

陈飞, 陈界宏, 王飞, 毛志强, 艾萨·伊斯马伊力, 刘彦麟. 2025. 新磨村滑坡地磁扰动现象时序特征分析[J]. 地球与行星物理论评(中英文), 56(6): 689-698. doi: 10.19975/j.dqyxx.2024-044.

Chen F, Chen C H, Wang F, Mao Z Q, Yisimayili A, Liu Y L. 2025. Characterisation of the temporal sequence of geomagnetic fluctuation of Xinmocun landslide[J]. Reviews of Geophysics and Planetary Physics, 56(6): 689-698 (in Chinese). doi:10.19975/j.dqyxx.2024-044.

新磨村滑坡地磁扰动现象时序特征分析

陈飞^{1*}, 陈界宏¹, 王飞¹, 毛志强², 艾萨·伊斯马伊力³, 刘彦麟¹

1 地质灾害防治与地质环境保护全国重点实验室(成都理工大学), 成都 610059

2 中国地质大学(武汉)地球物理与空间信息学院, 武汉 430074

3 新疆维吾尔自治区地震局, 乌鲁木齐 830011

摘要: 选择合适的滑坡监测预警指标是实现科学预警的关键。为揭示滑坡发生前地磁扰动信号的特征与规律, 探索利用地磁信号作为滑坡预警指标的可能性, 本文选取了新磨村滑坡作为研究对象, 利用互相关计算方法, 分析滑坡附近的台站与其他台站的数据相关性, 统计在观测时段内扰动信号出现的频次, 判别滑坡地磁扰动现象, 确定滑坡地磁扰动信号特征与规律。结果表明, 新磨村滑坡发生失稳前出现了明显的地磁扰动现象, 扰动信号在滑坡主滑方向一侧呈现较强的规律性, 且以滑坡点附近出现连续磁扰动高相关性区域为特征。在滑坡发生前后地磁扰动异常信号长期存在, 整体呈现滑坡失稳前出现频繁、滑坡失稳后迅速减少的特点, 且与滑坡的变形破坏特征呈现强相关性。滑坡地磁扰动异常信号可被视为一种新的极具潜力的滑坡监测预警指标, 用于搜索潜在滑坡的位置, 探索突发滑坡的演变阶段, 实现有效的滑坡预警。

关键词: 新磨村滑坡; 地磁扰动; 互相关计算; 滑坡监测预警

doi: 10.19975/j.dqyxx.2024-044

中图分类号: P318

文献标识码: A

Characterisation of the temporal sequence of geomagnetic fluctuation of Xinmocun landslide

Chen Fei^{1*}, Chen Chieh-hung¹, Wang Fei¹, Mao Zhiqiang², Aisa Yisimayili³, Liu Yanlin¹

1 State Key Laboratory of Geohazard Prevention and Geoenvironment Protection (Chengdu University of Technology, Chengdu), Chengdu 610059, China

2 School of Geophysics and Geomatics, China University of Geosciences (Wuhan), Wuhan 430074, China

3 Earthquake Agency of Xinjiang Uygur Autonomous Region, Urumqi 830011, China

Abstract: Selecting an appropriate index is essential for the scientific and effective early warning of landslides. To explore the potential use of geomagnetic fluctuation signals as an early warning index for landslides, this study investigates the characteristics of geomagnetic fluctuations associated with landslides. The Xinmocun landslide is chosen as the case study. Using cross-correlation analysis, we examine the data correlation between observation stations near the landslide and count the frequency of disturbance signals during the observation period to identify geomagnetic disturbance phenomena associated with the landslide. The study aims to elucidate the characteristics and patterns of geomagnetic disturbance signals related to landslides. The results reveal that significant geomagnetic disturbances were observed before the destabilization of the Xinmocun landslide. These disturbances predominantly occurred in the main sliding direction of the landslide and were marked by the presence of sustained high cross-correlation (CC) values (yellow, $CC > 0.45$) in areas near the landslide point. These geomagnetic disturb-

收稿日期: 2024-10-01; 录用日期: 2025-02-13

基金项目: 四川省自然科学基金资助项目(2022NSFSCO411)

Supported by the Sichuan Natural Science Foundation Project (Grant No. 2022NSFSCO411)

*通信作者: 陈飞(1997-), 男, 在读博士研究生, 主要从事地质灾害监测预警的研究. E-mail: f_chen_97@163.com



ance signals persisted for a prolonged period before and after the landslide event, displaying a pattern of frequent signals prior to instability, rapid reduction at the point of landslide failure, and strong correlation with the deformation and damage characteristics of the landslide. The findings suggest that geomagnetic disturbance signals can serve as a novel indicator for landslide monitoring. This approach offers the potential to identify the location of potential landslides, assess the evolutionary stages of sudden landslides, and enable effective early warning. Thus, the geomagnetic disturbance signals provide a promising tool for enhancing landslide prediction and risk management strategies.

Keywords: Xinmocun landslide; geomagnetic fluctuation; cross-correlation calculation; landslide monitoring and early warning

0 引言

滑坡是山区频发的地质灾害,经常造成严重的经济损失与人员伤亡,开展滑坡监测预警研究,获取滑坡变形演化过程中的关键信息,提出科学合理的预警判据,是降低灾害损失的有效方法(孙雪晨等, 2024)。位移被认为是直接反映坡体变形程度的监测指标,现阶段常见的位移监测方法主要是对地摄像摄影(李振洪等, 2023)、全球导航卫星系统 GNSS(邢保印等, 2023; 朱武等, 2022)、合成孔径雷达干涉技术(任开瑀等, 2020; 许强等, 2022)及实地布设传感器等方法。受地质环境与人类工程活动等影响,多数技术方法极易受到天气、地形、植被及人类活动的干扰。同时,在坡表或坡体深部布设传感器又面临着成本高、安装难度大、实现连续监测困难等问题。因此,探索能完成滑坡的长期稳定监测、实现科学高效的预警方法,是学术界与工程领域的热点与难点。

地磁观测是最早用于研究地震等自然灾害异常现象的地球物理方法之一(郝雪景等, 2023)。通过一个多世纪的系统研究,学术界认识到地磁异常现象与地震等地壳活动密切相关。一方面,岩石在应力作用下出现的磁化率和剩余磁性变化为基础的“压磁效应”(祁贵仲, 1978; 赵国泽等, 2022),是引起磁场观测数据出现异常变化的原因。另一种能引起地磁数据出现异常变化的是基于感应效应和地下电性变化的“感应磁效应”(李琪等, 2006; 王亶文, 2001)。在滑坡变形演化过程中,通常伴随着应力集中现象或降雨入渗所引起的滑体介质饱和度发生变化,从而引起介电性质改变,使得在滑坡演化过程中或是在滑坡发生失稳破坏前产生地磁观测异常成为可能。

本文选取了中国西南地区的新磨村滑坡为研究对象,搜集滑坡发生前后两周附近十数个地磁台站监测数据,利用互相关计算方法,分析滑坡附近的台站与其他台站的数据相关性,统计在观测时段内扰动信号出现的频次,判别滑坡地磁扰动现象,确定滑坡地磁扰动信号特征与规律。研究结果有助于规避观测到的滑坡地磁扰动现象发生的偶然性,为将地磁扰动现象作为滑坡预警判据提供参考。

1 研究区地质概况

据成都理工大学地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室研究团队调查结果所述(许强等, 2017),新磨村滑坡位于四川省茂县叠溪镇新磨村新村组后山,该滑坡于 2017 年 6 月 24 日 6 时左右发生失稳破坏,瞬间摧毁坡脚的新磨村,掩埋 64 户建筑物和 1500 m 道路,造成了 10 人死亡、73 人失踪,受到国内外广泛关注。图 1 是以新磨村滑坡无人机航拍影像为底图绘制的滑坡平面图,滑坡源区所在位置为东经 $103^{\circ}39'46''$ 、北纬 $32^{\circ}4'47''$,海拔约 3100~3400 m,垮塌区长约 200 m,宽约 300 m,平均厚度约 70 m,体积约 $450 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。滑坡解体形成的碎屑流刮铲地表,在 2700~3100 m 形成流通刮铲区。碎屑流物质自 2700 m 以下呈扇状扩散,形成堆积区。滑坡周边区域出露的地层岩性主要有泥盆系的危关群(Dwg₂)、石炭系(C)、二叠系下统(P₁)、三叠系波茨沟组(T_{1b})和杂谷脑组(T_{2z})变质沙岩、大理化灰岩、千枚岩等。滑坡附近区域处在较场弧形构造的弧顶部位,区域内分布有多条断裂带,其中松坪沟断裂正好从此次滑坡区通过,对滑坡的影响较大。图 2 为滑源区工程地质剖面图,由图可知,滑坡下覆基岩主要为三叠系中统杂谷脑组(T_{2z})中厚-厚层状变质石英砂岩夹薄层状板岩,层面产状 $N80^{\circ} \sim 85^{\circ}W/SW \angle 47^{\circ}$ 。

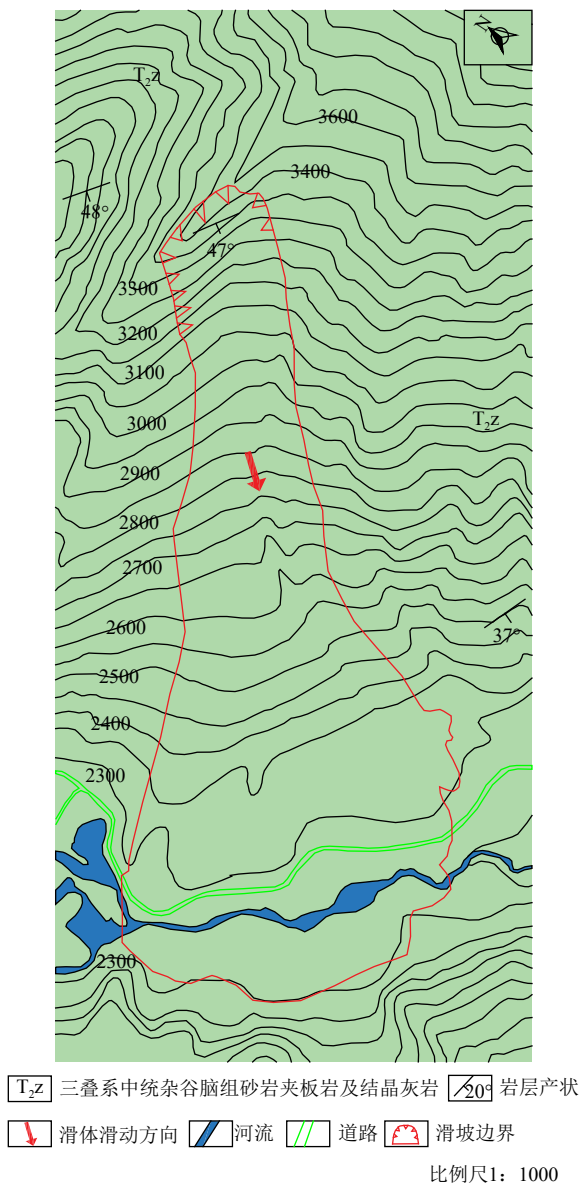


Fig. 1 Engineering geological plan of Xinmocun landslide

滑源区主要发育两组节理, 节理 1 产状 $N44^{\circ}E/SE \angle 84^{\circ}$, 节理 2 产状 $N46^{\circ}E/NW \angle 47^{\circ}$ 。

滑坡的成因机制是多种内在控制性因素与外在诱发性因素共同作用的复杂过程。通过第一时间的现场调查与历史资料分析, 新磨村滑坡高陡且单薄的地形条件为滑坡提供了潜在的动力来源, 复杂的地质构造, 如断裂活动和软弱岩层, 则进一步降低了岩体的力学稳定性, 加之在多次地震活动中岩体的裂隙扩展与破坏累积, 为滑坡的发生埋下了隐患。降雨是诱发滑坡失稳的关键因素, 据滑坡附近叠溪镇和松坪沟两处降水观测站资料显示, 滑坡发生前仅 2 个月的时段内累计降雨量达 200 多毫米, 显著大于该地区同期降雨量, 持续的降雨导致本已处于临界状态的滑块出现整体失稳破坏。

2 研究方法

对大尺度区域站点的地磁数据进行对比, 是确定扰动源的有效方法。互相关方法 (cross-correlation method) (Stoica and Moses, 2005) 是一种通过计算两个信号在不同滞移条件下的相似性来分析其关联性的统计工具。对于连续信号 $x(t)$ 和 $y(t)$, 其互相关函数定义为:

$$R_{xy}(\tau) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t)y(t+\tau)dt \quad (1)$$

其中, τ 表示时间滞移量, $R_{xy}(\tau)$ 表示 $x(t)$ 和 $y(t)$ 在滞移 τ 时的相关性。

对于离散信号 $x[n]$ 和 $y[n]$, 互相关函数定义为:

$$R_{xy}[k] = \sum_n x[n]y[n+k] \quad (2)$$

其中, k 是滞移的离散值, 通过对不同的 k 求和, 可以获得信号间的相关性分布。

互相关函数的峰值位置反映了信号间的时间延迟, 峰值大小表明两信号的相关性强弱, 函数形态则揭示了信号的周期性和相位关系。该方法广泛应用于时延估计、模式识别和频谱分析, 例如雷达回波时间测量、地震波传播时间差分析等, 是信号处理领域的重要工具。

本研究整理了滑坡点附近约 500 km 半径内的采样间隔为 1 Hz 的地磁资料 (图 3), 其中红星为新磨村滑坡所在位置, 青色三角形为滑坡点附近的地磁台站。通过采用互相关方法计算互相关值 (cross correlation value, 计算结果以下称 CC 值), 分析了滑坡周边 19 个地磁台站的监测数据, 评估了距离滑坡最近的台站的地磁数据与其他站点获取的参考数据之间的相似性, 高 CC 值表明由于局部效应导致的潜在源的位置。

3 研究结果

3.1 滑坡地磁扰动信号特征识别

如图 4 所示为新磨村滑坡发生失稳当天 (世界时) 的地磁数据计算结果, 通过每两小时进行一次互相关计算, 获得了一天中 12 个时间点的地磁数据。其中, 0 hours 代表滑坡发生的时刻, 绿色的圆形代表的是以滑坡点为圆心、半径为 500 km 的观测区域, 红色的箭头分别代表的是滑坡的主滑方向与滑坡的走向, 黑色的三角形代表的是监

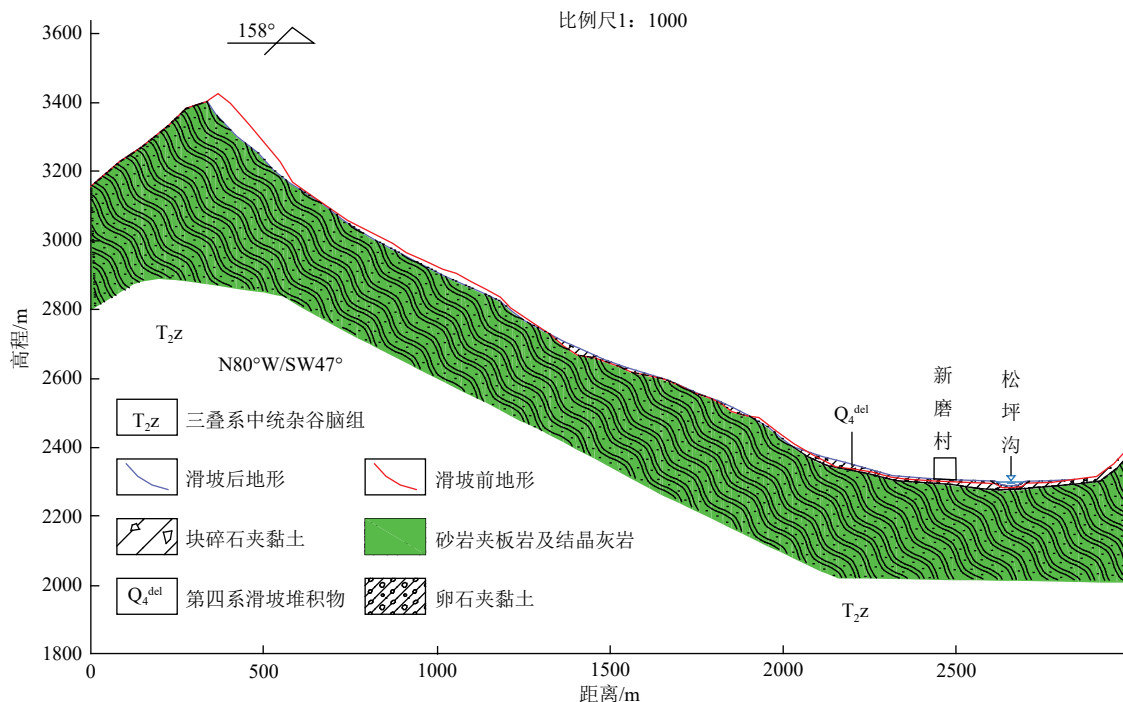


图2 滑坡工程地质剖面图

Fig. 2 Engineering geological cross-section of Xinmocun landslide

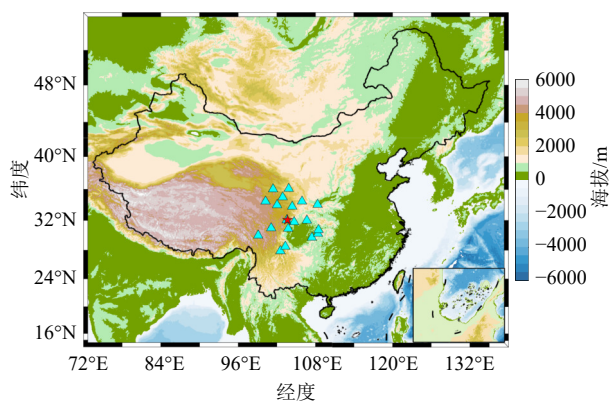


图3 地磁台站分布图

Fig. 3 Map of geomagnetic stations

测台站位置, 红色三角形代表的是选取的与滑坡附近台站做互相关计算的台站. 由于地磁数据 X 分量 (南北) 与 Y 分量 (东西) 易受其他多种因素的影响 (Ahn et al., 2000; Yamazaki and Maute, 2017), 因而在分析过程中我们选择了 Z 分量进行分析. 由图 4d、4e、4i、4j 等多个时刻地磁数据计算结果可以发现, 在滑坡点附近出现了明显的高 CC 值区域, 即在新磨村滑坡发生前出现了明显的局部地磁扰动现象.

通过分析新磨村滑坡失稳前后 14 天的长时间序列的地磁数据, 总结了滑坡失稳前的地磁扰动特征. 其中, 以滑坡点为圆心、半径为 500 km 的圆形定义为观测区域, 圆形区域按滑坡的主滑方分为主

滑方向一侧与主滑方向对侧. 滑坡失稳前的地磁扰动异常特征主要出现在主滑方向一侧区域, 且以滑坡点附近出现连续高 CC 值 (黄色, $CC > 0.45$) 区域为特征.

3.2 新磨村滑坡地磁扰动时序特征分析

在对滑坡地磁数据特征进行识别的基础上, 对新磨村滑坡发生前后 14 天的地磁数据进行分析, 统计在一天 12 个时刻滑坡地磁扰动特征出现的频率. 由于地磁计算数据量较大, 难以将滑坡发生前后近一个月的数据悉数展示, 本文将整个时间线分为了滑坡发生前 (6 月 10 日至 6 月 24 日) 和滑坡发生后 (6 月 25 日至 7 月 8 日) 两段, 展示具有代表性的地磁数据计算结果.

如图 4、图 5 所示为新磨村滑坡发生前的地磁数据互相关计算结果, 其中图 4d、4j 与图 5a、5b、5e、5h、5i 均出现了明显的地磁扰动特征, 对应的当天地磁扰动出现的频率分别为 5/12 和 2/12. 如图 6、图 7 所示为新磨村滑坡发生后的地磁数据互相关计算结果, 其中图 6g、6k 和图 7j、7k 出现了明显的地磁扰动特征, 对应的当天地磁扰动出现的频次均为 2/12.

统计新磨村滑坡发生前后 14 天滑坡主滑方向一侧与主滑方向对侧的地磁数据日出现频次如图 8 和图 9 所示. 在滑坡主滑方向一侧 (图 8), 整个

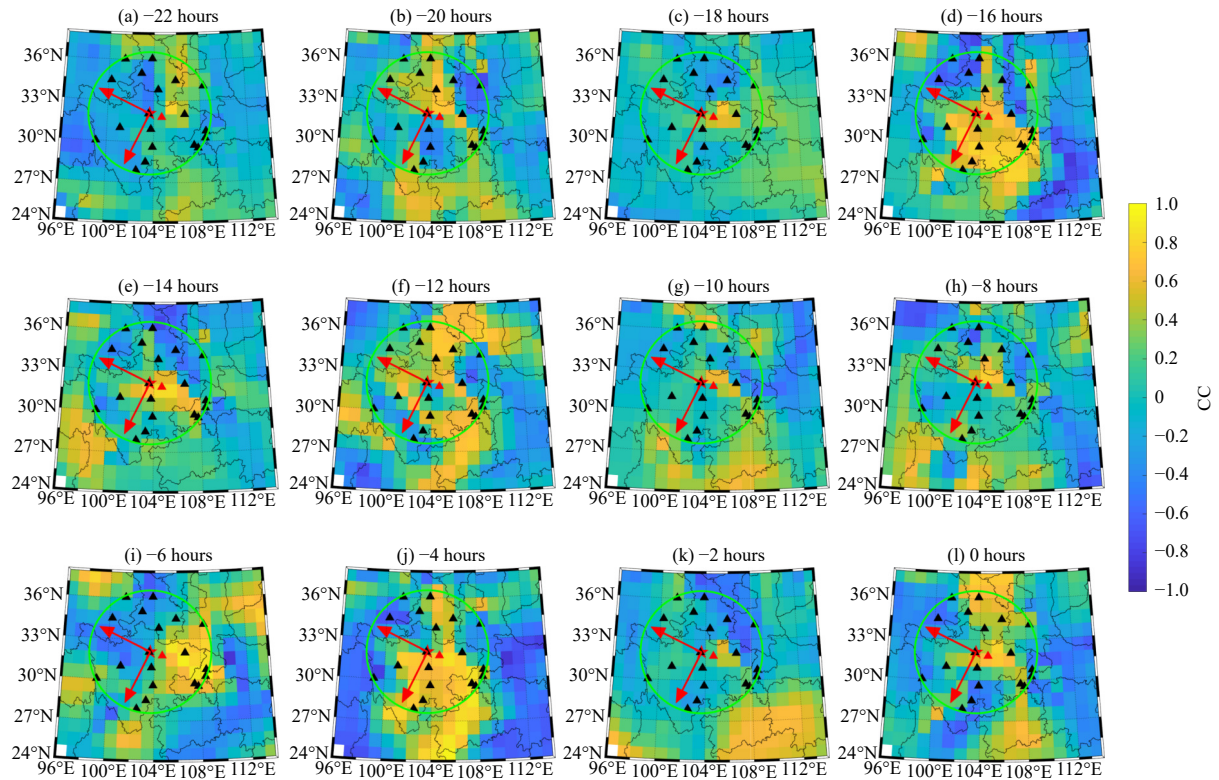


图 4 新磨村滑坡 6 月 24 日地磁数据

Fig. 4 Geomagnetic data for Xinmaocun landslide on June 24

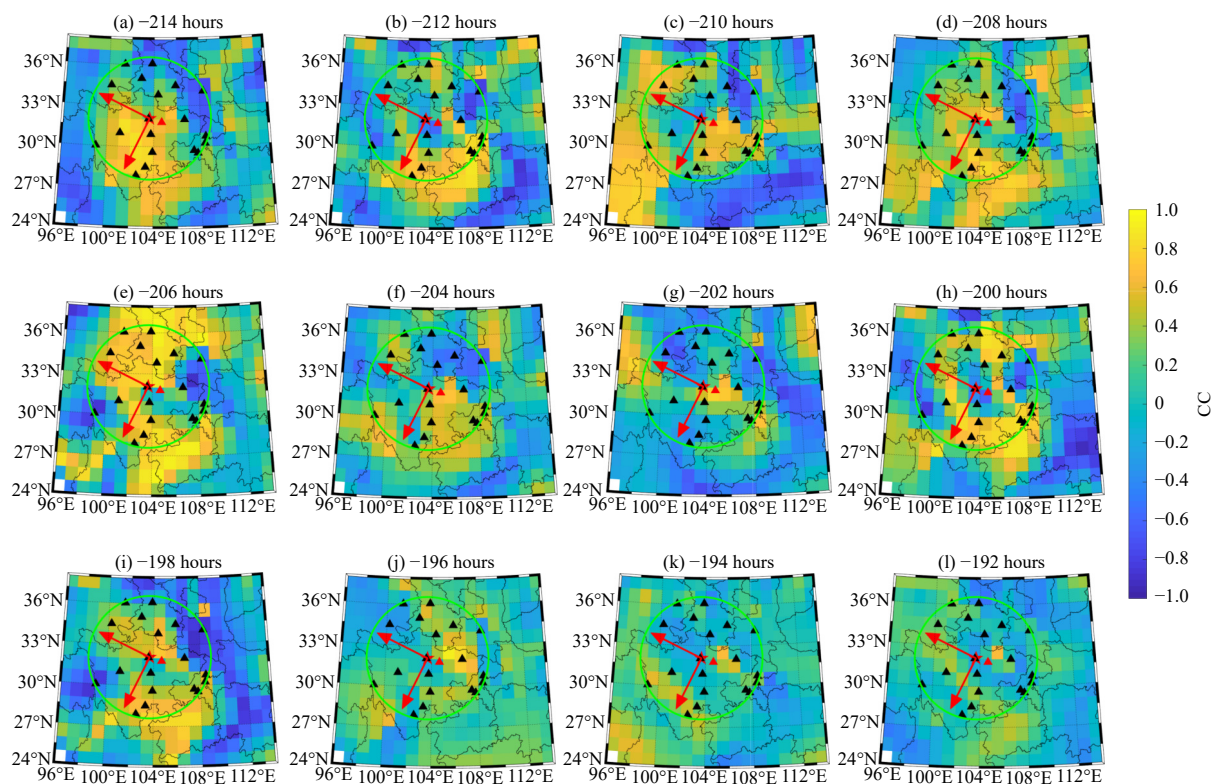


图 5 新磨村滑坡 6 月 16 日地磁数据

Fig. 5 Geomagnetic data for Xinmaocun landslide on June 16

观测时间段内滑坡地磁扰动信号并未消失, 整体呈现滑坡失稳前频繁出现、滑坡失稳后迅速减少的特点. 滑坡发生失稳破坏 (6 月 24 日) 前地磁扰动信

号多日频繁出现, 其中 6 月 11 号、16 日和 18 出现频次达到 5/12. 滑坡发生失稳后地磁扰动信号出现频率较失稳前明显降低, 仅在 6 月 26 日出现频

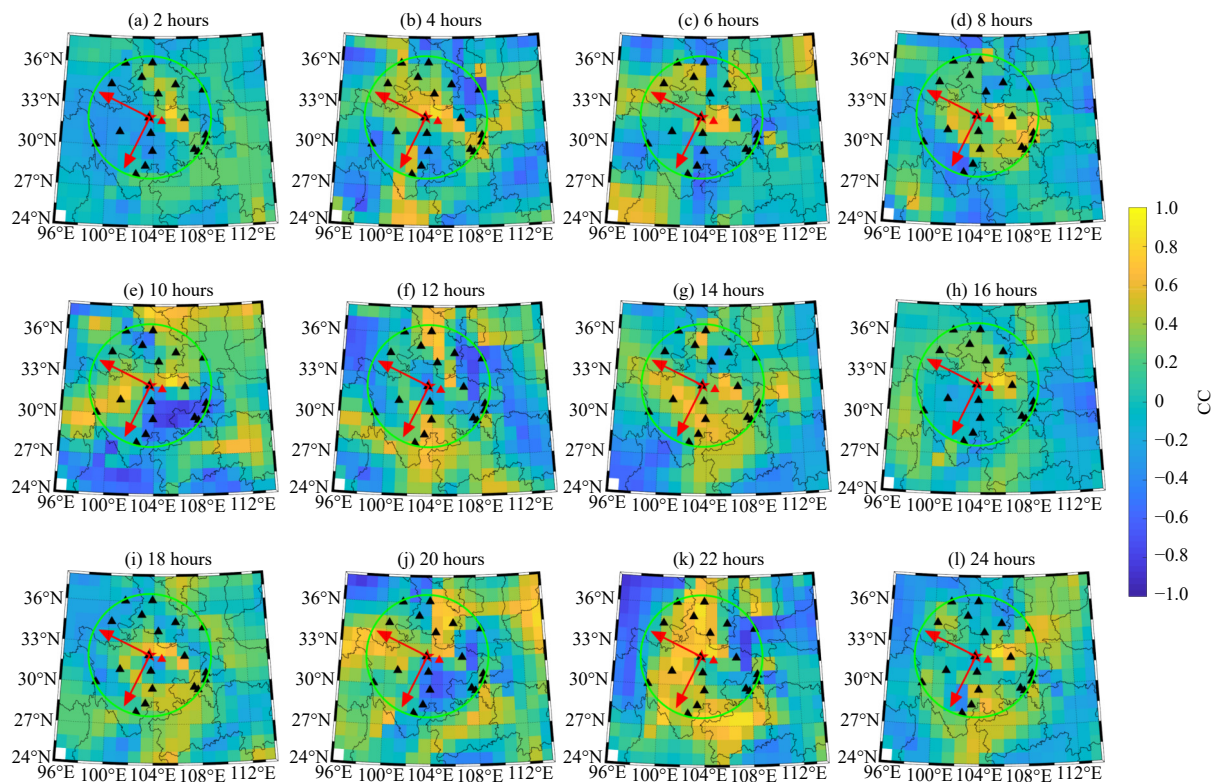


图 6 新磨村滑坡 6 月 25 日地磁数据

Fig. 6 Geomagnetic data for Xinmaocun landslide on June 25

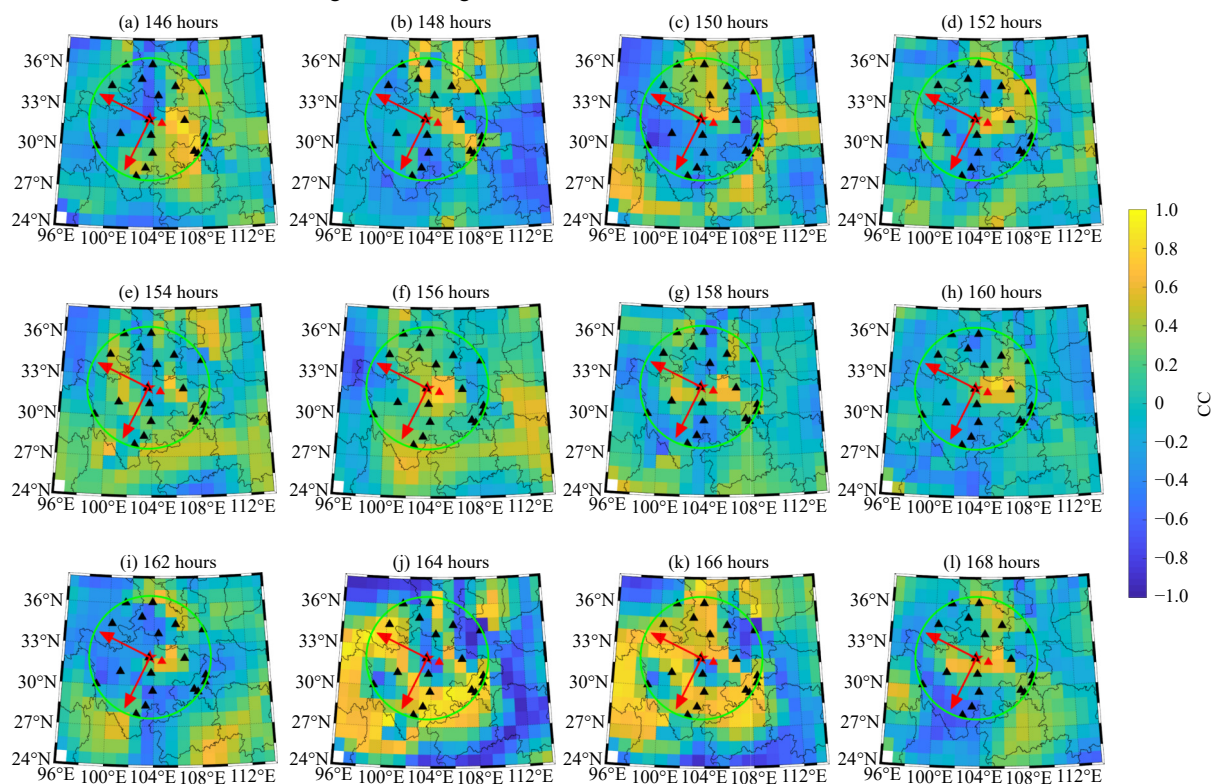


图 7 新磨村滑坡 7 月 1 日地磁数据

Fig. 7 Geomagnetic data for Xinmaocun landslide on July 1

次达到 6/12, 随后出现频次基本降到了 2/12 以下。在滑坡主滑方向对侧 (图 9), 整个观测时间段内同样出现了明显的滑坡地磁扰动信号, 但信号出现

频次杂乱无明显规律性。相较而言, 滑坡主滑方向一侧的地磁扰动信号更具有成为滑坡监测预警信号观测来源的潜力。

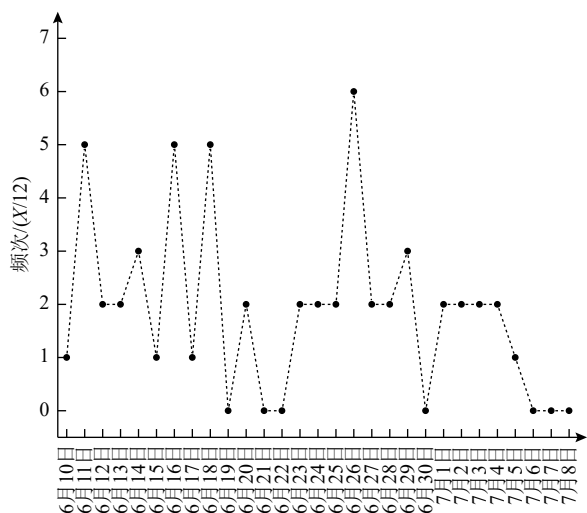


图 8 新磨村滑坡主滑方向一侧地磁信号日出现频次

Fig. 8 Daily frequency of geomagnetic signals in the main slide direction of Xinmaocun landslide

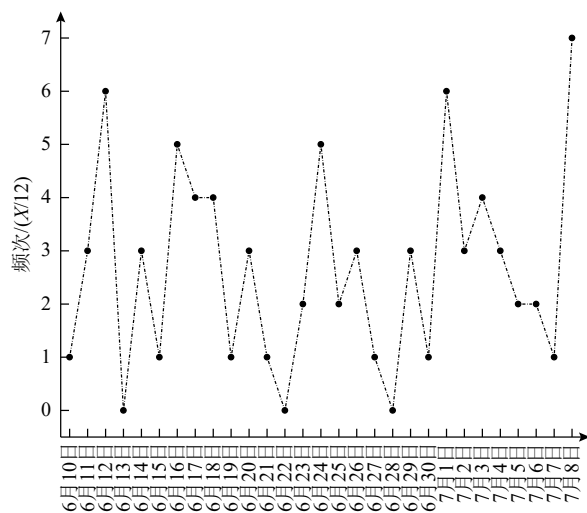


图 9 新磨村滑坡主滑方向对侧地磁信号日出现频次

Fig. 9 Daily frequency of geomagnetic signals on the opposite side of the main slide direction of Xinmaocun landslide

3.3 地磁扰动信号与滑坡变形相关性分析

滑坡发生失稳后, 相关团队利用 IBIS-L 型地基合成孔径雷达 (GBSAR) 对滑坡区开展了全天候连续应急变形监测 (许强等, 2017). 图 10 为滑坡监测点分布图, 图 11 为监测点的变形-时间曲线图. 由监测点变形-时间曲线可以发现, 在滑坡发生整体失稳后, 滑坡区局部岩体仍然在不断变形, 且出现了三次较为明显的变形. 第一次较为明显的变形发生在从 6 月 30 日 6:00 至 18:00 时间段, 最大累计变形量约 80 mm. 第二次变形出现在 7 月 1 日 6:00 至 18:00 时间段, 最大累计变形量约 40 mm. 第三次变形发生在 7 月 2 日 6:00 至 18:00 时间段,

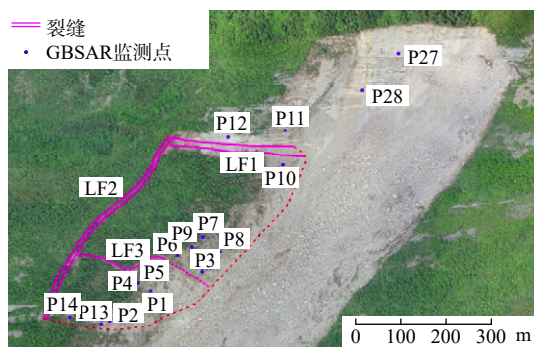


图 10 滑坡监测点分布图 (引自许强等, 2017)

Fig. 10 Map of landslide monitoring sites (from Xu et al., 2017)

最大累计变形量约 60 mm.

图 7、图 12、图 13 分别为三次变形对应的当

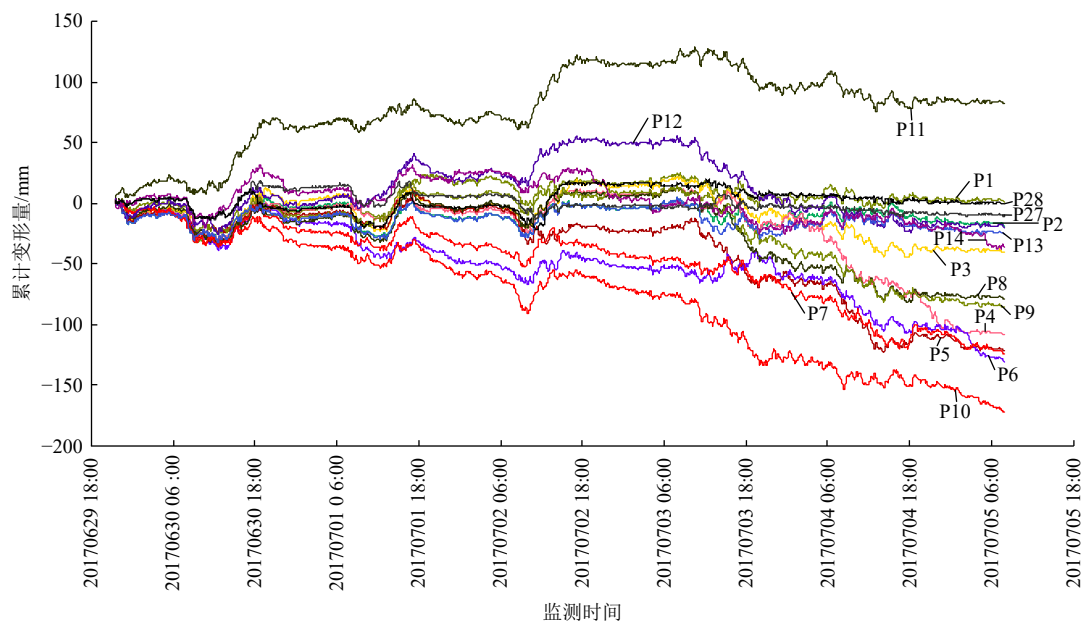


图 11 滑坡监测点的变形-时间曲线图 (引自许强等, 2017)

Fig. 11 Deformation-time plots at landslide monitoring sites (from Xu et al., 2017)

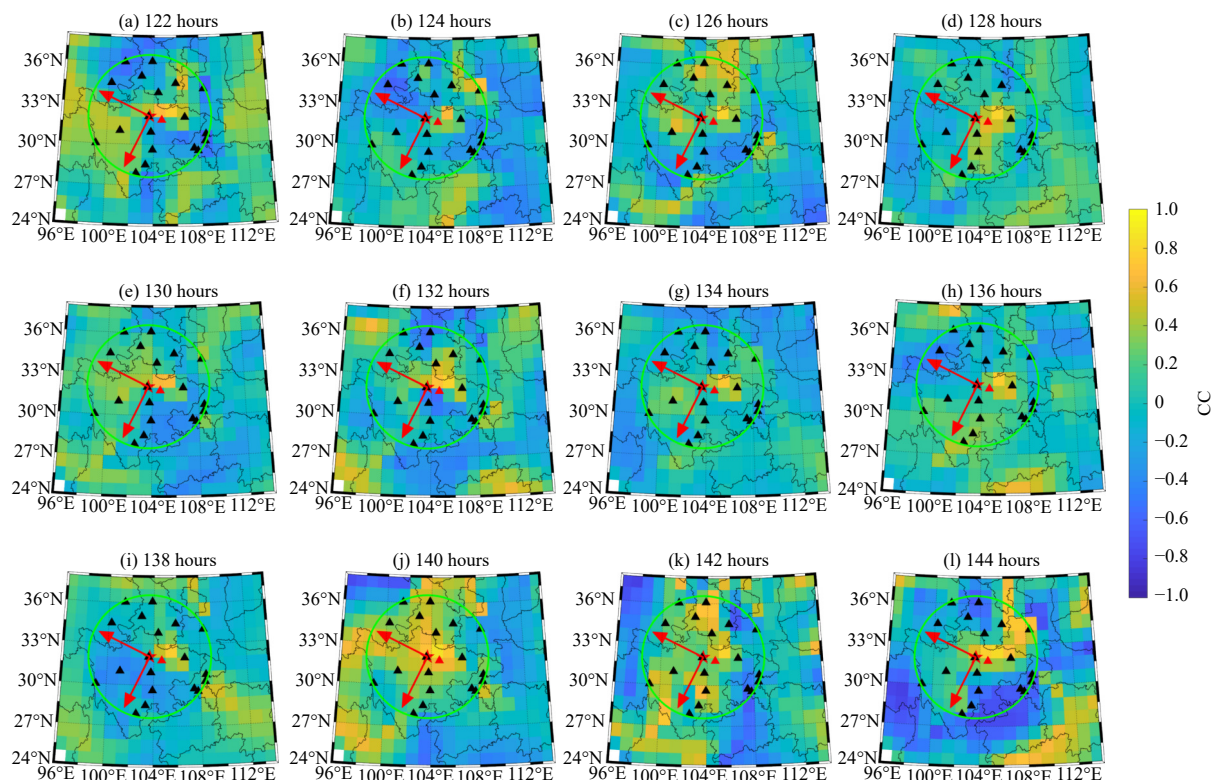


图 12 新磨村滑坡 6 月 30 日地磁数据

Fig. 12 Geomagnetic data for Xinmaocun landslide on June 30

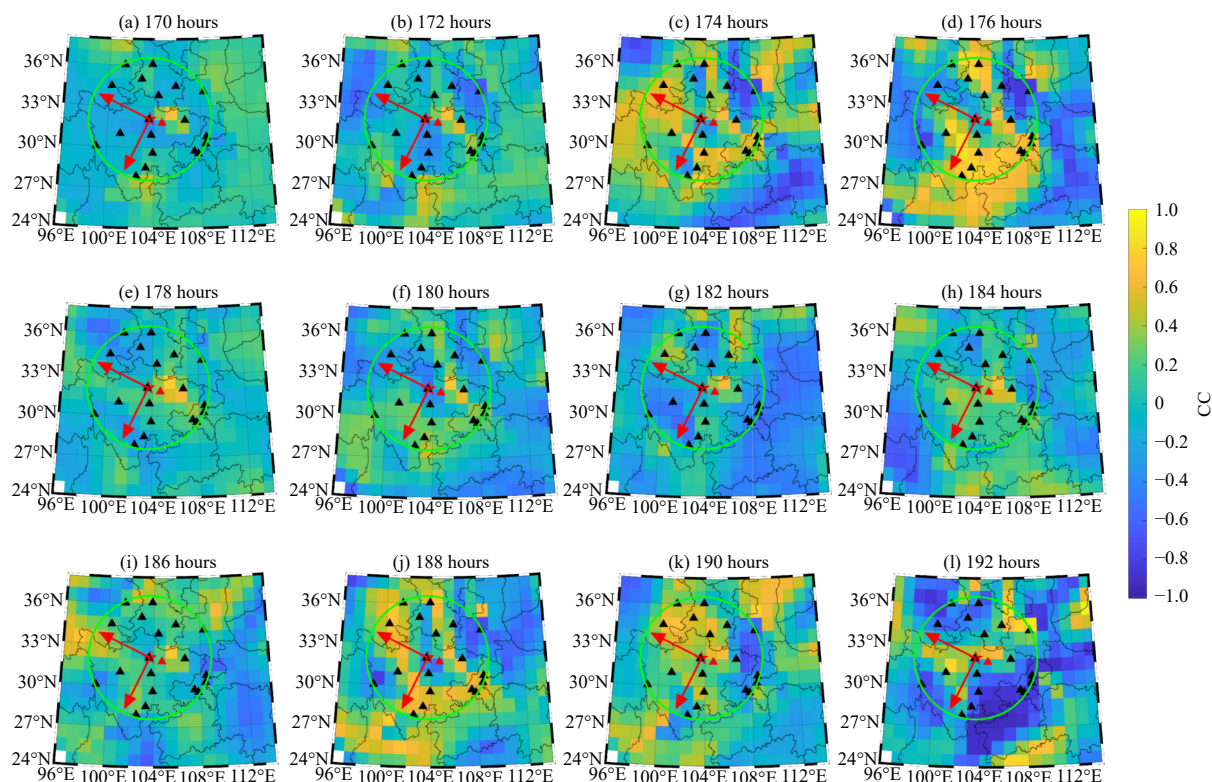


图 13 新磨村滑坡 7 月 2 日地磁数据

Fig. 13 Geomagnetic data for Xinmaocun landslide on July 2

天地磁数据的互相关计算结果. 如图 12d-12j 所示为新磨村滑坡 6 月 30 日 6:00 至 18:00 时间段的地磁数据互相关计算结果, 多数时刻 (图 12d-12i) 在

滑坡点附近均出现了较小的高 CC 值区域, 但并不明显, 在 18:00 时刻 (图 12j) 出现了明显的自滑坡向外的连续高 CC 值区域, 地磁数据计算结果表

明地磁信号记录到了滑坡岩体这一明显的变形破坏过程.图 7d-7j 为新磨村滑坡 7 月 1 日 6:00 至 18:00 时间段的地磁数据互相关计算结果,6 时(图 7d)至 16 时(图 7i)在滑坡点处出现局部的高 CC 值区域,从 18 时(图 7j)到 20 时(图 7k)滑坡点附近出现明显的地磁扰动现象,且扰动信号由弱不断变强,对应于该时间段滑坡局部变形的不断增大.图 13d-13j 为新磨村滑坡 7 月 2 日 6:00 至 18:00 时间段的地磁数据互相关计算结果,地磁变化规律与 1 日相似,在 18 时(图 13j)到 20 时(图 13k)滑坡点附近出现明显的地磁扰动现象,且扰动信号由弱不断变强,与监测到的滑坡区的变形对应较好.

4 讨 论

本文利用互相关计算方法,对新磨村滑坡发生失稳前后两周的地磁数据进行了计算,发现在滑坡发生变形和破坏的过程中出现了较为明显的地磁扰动现象.地磁扰动信号在滑坡主滑方向一侧呈现滑坡失稳前出现频繁,滑坡失稳后迅速减少的特点.地磁数据计算结果显示 CC 值超过 0.45 时,即视为滑坡区出现扰动信号.但需要说明的是,滑坡地磁扰动信号是以研究区域内的 CC 值的相对高值作为判据,因而扰动信号出现时的 CC 值,必然随着滑坡区的地质环境及触发滑坡失稳的外在因素的改变而改变,研究在不同的地质条件和触发因素下的临界 CC 值的变化或将成为后续潜在的研究点.另一方面,虽然滑坡变形过程中的位移时间曲线与地磁扰动信号的出现对应较好,但现阶段仍然难以说明扰动信号的出现是直接跟滑坡的变形相关,还是跟触发滑坡发生变形的因素相关.滑坡地磁扰动现象的识别或将给滑坡监测预警研究提供一种潜在的选择,地磁扰动信号能否成为有效的监测预警方式需要后续开展深入的研究.

5 结 论

本文选取了新磨村滑坡为研究对象,在搜集滑坡发生前后两周附近十数个地磁台站监测数据的基础上,利用互相关计算方法,分析滑坡附近的台站与全国范围内其他台站的数据相关性,判别滑坡地磁扰动现象,确定滑坡地磁扰动信号特征与规律,并分析了扰动信号与滑坡变形特征的相关性,得到如下结论:新磨村滑坡发生失稳前出现了明显的地

磁扰动现象,扰动信号主要出现在滑坡主滑方向一侧,且以滑坡点附近出现连续高 CC 值(黄色, $CC > 0.45$)区域为特征.在滑坡发生前后地磁扰动信号长期存在,整体呈现滑坡失稳前出现频繁、滑坡失稳后迅速减少的特点,且与滑坡的变形破坏特征呈现强相关性.滑坡地磁扰动异常信号可被视为一种新的极具潜力的滑坡监测预警指标,用于搜索潜在滑坡的位置,探索突发滑坡的演变阶段,实现有效的滑坡预警.

致 谢

文中使用的地磁数据来自于中国地震局地球物理研究所国家地磁台网中心,在此表示感谢.

References

- Ahn B-H, Kroehl H W, Kamid Y, et al. 2000. Universal time variations of the auroral electrojet indices[J]. *Journal of Geophysical Research*, 105(A2): 267-275.
- Hao X J, Han S, Gao L F, Liu W. 2023. Typical interference analysis of FHD-2B observation data at Datong seismic station[J]. *Progress in Earthquake Sciences*, 53(6): 251-260 (in Chinese).
- Li Q, Lin Y F, Zeng X P. 2006. Wavelet analysis as a tool for revealing geomagnetic precursors of the Zhangbei earthquake[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 49: 855-863 (in Chinese).
- Li Z H, Zhu W, Yu C, et al. 2023. Development status and trends of Imaging Geodesy[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 52(11): 1805-1834 (in Chinese).
- Qi G Z. 1978. Expansion of the "magnetic effect"[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 21(1): 18-33 (in Chinese).
- Ren K Y, Yao X, Zhao X M, et al. 2020. Study of landslide failure prediction based on TS-InSAR, GPS and image offset monitoring[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 39(S2): 3421-3431 (in Chinese).
- Stoica P, Moses R L. 2005. *Spectral Analysis of Signals*[M]. Upper Saddle River, NJ: Pearson Prentice Hall, 452: 25-26.
- Sun X C, Chang C Y, Bo J S, et al. 2024. The influence of seismic frequency spectrum characteristics on seismic response of loess slope[J]. *Acta Seismologica Sinica*, 46(6): 1024-1033 (in Chinese).
- Wang D W. 2001. Geomagnetism as a tool in the exploration of earthquake forecasting[J]. *Progress in Earthquake Sciences*, (5): 17-21 (in Chinese).
- Xing B Y, Zhang W Y, Zhang G C, et al. 2023. Prediction of step-type landslides based on deformation rate decomposition: A case study of Gapa landslide[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 42(3): 685-697 (in Chinese).
- Xu Q, Li W L, Dong X J, et al. 2017. The Xinmocun landslide on June 24, 2017 in Maoxian, Sichuan: Characteristics and failure mechanism[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 36(11): 2612-2628 (in Chinese).
- Xu Q, Zhu X, Li W L, et al. 2022. Technical progress of space-air-

- ground collaborative monitoring of landslide[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 51(7): 1416-1436 (in Chinese).
- Yamazaki Y, Maute A. 2017. Sq and EEJ—a review on the daily variation of the geomagnetic field caused by ionospheric dynamo currents[J]. *Space Science Reviews*, 206(1-4): 299-405.
- Zhao G Z, Zhang X M, Cai J T, et al. 2022. A review of seismo-electromagnetic research in China[J]. *Science China Earth Sciences*, 65(7): 1229-1246.
- Zhu W, Zhang Q, Zhu J J, et al. 2022. Real-time monitoring and early warning technology for huge landslides[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 44(7): 1341-1350 (in Chinese).
- ### 附中文参考文献
- 郝雪景, 韩胜, 高龙飞, 刘炜. 2023. 大同站 FHD-2B 地磁观测数据典型干扰分析[J]. *地震科学进展*, 53(6): 251-260.
- 李琪, 林云芳, 曾小苹. 2006. 应用小波变换提取张北地震的震磁效应[J]. *地球物理学报*, 49: 855-863.
- 李振洪, 朱武, 余琛, 等. 2023. 影像大地测量学发展现状与趋势[J]. *测绘学报*, 52(11): 1805-1834.
- 祁贵仲. 1978. “膨胀”磁效应[J]. *地球物理学报*, 21(1): 18-33.
- 任开瑀, 姚鑫, 赵小铭, 等. 2020. 基于时序 InSAR、GPS、影像偏移测量 3 种监测数据的滑坡失稳破坏预测研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 39(S2): 3421-3431.
- 孙雪晨, 常晁瑜, 薄景山, 等. 2024. 地震动频谱特性对黄土斜坡地震响应的影响[J]. *地震学报*, 46(6): 1024-1033.
- 王亶文. 2001. 地震预报探讨中的地磁学手段[J]. *国际地震动态*, (5): 17-21.
- 邢保印, 张炜怡, 章广成, 等. 2023. 基于变形速率分解的阶跃型滑坡预测——以岷爬滑坡为例[J]. *岩石力学与工程学报*, 42(3): 685-697.
- 许强, 李为乐, 董秀军, 等. 2017. 四川茂县叠溪镇新磨村滑坡特征与成因机制初步研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 36(11): 2612-2628.
- 许强, 朱星, 李为乐, 等. 2022. “天-空-地”协同滑坡监测技术进展[J]. *测绘学报*, 51(7): 1416-1436.
- 赵国泽, 张学民, 蔡军涛, 等. 2022. 中国地震电磁研究现状和发展趋势[J]. *中国科学: 地球科学*, 65(7): 1229-1246.
- 朱武, 张勤, 朱建军, 等. 2022. 特大滑坡实时监测预警与技术装备研发[J]. *岩土工程学报*, 44(7): 1341-1350.