

刘冠中, 马瑾, 张鸿旭等. 二十年来蠕变和短基线观测反映的鲜水河断裂带活动特征. 地球物理学报, 2013, 56(3): 878-891, doi:10.6038/cjg20130317.

Liu G Z, Ma J, Zhang H X, et al. Study on activity features of Xianshuihe fault zone with fault creep and short baseline observation for the last 20 years. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2013, 56(3): 878-891, doi:10.6038/cjg20130317.

## 二十年来蠕变和短基线观测反映的 鲜水河断裂带活动特征

刘冠中<sup>1,2</sup>, 马瑾<sup>1</sup>, 张鸿旭<sup>2</sup>, 王建军<sup>2</sup>, 杨永林<sup>3</sup>, 王兰<sup>3</sup>

1 中国地震局地质研究所 地震动力学国家重点实验室, 北京 100029

2 中国地震局地壳应力研究所, 北京 100085

3 四川省地震局测绘工程院, 四川雅安 625000

**摘 要** 利用鲜水河断裂带 1990 年 1 月—2009 年 12 月的蠕变与短基线数据, 采用小波变换与断层运动学分析方法, 获取构造活动产生的断层形变速率. 结合近场断层形变测量与 GPS 资料, 分析了该断裂带的分段活动特征及时空演化. 结果显示: (1) 不同段落断层活动方式存在差异性. 鲜水河断裂带分段活动现象显著, 以道孚县为界, 以北的炉霍、道孚断层走滑量相对较大且活动方式稳定, 显示张性和左行走滑; 以南的乾宁、折多塘断层活动微弱, 走滑量小, 且滑动状态复杂, 其中, 乾宁断层为压性和左行走滑, 折多塘断层为微弱的右行走滑. 这种分段活动特征可能与断层几何及巴颜喀拉块体内部次级块体的差异运动有关. (2) 不同时期断层走滑方式存在交替性. 鲜水河断裂带虽以左行走滑为主, 但在汶川地震前一些断层段出现过逆向走滑现象. 汶川地震前 2 年, 炉霍、道孚断层左行走滑减弱, 乾宁、折多塘断层在 2007 年出现过逆向走滑, 至 2009 年底, 逆向走滑区域保持扩展态势. (3) 不同测点间距得到的断层错动速率和变形带空间分布特征不同. 不同测量方法的分析结果表明, 鲜水河断裂带不同段落和跨距宽度的走滑速率有所不同. 测点间距 18.7~65.1 m 的蠕滑速率为 0.01~0.78 mm/a; 测点间距 72~288 m 的短基线测量为 0.02~2.46 mm/a, 点距十几至几十公里的 GPS 观测为 6~11 mm/a; 地质滑动速率 5~15 mm/a. 随测点间距的增加, 平行断层的位移速率按对数函数增长, 视剪应变率按幂函数衰减. 我们推测, 大间距测点的数据中既包含了跨断层的错动, 也包含了断层两侧块体的分布变形; 现今的断层形变测量与地质调查之间的差异, 说明断层错动速率在时间上不是常数.

**关键词** 鲜水河断裂带, 蠕变, 短基线, 分段活动, 逆向走滑

doi:10.6038/cjg20130317

中图分类号 P542

收稿日期 2012-01-29, 2013-01-23 收修定稿

### Study on activity features of Xianshuihe fault zone with fault creep and short baseline observation for the last 20 years

LIU Guan-Zhong<sup>1,2</sup>, MA Jin<sup>1</sup>, ZHANG Hong-Xu<sup>2</sup>, WANG Jian-Jun<sup>2</sup>,  
YANG Yong-Lin<sup>3</sup>, WANG Lan<sup>3</sup>

1 State Key Laboratory of Earthquake Dynamics, Institute of Geology, China Earthquake Administration, Beijing 100029, China

2 Institute of Crustal Dynamics, China Earthquake Administration, Beijing 100085, China

3 Survey Engineering Institute, Earthquake Administration of Sichuan Province, Ya'an Sichuan 625000, China

**Abstract** We derive deformation rates of the fault applying wavelet transform and fault

**基金项目** 国家自然科学基金“亚失稳应力状态的识别及演化趋势研究”(41172180)、“断层活动引起的热场与应变场的实验研究与现场观测”(40872129)、“断层形变的协同化、耦合程度与失稳研究”(41204005), 与中国地震局地壳应力研究所基本科研业务专项“鲜水河断裂带断层蠕变与复杂几何结构的关系及非稳态蠕滑事件的动力学含义”(ZDJ2011-18)共同资助.

**作者简介** 刘冠中, 男, 1980 年生, 助理研究员, 主要从事地壳形变与构造物理方面的研究. E-mail: lgz365@yahoo.cn

kinematics, by using the data of creepmeter and short baseline from Xianshuihe fault zone. Based on these results and combined with GPS observations, we analyze the segmental character and the spatial-temporal evolution of the fault activities. Our study shows that: (1) The fault activity is different along different segments. The segmental activity of Xianshuihe fault zone is significant. In detail, Luhuo and Daofu fault, extending northwest from Daofu County, are tensional and left-lateral, with comparatively larger strike-slip rates, and their motions are more stable than Qianning and Zheduotang fault. While Qianning and Zheduotang fault to the south of Daofu County tend to be locked, and the states of movement are complex, where Qianning fault is compressive left-lateral and Zheduotang fault is right-lateral. The possible causes of this segmentation include fault bending and the differential movements of sub-block in Bayankala active block. (2) The slipping mode of fault alternates during different period of time. Although Xianshuihe fault is a left-lateral strike-slip active fault, nonetheless, there is reverse strike-slip along some segments before Wenchuan earthquake. The left-lateral creep rates of Luhuo and Daofu fault are decreased in the 2 years before  $M_s 8.0$  Wenchuan earthquake, and Qianning and Zheduotang fault exhibited right-lateral strike-slip abnormally in 2007. To the end of 2009, the range of reverse strike-slip is still growing. (3) The strike-slip rates observed by different-length measuring lines and the spatial distribution features of deformation belt are different. The strike-slip rates of Xianshuihe fault zone are not consistent at different segment and scale by different observing methods. The creepmeters are  $0.01 \sim 0.78$  mm/a (18.7 m to 65.1 m across fault), and short baselines are  $0.02 \sim 2.46$  mm/a (72m to 288 m across fault), however, GPS observations are  $6 \sim 11$  mm/a (dozens of kilometers across fault), and geological survey results are  $5 \sim 15$  mm/a. At increasing distances perpendicular to the fault, the average creep rate on one side of the fault grows following a logarithm function, and the deformation intensity attenuates following a power function. We infer that the far-field displacement includes the deformation or distributed offset of bilateral blocks of fault. At last, the difference between present fault deformation observations and geological survey results indicates that the fault slip rate is not a constant in time domain.

**Keywords** Xianshuihe fault zone, Creep, Short baseline, Segmentation, Reverse strike-slip

## 1 引 言

鲜水河断裂带地处青藏断块区东北边缘,南北地震带的中段,其北为巴颜喀拉块体,其南为川滇块体,是一条左行走滑的全新世活动断裂带<sup>[1]</sup>,全长 300 余公里,总体走向  $N40^\circ \sim 50^\circ W$ ,具有向北东方向的微弯曲,倾向主要为 NE,小部分为 SW,倾角较陡,一般在  $70^\circ$  左右,其北西段是由老乾宁向北西延伸的部分,形迹相对简单和连续,属于“单一型”几何结构<sup>[2]</sup>,内部可细分为左阶斜列的炉霍段、道孚段、乾宁段(图 1),其中炉霍段 1973 年 2 月 6 日发生过炉霍 7.6 级地震,道孚段 1981 年 1 月 24 日发生过道孚 6.9 级地震;南东段(老乾宁以南)则相对复杂,由雅拉河、康定(色拉哈)、折多塘、磨西四条分支断层组成。20 世纪 70 年代开始,我国地震工作者沿该

断裂带的主干断裂进行跨断层形变观测,早期为水准和短基线测量,至 80 年代末期,又相继布设了跨断层定点连续蠕变测点,积累了大量宝贵的断层形变资料。近十多年来,鲜水河周边地区发生多次强震,其中包括 1997 年玛尼  $M_s 7.5$  级地震,2001 年昆仑山  $M_s 8.1$  级大地震,2008 年汶川  $M_s 8.0$  级大地震,这几次地震均发生在巴颜喀拉块体的边界断裂带上,鲜水河断裂带作为巴颜喀喇块体的西南边界,在这一时期发生了什么样的变化,对于区域动力学研究意义重大,需要通过断层形变观测数据深入分析。

鉴于鲜水河断裂带在青藏高原内部变形中所起的关键作用,前人的研究涉及地震地质条件、地壳形变观测、地震危险性等方面。在空间展布上,该断裂带具有雁列组合和断层弯曲的几何特征<sup>[3]</sup>。滑动速率方面,由地貌断错分析得到的近代地质滑动速率

介于  $5\sim 15\text{ mm/a}^{[4-7]}$ , GPS 观测到的现今滑动速率为  $6\sim 11\text{ mm/a}^{[8-10]}$ , 近场的短基线测量显示其北段为  $1.04\sim 3.82\text{ mm/a}$ , 中南段最低  $0.08\text{ mm/a}^{[11]}$ . 诸多研究显示以老乾宁为分界点(图 1), 断裂带的北西段与南东段在地貌、深部结构、滑动速率及地震活动性方面具有分段性, 北西段强震活动频度高, 走滑速率相对较大<sup>[12]</sup>; 南东段断裂出现分支, 地貌上表现为隆起区<sup>[13]</sup>, 走向发生顺时针偏转, 地震频度相对北西段低, 走滑速率小于北西段. 岩石的破碎程度<sup>[14]</sup>、断层泥的粒径分布<sup>[15]</sup>、地壳厚度以及重磁异常<sup>[14]</sup>的分布也显示其分段差异明显. 此外, 也有学者从短周期蠕滑事件频次差异<sup>[16]</sup>、断层蠕变的分维值<sup>[17]</sup>的角度探讨了该断裂带的活动特征.

如上所述, 前人已对鲜水河断裂带的分段性进行过研究, 但大多是基于断层几何方面的讨论, 对断层形变观测反映的分段活动关注较少. 近十几年来, 该断裂带周边强震频发, 对其断层活动可能存在影响. 2008 年, 巴颜喀拉块体东南边界的龙门山断裂曾发生逆冲兼右旋走滑的汶川 8.0 级大地震<sup>[18]</sup>, 它是巴颜喀拉地块整体 SEE 向运动在龙门山推覆构造带上弹性加载以至释放的结果<sup>[19]</sup>, 然而, 鲜水河断裂带长期以来均为左行走滑, 在运动学上与巴颜喀拉块体 SEE 向的运动相互矛盾, 汶川地震前鲜水

河断裂带理应出现右行走滑或左行走滑的减弱, 这样才能为汶川地震积累弹性应变能, 这个疑问有待实际的断层形变资料去证实. 以往的研究显示, 不同观测方法得到的鲜水河断裂带走滑速率差异显著, 那么, 断裂带两侧的变形场是如何分布的?

针对上述问题, 本文利用鲜水河断裂带 1990 年 1 月—2009 年 12 月的蠕变与短基线数据, 采用小波变换与断层运动学分析方法, 获取构造活动产生的断层形变速率. 结合近场断层形变测量与 GPS 资料分析该断裂带的分段活动特征及时空演化.

## 2 鲜水河断裂带断层形变观测概况

### 2.1 蠕变观测

断层蠕变仪是一种监测断层活动的有力工具<sup>[20-22]</sup>, 常见杆式、线式和梁式三种<sup>[23]</sup>, 本质上均为断层近场的基线测量. 鲜水河断裂带的 6 个蠕变测点由北向南依次为虾拉沱、恰叫、沟普、龙灯坝、老乾宁和紫马垮(图 1), 采用 DSJ 水平蠕变仪, 产出数据为日值, 目前已经积累了 20 余年的历史数据. DSJ 仪器应用比较法原理, 采用超低膨胀系数、高抗拉张强度的含 Nb 钢瓦合金丝, 以确定张力下形成的弦长为长度基准, 观测两个被测参考点之间水平距离

表 1 鲜水河断裂带蠕变测点基础资料

Table 1 Basic information of fault creep measuring sites along Xianshuihe fault zone

测点名称	虾拉沱	恰叫	沟普	龙灯坝	老乾宁	紫马垮	
经纬度(°)	100.75, 31.28	100.93, 31.14	101.10, 30.98	101.33, 30.73	101.48, 30.57	102.27, 29.09	
所跨断层	炉霍断裂与道孚断裂间的拉张区	道孚断层	道孚断层	乾宁断层	乾宁断层	磨西断层与鹿子坪断层交汇地带	
断层产状	F1: N45°W/SW∠69° F2: N50°W/NE∠57°	N48°W/ NE∠55°	N50°W/ NE∠60°	N36°W/ SW∠38°	N30°W/ NE∠75°	N5°E/ W∠70°~80°	
测线方位	斜交	N15°W	N13°W	N16°W	N68°W	N3°E	N30°W
	直交	N45°E	N42°E	N42°E	N56°E	N58°E	N85°W
测线与断层 夹角(°)*	斜交	30	35	34	32	33	35
	直交	90	90	92	92	88	90
测线长度(m)	斜交	65.1	35.0	33.3	30.0	27.7	35.8
	直交	31.1	22.0	19.7	20.0	18.7	21.0
基底岩性	首端	Q <sub>4</sub> <sup>1-2</sup> 含砾黄土	Q <sub>2-5</sub> 砾石层	T <sub>2</sub> 破碎的碎块状、碎粒状灰岩	T <sub>3</sub> 强挤压破碎砂岩夹板岩	中更新统冲积砾石层	花岗岩风化壳
	尾端	Q <sub>4</sub> <sup>1-2</sup> 含砾黄土及砾石、漂石	Q <sub>2-5</sub> 砾石层和褐黑色腐殖质粘土	T <sub>3</sub> 变质砂岩及泥质千枚岩	灰褐色含粘土和碎屑的粘土质砂层	中更新统冲积砾石层	花岗岩风化壳
选取资料 起止年月	起始	1990 年 1 月	1990 年 1 月	1990 年 1 月	1990 年 1 月	1990 年 1 月	1990 年 9 月
	终止	2009 年 12 月	2009 年 12 月	2009 年 12 月	2009 年 12 月	2009 年 12 月	2009 年 12 月
数据完好率	斜交	100%	100%	100%	91.8%	100%	100%
	直交	100%	89.9%	100%	96.7%	95.2%	100%

注: 斜交测线与断层夹角为测线与断层走向所夹锐角( $0^\circ\sim 90^\circ$ ), 直交测线与断层夹角统一为测线逆时针转至断层走向的角度( $0^\circ\sim 180^\circ$ ).

的微量变化,仪器跨距一般为 3~50 m,机械式仪器灵敏度为 0.002 mm,光电式为 0.001 mm,量程为 30 mm(可扩展),具有温度自动补偿、抗干扰能力强、长期稳定性高等优点.测线布设方式是一条与断层走向斜交(所夹锐角介于 30°~35°),另一条与断层走向近正交.

本研究使用 1990 年 1 月—2009 年 12 月的日值数据,部分台站由于仪器故障等原因存在缺值,缺

值统计情况及其他基础资料见表 1.

### 2.2 短基线测量

鲜水河断裂带 8 个短基线观测场地由北向南分别为侏倭、格萾、虚墟、虾拉沱、沟普、龙灯坝、老乾宁和折多塘(图 1),测线边长介于 72~288 m 之间,观测周期基本为每年 6 次,极少的时段为每年 3、4 次,测量精度优于  $10^{-6}$ ,由于篇幅所限,场地基础资料可参阅文献[24].因为短基线的观测历史比较长,为

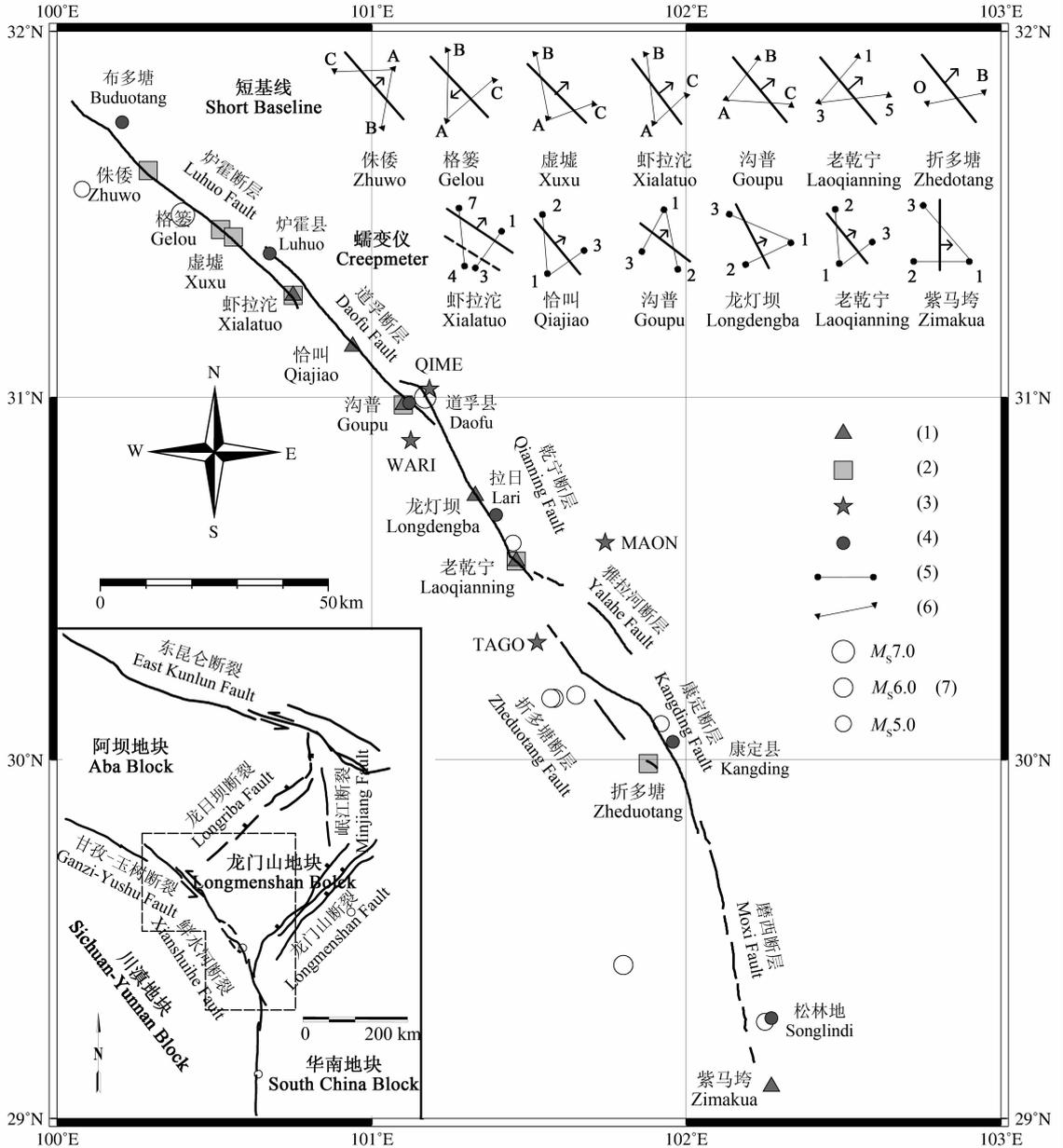


图 1 鲜水河断裂带断层形变观测场地位置与测线布设方式示意图

(1)蠕变测点;(2)短基线场地;(3)GPS测点,WARI、QIME、TAGO、MAON 分别对应瓦日、七美、塔公、牦牛;(4)市县;(5)蠕变仪测线;(6)短基线测线;(7)1970 年以来 5 级以上地震.

Fig. 1 Distribution map of across-fault deformation measuring sites along Xianshuihe fault zone

(1) Creepmeter; (2) Short baseline sites; (3) GPS stations; (4) City or town; (5) Creepmeter line; (6) Short baseline; (7) Earthquakes of  $M_s \geq 5.0$  since 1970.

便于分析,统一使用 1990 年后的数据(龙灯坝短基线场地上,两条斜交测线的观测结果相互矛盾而无法解释,故未予采用).短基线观测场地中,虾拉沱、沟普、老乾宁三个场地同时具有蠕变观测,可以进行对比分析.

### 3 数据处理方法

近地表的跨断层形变观测受季节、气象等环境干扰明显,数据一般会呈现年周期变化,并叠加有高频噪声和随机干扰,研究显示季节变化、降雨都能够触发或影响断层的蠕滑行为<sup>[25-26]</sup>,在计算断层形变速率时应尽量消除或减小这些干扰的影响.以往研究中,主要采用拟合的方法提取数据的趋势变化,消除年变后计算断层形变速率<sup>[24,27]</sup>.本文将采用适应性更强的小波变换方法提取长周期趋势形变,利用趋势变化计算断层运动速率.

#### 3.1 小波变换提取趋势形变

小波变换是 20 世纪发展起来的一种能够进行多分辨率分析的理论,可以提供信号随时间变化的频谱特征<sup>[28]</sup>.首先对原始数据进行二进小波变换,根据每层的频率范围和变化特征,确定年周期变化和趋势变化所在的频段,将年变和其他高频信息所在频段的小波系数置零,最后进行重构便得到包含构造活动信息的长周期趋势形变.

针对蠕变仪数据,选用 db6 二进制小波,为避免过度分解,根据数据长度,计算其最大分解层数为 9.蠕变仪日值数据的频率范围介于  $0 \sim 1.154 \times 10^{-5}$  Hz(对应周期  $1 \sim \infty$  天),小波分析结果显示 8、9 层上的细节部分显示出明显的周期性变化,其频带为  $2.261 \times 10^{-8} \sim 9.042 \times 10^{-8}$  Hz(128 ~ 512 天),因此这部分信号一定包括了周期为 365 天的年变成分,9 层近似部分则显示为明显的趋势性变化,频率范围介于  $0 \sim 2.261 \times 10^{-8}$  Hz(512 ~  $\infty$  天),说明这部分为信号的长周期趋势项.将所有细节部分的小波系数置零,剔除相对高频成分,利用 9 层近似部分重构便得到趋势形变.

对于短基线数据,由于观测周期不均匀,对原始数据进行三次样条插值处理,插值后每年得到间隔均匀(两月)的 6 个值.小波基仍选用 db6 小波,最大分解层数为 3,其三层近似部分的频率范围是  $0 \sim 2.411 \times 10^{-8}$  Hz(480 ~  $\infty$  天),因此利用该层的小波系数进行重构可滤除年周期变化,进而得到趋势变化.

上述方法剔除了资料中的年周期变化成分,以

及其他相对高频的细节部分,这样会损失数据的高频信息,但对于提取长周期的断层趋势形变来说是合理、有效的.

#### 3.2 计算断层运动参数

采用上节中的方法,提取各条测线的趋势变化,对其做一阶差分,得到测线长度的日变化量或两月变化量,在此基础上根据断层与测线相对位置的几何关系计算断层走滑、张压运动速率(对于缺值的时段进行了线性插值处理).

在小变形情况下,近似认为断层两盘均为刚体,并假设地表测值在一定程度上反映了断层整体运动的相对变化.由于断层垂直方向的位移是两条测线伸缩量的高阶分量,所以这里仅考虑水平方向上的位移.设断层一盘相对另一盘在水平面上的错动矢量为  $\mathbf{V}(\Delta S, \Delta T)$ ,其中  $\Delta S$  是平行断层的水平扭错分量,  $\Delta T$  是垂直断层的张压分量.欲得到断层错动矢量  $\mathbf{V}(\Delta S, \Delta T)$ ,至少需要两条与断层交角不同的跨断层基线测量,设两条测线与断层夹角分别为  $\alpha_1, \alpha_2$  (测线逆时针旋转至断层走向的角度),测线长度的变化量分别为  $\Delta L_1, \Delta L_2$ ,根据几何关系有如下关系式:

$$\begin{cases} \Delta L_1 \approx \Delta S \cos \alpha_1 - \Delta T \sin \alpha_1, \\ \Delta L_2 \approx \Delta S \cos \alpha_2 - \Delta T \sin \alpha_2, \end{cases} \quad (1)$$

由(1)式可得:

$$\begin{cases} \Delta S \approx \frac{\Delta L_1 \sin \alpha_2 - \Delta L_2 \sin \alpha_1}{\sin(\alpha_2 - \alpha_1)}, \\ \Delta T \approx \frac{(\Delta L_1 \cos \alpha_2 - \Delta L_2 \cos \alpha_1)}{\sin(\alpha_2 - \alpha_1)}. \end{cases} \quad (2)$$

规定测线长度变化量  $\Delta L_1, \Delta L_2$  以伸长为正;水平扭错分量  $\Delta S$  以左行为正;水平张压分量  $\Delta T$  以压缩为正.

折多塘场地只有一条斜交测线,因此没有计算其张压运动分量,只近似按下式计算水平扭错分量:

$$\Delta S \approx \frac{\Delta L}{\cos \alpha}, \quad (3)$$

其中  $\Delta S$  含义同上,  $\Delta L$  为该条测线的伸缩量,  $\alpha$  为测线与断层走向所夹锐角.

最终,使用蠕变仪数据得到的  $\Delta S, \Delta T$  为日速率,短基线得到的  $\Delta S, \Delta T$  为两月(60 天)速率.

### 4 处理结果

#### 4.1 测线长度改变量及其趋势变化特征

各条测线长度改变量(即原始观测数据)及采用

小波变换提取的趋势变化如图 2 所示, 曲线上表示测线伸长, 下降表示缩短. 可以看出, 采用小波变换提取断层形变的趋势变化, 对原始数据拟合程度高, 无“过拟合”现象, 能够较好地反映其时变特性.

从虾拉沱、沟普场地的蠕变和短基线观测来看, 主要反映断层走滑运动的斜交测线长度改变量比直交测线大一个数量级, 表明鲜水河断裂带以水平走滑为主.

断层蠕变数据中(图 2 右列曲线), 虾拉沱、沟普斜交测线累计伸缩量较大, 趋势显著, 相比之下近直交测线的变化不明显; 其他测点的伸缩量均较小, 趋势也比较波动.

短基线方面(图 2 左列曲线), 侏倭、虾拉沱、沟普场地的趋势较为单调, 累计伸缩量相对蠕变观测

大很多. 例如, 虾拉沱蠕变仪斜交测线约为 15 mm, 短基线则达到 44 mm 之多. 相比之下, 其他场地的长度改变量不显著, 趋势转折较频繁.

在虾拉沱、沟普、老乾宁三个场地上, 同时具有蠕变和短基线观测, 图 3 是两者观测结果的对比(注意图中两种观测的纵轴数值范围不同). 由于沟普、老乾宁场地上蠕变和短基线观测的斜交测线布设方式不同, 为便于比较, 将短基线的斜交测线结果进行了翻转. 虾拉沱和沟普场地上, 两种观测结果的趋势基本一致, 斜交测线均表现为比较单调的上升趋势, 近直交测线长度改变量较小, 趋势变化不显著. 老乾宁场地上, 两种观测反映出的断层活动均比较微弱, 两者的趋势变化存在较大差异, 其中, 斜交测线大致在 2000 年以后呈现相反的趋势; 直交测线的变化趋

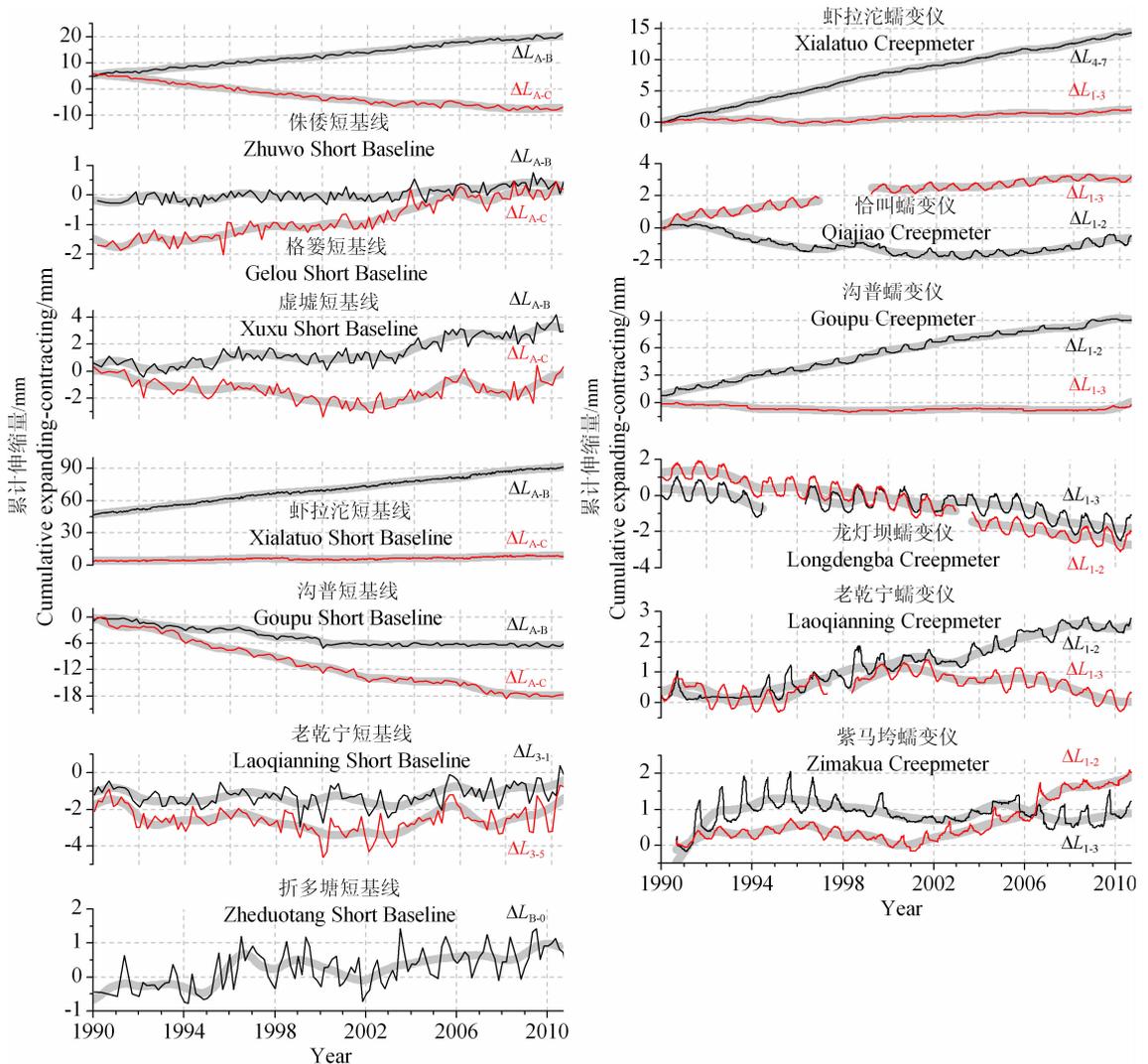


图 2 二十年来鲜水河断裂带蠕变与短基线观测结果(红、黑细线)和采用小波变换方法提取的长周期趋势变化(粗灰线)  
Fig. 2 Results of creep and short baseline observation along Xianshuihe fault zone for the last 20 years  
(thin red and black line) and their trend lines derived by wavelet transform (thick grey line)

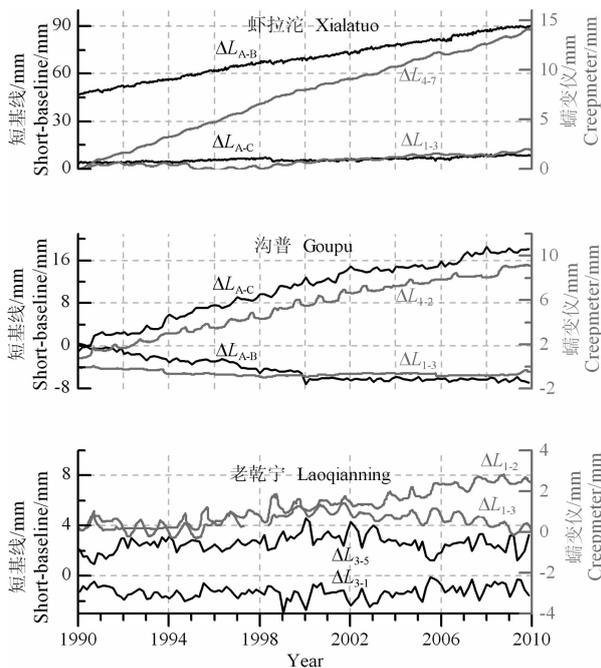


图3 同一场地的蠕变(灰色)与短基线(黑色)观测结果对比  
Fig. 3 Comparison of creep (gray) and short baseline (black) observation results in the same site

势也有所不同,蠕变仪的直交测线在2001、2002年前后由升转降,而短基线直交测线的趋势变化不明显。

#### 4.2 断层形变的的空间分布

20年来鲜水河断裂带各测点累计走滑量与张压量的空间分布见图4。

走滑运动方面,蠕变仪和短基线都显示鲜水河断裂带基本为左行走滑,且短基线的活动量大于蠕变仪。蠕变仪中累计走滑量最大的是虾拉沱,达到15.58 mm,其次为沟普的9.46 mm,其他测点的量值都比较小,其中恰叫和紫马垮两点比较特殊,显示微弱的右行。短基线中累计走滑量最大的也是虾拉沱,达到50.08 mm,其次为侏倭和沟普,分别为20.11 mm、18.22 mm,其他场地的走滑都很微弱,其中折多塘观测至今的终态走滑量为右行。两种观测手段均显示,炉霍、道孚断层的走滑量较大,而乾宁、折多塘断层活动微弱。

张压运动方面,两种手段的活动量相差不多。蠕变方面,虾拉沱、恰叫、沟普显示张性活动,龙灯坝、老乾宁均为压性,且龙灯坝较强,达到3.75 mm,最南端的紫马垮为张性。短基线结果显示,侏倭、虾拉沱场地为张性活动,累计拉张量分别为-4.21 mm、-4.66 mm,沟普的短基线则为较强的压性,累计张压量达到5.91 mm。以上结果表明,炉霍、道孚断层表现为张性活动(GPS观测也显示甘孜-炉霍段具

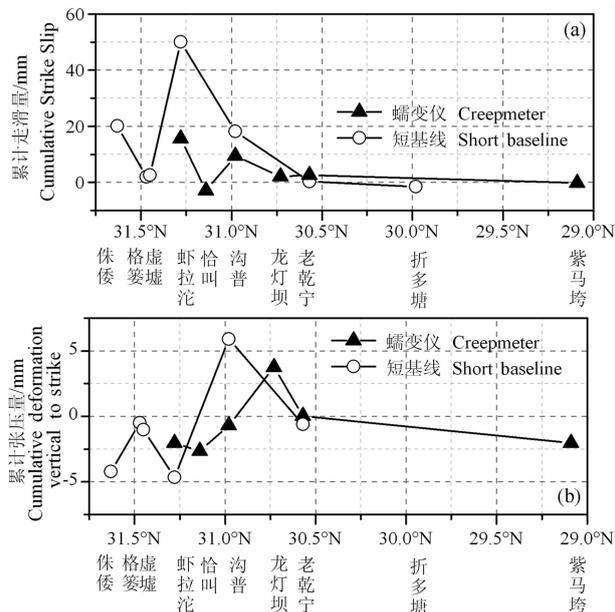


图4 鲜水河断裂带各测点累计走滑量(a)与张压量(b)的空间分布。走滑量以左行为正,右行为负;张压量以压缩为正,拉张为负

Fig. 4 The spatial distribution of fault-parallel (a) and fault-normal (b) components along Xianshuihe fault zone. The positive values represent sinistral for fig (a), and the positive values represent compressional for fig (b).

有较大的拉张分量<sup>[29]</sup>),而乾宁断层为压性活动,最南端的紫马垮为张性。

对比同一场地的蠕变和短基线结果,虾拉沱场地上,两者反映的断层活动性质相同,均为张性左行走滑,但活动量上短基线大于蠕变观测;沟普场地上,蠕变与短基线均显示左行走滑,且短基线活动量较大,但两者显示的张压活动相反,蠕变为微小的张性,短基线则为较强的压性。老乾宁场地上两种观测的活动量都很小,难以说明问题。虽然存在部分矛盾,但总体上两种手段所反映的断层活动特征较为一致,均显示出北西强南东弱的活动特点,主要差别在于活动量的大小。

#### 4.3 断层走滑随时间的变化

根据各个测点的累计走滑量,得到20年来蠕变观测的平均走滑速率介于0.01~0.78 mm/a,短基线的平均走滑速率在0.02~2.46 mm/a之间。

下面以观测时间内周边强震的发生时间为节点,计算出震间时段的平均走滑速率(图5),选取的三次强震分别为1997年11月8日玛尼7.5级(E1)、2001年11月14日昆仑山8.1级(E2)、2008年5月12日汶川8.0级(E3)。蠕变观测中(图5a),虾拉沱、沟普、龙灯坝的走滑速率总体呈衰减趋势;短基

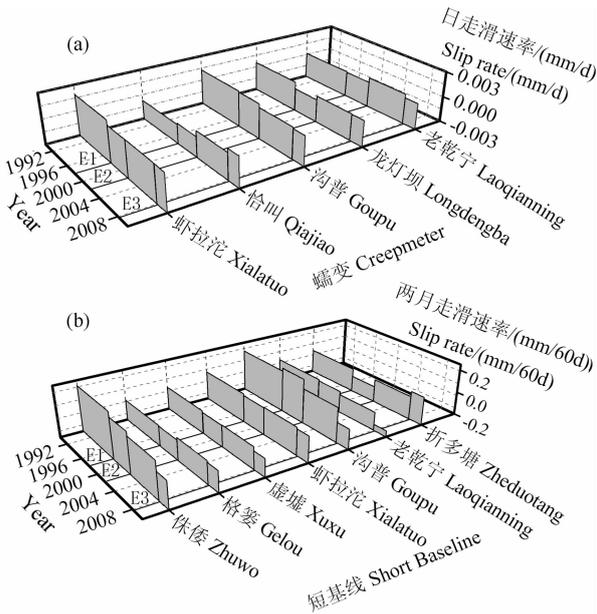


图5 不同时段鲜水河断裂带蠕变与短基线观测的平均走滑速率  
(a)蠕变观测;(b)短基线观测。

Fig. 5 The mean values of strike-slip rates along Xianshuihe fault zone in different period of time  
(a) Creep observation; (b) Short baseline observation.

线观测中(图 5b),除格篓外,其他场地也为衰减态势,说明鲜水河断裂带在炉霍、道孚地震后,断层面逐步愈合,向闭锁的方向发展。

图 6 给出了各测点走滑速率的年均值变化,除上述的整体衰减特征外,沟普以北的场地走滑速率年均值的变化范围较小(短基线表现更明显),说明炉霍、道孚断层蠕滑比较稳定;以南波动范围较大,变化频繁,表示乾宁、折多塘断层蠕滑状态复杂。

综上所述,二十余年的断层蠕变与短基线观测显示,鲜水河断裂带的走滑呈衰减趋势,分段性显著,以道孚县为界,以北的炉霍、道孚断层与以南的乾宁、折多塘断层在活动量、活动性质上差异明显,炉霍、道孚断层走滑量大且活动方式稳定,显示张性和左行走滑;乾宁、折多塘断层活动微弱,走滑量小且活动状态复杂,其中乾宁断层为压性和左行走滑,折多塘断层为微弱的右行走滑,最南端紫马垮场地为张性和右行,且以张性为主。

#### 4.4 断层形变的时空演化

为更直观地展示断层形变的时空演化过程,以时间为 X 轴,场地的纬度为 Y 轴,采用克里金(Kriging)插值,做出蠕变和短基线观测得到的走滑、张压运动速率等值线图(图 7)。

概略的来看,大部分时间断裂带的走滑都是左

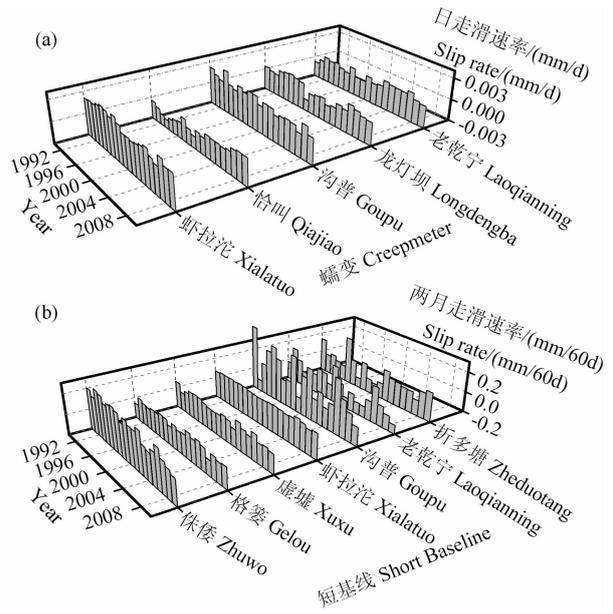


图6 鲜水河断裂带走滑速率年均值变化  
(a)蠕变观测;(b)短基线观测。

Fig. 6 The variations of annual mean values of strike-slip rates along Xianshuihe fault zone  
(a) Creep observation; (b) Short baseline observation.

行的(图 7(a,b),色标为红色),但在某些时段存在逆向走滑(右行走滑),比较明显的两个时间段为 2001 年昆仑山地震和 2008 年汶川地震前后(色标为蓝色),右行走滑较明显的场地包括恰叫、龙灯坝、老乾宁、折多塘。2001 年昆仑山 8.1 级地震前后,老乾宁、折多塘场地出现了明显的右行错动,这在以往的研究中也有所论述<sup>[30]</sup>。汶川地震前,从蠕变结果来看(图 7b),沟普场地从 2007 年开始左行蠕滑速率开始减小,之后减小区域向南扩展。短基线结果显示(图 7a),沟普及以北的场地左行走滑从 2006 年中开始持续减弱;折多塘场地在 2006 年底至 2007 年底发生过逆向走滑;老乾宁场地在 2007 年中也开始出现右行走滑,且右行区域有扩大趋势。由此可见,汶川地震前 2 年左右,炉霍、道孚断层表现为左行走滑减弱,乾宁、折多塘断层在 2007 年确实出现过右行走滑。

其他时间里,个别场地也发生过逆向走滑,但不是很突出,可靠性及原因有待深入分析。2009 年 9 月,沟普、龙灯坝的蠕变测点由之前的左行变为右行,并有扩大趋势;同期的短基线观测也显示沟普、折多塘场地相继发生了逆向走滑。因此,逆向走滑区域至少已扩展到乾宁断层和折多塘断层,值得关注。

对比蠕变仪和短基线所反映的断层走滑随时间的变化,虾拉沱场地表现较为一致,观测时段内均为

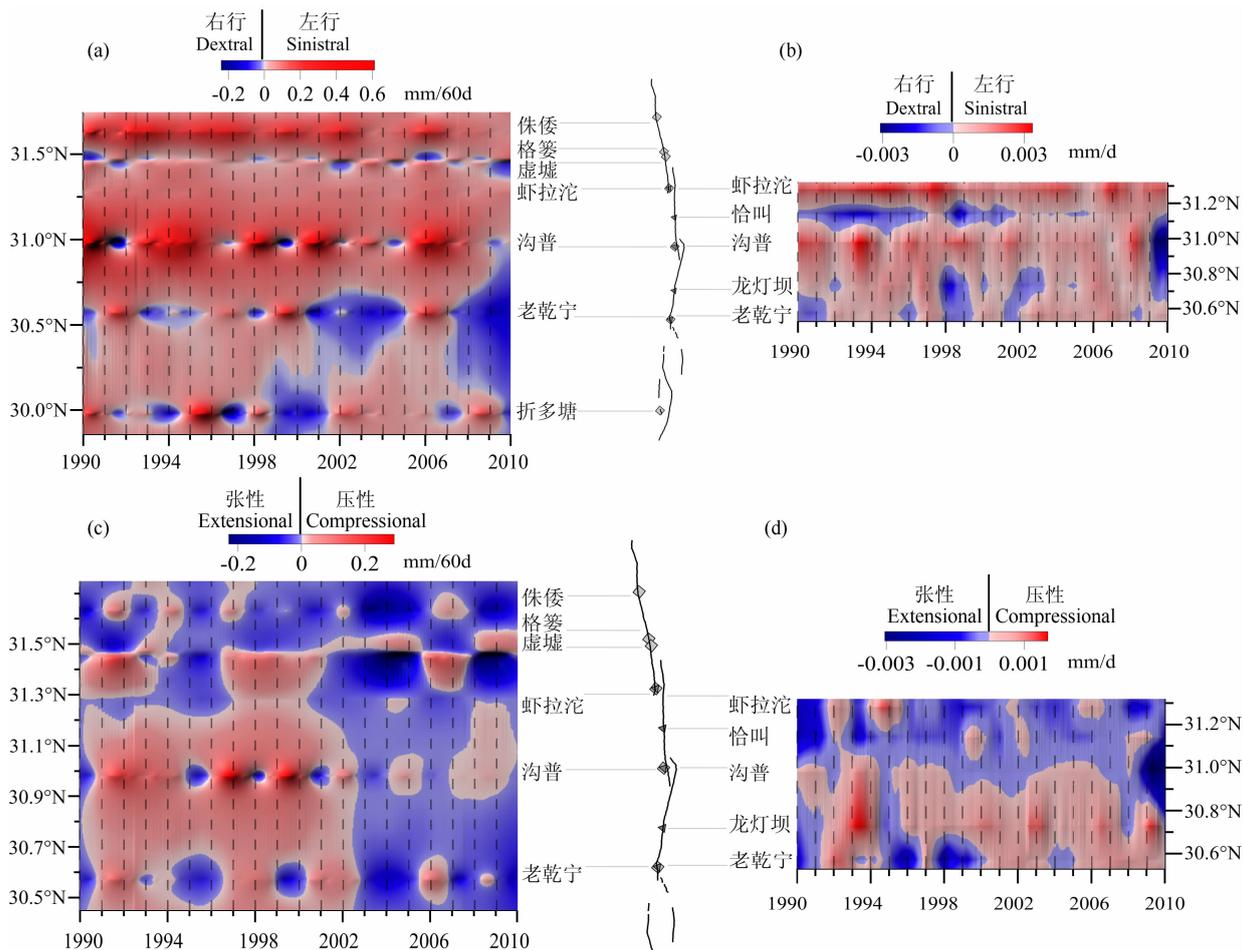


图 7 鲜水河断裂带断层形变速率的时空演化等值线图

(a) 短基线走滑速率; (b) 蠕变仪走滑速率; (c) 短基线张压速率; (d) 蠕变仪张压速率。

Fig. 7 Contour map of deformation rates' temporal-spatial evolution along Xianshuihe fault zone

(a) Strike-slip rate from creepmeter; (b) Strike-slip rate from short baseline; (c) Deformation rate vertical to strike from short baseline; (d) Deformation rate vertical to strike from creepmeter.

较强的左行走滑; 沟普的总体变化趋势有一定的对应性, 2009 年前基本为左行, 之后变为右行, 并且都存在多次走滑速率强弱的交替变化, 老乾宁测点的一致性较差, 两者所反映的旋性有时相反。

张压运动速率的时空变化如图 7(c、d) 所示。空间上来看, 蠕变观测显示道孚断层为张性活动, 乾宁断层则以压性为主 (图 7d); 短基线显示的张压活动分为两个阶段 (图 7c), 2003 年前为第一个阶段, 炉霍、道孚断层张性活动占主导, 乾宁断层以压性为主, 2003 年后为第二个阶段, 其北西段基本都为张性活动。汶川地震后, 恰叫、沟普蠕变仪的张性活动比较醒目。

对比两种观测所反映的断层张压活动, 两者在 2003 年之前均显示沟普以北为张性, 以南为压性, 但 2003 年之后, 短基线显示乾宁断层为张性, 蠕变却显示压性。相比之下, 两种手段所反映的走滑运动

一致性要优于张压运动, 这可能是因为鲜水河断裂带以左行走滑为主, 走滑运动分量更显著所致。

总结起来, 在走滑运动方面, 虽然鲜水河断裂带以左行走滑为主, 但某些部位存在逆向走滑现象, 比较突出的为乾宁、折多塘断层。汶川地震前 2 年, 炉霍、道孚断层左行走滑减弱, 乾宁、折多塘断层在 2007 年出现过右行走滑。张压运动方面, 炉霍、道孚断层以张性为主, 乾宁断层以压性为主。

## 5 结论

(1) 不同段落断层活动方式存在差异性。鲜水河断裂带断层活动具有明显的分段性, 以道孚县为界, 以北的炉霍、道孚断层走滑量较大且活动方式稳定, 显示张性和左行走滑; 以南的乾宁、折多塘断层活动微弱, 走滑量小, 且滑动状态复杂, 其中, 乾宁断

层为压性和左行走滑,折多塘断层为微弱的右行走滑。

(2) 不同时期断层走滑方式存在交替性。鲜水河断裂带虽以左行走滑错动为主,但汶川地震前在一些断层段出现过逆向走滑现象。汶川地震前 2 年,炉霍、道孚断层左行走滑减弱,乾宁、折多塘断层在 2007 年出现过右行走滑,至 2009 年底,逆向走滑区域保持扩展态势。

(3) 不同测点间距得到的断层错动速率不一致。随远离断层距离的增加,平行断层的位移速率逐渐增大,测点间距 18.7~65.1 m 的蠕变速率为 0.01~0.78 mm/a;测点间距 72~288 m 的短基线测量为 0.02~2.46 mm/a,点距十几至几十公里的 GPS 观测为 6~11 mm/a<sup>[8-10]</sup>;地质滑动速率为 5~15 mm/a<sup>[4-7]</sup>。

## 6 讨 论

### 6.1 鲜水河断裂带分段活动的影响因素

对于鲜水河断裂带分段活动的成因,有学者认为该断裂带在南东段走向发生偏转,来自左旋运动的水平侧压增加,导致断裂南西盘南东向水平滑移受阻,并转换为垂直运动分量<sup>[6]</sup>;此外,南东段断裂发生分支,可能对两侧地块的相对运动起到分配作用,使其走滑速率小于北西段<sup>[4]</sup>。但是,上述研究的分段位置划在老乾宁附近,而在本文中,断层形变观测显示的分段点在道孚县附近,以北的炉霍、道孚断层与以南的乾宁、折多塘断层在活动量、活动性质上差异明显。

道孚断层与乾宁断层在道孚县附近以左阶雁列衔接,同时走向发生约 15°的偏转(图 1),1981 年道孚 6.9 级地震就发生在这个部位,说明该拐折点是一个较强的障碍物,上述断层活动差异可能与这种几何结构的改变有关。根据断层滑动资料<sup>[31]</sup>和震源机制解<sup>[32-33]</sup>,鲜水河地区主压应力轴方位角介于 255°~295°之间,在不考虑其他因素的情况下,炉霍、道孚断层与应力主轴的夹角要小于乾宁断层与应力主轴的夹角,故而前两者走滑运动较强,后者走滑较弱并显示压扭性,实测的断层形变资料基本证实了这一点。构造物理实验中,小角度拐折的存在可使其两侧的断层交替成为主导活动构造,强度较高的非连续部位的变形对断层带的变形有一定的控制作用<sup>[34]</sup>,因此在道孚县附近的拐折构造可能是影响两侧断层活动差异的因素之一。

在巴颜喀拉块体内部,与龙门山断裂带近平行的龙日坝断裂带,将巴颜喀拉块体划分为西部的阿坝和东部的龙门山两个次级块体(图 1 左下缩略图),龙日坝断裂带吸收、转换了巴颜喀拉块体的部分 SE 向运动,两个次级块体在滑移方向和速率上均存在一定的差异<sup>[10,35]</sup>。龙日坝断裂与鲜水河断裂带大致交汇于炉霍北东<sup>[35]</sup>,接近于道孚县附近的拐折部位,阿坝块体与龙门山块体的差异运动,可能导致它们与川滇块体之间的相对运动有所不同,反映在断层形变上,可能以道孚县为界,两侧断层活动呈现差异。另外,龙门山地区的 GPS 观测显示,在道孚县南西可能存在一个具有右旋运动的地块边界<sup>[36]</sup>,其可靠性及潜在的影响还需进一步的证实。

总之,本文显示的分段活动可能与断层几何及巴颜喀拉块体内部次级块体的差异运动有关。

### 6.2 汶川地震前后鲜水河断裂带的逆向走滑

汶川地震发生于巴颜喀拉块体的东南边界,即挤压性质的龙门山逆冲断裂带。由 4.4 节的描述可知,汶川地震前,鲜水河断裂带的炉霍、道孚断层左行走滑减弱,乾宁、折多塘断层在 2007 年出现右行走滑,即以道孚县为分段点,两侧断层活动的变化模式有所不同。由于鲜水河断裂带的左行走滑是巴颜喀拉与川滇块体南东向的差异运动所致,因此上述变化说明,在汶川地震前巴颜喀拉块体东部的南东向运动加剧,这在跨龙门山断裂的短水准观测中有直接的体现,五个测点中有三个出现压性增强或由张性转压性的活动<sup>[37]</sup>。

汶川地震后,震区的震后形变 GPS 连续观测表明,大部分观测点的震后位移方向与同震位移方向相近,表明震后形变在某种程度上是同震形变的延续,其形变源有某种相似性<sup>[38]</sup>。2009 年 9 月,沟普、龙灯坝的蠕变测点为明显的右行走滑,沟普、折多塘的短基线场地也显示断层旋性发生了改变,两种手段同时观测到如此大范围的逆向走滑现象,说明这并非局部行为。更重要的是,逆向走滑区在道孚县附近便不再向北发展,而龙日坝断裂与鲜水河断裂带恰好在此交汇,而且 GPS 观测发现跨越龙日坝断裂带 100 km 的距离上,在 1997—2007 年存在约 1.8 mm/a 的水平缩短作用<sup>[39]</sup>,这可能说明由于龙日坝断裂的存在,鲜水河断裂带以道孚县为界,两侧的断层段分属不同的次级块体,因此其断层活动在震前和震后的变化都具有分段性。

综合上述信息,鲜水河断裂带在汶川地震前后出现逆向走滑的可能机理为:汶川地震前巴颜喀拉

块体南东向运动增强, 龙门山断裂带挤压加剧, 由于龙日坝断裂的影响, 道孚县以北的炉霍、道孚断层表现为左行走滑减弱, 以南的乾宁、折多塘断层表现为逆向走滑; 震后, 龙门山断裂带积累的弹性应变能释放, 表现出与同震形变方向相同的震后松弛形变, 震后松弛的范围可能只牵涉龙门山地块, 或者以龙门山地块为主, 而阿坝地块由于龙日坝断裂的影响, 震后形变不如龙门山地块显著, 因此, 这种变形模式导致地震后道孚县以南的乾宁、折多塘断层发生右行走滑, 而以北的炉霍、道孚断层仍为左行。

### 6.3 断层形变观测与其他观测手段的对比与分析

本文的计算结果显示, 蠕变观测得到的鲜水河断裂带走滑速率在 0.01~0.78 mm/a 区间, 短基线测量介于 0.02~2.46 mm/a, 均小于文献[11]的结果(使用 1980—2001 年的短基线数据, 本文则为 1990 年 1 月—2009 年 12 月), 这种差异应是分析时段的不同造成的, 断层形变随构造活动不断发展变化, 如前所述, 鲜水河断裂带的走滑运动整体上是衰减的, 因此最近 20 年的平均走滑速率会有所减小。

相比地质滑动速率(5~15 mm/a)<sup>[4-7]</sup>和 GPS 观测(6~11 mm/a)<sup>[8-10]</sup>, 蠕变和短基线测量显得都很微小。我们选取相同时段的蠕变仪、短基线、GPS

观测结果进行比较。布设在道孚的七美(QIME)和瓦日(WARI)跨断层 GPS 连续观测点, 点距为 16.7 km (图 1), 与沟普跨断层测量场地的位置接近。2006 年 2 月—2007 年 11 月期间, GPS 连续观测显示道孚处平均左旋走滑速率为(6.3±0.3)mm/a<sup>[8]</sup>, 而同期的蠕变与短基线观测均不到 2 mm/a。我们将不同手段得到的走滑速率进行对数曲线拟合, 为了更贴合实际, 将断层两侧≥100 km 的远场走滑速率限定为 GPS 观测的较大值 11 mm/a(假设断层两侧变形场反对称分布, 断层一侧平行断层的位移速率则为 5.5 mm/a), 所得的拟合方程具有统计学意义(图 8a), 之后由拟合方程得到离开断层的距离与位移速率之间的关系(表 2), 可以看出距离断层越远, 平行断层的位移速率越大, 但变化率逐渐减小, 当离开断层的距离超过 30 km 左右时, 位移速率已达到 4.45 mm/a, 占总位移速率 5.5 mm/a 的 80% 以上, 此后位移速率随距离增加缓慢。

我们将不同手段得到的走滑速率除以各自的点距(基线长度), 得到单位距离上(1 km)的位移速率, 由于断层的走滑量相对于 1 km 的单位距离很微小, 两者的比值近似于角应变, 所以在这里称之为视剪应变率, 用以代表断层两侧的变形强度。通过回

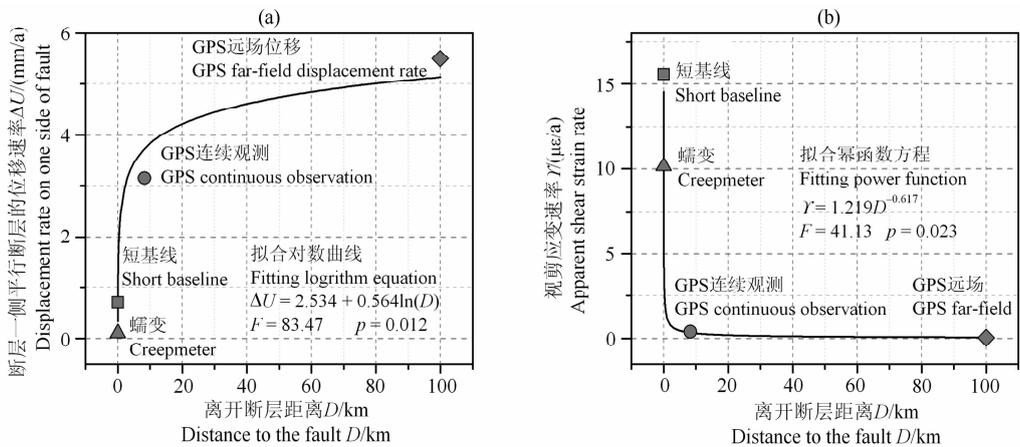


图 8 鲜水河断裂带道孚县附近 2006 年 2 月—2007 年 11 月不同测点间距的平均走滑速率与变形强度 (a) 断层一侧平行于断层的位移速率随距离的变化; (b) 视剪应变率随距离的变化。

Fig. 8 The mean values of strike-slip rates by different observation methods and the deformation intensity near Daofu county of Xianshuihe fault zone from Feb. 2006 to Nov. 2007

- (a) The relation between displacement rate on one side of the fault and distance to the fault;
- (b) The relation between approximate shear strain rate and distance to the fault.

表 2 断层一侧平行于断层的位移速率与离开断层距离之间的关系

Table 2 The relation between displacement rate on one side of the fault and distance to the fault

离开断层距离 D(km)	1	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
单侧位移速率 ΔU(mm/a)	2.53	3.83	4.22	4.45	4.61	4.74	4.84	4.93	5.01	5.07	5.13

归分析发现(图 8b),断裂带中心的变形强度最大,远离断层时视剪应变率急剧衰减,其变形模式更接近剪切不连续的脆性断裂<sup>[40]</sup>。

由上述分析可知,不同测点间距的断层错动速率不统一,在相同时段内,随测点间距的增加,平行断层的位移速率按对数函数增长,视剪应变率按幂函数衰减,超过一定的断层影响区将趋向稳定,因此测量的空间“尺子”大小不同,就会导致观测到的形变信息成分不同。近场观测的测线长度从几十米到几百米,很明显这样的跨距不可能穿越整个变形场,而只能反映出断裂带的一部分变形。对于远场的 GPS 观测,其点距可达几十公里,可能包含了断层的错动、断层两侧块体的黏弹性或塑性变形,更能反映块体之间的相对运动。在一个大地震旋回中,断层形变的发展阶段常常可划分为震前期—同震期—震后期—间震期<sup>[40]</sup>,断层近、远场的形变速率差异在不同阶段有所不同,在震后滑动阶段,断层面近乎开放,近场滑动速率较高,与远场速率差异小<sup>[41]</sup>;而在震前闭锁阶段,断层近场的相对运动微弱,与远场形变速率的差异就会很大。因此,除了要考虑测量空间尺度的不同,还要看断层形变处于大地震旋回的哪个阶段,由目前沟槽场地的形变观测情况来看,近、远场位移速率相差悬殊,断层的应变积累程度应较高。

地质资料显示的断层滑动速率,其时间跨度要比现今的形变测量大很多,是历史上多次震时快速错动与震间缓慢滑动累加后的平均,而且震时的突然错动应该占主要成分,代表了断层活动的长期背景,它与现今断层形变是不同时间尺度的观测,几十年的形变观测相对于漫长的地质时期过于短暂,获得的信息量还很有限<sup>[42]</sup>,它们之间的差异说明断层错动速率在时间上不是常数。

本文的结果只是基于观测资料的初步分析,还存在一些问题和无法解释的现象,例如,同一场地的断层蠕变与短基线观测在某些时段变化不同步, GPS 观测并未发现鲜水河断裂带的逆向走滑等,需要做深入的思考和研究。

**致谢** 感谢两位匿名审稿专家的建设性修改意见,使本文在原有水平上有很大提高。论文撰写过程中,与中国地震局地质研究所刘力强研究员、刘培洵副研究员,四川省地震局测绘工程院苏琴高级工程师进行过多次有益交流,在此一并表示感谢!

## 参考文献(References)

[1] Allen C R, Lou Z L, Qian H, et al. Field study of a highly

active fault zone: The Xianshuihe fault of Southwestern China. *Geological Society of America Bulletin*, 1991, 103(9): 1178-1199.

- [2] 潘懋,梁海华,蔡永恩等. 中国川西地区鲜水河断裂和则木河断裂几何学、运动学特征及地震活动性对比研究. *中国地震*, 1994, 10(1): 28-37.  
Pan M, Liang H H, Cai Y E, et al. Comparison between the Xianshuihe fault zone and Zemuhe fault zone, western Sichuan province, China. *Earthquake Research in China (in Chinese)*, 1994, 10(1): 28-37.
- [3] 闻学泽, Allen C R, 罗灼礼等. 鲜水河全新世断裂带的分段性、几何特征及其地震构造意义. *地震学报*, 1989, 11(4): 362-372.  
Wen X Z, Allen C R, Luo Z L, et al. Segmentation, geometric features, and their seismotectonic implications for the Holocene Xianshuihe fault zone. *Acta Seismologica Sinica (in Chinese)*, 1989, 11(4): 362-372.
- [4] 钱洪,艾伦 C R, 罗灼礼等. 全新世以来鲜水河断裂的活动特征. *中国地震*, 1988, 4(2): 9-18.  
Qian H, Allen C R, Luo Z L, et al. The active characteristics of Xianshuihe fault in Holocene. *Earthquake Research in China (in Chinese)*, 1988, 4(2): 9-18.
- [5] 闻学泽,徐锡伟,郑荣章等. 甘孜—玉树断裂的平均滑动速率与近代大地震破裂. *中国科学(D辑:地球科学)*, 2003, 33(Z1): 199-208.  
Wen X Z, Xu X W, Zheng R Z, et al. The average slip rate and modern strong earthquake rupture of Ganzi-Xianshuihe fault. *Science in China (Series D) (in Chinese)*, 2003, 33(Z1): 199-208.
- [6] 徐锡伟,闻学泽,郑荣章等. 川滇地区活动块体最新构造变动样式及其动力来源. *中国科学(D辑:地球科学)*, 2003, 33(Z1): 151-162.  
Xu X W, Wen X Z, Zheng R Z, et al. Pattern of latest tectonic motion and its dynamics for active blocks in Sichuan-Yunnan region. *Science in China (Series D)*, 2003, 33(Z1): 151-162.
- [7] Holt W E, Ni J F, Wallace T C, et al. The active tectonics of the Eastern Himalayan syntaxis and surrounding regions. *Journal of Geophysical Research*, 1991, 96(B9): 14595-146321.
- [8] 王敏,沈正康,甘卫军等. GPS 连续监测鲜水河断裂形变场动态演化. *中国科学(D辑:地球科学)*, 2008, 38(5): 575-581.  
Wang M, Shen Z K, Gan W J, et al. Deformation dynamic evolution of Xianshuihe fault by GPS continuous observation. *Science in China (Series D) (in Chinese)*, 2008, 38(5): 575-581.
- [9] Chen Z, Burchfiel B C, Liu Y, et al. Global positioning system measurements from Eastern Tibet and their implications for India/Eurasia intercontinental deformation. *J. Geophys. Res.*, 2000, 105(B7): 16215-16227.
- [10] Shen Z K, Lu J N, Wang M, et al. Contemporary crustal

- deformation around the Southeast borderland of the Tibetan plateau. *J. Geophys. Res.*, 2005, 110(B11): B11409, doi: 10.1029/2004JB003421.
- [11] 程万正, 刁桂苓, 吕弋培等. 川滇地块的震源力学机制、运动速率和活动方式. *地震地质*, 2003, 25(1): 71-87.  
Cheng W Z, Diao G L, Lü Y P, et al. Focal mechanisms, displacement rate and mode of motion of the Sichuan-Yunnan block. *Seismology and Geology* (in Chinese), 2003, 25(1): 71-87.
- [12] 龙德雄, 邓天岗. 鲜水河断裂带断层运动分段特征的初步研究. *地震研究*, 1986, 9(5): 591-600.  
Long D X, Deng T G. A preliminary study on segment feature of fault motion along Xianshuihe Fault belt. *Journal of Seismological Research* (in Chinese), 1986, 9(5): 591-600.
- [13] 闻学泽, 白兰香. 鲜水河活动断裂带形变组合与运动特征的研究. *中国地震*, 1985, 1(4): 53-59.  
Wen X Z, Bai L X. Study on the deformation composition and the motion feature of the Xianshuihe active fault zone. *Earthquake Research in China* (in Chinese), 1985, 1(4): 53-59.
- [14] 张家涛, 姚光亮. 鲜水河断裂带的分段活动特征. *地壳形变与地震*, 1990, 10(3): 52-60.  
Zhang J T, Yao G L. The characteristic of segmented activity of Xianshuihe fault zone. *Crustal Deformation and Earthquake* (in Chinese), 1990, 10(3): 52-60.
- [15] 杨主恩, 郭芳, 李铁明等. 鲜水河断裂西北段的断层泥特征及其地震地质意义. *地震地质*, 1999, 21(1): 21-28.  
Yang Z E, Guo F, Li T M, et al. The characteristics of fault gouges from the Xianshuihe fault zone and its geological implications. *Seismology and Geology* (in Chinese), 1999, 21(1): 21-28.
- [16] 周硕愚, 施顺英, 宋永厚等. 鲜水河断裂带现今断层运动短周期事件的发现与初步研究. *地壳形变与地震*, 1996, 16(4): 1-8.  
Zhou S Y, Shi S Y, Song Y H, et al. Discovery and preliminary research for short-period phenomena of present-day fault movement on Xianshuihe fault zone. *Crustal Deformation and Earthquake* (in Chinese), 1996, 16(4): 1-8.
- [17] 吕弋培, 王兰, 苏琴. 断层蠕变的分维变化及其与地震之关系. *地壳形变与地震*, 1999, 19(4): 62-67.  
Lü Y P, Wang L, Su Q. Changes of fractal dimension of fault creep and their relations to earthquake. *Crustal Deformation and Earthquake* (in Chinese), 1999, 19(4): 62-67.
- [18] 张国民, 邵志刚, 刘桂萍等. 汶川 8.0 级地震构造动力成因分析. *地震*, 2009, 29(1): 164-173.  
Zhang G M, Shao Z G, Liu G P, et al. Analysis on the geodynamic cause of the Wenchuan 8.0 earthquake. *Earthquake* (in Chinese), 2009, 29(1): 164-173.
- [19] 徐锡伟, 闻学泽, 叶建青等. 汶川 M<sub>s</sub>8.0 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<sub>s</sub>8.0 Wenchuan earthquake surface ruptures and its seismogenic structure. *Seismology and Geology* (in Chinese), 2008, 30(3): 597-629.
- [20] Nason R D, Phillippsborn F R, Yamashita P A. Catalog of creep-meter measurements in central California from 1968 to 1972. U S Geol. Surv. Open File Rep, 1974.
- [21] Gouly N R, Davis P M, Gilman R, et al. Meteorological noise in wire strainmeter data from parfield, California. *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 1979, 69(5): 1983-1988.
- [22] Lee J C, Jeng F S, Chu H T, et al. A rod-type creepmeter for measurement of displacement in active fault zone. *Earth Planets Space*, 2000, 52: 321-328.
- [23] King C Y, Nason R D, Burford R O. Coseismic steps recorded on creep meters along the San Andreas Fault. *J. Geophys. Res.*, 1977, 82(11): 1655-1662.
- [24] 杨永林, 苏琴. 鲜水河断裂带现今活动特征研究. *大地测量与地球动力学*, 2007, 27(6): 22-27.  
Yang Y L, Su Q. On present activity characteristics of Xianshuihe fault Zone. *Journal of Geodesy and Geodynamics* (in Chinese), 2007, 27(6): 22-27.
- [25] Roeloffs E. Creep rate changes at parkfield, California 1996—1999: Seasonal, precipitation induced, and tectonic. *J. Geophys. Res.*, 2001, 106(B8): 16525-16547.
- [26] Lee J C, Angelier J, Chu H T, et al. Active fault creep variations at Chihshang, Taiwan, revealed by creep meter, monitoring, 1998—2001. *J. Geophys. Res.*, 2003, 108(B11): 2528.
- [27] 吕弋培, 李铁明, 廖华. 鲜水河断裂带跨断层形变测量及其地震学意义. *地震地质*, 1997, 19(4): 333-340.  
Lü Y P, Li T M, Liao H. Across-fault deformation measurement along the Xianshuihe fault zone and its seismological implications. *Seismology and Geology* (in Chinese), 1997, 19(4): 333-340.
- [28] Mallat S. A theory for multiresolution signal decomposition the wavelet representation. *IEEE Transactions on PAMI*, 1989, 11(7): 674-693.
- [29] 王阎昭, 王恩宁, 沈正康等. 基于 GPS 资料约束反演川滇地区主要断裂现今活动速率. *中国科学(D 辑: 地球科学)*, 2008, 38(5): 582-597.  
Wang Y Z, Wang E N, Shen Z K, et al. Constrained inversion on major fault slip rate of Sichuan-Yunnan region based on GPS data. *Science in China (Series D)* (in Chinese), 2008, 38(5): 582-597.
- [30] 苏琴, 杨永林, 张永久等. 昆仑山口西 8.1 级地震对鲜水河断裂带断层活动的影响. *地震研究*, 2009, 32(2): 169-174.  
Su Q, Yang Y L, Zhang Y J, et al. Influence of the Kunlun Mountain M<sub>s</sub>8.1 earthquake to the Xianshuihe fault activity. *Journal of Seismological Research* (in Chinese), 2009, 32(2): 169-174.
- [31] 谢富仁, 李宏. 利用断层滑动资料确定鲜水河断裂带现代构造应力的方向和大小. *地震学报*, 1995, 17(2): 164-171.

- Xie F R, Li H. Magnitude and direction of modern tectonic stress field of Xianshuihe fault zone using fault slip data. *Acta Seismologica Sinica* (in Chinese), 1995, 17(2): 164-171.
- [32] 孙建中, 施顺英, 周硕愚等. 利用地震矩张量反演鲜水河断裂带现今运动学特征. 地壳形变与地震, 1994, 14(4): 9-15. Sun J Z, Shi S Y, Zhou S Y, et al. Inversion of the present kinematic characteristics of Xianshuihe fault zone from seismic moment tensor. *Crustal Deformation and Earthquake* (in Chinese), 1994, 14(4): 9-15.
- [33] 刘春, 邵辉成, 石军等. 利用地震矩张量初步分析断裂带的运动学特征. 地震地质, 2005, 27(3): 429-436. Liu C, Shao H C, Shi J, et al. Preliminary analysis of kinematic features of a fault zone by seismic moment tensors. *Seismology and Geology* (in Chinese), 2005, 27(3): 429-436.
- [34] 马瑾, 马胜利, 刘力强等. 断层几何结构与物理场的演化及失稳特征. 地震学报, 1996, 18(2): 200-207. Ma J, Ma S L, Liu L Q, et al. Geometrical textures of faults, evolution of physical field and instability characteristics. *Acta Seismologica Sinica* (in Chinese), 1996, 18(2): 200-207.
- [35] 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, 38(5): 529-542.
- [36] Zhang K L, Wei D P. Implications from the kinematic pattern of the Longmenshan Region. *Tectonophysics*, 2011, 504(1-4): 57-64.
- [37] 焦青, 杨选辉, 许丽卿等. 汶川8.0级地震前后龙门山断裂活动特征浅析. 大地测量与地球动力学, 2008, 28(4): 7-11. Jiao Q, Yang X H, Xu L Q, et al. Preliminary study on motion characteristics of Longmenshan fault before and after  $M_s 8.0$  Wenchuan earthquake. *Journal of Geodesy and Geodynamics* (in Chinese), 2008, 28(4): 7-11.
- [38] 王敏, 沈正康, 万永革等. 2008年汶川  $M_w 7.9$  地震 GPS震后形变场监测与龙门山断裂带震后滑移及其邻域流变学响应研究. // 中国地球物理 2010——中国地球物理学会第二十六届年会、中国地震学会第十三次学术大会论文集. 2010. Wang M, Shen Z K, Wan Y G, et al. GPS postseismic deformation field monitoring on 2008  $M_w 7.9$  Wenchuan earthquake and study on after slip and rheological response of Longmenshan fault zone and its surrounding area. // Chinese Geophysical Society 26th Annual Symposium and Seismological Society of China 13th Academic Meeting (in Chinese). 2010.
- [39] 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. Du F, Wen X Z, Zhang P Z, et al. Interseismic deformation across the Longmenshan fault zone before the 2008  $M_8.0$  Wenchuan earthquake. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2009, 52(11): 2729-2738.
- [40] Scholz C H. *The Mechanics of Earthquakes and Faulting*, 2nd ed. New York: Cambridge University Press, 2002.
- [41] 杜方, 闻学泽, 张培震. 鲜水河断裂带炉霍段的震后滑动与形变. 地球物理学报, 2010, 53(10): 2355-2366. Du F, Wen X Z, Zhang P Z. Post-seismic slip and deformation on the Luhuo segment of the Xianshuihe fault zone. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2010, 53(10): 2355-2366.
- [42] 车兆宏, 张艳梅. 南北地震带中南段断层现今活动. 地震, 2001, 21(3): 31-38. Che Z H, Zhang Y M. The recent fault activity along the middle and southern segments of South-North Seismic Belt. *Earthquake* (in Chinese), 2001, 21(3): 31-38.

(本文编辑 胡素芳)