

张海洋. 2024. 2019年丰南4.5级地震前后岩石圈磁场水平矢量动态演化特征. 中国地震, 40(2): 426~435.

2019年丰南4.5级地震前后岩石圈 磁场水平矢量动态演化特征

张海洋^{1,2)}

1) 河北红山巨厚沉积与地震灾害国家野外科学观测研究站, 河北邢台 054000

2) 保定地震监测中心站, 河北保定 071000

摘要 基于唐山及周边地区2018年4月—2020年9月连续6期的流动地磁观测资料, 经过数据处理获得5期岩石圈磁场半年尺度的时空变化数据, 再结合2019年12月5日丰南4.5级地震对震中附近岩石圈水平矢量时空演化特征进行分析。结果表明: ①在岩石圈磁场水平矢量动态演化过程中, 丰南地震震中附近岩石圈磁场水平矢量异常出现在震前一年时期, 且随着时间推移, 岩石圈磁场水平矢量弱变区在空间上具有由东向西发展的演变过程。②丰南地震震中区域水平矢量模值在地震前后出现先减小后增大的反向变化, 震前半年水平矢量模值最小, 丰南地震发生于水平矢量模值反向增大的过程中。③根据亚失稳理论与岩石圈磁场水平矢量变化关系, 在长期岩石圈磁场水平矢量存在方向变化和弱变的区域寻找潜在的异常区, 再结合异常区水平矢量模值的动态演化, 或许可以作为一种识别震前震磁前兆异常信息的方法。

关键词: 丰南4.5级地震 流动地磁 岩石圈磁场水平矢量 动态演化 亚失稳理论

[文章编号] 1001-4683(2024)02-0426-10 [中图分类号] P315 [文献标识码] A

0 引言

岩石圈磁场也称为地磁异常场, 是地磁场的重要组成部分, 其空间分布和时间变化受岩石圈物质磁化率参数、地质构造及其运动、岩石圈温度和应力状态等多种因素的影响(Hao et al, 1982; Yamazaki, 2013)。国内外学者通过研究不同地区的地震活动, 发现了与地震有关的地磁场异常变化现象(Johnston et al, 1994; Mueller et al, 1998; 何畅等, 2017; 冯丽丽等, 2022), 这也意味着地震活动与地磁异常具有一定相关性(闫亚芬等, 2016)。众多地磁学者根据这一特性, 对南北地震带、南北天山和大华北等地区的众多地震与岩石圈磁场变化关系展开研究, 结果发现地震发生前震中区域岩石圈磁场水平矢量往往存在一定程度的幅值弱变和方向转向的特征(倪喆等, 2014; 赵慧琴等, 2021)。且有学者认为水平矢量出现弱变、转向现象, 可能与震前岩石圈应力水平及断层闭锁程度的增加有关(宋成科等, 2019)。

[收稿日期] 2023-02-14 [修定日期] 2023-10-20

[项目类别] 河北省地震科技星火计划攻关项目(DZ2021121600003、DZ2021121500001、DZ2024112200007)、河北省地震科技星火计划重点项目(DZ2024112200008)共同资助

[作者简介] 张海洋, 男, 1989年生, 工程师, 主要从事流动地磁监测与岩石圈磁场异常分析研究工作。

E-mail: 1028897507@qq.com

因此,有必要对地震活动较强区域连续数年的流动地磁观测数据进行深入系统分析,研究岩石圈磁场水平矢量的动态演化特征,结合地震分布,提炼震前岩石圈磁场水平矢量异常变化信息,以便更为准确地总结震磁前兆异常信息识别方法。

唐山及周边地区构造环境复杂,宏观上位于两个二级构造块体之间,北部为燕山块体,南部为华北平原块体。微观上区内浅层活动性断裂带密集分布(郭蕾等,2019),发育多种形态的NE、NNE、NW向断裂构造,最为典型的是唐山地区由NE向的宁河—昌黎断裂、丰台—野鸡坨断裂以及NW向的滦县—乐亭断裂、蓟河断裂构成的菱形断裂块体。该块体断裂以张性断裂为主,地震活动频繁,是我国中强地震活动的重要区域(张志相等,2022)。历史上区内发生的较大地震为1976年7月28日唐山7.8级地震。近年来,该区地震活动水平有所增强,2019年12月5日唐山丰南区(39.31°N,118.04°E)就发生了4.5级地震,震源深度10km,当地震感强烈。该地震位于唐山及周边地区流动地磁监测网内,且河北省地震局流动地磁团队每年在该地区开展两次流动地磁测量,积累了丰富的流动地磁资料。

本文利用唐山及周边地区2018年4月—2020年9月连续6期的流动地磁观测资料,经过数据处理获得2018年4—9月、2018年9月—2019年4月、2019年4—9月、2019年9月—2020年4月、2020年4—9月共5期半年尺度岩石圈磁场水平矢量动态变化数据,再结合丰南4.5级地震分析地震前后震中区域岩石圈磁场水平矢量的动态演化特征,并探讨震前震磁前兆异常信息识别方法。

1 数据来源及处理方法

1.1 数据来源

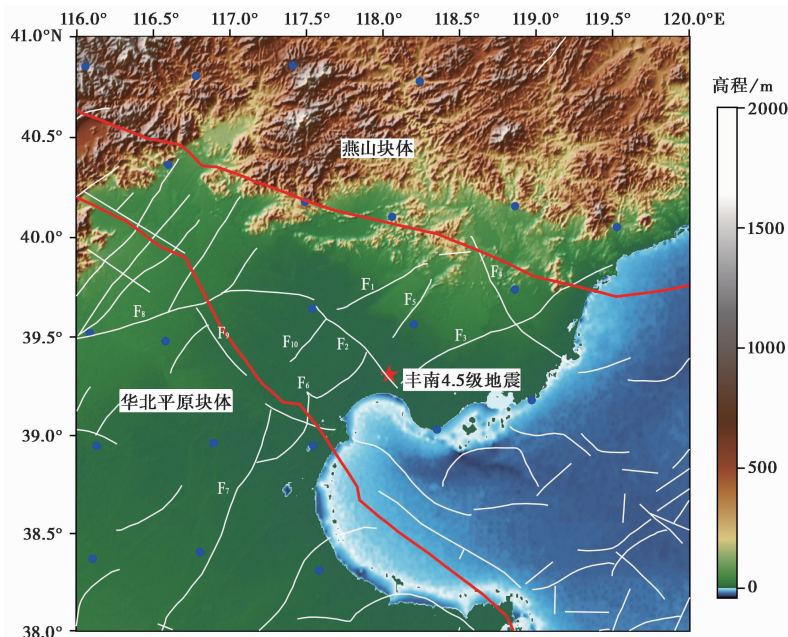
流动地磁矢量野外观测以地磁总强度 F 、磁偏角 D 、磁倾角 I 三要素为测量对象,通过地磁要素间的三角函数关系,可获得水平分量 H 、东向分量 Y 、北向分量 X 及垂直分量 Z 的4个要素数值。而水平矢量是东向分量 Y 与北向分量 X 的合成。研究区内共有测点22个,测点平均间距约70km,呈网格状均匀分布(图1)。各测点观测环境良好,无电磁干扰,观测数据能够准确反映该地区的地磁场特征,野外测量时规避了磁暴等磁扰事件。测量位置处设有固定测桩,每期进行6组重复测量,而每组观测耗时5min左右,总耗时1h左右,对6组观测数据分别进行通化,并计算6组数据通化平均值及均方误差。在对各组数据取平均的过程中,极大地压制了地磁脉动等短周期时变信号。

地磁场总强度观测使用的仪器为GSM-19T质子旋进磁力仪,其灵敏度为0.15nT@1Hz,分辨率为0.01nT,绝对精度为 ± 0.2 nT。地磁场磁偏角和磁倾角观测使用磁通门经纬仪CTM-DI,精度达0.1'。各测点地磁场水平和垂直梯度均小于5nT。

1.2 数据处理方法

流动地磁原始观测数据包括外源场、主磁场和岩石圈磁场,因此需对野外获得的磁场数据进行处理,以去除岩石圈磁场以外的外源变化磁场以及主磁场部分的影响。主要的数据处理过程如下:

(1)日变通化改正,为消除流动地磁观测数据包含的地磁场日变化等外源场影响,本文采用台网通化法对数据进行日变通化改正。该方法利用观测区周边多个地磁台站连续观测分钟值的数据进行函数拟合,获取日变通化空间参考场,降低了通化台选择带来的通化误差



注: F_1 : 丰台—野鸡坨断裂; F_2 : 蓟运河断裂; F_3 : 宁河—昌黎断裂; F_4 : 滦县—乐亭断裂; F_5 : 唐山断裂; F_6 : 海西断裂; F_7 : 白塘口西断裂; F_8 : 宝坻断裂; F_9 : 廊坊—武清断裂; F_{10} : 潘庄西断裂。

图1 唐山及周边地区流动地磁测点分布

(Su et al, 2022)。通化零时为测量时段内某一磁静日的 0—3 时(北京时间)。

(2) 长期变化改正, 为消除地球主磁场和研究区域磁场的变化成分, 本文采用 IGRF13_SV 模型方法, 对每期日变通化数据集进行长期变化改正, 改正日期为上一期的日变通化日。

(3) 岩石圈磁场变化, 对相邻期长期变化改正后的数据集进行差值计算, 即可获得抵消主磁场后的岩石圈磁场变化数据。为获得合理可信的计算结果, 对相邻 2 期发生迁移和单要素异常的测点予以剔除。

通过计算均方误差来判断日变通化改正结果和野外测量数据的精度和可靠性, 根据流动地磁技术规范, 地磁总强度 F 、磁偏角 D 和磁倾角 I 日变通化的均方误差应不超过 1.5nT、0.5' 和 0.3'。2018 年 4 月—2020 年 9 月连续 6 期流动地磁观测数据的日变通化均方差如表 1 所示, 其中 F 平均精度优于 0.29nT, 最高精度为 0.21nT; D 的平均精度优于 0.13', 最高精度为 0.08'; I 的平均精度优于 0.05', 最高精度为 0.04'。日变改正后 F 、 D 、 I 三要素的均方误差均符合规范要求, 说明野外测量结果精确可靠。

2 岩石圈磁场水平矢量及其模值变化

丰南 4.5 级地震前后岩石圈磁场水平矢量(由东向分量的变化 ΔY 与北向分量的变化 ΔX 合成)变化图像如图 2 所示, 在此基础上讨论震中区域在震前以及震后时期的岩石圈磁场水平矢量的动态演化过程。

2.1 岩石圈磁场水平矢量时空变化

(1) 2018 年 4—9 月, 唐山及周边地区岩石圈磁场水平矢量变化方向较为杂乱, 无明显

表 1 地磁重复观测点日变化三要素均方差

观测时间 (年-月-日)	F/nT			D/($'$)			I/($'$)		
	最大值	最小值	平均值	最大值	最小值	平均值	最大值	最小值	平均值
2018-03-06—04-29	0.87	0.04	0.22	0.22	0.06	0.13	0.12	0.01	0.05
2018-08-19—09-28	0.58	0.07	0.22	0.24	0.02	0.10	0.13	0.01	0.05
2019-03-01—04-22	0.87	0.06	0.26	0.23	0.04	0.09	0.08	0.02	0.04
2019-08-17—09-24	0.93	0.07	0.29	0.16	0.05	0.09	0.11	0.02	0.04
2020-05-17—07-25	0.60	0.06	0.24	0.16	0.03	0.09	0.11	0.03	0.05
2020-08-19—10-14	0.65	0.03	0.21	0.17	0.03	0.08	0.08	0.01	0.04

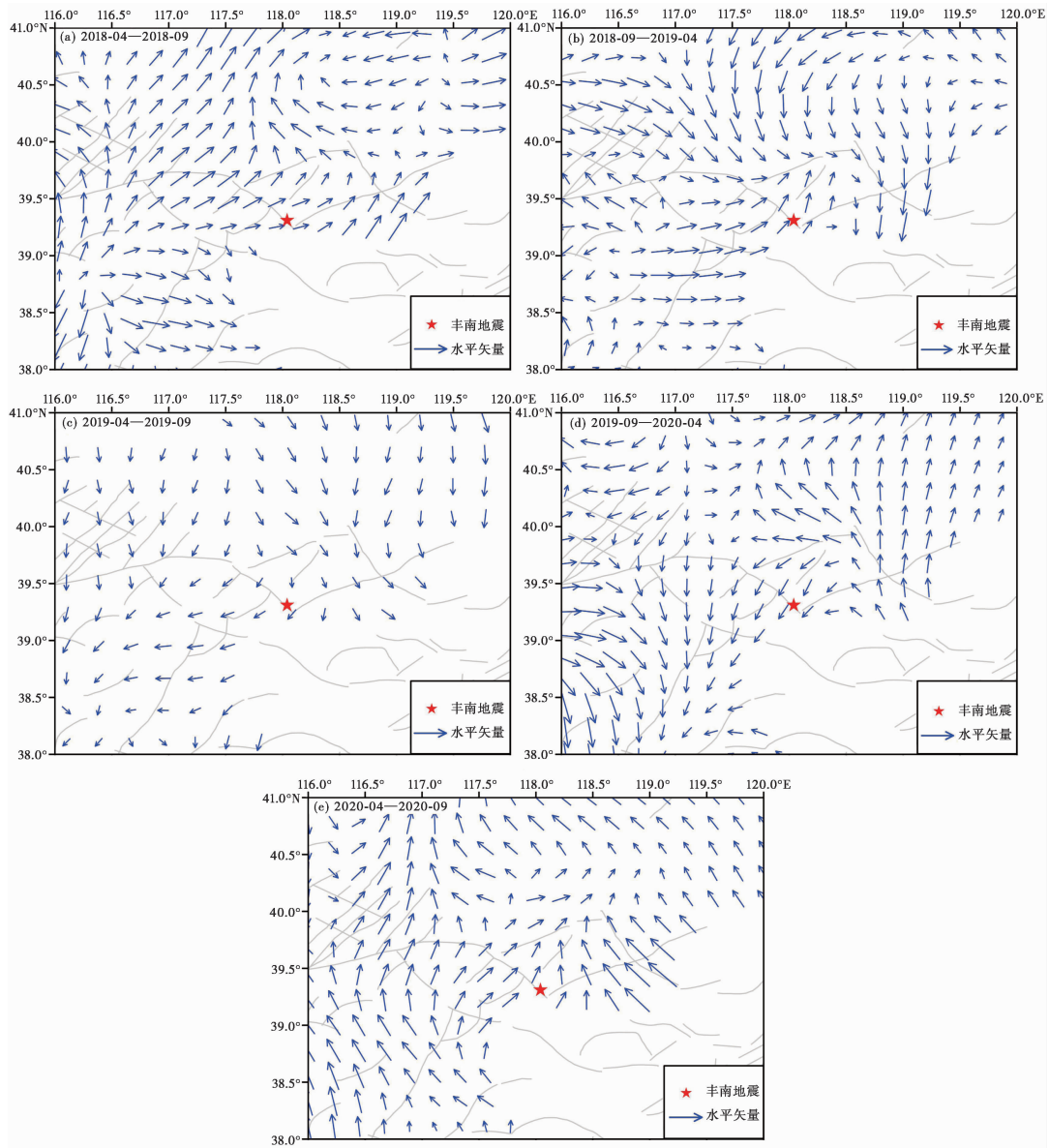


图 2 唐山及周边地区岩石圈磁场水平矢量变化

优势方向(图2(a))。研究区内岩石圈磁场水平矢量变化幅值具有西强东弱的特点。岩石圈水平矢量的幅值和方向变化主要集中在2个区域:①沧州附近主要呈现幅值弱化和方向向四周发散的现象;②唐山北部地区主要呈现幅值弱化和方向转折的现象。

本阶段为丰南4.5级地震前一年半时期,震中附近岩石圈磁场水平矢量变化方向较为一致,主要呈现为NE向,变化幅值平顺,无明显异常。

(2)2018年9月—2019年4月,本期研究区内岩石圈磁场水平矢量变化方向表现较为一致,主要以WE向和近NS向为主;幅值变化较上期相对变大,具有东部强、西部弱的特点(图2(b))。岩石圈水平矢量的幅值和方向变化主要集中于2个区域:①沧州附近主要呈现幅值弱化和方向向四周发散的现象;②唐山及北部地区主要呈现幅值弱化和方向对冲的现象。

本阶段为丰南地震前一年时期,震中及其西部岩石圈磁场水平矢量变化方向继续保持NE向的转向特征,变化幅值与周围相比相对较大。震中东部岩石圈磁场水平矢量变化方向发生明显转向,由NE向转变为近EW向和SN向,变化幅值与周围相比明显较弱,显示出岩石圈磁场水平矢量变化幅值减弱、方向转向的异常。

(3)2019年4—9月,本期岩石圈磁场水平矢量变化方向整体较为一致,研究区北部主要以NS向为主,研究区南部主要以EW向为主,幅值变化较上期明显减小,呈现北高南低的特点(图2(c))。岩石圈水平矢量的幅值和方向变化主要集中于2个区域:①沧州附近主要呈现幅值弱化和方向对冲的现象;②津唐交界区南部地区主要呈现幅值弱化和方向分散的现象。

本阶段为丰南地震前半年时期,震中及其西部岩石圈磁场水平矢量变化方向开始发生较大变化,由NE向转变为近SN向和SW向,变化幅值明显较周围变弱,形成小范围弱变区,显示具有岩石圈磁场水平矢量变化幅值减弱、方向转向的异常。震中东部岩石圈磁场水平矢量变化方向也开始发生变化,由SN向转变为SE向,变化幅值较周围变大。

(4)2019年9月—2020年4月,岩石圈磁场水平矢量变化方向整体较为散乱,空间连续性和一致性差,无明显优势方向(图2(d))。岩石圈磁场水平矢量变化幅值较上期明显变大。岩石圈水平矢量的幅值和方向变化主要集中在唐山菱形块体内,具有幅值弱化和方向转折的现象。

本阶段为丰南地震同震时期,震中及其西部岩石圈磁场水平矢量变化方向未发生较大变化,震中处较小区域由近SN向转变为SW向,震中西部继续保持SW向的分布特征,变化幅值较周围有所增大。震中东部岩石圈磁场水平矢量变化方向变化较大,由SE向转变为EW向,变化幅值较周围变小。该期岩石圈磁场水平矢量变化方向与第二期基本相反。

(5)2020年4—9月,研究区内岩石圈磁场水平矢量变化方向整体较为一致,主要以NW向为主,岩石圈磁场水平矢量变化幅值较上期有所减小(图2(e))。岩石圈水平矢量的幅值和方向变化主要集中在唐山菱形块体北部区域,具有幅值弱化和方向转折的现象。

本阶段为丰南地震震后半年时期,震中及其西部岩石圈磁场水平矢量变化方向发生较大变化,由SW向转变为近SN向和NE向,变化幅值与周围基本保持一致。震中东部岩石圈磁场水平矢量变化方向则由EW向转变为NW向,方向变化较大,变化幅值与周围基本保持一致。

2.2 丰南 4.5 级地震震中岩石圈磁场水平矢量动态演化特征

综上所述,丰南地震前一年半时期,震中附近岩石圈磁场水平矢量变化方向较为一致,幅值大小较为均衡,并无明显异常变化。地震前一年时期,震中附近岩石圈磁场水平矢量变化开始发生变化,首先是震中东部宁河—昌黎深断裂附近水平矢量变化开始出现转向和幅值弱变的现象。随着地震孕育,在地震前半年时期水平矢量的转向和弱变区开始向震中及西部的蓟运河断裂东南段演变。同震时期,岩石圈磁场水平矢量变化开始出现反向恢复性变化,震中附近水平矢量变化方向转向和幅值弱变区消失,水平矢量变化方向和幅值大小与第一期相近。震后半年,震中附近无水平矢量变化转向和弱变区异常现象,方向较为一致,幅值变化较为平顺。可见,丰南地震震中附近岩石圈磁场异常出现在震前一年时期,且岩石圈磁场水平矢量弱变区在空间上具有由东向西发展的演化过程,地震发生后弱变区消失。

从研究区水平矢量转向和弱化范围空间迁移变化来看,震中东部区域水平矢量先出现转向和弱变现象,随着时间的推移,已出现转向和弱变现象的区域开始向震中及西部迁移,原有转向和弱变现象的部分区域转化为磁场逐渐增强。由图 2 还可以看到,研究区内震中区之外的地方水平矢量也有方向偏转和弱变现象发生,但震中区是水平矢量量级和方向差异性最为显著的地区。本次地震引起的岩石圈磁场异常首先出现在震中东部的宁河—昌黎深断裂附近,之后逐渐向西部蓟运河断裂东南段演变。相关研究指出,震中东部的宁河—昌黎深断裂为本次地震的发震构造(李赫等,2020)。因此,地震发生前的岩石圈磁场异常变化可能最先由发震断裂的构造活动引起。

2.3 震中区域岩石圈磁场水平矢量模值动态演化

岩石圈磁场水平矢量模值是指水平矢量变化向量的模值,由北向分量、东向分量的变化数值组成,可以定量表示水平矢量变化大小。

岩石圈磁场水平矢量模值 $|H|$ 的计算公式为

$$|H| = \sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2} \quad (1)$$

其中, Δx 、 Δy 表示相邻两期岩石圈磁场北向分量、东向分量半年变化的数值。

基于 5 期唐山及周边地区岩石圈磁场半年变化数据,应用曲面样条插值方法生成岩石圈磁场七要素的 $0.1^\circ \times 0.1^\circ$ 网格数据,通过式(1)即可获得岩石圈磁场水平矢量模值数据及其空间分布情况(图 3)。由于观测的地磁前兆异常与地磁测点距震中的距离有关,丰南地震震中距周围测点的平均距离约为 50km,故以丰南地震震中为中心选择 $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ 区域作为地磁异常区域,以该区域水平矢量模值的平均值作为震中区水平矢量模值,分析其动态演化特征。

由图 3(a) 可以看出,2018 年 4—9 月研究区内岩石圈磁场水平矢量模值变化在 0.25~7.60nT 之间,均值为 3.12nT。丰南地震震中区水平矢量模值 2.72nT,略低于研究区水平矢量模值的平均值,此时震中区弱化现象不明显。由图 3(b) 可以看出,2018 年 9 月—2019 年 4 月研究区内岩石圈磁场水平矢量模值变化在 0.03~6.07nT 之间,均值为 2.49nT。丰南地震震中区水平矢量模值为 2.3nT,略低于研究区水平矢量模值的平均值,此时震中东部水平矢量模值明显小于震中西部。由图 3(c) 可以看出,2019 年 4—9 月研究区内岩石圈磁场水平矢量模值变化在 0.24~7.82nT 之间,均值为 3.27nT。丰南地震震中区水平矢量模值为 2.11nT,远低于研究区水平矢量模值的平均值,震中区明显出现弱化现象,震

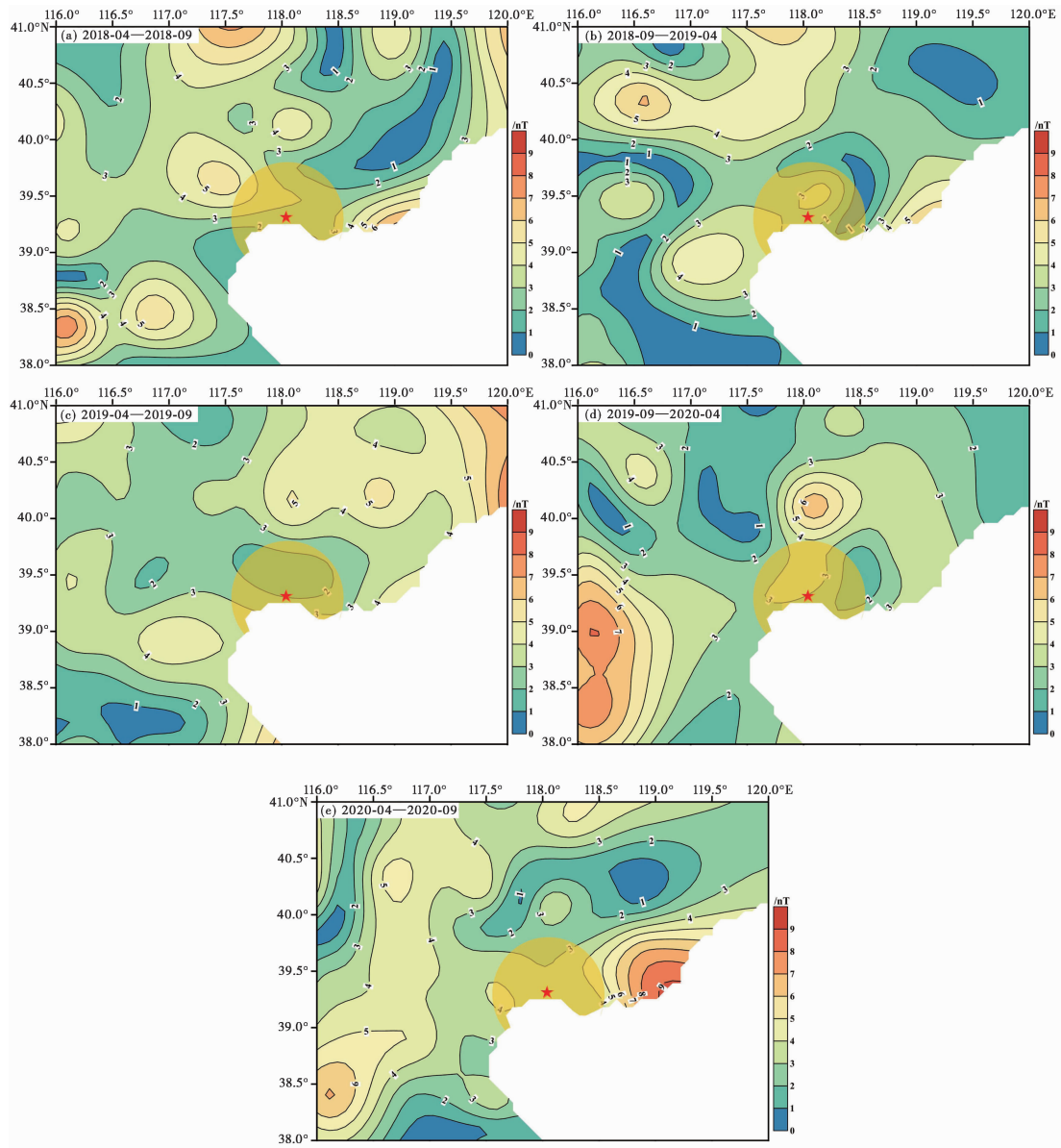


图3 唐山及周边地区岩石圈磁场水平矢量模值空间分布

中及西部水平矢量模值明显小于周边地区。由图3(d)可以看出,2019年9月—2020年4月研究区内岩石圈磁场水平矢量模值变化在0.19~8.05nT之间,均值为3.04nT。丰南地震震中区水平矢量模值为2.7nT,略低于研究区水平矢量模值的平均值,此时震中区弱化现象开始消失。由图3(e)可以看出,2020年4—9月研究区内岩石圈磁场水平矢量模值变化在0.36~9.25nT之间,均值为3.5nT。丰南地震震中区水平矢量模值为3.49nT,与研究区水平矢量模值的平均值一致,此时震中区弱化现象基本消失。

综合分析5期震中区域水平矢量模值动态演化(图4),可以看出震中区域水平矢量模

值在地震前后出现先减小后增大的反向变化,震前半年水平矢量模值最小,丰南地震就发生在水平矢量模值反向增大的过程中。

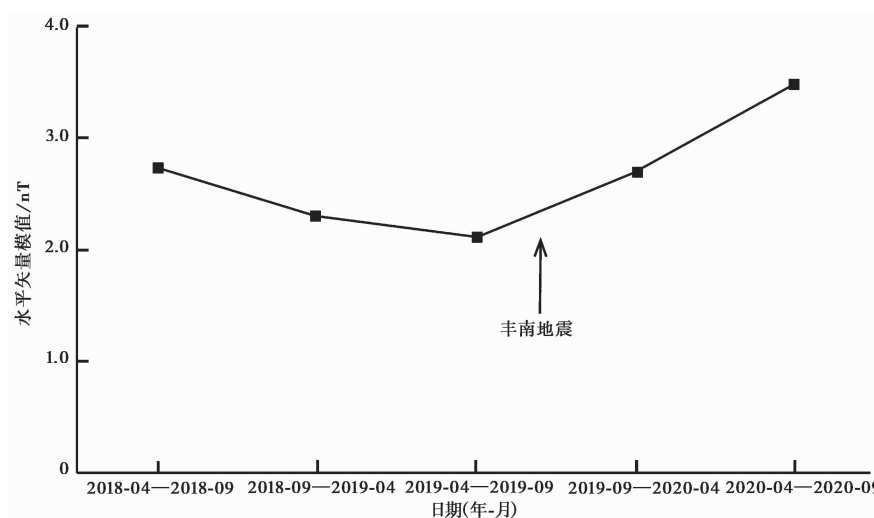


图4 震中区域岩石圈磁场水平矢量模值动态演化

3 讨论

构造磁学表明,岩石圈磁场局部异常变化与地震活动存在一定相关性。尽管地区构造条件和地震类型不同,但所观测到的地磁前兆异常信息具有相似性,震中区域均存在岩石圈磁场水平矢量弱变的特征(汤筱麒等,2019;冯丽丽,2019)。相关学者基于断层亚失稳理论和压磁效应研究认为,岩石圈磁场水平矢量的弱变现象对应着亚失稳模型的0点,此时断层由亚稳态进入亚失稳状态,应力变化也由能量积累为主变为能量释放为主。随着岩石圈磁场水平矢量弱变区的演变,连续多期存在弱变区域且有“重叠”区域,同时其外围存在水平矢量量级的增大、方向的改变,可能预示着地震将要发生在弱变区“重叠”区域的边缘(陈政宇等,2021)。马瑾等(2000)基于实验岩石力学研究认为,交叉断层系统中一条断层失稳会动态地为另一条正交的断层加载,使后者的剪应力瞬时增加并超过其强度,从而发生失稳。

唐山地区的断裂构造和主震的破裂过程极为复杂,不同断裂在区域应力场作用下的地震活动存在明显差异(李铁群等,2008;杨雅琼等,2016)。丰南4.5级地震发生在宁河—昌黎断裂西南段、唐山断裂西南段和蓟运河断裂东南段的交汇处,此处闭锁程度较高,且地壳介质较为破碎,其地壳闭锁段的静摩擦强度较小,不易积累较大的地壳应力(王想等,2021)。基于亚失稳理论与岩石圈磁场水平矢量变化关系分析,丰南地震前一年时期,震中东部的宁河—昌黎断裂西南段附近开始出现水平矢量的弱变区,说明此时宁河—昌黎断裂西南段可能进入亚失稳状态阶段,应力变化由积累转为释放,造成唐山断裂的西南段和蓟运河断裂的东南段应力加载,使宁河—昌黎断裂西南段、唐山断裂西南段和蓟运河断裂东南段的交汇处的剪应力瞬时增加,并超过其强度发生失稳,从而导致丰南地震发生。因此,根据亚失稳理论与岩石圈磁场水平矢量变化关系,在研究区多期岩石圈磁场水平矢量存在方向变化和弱变的区域寻找潜在的异常区,再结合异常区水平矢量模值的动态演化,或许可以作为一种识

别地震前震磁前兆异常信息的方法。

4 结论

本文基于唐山及周边地区 2018 年 4 月—2020 年 9 月连续 6 期的流动地磁观测资料,经过数据处理获得半年尺度岩石圈磁场水平矢量变化数据,再结合丰南地震震中分布,分析了丰南地震前后岩石圈磁场水平矢量及其模值动态演化过程,得出以下初步结论:

(1) 在岩石圈磁场水平矢量动态演化过程中,丰南地震震中附近岩石圈磁场水平矢量异常出现在震前一年时期,随着时间推移,岩石圈磁场水平矢量弱变区在空间上具有由东向西发展的演化过程,地震发生后弱变区消失。

(2) 丰南地震震中区域水平矢量模值在地震前后出现先减小后增大的反向变化,震前半年水平矢量模值最小,丰南地震就发生在水平矢量模值反向增大的过程中。

(3) 根据亚失稳理论与岩石圈磁场水平矢量变化关系,认为研究区内连续多期岩石圈磁场水平矢量发生方向变化和弱变的区域,可能为潜在的震磁异常区,需重点关注。

致谢: 本文使用了国家地磁台网中心的地磁观测数据、IAGA-V5 的 IGRF 主磁场模型以及中国地震局流动地磁观测技术团队的数据结果,审稿专家对文章提出了宝贵的建议,在此一并表示感谢。

参考文献

- 陈政宇,倪喆,周思远,等. 2021. 基于亚失稳理论分析 2021 年云南漾濞 $M_s 6.4$ 地震前岩石圈磁场变化特征. 地震研究, **44**(3):391~398.
- 冯丽丽. 2019. 2010—2016 年南北地震带岩石圈磁场变化分析. 地震学报, **41**(2):239~248.
- 冯丽丽,李霞,赵玉红,等. 2022. 2022 年 1 月 8 日青海门源 6.9 级地震短临异常跟踪分析. 中国地震, **38**(1):12~20.
- 郭蕾,宫猛,王宁. 2019. 2012 年唐山 $M_L 5.2$ 地震前后的速度结构对比分析. 中国地震, **35**(4):695~708.
- 何畅,廖晓峰,祁玉萍,等. 2017. 2017 年 8 月 8 日九寨沟 $M_s 7.0$ 地震前成都台地磁谐波振幅比异常分析. 中国地震, **33**(4):575~581.
- 李赫,董一兵,王熠熙,等. 2020. 唐山地区地震成因初探——以丰南 2010 年 $M_4.1$ 和 2019 年 $M_4.5$ 地震序列为例. 地球物理学进展, **35**(4):1276~1283.
- 李轶群,王健. 2008. 唐山余震区中小地震震源机制解分区特征的初步研究. 中国地震, **24**(2):150~158.
- 马瑾,马胜利,刘力强,等. 2000. 交叉断层的交替活动与块体运动的实验研究. 地震地质, **22**(1):65~73.
- 倪喆,袁浩浩,王粲,等. 2014. 2014 年云南鲁甸 6.5 级、永善 5.0 级地震前岩石圈磁场局部异常特征分析. 地震研究, **37**(4):537~541.
- 宋成科,倪喆,陈斌,等. 2019. 龙门山断裂带南段岩石圈磁场变化分析. 地震工程学报, **41**(6):1529~1535.
- 汤筱麒,陈政宇,赵育飞,等. 2019. 2010—2017 年甘川交界地震前震磁异常特征分析. 华南地震, **39**(4):69~74.
- 王想,周依,陈婷,等. 2021. 2020 年 7 月 12 日唐山 5.1 级地震分析. 地震工程学报, **43**(6):1280~1287.
- 闫亚芬,滕吉文,阮小敏,等. 2016. 龙门山和相邻地域航磁特征与汶川大地震. 地球物理学报, **59**(1):197~214.
- 杨雅琼,王晓山,万永革,等. 2016. 由震源机制解推断唐山地震序列发震断层的分段特征. 地震学报, **38**(4):632~643.
- 张志相,王江,张帆,等. 2022. 唐山地区断层土壤气体 CO_2 连续观测台阵数据分析. 华北地震科学, **40**(4):69~76.
- 赵慧琴,张海洋,李博,等. 2021. 河北及周边地区岩石圈磁场变化及震前异常特征. 地震工程学报, **43**(5):1008~1013.
- Hao J Q, Hastie L M, Stacey F D. 1982. Theory of the seismomagnetic effect: a reassessment. Phys Earth Planet Inter, **28**(2):129~140.
- Johnston M J S, Mueller R J, Sasai Y. 1994. Magnetic field observations in the near-field the 28 June 1992 $M_w 7.3$ Landers, California, earthquake. Bull Seismol Soc Am, **84**(3):792~798.

- Mueller R J, Johnston M J S. 1998. Review of magnetic field monitoring near active faults and volcanic calderas in California; 1974–1995. *Phys Earth Planet Inter*, **105**(3–4):131–144.
- Su S P, Chen S G, Zhao H Q. 2022. Taylor polynomial spatial reference field method for field geomagnetic diurnal variation reduction. *Izv Phys Solid Earth*, **58**(6):981–991.
- Yamazaki K. 2013. Improved models of the piezomagnetic field for the 2011 M_w 9.0 Tohoku-oki earthquake. *Earth Planet Sci Lett*, **363**:9–15.

Dynamic Evolution of Horizontal Vector of Lithospheric Magnetic Field Before and After the 2019 Fengnan M_s 4.5 Earthquake

Zhang Haiyang^{1,2)}

1) Hebei Hongshan Thick Sediments and Seismic Hazards National Observation and Research Station, Xingtai 054000, Hebei, China

2) Baoding Earthquake Monitoring Center Station, Baoding 071000, Hebei, China

Abstract Based on six consecutive periods of mobile geomagnetic observation data in Tangshan and its surrounding areas from April 2018 to September 2020, the spatial and temporal variation data of the lithospheric magnetic field on a half-year scale were obtained through data processing. In conjunction with the Fengnan M_s 4.5 earthquake on December 5, 2019, the spatial and temporal evolution characteristics of the lithospheric horizontal vector near the epicenter were systematically analyzed. The results indicate that: ① In the dynamic evolution process of the lithospheric magnetic field's horizontal vector, an anomaly in the horizontal vector appeared in the epicenter area of the Fengnan earthquake one year before the event. Over time, the weak variation area of the vertical magnetic field exhibited an east-to-west spatial evolution. ② The magnitude of the horizontal vector in the epicenter area of the Fengnan earthquake decreased initially and then increased before and after the earthquake. The horizontal vector magnitude was smallest six months before the earthquake, with the Fengnan earthquake occurring during the reverse increase of the horizontal vector modulus. ③ According to the relationship between the sub-instability theory and the horizontal vector variation of the lithospheric magnetic field, identifying seismomagnetic precursory anomalies may involve searching for potential anomaly areas where the horizontal vector of the lithospheric magnetic field shows directional and weak variations over multiple periods. This should be combined with the dynamic variation of the average value of the horizontal vector modulus in the anomaly area. These findings suggest a method for identifying seismomagnetic precursor information before an earthquake by monitoring specific variations in the horizontal vector of the lithospheric magnetic field.

Keywords: The Fengnan M_s 4.5 earthquake; Mobile geomagnetic; Horizontal vector of lithospheric magnetic field; Dynamic evolution; The meta-instability theory