

<https://doi.org/10.3799/dqkx.2023.144>



基于高阶磁异常导数与高阶统计量的地震短临预测方法

刘欢^{1,2,3}, 赵润卓^{1,2,3}, 董浩斌^{1,2,3}

1. 中国地质大学自动化学院, 湖北武汉 430074
2. 复杂系统先进控制与智能自动化湖北省重点实验室, 湖北武汉 430074
3. 地球探测智能化技术教育部工程研究中心, 湖北武汉 430074

摘要: 中强级地震给我国人民生命财产安全带来不可磨灭的灾难, 探索中强震发生时地球内部磁场与地震间的联系, 获取地震发生的前兆信息, 进而实现对中强级地震的预报, 是亟待解决的关键问题。近年来, 地磁场垂直分量Z被普遍用来进行地震预警, 但其存在预测周期长、阈值不易确定、对中强震预测精度不高等问题。为解决上述问题, 提出一种基于高阶磁异常导数与高阶统计量的地震短临预测方法(简称:HMAD-HS), 以有效减少高斯噪声对中强震前兆地磁信号的影响、缩短预测期、降低预测误报率, 进而提高预测性能。为验证该方法的可行性, 以2017年新疆喀什地区中强震情况为例, 将HMAD-HS与加卸载响应比、地磁逐日比等常用方法进行对比分析, 实验表明: HMAD-HS处理得到的中强震前兆信号明显且漏报率与误报率降低30%以上, 大幅提升了预报可信度。此外, 将HMAD-HS应用于我国多个地区的中强震短临预测, 证明该方法具有普适性且对中强震预测效果良好。

关键词: 中强震; 前兆信息; 高阶磁异常导数; 高阶统计量; 地球物理学。

中图分类号: P316

文章编号: 1000-2383(2024)08-2952-09

收稿日期: 2023-01-22

Short-Impending Earthquake Prediction Method Based on High-Order Magnetic Anomaly Derivative and High-Order Statistic

Liu Huan^{1,2,3}, Zhao Runzhuo^{1,2,3}, Dong Haobin^{1,2,3}

1. School of Automation, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China
2. Hubei Key Laboratory of Advanced Control and Intelligent Automation for Complex Systems, Wuhan 430074, China
3. Engineering Research Center of Intelligent Technology for Geo-Exploration, Ministry of Education, Wuhan 430074, China

Abstract: In recent years, moderate-strong earthquakes have brought indelible disasters to the safety of people's lives and properties. Hence, exploring the connection between geomagnetic fields and earthquakes, obtaining precursor information, and then realizing the prediction of moderate-strong earthquakes are vital issues that need to be solved urgently. For now, the vertical component Z of the geomagnetic field has been widely used for moderate-strong earthquake early warning. However, it still has numerous problems such as long prediction periods, difficulty in determining the threshold, and low prediction accuracy. To solve the above problems, a short-impending earthquake prediction method based on high-order magnetic anomaly derivative and high-order statistic, dubbed HMAD-HS, is proposed, which can effectively reduce the influence of Gaussian noise on the precursor geomagnetic field, shorten the prediction period, and then improve the prediction accuracy. To verify the feasibility of this

基金项目: 国家自然科学基金(No. 42274233); 国家重点研发计划项目(No. 2018YFC1503702).

作者简介: 刘欢(1989—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事智能地球物理仪器、信号与信息处理、健康监测与故障诊断方面的研究。ORCID: 0000-0001-9316-4749. E-mail: huan.liu@cug.edu.cn

引用格式: 刘欢, 赵润卓, 董浩斌, 2024. 基于高阶磁异常导数与高阶统计量的地震短临预测方法. 地球科学, 49(8): 2952—2960.

Citation: Liu Huan, Zhao Runzhuo, Dong Haobin, 2024. Short-Impending Earthquake Prediction Method Based on High-Order Magnetic Anomaly Derivative and High-Order Statistic. *Earth Science*, 49(8): 2952—2960.

method, taking the moderate-strong earthquakes of Kashgar, Xinjiang in 2017 as an example, the HMAD-HS was compared with two commonly used methods, i.e., load-unload response ratio and geomagnetic daily ratio. The experimental results show that the precursor signals of moderate-strong earthquakes obtained by HMAD-HS are obvious, and the missing report rate and false report rate are reduced by more than 30%, which greatly improves the forecast credibility. Further, the applications of HMAD-HS for the short-term prediction of moderate-strong earthquakes in many regions of our country prove that the proposed method is universal and has a good effect on predicting moderate-strong earthquakes.

Key words: short-impending earthquake; precursor information; high-order magnetic anomaly derivative; high-order statistic; geophysics.

0 引言

地震是一种具有突发性和破坏性的自然灾害,常常造成重大的人员伤亡和经济损失,同时容易引发海啸、瘟疫等,其危害远超地震本身所带来的直接影响,因此地震灾害预警一直是全世界急于攻克的难题(秦乐,2020)。我国位于环太平洋与欧亚地震带之间,地震具有频度高、震源浅、分布广等特点(尹祥础,2015)。据统计,近5年来我国发生中强震150余起(如图1所示),其中新疆、四川等地为地震多发区(李德威等,2014),给当地人民带来了无法言喻的痛苦。

地震作为自然灾害无法阻止,为了将损害降到最低,目前主要应对措施是收集地震发生的前兆信息,进而实现地震预测。国外学者 Stacey(1963)、Nagata(1972)等人在20世纪六七十年代开始着眼于研究地磁与地震间的联系,提出了“压磁效应”理论。之后,国内学者相继提出“膨胀磁效应”(祁贵仲,1978)、“感应磁效应”等。上述研究结果表明:在地震孕育过程中,震源区地下应力逐渐积累,导致岩石内部磁性的各向异性发生改变,进而改变地下介质电磁参数(丁鉴海等,2005),而这一过程引起

的磁场变化在一定程度上可以反映地震前兆信息。由于地磁场是随时间、空间变化的物理量,其时空属性具有延拓性(陈思静等,2022;胡祥云等,2022),通过分析地震发生前的磁场分布和变化规律,依据历史数据即可完成对该地区的地震预测。

此外,研究人员通过对以往地磁数据的观察,发现中强震发生前,震源区域地磁场垂直分量Z会出现较为明显的“V”型波动,Z分量的日变化在一定程度上可以反应地球内部介质电磁性质的变化(倪晓寅等,2021)。因此,近年来国内外学者普遍研究如何利用Z分量的处理结果作为地震前兆的依据。

目前,利用地磁数据及其异常提取的地震预测方法主要有加卸载响应比法、地磁逐日比法等。通过探索震前地磁异常在持续时间、变化幅度和异常范围等方面呈现的变化规律,实现地磁异常与地震的准确对应。在加卸载响应比法方面,尹祥础和尹灿(1991)率先提出该理论,将加卸载响应比定义为非线性系统失稳过程中伴随外部应力加载与卸载的不平衡作用过程;王亶文(1995)将加卸载响应比法引入地震预测模型中,通过日变幅比值清楚地刻画出震源区介质的损伤程度,借此来实现地震预测;在此基础上,曾小萍(1996)等人考虑磁暴过程对加卸载响应的影响,进一步优化了加载与卸载的计算过程。Trotta and Tullis(2006)对加卸载响应比法进行独立测试,研究不同参数对预测结果的影响。在地磁逐日比法方面,冯志生(2001)等人基于地磁日变幅,简化加卸载响应比值计算方式,提出了地磁逐日比法,更便于实际操作计算。近几年,艾萨·伊斯马伊力(2021)、钱才(2021)等人利用地磁逐日比法为新疆强震活跃期的判定及地震预报提供参考依据。然而,加卸载响应比法和地磁逐日比法仍然存在所需数据繁多、受阈值影响较大、地震预测期较长等问题。

针对以上问题,本文提出了一种基于高阶磁异

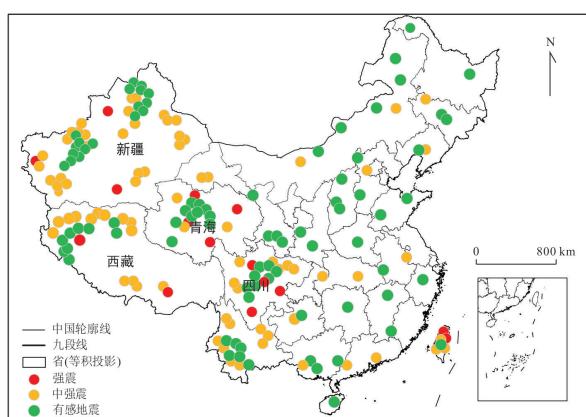


图1 我国近5年地震分布

Fig.1 Earthquake distribution in China in recent 5 years

底图据自然资源部审图号:GS(2020)4630号

常导数与高阶统计量的地震短临预测方法,简称 HMAD-HS。本方法不受阈值影响,预测周期可缩短在 120 天以内,降低预测的误报率、漏报率,进一步提高了中强震的预测可信度。主要贡献如下:

(1) 分析了地磁分量间的相关性,选取地磁总场 F 作为地震前兆信息原始数据,以克服磁暴对 Z 分量的影响;

(2) 采用滑动窗与最小二乘法对地磁总场 F 进行预先处理,得到高阶磁异常导数,并将其与高阶统计量法相结合,以抑制高斯噪声对地磁信号的影响,进一步放大地震前兆信号;

(3) 将所提出的 HMAD-HS 方法与目前常用的地磁逐日比法、加卸载响应比法,在同一地区、同一年内对中强震的预测准确度进行了对比研究,验证了 HMAD-HS 法的优势。此外,进一步分析了 HMAD-HS 方法针对我国不同地区的地震预测准确度,验证了该方法的普适性。

1 地磁分量相关性分析

由于地磁场垂直分量 Z 与地震关系紧密,常被用于分析地震前兆信息(张振宇等,2021),然而地磁 Z 分量受磁暴影响明显,会对地震预测结果产生影响,为了提高预测的可信度,我国李鸿宇(2018)、陈贤(2021)等人根据地磁每日一值空间相关分析法,研究发现地磁总场 F 日值数据与地震存在联系,地磁总场强度 F 与其他地磁要素间关系如图 2 所示。

图中地磁场作为矢量场,由总场强度 F 、水平分量 H 、北向分量 X 、东向分量 Y 、垂直分量 Z 、磁倾角 I 、磁偏角 D 这 7 个要素组成,其中 F 分量与 X 、 Y 、 Z

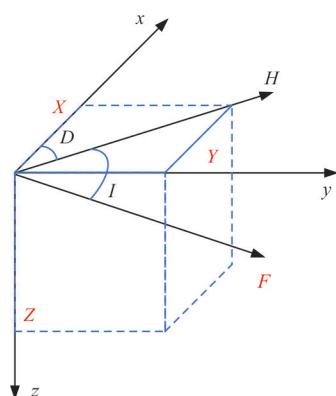


图 2 地磁七要素示意图

Fig.2 Schematic diagram of the seven elements of geomagnetic field

分量间的关系为 $F^2 = X^2 + Y^2 + Z^2$ 。当 F 分量年变化曲线出现“V”型突然变化时,往往后期有地震发生(Cop et al., 2021),可以推断出地磁分量 F 与地震联系紧密。为了进一步验证地磁 F 分量可以为地震监测预报工作提供数据支撑,本文对地磁分量间的相关性展开分析,借此来研究地磁 F 分量与 Z 分量间相关性,地磁分量相关性分析图如图 3 所示。

图 3 中,主对角线部分分别表示 4 个地磁分量场的数据分布柱状图,其中红色曲线为柱状图的拟合曲线,可以清楚地表现地磁分量数据的统计分布特性。横纵坐标表示地磁分量大小,单位为 nT。左下角黑色圆圈部分表示两两地磁分量间相关性的散点分布图,其中红色曲线为散点分布图的拟合曲线。右上角数字代表对应分量的相关系数大小,数字的正负表示对应两个分量的正、负相关性;此外,用星标数量表示显著性水平,星标数量越多表明该数据可信度越高。图中不难看出 Z 分量与 F 分量是正相关,相关系数较大并且该数据可信度极高。所以通过地磁 F 分量替代地磁 Z 分量,以获取地震前兆信息的方法是可行的,可进一步抑制磁暴影响,提高地震预测精度。

2 HMAD-HS 地震短临预测方法

2.1 高阶磁异常导数获取

地球磁场的变化主要来源于地球内部,是由地球液态核心的不规则流动造成的,由此引发的地磁抖动也被认为是导致地震的原因。Cop et al.(2021)提出地球磁场的每个分量均可表示为高阶多项式,且地磁抖动可看作是多项式系数的变化。故本文采用滑动窗口算法与最小二乘法将地磁 F 分量数据拟合成高阶多项式,进而计算得出高阶磁异常导数。

(1) 获取高阶多项式 滑动窗口算法指一个窗口,在一段区间上从左到右滑动,一直到区间的尾部,滑动窗口的长度是可以动态变化的(也可以固定)。该算法可以将嵌套循环问题转化为单循环问题,降低循环复杂度。最小二乘法是一种数学优化技术,它通过最小化误差的平方和寻找数据的最佳函数匹配。通过滑动窗算法选取数据后采用最小二乘法将数据拟合成高阶多项式,使总的拟合误差达到最小。滑动窗口算法与最小二乘法拟合高阶多项式原理如图 4 所示。

图 4 中左侧为滑动窗算法示意图,右侧为最小二乘法拟合高阶多项式示意图,以拟合成三阶多项

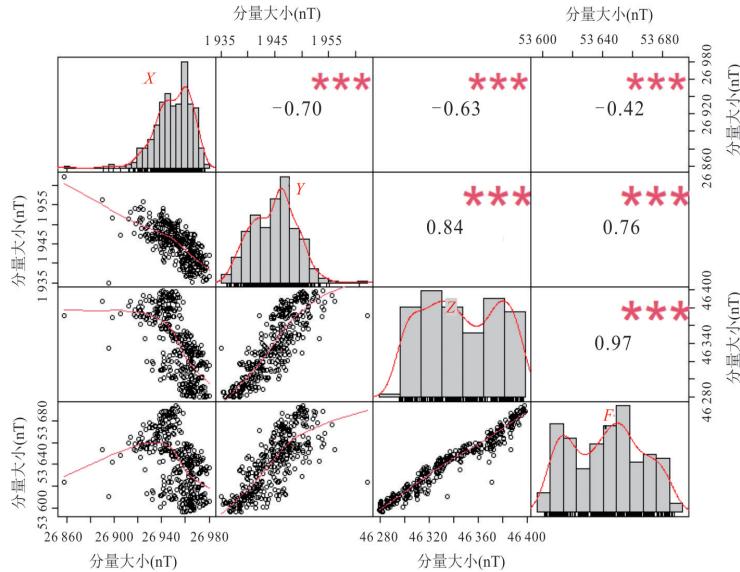


图3 地磁分量相关性热图

Fig.3 Geomagnetic component correlation heat map

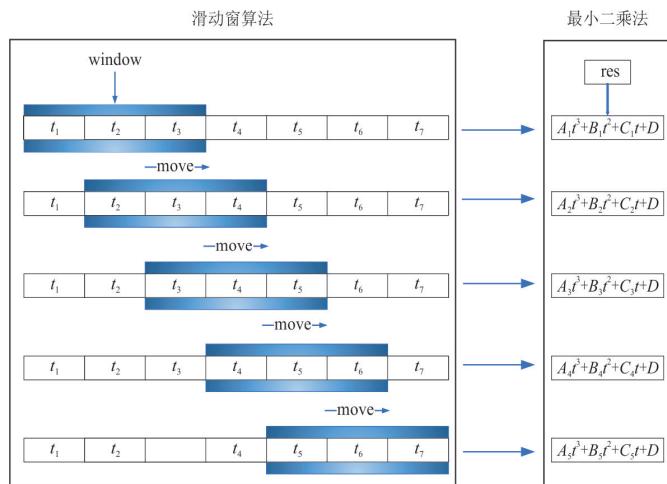


图4 高阶多项式获取示意图

Fig.4 High order polynomial acquisition diagram

式、窗口长度以3个单位长度大小为例,依次选取数据并向右滑动至数据终点,每个窗口内数据通过最小二乘法拟合成对应的高阶多项式,为计算高阶磁异常导数做准备.

(2) 获取高阶导数 基于上述滑动窗口算法、最小二乘法拟合成的高阶多项式,地磁震动可以看作是其高阶系数的变化(Gavoret *et al.*, 1986),需要针对时间对高阶多项式求导,高阶导数用来表现原始地磁分量数据变化的累加效应,可以更清楚地放大曲线的变化.高阶磁异常导数获取公式如下:

$$\begin{cases} y(t) = k_1 t^n + k_2 t^{n-1} + k_n t + k_{n+1} \\ \frac{dy}{dt} = nk_1 t^{n-1} + (n-1)k_2 t^{n-2} + k_n \\ \frac{d^2y}{dt^2} = n(n-1)k_1 t^{n-2} + \dots + 2k_{n-1}, \\ \dots \\ \frac{d^n y}{dt^n} = \prod_{i=0}^{n-1} (n-i) k_1 \end{cases} \quad (1)$$

式中: n 表示阶数且不小于3, t 为时间变量, $k_i(i=1, 2, \dots, n+1)$ 表示高阶多项式的系数.以三阶多项式为例,其磁异常导数可以表示为:

$$\left\{ \begin{array}{l} y(t) = At^3 + Bt^2 + Ct + D \\ \frac{dy}{dt} = 3At^2 + 2Bt + C \\ \frac{d^2y}{dt^2} = 6At + 2B \\ d\left(\frac{\frac{d^2y}{dt^2}}{dt}\right) = 6A \end{array} \right. , \quad (2)$$

式中, A, B, C, D 为前述获取高阶多项式过程中拟合出的三阶多项式系数, $6A$ 即为所求得的高阶磁异常导数, 通过滑动窗法将每个窗口内数据拟合成高阶多项式后, 记录每个窗口求得的高阶磁异常导数.

2.2 高阶统计量信号处理

高阶统计量主要包括高阶矩、高阶累积量、高阶矩谱和高阶累积量谱(杨涛等, 2005). 本文主要选用高阶累积量来反映地震前兆信息, 研究表明, 由于地震信号的噪声大多具有高斯性或者似高斯性, 而高斯噪声二阶以上的高阶累积量恒为 0, 故计算地震信号的高阶累积量可以抑制高斯有色噪声, 进而有效提取非高斯信号的多种信号特征信息, 更加符合实际地震数据情况, 是获取地震前兆信息的重要手段.

此外, 针对地磁信号中非高斯噪声的影响, 由于地磁台站通常建设在远离城市等电磁干扰源的区域, 且会经常进行一系列的校准和误差修正, 因此受到非高斯噪声的影响较小. 由于本文所使用的数据源主要来自于地磁台站, 基于前述分析, 主要针对高斯噪声干扰进行了预处理, 忽略了非高斯噪声的影响.

针对高阶矩, 对于变量 X , 它的 k 阶矩可以表示为:

$$m_k \triangleq \text{Mon}\{X^k\} = E\{X^k\}, \quad (3)$$

式中: 变量 X 由公式(2)中获取的高阶磁异常导数构成. 针对高阶累积量, 在对于变量 X , 它的 k 阶累积量可以表示为:

$$k=1, C_1 = m_1, \quad (4)$$

$$k=2, C_2 = m_2 - 3m_1m_1 + 2m_1^2, \quad (5)$$

$$k=3, C_3 = m_3 - 3m_2m_1 + 2m_1^2, \quad (6)$$

$$k=4, C_4 = m_4 - 4m_3m_1 - 3m_2^2 + 12m_2m_1^2 - 6m_1^4, \quad (7)$$

式中: m_k 表示公式(3)中所求得的 k 阶矩, C_k 表示所求得的 k 阶累积量. 零均值四阶累积量的异常变化幅度比前三阶累积量明显, 故研究中一般选用四阶及以上高阶累计量, 在地震预测中发现四阶及以上阶数所获得的异常点差别很小, 所以仅展示四阶累积量结果, 如公式(7)所示.

2.3 地震前兆磁异常信息提取

取某地区一年的地磁总场 F 日值数据 $F_t (t=1, 2, 3, \dots)$, 然后对该数据进行标准化处理, 即将其转化为零均值数据, 可以简化处理流程, 提高后续分析结果的精确度. 此外, 考虑到磁暴等引发的短期磁异常可能伴随有短临地震信息, 在数据预处理阶段并没有对该干扰进行预先剔除, 而是保留地磁台站原有数据信息. 标准化处理公式如下:

$$\bar{F}_t = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N F_t, \quad (8)$$

$$X_F = F_t - \bar{F}_t, \quad (9)$$

式中: N 为每个月的天数, \bar{F}_t 为 F_t 一个月的平均值, X_F 为标准化后的序列. 根据 1.2 节中方法对 X_F 数据序列求得高阶磁异常导数后, 根据公式(3):(7) 得到高阶统计量, 进而绘制出高阶统计量的变化曲线. 结合实例, 针对某地区往年数据进行实验, 利用计算出的高阶统计量变化曲线来确定异常值点及其所对应的日期, 查阅资料观察异常点日期后 120 天内是否有中强震发生, 以借此验证本文所提出的 HMAD-HS 法是否满足地震短临预测.

3 地震短临预测方法对比分析

采用加卸载响应比法、地磁逐日比法和 HMAD-HS 法对 2017 年新疆喀什地区中强震情况进行预测分析, 通过比较分析 HMAD-HS 法在中强震短临预测方面的优势. 此外, 将该方法对我国不同地区的中强震进行预测分析, 借此验证其普适性.

3.1 地震短临预测方法比较

根据调查数据显示, 2017 年新疆喀什地区共发生地震 20 余次, 包含震级从 3.0 级有感地震到 5.5 级中强震, 涵盖震级范围广泛、样本数目较多, 故被选作本次实验目标, 其中该年震级最强的两次地震分别是 5 月 11 日 5.5 级地震和 12 月 7 日 5.2 级地震, 3 种方法对上述两次中强震的预测情况如图 5 所示.

图 5 为分别采用地磁逐日比法、加卸载响应比法、以及 HMAD-HS 法对中强震的短临预测效果, 图中已标注出两次中强震的日期, 需确定阈值后, 判断该年的异常值点. 阈值的选取可由该地区历史地磁数据推算得到, 但不同年份之间的阈值仍存在细微差异, 所以两种方法的预测结果受阈值影响较大.

图 5a 表示针对 2017 年喀什地区采用地磁逐日比法, 选取阈值为 2.5 的预测结果. 图中可以获取 5 处异常点, 其中第 37 天与第 243 天分别与两次中强

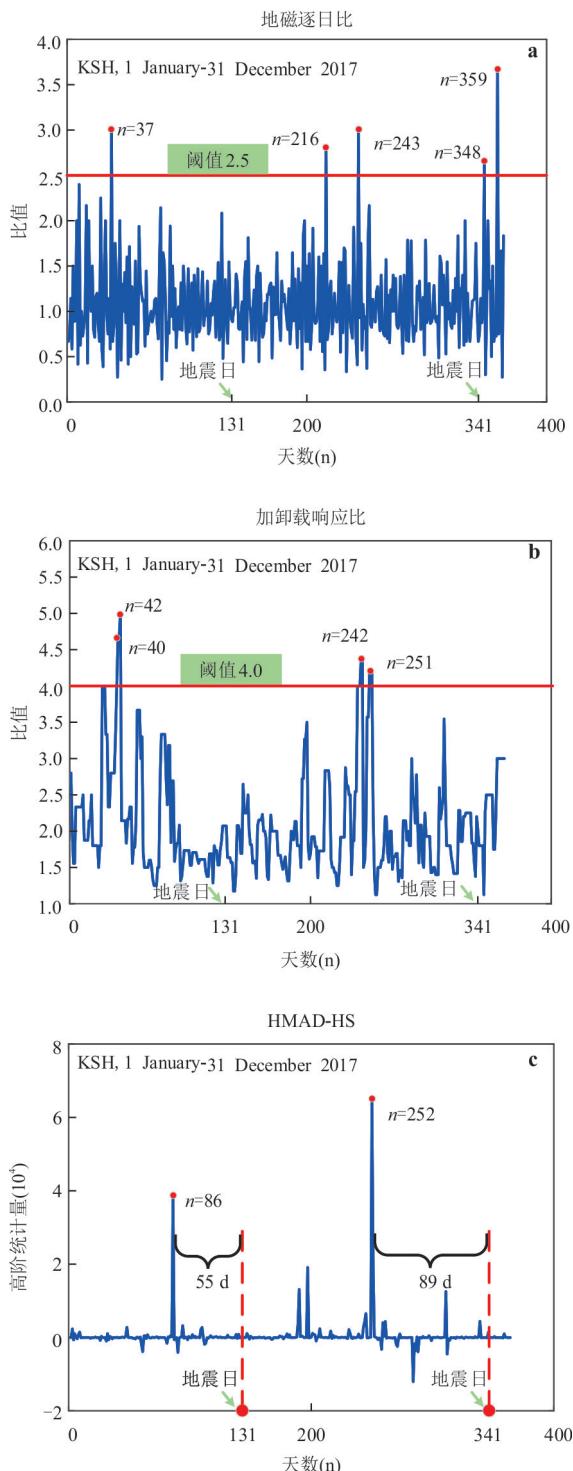


图5 地震短临预测方法比较

Fig.5 Comparison of different short-impending earthquake forecasting methods

震对应满足短临预测期要求,但另外3次异常值点未能成功预测地震,误报率为60%,因此,该方法预测结果的可信度较低.不同阈值对地磁逐日比法影响如表1所示.

图5b表示针对2017年喀什地区采用加卸载响应

表1 地磁逐日比法、加卸载响应比法、以及HMAD-HS方法对比结果

Table 1 Quantified comparison using geomagnetic daily ratio, loading and unloading response ratio, and HMAD-HS

方法	地磁逐日比			加卸载响应比			HMAD-HS
阈值	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0	4.5	\\"\\
漏报率	0	0	100%	0	0	50%	0
误报率	81.8%	60%	0	75%	50%	50%	0
涵盖率	100%	100%	0	100%	100%	50%	100%

比法,选取阈值为4.0的预测结果.图中可以获取4处异常点,4次异常值点均满足中强震短临预测要求,故无法准确识别异常值点与地震的对应关系,计算得出其误报率为50%,短临预测效果略优于地磁逐日比法.不同阈值对加卸载响应比法影响如表1所示.

图5c表示针对2017年喀什地区采用HMAD-HS法的预测结果.图中纵坐标“高阶统计量”代表计算获得的高阶累积量大小.高阶统计量包含高阶累积量、高阶矩等,在地震预测领域,常用“高阶统计量”作为地球物理学的分析工具.图中变化曲线可以观察到两次明显的异常值点,并且两次异常值点分别与两次中强震的时间间隔在4个月内,满足短临预测要求.该方法无需考虑阈值的影响且误报率与虚报率为0,极大增强预测结果的可信度.

3.2 普适性实验

为进一步验证HMAD-HS地震短临预测方法的普适性,在新疆喀什地区预测情况优异的基础上,选取同样作为我国中强震频发地的四川成都、青海海西、以及未发生中强震的湖北武汉作为预测研究对象.此外,为保证实验结果的可信度,选取不同年份以验证HMAD-HS方法可行性.

(1) 成都地区地震短临预测 根据调研数据,成都地区位于我国南北地震带中段,该地区强震发生概率较高.2013年至2014年年初,成都共记录发生中强震3次,分别为2013年4月21日的5.4级地震、5.0级地震和2014年4月2日的4.5级地震.

基于HMAD-HS的四川成都地区地震短临预测结果如图6所示.可以看出,第341天的异常值点与2014年4月2日中强震对应;第75天的异常值点与2013年4月21日的中强震对应,且满足短临预测关系.但成都当日发生两次中强震,故漏报一次.综上,所提出的HMAD-HS方法针对2013—2014年成都地区中强震短临预测的涵盖率为66.7%,漏报率为33.3%,误报率为0.

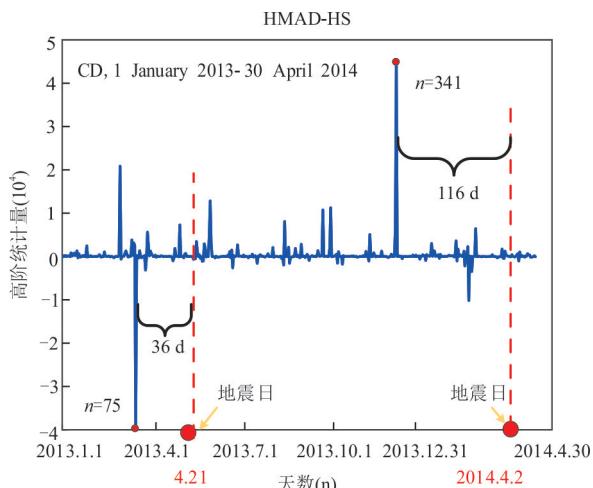


图 6 基于 HMAD-HS 方法的成都地区地震短临预测结果
Fig.6 Short-impending earthquake forecasting results of Chengdu using HMAD-HS

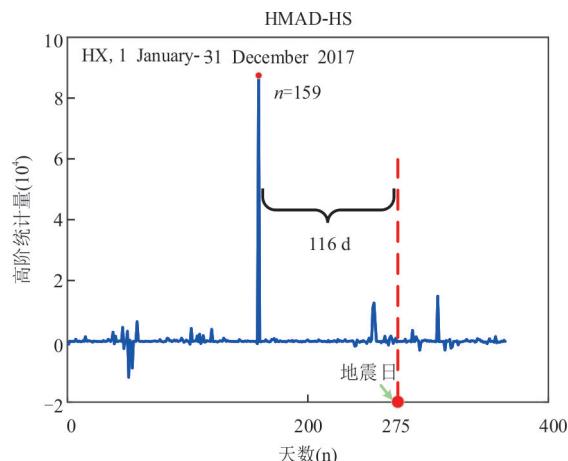


图 7 基于 HMAD-HS 方法的海西地区地震短临预测结果
Fig.7 Short-impending earthquake forecasting results of Haixi using HMAD-HS

(2) 青海海西地区地震短临预测 根据调研数据,青海海西中格尔木地区位于我国西北部青藏高原地震带,该地区地震频繁且地震活动较强,选取其 2014 年的地磁数据作为研究对象,该年发生一次 5.2 级中强震,时间为 2014 年 10 月 2 日。

基于 HMAD-HS 的青海海西地震短临预测结果如图 7 所示。可以看出,第 159 天的异常值点满足短临预测要求,预测期在 4 个月内,与 2014 年 10 月 2 日发生的中强震对应。因此,本文所提出的 HMAD-HS 方法针对 2014 年海西地区中强震短临预测的涵盖率接近 100%,漏报率与虚报率为 0。

(3) 武汉地区地震短临预测 武汉作为我国南部内陆城市,近年来未发生地震,选取其 2015 年的地

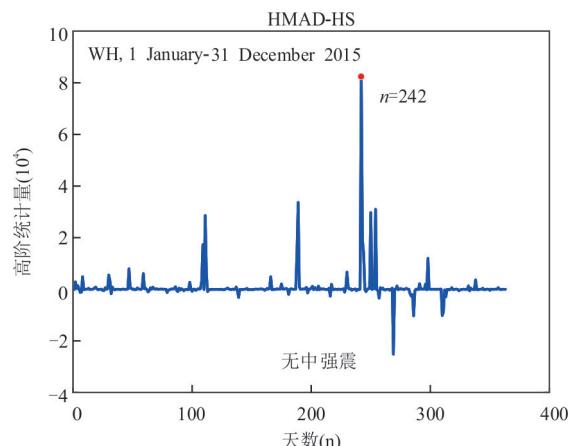


图 8 基于 HMAD-HS 方法的武汉地区地震短临预测结果
Fig.8 Short-impending earthquake forecasting results of Wuhan using HMAD-HS

磁数据作为研究对象,以验证 HMAD-HS 方法在无中强震发生地区是否会误检测到地震前兆信号。

基于 HMAD-HS 的湖北武汉地区地震短临预测结果如图 8 所示。可以看出,在 242 天处存在异常值点,但该年度无地震与其对应,表明所提出的 HMAD-HS 方法针对无中强震的地区易发生误报。

为综合评估所提出 HMAD-HS 方法的可行性,本文采用 HMAD-HS 方法对 2017—2022 年多个地区的地磁台站数据进行了处理,通过涵盖率、误报率和漏报率数据大小考量预测效果。其中,涵盖率表示有地震且预测成功的次数占实际发生地震总数的比值;漏报率表示有地震但未预测成功的次数占实际发生地震总数的比值,且涵盖率与漏报率总和为 100%。误报率表示预测地震失败次数与预测发生地震总数的比值,与涵盖率和漏报率无数学关系。

图 9 展示了 2017—2022 年使用 HMAD-HS 方法针对不同地区的中强震预测结果。结果表明,在武汉等无地震区,HMAD-HS 方法预测误报率较高。而针对喀什、成都、海西所在的地震区,HMAD-HS 方法预测效果良好,平均涵盖率约为 78.9%,平均漏报率约为 21.1%,平均误报率约为 20.7%,可以实现对已知中强级地震的有效预测,且相较于地磁逐日比法、加卸载响应比法等目前常用的地震预测方法,漏报率与误报率降低 30% 以上。上述实验结果表明:由于 HMAD-HS 方法可以有效放大地磁信号中的异常信息点,包括地震及其他短期磁异常(如磁暴)。在地震区,由于地震信号导致的磁异常强度远大于其他干扰,对地震预警造成的影响很小,故预测效果良好。而在无地震区,HMAD-HS 方法会放大磁暴等短期磁异常信息,

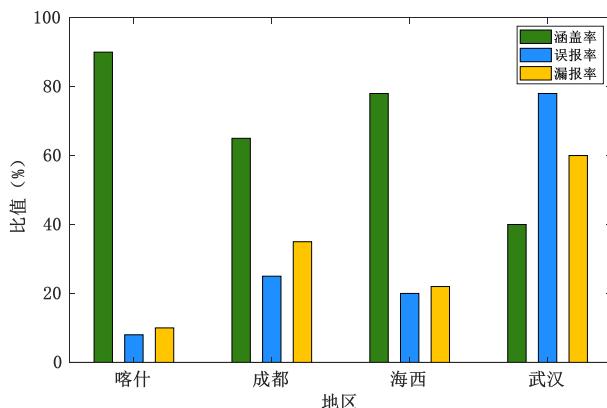


图9 2017—2022年使用HMAD-HS方法针对不同地区中强震预测结果对比

Fig.9 Comparison of medium-strong earthquake forecasting results of multi-cities using HMAD-HS from 2017 to 2022

造成地震信息的误报.故所提出的HMAD-HS方法在地震多发区可信度更高.

4 结论

本文围绕我国现阶段地震预测方法展开讨论,提出了一种基于高阶磁异常导数与高阶统计量的地震短临预测方法(HMAD-HS),在一定程度上弥补了现有方法在预测周期、中强震预测可信度等方面不足,同时也为我国对中强震短临预测提供了必要的参考依据.研究结果表明:(1)HMAD-HS方法选取地磁分量 F 替代 Z 作为研究对象,有效抑制了高斯噪声对中强震前兆地磁信号的影响,无需考虑阈值且误报率与漏报率均降低30%以上,短临预测结果可信度高;(2)HMAD-HS方法缩短了地震预测期,减少了研究所需数据成本.

此外,本研究也存在一定的不足,主要表现在:HMAD-HS方法预测地震的震级主要集中在5~6级,对于中强震4.5~5级的地震预测不准且存在无中强震地区误报的情况;未能确定高阶磁异常导数阶数的选择与地震信号的关系;使用HMAD-HS方法处理当前地磁台站数据时,其结果可以用来评估该地区未来4个月内的地震情况,但因地震暂未发生,目前无法用预测涵盖率、误报率等数据进一步考量结果的有效性.

所以在未来研究工作中,如何探寻地磁信号与中强震不同震级间的关系,选取最优高阶导数阶数以进一步获取更多地震前兆信息;基于当前地磁台站数据对未发生的地震进行预判,并与未来网站提供的、新闻报道的地震发生情况进行比对,以进一步验证所提出方法的实用性,是下一步的重点研究方向.

References

- AiSa, Y., Feng, Z. S., Chen, J. H., et al., 2021. Geomagnetic Day by Day Ratio and Its Relationship with Strong Earthquakes in Xinjiang and Its Adjacent Areas. *Chinese Journal of Space Science*, 41(4): 617—625(in Chinese with English abstract).
- Chen, S. J., Hu, X. Y., Liu, S., et al., 2022. Application Study on High Precision Aeromagnetic Survey in Weila-situ, Inner Mongolia, China. *Earth Science*, 47(6): 2175—2189 (in Chinese with English abstract).
- Chen, X., Huang, E. X., Cheng, W. L., 2021. Correlation Anomalies of Total Daily F Value of the Geomagnetic Field in Southern Henan and Adjacent Areas. *Seismological and Geomagnetic Observation and Research*, 42(3): 115—120(in Chinese with English abstract).
- Cop, R., Rasson, J. L., Bilc, A., 2021. Accelerations in the Local Magnetic Field on the Adriatic Tectonic Microplate. *Open Journal of Earthquake Research*, 10(3): 95—104. <https://doi.org/10.4236/ojer.2021.103007>
- Ding, J. H., Suo, Y. C., Yu, S. R., et al., 2005. Phenomena of Geomagnetic and Ionospheric Anomalies and Their Relation to Earthquakes. *Chinese Journal of Space Science*, (6): 44—50. (in Chinese with English abstract).
- Feng, Z. S., Wang, J. Y., Jiang, Y. L., et al., 2001. Ratio of Daily Variation Amplitude of Geomagnetic Vertical Component and Its Relation with Earthquake. *South China Journal of Seismology*, (2): 20—27(in Chinese with English abstract).
- Gavoret, J., Gibert, D., Menvielle, M., et al., 1986. Long-term Variations of the External and Internal Components of the Earth's Magnetic Field. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 91(B5): 4787—4796. <https://doi.org/10.1029/jb091ib05p04787>
- Hu, X. Y., Han, B., Yu, T., et al., 2022. How to effectively deal with geomagnetic disaster prevention and mitigation.

- Earth Science*, 47(10): 3904—3905 (in Chinese with English abstract).
- Li, D. W., Chen, J. L., Chen, G. F., et al., 2014. Continental Seismotectonic System : Example from Qinghai-Tibet Plateau and Its Adjacent Areas. *Earth Science*, 39(12): 1763—1775(in Chinese with English abstract).
- Li, H. Y., Yuan, G. P., 2018. Spatial Correlation Characteristics of Geomagnetic Total Field before Strong Earthquakes. *Earthquake*, 38(1): 157—166(in Chinese with English abstract)
- Nagata, T., 1972. Application of Tectonomagnetism to Earthquake Phenomena. *Tectonophysics*, 14(3/4): 263—271. [https://doi.org/10.1016/0040-1951\(72\)90074-1](https://doi.org/10.1016/0040-1951(72)90074-1)
- Ni, X. Y., Huang, S., Jiang, C. F., et al., 2021. Geomagnetic Diurnal Variation Anomalies Before 2019 Changning M6.0 Earthquake and Xiahe M5.7 Earthquake. *Earthquake*, 41(3): 202—218(in Chinese with English abstract).
- Qi, G. Z., 1978. Dilatancy-Magnetic Effect. *Chinese Journal of Geophysics*, (1): 18—33(in Chinese with English abstract).
- Qian, C., Chen, L. G., Zhang, Z. G., 2021. Daily Ratio Anomaly of Vertical Component of Geomagnetic Field and Its Prediction Efficiency before Baicheng M5.4 Earthquake. *Inland Earthquake*, 35(2): 129—135(in Chinese with English abstract).
- Qin, L., 2020. Research and Implementation of Earthquake Precursor Data Analysis and Anomaly Monitoring(Dissertation). Anhui University, Hefei, 1—2. (in Chinese with English abstract).
- Stacey, F. D., 1963. Seismo-Magnetic Effect and the Possibility of Forecasting Earthquakes. *Nature*, 200(4911): 1083—1085. <https://doi.org/10.1038/2001083b0>
- Trotta, J. E., Tullis, T. E., 2006. An Independent Assessment of the Load/Unload Response Ratio (LURR) Proposed Method of Earthquake Prediction. *Pure and Applied Geophysics*, 163(11/12): 2375—2387. <https://doi.org/10.1007/s00024-006-0128-9>
- Wang, D. W., 1995. Geomagnetic Application of the Theory of Load-Unload Response Ration in the Prediction of Earthquake by Geomagnetism. *Seismological and Geomagnetic Observation and Research*, (3): 26—30(in Chinese with English abstract).
- Yang, T., Liu, Q. S., Fu, Y. Y., et al., 2005. Study on the Relationship between Seismo-Magnetic Effects and Seismicity in West Gansu and Its Adjacent Area with Higher-order Statistics. *North China Earthquake Sciences*, (1): 52—56(in Chinese with English abstract).
- Yin, X. C., Yin, C., 1991. Precursors of Nonlinear System Instability and Exploration of New Methods for Earthquake Prediction: Response Ratio Theory and Its Application. *Recent Developments in World Seismology*, (3): 16—18 (in Chinese with English abstract).
- Yin, X. C., 2015. Response Ratio Theory of Loading and Unloading and Its Application. Science Press, Beijing (in Chinese).
- Zeng, X. P., Xu, C. R., Zhao, M., et al., 1996. The Load-Unload Response Phenomena of Geomagnetic Field to Solar Wind and Earthquake Prediction. *Seismological and Geomagnetic Observation and Research*, (1): 49—53(in Chinese with English abstract).
- Zhang, Z. Y., Hu, X. Y., Wang, D. Y., et al., 2021. Geophysical Field Characteristics of Dongyang Region, Fujian Province. *Earth Science*, 46(10):3717—3729(in Chinese with English abstract).
- ### 中文参考文献
- 艾萨·伊斯马伊力, 冯志生, 陈界宏, 等, 2021. 地磁逐日比与新疆及周边地区强震关系. *空间科学学报*, 41(4): 617—625.
- 陈思静, 胡祥云, 刘双, 2022. 内蒙古维拉斯托地区高精度航磁调查与应用研究. *地球科学*, 47(6): 2175—2189.
- 陈贤, 黄恩贤, 成万里, 2021. 豫南及邻区地磁总场F日值相关性异常. *地震地磁观测与研究*, 42(3): 115—120.
- 丁鉴海, 索玉成, 余素荣, 2005. 地磁场与电离层异常现象及其与地震的关系. *空间科学学报*, (6): 44—50.
- 冯志生, 王建宇, 蒋延林, 等, 2001. 地磁垂直分量日变幅逐日比及其与地震关系的探讨. *华南地震*, (2): 20—27.
- 胡祥云, 韩波, 余涛, 2022. 如何有效应对地磁灾害防灾减灾. *地球科学*, 47(10): 3904—3905.
- 李德威, 陈继乐, 陈桂凡, 等, 2014. 大陆地震构造系统:以青藏高原及邻区为例. *地球科学*, 39(12):1763—1775.
- 李鸿宇, 袁桂平, 2018. 强震前地磁总场F_(2)测值的空间相关特征研究. *地震*, 38(1): 157—166.
- 倪晓寅, 黄颂, 姜楚峰, 2021. 2019年长宁6.0级与夏河5.7级地震前的地磁日变化异常. *地震*, 41(3): 202—218.
- 祁贵仲, 1978. “膨胀”磁效应. *地球物理学报*, (1): 18—33.
- 钱才, 陈鲁刚, 张治广, 2021. 拜城M_S5.4地震前地磁逐日比异常及其预报效能分析. *内陆地震*, 35(2): 129—135.
- 秦乐, 2020. 地震前兆数据分析与异常监测研究及实现(博士毕业论文). 合肥:安徽大学
- 王寰文, 1995. 加卸载响应比理论在以磁报震中的应用探索. *地震地磁观测与研究*, (3): 26—30.
- 杨涛, 刘庆生, 付媛媛, 等, 2005. 陇西及周边地区地震活动与震磁效应的高阶统计量研究. *华北地震科学*, (1): 52—56.
- 尹祥础, 尹灿, 1991. 非线性系统失稳的前兆与地震预测新方法的探索——响应比理论及其应用. *国际地震动态*, (3): 16—18.
- 尹祥础, 2015. 加卸载响应比理论及其应用. 北京: 科学出版社.
- 曾小苹, 续春荣, 赵明, 等, 1996. 地球磁场对太阳风的加卸载响应与地震. *地震地磁观测与研究*, (1): 49—53.
- 张振宇, 胡祥云, 王大勇, 等, 2021. 福建东洋地区地球物理场特征. *地球科学*, 46(10):3717—3729.