

青海东南部应力场特征及正断层小震现象的初步研究^①

马辉青, 姚家骏, 马建新, 李玮杰, 袁伏全

(青海省地震局, 青海 西宁 810000)

摘要:利用2008—2013年青海东南部数字地震波资料,采用Pg、Sg最大振幅比及CAP方法反演得到92个 $M_L 2.5 \sim 4.9$ 中小地震震源机制解。统计结果表明该区中小地震震源类型以走滑为主,应力轴接近水平,兼有一定量正断层类型,逆冲类型较少;利用格点尝试法求出研究区平均现代构造应力场是以处于近NE—SW方向的水平压应力和近NW—SE方向的水平张应力为特征;进一步分析了研究区正断层小震产生的背景,初步认为这些正断层类型小震可能主要源自高海拔地形产生的重力滑塌作用。

关键词:青海东南部;震源机制解;构造应力场;正断层地震

中图分类号: P315.72¹7

文献标志码: A

文章编号: 1000-0844(2014)02-0372-08

DOI:10.3969/j.issn.1000-0844.2014.02.0372

Research on Stress Field Characteristics and Normal Fault Small Earthquakes of Southeastern Qinghai

MA Hui-qing, YAO Jia-jun, MA Jian-xin, LI Wei-jie, YUAN Fu-quan

(Earthquake Administration of Qinghai Province, Xining, Qinghai 810000, China)

Abstract: Digital seismic waves recorded by Qinghai and Gansu digital networks from January 2008 to August 2013 are used to obtain 92 focal mechanism solutions of $4.9 \geq M_L \geq 2.5$ moderate and small earthquakes in southeastern Qinghai by using the methods of P-wave and S-wave maximum amplitude ratio and cut and paste (CAP). The focal mechanism solutions of $3.9 \geq M_L \geq 2.5$ are retrieved by the former method, and the other larger earthquakes are retrieved by the latter. Moreover, analysis of these focal mechanism solutions by means of statistics and systematic cluster analysis reveals that the predominant distributions of the plunge of T- and P-axes are less than 45° and that a few have a high plunge of P. These results indicate that the moderate and small earthquakes in this region are mostly strike-slip and that a certain number of normal fault earthquakes are present; however, small thrust fault earthquakes are rarely seen. The distributions of all of the azimuths of the P-axis are widely scattered, which may be attributed to the fact that the small earthquakes are more happenstance than tectonic earthquakes; however, the distributions of the P-axis azimuth of $M_L \geq 3.0$ are so regular that it is easy to see the predominant distributions. By using focal mechanism solutions of $M_L \geq 3.0$ by the grid test method, the mean regional stress field is obtained. The tectonic stress field is primarily represented by NE—SW horizontal compressive stress and NW—SW horizontal tensile stress in the southeastern Qinghai province, and the mean contradictory ratio is 0.32. These results are the same as those in previous re-

① 收稿日期: 2013-09-18

基金项目: 2014年星火计划青年项目(XH14050Y); 2014年度震情跟踪青年课题(2014020123)

作者简介: 马辉青(1957—),男(回族),青海民和人,长期从事地震监测工作。

通讯作者: 姚家骏,男(汉族),河南泌阳人,主要从事数字地震研究。邮箱: qhyaojiajun@163.com

search. Furthermore, it is determined that the small normal fault earthquakes are mainly distributed in the eastern part of the Kunlun active fault (Maqin—Maqu) and in the southern part of the Elashan Mountain fault. This paper analyses the mechanism in which small normal fault earthquakes are produced. The southeastern region of Qinghai province still belongs to the inner Qinghai—Tibet block, and the significant differences in elevation could create many small pull-apart basins in some area, such as the eastern part of the Kunlun active fault (Maqin—Maqu). In this region, the small normal fault earthquakes have a certain proportion; therefore, it is suggested that these small normal fault earthquakes may be attributed to gravity slumping because of the high altitude.

Key words: the southeast of Qinghai; focal mechanism solutions; tectonic stress field; normal fault earthquakes

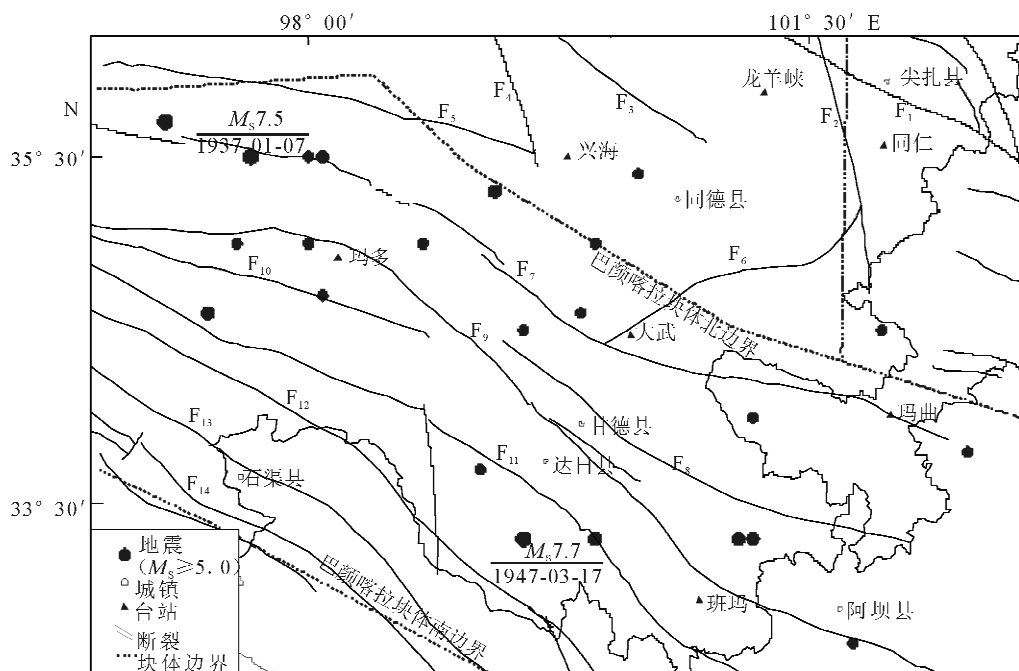
0 引言

青海东南部(兴海—玛多—达日地区)分布着东昆仑、玛多—甘德、鄂拉山等大型活动断裂,自 20 世纪 30 年代该区有地震记录以来发生了多次强震(图 1)。但自 2000 年兴海 6.6 级地震以来,该区 $M_s \geq 5.0$ 地震平静已逾 13 年,区内东昆仑断裂玛沁至玛曲的大震空段也受到许多重视^[1-3]。2008 年汶川 $M_s 8.0$ 地震后,汶川地震对周边断层库仑应力的影响成了研究的热点。邵志刚等^[4]基于 Burgers 体黏滞松弛模型计算汶川地震引起的库仑应力动态演化,认为震后东昆仑断裂玛曲段等四条断层段上的

库仑应力显著增加;万永革等^[5]以汶川地震破裂为驱动源计算了该地震造成周围断层上的静态库仑破裂应力变化,结果显示龙门山断裂北部和最南端、东昆仑断裂、鄂拉山断裂等断裂库仑破裂应力增加。鉴于断层应力状态、强震活动图像等各种异常,本文对该区近年来中小地震震源机制解及地壳应力场特征进行了较系统的研究。

1 资料及地壳模型选取

“十五”数字化改造后,青海地震台网密度有了很大提高,东南部有同仁、兴海、玛多、大武、玛曲、班



F₁: 青海南山断裂; F₂: 日月山断裂; F₃: 共和盆地南缘断裂; F₄: 鄂拉山断裂; F₅: 昆中断裂; F₆: 军功断裂; F₇: 东昆仑断裂; F₈: 久治断裂; F₉: 玛多—甘德断裂; F₁₀: 昆仑山口西—江错断裂; F₁₁: 达日断裂; F₁₂: 巴颜喀喇山主峰断裂; F₁₃: 清水河断裂; F₁₄: 杂乎—楚玛尔河断裂

图 1 青海东南部地区强震及构造分布

Fig. 1 Distribution of strong earthquakes and tectonics in the southeast of Qinghai

玛等多个测震台站,基本满足了反演中小地震震源机制解及应力场的要求。本研究收集了 2008 年至 2013 年 8 月来自青海、甘肃地震数字台网记录的青海东南部地区地震资料,利用 Pg、Sg 最大振幅比^[6]及 CAP 方法^[7]反演该区 2.5~4.9 级(M_L 震级,下同)地震的震源机制解,并分析目前该区域构造应力场特征。

本文的研究范围为 $E98.80^{\circ}\sim 101.60^{\circ}$, $N33.20^{\circ}\sim 36.00^{\circ}$ 。该区近 10 年以来以小震活动为主,最大为 2011 年 5 月 2 日达日 4.9 级地震。选取 2008 年以来的地震波形反演青海东南部中小地震震源机制解,其中 2.5~3.9 级地震采用最大振幅方法反演,该法具有精度高、需用资料少等优点,但台站记录的震中距要求苛刻,一般选在 200 km 之内,以避免出现 Pn 和 Pg 混淆的情况;该区台站密度相对东部地区仍然较低,为了进一步提高反演精度,4.0~4.9 级地震采用 CAP 方法反演,这样震中距 250 km 之内的台站记录都能有效参与反演。目前震源机制解反演多基于水平成层的速度结构模型。利用层析成像、重力多尺度分解等手段研究发现青藏高原东北隅地壳结构横向差异很大^[8-10],下地壳是一个楔形层,由青藏高原内部逐渐向阿拉善地块、鄂尔多斯地块和扬子准地台方向变薄。除了这些研究结果,Crust2.0 模型提供了 $2^{\circ}\times 2^{\circ}$ 分辨率的地壳速度模型。结合人工地震、层析成像研究结果和 Crust2.0 模型,经过反复的实验,拟采用图 2 所示的地壳速度模型。

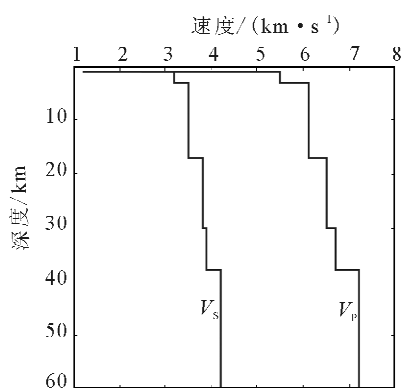


图 2 研究区地壳速度模型

Fig. 2 Crustal velocity model for the study region

2 中小地震震源机制解及应力场

2.1 震源机制解反演

采用上述方法与模型,本文获得了 2008 年 1 月至 2013 年 8 月间青海东南部周边地区 92 次中小地

震的震源机制解,约占该区同时期地震总数的 72%。其余地震多为 2.5~2.9 级小震,由于信噪比过低、P 波初动记录不清,未能得到很好的反演结果;但几乎全部的 3.0~4.9 级地震震源机制解都反演成功。较大地震震源机制解的完整性确保了反演结果的可靠。92 个结果包含 40 次 2.5~2.9 级地震;45 次 3.0~3.9 级地震;7 次 4.0~4.9 级地震。图 3 为 92 个地震震源机制解的空间分布。

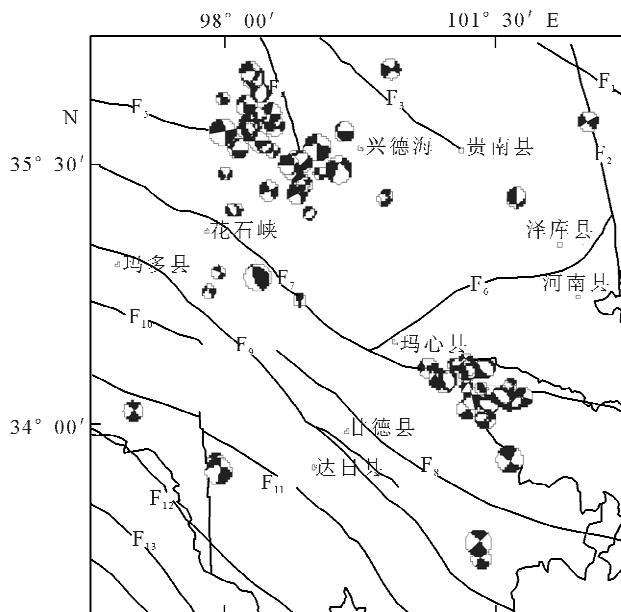


图 3 青海东南部中小地震震源机制解空间分布

Fig. 3 Distribution of the focal mechanism solutions in southeast Qinghai region

以 10° 为分辨单位,统计 92 个震源机制解 P、T 应力轴倾角及方位角分布特征(图 4(a))。结果表明 P 轴倾角小于 20° 的震源机制解占总数的 50%, 30° 以下占总数的 58.70%, 45° 以下占 80.43%, 70° 以上的高倾角部分占 15.22%; T 轴倾角小于 20° 占总数的 73.91%, 小于 30° 占 93.84%, 小于 45° 高达 97.83%, 仅有一个地震 T 轴倾角大于 70° 。方位角参数的玫瑰图比较凌乱,看不出应力轴方位角优势明显集中的方向。这种现象是正常的,因为小震的发生存在偶然性,许多小震与主构造无直接关联,受局部构造控制,造成了某一区域小震震源机制解应力轴方位分布无明显的规律。

本文进一步选取 3.0 级以上的地震震源机制解参数进行统计,结果如图 4(b)所示。P 轴倾角小于 15° 占总数的 54.70%, 小于 30° 占 62.75%, 小于 45° 占 84.31%, 70° 以上分布占 15.69%; T 轴倾角小于 20° 占该区总数的 68.63%, 小于 30° 占总数的

92.16%, 小于 45° 占 97.56%。3.0 级以上的地震震源机制解方位角参数的玫瑰图优势明显, P 轴方位

角优势方位在近 NE—SW 向, T 轴方位角优势方位在近 NW—SE 向。

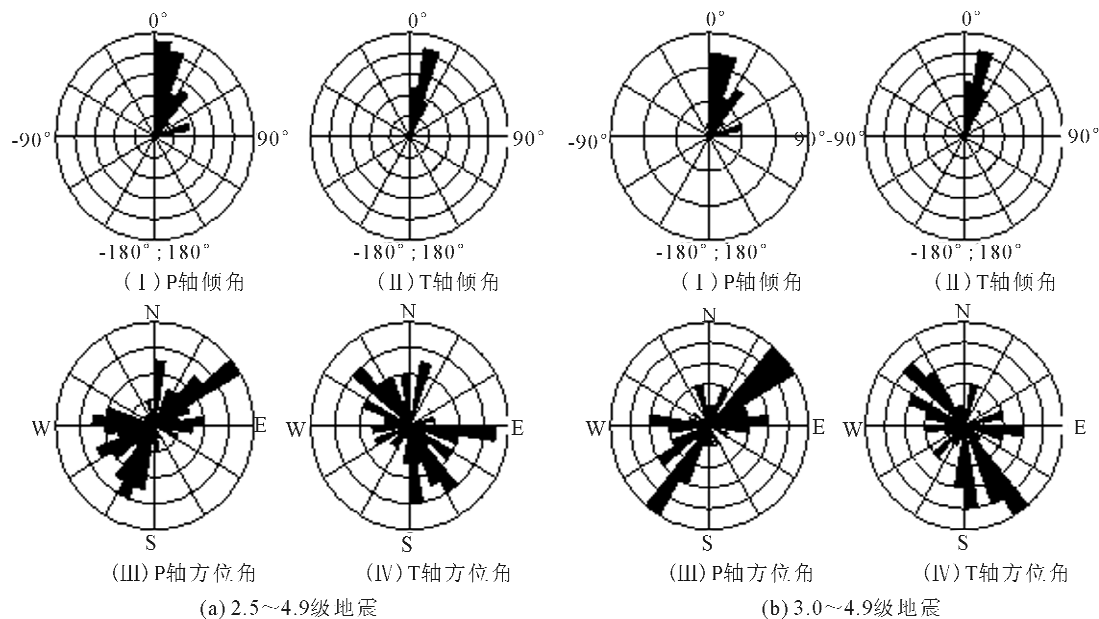


图 4 青海东南部中小地震震源机制解应力轴参数玫瑰图

Fig. 4 Rose diagrams of the stress axis parameters from focal mechanism solutions in southeast Qinghai area

根据地震断层类型的分类原则^[11-12], 震源机制解类型与 P、T 轴的倾角有关, P 轴倾角越大, 正断成分越多; T 轴倾角越大, 逆冲成分越多; P、T 轴倾角越小, 走滑成分越大。该区小震震源机制解 P 轴倾角集中在 $0^\circ \sim 30^\circ$ 之间, T 轴倾角也集中在 $0^\circ \sim 30^\circ$ 之间, 但 P 轴大于 70° 的高倾角区间有一定的分布, 由此可知该区中小地震以走滑类型为主, 有一定量的正断型地震, 逆冲地震较少。根据较大地震 P 轴方位角的优势分布可看出青海东南部主要受到近 NE—SW 向水平压应力。

2.2 震源机制解系统聚类分析

利用刁桂苓等^[13]提出的系统聚类思路, 可以把震源机制解归类, 取震源机制数占比例较多的一类作为优势结果, 从而可以定量得到区域应力场平均

分布状态。采用该方法将 92 次地震震源机制解最终划分为 5 类(见图 5 和表 1)。其中 AlfaPT 为平均 P、T 轴的夹角, 表示平均解质量, 越接近 90° 质量越好。

由图 5 和表 1 可见, 第 2 类地震最多, 有 43 次, 约占总数的 46.74%, 且属于走向滑动类型, P 轴空间取向和区域构造应力场一致; 属于走滑类型的还有第 1 类, 占总数的 17.39%, 但是 P 轴方位接近 EW 向。走滑地震共占总数的 64.13%, 称之为为主类。第 3 类为逆冲类型, 仅有 2 次; 第 4 类属于正断类型, 共有 13 次, 占 14.13%; 第 5 类为斜滑类型。由此可以看出, 该区小震错动方式以走滑型活动为主, 伴有一定量的正断、斜滑类型, 逆冲类型的小震较少。

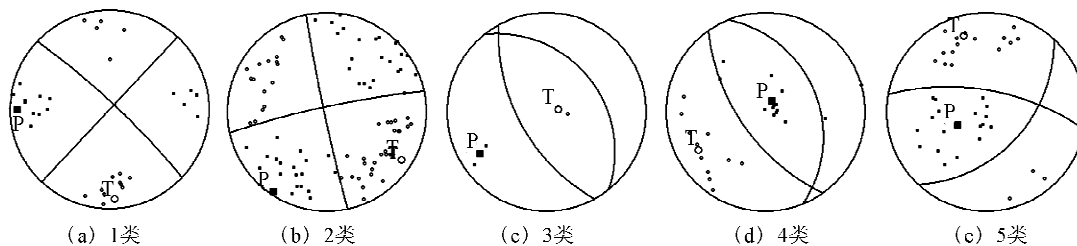


图 5 系统聚类分析后各类 P、T 轴及其平均解投影

Fig. 5 P and T axes and average solution project of each type after systematic cluster analysis

表 1 每种震源机制解类型平均应力轴参数

Table 1 Average stress axis parameters of different type of focal mechanism solutions

类型	应力轴						平均 P、T 轴 夹角/(°)	数量/个
	P 轴		T 轴		B 轴			
	方位/(°)	与铅垂线线夹角/(°)	方位/(°)	与铅垂线线夹角/(°)	方位/(°)	与铅垂线线夹角/(°)		
1	269.56	85.48	176.77	84.29	39.80	7.44	87.68	16
2	213.34	87.90	122.58	83.55	321.23	6.81	89.49	43
3	237.40	76.98	77.65	13.48	328.45	85.49	89.66	02
4	32.61	14.38	240.10	75.59	148.45	83.62	88.42	13
5	244.58	34.92	343.59	77.02	82.40	56.39	84.44	18

2.3 地震类型空间分布特征

为了更好地观察地震类型空间分布特征,本文把震源机制解系统聚类分析结果分别投影在研究区内。图 6(a)为第一、第二类走滑型地震,这些地震存在于该区大型走滑断裂及其周边区域,如右旋走滑的鄂拉山断裂,左旋走滑的东昆仑断裂等。图 6

(b)为正断类型、斜滑类型及少数的逆冲型地震,主要集中在鄂拉山断裂带南段温泉次级断裂段^[14]与昆中断裂的交汇处、东昆仑断裂玛沁段以东肯定那、西科河、唐地等次级断裂段^[15]周边,其中后者的比例要高于前者。

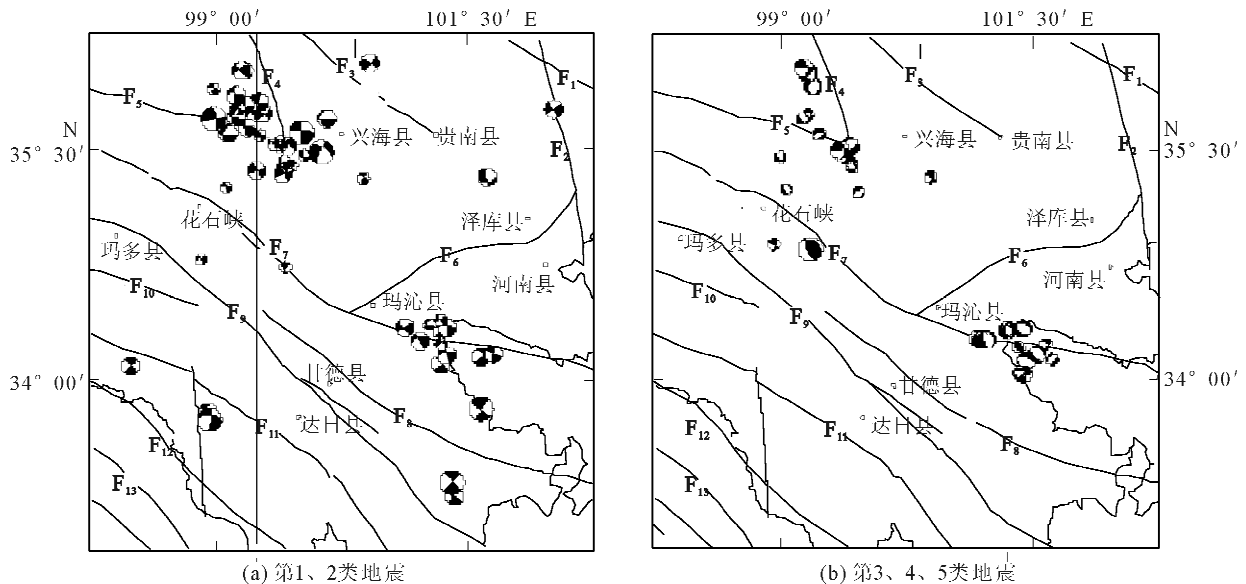


图 6 不同类型震源机制解空间分布

Fig. 6 Distribution of different kind of the focal mechanism solutions

2.4 区域平均应力场特征

本文采用格点尝试法^[16]对研究区现今构造应力场的方向特征进行了研究。考虑到 2.5~2.9 级地震震级较小,发震随机性较大,该震级范围约 50% 的地震未能反演出,本文舍弃 2.5~2.9 级小震,只选用 3.0 级以上地震震源机制解,根据 52 个 3.0~4.9 级地震震源机制解结果求出该区域的平均应力场。

通过格点尝试法得到青海东南部在数据所覆盖的时间段内的小震综合断层解。图 7 为综合断层解等面积投影得到的平均应力轴,离球心越远,离源角越大,倾角越小。图中 P、T 轴几乎在球面上,

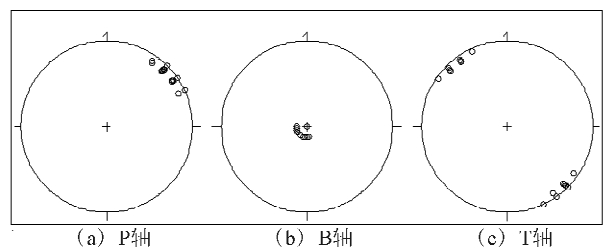


图 7 平均主应力轴特征(等面积投影)

Fig. 7 The average principal axis of stress (homolographic projection)

说明其倾角很小,研究区主类震源机制解平均解呈现走滑型应力特征,最大主应力轴 P 倾角 7°,最小

主应力轴 T 倾角 1°,几乎水平。B 轴倾角为 83°近垂直;P 轴方位 49°,为 NE 向,T 轴方位 319°,为 NW 向,矛盾比 0.32;两个节面走向分别为近 EW 和 NS 方向(表 2)。本文结果与董治平等^[17]、许忠

淮等^[18]、徐纪人等^[19]对该区构造应力场的研究比较一致,青海东南部处于近 NE—SW 方向的水平压应力和近 NW—SE 方向的水平张应力为特征的现代构造应力场作用之下。

表 2 研究区平均主应力轴参数

Table 2 Average stress parameters of main type in study region

节面 I			节面 II			P 轴		T 轴		B 轴		矛盾比
走向/(°)	滑动/(°)	倾角/(°)	走向/(°)	滑动/(°)	倾角/(°)	方位/(°)	倾角/(°)	方位/(°)	倾角/(°)	方位/(°)	倾角/(°)	
184	-175	86	94	-4	85	49	7	319	1	222	83	0.32

4 正断层小震现象的初步分析

由于该区断裂以走滑作用为主,出现大量的走滑型中小地震是正常的,但存在一定比例的正断及含正断成分的斜滑类型地震却是令人思考的现象。研究人员在青藏高原内部发现大量的正断层型强震,徐纪人等^[20]整理 1918—2005 年期间中国大陆及周缘地区 $M<5.0$ 岩石圈地震的震源机制解,发现大量正断层型和走滑正断层型地震集中发生在青藏高原的中部和中南部地区,认为其动力学原因可能与青藏高原持续隆升、自重增大引起的重力崩塌及其周边区域构造应力状况有关。曾融生等^[21]发现鲜水河断裂不少强震包含很多正断成分,并认为该断裂带某些地震的正断层成份可能与甘孜—炉霍地区存在地区性的拉分盆地有关。因此可见正断型地震在青藏高原内部是常见的地震类型。从动力学角度来看,青藏高原在印度板块持续向北运动的强大作用下,受北部的祁连山、柴达木盆地和西北部的阿尔金山、塔里木的强烈阻挡^[22-23],致使隆升抬高后的高原转向阻力相对较弱的东部运动,从而造成青藏高原拉萨、羌塘、巴颜喀拉等二级块体发生了近 EW 方向的扩张运动。巴颜喀拉块体东挤及隆升的过程中,部分地区由于海拔过高,容易在走滑及重力位能作用背景下形成断陷构造的拉分盆地。这些盆地的规模并不大,但数量众多,例如东昆仑断裂东段玛沁至玛曲之间的肯定那、西科河、唐地等次级断裂段区域存在着大量、小规模

5 结论及讨论

的拉分盆地^[15],地质构造研究与该区正断层小震现象比较一致。因此可以推测,在构造应力与重力联合作用下,局部的拉张作用产生了为数不少的正断层型小震。但是鄂拉山断裂带南段温泉次级断裂段相关研究相对较少,该区正断层小震密集的现象是否也与拉分盆地相关需进一步研究。

本文收集并整理了 2008—2013 年 8 月青海东南部地区数字地震波资料,在研究区最新的速度结构结果基础上,利用振幅比及 CAP 方法,得到了 92 次 2.5~4.9 级地震的震源机制解。采用系统聚类

和格点尝试法进行分析,研究区中小地震震源机制解以走滑类为主,应力轴比较接近水平,研究区构造应力场以水平挤压为主要特征,处于近 NE—SW 方向的水平压应力和近 NW—SE 方向的水平张应力为特征的现代构造应力场作用之下。由此可以认为研究区所发生地震的构造断层是以走滑运动特征为主的,区内地震发生的应力作用方式是以水平和近水平力的推扭。

东昆仑断裂东段玛沁—玛曲部分在走滑及重力作用背景下,容易形成规模不大的拉分盆地,高海拔地形地貌产生的重力滑塌作用可能是这些地区产生正断类型小震的诱因。

本文的完成过程中,得到了中国科学院测量与地球物理研究所郑勇研究员的建议与指导,在此表示衷心的感谢;同时得到了甘肃省地震局张辉、宁夏回族自治区地震局曾宪伟、四川省地震局张致伟的帮助,一并表示感谢。

参考文献(References)

[1] Wen X Z, Yi G X, Xu X W. Background and Precursory Seismicities Along and Surrounding the Kunlun Fault Before the Ms8. 1, 2001, Kokoxili Earthquake, China[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2007, 30: 63-72.

[2] 江娃利, 谢新生. 东昆仑活动断裂带强震地表破裂分段特征[J]. 地质力学学报, 2006, 12(2): 132-139.

JIANG Wa-li, XIE Xin-sheng. Characteristics of Segments of Surface Ruptures of Strong Earthquakes along the East Kunlun Active Fault Zone[J]. Journal of Geomechanics, 2006, 12(2): 132-139. (in Chinese)

[3] 李陈侠, 徐锡伟, 闻学洋, 等. 东昆仑断裂带中东部地震破裂分段性与走滑运动分解作用[J]. 中国科学: 地球科学, 2011, 41

- (9);1295-1310.
- LI Chen-xia, XU Xi-wei, Wen Xue-ze, et al. Character of Rupture Segmentation and Slip Partitioning of East Kunlun Active Fault[J]. Science in China: Earth Science, 2011, 41(9): 1295-1310. (in Chinese)
- [4] 邵志刚, 周龙泉, 蒋长胜, 等. 2008年汶川 $M_s 8.0$ 地震对周边断层地震活动的影响[J]. 地球物理学报, 2010, 53(8): 1784-1795.
- SHIAO Zhi-gang, ZHOU Long-quan, JIANG Chang-sheng, et al. The Impact of Wenchuan $M_s 8.0$ Earthquake on the Seismic Activity of Surrounding faults[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2010, 53(8): 1784-1795. (in Chinese)
- [5] 王永革, 沈正康, 盛书中, 等. 2008年汶川大地震对周围断层的影响[J]. 地震学报, 2009, 31(2): 128-139.
- WAN Yong-ge, SHEN Zheng-kang, Sheng Shu-zhong, et al. The Influence of 2008 Wenchuan Earthquake on Surrounding Faults[J]. Acta Seismologica Sinica, 2009, 31(2): 128-139. (in Chinese)
- [6] 梁尚鸿, 李幼铭, 束沛镛. 利用区域地震台网 P、S 振幅比资料测定小震震级参数[J]. 地球物理学报, 1984, 27(3): 249-257.
- LIANG Shang-hong, LI You-ming, Shu Pei-yi. On the Determining of Source Parameters of Small Earthquakes by Using Amplitude Ratios of P and S from Regional Network Observations [J]. Chinese Journal of Geophysics, 1984, 27(3): 249-257. (in Chinese)
- [7] Zhu L P, Heimberger D V. Advancement in Source Estimation Techniques Using Broadband Regional Seismograms [J]. Bull Seis Soc Am, 1996, 86(5): 1634-1641.
- [8] 周民都, 张元生, 石雅馨, 等. 青藏高原东北缘地壳三维速度结构[J]. 地球物理学进展, 2006, 21(1): 127-134.
- ZHOU Min du, ZHANG Yuan sheng, SHI Ya liu, et al. Three dimensional Crustal Velocity Structure in the Northeastern Margin of the Qinghai-Tibetan Plateau[J]. Progress in Geophysics, 2006, 21(1): 127-134. (in Chinese)
- [9] 陈立军, 胡奉湘, 陈晓逢. 全球地震柱的地震层析成像证据[J]. 华南地震, 2013, 33(4): 1-10.
- CHEN Li-jun, HU Feng-xiang, CHEN Xiao-feng. Proof of Seismic Tomography in Seismic Cylinders on the Earth[J]. South China Journal of Seismology, 2013, 33(4): 1-10. (in Chinese)
- [10] 黄锐, 李爱勇, 朱春生, 等. 玛曲—北川 MT 大剖面及川西北地壳结构初探[J]. 西北地震学报, 2010, 32(4): 334-338.
- HUANG Rui, LI Ai-yong, ZHU Chun-sheng, et al. MA qu-Beichuan MT Profiling and Preliminary Investigation of Crustal Structure in Northwest Sichuan, China[J]. Northwestern Seismological Journal, 2010, 32(4): 334-338. (in Chinese)
- [11] 马文涛, 徐锡伟, 徐平, 等. 地震三角形分类图解法与华北地区地震成因分析[J]. 地震物理学进展, 2004, 19(2): 379-385.
- MA Wen-tao, XU Xi-wei, XU Ping, et al. The Method of Triangle Seismic Classify and Analysis on the Seismic Cause in the northern China[J]. Progress in Geophysics, 2004, 19(2): 379-385. (in Chinese)
- [12] 崔效锋, 谢富仁, 赵建涛. 中国及邻区震源机制解的分区特征[J]. 地震地质, 2005, 27(2): 298-307.
- CUI Xiao-feng, XIE Fu-ren, ZHIAO Jian-tao. The Regional Characteristics of Focal Mechanism Solutions in China and its Adjacent Arcas[J]. Seismology and Geology, 2005, 27(2): 298-307. (in Chinese)
- [13] 刁桂苓, 于利民, 李钦祖. 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, 1992, 8(3): 86-92.
- DIAO Gui-ling, YU Li-min, LI Qin-zu. Hierarchical Clustering Analysis of the Focal Mechanism Solution Taking the Haicheng Earthquake Sequences for Example[J]. Earthquake Research In China, 1992, 8(3): 86-92. (in Chinese)
- [14] 袁道阳, 张培震, 刘小龙, 等. 青海鄂拉山断裂带晚第四纪构造活动及其所反映的青藏高原东北缘的变形机制[J]. 地学前缘, 2004, 11(4): 393-402.
- YUAN Dao-yang, ZHANG Pei-zhen, LIU Xiao-long, et al. The Tectonic Activity and Deformation Features During the Late Quaternary of Elashan Mountain Active Fault Zone in Qinghai Province and its Implication for the Deformation of the Northeastern Margins of the Qinghai-Tibet Plateau[J]. Earth Science Frontiers, 2004, 11(4): 393-402. (in Chinese)
- [15] 李陈侠, 徐锡伟, 闻学泽, 等. 东昆仑断裂东段玛沁—玛曲段几何结构特征[J]. 地震地质, 2009, 31(3): 441-458.
- LI Chen-xia, Xu Xi-wei, Wen Xue-ze, et al. The Segmental Characteristics of Geometrical Structure of the East Kunlun Active Fault[J]. Seismology and Geology, 2009, 31(3): 441-458. (in Chinese)
- [16] 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): 268-279.
- XV Zhong huai, YAN Ming, ZHAO Zhong he. Evaluation 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): 268-279. (in Chinese)
- [17] 董治平, 姚政生, 雷芳. 青海东部活断层与现代构造应力场[J]. 大地测量与地球动力学, 1992, 12(4): 64-71.
- DONG Zhi-ping, YAO Zheng-sheng, Lei Fang. Active Faults and Modern Tectonic Stress Field in the Region of Eastern Qinghai[J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 1992, 12(4): 64-71. (in Chinese)
- [18] 许忠淮, 汪素云, 黄雨蕊, 等. 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, 1987, 30(5): 476-486.
- XV Zhong-huai, WANG Su-yun, HUANG Yu-rui, et al. Directions of Mean Stress Axes in China Deduced from Micro-earthquake Data[J]. Chinese Journal of Geophysics, 1987, 30(5): 476-486. (in Chinese)
- [19] 徐纪人, 赵志新. 青藏高原及其周围地区区域应力场与构造运动特征[J]. 中国地质, 2006, 33(2): 275-285.
- XU Ji-ren, ZHAO Zhi-xin. Geology in China Characteristics of the Regional Stress Field and Tectonic Movement on the Qinghai-Tibet Plateau and in its Surrounding Arcas[J]. Ge-

- ology in China, 2006, 33(2):275-285. (in Chinese)
- [20] 徐纪人, 赵志新. 中国岩石圈应力场与构造运动区域特征[J]. 中国地质, 2006, 33(4):782-792.
XU Ji-ren, ZHAO Zhi-xin. Regional Characteristics of the Lithospheric Stress Field and Tectonic Motions in China and its Adjacent Areas[J]. Geology in China, 2006, 33(4):782-792. (in Chinese)
- [21] 曾融生, 孙卫国. 青藏高原及其邻区的地震活动性和震源机制及高原物质东流的讨论[J]. 地震学报, 1992, 14(增刊):534-564.
ZENG Rong-sheng, SUN Wei-guo. Discussion of the Seismic and mechanism as well as the Oriental Flowing of the Material in Qinghai-Tibet Plateau and its Adjacent Areas 1992, 14 (Supp.):534-564. (in Chinese)
- [22] 张培震, 王琪, 马宗晋. 青藏高原现今构造变形特征与 GPS 速度场[J]. 地学前缘, 2002, 9(2):442-450.
ZHANG Pei-zhen, WANG Qi, MA Zong-jin. GPS Velocity Field and Active Crustal Deformation in and Around the Qinghai-Tibet Plateau[J]. Earth Science Frontiers, 2002, 9(2):442-450. (in Chinese)
- [23] 郑勇, 傅容珊, 熊熊. 中国大陆及周边地区现代岩石圈演化动力学模拟[J]. 地球物理学报, 2006, 49(2):415-427.
ZHENG Yong, FU Rong-Shan, XIONG Xiong. Dynamic Simulation of Lithospheric Evolution From the Modern China Mainland and Its Surrounding Areas[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2006, 49(2):415-427. (in Chinese)

(上接 371 页)

- [43] 杜鹏, 柴炽章, 沈卫华, 等. 罐罐岭断裂带最新活动特征[J]. 地震地质, 2007, 29(3):597-606.
DU Peng, CHAI Zhi-zhang, SHEN Wei-hua, et al. Characteristic of the Holocene Activity of the Guanganling Fault Zone [J]. Seismology And Geology, 2007, 29(3):597-606. (in Chinese)
- [44] 柳焯, 王爱国, 李明永, 等. 长岭山北麓断裂晚第四纪活动性及构造稳定性研究[J]. 中国地震, 2006, 22(4):394-404.
LIU Yu, WANG Ai-guo, LI Ming-yong, et al. Research on Active Features and Tectonic Stability in the Late Quaternary of the North Piedmont Fault of Changlingshan [J]. Earthquake Research in China, 2006, 22(4):394-404. (in Chinese)
- [45] 郭良迁, 周海涛, 杜雪松, 等. 中国大陆应变应力场研究[J]. 华南地震, 2012, 32(1):1-10.
GUO Liang-qian, ZHOU Hai-tao, DU Xue-song, et al. Studies on Stress-strain Field of Chinese Mainland [J]. South China Journal of Seismology, 2012, 32(1):1-10. (in Chinese)
- [46] Wang J, Shieh C, Chang T. Striggering Mechanism of a Shallow Earthquake: Case Study of the 1999 Chi-Chi (Taiwan) Earthquake [J]. Phys Earth Planet Inter, 2003, 135(1):17-25.