

汶川地震后青藏高原东北缘中等地震活动特征分析

张 辉^{1,2}, 徐 辉¹, 李春燕¹, 郑田新¹

(1. 中国地震局兰州地震研究所, 甘肃 兰州 730000; 2. 兰州地球物理国家野外科学观测研究站, 甘肃 兰州 730000)

摘要:汶川地震后青藏高原东北缘地区发生了多次 $M_L \geq 4.0$ 地震, 本文利用甘肃数字地震台网的资料, 采用 CAP 方法计算得到了 31 次 $M_L \geq 4.0$ 地震的震源机制解, 并对结果进行分析与讨论。研究表明: 受汶川地震的影响, 青藏高原东北缘区域应力场的调整过程使得中等地震分区、丛集活动, 地震类型表现出明显的区域特征。31 次中等地震的最大主应力方位显示, 祁连山地震带优势方向为 NE 向, 甘东南地区近 EW 向, 表明区域应力场呈现局部性的特征。

关键词: 青藏高原东北缘; 震源机制; 区域应力场

中图分类号: P315.51 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-0844(2013)增刊-0067-06

DOI: 10.3969/j.issn.1000-0844.2013.增刊.0067

Analysis on Activity Characteristics of Moderate Earthquakes in Northeastern Margin of Tibetan Plateau after the Wenchuan Earthquake

ZHANG Hui^{1,2}, XU Hui¹, LI Chun-yan¹, ZHENG Tian-xin¹

(1. Lanzhou Institute of Seismology, CEA, Lanzhou Gansu 730000, China;

2. Lanzhou National Observatory of Geophysics, Lanzhou Gansu 730000, China)

Abstract: On the basis of data of Gansu Seismological Network, the focal mechanism solutions of 31 $M_L \geq 4.0$ earthquakes which occurred in the northeastern margin of Tibetan Plateau after Wenchuan earthquake were obtained in the paper by using the CAP method, and then the results were analyzed and discussed. The results showed that because of the adjustment process of regional stress field in northeastern margin of Tibetan Plateau which was influenced by Wenchuan earthquake, activities of moderate earthquakes there presented zoning and clustering, and earthquake types had obviously regional characteristics. The maximum of principal stress azimuth of 31 moderate earthquakes revealed that predominant azimuth in Qilianshan seismic belt was NE and that in southeastern Gansu was nearly EW, which showed a localized characteristic of regional stress field.

Key words: northeastern margin of Tibetan Plateau; focal mechanism; regional stress field

0 引言

2008 年 5 月 12 日四川汶川 $M_s 8.0$ 大地震发生在我国南北地震带中段、青藏高原东缘、巴颜喀拉地块东边界南段的 NE 向龙门山断裂带上, 地震形成

240 km 的地表破裂带, 伴有 4~6 m 的同震垂直位移以及 3~5 m 的右旋水平位移^[1], 给四川及周边地区造成了巨大的人员伤亡和财产损失。汶川地震后, 青藏高原东北缘响应发生了一系列的中强地震。

收稿日期: 2013-04-21

基金项目: “十二五”国家科技支撑计划项目专题(2012BAK19B01-07); 国家自然科学基金项目(41304048, 41174059)

作者简介: 张 辉(1978-), 男, 副研究员, 主要从事地震学及地震综合预测研究。E-mail: zhh_gx@163.com

通讯作者: 徐辉(1970-), 女, 工程师, 主要从事地震分析预测研究。

地震的震源机制从一定角度描述了震源的性质及其破裂过程,是分析地震应力状态的一个有效途径,因此,基于多个中等地震的震源机制解可以有效的分析区域应力场特征。

鉴于可靠的震源机制解对于了解地震孕育、发生机理以及区域构造动力学环境等具有十分重要的意义,同时,为了深入了解汶川地震后青藏高原东北缘区域应力场的变化特征,本文利用甘肃及边邻地区的区域数字地震台网的宽频带波形资料,采用最近十多年国际上不断发展和完善的 CAP 方法^[2-6],反演了青藏高原东北缘地区 31 次 4.0 级以上地震的震源机制解,并就汶川地震对该区地震活动的影响进行了探讨。

1 由 CAP 方法反演震源机制解

1.1 基本原理

CAP 方法是一种全波形的反演方法,具有所需台站少、反演结果对速度模型和地壳结构横向变化的依赖性相对较小等优点。其主要思想是利用近震数据,把宽频带数字波形记录分为体波和面波,分别计算它们的理论地震图和实际观测波形的目标误差函数,在给定参数空间中进行网格搜索,同时反演震源机制解和震源深度。

考虑到因几何扩散产生的衰减对波形的影响,使用经震中距矫正后的绝对误差值作为误差目标函数^[7],定义为:

$$e = \left\| \left(\frac{r}{r_0} \right)^p \right\| \cdot \|u - s\| \tag{1}$$

式中, r 为震中距, r_0 为选定的参考震中距; p 为指数因子,一般而言,体波 $p=1$,面波 $p=0.5$ 。在此定义的目标误差函数下,采用网格搜索的方法在 M_0 、 $\theta-\varphi$ 、 δ 、 λ 以及震源深度空间进行搜索,得到最佳的震源机制解、矩震级和震源深度。

1.2 反演计算

反演过程中,首先将宽频带地震记录去除仪器响应,旋转、积分到径向、切向和垂向的地动位移。采用频率-波数(F-K)方法^[4]计算各震中距的格林函数,该方法适用于水平层地壳模型。通过对频率和波数分别进行积分,采用传播矩阵计算地震的全波场位移分布,计算各种频率下包含了体波和面波波形等成分的全部波形。为了消除速度结构横向变化的影响,并分割成体波(Pnl)和面波(Snl)两个部分,对 Pnl 波和面波波形分别通过 0.05~0.2 Hz 和 0.05~0.1 Hz 的 4 阶 Butterworth 带通滤波器

压制噪音;理论地震图采用与观测图相同的分解、滤波规则。得到了 Pnl 波的垂向和径向分量,以及面波的垂向、径向和切向分量 5 个部分。进行理论地震图和观测地震图各分量比对的时候,允许两者在适当的时间范围内相对浮动,以能达到最高的一致性,最终搜索出合成地震图和观测地震图全局差异最小的震源机制解。

1.3 反演结果与分析

图 1 为利用网格搜索得到的 2012 年 5 月 3 日金塔 5.4 级地震震源机制随不同震源深度的变化图,横轴为不同的地震深度,纵轴为该深度计算理论波形和实际观测的最小二乘误差值。图 1 显示,反演得到的震源机制较为稳定,随震源深度的变化不是很明显,震源深度为 9 km 时具有最小的反演误差。

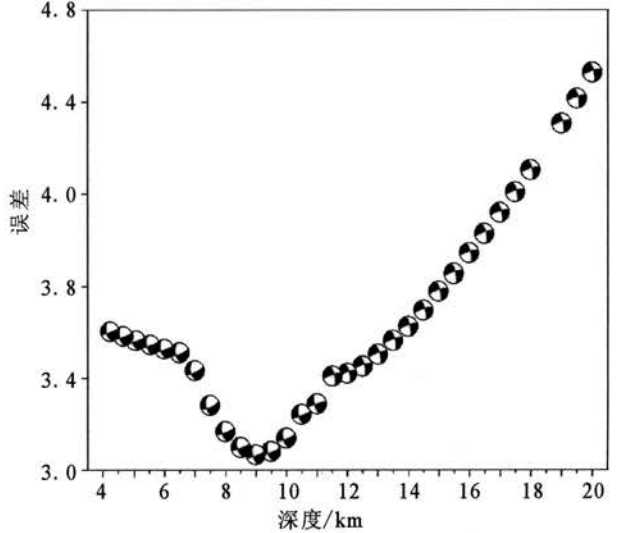


图 1 不同深度误差和震源机制随震源深度的变化图
Fig.1 Change chart of depth error and focal mechanisms at different focal depths

震源深度为 9 km 时,金塔地震的震源机制解节面 I 走向 78°、倾角 82°、滑动角 -26°;节面 II 走向 172°、倾角 64°、滑动角 -171°。图 2 给出了相应深度的波形拟合情况,由图可见在不同方位角台站上都能较好地与实际记录到的波形匹配,其绝对振幅大小也较为相似,互相关系数多数在 85% 以上,表明波形的 Pnl 和 Snl 部分都有较好的对应关系。

对于金塔 5.4 级地震,国内外不同研究机构也给出了相应的震源机制解参数,我们将本文获得的结果与其进行比较(表 1),从中可以看出不同来源的结果是比较接近的,反映了利用 CAP 方法反演震源机制解是可靠,也为本文其它中等地震反演结果的可靠性提供了保障。

2 青藏高原东北缘中地震活动特征

青藏高原东北缘是青藏高原向大陆内部扩展的前缘部位,东北部毗邻基底隆起、沉积层很薄的阿拉善地块,东部连接完整而稳定的鄂尔多斯地块(图

3)。从大地构造方面,青藏高原东北缘与龙门山构造带同属青藏块体,统计结果表明:①龙门山构造带发生 7 级以上大震后,在青藏高原东北缘地区都有响应地震发生。2008 年汶川 $M_s8.0$ 地震后青藏

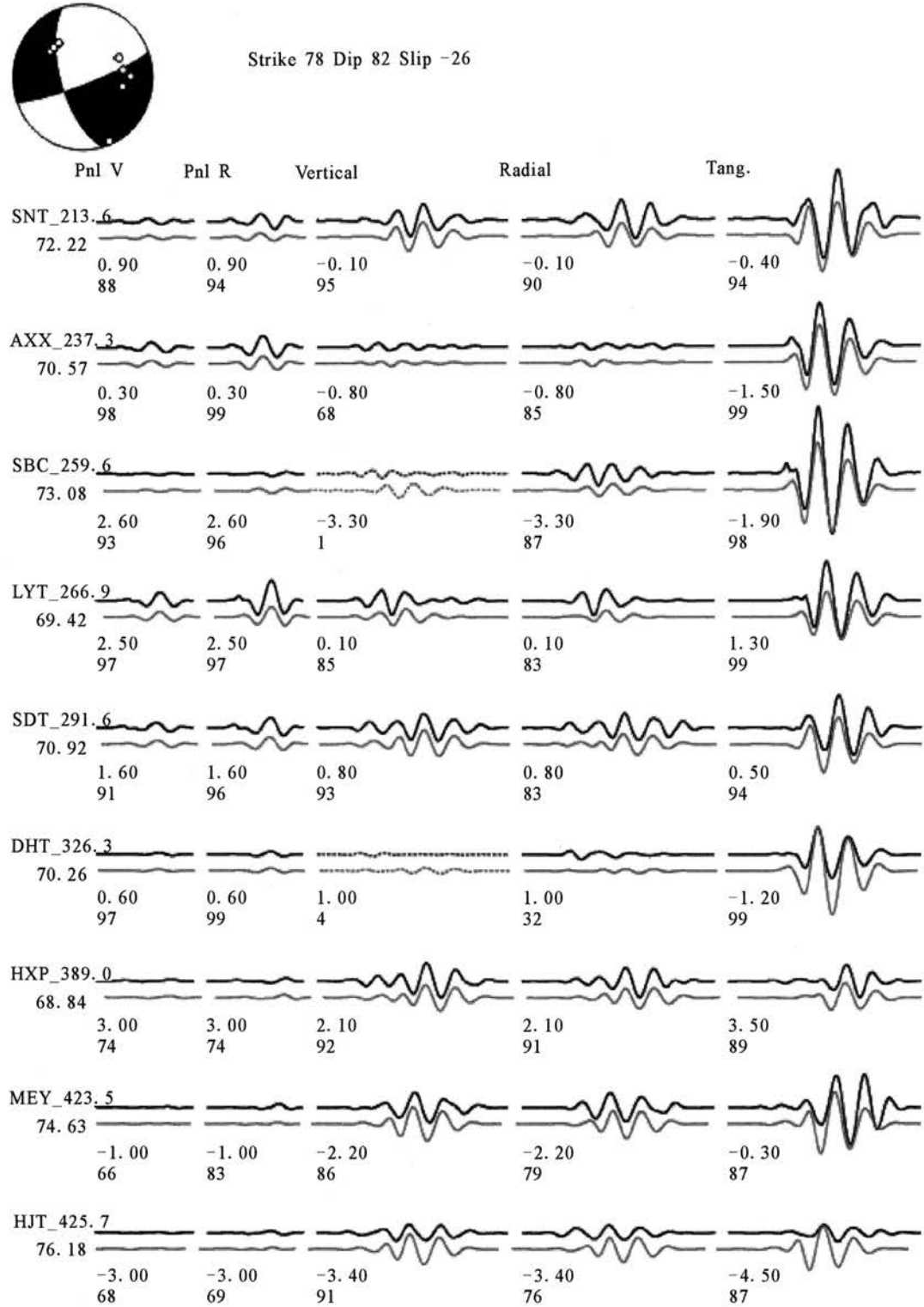


图 2 $M_s5.4$ 地震震源机制解、台站分布、反演误差、互相关系数示意图
(其中理论图(灰色)、观测图(黑色),虚线波段不参与反演计算)

Fig. 2 The focal mechanism solution of the $M_s5.4$ mainshock, station distribution, inversion error and the observation and cross-correlation coefficient (Gray refers to theortical curve, black refers to observed cvrve and the broken line band is not involved in the inversion)

表 1 本文结果与不同研究机构的震源机制解比较

节面 I / (°)			节面 II / (°)			T 轴 / (°)		B 轴 / (°)		P 轴 / (°)		资料来源
走向	倾角	滑动角	走向	倾角	滑动角	方位角	倾角	方位角	倾角	方位角	倾角	
258	78	-7	349	83	-168	123	3	19	76	214	13	地球所
159	78	161	251	71	13	115	22	308	68	207	4	预测所
69	73	-11	162	80	-163	295	5	192	70	26	19	Harvard
78	82	-26	172	64	-171	127	12	242	63	32	24	本文

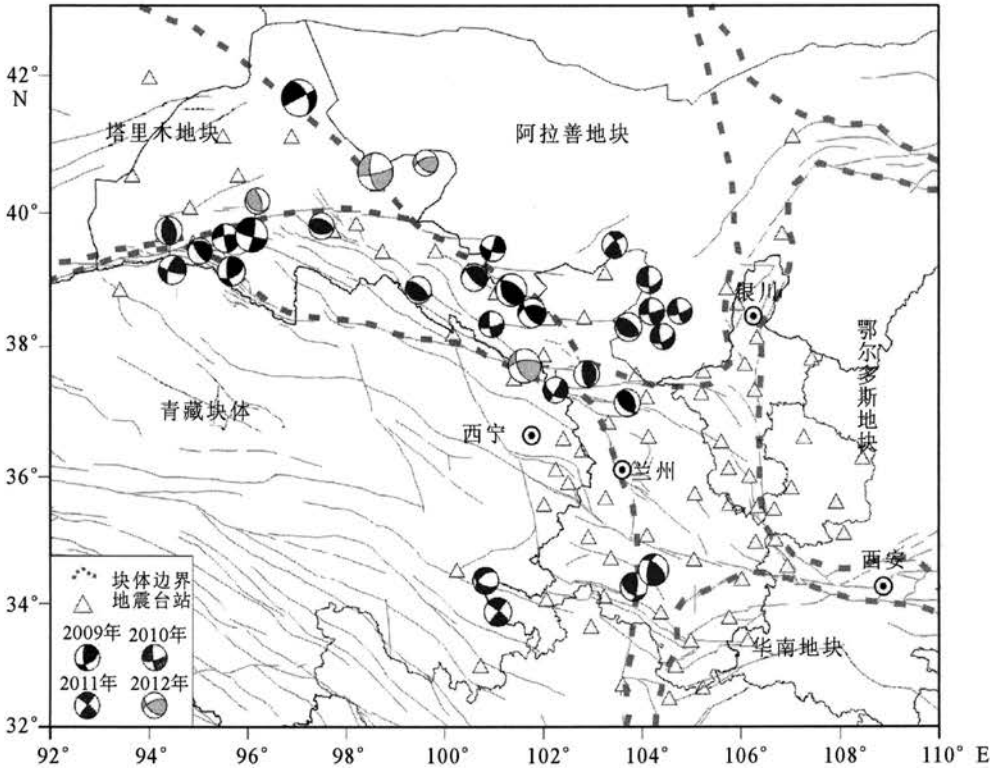


图 3 台站及震源机制解分布图

Fig. 3 Distribution of stations and focal mechanism solutions

高原东北缘发生了一系列的中强地震,首先在海西发生了2008年11月10日6.3级地震,2009年8月6.4、6.1级地震,随后10月2日肃南发生5.2级地震,2012年5月3日金塔5.4级地震,2013年2月12日海西5.1级地震;而沿着青藏高原东北缘发生了多次 $M_L \geq 4.0$ 地震。

2.1 中等地震震源机制解特征

图3给出了采用CAP方法反演得到的2009—2013年青藏高原东北缘地区31次 $M_L \geq 4.0$ 地震的震源机制解的空间分布图。从图中震中分布可以看出,地震在时间上具有分区活动、丛集发生的特点,地震类型表现出明显的区域特征。主要表现在:2009年地震主要分布在阿尔金断裂与祁连山交汇及沿着阿拉善地块的西边界发生,类型以走滑型及逆断层为主;2010年地震主要集中在祁连山东中段,甘蒙交界地区,以走滑为主;2011年主要发生在甘肃的两端,地震类型以走滑兼逆冲型;2012年地震主要沿阿尔金断裂东段发生,以走滑型为主。分

析认为,受汶川地震的影响,不同时间段、不同区域内中等地震的丛集发生,反映了应力应变能的积累—释放过程,从而印证了青藏高原东北缘地区应力场的调整过程。

2.2 中等地震最大主应力特征

根据表2中Zoback(1992)研究全球应力场时的分类标准,对 $M_L \geq 4.0$ 地震的断层面解类型进行了分类。结果表明2009年以来发生在青藏高原东北缘的4.0级以上地震以走滑型(SS)和逆断层(TF)地震为主,各12次,共占77.4%;逆断层为主兼走滑的(TS)3次,正断层为主兼走滑的(NS)1次,正断层(NF)1次(表3)。与徐纪人等^[9]利用中强地震震源机制解得到的青藏高原周缘地区的地震类型以逆断层型或走滑型为主的结果相一致。

图4为根据Zoback划分原则得到的每个地震最大主应力投影图,线段的方向表示方位角,线段的长度代表倾角,越短表示越直立,越长表示越水平。由图4可知祁连山地震带上27次地震的最大主应

力优势方向 NE 向,与青藏块体的构造应力场主压应力方向基本一致。表明祁连山地震带受到青藏块体与东北部坚硬阿拉善块体的共同约束,在青藏块体 NE 向的水平挤压作用下,祁连山地震带表现出

了复杂的地球物理特性和地质特性。甘东南地区的 4 次地震最大主应力方向近 EW 向,与利用剪切波分裂得到主压应力方向基本一致^[10]。

表 2 震源机制解类型的划分原则

类型	P 轴俯角 $\delta/(^{\circ})$	B 轴俯角 $\delta/(^{\circ})$	T 轴俯角 $\delta/(^{\circ})$	最大主应力方位
正断层(NF)	≥ 52		< 35	取 B 轴方位
正断层为主兼走滑(NS)	$40 \leq \delta < 52$		< 20	T 轴方位+90°
走滑型(SS)	< 40	> 45	< 20	T 轴方位+90°
逆断层为主兼走滑(TS)	< 20		$40 \leq \delta < 52$	取 P 轴方位
逆断层(TF)	< 35		≥ 52	取 P 轴方位
未确定(UD)	3 个应力轴的俯角都在 25°~45°,或 P 轴和 T 轴俯角较为接近,都在 40°至 50°之间			取 P 轴方位

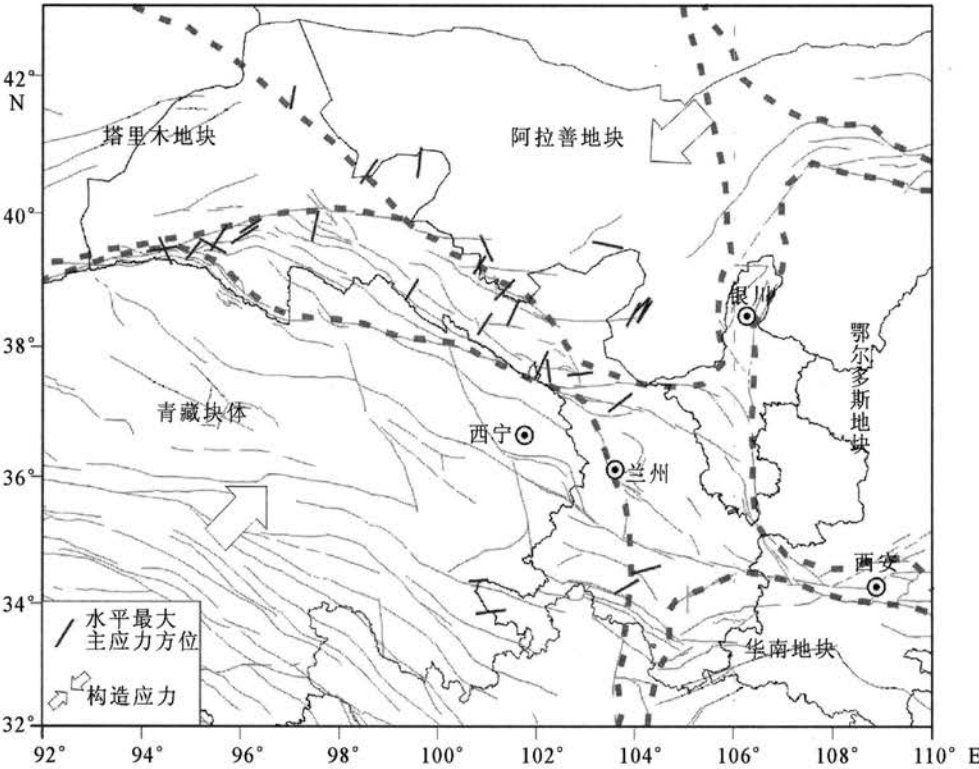


图 4 最大主应力方位投影图

Fig. 4 Azimuth projection of maximum principal stress

表 3 震源机制解类型的统计结果

地震类型	地震个数	百分比
NF	1	3.2%
NS	1	3.2%
SS	12	38.7%
TF	12	38.7%
TS	3	9.7%
UD	2	6.5%

青藏高原东北缘地处多个二级地块的交汇区,区内断裂交错分布,由于研究区受到不同构造块体间的相互作用,区域应力场呈现局部性的特征,造成祁连山地震带和甘东南活动构造区的应力场表现出

明显的差异(图 4),这也是中等地震震源机制解最大主应力方向差异所揭示出的现象。

3 讨论与结论

汶川地震后青藏高原东北缘地区响应发生了多次中等地震,本文利用甘肃数字地震台网的资料,采用 CAP 方法计算得到了 31 次 $M_L \geq 4.0$ 地震的震源机制解,并对 31 次地震震源机制解进行分析与讨论,得出如下结论:

(1) 青藏高原东北缘地区中等地震在时间上具有分区活动、丛集发生的特点,地震类型表现出明显的区域特征。受汶川地震的影响,不同时间段、不同

区域内中等地震的丛集发生,反映了应力应变能的积累一释放过程,从而印证了青藏高原东北缘区域应力场的调整过程。

(2) 31 次中等地震的最大主应力方位具有区域特征,祁连山地震带上 27 次地震的最大主应力优势方向为 NE 向,甘东南地区的 4 次地震最大主应力近 EW 向。祁连山地震带和甘东南活动构造区表现出的差异表明,在北东向挤压应力作用下,青藏高原东北缘在不同构造块体间的相互作用下,表现出复杂的地球物理特性和地质特性,使得区域应力场呈现局部性的特征。

致谢:本文使用了中国地震局甘肃区域地震台网提供的波形资料;CAP 波形反演程序来源于美国圣路易斯大学的朱露培博士,由中国科学技术大学倪四道教授提供;绘图采用了 GMT 软件。在此一并致谢。

参考文献

- [1] 徐锡伟,闻学泽,叶建青,等.汶川 $M_s 8.0$ 地震地表破裂带及其发震构造[J].地震地质,2008,30(3):597-629.
- [2] Zhao L S, Helmberger D V. Source Estimation from Broadband Regional Seismograms[J]. Bull. Seis Soc Am,1994,84(1):91-104.
- [3] Zhu L P, Helmberger D V. Advancement in Source Estimation Techniques Using Broadband Regional Seismograms[J]. Bull Seism Soc Amer,1996,86:1634-1641.
- [4] Zhu L, Rivera L A. A Note on the Dynamic and Static Displacements from a Point Source in Multilayered Media[J]. Geophys J Int,2002,148:619-627.
- [5] 郑勇,马宏生,吕坚,等.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[J].中国科学:D 辑,2009,39(4):413-426.
- [6] 张辉,王熠熙.2012 年 5 月 3 日金塔—阿拉善盟 5.4 级地震震源机制解[J].西北地震学报,2012,34(2):205-206.
- [7] Tan Y, Zhu L, Helmberger DV, et al. Locating and Modeling Regional Earthquakes with Two Stations[J]. J Geophys Res, 2006,111(B01):306-314.
- [8] Zoback M L. First- and Second-order Patterns of Stress in the Lithosphere the World Stress Map Project[J]. J Geophys, 1992,97(B8):11703-11728.
- [9] 徐纪人,赵志新,石川有三.中国大陆地壳应力场与构造运动区域特征研究[J].地球物理学报,2008,51(3):770-781.
- [10] 张辉,王熠熙,冯建刚.甘东南地区地壳各向异性特征[J].西北地震学报,2011,33(2):111-116.