

跨断层与 GPS 地壳形变数据联合反演鲜水河断裂地震危险性

尹海权¹⁾, 郭祥云²⁾, 常明¹⁾, 占伟¹⁾, 李腊月¹⁾, 徐东卓¹⁾

1) 中国地震局第一监测中心, 天津, 300180; 2) 中国地震局地球物理研究所, 北京, 100081

内容提要:为了探索 GPS 和跨断层地壳形变数据联合反演效果, 本文以鲜水河断裂为研究对象, 利用 1999~2007 期, 2009~2013 期和 2013~2017 期中国大陆 GPS 水平速度场数据, 使用贝叶斯反演方法, 以跨断层数据为先验条件, 估算了川滇菱形块体东边界(主要为鲜水河断裂)的断层运动速率。发现增加跨断层数据后, 反演图像的近场和远场速率区别更加显著, 不同期次的断层活动速率表现出明显的差异。但是, 本方法在震前效果并不明显, 尤其是在汶川地震前部分跨断层场地的逆向走滑特征很难表现出来, 对于地震预测预报也很难起到优势作用, 但从反演效果上来看, 可以更直观的反映断层在近场和远场上的速率差异以及地震后断层运动速率的分段特征。最终根据上述研究方法认为鲜水河断裂带在汶川地震后, 经过多年的应力调整, 目前左旋走滑速率已经基本恢复到震前状态, 鲜水河断裂南段持续拉张趋势, 川滇菱形块体的顺时针旋转作用持续加强, 鲜水河断裂的道孚段和磨西段存均在一定的走滑速率亏损, 应注意这两个地区的地震危险性, 以及这两个地区地震危险的关联性。

关键词:鲜水河断裂; 跨断层; GPS; 数据融合; 断裂活动性

地表形变场的获取和精化是认识地壳运动与强震孕育机理、探求其对环境的影响、推进地球动力学发展等方面的重要基础性工作。地表形变场的变化具有连续性、动态性、区域性和复杂性的特点, 其受地球内部构造运动和人类活动的共同影响。GPS 和跨断层等大地测量技术为不同尺度的地壳形变过程、活动断裂的运动变形特征的监测提供了高效、稳定、精确的观测结果。

GPS 用于地壳形变研究的优势在于时间连续性好、具有较高的水平向定位精度, GPS 连续观测和流动观测相结合能获得较为精确的大尺度水平形变场(Wang Qi et al., 2001; Zhang Peizhen et al., 2004; Gan Weijun et al., 2007), 并在板块运动分析、反演地震发震断裂特征参数、研究中国大陆及区域速度场、应力场变化、地震动态位移分析以及地震危险区判定等方面取得了较多的研究成果, 为地震预测预报提供了丰富的资料(Meng Qingxiao et al., 2018a, 2018b)。跨断层形变监测具有短测

线跨活动断层(数十、数百米至数千米)、复测周期短(1 至数月)、跟踪性好、物理意义明确等特点, 能在一定程度上获取断层活动的张压、走滑信息并跟踪其时间域的动态演变, 同时也具有空间场的控制能力。

从变形尺度上来看, GPS 观测结果能从较大尺度反映地壳形变特征, 而跨断层观测则反映了断裂局部的运动特点, 尽管尺度不同, 但针对同一断裂带, 两种形变观测资料所反映的断裂运动性质是统一的。从地震预测预报效能来看, GPS 形变异常多为中长期预报提供分析结果, 而跨断层观测能够达到中短期的预报水平。在多种形变资料综合应用方面, 前人做了大量研究工作, 例如 Jiang Zaisen et al. (2010)利用 GPS 边长变化率与跨断层水平形变联合求解应变率场变化; Zhang Jing et al. (2009)利用 GPS 和同期跨断层观测资料对鲜水河断裂带的滑动率、应变率进行了分析计算; Wang Shuangxu et al. (2013)综合利用 GPS 和水准观测资料分析研究

注: 本文为国家重点研发计划课题(2017YFC1500501)、地震科技星火项目(XH20077Y、XH18067Y)、震情跟踪课题(2019010229)资助的成果。

收稿日期: 2019-10-25; 改回日期: 2020-01-18; 网络发表日期: 2020-04-17; 责任编辑: 张永双; 责任编辑: 黄敏。

作者简介: 尹海权, 男, 1990 年生。博士, 工程师, 从事地震地质等方面工作。Email: 742946697@qq.com。

引用本文: 尹海权, 郭祥云, 常明, 占伟, 李腊月, 徐东卓. 2020. 跨断层与 GPS 地壳形变数据联合反演鲜水河断裂地震危险性. 地质学报, 94(8): 2487~2499, doi: 10.19762/j.cnki.dizhixuebao.2020055.
Yin Haiquan, Guo Xiangyun, Chang Ming, Zhan Wei, Li Layue, Xu Dongzhuo. 2020. Inversion of seismic hazard of the Xianshuihe fault by cross-fault and GPS crustal deformation data. Acta Geologica Sinica, 94(8): 2487~2499.

了青藏高原东缘现今三维地壳运动特征。但前人通常是将两种数据结果进行融合分析,而将两种形变数据融合的则相对较少。

目前,形变监测数据的融合反演研究是比较关注的方向。随着各种观测技术的不断成熟,对其反演方法的研究也得以在 20 世纪 90 年代中后期顺利开展,并于本世纪前十年广泛应用于大震震例研究中。目前 GPS 和跨断层两种形变观测手段测均已积累了大量的资料,充分挖掘这些资料中包含的形变信息,发挥各自的优势,互为补充将能为强震预测预报提供较好的依据。因此,本文拟利用跨断层高分辨率的特点来弥补 GPS 分辨率低的不足,利用 GPS 背景场特点弥补跨断层的小范围及数据局限性的不足,探索与试验基于 GPS 和跨断层两种大地测量资料,反演分析活动断裂运动变形特征及判断地震危险性的方法。

1 区域地质背景

鲜水河断裂属于川滇构造带主体断裂结构的一部分。现今的川滇构造带是在原印支期古特提斯构造基础上叠加新特提斯的青藏构造后,发生了大规模的旋转变位、逃逸走滑及其内部的中小块体相对运动,从而形成的走滑断裂构造系(Wang Erqi et al., 2009; Wu Fuyao et al., 2019; Zhang Yueqiao et al., 2018)。川滇构造带东部的结构以扬子地块西南缘近 NS 向的鲜水河-安宁河-小江断裂带为主体的左行走滑体系为主,向东还包括大凉山断裂带、汉源-甘洛断裂带等一系列呈 NS 或者 NW-SE 向南逐渐转换为 NS 向展布的左行走滑兼逆冲断裂系。其中,鲜水河-安宁河-小江断裂走滑断裂构成了川滇构造带的主体断裂结构,也是青藏高原陆壳以东喜马拉雅构造结(Wu Zhonghai et al., 2015; Xu Zhiqin et al., 2011)为中心顺时针旋转的向东南运动的最大旋转破裂边界(图 1)。

鲜水河断裂带是中国西南山区一条现今活动强烈的大型左旋走滑断裂带,具有规模大、活动性强、地震频度高等特点。通常所说的鲜水河断裂带主要是指北起甘孜东谷附近,大体呈 NW-SE 向展布,经炉霍、道孚、康定延伸至泸定的磨西以南的部分,全长约 350km。广义的鲜水断裂带则包括鲜水河断裂和甘孜-玉树断裂,二者在甘孜附近呈左阶羽斜列,在区域上共同构成中国西南川滇活动地块的北边界和巴颜喀拉地块的西南边界。呈 NW 走向的鲜水河断裂带与近 NS 向的安宁河断裂带交接于石

棉地区,南段的小江断裂带则呈近 NS 向,与安宁河断裂带之间由简短的 NW 向则木河断裂相连接,三者依次从北向南排列衔接。鲜水河断裂带主体是由多条紧密的左行斜列剪切次级断裂组成,是一条下切达岩石圈的深大断裂(Chen Yingtao, 2014)。根据水系及其地质体错断的研究结果,鲜水河断裂带晚新生代左行位移约为 60km,滑移速率则为 10mm/a(Xu Xiwei et al., 2003)。

现今的川滇地块是青藏高原向东南挤出逃逸最强烈的地区之一,这种强烈的东向挤出作用在其东边界断裂带上主要表现为高速的左旋或右旋走滑以及强烈而频繁的地震活动(Cheng Jia et al., 2011)。自 1967 年炉霍 6.8 地震、1973 年炉霍 7.9 地震特别是 1981 年道孚 6.9 地震发生以来,我国许多单位和相关学者在该地区开展了系统的地震地质调查及大比例尺填图工作,取得了丰硕的成果。研究内容主要涉及鲜水河断裂带的地震地质条件、古地震研究、地壳形变监测、地震危险性等方面(Qian Hong et al., 1988; Wen Xueze et al., 1989; Xiong Tanyu et al., 2010; Xu Caijun et al., 2012; Chen Changyun et al., 2013; Fang Ying et al., 2015)。进入 21 世纪以来,研究区及其周边发生了多次 7 级及以上大地震,主要有 2001 年 11 月 14 日昆仑山里氏 8.1 级大地震、2008 年 3 月 21 日新疆于田里氏 7.3 级大地震、2008 年 5 月 12 日四川汶川里氏 8.0 级大地震、玉树 7.1 级地震和芦山 7.0 级地震(Qiu Jun et al., 2017; Xu Dongzhuo et al., 2017)。这几次地震中有三次(昆仑、汶川、玉树)发生在夹持于鲜水河断裂带、东昆仑断裂带和龙门山断裂带之间的松潘-甘孜活动块体的边界断裂带上(Zhao Yizhe et al., 2008; Tong Yabo et al., 2014; Cui Junwen et al., 2016)。

综上所述,基于充分挖掘多种形变观测资料预测预报价值以及鲜水河断裂地震危险形势分析的需求,本文选择鲜水河断裂为研究对象,在对 GPS 和跨断层观测数据综合处理分析的基础上,利用贝叶斯方法将跨断层数据作为先验信息(Jackson et al., 1985; Wu Jicang et al., 1997, 2000; Yang Qianli et al., 2016)进行断裂活动反演,并分析鲜水河断裂带的形变运动特征和地震危险背景。

2 数据处理及反演方法

在数据处理上,本文利用 GPS 和跨断层基线数据的年速率进行断裂活动反演,将二者的速率在平

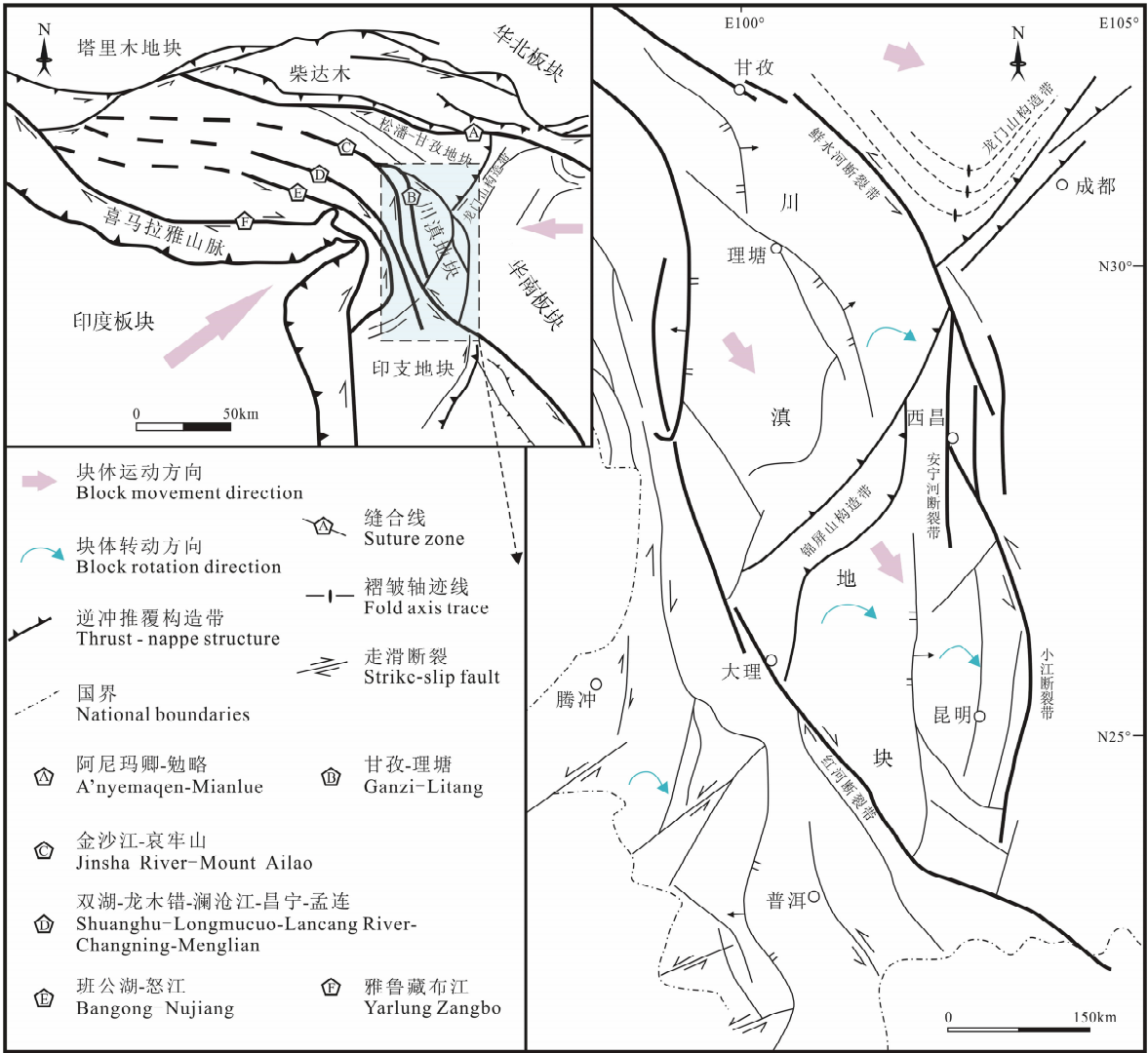


图 1 川滇地块及其周缘构造框架图(据 Chen Yingtao et al. , 2014)

Fig.1 Sichuan-Yunnan block and its surrounding tectonic framework (after Chen Yingtao et al. , 2014)

行断裂走向方向和垂直断裂走向方向进行分解,从而分析断裂的走滑状态和水平张压状态。由于鲜水河断裂并不是一条直线或者近似直线,因此,必须要了解鲜水河断裂的分段性以及每段断裂的参数,尤其是断裂的走向和分段位置,这样才能保证将 GPS 数据和跨断层数据正确的分解为走滑速率和水平张压速率。本文中所采用的断层参数(Li Tieming et al. , 2019)见表 1。

2.1 数据处理

收集研究区域及周边连续观测性好、分布相对均匀、稳定性好的 GPS 基准站观测数据和流动站数据,并利用 GAMIT/GLOBK10.50 和 QOCA 软件进行解算,获取其时间序列,建立 GPS 区域参考框架。对每个流动站结果进行精细处理,获取研究区稳定、可靠的 GPS 速度场,在此基础上应用贝叶斯

表 1 川滇地块东北缘鲜水河断裂分段及断层参数

Table 1 Attitude parameters and segmentation of the Xianshuihe Fault in the northeast of Sichuan-Yunnan Block

断裂段	断层中心坐标		走向(°)	倾向(°)	长度(km)
	经度(°)	纬度(°)			
炉霍	100.400	31.537	N45W	NE/70	90
道孚	100.925	31.161	N45W	NE/70	80
老乾宁	101.297	30.776	N40W	SW/70	70
康定	101.820	30.208	N30W	SW/70	85
磨西	101.187	29.444	N20W	NE/70	90

反演方法获取研究区域的空间速度场(Zhan Wei et al. , 2014)。

跨断层数据的处理主要利用协调比的方法进行处理(Zhang Jing et al. , 2011),协调比是根据断层参数,利用跨断层基线和水准数据,根据断层刚体滑动模型,将数据在水平走滑、水平挤压和垂直升降三

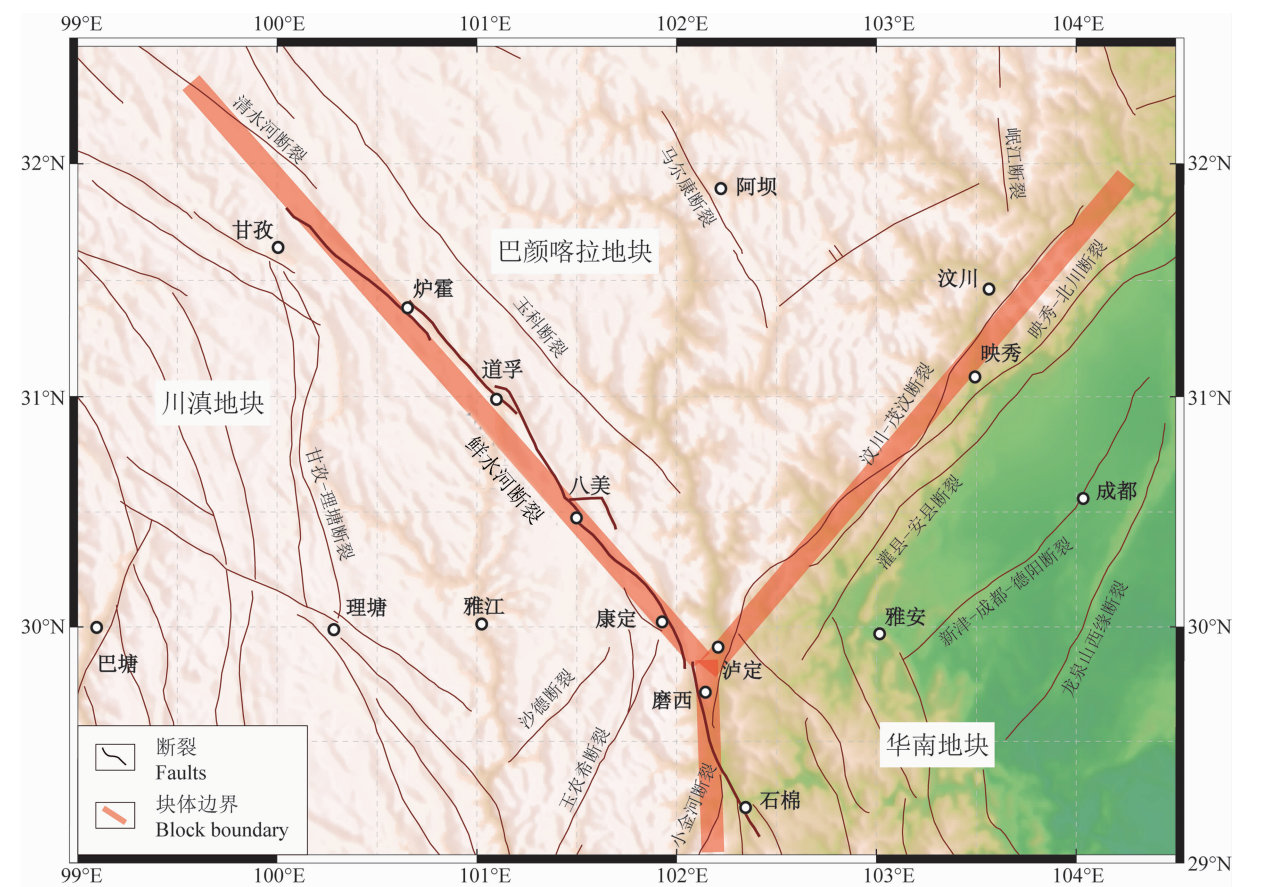


图 2 川滇地块东北缘主要断裂分布

Fig. 2 Distribution of the major faults in the northeast of Sichuan-Yunnan Block

个方向上进行分解,最终利用这三个方向的形变累积量做比进行分析的方法,在计算过程中通过对三维形变累积量对时间求导数即可得到断层三维形变活动速率。

另外,从数据意义上来看,跨断层速度场数据代表了块体边界速度,或者是川滇块体相对巴颜喀拉块体的速度,因此,本文中对 GPS 数据进行处理时,剔除了巴颜喀拉块体的速度,计算了川滇块体相对于巴颜喀拉块体的相对速度。计算中使用了 1999~2007 期、2009~2013 期和 2013~2017 三期 GPS 数据,研究区中每期所使用的的测站代号、测站位置以及所使用的 8 个跨断层场地分布见图 2、3、4、5,数据处理结果见表 2、3、4、5、6、7。

为了将跨断层数据和 GPS 速度场统一,本次工作假设巴颜喀拉块体固定,那么跨断层基线数据的变化量均为川滇块体的活动量;再假设在断层活动时,基线的方向未发生变化(实际中基线角度变化也很小),只发生了基线的伸长或者缩短;然后,将数据变化量分解为断层走向和断层倾向两组数据,并根据 GPS 速度场数据的期次,选取对应的时间跨度,

对数据进行线性拟合,从而得出断层走向和断层倾

表 2 川滇地块东北缘 1999~2007 期 GPS 数据处理结果

Table 2 Results of GPS data processing of the northeast of Sichuan-Yunnan Block during 1999~2007				
经度(°)	纬度(°)	张压(mm/a)	走滑(mm/a)	测站
100.12	29.18	-1.5831	10.1980	H080
100.24	31.32	6.5285	9.4303	H057
100.28	29.99	1.2493	8.5290	JB40
100.30	31.65	5.4196	4.1287	H056
100.31	30.92	3.1408	9.0796	H063
100.39	29.70	0.2181	10.6087	H075
100.75	31.30	3.6388	5.5610	H054
100.93	31.14	2.4875	7.5424	H062
101.02	30.11	-0.4068	8.4036	H068
101.16	30.96	0.0467	4.0633	H053
101.49	30.08	0.0696	10.1131	H067
101.50	30.49	-0.3947	9.0790	JB35
101.52	28.96	-3.0954	9.8524	H083
101.52	30.33	-0.0635	10.3822	H079
101.56	29.85	-1.9945	9.0231	H074
101.79	30.07	-2.8330	6.7321	H066
102.08	29.69	0.1320	4.1899	H078

注:速率值为正表示左旋和挤压,数据不同处理方式以及数据筛选结果会导致处理结果有所出入。

表 3 川滇地块东北缘鲜水河断裂带 1999~2007 期跨断层数据处理结果

Table 3 Results of Cross-fault data processing of the Xianshuihe Fault in the northeast of Sichuan-Yunnan Block during 1999~2007

经度(°)	纬度(°)	张压(mm/a)	走滑(mm/a)	点名
100.59	31.45	−0.3888	0.2052	虚墟
101.88	29.99	−0.06	−0.0312	折多塘
101.48	30.56	−0.2568	−0.1332	老乾宁
100.30	31.65	0.3024	0.3996	侏倭
101.40	30.67	−0.2004	0.018	龙灯坝
101.10	30.98	0.6492	0.5568	沟普
100.44	31.17	−0.378	0.6048	虾拉沱
100.54	31.48	0.2856	−0.2472	格菱坝子

注:速率值为正表示左旋和挤压,数据不同处理方式以及数据筛选结果会导致处理结果有所出入。

表 4 川滇地块东北缘 2009~2013 期 GPS 数据处理结果
Table 4 Results of GPS data processing ofthe northeast of Sichuan-Yunnan Block during 2009~2013

经度(°)	纬度(°)	张压(mm/a)	走滑(mm/a)	点名
100.02	31.61	2.4667	1.4818	SCGZ
100.24	31.32	4.8333	4.1805	H057
100.28	29.99	−5.2651	3.1794	H185
100.30	31.65	2.1174	0.2912	H056
100.31	30.92	1.0608	3.8308	H063
100.32	30.47	−1.2094	3.8003	H329
100.39	29.70	−4.6194	5.5806	H075
100.67	31.39	1.2487	2.8839	SCLH
100.75	31.30	0.9127	1.8091	H054
100.93	31.14	−0.6709	1.2335	H062
101.01	30.11	−3.8349	3.3670	LS21
101.02	30.11	−2.6108	2.3630	H068
101.07	30.57	−1.8684	4.5995	H343
101.12	30.98	−1.7319	1.2244	SCDF
101.16	30.96	−0.8304	0.4474	H053
101.49	30.08	−4.3467	3.9144	H067
101.50	30.49	−2.2213	4.1429	JB35
101.52	30.33	−3.2470	4.8306	H079
101.56	29.85	−7.8181	3.3610	H074
101.56	29.85	−5.6852	4.7348	LS22
102.08	29.69	−5.8511	0.9370	H078
101.79	30.07	−6.4253	1.1378	H066

注:速率值为正表示左旋和挤压,数据不同处理方式以及数据筛选结果会导致处理结果有所出入。

向两组方向的跨断层数据速度场,从而完成 GPS 数据和跨断层数据的融合。

2.2 反演方法

将鲜水河区域附近的 GPS 观测数据与跨断层基线观测数据分解为断裂走向和断裂垂向的形变速率,构建多元数据,利用贝叶斯算法对变化模型进行

反演。假定地面点变化为三元 n 次方程,则观测方程表达式如下:

表 5 川滇地块东北缘鲜水河断裂带 2009~2013 期跨断层数据处理结果

Table 5 Results of Cross-fault data processing of the Xianshuihe Fault in the northeast of Sichuan-Yunnan Block during 2009~2013

经度(°)	纬度(°)	张压(mm/a)	走滑(mm/a)	点名
100.59	31.45	−0.3732	−0.2016	虚墟
101.88	29.99	−0.0396	−0.0204	折多塘
101.48	30.56	−1.0512	−0.4644	老乾宁
100.30	31.65	0.2544	0.336	侏倭
101.40	30.67	−0.0396	−0.1152	龙灯坝
101.10	30.98	0.654	0.5772	沟普
100.44	31.17	−0.3132	0.5016	虾拉沱
100.54	31.48	−0.5364	−0.4704	格菱坝子

注:速率值为正表示左旋和挤压,数据不同处理方式以及数据筛选结果会导致处理结果有所出入。

表 6 川滇地块东北缘 2013~2017 期 GPS 数据处理结果
Table 6 Results of GPS data processing ofthe northeast of Sichuan-Yunnan Block during 2013~2017

经度(°)	纬度(°)	张压(mm/a)	走滑(mm/a)	点名
101.50	30.49	0.4266	5.5485	JB35
100.28	29.99	−2.7888	5.3746	JB40
101.12	30.98	0.4369	2.8629	SCDF
100.02	31.61	3.3067	2.4187	SCGZ
100.67	31.39	1.6832	2.8023	SCLH
101.16	30.96	−1.4394	1.6494	H053
100.75	31.30	0.6866	2.4820	H054
100.30	31.65	3.3917	4.1922	H056
100.24	31.32	3.0824	6.6653	H057
100.93	31.14	0.6911	5.2073	H062
100.31	30.92	1.1690	6.7198	H063
101.79	30.07	−5.8826	7.2325	H066
101.49	30.08	−4.5733	8.3645	H067
101.02	30.11	−2.1178	7.2602	H068
101.56	29.85	−6.7136	9.2823	H074
100.39	29.70	−3.2436	6.9582	H075
102.08	29.69	−3.3900	0.5998	H078
101.52	30.33	6.3138	13.7753	H079
100.01	31.62	3.8667	4.2101	H182
100.32	30.47	7.9976	3.5034	H329
101.07	30.57	0.1800	7.7865	H343
101.40	30.61	1.4126	4.8757	H345

注:速率值为正表示左旋和挤压,数据不同处理方式以及数据筛选结果会导致处理结果有所出入。

$$\begin{aligned} Z = f(X,Y) = & a_1X + a_2Y + a_3X^2 + a_4Y^2 + \\ & a_5XY + \cdots + a_{\sum_{j=1}^n c_j+1}^n X^n + a_{\sum_{j=1}^n c_j+2}^n Y^n + a_{\sum_{j=1}^n c_j+3}^n X^{n-1}Y \\ & + \cdots + a_{\sum_{j=1}^{n+1} c_j}^{n+1} X Y^{n-1} \end{aligned}$$

观测数据由 GPS 观测数据与基线观测数据组成如下:

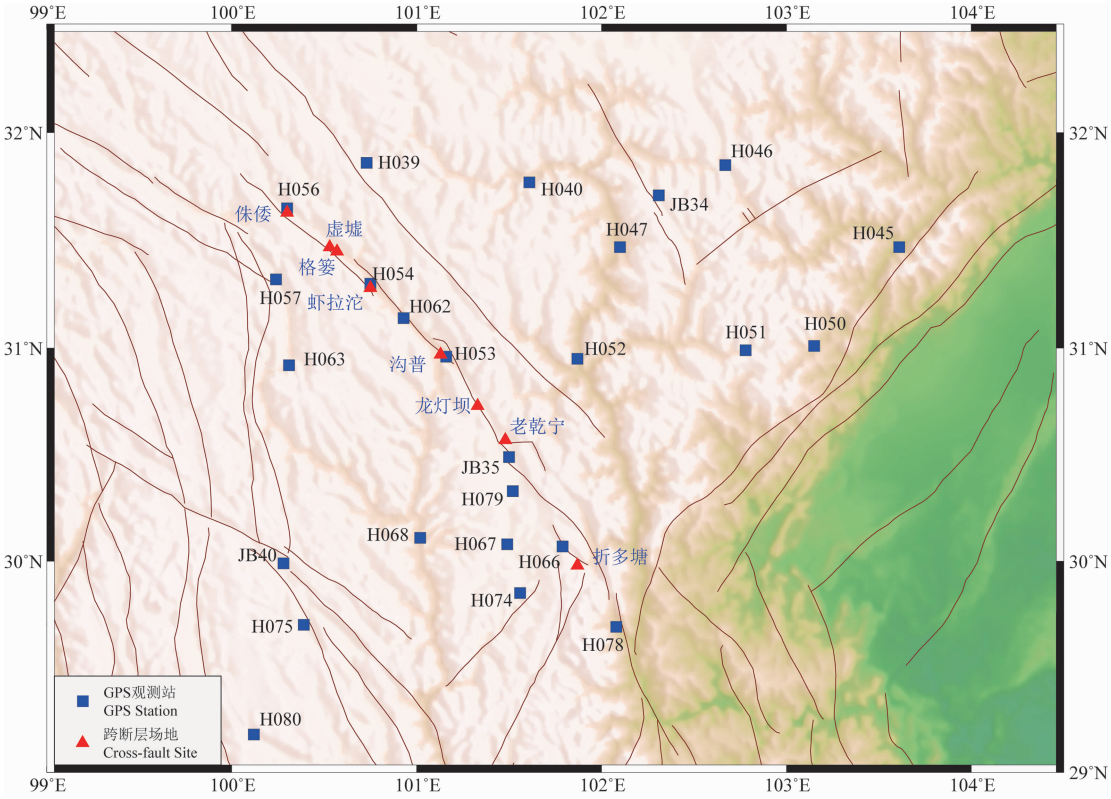


图 3 川滇地块东北缘 1999~2007 期 GPS 测站分布及跨断层场地位置

Fig. 3 The GPS stations of 1999~2007 period and location of cross-fault sites in the northeast of Sichuan-Yunnan Block

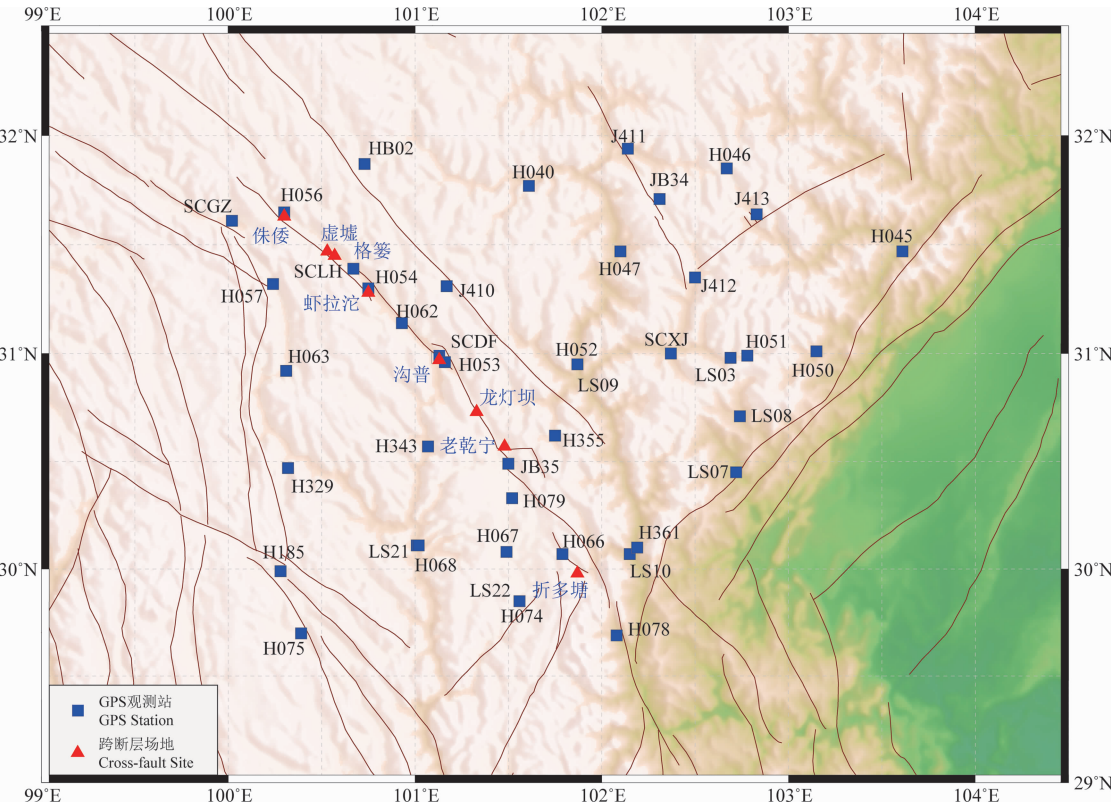


图 4 川滇地块东北缘 2009~2013 期 GPS 测站分布及跨断层场地位置

Fig. 4 The GPS stations of 2009~2013 period and location of cross-fault sites in the northeast of Sichuan-Yunnan Block

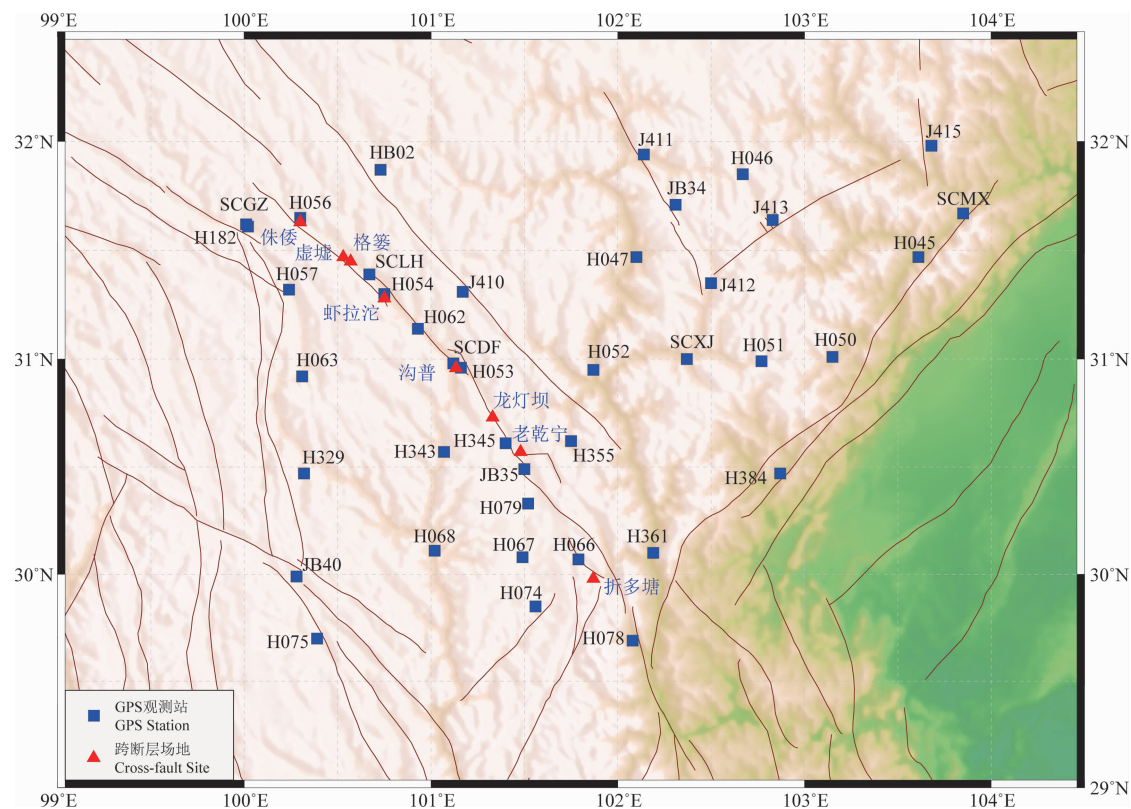


图 5 川滇地块东北缘 2013~2017 期 GPS 测站分布及跨断层场地位置

Fig. 5 The GPS stations of 2013~2017 period and location of cross-fault sites in the northeast of Sichuan-Yunnan Block

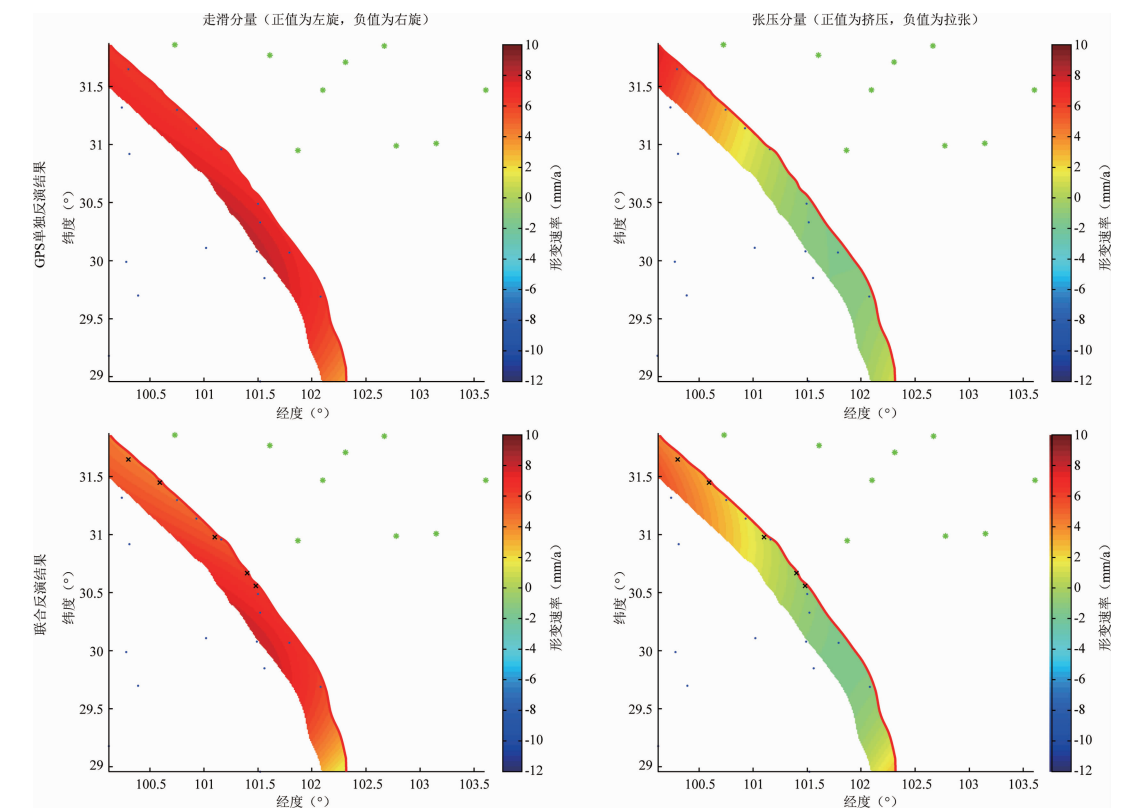


图 6 川滇地块东北缘鲜水河断裂 1999~2007 期速率反演结果

Fig. 6 The rate inversion result of the Xianshuihe Fault during 1999~2007 in the northeast of Sichuan-Yunnan Block

表 7 川滇地块东北缘鲜水河断裂带 2013~2017 期
跨断层数据处理结果

Table 7 Results of Cross-fault data processing of the
Xianshuihe Fault in the northeast of
Sichuan-Yunnan Block during 2013~2017

经度(°)	纬度(°)	张压(mm/a)	走滑(mm/a)	点名
100.59	31.45	-4.6656	2.4624	虚墟
101.88	29.99	-0.72	-0.3744	折多塘
101.48	30.56	-3.0816	-1.5984	老乾宁
100.30	31.65	3.6288	4.7952	侏倭
101.40	30.67	-2.4048	0.216	龙灯坝
101.10	30.98	7.7904	6.6816	沟普
100.44	31.17	-4.536	7.2576	虾拉沱
100.54	31.48	3.4272	-2.9664	格婆坝子

注:速率值为正表示左旋和挤压,数据不同处理方式以及数据筛选结果会导致处理结果有所出入。

利用最小二乘原理对观测方程进行求解。在解算的过程中,由于观测环境、观测方式的不同导致数据的精度不同,假设先验概率权重 $\lambda_{Z_{GPS}}:\lambda_{Z_K}$ 为 1:3。假设当前反演模型为 m 次,利用最小二乘原理对反演模型进行解算,得到系数矩阵 A 。求解观测数据在当前反演模型下的中误差,并以此为据计算贝叶斯算法中的后验概率权重,得到当前 m 次的最优反演模型,以中误差 i_m 作为精度评定值。计算比较 n 次反演模型中,选定 i_m 最小的反演模型为多元观测数据反演的最优模型,最终得出反演图像结果。

3 结果与分析

研究区内主要包含了两个块体,一个是川滇块体,另一个是巴颜喀拉块体。川滇块体具有围绕东喜马拉雅构造结顺时针旋转的特点,造成这种顺时针旋转和旋扭叠加伸展变形的最重要因素为印度板块与扬子板块之间的右旋剪切和青藏高原内部物质向东南的不均匀挤出共同产生的力偶作用和岩石圈性质结构差异(Wu Zhonghai et al., 2015);而巴颜喀拉块体则主要受到青藏高原向东挤出的作用整体呈现强烈的东向运动(Li Chong, 2014)。在此动力学背景下,从图 6 中可以看出,在汶川地震前,川滇块体的顺时针旋转速率大于巴颜喀拉块体向东/东南的运动速率,从而使得鲜水河断裂呈现显著的左旋走滑特征。并且受印度板块推挤,鲜水河断裂的北段的挤压也是明显大于南段。

另外,如图 6 所示,无论从 GPS 单独反演结果还是联合反演结果来看,鲜水河断裂呈明显的左旋走滑状态,仅西南段出现小范围的闭锁情况,而联合反演结果则显示西南段的闭锁情况更强,并且联合

反演结果表明鲜水河断裂左旋走滑速率有所减缓,这与部分跨断层场地在汶川地震前出现右旋走滑以及断层近场运动速率较慢有关(Liu Guanzhong et al., 2013)。Liu Guanzhong et al. (2013) 利用蠕变、短基线和 GPS 等数据,采用小波变换与断层运动学分析方法,对造成这种断层近场速率(0.01~2.46mm/a)远小于远场速率(6~11mm/a)的现象进行了分析,认为远场速率中不仅包含了跨断层的错动,也包含了断层两侧块体分布的变形特征,而块体并不是一个完整的刚体,其不仅包含了硬度较高的基底,还包含了易变形的沉积盖层。从张压活动来看,两种反演结果均显示鲜水河断裂北西段出现川滇块体向巴颜喀拉块体挤压的现象,而从联合反演结果可以看出,这种推挤作用在垂直于断裂方向上存在不均匀性,越靠近断层推挤运动速率越低,说明近场速率慢,远场速率快的特点;而断裂的其他部位,并不存在明显的挤压和拉张作用,可能存在一定的闭锁。

从图 7 中可以看到,汶川地震后,鲜水河断裂的左旋走滑速率明显降低,甚至在断裂南段出现一定的拉张趋势,这是因为汶川地震释放了大量的应力和应变,导致巴颜喀拉地块向四川盆地的挤压运动速率加快,巴颜喀拉块体和川滇块体的相对运动增强,从而降低了鲜水河断裂的左旋走滑速率和挤压速率。联合反演结果和 GPS 单独反演结果的区别较大,图 7 中可以看到联合反演的断裂走滑速率要大于 GPS 单独反演结果,这与汶川地震震后形变调整有关,前人研究结果表明断层近、远场的形变速率在地震前后有所差异,在震后滑动阶段,断层面相对开放,近场滑动速率较高(但仍达不到远场速率),从而使得联合反演的走滑速率较增强。另外,联合反演结果中鲜水河断裂的滑动速率分段性更加明显,断裂北段中的道孚段有一小段闭锁,其他段大部分仍为蠕滑状态。

从图 8 中可以看出,鲜水河断裂左旋走滑速率增加,仅在道孚段出现速率相对差异,两种数据结果差距不明显。鲜水河断裂挤压速率逐渐增强,仅磨西段持续拉张,联合反演结果显示磨西段拉张速率更大。综合走滑和张压活动来看,鲜水河断裂受汶川地震的影响逐渐减弱,重新恢复到原来的以走滑活动为主的运动状态,但是区别在于道孚段存在一定的速率亏损,磨西段也存在拉张现象,并且道孚段-老乾宁段的挤压速率明显超过汶川地震前的状态。另外,从图 8 中可以看到道孚段和磨西存均在

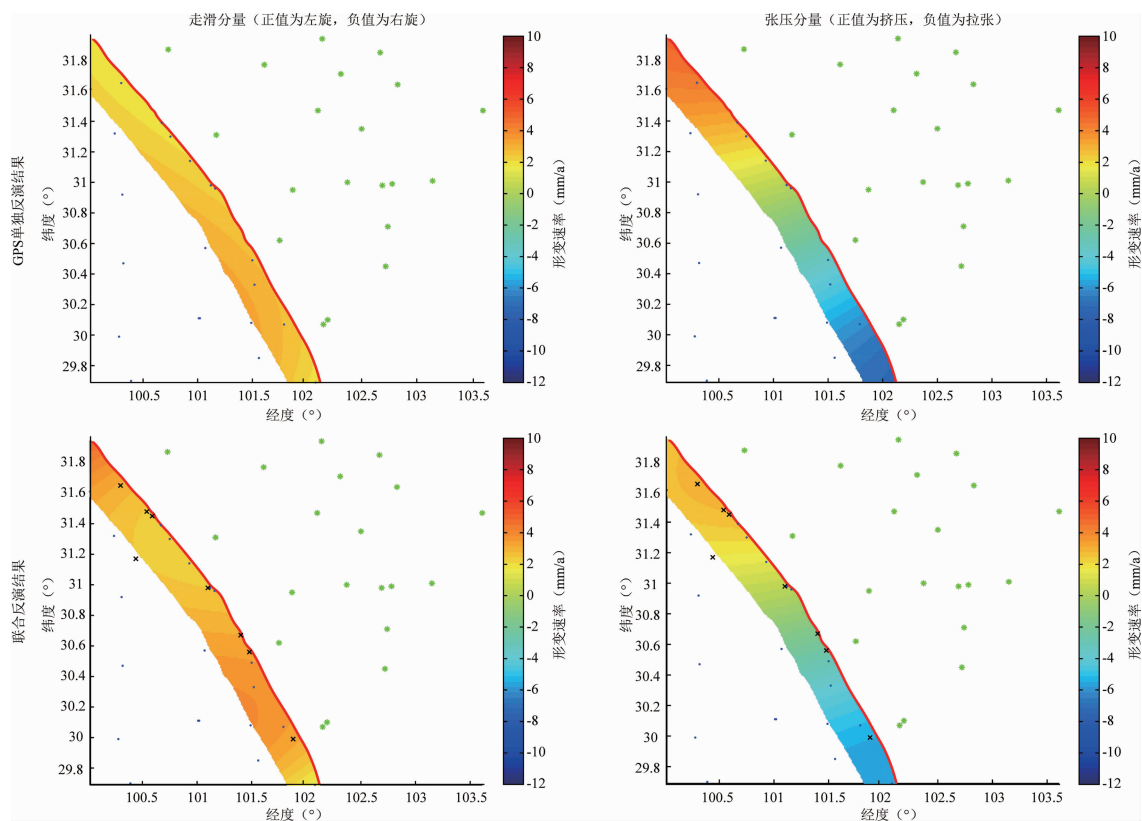


图 7 川滇地块东北缘鲜水河断裂 2009~2013 期速率反演结果

Fig. 7 The rate inversion result of the Xianshuihe Fault during 2009~2013 in the northeast of Sichuan-Yunnan Block

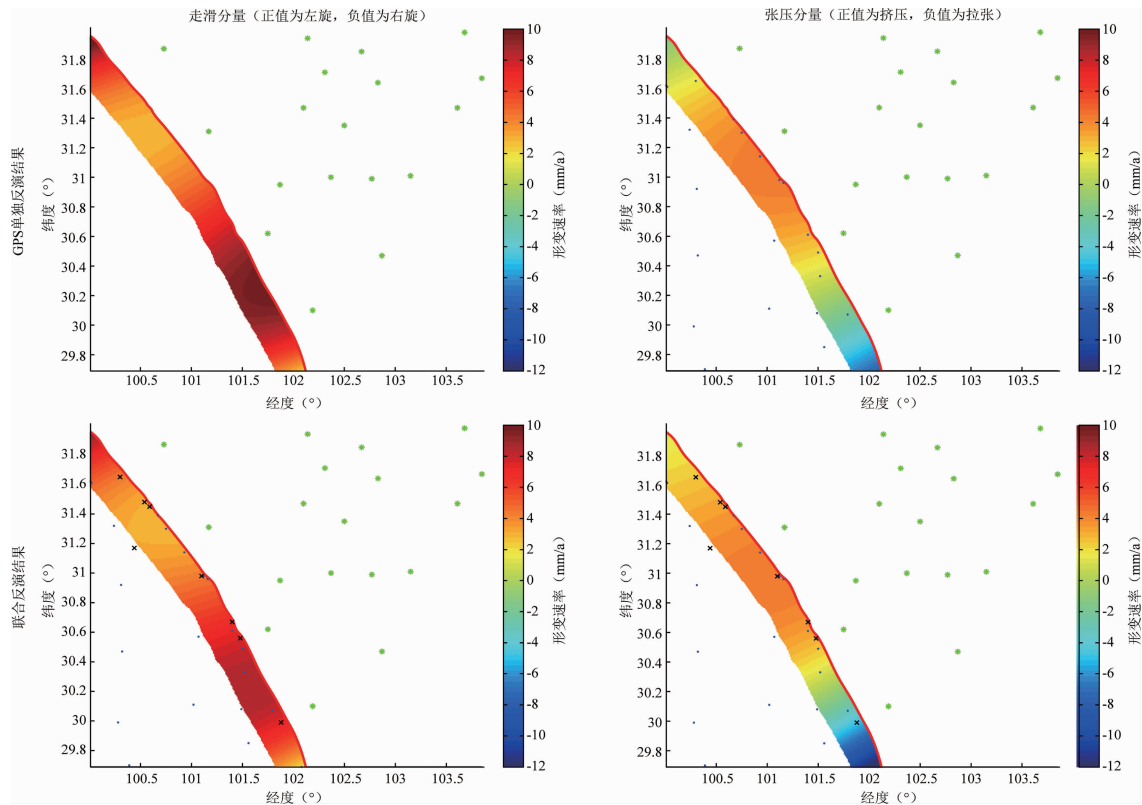


图 8 川滇地块东北缘鲜水河断裂 2013~2017 期速率反演结果

Fig. 8 The rate inversion result of the Xianshuihe Fault during 2013~2017 in the northeast of Sichuan-Yunnan Block

一定的速率亏损,因此,尽管汶川地震后鲜水河断裂的地震危险性有所减低,但还是应该注意道孚段和磨西段的地震危险性(小震),由于这两段同处于相同的断裂体系和动力学系统中,同时也需要注意这两个地区地震危险的关联性,一旦其中一个地区发生了地震,那么也许应该注意另一个地区存在更大地震发生的可能性。

综上所述,可以看到一种现象,在汶川地震前形变反演结果受远场数据影响较大(尤其是指走滑速率),反演图像中的近场速率影响并不显著(图 6),而在震后滑动或震后形变调整阶段,近场速率则对反演结果能够产生较大影响,可以明显表现出断裂速率分段特点(图 7);在震后断层滑动结束或震后形变、应力调整结束后,断层又重新恢复到远场速率占主导地位的状态(图 8)。因此,对于地震中的形变数据,可能存在某种形变旋回,对于这种“旋回”需要进一步加强多数据融合分析方面的工作。

4 讨论

通过对反演结果的分析,发现在汶川地震前,受龙门山断裂闭锁的影响,巴颜喀拉块体向东/东南的运动受到限制,而在印度板块、青藏高原推挤的作用下,川滇块体的顺时针旋转并未受到影响,进而导致鲜水河断裂持续呈左旋走滑运动。并且震前的反演结果明显受远场速率(GPS 速率)影响大,GPS 单独反演结果和联合反演结果区别不显著。在汶川地震后的断层蠕滑调整阶段,巴颜喀拉块体向四川盆地的挤压运动速率加快,从而降低了鲜水河断裂的左旋走滑速率和挤压速率。此时的联合反演结果和 GPS 单独反演结果则表现出明显差异,联合反演结果中可以看到鲜水河断裂呈现明显的速率分段特点。从 2013~2017 数据来看,鲜水河断裂的震后调整基本结束,又重新开始一次“形变旋回”,图像中的联合反演结果和 GPS 单独反演结果区别又不显著,远场速率对结果的影响重新占主导地位。但与汶川地震前的不同,鲜水河断裂的道孚段和磨西段存在一定的闭锁,可能存在地震危险性。

而针对鲜水河断裂现今地震活动性,不同学者有不同的认识,总的来说,在汶川地震后鲜水河断裂的地震危险性有所降低。Zou Zhenyu et al. (2015)通过对川滇地区 GPS 速度场分析,认为汶川地震后鲜水河断裂左旋剪切有所减弱,川滇块体南东向的挤出滑移在 2011~2013 年相对 2009~2011 年有所增强(即川滇块体的顺时针旋转作用增强)。Wu

Weiwei et al. (2017)利用震源谱对川滇活动块体主要活动断裂的现今应力状态进行了分析,认为鲜水河断裂带的地震应力降以康定为界南低北高,南段(康定-石棉)短期内难以积累较高应变,北段(甘孜-康定)应力水平较高,段落局部仍有较高的应力积累。Zhao Jing et al. (2018)利用 GPS 和跨断层水准、测距数据综合讨论了鲜水河断裂的三维运动与变形特征和地震危险性,认为鲜水河断裂 SE 段具有较强的危险性,汶川地震后该紧迫性有所减缓,但仍强于 NW 段。

综上所述,利用 1999~2007 期,2009~2013 期和 2013~2017 期中国大陆 GPS 速度场数据,采用贝叶斯反演程序,以跨断层数据为先验条件,估算了川滇菱形块体东边界(主要为鲜水河断裂)的断裂运动速率,并对比了单独的 GPS 数据反演结果以及联合反演结果。发现增加跨断层数据后,反演图像中近场和远场速率区存在一定差异,不同期次的断层活动速率变化明显,尤其在震后形变调整过程中,从而说明了本方法具有一定的效果。但是,本方法在震前效果并不明显,也就是说在长期稳定的动力学条件下,两种反演方法很难表现出不同的效果,尤其是在汶川地震前部分跨断层场地的逆向走滑特征(Liu Guanzhong et al., 2013)很难表现出来,对于地震预测预报也很难起到优势作用,另外在近场远场形变解释上也存在一定的争议,大部分学者并不认为 GPS 数据和跨断层数据可以放在相同尺度内进行分析,但是从反演效果上来看,将两者数据融合反演分析,可以更直观的反映断层在近场和远场上的速率差异。这对于后续断层动力学研究也许有着辅助作用。

5 结论

(1)汶川地震前,鲜水河断裂持续呈左旋走滑状态,地震后左旋走滑速率减弱,目前在持续恢复中。

(2)汶川地震前,鲜水河断裂炉霍段存在应力挤压现象,其余段挤压速率不显著,地震后,整体挤压速率变缓,东南段出现拉张显现,目前鲜水河断裂道孚-老乾宁段挤压速率增强,并超过震前状态。

(3)汶川地震后川滇块体的顺时针旋转运动增强,道孚段和磨西段存均在一定的走滑速率亏损,应该注意道孚段和磨西段的地震危险性,以及这两个地区地震危险的关联性。

(4)联合 GPS 数据和跨断层数据反演结果显示,跨断层数据的加入可以在一定程度上反应近场

形变特点,并可能存在“形变旋回”现象,但对于地震预测预报效果仍需要进一步研究。

致谢:由衷感谢审稿专家对本文提出的宝贵意见和建议,以及责任编辑对本文的细致审查。

References

- Chen Changyun, Ren Jinwei, Meng Guojie, Yang Panxin, Xiong Renwei, Hu Chaozong, Su Xiaoning, Su Jianfeng. 2013. Division, deformation and tectonic implication of active blocks in the eastern segment of Bayan Har block. *Chinese Journal of Geophysics*, 56(12): 4125~4141 (in Chinese with English abstract).
- Chen Yingtao. 2014. Tectonic connection and evolution between Longmenshan tectonic belt and Sichuan-Yunnan tectonic belt. Northwest University: doctoral dissertation (in Chinese with English abstract).
- Cheng Jia, Liu Jie, Gan Weijun, Yu Huaizhong, Li Gang. 2011. Characteristics of strong earthquake evolution around the eastern boundary faults of the Sichuan-Yunnan rhombic block. *Sci China Earth Sci*, 41(09): 1311~1326 (in Chinese).
- Cui Junwen, Wang Lianjie, Zou Zhangchun, Sun Dongshen, Peng Chen, Chen Weiwei, Li Zongfan. 2016. The NW-SE trending Structure Perpendicular to the Yingxiu Beichuan Faulting Zone and the Wenchuan Earthquake. *Acta Geologica Sinica*, 90(6): 1041~1061.
- Fang Ying, Zhang Jing, Jiang Zaisen, Shao Zhigang, Cao Jianling. 2015. Movement characteristics of the northwest segment of the Xianshuihe fault zone derived from cross-fault deformation data. *Chinese Journal of Geophysics*, 58(5): 1645~1653 (in Chinese with English abstract).
- Gan Weijun, Zhang Peizhen, Shen Zheng-Kang, Niu Zhijun, Wang Min, Wan Yongge, Zhou Demin, Cheng Jia. 2007. Present-day crustal motion within the Tibetan Plateau inferred from GPS measurements. *Journal of Geophysical Research*, 112 (B08416): 1~14.
- Jackson D D, Matsu M U. 1985. A Bayesian Approach to Nonlinear Inversion. *J Geophys Res*, 90(B1): 581~591.
- Jiang Zaisen, Liu Jingnan. 2010. The method in establishing strain field and velocity field of crustal movement using least squares collocation. *Chinese Journal of Geophysics*, 53(5): 1109~1117 (in Chinese with English abstract).
- Li Chong. 2014. Research on Crustal Deformation and Dynamic Mechanism in Bayan Har Block Region. Wuhan University: doctoral dissertation (in Chinese with English abstract).
- Li Tieming, Zhu Yiqing, Yang Yonglin, Xu Yunma, An Yanfen, Zhang Ying, Feng Shengtao, Huai Yanke, Yang Jiuyuan. 2019. The current slip rate of the Xianshuihe fault zone calculated using multiple observational data of crustal deformation. *Chinese Journal of Geophysics*, 62(4): 1323~1335 (in Chinese with English abstract).
- Liu Guanzhong, Ma Jin, Zhang Hongxu, Wang Jianjun, Yang Yonglin, Wang Lan. 2013. Study on activity features of Xianshuihe fault zone with fault creep and short baseline observation for the last 20 years. *Chinese Journal of Geophysics*, 56(3): 878~891 (in Chinese with English abstract).
- Meng Qingxiao, Dang Xuehui. 2018a. Research on Current Crustal Deformation in the Jiuzhaigou Area under the Constraints of GPS Results by Discontinuous Contact Model. *Journal of Seismological Research*, 41(3): 390~397 (in Chinese with English abstract).
- Meng Qingxiao, Jing Pengxu, He Shenhui, Dang Xuehui. 2018b. Research on current crustal deformation in Longxi area under the constraints of GPS results by discontinuous contact model. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 38(12): 1227~1231 (in Chinese with English abstract).
- Qian Hong, Allen C R, Luo Zhuoli, Wen Xueze, Zhou Huawei, Huang Weishi. 1988. The Active Characteristics of Xianshuihe Fault in Holocene. *Earthquake Research in China*, 4(2): 11~20 (in Chinese with English abstract).
- Qiu Jun, Wu Manlu, Fan Taoyuan, Zhang Chongyuan, Li Ran, Chen Lizhong. 2017. Comparative analysis of in situ stress state in the southwestern segment of Longmenshan fault zone before and after Lushan Earthquake. *Acta Geologica Sinica*, 91(5): 969~978.
- Tong Yabo, Yang Zhenyu, Zhang Xudong, Wu Zhonghai, Zhao Yue, Wang Heng, Xu Ying, Gao Liang, An Chunzhi. 2014. The Paleomagnetic analysis about the Later Cenozoic crustal deformation characteristics of the Chuandian Terrane clockwise rotation system in the southeast edge of Tibet Plateau. *Acta Geologica Sinica*, 88(11): 2057~2070.
- Wang Erqi, Yin Jiyun. 2009. Cenozoic multi-stage deformation occurred in southwest Sichuan: cause for the dismemberment of the proto-Sichuan basin. *Journal of Northwest University (Natural Science Edition)*, 39(03): 359~367 (in Chinese with English abstract).
- Wang Qi, Zhang Peizhen, Freymueller J T, Bilham R, Larson K M, Lai Xi'an, You Xinzhaoh, Niu Zhijun, Wu Jianchun, Li Yanxin, Liu Jingnan, Yang Zhiqiang, Chen Qizhi. 2001. Present-day crustal deformation in China constrained by global positioning system measurements. *Science*, 294: 574~577.
- Wang Shuangxu, Jiang Fengyun, Hao Ming, Zhu Liangyu. 2013. Investigation of features of present 3D crustal movement in eastern edge of Tibet plateau. *Chinese Journal of Geophysics*, 56(10): 3334~3345 (in Chinese with English abstract).
- Wen Xueze, Allen C R, Luo Zhuoli, Qian Hong, Zhou Huawei, Huang Weishi. 1989. Segmentation, geometric features, and their seismotectonic implications for the holocene Xianshuihe fault zone. *Acta Seismologica Sinica*, 11(4): 362~372 (in Chinese with English abstract).
- Wu Fuyao, Jiang Liangwen, Zhang Guangze, Song Zhang. 2019. The fault activity and seismic hazard assessment of central north segment of the Degin-Zhongdian fault, southeastern Qinhai-Tibet plateau. *Acta Geological Sinica*, 93(10): 2656~2665 (in Chinese with English abstract).
- Wu Jicang, Cheng Yongqi. 1997. Inversion of model parameters by Considering prior information: Determination of the dislocation model parameters of Lancang-Gengma earthquakes. *Crustal Deformation and Earthquake*, 17(2): 29~34 (in Chinese with English abstract).
- Wu Jicang, Cheng Yongqi, Xu Caijun. 2000. Inversion of mechanism of active faults by deformation data. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 29(S1): 53~58 (in Chinese with English abstract).
- Wu Weiwei, Wu Peng, Wei Yaling, Sun Wei. 2017. Regional characteristics of stress state of main seismic active faults in mid-northern part of Sichuan-Yunnan block. *Chinese Journal of Geophysics*, 60(5): 1735~1745 (in Chinese with English abstract).
- Wu Zhonghai, Long Changxing, Fan Taoyuan, Zhou Chunjing, Feng Hui, Yang Zhenyu, Tong Yabo. 2015. The arc rotational-shear active tectonic system on the southeastern margin of Tibetan Plateau and its dynamic characteristics and mechanism. *Geological Bulletin of China*, 34(1): 1~31 (in Chinese with English abstract).
- Xiong Tanyu, Yao Xin, Zhang Yongshuang. 2010. A review on study of activity of Xianshuihe fault zone since the holocene. *Journal of Geomechanics*, 16(2): 176~188 (in Chinese with English abstract).
- Xu Caijun, He Ping, Wen Yangmao, Yang Yonglin. 2012. Crustal deformation monitoring of Xianshuihe fault by CR-InSAR. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 37(3): 302~305 (in Chinese with English abstract).
- Xu Dongzhuo, Jiao Shoutao, Zhu Chuanbao, Sun Feifei, Guan Jian, Yin Haiquan. 2017. Regional deformation characteristics in the

- southwestern segment of Longmen Mountain fault zone before Lushan $M_{7.0}$ earthquake and possibly induced earthquake model. *Acta Geologica Sinica*, 91(10): 2175~2184.
- Xu Xiwei, Wen Xueze, Zheng Rongzhang, Ma Wentao, Song Fangmin, Yu Guihua. 2003. The latest tectonic change pattern of active blocks in the Sichuan-Yunnan region and its source of power. *Sci China Earth Sci*, S1: 151~162 (in Chinese).
- Xu Zhiqin, Yang Jingsui, Li Haibing, Ji Shaocheng, Zhang Zeming, Liu Yan. 2011. On the Tectonics of the India-Asia Collision. *Acta Geologica Sinica*, 85(01): 1~33 (in Chinese with English abstract).
- Yang Qianli, Wu Guochen. 2016. Multi-scale seismic inversion method based on Bayesian theory. *Progress in Geophysics*, 31(3): 1246~1256 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Jing, Li Kaiwu, Wu Yanqiang, Li Chunguang. 2011. Application of fault motion coordination ratio in earthquake prediction. *Earthquake*, 31(3): 19~26 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Peizhen, Shen Zhengkan, Wang Min, Gan Weijun, Bürgmann R, Molnar P, Wang Qi, Niu Zhijun, Sun Jianzhong, Wu Jianzhong, Wu Jianchun, Sun Hanrong, You Xinzhaoh. 2004. Continous deformation of the Tibetan Plateau from global positioning system data. *Gelogy*, 32(9): 809~812.
- Zhan Wei, Wu Yanqiang, Zhang Libo, Zhu Shuang, Meng Xiangang. 2014. Comparative analysis of sub-network division schemes for the GNSS continuous stations. *Earthquake*, 34(4): 136~142 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Yueqiao, Dong Shuwen, Jia Dong. 2019. A new sinistral strike-slip fault in the minshan area of northeastern Tibetan Plateau revealed by the 2017 Jiuzhaigou $M_{7.0}$ earthquake. *Acta Geologica Sinica*, 92(12): 2377~2387 (in Chinese with English abstract).
- Zhao Jing, Ren Jinwei, Jiang Zaisen, Yue Chong. 2018. Three-dimensional deformation characteristics of the Xianshuihe fault zone. *Seismology and Geology*, 40(4): 818~831 (in Chinese with English abstract).
- Zhao Yizhe, Wu Zhongliang, Jiang Changsheng, Zhu Chuanzhen. 2008. Present deep deformation along the Longmenshan fault by seismic data and implications for the tectonic context of the Wenchuan earthquake. *Acta Geologica Sinica*, 82(12): 1778~1787.
- Zou Zhenyu, Jiang Zaisen, Wu Yanqiang, Wei Wenxin, Fang Ying, Liu Xiaoxia. 2015. Dynamic characteristics of crustal movement in north-south seismic belt from GPS velocity field before and after the Wenchuan earthquake. *Chinese Journal of Geophysics*, 58(5): 1597~1609 (in Chinese with English abstract).
- ## 参 考 文 献
- 陈长云, 任金卫, 孟国杰, 杨攀新, 熊仁伟, 胡朝忠, 苏小宁, 苏建峰. 2013. 巴颜喀拉块体东部活动块体的划分、形变特征及构造意义. *地球物理学报*, 56(12): 4125~4141.
- 陈应涛. 2014. 龙门山构造带与川滇构造带交接关系与演化研究. 西北大学: 博士学位论文.
- 程佳, 刘杰, 甘卫军, 余怀忠, 李纲. 2011. 川滇菱形块体东边界各断层段强震演化特征研究. *中国科学: 地球科学*, 41(09): 1311~1326.
- 崔军文, 王连捷, 邹长春, 孙东生, 彭诚, 陈威威, 李宗凡. 2016. 映秀-北川断裂带中垂直断裂带走向的 NW SE 向构造和汶川地震. *地质学报*, 90(6): 1041~1061.
- 方颖, 张晶, 江在森, 邵志刚, 曹建玲. 2015. 用跨断层形变资料分析鲜水河断裂西北段的运动特征. *地球物理学报*, 58(5): 1645~1653.
- 江在森, 刘经南. 2010. 应用最小二乘配置建立地壳运动速度场与应变场的方法. *地球物理学报*, 53(5): 1109~1117.
- 李冲. 2014. 巴颜喀拉区域地壳形变特征及动力机制研究. 武汉大学: 博士学位论文.
- 李铁明, 祝意青, 杨永林, 徐云马, 安艳芬, 张瀛, 冯胜涛, 槐岩珂, 杨九元. 2019. 综合利用多种地壳形变观测资料计算鲜水河断裂带现今滑动速率. *地球物理学报*, 62(4): 1323~1335.
- 刘冠中, 马瑾, 张鸿旭, 王建军, 杨永林, 王兰. 2013. 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*, 56(3): 878~891.
- 孟庆筱, 党学会. 2018a. GPS 约束下九寨沟地区断裂带现今运动速率的非连续接触模拟研究. *大地测量与地球动力学*, 41(3): 390~397.
- 孟庆筱, 景鹏旭, 何申海, 党学会. 2018b. GPS 约束下陇西地区断裂带现今滑动速率的非连续接触模拟研究. *大地测量与地球动力学*, 38(12): 1227~1231.
- 钱洪, Allen C R, 罗灼礼, 闻学泽, 周华伟, 黄伟师. 1988. 全新世以来鲜水河断裂带的活动特征. *中国地震*, 4(2): 11~20.
- 邱君, 吴满路, 范桃园, 张重远, 李冉, 陈利忠. 2017. 芦山地震前后龙门山断裂带西南段地应力状态对比分析. *地质学报*, 91(5): 969~978.
- 全亚博, 杨振宇, 张旭东, 吴中海, 赵越, 王恒, 徐颖超, 高亮, 安纯志. 2014. 青藏高原东南缘晚新生代川滇地体旋扭构造体系地壳变形特征的古地磁学分析. *地质学报*, 88(11): 2057~2070.
- 王二七, 尹纪云. 2009. 川西南新生代构造作用以及四川原型盆地的破坏. *西北大学学报(自然科学版)*, 39(03): 359~367.
- 王双绪, 蒋锋云, 郝明, 朱良玉. 2013. 青藏高原东南缘现今三维地壳形变运动特征研究. *地球物理学报*, 56(10): 3334~3345.
- 闻学泽, Allen C R, 罗灼礼, 钱洪, 周华伟, 黄伟师. 1989. 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*, 11(4): 362~372.
- 吴富晓, 蒋良文, 张广泽, 宋章. 2019. 青藏高原东南缘德钦-中甸断裂中北段活动性及地震危险性评估. *地质学报*, 93(10): 2656~2665.
- 伍吉仓, 陈永奇. 1997. 顾及先验信息的模型参数反演-澜沧-耿马地震位错模型参数的求定. *地壳形变与地震*, 17(2): 29~34.
- 伍吉仓, 陈永奇, 许才军. 2000. 活断层形变数据反演. *测绘学报*, 29(S1): 53~58.
- 吴微微, 吴朋, 魏娅玲, 孙玮. 2017. 川滇活动块体中-北部主要活动断裂带现今应力状态的分区分区特征. *地球物理学报*, 60(5): 1735~1745.
- 吴中海, 龙长兴, 范桃园, 周春景, 冯卉, 杨振宇, 全亚博. 2015. 青藏高原东南缘弧形旋扭构造体系及其动力学特征与机制. *地质通报*, 34(1): 1~31.
- 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. *地质力学学报*, 16(2): 176~188.
- 许才军, 何平, 温扬茂, 杨永林. 2012. 利用 CR-InSAR 技术研究鲜水河断层地壳形变. *武汉大学学报(信息科学版)*, 37(3): 302~305.
- 徐东卓, 焦守涛, 朱传宝, 孙非非, 管见, 尹海权. 2017. 芦山 $M_{7.0}$ 地震前龙门山断裂带西南段区域形变特征分析及发震模型探讨. *地质学报*, 91(10): 2175~2184.
- 徐锡伟, 闻学泽, 郑荣章, 马文涛, 宋方敏, 于贵华. 2003. 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: 地球科学*, (S1): 151~162.
- 许志琴, 杨经绥, 李海兵, 嵇少丞, 张泽明, 刘焰. 2011. 印度-亚洲碰撞大地构造. *地质学报*, 85(01): 1~33.
- 杨千里, 吴国忱. 2016. 基于贝叶斯理论的多尺度地震反演方法. *地球物理学进展*, 31(03): 1246~1256.
- 张晶, 江在森, 方颖, 王武星. 2009. 形变综合观测对地表构造变形的定量分析. *地震*, 29(2): 32~39.
- 占伟, 武艳强, 章力博, 朱爽, 孟宪纲. 2014. 陆态网络 GNSS 连续站分区分解算方案的对比分析. *地震*, 2014, 34(4): 136~142.
- 张晶, 黎凯武, 武艳强, 李春光. 2011. 断层活动协调比在地震预测中的应用. *地震*, 31(3): 19~26.
- 张岳桥, 董树文, 贾东. 2018. 2017 年九寨沟 $M_{7.0}$ 地震揭示青藏高原东南缘岷山地区一条新的左旋走滑断裂. *地质学报*, 92(12): 2377~2387.
- 赵静, 任金卫, 江在森, 岳冲. 2018. 鲜水河断裂带三维变形特征.

地震地质, 40(4): 818~831.
赵伟喆, 吴忠良, 蒋长胜, 朱传镇. 2008. 用地震资料估计的龙门山断裂深部形变及其对于汶川地震成因的意义. 地质学报, 82(12): 1778~1787.

邹镇宇, 江在森, 武艳强, 魏文薪, 方颖, 刘晓霞. 2015. 基于 GPS 速度场变化结果研究汶川地震前后南北地震带地壳运动动态特征. 地球物理学报, 58(5): 1597~1609.

Inversion of seismic hazard of the Xianshuihe fault by cross-fault and GPS crustal deformation data

YIN Haiquan^{*1)}, GUO Xiangyun²⁾, CHANG Ming¹⁾, ZHAN Wei¹⁾, LI Layue¹⁾, XU Dongzhuo¹⁾

1) *First Crust Monitoring and Application Center, CEA, Tianjin, 300180;*

2) *China Earthquake Administration, CEA, Beijing, 100081*

** Corresponding author: 742946697@qq.com*

Abstract

In order to explore the joint inversion effect of GPS and cross-fault crustal deformation data, this paper takes the Xianshuihe fault as the research object. The study analyzed and contrasted the difference between joint inversion result and GPS inversion result and the deformation characteristics and seismic hazard of the Xianshuihe fault zone. The horizontal velocity data of GPS in China from 1999~2007, 2009~2013 and 2013~2017 were used, and the Bayesian inversion procedure was applied to estimate the movement rate of the Xianshuihe fault by using the cross-fault data as a priori condition. We compared individual GPS data inversion results with joint inversion results. It was found that the difference between near-field and far-field rates in the inversion image is more significant after the cross-fault data is added. The rate of fault activity varies significantly in different periods, especially during the deformation adjustment process after the Wenchuan earthquake. However, the effect of this method for pre-seismic is not obvious, especially the reverse strike-slip characteristics of part of cross-fault sites before the Wenchuan earthquake are difficult to show, and it is difficult to play a dominant role in earthquake prediction. But in general the analysis of fusion inversion analysis can be more intuitive to reflect the difference in velocity between the fault in the near and far fields. Finally, according to the above research method, after the Wenchuan earthquake, the left-lateral strike-slip rate has basically recovered to the pre-earthquake state by years of stress adjustment, and the southern section of the Xianshuihe fault continues to stretch. The clockwise rotation of the Sichuan-Yunnan block continues to strengthen. In addition, the Daofu section and the Moxi section of the Xianshuihe fault are at a certain slip-rate loss. It is necessary to pay attention to the seismic hazard and the correlation of earthquake risk in these two areas.

Key words: The Xianshuihe Fault; cross-fault; GPS; data fusion; fault activity