

# 青藏块体东北缘近期 GPS 水平运动特征 与汶川大震影响<sup>\*</sup>

张 希, 张晓亮, 张四新, 王双绪, 蒋锋云

(中国地震局第二监测中心, 西安 710054)

**摘要:** 利用青藏块体东北缘 2004~2007 年、2007~2009 年 GPS 水平运动观测资料, 分析地壳运动与活动断裂带构造变形演化特征以及汶川大震对活动断裂的影响。研究表明: 祁连山—海原断裂带近期仍呈现与其构造活动背景一致的左旋挤压特性, 观测结果未显示汶川大震对断裂有明显影响。而汶川大震对西秦岭构造区中东部、六盘山断裂中南段、秦岭北麓与渭河断裂的西段的影响相对显著, 其中对西秦岭构造区中东部的大范围区域应变积累可能呈以增强为主的影响, 其它断裂段近期可能呈以调整为主的状态特征。

**关键词:** 青藏块体东北缘; GPS; 汶川地震

**中图分类号:** P315.72<sup>+</sup>7 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-0666(2010)04-0265-04

## 0 引言

青藏块体东北缘是我国大陆构造活动强烈、强震集中的重点地区之一。区内自北向南发育着 NW—NW 向的祁连山—海原—六盘山断裂带、西秦岭北缘断裂带等新构造时期以来的活动断裂带 (图 1<sup>a</sup> 走廊北侧断裂、祁连山北缘断裂与皇城—塔尔庄断裂、昌马—俄博断裂、门源—陶莱山断裂均属祁连山断裂带; 西秦岭北缘断裂、临潭—宕昌断裂、礼县—罗家堡断裂组成西秦岭构造区)。受印度板块北推碰撞欧亚大陆的主动动力控制, 以及受相对稳定的阿拉善地块、鄂尔多斯地块一定程度的阻挡, 青藏块体东北缘活动断裂带地质构造活动以 NE 向挤压—逆冲和走滑—旋转 (顺时针) 为主要特征 (丁国瑜, 卢演伟, 1991; 虢顺民, 江在森, 2000), 是构造活动与应力场变化的敏感部位。2008 年 5 月 12 日汶川 8.0 级特大地震就发生在该区东南缘附近的龙门山断裂中南段 (图 1<sup>a</sup> 南边框外 76 km 处), 对该区活动断裂带构造变形与应变积累可能有影响。

2009 年 8~9 月笔者所在单位承担了中国地壳运动观测网络项目对青藏块体东北缘地区 130 多个 GPS 站点的复测任务, 加上 2004~2007 年 150 余

个站点的观测资料, 经 GAMIT/GLOBK 软件处理, 获得了 2004~2007 年、2007~2009 年即汶川地震前、地震时与地震后该研究区相对欧亚板块的水平运动速度场结果。本文扣除测区整体平移与旋转量 (江在森等, 2001), 借助最小二乘配置拟合与位移—应变偏导关系 (张希, 江在森, 1999; 江在森等, 2003), 以突出 GPS 站点间、尤其是活动断裂带两侧相对运动、构造变形及其时空演化特征并进一步分析汶川大震对该研究区地壳运动与活动断裂带构造变形、应变积累可能的影响。

## 1 汶川震前青藏块体东北缘 GPS 水平运动与构造变形特征

从扣除测区整体平移与旋转量的相对运动矢量图 (图 1<sup>a</sup>) 来看, 汶川大震之前的 2004~2007 年, NW—NW 向展布的祁连山—海原断裂带呈显著的左旋走滑、逆断挤压差异运动特性, 即以该断裂带为界, 其北侧呈 SW—W—NW 运动、南侧呈 N—NE—SE 向运动, 与其构造活动背景一致 (丁国瑜, 卢演伟, 1991; 虢顺民, 江在森, 2000; 江在森等, 2001), 总体上反映出以能量积累为主的特性。其它断裂两侧相对运动虽没有祁连山—海原断裂带差异显著, 从运动方向与量值

<sup>\*</sup> 收稿日期: 2010-02-04

基金项目: 国家自然科学基金课题“汶川地震对区域应变积累影响的研究” (40974005) 与中国地震局 2010 年度震情跟踪合同制定向工作任务 (2010010401) 资助。

大小（即图中箭头长度）来看，六盘山断裂左旋走滑特性、西秦岭北缘断裂左旋挤压特性相对明显，渭河与秦岭北麓断裂区域以挤压为主。通过最小二乘配置内插拟合获取网格点速度场函数，再借助位移—应变偏导关系推求视应变场（张希，江在森，1999；江在森等，2003）从而得到反映出站点间相对运动差异的最大剪应变率与面膨胀应变率分布等值线图（图2<sup>a</sup>、图3<sup>a</sup>），更可以看出：2004~2007年，剪切变形较大的是祁连山断裂带至海原断裂西段，尤其祁连山断裂带中东段至海原断裂西段（最高达 $6\sim8\times10^{-8}/a$ ），其次是西秦岭北缘断裂带及与礼县—罗家堡断裂交汇区附近（最高达 $5\times10^{-8}/a$ ）；面膨胀压性高值区沿祁连山—海原断裂带、西秦岭北缘断裂带清晰展

布，最高达 $-4\times10^{-8}/a$ 。总体上，与这两条大型构造断裂带的地质活动背景一致。

## 2 汶川震时与震后青藏块体东北缘GPS水平运动与构造变形特征

汶川大震震时与震后的2007~2009年（图1<sup>b</sup>），门源—陶莱山断裂南侧观测站点很少，其北侧即祁连山构造区GPS水平运动方向仍呈与上一时段比较一致的SWW—W—NNW向，相比汶川震前没有出现大的变化；海原断裂两侧维持与上一时段相似的左旋挤压相对运动特征，量值上也没有显示大的变化。从最大剪应变率最高值与高值区分布位置、面膨胀应变率张、压分布及其量值来看，大震前后也没有发生大的改变。本文所用有限站点的观测结果，未显示汶川大震对祁连山—海原断裂带有显著影响，这与万永革等（2009）

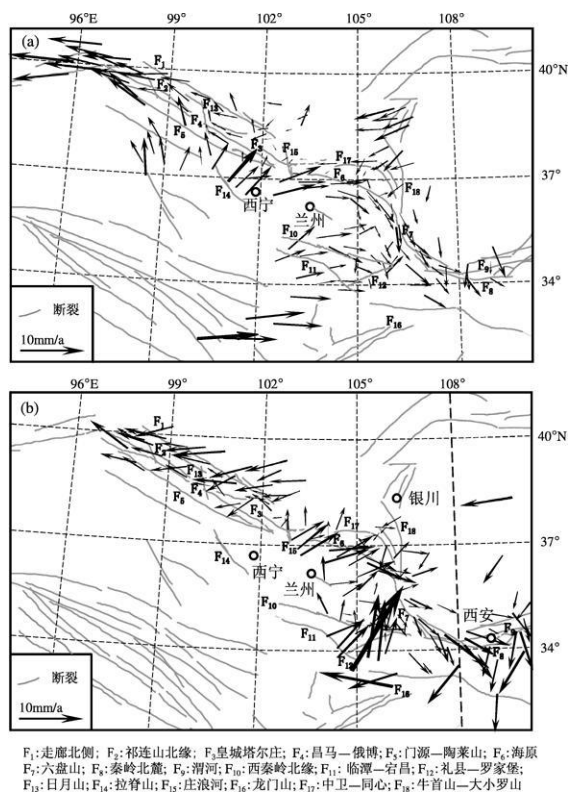


图1 青藏块体东北缘GPS观测获得的汶川地震前后相对水平运动矢量图  
(a) 2004~2007年；(b) 2007~2009年  
(扣除测区整体平移与旋转，中国地壳运动观测网络项目)  
Fig.1 Vector of relative horizontal movement before and after the Wenchuan earthquake observed by GPS in the northeastern margin of Qinghai-Tibet Block  
(After deducting the motion and rotation of the entire area belonging to the crustal movement

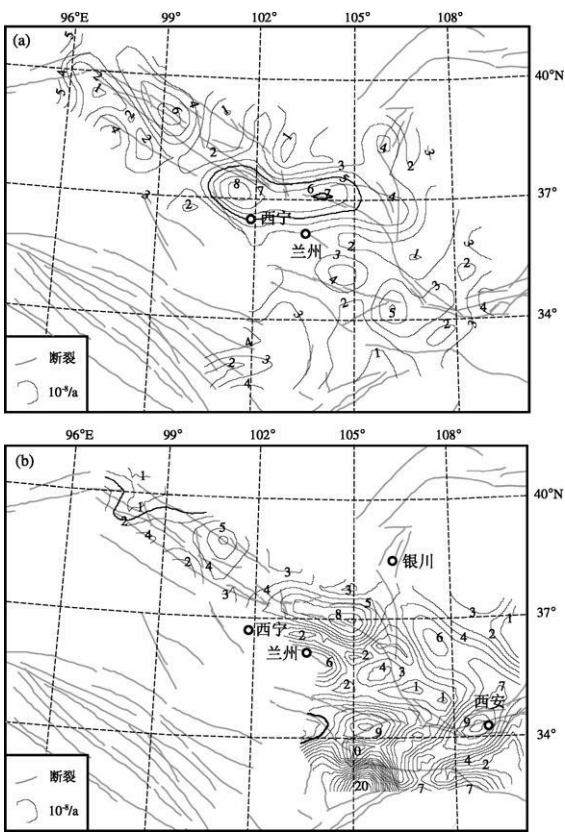


图2 青藏块体东北缘2004~2009年最大剪应变率等值线分布图  
(a) 2004~2007年；(b) 2007~2009年  
Fig.2 Isolines of maximum shear strain rate during 2004~2009 in the northeastern margin of Qinghai-Tibet Block

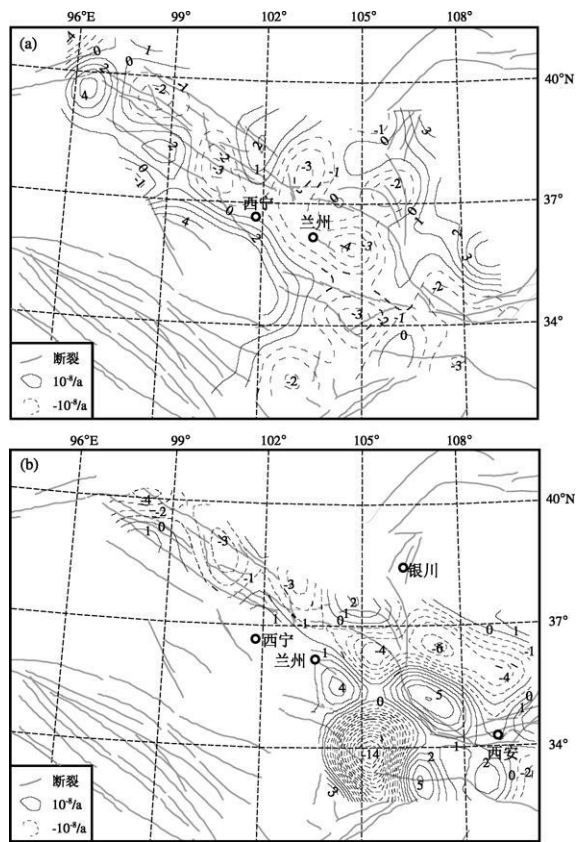


图 3 青藏块体东北缘 2004~2009 年面膨胀应变率等值线分布图

(a) 2004~2007 年; (b) 2007~2009 年  
Fig 3 Isolines of superficial expansion rate during 2004~2009 in the northeastern margin of Qinghai-Tibet block

所做的汶川地震在该断裂带库仑应力变化值偏小 ( $10^{-4}$  MPa 量级甚至更低) 的结果一致。

西秦岭构造区及鄂尔多斯地块西南缘的六盘山断裂中南段、渭河与秦岭北麓断裂西段比较靠近汶川震区。龙门山断裂北东向延伸到达的陕、甘、川交界区附近在汶川大震后发生过数次 5 级以上余震 (王卫民等, 2008; 中国地震局监测预报司, 2008)。2009 年 11 月 5 日在距汶川较远的陕西高陵地区还发生了 4.4 级地震, 这在陕西地区比较少见, 可能反映了汶川大震调整影响。而借助库仑应力变化计算推测认为汶川大震对西秦岭北缘断裂东段 ( $105^{\circ}\text{E}$  以东)、六盘山断裂南段与秦岭北麓断裂西段应变积累以一定程度的增强影响为主; 对西秦岭北缘断裂西段 ( $105^{\circ}\text{E}$  以西)、六盘山断裂中段、秦岭北麓断裂中东段应变积累可能存在一定程度的减缓为主的影响 (万永革等, 2009; 张希, 江在森, 1999)。  $10^{-3} \sim 10^{-4}$  MPa 量

级。从图 1~3 (b) 反映的断裂两侧相对变形特征及量值来看, 2007~2009 年即汶川震时与震后, 西秦岭北缘断裂带东段及其南侧的临潭-宕昌断裂中东段、礼县-罗家堡断裂及其附近区域呈现与上一时段及构造活动背景一致的挤压变化, 量值显著增高。汶川大震在该大范围区域产生了较上一时段增大数倍的 NE 向挤压运动, 该地区 2007~2008 年 6 月 GPS 水平运动也呈显著 NE 向挤压 (张希等, 2008)。面膨胀压性最高值达  $-14 \times 10^{-8}$  /a 以上, 大约是汶川震前的 5 倍; 剪切变形也显著增强, 最高达  $(9 \sim 20) \times 10^{-8}$  /a, 是汶川震前的 2~4 倍。西秦岭北缘断裂东段两侧仍呈现左旋运动特性, 汶川大震同震变化及其影响应促进西秦岭构造区中东部 (GPS 站点主要分布于此) 的左旋挤压活动 (与地质背景一致)。汶川大震对该区域 (包括延伸到达的六盘山断裂以西区域) 应变积累更可能有增强影响, 这个判断与万永革等 (2009)、张希等 (2009) 的库仑应力计算结果基本一致。至于六盘山断裂 (地质活动背景为逆断层) 中一南段及陕、甘、宁交界区附近的渭河与秦岭北麓断裂西段 ( $108^{\circ}\text{E}$  以西, 地质活动背景为正断层), 汶川大震后相对于震前, 剪切变形增强达到  $(4 \sim 8) \times 10^{-8}$  /a, 是汶川震前的 1.3~2.7 倍, 而面膨胀应变率以由弱挤压为主转为以拉张为主, 绝对值  $(2 \sim 4) \times 10^{-8}$  /a, 是汶川震前面膨胀应变率绝对值的 2 倍, 汶川大震对其应变积累究竟是正影响还是负影响, 万永革等 (2009) 的库仑应力计算结果显示: 汶川地震对六盘山断裂南段、秦岭北麓断裂西段以正影响为主; 对六盘山断裂中段以负影响为主。前者是发震一年多后实际观测结果, 后者是相对简化的数理模型计算, 可能主要反映同震影响, 鉴于其正好位于西秦岭构造区大范围压性高值区的边缘地带, 呈现相当显著的压、张差异变化高梯度分布, 笔者认为这更可能反映的是汶川大震发生一年多后, 在西秦岭构造区中东部及其北侧的应变积累以增强为主的大背景下, 周围局部区域的调整、扰动状态。跨六盘山断裂由西至东会宁-平凉 200 多 km 长水准剖面观测显示 2006~2009 年与地形地貌相反的、隆德山区相对平凉盆地下沉的逆继承性形变特征, 也反映了它的调整状态 (图 4)。而渭河与秦岭北麓断裂中东段 ( $108^{\circ}\text{E}$  以东) 上一时段站点偏少, 从有限个公共站点的剪切变形与张、压变化特性来看, 不排除调整状态下扰动为主的特征。2009 年 11 月 5 日高陵 4.4 级地震很可能就是这种调整扰

动下的能量积累区失稳释放所引发的。

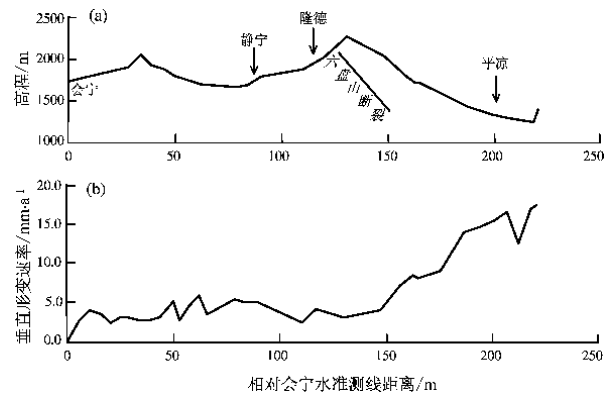


图 4 跨六盘山断裂水准剖面地形 (a)  
与 2006~2009 年变化速率 (b)  
Fig 4 Variation rate during 2006~2009 of leveling  
section crossing the Liupanshan Fault and its landform

3 结论

2009 年青藏块体东北缘有限个站点的 GPS 观测结果未显示汶川大震对祁连山—海原断裂带有明显影响。目前该断裂带仍呈现与其构造活动背景一致的左旋挤压特性。而汶川大震对西秦岭构造区中东部、六盘山断裂中南段、秦岭北麓与渭

河断裂的西段影响相对显著，对其应变积累可能以增强作用为主，这主要表现在西秦岭构造区中东部的大范围区域内。而其它断裂带近期可能表现为以调整为主的状态特征。

参考文献:

丁国瑜, 卢涛涛. 1991. 中国岩石圈动力学概论 [M]. 北京: 地震出版社, 142—153.  
魏顺民, 江在森. 2000. 青藏高原东北缘晚第四纪块体划分与运动态势研究 [J]. 地震地质, 22 (3): 219—231.  
江在森, 马宗晋, 张希, 等. 2003. GPS 初步结果揭示的中国大陆水平应变场与构造变形 [J]. 地球物理学报, 46 (3): 352—358  
江在森, 张希, 崔笃信, 等. 2001. 青藏块体东北缘近期水平运动与变形 [J]. 地球物理学报, 44 (5): 636—644.  
万永革, 沈正康, 盛书中, 等. 2009. 2008 年汶川大地震对周围断层的影响 [J]. 地震学报, 31 (2): 128—139.  
王卫民, 赵连锋, 李娟, 等. 2008. 四川汶川  $M_{s8.0}$  地震震源过程 [J]. 地球物理学报, 51 (5): 1403—1410.  
张希, 崔笃信, 蒋锋云. 2009. 基于 GPS 观测的汶川地震参数反演与库仑应力变化分析 [J]. 地震研究, 32 (4): 351—356  
张希, 崔笃信, 王文萍, 等. 2008. 利用 GPS 资料分析汶川地震前后川滇及其邻区水平运动及应变积累 [J]. 地震研究, 31 (增刊): 464—470.  
张希, 江在森. 1999. 对华北 GPS 监测区近期地壳应变连续分布的估计 [J]. 地震学刊, 75 (2): 58—62  
中国地震局监测预报司. 2008. 汶川 8.0 级地震科学研究报告 [M]. 北京: 地震出版社: 21—39.

Features of Current Horizontal Movement Observed by GPS  
and Influence of the Great Wenchuan Earthquake in the  
Northeastern margin of Qinghai-Xizang block

ZHANG Xi ZHANG Xiao-liang ZHANG Si-xin WANG Shuang-xu JIANG Feng-yun  
(The Second Monitoring and Application Center of CEA, Xi'an 710054, Shaanxi, China)

Abstract

Using the GPS observational data during the period of 2004~2007 and 2007~2009 in the northeastern margin of Qinghai-Tibet block, the evolution features of crustal movement and tectonic deformation of active fractures are analyzed together with the influence of the Wenchuan Earthquake. The result shows that this earthquake did not display remarkable effect on the Qilian-Shan-Haoyuan fracture belt from observation result of limit stations, which still reflected thrust and sinistral slip with according to its tectonic background, but displayed relatively obvious influence on the West Qinling tectonic region, the medium-southern segments of Liupanshan fault, the west segments of Northern foot fault of Qinling and Weihe fault, mainly revealing enhanced strain accumulation on the middle-eastern West Qinling tectonic region, mainly revealing adjusting-disturbing effect on other fault segments.

Key words: Northeastern margin of Qinghai-Xizang block, GPS, Wenchuan Earthquake  
©1994-2014 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net