

2009 年青海大柴旦 $M_s 6.4$ 地震前中小地震 震源机制前兆特征分析*

余 娜

(青海省地震局, 青海 西宁 810001)

摘要: 2009 年 8 月 28 日青海省大柴旦 $M_s 6.4$ 地震发生前, 在震中附近发生了 30 多个 $1.0 \leq M_L \leq 3.9$ 地震。针对这些中小地震, 采用青海省区域地震台网观测资料, 利用矩张量反演理论和格林函数库技术对主震及震前中小地震进行快速矩张量反演, 计算出了其中 15 个 $M_L \geq 1.5$ 地震的震源机制解。结果表明, 主震发生前中小地震震源参数的一致性较好, 断层面走向、倾角的一致性达到 86%, 其初至 P 波波形相关系数也较高。中小地震应力 P、T 轴的优势方向与该区域应力场方向基本一致。

关键词: 初至波形; 矩张量反演; 震源机制解; 大柴旦地区

中图分类号: P315.2

文献标识码: A

文章编号: 1000-0666(2014)增刊-0022-06

0 引言

地震是地壳构造活动的产物, 是地下介质受到应力作用产生破裂的过程, 分析大震前震源周围中小震的震源参数对于了解震源区的应力状态具有重要的意义。在日常震情跟踪中, 经常会遇到根据中等地震来判断其是主震还是前震, 其后还会有更大的地震发生, 能够快速、准确的判定和识别前震特征对短临地震预报尤为关键。陈颢 (1978) 对多个强震震例进行了研究, 指出震源机制的一致性可以用来判定一个地震序列是前震序列还是震群序列。王俊国和刁桂苓 (2005)、柯龙生等 (1977)、啜永清等 (2000) 研究表明, 在震群中最大地震发生之前, 中小地震震源机制的相对一致性往往是地震活动性增强的标志, 而相对紊乱往往伴随着余震或者地震群活动的减弱, 因而, 从地震震源机制的一致性可以判断最大地震是否已发生。

震源机制的确定与地震观测台网的空间分布密切相关。在震源机制研究中, 有 P 波初动符号、P 波和 S 波的振幅比等方法, 但都有一定的局限性。

首先, 这些方法需要获得震中周围 3 个或 3 个以上的台站记录, 台站布局对其结果有影响; 其次, 对震级大小也有一定的要求, 但小震的震源机制有其特殊的意义, 震级减小能够获得记录的台站数也相应减少, 有时只能获得单台记录, 所以不能用这些方法求取震源机制解 (荣代潞, 2000)。由于青海省内数字化地震台网分布比较稀疏, 满足条件的地震波形资料较少, 因此, 本文使用青海省区域地震台网记录到的初至波形资料, 利用格林函数库技术对中小震进行矩张量反演, 克服了记录台站较少时无法准确得到小震震源机制解的缺陷。

1 方法和原理

当震源距和所涉及的波长远大于震源的尺度时, 可以把震源视为点源。在这种情形下, 若设震源位于坐标原点, 那么在场点 r 处的地震位移 $u(r, t)$ 为

$$u_i(r, t) = G_{ij,k}(r, t) * M_{jk}(t). \quad (1)$$

式中, “*” 表示时域里褶积。由式 (1) 可见, 若知道观测位移 $u_i(r, t)$ 和格林函数 $G_{ij,k}(r, t)$, 便可

* 收稿日期: 2014-08-30.

基金项目: 青海省科技厅项目——运用 GPS 与数字化地震资料开展青海及邻区强震危险性研究 (2013-Z-710) 和青海省地震科学基金——采用震源机制一致性分析判别震群类型 (2013B02) 联合资助。

通过反演得到地震矩张量 $M_{jk}(t)$ 。用矩张量表示地震震源的特性时,就能将震源效应和传播路径效应分开,而将记录到的地面运动、震源和传播路径三者之间的关系归结为一种线性关系。矩张量反演既可在时间域内进行,也可在频率域内进行。在实际应用中,我们一般采用频率域里的矩张量反演技术。对式 (1) 进行傅里叶变换,得到地震位移谱

$$u_i(r,\omega) = G_{ij,k}(r,\omega) \cdot M_{jk}(\omega).$$

(2)

式中, ω 为角频率。地震位移谱等于格林函数的谱和矩张量的谱的乘积。将反演得到的矩张量的谱经逆傅里叶变换,就可得到作为时间函数的地震矩张量 (陈运泰等, 2000; 周云好, 2002)。为了减少矩张量反演过程中的介质响应——格林函数计算时间, 根据上述原理, 利用计算格林函数库技术计算出震源区周边半径 300 km、采样间隔 0.02 s 的格林函数库, 该方法可以在短时间内, 快速确定中小地震震源机制解参数。

2 数据处理结果

2.1 资料选取

以 2009 年 8 月 28 日大柴旦 6.4 级地震为例, 选取震前 1 个月内、距主震 100 km 范围、与主震震级相差 1 级以上、发生在主震震源区附近的 $M_L \geq 1.5$ 的中小地震 (王林瑛等, 2005), 初动波形较清晰、完整, 定位精度为 A 类。随着震级的减小数字地震波资料的信噪比会下降, 对于信噪比较差的资料使用带通滤波器 (0.05 ~ 15 Hz) 进行滤波处理, 选取了 14 个符合条件的中小地震。反演程序使用中国地震局地球物理所许力生等提供的矩张量反演程序包, 运用格林函数库确定的结果 (表 1、图 1) 与 USGS 给出的结果比较接近, 表明本文的反演结果是比较可信的, 且主震的理论地震波与实际观测波形拟合的较好, 拟合系数达到 90% 以上 (图 1c)。

表 1 大柴旦 6.4 级地震及前震震源机制解结果

Tab. 1 Focal mechanism solutions of Dachaidan $M_s6.4$ earthquake and its foreshock

| 编号 | 发震时间 | | 震中位置/(°) | | 震级 | 节面 A/(°) | | | 节面 B/(°) | | | P 轴/(°) | | T 轴/(°) | | N 轴/(°) | |
|--------|------------|----------|-------------|-------------|-----------|----------|----|-----|----------|----|-----|---------|----|---------|----|---------|----|
| | 年-月-日 | 时:分:秒 | φ_N | λ_E | (M_L) | 走向 | 倾角 | 滑动角 | 走向 | 倾角 | 滑动角 | 方位 | 倾角 | 方位 | 倾角 | 方位 | 倾角 |
| 1 | 2009-08-05 | 05:40:04 | 37.7 | 95.8 | 2.7 | 272 | 63 | 89 | 94 | 27 | 92 | 3 | 18 | 180 | 72 | 272 | 1 |
| 2 | 2009-08-05 | 08:14:46 | 37.7 | 95.8 | 2.7 | 71 | 51 | 81 | 265 | 40 | 101 | 167 | 6 | 296 | 81 | 77 | 7 |
| 3 | 2009-08-10 | 04:41:46 | 37.7 | 95.8 | 2.8 | 90 | 53 | 103 | 249 | 39 | 73 | 171 | 7 | 47 | 77 | 262 | 10 |
| 4 | 2009-08-13 | 19:38:32 | 37.5 | 95.8 | 2.9 | 263 | 55 | 60 | 128 | 45 | 126 | 14 | 6 | 116 | 65 | 281 | 24 |
| 5 | 2009-08-14 | 06:38:18 | 37.5 | 96.6 | 2.3 | 295 | 71 | 143 | 39 | 55 | 23 | 350 | 10 | 252 | 39 | 92 | 49 |
| 6 | 2009-08-18 | 10:57:57 | 37.6 | 95.8 | 3.1 | 110 | 55 | 73 | 318 | 38 | 113 | 212 | 9 | 333 | 74 | 120 | 14 |
| 7 | 2009-08-19 | 20:56:55 | 37.5 | 94.7 | 2.7 | 245 | 57 | 105 | 39 | 57 | 105 | 325 | 11 | 196 | 73 | 57 | 13 |
| 8 | 2009-08-19 | 23:05:05 | 37.4 | 94.7 | 1.9 | 123 | 67 | 110 | 260 | 30 | 51 | 198 | 20 | 295 | 18 | 65 | 63 |
| 9 | 2009-08-20 | 05:54:13 | 37.4 | 94.7 | 1.7 | 290 | 40 | 113 | 81 | 54 | 72 | 184 | 7 | 299 | 74 | 92 | 15 |
| 10 | 2009-08-20 | 09:01:56 | 37.4 | 94.7 | 1.7 | 263 | 34 | 110 | 59 | 58 | 77 | 158 | 12 | 295 | 74 | 66 | 11 |
| 11 | 2009-08-20 | 12:51:07 | 37.4 | 94.7 | 2.1 | 258 | 69 | 132 | 10 | 46 | 30 | 319 | 14 | 213 | 48 | 60 | 39 |
| 12 | 2009-08-21 | 06:29:41 | 37.4 | 94.7 | 1.7 | 237 | 45 | 112 | 27 | 49 | 69 | 132 | 2 | 229 | 74 | 41 | 15 |
| 13 | 2009-08-22 | 02:56:53 | 37.4 | 94.7 | 1.9 | 125 | 68 | 80 | 330 | 24 | 113 | 223 | 22 | 18 | 66 | 129 | 9 |
| 14 | 2009-08-22 | 06:06:50 | 37.4 | 96.9 | 2.1 | 274 | 86 | 87 | 131 | 5 | 27 | 7 | 41 | 181 | 49 | 274 | 3 |
| 15 | 2009-08-28 | 09:51:59 | 37.8 | 95.9 | $M_s6.4$ | 280 | 67 | 81 | 122 | 25 | 110 | 17 | 22 | 174 | 67 | 284 | 8 |
| USGS结果 | | | 37.6 | 95.76 | $M_w6.2$ | 295 | 31 | 102 | 101 | 60 | 83 | 196 | 14 | 352 | 74 | 105 | 6 |

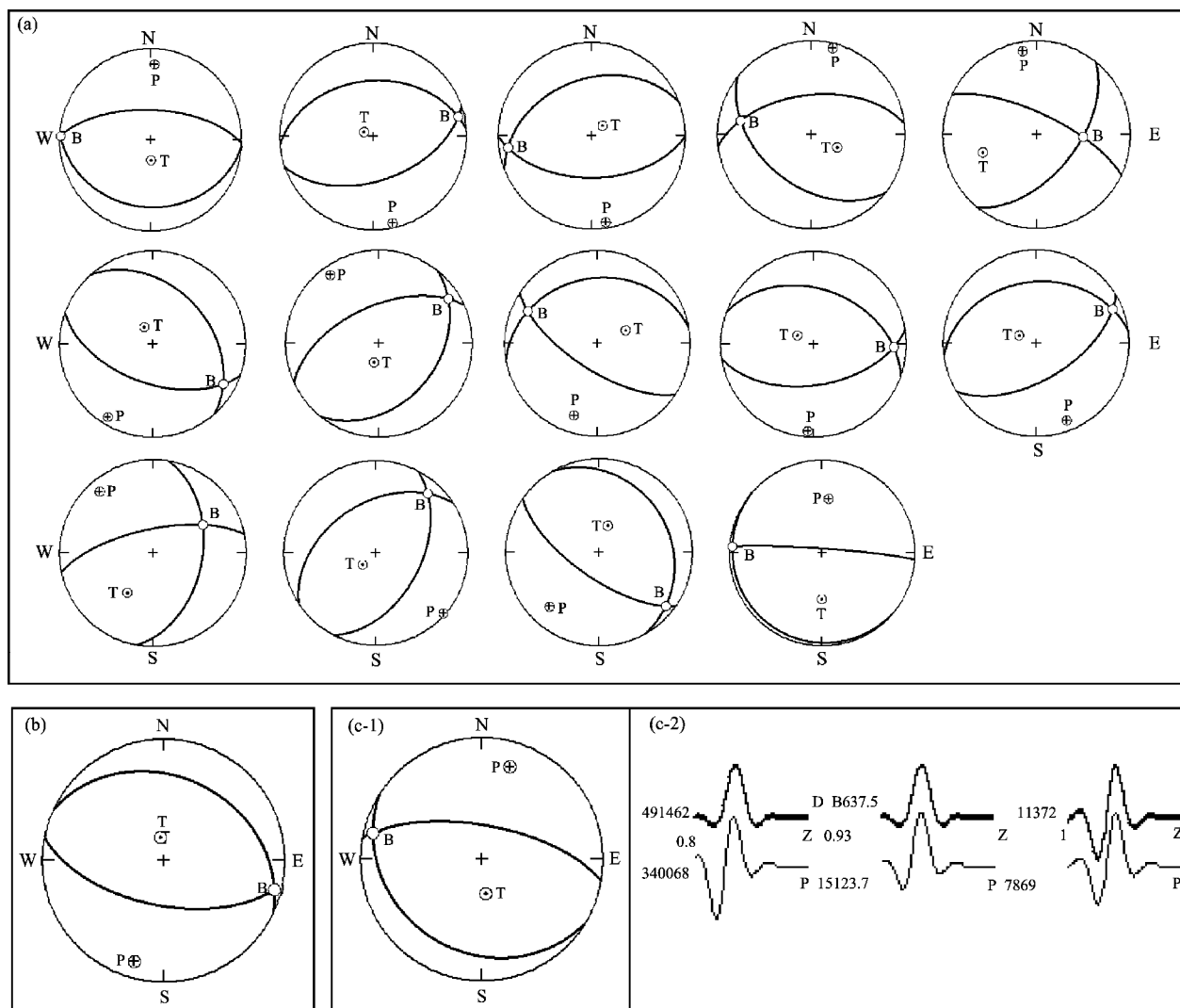


图1 大柴旦6.4级地震前中小地震的震源机制解

(a) 本文结果; (b) 6.4级地震 USGS 结果; (c) 6.4级地震及拟合结果

Fig. 1 Focal mechanism solutions of mid-small earthquakes before Dachaidan $M_s6.4$ earthquake

(a) the result in this paper; (b) focal mechanism of Da Qaidam $M6.4$ earthquake by USGS;

(c) focal mechanism of Da Qaidam $M6.4$ earthquake and its fitting result in this paper

2.2 震源机制一致性参数

由于分析处理误差和数据资料有限等因素影响,一个地震序列中每个地震的震源机制解不可能完全一样,只能存在相对一致的现象,因此,可以用标准误差来表征它们分布的集中程度,用参数 K 值定量的描述震源机制的相对一致情况。

规定凡断层面走向在区间 $[\bar{\alpha} - C, \bar{\alpha} + C]$ 内的地震,认为他们的震源机制解是一致的。 $\bar{\alpha}$ 是断层走向平均值, C 给出了一致性范围,它的选取十分重要,若 C 选取的太小,前震也会变成不一致,令

$$C = 2\sigma_{\text{前}} = 2 \sqrt{\sum_{i=1}^N (\alpha_{\text{前}i} - \bar{\alpha}_{\text{前}})^2 / N - 1}. \quad (3)$$

可以保证前震 95% 的概率落在一致性区间之内。若在 N 次地震中,震源机制一致的有 n_1 , 不一致的有 n_2 个,定义该群地震的震源机制相对一致性参数 K 为 (陈颢, 1978):

$$K = \frac{n_1 - n_2}{N}. \quad (4)$$

K 值越接近 1, 表示震源机制解越一致; K 值越接近于 0, 表示越不一致。对于大柴旦 6.4 级地震前

地震断层面走向的标准误差:

$$\sigma_{\text{前}} = \sqrt{\sum_{i=1}^N (\alpha_{\text{前}i} - \bar{\alpha}_{\text{前}})^2 / N - 1}$$

$$= \sqrt{9363/14 - 1} = 25^\circ. \quad (5)$$

其中: $i = 1, 2, 3 \cdots, N$; N 是参加统计的前震数目; $\alpha_{\text{前}i}$ 是第 i 个前震的断层面走向; $\bar{\alpha}_{\text{前}}$ 是 N 个前震断层面走向的平均值:

$$\bar{\alpha}_{\text{前}} = \sum_{i=1}^N \alpha_{\text{前}i} / N = 273^\circ \quad (6)$$

$$K_{\text{走向}} = \frac{13-1}{14} = 0.86. \quad (7)$$

大柴旦 6.4 级地震前地震断层面倾角的标准误差为

$$\sigma_{\text{前}} = \sqrt{4159/14 - 1} = 17^\circ,$$

$$K_{\text{倾角}} = \frac{13-1}{14} = 0.86. \quad (8)$$

同理, $\sigma_{\text{前}} = \sqrt{8760/14 - 1} = 25^\circ,$

$$K_{\text{滑动角}} = \frac{14-0}{14} = 1. \quad (9)$$

从计算结果可以看出, 主震发生之前中小地震震源参数的一致性较好, 断层面走向、倾角的一致性达到 86%, 也就是说主震发生前的一系列

中小地震的震源机制解趋于一致, 可以利用大震前一群地震震源参数 K 值相对较高这一现象, 对地震群的发展趋势作出估计。

3 分析与讨论

通过强震前 14 个中小地震矩张量反演得到的震源机制解, 节面 I 优势方向为东南和近东西方向, 平均方位角为 270° (图 2a); P 轴优势方向为北东和南西, 平均方位角 250° (图 2b), 平均倾角为 25° ; T 轴优势方向为西北, 平均方位角为 320° (图 2c), 平均倾角 39° 。大柴旦 6.4 级地震的发震主断层为逆冲左旋走滑断裂 (姜枚等, 2006; 孙长虹等, 2012), 中小地震震源机制全部为左旋逆冲断裂, 平均倾角也较小, 震源深度在 5 ~ 11 km 之间, 表明该区域的地震活动受上地壳水平应力场控制, 与宗务隆山断裂运动有密切关系 (图 3)。强震前中小地震断层面走向、倾角的一致性达到 86%, 表明相对一致性可以作为前兆特征为中小地震活动较发育区域的震情跟踪工作提供有益的借鉴。

大柴旦 6.4 级地震前的波形也十分相似, 图 4 是距 2009 年 8 月 5 日 5 时 (实线) 和 8 时 (虚线) 两个地震 190 km 的格尔木台 3 个分量 P 波前 50 个点的相关关系图, 东西向相关系数为 0.91, 南北向相关系数为 0.69, 垂直向相关系数为 0.80, 其余台站相关系数介于 0.7 ~ 0.9。因此, 从波形

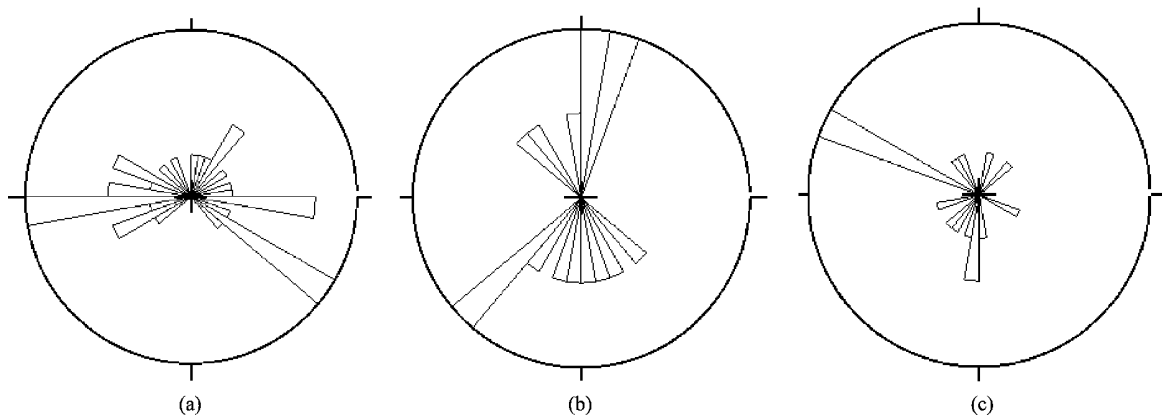


图 2 大柴旦 6.4 级地震前中小地震的震源机制参数统计图

(a) 节面 I 走向; (b) P 轴方位; (c) T 轴方位

Fig. 2 Statistical chart of focal mechanism parameters for mid-small earthquakes before Dachaidan $M_s 6.4$ earthquake

(a) strike of plane I; (b) direction of P axis; (c) direction of T axis

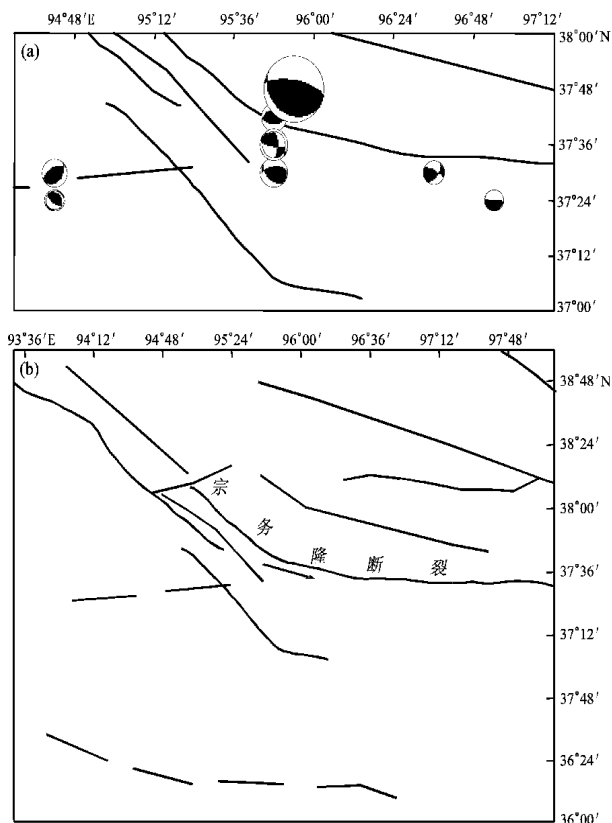


图3 大柴旦 6.4 级地震及震前中小地震的震源机制解 (a) 及构造空间分布 (b)

Fig. 3 The focal mechanism solutions of Dachaidan $M_s 6.4$ earthquake and the mid-small earthquakes before the earthquake (a) and space distribution of construction (b)

意义上进一步说明主震前一系列中小地震震源机制的相似性, 即其震源机制一致性程度较高, 具有一定的前兆特征。

4 初步结论

(1) 运用矩张量反演理论, 通过格林函数库技术, 可以快速计算出中小地震的震源机制解, 反演得到的 6.4 级地震的震源机制解结果与 USGS 给出结果接近, 表明本文结果是可靠的。对强震前 14 个 $M_L \geq 1.5$ 级中小地震矩张量反演结果进行一致性分析, 认为强震前中小地震的震源参数一致性较高, 达 86%, 其初至 P 波波形相关系数也较高。初步研究认为大柴旦 6.4 级地震前的地震序列具有前兆指示意义, 在实际的应用中, 需注意与前兆资料结合给出震情的分析判定。

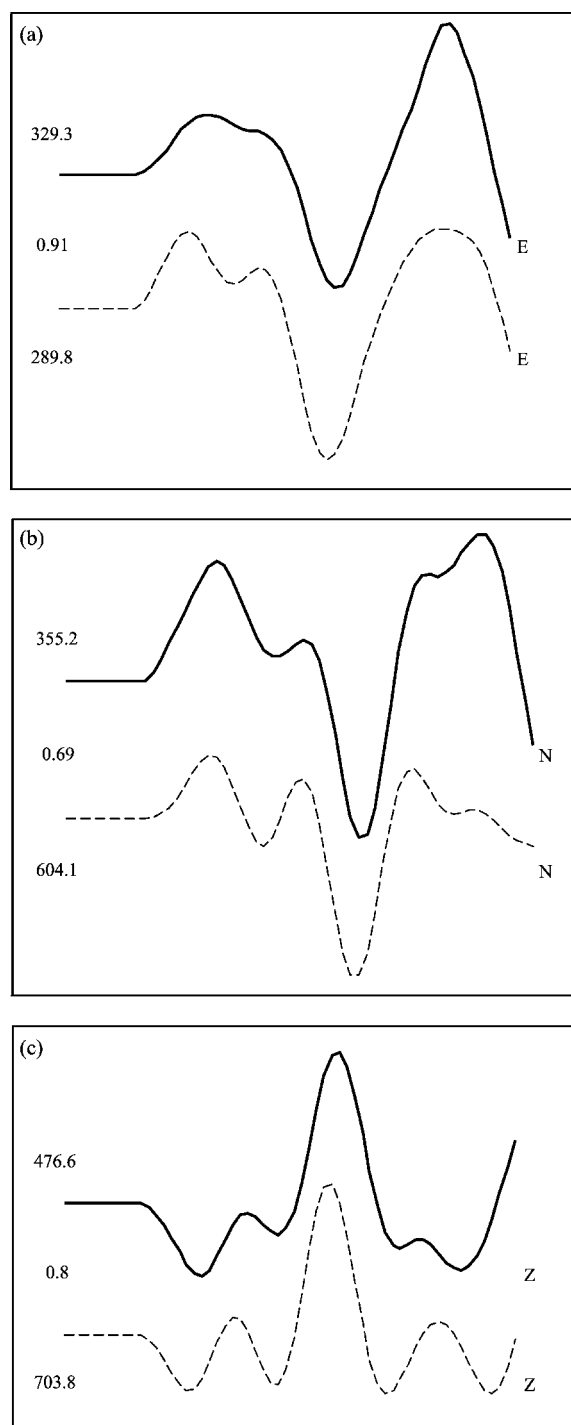


图4 格尔木台 3 个分量初至 P 波波形相关分析图
Fig. 4 The correlation analysis chart of first arrival P wave of three component at Golmud Station

(2) 根据反演出的矩张量解的分析, 中小地震的地震破裂类型全部为左旋逆冲断裂, 平均倾角也较小, 震源深度在 5 ~ 11 km 之间, 表明该区域的地震活动受上地壳水平应力场控制, 与宗务隆山断裂运动有密切关系。

参考文献:

- 陈颙. 1978. 用震源机制一致性作为描述地震活动性的新参[J]. 地球物理学报, 21(2): 142 - 159.
- 陈运泰, 吴忠良, 王培德, 等. 2000. 数字地震学[M]. 北京: 地震出版社.
- 吸永清, 吸永清, 王赵丽, 等. 2000. 用初动符号的变化识别前震和震群的研究[J]. 中国地震, 16(3): 242 - 255.
- 姜枚, 许志琴, 钱荣毅, 等. 2006. 从德令哈地震分析青藏高原北缘东段的深部构造活动[J]. 中国地质, 33(2): 268 - 272.
- 柯龙生, 李用普, 章爱娣, 等. 1977. 前震序列与一般小震群活动规律的探讨[J]. 地球物理学报, 20(2): 89 - 94.
- 荣代谔, 李亚荣, 金铭, 等. 2000. 利用单台数字地震记录反演天祝—古浪 5.4 级地震矩张量[J]. 高原地震, 12(2): 32 - 36.
- 孙长虹, 许丰, 杨玉波, 等. 2012. 2003 年青海省德令哈 6.7 级地震序列的震源机制解及其构造含义[J]. 地球物理学报, 55(10): 3338 - 3346.
- 王俊国, 刁桂苓. 2005. 千岛岛弧大震前哈佛大学矩心矩张量(CMT)解一致性的预测意义[J]. 地震学报, 27(2): 178 - 183.
- 王林瑛, 陈佩燕, 吴忠良, 等. 2005. 前震特征及其识别研究[J]. 地震学报, 27(2): 171 - 177.
- 周云好. 2000. 用远场体波反演震源破裂过程研究[D]. 北京: 中国地震局地震预测研究所, 20 - 25.

Analysis on Precursory Characteristics of Focal Mechanism Solutions of Mid-small Earthquakes before Qinghai Dachaidan $M_s6.4$ Earthquake in 2009

YU Na

(Earthquake Administration of Qinghai Province, Xining 810001, Qinghai, China)

Abstract

The $M_s6.4$ earthquake occurred in Qinghai Dachaidan area on Aug. 28 in 2009, and there occurred more than thirty $1.0 \leq M_L \leq 3.9$ earthquakes before the main shock around the epicenter. Using the observation data in Qinghai Regional Seismic Network, we quickly inversed the moment tensor for the main shock and the mid-small earthquakes before the main shock to calculate the focal mechanism solutions of 15 $M_L \geq 1.5$ earthquakes by moment tensor inversion theory and Green function database technology. The results show that the focal mechanism solutions of mid-small earthquakes before main shock showed the good consistency, the consistency of the strike and dip of the fault plane reached to 86%, and the correlation coefficient of the initial P wave was higher. The advantage direction of the P、T axis of stress of mid-small earthquakes was consistent with the direction of stress field in the study region.

Key words: first arrival waveform; inversion of moment tensor; focal mechanism solution; Dachaidan area