

张小涛,余怀忠. 2025. 2022年青海门源6.9级地震前态矢量异常研究[J]. 地震研究, 48(2): 247–252, doi:10.20015/j.cnki.ISSN1000-0666.2025.0026.

Zhang X T, Yu H Z. 2025. Research on the state vector anomaly before the Menyuan, Qinghai  $M_s$  6.9 earthquake[J]. *Journal of Seismological Research*, 48(2): 247–252, doi:10.20015/j.cnki.ISSN1000-0666.2025.0026.

## 2022年青海门源6.9级地震前态矢量异常研究\*

张小涛, 余怀忠

(中国地震台网中心, 北京 100045)

**摘要:** 2022年1月8日青海门源6.9级地震前存在多项地震活动性和地球物理异常, 利用态矢量方法回溯性研究其震前异常, 通过遍历 $3^\circ \times 3^\circ$ 至 $12^\circ \times 12^\circ$ 的研究区域发现, 选取 $8^\circ \times 8^\circ$ 的研究范围能更好地反映震前异常; 震前门源地震存在态矢量的模( $M$ )、态矢量增量的模( $\Delta M$ )、态矢量之间的夹角变化( $\varphi$ )和态矢量与单位矢量的转角变化( $\varphi_e$ ) 4个参量的异常; 4个参量中的 $M$ 和 $\Delta M$ 映震效果要优于 $\varphi$ 和 $\varphi_e$ 。总体来看, 门源地震前态矢量异常变化平稳, 震前异常突出, 属于中短期异常。

**关键词:** 态矢量; 门源地震; 回溯性研究; 地震异常

**中图分类号:** P315.72 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-0666(2025)02-0247-06

doi:10.20015/j.cnki.ISSN1000-0666.2025.0026

### 0 引言

2022年1月8日1时45分青海海北州门源县( $37.77^\circ\text{N}$ ,  $101.26^\circ\text{E}$ )发生6.9级地震, 震源深度10 km。此次地震震感范围大, 青海、甘肃震感强烈, 根据震害快速评估和现场初步调查结果, 地震烈度最高达到IX度(李鑫等, 2022)。地震震中位于青藏高原东北缘祁连山地震带东段, 南北地震带的北部, 震源机制解显示为走滑型(韩立波, 2022), 距震中最近的断层是托莱山北缘断裂, 约3 km(冯万鹏等, 2023)。地震震中附近200 km范围内, 1900年以来发生6级以上地震8次, 周围历史地震活动活跃。

门源地震后, 不同学者研究了其震前的地震活动性(许延军等, 2022)、电磁(姚赛赛等, 2023; 祝杰等, 2023)、形变(朱爽等, 2022; 鲁小飞等, 2023)方面的异常, 为研究本次地震积累了各方面的数据。

态矢量来源于统计物理学, 是一个对连续场进行粗粒化描述的概念, 适合用来研究复杂系统问题。尹祥础等(2004)引入态矢量方法对1975年海城7.3级地震和1976年唐山7.8级地震进行了研究, 发现大地震前态矢量参数有显著的变化, 因此认为态矢量的特征变化可能是一种地震前兆; 余怀忠等(2004)利用岩石力学实验对态矢量方法进行研究, 结果表明岩石试件破坏之前, 表征态矢量的相关参量都发生了异常明显的变化, 说明使用态矢量方法可以对脆性材料的破坏乃至地震作出预测。鉴于态矢量有较好的物理意义, 吴永加等(2006)和黄显良等(2006)分别利用该方法对中国大陆部分显著地震进行了震前态矢量异常特征研究, 发现绝大多数震例震前均存在不同程度的态矢量异常现象。为了提高地震的预测准确度, 余怀忠等(2012)、周发仁和余怀忠(2016)、夏彩韵等(2019)将态矢量方法与图像信息、加卸载响应比、矩张量加速释放方法相结合, 对川滇、辽宁等地区地震危险性进行了回溯

\* 收稿日期: 2024-04-02.

基金项目: 国家自然科学基金联合基金(U2039205); 国家重点研发计划(2018YFE0109700).

第一作者简介: 张小涛(1982-), 高级工程师, 主要从事地震活动性方面的研究. E-mail: zhangxiaotao@seis.ac.cn.



个  $1^\circ \times 1^\circ$  的子区域,  $N = L \times L$ , 每个子区域内的  $V_i$  为一个时间窗内该子区域发生的地震能量对数的和:

$$V_i = \sum_{j=1}^k \log E_i = \sum_{j=1}^k \log(11.8 + 1.5m_j) \quad (7)$$

式中:  $i$  为子区域的序号;  $j$  为子区域内的地震序号;  $m_j$  为第  $j$  个地震的震级;  $k$  为这一时间窗内发生的地震数目。考虑到地震目录的完备性, 选取  $M3.0 \sim 5.4$  的地震参与计算, 以 12 个月为时间窗长, 1 个月为步长进行滑动, 根据式 (7) 计算每个子区每个时刻的物理量  $V_i$ , 再根据式 (3) ~ (6) 计算态矢量的 4 个参量的时间序列。

为研究门源 6.9 级地震前态矢量变化敏感区域的大小, 选取中国地震台网中心提供的 2007 年 1 月—2020 年 12 月的全国地震目录, 取  $L = 3^\circ \sim 12^\circ$ , 计算不同空间尺度态矢量参量的变化, 研究态矢量参数异常。本文以  $L = 8^\circ \times 8^\circ$  时的计算结果为例进行讨论。

### 2.1 态矢量的参量 $M$

图 3 是门源 6.9 级地震前态矢量的参量  $M$  的时序曲线, 从图中可以看出, 2007 年以来参量  $M$  的时序曲线变化较为平稳, 2013 年 6—7 月和 2016 年 10—12 月有小幅的升高, 但均未突破均值 + 2 倍均方差的阈值, 2021 年 5 月参量  $M$  快速升高, 直至发震。参量  $M$  反映了震前的中短期异常。

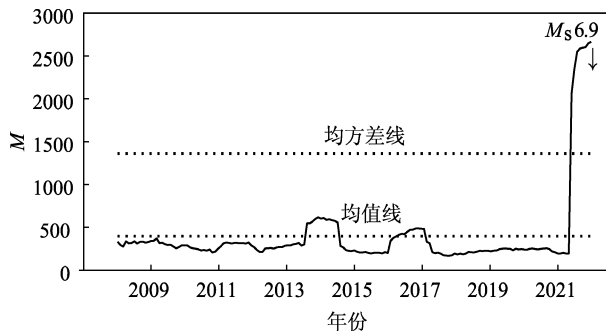


图3 门源 6.9 级地震前态矢量的参量  $M$  时序曲线  
Fig. 3 Time history of parameter  $M$  of the state vector before the Menyuan, Qinghai  $M_s6.9$  earthquake

### 2.2 态矢量的参量 $\Delta M$

图 4 是门源 6.9 级地震前态矢量的参量  $\Delta M$  的时序曲线, 从图中可以看出, 2007 年参量  $\Delta M$  的时序曲线变化较为平稳, 2013 年 5 月、2014 年 8

月、2016 年 1 月和 2017 年 1 月出现 4 次较小的高值波动, 2021 年 6 月出现快速上升后又快速下降, 高值异常显著, 此后的半年内发生了门源 6.9 级地震。参量  $\Delta M$  反映了震前的中短期异常。

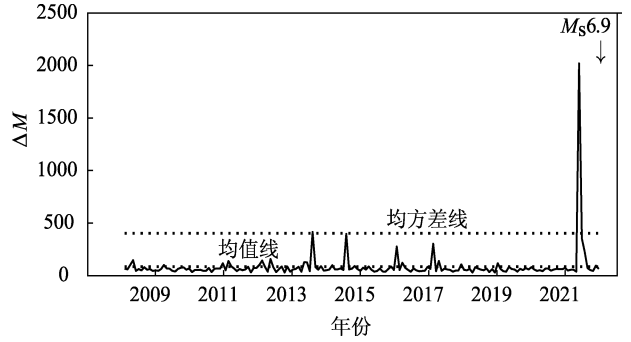


图4 门源 6.9 级地震前态矢量的参量  $\Delta M$  时序曲线  
Fig. 4 Time history of parameter  $\Delta M$  of the state vector before the Menyuan, Qinghai  $M_s6.9$  earthquake

### 2.3 态矢量的参量 $\varphi$

图 5 是门源 6.9 级地震前态矢量的参量  $\varphi$  的时序曲线, 该曲线显示震前参量  $\varphi$  时序波动较大, 多次出现高值异常, 但在地震前的半年时间内参量  $\varphi$  时序曲线出现了最高值。由于该序列出现的异常较多, 很难在震前判定其是否是临震异常。以回溯性来看, 门源 6.9 级地震震前半年左右时序曲线出现最大异常。

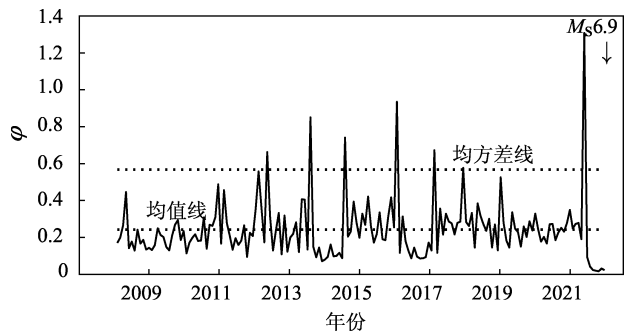


图5 门源 6.9 级地震前态矢量的参量  $\varphi$  时序曲线  
Fig. 5 Time history of Parameter  $\varphi$  of the state vector before the Menyuan, Qinghai  $M_s6.9$  earthquake

### 2.4 态矢量的参量 $\varphi_c$

图 6 是门源 6.9 级地震前态矢量的参量  $\varphi_c$  的时序曲线, 曲线在 2009—2021 年出现 2 次高值异常, 震前的 2021 年 4 月  $\varphi_c$  快速上升直至发震。从回溯性来看, 参量  $\varphi_c$  反映了震前的中短期异常。

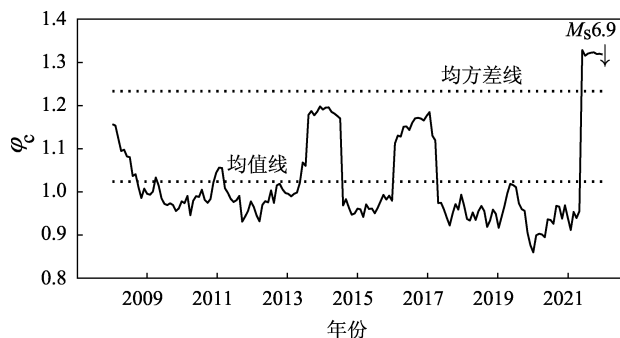


图6 门源6.9级地震前态矢量的参量 $\varphi_c$ 时序曲线  
Fig. 6 Time history of parameter  $\varphi_c$  of the state vector before the Menyuan, Qinghai  $M_s 6.9$  earthquake

总体来看,门源6.9级地震前态矢量的4个参量均表现出了中短期异常,从映震效果来看,态矢量的模 $M$ 和态矢量的增量的模 $\Delta M$ 的映震效果要优于其它2个参量。

### 3 讨论

#### 3.1 尺度选择

本文研究以门源6.9级地震为中心,遍历 $3^\circ \times 3^\circ$ 至 $12^\circ \times 12^\circ$ 的研究区域,结果显示 $7^\circ \times 7^\circ$ 至 $9^\circ \times 9^\circ$ 研究区域的映震效果较佳,能够反映出震前巨幅的中短期异常,而 $3^\circ \times 3^\circ$ 至 $6^\circ \times 6^\circ$ 和 $10^\circ \times 10^\circ$ 至 $12^\circ \times 12^\circ$ 研究区域未能较好地显示出震前异常现象,这或许与地震的孕震范围有关。据中国震例统计(张肇诚等,1990),7级左右地震的孕震(或影响)半径约为400 km。本次地震前态矢量异常的较佳研究范围为 $7^\circ \sim 9^\circ$ ,对应的研究区域半径约为350~450 km,这与6.9级地震的孕震范围较为一致。选取与孕震范围一致的空间范围做为研究区域一方面可以最大范围地包含异常信息,较小范围( $3^\circ \times 3^\circ$ 至 $6^\circ \times 6^\circ$ )可能涵盖的异常信息不够,也能摒弃选取更大范围( $10^\circ \times 10^\circ$ 至 $12^\circ \times 12^\circ$ )带来的干扰信息,影响态矢量方法对异常的提取。

#### 3.2 态矢量的4个参量的异常数量

门源6.9级地震前4个参量均出现了中短期异常。这4个参量都包含着一定的物理含义,如:参量 $M$ 表征研究区域地震活动的总体水平,参量 $\Delta M$ 体现了研究区在相邻时刻整体水平的变化,二者在震前都表现出显著异常,可能从态矢量的角度

说明系统的不稳定性加剧,更利于研究区域地震。门源地震前4个参量都出现了较显著的异常,一定程度上表明震前研究区域地震活动性处于不稳定状态。张小涛(2022)统计145个震例发现:24.8%震例震前存在4个参量异常,30.3%震例震前存在3个参量异常,18.6%震例震前存在2个参量异常,21.4%震例震前存在1个参量异常。可见,绝大多数地震前都存在态矢量的参量异常,像门源6.9级地震前异常较为突出的震例也占一定比例。这在一定程度上表明应用态矢量方法对大震异常的提取有一定的普遍性。

#### 3.3 映震效果

吴永加(2006)研究美国南加州地区 $M \geq 6.5$ 地震前态矢量异常发现,相对于态矢量参量 $\Delta M$ 、 $\varphi$ 及 $\varphi_c$ ,参量 $M$ 在震前的变化更为敏感。张小涛(2022)统计了1975—2020年中国大陆6.0级以上地震前态矢量4个参量的异常发现:4个参量的映震效果从优到劣排序为:态矢量参量 $M$ 、 $\varphi_c$ 、 $\Delta M$ 、 $\varphi$ 。本震例也显示态参量 $M$ 在震前变化稳定,震前异常突出,能够较好地反映震前异常。这或许与参量 $M$ 反映的是研究区域整个物理场的总体水平有关(余怀忠等,2004),其物理机制简单且清晰,能够较好地反映出研究区域的异常活动。

### 4 结论

本文利用态矢量方法研究了2022年门源6.9级地震震前态矢量4个参量的异常特征,主要得到以下结论:

(1) 门源6.9级地震前态矢量4个参量出现异常,最显著的异常均出现在震前半年左右,中短期异常特征明显。

(2) 门源6.9级地震前4个参量中:态矢量的模 $M$ 、态矢量的增量的模 $\Delta M$ 异常突出,异常映震效果优于态矢量之间的夹角 $\varphi$ 和任意时刻态矢量与单位态矢量之间的转角变化 $\varphi_c$ ,这与其他震例的研究结果趋于一致。

(3) 当态矢量异常的研究区域选择范围( $8^\circ \times 8^\circ$ )与门源6.9级地震的孕震范围大小(半径约400 km)一致时,态矢量方法能更好地提取震前异常。

感谢中国地震台网中心吴永加工程师给予态矢量方法程序方面的帮助。

## 参考文献:

- 冯万鹏,何晓慧,张逸鹏,等. 2023. 2022年青海门源  $M_w$ 6.6 地震的发震断层及孕震构造模式[J]. 科学通报, 68(S1): 254–270.
- Feng W P, He X H, Zhang Y P, *et al.* 2023. Seismic faults of the 2022  $M_w$ 6.6 Menyuan, Qinghai earthquake and their implication for the regional seismogenic structures [J]. Chinese Science Bulletin, 68(S1): 254–270. (in Chinese)
- 韩立波. 2022. 2022年青海门源  $M_s$ 6.9 地震震源机制解[J]. 地震科学进展, 52(2): 49–54.
- Han L B. 2022. Focal mechanism of 2022 Menyuan  $M_s$ 6.9 earthquake in Qinghai Province[J]. Progress in Earthquake Sciences, 52(2): 49–54. (in Chinese)
- 黄显良,陈宇卫,沈小七,等. 2006. 华东地区态矢量的研究[J]. 地震地磁观测与研究, 27(5): 1–5.
- Huang X L, Chen Y W, Shen X Q, *et al.* 2006. The study on state vector in east China[J]. Seismological and Geomagnetic Observation and Research, 27(5): 1–5. (in Chinese)
- 李鑫,李智敏,盖海龙,等. 2022. 青海门源  $M_s$ 6.9 地震极震区震害调查与防灾建议[J]. 震灾防御技术, 17(1): 84–94.
- Li X, Li Z M, Gai H L, *et al.* 2022. Investigation and prevention suggestion of earthquake disaster in the extreme earthquake area of  $M_s$ 6.9 earthquake in Menyuan County, Qinghai province[J]. Technology for Earthquake Disaster Prevention, 17(1): 84–94. (in Chinese)
- 鲁小飞,谭凯,张彩红,等. 2023. 2022年门源6.9级地震的GPS形变特征[J]. 大地测量与地球动力学, 43(4): 387–391.
- Lu X F, Tan K, Zhang C H, *et al.* 2023. Study of the CPS deformation characteristics of the Menyuan  $M_6$ .9 earthquake in 2022[J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 43(4): 387–391. (in Chinese)
- 吴永加,张永仙,尹祥础. 2006. 1970年以来中国大陆25次6.8级以上地震前态矢量异常特征研究[J]. 地震, 26(2): 61–67.
- Wu Y J, Zhang Y X, Yin X C. 2006. Characteristics of state vector anomaly before 25 earthquakes ( $M \geq 6.8$ ) in China's mainland since 1970 [J]. Earthquake, 26(2): 61–67. (in Chinese)
- 吴永加. 2006. 强震前态矢量异常特征研究[D]. 北京: 中国地震局地震预测研究所.
- Wu Y J. 2006b. Characteristics of state vector anomaly before large earthquakes [D]. Beijing: Institute of Earthquake Forecasting, CEA. (in Chinese)
- 夏彩韵,王亮,张博. 2019. 多方法组合模型对辽宁及邻区中强地震的回溯性检验研究[J]. 防灾减灾学报, 35(S1): 68–73.
- Xia C Y, Wang L, Zhang B. 2019. Study on backtracking test of the strong earthquakes in Liaoning and its adjacent areas by combination approach model [J]. Journal of Disaster Prevention and Reduction, 35(S1): 68–73. (in Chinese)
- 许延军,张学辉,曹勇,等. 2022. 门源6.9级地震前地应变加载响应比异常分析[J]. 地震工程学报, 44(3): 707–712.
- Xu Y J, Zhang X H, Cao Y, *et al.* Load/Unload Response Ratio anomalies of strain before the Menyuan  $M_s$ 6.9 earthquake [J]. China Earthquake Engineering Journal, 44(3): 707–712. (in Chinese)
- 姚赛赛,高曙德,陈雪梅,等. 2023. 2022年青海门源  $M_s$ 6.9 地震前地电阻率变化分析[J]. 大地测量与地球动力学, 43(2): 141–147.
- Yao S S, Gao S D, Chen X M, *et al.* 2023. Analysis of earth resistivity changes before the 2022 Qinghai Menyuan  $M_s$ 6.9 earthquake [J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 43(2): 141–147. (in Chinese)
- 尹祥础,余怀忠,张永仙,等. 2004. 态矢量——分析地震活动性的一种新方法[J]. 中国地震, 20(1): 73–79.
- Yin X C, Yu H Z, Zhang Y X, *et al.* 2004. State vector—a new method to analysis seismicity [J]. Earthquake Research in China, 20(1): 73–79. (in Chinese)
- 余怀忠,程佳,张小涛,等. 2012. 多方法联合分析未来地震发生趋势[J]. 西北地震学报, 34(1): 1–9.
- Yu H Z, Cheng J, Zhang X T, *et al.* 2012. Multi-method linked to study future seismic tendency [J]. Northwestern Seismological Journal, 34(1): 1–9. (in Chinese)
- 余怀忠,尹祥础,张永仙,等. 2004. 态矢量方法的实验研究 [J]. 地震, 24(3): 1–7.
- Yu H Z, Yin X C, Zhang Y X, *et al.* 2004. Experimental study of state vector [J]. Earthquake, 24(3): 1–7. (in Chinese)
- 张小涛. 2022. 强震前态矢量异常研究[J]. 地震地磁观测与研究, 43(S1): 492–493.
- Zhang X T. 2022. Study on state vector anomalies before strong earthquakes [J]. Seismological and Geomagnetic Observation and Research, 43(S1): 492–493. (in Chinese)
- 张肇诚,罗兰格,李海华,等. 1990. 中国震例(1981—1985) [M]. 北京: 地震出版社.
- Zhang Z C, Luo L G, Li H H, *et al.* 1990. Earthquake cases in China (1981–1985) [M]. Beijing: Seismological Press. (in Chinese)
- 周发仁,余怀忠. 2016. 多方法组合模式对川滇地区强震发生的回溯性检验[J]. 地震工程学报, 38(2): 268–277.
- Zhou F R, Yu H Z. 2016. Retrospective test of strong earthquakes in Sichuan-Yunnan region using a combination of multi-methods [J]. China Earthquake Engineering Journal, 38(2): 268–277. (in Chinese)
- 朱爽,占伟,梁洪宝,等. 2022. 青海门源6.9级地震同震及震前GNSS变形特征分析[J]. 地震工程学报, 44(2): 370–379.
- Zhu S, Zhan W, Liang H B, *et al.* 2022. Coseismic deformation characteristics before the Menyuan, Qinghai  $M_6$ .9 earthquake from GNSS observation data [J]. China Earthquake Engineering Journal, 44(2): 370–379. (in Chinese)

## Research on the State Vector Anomaly before the Menyuan, Qinghai $M_s6.9$ Earthquake

ZHANG Xiaotao, YU Huaizhong

(China Earthquake Networks Center, Beijing 100045, China)

### Abstract

There were multiple seismic and geophysical anomalies before the Menyuan, Qinghai  $M_s6.9$  earthquake on January 8, 2022. In this paper we adopted the state vector method to retrospectively study the anomalies before the Menyuan earthquake. By traversing the sub-regions from  $3^\circ \times 3^\circ$  to  $12^\circ \times 12^\circ$  around the epicenter of the Menyuan earthquake, we found that the  $8^\circ \times 8^\circ$  sub-region can best reflect the Menyuan earthquake anomalies. Four parameters of the state vector became anomalous before the Menyuan earthquake. They were state vector modulus  $M$ , state vector modulus increment  $\Delta M$ , the angle variation ( $\varphi_c$ ) between state vector  $V_{t-\Delta t}$  and state vector  $V_t$ , the corner variation ( $V_e$ ) between state vector  $V_t$  (at any time) and unit vector. Of these 4 parameters,  $M$  and  $\Delta M$  have better precursory effect than  $\varphi$  and  $\varphi_c$ . Generally, before the Menyuan earthquake, these anomalies were continuous and significant. They were short-and medium-term anomalies.

**Keywords:** state vector; the Menyuan  $M_s6.9$  earthquake; retrospective study; seismic anomaly