

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, DOI: 10.3969/j.issn.0001-5733.2010.10.009

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, DOI: 10.3969/j.issn.0001-5733.2010.10.009

鲜水河断裂带炉霍段的震后滑动与形变

杜 方¹, 闻学泽^{1,2}, 张培震³

1 四川省地震局, 成都 610041

2 中国地震局地震预测研究所, 北京 100036

3 中国地震局地质研究所地震动力学国家重点实验室, 北京 100036

摘 要 1973 年 2 月在鲜水河断裂带炉霍段发生了 $M7.6$ 地震破裂. 自那以来, 先后在炉霍县虾拉沱布设了若干横跨该地震断层(1973 年破裂带)的地壳形变观测系统, 包括断层近场的短基线、短水准、蠕变仪、人工构筑物等, 以及断层近-远场的 GPS 观测站. 利用这些观测系统的长期观测资料, 本文分析了鲜水河断裂带炉霍段的震后滑动/变形及其时、空变化特征, 并建立起解释这些特征的动力学模式. 研究表明: (1) 1973 年地震后的头 5 年, 地震断层在虾拉沱场地表现为开放性, 近场的断层震后滑动以无震左旋蠕滑为主, 速率达到 10.27 mm/a , 且伴有微量的拉张性蠕滑作用; 1979 年以来, 左旋蠕滑速率由 5.3 mm/a 逐渐减小到 2.27 mm/a , 减小的过程呈对数函数型, 反映此阶段断层面已逐渐重新耦合、正朝闭锁的方向发展, 并伴有部分应变积累. (2) 1999 年以来, 地震断层两侧远场的相对左旋位移/变形速率为 10 mm/a , 远大于同时期断层近场(跨距 $40 \sim 144 \text{ m}$)的左旋蠕滑速率 $0.66 \sim 2.52 \text{ mm/a}$; 远-近场位移/形变速率的显著变化发生在地震断层两侧各宽约 30 km 的范围, 显示出这是与大地震应力应变积累—释放相关的断裂带宽度. (3) 结合动力学背景与深部构造信息, 本文对这里断层的震后位移/变形及其时、空变化的机理进行初步解释, 要点是: 震后约 5 年之后, 由于逐渐增大的断层滑动/摩擦阻抗, 上地壳脆性层中的断层面由震后初期的开放性逐渐转向重新耦合、并朝闭锁的方向发展, 但其两侧地块深部持续的延性相对运动拖拽着浅部脆性层发生相应的弹性位移/变形. (4) 可估计再经历 $15 \sim 25$ 年, 研究断裂段将完全“闭锁”, 即进入积累下一次大地震应力应变的震间闭锁阶段.

关键词 鲜水河断裂带, 1973 年地震破裂, 跨断层形变测量, GPS 测量, 震后滑动/变形

DOI: 10.3969/j.issn.0001-5733.2010.10.009

中图分类号 P315, P542

收稿日期 2010-04-22, 2010-09-06 收修定稿

Post-seismic slip and deformation on the Luhuo segment of the Xianshuihe fault zone

DU Fang¹, WEN Xue-Ze^{1,2}, ZHANG Pei-Zhen³

1 Earthquake Administration of Sichuan Province, Chengdu 610041, China

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

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

Abstract An $M=7.6$ earthquake ruptured the Luhuo segment of the Xianshuihe fault zone, Sichuan, in Feb., 1973. Since then, several cross-fault (across the 1973 rupture) deformation observation systems have been set up at Xialatang site in Luhuo County, including a system of short baselines and short leveling, a set of creep-meters, an artificial construction, and some GPS geodetic stations near to or far from the fault. By using the observation data from these systems, this paper studies the characteristics of post-seismic slip/deformation and their temporal-spatial

variations for the Luhuo segment of the Xianshuihe fault zone, and builds a geodynamic model to explain the characteristic features. Our study mainly shows that (1) in the first five years following the 1973 earthquake, the earthquake fault at Xialatang site behaved as an open one and the post-seismic slip was mainly aseismic left-lateral slip (creeping) at an average rate of 10.27 mm/a along with slight tensional creeping. From 1979, however, the creep rate has been slowing down gradually from 5.3 mm/a to 2.27 mm/a following a logarithmic function, suggesting that during this period the fault plane has been tending to re-couple and re-lock gradually with some strain having built-up. (2) Since 1999 the rate of relative left-lateral displacement/deformation at far-fields on both sides of the fault segment is estimated to be 10 mm/a, much greater than the near-fault (40 m to 144 m across the fault) left-lateral creep rates of 0.66 mm/a to 2.52 mm/a in the same stage. Also, such significant differences of the near- and far-fault displacement/deformation rates occur along an about 2×30 -km-wide zone centered along the fault segment, indicating the width of the seismogenic fault zone associated with the stress/strain build-up and release during major earthquake cycles here. (3) Combining with information of geodynamic background and deep crustal structure, the authors try to explain the mechanism of the post-seismic fault slip/deformation and its spatial-temporal variation for the studied fault segment. Key points of the explanation are as follows: Starting from the 5th year after the 1973 earthquake, the fault plane in the brittle upper crust, which was open in the earlier post-seismic stage, has been tending to re-couple and re-lock as a result of gradual increasing slip/friction resistance on the fault plane. In the deeper crust, however, the continuous ductile relative motion between the two sides of the fault keeps dragging the brittle upper crust to produce elastic displacement/deformation. (4) It can be estimated that the studied fault segment will entirely “re-lock”, enter the stage of inter-seismic locking, and re-build up stress/strain for the next major event in the next 15 to 25 years.

Keywords Xianshuihe fault zone, The 1973 earthquake rupture, Across-fault deformation survey, GPS survey, Post-seismic slip/deformation

1 引言

一条活断层(段)在一次大地震发生之前、发生时以及发生后的不同阶段,具有不同力学性质的滑动行为. 一般用震前滑动(pre-seismic slip)、同震滑动(coseismic slip)、震后滑动(post-seismic slip)以及震间滑动(inter-seismic slip)来区分4个阶段的断层滑动行为. 研究震后滑动,不仅可分析活断层(段)在一次大地震之后的应力与摩擦特性随时间变化的过程,而且能获知断层上应力应变重新积累与分布的时-空信息^[1~4]. 这使得震后滑动研究在国际地震活断层行为的研究中占有重要的地位. 已有一些研究反映在一些板块边界上由大地震后持续不断的震后滑动所释放的能量甚至与主震的相当^[1,2,5]. 研究断层的震后滑动需要以跨越地震断层带(或地表破裂带)的、较长时期的形变测量资料为基础,也

可根据时间相依的反演方法模拟地震断层震后滑动行为的时间演化^[5~7].

我国川西高原的NW向鲜水河断裂带是一条左旋走滑型强活动断裂带,其最北西的炉霍段曾于1973年2月6日发生M7.6大地震,并产生了长约90 km的地震断层或地表破裂带^[8,9]. 这次大地震发生后,四川省地震局先后布设了跨越该地震断层的近场地壳形变观测系统. 其中,在炉霍县的虾拉沱场地布设有跨断层短基线、短水准、蠕变仪以及永久性的人工构筑物等,并已分别获得30多年和20多年的观测资料. 此外,1990年代后期至2007年的“中国地壳运动观测网络”工程项目已在鲜水河断裂带两侧地区布设了许多区域GPS流动观测站,并已有多年观测数据和解算的平均站速度资料. 因此,鲜水河断裂带炉霍段是深入研究我国地震断层的震后滑动行为与形变特征的最理想场所.

本研究拟利用虾拉沱场地数十年的跨断层形变

观测资料以及 1999 年以来的区域 GPS 站速度场, 综合分析鲜水河断裂带炉霍段自 1973 年大地震以来的震后滑动/形变行为及其时、空变化特征.

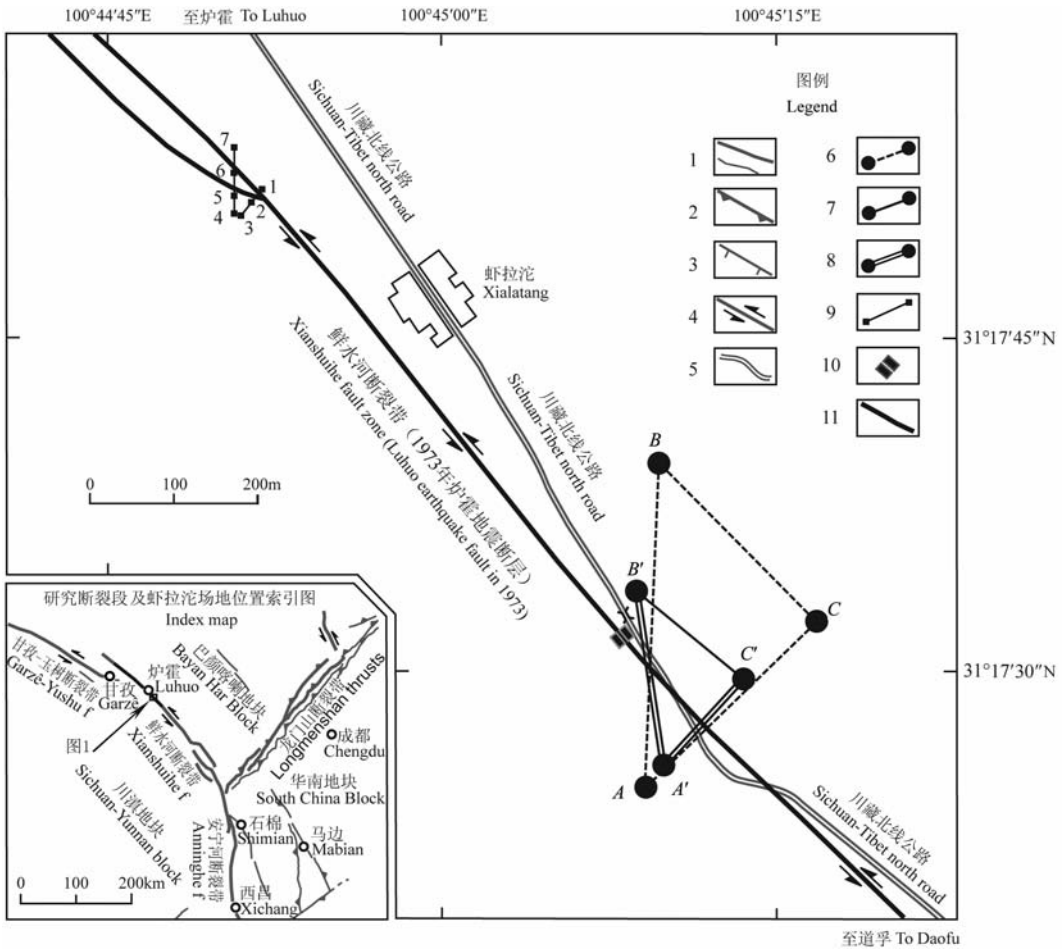
2 形变观测系统与资料

1973 年 2 月 6 日四川炉霍 M7.6 地震发生在 NW 向鲜水河断裂带的最北西段(炉霍段)上(图 1 索引图). 该断裂段的结构较单一, 显示出以左旋走滑为主的全新世活动方式^[8~11]. 本文的分析将使用在炉霍县虾拉沱场地跨越 1973 年地震断层的短基

线、短水准、蠕变仪以及“炉霍地震纪念碑亭”的数十年观测资料, 同时使用该地震断层两侧的区域 GPS 站速度场资料. 为此, 本节介绍相应的跨断层形变观测系统以及观测资料的情况.

2.1 虾拉沱场地的短基线和短水准

1973 年 2 月炉霍 M7.6 地震后不久, 曾在炉霍县虾拉沱村附近布设 A、B、C 三点构成跨越炉霍地震断层的临时短水准观测场地, 如图 1 所示. 1976 年对该临时短水准观测场地进行改建, 重新埋设 A'、B'、C' 三点, 构成正式的跨断层短基线与短水准的联合观测系统, 开始正式施测. 其中, A' 点位于主



- 1. 活动断层, 2. 活动逆断层, 3. 活动正断层, 4. 活动走滑断层, 5. 公路, 6. 炉霍震后临时短水准测线, 7. 短水准测线,
 - 8. 短水准、短基线测线, 9. 蠕变仪测线, 10. 炉霍地震纪念碑亭, 11. 1973 年 M7.6 地震的地表破裂带(地震断层).
1. Active fault, 2. Active reverse fault, 3. Active normal fault, 4. Active strike-slip fault, 5. Road, 6. Temporary short leveling line after the Luhuo earthquake, 7. Short leveling line, 8. Short leveling line and baseline, 9. Creepmeter, 10. Tablet pavilion for monumentalizing victims in the Luhuo earthquake, 11. Surface rupture zone (earthquake fault) of the 1973 M7.6 earthquake.

图 1 鲜水河断裂带炉霍段虾拉沱场地的跨断层形变观测系统分布图, 索引图指示虾拉沱的位置及其与 1973 年地震破裂的关系

Fig. 1 Map of the across-fault deformation survey systems at Xialatang site on the Luhuo segment of the Xianshuihe fault zone. The index map indicates the position of Xialatang and its relation to the 1973 earthquake rupture

断层南西盘, B' 和 C' 点位于北东盘. $A'B'$ 测线跨断层长 216 m, 与断层走向斜交 35° 角; 另一跨断层的 $A'C'$ 测线长 144 m, 与断层走向垂直. 1976 年至今, 四川省地震局虾拉沱地震形变观测台每月对 $A'B'$ 和 $A'C'$ 两条边的长度进行三次短基线测量(每月 10、20 和 30 日进行), 另外, 每天均对 A' 、 B' 、 C' 三点实施水准测量. 本文使用了虾拉沱场地 1976~2009 年的短水准与短基线观测资料.

2.2 虾拉沱场地的蠕变仪

1989 年, 在虾拉沱短基线与短水准场地西北侧约 800m 处建成跨断层的蠕变仪观测系统, 并开始连续观测至今(图 1). 该系统是在全长 190 m 的“V”字型地下巷道中安装了 3 跨斜交断层和 2 跨垂直断层、精度为 0.5×10^{-6} 的钢瓦丝断层水平位移测量仪, 简称 DSJ 蠕变仪, 每一跨的跨距为 15~25 m; 其中, 1-2 跨和 6-7 跨分别垂直跨越和斜跨了 1973 年地震断层的主破裂面, 5-6 跨跨越了 1973 年的分支破裂面, 而 2-3 跨和 4-5 跨则位于断层南西盘的同一侧. 本研究使用了该蠕变仪 1989~2008 年期间的观测资料.

2.3 虾拉沱场地的跨断层永久构筑物

1984 年 8 月, 在虾拉沱短基线与短水准场地 $A'B'$ 测线的西侧, 建成一跨越 1973 年地震断层的永久性构筑物——“炉霍地震纪念碑亭”(图 1、参见图 3). 该碑亭是两侧对称、各自独立的钢筋混凝土构筑体, 分别坐落于 1973 年地震主断层面的南西和北东盘; 两部分基座之间 0.2 m 宽的分隔带正好是 1973 年地震主断层面通过处. 该分隔带内装有滚珠, 以利于记录碑亭两部分之间的震后滑动. 该碑亭两个基座的大小为 3.67 m \times 2.55 m, 地面部分高 8.76 m, 顶端的造型仿张衡地动仪(参见图 3).

2.4 区域 GPS 观测及其站速度场

1990 年代后期至 2007 年的“中国地壳运动观测网络”工程项目在鲜水河断裂带及其邻区布设了许多区域 GPS 流动观测站, 并已获得多期观测资料. 本文使用跨越该断裂带炉霍段的 GPS 平均速度场资料(图 2 中蓝色虚线框范围)来分析震后位移与变形随离开主断层距离的变化与分布特征. GPS 平均站速度是由中国地震局地质研究所王敏研究员解算得到的, 是基于 1997、2001、2004 和 2007 年的 4 期 GPS 观测结果, 将 ITRF2000 (International Terrestrial Reference Frame 2000) 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^[12~14].

3 断层近场的震后滑动

3.1 碑亭记录的震后滑动

1984 年 8 月建成的、虾拉沱场地跨越 1973 年 $M7.6$ 地震主断层的永久性构筑物——“炉霍地震纪念碑亭”(图 3a、b)已逐渐记录了以下震后滑动现象: 1986 年夏, 在该碑亭两分体结构之间的水泥地板开始出现羽列排列的、与主断层走向呈锐角斜交的细裂缝; 由于观测期间沿该断层没有发生中等以上地震, 因此认为这些裂缝是沿 1973 年地震断层发生震后蠕滑的结果^[9]. 此后, 这里的裂缝不断加大、贯通, 左旋蠕滑的累积位移量越来越大. 在 2007 年 10 月 31 日(该碑亭建成 23 年零 2 个月), 我们见到并测量出该碑亭两侧的分体式构筑物已沿主断层面发生了累积约 40 mm 的左旋蠕滑位移(图 3c), 反映这里在跨越 1973 年地震断层面两侧各 2~3 m 宽的范围内, 在 1984~2007 年间的震后左旋蠕滑平均速率约为 1.7 mm/a.

3.2 蠕变仪记录的震后滑动

自 1989 年以来, 虾拉沱场地的 DSJ 蠕变仪已观测了 20 余年. 在该场地附近, 1973 年地震断层先分成两条分支、然后合二为一(但不排除在蠕变仪跨距之外还有别的分支地震断层). 蠕变仪的斜交边由三跨组成, 与 1973 年地震断层走向呈 30° 角相交(图 1); 其中, 跨断层的 6-7 跨与 5-6 跨的边长表现出随时间缓慢增长, 增长量为 ΔD_{6-7} 和 ΔD_{5-6} , 而未跨断层的 4-5 跨的边长基本无变化(图 4a). 蠕变仪的正交边由两跨组成, 与地震断层的走向正交(图 1); 其中, 跨断层的 1-2 跨的边长有极缓慢的增长, 增长量为 ΔD_{1-2} , 而未跨断层的 2-3 跨的边长随时间无显著变化(图 4a). 观测期间沿 1973 年地震断层并没有发生中等以上地震, 反映由蠕变仪观测到的是该断层以左旋蠕滑为主、兼有轻微横向拉张的震后蠕滑作用.

根据公式(1)

$$\Delta L = \frac{\Delta D_{4-5} + \Delta D_{5-6} + \Delta D_{6-7}}{\cos \alpha_1}, \quad (1)$$

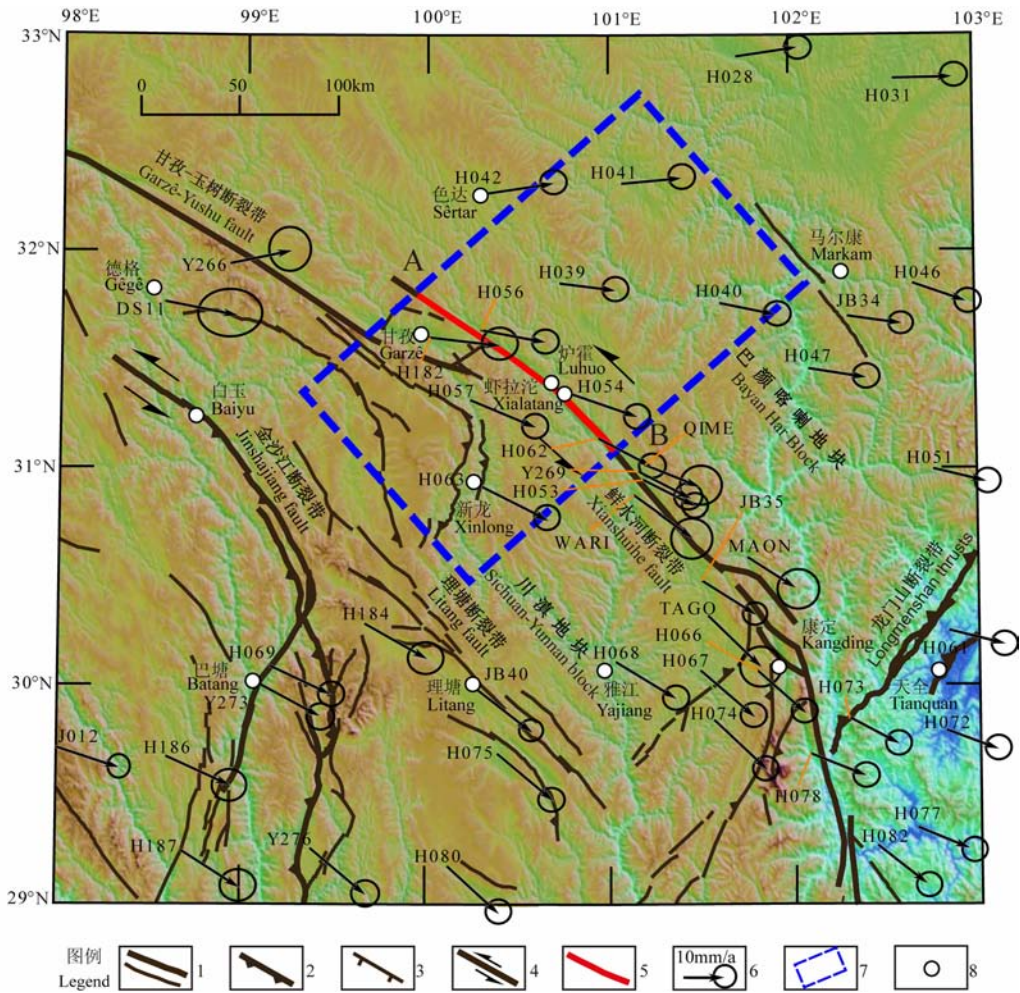
我们由蠕变仪斜交边各跨的长度变化量 ΔD_{4-5} 、 ΔD_{5-6} 、 ΔD_{6-7} 之和, 以及斜交边与断层走向的交角 α_1 ($=30^\circ$), 换算出沿断层走向的蠕滑量 ΔL , 结果绘于图 4b. 从图 4b 可见, 虾拉沱场地的蠕变仪在横跨 1973 年地震断层带宽约 40 m 的范围内观测到显著的断层震后左旋蠕滑作用, 累积蠕滑量 16.13 mm,

平均蠕滑速率为 0.82 mm/a。另外,这里的积累蠕滑量随时间呈对数函数型衰减,采用对数函数拟合得到拟合方程为: $\Delta L = a + b \ln t$, $a = -12146.35$, $b = 1599.15$, 相关系数 $\gamma = 0.997$, 并由拟合方程估得 1990~1994 年期间的蠕滑平均速率为 0.93 mm/a, 1995~1999 年期间下降为 0.89 mm/a, 2000~2004

年期间再下降为 0.72 mm/a, 而 2005~2009 年期间继续下降为 0.68 mm/a(表 1)。

3.3 短基线、短水准观测的震后滑动

自 1980 年代中期以来,已有研究者先后报道了虾拉沱场地跨断层短基线(图 1)观测到的、呈对数函数衰减的震后断层蠕动现象^[7, 9, 15], 原因是这里



1. Active fault, 2. Active reverse fault, 3. Active normal fault, 4. Active strike-slip fault, 5. Surface rupture zones of the 1973 M7.6 Earthquake, 6. GPS station velocity vectors and their errors, 7. An area for the GPS station velocity profile in Fig. 6, 8. City or town.

图 2 鲜水河断裂带及邻区的区域 GPS 站点及其平均站速度场

Fig. 2 GPS stations and their average velocity field in the region along and surrounding the Xianshuihe fault zone

表 1 虾拉沱场地观测的近场断层震后蠕滑速率 (mm/a) 及其随时间变化

Table 1 Near-fault post-seismic creep rates observed at Xialatang site and their time variation

	1976~1978 年	1979~1983 年	1984~1989 年	1990~1994 年	1995~1999 年	2000~2004 年	2005~2009 年
$V_{\Delta L}$	/	/	/	0.93	0.89	0.72	0.68
V_{Base}	10.27	5.30	3.58	3.05	2.54	2.42	2.27
$V_{\Delta h}$	1.78	0.75	0.60	0.41	0.34	0.30	0.26

注: $V_{\Delta L}$ 由蠕变仪斜交边(共 3 跨)记录换算的断层左旋蠕滑速率; V_{Base} 由短基线 A'B' 边记录换算的断层左旋蠕滑速率; $V_{\Delta h}$ 由短水准测点 A' 和 B' 记录的断层两盘相对垂直蠕滑速率。



图 3 炉霍地震纪念碑亭及其震后位移的照片

(a) 碑亭全景(镜向北,摄于 1984 年 8 月);(b) 碑亭全景(镜向北西,摄于 2007 年 10 月);(c) 沿 1973 年 $M7.6$ 地震主断层面(红线)的震后蠕滑使得碑亭两独立构筑体的基础产生的累积位移(镜向东北,摄于 2007 年 10 月).

Fig. 3 Pictures of the tablet pavilion for monumentalizing victims in the Luhuo earthquake and its displacements by the post-seismic creeping

(a) A panoramic picture of the tablet pavilion (to the north, taken in Aug. 1984); (b) A panoramic picture of the tablet pavilion (to the northwest, taken in Oct. 2007); (c) Cumulative displacement between two independent rigid-bases of the tablet pavilion along the main rupture of the 1973 $M7.6$ earthquake (to the northeast, taken in Oct. 2007).

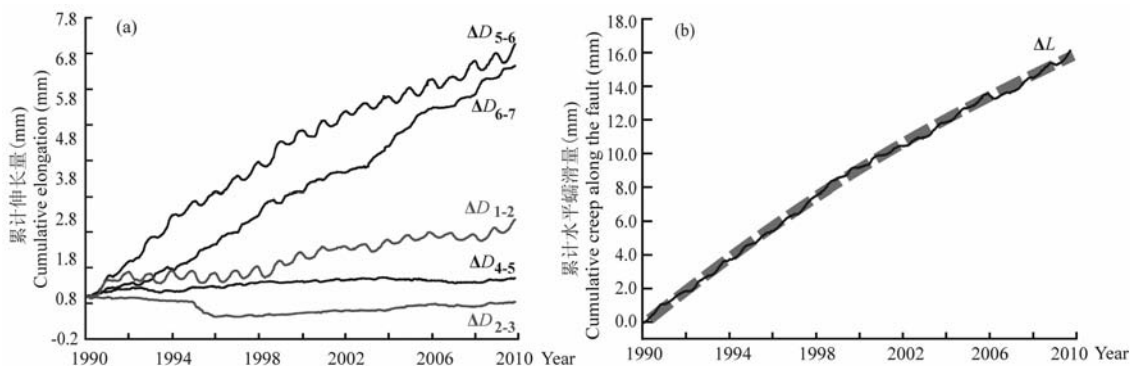


图 4 虾拉沓场地蠕变仪记录的断层蠕滑量随时间的变化

(a) 蠕变仪各跨的长度改变量 ΔD 随时间的变化;(b) 换算的、沿断层走向的左旋蠕滑量 ΔL 随时间的变化(虚线为拟合曲线).

Fig. 4 Time-variations of the post-seismic creep recorded by a set of creepmeters at the Xialatang site

(a) Time-variation ΔD of the length of every span of the creepmeters;(b) Calculated time-variation ΔL of the along-fault left-lateral creep (The fitting curve is the dashed one).

与 1973 年地震断层走向呈 35° 交角的斜交短基线 $A'B'$ 随时间不断增长,且增长的速率缓慢下降。我们基于 1976~2009 年的观测资料,利用三角关系(2)式:

$$\Delta L_{\text{Base}} = \frac{\Delta D_{A'-B'}}{\cos(\alpha_2)}, \quad (2)$$

由短基线斜交边 $A'B'$ 的长度变化量 $\Delta D_{A'-B'}$ 以及该斜交边与断层的交角 $\alpha_2 (= 35^\circ)$ 换算出沿断层走向的左旋蠕滑量 ΔL_{Base} ,结果绘于图 5a。其表明在 1976~2009 年期间,在横跨 1973 年地震断层带、宽约 144 m 的范围内观测到十分显著的震后左旋蠕滑作用,累积左旋蠕滑量为 127.91 mm,平均蠕滑速率为 3.88 mm/a。考虑到这里的震后蠕滑速率随时间呈现对数函数型减慢,我们采用对数函数拟合,获得拟合方程为: $\Delta L_{\text{Base}} = c + d \ln t$, $c = -37193.21$, $d = 4904.40$, 相关系数 $\gamma = 0.990$, 并由拟合方程分别估计出 1976~1978 年期间的蠕滑速率为 10.27 mm/a, 1979~1983 年期间为 5.30 mm/a, 1984~1989 年期间为 3.58 mm/a, 1990~1994 年期间为 3.05 mm/a, 1995~1999 年期间为 2.54 mm/a, 2000~2004 年期间为 2.42 mm/a, 2005~2009 年期间为 2.27 mm/a (图 5a, 表 1)。这些显示这里断层的蠕滑速率在 1973 年地震后的头 5 年较高,然后随时间逐渐缓慢减小。另外,与地震断层走向正交的基线边 $A'C'$ 的长度随时间也有很缓慢的增长,且增长速率逐渐下降(图 5a);反映这里的震后蠕动除了以左旋走滑为主外,还兼有轻微的横向拉张作用。

这里的短水准还观测到跨断层的 $A'B'$ 和 $A'C'$ 两测线均显示 1973 年地震断层的震后蠕动还伴有垂直分量,高差累计变化最大幅度为 18.21 mm,断层的北东盘相对上升;而且,垂直蠕动速率也出现对

数函数型减缓的趋势:从 1976~1978 年期间的约 1.78 mm/a 衰减到 2005~2009 年期间的约 0.26 mm/a (图 5b)。另外,位于断层北东盘、平行于断层的短水准 $B'C'$ 测线的 C' 点相对 B' 点发生了缓慢的微量下降,反映此处断层在震后蠕滑的同时,北东盘还伴有朝南东方向的倾斜运动。

本节表明虾拉沱场地的短基线和短水准均观测到 1973 年地震断层的明显震后蠕动,在 1976~2009 年约 33 年中,左旋蠕滑和垂直蠕滑的累积量分别为 127.91 mm 和 18.21 mm,两者之比约为 7:1,蠕滑速率随时间呈现对数函数型减缓,以左旋走滑为主的蠕动还伴有微量的、横向的水平拉张作用以及顺断层走向的倾斜作用。

4 GPS 观测的断层两侧地块运动

为了了解 1973 年地震断层两侧、由近到远的地块运动特征,我们根据由 1999~2007 年期间 GPS 区域流动观测资料得到的 GPS 平均速度场(图 2),绘制跨越 1973 年地震断层区域的(图 2 蓝色虚线框范围)、平行于该断层的 GPS 站速度分量剖面(图 6)。

图 6 反映 1973 年地震断层两侧地块之间存在明显的水平运动速度差。其中,在断层两侧各自离开 ≥ 40 km 的远场,北东侧巴颜喀喇地块和南西侧川滇地块的、平行断层的水平运动速度分别为 9 mm/a 和 19 mm/a (相对于欧亚大陆的稳定地区)。因此,在远场的背景上,川滇地块的水平运动速度大约比巴颜喀喇地块快 10 mm/a (与其他研究相关的研究结果^[14,16]比较一致)。这也是鲜水河断裂带左旋走滑运动的原因。然而,在 1973 年地震断层两侧各

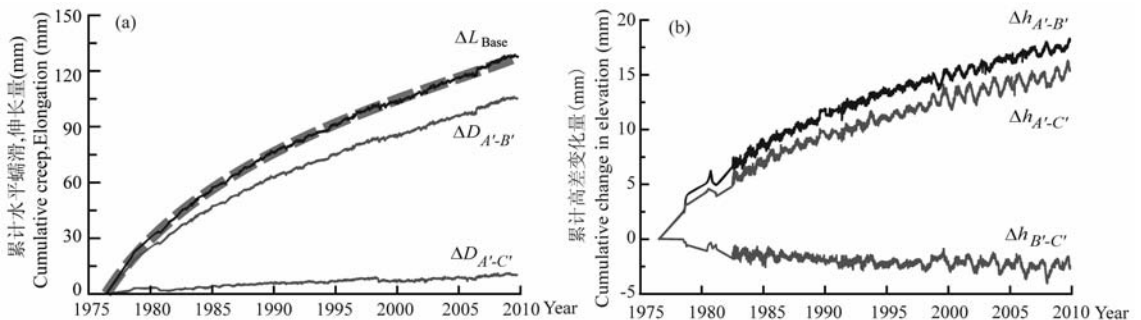


图 5 虾拉沱场地短基线和短水准观测的震后断层蠕滑量随时间变化

(a) 短基线 $A'B'$ 和 $A'C'$ 长度 $\Delta D_{A'-B'}$ 和 $\Delta D_{A'-C'}$, 以及换算的断层左旋蠕滑量 ΔL_{Base} 的时间变化(虚线为拟合曲线); (b) 短水准的观测高差随时间的变化。

Fig. 5 Time-variations of post-seismic fault creep from the cross-fault short leveling and baseline surveys at Xialatang site

(a) Time-variations $\Delta D_{A'-B'}$ and $\Delta D_{A'-C'}$ of baseline lengths $A'B'$ and $A'C'$, and calculated along-fault left-lateral creep ΔL_{Base} .

(The fitting curve is the dashed one); (b) Time-variations of the height differences surveyed with the short leveling.

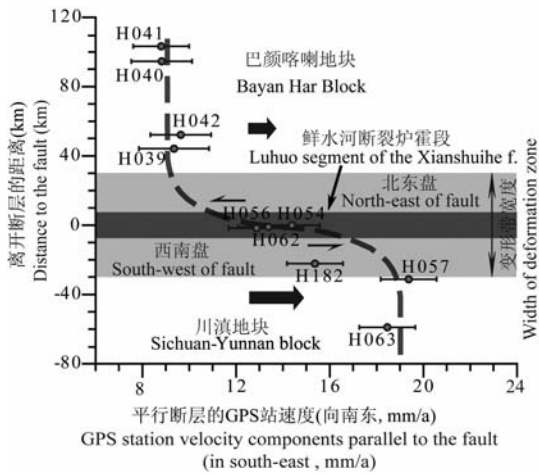


图 6 横跨鲜水河断裂带炉霍段的 GPS 平均站速度剖面(平行断裂的速度分量)(剖面位置参见图 2, 站速度为 1999~2007 年期间的平均值)

Fig. 6 GPS station velocity profile (for fault-parallel components) across the Luhuo segment of the Xianshuihe fault zone (See Fig. 2 for the profile's position. Station velocities are mean ones for the period from 1999 to 2007)

表 2 炉霍断层段近、远场不同距离、不同时期的震后左旋位移/形变速率

Table 2 Post-seismic left-lateral displacements/deformation rates at different near- and far-fault positions and in different post-seismic periods for the Luhuo fault segment

跨断层形变监测项	监测时段	横跨主断层的跨距(m)	沿主断层的累积左旋蠕动量(mm)	沿主断层左旋蠕动速率(mm/a)
分体式碑亭(刚体)	1984-08~2007-12	5	40	1.73
虾拉沱跨断层 DSJ 蠕变仪	1990-01~1998-12	40	8.54	0.95
	1999-01~2007-12		5.96	0.66
虾拉沱跨断层 短基线	1976-06~1978-12	144	26.04	10.27
	1979-01~1998-12		75.83	3.79
	1999-01~2007-12		22.66	2.52
断层两侧 区域 GPS 站速度 (拟合值)	1999~2007	10000	/	4.3
		20000	/	6.5
		40000	/	8.7
		60000	/	9.6
		80000	/	10
		120000	/	10

<30 km的中-近场距离上,明显存在距离断层由远而近、平行于断层的水平运动速度差由大逐渐变小的趋势(图 6). 我们已根据野外调查判定出靠近断层的 3 个 GPS 测站位置与断层的关系,其中, H056 和 H062 两个测站位于断层的南西盘,而 H054 测站位于断层的北东盘. 这样,参考走滑断层的形变模式^[17],可由图 6 的拟合线估计断层两盘在远-近场不同距离的水平运动速度差分别为:跨距 ≥ 80 km (单侧 ≥ 40 km) 时约 10 mm/a, 60 km (单侧 30 km) 时约 9.6 mm/a, 40 km (单侧 20 km) 时约 8.7 mm/a, 20 km (单侧 10 km) 时约 6.5 mm/a, 10 km (单侧 5 km) 时约 4.3 mm/a (表 2). 再进一步靠近主断层时,可由虾拉沱场地在大体同时期(1999 年以来)观测到的 40~144m 跨距的左旋蠕动速率仅 0.66~2.52 mm/a(表 2).

下一节将进一步说明:鲜水河断裂带炉霍段两侧远-近场位移/变形速率的显著差别主要发生在 1979 年以来,而且,这种差别是随着近场断层蠕滑速率的逐渐减小而增加的.

5 进一步分析与讨论

以上已通过分析不同时间和空间跨度的大地形变测量资料,揭示出鲜水河断裂带炉霍段在 1973 年 M7.6 地震破裂后,主要表现出以下两点运动特征:(1)沿地震断层发生震后左旋蠕滑,蠕滑速率随时间

呈对数函数型衰减;(2)横跨断层的远场水平左旋运动速度要远大于近场的震后蠕滑速率. 本节拟从以下两方面进一步分析、讨论 1973 年地震断层震后运动特征的物理涵义以及产生机理,并建立相应的动力学模式.

5.1 近场断层蠕滑速率随时间衰减的涵义

以虾拉沱场地跨断层短基线为代表的观测揭

示:在 1976~1978 年期间,断层近场的震后左旋蠕滑速率高达 10.27 mm/a(图 5a 和表 1),这与该断层远场的平均运动速度(图 6 中断层两侧的速度差约 10 mm/a)、以及由地质方法确定的该断层的长期(数千—数万年)平均滑动速率(8~12 mm/a)^[18]非常接近,说明在 1973 年 M7.6 地震后的最初阶段(震后的头 5 年),断层面几乎是完全开放、松弛的,并以与断层两侧远场的(或者沿断层长期平均的)运动速度接近的速率进行震后左旋蠕滑运动。然而,在 1979~1983 年期间,断层近场的震后左旋蠕滑速率逐渐减小至 5.3 mm/a,年均下降约 1 mm/a;然后,随时间呈对数函数型曲线逐渐缓慢减小至 2009 年的 2.27 mm/a(图 5a),年均下降 0.10~0.15 mm/a,说明经过震后最初 5 年较高速率滑动的调整阶段后,地震断层面已由先前的完全开放、松弛状态转为逐渐重新耦合、并朝闭锁方向发展的状态。

根据在大地震轮回不同阶段的断层形变/滑动行为理论^[19~21],可用图 7 中的灰色实曲线段来表示在虾拉沱场地观测到的、呈对数函数型衰减的震后蠕滑作用在整个大地震轮回中的地位。图 7 说明虾拉沱场地过去在 30 多年观测到的是 1973 年地震断层在震后滑动阶段前半部分的运动。根据蠕滑速率下降的趋势(图 5a)可推测这里的断层面未来一段时期仍以 2.0 mm/a 或更低的速率继续震后蠕滑,直至 15~25 年后,断层面才完成重新“耦合”、完全闭锁,进入“震间闭锁”状态。

5.2 断层近-远场滑动/变形速率差异的原因

综合图 3、4、5 和 6 的观测结果,可将震后位移/

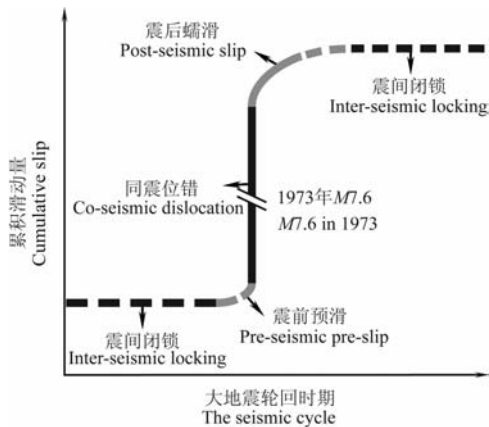


图 7 鲜水河断裂带炉霍段近场滑动行为的时间进程模式(虚线表示推测的、而非观测的累积滑动量随时间的变化) Fig. 7 A model for near-field fault slip behavior and its time variation of the Luhuo segment of the Xianshuihe fault zone (Dashed line and curve represent inferred rather than observed accumulative fault slip and its variation with time)

变形的累积量和速率与离开鲜水河断裂带炉霍段距离的关系整理如表 2。表 2 和图 6 共同揭示出 1973 年 M7.6 地震后经过 26 年,在垂直于地震断层走向的方向上,近场跨距 40~144 m 断层左旋蠕滑速率下降为 0.66~2.52 mm/a,仅为远场平均左旋位移/变形速率约 10 mm/a 的 7%~25%,即近场震后位移/变形速率要远小于远场的。结合图 5a 和 4.1 节的分析,可知断层两侧远-近场位移/变形速率的显著差别主要发生在 1979 年以来,即随着近场断层的蠕滑速率逐渐减小而逐渐增加。此外,图 6 大体反映近、远场的位移/形变速率的显著变化发生在主断层两侧各宽约 30 km 的范围,该范围可能是与大地震的应力应变积累—释放相关的断裂带宽度。

图 6 所示的断层近、远场的左旋位移/变形样式很接近于走滑断层的弹性应变积累模式^[17,22],细微的差别是:在图 6 中,断层面依然存在小量、仅及远场位移/变形量 7%~25%的震后蠕滑,尚未完全闭锁。因此,基于地震轮回不同阶段断层变形特征、脆-延转换带(brittle-ductile transition zone)的作用等理论^[17,23],同时参考穿越鲜水河断裂带北西段(道孚附近)的地壳速度结构^[24],本研究建立起图 8 的动力学模式来初步解释如图 5a、图 6 所示的震后断层位移/变形样式。

图 8 说明在 1973 年地震后的早期阶段,脆性上地壳中的地震断层面处于开放、应力松弛状态,可随着地壳较深部脆-延转换带及其以下的黏-塑性(延性)运动而进行以左旋蠕滑为主的震后调整性滑动,且深、浅部断层的滑动速率相当(图 8a)。因此,在 1973 年地震后的最初 5 年(1979 年之前),虾拉沱场地观测到地震断层的近场左旋滑动速率为 10.27 mm/a(参见表 1),与断层长期平均的左旋位移/变形速率相当。

经过震后早期阶段 5 年的开放性调整运动,脆性层的断层面由于随着逐渐增大的滑动/摩擦阻抗而转向重新耦合,并朝趋于闭锁的方向发展,致使在随后的 30 余年中(1979~2009 年)近场的断层左旋蠕滑速率呈对数函数型逐渐减缓(参见图 4a、图 5a、表 1)。然而,相同时段内,由于断层及其两侧地壳较深部位的黏-塑性相对运动持续进行(即脆-延转换带以下的断层面持续位移),并拖拽了上覆脆性层发生相应的弹性位移/变形。因此,自 1979 年以来的 30 余年中,鲜水河断裂带炉霍段两侧远场的左旋位移/变形速率要远大于在虾拉沱场地观测到的断层近场蠕滑速率,清楚反映 1973 年地震断层在经过

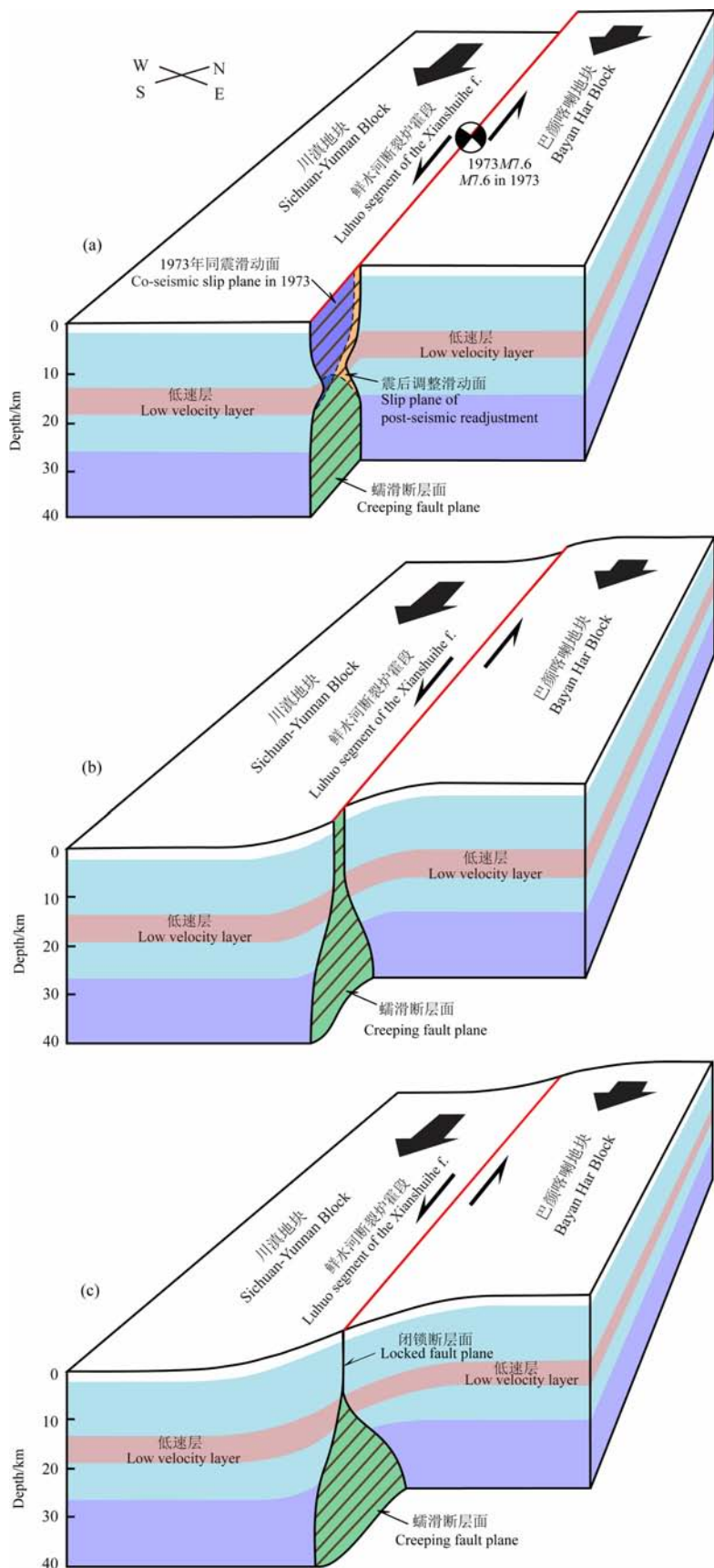


图 8 1973 年 $M7.6$ 地震时及震后不同阶段鲜水河断裂带炉霍段位移/变形的动力学模式

(a) 1973 地震时至 1978 年; (b) 1979~2009 年; (c) 未来 15~25 年后. 地壳分层速度结构据文献[24].

Fig. 8 Dynamics model showing the displacement/deformation in various stages during and after the $M=7.6$ earthquake of 1973 on the Luhuo segment of the Xianshuihe fault zone

(a) From the 1973 coseismic faulting to 1978; (b) 1979 to 2009; (c) In the future decades. Information of the crustal velocity structure is from Ref. [24].

震后最初阶段的开放性调整滑动后,断层面逐渐趋于重新耦合,并朝闭锁的方向发展,目前已有了部分应变的积累(图 8b).

依据虾拉沱场地观测的断层近场蠕滑速率的衰减趋势(图 5a),由表 1 短基线 2009 年的年速率 2.27 mm/a,和近年的年衰减速率 0.10~0.15 mm/a,可推测再经历 15~25 年,鲜水河断裂带炉霍段将完全“闭锁”,进入积累下一次大地震应力应变的震间闭锁阶段.到那时,断层近、远场的左旋位移/变形速度差还要进一步增大(图 8c).

6 结 论

基于 30 多年的测量资料系统分析了鲜水河断裂带北西段在 1973 年 $M7.6$ 地震后的近、远场震后滑动/变形特征及其随时间的变化,结果主要表明:

(1)1973 年地震后的最初 5 年,地震断层在虾拉沱场地表现为松弛与开放性,运动以无震的左旋蠕滑为主,速率达到 10.27 mm/a,同时伴有微量的拉张蠕滑作用;然而,1979 年以来,蠕滑速率由 5.3 mm/a 逐渐减小到 2.27 mm/a,衰减的过程呈对数函数型,反映在此时段中,研究断裂段已由早先的开放性逐渐重新耦合、并朝闭锁的方向发展,且有部分应变积累.

(2)1999 年以来,断裂两侧远场的相对左旋水平位移/变形速率达到 10 mm/a,远大于断层近场(跨距 40~144 m)的震后左旋蠕滑速率 0.66~2.52 mm/a.远、近场位移/形变速率的显著变化发生在断裂两侧各宽约 30 km 的范围,该范围可能是与大地震的应力应变积累-释放相关的断裂带宽度.

(3)本文建立的动力学模式(图 8)可以初步解释研究断裂段的震后位移/变形特征及其时、空变化的原因.其要点是:上地壳脆性层的断层面遇到逐渐增大的滑动/摩擦阻抗而趋于重新耦合,可能是观测到近场断层的震后蠕滑速率随时间呈对数函数型减小的重要原因;而在相同时段内,在断裂及其两侧的深部持续进行的延性相对运动、拖拽了脆性层发生相应的弹性位移/变形,则可能是研究断裂段两侧远场的左旋位移/变形速率要远大于近场的重要原因.

(4)依据断层近场蠕滑速率的衰减趋势,再经历 15~25 年,鲜水河断裂带炉霍段将完全“闭锁”,即进入积累下一次大地震应力应变的震间闭锁阶段.

致 谢 作者感谢美国科罗拉多大学 Peter Molnar 教授与中国地震局地质研究所李传友博士,他们曾

在 2007 年 10~11 月与本文作者一道赴鲜水河断裂带及虾拉沱场地考察,并一同讨论有关问题.

参考文献(References)

- [1] Heki K, Miyazaki S, Tsuji H. Silent fault slip following an interplate thrust earthquake at the Japan Trench. *Nature*, 1997, **386**: 595~598
- [2] Takuya Nishimura, Satoshi Miura, Kenji Tachibana, et al. Distribution of seismic coupling on the subducting plate boundary, in northeastern Japan inferred from GPS observations. *Tectonophysics*, 2000, **323**: 218~238
- [3] Reilinger R E, Ergintav S, Bürgmann R, et al. Coseismic and postseismic fault slip for the 17 August, 1999, $M=7.5$, Izmit, Turkey Earthquake. *Science*, 2000, **289**(5484): 1519~1524
- [4] Yagi Y, Kikuchi M, Sagiya T. Co-seismic slip, post-seismic slip, and aftershocks associated with two large earthquakes in 1996 Hyuga-nada, Japan. *Earth Planets Space*, 2001, **53**: 793~803
- [5] Ozawa S, Kaidzu M, Murakami M, et al. Coseismic and postseismic crustal deformation after the M_w8 Tokachi-oki earthquake in Japan. *Earth Planets Space*, 2004, **56**: 675~680
- [6] Segall P, Matthews M. Time dependent inversion of geodetic data. *J. Geophys. Res.*, 1997, **102**: 22391~22409
- [7] Naoyuki Kato, Xinglin Lei, Xueze Wen. A synthetic seismicity model for the Xianshuihe fault, southwestern China: simulation using a rate- and state-dependent friction law. *Geophys J. Int.*, 2007, **169**: 286~300
- [8] 唐荣昌,文德华,邓天岗等. 1973 年炉霍 7.9 级地震的地裂缝特征及地震成因的初步探讨. *地球物理学报*, 1976, **19**(1): 18~27
Tang R C, Wen D H, Deng T G, et al. A preliminary study on the characteristics of the ground fractures during the Luhuo $M=7.9$ earthquake, 1973 and the origin of the earthquake. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 1976, **19**(1): 18~27
- [9] Allen C R, Lou Z L, Qian H, et al. Field study of a highly active fault zone: The Xianshuihe fault of southwestern China. *Geol Soc Am Bull.* 1991, **103**(9): 1178~1199
- [10] 钱 洪, C R 艾伦, 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
- [11] 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, **3**(4): 437~452

- [12] 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
- [13] Shen Z K, Wang M, Li Y, et al. Crustal deformation associated with the Altyn Tagh fault system, Western China, from GPS. *J. Geophys Res.*, 2001, **106**: 30607~30621
- [14] 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), 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
- [15] 刘本培. 虾拉沱地震断层蠕动的观测与研究. 地壳形变与地震, 1985, **5**(4): 357~365
Liu B P. Observation and study of creeping for the Xialatuo seismic fault. *Crustal Deformation and Earthquake* (in Chinese), 1985, **5**(4): 357~365
- [16] 李延兴, 杨国华, 李智等. 中国大陆活动地块与应变状态. 中国科学(D辑), 2003, **33**(增刊): 65~81
Li Y X, Yang G H, Li Z, et al. Movement and strain conditions of active blocks in the Chinese mainland. *Science in China (Series D)*, 2003, **46**(Suppl.): 82~117
- [17] Scholz C H. *The Mechanics of Earthquakes and Faulting*, 2nd ed. Cambridge, New York, 2002. 471
- [18] 李天福, 杜其方, 游泽李等. 鲜水河活动断裂带及强震危险性评估. 成都: 成都地图出版社, 1997. 1~230
Li T F, Du Q F, Zhang Z L, et al. *The Active Xianshuihe Fault Zone and Its Seismic Risk Assessment* (in Chinese). Chengdu: Chengdu Cartographic Publishing House, 1997. 230
- [19] Savage J C, Prescott W H. Asthenospheric readjustment and the earthquake cycle. *J. Geophys Res.*, 1978, **83**: 3369~3376
- [20] Thatcher W. The earthquake cycle and its role in the long-term deformation of the continental lithosphere. *Annales di Geofisica*, 1993, **36**: 13~24
- [21] Kato N. Seismic cycle on a strike-slip fault with rate- and state-dependent strength in an elastic layer overlying a viscoelastic half-space. *Earth, Planets Space*, 2002, **54** (11): 1077~1083
- [22] Tse S T, Rice J R. Crustal earthquake instability in relation to the depth variation of frictional slip properties. *J. Geophys. Res.*, 1986, **91**(B9): 9452~9472
- [23] Duba A G, Hugh Corey, Duba A G. *The Brittle-Ductile Transition in Rocks: the Heard Volume*. Washington, D. C.: American Geophysical Union, 1990. 243
- [24] 王椿镛, 吴建平, 楼海等. 青藏高原东部壳幔速度结构和地幔变形场的研究. 地学前缘, 2006, **13**(5): 349~359
Wang C Y, Wu J P, Lou H, et al. Study of crustal and upper mantle's structure and mantle deformation field beneath the eastern Tibetan plateau. *Earth Science Frontiers* (in Chinese), 2006, **13**(5): 349~359

(本文编辑 胡素芳)