

文章编号:1671-5942(2014)03-0099-05

青藏高原东北缘近期地壳水平运动研究^{* 1}

郝 明 秦 婵 兰 李 煒 航 王 文 萍 周 珑

(中国地震局第二监测中心, 西安 710054)

摘要 对2011~2013年7月的3期流动GPS最新观测资料进行处理, 获取青藏高原东北缘地区近期地壳水平运动速度场图像。水平运动速率、跨主要活动断裂GPS运动剖面以及应变率场结果表明: 1)祁连山北缘断裂东段-榆木山断裂、六盘山断裂地壳缩短较为明显, 但在断裂两侧邻近区域差异性运动并不明显, 说明这两条断裂处于应变积累阶段, 闭锁程度高; 2)岷县-宕昌断裂处于剪切应变积累的强闭锁阶段, 2013-07-22在该断裂带上发生了Ms6.6地震; 3)受2008年汶川地震震后影响的龙门山震区已基本调整恢复到震前的运动态势, 龙门山断裂带挤压缩短率为1~3 mm/a。

关键词 青藏高原东北缘; 地壳运动; 水平速度场; 岷县地震; 地壳缩短

中图分类号:P227

文献标识码:A

RECENT HORIZONTAL VELOCITY FIELD OF NORTHEASTERN TIBETAN PLATEAU

Hao Ming, Qin Shanlan, Li Yuhang, Wang Wenping and Zhou Lin

(Second Crustal Monitoring and Application Centre, Xi'an 710054)

Abstract The horizontal velocity field of the northeastern Qinghai-Tibet plateau is acquired by using the GPS data observed between 2011 and 2013. The current crustal movement in the northeastern margin of the Tibetan plateau is consistent with the long term motion. The north Qilianshan fault is experiencing the deformation of contraction and left-lateral shear, and the shortening rate is larger than the strike slip rate. The horizontal shortening rate of west part of north Qilianshan fault is larger than that of the east part. The GPS velocity profile across the west part of north Qilianshan fault shows that the strain is accumulating while the underneath of this fault is locking. The profile perpendicular to the Liupanshan fault demonstrates that the shortening is distributed at the west of Liupanshan with a range of 300 km. There is no differential movement in the vicinity of both sides of Liupanshan. Therefore, Liupanshan fault is locked deeply. The profile parallel to Diebu-Bailongjiang fault and west Qinling shows that there is a strike-slip deformation gradient between them. Linxia-Tanchang fault is located at this gradient and the shear strain is accumulating. The 2013 Minxian Ms 6.6 earthquake might be associated with this elastic strain accumulation due to locking. The tectonic motion of Longmenshan fault and surrounding area has been basically restored to horizontal movement before the 2008 Wenchuan earthquake.

Key words: northeastern Qinghai-Tibetan plateau; crustal movement; horizontal velocity field; Minxian earthquake; crustal convergence

* 收稿日期:2013-10-16

基金项目:国家自然科学基金项目(41174083); 地震行业科研专项(201208009); 陕西省科技计划项目(2012SF2-17)。

作者简介:郝明,男,1982年生,博士,研究方向:GPS数据处理及其在地形监测中的应用。E-mail:ha_mg@163.com。

作为青藏高原北东向扩展的前缘地带,青藏高原东北缘地区正经历着地壳缩短和走滑剪切变形。研究本区的运动与变形对研究整个青藏高原的运动与变形以及强震预测具有重要科学意义。对该区域的地壳水平运动也已取得了许多重要进展^[1~3]。本文利用最新 GPS 观测资料,探讨和分析了青藏高原东北缘地区近期地壳水平运动特征和应变率场分布情况。

1 资料和处理方法

资料主要来源于 2011 年和 2013 年“中国大陆构造环境监测网络”项目(简称“陆态网络”)在青藏高原东北缘观测的 GPS 数据以及地震行业专项“中国综合地球物理场观测鄂尔多斯地块及周缘地区”于 2012 年在鄂尔多斯地块西缘及龙门山地区观测的 GPS 数据。数据处理采用 GAMIT/GLOBK 软件^[4],按以下 3 步完成:

1)首先利用 GAMIT 获得 GPS 测站坐标、卫星轨道及台站对流层天顶延迟等参数及其方差-协方差矩阵的单日松弛解。解算时采用 SOPAC 数据中心提供的精密星历文件,并将中国大陆及周边的 IGS 测站观测数据加入区域网站的分析处理。为保证最终结果的自洽性,同时获取了全球 100 多个 IGS 测站的单日松弛解。

2)利用 GLOBK 软件(卡尔曼滤波)进行多时段综合解算,以获得网平差结果。在进行 GLOBK 综合解算时,把区域站单日松弛解和全球 IGS 站单日松弛解捆绑在一起,并选取全球均匀分布的 90 多个稳定站(GAMIT/GLOBK 软件提供)为基准点,将区域站速度场固定到 ITRF2008 框架下。

3)利用 Altamimi 等^[5]提供的 ITRF2008 框架下欧亚板块欧拉极,获取青藏高原东北缘及邻区相对稳定欧亚板块的水平运动速度场图像(图 1,椭圆代表 2 倍中误差;红色矩形框为图 2 中剖面位置;灰色线条表示主要活动断裂)。

2 水平运动速度场与应变率场

2.1 水平运动特征

青藏高原东北缘 2011~2013 期间地壳水平运动与 1998~2009 长期运动趋势总体一致^[6]。印度板块向欧亚板块俯冲,造成青藏高原北东向扩展,由于受到阿拉善、鄂尔多斯、华南等稳定地块的阻挡,被高原东缘的地壳缩短和走滑剪切所调整吸收^[7]。图 1 清晰地反映出东北缘地区 GPS 速度场由北向南的变化特征,即由祁连山地区的北东方向,变为东昆仑与海原-六盘山断裂之间的北东东方向,再到龙

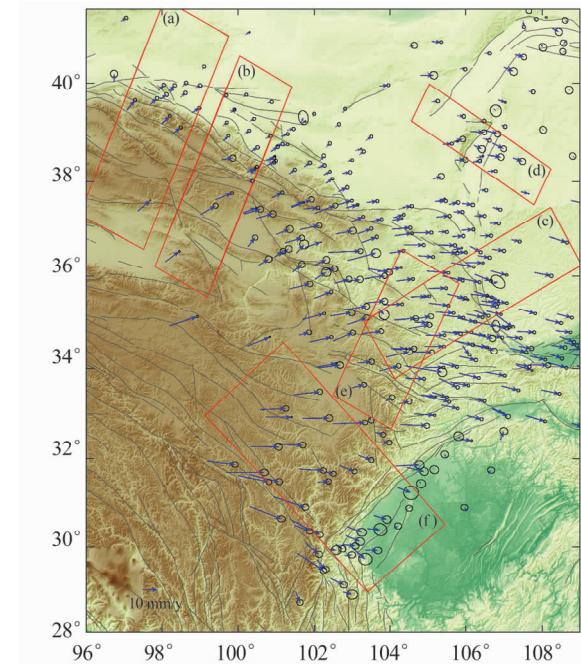


图 1 青藏高原东北缘 GPS 水平运动速度场

Fig. 1 Horizontal velocity field for the northeastern Tibetan plateau with respect to Eurasia block

门山地区的东方向或南东东方向。在祁连山地区, GPS 运动速率由柴达木盆地的 11 mm/a 减小到阿拉善地块的 2~3 mm/a,地壳水平挤压比较明显。

为估计某断层的活动情况,可以选取断层两侧一定范围内的 GPS 测站,投影得到平行于垂直断层走向的速度分量随断层距离的分布。假定块体为刚性,分别求得两块体速度分量的统计平均值,它们的差分别是沿断层的滑动速率和跨断层的拉张或挤压速率^[8]。由横跨祁连山北缘断裂西段的 GPS 运动速率剖面(图 2(a))可得出,该断裂存在 5~6 mm/a 的挤压缩短,同时兼具约 4 mm/a 的左旋走滑速率。跨祁连山北缘断裂东段-榆木山断裂的 GPS 速率剖面(图 2(b))表明,在该段断裂南北两侧 300 km 范围内,有明显的水平挤压和左旋走滑剪切运动,但在断裂两侧各 50 km 范围内的邻近区域差异性运动并不明显,反映出祁连山北缘断裂东段正经历着应变积累的强闭锁阶段。由图 2(b)还可以获取榆木山断裂分别具有约 8 和 4 mm/a 的水平缩短和左旋走滑速率。因此祁连山北缘断裂具有明显的地壳缩短和左旋剪切变形^[2,9]。

将图 1 与长期运动速度场^[6]作对比可以发现,庄浪河断裂东西两侧的差异性运动增强,海原断裂带左旋走滑状态持续。

由横跨六盘山断裂的 GPS 水平运动剖面(图 2(c))可以看出,六盘山的地壳缩短速率为 5~6 mm/a。地壳缩短并不存在于六盘山断裂附近,而是

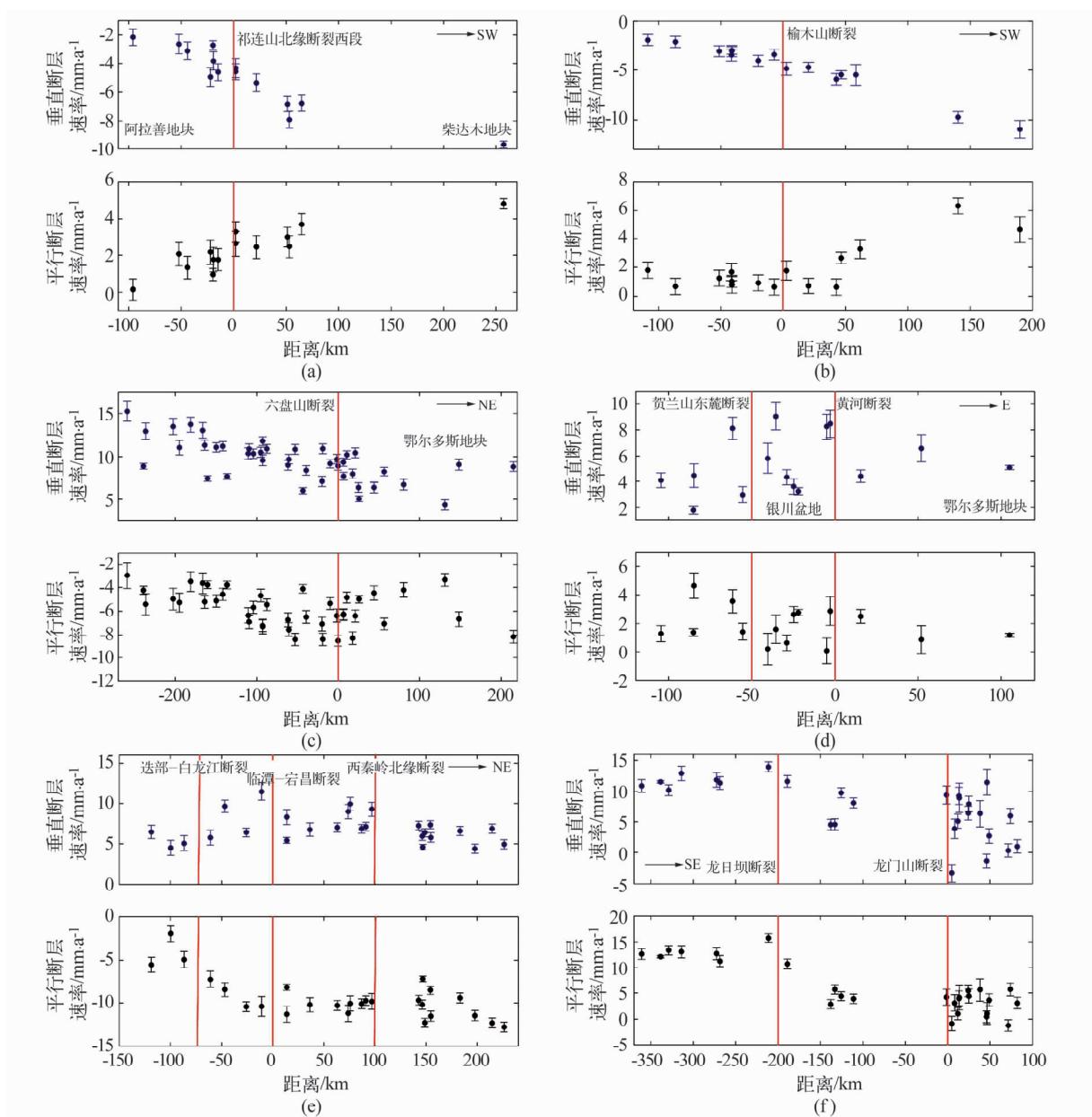


图2 跨青藏高原东北缘及邻区主要断裂带的GPS运动剖面

Fig. 2 GPS profiles across major active faults in northeastern Tibetan plateau

在其以西宽达300 km的范围内^[2]。与垂直于榆木山断裂的GPS速率剖面相似,六盘山两侧的邻近区域内垂直断层的运动速率基本没有差异,由此认为六盘山断裂现处于强闭锁状态。

从横跨银川盆地的垂直和平行断层的速度剖面中(图2(d))可以看出,银川盆地现处于东西向拉张状态^[10],同时兼具微弱的右旋走滑。

根据横跨迭部-白龙江断裂、岷县-宕昌断裂和西秦岭断裂三大断裂系的平行断层GPS速度场剖面(图2(e))可以发现,迭部-白龙江断裂以南相对西秦岭断裂以北存在约6 mm/a的右旋走滑运动,而夹在这两条断裂之间的岷县-宕昌断裂则位于形变梯度带内,处于应变积累的强闭锁阶段。2013-

07-22甘肃岷县6.6级地震的发生应该与岷县-宕昌断裂强闭锁状态有关。

跨龙门山断裂的GPS运动剖面(图2(f))揭示出龙门山断裂带存在1~3 mm/a的水平挤压,与2008年Ms8.0级汶川地震前的地壳缩短率一致^[11]。龙门山西侧200 km处的龙日坝断裂具有约7 mm/a的右旋走滑和1 mm/a水平缩短,与全新世期间长期平均滑动速率相当^[12]。以上分析表明,受汶川地震影响的龙门山地区的构造运动已基本调整恢复到地震前的运动形态。

2.2 应变率场分析

GPS速度场可给出直观的板块或地块的运动状态,应变率场能够表达变形的性质与强度。速度场

与选取的参考框架有关,应变率场则与基准无关,因此可能是一种更好的解决方法。很多学者提出了由 GPS 速度场计算应变率场的方法^[13~14]。本文采用 Shen 等^[13]提出的台站至计算点距离加权的方法计算应变率场图像(图 3、4)。

由图 3 可见,最大压应变率位于鲜水河断裂附近,中心处达到 $5 \times 10^{-8}/\text{a}$,这个地区的剪应变率也最大,为 $4 \times 10^{-8}/\text{a}$ 。仅次于鲜水河断裂带的高构造压应变区为祁连山断裂带,约 $3 \times 10^{-8}/\text{a}$ 。该区域水平扩容率为负,代表挤压缩短比较明显,中心处达到 $2.5 \times 10^{-8}/\text{a}$ 。海原断裂表现出明显的剪切变形特征,西段跨断层最大剪应变率大于东段,并且以压应变率为主,其方向由北东向变为北东东向。

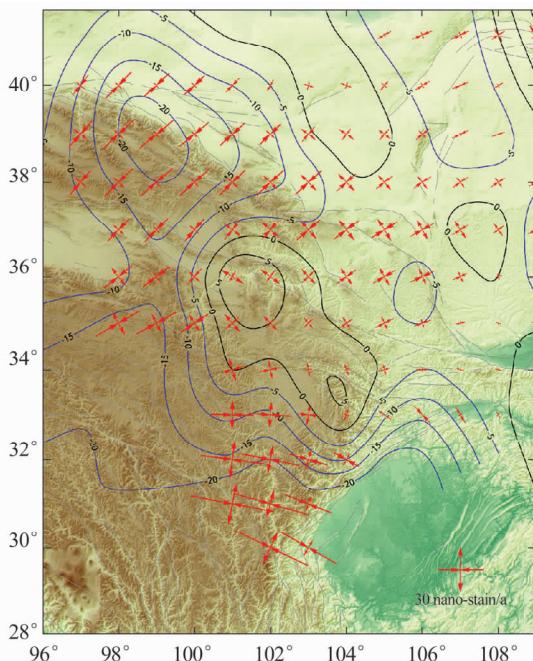


图 3 主应变率和面膨胀率分布(单位: $10^{-9}/\text{a}$)

Fig. 3 Principle strain rates and dilation rate

3 结 论

利用 2011~2013 年期间的 3 期流动 GPS 观测资料,对青藏高原东北缘地区的最新运动学特征进行分析。近期青藏高原东北缘水平运动速率与 1998~2009 年的长期运动总体一致。祁连山北缘断裂具有水平挤压和左旋剪切变形,水平挤压速率大于走滑速率。该断裂东段的地壳缩短速率明显高于西段,GPS 运动剖面图揭示出东段现处于应变积累的强闭锁阶段。六盘山地区的挤压缩短存在在其以西 300 km 的范围内,而两侧邻近区域基本没有差异性运动,说明六盘山断裂闭锁程度高。横跨迭部-白龙江断裂和西秦岭断裂的 GPS 运动剖面表明,位于这两条断裂之间的岷县-宕昌断裂处于剪切变形的

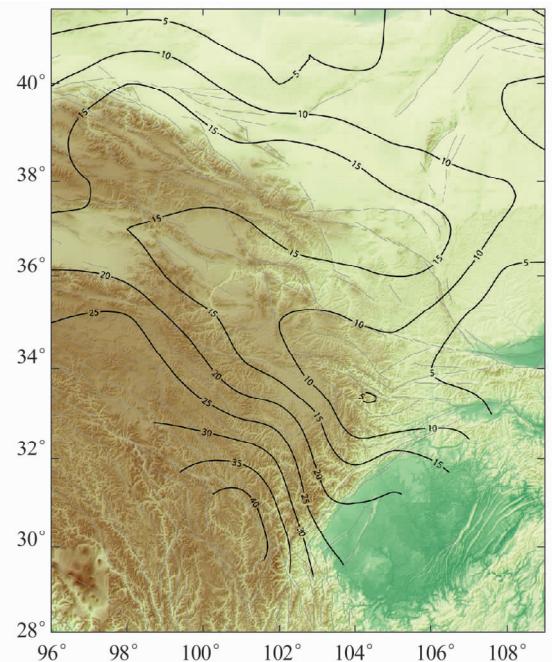


图 4 最大剪应变率分布(单位: $10^{-9}/\text{a}$)

Fig. 4 Maximum shear strain rate

形变速率梯度带内,2013 年甘肃岷县地震应该与震前岷县-宕昌断裂强闭锁状态有关。龙门山断裂带及周围的构造运动速率已基本调整恢复到 2008 年汶川地震前的运动态势。

致谢 感谢“中国大陆构造环境监测网络”项目提供的部分 GPS 观测数据!

参 考 文 献

- 江在森,等. 青藏块体东北缘近期水平运动与变形[J]. 地球物理学报,2001,41(5):636~644. (Jiang Zaisen, et al. Recent horizontal movement and deformation in the Northeast margin of Qinghai-Tibet block [J]. Chinese J Geophys, 2001, 41(5):636~644)
- Zhang P Z, et al. Continuous deformation of the Tibetan plateau from global positioning system data [J]. Geology, 2004, 32(9):809~812.
- 崔笃信,等. 青藏高原东北缘岩石圈变形及其机理[J]. 地球物理学报,2009,52(6):1 490~1 499. (Cui Duxin, et al. Lithosphere deformation and deformation mechanism in northeastern margin of Qinghai-Tibet plateau [J]. Chinese J Geophys, 2009, 52(6):1 490~1 499)
- Herring T A, King R W, McClusky S C. GAMIT reference manual, Release 10. 35 [M]. Massachusetts Institute of Technology, 2009.
- Altamimi Z Collilieux X Métivier L. ITRF2008: an improved solution of the international terrestrial reference frame [J]. J Geod, 2011, 85:457~473.
- 李强,等. 中国大陆构造变形高精度大密度 GPS 监测现今速度场[J]. 中国科学: 地球科学, 2012, 42(5):629~

632. (Li Qiang, et al. A precise velocity field of tectonic deformation in China as inferred from intensive GPS observations [J]. *Science China Earth Sciences*, 2012, 42(5):629–632)
- 7 Tappognier P, et al. Oblique stepwise rise and growth of the Tibet plateau [J]. *Science*, 2001, 294:1 671–1 677.
- 8 吕江宁,沈正康,王敏. 川滇地区现代地壳运动速度场和活动块体模型研究[J]. 地震地质, 2003, 25(4):543–554. (Lü Jiangning, Shen Zhengkang, Wang Min. Contemporary crustal deformation and active tectonic block model of the Sichuan-Yunnan region in China[J]. *Seismology and Geology*, 2003, 25(4):543–554)
- 9 Lease R, et al. Cenozoic shortening budget for the northeastern edge of the Tibetan Plateau: Is lower crustal flow necessary? [J] *Tectonics*, 2012, 31, TC3011.
- 10 柴炽章, 等. 银川市活动断层探测与地震危险性评价 [M]. 北京:科学出版社, 2011. (Chai Zhizhang, et al. Active faults exploration and seismic hazard assessment of Yinchuan city [M]. Beijing: Science Press, 2011)
- 11 张培震, 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):1 066–1 073. (Zhang Peizhen, et al. Slip rates and recurrence intervals of the Longmenshan active fault zone, and tectonic implications for the mechanism of the May 12 Wenchuan earthquake, 2008, Sichuan, China [J]. *Chinese J Geophys*, 2008, 51(4):1 066–1 073)
- 12 徐锡伟, 等. 巴颜喀拉地块东部龙日坝断裂带的发现及其大地构造意义 [J]. 中国科学(D辑):地球科学, 2008, 38(5):529–542. (Xu Xiwei, et al. Discovery of the Longriba fault zone in eastern Bayan Har block, China and its tectonic implication [J]. *Science China Earth Sciences*, 2008, 51(9):1 209–1 223)
- 13 Shen Z K, Jackson D D, Ge B X. Crustal deformation across and beyond the Los Angeles basin from geodetic measurements [J]. *J Geophys Res*, 1996, 101:27 957–27 980.
- 14 江在森, 刘经南. 应用最小二乘配置建立地壳运动速度场与应变场的方法 [J]. 地球物理学报, 2010, 53(5):1 109–1 117. (Jiang Zaisen, Liu Jingnan. The method in establishing strain field velocity of crustal movement using least squares collocation [J]. *Chinese J Geophys*, 2010, 53(5):1 109–1 117)

(上接第98页)

- 6 Schaffrin B, Wieser A. On weighted total least-square adjustment for linear regression [J]. *Journal of Geodesy*, 2008, 82(7):415–421.
- 7 王乐洋, 许才军, 鲁铁定. 病态加权总体最小二乘平差的岭估计解法 [J]. 武汉大学学报:信息科学版, 2010, 35(11):1 346–1 350. (Wang Leyang, Xu Caijun, Lu Tieding. Ridge estimation method in ill-posed weighted total least squares adjustment [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2010, 35(11):1 346–1 350)
- 8 赵辉. 基于加权总体最小二乘的GPS数据高程拟合 [J]. 大地测量与地球动力学, 2011, 31(5):88–90, 96. (Zhao Hui. GPS height fitting of weighted total least-squares adjustment [J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 2011, 31(5):88–90, 96)
- 9 周拥军, 朱建军, 邓才华. 附参数的条件平差与按行独立的加权总体最小二乘法估计的一致性研究 [J]. 测绘学报, 2012, 41(1):48–53. (Zhou Yongjun, Zhu Jianjun, Deng Caihua. The consistency between row-wised weighted total least squares and condition adjustment with parameters [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2012, 41(1):48–53)
- 10 陈玮娴, 等. 加权总体最小二乘在三维激光标靶拟合中的应用 [J]. 大地测量学与地球动力学, 2010, 30(5):90–96. (Chen Weixian, et al. Application of weighted total least squares to target fitting of three-dimensional laser scanning [J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 2010, 30(5):90–96)
- 11 Soudarissanane S, Van R J, Bucksch A, et al. Error budget of terrestrial laser scanning: influence of the incidence angle on the scan quality [C]. 3D-Nord Ost, Berlin, 2007.
- 12 Soudarissanane S, et al. Incidence angle influence on the quality of terrestrial laser scanning points [C]. ISPRS Workshop Laserscanning, 2009.
- 13 Soudarissanane S, et al. Scanning geometry: influence factor on the quality of terrestrial laser scanning points [J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2011, 66(4):389–399.
- 14 王解先, 季凯敏. 工业测量拟合 [M]. 北京:测绘出版社, 2008. (Wang Jieyan, Ji Kaimin. Industrial measurement fitting [M]. Beijing: Surveying and Mapping Press, 2008)