

杜 方, 闻学泽, 张培震等. 2008 年汶川 8.0 级地震前横跨龙门山断裂带的震间形变. 地球物理学报, 2009, **52**(11):2729~2738, DOI:10.3969/j.issn.0001-5733.2009.11.007

Du F, Wen X Z, Zhang P Z, et al. Interseismic deformation across the Longmenshan fault zone before the 2008 M8.0 Wenchuan earthquake. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2009, **52**(11):2729~2738, DOI:10.3969/j.issn.0001-5733.2009.11.007

2008 年汶川 8.0 级地震前横跨龙门山 断裂带的震间形变

杜 方^{1,2}, 闻学泽^{2,3}, 张培震^{1,4}, 王庆良⁵

1 地震动力学国家重点实验室, 北京 100029

2 四川省地震局, 成都 610041

3 中国地震局地震预测研究所, 北京 100036

4 中国地震局地质研究所, 北京 100029

5 中国地震局第二监测中心, 西安 710054

摘 要 利用区域 GPS 和水准测量资料, 结合地震构造背景的分析, 本文研究 2008 年汶川 8.0 级地震前横跨龙门山断裂带地区的震间地壳形变, 探讨引起这种形变的活动构造与动力学模式, 并由此认识汶川地震的孕育与成因机制. 主要结果表明: 1997~2007 年期间, 自龙门山断裂带中段朝北西约 230 km 的地带内存在垂直于断裂的水平缩短变形、以及平行于断裂的水平右旋剪切变形, 缩短率为 $1.3 \times 10^{-8}/a$ (即: 0.013 mm/km/a), 角变形速率为 $2.6 \times 10^{-8}/a$; 同一地带在 1975~1997 年期间还表现出垂直上隆变形, 上隆速率在龙门山前山断裂与中央断裂之间仅 0.6 mm/a, 而至龙门山后山断裂及其以西达 2~3 mm/a. 这些反映了在汶川地震之前至少 10~30 余年, 龙门山断裂带中段的前山与中央断裂业已闭锁、并伴有应变积累. 造成这种形变的主要原因是: 以壳内的低速层为“解耦”带, 巴颜喀拉地块上地壳朝南东的水平运动在四川盆地西缘受到华南地块的阻挡、转换成龙门山断裂带中段的逆冲运动; 由于该断裂段的震间闭锁, 致使西侧的巴颜喀拉地块的上地壳发生横向缩短以及平行断裂的右旋剪切变形. 然而, 龙门山断裂带北段在 1997~2007 年期间除了有大约 0.9 mm/a 的右旋剪切变形外, 横向的缩短变形极微弱, 这可能与该断裂段西侧的岷江、虎牙、龙日坝等断裂带吸收了巴颜喀拉地块朝东水平运动的大部分有关. 另外, 汶川地震前, 横跨龙门山断裂带中段与北段的地壳形变特征的差异, 与汶川地震时能量释放的空间分布吻合.

关键词 汶川地震, 震间形变, 断裂闭锁, 龙门山断裂带, 巴颜喀拉地块

DOI:10.3969/j.issn.0001-5733.2009.11.007

中图分类号 P541

收稿日期 2009-05-06, 2009-09-07 收修定稿

Interseismic deformation across the Longmenshan fault zone before the 2008 M8.0 Wenchuan earthquake

DU Fang^{1,2}, WEN Xue-Ze^{2,3}, ZHANG Pei-Zhen^{1,4}, WANG Qing-Liang⁵

1 State Key Laboratory of Earthquake Dynamics, Beijing 100029, China

2 Earthquake Administration of Sichuan Province, Chengdu, 610041, China

3 Institute of Earthquake Science, China Earthquake Administration, Beijing 100036, China

4 Institute of Geology, China Earthquake Administration, Beijing 100029, China

5 Second Monitoring Center, China Earthquake Administration, Xi'an 710054, China

基金项目 地震动力学国家重点实验室开放基金课题(LED2008B01)与中国地震局监测预报司工作专项“中国大陆 7、8 级地震中长期危险性预测研究”共同资助.

作者简介 杜 方, 1959 年生, 研究员, 从事大地形变测量与地震预测研究. E-mail: scdufang888@yahoo.com.cn

Abstract By using regional GPS and leveling data and through an analysis considering seismotectonic background, this paper studies interseismic crustal deformation in the region across the Longmenshan fault zone before the 2008 *M*8.0 Wenchuan earthquake, discusses the active tectonic and geodynamic model that caused the interseismic deformation, and, from these, analyzes the mechanism of brewing and producing the Wenchuan earthquake. The result mainly shows that, in the period from 1997 to 2007 horizontal shortening in the direction perpendicular to the fault zone and horizontal right-lateral shearing parallel to the fault zone occurred in the area from the middle segment of the fault zone to about 230 km away northwest. The shortening rate is estimated to be 1.3×10^{-8} /a (that is 0.013 mm/km/a) and the distortion rate to be 2.6×10^{-8} /a. Vertical uplifting also happened in the same area during the period from 1975 to 1997, with uplifting rates changing from 0.6 mm/a in between the frontal-range fault and the central fault of the fault zone to 2 to 3 mm/a near and northwest of the back-range fault of the fault zone. All these reflect that at least in the last 10 to over 30 years before the Wenchuan earthquake the frontal-range and central faults of the middle segment of the Longmenshan fault zone had been locked with strain building up. The main reason to cause such deformation is believed to be that, taking a low-velocity zone in the crust as an “uncoupling layer”, the horizontal southeast-ward movement of the upper crust of the Bayan Har block was counterworked from the South China block at the western edge of the Sichuan basin and transformed into the thrust movement along the middle segment of the fault zone. The interseismic locking of this fault segment made both the horizontal shortening perpendicular to the fault and the right-lateral shearing parallel to the fault occur in the upper crust of the Bayan Har block. However, during the period from 1997 to 2007, horizontal shortening across the northern segment of the Longmenshan fault zone was very weak, but a right-lateral distortion deformation of 0.9 mm/a happened there. Such weak activity of the northern Longmenshan fault segment should apparently be attributed to that those fault zones of Minjiang, Huya and Longriba on the west of this fault segment have absorbed most of the horizontal east-ward movement of the Bayan Har block. In addition, the difference of the crustal deformation features between the middle and northern segments of the Longmenshan fault zone before the Wenchuan earthquake is consistent with the difference of along-fault distribution of the coseismic energy release during the earthquake.

Keywords Wenchuan earthquake, Interseismic deformation, Fault locking, Longmenshan fault zone, Bayan Har block

1 引言

2008年5月12日的四川汶川8.0级地震发生在青藏高原东缘、巴颜喀拉与华南两个活动地块边界的NE向龙门山断裂带上。震后的调查研究已揭示出这次地震的发震构造是龙门山断裂带中-北段及其基底滑脱带,地表破裂带分别沿龙门山中央断裂中、北段和前山断裂的中段展布^[1],震源破裂起始于汶川映秀镇以西,朝北东呈单侧破裂扩展至青川附近^[2,3],且在破裂的南西段,地震断层运动以逆冲为主,向北东逐渐变为以右旋走滑为主^[1,4]。这些结

果是进一步理解和认识汶川8.0级地震成因以及龙门山断裂带大地震孕育机制的重要基础。

在与汶川地震成因机制研究相关的诸多问题中,一个重要的问题是:这次巨大地震发生之前、龙门山断裂带上,特别是在发震的龙门山断裂带中、北段上,是否存在长期的应变积累背景?这一问题涉及到“震间形变”的研究。

对同一地点在相继两次大地震之间的地壳形变、即“震间形变”的研究,一直是地震成因研究的重要方面。这种研究将震间地壳形变场与孕震构造的分析紧密结合,探索区域形变场与潜在发震断裂动力学特征的关系。早在1970年代,Thatcher、

Prescott 等^[5~7]即应用大地测量资料研究南加州、圣安德烈斯断层北段以及美国西部的地壳形变场与应变积累速率;后来的工作有 Savage^[8,9]利用水准测量资料研究南加州圣安德烈斯断层以及日本南海板块俯冲带的震间地壳隆起,等等。最近十多年来, GPS 和水准测量资料的综合利用,使得震间地壳形变以及大地震潜在危险性的研究进一步发展,例如对喜马拉雅冲断带^[10~12]、苏门达腊板块边界带^[13]、台湾中央山脉地区^[14]的震间地壳形变的研究,以及利用区域 GPS 站速度分布估算龙门山断裂带的震间平均滑动速率、进而估计与汶川地震类似大小事件的平均复发间隔的研究^[15],等等。

我们注意到在 2008 年汶川 8.0 级地震之前,龙门山断裂带及其两侧较大区域已有由多期 GPS 测量结果解算的平均站速度资料,同时,沿龙门山断裂带中段还有两条路线的水准复测资料。本文拟结合地震构造背景分析这些大地测量资料,研究汶川地震之前最后 10~30 余年横跨龙门山断裂带中、北东段地区的地壳形变,探讨这种形变所反映的潜在发震断裂及其邻近地区的震间形变特征与动力学模式,由此认识汶川 8.0 级地震孕育的构造环境与成因机制。

需要说明的是:关于青藏高原东缘的新生代构造变形、隆升的动力学机制,是以块体水平挤压并引起地壳增厚以及上地壳的逆冲—褶皱作用为主?还是以“中、下地壳流”引起的下地壳扩展为主,目前有争议^[16~21]。本文仅企图由青藏高原东缘块体的挤压隆升作用与中、上地壳的静态构造背景来初步解释汶川地震前观测到的地壳形变现象,但不排除青藏高原东缘的上隆具有中、下地壳或更深处物质运移与垂直力作用的背景。

2 研究区及资料来源

本文的研究范围如图 1 所示,主要涉及 NE 向龙门山断裂带及其近邻的近 S-N 向岷江与虎牙断裂带(展布于平武、松潘至若尔盖之间)、NE 向龙日坝断裂带(展布于红原南东侧)等活动断裂。图 1 绘出了 2008 年汶川 8.0 级地震的地表破裂带(紫线),其展布于龙门山断裂带中央断裂的中段(都江堰—北川)与北段(北川—广元)以及前山断裂的中段(都江堰—安县)。为了分析汶川地震前、潜在发震断裂及其附近的地壳形变特征,我们在综合考虑活动断裂与汶川地震地表破裂带展布、跨断裂的 GPS 区域

站和水准测量路线分布的基础上,设计出分别横跨龙门山断裂带的中段与北段、岷江与虎牙断裂带以及龙日坝断裂带的三个重点研究区,分别用 A、B、C 三个矩形指示(图 1)。

2.1 区域 GPS 站速度资料

从 20 世纪 90 年代后期至 2007 年止的“中国地壳运动观测网络”工程项目为龙门山断裂带及其邻区获得 4 期区域 GPS 站的流动观测数据。本文使用了由中国地震局地壳运动监测工程研究中心王敏研究员解算和处理的、各测站的相对平均运动速度资料。这种平均运动速度是将 TRF2000 框架下的整体运动转换为稳定的欧亚板块参考框架下测站的相对平均运动速度。GPS 观测数据的处理、解算的方法与程序可参见文献[22,23]。

2.2 水准复测资料

目前,仅可获得汶川地震前、跨越 NE 向龙门山断裂带中段两条测线的各两期 I 等水准测量资料。第一条路线起于成都,经都江堰、汶川、理县、马尔康以东至阿坝,全长 530.8 km,资料的起、止年份是 1975 年和 1997 年,水准测点间距在 0.1~24.1 km 之间,89%的测点间距小于 15 km;第二条路线起于茂县,经北川、安县至绵竹,总长度为 172.9 km,水准测点间距在 2.5~19.5 km 之间,98%的测点间距小于 7 km,资料的起、止年份是 1987 年和 1997 年。这两条 I 等水准测线均穿越了龙门山断裂带中段(图 1)。本文使用中国地震局第二监测中心根据这两条路线水准测量结果处理得到的垂直形变速率资料。另外,龙门山断裂带北段(北川—广元)地区在汶川地震前仅有一期 II 等水准测量资料,本文未使用。

3 汶川地震前横跨龙门山断裂带的地壳形变

3.1 A 区的水平形变

图 2 是图 1 中 A 区范围的 GPS 水平向站速度剖面。该剖面横穿 NE 向龙门山断裂带中段与龙日坝断裂带,后者已证实也是一条活动断裂带^[24]。图 2(a,b)分别表示垂直和平行于这两条断裂带走向的 GPS 站速度分量随离开断裂带距离的变化,清楚反映了横跨这两条断裂带的现今构造差异运动:

(1)在龙日坝断裂带的北西侧,垂直于断裂走向的站速度分量在远离和接近断裂的 Y225 号点和 H031 号点均为 9.1 mm/a,显示出不存在垂直于断

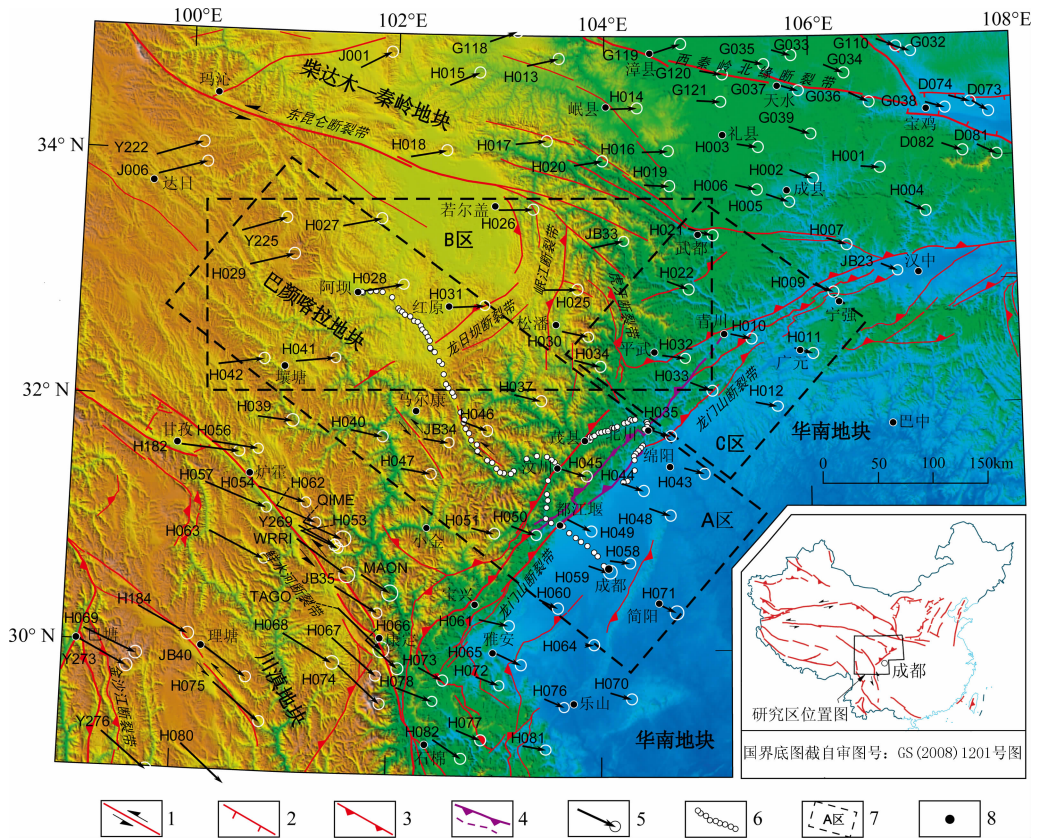


图 1 研究区的活动断裂、区域 GPS 站速度矢量以及使用的 I 等水准测量路线图
索引图指示本文研究区在中国大陆的位置. 图例说明: 1. 走滑断层, 2. 正断层, 3. 逆断层, 4. 汶川地震地表破裂带, 5. GPS 站速度矢量及其误差, 6. 水准测点及路线, 7. 重点研究区及其代号, 8. 城镇.

Fig. 1 A map showing active faults, GPS station velocities and first-order leveling lines used in this study
The index map indicates the position of the studied region of this paper in mainland China. Legends explanations: 1. Strike-slip fault, 2. Normal fault, 3. Reverse fault, 4. Surface rupture zones of the Wenchuan earthquake, 5. GPS station velocity vectors and their errors, 6. Leveling lines, 7. Key studied areas and their symbols, 8. City or town.

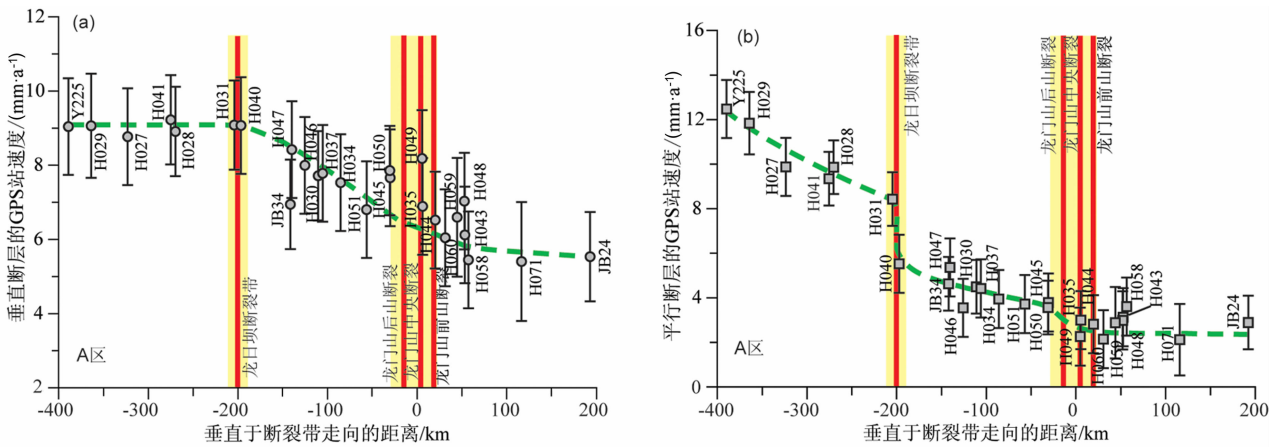


图 2 横跨龙门山断裂中段(A 区)的 GPS 站速度剖面

(a) 垂直断裂走向的站速度分量; (b) 平行断裂走向的站速度分量.

Fig. 2 GPS station velocity profiles across the middle segment of the Longmenshan fault zone (area A)

(a) For velocity components perpendicular to the faults, (b) For velocity components parallel to the faults.

裂走向的水平缩短变形作用。但在该断裂带南东侧,垂直于断裂走向的站速度分量降为 7.3 mm/a,反映出在跨越该断裂带的距离(100 km)上存在约 1.8 mm/a 的水平缩短作用,缩短率(即线变形速率)为 0.018 mm/km/a。

在龙日坝断裂带的北西侧,平行于断裂走向的站速度分量为 8.5~12.5 mm/a,其中,较接近该断裂带的 H031、H041 和 H028 三个点的站速度分量平均为 9.2 mm/a,但在该断裂带南东侧减小为 4.5 mm/a。这表明沿龙日坝断裂带存在约 4.7 mm/a 的右旋剪切变形(或走滑运动),与较早由 GPS 测量揭示的以及由地质地貌及年代学方法估计的 4~6 mm/a^[24,25] 右旋走滑速率值很接近。

(2)在龙日坝断裂带到龙门山断裂带中段的前山断裂之间,由北西朝南东在宽约 230 km 的范围内,垂直与平行于断裂走向的 GPS 站速度分量呈缓慢下降。其中,垂直于断裂的分量从靠近龙日坝断裂带的 H040 点约 9.1 mm/a 下降至靠近龙门山前山断裂的约 6.1 mm/a(H060 号点),反映存在约 3.0 mm/a 的水平缩短作用,水平缩短率为 $1.3 \times 10^{-8}/a$ (即:0.013 mm/km/a);而向南东的四川盆地内部,已基本无缩短变形作用。

(3)平行于断裂的分量则从靠近龙日坝断裂带的 H040 点约 5.5 mm/a 下降至靠近龙门山中央断裂附近的约 2.5 mm/a,反映出在龙门山中央断裂北西的龙门山后山地区,地块的水平右旋剪切变形率(即角变形速率)为 $2.6 \times 10^{-8}/a$ 。再向南东的四川盆地基本维持在 2.5 mm/a,反映在 2008 年汶川地震之前的约 10 年中横跨龙门山断裂带地区也存在一定的右旋剪切变形。

以上表明,在图 1A 区的龙日坝断裂带与龙门山前山断裂之间,由北西朝南东,无论垂直于还是平行于断裂的 GPS 站速度分量均逐渐下降至十分接近于四川盆地中部的,反映出至少是在汶川地震之前的近 10 年中,龙门山断裂带中段存在显著的闭锁作用,且由龙门山后山断裂至主中央断裂、再至前山断裂,断层面的闭锁程度逐步增高。

3.2 B 区和 C 区的水平形变

图 3 是沿图 1 中 B、C 区走向的、分别垂直和平行于岷江与虎牙断裂带(B 区)以及龙门山断裂带北段(C 区)的 GPS 水平向站速度分量随距离变化的剖面,从中可看到:

(1)横跨岷江与虎牙断裂带的水平形变:如图 3a 直立虚线的左侧所示,岷江与虎牙断裂带以西的

巴颜喀拉块体内部,垂直于断裂的 GPS 水平向站速度分量从断裂带以西 180~250 km 处的约 15 mm/a 降为邻近断裂带的 12.5 mm/a;在穿越宽度约 150 km 的岷江与虎牙断裂带后,朝东的水平向站速度分量再降为约 7.5 mm/a。反映穿越该断裂带的水平缩短速率约为 5 mm/a,其中,岷江断裂带(也包括 NE 向龙日坝断裂带的北东段)的缩短速率约为 4.0 mm/a,虎牙断裂带的约为 1 mm/a。

如图 3b 直立虚线的左侧所示,平行于岷江与虎牙断裂带的 GPS 水平向站速度分量从该断裂带西侧 180~250 km 处的约 3.0 mm/a 降为邻近该断裂带的约 0.1 mm/a,穿越该带后再降至 -2.0 mm/a。反映穿越该断裂带的水平右旋剪切位移总速率约为 2.1 mm/a,主要分配在岷江断裂带上。这些显示岷江断裂带存在显著的现今水平压缩与剪切变形作用;而虎牙断裂带的变形较微弱,可能与其在 1976 年发生松潘 7.2 级强震群时的应变大释放有关。

(2)横跨龙门山断裂带北段的水平形变:如图 3a 直立虚线的右侧所示,横跨龙门山断裂带北段的、垂直于断裂的 GPS 水平向站速度分量,从该断裂带北西侧 100 km 处的约 6.9 mm/a 缓慢降至该断裂带中心部位的约 6.0 mm/a,后者已接近该断裂带南东侧、四川盆地中的 5.5 mm/a。另如图 3b 直立虚线的右侧所示,平行于该断裂带的 GPS 水平向站速度分量,从该断裂带北西侧 30~100 km 处的约 4.5 mm/a 降至该断裂带中心部位的约 3.6 mm/a。这些反映出在汶川地震之前,龙门山断裂带北段的横向水平缩短作用极微弱,但伴有约 0.9 mm/a 的右旋剪切变形,且主要发生在该断裂带的后山断裂(青川断裂)与中央断裂(茶坝—林庵寺断裂)之间的地带,而那里的前山断裂(江油—广元断裂)已无明显剪切变形。因此,在汶川 8.0 级地震之前至少 10 年,龙门山断裂带北段的后山与中央断裂上应有较低速率的水平右旋剪切变形与应变积累。

3.3 A 区的垂直形变

根据由跨越龙门山断裂带中段(A 区)两条水准测线(见图 1)的各两期 I 等水准复测资料(1975 和 1997 年、1987 和 1997 年)计算得到的垂直形变速率数据,我们采用内插方法计算并绘制出相应的垂直形变等值线图 and 立体模式图(图 4)。由图 4 可见,在 1975~1997 年期间,龙门山断裂带中段的西北侧地区存在明显的垂直形变上隆作用。其中,在龙门山前山断裂与中央断裂之间的隆起速率最小,在 0.6 mm/a 左右;从中央断裂至后山断裂,隆起速率很快增加到

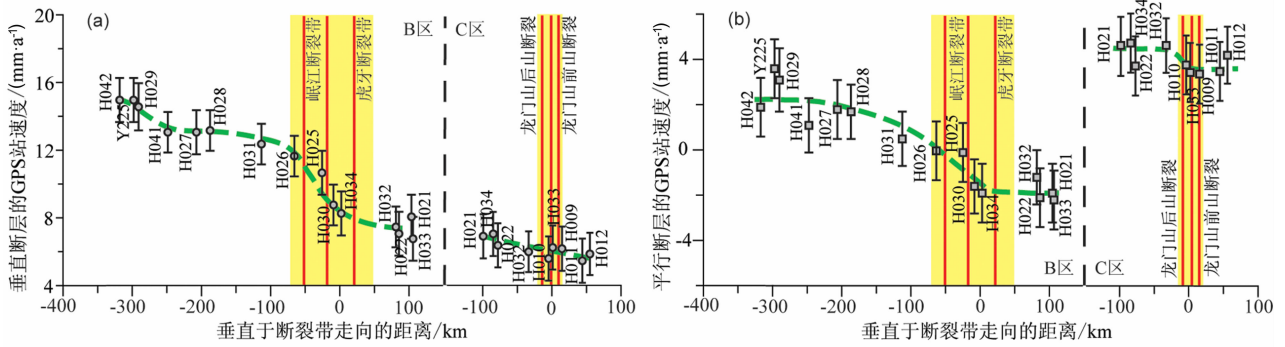


图 3 跨岷江与虎牙断裂带(B区)和龙门山断裂带北段(C区)的GPS站速度剖面

(a) 垂直于断裂走向的站速度分量; (b) 平行于断裂走向的站速度分量.

Fig. 3 GPS station velocity profiles across the Minjiang-Huya faults(area B) and the northern segment of the Longmenshan fault zone(area C)

(a) For velocity components perpendicular to the faults; (b) For velocity components parallel to the faults.

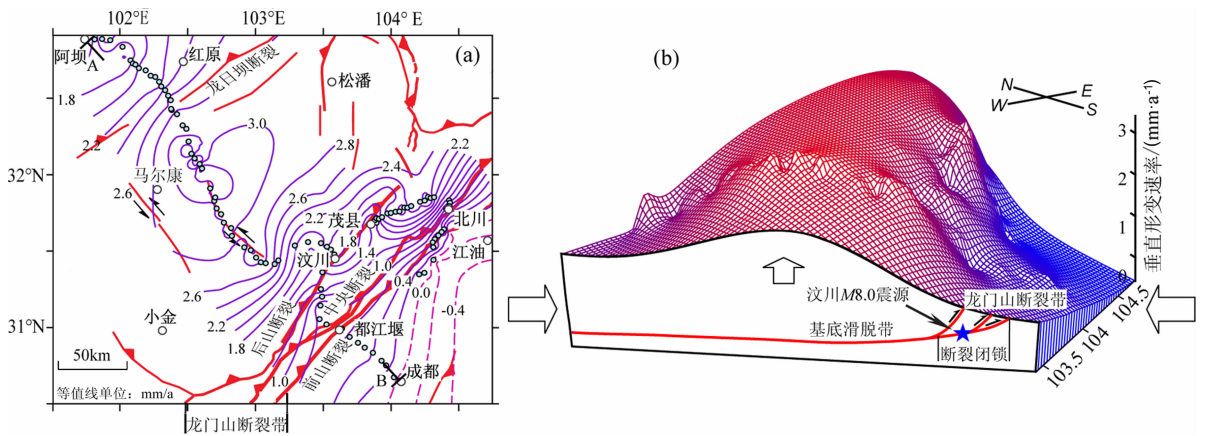


图 4 横跨龙门山断裂带中段地区的垂直形变速率(单位: mm/a)图

(a) 等值线图, A—B 连线为图 6 中垂直形变速率剖面的位置; 断层与水准路线的图例同图 1; (b) 立体模式图.

Fig. 4 Vertical deformation rates (in mm/a) across the middle segment of the Longmenshan fault zone

(a) A contour map with the same legends with that on Fig. 1 for faults and leveling lines. The straight line from A to B indicates the position of the vertical deformation rate profile in Fig. 6. (b) A 3-dimensional model.

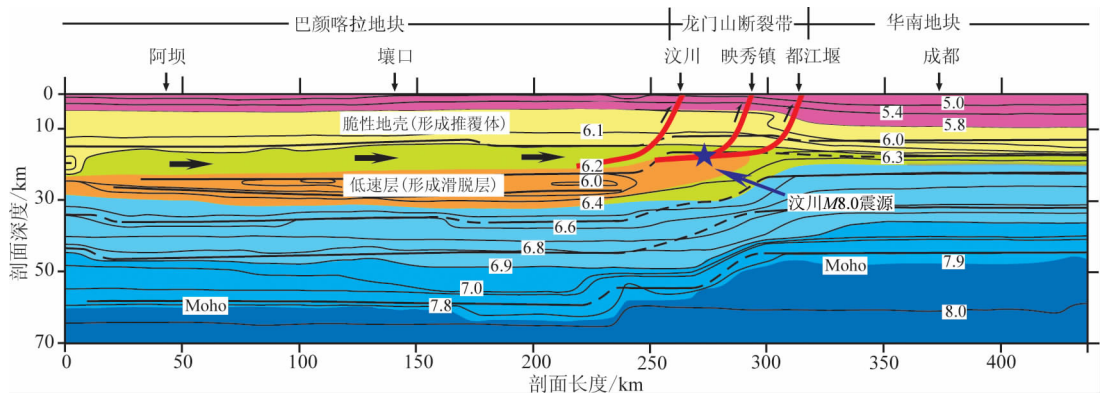


图 5 横穿龙门山断裂带中段(A区)的地壳速度结构剖面(据文献[28]略改)

以P波速度分层, 数字为P波速度(km/s), 水平向黑箭头示意低速层之上的上地壳朝南东方向的运动, 蓝色五星是2008汶川8.0级地震震源.

Fig. 5 A velocity structure section of the crust of the area across the middle segment of the Longmenshan fault zone(area A) . Modified from [28]

The crust is stratified into various layers with different P-wave velocities indicated by numbers (in km/s).

Black arrows indicate the southeast-ward movement of the upper crust on the low velocity zone.

Blue five-star indicates the hypocenter of the 2008 M8.0 Wenchuan earthquake.

2.2 mm/a。在龙门山后山断裂及其以西的高原上,同期的隆起速率高达 2~3 mm/a;隆起速率的最大梯度带位于龙门山后山断裂与中央断裂之间(北川附近)或者后山断裂西北侧(汶川附近),梯度值为 0.08~0.11 mm/a/km。

由此可见,在龙门山断裂带中段及其北西侧的高原地区,至少在 2008 年汶川 8.0 级地震之前的 10~30 余年中已发生较强烈的垂直形变隆起,且隆起的速率在龙门山前山与中央断裂地区最小,向后山断裂及其北西逐渐增大。这同样反映汶川地震前龙门山中央断裂与前山断裂处于闭锁状态。

4 汶川地震前 10~30 余年震间形变的成因分析

上一节已揭示出汶川地震前 10~30 余年横跨龙门山断裂带中段和北段的水平形变、以及横跨该断裂带中段的垂直形变特征。本节拟结合区域活动构造与动力学背景分析产生这种汶川地震之前最后阶段的“震间形变”的原因。

4.1 横跨龙门山断裂带的深部构造与动力学背景

龙门山断裂带属于巴颜喀拉地块与华南地块西部(四川盆地)之间边界的推覆型活动构造带^[24~26]。横跨四川盆地西部—龙门山—巴颜喀拉地块内部的地震探测剖面不仅揭示出横跨该断裂带是地壳厚度的陡变带,同时发现在巴颜喀拉地块内 20~25 km 的深度上存在朝北西缓倾并转为近水平延伸的低速层(或电性上的高导层)^[27~29]。该低速层的南东端结束于龙门山中央断裂与前山断裂之间的下方,更深处则是相对高速的中、下地壳(图 5)。

由于印度洋板块对欧亚板块的强烈推挤以及青藏高原的强烈隆升作用,使得青藏地块产生向东和南东方向的水平挤出运动^[30,31]。巴颜喀拉地块属于青藏地块的次级块体之一,它在向东和南东的水平挤出运动中,受到华南地块的阻挡而产生纵向的水平挤压,使得该块体的前端地壳增厚(图 5)。与此同时,该块体内 20~25 km 深度上存在的低速带可成为上地壳与中-下地壳两部分相对运动的“解耦”带^[27~29],上地壳部分的南东向水平挤出运动速度可能要快一些(图 5)。对汶川地震余震的重新定位结果表明沿龙门山断裂带中段之下余震密集带的底边界向北西倾,且在深度 15~20 km 处倾角变缓^[32]。这反映了龙门山断裂带中段及其北西侧的壳内低速带属于无震的延性层,其上方的上地壳属于脆性层,

而基底滑脱面则应位于这两层之间的“脆-延转换边界”的深度上。

4.2 横跨龙门山断裂带中段的震间形变模式

综合图 2、4、5 的信息,本小节分析汶川 8.0 级地震前 10~30 余年横跨龙门山断裂带中段(图 1 的 A 区)水平与垂直形变场(图 2、4)产生的原因。

如图 6 所示,巴颜喀拉地块的壳内低速带向南东终止于龙门山断裂带之下(参见图 5),使得在该低速带终止端附近,上地壳的南东向水平运动被迫转换为龙门山断裂带的逆冲运动。然而,龙门山断裂带位于脆性层中,断裂运动主要应由伴有强震或大地震的间歇式黏滑运动(而不应是长期缓慢连续的位移)来完成。在相继两次大地震之间的“震间”时期,龙门山断裂带发生闭锁,使得巴颜喀拉地块上地壳的水平运动受阻,造成沿壳内“解耦”带(或低速带)的位移速率越靠近闭锁断裂段时越小,同时,在该“解耦”带之上的上地壳发生垂直于断裂走向的水平缩短变形。这种震间变形作用表现为:(1)在 A 区中,1997~2007 年期间从龙日坝断裂带南东侧至龙门山前山断裂之间,垂直于断裂的 GPS 水平向站速度分量从 9.1 mm/a 逐渐减小至 6.5 mm/a,后者与稳定的四川盆地(华南地块)中的一致(参见图 2a);(2)在 A 区中,1975~1997 年期间,龙门山中央断裂以西地区发生了明显的地表垂直隆升作用,最大隆升速率达 3.1 mm/a,最大的隆升速率梯度带

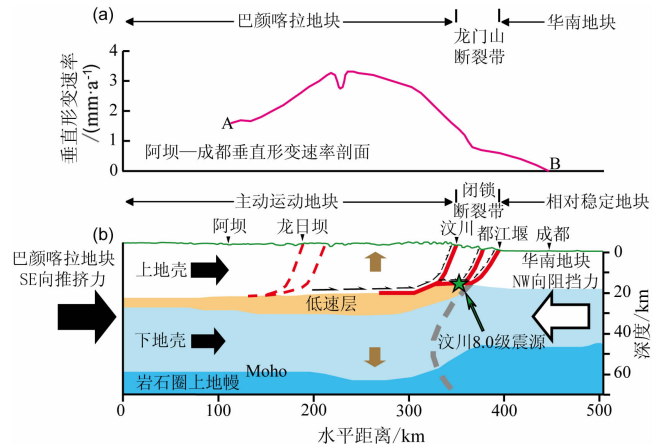


图 6 汶川地震前横跨龙门山断裂带中段的震间地壳形变与动力学模式

(a) 垂直形变速率剖面,位置参见图 4 a; (b) 深部构造与动力学模式。
Fig. 6 A model of the interseismic crustal deformation and geodynamics across the middle segment of the Longmenshan fault zone before the Wenchuan earthquake
(a) A vertical deformation rate profile (see Fig. 4 a for the position of the profile); (b) A deep tectonic and geodynamic model.

位于龙门山中央断裂与后山断裂之间(图 6a, 并参见图 4)。

需要指出的是:上述最大达到 3.1 mm/a 隆升速率(图 6a),除了来源于巴颜喀拉地块的 SE 向水平运动、受华南地块的阻挡以及龙门山断裂带的震间闭锁作用而引起的隆升作用外,还应包含来源于青藏高原整体隆升作用的部分。可由以下两条线索估计青藏高原整体隆升(在巴颜喀拉地块的)速率:(1)水准复测结果反映:汶川地震前,巴颜喀拉地块相对于华南地块西缘(成都地区)的隆升速率虽以马尔康附近为最大(3.1 mm/a),但再向西至红原以西和阿坝附近,已回落为 1.8~2.0 mm/a(图 4 a、图 6a);(2)根据构造地貌的研究,晚更新世以来,穿越巴颜喀拉和华南两个地块的岷江河床,在龙门山区(巴颜喀拉块体一侧)的下切速率约为 1.8 mm/a,而在成都平原地区(华南地块一侧)的下切速率仅约为 0.6 mm/a^[33];因为地壳的隆升速率 \geq 河流的下切速率^[34],因此,相对于华南地块,巴颜喀拉地块有 >1.2 mm/a 的隆升速率应该归因于青藏高原整体隆升(在巴颜喀拉地块)的作用。所以,在巴颜喀拉地块内部,由青藏高原整体隆升作用引起的隆升速率应 >1.2 mm/a、最可能是 1.8~2.0 mm/a,而由巴颜喀拉地块的 SE 向水平推挤、受华南地块和龙门山断裂带震间闭锁作用的阻挡而引起的最大隆升速率应为 1.1~1.3 mm/a(3.1 mm/a 减去 2.0 mm/a 或 1.8 mm/a)。换句话说,若扣除青藏高原整体隆升(在巴颜喀拉地块)的速率,图 4a 和图 6a 中,由于巴颜喀拉地块西部(从龙日坝断裂带至龙门山前山断裂中段之间)存在的 3.0 mm/a 的水平缩短作用而引起的隆升速率最大为 1.1~1.3 mm/a。

图 6 的模式可以较好地解释在汶川地震之前观测到的、横跨龙门山断裂带中段的水平与垂直地壳形变现象(图 2、4),同时,可以辅证在汶川地震前的最后 10~30 余年,龙门山断裂带中段的中央与后山断裂是显著闭锁的,并且应伴有应变积累。

4.3 龙门山断裂带北段震间形变的形成背景

区域 GPS 测量成果显示龙门山断裂带北段(在图 1 的 C 区中)至少在汶川地震前 10 年,垂直于断裂的水平缩短变形极微弱,但伴有约 0.9 mm/a 的右旋剪切变形(参见图 3)。

由图 1 的 B 和 C 区看到:在龙门山断裂北段的西侧存在近 S-N 向岷江与虎牙断裂带,它们以西还存在 NE 向龙日坝断裂带(北东段)。图 3 显示:龙日坝和岷江与虎牙两断裂带的走滑与逆冲作用共同吸

收(或分解)了来自巴颜喀拉地块向东水平运动的约 85%,致使到了龙门山断裂北段,水平缩短作用极微弱(进而可推断垂直隆升变形也不明显),仅剩约 0.9 mm/a 的右旋剪切变形作用,且主要发生在该断裂段的后山断裂(青川断裂)与中央断裂(茶坝—林庵寺断裂)之间(参见图 3b)。

5 结论与讨论

(1)GPS 测量反映在汶川地震前约 10 年,从龙门山断裂带中段的前山断裂朝北西约 230 km 的地带内存在垂直于断裂的水平挤压或缩短、以及平行于断裂的水平右旋剪切的变形作用,缩短率为 1.3×10^{-8} /a(即 0.013 mm/km/a),角变形速率为 2.6×10^{-8} /a。在同一地带,水准测量则反映汶川地震前 10~30 余年存在明显的垂直上隆变形,且在龙门山的前山与中央断裂之间的上隆速率最小,仅 0.6 mm/a,而龙门山后山断裂及其以西高原地区的上隆速率达 2~3 mm/a,最大上隆速率的梯度带位于龙门山后山断裂与中央断裂之间以及后山断裂北西侧。这些反映了在汶川地震之前至少 10~30 余年,龙门山断裂带中段已闭锁,并且伴有正(压)应变和右旋剪应变的积累。

(2)巴颜喀拉地块的上地壳以壳内低速层为“解耦”带向南东水平运动,在四川盆地西缘(低速层结束处)受阻,转换成为龙门山断裂带中段的逆冲运动。由于该段的龙门山中央与前山断裂的震间闭锁作用,致使巴颜喀拉地块的上地壳发生横向水平挤压变形以及平行于断裂的水平右旋剪切变形作用,产生了上述在汶川地震前最后阶段观测到的震间形变。

(3)GPS 测量也反映在汶川地震前约 10 年,横跨龙门山断裂带北段的地区几乎不存在横向的缩短作用,仅在该段的中央与前山断裂地区发生约 0.9 mm/a 的右旋剪切变形。造成龙门山断裂带北段地壳变形明显偏弱的主要原因是:近 S-N 向岷江与虎牙断裂带、以及 NE 向龙日坝断裂带(北东段)的逆冲与走滑运动已吸收(或分解)了巴颜喀拉地块向东水平运动分量的约 85%。

(4)汶川地震前的地壳形变特征与震时的应变释放与同震位错方式是吻合的。汶川地震前,横跨龙门山断裂带中段比横跨该断裂带北段的地区有更高速率的形变,并同时伴有显著的横向缩短和右旋剪切变形作用(参见结论 1 和 3);汶川地震时,沿龙门

山断裂带中段的破裂(震源过程的前 66s)释放了大于 60% 的总能量^[3](另一结果是:震源过程的前 58 s 释放了约 94% 的总能量^[4,35]),且表现出逆冲为主或逆冲兼右旋走滑的同震位错特征^[1,4]。

致 谢 马胜利、刘桂萍研究员为本研究的立项提供了支持与帮助,在此深表谢意。

参考文献(References)

- [1] 徐锡伟,闻学泽,叶建青等. 汶川 $M_s8.0$ 地震地表破裂带及其发震构造. 地震地质, 2008, **30**(3):597~629
Xu X W, Wen X Z, Ye J Q, et al. The $M_s8.0$ Wenchuan earthquake surface ruptures and its seismogenic structure. *Geology and Seismology*(in Chinese), 2008, **30**(3): 597~629
- [2] Ji C, Hayes G. Preliminary result of the May 12, 2008 $M_w7.9$ eastern Sichuan, China earthquake. Page Last Modified: May 12, 2008 11:07:35 UTC, http://earthquake.usgs.gov/eqcenter/eqinthenews/2008/us_2008ryan/finite_fault.php
- [3] 王卫民, 赵连锋, 李 娟等. 四川汶川 8.0 级地震震源过程. 地球物理学报, 2008, **51**(5):1403~1410
Wang W M, Zhao L F, Li J, et al. Rupture process of the $M_s8.0$ Wenchuan earthquake of Sichuan, China. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2008, **51**(5):1403~1410
- [4] 陈运泰, 许力生, 张 勇等. 2008 年 5 月 12 日汶川特大地震震源特性分析报告. [http://www.cea-igp.ac.cn/汶川地震专题/地震情况/初步研究及考察结果\(一\).pdf](http://www.cea-igp.ac.cn/汶川地震专题/地震情况/初步研究及考察结果(一).pdf), 2008
Chen Y T, Xu L S, Zhang Y, et al. Analysis report on focal characteristics of the Wenchuan strong earthquake on May 12, 2008. [http://www.cea-igp.ac.cn/Wenchuan_earthquake_special_subject/Earthquake_situation/Preliminary_study_and_investigation_results\(I\).pdf](http://www.cea-igp.ac.cn/Wenchuan_earthquake_special_subject/Earthquake_situation/Preliminary_study_and_investigation_results(I).pdf) (in Chinese), 2008
- [5] Thatcher W. Strain accumulation on the northern San Andreas fault zone since 1906. *J. Geophys. Res.*, 1975, **80**:4873~4880
- [6] Thatcher W. Horizontal crustal deformation from historic geodetic measurements in southern California. *J. Geophys. Res.*, 1979, **84**:2351~2370
- [7] Prescott W H, Savage J C, Kinoshita W T. Strain accumulation rates in the western United States between 1970 and 1978. *J. Geophys. Res.*, 1979, **84**:5423~5436
- [8] Savage J C, Lisowski M. Interseismic deformation along the San Andreas fault in southern California. *J. Geophys. Res.*, 1995, **100**(12):703~717
- [9] Savage J C. Interseismic uplift at the Nankai subduction zone, southwest Japan, 1951~1990. *J. Geophys. Res.*, 1995, **100**:6339~6350
- [10] Bilham R, Larson K, Freymueller J, et al. GPS measurements of present-day convergence across the Nepal Himalaya. *Nature*, 1997, **386**:61~64
- [11] Burgmann R, Larson K, Bilham R. Model inversion of GPS and leveling measurements across the Himalaya: Implications for earthquake hazards and future geodetic networks. *Himalayan Geology*, 1999, **20**:59~72
- [12] Jouanne F, Mugnier J L, Gamond J F, et al. Current shortening across the Himalayas of Nepal. *Geophysical Journal International*, 2004, **157**:1~14
- [13] Prawirodirdjo L, Bock Y, McCaffrey R, et al. Geodetic observations of interseismic strain segmentation at the Sumatra subduction zone. *Geophysical Research Letters*, 1997, **24**(21):2601~2604
- [14] Hsu Y J, Simons M, Yu S B, et al. A two-dimensional dislocation model for interseismic deformation of the Taiwan mountain belt. *Earth and Planetary Science Letters*, 2003, **211**:287~294
- [15] 张培震, 徐锡伟, 闻学泽等. 2008 年汶川 8.0 级地震震断裂的滑动速率、复发周期和构造成因. 地球物理学报, 2008, **51**(4):1066~1073
Zhang P Z, Xu X W, Wen X Z, et al. Slip rates and recurrence intervals of Longmen shan active fault zone and tectonic implications for mechanism of the May 12 Wenchuan earthquake, 2008, Sichuan, China. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2008, **51**(4):1066~1073
- [16] Tapponnier P, Xu Z Q, Francoise R, et al. Oblique stepwise rise and growth of the Tibet Plateau. *Science*, 2001, **294**:1671~1677
- [17] Royden L H, Burchfiel B C, King R W, et al. Surface deformation and lower crustal flow in eastern Tibet. *Science*, 1997, **276**:788~790
- [18] Royden L H, Burchfiel B C, van der Hilst R D. The geological evolution of the Tibetan Plateau. *Science*, 2008, **321**:1054~1958
- [19] 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. *GSA Today*, 2008, **18**:4~11
- [20] Hubbard J, Shaw J H. Uplift of the Longmen Shan and Tibetan plateau, and the 2008 Wenchuan ($M = 7.9$) earthquake. *Nature*, 2009, **458**:194~197
- [21] 刘启元, 李 昱, 陈九辉等. 汶川 $M_s8.0$ 地震: 地上地幔 S 波速度结构的初步研究. 地球物理学报, 2009, **52**(2):309~319
Liu Q Y, Li Y, Chen J H, et al. Wenchuan $M_s8.0$ earthquake: Preliminary study of the S wave velocity structure of the crust and upper mantle. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2009, **52**(2):309~319
- [22] Shen Z K, Zhao C, Yin A, et al. Contemporary crustal deformation in east Asia constrained by Global Positioning System measurements. *J. Geophys. Res.*, 2000, **105**:5721~5734
- [23] 王 敏, 沈正康, 牛之俊等. 现今中国大陆地壳运动与活动块体模型. 中国科学(D辑)—地球科学, 2003, **33**(增刊):21~32
Wang M, Shen Z K, Niu Z J, et al. Contemporary crustal

- deformation of the Chinese continent and tectonic block model. *Science in China (Series D)* (in Chinese), 2003, **33** (Suppl.):25~40
- [24] 徐锡伟, 闻学泽, 陈桂华等. 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. *中国科学(D辑)—地球科学*, 2008, **38**(5):529~542
Xu X W, Wen X Z, Chen G H, et al. Discovery of the Longriba faults, eastern part of the Bayankela tectonic block and its geodynamic implications. *Science in China (Series D)*, 2008, **51**(9):1209~1223
- [25] Shen Z K, Lü J N, Wang M, et al. Contemporary crustal deformation around the southeast borderland of the Tibetan Plateau. *J. Geophys. Res.*, 2005, **110**(B11409), doi: 10.1029/2004JB003421
- [26] 张培震, 邓起东, 张国民等. 中国大陆的强震活动与活动地块. *中国科学(D辑)*, 2003, **33**(增刊):12~20
Zhang P Z, Deng Q D, Zhang G M, et al. Active tectonic blocks and strong earthquake activities in the continent of China. *Science in China (Series D)*, 2003, **33**(Suppl.):13~24
- [27] 王椿镛, 韩渭宾, 吴建平. 松潘—甘孜造山带地壳速度结构. *地震学报*, 2003, **25**(3):229~242
Wang C Y, Han W B, Wu J P, et al. Crustal structure beneath the Songpan-Garze orogenic belt. *Acta Seismologica Sinica*, 2003, **16**(3):237~250
- [28] 朱介寿. 汶川地震的岩石圈深部结构与动力学背景. *成都理工大学学报(自然科学版)*, 2008, **35**(4):348~356
Zhu J S. The Wenchuan earthquake occurrence background in deep structure and dynamics of lithosphere. *Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition)* (in Chinese), 2008, **35**(4):348~356
- [29] 滕吉文, 白登海, 杨辉等. 2008汶川 $M_s8.0$ 地震发生的深层过程和动力学响应. *地球物理学报*, 2008, **51**(5):1385~1402
Teng J W, Bai D H, Yang H, et al. Deep processes and dynamic responses associated with the Wenchuan $M_s8.0$ earthquake of 2008. *Chinese J. Geophys* (in Chinese), 2008, **51**(5):1385~1402
- [30] Tapponnier P, Peltzer G, Le Dain A Y, et al. Propagating extrusion tectonics in Asia: New insights from simple experiments with plasticine. *Geology*, 1982, **10**(12):611~616
- [31] Zhang P Z, Shen Z K, Wang M, et al. Continuous deformation of the Tibetan Plateau from Global Positioning System data. *Geology*, 2004, **32**(9):809~812, doi: 10.1130/G20554.1
- [32] 黄媛, 吴建平, 张天中等. 汶川8.0级大地震及其余震序列重定位研究. *中国科学(D辑)*, 2008, **38**(10):1242~1249
Huang Y, Wu J P, Zhang T Z, et al. Relocation of the $M8.0$ Wenchuan earthquake and its aftershock sequence. *Science in China (Series D)*, 2008, **51**(12):1703~1711
- [33] 李勇, 周荣军, Densmore A L等. 青藏高原东缘大陆动力学过程与地质响应. 北京:地质出版社, 2006. 1~148
Li Y, Zhou R J, Densmore A L, et al. Geodynamic Processes of Eastern Margin of the Tibetan Plateau and Its Geological Responses (in Chinese). Beijing: Geological Publishing House, 2006. 1~148
- [34] Maddy D, Bridgland D R, Green C P. Crustal uplift in southern England: Evidence from the river terrace records. *Geomorphology*, 2000, **33**:167~181
- [35] 张勇, 冯万鹏, 许力生等. 2008年汶川大地震的时空破裂过程. *中国科学(D辑)*, 2008, **38**(10):1186~1194
Zhang Y, Feng W P, Xu L S, et al. Rupture process of space-time of the Wenchuan strong earthquake in 2008. *Science in China (Series D)* (in Chinese), 2008, **38**(10):1186~1194

(本文编辑 胡素芳)