

林向东, 徐平, 葛洪魁, 武敏捷, 武安绪. 2011. 小江断裂中段及其邻近地区应力场时间变化分析. 地震学报, 33(6): 755-762.

Lin Xiangdong, Xu Ping, Ge Hongkui, Wu Minjie, Wu Anxu. 2011. Possible crustal stress change in middle section of Xiaojiang fault and its adjacent area. *Acta Seismologica Sinica*, 33(6): 755-762.

小江断裂中段及其邻近地区应力场 时间变化分析^{*}

林向东^{1,2),*} 徐 平²⁾ 葛洪魁¹⁾ 武敏捷²⁾ 武安绪²⁾

1) 中国北京 100081 中国地震局地球物理研究所

2) 中国北京 100080 北京市地震局

摘要 研究地壳构造应力状态及其时空分布特征,特别是应力变化的信息,是探讨地震成因、分析发震条件的重要有效途径之一.本文利用 1998 年 1 月至 2009 年 1 月以来小江断裂中段及其邻近区 $M_L \geq 2.5$ 的共计 740 个震源机制解,基于小江断裂中段及其邻近地区地质构造背景,对研究区进行了分区;以该区域内较大地震为界,结合余震时间序列特征,进行时间上的分段;去除较大地震后,采用最长距离聚类分析方法对各分区的地震进行了分类.在此基础上,利用 Gephart 的应力张量反演方法,根据震源机制解资料反演出了各分区的优势应力场.结果表明,在观测时段内,根据构造和震源机制,可将研究区域分为 A 和 B 两个区域. A 区最大主应力 σ_1 方位在 4 个时段内大致为 NNW 向, B 区北部在 4 个时段内 σ_1 方位大致为 NNW 向、WNW 和 ENE 向.从应力结构看, A 区和 B 区北部应力以水平作用为主. B 区南部 σ_1 方位大致为 NNW 向,仍以水平作用为主; B 区北部 σ_1 方位变化较大,可能与 B 区北部地质结构复杂、应力调整活跃有关.而 A 区主应力方位相对稳定,显示了滇中块体的稳定性.

关键词 小江断裂中段 震源机制解 应力场变化

doi:10.3969/j.issn.0253-3782.2011.06.006

中图分类号: P315.72⁺7

文献标识码: A

Possible crustal stress change in middle section of Xiaojiang fault and its adjacent area

Lin Xiangdong^{1,2),*} Xu Ping²⁾ Ge Hongkui¹⁾ Wu Minjie²⁾ Wu Anxu²⁾

1) Institute of Geophysics, China Earthquake Administration, Beijing 100081, China

2) Earthquake Administration of Beijing Municipality, Beijing 100080, China

Abstract: The study on temporal and spatial crustal stress change is important for exploring earthquake origin and seismogenic condition. Based on 740 focal mechanism solutions of $M_L \geq 2.5$ earthquakes occurred during Jan. 1998 to Jan. 2009 in middle Xiaojiang fault and its adjacent area, the studied region was divided into sub-regions, and temporally further divided into phases with the larger earthquakes as boundary of the sub-regions. After removal of the larger

^{*} 基金项目 “十一五”国家科技支撑项目“构造变形动力过程的野外观测与物理解释(2006BAC01B03-03-01)”资助.
中国地震局地球物理研究所论著 11AC1017.

收稿日期 2010-09-29 收到初稿, 2011-10-11 决定采用修改稿.

⁺ 通讯作者 e-mail: lxdongd@163.com

earthquakes this paper inverted the focal mechanism data with the method of Gephart for the stress in main phase of each sub-region. The result indicates that the azimuth of maximum principal stress σ_1 in 4 temporal phases of the sub-region A is approximately NNW-SSE, and in northern part of sub-region B are approximately NNW-SSE, WNW-ESE and ENE-WSW. The azimuth of σ_1 in southern part of sub-region B is approximately NNW-SSE. The azimuth of σ_1 in northern part of sub-region B changed significantly, while the azimuth of σ_1 in sub-region A is relatively stable. This result may be related to the complicated structure and possible stress adjusting in northern sub-region B. The σ_1 directions in sub-region A may indicate seismically relative stability of the central Yunnan crustal block.

Key words: middle section of Xiaojiang fault; focal mechanism; stress change

引言

一个地区的构造应力场不是一成不变的,构造应力的变化与集中是孕震的关键.汶川 $M_s 8.0$ 地震发生在一个意想不到的地方,给我们敲响了警钟:我们研究应力场的时候也应该关注其随时间的变化(Chen *et al.*, 2008).研究地壳构造应力状态及其时空分布特征,特别是应力变化的信息,是探讨地震成因,分析发震条件的重要有效途径之一.虽然现今构造应力场的研究已经取得了许多重要成果,但是在构造应力场随时间变化的监测与分析方面,研究成果较少.

小江断裂地处川滇地区,是南北带上著名的活动断裂带.小江断裂及其邻近地区构造很复杂,应力调整也比较激烈,历史上曾发生多次大地震,认清该区域的构造应力在空间和时间上的变化具有重要的意义.在小江断裂及其邻近地区的应力场研究方面,已经取得了重要的研究成果.例如,阚荣举等(1977, 1980)、李坪和汪良谋(1975)依据强震震源机制解和地震地表破裂带资料提出了“川滇菱形块体”向 SSE 相对移动的结论.许忠淮等(1987)依据多次小震数据分析了川滇地区地壳应力场的方向特征.程万正等(2003)提出川滇地块间运动的不均匀性,并得出滇中地块的运动优势方向为 SSE.谢富仁等(2001)利用断层滑动资料反演构造应力张量的方法,获得滇西南地区现代构造应力场.崔效锋等(2006)讨论了川滇地区现代构造应力场分区及动力学意义.王绍晋等(2005)利用强震震源机制资料,对昆明及附近地区现代构造应力场的空间分布、地震震源破裂特征进行了分析,认为昆明地区现代构造应力场以水平作用为主,主压应力优势方位为 SSE-SE,主张应力优势方位为 NE-ENE.上述研究得到了有关小江断裂及其邻近地区的大地构造和应力场空间分布的重要信息,但在应力场的时间变化上的探索较少.

本文利用云南省数字地震台网记录到的 740 次地震事件,基于震源机制解和地质构造,从时间尺度上反演了研究区的应力场变化情况,并讨论了汶川 $M_s 8.0$ 地震对该区的构造应力场变化的影响.

1 资料选取及研究方法

本文利用林向东(2009)测定的 1998 年 1 月至 2009 年 1 月以来小江断裂中段及其邻区 (24.54°N — 27.82°N ; 101.148°E — 104.036°E) $M_L \geq 2.5$ (图 1) 的共计 740 个震源机制解结

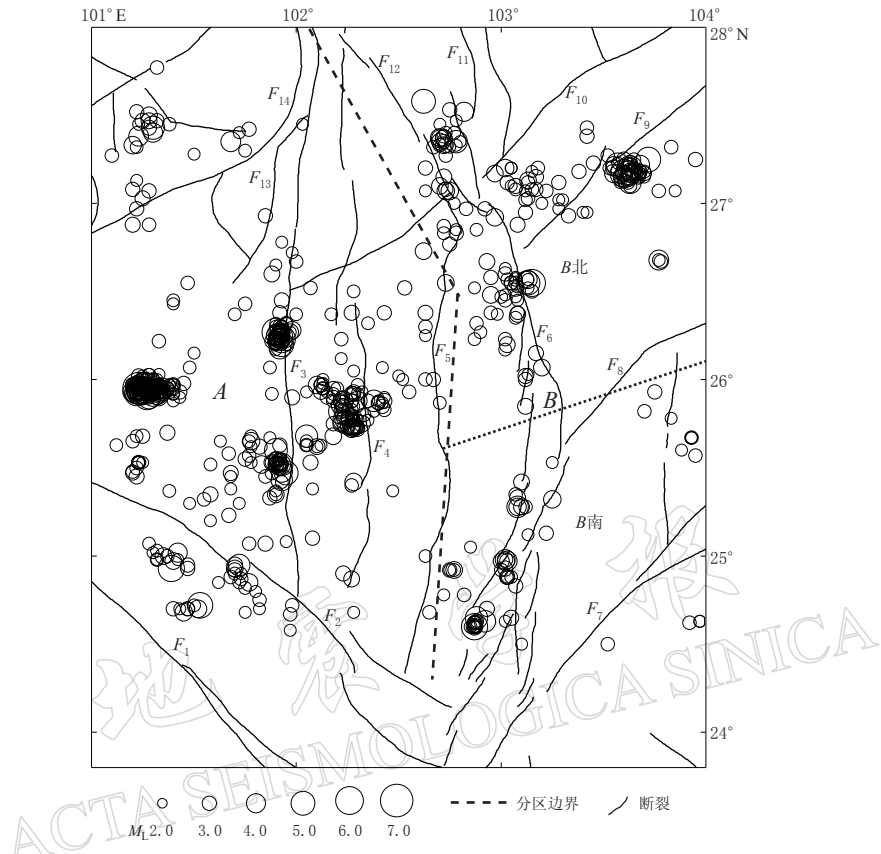


图 1 小江断裂中段及其邻近区 1998 年 1 月至 2009 年 1 月所选地震震中分布及分区

F_1 : 红河断裂; F_2 : 楚雄—建水断裂; F_3 : 元谋断裂(又称绿汁江断裂); F_4 : 罗次断裂;
 F_5 : 普渡河断裂; F_6 : 小江断裂(分东西支断裂); F_7 : 文山断裂(又称弥勒—师宗断裂);
 F_8 : 寻甸—来宾铺断裂; F_9 : 巧家断裂; F_{10} : 连峰断裂; F_{11} : 鲜水河断裂;
 F_{12} : 则木河断裂; F_{13} : 盐源断裂; F_{14} : 马头山断裂(邓起东, 2007)

Fig. 1 Selected earthquake's epicenter distribution during Jan. 1998 to Jan. 2009 and sub-region division in middle Xiaolang fault area and its vicinity

F_1 through F_{14} denote faults (after Deng Qidong, 2007)

果进行了应力场变化研究. 在此研究中, 震源机制解的计算采用垂直向 P 波与 SV 波振幅比(梁尚鸿等, 1984; 刁桂苓等, 1993)的方法, 以广义透射系数的快速算法, 计算合成地震图得到各自最大振幅, 并通过其垂直向最大振幅比值与观测资料拟合, 反演出震源机制解, 再结合 P 波初动方向分布选择最佳解. 在震源机制分类时采用最长距离聚类的方法(刁桂苓等, 1992). 该方法将大量震源机制以各自的空间取向划分出不同的类, 并研究它们之间的亲疏程度. 其原理是将各自样本自成一类, 然后将距离最小的两类合并, 再将距离最近的两类合并, 直到把所有样本全归为一类. 在计算应力场时采用震源机制应力场反演方法: FMSI (focal mechanism stress inversion)(Gephart, 1990), 该方法用断层滑动方向与最大剪应力方向间的残差最小, 即辅助轴的最小转动值使得断层面解与理论计算的断层面解最接近时, 获得最优应力模型, 得到主应力方向. 其基本假定是: ① 在一定时空范围内, 研究区内的应力场是均匀的; ② 断层滑动方向与断层面上最大剪应力方向一致.

应力是对称的二阶张量,有 6 个独立的参数,由于只有偏应力张量才能产生剪应力,因此,在只考虑构造应力张量的偏应力张量(对角线和为零)和人为规定八面体剪应力大小的情况下,断层面的剪应力方向只依赖于 4 个参量,即 3 个主应力方向和 1 个应力比 R (指中间主应力相对大小,令 $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ 分别为最大、中间和最小主应力,取压应力为正, $R=(\sigma_2-\sigma_1)/(\sigma_3-\sigma_1)$),上述 4 个应力参数的任何一种组合都可作为一个应力模型,与观测数据拟合最好的模型则为最优模型.

为了系统地研究小江断裂及其邻近地区应力的时间变化特征,我们首先将研究区进行空间分区.根据研究区地质构造上主要包括以小江断裂为界的滇中块体和滇东块体,本文以小江断裂为界,将小江断裂中段及其邻区分为 A 和 B(包含小江断裂带)两个区(林向东, 2009; 林向东等, 2010).同时为了研究应力场在中强地震前后的变化,我们在空间分区的基础上,以该区域内较大地震为界并去除较大地震的情况下,结合余震时间序列特征,进行了时间上的分段(表 1—表 3),计算时去除较大地震是为了消除它们本身对地震前后时段应力场反演结果的影响.在去除 2003 年 7 月 4 日大姚 $M_L6.7$ 和 2003 年 10 月 16 日大姚 $M_L6.2$ 地震的情况下,将 A 区分为 4 个时间段,分别为大姚 $M_L6.7$ 地震前、大姚两次地震之间、余震密集和余震衰减 4 个阶段.由于 B 区在时间分布上,北部地震比较集中,而在南部地震较少,根据地震分布将 B 区分为北部和南部两个子分区进行分析.在去除 2003 年 11 月 15 日鲁甸 $M_L5.4$, 2004 年 8 月 10 日鲁甸 $M_L5.9$ 和 2005 年 8 月 5 日会泽 $M_L5.7$ 地震的情况下,将 B 区北部进行时间分段:分为鲁甸 $M_L5.4$ 地震前、鲁甸 $M_L5.9$ 地震之前、会泽 $M_L5.7$ 地震之前和会泽 $M_L5.7$ 地震之后;在 B 区南部,由于地震较少,在时间尺度上无法进行分段,所以本文对该区域的所有地震进行集中分类.

表 1 A 区时间分段表(目录挑选时去除了大姚两次 6 级以上主震)

Table 1 Temporal phase division of sub-region A

序号	分段名称	时间段	震源机制解个数
1	大姚 $M_L6.7$ 地震之前	1998-01—2003-07-21	126
2	大姚两次地震间	2003-07-21—2003-10-16	55
3	余震密集	2003-10-16—2005-12-31	189
4	余震衰减	2006-01-01—2009-01-30	133

表 2 B 区北部时间分段表(目录挑选时去除了 3 次 5.4 级以上地震)

Table 2 Temporal phase division of northern sub-region B (with 3 $M_L\geq 5.4$ earthquakes removed)

序号	分段名称	时间段	震源机制解个数
1	鲁甸 $M_L5.4$ 地震前	2000-01-01—2003-11-15	26
2	鲁甸 $M_L5.9$ 地震前	2003-11-15—2004-08-10	29
3	会泽 $M_L5.7$ 地震前	2004-08-10—2005-08-05	29
4	会泽 $M_L5.7$ 地震后	2005-08-05—2009-01-30	84

表 3 B 区南部地震目录

Table 3 Earthquake catalog for southern sub-region B

序号	分段名称	时间段	震源机制解个数
1	B 区南部	2000-01-01—2009-01-30	64

进行应力场反演时，为了保证其计算结果的可信度，要求震源机制资料 P 和 T 轴要有较好的一致性。计算时通常将一些与 P 和 T 轴总体优势方向相矛盾的数据略去，不参与反演。通过对所有震源机制解进行聚类，可以将震源机制分成一致性较好的几个类别，能较好地避免矛盾地震参与反演引起误差的问题。

本文利用最长距离聚类分析方法(刁桂苓等, 1992)，对 A 区和 B 区北部各个时间段的地震进行了分类，同时对 B 区南部所有地震也进行了聚类分析(表 4)。结果表明， A 区和 B 区分类最多为 5 类，最少为 2 类。我们将震源机制解个数最多的一类视为主类。 A 区 1—4 时段主类震源机制解个数分别为 76, 48, 137, 58； B 区北部 1—4 时段主类震源机制解个数分别为 17, 17, 12, 45； B 区南部的主类震源机制解个数为 44 个。

表 4 聚类分析结果
Table 4 Cluster analysis result

分区	序号	震源机制解个数				
		a	b	c	d	e
A 区时间分段	1	10	76	26	10	4
	2	48	2	5		
	3	137	10	12	24	6
	4	58	14	28	33	
B 区北部时间分段	1	17	9			
	2	17	12			
	3	6	8	12	3	
	4	20	6	45	5	8
B 区南部时间分段	1	20	44			

注：表中 a, b, c, d, e 表示类别。

2 反演结果

在应力反演过程中，本文选取各分区震源机制聚类结果的主类进行应力场反演。 A 区 1, 2, 3 和 B 区北 1 时段，以及 B 区南的主类事件的比率超过了 60%；而 A 区 4 和 B 区北 2, 3, 4 时段主类事件并没有达到 60%，表明这些时段震源机制的特性比较复杂。从某种意义上说，通过聚类主类反演出的应力场只能代表该区的优势应力场，而不是总的应力场，该问题将在下一节讨论。

利用主类震源机制进行应力反演结果表明(表 5，图 2)，各个时段和分区的误差都控制在 10° 以内，误差范围在 2.9° — 8.3° 之间，说明结果的可信度比较高。

A 区. 在大姚 $M_L6.7$ 地震前、大姚两次地震之间、余震密集、余震衰减 4 个时间段主压应力倾角在 12° — 21° 之间变化， R 值在 0.35—0.65 之间变化，应力场作用方式在 4 个时段中主要以水平作用为主。

B 区北部. 在鲁甸 $M_L5.4$ 地震、 $M_L5.9$ 地震、会泽 $M_L5.7$ 地震前后时段之间，主压应力倾角在 7° — 14° 之间变化， R 值在 0.45—0.50 之间变化，应力场作用方式在 4 个时段均以水平作用为主。

B 区南部. 主压应力倾角为 24° ， R 值为 0.40，应力场作用方式仍以水平为主。

鉴于在 B 区北部的第 2 时段主类 a 与辅类 b 震源机制解数据个数基本相当，分别为 17 和 12 个，我们在利用主类进行应力场反演的同时，也用了 b 类进行反演(表 5 中序号 2b，

图 2). 结果表明, 主压应力倾角为 35° , 但其方位与主类反演结果(表 5 中序号 2a, 图 2)相比相差 77° . 这一现象表明了该区应力的复杂性且仍以水平作用为主.

总体来说, 在时间上, A 区的应力场在两次大地震前后主压应力方位与空间反演的滇中块体的主压应力场基本一致. 而 B 区北部震源机制解特性复杂, 由聚类主类反演得到优

表 5 小江断裂中段及其邻近地区各分区时间域应力场反演结果

Table 5 Temporal stress variation in each sub-region of the studied region

分区	序号	σ_1		σ_2		σ_3		R	残差/ $^{\circ}$
		倾角/ $^{\circ}$	方位/ $^{\circ}$	倾角/ $^{\circ}$	方位/ $^{\circ}$	倾角/ $^{\circ}$	方位/ $^{\circ}$		
A 区	1	21	147	69	333	2	238	0.65	7.4
	2	18	166	71	330	5	74	0.60	6.2
	3	13	160	72	296	12	67	0.50	4.9
	4	12	330	70	94	16	236	0.35	5.9
B 区 北部	1	14	122	49	229	37	21	0.50	3.2
	2a	12	264	56	155	31	1	0.05	7.8
	2b	35	187	50	333	17	84	0.80	2.0
	3	9	144	53	42	35	240	0.45	3.0
	4	7	162	80	25	6	253	0.40	8.3
B 区南部		24	332	65	139	5	240	0.40	5.6

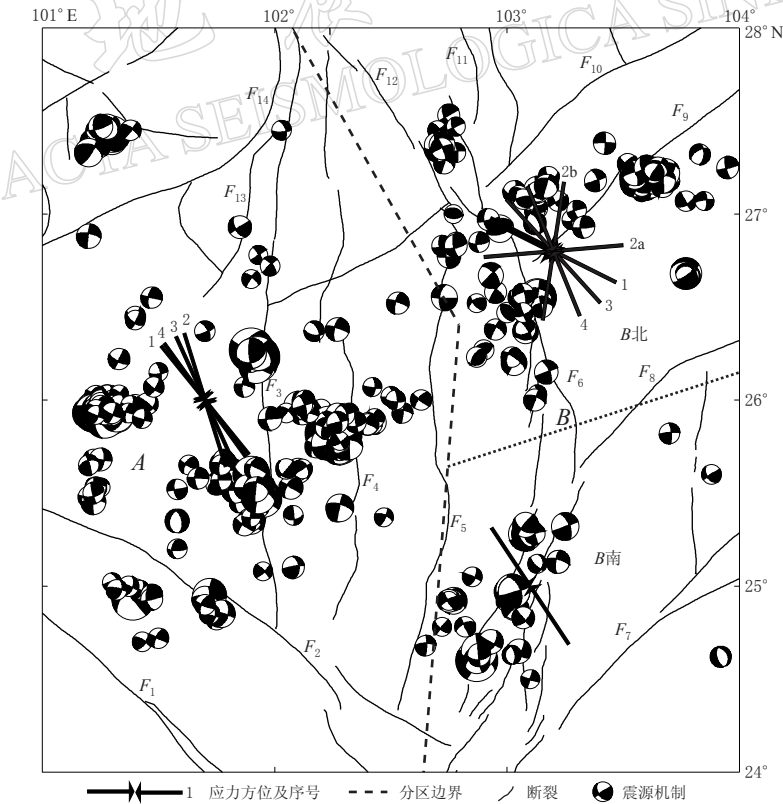


图 2 小江断裂中段及其邻近地区各分区时间域应力场反演结果及聚类主类震源机制分布(图中断裂名称同图 1)

Fig. 2 Temporal stress variation in each sub-region of the study region (the fault name see in Fig. 1)

势应力场的主压应力方位在鲁甸 $M_L 5.9$ 地震前相对 $M_L 5.4$ 地震前的应力场方位改变了 142° , 而在鲁甸 $M_L 5.9$ 地震后会泽 $M_L 5.7$ 地震前主压应力偏转较大, 方位改变了 120° , 而会泽地震后主压应力方位又偏转了 22° ; B 区南部地震数目少, 主压应力方位为 332° .

在应力场的反演过程中, 震源机制解的可靠性是一个不可忽视的问题, 本文中所用震源机制资料由梁尚鸿等(1984)提出的最大振幅比方法解出, 基于 P 波初动方向测定震源机制解的格点尝试法(许忠淮等, 1983)所给出的解空间比其它方法要好, 胡新亮等(2004)比较了由格点尝试法和直达 P 波和 S 波垂直向振幅比方法分别测定了 2 个首都圈 4 级地震的震源机制解, 二者基本一致. 刁桂苓等(1993)对梁尚鸿等(1984)的方法进行了完善, 编写了新的选解程序, 使得更好地结合 P 波初动方向来选择最优解. 鉴于中小地震的随机性, 反演方法上的局限, 以及地震分布的不均匀性, 本文应力场时间尺度上的变化精度不是非常高, 但是反演结果能反映出研究区时间上的应力的局部变化. 在 B 区北各个时段应力场反演结果变化相对较大. 特别是在 B 区 2 时段, 2a 和 2b 两类地震空间分布在大致相同的地点, 根据两类地震反演应力场结果的不同, 表明了应力场可能有变化. 将 B 区南部与北部比较可以看出, 小江断裂南部构造活动性相对北部较弱.

3 讨论与结论

通过在空间分区的基础上分时间段进行的应力反演结果表明, 小江断裂及其邻近地区主压应力方位主要为 NNW 向, 与崔效锋等(2006)、王绍晋等(2005)和 Lin 等(2011)的计算结果有一致性, 说明本研究结果是合理性的. 在 A 区, 滇中块体内两次中强地震前后应力场在时间上主压应力场方位变化都不大; 而在 B 区北部, 优势应力场的主压应力场方位可能随时间变化, 而且该区域震源机制特性复杂, 显示了 B 区北部应力调整明显, 而滇中块体则相对稳定. B 区南部地震活动相对较少, 也表明了小江断裂南部构造活动比北部弱.

在本研究中, 在时间段分区上, 聚类分析结果的主类数据除了 A 区 1, 2, 3 和 B 区北部 1 时段, 以及 B 区南部主类事件的比率超过了 60%; 而 A 区 4 和 B 区北 2, 3, 4 时段主类事件并没有达到 60%. 主类数据大于 60% 基本代表了各个分区各时段的主应力场. 对于主类数据占总数比率小于 60% 的区域, 从另一个方面显示了这些区域震源机制解的复杂多样性, 反映了该区应力调整明显. 应力场的反演结果并不能代表总的应力场, 但鉴于主类事件在数量上的优势, 反演结果可以视为该区的优势应力场. 根据 Oppenheimer(1990)、Hauksson 等(1995)、以及 Dreger 和 Savege (1999)等人的研究, 在大地震发生后, 观测到了余震的震源机制的复杂性及多样性, Castillo 和 Zoback (1995)认为这个现象是主震引起的应力释放几乎达到了完全释放的证据, 并且说明了该区域内的断层的摩擦强度较小. 在小江断裂带区, 地质构造复杂、地震活动强烈, 小震呈现的多样性, 可能是地质构造复杂性和由中强震引起的应力释放比较充分的综合反映.

另一有意义的问题是, 本文研究的数据刚好覆盖了 2008 年 5 月 12 日汶川 $M_s 8.0$ 大地震前、后的时段. 汶川地震后, 研究区并没有呈现显著的地震活跃性, 各分区主压应力方位在包含汶川地震时段并没有显著的调整. 受震源机制计算应力场的分辨率的影响, 从震源机制方面还不能够明确地判定汶川地震对小江断裂及邻近地区的影响及其大小.

河北省地震局刁桂苓研究员为本研究提供了计算震源机制解的程序, 中国地震局地球

物理研究所许忠淮研究员及几位评审专家对本文提出了修改意见和建议, 在此一并表示感谢。

参 考 文 献

- 程万正, 刁桂苓, 吕弋培, 张永久, 李桂芳, 陈天长. 2003. 川滇地块的震源力学机制、运动速率和活动方式[J]. 地震地质, **25**(1): 71-87.
- 崔效锋, 谢富仁, 张红艳. 2006. 川滇地区现代构造应力场分区及动力学意义[J]. 地震学报, **28**(5): 451-461.
- 刁桂苓, 于利民, 李钦祖. 1992. 震源机制解的系统聚类分析: 以海城地震序列为例[J]. 中国地震, **8**(3): 86-92.
- 刁桂苓, 于利民, 宁杰远, 孙佩卿, 张子广. 1993. 1989 年大同震群的体破裂特征[J]. 地球物理学报, **36**(3): 360-368.
- 邓起东. 2007. 中国活动构造图(1: 400 万)[M]. 北京: 地震出版社: 1.
- 阚荣举, 张四昌, 晏凤桐. 1977. 我国西南地区现代构造应力场与现代构造活动特征的探讨[J]. 地球物理学报, **20**(2): 96-109.
- 阚荣举. 1980. 西南地区现代构造应力场与板内强震活动[J]. 地震研究, **3**(3): 45-59.
- 胡新亮, 刁桂苓, 马瑾, 李雪英, 高景春, 王勤彩. 2004. 利用数字地震记录的 \bar{P} , \bar{S} 振幅比资料测定小震震源机制解的可靠性分析[J]. 地震地质, **26**(2): 347-352.
- 李坪, 汪良谋. 1975. 云南川西地区地震地质基本特征的探讨[J]. 地质科学, (4): 308-325.
- 梁尚鸿, 李幼铭, 束沛镛, 朱碇定. 1984. 利用区域地震台网 P 、 S 振幅比资料测定小震震源参数[J]. 地球物理学报, **27**(3): 249-257.
- 林向东. 2009. 小江断裂中段及其邻近地区震源机制解与构造应力场分析[D]. 兰州: 中国地震局兰州地震研究所: 37-38.
- 林向东, 徐平, 武敏捷, 武安绪. 2010. 小江断裂中段及邻区构造应力场分布特征[J]. 中国地震, **26**(2): 192-200.
- 王绍晋, 龙晓帆, 余庆坤. 2005. 昆明地区现代构造应力场分析[J]. 地震研究, **28**(2): 178-184.
- 许忠淮, 阎明, 赵仲和. 1983. 由多个小地震推断的华北地区构造应力场的方向[J]. 地震学报, **5**(3): 268-279.
- 许忠淮, 汪素云, 黄雨蕊, 高阿甲, 金小锋, 常向东. 1987. 由多个小震推断的青甘和川滇地区地壳应力场的方向特征[J]. 地球物理学报, **30**(5): 476-486.
- 谢富仁, 苏刚, 崔效锋. 2001. 滇西南地区现代构造应力场分析[J]. 地震学报, **23**(1): 17-23.
- Chen Y, Li L, Li J, Li G. 2008. Wenchuan earthquake: Way of thinking is changed[J]. *Episodes*, **31**: 374-377.
- Castillo, D A, Zoback M D. 1995. Systematic stress variations in the southern San Joaquin Valley and along the White Wolf Fault: Implications for the rupture mechanics of the 1952 $M_s 7.8$ Kern County earthquake and contemporary Seismicity[J]. *J Geophys Res*, **100**: 6249-6264.
- Dreger D, Savage B. 1999. Aftershocks of the 1952 Kern County, California, earthquake sequence[J]. *Bull Seism Soc Amer*, **89**(4): 1094-1108.
- Gephart J W. 1990. FMSI: A Fortran program for inverting fault/slickenside and earthquake focal mechanism data to obtain the regional stress tensor[J]. *Computer & Geoscience*, **16**(7): 953-989.
- Hauksson E, Jones L M, Hutton K. 1995. The 1994 Northridge earthquake sequence in California: Seismological and tectonic aspects[J]. *J Geophys Res*, **100**: 12335-12355.
- Lin X D, Xu P, Wu M J, Wu A X. 2011. Inversion of stress fields in the middle section of the Xiaojiang fault and its adjacent area[J]. *Earthquake Research in China*, **25**(1): 82-91.
- Oppenheimer D H. 1990. Aftershock slip behavior of the 1989 Loma Prieta, California, earthquake[J]. *Geophy Resh Lett*, **17**(8): 1199-1202.