

周文敏,万永革,张建国,等.云南禄劝地震震源处的应力场求解[J].地震工程学报,2017,39(2):0262-0267.doi:10.3969/j.issn.1000-0844.2017.02.0262

ZHOU Wen-min, WANG Yong-ge, ZHANG Jian-guo, et al. Stress Field Calculations of Hypocenter in Yunnan Luquan Earthquake[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2017, 39(2): 0262-0267. doi:10.3969/j.issn.1000-0844.2017.02.0262

## 云南禄劝地震震源处的应力场求解<sup>①</sup>

周文敏<sup>1</sup>, 万永革<sup>2</sup>, 张建国<sup>3</sup>, 郭威<sup>1</sup>, 高冰莹<sup>4</sup>

(1. 云南大学, 云南 昆明 650500; 2. 防灾科技学院, 河北 廊坊 065201;

3. 云南省地震局, 云南 昆明 650224; 4. 天津市地震局, 天津 300201)

**摘要:**采用前人反演得到的云南禄劝地震的地震矩张量和主震及部分余震的震源机制解,以该主震震中为中心在全球CMT目录中查询到的部分地震的震源机制解,先将地震矩张量转化为震源机制解,运用精细网格搜索反演方法将震源机制解反演得到禄劝地震和其周边地区的应力场。对反演得出的两个应力场进行差异性对比研究,结果表明禄劝地震震源处主压应力场为NNW—SSE向,主压应力与主张应力相当,周边地区的主压应力方向为NW—SE,断层破裂面倾角大,以走滑正断层为主,主压应力占优势。但是由于云南地区主要由NNW—SSE和NW—SE方向的主压应力控制,并受本文所选的周边地区的经纬度及所处地区的控制,所以该区域在总体上受NW—SE方向的压应力控制,局部地区受NNW—SSE方向的压应力控制。该结果可以用来分析该地区的地震地质背景和断层形成条件,对地球动力环境的研究有一定的意义。

**关键词:**禄劝地震; 余震; 震源机制; 应力场

中图分类号:P315

文献标志码:A

文章编号: 1000-0844(2017)02-0262-06

DOI:10.3969/j.issn.1000-0844.2017.02.0262

## Stress Field Calculations of Hypocenter in Yunnan Luquan Earthquake

ZHOU Wen-min<sup>1</sup>, WANG Yong-ge<sup>2</sup>, ZHANG Jian-guo<sup>3</sup>, GUO Wei<sup>1</sup>, GAO Bing-ying<sup>4</sup>

(1. Yunnan University, Kunming 650500, Yunnan, China;

2. Institute of Disaster Prevention, Langfang 065201, Hebei, China;

3. Earthquake Administration of Yunnan Province, Kunming 650224, Yunnan, China;

4. Earthquake Administration of Tianjin Municipality, Tianjin 300201, China)

**Abstract:** There is a complicated stress state in Yunnan and the main research object in this paper is the Luquan seismic zone. The Luquan seismic belt is located in the Xiaojiang fault zone in the southern section of the North-South Seismic Belt within China's borders. The complexity of the stress field of the Luquan seismic zone gives it great research value as the focal-mechanism solution in the area contains a great amount of information about the focus of earthquakes. In this paper, we use the seismic moment tensor of the Yunnan Luquan earthquake and the focal mechanism solution of its main shock and aftershocks from the inversion of previous scholars, and refer to the Global CMT Catalog for the focal mechanism solutions of several earthquakes based on the

① 收稿日期:2016-04-18

基金项目:国家国际合作项目《中国—东南亚毗邻区大震活动地球动力学研究》项目(2015DFA21260)

作者简介:周文敏(1992—),女,云南昆明人,硕士研究生,主要从事地震学和地震地质学研究。E-mail:1091797875@qq.com。

Luquan earthquake. We transform the seismic moment tensor into a focal mechanism solution and then use a stress-field inversion program to invert the focal mechanism solution and obtain the stress field of the Luquan earthquake and surrounding areas. Then, we compare the differences between the two stress fields. We found the principal compression stress field of the hypocenter in the Yunnan Luquan earthquake to be in the NNW-SSE direction. Also, we found the principal compression stress to be equivalent to the principal extensional stress, and that of surrounding areas to be in the NW-SE direction. Furthermore, the fracture surface of faults, mainly down strike-slip faults have a large slope angle and the principal compression stress is in a dominant position. However, we found Yunnan to be primarily affected by the principal compression stress in the NNW-SSE and NW-SE directions, given the impact of its location and the longitude and latitude of its surrounding areas. Therefore, in general, Yunnan is affected by compression stress in the NW-SE direction, with some areas affected by compression stress in the NNW-SSE direction. These research results can be used to analyze the mechanism of earthquakes and the seismic geological background and formation conditions of the faults in the area. They also have some significance in promoting relevant research on the geodynamic environment in the Yunnan region.

**Key words:** Luquan earthquake; aftershock; focal mechanism; stress field

## 0 引言

1985年4月18日13时云南禄劝发生了 $M_{\text{S}}6.1$ 地震,震源深度大约9 km,震中位于 $25^{\circ}51'N, 102^{\circ}49'E$ <sup>[1]</sup>,之后发生了多个余震,为研究该地区构造应力场提供了丰富的参考资料。云南地区的地震活动受研究者的广泛关注,而且大量地震事件证明主震的孕育发生受区域应力场的控制<sup>[2]</sup>。研究该地区应力场有助于整体把握该地区的断裂力学特征和运动模型,有助于深入了解地震地质背景和地球动力环境。

震源机制解携带大量的震源信息,其中包括震源处应力场的状态<sup>[3]</sup>。目前,国内外应力场研究方法种类众多,就地球物理类的应力场研究方法而言,由震源机制解反演应力场是最常见的方法。万永革等<sup>[4]</sup>基于中国地壳应力数据库和哈佛大学矩心张量目录给出了中国现代构造应力场。谢富仁等<sup>[5]</sup>利用由断层滑动方向反演构造应力张量得到滇西北及邻区现代构造应力场特征。康英等<sup>[6]</sup>采用Gephart和Forsyth<sup>[7]</sup>以及Gephart<sup>[8]</sup>的应力张量反演方法得到广东及其邻区的应力场。郭云祥等<sup>[9]</sup>利用基于P波初动符号和振幅比HASH方法,得出川滇地区部分 $M3.0$ 以上地震震源机制解,并使用可靠的中小地震震源机制解,采用基于中小地震震源机制解的Hardebeck和Michael的阻尼区域应力场反演方法得出了该区域的水平最大主压应力方向。

本研究把所收集到的禄劝地震主震及其部分余震的矩张量转化为震源机制解,使用万永革<sup>[10]</sup>给出

的由震源机制解反演应力场的最新精细网格搜索反演方法,得到云南禄劝地震震源处的平均应力场。

## 1 资料来源

### 1.1 研究区概况

青藏高原东南的云南处于印度板块和欧亚板块碰撞最前缘,受此两大板块北东向碰撞所引起的构造应力场的影响<sup>[11]</sup>,造就了该地区地震活动分布广、频度高、强度大、震源浅及地震灾害重的总特征<sup>[12]</sup>。禄劝地震主震位于小江断裂的中段,作为川滇菱形块体东边界的一部分,GPS资料显示其具有一定的左旋走滑和张扭特征<sup>[13]</sup>。研究该区域的构造应力场不仅可以认识该地区的地壳构造运动和其发生、发展以及转变规律,且对解释板块运动、构造运动方式和地震的孕育和发生起着重要作用。

云南的特殊地理位置造就了其复杂应力状态。云南地区现代构造应力场大致可以分为四大块,滇西和滇西南为NNE—NE向主压应力场,滇中为NE和NNW向压应力场,滇东北为近EW向压应力场,滇东为NW向压应力场<sup>[14]</sup>。本文所研究的禄劝地震及其背景对比研究区域位于滇中和滇东过渡区域内且横跨小江断裂带,应力场情况复杂。禄劝地震位于小江断裂附近,而该断裂是云南地震史上活动强度最大的断裂带,且现今该断裂带的活动正在增强<sup>[15]</sup>。林向东等<sup>[16]</sup>指出,小江断裂的中段及邻区断层错动方式主要以走滑为主;和本文背景区域对应的最大主应力方位大致为NNW向;其应力

结构以水平作用为主,走滑特征很明显;但滇中块体中应力场的大致方位是由 NNW 向转变为 NW 向。王绍晋等<sup>[17]</sup>利用强震震源机制解得出昆明及其周边地区的构造应力场以水平运动为主,主压应力方向为 NNW—NW, 主张应力方向为 SW—SWW。沈娅宏等<sup>[18]</sup>应用 snake 方法计算震源机制解,得出小江断裂带主要为走滑型震源错动类型,受近水平的 NNW—SSE 向挤压。综上所述,前人使用多种方式得出的小江断裂及其邻区的现代构造应力场的结果表明,该区域以断裂走滑错动为主,主压应力方向主要为 NNW 向。

## 1.2 求解云南禄劝地震震源处应力场相关资料来源

本研究使用吴忠良等<sup>[19]</sup>采用近震源宽频带记录的禄劝地震 ( $M_s = 6.1$ ) 15 次余震直达 P 波、S 波和 SP 转换波波形进行矩张量反演得出的地震矩张量及倪江川等<sup>[20]</sup>最终得到的禄劝地震的部分余震直达 P 波、S 波和 SP 转换波波形进行矩张量反演的主震和三个余震的震源机制解。

震源机制解资料选用 1976—2016 年,面波震级范围为 4~7,地震事件发生的区域为  $100.817^\circ \sim 104.817^\circ E$ ,  $23.850^\circ \sim 27.850^\circ N$  的美国的全球

CMT 目录,以此来对所求的应力场进行对比分析。此次研究共收集整理了 24 次地震震源机制解参数(表 1)。为了保证所选取的地震的独立性和随机性,所选 CMT 目录地震剔除了禄劝地震的主震和余震。

## 2 应力场求解及分析

### 2.1 应力场反演方法

由吴忠良等的禄劝地震 15 次余震地震矩张量得到对应的震源机制解,并验证倪江川等的禄劝地震主震及其余震的震源机制解。本研究使用根据震源机制资料求解应力场方向和相对大小的网格搜索反演方法,联合 MATLAB 得出云南禄劝地震震源处及背景研究区域的平均应力状态。

### 2.2 验证结果与部分计算结果

将 15 次余震的矩张量反演结果转换为震源机制解的结果见表 2。由于本文使用的原始数据来源于吴忠良等<sup>[19]</sup>的近震源宽频带记录的地震矩张量反演得出的地震矩张量,其计算过程已经存在误差,所以再次使用该组数据进行计算得到的数据和文中所给的原始数据之间存在很小的差别。

表 1 来源于全球 CMT 目录的震源机制

Table 1 Focal mechanism from the global CMT catalog

序号	发震时间	发震地点		节面一		节面二		
		纬度/(°)	经度/(°)	走向/(°)	倾角/(°)	滑动角/(°)	走向/(°)	倾角/(°)
1	1976-11-06	27.50	101.40	19	66	-6	111	84
2	1980-02-02	27.60	101.38	213	74	-6	304	84
3	1985-04-18	25.39	102.64	100	57	-170	5	82
4	1986-03-13	25.45	101.02	330	25	-104	165	66
5	1993-08-14	25.63	101.80	209	76	15	115	76
6	1998-10-02	27.45	101.52	332	16	-89	151	74
7	1998-11-19	27.25	101.47	31	79	-9	123	81
8	2000-01-14	25.34	101.28	25	77	-2	116	88
9	2000-01-14	25.39	101.40	27	78	-6	118	84
10	2001-05-23	27.53	101.11	8	87	-2	98	88
11	2001-07-09	24.89	101.25	233	50	2	142	89
12	2001-10-27	26.36	101.01	35	69	1	305	89
13	2003-07-21	25.98	101.32	200	80	-6	291	84
14	2003-10-16	25.89	101.52	18	88	-1	108	89
15	2004-08-10	27.16	103.78	156	85	1	66	89
16	2005-08-05	26.46	103.19	252	73	-178	161	88
17	2008-08-30	26.19	102.04	100	86	180	190	90
18	2008-08-31	26.16	102.01	11	77	-7	102	84
19	2009-07-09	25.52	101.17	204	84	-3	294	87
20	2012-09-07	27.47	104.12	350	51	35	236	63
21	2012-09-07	27.47	104.19	234	58	155	338	69
22	2014-05-07	25.43	102.01	356	72	-15	91	76
23	2014-08-03	27.06	103.50	71	81	-175	340	86
24	2015-03-09	25.26	103.30	183	74	-10	276	80

表2 15次余震震源机制

Table 2 Focal mechanism of 15 aftershocks

编号 No.	节面一			节面二		
	走向/(°)	倾角/(°)	滑动角/(°)	走向/(°)	倾角/(°)	滑动角/(°)
1	224.2	62.3	34.7	116.4	59.7	147.5
2	86.8	88.4	-138.2	355.4	48.2	-2.2
3	237.2	71.6	44.6	129.9	48.3	154.9
4	49.5	90.0	0.5	319.5	89.5	180.0
5	100.8	68.8	39.6	354.2	53.6	153.3
6	247.3	86.8	-174.3	157.0	84.3	-3.2
7	270.7	80.9	-147.7	175.0	58.1	-10.7
8	185.9	78.4	25.8	90.4	64.7	167.2
9	54.6	79.4	121.8	161.2	33.4	19.6
10	359.5	87.1	-11.1	90.0	78.9	-177.0
11	78.7	55.6	136.5	197.0	55.4	43.4
12	265.7	75.6	155.4	2.2	66.2	15.8
13	155.7	71.3	-145.0	53.0	57.1	-22.4
14	131.3	81.2	127.5	232.5	38.4	14.3
15	33.8	75.7	33.8	294.4	57.4	162.9

对倪江川等<sup>[20]</sup>的云南禄劝地震部分余震的矩张量反演的结果进行验证,即使用一个节面的参数得到另外一个节面的参数,验证后的结果见表3。

由于计算时使用原文给出的数据已经是经过计算过的参数,因此这些参数和原文给出的参数有一定的差别,但差别很小。

表3 云南禄劝地震主震和部分余震的验证后的震源参数

Table 3 Verified focal parameters of main shock and several aftershocks in Yunnan Luquan earthquake

地震/编号	节面一			节面二		
	走向/(°)	倾角/(°)	滑动角/(°)	走向/(°)	倾角/(°)	滑动角/(°)
主震	237.880 2	53.422 3	58.304 2	103.87 3	49.595 7	125.343 2
No.13	217.128 5	57.478 6	22.956 1	117.873 5	68.839 1	155.773
No.18	206.931 7	77.369 7	36.623 8	107.693 7	54.337 9	164.300 6
No.20	200.602 1	74.937 5	29.612 8	102.235 7	61.503 1	162.872 5

### 2.3 震源机制解联合求得云南禄劝地震震源处的平均应力场

使用表2和表3中的震源机制参数得出的禄劝地震及其部分余震的最佳参数见表4,其相应的应力场见图1。由图可知,主压应力的优势方向为NNW—SSE,张应力的优势方向为NEE—SWW,由节面参数可知地震发生区域以走滑错动为主,该区域主要受水平错动力的作用。

### 2.4 来源于CMT全球地震目录的震源机制解得出的背景研究区平均应力场

对来源于CMT的震源机制解进行应力场反演,得到背景对比研究区域的最佳平均参数(表5)和应力场(图3)。由此可得出,背景研究区域主压应力方向为近NW—SE方向,主张应力为近NE—SW向,由节面参数可得背景研究区域为走滑正断层状态。

表4 禄劝地震主震及余震的最优应力状态

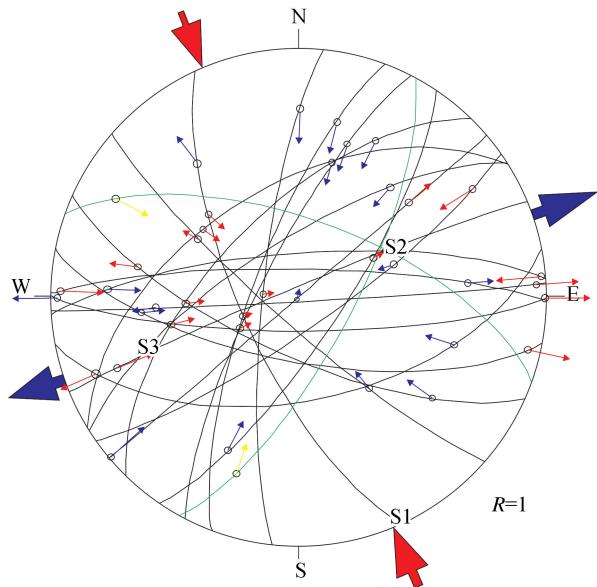
Table 4 The optimal state of stress of main shock and aftershocks in Luquan earthquake

节面一			节面二			P轴		B轴		T轴	
走向 /(°)	倾角 /(°)	滑动角 /(°)	走向 /(°)	倾角 /(°)	滑动角 /(°)	走向 /(°)	倾伏角 /(°)	走向 /(°)	倾伏角 /(°)	走向 /(°)	倾伏角 /(°)
28.3	72.3	27.1	289.5	64.3	160.3	157.50	5.28	59.00	58.00	250.75	31.46

表5 背景研究区域最优应力状态

Table 5 The optimal state of stress in background research regions

节面一			节面二			P轴		B轴		T轴	
走向 /(°)	倾角 /(°)	滑动角 /(°)	走向 /(°)	倾角 /(°)	滑动角 /(°)	走向 /(°)	倾伏角 /(°)	走向 /(°)	倾伏角 /(°)	走向 /(°)	倾伏角 /(°)
353.4	58.0	-42.1	109.0	55.4	-139.9	319.82	50.96	143.00	39.00	51.74	1.55



(S1 表示最大主压应力轴,S2 表示中间轴,S3 表示最大主张应力轴;其周围的封闭曲线代表 90% 置信度下应力场各轴的范围。黑色弧线为所选节面的等面积投影,E、W、S、N 表示东、西、南、北四个方向。红色大箭头表示最大主压应力的最优方向,蓝色大箭头表示最大主张应力轴的最优方向,红色小箭头为断层理论滑动方向,蓝色小箭头为断层观测滑动方向。绿色弧线为得到的 90% 置信度应力场下的最大剪应力节面。黄色小箭头为该节面的最大剪切力方向。R 为应力比。)

图 1 云南禄劝地震及余震应力状态

Fig.1 The state of stress of main shock and aftershocks in Yunnan Luquan earthquake

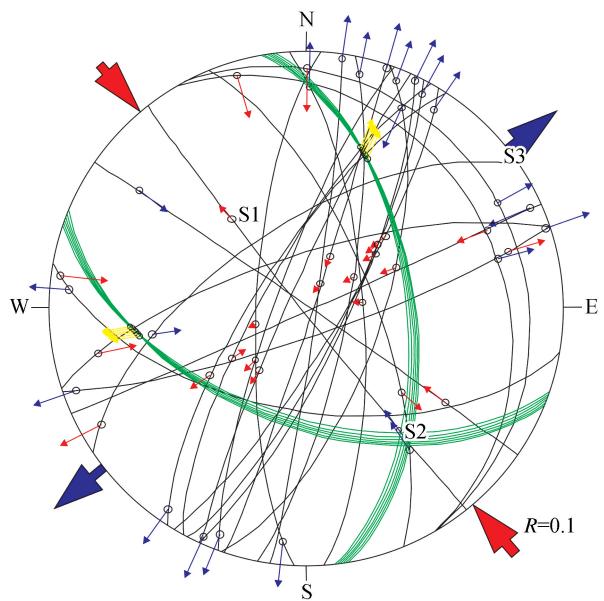


图 2 背景研究区域应力场状态

Fig.2 The state of stress in background research regions

## 2.5 分析

对比两组来源不同的震源机制解得出的研究区

应力场平均状态可知,禄劝地震震源处的应力场主压应力的优势方向为 NNW—SSE, 主张应力的优势方向为 NEE—SWW, 地震发生区域以走滑错动为主, 该区域主要受水平错动作用。而以主震震中为中心点, 经纬度各增加 2° 和减少 2° 在全球 CMT 目录中查询到的震源机制解得到的云南滇中北部的应力场主压应力方向为近 NW—SE 方向, 主张应力方向为近 NE—SW 方向, 以走滑断层应力状态为主, 其中夹杂了正断层应力状态。

## 3 结论和讨论

根据基础材料反演了禄劝地震震源处的应力场, 得出其 P 轴倾角接近水平, 该地区地震以走滑正断层应力状态为主, B 轴和 T 轴倾伏角较大, 震源处受 NNW—SSE 方向的主压应力作用。以禄劝地震主震为中心的滇中北部地区 P 轴倾伏角较大, B 轴次之, T 轴最小, 主要受近 NW—SE 方向的主压应力作用。

根据上文所述的应力场反演结果, 禄劝地震震源处的主压应力场的优势方向为 NNW—SSE, 张应力的方向为 NEE—SWW, 与背景研究区域滇中北部的主压应力的优势方向近 NW—SE 方向, 张应力方向为近 NE—SW 方向很接近; 结合云南地区的地质构造和动力源分析, 主压应力场的优势方向近 NNW—SSE 方向和云南地区主压应力场的大尺度方向 NNW—SSE 是相近的, 但与从 CMT 全球地震目录中选取的地震震源机制得出的背景研究区域的应力方向存在差异。云南地区总体受 NNW—SSE 方向的主压应力控制, 在局部地区如滇中东北部也受 NW—SE 向的主压应力的控制, 禄劝地处滇中北部, 由于欧亚板块受到印度板块的挤压, 以及印度板块对青藏高原的作用, 使得青藏高原的隆起和物质流动变形, 因此该区域受 NW—SE 向和 NNW—SSE 向的压力场作用。震源区的应力场和背景研究区域的应力场虽然有差别, 但也符合该区域本质上的应力场情况。

造成本研究得出的云南禄劝地震震源处的应力场状态和其背景研究区域的应力场状态不同的原因除了欧亚大陆碰撞作用外可能还有如下几点:

(1) 资料来源不同;

(2) 震级较大的地震的震源机制解反演出的应力场状态和震级较小的地震的震源机制反演出的应

力场状态不同;

(3) CMT 地震目录中查到的震源机制解是在一个相对较大的研究区域,其得出的应力场状态是一个更大范围的平均应力场状态。而禄劝地震主震和余震所发生的经纬度范围很小,得出的应该是一个较小区域的暂时性应力状态;

(4) 云南复杂的地质构造环境造就了该区域复杂的现代构造应力场,从而使得各个小区域的构造环境也存在差异,所以不同的区域也能造就不同的应力场状态;

(5) 由于存在记录误差、“真实”格林函数和理论格林函数之间的偏差、真实震源和点源近似之间的偏差,所以真实的地震矩要比理论得出的大,对本文研究结果有一定的影响。

但是由于本研究使用的应力场反演程序不会陷入局部极值、可考虑震源机制解的权重、得到最优解的同时还能得到拟合残差较小的解等几大优势,以上影响对于本研究的结果影响是非常小的。由此可知,本研究结果是可靠的。

## 参考文献(References)

- [1] 陈立德,罗平,雷素华,等.1985年云南禄劝地震[J].地震,1986,6(2):20-27.  
CHEN Li-de, LUO Ping, LEI Su-hua, et al. The 1985 Luquan Earthquake of M6.2 in Yunnan Province [J]. Earthquake, 1986, 6(2):20-27. (in Chinese)
- [2] 付虹,王绍晋,龙晓帆,等.宁洱地震序列的震源机制解分析[J].地震研究,2009,32(3):253-257.  
FU Hong, WANG Shao-jin, LONG Xiao-fan, et al. Analysis of Focal Mechanism of the Ning'er Earthquake Sequence [J]. Journal of Seismological Research, 2009, 32(3): 253-257. (in Chinese)
- [3] 许忠淮,阎明,赵仲和.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,1983,5(3):268-278.  
XU Zhong-huai, YAN Ming, ZHAO Zhong-he. Evalution of the Direction of Tectonic Stress in North China From Recorded Data of a Large Number of Small Earthquakes [J]. Acta Seismologica Sinica, 1983, 5(3): 268-278. (in Chinese)
- [4] 万永革,盛书中.中国现代构造应力场[J].世界地震译丛,2011(3):18-29.  
WANG Yong-ge, SHENG Shu-zhong. Contemporary Tectonic Stress Field in China [J]. Translated World Selsmology, 2011 (3): 18-29. (in Chinese)
- [5] 谢富仁,刘光勋,梁海庆.滇西北及邻区现代构造应力场[J].地震地质,1994,16(4):329-338.  
XIE Fu-ren, LIU Guang-xun, LIANG Hai-qing. Recent Tecton-
- ic Stress Field in Northwest Yunnan Province and Its Adjacent Areas [J]. Seismology and Geology, 1994, 16(4): 329-338. (in Chinese)
- [6] 康英,杨选,陈杏,等.广东及邻区的应力场反演[J].地震学报,2008,30(1):59-66.  
KANG Ying, YANG Xuan, CHEN Xing, et al. Inversion of Stress Field in Guangdong and Its Adjacent Area [J]. Acta Seismologica Sinica, 2008, 30(1): 59-66. (in Chinese)
- [7] Gephart J W, Forsyth D W. An Improved Method for Determining the Regional Stress Tensor Using Focal Mechanism Data: Application to the San Fernando Earthquake Sequence [J]. J Geophys Res, 1984, 89(B11):9305-9320.
- [8] Gephart J W. FMSI: A Fortran Program for Inverting Fault/slickenside and Earthquake Focal Mechanism Data to Obtain the Regional Stress Tensor [J]. Computer & Geosciences, 1990, 16(7):953-989.
- [9] 郭祥云,陈学忠,王生文,等.川滇地区中小地震震源机制解及构造应力场的研究[J].地震工程学报,2014,36(3):599-607.  
GUO Xiang-yun, CHEN Xue-zhong, WANG Sheng-wen, et al. Focal Mechanism of Small and Moderate Earthquakes and Tectonic Stress Field in Sichuan-Yunan Areas [J]. China Earthquake Engineering Journal, 2014, 36(3): 599-607. (in Chinese)
- [10] 万永革.根据震源机制求解构造应力场的网格搜索法[J].国际地震动态,2012(6):19-19.  
WANG Yong-ge. Solving the Grid Search Method of the Tectonic Stress Field Based on Focal Mechanism Solution [J]. Recent Developments in World Seismology, 2012(6): 19-19. (in Chinese)
- [11] 阙荣举,张四昌,晏凤桐,等.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,1977,20(2):96-109.  
KAN Rong-ju, ZHANG Si-chang, YAN Feng-tong, et al. Discussion of Recent Tectonic Stress Field and Characteristics of Recent Tectonic Movement in Southwest China [J]. Chinese J Geophys, 1977, 20(2): 96-108. (in Chinese)
- [12] 张国民,傅征祥,桂燮泰,等.地震预报引论[M].北京:科学出版社,2001:3-4.  
ZHANG Gou-min, FU Zheng-xiang, GUI Xie-tai, et al. Introduction to Earthquake Prediction [M]. Beijing: Science Press, 2001: 3-4. (in Chinese)
- [13] 施发奇,尤伟,付云文.GPS资料揭示的小江断裂近期运动特征[J].地震研究,2012,35(2):207-212.  
SHI Fa-qi, YOU Wei, FU Yun-wen. Recent Crustal Movement Characteristics of Xiaojiang River Fault Based on the GPS Data [J]. Journal of Seismological Research, 2012, 35(2): 207-212. (in Chinese)
- [14] 刘祖荫,苏有锦,秦嘉政,等.20世纪云南地震活动[M].北京:地震出版社,2002:24-47.  
LIU Zu-yin, SU You-jin, QIN Jia-zheng, et al. Seismicity in Yunnan in the 20<sup>th</sup> Century [M]. Beijing: Seismological Press, 2002: 24-47. (in Chinese)

(下转 277 页)

- JIA Shi-xu, ZHANG Xian-kang. Study on the Crust Phases of Deep Seismic Sounding Experiments and Fine Crust Structures in the Northeast of Tibetan Plateau[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2008, 51(5): 1431-1443. (in Chinese)
- [30] 赵凌强, 詹艳, 赵国泽, 等. 基于深部电性结构特征的 2013 年甘肃岷县漳县  $M_{\text{S}}6.6$  地震孕震环境探讨[J]. 地震地质, 2015, 37(2): 541-554.
- ZHAO Ling-qiang, ZHAN Yan, ZHAO Guo-ze, et al. The Seismogenic Environment of the 2013 Minxian-Zhangxian  $M_{\text{S}}6.6$  Earthquake Based on the Deep Electrical Structure[J]. Seismology and Geology, 2015, 37(2): 541-554. (in Chinese)
- [31] 柯小平, 王勇, 许厚泽, 等. 青藏高原地壳三维密度结构的重力反演[J]. 地球物理学进展, 2009, 24(2): 448-455.
- KE Xiao-ping, WANG Yong, XU Hou-ze, et al. The Three-di-
- imensional Crustal Density Structure of the Tibetan Plateau from Gravity Inversion. Progress in Geophys, 2009, 24(2): 448-455. (in Chinese)
- [32] 张元生, 冯红武, 张继锋, 等. 基于地震学资料探讨 2013 年岷县漳县 6.6 级地震发震构造[J]. 地震工程学报, 2013, 35(3): 319-424.
- ZHANG Yuan-sheng, FENG Hong-wu, ZHANG Ji-feng, et al. Study on Seismogenic Structure of 2013 Minxian-Zhangxian  $M_{\text{S}}6.6$  Earthquake with Seismological Data[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2013, 35(3): 319-424. (in Chinese)
- [33] 中国地震台网中心地震数据管理与服务系统.  
<http://www.csndmc.ac.cn/newweb/index.jsp> China Earthquake Networks Center, Seismic Data Management and Service System.  
<http://www.csndmc.ac.cn/newweb/index.jsp>.

\*\*\*\*\*  
 (上接 267 页)

- [15] 刘翔, 王绍晋, 钱晓东, 邬成栋. 2005 年会泽 5.3 级地震与小江断裂地震活动关系研究[J]. 地震研究, 2006, 29(4): 332-337.
- LIU Xiang, WANG Shao-jin, QIAN Xiao-dong, et al. Relation between the 2005 Huize M5.3 Earthquake and the Seismicity of Xiaojiang Fault[J]. Journal of Seismological Research, 2006, 29(4): 332-337. (in Chinese)
- [16] 林向东, 徐平, 武敏捷, 武安绪. 小江断裂中段及邻区构造应力场分布特征[J]. 中国地震, 2010, 26(2): 192-200.
- LIN Xiang-dong, XU Ping, WU Min-jie, et al. Inversion of Stress Field in Middle Section of the Xiaojiang Fault and Its Adjacent Area[J]. Earthquake Research in China, 2010, 26(2): 192-200. (in Chinese)
- [17] 王绍晋, 龙晓帆, 余庆坤. 昆明地区现代构造应力场分析[J]. 地震研究, 2005, 28(2): 178-184.
- WANG Shao-jin, LONG Xiao-fan, YU Qing-kun. Analysis on recent Tectonic Stress Field in the Yunnan Region[J]. Journal of Seismological Research, 2005, 28(2): 178-184. (in Chinese)
- [18] 沈娅宏, 张建国, 毛燕, 等. 小江断裂带及其周边地区构造应力场特征[J]. 云南大学学报: 自然科学版, 2012, 34(3): 308-314.
- SHEN Ya-hong, ZHANG Jian-guo, MAO Yan, et al. Characterer of Tectonic Stress in Xiaojiang Fault Zone and Surrounding Areas[J]. Journal of Yunnan University: Natural Sciences, 2012, 34(3): 308-314. (in Chinese)
- [19] 吴忠良, 陈运泰, 倪江川, 等. 近震源宽频带记录的地震矩张量反演[J]. 地震学报, 1994, 16(2): 141-152.
- WU Zhong-liang, CHEN Yun-tai, NI Jiang-chuan, et al. The Seismic Moment Tensor Inversion of Near Source Broadband Records [J]. Acta Seismologica Sinica, 1994, 16(2): 141-152. (in Chinese)
- [20] 倪江川, 陈运泰, 王鸣, 等. 云南禄劝地震部分余震的矩张量反演[J]. 地震学报, 1991, 13(4): 412-419.
- NI Jiang-chuan, CHEN Yun-tai, WANG Ming, et al. Moment Tensor Inuersion of Some Aftershocks of the April 18, 1985, Luquan, Yunnan, China, Earthquake [J]. Acta Seismologica Sinica, 1991, 13(4): 412-419.