



内蒙古地区观测山洞覆盖层厚度对VP型宽频带倾斜仪数据的影响机制

白少奇, 马武刚, 周煊超, 裴东洋, 郭延杰

引用本文:

白少奇, 马武刚, 周煊超, 等. 内蒙古地区观测山洞覆盖层厚度对VP型宽频带倾斜仪数据的影响机制[J]. 大地测量与地球动力学, 2026, 46(6): 737–747.

Bai Shaoqi, Ma Wugang, Zhou Xuanchao, et al. Influence Mechanism of Observation Cave Overburden Thickness on VP Broadband Tiltmeter Data in Inner Mongolia Region[J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 2026, 46(6): 737–747.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.14075/j.jgg.2025.08.287>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

甘肃临夏机场二维微动剖面探测

Detection of 2D Microtremor Profile of Linxia Airport in Gansu Province

大地测量与地球动力学. 2023, 43(12): 1235–1239 <https://doi.org/10.14075/j.jgg.2023.03.106>

气压短时扰动对常熟台伸缩仪影响频段的分析

Analysis on the Influence Frequency Band of the Extensometer at Changshu Station by Short-Term Air Pressure Disturbance

大地测量与地球动力学. 2023, 43(12): 1307–1312 <https://doi.org/10.14075/j.jgg.2023.03.179>

丽江台超导重力仪检测的漾濞 $M_S6.4$ 与玛多 $M_S7.4$ 地震同震重力变化

Coseismic Gravity Changes of Yangbi $M_S6.4$ and Maduo $M_S7.4$ Earthquakes Detected by Superconducting Gravimeter at Lijiang Station

大地测量与地球动力学. 2023, 43(12): 1246–1252 <https://doi.org/10.14075/j.jgg.2023.12.007>

基于几何分析法的低轨星座设计

LEO Constellation Design Based on Geometric Analysis Method

大地测量与地球动力学. 2023, 43(10): 1003–1007 <https://doi.org/10.14075/j.jgg.2023.10.003>

InSAR约束下的2021年西藏比如 $M_W5.7$ 地震断层几何参数及滑动分布

Fault Geometry Parameters and Slip Distribution of the 2021 Biru, Tibet $M_W5.7$ Earthquake Constraint by InSAR

大地测量与地球动力学. 2023, 43(10): 1086–1089,1100 <https://doi.org/10.14075/j.jgg.2023.10.017>

内蒙古地区观测山洞覆盖层厚度对 VP 型宽频带 倾斜仪数据的影响机制

白少奇¹ 马武刚^{2,3} 周煊超⁴ 裴东洋⁴ 郭延杰⁵

1 锡林浩特地震监测中心站, 锡林浩特, 027000

2 湖北省地震局, 武汉, 430071

3 中国地震局地震研究所, 武汉, 430071

4 内蒙古自治区地震局, 呼和浩特, 010010

5 赤峰地震监测中心站, 赤峰, 024000

摘要:基于内蒙古自治区 5 个台站的 VP 型宽频带垂直摆倾斜仪观测数据, 采用波传播理论模型与深度学习预测框架相结合的方法, 初步揭示了山洞覆盖层厚度对观测信号的多频段定量影响机制。结果显示, 覆盖层厚度与背景噪声(尤其是南北向)呈显著负相关, 但对低频信号影响较弱; 其对 M_2 潮汐波振幅具有方向性调控作用, 南北分量振幅随厚度增加呈线性递增, 而东西分量在 20 m 处呈现独特的共振放大效应(峰值较 10 m 处提升约 3.6 倍); 当厚度大于等于 20 m 时, 可有效抑制季节性数据波动, 使变化幅度显著减小且峰值滞后 1~2 个季节, 同时显著降低气压导纳系数。结合随机森林模型验证发现, 山洞覆盖层最佳厚度区间为 18~22 m (20 m 为最优值), 岩性影响为次要因素, 覆盖层厚度及其与山体岩性介质密度的交互作用构成主导控制参量。本研究选定 20 m 覆盖层厚度作为工程阈值, 为有效抑制背景噪声、保障潮汐信号保真度及抵御季节性干扰提供了重要设计依据, 逐步推动台站山洞观测建设由经验模式向量化、工程化方向发展。

关键词:覆盖层厚度; RMS; 气压导纳系数; M_2 潮汐波; 随机森林模型

中图分类号: P315

文献标识码: A

VP 型宽频带垂直摆倾斜仪是大地形变连续监测的核心设备之一。相较于传统形变观测仪器, 该仪器在采样率、频带宽度等关键性能指标上实现显著提升, 且仪器调零方式得到优化改进^[1]。山洞覆盖层厚度是影响 VP 型宽频带垂直摆倾斜仪观测环境噪声水平与信号保真度的关键要素: 较厚的覆盖层可通过物理隔离作用, 有效衰减高频环境扰动, 提升观测数据信噪比, 进而为高频构造事件的捕捉提供有利条件。

为提升 VP 型宽频带垂直摆倾斜仪观测数据质量, 我国地形变观测领域的专家学者开展了大量研究工作。田思留等^[2]系统分析了康定地震台垂直摆观测所受降雨、降雪、强日照及人工干扰等影响; 李波等^[3]基于个旧台 VP 型宽频带垂直摆倾斜仪观测资料, 识别出自然环境、场地条件、仪器故障及人为活动等典型干扰类型; 李慧玲等^[4]通过对代县台、灵丘台观测数据的分析,

总结出日常观测中自然环境与人为干扰的特征规律; 多布拉等^[5]聚焦雷电、气压、风扰等干扰因素展开专项研究; 张小艳等^[6]、杨绍富等^[7]分别针对内蒙古地区、库尔勒地区 VP 型宽频带垂直摆倾斜仪的背景噪声特征进行分析; 高翠珍等^[8]开展山西地区同类仪器背景噪声的相关研究; 王建昌等^[9]采用 HHT 方法解析西安地震台 VP 型垂直摆的背景噪声特征; 马武刚等^[10]评估河北区域 VP 型宽频带垂直摆倾斜仪的映震效能; 王嘉琦等^[11]以 2019 年河北唐山 M4.5 地震为例, 探讨河北区域该类仪器的同震响应特征; 安然等^[12]依托 2022 年四川泸定 M6.8 地震, 研究了关中地区地形变仪器的同震响应规律; 余思等^[13]对比分析江西省赣州地震中心站 DSQ 型水管倾斜仪与 VS 型宽频带垂直摆倾斜仪的同震响应差异。

上述研究虽已精准识别各类干扰因素, 但仍存在明显不足: 缺乏对山洞本体物理属性(尤其

收稿日期: 2025-08-12

项目来源: 内蒙古自治区地震局局长基金(2025QN16); 中国地震局地震研究所所长基金(306393)。

第一作者简介: 白少奇, 工程师, 主要研究方向为地震监测, E-mail: baishaoqi88@163.com。

通讯作者简介: 马武刚, 高级工程师, 主要研究方向为地震观测技术与仪器研发, E-mail: mataintian123@163.com。

是覆盖层厚度)如何定量调控干扰传递过程,以及其对仪器核心观测指标(如噪声水平、潮汐波特征、季节漂移、气压响应)影响机制的深入探讨。VP 型宽频带垂直摆倾斜仪作为监测地壳微弱形变(如固体潮、构造形变、火山活动、滑坡等)的高精度设备,其观测数据对近地表环境干扰极为敏感。覆盖层作为仪器基座与基岩之间的关键介质,其厚度直接决定环境干扰向仪器的传递路径与强度,最终影响观测数据质量——这一核心影响因素在以往研究中常被简化处理或忽略。

本文以内蒙古自治区 5 套 VP 型宽频带垂直摆倾斜仪及对应山洞覆盖层为研究对象,系统探究不同覆盖层厚度对仪器观测数据(噪声水平、 M_2 波振幅、季节变化趋势、气压导纳系数)的影响机制。研究突破传统数据统计相关性分析的局限,采用波传播理论模型与深度学习预测框架相结合的方法,阐明覆盖层厚度在噪声抑制与潮汐信号保真中的物理本质,旨在为后续山洞型地倾斜仪观测台站的规划与建设提供科学依据。

1 台站概况及资料选取

内蒙古自治区境内现有安装 VP 型宽频带垂直摆倾斜仪的台站,分别位于呼和浩特地震监测中心站(呼和浩特台)、锡林浩特地震监测中心站(宝昌台)、海拉尔地震监测中心站(海拉尔台)、巴彦淖尔地震监测中心站(乌海台)、包头市地震局(包头台)。台站观测山洞基本参数见表 1。

表 1 台站信息概况
Tab.1 Overview of station information

台站名称	覆盖层厚度/m	覆盖层岩性	湿度/%	年温差/℃
乌海台	10	石灰岩	50	<0.5
宝昌台	15	石英斑岩	85	<0.8
呼和浩特台	20	石英流纹岩	60	<0.4
海拉尔台	23	安山玢岩	80	<0.1
包头台	>50	云角闪斜长片麻岩	80	<0.1

VP 型宽频带垂直摆倾斜仪自投入台站观测运行以来,仪器数据连续率较高,观测数值一直相对稳定,具有较为清晰的年变特征及固体潮特征。本文选取 2021-01-01—2023-12-31 连续 3 a 的观测数据进行分析研究。

2 数据处理方法

2.1 数据预处理

对选取原始数据预处理的步骤如下:

1)数据清洗。识别并剔除由仪器瞬态故障、

标定信号或人为干扰引起的明显异常值(定义为超出该日数据均值±5 倍标准差的点);随后,对于缺失数据段(单点缺失或连续缺失少于 3 h),采用线性插值法进行填补。

2)滤波去噪。为分离固体潮汐信号与环境高频噪声,采用四阶 Butterworth 低通滤波器进行滤波处理,截止频率设定为 0.1 Hz。该频率是基于 VP 倾斜仪的有效观测频带及内蒙古地区典型环境噪声(如风扰,主要能量集中于大于 0.1 Hz)特征而设定的。滤波处理在 MATLAB 中使用 filtic 和 filter 函数实现,滤波器选最小相位。

3)归一化。为消除不同台站仪器灵敏度差异,对预处理后的数据序列进行 Min-Max 归一化,将其线性变换至[0, 1]区间。

图 1 以呼和浩特台 2021-01—2021-03 部分原始数据及预处理后结果为例,展示了数据清洗与滤波前后的对比。

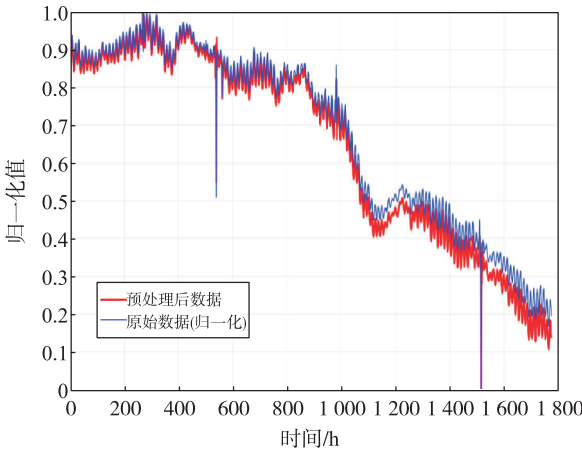


图 1 呼和浩特台原始数据与预处理数据结果对比
Fig.1 Comparison of raw data and preprocessed data results of Hohhot station

2.2 功率谱密度计算

PSD 反映信号在不同频率分量上的功率强度,用于识别信号中的周期性成分、噪声特征等。设信号为 $f(j)$, $j=1,2,\cdots,N$, 采样时间间隔为 Δt , 则功率谱密度(PSD)可表示为^[14]:

$$\text{PSD} = \frac{\Delta t}{N} \left| \sum_{j=1}^n x(j) \exp(2\pi(j-1)(k-1)/N) \right|^2$$

(1)

式中, Δt 为采样间隔; N 为采样点总数。一定频率范围内的平均功率谱密度为:

$$\text{mean PSD} = 1/M \sum_{k=k_1}^{k_2} \text{PSD}(k)$$

(2)

式中, k_1 和 k_2 分别为所选取频率范围的上限和下限; M 为所选取频率范围内的采样点数。

2.3 时域噪声水平计算

为量化数据在时域中的背景噪声水平,采用均方根(root mean square, RMS)作为评价指标。RMS反映了数据序列在单位时间内的波动强度,是地球物理观测中常用的噪声评估参数。其计算公式如下:

$$\text{RMS} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2} \quad (3)$$

式中, x_i 为第 i 个采样点; $\bar{x}$ 为该段数据的均值; N 为采样点数。

本研究将预处理后的数据按 1 h 分段,计算每段的 RMS 值,再取所有段的平均值作为该台站的代表性噪声水平。

2.4 FFT 频谱分析

快速傅里叶变换(FFT)是计算功率谱密度(PSD)的基础工具。本节所述 FFT 方法为 § 2.2 PSD 计算及 § 3.3 频谱分析提供频域变换支持。

对离散信号 $x[n]$ ($n=0,1,\dots,N-1$),其离散傅里叶变换(DFT)定义为:

$$X[k] = \sum_{n=0}^{N-1} x[n] e^{-j2\pi kn/N}, \quad k = 0,1,\dots,N-1 \quad (4)$$

式中, $X[k]$ 是频域复数序列,表示频率分量的幅度和相位, k 对应频率 $f_k = \frac{k f_s}{N}$, f_s 为采样率。

2.5 气压导纳系数

气压导纳系数(barometric admittance coefficient)定义为^[15]:

$$K_p = \frac{\partial \theta}{\partial P} \quad (5)$$

式中, θ 为倾斜仪记录的地倾斜变化量; P 为外部气压波动。

2.6 M_2 潮汐波提取方法

为了从观测数据中精确提取潮汐信息,国际上普遍采用基于维涅德(Venedikov)调和分析的谐波分析方法。

该方法的核心是将连续的固体潮观测序列 $Y(t)$ 分解为一系列谐波分量的叠加,其数学模型可表示为:

$$Y(t) = \sum_{i=1}^{N_t} [A_i \cos(\omega_i t + \varphi_i)] + \varepsilon(t) \quad (6)$$

式中, N_t 表示参与调和分析的潮汐波分量总数, $i=1,2,3,\dots,N_t$; A_i, φ_i 分别为第 i 个潮汐分量的观测振幅、相位滞后; ω_i 为该潮汐波的角频率,由天文参数决定,是已知的。

在众多潮汐波中, M_2 波(主要为月球半日波)因其振幅最大、信号最稳定,常被用作评估仪器性能、研究波传播介质物理性质的关键指标。其振幅因子 δ (观测振幅与理论振幅之比)和相位滞后 $\Delta\varphi$ 是重要的地球物理参数,计算公式如下:

$$\delta = A_{\text{观测}} / A_{\text{理论}} \quad (7)$$

$$\Delta\varphi = \varphi_{\text{观测}} - \varphi_{\text{理论}} \quad (8)$$

本研究将利用 Eterna、SPOTL 或 Baytap-G 等国际通用的潮汐分析软件包,对 VP 型宽频带垂直摆倾斜仪观测序列进行高精度的谐波分析,精确获取 M_2 波等主要潮汐波的参数,将其作为评估不同覆盖层条件下仪器潮汐保真度的核心量化指标。

3 山洞覆盖层厚度对观测数据影响分析

基于上述方法,分别进行了时域噪声(RMS)、季节性变化率、功率谱密度(PSD)、 M_2 波振幅和气压导纳系数等 5 个维度计算制图,系统分析比较各台站山洞覆盖层厚度对 VP 型宽频带垂直摆倾斜仪观测数据的影响。

3.1 山洞覆盖层厚度对数据噪声影响分析

为分析覆盖层厚度对背景噪声水平的影响,选取 2021-01-01—2021-03-31 (该时段内研究区域无 $M \geq 4.0$ 地震事件,能较好地反映台站固有背景噪声)的预处理后数据进行研究。首先,将数据按 1 h 长度分段,计算每小时的均方根(RMS)值。取所有这些 1 h 数据段的 RMS 值的平均数,作为该台站在此分析期间的代表性噪声水平。覆盖层厚度增加通常可以吸收或散射更多的振动能量,从而降低噪声值。5 个台站南北、东西分量的 RMS 均值结果如图 2 所示。

可以看出,各台站山洞 VP 型宽频带垂直摆倾斜仪 2 个测向观测数据的噪声值总体变化趋势是随着厚度的增加而变小,说明噪声水平与山洞覆盖层厚度存在一定相关性。采用 Pearson 相关法分析,对 2 个测向噪声值与覆盖层厚度的相关性进行量化,探究其变化关系,结果如图 3 所示。呼和浩特台(20 m)EW 向与海拉尔台(23 m)NS 向的 RMS 值曲线在观测期内表现出与其他台站不同的、更高的波动性,这是局部环境干扰所致。经核查,该波动与台站日志中记录的山洞内施工在时间上高度吻合。说明山洞覆盖层厚度的主要作用是宏观上的噪声抑制,如相关分析所示,但无法完全消除所有瞬时的、局部

环境发生的强干扰事件。这一现象也恰恰说明， 时干扰共同作用的结果。
在实际观测中，噪声水平是覆盖层厚度与局部瞬

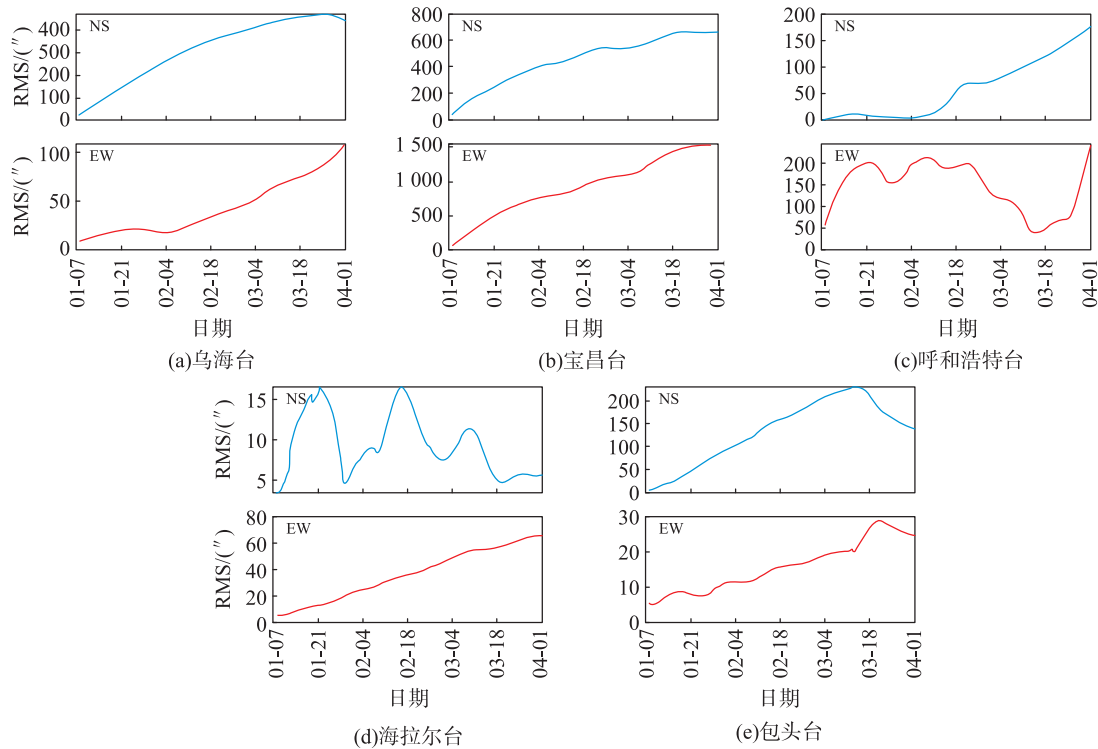


图 2 2021 年各台站 2 个测向数据 RMS 值曲线
Fig.2 RMS value curves of two direction data at each station in 2021

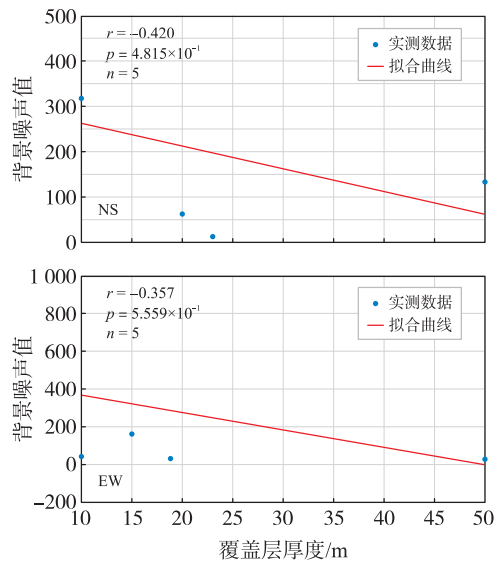


图 3 覆盖层厚度与背景噪声 Pearson 相关曲线
Fig.3 Pearson correlation curves between overburden thickness and background noise

由图 3 可见，南北向观测数据背景噪声值与覆盖层厚度相关系数 $r = -0.420$ ，东西向 $r = -0.357$ 。相关系数绝对值介于 $0.3 \sim 0.7$ ，厚度与背景噪声值之间存在中等强度的负相关，厚度增加时，噪声值会呈现出减弱趋势。从结果来看，覆盖层厚度确实对于噪声值有着一定的影响，覆盖层对于外界噪声有屏蔽作用。然而，山洞覆

盖层厚度并非唯一影响因素，需排查观测山洞岩体的完整性（如是否存在裂隙、含水层），以防止局部薄弱区放大噪声。

3.2 山洞覆盖层厚度对数据季节性变化影响分析

通过日常观察，季节变化对数据有显著影响。随着季节更替，仪器观测数据也会发生相应变化。覆盖层作为天然屏障，能在一定程度上抑制这种变化。为了探讨覆盖层厚度与季节变化之间的关系，量化季节性变化幅度，定义了季节变化率。计算方法是：对于每个台站 2022 年和 2023 年的同一季节（冬季：12 月—次年 2 月；春季：3—5 月；夏季：6—8 月；秋季：9—11 月），分别计算该季节内所有月均值的平均值，得到 2022 年均值和 2023 年均值。季节变化率计算公式为：季节变化率 = (2023 年均值 - 2022 年均值) / a，单位为 $\mu\text{rad/a}$ 。表 2 列出了据此计算得到的各台站各季节的变化率（东西向）。

通过对比 5 套仪器 2022—2023 年 2 个测向观测数据发现，南北向数据稳定性较差，季节性变化趋势不明显。故选取东西向观测数据，并绘制了月均值曲线图（图 4）。

表 2 显示，覆盖层厚度对于观测数据季节变化趋势存在着显著的调控作用。当覆盖层厚度

小于 20 m 时,各个季节之间变化幅度显著增大。最大值出现在宝昌台(15 m)秋季,约为 1 523 $\mu\text{rad/a}$,最低值出现在呼和浩特台(20 m)冬春季,约为-582 $\mu\text{rad/a}$ 。当覆盖层厚度大于 20 m 时,变化幅度明显减小。包头台(50 m)各季节变化均小于 120 $\mu\text{rad/a}$ 。结合图 4 可以看出,季节相位存在偏移现象。覆盖层厚度导致季节峰值出现系统性偏移,覆盖层厚度小于 20 m 的台站峰值多出现于秋、冬季(如宝昌台秋季、乌海台冬季),反映快速响应机制。当覆盖层厚度大于 20 m 时,峰值滞后至夏、秋季(如海拉尔、包头台均为秋季),表明厚层介质延滞应力传播,迟滞时间约 1~2 个季节。综合分析,覆盖层厚度 20 m 为关键阈值,大于 20 m 的覆盖层厚度可有效抑制季节变化对数据的影响。

表 2 各台站各季节数据平均值的变化率
Tab.2 Change rates of the average values of each seasonal data at each station

台站名称	厚度/m	冬季/ $\mu\text{rad} \cdot \text{a}^{-1}$	春季/ $\mu\text{rad} \cdot \text{a}^{-1}$	夏季/ $\mu\text{rad} \cdot \text{a}^{-1}$	秋季/ $\mu\text{rad} \cdot \text{a}^{-1}$
乌海	10	469.97	39.14	-206.70	-112.04
宝昌	15	682.74	536.68	1 131.07	1 523.20
呼和浩特	20	-582.28	-582.28	161.37	209.71
海拉尔	23	197.06	196.17	206.07	227.80
包头	50	70.73	22.73	41.12	117.29

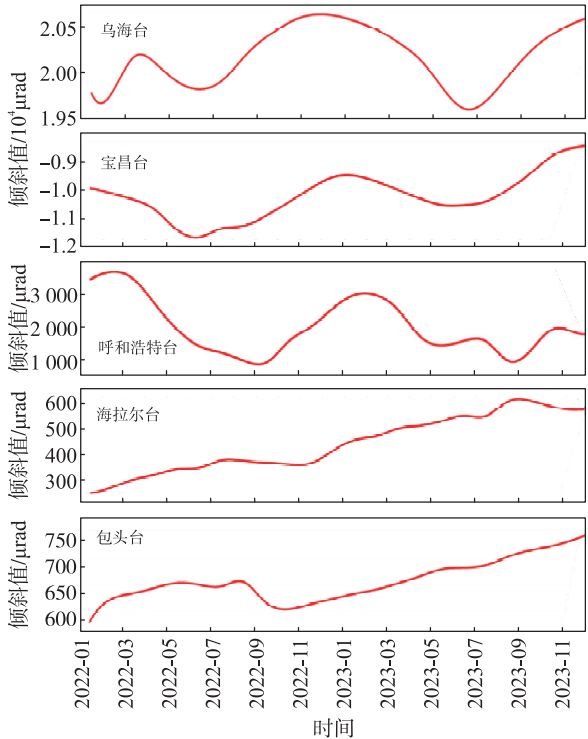


图 4 各台站东西向 2022—2023 年数据月均值曲线
Fig.4 Curves of monthly mean value of data in EW direction from 2022 to 2023 at each station

为全面评估山洞覆盖层厚度对季节性变化的调控作用,还需考虑各台站位置地域气候条件的差异。表 1 中已列出各台站年温差与湿度,但降水、冻融周期等因素亦可能影响数据季节性波动。由于台站分布范围广(乌海至海拉尔),气候差异显著;乌海台年降水量不足 200 mm,而海拉尔台可达 400 mm;宝昌台年温差达 0.8 $^{\circ}\text{C}$,呼和浩特台仅 0.4 $^{\circ}\text{C}$ 。这些因素可能导致季节性变化幅度的区域差异,但在覆盖层厚度大于等于 20 m 时,所有台站均表现出波动幅度显著减小(表 2),说明覆盖层厚度是抑制季节性干扰的主导因素。

季节性变化是温度、气压、降水、冻融等因素年周期变化的综合体现。山洞覆盖层的厚度决定了对外界(气压、降雨及温度)干扰的屏蔽效果,厚度越大对外界的干扰屏蔽效果越好,能够有效地衰减传递到仪器底座的干扰信号,提高数据的质量。气压导纳系数为单位气压变化诱发的仪器虚假倾斜信号强度,是衡量观测系统抗气压干扰能力的关键指标。故收集 5 个台站气压数据,计算气压导纳系数,分析其与覆盖层厚度的变化情况(图 5)。

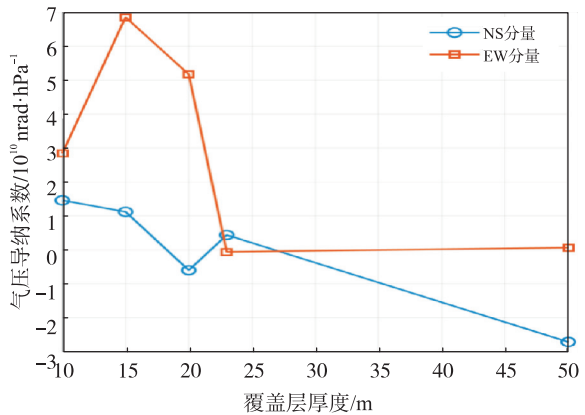


图 5 覆盖层厚度与气压导纳系数关系曲线
Fig.5 Relation curves between overburden thickness and barometric admittance coefficient

由图 5 可见,随着覆盖层厚度增加,南北分量气压导纳系数总体呈下降趋势,而东西分量气压导纳系数则先上升后下降,最终趋于平稳。尽管 2 个测向曲线形态不同,但当覆盖层厚度超过 20 m 时,气压导纳系数均迅速下降,表明足够厚的覆盖层显著减弱了地表大气气压波动向山洞内部的传播,减少了气压对数据的干扰。计算气压导纳系数与覆盖层厚度的相关系数得出,南北分量 $r = -0.949$,东西分量 $r = -0.600$ 。南北向气压导纳系数与覆盖层厚度有强负相关性,说明覆盖层越厚,南北向气压导纳系数越小。较厚的

覆盖层能在一定程度上有效缓冲地表气压对 VP 型宽频带垂直摆倾斜仪的干扰。东西向气压导纳系数与覆盖层厚度的关联未达一定显著性 ($p > 0.05$), 东西向形变可能受区域构造或浅层岩性控制。后续研究需结合钻孔岩芯数据与更多样本, 以厘清非均质地层对山洞内气压导纳系数的影响机理。

3.3 山洞覆盖层厚度对数据频谱影响分析

3.3.1 功率谱分析

为比较不同覆盖层厚度下的频谱特征, 选取 5 个台站 2022 年全年经预处理后的数据进行功

率谱计算。采用快速傅里叶变换 (FFT) 方法, 得到台站相应处理数据的功率谱密度曲线, 并进行比较。具体流程如下: 全年数据划分为多个长度为 30 d 的数据段, 相邻数据段重叠 50%, 对每个数据段加汉宁窗以减小频谱泄漏。对每个数据段进行 FFT 计算, 得到功率谱; 最后将所有数据段的功率谱进行平均, 得到台站平均功率谱密度。在此设置下, 频率分辨率 $\Delta f = 1/(30 \times 86\,400\text{ s}) \approx 3.8 \times 10^{-8}\text{ Hz}$ 。该分辨率也足以辨析 M_2 潮汐波 (频率约 $1.93 \times 10^{-5}\text{ Hz}$) 等主要固体潮谐波分量, 结果如图 6 所示。

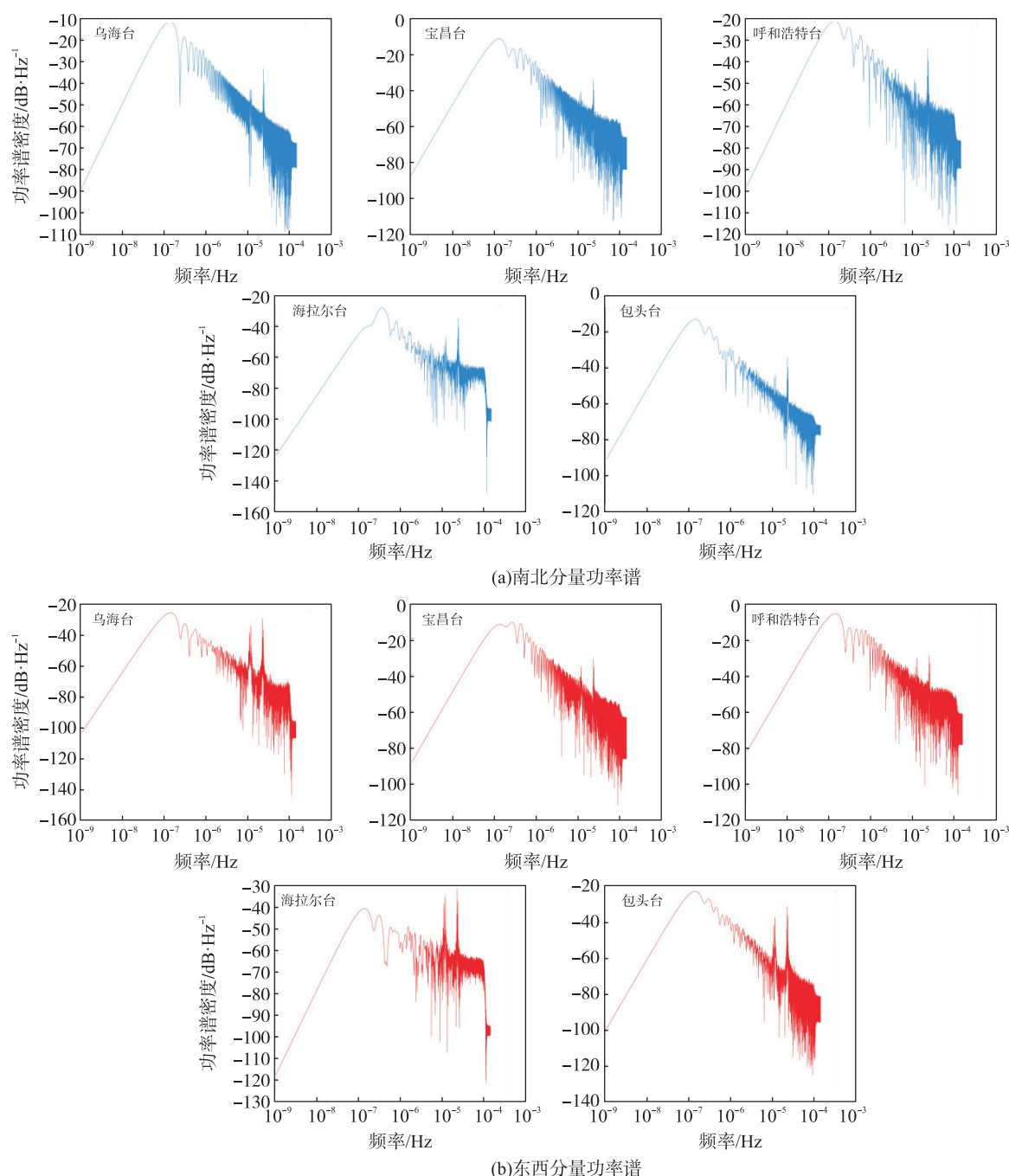


图 6 各台站 2 个测向数据功率谱密度曲线

Fig.6 Power density spectral curves of two directional data at each station

由图6可见,随着覆盖层厚度的增加,2个测向数据在高频段均表现出较为明显的能量衰减,在低频段能量略有增加。覆盖层作为隔震层,会减少高频振动的影响,使得功率谱在高频段的能量下降。而低频部分稳定,可能是地质活动本身的低频信号占主导,同时低频信号更易穿透厚层而保持稳定或略有增加。VP型宽频带垂直摆倾斜仪数据频率属于低频段,故覆盖层厚度对于数据的影响较小。

3.3.2 M_2 波分析

山洞覆盖层厚度通过弹性滤波与应力约束机制,显著影响VP型宽频带垂直摆倾斜仪对 M_2 波的响应特征。为更好地揭示不同的覆盖层厚度对垂直摆2个测向数据潮汐信号的调制规律,首先通过对原始数据预处理,编写MATLAB程序提取 M_2 潮汐波;然后对 M_2 潮汐波的矢量特征、总振幅展开分析(图7、图8)。

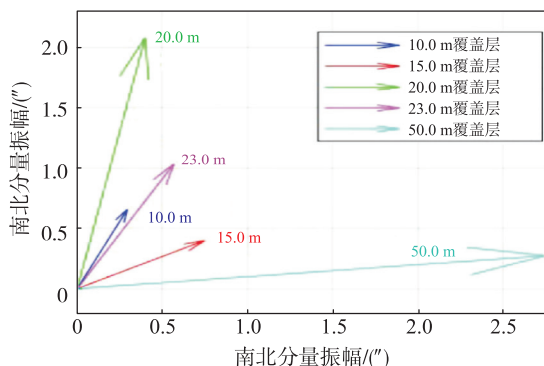


图7 2个测向 M_2 波振幅矢量分布

Fig.7 Distribution of M_2 wave amplitude vector in two directions

从图7矢量分布可见, M_2 波的南北与东西分量振幅随覆盖层厚度呈现非线性变化,且2个分量响应机制存在显著差异。

南北向分量:振幅随覆盖层厚度增加呈单调递增趋势,从10 m时的0.3"逐步提升至20 m时的1.2",23.0 m时达1.5"。相较于东西分量,南北分量的响应更为持续且增幅稳定,显示垂直方向(南北向)的潮汐应力对覆盖层厚度变化的敏感性较低,或受限于山洞围岩的水平应力约束条件。

东西向分量:振幅随覆盖层厚度增加呈现急剧增强后衰减的单峰型特征。当覆盖层厚度为20 m时,东西分量振幅达到峰值(约1.8 m,以矢量长度量化),较10 m厚度时提升约3.6倍;厚度增至23 m时,振幅小幅回落(约1.5 m),50 m时

进一步衰减至接近线性响应水平(约0.3 m)。该现象表明,20 m覆盖层可能构成特定的“共振型”地质结构,对 M_2 波的水平向潮汐信号产生显著放大效应。

通过对VP型宽频带垂直摆倾斜仪在不同山洞覆盖层厚度下的 M_2 潮汐波总振幅数据进行统计分析,结果显示,两者呈现显著的系统性关联特征(图8)。数据显示,当覆盖层厚度从10 m增加至50 m时, M_2 潮汐波总振幅整体呈现由1"递增至3"的趋势,且二者Pearson相关系数高达0.866,表明覆盖层厚度与潮汐信号振幅放大效应存在强正相关性。 M_2 潮汐波振幅对覆盖层厚度的响应特征,本质上反映了潮汐应力场在不同厚度弹性介质中的传递规律。山洞覆盖层作为地表至基岩之间的缓冲介质,其厚度变化通过改变应力集中程度与能量耗散特征影响VP型宽频带垂直摆倾斜仪观测信号。

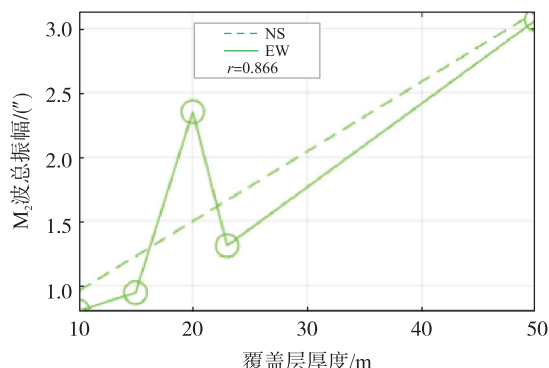


图8 2个测向 M_2 波总振幅与覆盖层厚度统计

Fig.8 Statistics of the total amplitude of two directional M_2 waves and the thickness of the coverage layer

M_2 潮汐波振幅受覆盖层厚度、岩性、地形及区域构造等多因素影响。本研究台站岩性各异(表1),地形从平原至丘陵,可能导致 M_2 波振幅本底值差异。但覆盖层厚度与振幅的强相关性($r=0.866$)表明厚度是关键调控因子。东西分量在20 m处的共振放大现象,在控制岩性因素后仍显著(如呼和浩特台与海拉尔台岩性不同,但均观测到峰值),在一定意义上是支持覆盖层厚度的主导作用。

4 山洞覆盖层最优厚度模型建立

为科学确定山洞覆盖层厚度的最优阈值,本研究构建了基于随机森林的机器学习回归模型。由于实际观测台站样本量有限($n=5$),直接训练模型容易导致过拟合。为此,本研究采用以下策

略提升模型的可靠性与泛化能力。

4.1 特征空间构建与目标变量定义

从基础地质条件、洞内环境参数 2 个维度构建特征空间。具体包括覆盖层厚度(连续变量, 5~60 m)、岩性类型(离散变量: 石灰岩、石英斑岩、石英流纹岩、安山玢岩、云角闪斜长片麻岩)、洞内湿度(40%~90%)和洞内年温差(0.1~2.0℃)。为全面评估覆盖层性能, 选取噪声水平、季节性波动、 M_2 潮汐波振幅与气压导纳系数 4 项观测指标, 构建综合性能得分 S 作为监督学习目标变量:

$$S = w_1 \cdot \text{Norm}(-\text{RMS}) + w_2 \cdot \text{Norm}(-\text{Seasonality}) + w_3 \cdot \text{Norm}(M_2 \text{ Amplitude}) + w_4 \cdot \text{Norm}(M_2 - \text{Pressure Admittance})$$

式中, $\text{Norm}(\cdot)$ 为 Min-Max 归一化函数; $w_1 \sim w_4$ 为权重系数, 反映各指标在站点性能评估中的相对重要性; 最优厚度定义为使 S 最大化的厚度值。

4.2 随机森林模型构建

随机森林通过集成多棵决策树的结果进行回归预测。设训练数据集为 $D = \{(X_i, y_i)\}_{i=1}^N$, 式中, X_i 为特征向量, y_i 为综合性能得分。模型通过 Bootstrap 采样生成 M 个训练子集 D_m , 并为每个子集训练一棵决策树 $h_m(X)$, 最终模型的预测结果为所有决策树输出的平均值:

$$\hat{y}(X) = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M h_m(X) \quad (9)$$

为增强模型的物理合理性, 在训练过程中引入物理约束损失函数:

$$L = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (y_i - \hat{y}(X_i))^2 + \lambda \cdot \Phi(X_i) \quad (10)$$

式中, $\Phi(X_i)$ 为物理约束项, 用于惩罚不符合波传播理论(如谐振条件)的预测结果; λ 为约束强度系数。

4.3 数据增强与模型训练

采用 Bootstrap 重采样技术, 基于 5 个真实台站的特征分布生成 1 000 组合成样本, 以模拟不同地质与厚度条件下的台站山洞性能, 使用增强后数据训练随机森林模型(树的数量为 500), 其设计架构与训练流程如图 9 所示。

4.4 模型验证与性能评估

为客观评估模型在真实小样本下的预测能力, 采用留一法交叉验证: 每次迭代使用 4 个真

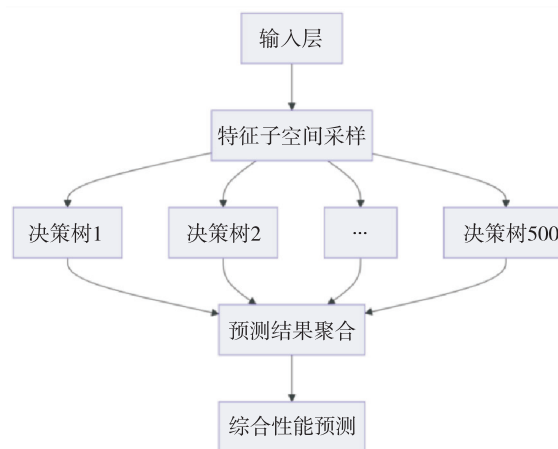


图 9 模型架构设计及训练过程

Fig.9 Model architecture design and training process

实台站数据作为训练集, 剩下的 1 个台站数据作为测试集, 循环 5 次。在此验证下, 模型预测厚度与(基于性能指标推算的)最优厚度的均方根误差(RMSE)为 1.8 m, 决定系数 $R^2 = 0.72$, 表明模型在小样本条件下仍具备良好的预测能力。

4.5 最优厚度确定与结果分析

使用全部 5 个台站数据训练最终模型, 并对合成样本进行预测。图 10 展示了所有样本的覆盖层厚度-综合性能得分分布, 曲线经核密度估计平滑。峰值对应的厚度即为系统推荐的最优厚度, 结果显示其集中分布于 18~22 m 区间, 其中 20 m 处性能得分最高, 与理论谐振厚度(20.7 m)高度吻合。

随机森林模型预测结果(图 10)显示, 覆盖层最优厚度呈现以 20 m 为中心的正态分布特征, 统计分析表明, 72.3% 的样本最优厚度集中在 18~24 m 区间, 其中 18~22 m 范围内占比 23.8%, 峰值出现在 20 m 处(样本占比 15.6%)。这一分布特征与理论共振频率计算结果高度吻合, 验证了物理模型设置的合理性。不同岩性条件下的最优厚度存在显著差异, 石英流纹岩(20.5 ± 1.2 m)和安山玢岩(20.3 ± 0.9 m)表现出较厚的最优覆盖层。石灰岩(19.2 ± 0.8 m)和石英斑岩(19.5 ± 1.0 m)的最优厚度相对较小。云角闪斜长片麻岩(18.8 ± 1.1 m)最优厚度的最小方差分析显示, 岩性对最优厚度的解释度为 17.4% ($p < 0.01$), 表明岩性是影响覆盖层设计的次要因素。

5 个实际台站的性能曲线(图 10)显示, 乌海台(10 m)和宝昌台(15 m)因厚度不足, 性能分别低于理论最优值 32.6% 和 18.4%。呼和浩特台(20 m)接近最优厚度, 实测性能达理论值的

92.3%。海拉尔台(23 m)和包头台(50 m)因厚度过大导致性能下降 15.7%和 41.2%。这一结

果验证了模型预测的可靠性,实际厚度偏离最优值会显著影响台站性能。

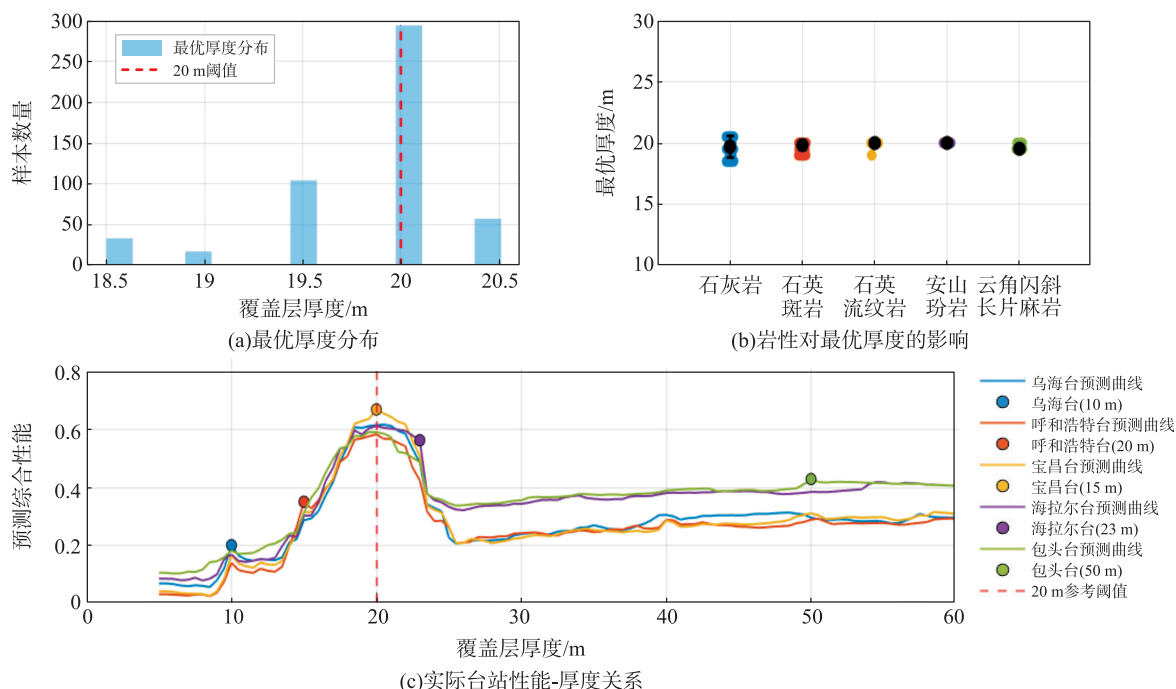


图 10 随机森林模型预测结果
Fig.10 Random forest model prediction results

通过对重要特征进行排序(图 11),可以得出,覆盖层厚度(Thickness)重要性指数为 2.20,厚度-密度交互项(Thick Density)重要性指数为 1.30,密度(Density)重要性指数为 0.20,岩性类型(Rock Type)重要性指数为 0.15,VP/Q 比值(VPQ)重要性指数为 0.10。前 2 项累积贡献达 75.9%,表明厚度参数及其与介质密度的耦合作用是影响台站性能的关键因素。

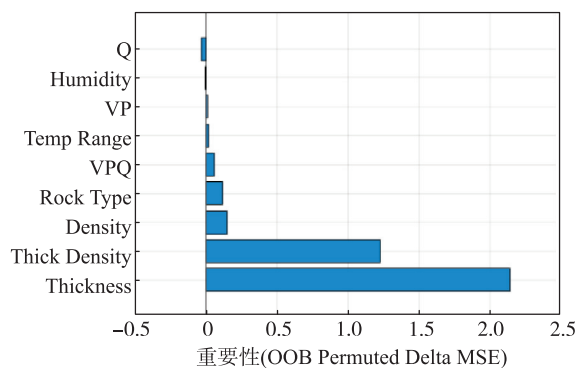


图 11 预测模型特征重要性排序
Fig.11 Ranking of feature importance in predictive models

5 结 语

通过对内蒙古区域不同的山洞覆盖层厚度与 VP 型宽频带垂直摆倾斜仪数据背景噪声分

析、数据时频计算、季节性分析、气压导纳系数计算和机器学习建立模型进行验证,得出以下初步结论:

1)覆盖层通过阻尼效应吸收振动能量,厚度增加可有效降低噪声。不同的覆盖层厚度与仪器南北向数据噪声呈中等强度负相关。南北向相关性较强,研究区内仪器的南北向噪声对覆盖层厚度更加敏感。不同的山洞覆盖层厚度对 VP 型宽频带垂直摆倾斜仪低频信号数据影响较小,但对高频信号有衰减作用,对低频信号影响较弱。山洞覆盖层厚度增加,吸收更多地震能量,仪器频响效应有所降低。

2)不同的覆盖层厚度与 M_2 潮汐波振幅呈显著正相关,南北与东西分量响应机制存在一定差异:南北分量振幅随厚度增加持续稳定递增,反映垂直应力传递的线性特征;东西分量在 20 m 厚度处出现峰值放大效应,揭示特定厚度的覆盖层可能构成水平向潮汐应力的“共振型”地质结构。

3)不同的覆盖层厚度对观测数据的季节变化趋势有显著调控作用。随着山洞覆盖层厚度的增加,各季节数据变化幅度显著减小,峰值滞后出现 1~2 个季节。覆盖层厚度大于 20 m 时,可有效抑制季节变化对数据的影响。通过计算气压导纳系数,增大覆盖层厚度可有效抑制气压

对观测数据的干扰。当覆盖层厚度大于 20 m 时,南北向与东西向气压导纳系数均大幅减小。

4) 基于 5 个台站 3 a 观测数据训练学习和随机森林模型验证,提出观测山洞覆盖层设计最优厚度在 18~22 m 为理想区间的设计建议。由于岩性对最优厚度有影响但贡献度有限,因此在工程建设设计中仅作为次要调整因素,厚度参数及其与介质密度的交互作用是影响台站性能的主导因素。该研究可为新仪器架设提供山洞建设工程量化依据,从而推进山洞工程建设设计从经验指导转向工程量化设计。

致谢:文中数据均来自内蒙古自治区地震台,在此表示感谢。

参考文献

- [1] 马武刚,胡国庆,谭业春,等. 新型宽频带垂直摆倾斜仪的设计及应用[J]. 测绘信息与工程, 2010(5): 28-30 (Ma Wugang, Hu Guoqing, Tan Yechun, et al. Design and Application of New Wide Frequency Band Vertical Pendulum Tiltmeter[J]. Journal of Geomatics, 2010(5): 28-30)
- [2] 田思留,刘仕锦,袁媛,等. 康定地震台 VP 型宽频带垂直摆倾斜仪常见干扰分析[J]. 四川地震, 2019(4): 26-31 (Tian Siliu, Liu Shijin, Yuan Yuan, et al. Analysis of the Common Interference Factors of VP Vertical Pendulum Tiltmeter in Kangding Seismic Station[J]. Earthquake Research In Sichuan, 2019(4): 26-31)
- [3] 李波,陈阳,白世达,等. 个旧地震台 VP 型宽频带垂直摆倾斜仪观测干扰研究[J]. 高原地震, 2021, 33(4): 49-55 (Li Bo, Chen Yang, Bai Shida, et al. Observation Interference of VP Vertical Pendulum Tiltmeter at Gejiu Seismic Station[J]. Plateau Earthquake Research, 2021, 33(4): 49-55)
- [4] 李惠玲,高云峰,程冬焱,等. VP 宽频带垂直摆倾斜仪观测干扰识别[J]. 地震地磁观测与研究, 2018, 39(2): 100-107 (Li Huiling, Gao Yunfeng, Cheng Dongyan, et al. Identification of Observation Interference of VP Broadband Vertical Pendulum Tiltmeter[J]. Seismological and Geomagnetic Observation and Research, 2018, 39(2): 100-107)
- [5] 多布拉,次旦卓玛,洛桑罗布,等. 西藏地区 VP 型垂直摆倾斜仪观测数据质量及干扰分析[J]. 高原地震, 2022, 34(3): 65-72 (Duobu La, Cidan Zhuoma, Luosang Luobu, et al. Quality and Interference Analysis of Observation Data of VP Vertical Pendulum Tiltmeter in Xizang Area[J]. Plateau Earthquake Research, 2022, 34(3): 65-72)
- [6] 张小艳,安全,熊峰,等. 内蒙古 VP 型垂直摆倾斜仪背景噪声特征分析[J]. 大地测量与地球动力学, 2024, 44(11): 1193-1198 (Zhang Xiaoyan, An Quan, Xiong Feng, et al. Analysis of Background Noise Characteristics of VP Vertical Pendulum Tiltmeter in Inner Mongolia[J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2024, 44(11): 1193-1198)
- [7] 杨绍富,宋春燕,苏萍,等. 库尔勒 VP 型宽频带垂直摆倾斜仪背景噪声水平分析[J]. 内陆地震, 2024, 38(4): 394-402 (Yang Shaofu, Song Chunyan, Su Ping, et al. Analysis of Background Noise Level of Korla VP Broadband Vertical Pendulum Tiltmeter[J]. Inland Earthquake, 2024, 38(4): 394-402)
- [8] 高翠珍,王晓霞,高彦,等. 山西垂直摆倾斜仪背景噪声分析[J]. 地震地磁观测与研究, 2024, 45(1): 101-107 (Gao Cuizhen, Wang Xiaoxia, Gao Yan, et al. Analysis of Background Noise of Shanxi Vertical Pendulum Tiltmeter[J]. Seismological and Geomagnetic Observation and Research, 2024, 45(1): 101-107)
- [9] 王建昌,颜文华,朱宣明,等. 基于 HHT 方法分析西安地震台 VP 垂直摆观测背景特征[J]. 科技与创新, 2021(6): 30-34 (Wang Jianchang, Yan Wenhua, Zhu Xuanming, et al. Analysis of Background Characteristics of VP Vertical Pendulum Observation at Xi'an Seismic Station Based on HHT Method[J]. Science and Technology & Innovation, 2021(6): 30-34)
- [10] 马武刚. 河北 VP 型宽频带垂直摆倾斜仪映震效能及时频特征分析[J]. 大地测量与地球动力学, 2022, 42(6): 643-649 (Ma Wugang. Analysis of Seismic Reflection Efficiency and Time-Frequency Characteristics of Hebei VP Broadband Vertical Pendulum Tiltmeter[J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2022, 42(6): 643-649)
- [11] 王嘉琦,杨东辉,常玉柱,等. 河北区域 VP 型宽频带垂直摆倾斜仪同震响应分析: 以 2019 年河北唐山 M4.5 地震为例[J]. 山西地震, 2022(1): 28-30 (Wang Jiaqi, Yang Donghui, Chang Yuzhu, et al. Coseismic Response Analysis of VP Broadband Vertical Pendulum Tiltmeter in Hebei Region-Taking Tangshan M4.5 Earthquake in Hebei Province in 2019 as an Example[J]. Earthquake Research in Shanxi, 2022(1): 28-30)
- [12] 安然,白翔宇,王希彬,等. 关中地区 VP 型宽频带垂直摆倾斜仪同震响应分析: 以 2022 年四川泸定 M6.8 级地震为例[J]. 科技与创新, 2024(17): 37-41 (An Ran, Bai Xiangyu, Wang Xibin, et al. Coseismic Response Analysis of VP Broadband Vertical Pendulum Tiltmeter in Guanzhong Area: Taking the 2022 Luding Earthquake in Sichuan as an Example[J]. Science and Technology & Innovation, 2024(17): 37-41)
- [13] 余思,唐婷婷. 江西省赣州地震中心站 DSQ 型水管倾斜仪与 VS 型垂直摆倾斜仪同震响应对比分析[J]. 地震科学进展, 2023, 53(9): 409-415 (Yu Si, Tang Tingting. Comparative Analysis of Coseismic Response of DSQ Water Pipe Tiltmeter and VS Vertical Pendulum Tiltmeter in Ganzhou Earthquake Center Station, Jiangxi Province[J]. Progress in Earthquake Sciences, 2023, 53(9): 409-415)
- [14] 江颖,刘子维,张苗苗,等. 超导重力仪背景噪声水平分析

- [J]. 大地测量与地球动力学, 2016, 36(8): 689-693
(Jiang Ying, Liu Ziwei, Zhang Miaomiao, et al. Analysis of Background Noise Level of Superconducting Gravimeter [J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2016, 36(8): 689-693)
- [15] Melchior P. The Tides of the Planet Earth [M]. Oxford: Pergamon Press, 1983

Influence Mechanism of Observation Cave Overburden Thickness on VP Broadband Tiltmeter Data in Inner Mongolia Region

BAI Shaoqi¹ MA Wugang^{2,3} ZHOU Xuanchao⁴ PEI Dongyang⁴ GUO Yanjie⁵

1 Xilinhaote Earthquake Monitoring Center Station, Xilinhaote 027000, China

2 Hubei Earthquake Agency, Wuhan 430071, China

3 Institute of Seismology, CEA, Wuhan 430071, China

4 Earthquake Agency of Inner Mongolia Autonomous Region, Hohhot 010010, China

5 Chifeng Earthquake Monitoring Center Station, Chifeng 024000, China

Abstract: Based on the observation data of VP-type broadband vertical pendulum inclinometers from 5 stations in Inner Mongolia, this study adopted a method combining the wave propagation theoretical model and the deep learning prediction framework to preliminarily reveal the multi-frequency quantitative influence mechanism of the overburden thickness of observation caves on the observation signals. The results show that the overburden thickness is significantly negatively correlated with background noise (especially in the north-south direction), but has a weak impact on low-frequency signals. It exerts a directional regulatory effect on the amplitude of M_2 tidal waves: the amplitude of the north-south component increases linearly with the increase of thickness, while the east-west component shows a unique resonance amplification effect at the thickness of 20 m (the peak value is about 3.6 times higher than that at 10 m). When the thickness is greater than or equal to 20 m, it can effectively suppress the seasonal fluctuation of data, significantly reduce the variation amplitude, delay the peak value by 1—2 seasons, and simultaneously decrease the barometric admittance coefficient remarkably. Verified by the random forest model, it is found that the optimal thickness range of the cave overburden is 18—22 m (with 20 m as the optimal value). Lithology is a secondary influencing factor, while the overburden thickness and its interaction with the density of mountain lithologic media constitute the dominant control parameters. In this study, 20 m of overburden thickness was selected as the engineering threshold, which provides an important design basis for effectively suppressing background noise, ensuring the fidelity of tidal signals and resisting seasonal interference, and gradually promotes the construction of cave-based observation at stations from an empirical mode to a quantitative and engineering-oriented direction.

Key words: overburden thickness; RMS; barometric pressure admittance coefficient; M_2 tidal wave; random forest model