变均为正值。剖面 I 的量值平均为 2mm/a ，在卡兹克阿尔特断裂南边地区出现小范围 3mm/a 的变化速率；沿剖面 II 由北向南从阿图

5 结论

本文利用层叠 InSAR 技术获取了喀什-乌恰交汇区 2004—2010 年的地壳 LOS 向形变速率场, 由于 NNW 向水平形变对 LOS 向的贡献非常小, 获取的 LOS 向形变速率场可基本代表垂直形变特征。结果显示, 研究区垂直形变速率为 $-1-2\text{mm/a}$; 从整体形变量来看, 主要以隆升为主, 隆升最明显的区域为乌恰西南的山区, 形变速率为 $1-2\text{mm/a}$ 。喀什、阿图什这一带形变量比较小或比较稳定, 在 $0-1\text{mm/a}$ 之间, 形变场呈现西南隆升, 东北垂直变化比较平稳的特征。隆升变化和比较稳定区域的交界带出现在卡兹克阿尔特断裂和阿图什南翼断裂之间, 1985 年乌恰 7.4 级地震就发生在该断裂上。从水平和垂直形变速度场结果中也可以看到, 喀什-乌恰交汇区中 $7-9\text{mm/a}$ 左右的水平运动能量和 $1-2\text{mm/a}$ 左右的地壳垂直运动能量在该区域被吸收, 表明阿图什南翼和卡兹克阿尔特断裂是喀什-乌恰交汇区垂直形变能量消耗的主要地带。

致谢: 本文所使用的数据是由中国地震研究所的乔学军研究员提供, 在软件使用、数据处理过程中也得到乔学军研究员的帮助和指导, 在此表示衷心感谢!

参考文献

- 陈杰, 李涛, 李文巧等, 2011. 帕米尔构造结及邻区的晚新生代构造与现今变形. 地震地质, **33**(2): 241—259.
- 冯先岳, 栾超群, 李军等, 1987. 卡兹克阿尔特断裂古地震研究. 内陆地震, **1**(3): 231—239.
- 寇程, 柯长青, 2013. 基于 D-InSAR 技术的伊朗巴姆地震地表形变监测. 震灾防御技术, **8**(1): 72—80.
- 李杰, 王琪, 王晓强等, 2012. 南天山—帕米尔现代地壳形变特征与应变场分布. 大地测量与地球动力学, **32**(1): 1—4.
- 乔学军, 聂兆生, 杨少敏等, 2011. GPS 与 InSAR 揭示喀什坳陷及邻区的垂直运动与构造特征. 大地测量与地球动力学, (3): 1—7.
- 王琪, 丁国瑜, 乔学军等, 2000. 用 GPS 研究南天山(伽师)地区现今地壳形变. 地震学报, **22**(3): 263—270.
- 王晓强, 李杰, 王琪等, 2005. 天山现今地壳运动的形变场分析. 大地测量与地球动力学, **25**(3): 63—68.
- 张先康, 赵金仁, 张成科等, 2002. 帕米尔东北侧地壳结构研究. 地球物理学报, **45**(5): 665—671.
- Abdrakhmatov K.Y., Aldazhanov S.A., Hager B.H. et al., 1996. Relatively recent construction of the Tien Shan inferred from GPS measurements of present-day crustal deformation rates. *Nature*, **384**: 450—453.
- Biggs J., Wright T., Zhong Lu et al., 2007. Multi-interferogram method for measuring interseismic deformation, Denali fault, Alaska. *Geophys. J. Int.*, **170**: 1165—1179.
- Burtman V.S., Molnar P., 1993. Geological and geophysical evidence for deep subduction of continental crust beneath the Pamir. *Special Paper Geological Society of America*, **281**: 1—76.
- Chang Zhanqiang, Liu Xiaomeng, Xue Tengfei et al., 2011. Investigating ground subsidence in Beijing by using interferogram stacking InSAR. *Spatial Data Mining and Geographical Knowledge Services (ICSDM)*, 2011 IEEE International Conference: 378, 380.
- Chen C.W., Zebker H. A., 2000. Network approaches to two-dimensional phase unwrapping: intractability and two new algorithms. *Journal of the Optical Society of America*, **7**: 401—414.
- Chen C.W., Zebker H.A., 2001. Two-dimensional phase unwrapping with use of statistical models for cost functions in nonlinear optimization. *Journal of the Optical Society of America*, **18**: 338—351.
- Chen C.W., Zebker H. A., 2002. Phase unwrapping for large SAR interferograms: Statistical segmentation and

- generalized network models. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, **40**: 1709—1719.
- Ischuk A., Bendiek R., Rybin A. et al., 2013. Kinematics of the Pamir and Hindu Kush regions from GPS geodesy. *Geophys. Res. Solid Earth*, **118** (5): 2408—2416.
- Ivana Hlaváčová, 2006. InSAR Stack Processing - Deformation Mapping in the Area of Northern Bohemia. Department of Mapping and Cartography Faculty of Civil Engineering Czech Technical University, Prague.
- Massonnet D., Feigl K.L., 1995. Discrimination of geophysical phenomena in satellite radar interferograms. *Geophysical Research Letters*, **22** (12): 1537—1540.
- Molnar P., Tapponnier P., 1975. Cenozoic tectonics of Asia, effects of continental collision. *Science*, **189**: 419—426.
- Rosen P. A., Hensley S., Peltzer G. et al., 2004. Updated repeat orbit interferometry package released. *Eos Trans. AGU*, **85** (5): 47.
- Wang Qi, Zhang P., Freymeuller J. et al., 2001. Present-day crustal deformation in China constrained by Global Positioning System measurements. *Science*, **294** (5542): 574—577.
- Yang Shaomin, Li Jie, Wang Qi, 2008. The deformation pattern and fault rate in the Tianshan Mountains inferred from GPS observations. *Sci. China Ser. D-Earth Sci.*, **38** (7): 872—880.
- Zubovich A.V., Wang X.Q., Scherba Y.G. et al., 2010. GPS velocity field for the Tien Shan and surrounding regions. *Tectonics*, **29** (6): 1007—1029.

Analysis on Vertical Crustal Deformation of Kashgar-Wuqia Intersection Area Using InSAR Technology

Ailixiati·Yushan¹⁾, Qiao Xuejun²⁾, Wang Xiaoqiang¹⁾, Li Jie¹⁾,
Liu Daiqin¹⁾, Li Guirong¹⁾ and Chen Li¹⁾

1) Earthquake Administration of Xinjiang Uyghur Autonomous Region, Urumqi 830011, China

2) Institute of Seismology, China Earthquake Administration, Wuhan 430071, China

Abstract Vertical crustal deformation fields of Kashgar-Wuqia intersection area were obtained by using ENVISAT ASAR data from year of 2004 to 2010 with the technology of stacking InSAR. Our result shows that, vertical deformation velocity of Kashgar-Wuqia is about -1—2mm/a, in which the mountain area of northern Wuqia has the highest value of uplifting among entire study area with a uplift value of 2mm/a. Whereas, the deformation of surrounding area of Kashgar and Atush is about 0—1mm/a. As the gradient zone of northern Wuqia uplifting area and Kashgar-Atush stable area, south Atush fault and Kazkearte fault, with 1—2mm/a of vertical deformation energy and 7—9mm/a of horizontal deformation energy, were absorbed by these area. The above two faults are the main deformation energy consumption area of Kashgar-Wuqia region.

Key words: Stacking InSAR; Kashgar; Wuqia; Vertical deformation