



2012年5月3日甘肃金塔 $M_S5.4$ 地震矩张量反演^①

陈继锋

(中国地震局兰州地震研究所, 甘肃 兰州 730000)

摘要:使用甘肃省测震台网记录的三分向宽频带长周期数字波形资料,在时间域反演2012年5月3日甘肃金塔5.4级地震的矩张量解,并与Harvard大学CMT解进行比较。结合该地区的地质资料和构造背景,分析金塔地震的震成因。结果显示震源性质为走滑型,断层破裂面走向为 166° 、倾角 66° 、滑动角 -168° ,P轴走向为 32° ,与金塔地震余震分布和地震破坏分布情况大体一致,由此推测金塔地震的发震断层可能为神螺山—野马井断层。

关键词: 金塔5.4级地震; 矩张量反演

中图分类号: P315; P542 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-0844(2015)04-1124-05

DOI: 10.3969/j.issn.1000-0844.2015.04.1124

Moment Tensor Inversion of the 2012 Jinta, Gansu $M_S5.4$ Earthquake

CHEN Ji-feng

(Lanzhou Institute of Seismology, China Earthquake Administration, Lanzhou 730000, Gansu, China)

Abstract: On May 3, 2012, the Jinta $M_S5.4$ earthquake occurred beneath the northeast margin of the Tibetan Plateau, Gansu, China. We analyzed the broadband waveforms for the mainshock with sufficient signal-to-noise levels to invert for seismic moment tensors. All stations involved in this study are broadband stations situated near the May 3 mainshock; data showing such problems as misorientation of horizontal components, mislabeling and polarity reversal in one or more components were removed. During the data processing, we removed the mean value and instrument response, detrended the waveforms, integrated the three-component velocity waveforms to displacement, and rotated the horizontal components to the radial and tangential directions. Before performing moment tensor inversion, waveforms were filtered with a Butterworth Filter with frequencies between 0.016 Hz and 0.05 Hz. On the basis of the Crust 1.0 global crustal model, and considering the heterogeneity of the crust and the distances to the recording stations, various velocity models for each station were employed to account for variabilities in the crustal structure. During the inversion process, to insure the quality of the results, we retained only the station with variance reduction (V_R) is ≥ 80 , and got 5 stations for the inversion. After depth iteration, the best solutions obtained at a depth of 12 km were 71, 29, and 91.5% for double couple (DC), the compensated linear vector dipole (CLVD) component, and V_R , respectively, which indicates high-quality results. The two panels strike, dip, and rake of the solution were 166° , 66° , -168° and 71° , 79° , -25° respectively. It is found that our inversion results are basically consistent with the strike of the Shenluoshan-Yemajing fault, and the aftershocks distribution occurred near the fault. Associating with the tectonic framework, damage characteristics, and the aftershock distribution feature, we suggest that Jinta $M_S5.4$ earthquake was caused by the combined action of southeast Mashan fault and Shenluoshan—Yemajing fault, and the latter should be the seismogenic fault of the earthquake.

Key words: Jinta $M_S5.4$ earthquake; moment tensor inversion

① 收稿日期: 2014-12-25

基金项目: 地震行业科研专项课题(201208009)

作者简介: 陈继锋(1978—),男,甘肃清水人,高级工程师,主要从事地震台网运维和地震学的研究工作。E-mail: chenjf163@163.com.

0 引言

震源机制解是地震学的重要组成部分,对研究地壳应力场、强地面运动模拟、地震灾害评估等方面有重要意义。测定震源机制解的方法有多种,其中应用矩张量概念进行震源物理研究是当代地震学的一个重要前沿课题。地震矩张量可以直接从波形记录的反演中获得,既不需要对震源有任何先验的假设,也不需要大量的观测数据,因此在处理中等地震震源机制解中具有明显优势。近年来随着宽频带数字地震仪的广泛应用,地震波形记录的质量明显提高,极大地推动了震源物理过程研究的进展。由于区域性地震波形记录包含有关震源和区域地壳的丰富信息,利用波形资料研究中小地震的震源机制,其结果不仅有助于了解震源区和区域性应力状态以及断层的构造特性,也是理解地震孕育过程的重要途径。

由于中等地震的能量相对较小,通常难以利用远场波形反演地震矩张量解。利用 P 波初动求震源机制解时,一旦近场没有足够的台站分布,观测所能提供的初动资料数量以及这些初动点在震源球上分布的均匀程度对结果有相当大的影响,因此获得的震源机制解常常可靠性较差。随着新建的国家和区域数字地震台网的运行,利用区域震源宽频带记录进行中小地震震源参数的研究成为近年来一个活跃的研究领域^[1-3,10]。许多研究表明由于区域长周期地震波对速度结构的横向变化及密度的非均匀性相对不敏感,如果震源位置比较准确,地震满足震源的同步,假设波形信噪比高,则用区域范围稀疏台站记录的三分量长周期波形就足以反演得到稳定的矩张量解。另外,由波初动得到的机制解仅仅是初始破裂面,由波形反演结果得到的则是整个破裂过程的信息,由于初始破裂方向并不一定与地震的断层错动完全一致,因此矩张量解得到的震源机制结果相对更加完整、可靠^[4-6]。

2012 年 5 月 3 日在甘肃省金塔县与内蒙古自治区阿拉善额济纳旗交界处发生 $M_s5.4$ 地震。本次地震有感范围大,酒泉、嘉峪关等城市均强烈有感。利用震源区宽频带三分量地震仪波形数据的长周期波形记录,在时间域反演本次地震的矩张量解,并与 Harvard 大学 CMT 解进行比较,最后结合构造背景分析震成因。

1 研究方法

使用 Dreger 等^[2]提出的利用区域范围长周期体波三分量波形在时间域反演地震矩张量解的 TDMT 程序,方法原理详见文献^[6]。该方法目前在南加州台网及全球多个国家台网中运行以提供近实时地震矩张量解,在我国新疆伽师和甘肃岷县漳县地震序列研究中也得到了应用^[6-7]。理论地震图的正演计算使用经 Saikia^[8]改进的离散波数积分方法:当使用长周期波形资料时,地震满足震源为点源的假设,震源时间函数直接取函数;每个参加反演的台站可以分别使用不同的地壳速度、密度等。

具体反演过程是:首先对观测波形进行去均值、去倾斜校正、反褶仪器传递函数将记录变为实际速度值(m/s),再旋转到 Z、R、T 分量并积分为位移值;然后使用 Butterworth 带通滤波器对观测资料滤波到需要的长周期频段(0.016~0.

05 Hz),以剔除较低频和较高频噪声而不破坏用于矩张量反演的信息,对计算的 Green 函数也滤波到与观测数据同样的频率范围;最后采用迭代拟合相关系数的方法对观测波形和理论波形进行拟合。

2 数据准备及速度模型选取

使用 2012 年 5 月 3 日甘肃金塔 $M_s5.4$ 地震周边 400 km 范围内的所有宽频带波形记录资料,去除限幅和断记等有问题台站,最终选定 AXX(安西台)、GTA(高台台)、DHT(敦煌台)、QTS(青头山台)和 JYG(嘉峪关台)5 个信噪比较高的宽频带波形记录的台站资料反演矩张量解。这 5 个台基全为基岩山洞观测,其中 GTA 台使用 JCZ-1 型超宽频带地震计(频带宽度为 50 Hz~360 s 速度输出平坦),JYG 台使用 BBVS-120 型甚宽频带地震计(频带宽度为 50 Hz~120 s 速度输出平坦),AXX 台使用 CTS-1E 型甚宽频带地震计(频带宽度为 50 Hz~120 s 速度输出平坦),QTS 台使用 BBVS-60 型宽频带地震计(频带宽度为 50 Hz~60 s 速度输出平坦),DHT 台使用 CMG-3ESPC 型宽频带地震计(频带宽度为 50 Hz~60s 速度输出平坦)。地震数据采集器字长全部为 24 位,采样率为 100。

近年来随着我国区域台网仪器布设数量剧增,产出大量数字地震观测数据,对这些数字地震资料的应用研究得到快速发展,对地震数据的高质量产出也提出了要求。Niu 等^[9]通过对宽频带仪器远场直达波三分量的极性分析检测了全国宽频带地震台运行期间可能出现的仪器方位角以及初至波极性倒转等问题。该研究结果显示上述台站未出现极性反转现象,方位角的偏差很小,基本可以忽略其方位角偏差造成的影响^[10]。

反演地震矩张量的重要步骤之一是计算格林函数,计算结果在很大程度上影响反演结果的可靠性,因此速度模型的建立是一件非常基础而关键的工作。本文计算理论地震图使用 Crust1.0 的 $1^\circ \times 1^\circ$ 分层的速度和密度结构模型。Crust1.0 模型的分辨率为 $1^\circ \times 1^\circ$,目前被广泛使用,将该模型与甘肃地区深浅部结构的研究结果进行对比,差别较小。同时由于反演方法使用区域范围长周期的波形数据反演结果对结构的依赖性不强,研究中根据各个台站的位置最终使用各台站下方的速度模型。

3 矩张量反演及结果分析

图 1 为 2012 年 5 月 3 日甘肃金塔与内蒙额济纳旗交界地区 $M_s5.4$ 地震台站分布图,距离最近台站 YJZ(俞井子台)限幅,震中周围台站稀疏且震中以北没有台站。图 2 为本次地震 AXX(安西台)的波形处理过程。

图 3 为本次地震中上述 5 个台站实际观测与理论波形以及反演结果。用双力偶震源机制解得下半球投影,同时绘出 P、T 轴,5 台理论波形和实际观测波形的相互关系为 91.5%。由图 3 可见此次地震为典型走滑型地震。

全球很多研究机构对地震矩张量进行过反演研究,其中哈佛大学被公认为最权威的研究机构之一,他们对全球绝大

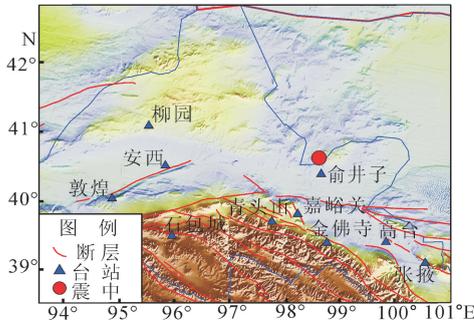


图1 2012年5月3日 $M_s5.4$ 地震震中台站分布图
Fig.1 Distribution of stations around the epicenter of $M_s5.4$ earthquake on May 3, 2012

部分 $M_w > 4.8$ 地震矩张量作了反演。为进一步分析本文矩张量反演结果的可靠性,与哈佛大学的结果进行对比,数据显示两者结果十分接近,也与张辉^[11]等应用 CAP 方法计算

的震源机制解基本一致。金塔 $M_s5.4$ 地震双力偶震源机制解具体参数见表 1。

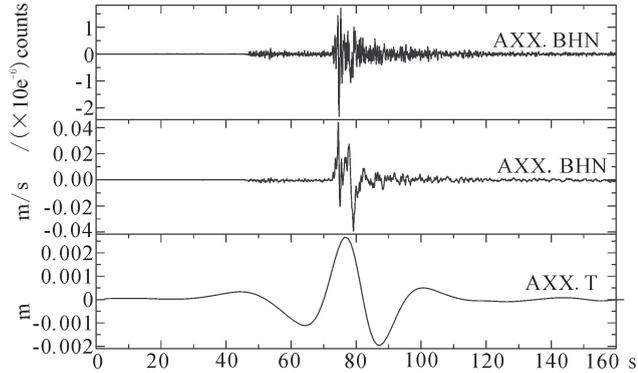


图2 2012年5月3日甘肃金塔 $M_s5.4$ 地震观测波形的滤波处理

Fig.2 Filter processing of the observed waveforms recorded from Jinta $M_s5.4$ earthquake, on May 3, 2012

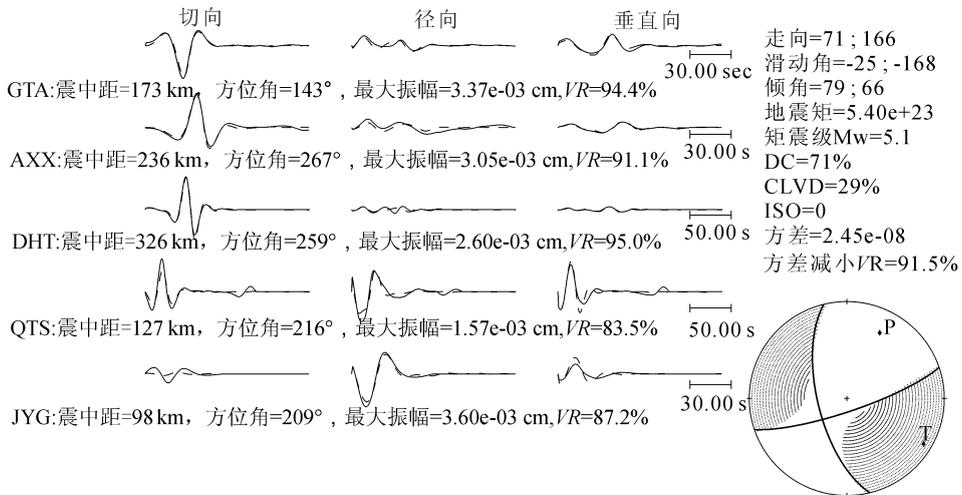


图3 理论波形与实际波形拟合及反演结果(实线为记录波形,虚线为理论波形)

Fig.3 The inversion results and comparison of the synthetic waveforms with the observed waveforms (Solid line represents observed waveform, dashed line represents the synthetic waveform)

表 1 2012年5月3日金塔 $M_s5.4$ 地震双力偶震源机制解

Table 1 The double-couple focal mechanism for the $M_s5.4$ event on May 3, 2012

发震时刻 (UTC)	M_s	M_w	节面 I			节面 II			地震矩	来源
			走向/(°)	倾角/(°)	滑动角/(°)	走向/(°)	倾角/(°)	滑动角/(°)		
2012-05-03T10:19:34.9	5.4	5.1	71	79	-25	166	66	-168	$5.40e+23$	本文
2012-05-03T10:19:36.0	5.2	5.2	69	73	-11	162	80	-163	$7.88e+23$	哈佛

在计算理论格林函数时,震源深度影响理论地震图的形态,在一定程度上将影响震源机制的反演结果。为减少震源深度的误差对矩张量解的影响,在深度上进行迭代,反演若干个深度上的地震矩张量解,以波形拟合误差最小的震源深度和相应的矩张量解作为最佳结果。这样在对初始震源深度进行评价和校正的同时,得到最佳的矩张量解。图 4 中可以看出震源深度的变化对拟合误差有一定的影响,在不同的深度,方差减小 V_R 值变化很明显,有显著的高值点,即为本

次地震破裂的矩心位置 12 km。然而在很宽的深度范围,反演结果都比较稳定,表明了该方法的稳定性。

金塔 $M_s5.4$ 地震震区为大面积的戈壁、荒漠,现场考察未发现地表裂缝、断层等构造现象,极震区属甘肃北山戈壁丘陵区,无居民点,居住人员大多为萤石矿和煤矿工人,居住房屋多为活动板房和简易工棚,没有造成明显破坏^[12-13]。地震发生后其余震活动较为频繁,截止 2012 年 6 月 1 日甘肃省地震台网共记录到 0 级以上余震 696 次。震中附近台站

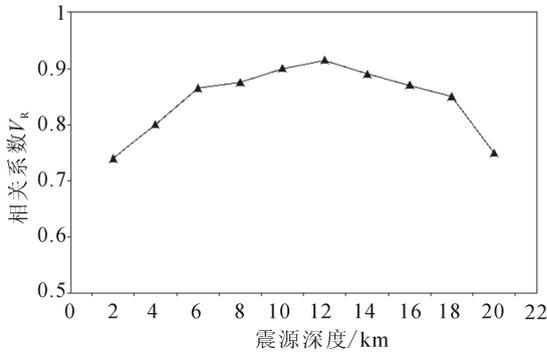


图 4 不同震源深度上矩张量解及波形拟合方差减小 V_R 值

Fig.4 Moment tensor solutions and the variance reduction values at different focal depths

稀疏,且全部位于震中以南,最近台站 YJZ(俞井子台)距离震中大约 28 km,667 次余震为单台(俞井子台)记录,29 次能定位的余震分布如图 5 所示呈明显的 NS 向排列。该地震震源机制解表明,有一组节面呈近南北向分布,这与金塔地震余震展布基本吻合。

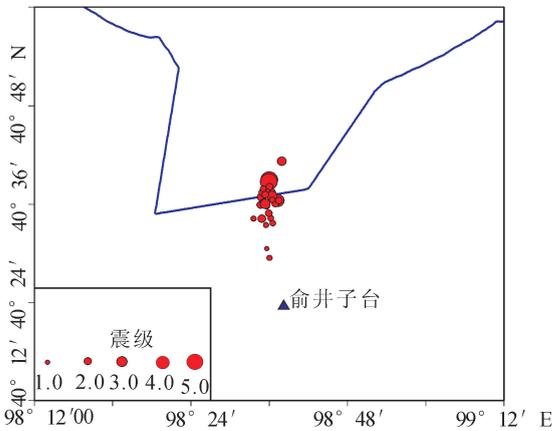


图 5 2012 年 5 月 3 日 $M_S5.4$ 地震余震分布图

Fig.5 Distribution of aftershocks of the $M_S5.4$ earthquake on May 3,2012

何文贵^[13]结合余震和地震破坏分布情况分析认为,主震位于马山南东断层(F_1)和神螺山—野马井断层(F_2)交汇处,本次地震是这两条井断层共同作用的结果,其发震断层可能为神螺山—野马井断层(图 6)。

4 讨论与结论

利用甘肃省测震台网记录的三分量宽频带波形资料反演 2012 年 5 月 3 日金塔 $M_S5.4$ 地震的矩张量解,虽然最近台站 YJZ(俞井子台)限幅,震中周围台站稀疏且震中以北没有台站,但由图 1 和图 4 可以看出用于反演地震矩张量的 5 个台站波形拟合较好,数据显示与哈佛大学矩张量解十分相似,反演结果可靠。

金塔 $M_S5.4$ 地震震区为大面积的戈壁、荒漠,现场考察

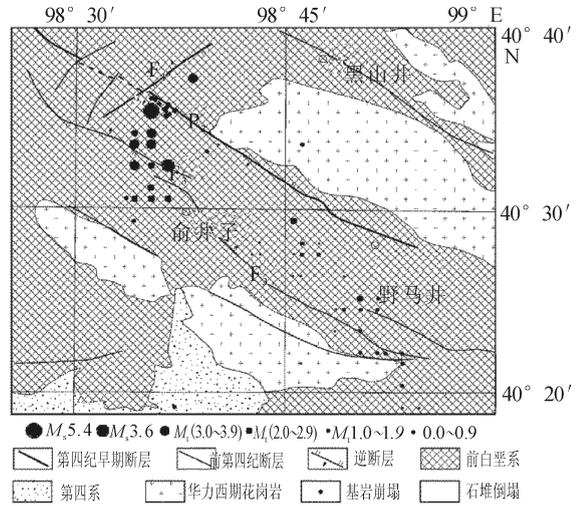


图 6 金塔 $M_S5.4$ 级地震震中附近地震构造图^[13]

Fig.6 Seismotectonic map around the epicenter of Jinta $M_S5.4$ earthquake^[13]

未发现地表裂缝、断层等构造现象。其震源机制解计算结果表明,有一组节面方位角为 166° 、倾角 66° 、滑动角 -168° ,结合余震分布特征和何文贵等人的地质调查结果,2012 年金塔 $M_S5.4$ 级地震是马山南东断层和神螺山—野马井断层共同作用的结果,其发震断层可能为神螺山—野马井断层。

震源应力场的 P 轴方向为 $N32^\circ E$,不仅与甘肃地区活断层所反演的主压应力方向吻合,而且表明震源机制解研究结果与活断层计算结果和认识完全一致。

利用区域范围长周期体波三分量波形在时间域反演金塔地震的断层面解,但这只是地震震源参数中的一部分,不足以完全揭示金塔地震的发生、发展和终止,还应通过各种地球物理方法研究地震破裂过程、震源区的精细结构、构造应力场等,并结合震源物理学、野外地质考察等研究进一步明确此次地震的发震机理。

致谢:研究过程中使用了美国伯克利地震实验室的矩张量反演软件和 SAC 波形处理软件,大部分图件使用 GMT 绘制,特此申明。赵翠萍研究员辅导了 TDMT 程序的使用,在此一并感谢!

参考文献 (References)

- [1] Ghose S, Hamberger M W. Source Parameters of Moderately-sized Earthquakes in Tiansha, Central Asia from Regional Moment Tensor Inversion [J]. Geophys Res Lett, 1990, 5: 3181-3184.
- [2] Dreger D S, Savage B. Aftershocks of the 1952 Kern County, California, Earthquake Sequence [J]. Bull Seism Soc Am, 1998, 89: 1094-1108.
- [3] Kim S G, Kraeva N. Source Parameter Determination of Local Earthquakes in Loreausing Moment Tensor Inversion of Single Station Data [J]. Bull Seism Soc Am, 1999, 89(4): 1077-1082.
- [4] Tan Y, Zhu L, Helmberger D V, et al. Locating and Modeling Regional Earthquakes with Two Stations [J]. J Geophys Res,

2006, 111, B01306, doi:10.1029/2005JB003775.

- [5] Dreger D S, Helmberger D V. Determination of Source Parameters at Regional Distances with Three-components Sparse Network Data[J]. *J Geophys Res*, 1993, 98: 8107-8125.
- [6] 赵翠萍, 陈章立, 郑斯华, 等. 伽师震源区中等强度地震矩张量反演及其应力场特征[J]. *地球物理学报*, 2008, 51(3): 782-792. ZHAO Cui-ping, CHEN Zhang-li, ZHENG Si-hua, et al. Moment Inversion of Moderate Earthquakes and the Locally Perturbed Stress Field in the Jiashi Source Region[J]. *Chinese J Geophys*, 2008, 51(3): 782-792. (in Chinese)
- [7] 陈继锋, 林向东, 何新社. 2013年甘肃岷县 M_S 6.6 地震矩张量反演及发震构造初探[J]. *地震工程学报*, 2013, 35(3): 425-431. Chen Ji-feng, LIN Xiang-dong, HE Xin-she. Moment Tensor Inversion and Seismogenic Tectonics of the 2013 Minxian M_S 6.6 Earthquake in Gansu[J]. *China Earthquake Engineering Journal*, 2013, 35(3): 425-431. (in Chinese)
- [8] Saikia K S. Modified Frequency-wave Number Algorithm For regional Seismograms Using Filon's Quadrature: Modeling of Lg Waves in Eastern North America[J]. *Geophys J Int*, 1994, 118(1): 142-158.
- [9] Niu F L, Li J. Component Azimuths of the CEArray Stations Estimated From P-wave Particle Motion[J]. *Earthquake Science*, 2011, 24(1): 3-13.
- [10] 唐兰兰, 赵翠萍, 王海涛. 2008年新建乌恰 6.8 级地震序列震

源特征及帕米尔东北缘应力场研究[J]. *地球物理学报*, 2012, 55(4): 1228-1239.

- TANG Lan-lan, ZHAO Cui-ping, WANG Hai-tao. Study on the Source Characteristics of the 2008 M_S 6.8 Wuqia, Xinjiang Earthquake Sequence and the Stress Field on the Northeastern Boundary of Pamir[J]. *Chinese J Geophys*, 2012, 55(4): 1228-1239. (in Chinese)
- [11] 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. ZHANG Hui, WANG Yi-xi. Focal Mechanism of the Jinta-Alashanmeng M_S 5.4 Earthquake on May 3, 2012[J]. *Northwestern Seismological Journal*, 2012, 34(2): 205-206. (in Chinese)
- [12] 董治平, 程建武, 张辉. 2012年5月3日甘肃金塔 5.4 级地震[J]. *国际地震动态*, 2012, 6: 41. DONG Zhi-ping, CHENG Jian-wu, ZHANG Hui. The Jinta M_S 5.4 Earthquake on May 3, 2012[J]. *Recent Developments in World Seismology*, 2012, 6: 41. (in Chinese)
- [13] 何文贵, 袁道阳, 王爱国, 等. 2012年甘肃金塔 M_S 5.4 地震发震构造讨论[J]. *地震工程学报*, 2013, 35(增刊1): 51-53. HE Wen-gui, YUAN Dao-yang, WANG Ai-guo, et al. Discussion on Seismogenic Structures of Jinta M_S 5.4 Earthquake in Gansu Province, 2012[J]. *China Earthquake Engineering Journal*, 2013, 35(Supp 1): 51-53. (in Chinese)

(上接 1123 页)

弱,但也值得关注。2015年大震发生前后可倍出若干倍九天日期,其中只有10月26日与望日接近重合(只差1天)。另外该震前18天有强磁暴发生,这也符合“磁暴倍九法”的预测,因此可选10月26日前后为发震日。类似情况在国内有文献[1-2]中所列震例。附带指出,2015年大震附近有很高的蒂里奇米尔山峰(7 690 m)。在我国此类震例亦较多。

[参考文献]

- [1] 郭增建, 秦宝燕. 大震发生日期的预报——异年倍九律[J]. *地震工程学报*, 1986, 8(2): 96-104. GUO Zeng-jian, QIN Bao-yan. The Predication for the Date of the Occurrence of Large Earthquakes——The Multiplied Nine-Day Regularity in Different Years[J]. *Northwestern Seismological Journal*, 1986, 8(2): 96-104. (in Chinese)
- [2] 郭安宁, 郭增建, 张炜超, 等. 三性法及静中动方法对甘肃岷县漳县 M_S 6.6 地震的趋势性前兆显现的回顾研究[J]. *地震工程学报*, 2013, 35(3): 522-528. GUO An-ning, GUO Zeng-jian, ZHANG Wei-chao, et al. Ret-

rospective Study on the Trend of Apparent Precursors of the Minxian—Zhangxian M_S 6.6 Earthquake with the Triplet Method and “Activity in Quiescence” Method[J]. *China Earthquake Engineering Journal*, 2013, 35(3): 522-528. (in Chinese)

- [3] 郭增建, 郭安宁, 张炜超, 等. 甘肃岷县漳县 6.6 级地震发生日期的触发因素分析及对短临预测方法的思考[J]. *地震工程学报*, 2013, 35(3): 413-418. GUO Zeng-jian, GUO An-ning, ZHANG Wei-chao, et al. Analysis of Trigger Factors of the Minxian—Zhangxian M_S 6.6 Earthquake Occurrence Date and Short—impending Prediction Methods[J]. *China Earthquake Engineering Journal*, 2013, 35(3): 413-418. (in Chinese)
- [4] 郭安宁, 李鑫, 赵乘程, 等. 2013年芦山 7.0 级地震一年尺度预测的回顾性研究——基于三性法、静中动和垂震底继模式[J]. *地震工程学报*, 2013, 35(2): 257-265. GUO An-ning, LI Xin, ZHAO Cheng-cheng, et al. Retrospective Study on One—year Prediction for 2013 Lushan M_S 7.0 Earthquake[J]. *China Earthquake Engineering Journal*, 2013, 35(2): 257-265. (in Chinese)