

杨悦, 田鹏, 白仙富. 基于低成本地磁场观测台阵的滇西南及邻区地震地磁Z分量异常分析[J]. 华南地震, 2026, 46(2): 10-21. [YANG Yue, TIAN Peng, BAI Xianfu. Analysis of Geomagnetic Z-Component Anomalies Associated with Earthquakes in Southwestern Yunnan and Its Adjacent Regions Based on Low-Cost Geomagnetic Observation Array[J]. South China journal of seismology, 2026, 46(2): 10-21]

基于低成本地磁场观测台阵的滇西南及 邻区地震地磁Z分量异常分析

杨悦, 田鹏, 白仙富

(云南省地震局, 昆明 650201)

摘要: 为提高滇西南地区的地震预报效能, 天津市地震局、天津大学和云南省地震局在临沧市地区布设了低成本地磁场观测台阵, 实现了区域地磁场的密集观测。研究基于临沧市低成本地磁场观测台阵的观测数据, 利用加卸载响应比法和相关性分析法分析了滇西南及邻区2023年8月—2025年4月的显著地震事件发生前的地磁Z分量变化特征, 结果显示: 在排除仪器故障、环境干扰、太阳活动等影响因素的前提下, 距离地磁场观测站点500 km以内的10次4.0级以上地震中有6次地震震前2~23天Z分量加卸载响应比出现异常, 超过阈值, 多个站点日变幅度出现不同程度的减小, 日变趋势被“压平”, 且通常持续2~3天; 距离地磁场观测站点20 km以内的2次3.0级小地震震前4~6天Z分量日变相关性降低, 低于阈值, 单个站点的日变趋势出现“反相”。滇西南及邻区地震地磁Z分量异常提取证明了低成本地磁场观测可为一定区域范围内地震的短临预报提供参考。

关键词: 低成本地磁场观测台阵; 加卸载响应比; 日变相关性; 地震预报

中图分类号: P315.72+1

文献标识码: A

文章编号: 1001-8662(2026)02-0010-12

DOI: 10.13512/j.hndz.2026.02.02

Analysis of Geomagnetic Z-Component Anomalies Associated with Earthquakes in Southwestern Yunnan and Its Adjacent Regions Based on Low-Cost Geomagnetic Observation Array

YANG Yue, TIAN Peng, BAI Xianfu

(Yunnan Earthquake Agency, Kunming 650201, China)

Abstract: To improve earthquake forecasting efficiency in southwestern Yunnan, Tianjin Earthquake Agency, Tianjin University, and Yunnan Earthquake Agency have deployed a low-cost geomagnetic field observation array

收稿日期: 2025-08-05

基金项目: 云南省地震局青年地震科学基金资助项目(2024K07); 云南省中青年学术和技术带头人后备人才项目(202405AC350051)联合资助。

作者简介: 杨悦(1996-), 女, 助理工程师, 主要从事地震地质、地震地磁观测与研究工作。

E-mail: yangyue2412@163.com

通信作者: 白仙富(1979-), 男, 正高级工程师, 主要从事区域防灾减灾救灾基础理论与关键技术、高原地震次生灾害防治与山地环境保育等领域研究工作。

E-mail: xf_bai520@163.com

in Lincang City, achieving the intensive observation of regional geomagnetic field. Based on the observation data of low-cost geomagnetic field observation array in Lincang City, this paper analyzed the variation characteristics of geomagnetic Z -component before the significant earthquakes in southwest Yunnan and its adjacent areas from August 2023 to April 2025 by using the load-unload response ratio method and correlation analysis method. The results show that under the premise of eliminating instrument failure, environmental interference, solar activity and other influencing factors, 6 of the 10 earthquakes with $M \geq 4.0$ within 500 km from the geomagnetic field observation station have abnormal Z -component load and unload response ratio in 2–23 days before the earthquake, which exceeds the threshold. The daily variation amplitude of multiple stations decreases to varying degrees, and the daily variation trend is “flattened”, and usually lasts for 2–3 days. The daily variation correlation of Z -component in 4–6 days before two $M3.0$ small earthquakes within 20 km from the geomagnetic field observation station is lower than the threshold value, along with trend inversions at individual stations. The extraction of Z -component geomagnetic anomalies associated with seismic activity in southwestern Yunnan and its adjacent areas proves that low-cost geomagnetic field observation can provide reference for short-term and imminent earthquake forecasting in a certain area.

Keywords: Low-cost geomagnetic observation array; Load-unload response ratio; Daily variation correlation; Earthquake forecasting

0 引言

地磁观测是地震前兆监测的重要手段之一,通过分析磁场变化特征,可以揭示潜在的地震活动信号。强震发生前由于应力作用,地下介质的物理特性如电导率会发生改变,从而引起磁场的变化,“压磁效应”、“膨胀磁效应”、“感应磁效应”等解释震磁关系的理论也被相继提出^[1–4]。然而,临震前的磁场异常却时常难以捕捉,时空分布规律难以探讨,其中一个原因是目前利用地磁观测数据分析震前异常普遍依赖于固定台站地磁观测仪器,如磁通门磁力仪、质子旋进式磁力仪^[5],但是这些专业的地磁观测成本高,对观测环境要求严格,无法达到理想的成网成片观测需求,空间分辨率低;同时流动地磁观测需要投入大量人力成本和时间成本,每年只开展一到两次,时间分辨率低。时空分辨率同时制约了地磁研究的开展,利用地磁观测进行地震前兆观测,提取地震前兆异常信息也变得十分困难。为提升地磁场监测效能,天津市地震局、天津大学研发了低成本地磁观测仪器,与云南省地震局开展合作,在地震频发的滇西南地区进行磁场变化实时监测。

地磁日变化是地震预报研究中长期关注的一个重要指标,由距离地面约 100 km 高空中的电离层电流体系引起,其中 Sq 电流体系是主要场源,电离层中的粒子在太阳辐射和日月引力的共同作用下,发生对流运动和潮汐运动,在地面产生地磁日

变化^[6–8]。地磁 Z 分量可以近似代表 Sq 电流体系的位型、强度及空间分布,对局部区域的磁场变化表现得更加敏感^[9–10]。通常认为,地磁 Z 分量与地下介质的关系最密切,当区域地下介质电导率等电磁性质改变时,地磁 Z 分量日变曲线会出现幅度和相位的改变^[11–12]。

随着地磁观测技术的发展和大量震例的深入研究,我国地震预报研究人员先后提出了多种有效的地磁 Z 分量日变化异常分析方法,其中加卸载响应比法、相关性分析法作为地震中短期异常分析方法应用于我国的地震预报工作,其技术思路都是基于地磁 Z 分量日变化在一定空间范围内具有良好的同步性,通过识别地磁 Z 分量异常来研究地磁观测的时空变化特征与地震的关系。近年来,加卸载响应比法在分析上海及邻区 4.0 级以上地震、南北地震带及邻区显著地震事件中得到了验证^[12–13];相关性分析法被有效应用于四川地区 6.0 级以上地震、豫南及邻区地震震前异常提取^[14–15]。

本文选取滇西南及邻区($95^{\circ} \sim 102^{\circ} \text{E}$, $20^{\circ} \sim 25^{\circ} \text{N}$)2023 年 8 月—2025 年 4 月 4.0 级以上地震事件为一组研究震例。已有研究证明,距离低成本地磁场观测站点 20 km 以内的小震震前观测数据出现异常变化^[16],因此同时选择相同时间段内距离观测站点 20 km 左右的 3.0 级地震为另一组研究震例,利用低成本地磁观测台阵数据通过地磁 Z 分量加卸载响应比、日变相关性分析方法对低成本地磁场观测数据进行分析,提取震前异常。

1 区域构造背景

滇西南及邻区在构造位置上属于滇缅地块,位于青藏高原东南缘,东与川滇菱形块体相接,西北与印度板块东北部相接,新生代以来持续受印度板块对欧亚板块的挤压,形成了以红河断裂、实皆断裂和莫边府断裂为主要控制性边界、内部为一系列NE向和NW向复活或新生断裂带以及大规模水平走滑运动为主要特征的构造格局,是我国大陆构造活动最强烈的地区之一^[17-20]。断裂体系中NE向左旋走滑断裂主要有南汀河断裂、孟连断裂和打洛断裂等;NW向右旋走滑断裂主要有红河断裂、无量山断裂和南华—楚雄断裂等(图1)。研究区地震的

孕育与发生受到了复杂构造体系的强烈控制,该区域因此成为地震活动频发的地带,2001年以来发生过10次6.0级以上地震,其中有3次7.0级以上地震(图1)。2025年3月28日的缅甸7.9级地震是近年来震级最大的一次地震事件,发震构造为实皆断裂,这是一条近SN向的右旋走滑断裂(图1)。地质学研究显示,自中新世形成以来,其右旋位错总量已有330~450 km,基于此粗略估算实皆断裂自中新世以来的平均滑动速率约为14~20 mm/a,是青藏高原东南缘地区现今滑移速率最高的活动断裂^[21-23],断裂1930年以来发生过7次7级以上地震,此次7.9级地震发生在实皆断裂的地震空区上,释放了长期以来所积累的应力。

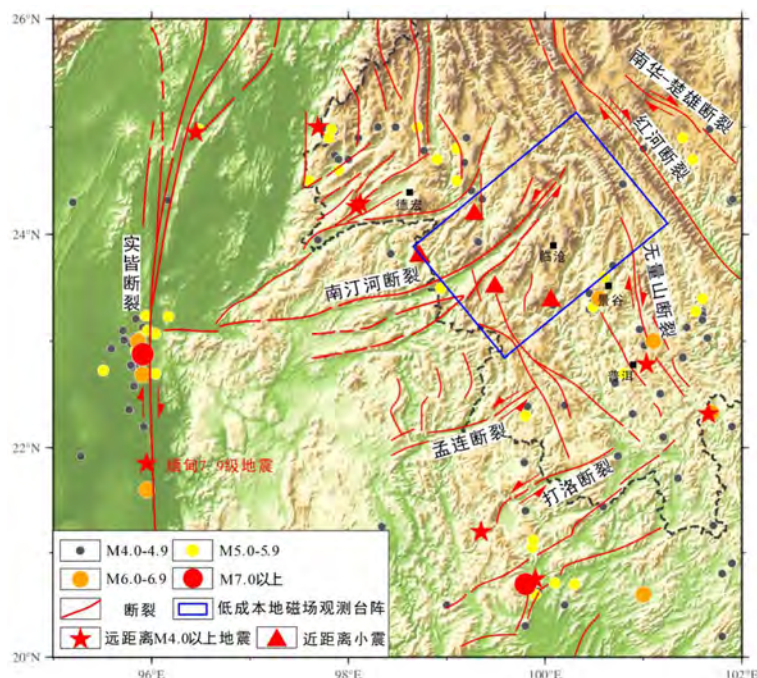


图1 区域构造图(2001年以来4.0级以上地震分布,数据来自中国地震台网目录)

Fig. 1 Regional tectonic map (distribution of earthquakes with $M \geq 4.0$ since 2000, data from the China Earthquake Networks Center)

2 低成本地磁场观测台阵

低成本地磁场监测设备于2021年3月完成开发测试工作,具备了连续自动化观测能力和较强的环境适应性,前期在天津地区建成了高密度的地磁场观测台网^[16]。自2023年5月在临沧地区布设,8月开始对区域的磁场变化实时监测,目前已有22个观测站点,站点分布见图2。低成本地磁场监测设备的系统主要由监测感知功能区、通信功

能区和系统服务管理区三部分组成。监测感知功能区包括RM3100三轴磁传感器、重力加速度传感器和温度与气压监测传感器,实现对地磁场、重力加速度和环境要素的实时采集;通信功能区采用窄带物联网(NB-IoT),实现了基于用户数据报协议(UDP)的数据通信等功能,并提供精准的授时服务;系统管理区包括能源管理模块、存储管理模块和时间管理模块,通过接口连接控制外围硬件单元,实现对设备的能源使用管理和对采集数据的本地存储。

低本地磁场监测设备的核心部件是RM3100三轴磁传感器,其测量范围为 $-800\sim 800\ \mu\text{T}$,灵敏度为 $10\ \text{nT}$,通过SPI接口进行通信^[24],利用电磁感应原理,分别测量 X 、 Y 、 Z 轴上的磁场变化,当传感器感应到一个外部的磁场时,磁性发生变化,从而改变传感器的电性能参数,产生电信号,电子系统把三个方向的磁场变化数据综合起来,将其转换成数字信号^[25]。

在研制低本地磁场监测设备时,为降低设备内部通信模组和供电模组产生的电磁波对磁传感器的影响,在设备上加装了过渡杆,将磁传感器安装于过渡杆顶端作为探头,整根过渡杆和探头采用PVC管进行封装保护^[16]。地磁场监测设备主要安装部署在学校、政府和现有地震台站的屋顶,能够隔离非固定铁磁性物质的侵入,同时保证太阳能充电需求,安装方式主要有壁挂式、落地式和抱杆式,便于野外快速安装。仪器观测所得到的是 X 分量、 Y 分量、 Z 分量的数据,采样间隔为 $30\ \text{s}$,数据通信采用无线方式,实时采集并传输,实现了无人值守的连续观测。

相较于传统地磁观测追求高精度与长期连续记录,设备往往较为昂贵、布点稀疏,多在固定观测台站运行,低本地磁场监测设备则强调高密度台网覆盖与快速部署,运用窄带物联网(NB-IoT)、

太阳能供电与能源管理系统等新技术,在保证满足研究需求的精度前提下大幅降低成本,且安装便捷、环境适应性强;具备多参数综合监测能力,可同时采集地磁、重力、温度、气压等数据,有助于异常综合判别分析。

3 数据和方法

目前布设的低本地磁场观测台阵中12个站点于2023年8月布设完成,运行稳定,其余10个站点于2025年2月布设完成,观测时间短,可用于分析震例的数据较少,且安装初期运行尚不稳定,数据时有突跳,因此选择前期的12个站点数据进行分析(图2)。地磁数据中的随机噪声会造成地磁信号的随机起伏和淹没,去噪效果直接或间接地影响着后续的数据处理与分析。小波变换是地磁观测数据处理中常用的一种方法,可以将频率较高的扰动变化和随机噪声分离^[26-29],本文采用常用于处理地磁日变观测数据的db5小波对数据进行分解并剔除数据中一阶至三阶的高频信息,保留较低频的地磁日变信息,小波消噪前后数据对比见图3,利用小波分解后的第四层低频数据做后续的加卸载响应比和日变相关系数计算。

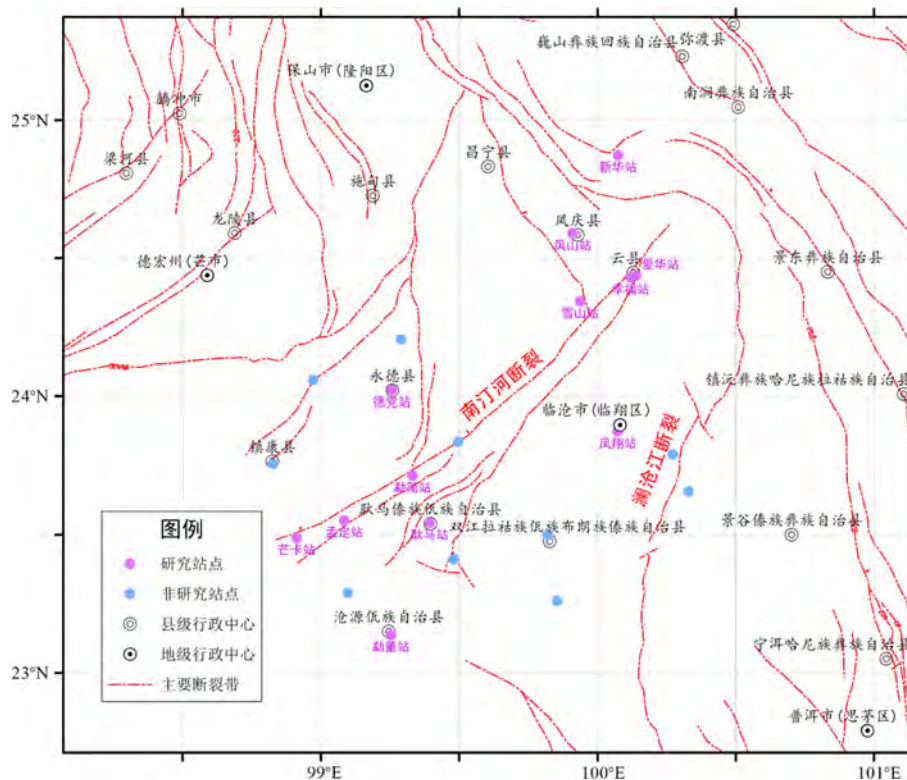


图2 临沧地区低本地磁场观测台阵站点分布图

Fig.2 Distribution of low-cost geomagnetic observation stations in Lincang region

3.1 加卸载响应比

地磁日变化的强弱用日变幅度来表达,即日变化最大值与最小值差^[10]。日变幅度前后几天的差异或者来自外空变化磁场的改变,或者来自地壳介质电导率的改变,而后者则可能与地震有关。地磁加卸载响应比的定义为:

$$P(Z) = \frac{R_z(\max)}{R_z(\min)} \quad (1)$$

式(1)中, $R_z(\max)$ 为地磁 Z 分量日变化幅度极大值,该日期为加载日; $R_z(\min)$ 为 $R_z(\max)$ 出现之后的第一个极小值,该日期为卸载日。根据前人研究经验,设定阈值为 3.0,若加卸载响应比超过阈值,则认为出现异常。

3.2 日变相关性

在一个不大的范围内,磁静日 Z 分量日变化基

本是同步的,采用相关系数 R 可反映两个观测站点地磁日变化的同步性,如果一个站点处于“磁异常区”,则可能会造成地磁日变畸变,站点间的相关系数 R 变小^[30]。本文对相关系数 R 的计算按照以下步骤进行:①以各站点每天北京时间 00:00—03:00 的 Z 分量均值作为当日基值;②以 24 个整点值减去当日基值的差值作为地磁日变值;③根据式(2)利用 24 个日变值计算当日相关系数 R 。

$$R = \frac{\sum (X_i - \bar{X}) \sum (Y_i - \bar{Y})}{\sqrt{\sum (X_i - \bar{X})^2 \cdot \sum (Y_i - \bar{Y})^2}} \quad (2)$$

$$\bar{X} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N X_i, \quad \bar{Y} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N Y_i \quad (3)$$

式(2)、(3)中, R 为相关系数, $\bar{X}$ 、 $\bar{Y}$ 分别为两个台站的地磁日变值均值, X_i 、 Y_i 分别为两个台站某一时段的地磁日变值。以日变相关系数的平均值减去两倍标准差($\bar{R} - 2\sigma$)为阈值,若相关系数 R 低于阈值,则认为出现异常。

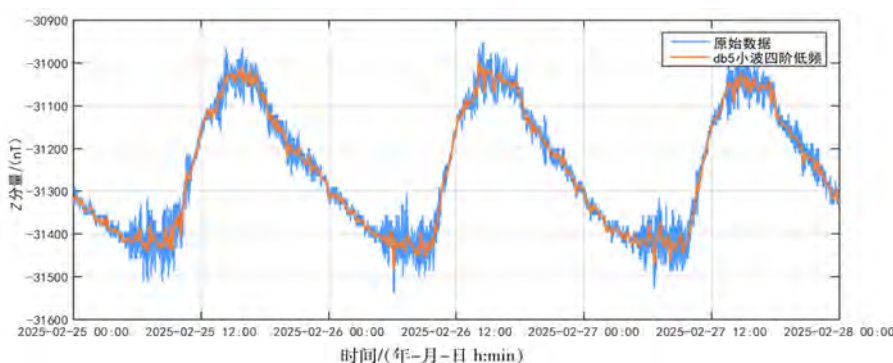


图3 原始数据与db5小波分解后的四阶低频信号对比图

Fig.3 Comparison between the original geomagnetic Z -component signal and the fourth-order low-frequency signal derived from db5 wavelet decomposition

4 结果分析

滇西南及邻区 2023 年 8 月—2025 年 4 月发生的 4.0 级以上地震距离台阵的最小震中距都超过了 100 km,而 3.0 级地震的最小震中距在 20 km 左右,因此根据震级和震中距,把所选震例划分为远距离 4.0 级以上地震和近距离小震(图 1)。本文所分析的远距离 4.0 级以上地震共有 10 次(表 1),而近距离小震分别是 2023 年 9 月 3 日耿马 3.3 级地震、2023 年 10 月 20 日永德 3.1 级地震、2024 年 9 月 23 日双江 3.6 级地震、2025 年 3 月 28 日镇康 3.0 级地震,但双江 3.6 级地震和镇康 3.0 级地震前后由于距离最

近的仪器故障,未能记录到观测数据,因此本文主要分析耿马 3.3 级地震和永德 3.1 级地震。

4.1 远距离 4.0 级以上地震

排除仪器故障、环境干扰、太阳活动等影响因素,10 次远距离地震中有 6 次地震事件前出现加卸载响应比的异常,对应率为 60%(表 1),本文主要对其中 4 次地震的异常进行分析:2023 年 11 月 18 日,10 个站点的加卸载响应比同步超过阈值 3.0,占比达 83%,异常出现后 15 天发生了芒市 5.0 级地震(图 4);2023 年 12 月 8 日,8 个站点的加卸载响应比同步超过阈值 3.0,占比为 67%,异常出现后 23 天发生了缅甸 5.0 级地震(图 4);2024 年 7 月 29

日, 4个站点的加卸载响应比同步超过阈值3.0, 异常出现后的22天发生了思茅4.6级地震(图5); 2025年3月19—20日, 地磁观测站点数据日变幅度同步发生了不同程度的降低, 其中6个站点的加卸载响应比超过阈值3.0, 占比50%, 异常出现后9

天发生了缅甸7.9级地震(图6)。4次地震事件的原始地磁Z分量时序特征显示震前异常站点的日变幅度同步显著减小, 日变趋势被“压平”, 异常持续2~3天(图7)。

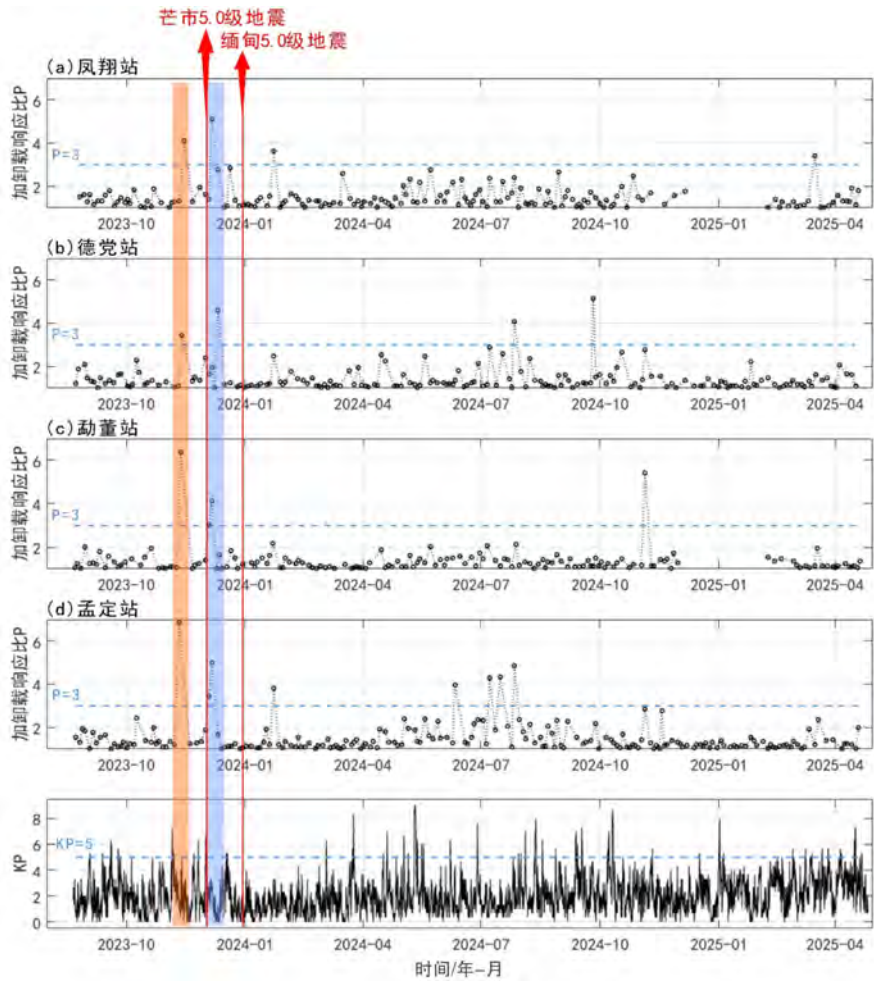


图4 芒市5.0级地震及缅甸5.0级地震加卸载响应比异常典型站点

Fig.4 Representative stations with anomalous load-unload response ratios for the Mangshi *M*5.0 earthquake and Myanmar *M*5.0 earthquake

进一步分析发现, 异常程度与震中距成反相关关系, 芒市5.0级地震与缅甸5.0级地震震级相同, 而芒市地震距离异常站点的最大震中距较短, 但出现异常的仪器数量更多, 加卸载响应比也更大; 异常程度与震级成正相关关系, 缅甸7.9级地震虽然距离异常站点的最大震中距达514 km, 但仍有一半的仪器出现异常。

4.2 近距离小震

耿马3.3级地震和永德3.1级发生前后, 震中附近观测站点的仪器记录数据连续、完整, 采用地磁Z分量日变相关性方法分析两个小震。幸福

站、凤翔站、孟定站分别位于台阵的不同方向, 在数据选取时段内仪器运行较为稳定, 选取这三个站点作为参考站; 耿马站距离耿马3.3级地震震中10.5 km, 德党站距离永德3.1级地震震中18.8 km, 因此选取这两个站点分别作为两个小震的分析站。

排除仪器故障、环境干扰、太阳活动等影响因素, 耿马站与三个参考站的Z分量日变相关系数在8月28日同步出现了低于阈值的异常现象, 其中与孟定站的日变相关系数变为负值, 说明两个站点的地磁日变成反相关, 异常出现后的6天发生耿马3.3级地震(表2, 图8)。分析耿马站的原始地

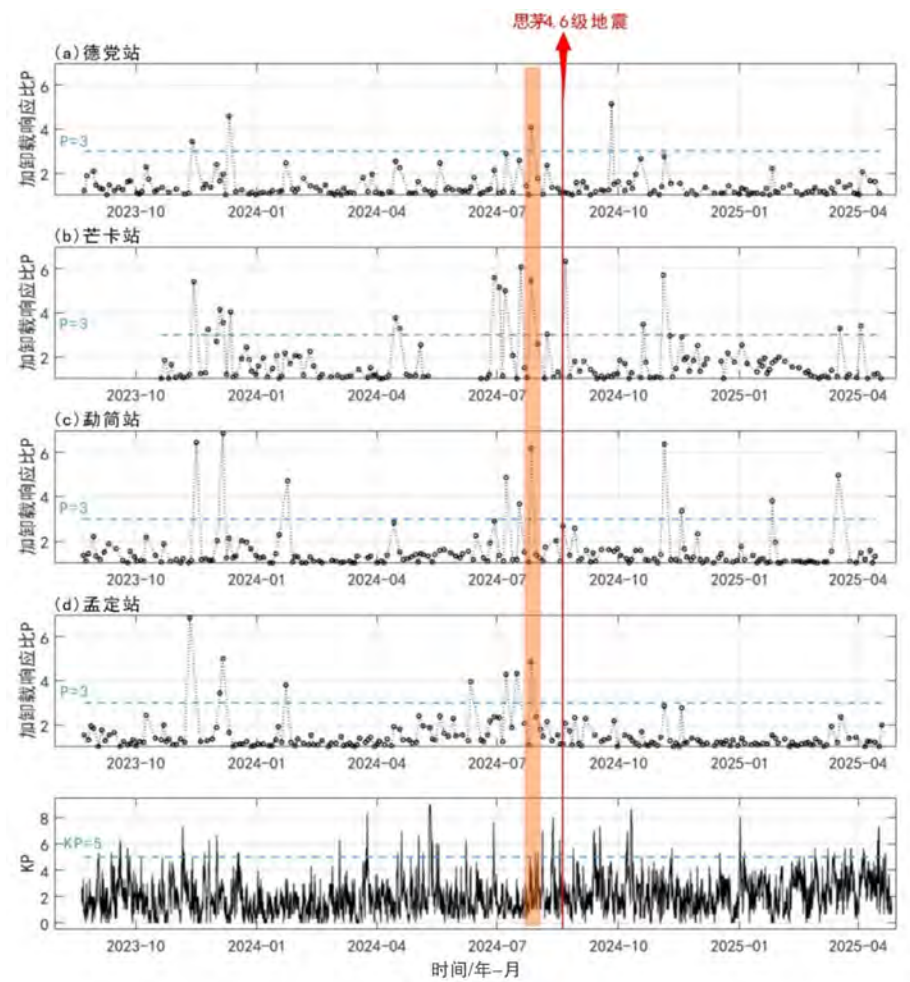


图5 思茅4.6级地震加卸载响应比异常典型站点

Fig.5 Representative stations with anomalous load-unload response ratios for the Simao *M*4.6 earthquake

表1 研究区2023年8月—2025年4月4.0级以上地震加卸载响应比结算结果统计

Table 1 Statistical summary of calculated load-unload response ratios for earthquakes (*M*≥4.0) in the study area from Aug. 2023 to Apr. 2025

地震事件				是否 异常	最大加卸 载响应比	异常时段	异常提 前天数	最大震中 距/(km)	异常 站点数
序号	发震时间/年-月-日	震级/ <i>M</i>	震中						
1	2023-11-17	5.9	缅甸	否	—	—	—	—	—
2	2023-12-02	5.0	芒市	是	13.7	2023-11-17—18	15	210	10
3	2023-12-30	5.0	缅甸	是	6.9	2023-12-07—08	23	386	8
4	2024-07-19	4.0	芒市	是	5.0	2024-07-10—12	9	139	3
5	2024-08-20	4.6	思茅	是	6.2	2024-07-29—30	22	230	4
6	2024-10-14	4.2	缅甸	否	—	—	—	—	—
7	2024-11-08	4.2	缅甸	是	7.9	2024-11-06—08	2	460	7
8	2024-12-04	4	老挝	否	—	—	—	—	—
9	2025-03-28	7.9	缅甸	是	6.5	2025-03-19—21	9	514	6
10	2025-04-13	5.4	缅甸	否	—	—	—	—	—

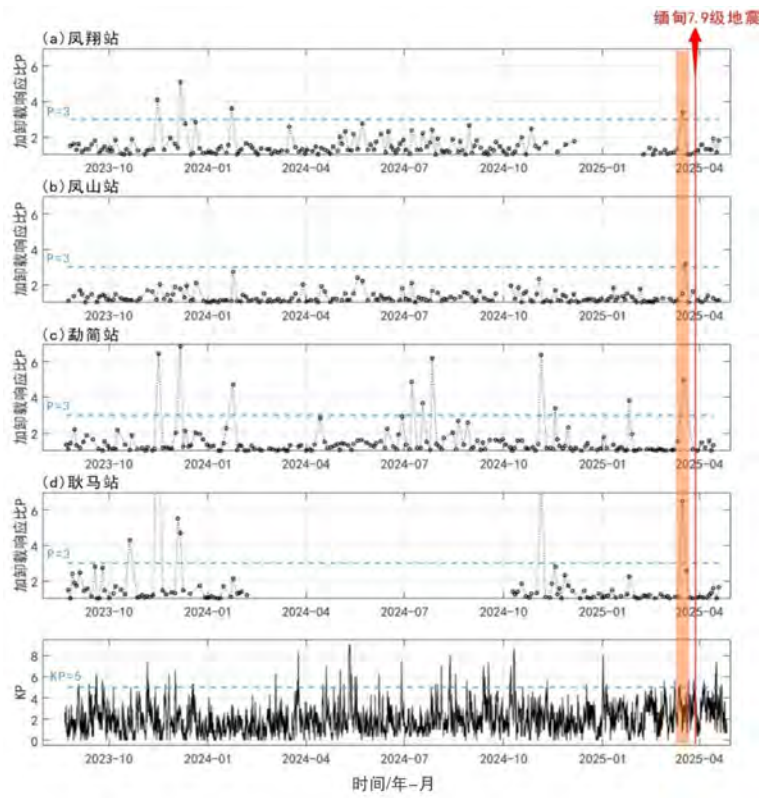


图6 缅甸7.9级地震加卸载响应比异常典型站点

Fig.6 Representative stations with anomalous load-unload response ratios for the Myanmar *M*7.9 earthquake

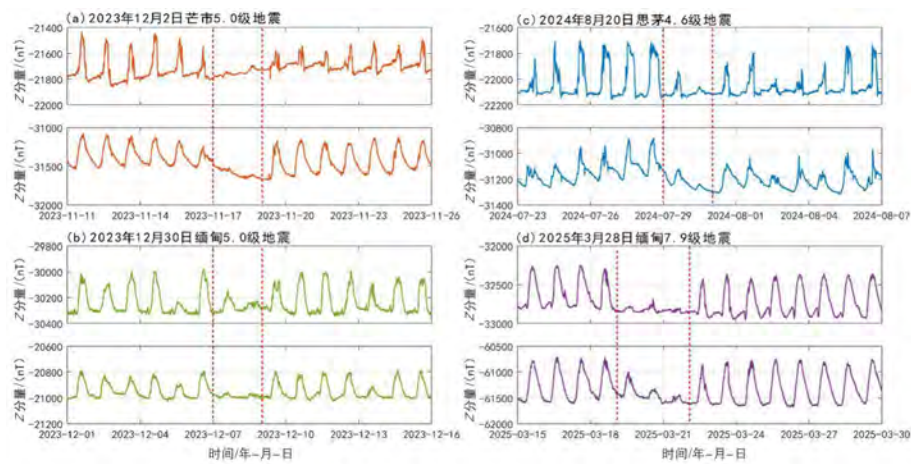


图7 4次地震事件原始地磁Z分量异常时序图

Fig.7 Time series of original geomagnetic *Z*-component anomalies for the four earthquakes

磁Z分量时序特征,发现在8月28日发生了日变化的畸变,出现“反相”现象,这也是导致与参考站日变相关系数为负值的原因,从变化趋势来看,地震之前日变发生整体的下降,地震之后又发生整体的上升(图10(a))。德党站与三个参考站的Z分量日变相关系数在10月16日同步出现了低于阈值的现象,异常出现后的4天发生了永德3.1级地震(表2,图9)。分析德党站原始地磁Z分量时序特征,发现10月16日地震前发生了日变化的畸变,出现

“反相”现象,导致德党站与参考站的日变相关性降低(图10(b))。

5 讨论

5.1 震前异常响应分析

2022年6月23日天津宝坻区发生了一次2.0级地震,天津低本地磁场观测网络捕捉到了此次微

表 2 耿马 3.3 级地震、永德 3.1 级地震地磁 Z 分量日变相关系数异常统计

Table 2 Statistical summary of anomalies in daily variation correlation coefficients of the geomagnetic Z-component for the Gengma M3.3 earthquake and Yongde M3.1 earthquake

分析站—参考站	背景值($\bar{R}$)	阈值($\bar{R} - 2\sigma$)	异常幅度
耿马站—幸福站	0.8371	0.5203	0.4699
耿马站—凤翔站	0.8150	0.5277	0.4386
耿马站—孟定站	0.8781	0.5154	1.0164
德党站—幸福站	0.8035	0.5144	0.3734
德党站—凤翔站	0.7091	0.4270	0.1812
德党站—孟定站	0.7731	0.5033	0.4107

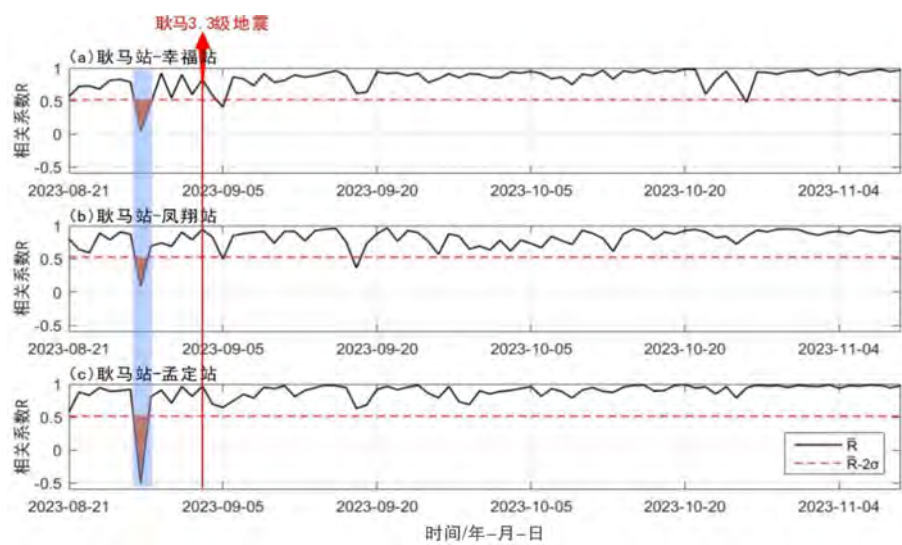


图 8 耿马 3.3 级地震地磁 Z 分量日变相关性异常

Fig.8 Daily variation correlation anomaly of geomagnetic Z-component for the Gengma M3.3 Earthquake

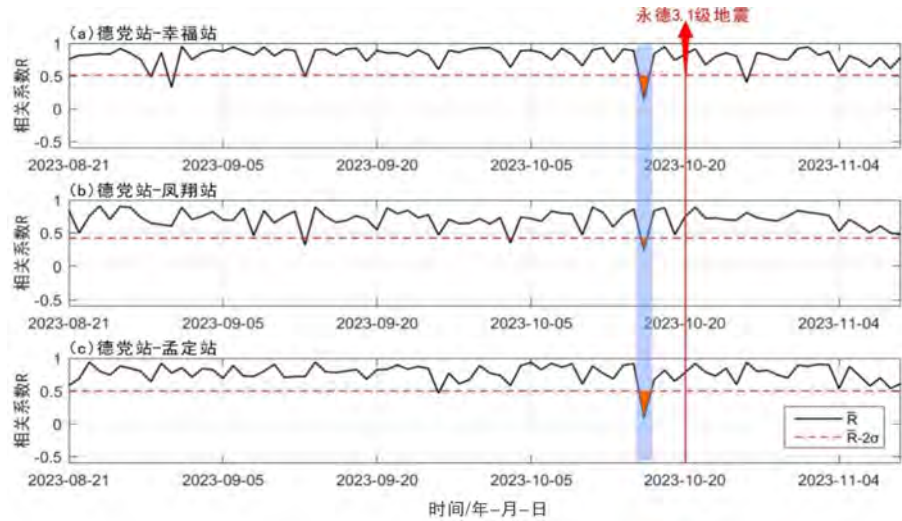


图 9 永德 3.1 级地震地磁 Z 分量日变相关性异常

Fig.9 Daily variation correlation anomaly of geomagnetic Z-component for the Yongde M3.1 earthquake

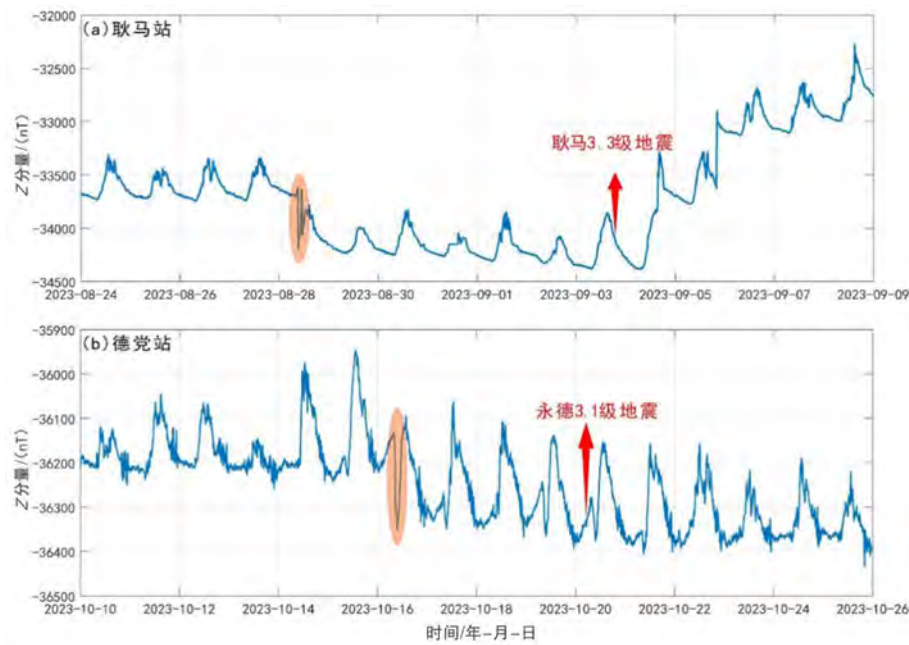


图10 耿马3.3级地震和永德3.1级地震原始地磁Z分量异常时序图

Fig.10 Time series of original geomagnetic Z-component anomalies for the Gengma $M3.3$ earthquake and Yongde $M3.1$ earthquake

小地震的震前异常,震前24~12 h期间,距离震中1.2 km的观测站点与距离震中5.8 km、20.1 km的观测站点数据变化趋势相反^[16]。对于滇西南及邻区的地震事件,低成本地磁场观测台阵表现出更为显著的异常。震例研究表明,在10次远距离4.0级以上地震中,有6次地震震前出现了明显的加卸载响应比异常,异常站点的最大震中距在139~514 km之间,表明低成本地磁场观测台阵对震中距500 km以内的地震具有一定的异常响应能力,多个站点的地磁Z分量日变幅度在震前2~23天出现减小,日变趋势被“压平”(表1,图5~7);而对于近距离的20 km以内的3.0级小震的异常形式有所不同,表现为震前4~6天站点间日变相关性降低,距离震中最近的站点的地磁Z分量日变形态出现“反相”(表2,图8~10)。耿马3.3级地震和永德3.1级地震震前的Z分量异常与天津2.0级地震相同,都表现为距离震中最近的站点数据与其他站点数据变化趋势相反,说明低成本地磁场观测数据的有效性和科学性。

5.2 地磁Z分量日变化异常机理

在一个相当大的范围内,磁静日各地磁观测站点的地磁垂直分量日变化形态是基本一致的,各站点之间的日变化有明显的相关性,冯志生等利用地磁低点位移法研究相关震例,认为当出现“反相”现象时,可能与地下电流分布出现畸变有关,即存

在感应电流的集中分布^[31-34]。当存在孕震区时,地质构造块体发生短期微动态活动,包括发生整体运动时,一些断层及其交汇区的电导性质将会发生变化,在电性方面一些平时并不贯通的断层发生贯通,从而有可能形成短期高导(低阻)通道,造成感应电流短期内在高导(低阻)通道内的集中,其实也是变化磁场在地球内部的感应电流重新分布的结果^[31]。

以上机理同样适用于解释震前地磁Z分量加卸载响应比和日变相关性异常。若某一区域地下存在感应电流,由于电磁感应产生的Z分量磁场幅度与地磁场正常日变化幅度相抵消或相叠加,导致某一时段的地磁Z分量日变幅度减小或增大,根据加卸载响应比的计算公式,分子变大或分母变小时,计算结果变大,超过一定阈值则认为出现异常。而当感应电流在两个站点之间通过时产生磁场,同样叠加在原有地磁Z分量上,则可能导致站点间的地磁Z分量日变化相关性下降,出现“反相”。地磁日变化感应电流为震前地磁Z分量异常提供了机理解释,但是目前并未对感应电流的分布特征及其与地震的关系作出定量分析。同时,由于低成本地磁观测台阵的空间区域较小,不能覆盖所研究的全部震例,无法给出异常与震中在空间上的全貌并探讨其对应的空间关系。

研究区所选的10次远距离4.0级以上地震中,6次地震震前部分地磁观测站点的地磁Z分量加卸

载响应比出现异常现象,但有的站点反应较为明显,且个别站点的反应异常突出,加卸载响应比值较高,如2023年12月2日芒市5.0级地震前,异常站点的加卸载响应比最大达到了13.7,远远超过所设阈值,而有的站点几乎没有反应或者反应不够显著,这可能与所处的地理位置、地震发震构造地下电性结构分布的差异性等相关因素有关^[12]。

文中地磁 Z 分量加卸载响应比和日变相关系数阈值是参考固定台站地磁观测所设,对于所研究的震例有较好的对应效果,但考虑到仪器性能的差异,在今后的研究中还需大量震例验证,设定适用于低成本地磁场观测仪器的阈值。在判定异常时需要对站点数量进行约束,从而提出更加适用于低成本地磁场观测台阵的地震预报指标。

5.3 低成本地磁场观测台阵的优势与局限性

低成本地磁场观测台阵具有覆盖广、免维护的优势,空间分辨率高,布设灵活,且无需像固定地磁台站依赖于严格的场地条件,通过高密度布设和实时监测,能够有效捕捉地磁场数据的时空变化特征,为地震前兆异常识别提供重要支撑,在地震频发区、潜在震源区建设密集性低成本地磁场观测台阵是未来震磁预报研究的一种有效途径。

然而,低成本地磁场观测仪器在仪器性能、抗干扰能力等方面与固定地磁台站专业的观测仪器存在一定的差距,主要是通过监测地磁场数据的相对变化来识别异常。通过计算一段时间内站点间 Z 分量日变空间相关系数,发现与固定地磁台站观测仪器的相关系数(通常高于0.9)相比偏低(表2)^[15, 30],这反映了低成本仪器在稳定性和抗环境干扰方面的局限性。

目前,由于低成本地磁场观测台阵投入运行时间尚短,累计的观测数据时长有限,尚未形成长期稳定的背景参考,受观测时间短的限制,能够用于分析的典型震例较少,尤其是中强以上地震事件不足,使得震前异常识别的规律性尚不明确,相关的判别指标仍处于初步探索阶段。

5.4 建设观测网络的必要性

缅甸7.9级地震的发生极有可能对中国云南境内的地壳应力状态产生影响,特别是在地质构造活动活跃的滇西南地区,当前已进入地震活动的紧张态势。区域内的南汀河断裂带作为滇西南重要的活动断裂之一,其构造应力积累与释放情况受到广泛

关注。研究表明,大震之后区域性断裂的响应可能表现为诱发性地震、地应力重新分布或地球物理场的异常变化^[35],因此,加强对该断裂带及其周边区域的地球物理监测具有重要意义。在此背景下,部署低成本地磁场观测台阵是提升前兆监测能力的经济有效手段,通过构建区域地磁监测网络,可以实现对地震前地磁异常的快速感知,为地震短临预报提供重要的数据支撑。随着观测技术的不断发展,低成本地磁观测系统有望在滇西南等地震高风险地区推广应用,提升地震灾害的综合防范能力。

6 结论与展望

本文基于临沧市地区的低成本地磁场观测台阵的观测数据,利用加卸载响应比法和相关性分析法分析了滇西南及邻区2023年8月—2025年4月显著地震事件发生前的地磁 Z 分量变化特征,得出以下结论:

(1)距离地磁场观测站点500 km以内的10次4.0级以上地震中有6次地震震前2~23天 Z 分量加卸载响应比出现异常,超过所设阈值,多个站点日变幅度出现不同程度的减小,日变趋势被“压平”。异常程度与震中距成反相关关系,与震级成正相关关系。

(2)距离地磁场观测站点20 km以内的2次3.0级小震震前4~6天 Z 分量日变相关性降低,分析站与参考站之间的相关系数低于所设阈值,单个站点的日变趋势出现“反相”,捕捉到了过去不曾捕捉到的小震级地震前的异常信息。

(3)低成本地磁场仪器在稳定性和抗环境干扰方面存在一定的局限性,且由于投入运行时间尚短,尚未形成长期稳定的背景参考值,能够用于分析的典型震例较少,在一定程度上制约了其预报效能的提升。

在今后的观测和研究中,将在现有低成本地磁场监测技术的基础上,建立多源长期连续的观测数据库,提出科学的地震预报指标,同时引入机器学习与深度学习等大数据方法,开展多尺度时空特征提取与异常自动识别研究,并探索多源特征融合的短临预测模型,进一步提升地磁观测在地震前兆识别与预警中的应用能力。

参考文献

- [1] Stacey F D. The seismomagnetic effect[J]. Pure Appl Geophys, 1964, 58(1): 5-22.

- [2] Nagata T. Application of tectonomagnetism to earthquake phenomena[J]. *Tectonophysics*, 1972, 14(3/4):263–271.
- [3] 祁贵仲. “膨胀”磁效应[J]. *地球物理学报*, 1978, 21(01):18–33.
- [4] 李钧. 导电率随时间变化的导电球的电磁响应问题[J]. *地球物理学报*, 1979, 22(03):243–254.
- [5] 王晓美. 地磁场相对变化观测技术研究[D]. 北京:中国地震局地球物理研究所, 2019.
- [6] Stening R, Reztsova T, Ivers D, et al. A critique of methods of determining the position of the focus of the Sq current system [J/OL]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2005, 110(A4).
- [7] Stening R, Reztsova T, Minh L H. Day-to-day changes in the latitudes of the foci of the Sq current system and their relation to equatorial electrojet strength[J/OL]. *Journal of Geophysical Research Space Physics*, 2005, 110(A10).
- [8] 张雨欣. 地磁日变规律以及日变值计算方法研究[D]. 北京:中国地质大学, 2021.
- [9] Takeda M. Contribution of wind, conductivity, and geomagnetic main field to the variation in the geomagnetic Sq field[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2013, 118(7):4516–4522.
- [10] 赵旭东, 何宇飞, 李琪, 等. 基于中国地磁台网数据的太阳静日期间地磁场 Z 分量日变化幅度分析[J]. *地球物理学报*, 2022, 65(10):3728–3742.
- [11] 冯志生, 梅卫萍, 张苏平, 等. FHD磁力仪 Z 分量分钟值日变化空间相关性的初步应用[J]. *华南地震*, 2005, 25(03):1–7.
- [12] 戴苗, 冯志生, 刘坚, 等. 南北地震带地磁加卸载响应比应用研究[J]. *地质科技情报*, 2017, 36(04):222–227+249.
- [13] 李伟, 龚耀, 赵文舟, 等. 地磁加卸载响应比方法在上海及其邻区地震研究中的应用[J]. *地震*, 2014, 34(01):125–133.
- [14] 邱桂兰, 何跃, 王登伟, 等. 地磁 Z 分量分钟值空间相关法在四川地区地震预报中的应用[J]. *高原地震*, 2014, 26(01):1–7.
- [15] 陈贤, 黄恩贤, 成万里. 豫南及邻区地磁总场 F 日值相关性异常[J]. *地震地磁观测与研究*, 2021, 42(03):115–120.
- [16] 孙路强, 张明东, 康健, 等. 低成本地磁场监测设备的设计与实现[J]. *地震工程学报*, 2024, 46(03):665–671.
- [17] Fu B, Walker R, Sandiford M. The 2008 Wenchuan earthquake and active tectonics of Asia[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2011, 40(4):797–804.
- [18] 许志琴, 杨经绥, 李海兵, 等. 印度—亚洲碰撞大地构造[J]. *地质学报*, 2011, 85(01):1–33.
- [19] 刘鸣, 付碧宏, 董彦芳. 青藏高原东南缘滇缅地块NE向走滑断裂带的新构造活动与大地震危险性[J]. *地球物理学报*, 2015, 58(11):4174–4186.
- [20] 白仙富, 戴雨芾. 滇缅活动地块构造应力场研究[J]. *震灾防御技术*, 2019, 14(01):60–76.
- [21] Searle M P, Noble S R, Cottle J M, et al. Tectonic evolution of the Mogok Metamorphic Belt, Burma (Myanmar) constrained by U–Th–Pb dating of metamorphic and magmatic rocks[J]. *Tectonics*, 2007, 26(3):TC3014.
- [22] Tin T Z H, Nishimura T, Hashimoto M, et al. Present-day crustal deformation and slip rate along the southern Sagaing fault in Myanmar by GNSS observation[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2022(228):105125.
- [23] 计昊旻, 任治坤, 刘金瑞. 青藏高原东南缘上地壳晚新生代构造变形综述[J]. *地球科学*, 2024, 49(02):480–499.
- [24] 罗静博, 林春生, 陈浩. 基于RM3100磁传感器的舰船磁场信号采集系统设计[J]. *传感器与微系统*, 2021, 40(02):86–88.
- [25] Sun L Q, Bai X F, Kang J, et al. Design and implementation of low-cost geomagnetic field monitoring equipment for high-density deployment[J]. *Applied Geophysics*, 2024(21):505–512.
- [26] 李琪, 林云芳, 曾小苹. 应用小波变换提取张北地震的震磁效应[J]. *地球物理学报*, 2006, 49(03):855–863.
- [27] Peng H, Katsumi H, Qinghua H, et al. Evaluation of ULF electromagnetic phenomena associated with the 2000 Izu Islands earthquake swarm by wavelet transform analysis[J]. *Natural Hazards & Earth System Sciences*, 2011, 11(3):965–970.
- [28] Peng H, Katsumi H, Qinghua H, et al. Spatiotemporal characteristics of the geomagnetic diurnal variation anomalies prior to the 2011 Tohoku earthquake (M_w 9.0) and the possible coupling of multiple pre-earthquake phenomena[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2016(129):13–21.
- [29] 张连伟, 郑彦鹏, 梁瑞才, 等. 基于小波变换的海洋地磁日变改正研究[J]. *海洋科学进展*, 2020, 38(04):635–648.
- [30] 张亮娥, 陈常俊, 宫静芝, 等. 原平4.2级地震前山西地磁台阵数据异常特征分析[J]. *地震科学进展*, 2023, 53(10):469–475.
- [31] 冯志生, 李琪, 李鸿宇, 等. 地磁低点位移线两侧异常变化的反相位现象及其解释[J]. *中国地震*, 2009, 25(02):206–213.
- [32] 章鑫, 冯志生, 袁桂平. 基于地磁垂直分量反相位现象的地下畸变电流正演计算[J]. *大地测量与地球动力学*, 2019, 39(06):596–601.
- [33] 冯志生, 姜楚峰, 冯丽丽, 等. 短期重现性地磁日变化感应电流集中分布与地震关系初步研究[J]. *中国地震*, 2020, 36(03):502–516.
- [34] 李军辉, 姜楚峰, 吴迎燕, 等. 强震前地磁日变化感应电流线状集中分布孕震机理研究[J]. *地震*, 2021, 41(03):219–228.
- [35] 孙浩越, 江国焰, 何宏林, 等. 云南景谷 M_s 6.6地震对南汀河断裂带地震危险性的影响[J]. *地球物理学报*, 2015, 58(11):4197–4206.