

尹欣欣,郭安宁,赵韬,等.四川长宁 $M_s6.0$ 地震区域构造应力场特征分析[J].地震工程学报,2019,41(5):1215-1220.doi:10.3969/j.issn.1000-0844.2019.05.1215

YIN Xinxin, GUO Anning, ZHAO Tao, et al. Characteristics of the Regional Tectonic Stress Field of the Changning $M_s6.0$ Earthquake, Sichuan Province[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2019, 41(5): 1215-1220. doi: 10.3969/j.issn.1000-0844.2019.05.1215

四川长宁 $M_s6.0$ 地震区域构造应力场特征分析

尹欣欣¹, 郭安宁¹, 赵韬³, 李少华^{1,2}

(1. 甘肃省地震局, 甘肃 兰州 730000; 2. 中国地震局黄土地震工程开放实验室, 甘肃 兰州 730000;
3. 陕西省地震局, 陕西 西安 710000)

摘要: 2019年6月17日在四川宜宾市长宁县(28.34°N, 104.90°E)发生 $M_s6.0$ 地震, 余震发育。本文利用区域测震台网的地震观测数据基于CAP方法计算了28°~29°N, 104°~105°E范围内的14个 $M_s > 3.0$ 以上地震的震源机制解, 结合全球矩心矩张量目录和部分前人研究结果中该区域的共27个震源机制解数据, 应用MSATSI软件反演了研究区域的应力场。将研究区域按 $0.1^\circ \times 0.1^\circ$ 划分成25个应力网格, 最终得到9个网格的应力分布结果, 大多数应力场方向稳定, 根据主震所在应力网格点得到主震的断层类型为主逆冲型。本文研究成果为四川长宁地区的孕震机理、活动构造以及地震趋势判定提供了可靠的参考依据。

关键词: 长宁地震; 震源机制解; 应力场反演; CAP震源机制解法

中图分类号: P315

文献标志码: A

文章编号: 1000-0844(2019)05-1215-06

DOI: 10.3969/j.issn.1000-0844.2019.05.1215

Characteristics of the Regional Tectonic Stress Field of the Changning $M_s6.0$ Earthquake, Sichuan Province

YIN Xinxin¹, GUO Anning¹, ZHAO Tao³, LI Shaohua^{1,2}

(1. Earthquake Agency of Gansu Province, Lanzhou 730000, Gansu, China;

2. Open Laboratory of Loess Earthquake Engineering, China Earthquake Agency, Lanzhou 730000, Gansu, China;

3. Earthquake Agency of Shaanxi Province, Xi'an 710000, Shaanxi, China)

Abstract: On June 17, 2019, an $M_s6.0$ earthquake occurred in Changning County, Yibin City, Sichuan Province (28.34°N, 104.90°E), China, followed by aftershocks. Seismic observation data from the regional seismic network were used to calculate the focal mechanism solutions of 14 $M_s > 3.0$ earthquakes in the range of 28°–29°N, 104°–105°E, based on the CAP method. Combined with data from 27 focal mechanism solutions of the study area from previous research results, the stress field of the study area was inverted using MSATSI software. After gridding the study area

收稿日期: 2018-11-11

基金项目: 中国地震局地震预测研究所基本科研业务费专项(2019IESLZ07, 2015IESLZ04, 2017 IESLZ09); 中国地震局地震科技星火计划项目(XH19043)共同资助

第一作者简介: 尹欣欣(1986—), 男, 高级工程师, 主要从事地震台网监测和数字地震资料的应用。E-mail: yxx@gstdzj.gov.cn.

通信作者: 李少华, 男, 高级工程师, 主要从事地震学、反演方面的研究工作。E-mail: lsh8111@sina.com.

as $0.1^\circ \times 0.1^\circ$, the distribution of 25 stress fields was obtained. Most of the stress fields were stable. The fault type of the mainshock was mainly a thrust earthquake according to the stress grid where the mainshock was located. Results of this paper can provide a reliable reference for seismogenic mechanisms, active structure, and the determination of seismic tendencies in the Changning area of Sichuan Province.

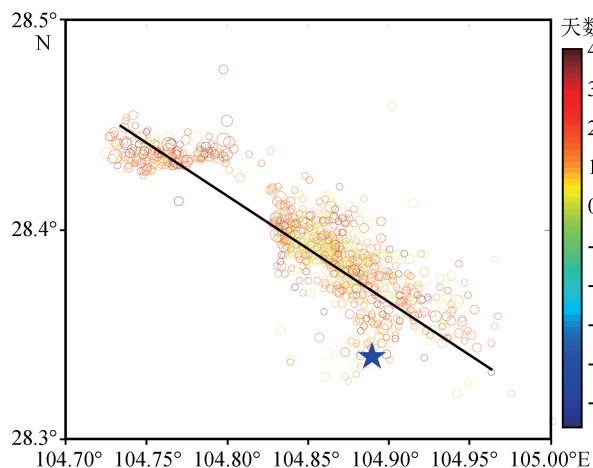
Keywords: Changning earthquake; focal mechanism solution; stress field inversion; CAP method

0 引言

据中国地震台网测定,2019年6月17日22时55分在四川宜宾市长宁县($28.34^\circ\text{N}, 104.90^\circ\text{E}$)发生6.0级地震,震源深度16 km。本次地震所处的川东南地区,自2018年12月以来5级以上地震活跃,本次地震南侧约14 km处曾发生2018年12月16日四川兴文5.7级和2019年1月3日四川珙县5.3级地震。1900年以来,震中50 km范围内未发生6级以上地震;震中100 km范围内发生过2次6级以上地震,分别为1917年7月31日云南大关6.8级和1974年5月11日云南大关北7.1级地震,其中云南大关北7.1级地震为距本次地震最近的6级以上地震,空间距离约80 km;震中100~200 km范围内发生6.0至6.9级地震5次,均属于1935—1936年四川马边6级强震群序列。上述6级以上地震均发生在川滇块体东边界的马边—大关地震带上。此次地震位于川东南地区,发生于四川盆地边缘的长宁背斜构造附近规模不大的次级断层上,与上述6级以上地震处于不同的构造位置,也与发生在龙门山断裂带上的汶川8.0级地震和芦山7.0级地震处于不同的构造位置。本次地震序列相对活跃,截止至6月24日8时30分,共记录到3级以上余震47次,其中3.0至3.9级地震40次;4.0至4.9级地震4次;5.0至5.9级地震3次,分别为6月17日23时36分5.1级地震和6月18日7时34分5.3级地震以及6月22日22时29分5.4级地震。相对于其他地震来说,本次地震余震十分丰富,具体分布见图1所示。根据余震分布方向可以看出本次地震迁移方向为NW向,度数大约为北向西 70° 。如此丰富的余震可能与震区附近分布有多条规模不大的次级断层触发活动有关。

2019年6月17日四川长宁6.0级地震发生后,造成了10多人死亡数百人受伤,并造成了巨大的经济损失。为了研究该地震主余震的震源机制以及发震地区的构造应力场,本文收集了区域地震台网的

地震事件波形,利用CAP震源机制方法分析了主余震14个震源机制解,联合该地区历史地震震源机制解资料采用STASI方法反演了 $104^\circ\sim 106^\circ\text{E}, 27^\circ\sim 29^\circ\text{N}$ 范围内(简称研究区域)的区域构造应力场。通过区域构造应力场给出了震源区的受力分布状况,为地震的孕育背景和后续的趋势分析提供了基础。



(蓝色“☆”代表主震位置)

图1 2019年6月12日—6月22日之间四川长宁地区地震时空分布

Fig.1 Spatial-temporal distribution of earthquakes in Changning area, Sichuan Province during June 12–22, 2019

1 震源机制解计算

本文计算震源机制解方法使用的是CAP震源机制解法,该方法的基本原理为:任意一个双力偶震源的理论合成位移 $s(t)$ 可表示为:

$$s(t) = M_0 \sum_{i=1}^3 A_i(\theta - \varphi_i, \delta, \lambda) G_i(t) \quad (1)$$

式中: $i=1, 2, 3$ 时分别为垂直走滑、垂直倾滑和 45° 倾滑等3种最基本的断层类型; G_i 为格林函数; A_i 为射线系数; θ 为台站方位角; M_0 为标量地震矩; $\varphi_i, \delta, \lambda$ 依次为所求震源机制解的走向、倾角和滑动角参数。

反演过程中,以合成地震位移 $s(t)$ 与观测地震位移 $u(t)$ 一致作为判断标准

$$u(t) = s(t) \quad (2)$$

可定义一个如下的误差目标函数来衡量 s 与 u 的差异

$$e = \left\| \left(\frac{r}{r_0} \right)^p \right\| \cdot \| u - s \| \quad (3)$$

式中: r 为震中距; r_0 为选定的参考震中距; p 则是考虑到几何扩散因子对地震波形的影响而采用的指数因子,它使得地震的矩震级大小较为可靠,经参考前人研究的经验,一般情况下体波可给定 $p=1.0$ 、面波 $p=0.5$ ^[1-5]。根据以上 CAP 震源机制解方法对主震后 14 次 3 级以上的地震事件做了震源机制解计算。另外,收集了研究区域范围内 27 个历史震源机制解,具体空间分布见图 2 所示。

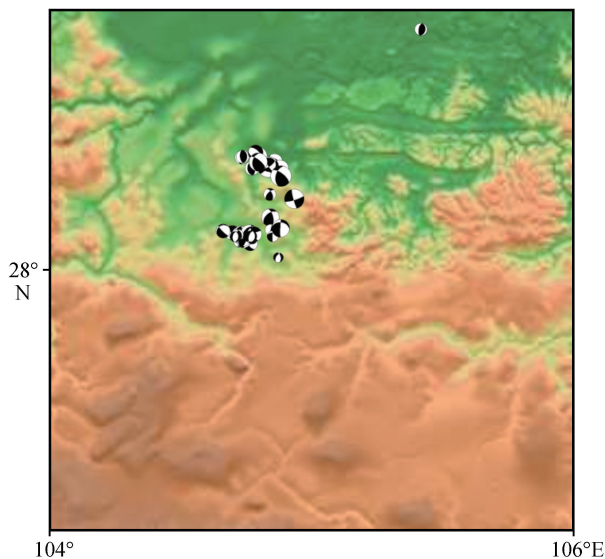


图 2 本文使用的震源机制解空间分布

Fig.2 Spatial distribution of focal mechanism solutions used in this paper

2 应力场反演

自然界中介质从一种应力状态转换到另一种应力状态中间过渡的过程一定是连续的,但实际调查研究应力场方向的分布时,所获得的应力张量解也许与输入数据的约束方式有关^[6-7]。为此,SATSI 算法^[8]很好地解决了该问题。程序中,输入震源机制在反演之前可被分到按一定维度分布的许多子区(称之为网格点)上,维度从 0D(一个网格点的单一法向应力反演运行)到 1D(应力场随时间变化)再上升到 4D(时空分布),4D 是把时间作为额外的坐标。

然后,采用阻尼最小二乘反演同时得到每个网格点的应力张量并进行平滑。本研究采用 Hardebeck 和 Michael^[8]提出的应力反演方法,使用 Martínez-Garzón 等^[9]提供的基于 SATSI 算法的 MSATSI 程序,利用震源机制解资料计算研究区域的构造应力场。该方法依据两个准则的其中一个为:使每个小区域的构造应力在震源机制节面上的剪应力与断层的滑动方向最为一致;Hardebeck 等对不同的数据选取方式做过研究,发现在反演过程中加入最优阻尼系数,可以消除方法来对应应力场参数的不确定度评估。因此另一个准则为:反演的过程中需加上一个合理的阻尼使反演的相邻区域的应力张量变化最小。

采样的迭代次数对于解的不确定度评价有重要意义,重采样次数过少会导致结果的可信度较低,次数过多又会导致计算量大,计算时间冗长。本文在多次测试并参考前人研究结果在 95% 的置信度下,采取对所有数据进行 2 000 次的抽样率来确定应力场参数的不确定度。经过计算得到最优状态下的三个主轴的应力方向及应力形因子 R 值

$$R = \frac{\sigma_2 - \sigma_1}{\sigma_3 - \sigma_1} \quad (4)$$

式中: R 值为应力形因子,该参数代表着相对应力的大小; σ_1 、 σ_2 、 σ_3 分别代表最大、中间、最小主压应力。通常情况下,描述一个完整的应力张量需要三个主应力 σ_1 、 σ_2 、 σ_3 的取值以及 T、B 和 P 轴方向,然而确定绝对应力大小是非常困难的^[10]。为使问题简化,引入约束 $\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3 = 0$,即仅考虑偏应力张量(由于改变流体静压强的大小不能改变各断层面上切应力的方向),并结合应力比定义式,就可以将 6 个独立参数简化成 5 个独立参数表示。而 R 值的意义是:当 R 值接近于 1.0 时,表示最小主压应力(σ_3)与中间主应力(σ_2)表现的张应力状态是一致的,即中间主应力也表现出一定的拉张成分,处于双轴拉张状态,两轴无法区分;当 R 值接近于 0.5 时,最大主压应力轴和最小主压应力轴均确定;当 R 值接近于 0 时,表示主压应力(σ_1)与中间主应力(σ_2)表现的压应力状态是一致的,处于双轴压缩状态,两轴无法区分。选取合适的阻尼系数,可以更好地在反演过程中分配观测值与理论值误差项和模型长度项的相对权重。阻尼系数过大,则平滑约束越紧,模型长度越短,得到的误差越大。根据 MSATSI 程序得到区域传统应力反演方法中人为因素带来的应力旋

转,实现观测值与理论值的最佳符合,最大限度地减少相邻区域之间的应力差异^[8]。因此选取最优的阻尼系数至关重要,可以更好地在反演过程中分配观测值与理论值误差项和模型长度项的相对权重。本文采用 MSATSI 软件包提供的方法,通过设定一系列的阻尼值,得到应力场反演模型长度与数据拟合,空心表示阻尼系数 e 的取值(图3),符号“+”表示所选择的最佳阻尼系数,折中曲线的拐点(本文中 $e=0.9$)即为最佳阻尼系数。拐点左侧,模型复杂程度提高,反演误差有所改善,但是观测值和理论值匹配度急剧降低;拐点右侧,随着模型的简化,反演误差会急剧增大^[8]。

本研究将研究区域以 $0.1^\circ \times 0.1^\circ$ 网格将研究区域划分为 25 个应力单元格,每个网格采用的震源机制至少为 1 个,地震个数少的网格里程序会采用阻尼最小二乘反演^[11-13]同时得到每个网格点的应力张量并进行平滑,即利用邻近网格节点及其周围一定范围内的多个震源机制解进行应力张量平滑约束。利用所有震源机制解数据反演得到9个网格的应力

分布,具体结果见图 4~6 所示,从结果上看,得到的 9 个网格的应力分布大部分最大水平应力方向稳定,主震位置所在的网格为 $28.3^\circ\text{N}, 104.8^\circ\text{E}$ 。

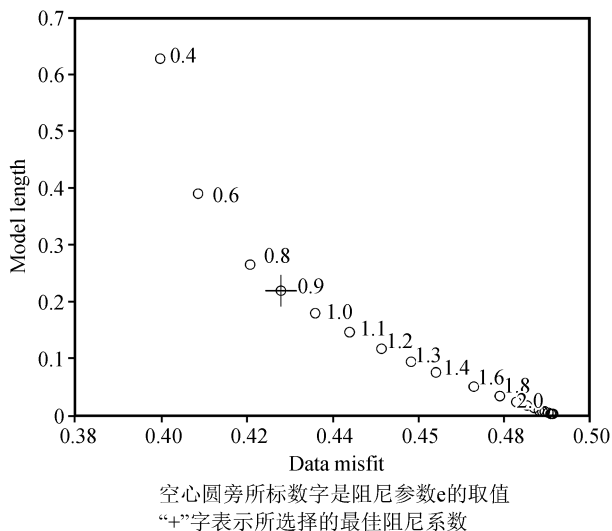


图 3 模型长度与数据拟合误差之间的折中曲线
Fig.3 Trade-off curve between the model length and the data fitting error

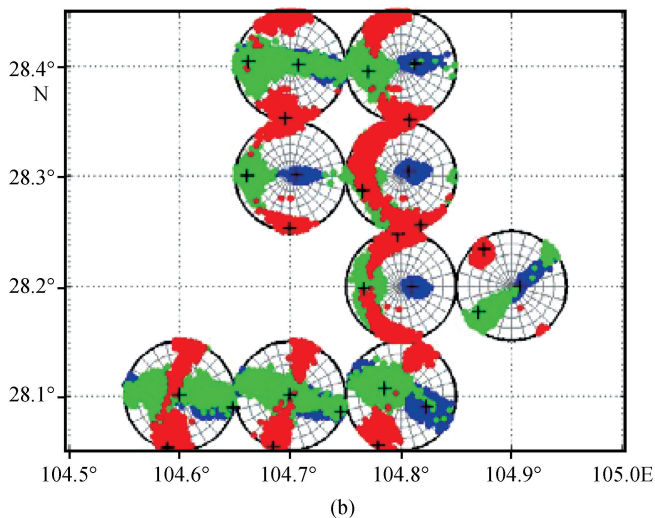
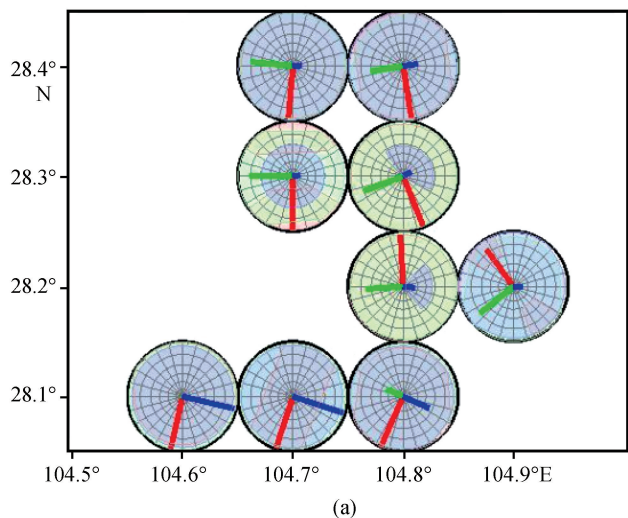


图 4 应力分布反演结果
Fig.4 Inversion results of stress distribution

3 结论与讨论

本文利用四川长宁 6.0 地震的主余震资料,分析了本次地震的时空迁移特征。根据余震序列分布特征,得到该次地震余震迁移方向为北向西 70° ,破裂长度大致为 35 km。

此次地震 $M_s 3.0$ 以上余震次数较多,本文利用 CAP 震源机制解方法对 14 次 3 级以上的地震序列做了震源机制解计算,结合研究区域内 27 个历史震

源机制解反演了区域构造应力场,应力场反演结果显示主震区域网格($28.3^\circ\text{N}, 104.8^\circ\text{E}$)断层显示为蓝色即逆冲类型,应力型因子 R 值为 0.35,表示主压应力(σ_1)与中间主应力(σ_2)表现的压应力状态比较接近,两轴难以区分。

本研究的震源机制解数据分布不是非常理想,借助 MSATSI 程序的阻尼最小二乘方法反演应力场得到相对真实可靠的结果。今后在台站密度的进一步加大,地震观测资料不断积累的基础上,根据大

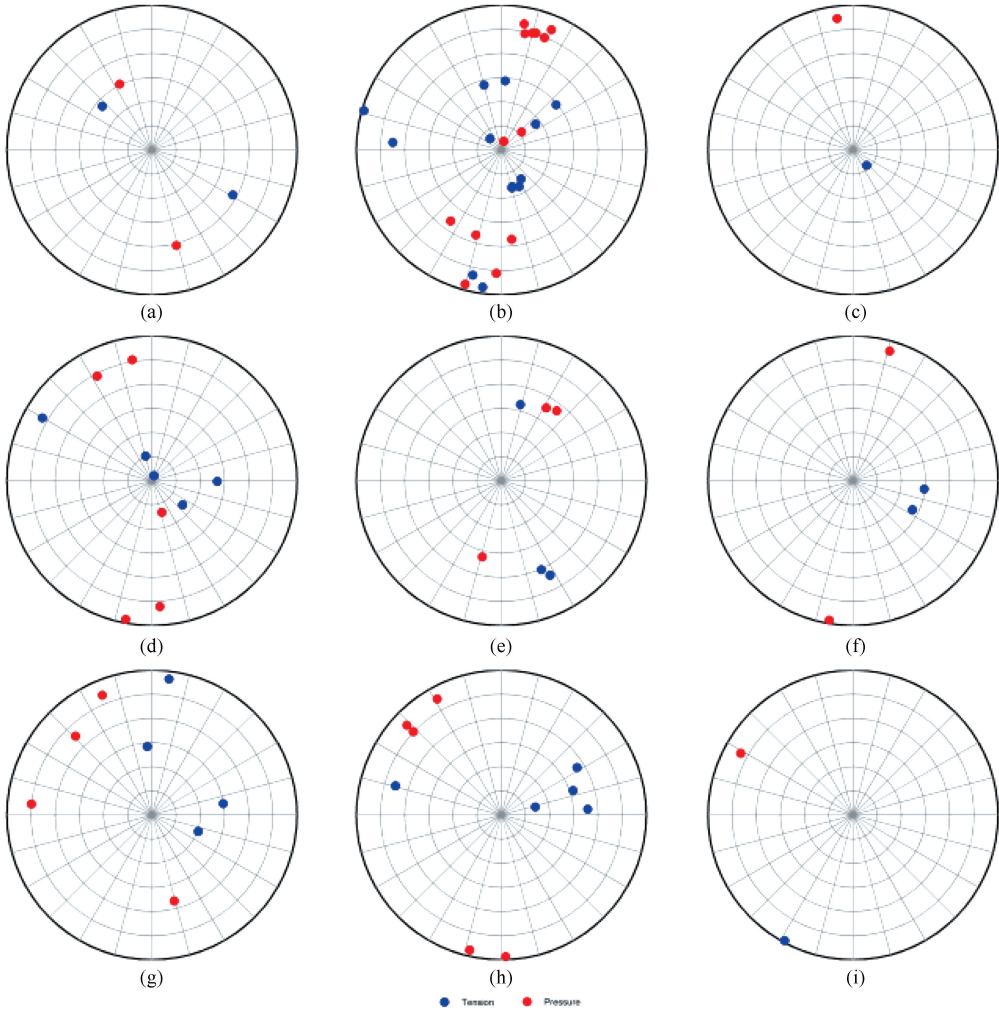
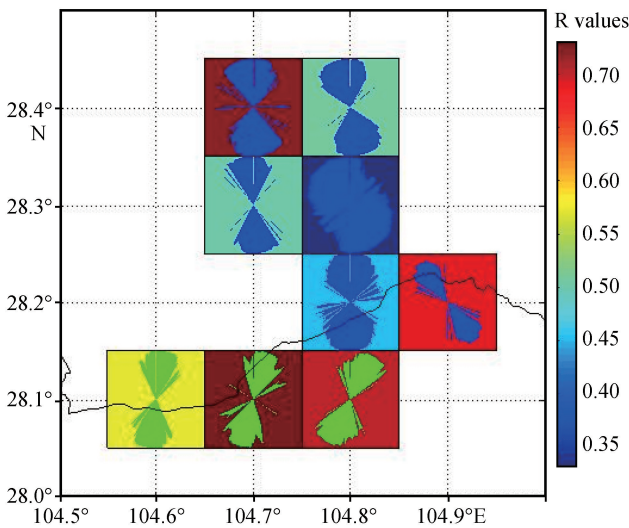


图 5 得到的 9 个网格具体应力分布

Fig.5 Specific stress distribution of 9 grids



($0.1^\circ \times 0.1^\circ$, 每个网格点都给出最大水平应力“红色表示正断层作用体系,绿色表示走滑断层体系,蓝色表示逆断层作用体系,黑色表示斜滑断层体系”)

图 6 本文研究区域应力反演结果

Fig.6 Stress inversion results in the study area

量可靠的小震震源机制解,可以反演得到更接近真实情况的精确应力场分布。

致谢:感谢四川省区域测震台网提供的地震事件波形资料以及 German Research Centre for Geosciences 提供的反演程序,本文图件是采用 GMT 和 Matlab 程序绘制。

参考文献(References)

[1] 杨萍,张辉,冯建刚.2015 年 11 月 23 日青海祁连 $M_s5.2$ 地震震源机制解及发震构造初步探讨[J].地震工程学报,2017,39(1):150-153,185.
 YANG Ping, ZHANG Hui, FENG Jianguang. Preliminary Study on Focal Mechanism Solution and Seismogenic Structure of Qilian, Qinghai $M_s5.2$ Earthquake on Nov.23, 2015[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2017, 39(1): 150-153, 185.

[2] 石学录,姚家骏,张博.2010 年玉树地震序列 $M_L \geq 4.0$ 事件震源机制解特征分析[J].地震工程学报,2017,39(1):112-118.
 SHI Xuelu, YAO Jiajun, ZHANG Bo. Focal Mechanism Solu-

- tion Analysis of $M_L \geq 4.0$ Earthquakes in the 2010 Yushu Earthquake Sequence[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2017, 39(1): 112-118.
- [3] 尹欣欣, 赵林林, 杨立明, 等. 青海门源 $M_S 6.4$ 地震震源机制解与震源深度研究[J]. 大地测量与地球动力学, 2018, 38(6): 624-628, 638.
YIN Xinxin, ZHAO Linlin, YANG Liming, et al. Research on Focal Mechanism and South Depth of Menyuan, Qinghai $M_S 6.4$ Earthquake[J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2018, 38(6): 624-628, 638.
- [4] 蔡杏辉, 陈惠芳, 段刚, 等. CAP方法反演福建漳浦海域 $M_L 4.0$ 级地震震源机制解[J]. 华南地震, 2018, 38(4): 17-21.
CAI Xinghui, CHEN Huifang, DUAN Gang, et al. Inversion of the Focal Mechanisms of the $M_L 4.0$ Earthquake in Zhangpu Sea Area, Fujian by Using the CAP Method[J]. South China Journal of Seismology, 2018, 38(4): 17-21.
- [5] 王力伟, 吴国瑞, 黄柳芳. CAP方法反演新丰江锡场地区 $M_L 4.0$ 级以上地震震源机制解[J]. 华南地震, 2018, 38(3): 1-8.
WANG Liwei, WU Guorui, HUANG Liufang. Focal Mechanism Inversion of $M_L \geq 4.0$ Earthquakes in Xichang, Xinfengjiang Reservoir by CAP Method[J]. South China Journal of Seismology, 2018, 38(3): 1-8.
- [6] HARDEBECK J L, MICHAEL A J. Stress orientations at intermediate angles to the San Andreas Fault, California[J]. Journal of Geophysical Research Solid Earth, 2004, 109(B11): B11310.
- [7] TOWNEND J. Regional Tectonic Stress near the San Andreas Fault in Central and Southern California [J]. Geophysical Research Letters, 2004, 31(15): L15S11.
- [8] HARDEBECK J L, MICHAEL A J. Damped Regional-scale Stress Inversions: Methodology and Examples for Southern California and the Coalinga Aftershock Sequence[J]. Journal of Geophysical Research Solid Earth, 2006, 111(B11): B11310.
- [9] MARTINEZ-GARZON P, KWIASTEK G, ICKRATH M, et al. MSATSI: A MATLAB Package for Stress Inversion Combining Solid Classic Methodology, a New Simplified User-Handling, and a Visualization Tool[J]. Seismological Research Letters, 2014, 85(4): 896-904.
- [10] 万永革, 沈正康, 兰从欣. 根据走滑大地震前后应力轴偏转和应力降求取偏应力量值的研究[J]. 地球物理学报, 2006, 49(3): 838-844.
WAN Yongge, SHEN Zhengkang, LAN Congxin. Deviatoric Stress Level Estimation According to Principle Axes Rotation of Stress Field before and after Large Strike-slip Type Earthquake and Stress Drop[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2006, 49(3): 838-844.
- [11] MENKE W. Geophysical Data Analysis: Discrete Inverse theory[J]. San Diego, 1989, California: Academic Press.
- [12] WAN Y G. Contemporary Tectonic Stress Field in China[J]. Earthquake Science, 2010, 23(4): 377-386.
- [13] 刘旭宙, 张元生, 秦满忠. 岷县 $M_S 6.6$ 地震震源机制及构造应力研究[J]. 地震工程学报, 2013, 35(3): 432-437.
LIU Xuzhou, ZHANG Yuansheng, QIN Manzhong. Analysis of the Focal Mechanism and Tectonic Stress of Minxian $M_S 6.6$ Earthquake[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2013, 35(3): 432-437.