

罗钧, 赵翠萍, 周连庆. 2015. 2013 年 8 月香格里拉德钦—得荣  $M_s$ 5.9 地震序列震源机制与应力场特征. 地球物理学报, 58(2): 424-435, doi:10.6038/cjg20150207.

Luo J, Zhao C P, Zhou L Q. 2015. Focal mechanisms and stress field of the Shangri-La Deqen, Yunnan Province—Derong, Sichuan Province  $M_s$ 5.9 earthquake sequence in August, 2013. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 58(2): 424-435, doi:10.6038/cjg20150207.

## 2013 年 8 月香格里拉德钦—得荣 $M_s$ 5.9 地震序列震源机制与应力场特征

罗钧<sup>1,2</sup>, 赵翠萍<sup>2</sup>, 周连庆<sup>1,2\*</sup>

1 中国地震局地球物理研究所, 北京 100081

2 中国地震局地震预测研究所(地震预测重点实验室), 北京 100036

**摘要** 利用中国区域台网地震波形记录, 采用 CAP 方法反演了香格里拉德钦(位于云南省)—得荣(属于四川省) 2013 年 8 月 28 日  $M_s$ 5.1、8 月 31 日  $M_s$ 5.9 地震及 8 次  $M_s > 4$  余震的震源双力偶断层面解和震源质心深度. 结合震区地质构造、余震分布、烈度分布、动力学背景等资料, 分析了此次地震序列的震源机制和应力场特征. 反演结果表明, 此次地震序列为节面倾角倾斜的正断层型地震, 发震断层为 NWW 向活动构造带. 序列中最大地震  $M_s$ 5.9 和次大地震  $M_s$ 5.1 地震的破裂节面分别为走向  $299^\circ$ 、倾角  $53^\circ$ 、滑动角  $-73^\circ$ ; 走向  $290^\circ$ 、倾角  $55^\circ$ 、滑动角  $-72^\circ$ . 震源区受到强烈的水平拉张力、垂直挤压力作用.  $M_s$ 5.9 地震后续余震  $T$ 、 $P$  轴方位角随时间变化强烈, 表明  $M_s$ 5.9 地震后震源区应力调整作用明显. 震源区应力场反演结果显示, 地震发生的构造带上最大主拉应力为 NNE-SSW 向, 最大主压应力为 NW-SE 向, 与 GPS 观测所反映的地表最大主应力分布方向基本一致, 表明震源区的应力状态可能主要受到背景大尺度构造应力场的控制. 此次地震序列填充了川滇地区震源机制及应力场的空间分布图像, 1976 年以来可靠的震源机制解资料表明香格里拉次级块体是川滇块体及周边区域显著的拉张作用区域. 香格里拉次级块体和保山次级块体正断层地震的断层节面及震源应力轴分布的空间变化, 与 GPS 观测反映的地表最大主拉应力分布较一致, 其空间分布特征反映了在青藏高原物质挤出背景下, 块体之间相互作用、地势差异等作用对构造活动的影响.

**关键词** 香格里拉德钦—得荣地震; 震源机制解; CAP 方法; 正断层型地震

doi:10.6038/cjg20150207

中图分类号 P315

收稿日期 2014-03-14, 2014-09-18 收修定稿

## Focal mechanisms and stress field of the Shangri-La Deqen, Yunnan Province—Derong, Sichuan Province $M_s$ 5.9 earthquake sequence in August, 2013

LUO Jun<sup>1,2</sup>, ZHAO Cui-Ping<sup>2</sup>, ZHOU Lian-Qing<sup>1,2\*</sup>

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

2 Key Laboratory of Earthquake Prediction, Institute of Earthquake Science, CEA, Beijing 100036, China

**Abstract** No  $M_s > 5$  earthquakes have been observed in the northwestern boundary of the Sichuan-Yunnan Block, the Jinshajiang fault and the Deqen-Zhongdian-Daju fault systems, since 1976. The  $M_s$ 5.1 earthquake and the  $M_s$ 5.9 earthquake, which sequentially took place in Shangri-La

**基金项目** 国家自然科学基金青年项目“基于三维介质衰减结构成像研究汶川 8 级地震震源环境及其与流体的关系”(41104033)和“芦山 7 级地震震源区及南北地震带中南段的地震学综合研究”(2013IES010104)共同资助.

**作者简介** 罗钧, 拉祜族, 中国地震局地球物理研究所在读博士生, 研究方向为数字地震学. E-mail: luojun@cea-ies.ac.cn

\* **通信作者** 周连庆, 助理研究员, 研究方向为数字地震学. E-mail: zhoulq@cea-ies.ac.cn

Deqen, Yunnan province—Derong Sichuan province on April 28<sup>th</sup>, 2013 and April 31<sup>th</sup>, 2013, supplement apparent gaps of the focal mechanisms spatial distributions image of Sichuan-Yunnan Block boundary fault systems and also provide important date for further researches in terms of both faulting activities and tectonic stress field characteristics. Using digitally broadband seismic records, we determined focal mechanisms of 10 moderate earthquakes ( $M_s > 4$ ) in this  $M_s$ 5.9 and  $M_s$ 5.1 earthquake sequence. The focal mechanism solutions then supply data for the analyses of seismogenic fault activities and investigations of focal mechanisms and stress field characteristics in the Sichuan-Yunnan region. Regional broadband seismic records of China Seismograph Network were used to determine the focal mechanisms and focal depths of the  $M_s$ 5.9 earthquake,  $M_s$ 5.1 earthquake and other  $M_s > 4$  events by the whole wave inversion method called the Cut-and-Paste method. The Focal Mechanism Stress Inversion method was introduced to estimate the local crust stress field of the source region. Combining our researches of focal mechanisms of moderate and large earthquakes in recent years with the geologic structures, aftershock distributions, intensity features and geodynamic backgrounds, we analyzed the characteristics of focal mechanisms and stress field of this earthquake sequence.

The following results are obtained from focal mechanisms and stress field solutions of the  $M_s$ 5.9,  $M_s$ 5.1 earthquake sequence: (1) The  $M_s$ 5.9 earthquake and  $M_s$ 5.1 earthquake are normal faulting events, so are other eight  $M_s > 4$  aftershocks. Results show seismogenic fault is a northwest-west striking active fault. The fault solutions of the  $M_s$ 5.9 and  $M_s$ 5.1 earthquakes are strike  $299^\circ$ , dip  $53^\circ$ , rake  $-73^\circ$  and strike  $290^\circ$ , dip  $55^\circ$ , rake  $-72^\circ$  respectively. (2) Spatial distributions of  $T$ -axes and  $P$ -axes of the  $M_s$ 5.9 and  $M_s$ 5.1 events are exhibited similar, whereas, the orientations of these two axes of the  $M_s$ 5.9 aftershocks deviate from the ones of the main event in the following two days and relocate to the ones that are similar with the main event later, indicating an obvious stress readjustment process in the seismic source region. (3) The maximum principal axes (maximum compression) are perpendicularly oriented in northwest-southeast and the minimum principal axes (minimum compression) are horizontally in north-northeast-south-southwest, leading to an obvious normal-faulting active region. These distributions are consistent with the trending of the surface maximum principal tensile stress field derived from the geodetic observations. (4) Combined our previous focal mechanisms determination, it can be concluded that the Shangri-La sub-block and the Baoshan sub-block are two interior regions in the Sichuan-Yunnan Block which are obviously under the normal-faulting regimes. However, the fault nodal planes and  $P$ -axes and  $T$ -axes strike differently in each boundary fault system. The orientations of nodal planes exhibit a clockwise rotation, with a gradual change from trending east-west in the northern section of the Jinshajiang fault and the middle section of the Litang fault to trending northwest-west in the Deqen-Zhongdian-Daju fault then to trending nearly north-south in the southwestern section of the Lijiang-Xiaojinhe fault and the northern margin of the Baoshan sub-block. The  $T$ -axes are correspondingly oriented in north-south or north-northwest-south-southeast further to northeast-southwest then to east-west or northeast-east-southwest-west, suggesting that stress states in these boundary faults are not consistent under the normal faulting regimes. In sum, this  $M_s$ 5.9,  $M_s$ 5.1 earthquake sequence is an apparent normal-faulting sequence. The stress field of seismic source experienced distinct stress readjustments during the development process of the whole sequence. Solutions of focal mechanisms of the Sichuan-Yunnan region in recent years show that the Shangri-La sub-block and the Baoshan sub-block are primarily under normal faulting stress patterns which are dominated by the horizontally tensile stress field. While

the changes of the nodal planes and  $T$ -axes orientations in each boundary fault system indicate the existed influences of the sub-blocks interactions, terrain diversities under the background tectonic stress field.

**Keywords** Shangri-La Deqen-Derong earthquake; Focal mechanism; CAP method; Normal-faulting event

## 1 引言

据中国地震台网测定,2013年8月28日04时44分在云南香格里拉德钦与四川得荣交界地区发生  $M_s5.1$  地震,震中位于东经  $99.33^\circ$ ,北纬  $28.20^\circ$ ,之后震区余震不断.震后第三天,8月31日08时04分,香格里拉震区(本文以最大地震所处区域定义)再次发生  $M_s5.9$  地震,震中位于东经  $99.35^\circ$ ,北纬  $28.15^\circ$ .根据地震速报结果,截至9月6日23时,  $M_s5.9$  地震共记录到余震1989次,其中4.0~4.9级11次,3.0~3.9级70次.香格里拉震区位于滇西北地区德钦一中甸一大具断裂带中段附近,根据中国地震台网的定位结果,此次香格里拉地震序列中的两次  $M_s>5$  地震震中距德钦一中甸一大具断裂带东北方向约20 km(图1).德钦一中甸一大具断裂带全长约300 km,北起云南德钦,南至永胜盆地北端,自上新世末期至早更新世开始形成,第四纪中期以来右旋走滑运动速率为  $4\sim6\text{ mm}\cdot\text{a}^{-1}$ (沈军等,2001).作为青藏高原东南部的显著第四纪右旋走滑活动断裂之一,德钦一中甸一大具断裂带的近期活动方式和所起的构造作用一直受到针对青藏高原物质东向挤出、逃逸的动力学研究的关注.地质考察结果研究认为该断裂带的右旋走滑活动主要受到其北部块体水平运动的控制,并与同样右旋走滑运动的红河断裂带一起构成川滇块体的西南边界(沈军等,2003).GPS形变观测结果也认同德钦一中甸一大具断裂带作为边界断裂带的特征,认为其构成了川滇块体内部香格里拉次级块体的西边界(程佳等,2012).但GPS观测同时表明该断裂带在现今活动很弱(王阎昭等,2008),只在其以西地区观测到明显拉张作用,此次香格里拉震区所处的香格里拉次级块体内部变形不大(程佳等,2012).而已有的其他基于地震、水压致裂等不同资料开展的不同尺度下青藏高原东南缘块体构造应力场特征的研究结果亦并未涵盖此次地震序列所处的香格里拉次级块体内部区域(谢富仁等,1993;程万正等,2003;崔效锋等,2006;Xu et al., 2010; Zhao et al., 2013).事实上,香格里拉震区所处区域1976年以来  $M_s>5$  地震活

动平静,此次  $M_s5.1$ 、 $M_s5.9$  地震是该区近40年以来发生的两次  $M_s>5$  的地震.中等强度的地震携带了区域构造应力场的主要信息,其震源机制解包含地震断层面解、发震应力场  $P$ 、 $T$  轴、震源深度等参数,是认识地震发震断层、探究地震发震机理和区域构造应力的有力手段,尤其是在水压致裂等方法难以到达的地壳深部区域,几乎成为了开展地壳应力特征研究的唯一有效途径.

对于这种长期缺乏中强地震的区域,此次香格里拉地震序列不仅补充了川滇地区地震活动的空间分布图像,且其震源机制解结果无疑是研究震区构造应力特征宝贵的基础资料.对震区构造应力特征开展研究不仅能够为震后趋势判定提供一定依据,同时能加深对香格里拉次级块体运动特征的认识,进而在一定程度上为认识青藏高原东南缘地壳运动及动力来源提供新的证据.因此,本文的目的在于通过香格里拉地震序列主要中等地震的震源机制解的求解,分析其诱发机制和震源区构造应力特征,以期在补充本文作者近年来对川滇地区开展震源机制求解的数据库的同时,为进一步探讨青藏高原东南缘第四纪以来的块体运动特征和动力学模式提供一定程度的支撑.

本文使用我国区域台网的波形数据,获取了  $M_s5.1$ 、 $M_s5.9$  地震和8次  $M_s>4$  余震的震源机制解,得到了这几次地震的矩震级、地震断层面解、震源应力场  $P$ 、 $T$  轴的分布及最佳震源质心深度等参数.在此基础上,结合该区地质构造和GPS等研究,分析探讨了本次地震序列的震源机制和地壳构造应力场特征.

## 2 CAP方法波形拟合求解震源机制解

### 2.1 方法与数据

由 Zhao 和 Helmberger(1994)提出,Zhu 和 Helmberger(1996)发展的 CAP(Cut-and-Paste)方法将区域三分量全波形分为体波和面波两部分,对其采用不同的频段滤波后参与反演.考虑到区域地震震相中面波振幅较体波振幅大  $2\sim3$  倍,而面波容易受到浅层速度结构影响,CAP方法对体波、面波分别给予不

同的权重,以提高体波部分在反演时的贡献.反演时通过网格搜索获取不同深度的最佳双力偶断层面解,对比不同深度的误差,得到最佳震源断层面解和震源质心深度.其优势在于反演时完整地使用了波形记录,能够反映较全面的震源信息,所用到的体波部分波形包含了 sPmP 等深度震相的信息,能够更好地约束地震震源深度.且该方法允许各时间窗理论波形和观测波形的相对滑动拟合,大大减少了对速度模型和地壳横向不均匀性的依赖(Zhu et al., 1997; 郑勇等,2009;Wei et al., 2012;吕坚等,2013).因此,本文采用 CAP 方法开展波形拟合,求解本次地震序列中 10 次  $M_s4.0$  以上地震的震源机制解.

理论地震图的计算,是波形拟合反演求解震源机制解准确与否的关键环节.本文采用 F-K(频率-波数)法(Zhu and Rivera, 2002)计算理论地震图,震中区的速度模型来自于 CRUST2.0 模型(Bassin

et al., 2000).鉴于地壳横向不均匀性的影响,利用区域范围的观测波形开展中地震震源机制解反演时,一般采用 350 km 以内的波形记录(罗艳等,2010;龙锋等,2010).对于本文研究的 10 次地震,我们从国家数据测震台网备份中心提供的波形数据中(郑秀芬等,2009),选取了震中距 350 km 范围内的云南、四川、西藏区域台网记录到的高信噪比的宽频段波形记录(图 1),且参与反演的台站能够均匀包围震中.

### 2.2 震源机制解结果

处理观测数据时,对每个区域地震波形记录经去除倾斜、去除仪器响应后,将其旋转至  $r-t-z$  三分量,分成体波和面波两个部分.为消除长周期脉动的影响,对体波部分进行 0.05~0.2 Hz、面波部分进行 0.05~0.1 Hz 的 Butterworth 带通滤波.反演时,每个地震同时计算了以 1 km 深度为间隔的各台的理论地震图,对各个深度的假想震源,以  $5^\circ$  的

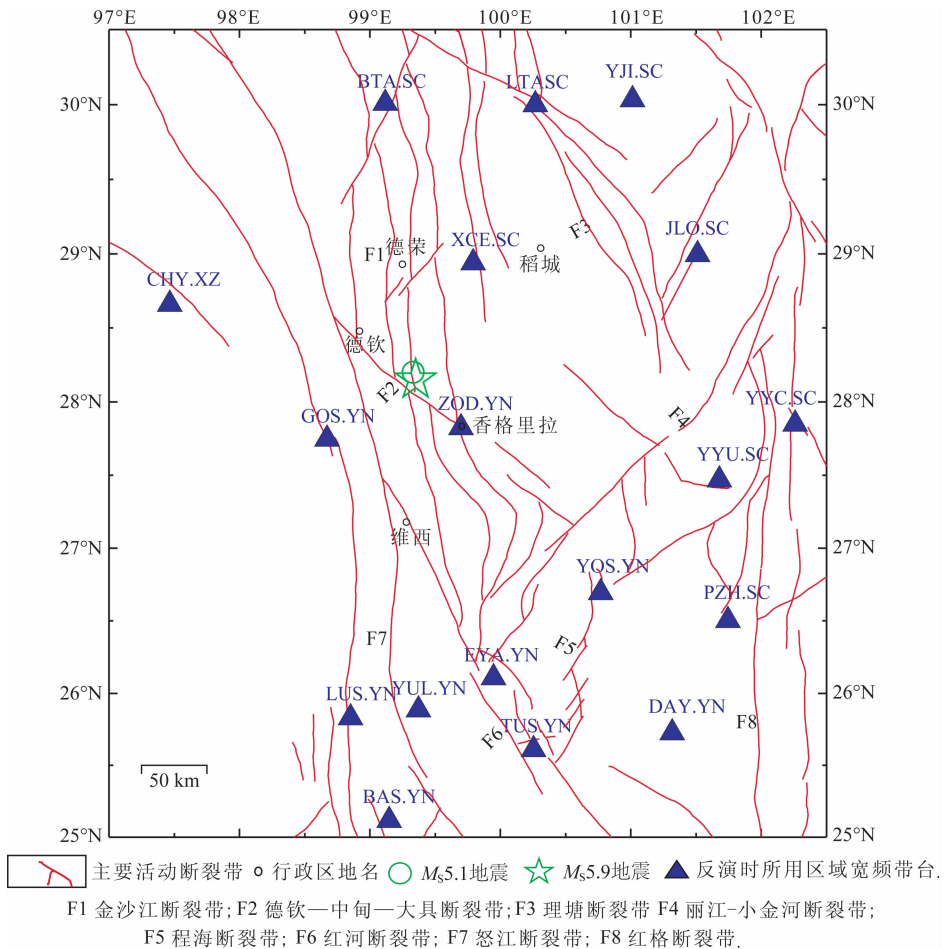


图 1 反演使用的台站分布图

图中所示台站上方的英文字母为“台站名.台网名”组合的缩写,参照国家数据测震台网备份中心所使用的缩写名称.

Fig. 1 Spatial distribution of regional stations used

Letters above the triangles which indicate the stations are the abbreviations of “stations. networks”, that are refer to the abbreviations used in the Data Backup Center for China Seismograph Network.

步长对断层面走向、倾角、滑动角进行网格搜索,断层面解精度可达  $5^\circ$ 。本文得到了  $M_S5.1$ 、 $M_S5.9$  地震及后续 8 次  $M_S > 4$  余震的最佳双力偶断层面解和震源质心深度,结果详见表 1。由于篇幅限制,本文仅给出了  $M_S5.9$ 、 $M_S5.1$  地震的波形拟合图和深度拟合图(图 2),从图中可看出两次地震波形拟合较好,平均拟合相关系数达到 81.2%、84.2%,相当一部分波形的拟合相关系数大于 90%。结果显示,  $M_S5.9$  地震为正断层型兼有小部分走滑分量的地震,断层面解为:节面 I 走向  $299^\circ$ 、倾角  $53^\circ$ 、滑动角  $-73^\circ$ ,节面 II 走向  $91^\circ$ 、倾角  $40^\circ$ 、滑动角  $-112^\circ$ ,矩震级  $M_w5.58$ ,震源质心深度 9 km。  $M_S5.1$  地震断层面解为:节面 I 走向  $290^\circ$ 、倾角  $55^\circ$ 、滑动角  $-72^\circ$ ,节面 II 走向  $80^\circ$ 、倾角  $39^\circ$ 、滑动角  $-114^\circ$ ,矩震级  $M_w5.06$ ,震源质心深度 7 km。本文结果与其他机构给出的结果基本一致(表 2)。  $M_S5.9$  地震和  $M_S5.1$  地震震源机制解类型相似,震源压应力轴  $P$  轴倾角较陡,方位角为 NEE—SWW 向;张应力轴  $T$  轴近于水平,方位角为 NNE—SSW 向。

表 1 及图 3 给出了本文得到的 10 次地震的震源机制解。由表 1 及图 3 可见,其他 8 次  $M_S4.0$  以上余震的震源破裂类型均以正断层类型为主,个别兼

有少量走滑分量。震源断层面倾角倾斜,  $P$  轴近于直立,方向多数为近 NEE—SWW 向。  $T$  轴基本水平,方向多数为近 NNE—SSW 向。地震震源质心深度较浅,介于 5~12 km 之间。2 号余震与  $M_S5.9$ 、 $M_S5.1$  地震的震源机制类型基本一致,均为 NWW 向正断层兼有部分左旋走滑分量或近 EW 向兼有部分右旋走滑分量,后续 7 次余震除 8 号地震断层面近 EW 向外,其他余震 NWW 向或 NW 向断层面明显,但 6 号、7 号、9 号除 NWW 向节面外,亦表现出近 EW 向断层面。

### 3 分析及讨论

#### 3.1 云南香格里拉德钦—四川得荣地震序列震源机制特征

云南香格里拉德钦—四川得荣地震序列中,中等级以上地震震源机制解除个别出现近 EW 向节面外, NWW 向的优势断层面分布特征明显(图 3)。同时,整个序列地震的分布长轴近 NWW 向。根据中国地震局发布的  $M_S5.9$  地震烈度图,本次地震最高烈度为 VII 度,等震线呈椭圆、长轴沿 NW 走向分布。  $M_S5.1$ 、 $M_S5.9$  地震和余震震中基本位于 VII 度震区

表 1 CAP 方法获取的震源机制解结果

Table 1 Focal mechanisms obtained by CAP method

序号	发震时刻	纬度/经度/ (°N) (°E)	质心 深度 $M_S$ /km	$M_S$	$M_w$	节面 I			节面 II			$P$ 轴		$T$ 轴		类型	使用 (Zoback, 1992) 台站 数目
						走向/ (°)	倾角/ (°)	滑动角/ (°)	走向/ (°)	倾角/ (°)	滑动角/ (°)	方位角/ (°)	倾角/ (°)	方位角/ (°)	倾角/ (°)		
1	20130828 044452.2	99.33 28.20	7	5.1	5.06	290	55	-72	80	39	-114	249	73	7	8	NF	11
2	20130828 075304.6	99.36 28.19	6	4.5	4.48	291	55	-73	83	38	-113	247	73	9	9	NF	6
3	20130831 080419.2	99.35 28.15	9	5.9	5.58	299	53	-73	91	40	-112	261	74	16	7	NF	17
4	20130831 081327.4	99.44 28.24	12	4.4	4.41	308	41	-97	137	49	-84	91	84	223	4	NF	8
5	20130831 082703.2	99.45 28.20	7	4.5	4.75	323	56	-79	124	36	-106	267	76	45	10	NF	10
6	20130831 091845.4	99.41 28.26	10	4.1	4.49	283	57	-81	87	34	-104	220	76	7	12	NF	8
7	20130901 071746.3	99.49 28.19	10	4.5	4.28	273	75	-99	127	18	-58	170	59	12	29	NF	8
8	20130902 225232.6	99.37 28.19	9	4.2	4.39	275	51	-90	95	39	-90	185	84	5	6	NF	10
9	20130903 223234.6	99.46 28.19	8	4.5	4.65	268	41	-117	122	54	-68	86	71	197	7	NF	10
10	20130906 230408.7	99.47 28.22	7	4.5	4.56	289	36	-116	141	58	-72	93	71	218	11	NF	8

表 2 震源机制解结果(走向,倾角,滑动角)对比

Table 2 Comparison of focal mechanism solutions

	本文计算结果	中国地震局地球物理研究所结果	Global CMT 解
$M_S5.9$ 地震	$299^\circ, 53^\circ, -74^\circ$	$285^\circ, 53^\circ, -74^\circ$	$292^\circ, 43^\circ, -74^\circ$
$M_S5.1$ 地震	$290^\circ, 55^\circ, -72^\circ$	$289^\circ, 52^\circ, -73^\circ$	—
数据类型	区域地震观测记录波形拟合	区域地震观测记录波形拟合	全球远震记录波形拟合





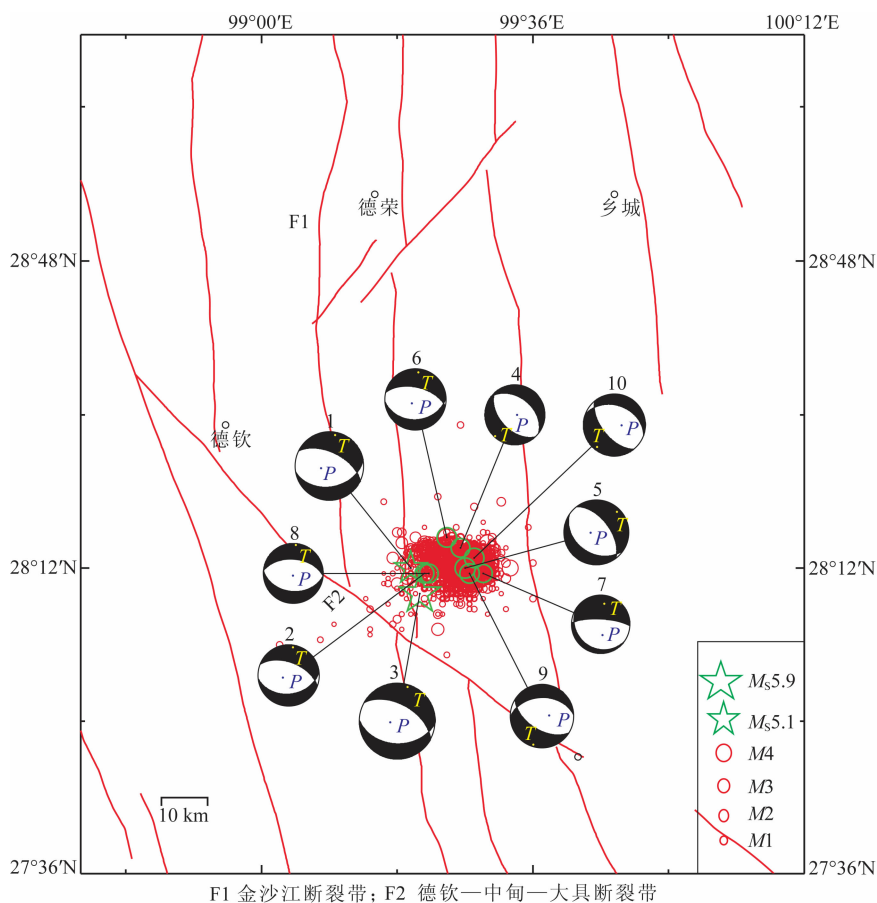


图 3 震源机制空间分布图

图中的震源球上方的序号对应表 1 中的事件序号,图中余震为  $M_S 5.1$  地震发生至 9 月 10 日  $M_S > 1$  的余震分布。

Fig. 3 Spatial distribution of focal mechanisms

The number above the beach ball is consistent with the ones in Table 1.  $M_S > 1$  aftershocks drawn is from the occurrence of the  $M_S 5.1$  event to Sep 10<sup>th</sup>, 2013.

之内。因此可以推断发震断层应为一条 NWW 向的正断层型活动断裂带。

由图 4 可见,10 次地震  $T$  轴呈近水平分布, $P$  轴近于直立,其方位角分布表明震源区存在强烈的近 NS 向水平拉张,近 EW 向垂直挤压作用。且  $T$ 、 $P$  轴方位角均随时间发生明显变化,震源区应力调整剧烈。其中,1—3 号地震的  $T$  轴为 NNE-SSW 向,4、5 号地震转变为 NE-SW 向,6—8 号地震恢复为与  $M_S 5.1$  地震基本一致的 NNE-SSW 向,随后的 9 号地震略有向东偏转,与  $M_S 5.9$  地震一致,但 10 号地震则转为 NE-SW 向。显然 4、5、10 号地震的  $T$  轴方向明显偏离了其他几次地震, $M_S 5.9$  地震后,8 月 31 日的  $M_S 4.4$  和  $M_S 4.5$  两次地震震源区出现短暂的拉张应力调整,随后的 6—9 号地震显示,截至 9 月 3 日拉张应力已逐渐恢复到与主震较一致方向,但是 9 月 6 日拉张应力再次转变到 NE-SW 方向。震源区  $T$  轴出现两次从 NNE-SSW 转变到 NE-SW 的

变化周期,表明拉张应力在主震发生后的较短时间内调整作用明显。 $P$  轴的方位角分布亦存在变化,其中 1—5 号地震的  $P$  轴为 NEE-SWW 向,6 号地震的  $P$  轴转变为 NE 向,7、8 号地震的  $P$  轴进一步转变为 NNW-SSE 和 NNE-SSW 向,而 10 号地震的  $P$  轴方向则恢复到与  $M_S 5.9$  地震一致。6、7、8 号地震的  $P$  轴方向严重偏离了其他几次地震,说明  $M_S 5.9$  地震后(9 月 1、2 日) $P$  轴出现强烈的调整,9 月 6 日的 10 号地震则显示  $P$  轴已经恢复到与  $M_S 5.9$  地震基本一致的方向。

震源机制解携带的是地壳内部的应力状态,一个地震序列的震源机制解能够反映该序列所处的构造带的应力状态。本文利用 FMSI (Gephart and Forsyth, 1984; Gephart, 1990) 方法,对香格里拉地震序列开展了震区地壳构造应力场的反演,结果表明,震源区最大主压应力方位角  $144^\circ$ ,倾角  $53^\circ$ ; 最大主张应力方位角  $8^\circ$ ,倾角  $29^\circ$ 。由于近 40 年来,

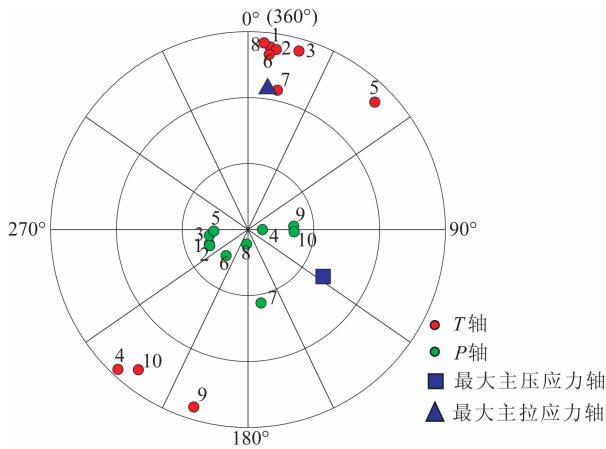


图4 震区发震应力场  $P$ 、 $T$  轴,构造应力场最大主压(拉)应力轴在水平面的投影示意图

投影点的方向表示方位角,与圆心之间的距离长度表示倾角,倾角越低,距离越长;倾角越高,距离越短。 $P$ 、 $T$  轴投影点旁注释的数字,代表对应表1中的地震事件,以示其方位角随时间发生变化的分布。

Fig. 4 Spatial distributions of  $P$ -axes,  $T$ -axes of earthquake seismogenic stress field and the principal stress axes of the local tectonic stress field

The dots and lengths to the center show the azimuth and dip respectively, while the longer lengths represent lower dips and shorter lengths indicate higher dips. Numbers near the dots indicate the corresponding event which are consistent with Table 1, showing the changes of  $P$ -axes and  $T$ -axes over time.

香格里拉地区鲜有中等以上地震发生,背景区域构造应力场的资料甚少,因此本文参考 GPS 观测给出的背景应变率场所反映的地表应力状态进行分析。本文应力场反演结果表明,震区构造带上受到 NW-SE 向垂直挤压、NNE-SSW 水平拉张的应力作用。GPS 观测认为滇西香格里拉地区地表相对于欧亚板块朝 NNW 向滑移 (Shen et al., 2005; Gan et al., 2007; 王阎昭等, 2008; 程佳等, 2012; Zhang, 2013), 反映出 NW 向的地表最大主压应力, NE 向和 NNE 向的地表最大主拉应力分布。本文得到  $M_{s5.9}$  地震序列的构造应力场结果表明震区地壳应力状态与地表的应力状态基本一致, 地震发生构造带上的应力状态可能受到背景大尺度应力场的控制。

### 3.2 川滇地区中强以上地震的震源机制解空间分布特征

川滇地区位于青藏高原东南缘,晚中新世以来,印度板块与欧亚板块的持续碰撞导致青藏高原隆升并东向挤出,在其东部刚性的华南块体阻挡下,高原物质沿川滇块体边界的大型走滑断裂带呈南东向挤

出,导致位于青藏高原东南缘的川滇地区发生顺时针转动和南东向滑移。程佳等 (2012) 的研究结果认为,川滇块体内部的各次级块体均受到了来自其相邻块体的应力作用而发生旋转,相邻块体之间的边界断裂带也呈现出相应的挤压或拉张活动特征。香格里拉震区处于滇西北香格里拉次级块体与保山次级块体的边界断裂带德钦—中甸—大具断裂带中段附近,本文计算的 10 次地震和极震区均位于香格里拉次级块体内部。这里历史上长期缺乏地震,本次地震序列的发生填补了作者近期对川滇地区中强以上地震震源机制解的研究结果 (罗钧等, 2014), 图 5 给出了较为完整的近期川滇地区中强以上地震的震源机制解空间分布图像。

由图 5、6 可见,川滇块体各不同断裂带、块体内部各次级块体之间、块体内外表现出不同的震源机制解空间分布特征。总体上,除香格里拉次级块体各边界断裂带、保山次级块体北缘为显著的正断层型震源机制解类型外,滇中次级块体东、西边界断裂带分别表现为左旋走滑和右旋走滑的机制解类型,而四川盆地与马边次级块体之间的边缘过渡区域,震源机制解类型多表现为逆冲型,反映了西部高原物质向东逃逸推覆过程中受到其东部稳定的华南块体的抵挡、川滇块体向南东向滑移的构造活动特征。

香格里拉次级块体是川滇块体内部显著的正断层地震分布区域,其北边界金沙江断裂带北缘与理塘断裂带交汇处、东边界理塘断裂带中段、南边界丽江—小金河断裂带西南段上,均显著分布着正断层型地震。沿各边界断裂带的震源机制分布表明香格里拉次级块体及其边界断裂带主要受水平引张力控制,张应力轴  $T$  轴较为水平,压应力轴  $P$  轴较为直立。香格里拉次级块体西侧的保山次级块体北缘的震源机制解亦为正断层型,拉张作用显著。

我们注意到,在香格里拉次级块体震源机制解压应力轴  $P$  轴整体较为直立、 $T$  轴基本水平的背景下,其各边界断裂带上正断层地震的断层节面及震源应力轴走向存在差异,与保山次级块体北缘的正断层地震的断层节面和震源应力轴走向也不一致,显示出香格里拉次级块体和保山次级块体受力状态和运动方向的差异。金沙江断裂带北缘断层节面为 EW 向, $T$  轴近 NS 向或 NNW-SSE 向;理塘断裂带中段断层节面为近 EW 向, $T$  轴近 N-S 向,个别呈 NNE-SSW 向;德钦—中甸—大具断裂带中段断层节面为 NWW 向, $T$  轴呈 NE-SW 向或 NNE-SSW 向。丽江—小金河断裂带西南段保山次级块体北缘



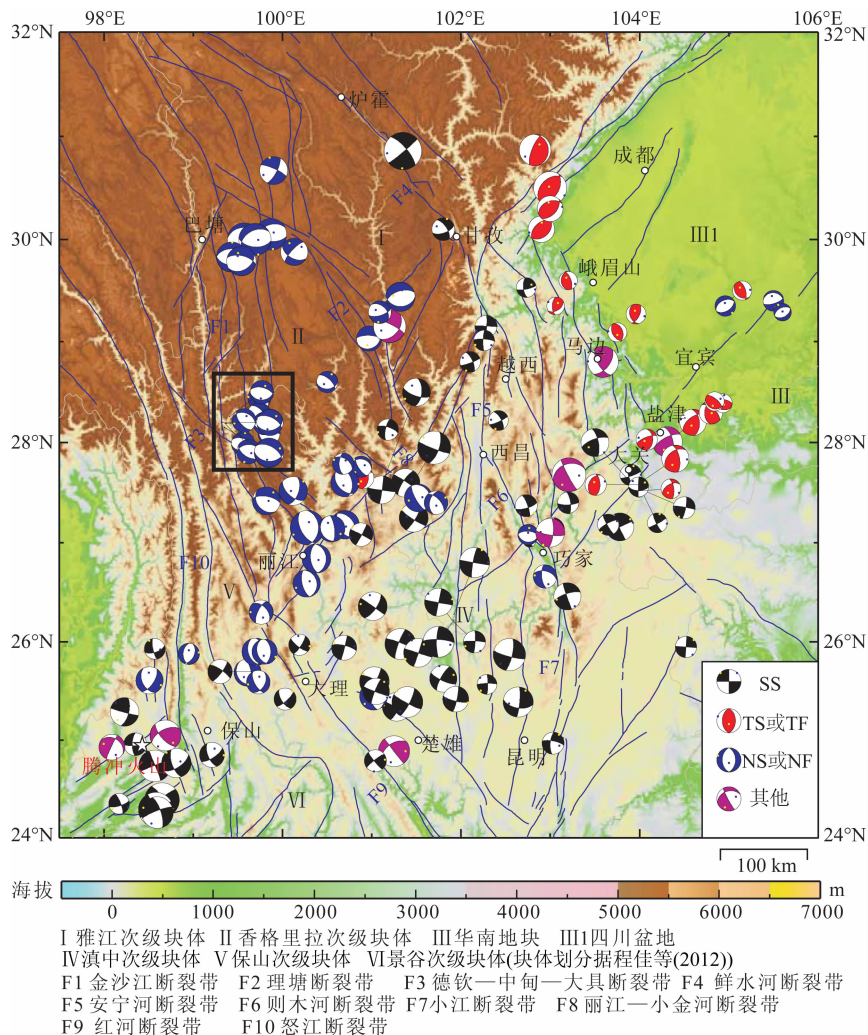


图5 1976年至2013年9月10日川滇块体及周边近期中等地震震源机制分布图  
 震源机制解按照 Zoback(1992)分类,图中黑色框内的震源机制解为此次香格里拉德钦地震序列的震源机制解分布。

Fig. 5 Spatial distribution of the moderate focal mechanisms of Sichuan-Yunnan block and its adjacent regions from 1976 to Sep 10<sup>th</sup>, 2013

Focal mechanism solutions are classified according to Zoback (1992), the beach-balls in the black box are the results of this paper.

断层节面为近 NS 向,  $T$  轴呈近 EW 向或 NEE-SWW 向. GPS 观测认为 (Gan et al., 2007; 王阎昭等, 2008; 程佳等, 2012), 由于川滇块体及周边的各个相邻次级块体间的应力作用, 香格里拉次级块体和保山次级块体以不同的速率做高速的顺时针旋转, 但保山次级块体的旋转速率更高, 这与两次级块体所受到不同的地壳应力作用有关. 香格里拉次级块体的地壳形变受到青藏高原主体地区的挤出和东喜马拉雅构造的楔入共同作用, 而保山次级块体除此之外, 还受到由于地势差异引起的重力滑塌影响和缅甸板块相对于自身的逆时针旋转在块体北东端产生拉张作用的拖曳 (Socquet and Pubellier, 2005). 震源机制解结果所显示的香格里拉次级块体边界断裂带和保山次级块体北缘不同的震源区拉张应力分

布, 表明了作为青藏高原东南缘两主要次级块体的香格里拉次级块体和保山次级块体内不同的拉张应力作用方式和地壳应力环境.

## 4 结论

当前的研究在大尺度范围上, 对青藏高原东南缘受到高原物质东向挤出和滑移的运动特征已达成了共识 (Tapponnier et al., 2001). 在此基础上, 该区各个次级块体的运动特征和边界断裂带的活动习性, 对认识区域地震背景和现今构造应力场特征仍具有重要的研究价值. 本文通过使用云南、四川、西藏区域台网的数字地震波形资料及区域地震全波形拟合的 CAP 方法, 获得了云南香格里拉德钦  $M_s 5.9$

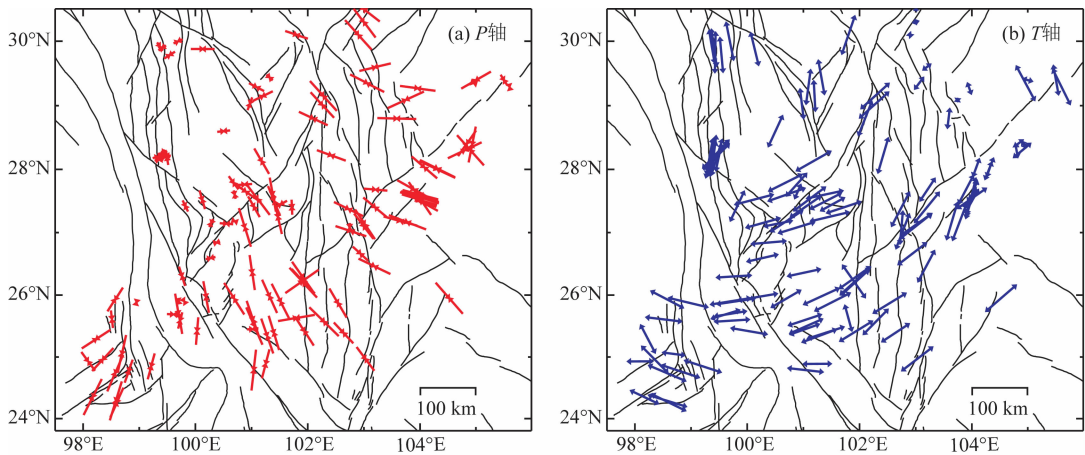


图6 1976年至2013年9月10日川滇块体及周边近期中等地震的  $P$ 、 $T$  轴分布  
 线段方向表示方位角,长度表示倾角,倾角越低,线段越长;倾角越高,线段越短。

Fig. 6 Spatial distributions of  $P$ -axes and  $T$ -axes of Sichuan-Yunnan block and its adjacent region from 1976 to Sep 10<sup>th</sup> 2013

The directions and lengths show the azimuth and the dip respectively, while the longer ones represent lower dips and shorter arrows indicate higher dips.

地震序列中  $M_s$ 4.0 以上地震的震源机制解。此次地震序列发生在历史上长期缺乏破坏性地震的德钦—中甸—大具断裂带中段,本文的计算结果填充了川滇地区震源机制解及构造应力场的空间分布图像,加深了对川滇地区动力学过程的认识。

综上所述,云南香格里拉德钦地震序列  $M_s$ 5.1、 $M_s$ 5.9 地震的破裂节面分别为走向  $290^\circ$ 、倾角  $55^\circ$ 、滑动角  $-72^\circ$ ;走向  $299^\circ$ 、倾角  $53^\circ$ 、滑动角  $-73^\circ$ 。本文获取的 10 次  $M_s > 4$  地震均为正断层型地震,破裂面走向优势分布为 NWW 向,发震构造应为 NWW 向活动断裂,断层节面倾角倾斜,为正断层型地震序列。震源区  $T$  轴基本水平,方位角主要表现为 NNE-SSW 向。 $P$  轴基于直立,方位角主要表现为 NEE-SWW 向。同时, $M_s$ 5.9 地震后持续余震  $T$ 、 $P$  轴随时间出现明显的方位角变化,表明  $M_s$ 5.9 地震后震源区应力调整作用突出。

构造应力场反演结果表明该地震序列发生的构造活动带受到强烈的 NW-SE 向垂直挤压,NNE-SSW 水平拉张应力作用,与 GPS 观测所反映的背景地表最大主压(拉)应力方向基本一致。震源区的应力状态可能主要受到背景大尺度构造应力场的控制。香格里拉震区位于香格里拉次级块体内部,该次级块体是川滇块体及周边区域显著的拉张作用区。但香格里拉次级块体和保山次级块体正断层地震的断层节面及震源应力轴走向分布的空间变化特征,表明在大尺度构造应力场作用下存在块体间相互作用、地势差异引起的重力滑塌等作用对构造活动的

影响。

**致谢** 中国地震局地球物理研究所“国家数字地震测震台网数据备份中心”为本研究提供地震波形数据(郑秀芬等,2009)。本文 CAP 波形反演和 F-K 理论地震图计算程序来源于美国圣路易斯大学的朱露培博士;图形绘制采用了 GMT 绘图软件(Wessel and Smith, 1991)。在此一并感谢。

## References

- Bassin C, Laske G, Masters G. 2000. The current limits of resolution for surface wave tomography in North America. *Eos Trans AGU*, 81: F897.
- Cheng J, Xu X W, Gan W J, et al. 2012. Block model and dynamic implication from the earthquake activities and crustal motion in the southeastern margin of Tibetan Plateau. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 55(4): 1198-1212, doi:10.6038/j.issn.0001-5733.2012.04.016.
- Cheng W Z, Diao G L, Lü G P, et al. 2003. Focal mechanisms, displacement rate and mode of motion of the Sichuan-Yunnan Block. *Seismology and Geology* (in Chinese), 25(1): 71-87.
- Cui X F, Xie F R, Zhang H Y. 2006. Recent tectonic stress field zoning in Sichuan-Yunnan region and its dynamic interest. *Acta Seismologica Sinica* (in Chinese), 28(5): 451-461.
- Gan W J, Zhang P Z, Shen Z K, et al. 2007. Present-day crustal motion within the Tibetan Plateau inferred from GPS measurements. *J. Geophys. Res.*, 112(B8): B08416, doi: 10.1029/2005JB004120.
- Gephart J W, Forsyth D W. 1984. An improved method for determining the regional stress tensor using earthquake focal mechanism data; application to the San Fernando earthquake

- sequence. *J. Geophys. Res.*, 89(B11): 9305-9320.
- Gephart J W. 1990. Stress and the direction of slip on fault planes. *Tectonics*, 9(4): 845-858.
- Long F, Zhang Y J, Wen X Z, et al. 2010. Focal mechanism solutions of  $M_L \geq 4.0$  events in the  $M_s 6.1$  Panzhihua-Huilu earthquake sequence of Aug 30, 2008. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 53(12): 2852-2860, doi: 10.3969/j.issn.0001-5733.2010.12.008.
- Luo J, Zhao C P, Zhou L Q. 2014. Characteristics of focal mechanisms and stress field of the Chuan-Dian rhombic block and its adjacent regions. *Seismology and Geology* (in Chinese), 36(2): 405-421.
- Luo Y, Ni S D, Zeng X F, et al. 2010. A shallow aftershock sequence in the north-eastern end of the Wenchuan earthquake aftershock zone. *Science in China (Series D): Earth Science* (in Chinese), 53(11): 1655-1664.
- Lü J, Zheng X F, Xiao J, et al. 2013. Rupture characteristics and seismogenic structures of the  $M_s 5.7$  and  $M_s 5.6$  Yiliang earthquake of Sep. 7, 2012. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 56(8): 2645-2654, doi: 10.6038/cjg20130814.
- Shen J, Wang Y P, Ren J W. 2001. The Quaternary right-lateral strike-slipping on the Deqin-Zhongdian-Daju Fault zone in Yunnan, China. // Ma Z J ed. *Study on Recent Deformation and Dynamics of the Lithosphere of Qinghai-Xizang Plateau* (in Chinese). Beijing: Seismological Press, 123-135.
- Shen J, Wang Y P, Ren J W, et al. 2003. Quaternary dextral shearing and crustal movement in southeast Tibetan Plateau. *Xinjiang Geology* (in Chinese), 21(1): 120-125.
- Shen Z K, Lü J N, Wang M, et al. 2005. Contemporary crustal deformation around the southeast borderland of the Tibetan Plateau. *J. Geophys. Res.*, 110(B11): B11409, doi: 10.1029/2004JB003421.
- Socquet A, Pubellier M. 2005. Cenozoic deformation in western Yunnan (China-Myanmar border). *Journal of Asian Earth Science*, 24(4): 495-515.
- Tapponnier P, Xu Z Q, Roger F, et al. 2001. Oblique stepwise rise and growth of the Tibet Plateau. *Science*, 294(5547): 1671-1677. doi: 10.1126/Science.105978.
- Wang Y Z, Wang E N, Shen Z K, et al. 2008. GPS-constrained inversion of present-day slip rates along major faults of the Sichuan-Yunnan region, China. *Science in China (Series D): Earth Science* (in Chinese), 51(9): 1267-1283.
- Wei S J, Zhan Z, Tan Y, et al. 2012. Locating earthquakes with surface waves and Centroid moment tensor estimation. *J. Geophys. Res.*, 117(B4): B04309, doi: 10.1029/2011JB008501.
- Wessel P, Smith W H F. 1991. Free software helps map and display data. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 72(41): 441-446.
- Xie F R, Zhu J Z, Liang H Q, et al. 1993. The basic characteristics of recent tectonic stress field in southwest region of China. *Acta Seismologica Sinica* (in Chinese), 15(4): 407-417.
- Xu Y, Herrmann R B, Koper K D. 2010. Source parameters of regional small-to-moderate earthquakes in the Yunnan-Sichuan region of China. *Bull. Seis. Soc. Am.*, 100(5B): 2518-2531. doi: 10.1785/0120090195.
- Zhang P Z. 2013. A review on active tectonics and deep crustal processes of the Western Sichuan region, eastern margin of the Tibetan Plateau. *Tectonophysics*, 584: 7-22, doi: 10.1016/j.tecto.2012.02.021.
- Zhao L, Luo Y, Liu T Y, et al. 2013. Earthquake focal mechanisms in Yunnan and their inference on the regional stress field. *Bull. Seis. Soc. Am.*, 103(4): 2498-2507, doi: 10.1785/0120120309.
- Zhao L S, Helmberger D V. 1994. Source estimation from broadband regional seismograms. *Bull. Seis. Soc. Am.*, 84(1): 91-104.
- Zheng X F, Ouyang B, Zhang D N, et al. 2009. Technical system construction of Data Backup Center for China Seismograph Network and the data support to researches on the Wenchuan earthquake. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 52(5): 1412-1417, doi: 10.3969/j.issn.0001-5733.2009.05.031.
- Zheng Y, Ma H S, Lü J, et al. 2009. Source mechanism of strong aftershocks ( $M_s \geq 5.6$ ) of the 2008/05/12 Wenchuan earthquake and the implication for seismotectonics. *Science in China (Series D): Earth Science* (in Chinese), 52(6): 739-753.
- Zhu L P, Helmberger D V. 1996. Advancement in source estimation techniques using broadband regional seismograms. *Bull. Seis. Soc. Am.*, 86(5): 1634-1641.
- Zhu L P, Helmberger D V, Saikia C K, et al. 1997. Regional waveform calibration in the Pamir-Hindu Kush region. *J. Geophys. Res.*, 102(B10): 22799-22813.
- Zhu L P, Rivera L A. 2002. A note on the dynamic and static displacements from a point source in multilayered media. *Geophys. J. Int.*, 148(3): 619-627.
- Zoback M L. 1992. First- and second-order patterns of stress in the lithosphere: The world stress map project. *J. Geophys. Res.*, 97(B8): 11703-11728.

## 附中文参考文献

- 程佳, 徐锡伟, 甘卫军等. 2012. 青藏高原东南缘地震活动与地壳运动所反映的块体特征及其动力来源. *地球物理学报*, 55(4): 1198-1212, doi: 10.6038/j.issn.0001-5733.2012.04.016.
- 程万正, 刁桂苓, 吕戈培等. 2003. 川滇地块的震源力学机制、运动速率和活动方式. *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. *地震学报*, 28(5): 451-461.
- 龙锋, 张永久, 闻学泽等. 2010. 2008年8月30日攀枝花—会理6.1级地震序列  $M_L \geq 4.0$  事件的震源机制解. *地球物理学报*, 53(12): 2852-2860, doi: 10.3969/j.issn.0001-5733.2010.12.008.
- 罗钧, 赵翠萍, 周连庆. 2014. 川滇块体及周边区域现今震源机制和应力场特征. *地震地质*, 36(2): 405-421.
- 罗艳, 倪四道, 曾祥方等. 2010. 汶川地震余震区东北端一个余震序列的地震学研究. *中国科学(D辑): 地球科学*, 40(6): 677-687.

- 吕坚, 郑秀芬, 肖健等. 2013. 2012年9月7日云南彝良  $M_s$ 5.7、 $M_s$ 5.6 地震震源破裂特征与发震构造研究. 地球物理学报, 56(8): 2645-2654, doi: 10.6038/cjg20130814.
- 沈军, 汪一鹏, 任金卫. 2001. 中国云南德钦—中甸—大具断裂带第四纪右旋走滑运动. // 马宗晋编. 青藏高原岩石圈现今变动与动力学. 北京: 地震出版社, 123-135.
- 沈军, 汪一鹏, 任金卫等. 2003. 青藏高原东南部第四纪右旋剪切运动. 新疆地质, 21(1): 120-125.
- 王闯昭, 王恩宁, 沈正康等. 2008. 基于 GPS 资料约束反演川滇地区主要断裂现今活动速率. 中国科学(D辑): 地球科学, 38(5): 582-597.
- 谢富仁, 祝景忠, 梁海庆等. 1993. 中国西南地区现代构造应力场基本特征. 地震学报, 15(4): 407-417.
- 郑秀芬, 欧阳飏, 张东宁等. 2009. “国家数字测震台网数据备份中心”技术系统建设及其对汶川大地震研究的数据支撑. 地球物理学报, 52(5): 1412-1417, doi: 10.3969/j.issn.0001-5733.2009.05.031.
- 郑勇, 马宏生, 吕坚等. 2009. 汶川地震强余震( $M_s \geq 5.6$ )的震源机制解及其与发震构造的关系. 中国科学(D辑): 地球科学, 39(4): 413-426.

(本文编辑 胡素芳)