

张瑜,陈双贵,马辉源,等. 2019—2021年门源  $M_s6.9$  地震岩石圈磁场异常回溯分析[J]. 华南地震, 2023, 43(1): 46–54. [ZHANG Yu, CHEN Shuanggui, MA Huiyuan, et al. Retrospective Analysis of Lithospheric Magnetic Field Anomalies of Menyuan  $M_s6.9$  Earthquake from 2019 to 2021 [J]. South China journal of seismology, 2023, 43(1): 46–54]

## 2019—2021年门源 $M_s6.9$ 地震 岩石圈磁场异常回溯分析

张 瑜, 陈双贵, 马辉源, 杨 磊, 雷 光, 肖世堂, 闫万生, 杨 龙  
(甘肃省地震局, 兰州 730000)

**摘要:** 分析了2019—2021年门源  $M_s6.9$  地震周边岩石圈磁场部分要素的时空演化特征, 结果表明: 岩石圈磁场要素异常在震前1~2年比较明显, 其中震中均位于磁偏角  $D$  模量、总强度  $F$  模量、垂直分量  $Z$  模量的正负交界地带, 距离“0”值线10~50 km, 震中位于水平分量模量的高梯度带, 水平矢量方向和幅值在震中东南100 km范围内转向、回旋和减小, 垂直矢量的方向和幅值在震中及东南100 km范围内出现对冲、发散和减小; 震前1~2年水平矢量幅值、垂直矢量幅值在发震断层冷龙岭断裂带东段南北两侧呈现出北高南低的态势, 依据压磁效应分析可知, 冷龙岭断裂带东段北侧岩石圈磁场较大, 应力变化主要以释放为主, 南侧岩石圈磁场较小, 应力变化主要以加载为主, 反之该区域应力场的变化导致了岩石圈磁场的异常变化。

**关键词:** 岩石圈磁场要素异常; 连续三年两期; 零值线; 矢量弱变化

中图分类号: P318.5

文献标识码: A

文章编号: 1001-8662(2023)01-0046-09

DOI: 10.13512/j.hndz.2023.01.06

## Retrospective Analysis of Lithospheric Magnetic Field Anomalies of Menyuan $M_s6.9$ Earthquake from 2019 to 2021

ZHANG Yu, CHEN Shuanggui, MA Huiyuan, YANG Lei, LEI Guang,  
XIAO Shitang, YAN Wansheng, YANG Long  
(Gansu Earthquake Agency, Lanzhou 730000, China)

**Abstract:** This paper analyzes the temporal and spatial evolution characteristics of some elements of the lithospheric magnetic field around the Menyuan  $M_s6.9$  earthquake from 2019 to 2021. The results show that the anomalies of the lithospheric magnetic field elements are obvious 1–2 years before the earthquake, and epicenters are located at the positive and negative boundaries of the magnetic declination  $D$  modulus, total strength  $F$  modulus, and vertical component  $Z$  modulus isolines, 10–50 km away from the "0" value line. The epicenters are

收稿日期: 2022-07-02

基金项目: 流动地球物理场观测项目(ZX1803001); 国家自然科学基金项目(U2039206)。

作者简介: 张瑜(1989-), 男, 工程师, 主要从事流动地磁测量与研究。

E-mail: 569895955@qq.com

通信作者: 陈双贵(1976-), 男, 高级工程师, 主要从事流动地磁测量与研究。

E-mail: 2716938@qq.com

located at the high gradient zone of the horizontal component modulus, and the direction and amplitude of horizontal vector turn, whirl and decrease within 100 km southeast of the epicenter, while the direction and amplitude of vertical vector diverge and decrease within 100 km southeast of the epicenter. The amplitude of horizontal vector and vertical vector 1–2 years before the earthquake show a trend of high in the north and low in the south on the north and south sides of the east section of the Lenglongling fault zone. According to the analysis of piezomagnetic effect, it can be seen that the lithospheric magnetic field on the north side of the east section of the Lenglongling fault zone is large, and the stress change is mainly release, while the lithospheric magnetic field on the south is small, and the stress change is mainly loading. On the contrary, the change of stress field in this area leads to the change of lithospheric magnetic field.

**Keywords:** Anomaly of lithospheric magnetic field elements; Two periods for three consecutive years; Zero value line; Weak vector variation

## 0 引言

甘肃青海交界的祁连山地区为地震的高发区域, 2020年1月至2022年6月甘肃青海交界地区( $30^\circ \sim 40^\circ\text{N}$ ,  $95^\circ \sim 105^\circ\text{E}$ )相继发生5.0级以上地震14次(中国地震台网中心官网统计), 且强震活动性有增强的趋势。强烈的地震给当地造成了极大地破坏, 该区域也是众多地震学者重点关注的地区之一。地磁学者通过监测地磁场异常信息来研究震磁关系, 近一个世纪的研究发现<sup>[1-3]</sup>, 地磁异常现象与地震活动关系大体可分成两类: 一类是基本磁场观测数据中岩石在应力作用下产生的“压磁效应”<sup>[3]</sup>, 另一类是基于感应效应和地下电性变化出现的有关地磁异常的“感应磁效应”。针对上述两种震磁关系, 相关学者已进行过大量的研究工作, 并取得了相应的研究成果<sup>[4-15]</sup>。

本文研究区域为甘青交界的门源地区( $35^\circ \sim 40^\circ\text{N}$ ,  $98^\circ \sim 105^\circ\text{E}$ ), 研究区域历史上发生过多次强震, 最近的两次为2016年6.4级地震及2022年6.9级地震。中国地震局地球物理研究所的流动地磁团队在该区域内布设有高密度的流动地磁矢量测点, 主要研究的对象是容易在地表造成较大地震破坏的岩石圈层。利用在研究区域布设的65个流磁测点的三分量矢量数据得出研究区域2019—2021年岩石圈磁场的变化特征, 对门源  $M_s6.9$  地震进行岩石圈磁场异常的回溯分析及总结。

## 1 测点及数据处理

本文选取研究区域为  $35^\circ \sim 40^\circ\text{N}$ 、 $98^\circ \sim 105^\circ\text{E}$ , 总共使用的流动地磁场矢量测点有65个, 如图1所示。观测作业执行《流动地磁测量基本技术要

求》及其规范性附录<sup>[16]</sup>, 作业任务在4~9月完成, 测点为重复性测点, 平均间距约60~70 km, 测量时均避开了各种人工电磁干扰源。测量内容包括测点的梯度值、GPS方位角、磁偏角  $D$ 、磁倾角  $I$ 、总强度  $F$ , 为保证测点周围环境的一致性, 测量团队严格控制相邻两期测量的主副点点位差在1.5 nT之内。观测精度要求: 测点水平梯度不得超过3 nT/m, 垂直梯度不得超过5 nT/m, 两次GPS方位角误差小于6", 每个测点测量六组三分量值。

本文采用2019—2021年流动地磁  $D$ 、 $I$ 、 $F$  三分量数据, 根据磁偏角  $D$ 、磁倾角  $I$ 、总强度  $F$  可以计算出地磁场的其它四个要素, 分别是北向分量  $X$ 、东向分量  $Y$ 、水平分量  $H$  和垂直分量  $Z$ , 以及水平矢量、垂直矢量, 计算参照如下公式(1)<sup>[17]</sup>:

$$\begin{aligned} Z &= F \sin I, H = F \cos I \\ Y &= H \sin D, X = H \cos D \end{aligned} \quad (1)$$

通过日变通化改正、主磁场长期变改正、主磁场剥离、岩石圈磁场差值等主要技术处理, 获取研究区岩石圈磁场差值  $\Delta D$ 、 $\Delta I$ 、 $\Delta F$  等<sup>[18]</sup>, 数据处理流程如图2, 具体步骤过程如下:

(1)日变通化改正。日变通化的主要目的是消除流动地磁观测数据中规则的地磁场日变化等外源场成分, 依托测区邻近地磁台站(网)连续观测分钟值数据, 采用台网参照法, 对野外观测数据进行日变通化处理, 获取监测区日变通化改正数据集, 通化要求: 地磁要素均方差  $\delta_D \leq 0.5'$ ,  $\delta_I \leq 0.5'$ ,  $\delta_F \leq 1.5 \text{ nT}$ 。基本思路为测点P地磁要素  $t$  时刻的测量值  $F_{Pt}$  与测点P通化零时值  $F_{P0}$  之差与参考台S地磁要素  $t$  时刻观测分钟值  $F_{St}$  与参考台S通化日00:–03:00连续观测分钟值数据平均值  $F_{S0}$  之差相等, 计算如公式(2)。

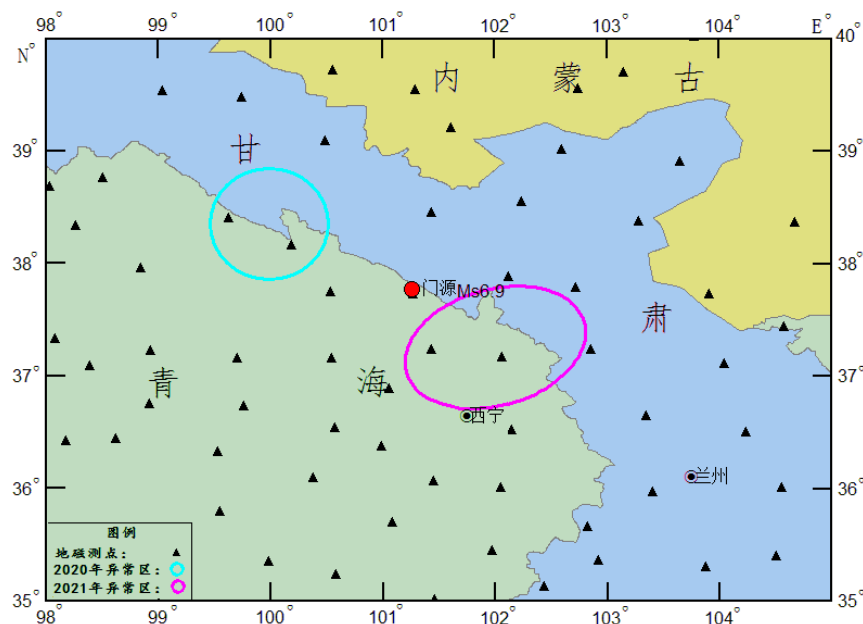


图1 研究区域地磁测点分布

Fig.1 Distribution of geomagnetic survey points in the study area

$$F_{Pt} - F_{P0} = F_{St} - F_{S0} \quad (2)$$

公式(2)中 $F_{P0}$ 通过日变通化得到通化零时的结果,通化零时为通化参考台所处时区地方时00:00~03:00的平均值,通化零日为距实际野外测量时间段最近的磁静日。 $F_{Pt}$ 为测点P在时间 $t$ 时的地磁测量值, $F_{St}$ 为通化参考台S在时间 $t$ 时的观测分钟值数据, $F_{S0}$ 为通化参考台S在所处时区地方时00:00~03:00的连续观测分钟值数据平均值。

(2)长期变改正。采用1995年1月1日以来的全国地磁台网观测数据,建立中国及周边地区地磁场长期变化NOC非线性模型<sup>[9]</sup>,对日变通化改正数据集进行主磁场长期变改正。本文将日变通化后的数据统一归算至2020.0地磁标准年代。计算如公式(3)。

$$F_{Pv} = F_{P0} - \Delta_{Pv} \quad (3)$$

公式(3)中 $F_{Pv}$ 为测点经过长期变化改正到标准地磁年代的结果, $\Delta_{Pv}$ 为测点P处地磁场长期变化改正参考数值。

(3)主磁场剥离。以“中国地磁参考场2020.0年代”为研究区主磁场参考模型,并在监测区长期变改正数据结果中进行剔除即可得到岩石圈磁场,对两期岩石圈磁场做差值分析即获得相邻两期岩石圈磁场的时空分布特征。剥离地磁正常场,获得观测区域、观测时间段内地磁岩石圈磁场的空间分布,计算如公式(4)。

$$M_p = F_{Pv} - F_{Pn} \quad (4)$$

公式(4)中, $M_p$ 为测点P经地磁正常场剥离后所获得的岩石圈磁场数值, $F_{Pn}$ 为测点P处的地磁主磁场参考数值。本文只讨论水平矢量、垂直矢量,磁偏角模量、磁倾角模量、总强度模量、水平分量模量、垂直分量模量等值线的时空分布演化特征。

## 2 岩石圈磁场空间分布特征

本文研究的门源周边地区流动地磁测量的时间均为2019—2021年的7~9月,根据上述建立的岩石圈磁场差值模型,绘制该区域2019—2020年、2020—2021年门源 $M_s6.9$ 地震前两期水平矢量、垂直矢量,磁偏角模量、磁倾角模量、总强度模量、水平分量模量、垂直分量模量等值线的时空分布特征图(图3~5),以下将2019—2020年、2020—2021年分别称为震前第二期、震前第一期。

### 2.1 水平矢量、垂直矢量的时空演化特征

图3为震前两期水平矢量、垂直矢量的时空演化特征图。水平矢量:震前第二期显示在震中水平矢量变化平稳,矢量的大小和方向均无明显的异常,总体的方向自南至北,幅值东部大于西部,震中西北130 km处矢量出现了明显的弱变化,方向有向南旋转、对冲的趋势且矢量最小。震前第一期则显示矢量的方向发生了大范围的变化,几

乎与震前第二期相反,震中及东南30~100 km处有大的转向、回旋,其中靠近震中处为顺时针回旋,较远处则逆时针回旋,异常极具代表性,震

中位置与中国地震局流动地磁团队2021年年终异常判定结果最近仅30 km,映震效果良好。

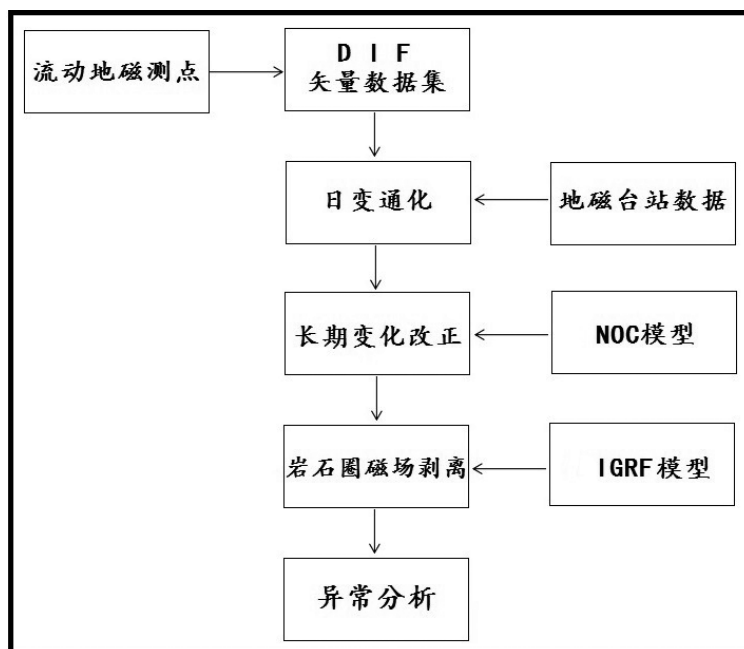


图2 数据处理流程图

Fig.2 Data processing flow chart

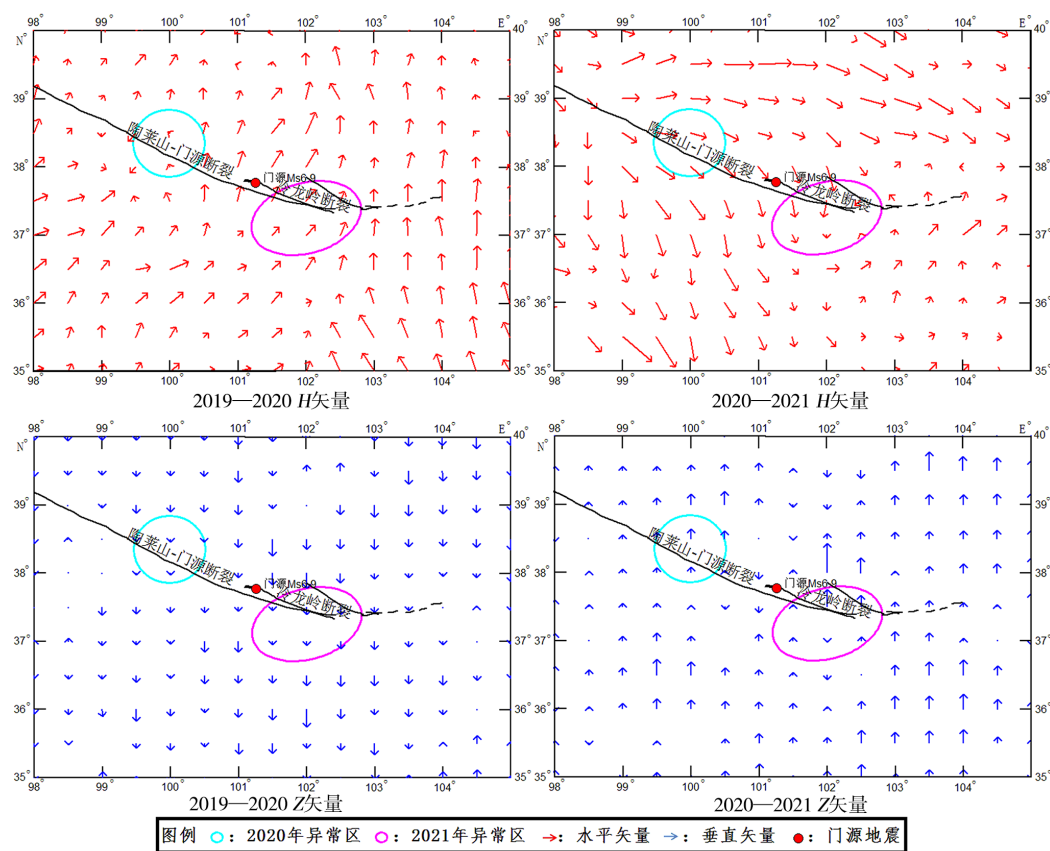


图3 水平矢量、垂直矢量时空演化特征图

Fig.3 Spatial and temporal evolution characteristic map of horizontal vector and vertical vector



垂直矢量：震前第二期震中位置并无对冲或转向等异常，幅值显示东侧明显大于西侧。震前第一期则显示矢量的方向与震前第二期相反，总体方向自南至北，在震中两侧小范围区域内方向相反，震中东南 100 km 处呈发散状，矢量幅值以冷龙岭断裂带为界，北大南小。

## 2.2 磁偏角 $D$ 模量、磁倾角 $I$ 模量的动态演化

图 4 为震前两期磁偏角  $D$  模量、磁倾角  $I$  模量的时空演化特征图。磁偏角  $D$  模量：震前第二期显示门源震中周边以正异常为主，负异常以带状的形式分布于震中西北及东南方向， $D$  要素的最大值为  $1.6'$ ，最小值为  $-1.3'$ ，震中为  $0.5'$ ，震中距离最近的零线为 90 km。震前第一期则显示研究区域大面积正异常，负异常以点状形式零星分布。震中东南 50~180 km 处有小范围负异常区。 $D$  要素的最大值为  $1.7'$ ，最小值为  $-0.3'$ ，震中为  $0.3'$ ，震中距离“0”值线为 50 km。

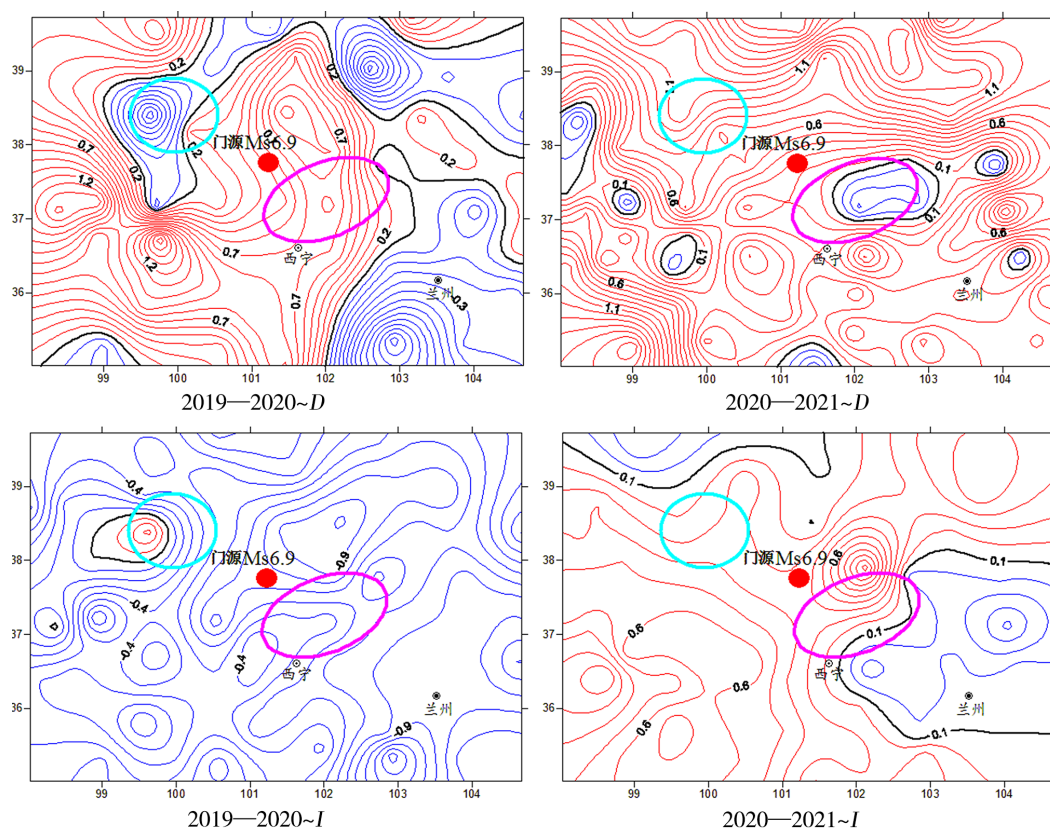
磁倾角模量：震前第二期显示门源震中周边以负异常为主，正异常只以点状形式出现在震中西北方向 130 km 处， $I$  要素的最大值为  $0.3'$ ，最小

值为  $-1.3'$ ，震中为  $-0.7'$ ，震中距离最近的零线为 120 km。震前第一期则显示门源震中周边以正异常为主，负值区仅分布于研究区域的东南及西北角， $I$  要素的最大值为  $1.1'$ ，最小值为  $-0.4'$ ，震中为  $0.3'$ ，震中距离“0”值线为 120 km。

## 2.3 水平分量 $dH$ 模量、总强度 $F$ 模量、垂直分量 $dZ$ 模量的时空演化特征

图 5 为震前两期水平分量  $dH$  模量、总强度  $F$  模量、垂直强度  $dZ$  模量的时空演化特征图。

(1) 水平分量  $dH$  模量。震前第二期显示研究区域以正异常为主，在震中西北 200 km 处有小范围的负异常分布，震中位于正异常区的高梯度带，水平分量的最大值为 19 nT，最小值为  $-6$  nT，震中为 11 nT。震中距离最近的零线为 120 km。震前第一期则显示研究区域大面积负异常，正异常仅分布于研究区域的东南及西北角，两期整体分布与磁倾角  $I$  要素类似。震前第一期水平分量的最大值为 6 nT，最小值为  $-11$  nT，震中为  $-8$  nT，位于负异常区的高梯度带。震中距离最近的零“0”值线为 120 km。



图例 ○：2020年异常区 ○：2021年异常区 ●：门源地震

(红色代表正值,黑色代表零线,蓝色代表负值,等变线间隔为  $0.1'$ )

图 4 磁偏角模量、磁倾角模量等值线时空演化特征图

Fig.4 Spatial and temporal evolution characteristic map of isolines of magnetic declination modulus and magnetic inclination modulus

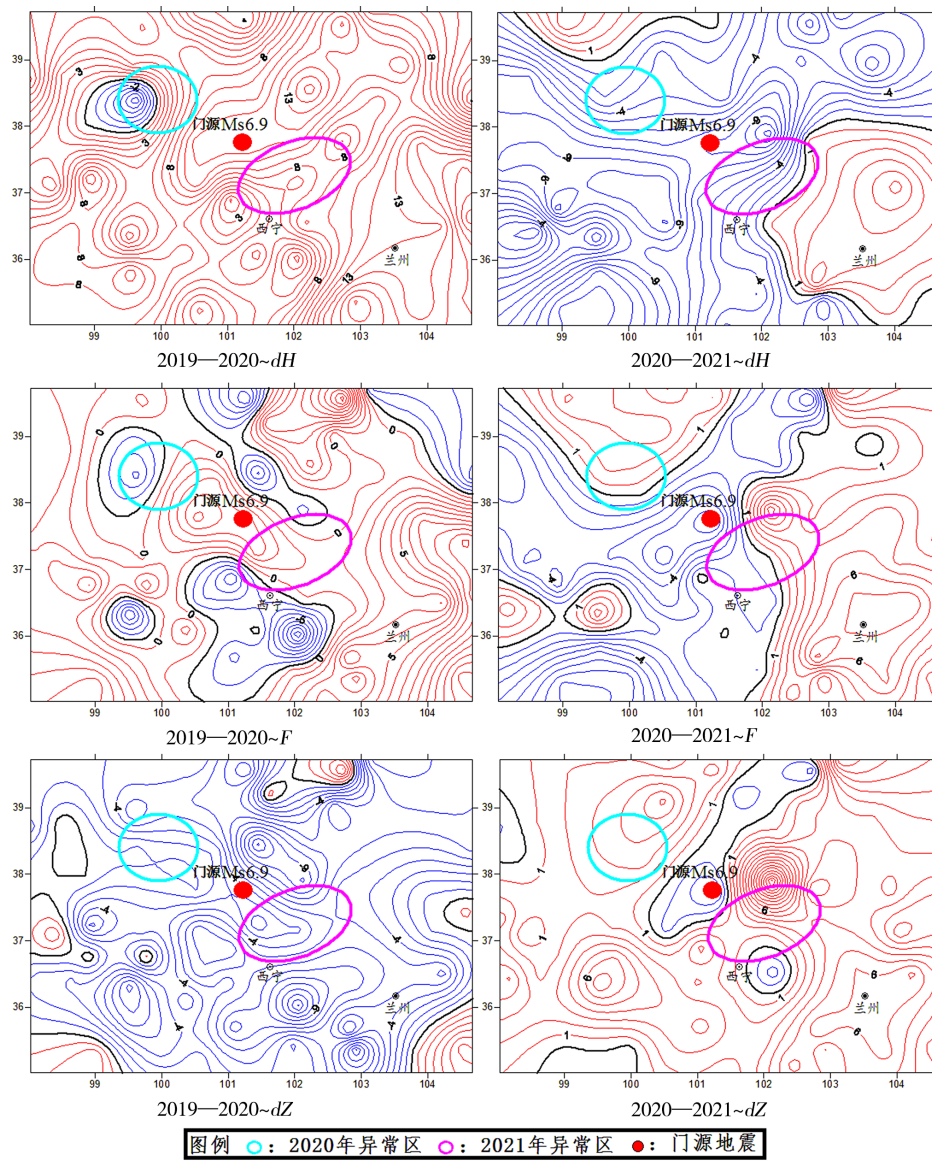


图5 水平分量模量、总强度模量、垂直分量模量等值线时空演化特征图(等变线间隔为1 nT)  
Fig.5 Spatial and temporal evolution characteristic map of isolines of horizontal component modulus ,  
total strength modulus and vertical component modulus (isoline interval is 1 nT)

(2)总强度  $F$  模量。震前第二期显示研究区域总强度以正异常为主,负异常以带状和点状分布,震中位于正异常区。总强度的最大值为14 nT,最小值为-9 nT,震中为3 nT,震中距离“0”值线为30 km。震前第一期则显示研究区域正负异常区域各占一半,正负异常均高度集中,震中位于负异常区,总强度的最大值为7 nT,最小值为-7 nT,震中为-7 nT,位于负异常区的高梯度带,震中距离“0”值线为40 km。

(3)垂直分量模量。震前第二期显示研究区域以负异常为主,垂直分量的最大值为6 nT,最小值为-13 nT,震中为-4 nT,震中距离最近的零线

为170 km。震前第一期则显示出与第二期较大的变化,研究区域以正异常为主,垂直分量的最大值为16 nT,最小值为-3 nT,震中为-3 nT,震中位于正负异常的交界地带,距离“0”值线10 km。

### 3 岩石圈磁场要素异常与门源地震

#### 3.1 地磁要素异常与门源地震的关系

通过对门源震前岩石圈磁场各要素的回溯分析,发现震前岩石圈磁场要素时空分布规律与震中位置有特殊关系,见表1。由表1可见,门源

$M_s6.9$ 地震震前1~2年异常的磁要素(水平矢量、垂直矢量、磁偏角、总强度、水平分量、垂直分量)明显多于震前2~3年(水平分量、总强度),震中位置的异常主要表现为三类:矢量转向、对冲以及弱化;“0”值线附近(“0”值线两侧约50 km范围内);高梯度带。具体的表现如下:①水平矢量震前震中周边会出现弱化、对冲、转向等异常,其中水平矢量在震前2~3年异常的位置距离震中较远,异常区的范围较小,震中60 km范围内未见明显异常,震前1~2年异常明显,矢量的方向在震中东南30~100 km处转向;②垂直矢量在震前1~3年的表现与水平矢量相似,震前2~3年震中周边并无明显异常,震前1~2年震中东南30~100 km有明显弱化,震中两侧方向相反;③对于磁偏角、磁倾角、总强度以及垂直分量等均应主要关注震中的位置与零值线、高梯度带的分布,尤其值得关注是总强度及垂直强度零值线与地震的位置(笔者在修改稿件时做了2020—2021年南北带北段岩石圈磁场要素的时空分布及震例总结,发现2022年发生在青海甘肃以及四川南部的中强地震震中与总强度和垂直强度零值线对应较好),对于地震发震地点的预判可以结合水平矢量、垂直矢量异常情况可更准确判定出异常区域。

3.2 地磁矢量与构造的关系

据震后对发震构造和地表破裂的调查显示门源 $M_s6.9$ 地震发生在陶莱山—门源断裂带和冷龙岭断裂带的交会部位,断层走向为NWW<sup>[20]</sup>。门源震前第二期显示水平矢量方向与断层走向呈90°,门源震前第一期显示水平矢量方向与断层走向大体

一致,在震中至冷龙岭断裂带与陶莱山断裂带交汇地带明显的旋转,幅值较周边地区也明显的变小,异常的范围从震中向东南方向延伸约100 km,矢量幅值大致以冷龙岭断裂带为界,北部较大南部较小。垂直矢量在震前第一期中显示出异常,主要表现在震中位置两侧矢量方向对冲,冷龙岭断裂带与陶莱山断裂带交汇地带矢量幅值增大,异常的范围与水平矢量异常范围大体一致。

3.3 震磁异常关系探讨

地震在发生之前地壳岩层在区域应力场作用下会发生变形,当岩层所受的累积应变能达到一定程度,岩层发生破裂和错动进而发生地震。岩石磁学的实验室结果<sup>[21]</sup>表明,岩石的磁化率会随应力变化而变化,相当多的岩石在应力增加时磁化率降低,应力降低时磁化率升高,应力与磁场大小存在着近似反向的关系,本文研究的磁场矢量是磁场大小的最直观的一种体现,也即磁场矢量大小与应力存在着近似反向的关系,门源震中异常区矢量幅值大小大致以冷龙岭断裂带为界,北部大于南部说明冷龙岭断裂带东段北部岩石圈磁场增大,应力变化主要以释放为主,应力变化应处于较低水平;冷龙岭断裂东段南部岩石圈磁场强度减小,应力变化主要以积累为主,应力变化应处于较高水平,冷龙岭断裂带东段构造应力变化引起的磁效应可能是震前1~2年造成震中东南区域岩石圈磁场异常变化的主要原因,由此也可以推断应力来源于震中位置的东南方向,在冷龙岭断裂带与陶莱山断裂带交汇地带受到某种阻挡,在震中位置应力得到释放并引发了地震。

表1 门源  $M_s6.9$ 地震岩石圈磁场异常要素统计表  
Table 1 Statistical table of anomalies of lithospheric magnetic field elements of Menyuan  $M_s6.9$  earthquake

期数	地磁矢量在震中周边的表现形式		震中在岩石圈磁场中特征位置					异常要素汇总
	水平矢量	垂直矢量	磁偏角	磁倾角	总强度	水平分量	垂直分量	
震前第二期 (2019—2020)	无明显异常	无明显异常	震中0.5'	震中-0.7'	震中3 nT; 距“0”值线30 km	震中11 nT; 高梯度带	震中-4 nT	2
震前第一期 (2020—2021)	在震中及东南30~100 km处转向;幅值在震中东南侧变小	震中东西两侧方向对冲;幅值在震中东南增大	震中0.3'; 距“0”值线50 km	震中0.3'	震中-7 nT; 距“0”值线40 km	震中-8 nT; 高梯度带	震中-3 nT; 距“0”值线10 km	6



## 4 讨论与结论

通过对2019—2021年门源  $M_s6.9$  地震周边地区岩石圈磁场要素时空分布特征的分析可以看出在地震发生之前震中附近岩石圈磁场各分量均发生了不同程度的变化,最明显的异常出现在震前1~2年震中东南方向100 km范围内:①水平矢量、垂直矢量幅值大小和方向均大致以冷龙岭断裂带为界出现了明显的不同,其中幅值大小均表现出冷龙岭断裂带东段北部大于南部,由亚磁效应可知冷龙岭断裂带东段南部应力应大于北部;②磁偏角、磁倾角、总强度、垂直强度也在冷龙岭断裂带东段北部有高梯度带出现。以上两种异常可以认为震中东南方向冷龙岭断裂东段构造应力场出现了较大变化,但是门源  $M_s6.9$  地震震中距离异常最明显的区域仍有60 km,应力变化最明显的地方非震源区的本质需进一步分析。据潘家伟等研究认为门源  $M_s6.9$  地震余震向SE方向扩展,表明具有应力向东迁移趋势<sup>[22]</sup>,加剧了部分断层未来发生强震危险性的可能,如果以震磁关系的研究或者以磁报震为目的进行研究,就需要不断跟进补充地磁资料来跟踪分析门源  $M_s6.9$  地震对周围断层应力场的变化影响。目前已知的震磁效应主要包括压磁效应、感应磁效应、动电磁效应和热磁效应等,一次地震可能伴随多种震磁效应,其影响占比也不同<sup>[23]</sup>。据部分学者研究表明,在地震发生前门源地震台静水位、水平搓倾斜和钻孔应变观测资料在此次地震中均出现了明显的短临异常”,其中,静水位出现加速上升和下降异常变化;石英水平摆倾斜仪存在北倾的加速或转折异常变化;钻孔应变四分量在震前监测到强烈的挤压变化<sup>[24]</sup>,说明该地区应力状态一直在发生变化,由此推断门源  $M_s6.9$  地震可能收到多种震磁效应的综合影响,各震磁效应的影响占比也需要进一步的分析研究。

通过对门源  $M_s6.9$  地震的回溯分析可以得出以下结论:

(1)门源  $M_s6.9$  地震周边岩石圈磁场各要素异常在震前1~2年比较明显,其中震中均位于磁偏角  $D$  模量、总强度  $F$  模量、垂直分量  $Z$  模量的正负交界地带,距离“0”值线10~50 km,震中位于水平分量  $dH$  模量的高梯度带,水平矢量方向和幅值在震中附近出现了明显的变化,震中东南约100 km范围内的转向和回旋是极具代表性的异常变化。

(2)水平矢量与研究区域内的断层的走向在震前1~2年表现出较高的一致性,但水平矢量弱变化最明显的地方位于震中东南30~100 km处,如用水平矢量的变化来进行发震地点的预测,需要将矢量的变化特征与构造运动结合起来分析,并需要更深入地掌握对地震地磁异常现象的识别。

(3)根据震前1~2年冷龙岭断裂带东段岩石圈磁场的大小异常变化可以推断冷龙岭断裂带东段应力场出现了明显的变化,其中水平矢量幅值、垂直矢量幅值在冷龙岭断裂带东段南北两侧呈现出北高南低的态势,依据压磁效应分析可知冷龙岭断裂带东段北侧岩石圈磁场较大,应力变化主要以释放为主,南侧岩石圈磁场较小,应力变化主要以加载为主。

本文仅对门源6.9级强震做了回溯分析,得出岩石圈磁场异常变化与门源强震的一些粗浅认识,尚不能准确的定性解释岩石圈磁场异常变化与地震的关系,其机理有待于今后深入的分析与研究。

致谢:本文使用的流动地磁数据由中国地震局地球物理研究所、河北省地震局、云南省地震局、甘肃省地震局等十三家省局单位共同处理完成,作者在此表示感谢,同时感谢中国地震局流动地磁技术团队在异常研判方面做出的努力,也感谢审稿专家的高效评审和编辑老师的润色。

## 参考文献

- [1] Stacey F D. The seismomagnetic effect[J]. Pure Appl Geophys, 1964(58): 5-22.
- [2] Yukutake T, Tachinaka H. Geomagnetic variation associated with stress change within a semi-infinite elastic earth caused by a cylindrical force source[J]. Bulletin of the Earthquake Research Institute, University of Tokyo, 1967, 45(3): 785-798.
- [3] 祁贵仲. “膨胀”磁效应[J]. 地球物理学报, 1978, 31(1): 18-33.
- [4] 安振昌, 谭东海, 王月华, 等. 亚洲MAGSAT卫星磁异常图[J]. 地球物理学报, 1996, 39(4): 461-469.
- [5] 安振昌, 谭海东. 亚洲MAGSAT卫星磁测数据处理[J]. 地球物理学报, 1996, 39(3): 82-88.
- [6] 安振昌, 谭海东. 亚洲MAGSAT卫星磁异常冠谐分析[J]. 地球物理学报, 1998, 41(2): 168-173.
- [7] 顾左文, 张毅, 姚同起, 等. 九江—瑞昌  $M_s5.7$  地震地磁异常的观测与分析[J]. 地震学报, 2006, 28(6): 611-621.
- [8] 徐文耀, 白春华, 康国发. 地壳磁异常的全球模型[J]. 地球物理学进展, 2008, 23(3): 641-651.



- [9] 王慧琳,陈超,张昌达. 最新的岩石圈磁场模型及中国磁异常特征的几点认识[J]. 地学前缘, 2008, 15(3): 64-71.
- [10] 陈斌. 自然正交分量方法在地震地磁监测中的应用[J]. 地震研究, 2011, 34(4): 466-469.
- [11] 顾春雷,张毅,顾左文,等. 华北地震区岩石圈磁异常场零值线与中强震震中分布关系[J]. 地震工程学报, 2012, 34(2): 174-179.
- [12] 倪喆,陈双贵,袁洁浩,等. 芦山 7.0 级地震前后岩石圈磁场异常变化研究[J]. 地震研究, 2014, 37(1): 61-65.
- [13] 张吕达. 卫星的磁测和过去、现在、未来[J]. 物探与化探, 2003, 27(5): 229-332.
- [14] 赵慧琴,张海洋,李博,等. 河北及周边地区岩石圈磁场变化及震前异常特征[J]. 地震工程学报, 2021, 43(5): 1008-1013.
- [15] 赵慧琴,云萌,苏树朋,等. 2015—2016 年大华北岩石圈磁场变化及震前异常特征[J]. 地震研究, 2017, 40(3): 368-371.
- [16] 中国地震局. 地震地磁野外测量规范[M]. 北京:地震出版社, 1995.
- [17] 丁鉴海,卢振业,余素荣. 地震地磁学概论[M]. 合肥:中国科学技术大学出版社, 2011.
- [18] 陈斌,袁洁浩,王粲,等. 流动地磁监测数据处理流程[J]. 地震研究, 2017, 40(3): 335-339+510-511.
- [19] 顾左文,陈斌,高金田,等. 应用 NOC 方法研究中国地区地磁时空变化[J]. 地球物理学报, 2009, 52(10): 2602-2612.
- [20] 李智敏,盖海龙,李鑫,等. 2022 年青海门源  $M_s 6.9$  地震发震构造和地表破裂初步调查[J]. 地质学报, 2022, 96(1): 330-335.
- [21] Jelenska M. Stress dependence of magnetization and magnetic properties of igneous rocks[J]. Pure Appl Geophys, 1975, 113(1): 635-649.
- [22] 潘家伟,李海滨,刘栋梁,等. 2022 年青海门源  $M_s 6.9$  地震地表破裂带及发震构造研究[J]. 地质学报, 2022, 96(01): 251-253.
- [23] 董超,陈斌,袁洁浩,等. 2021 年 5 月 22 日玛多  $M_s 7.4$  地震震前岩石圈磁场变化特征分析[J]. 地震学报, 2021, 43(4): 453-462.
- [24] 汪发耀,杨积礼,李滔,等. 2022 年 1 月 8 日青海门源 6.9 级地震前地球物理观测异常分析[J]. 高原地震, 2022, 34(01): 15-20.