

基金项目：“十二五”国家科技支撑计划课题《南北地震带强震综合预测与跟踪方法研究》（编号 2012BAK19B01-07）资助。

序变化曲线。进而基于场地间灰色关联度计算，提炼反映鲜水河断裂构造变形特征方式、量值水平及其动态演化过程、分段差异性的走滑、张压、垂向活动参量新综合指标，突出构造活动较明显或持续性的改变；研究该综合特征指标与断裂附近强震孕育—发生、与周围大尺度区域大震孕育或同震、调整影响的可能关系。

1 鲜水河断裂各场地活动参量计算分析

1.1 各场地活动参量累积变化曲线计算绘制

焦青和范国胜（2007）给出了根据两条跨断层基线观测结果，推算沿断层走向水平走滑量 ΔS 与水平面上垂直于走向张压活动量 ΔD 的公式如下：

$$\Delta S \approx \frac{\sin \alpha_2 \Delta L_1 - \sin \alpha_1 \Delta L_2}{\sin(\alpha_2 - \alpha_1)}, \tag{1}$$

$$\Delta D \approx \frac{\cos \alpha_1 \Delta L_2 - \cos \alpha_2 \Delta L_1}{\sin(\alpha_2 - \alpha_1)}. \tag{2}$$

式中， ΔL_1 、 ΔL_2 分别为斜交和正交（或接近正交）测线的测值变化； α_1 、 α_2 分别为两条基线与断层走向的夹角（据“右手规则”，右手伸开、手心向上，拇指为断层倾向、其余四指方向为断层走向；断层走向逆时针旋转到测边可得 $0^\circ \sim 180^\circ$ 夹角）。若 $\Delta S < 0$ ，断层活动特性为左旋走滑，否则为右旋走滑； $\Delta D < 0$ 为压性变化，否则为张性变化。由此可得鲜水河断裂 6 个基线场地（折多塘场地仅有 1 条测线，未计算）水平走滑与张压变化时序曲线。计算时以半年为一窗长，即 ΔL_1 、 ΔL_2 是某半年观测均值相对之前半年观测均值的差异变化，这样做既可反映强震前后动态变化，也可剔除或削弱可能与非构造因素干扰或同震变形有关、信度偏低的短暂尖点突跳，突出持续性较好的异常。鉴于式（1）、（2）获得的是半年时间间隔的实时变化量，正、负波动性大，断层总体与长期活动趋势反而看不清楚，故通过累加获取水平走滑与张压变化累积参量：假设某半年 t^{k_0} ，该半年及以前的每半年相对其上半年走滑与张压变化量为 $\Delta S_j, \Delta D_j, j = 1, 2, \cdots, k_0$ ，则累积参量为 $\sum S = \sum_{j=1}^{k_0} \Delta S_j, \sum D = \sum_{j=1}^{k_0} \Delta D_j$ ；而对反映两盘垂向

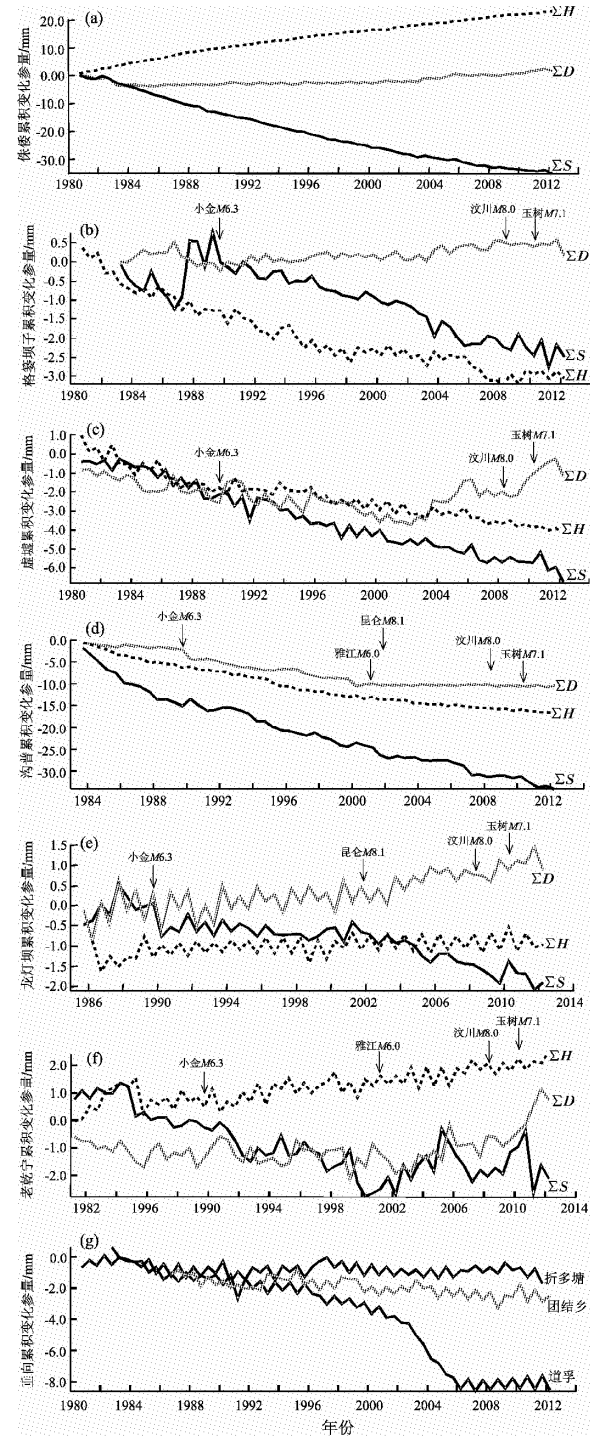


图 2 鲜水河断裂断层活动参量时序曲线
(a) 休倭场地；(b) 格洛坝子场地；(c) 虚墟场地；
(d) 沟普场地；(e) 龙灯坝场地；(f) 老乾宁场地；
(g) 折多塘、团结乡、道孚场地
Fig. 2 Time-sequence curve of fault activity parameters at Xianshuihe Fault
(a) Zhuwu site; (b) Geloubazi site; (c) Xuxu site; (d) Goupu site; (e) Longdengba site; (f) Laoqianning site; (g) Zheduotang, Tuanjiexiang and Daofu sites

差异变化的水准观测,同理可求垂向变化累积量 $\sum H$ (两条测线则取观测均值),故曲线向下变化表示左旋、压性、逆断,向上变化为右旋、张性、正断,结果见图2。

1.2 各场地活动参量累积变化曲线分析

从图2可看出:(1)侏倭综合场地左旋为主但近几年减缓,兼相对偏弱的正断特性,拉张变化更弱,2003~2005年水平拉张加速;(2)格篭坝子综合场地左旋逆断为主,1986~1989年右旋逆转、张压波动可能与1989年9月小金6.3级地震有关。图中还能看到2003~2005年左旋加速,2003年拉张加速,2006~2007年逆断加速,2011年左旋加速;(3)虚墟综合场地左旋、逆断、挤压为主,小金地震前波动略增、震后逆断挤压减弱,2007~2009年左旋减弱,近年来又加速,2003~2005年压性逆转为张性、2006年转平、2009~2011年拉张再次加速;(4)沟普综合场地呈左旋、逆断、挤压特性,小金地震后左旋减弱并出现短暂的压性加速;2001年11月昆仑山口西8.1级地震震前压性曾短暂加速,也可能与同年2月雅江6级地震有关,震后左旋压性逆断均减弱;2007年左旋加速、之后减弱;近两年再次出现短暂的左旋加速现象,目前基本恢复;(5)龙灯坝综合场地近10年来左旋变化明显、兼弱拉张特性。小金地震前波动显著、震后左旋减弱;昆仑山口西8.1级地震后至汶川8.0级地震前左旋、拉张加速;玉树7.1级地震前出现短暂的左右旋波动变化;2011年出现短暂的左旋加速现象,目前基本恢复;(6)老乾宁综合场地左旋为主、兼弱正断特性,小金地震前后波动加剧;雅江地震前或昆仑山口西8.1级地震后、汶川地震前、玉树地震前出现过一定程度转折变化;2005年以来尤其近两年拉张明显加速;(7)道孚、折多塘、团结乡水准或单测线场地逆断为主,道孚场地2003~2005年逆断变化大增、之后转平。

综合分析认为:鲜水河断裂基线与水准综合场地左旋走滑占主要优势,兼弱张一压、正一逆断波动变化;若加上纯水准与折多塘单测线场地,逆断场地略多于正断场地,即逆断特性比正断特性略微明显,与邓起东等(2002)、熊探宇等(2010)得出的地质信息,桂焜长和顾国华(1992)、范国胜和焦青(2008)对形变观测的分

析结果一致。总体上近十年比之前十几年拉张略增或逆断略减,这可能与2001年11月测区以西近千公里外昆仑山口西8.1级大震后大区域应力场调整影响(苏琴等,2009)有关;2008年5月汶川8.0级地震前数年内%基线场地左旋或拉张加速、张一压逆转、至少持续1年(其中3场地震后恢复),道孚水准出现显著逆断加速一转平异常,共占场地总数的%,不排除汶川8.0级地震前周围大区域应力场强化或扰动影响的可能;玉树7.1级地震前新异常仅2处、左旋短暂加速或拉张增强,震后%基线场地左旋加速,但绝大多数属半年内短期变化、可能与相邻断裂发生的玉树地震影响(左旋为主、兼挤压变化)有关(不排除川滇菱形地块短期内东南运动加速可能),目前基本恢复。

本文研究结果与张希等(2005,2009,2010)的GPS分析结果相比,鲜水河断裂左旋走滑占主要优势的结论非常一致;GPS资料显示昆仑山口西8.1级大震后对鲜水河断裂有调整影响,这也与本文结论一致;而对最新GPS观测结果^①的计算显示2009~2011年相对汶川地震前的2004~2007年鲜水河断裂左旋运动略增(发生玉树地震的玉树断裂东段左旋运动显著增强),与上述结果相似,跨断层观测更反映短期效应、之后恢复的场地占绝大多数。目前变化相对明显的为老乾宁场地,其次是虚墟场地,基本上与汶川、玉树尤其汶川震前变化趋势一致,可能仍反映有发生强震的背景信息。

2 鲜水河断裂活动参量新综合指标计算分析

2.1 活动参量综合指标提取新方法探索

由于跨断层场地分散、测线短,场地条件与活动水平、特性存在差异,为提炼断裂或断裂段总体活动特性,首先需扣除各场地观测所得断层活动的本底水平。即对每处场地、每个分量,除以起测以来该分量的绝对值均值,这样可获得水平走滑与张压、垂向三方向、无量纲的累积活动参量。但各场地曲线形态仍存在差异,不能简单地求均值合成。若增加与其它场地相似度相对较高的场地权重、减轻与其它场地相似度偏低的场地权重,有利于突出与该断裂或断裂段构造活动

① 中国地震局第二监测中心. 2011. 2012年度地震趋势研究报告.

相关的共性特征。而灰色关联分析方法，是基于行为因子序列的微观或宏观几何接近，以分析和确定因子间影响程度或因子对主行为的贡献测度而进行的一种分析方法，它根据因素之间发展态势的相似或相异程度来衡量因素间的关联程度（门可佩，夏建平，1995；彭立国，陆明勇，2004）。设 $x_0 = \{x_0(k) \mid k = 1, 2, \cdots, n\}$ 为参考序列； $x_i = \{x_i(k) \mid k = 1, 2, \cdots, n\} (i = 1, 2, \cdots, m)$ 为比较序列， $x_i(k)$ 与 $x_0(k)$ 关联系数可表示为

$$\xi_i(k) = \frac{\min_i \min_k |x_0(k) - x_i(k)| + \rho \max_i \max_k |x_0(k) - x_i(k)|}{|x_0(k) - x_i(k)| + \rho \max_i \max_k |x_0(k) - x_i(k)|}. \quad (3)$$

通常取分辨系数 $\rho = 0.5$ ， x_0 与 x_i 间灰色关联度则定义为

$$\gamma_i = \gamma(x_0, x_i) = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \xi_i(k). \quad (4)$$

由此可求得该断裂或断裂段上每个场地（参考序列）相对其它场地参量序列（比较序列）的灰色关联度（对 $\gamma_i, i = 1, 2, \cdots, m$ 再求均值）。假设断裂或断裂段上有 m_0 个场地，每个场地相对其它（ $m_0 - 1$ ）场地活动参量序列的灰色关联度为 $\gamma_j^0, j = 1, 2, \cdots, m_0$ ， t 时刻时，上述计算所得无量纲的断层活动参量值为 $u_j^t, j = 1, 2, \cdots, m_0$ ，则该时刻活动参量综合指标定义为

$$\alpha^t = \frac{\sum_{j=1}^{m_0} \gamma_j^0 u_j^t}{\sum_{j=1}^{m_0} \gamma_j^0}. \quad (5)$$

由此提炼出该断裂或断裂段三方向（水平走滑与张压、垂向）、无量纲、加权合成的活动参量综合指标 S_q^0, D_q^0, H_q^0 。鉴于同一断裂带上各场地起测时间有差异，式（3）中两两相减时取公共时段；而计算式（5）所示综合指标时起始时间取至少观测 80% 场地的时刻。

2.2 鲜水河断裂活动参量综合指标分析

将鲜水河断裂划分为北西段（侏倭、格婆坝子、虚墟、沟普、道孚场地）和南东段（龙灯坝、老乾宁、折多塘、团结乡场地），各场地的各活动分量相对其它场地的灰色关联度计算结果见表 1，量值均在 0.5 以上、场地间差异 0.1 ~ 0.3。事实上，灰色关联度方法旨在仅降低或升高场地权重的情况下尽可能将所有曲线结果全部应用，更突出资料分析的综合性。利用林纪曾（1981）的线性相关系数也可以加权计算，但很容易出现负相关而不得不剔除某些场地，经试算，没有本文的灰色关联度加权计算结果客观。所得新综合指标时序曲线如图 3 显示：

（1）从水平走滑与张压、垂向变化三分量时序曲线反映的长趋势性、稳定性、量值水平综合来看，鲜水河断裂左旋走滑占主要优势，兼有张一压、正一逆断阶段性变化和波动变化（逆断时段比正断的时段略长，近十年来断裂南东段拉张特性比北西段明显）。其中，断裂南东段变化稳定性明显弱于北西段、震荡或波动幅度较大，可能与其属于与龙门山断裂、安宁河断裂交汇的 Y 字型构造区的重要组成部分以及位于巴颜喀拉地块东南角，断裂纵横交错、活动特性各异、影响因素相对偏多，故构造活动更为复杂有关。

表 1 鲜水河断裂各场地灰色关联度计算结果

Tab. 1 Computation results of grey relation degree for every site at Xianshuihe Fault

断裂	活动分量	侏倭综合	格婆坝子综合	虚墟综合	沟普综合	道孚水准	龙灯坝综合	老乾宁综合	折多塘水准	团结乡水准
鲜水河断裂全段	走滑	0.755 1	0.688 2	0.750 9	0.745 3		0.729 7	0.669 5		
	张压	0.689 5	0.607 8	0.705 4	0.708 4		0.640 1	0.717 0		
	垂向	0.565 7	0.776 0	0.783 5	0.774 3	0.756 4	0.695 8	0.581 4	0.743 8	0.751 2
鲜水河断裂北西段	走滑	0.799 8	0.653 8	0.806 2	0.787 0					
	张压	0.680 4	0.571 5	0.701 6	0.703 3					
	垂向	0.530 5	0.792 0	0.802 1	0.790 0	0.769 1				
鲜水河断裂南东段	走滑						0.681 2	0.681 2		
	张压						0.588 2	0.588 2		
	垂向						0.700 3	0.558 7	0.741 9	0.714 3

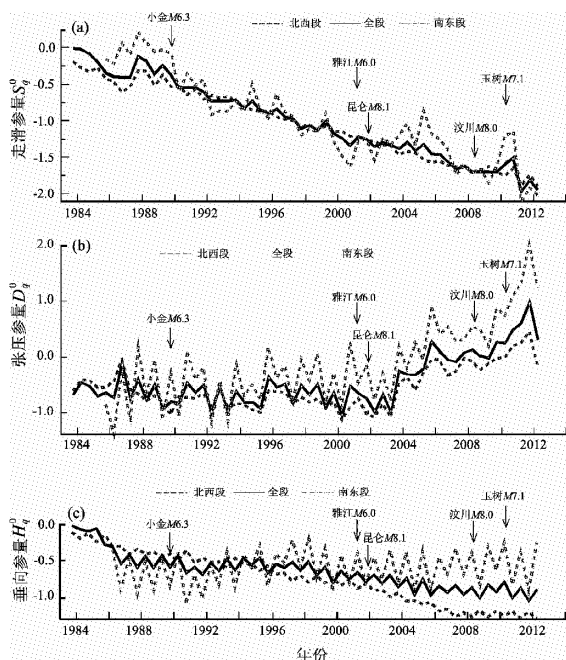


图3 基于灰色关联度的鲜水河断裂活动参量综合指标时序曲线

Fig. 3 Time-sequence curve of synthetic index for activity parameters at Xianshuihe Fault based upon grey relation degree

(2) 跨断层形变资料积累以来, 仅两侧 100 多公里处发生过 1989 年 9 月 22 日的小金 6.3 级和 2001 年 2 月 23 日的雅江 6.0 级地震 (图 1), 震前数月甚至 1~2 年 (或震后) 出现过加速或转折、波动加剧等异常变化, 尤其断裂南东段。

(3) 资料积累以来距断裂两端不远处发生过的大震有 2008 年 5 月 12 日汶川 8.0 级 (最近距离 176 km) 和 2010 年 4 月 14 日玉树 7.1 级 (最近距离 378 km) 地震。汶川地震前数年整条断裂尤其南东段出现左旋加速 (2006 年)、右旋转左旋—加速 (2005~2006 年)、拉张增强 (2003~2005 年) 异常变化, 断裂北西段逆断加速 (尤其 2004~2006 年), 不排除汶川 8.0 级震前周围大区域应力场强化或扰动影响的可能, 与范国胜和焦青 (2008) 的研究结果总体相符。玉树地震前新异常不多, 只有断裂南东段右旋转折明显、拉张略微增强。但震后的 2011 年整个鲜水河断裂带左旋加速普遍, 近期才恢复; 断裂南东段近两年拉张变化也曾加速, 目前折返, 故不排除玉树地震后相对明显、但属短期作用的影响, 这种影响以一定程度左旋加速为主。

(4) 2001 年 11 月 14 日昆仑山口西 8.1 级地震发生在巴颜喀拉地块北边界, 距鲜水河断裂虽有约 1 000 km, 但属于同一地块的边界。震后相对震前鲜水河断裂拉张总体增强、至今维持, 可能与震后大区域应力场调整影响有关。

3 结论

(1) 基于灰色关联度计算, 笔者提炼了反映鲜水河断裂构造变形特征方式、量值水平及其动态演化过程、分段差异性的走滑、张压、垂向活动参量新综合指标, 研究了该综合特征指标与断裂附近强震孕育—发生、与周围大尺度区域大震孕育或同震、调整影响的可能关系。

(2) 鲜水河断裂左旋走滑占主要优势, 兼张—压、正—逆断阶段性和波动变化 (逆断时段比正断时段略长; 断裂南东段断层活动稳定性弱于北西段、近十年拉张特性比北西段明显)。1969 年 9 月 22 日小金 6.3 级地震、2001 年 2 月 23 日雅江 6 级地震前数月至 1~2 年 (或震后) 出现过加速或转折、波动加剧等异常变化。

(3) 昆仑山口西 8.1 级地震后相对震前鲜水河断裂拉张增强, 可能与大区域应力场调整影响有关; 汶川 8.0 级地震前数年该断裂或分段落出现过左旋加速、右旋转左旋—加速、拉张增强、逆断加速异常变化, 不排除受孕震应力场强化或扰动影响的可能; 玉树 7.1 级地震前新异常不多, 但震后的 2011 年鲜水河断裂左旋加速普遍, 近期恢复, 不排除玉树地震后短期内一定程度的影响。

(4) 目前断层活动相对明显的场地为老乾宁场地、其次是虚墟场地, 基本上与汶川、玉树尤其汶川震前变化趋势一致, 可能仍反映有发生强震的背景信息。

参考文献:

- 车兆宏. 2003. 我国断层形变观测在地震研究中的进展及问题[J]. 国际地震动态, (11): 144-148.
- 陈兵, 江在森, 赵振才. 2000. 中国西部断层形变趋势异常特征与地震活动关系研究[J]. 中国地震, 16(1): 77-85.
- 邓起东, 张培震, 冉勇康, 等. 2002. 中国活动构造基本特征[J]. 中国科学(D 辑), 32(12): 1020-1030.
- 范国胜, 焦青. 2008. 汶川地震前川滇地区断裂活动特征分析[J]. 大地测量与地球动力学, 28(6): 27-30.
- 桂煜长, 顾国华. 1992. 鲜水河断裂带的现今水平形变及构造动态[J]. 地震地质, 14(1): 61-67.

- 江在森, 丁平, 王双绪, 等. 2001. 中国西部大地形变监测与地震预测 [M]. 北京: 地震出版社.
- 焦青, 范国胜. 2007. 河北文安地震前后首都圈跨断层位移的变化特征[J]. 大地测量与地球动力学, 27(6): 17–21.
- 林纪曾. 1981. 观测数据的数学处理[M]. 北京: 地震出版社.
- 门可佩, 夏建平. 1995. 地震前兆资料的灰关联综合分析方法[J]. 地震, (2): 137–142.
- 彭立国, 陆明勇. 2004. 灰色系统理论在地震预报中的应用[J]. 大地测量学与地球动力学, 24(5): 120–123.
- 苏琴, 杨永林, 张永久, 等. 2009. 昆仑山口西 8.1 级地震对鲜水河断裂带断层活动的影响[J]. 地震研究, 23(2): 169–174.
- 熊探宇, 姚鑫, 张永双. 2010. 鲜水河断裂带全新世活动性研究进展综述[J]. 地质力学学报, 16(2): 176–188.
- 杨永林, 苏琴. 2007. 鲜水河断裂带现今活动研究[J]. 大地测量与地球动力学, 27(6): 22–27.
- 张希, 崔笃信, 张四新, 等. 2009. 地形变观测揭示的汶川 $M_s 8.0$ 地震同震响应与影响[J]. 武汉大学学报信息科学版, 34(10): 1204–1209.
- 张希, 江在森, 王双绪, 等. 2005. 川滇地区地壳水平运动的弹性块体边界负位错模型与强震地点预测[J]. 地震研究, 28(2): 119–124.
- 张希, 江在森. 2010. 南北地震带中南段地壳水平运动负位错反演与汶川等地震背景[J]. 西北地震学报, 32(2): 105–111.

Research on Activity Features of Xianshuihe Fault and its Relationship with Great Earthquakes Based upon Grey Relation Degree Method

ZHANG Xi, TANG Hong-tao, LI Rui-sha, JIA Peng

(The Second Monitoring and Application Center of CEA, Xi'an 710054, Shaanxi, China)

Abstract

Basing on mobile deformation data cross the fault and using grey relation degree analyze method, we got the new synthetic index for strike-tensile-vertical activity parameters of Xianshuihe Fault, which could reflect features, value, dynamic evolution process and tectonic deformation difference in different segment of Xianshuihe Fault. We studied the relationship of the new synthetic index with preparation-occurrence of strong earthquakes around the Xianshuihe Fault, and its relationship with preparation, co-seismic or adjustment influence of great earthquakes in large-scale area nearby. The results showed that: (1) Xianshuihe Fault mainly is left-lateral strike-slip fault. (2) The curve of activity parameters accumulation showed the anomaly variation of speeding up or turning before Xiaojin $M_s 6.3$ and Yajiang $M_s 6.0$ earthquakes. (3) We could observed the adjustment influence on the Xianshuihe Fault after the $M_s 8.1$ earthquake at the Western Pass of Kunlun Mountains, stress field intensifying or disturbing influence on Xianshuihe Fault before the Wenchuan $M_s 8.0$ earthquake, and left-lateral accelerating influence on Xianshuihe Fault after the Yushu $M_s 7.1$ earthquake in short-time.

Key words: Xianshuihe Fault; fault deformation; grey relation degree; analysis on great earthquakes