

王朝景,李博,苏树朋. 2024. 基于多期累积岩石圈磁场变化分析唐山 $M_s5.1$ 地震震磁异常[J]. 地震研究, 47(4): 517–527, doi:10.20015/j.cnki.ISSN1000-0666.2024.0043.

Wang Z J, Li B, Su S P. 2024. Analysis of the seismomagnetic anomaly of the Tangshan $M_s5.1$ earthquake based on the accumulative variation of the lithospheric magnetic field[J]. *Journal of Seismological Research*, 47(4): 517–527, doi:10.20015/j.cnki.ISSN1000-0666.2024.0043.

基于多期累积岩石圈磁场变化分析唐山 $M_s5.1$ 地震震磁异常*

王朝景^{1,2}, 李博^{1,2}, 苏树朋^{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. 河北省地震局流动测量队, 河北 保定 071000)

摘要: 利用 2016—2021 年河北及周边地区的 6 期流动地磁矢量观测资料, 针对 2020 年 7 月 12 日唐山 $M_s5.1$ 地震, 建立了震前 1~4 年和震后 1 年的岩石圈磁场变化模型, 对比分析了研究区岩石圈磁场的总强度、磁偏角、磁倾角和水平矢量 4 个要素的时空演化过程。结果表明: ①震前累积 4 年和 3 年的岩石圈磁场各要素变化中区域整体趋势强, 与大地构造有一定的相关性; 震前 2 年和 1 年的岩石圈磁场变化中, 局部特征显著; 震前 1~4 年变化中震中附近总强度、磁偏角、磁倾角变化量值均较小, 且多有变化零值线分布, 水平矢量呈现出持续的弱变化特征; 震后震中附近的磁偏角和变化量值大。②从震前岩石圈磁场变化的时空演化过程, 可以看出, 越接近发震时间, 局部正、负变化空间分布将取代区域的整体趋势。

关键词: 流动地磁; 震磁异常; 累积变化; 岩石圈磁场

中图分类号: P318.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-0666(2024)04-0517-11

doi:10.20015/j.cnki.ISSN1000-0666.2024.0043

0 引言

岩石圈磁场是地磁场的重要组成部分, 主要来源于地壳或上地幔磁性岩石的磁性; 处于不同温度和压力下的多种磁性矿物可能表现出各种不同的磁性特征, 岩石圈磁场能够很好地反映大陆地壳岩石的各向异性 (Acheache *et al*, 1987; Kang *et al*, 2012)。岩石圈磁场包含了地壳和上地幔物质状态和结构的丰富信息, 因此通过对岩石圈磁场的研究可以推进对地球演化、地质构造演变及成矿研究等相关领域的基础研究 (陈斌等, 2017)。地震在孕育及发生过程中产生的震

磁效应被广泛研究, 例如压磁效应、感应磁效应、膨胀磁效应和热磁效应等 (丁鉴海等, 2006)。研究还发现岩石圈磁异常或磁性结构与板内地震空间分布有关联性 (杜劲松等, 2017)。例如: 2017 年九寨沟 $M_s7.0$ 地震前, 震中西侧出现岩石圈磁场的正负异常交替现象可能与九寨沟地震的孕育有关 (宋成科, 2021); 2018 年永清 $M_w4.3$ 地震前后岩石圈磁场变化趋势发生改变 (王朝景等, 2021); 2013 年芦山 $M_s7.0$ 地震、2014 年鲁甸 $M_s6.5$ 地震前, 地震震中及附近区域出现高梯度分布, 或者正负变化等现象 (倪喆等, 2014a, b); 震中及附近, 震前岩石圈磁场矢量变化出现弱化、转向等 (苏树朋等, 2020;

* 收稿日期: 2023-04-12.

基金项目: 中国地震局监测、预报、科研三结合课题 (3JH-202401066); 河北省地震科技星火计划项目 (DZ2024112200008, DZ2024112200007).

第一作者简介: 王朝景 (1990-), 工程师, 主要从事流动地磁监测与研究. E-mail: wangzj90@163.com.

顾春雷等, 2010; 张瑜等, 2023)。

2020 年 7 月 12 日唐山发生 $M_s 5.1$ 地震, 这是河北省 2006 年 7 月 4 日文安 $M_s 5.1$ 地震以来的又一次 5 级以上地震, 是一次重要的地震事件, 是该区构造活动的重要体现。周依等 (2022) 推测此次地震的发震断层为唐山—古冶断裂。为了深入研究该地震的震磁异常特征, 本文以河北及周边地区为研究区, 对该区的流动地磁矢量资料进行分析。

2009 年以来中国地震局流动地磁技术团队对大华北、南北地震带、南北天山等地区持续开展了大规模的流动地磁矢量测量工作, 积累了丰富的观测资料 (苏树朋等, 2017; 陈政宇等, 2021)。地震发生是直接迅速的, 而地震的孕育过程在时空上是复杂缓慢的。近年来学者对岩石圈磁场变化的分析多为一年尺度 (冯丽丽, 2019; 董超等, 2021; 张海洋等, 2022), 对岩石圈磁场的多期累积变化研究少, 对岩石圈磁场的变化趋势研究更少, 未见有多期累积变化的对比研究。笔者对 2016—2021 年河北及周边地区的 6 期流动地磁矢量资料进行处理, 结合唐山 $M_s 5.1$ 地震, 建立了该区多期累积的岩石圈磁场变化模型, 对比分析了岩石圈磁场变化趋势、震磁异常特征。

1 研究区概况及数据处理

本文研究区的北部属于燕山地块, 中南部属于华北平原地块。燕山地块位于东北地块的西南角、华北平原地块的北部, 为一近东西向的楔状块体 (陈长云, 2016; 唐方头, 2003; 刁守中等, 2023)。华北平原地块是由北东向的山西断陷带、北西向的张家口—渤海断裂带、北北东向的郯城—庐江断裂带和近东西向的秦岭—大别山构造带共四组断裂控制的结构破碎的复合型块体 (王晓山, 2017; 张培震等, 2003)。张家口—渤海断裂带位于华北平原地块的北侧, 紧邻燕山地块, 是一条具相当规模的北西西向的、由 20 多条具有正断兼左旋走滑性质的断裂组成的活动构造带 (方颖等, 2008), 也是一条重要的地震活动带。

本文收集 2016 年 5 月至 2021 年 5 月共计 6 期流动地磁矢量资料, 选取河北及周边地区内的 85 个矢量测点, 测点间距约 70 km, 野外测点周围梯度 < 5.0 nT/m, 磁偏角与磁倾角测量仪器为磁通门经纬仪, 地磁场总强度测量设备为 GSM-19T 质子旋进磁力仪, 灵敏度为 0.15 nT@1 Hz, 分辨率为 0.01 nT, 绝对精度为 ± 0.2 nT (Wang *et al*, 2020; 谈昕等, 2015; 畅国平等, 2020)。在数据处理过程中剔除了个别不合格的异常数据。

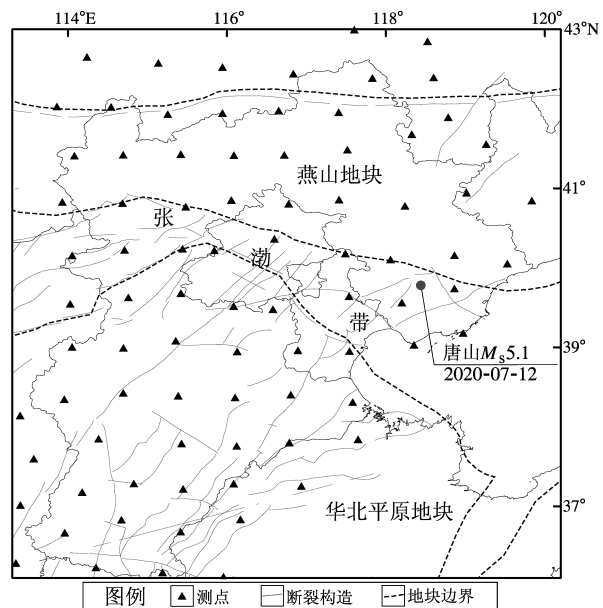


图 1 研究区流动地磁测点分布

Fig. 1 Distribution of the measuring points of the mobile geomagnetic surveying network in the study area

对流磁矢量测量数据进行外源变化场、主磁场长期变化、主磁场等地磁场成分的去除, 得到研究区的岩石圈磁场数值模型。数据主要进行了日变通化改正、长期变化改正、差值计算等处理过程 (陈斌等, 2017)。其中, 日变通化过程采用单台通化, 参照台站为隆尧台、泰安台、静海台、呼和浩特台、昌黎台、锡林浩特台; 长期变化改正采用中国地区地磁基本场长期变化的 6 阶自然正交分量的非线性模型计算; 将相邻期次、相同测点数据进行差值计算; 对得到的相邻期的差值数据进行曲面样条插值拟合 (顾左文等, 2006), 从而得到 1 年期的岩石圈磁场变化模型。将上述处理方法得到的 1 年期的岩石圈磁场变化数据进行累

加,从而得到2年、3年、4年的岩石圈磁场累积变化模型。例如2018—2020岩石圈磁场变化模型计算方法: $\{(2020 - 2019) + (2019 - 2018) = 2020 - 2018\}$ 。如此避免了长时间两期数据直接作差,从而解决了测点迁移导致的测点不连续性问题。曲面样条的计算公式(陈斌等,2014;余志伟,1987)为:

$$W(x, y) = a_0 + a_1x + a_2y + \sum_{i=1}^n A_i r_i^2 \ln(r_i^2 + \varepsilon) \quad (1)$$

$$\sum_{i=1}^n A_i = \sum_{i=1}^n A_i x_i = \sum_{i=1}^n A_i y_i = 0$$

式中: x, y 为计算位置的横坐标和纵坐标; x_i 和 y_i 分别为第 i 个原始测点的横坐标和纵坐标; $W(x, y)$ 为 x, y 位置处的求解物理量; a_0, a_1, a_2 和 A_i 为曲面样条函数的拟合系数; n 为原始数据的个数; r_i 为计算位置与第 i 个空间点的距离; ε 为曲率因子,本文取为 10^{-7} 。

2 岩石圈磁场变化与震磁异常

本文通过上述计算得到了2016—2021年河北及周边地区岩石圈磁场磁偏角 D 变化图(图2),等变线间隔 $0.2'$ 。磁倾角 I 变化图(图3),等变线间隔 $0.1'$ 。总强度 F 变化图(图4),等变线间隔 1 nT 。对磁偏角 D 变化、磁倾角 I 变化、总强度 F 变化的震磁异常特征进行了量化统计(表1),绘制了水平矢量 H 变化图(图5)。

在磁偏角 D 、磁倾角 I 、总强度 F 的分析中,将震中距各要素变化零值线 $\leq 30 \text{ km}$ (顾春雷等,2012,杨学慧等,2020)视为距离变化零值线近。

2.1 磁偏角变化与震磁异常特征

① 2016-05—2020-05 时段的磁偏角 D 变化(图2a)幅值为 $-1.9' \sim 2.2'$, 正变化主要分布于燕山地块及张渤带(本文中的张渤带均指张渤带陆地段,下文亦同),负变化分布于华北平原地块南部。

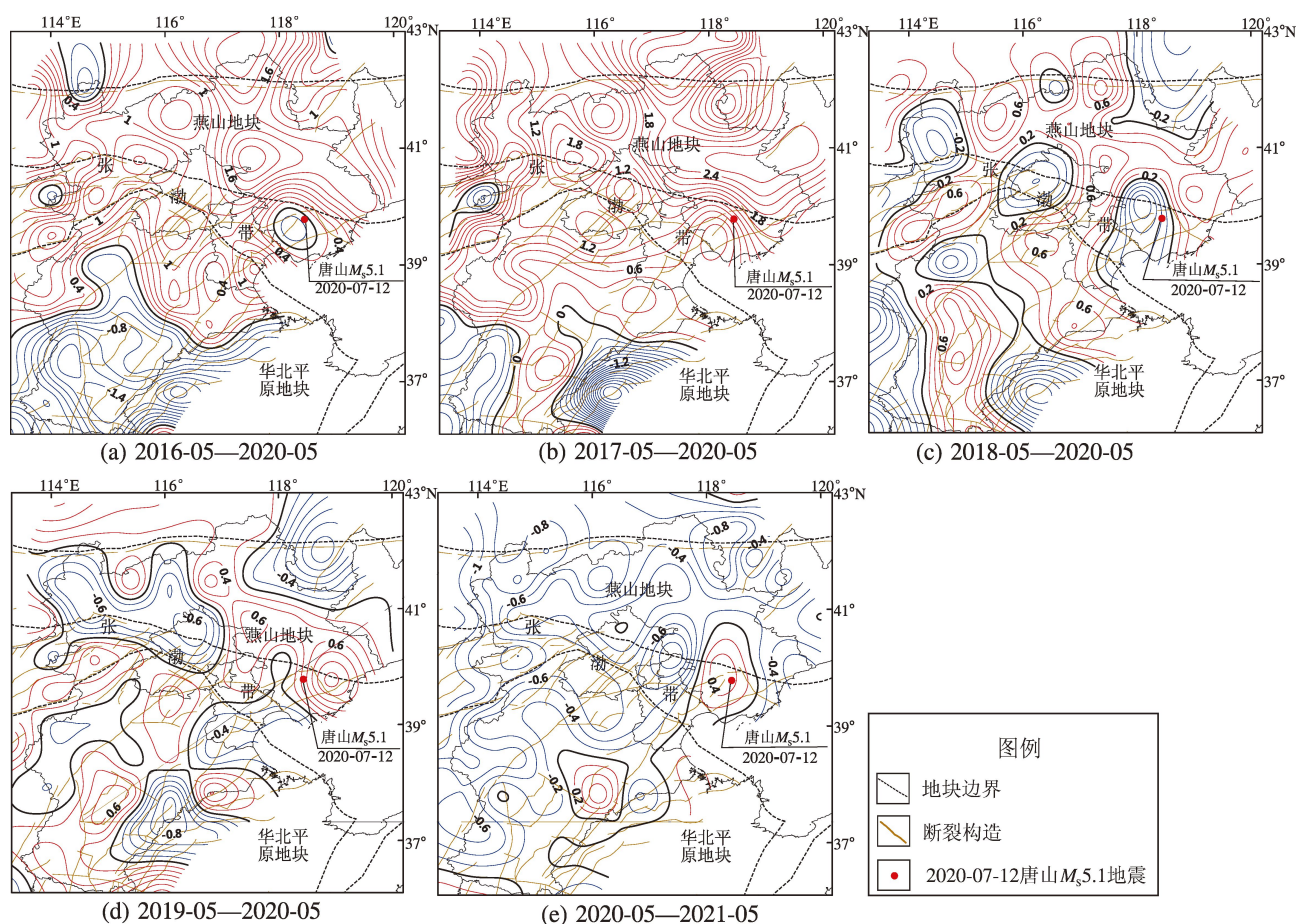


图2 磁偏角 D 变化分布

Fig. 2 Distribution of the variation of magnetic declination D

唐山 $M_s5.1$ 震中位于小范围的负变化区,震中变化量值约为 $-0.1'$,量值相对较小,震中距变化零值线约 5.7 km 。② 2017-05—2020-05 时段,变化幅值为 $-3.4' \sim 3.1'$,呈北正南负特征,正变化主要分布于燕山地块、张渤带及华北平原地块的北部,负变化分布于华北平原地块的南部(图 2b)。唐山 $M_s5.1$ 震中位于正变化区,震中的变化量值约为 $1.0'$,量值相对较小。③ 2018-05—2020-05 时段,变化幅值为 $-1.6' \sim 1.0'$,呈正、负相间分布(图 2c),3 个负变化区在张渤带相间分布,等变线整体趋势差。唐山 $M_s5.1$ 震中位于独立的负变化区,震中的变化量值约为 $-0.4'$,量值相对较小,距变化零值线约 15.5 km 。④ 2019-05—2020-05 时段,变化幅值为 $-1.3' \sim 1.3'$,呈正、负相间分布,等变线分布较为散乱(图 2d)。唐山 $M_s5.1$ 震中位于正变化区,震中西南侧呈负变化特征,震中变化量值约为 $0.5'$,量值相对较小,距变化零值线约 25.8 km 。⑤ 2020-05—2021-05 时段,变化幅值为 $-1.4' \sim 0.7'$,研究区整体为负变化所控,张渤带的东部有小范围的正变化区(图 2e)。唐山 $M_s5.1$ 震中位于小范围的正变化区,震中量值约为 $0.5'$,相较区域背景,量值较大,震中距变化零值线约 38.2 km 。

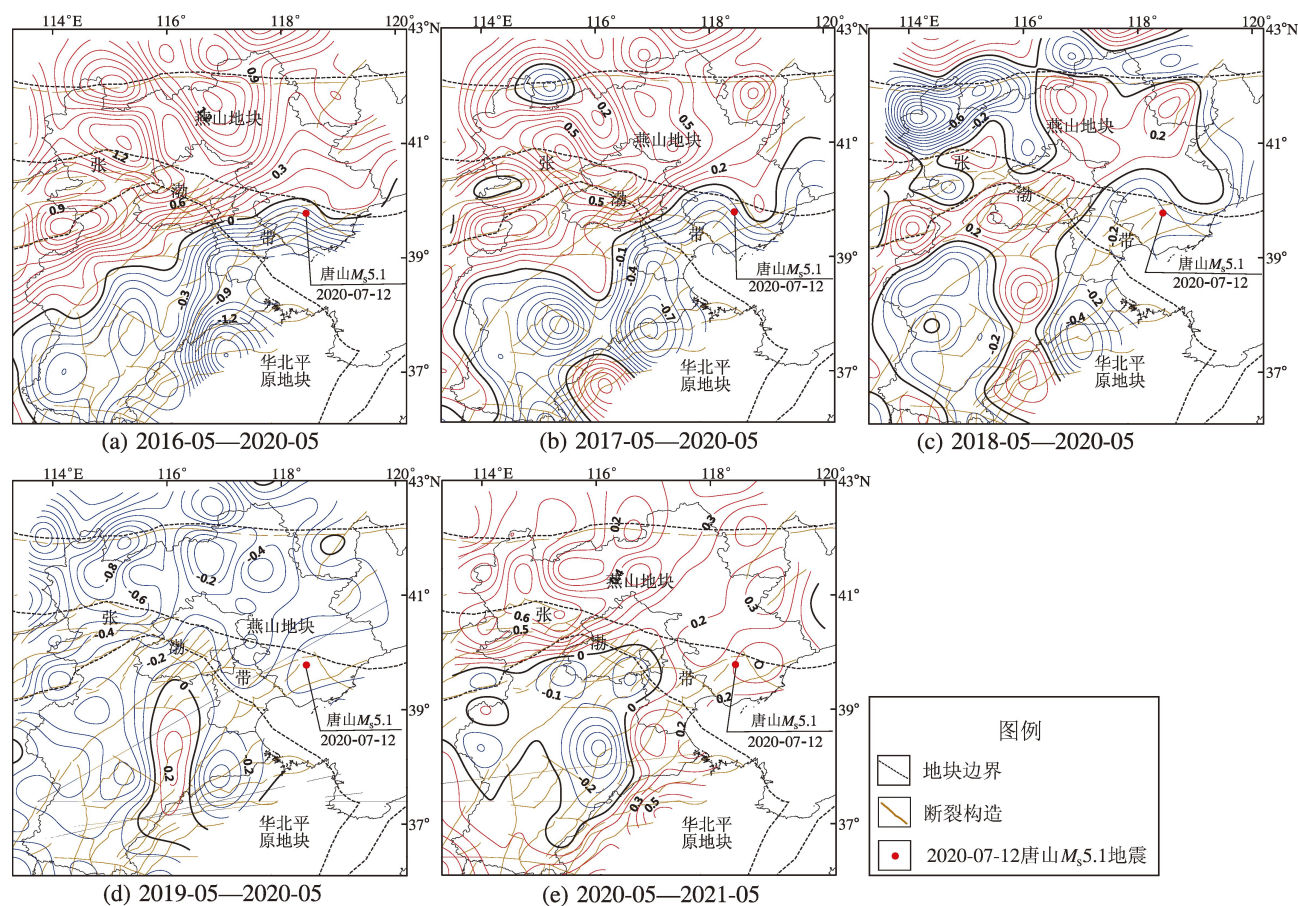
与震后震中呈现正变化的高值异常相比,震前多期变化中震中变化量值相对较小。除 2017-05—2020-05 (3 年) 变化外,其余期次的变化中震中均靠近磁偏角变化零值线,可见弱变化特征显著。震前 4 年和 3 年的磁偏角变化呈北正南负特征,正变化主要分布于燕山地块和张渤带,负变化分布于华北平原地块的南部,正、负变化的分布在地质构造上表现出良好的区域整体趋势;震前 2 年和 1 年的磁偏角变化打破了原有特征,展现出在局部区域均存在正、负变化;震后 1 年磁偏角的负变化控制着整个研究区,仅少量小范围正值区分布于区域东部。可见,从磁偏角变化在构造上的分布来看,震前累积 4 年和 3 年的变化整体趋势强,震前 2 年和 1 年的局部变化更为显著。

2.2 磁倾角变化与震磁异常特征

① 2016-05—2020-05 时段的磁倾角 I 变化,变化幅值为 $-1.7' \sim 1.3'$,正变化主要覆盖

了燕山地块,同时向张渤带西侧延伸,负变化分布于华北平原地块的东南侧(图 3a)。唐山 $M_s5.1$ 地震震中位于负变化区,震中变化量约为 $-0.16'$,量值小,距变化零值线约 20.7 km 。② 2017-05—2020-05 时段,变化幅值为 $-0.9' \sim 0.8'$,等变线变化趋势与 2016-05—2020-05 变化相似(图 3b)。唐山 $M_s5.1$ 震中位于负变化区,震中变化量为 $-0.16'$,量值较小,距变化零值线约 16.8 km 。③ 2018-05—2020-05 时段,变化幅值为 $-1.2' \sim 0.5'$,正、负相间分布,呈现以张渤带中部为中心的正变化向南北两侧延伸分布,周围以负变化为主(图 3c)。唐山 $M_s5.1$ 震中位于负变化区,震中变化量值约为 $-0.20'$,量值小,距变化零值线约 43.8 km 。可以看出张渤带(陆地段)东部的唐山及周边地区的变化相对于区域背景变化值小。④ 2019-05—2020-05 时段,变化幅值为 $-0.9' \sim 0.3'$,仅在华北平原地块中部出现舌形正变化,其余区域为负变化所控(图 3d)。唐山 $M_s5.1$ 震中位于负变化区,震中变化量值约为 $-0.04'$,量值小。⑤ 2020-05—2021-05 时段,变化幅值为 $-0.5' \sim 0.8'$,负变化主要分布于华北平原地块的中西部,其余区域为正变化所控(图 3e)。唐山 $M_s5.1$ 震中位于正变化区,量值约为 $0.09'$,附近无成规模的变化零值线,震中以东约 10.3 km 处有一极小范围的变化零值线。

与震后震中位于磁倾角 I 的正变化区相比,震前 1~4 年的变化中,震中均位于负变化区。除震前 1 年(2019-05—2020-05) 变化外,震中附近均有磁倾角 I 的变化零值线分布,震前震中变化量值,均较小,张渤带东部的唐山及周边地区的变化量值相对于区域背景场变化量值而言相对较小。震前 4 年和 3 年磁倾角的正变化主要覆盖了燕山地块,同时向张渤带西侧延伸,而负变化分布于华北平原地块的东南侧;震前 2 年以张渤带中部为中心的正变化向南北两侧延伸分布,四周以负变化分布为主;震前 1 年仅在华北平原地块中部出现了舌形正变化,其余区域为负变化;震后 1 年正变化控制着燕山地块及张渤带,负变化分布于研究区的西南部。可见震后 1 年的变化与震前 1~4 年的变化相比,其等变线变化形态和演化趋势已完全改变。

图3 磁倾角 I 变化分布Fig. 3 Distribution of the variation of magnetic inclination I

2.3 总强度变化与震磁异常特征

① 2016-05—2020-05 时段，总强度 F ，变化幅值为 $-1.5 \sim 33.6$ nT，幅值大，正变化几乎分布于整个研究区域，仅在张渤带东部出现小范围的负变化，研究区西部变化量值远大于东部（图 4a）。唐山 $M_s 5.1$ 震中位于正变化区，位于高梯级带边缘，震中变化量值约为 9.2 nT，距变化零值线约为 51.7 km。② 2017-05—2020-05 时段，变化幅值为 $0.5 \sim 24.4$ nT，正变化控制着整个研究区，西部变化量值远大于东部（图 4b）。唐山 $M_s 5.1$ 震中位于正变化区，震中变化量值约为 7.2 nT，量值小。③ 2018-05—2020-05 时段，变化幅值为 $-1.4 \sim 20.8$ nT，正变化控制着研究区（图 4c），局部有小范围的负变化区。唐山 $M_s 5.1$ 震中位于正变化区，震中变化量值约为 4.1 nT，量值小。④ 2019-05—2020-05 时段，变化幅值为 $-4.2 \sim 9.4$ nT，正变化为主要分布于燕山地块，负变化占据着华北平原地块东南和张渤带（图 4d）。唐山 $M_s 5.1$ 震中位于正

变化区，震中变化量值约为 1.5 nT，量值小，距变化零值线约 53.8 km。⑤ 2020-05—2021-05 时段，变化幅值为 $-3.9 \sim 7.0$ nT（图 4e），正负变化相间分布，整体趋势差。唐山 $M_s 5.1$ 震中位于正负变化交界附近的正变化区，震中变化量值约为 0.4 nT，距变化零值线约 10.3 km。

除 2016-05—2020-05 时段的变化外，唐山 $M_s 5.1$ 地震前后，张渤带东部的唐山及周边地区总强度 F 的变化量值相较于区域背景值较小，震中变化量值相对较小，呈弱变化特征。此外，震前 2~4 年的总强度 F 变化呈现出整体趋势强的特征，正变化控制着整个研究区域，震前 1 年打破了 4 年、3 年和 2 年的演化趋势，演变成正变化主要分布于燕山地块，负变化则占据着华北平原地块东南和张渤带，震后总强度 F 则呈现正、负变化分散分布于研究区的特征，地震前后差异显著。从各期变化均可看出研究区域的西北部变化量值大于东南部，随时间累积，研究区总强度的变化幅值也在变大。

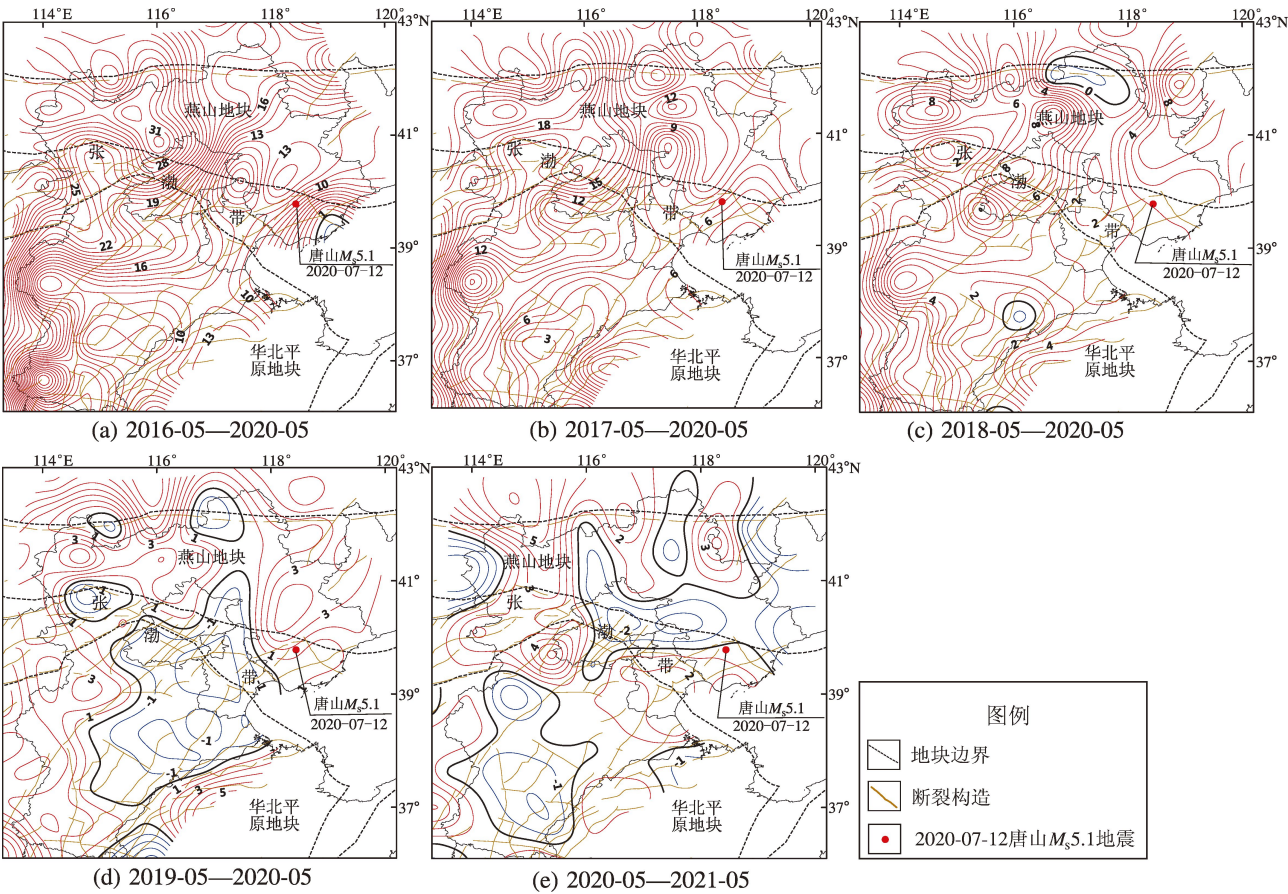


图 4 总强度 F 变化分布

Fig. 4 Distribution of the variation of total intensity F

表 1 唐山 $M_s5.1$ 地震震中磁偏角 D 、磁倾角 I 、总强度 F 变化与异常特征表

Tab. 1 The variation of magnetic declination D , magnetic inclination I , total intensity F and their anomalous characteristics in Tangshan $M_s5.1$ earthquake epicenter

	2016-05—2020-05		2017-05—2020-05		2018-05—2020-05		2019-05—2020-05		2020-05—2021-05	
	(4 年)		(3 年)		(2 年)		(1 年)		(1 年)	
	震中/背景	异常特征	震中/背景	异常特征	震中/背景	异常特征	震中/背景	异常特征	震中/背景	异常特征
D 变化值/ ($^{\circ}$)	-0.1/ -1.9~2.2	距变化零值线 5.7 km 量值小	1.0/ -3.4~3.1	量值小	-0.4/ -1.6~1.0	距变化零值线 15.5 km 量值小	0.5/ -1.3~1.3	距变化零值线 25.8 km 量值小	0.5/ -1.4~0.7	距变化零值线 38.2 km 量值大
I 变化值/ ($^{\circ}$)	-0.16/ -1.7~1.3	距变化零值线 20.7 km 量值小	-0.16/ -0.9~0.8	距变化零值线 16.8 km 量值小	-0.20/ -1.2~0.5	距变化零值线 43.8 km 量值小	-0.04/ -0.9~0.3	量值小	0.09/ -0.5~0.8	距变化零值线 29.7 km 量值小
F 变化值/ nT	9.2/ -1.5~33.6	距变化零值线 51.7 km 梯级带	7.2/ 0.5~24.4	量值小	4.1nT/ -1.4~20.8	量值小	1.5/ -4.2~9.4	距变化零值线 53.8 km 量值小	0.40/ 3.9~7.0	距变化零值线 10.3 km 量值小

2.4 水平矢量 H 的变化与震磁异常特征

① 2016-05—2020-05 时段研究区水平矢量 H 的变化呈现出较好的规律性, 呈现出东强西弱特征 (图 5a)。唐山及周边地区的量值相对于周围区域显著弱化, 唐山 $M_s5.1$ 震中附近的量值相较于周边也

出现了显著的弱化, 尤其是震中及其东部弱化显著, 震中东、西、北侧的矢量均出现明显的转向。② 2017-05—2020-05 时段的变化 (图 5b) 与 2016-05—2020-05 时段的变化具有相似性, 东部量值大, 中西部量值小。唐山 $M_s5.1$ 震中及其附近的量值相

较于其周围区域显著弱化,震中位于矢量方向转向的交界位置。③ 2018-05—2020-05 时段中 H 矢量分布较为散乱,局部弱化,规律性不强(图 5c)。唐山 $M_s5.1$ 震中西部量值大,而东部则明显较小,震中位于 H 矢量方向分化的位置。④ 2019-05—2020-05 时段,整体趋势差,量值西北大、东南小,

局部出现弱化(图 5d)。唐山 $M_s5.1$ 震中附近出现了显著的弱化与方向转向,震中东部出现了强、弱突变现象。⑤ 2020-05—2021-05 时段中 H 矢量分布较为散乱,规律性差,区域的西北部量值较大,区域局部出现了弱化(图 5e)。唐山 $M_s5.1$ 震中量值较大。

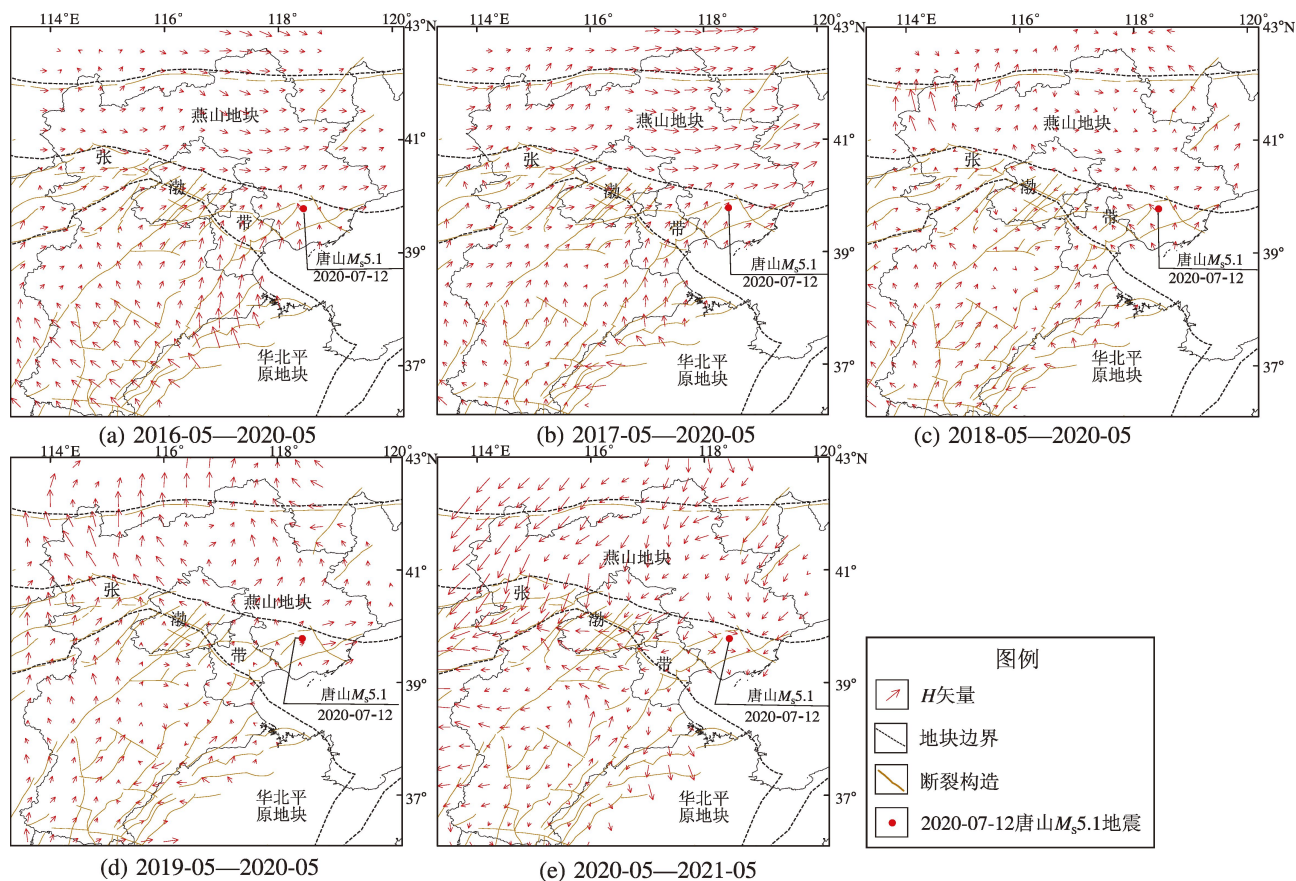


图5 水平矢量 H 变化分布

Fig. 5 Distribution of the variation of horizontal vector H

与唐山 $M_s5.1$ 震后 1 年震中 H 矢量变化量值大相比,震前 1~4 年震中的累积变化 H 矢量变化量值均相对较小,呈持续的弱化特征。但 4 和 3 年变化的背景场较为稳定,2 和 1 年的背景场较为散乱。震前震中及附近 H 矢量方向以向北为主,震后则以向东南为主。此外,震前 4 和 3 年的累积变化 H 矢量的整体趋势强,可以看出 H 矢量的方向与大地构造有着强相关性,在燕山地块内 H 矢量方向以向东为主,而在华北平原地块则以向北为主;2 和 1 年的变化,在燕山地块内 H 矢量方向以向北、东北为主,在华北平原地块方向以向北为

主,但局部呈方向散乱、弱化的特征。震后 1 年,在燕山地块内 H 矢量方向转变为以向西南、东南为主,在华北平原地块以向南、向西为主,局部较乱。地震前后燕山地块、华北平原地块矢量反向。

3 讨论

对河北及周边地区 2016—2021 年岩石圈磁场多期累积变化的对比分析可以看出,地震前后岩石圈磁场的变化趋势发生了改变。同时,震前 1~

4 年变化中震中及附近呈现出一定的震磁异常特征,在震后 1 年的岩石圈磁场变化中,震中特征与震前相异。

研究区背景构造应力场的总体方向为 NE-SW 至 NEE-SWW 方向,存在分区特征(杨树新等, 2012; 王晓山, 2017), 该区域主要受太平洋俯冲带的影响,地壳主要以水平运动为主(吴晶等, 2011; 朱守彪等, 2010)。唐山 $M_s5.1$ 地震前唐山地区和华北构造区的地震活动性异常以缺震和显著平静为主,表明该区域地壳应力积累到了一定程度(王想等, 2021; 纪春玲等, 2021), 唐山大地震 15 年后,该区库仑应力呈现缓慢的稳定增加状态(朱琳等, 2021)。岩石磁学实验理论研究表明,介质的剩磁和磁化率与其应力成反比(高龙生, 李松林, 1985; Nagata, 1970; Ohnaka Kinoshita, 1968)。Wang 等(2019)在呼图壁储气库注气与采气过程中对局部岩石圈磁场进行了研究,发现储气库注气加压局部岩石圈磁场呈负变化,采气卸压则呈正变化。岩石圈磁场变化较弱的区域可能是地壳应力水平较高的地区(张海洋等, 2022; 宋成科, 2021)。根据上述前人对区域的应力状态及压磁学理论研究,可以看出岩石圈磁场变化能够反映地壳应力的变化情况。唐山 $M_s5.1$ 震前 1~4 年的岩石圈磁场变化中,4 和 3 年的变化区域背景场呈现出相似的整体趋势,与大地构造有一定的相关性,这可能更多的反映的是较长时间内区域应力的相对稳定的缓慢变化状态;震前 2 和 1 年的岩石圈磁场变化中,局部特征显著,可能更多的反映的是局部应力的变化。同时在震前 4、3、2 和 1 年的变化中震中及附近多出现零值线、弱变化等震磁异常特征,表明震中及附近相对于背景场呈现出一定的应力集中的特征,同时暗示着震前震中及附近的局部应力集中的持续时间长。震前长时间的累积变化震中附近震磁异常显著异于背景场,这暗示着震中及附近应力呈现不断累积的特征,从而时间愈长,累积越大,异常相较背景场愈显著。这从时间与空间上证明了,此次地震可能与区域背景主应力的稳定增加以及局部应力集中有着密切关系。震后岩石圈磁场各要素的变化趋势改变及震中附近岩石圈磁场变化特征与震前形成反差,可能跟地震前后应力的集中与释

放有关,具体的量化分析,还需进一步研究。

4 结语

建立了多期累积岩石圈磁场变化模型,结合唐山 $M_s5.1$ 地震,对震磁异常特征进行分析显示:

(1) 震后唐山 $M_s5.1$ 震中及附近的磁偏角、水平矢量变化量值大,而震前 1~4 年变化中震中及附近总强度、磁偏角、磁倾角变化量值均较小,且多有变化零值线分布,同时震前水平矢量呈现出持续的弱变化特征。此外,震中及附近地震前后水平矢量的方向发生了根本性的转变。

(2) 震前 4 年、3 年的岩石圈磁场变化整体趋势强,与大地构造有着强相关性,尤其是水平矢量变化与地块边界有着较好的对应,唐山 $M_s5.1$ 震中及附近震磁异常特征显著异于背景场,易于辨识。震前 2 年、1 年的岩石圈磁场变化,震中及附近亦呈现一定的异常特征,但背景场分布较为散乱。

(3) 震前 1~4 年多期累积的岩石圈磁场变化分布特征差异明显,多期累积岩石圈磁场变化的对比分析,对震磁异常的提取与辨识有着重要意义。本文从多期累积岩石圈磁场变化的空间演化特征对震磁异常进行了定性的分析,具体震磁关系的量化分析,以及孕震过程中相关数学物理模型的建立,是我们下一步的研究方向。

参考文献:

- 畅国平,王秀敏,袁洁浩. 2020. GSM-19T 质子旋进磁力仪比测实验分析[J]. 地震地磁观测与研究, 41(4): 105-110.
- Chang G P, Wang X M, Yuan J H. 2020. The comparison test analysis of GSM-19T proton-precession magnetometer[J]. Seismological and Geomagnetic Observation and Research, 41(4): 105-110. (in Chinese)
- 陈斌,袁洁浩,王黎,等. 2017. 流动地磁监测数据处理流程[J]. 地震研究, 40(3): 335-339.
- Chen B, Yuan J H, Wang C, et al. 2017. Data processing flowchart of Chinese mobile geomagnet monitoring array[J]. Journal of Seismological Research, 40(3): 335-339. (in Chinese)
- 陈斌,袁洁浩,王雷,等. 2014. 2010 年代蒙古地区地磁场曲面样条[J]. 地球科学(中国地质大学学报), 39(12): 1927-1932.
- Chen B, Yuan J H, Wang L, et al. 2014. Geomagnetic field over Mongolia for 2010.0 epoch using spherical cap harmonic method[J]. Earth

- Science—Journal of China University of Geosciences, 39(12): 1927 – 1932. (in Chinese)
- 陈长云. 2016. 张家口—渤海断裂带分段运动变形特征分析[J]. 地震, 36(1): 1 – 11.
- Chen C Y. 2016. Characteristics of segmentary motion and deformation along the Zhangjiakou – Bohai fault [J]. Earthquake, 36(1): 1 – 11. (in Chinese)
- 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 $M_{\text{s}}6.4$ 地震前岩石圈磁场变化特征[J]. 地震研究, 44(3): 391 – 398.
- Chen Z Y, Ni Z, Zhou S Y, *et al.* 2021. Analysis based on the meta – instability theory of the variation characteristics of the lithospheric magnetic field in Yunnan before the 2021 Yangbi, Yunnan $M_{\text{s}}6.4$ earthquake [J]. Journal of Seismological Research, 44(3): 391 – 398. (in Chinese)
- 刁守中, 王峰, 李霞. 2023. 1976 年唐山 7.8 级地震在鲁北造成的震害情况及其烈度校订[J]. 华南地震, 43(1): 80 – 88.
- Diao S Z, Wang F, Li X. 2023. Seismic damage in northern Shandong province caused by Tangshan $M7.8$ earthquake in 1976 and its intensity revision [J]. South China journal of seismology, 43(1): 80 – 88. (in Chinese)
- 丁鉴海, 申旭辉, 潘威炎, 等. 2006. 地震电磁前兆研究进展[J]. 电波科学学报, 21(5): 791 – 801.
- Ding J H, Shen X H, Pan W Y, *et al.* 2006. Seismo electromagnetism precursor research progress [J]. Chinese Journal of Radio Science, 21(5): 791 – 801. (in Chinese)
- 董超, 陈斌, 袁洁浩, 等. 2021. 2021 年 5 月 22 日玛多 $M_{\text{s}}7.4$ 地震震前岩石圈磁场变化特征分析[J]. 地震学报, 43(4): 453 ~ 462.
- Dong C, Chen B, Yuan J H, *et al.* 2021. Characteristic analysis of the lithospheric magnetic anomaly before the Maduo $M_{\text{s}}7.4$ earthquake on 22nd May 2021 [J]. Acta Seismologica Sinica, 43(4): 453 ~ 462. (in Chinese)
- 杜劲松, 胡正旺, 陈超, 等. 2017. 大陆岩石圈大尺度磁性结构与板内地震空间分布之间的关联性[C]//2017 中国地球科学联合学术年会论文集(三十八)——专题 74: 电磁卫星观测与应用, 72 – 74.
- Du J S, Hu Z W, Chen C, *et al.* 2017. The correlation between the large – scale magnetic structure of continental lithosphere and the spatial distribution of intraplate earthquakes [C]//2017 China Earth Science Joint Academic Annual Conference Proceedings (38) – Topic 74: Observation and Application of Electromagnetic Satellites, 72 – 74. (in Chinese)
- 冯丽丽. 2019. 2010—2016 年南北地震带岩石圈磁场变化分析[J]. 地震学报, 41(2): 239 – 248.
- Feng L L. 2019. Lithospheric geomagnetic field variation in the North – South Seismic Belt from 2010 to 2016 [J]. Acta Seismologica Sinica, 41(2): 239 – 248. (in Chinese)
- 高龙生, 李松林. 1985. 单轴应力作用下两种不同方法研究岩石磁化率变化的结果[J]. 地震学报, 7(3): 285 – 299.
- Gao L S, Li S L. 1985. The experimental results of variations in the susceptibility of rock samples under uniaxial stress by two different approaches [J]. Acta Seismologica Sinica, 7(3): 285 – 299 (in Chinese).
- 顾春雷, 张毅, 顾左文, 等. 2012. 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]. 西北地震学报, 34(2): 174 – 179.
- Gu C L, Zhang Y, Gu Z W, *et al.* 2012. Relationship between zero – value – line of abnormal geomagnetic field in lithosphere and strong – moderate earthquake epicenters in North China seismic region [J]. Northwestern Seismological Journal, 34(2): 174 – 179. (in Chinese)
- 顾春雷, 张毅, 徐如刚, 等. 2010. 地震前后岩石圈磁场变化特征分析[J]. 地球物理学进展, 25(2): 472 – 477.
- Gu C L, Zhang Y, Xu R G, *et al.* 2010. Analysis of the variation characteristic in the lithospheric geomagnetic field before and after earthquakes [J]. Progress in Geophysics, 25(2): 472 – 477. (in Chinese)
- 顾左文, 张毅, 姚同起, 等. 2006. 九江—瑞昌 $M_{\text{s}}5.7$ 地震地磁异常的观测与分析[J]. 地震学报, 28(6): 611 – 621.
- Gu Z W, Zhang Y, Yao T Q, *et al.* 2006. Observation and analysis of geomagnetic abnormality associated with the $M_{\text{s}}5.7$ Jiujiang – Ruichang earthquake [J]. Acta Seismologica Sinica, 28(6): 611 – 621. (in Chinese)
- 纪春玲, 董博, 章阳, 等. 2021. 2020 年唐山古冶 5.1 级地震前流体固体潮参数时空变化研究[J]. 大地测量与地球动力学, 41(8): 821 – 826.
- Ji C L, Dong B, Zhang Y, *et al.* 2021. Study on temporal and spatial variation of fluid solid tide parameters before the Tangshan Guye $M_{\text{s}}5.1$ earthquake in 2020 [J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 41(8): 821 – 826. (in Chinese)
- 倪喆, 陈双贵, 袁洁浩, 等. 2014a. 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, 37(1): 61 – 65.
- Ni Z, Chen S G, Yuan J H, *et al.* 2014a. Research on anomalies variation of lithosphere magnetic field before and after Lushan $M_{\text{s}}7.0$ earthquake [J]. Journal of Seismological Research, 37(1): 61 – 65. (in Chinese)
- 倪喆, 袁洁浩, 王桢, 等. 2014b. 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[J]. 地震研究, 37(4): 537 – 541.
- Ni Z, Yuan J H, Wang C, *et al.* 2014b. Analysis of local anomalous characteristics of lithospheric magnetic field before Ludian $M6.5$ and Yongshan $M5.0$ earthquake in Yunnan in 2014 [J]. Journal of Seismological Research, 37(4): 537 – 541. (in Chinese)
- 宋成科. 2021. 九寨沟 $M_{\text{s}}7.0$ 地震前地磁异常[J]. 地震工程学报, 43(5): 1037 – 1044.
- Song C K. 2021. Geomagnetic anomalies prior to the Jiuzhaigou $M_{\text{s}}7.0$ earthquake in 2017 [J]. China Earthquake Engineering Journal, 43

- (5):1037–1044. (in Chinese)
- 苏树朋,李博,张海洋,等. 2020. 晋冀蒙与京津冀地区高空间分辨率岩石圈磁场地震地质特征初步研究[J]. 震灾防御技术,15(2):463–471.
- Su S P, L B, Zhang H Y, *et al.* 2020. Preliminary study on the seismogeological characteristics of the high spatial resolution lithospheric magnetic field in Jin Ji Meng and Jing Jin Ji regions[J]. Technology for Earthquake Disaster Prevention, 15(2):463–471. (in Chinese)
- 苏树朋,赵慧琴,李博,等. 2017. 大华北地区岩石圈磁场空间分布与地震地质特征[J]. 地震研究,40(3):345–351.
- Su S P, Zhao H Q, Li B, *et al.* 2017. Spatial distribution and seismic geological characteristics of the lithospheric magnetic field in the North China Region[J]. Journal of Seismological Research, 40(3):345–351. (in Chinese)
- 谈昕,张毅,王雷,等. 2015. GSM–19T 质子磁力仪性能测试[J]. 地震地磁观测与研究,36(5):40–45.
- Tan X, Zhang Y, Wang L, *et al.* 2015. Main performance test and analysis of GSM–19T proton magnetometer[J]. Seismological and Geomagnetic Observation and Research, 36(5):40–45. (in Chinese)
- 唐方头. 2003. 华北地块近期构造变形和强震活动特征研究[D]. 北京:中国地震局地质研究所.
- Tang F T. 2003. A study on the characteristics of recent tectonic deformation and earthquake activity in North China[D]. Beijing: Institute of Geology, China Earthquake Administration. (in Chinese)
- 王朝景,刘德强,苏树朋,等. 2021. 2018 年永清 $M_w 4.3$ 地震前后岩石圈磁场变化特征[J]. 地震地磁观测与研究,42(3):129–136.
- Wang Z J, Liu D Q, Su S P, *et al.* 2021. Analysis of lithospheric geomagnetic field variation characteristics before and after the Yongqing $M_w 4.3$ earthquake in 2018[J]. Seismological and Geomagnetic Observation and Research, 42(3):129–136. (in Chinese)
- 王想,周依,陈婷,等. 2021. 2020 年 7 月 12 日唐山 5.1 级地震分析[J]. 地震工程学报,43(6):1280–1287.
- Wang X, Zhou Y, Chen T, *et al.* 2021. Analysis of the Tangshan $M_5.1$ earthquake on July 12, 2020[J]. China Earthquake Engineering Journal, 43(6):1280–1287. (in Chinese)
- 王晓山. 2017. 华北平原块体地壳应力场与强震震源断层参数的研究[D]. 北京:中国地震局地球物理研究所.
- Wang X S. 2017. Study on the crustal stress field and the focal fault parameter of large earthquake of North China Plain block[D]. Beijing: Institute of Geophysics, China Earthquake Administration. (in Chinese)
- 吴晶,王辉,曹建玲,等. 2011. 地壳介质非均匀性对华北地区强震活动的影响[J]. 地球物理学报,54(8):2023–2033.
- Wu J, Wang H, Cao J L, *et al.* 2011. Influence of crustal inhomogeneity on seismicity in North China[J]. Chinese Journal of Geophysics, 54(8):2023–2033. (in Chinese)
- 杨树新,姚瑞,崔效锋,等. 2012. 中国大陆与各活动地块、南北地震带实测应力特征分析[J]. 地球物理学报,55(12):4207–4217.
- Yang S X, Yao R, Cui X F, *et al.* 2012. Analysis of the characteristics of measured stress in Chinese mainland and its active blocks and North–South seismic belt[J]. Chinese Journal of Geophysics, 55(12):4207–4217. (in Chinese)
- 杨学慧,王赞辉,姚休义. 2020. 云南地区岩石圈磁场特征及震磁性[J]. 地震研究,43(4):745–750.
- Yang X H, Wang Y H, Yao X Y. 2020. Characteristics of lithospheric magnetic field and seismomagnetic characteristics in Yunnan area[J]. Journal of Seismological Research, 43(4):745–750. (in Chinese)
- 余志伟. 1987. 一种新的地质曲面插值计算方法——曲面样条函数方法[J]. 中国矿业学院学报,16(4):69–76.
- Yu Z W. 1987. A new method for interpolating geological surface[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 16(4):69–76. (in Chinese)
- 张海洋,苏树朋,赵慧琴. 2022. 2022 年青海门源 6.9 级地震前岩石圈磁场异常变化分析[J]. 地震工程学报,44(3):735–743.
- Zhang H Y, Su S P, Zhao H Q, *et al.* 2022. Variation of lithospheric magnetic field anomalies before the Menyuan, Qinghai $M_6.9$ earthquake in 2022[J]. China Earthquake Engineering Journal, 44(3):735–743. (in Chinese)
- 张培震,邓超东,张国民,等. 2003. 中国大陆的强震活动与活动地块[J]. 中国科学:地球科学,33(S1):12–20.
- Zhang P Z, Deng Q D, Zhang G M, *et al.* 2003. Active tectonic blocks and strong earthquakes in the continent of China[J]. Scientia Sinica Terrae, 33(S1):12–20. (in Chinese)
- 张瑜,陈双贵,马辉源,等. 2023. 2019—2021 年门源 $M_5.9$ 地震岩石圈磁场异常回溯分析[J]. 华南地震,43(1):46–54.
- Zhang Y, Chen S G, Ma H Y, *et al.* 2023. Retrospective analysis of lithospheric magnetic field anomalies of Menyuan $M_5.9$ earthquake from 2019 to 2021[J]. South China Journal of Seismology, 43(1):46–54. (in Chinese)
- 周依,王想,孙丽娜. 2022. 2020–07–12 河北唐山 $M_5.1$ 地震震源参数及发震构造分析[J]. 大地测量与地球动力学,42(2):172–175.
- Zhou Y, Wang X, Sun L N, *et al.* Source parameters and seismogenic structure analysis of the July 12, 2020 Tangshan $M_5.1$ Earthquake[J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 42(2):172–175. (in Chinese)
- 朱琳,李腾飞,石富强,等. 2021. 1976 年唐山强震群震后库仑应力演化及其与 2020 年古冶 5.1 级地震的关系[J]. 地震研究,44(1):1–8.
- Zhu L, Li T F, Shi F Q, *et al.* 2021. The Coulomb stress evolution after the 1976 Tangshan strong earthquake swarm and its relationship with the 2020 Guye $M_5.1$ earthquake[J]. Journal of Seismological Research, 44(1):1–8. (in Chinese)
- 朱守彪,张培震,石耀霖. 2010. 华北盆地强震孕育的动力学机制研究[J]. 地球物理学报,53(6):1409–1417.

- Zhu S B, Zhang P Z, Shi Y L. 2010. A study on the mechanisms of strong earthquake occurrence in the North China Basin [J]. Chinese Journal of Geophysics, 53(6): 1409 – 1417. (in Chinese)
- Achache J, Abtout A, Le Mouél J – L. 1987. The downward continuation of magsat crustal anomaly field over southeast asia [J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 92(B11): 11584 – 11596.
- Kang G, Gao G, Bai C, *et al.* 2012. Characteristics of the crustal magnetic anomaly and regional tectonics in the Qinghai – Tibet Plateau and the adjacent areas [J]. Scientia Sinica Terrae, 55(6): 1028 – 1036.
- Nagata T. 1970. Basic magnetic properties of rocks under the effects of mechanical stresses [J]. Tectonophysics, 9(2): 167 – 195.
- Ohnaka M, Kinoshita H. 1968. Effects of uniaxial compression on remanent magnetization [J]. Journal of Geomagnetism and Geoelectricity, 20(2): 93 – 99.
- Thébault E, Purucker M, Whaler K A, *et al.* 2010. The magnetic field of the earth's lithosphere [J]. Space Science Reviews, 155(1 – 4): 95 – 127.
- Wang Z D, Chen B, Yuan J H. 2020. Taylor polynomial model of the geomagnetic field in an underground gas storage area [J]. Geomagnetism and Aeronomy, 60(3): 373 – 380.

Analysis of the Seismomagnetic Anomaly of the Tangshan $M_{\text{s}}5.1$ Earthquake Based on the Accumulative Variation of the Lithospheric Magnetic Field

WANG Zhaojing, LI Bo, SU Shupeng

(1. Hebei Hongshan National Observatory on Thick Sediments and Seismic Hazards, Xingtai 054000, Hebei, China;

2. Mobile Survey Team of Hebei Earthquake Agency, Baoding 071000, Hebei, China)

Abstract

Based on 6 periods of mobile geomagnetic vector measurement from 2016 to 2021 in Hebei and its surrounding areas, this paper builds a model to illustrate the variation of the lithospheric magnetic field 4 years, 3 years, 2 years and 1 year before the July 12, 2020 Tangshan $M_{\text{s}}5.1$ earthquake, and 1 year after the earthquake. The temporal and spatial evolution of the total strength, the magnetic declination, the magnetic inclination and the horizontal vector of the lithospheric magnetic field in the study area are compared and analyzed. The results show that: ① The 4 – year and 3 – year cumulative variation of the 4 elements of the lithospheric magnetic field before the Tangshan $M_{\text{s}}5.1$ earthquake showed a significant trend in total in the region, which had a certain correlation with the geotectonic settings. Two – year and 1 – year variation of the 4 elements of the lithospheric magnetic field before the Tangshan $M_{\text{s}}5.1$ earthquake showed significant characteristics in some parts of the study area. Four years, 3 years, 2 years, and 1 year before the Tangshan $M_{\text{s}}5.1$ earthquake, the variation of the total strength, the magnetic declination, and the magnetic inclination near the epicenter of the earthquake is insignificant, and most of the values distributed along the zero – value line. The horizontal vector showed continuous and weak variation. After the Tangshan $M_{\text{s}}5.1$ earthquake, the magnetic declination near the epicenter varied obviously, and so did the horizontal vector. ② The temporal and spatial evolution of the lithospheric magnetic field variation before the earthquake showed that when approaching the original time of the Tangshan $M_{\text{s}}5.1$ earthquake, the trend of the spatial distribution of the local positive and negative variation would replace the overall variation trend in the region.

Keywords: mobile geomagnetics; seismomagnetic anomaly; accumulative variation; the lithosphere magnetic field