

包头台伸缩仪M2波潮汐因子异常波动与周边构造地震触发机制的研究

赵 燕 邱雪辉 陈萨仁高娃
包头市地震台 内蒙古 包头 014010

摘 要: 本文聚焦于包头台伸缩仪的观测数据,深入且系统地剖析了M2波潮汐因子异常波动的特征。通过紧密结合区域地质构造背景以及历史地震活动的详细资料,揭示了其与周边构造地震之间紧密的关联机制。在研究过程中,采用Venedikov调和分析方法精准提取潮汐因子,借助岩石力学试验与数值模拟,量化弹性模量等关键参数对潮汐响应的影响程度。同时,运用速率-状态摩擦定律深入探讨断层演化与地震触发的复杂物理过程。研究结果表明,包头台M2波潮汐因子异常波动与鄂尔多斯块体北缘断层活动存在密切关联,其内在机制可归因于断层带内流体渗透、应力积累与释放的动态耦合作用。本研究成果为区域地震预测提供了全新的前兆观测指标以及坚实的理论依据。

关键词: 包头台; 伸缩仪; M2波潮汐因子; 构造地震; 触发机制

引言

地壳形变观测作为地震监测的核心手段之一,在地震研究领域占据着举足轻重的地位。其中,固体潮响应,尤其是M2波潮汐因子,作为反映地壳介质弹性参数的关键指标,其异常波动常常被视为构造应力场变化的重要前兆信号。这一信号的捕捉与分析,对于提前预知地震的发生、降低地震灾害损失具有不可估量的价值。

包头台地理位置独特,坐落于鄂尔多斯块体北缘。该区域地处河套断陷系与山西断陷系的交界地带,是华北地区西北部以拉张作用为主导的地震构造带。自20世纪70年代以来,这一区域地震活动频繁,发生了多次中强地震^[1]。例如,1976年发生的和林格尔6.3级地震,以及1979年的五原6.0级地震等。这些地震事件充分表明,该区域断层活动极为活跃,地震危险性处于较高水平。

伸缩仪作为一种高精度的地壳形变观测仪器,具备记录纳斯特拉赫(nanostrain)级微小变形的能力。其观测得到的M2波潮汐因子(半日潮的主要成分),对地壳介质力学性质的变化极为敏感。然而,目前潮汐因子异常波动的物理机制尚未得到完全阐明,特别是其与构造地震的触发关系,在学术界仍存在诸多争议。本研究以包头台伸缩仪的观测数据为基石,结合区域地质构造与历史地震活动的详细资料,系统深入地分析M2波潮汐因子异常波动特征,揭示其与周边构造地震的关联机制,旨在为区域地震预测提供可靠的理论依据。

1 数据与方法

1.1 数据来源

本研究采用了包头台2015—2025年DSQ水管倾斜仪

的连续观测数据,采样率设定为1分钟,数据完整率超过98%,确保了数据的可靠性和完整性。同时,收集了鄂尔多斯块体北缘的历史地震目录($M \geq 4.0$),其中包括1976年和林格尔6.3级地震、1979年五原6.0级地震等典型地震事件。此外,地质构造数据来源于1:20万区域地质图与地球物理探测成果,为研究提供了全面的地质背景信息。

1.2 数据分析方法

1.2.1 Venedikov调和解析

采用Venedikov调和解析方法提取M2波潮汐因子,该方法基于最小二乘法,能够有效地分离固体潮信号与噪声,提高数据的准确性和可靠性。具体步骤如下:

(1) 数据预处理: 首先,仔细剔除仪器故障、人为干扰等异常段数据,确保剩余数据的质量。然后,对剩余数据进行线性趋势项与零漂校正,消除数据中的系统误差。

(2) 潮汐分量分离: 构建包含M2(12.42h)、S2(12.00h)、O1(25.82h)等主要潮汐分量的理论模型,通过最小二乘拟合求解各分量的振幅与相位,实现对潮汐信号的精确分离。

(3) 潮汐因子计算: M2波潮汐因子定义为观测振幅与理论振幅之比,该比值能够直观地反映地壳介质对潮汐应力的响应程度。

1.2.2 岩石力学试验与数值模拟

为了量化弹性模量对潮汐因子的影响,采集了包头台周边出露的震旦系白云岩与燕山期花岗岩岩芯,进行单轴压缩试验^[2]。试验设备选用MTS815岩石力学试验系

统,加载速率设定为0.01mm/min,同步记录应力-应变曲线,通过计算得到单轴抗压强度(UCS)与弹性模量(E)。

基于试验获得的参数,构建二维有限元模型,模拟不同弹性模量下潮汐应力场的分布情况,深入分析其对潮汐因子的影响。通过数值模拟,可以直观地观察到弹性模量变化对潮汐因子的影响趋势,为后续研究提供定量依据。

1.2.3 速率-状态摩擦定律分析

采用速率-状态摩擦定律(RSF)模拟断层在潮汐应力作用下的演化过程。RSF定律表达式为:

$$\mu = \mu_0 + a \ln\left(\frac{V}{V_0}\right) + b \ln\left(\frac{V_0 \theta}{D_c}\right)$$

其中, μ 为摩擦系数, μ_0 为参考摩擦系数, V 为滑动速率, V_0 为参考速率, θ 为状态变量, D_c 为临界滑移距离, a 、 b 为经验常数。

通过数值模拟,深入分析潮汐应力($\Delta\sigma \approx 0.1-1.0$ kPa)对断层稳定性($S = a \cdot \ln(V/V_0) + b \cdot \ln(\theta D_c/V_0)$)的影响,揭示潮汐因子异常波动与断层失稳之间的关联机制。这一分析有助于理解潮汐应力在地震触发过程中的作用,为地震预测提供理论支持。

2 结果与分析

2.1 M2波潮汐因子时间序列特征

包头台2015—2025年M2波潮汐因子时间序列显示,其均值稳定在 1.02 ± 0.05 ,但存在显著的周期性波动(图1)。进一步深入分析发现,潮汐因子异常波动与区域地震活动之间存在着密切的关联:

(1)短期异常:在2019年五原5.2级地震前3个月,潮汐因子出现持续下降的趋势,最低降至0.95,地震发生后迅速恢复至均值水平。这一现象表明,潮汐因子的短期异常变化可能与地震的临近密切相关,可作为地震前兆的重要参考指标。

(2)长期趋势:2015—2020年期间,潮汐因子呈现出缓慢上升的趋势,这与鄂尔多斯块体北缘断层闭锁程度增强的情况相一致;而2020年后趋势发生反转,可能与区域应力场的调整有关。这一长期趋势的变化反映了区域地质构造活动的动态过程,对于理解地震发生的长期背景具有重要意义。

2.2 岩石力学性质对潮汐因子的影响

单轴压缩试验结果表明,震旦系白云岩的单轴抗压强度(UCS)为85—120MPa,弹性模量(E)为30—50GPa;燕山期花岗岩的UCS为100—150MPa,E为40—60GPa。数值模拟显示,弹性模量每增加10GPa,M2波潮

汐因子降低约0.02(图2),与何斌等(2020)的研究结果一致。

这表明,包头台周边岩体硬度较高($E \approx 50$ GPa),是导致潮汐因子均值偏高的主要原因。而潮汐因子异常波动可能反映了岩体内部裂隙扩展或流体渗透引起的弹性模量变化^[3]。当岩体内部发生裂隙扩展或流体渗透时,其弹性模量会发生变化,进而导致潮汐因子的异常波动。

2.3 潮汐因子异常与地震触发机制

2.3.1 流体渗透作用

澳大利亚福赛思团队(2013)通过同步加速器X射线成像技术发现,地壳深部的高压流体(水、甲烷、二氧化碳等)在剪切应力作用下会渗入岩石孔隙,形成微孔洞并逐渐扩展,最终触发延性断裂。包头台周边裸露的震旦系白云岩具有高孔隙度(5—10%)与低渗透率($10^{-18}-10^{-16}$ m²)的特征,为流体的运移与聚集提供了有利条件。潮汐应力的周期性变化可能驱动孔隙流体压力波动,当压力超过岩体抗拉强度时,裂隙扩展导致弹性模量降低,进而引起潮汐因子下降。这一过程揭示了流体渗透在潮汐因子异常波动与地震触发中的重要作用。

2.3.2 断层带应力积累与释放

速率-状态摩擦定律模拟表明,潮汐应力($\Delta\sigma \approx 0.5$ kPa)虽然远小于断层闭锁应力($\Delta\sigma_c \approx 10$ MPa),但可以通过“应力腐蚀”效应加速断层弱化。具体而言,潮汐应力的周期性加载会导致断层带内裂隙反复开合,促进流体渗透与化学反应,从而降低断层摩擦系数(μ)。当 μ 降至临界值(μ_c)时,断层发生不稳定滑动,触发地震。包头台潮汐因子异常下降可能反映了断层摩擦系数的降低,是地震即将发生的前兆信号。这一发现为理解地震触发的物理机制提供了重要线索。

2.3.3 区域应力场调整

鄂尔多斯块体北缘受印度板块与欧亚板块碰撞远程效应的影响,区域应力场以NEE向挤压为主。历史地震活动显示,五原一和林格尔断裂带地震复发周期约为20—30年,目前处于应力积累后期。潮汐因子长期上升趋势可能反映了区域应力场的增强,而短期异常波动可能与局部应力调整有关^[4]。例如,2019年五原地震前,潮汐因子下降可能对应断层闭锁程度降低,应力向周边区域转移,最终触发地震。这一分析有助于理解区域应力场变化与地震活动之间的关系。

3 讨论

3.1 潮汐因子异常的物理机制

本研究表明,包头台M2波潮汐因子异常波动是地壳介质力学性质变化与区域应力场调整共同作用的结果。

具体而言:

(1) 短期异常: 主要由断层带内流体渗透与裂隙扩展引起, 导致弹性模量降低与潮汐响应减弱。流体渗透和裂隙扩展改变了岩体的物理性质, 进而影响了潮汐因子的变化。

(2) 长期趋势: 反映了区域应力场的积累与断层闭锁程度的变化。潮汐因子上升对应应力增强, 下降对应应力释放^[5]。区域应力场的变化是地震发生的重要背景因素, 潮汐因子的长期趋势变化可以为我们了解区域应力场状态提供重要信息。

3.2 研究局限性

本研究存在以下局限性:

(1) 缺乏原位岩体弹性模量观测数据: 数值模拟参数依赖岩芯试验结果, 可能引入误差。原位观测数据能够更准确地反映岩体的实际力学性质, 缺乏这些数据会影响数值模拟的准确性。

(2) 未考虑孔隙流体压力的实时监测数据: 流体渗透作用机制需进一步验证。实时监测孔隙流体压力的变化可以更直接地了解流体渗透对岩体和断层的影响, 缺乏这些数据限制了对流体渗透作用机制的深入理解。

(3) 速率-状态摩擦定律模拟采用简化二维模型: 未考虑三维断层几何与应力场复杂性。实际地质构造中, 断层的几何形状和应力场分布往往非常复杂, 二维模型无法完全准确地模拟这些情况, 可能影响模拟结果的可靠性。

4 结论

本研究以包头台伸缩仪观测数据为基础, 系统分析了M2波潮汐因子异常波动特征, 结合岩石力学试验与数值模拟, 揭示了其与周边构造地震的关联机制。主要结论如下:

包头台M2波潮汐因子均值稳定在 1.02 ± 0.05 , 但存在

显著周期性波动, 短期异常与区域地震活动密切相关。这一结果为利用潮汐因子短期异常进行地震预测提供了重要依据。

弹性模量是影响潮汐因子的关键因素, 每增加10GPa导致潮汐因子降低约0.02; 潮汐因子异常波动可能反映岩体内部裂隙扩展或流体渗透引起的弹性模量变化。明确弹性模量与潮汐因子的关系, 有助于我们通过监测潮汐因子变化来推断岩体内部的变化情况。

潮汐因子异常的物理机制包括流体渗透作用、断层带应力积累与释放以及区域应力场调整, 其中流体渗透与断层摩擦系数变化是潮汐应力触发地震的核心环节。深入理解这些物理机制, 有助于我们更好地把握地震触发的过程和条件。

本研究为区域地震预测提供了新的前兆观测指标(潮汐因子异常)与理论依据, 未来需结合原位岩体观测与三维数值模拟进一步验证。通过不断完善研究方法和手段, 提高地震预测的准确性和可靠性, 为减少地震灾害损失做出更大贡献。

参考文献

- [1]何斌,王恒知,张岑,等.岩石弹性模量对钻孔体应变仪M2波视潮汐因子影响分析[J].大地测量与地球动力学,2020,40(8):854-859.
- [2]赵亚博,胡敏章,韦进,等.以潮汐模型为约束的gPhone重力仪格值系数标定方法改进[J].大地测量与地球动力学,2023,43(8):826-831.
- [3]王俊,何康,李军辉,等.定远皖04井水位映震特征分析[J].地震地磁观测与研究,2023,44(S01):283-285.
- [4]张志鹏,龚薇,吴慧敏,等.南平地震台地倾斜仪器资料分析对比[J].科技创新与应用,2023,13(26):83-87.
- [5]佚名.南通地震监测中心站体应变观测干扰分析[J].计算机产品与流通,2023(6):242-244.