

基于高分辨率卫星影像估算汶川地震同震水平缩短量:以白沙河段为例

石峰, 何宏林*, 魏占玉

中国地震局地质研究所 国家地震活断层研究中心, 北京 100029

Shi Feng, He Honglin*, Wei Zhanyu

National Center for Active Fault Studies, Institute of Geology, China Earthquake Administration, Beijing 100029, China

Shi Feng, He Honglin, Wei Zhanyu. Co-seismic horizontal shortening associated with Wenchuan earthquake from high resolution satellite images: An example by Baishahe section. *Earth Science Frontiers*, 2010, 17(5): 067-074

Abstract: The May 12th, 2008 Wenchuan earthquake (M_w 7.9) in Sichuan Province led to severe casualties and a huge economic loss. Field investigations after the earthquake have obtained a lot of co-seismic deformation data. However, most of them are strike and vertical offset; the horizontal shortening which is as important as the strike and vertical offset was rarely reported. In order to estimate the horizontal shortening, we suggested a new method: drawing reference geometric features in QuickBird images first; then calculating the space between adjacent features before and after earthquake, respectively; finally obtaining the co-seismic horizontal shortening based on the contrast of the spaces before and after earthquake. The Baishahe rupture section was selected as the sample place to test this new method for estimating co-seismic horizontal shortening because there are two roads, one on the northern side of the rupture and another on the southern with 300 m to 900 m spacing. By contrasting the space between two roads before and after earthquake, we obtained a series of horizontal shortening amounts; the average, maximum and minimum of those are 6.8 m, 13.2 m and 1.1 m, respectively, and the error is 2.33 m. Checking the field measurement of the two roads after earthquake, we inferred that about 1.18 m may have been overrated using this new method. Moreover, our estimated results using this new method are larger than the calculated results based on restoration of deformed constructions and strata near the surface rupture, suggesting that the co-seismic horizontal shortening should have been distributed in a wider area, including the immeasurable permeated deformation far from the rupture and the measurable near the rupture.

Key words: Wenchuan earthquake; surface rupture; co-seismic horizontal shortening; image contrast

摘要: 2008年汶川地震(M_w 7.9)造成了严重的人员伤亡和重大经济损失。震后现场调查获得大量的垂直和走滑同震位移数据,但缺乏同震水平缩短量数据,直接影响了对汶川地震的同震形变特征的研究。文中尝试从一个新的角度,通过地震前、后 QuickBird 卫星影像对比,同时结合野外实地测量来分析汶川地震地表破裂带同震水平缩短量。白沙河破裂段位于中央主破裂带的西南端,距震中区映秀镇最近仅有 15 km。在该破裂段的两侧各有一条乡间公路,相距 300~900 m,我们通过对对比地震前、后 QuickBird 卫星影像的公路间距变

收稿日期: 2010-02-23; 修回日期: 2010-05-08

基金项目: 国家自然科学基金项目(40841019); 中国地震局汶川 8.0 级地震科学考察项目

作者简介: 石峰(1984—),男,博士研究生,构造地质学专业。E-mail: skywazy@126.com

* 通信作者简介: 何宏林(1964—),男,研究员,博士生导师,地震地质与活动构造专业。E-mail: honglinhe123@vip.sina.com

化,对比震后实测公路位置与震前的差异,获得了一系列的同震水平缩短量,其平均值为 6.8 m(RMS),最大值和最小值分别为 13.2 m 和 1.1 m,综合误差为 2.33 m。该估计值大于沿地表破裂带通过复原变形人工构造物以及变形地层所获得的同震水平缩短量,说明汶川地震在地表造成的水平缩短分布在一个较大的范围内,而破裂带附近所观测到的仅仅是其中的一部分。

关键词:汶川地震;地表破裂;同震水平缩短量;影像对比

中图分类号:P316 文献标志码:A 文章编号:1005-2321(2010)05-0067-08

2008年汶川地震(M_w 7.9)发生在青藏高原东缘龙门山推覆构造带上,同时使北川—映秀断裂和灌县—江油断裂两条倾向NW的叠瓦状逆断层产生地表破裂。其中,沿北川—映秀断裂展布的地表破裂长约250 km,以逆冲为主兼有右旋走滑分量;沿灌县—江油断裂展布的地表破裂带长约72 km,是一条纯逆断层型地表破裂带;另外,在上述两条地表破裂带西部还发育着一条NW向以逆冲为主兼有左旋走滑分量的小鱼洞地表破裂带,长约6 km^[1-10]。震后通过地表破裂带的详细调查,获得了大量垂直和走滑同震位移数据^[1-7],而反映同震水平缩短量的数据较少,只有零星的根据跨破裂的人工构筑物、道路以及探槽内地层等的变形复原获得的测量值,或者根据破裂的空间结构和垂直、走滑同震位移量得到的估计值^[11-17]。同震位移向量由垂直、走滑和水平缩短(或拉张)三分量构成,水平缩短(或拉张)分量的缺乏必然会导致对汶川地震的破裂特征认识的偏差。因此,如何获得破裂的水平缩短(或拉张)分量来校正汶川地震地表同震变形特征的认识偏差就成为—一个重要课题。

GPS和InSAR观测数据给出了汶川地震的区域同震位移场,但是由于龙门山区地势陡峻,已经发表的InSAR数据显示,近断裂的强变形带难以获得理想的干涉数据^[18-20];而GPS数据则因为连续观测站布局有限,只能获取远场的同震位移^[21-22]。另外,最近几年发展起来的利用地震前、后高分辨率卫星光学影像的亚像元相干分析技术也为区域同震位移场的研究提供了一个新的手段,并已经在多次地震中应用^[23-26],该方法的关键在于对比地震前、后卫星影像亚像元的绝对位置。但是在对正射校正后的卫星影像地理位置进行定位时,地面控制点的数量与精度起着决定性作用,而地面控制点在地震前、后的精确位置的获得存在较大的不确定性。本文将从一个新的角度,从光学卫星影像提取特征地物的几何形态,结合野外实地测量结果,通过对比地震前后这些特征地物几何形态的空间位置变化来估算同震水

平缩短量,该方法可有效地避免地震前、后卫星影像之间绝对地理位置对比造成的误差和不确定性。

白沙河破裂段位于主破裂的西南端,距震中区映秀镇最近仅有15 km。该破裂段几何结构复杂,由多条分支破裂组成,总体走向约为 50° ,最大同震垂直位移达到了6.5 m,最大同震右旋位移达到了4.8 m^[12]。野外调查发现,沿该破裂段存在许多明显的水平挤压、缩短现象,但是所获得的水平缩短数据零星分散^[12,15]。在破裂带的两侧也即白沙河两侧有两条乡间公路,为我们提供了十分优越的特征地物,因此我们选取该破裂段作为研究对象。利用地震前后Quick Bird卫星光学影像提取上述两条乡间公路的几何形态,并结合地震后道路的实测数据,对比地震前、后道路的空间位置变化,估算同震水平缩短量。

1 水平缩短量估算方法

本文通过以下5个步骤来完成对同震水平缩短量的估算。

步骤1:对选取的两条乡间道路进行实地考察,确定道路是否为震后重修或改建的,剔除震后人改造的路段,采用GPS实时差分测量技术(RTK)对选取的道路进行详细测量。

步骤2:选取地震前后效果较好的,分辨率为0.6 m的Quick Bird卫星影像进行正射校正。其中,震前影像根据1:5万数字高程模型(DEM)来进行校正;震后影像根据实地测量的100个地面控制点(GCP)并结合1:5万DEM进行校正。

步骤3:在正射校正后的Quick Bird卫星影像中,提取所选取的两条乡间道路在地震前后的几何形态(图1)。

步骤4:对比提取的地震前、后两条乡间道路间距的差异,对比从影像中提取的地震前道路数据与地震后实测数据,估计同震水平缩短量(图2,3)。

步骤5:对同震水平缩短量进行误差分析(图4,5)。

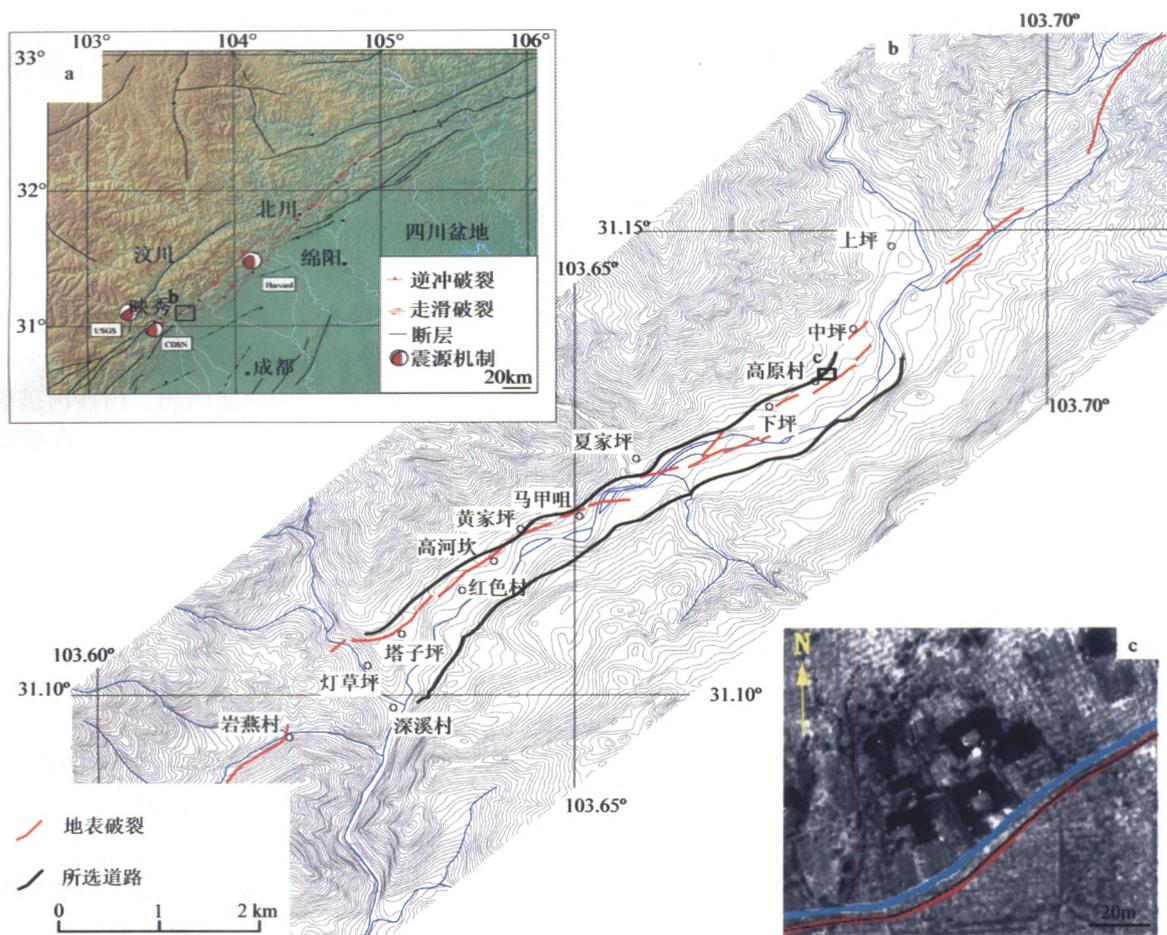


图 1 白沙河段地表破裂分布及标志道路位置

Fig. 1 Surface rupture in Baishahe section and locations of reference roads

a—汶川地震地表破裂分布, 改自徐锡伟等^[1], 断层资料来自中国活动构造图^[27], 黑框表示图 b 研究区白沙河段地表破裂位置; b—白沙河段地表破裂分布, 改自何宏林等^[12], 红线为地表破裂, 黑线为本研究选择的两条标志道路, 黑框指示图 c 位置; c—地震前、后道路对比(局部)图, 底图为震前 0.6 m 分辨率的 QuickBird 卫星影像, 蓝色宽带为震前影像提取的道路, 红色宽带为震后影像提取的道路, 黑色点线为地震后通过差分 GPS 实测道路的南路肩。

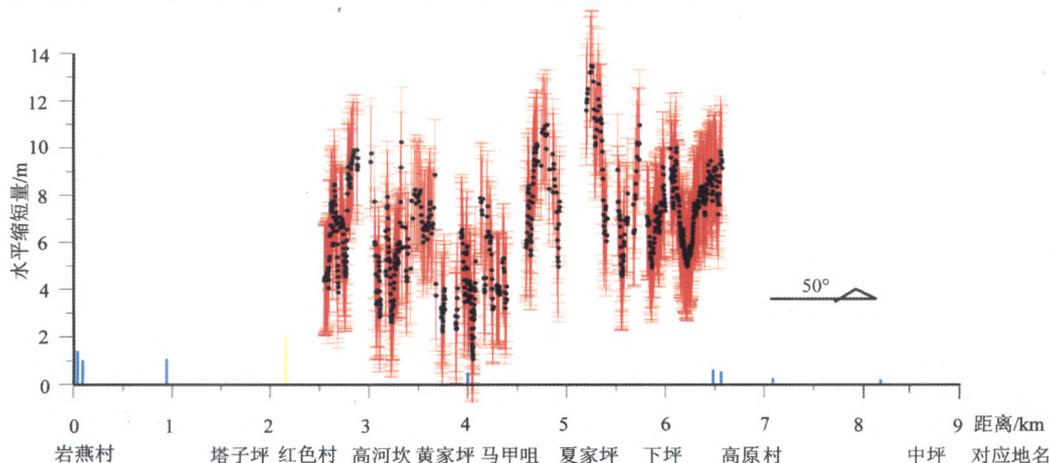


图 5 白沙河段同震水平缩短量分布图

Fig. 5 Distribution of co-seismic horizontal shortenings along Baishahe section

黑点为本文得到同震水平缩短量数据, 垂直短红线代表了每个数据的误差范围, 黄线是根据当地老乡对地震破裂过程的目击描述获得的同震水平缩短量^[12], 蓝线为根据破裂带上人工构筑物变形复原获得的同震水平缩短量^[15]。

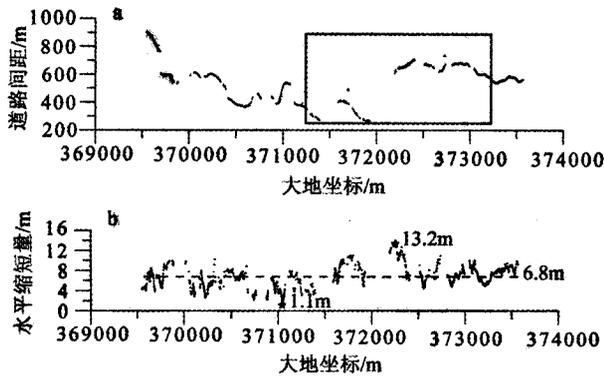


图2 由卫星影像获得的地震前后道路间距(a)和同震水平缩短(b)

Fig.2 Space between two roads (a) and co-seismic horizontal shortening (b) from satellite images

a—通过卫星影像中提取的白沙河断裂段两侧道路在140°方向上的间距,灰色点线为震前的间距,黑色点线为震后的间距,黑框为图4显示的实测区域;b—对比地震前后道路间距获得的140°方向上的同震水平缩短,一个黑色点带表示一个同震水平缩短量,最大值13.2m和最小值1.1m分别用黑色五角星表示,黑色虚线表示平均值6.8m。

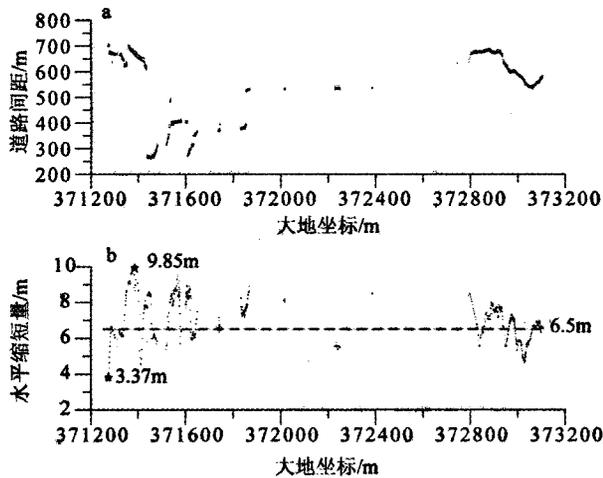


图3 由震后实测及震前卫星影像获得的地震前后道路间距(a)和同震水平缩短(b)

Fig.3 Space between two roads (a) and co-seismic horizontal shortening (b) from GPS measurements after the earthquake and satellite images before the earthquake

a—白沙河断裂段两侧道路在140°方向上的间距,灰色点线为震前影像提取道路的间距,黑色点线为震后实测道路的间距;b—对比地震前、后道路间距获得的140°方向上的同震水平缩短量,一个黑色点代表一个同震水平缩短量,最大值9.85m和最小值3.37m分别用黑色五角星表示,黑色虚线表示平均值6.5m。

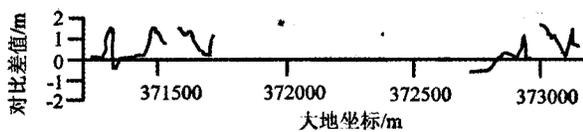


图4 两种方法获得的同震水平缩短量的差值

Fig.4 Difference between horizontal shortenings calculated by the two methods explained in 2.1 and 2.2

2 白沙河断裂段同震水平缩短量的计算

2.1 地震前、后卫星影像的道路对比

我们选取的特征地物是位于塔子坪村和高原村之间的两条乡间道路,两条道路分别延伸在白沙河的南北两岸,长约5 km。由于白沙河断裂段地表破裂是沿白沙河发育的,因此除局部地段外,这两条道路正好位于地表破裂带的南北两侧。白沙河断裂段破裂带的平均走向50°,因此我们选择垂直平均破裂走向的140°作为估算同震水平缩短量的方向,沿该方向上测量提取的地震前、后影像道路的间距,地震前、后影像道路间距的差值就是在140°方向上的同震水平缩短量。我们每间隔3~5 m测量一次,获得了906个同震水平缩短量数据(图2b)。平均值在6.8 m,最大值13.2 m,最小值1.1 m。

2.2 震后实测道路与震前影像道路对比

地震后,我们选择了一段2 km长的道路,采用GPS实时差分测量技术进行了详细的测量,获得两条道路较精确的震后位置。同样,在140°方向上获得震后实测道路的间距和震前影像道路的间距两组数据(采样间距为3~5 m)。由此我们获得200个点的水平缩短量数据,平均值为6.5 m,最大值为9.85 m,最小值3.37 m(图3)。

3 误差分析

卫星影像的误差主要来自于轨道的不同、观测角度和地形影响,以及平台和探测器参数的不确定性^[23]。本文选取了Quick Bird的0.6 m分辨率的预正射产品,该影像在不经其他处理的情况下绝对水平均方根误差(RMSE)达到了14 m^[28],不能满足测量同震地表位移的精度要求。通过数值地形高程数据(DTED)2级(1弧秒的间隔或30 m的间隔)数值高程模型(DEM),选择适合的有理多项式模型(RPCs)和多个亚米级地面控制点(GCP)处理该影像,水平误差可以控制在2 m以内^[29]。为了进一步提高精度,本文选用的数值高程模型是1:5万DEM数据(20 m分辨率),GCP采用GPS实时差分测量技术(水平精度为10 mm),通过双线性内插法来校正卫星影像,理论上精度应该远远高于2 m。尽管如此,我们还是将2 m作为来自影像处理本身

造成的误差估计。

还有一部分误差来自于影像上提取道路时产生的误差,主要是在选取道路时的边界误差。该误差不会大于一个像元(即 0.6 m),地震前、后两次相加后的误差不会大于两个像元(即 1.2 m)。将这部分的误差按最大值 1.2 m 计算。

本研究所选择的方法是对比地震前、后两条道路间距,用两组间距的差值来估计同震水平缩短量,不进行地震前、后的道路影像的位置对比,因此避免了由此产生的误差和不确定性。因而,上述产生于图像处理过程中的误差是同震水平缩短量估计的主要误差来源,综合这两种误差估计,我们得出通过地震前、后卫星光学影像获得的同震水平缩短量的误差估计为 2.33 m。

由于实测道路的精度达到了厘米级,理论上通过实测道路间距和地震前影像道路间距对比(2.2 描述的方法)获得的同震水平缩短量精度要明显高于仅仅用地震前、后影像道路间距对比(2.1 描述的方法)所获得的结果。因此,比较两种估计结果之间的差异也可以作为判断误差大小的辅助手段。图 4 显示 2.1 方法获得的结果与 2.2 方法获得的结果间的差值,可以看出,大部分用地震前、后影像道路间距对比所得出的结果都大于实际测量道路间距和地震前影像道路间距对比所获得的结果,说明仅仅依靠影像获得的同震水平缩短量可能比实际缩短量要大。我们选取 100 个点进行均方根分析,得到 $RMSE=1.18$ m,该值可能代表了上述仅仅依靠影像获得的同震水平缩短量中的过大估计量。

而且,由于这两种方法之间造成的差异仅有 1.18 m,小于前述的综合误差估计 2.33 m,因此也从另一个角度说明了我们的误差估计是合理的。

4 讨论

综合上述两种方法的计算结果以及误差估计,我们得到了汶川地震破裂带白沙河段的水平缩短量分布情况(图 5)。可以看出同震水平缩短量在该段总体上比较均衡,其值大部分在 4.5~10 m 间波动,没有明显的增大或减小趋势。这与其他研究者在该段通过近破裂带测量得到的位移量沿北东方向减小的结论^[12,15]不一致。通过近破裂带地表形变测量获得的同震位移量受近地表地形和上覆松散堆积物的厚度影响比较严重^[12],本文研究方法虽然也受地形和上覆松散堆积物的厚度的影响,但无论是在跨地表破裂带 300~900 m 范围内得到的同震水平缩短量,相对而言,这些影响因素会小很多,更能真实反应同震水平缩短量的变化。在图 5 中最小值和最大值分别分布在黄家坪段和夏家坪段,这是因为在黄家坪段两条道路在地表破裂带的同一侧,都处于破裂带下盘,因而计算出的水平缩短量也仅仅是发生在破裂带下盘上的,相对较小;而夏家坪段存在一个巨大的滑坡(图 6),可能造成靠近破裂带的公路发生过大的位移,因而产生了较大的水平缩短量。

发震断裂无论是走滑断裂还是逆冲断裂,肉眼能观察到明显变形的地表破裂带宽度大部分不超过 30 m^[30],此次汶川地震的地表破裂带宽度大部分小于 40 m,半数以上为 10~30 m^[3],个别地段宽度可达 100 m^[1],白沙河段地表破裂的影响宽度最大接近 300 m,并由多条次级破裂组成^[12]。与其他根据该破裂带上变形复原获得的研究结果相比(图 5,图 7),本研究所获得的同震水平缩短量要大得多。图 7 显示了随跨断层不同距离的水平缩短量的分



图 6 夏家坪地区巨大滑坡(镜像北)

Fig. 6 Big landslide occurred near the Xiajiaping (Photo to north)

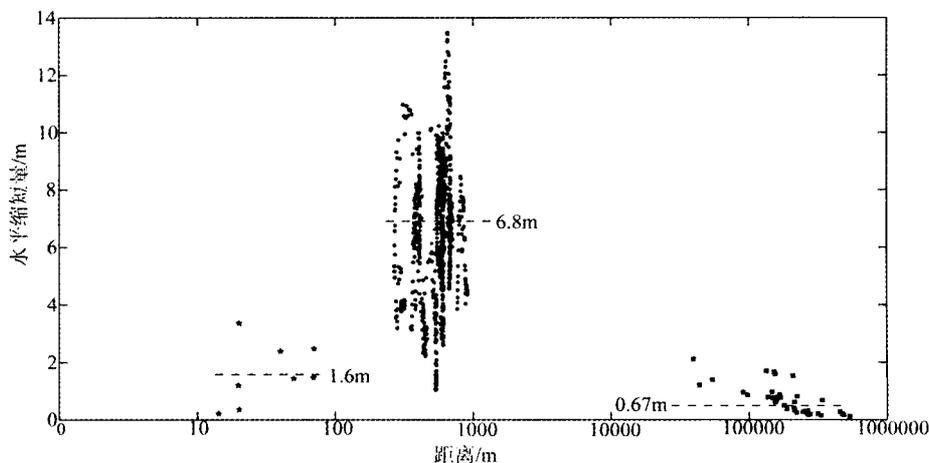


图7 跨断层不同距离的水平缩短量分布图

Fig. 7 Distribution of co-seismic horizontal shortenings in different spaces across rupture
 黑色五角星数据为近破裂带野外测量数据^[15];黑色圆点为本文数据;黑色正方形为GPS数据^[21];
 黑色虚线表示相应平均值。

布,黑色五角星为根据该破裂带上变形复原获得的结果^[15],黑色圆点为本文结果,黑色正方形为根据GPS数据^[21]在 140° 方向上得到的水平缩短量。我们的结果大于GPS的结果,这与理论结果相一致,即同震变形随距断层距离变远而变小。但是本文的结果又大于在近破裂带上几米至几十米较窄范围内得到的可见的同震水平缩短量,其他研究者在中央断裂北川—插鼓段通过滑动位移矢量计算得到的同震水平缩短量最大为 3.3 m ^[17],在前山断裂白鹿段通过复原探槽地层得到的同震水平缩短量最大为 2.83 m ^[14],这与在中央断裂白沙河段通过复原人工构造物变形得到的最大水平缩短量 3.37 m ^[15]相一致,均小于本研究所获得的同震水平缩短估计值。这说明除地表破裂带附近可观测得同震水平缩短量以外,在一个更大的范围内还存在通常肉眼难以观察到的透入式变形。这与1999年台湾集集地震的研究结果一致^[31]。

5 结论

通过地震前、后高分辨卫星影像提取破裂带两侧道路,对比两道路间距的差值我们获得了在垂直破裂带平均走向上的同震水平缩短量,平均值在 6.8 m ,最大值 13.2 m ,最小值 1.1 m ,误差估计为 2.33 m 。而通过对比地震前影像道路间距和地震后实际测量道路的间距,也获得了一组垂直破裂带平均走向上的同震水平缩短量,平均值为 6.5 m ,最

大值和最小值分别为 9.85 和 3.37 m 。在可对比的范围内,这两种方法获得的结果之间的平均差值为 1.18 m ,表明仅仅依靠影像获得的同震水平缩短量存在过大估计,也从另一个角度说明了我们的误差估计是合理的。本研究所获得的同震水平缩短量估计明显大于其他根据破裂带上人工构造物变形和变形地层复原获得的研究结果,表明除地表破裂带附近可观测得同震水平缩短量以外,在一个更大的范围内还存在通常肉眼难以观察到的透入式连续变形。

在成文过程与中国地震局地质研究所的邓起东院士,张培震、徐锡伟研究员,陈立春副研究员进行了有益的探讨,在遥感卫星影像处理与分析中得到了国家卫星气象中心朱琳博士和中国科学院地理科学与资源研究所张英的技术帮助,在修改过程中得到了匿名审稿专家的建设性意见,在此一并谢过。

References

- [1] Xu X W, Wen X Z, Ye J Q, et al. The M_s 8.0 Wenchuan earthquake surface ruptures and its seismogenic structure[J]. *Seismology and Geology*, 2008, 30 (3): 597-629 (in Chinese).
- [2] Xu X W, Wen X W, Yu G H, et al. Co-seismic reverse- and oblique-slip surface faulting generated by the 2008 M_w 7.9 Wenchuan earthquake, China[J]. *Geology*, 2009, 37 (6): 515-518.
- [3] Zhou Q, Xu X W, Yu G H, et al. Investigation on widths of

- surface rupture zones of the M_s 8.0 Wenchuan earthquake, Sichuan Province, China[J]. *Seismology and Geology*, 2008, 30(3): 778-788(in Chinese).
- [4] Zhang P Z, Xu X W, Wen X Z, et al. Slip rates and recurrence intervals of the Longmen Shan active fault zone, and tectonic implications for the mechanism of the May 12 Wenchuan earthquake, 2008, Sichuan, China[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2008, 51(4): 1066-1073(in Chinese).
- [5] Ma B Q, Zhang S M, Tian Q J, et al. The surface rupture of Wenchuan earthquake (M 8.0)[J]. *Quaternary Sciences*, 2008, 28(4): 513-517(in Chinese).
- [6] He Z T, Ma B Q, Tian Q J, et al. Deformation features of surface rupture of Wenchuan earthquake (M 8.0) at the Pingtong Town[J]. *Quaternary Sciences*, 2008, 28(5): 789-795(in Chinese).
- [7] He H L, Sun Z M, Wang S Y, et al. Rupture of the M_s 8.0 Wenchuan earthquake[J]. *Seismology and Geology*, 2008, 30(2): 359-362(in Chinese).
- [8] Burchfiel B C, Royden L H, van der Hilst R D, et al. A geological and geophysical context for the Wenchuan earthquake of 12 May 2008, Sichuan, People's Republic of China[J]. *GSA Today*, 2008, 18: 4-11, doi: 10.1130/GSATG18A.1.
- [9] Li C Y, Wei Z Y, Ye J Q, et al. Amounts and styles of coseismic deformation along the northern segment of surface rupture of the 2008 Wenchuan M_w 7.9 earthquake, China[J]. *Tectonophysics* (in press), doi: 10.1016/j.tecto.2009.09.023.
- [10] Liu Z J, Zhang Z, Wen L, et al. Co-seismic ruptures of the 12 May 2008 M_s 8.0 Wenchuan earthquake, Sichuan: East-west crustal shortening on oblique, parallel thrusts along the eastern edge of Tibet[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2009, 286(3-4): 355-370.
- [11] Chen G H, Xu X W, Zheng R Z, et al. Quantitative analysis of the co-seismic surface rupture of the 2008 Wenchuan earthquake, Sichuan, China along the Beichuan-Yingxiu Fault[J]. *Seismology and Geology*, 2008, 30(3): 723-738 (in Chinese).
- [12] He H L, Sun Z M, Wei Z Y, et al. Rupture of the M_s 8.0 Wenchuan earthquake along Baishahe River[J]. *Seismology and Geology*, 2008, 30(3): 658-673(in Chinese).
- [13] Gao X, He H L, Wei Z Y, et al. The causation of maximum horizontal displacement of Wenchuan earthquake along the Baisha River[J]. *Seismology and Geology*, 2008, 30(4): 1004-1011(in Chinese).
- [14] Wang H, Ran Y K, Chen L C, et al. The discussion on the calculation method of surface shortening amount due to reverse-faulting surface rupture: With the example of surface deformation of the M_s 8.0 Wenchuan earthquake[J]. *Seismology and Geology*, 2008, 30(4): 1033-1045(in Chinese).
- [15] Shi F, He H L, Wei Z Y. Co-seismic horizontal shortening on Baishahe segment of Wenchuan earthquake rupture zone[J]. *Quaternary Sciences*, 2009, 29(3): 546-553(in Chinese).
- [16] Chen G H, Xu X W, Yu G H, et al. Co-seismic slip and slip partitioning of multi-faults during the M_s 8.0 2008 Wenchuan earthquake[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2009, 52(5): 1384-1394(in Chinese).
- [17] Li T, Chen J, Huang M D, et al. Methods to calculating slip vectors of reverse-fault earthquake surface rupture: A case study in Wenchuan earthquake[J]. *Quaternary Sciences*, 2009, 29(3): 524-534(in Chinese).
- [18] Sun J B, Liang F, Shen Z K, et al. InSAR deformation observation and preliminary analysis of the M_s 8 Wenchuan earthquake[J]. *Seismology and Geology*, 2008, 30(3): 789-795(in Chinese).
- [19] Qu C Y, Song X G, Zhang G F, et al. Analysis on the characteristics of InSAR coseismic deformation of the M_s 8.0 Wenchuan earthquake[J]. *Seismology and Geology*, 2008, 30(4): 1076-1084(in Chinese).
- [20] Manabu Hashimoto, Mari Enomoto, Yo Fukushima. Coseismic deformation from the 2008 Wenchuan, China, earthquake derived from ALOS/PALSAR Images[J]. *Tectonophysics*(in press), doi: 10.1016/j.tecto.2009.08.034.
- [21] The Project of Crustal Movement Observation Network of China. The coseismic displacement fields of Wenchuan M_s 8.0 earthquake occurrence in 2008 using GPS data[J]. *Science in China: Series D*, 2008, 38(10): 1195-1206 (in Chinese).
- [22] Gu G H, Wang W X. Coseismic displacements from the 2008 Wenchuan M 8.0 earthquake observed by GPS[J]. *Earthquake*, 2009, 29(1): 92-99(in Chinese).
- [23] Van Pumbroek N, Michel R, Bient R, et al. Measuring earthquakes from optical satellite images[J]. *Applied Optics*, 2000, 39(20): 3486-3494.
- [24] Michel R, Avouac J P. Deformation due to the 17 August 1999 Izmit, Turkey, earthquake measured from SPOT images[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2002, 107(B4): 2062, doi: 10.1029/2001JB000102.
- [25] Dominguez S, Avouac J P, Michel R. Horizontal coseismic deformation of the 1999 Chi-Chi earthquake measured from SPOT satellite images: Implications for the seismic cycle along the western foothills of central Taiwan[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2003, 108(B2): 2083, doi: 10.1029/2001JB000951.
- [26] Klinger Y, Michel R, King G C P. Evidence for an earthquake barrier model from M_w -7.8 Kokoxili (Tibet) earthquake slip-distribution[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2006, 242: 354-364.
- [27] Deng Q D, Ran Y K, Yang X P, et al. Map of Active Tectonics in China[M]. Beijing: Seismological Press, 2007(in

Chinese).

- [28] http://www.digitalglobe.com/file.php/646/QuickBird_Imagery_Products-Product_Guide.pdf.
- [29] http://www.digitalglobe.com/file.php/645/QuickBird_Imagery_Products-FAQ.pdf.
- [30] Xu X W, Yu G H, Ma W T, et al. Evidence and methods for determining the safety distance from the potential earthquake surface rupture on active fault[J]. *Seismology and Geology*, 2002, 24(4): 470-483(in Chinese).
- [31] Lee Y H, Wu K C, Rau R J, et al. Revealing coseismic displacements and the deformation zones of the 1999 Chi-Chi Earthquake in the Tsaotung Area, Central Taiwan, using digital cadastral data[J]. *Journal of Geophysics Research*, 2009, 115, B03419, doi: 10.1029/2009JB006397(in press).
- ### 参考文献
- [1] 徐锡伟, 闻学泽, 叶建青, 等. 汶川 M_s 8.0 地震地表破裂带及其发震构造[J]. *地震地质*, 2008, 30(3): 597-629.
- [3] 周庆, 徐锡伟, 于贵华, 等. 汶川 8.0 级地震地表破裂带宽度调查[J]. *地震地质*, 2008, 30(3): 778-788.
- [4] 张培震, 徐锡伟, 闻学泽, 等. 2008 年汶川 8.0 级地震发震断裂的滑动速率、复发周期和构造成因[J]. *地球物理学报*, 2008, 51(4): 1066-1073.
- [5] 马保起, 张世民, 田勤俭, 等. 汶川 8.0 级地震地表破裂带[J]. *第四纪研究*, 2008, 28(4): 513-517.
- [6] 何仲太, 马保起, 田勤俭, 等. 汶川 8.0 地震地表破裂带通镇段的变形特征[J]. *第四纪研究*, 2008, 28(5): 789-795.
- [7] 何宏林, 孙昭民, 王世元, 等. 汶川 M_s 8.0 地震地表破裂带[J]. *地震地质*, 2008, 30(2): 359-362.
- [11] 陈桂华, 徐锡伟, 郑荣章, 等. 2008 年汶川 M_s 8.0 地震地表破裂变形定量分析: 北川—映秀断裂地表破裂带[J]. *地震地质*, 2008, 30(3): 723-738.
- [12] 何宏林, 孙昭民, 魏占玉, 等. 汶川 M_s 8.0 地震地表破裂带白沙河段破裂及其位移特征[J]. *地震地质*, 2008, 30(3): 658-673.
- [13] 高翔, 何宏林, 魏占玉, 等. 汶川地震白沙河段最大地表水平位移量的成因分析[J]. *地震地质*, 2008, 30(4): 1004-1011.
- [14] 王虎, 冉勇康, 陈立春, 等. 地表破裂型逆断层地表缩短量计算方法探讨: 以汶川 M_s 8.0 地震地表变形为例[J]. *地震地质*, 2008, 30(4): 1033-1045.
- [15] 石峰, 何宏林, 魏占玉. 汶川地震破裂带白沙河段同震水平缩短量的估算[J]. *第四纪研究*, 2009, 29(3): 546-553.
- [16] 陈桂华, 徐锡伟, 于贵华, 等. 2008 年汶川 M_s 8.0 地震多断裂破裂的近地表同震滑移及滑移分解[J]. *地球物理学报*, 2009, 52(5): 1384-1394.
- [17] 李涛, 陈杰, 黄明达, 等. 逆断层型地震地表破裂带滑动矢量计算方法探讨: 以汶川地震为例[J]. *第四纪研究*, 2009, 29(3): 524-534.
- [18] 孙建宝, 梁芳, 沈正康, 等. 汶川 M_s 8.0 地震 InSAR 形变观测及初步分析[J]. *地震地质*, 2008, 30(3): 789-795.
- [19] 屈春燕, 宋小刚, 张桂芳, 等. 汶川 M_s 8.0 地震 InSAR 同震形变场特征分析[J]. *地震地质*, 2008, 30(4): 1076-1084.
- [21] 国家重大科学工程中国地壳运动观测网络项目组. GPS 测定的 2008 年汶川 M_s 8.0 级地震的同震位移场[J]. *中国科学: D 辑*, 2008, 38(10): 1195-1206.
- [22] 顾国华, 王武星. GPS 测得的汶川大地震同震位移[J]. *地震*, 2009, 29(1): 92-99.
- [27] 邓起东, 冉勇康, 杨晓平, 等. 中国活动构造图[M]. 北京: 地震出版社, 2007.
- [30] 徐锡伟, 于贵华, 马文涛, 等. 活断层地震地表破裂“避让带”宽度确定的依据与方法[J]. *地震地质*, 2002, 24(4): 470-483.