

利用格林函数库计算 2008 年青海大柴旦 6.4 级地震的余震震源机制^①

刘 薇¹, 张晓清², 石玉成³, 文 勇², 赵燕杰²

(1. 中国科学技术大学, 安徽 合肥 230026; 2. 青海省地震局, 青海 西宁 810001;
3. 甘肃省地震局, 甘肃 兰州 730000)

摘 要:通过建立格林函数库可以降低在矩张量反演过程中的计算量,提高获取中小地震震源机制解的速度。运用此方法对 2008 年 11 月 10 日青海大柴旦 6.4 级地震的地震序列中 $M_L \geq 2.0$ 的 98 个余震进行了震源机制解,在小震矩张量反演中克服了模拟资料无法准确得到小震震源机制解的缺陷,初步探索了运用区域数字地震台网资料确定中小地震震源机制解的方法,并对计算结果给出了解释。

关键词:青海大柴旦地震;地震矩张量;余震序列;格林函数库

中图分类号: P315.01 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-0844(2012)02-0154-07

DOI: 10.3969/j.issn.1000-0844.2012.02.0154

Using Green Function Database and Quick Moment Tensor Inversion Calculating the Focal Mechanism Solution of Aftershocks of Dachaidan $M_s 6.4$ Earthquake in 2008 in Qinghai Province

LIU Wei¹, ZHANG Xiao-qing², SHI Yu-cheng³, WEN Yong², ZHAO Yan-jie²

(1. University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China;

2. Earthquake Administration of Qinghai Province, Xining 810001, China;

3. Earthquake Administration of Gansu Province, Lanzhou 730000, China)

Abstract: Through establishing the Green function database, the calculation work in the moment tensors inversion method is reduced, and speed for getting focal mechanism solutions of moderate-small earthquakes is improved. Using this method the focal mechanism solutions for 98 events with $M_L \geq 2.0$ in 2008, in Qinghai province are calculated. The result is discussed also. The research work is helpful to using regional digital seismograph network data for giving focal mechanism solution of small earthquakes.

Key words: Dachaidan earthquake in Qinghai province; Seismic moment tensors; Aftershock; Green function database

0 引言

震源机制在地震发生过程、区域应力场、震源区断层构造等方面的研究有着重要的理论意义^[1-4]。利用数字化地震资料进行地震矩张量反演计算,是对震源介质进行研究的最好的方法之一。目前,随

着数字地震观测资料的积累,国内外地震工作者对中强地震开展地震矩张量的计算已较为普遍,利用区域地震台网的数字地震波计算中小震的震源机制工作也在积极开展之中。对研究地震活动性前兆异

① 收稿日期:2011-01-25

基金项目:青海省地震局地震科学基金(2010A2;2009B05)

作者简介:刘 薇(1981-),女(汉族),安徽凤阳人,工程师,硕士研究生,现主要从事地震安全性评价,数字地震震源研究。

常而言,中小地震的震源参数的前兆指示意义对于地震预报、震后趋势判定具有更为重要的作用,对震源介质的物理参数研究也同样具有重要作用。通过小震矩张量反演计算,不仅可以得到小震的震源机制解,同时也可对本地区的构造应力场的变化进行研究和判定。本文通过建立格林函数库降低在矩张量反演过程中的计算量,对 2008 年 11 月 10 日青海大柴旦 6.4 级地震的余震序列进行震源机制解,探索适用区域数字台网资料确定中小地震震源机制的方法。

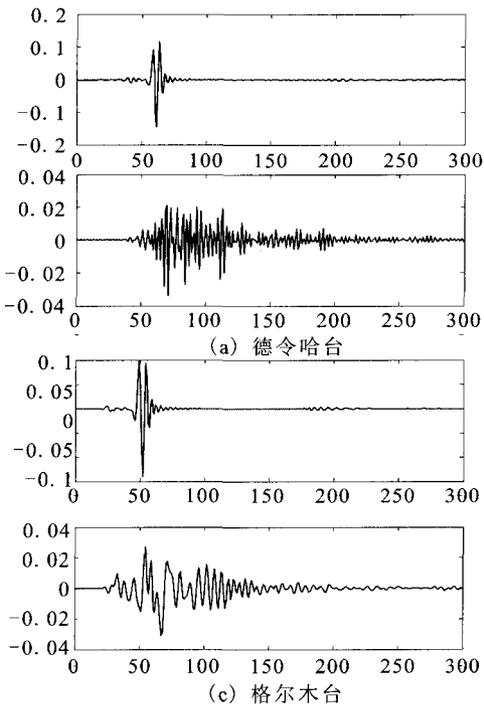
1 矩张量反演方法

如果震源的尺度与震源距以及所涉及的波长相比很小,那么便可以把震源视为一点源。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,“ $*$ ”表示时间域里的褶积。由式(1)可见,如果知道观测位移 $u_i(r,t)$ 和格林函数 $G_{ij,k}(r,t)$,便可通过反演得到地震矩张量 $M_{jk}(t)$ 。在实际应用中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,便得到地震位移谱的表示式

$$u_i(r,\omega) = G_{ij,k}(r,\omega) \cdot M_{jk}(\omega) \quad (2)$$



式中, ω 为角频率。地震位移的谱等于格林函数的谱和矩张量谱的乘积。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^[5]。反演过程中所考虑的震源是同步的,地震矩张量 6 个元素在整个震源过程中具有相同的时间历史。在一定地壳模型条件下格林函数代表介质传播响应,理论上为利用数字地震观测资料较好的地震事件进行矩张量反演确定震源机制解奠定了基础^[5-7]。

2 格林函数库的建立

2.1 速度模型的确立

地震震源参数的解算都是基于合理的地壳模型基础之上,地震引起的位移一方面依赖于地震震源,另一方面依赖于包括场地条件在内的地震波传播路径。为了得到真实的震源信息,只能针对具体问题取实际传播路径的合理近似。为了得到研究区域内地区的地壳模型,本文收集了有关青海地区地壳模型的资料,并以此模型为基础,通过运用 2008 年 11 月 10 日大柴旦 6.4 级地震的震源参数^[8],使用水平层状介质理论地震图计算方法合成该次地震的理论地震图,通过对主要震相走时和理论走时的反复调

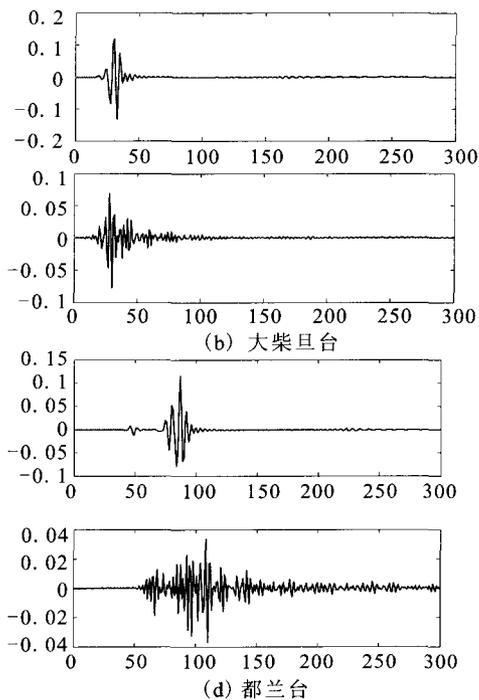


图 1 几个台站记录的 2008 年 11 月 10 日大柴旦 6.4 级地震归一化理论地震图与归一化观测地震图比较

Fig. 1 Comparison between the normalized theoretical seismograms and the normalized observation ones for Dachaidan M6.4 earthquake on Nov. 10, 2008, recorded by some seismic stations in Qinghai province.

试与比较,使主要震相的走时和理论走时基本一致,同时,比较了不同震中距的实际地震观测图中主要震相的实际走时和合成地震图的主要震相走时。震中距为 147 km 的德令哈地震台的观测震相走时为 $SG-PG=18.6$ s,合成震相走时为 $SG-PG=18.8$ s,二者只相差 0.2 s(图 1(a));震中距为 45 km 的大柴旦地震台的观测震相走时为 $SG-PG=5.7$ s,合成震相走时为 $SG-PG=6.0$ s,二者只相差 0.3 s(图 1(b));震中距为 177 km 的格尔木地震台的观测震相走时为 $SG-PG=22.4$ s,合成震相走时为 $SG-PG=22.8$ s,二者只相差 0.4 s(图 1(c));震中距为 258 km 的都兰地震台的观测震相走时为 $SG-PG=33.6$ s,合成震相走时为 $SG-PG=33.9$ s,二者只相差 0.3 s(图 1(d))。所选择台站的震中距跨度在 45~300 km 之间,这些台站(SG-PG)的最大偏差为 0.5 s,平均偏差为 0.37 s。

经过反复调试计算最终确定了用于本文数字地震台网计算格林函数的分层地壳模型(表 1)。

表 1 本文采用的地壳速度模型

层序	层厚 /km	P 波速度 / $[km \cdot s^{-1}]$	S 波速度 / $[km \cdot s^{-1}]$	密度 / $[g \cdot cm^{-2}]$
1	2.5	5.11	3.15	2.40
2	5.0	6.10	3.51	2.45
3	15.0	6.27	3.63	2.59
4	10.0	6.47	3.69	2.65

2.2 格林函数库的建立及误差分析

通过进行地震矩张量反演计算获取介质传播响应格林函数,这一工作将耗费大量的计算时间。特别是随着观测数据采样率的提高,如采样率提高 10 倍,计算量大约提高 1 000 倍。在实际运用中经常面临突然出现的小震群或者是中强地震的余震序列需要处理,使用常规的计算方法需要很长时间。为了解决上述不足之处,需建立格林函数库。

假设研究地区内的观测台站的最小距离为 10 km,则取“假想”台站的台间距即同心圆的半径的步长为 10 km;由于 5° 左右的地震断层的走向误差已经足够小,所以“假想”台站的方位角的步长取为 5° ;考虑到目前青海地震台网在震源深度上的分辨精度为 5 km 源深度差,则“假想”震源的震源深度可以设为 0.5、10、15、20、25、30 km。在上述模型基础上建立在柱坐标系的格林函数库。这样一来,当一次地震发生时从格林函数库中总可以找到震源深度误差不超过 2.5 km、震中距误差不超过 5 km 和方位角误差不超过 2.5° 的“假想”台站格林函数,近似的代替观测台站对应的格林函数^[9]。本文中采用

的观测台站到震源最大的距离在 300 km 以内,因此计算格林函数库的空间半径确定为 300 km(图 2)。(假设要建立格林函数库的空间半径为 300 km 范围,图中同心圆标示地震震中,同心圆半径的步长为 10 km,方位角的步长为 5° ;同心圆与径线的交点表示可能的台站位置。)

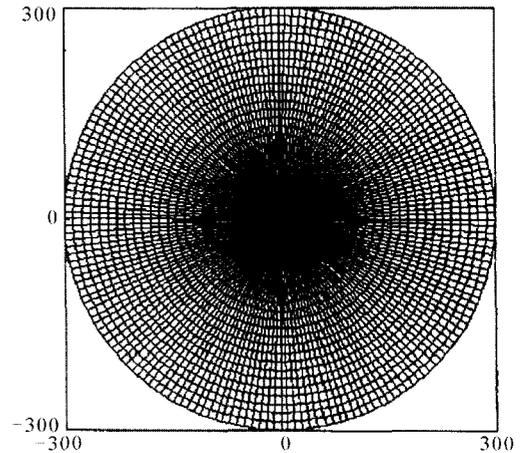


图 2 建立格林函数库示意图

Fig. 2 Sketch of built Green function database.

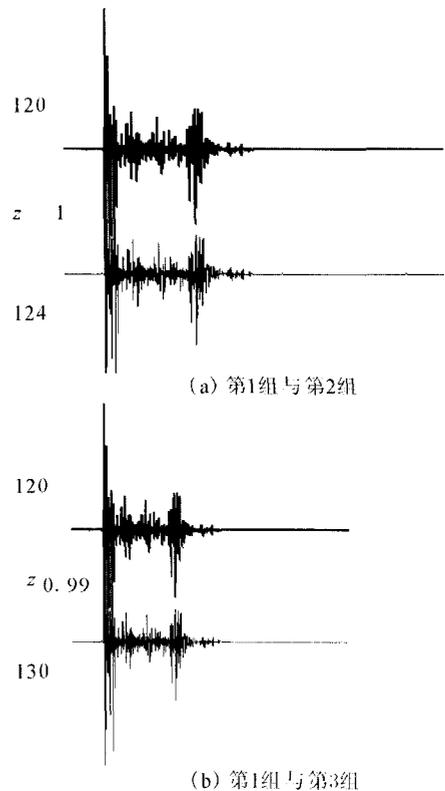


图 3 第 1 组与第 2 组、第 3 组格林函数相关系数

Fig. 3 The correlation coefficients of Green function between group 1 and 2, group 1 and 3.

我们沿用的地震矩张量反演方法是基于柱坐标

系进行计算的。为了防止格林函数库近处的误差小,远处的误差会增大,进行了专门的计算验证。以 2008 年 11 月 10 日 09 时 22 分 $M_s 6.4$ 地震为例计算了在本文中最近的台站都兰地震台所在位置垂直分量的格林函数。地震与台站的方位角为 124° ,震中距为 258 km,我们计算了 3 组数据,其震中距和方位角分别为: 258 km, 120° ; 258 km, 124° ; 258 km, 130° 。第 1 组与第 2 组格林函数相关系数为 1 (图 3(a)),第 1 组与第 3 组格林函数相关系数为 0.99 (图 3(b))。由此表明方位角变化在 $\pm 5^\circ$ 时,其格林函数相关系数为 1,变化在 $\pm 10^\circ$ 时,其格林函数相关系数为 0.99。虽然余震的分布会造成地震与台站之间的方位角有一定的变化,但变化的幅度一般都在 20° 以内。在此范围内变会造成格林函数一定的误差,相关性降了 0.01。本文计算格林函数库

设定的方位角步长为 5° 。所以本文用的格林函数库不会出现远处的格林函数误差较大。

2.3 资料选取与计算

本文所用资料的挑选标准为:初至波(P、Pn)波形清楚完整、仪器标定参数完整。从 2008 年 11 月 10 日大柴旦 $M_s 6.4$ 地震发生后的 11 月 10 日至 2009 年 5 月 31 日该地震余震区及附近发生且有定位结果的 $M_L \geq 2.0$ 的 160 次余震中选取初动较清晰的地震 98 个,利用青海省数字化地震波观测资料共做了 98 个地震矩张量解。基本采用原始波形资料,尽量不做滤波处理,若含有长周期脉动、零漂以及高频噪声的观测资料,采用带通滤波器进行滤波(0.05~15 Hz)。地震定位结果采用的是中国地震局台网中心正式发布的结果。

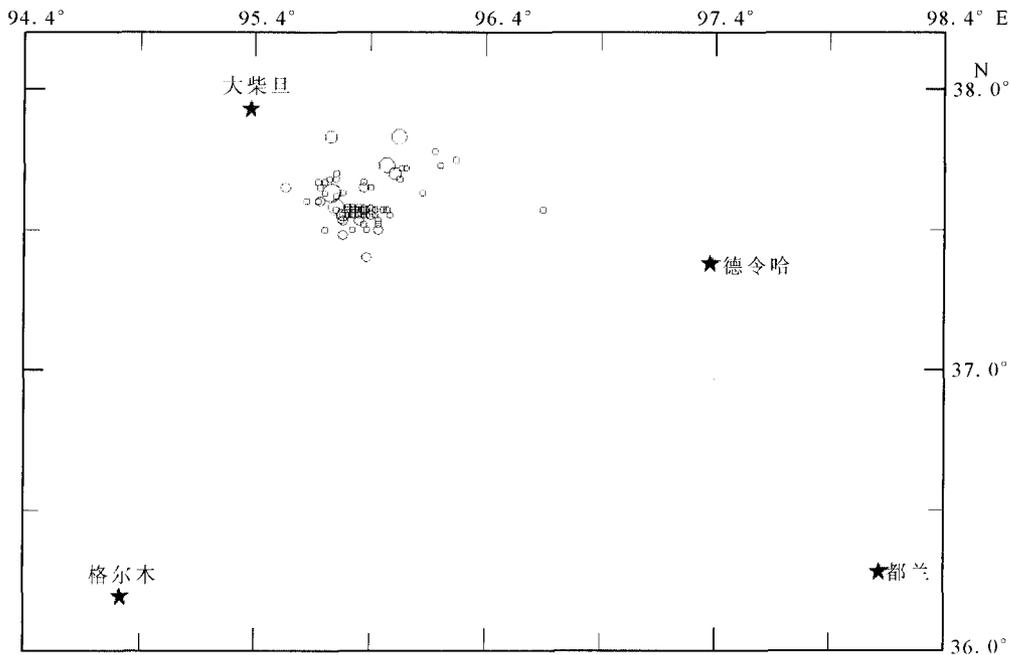


图 4 地震台站及震中分布图(五星表示地震台)

Fig. 4 Distribution of seismic stations and aftershocks epicenters.

3 数据处理结果

本文主要针对中强地震发生后的震级小于 4 级的余震序列,运用地震矩张量反演方法获取震源机制解参数。选取 2008 年 12 月 17 日 00 时 10 分 2.0 秒, $M_L = 2.8$ 地震为例说明计算过程,其余地震处理过程基本相似。其原始资料背景干扰较重(图 5 (a)),通过地震波资料频谱分析,其拐角频率均在 10 Hz 左右,采用带通滤波器进行滤波处理(0.05~15 Hz),在此频段内仪器和滤波器频谱特性曲线是

平直的,能够较好的滤掉周期较大地脉动和低频成份^[10],获取反演所需每个地震的初至(P、Pn)波形资料,一般 30 个采样点。随后将直角坐标下观测到的地震资料转换至柱坐标系中^[11]。使用许力生教授提供的地震矩张量反演的软件包 QuickMT 进行地震矩张量反演得到地震的震源机制解(图 6)。

通过对 98 个余震矩张量反演得到的震源机制解(图 7)的分析,发现其震源参数与传统地震参数相比有更丰富的内涵。余震 P 轴的平均走向为 202° ,平均倾角 29° ;T 轴平均走向为 110° ,平均倾角

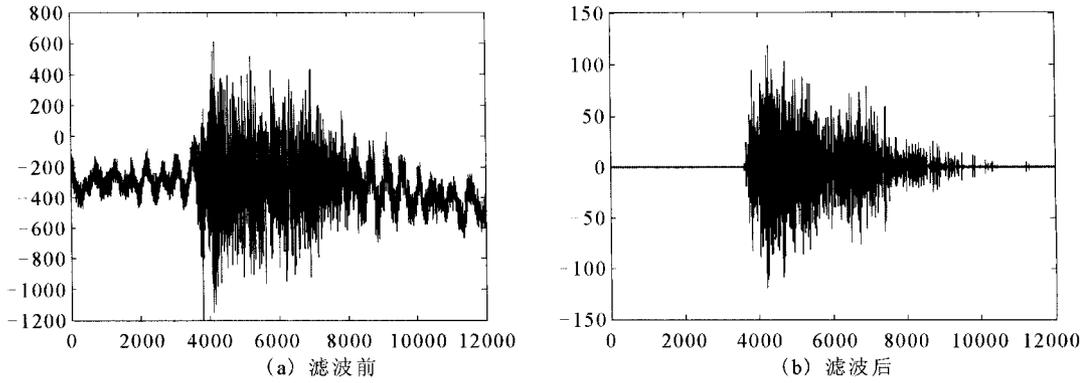


图 5 2008 年 12 月 17 日 00 时 10 分 2.0 秒, 德令哈地震台记录(垂直向)的 M_L 2.8 地震
 Fig. 5 The waveforms of a M_L 2.8 before and after filtering recorded by Delingha seismic station on Dec. 17, 2008.

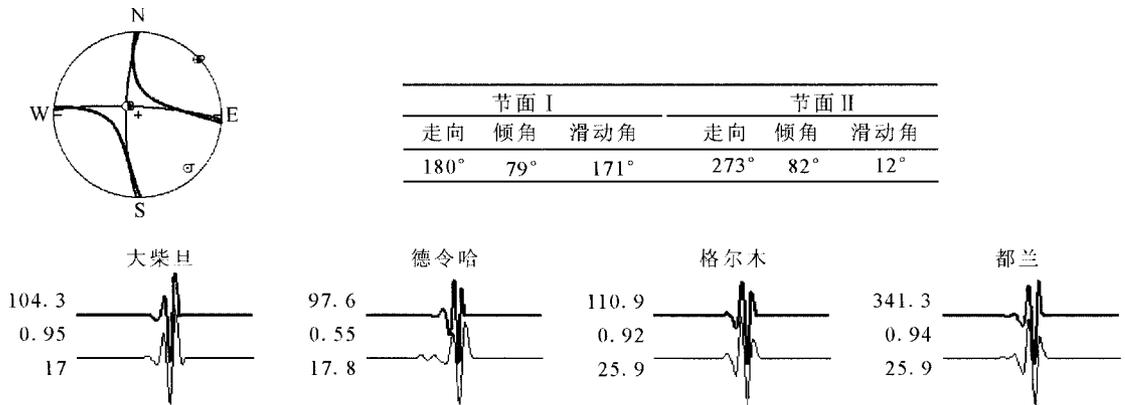


图 6 图 5 中 M_L 2.8 地震震源机制解及理论地震图观测地震图的拟合相关系数
 Fig. 6 The focal mechanism solution and the fitting correlation coefficient between the theoretical seismogram and the observation seismogram for event shown in Fig. 5.

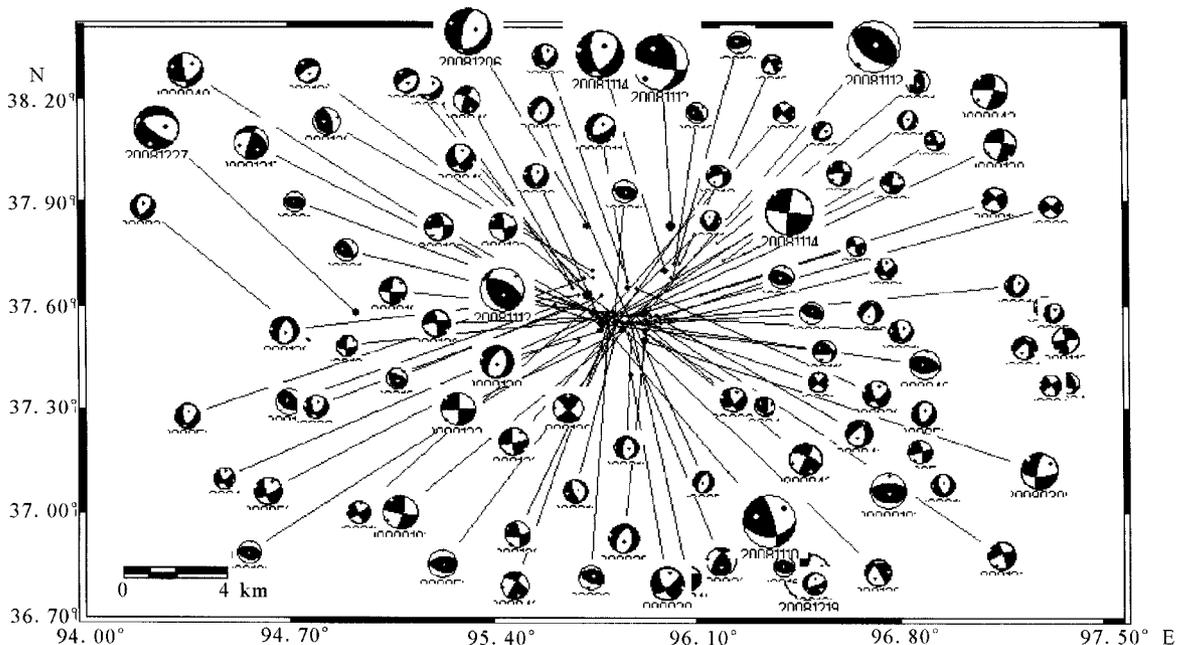


图 7 大柴旦 M_S 6.4 地震及余震地震矩张量空间分布图
 Fig. 7 Distribution of seismic moment tensors for Dachaidan M_S 6.4 earthquake and aftershocks.

25°。P 轴走向的优势方向中 NE 和 SW 向占总数的 85%，倾角小于 45°的占 64%；T 轴走向的优势方向中 NW 和 SE 向占总数的 86%，倾角小于 45°的占 72% (图 8)。余震错动面 I 平均参数为走向 164°、倾角 53°、滑动角 19°；余震错动面 II 平均参数为走向 188°、倾角 69°、滑动角 17°。主震的 P 轴走向 186°，倾角 20°；T 轴走向 20°，倾角 65°；主震破裂

面走向方位角为 108°、倾角 67°、滑动角 106°^①。根据青海地震局地震地质灾害损失评估报告，该地震等震线图走向为 NW 向到 SE 向^①。从震群平均 P、T 轴走向来看，与本区域应力场的反演结果及 GPS 观测资料计算的构造应力场较为接近^[12-14]，总体呈 NE 和 NW 走向。

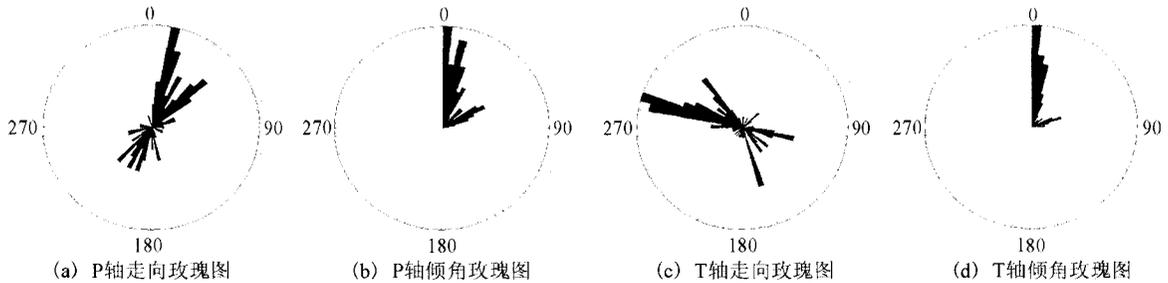


图 8 大柴旦余震序列震源机制解 P、T 轴走向和倾角玫瑰图

Fig. 8 Rose diagrams of P, T axial azimuth angles and dip angles from the focal mechanism solution for Dachaidan aftershocks sequence.

从余震 $M-t$ 图来看 (图 9)，大致可分为 3 个时段：第 1 个时段为主震发生到 11 月 24 日，P 轴平均走向为 148°，平均倾角 18°；T 轴平均走向为 168°，平均倾角 39°。第 2 个时段为 2008 年 11 月 30 日—2009 年 2 月 23 日，P 轴平均走向为 201°，平均倾角 28°；T 轴平均走向为 109°，平均倾角 29°。第 3 个时段为 2009 年 3 月 5 日—2009 年 5 月 30 日，P 轴平

均走向为 203°，平均倾角 33°；T 轴平均走向为 114°，平均倾角 16°。从各个时段的 P、T 走向和倾角平均值来看，第 1 阶段与主震的 P、T 轴走向有较大差异，2、3 阶段逐步与主震的 P、T 轴走向相一致，这表明在主震发生后震源附近应变较大，随着能量的释放，该区域的应力场逐步恢复到原来的状态，余震序列正常衰减。

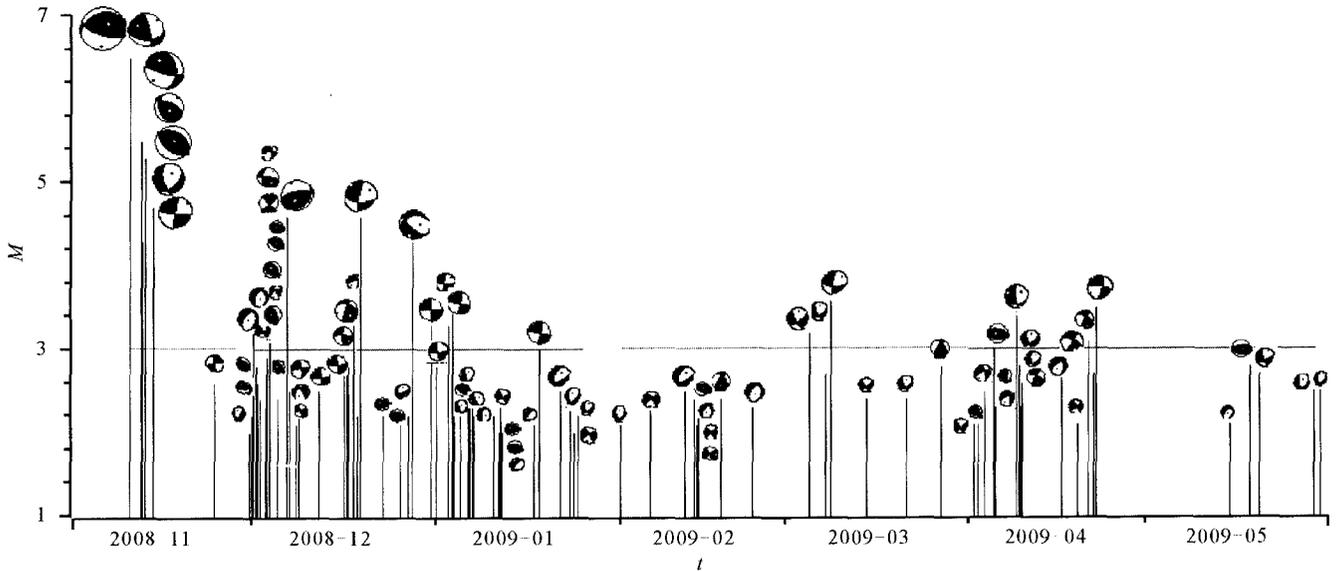


图 9 大柴旦 $M_s6.4$ 地震余震序列 $M-t$ 图

Fig. 9 The $M-t$ diagram of aftershock sequence of Dachaidan $M_s6.4$ earthquake.

① 青海省地震局, 2008 年 11 月 10 日大柴旦地震灾害损失评估报告, 2008.

4 结论

(1) 2008年11月10日大柴旦6.4级地震为左旋逆冲兼少量走滑破裂,其运动模式总体与宗务隆山断裂一致。P轴走向 186° ,与GPS给出该地区的速度场的方向基本一致^[15]。P轴倾角 20° ,倾角较小表明受水平应力场影响较大。其余震的P轴平均走向为 202° ,与主震P轴走向基本一致,优势方向为NE-SW,倾角较小,表明活动总体受到宗务隆山断裂的控制^[16]。

(2) 余震序列地震的P、T轴平均走向在第1阶段与主震差异较大,随着时间的推移逐步恢复到与构造应力场基本一致的状态,余震序列正常衰减。

(3) 本文通过格林函数库的计算提高了获取中小地震震源机制解的速度;获取了小震震源机制的资料,可以得到较为可靠的应力变化信息,有望为中强地震震情趋势判定,地震预测研究提供新的途径。

[参考文献]

- [1] 刘超,张勇,许力生,等.一种矩张量反演新方法及其对2008年汶川 $M_s8.0$ 地震序列的应用[J].地震学报,2008,30(4):329-339.
- [2] 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.
- [3] 许忠淮,汪素云,黄雨蕊,等.由大量的地震资料推断的我国大陆构造应力场[J].地球物理学报,1989,32(6):636-647.
- [4] 胡幸平,俞春泉,陶开,等.利用P波初动资料求解汶川地震及其强余震震源机制解[J].地球物理学报,2008,51(6):1711-1718.
- [5] Aki K, Richards P G. 定量地震学[M].北京:地震出版社,1980.
- [6] 陈运泰,吴忠良,王培德,等.数字地震学[M].北京:地震出版社,2000.
- [7] 刘杰,郑斯华,黄玉龙.利用遗传算法反演非弹性衰减系数、震源参数和场地响应[J].地震学报,2003,25(2):211-218.
- [8] <http://www.globalcmt.org/CMTsearch.html>.
- [9] 陈运泰.中国大陆地震学与地球内部物理学研究进展[M].北京:地震出版社,2004:626-627.
- [10] 周云好.用远场体波反演震源破裂过程研究[D].中国地震局地震预测研究所,2002:20-25.
- [11] 李旭,陈云泰,王培德.水平层状介质中的理论地震图计算程序说明书[R].1994.
- [12] 张晓清,马文静.昆仑山口西8.1级地震前青海省形变及地温前兆特征分析[J].高原地震,2002,14(1):70-75.
- [13] 张希,江在森,王琪,等.青藏高原北部地区构造变形特征及与强震关系[J].地球物理学进展,19(2):363-371.
- [14] 董娣,桑向国,刘锐,等.震源机制对近场地震动反应谱的影响[J].西北地震学报,2008,30(1):6-10.
- [15] 赖锡安.中国大陆现今地壳运动[M].北京:地震出版社,2004:338-362.
- [16] 姜枚,许志琴,钱荣毅.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,2006,33(2):268-274.
- [17] 李霞,董翔,刘希强,等.采用体波振幅相关系数方法研究地震集中区震源机制变化过程[J].西北地震学报,2010,32(3):231-236.
- [18] 李亚荣,朱新运.天祝—古浪5.4级地震震源机制和发震断层以及海原西断裂大地震危险性讨论[J].西北地震学报,2002,24(3):236-240.